ΑΙΤΙΑΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΟΤΗΤΑ ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Χρυσοβαλάντης Στεργίου

Διδακτορική Διατριβή

Επιβλέπων
Διονύσιος Αναπολιτάνος

Μέλη Συμβουλευτικής Επιτροπής
Αριστείδης Αραγεώργης
Στάθης Ψύλλος

Διαπανεπιστημιακό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα
«Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας»

Τμήμα Μεθοδολογίας, Ιστορίας και Θεωρίας της Επιστήμης, Ε.Κ.Π.Α.

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών,
Τομέας Ανθρωπιστικών και Κοινωνικών Επιστημών και Δικαίου, Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2011

ΑΙΤΙΑΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΤΟΠΙΚΟΤΗΤΑ

ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΚΑΙ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Χρυσοβαλάντης Στεργίου

Διδακτορική Διατριβή

Επιβλέπων
Διονύσιος Αναπολιτάνος

Μέλη Συμβουλευτικής Επιτροπής
Αριστείδης Αραγεώργης
Στάθης Ψύλλος

Διαπανεπιστημιακό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα
«Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας»

Τμήμα Μεθοδολογίας, Ιστορίας και Θεωρίας της Επιστήμης, Ε.Κ.Π.Α.

Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών,
Τομέας Ανθρωπιστικών και Κοινωνικών Επιστημών και Δικαίου, Ε.Μ.Π.

Αθήνα 2011

στους γονείς μου,
τον Σπύρο και τη Μαρία

Περίληψη

Αιτιότητα και τοπικότητα στην κλασική και στην κβαντική φυσική

Στην εργασία επιχειρείται η μελέτη των αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις στο πλαίσιο θεωριών της κλασικής και της κβαντικής φυσικής. Κεντρικός στόχος είναι η εξέταση της συμβατότητας αυτών των προσεγγίσεων της αιτιότητας με την εικόνα του κόσμου όπως προκύπτει μέσα από σύγχρονες φυσικές θεωρίες. Στο πρώτο μέρος της εργασίας, που περιλαμβάνει τα πέντε πρώτα κεφάλαια, ανασυγκροτούνται, συγκρίνονται και εντάσσονται στο πλαίσιο ευρύτερων ταξινομήσεων για την αιτιότητα, οι αιτιακές θεωρίες των Russell (θεωρία των αιτιακών γραμμών), Reichenbach (μέθοδος του ίχνους, πιθανοκρατική προσέγγιση και αρχή του κοινού αιτίου), Salmon (μέθοδος του ίχνους, δομή, αναλλοίωτες και διατηρήσιμες ποσότητες) και Dowe (θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων). Στο δεύτερο μέρος της εργασίας εξετάζονται τα προβλήματα που προκύπτουν για τις θεωρίες αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων όταν επιχειρούμε με αυστηρό τρόπο να θεμελιώσουμε βασικές αιτιακές έννοιες, όπως είναι η έννοια της αιτιακής διαδικασίας και του συζευκτικού κοινού αιτίου, στο πλαίσιο σχετικιστικών κλασικών φυσικών θεωριών (σωματιδιακή θεωρία των van Dam και Wigner, θεωρία ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon, κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία) και θεωριών της κβαντικής φυσικής (αλγεβρική σχετικιστική κβαντική θεωρία πεδίων). Σε αυτό το πλαίσιο αναδεικνύεται το ζήτημα της τοπικότητας στις φυσικές θεωρίες, όπως αυτό αναδύεται στη θεμελίωση τοπικών κλασικών και κβαντικών θεωριών (σημασιολογική τοπικότητα), στη σχέση ανάμεσα σε καθολικές και σε τοπικές συνθήκες που ισχύουν για τα φυσικά συστήματα (τοπική και καθολική αιτιοκρατία) καθώς και στο κεντρικό (για τις υπό συζήτηση αιτιακές θεωρίες) ζήτημα της δράσης εξ επαφής (ανισότητες Bell, παράδοξο EPR, θεώρημα Reeh-Schlieder και συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας). Αναπτύσσονται επιχειρήματα που στηρίζουν τρεις γενικές θέσεις. Πρώτον, σε ορισμένες φυσικές θεωρίες είναι αδύνατο να διατυπωθούν οι αναγκαίες φυσικές υποθέσεις που επιτρέπουν τον ορισμό βασικών αιτιακών εννοιών και αρχών. Δεύτερον, άλλες φυσικές θεωρίες, μολονότι επιτρέπουν τη διατύπωση των κατάλληλων υποθέσεων, αυτή τίθεται μόνον ad hoc. Και, τέλος, σε ορισμένες περιπτώσεις απαιτείται η αναθεώρηση βασικών αιτιακών αρχών και εννοιών που μας έχει κληροδοτήσει η σύγχρονη φιλοσοφική παράδοση.

Abstract

Causal Processes and Locality in Classical and in Quantum Physics

In this work we try to study theories of causation based upon causal processes and causal interactions in the context of classical and quantum physics. Our central aim is to find out whether such causal theories are compatible with the world picture suggested by contemporary theories of physics. In the first part, we review, compare and try to place among more general taxonomical schemes, the causal theories by Russell (the causal lines approach), Reichenbach (mark method, probabilistic causality and the principle of common cause), Salmon (mark method, structure, invariant and conserved quantities approaches) and Dowe (conserved quantity theory). In the second part of the work, we deal with some problems that process theories of causation face whenever one tries to define, rigorously, causal concepts (e.g. "causal process" or "conjunctive common cause") in the context of classical relativistic physical theories (van Dam – Wigner particle theory, the free Klein-Gordon field, classical electromagnetic theory) as well as quantum theories (algebraic relativistic quantum field theory). In this vein, special attention has been given to the locality problem in physical theories as it emerges from the structure of local classical the quantum theories (semantic locality), the relation between global and local conditions for physical systems (global and local determinism) as well as the problem of action at a distance, which is of central importance for the theories of causation under examination (Bell's inequalities, EPR paradox, Reeh-Schlieder theorem and local independence conditions). We argue for three different theses: first, there are physical theories in the context of which it is impossible even to formulate the necessary physical hypotheses that allow us to define basic causal concepts and causal principles; second, there are physical theories which allow us to formulate these hypotheses only ad hoc; finally, in some cases it is necessary to revise basic causal principles and concepts bequeathed by the philosophical tradition.

Περιεχόμενα

Πίνακας Σχημάτων

Ευχαριστίες

Εισαγωγή **1**

1. Η θεωρία των Αιτιακών Γραμμών του Russell **12**
   - 1.1. Αιτιακές Γραμμές **14**
   - 1.2. Κριτική της θεωρίας των Αιτιακών Γραμμών **22**
2. Ο Reichenbach και η Αιτιακή Δομή του Κόσμου **30**
   - 2.1. Η Μέθοδος του Ίχνους **31**
   - 2.2. Η Πιθανοκρατική Προσέγγιση στην Αιτιότητα και η Αρχή του Κοινού Αιτίου **47**
   - 2.3. Παράρτημα στο 2ο κεφάλαιο: Στατιστικές Σχέσεις και Συστήματα Κοινών Αιτίων **69**
3. Η Πρώιμη Αιτιακή Θεωρία του Salmon **79**
   - 3.1. Η έννοια της Διαδικασίας **80**
   - 3.2. Αιτιακές Διαδικασίες **88**
   - 3.3. Η παραγωγή της Αιτιακής Επίδρασης **98**
     - 3.3.1. Αιτιακές αλληλεπιδράσεις **99**
     - 3.3.2. Παραγωγή Δομής **107**
   - 3.4. Προβλήματα της Πρώιμης Αιτιακής Θεωρίας του Salmon **114**
     - 3.4.1. Το πρόβλημα της κυκλικότητας των ορισμών **116**
     - 3.4.2. Η επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους **119**
     - 3.4.3. Οι αντιγεγονικές προτάσεις στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon **128**
     - 3.4.4. Τα είδη των αιτιακών αλληλεπιδράσεων **136**
4. Ύστερες θεωρίες αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων **142**
   - 4.1. Η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe **143**
   - 4.2. Ο ορισμός των αιτιακών εννοιών με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων **148**
   - 4.3. Διατηρήσιμες ποσότητες: Η τελική θεωρία του Salmon **163**
   - 4.4. Κριτική στην ύστερη θεωρία του Salmon **176**
5. Αιτιακές σχέσεις και αιτιακές συνδέσεις **190**
   - 5.1. Οι όροι της αιτιακής σχέσης **190**

5.2. Αιτιακές συνδέσεις και το πρόβλημα του Hume **194**
5.3. Τι είδους σχέσης είναι η αιτιότητα; **206**

6. Αιτιακές διαδικασίες και κλασική φυσική **221**
6.1. Αιτιακές διαδικασίες και σωματίδια **222**
6.2. Αιτιακές διαδικασίες και πεδία **229**
6.3. Αιτιακές διαδικασίες και πεδία: τοπική προσέγγιση **235**
6.3.1. Αιτιακές διαδικασίες στην αλγεβρική κλασική θεωρία πεδίων **236**
6.4. Αιτιακές διαδικασίες και διάδοση ασυνέχειας στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο **242**

7. Έννοιες τοπικότητας στην τοπική κβαντική φυσική **253**
7.1. Σημασιολογική τοπικότητα και τοπική κβαντική φυσική **254**
7.2. Τοπική ανεξαρτησία **270**
7.2.1. Συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων και καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος **272**
7.2.2. Ανεξαρτησία συμβάντων και μεταθετότητα των τοπικών αλγεβρών **280**
7.2.3. Ανεξαρτησία συμβάντων και ανισότητες τύπου Bell στην τοπική κβαντική φυσική **286**
7.2.4. Επιχείρημα EPR και τοπική κβαντική φυσική **294**
7.2.5. Συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία **300**
7.2.6. Τοπική ανεξαρτησία και το θεώρημα Reeh-Schlieder **310**
7.3. Τοπική Εξάρτηση **318**
7.3.1. Καθολικές συνθήκες εξάρτησης **320**
7.3.2. Τοπικές συνθήκες εξάρτησης **330**
7.4. Μερικές σκέψεις για τις αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική **335**
7.4.1. Συνεχής διάδοση ίχνους στον κώνο φωτός **335**
7.4.2. Όρια στη διάδοση του ίχνους **339**
7.4.3. Μία διαφορετική προσέγγιση στις αιτιακές διαδικασίες **344**

8. Αρχή του Κοινού Αιτίου και Τοπική Κβαντική Φυσική **353**
8.1. Κοινά αίτια και Τοπική Κβαντική Φυσική **356**
8.2. Συστήματα Κοινών Αιτίων του Reichenbach και Τοπική Κβαντική Φυσική **370**
8.3. Κοινά-Κοινά Αίτια και Ανισότητες Clauser-Horne **379**

9. Επισκόπηση και Συμπεράσματα **388**

Παραρτήματα

A. Στοιχεία από τη θεωρία των C* και των von Neumann αλγεβρών **414**
B. Το θεώρημα Reeh-Schlieder **422**

Βιβλιογραφία **428**

Πίνακας Σχημάτων

Σχήμα 2.1: Το κινούμενο σημείο τομής δύο κανόνων.(Reichenbach 1958:147) **41**

Σχήμα 2.2: Το αιτιακό δίκτυο. Τα συμβάντα Q, R δεν έχουν αιτιακή σχέση. Η κατεύθυνση των αιτιακών σχέσεων παριστάνεται με βέλη. Το δίκτυο αποκτά αντίθετη κατεύθυνση αν αναστρέψουμε την κατεύθυνση όλων των βελών. (Reichenbach 1956:37) **48**

Σχήμα 2.3: Αιτιακές αλυσίδες τριών συμβάντων. Οι αιτιακές σχέσεις έχουν αντίθετη κατεύθυνση. (Reichenbach 1956:189) **52**

Σχήμα 2.4: Το A_2 είναι αιτιακώς ανάμεσα στο A_1 και στο A_3. Στην αριστερή διάταξη είναι το κοινό αίτιο και στη δεξιά διάταξη το κοινό αποτέλεσμα. (Reichenbach 1956:194) **52**

Σχήμα 2.5: Συμβάντα στην περιοχή του A_2 που δείχνουν την τοπική συγκρισιμότητα της χρονικής τάξης. (Reichenbach 1956:195) **53**

Σχήμα 3.1: Τα κβάζαρ 0957+561A,B. (Blodwell 1985) **113**

Σχήμα 4.1: (a) Αιτιακή Αλληλεπίδραση. (b) Απλή Τομή. (Dowe 2000:108) **173**

Σχήμα 6.1: Μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας κατά μήκος μίας φωτεινής ακτίνας. (Landau-Lifschitz 2003:144) **249**

Σχήμα 7.1: Η αιτιακή πλήρωση μιας ορθογώνιας περιοχής **332**

Σχήμα 7.2: Αιτιακές Διαδικασίες στην Τοπική Κβαντική Φυσική **338**

Σχήμα 8.1: Ο εντοπισμός του κοινού αιτίου στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος δύο διπλών κώνων **365**

Σχήμα 8.2: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την απόδειξη των ανισοτήτων Bell. (Clauser-Shimony 1978) **383**

Σχήμα 8.3: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την απόδειξη των ανισοτήτων Clauser-Horne. (Clauser-Shimony 1978) **383**

Σχήμα 8.4: Μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στις ανισότητες Bell και στις ανισότητες Clauser-Horne. **386**

Ευχαριστίες

Αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω ορισμένους ανθρώπους χωρίς τους οποίους αυτή η εργασία ίσως να μη γράφονταν ποτέ ή, ακόμα κι αν γράφονταν, θα ήταν εντελώς διαφορετική. Καταρχάς, θέλω να ευχαριστήσω το δάσκαλό μου και φίλο *Αριστείδη Αραγεώργη*. Χωρίς την σταθερή και ακούραστη αρωγή του σε κάθε φάση της εργασίας, σε κάθε μικρή ή μεγάλη δυσκολία που αντιμετώπισα, το έργο αυτό δεν θα είχε πραγματωθεί. Όμως τα πιο σημαντικά μαθήματα που έλαβα από τον Αριστείδη δεν αφορούν, στενά, στο περιεχόμενο αυτής της εργασίας αλλά στη συνολική στάση απέναντι στη φιλοσοφία και σε όσους τη θεραπεύουν. Ελπίζω και εύχομαι να μπορέσω να σταθώ αντάξιος της εμπιστοσύνης του.

Παραπέρα, υπήρξαν κάποιοι άνθρωποι που μαζί τους συζήτησα εν μέρει ή εν συνόλω την εργασία καθώς και συγκεκριμένες ιδέες που υποστηρίζονται σε αυτή. Αυτοί είναι ο *Στάθης Ψύλλος*, στον οποίο οφείλω την ιδέα για τη συγγραφή του πέμπτου κεφαλαίου της εργασίας και για τη διάρθρωση του πρώτου μέρους, ο *Θεοφάνης Γραμμένος*, η *Ανδρομάχη Σπανού* και η *Λάρα Σκουρλά*. Τους ευχαριστώ από καρδιάς. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω το *Σωτήρη Καρανάσιο*, καθηγητή μαθηματικών της σχολής Ε.Μ.Φ.Ε του Ε.Μ.Π. που με δέχθηκε ως ακροατή στο μεταπτυχιακό μάθημα «C* άλγεβρες», το 2006, το *Βασίλειο Καρακώστα,* φιλόσοφο της φυσικής, καθώς και όλα τα μέλη της εξεταστικής επιτροπής της διδακτορικής διατριβής για τον κόπο που κατέβαλλαν για να διαβάσουν το έργο μου. Δεν πρέπει να λησμονήσω να ευχαριστήσω το συνάδελφο *Δημήτρη Παπαγιαννάκο*, για τη βοήθειά του στο πρόγραμμα βασικής έρευνας του Ε.Μ.Π με τίτλο «Αιτιότητα και Τοπικότητα στην Κβαντική Θεωρία Πεδίων», που ολοκληρώθηκε το 2007. Τέλος, οφείλω να ευχαριστήσω δύο από τους στυλοβάτες του μεταπτυχιακού προγράμματος «Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας», τον επιβλέποντα της διατριβής μου *Διονύσιο Αναπολιτάνο* και τον *Αριστείδη Μπαλτά,* για τη βοήθειά τους στην ολοκλήρωση αυτού του έργου. Η οφειλή μου στον Αριστείδη Μπαλτά είναι ιδιαίτερη, πολλαπλή και πάει αρκετά πίσω στο χρόνο, όταν αποτέλεσε πηγή έμπνευσης για την ενασχόλησή μου με τη φιλοσοφία στα ύστερα φοιτητικά μου χρόνια και σταθερό αρωγό αυτής της προσπάθειας.

Πέραν της ακαδημαϊκής κοινότητας, επιθυμώ να ευχαριστήσω τη σύντροφό μου *Ξένια Μυλωνά*. Η άμεση συμβολή της στην εργασία έχει να κάνει με κάποια σχήματα που υπάρχουν σε αυτή. Η σημαντική συμβολή της έχει να κάνει με τη συνεχή ενθάρρυνση και με την υπομονή που επέδειξε για αρκετά χρόνια μέχρι την ολοκλήρωση του έργου. Επίσης, ευχαριστώ τους φίλους μου *Δημήτριο Νούσιο* («λατρεία»), για τις ατελείωτες ώρες που συζητήσαμε για την κβαντική θεωρία πεδίων και το *Νίκο Καρακώστα* για την ηθική συμπαράστασή του τα χρόνια συγγραφής της εργασίας.

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η σχέση της αιτιότητας με τη φυσική είναι τόσο παλιά όσο και η φιλοσοφική έρευνα για τον κόσμο. Γεννήθηκε μέσα από την προσπάθεια εξήγησης της κίνησης, και γενικότερα της μεταβολής, στο φυσικό κόσμο, στο πλαίσιο της αρχαίας ελληνικής φιλοσοφίας. Η αιτιότητα νοήθηκε ως οντολογική αρχή που διέπει τις φυσικές μεταβολές. Στη νεότερη εμπειριστική φιλοσοφία η αιτιότητα συνδέθηκε με την εμπειρία και τη γνώση που προέρχεται από τον κόσμο της εμπειρίας. Έτσι, από οντολογική αρχή που αφορά στα πράγματα καθαυτά, η αιτιότητα περιορίστηκε σε μία αρχή που διέπει την παραγωγή, τη σύνδεση ή τη σχέση ιδεών που έχουν ως πηγή τους την εμπειρία. Μάλιστα, ο περίφημος αιτιακός σκεπτικισμός του Hume είναι συνέπεια της αδυναμίας θεμελίωσης της αιτιακής αρχής, της σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα, στον κόσμο των πραγμάτων όπως αυτά μας δίδονται μέσα από την εμπειρία. Ο Hume στράφηκε στις λειτουργίες του νου και θεμελίωσε την αιτιότητα στον τρόπο που εμείς νοούμε τα πράγματα που μας δίδονται μέσω της εμπειρίας. Αυτή η υποκειμενική στροφή στην αιτιότητα ολοκληρώνεται με το έργο του Kant που αναγνωρίζει στην αρχή της αιτιότητας a priori συνθετικό χαρακτήρα. Για τον Kant ο νόμος της αιτιότητας ούτε επικυρώνεται ούτε διαψεύδεται από την πολλαπλότητα των εμπειριών· αντιθέτως, αποτελεί νοητική προϋπόθεση για την εμπειρική γνώση της χρονικής διαδοχής των φαινομένων.

Ο Russell, στις αρχές του προηγούμενου αιώνα (Russell 1913), άσκησε έντονη κριτική στην αιτιότητα και στο ρόλο που της αποδίδουν οι φιλόσοφοι, με βάση τις επιστημονικές θεωρίες της εποχής του. Μεταξύ άλλων αμφισβήτησε την αξία αιτιακών αρχών της μορφής "ένα συμβάν *x* είναι αίτιο ενός συμβάντος *y* αν και μόνο αν …" για τη φυσική επιστήμη καθώς και την αξία των αιτιακών νόμων που συνδέουν ένα ορισμένο αίτιο με ένα καθορισμένο αποτέλεσμα. Ουσιαστικά, ο Russell προσπάθησε να εξορίσει την αιτιότητα από τον κόσμο που περιγράφουν οι φυσικές θεωρίες. Σε παρόμοια κατεύθυνση με το Russell κινούνται και αρκετοί σύγχρονοι φιλόσοφοι (Norton, Hitchcock, Woodward κ.ά.[1]) που, μολονότι αναγνωρίζουν κάποιο ρόλο στην αιτιότητα, θεωρούν ότι ο ρόλος αυτός αφορά σε περιορισμένες περιοχές

[1] Για μια συλλογή άρθρων που υποστηρίζουν αυτή τη θέση παραπέμπουμε στο (Price and Corry 2007).

του πραγματικού ή έχει να κάνει περισσότερο με τη σχέση του υποκειμένου με τον κόσμο παρά με τον τρόπο που ο ίδιος ο κόσμος είναι οντολογικά συγκροτημένος. Συγκεκριμένα, ο Norton υποστηρίζει μία σκεπτικιστική στάση ως προς τις θεμελιωτικές προσεγγίσεις της αιτιότητας, τον αιτιακό φονταμενταλισμό (causal fundamentalism), που προκύπτει από το γεγονός ότι μέχρι σήμερα οι αιτιακές θεωρίες έχουν αποτύχει να επιβάλλουν γεγονικούς περιορισμούς στον κόσμο, όπως αυτός περιγράφεται από τις επιστημονικές θεωρίες.

Ωστόσο, η συνεισφορά του Russell στη συζήτηση περί αιτιότητας δεν περιορίζεται στην κριτική του στάση. Στο ύστερο έργο του ο Russell, αρνούμενος τον καντιανό υποκειμενισμό, υποστηρίζει ότι η αιτιότητα δεν αποτελεί θεμελιωτική αρχή του τρόπου με τον οποίο το υποκείμενο συγκροτεί τον κόσμο της εμπειρίας, αλλά αντικειμενικό χαρακτηριστικό του κόσμου των πραγμάτων (Russell 1948). Ο ρόλος της αιτιότητας στους επιστημονικούς συλλογισμούς, και συγκεκριμένα στη θεμελίωση του επαγωγικού συλλογισμού, είναι αποτέλεσμα της υπόθεσης ότι ο κόσμος μας είναι τέτοιος ώστε να μπορούμε να μιλάμε για αιτιακές γραμμές και για αιτιακούς νόμους. Η έννοια της αιτιακής γραμμής εντάσσει το Russell στη φιλοσοφική παράδοση των αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις – το κεντρικό αντικείμενο αυτής της εργασίας.

Οι απαρχές αυτής της παράδοσης θα πρέπει να αναζητηθούν στο Reichenbach, και στη διάκριση ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων. Ο Reichenbach, αντί να θεωρεί την αιτιότητα ως προϋπόθεση για την επιτυχία της επαγωγής, όπως ο Russell, συναρτά την αιτιότητα με την επιτυχία της επαγωγής. Η αιτιότητα υπάρχει, διότι, στον κόσμο μας, η επαγωγή αποτελεί έγκυρη συλλογιστική διαδικασία για τη συναγωγή του μη παρατηρηθέντος από το παρατηρηθέν (Reichenbach 1932). Δηλαδή, η αιτιότητα αποτελεί ένα ενδεχομενικό χαρακτηριστικό του κόσμου που θεμελιώνεται στην επιτυχία της επιστημονικής μεθοδολογίας. Για τον Reichenbach, όλα τα υπόλοιπα χαρακτηριστικά της αιτιότητας, όπως π.χ. ο τοπικός χαρακτήρας της διάδοσης της αιτιακής επίδρασης, προϋποθέτουν την επαγωγική θεμελίωση της αιτιότητας. Μόνο εφόσον μπορούμε να μιλάμε για δυνάμει συμβάντα, στη βάση της επαγωγής, μπορούμε να αναφερθούμε σε ακολουθίες συμβάντων και, εν τέλει, να θεμελιώσουμε τη διάκριση ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων σε συμφωνία με την ειδική

θεωρία της σχετικότητας.

Ο Salmon (1984) επιχειρεί πιο ριζική στροφή στην κατεύθυνση της οντολογικής θεώρησης της αιτιότητας. Γι' αυτόν η αιτιακή σχέση δεν περιορίζεται στην επικράτεια του παρατηρήσιμου, του κόσμου της εμπειρίας με τη στενή έννοια, αλλά και σε μη παρατηρήσιμες οντότητες που αποδέχεται η φυσική επιστήμη. Η θέση αυτή επιτρέπει στο Salmon να θεμελιώσει το ρεαλισμό του ως προς τις θεωρητικές οντότητες στη βάση της αρχής του κοινού αιτίου. Από την άλλη, οι καλύτερες φυσικές θεωρίες που διαθέτουμε παρέχουν το πλαίσιο για τη διατύπωση της αιτιακής θεωρίας του. Με αυτόν τον τρόπο ο Salmon δεν εξαρτά την ύπαρξη της αιτιότητας από την επιτυχία της επιστημονικής μεθοδολογίας, όπως έκανε ο Reichenbach, αλλά από τη συμφωνία της με την εικόνα του κόσμου που προκύπτει από τις πλέον επικυρωμένες επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε. Έτσι, ο Salmon υποστηρίζει ότι ενώ μία οντολογία φυσικών αντικειμένων αρμόζει στην προ-σχετικιστική φυσική, μία οντολογία συμβάντων ή μία οντολογία διαδικασιών αρμόζει στη σχετικιστική φυσική. Επιζητώντας τη συμφωνία της αιτιακής θεωρίας του με τις οντολογικές απαιτήσεις της σχετικιστικής φυσικής, ο Salmon επιλέγει τη θεμελίωση της αιτιότητας στη βάση αιτιακών διαδικασιών.

Η φιλοσοφική παράδοση των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων θεμελιώνεται με τις προσεγγίσεις του Wesley Salmon (1984) και του Phil Dowe (1992-2000). Παρά τις διαφορές τους, και οι δύο προσεγγίσεις υποστηρίζουν ότι η αιτιότητα επεξηγείται με όρους *αιτιακών διαδικασιών* – δηλαδή, οντοτήτων που έχουν χρονική διάρκεια και είναι υπεύθυνες για τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης από το αίτιο στο αποτέλεσμα (Salmon) είτε για τη συγκρότηση αιτιακών αντικειμένων που αλληλεπιδρούν (Dowe) - και *αιτιακών αλληλεπιδράσεων* - δηλαδή, συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε ορισμένα χωροχρονικά σημεία και μεταβάλλουν χαρακτηριστικές ιδιότητες των αιτιακών διαδικασιών. Επιπλέον, και οι δύο προσεγγίσεις θεμελιώνουν την αιτιακή οντολογία που υιοθετούν σε φυσικά χαρακτηριστικά του κόσμου τα οποία περιγράφονται από τις καλύτερες επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε. Πρόκειται για *θεωρίες φυσικής αιτιότητας*. Με άλλα λόγια, οι Salmon και Dowe υιοθετούν ένα γενικό μεθοδολογικό αίτημα σύμφωνα με το οποίο η αιτιότητα επεξηγείται με βάση ενδεχομενικά φυσικά χαρακτηριστικά του κόσμου μας και υποστηρίζουν ότι η επεξήγηση της αιτιότητας με

όρους αιτιακών διαδικασιών ικανοποιεί αυτό το μεθοδολογικό αίτημα.

Η βασική συνέπεια του γενικού μεθοδολογικού αιτήματος είναι η θεώρηση της αιτιότητας σε στενή σχέση με τις φυσικές θεωρίες και, μέσω αυτών, με τη θεμελιώδη οντολογία του κόσμου. Η αιτιότητα αποτελεί την οντολογική αρχή που διέπει τη μεταβολή στο φυσικό κόσμο και οι φυσικές θεωρίες μάς λένε πως περιγράφονται οι μεταβολές στο φυσικό κόσμο και σε ποιες θεμελιώδεις οντότητες αναφέρονται: σωματίδια, πεδία κ.λπ. Οι αιτιακές θεωρίες επεξηγώντας τις βασικές αιτιακές έννοιες με όρους φυσικών εννοιών ουσιαστικά ταυτίζουν την αιτιακή σχέση με κάποιες φυσικές σχέσεις ανάμεσα στις θεμελιώδεις φυσικές οντότητες. Ο ενδεχομενικός χαρακτήρας αυτών των προσεγγίσεων στην αιτιότητα γίνεται φανερός σε περιόδους αλλαγής των επιστημονικών θεωριών, στις επιστημονικές επαναστάσεις. Η αληθοτιμή των προτάσεων που μπορούν να διατυπωθούν στο πλαίσιο δύο διαφορετικών επιστημονικών θεωριών ενδέχεται να είναι διαφορετική, κατά συνέπεια η εικόνα του κόσμου που προκύπτει από τις προτάσεις που θεωρούμε ως αληθείς στο πλαίσιο της κάθε θεωρίας να είναι διαφορετική - άρα, διαφορετικές αναμένεται να είναι και οι θέσεις περί αιτιότητας που βρίσκονται σε συμφωνία με την εκάστοτε θεωρία. Η απόρριψη της δράσης εξ αποστάσεως καθώς και η διατύπωση πιθανοκρατικών αιτιακών θεωριών δείχνουν του λόγου το αληθές. Το γεγονός αυτό δεν συνεπάγεται την πλήρη σχετικότητα των αντιλήψεων μας περί αιτιότητας, αλλά μόνο ότι οι ιδέες μας για την αιτιότητα έχουν και αυτές την «ιστορία» τους, η οποία είναι στενά δεμένη με την ιστορία των επιστημονικών θεωριών.

Σε αυτό το πλαίσιο, κατ' αναλογία με τη ρεαλιστική θέση ότι οι επιστημονικές θεωρίες καθώς εξελίσσονται συγκλίνουν προς την αλήθεια, θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι το ίδιο συμβαίνει και με τις αιτιακές θεωρίες. Όποιος υιοθετεί αυτή την πεποίθηση δεν κάμπτεται από το βάρος των «αποτυχημένων» αιτιακών θεωριών, όπως και ο ρεαλιστής ως προς τις επιστημονικές θεωρίες δεν κάμπτεται από επιχειρήματα του τύπου της πεσιμιστικής επαγωγής. Η αποτυχία να βρεθεί μία επιτυχημένη αιτιακή θεωρία απλώς σημαίνει ότι ο στόχος δεν έχει επιτευχθεί ακόμα και όχι ότι δεν μπορεί να επιτευχθεί, όπως φαίνεται να πιστεύει ο Norton (2007). Επίσης, όποιος πιστεύει ότι η αιτιότητα αποτελεί θεμελιώδη οντολογική αρχή του κόσμου δεν κλονίζεται από το γεγονός ότι υπάρχουν διαφορετικές θεωρήσεις για την αιτιότητα. Αναφέραμε ήδη, με το παράδειγμα της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας,

ότι σε συμφωνία με την ίδια επιστημονική θεωρία ενδέχεται να βρίσκονται περισσότερες από μία οντολογικές θεωρήσεις (συμβάντων και διαδικασιών). Με άλλα λόγια, υπάρχει υποκαθορισμός της οντολογίας από τις επιστημονικές θεωρίες. Το γεγονός αυτό επιτρέπει, καταρχήν, ένα είδος αιτιακού πλουραλισμού.

Ωστόσο, η υιοθέτηση του γενικού μεθοδολογικού αιτήματος δεν είναι χωρίς προβλήματα. Ένα από αυτά αφορά στον κίνδυνο περιορισμού της εμβέλειας της αιτιότητας στο πλαίσιο μίας θεωρίας, σε ένα επιστημονικό αντικείμενο. Το πρόβλημα ενδεχομένως να επιλύεται στο πλαίσιο του ίδιου επιστημονικού αντικειμένου μέσα από τη διάκριση ανάμεσα σε θεμελιώδεις και φαινομενολογικές επιστημονικές θεωρίες και τον περιορισμό της συμφωνίας της αιτιότητας με την εικόνα του κόσμου όπως προκύπτει από τις πρώτες. Επιπλέον, θα μπορούσαμε να υιοθετήσουμε σχέσεις αναγωγής ή επιγένεσης που να δικαιολογούν τη χρήση αιτιακών περιγραφών πέραν από το πλαίσιο των θεμελιωδών φυσικών θεωριών. Ωστόσο, το πρόβλημα γίνεται ιδιαίτερα οξύ όταν αναφερόμαστε σε διαφορετικά επιστημονικά αντικείμενα, π.χ., στη βιολογία και στη φυσική. Πώς θεμελιώνεται η διάκριση ανάμεσα στα έμβια και άβια όντα και, αντιστοίχως, η αιτιότητα ως οντολογική αρχή; Θα πρέπει να υιοθετήσουμε φυσικαλιστικούς αναγωγισμούς, όπως ενδεχομένως θα πρότεινε κάποιος που θεμελιώνει την αιτιότητα σε φυσικές θεωρίες;

Σε αυτή την εργασία δεν θα αναλύσουμε τις γενικές συνέπειες του μεθοδολογικού αιτήματος που συνδέει την αιτιότητα με την εικόνα του κόσμου όπως προκύπτει από τις καλύτερες επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε. Αυτό που θα μας απασχολήσει είναι η ορθότητα της συγκεκριμένης θέσης των Salmon και Dowe κατά την οποία η θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων είναι συμβατή με την εικόνα του κόσμου. Θα ερευνήσουμε τη σχέση ανάμεσα σε σύγχρονες φυσικές θεωρίες και στην αιτιότητα όπως αναλύεται εντός της φιλοσοφικής παράδοσης των Russell, Reichenbach, Salmon και Dowe. Οι φυσικές θεωρίες στις οποίες θα αναφερθούμε είναι κλασικές σχετικιστικές θεωρίες σωματιδίων και πεδίων (όπως είναι η θεωρία των van Dam και Wigner, η θεωρία του ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon και η θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου), καθώς και σχετικιστικές κβαντικές θεωρίες πεδίων στην προσέγγιση της τοπικής κβαντικής φυσικής. Ο κύριος στόχος είναι να ορίσουμε στο εννοιολογικό πλαίσιο αυτών των φυσικών θεωριών, με διαισθητικά εύλογο τρόπο, βασικές έννοιες της αιτιακής

θεωρίας (όπως είναι η έννοια της αιτιακής διαδικασίας) και ακολούθως να εξετάσουμε υπό ποιες προϋποθέσεις υπάρχουν οντότητες που να ικανοποιούν τους ορισμούς σε μοντέλα αυτών των επιστημονικών θεωριών αυτών.

Όλες οι σύγχρονες αιτιακές θεωρίες αντιμετωπίζουν με αμηχανία την κβαντική θεωρία και τις «παράδοξες», από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής, προβλέψεις της. Η έλευση της κβαντικής μηχανικής αμφισβήτησε τον ντετερμινιστικό χαρακτήρα της αιτιότητας και τροφοδότησε τις προσεγγίσεις πιθανοκρατικής αιτιότητας που συναντάμε στον εικοστό αιώνα. Ωστόσο, το βασικό πρόβλημα που αντιμετωπίζουν οι αιτιακές θεωρίες με την κβαντική μηχανική έχει να κάνει κυρίως με το ζήτημα της τοπικότητας, της απουσίας δράσης από απόσταση. Από τη μία πλευρά, οι αρχές που εκφράζουν τον τοπικό χαρακτήρα της αιτιακής επίδρασης είναι σχεδόν κοινός τόπος για τις αιτιακές θεωρίες, ενώ, από την άλλη, αμφισβητούνται έντονα από ορισμένα αποτελέσματα που προβλέπονται από την κβαντική θεωρία. Για τον Salmon η διαπίστωση αιτιακών ανωμαλιών στην περιγραφή φυσικών συστημάτων από την κβαντική μηχανική έχει ως συνέπεια να μην μπορούμε εύκολα να μιλήσουμε για αιτιακές διαδικασίες στον κβαντικό κόσμο. Επίσης, η δυσκολία να διατυπωθούν αιτιακές εξηγήσεις των απομακρυσμένων συσχετίσεων που προβλέπονται από το νοητικό πείραμα EPR και από τις ανισότητες τύπου Bell, μέσω της αρχής του κοινού αιτίου, κρούουν τον κώδωνα του κινδύνου σε σχέση με τη συμφωνία της κβαντικής μηχανικής με την αιτιότητα.

Ο ίδιος ο Salmon μας παροτρύνει να εγκαταλείψουμε το πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής και να εξετάσουμε τα προβλήματα της θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων στο πιο φιλόξενο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας πεδίων, χωρίς, ωστόσο, να εμβαθύνει σε αυτή την κατεύθυνση. Ο Salmon θεώρησε τη κβαντική ηλεκτροδυναμική ως μία θεωρία που περιγράφει τοπικές αλληλεπιδράσεις, απαλλαγμένες από τη δράση από απόσταση, και μας δίνει μία εικόνα που δεν είναι ασύμβατη με την αιτιακή θεωρία που ο ίδιος διατύπωσε (Salmon 1984:255).

Σε αυτή την εργασία ακολουθούμε την παρότρυνση του Salmon θεωρώντας ότι τα προβλήματα τοπικότητας που αντιμετωπίζει η αιτιότητα μπορούν να εξετασθούν με αυστηρότητα μόνο στο πλαίσιο μιας θεωρίας στην οποία μπορούν να ορισθούν συνθήκες τοπικότητας. Η κβαντική μηχανική είναι μία θεωρία που εκ της

δομής της περιγράφει τα φυσικά συστήματα στο χώρο των καταστάσεων. Οι έννοιες τοπικό παρατηρήσιμο και τοπική κατάσταση δεν έχουν νόημα στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις, π.χ. στην αναπαράσταση θέσης και για πεπερασμένο, το πολύ, πλήθος μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων. Γι' αυτό στραφήκαμε στην τοπική κβαντική φυσική που αρχικά διατυπώθηκε από τους Haag και Kastler ως αλγεβρική προσέγγιση στην κβαντική θεωρία πεδίων στο χωρόχρονο Minkowski και στη συνέχεια επεκτάθηκε στην περιγραφή κβαντικών πεδίων σε καμπύλους χωροχρόνους και σε ζητήματα κβαντικής θερμοδυναμικής, με την προσδοκία να καταπιαστεί με το ζήτημα της ενοποίησης της γενικής θεωρίας της σχετικότητας με τη κβαντική θεωρία. Όπως θα δούμε αναλυτικά στη συνέχεια, η τοπική κβαντική φυσική ενσωματώνει καταρχήν τις έννοιες του τοπικού παρατηρήσιμου και της τοπικής κατάστασης ενώ επιτρέπει την αυστηρή διατύπωση συνθηκών τοπικότητας, οι οποίες ενσωματώνουν την απαίτηση η διάδοση της αιτιακής επίδρασης να γίνεται με ταχύτητα μικρότερη από εκείνη του φωτός στο κενό.

Η εξέταση των προβλημάτων της αιτιότητας στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής έχει ένα ακόμα χαρακτηριστικό που αφορά κυρίως στη μεθοδολογία της φιλοσοφίας της φυσικής. Η τοπική κβαντική φυσική είναι μία αξιωματική θεωρία, σε αντίθεση με τη κβαντική θεωρία πεδίων στη συνήθη διατύπωση που υιοθετούν οι φυσικοί και στην οποία αναφέρεται ο Salmon. Το γεγονός αυτό έχει πλεονεκτήματα αλλά και ορισμένα μειονεκτήματα. Το πρώτο πλεονέκτημα έχει να κάνει με το γεγονός ότι οι πρωταρχικοί όροι, τα αξιώματα και οι συνθήκες που διατυπώνονται στο πλαίσιο της θεωρίας είναι διατυπωμένα με σαφήνεια και μαθηματική αυστηρότητα. Κάτι τέτοιο δεν ισχύει στη συμβατική προσέγγιση στην κβαντική θεωρία πεδίων που θεωρεί, π.χ., ότι το κβαντικό πεδίο ορίζεται με την αντιστοιχία τελεστών σε σημεία του χωροχρόνου. Η σημασία αυτού του γεγονότος για τη φιλοσοφική μεθοδολογία έχει να κάνει με την αυστηρότητα της διατύπωσης φιλοσοφικών εννοιών και υποθέσεων, με διαισθητικά προφανές περιεχόμενο, στο πλαίσιο μιας επιστημονικής θεωρίας. Βεβαίως, είναι ανοιχτό ζήτημα, και κρίνεται κατά περίπτωση, το εάν η μεταφορά της μαθηματικής αυστηρότητας στο φιλοσοφικό πλαίσιο οδηγεί σε γόνιμες εννοιολογικές διακρίσεις. Ενίοτε η «σαφήνεια» των ιδεών μπορεί να είναι ανταγωνιστική με τη γονιμότητα τους.

Το δεύτερο πλεονέκτημα αφορά στην παραγωγική συναγωγή θεωρημάτων από το αξιωματικό σύστημα της επιστημονικής θεωρίας. Η μαθηματική απόδειξη μίας πρότασης που εκφράζει μία φιλοσοφική θέση για τον κόσμο, διατυπωμένη με βάση τους πρωταρχικούς όρους μίας αξιωματικής θεωρίας, αποτελεί ένα έγκυρο παραγωγικό επιχείρημα που το συμπέρασμα του μπορεί να αμφισβητηθεί μόνο αν αμφισβητηθεί κάποιο από τα αξιώματα της θεωρίας. Το ίδιο ισχύει και για οποιαδήποτε πρόταση δεν είναι θεώρημα, και για την απόδειξή της χρησιμοποιούμε επιπλέον προτάσεις, πέραν των αξιωμάτων, που συνιστούν εύλογες υποθέσεις.

Βεβαίως, τα πλεονεκτήματα που αναφέραμε αφορούν σε κάθε θεωρία που διατυπώνεται σε αξιωματική μορφή και όχι συγκεκριμένα στην τοπική κβαντική φυσική. Μάλιστα, θα μπορούσε κάποιος να αναρωτηθεί γιατί επιλέξαμε αυτή την αξιωματική διατύπωση της κβαντικής θεωρίας πεδίων και όχι, π.χ., τη θεμελίωση κατά Wightman. Υπάρχουν δύο λόγοι γι' αυτή την επιλογή. Ο πρώτος έχει να κάνει με τη διαισθητικά προφανή ερμηνεία των πρωταρχικών όρων και των αξιωμάτων της τοπικής κβαντικής φυσικής. Ο δεύτερος λόγος έχει να κάνει με τη φιλοσοφική κοινότητα και την ευρεία διάδοση καθώς και τα σημαντικά, ως προς τη φιλοσοφική τους σημασία, αποτελέσματα που έχει δώσει αυτή η προσέγγιση στην κβαντική θεωρία πεδίων.

Ας δούμε, τώρα, τα βασικά μειονεκτήματα αυτής της επιλογής. Το πρώτο μειονέκτημα αφορά στην απομάκρυνση από την κοινότητα των φυσικών επιστημόνων που ασχολούνται με την κβαντική θεωρία πεδίων. Σε αντίθεση με τους φιλοσόφους, οι φυσικοί που ασχολούνται με την τοπική κβαντική φυσική αποτελούν μία πολύ μικρή κοινότητα επιστημόνων που ενδιαφέρονται για τη *μαθηματική* φυσική και για ζητήματα *θεμελίωσης* των κβαντικών θεωριών.

Ωστόσο, το πιο σημαντικό μειονέκτημα αυτής της προσέγγισης αφορά στο γεγονός ότι μέχρι τώρα δεν έχουν βρεθεί ενδιαφέροντα μοντέλα της θεωρίας που να περιγράφουν αλληλεπιδρώντα κβαντικά πεδία. Αυτό δεν σημαίνει ότι η τοπική κβαντική φυσική δεν μπορεί να περιγράψει αλληλεπιδρώντα κβαντικά πεδία, αλλά ότι δεν έχουν κατασκευασθεί, τοπικά κβαντικά συστήματα που να περιγράφουν αλληλεπιδρώντα κβαντικά πεδία. Το γεγονός ίσως να εμπνέει ανησυχία στο φιλόσοφο που ασχολείται με ζητήματα αιτιότητας. Πώς είναι δυνατόν να μιλήσουμε για αιτιότητα στον κόσμο, με βάση μία φυσική θεωρία, χωρίς να γνωρίζουμε μοντέλα

που να περιγράφουν αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις θεμελιώδεις οντότητες της θεωρίας; Όμως η εμπειρία από τη φιλοσοφία της φυσικής αποδεικνύει το αντίθετο. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, εκτός από τις συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας, τις ανισότητες Bell και την περιγραφή του πειράματος EPR, στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής έχουν διατυπωθεί η αρχή του κοινού αιτίου καθώς και η αντιγεγονική πιθανοκρατική αιτιακή θεωρία του Lewis (Butterfield 1992, Redei 1993). Επιπλέον, στην τοπική κβαντική φυσική ορίζεται η έννοια της τοπικής φυσικής διεργασίας, η οποία εκφράζει τοπικές αλληλεπιδράσεις σε πεπερασμένες χωροχρονικές περιοχές - γεγονός που μας επιτρέπει να περιγράψουμε τη μέθοδο του ίχνους του Reichenbach καθώς και την έννοια της αιτιακής διαδικασίας με βάση την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon (1984).

Η εργασία μπορεί να διαιρεθεί σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, το οποίο αποτελείται από τα πέντε πρώτα κεφάλαια, θα επιχειρήσουμε μία κριτική ανασυγκρότηση της φιλοσοφικής παράδοσης των θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ενώ, στο δεύτερο μέρος, το οποίο αποτελείται από τα τρία τελευταία κεφάλαια, εξετάζουμε τις θεωρίες αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων στο πλαίσιο των φυσικών θεωριών που αναφέραμε.

Συγκεκριμένα, στο πρώτο κεφάλαιο θα μας απασχολήσει η θεωρία των αιτιακών γραμμών του Russell. Η θεωρία αυτή θεωρείται πρόδρομος της πρώιμης θεωρίας του Salmon. Οι στόχοι μας σε αυτό το κεφάλαιο είναι αφενός να αναδείξουμε τα στοιχεία εκείνα που συναντάμε στις μεταγενέστερες αιτιακές θεωρίες, αφετέρου να εξετάσουμε κατά πόσο είναι δικαιολογημένη η κριτική που ασκήθηκε στη θεωρία του Russell από τους Salmon και Dowe.

Στο δεύτερο κεφάλαιο προσπαθούμε να ανασυγκροτήσουμε πτυχές της αιτιακής θεωρίας του Reichenbach. Θα σταθούμε ιδιαιτέρως στη μέθοδο του ίχνους, καθώς και στη διάκριση ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων που αντιστοιχεί στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες. Επιπλέον, θα επικεντρωθούμε στην πιθανοκρατική προσέγγιση της αιτιότητας και στην αρχή του κοινού αιτίου (όπως επεξηγείται με τη βοήθεια των στατιστικών σχέσεων). Τέλος, στο παράρτημα του δεύτερου κεφαλαίου θα αναλύσουμε, μέσω παραδειγμάτων, την έννοια του συστήματος κοινών αιτίων του

Reichenbach που έχει προτείνει ο Redei και θα αναδείξουμε το πρόβλημα της συνάφειας που αντιμετωπίζουν οι εξηγήσεις των συσχετίσεων από συστήματα κοινών αιτίων.

Στο τρίτο κεφάλαιο θα μας απασχολήσει η πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon που διατυπώνεται με τη μέθοδο του ίχνους. Θα δώσουμε ιδιαίτερο βάρος στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες που έχουν την ικανότητα να διαδίδουν τροποποιήσεις τοπικών χαρακτηριστικών (ίχνος) και στις αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν δομή. Θεωρούμε ότι το δεύτερο είδος αιτιακών διαδικασιών, το οποίο και ο ίδιος ο Salmon υποβάθμισε στις ύστερες ανασυγκροτήσεις της θεωρίας του, δεν έχει τύχει επαρκούς μελέτης στη βιβλιογραφία.

Στο τέταρτο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στις ύστερες θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων που διατυπώθηκαν από το Salmon με όρους αναλλοίωτων και διατηρήσιμων ποσοτήτων, καθώς και στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe. Θα επιχειρήσουμε μία σύγκριση αυτών των θεωριών επισημαίνοντας τα κοινά στοιχεία και τις διαφορές τους και θα αποτιμήσουμε την κριτική που έχουν δεχθεί.

Στο πέμπτο κεφάλαιο, με το οποίο ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος της εργασίας, θα επιχειρήσουμε μία επισκόπηση των αιτιακών θεωριών στις οποίες αναφερθήκαμε στο φως γενικών πραγματεύσεων της αιτιότητας. Συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε με ποιον τρόπο αναλύεται η αιτιακή σχέση στο πλαίσιο των θεωριών αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Επίσης, θα αναφερθούμε στην επάρκεια της λύσης του χιουμιανού προβλήματος της αιτιότητας που προτείνει ο Salmon. Και, τέλος, θα εξετάσουμε κατά πόσον η αιτιακή σχέση που επεξηγείται με όρους αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων είναι ενική ή γενική, ενδογενής ή εξωγενής, και αναγώγιμη ή μη.

Στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας θα προσπαθήσουμε να ορίσουμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο κλασικών φυσικών θεωριών. Καταρχάς αναφερόμαστε στη σχετικιστική σωματιδιακή θεωρία των van Dam και Wigner και στη θεώρηση ενός σωματιδίου ως αιτιακής διαδικασίας. Στη συνέχεια ασχολούμαστε με πεδιακές θεωρίες και, συγκεκριμένα, με το ζήτημα του ορισμού αιτιακών διαδικασιών στο ελεύθερο βαθμωτό πεδίο Klein-Gordon και στο κλασικό ελεύθερο

ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Στην πρώτη περίπτωση εξετάζουμε το πρόβλημα από τη σκοπιά της ύστερης θεωρίας του Salmon και της θεωρίας του Dowe και διερευνούμε κατά πόσο η έννοια της αιτιακής διαδικασίας θα πρέπει να ορισθεί με καθολικές ή τοπικές διατηρήσιμες ποσότητες. Στην περίπτωση του κλασικού ελεύθερου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου θεωρούμε τη διάδοση ασυνεχειών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως διάδοση ίχνους που δημιουργείται σε κάποια περιοχή του χωροχρόνου σε συμφωνία με την πρώιμη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών του Salmon.

Με το έβδομο κεφάλαιο επιχειρούμε μία εισαγωγή στην τοπική κβαντική φυσική από τη σκοπιά των συνθηκών τοπικότητας που συζητιούνται στο πλαίσιό της. Θα διακρίνουμε δύο είδη συνθηκών τοπικότητας: αυτές που εκφράζουν τοπική ανεξαρτησία και εκείνες που εκφράζουν τοπική εξάρτηση. Σε αυτό το πλαίσιο θα εξετάσουμε την παραβίαση των ανισοτήτων Bell στην τοπική κβαντική φυσική και θα ερμηνεύσουμε την ανασυγκρότηση του επιχειρήματος EPR που έχει προταθεί από τους Redhead και Wagner. Η έννοια της τοπικής φυσικής διεργασίας μας επιτρέπει να ορίσουμε την έννοια του ίχνους που δημιουργείται σε κάποιο συμβάν ενός τοπικού κβαντικού συστήματος σε μία περιοχή του χωροχρόνου. Με τη βοήθεια αυτής της έννοιας και της συνθήκης της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας, που αποτελεί συνθήκη τοπικής εξάρτησης, θα πραγματευθούμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας με βάση τη μέθοδο του ίχνους και θα εξετάσουμε αν υπάρχουν τέτοιες οντότητες στην τοπική κβαντική φυσική.

Στο τελευταίο κεφάλαιο θα αναφερθούμε στην αρχή του κοινού αιτίου στην τοπική κβαντική φυσική. Θα στηριχθούμε στα αποτελέσματα των εργασιών των Redei και Summers και θα προσπαθήσουμε να ερμηνεύσουμε την ασθενή αρχή του κοινού αιτίου με τη βοήθεια περισσότερων του ενός συμβάντων, καθένα από τα οποία εκλαμβάνεται ως μερικό αίτιο της στατιστικής συσχέτισης. Επίσης, θα δείξουμε ότι τα μερικά αίτια δεν συγκροτούν σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach. Τέλος, θα δείξουμε με ποιον τρόπο συνάγονται οι ανισότητες Clauser-Horne (και ακολούθως οι ανισότητες Bell) από την υπόθεση της ύπαρξης ενός κοινού συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach για τέσσερις στατιστικές συσχετίσεις.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΡΩΤΟ

Η ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ ΑΙΤΙΑΚΩΝ ΓΡΑΜΜΩΝ ΤΟΥ RUSSELL

Η στάση του Russell σε σχέση με την αιτιότητα δεν ήταν πάντα η ίδια. Στο άρθρο του "On the notion of cause" (1913) διατύπωσε μία καταλυτική κριτική στην αιτιότητα από την σκοπιά της σχέσης της με την επιστήμη[1]. Σε αυτή την κριτική ο Russell διαπιστώνει ότι «στις αναπτυγμένες επιστήμες, όπως η βαρυτική αστρονομία, δεν συναντάται ο όρος "αίτιο"» και υποστηρίζει ότι «ο λόγος που η φυσική έπαψε να αναζητά αίτια είναι επειδή στην πραγματικότητα δεν υπάρχουν τέτοια πράγματα». Η αρχή της αιτιότητας καταδικάζεται με γλαφυρό τρόπο ως «λείψανο μίας περασμένης εποχής, που επιβιώνει, όπως και η μοναρχία, μόνο επειδή εσφαλμένα υποτίθεται ότι δεν κάνει κακό», ενώ, υποστηρίζει ο Russell, οι φιλόσοφοι θα έπρεπε να επιθυμούν την εξάλειψη της λέξης "αίτιο" από το φιλοσοφικό λεξιλόγιο διότι είναι «αναπόφευκτα συνδεδεμένη με αποπροσανατολιστικούς συνειρμούς» (Russell 2003:164-5).

Τριανταπέντε χρόνια αργότερα, στο βιβλίο του *Human Knowledge*, ο Russell αναθεωρεί την στάση του αποδεχόμενος ότι «η επιστήμη υποθέτει τρόπον τινά την αιτιότητα, και το τωρινό μας ερώτημα είναι: υπό ποια έννοια η αιτιότητα περιλαμβάνεται στην επιστημονική μέθοδο;» (Russell 1948:329). Σε αυτή τη φάση η κριτική στην αιτιότητα δεν συνιστά άρνηση της σημασίας της για την περιγραφή του κόσμου, όπως αυτή προκύπτει από τις επιστήμες, αλλά αφετηρία διατύπωσης μίας νέας αιτιακής θεωρίας που θα βρίσκεται σε συμφωνία με την επιστήμη. Έτσι, για την αρχή της αιτιότητας υποστηρίζει ότι «εμφανίζεται στα έργα όλων των φιλοσόφων σε

[1] Υπενθυμίζουμε ότι το άρθρο του Einstein για την ειδική θεωρία της σχετικότητας δημοσιεύτηκε το 1905, ενώ η γενική θεωρία της σχετικότητας είδε το φως δύο χρόνια μετά την δημοσίευση του άρθρου του Russell, το 1915. Από την άλλη, για την κβαντική θεωρία το 1913 είναι έτος σταθμός, αφού είναι το έτος δημοσίευσης του μνημειώδους έργου του Bohr "On the Constitution of Atoms and Molecules".

μία στοιχειώδη μορφή που δεν αποδέχεται καμιά αναπτυγμένη επιστήμη» (ό.π.:332), και παραδέχεται ότι η αρχή της αιτιότητας έχει περιορισμούς διότι υπάρχουν συμβάντα τα οποία δεν βρίσκονται σε αιτιακή σχέση με άλλα συμβάντα: «…θα θεωρήσω ότι ο νόμος της αιτιότητας υποστηρίζει ότι οι αιτιακές ακολουθίες όταν συμβαίνουν είναι αναλλοίωτες, και ότι συμβαίνουν συχνά, αλλά όχι ότι *κάθε* συμβάν είναι μέλος *κάποιας* αναλλοίωτης αιτιακής ακολουθίας» (ό.π.:472). Επίσης, σε σχέση με την έννοια "αίτιο" ο Russell διαπιστώνει ότι «είναι πρωτόγονη και μη επιστημονική» και ότι «στην επιστήμη έχει αντικατασταθεί από την έννοια "αιτιακός νόμος"» (ό.π.:474). Το πρόβλημα του Russell σε αυτή την περίπτωση είναι ότι μία γενίκευση του κοινού νου που εκφράζεται από μία πρόταση της μορφής "το Α είναι αίτιο του Β", δεν λαμβάνει υπόψη της ότι στο χρονικό διάστημα που μεσολαβεί ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα μπορεί να λάβει χώρα κάποιο συμβάν που να αποτρέπει να λάβει χώρα το συμβάν Β. Στο πλαίσιο των επιστημών αυτό το πρόβλημα, σύμφωνα με τον Russell, επιλύεται με τρεις τρόπους: είτε υποθέτοντας την ύπαρξη στατιστικών κανονικοτήτων, είτε υιοθετώντας αιτιακούς νόμους σε διαφορική μορφή που περιγράφουν τάσεις (οι οποίες μεταβάλλονται κάθε χρονική στιγμή) για την εξέλιξη κάποιων φυσικών μεγεθών, είτε, τέλος, υιοθετώντας ένα αίτημα που ονομάζει *σχεδόν-εμμένεια* (quasi-persistence), το οποίο μας επιτρέπει να ορίσουμε τη βασική έννοια με την οποία θα ασχοληθούμε σε αυτό το κεφάλαιο, την έννοια της *αιτιακής γραμμής*.

Προτού όμως να αναλύσουμε την έννοια της αιτιακής γραμμής, ας δούμε με ποιον τρόπο ο Russell κατανοεί τη σχέση της αιτιότητας με την επιστημονική μεθοδολογία. Η αιτιακή θεωρία που αναπτύσσει ο Russell στο *Human Knowledge* είναι πλήρως προσαρμοσμένη στην ανάγκη δικαιολόγησης των επαγωγικών γενικεύσεων που εκφράζουν αιτιακούς νόμους. Για τον Russell μία έγκυρη επαγωγική γενίκευση δεν είναι τίποτα άλλο από μία απλή λογικομαθηματική εφαρμογή της θεωρίας των πιθανοτήτων σε προκείμενες που προκύπτουν ανεξάρτητα από την επαγωγή (ό.π.:451). Οι προκείμενες αυτές αποδίδουν αρχική μη μηδενική τιμή πιθανότητας στην καθολική γενίκευση. Έτσι, δεδομένου ενός συνόλου εμπειρικών τεκμηρίων για τα οποία ισχύει, π.χ., ότι κάθε Α είναι Β θα πρέπει να μπορούμε να αποδώσουμε κάποια αρχική μη μηδενική πιθανότητα στην καθολική γενίκευση "όλα τα Α είναι Β" – που μετρά τον βαθμό πεποίθησης στην αλήθειά της – για να μπορέσουμε στη συνέχεια να επικυρώσουμε την πρόταση, αυξάνοντας την

πιθανότητα να είναι αληθής στο φως νέων εμπειρικών τεκμηρίων[2]. Οι προκείμενες αυτές διατυπώνονται από το Russell ως αιτήματα που πρέπει να γίνουν αποδεκτά a priori και χωρίς καμία εμπειρική τεκμηρίωση, διότι διαφορετικά θα εμπλακούμε στον φαύλο κύκλο να αναζητούμε προκείμενες που να δικαιολογούν τα αιτήματα ως εμπειρικές γενικεύσεις. Τα αιτήματα που προτείνει ο Russell είναι τα εξής: α) το αίτημα της σχεδόν-εμμένειας, β) το αίτημα των διακρίσιμων αιτιακών γραμμών, γ) το αίτημα της χωροχρονικής συνέχειας στις αιτιακές γραμμές, δ) το αίτημα της δομής και ε) το αίτημα της αναλογίας.

Με εξαίρεση το τελευταίο αίτημα, τα υπόλοιπα είναι διατυπωμένα με τη βοήθεια αιτιακών εννοιών. Τα αιτήματα λένε ότι ο κόσμος δεν είναι απλώς μία συλλογή τυχαίων συμβάντων, αλλά υπάρχει κάποιου τύπου τάξη στα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε αυτόν, η οποία περιγράφεται με βάση σχέσεις και ομοιομορφίες αιτιακού χαρακτήρα. Η ύπαρξη αυτής της τάξης που θεμελιώνεται στην αιτιότητα είναι αναγκαία για να μπορούμε να κάνουμε έγκυρους επαγωγικούς συλλογισμούς με τους οποίους καταλήγουμε στη διατύπωση αιτιακών νόμων.

1.1 Αιτιακές γραμμές

Το αίτημα της σχεδόν-εμμένειας υποστηρίζει ότι,

> Δεδομένου ενός συμβάντος Α, είναι πολύ συχνό, σε οποιαδήποτε γειτονική χρονική στιγμή και σε κάποιο γειτονικό τόπο, να υπάρχει ένα συμβάν που είναι πολύ όμοιο με το Α. (Russell 1948:506)

Το αίτημα αυτό είναι πολύ σημαντικό για να μιλάμε για φυσικά αντικείμενα ή για πρόσωπα χωρίς να επικαλούμαστε την έννοια της ουσίας ως το υπόστρωμα που παραμένει αναλλοίωτο στη μεταβολή: το φυσικό αντικείμενο, σύμφωνα με το Russell, είναι μία ακολουθία συμβάντων που ικανοποιούν το αίτημα της σχεδόν-εμμένειας.

[2] Ακόμα, βέβαια, και αν λυθεί το πρόβλημα της απόδοσης μη μηδενικών αρχικών πιθανοτήτων σε γενικεύσεις, αυτό δεν συνεπάγεται ότι η επικύρωση καθίσταται απλή λογικομαθηματική εφαρμογή της θεωρίας πιθανοτήτων. Για παράδειγμα, οι κανόνες αναθεώρησης των πεποιθήσεών μας στο φως νέων εμπειρικών τεκμηρίων, δεν αποτελούν *θεώρημα* της θεωρίας πιθανοτήτων και απαιτούν δικαιολόγηση ώστε να γίνουν αποδεκτοί.

Όμως το αίτημα της σχεδόν-εμμένειας αναφέρεται στην ύπαρξη ενός τουλάχιστον συμβάντος που λαμβάνει χώρα στη χωροχρονική γειτονιά ενός συμβάντος Α. Δηλαδή, είναι δυνατόν την ίδια χρονική στιγμή σε διαφορετικούς γειτονικούς τόπους να λαμβάνουν χώρα περισσότερα από ένα συμβάντα που να είναι όμοια με το Α. Στην περίπτωση αυτή ορίζονται περισσότερες από μία ακολουθίες συμβάντων που ικανοποιούν το αίτημα της σχεδόν-εμμένειας και έχουν το Α ως κοινό συμβάν. Αυτή η δυνατότητα δημιουργεί προβλήματα όσον αφορά τη θεώρηση ενός αντικειμένου ως ακολουθία συμβάντων διότι αναδεικνύει την ανεπάρκεια του αιτήματος της σχεδόν-εμμένειας να εξασφαλίσει την ταυτότητα του αντικειμένου στον χρόνο.

Για να ορισθεί το φυσικό αντικείμενο ως ακολουθία συμβάντων κατά τρόπον ώστε να διατηρείται η χρονική ταυτότητά του, απαιτείται να διακρίνουμε ανάμεσα στα συμβάντα που είναι όμοια με το Α και λαμβάνουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή *t* στη γειτονιά του Α, κάποιο, που να έχει με το Α μία ιδιαίτερη σχέση. Αυτό επιτυγχάνεται με τον ορισμό των αιτιακών γραμμών:

> Η αιτιακή γραμμή ... είναι μία χρονική σειρά συμβάντων που σχετίζονται με τέτοιο τρόπο ώστε αν θεωρήσουμε ως δεδομένα κάποια από αυτά να μπορούμε να συμπεράνουμε κάτι για τα άλλα, οτιδήποτε και αν συμβαίνει αλλού. (Russell 1948:477)

Το αίτημα των διακρίσιμων αιτιακών γραμμών υποστηρίζει ότι οι αιτιακές γραμμές υπάρχουν:

> Είναι συχνά δυνατόν να διαμορφωθεί μία σειρά συμβάντων τέτοια ώστε από ένα ή δύο μέλη της σειράς να μπορούμε να συναγάγουμε κάτι για όλα τα άλλα μέλη. (ό.π.:508)

Σύμφωνα με τον ορισμό, σε μία αιτιακή γραμμή μπορούμε να συναγάγουμε κάποιο χαρακτηριστικό που αναφέρεται σε κάθε συμβάν που ανήκει σε αυτήν. Η συναγωγή πραγματοποιείται με την βοήθεια ενός εσωτερικού αιτιακού νόμου που συνέχει την αιτιακή γραμμή. Ο Russell ορίζει τον αιτιακό νόμο ως μία γενική αρχή στη βάση της οποίας, δεδομένων επαρκών συνθηκών για συγκεκριμένες περιοχές του χωροχρόνου, είναι δυνατόν να συμπεράνουμε κάτι, με βεβαιότητα ή με υψηλό βαθμό πιθανότητας, για άλλες περιοχές του χωροχρόνου (Russell 1948:326). Ένας εσωτερικός αιτιακός νόμος διέπει τα συμβάντα μίας αιτιακής γραμμής χωρίς να λαμβάνει υπόψη το τι συμβαίνει σε περιοχές του χωροχρόνου που δεν ανήκουν στην αιτιακή γραμμή. Η ιδιαίτερη σχέση την οποία έχουν τα συμβάντα σε μία αιτιακή γραμμή και χάρη στην

οποία διακρίνεται ένα συμβάν που ανήκει σε αυτήν από όλα τα άλλα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα την ίδια χρονική στιγμή –σχέση που μας επιτρέπει να ερμηνεύσουμε την αιτιακή γραμμή ως ένα αντικείμενο– είναι ότι όλα τα συμβάντα ικανοποιούν τον ίδιο εσωτερικό αιτιακό νόμο.

Είναι σημαντικό να κατανοήσουμε τι σημαίνει ότι ο νόμος που διέπει μία αιτιακή γραμμή δεν λαμβάνει υπόψη συμβάντα που δεν ανήκουν στην αιτιακή γραμμή. Θα μπορούσε κάποιος να ισχυριστεί ότι αυτό σημαίνει ότι η αιτιακή γραμμή περιγράφει απομονωμένα συστήματα, δηλαδή συστήματα που εξελίσσονται σε απουσία αλληλεπιδράσεων με το περιβάλλον. Όμως τα πράγματα δεν είναι έτσι. Ας υποθέσουμε, για παράδειγμα, ότι ένα σώμα εκτελεί ελεύθερη πτώση σε κάποιο τόπο κοντά στην επιφάνεια της γης. Το σώμα είναι μία αιτιακή γραμμή και ο νόμος που δίνει την απόσταση την οποία διανύει το σώμα σε ορισμένο χρονικό διάστημα είναι η κανονικότητα που διέπει την αιτιακή γραμμή του σώματος. Αυτός ο νόμος περιγράφει την κίνηση του σώματος, δηλαδή, τα συμβάντα της αιτιακής γραμμής, χωρίς να αναφέρεται σε κίνηση στο πεδίο βαρύτητας της γης και στη βαρυτική αλληλεπίδραση του σώματος με το πεδίο. Ούτε αναφέρεται σε συμβάντα εκτός της αιτιακής γραμμής, όπως είναι η ύπαρξη της γης ως πηγής του πεδίου βαρύτητας. Ένα πιο σύγχρονο παράδειγμα αποτελεί ο νόμος εξασθένισης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που διέρχεται μέσα από την ύλη. Σε αυτή την περίπτωση ο νόμος μάς λέει ότι η ένταση της ακτινοβολίας I (που εκφράζει τον αριθμό φωτονίων ανά μονάδα εμβαδού και ανά μονάδα χρόνου) μειώνεται εκθετικά με την διανυόμενη απόσταση x εντός ενός ομογενούς υλικού. Τα συμβάντα που καθορίζουν την αιτιακή γραμμή χαρακτηρίζονται από την ένταση της ακτινοβολίας κάθε χρονική στιγμή στο σημείο του υλικού από το οποίο διέρχεται η ακτινοβολία. Η κανονικότητα που ικανοποιούν οποιαδήποτε δύο συμβάντα της αιτιακής γραμμής είναι η εξής: η διαφορά των λογαρίθμων της έντασης της ακτινοβολίας στα δύο συμβάντα είναι ανάλογη της χωρικής τους απόστασης (Eisberg and Resnick 1985:50). Όπως και στην περίπτωση του νόμου που διέπει την ελεύθερη πτώση, η κανονικότητα αυτή δεν αναφέρεται σε συμβάντα εκτός της αιτιακής γραμμής, δεν περιγράφει τη φύση της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με τα άτομα του υλικού από το οποίο διέρχεται η ακτινοβολία. Κατά τη διαδρομή των ακτινών γ μέσα από την ύλη είναι δυνατό να συμβεί πλήθος φαινομένων: το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, το φαινόμενο Auger, οι σκεδάσεις Thomson και Compton και η δίδυμη γένεση. Όμως ο νόμος της εξασθένισης της

ακτινοβολίας στον οποίο αναφερθήκαμε δεν λαμβάνει υπόψη στην περιγραφή της αιτιακής γραμμής κανένα από αυτά. Αναφερθήκαμε σε αυτά τα παραδείγματα για να δείξουμε ότι μολονότι κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής μπορεί να λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις οι οποίες ενδεχομένως να εξαρτώνται από συμβάντα εκτός της αιτιακής γραμμής, η κανονικότητα που διέπει την αιτιακή γραμμή είναι δυνατόν να μην αναφέρεται σε αυτά τα εξωτερικά συμβάντα και υπό αυτή την έννοια συσχετίζει τα συμβάντα της αιτιακής γραμμής ανεξάρτητα από οτιδήποτε συμβαίνει αλλού.

Επίσης, θα πρέπει να διακρίνουμε ανάμεσα σε κανονικότητες που ισχύουν για ένα μέρος των συμβάντων μίας αιτιακής γραμμής και σε άλλες κανονικότητες που διέπουν το σύνολο των συμβάντων. Σκεφτείτε (με κάποιο βαθμό εξιδανίκευσης) ένα σώμα το οποίο αρχικά κινείται στο κενό και στη συνέχεια στην κίνηση του επιδρά το βαρυτικό πεδίο ενός άστρου που είναι σε ορισμένη απόσταση από αυτό. Η μάζα του σώματος δεν μεταβάλλεται καθ' όλη τη διάρκεια της κίνησης και η σταθερότητα της μάζας αποτελεί τον εσωτερικό νόμο που διέπει το σύνολο των συμβάντων που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή του σώματος. Στη βάση αυτής της κανονικότητας λέμε ότι το ίδιο σώμα που αρχικά κινούνταν στο κενό, ακολούθως επηρεάζεται από βαρυτική επίδραση του άστρου. Από την άλλη, η σταθερότητα της ορμής και της ενέργειας του σώματος όσο αυτό κινείται στο κενό είναι μία κανονικότητα που ισχύει μόνο για ορισμένα από τα συμβάντα της αιτιακής γραμμής. Αυτό σημαίνει ότι δεν μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη χρονική ακολουθία συμβάντων που περιγράφει την κίνηση του σώματος με βάση τη σταθερότητα της ορμής και της ενέργειας. Ακόμα πιο χαρακτηριστικό είναι το παράδειγμα του ίδιου του Russell που θεωρεί ως μία αιτιακή γραμμή την ακολουθία συμβάντων που συνδέει ένα ραδιοφωνικό εκφωνητή με τον ακροατή του. Σε αυτή την περίπτωση μόνο τα αρχικά και τα τελικά συμβάντα αναφέρονται σε αντίστοιχες ποιότητες, διαταραχές της πυκνότητας του αέρα, ηχητικά κύματα, που παράγονται από παλλόμενες χορδές ή διεγείρουν μεμβράνες. Η διαδικασία της εκπομπής μπορεί να αναλυθεί με φυσικές διεργασίες που αφορούν στη δημιουργία, στη διάδοση και στη λήψη ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Ωστόσο, υποστηρίζει ο Russell, υπάρχει μία σταθερή δομή που διαδίδεται σε ολόκληρη τη διαδικασία και καθιστά δυνατή τη συσχέτιση όσων λέγει ο εκφωνητής και με όσα ακούει ο ακροατής.

Κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής μπορεί να υπάρχει σταθερότητα κάποιας ποιότητας ή σταθερότητα δομής ή μία βαθμιαία μεταβολή και στα δύο. Αυτό που δεν παρατηρείται είναι ξαφνική μεταβολή οποιουδήποτε φυσικού μεγέθους (Russell 1948:477). Σύμφωνα με τον Russell οι αιτιακοί νόμοι διακρίνονται σε νόμους εμμένειας (laws of persistence) και σε νόμους μεταβολής (laws of change). Οι νόμοι εμμένειας ενδέχεται να μας λένε ότι μία ποσότητα διατηρείται σταθερή κατά την χρονική εξέλιξη μίας διαδικασίας – για παράδειγμα, η ορμή του συστήματος που αναπαριστάνεται από την ακολουθία συμβάντων που συνιστά την αιτιακή γραμμή. Επίσης, οι νόμοι εμμονής μπορεί να λένε ότι υπάρχει σταθερότητα δομής στην αιτιακή γραμμή. Για παράδειγμα, σε μία αιτιακή γραμμή που περιγράφει την κίνηση ενός μορίου ή ενός ατόμου, η δομή του μορίου ή του ατόμου διατηρείται σταθερή εφόσον δεν λαμβάνουν χώρα χημικές αντιδράσεις. Οι νόμοι μεταβολής λένε με ποιον τρόπο μεταβάλλεται η κατάσταση του συστήματος και κατά συνέπεια των φυσικών μεγεθών που αφορούν το σύστημα με τον χρόνο. Κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής μπορεί να έχουμε μεταβολή κάποιου μεγέθους ή της δομής του συστήματος, όπως για παράδειγμα στην περίπτωση της κίνησης ενός φωτονίου στην περιοχή ενός σώματος μεγάλης μάζας, όπου η τροχιά του φωτονίου καμπυλώνεται, ή στην περίπτωση της κίνησης φορτισμένου σωματιδίου σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ή μίας σφαίρας πάνω σε ένα τραπέζι. Επομένως, ο εσωτερικός νόμος που ισχύει σε μία αιτιακή γραμμή μπορεί να είναι είτε νόμος εμμονής είτε νόμος μεταβολής.

Η ξαφνική μεταβολή κάποιων φυσικών μεγεθών σε ένα χωροχρονικό σημείο της αιτιακής γραμμής σημαίνει ότι σε αυτό το σημείο παύει να ισχύει ο αιτιακός νόμος που διέπει τα συμβάντα που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή. Σε τέτοια σημεία ενδέχεται η αιτιακή γραμμή να αλληλεπιδρά με μία άλλη αιτιακή γραμμή, όπως συμβαίνει κατά τη σύγκρουση δύο σφαιρών του μπιλιάρδου. Κατά την αλληλεπίδραση ο αιτιακός νόμος που διέπει μία αιτιακή γραμμή δεν έχει να μας πει και πολλά πράγματα για τα συμβάντα που θα λάβουν χώρα μετά την αλληλεπίδραση. Για να περιγράψουμε ό,τι συμβαίνει μετά την αλληλεπίδραση θα πρέπει να αναφερθούμε και στις δύο αιτιακές γραμμές που αλληλεπιδρούν. Ωστόσο, ο Russell επισημαίνει ότι τα χωροχρονικά σημεία στα οποία λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις αιτιακών γραμμών είναι εξαιρέσεις στο σύνολο των συμβάντων που αποτελούν την

αιτιακή γραμμή[3]. Κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής, για το μεγαλύτερο χρονικό διάστημα, ισχύει ο εσωτερικός νόμος που τη διέπει.

Οι αιτιακές γραμμές είναι χωροχρονικά συνεχείς. Η θέση αυτή αποτελεί το τρίτο αίτημα του Russell που ερμηνεύεται ως άρνηση της δράσης από απόσταση. Ο Russell υποστηρίζει ότι μεταξύ δύο οποιονδήποτε συμβάντων μίας αιτιακής γραμμής υπάρχει μία σχέση που μπορεί να θεωρηθεί ως σχέση αιτίου-αποτελέσματος (Russell 1948:509). Αν δύο συμβάντα είναι χωροχρονικά απομακρυσμένα και το χρονικά πρότερο συμβάν θεωρηθεί ως αίτιο του άλλου συμβάντος, τότε η θέση ότι δεν υπάρχει δράση από απόσταση μάς οδηγεί στην υπόθεση ότι μεταξύ των δύο συμβάντων παρεμβάλλονται άλλα συμβάντα της αιτιακής γραμμής που συγκροτούν μία αλυσίδα χωροχρονικά γειτονικών συμβάντων που ανά δύο, «διαδοχικά», έχουν σχέση αιτίου-αποτελέσματος. Επειδή όμως τα συμβάντα θεωρούμε ότι λαμβάνουν χώρα σε χωροχρονικά σημεία, οι διαδοχικοί κρίκοι μίας διακριτής αιτιακής αλυσίδας θα είναι σε κάθε περίπτωση χωροχρονικά απομακρυσμένοι. Το γεγονός αυτό μας οδηγεί στην υπόθεση ότι η αιτιακή αλυσίδα που συνδέει ένα αίτιο που είναι απομακρυσμένο από το αποτέλεσμα που προκαλεί, θα πρέπει να αποτελείται από ένα σύνολο συμβάντων με δομή συνεχούς. Έτσι, καταλήγουμε στο αίτημα της χωροχρονικής συνέχειας των αιτιακών γραμμών.

Μία σημαντική συνέπεια αυτού του αιτήματος για την επιστημονική μεθοδολογία είναι ότι προσφέρει δικαιολόγηση της συναγωγής συμβάντων που δεν έχουν παρατηρηθεί από τα συμβάντα που παρατηρούνται σε μία αιτιακή γραμμή. Έτσι, αν θεωρήσουμε την αιτιακή γραμμή ενός κινούμενου σώματος τότε τις χρονικές στιγμές ανάμεσα σε δύο χρονικά διαδοχικές παρατηρήσεις υποθέτουμε, λόγω της συνέχειας της αιτιακής γραμμής, ότι το σώμα υπάρχει σε κάποιο σημείο του χώρου κάθε χρονική στιγμή.

Το τέταρτο αίτημα του Russell είναι το αίτημα της δομής:

> Όταν ένας αριθμός δομικά όμοιων σύνθετων συμβάντων διατάσσονται γύρω από ένα κέντρο, σε περιοχές που δεν είναι πολύ απομακρυσμένες, συνήθως συμβαίνει να ανήκουν όλα σε αιτιακές γραμμές που έχουν την αρχή τους σε ένα συμβάν στο κέντρο που έχει ίδια δομή. (Russell 1948:511)

[3] Όπως θα δούμε στο έκτο κεφάλαιο (6.1), οι van Dam και Wigner υποστηρίζουν ότι είναι εξαιρετικά απίθανο να συμβούν συγκρούσεις σωματιδίων στο πλαίσιο μίας κλασικής, σχετικιστικής, σωματιδιακής θεωρίας.

Όπως αναφέραμε προηγουμένως, κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής ενδέχεται να εκδηλώνεται μία σταθερή δομή. Η δομή αυτή είναι η δομή των σύνθετων συμβάντων που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή. Ως παραδείγματα δομών μπορούμε να θεωρήσουμε τη μορφή ενός αντικειμένου, μίας μπάλας ή μίας σκιάς, ή τη σύσταση ενός αντικειμένου (π.χ., μίας σταγόνας από μόρια νερού), ή τη δομή που ορίζεται από μία σχέση που πρέπει να ικανοποιούν σε κάθε χωροχρονικό σημείο οι δυνατές τιμές των φυσικών μεγεθών που περιγράφουν ένα αντικείμενο. Αν τώρα σύνθετα συμβάντα που εκδηλώνουν παρόμοια δομή διατάσσονται γύρω από ένα κέντρο (π.χ., διαφορετικές φωτογραφίες του ίδιου κεντρικού αντικειμένου ή ακροάσεις του ίδιου εκφωνητή από διαφορετικούς ακροατές ή σταγονίδια νερού που εκτοξεύονται με μεγάλη διασπορά γύρω από ένα ψεκαστή), τότε αυτά ανήκουν σε αιτιακές γραμμές που ξεκινούν από το κέντρο όπου λαμβάνει χώρα ένα συμβάν όμοιας δομής. Δηλαδή, στο κέντρο το αντικείμενο της φωτογραφίας έχει ίδια μορφή με το απείκασμά του, ο λόγος που εκφέρει ο εκφωνητής είναι κοινός και σε κάθε σταγονίδιο νερού από αυτά που διατάσσονται γύρω από το κέντρο, αντιστοιχεί ένα σταγονίδιο στο κέντρο.

Εκτός όμως από την περίπτωση των σύνθετων συμβάντων υπάρχουν και περιπτώσεις συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά σημεία του χώρου μία ορισμένη χρονική στιγμή και ικανοποιούν μία σχέση με την οποία ορίζεται μία δομή συμβάντων – για παράδειγμα, το σύνολο των σημείων του χώρου στα οποία φθάνει ταυτόχρονα το ωστικό κύμα από μία έκρηξη ή το φως ενός λαμπτήρα. Αν όμοιες δομές διατάσσονται σε διαφορετικές χρονικές στιγμές γύρω από ένα κέντρο – λόγου χάριν, αν έχουμε σφαιρική διάδοση του κύματος – τότε υπάρχει ένα κεντρικό σύμπλεγμα που προηγήθηκε της εκδήλωσης της δομής:

> Όταν ένας αριθμός όμοιων δομών συμβάντων υπάρχουν σε περιοχές που δεν είναι πολύ απομακρυσμένες, και διατάσσονται γύρω από ένα κέντρο, τότε υπάρχει σημαντική πιθανότητα να έχει προηγηθεί αυτών ένα κεντρικό σύμπλεγμα που έχει την ίδια δομή, και αυτές να συμβαίνουν σε χρόνους που διαφέρουν από ένα ορισμένο χρόνο κατά ποσό ανάλογο των αποστάσεων τους από τη κεντρική δομή. (Russell 1948:489)

Η βασική διαφορά αυτής της αρχής από το αίτημα της δομής είναι η εξής: το αίτημα της δομής αναφέρεται σε όμοιες δομές σύνθετων συμβάντων που διαδίδονται κατά μήκος διαφορετικών αιτιακών γραμμών, οι οποίες εκκινούν από το ίδιο χωροχρονικό σημείο και καταλήγουν σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία. Αντίθετα, η δεύτερη αρχή αναφέρεται στην "εξάπλωση" της δομής που ήταν αρχικά συγκεντρωμένη σε

ένα σύνθετο κεντρικό συμβάν σε μία ευρύτερη περιοχή του χωροχρόνου, έτσι ώστε η δομή που εκδηλώνεται μία χρονική στιγμή, από συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικά σημεία του χώρου, να είναι όμοια με τη αντίστοιχη δομή που εκδηλώνεται από τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε μία επόμενη χρονική στιγμή.

Πριν προχωρήσουμε στην κριτική των θέσεων του Russell, ας συνοψίσουμε τη θεωρία των αιτιακών γραμμών στις εξής προτάσεις:

1. Η αιτιακή γραμμή είναι μία χωροχρονικά συνεχής σειρά συμβάντων που διέπονται από μία κανονικότητα.
2. Η κανονικότητα που διέπει τα συμβάντα μίας αιτιακής γραμμής εκφράζει την σταθερότητα ή τη βαθμιαία μεταβολή ποιοτήτων ή δομής κατά μήκος της γραμμής.
3. Η σχέση αιτίου-αποτελέσματος είναι μία σχέση που συνδέει δύο συμβάντα της ίδιας αιτιακής γραμμής.
4. Ένα φυσικό αντικείμενο είναι μία αιτιακή γραμμή. Τα συμβάντα που ανήκουν στην αιτιακή γραμμή ενός αντικειμένου περιγράφουν την ύπαρξη του αντικειμένου κάθε χρονική στιγμή σε κάποιο σημείο του χώρου.
5. Οι αιτιακές γραμμές αλληλεπιδρούν και στα χωροχρονικά σημεία που λαμβάνει χώρα αλληλεπίδραση δεν ισχύει η κανονικότητα που διέπει καθεμιά από τις αλληλεπιδρώσες αιτιακές γραμμές. Τα χωροχρονικά σημεία που λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις είναι “εξαιρέσεις” – μεμονωμένα σημεία στο συνεχές μίας αιτιακής γραμμής.
6. Η εκδήλωση ομοιότητας ως προς τη δομή κάποιων συμβάντων που συνδέονται με κάποιο κέντρο οφείλεται στο ότι υπάρχουν αιτιακές γραμμές, κατά μήκος των οποίων εκδηλώνεται η δομή αυτή, που συνδέουν καθένα από αυτά τα συμβάντα με ένα συμβάν στο κέντρο.

1.2 Κριτική της θεωρίας των αιτιακών γραμμών

Η θεωρία των αιτιακών γραμμών θεωρείται πρόγονος των νεότερων αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε διαδικασίες. Γι' αυτό θα αναφερθούμε στην κριτική που άσκησαν στη θεωρία του Russell, οι νεότεροι συνεχιστές της παράδοσης, Salmon και Dowe. Η συμβολή μας θα είναι να αποτιμήσουμε την κριτική και να αποκαταστήσουμε τη θεωρία του Russell στα σημεία που η κριτική είναι αδικαιολόγητη.

Ο Salmon αναφέρει ότι αυτό που εννοεί με τον όρο "διαδικασία", μία έννοια με την οποία θα ασχοληθούμε εκτενώς στο τρίτο κεφάλαιο, είναι παρόμοιο με ό,τι ο Russell ονόμασε "αιτιακή γραμμή" (Salmon 1984:140). Όμως για τον Salmon δεν είναι όλες οι διαδικασίες αιτιακές. Πέραν των αιτιακών διαδικασιών υπάρχουν και ψευδο-διαδικασίες και η κριτική που ασκεί στον Russell είναι ότι δεν καταφέρνει με τον ορισμό που δίνει για τις αιτιακές γραμμές να συλλάβει αυτή τη διάκριση. Για παράδειγμα, μία κινούμενη μπάλα του τένις είναι μία αιτιακή διαδικασία ενώ η κινούμενη σκιά της μπάλας που δημιουργείται σε έναν τοίχο είναι μία ψευδο-διαδικασία. Όμως και οι δύο διαδικασίες διέπονται από κάποια κανονικότητα: η μπάλα έχει σταθερή μάζα, σχήμα και ορμή (αν για την κίνηση της αγνοήσουμε την επίδραση του αέρα και της βαρύτητας), ενώ η σκιά διατηρεί το σχήμα της σε κάθε σημείο της κίνησης και σταθερή ταχύτητα κίνησης (εφόσον η ορμή της μπάλας είναι σταθερή). Άρα τόσο η κινούμενη μπάλα όσο και η κινούμενη σκιά αποτελούν αιτιακές γραμμές.

Ο Russell θα μπορούσε να διακρίνει τις αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες αν όριζε με μεγαλύτερη προσοχή την έννοια του αιτιακού νόμου διακρίνοντάς τον από κανονικότητες που δεν εκφράζουν την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα συμβάντα που συσχετίζουν. Μία τέτοια διάκριση θα μπορούσε να είναι η διάκριση ανάμεσα σε κανονικότητες που εκφράζουν νόμους της φύσης και σε ατυχηματικές κανονικότητες, θεωρώντας ότι μόνον οι πρώτες μπορούν να εκφράσουν αιτιακές σχέσεις. Σύμφωνα με την άποψη που κατάγεται από τους Mill, Ramsey και Lewis (MRL), οι κανονικότητες που εκφράζουν νόμους της φύσης δεν είναι απομονωμένες, δεν διέπουν μόνο μία συγκεκριμένη ακολουθία συμβάντων, αλλά αποτελούν μέρος του καλύτερου (ως προς το συνδυασμό απλότητας και

πληροφοριακού περιεχομένου) συστήματος αξιωμάτων που μπορεί να περιγράψει τη φύση (Earman 1986:87 και Psillos 2002:148). Ωστόσο, αυτή η διάκριση δεν είναι ιδιαίτερα χρήσιμη για την περίπτωσή μας. Ας υποθέσουμε ότι οι νόμοι του Νεύτωνα και οι νόμοι της οπτικής αποτελούν τμήματα του καλύτερου συστήματος αξιωμάτων που περιγράφει τη φύση. Με τη βοήθεια αυτών των νόμων θα μπορούσε κανείς να συναγάγει την πρόταση "η σκιά ενός σώματος που κινείται με σταθερή ταχύτητα, κινείται επίσης με σταθερή ταχύτητα, ως προς κάποιον αδρανειακό παρατηρητή", να τη θεωρήσει ως πόρισμα του συστήματος αξιωμάτων, και να θεωρήσει μία διαδικασία για την οποία ισχύει αυτή η κανονικότητα ως αιτιακή. Επομένως, η διάκριση ανάμεσα στις κανονικότητες που εκφράζουν αιτιακές σχέσεις και σε εκείνες που δεν εκφράζουν αιτιακές σχέσεις θα πρέπει να ανατέμνει τη διάκριση των Mill, Ramsey και Lewis ανάμεσα σε νόμους της φύσης και σε ατυχηματικές κανονικότητες.

Ο Salmon προτείνει να διακρίνουμε ανάμεσα στις αιτιακές κανονικότητες που είναι αυτοκαθοριζόμενες και στις κανονικότητες που είναι παρασιτικές επί αιτιακών κανονικοτήτων, εξωτερικών ως προς τη διαδικασία (Salmon 1984:145). Η αδρανειακή κίνηση ενός σώματος και η διάδοση μίας φωτεινής ακτίνας στο κενό διέπονται από αιτιακές κανονικότητες και αποτελούν αιτιακές διαδικασίες, ενώ, αντιθέτως, η κίνηση της σκιάς ενός σώματος εξαρτάται από την κίνηση του σώματος και από τη διάδοση των φωτεινών ακτινών και τις κανονικότητες που διέπουν αυτές τις διαδικασίες. Δηλαδή, σε απουσία εκδήλωσης της αιτιακής κανονικότητας που διέπει την κίνηση του σώματος ή τη διάδοση των φωτεινών ακτινών, η σκιά του σώματος παύει να υπάρχει. Γι' αυτό στην περίπτωση της κίνησης της σκιάς που αποτελεί ψευδο-διαδικασία, η όποια κανονικότητα εκδηλώνεται είναι παρασιτική επί αιτιακών κανονικοτήτων που είναι εξωτερικές ως προς τη διαδικασία.

Η θέση ότι οι κανονικότητες που διέπουν τις ψευδο-διαδικασίες είναι παρασιτικές επί αιτιακών κανονικοτήτων που διέπουν συμβάντα που δεν ανήκουν στη διαδικασία, φανερώνει την εξάρτηση των ψευδο-διαδικασιών από συμβάντα που λαμβάνουν χώρα «αλλού». Ωστόσο, το γεγονός ότι ο νόμος που διέπει την αιτιακή γραμμή δεν αναφέρεται σε συμβάντα που δεν ανήκουν σε αυτή, συσκοτίζει τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές κανονικότητες και σε εκείνες τις κανονικότητες που διέπουν τις ψευδο-διαδικασίες. Διότι, τόσο στην περίπτωση των ψευδο-διαδικασιών

όσο και στην περίπτωση των αιτιακών διαδικασιών, τις οποίες ο Russell θα χαρακτήριζε ως αιτιακές γραμμές, υπάρχει μία κανονικότητα που συσχετίζει τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε αυτές χωρίς να λαμβάνει υπόψη εξωτερικά συμβάντα. Έτσι, δεν είναι δυνατό να αναδειχθεί ο παρασιτικός χαρακτήρας των κανονικοτήτων που διέπουν τις ψευδο-διαδικασίες.

Ωστόσο, ο Salmon πίστευε ότι ο Russell είχε την πρόθεση να μη συμπεριλάβει τις ψευδο-διαδικασίες στις αιτιακές γραμμές και απλώς δεν το κατόρθωσε. Για να υποστηρίξει αυτή την άποψη υιοθέτησε μία διαφορετική ερμηνεία από αυτή που προτείνουμε σε σχέση με την απαίτηση του Russell ο αιτιακός νόμος να περιγράφει την αιτιακή γραμμή «οτιδήποτε και αν συμβαίνει αλλού». Συγκεκριμένα, θεωρούσε ότι αυτός ο περιορισμός δηλώνει την απομόνωση της αιτιακής γραμμής από το σύνολο όλων των *δυνατών* εξωτερικών συμβάντων. Προφανώς μία ψευδο-διαδικασία δεν είναι απομονωμένη από το σύνολο όλων των δυνατών εξωτερικών συμβάντων. Αντιθέτως, εξαρτάται πλήρως από εξωτερικά συμβάντα· κατά συνέπεια, δεν είναι δυνατό να ικανοποιεί αυτόν τον περιορισμό και άρα να θεωρείται αιτιακή γραμμή. Όμως ο Salmon θεωρεί ότι η απαίτηση της απομόνωσης της αιτιακής γραμμής από το σύνολο όλων των δυνατών εξωτερικών συμβάντων είναι υπερβολική και δεν ικανοποιείται ούτε καν από τις αιτιακές διαδικασίες. Μία αιτιακή διαδικασία δεν εξαρτάται από εξωτερικά συμβάντα μόνο αν δεν υπάρχει μία δεύτερη αιτιακή διαδικασία που να μεταφέρει αιτιακή επίδραση από αυτά σε κάποιο σημείο της πρώτης διαδικασίας. Στην περίπτωση όμως που μεταφέρεται αιτιακή επίδραση από ένα εξωτερικό συμβάν σε μία διαδικασία, τότε ακόμα και αν αυτή είναι αιτιακή, η ύπαρξη της εξαρτάται από την αλληλεπίδραση με το συμβάν. Ο Salmon αναφέρει τα παραδείγματα της εκτροπής των φωτεινών ακτινών στην περιοχή ενός σώματος μεγάλης μάζας, της καταστροφής των επιστολών που μεταφέρει ένα φορτηγό του ταχυδρομείου από μία πυρηνική έκρηξη και της επίδρασης της ηλιακής δραστηριότητας στις τηλεπικοινωνίες. Για την αποκατάσταση της ορθότητας του περιορισμού που θέτει ο Russell ώστε να είναι δυνατή η χρήση του ως κριτήριο διάκρισης των αιτιακών διαδικασιών από τις ψευδο-διαδικασίες, ο Salmon προτείνει την εξής διατύπωση: «Μία αιτιακή διαδικασία θα παρέμενε υπαρκτή ακόμα και αν ήταν απομονωμένη από εξωτερικές αιτιακές επιδράσεις» (Salmon 1984:145) – γεγονός που προφανώς δεν συμβαίνει με τις ψευδο-διαδικασίες. Ωστόσο, ο ίδιος ο Salmon αρνείται να αποδεχθεί μία τέτοια απαίτηση επειδή «φλερτάρει με την

κυκλικότητα», όπως αναφέρει, διότι η εξωτερική αιτιακή επίδραση διαδίδεται και αυτή μέσω αιτιακών διαδικασιών.

Για να συνοψίσουμε αυτό το πρώτο σημείο κριτικής, ο Salmon θεωρεί ότι ο Russell μολονότι επιθυμεί να κάνει τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες και να μην συμπεριλάβει τις τελευταίες στην έννοια της αιτιακής γραμμής, δεν το κατορθώνει. Από τη δική μας πλευρά, πιστεύουμε ότι ο Russell δεν κατορθώνει να κάνει αυτή τη διάκριση διότι δεν την έχει κατά νου. Η έννοια της αιτιακής γραμμής μπορεί να συμπεριλάβει και τις ψευδο-διαδικασίες ακριβώς επειδή ο νόμος που διέπει μία αιτιακή γραμμή περιγράφει κανονικότητες που διέπουν τα συμβάντα της γραμμής χωρίς να εξετάζει συμβάντα που είναι εκτός γραμμής και τη σχέση τους με τις κανονικότητες που διέπουν τη γραμμή.

Το δεύτερο σημείο κριτικής στη θεωρία του Russell αφορά το γεγονός ότι τόσο η έννοια της αιτιακής γραμμής όσο και τα αιτήματα που αναφέραμε είναι διατυπωμένα με επιστημικούς, άρα ανθρωποκεντρικούς, όρους. Εδώ ο Salmon αναφέρει ότι «χρειαζόμαστε ένα κριτήριο που δεν στηρίζεται σε επιστημικές έννοιες όπως η γνώση και η συναγωγή, διότι η μεγάλη πλειονότητα των αιτιακών διαδικασιών στην ιστορία του σύμπαντος είναι τελείως ανεξάρτητη από τους ανθρώπινους γνώστες» (Salmon 1984:145). Ωστόσο, αυτό το σημείο κριτικής έχει να κάνει περισσότερο με την συγκεκριμένη διατύπωση του ορισμού των αιτιακών γραμμών και των αντίστοιχων αιτημάτων παρά με την πρόθεση του Russell. Ο ίδιος Russell αναγνωρίζει την αντικειμενική διάσταση των αιτημάτων πέραν από την επιστημική. Συγκεκριμένα, τα αιτήματα που θέτει ο Russell, με τα οποία θεμελιώνεται η ύπαρξη των αιτιακών γραμμών έχουν τόσο αντικειμενική όσο και υποκειμενική διάσταση: αντικειμενικά θεμελιώνουν ότι «κάτι» (π.χ. μία ακολουθία συμβάντων) συμβαίνει συνήθως, αλλά όχι πάντα· ενώ υποκειμενικά, υποστηρίζουν ότι είναι ορθολογικό να πιστεύουμε ότι υπό ορισμένες συνθήκες, συνήθως, αυτό το «κάτι» συμβαίνει και ως εκ τούτου, να αποδίδουμε στους αντίστοιχους ισχυρισμούς τις αναγκαίες για την επαγωγή μη μηδενικές πρότερες πιθανότητες (Russell 1948:506). Βεβαίως, και ο Salmon αναγνωρίζει ότι ο επιστημικός χαρακτήρας της προσέγγισης του Russell μπορεί να διορθωθεί αν ο χαρακτηρισμός των αιτιακών γραμμών τεθεί με αντικειμενικούς, μη ανθρωποκεντρικούς όρους, ως ύπαρξη αντικειμενικών κανονικοτήτων που διέπουν μία διαδικασία.

Ο Dowe πιστεύει ότι η θεμελίωση των αιτιακών γραμμών δεν επαρκεί για να δικαιολογήσει το *σύνολο* των ορθολογικών συναγωγών που κάνουμε και γι' αυτό θεωρεί ότι δεν πρέπει να αποδεχτούμε την επιστημική θεωρία του Russell. Ο Dowe υποστηρίζει ότι «υπάρχουν και άλλοι τύποι αιτιακών δομών πέραν από τις αιτιακές γραμμές» που δικαιολογούν τις συναγωγές μας (Dowe 2000:65). Ως παράδειγμα αναφέρει την περίπτωση δύο συμβάντων που είναι αποτελέσματα κάποιου κοινού αιτίου και ως εκ τούτου συσχετίζονται – άρα εκδηλώνουν κάποια κανονικότητα στη βάση της οποίας μπορούμε να κάνουμε συναγωγές – χωρίς τα συμβάντα να έχουν άμεση αιτιακή σύνδεση. Ωστόσο, αυτή η κριτική του Dowe, στο βαθμό που στηρίζεται στην περίπτωση των αιτιακών δομών κοινού αιτίου, είναι εσφαλμένη. Ο Russell μολονότι δεν αναφέρεται ρητά στην αρχή του κοινού αιτίου, ούτε την εκφράζει στο πλαίσιο πιθανοκρατικών θεωρήσεων, που όπως θα δούμε στη συνέχεια κάνει ο Reichenbach, περιγράφει αιτιακές δομές κοινού αιτίου με τη βοήθεια του αιτήματος της δομής. Η κανονικότητα που διέπει μία δομή, ή εκφράζει την ομοιότητα των δομών σύνθετων συμβάντων, εξηγείται από την ύπαρξη ενός κοινού προγονικού συμβάντος και όχι με την άμεση σύνδεση των συμβάντων που συγκροτούν τη δομή, ή που εκδηλώνουν παρόμοια δομή, μέσω μίας αιτιακής γραμμής.

Ο Dowe διαπιστώνει δύο ακόμα αδυναμίες της θεωρίας του Russell. Η πρώτη έχει να κάνει με τη διατύπωση της θεωρίας των αιτιακών γραμμών με όρους συμβάντων που έχουν σχέση αιτίου-αποτελέσματος (Dowe 2000:65). Ο Dowe ερμηνεύει αυτή την προσέγγιση ως αναγωγή των αιτιακών διαδικασιών σε αιτιακές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα. Και μία τέτοια αναγωγή, υποστηρίζει ότι, θα οδηγούσε ξανά πίσω στο πρόβλημα που υποτίθεται ότι επιλύει μία αιτιακή θεωρία που θεμελιώνεται σε διαδικασίες: το πρόβλημα της φύσης της αιτιακής σχέσης ανάμεσα σε δύο συμβάντα. Επιπλέον, θα άφηνε ανοικτό το ζήτημα, που επίσης υποτίθεται ότι επιλύεται με μία θεωρία διαδικασιών περί του αν η εμμονή ενός αντικειμένου στην ύπαρξη αποτελεί μία μορφή αιτιότητας. Ο Dowe μάς λέει ότι ο Salmon, σε αντίθεση με τον Russell, θεωρώντας τις διαδικασίες ως βασικές οντότητες του κόσμου μας επιλύει αυτού του είδους τα προβλήματα.

Μήπως όμως ο Dowe είναι υπερβολικός με την επισήμανση αυτής της αδυναμίας του Russell; Καταρχάς, ο Russell ρητά επισημαίνει ότι η εμμονή στην ύπαρξη ενός αντικειμένου αποτελεί μία μορφή αιτιότητας (Russell 1948:327), όπως

και ο Salmon υποστηρίζει ότι είναι δυνατόν να αναλύσουμε τις αιτιακές διαδικασίες στο πλαίσιο μίας οντολογίας συμβάντων, θεωρώντας αυτές ως συνεχείς σειρές συμβάντων (Salmon 1984:182-3). Επιπλέον, η θεωρία των αιτιακών γραμμών δεν προσδιορίζει την σχέση των συμβάντων σε μία αιτιακή γραμμή ως αιτιακή, αλλά αφενός ως μία σχέση χρονικής διάταξης που αποδίδει δομή συνεχούς στο σύνολο των συμβάντων που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή, αφετέρου ως νομολογική σχέση. Μόνο εκ των υστέρων και αφού θεωρηθεί μία ακολουθία συμβάντων ως αιτιακή γραμμή, ο Russell υποστηρίζει ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι δύο οποιαδήποτε συμβάντα της γραμμής έχουν σχέση αιτίου και αποτελέσματος. Με αντίστοιχο τρόπο οι θεωρίες των διαδικασιών επεξηγούν την αιτιακή σχέση με όρους αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων.

Η δεύτερη αδυναμία της θεωρίας των αιτιακών γραμμών που επισημαίνει ο Dowe (ό.π.:66) αφορά στη δυνατότητά της να περιγράψει αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Στις αλληλεπιδράσεις δεν έχουμε εμμονή κάποιας σταθερής ποιότητας ή δομής αλλά τροποποιήσεις ποιοτήτων και δομών που εκφράζονται με τη μεταφορά αιτιακής επίδρασης από τη μία διαδικασία στην άλλη. Μολονότι ο Dowe παραδέχεται ότι ο Russell δεν υποστηρίζει τη θέση ότι οι αιτιακές γραμμές περιγράφουν συνολικά την αιτιότητα στον κόσμο, ισχυρίζεται ότι αν την υποστήριζε τότε δεν θα υπήρχε χώρος για αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε διαδικασίες.

Όμως, και αυτή η κριτική του Dowe είναι προβληματική. Κατά πρώτον διότι απαντάει σε υποθετικούς ισχυρισμούς που δεν ισχύουν για τον Russell. Δεύτερον, επειδή ο Russell αναφέρεται σε αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αιτιακές γραμμές χωρίς όμως να υιοθετεί κάποιο αίτημα σε σχέση με αυτές τις αλληλεπιδράσεις διότι δεν θεωρεί ότι είναι επιστημολογικά αναγκαίο για τη διατύπωση γενικεύσεων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις (Russell 1948:508). Τρίτον, διότι αναφέρεται σε αλληλεπιδράσεις κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής, χαρακτηρίζοντάς τις αιτιακές, χωρίς όμως να τις αναλύει παραπέρα (ό.π.:509). Το πρόβλημα με την προσέγγιση του Russell είναι ότι σε αυτή δεν αναλύεται επαρκώς η έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Από την άλλη, ο Dowe ασκεί την κριτική αυτή με «αγαθή πρόθεση». Θέλει να δείξει ότι δεν αρκεί να ορίσουμε την αιτιότητα ως εμμονή των χαρακτηριστικών ενός αντικειμένου για να περιγράψουμε την αιτιότητα στον κόσμο. Θα πρέπει επίσης να αναφερθούμε και στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις.

Απ' όλα όσα αναφέραμε ως κριτική στη θεωρία του Russell το πιο σημαντικό είναι η αδυναμία της θεωρίας του να διακρίνει ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες. Αυτή η διάκριση έγινε για πρώτη φορά από τον Reichenbach στο έργο του *The Philosophy of Space and Time* (1928), πολύ πριν τη διατύπωση της θεωρίας των αιτιακών γραμμών, και είναι άξιο απορίας το γιατί η διάκριση δεν υιοθετήθηκε από τον Russell, δεδομένης της εκτεταμένης αναφοράς στον Reichenbach στο *Human Knowledge.* Στο επόμενο κεφάλαιο θα ασχοληθούμε με τις θέσεις του Reichenbach για τις αιτιακές διαδικασίες καθώς και με ορισμένες πτυχές των αιτιακών προσεγγίσεων του που επέδρασαν στη διατύπωση της αιτιακής θεωρίας του Salmon, τουλάχιστον στην πρώιμη εκδοχή της.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε τη θεωρία των αιτιακών γραμμών του Russell, που αποτελεί πρόδρομο των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Τα βασικά σημεία αυτής της θεωρίας συνοψίζονται στις προτάσεις [1] – [6] που αναφέραμε στο τέλος της ενότητας 1.1.

Το βασικό πρόβλημα της θεωρίας είναι ότι δεν μπορεί να διακρίνει ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες. Ο Salmon υποστηρίζει ότι ήταν στις προθέσεις του Russell να κάνει αυτή τη διάκριση αλλά δεν τα κατάφερε. Αντιθέτως, εμείς υποστηρίξαμε ότι ο Russell δεν είχε κατά νου αυτή τη διάκριση. Η έννοια της αιτιακής γραμμής δεν περιλαμβάνει αποκλειστικά διαδικασίες που δεν αλληλεπιδρούν αλλά και διαδικασίες που αλληλεπιδρούν και μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά τους σύμφωνα με ένα εσωτερικό νόμο. Έτσι, ανεξάρτητα από το πώς δημιουργείται μία κινούμενη σκιά, εφόσον υπάρχει ένα νόμος που να περιγράφει την κίνηση της, η διαδικασία που την περιγράφει *είναι* αιτιακή γραμμή κατά Russell.

Στη συνέχεια εξετάσαμε και άλλα σημεία κριτικής, που αφορούν α) στον επιστημικό χαρακτήρα των ορισμών των αιτιακών εννοιών και των αιτιακών αρχών, β) στην ανεπάρκεια των αιτιακών αρχών που επικαλείται ο Russell να παίξουν το γνωσιακό ρόλο για τον οποίο προορίζονται, γ) στο γεγονός ότι ο Russell δεν πραγματεύεται την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης αντίστοιχα με την έννοια των αιτιακών γραμμών

με αποτέλεσμα να φαίνεται ως εάν η αιτιακή του θεωρία να μην περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις, δ) στο ότι ο Russell διατυπώνει τη θεωρία του με όρους συμβάντων υποβαθμίζοντας, έτσι, μία οντολογία διαδικασιών. Η κριτική σε αυτά τα σημεία της θεωρίας του Russell θεωρήσαμε ότι είναι δευτερεύουσας σημασίας, και, μάλιστα, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι υπερβολική, ενώ σε άλλες απλώς εσφαλμένη.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΔΕΥΤΕΡΟ

Ο REICHENBACH ΚΑΙ Η ΑΙΤΙΑΚΗ

ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΚΟΣΜΟΥ

Η αιτιότητα αποτελεί κομβικό σημείο στη φιλοσοφία του Reichenbach. Ως συνεχιστής της εμπειριστικής παράδοσης και επικριτής του Kant, ο Reichenbach, προσπαθεί να αποκαταστήσει τη σχέση της αιτιότητας με τον κόσμο της εμπειρίας και με τη δυνατότητά μας να κάνουμε επαγωγικές γενικεύσεις. Υποστηρίζει ότι η αρχή της αιτιότητας δεν αποτελεί μία a priori συνθετική πρόταση, αλλά μία αρχή που προκύπτει επαγωγικά, σε δεύτερο επίπεδο, από το γεγονός ότι ο κόσμος μας είναι τέτοιου είδους που να δικαιολογεί την επιτυχία της επαγωγής για τη συναγωγή των κανονικοτήτων που διέπουν τη φύση. Συμμεριζόμενος ιδέες του Leibniz για το χρόνο, επιχειρεί να αναγάγει την τάξη του χρόνου στην αιτιακή δομή, προτείνοντας μία αιτιακή θεωρία του χρόνου. Μόνο με τον ορισμό της δομής του χρόνου με όρους αιτιακής σύνδεσης, υποστηρίζει ο Reichenbach, θα δείξουμε ποια χαρακτηριστικά της φυσικής πραγματικότητας αντανακλώνται στη δομή του χρόνου. Επηρεασμένος από τον Einstein, ο Reichenbach επιχειρεί να αναλύσει την αιτιακή σχέση με όρους σημάτων που διαδίδονται μεταξύ των συμβάντων του χωροχρόνου. Η ταχύτητα του φωτός στο κενό που αποτελεί το ανώτερο όριο της ταχύτητας διάδοσης σημάτων, είναι η ταχύτητα διάδοσης του πρώτου σήματος, του ταχύτερου φορέα μηνυμάτων. Οι πραγματικές ακολουθίες συμβάντων, οι αιτιακές διαδικασίες, διαδίδουν σήματα με ταχύτητα μικρότερη ή ίση με την ταχύτητα του φωτός στο κενό, ενώ οι μη πραγματικές ακολουθίες, οι ψευδο-διαδικασίες, μπορούν μεν να εκδηλώνουν ως και άπειρη ταχύτητα, όμως είναι αδύνατο να διαδώσουν σήμα. Ως σύγχρονος των πρωτεργατών της κβαντικής μηχανικής, ο Reichenbach αναδεικνύει τα προβλήματα που επιφέρει *αυτή* η νέα θεωρία σε παραδοσιακές αντιλήψεις για την αιτιότητα. Οι

κλασικές διαισθήσεις μας για την ταυτόχρονη απόδοση τιμών σε όλα τα παρατηρήσιμα ενός σωματιδίου οδηγεί σε αιτιακές ανωμαλίες, δηλαδή σε παραβιάσεις της αρχής της δράσης εξ επαφής, στα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα ανάμεσα σε δύο διαδοχικές παρατηρήσεις, και το ίδιο ισχύει αν αποδεχτούμε την κλασική θέση της διακρισιμότητας των σωματιδίων. Τέλος, στον Reichenbach οφείλεται, σε μεγάλο βαθμό, η στροφή στην πιθανοκρατική αιτιότητα, δηλαδή, η προσπάθεια θεμελίωσης των αιτιακών σχέσεων σε στατιστικές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα.

Προφανώς σε αυτή την ενότητα δεν πρόκειται να ασχοληθούμε με όλες τις πτυχές της προσέγγισης του Reichenbach για την αιτιότητα. Αυτό που μας ενδιαφέρει κυρίως είναι να αναδείξουμε τις βασικές ιδέες του Reichenbach σε σχέση με την αιτιακή δομή του κόσμου και να εξετάσουμε την εξειδίκευση αυτών των ιδεών με βάση δύο προσεγγίσεις: α) τη μέθοδο του ίχνους (mark method) που χρησιμοποιείται για τον ορισμό των αιτιακών σχέσεων ανάμεσα σε συμβάντα και τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες και β) τη στατιστική περιγραφή των αιτιακών σχέσεων. Πέραν από την καθαυτό φιλοσοφική τους αξία, οι προσεγγίσεις αυτές είχαν ιδιαίτερη επίδραση στους νεότερους υποστηρικτές αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε διαδικασίες, και κυρίως στο μαθητή του Reichenbach, Wesley Salmon.

2.1 Η μέθοδος του ίχνους

Ο Reichenbach αναφέρεται για πρώτη φορά στη μέθοδο του ίχνους στο "Bericht über eine Axiomatik der Einsteinchen Raum-Zeit-Lehre" (1921). Στη συνέχεια, στο *The Philosophy of Space and Time* (1928), χρησιμοποιεί τη μέθοδο του ίχνους για να διατυπώσει μία αναγκαία συνθήκη για να αποτελεί ένα συμβάν αίτιο κάποιου άλλου συμβάντος, ενώ στο τελευταίο έργο του, *The Direction of Time* (1956), ορίζει με βάση τη μέθοδο του ίχνους την αιτιακή συνάφεια (causal relevance) ανάμεσα σε δύο συμβάντα.

Το ίχνος είναι το «αποτέλεσμα της παρέμβασης με μία μη αντιστρεπτή διαδικασία» αναφέρει ο Reichenbach (1956:198). Ας θεωρήσουμε μία ακτίνα λευκού φωτός που διαδίδεται από ένα σημείο E_1 σε κοντινό σημείο E_2. Σε κάποιο σημείο της πορείας της ακτίνας τοποθετούμε ένα κόκκινο γυαλί, ώστε η ακτίνα διερχόμενη από αυτό να μεταβάλλει το χρώμα της, και η κόκκινη, πλέον, ακτίνα να καταλήγει στο E_2. Η αλληλεπίδραση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με το γυαλί, κατά την οποία λαμβάνει χώρα απορρόφηση ορισμένων συχνοτήτων της ακτινοβολίας, είναι μία μη αντιστρεπτή διαδικασία. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας στη φωτεινή ακτίνα, το ίχνος που δημιουργείται, είναι η μεταβολή του χρώματός της από λευκό σε κόκκινο. Η αλληλεπίδραση του γυαλιού με τη φωτεινή ακτινοβολία είναι μη αντιστρεπτή, γεγονός που διαπιστώνεται από το ότι η αντίστροφη διεργασία – σύμφωνα με την οποία μία κόκκινη ακτίνα ξεκινάει από το E_2 και διερχόμενη από το γυαλί προκαλεί εκπομπή ακτινοβολίας κατάλληλων συχνοτήτων ώστε να εξέρχεται από το γυαλί λευκή φωτεινή ακτίνα – δεν είναι φυσικώς πραγματοποιήσιμη. Έστω ότι αντί του γυαλιού παρεμβάλαμε στην πορεία της φωτεινής ακτίνας ένα κατάλληλα τοποθετημένο κάτοπτρο ώστε να προκαλείται μικρή εκτροπή της φωτεινής ακτίνας, με αποτέλεσμα από το E_1 η ακτίνα να καταλήγει τελικά σε ένα σημείο E_2' χωρίς οποιαδήποτε άλλη αλλαγή. Σε αυτή την περίπτωση θα επιφέραμε μία μεταβολή που δεν μπορεί να θεωρηθεί ως ίχνος, διότι προκύπτει από μία αντιστρεπτή διαδικασία. Δηλαδή, θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε ότι η πραγματική πορεία της φωτεινής ακτίνας είναι από το E_2' στο E_1, και όχι αντίστροφα, όπως αρχικά υποθέτουμε, και η εκτροπή εμφανίζεται ως προς το E_1.

Πέραν όμως της έννοιας "μη αντιστρεπτή διαδικασία", στον ορισμό του ίχνους περιλαμβάνεται και η έννοια της *παρέμβασης*. Με τον όρο αυτό ο Reichenbach εννοεί την πρόκληση μίας μεταβολής η οποία αφήνει αναλλοίωτο το παρελθόν και επηρεάζει το μέλλον μίας διαδικασίας (Reichenbach 1956:45). Παρατηρείστε ότι στα παραδείγματα που αναφέραμε παραπάνω κάναμε την υπόθεση ότι η αλληλουχία των συμβάντων έχει πάντα ορισμένη κατεύθυνση και η μεταβολή που προκαλείται αφορά στο μέλλον. Στην περίπτωση της φωτεινής ακτίνας που διέρχεται από το γυαλί δώσαμε δύο περιγραφές των συμβάντων. Στην πρώτη περιγραφή θεωρήσαμε ότι η λευκή φωτεινή ακτίνα ξεκινάει από το E_1 και καταλήγει κόκκινη στο E_2 αφού διέλθει από το γυαλί. Δηλαδή, η παρουσία της ακτίνας στο E_1 θεωρήσαμε ότι είναι χρονικά

πρότερο συμβάν της διέλευσης από το γυαλί ενώ η παρουσία της στο E_2 χρονικά ύστερη της διέλευσης. Άρα, η διέλευση από το γυαλί επηρεάζει το χρώμα της φωτεινής ακτίνας σε συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στο μέλλον και όχι στο παρελθόν. Το ίδιο ισχύει και για την περιγραφή των συμβάντων σύμφωνα με την αντίθετη χρονική κατεύθυνση. Αν μία κόκκινη φωτεινή ακτίνα ξεκινάει από το E_2 και διερχόμενη από το γυαλί αλλάζει χρώμα και ακολούθως εμφανίζεται μία λευκή φωτεινή ακτίνα στο E_1 , τότε η χρονική διάταξη των συμβάντων είναι τέτοια ώστε η διέλευση να έπεται χρονικά της εκκίνησης της ακτίνας από το E_2 και να προηγείται χρονικά της άφιξης της ακτίνας στο E_1 με τη μεταβολή του χρώματος να αφορά στο μέλλον και όχι στο παρελθόν. Επομένως, και στις δύο περιπτώσεις περιγράφουμε μία παρέμβαση, όπου η μεταβολή επιδρά σε μελλοντικά συμβάντα και όχι σε παρελθοντικά. Το γεγονός ότι η δεύτερη περιγραφή δεν αντιστοιχεί σε μία φυσικώς πραγματοποιήσιμη παρέμβαση έχει να κάνει με τη μη αντιστρεπτότητα της απορρόφησης του φωτός από το γυαλί. Στο άλλο παράδειγμα που αφορά στην εκτροπή μίας ακτίνας μέσω ανάκλασης σε ένα κάτοπτρο, η αλληλεπίδραση είναι αντιστρεπτή και η αντίστροφη παρέμβαση φυσικώς πραγματοποιήσιμη.

Για να επεξηγήσει τη μεταβολή που προκαλείται σε ένα συμβάν, ο Reichenbach αναφέρεται σε αντιγεγονικές υποθετικές προτάσεις. Το γεγονός ότι διαπιστώνουμε ότι προκαλείται μεταβολή στο χρώμα ή στην κατεύθυνση της φωτεινής ακτίνας μετά την παρέμβασή μας, δεν μπορεί να προκύψει από την παρατήρηση και μόνο. Αυτό που παρατηρούμε, αντιστοίχως στα δύο παραδείγματα, είναι αφενός την παρουσία της λευκής φωτεινής ακτίνας στο E_1 και της κόκκινης ακτίνας στο E_2 καθώς και τη διέλευση της από το γυαλί, αφετέρου την παρουσία της λευκής φωτεινής ακτίνας στο E_1 και σε ένα κοντινό του E_2 σημείο (στο E_2'), καθώς και την πρόσπτωσή της στο κάτοπτρο. Για να διαπιστώσουμε τη μεταβολή θα πρέπει να πούμε τι θα συνέβαινε, αν η παρέμβαση δεν λάμβανε χώρα. Έτσι, ας θεωρήσουμε μία συγκεκριμένη χρονική κατεύθυνση σύμφωνα με την οποία η φωτεινή ακτίνα ξεκινάει από το E_1 και καταλήγει στο E_2. Τότε, θα πρέπει να θεωρήσουμε, αντιστοίχως στα δύο παραδείγματα, ως αληθείς τις αντιγεγονικές υποθετικές προτάσεις: "αν η ακτίνα δεν διέρχονταν από το γυαλί θα είχε λευκό χρώμα στο E_2" και "αν η ακτίνα δεν προσέπιπτε στο κάτοπτρο θα έφθανε στο E_2".

Όμως, υπάρχουν μεταβολές που περιγράφονται από αντιγεγονικές υποθετικές προτάσεις, και δεν αποτελούν παρεμβάσεις (Reichenbach 1956:44). Για να το δούμε αυτό ας θεωρήσουμε τις εξής προτάσεις: "Η ακτίνα θα είχε κόκκινο χρώμα στο E_1, αν δεν διέρχονταν από το γυαλί" και "Η ακτίνα θα ήταν κοντά στο E_1 (στο E_1'), αν δεν προσέπιπτε στο κάτοπτρο". Αυτές οι αντιγεγονικές προτάσεις δεν περιγράφουν παρεμβάσεις, διότι, δεδομένης της χρονικής κατεύθυνσης από το συμβάν E_1 στο συμβάν E_2, μας λένε ότι η μεταβολή που περιγράφεται αφορά στο παρελθόν και αφήνει αναλλοίωτο το μέλλον: η ακτίνα θα ήταν κόκκινη προτού να διέλθει από το γυαλί, και, η ακτίνα θα ήταν στο E_1' πριν την πρόσπτωση στο κάτοπτρο. Σύμφωνα με το Reichenbach αυτές οι αντιγεγονικές προτάσεις μας λένε ότι το αποτέλεσμα που προκύπτει από μία πραγματική ακολουθία συμβάντων, η οποία περιλαμβάνει το συμβάν της διέλευσης του φωτός από το γυαλί ή της ανάκλασης στο κάτοπτρο, μπορεί να προκληθεί και από μία εναλλακτική ακολουθία συμβάντων που αποτελούν *εναλλακτικά αίτια*. Και η μεταβολή που υποστηρίζεται από την αντιγεγονική πρόταση αφορά στη μετάβαση από την πραγματική ακολουθία συμβάντων σε κάποιο εναλλακτικό αίτιο που προκαλεί το ίδιο αποτέλεσμα-χρονικά ύστερο συμβάν. Στην πρώτη περίπτωση, υπάρχει μία εναλλακτική ακολουθία συμβάντων σύμφωνα με την οποία μία κόκκινη φωτεινή ακτίνα διαδίδεται ευθύγραμμα από το E_1 στο E_2, σε απουσία του γυαλιού. Ενώ αντίστοιχα, στη δεύτερη περίπτωση, το εναλλακτικό αίτιο είναι μία ακτίνα διαδίδεται ευθύγραμμα από ένα σημείο E_1', κοντά στο E_1, στο σημείο E_2', κοντά στο E_2, σε απουσία του κατόπτρου.

Η διάκριση των μεταβολών σε παρεμβάσεις και σε μεταβάσεις σε εναλλακτικά αίτια εξαρτάται από το ποια χρονική κατεύθυνση έχουμε επιλέξει ως θετική. Μάλιστα, η μεταβολή που καλούμε "παρέμβαση" ως προς τη μία χρονική κατεύθυνση αποτελεί μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο ως προς την αντίθετη χρονική και αντίστροφα. Έστω ότι θεωρούμε ως θετική τη χρονική κατεύθυνση σύμφωνα με την οποία το συμβάν της εμφάνισης της κόκκινης φωτεινής ακτίνας στο E_2 θεωρείται χρονικά πρότερο του συμβάντος της εμφάνισης λευκής φωτεινής ακτίνας στο E_1 αφού έχει προηγηθεί η διέλευση από το γυαλί. Η παρέμβαση στηρίζεται στην αλήθεια της αντιγεγονικής πρότασης "αν το γυαλί δεν υπήρχε, τότε η ακτίνα θα έφθανε κόκκινη στο E_1". Όμως, όπως είδαμε προηγουμένως, κατά την αντίθετη χρονική κατεύθυνση, το γεγονός της ύπαρξης μίας κόκκινης φωτεινής ακτίνας το ερμηνεύσαμε ως ύπαρξη

εναλλακτικού αιτίου και τη μεταβολή ως μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο. Μολονότι στην περίπτωση των μη αντιστρεπτών διαδικασιών η ερμηνεία αυτή είναι φανταστική –αφού δεν υποστηρίζεται από κάποια πραγματική φυσική διαδικασία–, τα πράγματα δεν είναι έτσι, για τις αντιστρεπτές διαδικασίες. Αν η θετική χρονική κατεύθυνση ήταν από το E_2 στο E_1 τότε η παρεμβολή του κατόπτρου σε μία φωτεινή ακτίνα που διαδίδεται ευθύγραμμα από ένα σημείο E_2' οδηγεί σε εμφάνιση της ακτίνας στο E_1. Επίσης, σε απουσία του κατόπτρου, η ακτίνα θα διαδίδονταν από το σημείο E_2' στο σημείο E_1'. Όμως και αυτή η μεταβολή σύμφωνα με την αντίθετη χρονική κατεύθυνση εκφράζει μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο.

Μπορούμε να συνοψίσουμε την ανάλυση του Reichenbach που οδηγεί στον ορισμό της έννοιας του ίχνους στις εξής προτάσεις:

1. Οι μεταβολές που μπορούμε να νοήσουμε σε μία ακολουθία συμβάντων διακρίνονται σε παρεμβάσεις και σε μεταβάσεις σε εναλλακτικά αίτια. Η διάκριση αυτή προϋποθέτει την ύπαρξη χρονικής κατεύθυνσης.

2. Για δεδομένη χρονική κατεύθυνση, οι παρεμβάσεις διατηρούν αναλλοίωτο το παρελθόν και μεταβάλλουν το μέλλον. Περιγράφονται από αντιγεγονικές προτάσεις του τύπου "αν η παρέμβαση δεν λάμβανε χώρα, το μέλλον θα ήταν διαφορετικό".

3. Για δεδομένη χρονική κατεύθυνση, οι μεταβάσεις σε εναλλακτικά αίτια διατηρούν αναλλοίωτο το μέλλον και μεταβάλλουν το παρελθόν. Περιγράφονται από αντιγεγονικές προτάσεις του τύπου "αν η παρέμβαση δεν λάμβανε χώρα, το παρελθόν θα ήταν διαφορετικό".

4. Αν για δεδομένη χρονική κατεύθυνση μία μεταβολή αποτελεί παρέμβαση, ως προς την αντίθετη κατεύθυνση αποτελεί μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο και αντίστροφα.

5. Οι παρεμβάσεις μπορούν να γίνουν είτε μέσω αντιστρεπτών διαδικασιών, είτε μέσω μη αντιστρεπτών διαδικασιών.

6. Αν η παρέμβαση γίνεται μέσω μίας αντιστρεπτής διαδικασίας, τότε η μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο είναι φυσικώς πραγματοποιήσιμη - δηλαδή, υπάρχει φυσική διαδικασία που να αποτελεί παρέμβαση κατά την αντίθετη χρονική κατεύθυνση.

7. Αν η παρέμβαση γίνεται μέσω μίας μη αντιστρεπτής διαδικασίας, τότε η μετάβαση σε εναλλακτικό αίτιο δεν είναι φυσικώς πραγματοποιήσιμη - δηλαδή, δεν υπάρχει φυσική διαδικασία που να αποτελεί παρέμβαση κατά την αντίθετη χρονική κατεύθυνση.

8. Το ίχνος είναι το αποτέλεσμα παρέμβασης με μία μη αντιστρεπτή διαδικασία.

Για να ορίσουμε με τη μέθοδο του ίχνους τη σχέση αιτιακής συνάφειας[1] ανάμεσα σε δύο συμβάντα E_1 και E_2 υποθέτουμε ότι στο πρώτο από αυτά δημιουργούμε ένα ίχνος: δηλαδή, στο E_1 λαμβάνει χώρα μία αλληλεπίδραση η οποία μεταβάλλει το συμβάν E_1 έτσι ώστε αντί του E_1 να λαμβάνει χώρα ένα συμβάν E_1* . Το συμβάν E_1* είναι το συμβάν που προκύπτει από την υπέρθεση του ίχνους στο E_1 μέσω μίας μη αντιστρεπτής διαδικασίας. Τότε, αν αντί του συμβάντος E_2 λαμβάνει χώρα το συμβάν E_2*, το οποίο συνίσταται από το E_2 μαζί με το υπερτιθέμενο ίχνος, λέμε ότι το ίχνος που δημιουργήθηκε στο E_1 εμφανίζεται στο E_2. Λόγω της μη αντιστρεπτότητας της παρέμβασης με την οποία δημιουργήθηκε το ίχνος, συμπεραίνουμε ότι το συμβάν στο οποίο εμφανίστηκε, το E_2, έπεται χρονικά του συμβάντος στο οποίο δημιουργήθηκε, το E_1. Ενώ από το γεγονός ότι μία μεταβολή στο E_1 επιδρά στο E_2 συμπεραίνουμε ότι το E_1 συμβάλλει στο να λάβει χώρα το E_2. Έτσι, ο Reichenbach καταλήγει στον εξής ορισμό για την αιτιακή συνάφεια δύο συμβάντων:

> Αν ένα ίχνος δημιουργείται σε ένα συμβάν A_i και εμφανίζεται σε ένα συμβάν A_k , τότε το A_i είναι *αιτιακώς συναφές* με το A_k. (Reichenbach 1956:200)

Παρατηρείστε ότι στον ορισμό αυτό διατυπώνεται μία ικανή συνθήκη για την ύπαρξη αιτιακής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα, με όρους δημιουργίας και εμφάνισης ίχνους, και όχι μία συνθήκη που είναι ικανή και αναγκαία. Ο ορισμός της αιτιακής συνάφειας με τη μέθοδο του ίχνους στηρίζεται στην υπόθεση ότι είναι φυσικώς δυνατό να ανακαλύψουμε ένα ίχνος που δημιουργείται σε κάποιο συμβάν από φυσικά αίτια ή να κατασκευάσουμε ένα τέτοιο ίχνος στο εργαστήριο και να παρατηρήσουμε

[1] Στα πρώιμα έργα του ο Reichenbach (1928:137, 2006:210) χρησιμοποιεί τους όρους "αιτιακή σχέση" (causal relation) ή "σχέση αιτίου-αποτελέσματος" για να εκφράσει τη σχέση αιτιακής συνάφειας. Γι' αυτό θεωρούμε τις έννοιες αυτές ισοδύναμες στο πλαίσιο της φιλοσοφίας του. Αντιθέτως, ο όρος "αιτιακή σύνδεση" χρησιμοποιείται για να εκφράσει την ύπαρξη σχέσεων αιτιακής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα, ανεξάρτητα από την κατεύθυνση, δηλαδή, ανεξάρτητα από το ποιο συμβάν είναι το αίτιο και ποιο το αποτέλεσμα. Επίσης, ο όρος "αιτιακή σύνδεση" χρησιμοποιείται για να εκφράσει τη σχέση που έχουν δύο συμβάντα ως αποτελέσματα ενός κοινού αιτίου (Reichenbach 1956:29).

αν το ίχνος εμφανίζεται σε άλλα συμβάντα. Άρα, η διατύπωση στον ορισμό μίας ικανής και αναγκαίας συνθήκης για την ύπαρξη αιτιακής συνάφειας με βάση τη μέθοδο του ίχνους, θα σήμαινε ότι η αιτιακή συνάφεια ορίζεται αποκλειστικά σε συμβάντα που μπορούν να φέρουν ίχνος. Όμως, ο Reichenbach δεν θεωρεί ότι η αιτιακή συνάφεια θεμελιώνεται αποκλειστικά πάνω σε αυτή την προϋπόθεση. Όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, διατυπώνει και ένα δεύτερο ορισμό για την αιτιακή συνάφεια ανάμεσα σε δύο συμβάντα στη βάση των στατιστικών και των χωροχρονικών σχέσεων που αυτά ικανοποιούν, ο οποίος είναι ανεξάρτητος από τη μέθοδο του ίχνους. Μάλιστα, υποστηρίζει για τις περιπτώσεις αιτιακής συνάφειας που περιλαμβάνονται στο δεύτερο ορισμό πως η υπόθεση ότι «είναι φυσικώς δυνατό να ανακαλύψουμε ή να κατασκευάσουμε ένα ίχνος που να κινείται από το συμβάν A_1 στο συμβάν A_3 είναι μία υπόθεση που επικυρώνεται από πολλές εμπειρίες» (Reichenbach 1956:204). Ωστόσο, η υπόθεση αυτή δεν πρέπει να θεωρηθεί *a priori* αληθής ούτε όσον αφορά στη φυσική δυνατότητα δημιουργίας και εμφάνισης του ίχνους σε ένα συμβάν, ούτε σε σχέση με την ικανοποίηση του κριτηρίου που διατυπώνεται στον ορισμό της αιτιακής συνάφειας με τη μέθοδο του ίχνους από ένα ζεύγος συμβάντων που ικανοποιούν τα στατιστικά κριτήρια του δεύτερου ορισμού. Άρα, καταλήγει ο Reichenbach δεν είναι *a priori* αληθές ότι οι δύο ορισμοί προσδίδουν στην έννοια "αιτιακή συνάφεια" την ίδια έκταση: «Η εκτασιακή ταυτότητα των δύο ορισμών της αιτιακής συνάφειας είναι άρα ζήτημα εμπειρικών τεκμηρίων» (ό.π.:204) [2].

Ωστόσο, ο Reichenbach σε προγενέστερα έργα του έχει διατυπώσει με τη βοήθεια της μεθόδου του ίχνους μία αναγκαία συνθήκη για την αιτιακή συνάφεια ανάμεσα σε δύο συμβάντα. Συγκεκριμένα, στο *The Philosophy of Space and Time,* ο Reichenbach υποστηρίζει ότι για δύο συμβάντα E_1, E_2,

> αν το E_1 είναι αίτιο του E_2 τότε μία μικρή μεταβολή (ένα ίχνος) στο E_1 συνδέεται με μία μικρή μεταβολή στο E_2, ενώ μικρές μεταβολές στο E_2 δεν συνδέονται με μεταβολές στο E_1. (Reichenbach 1928:137)

[2] Οι δύο ορισμοί διαφέρουν και ως προς την πρακτική χρησιμότητα τους για τη διαπίστωση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας. Ο δεύτερος ορισμός πλεονεκτεί ως προς το ότι «μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε περιπτώσεις που η διαδικασία σήμανσης δεν μπορεί να εφαρμοστεί για τεχνικούς λόγους, όπως για παράδειγμα σε περιπτώσεις που εξαιρούνται από την πειραματική παρέμβαση» (ό.π.:204).

Η πρόταση αυτή εκφράζει έναν περιορισμό για τα συμβάντα E_1 και E_2 που έχουν αιτιακή συνάφεια. Θα πρέπει στα συμβάντα αυτά να μπορούμε να δημιουργήσουμε ίχνος και, επίσης, να διαπιστώσουμε την εμφάνιση ή τη μη εμφάνιση του ίχνους. Επιπλέον, θα λέμε ότι το E_1 είναι αίτιο του E_2 μόνο αν είναι αληθείς οι ακόλουθες προτάσεις: "αν δημιουργήσουμε ίχνος στο E_1, το ίχνος εμφανίζεται στο E_2" και "αν δημιουργήσουμε ίχνος στο E_2, το ίχνος δεν εμφανίζεται στο E_1". Στο *The Direction of Time*, ο Reichenbach δεν θέλει να υιοθετήσει *a priori* αυτούς τους περιορισμούς για την αιτιακή συνάφεια. Αν τους υιοθετούσε τότε θα υποστήριζε την αναγωγή της σχέσης της αιτιακής συνάφειας σε μία σχέση συμβάντων που ορίζεται με τη μέθοδο του ίχνους. Επομένως, μπορούμε στο σημείο αυτό να εντοπίσουμε μία διαφορά ανάμεσα στην ανάλυση της σχέσης της αιτιακής συνάφειας με τη μέθοδο του ίχνους στα πρώιμα έργα του Reichenbach και στο τελευταίο του έργο.

Αυτή όμως δεν είναι η μοναδική διαφορά. Ικανή συνθήκη για να είναι αιτιακώς συναφές το E_1 με το E_2 είναι η πρόταση "αν δημιουργήσουμε ίχνος στο E_1, το ίχνος εμφανίζεται στο E_2", ενώ αναγκαία συνθήκη αιτιακής συνάφειας αποτελεί η σύζευξη των δύο υποθετικών προτάσεων που αναφέραμε. Όμως, αν το ίχνος είναι το αποτέλεσμα παρέμβασης με μία μη αντιστρεπτή διαδικασία τότε η δεύτερη πρόταση, "αν δημιουργήσουμε ίχνος στο E_2, το ίχνος δεν εμφανίζεται στο E_1", είναι συνέπεια της πρώτης. Δηλαδή, αν δημιουργήσουμε ίχνος στο E_1 και το ίχνος εμφανιστεί στο E_2, τότε το E_1 προηγείται χρονικά του E_2. Επειδή όμως το ίχνος διαδίδεται μόνο κατά τη θετική χρονική κατεύθυνση, από χρονικά πρότερα σε χρονικά ύστερα συμβάντα, αν δημιουργήσουμε το ίχνος στο συμβάν E_2 αυτό δεν θα εμφανισθεί στο E_1. Το γεγονός ότι ο Reichenbach απαιτεί, ως αναγκαία συνθήκη, τη σύζευξη των δύο υποθετικών προτάσεων μας κάνει να σκεφτούμε ότι, ενδεχομένως, όταν διατύπωνε τη συνθήκη αυτή να μην προϋπέθετε ότι το ίχνος δημιουργείται με μη αντιστρεπτές διαδικασίες ή να μην "έπαιρνε πολύ στα σοβαρά" τις συνέπειες αυτού του γεγονότος. Ο Reichenbach κατηγορεί για παρανόηση των απόψεων του όσους θεωρούν ότι στα πρώιμα έργα του υποστήριζε το ίχνος μπορεί να δημιουργείται και από αντιστρεπτές διαδικασίες: «Ορισμένοι από τους επικριτές μου ερμήνευσαν τις διατυπώσεις μου ως σημαίνουσες ότι το ίχνος δεν απαιτείται να δημιουργηθεί μέσω μη αντιστρεπτών διαδικασιών. Αυτό αποτελεί παρανόηση» (Reichenbach 1956:198 υποσ. 1). Ωστόσο, το ζήτημα παραμένει. Για ποιο λόγο ο Reichenbach απαιτεί να είναι αληθείς δύο

προτάσεις, ως αναγκαία συνθήκη της αιτιακής συνάφειας, που η μία είναι συνέπεια της άλλης δεδομένου του ορισμού του ίχνους ως αποτέλεσμα παρέμβασης με μη αντιστρεπτές διαδικασίες; Η μόνη ερμηνεία την οποία μπορούμε να δώσουμε είναι ότι κατά τη διατύπωση της αναγκαίας συνθήκης, ο Reichenbach δεν έλαβε σοβαρά υπόψη τις συνέπειες του ορισμού του ίχνους.

Υπάρχει κάτι ακόμα που πρέπει να επισημάνουμε σε σχέση με τη διάδοση του ίχνους από το αίτιο στο αποτέλεσμα. Αυτό αφορά τη συνθήκη ευστάθειας που απαιτείται, σύμφωνα με την οποία «μία *μικρή μεταβολή* (ένα ίχνος) στο E_1 συνδέεται με μία *μικρή μεταβολή* στο E_2». Η δημιουργία ίχνους αποτελεί «μικρή μεταβολή» σε ένα συμβάν. Αυτή η μεταβολή μπορεί να ερμηνευθεί είτε ως αλλαγή της αρχικής κατάστασης του συστήματος, είτε ως μεταβολή της δομής του συστήματος. Για παράδειγμα, θεωρείστε ένα υλικό σημείο που εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση, η αρχική του κατάσταση ορίζεται από τη θέση και την ορμή του υλικού σημείου τη χρονική στιγμή μηδέν, ενώ, η συχνότητα ταλάντωσης του υλικού σημείου είναι ανεξάρτητη από την κατάσταση και αποτελεί δομικό στοιχείο της κίνησης. Αν προκαλέσουμε μία μεταβολή τη χρονική στιγμή μηδέν, η μεταβολή αυτή μπορεί να είναι είτε μεταβολή της θέσης ή/και της ορμής του υλικού σημείου τη δεδομένη χρονική στιγμή είτε μεταβολή της συχνότητας ταλάντωσης, δηλαδή μεταβολή του δυναμικού νόμου που διέπει τη χρονική εξέλιξη του συστήματος. Η θέση ότι μικρές μεταβολές στην αρχική κατάσταση ενός συστήματος οδηγούν σε μικρές μεταβολές στην τελική κατάσταση του συστήματος, σημαίνει ότι το σύστημα μας δεν εκδηλώνει ευαισθησία ως προς τις αρχικές συνθήκες. Ενώ η θέση ότι μικρές μεταβολές στη δομή του δυναμικού συστήματος παράγουν ένα παραπλήσιο, από πλευράς δυναμικής, σύστημα, σημαίνει ότι το σύστημα είναι δομικά ευσταθές. Με άλλα λόγια, ανάλογα με το πώς θα ερμηνεύσουμε την έννοια της μεταβολής που προκαλείται σε ένα συμβάν θα πρέπει να απαιτήσουμε να ισχύει κατά τη διάδοση του ίχνους κάποιο από τα δύο είδη ευστάθειας που αναφέραμε.

Όμως ανεξάρτητα από την ερμηνεία που θα δώσουμε στην έκφραση "μικρή μεταβολή", και κατά συνέπεια στο είδος της ευστάθειας που θα θεωρήσουμε ότι ικανοποιεί η διάδοση του ίχνους, γνωρίζουμε από τη θεωρία των δυναμικών συστημάτων ότι υπάρχουν δυναμικά συστήματα που εκδηλώνουν ευαισθησία ως

προς τις αρχικές συνθήκες καθώς και δυναμικά συστήματα που δεν είναι δομικά ευσταθή. Σε αυτές τις περιπτώσεις μία μικρή μεταβολή που προκαλείται είτε στην αρχική κατάσταση είτε στη δομή του συστήματος μπορεί να οδηγήσει σε μεγάλες αποκλίσεις στην κατάσταση του συστήματος μετά από ορισμένο χρόνο. Άρα, μία μικρή μεταβολή, το ίχνος, που δημιουργείται σε κάποιο συμβάν είναι δυνατό να διαδίδεται κατά τρόπον ώστε μετά από κάποιο χρονικό διάστημα να εμφανίζεται μία μεγάλη μεταβολή στην κατάσταση του συστήματος. Σε τέτοιες περιπτώσεις η αναγκαία συνθήκη της αιτιακής σχέσης που συνδέει μικρές μεταβολές σε δύο συμβάντα δεν ικανοποιείται. Βεβαίως, το πρόβλημα αυτό μπορεί να διορθωθεί αν θεωρήσουμε το ίχνος ως μία μικρή μεταβολή που προκαλείται σε ένα συμβάν, χωρίς να απαιτήσουμε η μεταβολή που εμφανίζεται στο συμβάν που διαδίδεται το ίχνος να είναι επίσης μικρή.

Η αναγκαία συνθήκη για τη σχέση αιτιακής συνάφειας που διατυπώνεται στο *The Philosophy of Space and Time* έχει δύο εφαρμογές. Η πρώτη αφορά στη γνώση της κατεύθυνσης της σχέσης αυτής. Σύμφωνα με τον Reichenbach αν δύο συμβάντα βρίσκονται σε σχέση αιτιακής συνάφειας χωρίς να γνωρίζουμε ποιο από τα δύο είναι το αίτιο, δηλαδή ποια είναι η κατεύθυνση της σχέσης αυτής, τότε μπορούμε να γνωρίσουμε την κατεύθυνση της σχέσης εκτελώντας, επαναληπτικά, πειράματα σήμανσης (Reichenbach 1928: 137 και 2006:210). Στο πρώτο πείραμα παρατηρούμε τα δύο συμβάντα χωρίς να λαμβάνει χώρα κάποια διαδικασία σήμανσης. Στη συνέχεια, δημιουργούμε ίχνος διαδοχικά σε καθένα από τα δύο συμβάντα και παρατηρούμε αν το ίχνος εμφανίζεται στο άλλο συμβάν. Έστω ότι τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων στα διαδοχικά πειράματα περιγράφονται από τους συνδυασμούς E_1E_2 , E_1E_2* , E_1*E_2* που ερμηνεύονται αντίστοιχα ως εξής: α) κανένα από τα δύο συμβάντα δεν φέρει ίχνος, β) το E_1 δεν φέρει ίχνος και το E_2 φέρει ίχνος, γ) και τα δύο συμβάντα φέρουν ίχνος. Ο συνδυασμός που δεν παρατηρούμε είναι ο E_1*E_2, δηλαδή ο συνδυασμός στον οποίο το E_1 φέρει ίχνος ενώ το E_2 δεν φέρει ίχνος. Από αυτές τις παρατηρήσεις καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι το συμβάν που δεν φέρει ίχνος όταν το άλλο συμβάν φέρει ίχνος είναι το αίτιο: δηλαδή, στη συγκεκριμένη περίπτωση το αίτιο είναι το E_1. Αν παρατηρούσαμε αντί του συνδυασμού E_1E_2*, το

συνδυασμό $E_1 * E_2$, που προηγουμένως θεωρήσαμε δεν έχει παρατηρηθεί, τότε θα συμπεραίναμε ότι το αίτιο είναι το συμβάν E_2.

Η δεύτερη εφαρμογή της αναγκαίας συνθήκης για την σχέση αιτιακής συνάφειας αφορά στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες ή, όπως τις ονομάζει ο Reichenbach, σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων[3]. Ας θεωρήσουμε τα συμβάντα που ορίζονται από την παρουσία ενός αντικειμένου σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία. Για παράδειγμα, ακολουθία συμβάντων συγκροτούν τα συμβάντα που ορίζονται από την παρουσία μίας φωτεινής ακτίνας, μίας κινούμενης σφαίρας ή ενός κινούμενου φωτεινού ίχνους σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία. Η φωτεινή ακτίνα, το φως, γνωρίζουμε από την ειδική θεωρία της σχετικότητας ότι κινείται στο κενό με σταθερή πεπερασμένη ταχύτητα. Όμως το φωτεινό ίχνος ή μία σκιά σε ένα πέτασμα μπορούν να κινούνται με ταχύτητες που υπερβαίνουν την ταχύτητα του φωτός στο κενό. Ωστόσο, ενώ, όπως είδαμε προηγουμένως, η φωτεινή ακτίνα διαδίδει το ίχνος που δημιουργείται σε ένα συμβάν, οι ακολουθίες συμβάντων που ορίζονται από την κίνηση ενός αντικειμένου με ταχύτητες που υπερβαίνουν την ταχύτητα του φωτός στο κενό δεν διαδίδουν το ίχνος που δημιουργείται σε ένα συμβάν.

Για να το δείξει αυτό ο Reichenbach (1928:147) αναλύει την κίνηση του σημείου τομής μίας κινούμενης ράβδου με μία ακίνητη ράβδο (βλ. Σχήμα 2.1).

Σχ. 2.1 Το κινούμενο σημείο τομής δύο κανόνων. Από το (Reichenbach 1928:147).

[3] Ο Reichenbach αποδίδει στο von Laue τα πρωτεία της διάκρισης ανάμεσα σε πραγματικές και σε μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων με τη μέθοδο του ίχνους. (Reichenbach 1978b:186)

Η ταχύτητα κίνησης του σημείου τομής της ράβδου είναι μεγαλύτερη όσο μικρότερη είναι η γωνία που σχηματίζουν οι δύο ράβδοι και στην οριακή περίπτωση που η ακίνητη και η κινούμενη ράβδος είναι παράλληλες, η ταχύτητα του σημείου τομής είναι άπειρη. Ωστόσο, το κινούμενο σημείο τομής των δύο ράβδων δεν μπορεί να διαδώσει το ίχνος που δημιουργείται σε κάποιο συμβάν. Συγκεκριμένα, αν προκαλέσουμε μία μεταβολή στην πορεία του σημείου τομής, ένα ίχνος, δημιουργώντας ένα εξόγκωμα τύπου V κοντά στο ανώτερο σημείο της ακίνητης ράβδου, το ίχνος δεν εμφανίζεται στο συμβάν που ορίζεται από τη σύμπτωση του σημείου τομής με το κατώτερο σημείο της ράβδου. Και το ίδιο ισχύει αν το ίχνος δημιουργηθεί κοντά στο κατώτερο σημείο της ράβδου. Επομένως, η αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη σχέσης αιτιακής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα δεν ικανοποιείται και η ακολουθία συμβάντων που ορίζεται από την κίνηση του σημείου τομής των δύο ράβδων δεν είναι αιτιακή αλυσίδα. Ο Reichenbach υποστηρίζει ότι το ίδιο ισχύει για κάθε ακολουθία συμβάντων που ορίζονται από την κίνηση ενός αντικειμένου με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

Έτσι, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ταχύτητα του φωτός στο κενό δεν είναι μόνο σταθερή και πεπερασμένη αλλά και η οριακή ταχύτητα διάδοσης αιτιακής επίδρασης σε μία ακολουθία συμβάντων. Οι ακολουθίες συμβάντων που ορίζονται από τη χωροχρονική θέση ενός αντικειμένου που κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό είναι μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων και δεν διαδίδουν αιτιακή επίδραση από το ένα συμβάν στο επόμενο. Αντίθετα, οι πραγματικές ακολουθίες συμβάντων διαδίδουν αιτιακή επίδραση, δηλαδή αποτελούν αιτιακές αλυσίδες.

Τέλος, θα θέλαμε να αναφερθούμε στην έννοια της διάδοσης του ίχνους κατά μήκος μίας αιτιακής αλυσίδας. Αρχικά παρατηρείστε ότι σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει μπορούμε να ορίσουμε με τη μέθοδο του ίχνους μία σχέση διάταξης $"<"$ σε ένα σύνολο συμβάντων $\mathbb{S}$ στα οποία μπορεί να δημιουργηθεί ορισμένο ίχνος. Για δύο συμβάντα E_1, E_2 του $\mathbb{S}$ θα λέμε ότι $E_1 < E_2$ αν και μόνο αν το ίχνος που δημιουργείται στο συμβάν E_1 εμφανίζεται στο συμβάν E_2. Η σχέση $"<"$ είναι *ασύμμετρη*, δηλαδή, για κάθε ζεύγος στοιχείων E_i και E_j του $\mathbb{S}$ αν ισχύει $E_i < E_j$ τότε δεν ισχύει $E_j < E_i$. Αυτό σημαίνει ότι αν το ίχνος που δημιουργείται σε ένα

συμβάν E_i εμφανίζεται σε ένα συμβάν E_j, τότε το ίχνος που δημιουργείται στο E_j δεν εμφανίζεται στο συμβάν E_i. Όμως, αν το ίχνος δημιουργηθεί σε ένα συμβάν E_i τότε θα εμφανιστεί στο E_i, δηλαδή θα λάβει χώρα το συμβάν E_i^* αντί του E_i. Από αυτή τη διαπίστωση θα μπορούσε κάποιος να συναγάγει ότι η σχέση "$<$" είναι ανακλαστική, γεγονός που αντιβαίνει στη θέση ότι είναι ασύμμετρη. Ωστόσο, η ερμηνεία αυτή δεν είναι ορθή και οδηγεί στο παράδοξο συμπέρασμα ότι κάθε συμβάν είναι αίτιο του εαυτού του, εφόσον είναι αιτιακά συναφές με τον εαυτό του σύμφωνα με τον ορισμό της αιτιακής συνάφειας που προτείνει ο Reichenbach. Το σφάλμα της ερμηνείας συνίσταται στη μη διάκριση της εμφάνισης του ίχνους ως άμεσο αποτέλεσμα της δημιουργίας του σε κάποιο συμβάν και στην εμφάνιση του ίχνους ως αποτέλεσμα της διάδοσης της αιτιακής επίδρασης από το συμβάν στο οποίο δημιουργείται σε κάποιο διαφορετικό συμβάν με το οποίο το πρώτο συμβάν είναι αιτιακώς συναφές. Άρα, όταν αναφερόμαστε σε εμφάνιση του ίχνους σε κάποιο συμβάν θα εννοούμε εμφάνιση χωρίς δημιουργία ίχνους στο συμβάν αυτό, μολονότι η δημιουργία του ίχνους συνεπάγεται εμφάνιση του ίχνους στο συμβάν που δημιουργείται.

Επιπλέον, η σχέση "$<$" είναι *μεταβατική*, δηλαδή ισχύει ότι αν το ίχνος που δημιουργείται σε ένα συμβάν E_i εμφανίζεται στο συμβάν E_j και το ίχνος που δημιουργείται στο συμβάν E_j εμφανίζεται στο συμβάν E_k, τότε το ίχνος που δημιουργείται στο E_i εμφανίζεται στο συμβάν E_k, για κάθε τριάδα συμβάντων E_i, E_j, E_k στο $\mathbb{S}$. Παρατηρείστε ότι με τη βοήθεια της σχέσης "$<$", που ικανοποιεί τις ιδιότητες της ασυμμετρίας και της μεταβατικότητας, μπορούμε να ορίσουμε την αντίστοιχη σχέση μερικής διάταξης "$\leq$" στο $\mathbb{S}$, δηλαδή μία σχέση που είναι *ανακλαστική, αντισυμμετρική και μεταβατική*, ως εξής: $E_1 \leq E_2$ αν και μόνο αν είτε $E_1 < E_2$ είτε το E_1 ταυτίζεται με το E_2. Τέλος, σε μία αιτιακή αλυσίδα $\mathbb{S}$ όλα τα στοιχεία θα πρέπει να είναι συγκρίσιμα με τη σχέση "$<$" (ή αντιστοίχως με την "$\leq$"). Γι' αυτό θα πρέπει να ισχύει ότι για κάθε ζεύγος συμβάντων E_i, E_j $(i \neq j)$ του

$\mathbb{S}$, $E_i < E_j$ ή $E_j < E_i$ (αντιστοίχως για την "$\leq$"). Σε αυτή την περίπτωση το $\mathbb{S}$ είναι *γραμμικώς* ή *ολικώς διατεταγμένο* ως προς τη σχέση "$<$" (ή την "$\leq$")[4].

Ας υποθέσουμε τώρα ότι το σύνολο $\mathbb{S}$ είναι *πυκνό* ως προς κάποια από τις δύο σχέσεις ολικής διάταξης. Αυτό που ισχύει τότε είναι ότι για κάθε ζεύγος διαφορετικών συμβάντων της αιτιακής αλυσίδας E_i, E_j $(i \neq j)$ με $E_i < E_j$, υπάρχει ένα τρίτο συμβάν E_k τέτοιο ώστε $E_i < E_k$ και $E_k < E_j$. Δηλαδή, για δύο συμβάντα E_i, E_j $(i \neq j)$ για τα οποία ισχύει ότι το ίχνος που δημιουργείται στο E_i εμφανίζεται στο E_j υπάρχει ένα συμβάν E_k τέτοιοι ώστε το ίχνος που δημιουργείται στο E_i εμφανίζεται στο E_k και το ίχνος που δημιουργείται στο E_k εμφανίζεται στο E_j . Σημειώνουμε επίσης ότι όταν ένα σύνολο είναι πυκνό τότε δεν υπάρχουν διαδοχικά στοιχεία, δηλαδή στοιχεία μεταξύ των οποίων να μην βρίσκεται άλλο στοιχείο του συνόλου. Άρα σε μία αιτιακή αλυσίδα που είναι πυκνή ως προς τη διάταξη που ορίσαμε κανένα συμβάν δεν έχει επόμενο ή προηγούμενο στοιχείο.

Το επόμενο βήμα είναι να υποθέσουμε ότι το σύνολο των συμβάντων της αιτιακής αλυσίδας είναι *πλήρες κατά Dedekind*, δηλαδή ότι δεν έχει χάσματα. Για ένα σύνολο $\mathbb{S}$ εφοδιασμένο με μία σχέση ολικής διάταξης και μία διαμέριση του $\mathbb{S}$ σε δύο υποσύνολα $\mathbb{S}_1, \mathbb{S}_2$ για τα οποία ισχύει: αν $(E_i, E_j) \in \mathbb{S}_1 \times \mathbb{S}_2$ τότε $E_i < E_j$ - θα λέμε ότι έχουμε *χάσμα* τότε και μόνο τότε όταν το $\mathbb{S}_1$ δεν έχει μέγιστο στοιχείο και το $\mathbb{S}_2$ δεν έχει ελάχιστο στοιχείο. Επίσης θα λέμε ότι το $\mathbb{S}$ είναι *πλήρες κατά Dedekind* όταν δεν υπάρχει διαμέριση του $\mathbb{S}$ με την οποία να έχουμε χάσμα. Με τις δύο αυτές υποθέσεις που κάναμε συμπεραίνουμε ότι το σύνολο των συμβάντων $\mathbb{S}$ που συγκροτούν την αιτιακή αλυσίδα είναι *συνεχές* σύνολο ή διαφορετικά ότι η διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας αιτιακής αλυσίδας είναι συνεχής.

Το τελευταίο βήμα για να μιλήσουμε για *χωροχρονική συνέχεια* στη διάδοση του ίχνους κατά μήκος της αιτιακής αλυσίδας είναι να θεωρήσουμε την "1-1" και

[4] Ο Suppes (1999:223) διακρίνει ανάμεσα στις δύο σχέσεις γραμμικής διάταξης, τις οποίες ονομάζει *απλή διάταξη* (simple ordering), "$\leq$", και *αυστηρώς απλή διάταξη* (strict simple ordering), "$<$", αντιστοίχως. Ο Russell (1920:34), την ορολογία του οποίου ακολουθεί ο Reichenbach, ονομάζει *σειριακή σχέση* (serial relation) ή *σειρά* (series) μία σχέση που είναι ασύμμετρη, μεταβατική και συνεκτική (connected). Ο τελευταίος όρος δηλώνει την ιδιότητα, για κάθε ζεύγος συμβάντων E_i, E_j $(i \neq j)$ του $\mathbb{S}$, $E_i < E_j$ ή $E_j < E_i$.

"επί" απεικόνιση ανάμεσα στο σύνολο $\mathbb{S}$ των συμβάντων της αιτιακής αλυσίδας και σε ένα σύνολο σημείων $\mathbb{F}$ του χωροχρόνου. Η ύπαρξη αυτής της απεικόνισης είναι δεδομένη εφόσον αναφερόμαστε σε ενικά συμβάντα (και όχι σε τύπους συμβάντων) που λαμβάνουν χώρα σε ένα και μόνο ένα σημείο του χωροχρόνου. Λόγω αυτής της απεικόνισης μπορούμε να ορίσουμε μία σχέση διάταξης ολικής στο σύνολο $\mathbb{F}$ με την οποία το $\mathbb{F}$ να καθίσταται συνεχές σύνολο. Δηλαδή, το σύνολο των σημείων του χωροχρόνου που αναπαριστάνουν γεωμετρικά την αιτιακή αλυσίδα είναι συνεχές σύνολο.

Ο Reichenbach αναφέρεται στη *συνέχεια* ως χαρακτηριστικό της διάδοσης του ίχνους.

> Όταν η διαδικασία σήμανσης χρησιμοποιείται για να σημάνει αιτιακές γραμμές, το ίχνος εμφανίζεται σε όλα τα συμβάντα κατά μήκος της αιτιακής γραμμής. Αν το ίχνος σταματήσει σε κάποιο σημείο, δεν επανεμφανίζεται σε επόμενα σημεία. Για παράδειγμα, σε κάποιο σημείο το ίχνος κιμωλίας σε μία μπάλα του μπιλιάρδου μπορεί να σβήσει. Αν συμβεί αυτό, το ίχνος δεν εμφανίζεται στην μπάλα από κει και πέρα. Αυτή η σκέψη […] εκφράζει τη *συνέχεια του ίχνους* […] η διαδικασία σήμανσης συμφωνεί με την αρχή δράσης εξ επαφής. (Reichenbach 1956:201-2)

Σύμφωνα με όσα αναφέραμε παραπάνω, αυτή η θέση του Reichenbach εκφράζει τη συνθήκη ότι η αιτιακή αλυσίδα είναι πλήρης κατά Dedekind, δηλαδή, δεν έχει χάσματα ως προς τη σχέση που ορίζεται από τη διάδοση του ίχνους. Όμως η πληρότητα δεν συνεπάγεται ότι η αιτιακή αλυσίδα είναι πυκνό σύνολο ως προς τη σχέση ολικής διάταξης που ορίζεται από τη διάδοση του ίχνους. Άρα, αυστηρά μιλώντας, η συνέχεια της διάδοσης του ίχνους κατά μήκος μίας αιτιακής αλυσίδας δεν προκύπτει από αυτή τη συνθήκη. Ωστόσο, ο Reichenbach, στο άρθρο του "The aims and Methods of Physical Knowledge" (1929), αναφερόμενος στις συνεπαγωγές που περιγράφουν τη σχέση αιτίου-αποτελέσματος στη γλώσσα μάς λέει ότι η συνεπαγωγή "αν *A* τότε *B*" είναι «*μεταβατική* και *συνεκτική* [*connected*] και η προκύπτουσα σειρά έχει τα χαρακτηριστικά ενός *γραμμικού ανοικτού συνεχούς*.» (Reichenbach 1978b:194). Μολονότι το παραπάνω χωρίο δεν αναφέρεται ρητά στην ιδιότητα της αιτιακής αλυσίδας να είναι πυκνό σύνολο ως προς τη σχέση ολικής διάταξης που περιγράφεται με την αιτιακή συνεπαγωγή, το γεγονός αυτό προκύπτει από την επεξήγηση των μαθηματικών όρων στο πλαίσιο της προσέγγισης του Russell

στην οποία παραπέμπει[5]. Έτσι, αν η αιτιακή αλυσίδα έχει δομή συνεχούς ως προς την αιτιακή συνεπαγωγή θεωρούμε ότι θα έχει δομή συνεχούς και ως προς τη σχέση ολικής διάταξης που ορίζεται με τη μέθοδο του ίχνους. Άρα, το ίχνος διαδίδεται κατά μήκος μίας αιτιακής αλυσίδας με χωροχρονικά συνεχή τρόπο, όπως και στην περίπτωση της αιτιακής γραμμής του Russell, σε πλήρη συμφωνία με την απαίτηση της δράσης εξ επαφής.

Ως συνέχεια της ανάλυσης που προηγήθηκε για την έννοια τους ίχνους μπορούμε να συνοψίσουμε τα συμπεράσματά μας για τη θεώρηση της σχέσης αιτιακής συνάφειας με βάση τη μέθοδο του ίχνους, ως εξής:

9. Ο ορισμός που διατυπώνεται από τον Reichenbach στο *The Direction of Time* μας λέει ότι ικανή συνθήκη για να έχουν δύο συμβάντα σχέση αιτιακής συνάφειας είναι το ίχνος που δημιουργείται σε ένα από αυτά να εμφανίζεται στο άλλο.

10. Στις πρώιμες προσεγγίσεις της σχέσης αιτίου και αποτελέσματος με τη βοήθεια της μεθόδου του ίχνους[6] διατυπώνεται μία αναγκαία συνθήκη για την αιτιακή σχέση. Θεωρώ ότι υπάρχει μία δυσεπίλυτη διάσταση στο Reichenbach ανάμεσα στη θεώρηση της μεθόδου του ίχνους ως αναγκαίας και ως ικανής συνθήκης.

11. Η θεώρηση της διάδοσης του ίχνους ως αναγκαίας συνθήκης μας δίνει ένα κριτήριο διάκρισης ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων. Οι μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων, που αντιστοιχούν σε ψευδο-διαδικασίες, δεν έχουν την ικανότητα να διαδίδουν το ίχνος που δημιουργείται σε κάποιο σημείο τους. Στην κατηγορία των μη πραγματικών ακολουθιών συμβάντων ανήκουν όλες εκείνες οι ακολουθίες που περιγράφουν την κίνηση ενός αντικειμένου με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο κενό.

[5] Για το Russell «μία σειρά έχει "συνέχεια κατά Dedekind" όταν είναι τύπου Dedekind [Dedekindian] και συμπαγής [compact]» (Russell 1920:101). Το να είναι μία σειρά "τύπου Dedekind" σημαίνει να είναι πλήρης, ενώ το να είναι "συμπαγής" σημαίνει να είναι πυκνό σύνολο.

[6] Εδώ αναφερόμαστε τόσο στο *The Philosophy of Space and Time* όσο και σε άλλα έργα του Reichenbach που είναι προγενέστερα του *The Direction of Time.*

2.2 Η πιθανοκρατική προσέγγιση στην αιτιότητα και η αρχή κοινού αιτίου.

Ο Reichenbach εκκινεί από την ιδέα ότι η αιτιακή δομή του κόσμου μπορεί να παρασταθεί ως ένα δίκτυο του οποίου οι κόμβοι του αναπαριστάνουν συμβάντα και οι γραμμές του δικτύου σχέσεις αιτιακής συνάφειας μεταξύ των συμβάντων. Σε σχέση με τη δομή του δικτύου, ο Reichenbach υιοθετεί κάποιες εμπειρικές υποθέσεις οι οποίες εκφράζουν ιδιότητες διάταξης του αιτιακού δικτύου. Αυτές οι ιδιότητες ισχύουν ανεξάρτητα από το ποια είναι η κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας. Για να προσδιορίσουμε την κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας στο δίκτυο θα πρέπει να υιοθετήσουμε επιπλέον υποθέσεις όπως είναι η αρχή κοινού αιτίου. Η βασική θέση του Reichenbach για την πιθανοκρατική προσέγγιση της αιτιότητας είναι ότι οι στατιστικές σχέσεις που διαπιστώνονται ανάμεσα σε συμβάντα επιτρέπουν να κατασκευάσουμε ένα αιτιακό δίκτυο που ικανοποιεί τις ιδιότητες διάταξης και, επιπλέον, οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας σε αυτό έχουν ορισμένη κατεύθυνση.

Το αιτιακό δίκτυο (βλ. Σχήμα 2.2) ικανοποιεί τέσσερις ιδιότητες:

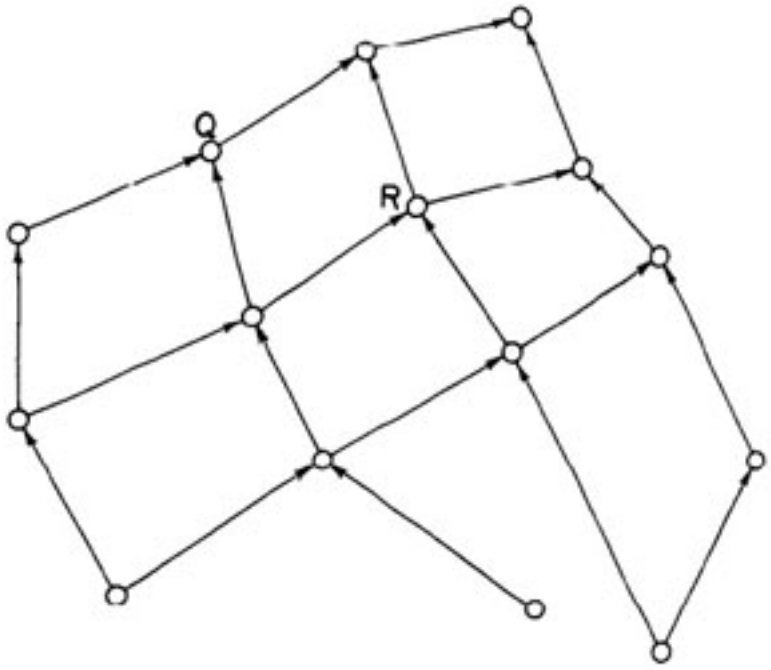
1. Στο δίκτυο υπάρχουν ζεύγη κόμβων που δεν συνδέονται με κάποια γραμμή.

2. Οι γραμμές που συνδέουν συμβάντα του δικτύου έχουν κατεύθυνση, είναι προσανατολισμένες.

3. Αν προσδώσουμε κατεύθυνση σε μία από τις γραμμές που αναπαριστάνουν τις σχέσεις αιτιακής συνάφειας στο δίκτυο, τότε επιλέγεται κατεύθυνση για όλες τις γραμμές του δικτύου.

4. Το αιτιακό δίκτυο είναι ανοικτό - δηλαδή, δεν υπάρχουν σε αυτό κλειστές αιτιακές αλυσίδες.

Η πρώτη ιδιότητα σημαίνει ότι υπάρχουν ζεύγη συμβάντων τα οποία δεν σχετίζονται αιτιακά. Δηλαδή, κανένα από τα συμβάντα του ζεύγους δεν είναι αίτιο του άλλου ή αιτιακός παράγων που επιδρά στο άλλο συμβάν.



Σχ. 2.2 Το αιτιακό δίκτυο. Τα συμβάντα *Q*, *R* δεν έχουν αιτιακή σχέση. Η κατεύθυνση των αιτιακών σχέσεων παριστάνεται με βέλη. Το δίκτυο αποκτά αντίθετη κατεύθυνση αν αναστρέψουμε την κατεύθυνση όλων των βελών. (Reichenbach 1956:37)

Η δεύτερη ιδιότητα προκύπτει από την ασυμμετρία της σχέσης αιτιακής συνάφειας: για κάθε ζεύγος συμβάντων που βρίσκονται σε σχέση αιτιακής συνάφειας μόνο το ένα μπορεί να είναι αίτιο του άλλου ή αιτιακός παράγων που επιδρά στο άλλο συμβάν. Η τρίτη ιδιότητα διάταξης σημαίνει ότι υπάρχει κάποιου είδους συνέπεια ως προς την επιλογή κατεύθυνσης στις διαφορετικές γραμμές. Δεν είναι δυνατόν να αλλάξουμε αυθαίρετα την κατεύθυνση σε μία γραμμή του δικτύου και να έχουμε ένα διαφορετικό δίκτυο που μπορεί να αναπαριστάνει μία διαφορετική αιτιακή κατάσταση του κόσμου. Λόγω αυτής της ιδιότητας το δίκτυο κληρονομεί από τις γραμμές μία καθολική έννοια κατεύθυνσης. Έτσι, καθολικά το δίκτυο έχει δύο δυνατές κατευθύνσεις, όπως και κάθε γραμμή του, που η μία προκύπτει από την άλλη αν αντιστρέψουμε τον προσανατολισμό του συνόλου των γραμμών που συνδέουν τα συμβάντα στο δίκτυο. Τέλος, η τέταρτη ιδιότητα σημαίνει ότι δεν υπάρχει ακολουθία προσανατολισμένων γραμμών που μας οδηγούν από τον ένα κόμβο του δικτύου στο επόμενο, σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους, οι οποίες να αρχίζουν και να τελειώνουν στον ίδιο κόμβο.

Για να κατασκευάσει ένα δίκτυο που να ικανοποιεί αυτές τις τέσσερις ιδιότητες, ο Reichenbach ορίζει για μία τριάδα συμβάντων τη σχέση "(βρίσκεται) αιτιακώς ανάμεσα" (causal between relation), με τη βοήθεια στατιστικών σχέσεων (1956:190).

Για τρία συμβάντα A_1, A_2, A_3 , θα λέμε ότι το A_2 βρίσκεται *αιτιακώς ανάμεσα* στα A_1, A_3, btw(A_1, A_2, A_3), αν οι ακόλουθες σχέσεις ισχύουν:

$$1 > \mathrm{P}(A_3 \,|\, A_2) > \mathrm{P}(A_3 \,|\, A_1) > \mathrm{P}(A_3) > 0 \qquad (2.2.1)$$

$$1 > \mathrm{P}(A_1 \,|\, A_2) > \mathrm{P}(A_1 \,|\, A_3) > \mathrm{P}(A_1) > 0 \qquad (2.2.2)$$

$$\mathrm{P}(A_3 \,|\, A_1 \,\&\, A_2) = \mathrm{P}(A_3 \,|\, A_2) \qquad (2.2.3)$$

Οι στατιστικές σχέσεις (2.2.1) - (2.2.3) αναφέρονται σε τύπους συμβάντων που ο Reichenbach ονομάζει *συνοριζόμενες κλάσεις* (*codefined classes*) συμβάντων.

> Λέμε ότι μία κλάση *A* είναι συνοριζόμενη αν είναι δυνατόν η κατάταξη ενός συμβάντος *x* στην κλάση *A* να συμπίπτει με το συμβάν *x*. Με άλλα λόγια, παρατηρώντας το *x* θα πρέπει να είμαστε σε θέση να πούμε αν το *x* ανήκει στην *A*, και θα πρέπει να μην είναι αναγκαίο να γνωρίζουμε για το σκοπό αυτής της κατάταξης εάν συγκεκριμένα άλλα συμβάντα *y, z, …* έλαβαν χώρα νωρίτερα ή αργότερα, ή ταυτόχρονα σε απομακρυσμένους τόπους… Από λογική άποψη, η συνοριζόμενη κλάση είναι ένα μονοθέσιο κατηγόρημα που δεν προκύπτει με συστολή πολυθέσιων κατηγορημάτων. (Reichenbach 1956:187)

Επίσης, οι πιθανότητες που αναφέρονται στις στατιστικές σχέσεις ερμηνεύονται ως σχετικές συχνότητες εμφάνισης συμβάντων που ανήκουν σε μία ορισμένη κλάση σε ένα μεγάλο αριθμό παρατηρήσεων. Τέλος, υπάρχει ένας ακόμα περιορισμός που αφορά στις τριάδες ενικών συμβάντων για τις οποίες μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι ισχύει η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα". Ο Reichenbach δεν θέλει να συγκρίνουμε ενικά συμβάντα τα οποία είναι χωροχρονικώς απομακρυσμένα, μολονότι ενδέχεται να ανήκουν σε κλάσεις που ικανοποιούν τις παραπάνω στατιστικές σχέσεις. Τα συμβάντα που συγκρίνουμε θα πρέπει να είναι χωροχρονικώς γειτονικά και μόνο μέσω άλλων ενικών συμβάντων που ανήκουν σε διαφορετικές κλάσεις (δηλαδή, άλλων τριάδων συμβάντων) μπορούμε να συγκρίνουμε χωροχρονικώς απομακρυσμένα συμβάντα. Με άλλα λόγια, το αιτιακό δίκτυο συγκροτείται τοπικά μέσω της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα".

Η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα" αναφέρεται σε χωροχρονικώς γειτονικά συμβάντα που ανήκουν στις κλάσεις, A_1, A_2, A_3 και μας λέει ότι αν κάποιο από αυτά, π.χ. το συμβάν A_2 , έχει αιτιακή σχέση με καθένα από τα άλλα δύο συμβάντα, τότε αυτό βρίσκεται αιτιακώς ανάμεσα στα συμβάντα A_1 και A_3: $btw(A_1, A_2, A_3)$. Οι στατιστικές σχέσεις του ορισμού της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα" ερμηνεύονται ως εξής:

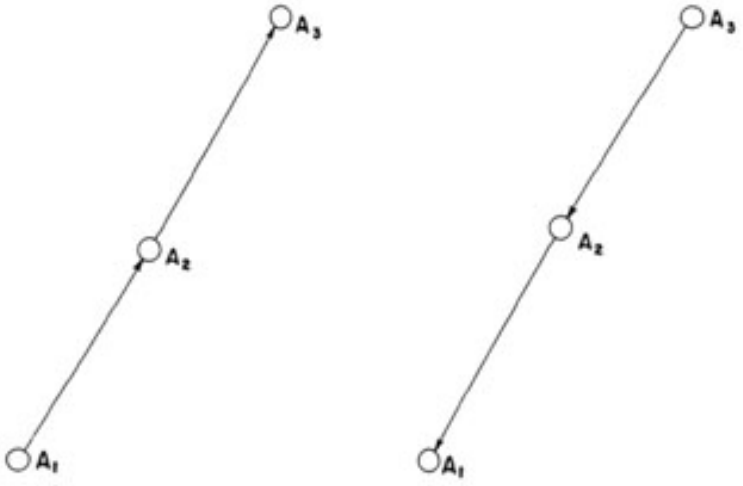
1. Σε μία δεδομένη τριάδα συμβάντων για να υπάρχει κάποιο συμβάν που να είναι αιτιακώς ανάμεσα στα άλλα δύο, θα πρέπει τα συμβάντα ανά ζεύγη να εκδηλώνουν σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας[7]. Δηλαδή, η πιθανότητα δύο συμβάντα να λάβουν χώρα μαζί να είναι μεγαλύτερη από την πιθανότητα που θα αποδίδαμε σε μία τυχαία σύμπτωση.
2. Η υπό συνθήκη πιθανότητα να λάβει χώρα ένα συμβάν A_3 δεδομένου ενός συμβάντος A_2 με το οποίο υπάρχει σχέση αιτιακής συνάφειας, είναι μεγαλύτερη από την υπό συνθήκη πιθανότητα του A_3 δεδομένου ενός συμβάντος A_1 με το οποίο δεν υπάρχει σχέση αιτιακής συνάφειας.
3. Η υπό συνθήκη πιθανότητα να λάβει χώρα ένα συμβάν A_3 με δεδομένο ένα συμβάν A_2 με το οποίο υπάρχει σχέση αιτιακής συνάφειας, δεν μεταβάλλεται αν θεωρήσουμε επίσης ως δεδομένο ότι έλαβε χώρα ένα συμβάν A_1 το οποίο δεν έχει σχέση αιτιακής συνάφειας με το A_3.

Ο Reichenbach αποδεικνύει δύο βασικές ιδιότητες της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα", με βάση τις στατιστικές σχέσεις του ορισμού. Η πρώτη ιδιότητα μας λέει για μία δεδομένη τριάδα συμβάντων η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα" ικανοποιείται με μοναδικό τρόπο: μόνο ένα συμβάν της τριάδας μπορεί να είναι αιτιακώς ανάμεσα στα άλλα δύο. Η δεύτερη ιδιότητα μάς λέει ότι για μία δεδομένη τριάδα συμβάντων η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα" είναι μοναδική ως προς τα ακραία συμβάντα – δηλαδή, ισχύει

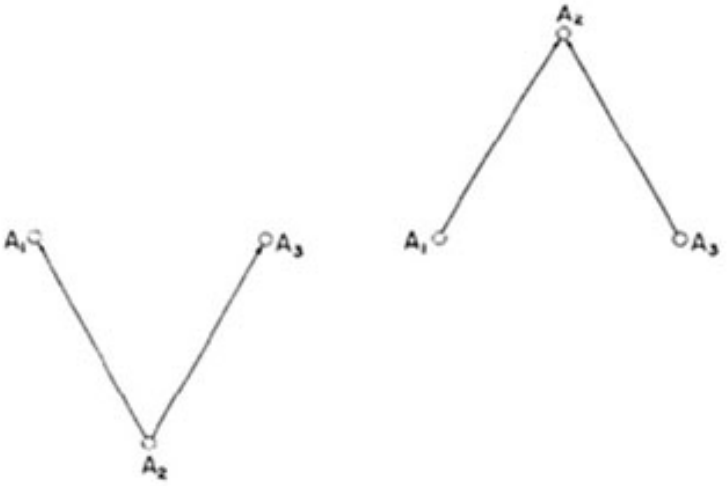
[7] Ο όρος "στατιστική συνάφεια" (statistical relevance) χρησιμοποιείται από τους Reichenbach και Salmon για να εκφράσει το γεγονός ότι η υπό συνθήκη πιθανότητα ενός συμβάντος δεδομένου κάποιου άλλου συμβάντος είναι διαφορετική από την ολική πιθανότητα που έχει το πρώτο συμβάν. Η στατιστική συνάφεια διακρίνεται σε θετική στατιστική συνάφεια, εφόσον η υπό συνθήκη πιθανότητα είναι μεγαλύτερη από την ολική πιθανότητα, και σε αρνητική στατιστική συνάφεια, στην αντίθετη περίπτωση. Στη βιβλιογραφία, εναλλακτικά του όρου "στατιστική συνάφεια" χρησιμοποιείται ο όρος "στατιστική συσχέτιση" (statistical correlation). Στην εργασία χρησιμοποιούμε και τους δύο όρους χωρίς διαφοροποίηση.

$btw(A_1, A_2, A_3) \Rightarrow btw(A_3, A_2, A_1)$. Για να ερμηνεύσουμε αυτές τις ιδιότητες ας θεωρήσουμε μία αιτιακή αλυσίδα που συγκροτείται από τα τρία συμβάντα A_1, A_2, A_3, δηλαδή μία ακολουθία προσανατολισμένων γραμμών που μας οδηγούν από το ένα συμβάν στο επόμενο, σύμφωνα με τον προσανατολισμό τους. Αν παραβιαστεί η πρώτη ιδιότητα τότε η αιτιακή αλυσίδα θα είναι κλειστή, πράγμα που δεν μπορεί να ισχύει στο αιτιακό δίκτυο. Η δεύτερη ιδιότητα μάς λέει ότι αν εναλλάξουμε τα ακραία συμβάντα της αιτιακής αλυσίδας η σχέση παραμένει αναλλοίωτη. Όμως η εναλλαγή των ακραίων συμβάντων συνεπάγεται αλλαγή κατεύθυνσης των σχέσεων αιτιακής συνάφειας. Άρα, η δεύτερη ιδιότητα μάς λέει ότι αν αλλάξει η κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας σε μία αιτιακή αλυσίδα, η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα" παραμένει αναλλοίωτη.

Ωστόσο, η αιτιακή αλυσίδα δεν αποτελεί τη μοναδική δυνατή διάταξη τριών συμβάντων. Στις παραπάνω προτάσεις (1) – (3), ενώ ερμηνεύσαμε τις στατιστικές σχέσεις με βάση τις σχέσεις αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στα συμβάντα μίας τριάδας, δεν θεωρήσαμε ως δεδομένο ότι οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας έχουν συγκεκριμένη κατεύθυνση, δηλαδή δεν διακρίναμε ανάμεσα σε αίτιο και αποτέλεσμα. Ούτε βεβαίως η κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας προκύπτει από τις στατιστικές σχέσεις που κάποια συμβάντα ικανοποιούν χωρίς επιπλέον υποθέσεις. Αυτό σημαίνει ότι για μία τριάδα συμβάντων A_1, A_2, A_3 για την οποία ισχύει η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα", $btw(A_1, A_2, A_3)$, υπάρχουν διαφορετικές δυνατές διατάξεις οι οποίες φαίνονται στα σχήματα 2.3, 2.4. Παρατηρείστε ότι μπορούμε να διακρίνουμε ανάμεσα στις διατάξεις που τα συμβάντα συγκροτούν αιτιακή αλυσίδα (Σχήμα 2.3) και στις άλλες δύο διατάξεις των συμβάντων (Σχήμα 2.4) με βάση τη σχετική κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας στο συμβάν A_2. Στις αιτιακές αλυσίδες οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας έχουν την ίδια κατεύθυνση ενώ στις διατάξεις κοινού αιτίου ή κοινού αποτελέσματος έχουν αντίθετες κατευθύνσεις. Αυτή η διάκριση δεν μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα" διότι σε όλες τις περιπτώσεις που παριστάνονται στα σχήματα 2.3 και 2.4 το συμβάν A_2 βρίσκεται αιτιακώς ανάμεσα στα A_1 και A_3. Το γεγονός αυτό σημαίνει ότι δεν αρκεί η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα" για την κατασκευή του αιτιακού δικτύου.



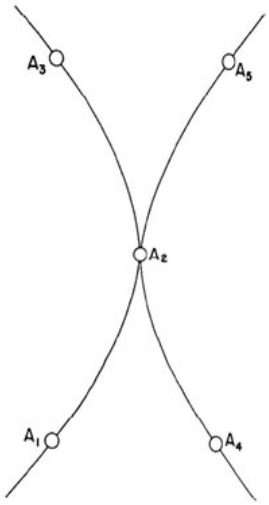
Σχ. 2.3 Αιτιακές αλυσίδες τριών συμβάντων. Οι αιτιακές σχέσεις έχουν αντίθετη κατεύθυνση. (Reichenbach 1956:189)



Σχ. 2.4 Το A_2 είναι αιτιακώς ανάμεσα στο A_1 και στο A_3. Στην αριστερή διάταξη είναι το κοινό αίτιο και στη δεξιά διάταξη το κοινό αποτέλεσμα. (Reichenbach 1956:194)

Η διάκριση των δυνατών διατάξεων τριών συμβάντων A_1, A_2, A_3 για τα οποία ισχύει $btw(A_1, A_2, A_3)$, με βάση τη σχετική κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας μπορεί να γίνει με τη βοήθεια της *αρχής της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης* (principle of local comparability of time order). Σύμφωνα με αυτή την αρχή «αν δύο διαδικασίες συμπλέκονται χωροχρονικά θεωρούμε δυνατή τη σύγκριση

των χρονικών κατευθύνσεων τους. Η πρόταση ότι σε μία δεδομένη περιγραφή, δύο διαδικασίες έχουν την ίδια χρονική κατεύθυνση, θεωρείται παρατηρησιακά επαληθεύσιμη» (Reichenbach 1956:35). Για να κατανοήσουμε την αρχή, ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα του ίδιου του Reichenbach (1956:195). Έστω δύο σφαίρες που συγκρούονται κάποια χρονική στιγμή, σε κάποιο σημείο του χώρου, (βλ. Σχήμα 2.5).



Σχήμα 2.5 Συμβάντα στην περιοχή του A_2 που δείχνουν την τοπική συγκρισιμότητα της χρονικής τάξης. (Reichenbach 1956:195)

Η κίνηση της κάθε σφαίρας αποτελεί μία διαδικασία και το συμβάν A_2 αναπαριστάνει τη συμπλοκή των δύο διαδικασιών, δηλαδή, γεωμετρικά είναι το σημείο όπου οι δύο διαδικασίες συμπίπτουν χωροχρονικά. Το ζητούμενο είναι να προσδιορίσουμε τη σχετική κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας για οποιαδήποτε δύο ζεύγη συμβάντων,

$$(A_2, A_i) \text{ και } (A_2, A_j) \quad \text{με } i, j = 1,3,4,5 \text{ και } i \neq j$$

Η αρχή της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης υποστηρίζει ότι αυτό είναι εφικτό στη βάση αποκλειστικά παρατηρησιακών δεδομένων.

Συγκεκριμένα, ο Reichenbach υποστηρίζει ότι είναι παρατηρησιακώς δυνατό να διαπιστώσουμε ποια από τα ζεύγη συμβάντων,

$$(A_1, A_3), (A_1, A_4), (A_1, A_5),$$

$$(A_3, A_4), (A_3, A_5), (A_4, A_5)$$

συμπίπτουν χωροχρονικά, κατά προσέγγιση. Η παρατήρηση της χωροχρονικής σύμπτωσης δύο συμβάντων συνίσταται στη διαπίστωση ότι αυτά, *και μόνον αυτά*, λαμβάνουν χώρα μαζί σε κάποια χωροχρονική περιοχή. Έστω ότι διαπιστώνουμε ότι τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα μαζί και συμπίπτουν χωροχρονικά κατά προσέγγιση είναι τα συμβάντα (A_1, A_4) και τα (A_3, A_5) και όχι κάποιο από τα ζεύγη $(A_1, A_3), (A_1, A_5), (A_3, A_4), (A_4, A_5)$. Αυτό σημαίνει ότι η παρατήρηση οποιουδήποτε άλλου ζεύγους συμβάντων εκτός των (A_1, A_4) και (A_3, A_5) συμπεριλαμβάνει και την παρατήρηση και του συμβάντος A_2 στην χωροχρονική γειτονιά του οποίου λαμβάνουν χώρα όλα τα συμβάντα. Πιο συγκεκριμένα, στο παράδειγμα των δύο σφαιρών που συγκρούονται μπορούμε να διαπιστώσουμε την κατά προσέγγιση χωροχρονική σύμπτωση των δύο σφαιρών πριν ή και μετά τη σύγκρουση χωρίς η παρατήρηση να συμπεριλαμβάνει και το συμβάν της σύγκρουσης. Αντιθέτως, κάθε παρατήρηση που διαπιστώνει τη χωροχρονική γειτονία συμβάντων που αναπαριστούν την κίνηση της ίδιας σφαίρας πριν και μετά τη σύγκρουση περιλαμβάνει και το συμβάν της σύγκρουσης των δύο σφαιρών. Εφόσον, διαπιστώσουμε ότι τα συμβάντα (A_1, A_4) συμπίπτουν χωροχρονικώς κατά προσέγγιση μπορούμε να συμπεράνουμε τη σχετική κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στο συμβάν A_2 και στα συμβάντα A_1 και A_4: το A_2 είναι αιτιακώς ανάμεσα στα A_1 και A_4 και οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στο A_2 και στο A_1 καθώς και στο A_2 και στο A_4 έχουν αντίθετη κατεύθυνση. Σε αντίστοιχο συμπέρασμα καταλήγουμε και για τη σχετική κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στο συμβάν A_2 και στα συμβάντα A_3 και A_5.

Στο πλαίσιο της στατιστικής θεώρησης του αιτιακού δικτύου, εκτός από την έννοια της κατά προσέγγιση χωροχρονικής σύμπτωσης, υπάρχει άλλη μία προϋπόθεση για την εφαρμογή της αρχής της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης. Αυτή αφορά στις ανισότητες (2.2.1), (2.2.2) που αναφέρονται στον ορισμό της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα". Συγκεκριμένα, ο Reichenbach (1956:194) παρατηρεί ότι αν μία τριάδα συμβάντων A_1, A_2, A_3 είναι πολύ κοντά, όπως απαιτείται για να εξακριβώσουμε αν συμπίπτουν κατά προσέγγιση, τότε οι πιθανότητες

$\mathrm{P}(A_3|A_2)$, $\mathrm{P}(A_3|A_1)$ και $\mathrm{P}(A_1|A_2)$, $\mathrm{P}(A_1|A_3)$ θα είναι σχεδόν ίσες με μονάδα και θα είναι πολύ δύσκολο να διαπιστώσουμε τις ανισοτικές σχέσεις που διατυπώνονται στις συνθήκες (2.2.1) , (2.2.2) και ως εκ τούτου να συναγάγουμε ότι ισχύει η σχέση "αιτιακώς ανάμεσα". Για να υπερβεί αυτή τη δυσκολία ο Reichenbach θέτει ως προϋπόθεση τη δυνατότητα επικύρωσης αυτών των ανισοτικών σχέσεων, μολονότι όλες οι πιθανότητες προσεγγίζουν τη μονάδα.

Με τη βοήθεια της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα" και της αρχής της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα δίκτυο συμβάντων το οποίο ικανοποιεί τις ιδιότητες διάταξης που αναφέραμε στην αρχή της υποενότητας 2.2 και πιο συγκεκριμένα επιδέχεται δύο δυνατές καθολικές κατευθύνσεις. Για να επιλέξουμε μία από τις δύο δυνατές κατευθύνσεις χρειάζεται μία εμπειρική υπόθεση που να μας λέει ότι το αιτιακό δίκτυο του κόσμου *μας* έχει μία συγκεκριμένη κατεύθυνση. Ο Reichenbach διατυπώνει αυτή την εμπειρική υπόθεση με τη βοήθεια της έννοιας "δίκρανο σύζευξης".

Τρία συμβάντα A,B,C λέμε ότι αποτελούν *δίκρανο σύζευξης* (conjunctive fork) $<A,C,B>$ αν ικανοποιούν τις παρακάτω στατιστικές σχέσεις:

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B|C) = \mathrm{P}(A|C)\mathrm{P}(B|C) \tag{2.2.4}$$

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B|\tilde{C}) = \mathrm{P}(A|\tilde{C})\mathrm{P}(B|\tilde{C}) \tag{2.2.5}$$

$$\mathrm{P}(A|C) > \mathrm{P}(A|\tilde{C}) \tag{2.2.6}$$

$$\mathrm{P}(B|C) > \mathrm{P}(B|\tilde{C}) \tag{2.2.7}$$

Παρατηρείστε ότι σε ένα δίκρανο σύζευξης $<A,C,B>$, αν τα συμβάντα A,B,C είναι χωροχρονικώς γειτονικά και όλες οι υπό συνθήκη πιθανότητες είναι μη μηδενικές, τότε ισχύει $btw(A,C,B)$. Από τη (2.2.4) προκύπτει άμεσα η σχέση (2.2.3) για A_1=A, A_2=C και A_3=B. Για να δείξουμε ότι ισχύει η (2.2.1) αρκεί να δείξουμε τις εξής ανισότητες:

$$\mathrm{P}(B|A) > \mathrm{P}(B) \tag{2.2.8}$$

$$\mathrm{P}(B|C) > \mathrm{P}(B|A) \tag{2.2.9}$$

$$\mathrm{P}(B|C) > \mathrm{P}(B) \tag{2.2.10}$$

Ο Reichenbach απέδειξε ότι οι σχέσεις (2.2.4)-(2.2.7) αποτελούν ικανή συνθήκη για να ισχύει η (2.2.8). Για να δείξουμε τη (2.2.9) αναλύουμε τη διαφορά $\mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|A)$ με βάση το νόμο ολικής πιθανότητας,

$$\mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|A) = \mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|C \,\&\, A)\mathrm{P}(C|A) - \mathrm{P}(B|\tilde{C} \,\&\, A)\mathrm{P}(\tilde{C}|A)$$

λόγω των (2.2.4) και (2.2.5) έχουμε,

$$\mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|A) = \mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|C)\mathrm{P}(C|A) - \mathrm{P}(B|\tilde{C})\mathrm{P}(\tilde{C}|A)\,.$$

Με τη βοήθεια της (2.2.7) προκύπτει η ανισότητα,

$$\mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|A) = \left\{\mathrm{P}(B|C) - \mathrm{P}(B|\tilde{C})\right\}\mathrm{P}(\tilde{C}|A) > 0$$

Άρα, η (2.2.9) ισχύει. Τέλος, η (2.2.10) προκύπτει άμεσα από το νόμο της ολικής πιθανότητας,

$$\mathrm{P}(B) = \mathrm{P}(B|C)\mathrm{P}(C) + \mathrm{P}(B|\tilde{C})\mathrm{P}(\tilde{C})\,,$$

με τη βοήθεια της (2.2.7). Με αντίστοιχο τρόπο μπορούμε να δείξουμε ότι από τις (2.2.4)-(2.2.7) προκύπτουν και οι ανισότητες (2.2.2).

Το αντίστροφο της πρότασης που δείξαμε δεν γνωρίζουμε αν ισχύει γενικά. Διότι, ενώ οι σχέσεις (2.2.4) και (2.2.6), (2.2.7) προκύπτουν άμεσα από τις στατιστικές σχέσεις του ορισμού της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα", αν θέσουμε A_1=A, A_2=C και A_3=B, δε γνωρίζουμε αν και η η (2.2.5) να συναχθεί παραγωγικά από τις ίδιες σχέσεις.

Ο Reichenbach χρησιμοποιεί την έννοια του δίκρανου σύζευξης για να αναλύσει τις διατάξεις κοινού αιτίου και κοινού αποτελέσματος που παριστάνονται στο σχήμα 2.4. Σε αυτές τις περιπτώσεις δύο συμβάντα A, B (A_1 και A_3 στο σχήμα) που δε βρίσκονται σε αιτιακή σχέση εκδηλώνουν μία μη πιθανή σύμπτωση[8], δηλαδή, λαμβάνουν χώρα μαζί πιο συχνά απ' ό,τι αν ήταν στατιστικώς ανεξάρτητα. Στο πλαίσιο της στατιστικής περιγραφής η μη πιθανή σύμπτωση δύο συμβάντων εκφράζεται από το γεγονός ότι τα δύο συμβάντα εκδηλώνουν θετική στατιστική σχέση:

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B) > \mathrm{P}(A)\mathrm{P}(B) \qquad (2.2.11)$$

Σε αυτές τις περιπτώσεις, υποστηρίζει ο Reichenbach, υπάρχει ένα τρίτο συμβάν C που είναι κοινό αίτιο των A και B, συγκροτεί με αυτά δίκρανο σύζευξης και εξηγεί τη θετική στατιστική σχέση. Αυτή είναι *η αρχή του κοινού αιτίου*.

Πρέπει να επισημάνουμε ότι για τον Reichenbach η ύπαρξη κοινού αιτίου C δύο συμβάντων A και B *δεν συνεπάγεται* ότι τα τρία συμβάντα συγκροτούν δίκρανο σύζευξης (Reichenbach 1956:163). Για παράδειγμα, θεωρείστε τη ρίψη δύο ζαριών. Το συμβάν αυτό είναι κοινό αίτιο για να "φέρουμε εξάρες". Ωστόσο, τα δύο συμβάντα που ορίζονται με τα αντίστοιχα αποτελέσματα που εμφανίζουν τα δύο ζάρια είναι στατιστικώς ανεξάρτητα και κατά συνέπεια δεν συγκροτούν με το κοινό αίτιο δίκρανο σύζευξης. Επίσης, η ύπαρξη ενός συμβάντος που συγκροτεί με τα A και B δίκρανο σύζευξης δεν αποτελεί ικανή συνθήκη για να θεωρήσουμε ότι το συμβάν αυτό αποτελεί κοινό αίτιο που εξηγεί τη μη πιθανή σύμπτωση των A και B. Σύμφωνα με τον Reichenbach, οι στατιστικές σχέσεις με τις οποίες ορίζεται η έννοια του δίκρανου σύζευξης ικανοποιούνται και στις περιπτώσεις που το συμβάν είναι κοινό αποτέλεσμα των A και B. Άρα, οι στατιστικές σχέσεις από μόνες τους, δεν επαρκούν για τη διάκριση ανάμεσα σε διατάξεις κοινού αιτίου και κοινού αποτελέσματος στο αιτιακό δίκτυο. Επομένως, για τον Reichenbach η έννοια του κοινού αιτίου είναι

[8] Ο J. Uffink (1999) επισημαίνει, σε σχέση με τον όρο «μη πιθανή σύμπτωση», ότι ενώ υιοθετείται από τον Reichenbach, πουθενά δεν "μεταφράζεται" στην προφανή μαθηματική σχέση που θα μπορούσε να τον εκφράσει: $\mathrm{P}(A \,\&\, B) << 1$. Προφανώς, ο όρος δεν κατανοείται με την κυριολεκτική σημασία, ότι η πιθανότητα είναι μικρή, αλλά για να εκφράσει ότι η σύμπτωση λαμβάνει χώρα με μη αναμενόμενη, «ξαφνική», συχνότητα.

ανεξάρτητη από την έννοια που περιγράφεται με την έκφραση "το συμβάν που βρίσκεται αιτιακώς ανάμεσα σε δύο συμβάντα και συγκροτεί με αυτά δίκρανο σύζευξης".

Μάλιστα, ο Salmon προχωράει ένα βήμα παραπέρα. Ενώ ο Reichenbach υποστηρίζει ότι οι μαθηματικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης αδυνατούν να διακρίνουν τις διατάξεις κοινού αιτίου από τις διατάξεις κοινού αποτελέσματος, ο Salmon υποστηρίζει με τη βοήθεια του παραδείγματος του Ellis Crasnow, ότι ένα συμβάν ενδέχεται να σχηματίζει μαζί με δύο άλλα συμβάντα που εκδηλώνουν σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας, δίκρανο σύζευξης, χωρίς να είναι κοινό αίτιο ή κοινό αποτέλεσμα αυτών.

> Θεωρείστε ότι κάποιος άνθρωπος φτάνει στο γραφείο του στις 9.00 π.μ., φτιάχνει καφέ και κάθεται να διαβάσει την πρωϊνή εφημερίδα. Κάποιες φορές, ωστόσο, φτάνει γρηγορότερα, στις 8.00 π.μ., και αυτά τα πρωινά η γραμματέας του φτάνει κάπως νωρίτερα και ετοιμάζει μία φρέσκια κανάτα καφέ. Επιπλέον, ακριβώς αυτά τα πρωϊνά, συναντιέται στο γραφείο του με έναν από τους συνεταίρους του που κανονικά εργάζεται σε διαφορετική τοποθεσία. Λοιπόν, αν θεωρήσουμε το γεγονός ότι ο καφές είναι ήδη έτοιμος όταν φτάνει (A) και το γεγονός ότι ο συνεταίρος του εμφανίζεται εκείνο το πρωϊνό (B), ως την προς εξήγηση σύμπτωση, τότε, θα μπορούσε να επισημανθεί ότι αυτά τα πρωινά παίρνει το λεωφορείο των 7.00 π.μ. (C), ενώ τα άλλα πρωινά συνήθως παίρνει το λεωφορείο των 8.00 π.μ. ($\tilde{C}$). Σε αυτό το παράδειγμα, είναι εύλογο να υποθέσουμε ότι τα *A,B* και *C* συγκροτούν ένα δίκρανο σύζευξης που ικανοποιεί τις σχέσεις (1)-(4), [(2.2.4)-(2.2.7)], αλλά προφανώς το *C* δεν μπορεί να θεωρηθεί αίτιο ούτε του *A* ούτε του *B*. Το πραγματικό αίτιο είναι ένα εντελώς διαφορετικό συμβάν *C΄*, και συγκεκριμένα, το τηλεφωνικό ραντεβού που έκλεισε την προηγούμενη μέρα η γραμματέας του. Το *C΄* είναι, πραγματικά, το κοινό αίτιο των *A,B* και *C*. (Salmon 1984:168)

Αυτή η θέση του Salmon απομακρύνει ακόμα περισσότερο την έννοια του κοινού αιτίου από τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Το πρόβλημα της μη διάκρισης κοινού αιτίου – κοινού αποτελέσματος από τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης μπορεί να επιλυθεί αν συμπεριλάβουμε στον προσδιορισμό του κοινού αιτίου εκτός από τις στατιστικές σχέσεις και τους χωροχρονικούς προσδιορισμούς των συμβάντων. Έτσι, απαιτούμε το κοινό αίτιο να μην ικανοποιεί μόνο στατιστικές σχέσεις αλλά και να είναι χρονικά πρότερο των συσχετιζόμενων συμβάντων. Ωστόσο, το παράδειγμα του Ellis Crasnow δείχνει ότι μία συνθήκη του τύπου "στατιστικές σχέσεις + χρονικές σχέσεις" δεν είναι αρκετή. Γι' αυτό ο Salmon υποστηρίζει ότι αυτό που απαιτείται για να χαρακτηρίσουμε ένα συμβάν *C* που σχηματίζει δίκρανο σύζευξης με δύο συμβάντα *A,B* κοινό αίτιο αυτών είναι να

υπάρχουν δύο *ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες* που να διαδίδουν αιτιακή επίδραση από το *C* στα *A,B* αντίστοιχα.

Είναι ακόμη σημαντικό να κατανοήσουμε τι σημαίνει "εξήγηση της θετικής στατιστικής συνάφειας που εκδηλώνουν δύο συμβάντα". Αυτό που προκύπτει με βάση τη θεωρία πιθανοτήτων είναι ότι αν τρία συμβάντα συγκροτούν ένα δίκρανο σύζευξης $<A,C,B>$ τότε ισχύει η (2.2.11). Άρα, θα μπορούσε να υποστηρίξει κάποιος ότι η ουσία της εξήγησης της θετικής στατιστικής συνάφειας που εκδηλώνουν δύο συμβάντα συνίσταται στην παραγωγική συναγωγή της στατιστικής σχέσης (2.2.11) με βάση κάποιες προκείμενες. Όμως σύμφωνα με το Reichenbach «όταν λέμε ότι το κοινό αίτιο *C* εξηγεί τη συχνή σύμπτωση, δεν αναφερόμαστε μόνο στη δυνατότητα να συνάγουμε παραγωγικά τη σχέση (1) [(2.2.11)], αλλά και στο γεγονός ότι σε σχέση με το αίτιο *C* τα συμβάντα *A* και *B* είναι αμοιβαίως ανεξάρτητα: εδώ, *η στατιστική εξάρτηση* συνάγεται παραγωγικά από την ανεξαρτησία. Το κοινό αίτιο είναι ο συνδετικό κρίκος που μετασχηματίζει την ανεξαρτησία σε εξάρτηση» (Reichenbach 1956:159-160). Έτσι, αν θεωρήσουμε ως δεδομένη την ύπαρξη του κοινού αιτίου, ή την απουσία αυτού, τότε τα συμβάντα *A*,*B* λαμβάνουν χώρα μαζί με τυχαίο τρόπο διότι δεν υπάρχει κάποιος άλλος παράγοντας – συμβάν που να προκαλεί τη συστηματική τους σύμπτωση. Η παραγωγική συναγωγή της θετικής στατιστικής συνάφειας εκφράζει στο μαθηματικό πλαίσιο τη μετατροπή της τυχαίας σύμπτωσης δύο συμβάντων, σε συστηματική σύμπτωση αυτών λόγω της ύπαρξης του κοινού αιτίου. Μπορούμε λοιπόν να συνοψίσουμε ως εξής την έννοια της εξήγησης της μη πιθανής σύμπτωσης δύο συμβάντων *A*, *B* ως εξής:

> (I) Η εξήγηση της θετικής στατιστικής συνάφειας δύο συμβάντων *A*, *B* συνίσταται στην ύπαρξη ενός τρίτου συμβάντος *C* με το οποίο ορίζεται μία διαμέριση της στατιστικής συλλογής έτσι ώστε (α) η συσχέτιση των *A*,*B* να εξαφανίζεται σε κάθε μία από τις υποσυλλογές που προκύπτουν από τη διαμέριση και (β) η θετική στατιστική συνάφεια των *A,B* να συνάγεται παραγωγικά από τη συνθήκη (α) μαζί με επιπλέον συνθήκες που ικανοποιούν οι πιθανότητες που αποδίδονται στα συμβάντα *A,B,C*[9].

[9] Η διατύπωση αυτή τονίζει τα βασικά χαρακτηριστικά που προϋποθέτει ο Reichenbach για την εξήγηση μίας σχέσης θετικής στατιστικής συνάφειας. Θα μπορούσαμε να αναφέρουμε ρητά τη

Η απαίτηση τα συμβάντα *A,B,C* να συγκροτούν δίκρανο σύζευξης <*A,C,B*>, αποτελεί ικανή συνθήκη για να εξηγήσουμε τη θετική στατιστική συνάφεια των *A,B*.

Αυτή η ερμηνεία που δώσαμε για την εξήγηση της θετικής στατιστικής συνάφειας δύο συμβάντων είναι μία στατιστική ερμηνεία η οποία δεν αναφέρεται στις σχέσεις αιτιακής συνάφειας που συνδέουν το *C* με τα συσχετιζόμενα συμβάντα *A,B*. Όπως ήδη αναφέραμε ο Reichenbach υποστηρίζει ότι και το κοινό αποτέλεσμα *E* δύο συμβάντων ενδέχεται να συγκροτεί με τα *A,B* δίκρανο σύζευξης και, κατά συνέπεια, στην βάση όσων αναφέραμε, να εξηγεί τη θετική στατιστική συνάφεια που εκδηλώνουν. Ωστόσο, η εξήγηση με όρους κοινού αποτελέσματος αποτελεί για το Reichenbach τελεολογική εξήγηση - τα συμβάντα *A,B* εκδηλώνουν θετική στατιστική συνάφεια ένεκα του να λάβει χώρα ένα συμβάν *E* – και ως τέτοια απορρίπτεται, διότι, όπως υποστηρίζει, τα τελικά αίτια είναι ασύμβατα με το δεύτερο νόμο της θερμοδυναμικής (Reichenbach 1956:162). Επομένως, θα πρέπει καταρχήν να περιορίσουμε τις αποδεκτές εξηγήσεις της θετικής στατιστικής συνάφειας δύο συμβάντων στις αιτιακές εξηγήσεις και αυτό μπορεί να γίνει αν απαιτήσουμε το *C* να είναι κοινό αίτιο:

> (II) Η εξήγηση της θετικής στατιστικής συνάφειας δύο συμβάντων *A*, *B* συνίσταται στην ύπαρξη ενός τρίτου συμβάντος *C* με το οποίο ορίζεται μία διαμέριση της στατιστικής συλλογής έτσι ώστε (α) η συσχέτιση των *A*,*B* να εξαφανίζεται σε κάθε μία από τις υποσυλλογές που προκύπτουν από τη διαμέριση και (β) η θετική στατιστική συνάφεια των *A,B* να συνάγεται παραγωγικά από τη συνθήκη (α) μαζί με επιπλέον συνθήκες που ικανοποιούν πιθανότητες που αποδίδονται στα συμβάντα *A,B,C* , (γ) το *C* να είναι κοινό αίτιο των *A* και *B*.

Ο Salmon δεν αποδέχεται ότι αυτή η προσέγγιση για την εξήγηση της θετικής στατιστικής συνάφειας που εκδηλώνουν δύο συμβάντα που δεν έχουν αιτιακή συνάφεια, είναι η μοναδική εξήγηση που μπορεί να διατυπωθεί με όρους κοινού αιτίου. Συγκεκριμένα, θεωρεί ότι δύο συμβάντα μπορεί να εκδηλώνουν θετική

συνθήκη που ικανοποιεί το κοινό αίτιο, δηλαδή, ότι αυξάνει την πιθανότητα να λάβουν χώρα τα *A* και *B*, και να θεωρήσουμε ως πόρισμα την παραγωγική συναγωγή της σχέσης θετικής στατιστικής συνάφειας. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση η παραγωγική συναγωγή του αιτίου θα "κρύβονταν" στις σχέσεις του μαθηματικού μοντέλου του κοινού αιτίου.

στατιστική συνάφεια, να υπάρχει κοινό αίτιο και τα συμβάντα αυτά να μην είναι στατιστικώς ανεξάρτητα ως προς το κοινό αίτιο. Δηλαδή, το κοινό αίτιο να μην είναι «ο συνδετικός κρίκος που μετασχηματίζει την ανεξαρτησία σε εξάρτηση», όπως υποστηρίζει ο Reichenbach (1956:160). Για παράδειγμα, στο παιχνίδι του μπιλιάρδου, ας υποθέσουμε ότι δύο σφαίρες, η λευκή και το νούμερο οκτώ βρίσκονται πάνω στο τραπέζι. Υποθέτουμε επίσης ότι οι σφαίρες έχουν τέτοια διάταξη που αν επιχειρήσουμε ένα κτύπημα στη λευκή σφαίρα που θα προκαλέσει κρούση των δύο σφαιρών (C) και θα βάλει τη σφαίρα νούμερο 8 σε μία ορισμένη τρύπα του τραπεζιού (A), τότε είναι σχεδόν βέβαιο ότι η λευκή σφαίρα θα μπει σε μία διαφορετική τρύπα του τραπεζιού (B). Έστω, τώρα, ότι δεδομένης της κρούσης της λευκής σφαίρας με τη σφαίρα νούμερο 8, η πιθανότητα η "8" να μπει στην καθορισμένη τρύπα είναι ½, καθώς και ότι η πιθανότητα η λευκή σφαίρα να μπει στην άλλη τρύπα, δεδομένης της κρούσης με την "8" είναι επίσης ½. Σε αυτή την περίπτωση ισχύει,

$$\mathrm{P}(A|C) = \mathrm{P}(B|C) = 1/2 \text{ και } \mathrm{P}(A|B\,\&\,C) \simeq 1.$$

Επομένως, μολονότι η κρούση των δύο σφαιρών αποτελεί κοινό αίτιο τόσο της εισόδου της "8" στη μία τρύπα, όσο και της λευκής σφαίρας στην άλλη,

$$\mathrm{P}(A|B\,\&\,C) > \mathrm{P}(A|C). \qquad (2.2.12)$$

Δηλαδή, η συσχέτιση των A,B δεν εξαφανίζεται σε κάθε μία από τις υποσυλλογές που προκύπτουν από τη διαμέριση της συλλογής ως προς το κοινό αίτιο, μολονότι το κοινό αίτιο, η κρούση, εξηγεί γιατί και οι δύο σφαίρες μπαίνουν μαζί στις αντίστοιχες τρύπες του τραπεζιού (Salmon 1998:294).

Αν αυτό το παράδειγμα φαίνεται κάπως απλοϊκό, ο Salmon αναφέρεται και στην περίπτωση της σκέδασης Compton (ό.π.:133). Ένα φωτόνιο ενέργειας E συγκρούεται με ακίνητο ηλεκτρόνιο σ' ένα πείραμα σκέδασης Compton, με αποτέλεσμα το αρχικά ακίνητο ηλεκτρόνιο να αποκτά κινητική ενέργεια $E_1<E$, και να επανεκπέμπεται φωτόνιο ενέργειας $E_2<E$. Λόγω της αρχής διατήρησης της ενέργειας ισχύει $E_1 + E_2 = E$. Ας θεωρήσουμε τα εξής συμβάντα, A: Ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας E_1 εκπέμπεται κατά την σκέδαση, B: Φωτόνιο ενέργειας E_2

εκπέμπεται κατά την σκέδαση , C: Φωτόνιο ενέργειας Ε σκεδάζεται από ακίνητο ηλεκτρόνιο. Έστω ότι η πιθανότητα ένα φωτόνιο ενέργειας E_2 να εκπεμφθεί κατά την σκέδαση φωτονίου ενέργειας Ε από ακίνητο ηλεκτρόνιο είναι 0,1 και είναι ίση με την πιθανότητα να εκπεμφθεί ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας E_1 κατά την σκέδαση του φωτονίου ενέργειας Ε από το ακίνητο ηλεκτρόνιο, δηλαδή,

$$\mathrm{P}(A|C) = \mathrm{P}(B|C) = 0{,}1\,.$$

Τότε, δεδομένου ότι ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας, αν εκπεμφθεί φωτόνιο ενέργειας E_2 κατά την σκέδαση, θα εκπεμφθεί και ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας $E_1 = E\text{-}E_2$ και αντίστοιχα αν εκπεμφθεί ηλεκτρόνιο κινητικής ενέργειας E_1, θα εκπεμφθεί φωτόνιο ενέργειας $E_2 = E\text{-}E_1$. Επομένως, η πιθανότητα να εκπεμφθεί ένα φωτόνιο ενέργειας E_2 και ένα ηλεκτρόνιο ενέργειας E_1 κατά την σκέδαση φωτονίου ενέργειας Ε με ακίνητο ηλεκτρόνιο είναι

$$\mathrm{P}(A\,\&\,B|C) = 0{,}1\,.$$

Άρα, και στην περίπτωση της σκέδασης Compton ισχύει,

$$\mathrm{P}(A\,\&\,B|C) > \mathrm{P}(A|C)\cdot\mathrm{P}(B|C)\,.$$

Σε αυτές τις περιπτώσεις ο Salmon δεν αναφέρεται στη συγκρότηση δίκρανου σύζευξης, αλλά στην ύπαρξη ενός άλλου τύπου δίκρανου, το *δίκρανο αλληλεπίδρασης* (interactive fork). Στο δίκρανο αλληλεπίδρασης το κοινό αίτιο είναι το συμβάν στο οποίο δύο ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες αλληλεπιδρούν. Μετά την αλληλεπίδραση, οι διαδικασίες παύουν να είναι ανεξάρτητες και τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνουν, τα συμβάντα *A* και *B*, λαμβάνουν χώρα μαζί πιο συχνά απ' ό,τι εάν οι διαδικασίες ήταν ανεξάρτητες – με δεδομένη την αλληλεπίδραση τους. Αυτή είναι η ερμηνεία που μπορούμε να δώσουμε στη σχέση (2.2.12). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε αναλυτικά στις έννοιες "αιτιακή αλληλεπίδραση" και "δίκρανο αλληλεπίδρασης" στο πλαίσιο της θεωρίας του Salmon. Αυτό που θα πρέπει να σημειώσουμε εδώ είναι η διαφωνία του Salmon με τον Reichenbach σε σχέση με την

κατανόηση της εξήγησης της θετικής στατιστικής συνάφειας που εκδηλώνουν δύο συμβάντα τα οποία δεν βρίσκονται σχέση αιτιακής συνάφειας.

Ας επιστρέψουμε τώρα στην αρχή του κοινού αιτίου. Σύμφωνα με τον Reichenbach, η αρχή μας λέει ότι στον κόσμο μας οι σχέσεις θετικής στατιστικής συνάφειας που δεν εκφράζουν σχέσεις αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στα συσχετιζόμενα συμβάντα πάντα εξηγούνται αιτιακώς σύμφωνα με την (ΙΙ). Η αρχή δεν αποκλείει για δύο συμβάντα *A* και *B* που λαμβάνουν χώρα μαζί πιο συχνά απ' ό,τι αν ήταν ανεξάρτητα, να υπάρχει ένα συμβάν *E* που να είναι το κοινό αποτέλεσμα των *A,B* και να συγκροτεί με αυτά δίκρανο σύζευξης <*A,E,B*>. Ούτε βεβαίως να υπάρχουν συμβάντα που συγκροτούν με τα *A,B* δίκρανο σύζευξης τα οποία δεν είναι ούτε κοινό αίτιο των *A* και *B*, ούτε κοινό αποτέλεσμα, όπως υποστήριζε ο Salmon. Αυτό που αποκλείεται από την αρχή κοινού αιτίου είναι να συμβαίνει κάτι από τα παραπάνω χωρίς να λαμβάνει χώρα ένα συμβάν *C*, το κοινό αίτιο των *A,B*, που σχηματίζει με τα *A,B* δίκρανο σύζευξης, <*A,C,B*> . Στις περιπτώσεις που εκτός από το κοινό αίτιο *C* των *A,B* υπάρχει και ένα τέταρτο συμβάν *E* που σχηματίζει με αυτά δίκρανο σύζευξης λέμε ότι έχουμε ένα *διπλό δίκρανο σύζευξης* που μπορεί να αναλυθεί στα *απλά δίκρανα σύζευξης* <*A,C,B*> και <*A,E,B*>.

Για τον καθορισμό της καθολικής κατεύθυνσης του αιτιακού δικτύου ο Reichenbach στηρίζεται στα απλά δίκρανα σύζευξης. Όπως είδαμε προηγουμένως, με τη βοήθεια της σχέσης "αιτιακώς ανάμεσα" και με την αρχή της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης μπορούμε να κατασκευάσουμε ένα αιτιακό δίκτυο το οποίο έχει δύο δυνατές καθολικές κατευθύνσεις. Αν δύο συμβάντα *A,B* του αιτιακού δικτύου σχηματίζουν ένα απλό δίκρανο σύζευξης <*A,C,B*> με ένα και μόνο ένα συμβάν *C* τότε σε αυτό, οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας έχουν ορισμένη κατεύθυνση, από το *C* στο *A* και από το *C* στο *B*. Λόγω του γεγονότος ότι αρκεί να αποδώσουμε κατεύθυνση σε μία σχέση αιτιακής συνάφειας στο δίκτυο για να αποδοθεί μία συγκεκριμένη καθολική κατεύθυνση σε αυτό, συμπεραίνουμε ότι και το δίκτυο έχει ορισμένη κατεύθυνση που είναι σε συμφωνία με την κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας ανάμεσα στο *C* και στα *A,B* αντιστοίχως. Επιπλέον, η καθολική κατεύθυνση του αιτιακού δικτύου δεν μπορεί να είναι η αντίθετη διότι τότε το *C* θα ήταν κοινό αποτέλεσμα των *A, B* χωρίς να υπάρχει κοινό αίτιο αυτών,

γεγονός που παραβιάζει την αρχή του κοινού αιτίου. Συνεπώς, για να προσδιορίσουμε την κατεύθυνση του αιτιακού δικτύου αρκεί να περιοριστούμε σε *ένα* απλό δίκρανο σύζευξης, που δεν αποτελεί τμήμα διπλού δίκρανου σύζευξης, και να καθορίσουμε τις σχέσεις αιτιακής συνάφειας σε αυτό. Η καθολική κατεύθυνση του δικτύου είναι εκείνη που συμφωνεί με την κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας στο συγκεκριμένο απλό δίκρανο σύζευξης.

Ο Salmon υποστηρίζει μία πιο ισχυρή θέση από αυτή του Reichenbach για την κατεύθυνση των αιτιακών σχέσεων στα δίκρανα σύζευξης. Συγκεκριμένα υποστηρίζει ότι στα δίκρανα σύζευξης γενικά, είτε απλά είναι αυτά είτε διπλά, οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας έχουν ορισμένη κατεύθυνση που καθορίζει με μοναδικό τρόπο την καθολική κατεύθυνση του δικτύου. Για τον καθορισμό της καθολικής κατεύθυνσης του δικτύου, ο Reichenbach αφήνει κατά μέρος τα διπλά δίκρανα σύζευξης που σχηματίζονται από τα συσχετιζόμενα συμβάντα, το κοινό αίτιο αυτών και το κοινό αποτέλεσμα τους, διότι θεωρεί ότι σε αυτά οι σχέσεις αιτιακής συνάφειας μπορούν να αντιστραφούν χωρίς να υπάρξει πρόβλημα με την αρχή κοινού αιτίου - κατά συνέπεια δεν μπορούμε με βάση αυτά να αποδώσουμε μία συγκεκριμένη καθολική κατεύθυνση στο δίκτυο. Ο Salmon, από την άλλη, θεωρεί ότι δεν μπορούν να υπάρξουν τέτοιου είδους διπλά δίκρανα σύζευξης που να περιλαμβάνουν το κοινό αίτιο και το κοινό αποτέλεσμα των δύο συμβάντων. Τα μοναδικά, φυσικώς δυνατά, διπλά δίκρανα σύζευξης είναι του τύπου που περιγράφεται στο παράδειγμα του Ellis Crasnow. Δηλαδή, διπλά δίκρανα σύζευξης που σχηματίζονται από το κοινό αίτιο και ένα συμβάν που ικανοποιεί με ατυχηματικό τρόπο τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Ωστόσο, η θέση αυτή, όπως ο ίδιος ο Salmon παραδέχεται, αποτελεί μία μη δικαιολογημένη πεποίθησή του για το πώς είναι ο κόσμος μας:

> Δεν έχω κάποιο ισχυρό επιχείρημα για να δείξω ότι στην περίπτωση ενός διπλού δίκρανου… τα *A,C,B* και *A,E,B* δεν μπορούν αμφότερα να είναι συζευκτικά. Αυτοί οι συνδυασμοί είναι λογικώς δυνατοί … Παρ' όλα αυτά, δεν έχω καταφέρει να βρω ή να κατασκευάσω ένα φυσικώς εύλογο παράδειγμα, και ο Reichenbach ποτέ δεν μας έδωσε ένα τέτοιο παράδειγμα. Θα ήταν χρήσιμο να μάθουμε αν τα διπλά δίκρανα σύζευξης αυτού του είδους παραβιάζουν κάποια θεμελιώδη φυσική αρχή. Δεν γνωρίζω την απάντηση σε αυτή την ερώτηση. (Salmon 1984:167)

Πάντως, σε κάθε περίπτωση, είτε στην εκδοχή του Reichenbach, είτε στην «πιο σκληρή» εκδοχή του Salmon, το κλειδί για να αποκτήσει καθολική κατεύθυνση το

αιτιακό δίκτυο του κόσμου είναι τα απλά δίκρανα σύζευξης που σχηματίζονται από το κοινό αίτιο και δύο συσχετιζόμενα συμβάντα.

Ολοκληρώνοντας αυτή την ενότητα θα παρουσιάσουμε το δεύτερο ορισμό της αιτιακής συνάφειας που αναφέρει ο Reichenbach, ο οποίος διατυπώνεται με όρους στατιστικών σχέσεων. Συγκεκριμένα,

> Ένα συμβάν A_1 είναι αιτιακώς συναφές με ένα ύστερο συμβάν A_3 αν
>
> $$\mathrm{P}(A_3 \mid A_1) > \mathrm{P}(A_3) \qquad (2.2.13)$$
>
> και δεν υπάρχει σύνολο συμβάντων $\left\{A_2^{(1)} \ldots A_2^{(n)}\right\}$ που να είναι πρότερα του, ή ταυτόχρονα με το, A_1 τέτοιο ώστε το σύνολο να αποκρύπτει (screens-off) το A_1 από το A_3. (Reichenbach 1956:204)

Για να κατανοήσουμε τον ορισμό, καταρχάς, θα πρέπει να εξηγήσουμε τι σημαίνει ότι ένα σύνολο συμβάντων αποκρύπτει ένα συμβάν από μία στατιστική σχέση. Σύμφωνα με τον Reichenbach, αν $\left\{A_2^{(1)} \ldots A_2^{(n)}\right\}$ είναι ένα σύνολο συμβάντων για το οποίο ισχύει,

$$\mathrm{P}(A_3 \mid A_1 \,\&\, A_2^{(1)} \,\&\, \ldots \,\&\, A_2^{(n)}) = \mathrm{P}(A_3 \mid A_2^{(1)} \,\&\, \ldots \,\&\, A_2^{(n)}), \qquad (2.2.14)$$

τότε θα λέμε ότι $\left\{A_2^{(1)} \ldots A_2^{(n)}\right\}$ αποκρύπτει το A_1 από το A_3. Η σύζευξη των *n* συμβάντων στη (2.2.14) δεν πρέπει να θεωρηθεί ως ένα συμβάν, μολονότι σε ένα κλασικό χώρο πιθανοτήτων η κλάση των υποσυνόλων που αναπαριστάνει τα συμβάντα είναι κλειστή ως προς τη σύζευξη. Ο λόγος γι' αυτό προκύπτει από την ερμηνεία των συμβάντων ως συνοριζόμενες κλάσεις: η σύζευξη των συμβάντων ενδέχεται να μην μπορεί να ερμηνευθεί ως μία συνοριζόμενη κλάση αλλά ως η συνθήκη που περιγράφει ότι τα συμβάντα $A_2^{(1)} \ldots A_2^{(n)}$ λαμβάνουν χώρα μαζί.

Η δεύτερη επισήμανση που αφορά στον ορισμό της αιτιακής συνάφειας έχει να κάνει με το γεγονός ότι προϋποθέτει τον καθορισμό της χρονικής κατεύθυνσης και συγκεκριμένα τις σχέσεις της χρονικής προτεραιότητας και της ταυτοχρονίας. Η σχέση της χρονικής προτεραιότητας προκύπτει με βάση την απόδοση κατεύθυνσης στις σχέσεις αιτιακής συνάφειας. Σύμφωνα με τον Reichenbach,

> Σε ένα δίκρανο σύζευξης *ACB* που είναι ανοικτό από τη μία πλευρά, το *C* είναι χρονικά πρότερο των *A*,*B*[10] (Reichenbach 1956:162).

Επειδή όπως αναφέραμε η κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας στο δίκτυο που αναπαριστάνει αιτιακώς τον κόσμο καθορίζεται από την κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας σε ένα απλό δίκρανο σύζευξης, υποθέτοντας ότι η κατεύθυνση των σχέσεων αιτιακής συνάφειας ταυτίζεται με την κατεύθυνση του χρόνου, καταλήγουμε, σε συμφωνία με την κλασική χιουμιανή θέση, ότι το αίτιο είναι χρονικά πρότερο του αποτελέσματος.

Από την άλλη, η προϋπόθεση της σχέσης της ταυτοχρονίας είναι προβληματική για τη συμβατότητα του ορισμού της αιτιακής συνάφειας με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, που συνεπάγεται τη σχετικότητα της ταυτοχρονίας. Έτσι, είτε ο ορισμός της αιτιακής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι περιορίζεται σε έναν αδρανειακό παρατηρητή ως προς τον οποίο «δεν υπάρχει σύνολο συμβάντων $\left\{A_2^{(1)}...A_2^{(n)}\right\}$ που να είναι πρότερα του, ή ταυτόχρονα με το, A_1», είτε θα πρέπει να τροποποιήσουμε τον ορισμό στο σημείο αυτό ως εξής: «δεν υπάρχει σύνολο συμβάντων $\left\{A_2^{(1)}...A_2^{(n)}\right\}$ που να είναι πρότερα του, ή ταυτόχρονα *ως προς οποιονδήποτε παρατηρητή* με το, A_1».

Τέλος, ο ορισμός της αιτιακής συνάφειας μάς λέει ότι το αίτιο A_1 αυξάνει την πιθανότητα να λάβει χώρα το αποτέλεσμα A_3 που είναι ένα χρονικά ύστερο συμβάν. Επιπλέον, αυτή η θετική στατιστική σχέση δεν εξαφανίζεται οποιαδήποτε άλλα συμβάντα $A_2^{(1)}...A_2^{(n)}$, χρονικά πρότερα του αιτίου ή ταυτόχρονα με αυτό και αν θεωρήσουμε ότι λαμβάνουν χώρα.

[10] Ο Reichenbach αναφέρεται σε «ανοικτά» δίκρανα σύζευξης ενώ εμείς προτιμήσαμε να μιλήσουμε για απλά δίκρανα σύζευξης. «Αν ένα δίκρανο είναι συζευκτικό, λέμε ότι είναι κλειστό στο *C*. Αν δεν υπάρχει συμβάν *E* στην άλλη πλευρά του δίκρανου που να ικανοποιεί τις σχέσεις (5)-(8) [αντιστ.(2.2.4) - (2.2.7)], λέμε ότι το δίκρανο είναι ανοικτό σε εκείνη την πλευρά.» (Reichenbach 1956:162). Δεν υπάρχει κάποιος ιδιαίτερος λόγος γι' αυτή μας την επιλογή πέραν του περιορισμού της έννοιας του απλού δίκρανου σύζευξης στο μαθηματικό μοντέλο που περιγράφει το κοινό αίτιο ή/και το κοινό αποτέλεσμα. Έτσι, αν δύο συμβάντα ικανοποιούν τις στατιστικές σχέσεις (2.2.4) - (2.2.7), τότε μιλάμε για διπλό δίκρανο σύζευξης χωρίς να εξετάζουμε από ποια «πλευρά» είναι κλειστό. Το διπλό δίκρανο σύζευξης του παραδείγματος του Ellis Crasnow είναι «ανοικτό» από τη μία πλευρά, σύμφωνα με την ορολογία του Reichenbach. Προφανώς, οι δύο πλευρές από τις οποίες μπορεί να είναι κλειστό ένα δίκρανο είναι η πλευρά του κοινού αιτίου και η πλευρά του κοινού αποτελέσματος.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο προσπαθήσαμε να ανασυγκροτήσουμε την προσέγγιση του Reichenbach στην αιτιότητα μέσα από δύο, σχετικώς ανεξάρτητες, προοπτικές: τη θεμελίωση της σχέσης αιτιακής συνάφειας δύο συμβάντων με βάση την έννοια του ίχνους και τη θεμελίωση της αιτιακής συνάφειας με βάση στατιστικές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα.

Η μέθοδος του ίχνους στηρίζεται στην αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων και περιλαμβάνει την υιοθέτηση της ασυμμετρίας ανάμεσα στο παρελθόν και στο μέλλον. Η εμφάνιση του ίχνους που δημιουργείται σε ένα συμβάν, σε κάποιο διαφορετικό συμβάν, προτείνεται στο ύστερο έργο του Reichenbach ως ικανή συνθήκη για την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα δύο συμβάντα. Όμως διαπιστώσαμε ότι υπάρχει ασυμφωνία σε σχέση με το πρότερο έργο του Reichenbach σε αυτό το σημείο. Στις πρώιμες προσεγγίσεις ο Reichenbach φαίνεται να προτείνει με βάση τη μέθοδο του ίχνους, μία αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη σχέσης αιτιακής συνάφειας. Επιπλέον, η θεώρηση του ίχνους ως αναγκαία συνθήκη μας δίνει ένα κριτήριο διάκρισης ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές ακολουθίες συμβάντων που αποτελούν πρόδρομο των αιτιακών διαδικασιών και των ψευδο-διαδικασιών αντίστοιχα.

Από την άλλη πλευρά, στο πλαίσιο του στατιστικού προσδιορισμού των σχέσεων αιτιακής συνάφειας, είδαμε με ποιον τρόπο το αιτιακό δίκτυο μπορεί να περιγραφεί με βάση τη σχέση "αιτιακώς ανάμεσα", έτσι ώστε να ικανοποιούνται εύλογες αρχές, από τα συμβάντα που το συγκροτούν. Επιπλέον, με την αρχή της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης, είδαμε πως το αιτιακό δίκτυο αποκτά καθολική κατεύθυνση με βάση τα τεκμήρια που προκύπτουν από την παρατήρηση. Επίσης, αναφερθήκαμε στην έννοια του δίκρανου σύζευξης και στην αρχή του κοινού αιτίου του Reichenbach. Με βάση την έννοια του δίκρανου σύζευξης, και συγκεκριμένα των απλών δίκρανων σύζευξης, η αιτιακή κατεύθυνση του δικτύου μπορεί να επιλέγει με μοναδικό τρόπο. Ωστόσο, υποστηρίξαμε ότι η έννοια του δίκρανου σύζευξης δεν αποτελεί ούτε αναγκαία, ούτε ικανή συνθήκη για το κοινό αίτιο. Υπάρχουν περιπτώσεις που το κοινό αίτιο δύο συμβάντων δεν ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης, όπως στην περίπτωση που δεν

εκδηλώνεται στατιστική συνάφεια ανάμεσα στα αποτελέσματα του κοινού αιτίου, καθώς και στην περίπτωση που η στατιστική συνάφεια που εκδηλώνεται εξηγείται με βάση την έννοια του δίκρανου αλληλεπίδρασης. Επιπλέον, αναφέραμε το παράδειγμα του Ellis Crasnow, που σύμφωνα με το Salmon δείχνει ότι οι στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης δεν αποτελούν ούτε ικανή συνθήκη για το κοινό αίτιο. Τέλος, παρουσιάσαμε τον ορισμό της αιτιακής συνάφειας που προτείνει ο Reichenbach που στηρίζεται στις στατιστικές και στις χρονικές σχέσεις που ικανοποιεί το αίτιο και το αποτέλεσμα.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΣΤΟ ΔΕΥΤΕΡΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ

Στατιστικές Σχέσεις και Συστήματα Κοινών Αιτίων[11]

Τι γίνεται αν δεν υπάρχει το κοινό αίτιο μίας μη αιτιακής σχέσης στατιστικής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα; Τι γίνεται αν δεν υπάρχει ένα συμβάν *C* που να ικανοποιεί τις σχέσεις (2.2.4) - (2.2.7) και να εξηγεί τη θετική στατιστική συνάφεια των *A*, *B*; Σίγουρα, αυτό το ενδεχόμενο αποτελεί απειλή για την Αρχή Κοινού Αιτίου του Reichenbach.

Οι Hofer-Szabó και Rédei (2004) έχουν προτείνει δύο στρατηγικές για την αντιμετώπιση αυτής της «απειλής». Η πρώτη στρατηγική υιοθετεί τη θέση ότι ο χώρος των πιθανοτήτων στον οποίο περιγράφονται οι στατιστικές συσχετίσεις ζευγών συμβάντων δεν είναι αρκετά "πλούσιος" ώστε να περιλαμβάνει το κοινό αίτιο για όλες τις συσχετίσεις. Έτσι, προτείνεται η κατάλληλη επέκταση του χώρου ώστε ο νέος χώρος να εμπεριέχει το κοινό αίτιο κάθε στατιστικής συσχέτισης. Μάλιστα, οι Gyenis και Rédei (2010) δείχνουν ότι μία τέτοια επέκταση είναι πάντα μαθηματικώς εφικτή.

Η δεύτερη στρατηγική αφορά στην ιδέα ότι η θετική στατιστική συνάφεια δύο συμβάντων ενδέχεται να μην οφείλεται σε ένα μόνο παράγοντα, το κοινό αίτιο, αλλά σε περισσότερους παράγοντες –«επιμέρους κοινά αίτια» τους ονομάζουν οι Hofer-Szabó και Rédei (2004, 2006)– οι οποίοι ως σύνολο εξηγούν τη στατιστική συνάφεια. Έτσι, η στρατηγική αυτή προτείνει να διευρύνουμε τη προσέγγιση μας για την εξήγηση των σχέσεων στατιστικής συνάφειας πέραν του αιτήματος της ύπαρξης κοινού αιτίου και να εξετάσουμε κατά πόσον ισχύει μία αρχή που απαιτεί την ύπαρξη περισσότερων του ενός παραγόντων που επιδρούν αιτιακώς στα στατιστικώς συναφή συμβάντα συγκροτώντας ένα σύστημα κοινών αιτίων.

Συγκεκριμένα, η σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας,

[11] Το παράρτημα αποτελεί μέρος της ομιλίας μου στο 1ο Πανελλήνιο Συνέδριο Φιλοσοφίας της Επιστήμης, Πανεπιστήμιο Αθηνών, Οκτώβριος 2010, (Στεργίου 2010)

$$\mathrm{P}(A \cap B) > \mathrm{P}(A)\,\mathrm{P}(B)\ ^{12} \qquad (\Pi.1)$$

για δύο συμβάντα *A,B* που δεν έχουν αιτιακή συνάφεια, μπορεί να εξηγηθεί από περισσότερα του ενός συμβάντα $C_1,...,C_n$, τα οποία διαμερίζουν τη στατιστική συλλογή, δηλαδή,

$$C_i \cap C_j = \varnothing \quad i \neq j, \qquad \bigcup_{i=1,...,n} C_i = \Omega. \qquad (\Pi.2)$$

Τα συμβάντα αυτά ικανοποιούν τις εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$\mathrm{P}(A \cap B \,|\, C_i) = \mathrm{P}(A \,|\, C_i)\mathrm{P}(B \,|\, C_i) \ \text{ για κάθε } i = 1,...,n, \qquad (\Pi.3)$$

$$\Big[\mathrm{P}(A \,|\, C_i) - \mathrm{P}(A \,|\, C_j)\Big]\Big[\mathrm{P}(B \,|\, C_i) - \mathrm{P}(B \,|\, C_j)\Big] > 0 \qquad (i \neq j) \qquad (\Pi.4)$$

και το σύνολο $\{C_1,...,C_n\}$ ονομάζεται *σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για το ζεύγος A,B* (Reichenbachian Common Cause System).

Ο πληθικός αριθμός n του συνόλου $\{C_1,...,C_n\}$ ονομάζεται *μέγεθος* (size) του συστήματος κοινών αιτίων. Παρατηρείστε, επίσης, ότι ένα σύστημα κοινών αιτίων με μέγεθος 2 ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις (2.2.4) - (2.2.7) με κοινό αίτιο *C* το συμβάν C_i που αυξάνει την πιθανότητα να λάβουν χώρα τα *A* και *B*. Ένα σύστημα κοινών αιτίων με μέγεθος μεγαλύτερο του 2 ονομάζεται *ορθό* (proper).

Όπως και στην περίπτωση του κοινού αιτίου, αποδεικνύεται ότι οι σχέσεις (Π.3) , (Π.4) αποτελούν ικανές συνθήκες για να ισχύει η (Π.1), δηλαδή, τα συμβάντα *A*, *B* να εκδηλώνουν σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας (Hofer-Szabó and Rédei 2004:Πρτ2). Με άλλα λόγια, στατιστική συσχέτιση συνάγεται παραγωγικά από την υπόθεση της ύπαρξης του συστήματος κοινών αιτίων.

[12] Η χρήση λογικών συνδέσμων (άρνηση, σύζευξη, διάζευξη κ.λπ.) στο όρισμα της συνάρτησης πιθανότητας στην προηγούμενη ενότητα και των συνολοθεωρητικών πράξεων (τομή, ένωση κ.λπ.) στο παράρτημα του δευτέρου κεφαλαίου δεν θα πρέπει να μας προβληματίζει. Απλώς, στην πρώτη περίπτωση θεωρούμε ότι η συνάρτηση πιθανότητας ορίζεται στην άλγεβρα Lindenbaum-Tarksi μιας θεωρίας στη γλώσσα του κλασικού προτασιακού λογισμού η οποία έχει δομή άλγεβρας Boole, ενώ στη δεύτερη περίπτωση η συνάρτηση πιθανότητας ορίζεται σε ισόμορφο πεδίο συνόλων της άλγεβρας Lindebaum-Tarski, δηλαδή σε μία αναπαράσταση της άλγεβρας Boole.

Παραπέρα, οι Hofer-Szabó και Rédei υιοθετούν τη θέση του Reichenbach σύμφωνα με την οποία η παραγωγική συναγωγή της σχέσης στατιστικής συνάφειας από την υπόθεση της ύπαρξης κοινού αιτίου (ή, αντιστοίχως, από την υπόθεση της ύπαρξης ενός συστήματος κοινών αιτίων) είναι *απαραίτητο μέρος* της εξήγησης της στατιστικής σχέσης. Έτσι, αναφέρουν χαρακτηριστικά για την περίπτωση του κοινού αιτίου:

> Η σημασία της Πρότασης 1 συνίσταται στο ότι δείχνει με ποιον τρόπο το κοινό αίτιο *εξηγεί* μία συσχέτιση: από την υπόθεση ότι τα συμβάντα *A,B* και *C* ικανοποιούν τις συνθήκες του Reichenbach, μπορεί κάποιος να *συναγάγει παραγωγικά* ότι τα *A* και *B* είναι (θετικώς) συσχετιζόμενα. (Hofer-Szabó and Rédei 2006:747)

Και ακόμα, για την περίπτωση της εξήγησης της στατιστικής σχέσης με ένα σύστημα κοινών αιτίων, αναφέρουν:

> Η εξήγηση της συσχέτισης από ένα σύστημα μερικών κοινών αιτίων σημαίνει ότι κάποιος μπορεί να διαμερίσει τη στατιστική συλλογή σε περισσότερες από μία υποσυλλογές, με τέτοιο τρόπο ώστε (i) η συσχέτιση εξαφανίζεται σε κάθε υποσυλλογή, (ii) κάθε ζεύγος υποσυλλογών συμπεριφέρεται όπως οι δύο υποσυλλογές που καθορίζονται από το κοινό αίτιο και την άρνηση του και (iii) το σύνολο των "επιμέρους κοινών αιτίων" εξηγεί τη συσχέτιση υπό την έννοια ότι συνεπάγεται αυτή. (ό.π.)

Στη συνέχεια, θα παρουσιάσουμε κάποια παραδείγματα συστημάτων κοινών αιτίων του Reichenbach, με σκοπό να αποσαφηνιστεί η έννοια. Επίσης, θα υποστηρίξουμε ότι η θέση των Hofer- Szabó και Rédei ότι ένα τέτοιο σύστημα κοινών αιτίων εξηγεί μία θετική στατιστική συσχέτιση είναι *προβληματική*, διότι στο εξηγούν ενδέχεται να υπεισέρχονται παράγοντες που δεν είναι στατιστικώς συναφείς με τα συσχετιζόμενα συμβάντα.

Π.1 Μερικά παραδείγματα συστημάτων κοινών αιτίων.

Το πρώτο παράδειγμα στο οποίο θα αναφερθούμε αφορά στις στατιστικές συσχετίσεις που εκδηλώνονται ανάμεσα στα αποτελέσματα δύο διαδοχικών ρίψεων κερμάτων. Συγκεκριμένα, ας υποθέσουμε ότι από μία συλλογή κερμάτων επιλέγουμε τυχαία ένα κέρμα και το ρίχνουμε δύο φορές. Επαναλαμβάνουμε την ίδια διαδικασία πολλές φορές και σχηματίζουμε τη στατιστική των αποτελεσμάτων των ρίψεων.

Αυτό που διαπιστώνουμε είναι ότι ανάμεσα στα ενδεχόμενα,

Kx_1 : «το κέρμα x έφερε "κεφάλι" στην $1^{η}$ ρίψη»

και

Kx_2 : «το κέρμα x έφερε "κεφάλι" στην $2^{η}$ ρίψη»

εκδηλώνεται σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας. Δηλαδή, η πιθανότητα, υπολογιζόμενη ως σχετική συχνότητα να έρθει "κεφάλι" στην πρώτη και στη δεύτερη ρίψη είναι μεγαλύτερη από εκείνη που θα διαπιστώναμε αν αυτό συνέβαινε τυχαία. Έτσι, ισχύει,

$$\mathrm{P}(Kx_1 \cap Kx_2) > \mathrm{P}(Kx_1)\mathrm{P}(Kx_2) \qquad (\Pi.5)$$

Προφανώς, θα ήταν λάθος να θεωρήσει κάποιος με βάση την (Π.5) ότι το αποτέλεσμα "κεφάλι" στην πρώτη ρίψη «προκαλεί» να έρθει κεφάλι και στη δεύτερη ρίψη. Η στατιστική συσχέτιση των αποτελεσμάτων των δύο ρίψεων εξηγείται με βάση την παρατήρηση ότι τα κέρματα που επιλέγονται προς ρίψη δεν είναι τα ίδια κάθε φορά. Στη συλλογή από την οποία επιλέγονται υπάρχουν, π.χ., τρία είδη κερμάτων, C_a, C_b, C_c, εκ των οποίων καθένα έχει διαφορετική πιθανότητα p_i να φέρει "κεφάλι" σε μία ρίψη. Δηλαδή, αν περιοριστούμε στην υποσυλλογή που αποτελείται από ένα είδος κερμάτων, ισχύει,

$$\mathrm{P}(Kx_1 \,|\, C_i x) = p_i = \mathrm{P}(Kx_2 \,|\, C_i x) \quad \text{με } i = a, b, c. \qquad (\Pi.6)$$

και $0 < p_a, p_b, p_c < 1$ με $p_a \neq p_b$, $p_b \neq p_c$, $p_a \neq p_c$

Επίσης, σε κάθε υποσυλλογή που αποτελείται από ένα ορισμένο είδος κερμάτων διαπιστώνεται ότι το αποτέλεσμα της πρώτης ρίψης είναι στατιστικώς ανεξάρτητο από το αποτέλεσμα της δεύτερης ρίψης. Δηλαδή,

$$\mathrm{P}(Kx_1 \cap Kx_2 \,|\, C_i x) = \mathrm{P}(Kx_1 \,|\, C_i x)\mathrm{P}(Kx_2 \,|\, C_i\, x) = p_i^2 \quad \text{για } i = a, b, c\,. \qquad (\Pi.7)$$

Επιπλέον ισχύει η σχέση,

$$\Big[\mathrm{P}(Kx_1\,|\,C_i x)-\mathrm{P}(Kx_1\,|\,C_j x)\Big]\Big[\mathrm{P}(Kx_2\,|\,C_i x)-\mathrm{P}(Kx_2\,|\,C_j x)\Big]$$
$$=\left(p_i-p_j\right)^2>0,\quad (i\neq j\in\{a,b,c\}) \tag{Π.8}$$

Οι (Π.7) και (Π.8) μας οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διαμέριση $\{C_a, C_b, C_c\}$ είναι σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για τη στατιστική συσχέτιση (Π.5). Ένα αριθμητικό μοντέλο του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach για το συγκεκριμένο παράδειγμα φαίνεται στον πίνακα 1:

ΠΙΝΑΚΑΣ 1		
$p_a=\frac{3}{4}$	$p_b=\frac{3+\sqrt{5}}{8}$	$p_c=\frac{3-\sqrt{5}}{8}$
$\mathrm{P}(C_i x)=\frac{1}{3}$ για $i=a,b,c.$		
$\mathrm{P}(Kx_1\cap Kx_2)=\frac{1}{3}$	$\mathrm{P}(Kx_1)=\mathrm{P}(Kx_2)=\frac{1}{2}$	

Στο παράδειγμα που αναφέραμε το σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach που εξηγεί τη στατιστική συσχέτιση (Π.5) είναι μεγέθους 3. Ωστόσο, είναι προφανές ότι μπορούμε να διατυπώσουμε ένα αντίστοιχο παράδειγμα όπου η αρχική συλλογή να αποτελείται από *n* είδη κερμάτων, για κάθε πεπερασμένο $n\geq 2$, και η σχέση στατιστικής συνάφειας να εξηγείται από ένα σύστημα κοινών αιτίων μεγέθους *n*.

Σε μία προσπάθεια γενίκευσης της έννοιας του συστήματος κοινών αιτίων, οι Hofer – Szabo και Rédei (2004) έθεσαν το πρόβλημα της ύπαρξης συστημάτων κοινών αιτίων αριθμησίμως απείρου μεγέθους. Αυτό το πρόβλημα, τουλάχιστον στη μαθηματική μορφή του, επιλύθηκε από τους Marczyk και Wronski (2010) με ένα παράδειγμα ενός τέτοιου συστήματος. Έστω, $\langle[0,1), W, \lambda\rangle$ ο κλασικός χώρος πιθανοτήτων που ορίζεται στο πραγματικό διάστημα [0,1), με W του σύνολο των Lebesgue μετρήσιμων υποσυνόλων του διαστήματος αυτού και λ το μέτρο Lebesgue. Η διαμέριση

$$C = \{C_n\}_{n\in\mathbb{N}} \quad \text{με} \quad C_n = \left[\frac{2^n-1}{2^n}, \frac{2^{n+1}-1}{2^{n+1}}\right), \tag{Π.9}$$

αποτελεί ένα απείρως αριθμήσιμου μεγέθους σύστημα κοινών αιτίων για τη θετική στατιστική σχέση που εκδηλώνουν στον $<[0,1), W, \lambda>$ τα συμβάντα *A, B* που αναπαριστάνονται από τα εξής υποσύνολα του [0,1):

$$\begin{aligned} A &= \bigcup_{n=0}^{\infty}\left[\frac{2^n-1}{2^n}, \frac{2^{n+1}-1}{2^{n+1}} + l_n\right) \\ B &= \bigcup_{n=0}^{\infty}\left[\frac{2^n-1}{2^n} + \frac{n+1}{n+2}\cdot l_n, \frac{2^n-1}{2^n} + \frac{n+1}{n+2}\cdot l_n + l_n\right) \end{aligned} \tag{Π.10}$$

όπου $l_n = \dfrac{1}{(n+2)\cdot 2^{n+1}}$.

Επιπλέον, οι Marczyk και Wronski απέδειξαν ότι δεν υπάρχουν συστήματα κοινών αιτίων με μεγαλύτερο μέγεθος, π.χ., υπεραριθμήσιμα συστήματα κοινών αιτίων. Ο πληθικός αριθμός μίας διαμέρισης που αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach είναι μικρότερος ή το πολύ ίσος με τον πληθικό αριθμό των φυσικών αριθμών (Marczyk and Wronski 2010:Θεώρ.5).

Ας επιστρέψουμε όμως στο παράδειγμα της ρίψης κερμάτων παρατηρώντας ότι από το αριθμητικό μοντέλο που παραθέσαμε προκύπτει ότι

$$\begin{aligned} &\mathrm{P}(Kx_1 \,|\, C_a x) = \mathrm{P}(Kx_2 \,|\, C_a x) > \mathrm{P}(Kx_1) = \mathrm{P}(Kx_2), \\ &\mathrm{P}(Kx_1 \,|\, C_b x) = \mathrm{P}(Kx_2 \,|\, C_b x) > \mathrm{P}(Kx_1) = \mathrm{P}(Kx_2), \\ &\mathrm{P}(Kx_1 \,|\, C_c x) = \mathrm{P}(Kx_2 \,|\, C_c x) < \mathrm{P}(Kx_1) = \mathrm{P}(Kx_2), \end{aligned} \tag{Π.11}$$

δηλαδή, καθένας από τους παράγοντες που διαμερίζουν την αρχική στατιστική συλλογή και ορίζουν συλλογικά το σύστημα κοινών αιτίων είναι στατιστικώς συναφής με αμφότερα τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Έτσι, μπορεί να δικαιολογηθεί ο χαρακτηρισμός αυτών των παραγόντων ως "επιμέρους κοινά αίτια", μολονότι ορισμένοι μόνο από αυτούς αυξάνουν την πιθανότητα του αποτελέσματος.

Ωστόσο, ας θεωρήσουμε τις συνθήκες που πρέπει να ικανοποιεί μία διαμέριση της στατιστικής συλλογής ώστε να αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για μία δεδομένη στατιστική συσχέτιση. Είναι αυτές ικανές ώστε κάθε παράγων που ορίζει τη διαμέριση να είναι στατιστικώς συναφής με τα συσχετιζόμενα συμβάντα; Δηλαδή, προκύπτει από τις συνθήκες (Π.3) και (Π.4) ότι

$$\mathrm{P}(A|C_i) \neq \mathrm{P}(A) \quad \text{και} \quad \mathrm{P}(B|C_i) \neq \mathrm{P}(B), \quad \text{για } i = 1,\ldots,n; \qquad (\Pi.12)$$

Η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι *αρνητική* και για να το δείξουμε αρκεί το ακόλουθο παράδειγμα.

Ένα εργοστάσιο κατασκευάζει ένα ορισμένο τύπο ανταλλακτικού αυτοκινήτων που αποτελείται από δύο μέρη, τα μέρη *a* και *b*. Το εργοστάσιο διαθέτει τρεις γραμμές παραγωγής του ανταλλακτικού, εκ των οποίων καθεμία αποτελείται από δύο μηχανές που κατασκευάζουν τα αντίστοιχα μέρη του ανταλλακτικού.

Από τη στατιστική έρευνα στο τμήμα διαλογής του εργοστασίου διαπιστώνεται ότι τα ελαττωματικά ανταλλακτικά που παράγονται, συνήθως, εμφανίζουν ελάττωμα σε αμφότερα τα μέρη από τα οποία αποτελούνται. Έτσι, αν *A* το ενδεχόμενο "το μέρος *a* του ανταλλακτικού είναι ελαττωματικό" και *B* το ενδεχόμενο "το μέρος *b* του ανταλλακτικού είναι ελαττωματικό", αυτό που διαπιστώνεται είναι ότι ισχύει η (Π.1).

Αυτή η διαπίστωση δεν ήταν αναμενόμενη για τους υπεύθυνους του εργοστασίου, διότι οι μηχανές του εργοστασίου που παράγουν τα αντίστοιχα μέρη των ανταλλακτικών λειτουργούν ανεξάρτητα σε κάθε γραμμή παραγωγής του ανταλλακτικού.

Για να εξηγήσουν την παράδοξη στατιστική συσχέτιση, οι υπεύθυνοι κάνουν τις εξής παρατηρήσεις:

1) Για μία μηχανή που βρίσκεται στη γραμμή παραγωγής L_i και παράγει το μέρος j του ανταλλακτικού, η πιθανότητα να κατασκευάσει ένα ελαττωματικό ανταλλακτικό είναι p_{ij}. Άρα,

$$\mathrm{P}(A|L_i) = p_{ia} \quad i = 1,2,3 \tag{Π.13}$$

και

$$\mathrm{P}(B|L_i) = p_{ib} \quad i = 1,2,3 \tag{Π.14}$$

Επειδή, το εργοστάσιο αναπτύχθηκε σταδιακά, προσθέτοντας νέες γραμμές παραγωγής, οι μηχανές στη γραμμή 1 είναι παλαιότερες και λιγότερο αξιόπιστες από τις αντίστοιχες στη γραμμή 2 και αυτές της γραμμής 2 είναι παλαιότερες και λιγότερο αξιόπιστες από τις αντίστοιχες της γραμμής 3. Γι' αυτό ισχύει,

$$\begin{aligned} &\mathrm{P}(A|L_1) > \mathrm{P}(A|L_2) > \mathrm{P}(A|L_3) \\ &\text{και} \quad \mathrm{P}(B|L_1) > \mathrm{P}(B|L_2) > \mathrm{P}(B|L_3). \end{aligned} \tag{Π.15}$$

2) Η παραγωγή μερών του ανταλλακτικού από κάθε μηχανή σε μία γραμμή παραγωγής δεν εξαρτάται από το τι παράγεται στις υπόλοιπες μηχανές. Άρα ισχύει ότι

$$\mathrm{P}(A \cap B|L_i) = \mathrm{P}(A|L_i)\mathrm{P}(B|L_i) \quad \text{για } i = 1,2,3. \tag{Π.16}$$

Οι παρατηρήσεις αυτές οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η διαμέριση $\{L_1, L_2, L_3\}$ της συνολικής παραγωγής του εργοστασίου αποτελεί ένα σύστημα κοινών αιτίων για τη στατιστική συσχέτιση (Π.1) ανάμεσα στα ελαττωματικά μέρη των ανταλλακτικών.

Ωστόσο, μελετώντας πιο προσεκτικά τις τιμές των πιθανοτήτων διαπιστώνεται το παράδοξο της ύπαρξης μίας γραμμής παραγωγής που δεν επηρεάζει την ολική πιθανότητα παραγωγής ελαττωματικών ανταλλακτικών. Συγκεκριμένα, επειδή η συνολική παραγωγή ανταλλακτικών του εργοστασίου προέρχεται εξίσου από όλες τις γραμμές παραγωγής ισχύει

$$\mathrm{P}(L_i) = \frac{1}{3}, \quad i = 1,2,3.$$

Επιπλέον, έστω ότι οι πιθανότητες να παραχθούν ανταλλακτικά με ελαττώματα στο μέρος *a* και στο μέρος *b* δίνονται από τον πίνακα 2:

ΠΙΝΑΚΑΣ 2		
	$\mathrm{P}(A\|L_i)$	$\mathrm{P}(B\|L_i)$
$i=1$	0.1	0.2
$i=2$	0.055	0.11
$i=3$	0.01	0.02

Τότε, από το λογισμό των πιθανοτήτων και τις σχέσεις (Π.16) προκύπτει ότι

$$\mathrm{P}(A)=0.055\ ,\ \mathrm{P}(B)=0.11\ ,\ \mathrm{P}(A\cap B)=8,75\times10^{-3}$$
$$\mathrm{P}(A\cap B)>\mathrm{P}(A)\mathrm{P}(B). \qquad (\Pi.17)$$

Παρατηρείστε ότι η $\mathrm{P}(A|L_2)=\mathrm{P}(A)=0.055$ και $\mathrm{P}(B|L_2)=\mathrm{P}(B)=0.11$. Άρα, η γραμμή παραγωγής 2 μολονότι αποτελεί μέρος του συστήματος κοινών αιτίων που εξηγεί τη στατιστική συσχέτιση (Π.17) δεν είναι στατιστικώς συναφής, δηλαδή δεν επηρεάζει την πιθανότητα να λάβουν χώρα, τα συμβάντα *A* και *B*.

Το ενδεχόμενο, ανάμεσα στους παράγοντες που ορίζουν ένα σύστημα κοινών αιτίων, να βρίσκεται ένας παράγοντας που δεν είναι στατιστικώς συναφής με τα συμβάντα που ορίζουν την προς εξήγηση συσχέτιση, αντιβαίνει στις διαισθήσεις μας τόσο όσον αφορά στην επιστημονική εξήγηση όσο και στην έννοια του κοινού αιτίου. Υπενθυμίζουμε ότι με το παράδειγμα ενός άνδρα που δεν εγκυμονεί, «λόγω» του γεγονότος ότι λαμβάνει αντισυλληπτικά χάπια, ασκείται κριτική στο μοντέλο επαγωγικής-στατιστικής εξήγησης του Hempel στη βάση ότι επιτρέπει την εξήγηση συμβάντων από μη συναφείς παράγοντες (Salmon *et al*., 2003:32). Επιπλέον, δεν θα μπορούσε κάποιος εύκολα να μας πείσει ότι ένας παράγοντας που δεν μεταβάλλει την πιθανότητα να λάβουν χώρα δύο συμβάντα είναι δυνατό να αποτελεί κοινό αίτιο ή έστω επιμέρους κοινό αίτιο αυτών. Άλλωστε, το μαθηματικό μοντέλο του κοινού αιτίου δεν επιτρέπει τη συμπερίληψη μη συναφών παραγόντων στο εξηγούν: τόσο το κοινό αίτιο όσο και το συμβάν που αναπαριστάνει την άρνησή του, αποτελούν στατιστικώς συναφείς παράγοντες με τα συμβάντα που εκδηλώνουν στατιστική συσχέτιση. Από αυτή την παρατήρηση μπορούμε να βγάλουμε ένα ακόμα συμπέρασμα: μόνο τα ορθά συστήματα κοινού αιτίου, με μέγεθος μεγαλύτερο του 2,

επιτρέπουν τη συμπερίληψη μη στατιστικώς συναφών παραγόντων με τα συσχετιζόμενα συμβάντα.

Ίσως, λοιπόν, θα πρέπει να ενισχύσουμε τον ορισμό του συστήματος κοινών αιτίων με επιπλέον συνθήκες από αυτές που υποθέτουν οι Hofer- Szabó και Rédei ώστε να αποκλεισθεί η συμπερίληψη παραγόντων που δεν είναι στατιστικώς συναφείς με τα αποτελέσματα. Όμως, δεν μου είναι καθόλου σαφές αν αυτές οι συνθήκες θα πρέπει να απαιτούν οι παράγοντες που ορίζουν την εξηγητική διαμέριση να είναι στατιστικώς συναφείς, ως επιμέρους κοινά αίτια, με *αμφότερα* τα συσχετιζόμενα συμβάντα ή μπορούμε να απαιτήσουμε οι παράγοντες αυτοί να είναι στατιστικώς συναφείς με *τουλάχιστον* ένα από τα συσχετιζόμενα συμβάντα, δηλαδή να είναι επιμέρους αιτιακοί παράγοντες για το ένα συμβάν (ή επιμέρους κοινά αίτια).

Μάλιστα, στην περίπτωση που οι συνθήκες αυτές δεν ικανοποιούνται για κάποιο παράγοντα που ορίζει τη διαμέριση, τότε θα πρέπει να εγκαταλείψουμε τη διαμέριση συνολικά, χωρίς να προσπαθήσουμε να βρούμε άλλους παράγοντες που να την καθιστούν πιο εκλεπτυσμένη. Συγκεκριμένα, κάποιος θα μπορούσε να σκεφτεί ότι αν ένας παράγων C_j μίας διαμέρισης $\{C_i\}_{i=1}^{m}$ δεν είναι στατιστικώς συναφής με τα A και B και η διαμέριση ικανοποιεί τον ορισμό του συστήματος κοινών αιτίων που προτείνουν οι Hofer-Szabó και Rédei , τότε καταρχήν θα μπορούσαμε να θεωρήσουμε δύο (ή περισσότερους) παράγοντες που να διαμερίζουν την υποσυλλογή C_j, και κατά συνέπεια να μεταβάλλουν την πιθανότητα να λάβουν χώρα τα A και B, και να ορίσουμε με αυτό τον τρόπο μία νέα διαμέριση $\{C_1,...,C_{j_1},C_{j_2},...,C_m\}$ που να αποτελείται από στατιστικώς συναφείς παράγοντες με τα A,B η οποία βεβαίως, θα απαιτήσουμε να είναι σύστημα κοινών αιτίων. Κάτι τέτοιο όμως δεν μπορεί να γίνει όπως απέδειξαν οι Hofer-Szabó και Rédei (2004:Πρτ. 4), διότι σε αυτή την περίπτωση η νέα διαμέριση δεν θα αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων.

Με αυτές τις παρατηρήσεις ολοκληρώνουμε, προς το παρόν, την αναφορά μας στην έννοια του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach. Στο ζήτημα θα επανέλθουμε στο όγδοο κεφάλαιο, όπου θα εξετάσουμε την έννοια του συστήματος κοινών αιτίων στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΡΙΤΟ

Η ΠΡΩΙΜΗ ΑΙΤΙΑΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ SALMON

Παρά τη μεγάλη συμβολή του Russell και του Reichenbach στη διαμόρφωση των αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις, ο αμερικανός φιλόσοφος Wesley C. Salmon είναι αυτός που έρχεται στο νου όλων όσων αναφέρονται σε τέτοιου είδους αιτιακές θεωρίες. Θα τολμούσαμε να ισχυριστούμε ότι τόσο οι αιτιακές γραμμές όσο και οι ακολουθίες συμβάντων, που διακρίνονται σε πραγματικές και σε μη πραγματικές, ανήκουν στην προϊστορία των αιτιακών διαδικασιών. Και όπως σε κάθε νέα σύνθεση, έτσι και στην περίπτωση που εξετάζουμε, το παρελθόν αποτελεί αφενός πηγή έμπνευσης, αφετέρου πεδίο άσκησης κριτικής που οριοθετεί το νέο από το παλαιό.

Στην κριτική που άσκησε ο Salmon, αλλά και ο Dowe στη συνέχεια, στις αιτιακές θεωρίες του Russell και του Reichenbach έχουμε ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες. Εδώ, θα αναφέρουμε απλώς τα σημεία που αυτές οι προσεγγίσεις στάθηκαν πηγή έμπνευσης για την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon.

Καταρχάς, ο Salmon κατανοεί με βάση την έννοια της αιτιακής γραμμής αυτό που ο ίδιος θα ονομάσει *διαδικασία* (process). Όπως θα δούμε στην ενότητα 3.1, αυτό σημαίνει την απαίτηση χωροχρονικής συνέχειας για τη γεωμετρική αναπαράσταση μίας διαδικασίας καθώς και την περιγραφή των χαρακτηριστικών που εκδηλώνονται κατά μήκος αυτής με τη βοήθεια της έννοιας της αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης, μίας έννοιας που προκύπτει από τις συνοριζόμενες κλάσεις του Reichenbach. Επίσης, κατά μήκος μίας διαδικασίας, όπως συμβαίνει και με τις αιτιακές γραμμές, είναι δυνατό να εκδηλώνεται ομοιομορφία δομής.

Δεύτερον, η διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και σε ψευδο-διαδικασίες καθώς και ο ορισμός των αιτιακών αλληλεπιδράσεων στηρίζονται στη μέθοδο του ίχνους

του Reichenbach. Όπως θα δούμε στην ενότητα 3.2, η υιοθέτηση από το Salmon της μεθόδου του ίχνους καθιστά τη θεωρία του εξαρτημένη από την αλήθεια ορισμένων αντιγεγονικών προτάσεων. Επίσης, η έννοια της διάδοσης του ίχνους στηρίζεται στη λύση που είχε δώσει ο Russell στο ζηνώνειο παράδοξο του βέλους.

Τέλος, στην ενότητα 3.3 θα δούμε ότι η παραγωγή της αιτιακής επίδρασης, περιγράφεται από τα δίκρανα σύζευξης και τα δίκρανα αλληλεπίδρασης, τα οποία έχουν την αφετηρία τους στην έννοια του κοινού αιτίου που σχηματοποιήθηκε για πρώτη φορά από τον Reichenbach. Επίσης, η παραγωγή δομής από δίκρανα σύζευξης είναι μία ιδέα που η καταγωγή της θα πρέπει να αναζητηθεί στο αίτημα της δομής του Russell.

3.1. Η έννοια της διαδικασίας

Η έννοια "διαδικασία" δεν ορίζεται αυστηρά στο πλαίσιο της πρώιμης θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Ο Salmon (1984) προτιμά να περιγράψει την έννοια με παραδείγματα, να μας παραπέμψει στο έργο του Russell και στην έννοια της αιτιακής γραμμής (για να επεξηγήσει αυτό που εννοεί με τον όρο "διαδικασία") και, τέλος, να μας δώσει τα εξής βασικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών:

> …τα συμβάντα είναι σχετικώς εντοπισμένα στο χωρόχρονο, ενώ οι διαδικασίες έχουν πολύ μεγαλύτερη χρονική διάρκεια, και σε ορισμένες περιπτώσεις, πολύ μεγαλύτερη χωρική έκταση. Στα χωροχρονικά διαγράμματα, τα συμβάντα αναπαριστάνονται από σημεία, ενώ οι διαδικασίες από γραμμές. (Salmon 1984:139)

> Μία δεδομένη διαδικασία, είτε αιτιακή είτε ψευδο-διαδικασία, έχει ένα ορισμένο βαθμό ομοιομορφίας – μπορούμε να πούμε, κάπως χαλαρά, ότι εκδηλώνει ορισμένη δομή. (ό.π.:144)

Αργότερα, στο πλαίσιο του διαλόγου που έχει με τον Dowe, ο Salmon θα υιοθετήσει τον ακόλουθο ορισμό της έννοιας:

> Η διαδικασία είναι κάτι που επιδεικνύει συνοχή χαρακτηριστικών. (Salmon 1998:250)

Έτσι, ενώ η κρούση δύο σφαιρών του μπιλιάρδου είναι ένα συμβάν, η κίνηση της σφαίρας από το σημείο κρούσης προς την τρύπα του τραπεζιού αποτελεί μία

διαδικασία. Μία έκρηξη σε ένα μακρινό άστρο μπορεί να θεωρηθεί ως ένα συμβάν, ενώ η διάδοση μίας ακτίνας φωτός που προέρχεται από την έκρηξη αποτελεί μία διαδικασία. Επίσης, η κίνηση ενός αυτοκινήτου, αλλά και τη σκιάς του, μπορούν να θεωρηθούν ως διαδικασίες, όπως και η κίνηση ενός ηλεκτρονίου στον καθοδικό σωλήνα ενός παλμογράφου ή η κίνηση της φωτεινής κηλίδας που δημιουργείται από τη δέσμη των ηλεκτρονίων στη οθόνη του. Ένα κοινό στοιχείο όλων αυτών των διαδικασιών είναι ότι μπορούμε, επιλέγοντας ένα χαρακτηριστικό σημείο του κάθε αντικειμένου (π.χ., το κέντρο μάζας μίας σφαίρας) ή θεωρώντας το αντικείμενο χωρικά σημειακό, να αναπαραστήσουμε γεωμετρικά την ιστορία του με μία γραμμή σε ένα χωροχρονικό διάγραμμα, ώστε κάθε σημείο της γραμμής να αναπαριστάνει τη χωρική θέση του χαρακτηριστικού σημείου του αντικειμένου ή το ίδιο το αντικείμενο σε μία ορισμένη χρονική στιγμή. Έτσι προκύπτει η θέση του Salmon ότι η αναπαράσταση μίας διαδικασίας στο χωρόχρονο είναι μία γραμμή, σε αντίθεση τα συμβάντα που θεωρούμε ότι λαμβάνουν χώρα σε σημεία του χώρου κάποιες χρονικές στιγμές και άρα η γεωμετρική τους αναπαράσταση στο χωρόχρονο δίνεται από σημεία.

Ας ξεκινήσουμε, λοιπόν, αντίστροφα θεωρώντας μία χωροχρονική γραμμή *S*. Για να ισχυριστούμε ότι η *S* αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία θα πρέπει να έχουμε εκδήλωση σε αυτήν είτε κάποιων χαρακτηριστικών, ως προς τα οποία έχει συνοχή, είτε ορισμένης δομής. Στα παραδείγματα που αναφέραμε η μορφή του αυτοκινήτου ή της σκιάς αποτελούν δομές που εκδηλώνονται σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία, ενώ η ένταση της φωτεινής κηλίδας στην οθόνη του παλμογράφου ή το χρώμα της φωτεινής ακτίνας είναι χαρακτηριστικά ως προς τα οποία η αντίστοιχη διαδικασία εκδηλώνει συνοχή.

Οι όροι "χαρακτηριστικό" και "δομή" θεωρούνται βασικοί για τη διατύπωση της πρώιμης εκδοχής της θεωρίας του Salmon. Ωστόσο, όπως ο ίδιος παραδέχθηκε αργότερα (Salmon 1994), χρησιμοποιήθηκαν χωρίς να επεξηγείται το νόημα τους. Σε μία προσπάθεια αποσαφήνισης του νοήματος του όρου "χαρακτηριστικό", ο Salmon αναφέρεται στην έννοια της *αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης*. Μία κλάση είναι αντικειμενικά συνοριζόμενη αν και μόνο αν ένα συμβάν μπορεί να (μην) ταξινομηθεί σε αυτή με βάση την πληροφορία που λαμβάνει ένας ανιχνευτής που αποκρίνεται σε

αυτό το συμβάν και την επεξεργάζεται ένας υπολογιστής. Η ταξινόμηση ενός συμβάντος σε μία συνοριζόμενη κλάση δεν μεταβάλλεται από συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στον κώνο φωτός του μέλλοντος του συμβάντος που ταξινομείται, ούτε από πληροφορία που προκύπτει από την ανίχνευση τέτοιων συμβάντων (Salmon 1984:68). Μολονότι η τελευταία πρόταση του ορισμού αυτού εξαιρεί μόνο την πληροφορία που προέρχεται από συμβάντα-ανιχνευτές που λαμβάνουν χώρα στο μέλλον του υπό εξέταση συμβάντος, ο Salmon, σε άρθρο του 1994, φαίνεται να γενικεύει την εξαίρεση απορρίπτοντας κάθε πληροφορία που προέρχεται από συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικό χωροχρονικό σημείο από εκείνο του υπό εξέταση συμβάντος[1]. Έτσι, τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται σε μία διαδικασία περιγράφονται από αντικειμενικά συνοριζόμενες κλάσεις συμβάντων και η εκδήλωση ενός χαρακτηριστικού σε ένα χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία είναι ένα συμβάν που λαμβάνει χώρα σε αυτό το σημείο και ανήκει στην αντικειμενικά συνοριζόμενη κλάση συμβάντων που περιγράφει αυτό το χαρακτηριστικό.

Η τροποποίηση του αρχικού ορισμού της αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης ως προς το είδος της πληροφορίας που επεξεργάζεται ο υπολογιστής, φέρνει την έννοια ακόμα πιο κοντά στον εννοιολογικό της πρόγονο, τη "συνοριζόμενη κλάση" του Reichenbach, στην οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως (ενότ. 2.2). Όμως, η προσέγγιση του Salmon διαφέρει από αυτή του Reichenbach σε τρία βασικά σημεία. Πρώτον, ο Salmon δεν δεσμεύεται στην παρατηρησιμότητα των ιδιοτήτων, γι' αυτό και αντικαθιστά τον "παρατηρητή" με "ανιχνευτή". Δεύτερον, ο προσδιορισμός για το αν ένα συμβάν ανήκει σε μία αντικειμενικά συνοριζόμενη κλάση δεν εξαρτάται από τη γνώση που έχουμε. Ο υπολογιστής επεξεργάζεται πληροφορία κωδικοποιημένη σε φυσικές διαδικασίες με βάση φυσικούς νόμους. Τέλος, ο Reichenbach δεν επιτρέπει να εξαρτάται η κατάταξη ενός συμβάντος σε μία συνοριζόμενη κλάση από άλλα συμβάντα ή από πληροφορία που προκύπτει από την ανίχνευση τους. Αντιστοίχως, όπως ήδη αναφέραμε, ο Salmon τηρεί αμφιλεγόμενη

[1] «Για παράδειγμα όταν μετράμε θερμοκρασία χρησιμοποιώντας ένα θερμοζεύγος, ουσιαστικά διαβάζουμε ένα ποτενσιόμετρο για να ανιχνεύσουμε μία ηλεκτρεγερτική δύναμη. Ο υπολογιστής, στον οποίο αναφέρεται η επεξήγηση, θα πρέπει να μπορεί να μεταφράζει την ένδειξη του ποτενσιόμετρου σε καθορισμό της θερμοκρασίας στη βάση νόμων που αφορούν στα ηλεκτρικά αποτελέσματα (outputs) των θερμοζευγών, *αλλά χωρίς να λαμβάνει πληροφορία από άλλο φυσικό ανιχνευτή*» (Salmon 1998:251, έμφαση δική μου).

στάση όσον αφορά στην προέλευση της πληροφορίας με βάση την οποία ταξινομείται ένα συμβάν σε μία αντικειμενικά συνοριζόμενη κλάση. Από τη μία πλευρά, με τον ορισμό του 1984, δεν αποκλείει συμβάντα και πληροφορία από το παρελθόν να επηρεάζουν την ταξινόμηση ενός συμβάντος σε μία αντικειμενικά συνοριζόμενη κλάση ενώ, από την άλλη, με το άρθρο του 1994, φαίνεται να συμφωνεί με τον Reichenbach.

Ο Salmon προσέφυγε στην ανάλυση των χαρακτηριστικών που εκδηλώνονται σε μία διαδικασία για να απαντήσει σε αντιπαραδείγματα που διατυπώθηκαν στη θεωρία του. Τα αντιπαραδείγματα αυτά στηρίχθηκαν στην ασάφεια της έννοιας "χαρακτηριστικό" και είχαν ως στόχο την ταξινόμηση ψευδο-διαδικασιών ως αιτιακές διαδικασίες με βάση τη μέθοδο του ίχνους. Τα χαρακτηριστικά που χρησιμοποιήθηκαν –όπως το *να είναι κάτι η σκιά ενός γρατζουνισμένου αυτοκινήτου* (Kitcher 1989:463), ή *το να είναι κάτι η σκιά που βρίσκεται πιο κοντά στη γέφυρα Harbour απ' ό,τι στην όπερα του Sydney* (Dowe 1992)– μολονότι αποδίδονται σε ένα συμβάν, εκφράζουν τη σχέση του συμβάντος με άλλα συμβάντα. Δηλαδή, τα χαρακτηριστικά αυτά ορίζουν ένα συμβάν με βάση μία σχεσιακή ιδιότητα που το συσχετίζει με άλλα συμβάντα. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση το χαρακτηριστικό που αποδίδουμε σε ένα χωροχρονικό σημείο συσχετίζει τη σκιά που βλέπουμε σε αυτό το χωροχρονικό σημείο με ένα αυτοκίνητο που είναι γρατζουνισμένο και εντοπίζεται σε κάποιο άλλο χωροχρονικό σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση το χαρακτηριστικό που αποδίδουμε στο χωροχρονικό σημείο που εμφανίζεται η σκιά ορίζεται με βάση τις σχετικές χωρικές αποστάσεις τριών συμβάντων που είναι ταυτόχρονα ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς. Άρα, η ταξινόμηση ενός συμβάντος στην κλάση συμβάντων που ορίζεται με βάση τέτοιου είδους χαρακτηριστικά δεν μπορεί να προκύψει από έναν ανιχνευτή και έναν υπολογιστή που βρίσκεται στο σημείο που λαμβάνει χώρα το συμβάν – δηλαδή, η κλάση συμβάντων δεν είναι αντικειμενικά συνοριζόμενη. Επιπλέον, με βάση τη θεώρηση των αντικειμενικά συνοριζόμενων κλάσεων, δεν αποτελούν αποδεκτά χαρακτηριστικά μίας διαδικασίας ιδιότητες, όπως αυτές στις

οποίες αναφέρθηκε ο Goodman, που για τον ορισμό τους απαιτείται να αναφερθούμε στη μελλοντική κατάσταση ενός αντικειμένου[2].

Ο Dowe διατηρεί επιφυλάξεις ως προς το αν η περιγραφή των χαρακτηριστικών από αντικειμενικά συνοριζόμενες κλάσεις συμβάντων μπορεί να ικανοποιήσει τις ίδιες τις απαιτήσεις που θέτει ο Salmon. Υποστηρίζει ότι ενώ δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε τοπικά, παρατηρώντας τη σκιά ενός αυτοκινήτου, αν πρόκειται για ένα γρατζουνισμένο ή όχι αυτοκίνητο, μπορούμε να διαπιστώσουμε αν πρόκειται για τη σκιά ενός αυτοκινήτου με ανοιχτό καπό. Το αν κάτι είναι η σκιά ενός αυτοκινήτου με ανοικτό καπό, μπορεί να διαπιστωθεί τοπικά από μία διάταξη ανιχνευτή-υπολογιστή που ανιχνεύει το σχήμα και την ταχύτητα του αντικειμένου. Ωστόσο, ο ορισμός αυτής της ιδιότητας στηρίζεται στη γνώση ότι κάτι, κάπου αλλού, είναι ένα αυτοκίνητο με ανοιχτό καπό. Άρα, υποστηρίζει ο Dowe, «υποψιάζομαι ότι ο Salmon δεν έχει απαλλαγεί σε τελική ανάλυση από την επιστημική ουσία της "συνοριζόμενης κλάσης" του Reichenbach, διότι τέτοιες ιδιότητες, μολονότι είναι τοπικά διακρίσιμες, έχουν αλλού την οντική τους βάση» (Dowe 2000:78).

Τα χαρακτηριστικά μίας διαδικασίας δεν εκδηλώνονται σε απομονωμένα χωροχρονικά σημεία της γραμμής που την αναπαριστάνει. Ο Salmon υποθέτει κάποιου τύπου ομοιομορφία σε σχέση με αυτά τα χαρακτηριστικά, αν όχι για ολόκληρη τη γραμμή που αναπαριστάνει τη διαδικασία, τουλάχιστον για τμήματα της. Έτσι, αν σε κάποιο σημείο της χωροχρονικής γραμμής εκδηλώνεται κάποιο χαρακτηριστικό, τότε θα πρέπει να υποθέσουμε ότι υπάρχει μία ανοικτή χωροχρονική περιοχή του σημείου αυτού στην οποία σε κάθε σημείο της γραμμής εκδηλώνεται το ίδιο χαρακτηριστικό. Αυτό το αίτημα έχει ως συνέπεια να μη θεωρούμε ως γεωμετρική αναπαράσταση διαδικασιών, τις χωροχρονικές γραμμές που σε κάθε σημείο τους, ή σε κάθε σημείο κάποιου διαστήματος αυτών, εκδηλώνονται διαφορετικά χαρακτηριστικά. Έτσι, αποκλείονται από τις διαδικασίες "παράξενες" περιπτώσεις εκδηλώσεων χαρακτηριστικών κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής. Για παράδειγμα, θεωρείστε μία χωροχρονική γραμμή που σε κάθε σημείο της εμφανίζεται ένα διαφορετικό σωματίδιο ή αναπαριστάνει σωματίδια που

[2] Σύμφωνα με τον Goodman (1983:72) δεν μπορούμε να διακρίνουμε ανάμεσα στα πράσινα διαμάντια και στα *πρά-κινα* διαμάντια, διότι αμφότερα μέχρι τώρα είναι πράσινα, όμως σε κάποια μελλοντική χρονική στιγμή τα *πρά-κινα* είναι κόκκινα.

εμφανίζονται ασυνεχώς σε συγκεκριμένα χωροχρονικά σημεία. Τέτοιου είδους χωροχρονικές γραμμές δεν αναπαριστάνουν διαδικασίες.

Η κριτική που δέχτηκε αυτός ο περιορισμός που χαρακτηρίζει τις διαδικασίες είναι ότι εξαιρεί βραχύχρονες διαδικασίες (Dowe 2000:74). Για παράδειγμα τα υπο-ατομικά σωματίδια που έχουν μικρό χρόνο ζωής και παρόλα αυτά έχουν παίζουν σημαντικό αιτιακό ρόλο, δεν θεωρούνται διαδικασίες. Ωστόσο, η κριτική αυτή δεν είναι ορθή στο βαθμό που δεν ορίζεται ελάχιστο εύρος του διαστήματος της χωροχρονικής γραμμής στο οποίο απαιτείται να εκδηλώνεται κάποιο χαρακτηριστικό για να θεωρηθεί η γραμμή γεωμετρική αναπαράσταση μίας διαδικασίας. Το μόνο που αποκλείεται είναι στιγμιαίες εμφανίσεις και εξαφανίσεις χαρακτηριστικών και αντικειμένων.

Όπως ήδη αναφέραμε, οι διαδικασίες, εκτός από ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό είναι δυνατό να εκδηλώνουν και ομοιομορφία δομής. Η "δομή" είναι ο δεύτερος όρος ως προς τον οποίο διαπιστώνεται ασάφεια στην πρώιμη εκδοχή της θεωρίας του Salmon. Για το νόημα του όρου ο Salmon αναφέρει ακόμα λιγότερα απ' ό,τι για τα χαρακτηριστικά μίας διαδικασίας. Ωστόσο, είναι εύλογο να ανατρέξουμε στη θεωρία του Russell για τον ορισμό της έννοιας, δεδομένης της ομοιότητας ανάμεσα στις διαδικασίες και στις αιτιακές γραμμές, και λόγω του γεγονότος ότι σε μία αιτιακή γραμμή μπορεί να υπάρχει «σταθερότητα δομής» (Russell 1948:477). Για τον Russell, μία δομή περιγράφεται από ένα σύνολο *K* και από μία ή περισσότερες *n*-μελείς σχέσεις *R* ανάμεσα στα στοιχεία του συνόλου αυτού (ό.π. 271-2). Θεωρούμε ότι στην περίπτωσή μας, θα πρέπει να κατανοήσουμε τη σχέση *R* ως μία σχέση ανάμεσα σε χαρακτηριστικά που περιγράφονται από αντικειμενικά συνοριζόμενες κλάσεις συμβάντων. Άρα, θα πρέπει να θεωρήσουμε το *K* ως το σύνολο των αντικειμενικώς συνοριζόμενων κλάσεων συμβάντων.

Μία δομή <*K,R*> είναι δυνατό να εκδηλώνεται σε ένα ή σε περισσότερα από ένα χωροχρονικά σημεία. Αν υποθέσουμε ότι η *R* είναι μία διμελής σχέση, τότε θα λέμε ότι η δομή <*K,R*> εκδηλώνεται σε ένα χωροχρονικό σημείο αν υπάρχει ένα συμβάν *x* που λαμβάνει χώρα στο εν λόγω σημείο και ταξινομείται σε δύο διαφορετικές αντικειμενικά συνοριζόμενες κλάσεις συμβάντων P_1 και P_2, οι οποίες ικανοποιούν τη σχέση *R*. Για παράδειγμα, ένα στοιχειώδες σωματίδιο έχει σταθερό

λόγο μάζας προς φορτίο. Δηλαδή, σε ένα χωροχρονικό σημείο που θεωρούμε ότι εντοπίζεται το σωματίδιο εκδηλώνονται δύο ιδιότητες που βρίσκονται σε μία ορισμένη σχέση – έχουν ορισμένο λόγο. Από την άλλη, θα λέμε ότι η δομή <*K,R*> εκδηλώνεται σε δύο χωροχρονικά σημεία αν υπάρχουν συμβάντα x_1, x_2 τα οποία ταξινομούνται σε δύο διαφορετικές αντικειμενικά ομογενείς κλάσεις συμβάντων P_1 και P_2, αντιστοίχως, οι οποίες βρίσκονται σε μία σχέση *R*. Για παράδειγμα, η σχέση στατιστικής συνάφειας που συνδέει δύο χωροειδώς απομακρυσμένα συμβάντα που ανήκουν στις κλάσεις *A,B* ορίζει μία δομή που εκδηλώνεται σε περισσότερα από ένα χωροχρονικά σημεία.

Με βάση την παραπάνω ανάλυση, η ομοιομορφία ως προς τη δομή που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας προϋποθέτει, αφενός, την εκδήλωση δομής σε κάθε χωροχρονικό σημείο της γραμμής που περιγράφει γεωμετρικά τη διαδικασία, αφετέρου, την ταύτιση των δομών που εκδηλώνονται σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία της γραμμής αυτής. Σύμφωνα με τον Russell, δύο δομές $\langle K_1, R_1, ..., R_m \rangle$, $\langle K_2, L_1, ..., L_m \rangle$ ταυτίζονται αν και μόνο αν α) σε κάθε στοιχείο του K_1 μπορεί να αντιστοιχηθεί ένα και μόνο στοιχείο του K_2 και για κάθε στοιχείο του K_2 υπάρχει ένα στοιχείο του K_1 που να του αντιστοιχεί *και* β) για κάθε *n*-άδα στοιχείων του K_1 που ικανοποιεί τη σχέση R_i $(i = 1, ..., m)$ ισχύει ότι η αντίστοιχη *n*-άδα στοιχείων του K_2 ικανοποιεί τη σχέση L_i $(i = 1, ..., m)$ και αντίστροφα (Russell 1948:271-2).

Γενικώς, η ταυτότητα των δομών που εκδηλώνονται σε δύο διαφορετικά σημεία μίας διαδικασίας δεν συνεπάγεται ότι και τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται στα σημεία αυτά ταυτίζονται. Είναι δυνατόν σε δύο διαφορετικά σημεία μίας διαδικασίας να εκδηλώνονται διαφορετικά χαρακτηριστικά, που σε κάθε σημείο ικανοποιούν την αντίστοιχη σχέση. Αυτό συνεπάγεται ότι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία δομής δεν εκδηλώνει, κατ' ανάγκη, και ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό. Το παράδειγμα της αιτιακής γραμμής που ξεκινάει από την εκφώνηση ενός μηνύματος που εκπέμπεται ραδιοφωνικά και καταλήγει σε κάποιον ακροατή, μπορεί να θεωρηθεί ως παράδειγμα διαδικασίας στην οποία εκδηλώνεται ομοιομορφία ως προς τη δομή του μηνύματος, αλλά όχι ως προς τα χαρακτηριστικά

που εκδηλώνονται κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής που θεωρούμε ότι την αναπαριστάνει γεωμετρικά. Από την άλλη, το γεγονός ότι μία διαδικασία εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό δεν συνεπάγεται ότι εκδηλώνει και ομοιομορφία δομής - αφενός, διότι ο ορισμός της δομής προϋποθέτει, πέραν από την εκδήλωση χαρακτηριστικών, την ύπαρξη σχέσεων που ικανοποιούνται από αυτά τα χαρακτηριστικά, αφετέρου, διότι θα πρέπει η διαδικασία να εκδηλώνει ομοιομορφία τουλάχιστον ως προς δύο χαρακτηριστικά για να μπορούμε να μιλήσουμε για δομή με μη τετριμμένο τρόπο.

Ο Dowe κατανοεί με διαφορετικό τρόπο την έννοια της δομής μίας διαδικασίας. Θεωρεί ότι αυτή συνίσταται στη χρονική σταθερότητα κάποιας ιδιότητας που εκδηλώνεται κατά μήκος της διαδικασίας (Dowe 2000:81). Δηλαδή, η δομή μίας διαδικασίας δεν εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της διαδικασίας αλλά αναφέρεται στη διαδικασία συνολικά. Ωστόσο, αν αποδώσουμε στον όρο αυτή τη σημασία, τότε η έννοια της δομής μίας διαδικασίας γίνεται ασύμβατη με μία άλλη έννοια που παίζει πρωταρχικό ρόλο για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών: τη *διάδοση δομής*. Όπως θα δούμε στη συνέχεια, στο πλαίσιο της θεωρίας του Salmon, η "διάδοση" αποτελεί έναν τεχνικό όρο που εκφράζει την αντιστοίχιση αυτού που διαδίδεται σε κάθε σημείο της διαδικασίας, κατά μήκος της οποίας διαδίδεται. Έτσι, η διάδοση δομής δεν είναι τίποτα άλλο από την απεικόνιση μίας δομής στα σημεία της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία και προϋποθέτει ότι η δομή που χαρακτηρίζει τη διαδικασία εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της. Στη θέση του Dowe για τη δομή μίας διαδικασίας θα επανέλθουμε, όταν θα εξετάσουμε την κριτική που ασκείται στον Salmon για την παραγωγής δομής με τη βοήθεια των δίκρανων σύζευξης.

Συνοψίζοντας, μπορούμε να διακρίνουμε τις διαδικασίες σε δύο είδη: α) σε αυτές που κατά μήκος τους εκδηλώνεται κάποιο σταθερό χαρακτηριστικό και, β) σε αυτές που κατά μήκος τους εκδηλώνεται κάποια σταθερή δομή. Η γεωμετρική αναπαράσταση αμφότερων των ειδών διαδικασίας είναι μία χωροχρονική γραμμή. Η έννοια του χαρακτηριστικού που εκδηλώνεται σε μία διαδικασία επεξηγείται με τη βοήθεια της αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης συμβάντων. Επιπλέον υποθέσαμε ότι η δομή μπορεί να κατανοηθεί με τη βοήθεια της έννοιας δομής που υιοθετεί ο

Russell - μολονότι ο Salmon δεν παραπέμπει ρητά σε αυτή. Η ομοιομορφία ως προς τα χαρακτηριστικά ή τη δομή που εκδηλώνονται κατά μήκος μίας διαδικασίας σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά και η δομή δεν εκδηλώνονται σε μεμονωμένα σημεία μίας διαδικασίας. Σε μία διαδικασία η εκδήλωση ενός χαρακτηριστικού ή/και δομής λαμβάνει χώρα τουλάχιστον σε ένα συνεχές τμήμα της διαδικασίας, αν όχι σε κάθε σημείο της διαδικασίας.

3.2 Αιτιακές Διαδικασίες

Σύμφωνα με τον Salmon, οι διαδικασίες διακρίνονται σε αιτιακές και σε ψευδο-διαδικασίες. Η διάκριση αυτή αφορά τόσο στις διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό όσο και στις διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Οι αιτιακές διαδικασίες, σε αντιδιαστολή με τις ψευδο-διαδικασίες, έχουν μία ορισμένη ικανότητα η οποία ενεργοποιείται εφόσον δημιουργήσουμε μία τροποποίηση στο χαρακτηριστικό ή στη δομή που εκδηλώνουν. Αυτή η τροποποίηση είναι ένα ίχνος που δημιουργούμε σε ένα χωροχρονικό σημείο της διαδικασίας. Η ικανότητα των αιτιακών διαδικασιών συνίσταται στη *διάδοση* του δημιουργούμενου ίχνους κατά μήκος της διαδικασίας. Αυτό δεν σημαίνει ότι οι αιτιακές διαδικασίες διαδίδουν τροποποιήσεις (ίχνος) αλλά ότι έχουν την ικανότητα να το κάνουν. Στην πραγματικότητα οι αιτιακές διαδικασίες ενδέχεται να διαδίδουν τροποποιήσεις ή απλώς να εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό ή/και ως προς κάποια δομή. Αντιθέτως, οι ψευδο-διαδικασίες δεν έχουν αυτή την ικανότητα. Μάλιστα, ο Salmon υποστηρίζει ότι οι ψευδο-διαδικασίες δεν υφίστανται σε απουσία αιτιακών διαδικασιών: είναι παρασιτικές ως προς αυτές. Στην αιτιακή θεωρία του Salmon οι αιτιακές διαδικασίες μπορούν να διαδώσουν αιτιακή επίδραση από ένα σημείο του χωροχρόνου σε κάποιο άλλο. Οι αιτιακές διαδικασίες αποτελούν τους δεσμούς που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα.

Η διάδοση της τροποποίησης ενός χαρακτηριστικού που εκδηλώνεται σε μία διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε ένα χωροχρονικό σημείο, περιγράφεται από την *αρχή διάδοσης ίχνους* (ΑΔΙ), σύμφωνα με την οποία:

> Έστω *P* μία διαδικασία που, σε απουσία αλληλεπιδράσεων με άλλες διαδικασίες θα παρέμενε ομοιόμορφη ως προς κάποιο χαρακτηριστικό *Q*, το οποίο θα εκδήλωνε με συνέπεια σε ένα διάστημα που περιλαμβάνει τα σημεία *A* και *B*, $A \neq B$. Τότε, ένα ίχνος (που συνίσταται σε τροποποίηση του *Q* σε *Q΄*), που εισάγεται στη διαδικασία P μέσω μίας μοναδικής τοπικής αλληλεπίδρασης στο σημείο *A*, διαδίδεται στο σημείο *B* αν εκδηλώνει την τροποποίηση *Q΄* στο *B* και σε όλα τα στάδια της διαδικασίας ανάμεσα στα *A* και *B* χωρίς επιπρόσθετες παρεμβάσεις. (Salmon 1984:148)

Το ίχνος δημιουργείται τοπικά σε ένα σημείο *A* της γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία η οποία είναι ομοιόμορφη ως προς ένα χαρακτηριστικό *Q*. Το ίχνος είναι η τροποποίηση του χαρακτηριστικού *Q* σε *Q΄*. Δηλαδή, η δημιουργία ίχνους στο *A* σημαίνει ότι στο σημείο αυτό εκδηλώνεται το χαρακτηριστικό *Q΄*. Το χωροχρονικό σημείο *A* στο οποίο δημιουργείται ίχνος σε μία διαδικασία *P* είναι, γεωμετρικά, το σημείο τομής δύο ή περισσότερων διαδικασιών. Η τοπική αλληλεπίδραση που δημιουργεί το ίχνος στο *A*, όπως θα δούμε στη συνέχεια, ενδέχεται να είναι αιτιακή αλληλεπίδραση, εφόσον οι διαδικασίες που τέμνονται γεωμετρικά στο σημείο αυτό είναι αιτιακές. Ωστόσο, ίχνος μπορεί να δημιουργηθεί και σε μία ψευδο-διαδικασία και σε αυτή την περίπτωση η δημιουργία ίχνους δεν είναι αποτέλεσμα αιτιακής αλληλεπίδρασης. Ο ορισμός του ίχνους στον οποίο κατέληξε ο Salmon στην ύστερη ανασυγκρότηση της θεωρίας του είναι ο εξής:

> Το ίχνος είναι η τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού που λαμβάνει χώρα σε μία μοναδική τοπική τομή. (Salmon 1998:250)

Το ίχνος που δημιουργείται στο σημείο *A* εκδηλώνεται σε ένα διαφορετικό χωροχρονικό σημείο *B* της γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά τη διαδικασία στο χωρόχρονο. Για να μιλήσουμε, όμως, για διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας διαδικασίας δεν αρκεί η εμφάνιση του σε ένα διαφορετικό χωροχρονικό σημείο *B* της διαδικασίας. Θα πρέπει, αφενός, το ίχνος να εμφανίζεται σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που συνδέει τα *A* και *B* (ώστε, υπ' αυτή την έννοια, η διάδοση του ίχνους από το *A* στο *B* να είναι χωροχρονικά συνεχής) *και*, αφετέρου, η εμφάνισή του να λαμβάνει χώρα σε απουσία επιπρόσθετων παρεμβάσεων μεταξύ του *A* και του *B*, δηλαδή σε απουσία επιπρόσθετων αλληλεπιδράσεων αντίστοιχων με αυτών που δημιούργησαν το ίχνος στο *A*. Έτσι, ο Salmon ορίζει την έννοια της *διάδοσης του ίχνους* ως εξής:

> Το ίχνος διαδίδεται κατά μήκος ενός διαστήματος όταν εμφανίζεται σε κάθε χωροχρονικό σημείο αυτού του διαστήματος, σε απουσία αλληλεπιδράσεων. (Salmon 1998:250)

Πώς όμως ο Salmon καταλήγει σε αυτό τον ορισμό για τη διάδοση του ίχνους; Καταρχήν, «η διάδοση είναι ένα είδος κίνησης» (Salmon 1998:21). Μάλιστα, θα προσθέταμε, ότι η διάδοση αντιστοιχεί σε αυτό που οι φυσικοί ονομάζουν *αδρανειακή* κίνηση. Η έννοια της κίνησης από πολύ νωρίς στην ιστορία της φιλοσοφίας ήρθε αντιμέτωπη με μία οικογένεια παραδόξων που είναι γνωστά ως παράδοξα του Ζήνωνος. Ο σκοπός για τον οποίο διατυπώθηκαν αυτά τα παράδοξα ήταν να δείξουν ότι η παραδοχή ότι ένα φυσικό αντικείμενο κινείται οδηγεί σε λογικές αντιφάσεις. Ένα από τα παράδοξα του Ζήνωνος είναι το παράδοξο του βέλους, το οποίο, σύμφωνα με το Salmon, επιλύθηκε μόλις στις αρχές του προηγούμενου αιώνα[3]. Η θεωρία που με επιτυχία αντιμετώπισε το παράδοξο του βέλους είναι η "at-at" θεωρία της κίνησης του Russell. Ο Russell προσπαθώντας να απαντήσει στο παράδοξο του πώς γίνεται ένα βέλος που βρίσκεται σε έναν ορισμένο τόπο σε μία ορισμένη χρονική να θεωρείται κινούμενο, υποστήριξε την άποψη ότι η κίνηση του βέλους είναι μία "1-1 και επί" απεικόνιση σημείων του χώρου σε χρονικές στιγμές. Έτσι, το να λέμε ότι το βέλος κινείται δεν σημαίνει τίποτα παραπάνω και τίποτα λιγότερο από το να θεωρούμε ότι σε κάθε ορισμένη χρονική στιγμή της κίνησης του βρίσκεται σε ένα και μόνον ένα ορισμένο σημείο του χώρου (αλλά σε διαφορετικά σημεία του χώρου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές). Με άλλα λόγια, το να κινείται το βέλος από ένα χωρικό σημείο *A*, στο οποίο βρίσκεται κάποια χρονική στιγμή t_1, σε ένα χωρικό σημείο *B*, στο οποίο βρίσκεται κάποια επόμενη χρονική στιγμή t_2, σημαίνει ότι το βέλος καταλαμβάνει τα σημεία ανάμεσα στα *A* και *B* τις χρονικές στιγμές που είναι μεταξύ των χρονικών στιγμών t_1 και t_2. Το σημαντικό χαρακτηριστικό που αποδίδεται στην κίνηση σε αυτή την προσέγγιση είναι η συνέχεια. Επειδή η κίνηση θεωρείται συνεχής και στο συνεχές δεν υπάρχει επόμενο ή προηγούμενο σημείο κάποιου δεδομένου σημείου, δεν έχει νόημα να ρωτάμε, όπως κάνουν οι υποστηρικτές του ζηνώνειου παραδόξου, με ποιον τρόπο ένα βέλος που βρίσκεται κάποια χρονική στιγμή σε κάποιο σημείο του χώρου, μεταβαίνει σε επόμενη χρονική

[3] Η διατύπωση του παραδόξου του βέλους από τον Salmon έχει ως εξής: «Σε αυτό το παράδοξο ο Ζήνων υποστηρίζει ότι ένα βέλος σε πτήση είναι πάντα σε ηρεμία. Κάθε δεδομένη στιγμή, ισχυρίζεται, το βέλος είναι εκεί όπου είναι, καταλαμβάνοντας ένα μέρος του χώρου ίσο με αυτό. Κατά την διάρκεια μίας στιγμής δεν μπορεί να κινηθεί, διότι αυτό θα απαιτούσε η στιγμή να έχει μέρη, και μία στιγμή είναι εξ ορισμού ένα ελάχιστο και αδιαίρετο στοιχείο χρόνου. Αν το βέλος κινούνταν διαρκούσης της στιγμής, θα έπρεπε να είναι σε έναν τόπο, σε ένα μέρος της στιγμής, και σε ένα διαφορετικό τόπο, σε ένα άλλο μέρος της στιγμής. Επιπλέον, για να κινηθεί το βέλος διαρκούσης της στιγμής θα απαιτούνταν να καταλαμβάνει χώρο μεγαλύτερο από αυτό, διότι διαφορετικά δεν θα είχε περιθώριο να κινηθεί.» (Salmon 2001:10)

στιγμή στο επόμενο σημείο του χώρου. Με αυτό τον τρόπο διαλύεται το παράδοξο της κίνησης του βέλους στο πλαίσιο της θεωρίας της κίνησης του Russell, η οποία είναι γνωστή ως *"at-at"* θεωρία της κίνησης.

Εφόσον η διάδοση είναι ένα είδος κίνησης, τότε μία αποδεκτή θεώρηση της διάδοσης θα πρέπει να μπορεί να αντιμετωπίζει με επιτυχία το ζηνώνειο παράδοξο. Γι' αυτό ο Salmon υιοθετεί την "at-at" θεωρία για να περιγράψει τη διάδοση του ίχνους σε μία διαδικασία. Επιπλέον, αυτή η προσέγγιση αναδεικνύει τη διαφορά ανάμεσα στη συνεχή διάδοση της αιτιακής επίδρασης κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας από την ασυνεχή διάδοση κατά μήκος της παραδοσιακής διακριτής αιτιακής αλυσίδας συμβάντων. Συχνά, για να εξηγηθεί η διάδοση της αιτιακής επίδρασης από ένα συμβάν που είναι αίτιο σε ένα χωροχρονικά απομακρυσμένο συμβάν, το αποτέλεσμα, θεωρούμε μία ακολουθία συμβάντων που ξεκινάει από το αίτιο και καταλήγει στο αποτέλεσμα. Τα συμβάντα που συγκροτούν την ακολουθία, ανά δύο διαδοχικά, υποθέτουμε ότι βρίσκονται σε αιτιακή σχέση. Το πρόβλημα σε αυτή την προσέγγιση είναι ότι δεν μπορεί να εξηγηθεί με ποιον τρόπο η αιτιακή επίδραση διαδίδεται από το ένα συμβάν στο επόμενο. Ο πολλαπλασιασμός των συμβάντων, που αρχικά θεωρούμε ότι είναι δύο, από την παρεμβολή της ακολουθίας συμβάντων απλώς πολλαπλασιάζει τις περιπτώσεις αιτιακών σχέσεων στις οποίες πρέπει να εξηγήσουμε τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης από το αίτιο στο αποτέλεσμα, εφόσον η ακολουθία είναι διακριτή. Η απαίτηση της συνεχούς διάδοσης της αιτιακής επίδρασης, όπως εκφράζεται μέσω της ικανότητας των αιτιακών διαδικασιών να διαδίδουν το ίχνος που δημιουργείται σε κάποιο σημείο τους, εξαλείφει το πρόβλημα στερώντας από το ερώτημα το νόημα του. Αν δύο συμβάντα βρίσκονται σε αιτιακή σχέση, τότε αυτά συνδέονται με μία αιτιακή διαδικασία που διαδίδει αιτιακή επίδραση. Η διάδοση της αιτιακής επίδρασης δεν γίνεται από ένα συμβάν στο επόμενο, αλλά πραγματοποιείται σύμφωνα με την "at-at" θεωρία σε κάθε σημείο της συνεχούς χωροχρονικής γραμμής που συνδέει τα δύο συμβάντα. Και στο συνεχές δεν έχει νόημα να ρωτάμε πώς διαδίδεται η αιτιακή επίδραση από ένα χωροχρονικό σημείο ή συμβάν στο επόμενο, διότι στο συνεχές δεν υπάρχει *επόμενο* σημείο.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της αρχής που διέπει τη διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας διαδικασίας είναι η εξάρτησή της από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων: «Αυτή η αρχή είναι ξεκάθαρα αντιγεγονική», αναφέρει ο Salmon, «διότι υποστηρίζει ρητά ότι η διαδικασία *P* θα συνέχιζε να εκδηλώνει το χαρακτηριστικό *Q* αν η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση σήμανσης δεν συνέβαινε» (Salmon 1984:148). Η προσφυγή του Salmon σε αντιγεγονικές προτάσεις για τη διατύπωση της (ΑΔΣ) είναι αποτέλεσμα της κριτικής που δέχτηκαν προηγούμενες διατυπώσεις της αρχής από τη N. Cartwright. Ο Salmon περιγράφει την κριτική αυτή με τη βοήθεια του γνωστού παραδείγματος του περιστρεφόμενου φάρου που δημιουργεί μία φωτεινή κηλίδα σε ένα πέτασμα. Αυτό που θέλουμε είναι να δημιουργήσουμε ένα ίχνος στη φωτεινή κηλίδα, τοποθετώντας στο πέτασμα ένα κόκκινο φίλτρο. Όμως, ας υποθέσουμε ότι κλάσματα του δευτερολέπτου πριν την τοποθέτηση του φίλτρου, ένας μηχανισμός αλλάζει τους φακούς του φάρου με αποτέλεσμα η κηλίδα να χρωματίζεται κόκκινη. Έτσι, το ίχνος που δημιουργείται στη φωτεινή κηλίδα, φαίνεται ως εάν να διαδίδεται κατά μήκος αυτής. Η αντιγεγονική πρόταση που απαιτεί ο Salmon να είναι αληθής μας αποτρέπει από το να εξάγουμε αυτό το συμπέρασμα. Διότι, στην περίπτωση του παραδείγματός μας ακόμα και αν δεν λάμβανε χώρα η αλληλεπίδραση σήμανσης της φωτεινής κηλίδας, αυτή θα χρωματίζονταν κόκκινη και δεν θα παρέμενε λευκή όπως απαιτεί η αντιγεγονική πρόταση που θεωρούμε αληθή.

Η έννοια του ίχνους και ο αντιγεγονικός χαρακτήρας της (ΑΔΙ) παραπέμπουν στην πραγμάτευση της μεθόδου του ίχνους από το Reichenbach και στη χρήση της για τον καθορισμό της αιτιακής σχέσης ενός ζεύγους συμβάντων. Υπενθυμίζουμε ότι ο Reichenbach ορίζει την σχέση αιτιακής συνάφειας μεταξύ δύο συμβάντων *A* και *B* στη βάση της εμφάνισης στο *B* ενός ίχνους που δημιουργείται στο συμβάν *A*. Επιπλέον, ορίζει το ίχνος ως μία παρέμβαση με μία μη αντιστρεπτή διαδικασία, και οι παρεμβάσεις θεωρούνται μεταβολές που δημιουργούνται σε κάποιο συμβάν και επηρεάζουν τα συμβάντα που έπονται χρονικά αυτού του συμβάντος, αφήνοντας αναλλοίωτα τα συμβάντα που προηγήθηκαν χρονικά. Οι παρεμβάσεις περιγράφονται από αντιγεγονικές προτάσεις του τύπου "αν η παρέμβαση δεν λάμβανε χώρα το μέλλον θα ήταν διαφορετικό".

Από την άλλη, ο Salmon δεν αναφέρεται σε ακολουθίες συμβάντων αλλά σε διαδικασίες και προσπαθεί να εφαρμόσει στις διαδικασίες τη μέθοδο του ίχνους για να διακρίνει ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες. Όπως είδαμε, ο Salmon δίνει ιδιαίτερο βάρος στη χωροχρονική συνέχεια της διάδοσης του ίχνους, ενώ για τον Reichenbach αρκεί η επίδραση της παρέμβασης στα συμβάντα που έπονται χρονικά του συμβάντος στο οποίο δημιουργείται το ίχνος. Επίσης, μολονότι ο Salmon αναφέρει τον όρο "παρέμβαση" στην (ΑΔΙ), δεν υιοθετεί το βασικό χαρακτηριστικό της σημασίας που αποδίδει σε αυτόν ο Reichenbach: το ότι προϋποθέτει τη συμβατική, έστω, επιλογή της χρονικής κατεύθυνση, της φοράς του βέλους του χρόνου. Ο Salmon διατυπώνει την έννοια της διάδοσης ίχνους κατά μήκος μίας διαδικασίας από ένα χωροχρονικό σημείο *A* σε ένα χωροχρονικό σημείο *B*, χωρίς να υποθέτει ότι το *B* και όλα τα ενδιάμεσα σημεία της διαδικασίας από το *A* στο *B*, έπονται χρονικά του σημείου *A* στο οποίο δημιουργείται το ίχνος. Επίσης, για να αποφύγει τη μη συνειδητή αναφορά σε χρονική κατεύθυνση, προτιμά να χρησιμοποιεί γεωμετρικούς όρους, όσο αυτό είναι δυνατό. Αναφέρεται σε τομές χωροχρονικών γραμμών που αναπαριστάνουν γεωμετρικά διαδικασίες και στα χαρακτηριστικά που εκδηλώνει μία διαδικασία σε διαστήματα στα δύο τμήματα της χωροχρονικής γραμμής εκατέρωθεν του σημείου τομής και όχι στα χαρακτηριστικά "πριν" και "μετά" την αλληλεπίδραση σήμανσης (Salmon 1984:176 και 1998:250).

Ωστόσο, υπάρχει μία ασυμμετρία στην (ΑΔΙ), η οποία πολύ εύκολα μπορεί να μας οδηγήσει στη συμβατική επιλογή χρονικής κατεύθυνσης. Μέσω της αντιγεγονικής πρότασης που περιλαμβάνεται στην αρχή, ο Salmon προεπιλέγει το χαρακτηριστικό *Q* που θα εκδήλωνε η διαδικασία σε απουσία της αλληλεπίδρασης. Άρα, τα δύο διαφορετικά χαρακτηριστικά *Q* και *Q΄* που εκδηλώνει η διαδικασία στα τμήματα που διαχωρίζονται γεωμετρικά από το σημείο τομής στο οποίο λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση, δεν έχουν το ίδιο καθεστώς. Μόνο το ένα από αυτά θα εκδηλώνονταν στη διαδικασία σε απουσία αλληλεπίδρασης. Έτσι, το τμήμα της διαδικασίας που εκδηλώνει το χαρακτηριστικό *Q* μπορούμε να θεωρήσουμε ότι ανήκει στο παρελθόν του τμήματος που εκδηλώνει το χαρακτηριστικό *Q΄*. Όμως ακόμα κι αν υιοθετήσουμε μία συμβατική χρονική κατεύθυνση με βάση τα παραπάνω, η θέση του Salmon διαφέρει από εκείνη του Reichenbach. Η διάκριση του Reichenbach ανάμεσα σε μεταβολές που είναι παρεμβάσεις και σε μεταβολές που

ερμηνεύονται ως μεταβάσεις σε εναλλακτικά αίτια (και περιγράφονται από τις αντίστοιχες αντιγεγονικές προτάσεις) *προϋποθέτουν* την επιλογή μίας συμβατικής χρονικής κατεύθυνσης. Αντιθέτως, αυτό που υποστηρίξαμε είναι ότι με βάση την αντιγεγονική πρόταση που περιλαμβάνεται στην (ΑΔΙ) μπορούμε να υιοθετήσουμε, *εκ των υστέρων*, μία συμβατική χρονική κατεύθυνση, χωρίς αυτό να προϋποτίθεται.

Η πιο σημαντική διαφορά ανάμεσα στη μέθοδο του ίχνους του Reichenbach και στην (ΑΔΙ) του Salmon αφορά στη χρήση μη αντιστρεπτών διαδικασιών για τη δημιουργία του ίχνους. Έστω ότι μία διαδικασία εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς ένα χαρακτηριστικό Q σε απουσία αλληλεπίδρασης. Η δημιουργία ίχνους συνίσταται στην τροποποίηση από Q σε Q', η οποία λαμβάνει χώρα σε ένα χωροχρονικό σημείο της διαδικασίας. Αυτό που υποστηρίζει ο Salmon είναι ότι αν υποθέσουμε ότι η διαδικασία εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς το χαρακτηριστικό Q' σε απουσία αλληλεπίδρασης, τότε η αντίθετη τροποποίηση, από Q' σε Q ενδέχεται να είναι φυσικώς πραγματοποιήσιμη. Έτσι, καταρχήν διαχωρίζει το πρόβλημα του καθορισμού της κατεύθυνσης του χρόνου με βάση τη φυσική των μη αντιστρεπτών διαδικασιών από το τι αποτελεί αιτιακή διαδικασία και αιτιακή αλληλεπίδραση: «… είναι καλύτερο να σκεφτόμαστε τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις με όρους χρονικής συμμετρίας και τις αιτιακές συνδέσεις που παρέχουν οι αιτιακές διαδικασίες ως συμμετρικές συνδέσεις.» (Salmon 1984:176). Η πρόθεση του Salmon, σε αντίθεση με τον Reichenbach, δεν είναι να ασχοληθεί στο πλαίσιο της αιτιακής θεωρίας που διατυπώνει με ζητήματα που αφορούν στην κατεύθυνση του χρόνου. Γι' αυτό, προσπαθεί να διατυπώσει τις βασικές έννοιας της θεωρίας με τέτοιο τρόπο που, αφενός να είναι ουδέτερος ως προς το ζήτημα του καθορισμού του βέλους του χρόνου, αφετέρου να ταιριάζει αρμονικά με μία αιτιακή θεωρία του χρόνου (ό.π.: υποσ.14).

Αφού αναλύσαμε την έννοια της διάδοσης ίχνους, μπορούμε πλέον να παρουσιάσουμε τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon:

> Αιτιακή διαδικασία είναι η διαδικασία που μπορεί να διαδώσει ίχνος. (Salmon 1998:250).

Σύμφωνα με αυτό τον ορισμό, το στοιχείο που διακρίνει τις αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες είναι μία ορισμένη ικανότητα που τους αποδίδεται να διαδίδουν το ίχνος που δημιουργείται σε κάποιο σημείο τους. Πώς όμως θα πρέπει να κατανοήσουμε αυτή την ικανότητα; Η απάντηση που δίνει ο Salmon σε αυτό το ερώτημα μάλλον δεν είναι πειστική. Αναφέρει ότι «η ικανότητα διάδοσης ίχνους μπορεί να θεωρηθεί ως ένα ιδιαιτέρως σημαντικό είδος σταθερής σύζευξης – ίδιου είδους πράγμα με αυτό που αναγνώρισε ο Hume ως παρατηρήσιμο και αποδεκτό» (Salmon 1984:147). Η θέση του Salmon ότι η διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας μπορεί να ελεγχθεί πειραματικά και να θεωρηθεί, καταρχήν, παρατηρήσιμη, μπορεί να γίνει αποδεκτή. Επίσης, μπορούμε να αποδεχτούμε ότι η διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας διαδικασίας αποτελεί εκδήλωση κάποιας κανονικότητας που διέπει αυτή τη διαδικασία. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση δεν παρατηρούμε την ικανότητα μίας διαδικασίας να διαδίδει κάτι, αλλά την *ενεργοποίηση* αυτής της ικανότητας η οποία εκδηλώνεται με την κανονικότητα που ισχύει σε αυτή την αιτιακή διαδικασία όταν έχει δημιουργηθεί κάποιο ίχνος. Άρα, δεν είναι ορθό αυτό που υποστηρίζει ο Salmon ότι η *ικανότητα* διάδοσης του ίχνους αποτελεί κάποιο είδος σταθερής σύζευξης (Psillos 2002:114).

Από την άλλη, η ικανότητα που έχει μία διαδικασία να διαδίδει ίχνος, μπορεί να περιγραφεί με τη βοήθεια μίας αντιγεγονικής πρότασης όπως έχει υποστηρίξει ο Hitchcock (1995) και ο Woodward (2003:351). Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε μία διαδικασία *P* στην οποία δεν έχει δημιουργηθεί κάποιο ίχνος. Για να είναι η *P* αιτιακή διαδικασία θα πρέπει να είναι αληθής η αντιγεγονική πρόταση s: "αν δημιουργηθεί ένα ίχνος σε κάποιο σημείο της P, τότε αυτό διαδίδεται κατά μήκος της". Η αλήθεια μίας αντιγεγονικής πρότασης τόσο σύμφωνα με τη σημασιολογία του Goodman[4], όσο και σύμφωνα με τη σημασιολογία των δυνατών κόσμων του Lewis[5], στηρίζεται στους φυσικούς νόμους που ισχύουν στον πραγματικό κόσμο. Έτσι, αν, όπως προτείνει ο Salmon, θεωρήσουμε ότι η διάδοση του ίχνους κατά μήκος της P αποτελεί μία

[4] Ο Goodman (1983:13), σε αδρές γραμμές προτείνει ότι η αντιγεγονική υποθετική πρόταση $p \square\!\rightarrow q$ είναι αληθής αν και μόνο αν η *p* μαζί με ένα σύνολο γεγονότων S και ένα σύνολο νομολογικών προτάσεων *L συνεπάγεται* την *q*.

[5] Σύμφωνα με τον Lewis (1973:57-60) η αντιγεγονική πρόταση $p \square\!\rightarrow q$ είναι αληθής στον κόσμο *w* αν και μόνο αν η *q* είναι αληθής σε κάθε κόσμο που είναι *p*-προσβάσιμος από τον *w*. Η ιδέα του Lewis είναι να αποδώσουμε σε κάθε προκείμενη *p* της αντιγεγονικής πρότασης $p \square\!\rightarrow q$ και σε κάθε κόσμο *w* ένα σύνολο δυνατών κόσμων που είναι οι εγγύτεροι δυνατοί κόσμοι στον *w* στους οποίους η *p* είναι αληθής. Αυτοί οι δυνατοί κόσμοι είναι *p-προσβάσιμοι* από τον *w*.

κανονικότητα, η οποία διέπεται από έναν φυσικό νόμο που ισχύει στον πραγματικό κόσμο, τότε η αντιγεγονική πρόταση s είναι αληθής. Αυτό σημαίνει ότι μολονότι η ικανότητα μίας αιτιακής διαδικασίας να διαδίδει ίχνος δεν ταυτίζεται με την ισχύ μίας κανονικότητας που καθορίζει τη διάδοση του ίχνους, *υποστηρίζεται* από την ισχύ μίας τέτοιας κανονικότητας που εκφράζει ένα φυσικό νόμο[6].

Για να ολοκληρώσουμε τη συζήτηση περί αιτιακών διαδικασιών στο πλαίσιο της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon οφείλουμε να αναφερθούμε στις διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Καταρχάς, πρέπει να επισημάνουμε ότι η σταθερότητα της δομής που εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά τη διαδικασία δεν αποτελεί κριτήριο για να χαρακτηρίσουμε μία διαδικασία ως αιτιακή. Και οι ψευδο-διαδικασίες μπορεί να εκδηλώνουν σε κάθε σημείο τους σταθερά χαρακτηριστικά και να έχουν μία καθορισμένη δομή, π.χ. η μορφή μίας σκιάς που εμφανίζεται κινούμενη σε ένα λευκό τοίχο μπορεί να παραμείνει αναλλοίωτη εφόσον τηρηθούν ορισμένες προϋποθέσεις. Δεύτερον, ήδη έχουμε αναφέρει, ότι κατά μήκος μίας διαδικασίας είναι δυνατό να μεταβάλλονται τα χαρακτηριστικά που συγκροτούν τη δομή που εκδηλώνεται σε μία διαδικασία, χωρίς να μεταβάλλεται η ίδια η δομή. Άρα, για μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία δομής, η διάδοση του ίχνους που ορίζεται γενικώς ως η τροποποίηση κάποιου χαρακτηριστικού δεν αρκεί για να ορίσουμε τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και σε ψευδο-διαδικασίες. Έτσι, ο Salmon, με τη βοήθεια της έννοιας της διάδοσης, διατυπώνει ένα διαφορετικό κριτήριο για τις διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής, την αρχή διάδοσης αιτιακής επίδρασης (ΑΔΑΕ):

> ΑΔΑΕ: Μία διαδικασία που διαδίδει τη δομή της είναι ικανή να διαδώσει αιτιακή επίδραση από μία χωροχρονική τοποθεσία σε μία άλλη (Salmon 1984:155).

Σύμφωνα με την (ΑΔΑΕ) η κατηγορία διαδικασιών που εκδηλώνουν τη δομή τους σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που τις αναπαριστάνει γεωμετρικά, σε απουσία αλληλεπιδράσεων, έχουν την ικανότητα να διαδίδουν αιτιακή επίδραση και, συνεπώς, είναι αιτιακές διαδικασίες.

[6] Ο Salmon δεν θα αποδέχονταν αυτή τη θεώρηση για την αποτίμηση της αλήθειας της αντιγεγονικής πρότασης που περιγράφει την ικανότητα μίας διαδικασίας να διαδίδει ίχνος, διότι, όπως θα δούμε στη συνέχεια [ενότητα 3.4], θεωρούσε ακατάλληλη για το πλαίσιο της αιτιακής θεωρίας την αποτίμηση της αλήθειας των αντιγεγονικών προτάσεων στη βάση των σημασιολογικών θεωριών δυνατών κόσμων.

Επιπλέον, ο Salmon διατυπώνει μία ικανή συνθήκη για να λέμε ότι μία διαδικασία διαδίδει δομή, που είναι αντίστοιχη με την αρχή διάδοση ίχνους, την αρχή διάδοσης δομής (ΑΔΔ).

> ΑΔΔ: Αν μία διαδικασία είναι ικανή να διαδίδει αλλαγές δομής που οφείλονται σε αλληλεπιδράσεις σήμανσης, τότε λέμε ότι αυτή η διαδικασία διαδίδει τη δική της δομή. (Salmon 1984:154)

Η «αλλαγή δομής» που αναφέρεται στην (ΑΔΔ) μπορεί να εκφράζεται ως τροποποίηση ορισμένου χαρακτηριστικού, το οποίο εκφράζει τη δομή που εκδηλώνεται, χωρίς όμως αυτό να σημαίνει ότι *κάθε* τροποποίηση *κάποιου* χαρακτηριστικού που εκδηλώνεται με ομοιομορφία κατά μήκος της διαδικασίας και που λαμβάνει χώρα σε κάποιο χωροχρονικό σημείο αποτελεί αλλαγή δομής. Επιπλέον, δεν μπορούμε να αποκλείσουμε την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών που, ενώ εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό, δεν εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Άρα, η (ΑΔΔ) αντιστοιχεί στην (ΑΔΙ), χωρίς, ωστόσο, να ανάγεται στην τελευταία.

Επιπλέον, η (ΑΔΔ) δεν πρέπει να θεωρείται ως ένα δεύτερο ανεξάρτητο κριτήριο το οποίο ικανοποιούν οι αιτιακές διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Αυτή τη θέση υποστηρίζουν οι Woodward (1989:375-6) και Psillos (2002:112-3), θεωρώντας ότι η (ΑΔΑΕ) αποτελεί το πρώτο κριτήριο για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών. Μάλιστα, συγκρίνοντας τα κριτήρια, υποστηρίζουν α) ότι είναι εννοιολογικώς διακρίσιμα, αφού η (ΑΔΔ), σε αντίθεση με την (ΑΔΑΕ), στηρίζεται στην έννοια του ίχνους / σήμανσης και β) ότι τα δύο κριτήρια δεν έχουν κατ' ανάγκη την ίδια έκταση στο βαθμό που ενδέχεται να υπάρχουν αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν δομή, αλλά δεν επιδέχονται αλλαγές δομής μέσω αλληλεπιδράσεων σήμανσης (π.χ., ένα φωτόνιο).

Καταρχάς, ο Woodward φαίνεται να ταυτίζει την (ΑΔΔ) με την (ΑΔΙ) και τη δομή που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας με τα χαρακτηριστικά της διαδικασίας. Αυτό, προκύπτει από το γεγονός ότι θεωρεί ότι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις παράγουν τροποποιήσεις δομής (Woodward 1989: 357), ενώ, σύμφωνα με τη δική μας προσέγγιση, ενδέχεται να παράγουν τόσο τροποποιήσεις δομής όσο και απλές τροποποιήσεις χαρακτηριστικών χωρίς αντίστοιχη τροποποίηση

της δομής. Αν δεχτούμε τη θέση του Woodward, τότε πράγματι η (ΑΔΙ) – που πλέον ταυτίζεται με την (ΑΔΔ) – είναι εννοιολογικά και εκτασιακά διακριτό κριτήριο των αιτιακών διαδικασιών.

Από την άλλη, αν θεωρήσουμε την (ΑΔΔ) ως διαφορετική αρχή από την (ΑΔΙ), τότε μπορούμε να θεωρήσουμε την (ΑΔΑΕ) ως το κριτήριο για να είναι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία δομής, αιτιακή. Η (ΑΔΔ) εκφράζει μία ικανή συνθήκη για να διαδίδει μία διαδικασία τη δομή της. Έτσι, προτείνουμε την εξής ερμηνεία:

ικανότητα διάδοσης τροποποίησης δομής $\xrightarrow{(\text{ΑΔΔ})}$ διάδοση ιδιοδομής $\xleftrightarrow{(\text{ΑΔΑΕ})}$ Αιτιακή διαδικασία

Αυτό δεν σημαίνει ότι όλες οι διαδικασίες που διαδίδουν δομή, και σύμφωνα με την (ΑΔΑΕ) είναι αιτιακές, θα επιδέχονται, κατ' ανάγκη, αλλαγές δομής μέσω αλληλεπιδράσεων σήμανσης. Εφόσον, όμως, επιδέχονται αλλαγές δομής, θα πρέπει να τις διαδίδουν. Επομένως, ενώ η (ΑΔΑΕ) αποτελεί ένα κριτήριο το οποίο ικανοποιούν οι αιτιακές διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς τη δομή, η (ΑΔΔ) εκφράζει μία ικανή συνθήκη την οποία ικανοποιούν μόνο εκείνες οι αιτιακές διαδικασίες που, αφενός, εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς τη δομή και, αφετέρου, επιδέχονται αλλαγές δομής. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δούμε ότι στην ύστερη θεωρία του Salmon ό,τι ισχύει σε σχέση με τη δομή, το αντίστοιχο ισχύει και για τις διατηρήσιμες ποσότητες. Η διάδοση των διατηρήσιμων ποσοτήτων είναι το κριτήριο για να είναι μία διαδικασία αιτιακή και η διάδοση του ίχνους γίνεται απλώς μία ικανή συνθήκη, χρήσιμη για την ανίχνευση των αιτιακών διαδικασιών.

3.3 Η παραγωγή της αιτιακής επίδρασης

Η έννοια της αιτιακής διαδικασίας περιγράφει τη *διάδοση* της αιτιακής επίδρασης από το αίτιο στο αποτέλεσμα. Για να μπορέσουμε όμως να περιγράψουμε την αιτιακή σχέση θα πρέπει να αναφερθούμε και στο πώς *παράγεται* η αιτιακή επίδραση που διαδίδεται κατά μήκος των αιτιακών διαδικασιών. Όπως αναφέραμε στην

προηγούμενη ενότητα μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κατά μήκος των αιτιακών διαδικασιών διαδίδεται είτε α) μία ορισμένη δομή είτε β) τροποποιήσεις χαρακτηριστικών ή/και αλλαγές δομής που παράγονται από τοπικές αλληλεπιδράσεις. Επομένως, αν μιλήσουμε για παραγωγή αιτιακής επίδρασης, τότε θα πρέπει να μιλήσουμε είτε για παραγωγή της δομής είτε για παραγωγή τροποποιήσεων των χαρακτηριστικών. Ο Salmon εξηγεί την παραγωγή δομής με τη βοήθεια της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας και της έννοιας του δίκρανου σύζευξης του Reichenbach, ενώ για να εξηγήσει την παραγωγή τροποποιήσεων χαρακτηριστικών που διαδίδονται από τις αιτιακές διαδικασίες ορίζει την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης και του δίκρανου αλληλεπίδρασης.

3.3.1 Αιτιακές αλληλεπιδράσεις

Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, η έννοια της αιτιακής διαδικασίας στηρίζεται στην έννοια του ίχνους και στις αλληλεπιδράσεις σήμανσης που λαμβάνουν χώρα τοπικά, σε κάποιο χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει μία διαδικασία. Για παράδειγμα, θεωρήσαμε ως δημιουργία ίχνους τη μεταβολή του χρώματος μίας ακτίνας λευκού φωτός όταν διέλθει από κατάλληλο φίλτρο. Όμως, σε αυτή την προσέγγιση, εξετάσαμε την αλληλεπίδραση σήμανσης μόνο σε σχέση με την τροποποίηση που προκαλεί σε μία διαδικασία. Αγνοήσαμε δε πλήρως τις μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην άλλη διαδικασία με την οποία αλληλεπιδρά η σημανθείσα διαδικασία. Δηλαδή, στο συγκεκριμένο παράδειγμα, δεν λάβαμε υπόψη τις μεταβολές συμβαίνουν στο φίλτρο όταν απορροφά ακτινοβολία ορισμένου μήκους κύματος ώστε η ακτίνα να μεταβάλει το χρώμα της. Το φίλτρο μεταβάλλει τη θερμοκρασία του λόγω της απορρόφησης ενέργειας από το φως την οποία μετατρέπει σε θερμική. Μολονότι η θερμική ενέργεια διαχέεται στο περιβάλλον μπορούμε να θεωρήσουμε, σύμφωνα με τον Salmon, ότι για κάποιο μικρό χρονικό διάστημα διατηρείται στο γυαλί. Το γεγονός ότι δεν αναφερθήκαμε μέχρι τώρα στις μεταβολές που προκαλούνται στο φίλτρο, αλλά μόνο στις τροποποιήσεις των χαρακτηριστικών της φωτεινής ακτίνας, είναι απλώς ζήτημα προοπτικής που καθορίστηκε από την πρόθεσή μας να χαρακτηρίσουμε τη φωτεινή ακτίνα ως αιτιακή διαδικασία. Ωστόσο, αν σκεφτούμε ότι και το φίλτρο είναι ένα φυσικό αντικείμενο

που αποτελεί αιτιακή διαδικασία, όπως η ακτίνα φωτός, τότε συμπεραίνουμε ότι κατά τη σήμανση μίας αιτιακής διαδικασίας λαμβάνει χώρα μία αλληλεπίδραση αιτιακών διαδικασιών.

Η έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης (causal interaction) εκφράζει την ιδέα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και στο πλαίσιο της πρώιμης θεωρίας του Salmon εισάγεται με τη βοήθεια της ακόλουθης αρχής:

> ΑΑ: Έστω P_1 και P_2 δύο διαδικασίες που τέμνει η μία την άλλη στο χωροχρονικό σημείο S. Έστω Q το χαρακτηριστικό που θα εκδήλωνε η P_1 σε ένα διάστημα (το οποίο περιλαμβάνει υποδιαστήματα και στις δύο πλευρές της ιστορίας της P_1 , ως προς το S) αν δεν είχε συμβεί η τομή με την P_2· έστω R το χαρακτηριστικό που θα εκδήλωνε η P_2 σε ένα διάστημα (το οποίο περιλαμβάνει υποδιαστήματα και στις δύο πλευρές της ιστορίας της P_2 , ως προς το S) αν δεν είχε συμβεί η τομή με την P_1. Τότε, η τομή των P_1 και P_2 στο S συνιστά μία αιτιακή αλληλεπίδραση αν:
>
> (1) η P_1 εκδήλωνε το χαρακτηριστικό Q πριν από το S, αλλά εκδηλώνει ένα τροποποιημένο χαρακτηριστικό Q' σε ένα διάστημα που έπεται του S και
> (2) η P_2 εκδήλωνε το χαρακτηριστικό R πριν από το S, αλλά εκδηλώνει ένα τροποποιημένο χαρακτηριστικό R' σε ένα διάστημα που έπεται του S. (Salmon 1984:171)

Πρέπει, καταρχάς, να παρατηρήσουμε ότι η αρχή αυτή αποτελεί ικανή συνθήκη για να είναι μία αλληλεπίδραση αιτιακή. Στην (ΑΑ) διατυπώνονται δύο συνθήκες, η (1) και (2), οι οποίες εφόσον ικανοποιούνται θα λέμε ότι στο χωροχρονικό σημείο τομής δύο διαδικασιών λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Ωστόσο, οι συνθήκες αυτές αναφέρονται σε δύο συγκεκριμένα χαρακτηριστικά, Q και R, που αντιστοιχούν στις αλληλεπιδρώσες διαδικασίες, τα οποία εκδηλώνονται με συνέπεια σε απουσία τομής των διαδικασιών και τροποποιούνται αμοιβαία κατά την αλληλεπίδραση. Ο Salmon επισημαίνει ότι δύο διαδικασίες είναι δυνατόν να αλληλεπιδρούν αιτιακώς και σε κάθε μία από αυτές, να μην τροποποιείται κάποιο συγκεκριμένο χαρακτηριστικό, μολονότι αυτό εκδηλώνεται με συνέπεια σε απουσία τομής με την άλλη διαδικασία. Σε κάθε αιτιακή αλληλεπίδραση δεν τροποποιείται το σύνολο των χαρακτηριστικών που εκδηλώνουν οι αλληλεπιδρώσες διαδικασίες. Άρα, αν οι προϋποθέσεις για την τομή των διαδικασιών ισχύουν για *ένα* ζεύγος χαρακτηριστικών, τότε η αλληλεπίδραση είναι αιτιακή. Το αντίστροφο όμως δεν ισχύει. Μία ικανή και αναγκαία συνθήκη για την αιτιακή αλληλεπίδραση δύο διαδικασιών πρέπει να

υποθέτει ότι "υπ*άρχει* ένα ζεύγος χαρακτηριστικών των δύο διαδικασιών" που ικανοποιεί τις προϋποθέσεις ύπαρξης αιτιακής αλληλεπίδρασης (Salmon 1984: 174).

Επιπλέον, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι, όπως η αρχή διάδοσης ίχνους (ΑΔΙ), έτσι και η (ΑΑ) είναι μία αντιγεγονική αρχή, αφού απαιτεί να ισχύει η ομοιομορφία ως προς το χαρακτηριστικό Q που εκδηλώνει η διαδικασία P_1 (αντιστοίχως, το χαρακτηριστικό R για την P_2), αν αυτή δεν τέμνεται με την P_2 (αντιστοίχως, με την P_1). Η χρησιμότητα της αντιγεγονικής συνθήκης έγκειται στον αποκλεισμό ορισμένων αντιπαραδειγμάτων που περιγράφουν τομές ψευδο-διαδικασιών οι οποίες θα μπορούσαν εσφαλμένα να χαρακτηριστούν ως αιτιακές αλληλεπιδράσεις[7]. Συγκεκριμένα ο Salmon παρουσιάζει το εξής αντιπαράδειγμα (Salmon 1984:171). Ας θεωρήσουμε δύο προβολείς που δημιουργούν δύο φωτεινές κηλίδες πράσινου και κόκκινου χρώματος αντίστοιχα σε ένα τετράγωνο πέτασμα. Υποθέτουμε ότι η κίνηση του προβολέα κόκκινου φωτός είναι τέτοια ώστε η κόκκινη κηλίδα να κινείται από τη μία κορυφή του τετραγώνου κατά μήκος της διαγωνίου μέχρι το κέντρο και στη συνέχεια ακολουθώντας την άλλη διαγώνιο να καταλήγει σε μία άλλη κορυφή. Αντιστοίχως, η πράσινη κηλίδα εκκινεί από μία διαφορετική κορυφή του τετραγώνου και διερχόμενη από το κέντρο καταλήγει επίσης σε διαφορετική κορυφή με ανάλογο τρόπο. Το κέντρο του τετραγώνου αποτελεί σημείο τομής των ψευδο-διαδικασιών των δύο κινούμενων κηλίδων. Θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι στο κέντρο οι δύο κηλίδες συγκρούονται, όπως οι σφαίρες ενός μπιλιάρδου, και μεταβάλλουν τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κίνησης τους ή να υποθέσει ότι κατά την τομή η κόκκινη κηλίδα τρέπεται σε πράσινη, μεταβάλλοντας τα χρωματικά χαρακτηριστικά της, και αντιστοίχως η πράσινη τρέπεται σε κόκκινη. Με κάθε μία από αυτές τις ερμηνείες οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι στο κέντρο του τετραγώνου, τη χρονική στιγμή της διέλευσης των κηλίδων, λαμβάνει χώρα μία αιτιακή αλληλεπίδραση ανάμεσα σε ψευδο-διαδικασίες που τροποποιεί κάποιο χαρακτηριστικό τους.

Ωστόσο, τα πράγματα δεν είναι έτσι, διότι η αντιγεγονική πρόταση που αναφέρεται στην (ΑΑ) δεν ικανοποιείται. Συγκεκριμένα, αν σβήσουμε τον προβολέα που δημιουργεί την πράσινη κηλίδα, οπότε το κέντρο του τετραγώνου δεν αποτελεί

[7] Υπενθυμίζουμε ότι για αντίστοιχους λόγους ο Salmon εισήγαγε την αντιγεγονική συνθήκη στην περίπτωση της (ΑΔΙ).

πλέον σημείο τομής των δύο ψευδο-διαδικασιών, τότε η κόκκινη κηλίδα θα συνεχίσει να μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της κίνησης της *ως εάν* να συγκρούονταν. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση της δεύτερης ερμηνείας που θεωρούμε ότι τροποποιούνται τα χρωματικά χαρακτηριστικά της διαδικασίας, αν υποθέσουμε ότι ο πράσινος προβολέας παραμένει σβηστός έως ότου η κόκκινη κηλίδα φτάσει στο κέντρο του τετραγώνου, οπότε και ανάβει, ενώ ταυτοχρόνως σβήνει ο προβολέας που δημιουργεί την κόκκινη κηλίδα. Σε αυτή την περίπτωση, η κηλίδα κινείται στην ίδια διαγώνιο μεταβάλλοντας το χρώμα της από κόκκινο σε πράσινο στο κέντρο του τετραγώνου, χωρίς να τέμνεται με οποιαδήποτε άλλη διαδικασία. Σε ανάλογα συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε και για την πράσινη κηλίδα. Άρα, σε απουσία τομής των δύο ψευδο-διαδικασιών οι τροποποιήσεις που δημιουργούνται στο κέντρο του τετράγωνου πετάσματος είναι δυνατόν να παραμένουν. Συνεπώς, δεν θα πρέπει να υποθέσουμε ότι η τροποποίηση προήλθε από την τομή της μίας διαδικασίας με την άλλη ώστε να θεωρήσουμε την τομή ως αιτιακή αλληλεπίδραση. Με άλλα λόγια, η αντιγεγονική πρόταση σύμφωνα με την οποία σε απουσία τομής, κάθε διαδικασία διατηρεί ομοιόμορφα τα χαρακτηριστικά της δεν είναι αληθής.

Με αντίστοιχο τρόπο ο Salmon απαντά σε ένα είδος παραδειγμάτων που διατυπώθηκαν ανεξάρτητα από τους Maher και Otte (Salmon 1984:172). Ο στόχος και αυτού του είδους παραδειγμάτων είναι να δείξουν ότι υπάρχουν περιπτώσεις τομής ψευδο-διαδικασιών που μπορούν να θεωρηθούν ως αιτιακές αλληλεπιδράσεις με βάση την (ΑΑ). Θεωρείστε ένα διάφανο τραπέζι μπιλιάρδου στο οποίο δύο σφαίρες εκτελούν κεντρική κρούση μεταβάλλοντας τις διευθύνσεις κίνησης τους. Οι σφαίρες αποτελούν αιτιακές διαδικασίες που αλληλεπιδρούν αιτιακά στο χωροχρονικό σημείο που συγκρούονται. Οι σκιές των δύο σφαιρών απεικονίζονται σε πέτασμα που βρίσκεται κάτω από το τραπέζι και αποτελούν δύο ψευδο-διαδικασίες που τέμνονται. Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι η κίνηση της σκιάς κάθε σφαίρας θα διατηρούσε τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της αν δεν συναντούσε την άλλη σκιά, και επομένως, ότι η τομή των ψευδο-διαδικασιών αποτελεί αιτιακή αλληλεπίδραση.

Ωστόσο, η προσεκτικότερη εξέταση μάς οδηγεί στο ακριβώς αντίθετο συμπέρασμα. Θεωρείστε ότι επαναλαμβάνουμε το πείραμα της κρούσης των σφαιρών

αρκετές φορές και σε τυχαία επιλεγμένες επαναλήψεις φωτίζουμε με ακρίβεια την αναμενόμενη τροχιά της σκιάς μίας συγκεκριμένης σφαίρας ώστε να μην εμφανίζεται η σκιά. Παρατηρούμε, τότε, ότι η τροχιά της σκιάς της άλλης σφαίρας μεταβάλλει με τον ίδιο τρόπο τη διεύθυνση της στο σημείο του πετάσματος που αντιστοιχεί στο σημείο κρούσης των δύο σφαιρών ως εάν οι σκιές να διασταυρώνονταν. Έτσι, έχουμε έναν αριθμό τυχαία επιλεγμένων επαναλήψεων στις οποίες η τροχιά της σκιάς αλλάζει διεύθυνση μολονότι δεν διασταυρώνεται με την σκιά της άλλης σφαίρας. Αυτό μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αντιγεγονική πρόταση "αν η μία σκιά δεν συναντήσει την άλλη, τότε θα συνεχίσει να κινείται σε ευθεία γραμμή χωρίς να αλλάζει διεύθυνση", είναι ψευδής[8] και ότι το σημείο τομής των δύο ψευδο-διαδικασιών δεν αναπαριστάνει αιτιακή αλληλεπίδραση.

Στην ύστερη ανασυγκρότηση της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του ο Salmon συνοψίζει την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης σε δύο ορισμούς:

> Η αιτιακή αλληλεπίδραση είναι μία τομή στην οποία αμφότερες οι διαδικασίες σημαίνονται (τροποποιούνται) και το ίχνος σε κάθε διαδικασία διαδίδεται πέραν από τον τόπο της τομής.
>
> Σε μία αιτιακή αλληλεπίδραση το ίχνος εισάγεται σε καθεμία από τις τεμνόμενες διαδικασίες. (Salmon 1998:250)

Οι ορισμοί αυτοί αποσαφηνίζουν τα βασικά στοιχεία που συνθέτουν την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Πρώτο, η αιτιακή αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα στη γεωμετρική τομή των χωροχρονικών γραμμών που αναπαριστάνουν τις δύο διαδικασίες. Δεύτερο, σε μία αιτιακή αλληλεπίδραση πραγματοποιείται αμοιβαία τροποποίηση χαρακτηριστικών που εκδηλώνουν οι διαδικασίες (δημιουργία ίχνους σε καθεμία από αυτές). Και τρίτο, καθεμία από τις διαδικασίες που αλληλεπιδρούν αιτιακώς διαδίδει το ίχνος-τροποποίηση πέραν από το σημείο της τομής των χωροχρονικών γραμμών που τις αναπαριστάνουν γεωμετρικά.

Οι δύο ορισμοί για την αιτιακή αλληλεπίδραση διαφέρουν από την (ΑΑ) ως προς το ζήτημα της διάδοσης του ίχνους πέραν από το σημείο τομής των δύο διαδικασιών. Συγκεκριμένα, στην (ΑΑ) ο Salmon μάς λέει ότι για να έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση αρκεί η τροποποίηση να προκύπτει από την αλληλεπίδραση και το

[8] Ο Salmon προτείνει μία πειραματική μέθοδο για τη δικαιολόγηση των αντιγεγονικών προτάσεων στην οποία θα αναφερθούμε στην επόμενη ενότητα.

τροποποιημένο χαρακτηριστικό να εκδηλώνεται σε καθεμία από τις διαδικασίες για ένα διάστημα μετά το σημείο τομής. Αυτό όμως δεν αποτελεί διάδοση του ίχνους που δημιουργείται στο σημείο τομής. Για να έχουμε διάδοση θα πρέπει το ίχνος να εκδηλώνεται για ένα διάστημα πέραν του σημείου τομής, *σε απουσία επιπλέον παρεμβάσεων*. Επομένως, διαπιστώνουμε ότι στην ύστερη ανασυγκρότηση της θεωρίας του ο Salmon θέτει μία πιο ισχυρή συνθήκη, σε σχέση με την (ΑΑ), για τον ορισμό της αιτιακής αλληλεπίδρασης.

Ωστόσο, δεν φαίνεται η διαφορά αυτή να αντανακλά κάποια αλλαγή στον τρόπο που ο Salmon κατανοεί την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι πάντα θεωρούσε ότι μόνο οι αιτιακές διαδικασίες μπορούν να αλληλεπιδράσουν αιτιακά. «Αν δύο διαδικασίες», αναφέρει ο Salmon, «τέμνονται κατά τρόπον που ταξινομείται στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι αμφότερες οι διαδικασίες είναι αιτιακές, διότι καθεμιά από αυτές έχει σημανθεί (δηλαδή, έχει τροποποιηθεί) στην τομή με την άλλη και καθεμιά διαδίδει το σημάδι πέραν του σημείου τομής.» (Salmon 1984:174). Η θέση αυτή μολονότι διατυπώνεται λίγες σελίδες πιο κάτω από το σημείο που διατυπώνεται η (ΑΑ), δεν μπορεί να προκύψει άμεσα από αυτή. Αντιθέτως, με βάση τους ορισμούς που υιοθετεί ο Salmon στην ύστερη ανασυγκρότηση της θεωρίας του, το συμπέρασμα αυτό προκύπτει άμεσα. Το γεγονός αυτό μας κάνει να υποστηρίζουμε ότι η διαφορά που επισημάναμε δεν αντανακλά κάποια αλλαγή στη σκέψη του Salmon.

Ας εξετάσουμε όμως πιο συγκεκριμένα τα χαρακτηριστικά που συγκροτούν την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Καταρχάς, υπάρχουν περιπτώσεις που δύο διαδικασίες τέμνονται σε ένα χωροχρονικό σημείο χωρίς να τροποποιούν τα χαρακτηριστικά τους. Σύμφωνα με την κλασική φυσική, όταν δύο φωτεινές ακτίνες συναντώνται δεν αλληλεπιδρούν, δηλαδή, δεν τροποποιείται κάποιο από τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνουν, π.χ., η συχνότητα του φωτός[9]. Σε αυτή την περίπτωση, έχουμε σύμπτωση δύο αιτιακών διαδικασιών, χωρίς να συμβαίνει αιτιακή

[9] Όπως επισημαίνεται από τους Berestetskii, Lifshitz και Pitaevskii (1982:566), «η σκέδαση του φωτός από φως (στο κενό) είναι ιδιαζόντως διαδικασία της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής· στην κλασική ηλεκτροδυναμική δε συμβαίνει λόγω του γεγονότος ότι οι εξισώσεις Maxwell είναι γραμμικές.» Στην κβαντική φυσική οι Breit και Wheeler, ήδη από το 1934, προέβλεψαν τη σκέδαση δύο φωτονίων υψηλής ενέργειας από την οποία προκύπτει ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Ωστόσο, η διαδικασία αυτή δεν έχει ακόμη διαπιστωθεί πειραματικά.

αλληλεπίδραση στο σημείο τομής τους. Επομένως, η γεωμετρική τομή δύο διαδικασιών αποτελεί μόνο αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξη αιτιακής αλληλεπίδρασης.

Δεύτερον, η δημιουργία ίχνους σε μία διαδικασία δεν συνεπάγεται ότι λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Με άλλα λόγια, μία διαδικασία είναι δυνατόν να σημανθεί -δηλαδή, να εμφανίσει τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού της σε ένα χωροχρονικό σημείο- *χωρίς* να λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Για παράδειγμα, σκεφτείτε μία λευκή μπάλα μπιλιάρδου η οποία κινούμενη πάνω σε ένα διάφανο τραπέζι διέρχεται από σημείο στο οποίο προσπίπτει η δέσμη ενός προβολέα πράσινου φωτός. Σε εκείνο το σημείο στην μπάλα σχηματίζεται ένα πράσινο ίχνος, δηλαδή τροποποιείται το χρώμα της, χωρίς ωστόσο να διαδίδεται αυτή η τροποποίηση, παρ' όλο που η κίνηση της μπάλας αποτελεί αιτιακή διαδικασία[10]. Έτσι, παρά το γεγονός ότι με βάση την έννοια της σήμανσης μπορούμε να κατανοήσουμε την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης, όταν αναφερόμαστε σε αιτιακές διαδικασίες, η έννοια της σήμανσης δεν εξαντλείται στην έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης.

Μάλιστα, στο προηγούμενο παράδειγμα ικανοποιούνται όλες οι συνθήκες για να έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση, εκτός από τη συνθήκη διάδοσης του ίχνους. Το χωροχρονικό σημείο στο οποίο σχηματίζεται το ίχνος είναι σημείο γεωμετρικής τομής δύο διαδικασιών. Επίσης ισχύει η συνθήκη που διατυπώνεται στην (ΑΑ), σύμφωνα με την οποία σε απουσία τομής των δύο διαδικασιών η μπάλα του μπιλιάρδου θα εκδήλωνε τα ίδια χρωματικά χαρακτηριστικά καθ' όλη την κίνησή της, καθώς και η φωτεινή ακτίνα θα διέρχονταν ανεπηρέαστη από τη διάφανη επιφάνεια του τραπεζιού. Ακόμα, εκτός από το ίχνος που δημιουργείται στη μπάλα του μπιλιάρδου δημιουργείται ίχνος και στη φωτεινή ακτίνα. Λόγω της αδιαφάνειας της μπάλας του μπιλιάρδου δημιουργείται μία ασυνέχεια στη διάδοση της φωτεινής ακτίνας. Η ασυνέχεια αυτή διαδίδεται κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής που

[10] Ο Salmon δεν υποστηρίζει ότι κάθε είδους ίχνος που δημιουργείται σε μία αιτιακή διαδικασία διαδίδεται κατά μήκος αυτής. Για παράδειγμα, μία μπάλα από ζυμάρι αποτελεί αιτιακή διαδικασία διότι διαδίδει το ίχνος που έχει δημιουργηθεί σε αυτή από το δάχτυλο μας. Ωστόσο, μία λαστιχένια μπάλα, παρόλο που αποτελεί αιτιακή διαδικασία, δεν διαδίδει το ίδιο ίχνος λόγω των ελαστικών ιδιοτήτων του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη (Salmon 1984:154).

αναπαριστάνει γεωμετρικά τη διάδοση της ακτίνας [11]. Άρα, ισχύει και η συνθήκη που απαιτεί το ίχνος να δημιουργείται και στις δύο διαδικασίες που τέμνονται σε κάποιο χωροχρονικό σημείο.

Στην ενότητα 2.2 αναφερθήκαμε με παραδείγματα στην έννοια του δίκρανου αλληλεπίδρασης ως μία διάταξη κοινού αιτίου που είναι διαφορετική από αυτή που περιγράφεται τόσο από τον Reichenbach όσο και από τον Salmon με την έννοια του δίκρανου σύζευξης. Αυτό που είχαμε τονίσει είναι η διαφορά στις στατιστικές σχέσεις που ισχύουν ανάμεσα στα συμβάντα που συγκροτούν τα δύο είδη δίκρανου. Υπενθυμίζουμε ότι σε ένα δίκρανο αλληλεπίδρασης τα συμβάντα που βρίσκονται σε σχέση θετικής στατιστικής συνάφειας ως αποτέλεσμα της ύπαρξης του δίκρανου ενδέχεται να εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση ακόμα κι αν συμπεριλάβουμε την παρουσία του κοινού αιτίου, σε αντίθεση με το δίκρανο σύζευξης όπου η παρουσία του κοινού αιτίου αποκρύπτει τη σχέση στατιστικής συνάφειας. Δηλαδή, ισχύει,

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B \,|\, C) > \mathrm{P}(A \,|\, C)\mathrm{P}(B \,|\, C) \qquad (3.3.1)$$

Ωστόσο, όπως αναφέρει ρητά ο Salmon, η (3.3.1) δεν αποτελεί μέρος του ορισμού του δίκρανου αλληλεπίδρασης (Salmon 1998:301,υποσ.11). Η έννοια του δίκρανου αλληλεπίδρασης ορίζεται με τη βοήθεια των εννοιών της αιτιακής διαδικασίας και της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε δύο αιτιακές διαδικασίες που αλληλεπιδρούν αιτιακά σε κάποιο σημείο του χωροχρόνου. Έστω ότι οι τροποποιήσεις που παράγονται κατά την αιτιακή αλληλεπίδραση, διαδίδονται κατά μήκος των αιτιακών διαδικασιών σε απομακρυσμένα χωροχρονικά σημεία στα οποία διαπιστώνουμε ότι λαμβάνουν χώρα συμβάντα που εκδηλώνουν θετική στατιστική σχέση. Ο Salmon υποστηρίζει ότι το συμβάν στο οποίο λαμβάνει χώρα η αιτιακή αλληλεπίδραση είναι το κοινό αίτιο που εξηγεί τη θετική στατιστική συσχέτιση που εκδηλώνουν τα συμβάντα στα οποία καταλήγουν οι δύο αιτιακές διαδικασίες και αυτή η διάταξη κοινού αιτίου ονομάζεται *δίκρανο αλληλεπίδρασης*.

Το γεγονός ότι ο Salmon δεν περιλαμβάνει τη στατιστική σχέση (3.3.1) στον ορισμό του δίκρανου αλληλεπίδρασης αποτελεί ένα ακόμα βήμα απομάκρυνσής του

[11] Με τη διάδοση ασυνεχειών τέτοιου τύπου θα ασχοληθούμε στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας.

από τη θέση ότι οι αιτιακές σχέσεις μπορούν και πρέπει να θεμελιωθούν στη βάση των διαπιστωμένων στατιστικών σχέσεων που ισχύουν ανάμεσα σε συμβάντα. Το πρώτο βήμα έγινε με την άρνηση της θέσης ότι το αίτιο αυξάνει την πιθανότητα να λάβει χώρα το αποτέλεσμα. Το δεύτερο βήμα έγινε με τη βοήθεια του παραδείγματος του Ellis Crasnow και την απαίτηση ότι πέραν των στατιστικών σχέσεων του δίκρανου σύζευξης θα πρέπει να υπάρχουν και δύο ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες που να συνδέουν το συζευκτικό κοινό αίτιο με τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Και το τρίτο βήμα με τη θέση ότι σε ένα δίκρανο αλληλεπίδρασης η ισχύς κάποιας στατιστικής σχέσης που να συνδέει το κοινό αίτιο με τα συσχετιζόμενα συμβάντα είναι μόνο ενδεχομενική.

Στην επόμενη υποενότητα που αναφέρεται στην παραγωγή δομής, πέραν από τη διερεύνηση του ρόλου που παίζουν τα δίκρανα σύζευξης στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon, θα αναφερθούμε ξανά στα δίκρανα αλληλεπίδρασης και συγκεκριμένα σε χαρακτηριστικά τους που τα διακρίνουν από τα δίκρανα σύζευξης.

3.3.2 Παραγωγή Δομής

Οι τροποποιήσεις των χαρακτηριστικών που διαδίδονται κατά μήκος μίας διαδικασίας παράγονται σε συμβάντα στα οποία λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε δύο ή περισσότερες διαδικασίες. Όμως, όπως εξηγήσαμε στην προηγούμενη υποενότητα, υπάρχουν συμβάντα στα οποία δύο ή περισσότερες διαδικασίες συμπίπτουν γεωμετρικά χωρίς να αλληλεπιδρούν. Αν οι διαδικασίες αυτές είναι αιτιακές και τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται κατά μήκος αυτών συγκροτούν κάποιου είδους δομή, τότε στα συμβάντα όπου οι διαδικασίες συμπίπτουν θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα *παραγωγή δομής*.

Στην περιγραφή της παραγωγής δομής συγκλίνουν, για άλλη μία φορά, τόσο οι επιδράσεις από τη θεωρία των αιτιακών γραμμών του Russell, όσο και η υιοθέτηση της έννοιας του δίκρανου σύζευξης του Reichenbach. Συγκεκριμένα, από τον Russell υιοθετείται το αίτημα της δομής σύμφωνα με το οποίο αν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές έχουμε εκδήλωση της ίδιας δομής γύρω από ένα κοινό κεντρικό χωρικό

σημείο, τότε κάποια χρονική στιγμή στο σημείο αυτό λαμβάνει χώρα ένα συμβάν στο οποίο εκδηλώνεται η ίδια δομή. Επιπλέον, υπάρχουν αιτιακές γραμμές που συνδέουν το κεντρικό σημείο με τα σημεία στα οποία λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα που συγκροτούν την κοινή δομή[12]. Κατ' αντιδιαστολή, από τον Reichenbach υιοθετείται η έννοια του δίκρανου σύζευξης, η οποία εκφράζει τις αναγκαίες συνθήκες για το κοινό αίτιο δυο συμβάντων που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση. Έτσι, ο Salmon αναφέρεται σε δομές που συγκροτούνται από συμβάντα τα οποία εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση, υποστηρίζοντας ότι υπάρχει ένα κοινό αίτιο που ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Το κοινό αίτιο είναι το συμβάν στο οποίο συμπίπτουν χωροχρονικά ανεξάρτητες, μη αλληλεπιδρώσες, αιτιακές διαδικασίες, καθεμία εκ των οποίων εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς κάποιο από τα χαρακτηριστικά που συγκροτούν τη δομή. Στο κοινό αίτιο θα λέμε ότι λαμβάνει χώρα η παραγωγή της δομής.

Η ανεξαρτησία των αιτιακών διαδικασιών που συγκροτούν μία διάταξη κοινού αιτίου μπορεί να περιγραφεί με την εξής αντιγεγονική πρόταση: "Σε απουσία οποιασδήποτε αιτιακής διαδικασίας από αυτές που συγκροτούν τη διάταξη κοινού αιτίου, οι υπόλοιπες μένουν ανεπηρέαστες". Για να κατανοήσουμε αυτή τη συνθήκη, ας δώσουμε ένα παράδειγμα. Τα θραύσματα που προκύπτουν από μία έκρηξη βόμβας, σε κλάσματα του δευτερολέπτου μετά την έκρηξη, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι βρίσκονται σχεδόν στο ίδιο χωροχρονικό σημείο. Ωστόσο, η κίνηση καθενός από αυτά αποτελεί μία ανεξάρτητη αιτιακή διαδικασία[13], διότι σε απουσία οποιουδήποτε θραύσματος, οι αιτιακές διαδικασίες που περιγράφουν τις κινήσεις των υπολοίπων παραμένουν ανεπηρέαστες.

Η συνθήκη ανεξαρτησίας των αιτιακών διαδικασιών περιορίζει το είδος των δομών που παράγονται με βάση τις διατάξεις κοινού αιτίου. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε ένα κρύσταλλο που αποτελείται από ιόντα τα οποία αλληλεπιδρούν με δυνάμεις ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει την ιστορία του κρυστάλλου διαδίδεται η δομή του κρυστάλλου. Άρα, η διαδικασία αυτή είναι αιτιακή. Ωστόσο, η δομή του κρυστάλλου δεν μπορεί να θεωρηθεί ως αποτέλεσμα κάποιου συζευκτικού κοινού αιτίου που λαμβάνει χώρα σε

[12] Αυτό το αίτημα δομής είναι η δεύτερη αρχή στην οποία αναφερθήκαμε στην ενότητα 1.2.
[13] Αγνοώντας αμοιβαίες βαρυτικές αλληλεπιδράσεις, κρούσεις, κ.λπ.

κάποιο σημείο τομής των αιτιακών διαδικασιών που αναπαριστάνουν την ιστορία των ιόντων που συγκροτούν τον κρύσταλλο. Οι αιτιακές διαδικασίες των ιόντων του κρυστάλλου δεν είναι ανεξάρτητες. Αντιθέτως, αλληλεπιδρούν μεταξύ τους μέσω άλλων αιτιακών διαδικασιών που διαδίδουν επιδράσεις ηλεκτρομαγνητικής φύσης. Άρα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η δομή του κρυστάλλου που εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της διαδικασίας είναι αποτέλεσμα αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων, οι οποίες συνδέουν τις αιτιακές διαδικασίες που περιγράφουν τα συστατικά του, δηλαδή τα ιόντα του κρυστάλλου. Το γεγονός ότι η δομή που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας ενδέχεται να μην προκύπτει από μία διάταξη συζευκτικού κοινού αιτίου που συνδέεται με τα συμβάντα στα οποία εκδηλώνεται η δομή μέσω ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών, μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διάταξη συζευκτικού κοινού αιτίου δεν αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την παραγωγή δομής.

Ο Dowe υποστήριξε μία παρόμοια θέση στο πλαίσιο ενός επιχειρήματος με το οποίο ασκεί κριτική στην προσέγγιση του Salmon.

> Το δίκρανο σύζευξης χαρακτηρίζει δύο αποτελέσματα που προκύπτουν από ένα κοινό αίτιο … Αλλά δεν εφαρμόζεται σε περιπτώσεις που αφορούν σε ένα μοναδικό αποτέλεσμα, διότι δεν υπάρχει συσχέτιση. Σίγουρα όμως, ακόμα και αν ένας ηθοποιός πάθει τροφική δηλητηρίαση, ή ένας μόνο φοιτητής παραδώσει μία εργασία που είναι προϊόν αντιγραφής, έχουμε περιπτώσεις παραγωγής δομής … Είναι φανερό, ότι υπάρχουν περιπτώσεις παραγωγής δομής μίας διαδικασίας που δεν μπορούμε να αναγνωρίσουμε κανένα δίκρανο σύζευξης. (Dowe 2000:80)

Το επιχείρημα του Dowe μάς λέει ότι υπάρχουν περιπτώσεις όπου κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας εκδηλώνεται δομή, η οποία παράγεται με κάποιο τρόπο. Ωστόσο, για να έχουμε συσχέτιση και εξήγηση της παραγωγής δομής με βάση τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης απαιτείται η ύπαρξη τουλάχιστον δύο αιτιακών διαδικασιών που να καταλήγουν σε δύο συσχετιζόμενα συμβάντα. Έτσι, εφόσον η εκδήλωση της δομής γίνεται κατά μήκος μίας και μόνης διαδικασίας η συνθήκη αυτή δεν ικανοποιείται. Επομένως, υπάρχουν περιπτώσεις που δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε την ύπαρξη δίκρανου σύζευξης και ο στατιστικός χαρακτήρας δεν είναι ουσιώδες χαρακτηριστικό της παραγωγής δομής.

Ενώ συμφωνούμε ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες η δομή δεν μπορεί να εξηγηθεί με την υπόθεση της ύπαρξης ενός συζευκτικού κοινού αιτίου, το επιχείρημα

του Dowe είναι προβληματικό. Και τούτο διότι υποστηρίζει ότι σε περιπτώσεις στις οποίες η δομή διαδίδεται κατά μήκος μίας, μοναδικής, διαδικασίας, δεν μπορούμε καν να αναφερθούμε σε συσχετίσεις δύο αποτελεσμάτων και πολύ περισσότερο να εξετάσουμε αν αυτές προκύπτουν από ένα κοινό αίτιο που ικανοποιεί τις σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Ας δούμε ένα παράδειγμα που δείχνει το αντίθετο. Τόσο ο Salmon όσο και ο Dowe θεωρούν ότι η διάδοση ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος στο κενό αποτελεί αιτιακή διαδικασία[14]. Αν πρόκειται για σφαιρική διάδοση, τότε είναι γνωστό ότι κάθε χρονική στιγμή η ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας μετώπου κύματος είναι σταθερή. Δηλαδή, σε κάθε χρονική στιγμή διαπιστώνουμε την ύπαρξη μίας δομής που εκδηλώνεται στα σημεία όπου "φτάνει" το κύμα εκείνη τη χρονική στιγμή. Και επειδή αυτό λαμβάνει χώρα σε απουσία εξωτερικών παρεμβάσεων, θεωρούμε ότι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελεί μία αιτιακή διαδικασία που διαδίδει δομή. Ωστόσο, η διάδοση του κύματος μπορεί να περιγραφεί και ως ένα σύνολο αιτιακών διαδικασιών εκ των οποίων καθεμία διαδίδει την ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από το σημείο στο οποίο θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα η εκπομπή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σε ένα σημείο του μετώπου κύματος. Μάλιστα, με βάση την προσέγγιση της γεωμετρικής οπτικής μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτές οι αιτιακές διαδικασίες είναι ανεξάρτητες, δηλαδή ισχύει ότι σε απουσία μίας ή κάποιων εξ αυτών, λόγω της παρεμβολής εμποδίων, οι υπόλοιπες μένουν ανεπηρέαστες[15]. Άρα, σε αντίθεση με όσα υποστηρίζει ο Dowe, σε μία διαδικασία που διαδίδει δομή είναι δυνατό να διαπιστώσουμε την ύπαρξη ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών που συμπίπτουν σε κάποιο χωροχρονικό σημείο και συγκροτούν τη δομή. Επομένως, είναι, καταρχήν δυνατό να αναζητήσουμε την ύπαρξη *και* συσχετίσεων *και* δικράνων σύζευξης.

Βεβαίως, στην περίπτωση που εξετάζουμε, δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι οι αιτιακές διαδικασίες που περιγράφουν τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σχηματίζουν δίκρανο σύζευξης. Τα συμβάντα A, B που ορίζονται από τις

[14] Ένα πρόβλημα που υπάρχει με αυτή τη θέση αφορά στον ορισμό της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει την αιτιακή διαδικασία της διάδοσης κύματος. Σε αυτό το πρόβλημα θα αναφερθούμε στο έκτο κεφάλαιο της εργασίας.

[15] Οι Elmore και Heald αναφέρουν ότι « Η προσέγγιση της γεωμετρικής οπτικής προβλέπει ότι καμιά ακτινοβολία δεν εισχωρεί στις γεωμετρικές "σκιές", ενώ διαφορετικά η ακτινοβολία είναι η ίδια που θα υπήρχε αν τα εμπόδια δεν ήταν εκεί.» (Elmore and Heald 1985:322).

τιμές της ενέργειας ανά μονάδα επιφάνειας σε δύο διαφορετικά σημεία του μετώπου κύματος, μία δεδομένη χρονική στιγμή, αποτελούν ένα τέλειο δίκρανο[16],

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B \,|\, C) = \mathrm{P}(A \,|\, C)\mathrm{P}(B \,|\, C) = 1, \qquad (3.3.2)$$

όπου C το συμβάν που περιγράφει τη χωροχρονική σύμπτωση των δύο ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών στο σημείο όπου λαμβάνει χώρα η εκπομπή του κύματος. Το τέλειο δίκρανο, σύμφωνα με τον Salmon, αποτελεί οριακή περίπτωση τόσο των δίκρανων αλληλεπίδρασης όσο και των δίκρανων σύζευξης (Salmon 1998:297).

Το παράδειγμα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δείχνει ότι η χωροχρονική σύμπτωση δύο ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών και ο σχηματισμός δίκρανου σύζευξης είναι ανεξάρτητες συνθήκες. Υπό αυτή την έννοια, θεωρούμε αυτό το παράδειγμα συμπληρωματικό του παραδείγματος του Ellis Crasnow. Στο παράδειγμα του Ellis Crasnow σχηματίζεται δίκρανο σύζευξης από ένα συμβάν που δεν είναι συζευκτικό αίτιο διότι δεν ικανοποιούνται οι χωροχρονικές συνθήκες, ενώ στο παράδειγμα του ηλεκτρομαγνητικού κύματος το χωροχρονικό σημείο στο οποίο λαμβάνει χώρα το συμβάν της σύμπτωσης των αιτιακών διαδικασιών δεν αποτελεί συζευκτικό αίτιο διότι δεν σχηματίζεται δίκρανο σύζευξης, μολονότι οι χωροχρονικές συνθήκες ικανοποιούνται. Μάλιστα, το γεγονός ότι στη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δεν σχηματίζεται δίκρανο σύζευξης είναι απολύτως συμβατό με το ότι οι λύσεις των εξισώσεων του Maxwell για το ελεύθερο πεδίο που προκύπτουν αν αντιστρέψουμε την κατεύθυνση του χρόνου (και αλλάξουμε το πρόσημο του μαγνητικού πεδίου) αναπαριστάνουν φυσικώς πραγματοποιήσιμες διαδικασίες. Αν οι αιτιακές διαδικασίες που περιγράφουν τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος σχημάτιζαν δίκρανο σύζευξης, τότε η αντίστροφη διαδικασία δεν θα ήταν φυσικώς πραγματοποιήσιμη, διότι σύμφωνα με τη θέση του Salmon (ενότητα 2.2) το δίκρανο σύζευξης έχει μοναδική κατεύθυνση: είναι ανοικτό προς το μέλλον.

Η χρονική ασυμμετρία του δίκρανου σύζευξης συνεπάγεται μία βασική διαφορά ανάμεσα στα συζευκτικά αίτια, τα οποία σύμφωνα με το Salmon παράγουν

[16] Το ίδιο θα ισχύει αν τα A,B ανήκουν σε διαφορετικά μέτωπα κύματος και σε διαφορετικές αιτιακές διαδικασίες.

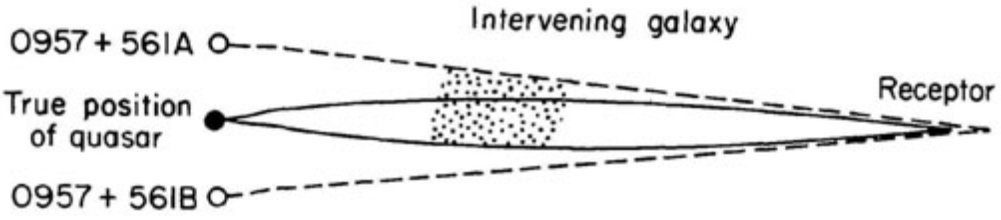
δομή, και στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις, οι οποίες παράγουν τροποποιήσεις σε χαρακτηριστικά αιτιακών διαδικασιών. Οι αιτιακές σχέσεις στα δίκρανα σύζευξης έχουν μία μόνο δυνατή κατεύθυνση, η οποία προσανατολίζει ολόκληρο το αιτιακό δίκτυο του κόσμου, και με βάση την οποία μπορούμε να ορίσουμε και τη χρονική κατεύθυνση των αιτιακών σχέσεων. Αντιθέτως, οι αιτιακές διαδικασίες και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις δεν δεσμεύονται ως προς το ζήτημα της χρονικής κατεύθυνσης. Υπάρχουν αλληλεπιδράσεις που είναι χρονικά συμμετρικές, δηλαδή τέτοιες ώστε οι αντίθετης κατεύθυνσης αλληλεπιδράσεις είναι φυσικώς δυνατόν να λάβουν χώρα (π.χ., η ελαστική κρούση δύο σφαιρών του μπιλιάρδου). Και υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, όπως η απορρόφηση φωτεινών συχνοτήτων από ένα φίλτρο ή η διάσπαση ουδέτερων K-μεσονίων σε ζεύγος $\pi^{\pm}$ μεσονίων, που δεν μπορούν να πραγματοποιηθούν κατά την αντίστροφη χρονική κατεύθυνση[17].

Μία άλλη διαφορά αφορά ανάμεσα στα συζευκτικά κοινά αίτια και στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις αφορά στην περιγραφή τους στο πλαίσιο των φυσικών θεωριών. Οι αιτιακές διαδικασίες και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις διέπονται από βασικούς νόμους της φυσικής. Ο Salmon υποστηρίζει ότι «*όλες οι θεμελιώδεις φυσικές αλληλεπιδράσεις* μπορούν να θεωρηθούν ως παραδείγματα του δίκρανου αλληλεπίδρασης» (Salmon 1998:299). Αντιθέτως, οι διατάξεις συζευκτικού κοινού αιτίου δε συνδέονται τόσο στενά με τους φυσικούς νόμους. Μολονότι εξαρτώνται από την ισχύ φυσικών νόμων αφού συγκροτούνται από αιτιακές διαδικασίες, οι διατάξεις συζευκτικού κοινού αιτίου προκύπτουν μόνο εφόσον ισχύουν συγκεκριμένες γεγονικές προϋποθέσεις που εκφράζουν τις συνθήκες υποβάθρου ενός συγκεκριμένου φυσικού προβλήματος.

Για να κατανοήσουμε τι εννοεί ο Salmon όταν αναφέρεται στις συνθήκες υποβάθρου που προϋποτίθενται του σχηματισμού διατάξεων συζευκτικών κοινών αιτίων, ας δούμε το ακόλουθο παράδειγμα. Τα κβάζαρ 0957+561A,B, αρχικά θεωρήθηκαν ως διαφορετικά αστρονομικά αντικείμενα που απέχουν 6΄΄ τόξου. Πλέον

[17] Για μία φιλοσοφική ανάλυση της θεωρίας της χρονικής ασυμμετρίας που στηρίζεται στη διάσπαση των K-μεσονίων παραπέμπουμε στο βιβλίο του Dowe (2000:202). Ωστόσο, πρέπει να επισημάνουμε ότι η διάσπαση των K-μεσονίων δεν αποτελεί αιτιακή αλληλεπίδραση σύμφωνα με την πρώιμη εκδοχή της θεωρίας του Salmon, διότι δεν υπάρχει δεύτερη αιτιακή διαδικασία με την οποία να αλληλεπιδρά το K-μεσόνιο. Η συμπερίληψη τέτοιου είδους αλληλεπιδράσεων στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις αποτέλεσε έναν από τους λόγους για τη μετάβαση από τη θεωρία του ίχνους στις ύστερες εκδοχές των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων.

οι αστρονόμοι υποστηρίζουν ότι πρόκειται για το ίδιο αντικείμενο που δίνει δύο διαφορετικές εικόνες λόγω της παρεμβολής ενός γαλαξία που λειτουργεί ως βαρυτικός φακός και προκαλεί σύγκλιση των φωτονίων που εκπέμπονται σε αποκλίνουσες κατευθύνσεις από το κβάζαρ.



Σχ. 3.1 Τα κβάζαρ 0957+561A,B. (Blodwell 1985)

Από τη μελέτη των φασματικών χαρακτηριστικών των δύο εικόνων που σχηματίζονταν στο τηλεσκόπιο, προέκυψαν εξαιρετικές ομοιότητες για τα δύο αστρονομικά αντικείμενα και η υπόθεση της ύπαρξης κοινού αιτίου, του ίδιου κβάζαρ, εξηγεί τις ομοιότητες αυτές. Οι δύο διαφορετικές εικόνες που λαμβάνουμε αντιστοιχούν σε διάδοση φωτονίων κατά μήκος δύο ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών στον καμπυλωμένο χωρόχρονο που προκύπτει από την ύπαρξη του γαλαξία. Προφανώς η διάδοση των φωτονίων διέπεται από φυσικούς νόμους. Ωστόσο, επισημαίνει ο Salmon, «αποτελεί γεγονική συνθήκη ότι το κβάζαρ και ο ελλειπτικός γαλαξίας είναι τοποθετημένα με τέτοιο τρόπο ώστε το φως που φθάνει σ' εμάς από δύο διαφορετικές κατευθύνσεις να προκύπτει από μία πηγή που ακτινοβολεί σχεδόν ομοιόμορφα από εκτεταμένα τμήματα της επιφάνειας της» (Salmon 1998:299). Δηλαδή, δεν υπάρχει κάποιος φυσικός νόμος που να επιβάλλει την ύπαρξη του ελλειπτικού γαλαξία ή τη συγκεκριμένη σχετική θέση του κβάζαρ και του ελλειπτικού γαλαξία ώστε να προκύπτει αυτό το φαινόμενο.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε ότι ο Salmon υποστηρίζει στο πλαίσιο της πρώιμης εκδοχή της αιτιακής θεωρίας του ότι η παραγωγή δομής περιγράφεται με τη βοήθεια συζευκτικών αιτίων. Τα συζευκτικά αίτια είναι συμβάντα που περιγράφονται από τη χωροχρονική σύμπτωση δύο ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών και διαδίδουν χαρακτηριστικά που εκδηλώνουν θετική στατιστική σχέση. Τα συσχετιζόμενα συμβάντα μαζί με το κοινό αίτιο σχηματίζουν δίκρανο σύζευξης. Υποστηρίξαμε με το

παράδειγμα της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος ότι οι χωροχρονικές συνθήκες που ικανοποιεί το συζευκτικό κοινό και η συνθήκη του σχηματισμού δίκρανου σύζευξης είναι ανεξάρτητες συνθήκες. Επίσης, υποστηρίξαμε με το παράδειγμα του κρυστάλλου ότι η ύπαρξη συζευκτικού κοινού αιτίου δεν αποτελεί αναγκαία συνθήκη για την παραγωγή της δομής που διαδίδεται κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας. Τέλος, παρουσιάσαμε δύο ακόμα διαφορές - πέρα από το ζήτημα της μη δέσμευσης του δίκρανου αλληλεπίδρασης στην ικανοποίηση στατιστικών σχέσεων, στο οποίο αναφερθήκαμε στην ενότητα 3.3.1 - που σύμφωνα με το Salmon υπάρχουν ανάμεσα στα συζευκτικά κοινά αιτία και στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Συγκεκριμένα, αναφερθήκαμε στο ζήτημα της χρονικής ασυμμετρίας των συζευκτικών κοινών αιτίων και της μη δέσμευσης ως προς το ζήτημα της κατεύθυνσης του χρόνου από τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις, καθώς και στην εξάρτηση των αιτιακών αλληλεπιδράσεων από φυσικούς νόμους και των συζευκτικών κοινών αιτίων από ειδικές συνθήκες υποβάθρου.

3.4 Προβλήματα της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon

Η κριτική που ασκήθηκε στην πρώιμη εκδοχή της θεωρίας του Salmon για τις αιτιακές διαδικασίες και τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις συνίσταται στην επισήμανση των ακόλουθων προβλημάτων.

1) Το πρόβλημα της κυκλικότητας των ορισμών. Το πρόβλημα αυτό επισημάνθηκε από τον Dowe (1992, 2000) και απαντήθηκε, σε κάποιο βαθμό, από τον Salmon με την αναδιατύπωση της θεωρίας του στο (Salmon 1998). Στην ενότητα 3.4.1 θα αναλύσουμε το πρόβλημα και τις απαντήσεις του Salmon και θα κάνουμε ορισμένες επιπλέον παρατηρήσεις.
2) Το πρόβλημα της επάρκειας του κριτηρίου του ίχνους, το οποίο αφορά στο αν το κριτήριο του ίχνους αποτελεί ικανή και αναγκαία συνθήκη για τον καθορισμό των αιτιακών διαδικασιών. Θα εξετάσουμε το πρόβλημα στην ενότητα 3.4.2 στη βάση παραδειγμάτων που διατυπώθηκαν από τον Kitcher (1989) και τον Dowe (2000).
3) Το πρόβλημα των αντιγεγονικών προτάσεων, που αφορά στην εξάρτηση της θεωρίας του Salmon από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων. Το πρόβλημα

αυτό, το οποίο κατά δήλωση του Salmon αποτέλεσε έναν από τους λόγους για τη στροφή στις αναλλοίωτες και στις διατηρήσιμες ποσότητες στις ύστερες εκδοχές της αιτιακής θεωρίας, θα το αναλύσουμε στην ενότητα 3.4.3.

4) Το πρόβλημα του είδους των αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Αυτό το πρόβλημα αφορά στην αδυναμία του ορισμού των αιτιακών αλληλεπιδράσεων με βάση την έννοια του ίχνους να συμπεριλάβει όλα τα είδη αλληλεπιδράσεων που θέλουμε να χαρακτηρίσουμε ως αιτιακές. Σύμφωνα με το Salmon αυτό επίσης αποτελεί ένα πρόβλημα που επιλύθηκε στο πλαίσιο των ύστερων εκδοχών της αιτιακής του θεωρίας.

Πέραν αυτών των προβλημάτων, στα οποία θα αναφερθούμε στις επόμενες ενότητες, υπάρχουν δύο ακόμα προβλήματα που επισημαίνονται. Το πρώτο αφορά στη στατιστική επεξήγηση των αιτιακών εννοιών. Οι αναφορές του Salmon στις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης κυρίως, αλλά και σε σχέση με τα δίκρανα αλληλεπίδρασης, θεωρήθηκαν από τον Dowe ως μία προσπάθεια να χαρακτηριστούν οι αιτιακές έννοιες με βάση στατιστικές σχέσεις. Έτσι, ο Dowe άσκησε κριτική σε αυτή τη στάση που θεώρησε ότι υιοθετεί ο Salmon στην πρώιμη εκδοχή της αιτιακής θεωρίας. Σε πτυχές αυτής της κριτικής έχουμε ήδη αναφερθεί σε προηγούμενες ενότητες. Δεν θεωρούμε ότι χρειάζεται περαιτέρω αναφορά σε αυτή, αφενός διότι ο ίδιος ο Salmon όταν διατυπώνει την πρώιμη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αλληλεπιδράσεων έχει ήδη εγκαταλείψει κάθε σκέψη σε αυτή την κατεύθυνση (Salmon 1984:174, υποσ.12), αφετέρου διότι αναφέρει ρητά ότι «ο Dowe κι εγώ δεν έχουμε καμιά βασική διαφωνία σε αυτό το ζήτημα» (Salmon 1998:252).

Το δεύτερο πρόβλημα που επισημαίνει ο Dowe αφορά στη σχέση της αιτιότητας με τις πιθανοκρατικές τάσεις. Ο Salmon υποστηρίζει ότι κατά μήκος των αιτιακών διαδικασιών ενδέχεται να διαδίδονται πιθανοκρατικές τάσεις για να λάβει χώρα μία αιτιακή αλληλεπίδραση. Η κριτική του Dowe (2000:85-87) αφορά στο κατά πόσον αυτή η θέση είναι συμβατή με την εμπειριστική προδιάθεση του Salmon που ήθελε να θεμελιώσει την αιτιακή του θεωρία σε συμφωνία με τις χιουμιανές επιταγές. Σε αυτό το ζήτημα θα αναφερθούμε στο πέμπτο κεφάλαιο, στο πλαίσιο της φιλοσοφικής αποτίμησης της θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων.

Τέλος, επειδή σε αρκετές περιπτώσεις έχουμε ήδη αναφερθεί σε ορισμένα από αυτά τα προβλήματα κατά την παρουσίαση των θέσεων του Salmon σε προηγούμενες ενότητες, θα όπου είναι δυνατό θα αποφύγουμε τις επαναλήψεις παραπέμποντας στις αντίστοιχες ενότητες.

3.4.1 Το πρόβλημα της κυκλικότητας των ορισμών

Ο Dowe (2000:72-3) επισημαίνει πρόβλημα κυκλικότητας για δύο ζεύγη εννοιών της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon. Το πρώτο ζεύγος αποτελείται από τις έννοιες "ίχνος" και "αλληλεπίδραση" , ενώ το δεύτερο από τις έννοιες "διάδοση ίχνους" και "αλληλεπίδραση".

Αυτό που υποστηρίζει ο Dowe για το πρώτο ζεύγος εννοιών είναι ότι αν ορίσουμε το ίχνος ως «την τροποποίηση που εισάγεται σε μία διαδικασία με μία μοναδική αλληλεπίδραση» και την αλληλεπίδραση ως «την τομή στην οποία αμφότερες οι διαδικασίες σημαίνονται», τότε η έννοια της αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει την έννοια του ίχνους και η έννοια του ίχνους ορίζεται με βάση την έννοια της αλληλεπίδρασης.

Προς άρση της κυκλικότητας, ο Salmon στην τελευταία ανασυγκρότηση της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του, αντικαθιστά στον ορισμό του ίχνους τον όρο "αλληλεπίδραση" με τον όρο "τομή". Έτσι, καταλήγουμε στον ορισμό του ίχνους που αναφέραμε στην ενότητα 3.2.

Ο Dowe υποστηρίζει ότι αυτή η διόρθωση είναι προβληματική διότι αν το ίχνος είναι τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού που λαμβάνει χώρα σε μία και μοναδική τοπική τομή, τότε δεν υπάρχει τίποτα που να αποτρέπει το ενδεχόμενο της ατυχηματικής συσχέτισης μίας αλλαγής σε μία διαδικασία με την τομή της με μία άλλη διαδικασία.

Βεβαίως, η αποφυγή τέτοιων ατυχηματικών συσχετίσεων προβλέπεται από τον Salmon. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, η (ΑΔΙ) απαιτεί να ισχύει μία αντιγεγονική πρόταση που περιγράφει ό,τι συμβαίνει σε μία διαδικασία σε απουσία

αλληλεπίδρασης με άλλες διαδικασίες. Αυτή η αντιγεγονική πρόταση μολονότι δεν περιλαμβάνεται στους ορισμούς που παρουσιάζει ο Salmon στην μεταγενέστερη ανασυγκρότηση της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του, διασώζει την προσέγγιση από τη μομφή της κυκλικότητας. Και αυτό το αναγνωρίζει και ο Dowe που αναφέρει ότι «αν ο Salmon επιτρέπει αυτή την πρόταση, τότε η αλλαγή από το "αλληλεπίδραση" στο "τομή" εξοβελίζει την κυκλικότητα με ικανοποιητικό τρόπο» (Dowe 2000:73).

Η δεύτερη περίπτωση στην οποία ο Dowe διαπιστώνει κυκλικότητα δεν είναι το ίδιο εύκολα διαχειρίσιμη. Η έννοια της διάδοσης περιλαμβάνει την έννοια της αλληλεπίδρασης, εφόσον η διάδοση πραγματοποιείται σε απουσία αλληλεπιδράσεων. Αντιστοίχως, η έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης περιλαμβάνει την έννοια της διάδοσης, εφόσον το ίχνος που δημιουργείται σε μία αιτιακή αλληλεπίδραση διαδίδεται πέραν από το σημείο της τομής.

Ο Dowe υποστηρίζει ότι η έννοια της διάδοσης δεν μπορεί να αφαιρεθεί από τον ορισμό της αιτιακής αλληλεπίδρασης διότι σε μία τέτοια περίπτωση καθίσταται δυνατόν η δημιουργία ίχνους σε ένα χωροχρονικό σημείο μίας ψευδο-διαδικασίας να μας οδηγεί στον συμπέρασμα ότι η διαδικασία είναι αιτιακή. Βεβαίως, όπως ήδη επισημάναμε η αρχή της αιτιακής αλληλεπίδρασης (ΑΑ) δεν περιλαμβάνει την έννοια της διάδοσης αλλά μόνο αυτή της εκδήλωσης ομοιομορφίας ως προς το τροποποιημένο χαρακτηριστικό. Παρ' όλα αυτά δεχθήκαμε ότι ο Salmon, στο σημείο αυτό, είχε κατά νου την έννοια της διάδοσης και όχι απλώς της εκδήλωσης ομοιομορφίας, δεδομένου ότι η αιτιακή αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα ανάμεσα σε δύο αιτιακές διαδικασίες.

Η εναλλακτική στρατηγική για την αποφυγή της κυκλικότητας, που προτείνει ο Dowe, έχει να κάνει με την αντικατάσταση του όρου "αλληλεπίδραση" με τον όρο "τομή" στον ορισμό της διάδοσης ίχνους. Δηλαδή, η διάδοση ίχνους σε ένα διάστημα να λαμβάνει χώρα "σε απουσία τομών με άλλες διαδικασίες". Το μειονέκτημα μίας τέτοιας διόρθωσης όμως, είναι ότι αποκλείει όχι μόνο τις ψευδο-διαδικασίες αλλά και περιπτώσεις αιτιακών διαδικασιών. Για παράδειγμα, σκεφτείτε μία αιτιακή διαδικασία που αποκτά κάποιο ίχνος σε μία αιτιακή αλληλεπίδραση και το εκδηλώνει σε κάθε σημείο της για ένα διάστημα μετά την αλληλεπίδραση. Αν η διαδικασία αυτή τέμνεται, χωρίς να αλληλεπιδρά, με μία άλλη διαδικασία τότε, σύμφωνα με την

προτεινόμενη διόρθωση, δεν μπορούμε να πούμε ότι διαδίδει το ίχνος της. Άρα, αν δεχτούμε αυτή τη διόρθωση, πολλές διαδικασίες που είναι αιτιακές δεν θα ταξινομούνται ως τέτοιες και αντιστοίχως, πολλές αλληλεπιδράσεις που είναι αιτιακές δεν θα θεωρούνται ως τέτοιες. Επομένως, μολονότι αυτή η τροποποίηση του ορισμού της διάδοσης ίχνους μάς επιτρέπει να αποφύγουμε την κυκλικότητα, έχει σημαντικό κόστος συνεπειών όσον αφορά την ταξινόμηση μίας διαδικασίας ή/και μίας αλληλεπίδρασης ως αιτιακής[18].

Βεβαίως, τόσο η κριτική του Dowe σε σχέση με την κυκλικότητα των ορισμών, όσο και η διόρθωση που υιοθετεί ο Salmon με την αντικατάσταση του όρου "αλληλεπίδραση" με τον όρο "τομή" στον ορισμό του ίχνους, προϋποθέτουν την ταύτιση της έννοιας της αλληλεπίδρασης που συναντάμε στους ορισμούς με την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Όπως όμως έχουμε ήδη αναφέρει, η έννοια της σήμανσης και κατά συνέπεια της αλληλεπίδρασης ή, καλύτερα, της παρέμβασης που δημιουργεί ίχνος, δεν εξαντλείται από την έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Άρα, στην πρώτη περίπτωση που διαπιστώνεται κυκλικότητα, ο όρος "αλληλεπίδραση" στον ορισμό του ίχνους, δεν ταυτίζεται κατ' ανάγκη με τον όρο "αιτιακή αλληλεπίδραση" που ορίζεται με βάση το ίχνος. Το ίδιο μπορούμε να πούμε και για τη δεύτερη περίπτωση στην οποία διαπιστώνεται κυκλικότητα. Για να έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση απαιτείται "ίχνος + διάδοση", ενώ η αλληλεπίδραση σήμανσης έχει ως αποτέλεσμα τη δημιουργία ίχνους σε κάποιο σημείο της διαδικασίας.

Μολονότι αυτή η ερμηνεία απαντά στα προβλήματα κυκλικότητας, αναδεικνύει ένα καινούργιο πρόβλημα της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon για το οποίο δεν έχουμε να πούμε κάτι παραπάνω: φαίνεται ότι υπάρχει μία έννοια αλληλεπίδρασης ή παρέμβασης που δεν ορίζεται, ενώ προϋποτίθεται για τη διατύπωση των ορισμών της θεωρίας. Έτσι, αν δεχτούμε αυτή την ερμηνεία τότε η αναγωγή των αιτιακών εννοιών σε γεωμετρικές έννοιες καθώς και στην έννοια του χαρακτηριστικού, που αποτελούν μη αιτιακές έννοιες, δεν επιτυγχάνεται, διότι είναι

[18] Η συνθήκη της απουσίας τομής με άλλες αιτιακές αλληλεπιδράσεις επανέρχεται στο πλαίσιο της ύστερης αιτιακής θεωρίας του Salmon με βάση το πρόβλημα των τομών μη αλληλεπιδρώντων διαδικασιών. Μία διαδικασία που τέμνεται, χωρίς να αλληλεπιδρά, με άλλες διαδικασίες δεν μπορεί να χαρακτηριστεί ως αιτιακή διαδικασία με βάση τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Ο λόγος είναι ότι στα σημεία τομής μεταβάλλεται το ποσό της διατηρήσιμης ποσότητας που εκδηλώνεται, ανεξάρτητα από το αν λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση ή όχι.

προφανές ότι η αλληλεπίδραση ή η παρέμβαση που δημιουργεί ίχνος είναι αιτιακή έννοια. Βεβαίως ο Salmon είναι σαφής σε σχέση με αυτό το ζήτημα. Απορρίπτει ρητά αυτή τη διάκριση δηλώνοντας: «… στην ορολογία μου η "αιτιακή αλληλεπίδραση" και η "αλληλεπίδραση είναι συνώνυμα· δεν υπάρχουν τέτοιου είδους πράγματα όπως μη αιτιακές αλληλεπιδράσεις» (Salmon 1998: 250).

3.4.2 Η επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους

Το πρόβλημα αφορά στην επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους να διακρίνει τις αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες. Τα επιχειρήματα που θα παρουσιάσουμε δείχνουν αφενός ότι υπάρχουν διαδικασίες που διαισθητικά θα τις θεωρούσαμε ως αιτιακές μολονότι δεν ικανοποιούν το κριτήριο του ίχνους - δηλαδή, ότι το κριτήριο του ίχνους δεν αποτελεί αναγκαία συνθήκη για μία αιτιακή διαδικασία («επιχειρήματα τύπου Α»)-, αφετέρου, ότι υπάρχουν διαδικασίες οι οποίες ικανοποιούν το κριτήριο του ίχνους μολονότι είναι ψευδο-διαδικασίες - δηλαδή, ότι το κριτήριο του ίχνους δεν αποτελεί ικανή συνθήκη για να είναι μία διαδικασία αιτιακή («επιχειρήματα τύπου Ι»).

Επιχειρήματα τύπου Α

Α1) Το κριτήριο του ίχνους απαιτεί μία διαδικασία να επιδεικνύει ορισμένο βαθμό ομοιομορφίας ως προς κάποιο χαρακτηριστικό. Όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.1, ο Dowe υποστηρίζει ότι αυτό έχει ως συνέπεια την εξαίρεση από την κατηγορία των αιτιακών διαδικασιών εκείνων των διαδικασιών που εκδηλώνουν βραχυχρόνια ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό. Ωστόσο, όπως επισημάναμε η κριτική αυτή δεν είναι ορθή, διότι στη συνθήκη ομοιομορφίας μίας διαδικασίας δεν ορίζεται ελάχιστη χρονική διάρκεια εκδήλωσης του χαρακτηριστικού ως προς το οποίο η διαδικασία εκδηλώνει ομοιομορφία.

Α2) Υπάρχουν αιτιακές διαδικασίες που δεν επιδέχονται τροποποιήσεις χαρακτηριστικών / σήμανση. Αυτό σημαίνει ότι τα χαρακτηριστικά που

εκδηλώνονται κατά μήκος της αιτιακής διαδικασίας αποτελούν ουσιώδεις ιδιότητες ενός φυσικού αντικειμένου. Δηλαδή, αν αυτές οι ιδιότητες ήταν διαφορετικές, τότε δεν θα αναφερόμασταν στο ίδιο αντικείμενο και στην ίδια αιτιακή διαδικασία. Ο Ψύλλος (Psillos 2002:113) αναφέρει το φωτόνιο ως μία τέτοιου είδους αιτιακή διαδικασία. Ωστόσο, το παράδειγμα δεν είναι ορθό, μολονότι η φιλοσοφική θέση που έρχεται να υποστηρίξει δεν μπορεί να θεωρηθεί εσφαλμένη. Συγκεκριμένα, ακόμη κι αν αγνοήσουμε το γεγονός ότι δεν μπορούμε να μιλάμε για τροχιά ενός κβαντικού σωματιδίου ώστε να αναπαριστάνουμε την κίνηση του φωτονίου με μία χωροχρονική γραμμή, το φωτόνιο εκτός από την ενέργεια και την ορμή του, που μπορούν να θεωρηθούν ως ουσιώδεις ιδιότητες, έχει μία ακόμα ιδιότητα που ονομάζεται ελικότητα[19]. Οι δύο δυνατές τιμές της ελικότητας δεν αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικά φωτόνια αλλά σε δύο διαφορετικές καταστάσεις του ίδιου φωτονίου. Το κλασικό ανάλογο των δύο αυτών καταστάσεων του φωτονίου είναι το δεξιόστροφα και αριστερόστροφα πολωμένο φως.

Από την άλλη πλευρά, στην ενότητα 2.1, αναφερόμενοι στη μέθοδο του ίχνους του Reichenbach, εξηγήσαμε το γεγονός ότι διατυπώνονται δύο ορισμοί της σχέσης αιτιακής συνάφειας – με βάση τη μέθοδο του ίχνους και με βάση τις στατιστικές σχέσεις – ως συνέπεια της μη δέσμευσης του Reichenbach στη φυσική δυνατότητα σήμανσης ενός συμβάντος. Το γεγονός αυτό μας κάνει να σκεφτούμε ότι η θέση που διατυπώνει ο Ψύλλος ενδέχεται να είναι ορθή και για την περίπτωση της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon. Ωστόσο, για να δείξουμε ότι υπάρχουν διαδικασίες που δεν επιδέχονται τροποποιήσεις χαρακτηριστικών, που δεν είναι δυνατό να σημανθούν, θα πρέπει να βρούμε κάποια πιο πειστικά παραδείγματα από εκείνο του φωτονίου.

Α3) Η διάδοση ίχνους, σύμφωνα με την (ΑΔΙ), λαμβάνει χώρα σε απουσία παρεμβάσεων και η διαδικασία κατά μήκος της οποίας διαδίδεται το ίχνος εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό, σε απουσία αλληλεπιδράσεων. Ωστόσο, όπως επισημαίνει ο Kitcher (1989:463), σε πραγματικές συνθήκες, ακόμα

[19] Με την ελικότητα (helicity) εννοούμε την προβολή του σπιν ενός σωματιδίου στην κατεύθυνση της ορμής. Η ελικότητα είναι θετική, αν το σπίν και η ορμή έχουν την ίδια κατεύθυνση και σε αυτή την περίπτωση η κατεύθυνση κίνησης του σωματιδίου και η φορά "ιδιοπεριστροφής" του σχηματίζουν δεξιόστροφο κοχλία. Αν η ορμή και το σπιν έχουν αντίθετη κατεύθυνση, τότε η ελικότητα είναι αρνητική (Burgess and Moore 2007:397).

και σε ελεγχόμενα πειράματα, οι αιτιακές διαδικασίες αλληλεπιδρούν συνεχώς με άλλες διαδικασίες. Και για να υποστηρίξουμε ορθά ότι κάποιες από αυτές τις αλληλεπιδράσεις έχουν σχέση με τη διάδοση του ίχνους, ή με την ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό, και κάποιες όχι ώστε να αποκλείσουμε μόνο τις πρώτες από αυτές, θα πρέπει να μπορούμε να διακρίνουμε εξαρχής ανάμεσα σε συναφείς και μη συναφείς αλληλεπιδράσεις. Και η διάκριση αυτή φέρει αιτιακό φορτίο και δεν μπορεί να προϋποτίθεται σε μία ανάλυση για την αιτιότητα.

Επιπλέον, η θεώρηση των αιτιακών διαδικασιών ως αυτοδιαδιδόμενες, μπορεί να είναι ορθή για την περίπτωση της αδρανειακής κίνησης ή της διάδοσης των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, δεν είναι όμως γενικά ορθή. Για παράδειγμα, τα ηχητικά κύματα προϋποθέτουν την ύπαρξη ενός μέσου για να διαδοθούν με το οποίο βρίσκονται σε συνεχή αλληλεπίδραση. Τέτοιου είδους διαδικασίες υποστηρίζει ο Dowe (2000:74) απαιτούν ένα αιτιακό υπόβαθρο και κάποιες περιγράφονται ως μία σειρά αλληλεπιδράσεων. Συνεπώς υπάρχουν αρκετές αιτιακές διαδικασίες που δεν θα τις θεωρήσουμε αιτιακές λόγω της συνθήκης που επιβάλλει η διάδοση του ίχνους και η ομοιόμορφη εκδήλωση ενός χαρακτηριστικού να γίνεται σε απουσία αλληλεπιδράσεων.

Το ζήτημα που θέτουν οι Kitcher και Dowe αφορά στο πεδίο εφαρμογής της θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων του Salmon. Η προϋπόθεση διάκρισης ανάμεσα σε συναφείς και σε μη συναφείς αλληλεπιδράσεις, που αναφέρει ο Kitcher αφορά στην αιτιακή περιγραφή μακροσκοπικών διαδικασιών και το ίδιο ισχύει σε σχέση με ζητήματα που αφορούν στο αιτιακό υπόβαθρο που προϋποτίθεται για την περιγραφή των αιτιακών διαδικασιών. Έτσι, ο Kitcher χαρακτηριστικά ισχυρίζεται ότι

> … οι συνθήκες του Salmon φαίνεται ότι είναι εφαρμόσιμες μόνο σε εξιδανικευμένες (στοιχειώδεις) διαδικασίες. Αυτό απαιτεί να παράσχουμε μία προσέγγιση για τον τρόπο με τον οποίο η αιτιακή δομή του μακροσκοπικού κόσμου προκύπτει από τη συμπερίληψη των στοιχειωδών διαδικασιών. (Kitcher 1989:469)

Ο Salmon μάλλον θα διαφωνούσε με τον Kitcher όσον αφορά στον περιορισμό της θεωρία του σε στοιχειώδεις διαδικασίες. Αυτό προκύπτει από τα πολλά παραδείγματα από την καθημερινή ζωή που αναφέρει. Η θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των

αιτιακών αλληλεπιδράσεων αφορά τόσο στη μικροσκοπική περιγραφή του κόσμου όσο και στη μακροσκοπική περιγραφή. Ωστόσο, η στάση που φαίνεται να υιοθετεί είναι ότι στις περιπτώσεις που, για λόγους όπως αυτούς που αναφέρουν οι Kitcher και Dowe, εγείρονται ενστάσεις ως προς την εφαρμοσιμότητα της θεωρίας θα πρέπει να εξετάσουμε μήπως οι περιγραφές μας είναι αδρομερείς και σε αναντιστοιχία με τη λεπτή υφή των στοιχειωδών διαδικασιών όπως αυτές περιγράφονται από τις καλύτερες και πιο θεμελιώδεις επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε.

Συγκεκριμένα, ο Salmon αντιμετωπίζει το πρόβλημα της ύπαρξης συνεχών αλληλεπιδράσεων κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής ενός φυσικού αντικειμένου, όταν εξετάζει την κίνηση εντός πεδίων (Salmon 1997). Οι απαντήσεις που φαίνεται να δίνει κινούνται σε δύο κατευθύνσεις. Πρώτο, η θεώρηση του πεδίου ως συνεχούς μέσου αποτελεί απλουστευτική εξιδανίκευση. Και δεύτερο, η αλληλεπίδραση μπορεί να γεωμετρικοποιηθεί και να θεωρήσουμε την κίνηση ως αδρανειακή κίνηση σε ένα χωρόχρονο με μεταβαλλόμενη τοπική γεωμετρία.

Η κίνηση μίας μπάλας στον αέρα συνίσταται στην αλληλεπίδραση της μπάλας με τα μόρια του αέρα, δηλαδή σε μία ακολουθία διακριτών συμβάντων. Ωστόσο, απλοποιούμε το πρόβλημα της κίνησης της μπάλας θεωρώντας αυτή ως κίνηση σε ένα συνεχές μέσο, χωρίς να λαμβάνουμε υπόψη τη φύση της ατμόσφαιρας. Η προσέγγιση αυτή μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει την κίνηση της μπάλας λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Η κίνηση της μπάλας στο κενό ή ανάμεσα σε δύο διαδοχικές αλληλεπιδράσεις με τα μόρια του αέρα, αποτελεί αιτιακή διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε απουσία αλληλεπιδράσεων.

Το ίδιο ισχύει και για τη διάδοση των ηχητικών κυμάτων στον αέρα. Ο ήχος μπορεί να περιγραφεί ως περιοδική μεταβολή της πίεσης του αέρα και η πίεση του αέρα είναι το αποτέλεσμα κρούσεων των μορίων του αέρα με τα τοιχώματα του δοχείου στο οποίο περιέχεται. Άρα η εξάρτηση της διάδοσης του ηχητικού κύματος από την ύπαρξη του αέρα μπορεί να εξηγηθεί, σε μικροσκοπικό επίπεδο, με βάση τις αιτιακές διαδικασίες των μορίων του αέρα και διακριτές αιτιακές αλληλεπιδράσεις στις οποίες ανάγεται η μακροσκοπικά διαπιστωμένη περιοδική μεταβολή της πίεσης.

Στο επίπεδο της θεμελιώδους φυσικής, η προσέγγιση της απλουστευτικής εξιδανίκευσης βρίσκει εφαρμογή στην ηλεκτροδυναμική. Σύμφωνα με την κβαντική ηλεκτροδυναμική, υποστηρίζει ο Salmon, η κίνηση ενός σωματιδίου στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποτελεί μία σειρά αιτιακών διαδικασιών που διακόπτονται από συχνές αιτιακές αλληλεπιδράσεις που αντιστοιχούν σε απορρόφηση ή εκπομπή φωτονίων. Μόνο για λόγους απλούστευσης κάνουμε την εξιδανίκευση να θεωρούμε το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ως συνεχές μέσο.

Από την άλλη, η γενική θεωρία της σχετικότητας μάς λέει ότι ένα σώμα που κινείται υπό την επίδραση μόνο του βαρυτικού πεδίου μπορεί να θεωρηθεί ότι εκτελεί ελεύθερη κίνηση σε έναν κατάλληλα καμπυλωμένο χωρόχρονο. Σύμφωνα με αυτή την προσέγγιση, δεν θεωρούμε ότι η βαρυτική αλληλεπίδραση μεταβάλλει τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της τροχιάς ενός σωματιδίου στον επίπεδο χωρόχρονο, αλλά ότι ο χωρόχρονος υποβάθρου καμπυλώνεται λόγω της ύπαρξης του βαρυτικού πεδίου και η τροχιά του σωματιδίου αποτελεί "ευθεία" –αυστηρά, γεωδαισιακή καμπύλη– του καμπυλωμένου χωροχρόνου. Έτσι, η κίνηση ενός σωματιδίου υπό την επίδραση του βαρυτικού πεδίου δεν αναπαρίσταται από μία χωροχρονική γραμμή σε κάθε σημείο της οποίας λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση, αλλά αποτελεί αιτιακή διαδικασία.

Ο Salmon δεν αρνείται γενικώς την υπόθεση ενός υποβάθρου στο οποίο λαμβάνουν χώρα οι αιτιακές διαδικασίες. Απλώς υποστηρίζει, σε αντίθεση με τον Dowe, *είτε* ότι οι θεμελιώδεις φυσικές θεωρίες μπορούν να περιγράψουν την αλληλεπίδραση των αιτιακών διαδικασιών με το υπόβαθρο με τρόπο που έρχεται σε συμφωνία με τη θεωρία του (όπως στην περίπτωση του ηχητικού κύματος, της μπάλας και της κίνησης του φορτίου σε ηλεκτρομαγνητικό πεδίο) *είτε* ότι το υπόβαθρο είναι αδρανές με την έννοια ότι δεν αλληλεπιδρά με τις αιτιακές διαδικασίες. Η ίδια η υπόθεση ενός χωροχρόνου για τη γεωμετρική περιγραφή των αιτιακών διαδικασιών προσδιορίζει το υπόβαθρο, την "αρένα" εντός της οποίας λαμβάνουν χώρα οι αιτιακές διαδικασίες. Όμως, η ενσωμάτωση, μέσω της γεωμετρικοποίησης, της βαρυτικής αλληλεπίδρασης στο χωροχρονικό υπόβαθρο οδηγεί στη θεώρηση ότι ένα σώμα που αλληλεπιδρά μόνο βαρυτικά με το περιβάλλον του μπορεί να θεωρηθεί ως ελευθέρως κινούμενο.

Επιχειρήματα τύπου Ι

Ι1) Το επιχείρημα από το ψευδο-ίχνος διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Kitcher (1989:463): «είναι δυνατόν οι ψευδο-διαδικασίες να διαδίδουν ψευδο-ίχνη με τον ίδιο τρόπο που οι αιτιακές διαδικασίες διαδίδουν πραγματικά ίχνη». Ας θεωρήσουμε το παράδειγμα ενός αυτοκινήτου που κάποια χρονική στιγμή τρίβεται σε ένα τοίχο και αποκτά μία γρατζουνιά. Το αυτοκίνητο αποτελεί μία αιτιακή διαδικασία που διαδίδει τη γρατζουνιά. Όμως, υποστηρίζει ο Kitcher, και η σκιά του αυτοκινήτου διαδίδει την ιδιότητα του να είναι σκιά ενός γρατζουνισμένου αυτοκινήτου. Άρα η σκιά αποτελεί αιτιακή διαδικασία.

Όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.1, η ιδιότητα του να είναι κάτι η σκιά ενός γρατζουνισμένου αυτοκινήτου δεν αποτελεί ένα χαρακτηριστικό που διαπιστώνεται τοπικά, σε κάθε σημείο χωροχρονικής γραμμής κατά μήκος της οποίας εκδηλώνεται η σκιά. Άρα δεν αποτελεί ένα χαρακτηριστικό που διαδίδεται κατά μήκος της διαδικασίας. Όμως τι γίνεται με το παράδειγμα του Dowe, στο οποίο η σκιά ανήκει σε ένα αυτοκίνητο με ανοιχτό καπό; Ο Dowe ορθά υποστηρίζει ότι αυτή η ιδιότητα μπορεί να διαπιστωθεί τοπικά με βάση το σχήμα της σκιάς. Επιπλέον, το άνοιγμα του καπό μπορεί να προκύψει από μία σύγκρουση του αυτοκινήτου που τροποποιεί την εξωτερική μορφή του, και μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το αντίστοιχο ψευδο-ίχνος προκύπτει από την τομή της σκιάς του αυτοκινήτου με τη σκιά του αντικειμένου με το οποίο συγκρούστηκε το αυτοκίνητο. Σε αυτή την περίπτωση μετά την τομή το ψευδο-ίχνος εκδηλώνεται πέραν από το σημείο τομής της σκιάς του αυτοκινήτου με τη δεύτερη σκιά. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύει η αντιγεγονική πρόταση που απαιτεί η (ΑΑ): σε απουσία της σκιάς του αντικειμένου με το οποίο συγκρούεται το αυτοκίνητο, η σκιά του αυτοκινήτου *δεν* παραμένει ανεπηρέαστη, αλλά εκδηλώνει την ίδια τροποποίηση ως εάν η σκιά να ήταν εκεί. Αυτή η περίπτωση μάς θυμίζει το παράδειγμα των Maher-Otte που αναφέραμε στην υποενότητα 3.3.1.

Τι γίνεται όμως αν το αυτοκίνητο συγκρούεται με τον τοίχο πάνω στον οποίο προβάλλεται η σκιά του; Σε αυτή την περίπτωση οι τεμνόμενες διαδικασίες είναι το αυτοκίνητο και η σκιά του, οι οποίες μετά το σημείο τομής εκδηλώνουν τροποποιήσεις σε χαρακτηριστικά που μπορούν να διαπιστωθούν τοπικά. Επιπλέον, σε απουσία σύμπτωσης των δύο διαδικασιών, η τροποποίηση που λαμβάνει χώρα σε

κάθε διαδικασία δεν θα συνέβαινε. Άρα, σύμφωνα με την (ΑΑ), στο χωροχρονικό σημείο της σύγκρουσης λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση και οι δύο διαδικασίες, της σκιάς και του αυτοκινήτου είναι αιτιακές. Με άλλα λόγια, στο συγκεκριμένο παράδειγμα το κριτήριο της διάδοσης του ίχνους, που όπως αναφέραμε σε προηγούμενη ενότητα προϋποτίθεται της (ΑΑ), μας οδηγεί στο συμπέρασμα ότι υπό ορισμένες συνθήκες μία ψευδο-διαδικασία, όπως η σκιά ενός αυτοκινήτου, *μπορεί* να χαρακτηριστεί ως αιτιακή διαδικασία. Επομένως, το κριτήριο της διάδοσης του ίχνους δεν είναι ικανή συνθήκη για τη διάκριση των αιτιακών διαδικασιών από τις ψευδο-διαδικασίες.

Μπροστά σε αυτό το παράδειγμα ο Salmon φαίνεται να «σηκώνει τα χέρια ψηλά». Το αναφέρει σε μία από τις τελευταίες του εργασίες (Salmon 1997), μαζί με ένα ακόμα αντιπαράδειγμα του Kitcher, ως έναν από τους λόγους για τους οποίους η πρώιμη αιτιακή θεωρία έπρεπε να εγκαταλειφθεί.

Ι2) Το δεύτερο επιχείρημα του Kitcher αναφέρεται σε *παράγωγα ίχνη*. Σε αυτού του τύπου τα επιχειρήματα μία ψευδο-διαδικασία εκδηλώνει τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού της λόγω μίας αλλαγής σε μία αιτιακή διαδικασία από την οποία εξαρτάται. Όπως επισημαίνει ο Dowe, η αλλαγή αυτή μπορεί να είναι είτε στην πηγή είτε στο αιτιακό υπόβαθρο. Η τοποθέτηση ενός φίλτρου στην πηγή φωτός που χρωματίζει την κηλίδα που σχηματίζεται σε ένα τοίχο (Salmon 1989:142), καθώς και η δημιουργία ίχνους στη σκιά του αυτοκινήτου από ένα επιβάτη που σηκώνει ένα σημαιάκι από το ανοιχτό παράθυρο (Kitcher 1989:463), αποτελούν παραδείγματα παράγωγων ιχνών που προκύπτουν από τροποποιήσεις στην πηγή της ψευδο-διαδικασίας. Αντιστοίχως, η τροποποίηση του κινούμενου φωτεινού ίχνους, από έναν άνθρωπο που τρέχει κατά μήκος του τοίχου κρατώντας ακριβώς μπροστά από το φωτεινό ίχνος ένα κόκκινο φίλτρο, ή η τροποποίηση της σκιάς του αυτοκινήτου σε έναν τοίχο, στο σημείο που ο τοίχος διακόπτεται και στη θέση του είναι τοποθετημένο ένα κιγκλίδωμα (Dowe 2000:78-79), αποτελούν παραδείγματα παράγωγων ιχνών που προκύπτουν από τροποποιήσεις στο αιτιακό υπόβαθρο της διαδικασίας.

Το πρόβλημα με τα παράγωγα ίχνη είναι ότι μολονότι εκδηλώνονται από ένα σημείο και μετά κατά μήκος μίας ψευδο-διαδικασίας, δεν δημιουργούνται στο σημείο

που αρχίζουν να εκδηλώνονται με μία και μοναδική τοπική αλληλεπίδραση. Για το φίλτρο που τοποθετείται στην πηγή του φωτός και για τη σημαία που υψώνεται από το ανοιχτό παράθυρο του αυτοκινήτου, αυτό είναι προφανές. Η τροποποίηση δεν δημιουργείται τοπικά εκεί που εκδηλώνεται, αλλά είτε στην πηγή του φωτός στην περίπτωση του φίλτρου, είτε στο αυτοκίνητο και στη σημαία που αλληλεπιδρούν με τις φωτεινές ακτίνες ήλιου, στην περίπτωση της τροποποίησης της σκιάς. Από την άλλη, στην περίπτωση του φράκτη ή του κινούμενου φίλτρου, σε κάθε σημείο της ψευδο-διαδικασίας έχουμε αναδημιουργία της τροποποίησης. Δηλαδή, σε αυτή την περίπτωση, η τροποποίηση που εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της διαδικασίας προκύπτει τοπικά μεν αλλά όχι με μία και μοναδική αλληλεπίδραση. Έπεται ότι το επιχείρημα των παράγωγων ιχνών μπορεί να απαντηθεί με βάση τις προϋποθέσεις της αρχής διάδοσης του ίχνους.

Η απάντηση όμως αυτή δεν ικανοποιεί τον Dowe. Για τη μεν πρώτη περίπτωση, υποστηρίζει ότι, σύμφωνα με τον Kitcher, όλες οι πραγματικές περιπτώσεις σήμανσης είναι πάντα αποτέλεσμα μίας αλυσίδας αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων και άρα δεν θα πρέπει να εξαιρέσουμε γι' αυτό το λόγο τα παραδείγματα που αναφέραμε. Για τη δεύτερη περίπτωση, ο Dowe υποστηρίζει ότι δεν θα πρέπει να δίνουμε ιδιαίτερο βάρος στη συνθήκη ότι η σήμανση θα πρέπει να πραγματοποιείται από μία και μοναδική τοπική αλληλεπίδραση, διότι σε αυτή την περίπτωση η σήμανση μίας φωτεινής ακτίνας από ένα φίλτρο καθίσταται προβληματική. Προφανώς, ο Dowe θεωρεί ότι στην περίπτωση της φωτεινής ακτίνας η σήμανση έχει κάποια διάρκεια και δεν λαμβάνει χώρα σε ένα σημείο του χωροχρόνου. Ωστόσο, στην ιδανική περίπτωση που θεωρούμε μία ακτίνα φωτός η οποία διέρχεται από το φίλτρο κάποια χρονική στιγμή και στη συνέχεια διαδίδεται με τροποποιημένα χαρακτηριστικά, δεν νομίζω ότι υπάρχει απολύτως κανένα πρόβλημα. Πάντως, ο Salmon φαίνεται να μην αξιολογεί ως σημαντικές τις κριτικές που προκύπτουν από το επιχείρημα του παράγωγου ίχνους. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στην εργασία του 1997, όπου αναφέρει το παράδειγμα του ψευδο-ίχνους, δεν αναφέρει κανένα από τα αντιπαραδείγματα παράγωγων ιχνών.

Ι3) Στην ίδια εργασία ο Salmon παρουσιάζει ένα ακόμα αντιπαράδειγμα που αφορά στην επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους. Αυτό είναι το παράδειγμα με το

οποίο ο Kitcher διαπιστώνει το πρόβλημα της *τυχαίας συντήρησης* (fortuitous maintenance): «Μπορούμε να κανονίσουμε έτσι ώστε οι ψευδο-διαδικασίες να διαδίδουν ίχνος, εκμεταλλευόμενοι την ιδέα ότι για κάποιες διαδικασίες δεν απαιτούνται επιπλέον παρεμβάσεις για να συνεχίσουν να οδεύουν» (Kitcher 1989:463-464). Συγκεκριμένα, φανταστείτε ένα όχημα που γλιστρά με πέδιλα σε ένα παγοδρόμιο και δημιουργεί μία σκιά. Ένα βλήμα εκτοξεύεται με τέτοιο τρόπο ώστε να προσγειώνεται στην άκρη της σκιάς, με οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας ίση με αυτή της σκιάς του οχήματος. Επειδή το βλήμα τίθεται επί της σκιάς δημιουργείται άμεση παραμόρφωση της μορφής της σκιάς. Επιπλέον, η παραμόρφωση διατηρείται επειδή το βλήμα διατηρεί τη θέση του σε σχέση με το όχημα και τη σκιά του.

Στο παράδειγμα αυτό, οι αδρανειακές κινήσεις δύο αντικειμένων, τα οποία δεν αλληλεπιδρούν καθ' οιονδήποτε τρόπο, συνδυάζονται έτσι, ώστε να δημιουργείται ίχνος στη σκιά του ενός από αυτά και το ίχνος να συντηρείται σε απουσία περαιτέρω αλληλεπιδράσεων. Μάλιστα, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι την τροποποίηση στη μορφή της σκιάς του οχήματος δεν τη δημιουργεί το ίδιο το βλήμα, αλλά η σκιά του βλήματος που έχει ίδια οριζόντια συνιστώσα της ταχύτητας με αυτή της σκιάς του οχήματος. Σε αυτή την περίπτωση, μπορούμε να μιλήσουμε και για αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε ψευδο-διαδικασίες, αφού τροποποιείται η μορφή της σκιάς τόσο του οχήματος όσο και του βλήματος και ισχύουν οι αντιγεγονικές προτάσεις που απαιτείται να είναι αληθείς από την (ΑΑ), σε αντίθεση με το παράδειγμα των Maher και Otte. Ο λόγος για αυτό είναι ότι δεν επηρεάζονται τα χαρακτηριστικά της κίνησης των δύο αντικειμένων των οποίων οι σκιές τροποποιούν τη μορφή τους.

Ο Kitcher αναφέρει δύο ενδεχόμενες ενστάσεις σε αυτό το παράδειγμα (Kitcher 1989:468). Η πρώτη αφορά στο γεγονός ότι πρόκειται για "αλληλεπίδραση" τύπου – λ, επειδή οι δύο ψευδο-διαδικασίες συνενώνονται σε μία μετά την προσγείωση του βλήματος επί της σκιάς· ενώ η δεύτερη, στο ενδεχόμενο οι ταχύτητες του βλήματος και της σκιάς να μην είναι επαρκώς συντεταγμένες και τα δύο αντικείμενα να διαχωρίζονται μετά την έλευση ενός χρονικού διαστήματος. Στην πρώτη ένσταση ο Kitcher απαντάει με δύο τρόπους: αφενός, υποστηρίζει ότι ο Salmon επιθυμεί να συμπεριλάβει τις αλληλεπιδράσεις τύπου-λ στις αιτιακές

αλληλεπιδράσεις, το δε γεγονός ότι αυτό δεν είναι δυνατό στο πλαίσιο της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του αποτελεί πρόβλημα για τη θεωρία, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα· αφετέρου, τροποποιεί το παράδειγμα ώστε να είναι συμβατό με την πρώιμη θεωρία. Για τη δεύτερη ένσταση ο Kitcher υποστηρίζει ότι αρκεί η παραμόρφωση της σκιάς του οχήματος να γίνεται για κάποιο χρονικό διάστημα, ακόμα κι αν αλλοιώνεται στο διάστημα αυτό. Άλλωστε, το ίχνος της κιμωλίας στην μπάλα του μπιλιάρδου επίσης αλλοιώνεται κατά την κίνηση της μπάλας.

Σε αυτή την ενότητα αναφερθήκαμε σε έξι προβλήματα που έχουν διατυπωθεί σε σχέση με την επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους για τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες. Τα πιο σημαντικά από αυτά είναι το πρόβλημα της δυνατότητας υπέρθεσης ίχνους σε κάθε αιτιακή διαδικασία (A2), το πρόβλημα των ψευδο-ιχνών (I1), το πρόβλημα της τυχαίας συντήρησης του ίχνους σε μία ψευδο-διαδικασία (I3) και το πρόβλημα που αφορά στη συνθήκη της διάδοσης του ίχνους σε απουσία παρεμβάσεων (A3). Οι ύστερες εκδοχές των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και των αλληλεπιδράσεων του Salmon ξεπερνούν τα τρία πρώτα προβλήματα – (A2, I1, I3). Σε αυτές, το κριτήριο του ίχνους από θεμελιώδες στοιχείο του ορισμού των αιτιακών εννοιών υποβιβάζεται σε έναν τρόπο ανίχνευσης αιτιακών διαδικασιών. Το τέταρτο πρόβλημα, (A3), όπως θα δούμε στη συνέχεια, αποτέλεσε ένα σημαντικό σημείο διάκρισης ανάμεσα στις ύστερες εκδοχές της αιτιακής θεωρίας του Salmon και στην αιτιακή θεωρία του Dowe.

3.4.3 Οι αντιγεγονικές προτάσεις στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon

Σε προηγούμενες ενότητες, έχουμε ήδη αναφερθεί στη σημασία των αντιγεγονικών προτάσεων για τη διατύπωση της αρχής διάδοσης ίχνους (ΑΔΙ) και της αρχής της αιτιακής αλληλεπίδρασης (ΑΑ). Επίσης, περιγράψαμε με τη βοήθεια αντιγεγονικών προτάσεων τι σημαίνει ότι μία αιτιακή διαδικασία έχει ικανότητα να διαδίδει ίχνος καθώς και τη σημασία της ανεξαρτησίας των αιτιακών διαδικασιών σε ένα δίκρανο σύζευξης. Ο Kitcher προχωράει ένα βήμα παραπέρα διαπιστώνοντας ότι ανεξάρτητα από τη χρήση των αντιγεγονικών προτάσεων για την επεξήγηση των βασικών

αιτιακών εννοιών και η ίδια η αιτιακή σχέση, όπως αναλύεται στη βάση αυτών των εννοιών, εξαρτάται από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων.

Ας εξετάσουμε το παράδειγμα της μπάλας του baseball που αφού χτυπηθεί με το ρόπαλο σπάει το τζάμι του απέναντι σπιτιού. Η κρούση της μπάλας και το σπάσιμο του τζαμιού, αποτελούν αιτιακές αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στις αιτιακές διαδικασίες της μπάλας και του ροπάλου, και της μπάλας και του τζαμιού, αντιστοίχως. Η επίδραση από την πρώτη αιτιακή αλληλεπίδραση στη δεύτερη διαδίδεται μέσω της αιτιακής διαδικασίας της μπάλας. Με την περιγραφή αυτών των αιτιακών αλληλεπιδράσεων και της συνδέουσας αιτιακής διαδικασίας επεξηγείται, σύμφωνα με το Salmon, η αιτιακή σχέση ανάμεσα στο χτύπημα της μπάλας και στο σπάσιμο του τζαμιού.

Όμως, ισχυρίζεται ο Kitcher, αυτή η ανάλυση με όρους αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων δεν είναι αρκετή για να δικαιολογήσουμε την αιτιακή σχέση: «θα πρέπει να ενσωματώσουμε στην προσέγγιση την ιδέα ότι η αρχική αλληλεπίδραση προκαλεί μία τροποποίηση που είναι υπεύθυνη για τα χαρακτηριστικά της καταληκτικής αλληλεπίδρασης» (Kitcher 1989:470). Για να το κάνουμε αυτό, θα πρέπει καταρχήν να προσδιορίσουμε το χαρακτηριστικό που τροποποιείται κατά την αρχική αλληλεπίδραση και είναι υπεύθυνο για την καταληκτική αλληλεπίδραση. Και αυτό δεν μπορεί να είναι, π.χ., η σκόνη που υπερτέθηκε στην μπάλα από ένα σκονισμένο ρόπαλο, αλλά η τροποποίηση που έγινε στην ορμή της μπάλας. Έτσι καταλήγουμε στην πρώτη αντιγεγονική πρόταση που θα πρέπει να ισχύει για να διαπιστώσουμε αιτιακή σχέση ανάμεσα στην κρούση της μπάλας και στο σπάσιμο του τζαμιού:

> (Α) Αν η αιτιακή διαδικασία του ροπάλου δεν τέμνονταν χωροχρονικά με την αιτιακή διαδικασία της μπάλας, τότε η ορμή της μπάλας θα ήταν διαφορετική.

Στη συνέχεια ας εξετάσουμε την κίνηση της μπάλας μέχρι το παράθυρο. Ο Kitcher επισημαίνει ότι η μπάλα στη διαδρομή της υφίσταται πολλές αλληλεπιδράσεις. Η μπάλα κινείται στο βαρυτικό πεδίο, δέχεται την αντίσταση του αέρα, ενδέχεται να επιδρούν στην κίνηση της ριπές ανέμου κ.λπ. Και όλες αυτές οι αλληλεπιδράσεις μεταβάλλουν την ορμή της μπάλας. Ακόμα κι αν η επίδραση του βαρυτικού πεδίου

ενσωματωθεί στη χωροχρονική γεωμετρία, θα πρέπει να υποθέσουμε είτε ότι αγνοούμε τις υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις της μπάλας είτε ότι θεωρούμε τη συνολική αιτιακή διαδικασία ως σύνθεση επιμέρους αιτιακών διαδικασιών που διαχωρίζονται από διακριτές αλληλεπιδράσεις, κατά μήκος των οποίων δεν λαμβάνει χώρα αλληλεπίδραση. Ο Kitcher υιοθετεί τη δεύτερη εκδοχή και επισημαίνει ότι για να κάνουμε μία τέτοια σύνθεση από επιμέρους αιτιακές διαδικασίες θα πρέπει να δεχτούμε μία σειρά αντιγεγονικές προτάσεις οι οποίες αφορούν στις τροποποιήσεις που παράγονται στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις: «Μία ακολουθία αιτιακών διαδικασιών $P_1,\ldots,P_n$ αποτελεί μία σύνθετη αιτιακή διαδικασία μόνο αν κάθε P_r αλληλεπιδρά με την P_{r+1} έτσι ώστε αν η P_r δεν είχε τροποποιηθεί ώστε να φέρει το Q_r, τότε η P_{r+1} δεν θα είχε τροποποιηθεί ώστε να φέρει το Q_{r+1}» (Kitcher 1989:469). Για λόγους απλότητας, ο Kitcher ενσωματώνει όλες αυτές τις αντιγεγονικές προτάσεις σε μία για την κίνηση της μπάλας συνολικά:

> (B) Αν η ορμή της αιτιακής διαδικασίας της μπάλας μετά την τομή με την αιτιακή διαδικασία του ροπάλου ήταν διαφορετική, τότε η ορμή της αιτιακής διαδικασίας της μπάλας ακριβώς πριν την τομή με την αιτιακή διαδικασία του παραθύρου θα ήταν διαφορετική.

Η τελευταία αντιγεγονική πρόταση, που σύμφωνα με τον Kitcher είναι απαραίτητο να ισχύει, μας λέει ότι υπεύθυνη για το σπάσιμο του τζαμιού δεν είναι γενικά η ορμή της μπάλας αλλά η συγκεκριμένη ποσότητα ορμής:

> (C) Αν η ορμή της αιτιακής διαδικασίας της μπάλας ακριβώς πριν την τομή με την αιτιακή διαδικασία του παραθύρου ήταν διαφορετική, τότε οι ιδιότητες της αιτιακής διαδικασίας του παραθύρου αμέσως μετά την τομή θα ήταν διαφορετική - συγκεκριμένα, το παράθυρο δεν θα είχε σπάσει!

Κατά την άποψη του Kitcher:

> Το καίριο σημείο είναι ότι το να ισχυριστούμε την ύπαρξη αιτιακής σχέσης [relation] ανάμεσα στα *c* και *e* δεν εξαρτάται απλώς από την ύπαρξη αλληλεπιδράσεων και διαδικασιών αλλά από την αποδοχή των αντιγεγονικών προτάσεων (A)-(C) (ή ασθενέστερων εκδοχών τους). *Θα πρέπει να επικαλεστούμε αντιγεγονικές προτάσεις όχι μόνο για να χαρακτηρίσουμε τις έννοιες της αιτιακής διαδικασίας και της αιτιακής αλληλεπίδρασης αλλά και για να ξεχωρίσουμε τις αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις που είναι συναφείς* [relevant] *με τα συγκεκριμένα συμβάντα.* (Kitcher 1989:471)

Και αφού διαπιστώσει την αναγκαιότητα να υποθέσουμε την ισχύ αντιγεγονικών προτάσεων, όχι μόνο για τους ορισμούς των αιτιακών εννοιών, αλλά και για την ίδια την περιγραφή συγκεκριμένων αιτιακών σχέσεων, ο Kitcher προχωράει ένα βήμα παραπέρα και προτείνει την εγκατάλειψη της θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων και την υιοθέτηση μίας αντιγεγονικής θεωρίας της αιτιότητας:

> Προτείνω ότι μπορούμε να έχουμε αιτιότητα χωρίς συνδέουσες αιτιακές διαδικασίες, και άρα αιτιακές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα στα οποία λαμβάνουν χώρα πολύ ιδιαίτερες αλληλεπιδράσεις. Αυτό που είναι κρίσιμο για τους αιτιακούς ισχυρισμούς φαίνεται ότι είναι η αλήθεια των αντιγεγονικών προτάσεων, και όχι η ύπαρξη διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Αν αυτό είναι ορθό, τότε δεν ισχύει απλώς ότι η προσέγγιση του Salmon για την αιτιακή δομή του κόσμου χρειάζεται συμπλήρωση μέσω της εισαγωγής περισσότερων αντιγεγονικών προτάσεων. Οι αντιγεγονικές προτάσεις βρίσκονται στην καρδιά της αιτιακής θεωρίας, ενώ οι ισχυρισμοί για την ύπαρξη διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων είναι, καταρχήν, περιττοί. Ίσως οι έννοιες αυτές να αποδειχθούν χρήσιμες για την προστασία μίας αντιγεγονικής θεωρίας της αιτιότητας έναντι ορισμένων οικείων μορφών δυσκολιών (προβλήματα pre-emption, υπερκαθορισμού, επιφαινομένων κ.ο.κ). (Kitcher 1989:472)

Ο Kitcher, με την κριτική του στη θεωρία του Salmon, θέτει τρία ζητήματα. Το πρώτο μάς λέει ότι η σύνδεση δύο αιτιακών αλληλεπιδράσεων από μία αιτιακή διαδικασία αποτελεί αναγκαία (;) συνθήκη για την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα σε δύο συμβάντα αλλά όχι ικανή συνθήκη. Θα πρέπει επιπλέον, (α) το τροποποιούμενο χαρακτηριστικό να είναι συναφές με τη συγκεκριμένη αιτιακή σχέση που θέλουμε να περιγράψουμε, (β) η τροποποίηση αυτού του χαρακτηριστικού να εξαρτάται από την αρχική αλληλεπίδραση και (γ) το χαρακτηριστικό αυτό να είναι ικανό να προκαλέσει την παρατηρούμενη τροποποίηση της άλλης διαδικασίας στην τελική αλληλεπίδραση[20]. Το δεύτερο ζήτημα αφορά στην επίλυση των παραπάνω προβλημάτων μέσω της απαίτησης να ισχύουν οι αντιγεγονικές προτάσεις (Α), (Β) και (C) που αντιστοιχούν στις προϋποθέσεις (α), (β), (γ) αντιστοίχως. Το τρίτο ζήτημα, αφορά στην αντιστροφή της σημασίας των αντιγεγονικών προτάσεων για τη

[20] Το ζήτημα που επισημαίνει ο Kitcher, σε σχέση με την επάρκεια της περιγραφής των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων επισημαίνεται και από τον Woodward: «Ένας πιο γενικός τρόπος να τεθεί το πρόβλημα είναι ότι εκείνα τα χαρακτηριστικά μίας διαδικασίας *P* λόγω των οποίων την κατατάσσουμε ως αιτιακή (ικανότητα διάδοσης ίχνους *M*) μπορεί να μην είναι τα χαρακτηριστικά της *P* που είναι αιτιακώς ή εξηγητικώς συναφή [relevant] με το αποτέλεσμα *E* που θέλουμε να εξηγήσουμε (το *M* μπορεί να είναι μη συναφές με το *E*, που, αντιθέτως, προκύπτει αιτιακά από κάποια άλλη ιδιότητα *R* της *P*). Η διάδοση του ίχνους, ακόμα κι αν διακρίνει ορθά τις αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες, δεν παρέχει τα μέσα, ως έχει, για να διακρίνουμε εκείνα τα χαρακτηριστικά ή τις ιδιότητες μίας αιτιακής διαδικασίας που είναι αιτιακώς ή εξηγητικώς συναφή με ένα αποτέλεσμα από εκείνα τα χαρακτηριστικά που δεν είναι συναφή» (Woodward 2003:353).

θεωρία. Αντί να θεωρούνται ως αναγκαίες συνθήκες για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων καθώς και για τον καθορισμό μίας συγκεκριμένης αιτιακής σύνδεσης ανάμεσα σε δύο συμβάντα, θα πρέπει σύμφωνα, με τον Kitcher, να θεωρήσουμε τις αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις ως συμπληρωματικές έννοιες σε μία ουσιαστικά αντιγεγονική αιτιακή θεωρία.

Ο Salmon κατανοεί ως πρόβλημα τη χρήση αντιγεγονικών προτάσεων στον ορισμό των αιτιακών εννοιών. Αυτός είναι ένας από τους λόγους που εγκαταλείπει την πρώιμη αιτιακή θεωρία που στηρίζεται στην έννοια του ίχνους και υιοθετεί την πρόταση του Dowe για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών και των αλληλεπιδράσεων με τη βοήθεια διατηρήσιμων ποσοτήτων.

> Όταν το κριτήριο του ίχνους είχε ξεκάθαρα προβλήματα λόγω της αντιγεγονικής εμπλοκής, θα έπρεπε να είναι προφανές ότι η μέθοδος του ίχνους θα μπορούσε να θεωρηθεί μόνο ως μία χρήσιμη πειραματική μέθοδος για την ανίχνευση ή την ταυτοποίηση αιτιακών διαδικασιών (π.χ., η χρήση ραδιενεργών ανιχνευτών), αλλά ότι δεν θα έπρεπε να χρησιμοποιείται για την επεξήγηση της ίδιας της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας. (Salmon 1998:253)

Με τη βοήθεια των διατηρήσιμων ποσοτήτων, αφενός συγκεκριμενοποιείται, τόσο ποιοτικά όσο και ποσοτικά, το χαρακτηριστικό, η διατηρήσιμη ποσότητα, που διαδίδεται κατά μήκος μίας διαδικασίας που συνδέει το αίτιο και το αποτέλεσμα, αφετέρου η θεωρία δεν εξαρτάται πλέον από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων. Ωστόσο, ακόμα και στο πλαίσιο της ύστερης αιτιακής του θεωρίας, ο Salmon δεν φαίνεται να αντιμετωπίζει, αρχικά τουλάχιστον, το πρόβλημα της αιτιακής σχέσης που επισημαίνει ο Kitcher. Το γεγονός αυτό, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο, αναδείχθηκε στην κριτική που άσκησε ο Hitchcock (1995) στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων,και οδήγησε τον Salmon να συμπληρώσει την αιτιακή περιγραφή με πληροφορίες που προέρχονται από τις στατιστικές σχέσεις, ώστε η συνολική περιγραφή, αιτιακή και στατιστική, να είναι *εξηγητικά* επαρκής.

Ωστόσο, τα προβλήματα του Salmon σε σχέση με την εξάρτηση της αιτιακής θεωρίας από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων δεν σταματούν εδώ. Ο Salmon θεωρεί ότι οι καλύτερες σημασιολογικές προσεγγίσεις για τις αντιγεγονικές προτάσεις που διαθέτουμε, δεν είναι κατάλληλες για την αποτίμηση της αληθοτιμής των αντιγεγονικών προτάσεων που υποστηρίζουν την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Συγκεκριμένα, αναφέρει ότι

> αν…οι αντιγεγονικές προτάσεις πρέπει να αποτιμώνται με τη σύγκριση διαισθήσεων σε σχέση με την εγγύτητα των δυνατών κόσμων, τότε θεωρώ ότι είναι ακατάλληλες για την επεξήγηση της αιτιότητας ή της επιστημονικής εξήγησης. (Salmon 1997)

Οι συνήθεις σημασιολογικές προσεγγίσεις για τις αντιγεγονικές προτάσεις αναφέρονται σε δυνατούς κόσμους και σε κανόνες ομοιότητας που καθορίζουν τη σχετική απόσταση των δυνατών κόσμων από τον πραγματικό κόσμο (Stalnaker 1968, Lewis 1973). Όμως, για κάποιον που ανήκει στην εμπειριστική παράδοση και έχει ως γνωσιολογική αφετηρία την εμπειρική πρόσβαση σε διαδικασίες και συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στον κόσμο μας, δεν είναι προφανές το πώς μπορεί να δικαιολογηθούν πεποιθήσεις για δυνατούς κόσμους πέραν του κόσμου στον οποίο έχουμε εμπειρική πρόσβαση. Όπως αναφέρει ο Kitcher (1989:473), η γνωσιολογία του εμπειριστή δεν συνάδει με τις καλύτερες σημασιολογικές προσεγγίσεις που διαθέτουμε για τις αντιγεγονικές προτάσεις. Ο Salmon προσπαθεί να θεμελιώσει την αιτιότητα με βάση την εμπειρία - να διατυπώσει μία εμπειρική ανάλυση της αιτιότητας, όπως υποστηρίζει ο Dowe. Άρα, σε αυτό το πλαίσιο δεν έχουν θέση προσεγγίσεις που αποτιμούν την αληθοτιμή των αντιγεγονικών προτάσεων με βάση πεποιθήσεις για δυνατούς κόσμους, πέραν του εμπειρικού.

Για να λύσει αυτό το πρόβλημα, ο Salmon δεν αποπειράται να διατυπώσει μία νέα σημασιολογία των αντιγεγονικών προτάσεων. Αυτό που επιχειρεί είναι να παράσχει μία μέθοδο για τη δικαιολόγηση της πεποίθησής μας ότι μία αντιγεγονική πρόταση είναι αληθής ή ψευδής. Μάλιστα, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το πεδίο εφαρμογής της μεθόδου αφορά σε εκείνες τις αντιγεγονικές προτάσεις που είναι απαραίτητο να αποτιμηθούν ως προς την αληθοτιμή για να υποστηρίξουμε ότι κάτι είναι αιτιακή διαδικασία ή αιτιακή αλληλεπίδραση. Ως προς το γενικότερο πρόβλημα, αυτό που φαίνεται να απαιτεί είναι η συμβατότητα της μεθόδου που προτείνει με μία επαρκή σημασιολογία των αντιγεγονικών προτάσεων:

> Θα πρέπει να προσεκτικά να επισημάνουμε ότι *δεν* προορίζω την προηγηθείσα πειραματική διαδικασία ως ανάλυση των αντιγεγονικών προτάσεων. Είναι, μάλλον, το αποτέλεσμα στο οποίο θα περιμέναμε να οδηγήσει οποιαδήποτε ανάλυση. (Salmon 1984:150)

Η πειραματική προσέγγιση στην οποία αναφέρεται το παραπάνω απόσπασμα είναι η μέθοδος των ελεγχόμενων πειραμάτων. Ο Salmon υποστηρίζει ότι με αυτή τη μέθοδο θα πρέπει να γνωρίζουμε την αληθοτιμή των αντιγεγονικών προτάσεων που μας

ενδιαφέρουν. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε την περίπτωση όπου ένα συμβάν *A* λαμβάνει χώρα και την αντιγεγονική πρόταση "αν το *A* δεν λάμβανε χώρα, τότε το *B* δεν θα συνέβαινε.". Για να πούμε αν η πρόταση αυτή είναι αληθής εκτελούμε κατ' επανάληψη ένα πείραμα στο οποίο υπό αυστηρά καθορισμένες συνθήκες απαιτούμε σε ορισμένες περιπτώσεις, επιλεγμένες τυχαία, να είναι αληθής η πρόταση "το *A* λαμβάνει χώρα", ενώ σε άλλες περιπτώσεις, όπου κάποιες από τις συνθήκες του πειράματος τροποποιούνται με ελεγχόμενο τρόπο, να είναι αληθής η πρόταση "το *A* δεν λαμβάνει χώρα". Η πρώτη ομάδα επαναλήψεων του πειράματος ονομάζεται "πειραματική ομάδα" ενώ η δεύτερη "ομάδα ελέγχου". Στην περίπτωση των επαναλήψεων που συνιστούν την πειραματική ομάδα παρατηρούμε απλώς τα *A* και *B* να λαμβάνουν χώρα. Στην ομάδα ελέγχου τροποποιούμε με ελεγχόμενο τρόπο τις συνθήκες του πειράματος ώστε το *A* να μη λαμβάνει χώρα και παρατηρούμε αν λαμβάνει χώρα το *B*. Στην περίπτωση που το *B* δε λαμβάνει χώρα η αντιγεγονική πρόταση είναι αληθής· διαφορετικά, είναι ψευδής. Τη μέθοδο αυτή προτείνει και ο Reichenbach για την «απόδειξη», όπως αναφέρει, των αντιγεγονικών προτάσεων. «Πώς μπορούμε να αποδείξουμε αυτή την υποθετική πρόταση;», διερωτάται ο Reichenbach (1956:43) και συνεχίζει: «Ο μοναδικός τρόπος να αποδείξουμε μία υποθετική πρόταση που είναι ενάντια στα γεγονότα είναι να εκτελέσουμε τη διαδικασία υπό μεταβαλλόμενες συνθήκες».

Το πρόβλημα με αυτή τη μέθοδο αφορά στην επιλογή των τροποποιήσεων που επιτρέπεται να γίνονται στο πείραμα ώστε στις επαναλήψεις που συγκροτούν την ομάδα ελέγχου το *A* να μην λαμβάνει χώρα. Ένα ελεγχόμενο πείραμα εκτελείται υπό αυστηρά καθορισμένες συνθήκες που καθορίζουν ποια από τα χαρακτηριστικά του πειράματος θα πρέπει να παραμένουν σταθερά και στις δύο ομάδες επαναλήψεων και ποια επιτρέπεται να μεταβάλλονται στις επαναλήψεις της ομάδας ελέγχου ώστε το συμβάν *A* να μη λαμβάνει χώρα. Ωστόσο, καταρχήν, μπορούμε να θεωρήσουμε ένα δεύτερο πείραμα, με ίδιο ή διαφορετικό πυρήνα σταθερών χαρακτηριστικών και με διαφορετικό σύνολο μεταβαλλόμενων χαρακτηριστικών κατά τις επαναλήψεις του πειράματος. Και για το δεύτερο πείραμα, στις επαναλήψεις που αποτελούν την πειραματική ομάδα προϋποθέτουμε ότι το συμβάν *A* λαμβάνει χώρα και διαπιστώνουμε ότι το *B* λαμβάνει χώρα, ενώ στην ομάδα ελέγχου προϋποθέτουμε ότι το συμβάν *A* δεν λαμβάνει και διαπιστώνουμε ότι το συμβάν *B* λαμβάνει χώρα, *σε*

αντίθεση με το πρώτο πείραμα. Με ποιο κριτήριο θα επιλέξουμε ποιο από τα δύο πειράματα είναι το κατάλληλο για τη διαπίστωση της αληθοτιμής της αντιγεγονικής πρότασης;

Μία απάντηση που θα μπορούσε να δοθεί είναι ότι το καταλληλότερο πείραμα είναι αυτό στο οποίο η ομάδα ελέγχου βρίσκεται εγγύτερα, ομοιάζει περισσότερο, με την αντίστοιχη πειραματική ομάδα επαναλήψεων. Λόγου χάριν, καταλληλότερο είναι εκείνο το πείραμα με τα λιγότερα σε πλήθος και με τα λιγότερο σημαντικά μεταβαλλόμενα χαρακτηριστικά. Όμως αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν κάποια δικαιολογημένα κριτήρια ομοιότητας, που είναι κοινά για όλα τα πειράματα, και μας επιτρέπουν να βρούμε τις διαφορές ανάμεσα στην ομάδα ελέγχου και στην πειραματική ομάδα σε κάθε πείραμα και να τις συγκρίνουμε. Μόνο αν διαθέτουμε αυτά τα κριτήρια μπορούμε να θεωρήσουμε την προσέγγιση του Salmon για τη δικαιολόγηση της αλήθειας των αντιγεγονικών προτάσεων ως επαρκή. Όπως αναφέρει χαρακτηριστικά ο Kitcher, «υπάρχει μία ανταλλαγή, εδώ, ανάμεσα σε ομοιότητες και διαφορές, και δεν διαθέτουμε μία θεωρία για τη δικαιολόγηση των αντιγεγονικών προτάσεων, εφόσον δεν έχουμε μία προσέγγιση για το πώς γίνονται αυτές οι ανταλλαγές» (Kitcher 1989:475).

Το πρόβλημα που επισημάναμε μπορεί να θεωρηθεί αντίστοιχο με το πρόβλημα του καθορισμού των κριτηρίων για την εγγύτητα των δυνατών κόσμων στον πραγματικό κόσμο, στη σημασιολογία των Stalnaker και Lewis. Βεβαίως, στην περίπτωσή μας ο "πραγματικός" κόσμος αντιστοιχεί στις επαναλήψεις του πειράματος που συνιστούν την πειραματική ομάδα και ο "δυνατός" κόσμος στις επαναλήψεις που συνιστούν την ομάδα έλεγχου, ενώ για κάθε πείραμα ο "πραγματικός" κόσμος μπορεί να είναι διαφορετικός. Όμως, και στις δύο περιπτώσεις συγκρίνουμε τη σχετική απόσταση του πραγματικού κόσμου με τον αντίστοιχο δυνατό κόσμο. Από την άλλη, υποθέτουμε ότι τα χαρακτηριστικά που παραμένουν σταθερά σε ένα πείραμα καθώς και αυτά που μεταβάλλονται είναι εμπειρικώς προσβάσιμα και διαχειρίσιμα από τον πειραματιστή – υπόθεση που δεν ισχύει στη γενική περίπτωση για τα χαρακτηριστικά ως προς τα οποία ομοιάζουν ή διαφέρουν οι δυνατοί κόσμοι από τον πραγματικό. Ακόμη, θα πρέπει να έχουμε υπόψη ότι δεν είναι δυνατό να ελέγξουμε πειραματικά οποιαδήποτε αντιγεγονική πρόταση.

Το πρόβλημα που παρουσιάσαμε σε σχέση με τη δικαιολόγηση των αντιγεγονικών προτάσεων από ελεγχόμενα πειράματα επιλύεται στην πειραματική πρακτική με βάση το απόθεμα αιτιακής γνώσης που διαθέτει ο πειραματιστής. Ο Kitcher (1989:475) επισημαίνει ότι ο πειραματιστής θα σχεδιάσει το ελεγχόμενο πείραμα κατά τρόπον ώστε όλα τα «*δυνητικά αιτιακώς συναφή*» με το αποτέλεσμα, πειραματικά χαρακτηριστικά να παραμείνουν κατά το δυνατόν πιο κοντά σε όλες τις επαναλήψεις του πειράματος, με εξαίρεση εκείνη τη συνθήκη που αναφέρεται στην υπόθεση της αντιγεγονικής πρότασης. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν μειώνει σε τίποτα τη σημασία του προβλήματος για τη μέθοδο των ελεγχόμενων πειραμάτων. Αν η μέθοδος για τη δικαιολόγηση των αντιγεγονικών προτάσεων εμπεριέχει αιτιακή γνώση που αφορά στο σχεδιασμό του κατάλληλου πειράματος, τότε οι αντιγεγονικές προτάσεις που απαιτούνται από τους ορισμούς των αιτιακών εννοιών δεν είναι δυνατό να δικαιολογούνται με βάση αυτή τη μέθοδο.

Συμπερασματικά, θα λέγαμε ότι το πρόβλημα του Salmon με τις αντιγεγονικές προτάσεις είναι το εξής: ενώ αρνείται για λόγους εμπειριστικής προδιάθεσης τη συνήθη σημασιολογία των δυνατών κόσμων, η μέθοδος που προτείνει για τη δικαιολόγηση της γνώσης που διατυπώνεται με αντιγεγονικές προτάσεις *είτε* καλείται να επιλύσει προβλήματα ανάλογα με αυτά που αντιμετωπίζει η συνήθης σημασιολογία των αντιγεγονικών προτάσεων *είτε* οδηγείται σε ένα φαύλο κύκλο όπου η αποτίμηση των αντιγεγονικών προτάσεων που προϋποτίθενται για τον ορισμό των αιτιακών εννοιών απαιτεί αιτιακή γνώση που με τη σειρά της επεξηγείται στη βάση αιτιακών εννοιών.

3.4.4 Τα είδη των αιτιακών αλληλεπιδράσεων

Ένα σημαντικό πρόβλημα της πρώιμης αιτιακής θεωρίας είναι ότι αδυνατεί να περιγράψει ορισμένα είδη αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Σύμφωνα με όσα αναφέραμε, αιτιακή αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα στο χωροχρονικό σημείο που τέμνονται δύο αιτιακές διαδικασίες. Σε αυτό το σημείο παράγεται σε κάθε διαδικασία μία τροποποίηση η οποία διαδίδεται κατά μήκος της. Λόγω της γεωμετρικής της αναπαράστασης μία τέτοια αλληλεπίδραση την ονομάζουμε *τύπου Χ*. Ως πρότυπο

μίας αλληλεπίδρασης τύπου Χ μπορούμε να θεωρήσουμε τη σύγκρουση δύο σφαιρών μπιλιάρδου.

Υπάρχουν όμως περιπτώσεις αιτιακών αλληλεπιδράσεων που περιλαμβάνουν μία αιτιακή διαδικασία η οποία διακλαδίζεται στο σημείο αλληλεπίδρασης σε δύο αιτιακές διαδικασίες. Για παράδειγμα, θεωρείστε μία αμοιβάδα που διαιρείται σε δύο μικρότερες αμοιβάδες, μία κότα που συνεχίζει να υπάρχει και μετά τη χρονική στιγμή κατά την οποία γεννάει ένα αβγό ή ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση και επιστρέφει στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο. Λόγω της γεωμετρικής της αναπαράστασης μία τέτοιου είδους αλληλεπίδραση ονομάζεται *τύπου Υ*.

Τέλος, υπάρχει ένα είδος αλληλεπίδρασης στο οποίο δύο αιτιακές διαδικασίες τέμνονται σε ένα χωροχρονικό σημείο και από το σημείο τομής προκύπτει μία τρίτη διαδικασία. Η σύλληψη ενός ηλεκτρονίου από ένα ιόν που το μετατρέπει σε ουδέτερο μόριο, η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα άτομο στη θεμελιώδη κατάσταση που το διεγείρει, ή η βρώση ενός ποντικιού από ένα φίδι, αποτελούν αλληλεπιδράσεις αυτού του τύπου, οι οποίες λόγω της γεωμετρικής τους αναπαράστασης ονομάζονται *τύπου λ*.

Το πρόβλημα με την περιγραφή της αιτιακής αλληλεπίδρασης στις περιπτώσεις τύπου Υ και λ είναι ότι δεν μπορούμε να αναφερθούμε σε δύο διαδικασίες που τροποποιούνται αμοιβαία. Σε καθεμία από αυτές τις περιπτώσεις θα πρέπει να αναφερθούμε σε τρεις διαδικασίες που τέμνονται στο σημείο αλληλεπίδρασης και σε καμιά από αυτές δεν μπορούμε να αναφερθούμε σε τροποποιήσεις που δημιουργεί η μία στην άλλη, αφού κάποιες από αυτές δεν υπάρχουν πριν ή μετά την αλληλεπίδραση και συνεπώς δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι θα εκδήλωναν με συνέπεια κάποιο χαρακτηριστικό σε απουσία αλληλεπίδρασης.

Η επίλυση αυτού του προβλήματος γίνεται στο πλαίσιο της ύστερης θεωρίας του Salmon όπου οι αιτιακές διαδικασίες χαρακτηρίζονται με όρους διάδοσης αναλλοίωτων-διατηρήσιμων ποσοτήτων και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις με όρους ανταλλαγής των ποσοτήτων αυτών σε ένα χωροχρονικό σημείο. Στο πλαίσιο της ύστερης θεωρίας δεν προϋποτίθεται η ταυτοποίηση των διαδικασιών πριν και μετά

την αλληλεπίδραση, όπως απαιτεί ο ορισμός της αιτιακής αλληλεπίδρασης με τη μέθοδο του ίχνους. Δηλαδή, στις αλληλεπιδράσεις τύπου Χ αναφερόμαστε σε τέσσερις διαδικασίες που διαδίδουν διατηρήσιμες ποσότητες και όχι σε δύο που τροποποιούν αμοιβαία κάποιο χαρακτηριστικό τους κατά την αιτιακή αλληλεπίδραση, ενώ αντιστοίχως στις περιπτώσεις των αλληλεπιδράσεων τύπου Υ και λ σε τρεις διαδικασίες. Ικανή συνθήκη για τον ορισμό της αιτιακής αλληλεπίδρασης είναι το γεγονός της διατήρησης των αναλλοίωτων-διατηρήσιμων ποσοτήτων στα χωροχρονικά σημεία όπου λαμβάνει χώρα.

Η επίλυση του προβλήματος των αιτιακών αλληλεπιδράσεων τύπου Υ και λ, μαζί με την αποφυγή της χρήσης των αντιγεγονικών προτάσεων για τους ορισμούς, των αιτιακών εννοιών αποτελούν τα δύο κύρια πλεονεκτήματά της ύστερης αιτιακής θεωρίας του Salmon έναντι της αιτιακής θεωρίας που θεμελιώνεται στη μέθοδο του ίχνους.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο προσπαθήσαμε να ανασυγκροτήσουμε την πρώιμη αιτιακή θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων του Salmon. Προσπαθήσαμε να παρουσιάσουμε εκτενώς την έννοια της διαδικασίας που αποτελεί τη βάση της ανάλυσης της αιτιότητας. Σε σχέση με την έννοια του χαρακτηριστικού που εκδηλώνεται σε μία διαδικασία αναδείξαμε μία αμφιταλάντευση του Salmon όσον αφορά στον τοπικό χαρακτήρα της έννοιας. Επιπλέον, αναφερθήκαμε στη δομή που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας. Για την ερμηνεία της προτείναμε να υιοθετηθεί ο ορισμός του Russell. Έτσι, καταλήξαμε ότι υπάρχουν δύο είδη διαδικασιών, αυτές που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και αυτές που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Η διαφορά τους έγκειται α) στο γεγονός ότι για να μιλήσουμε για δομή θα πρέπει να εκδηλώνονται τουλάχιστον δύο χαρακτηριστικά κατά μήκος μίας διαδικασίας, β) στο γεγονός ότι η εκδήλωση ομοιομορφίας δομής δεν συνεπάγεται και εκδήλωση ομοιομορφίας ως προς κάποιο

χαρακτηριστικό και γ) στο γεγονός ότι η δομή ενδέχεται να ορίζεται από χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία και να αποδίδεται σε ένα χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία, ενώ τα χαρακτηριστικά εκδηλώνονται στα σημεία της γραμμής που αναπαριστάνουν τη διαδικασία. Η διάκριση ανάμεσα σε διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής και χαρακτηριστικών τέμνει οριζόντια τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες.

Έτσι, οι αιτιακές διαδικασίες διακρίνονται σε αιτιακές διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής και σε αιτιακές διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό. Τα κριτήρια για να χαρακτηρίσουμε μία διαδικασία αιτιακή είναι διαφορετικά σε κάθε περίπτωση. Η αρχή διάδοσης του ίχνους μάς λέει ότι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό, είναι αιτιακή, αν και μόνο αν είναι ικανή να διαδώσει το ίχνος που δημιουργείται σε ένα χωροχρονικό σημείο αυτής. Το ίχνος σε αυτή την περίπτωση κατανοείται ως τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού. Η αρχή διάδοσης αιτιακής επίδρασης μάς λέει ότι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς τη δομή είναι αιτιακή αν και μόνο αν είναι ικανή να διαδώσει τη δομή της. Σε αυτή την περίπτωση η διάδοση του ίχνους, που θεωρείται ως τροποποίηση της δομής μίας διαδικασίας, θεωρείται ως ικανή συνθήκη. Αυτή η διαφοροποίηση μπορεί να θεωρηθεί ως πρόδρομος της θεώρησης των αιτιακών διαδικασιών ως τις διαδικασίες που διαδίδουν αναλλοίωτες-διατηρήσιμες ποσότητες.

Η διάκριση ανάμεσα στις αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν κάποιο χαρακτηριστικό και σε εκείνες που διαδίδουν τη δομή τους γίνεται ακόμα πιο φανερή όταν ο Salmon αναφέρεται στην παραγωγή αιτιακής επίδρασης. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα στα χωροχρονικά σημεία που τέμνονται δύο αιτιακές διαδικασίες και μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται σε κάθε μία από τις διαδικασίες αυτές. Προϋπόθεση για να έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση είναι οι τροποποιήσεις που δημιουργούνται σημειακά να διαδίδονται κατά μήκος των διαδικασιών που αλληλεπιδρούν. Ο Salmon θεωρεί ότι η δημιουργία ίχνους είναι ένα είδος αιτιακής αλληλεπίδρασης. Ωστόσο, αυτή η θέση είναι προβληματική, διότι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες

ενώ μπορούμε να δημιουργήσουμε ίχνος και σε μία ψευδο-διαδικασία. Βεβαίως, σε αυτή την περίπτωση το ίχνος δεν διαδίδεται.

Από την άλλη πλευρά, η δομή παράγεται από συζευκτικά κοινά αίτια, σύμφωνα με το Salmon. Τα συζευκτικά κοινά αίτια είναι συμβάντα που βρίσκονται σε σημεία που τέμνονται κατά προσέγγιση, χωρίς να αλληλεπιδρούν, δύο ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες. Οι διαδικασίες αυτές καταλήγουν σε συμβάντα που εκδηλώνουν θετική στατιστική σχέση και ικανοποιούν μαζί με το κοινό αίτιο τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Η δομή που εκδηλώνεται ορίζεται από σχέσεις που ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Με την έννοια του συζευκτικού κοινού αιτίου ο Salmon φαίνεται να προτείνει κάποιου είδους αναγωγή των αιτιακών διαδικασιών που διαδίδουν δομή σε αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν συσχετιζόμενα χαρακτηριστικά. Αυτό που προσπαθήσαμε να δείξουμε με το παράδειγμα του κρυστάλλου είναι ότι, σε αντίθεση με ό,τι υποστηρίζει ο Salmon, η διάδοση δομής δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών. Επίσης, με την αναφορά στη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δείξαμε ότι η δομή είναι δυνατό να παραχθεί από ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες χωρίς να ικανοποιούνται, μη τετριμμένα, οι στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Αυτό σημαίνει ότι τόσο η χωροχρονική σύμπτωση ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών όσο και η ικανοποίηση των στατιστικών αίτιων του δίκρανου σύζευξης δεν αποτελούν αναγκαίες συνθήκες για την παραγωγή δομής.

Τέλος, αναφερθήκαμε στις αδυναμίες και στην κριτική που έχει δεχθεί η πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon. Τα βασικά σημεία της κριτικής αφορούν στην κυκλικότητα των ορισμών των αιτιακών εννοιών, στην επάρκεια του κριτηρίου του ίχνους, στη εξάρτηση της θεωρίας από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων με συνακόλουθο το πρόβλημα της δικαιολόγησής τους και στην αδυναμία της θεωρίας να συμπεριλάβει το σύνολο των αιτιακών αλληλεπιδράσεων που λαμβάνουν χώρα στον κόσμο. Ορισμένα από αυτά τα προβλήματα αντανακλούν γνήσιες αδυναμίες της θεωρίας που αντιμετωπίζονται μόνο στο πλαίσιο της ύστερης θεωρίας του Salmon. Άλλα έχουν ήδη αντιμετωπιστεί από τον Salmon (1994) με ανασυγκρότηση της πρώιμης θεωρίας του και διασάφηση των ορισμών αιτιακών εννοιών. Ωστόσο, αυτό

που πρέπει να παρατηρήσουμε είναι ότι από αυτή την ύστερη ανασυγκρότηση της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon απουσιάζει η διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν δομή και σε αιτιακές διαδικασίες που έχουν την ικανότητα να διαδώσουν τροποποιήσεις χαρακτηριστικών.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΕΤΑΡΤΟ

ΥΣΤΕΡΕΣ ΘΕΩΡΙΕΣ ΤΩΝ ΑΙΤΙΑΚΩΝ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΩΝ ΚΑΙ ΤΩΝ ΑΙΤΙΑΚΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ

Τα προβλήματα που διαγνώσθηκαν στη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων κατά τη δεκαετία του 1980 ώθησαν τον Salmon στην αναθεώρηση της θεωρίας του. Στα προβλήματα αυτά αναφερθήκαμε εκτενώς στο προηγούμενο κεφάλαιο. Γι' αυτό εδώ θα συνοψίσουμε μόνο την κατεύθυνση στην οποία κινούνται οι αλλαγές που έγιναν στις ύστερες εκδοχές της αιτιακής θεωρίας του Salmon.

Κατά πρώτον, εγκαταλείπεται η έννοια της δομής που λόγω της ασάφειάς της δημιούργησε πολλά προβλήματα στην πρώιμη εκδοχή της θεωρίας. Δεύτερον, το ενδιαφέρον για τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται στις διαδικασίες περιορίζεται στις *αναλλοίωτες* και στις *διατηρήσιμες φυσικές ποσότητες*. Έτσι, καθορίζονται τα χαρακτηριστικά που εκφράζουν τη διάδοση επίδρασης κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας. Λόγω του περιορισμού των χαρακτηριστικών που θεωρείται ότι εκφράζουν τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης, περιορίζεται και το εύρος των αιτιακών αλληλεπιδράσεων που είναι κατάλληλες για την περιγραφή αιτίων και αποτελεσμάτων. Τρίτον, εγκαταλείπεται η έννοια του ίχνους που αποτέλεσε την κύρια πηγή αντιπαραδειγμάτων καθώς και της εξάρτησης της θεωρίας από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων. Πλέον, ο Salmon δεν αναφέρεται σε διάδοση τροποποιήσεων που δημιουργούνται σε ένα χωροχρονικό σημείο μίας διαδικασίας αλλά σε διάδοση μίας αναλλοίωτης ή διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά τη διαδικασία. Τέλος, στο πλαίσιο της νέας προσέγγισης αντιμετωπίζεται το πρόβλημα της περιγραφής δίκρανων αλληλεπίδρασης τύπου Υ και τύπου λ που δεν μπορούσαν να συμπεριληφθούν στην πρώιμη αιτιακή θεωρία λόγω του ορισμού της αιτιακής αλληλεπίδρασης με βάση την αμοιβαία δημιουργία ίχνους.

Η δυνατότητα για την πραγματοποίηση αυτών των αλλαγών προσφέρθηκε στο Salmon στις αρχές της δεκαετίας του '90, μετά τη διατύπωση της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Phil Dowe (1992)[1]. Έτσι, στην ενότητα που ακολουθεί θα ξεκινήσουμε με τη συνοπτική παρουσίαση της θεωρίας του Dowe. Στη συνέχεια θα εξετάσουμε την κριτική που άσκησε ο Salmon στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων καθώς και τις τροποποιήσεις που έκανε ώστε να καταλήξει στις δύο εκδοχές της ύστερης θεωρίας των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων.

4.1 Η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe

Όπως ομολογεί ο Salmon, η θεωρία που προτείνει ο Dowe «είναι όμορφη λόγω της απλότητας της» (Salmon 1998:253). Η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων βασίζεται μόνο σε δύο ορισμούς:

> ΔΠ1: Αιτιακή διαδικασία είναι η κοσμική γραμμή ενός αντικειμένου που κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα.
>
> ΔΠ2: Αιτιακή αλληλεπίδραση είναι η τομή των κοσμικών γραμμών που περιλαμβάνει την ανταλλαγή μίας διατηρήσιμης ποσότητας. (Dowe 1992 και 2000:90)

Ωστόσο, οι ορισμοί αυτοί έχουν από πίσω τους ένα πλέγμα προϋποθέσεων εντός του οποίου θα πρέπει να κατανοηθούν. Καταρχάς, η έννοια της διαδικασίας προϋποθέτει μία θέση για τη διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου. Ο Dowe υποστηρίζει ότι *διαδικασία είναι η χωροχρονική γραμμή ενός και του αυτού αντικειμένου*. Αν σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία μίας γραμμής υπάρχουν διαφορετικά αντικείμενα, τότε η γραμμή δεν αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία.

Ο Kitcher ήταν ο πρώτος που υποστήριξε ότι πέραν από αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες, μία χωροχρονική γραμμή μπορεί να αναπαριστάνει και «χωροχρονικά σκουπίδια» (spatiotemporal junk). Μία τέτοια χωροχρονική γραμμή είναι μία γραμμή συγκερασμού (gerrymandered path) που «δεν είναι επαρκώς ακέραια, ώστε να την εξυψώσουμε σε διαδικασία… Αυτή η τελευταία κατηγορία περιλαμβάνει τροχιές που είναι συνεχείς αλλά που κατά μήκος αυτών δεν υπάρχει

[1] Μολονότι ο Salmon αναγνωρίζει, εκ των υστέρων, την κατεύθυνση της επεξήγησης των αιτιακών εννοιών με βάση τις διατηρήσιμες ποσότητες, στα πρώιμα γραπτά του, δηλώνει ρητά ότι την περίοδο που αυτά γράφτηκαν δεν έβλεπε αυτή τη δυνατότητα. Βλ., π.χ., Salmon (1998: 204).

ουδεμία σταθερότητα ιδιοτήτων» (Kitcher 1989:462). Ανάμεσα στα χωροχρονικά σκουπίδια, ο Dowe διακρίνει τα «χρονοειδή προϊόντα συγκερασμού» (timewise gerrymanders) και τα «χωροειδή προϊόντα συγκερασμού» (spacewise gerrymanders). Τα πρώτα είναι «υποθετικά αντικείμενα που ορίζονται σε ένα χρονικό διάστημα στο οποίο ο ορισμός μεταβάλλεται με το χρόνο (το θεωρούμενο αντικείμενο στην πραγματικότητα είναι διαφορετικά αντικείμενα)» (Dowe 2000:99). Τα χρονοειδή προϊόντα συγκερασμού υπάρχουν σε χρονική διαδοχή, χωρίς επικάλυψη χρόνου, για κάποιο χρονικό διάστημα. Από την άλλη, τα χωροειδή προϊόντα συγκερασμού είναι υποθετικά αντικείμενα που προκύπτουν από τη «συνάθροιση» κάποιων αντικειμένων που συνυπάρχουν κάθε χρονική στιγμή, για κάποιο χρονικό διάστημα σε διαφορετικά σημεία του χώρου.

Ένα παράδειγμα ενός χρονοειδούς προϊόντος συγκερασμού ορίζεται με την έκφραση "το αντικείμενο που βρίσκεται στην τσέπη μου για ορισμένο χρονικό διάστημα [t_1,t_4]". Το αντικείμενο αυτό μπορεί να είναι: μία μπίλια για $t_1 \le t \le t_2$, ένα στυλό για $t_2 < t \le t_3$ και ένα κομμάτι ξύλο για $t_3 < t \le t_4$. Όπως διαπιστώνουμε από το παράδειγμα, τα χρονοειδή προϊόντα συγκερασμού μπορεί να επιδέχονται ενιαία περιγραφή. Επίσης, η χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει το χρονοειδές προϊόν συγκερασμού ενδέχεται να είναι συνεχής. Τέλος, τα διαφορετικά αντικείμενα που συγκροτούν το χρονοειδές προϊόν συγκερασμού μπορεί να συμφωνούν ως προς κάποιο χαρακτηριστικό, π.χ., να έχουν το ίδιο χρώμα ή την ίδια μάζα. Ωστόσο, τα χρονοειδή προϊόντα συγκερασμού δεν αποτελούν αντικείμενα, αλλά συλλογές διαφορετικών αντικειμένων σε διαφορετικούς χρόνους και γι' αυτό η ιστορία τους δεν αποτελεί διαδικασία.

Προϋπόθεση για να διακρίνουμε τις χωροχρονικές γραμμές που αναπαριστάνουν γεωμετρικά διαδικασίες είναι να μπορούμε να διαπιστώσουμε ότι διαφορετικά χρονικά μέρη της ίδιας χωροχρονικής γραμμής αναπαριστάνουν το ίδιο αντικείμενο. Δηλαδή, αυτό που χρειαζόμαστε, σύμφωνα με τον Dowe, είναι μία έννοια διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου. «Έτσι», αναφέρει ο Dowe, «η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων εκλαμβάνει τη διαχρονική ταυτότητα ως, κατά μία έννοια, πρωταρχική για τη θεωρία» (Dowe 1999:252). Ωστόσο, το γεγονός ότι η διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου θεωρείται προσωρινά ως πρωταρχική έννοια δεν σημαίνει ότι δεν μπορεί, ή δεν πρέπει, να αναλυθεί περαιτέρω. Το αντίθετο! Ο

Dowe επισημαίνει ότι υπάρχουν δύο αναλύσεις της διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου που είναι συμβατές με τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων: η θεωρία της ακριβούς ταυτότητας (strict identity)[2] και η θεωρία της ομοιότητας-συνέχειας (similarity-continuity theory)[3]. Όμως, λόγω του γεγονότος ότι και οι δύο θεωρίες έχουν αδυναμίες, ο Dowe αρνείται να δεσμεύσει εξαρχής τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων σε μία από αυτές: «είτε η ακριβής θεωρία είτε η θεωρία της συνέχειας-ομοιότητας θα έκαναν τη δουλειά, μολονότι και οι δύο έχουν τις αδυναμίες τους. Γι' αυτό επιλέγω να αφήσω την έννοια της ταυτότητας ενός αντικειμένου ως πρωταρχική στη θεωρία» (Dowe 2000:107).

Η θέση ότι η διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου προϋποτίθεται της έννοιας της διαδικασίας και γενικώς της θεμελίωσης της αιτιότητας συνεπάγεται ότι δεν είναι δυνατό να κατανοήσουμε τη διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου με βάση τις αιτιακές θεωρίες της ταυτότητας. Σύμφωνα με αυτές τις θεωρήσεις, «για να έχει ένα αντικείμενο διαχρονική ταυτότητα απαιτείται ως αναγκαία συνθήκη τα χρονικά μέρη του να σχετίζονται όπως το αίτιο με το αποτέλεσμα» (Dowe 2000:105). Έτσι, η προσέγγιση του Dowe όσον αφορά τον ορισμό της διαδικασίας τον φέρνει αντιμέτωπο με την προσέγγιση του Russell για τις αιτιακές γραμμές. Διότι, όπως αναφέραμε στην ενότητα 1.2, για τον Russell η διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου προϋποθέτει τη θεμελίωση της αιτιότητας στη βάση των αιτιακών γραμμών: ένα φυσικό αντικείμενο είναι μία αιτιακή γραμμή. Τα συμβάντα που ανήκουν στην αιτιακή γραμμή ενός αντικειμένου περιγράφουν την ύπαρξη του αντικειμένου κάθε χρονική στιγμή σε κάποιο σημείο του χώρου.

---

[2] Η θεωρία της ακριβούς ταυτότητας (Dowe 2000:102) κατανοεί τα αντικείμενα ως τρισδιάστατες, χωρικές, οντότητες που υπάρχουν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές. Ένα αντικείμενο θα πρέπει να είναι πλήρως παρόν σε μία χρονική στιγμή για να υπάρχει σε εκείνη τη χρονική στιγμή. Επίσης, ένα αντικείμενο είναι το ίδιο σε δύο διαφορετικές χρονικές στιγμές με τον ίδιο τρόπο που ένα αντικείμενο ταυτίζεται με τον εαυτό του και με τον ίδιο τρόπο που η ίδια ιδιότητα έχει δύο διαφορετικές εκδηλώσεις σε διαφορετικά πράγματα. Δηλαδή, η διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου δεν είναι διαφορετική από την ταυτότητα ενός αντικειμένου που υπάρχει μία χρονική στιγμή με τον εαυτό του, και ακόμη κατανοείται με βάση την εξής αναλογία:

$$\frac{\text{ίδια ιδιότητα } F}{Fa, Fb, \text{ εκδηλώσεις της } F \text{ στα } a, b} \approx \frac{\text{ίδιο αντικείμενο } x}{x_{t1}, x_{t2}, \text{ εκδηλώσεις του } x \text{ τις χρονικές στιγμές } t_1, t_2}.$$

[3] Σύμφωνα με τον Dowe (2000:103-4), στην προσέγγιση της διαχρονικής ταυτότητας με τη θεωρία της ομοιότητας και της συνέχειας τα αντικείμενα κατανοούνται ως τετραδιάστατες οντότητες που εκτείνονται στο χωρόχρονο. Τα αντικείμενα έχουν χρονικά μέρη - δηλαδή, σε κάθε χρονική στιγμή ένα χρονικό μέρος του αντικειμένου καταλαμβάνει μία χωρική περιοχή και εκδηλώνει ορισμένα χαρακτηριστικά. Οι σχέσεις ομοιότητας των χαρακτηριστικών που εκδηλώνονται σε κομμάτια με διαφορετικό χρονικό εντοπισμό, τα καθιστούν χρονικά μέρη ενός και του αυτού αντικειμένου.

Ωστόσο, ο Dowe δεν αρνείται την ανάλυση της διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου στη βάση των αιτιακών θεωριών της ταυτότητας, μόνο χάριν της κυκλικότητας που θα συνεπάγονταν μία τέτοια επιλογή για τους ορισμούς των αιτιακών εννοιών. Υποστηρίζει ότι υπάρχουν επιπλέον ανεξάρτητα επιχειρήματα που μας οδηγούν να αρνηθούμε αυτή την ανάλυση της διαχρονικής ταυτότητας. Ένα από αυτά[4] στηρίζεται στο αδύνατο σημείο της θεωρίας του Russell: τη μη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και ψευδο-διαδικασίες. Σε μία ψευδο-διαδικασία, αναφέρει ο Dowe (1996, 2000:105), όπως είναι η κίνηση της φωτεινής κηλίδας σε ένα τοίχο, η φωτεινή κηλίδα έχει διαχρονική ταυτότητα: παραμένει η ίδια φωτεινή κηλίδα σε διαφορετικές χρονικές στιγμές τής κίνησής της, χωρίς να αποτελεί αιτιακή διαδικασία[5]. Άρα η διαχρονική ταυτότητα δεν προϋποθέτει την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα συμβάντα μίας αιτιακής διαδικασίας.

Συνοψίζοντας, η κατανόηση μίας διαδικασίας ως χωροχρονικής γραμμής ενός και του αυτού αντικειμένου αναδεικνύει τη διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου σε προϋπόθεση της αιτιακής θεωρίας. Ωστόσο, η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων δεν δεσμεύεται, προς το παρόν, σε μία ορισμένη προσέγγιση τής διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου, αλλά θεωρεί την έννοια ως πρωταρχικό όρο που *μέλλει* να αναλυθεί.

Η δεύτερη προϋπόθεση της θεωρίας του Dowe αφορά στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακά και μη αιτιακά αντικείμενα, η οποία αντιστοιχεί στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και μη αιτιακές διαδικασίες[6]. Αιτιακά αντικείμενα είναι αυτά που κατέχουν διατηρήσιμες ποσότητες ενώ μη αιτιακά εκείνα που δεν κατέχουν διατηρήσιμες ποσότητες. Δηλαδή, υπάρχει ένα συγκεκριμένο είδος ιδιοτήτων, αυτές που ανήκουν

[4] Ο Dowe (1996) παραθέτει και ένα δεύτερο επιχείρημα που απαντά στο επιχείρημα των δύο θεών που προτείνει ο Armstrong υπέρ της αιτιακή θεωρίας της ταυτότητας. Το επιχείρημα του Dowe στηρίζεται σε ένα φανταστικό παράδειγμα που δείχνει ότι υπάρχουν περιπτώσεις στις οποίες ακόμα κι αν προσθέσουμε την αιτιότητα σε άλλες συνθήκες ταυτότητας (όπως η συνέχεια και η ομοιότητα), δεν είναι δυνατό να θεμελιωθεί η διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου.

[5] Στο σημείο αυτό θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι για τον Dowe η φωτεινή κηλίδα είναι ένα μη αιτιακό αντικείμενο και η κίνηση της στον τοίχο αποτελεί ψευδο-διαδικασία. Αντιθέτως, η ακολουθία φωτισμένων κομματιών τοίχου από την κηλίδα δεν αποτελεί αντικείμενο αλλά χρονοειδές προϊόν συγκερασμού: το κομμάτι τοίχου που φωτίζεται τη χρονική στιγμή t_1 + το κομμάτι τοίχου που φωτίζεται τη χρονική στιγμή t_2 + …

[6] Ο Dowe αναφέρεται σε αυτή τη διάκριση μόνο συμπληρωματικά ως προς τη διάκριση ανάμεσα στις αιτιακές και στις ψευδο-διαδικασίες: «Η θεωρία θα μπορούσε να διατυπωθεί με όρους *αντικειμένων*» (Dowe 2000:91). Ωστόσο, θεωρώ ότι η διάκριση είναι σημαντική διότι ο Dowe ρίχνει ιδιαίτερο βάρος στην έννοια του αντικειμένου ως προϋπόθεση του ορισμού της διαδικασίας.

σε διατηρήσιμες ποσότητες, οι οποίες αποδίδονται στα αιτιακά αντικείμενα και δεν μπορούν να αποδοθούν στα μη αιτιακά αντικείμενα, μολονότι τα τελευταία έχουν κάποιες άλλες ιδιότητες – θεωρείστε, π.χ., το σχήμα μίας σκιάς, τη φωτεινότητα μίας φωτεινής κηλίδας, κ.λπ. Έτσι, η αιτιακή διαδικασία είναι η κοσμική γραμμή ενός αιτιακού αντικειμένου ενώ οι ψευδο-διαδικασίες αποτελούν κοσμικές γραμμές μη αιτιακών αντικειμένων.

Σύμφωνα με τον Dowe «διατηρήσιμη ποσότητα είναι κάθε ποσότητα που διέπεται από ένα νόμο διατήρησης, και οι τρέχουσες επιστημονικές θεωρίες είναι ο καλύτερος οδηγός μας για το τι είναι αυτές» (Dowe 2000:91). Η θεωρία αναφέρεται σε καθολικά διατηρήσιμες ποσότητες και όχι σε ποσότητες που διατηρούνται τοπικά σε μία αλληλεπίδραση, ή κατά μήκος μίας διαδικασίας σε απουσία αλληλεπιδράσεων[7], ενώ συνδέει την αιτιότητα με την κατοχή αυτών των ποσοτήτων. Επιπλέον, ο Dowe υποστηρίζει ότι η αναφορά σε σύγχρονες φυσικές θεωρίες που περιγράφουν ποιες ποσότητες είναι διατηρήσιμες δεν εξαρτά την αιτιακή θεωρία από τη γνώση που διαθέτουμε για τον κόσμο. Οι φυσικές θεωρίες μέσω των νόμων διατήρησης μάς λένε ποιες διατηρήσιμες ποσότητες μπορούμε να συνδέσουμε με την αιτιότητα, εξαιρώντας εκείνες τις ποσότητες που είναι ατυχηματικά διατηρήσιμες (Dowe 2000:95). Τέλος, η ύπαρξη καθολικά διατηρήσιμων ποσοτήτων αποτελεί ένα ενδεχομενικό χαρακτηριστικό του κόσμου μας καθώς και των δυνατών κόσμων που μοιράζονται τους ίδιους φυσικούς νόμους -άρα, και τους ίδιους νόμους διατήρησης- με τον ενεργεία πραγματικό κόσμο. Το γεγονός αυτό έχει ως συνέπεια η αιτιακή θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων που συνδέει την αιτιότητα με την κατοχή διατηρήσιμων ποσοτήτων να είναι ενδεχομενική και όχι μεταφυσικώς αναγκαία θεωρία (Dowe 2000:95).

Η τρίτη προϋπόθεση αφορά σε μία συγκεκριμένη κατανόηση της έκφρασης "κατοχή μίας διατηρήσιμης ποσότητας". Εν γένει η απόδοση μίας ποσοτικοποιημένης ιδιότητας σε κάποιο αντικείμενο σημαίνει ότι στο αντικείμενο αυτό η ιδιότητα έχει καθορισμένη τιμή. Η ιδιότητα μεταβάλλεται εφόσον μεταβληθεί η τιμή της και αυτό μπορεί να θεωρηθεί ότι επιφέρει μεταβολή της ταυτότητας του αντικειμένου. Ο Dowe δεν συμμερίζεται αυτή την άποψη. Θεωρεί ότι μόνο το *είδος* της ποσότητας και όχι

[7] Η τοπική διατήρηση των διατηρήσιμων ποσοτήτων, σύμφωνα με τον Dowe, αποτελεί συνέπεια του γεγονότος ότι αυτές είναι καθολικά διατηρήσιμες. Στο επόμενο κεφάλαιο θα δείξουμε ότι αυτό δεν ισχύει γενικώς στην κλασική φυσική.

κάποια συγκεκριμένη *τιμή* αυτής αποτελεί ιδιότητα που χαρακτηρίζει τη διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου. Έτσι, η διαχρονική ταυτότητα ενός αιτιακού αντικειμένου προσδιορίζεται από το γεγονός ότι σε αυτό αποδίδεται, π.χ., "ενέργεια" και όχι "ενέργεια 5 eV". Σε κάθε χωροχρονικό σημείο μίας αιτιακής διαδικασίας υπάρχει το ίδιο αντικείμενο, με το ίδιο είδος ιδιότητας που αντιστοιχεί σε διατηρήσιμη ποσότητα, χωρίς η ιδιότητα αυτή να εκφράζει κατ' ανάγκη την ίδια τιμή. Η διάκριση ανάμεσα στη συγκεκριμένη τιμή της ιδιότητας και στο είδος της ιδιότητας επιτρέπει στον Dowe να ισχυριστεί ότι σε ένα χωροχρονικό σημείο μίας αιτιακής διαδικασίας μπορεί να υπάρχει ένα αιτιακό αντικείμενο που κατέχει μηδενικό ποσό ενέργειας.

4.2 Ο ορισμός των αιτιακών εννοιών με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων

Ο Salmon δομεί τη νέα εκδοχή της αιτιακής θεωρίας του τροποποιώντας κατάλληλα τους ορισμούς των αιτιακών εννοιών της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe. Οι τροποποιήσεις αφορούν: α) στη χρήση αναλλοίωτων ποσοτήτων αντί των διατηρήσιμων ποσοτήτων για τον ορισμό των αιτιακών εννοιών και β) στην αντικατάσταση της έννοιας της κατοχής μίας διατηρήσιμης ποσότητας από ένα αντικείμενο που έχει διαχρονική ταυτότητα από την έννοια της διάδοσης μίας αναλλοίωτης ποσότητας.

Καταρχάς ας δούμε πώς ο Salmon κατανοεί τη διάκριση ανάμεσα στις διατηρήσιμες και στις αναλλοίωτες ποσότητες αλλά και με ποιο τρόπο η ίδια διάκριση περιγράφεται στις σύγχρονες φυσικές θεωρίες.

> Το να λέμε ότι μία ποσότητα *διατηρείται* (σε ένα φυσικό σύστημα) σημαίνει ότι η τιμή της δεν αλλάζει με το χρόνο – είναι σταθερή σε σχέση με τη χρονική μετάθεση. Το να λέμε ότι μία ποσότητα είναι *αναλλοίωτη* (σε ένα φυσικό σύστημα) σημαίνει ότι παραμένει σταθερή σε αλλαγή του συστήματος αναφοράς. (Salmon 1998:255)

Σε μία τοπική χωροχρονική θεωρία, όπως είναι η γενική θεωρία της σχετικότητας, τα μοντέλα της οποίας είναι της μορφής $< M, O_1, ..., O_n >$, όπου M μία τετραδιάστατη διαφορίσιμη πολλαπλότητα και $O_i (i = 1, ..., n)$ πεδία γεωμετρικών αντικειμένων πάνω στην M, θα λέμε ότι ένα πεδίο γεωμετρικών αντικειμένων O_j είναι *αναλλοίωτο* ως

προς κάποιο διαφορομορφισμό f της πολλαπλότητας M αν και μόνο αν ισχύει $f*O_j = O_j$, όπου $f*$ είναι μία απεικόνιση που επάγεται από το διαφορομορφισμό f και μεταφέρει πεδία γεωμετρικών αντικειμένων που ορίζονται σε ανοικτά υποσύνολα U της M σε πεδία γεωμετρικών αντικειμένων που ορίζονται στην εικόνα αυτών των υποσυνόλων με το διαφορομορφισμό f. Στην ειδική περίπτωση[8] που το πεδίο γεωμετρικών αντικειμένων O_j περιγράφει μία βαθμωτή ποσότητα η οποία αναπαριστάνεται από μία λεία πραγματική συνάρτηση στην U, η $f*O_j$ ορίζεται από τη σχέση $\left(f*O_j\right)(f(p)) = O_j(p)$ για κάθε σημείο $p \in U$. Είναι γνωστό ότι οι διαφορομορφισμοί μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να περιγράψουν την αλλαγή τοπικών συστημάτων αναφοράς στην περιοχή ενός σημείου της πολλαπλότητας (Wald 1984:439). Επομένως, μία ποσότητα που είναι αναλλοίωτη ως προς ένα διαφορομορφισμό f είναι μία ποσότητα που είναι αναλλοίωτη ως προς την αλλαγή συστήματος συντεταγμένων που περιγράφεται από τον f.

Τα μοντέλα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας, οι δυνατοί χωρόχρονοι της θεωρίας, περιγράφονται από ζεύγη της μορφής $< M, g >$, όπου M μία τετραδιάστατη ημι-ρημάννεια διαφορίσιμη πολλαπλότητα και g ένα συμμετρικό, μη εκφυλισμένο, τανυστικό πεδίο δεύτερης τάξης υπογραφής Lorentz[9] που αναπαριστάνει τη μετρική. Η μετρική απεικονίζει δύο οποιαδήποτε διανύσματα του εφαπτόμενου χώρου σε κάθε σημείο της πολλαπλότητας σε έναν πραγματικό αριθμό που είναι το βαθμωτό τους γινόμενο. Ωστόσο, στη γενική περίπτωση η μετρική δεν παραμένει αναλλοίωτη υπό διαφορομορφισμούς με τη σημασία που προαναφέραμε. Οι διαφορομορφισμοί που αφήνουν αναλλοίωτη τη μετρική ονομάζονται *ισομετρίες*. Για φυσικά συστήματα που περιγράφονται σε σταθερό χωροχρονικό υπόβαθρο οι ισομετρίες έχουν ιδιαίτερη σημασία διότι εκφράζουν τις χωροχρονικές συμμετρίες του συστήματος, δηλαδή τις συμμετρίες που αφήνουν αναλλοίωτη τη χωροχρονική γεωμετρία. Επίσης, για συστήματα σε σταθερό χωροχρονικό υπόβαθρο που περιγράφονται από χωροχρονικές θεωρίες, οι χωροχρονικές συμμετρίες περιλαμβάνονται στις δυναμικές συμμετρίες του φυσικού συστήματος (Earman 1989:47).

[8] Για το γενικό ορισμό της απεικόνισης μεταφοράς ενός γεωμετρικού αντικειμένου που επάγεται από ένα διαφορομορφισμό f παραπέμπουμε στο (Friedman 1983:358) και στο (Wald 1984:437).

[9] Επιλέγουμε τη σύμβαση $(+---)$.

Όταν ο Salmon δηλώνει ότι η χωροχρονική απόσταση στην ειδική θεωρία της σχετικότητας είναι αναλλοίωτο (Salmon 1998:255), προϋποθέτει ότι ο χωρόχρονος Minkowski είναι το αμετάβλητο χωροχρονικό υπόβαθρο στο οποίο ενυπάρχουν οι αιτιακές διαδικασίες και λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις. Ο χωρόχρονος Minkowski της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας συγκροτείται από την πολλαπλότητα $\mathbb{R}^4$ και από μία επίπεδη μετρική με υπογραφή Lorentz, η_{ab}. Το σύνολο των μετασχηματισμών της πολλαπλότητας που αφήνει αναλλοίωτη τη μετρική περιγράφεται από την ομάδα Poincaré που περιλαμβάνει χωροχρονικές μετατοπίσεις, περιστροφές και μετασχηματισμούς Lorentz. Σε αυτή την περίπτωση, μία ποσότητα είναι αναλλοίωτη ως προς τους μετασχηματισμούς Poincaré αν έχει την ίδια τιμή για κάθε ζεύγος τοπικών συστημάτων αναφοράς που συνδέονται με τους μετασχηματισμούς Poincaré. Επιπλέον, στο χωρόχρονο της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας μπορούμε να ορίσουμε *καθολικά αδρανειακά συστήματα* αναφοράς στα οποία ισχύει ότι η απόσταση δύο σημείων $x, \overline{x}$ (όχι κατ' ανάγκη γειτονικών) είναι η αναλλοίωτη ποσότητα,

$$I = \left(x^0 - \overline{x}^0\right)^2 - \left(x^1 - \overline{x}^1\right)^2 - \left(x^2 - \overline{x}^2\right)^2 - \left(x^3 - \overline{x}^3\right)^2, \qquad (4.2.1)$$

όπου $\left(x^0, x^1, x^2, x^3\right)$ και $\left(\overline{x}^0, \overline{x}^1, \overline{x}^2, \overline{x}^3\right)$ οι συντεταγμένες των σημείων $x, \overline{x}$ ως προς το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς, αντιστοίχως. Τα καθολικά αδρανειακά συστήματα συνδέονται μεταξύ τους με μετασχηματισμούς Poincaré. Άλλες αναλλοίωτες ποσότητες είναι το φορτίο, η αδρανειακή μάζα ενός σωματιδίου καθώς και κάθε βαθμωτή ποσότητα που μπορεί να εκφραστεί ως γινόμενο δύο τετρανυσμάτων. Οι ποσότητες που δεν είναι αναλλοίωτες στους μετασχηματισμούς Poincaré είναι οι συνιστώσες των τετρανυσμάτων (π.χ., η ενέργεια και οι συνιστώσες της τριορμής) και γενικότερα των τανυστικών μεγεθών (π.χ., οι συνιστώσες του τανυστή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου).

Το σύνολο των μοντέλων της γενικής θεωρίας της σχετικότητας ικανοποιούν την τοπική εξίσωση διατήρησης για το τανυστικό πεδίο τάσης-ενέργειας-ορμής,

$$\nabla^a T_{ab} = 0\,. \qquad (4.2.2)$$

Ωστόσο, αυτός ο νόμος διατήρησης, που ισχύει και για άλλα φυσικά συστήματα όπως τα ελεύθερα πεδία σε κάποιο σχετικιστικό χωρόχρονο υποβάθρου, δεν επαρκεί για να συμπεράνουμε την ύπαρξη διατηρήσιμων ποσοτήτων. Απαιτείται επιπλέον η ύπαρξη ενός τουλάχιστον διανυσματικού πεδίου Killing[10] το οποίο παράγει μία συνεχή ομάδα ισομετριών. Αν ξ^{α} είναι ένα διανυσματικό πεδίο Killing τότε το διανυσματικό πεδίο J^{a} που ορίζεται με τη σχέση

$$J_{a} = T_{ab}\xi^{b}, \tag{4.2.3}$$

ικανοποιεί τον τοπικό νόμο διατήρησης,

$$\nabla^{a} J_{a} = 0. \tag{4.2.4}$$

Για να μπορέσουμε να καταλήξουμε από την (4.2.4) σε ένα καθολικό νόμο διατήρησης θα πρέπει να εξετάσουμε την ασυμπτωτική συμπεριφορά του διανυσματικού πεδίου J^{a} στο χωρικό άπειρο. Αν υποθέσουμε ότι το J^{a} μηδενίζεται στο χωρικό άπειρο τότε για δύο οποιεσδήποτε (μη τεμνόμενες) χωροειδείς υπερεπιφάνειες, Σ_{1}, Σ_{2} που εκτείνονται στο άπειρο, από το θεώρημα Gauss-Stokes προκύπτει ότι

$$\int_{\Sigma_{1}} J^{a} d\Sigma^{1}_{a} = \int_{\Sigma_{2}} J^{a} d\Sigma^{2}_{a}, \tag{4.2.5}$$

όπου $d\Sigma^{i}_{a}$ το προσανατολισμένο στοιχείο της επιφάνειας Σ_{i}. Έτσι, η ποσότητα

$$Q = \int_{\Sigma} J^{a} d\Sigma_{a} \tag{4.2.6}$$

που υπολογίζεται πάνω σε μία χωροειδή υπερεπιφάνεια Σ, σταθερού χρόνου, είναι διατηρήσιμη ποσότητα.

[10] Αν $\phi_{t} : M \to M$, $t \in \mathbb{R}$, είναι μία μονοπαραμετρική ομάδα ισομετριών τότε το διανυσματικό πεδίο ξ^{α} που είναι γεννήτορας της ομάδας ονομάζεται διανυσματικό πεδίο Killing. Ικανή και αναγκαία συνθήκη για να είναι το διανυσματικό πεδίο ξ^{α} διανυσματικό πεδίο Killing, είναι να ικανοποιεί την εξίσωση Killing, $\nabla_{a}\xi_{b} + \nabla_{b}\xi_{a} = 0$, με ∇_{a} τον τελεστή συναλλοίωτης παραγώγισης που συνδέεται με τη μετρική g_{ab} (Wald 1984:442).

Στην περίπτωση φυσικών συστημάτων που βρίσκονται σε κάποιο χωρόχρονο υποβάθρου -δηλαδή, συστημάτων των οποίων η ύπαρξη δεν επηρεάζει τη χωροχρονική γεωμετρία- οι ασυμπτωτικές συνθήκες που επιβάλλουμε στο διανυσματικό πεδίο J^a μπορούν να προκύψουν από συνθήκες που υποθέτουμε ότι ισχύουν για τον τανυστή τάσης-ενέργειας-ορμής του φυσικού συστήματος ή και για το ίδιο το πεδίο. Έτσι, θεωρούμε ότι ένα σώμα περιγράφεται από ένα χρονοειδή σωλήνα εντός του οποίου ισχύει $T_{ab} \neq 0$, ενώ έξω από το σωλήνα $T_{ab} = 0$[11]. Επίσης, για το ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στο χωρόχρονο Minkowski υποθέτουμε ότι το τανυστικό πεδίο Faraday F_{ab} μηδενίζεται επαρκώς «γρήγορα» καθώς η χωρική απόσταση πάνω σε μία χωροειδή υπερεπιφάνεια τείνει στο άπειρο καθώς και κατά μήκος οποιασδήποτε φωτοειδούς γεωδαισιακής.

Από την άλλη, στη γενική θεωρία της σχετικότητας, όπου δεν υπάρχει χωρόχρονος υποβάθρου και τα υλικά πεδία επιδρούν στη χωροχρονική γεωμετρία, δεν μπορούμε να υπολογίσουμε τη μεταβολή της καμπυλότητας του πεδίου της μετρικής ως προς κάποια παράμετρο που ορίζεται πάνω σε ένα επίπεδο χωρόχρονο υποβάθρου, όπως κάνουμε για τον τανυστή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση, η ασυμπτωτική συνθήκη που οι φυσικοί υποθέτουν ότι ισχύει για το πεδίο της μετρικής είναι η *ασυμπτωτική επιπεδότητα* (asymptotic flatness). Η γενική ιδέα είναι ότι η μετρική του χωροχρόνου προσεγγίζει στην επίπεδη μετρική Minkowski στην ασυμπτωτική περιοχή του χωροχρόνου ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς[12]. Με απλά λόγια, ο χωρόχρονος όσο τείνουμε προς το άπειρο «γίνεται άδειος και επίπεδος». Η συνήθης ερμηνεία των ασυμπτωτικών συνθηκών που αναφέραμε είναι ότι το σύστημα για το οποίο ισχύουν είναι κλειστό ή απομονωμένο, δηλαδή δεν επηρεάζεται από εξωτερικές επιδράσεις.

Μέχρι τώρα αναφερθήκαμε σε διατηρήσιμες ποσότητες που προκύπτουν από τις χωροχρονικές συμμετρίες ενός φυσικού συστήματος. Αυτές οι συμμετρίες συνεπάγονται την ύπαρξη των νόμων διατήρησης της ενέργειας, της ορμής και της στροφορμής. Όμως πέραν αυτών των συμμετριών ενδέχεται να υπάρχουν και οι συμμετρίες που περιγράφονται από μετασχηματισμούς που αφορούν σε έναν

[11] Στην περίπτωση αυτή δεν αναφερόμαστε σε ασυμπτωτικές, αλλά σε συνοριακές συνθήκες που επιβάλλονται στην κατανομή ύλης και ενέργειας.

[12] Λόγω τεχνικών δυσκολιών δεν αναφέρουμε τον αυστηρό επιστημονικό ορισμό της ασυμπτωτικής επιπεδότητας. Για όποιον ενδιαφέρεται παραπέμπουμε στο Wald (1984: κεφ.11).

εσωτερικό χώρο του συστήματος, και όχι στην πολλαπλότητα με την οποία περιγράφεται ο χωρόχρονος υποβάθρου, ως προς τους οποίους το φυσικό σύστημα παραμένει αναλλοίωτο. Αυτές οι συμμετρίες ονομάζονται συμμετρίες βάθμισης ή βαθμίδας (gauge symmetries). Οι συμμετρίες βάθμισης διακρίνονται σε καθολικές και σε τοπικές συμμετρίες, με τις πρώτες να περιγράφονται από μετασχηματισμούς της κατάστασης του φυσικού συστήματος σε όλο το χωρόχρονο με τον ίδιο τρόπο (ανεξάρτητα από τα σημεία της πολλαπλότητας), ενώ οι δεύτερες να μετασχηματίζουν το φυσικό σύστημα με διαφορετικό τρόπο σε κάθε σημείο του χωροχρόνου. Η διατήρηση του ηλεκτρικού φορτίου προκύπτει από το αναλλοίωτο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως προς τους μετασχηματισμούς βαθμίδας. Ο τοπικός νόμος διατήρησης που προκύπτει για την πυκνότητα ρεύματος –φορτίου είναι της μορφής (4.2.4), με J^a το διανυσματικό πεδίο φορτίου-ρεύματος. Από την τοπική εξίσωση, με ολοκλήρωση πάνω σε μία χωροειδή υπερεπιφάνεια Σ, εφόσον ισχύουν κατάλληλες ασυμπτωτικές συνθήκες, προκύπτει ο καθολικός νόμος διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου.

Οι διατηρούμενες ποσότητες που περιγράφονται από την (4.2.6) δεν είναι αναλλοίωτες, υπό την έννοια που αναφέραμε προηγούμενα. Γενικώς, η τιμή τους εξαρτάται από την επιλογή της χωροειδούς υπερεπιφάνειας Σ πάνω στην οποία υπολογίζεται το ολοκλήρωμα και συγκεκριμένα από τη διεύθυνση του διανυσματικού πεδίου που είναι κάθετο σε κάθε σημείο της επιφάνειας. Υπενθυμίζουμε ότι καταλήξαμε στον καθολικό νόμο διατήρησης (4.2.5) υποθέτοντας ότι οι Σ_1 , Σ_2 είναι δύο μη τεμνόμενες υπερεπιφάνειες που εκτείνονται στο άπειρο. Τι γίνεται όμως αν υπολογίσουμε την ποσότητα Q σε δύο *τεμνόμενες* υπερεπιφάνειες Σ, Σ΄ που εκτείνονται στο άπειρο; Σε αυτή την περίπτωση, η ποσότητα Q ενδέχεται να είναι διαφορετική. Επιπλέον, αν υποθέσουμε ότι η Σ και η Σ΄ αποτελούν επιφάνειες σταθερού χρόνου, στις οποίες αποδίδεται η ίδια τιμή στη χρονική μεταβλητή ως προς δύο διαφορετικά (καθολικά) συστήματα αναφοράς, τότε συμπεραίνουμε ότι η ποσότητα Q μία δεδομένη χρονική στιγμή ενδέχεται να διαφέρει ως προς τα δύο

συστήματα αναφοράς. Επομένως η Q, μολονότι είναι διατηρήσιμη ποσότητα, δεν είναι αναλλοίωτη[13].

Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, η ενέργεια και η στροφορμή αποτελούν παραδείγματα διατηρήσιμων ποσοτήτων που δεν είναι αναλλοίωτες για ένα φυσικό σύστημα στο χωρόχρονο Minkowski. Από την άλλη, υπάρχουν αναλλοίωτες ποσότητες που δεν είναι διατηρήσιμες εφόσον δεν ικανοποιούν ένα νόμο διατήρησης της μορφής (4.2.5). Για παράδειγμα, σε ένα συγκεκριμένο χωρόχρονο $< M, g >$, το βαθμωτό γινόμενο δύο διανυσμάτων του εφαπτόμενου χώρου σε ένα σημείο του χωροχρόνου είναι αναλλοίωτο ως προς τοπικές αλλαγές των συστημάτων αναφοράς, όπως επίσης και το χωροχρονικό διάστημα ή γενικώς μία ποσότητα που ορίζεται από το βαθμωτό γινόμενο δύο διανυσμάτων στον χωρόχρονο Minkowski. Τέλος, υπάρχουν ποσότητες που είναι αναλλοίωτες και διατηρήσιμες: για παράδειγμα, το ολικό φορτίο ή η ολική μάζα μίας συλλογής σωματιδίων σε κάποιο χωρόχρονο.

Μετά από αυτή την μάλλον εκτενή αναφορά στη διάκριση ανάμεσα σε αναλλοίωτες και σε διατηρήσιμες ποσότητες στο πλαίσιο των φυσικών θεωριών, ας προχωρήσουμε στο βασικό ζητούμενο της πρότασης του Salmon: για ποιο λόγο θα πρέπει να επιλέξουμε αναλλοίωτες ποσότητες για τον ορισμό των βασικών εννοιών της αιτιακής θεωρίας;

Καταρχάς, πρέπει να επισημάνουμε ότι ο Salmon δεν επιχειρηματολογεί ενάντια στη χρήση διατηρήσιμων ποσοτήτων για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών, αλλά μόνο υπέρ των αναλλοίωτων ποσοτήτων είτε αυτές είναι διατηρήσιμες είτε όχι. Η επιχειρηματολογία του Salmon παρουσιάζεται στο ακόλουθο χωρίο:

> Στην ειδική σχετικότητα το χωροχρονικό διάστημα είναι αναλλοίωτο. Αν δύο συμβάντα είναι αιτιακώς συνδέσιμα σε ένα σύστημα αναφοράς, αυτά είναι αιτιακώς συνδέσιμα σε κάθε σύστημα. Οι χωροειδείς, οι φωτοειδείς και οι χρονοειδείς απομακρύνσεις είναι αναλλοίωτες. Αν δύο συμβάντα είναι αιτιακώς συνδεδεμένα σε ένα σύστημα αναφοράς τότε είναι αιτιακώς συνδεδεμένα σε όλα τα συστήματα. Εφόσον προσπαθούμε να επεξηγήσουμε αιτιακές έννοιες που είναι ανεξάρτητες από σύστημα [αναφοράς], φαίνεται εύλογο το επεξηγούν να διατυπώνεται με όρους ανεξάρτητους από το σύστημα [αναφοράς] (βλ. Mühlhölzer 1994). (Salmon 1998:255)

[13] Μία αναγκαία διευκρίνηση. Το διανυσματικό πεδίο που προκύπτει από την ολοκλήρωση του τανυστικού πεδίου τάσης-ενέργειας-ορμής T_{ab} πάνω σε μία χωροειδή υπερεπιφάνεια Σ δε μεταβάλλεται από τις αλλαγές συστημάτων αναφοράς. Αυτό που αλλάζει είναι η πυκνότητα ενέργειας-ορμής που διαδίδεται κατά τη διεύθυνση του διανύσματος Killing σε κάθε σημείο του χωροχρόνου.

Η δομή της επιχειρηματολογίας δεν είναι αρκετά σαφής. Για την ανασυγκρότηση της θα πρέπει να ξεκινήσουμε από την τελευταία πρόταση που διατυπώνεται ως εύλογη μεθοδολογική αρχή:

> Α: Οι αιτιακές έννοιες που είναι ανεξάρτητες από το σύστημα αναφοράς θα πρέπει να επεξηγούνται με όρους ανεξάρτητους από το σύστημα αναφοράς.

Προς επίρρωση της μεθοδολογικής αρχής ο Salmon αναφέρει την περίπτωση της επεξήγησης της αιτιακής συνδεσιμότητας δύο συμβάντων με βάση την ειδική θεωρία της σχετικότητας:

> Π1: Η αιτιακή συνδεσιμότητα δύο συμβάντων επεξηγείται με βάση τη διάκριση της χωροχρονικής απόστασης μεταξύ των σημείων στα οποία λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα σε χρονοειδή, χωροειδή και φωτοειδή ανάλογα με το αν το χωροχρονικό διάστημα έχει τιμή θετική, αρνητική ή μηδέν αντιστοίχως.
>
> Π2: Το χωροχρονικό διάστημα είναι αναλλοίωτο.
>
> Σ1 : Η αιτιακή συνδεσιμότητα δύο συμβάντων είναι αναλλοίωτη: αν δύο συμβάντα είναι αιτιακώς συνδέσιμα σε ένα σύστημα αναφοράς, τότε θα είναι αιτιακώς συνδέσιμα σε κάθε σύστημα αναφοράς.

Στην περίπτωση αυτή η αιτιακή έννοια που είναι αναλλοίωτη και χρήζει επεξήγησης στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας είναι η αιτιακή συνδεσιμότητα δύο συμβάντων. Το επεξηγούν της έννοιας είναι η διάκριση των χωροχρονικών διαστημάτων σε χρονοειδή, φωτοειδή και χωροειδή που αποτελεί μία αναλλοίωτη διάκριση εφόσον το χωροχρονικό διάστημα είναι αναλλοίωτο.

Τέλος, ο Salmon υποστηρίζει ότι στη βάση της (Α), το επεξηγούν της έννοιας "αιτιακή σύνδεση", που δεν είναι διαφορετικό από τις φυσικές ποσότητες που θα περιληφθούν στον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας, θα πρέπει να είναι ανεξάρτητο από το σύστημα αναφοράς. Αναλυτικότερα:

Π3: Η αιτιακή σύνδεση δύο συμβάντων επεξηγείται από τα χαρακτηριστικά I_1, I_2,….

Π4: Τα I_1, I_2, … είναι αναλλοίωτα φυσικά χαρακτηριστικά.

Σ2: Η αιτιακή σύνδεση δύο συμβάντων είναι αναλλοίωτη: αν δύο συμβάντα είναι αιτιακώς συνδεδεμένα σε ένα σύστημα αναφοράς, τότε θα είναι αιτιακώς συνδεδεμένα σε κάθε σύστημα αναφοράς.

Η (Α) αποτελεί μεταφορά στο πλαίσιο της επεξήγησης των αιτιακών εννοιών μίας αντίστοιχης αρχής που υποστηρίζει ο Mühlhölzer, στον οποίο παραπέμπει ο Salmon στο τέλος του χωρίου που παραθέσαμε για την επιστημονική εξήγηση:

> (O_1) Αν το εξηγητέο έχει μία περιγραφή που είναι αναλλοίωτη σε σχέση με τα ισοδύναμα περιγραφικά συστήματα D_1 και D_2, τότε και η ίδια η εξήγηση θα πρέπει να είναι αναλλοίωτη σε σχέση με τα D_1 και D_2. (Mühlhölzer 1994:130)

Στην περίπτωση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας τα δύο περιγραφικά συστήματα αντιστοιχούν σε δύο διαφορετικούς αδρανειακούς παρατηρητές. Συγκεκριμένα, ο Mühlhölzer αναφέρεται στο παράδειγμα του Einstein (1952:37) για τη δημιουργία ρεύματος σε ένα αγωγό λόγω της σχετικής κίνησής του ως προς ένα μαγνήτη. Είτε θεωρήσουμε το φαινόμενο ως αποτέλεσμα της κίνησης του μαγνήτη σε σχέση με τον ακίνητο αγωγό, είτε το θεωρήσουμε αποτέλεσμα της κίνησης του αγωγού στο στατικό πεδίο που δημιουργεί ο ακίνητος μαγνήτης, πρόκειται για το ίδιο φαινόμενο. Όμως, κατά την κλασική ηλεκτροδυναμική, οι εξηγήσεις του φαινομένου ως προς τα δύο συστήματα αναφοράς είναι διαφορετικές. Η σχετικοποίηση της εξήγησης ως προς ένα σύστημα αναφοράς και το γεγονός ότι ο Einstein θεωρεί τις δύο εξηγήσεις ισοδύναμες εκφράζουν, σύμφωνα με τον Mühlhölzer, το αναλλοίωτο που αναφέρεται στην αρχή «Η σχετικοποίηση οδηγεί στο αναλλοίωτο και άρα στην ικανοποίηση της αρχής O_1» (ό.π.).

Αν η αναφορά του Salmon στο Mühlhölzer σταματούσε εδώ, δεν θα ήταν κατανοητό για ποιο λόγο κάποιος να μην αποδεχθεί επεξηγήσεις των αναλλοίωτων αιτιακών εννοιών με όρους διατηρήσιμων ποσοτήτων η τιμή των οποίων ορίζεται σε σχέση ένα αδρανειακό σύστημα, όπως προτείνει ο Dowe. Ωστόσο, ο Mühlhölzer

προτείνει και μία δεύτερη αρχή που πρέπει να ικανοποιούν οι επιστημονικές εξηγήσεις:

> (O_2) Αν το εξηγητέο δεν είναι σχετικοποιημένο ως προς μία παράμετρο P, που μπορεί να επιλεγεί αυθαιρέτως, τότε και η εξήγηση δεν θα πρέπει να είναι σχετικοποιημένη σε σχέση την P. (Mühlhölzer 1994:132)

Έτσι, επειδή οι αιτιακές έννοιες δεν σχετικοποιούνται ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς και τα φυσικά χαρακτηριστικά με τα οποία επεξηγούνται δεν θα είναι σχετικοποιημένα ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς.

Οι αρχές (O_1)και (O_2) εκφράζουν το αίτημα οι επιστημονικές εξηγήσεις να είναι κατά το δυνατόν περισσότερο αντικειμενικές, δηλαδή απαλλαγμένες από αυθαίρετα υποκειμενικά στοιχεία που υπεισέρχονται στην περιγραφή της φύσης: «αμφότερες μας λένε ότι το εξηγούν θα πρέπει να είναι τουλάχιστον τόσο αντικειμενικό όσο είναι το εξηγητέο» (Mühlhölzer 1994:133). Σύμφωνα με τον Mühlhölzer σε μία επιστημική θεώρηση της επιστημονικής εξήγησης οι αρχές αυτές είναι μία πολυτέλεια, διότι δεν αφορούν στη συναγωγή του εξηγητέου ως κάτι αναμενόμενο για τον επιστήμονα με βάση τους φυσικούς νόμους και τα γεγονότα που συγκροτούν το εξηγούν. Ωστόσο, στην οντική θεώρηση της επιστημονικής εξήγησης, όπου η εξήγηση κατανοείται με βάση την ένταξη του εξηγητέου σε αντικειμενικές κανονικότητες ή/και αιτιακές σχέσεις, ο Mühlhölzer υποστηρίζει ότι οι δύο αρχές εκφράζουν την ιδέα «ότι οι εξηγήσεις θα πρέπει να αποκαλύπτουν αντικειμενικές συνδέσεις στη φύση» (Mühlhölzer 1994:134). Ο Salmon προχωράει ένα βήμα παραπέρα και απαιτεί, σε δεύτερο επίπεδο, οι αιτιακές έννοιες στη βάση των οποίων διατυπώνονται οι οντικές εξηγήσεις, να επεξηγούνται και οι ίδιες με βάση αντικειμενικές περιγραφές που προκύπτουν από τις καλύτερες φυσικές θεωρίες που διαθέτουμε.

Ο Dowe δεν έχει κάποια ισχυρή ένσταση για τη χρησιμοποίηση αναλλοίωτων διατηρήσιμων ποσοτήτων, αντί των διατηρήσιμων ποσοτήτων που η τιμή τους εξαρτάται από την επιλογή συστήματος αναφοράς (Dowe 2000:119). Ωστόσο, δεν το θεωρεί απαραίτητο. Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο Dowe διακρίνει ανάμεσα στο είδος μίας διατηρήσιμης ποσότητας και στην καθορισμένη τιμή αυτής. Για να αναφερθεί στην αιτιακή διαδικασία ενός αντικειμένου αρκεί γι αυτόν το αντικείμενο να κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα ανεξάρτητα από την τιμή της. Άρα το γεγονός

ότι η τιμή της ενέργειας εξαρτάται από την επιλογή συστήματος αναφοράς δεν δημιουργεί κανένα πρόβλημα για τη θεώρηση μίας χωροχρονικής γραμμής ως αιτιακής διαδικασίας ενός αντικειμένου που κατέχει ενέργεια. Επίσης, η ύπαρξη αιτιακής σύνδεσης ανάμεσα σε δύο συμβάντα μπορεί να διαπιστωθεί από οποιονδήποτε παρατηρητή λόγω του γεγονότος ότι το αντικείμενο που ορίζει μία αιτιακή διαδικασία κατέχει κάποιο είδος διατηρήσιμης ποσότητας ανεξάρτητα από την επιλογή συστήματος αναφοράς.

Η διαφορά ανάμεσα στη θεώρηση του Salmon και του Dowe είναι η εξής. Ο μεν Salmon απαιτεί δύο διαφορετικοί παρατηρητές να διαπιστώνουν την ίδια αιτιακή σύνδεση ανάμεσα σε δύο συμβάντα, δηλαδή την ίδια αιτιακή διαδικασία, τόσο σε σχέση με τα γεωμετρικά, όσο και σε σχέση με τα φυσικά χαρακτηριστικά που διαδίδονται κατά μήκος αυτής. Ο δε Dowe δεν θεωρεί ότι αυτό είναι απαραίτητο. Οι διαφορετικοί παρατηρητές μπορεί να διαπιστώνουν διαφορετικό ποσό του ίδιου φυσικού μεγέθους, να δίνουν διαφορετική περιγραφή του αντικειμένου, αρκεί αυτό να είναι κάποια διατηρήσιμη ποσότητα. Άλλωστε, διαφορετικοί παρατηρητές δίνουν διαφορετικές περιγραφές, ως προς το σύστημα αναφοράς τους, και για τη χωροχρονική γραμμή που συνδέει δύο συμβάντα.

Το επόμενο πρόβλημα του Salmon συνίσταται στην επιλογή των κατάλληλων αναλλοίωτων ποσοτήτων για την περιγραφή των αιτιακών διαδικασιών. Όπως ήδη αναφέραμε, η χωροχρονική απόσταση ανάμεσα σε δύο σημεία αποτελεί αναλλοίωτο μέγεθος για την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Έτσι, εφόσον μία διαδικασία είναι γεωμετρικά μία περατωμένη γραμμή που συνδέει δύο χωροχρονικά σημεία Α και Β, μπορεί κάποιος να συμπεράνει ότι κάθε διαδικασία κατέχει ένα αναλλοίωτο μέγεθος που είναι η χωροχρονική απόσταση των περάτων της Α,Β και άρα είναι αιτιακή. Κατά συνέπεια, μία τέτοια θεώρηση αναιρεί τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και ψευδο-διαδικασίες. Για να επιλύσει αυτό το πρόβλημα ο Salmon απαιτεί οι αναλλοίωτες ποσότητες με τις οποίες χαρακτηρίζουμε μία αιτιακή διαδικασία να είναι *τοπικές* - δηλαδή, να εκδηλώνονται σε *κάθε* χωροχρονικό σημείο της διαδικασίας ανεξάρτητα από ό,τι συμβαίνει αλλού. Με άλλα λόγια, ο Salmon απαιτεί να ισχύουν οι περιορισμοί που έθεσε στην έννοια "χαρακτηριστικό μίας διαδικασίας" στην πρώιμη εκδοχή της αιτιακής θεωρίας του.

Ο Dowe θεωρεί ότι η λύση που δίνει ο Salmon είναι τουλάχιστον ασαφής. «Μου φαίνεται», γράφει ο Dowe, «ότι κάποιος θα μπορούσε εξίσου εύκολα να επιμείνει ότι η σκιά κατέχει το χωροχρονικό διάστημά της σε κάθε χωροχρονικό σημείο» (Dowe 2000:119). Η έκφραση "κατέχει το χωροχρονικό διάστημά της σε κάθε χωροχρονικό σημείο" νομίζω ότι εμπεριέχει *contradictio in terminis*. Ωστόσο, θα μπορούσε κάποιος να θεωρήσει ότι με αυτή την έκφραση ο Dowe δηλώνει ότι σε κάθε χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει την κίνηση της σκιάς μπορούμε να αποδώσουμε ένα χωροχρονικό διάστημα που είναι χαρακτηριστικό του μεγέθους της σκιάς. Σε αυτή όμως την περίπτωση η έκφραση "χαρακτηριστικό του μεγέθους της σκιάς" ερμηνεύει το αναλλοίωτο διάστημα δύο χωροχρονικών σημείων με όρους που εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς. Διότι, λόγω της σχετικότητας της ταυτοχρονίας, δύο σημεία που ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς είναι ταυτόχρονα και σηματοδοτούν το μέγεθος της σκιάς (είναι τα «πλέον απομακρυσμένα χωρικά σημεία» της σκιάς) ως προς κάποιο άλλο σύστημα αναφοράς μπορεί να μην είναι καν ταυτόχρονα, μολονότι διατηρούν αναλλοίωτη τη χωροχρονική τους απόσταση.

Όμως για τον Salmon δεν είναι αρκετή ούτε η απλή εκδήλωση της αναλλοίωτης ποσότητας σε κάθε σημείο μίας διαδικασίας για να τη χαρακτηρίσει ως αιτιακή. Σε αντίθεση με τον Dowe, δεν αναφέρεται απλώς στο είδος της αναλλοίωτης ποσότητας που εκδηλώνεται σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία, αλλά και στην τιμή αυτής. Αν ένα αντικείμενο εκδηλώνει ένα μηδενικό ποσό από μία φυσική ποσότητα, τότε δεν εκδηλώνει αυτή την φυσική ποσότητα. Με αυτόν τον τρόπο, ο Salmon θέλει να αποκλείσει περιπτώσεις που περιλαμβάνουν την εκδήλωση μηδενικών ποσών αναλλοίωτων ποσοτήτων από ψευδο-διαδικασίες. «Το σημαντικό σημείο», αναφέρει, «είναι ότι πρέπει να εμποδίσουμε τον ισχυρισμό ότι η σκιά είναι μία οντότητα που εκδηλώνει ηλεκτρικό φορτίο (του οποίου η τιμή είναι μηδέν) και παρόμοιες θέσεις» (Salmon 1998:256).

Αυτή η θέση του Salmon έχει προβλήματα τα οποία και ο ίδιος διαπιστώνει. Το πρώτο πρόβλημα αφορά στο φωτόνιο, που ενώ δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από φορτισμένα σωματίδια, στο φαινόμενο της δίδυμης γένεσης διασπάται σε ένα ζεύγος σωματιδίων, ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου, με

ίσο και αντίθετο φορτίο. Αυτό το πρόβλημα επιλύεται μόνο εάν υπάρχουν άλλες αναλλοίωτες ποσότητες, που έχουν μη μηδενική τιμή για το φωτόνιο, στη βάση των οποίων θα περιγράψουμε το φωτόνιο ως αιτιακή διαδικασία. Σύμφωνα με τον Salmon η αναλλοίωτη ποσότητα που κατέχει το φωτόνιο είναι η ταχύτητά του.

Το δεύτερο πρόβλημα που διαπιστώνει ο Salmon αφορά στην ύπαρξη *φυσικής μηδενικής τιμής* των αναλλοίωτων ποσοτήτων. Αν δεν υπάρχει φυσική μηδενική τιμή για τις φυσικές ποσότητες, τότε η αναφορά σε ορισμένο ποσό κάποιας από αυτές είναι αποτέλεσμα σύμβασης, οπότε μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ένα μη μηδενικό ποσό μίας αναλλοίωτης ποσότητας εκδηλώνεται σε μία ψευδο-διαδικασία, τροποποιώντας απλώς τη σύμβαση. Το απόλυτο μηδέν που είναι το μέγιστο κάτω φράγμα των θερμοκρασιών που μπορούν να εκδηλωθούν στη φύση υπό οποιεσδήποτε συνθήκες, αποτελεί τη φυσική μηδενική τιμή της θερμοκρασίας. Ο Salmon εικάζει, χωρίς να επιχειρηματολογεί γι' αυτό, ότι όλες οι ποσότητες που θεωρούμε διατηρήσιμες ή αναλλοίωτες έχουν φυσική μηδενική τιμή.

Όμως, ούτε η κατοχή ενός μη μηδενικού ποσού μίας αναλλοίωτης ποσότητας επαρκεί για την επεξήγηση της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας. Αν μία διαδικασία εκδηλώνει σε κάθε σημείο διαφορετικά ποσά της ίδιας αναλλοίωτης ποσότητας, τότε η διαδικασία δεν είναι αιτιακή. Ακόμα και αν μία διαδικασία εκδηλώνει σε κάθε σημείο της το ίδιο ποσό μίας αναλλοίωτης ποσότητας, αλλά αυτό συμβαίνει λόγω της ύπαρξης εξωτερικών παρεμβάσεων, η διαδικασία δεν είναι αιτιακή. Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η φωτεινή κηλίδα που κινείται σε έναν τοίχο με την ταχύτητα του φωτός κατέχει σε κάθε σημείο της τροχιάς της την ίδια αναλλοίωτη ποσότητα με το φωτόνιο. Ωστόσο, η φωτεινή κηλίδα δεν αποτελεί αιτιακή διαδικασία, όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Για να αποκλείσει τέτοιου είδους περιπτώσεις διαδικασιών από το να χαρακτηριστούν αιτιακές ο Salmon επιστρατεύει την έννοια της διάδοσης. Θα πρέπει να ικανοποιείται μία συνθήκη διάδοσης, αντίστοιχη με εκείνη που ισχύει στην περίπτωση του ίχνους, η οποία θα απαιτεί η εκδήλωση της αναλλοίωτης ποσότητα σε κάθε σημείο της διαδικασίας να πραγματοποιείται *σε απουσία αλληλεπιδράσεων* στις οποίες να ανταλλάσσεται η ποσότητα αυτή. Ο

ορισμός της έννοιας της διάδοσης μίας αναλλοίωτης ποσότητας, (ΔΑΠ), είναι ο εξής (Salmon 1998:257)[14]:

> (ΔΑΠ) Μία διαδικασία διαδίδει μία αναλλοίωτη ποσότητα από το A στο B ($A \neq B$) αν κατέχει την ποσότητα στο A και στο B και σε κάθε στάδιο της διαδικασίας από το A στο B χωρίς οποιαδήποτε αλληλεπίδραση στο ημίκλειστο διάστημα $(A,B]$ που περιλαμβάνει ανταλλαγή της συγκεκριμένης αναλλοίωτης ποσότητας.

Το διάστημα $(A,B]$ λαμβάνεται ημίκλειστο για να υπάρχει η δυνατότητα στο σημείο A να λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση που καθορίζει το ποσό της αναλλοίωτης ποσότητας που διαδίδεται κατά μήκος της διαδικασίας. Μάλιστα στο Salmon (1997) το διάστημα (A,B) λαμβάνεται ανοικτό ώστε και στα δύο άκρα της διαδικασίας να μπορεί να λάβει χώρα αλληλεπίδραση. Έτσι, στο παράδειγμα της κίνησης της φωτεινής κηλίδας δεν διαδίδεται η αναλλοίωτη ποσότητα, η αναλλοίωτη ταχύτητα του φωτός, αφού κάθε εκδήλωσή της προϋποθέτει την αλληλεπίδραση του τοίχου στον οποίο σχηματίζεται η κηλίδα με τη φωτεινή ακτίνα που τη δημιουργεί. Επομένως, η κίνηση της φωτεινής κηλίδας δεν ικανοποιεί τη συνθήκη διάδοσης που απαιτείται και δεν αποτελεί αιτιακή διαδικασία. Οι προϋποθέσεις που θέτει ο Salmon για τον ορισμό της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας, (ΑΔ), συνοψίζονται στον ακόλουθο ορισμό (Salmon 1998:257):

> (ΑΔ) Αιτιακή διαδικασία είναι η χωροχρονική γραμμή ενός αντικειμένου που διαδίδει ένα μη μηδενικό ποσό μίας αναλλοίωτης ποσότητας σε κάθε στιγμή της ιστορίας του (σε κάθε χωροχρονικό σημείο της τροχιάς του).

Ο ορισμός αυτός, επισημαίνει ο Salmon, είναι απαλλαγμένος από την αναφορά στην αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων. Ωστόσο, αυτή δεν είναι η μόνη διαφορά του από τον αντίστοιχο ορισμό που διατυπώνεται με όρους διάδοσης ίχνους. Πιστεύω ότι οι δύο έννοιες αιτιακής διαδικασίας δεν έχουν την ίδια έκταση. Υπάρχουν διαδικασίες

[14] Στο Salmon (1998) όπου αναφέρεται ο όρος «αναλλοίωτη ποσότητα» τίθεται μέσα σε παρένθεση και ο όρος «διατηρήσιμη ποσότητα». Αυτή η προσθήκη είναι ύστερη και αναφέρεται στη δεύτερη αναθεώρηση της θεωρίας του που διατυπώνεται με όρους διατηρήσιμων ποσοτήτων. Το πρωτότυπο άρθρο δημοσιεύτηκε το 1994 όταν ο Salmon εξηγούσε τις αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων, ενώ η αναδημοσίευση του στη συλλογή Salmon (1998) έπεται της δεύτερης αναθεώρησης, στην οποία ο Salmon αποδέχεται τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών και αλληεπιδράσεων στη βάση διατηρήσιμων ποσοτήτων.

που θεωρούνται αιτιακές ως προς τον πρώτο ορισμό και δεν είναι αιτιακές ως προς τον δεύτερο ορισμό. Στην πρώιμη εκδοχή της θεωρίας του, ο Salmon δέχεται ότι κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας είναι δυνατό να λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι στον ορισμό της διάδοσης του ίχνους αναφέρεται σε διαστήματα της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει την ίδια διαδικασία εκατέρωθεν του σημείου αλληλεπίδρασης. Αν δεν επρόκειτο για την ίδια διαδικασία, τότε δεν θα μπορούσαμε να ισχυριστούμε ότι η διαδικασία διαδίδει το ίχνος που προκύπτει από την αλληλεπίδραση σήμανσης. Μάλιστα, ο περιορισμός ότι με όρους διάδοσης ίχνους η θεωρία δεν μπορεί να αναφερθεί παρά μόνο σε αλληλεπιδράσεις τύπου Χ, και όχι λ ή Υ, αποτελεί συνέπεια της παραδοχής ότι υπάρχει μία αντιστοιχία ανάμεσα στις διαδικασίες πριν και μετά την αλληλεπίδραση. Αντιθέτως, ο ορισμός της αιτιακής διαδικασίας με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων συνεπάγεται ότι κατά μήκος της γραμμής που αναπαριστάνει μία αιτιακή διαδικασία δεν λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Έτσι, ενώ η κίνηση της σφαίρας του μπιλιάρδου πριν και μετά την κρούση της με την άλλη σφαίρα μπορεί να θεωρηθεί (σύμφωνα με την πρώιμη εκδοχή της θεωρίας) ως μία διαδικασία, στην περίπτωση της θεωρίας που βασίζεται σε αναλλοίωτες ποσότητες η κίνηση της ίδιας σφαίρας, πριν και μετά την κρούση, περιγράφεται από δύο διαδικασίες. Η έλλειψη ταυτότητας ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες πριν και μετά από μία αλληλεπίδραση μας επιτρέπει να περιγράψουμε αλληλεπιδράσεις τύπου λ και Υ, όπως η απορρόφηση ενός ηλεκτρονίου από ένα άτομο ή η δίδυμη γένεση.

Ας ολοκληρώσουμε αυτή την ενότητα με τη διατύπωση του ορισμού της αιτιακής αλληλεπίδρασης, (ΑΑ), στο πλαίσιο της νέας θεωρίας του Salmon.

(ΑΑ) Αιτιακή αλληλεπίδραση είναι η τομή των κοσμικών γραμμών που περιλαμβάνει ανταλλαγή μίας αναλλοίωτης ποσότητας.

Ο ορισμός αυτός δεν παρουσιάστηκε από τον ίδιο τον Salmon στην εργασία του 1994 αλλά από τον Dowe στην ανασυγκρότηση της αναθεωρημένης θεωρίας του Salmon στην εργασία του 1995. Με εξαίρεση την αντικατάσταση της έννοιας "διατηρήσιμη ποσότητα" από την έννοια "αναλλοίωτη ποσότητα" ο ορισμός δεν διαφέρει από τον ορισμό που προτείνει ο Dowe για τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Όμως, ο Salmon με αυτό τον ορισμό, που είναι επίσης απαλλαγμένος από το πρόβλημα των

αντιγεγονικών προτάσεων, συμπεριλαμβάνει στην κατηγορία των αιτιακών αλληλεπιδράσεων τις αλληλεπιδράσεις τύπου λ και Υ, σύμφωνα με τον αρχικό του στόχο.

4.3 Διατηρήσιμες ποσότητες: η τελική θεωρία του Salmon

Η θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων δεν είναι η καταληκτική πρόταση του Salmon. Μάλλον θα πρέπει να τη θεωρήσουμε ως ένα ενδιάμεσο σταθμό στην πορεία προς την υιοθέτηση της τελικής εκδοχής της θεωρίας του στην οποία οι αιτιακές έννοιες επεξηγούνται με όρους διατηρήσιμων ποσοτήτων. Η συνέχεια ανάμεσα στην τελική εκδοχή και στην θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων φαίνεται τόσο από το γεγονός ότι οι ορισμοί των αιτιακών εννοιών στην πρώτη προκύπτουν με ελάχιστες τροποποιήσεις των ορισμών που παρουσιάσαμε στην προηγούμενη ενότητα, όσο και από το γεγονός ότι η κριτική που έχει ασκηθεί στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Salmon ισχύει, εν πολλοίς, και για τη θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων. Άλλωστε, όπως ήδη αναφέραμε, υπάρχουν αναλλοίωτες ποσότητες που είναι και διατηρήσιμες. Όμως, ας δούμε, καταρχάς, για ποιο λόγο ο Salmon εγκαταλείπει την απαίτηση για αντικειμενικότητα στην περιγραφή των αιτιακών συνδέσεων, όπως αυτή εκφράζεται μέσω του ορισμού των αιτιακών εννοιών με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων, για να αποδεχθεί την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών με διατηρήσιμες ποσότητες.

Ο Hitchcock σε μία εργασία του, στην οποία θα αναφερθούμε εκτενώς στην επόμενη ενότητα, ασκώντας κριτική στην αιτιακή θεωρία του Salmon, ισχυρίζεται:

> Στη νέα μηχανική φιλοσοφία [αυτή του Salmon], όπως και στην παλιά, το εξηγητικό απόθεμα δεν περιέχει τίποτα άλλο εκτός από γεωμετρικές ιδιότητες. (Hitchcock 1995)

Ο Hitchcock όταν αναφέρεται στην παλιά μηχανική φιλοσοφία εννοεί τη φιλοσοφία του 17^{ου} αιώνα. Μολονότι ο Salmon διαφωνεί με την ιστορική εκτίμηση του Hitchcock, αποδέχεται την κριτική του όσον αφορά στη δική του θεωρία:

> Στο Salmon 1984 χρησιμοποίησα το κριτήριο της διάδοσης του ίχνους για τη διάκριση των αιτιακών διαδικασιών από τις ψευδο-διαδικασίες … Το αποτέλεσμα ήταν μία γεωμετρική δομή. Δεν υπάρχει τίποτα κακό με αυτού του είδους τη γεωμετρική προσέγγιση εφόσον

> αναγνωρίζονται τα όρια της … Η "at-at" θεωρία της αιτιακής διάδοσης … δεν αποκαλύπτει τίποτα για τα μηνύματα που στέλνονται … Στο Salmon 1994 υιοθέτησα μία εκδοχή της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Phil Dowe, στην οποία διστακτικά επέλεξα τις αναλλοίωτες ποσότητες, αλλά το αποτέλεσμα, όπως και πριν, ήταν ένα γεωμετρικό δίκτυο. Απλώς δόθηκαν διαφορετικά κριτήρια για τον ορισμό των χαρακτηριστικών των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων … η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων έχει ένα επιπλέον πλεονέκτημα: μας λέει κάτι σημαντικό για το τι διαδίδεται από τις αιτιακές διαδικασίες και για το τι τροποποιείται στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις, συγκεκριμένα, οι διατηρήσιμες ποσότητες. (Salmon1997)

Εδώ ο Salmon τοποθετεί τόσο την αιτιακή θεωρία του ίχνους όσο και τη θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων στον κοινό παρονομαστή των γεωμετρικών προσεγγίσεων. Πέραν από τις γεωμετρικές αναπαραστάσεις των αιτιακών διαδικασιών από χωροχρονικές γραμμές και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων από χωροχρονικά σημεία, για να ορίσουμε την έννοια της διαδικασίας αναφερθήκαμε αρχικά στην έννοια του χαρακτηριστικού που ορίζεται με βάση την έννοια της αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης, ενώ στη θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων απαιτήσαμε τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας να είναι αναλλοίωτα. Ωστόσο, και στις δύο περιπτώσεις οι περιορισμοί που τίθενται είναι εξ ολοκλήρου γεωμετρικοί. Στην πρώτη περίπτωση, η εκδήλωση ενός χαρακτηριστικού διαπιστώνεται τοπικά, από έναν ανιχνευτή σε ένα χωροχρονικό σημείο. Στη δεύτερη περίπτωση απαιτούμε, επιπλέον, αυτό που διαπιστώνεται από τον ανιχνευτή να είναι ανεξάρτητο από το σύστημα αναφοράς στο οποίο γίνεται η ανίχνευση. Από την άλλη, οι διατηρήσιμες ποσότητες αφορούν στη δυναμική ενός φυσικού συστήματος. Μας λένε ποια είναι εκείνα τα χαρακτηριστικά του φυσικού συστήματος που παραμένουν χρονικά σταθερά σε απουσία αλληλεπιδράσεων καθώς και ποιες είναι οι δυνατές αλληλεπιδράσεις ενός φυσικού συστήματος με άλλα φυσικά συστήματα ώστε να ισχύει ο νόμος διατήρησης για το ολικό σύστημα. Έτσι, η θεμελίωση της αιτιότητας στις διατηρήσιμες ποσότητες μας λέει κάτι παραπάνω από τις γεωμετρικές συνδέσεις των αιτιακώς σχετιζόμενων συμβάντων: μας λέει ποια χαρακτηριστικά τροποποιούνται στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις και ποια χαρακτηριστικά εκφράζουν τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης.

Σε αυτή τη θέση του Salmon μπορούν να εγερθούν δύο αντιρρήσεις. Η πρώτη αφορά στη διάκριση ανάμεσα στα γεωμετρικά και στα δυναμικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος. Προφανώς ο Salmon δεν λαμβάνει υπόψη του το γεγονός ότι η γεωμετρία του χωροχρόνου περιγράφεται από τη δυναμική του βαρυτικού πεδίου στη

γενική θεωρία της σχετικότητας. Μολονότι, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, χαρακτηρίζει ως αιτιακή διαδικασία την κίνηση ενός ελεύθερου σωματιδίου κατά μήκος μίας γεωδαισιακής σε καμπυλωμένο χωρόχρονο, στη θεώρησή του προϋποθέτει πάντα την ύπαρξη ενός χωρόχρονου υποβάθρου, μίας αρένας με συγκεκριμένη γεωμετρία, στην οποία διαδίδεται μέσω αιτιακών διαδικασιών η αιτιακή επίδραση που παράγεται από τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ωστόσο, η εικόνα του κόσμου με τη γενική θεωρία της σχετικότητας είναι διαφορετική. «Η γεωμετρία του χώρου και του χρόνου αλλάζει και εξελίσσεται, όπως καθετί άλλο στη φύση», αναφέρει ο Smolin, και συνεχίζει:

> Δεν έχουμε πλέον πεδία που κινούνται σε μία σταθερή γεωμετρία υποβάθρου. Έχουμε μία δέσμη πεδίων που όλα αλληλεπιδρούν το ένα με το άλλο, είναι όλα δυναμικά, όλα επηρεάζουν το ένα το άλλο, και ένα από αυτά είναι η γεωμετρία του χωροχρόνου. Μία τέτοια θεωρία την καλούμε *θεωρία ανεξάρτητη από το υπόβαθρο*. (Smolin 2006:44)

Αυτό σημαίνει ότι η διάκριση ανάμεσα στα γεωμετρικά και στα δυναμικά χαρακτηριστικά στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας που είναι ανεξάρτητη από το υπόβαθρο, όπως είναι η γενική θεωρία της σχετικότητας, δεν έχει και τόση σημασία, διότι το γεωμετρικό δίκτυο των αιτιακών σχέσεων που περιγράφει την αιτιακή δομή του κόσμου προκύπτει από τη δυναμική κάποιου πεδίου. Βεβαίως, θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι η αντίρρηση που εκφράσαμε δεν συνιστά μία συγκεκριμένη αδυναμία του επιχειρήματος του Salmon για τη μετάβαση από τη θεωρία των αναλλοίωτων ποσοτήτων στις διατηρήσιμες ποσότητες, αλλά γενικώς το όριο των αιτιακών θεωριών τόσο του Salmon όσο και του Dowe. Οι θεωρίες αυτές *έχουν ως προϋπόθεση την (τουλάχιστον προσεγγιστική) περιγραφή του κόσμου από φυσικές θεωρίες που εξαρτώνται από το υπόβαθρο.*

Η δεύτερη αντίρρηση έχει να κάνει με την πλήρη εγκατάλειψη της απαίτησης του αναλλοίωτου. Όπως παρατηρεί ο Dowe, θα μπορούσαμε να απαιτήσουμε οι διατηρήσιμες ποσότητες που χαρακτηρίζουν τις αιτιακές διαδικασίες και τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις να είναι και αναλλοίωτες. Γιατί ο Salmon δεν κάνει αυτή την επιλογή στην τελική θεωρία που διατυπώνει; Για ποιο λόγο θυσιάζει πλήρως το αίτημα για αντικειμενική περιγραφή της αιτιότητας; Σε αυτά τα ερωτήματα δεν υπάρχει κάποια γενική απάντηση. Ωστόσο, η απαίτηση οι αιτιακές να επεξηγούνται από αναλλοίωτες, διατηρήσιμες ποσότητες είναι προβληματική στην περίπτωση του φωτονίου. Λόγω της μηδενικής μάζας και του μηδενικού φορτίου του φωτονίου δεν φαίνεται να υπάρχει κάποια αναλλοίωτη διατηρήσιμη ποσότητα ώστε να

χαρακτηρίσουμε το φωτόνιο ως αιτιακή διαδικασία. Δεν νομίζω ότι ήταν τυχαίος ο προβληματισμός του Salmon που τον οδήγησε στη θεώρηση της ταχύτητας του φωτός ως την αναλλοίωτη ποσότητα με βάση την οποία μπορούμε να χαρακτηρίσουμε το φωτόνιο ως αιτιακή διαδικασία στο πλαίσιο της θεωρίας των αναλλοίωτων ποσοτήτων. Όμως η ταχύτητα δεν είναι διατηρήσιμη ποσότητα.

Οι ορισμοί των αιτιακών εννοιών με όρους διατηρήσιμων ποσοτήτων που προτείνει ο Salmon είναι οι εξής:

(ΔΔΠ) Μία διαδικασία διαδίδει μία διατηρήσιμη ποσότητα από το A στο B ($A \neq B$) αν και μόνο αν κατέχει [ένα καθορισμένο ποσό από] την ποσότητα στο A και στο B και σε κάθε στάδιο της διαδικασίας ανάμεσα στο A και στο B χωρίς οποιαδήποτε αλληλεπίδραση στο ανοικτό διάστημα (A,B) που περιλαμβάνει ανταλλαγή της συγκεκριμένης αναλλοίωτης ποσότητας.

(ΑΔ) Αιτιακή διαδικασία είναι η χωροχρονική γραμμή ενός αντικειμένου που διαδίδει ένα μη μηδενικό ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας σε κάθε στιγμή της ιστορίας του (σε κάθε χωροχρονικό σημείο της τροχιάς του).

(ΑΑ) Αιτιακή αλληλεπίδραση είναι η τομή των κοσμικών γραμμών που περιλαμβάνει ανταλλαγή μίας διατηρήσιμης ποσότητας.

Πέραν από την αντικατάσταση της έννοιας της αναλλοίωτης ποσότητας από την έννοια της διατηρήσιμης ποσότητας, καθώς και την αντικατάσταση του ημίκλειστου διαστήματος $(A,B]$ από το ανοικτό διάστημα (A,B) (την οποία έχουμε ήδη σχολιάσει), οι πιο σημαντικές αλλαγές σε αυτούς τους ορισμούς αφορά στη διατύπωση μίας ικανής και αναγκαίας συνθήκης στον ορισμό της διάδοσης της διατηρήσιμης ποσότητας (ΔΔΠ) στη θέση της ικανής συνθήκης που αναφέρεται στον ορισμό της διάδοσης μίας αναλλοίωτης ποσότητας (ΔΑΠ) καθώς και στην αλλαγή της έκφρασης «από το A στο B» που διατυπώνεται στο (ΔΑΠ) με την έκφραση «ανάμεσα στο Α και στο Β». Συγκεκριμένα, αν ο ορισμός της διάδοσης μίας διατηρήσιμης (ή αναλλοίωτης) ποσότητας διατυπωθεί ως ικανή συνθήκη, τότε δεν θα μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ικανή συνθήκη για να είναι μία διαδικασία, ψευδο-διαδικασία είναι

να μην ικανοποιεί τις προϋποθέσεις της διάδοσης, σύμφωνα με τον ορισμό (ΔΔΠ) (Dowe 1992 και 2000:115).

Η δεύτερη αλλαγή στον ορισμό της διάδοσης προκύπτει από την επισήμανση ότι ο ορισμός καθορίζει την κατεύθυνση της αιτιακής σχέσης με βάση την κατεύθυνση της διάδοσης, «από το *A* στο *B*». Μάλιστα, υπό προϋποθέσεις, αυτή η δέσμευση μπορεί να οδηγήσει και σε δέσμευση ως προς τη χρονική κατεύθυνση της αιτιακής σχέσης. Ο Salmon, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, δεν θέλει να δεσμευθεί με βάση τη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων, ούτε σε ορισμένη κατεύθυνση των αιτιακών σχέσεων, ούτε και σε ορισμένη κατεύθυνση του χρόνου. Γι' αυτό προτείνει την τροποποίηση που αναφέραμε στη (ΔΔΠ) σε σχέση με τη (ΔΑΠ), σε συμφωνία με την επισήμανση του Dowe.

Οι διατηρήσιμες και οι αναλλοίωτες ποσότητες που προϋποτίθενται για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών προσδιορίζονται από τις φυσικές θεωρίες. Ωστόσο, ο Salmon δεν θέλει να δεχτεί τη θέση του Dowe ότι «διατηρήσιμη ποσότητα *είναι* κάθε ποσότητα που διατηρείται καθολικά (universally) σύμφωνα με τις τρέχουσες επιστημονικές θεωρίες» [πλάγια γραφή, δική μου] (Dowe 1992:210). Το πρόβλημα του Salmon αφορά στη ρεαλιστική χροιά που έχει η παραπάνω πρόταση με τη χρήση της λέξης "είναι". Ο Salmon αναφέρει το παράδειγμα της ομοτιμίας (parity) που μολονότι μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του '50 θεωρούνταν διατηρήσιμη ποσότητα, το 1956 ανακαλύφθηκε ότι παραβιάζεται στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις και έκτοτε έχει πάψει να θεωρείται διατηρήσιμη ποσότητα. Έτσι, διερωτάται αν η ομοτιμία *ήταν* διατηρήσιμη ποσότητα μέχρι το 1956, και σήμερα, έχει πάψει πλέον να *είναι* διατηρήσιμη ποσότητα, σύμφωνα με τις τρέχουσες φυσικές θεωρίες. Αυτό που προτείνει είναι να μην υιοθετήσουμε μία ρεαλιστική ερμηνεία των φυσικών θεωριών, στην προσπάθειά μας να προσδιορίσουμε τις διατηρήσιμες ποσότητες που είναι απαραίτητες για τη θεμελίωση της αιτιακής θεωρίας: «Αυτό που θα πρέπει να πούμε είναι ότι κοιτάμε τις τρέχουσες, αποδεκτές επιστημονικές θεωρίες, για να μας πουν ποιες ποσότητες μπορούμε ευλόγως να θεωρήσουμε ως διατηρήσιμες …. Οι τρέχουσες επιστημονικές θεωρίες μας λένε ποιες ποσότητες να σκεφτόμαστε ως διατηρήσιμες, το αν αυτές είναι διατηρήσιμες είναι άλλο ζήτημα» (Salmon 1998:258).

Η στάση του Salmon εμφορείται από μία αρχή οικονομίας: να θεμελιωθεί η αιτιότητα στον κόσμο μας με βάση τις λιγότερες δυνατές μεταφυσικές και επιστημολογικές προϋποθέσεις και σε συμφωνία με δεδομένα της εμπειρίας όπως αυτά περιγράφονται με βάση τις καλύτερες επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε. Δεν θέλει να δεσμευθεί στη ρεαλιστική ερμηνεία των επιστημονικών θεωριών για να θεμελιώσει την αιτιότητα, ούτε, καταρχάς, να επιλύσει προβλήματα που άπτονται του επιστημονικού ρεαλισμού. Η άρνηση του Salmon να δεσμευθεί στη ρεαλιστική ερμηνεία των φυσικών θεωριών για τη θεμελίωση της αιτιότητας δεν έχει να κάνει με το αν πιστεύει ή όχι στο ρεαλισμό. Ο ίδιος είναι ρεαλιστής· ωστόσο, υποστηρίζει ότι η ρεαλιστική θέση θα πρέπει να δικαιολογηθεί με βάση την αιτιότητα και όχι το αντίστροφο[15].

Μία φυσική θεωρία, σύμφωνα με τη σημασιολογική προσέγγιση, είναι ένα σύνολο μοντέλων που αναπαριστάνουν φυσικώς δυνατούς κόσμους στους οποίους όλες οι προτάσεις της θεωρίας *T* είναι αληθείς και ένα σύνολο εμπειρικών υποθέσεων που ισχυρίζονται ότι κάποια από αυτά τα μοντέλα αναπαριστάνουν (κατά προσέγγιση) μέρη του πραγματικού κόσμου. Τα μοντέλα διακρίνονται σε εκείνα που περιγράφουν καταστάσεις πραγμάτων στον κόσμο μας και σε εκείνα που δεν περιγράφουν καταστάσεις πραγμάτων στον κόσμο μας. Για να το θέσουμε και σε αντιρεαλιστικό πλαίσιο, υπάρχουν μοντέλα των φυσικών θεωριών στα οποία μπορούμε να εμφυτεύσουμε, ως εμπειρική υπο-δομή, μία δομή που αναπαριστάνει τα παρατηρήσιμα φαινόμενα αλλά και μοντέλα των φυσικών θεωριών στα οποία δεν μπορούμε να κάνουμε κάτι τέτοιο (van Fraassen, 1980:100). Προφανώς, η διάκριση αυτή για τα μοντέλα μίας θεωρίας δεν είναι στατική. Νέα εμπειρικά δεδομένα, μπορούν να μεταβάλλουν το status ενός μοντέλου μίας φυσικής θεωρίας, που μέχρι σήμερα θεωρούμε ότι δεν περιγράφει τον κόσμο μας, αλλά απλώς κάποιο δυνατό

[15] Το βασικό του επιχείρημα υπέρ του ρεαλισμού ως προς τις θεωρητικές οντότητες προκύπτει από την επαγωγική γενίκευση των αιτιακών συλλογισμών που διατυπώνονται στη βάση δίκρανων σύζευξης για παρατηρήσιμες οντότητες (2005:31). Σε αδρές γραμμές, ο Salmon υποστηρίζει ότι λόγω της επιτυχίας της εξήγησης μίας μη αναμενόμενης στατιστικής συσχέτισης με βάση την ύπαρξη κοινού αιτίου, μπορούμε να γενικεύσουμε επαγωγικά τη μέθοδο και σε μη παρατηρήσιμες οντότητες. Έτσι, η συμφωνία ως προς τα αποτελέσματα πολλών διαφορετικών πειραματικών μεθόδων για τον προσδιορισμό του αριθμού του Avogadro συνιστά μία μη αναμενόμενη σύμπτωση που εξηγείται από την ύπαρξη κοινού αιτίου: των ατόμων, που είναι οι βασικές θεωρητικές οντότητες της ατομικής θεωρίας της ύλης. Στη βάση αυτού του επιχειρήματος, τα άτομα υπάρχουν. Στην εργασία αυτή δεν θα ασχοληθούμε με την προσέγγιση του Salmon στο ζήτημα του επιστημονικού ρεαλισμού. Ωστόσο, παραπέμπουμε τον ενδιαφερόμενο στο πρώτο μέρος της συλλογής άρθρων του Salmon (2005), που αναφέρεται στη θέση του για το ζήτημα του επιστημονικού ρεαλισμού.

κόσμο. Επιπλέον, η διάκριση αυτή δεν απαιτεί να υιοθετήσουμε κάποια θέση υπέρ του ρεαλισμού πέραν της δέσμευσης στην κυριολεκτική ερμηνεία της γλώσσας των επιστημονικών θεωριών (σημασιολογική θέση)[16]. Η θέση αυτή εμπεριέχεται στη θεώρηση ότι τα μοντέλα μίας φυσικής θεωρίας αποτελούν αληθείς περιγραφές δυνατών κόσμων της θεωρίας.

Αυτό που μας ενδιαφέρει για τη θεμελίωση της αιτιακής θεωρίας είναι αν σε εκείνα τα μοντέλα που θεωρούμε ότι περιγράφουν υπαρκτές καταστάσεις πραγμάτων, ικανοποιούνται οι φυσικές προϋποθέσεις της αιτιακής θεωρίας. Συγκεκριμένα, υπάρχουν διατηρήσιμες ποσότητες σε όλα τα μοντέλα μίας φυσικής θεωρίας που θεωρούμε ότι περιγράφουν καταστάσεις πραγμάτων και ποιες είναι αυτές οι ποσότητες; Για να το θέσουμε διαφορετικά, η πρόταση "η ποσότητα *Q* είναι διατηρήσιμη ποσότητα" είναι αληθής σε όλα τα μοντέλα μίας θεωρία *T* που μέχρι σήμερα θεωρούμε ότι περιγράφουν τον κόσμο; Αν η απάντηση σε αυτό το ερώτημα είναι καταφατική τότε μπορούμε να χαρακτηρίσουμε μία διαδικασία ως αιτιακή με βάση την *Q* καθώς και να περιγράψουμε αιτιακές αλληλεπιδράσεις που ανταλλάσουν ένα ποσό από την *Q*. Ωστόσο, η αλήθεια της πρότασης "η ποσότητα *Q* είναι διατηρήσιμη ποσότητα" ως προς τα μοντέλα της θεωρίας *T*, ακόμα και αν αυτά περιγράφουν υπαρκτές καταστάσεις πραγμάτων, δεν μας λέει κάτι για το πώς είναι ο κόσμος μας *στην πραγματικότητα*, ούτε αν η πρόταση αυτή είναι αληθής σε σχέση με τον *πραγματικό* κόσμο. Απλώς, καθιστά εύλογη την πεποίθησή μας ότι η ποσότητα *Q* είναι διατηρήσιμη. Το αν πράγματι η *Q* είναι διατηρήσιμη, όπως μας λέει ο Salmon, είναι ένα άλλο ζήτημα.

Ένα άλλο σημείο διαφωνίας του Salmon με τον Dowe σε σχέση με τις διατηρήσιμες ποσότητες έχει να κάνει με τη θέση του τελευταίου ότι διατηρήσιμες ποσότητες είναι οι ποσότητες που διέπονται από ένα νόμο διατήρησης (Dowe 2000:91). Το ζήτημα που αφορά στις προϋποθέσεις για να είναι μία πρόταση

[16] Ο Ψύλλος (Psillos 1999:xviii και 2008:37) διακρίνει τρεις θέσεις που υπερασπίζεται ο επιστημονικός ρεαλιστής: α) τη μεταφυσική θέση ότι ο κόσμος έχει μία ορισμένη δομή ανεξάρτητη από τη νόηση, β) τη σημασιολογική θέση ότι οι επιστημονικές θεωρίες πρέπει να κατανοούνται κυριολεκτικά και γ) τη γνωσιακή θέση ότι οι ώριμες και επιτυχημένες στις προβλέψεις τους θεωρίες είναι καλά επικυρωμένες και προσεγγιστικώς αληθείς για τον κόσμο μας. Κατά τη σημασιολογική θέση οι επιστημονικές θεωρίες είναι περιγραφές ενός καθορισμένου γνωστικού πεδίου, τόσο παρατηρήσιμου όσο και μη παρατηρήσιμου, και επιδέχονται αληθοτιμές. Οι θεωρητικοί όροι που εμφανίζονται στις θεωρίες έχουν δυνητική αναφορά. Αν συνεπώς οι επιστημονικές θεωρίες είναι αληθείς, τότε οι μη παρατηρήσιμες οντότητες τις οποίες θέτουν, ή παρεμφερείς οντότητες, βρίσκονται στον κόσμο μας.

επιστημονικός νόμος ή στο ποιες γενικεύσεις είναι νομοειδείς (δηλαδή, εκφράζουν φυσικούς νόμους εφόσον είναι αληθείς), είναι το αντικείμενο ενός μεγάλου κεφαλαίου στη φιλοσοφία της επιστήμης. Ο Salmon δεν θέλει, και δεν θεωρεί ότι είναι αναγκαίο, να εμπλακεί σε όλη αυτή τη συζήτηση μέσω της αιτιότητας και να δεσμεύσει την αιτιακή θεωρία σε κάποια από τις προσεγγίσεις για την έννοια του επιστημονικού νόμου. «Αν ακολουθούσαμε αυτή την πορεία», αναφέρει ο Salmon, «θα απελευθερωνόμασταν από την κατάρα των αντιγεγονικών προτάσεων μόνο με το κόστος να επωμιστούμε το πρόβλημα των νόμων» (Salmon 1998:258). Μάλιστα, αν σκεφτούμε ότι ένα από τα κριτήρια που προτείνονται για να είναι μία πρόταση νομοειδής είναι να υποστηρίζει αντιγεγονικές προτάσεις, καταλαβαίνουμε ότι η ανταλλαγή του προβλήματος της εξάρτησης της αιτιακής θεωρίας από αντιγεγονικές προτάσεις με το πρόβλημα των νόμων, κάθε άλλο παρά συμφέρουσα είναι. Το μοναδικό προαπαιτούμενο της θεωρίας του Salmon είναι να υπάρχει μία αληθής γενίκευση που να μας λέει ότι μία ποσότητα *Q* είναι διατηρήσιμη: «Αν η δήλωση για το φορτίο του ηλεκτρονίου είναι αληθής, τότε υπάρχει μία αληθής γενίκευση για το φορτίο του ηλεκτρονίου. Ωστόσο, *δεν έχει καμιά διαφορά αν αυτή η αληθής γενίκευση είναι ή δεν είναι νομολογική* [lawful]*. μόνο η αλήθεια της διακυβεύεται*. Το πρόβλημα των νόμων … δεν είμαστε υποχρεωμένοι να αντιμετωπίσουμε» (Salmon 1998: 259).

Πέραν από τα ζητήματα που αφορούν στην ύπαρξη των διατηρήσιμων ποσοτήτων, ο Salmon διαφωνεί με τον Dowe και σε σχέση με την προϋπόθεση της ύπαρξης ενός αντικειμένου σε κάθε διαδικασία. Για τον Salmon, κάτι που εκδηλώνει συνοχή χαρακτηριστικών και μπορεί να αναπαρασταθεί γεωμετρικά από μία χωροχρονική γραμμή είναι διαδικασία (Salmon 1998:250). Αυτό το "κάτι" είναι το αντικείμενο στο οποίο διαπιστώνονται τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνουν συνοχή - είναι μία τετραδιάστατη οντότητα στην οποία δεν αποδίδεται καμιά έννοια διαχρονικής ταυτότητας. Έτσι, ο Salmon δεν διακρίνει ανάμεσα στα αντικείμενα και στα προϊόντα συγκερασμού και αντιστοίχως, ούτε ανάμεσα σε χωροχρονικές γραμμές που αναπαριστάνουν αντικείμενα και σε χωροχρονικές γραμμές που αναπαριστάνουν χωροχρονικά σκουπίδια. Στην περίπτωση των αιτιακών διαδικασιών το αντικείμενο, με αυτή τη "χαλαρή" έννοια, διαδίδει ένα ορισμένο ποσό από μία διατηρήσιμη ποσότητα, ενώ στις ψευδο-διαδικασίες δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε τη διάδοση διατηρήσιμων ποσοτήτων. Στο πλαίσιο της θεωρίας του Dowe, η έννοια της διάδοσης μίας διατηρήσιμης ποσότητας είναι περιττή για τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας.

Αρκεί η κατοχή μίας διατηρήσιμης ποσότητας, μαζί με τη διαχρονική ταυτότητα του αντικειμένου, για να διαπιστώσουμε ότι μία διαδικασία είναι αιτιακή. Ο Salmon δεν δέχεται την αλλαγή του κριτηρίου της διάδοσης με το κριτήριο της κατοχής μίας διατηρήσιμης ποσότητας από ένα αντικείμενο που εκδηλώνει διαχρονική ταυτότητα: «Προσέφερα μία έννοια αιτιακής διάδοσης που αναλύεται με τους όρους της "at-at" θεωρίας, την οποία ο Dowe ανταλλάσει με μία μη αναλυμένη έννοια γενεαλογικής ταυτότητας (genidentity). Δεν νομίζω ότι αυτή είναι συμφέρουσα ανταλλαγή» (Salmon 1997). Γιατί όμως ο Salmon δεν δέχεται μία μη αναλυμένη έννοια ως πρωταρχικό όρο της θεωρίας του; Την απάντηση τη δίνει ο ίδιος λίγες γραμμές παρακάτω όταν αναφέρει ότι ο ορισμός της διάδοσης μαζί με τους ορισμούς των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων «προσφέρουν ένα κριτήριο που είναι αμέμπτως εμπειρικό και έτσι παρέχει μία αποδεκτή απάντηση στο θεμελιώδες πρόβλημα που έθεσε ο Hume για την αιτιότητα» (Salmon 1997). Με άλλα λόγια, ο Salmon αρνείται να ανταλλάξει την έννοια της διάδοσης μίας διατηρήσιμης ποσότητας με ένα κριτήριο που περιλαμβάνει εμπειρικώς μη διαπιστώσιμα στοιχεία στην αιτιακή θεωρία, υπό τη μορφή πρωταρχικών, μη αναλύσιμων όρων.

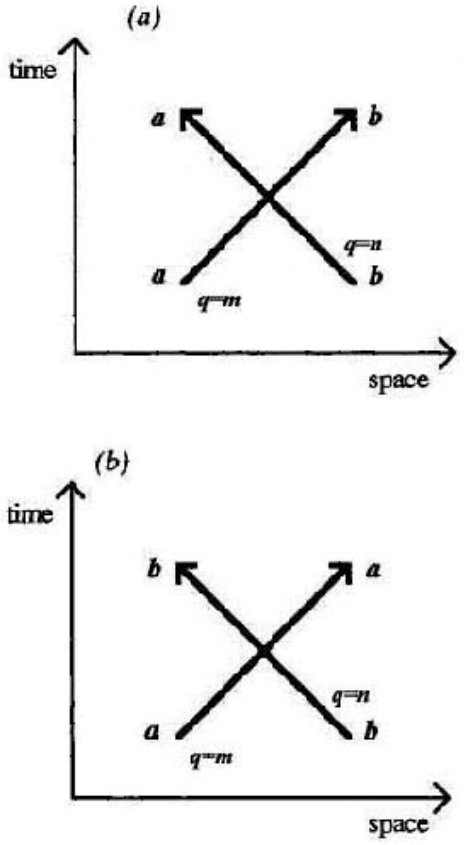
Όμως, όπως αναφέραμε στην πρώτη ενότητα του κεφαλαίου, ο Dowe δεν αρνείται την αναλυσιμότητα της διαχρονικής ταυτότητας. Απλώς, αυτό που δηλώνει είναι ότι δεν θέλει να δεσμευθεί σε μία θεωρία της ταυτότητας, διότι οι υπάρχουσες θεωρίες δεν τον ικανοποιούν. Γι' αυτό θεωρεί ως ανοικτό φιλοσοφικό ζήτημα, το ζήτημα της ταυτότητας ενός αντικειμένου (Dowe 2000:107). Ωστόσο, η αναλυσιμότητα της έννοιας της ταυτότητας δεν είναι από μόνη της αρκετή. Ο Salmon δεν θα δέχονταν, για παράδειγμα, την αυστηρή ταυτότητα, που θεωρεί τη διαχρονική ταυτότητα ενός αντικειμένου ως λογική σύνδεση των πλήρων εκφάνσεων ενός αντικειμένου σε διαφορετικές χρονικές στιγμές, ως ικανοποιητική βάση για την ανάλυση της αιτιότητας, σε συμφωνία με τη χιουμιανή προσέγγιση. Η σύλληψη της διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου με βάση τις λογικές συνδέσεις είναι προεμπειρική και άρα εμπειρικώς μη διαπιστώσιμη. Έτσι, η απαίτηση του Salmon για ένα κριτήριο που δεν θα περιλαμβάνει εμπειρικώς μη διαπιστώσιμα στοιχεία επεκτείνεται και στην ανάλυση της έννοιας της διαχρονικής ταυτότητας. Ο Dowe δεν αρνείται αυτή τη θέση· όμως, δεν δέχεται να δεσμευθεί σε μία χιουμιανή προσέγγιση της αιτιότητας: «Ανοικτό ζήτημα είναι το εάν η έννοια της διαχρονικής ταυτότητας, η οποία είναι πρωταρχική για την παρούσα θεωρία, μπορεί να χαρακτηριστεί κατά

χιουμιανό τρόπο με όρους ενικών γεγονότων της πραγματικότητας (matters of fact). Αν η ταυτότητα κατανοείται κατά χιουμιανό τρόπο, τότε η αιτιότητα είναι χιουμιανή. Αν η ταυτότητα κατανοείται κατά μη χιουμιανό τρόπο, τότε η αιτιότητα είναι μη χιουμιανή»(Dowe 2000:109).

Ο Dowe, απαντώντας στην κριτική του Salmon για τη θεώρηση της ταυτότητας ως πρωταρχικής έννοιας, παραθέτει το ακόλουθο επιχείρημα: αν η έννοια της αιτιακής διαδικασίας του Salmon δεν μπορεί να επεξηγηθεί χωρίς την έννοια της ταυτότητας, τότε και αυτή είναι μία πρωταρχική έννοια. Επομένως, ούτε η θεωρία του Salmon ξεφεύγει από την επίκληση πρωταρχικών εννοιών (Dowe 2000:108). Πρόκειται για ένα ad hominem επιχείρημα που επιχειρεί να αποτρέψει τη μετατροπή της κριτικής του Salmon στην προσέγγιση του Dowe σε επιχείρημα υπέρ της θεωρίας του, επισημαίνοντας ότι και η θεωρία του Salmon είναι ευάλωτη στην ίδια κριτική σε σχέση με την έννοια της αιτιακής διαδικασίας.

Για να δικαιολογήσει την προκείμενη του επιχειρήματός του ο Dowe αναφέρεται σε ένα παράδειγμα τομής δύο αιτιακών διαδικασιών στο οποίο δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε αν λαμβάνει χώρα ή όχι αιτιακή αλληλεπίδραση παρά μόνο με την προϋπόθεση της ταυτότητας των αντικειμένων πριν και μετά από το σημείο τομής. Ο Dowe (2000:120-1) υποθέτει δύο αντικείμενα που είναι πανομοιότυπα, εκτός από το γεγονός ότι το ένα κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα $q = n$ ενώ το άλλο έχει $q = m$ (βλ. Σχήμα 4.1). Υποθέτουμε ότι καθένα από αυτά διέρχεται κατευθείαν μέσα από το άλλο έτσι ώστε οι γραμμές τους να τέμνονται. Μετά την τομή δεν παρατηρείται κατά μήκος της ίδιας ευθείας καμιά αλλαγή στις ιδιότητες. Λαμβάνει χώρα στο σημείο τομής αιτιακή αλληλεπίδραση; Ο Dowe υποστηρίζει ότι η προσέγγιση της αιτιακής διαδικασίας του Salmon αποτυγχάνει να αποφασίσει μονοσήμαντα. Ενδέχεται το αντικείμενο a ($q = m$) και το αντικείμενο b ($q = n$) να περνούν το ένα μέσα από το άλλο αμετάβλητα, δηλαδή να μην υπάρχει αιτιακή αλληλεπίδραση. Όμως, ενδέχεται να υπάρχει αιτιακή αλληλεπίδραση στην οποία στο αντικείμενο a ($q = m$) αλλάζει η διεύθυνση κίνησης και το ποσό της q που κατέχει (σε $q = n$), και, ομοίως, στο αντικείμενο b ($q = n$) αλλάζει η διεύθυνση κίνησης και το ποσό της q που κατέχει (σε $q = m$). Επειδή στη δεύτερη περίπτωση έχουμε ανταλλαγή διατηρήσιμης ποσότητας, θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα αιτιακή

αλληλεπίδραση. Η άρση της αμφισημίας επιτυγχάνεται από την έννοια της διαχρονικής ταυτότητας: αν το *α* είναι το ίδιο αντικείμενο πριν και μετά από το σημείο τομής, τότε δεν υπάρχει αιτιακή αλληλεπίδραση. Και σε αυτή την περίπτωση μπορούμε να θεωρήσουμε τη γραμμή που αναπαριστάνει την κίνηση του *α* (αντιστ. του *b*) ως γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασία, αφού εκδηλώνεται κατά μήκος αυτής, συνεχώς, ένα μη μηδενικό ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας, σε απουσία αλληλεπιδράσεων. Έτσι, χωρίς τη συνθήκη της διαχρονικής ταυτότητας του αντικειμένου στις περιπτώσεις των τομών χωρίς αλληλεπίδραση είναι μη καθορίσιμο το αν έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση. Συνεπώς, η θεωρία του Salmon απαιτεί μία έννοια διαχρονικής ταυτότητας για τον καθορισμό των αιτιακών διαδικασιών.



Σχ. 4.1 (*a*) Αιτιακή Αλληλεπίδραση. (*b*) Απλή Τομή. (Dowe 2000:108)

Η περίπτωση των τομών χωρίς αλληλεπίδραση δεν μπορεί να δικαιολογήσει το συμπέρασμα στο οποίο θέλει να καταλήξει ο Dowe. Καμία από τις τεμνόμενες χωροχρονικές γραμμές δεν αποτελεί αιτιακή διαδικασία σύμφωνα με τη θεωρία του Salmon, ακόμα και αν υποθέσουμε τη διαχρονική ταυτότητα του αντικειμένου που

υπάρχει κατά μήκος αυτής. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον ορισμό, κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας θα πρέπει να εκδηλώνεται συνεχώς *ένα σταθερό ποσό* μίας διατηρήσιμης ποσότητας σε απουσία αλληλεπιδράσεων. Ωστόσο, το ποσό της διατηρήσιμης ποσότητας στο σημείο τομής των δύο διαδικασιών ισούται με το άθροισμα των ποσοτήτων που κατέχουν οι τεμνόμενες διαδικασίες. Αυτή τη θέση τη διατυπώνει ο Salmon σε ένα πόρισμα που προκύπτει λογικά από το γεγονός ότι μιλάμε για διατηρήσιμες ποσότητες:

> Όταν τέμνονται δύο οι περισσότερες διαδικασίες που κατέχουν μία δεδομένη διατηρήσιμη ποσότητα (είτε αλληλεπιδρούν είτε όχι), το ποσό αυτής της ποσότητας στην περιοχή της τομής πρέπει να είναι ίσο με το άθροισμα των χωριστών ποσοτήτων που κατέχονται από τις διαδικασίες που τέμνονται. (Salmon 1997)

Επομένως κατά μήκος των γραμμών που ο Dowe ισχυρίζεται ότι αναπαριστάνουν αιτιακές διαδικασίες δεν εκδηλώνεται ένα σταθερό ποσό της διατηρήσιμης ποσότητας *q*. Κατά συνέπεια δεν είναι αιτιακές διαδικασίες, ακόμα και αν υποθέσουμε τη διαχρονική ταυτότητα των αντικειμένων που περιγράφουν. Οπότε, συμπεραίνουμε ότι το παράδειγμα των τομών χωρίς αλληλεπίδραση δεν μπορεί να δικαιολογήσει τη θέση ότι η έννοια της αιτιακής διαδικασίας του Salmon δεν μπορεί να επεξηγηθεί χωρίς την έννοια της ταυτότητας (δηλαδή, την υπόθεση του ad hominem επιχειρήματος που ο Dowe απευθύνει στον Salmon). Έτσι, η κριτική του Salmon στον Dowe, όσον αφορά στη χρήση μη αναλυμένων πρωταρχικών εννοιών που δεν είναι απαραιτήτως εμπειρικώς διαπιστώσιμες, δεν θίγεται από το ad hominem επιχείρημα του τελευταίου.

Από τη σύγκριση των ορισμών της τελικής θεωρίας του Salmon με τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe προκύπτουν αρκετές ακόμα διαφορές ανάμεσα στις δύο θεωρίες[17]. Καταρχάς, η θεωρία του Salmon απαιτεί κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας να μη λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις, ενώ, ο Dowe διαφωνεί με αυτή την απαίτηση. Μάλιστα, όπως και ο Kitcher, (βλ. 3.4.2,A3), ο Dowe επισημαίνει ότι αυτή η συνθήκη είναι δύσκολο να επιβεβαιωθεί για αιτιακές διαδικασίες που συναντάμε στον πραγματικό κόσμο, όπου μία αιτιακή διαδικασία αλληλεπιδρά με πολλές άλλες αιτιακές διαδικασίες. Ο Salmon αντιτείνει ότι η

[17] Σε αυτή τη σύνοψη των διαφορών της θεωρίας του Salmon με τη θεωρία του Dowe, ενδέχεται, σε μερικά σημεία, να επαναλάβουμε ήδη ειπωμένα πράγματα. Ωστόσο, έκρινα σκόπιμο να παραθέσω συγκεντρωτικά όλες τις διαφορές ανάμεσα στις δύο θεωρίες, έστω και με τον κίνδυνο επαναλήψεων.

προσέγγιση του είναι "καταρχήν προσέγγιση", ότι μιλάει θεωρητικά χωρίς να λαμβάνει υπόψη του πραγματολογικά στοιχεία που αφορούν στην πρακτική έρευνα για τις αιτιακές διαδικασίες. Σε αυτή την περίπτωση το επίπεδο ανάλυσης καθορίζει ποιες αλληλεπιδράσεις θα λάβουμε υπόψη και ποιες θα αγνοήσουμε και πως συγκεκριμένα θα ορίσουμε τις αιτιακές διαδικασίες (Salmon 1997).

Στενά συνδεδεμένη με το ζήτημα της απουσίας αιτιακών αλληλεπιδράσεων σε μία αιτιακή διαδικασία είναι και η δεύτερη διαφορά των δύο θεωριών. Αν κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας υπάρχουν αλληλεπιδράσεις, όπως υποστηρίζει ο Dowe, τότε η διατηρήσιμη ποσότητα που εκδηλώνεται δεν θα έχει σταθερή τιμή. Ο Dowe, όπως αναφέραμε στην πρώτη ενότητα του παρόντος κεφαλαίου, δεν ενδιαφέρεται για την τιμή της διατηρήσιμης ποσότητας που κατέχεται από το αντικείμενο που χαρακτηρίζει μία αιτιακή διαδικασία, αλλά μόνο για το γεγονός ότι το αντικείμενο κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα. Αντιθέτως, ο Salmon επιβάλλοντας τη συνθήκη μη αλληλεπίδρασης απαιτεί, επιπλέον, η τιμή της διατηρήσιμης ποσότητας που διαδίδεται κατά μήκος της διαδικασίας να παραμένει σταθερή. Ωστόσο, η ύπαρξη σταθερής τιμής της ποσότητας που διαδίδεται κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας δεν αποτελεί συνέπεια της συνθήκης μη αλληλεπίδρασης της διαδικασίας με άλλες διαδικασίες. Ο Dowe αναφέρει ότι σε απουσία αλληλεπιδράσεων, η διατηρήσιμη ποσότητα κατά μήκος μίας διαδικασίας προφανώς έχει σταθερή τιμή (Dowe 2000:117). Όμως, ήδη αναφέραμε ότι αν μία διαδικασία τέμνεται, χωρίς να αλληλεπιδρά, με μία άλλη διαδικασία, τότε στο σημείο τομής η διατηρήσιμη ποσότητα μεταβάλλεται λόγω της ύπαρξης της δεύτερης διαδικασίας. Έπεται ότι για να έχουμε σταθερή τιμή μίας διατηρήσιμης ποσότητας σε μία διαδικασία, αυτή δεν πρέπει καν να τέμνεται με μία δεύτερη διαδικασία.

Η τρίτη διαφορά αφορά στο γεγονός ότι στη θεωρία του Salmon απαιτείται η τιμή της ποσότητας που διαδίδεται κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας να είναι μη μηδενική. Με αυτόν τον τρόπο αποφεύγουμε να χαρακτηρίσουμε μία ψευδο-διαδικασία ως αιτιακή που διαδίδει μηδενικό ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας. Ο Dowe ξεπερνά αυτό το πρόβλημα με τη διάκριση των αντικειμένων σε αιτιακά και μη. Ένα μη αιτιακό αντικείμενο, η ιστορία του οποίου περιγράφεται από μία ψευδο-διαδικασία, δεν δύναται να κατέχει διατηρήσιμη ποσότητα, ενώ ένα αιτιακό

αντικείμενο μπορεί να κατέχει διατηρήσιμες ποσότητες σε οποιαδήποτε τιμή, συμπεριλαμβανομένης και της μηδενικής.

Τέλος, η τέταρτη διαφορά αφορά στο αίτημα για χωροχρονική συνέχεια στη διάδοση της διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας, σύμφωνα με την "at-at" θεωρία της διάδοσης. Αυτή η θέση, στη θεωρία του Russell, όπου κάθε ζεύγος συμβάντων μίας αιτιακής γραμμής έχει σχέση αιτίου-αποτελέσματος, εκφράζει την τοπικότητα της αιτιακής σχέσης. Στην περίπτωση της θεωρίας του Salmon, όπου η αιτιακή σχέση αφορά σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις που συνδέονται μέσω αιτιακών διαδικασιών, η υπόθεση της χωροχρονικής συνέχειας εκφράζει την τοπικότητα στη διάδοση της αιτιακής επίδρασης. Ο Dowe αρνείται να δεσμευθεί σε αυτή τη συνθήκη στη βάση του γεγονότος ότι είναι λάθος να εξαιρέσουμε *a priori* περιπτώσεις αιτιακών εξηγήσεων που υποθέτουν τη μη τοπικότητα. Έτσι, αφήνει ανοικτή τη δυνατότητα οι αιτιακές διαδικασίες να έχουν «χάσματα», να είναι ασυνεχείς.

4.4 Κριτική στην ύστερη θεωρία του Salmon

Ο Hitchcock σε ένα ιδιαιτέρως διαφωτιστικό άρθρο τού 1995, πραγματεύεται τα προβλήματα τόσο της πρώιμης θεωρίας του Salmon όσο και των ύστερων θεωριών, σε σχέση με την επάρκειά τους να παρέχουν επιστημονικές εξηγήσεις ενικών συμβάντων. Στο πλαίσιο της ανάλυσής του, ο Hitchcock παραθέτει τρία προβλήματα για την ύστερη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Το πρώτο αφορά στην επάρκειά της να διακρίνει ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες. Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στην προϋπόθεση της έννοιας της αιτιακής αλληλεπίδρασης για τον ορισμό της διατηρήσιμης ποσότητας. Και το τρίτο πρόβλημα αφορά στο ζήτημα της επιλογής ανάμεσα σε αναλλοίωτες και σε διατηρήσιμες ποσότητες για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών.

Η κριτική σε σχέση με την επάρκεια της ύστερης θεωρίας να διακρίνει τις αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες διατυπώνεται με τη βοήθεια ενός παραδείγματος:

> Υποθέστε ότι μία σκιά σχηματίζεται πάνω σε ένα μεταλλικό πιάτο που έχει ομοιόμορφη μη μηδενική κατανομή φορτίου. Η σκιά κινείται επί του πιάτου με τέτοιο τρόπο ώστε η επιφάνεια του πιάτου που βρίσκεται στη σκιά να παραμένει σταθερή. Έτσι, η σκιά κατέχει σταθερή ποσότητα ηλεκτρικού φορτίου (μία ποσότητα που είναι και διατηρήσιμη και αναλλοίωτη) καθώς κινείται επί του πιάτου. Η σκιά δεν μετέχει σε καμία αιτιακή αλληλεπίδραση καθώς κινείται. Συγκεκριμένα, δεν βομβαρδίζεται από φωτόνια όπως η φωτεινή κηλίδα σε ένα παρόμοιο παράδειγμα που πραγματεύεται ο Salmon (1994:308). Με βάση τον ορισμό 3 [ΔΔΠ] η σκιά διαδίδει φορτίο, και με βάση τον ορισμό 2 [ΑΔ], είναι αιτιακή διαδικασία. (Hitchcock 1995:315)

Το παράδειγμα καταλήγει στο μη αποδεκτό συμπέρασμα ότι μία ψευδο-διαδικασία, η σκιά, είναι αιτιακή διαδικασία με βάση τους ορισμούς της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Επιπλέον, ο Hitchcock επισημαίνει ότι με τη θεωρία του ίχνους το συμπέρασμα αυτό θα είχε αποφευχθεί, διότι μία τοπική μεταβολή της κατανομής φορτίου στο πιάτο δεν θα διαδίδονταν από τη σκιά.

Ο Salmon (1997), απαντώντας στο Hitchcock, συντάσσεται με τον Dowe που υποστηρίζει ότι οι σκιές είναι αντικείμενα που μπορεί να έχουν σχήμα, μέγεθος ταχύτητα, αλλά δεν είναι το είδος των αντικειμένων που έχουν διατηρήσιμες ποσότητες. Το ηλεκτρικό φορτίο κατέχεται από το μεταλλικό πιάτο και όχι από τη σκιά. Άλλωστε, ο Salmon απαιτεί οι αιτιακές διαδικασίες να διαδίδουν μη μηδενικό ποσό κάποιας διατηρήσιμης ποσότητας, με δεδομένο ότι μπορούμε να θεωρήσουμε ότι μία ψευδο-διαδικασία κατέχει μηδενικό ποσό οποιασδήποτε διατηρήσιμης ποσότητας, άρα και του ηλεκτρικού φορτίου. Επομένως η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων μπορεί να αντιμετωπίσει το αντιπαράδειγμα του Hitchcock.

Ωστόσο, ο Salmon προτείνει μία διόρθωση του αντιπαραδείγματος που δημιουργεί ένα μικρό πρόβλημα στη θεωρία του και διακρίνει την απάντηση που δίνει από την αντίστοιχη της θεωρίας του Dowe. Αν αποδώσουμε το ηλεκτρικό φορτίο στο πιάτο και θεωρήσουμε το χωροχρονικό σωλήνα που περιγράφει το σκιασμένο μέρος του πιάτου κάθε χρονική στιγμή, τότε, σύμφωνα με το Salmon, έχουμε μία ψευδο-διαδικασία που κάθε χρονική στιγμή εκδηλώνει το ίδιο ποσό ηλεκτρικού φορτίου. Το ζητούμενο για την υπεράσπιση της ορθότητας της θεωρίας του Salmon είναι να δείξουμε ότι δεν έχουμε διάδοση κατά μήκος της ψευδο-διαδικασίας. Από την άλλη, ο Dowe δεν αντιμετωπίζει κανένα αντίστοιχο ζήτημα. Γι' αυτόν ο χωροχρονικός σωλήνας δεν αποτελεί καν διαδικασία, συνεπώς δεν εμπίπτει στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και ψευδο-διαδικασίες, εφόσον το αντικείμενο που κατέχει σε κάθε χωροχρονική στιγμή τη διατηρήσιμη ποσότητα είναι ένα διαφορετικό

κομμάτι τοίχου. Άρα, σε αυτή την περίπτωση, ο χωροχρονικός σωλήνα αναπαριστάνει ένα προϊόν χρονοειδούς συγκερασμού.

Στη βάση της κριτικής που έχει ασκήσει ο Salmon στην προϋπόθεση της διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών, η λύση του Dowe απορρίπτεται. Για να δικαιολογήσει τη μη ύπαρξη διάδοσης, ο Salmon θεωρεί ότι κάθε περιοχή του πιάτου που είναι σκιασμένη σε μία δεδομένη χρονική στιγμή αποτελεί το σημείο τομής δύο διαδικασιών: αυτής του σκιασμένου τμήματος του πιάτου και εκείνης του αντίστοιχου στη δεδομένη χρονική στιγμή χρονοειδούς σωλήνα που περιγράφει την ιστορία του συγκεκριμένου κομματιού του πιάτου. Στη συνέχεια εφαρμόζει το πόρισμα που αναφέραμε στην προηγούμενη ενότητα:

> Όταν τέμνονται δύο οι περισσότερες διαδικασίες που κατέχουν μία δεδομένη διατηρήσιμη ποσότητα (είτε αλληλεπιδρούν είτε όχι), η τιμή αυτής της ποσότητας στην περιοχή της τομής πρέπει να είναι ίση με το άθροισμα των χωριστών ποσοτήτων που κατέχονται από τις διαδικασίες που τέμνονται. (Salmon 1997)

Με βάση το παραπάνω πόρισμα, ο Salmon συμπεραίνει ότι αν κατά μήκος της διαδικασίας του σκιασμένου τμήματος του πιάτου διαδίδονταν μη μηδενικό ποσό ηλεκτρικού φορτίου, τότε στο σημείο τομής των δύο διαδικασιών θα είχαμε τοπική μεταβολή του ηλεκτρικού φορτίου για τη δεδομένη χρονική στιγμή σε σχέση με την τιμή του ηλεκτρικού φορτίου που εκδηλώνεται στο συγκεκριμένο κομμάτι του πιάτου κάθε άλλη χρονική στιγμή. Όμως κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει. Το ποσό του ηλεκτρικού φορτίου που εκδηλώνεται σε κάθε κομμάτι του πιάτου είναι το ίδιο ανεξάρτητα από το αν είναι σκιασμένο ή όχι. Άρα, η διάδοση του ηλεκτρικού φορτίου γίνεται κατά μήκος του χρονοειδούς σωλήνα του κομματιού του πιάτου και όχι κατά μήκος του χωροχρονικού σωλήνα του σκιασμένου τμήματος του πιάτου.

Το δεύτερο πρόβλημα που επισημαίνει ο Hitchcock αφορά στην κυκλικότητα την οποία εμπεριέχουν οι αιτιακές θεωρίες των διατηρήσιμων ποσοτήτων λόγω της χρήσης της έννοιας του κλειστού συστήματος για τον ορισμό των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Ένα σύστημα θεωρείται κλειστό ακριβώς όταν δεν μετέχει σε φυσικές αλληλεπιδράσεις. Επίσης, διατηρήσιμη ποσότητα είναι μία ποσότητα που παραμένει χρονικά σταθερή σε κάθε κλειστό φυσικό σύστημα που περιγράφει. Άρα η έννοια της αλληλεπίδρασης προϋποτίθεται της έννοιας του κλειστού συστήματος και, κατά

συνέπεια, του ορισμού της διατηρήσιμης ποσότητας. Ωστόσο, οι αιτιακές θεωρίες που εξετάσαμε προτείνουν την επεξήγηση της έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης με βάση τις διατηρήσιμες ποσότητες - δηλαδή, προϋποτίθεται από το επεξηγούν η προς επεξήγηση αιτιακή έννοια.

Η στρατηγική που προτείνεται για την επίλυση του προβλήματος αφορά στην προσπάθεια ορισμού του κλειστού συστήματος χωρίς την επίκληση της έννοιας της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Έτσι ο Dowe (2000:95) προτείνει την επεξήγηση της έννοιας του κλειστού συστήματος με βάση συγκεκριμένες ποσότητες που το περιγράφουν: «για παράδειγμα, η ενέργεια διατηρείται σε χημικές αντιδράσεις, υπό τη συνθήκη ότι δεν υπάρχει καθαρή ροή ενέργειας προς το εσωτερικό ή προς το εξωτερικό του συστήματος» (ό.π.). Η συνθήκη που θέτει ο Dowe στο παραπάνω απόσπασμα αποτελεί τον ορισμό ενός κλειστού συστήματος ως προς την ενέργεια. Ο Choi (2003:518-9) επισημαίνει ότι ο ορισμός του Dowe έχει δύο προβλήματα. Το πρώτο αφορά στην αποσαφήνιση της έκφρασης "καθαρή ροή" μίας ποσότητας Q[18]. Το δεύτερο πρόβλημα προκύπτει, σύμφωνα με τον Choi, από το γεγονός ότι η έννοια της ροής (flow) χρησιμοποιείται από τους φυσικούς για ποσότητες που είναι διατηρήσιμες. Επομένως, η έννοια της διατηρήσιμης ποσότητας εξαρτάται από την έννοια του κλειστού συστήματος που ορίζεται με όρους ροής μίας ποσότητας η οποία είναι διατηρήσιμη. Από αυτή τη σκοπιά, ο ορισμός του Dowe είναι προφανώς κυκλικός[19].

Έτσι, ο Choi διαπιστώνει την ανεπάρκεια του ορισμού του Dowe και προτείνει ένα διαφορετικό ορισμό για ένα σύστημα που είναι κλειστό σε σχέση με μία ποσότητα Q, χωρίς ούτε να επικαλείται την απουσία αλληλεπιδράσεων ούτε να προϋποθέτει ότι η ποσότητα Q είναι διατηρήσιμη. Συγκεκριμένα,

[18] Ο Choi υποστηρίζει ότι ένας τρόπος να αποσαφηνίσουμε την έκφραση "καθαρή ροή" μίας ποσότητας Q είναι υποθέτοντας τη διαχρονική ταυτότητα μίας φυσικής ποσότητας. Ωστόσο, απορρίπτει αυτή τη θέση συμφωνώντας με τον Dowe (2003:519). Προς το τέλος του άρθρου και αφού έχει αποσαφηνίσει την έννοια του κλειστού συστήματος προτείνει τον εξής ορισμό: «Για μία διατηρήσιμη ποσότητα Q, υπάρχει καθαρή ροή της Q προς το εσωτερικό (ή προς το εξωτερικό) του συστήματος τη χρονική στιγμή t αν και μόνο αν $dQ_{in}/dt = -dQ_{out}/dt > (<)0$ τη χρονική στιγμή t.» (2003:528). Βεβαίως, αυτός ο ορισμός της καθαρής ροής προϋποθέτει την έννοια της διατηρήσιμης ποσότητας και συνεπώς δεν είναι δυνατό να χρησιμοποιηθεί για τον ορισμό του κλειστού συστήματος.

[19] Προφανώς το επιχείρημα του Choi είναι σε συμφωνία με την επεξήγηση που προτείνει για την έκφραση "καθαρή ροή" [βλ. υποσ. 18]. Όμως, στηρίζεται στην παραδοχή ότι ο όρος "ροή" αναφέρεται μόνο σε διατηρήσιμες ποσότητες. Ωστόσο, αυτή η παραδοχή δεν είναι ορθή. Στη θεωρία των δυναμικών συστημάτων, η ροή ή η φασική ροή είναι μία μονοπαραμετρική ομάδα μετασχηματισμών στο φασικό χώρο που περιγράφει τη δυναμική ενός χαμιλτονιανού συστήματος (Arnold 1978:68).

> Ένα σύστημα είναι κλειστό σε σχέση με μία φυσική ποσότητα *Q* μία χρονική στιγμή *t* αν και μόνο αν (a) $dQ_{in}/dt = dQ_{out}/dt = 0$ τη χρονική στιγμή *t ή* (b) $dQ_{in}/dt \neq -dQ_{out}/dt$ τη χρονική στιγμή *t*, (Choi 2003:529)

όπου Q_{in} είναι το ποσό της *Q* εντός του συστήματος και Q_{out} το ποσό της *Q* έξω από το σύστημα, στο περιβάλλον. Η συνθήκη (a) μας λέει ότι η τιμή της *Q* να τείνει να παραμείνει χρονικά σταθερή μέσα και έξω από το σύστημα τη χρονική στιγμή *t*, ενώ η συνθήκη (b) μας λέει ότι η τάση της *Q* να αυξηθεί, να μειωθεί ή να παραμείνει χρονικά σταθερή, τη χρονική στιγμή *t*, είναι ανεξάρτητη από τις αντίστοιχες τάσεις της *Q* εκτός του συστήματος, την ίδια χρονική στιγμή.

Το τρίτο πρόβλημα που επισημαίνει ο Hitchcock αφορά στην επιλογή ανάμεσα σε αναλλοίωτες και σε διατηρήσιμες ποσότητες για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών. Υποστηρίζει ότι μόνο οι διατηρήσιμες ποσότητες απαλλάσσουν τη θεωρία από την ανάγκη προσφυγής σε αντιγεγονικές προτάσεις. Οι αναλλοίωτες ποσότητες που δεν είναι διατηρήσιμες μπορούν να υποστούν στο σημείο τομής δύο διαδικασιών μία τυχαία μεταβολή που να μας κάνει να συμπεράνουμε ότι λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση χωρίς αυτό πράγματι να συμβαίνει. «Το πλεονέκτημα των διατηρήσιμων ποσοτήτων», αναφέρει ο Hitchcock, «είναι ότι *οποιαδήποτε* αλλαγή σε μία διατηρήσιμη ποσότητα είναι αλλαγή που *δεν* θα συνέβαινε διαφορετικά» (Hitchcock 1995:315) - δηλαδή, χωρίς να λαμβάνει χώρα τομή δύο διαδικασιών. Ο Hitchcock υποστηρίζει τη θέση του θεωρώντας δύο φωτεινούς παλμούς που τέμνονται χωρίς να αλληλεπιδρούν σε κάποιο χωροχρονικό σημείο. Η θέση των παλμών θεωρεί ότι είναι μία αναλλοίωτη ποσότητα που μεταβάλλεται στο σημείο τομής χωρίς να λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση που να καθορίζει τη μεταβολή. Η μεταβολή στη θέση των παλμών θα λάμβανε χώρα ανεξάρτητα από το γεγονός της γεωμετρικής τομής τους.

Αυτά τα προβλήματα οδηγούν τον Hitchcock να προτείνει ότι:

> η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων είναι καλύτερο να ειδωθεί ως ενισχυτική της θεωρίας διάδοσης του ίχνους, παρά ως αντικαταστάτης της. Καμία θεωρία δεν παρέχει μία αναγωγιστική ανάλυση των εννοιών της αιτιακής διαδικασίας και της αιτιακής αλληλεπίδρασης, και καμιά δεν παρέχει αλάθητους κανόνες για την ανίχνευση αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Μάλλον, η καθεμία παρέχει καθοδηγητικές γραμμές για την αναγνώριση αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων, καθώς και λόγους να σκεφτόμαστε ότι αυτές οι έννοιες προϋποτίθενται από τη φυσική επιστήμη. (Hitchcock 1995:316)

Η πρόταση του Hitchcock που αφορά στη συμπληρωματικότητα των δύο αιτιακών θεωριών φαίνεται ότι προκύπτει από το γεγονός ότι με βάση την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon μπορούμε να αποφύγουμε να χαρακτηρίσουμε την κίνηση της σκιάς στο φορτισμένο πιάτο ως αιτιακή διαδικασία - σε αντίθεση με τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Ωστόσο, όπως είδαμε τόσο ο Salmon όσο και ο Dowe καταφέρνουν να δώσουν κατάλληλες απαντήσεις στο πρόβλημα του Hitchcock. Η δεύτερη θέση του Hitchcock αφορά στην αναγωγιστική ανάλυση των αιτιακών εννοιών. Αυτό που επισημαίνει είναι ότι και οι δύο θεωρίες αδυνατούν να αναγάγουν τις αιτιακές έννοιες σε μη αιτιακά γεγονότα του κόσμου. Σε αυτό το ζήτημα θα αναφερθούμε κάπως εκτενέστερα σε επόμενο κεφάλαιο. Πάντως, όσον αφορά στην κριτική του Hitchcock στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων η θέση αυτή φαίνεται ότι στηρίζεται στο πρόβλημα της κυκλικότητας του ορισμού της διατηρήσιμης ποσότητας. Ωστόσο, όπως αναφέραμε και αυτό το πρόβλημα φαίνεται να επιλύεται με βάση τον ορισμό των κλειστών συστημάτων από τον Choi. Η τρίτη θέση του Hitchcock αφορά στα προβλήματα επάρκειας του κριτηρίου του ίχνους καθώς και των διατηρήσιμων ποσοτήτων για τη διάκριση των αιτιακών διαδικασιών από τις ψευδο-διαδικασίες. Και σε αυτό το σημείο η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων φαίνεται να ξεπερνάει τα προβλήματα που επεσήμανε ο Kitcher και άλλοι φιλόσοφοι ενώ δεν διαπιστώνεται να έχει δικά της ανυπέρβλητα προβλήματα. Τέλος, ο Hitchcock αναδεικνύει το στόχο ως προς τον οποίο είναι συμπληρωματικές οι δύο θεωρίες του Salmon: την αναγνώριση των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων και την κατάδειξη τους ως έννοιες που προϋποτίθενται από τη φυσική επιστήμη. Έτσι, ο Hitchcock "κατεβάζει τον πήχη" για τις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων: από το να τις αντιμετωπίζουμε ως θεωρίες που θεμελιώνουν την αιτιότητα στον κόσμο μας στο να τις εκλαμβάνουμε ως αναγνωριστικές μεθόδους. Ωστόσο, η θέση του δηλώνει μόνο την ανεπάρκεια των συγκεκριμένων θεωριών χωρίς να θίγει την ύπαρξη των βασικών παραδοχών τους: την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων στον κόσμο.

Ας έρθουμε τώρα στο βασικό ζήτημα που θέτει ο Hitchcock με το άρθρο του: την επάρκεια της αιτιακής θεωρίας του Salmon να εξηγήσει γιατί ένα συμβάν λαμβάνει χώρα. Ο Hitchcock επισημαίνει ότι η εξηγητική συνάφεια (explanatory relevance) -δηλαδή, η σχέση του εξηγούντος με το εξηγητέο σε μία επαρκή επιστημονική εξήγηση- την οποία δεν μπόρεσαν να συλλάβουν τα μοντέλα του

επικαλύπτοντος νόμου του Hempel, αδυνατεί να επεξηγηθεί με όρους αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων (Hitchcock 1995:316). Υποστηρίζει ότι η ένταξη του προς εξήγηση συμβάντος σε ένα πλέγμα αιτιακών συνδέσεων, το οποίο συγκροτείται από αιτιακές διαδικασίες και αιτιακές αλληλεπιδράσεις, δεν αποτελεί επαρκή εξήγηση του συμβάντος. Στη πρώιμη αιτιακή θεωρία, το κριτήριο του ίχνους μπορεί να ταυτοποιεί το εξηγητέο με μία αιτιακή αλληλεπίδραση που συμπίπτει χωροχρονικά με αυτό και να διαπιστώνει τις αιτιακές διαδικασίες που το συνδέουν με άλλες αιτιακές αλληλεπιδράσεις· ωστόσο, το συγκεκριμένο ίχνος με το οποίο γίνεται αυτή η ταυτοποίηση ενδέχεται να μην αποτελεί την τροποποίηση του χαρακτηριστικού που περιγράφει το εξηγητέο συμβάν. Η ίδια κριτική μπορεί να διατυπωθεί και σε σχέση με την ύστερη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων, εφόσον το εάν λαμβάνει χώρα μία αιτιακή αλληλεπίδραση και το εάν μία χωροχρονική γραμμή αποτελεί γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας μπορεί να διαπιστωθεί στη βάση περισσότερων από μίας διατηρήσιμων ποσοτήτων, εκ των οποίων, μία μόνο περιγράφει το εξηγητέο. Συνεπώς, οι θεωρίες του Salmon δεν μπορούν να διακρίνουν ποιες ιδιότητες ή χαρακτηριστικά, που κατέχονται από αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις, είναι συναφείς με ένα συγκεκριμένο συμβάν και ποιες όχι.

Η κριτική του Hitchcock είναι ανάλογη με την κριτική του Kitcher όσον αφορά στην επεξήγηση της αιτιακής σχέσης. Όπως αναφέραμε στην ενότητα 3.4.3, σύμφωνα με τον Kitcher, για να διαπιστώσουμε την αιτιακή σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα δεν αρκεί να τα ταυτοποιήσουμε με κάποιες αιτιακές αλληλεπιδράσεις που συνδέονται μεταξύ τους με κάποια αιτιακή διαδικασία, αλλά και να δείξουμε ότι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις και η αιτιακή διαδικασία που τις συνδέει είναι συναφείς με αυτά τα συμβάντα. Όμως, ενώ η κριτική που ασκούν οι Kitcher και Hitchcock φαίνεται να στηρίζεται καταρχήν στα ίδια επιχειρήματα, οι στόχοι της καθεμίας είναι διαφορετικοί. Ο μεν Kitcher, διαπιστώνει την αδυναμία της αιτιακής θεωρίας του Salmon να περιγράψει την *αιτιακή* σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα ως ένα επιχείρημα ενάντια στη θεωρία. Ο δε Hitchcock διαπιστώνει την αδυναμία της αιτιακής θεωρίας του Salmon να περιγράψει την *εξηγητική* συνάφεια ανάμεσα σε δύο συμβάντα που συνδέονται αιτιακώς για να καταλήξει στο μετριοπαθές συμπέρασμα ότι η αιτιακή περιγραφή δεν επαρκεί για να καθορίσει την εξηγητική συνάφεια. Έτσι, σχηματικά, ο Kitcher καταλήγει στην «εξίσωση»

Αιτιακή Σχέση = (Διαδικασίες και Αλληλεπιδράσεις) + (Αντιγεγονικές Προτάσεις),

όπου η αντιγεγονική εξάρτηση του αιτίου από το αποτέλεσμα έχει μεγαλύτερη σημασία απ' ό,τι η περιγραφή τους με όρους αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων, ενώ ο Hitchcock στην «εξίσωση»

Εξηγητική Συνάφεια = (Διαδικασίες και Αλληλεπιδράσεις) + (Κάτι άλλο).

Ο Hitchcock αρνείται τη θέση ότι η εξηγητική συνάφεια θα πρέπει να αναλυθεί με όρους αντιγεγονικής εξάρτησης. Επιθυμεί μόνο να συναγάγει το «μάλλον ασθενές συμπέρασμα ότι μία επιτυχημένη προσέγγιση στην εξήγηση θα ήταν καλό να κάνει τη σχέση της εξηγητικής σχέσης να μοιάζει, χοντρικά, με αυτή της αντιγεγονικής εξάρτησης» (Hitchcock 1995:311).

Ο Salmon (1997:474) αποδέχεται την κριτική του Hitchcock, όμως, θεωρεί "ειρωνεία της τύχης" το γεγονός ότι απευθύνεται σε αυτόν. Στο παρελθόν, ο Salmon είχε ασκήσει την ίδια κριτική στα μοντέλα εξήγησης του Hempel καθώς και, μαζί με τον Kitcher, στην προσέγγιση του van Fraassen για την πραγματολογική θεώρηση της επιστημονικής εξήγησης. Αυτό που δέχεται είναι ότι αντιγεγονικοί ισχυρισμοί διατυπώνονται με πολύ άμεσο τρόπο στο πλαίσιο της επιστημονικής εξήγησης. «Όταν δίδουμε μία εξήγηση», αναφέρει ο Salmon, «το να σκεφτούμε τι θα συνέβαινε αν το εξηγούν δεν λάμβανε χώρα, είναι παρεμφερές» (Salmon 1997:475). Όμως, αυτού του είδους οι αντιγεγονικοί ισχυρισμοί υποστηρίζονται από υποθέσεις σχέσεων στατιστικής συνάφειας και γι' αυτό δεν πρέπει να μας προβληματίζει η χρήση τους. Ο Salmon αναφέρεται στο παράδειγμα του παραθύρου που σπάζει από το χτύπημα μίας μπάλας του baseball. Υπάρχουν διάφοροι παράγοντες που επιδρούν στο παράθυρο εκτός από τη μπάλα - για παράδειγμα, τα μόρια του αέρα που συγκρούονται με αυτό αλλά σπανίως το σπάζουν ή ο ήχος από τις φωνές παικτών που, επίσης, σπανίως σπάζει ένα παράθυρο. Αυτά τα δεδομένα μπορούν να καταγραφούν ως αντικειμενικές σχετικές συχνότητες που προκύπτουν από ελεγχόμενα πειράματα. Από τη μελέτη των συχνοτήτων συνάγουμε ποιοι παράγοντες είναι στατιστικώς συναφείς με τη θραύση του παραθύρου και ποιοι όχι. Αν ένας παράγοντας C είναι στατιστικώς συναφής με τον B σε έναν πληθυσμό A τότε

$$\mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, C) \neq \mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, \tilde{C})\,. \qquad (4.4.1)$$

Με δεδομένο ότι το *C δεν* λαμβάνει χώρα ($\tilde{C}$) και με βάση την (4.4.1), ισχυριζόμαστε ότι η αντιγεγονική πρόταση "αν το *C* λάμβανε χώρα, η πιθανότητα του *B* θα ήταν διαφορετική" είναι αληθής[20]. Επιπλέον, αν το *B* λαμβάνει χώρα και ισχύει $A \,\&\, \tilde{C} \rightarrow \tilde{B}$, τότε μπορούμε να ισχυριστούμε την αντιγεγονική πρόταση "αν το *C δεν* λάμβανε χώρα ($\tilde{C}$), τότε δεν θα λάμβανε χώρα το *B*". Ο Salmon ισχυρίζεται ότι αυτή η αντιγεγονική πρόταση «είναι οριακή περίπτωση στατιστικής συνάφειας» (Salmon 1997:476). Μολονότι δεν εξηγεί τον ισχυρισμό του, εικάζουμε ότι η στατιστική σχέση στην οποία αναφέρεται είναι η $\mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, C) = 1 > 0 = \mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, \tilde{C})$ και προκύπτει από τις υποθέσεις που κάνει[21].

Ο ισχυρισμός του Salmon για την υποστήριξη των αντιγεγονικών προτάσεων που διατυπώνουμε στην επιστημονική εξήγηση με βάση τις στατιστικές σχέσεις δεν μου είναι απολύτως σαφής και, εκ τούτου, ούτε ιδιαιτέρως πειστικός. Ωστόσο, η θέση αυτή του επιτρέπει τρεις φιλοσοφικές στάσεις: α) να συμφωνήσει με το αίτημα του Hitchcock για μία επεξήγηση της σχέσης εξηγητικής συνάφειας που να προσομοιάζει στην αντιγεγονική εξάρτηση - το οποίο και θεωρεί εύλογο, β), να μη μετατοπίσει το πρόβλημα των αντιγεγονικών προτάσεων από τη θεμελίωση της αιτιότητας στην επιστημονική εξήγηση και γ) να μην εγκαταλείψει τη θεωρία που υποστήριξε το 1984 για την ύπαρξη Στατιστικής Βάσης κάθε επιστημονικής εξήγησης. Αυτό που θα υποστηρίξει μετά την κριτική του Hitchcock είναι ότι η Στατιστική Βάση αποτελεί αναπόσπαστο συστατικό της σχέσης εξηγητικής συνάφειας που διαπιστώνεται σε μία επιστημονική εξήγηση:

> Στο Salmon (1984) χαρακτήρισα την επιστημονική εξήγηση ως μία δομή με δύο στρώσεις, η οποία στο ένα επίπεδο συνίσταται από σχέσεις στατιστικής συνάφειας και στο άλλο από αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις. Ως αποτέλεσμα της ανάλυσης του Hitchock, τώρα θα έλεγα (1) ότι οι σχέσεις στατιστικής συνάφειας [relevance], σε απουσία αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων, στερούνται εξηγητικής σημασίας και (2) ότι η σύνδεση

[20] Την καταγωγή αυτής της θέσης μπορούμε να τη βρούμε στο Reichenbach. Για το Reichenbach υπάρχει ένα είδος αντιγεγονικών προτάσεων, οι αντιγεγονικές προτάσεις *μη συμβολής* (counterfactuals of non-interference), που μπορεί να αναλυθεί με βάση τις στατιστικές σχέσεις (Reichenbach 1954:88).

[21] Συγκεκριμένα, από την υπόθεση "το *B* λαμβάνει χώρα στον στατιστικό πληθυσμό *A*" συμπεραίνουμε ότι $\mathrm{P}(B \,|\, A) = 1$ ενώ από το σύνολο προτάσεων $\left\{A \,\&\, \tilde{C} \rightarrow \tilde{B}, A, B\right\}$ προκύπτει παραγωγικά η πρόταση $\{C\}$. Επομένως, υπό την υπόθεση $A \,\&\, \tilde{C} \rightarrow \tilde{B}$, συμπεραίνουμε ότι $\mathrm{P}(C \,|\, A \,\&\, B) = 1$ και λόγω του γεγονότος ότι $\mathrm{P}(B \,|\, A) = 1$ καταλήγουμε στη σχέση $\mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, C) = \mathrm{P}(C \,|\, A) = 1$. Ενώ λόγω της συνεπαγωγής $A \,\&\, \tilde{C} \rightarrow \tilde{B}$ προκύπτει ότι $\mathrm{P}(B \,|\, A \,\&\, \tilde{C}) = 0$.

> αιτιακών διαδικασιών, σε απουσία σχέσεων στατιστικής συνάφειας, επίσης στερείται εξηγητικής σημασίας. Σε διάφορες συζητήσεις έχω εστιάσει στο (1) με αποτέλεσμα να αμελήσω φαινομενικά το (2) … αυτό ήταν λάθος. Και τα δύο είναι απαραίτητα. (Salmon 1997:476)

Ωστόσο, είναι πράγματι απαλλαγμένη η αιτιακή θεωρία του Salmon στην ύστερη εκδοχή της από την ανάγκη της χρήσης αντιγεγονικών προτάσεων; Υπενθυμίζουμε ότι αυτός ήταν ένας βασικός λόγος για την εγκατάλειψη της επεξήγησης των αιτιακών εννοιών στο πλαίσιο της θεωρίας του ίχνους και, συνακόλουθα, το βασικό πλεονέκτημα της ύστερης θεωρίας του Salmon και της θεωρίας του Dowe. Ο Ψύλλος αναφέρει δύο προβλήματα της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων που, τουλάχιστον καταρχάς, θέτουν ξανά το ζήτημα ότι η αναφορά σε αντιγεγονικές προτάσεις είναι απαραίτητη για την αιτιακή θεωρία. Με την αναφορά σε αυτά τα προβλήματα θα ολοκληρώσουμε την ενότητα.

Το πρώτο πρόβλημα που θέτει ο Ψύλλος (Psillos 2002:126) αφορά στη διάκριση του Dowe ανάμεσα σε αιτιακά και μη αιτιακά αντικείμενα. Κατά τον Dowe, στα αιτιακά αντικείμενα (π.χ., σε ένα υλικό σωματίδιο), αποδίδουμε διατηρήσιμες ποσότητες, ενώ στα μη αιτιακά αντικείμενα (π.χ., σε μία σκιά) δεν αποδίδουμε διατηρήσιμες ποσότητες. Αυτή η διάκριση δεν εξαρτάται από την τιμή που λαμβάνει η διατηρήσιμη ποσότητα σε κάθε αντικείμενο. Ο Salmon διακρίνει τη διαδικασία της σκιάς από ένα σωματίδιο με μηδενική ορμή (ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς) με βάση την τιμή κάποιας διατηρήσιμης ποσότητας, η οποία δεν είναι η ορμή αλλά μπορεί να είναι, για παράδειγμα, η ενέργεια που κατέχει κάθε αντικείμενο. Και το κριτήριο του Salmon είναι καταρχήν εμπειριστικό. Μπορούμε, καταρχήν, να διαπιστώσουμε εμπειρικά το ποσό της διατηρήσιμης ποσότητας που κατέχεται από κάθε αντικείμενο και ακολούθως να τα χαρακτηρίσουμε ως αιτιακές διαδικασίες ή ψευδο-διαδικασίες. Αντιθέτως, ο Dowe διακρίνει τη σκιά από το σωματίδιο με βάση την κατηγορία αντικειμένων στην οποία ανήκουν. Πώς όμως θεμελιώνεται αυτή η διάκριση; Ο Ψύλλος υποστηρίζει ότι είναι αναπόφευκτο να προσφύγουμε σε τροπικότητες και σε αντιγεγονικές προτάσεις. Μολονότι η σκιά και το σωματίδιο κατέχουν το ίδιο (μηδενικό) ποσό τριορμής, η μεν σκιά δεν θα μπορούσε να κατέχει μη μηδενικό ποσό από μία διατηρήσιμη ποσότητα, διότι δεν θα μπορούσε να μετάσχει σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις που θα της το προσέδιδαν, ενώ το σωματίδιο έχει την ικανότητα να αλληλεπιδρά και αν αλληλεπιδρούσε, θα μπορούσε να κατέχει

κάποιο μη μηδενικό ποσό ορμής. Με αντίστοιχο τρόπο, συνεχίζει ο Ψύλλος, μπορούμε να εξηγήσουμε τη διάφορα ανάμεσα στη χημική αδράνεια των ευγενών αερίων και σε δύο ουσίες που είναι χημικά ενεργές υπό ορισμένες συνθήκες. Τα ευγενή αέρια ακόμα κι αν έρθουν σε επαφή δεν αλληλεπιδρούν, ενώ οι χημικά ενεργές ουσίες, αν έρθουν σε επαφή υπό ορισμένες συνθήκες θα αντιδράσουν ανταλλάσοντας ορισμένο ποσό από τις σχετικές με την αλληλεπίδραση διατηρήσιμες ποσότητες. Με δυο λόγια, η εξήγηση αυτής της διαφοράς *απαιτεί* τη χρήση αντιγεγονικών προτάσεων.

Καταρχάς, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η προσφυγή σε αντιγεγονικές προτάσεις για τη θεμελίωση της διαφοράς ανάμεσα στα αιτιακά και στα μη αιτιακά αντικείμενα δεν αφορά στη θεωρία του Salmon. Από την άλλη, η εξήγηση της διάκρισης ανάμεσα στη χημική αδράνεια των ευγενών αερίων και στην "αδράνεια" που εκδηλώνουν δύο χημικές ενώσεις ή στοιχεία, σε καθαρή μορφή, τα οποία δεν έρχονται σε επαφή μπορεί επίσης να εξηγηθεί αν αναφερθούμε στο σύνολο των εμπειρικών τεκμηρίων που διαθέτουμε, όπως αυτά περιγράφονται από τις καλύτερες επιστημονικές θεωρίες. Έτσι, για μία χημικά αδρανή ουσία δεν έχει διαπιστωθεί η συμμετοχή της σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις, ενώ, αντιθέτως, για μία χημικά ενεργή ουσία υπάρχουν καταστάσεις πραγμάτων στις οποίες διαπιστώνουμε ότι μετέχει σε αλληλεπιδράσεις ανταλλάσσοντας διατηρήσιμες ποσότητες. Τέλος, η απάντηση που θα μπορούσε να δώσει ο Dowe στην κριτική του Ψύλλου σε σχέση με τη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακά και μη αιτιακά αντικείμενα αφορά στο πώς περιγράφουν οι καλύτερες επιστημονικές θεωρίες που διαθέτουμε ένα σωματίδιο και μία σκιά. Για τη μεν πρώτη περίπτωση η περιγραφή γίνεται στη βάση διατηρήσιμων ποσοτήτων, ενώ στη δεύτερη περίπτωση οι φυσικές θεωρίες δεν αναφέρονται σε διατηρήσιμες ποσότητες. Έτσι, η διάκριση ανάμεσα σε αιτιακά και μη αιτιακά αντικείμενα θεμελιώνεται χωρίς αναφορά στην αιτιότητα ή σε προδιαθέσεις των αντικειμένων.

Το δεύτερο πρόβλημα που θέτει ο Ψύλλος αφορά σε μη εκδηλώσιμες αιτιακές διαδικασίες. «Οι αιτιακές διαδικασίες που δεν έχουν πραγματική εκδήλωση δεν κατέχουν διατηρήσιμες ποσότητες, αλλά *μπορούν* να κατέχουν, ή *θα* κατέχουν, εφόσον εκδηλωθούν» (Psillos 2002:126). Ως παράδειγμα αναφέρει την κατάποση μίας ποσότητας πλουτωνίου ίσης με 1 quart (=1,14 λίτρα) και σχολιάζει:

> Αυτή, βεβαίως, αποτελεί αιτιακή διαδικασία. Αλλά δεν έχει εκδηλώσεις, αφού κανένας δεν έχει πιει αυτή την ποσότητα πλουτωνίου. Άλλωστε, φαίνεται ότι αυτή η αιτιακή διαδικασία δεν μπορεί να έχει εκδηλώσεις, επειδή ένα quart πλουτωνίου είναι πάνω από την κρίσιμη μάζα του πλουτωνίου. Αν τη θεωρήσουμε ως μη εκδηλωμένη, όπως νομίζω ότι πρέπει, χρειάζεται να αναφερθούμε σε αντιγεγονικές … υποθετικές προτάσεις: αν θα εκδηλώνονταν, θα κατείχε μία διατηρήσιμη ποσότητα. (Psillos 2002:126-7)

Εκτιμώ ότι ο Dowe θα μπορούσε να απαντήσει στον Ψύλλο ως εξής. Η αιτιακή διαδικασία που περιγράφεται στο παραπάνω απόσπασμα είναι μη εκδηλώσιμη υπό την έννοια ότι στον πραγματικό κόσμο (και σε όλους τους δυνατούς κόσμους που διέπονται από τους ίδιους φυσικούς νόμους με τον πραγματικό κόσμο) δεν μπορεί να λάβει χώρα. Όμως, η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων είναι μία θεωρία που περιγράφει αιτιακές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στον πραγματικό κόσμο και σε φυσικώς δυνατούς κόσμους με την παραπάνω σημασία. Άρα τα προβλήματα που μπορεί να προκύπτουν για τη θεωρία με την αναφορά σε *λογικώς* δυνατούς κόσμους στους οποίους η εν λόγω αιτιακή διαδικασία θα μπορούσε να εκδηλωθεί δεν μας ενδιαφέρουν. Επομένως, η δυνάμει ύπαρξη μη εκδηλώσιμων αιτιακών διαδικασιών δεν αποτελεί λόγο για να υποστηρίξουμε ότι η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων θα πρέπει να προσφεύγει σε αντιγεγονικές προτάσεις.

Έτσι, το προφητικό σχόλιο του Ψύλλου ότι σε αυτά τα προβλήματα οι υποστηρικτές των θεωριών των διατηρήσιμων ποσοτήτων ενδέχεται να διαθέτουν απαντήσεις εκπληρώνεται, νομίζω, σε κάποιο βαθμό.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο προσπαθήσαμε να ανασυγκροτήσουμε τις ύστερες αιτιακές θεωρίες του Salmon, τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe, τον μεταξύ τους διάλογο, καθώς και κριτικές απόψεις που έχουν διατυπωθεί γι’ αυτές τις θεωρίες.

Θεωρήσαμε πολύ σημαντικό να γίνει κατανοητό το επιχείρημα με το οποίο ο Salmon τάσσεται υπέρ της χρήσης των αναλλοίωτων ποσοτήτων έναντι της προτεινόμενης από το Dowe θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων. Πρόκειται για

ένα επιχείρημα που στηρίζεται στις δύο αρχές για την επιστημονική εξήγηση του Mühlhölzer, οι οποίες έχουν ως βασικό ζητούμενο την αντικειμενικότητα στην επιστημονική εξήγηση. Η αντικειμενικότητα θεωρώ ότι είναι και το βασικό κίνητρο του Salmon για την επιλογή των αναλλοίωτων ποσοτήτων για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών. Για λόγους που θεωρώ ότι δεν εξηγήθηκαν επαρκώς, ο Salmon εγκαταλείπει αυτή τη θέση στην τελική εκδοχή της θεωρίας του που θεμελιώνει την αιτιότητα στις διατηρήσιμες ποσότητες.

Η έννοια της αιτιακής διαδικασίας στις ύστερες θεωρίες του Salmon έχει διαφορετική έκταση από την αντίστοιχη έννοια που θεμελιώνεται με το κριτήριο του ίχνους. Αν σε κάποιο σημείο μίας διαδικασίας δημιουργείται ίχνος το οποίο διαδίδεται σε απουσία περαιτέρω παρεμβάσεων, τότε η διαδικασία είναι αιτιακή. Αντιθέτως, στην περίπτωση των ύστερων θεωριών οι αιτιακές διαδικασίες συνδέουν δύο αιτιακές αλληλεπιδράσεις σε απουσία οποιασδήποτε άλλης αλληλεπίδρασης. Μάλιστα, όπως αναφέραμε απαντώντας στο επιχείρημα του Dowe για τις μη αλληλεπιδρώσες τομές δύο διαδικασιών, στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων μία αιτιακή διαδικασία δεν είναι δυνατόν ούτε καν να τέμνεται με μία άλλη αιτιακή διαδικασία που διαδίδει την ίδια διατηρήσιμη ποσότητα, ανεξάρτητα από το αν αλληλεπιδρά με αυτή.

Ο Salmon, στην προσπάθειά του να θεμελιώσει την αιτιακή θεωρία, ακολουθεί μία αρχή οικονομίας όσον αφορά τη δέσμευση σε μεταφυσικές ή επιστημικές προϋποθέσεις. Έτσι, δεν υιοθετεί μία πλήρως ρεαλιστική ερμηνευτική στάση απέναντι στις φυσικές θεωρίες που περιγράφουν ποιες ποσότητες διατηρούνται στον κόσμο και αρνείται να εξαρτήσει την αιτιακή θεωρία από το πρόβλημα των φυσικών νόμων, περιοριζόμενος στο αίτημα της δυνατότητας διατύπωσης αληθών προτάσεων για γεγονότα διατήρησης. Επίσης, για τον ίδιο λόγο, αρνείται να ανταλλάξει την έννοια της διάδοσης με μία αναλύσιμη μεν, αλλά ακαθόριστη μέχρι τώρα, έννοια διαχρονικής ταυτότητας του αντικειμένου, όπως του προτείνει ο Dowe.

Τέλος, τόσο η θεωρία του Salmon όσο και η θεωρία του Dowe είναι οριστικά απαλλαγμένες από το πρόβλημα των αντιγεγονικών προτάσεων. Ο Kitcher θεωρούσε την επιστημονική εξήγηση ως περιγραφή αιτιακών σχέσεων και γι' αυτό απαιτούσε η σχέση εξηγητικής συνάφειας να ταυτίζεται με τη σχέση αιτίου και αποτελέσματος.

Έτσι, οδηγούνταν στο συμπέρασμα ότι δύο συμβάντα για τα οποία λέμε ότι βρίσκονται σε αιτιακή σχέση θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες αντιγεγονικές προτάσεις. Για τον Salmon η αιτιακή περιγραφή δεν ισοδυναμεί με την επιστημονική εξήγηση. Είναι αναγκαία, αλλά όχι ικανή, συνθήκη για μία επαρκή επιστημονική εξήγηση. Επίσης, οι αντιγεγονικές προτάσεις δεν αποτελούν προϋπόθεση για την ταυτοποίηση των συμβάντων στο αιτιακό πλέγμα. Η εξάρτηση από τις αντιγεγονικές προτάσεις επανέρχεται στο πλαίσιο της επιστημονικής εξήγησης. Όμως και σε αυτό το πλαίσιο, ο Salmon προσπαθεί -όχι ιδιαιτέρως πειστικά- να επιχειρηματολογήσει υπέρ της δικαιολόγησης των αντιγεγονικών προτάσεων με βάση τις στατιστικές σχέσεις που διαπιστώνονται από ελεγχόμενα πειράματα. Οι στατιστικές σχέσεις δεν θεμελιώνουν ούτε την αιτιότητα, ούτε την επιστημονική εξήγηση. Είναι όμως εξίσου αναγκαίες συνθήκες με την αιτιακή περιγραφή, για την επιστημονική εξήγηση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΠΕΜΠΤΟ

ΑΙΤΙΑΚΕΣ ΣΧΕΣΕΙΣ ΚΑΙ ΑΙΤΙΑΚΕΣ ΣΥΝΔΕΣΕΙΣ

Οι αιτιακές διαδικασίες και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι οι βασικές έννοιες με τις οποίες αναλύεται η αιτιακή σχέση, σύμφωνα με τις θεωρίες των Salmon και Dowe. Στα προηγούμενα κεφάλαια εστιάσαμε κυρίως στην επεξήγηση αυτών των αιτιακών εννοιών χωρίς να αναφερθούμε συστηματικά στην ανάλυση της ίδιας της αιτιακής σχέσης. Σε αυτό το κεφάλαιο θα αναφερθούμε πιο συγκεκριμένα σε αυτή την ανάλυση, με κύριο στόχο την ένταξη των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων σε ευρύτερες ταξινομήσεις που έχουν να κάνουν με ζητήματα που αφορούν στη φύση της αιτιότητας.

5.1 Οι όροι της αιτιακής σχέσης

Όταν αναφερόμαστε σε μία σχέση, είτε πρόκειται για την αιτιακή σχέση είτε για οποιαδήποτε άλλη σχέση με λογικό ή οντολογικό περιεχόμενο, είναι προφανές ότι θα πρέπει να προσδιορίσουμε την κατηγορία των οντοτήτων στις οποίες αναφέρεται αυτή η σχέση, τους όρους (relata) της σχέσης. Στην περίπτωση των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων θα υποστηρίξουμε ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι ενικές αιτιακές διαδικασίες ή ενικά συμβάντα. Τα συμβάντα διακρίνονται σε δύο είδη ανάλογα με αυτό που συμβαίνει στα χωροχρονικά σημεία στα οποία λαμβάνουν χώρα. Το πρώτο είδος αφορά σε συμβάντα στα οποία λαμβάνει χώρα τροποποίηση κάποιας ήδη υπάρχουσας ιδιότητας ενός αντικειμένου ή κάποιου χαρακτηριστικού σε ένα χωροχρονικό σημείο. Σε αυτή την κατηγορία συμβάντων ανήκουν οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Το δεύτερο είδος συμβάντων περιλαμβάνει τα συμβάντα στα οποία έχουμε εκδήλωση κάποιας ιδιότητας ενός

αντικειμένου ή κάποιου χαρακτηριστικού σε ένα χωροχρονικό σημείο. Σε αυτή την κατηγορία συμβάντων περιλαμβάνονται τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στα χωροχρονικά σημεία μίας αιτιακής διαδικασίας, σε απουσία αλληλεπιδράσεων.

Ας εξετάσουμε το παράδειγμα που αναφέρει ο Hume, «το πλέον τέλειο παράδειγμα της σχέσης αιτίας και αποτελέσματος» (Hume 2006:66), στο οποίο μία κινούμενη σφαίρα του μπιλιάρδου συναντά μία ακίνητη και μεταδίδει κίνηση σε αυτή μέσω κρούσης. Σύμφωνα με τον Hume, η αρχικώς κινούμενη σφαίρα είναι το αίτιο της κίνησης της αρχικώς ακίνητης σφαίρας μετά την κρούση. Οι κινήσεις των δύο σφαιρών, του αιτίου και του αποτελέσματος, είναι αιτιακές διαδικασίες, ενώ η κρούση τους αιτιακή αλληλεπίδραση. Άρα, η αιτιακή σχέση αναφέρεται σε δύο αιτιακές διαδικασίες που συνδέονται μέσω μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης. Ας θεωρήσουμε, τώρα, το συμβάν με το οποίο η αρχικώς κινούμενη σφαίρα αποκτά τη συγκεκριμένη κίνηση που έχει, εξαιτίας του χτυπήματος που της καταφέρνει ένας δεξιοτέχνης με τη στέκα. Το συμβάν αυτό, το οποίο συνίσταται στην αιτιακή αλληλεπίδραση της σφαίρας με τη στέκα, αποτελεί το αίτιο ενός δεύτερου συμβάντος, το οποίο επίσης είναι αιτιακή αλληλεπίδραση: της κρούσης της κινούμενης σφαίρας με τη σφαίρα που είναι αρχικά ακίνητη. Σε αυτή την περίπτωση το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις και η κίνηση της σφαίρας είναι η αιτιακή διαδικασία που συνδέει το αίτιο με το αποτέλεσμα. Θα μπορούσαμε να επαναλάβουμε την ίδια ανάλυση και με άλλα παραδείγματα, όπως το αναμμένο σπίρτο που πέφτει στο ξερό άχυρο και προκαλεί πυρκαγιά ή η μπάλα του baseball που σπάει το τζάμι στο απέναντι παράθυρο. Όμως, δεν είναι απαραίτητο. Σε κάθε περίπτωση θα διαπιστώσουμε την ύπαρξη δύο αιτιακών διαδικασιών ή δύο αιτιακών αλληλεπιδράσεων που είναι οι όροι της αιτιακής σχέσης και, αντιστοίχως, μίας αιτιακής διαδικασίας ή μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης που είναι ο «συνδετικός κρίκος» του αιτίου με το αποτέλεσμα[1].

Ο Salmon θεωρεί ότι η αιτιακή σχέση αφορά σε συμβάντα, που είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις, τα οποία συνδέονται με αιτιακές διαδικασίες. Έτσι, γράφει:

[1] Στο παράδειγμα του αναμμένου σπίρτου θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για δύο συμβάντα που συνδέονται μέσω αιτιακών διαδικασιών, την έναυση του σπίρτου και την ανάφλεξη του άχυρου. Αντιστοίχως, το χτύπημα της μπάλας με το ρόπαλο του baseball και η κρούση της μπάλας με το τζάμι είναι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις που μπορούν να θεωρηθούν ως όροι της αιτιακής σχέσης.

> Στην καθημερινή ζωή, όταν μιλάμε για σχέσεις αιτίου-αποτελέσματος, τυπικά σκεφτόμαστε (αλλά όχι απαραιτήτως πάντοτε) καταστάσεις στις οποίες ένα συμβάν (που καλούμε αίτιο) συνδέεται με ένα άλλο συμβάν (που καλούμε αποτέλεσμα) μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας. Καθένα από τα δύο συμβάντα σε αυτή τη σχέση είναι μία αλληλεπίδραση ανάμεσα σε δύο (ή περισσότερες) τεμνόμενες διαδικασίες. (Salmon 1984:178)

Από την άλλη, ο Dowe υιοθετεί και τις τρεις εκδοχές που αναφέραμε για τους όρους των αιτιακών σχέσεων. Ορίζει ως *συμβάν* (event) «την αλλαγή σε μία ιδιότητα ενός αντικειμένου κάποια χρονική στιγμή, για παράδειγμα, μία ποσοτική αλλαγή· ή μία σχετιζόμενη ταυτόχρονη αλλαγή σε περισσότερες από μία ιδιότητες σε περισσότερα από ένα αντικείμενα κ.ο.κ.» και ως *γεγονός* (fact) «ένα αντικείμενο που έχει μία ιδιότητα κάποια χρονική στιγμή ή για μία χρονική περίοδο» (Dowe 2000:169-170). Η θέση του Dowe είναι ότι οι όροι των αιτιακών σχέσεων μπορούν να είναι συμβάντα ή γεγονότα που είτε περιγράφονται με διατηρήσιμες ποσότητες είτε επιγίγνονται συμβάντων ή γεγονότων που περιγράφονται από διατηρήσιμες ποσότητες. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι συμβάντα στα οποία λαμβάνει χώρα ανταλλαγή μίας διατηρήσιμης ποσότητας και, άρα, μεταβολή της διατηρήσιμης ποσότητας που κατέχει κάθε αντικείμενο ενώ μία αιτιακή διαδικασία είναι ειδική περίπτωση γεγονότος στο οποίο το αντικείμενο κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα για κάποιο χρονικό διάστημα.

Όμως, ο Dowe δεν περιορίζεται στη θεώρηση των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων ως όρων των αιτιακών σχέσεων. Με δεδομένο ότι στον ορισμό που δίνει για τα γεγονότα συμπεριλαμβάνεται η περίπτωση του αντικειμένου που εκδηλώνει μία ιδιότητα σε μία χρονική στιγμή, ο Dowe ενσωματώνει στη θεώρησή του και αιτιακές σχέσεις ανάμεσα σε στάδια, εκδηλώσεις ιδιοτήτων από το ίδιο αντικείμενο, κατά μήκος της ίδιας διαδικασίας. Συγκεκριμένα, αναφέρεται στο παράδειγμα της κίνησης μίας σφαίρας του μπιλιάρδου (Dowe 2000:172). Η πρότερη ορμή της σφαίρας a, σε μία χρονική στιγμή t_1, $q(a)\big|_{t_1}$, θεωρείται αιτιακώς υπεύθυνη για την ύστερη ορμή της ίδιας σφαίρας, σε μία χρονική στιγμή t_2, $q(a)\big|_{t_2}$. Η σύνδεση των δύο γεγονότων γίνεται μέσω της αιτιακής διαδικασίας στην οποία ανήκουν και η οποία περιγράφει την ιστορία του ίδιου αντικειμένου. Δηλαδή, το αίτιο και το αποτέλεσμα, που είναι τα γεγονότα στα οποία ένα συγκεκριμένο ποσό ορμής εκδηλώνεται σε δύο χρονικές στιγμές από το ίδιο

αντικείμενο, τη σφαίρα του μπιλιάρδου, συνδέονται με την αιτιακή διαδικασία που ορίζεται από το ίδιο αντικείμενο που κατέχει ορμή.

Η θέση του Dowe για την ύπαρξη αιτιακών σχέσεων ανάμεσα σε συμβάντα («γεγονότα» κατά τον Dowe) που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος της ίδιας αιτιακής διαδικασίας προσεγγίζει τη θέση του Russell για την ύπαρξη αιτιακών σχέσεων κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής. Ο Russell, μολονότι δεν προϋποθέτει (όπως ο Dowe) για τον ορισμό της αιτιακής σχέσης την έννοια του αντικειμένου, ορίζει την αιτιακή σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα που ανήκουν στην ίδια αιτιακή γραμμή. Έτσι, για δύο συμβάντα που ανήκουν σε μία αιτιακή γραμμή, το χρονικώς πρότερο συμβάν θεωρείται αίτιο του χρονικώς ύστερου συμβάντος (αποτέλεσμα). Σε αυτή την περίπτωση, οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι συμβάντα που ορίζονται ως «μία πλήρης δέσμη ποιοτήτων που είναι μαζί παρούσες [compresent], δηλαδή, ως μία δέσμη που έχει τις εξής δύο ιδιότητες: (α) όλες οι ποιότητες της δέσμης είναι μαζί παρούσες, (β) τίποτα έξω από τη δέσμη δεν είναι παρόν μαζί με *οποιοδήποτε* μέλος της δέσμης» (Russell 1948:98). Έτσι, σύμφωνα με τη θέση των Russell και Dowe τα διαφορετικά στάδια μίας αιτιακής διαδικασίας έχουν σχέση αιτίου – αποτελέσματος. Μάλιστα, εφόσον τα χαρακτηριστικά, οι ποιότητες ή οι ιδιότητες, που εκδηλώνονται σε κάθε στάδιο μίας αιτιακής διαδικασίας παραμένουν ίδια, η εμμονή ενός αντικειμένου στην ύπαρξη προσδιορίζει (στην περίπτωση του Dowe), ή προσδιορίζεται από (στην περίπτωση του Russell), ένα είδος αιτιότητας που ονομάζεται *εμμενής αιτιότητα* [2].

Ο Salmon δεν φαίνεται να παίρνει σαφή θέση ως προς αυτό το είδος της αιτιότητας. Δεν αρνείται, καταρχήν, ότι κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας δύο

[2] Η διαφορά ανάμεσα στην προσέγγιση του Dowe και του Russell στην εμμενή αιτιότητα καταγράφεται στις διαφορετικές διατυπώσεις που χρησιμοποιήσαμε και αφορά στο αν η αιτιότητα αποτελεί προκείμενη του ορισμού της ταυτότητας ενός αντικειμένου (Russell) ή έννοια που προϋποθέτει την ταυτότητα του αντικειμένου (Dowe) (βλ. ενότητα 4.1). Στη νεότερη φιλοσοφία, η διάκριση ανάμεσα στο εμμενές αίτιο (causa immanens) και στο μεταβατικό αίτιο (causa transiens) συναντάται στην *Ηθική* του Spinoza (1992: μέρος Ι, Πρτ 18): «Ο Θεός είναι το εμμενές και όχι το μεταβατικό αίτιο των πραγμάτων». Παρακάτω, και συγκεκριμένα στην πρτ 28, ο Spinoza περιγράφει τη μεταβατική αιτιότητα ως την αιτιακή σχέση ανάμεσα στα ενικά πράγματα που έχουν ενική και καθορισμένη ύπαρξη και ενεργούν το ένα στο άλλο εξωτερικά. Ορισμένοι αναλυτές υποστηρίζουν ότι στον Spinoza η μεταβατική αιτιότητα πραγματοποιεί την εμμενή αιτιότητα μεταφράζοντας τη λογική φύση της πρώτης σε εξωτερικούς μηχανιστικούς όρους στη δεύτερη (Yovel 1989:158). Επίσης, ο Leibniz αρνείται τη μεταβατική αιτιότητα ανάμεσα στις Μονάδες: «Ακόμα δεν υπάρχει εξήγηση για το πώς μπορεί μία Μονάδα να αλλοιωθεί ή να αλλάξει στο εσωτερικό της από κάποιο άλλο δημιούργημα» (Leibniz 2006:§7). Ο Bennett υποστηρίζει ότι οι Μονάδες εξελίσσονται ντετερμινιστικά με βάση εσωτερικούς αιτιακούς νόμους προσήκοντες σε κάθε ξεχωριστή Μονάδα (Bennett 2003:246).

συμβάντα, που ορίζονται ως εκδηλώσεις του ίδιου χαρακτηριστικού, μπορούν να βρίσκονται σε αιτιακή σχέση. Αυτό που αρνείται είναι ότι η αιτιακή διαδικασία μπορεί να αναχθεί σε μία διακριτή αιτιακή αλυσίδα, χωρίς, όμως, να θεωρεί εσφαλμένη τη θέση ότι η αιτιακή διαδικασία είναι μία συλλογή συμβάντων με δομή συνεχούς (Salmon 1984:156,183). Επιπλέον, θεωρεί ότι δεν είναι συμφέρον, από ευρετική άποψη, να θεωρήσουμε την αιτιακή διαδικασία ως συλλογή συμβάντων διότι σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ορίσουμε την αιτιακή σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα ανεξάρτητα από την έννοια της αιτιακής διαδικασίας, γεγονός που επαναφέρει το πρόβλημα του Hume για την αιτιότητα. Ένα πρόβλημα που, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, ο Salmon υποστηρίζει ότι επιλύει με την "*at-at*" θεωρία για τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης. Ωστόσο, αυτά τα επιχειρήματα δεν απαντούν στο ερώτημα αν δύο συμβάντα κατά μήκος μίας διαδικασίας βρίσκονται σε αιτιακή σχέση και αν θα πρέπει να θεωρήσουμε τα συμβάντα που αποτελούν εκδηλώσεις χαρακτηριστικών κατά μήκος μίας διαδικασίας ως όρους μίας αιτιακής σχέσης. Δεν βλέπουμε το λόγο η αιτιακή σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα που ανήκουν σε μία αιτιακή διαδικασία να μην μπορεί να ορισθεί εκ των υστέρων, *προϋποθέτοντας* την έννοια της αιτιακής διαδικασίας, όπως υποστηρίζει ο Dowe.

5.2 Αιτιακές συνδέσεις και το πρόβλημα του Hume

Οι όροι της αιτιακής σχέσης, το αίτιο και το αποτέλεσμα, συνδέονται μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας ή μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης, ανάλογα με το τι είδους οντότητες θεωρούμε ότι είναι. Αυτή είναι η θέση που θα υποστηρίξουμε σε αυτή την ενότητα και που βρίσκεται σε γενική συμφωνία με εκείνη του Dowe. Για το Salmon η σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα είναι μία αιτιακή διαδικασία που ξεκινάει από την αιτιακή αλληλεπίδραση που θεωρούμε ως αίτιο και καταλήγει στην αιτιακή αλληλεπίδραση που θεωρούμε ως αποτέλεσμα. Προφανώς, αυτός ο περιορισμός των αιτιακών συνδέσεων στις αιτιακές διαδικασίες συνάδει με τη θέση ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ωστόσο, θεωρούμε ότι αποτελεί μόνο μία ειδική περίπτωση. Το ενδιαφέρον της θέσης του Salmon συνίσταται στον ισχυρισμό του ότι απαντάει στο πρόβλημα της αιτιότητας που διέγνωσε ο Hume. Η έννοια της αιτιακής διαδικασίας εκφράζει την ιδέα της σύνδεσης που αναζητούσε ο

Hume ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα. Όμως ας θυμηθούμε συγκεκριμένα ποιο ήταν το πρόβλημα, ποια λύση προσέφερε ο Hume σε αυτό, αλλά και ποια είναι η απάντηση του Salmon.

Για τον Hume υπάρχουν τρεις σχέσεις που μπορούν να διαπιστωθούν εμπειρικά, με βάση τα δεδομένα των αισθήσεων, και αφορούν στα αντικείμενα που χαρακτηρίζουμε ως αίτια και αποτελέσματα. Οι τρεις αυτές σχέσεις είναι η *χρονική προτεραιότητα* του αιτίου έναντι του αποτελέσματος, η *χωροχρονική γειτονία* και η *σταθερή σύζευξη* του αιτίου με το αποτέλεσμα. Οι δύο πρώτες σχέσεις διαπιστώνονται σε κάθε ενική εκδήλωση του αιτίου και του αποτελέσματος, ενώ η τρίτη σχέση για να διαπιστωθεί απαιτεί την παρατήρηση πολλών όμοιων εκδηλώσεων του αιτίου και του αποτελέσματος. Εκτός από αυτές τις τρεις σχέσεις, δεν υπάρχει τίποτα άλλο στα αντικείμενα που να θεωρείται ότι συνδέει το αίτιο με το αποτέλεσμα. Με βάση αυτά τα τρία χαρακτηριστικά της αιτιακής σχέσης διατυπώνεται από το Hume ο πρώτος ορισμός της αιτίας:

> Μπορούμε να ορίσουμε την ΑΙΤΙΑ *ως ένα αντικείμενο που προηγείται και βρίσκεται σε συνάφεια με κάποιο άλλο, ενώ όλα τα αντικείμενα που μοιάζουν με το πρώτο βρίσκονται σε όμοια σχέση χρονικής προτεραιότητας και συνάφειας με τα αντικείμενα που μοιάζουν με το δεύτερο.*(Hume 2005:323)[3]

Αυτό που δεν εξηγείται στον πρώτο ορισμό που δίνει ο Hume για την αιτία είναι η ιδέα της αναγκαίας σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα. Ο Hume θεωρεί ότι αυτό είναι από σημαντικότερα ερωτήματα στη φιλοσοφία και αφορά στην δύναμη και στην αποτελεσματικότητα των αιτίων να παράγουν τα αποτελέσματα τους (Hume 2005: 306). Το πρώτο συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει ο Hume κατά την αναζήτηση της ιδέας της αναγκαίας σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα είναι ότι αυτή δεν μπορεί να θεμελιωθεί μέσω της παρατήρησης του αιτίου με το αποτέλεσμα. Δεν υπάρχει κατ' αίσθηση εντύπωση η οποία να προκαλεί αυτή την ιδέα. Γι' αυτό στρέφεται στον αιτιακό συλλογισμό και στον τρόπο που συνάγουμε από το αίτιο το αποτέλεσμα. Εκεί διαπιστώνει ότι η ιδέα του αποτελέσματος δεν μπορεί να προκύψει από το αίτιο ούτε με το λόγο, ούτε με το λόγο σε συνδυασμό με την εμπειρία. Το αποτέλεσμα δεν είναι λογικώς αναγκαίο επακόλουθο του αιτίου. Μπορούμε να φανταστούμε την κινούμενη σφαίρα να προσκρούει στην ακίνητη και η τελευταία να μην τίθεται σε κίνηση.

[3] Η μεταφράστρια αποδίδει με τον όρο "συνάφεια" τον όρο "contiguity" του πρωτοτύπου – που εμείς αποδίδουμε ως "χωροχρονική γειτονία".

Δηλαδή, οι προτάσεις "Η κινούμενη σφαίρα προσπίπτει στην ακίνητη" και "Η ακίνητη σφαίρα δεν τίθεται σε κίνηση" δεν συγκροτούν ασυνεπές σύνολο προτάσεων. Όμως και η εμπειρία δεν βοηθάει στη δικαιολόγηση της πεποίθησης ότι το αποτέλεσμα έπεται αναγκαία του αιτίου. Σε αυτή την περίπτωση το πρόβλημα συνίσταται στην αδυναμία δικαιολόγησης της ορθότητας του επαγωγικού συλλογισμού. Από ένα σύνολο παρελθόντων εμπειρικών τεκμηρίων σύμφωνα με τα οποία ένα ορισμένο αποτέλεσμα e_i έπεται του αιτίου c_i για i=1,…,n , δεν μπορούμε να συνάγουμε ότι το ίδιο αποτέλεσμα e_{n+1} έπεται της εμφάνισης του αιτίου c_{n+1}, διότι το μέλλον μπορεί να επιφυλάσσει εκπλήξεις! Αν υποθέσουμε ότι αυτό δεν συμβαίνει και υιοθετήσουμε ως επιπλέον προκείμενη την πρόταση "Το μέλλον είναι ίδιο με το παρελθόν" τότε το επαγωγικό επιχείρημα μετατρέπεται σε έγκυρο παραγωγικό. Όμως, η επιπλέον προκείμενη δεν αποτελεί λογική αλήθεια, διότι μπορούμε να φανταστούμε το μέλλον να διαφέρει από το παρελθόν, ενώ η δικαιολόγησή της στην βάση προγενέστερων εμπειρικών τεκμηρίων μάς οδηγεί και πάλι στο σημείο απ' όπου ξεκινήσαμε. Άρα, ο επαγωγικός συλλογισμός δεν μπορεί να δικαιολογηθεί αναγόμενος σε ένα έγκυρο παραγωγικό επιχείρημα, κατά συνέπεια δεν μπορούμε να στηρίξουμε σε αυτόν την αναγκαιότητα με την οποία η ιδέα του αποτελέσματος ακολουθεί την ιδέα του αιτίου.

Η λύση που προτείνει ο Hume στο πρόβλημα της ιδέας της αναγκαίας σύνδεσης είναι ψυχολογική. Η παρατήρηση πολλών όμοιων περιπτώσεων σχέσεων αιτίου και αποτελέσματος δεν μπορεί να προσθέσει κάποια νέα εντύπωση στα αντικείμενα. Όμως, ο νους μας έχει την προδιάθεση να μεταβαίνει από μία ιδέα σε μία άλλη εφόσον έχει συνηθίσει να προσλαμβάνει συζευγμένες τις εντυπώσεις που αντιστοιχούν σε αυτές τις ιδέες. Η προδιάθεση αυτή, που είναι αντανακλαστική[4], δηλαδή δεν εμπίπτει στον ανθρώπινο έλεγχο, είναι η «καθ' έξιν μετάβαση». Η ενεργοποίηση αυτής της προδιάθεσης προκαλείται από την παρατήρηση της σταθερής σύζευξης του αιτίου και του αποτελέσματος και δημιουργεί μία νέα εσωτερική «εντύπωση» η οποία αντιστοιχεί στην ιδέα της αναγκαίας σύνδεσης. Έτσι, ο Hume καταλήγει στο εξής συμπέρασμα, το οποίο αποτελεί τη βάση για την υποκειμενική θεώρηση της αιτιότητας ως σύνδεσης ιδεών στο νου που του αποδίδεται:

[4] Μάλιστα, ο Salmon υποστηρίζει ότι η θεωρία του Hume για τη φύση της αναγκαίας σύνδεσης αιτίου και αποτελέσματος είναι παρόμοια με αυτή που στο πλαίσιο της ψυχολογίας του εικοστού αιώνα ονομάστηκε *θεωρία των εξαρτημένων αντανακλαστικών* και εισήχθη από τον Ι.Π. Παβλόφ το 1905 στη βάση του γνωστού πειράματος (Salmon 1998:15).

> …η αναγκαιότητα είναι κάτι που υπάρχει στο νου, όχι στα αντικείμενα, και δεν είναι ποτέ δυνατόν να σχηματίσουμε την παραμικρή ιδέα για αυτήν εάν τη θεωρήσουμε ως ποιότητα των αντικειμένων. Είτε δεν έχουμε καμία ιδέα της αναγκαιότητας είτε αυτή δεν είναι παρά ο καθορισμός της σκέψης να περνάει από αιτίες σε αποτελέσματα και από αποτελέσματα σε αιτίες σύμφωνα με την εμπειρίας της σύζευξης. (Hume 2005: 318).

Σε συμφωνία με αυτή τη θέση ο Hume παρουσιάζει το δεύτερο ορισμό της αιτίας που ορίζει την αιτιακή σχέση ως φυσική σχέση, ως συνειρμό δύο ιδεών:

> ΑΙΤΙΑ είναι *ένα αντικείμενο που προηγείται και βρίσκεται σε συνάφεια με κάποιο άλλο και είναι ενωμένο μαζί του με τέτοιο τρόπο ώστε η ιδέα του ενός να καθορίζει την ιδέα του άλλου και η εντύπωση του ενός να καθορίζει το νου να σχηματίσει μία πιο ζωηρή ιδέα του άλλου*. (Hume 2005: 324).

Ο Salmon προσπαθεί να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα με βάση την έννοια της αιτιακής διαδικασίας εκεί ακριβώς που ο Hume απέτυχε, στα ίδια τα πράγματα, και όχι στους ψυχολογικούς μηχανισμούς με τους οποίους ο νους σχηματίζει τις ιδέες των πραγμάτων. Για τον Salmon η αιτιακή διαδικασία είναι η φυσική σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα, που ορίζεται ανεξάρτητα από την αιτιότητα, με βάση φυσικά χαρακτηριστικά ή τροποποιήσεις τους, καθώς και διατηρήσιμες ή αναλλοίωτες ποσότητες, που διαδίδονται κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής και είναι τοπικώς μετρήσιμα φυσικά μεγέθη. Η διάδοση αυτών των χαρακτηριστικών κατά μήκος μίας διαδικασίας περιγράφει τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης από το αίτιο στο αποτέλεσμα.

Για τον Salmon η σύνδεση που υπάρχει ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα δεν είναι απαραιτήτως *αναγκαία*, όπως θεωρούσε ο Hume: το αίτιο δεν προκαλεί αναγκαία το αποτέλεσμα. Αυτή είναι μία διαφορά ανάμεσα στη λύση που προτείνει ο Salmon και σε εκείνη που αναζητούσε ο Hume για το πρόβλημα της αιτιότητας. Ο Salmon επισημαίνει τη διαφορά αυτή (Salmon 1998:24), χωρίς, όμως, να τον απασχολεί ιδιαιτέρως σε σχέση με το ζήτημα της σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα. Διακρίνει την αιτιότητα σε ντετερμινιστική και σε πιθανοκρατική (Salmon 1998:200) και θεωρεί ότι οι μηχανισμοί που ενέχουν το αίτιο και το αποτέλεσμα καθώς και τη φυσική σύνδεσή τους δεν είναι απαραιτήτως ντετερμινιστικοί. Έτσι, το πρόβλημα της εύρεσης της φυσικής σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα δεν αφορά μόνο σε ντετερμινιστικού τύπου αιτιακές σχέσεις - συνεπώς, και η λύση που προτείνεται δεν περιορίζεται σε αναγκαίες συνδέσεις.

Πέραν από αυτό το ζήτημα, ο Salmon υποστηρίζει ότι η λύση που προτείνει είναι σύμφωνη με τη θεώρηση του Hume. Με αυτό εννοεί ότι δεν καταφεύγει στην υπόθεση αιτιακών δυνάμεων για την επεξήγηση της φυσικής σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα. Συγκεκριμένα αναφέρει:

> Θεωρώντας την "at-at" θεωρία για τη διάδοση του ίχνους ως βάση για τη διάκριση των αιτιακών διαδικασιών από τις ψευδο-διαδικασίες, παρέχουμε μία προσέγγιση για τη διάδοση πληροφορίας και αιτιακής επίδρασης χωρίς να προσφεύγουμε σε οποιεσδήποτε "αιτιακές δυνάμεις", τις οποίες έχει πλήρως απαγορεύσει η προσέγγιση του Hume στην αιτιότητα. Με αυτή την προσέγγιση βλέπουμε ότι τελικά η μυστηριώδης σύνδεση ανάμεσα σε αιτίες και αποτελέσματα δεν είναι και τόσο μυστηριώδης. (Salmon 1984:155).

Ωστόσο, η παραπάνω δήλωση του Salmon δεν απέτρεψε ορισμένους σχολιαστές της πρώιμης θεωρίας του από το να ασκήσουν κριτική σε δύο σημεία: α) στη χρήση αντιγεγονικών προτάσεων στον ορισμό της διάδοσης ίχνους και β) στην αναφορά σε *αιτιακές τάσεις* (causal propensities) για τη θεμελίωση της πιθανοκρατικής αιτιότητας. Έχουμε ήδη αναφερθεί, στο τρίτο κεφάλαιο (βλ. ενότητα 3.4.3), στις ανεπάρκειες της πρότασης του Salmon για την εύρεση της αντικειμενικής αληθοτιμής μίας αντιγεγονικής πρότασης με τρόπο συμβατό με την εμπειριστική γνωσιολογία. Τα προβλήματα αυτά, σύμφωνα με τον Dowe (2000:87), ανακύπτουν και ως προς την αποτίμηση των αληθοτιμών δηλώσεων που αφορούν σε αιτιακές τάσεις, εφόσον αυτή προκύπτει από το πείραμα.

Συγκεκριμένα, ο Salmon υποστηρίζει ότι οι αιτιακές τάσεις συνίστανται από κατανομές πιθανότητας δυνατών συμβάντων, χωρίς όμως οι ίδιες πιθανότητες να είναι τάσεις. Θεωρεί ότι η ερμηνεία των πιθανοτήτων ως τάσεων δεν είναι μία *αποδεκτή* ερμηνεία του λογισμού των πιθανοτήτων[5]. Αντιθέτως, υποστηρίζει ότι μία αποδεκτή ερμηνεία για τις φυσικές πιθανότητες είναι η συχνοτική ερμηνεία[6]. Για να προσδιορίσουμε ποσοτικά τις αιτιακές τάσεις με βάση τις σχετικές συχνότητες που προκύπτουν για πραγματικά συμβάντα θα πρέπει να εκτελέσουμε κάποια πειράματα ή παρατηρήσεις σε καθορισμένους στατιστικούς πληθυσμούς. Ο Salmon υποστηρίζει ότι η αιτιακή τάση προσδιορίζεται ποσοτικά ως η πιθανότητα να λάβει χώρα ένας

[5] Για ένα τυπικό σύστημα μία ερμηνεία είναι αποδεκτή αν το νόημα που αποδίδεται στους πρωταρχικούς όρους με αυτή την ερμηνεία μετασχηματίζει τα τυπικά αξιώματα, και κατά συνέπεια όλα τα θεωρήματα, σε αληθείς προτάσεις. Μία βασική απαίτηση για τις πιθανοκρατικές έννοιες είναι να ικανοποιούν τα μαθηματικά αξιώματα του λογισμού των πιθανοτήτων (Salmon 1966:63).

[6] Η συχνοτική ερμηνεία των πιθανοτήτων αντιμετωπίζει πρόβλημα σε σχέση με το γενικό αξίωμα της αριθμήσιμης αθροισιμότητας των πιθανοτήτων. Γι' αυτό ο Salmon υποθέτει ότι ισχύει η πεπερασμένη αθροισιμότητα.

τύπος συμβάντος, στον οποίο ανήκει το ενικό συμβάν, σε μία αντικειμενικώς ομογενή διαμέριση ενός κατάλληλα επιλεγμένου πληθυσμού, μίας κλάσης αναφοράς που είναι σχετική με το συγκεκριμένο συμβάν. Έτσι, η πρόταση "Η αιτιακή τάση του *c* είναι 0,5" είναι αληθής εφόσον υπάρχει κλάση αναφοράς Ω και αντικειμενικά ομογενής διαμέριση $\{K_i\}_{i\in I}$ της Ω τέτοια ο τύπος συμβάντος C στον οποίο ανήκει το ενικό συμβάν c, $c \in C$, να περιέχεται σε κάποιο κελί της j της $\{K_i\}_{i\in I}$, $C \subseteq K_j$, και να ισχύει $P(C|K_j) = 0,5$. Τι γίνεται όμως στην περίπτωση που έχουμε περισσότερες από μία κλάσεις αναφοράς ή/και περισσότερες από μία αντικειμενικώς ομογενείς διαμερίσεις που να είναι σχετικές με το C; Με ποιο κριτήριο επιλέγουμε ποια είναι η κατάλληλη για την αποτίμηση, ως προς την αληθοτιμή, της πρότασης για την αιτιακή τάση του συμβάντος; Αυτό ήταν το πρόβλημα που αντιμετωπίσαμε με τις αντιγεγονικές προτάσεις και, συνεπώς, ο Dowe έχει δίκιο όταν υποστηρίζει ότι το πρόβλημα παραμένει και στην περίπτωση των αιτιακών τάσεων.

Ουσιαστικά το πρόβλημα είναι η επιλογή *ενός κατάλληλου* πλαισίου, που είναι διαφορετικό από το ενεργεία πλαίσιο, για την αποτίμηση της αληθοτιμής μίας πρότασης που στο ενεργεία πλαίσιο εκφράζει μία μη ενεργοποιημένη δυνατότητα ενώ στο προς επιλογή πλαίσιο η δυνατότητα αυτή έχει ενεργοποιηθεί. Η επίλυση αυτού του προβλήματος με τρόπο συμβατό προς τις εμπειριστικές αρχές θα επέτρεπε στον Salmon να θεωρήσει ότι τόσο οι αιτιακές τάσεις όσο και οι ιδιότητες των αιτιακών διαδικασιών που περιγράφονται με αντιγεγονικές προτάσεις δεν αποτελούν αιτιακές δυνάμεις του είδους που αρνείται ο Hume - δηλαδή, δυνάμεις που υπάρχουν μολονότι δεν έχουμε εντυπώσεις των εκδηλώσεων τους[7].

Πέραν όμως από την κριτική που ασκείται, με βάση το ζήτημα των αιτιακών δυνάμεων, στη θέση του Salmon ότι η αιτιακή διαδικασία είναι ακριβώς η σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα την οποία αναζητούσε ο Hume, υπάρχει και ένα άλλο σημείο στην προσέγγιση του Salmon που πρέπει να μας προβληματίσει. Για να συνδεθεί το αίτιο με το αποτέλεσμα μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας θα πρέπει αυτά

[7] Ο Ψύλλος (Psillos 2002:39) ονομάζει τη θέση του Hume "Απαίτηση Εκδήλωσης" (Manifestation Thesis) και υποστηρίζει ότι είναι το συμπέρασμα της εφαρμογής του ξυραφιού του Ockham σε σχέση με τις αιτιακές δυνάμεις. Η Απαίτηση Εκδήλωσης διατυπώνεται στο εξής χωρίο της *Πραγματείας*: «…είναι αδύνατον να συλλάβουμε την ιδέα της δύναμης και της αποτελεσματικότητας, εκτός εάν καταδειχθούν ορισμένες περιπτώσεις στις οποίες γίνεται *αντιληπτή* η άσκηση αυτής της δύναμης» (Hume 2005: 310).

να βρίσκονται σε χωροχρονική απόσταση. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις που περιγράφουν το αίτιο και το αποτέλεσμα στην προσέγγιση του Salmon δεν είναι χωροχρονικώς γειτονικά συμβάντα, όπως θεωρούσε ο Hume, αλλά χωροχρονικώς απομακρυσμένα συμβάντα που συνδέονται με μία αιτιακή διαδικασία. Μάλιστα, όπως έχουμε ήδη αναφέρει, ο Salmon (1997) αντιμετωπίζει την περίπτωση της συνεχούς σειράς αλληλεπιδράσεων ως εξιδανικευμένη απλούστευση και μας προτρέπει να αναλύσουμε μία συνεχή σειρά αλληλεπιδράσεων ως διακριτή ακολουθία αλληλεπιδράσεων, κάθε μία από τις οποίες συνδέεται με την επόμενη μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας. Ωστόσο, το πρόβλημα του Hume αφορά στην αναζήτηση της αναγκαίας σύνδεσης του αιτίου που είναι χωροχρονικώς γειτονικό με, και χρονικώς πρότερο ως προς, το αποτέλεσμα. Ο δεύτερος ορισμός της αιτίας, που εκφράζει τη λύση που προτείνει ο Hume, μας λέει ότι υπό αυτές τις προϋποθέσεις η ιδέα της σύνδεσης μπορεί να ανακαλυφθεί στις διεργασίες που συντελούνται στον ανθρώπινο νου.

Στην *Πραγματεία* ο Hume προχωράει ένα βήμα παραπέρα αναφερόμενος σε περιπτώσεις δύο χωρικώς απομακρυσμένων αντικειμένων που βρίσκονται σε αιτιακή σχέση.

> Αν και μερικές φορές δίνεται η εντύπωση ότι αντικείμενα που βρίσκονται σε απόσταση μπορεί να παράγουν το ένα το άλλο, κατόπιν προσεκτικής εξέτασης συνήθως ανακαλύπτουμε ότι αυτά συνδέονται με μία αλυσίδα από αιτίες συναφείς τόσο μεταξύ τους όσο και προς τα δύο απομακρυσμένα αντικείμενα. Ακόμη και εάν σε μερικές περιπτώσεις δεν μπορούμε να ανακαλύψουμε αυτή τη σύνδεση, υποθέτουμε ότι είναι υπαρκτή. (Hume 2005: 192)

Ο Salmon ορθά επισημαίνει ότι η παρεμβολή μίας αλυσίδας αιτίων και αποτελεσμάτων που ικανοποιούν τη συνθήκη της χωροχρονικής γειτνίασης δεν επιλύει το πρόβλημα της σύνδεσης του αρχικού αιτίου με το τελικό αποτέλεσμα αλλά απλώς το πολλαπλασιάζει. Διότι, σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να εξηγήσουμε με ποιον τρόπο συνδέεται κάθε αίτιο, που αποτελεί έναν κρίκο στην αλυσίδα, με το χωροχρονικώς γειτονικό αποτέλεσμα που είναι ο επόμενος κρίκος. Ωστόσο, ο Hume δεν ήθελε μέσω της αιτιακής αλυσίδας να επιλύσει το πρόβλημα της σύνδεσης του αιτίου με το αποτέλεσμα, αλλά να δείξει με ποιον τρόπο αποκαθίσταται η γειτνίαση, η επαφή, του αιτίου με το αποτέλεσμα στις περιπτώσεις που αυτά είναι χωροχρονικώς απομακρυσμένα. Ακόμα και όταν το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι χωροχρονικώς γειτονικά το πρόβλημα της φυσικής ή της αναγκαίας σύνδεσης παραμένει.

Η πρόταση του Salmon είναι να αντικαταστήσουμε την αιτιακή αλυσίδα που συνδέει το απομακρυσμένο αίτιο με το αποτέλεσμα με μία αιτιακή διαδικασία και τότε θα μας αποκαλυφθεί η αιτιακή σύνδεση. Η αιτιακή διαδικασία διαδίδει την επίδραση από το αίτιο στο αποτέλεσμα με συνεχή τρόπο, σύμφωνα με την "*at-at*" θεωρία της διάδοσης, και λόγω της συνέχειας δεν έχει νόημα να ρωτήσουμε πως διαδίδεται η αιτιακή επίδραση από το ένα συμβάν (χωροχρονικό σημείο) στο *επόμενο*, διότι στο συνεχές δεν υπάρχει *επόμενο* συμβάν. Όπως ήδη αναφέραμε, η πρόταση αυτή προϋποθέτει ότι το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι χωροχρονικώς απομακρυσμένα συμβάντα. Όμως, πρέπει να επισημάνουμε, επιπλέον, ότι δεν πρόκειται απλώς για την αντικατάσταση της αλυσίδας αιτίων και αποτελεσμάτων με μία αιτιακή διαδικασία, αλλά και για μία διαφορετική θεώρηση του είδους των συμβάντων κατά μήκος της αιτιακής αλυσίδας και της αιτιακής διαδικασίας. Αν το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις, τότε μία αιτιακή αλυσίδα είναι μία ακολουθία αιτιακών αλληλεπιδράσεων, δηλαδή συμβάντων στα οποία μεταβάλλεται κάποιο χαρακτηριστικό. Ωστόσο, σύμφωνα με το Salmon, κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας δεν λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις που επιφέρουν τροποποιήσεις των χαρακτηριστικών που διαδίδονται. Τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε μία αιτιακή διαδικασία είναι εκδηλώσεις χαρακτηριστικών σε συγκεκριμένα χωροχρονικά σημεία και, όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, αν θέλουμε να μιλήσουμε για αιτιακές σχέσεις ανάμεσα σε αυτά θα μιλήσουμε για εμμενή αιτιότητα.

Έτσι, ακόμα και αν δεχτούμε ότι η έννοια της αιτιακής διαδικασίας είναι σε πλήρη συμφωνία με τις χιουμιανές απαιτήσεις, ο Salmon δεν απαντά στο πρόβλημα της φυσικής σύνδεσης ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα που θέτει ο Hume. Για να ορίσει τη φυσική σύνδεση θυσιάζει τη χωροχρονική γειτονία του αιτίου με το αποτέλεσμα – συνθήκη που αποτελεί προϋπόθεση της χιουμιανής θεώρησης. Αυτό, βεβαίως, δεν σημαίνει ότι ο Salmon υιοθετεί την εξ αποστάσεως δράση του αιτίου, αφού ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα παρεμβάλλεται η αιτιακή διαδικασία που διαδίδει συνεχώς, τοπικά, την αιτιακή επίδραση. Ο Salmon απομακρύνει χωροχρονικώς το αίτιο από το αποτέλεσμα για να τα ξανασυνδέσει μέσω της αιτιακής διαδικασίας που αποτελεί τη φυσική τους σύνδεση.

Αν θέλουμε στο πλαίσιο μίας οντολογίας αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων και σε συμφωνία με τη χιουμιανή θέση για τη χωροχρονική γειτονία του αιτίου με το αποτέλεσμα, να ανακαλύψουμε τη φυσική σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα, θα πρέπει να θεωρήσουμε ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι αιτιακές διαδικασίες που τέμνονται σε κάποιο χωροχρονικό σημείο, το οποίο αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή αλληλεπίδραση. Όπως αναφέραμε και στην προηγούμενη ενότητα, αυτό είναι το σχήμα που περιγράφει στο πλαίσιο των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων το χιουμιανό παράδειγμα των σφαιρών του μπιλιάρδου που συγκρούονται και μεταβάλλουν τις κινητικές καταστάσεις τους. Μάλιστα, αν αντί για αιτιακές διαδικασίες μιλήσουμε για αιτιακά αντικείμενα, όπως μας επιτρέπει να κάνουμε η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe, τότε μπορούμε να προσεγγίσουμε ακόμα περισσότερο τη θεώρηση του Hume που θεωρεί ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης, το αίτιο και το αποτέλεσμα, είναι αντικείμενα. Στο χωροχρονικό σημείο που λαμβάνει χώρα η κρούση, οι δύο σφαίρες βρίσκονται σε επαφή και, όπως αναφέρει ο Hume, «δεν μεσολάβησε διακοπή μεταξύ της κρούσης και της κίνησης» (Hume 2006:67). Δηλαδή, το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι χωροχρονικώς γειτονικά. Αυτό που συνδέει το αίτιο και το αποτέλεσμα είναι η αιτιακή αλληλεπίδραση. Οι δύο αιτιακές διαδικασίες δεν τέμνονται απλώς σε ένα χωροχρονικό σημείο αλλά αλληλεπιδρούν. Το γεγονός αυτό καθιστά το τμήμα της *μίας* αιτιακής διαδικασίας που λαμβάνει χώρα "πριν" από το συμβάν της αλληλεπίδρασης *αίτιο* των χαρακτηριστικών που εκδηλώνονται στην *άλλη* διαδικασία "μετά" την αλληλεπίδραση. Η ύπαρξη της αιτιακής αλληλεπίδρασης δεν μπορεί να διαπιστωθεί τοπικά, παρά μόνο όσον αφορά στα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της. Όμως, η διαπίστωση ότι η αιτιακή αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα στο σημείο τομής των διαδικασιών, προκύπτει από τοπικά γεγονότα που αφορούν στη σύγκριση των χαρακτηριστικών και των διατηρήσιμων ποσοτήτων που εκδηλώνουν οι δύο διαδικασίες πριν και μετά την αλληλεπίδραση.

Πέραν από τις απλές περιπτώσεις που αναφέραμε, στις οποίες οι όροι της αιτιακής σχέσης συνδέονται είτε μέσω μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης είτε μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας, υπάρχουν και πιο σύνθετες περιπτώσεις. Σε αυτές τις περιπτώσεις το αίτιο και το αποτέλεσμα συνδέονται από μία συνεχή σειρά αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων στην οποία μπορούμε να αναγνωρίσουμε ενδιάμεσα αίτια και αποτελέσματα κατά το πρότυπο των απλών περιπτώσεων που

εξετάσαμε. Αυτό το σύνολο αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων που παρεμβάλλονται ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα μπορούμε να το θεωρήσουμε ως ανάλογο της κλασικής αιτιακής αλυσίδας.

Ο Dowe για να καλύψει όλες τις δυνατές περιπτώσεις αιτιακών σχέσεων παρουσιάζει δύο συνθήκες για την ύπαρξη αιτιακής σύνδεσης. Η πρώτη αφορά στην περίπτωση που οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις:

> Οι αλληλεπιδράσεις I_1, I_2 συνδέονται με μία αιτιακή σύνδεση χάριν μίας αιτιακής διαδικασίας p, μόνο αν κάποια διατηρήσιμη ποσότητα που ανταλλάσσεται στην I_2 ανταλλάσσεται επίσης και στην I_1 και κατέχεται από την p. (Dowe 2000:171)

Η συνθήκη αυτή είναι μόνο αναγκαία, και όχι και ικανή συνθήκη, λόγω προβλημάτων που αφορούν στη συνάφεια του αιτίου με το αποτέλεσμα, τα οποία αναλύσαμε τόσο στο τρίτο όσο και στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας. Ο Dowe ονομάζει αυτά τα προβλήματα «προβλήματα κακών συνδέσεων» (misconnections) και την προσέγγιση που θα θεωρούσε την παραπάνω συνθήκη ως αναγκαία *και* ικανή «αφελή προσέγγιση των διαδικασιών» (naïve process account) (Dowe 2000:147).

Η δεύτερη συνθήκη που διατυπώνει ο Dowe αφορά σε αιτιακές σχέσεις που έχουν ως όρους *γεγονότα*, σύμφωνα με την ορολογία που υιοθετεί, και όχι σε συμβάντα, δηλαδή αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Έστω ότι το αίτιο είναι το γεγονός ότι ένα αντικείμενο a κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα q, $q(a)$, ενώ, αντιστοίχως, το αποτέλεσμα είναι το γεγονός ότι ένα αντικείμενο b κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα q', $q'(b)$. Τότε θα λέμε ότι

> Υπάρχει μία αιτιακή σύνδεση (ή νήμα) ανάμεσα στο γεγονός $q(a)$ και στο γεγονός $q'(b)$ αν και μόνο αν υπάρχει ένα σύνολο αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα $q(a)$ και $q'(b)$ τέτοια ώστε:
>
> (1) οποιαδήποτε αλλαγή αντικειμένου από a σε b και οποιαδήποτε αλλαγή της διατηρήσιμης ποσότητας από q σε q' λαμβάνει χώρα σε μία αιτιακή αλληλεπίδραση που περιλαμβάνει τις ακόλουθες αλλαγές: $\Delta q(a)$, $\Delta q(b)$, $\Delta q'(a)$ και $\Delta q'(b)$· και
> (2) για κάθε ανταλλαγή στην (1) που περιλαμβάνει περισσότερες από μία διατηρήσιμες ποσότητες, οι αλλαγές στις ποσότητες διέπονται από ένα μοναδικό φυσικό νόμο. (Dowe 2000:171-2)

Οι μεταβολές στις διατηρήσιμες ποσότητες, ή στα αντικείμενα που συγκροτούν τα γεγονότα που συνδέονται σε μία αιτιακή σχέση, λαμβάνουν χώρα σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Η θέση αυτή εκφράζει την ιδέα που αναφέραμε προηγουμένως ότι

δύο αιτιακές διαδικασίες, που περιγράφουν το αίτιο και το αποτέλεσμα, συνδέονται μέσω μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης. Όμως, η συνθήκη του Dowe ικανοποιείται και σε περιπτώσεις αιτιακών σχέσεων που εκφράζουν την εμμενή αιτιότητα. Όπως είδαμε στην προηγούμενη ενότητα, δύο γεγονότα στα οποία το ίδιο αντικείμενο κατέχει την ίδια διατηρήσιμη ποσότητα, συνδέονται μέσω της αιτιακής διαδικασίας που ορίζεται από την κατοχή της ποσότητας αυτής από το ίδιο αντικείμενο και, άρα, έχουν σχέση αιτίου-αποτελέσματος.

Κατά την άποψη του Dowe, η δεύτερη συνθήκη για την αιτιακή σύνδεση αντιμετωπίζει το πρόβλημα των "κακών συνδέσεων". Άλλωστε, γι' αυτό διατυπώνεται ως ικανή και αναγκαία συνθήκη αιτιακής σύνδεσης. Ας δούμε ένα παράδειγμα. Έστω μία κινούμενη πράσινη μπάλα που έχει σταθερή ορμή q. Μία περίπτωση "κακής σύνδεσης" είναι να θεωρήσουμε ότι η ορμή της μπάλας σε μία χρονική στιγμή t_1, είναι αίτιο του γεγονότος ότι η μπάλα είναι πράσινη σε μία επόμενη χρονική στιγμή t_2. Σε αυτή την περίπτωση έχουμε δύο ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες που συμπίπτουν χωροχρονικά και θεωρούμε ότι το χαρακτηριστικό που εκδηλώνεται στη μία από αυτές σε κάποια χρονική στιγμή, η ορμή, είναι αίτιο της εκδήλωσης του χαρακτηριστικού της άλλης διαδικασίας σε μία επόμενη χρονική στιγμή, του χρώματος, ενώ η αιτιακή σύνδεση είναι η αιτιακή διαδικασία που ορίζεται από την κινούμενη πράσινη μπάλα. Η συνθήκη που προτείνει ο Dowe δεν επιτρέπει σχέσεις τέτοιου είδους διότι, σύμφωνα με την (1) η αλλαγή του χαρακτηριστικού, της διατηρήσιμης ποσότητας, μπορεί να γίνει μόνο μέσω αιτιακών αλληλεπιδράσεων, και στο συγκεκριμένο παράδειγμα δεν λαμβάνει χώρα καμιά αιτιακή αλληλεπίδραση στο χρονικό διάστημα t_1 και t_2.

Η πρόταση (2) στη δεύτερη συνθήκη αιτιακής σύνδεσης του Dowe αποκλείει την τυχαία σύμπτωση αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Έτσι ερμηνεύεται η απαίτηση οι διατηρήσιμες ποσότητες που ανταλλάσσονται σε μία οποιαδήποτε αλληλεπίδραση που συνδέει το αίτιο με το αποτέλεσμα να διέπονται από ένα και μοναδικό φυσικό νόμο[8]. Για παράδειγμα, έστω ότι μία μπάλα προσκρούει σε ένα τοίχο και μεταβάλλει

[8] Ο Dowe διευκρινίζει ότι για το σημείο αυτό δεν απαιτείται κάποια βαθιά ανάλυση των φυσικών νόμων. Αρκεί η απλή συμμεταβολή των διατηρήσιμων ποσοτήτων, δηλαδή η ύπαρξη κάποιας συναρτησιακής σχέσης που να τις συσχετίζει (Dowe 2000:172). Αυτή η διευκρίνιση μάς κάνει να διερωτόμαστε γιατί ο Dowe, εφόσον δεν απαιτεί κάτι παραπάνω από το φυσικό νόμο που διέπει τη σύνθετη αιτιακή αλληλεπίδραση, δεν αρκείται στην ύπαρξη μίας αληθούς καθολικής γενίκευσης, όπως θα έκανε ο Salmon.

την αρχική ορμή της. Στο σημείο της πρόσκρουσης, τη χρονική στιγμή που η μπάλα βρίσκεται σε επαφή με τον τοίχο, ένα πανίσχυρο λέιζερ δημιουργεί ίχνος καψίματος στην μπάλα. Οι δύο αλληλεπιδράσεις, η κρούση της μπάλας στον τοίχο και η δημιουργία ίχνους καψίματος, είναι ανεξάρτητες. Οι αντίστοιχες διατηρήσιμες ποσότητες, η ορμή της μπάλας και η θερμική ενέργεια που απορροφά δεν συνδέονται μέσω κάποιου νόμου. Γι' αυτό και δεν μπορούμε να ισχυριστούμε ότι ο τοίχος είναι αίτιο του ίχνους καψίματος ή ότι το λέιζερ είναι υπεύθυνο για τη μεταβολή της ορμής της μπάλας. Τέτοιου είδους συσχετίσεις αποτελούν παραδείγματα κακών συνδέσεων. Αντιθέτως, μπορούμε να θεωρήσουμε το λέιζερ ως αίτιο του καψίματος και τον τοίχο ως αίτιο της μεταβολής της ορμής της μπάλας.

Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι η πρόταση (2) δεν θα ήταν απαραίτητη στη συνθήκη για την αιτιακή σύνδεση, αν ο Dowe είχε διακρίνει τις απλές από τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις στον ορισμό της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Θα μπορούσε, για παράδειγμα, να υποστηρίξει ότι στις απλές αιτιακές αλληλεπιδράσεις ανταλλάσσεται μία διατηρήσιμη ποσότητα και η ανταλλαγή διέπεται από ένα νόμο διατήρησης, ενώ στις σύνθετες αιτιακές αλληλεπιδράσεις ανταλλάσσονται περισσότερες από μία διατηρήσιμες ποσότητες που διέπονται από διαφορετικούς νόμους διατήρησης και η συμμεταβολή τους διέπεται από ένα και μοναδικό νόμο. Έτσι, ο Dowe θα μπορούσε να διακρίνει τις περιπτώσεις τις τυχαίες συμπτώσεις απλών αλληλεπιδράσεων από τις σύνθετες αλληλεπιδράσεις, όπως απαιτείται στη συνθήκη της αιτιακής σύνδεσης.

Ο Dowe αναφέρει και άλλα παραδείγματα "κακών συνδέσεων"[9] στα οποία απαντά με βάση την προσέγγισή του. Δεν θα αναφερθούμε σε αυτά, αφού ο κύριος

[9] Αναφέρεται στο παράδειγμα του φυτού που επέζησε μετά από ψεκασμό με εντομοκτόνο που είχε ως αποτέλεσμα την ξήρανση των φυτών σε ποσοστό 90% (Cartwright 1983:28) και στη "κακή σύνδεση" ανάμεσα στο εντομοκτόνο και την επιβίωση του φυτού, καθώς και στο παράδειγμα του Papineau σύμφωνα με το οποίο μολονότι υπάρχουν αιτιακές διαδικασίες και αιτιακές αλληλεπιδράσεις που συνδέουν ένα παχύ αγόρι με έναν αδύνατο ενήλικα, δεν θα λέγαμε ποτέ ότι το παχύ αγόρι είναι αίτιο του αδύνατου ενήλικα (Dowe 2000:148). Η απάντηση σε αυτά τα παραδείγματα προκύπτει από μία σημαντική διάκριση που κάνει ο Dowe ανάμεσα σε συμβάντα και γεγονότα που μπορούν να συνδεθούν με αιτιακές συνδέσεις και σε γεγονότα του τύπου "Η ποσότητα *q* έχει τιμή μικρότερη από *x*". Αυτά τα γεγονότα είναι διαζευκτικού τύπου διότι μπορούν να γραφούν ως διάζευξη γεγονότων που περιγράφουν την ακριβή τιμή της ποσότητας *q*, η οποία είναι μικρότερη από *x*. Τέτοια διαζευκτικού τύπου γεγονότα –και ένα τέτοιο γεγονός περιγράφουν τα κατηγορήματα του τύπου "αδύνατος ενήλικας"– μολονότι αληθεύουν εφόσον αληθεύει ένας από τους όρους της διάζευξης στην οποία μπορούν να αναλυθούν, δεν μπορούν να αποτελούν όρους της αιτιακής σχέσης. Σε αντίθεση με τα διαζευκτικά γεγονότα, οι όροι της διάζευξης στην οποία αυτά αναλύονται ενδέχεται να συνδέονται αιτιακά με άλλα γεγονότα. Έτσι, το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει ο Dowe είναι ότι το γεγονός ότι

στόχος μας σε αυτή την ενότητα ήταν να αναδείξουμε τα είδη των αιτιακών συνδέσεων που μπορούν να θεμελιωθούν σε μία οντολογία αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων και τη σχέση της φυσικής σύνδεσης του αιτίου και του αποτελέσματος με την αναγκαία σύνδεση που αναζητούσε ο Hume.

5.3 Τι είδους σχέση είναι η αιτιότητα;

Οι απόψεις για το τι είδους σχέση είναι η αιτιότητα διαφέρουν από αιτιακή θεωρία σε αιτιακή θεωρία. Όμως, σύμφωνα με τον Ψύλλο (Psillos 2002:127 και Ψύλλος 2008:163), υπάρχουν ορισμένα ζητήματα που ορίζουν μία βάση για την ταξινόμηση των αιτιακών θεωριών, αναλόγως με τις θέσεις που υποστηρίζουν. Συγκεκριμένα, οι αιτιακές θεωρίες μπορούν να διακριθούν: α) σε θεωρίες που υποστηρίζουν ότι η αιτιακή σχέση αφορά σε ενικές οντότητες και σε θεωρίες που υποστηρίζουν ότι η αιτιακή σχέση είναι μία γενική σχέση που αφορά σε είδη, τύπους, ενικών οντοτήτων· β) σε θεωρίες που προσεγγίζουν την αιτιακή σχέση ως εγγενή σχέση των οντοτήτων που συσχετίζει και σε θεωρίες που υποστηρίζουν ότι η σχέση αυτή είναι εξωγενής· και γ) σε θεωρίες που υποστηρίζουν ότι η αιτιακή σχέση ανάγεται ή επιγίγνεται μη αιτιακών παραγόντων και σε θεωρίες για τις οποίες η αιτιακή σχέση είναι μη αναγώγιμη. Σε αυτή την ενότητα θα προσπαθήσουμε να εντάξουμε τις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων σε αυτό το πλαίσιο ταξινομήσεων ανάλογα με τη θέση που υποστηρίζουν σε σχέση με τα αντίστοιχα ζητήματα.

Ας εξετάσουμε τη διάκριση ανάμεσα σε ενική και γενική αιτιότητα θεωρώντας του όρους της αιτιακής σχέσης ως συμβάντα. Όταν μιλάμε για συμβάντα συνήθως αναφερόμαστε είτε σε ενικά συμβάντα είτε σε τύπους συμβάντων, οι οποίοι είναι συλλογές ενικών συμβάντων που ορίζονται με βάση κάποια σχέση ομοιότητας. Έτσι, οι αιτιακές σχέσεις αναφέρονται είτε σε σχέσεις ανάμεσα σε ενικά συμβάντα είτε σε σχέσεις ανάμεσα σε τύπους είτε και στα δύο. Για παράδειγμα, ο πρώτος ορισμός της αιτίας του Hume αναφέρεται τόσο σε ενικά συμβάντα που ικανοποιούν τις σχέσεις χρονικής προτεραιότητας και χωροχρονικής γειτονίας με το αποτέλεσμα,

---

«το *c* είναι αίτιο του *e* δεν συνεπάγεται ότι *c* είναι αίτιο του *d*, όπου το *e* συνεπάγεται το *d*» (Dowe 2000:175).

όσο και σε τύπους συμβάντων, συλλογές όμοιων συμβάντων, που βρίσκονται σε σταθερή σύζευξη, δηλαδή διέπονται από κάποια κανονικότητα. Αν περιοριστούμε σε μία συγκεκριμένη εκδήλωση της αιτιακής σχέσης που αφορά σε δύο ενικά συμβάντα, σύμφωνα με το Hume, τα συμβάντα αυτά θα βρίσκονται σε αιτιακή σχέση μόνο αν οι αντίστοιχοι τύποι συμβάντων έχουν σταθερή σύζευξη. Δηλαδή, η ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα ενικά συμβάντα *εξαρτάται* από την ύπαρξη μίας κανονικότητας που διέπει τους αντίστοιχους τύπους συμβάντων. Η θέση αυτή, την οποία αρνούνται οι υποστηρικτές της ενικής αιτιότητας, αποτελεί ένα βασικό χαρακτηριστικό των γενικών θεωρήσεων για την αιτιότητα.

Όμως τι ακριβώς αρνούνται οι υποστηρικτές της ενικής αιτιότητας; Σε μία ακραία εκδοχή, όπως αυτή που υποστηρίζει η Anscombe ([1971]1981:136), οι ενικές αιτιακές σχέσεις μπορούν να υπάρχουν ακόμα κι αν δεν υπάρχουν αληθείς αιτιακοί νόμοι που να συνδέουν τους τύπους των συμβάντων στους οποίους ανήκουν τα ενικά συμβάντα τα οποία αναγνωρίζονται ως αίτιο και αποτέλεσμα. Ωστόσο, αυτή η θέση δεν υιοθετείται από το σύνολο των υποστηρικτών της ενικής αιτιότητας. Άλλοι δέχονται κάποιου είδους "συνύπαρξη" των ενικών αιτιακών σχέσεων με αιτιακούς νόμους που διέπουν τύπους συμβάντων: σε κάθε ενική αιτιακή σχέση αντιστοιχεί ένα αιτιακός νόμος. Αυτό που αρνούνται είναι ότι η διαπίστωση αιτιακών σχέσεων στο επίπεδο των ενικών συμβάντων και, κατά συνέπεια, ο ορισμός της ενικής αιτιότητας, εξαρτάται από τις σχέσεις που διέπουν τους τύπους συμβάντων στους οποίους ανήκουν το αίτιο και το αποτέλεσμα, δηλαδή από αιτιακούς νόμους. Αυτού του είδους την ενική αιτιότητα υποστηρίζουν, για παράδειγμα, όσοι θεωρούν τους αιτιακούς νόμους ως επαγωγικές γενικεύσεις από αυθεντικές ενικές αιτιακές σχέσεις[10].

Ο Salmon υποστηρίζει ότι η αιτιότητα έχει πλευρές που αφορούν σε ενικές οντότητες, αλλά και γενικές πλευρές που περιγράφονται με στατιστικές γενικεύσεις (Salmon 1984:182, 1998:207). Η στατιστική περιγραφή των δίκρανων σύζευξης και των συζευκτικών κοινών αιτίων αναδεικνύει τη γενική πλευρά της αιτιότητας. Σε αυτές τις περιπτώσεις αναφερόμαστε σε στατιστικές κανονικότητες και σχέσεις που εκφράζουν στατιστική συνάφεια του αιτίου με το αποτέλεσμα. Όμως, σε αντίθεση με

[10] Για μία πιο λεπτομερή ανάλυση της ταξινόμησης των διαφορετικών ειδών ενικής αιτιότητας ο ενδιαφερόμενος μπορεί να δει την εισαγωγή του Moore (2009) σε πρόσφατο τεύχος του *The Monist* αφιερωμένο στις θεωρίες της ενικής αιτιότητας.

την προσέγγιση του Reichenbach, η στατιστική περιγραφή δεν επαρκεί για την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών και των αιτιακών σχέσεων. Ο Salmon υποστηρίζει ότι θα πρέπει να αναφερθούμε και σε *μηχανισμούς* που συνδέουν το αίτιο με το αποτέλεσμα στις αιτιακές διαδικασίες και στις αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Η θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων αναδεικνύει την ενική πλευρά της αιτιότητας. Όπως χαρακτηριστικά αναφέρει ο Salmon, «η αιτιακή διαδικασία είναι μία ενική οντότητα και τέτοιες οντότητες διαδίδουν αιτιακή επίδραση. Μία ενική αιτιακή διαδικασία υποστηρίζει την αιτιακή σύνδεση ανάμεσα σε ένα ενικό αίτιο και σε ένα ενικό αποτέλεσμα» (Salmon 1984:182). Από την άλλη, η προσέγγιση του Dowe περιορίζεται στο σκέλος της ενικής αιτιότητας που επεξηγείται με όρους αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Ο Dowe αρνείται τη γενική πλευρά της αιτιότητας που προτείνει ο Salmon, αφού δεν θεωρεί ότι τα δίκρανα σύζευξης παίζουν κάποιο ρόλο στην παραγωγή δομής και, γενικότερα, οι στατιστικές σχέσεις στην ανάλυση της παραγωγής αιτιακής επίδρασης (Dowe 2000:79-83).

Το δεύτερο χαρακτηριστικό με βάση το οποίο μπορούμε να ταξινομήσουμε τις αιτιακές θεωρίες αφορά στο εάν η αιτιακή σχέση θεωρείται από αυτές ως εγγενής ή ως εξωγενής σχέση ανάμεσα στους όρους που συσχετίζει. Σύμφωνα με τον Ψύλλο (Psillos 2002:128), θα λέμε ότι μία διμελής σχέση είναι εγγενής αν «κάθε φορά που δύο όροι βρίσκονται σε αυτή τη σχέση, το ζήτημα αφορά εξολοκλήρου στο πως οι όροι αυτοί τίθενται ο ένας έναντι του άλλου, και όχι στις σχέσεις τους με άλλα πράγματα». Έτσι, η αιτιακή σχέση που διαπιστώνεται ανάμεσα σε δύο ενικά συμβάντα *c*, *e* θα λέμε ότι είναι εγγενής αν αναφέρεται μόνο στις ιδιότητες των *c,e* και στις σχέσεις ανάμεσα στα *c,e*. Στην περίπτωση του πρώτου ορισμού της αιτίας του Hume, η ύπαρξης της αιτιακής σχέσης δεν αφορά μόνο σε σχέσεις ανάμεσα στα *c, e* και συγκεκριμένα στη χρονική προτεραιότητα του αιτίου και στη χωροχρονική γειτονία αιτίου και αποτελέσματος, αλλά και στη σύζευξη που διαπιστώνεται ανάμεσα στα *c* και *e* και σε οποιαδήποτε άλλα ενικά συμβάντα που είναι όμοια με τα *c* και *e*, αντιστοίχως. Έτσι, η θεώρηση ότι η αιτιακή σχέση ορίζεται με βάση μία κανονικότητα, ντετερμινιστική ή στατιστική, καθιστά την αιτιακή σχέση εξωγενή.

Αντιθέτως, στην περίπτωση στην οποία δύο αιτιακές αλληλεπιδράσεις συνδέονται με μία αιτιακή διαδικασία, ή δύο αιτιακές διαδικασίες συνδέονται μέσω

μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης, τότε η σχέση ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα είναι εγγενής. Κάθε φορά που λαμβάνει χώρα μία αιτιακή αλληλεπίδραση υπάρχουν τρεις τουλάχιστον αιτιακές διαδικασίες που τέμνονται στο χωροχρονικό σημείο που λαμβάνει χώρα η αιτιακή αλληλεπίδραση. Από αυτές, η μία τουλάχιστον προκύπτει μετά την αιτιακή αλληλεπίδραση και θεωρούμε ότι αποτελεί έναν "ακόρεστο δεσμό" που είναι δυνατό να συνδέσει τη συγκεκριμένη αιτιακή αλληλεπίδραση με άλλες αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Για να υπάρξει η δεύτερη αλληλεπίδραση, που θα θεωρήσουμε ότι είναι το αποτέλεσμα της πρώτης, θα πρέπει να κορεστεί ο "ακόρεστος δεσμός", δηλαδή να αλληλεπιδράσει με μία άλλη αιτιακή διαδικασία. Σε απουσία δεσμού ή της άλλης διαδικασίας με την οποία ο δεσμός αλληλεπιδρά, δεν λαμβάνει χώρα η δεύτερη αιτιακή αλληλεπίδραση. Έτσι, για να θεωρήσουμε ότι οι δύο αιτιακές αλληλεπιδράσεις βρίσκονται σε αιτιακή σχέση, θα πρέπει να ταυτιστούν δύο οντότητες που προκύπτουν από την παραδοχή ότι οι δύο αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα: η αιτιακή διαδικασία που αποτελεί τον "ακόρεστο δεσμό" που προκύπτει από το αίτιο με μία από τις αλληλεπιδρώσες αιτιακές διαδικασίες που ορίζουν το αποτέλεσμα. Το γεγονός ότι η αιτιακή διαδικασία, η οποία συνδέει τους όρους της αιτιακής σχέσης, τις δύο αιτιακές αλληλεπιδράσεις, είναι αναγκαία προϋπόθεση για να λάβουν χώρα οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις μάς οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η αιτιακή σχέση ανάμεσα στους όρους της αιτιακής σχέσης είναι εγγενής. Αυτό το συμπέρασμα ισχύει και για την περίπτωση που θα θεωρήσουμε, ως όρους της αιτιακής σχέσης, αιτιακές διαδικασίες που συνδέονται μέσω μίας αιτιακής αλληλεπίδρασης. Η τομή των αιτιακών διαδικασιών σε ένα χωροχρονικό σημείο οδηγεί στο ενδεχόμενο αλληλεπίδρασής τους και αυτό έχει να κάνει με το είδος των αιτιακών διαδικασιών που συμπίπτουν χωροχρονικά (π.χ., δύο φωτεινές ακτίνες είναι σχεδόν απίθανο να αλληλεπιδράσουν). Επομένως, η αιτιακή αλληλεπίδραση προκύπτει από τη φύση των όρων της αιτιακής σχέσης και η αιτιακή σχέση είναι εγγενής.

Ωστόσο, υπάρχουν δύο προβλήματα σε αυτή τη θεώρηση, τα οποία ανακύπτουν από τις προϋποθέσεις που περιλαμβάνονται στους ορισμούς των εννοιών της αιτιακής διαδικασίας και της αιτιακής αλληλεπίδρασης. Στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon, οι αιτιακές έννοιες εξαρτώνται από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων. Και η αποτίμηση των αντιγεγονικών προτάσεων, είτε γίνεται στο πλαίσιο της σημασιολογίας δυνατών κόσμων, είτε ακολουθώντας την πειραματική μέθοδο

που προτείνει ο Salmon, προϋποθέτει την εξέταση καταστάσεων πραγμάτων που είναι δυνατό να λάβουν χώρα (ή λαμβάνουν χώρα) σε ορισμένα πειραματικά πλαίσια. Αυτό σημαίνει ότι το αν ισχύει ή όχι μία αντιγεγονική πρόταση δεν εξαρτάται μόνο από την πραγματική ακολουθία συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε μία συγκεκριμένη διαδικασία. Έτσι, το αν υπάρχει αιτιακή σύνδεση ανάμεσα σε δύο συμβάντα εξαρτάται από κάτι διαφορετικό από αυτά[11].

Το δεύτερο πρόβλημα αναφέρεται στις προϋποθέσεις της ύπαρξης διατηρήσιμων ποσοτήτων, με βάση τη γενική θεωρία της σχετικότητας, και τέθηκε για πρώτη φορά από τον Rueger (1998). Ο Rueger υποστηρίζει ότι το κριτήριο της διάδοσης μίας διατηρήσιμης ποσότητας, ή της κατοχής μίας διατηρήσιμης ποσότητας από ένα αντικείμενο, εξαρτάται από προϋποθέσεις που αφορούν σε καθολικά χαρακτηριστικά του χωροχρόνου υποβάθρου. Άρα, η ύπαρξη αιτιακής σύνδεσης και, κατά συνέπεια, αιτιακής σχέσης δεν εξαρτάται μόνο από τους όρους της αιτιακής σχέσης και τις σχέσεις στις οποίες βρίσκονται, αλλά και από εξωγενείς, καθολικές, προϋποθέσεις που αφορούν στις διατηρήσιμες ποσότητες. Συνεπώς, η αιτιότητα όπως επεξηγείται με βάση τις διατηρήσιμες ποσότητες είναι εξωγενής.

Από φυσική άποψη, ο Rueger διατυπώνει δύο επιχειρήματα. Το πρώτο έχει να κάνει με την προϋπόθεση της ύπαρξης συμμετριών για τον ορισμό των τοπικών νόμων διατήρησης. Παρατηρεί ότι σε ένα χωρόχρονο που τοπικά δεν διαθέτει συμμετρίες, δεν μπορούν να οριστούν διατηρήσιμες ποσότητες και άρα αιτιακές διαδικασίες. Συνεπώς, μία διαδικασία που εντοπίζεται σε αυτή την περιοχή του χωροχρόνου είναι ψευδοδιαδικασία. Ωστόσο, αν η ίδια διαδικασία εντοπιστεί σε μία διαφορετική περιοχή του χωροχρόνου, όπου υπάρχουν οι κατάλληλες συμμετρίες, και η διαδικασία αυτή διαδίδει ή κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα, τότε η διαδικασία μπορεί να χαρακτηριστεί αιτιακή. Έτσι, καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το εάν μία διαδικασία είναι αιτιακή ή όχι εξαρτάται από γεγονότα που δεν αφορούν στην ίδια τη διαδικασία, αλλά στο χωροχρονικό περιβάλλον στο οποίο εντοπίζεται.

Το δεύτερο επιχείρημα στηρίζεται στη συνθήκη της ασυμπτωτικής επιπεδότητας, στην οποία αναφερθήκαμε στην ενότητα (4.2), που αποτελεί

[11] Το ίδιο ισχύει και όσον αφορά στο σκέλος που ο Salmon ονομάζει «γενική αιτιότητα». Σε αυτή την περίπτωση οι στατιστικές κανονικότητες προϋποθέτουν την έννοια της στατιστικής συλλογής που περιλαμβάνει όμοια συμβάντα.

προϋπόθεση για τον ορισμό καθολικών διατηρήσιμων ποσότητων στο πλαίσιο της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Σε αυτή την περίπτωση, ο Rueger θεωρεί *μία* διαδικασία, η οποία είναι ψευδοδιαδικασία εφόσον ο χωρόχρονος στον οποίο εντοπίζεται δεν είναι ασυμπτωτικά επίπεδος, ενώ είναι αιτιακή διαδικασία εφόσον ο χωρόχρονος αυτός εμφυτευθεί σε έναν ασυμπτωτικά επίπεδο χωρόχρονο. Οι δύο χωρόχρονοι υποβάθρου είναι τοπικά ίδιοι, αλλά διαφέρουν ως προς τα καθολικά χαρακτηριστικά τους.

Ο Dowe, προκειμένου να απαντήσει στον Rueger, υποστηρίζει ότι η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων συνιστά μία εμπειρική ανάλυση της αιτιότητας στον *πραγματικό κόσμο* και όχι σε δυνατούς κόσμους των οποίων τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά περιγράφονται από τα μοντέλα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας. Και στον πραγματικό κόσμο, ικανοποιούνται όλες εκείνες οι προϋποθέσεις για να ισχύουν συγκεκριμένοι τοπικοί και καθολικοί νόμοι διατήρησης που αφορούν στις συγκεκριμένες διατηρήσιμες ποσότητες, τις οποίες προβλέπουν οι φυσικές θεωρίες. Έτσι, το αν θα χαρακτηρίσουμε μία διαδικασία ως αιτιακή ή ως ψευδοδιαδικασία εξαρτάται αποκλειστικά από το αν κατέχει (ή διαδίδει στην περίπτωση του Salmon) διατηρήσιμες ποσότητες και η διαπίστωση αυτή αφορά σε τοπικά γεγονότα. Συνεπώς, η σχέση του αιτίου με το αποτέλεσμα όπως περιγράφεται από τις θεωρίες των διατηρήσιμων ποσοτήτων είναι εγγενής.

Ωστόσο, υπάρχει και ένα τρίτο πρόβλημα με τον εγγενή χαρακτήρα της αιτιακής σχέσης που αφορά στην εμμενή αιτιότητα. Σε αυτή την περίπτωση οι όροι τις αιτιακής σχέσης είναι δύο συμβάντα που εκδηλώνουν το ίδιο χαρακτηριστικό και η αιτιακή σχέση δεν μπορεί να χαρακτηριστεί εγγενής. Στην περίπτωση της θεωρίας των αιτιακών γραμμών του Russell, οι αιτιακές σχέσεις ορίζονται κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής που διέπεται από ένα εσωτερικό αιτιακό νόμο. Η ύπαρξη της αιτιακής γραμμής περιορίζει τα συμβάντα στα οποία μπορούν να ορισθούν αιτιακές σχέσεις σε σχέση με το σύνολο των δυνατών συμβάντων του κόσμου. Έτσι, ένα συμβάν *c* είναι αίτιο του *e* μόνο αν προηγείται χρονικά του *e* και αμφότερα τα *c,e* ανήκουν στην ίδια αιτιακή γραμμή. Αυτό σημαίνει ότι η αιτιακή σχέση είναι εξωγενής διότι για να καθορισθεί προϋποθέτει την ύπαρξη μίας αιτιακής γραμμής και την ένταξη των *c,e* σε αυτή.

Ομοίως, στις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών δύο συμβάντα είναι όροι της αιτιακής σχέσης που εκφράζει την εμμενή αιτιότητα μόνο αν ανήκουν στην ίδια αιτιακή διαδικασία ή συνδέονται μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας. Όμως, αυτή η σύνδεση δεν προκύπτει από τη φύση των συμβάντων που είναι δυνατό να αποτελέσουν όρους της αιτιακής σχέσης. Δύο συμβάντα μπορεί να εκδηλώσουν το ίδιο χαρακτηριστικό χωρίς να ανήκουν στην ίδια αιτιακή διαδικασία[12]. Το γεγονός ότι τα δύο συμβάντα βρίσκονται σε αιτιακή σχέση εξαρτάται από ένα σύνολο συμβάντων που παρεμβάλλονται ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα και ορίζουν την ύπαρξη της αιτιακής διαδικασίας. Μάλιστα, ο Dowe αναφέρει χαρακτηριστικά ότι «…αντί να υιοθετήσει μία υπόθεση για την ταυτότητα [του αντικειμένου], ο Salmon προσφεύγει σε ένα ειδικό είδος κανονικότητας …» (Dowe 2000:120). Έτσι, όπως στον Russell, έτσι και στον Salmon, είναι η ύπαρξη της κανονικότητας που περιγράφει τη διάδοση της διατηρήσιμης ποσότητας που καθιστά αιτιακή τη σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας.

Από την άλλη, η αιτιακή θεωρία του Dowe προϋποθέτει την έννοια του αντικειμένου κατά τρόπον ώστε το αίτιο και το αποτέλεσμα να ορίζονται με βάση την έννοια του αντικειμένου. Η διαφορά με τον Russell, αλλά και τον Salmon, έχει ως εξής: ο Russell θεωρεί την αιτιακή γραμμή ως συλλογή συμβάντων και τα συμβάντα ως όρους της αιτιακής σχέσης, ενώ ο Dowe ορίζει τόσο την έννοια της αιτιακής διαδικασίας όσο και τις έννοιες του συμβάντος και του γεγονότος -τους όρους των αιτιακών σχέσεων- *προϋποθέτοντας* την έννοια του αντικειμένου. Στην περίπτωση του Russell τα συμβάντα θα πρέπει να ικανοποιούν μία εξωτερική συνθήκη, να ανήκουν στην ίδια αιτιακή γραμμή, για να αποτελούν όρους της αιτιακής σχέσης, ενώ για τον Dowe τα γεγονότα που αφορούν στην εκδήλωση μίας ιδιότητας ενός αντικειμένου κάποια χρονική στιγμή αποτελούν εξαρχής, χωρίς προϋποθέσεις, χρονικά στάδια μίας αιτιακής διαδικασίας που ορίζεται με βάση κάποιο αιτιακό αντικείμενο. Υπό αυτή την έννοια η εμμενής αιτιότητα, στην προσέγγιση του Dowe, αποτελεί εγγενή αιτιακή σχέση ανάμεσα σε δύο γεγονότα.

[12] Στο σημείο αυτό κατανοούμε μία βασική διαφορά ανάμεσα στα *συμβάντα-αιτιακές αλληλεπιδράσεις*, των οποίων η ύπαρξη προϋποθέτει τις αλληλεπιδρώσες αιτιακές διαδικασίες, και στα *συμβάντα-εκδηλώσεις χαρακτηριστικών*, των οποίων η ύπαρξη προϋποτίθεται από τον ορισμό της έννοιας της διαδικασίας.

Το τρίτο πεδίο διαμάχης σε σχέση με τη φύση των αιτιακών σχέσεων αφορά στο αν η αιτιακή σχέση είναι αναγώγιμη σε μη αιτιακές σχέσεις και γενικώς σε μη αιτιακά γεγονότα. Θα μπορούσαμε απευθείας να ισχυριστούμε ότι οι αιτιακές σχέσεις που περιγράφονται στο πλαίσιο θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις είναι *αναγώγιμες* σχέσεις, διότι οι αιτιακές διαδικασίες και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις ορίζονται με βάση μη αιτιακές έννοιες και γεγονότα όπως είναι οι χωροχρονικές γραμμές, οι διατηρήσιμες ποσότητες, η διάδοση μίας διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος της αιτιακής διαδικασίας ή η κατοχή μίας διατηρήσιμης ποσότητας από ένα αντικείμενο και η ανταλλαγή διατηρήσιμων ποσοτήτων στα σημεία τομής των αιτιακών διαδικασιών. Ωστόσο, αξίζει να αναλύσουμε λίγο περισσότερο την έννοια της αναγωγής της αιτιακή σχέσης και να εντάξουμε τις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων σε πιο εκλεπτυσμένες ταξινομήσεις.

Ο Tooley επεξηγώντας την αναγωγή των αιτιακών σχέσεων διακρίνει δύο είδη αναγωγισμού: τον *αναλυτικό αναγωγισμό* και τις *θεωρίες ενδεχομενικής ταυτότητας* (Tooley 2005:388-389). Στον αναλυτικό αναγωγισμό περιλαμβάνεται τόσο η παραδοσιακή έννοια του αναγωγισμού μέσω ορισμών όσο και η λογική επιγένεση. Στον αναγωγισμό μέσω ορισμών ένα σύνολο εκφράσεων ή εννοιών K_1 ανάγεται σε ένα πεδίο εκφράσεων ή εννοιών K_2, το οποίο ονομάζεται βάση της αναγωγής, αν για κάθε έκφραση του K_1 διατυπώσουμε έναν ορισμό που περιλαμβάνει μόνο όρους από το K_2. Έτσι, σύμφωνα με αυτό το είδος αναλυτικού αναγωγισμού οι αιτιακές έννοιες είναι *αναλύσιμες* σε μη αιτιακούς όρους. Ωστόσο, ο Tooley επιλέγει να επεξηγήσει τον αναλυτικό αναγωγισμό με βάση την έννοια της λογικής επιγένεσης[13]. Έτσι, καταρχάς, ορίζει πότε δύο δυνατοί κόσμοι *W*, *W** συμφωνούν ως προς ένα σύνολο ιδιοτήτων και σχέσεων *S*:

> Δύο κόσμοι *W*, *W** συμφωνούν ως προς ένα σύνολο ιδιοτήτων και σχέσεων *S*, αν και μόνο αν υπάρχει μία "ένα προς ένα" απεικόνιση, *f*, ανάμεσα στα ατομικά αντικείμενα των δύο κόσμων τέτοια ώστε (1) για κάθε ατομικό αντικείμενο *x* του κόσμου *W* και για κάθε ιδιότητα *P* από το *S*, το *x* έχει την ιδιότητα *P* αν και μόνο αν το αντίστοιχο ατομικό αντικείμενο *x** του κόσμου *W** έχει επίσης την ιδιότητα *P*, και αντιστρόφως, και (2) για κάθε *n*-άδα ατομικών αντικειμένων $x_1,x_2,\ldots,x_n$ του *W* και κάθε σχέση *R*, τα $x_1,x_2,\ldots,x_n$ βρίσκονται σε σχέση *R* αν

[13] Όπως επισημαίνει ο Psillos η «επιγένεση είναι ασθενέστερη μορφή οντικής εξάρτησης από την πλήρη αναγωγή. Αν τα αιτιακά γεγονότα ανάγονται πλήρως σε μη αιτιακά γεγονότα, τότε τα *εκ πρώτης όψεως* αιτιακά γεγονότα, κατ' ουσίαν, *ταυτίζονται* με τα μη αιτιακά γεγονότα. Όμως, αν τα αιτιακά γεγονότα επιγίγνονται μη αιτιακών τότε τα δύο είδη γεγονότων *δεν* ταυτίζονται» (Psillos 2002:129).

> και μόνο αν τα αντίστοιχα ατομικά αντικείμενα x_1*,x_2*,…,x_n* του *W** επίσης βρίσκονται σε σχέση *R*, και αντιστρόφως. (Tooley 2005:387-388)

Στη συνέχεια, ο Tooley ορίζει τη λογική επιγένεση ενός συνόλου ιδιοτήτων και σχέσεων *T* σε ένα σύνολο ιδιοτήτων *S*.

> …οι ιδιότητες και οι σχέσεις σε ένα άλλο σύνολο *T* που είναι πλήρως διακριτό από το σύνολο ιδιοτήτων και σχέσεων *S* μπορούμε να λέμε ότι *επιγίγονται λογικά* στο *S* αν και μόνο αν για κάθε δύο κόσμους *W* και *W** ισχύει ότι αν οι *W* και *W** συμφωνούν ως προς τις σχέσεις και τις ιδιότητες του *S* τότε πρέπει επίσης να συμφωνούν και ως προς τις σχέσεις και τις ιδιότητες του συνόλου *T*. (Tooley 2005:388)

Με βάση τους παραπάνω ορισμούς ο Tooley καταλήγει σε μία ισχυρή και σε μία ασθενή αναγωγιστική θέση για τις αιτιακές σχέσεις. Η ισχυρή θέση για τον αναγωγισμό ως προς τις αιτιακές σχέσεις (strong reductionism with respect to causal relations) διατυπώνεται ως εξής:

> Αν δύο κόσμοι συμφωνούν ως προς όλες τις μη αιτιακές ιδιότητες και σχέσεις των επιμέρους αντικειμένων (particulars), τότε θα πρέπει να συμφωνούν και ως προς όλες τις αιτιακές σχέσεις ανάμεσα στις καταστάσεις πραγμάτων. Εν ολίγοις οι αιτιακές σχέσεις είναι λογικώς επιγενόμενες μη αιτιακών ιδιοτήτων και σχέσεων. (ό.π.)

Αντιστοίχως, η ασθενής θέση για τον αναγωγισμό ως προς τις αιτιακές σχέσεις (weak reductionism with respect to causal relations) λέει ότι

> Αν δύο κόσμοι συμφωνούν ως προς όλες τις μη αιτιακές ιδιότητες και σχέσεις των επιμέρους αντικειμένων (particulars) και ως προς τους νόμους που ισχύουν σε αυτούς, τότε θα πρέπει να συμφωνούν και ως προς όλες τις αιτιακές σχέσεις των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε αυτούς. (ό.π.)

Από την άλλη, οι θεωρίες της ενδεχομενικής ταυτότητας δεν δέχονται τον αναλυτικό αναγωγισμό για τις αιτιακές σχέσεις, διότι αρνούνται να θεωρήσουν τις αιτιακές σχέσεις ως σχέσεις ανάμεσα σε καταστάσεις πραγμάτων σε λογικώς δυνατούς κόσμους ή σε φυσικώς δυνατούς κόσμους που περιγράφονται από μη ρεαλιστικά μοντέλα φυσικών θεωριών. Αυτό που κάνουν οι θεωρίες αυτές είναι να ταυτίζουν την αιτιακή σχέση με κάποια σχέση στον πραγματικό κόσμο που περιγράφεται με μη αιτιακούς όρους. Από εδώ προκύπτει και ο ενδεχομενικός χαρακτήρας της αναγωγής σε αυτές τις θεωρίες: αν ο πραγματικός κόσμος ήταν διαφορετικός οι προτάσεις που ανάγουν την αιτιότητα σε μη αιτιακές σχέσεις και ιδιότητες θα ήταν ψευδείς. Ο Fair αναφέρει χαρακτηριστικά σε σχέση με τη δική του θεωρία ότι «η υποτιθέμενη σχέση ανάμεσα στην αιτιότητα και τη ροή ενέργειας-ορμής αναμένεται να έχει το λογικό

καθεστώς μίας ταυτότητας που έχει ανακαλυφθεί εμπειρικά» (Fair 1979:231). Ο Dowe υποστηρίζει ότι τέτοιου είδους προσεγγίσεις επιχειρούν μία "εμπειρική ανάλυση της αιτιότητας" και στοχεύουν να αναδείξουν «αυτό που πράγματι *είναι* η αιτιότητα στον πραγματικό κόσμο» (Dowe 2000:3) ενώ επικρίνει εκείνους που ασκούν κριτική σε αυτές τις προσεγγίσεις στη βάση του ότι δεν ισχύουν για όλους τους δυνατούς κόσμους (Dowe 2000:6)[14]. Σε αυτή την κατηγορία εκτός από τη θεωρία του Fair, ο Dowe κατατάσσει και τις θεωρίες του Aronson (1971), του Salmon, καθώς και τη δική του.

Στον αντίποδα τόσο του αναλυτικού αναγωγισμού όσο και των θεωριών ενδεχομενικής ταυτότητας, ο Tooley τοποθετεί τις ρεαλιστικές προσεγγίσεις της αιτιότητας. Ο ρεαλιστής αρνείται τις θεωρίες ενδεχομενικής ταυτότητας όσο και την ισχυρή θέση του αναλυτικού αναγωγισμού. Μία ακραία ρεαλιστική θέση είναι αυτή του άμεσου ρεαλισμού που υποστηρίζεται από την Anscombe. Σε αυτή την προσέγγιση η αιτιακή σχέση είναι (α) άμεσα παρατηρήσιμη, (β) μη αναγώγιμη σε μη αιτιακές σχέσεις και ιδιότητες αντικειμένων, ακόμα και αν συμπεριλάβουμε στη βάση της αναγωγής τους αιτιακούς νόμους (άρνηση ασθενούς αναλυτικού αναγωγισμού), και (γ) η έννοια της αιτιακής σχέσης είναι πρωταρχική, δηλαδή δεν αναλύεται περαιτέρω (Tooley 2005:391). Ο Tooley, ασκεί κριτική στη θέση του άμεσου ρεαλισμού και υποστηρίζει μία ρεαλιστική προσέγγιση στην αιτιότητα σύμφωνα με την οποία η αιτιακή σχέση κατανοείται ως θεωρητική σχέση που ανάγεται σε μη αναγώγιμους αιτιακούς νόμους και σε με μη αιτιακές ιδιότητες και σχέσεις. Έτσι, προτείνει την ιδέα ότι «η αιτιότητα ορίζεται ως η μοναδική σχέση ανάμεσα σε καταστάσεις πραγμάτων που είναι τέτοια ώστε οι νόμοι στους οποίους υπεισέρχεται με ορισμένο τρόπο, θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένα αιτήματα…» (Tooley 2005:429).

Μία διάκριση που τέμνει οριζόντια το στρατόπεδο των υποστηρικτών του αναγωγισμού, καθώς και τις προηγούμενες διακρίσεις σε ενική ή γενική αιτιότητα και σε εγγενή ή εξωγενή αιτιότητα, είναι η διάκριση ανάμεσα στο *χιουμιανό* και στο *μη*

[14] Η κριτική του Dowe αφορά τον Earman, τον Tooley αλλά και τον Rueger (όπως είδαμε παραπάνω) - φιλοσόφους που χρησιμοποίησαν επιχειρήματα με αναφορές σε δυνατούς κόσμους για να ασκήσουν κριτική στις θεωρίες του Aronson, του Salmon και του ιδίου, αντιστοίχως. Ο Dowe επισημαίνει ότι οι Earman και Tooley δεν επέδειξαν την πρέπουσα προσοχή στις «μεταφιλοσοφικές προθέσεις» των φιλοσόφων τους οποίους επικρίνουν (Dowe 2000:7).

χιουμιανό αναγωγισμό. Ο Lewis ορίζει τη *χιουμιανή επιγένεση* ως εξής: «ολόκληρη η αλήθεια για έναν κόσμο όπως ο δικός μας επιγίγνεται της χωροχρονικής κατανομής τοπικών ιδιοτήτων» (Lewis 1999:224). Η θέση αυτή συνεπάγεται ότι αν καθορίσουμε εγγενείς ιδιότητες των αντικειμένων σε κάθε σημείο του χωροχρόνου (τοπικές ιδιότητες), καθώς και τις χωροχρονικές σχέσεις τους, τότε καθορίζεται καθετί άλλο στον κόσμο συμπεριλαμβανομένων και των αιτιακών σχέσεων[15]. Για τον Tooley (1987:29) η χιουμιανή επιγένεση περιλαμβάνει τη θέση ότι οι αληθοτιμές των νομολογικών προτάσεων καθορίζονται λογικά από τις αληθοτιμές μη νομολογικών προτάσεων για επιμέρους αντικείμενα[16]. Άρα, αν υιοθετήσουμε τη χιουμιανή επιγένεση, τότε η ασθενής λογική επιγένεση της αιτιακής σχέσης συνεπάγεται την ισχυρή εκδοχή της.

Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό της αιτίας του Hume, η αιτιακή σχέση ανάγεται στις σχέσεις της χωροχρονικής γειτονίας και της χρονικής προτεραιότητας καθώς και σε μία κανονικότητα που εκφράζει τη σταθερή σύζευξη του αιτίου με το αποτέλεσμα. Ωστόσο, σύμφωνα με τη χιουμιανή επιγένεση, οι κανονικότητες επιγίγνονται των θεμελιωδών σχέσεων και ιδιοτήτων των αντικειμένων. Άρα, η βάση της αναγωγής, στον πρώτο ορισμό της αιτίας, είναι οι τοπικές ιδιότητες των αντικειμένων και οι χωροχρονικές τους σχέσεις. Το ίδιο ισχύει και για τις θεωρίες πιθανοκρατικής αιτιότητας που ανάγουν, σε πρώτο επίπεδο, τις αιτιακές σχέσεις σε στατιστικές κανονικότητες και χρονικές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα (βλ. Reichenbach 1956:204) και, σε δεύτερο επίπεδο, τις αιτιακές σχέσεις στη χωροχρονική κατανομή των συμβάντων, εφόσον ισχύει η χιουμιανή επιγένεση. Έτσι, η χιουμιανή επιγένεση προσδιορίζει ένα δεύτερο επίπεδο αναγωγής. Στο πρώτο επίπεδο, οι θεωρίες που αναφέραμε ανάγουν τις αιτιακές σχέσεις σε μη αιτιακές κανονικότητες, οι οποίες σε δεύτερο επίπεδο ανάγονται στη χωροχρονική κατανομή συμβάντων και στις σχέσεις ανάμεσα τους.

[15] Ο Tooley, αναφερόμενος στη χιουμιανή αναγωγή προϋποθέτει, επιπλέον, την άμεση παρατηρησιμότητα, σε τελική ανάλυση, των καταστάσεων πραγμάτων που αποτελούν τη βάση της χιουμιανής αναγωγής, καθώς και τη μη λογική σύνδεση τους εφόσον αυτές είναι διακριτές καταστάσεις πραγμάτων (Tooley 2005:390).

[16] Η θέση αυτή, διατυπωμένη με όρους δυνατών κόσμων, υπαγορεύει ότι δεν υπάρχουν δύο δυνατοί κόσμοι που να συμφωνούν ως προς όλα τα μη νομολογικά γεγονότα για τα επιμέρους αντικείμενα και να διαφέρουν ως προς τους νόμους που τους διέπουν.

Ωστόσο, η χιουμιανή αναγωγή δεν αφορά μόνο θεωρίες που είναι αναλυτικά αναγώγιμες αλλά και θεωρίες ενδεχομενικής ταυτότητας. Οι αντικειμενικώς ομογενείς κλάσεις συμβάντων στο πλαίσιο της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon περιγράφουν τοπικές μη σχεσιακές ιδιότητες αντικειμένων. Επίσης, οι έννοιες του ίχνους και της διάδοσης του ίχνους ορίζονται τοπικά, ενώ οι αληθοτιμές των αντιγεγονικών προτάσεων από τις οποίες εξαρτώνται οι αιτιακές έννοιες προκύπτει από εμπειρικά διαπιστωμένες κανονικότητες. Το ίδιο ισχύει και για την ύστερη αιτιακή θεωρία του Salmon, αλλά και για τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe. Μάλιστα, ακόμα κι αν κάποιος αποδεχτεί την κριτική του Rueger, που οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές και μη αιτιακές διαδικασίες επιγίγνεται καθολικών γεγονότων που αφορούν στην ύπαρξη διατηρήσιμων ποσοτήτων στο χωρόχρονο, αυτό δεν σημαίνει ότι οι θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων δεν είναι σύμφωνες με τη χιουμιανή επιγένεση. Αρκεί να δεχτούμε ότι τα καθολικά γεγονότα από τα οποία εξαρτώνται οι ορισμοί της αιτιακής διαδικασίας και της αιτιακής αλληλεπίδρασης επιγίγνονται γεγονότων που αφορούν σε τοπικά συμβάντα σε όλο το χωρόχρονο.

Στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων υπάρχει ένα ζήτημα που παραμένει ανοικτό και επηρεάζει την κρίση μας σε σχέση με τη συμφωνία της θεωρίας αυτής με τη χιουμιανή επιγένεση: το ζήτημα της ανάλυσης της έννοιας του αντικειμένου. Όπως είδαμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, ο Dowe αφήνει ανοικτό το κατά πόσον τα αντικείμενα χαρακτηρίζονται με όρους ενικών γεγονότων, σε συμφωνία με τη χιουμιανή ανάλυση (Dowe 2000:109). Αυτό σημαίνει ότι η βάση της αναγωγής της αιτιακής σχέσης ενδέχεται να περιλαμβάνει οντότητες που δεν επιγίγνονται της χωροχρονικής κατανομής ιδιοτήτων και των σχέσεων τους και, άρα, η αναγωγή της αιτιακής σχέσης δεν είναι του τύπου της χιουμιανής επιγένεσης. Για την ώρα, όμως, δεν μπορούμε να πούμε κάτι παραπάνω εφόσον το ζήτημα της επεξήγησης της έννοιας του αντικειμένου εκκρεμεί.

Για να συνοψίσουμε τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε σε αυτή την ενότητα θα πρέπει να εξετάσουμε καθεμία από τις αιτιακές θεωρίες που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και αιτιακές αλληλεπιδράσεις ξεχωριστά. Καταρχάς, η θεωρία του Salmon αντιστέκεται περισσότερο από τη θεωρία του Dowe στην αποκλειστική ένταξή της στις ταξινομήσεις που αναφέραμε. Έχει μία

συνιστώσα ενικής αιτιότητας που ανάγεται σε μία οντολογία αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με την προσέγγιση της ενδεχομενικής ταυτότητας. Ωστόσο, αυτή η συνιστώσα, τουλάχιστον στην πρώιμη εκδοχή της, δεν περιγράφει την αιτιακή σχέση ως εγγενή σχέση, είτε λόγω του γεγονότος ότι προϋποθέτει την ισχύ αντιγεγονικών προτάσεων για τον ορισμό των βασικών αιτιακών εννοιών, είτε λόγω της εμμενούς αιτιότητας που μπορούμε να υποθέσουμε ότι ισχύει κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας. Από την άλλη, η γενική συνιστώσα της αιτιότητας προϋποθέτει την ισχύ στατιστικών κανονικοτήτων για τον ορισμό της αιτιακής σχέσης στα δίκρανα σύζευξης, προσδιορίζοντας, κατά συνέπεια, την αιτιακή σχέση ως εξωγενή. Επίσης, ως προς αυτή τη συνιστώσα της αιτιότητας μπορούμε να μιλήσουμε για αναλυτικό αναγωγισμό υπό την έννοια της ασθενούς λογικής επιγένεσης, η οποία όμως χάριν της χιουμιανής επιγένεσης συνεπάγεται την ισχυρή επιγένεση των αιτιακών σχέσεων σε γεγονότα που αφορούν σε επιμέρους μη αιτιακές οντότητες (συμβάντα και διαδικασίες). Η χιουμιανή επιγένεση αποτελεί κοινό χαρακτηριστικό τόσο της γενικής όσο και της ενικής συνιστώσας της αιτιότητας στο Salmon, τόσο της λογικής επιγένεσης των αιτιακών σχέσεων σε στατιστικές σχέσεις, όσο και της ενδεχομενικής ταύτισης των οντοτήτων που είναι όροι της αιτιακής σχέσης με τις επιμέρους οντότητες που θεωρούνται ως αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις.

Ο Dowe, από την άλλη πλευρά, υποστηρίζει μία θεωρία αμιγούς ενικής αιτιότητας που θεμελιώνεται σε μία οντολογία αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων. Στο πλαίσιο της θεωρίας των διατηρήσιμων ποσοτήτων η αιτιακή σχέση είναι εγγενής. Όπως είδαμε, η κριτική του Rueger αντιμετωπίζεται με βάση τη θέση ότι η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων είναι μία θεωρία ενδεχομενικής ταυτότητας, ενώ το πρόβλημα με την εμμενή αιτιότητα αντιμετωπίζεται με βάση τη θέση ότι η έννοια του αντικειμένου είναι πρωταρχική έννοια της θεωρίας. Αυτή η τελευταία θέση του Dowe αφήνει ανοικτό το ζήτημα του κατά πόσον η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων υποστηρίζει τη χιουμιανή επιγένεση των αιτιακών σχέσεων σε τοπικά μη αιτιακά γεγονότα.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο εξετάσαμε τρία ζητήματα σε σχέση με τη φύση της αιτιακής σχέσης, στο πλαίσιο των θεωριών των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων: α) τη φύση των όρων της αιτιακής σχέσης, β) τη φύση της αιτιακής σύνδεσης και γ) την ταξινόμηση της αιτιακής σχέσης με βάση τις διακρίσεις ανάμεσα σε ενική και γενική αιτιότητα, εγγενή και εξωγενή αιτιότητα, αναγώγιμη ή μη αναγώγιμη αιτιότητα.

Ο Salmon θεωρεί ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι συμβάντα που περιγράφονται από αιτιακές αλληλεπιδράσεις, ενώ ο Dowe θεωρεί ότι οι όροι της αιτιακής σχέσης μπορούν να περιγραφούν είτε ως αιτιακές αλληλεπιδράσεις είτε ως αιτιακές διαδικασίες. Επιπλέον, ο Russell και ο Dowe θεωρούν ότι όροι της αιτιακής σχέσης σε ένα διαφορετικό είδος αιτιότητας, την εμμενή αιτιότητα, μπορούν να είναι και συμβάντα στα οποία εκδηλώνεται ένα χαρακτηριστικό ή μία ιδιότητα.

Η σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα γίνεται είτε μέσω αιτιακών διαδικασιών είτε μέσω αιτιακών αλληλεπιδράσεων, είτε με συνδυασμό των δύο αιτιακών οντοτήτων, ανάλογα με το ποιοι είναι οι όροι της αιτιακής σχέσης. Για τον Salmon, οι αιτιακές συνδέσεις είναι αιτιακές διαδικασίες που μεταφέρουν την αιτιακή επίδραση από το αίτιο στο αποτέλεσμα. Επίσης, ο Salmon υποστηρίζει ότι οι αιτιακές διαδικασίες αποτελούν τη φυσική σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα και με αυτόν τον τρόπο απαντά στο πρόβλημα της αιτιότητας του Hume. Εξετάσαμε ορισμένα ζητήματα που έχουν επισημανθεί σε σχέση με την απάντηση του Salmon στη χιουμιανή πρόκληση, και αφορούν στη χρήση αντιγεγονικών προτάσεων και αιτιακών τάσεων για την περιγραφή των αιτιακών διαδικασιών. Επιπλέον, παρατηρήσαμε ότι η απάντηση του Salmon στο πρόβλημα της φυσικής σύνδεσης προϋποθέτει τη χωροχρονική απομάκρυνση του αιτίου από το αποτέλεσμα, γεγονός που αντιβαίνει στη θέση του Hume ότι το αίτιο και το αποτέλεσμα πρέπει να είναι χωροχρονικώς γειτονικά. Όμως, ακόμα και στην περίπτωση που το αίτιο και το αποτέλεσμα δεν είναι χωροχρονικώς γειτονικά, αλλά συνδέονται μέσω αιτιακής αλυσίδας, οι αιτιακές σχέσεις ανάμεσα στους διαδοχικούς κρίκους της χιουμιανής αιτιακής αλυσίδας δεν είναι της ίδιας φύσης με τις σχέσεις των συμβάντων σε μία αιτιακή διαδικασία. Στην πρώτη περίπτωση, κατά μήκος της αιτιακής αλυσίδας έχουμε μία επανάληψη της αιτιακής σχέσης που περιγράφεται με τον πρώτο ορισμό της αιτίας από το Hume, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, η σχέση ανάμεσα στα

συμβάντα κατά μήκος της αιτιακής διαδικασίας είτε δεν είναι αιτιακή είτε αναφέρεται σε ένα διαφορετικό είδος αιτιότητας που ονομάζεται εμμενής αιτιότητα. Για τον Dowe, η αιτιακή σύνδεση, στη γενικότερη περίπτωση, περιγράφεται από ένα σύνολο αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων που ικανοποιεί ορισμένες προϋποθέσεις.

Επίσης, προσπαθήσαμε να εντάξουμε την αιτιακή σχέση που περιγράφεται από τις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων σε ευρύτερες ταξινομήσεις που αφορούν στην ενική, στην εγγενή και στην αναγώγιμη φύση της αιτιακής σχέσης. Σύμφωνα με τον Salmon, η αιτιότητα έχει δύο συνιστώσες, την ενική, που αφορά στην περιγραφή των αιτιακών σχέσεων με βάση τις αιτιακές διαδικασίες και τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις, και τη γενική που αφορά σε περιπτώσεις όπως αυτή του συζευκτικού κοινού αιτίου. Αντιθέτως, ο Dowe περιορίζει την ανάλυση του στην ενική αιτιακή σχέση που περιγράφεται από την πρώτη συνιστώσα του Salmon. Επίσης, η αιτιακή σχέση στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon δεν είναι εγγενής, στο βαθμό που εξαρτάται από την αλήθεια αντιγεγονικών προτάσεων και από στατιστικές κανονικότητες. Αντιθέτως, για τον Dowe, η αιτιακή σχέση είναι εγγενής εφόσον δεν εξαρτάται από καθολικές συνθήκες που αφορούν στην ύπαρξη διατηρήσιμων ποσοτήτων. Επίσης, η αιτιακή σχέση είναι αναγώγιμη, υπό την έννοια της ενδεχομενικής ταύτισης των θεμελιωδών αιτιακών οντοτήτων με μη αιτιακές καταστάσεις πραγμάτων στον κόσμο μας ή υπό την έννοια του αναλυτικού αναγωγισμού στην περίπτωση των πιθανοκρατικών αιτιακών σχέσεων που υπεισέρχονται στα συζευκτικά κοινά αίτια, σύμφωνα με τη θέση του Salmon. Τέλος, οι θεωρίες των Salmon και Dowe διαφέρουν και ως προς το ζήτημα της χιουμιανής επιγένεσης, με την πρώτη να την υποστηρίζει και τη δεύτερη να τη θέτει σε εκκρεμότητα, εν αναμονή της ανάλυσης της έννοιας του αντικειμένου.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΚΤΟ

ΑΙΤΙΑΚΕΣ ΔΙΑΔΙΚΑΣΙΕΣ ΚΑΙ ΚΛΑΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Στα προηγούμενα κεφάλαια εξετάσαμε τις βασικές προσεγγίσεις των θεωριών που θεμελιώνουν την αιτιότητα σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις, πραγματευτήκαμε τα προβλήματα τους, συζητήσαμε τις κριτικές που έχουν ασκηθεί σε αυτές, και, τέλος, προσπαθήσαμε να τις εντάξουμε στην ευρύτερη φιλοσοφική προβληματική της συζήτησης περί αιτιότητας. Στα κεφάλαια που ακολουθούν θα εξετάσουμε τις θεωρίες αυτές σε σχέση με πραγματικές φυσικές θεωρίες που αποτελούν το πλαίσιο στο οποίο οι έννοιες των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων λαμβάνουν «σάρκα και οστά». Μπορούν να ορισθούν αιτιακές διαδικασίες με βάση το εννοιολογικό πλαίσιο και τις υποθέσεις των φυσικών θεωριών; Τα συνήθη παραδείγματα αιτιακών διαδικασιών που αναφέρονται από τους Salmon και Dowe είναι συμβατά με τις φυσικές θεωρίες που τα περιγράφουν; Ποια η σημασία της τοπικότητας μίας φυσικής θεωρίας και των τοπικών φυσικών μεγεθών για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών; Αυτά είναι μερικά από τα ερωτήματα που θα μας απασχολήσουν.

Στο παρόν κεφάλαιο θα εξετάσουμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο κλασικών φυσικών θεωριών. Στην πρώτη ενότητα θα ασχοληθούμε με σχετικιστικές σωματιδιακές θεωρίες και με τη συνήθη αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας από τη χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει γεωμετρικά την κίνηση ενός σωματιδίου. Στις επόμενες ενότητες θα ασχοληθούμε με πεδιακές θεωρίες και συγκεκριμένα με το ελεύθερο πραγματικό πεδίο Klein-Gordon και με το ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Το βασικό πρόβλημα στην περίπτωση των πεδιακών θεωριών είναι η ταυτοποίηση μίας χωροχρονικής γραμμής ως γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας. Τα πεδία είναι χωροχρονικά εκτεταμένες

οντότητες και δεν είναι εύκολο να διακρίνουμε μία χωροχρονική γραμμή που να ικανοποιεί τις προϋποθέσεις των ορισμών της αιτιακής διαδικασίας. Για την περίπτωση του πεδίου Klein-Gordon θα υποστηρίξουμε ότι είναι δυνατό να ορίσουμε μία αιτιακή διαδικασία με βάση τη διατηρούμενη τετραορμή του πεδίου. Η προσέγγιση αυτή, που είναι συμβατή με τη θεωρία του Dowe, είναι το αντικείμενο της δεύτερης ενότητας του κεφαλαίου. Ωστόσο, ο Salmon δεν θα μπορούσε να την υποστηρίξει. Ο λόγος είναι ότι η διάδοση της διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος μίας διαδικασίας προϋποθέτει την εκδήλωση της διατηρήσιμης ποσότητας σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που την αναπαριστάνει, και, κατά συνέπεια, τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας με βάση τοπικά διατηρήσιμα μεγέθη. Στην τρίτη ενότητα, θα δούμε με ποιον τρόπο μπορεί να διατυπωθεί μία αναγκαία προϋπόθεση για τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας, σε συμφωνία με αυτή την απαίτηση, στο πλαίσιο της αλγεβρικής κλασικής θεωρίας πεδίων. Τέλος, στην τέταρτη ενότητα θα διερευνήσουμε τη διάδοση ασυνέχειας κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση υποστηρίζουμε ότι η χωροχρονική γραμμή μπορεί να θεωρηθεί γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας, σε συμφωνία με την πρώιμη εκδοχή της θεωρίας του Salmon, θεωρώντας την ασυνέχεια που εκδηλώνει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο σε μία επιφάνεια μετώπου κύματος ως ίχνος.

6.1 Αιτιακές διαδικασίες και σωματίδια[1]

Η χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου είναι το πιο συνηθισμένο παράδειγμα αιτιακής διαδικασίας που θα μπορούσαμε να σκεφτούμε. Στην ενότητα αυτή θα μελετήσουμε το παράδειγμα στο πλαίσιο της περιγραφής που μας δίνει μία σχετικιστική φυσική θεωρία η οποία υποθέτει ότι ο κόσμος αποτελείται από πεπερασμένο πλήθος σωματιδίων που κινούνται στο χωρόχρονο της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας.

Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε N σημειακά σωματίδια με μάζες ηρεμίας $m_i > 0$, i=1… N, καθένα εκ των οποίων αναπαριστάνεται γεωμετρικά από μία

[1] Οι υποενότητες 6.1-6.2, βασίστηκαν στο υλικό της ομιλίας μου στο πρώτο συνέδριο της European Philosophy of Science Association (Μαδρίτη, Νοέμβριος 2007). Βλ. (Stergiou 2007.)

χωροχρονική γραμμή στο χωρόχρονο Minkowski, $\langle \mathbb{R}^4, \eta_{ab} \rangle$ όπου η_{ab} είναι η μετρική Minkowski[2]. Η χωροχρονική γραμμή του σωματιδίου *i* περιγράφεται από μία διανυσματική συνάρτηση $x_i^a(\tau_i)$, με παράμετρο τον ιδιόχρονο, τ_i, του σωματιδίου, σε σχέση με ένα αυθαίρετα επιλεγμένο αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Υποθέτουμε, επίσης, ότι η κατεύθυνση του ιδιόχρονου είναι ίδια με την κατεύθυνση του χρόνου ως προς το επιλεγμένο σύστημα αναφοράς, δηλαδή $\dot{x}_i^0(\tau_i) > 0$.

Η τετραορμή κάθε σωματιδίου δίνεται από τη σχέση,

$$p_i^a = m_i \dot{x}_i^a(\tau_i) \text{ , για } i=1\ldots \text{N}, \tag{6.1.1}$$

ενώ απαιτούμε η ολική τετραορμή του συστήματος, ή ορθότερα οι συνιστώσες της, να είναι διατηρήσιμες ποσότητες. Δηλαδή, για κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς πρέπει να ισχύει,

$$\forall t_1, t_2 \in \mathbb{R},\ P^a(t_1) = P^a(t_2) \tag{6.1.2}$$

Με αυτές τις υποθέσεις μπορούμε να χαρακτηρίσουμε ως αιτιακή διαδικασία τη χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου; Ο Dowe θα απαντούσε καταφατικά. Η χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου αποτελεί αιτιακή διαδικασία διότι θεωρούμε ότι αναπαριστάνει την κίνηση ενός και του αυτού αντικειμένου που κατέχει διατηρήσιμες ποσότητες – τις συνιστώσες της τετραορμής. Από την άλλη, ο Salmon θα εξέταζε αν ισχύουν οι προϋποθέσεις του ορισμού της αιτιακής διαδικασίας: χωροχρονική συνέχεια, απουσία αιτιακών αλληλεπιδράσεων, κατοχή σταθερού ποσού τετραορμής. Η πρώτη προϋπόθεση θεωρούμε ότι ισχύει, εφόσον σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής του σωματιδίου εκδηλώνεται ορισμένο ποσό τετραορμής. Η δεύτερη προϋπόθεση δεν ισχύει γενικώς. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι κρούσεις που λαμβάνουν χώρα στα σημεία σύμπτωσης των χωροχρονικών γραμμών των σωματιδίων: δύο σωματίδια *i, k* συγκρούονται μόνο αν υπάρχουν τιμές των ιδιόχρονων τ_i, τ_k τέτοιες ώστε $x_i^a(\tau_i) = x_k^a(\tau_k)$. Οι van Dam και Wigner αναφέρουν ότι οι συμπτώσεις γραμμών σε ένα τετραδιάστατο χωρόχρονο είναι

[2] Εδώ, όπως και σε όλες τις αναφορές στο χωρόχρονο Minkowski, υιοθετούμε για την υπογραφή της μετρικής τη σύμβαση (+ − − −).

ιδιαιτέρως απίθανα συμβάντα εφόσον οι διαστάσεις του χωροχρόνου είναι περισσότερες από τρεις (van Dam and Wigner 1966:839). Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν αποκλείει το να λαμβάνουν χώρα. Επομένως, οι χωροχρονικές γραμμές που περιγράφουν κινήσεις σωματιδίων, αναπαριστάνουν, γεωμετρικά, αιτιακές διαδικασίες μόνο αν κατά μήκος αυτών δεν λαμβάνουν χώρα συγκρούσεις με άλλα σωματίδια.

Η τρίτη προϋπόθεση που θέτει ο Salmon στον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών αφορά στη χρονική σταθερότητα του ποσού της τετραορμής που κατέχεται από το σωματίδιο του οποίου η χωροχρονική γραμμή αναπαριστάνει μία αιτιακή διαδικασία. Ο Dowe υποστηρίζει ότι σε απουσία αιτιακών αλληλεπιδράσεων, η τρίτη προϋπόθεση ισχύει τετριμμένα, εφόσον η τετραορμή είναι διατηρήσιμη ποσότητα (Dowe 2000:117). Άρα, σύμφωνα με τον Dowe, θα αρκούσαν οι δύο πρώτες προϋποθέσεις για να αποφανθεί ο Salmon ότι μία χωροχρονική γραμμή αποτελεί αιτιακή διαδικασία. Ο Dowe δεν έχει δίκιο. Υπάρχουν σχετικιστικές σωματιδιακές θεωρίες στις οποίες η ολική τετραορμή είναι διατηρήσιμη ποσότητα και η τετραορμή ενός σωματιδίου μεταβάλλεται κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής του, μολονότι δεν συγκρούεται με άλλα σωματίδια. Αυτές οι θεωρίες είναι θεωρίες δράσης από απόσταση. Ωστόσο, αν ισχύει μία συνθήκη τοπικότητας που αφορά στον ορισμό της ολικής τετραορμής του συστήματος και υποθέσουμε ότι τα σωματίδια δεν συγκρούονται, τότε η τετραορμή κάθε σωματιδίου είναι χρονικά σταθερή. Ας τα δούμε, όμως, όλα αυτά συγκεκριμένα.

Μέχρι τώρα δεν έχουμε αναφερθεί στον ορισμό της ολικής τετραορμής του συστήματος σωματιδίων. Οι van Dam και Wigner παραθέτουν δύο ορισμούς που καθορίζουν με διαφορετικό τρόπο τη σχέση της ολικής τετραορμής του συστήματος με την τετραορμή των σωματιδίων. Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό, η ολική τετραορμή μία ορισμένη χρονική στιγμή t_1 είναι το άθροισμα των τετραορμών των σωματιδίων την ίδια χρονική στιγμή,

$$P^a(t_1) = \sum_{i=1}^{N} p_i^a(t_1) \tag{6.1.3}$$

Δηλαδή, η ολική τετραορμή του συστήματος κάθε χρονική στιγμή επιμερίζεται στα σωματίδια που αποτελούν το σύστημα. Με άλλα λόγια, κάθε χρονική στιγμή, η ολική

τετραορμή, που είναι μία καθολική ιδιότητα του συστήματος σωματιδίων, ανάγεται σε τοπικά γεγονότα, τις τιμές των τετραορμών των σωματιδίων τη δεδομένη χρονική στιγμή. Άρα, ο ορισμός (6.1.3) για την ολική τετραορμή εκφράζει τη γενική αρχή τοπικότητας σύμφωνα με την οποία τα καθολικά γεγονότα ανάγονται[3] σε τοπικά γεγονότα.

Αν υιοθετήσουμε αυτό τον ορισμό για την ολική τετραορμή, τότε σύμφωνα με ένα θεώρημα που απέδειξαν οι van Dam και Wigner (1966), η υπόθεση της απουσίας κρούσεων για τα σωματίδια συνεπάγεται ότι η τιμή της τετραορμής κάθε σωματιδίου παραμένει χρονικά σταθερή.

> Ας υποθέσουμε στο πλαίσιο μίας σχετικιστικής σωματιδιακής θεωρίας (α) ότι η ολική τετραορμή του συστήματος δίδεται από τη σχέση (6.1.3), (β) ότι ισχύει ο νόμος διατήρησης της ολικής τετραορμής (6.1.2) για κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς, (γ) ότι τα σωματίδια δεν συγκρούονται (δηλαδή, δεν υπάρχει ζεύγος σωματιδίων *i, k* και τιμές των ιδιόχρονων τ_i, τ_k έτσι ώστε $x_i^a(\tau_i) = x_k^a(\tau_k)$) και, τέλος, (δ) ότι ασυμπτωτικά, δηλαδή είτε για κάθε $\tau_i \to \infty$ είτε για κάθε $\tau_i \to -\infty$, οι χωροχρονικές γραμμές είναι ευθείες, δηλαδή $\lim_{\tau_i \to \pm\infty} \dot{x}_i^a(\tau_i) = const.$ Τότε για N = 2,3 ή 4 σωματίδια αποδεικνύεται ότι οι χωροχρονικές γραμμές είναι εξ ολοκλήρου ευθείες, δηλαδή για κάθε αδρανειακό σύστημα αναφοράς ισχύει $\forall t \in \mathbb{R}, p_i^a(t) = const.$

Έτσι, η τρίτη προϋπόθεση του ορισμού του Salmon καθίσταται περιττή και ο Dowe έχει δίκιο σε αυτή την ειδική περίπτωση. Για να είναι αιτιακή η διαδικασία που περιγράφει την κίνηση ενός σωματιδίου αρκεί να μην αλληλεπιδρά αιτιακώς με άλλες διαδικασίες και να εκδηλώνει τετραορμή σε κάθε χωροχρονικό σημείο.

Ωστόσο, η συνθήκη τοπικότητας που εκφράζεται με τον πρώτο ορισμό της ολικής τετραορμής δεν ισχύει σε κάθε σωματιδιακή θεωρία. Οι van Dam και Wigner κατασκευάζουν μία θεωρία στην οποία υπάρχουν σωματίδια που δεν έχουν χρονικά σταθερή τετραορμή, ενώ ταυτόχρονα ικανοποιούνται όλες οι προϋποθέσεις του

[3] Η έννοια της αναγωγής μπορεί να αντικατασταθεί από την έννοια της επιγένεσης για να έχουμε μία ασθενέστερη γενική αρχή τοπικότητας. Ωστόσο, στην περίπτωση που εξετάζουμε η ολική τετραορμή ανάγεται σε τοπικά μεγέθη, την τετραορμή των σωματιδίων, λόγω της ισότητας (6.1.3).

θεωρήματος, συμπεριλαμβανομένης της διατήρησης της ολικής τετραορμής, εκτός από τη συνθήκη (6.1.3). Υποθέτουν ότι η ολική τετραορμή επιμερίζεται μερικώς στα σωματίδια κάθε χρονική στιγμή. Ένα άλλο μέρος της ολικής τετραορμής είναι η τετραορμή αλληλεπίδρασης που υπολογίζεται ως το άθροισμα της τετραορμής που ανταλλάσει κάθε ζεύγος σωματιδίων. Συγκεκριμένα, υποθέτουν ότι μία ορισμένη χρονική στιγμή t_1 ισχύει,

$$P^a(t_1) = \sum_{i=1}^{N} p_i^a(t_1) + P_{\text{int}}^a(t_1) \tag{6.1.4}$$

όπου $P_{\text{int}}^a(t_1)$ η τετραορμή αλληλεπίδρασης τη χρονική στιγμή t_1,

$$P_{\text{int}}^a(t_1) = \sum_{i \neq k} P_{ik}^a(t_1), \tag{6.1.5}$$

με $P_{ik}^a(t_1)$ την τετραορμή που μεταφέρεται από το σωματίδιο i στο σωματίδιο k τη χρονική στιγμή t_1. Η $P_{ik}^a(t_1)$ ισούται με τη συνολική τετραορμή που έχει φύγει από το σωματίδιο i πριν τη χρονική στιγμή $t_1 = x_i^0(\tau_i)$ και φθάνει στο σωματίδιο k μετά τη χρονική στιγμή $t_1 = x_k^0(\tau_k)$. Επειδή το ποσό της τετραορμής που μεταφέρεται από το ένα σωματίδιο στο άλλο δεν είναι τοπικά μετρήσιμο μέγεθος συμπεραίνουμε ότι η τετραορμή αλληλεπίδρασης δεν ανάγεται σε τοπικά μετρήσιμα μεγέθη. Αυτό έχει ως συνέπεια και η ολική τετραορμή του συστήματος μία ορισμένη χρονική στιγμή να μην ανάγεται σε τοπικά γεγονότα όπως είναι η τιμή της τετραορμής κάθε σωματιδίου την ίδια χρονική στιγμή. Η (6.1.4) είναι ένας δεύτερος ορισμός της ολικής τετραορμής του συστήματος σωματιδίων που θα μπορούσε κάποιος να υιοθετήσει[4].

Η θεωρία των van Dam και Wigner περιγράφει σωματίδια που αλληλεπιδρούν από απόσταση[5] και δείχνει ότι ο ισχυρισμός του Dowe δεν είναι ορθός στη γενική περίπτωση: η απουσία αιτιακών αλληλεπιδράσεων δεν συνεπάγεται τη σταθερότητα των διατηρήσιμων ποσοτήτων σε μία διαδικασία. Έτσι, με βάση τον ορισμό του

[4] Οι van Dam και Wigner αναφέρουν χαρακτηριστικά: «η ολική γραμμική ορμή [ολική τετραορμή] δίδεται από την (5) [(6.1.3)] μόνο σε ασυμπτωτικές περιοχές. Στην περιοχή της αλληλεπίδρασης θα πρέπει να προστεθεί στο αριστερό μέλος της (5) [(6.1.3)] η γραμμική ορμή αλληλεπίδρασης» (van Dam and Wigner 1966:142).

[5] Η μεταφορά τετραορμής περιγράφει τη δράση από απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια που είναι αντίστοιχη με τη νευτώνεια αλληλεπίδραση, με τη διαφορά ότι σε αυτή την περίπτωση η αλληλεπίδραση δεν είναι *στιγμιαία* (van Dam and Wigner 1966:840).

Salmon η χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου που αλληλεπιδρά από απόσταση με άλλα σωματίδια δεν είναι αιτιακή διαδικασία και αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η τετραορμή του σωματιδίου δεν είναι σταθερή κάθε χρονική στιγμή σε απουσία αιτιακών αλληλεπιδράσεων.

Ωστόσο, είναι εφαρμόσιμη η εννοιολογική διάκριση του Salmon ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες στην περίπτωση της θεωρίας των van Dam και Wigner και γενικώς σε θεωρίες που προβλέπουν αλληλεπίδραση από απόσταση; Όπως αναφέραμε, η χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου στη θεωρία των van Dam και Wigner δεν είναι αιτιακή διαδικασία. Όμως, θα πρέπει να τη χαρακτηρίσουμε ως ψευδο-διαδικασία; Αν η απάντηση είναι καταφατική τότε οδηγούμαστε στο ακόλουθο παράδοξο. Ασυμπτωτικά, στο άπειρο παρελθόν και στο άπειρο μέλλον, η θεωρία προβλέπει ότι τα σωματίδια είναι ελεύθερα. Δηλαδή, δεν αλληλεπιδρούν ούτε από απόσταση, ούτε εξ επαφής, διότι θεωρούμε ότι η χωρική τους απόσταση είναι άπειρη. Μάλιστα, σε αυτή την περίπτωση ισχύει η σχέση (6.1.3) για την ολική τετραορμή του συστήματος και κάθε σωματίδιο κατέχει σταθερό ποσό τετραορμής. Έτσι, συνάγουμε ότι ασυμπτωτικά τα σωματίδια είναι αιτιακές διαδικασίες. Από εδώ προκύπτει το παράδοξο. Με ποιον τρόπο μεταβάλλεται το οντικό καθεστώς μίας διαδικασίας και από αιτιακή διαδικασία μετατρέπεται σε ψευδο-διαδικασία και αντίστροφα, προϊόντος του χρόνου;

Καταρχάς, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι το παράδοξο αυτό δεν αφορά στη θεωρία του Dowe που θεωρεί τη χωροχρονική γραμμή του σωματιδίου αιτιακή διαδικασία ακόμα και αν έχουμε αλληλεπίδραση από απόσταση. Δεύτερον, το παράδοξο δεν αφορά στην περίπτωση που υιοθετήσουμε τον πρώτο ορισμό για την ολική τετραορμή. Το θεώρημα των van Dam και Wigner μάς λέει ότι τα σωματίδια που έχουν σταθερή τετραορμή ασυμπτωτικά, είναι αιτιακές διαδικασίες εφόσον δεν λαμβάνουν χώρα κρούσεις σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή. Τρίτον, υπάρχουν περιπτώσεις χωροχρονικών γραμμών όπως η χορδή αλληλεπιδράσεων που περιγράφει την κίνηση ενός σωματιδίου υπό την συνεχή επίδραση ενός πεδίου, που επίσης δεν αναπαριστάνουν αιτιακές διαδικασίες σύμφωνα με τον ορισμό του Salmon. Ωστόσο, αυτές οι χωροχρονικές γραμμές δεν αναπαριστάνουν ούτε ψευδο-διαδικασίες. Οι διαδικασίες αυτές είναι εξιδανικευμένες απλουστεύσεις που σε ένα πιο θεμελιώδες επίπεδο ανάλυσης, στο πλαίσιο μίας θεμελιώδους φυσικής θεωρίας,

ενδέχεται να μπορούν να εξηγηθούν με βάση τις αιτιακές έννοιες της θεωρίας του Salmon (1997:465).

Πιστεύω ότι η τελευταία επισήμανση προσφέρει μία διέξοδο για τη λύση του παραδόξου. Συγκεκριμένα, μπορούμε να θεωρήσουμε τις σωματιδιακές θεωρίες της δράσης από απόσταση ως μη θεμελιώδεις θεωρίες. Άλλωστε, στο δεύτερο μισό του εικοστού αιώνα, και μέχρι σήμερα, αποτέλεσαν εξαιρέσεις στον κανόνα των φυσικών θεωριών που είναι κυρίως πεδιακές θεωρίες. Βεβαίως, η εισαγωγή της έννοιας του πεδίου ορίζει μία διαφορετική οντολογία του κόσμου. Ο κόσμος δεν αποτελείται μόνο από σωματίδια που δρουν από απόσταση αλλά και (ή μόνο) από πεδία που αλληλεπιδρούν εξ επαφής. Σε αυτή την περίπτωση η χωροχρονική γραμμή του σωματιδίου που μεταβάλλει την τετραορμή του μπορεί να θεωρηθεί ότι περιγράφει την κίνηση εντός πεδίου, ως συνεχή χορδή αλληλεπιδράσεων, η οποία σε πιο θεμελιώδες επίπεδο μπορεί να αναλυθεί σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις, κατά Salmon. Το πεδίο είναι το αντικείμενο που κατέχει το ποσό της ολικής τετραορμής του συστήματος που ονομάσαμε τετραορμή αλληλεπίδρασης. Μάλιστα, η τετραορμή αλληλεπίδρασης θα μπορούσε να ορισθεί με βάση τοπικά μετρήσιμα μεγέθη που χαρακτηρίζουν το πεδίο. Με αυτό τον τρόπο αποκαθίσταται και το πρόβλημα της τοπικότητας σε σχέση με τους ορισμούς που αναφέραμε. Σε ένα τέτοιο πλαίσιο μπορεί κάποιος να υποστηρίξει ότι αμφότεροι οι ορισμοί της ολικής τετραορμής του συστήματος ικανοποιούν τη συνθήκη τοπικότητας που απαιτεί τα καθολικά χαρακτηριστικά του συστήματος να ορίζονται με βάση τοπικά μεγέθη.

Συνοψίζοντας, θα λέγαμε ότι στις περιπτώσεις των σωματιδιακών θεωριών μπορούμε να χαρακτηρίσουμε τη χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου ως αιτιακή διαδικασία κατά Salmon μόνο αν τα σωματίδια δεν συγκρούονται και τα θεμελιώδη μεγέθη που περιγράφουν το σύστημα είναι τοπικά φυσικά μεγέθη. Το γεγονός αυτό καθιστά τις σωματιδιακές θεωρίες που προβλέπουν τη δράση από απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια μη συμβατές με την αιτιακή θεωρία του Salmon, μολονότι μπορούμε να αποφανθούμε ότι η χωροχρονική γραμμή ενός σωματιδίου που δέχεται ή ασκεί δράση από απόσταση δεν αποτελεί αιτιακή διαδικασία. Αυτό δεν φαίνεται να ισχύει στην περίπτωση του Dowe, δεδομένου ότι αυτός υποθέτει ότι η κατοχή μίας διατηρήσιμης ποσότητας από ένα και το αυτό αντικείμενο αρκεί για τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας. Ωστόσο, η αποδοχή της δράσης από απόσταση αντιφάσκει με

τη θέση του Dowe ότι σε απουσία αιτιακών αλληλεπιδράσεων, κατά μήκος μίας διαδικασίας, διατηρείται σταθερή η τιμή μίας διατηρήσιμης ποσότητας.

6.2 Αιτιακές διαδικασίες και πεδία

Οι θεμελιώδεις επιστημονικές θεωρίες της σύγχρονης φυσικής αναφέρονται σε πεδία. Η γενική θεωρία της σχετικότητας υποστηρίζει ότι η γεωμετρία του χωροχρόνου είναι μία συγκεκριμένη διαμόρφωση του βαρυτικού πεδίου που αποτελεί λύση των εξισώσεων του Einstein. Η ηλεκτρομαγνητική θεωρία πεδίου υποστηρίζει ότι στα σημεία του χωροχρόνου αποδίδεται το ηλεκτρικό και το μαγνητικό διάνυσμα κατά τρόπον ώστε η χωροχρονική κατανομή τιμών σε αυτά τα φυσικά μεγέθη να ικανοποιεί τις εξισώσεις Maxwell. Τέλος, οι κβαντικές θεωρίες πεδίων, στην πλέον διαδεδομένη μεταξύ των φυσικών ανάγνωσή τους, αποδίδουν αφηρημένους τελεστές, που δρουν σε κάποιο χώρο Hilbert και θεωρούμε ότι αναπαριστάνουν φυσικά μεγέθη, στα σημεία του χωροχρόνου. Μία συγκεκριμένη κατανομή τελεστών στα χωροχρονικά σημεία είναι η διαμόρφωση του κβαντικού πεδίου[6]. Το ζητούμενο σε αυτή την ενότητα είναι να εξετάσουμε τη σχέση ανάμεσα στα πεδία της κλασικής φυσικής και στην έννοια της αιτιακής διαδικασίας.

Όπως και προηγουμένως, θα θεωρήσουμε το χωρόχρονο Minkowski ως χωρόχρονο υποβάθρου $\langle \mathbb{R}^4, \eta_{ab} \rangle$ και θα υποθέσουμε ότι υπάρχει μία πραγματική λεία συνάρτηση $\phi : \mathbb{R}^4 \to \mathbb{R}$ που ικανοποιεί την εξίσωση Klein-Gordon,

$$\left(\Box + m^2 \right) \phi = 0 , \tag{6.2.1}$$

με $\Box = \eta_{ab} \partial^a \partial^b$ τον τελεστή d'Alembert και m τη μάζα του πεδίου. Ο τελεστής ενέργειας – ορμής του ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon έχει τη μορφή,

[6] Υπάρχουν πολλές ενστάσεις σε αυτή τη θεώρηση όπως, π.χ., αν είναι μαθηματικώς ορθή η απόδοση τελεστών σε σημεία του χωροχρόνου ή η ένσταση του Teller σύμφωνα με την οποία ως πεδίο δεν μπορεί να θεωρηθεί η κατανομή τελεστών στα σημεία του χωροχρόνου αλλά η κατανομή τιμών μεγεθών που αναπαριστάνονται από τελεστές στα σημεία του χωροχρόνου (Teller 1995:93). Ωστόσο, σε αυτό το σημείο δεν χρειάζεται να επεκταθούμε περισσότερο.

$$T_{ab}[\phi] = \partial_a \phi \partial_b \phi - \frac{1}{2}\eta_{ab}(\partial_c \phi \partial^c \phi - m^2 \phi^2)\,. \qquad (6.2.2)$$

Ο τανυστής ενέργειας-ορμής T_{ab} εξαρτάται ρητά από το ϕ, αλλά αν καθορίσουμε μία ορισμένη διαμόρφωση του πεδίου ϕ τότε μπορεί να θεωρηθεί ως ένα πεδίο στο χωρόχρονονο. Επίσης, ο τανυστής ενέργειας-ορμής ικανοποιεί τον τοπικό νόμο διατήρησης, $\partial^a T_{ab} = 0$.

Αν Σ είναι μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου στο χωρόχρονο Minkowski με κάθετο τετράνυσμα n^b, η ολική τετραορμή του πεδίου, $P^a[\phi]$, ορίζεται ως το ολοκλήρωμα στην υπερεπιφάνεια Σ της πυκνότητας τετραορμής ανά μονάδα τρισδιάστατου όγκου όπως μετριέται από έναν αδρανειακό παρατηρητή που κινείται στην κατεύθυνση του n^b με μοναδιαία ταχύτητα,

$$P^a[\phi] = \int_{\Sigma} T^a_b[\phi] n^b d^3x. \qquad (6.2.3)$$

Η τετραορμή του πεδίου είναι μία καθολικά διατηρήσιμη ποσότητα: κάθε συνιστώσα της έχει την ίδια τιμή σε διαφορετικές υπερεπιφάνειες σταθερού χρόνου. Η μηδενική συνιστώσα της, $P^0[\phi]$, αναπαριστάνει την ολική ενέργεια του πεδίου, ενώ οι υπόλοιπες τρεις συνιστώσες, $P^1[\phi], P^2[\phi], P^3[\phi]$, είναι οι συνιστώσες της χωρικής ορμής στο επιλεγμένο αδρανειακό σύστημα.

Το ζήτημα που θα μας απασχολήσει είναι αν το ελεύθερο πεδίο Klein-Gordon είναι αιτιακή διαδικασία. Σύμφωνα με τον Dowe το πεδίο είναι ένα αντικείμενο, όπως τα σωματίδια και τα κύματα (Dowe 2000:91), και αυτό το αντικείμενο υπό ορισμένες συνθήκες κατέχει διατηρήσιμες ποσότητες, ενέργεια και χωρική ορμή - άρα, είναι αιτιακό αντικείμενο. Το επόμενο βήμα για να μιλήσουμε για αιτιακή διαδικασία είναι να θεωρήσουμε τη χωροχρονική γραμμή του αντικειμένου ως τη γεωμετρική αναπαράσταση της αιτιακής διαδικασίας. Ωστόσο, ποια είναι η χωροχρονική γραμμή αυτού του αντικειμένου; Ποια χωροχρονική γραμμή θα θεωρήσουμε ότι αναπαριστάνει το ελεύθερο πεδίο Klein-Gordon σε μία συγκεκριμένη διαμόρφωση; Στην περίπτωση των σωματιδίων το πρόβλημα αυτό είναι τετριμμένο, διότι τα σωματίδια θεωρούνται σημειακά αντικείμενα και κάθε χρονική στιγμή βρίσκονται σε

ένα σημείο του χώρου. Όμως, στην περίπτωση του πεδίου, τα πράγματα είναι διαφορετικά. Ακόμα και αν υποθέσουμε ότι σε κάποιο σύστημα αναφοράς, ειδικές αρχικές συνθήκες περιορίζουν το πεδίο σε ένα σημείο του χώρου σε μία ορισμένη χρονική στιγμή, σε επόμενες χρονικές στιγμές, το πεδίο θα καλύπτει ευρύτερη περιοχή του χώρου εντός του κώνου φωτός του μέλλοντος του αρχικού χωροχρονικού σημείου. Έτσι, από το αρχικό χωροχρονικό σημείο διέρχονται απείρως πολλές χωροχρονικές γραμμές που περιλαμβάνουν σημεία του χωροχρόνου στα οποία το πεδίο έχει διαδοθεί.

Η χωροχρονική γραμμή του πεδίου μπορεί να καθορισθεί με τη βοήθεια διατηρήσιμης τετραορμής $P^a[\phi]$. Ας θεωρήσουμε την τετραορμή ως ένα σταθερό διανυσματικό πεδίο, δηλαδή ως την απόδοση ενός σταθερού διανύσματος σε κάθε σταθερό σημείο, τότε μπορούμε να ορίσουμε με μοναδικό τρόπο μία οικογένεια παράλληλων χρονοειδών γραμμών που έχουν την τετραορμή $P^a[\phi]$ ως εφαπτόμενο διάνυσμα. Με άλλα λόγια, η οικογένεια των χωροχρονικών γραμμών που ορίζουμε είναι οι ολοκληρωτικές γραμμές του διανυσματικού πεδίου $P^a[\phi]$. Κάθε χωροχρονική γραμμή είναι το ανάλογο της χωροχρονικής γραμμής ενός σωματιδίου με σταθερή τετραορμή $p^a = P^a[\phi]$. Έτσι, αν η χωροχρονική γραμμή του πεδίου Klein-Gordon ταυτίζεται με κάποια από τις ολοκληρωτικές γραμμές του διανυσματικού πεδίου $P^a[\phi]$, τότε μπορούμε να πούμε ότι σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής του πεδίου αποδίδεται σταθερό ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας που χαρακτηρίζει συνολικά το πεδίο. Η δεύτερη απαίτηση που θέτουμε είναι ότι η χωροχρονική γραμμή του πεδίου θα πρέπει να διέρχεται από χωροχρονικά σημεία στα οποία «υπάρχει» πεδίο, θα πρέπει να βρίσκεται «εντός του πεδίου». Η απαίτηση αυτή ικανοποιεί τη βασική διαίσθησή μας ότι σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής ενός αντικειμένου θα πρέπει να υπάρχει το αντικείμενο, πλήρως ή μερικώς. Έτσι, από τις ολοκληρωτικές γραμμές του διανυσματικού πεδίου $P^a[\phi]$ μόνο αυτές για τις οποίες ισχύει $T_{ab}\big|_p[\phi] \neq 0$, σε κάθε σημείο p της γραμμής, μπορούν να θεωρηθούν ως γεωμετρικές αναπαραστάσεις της αιτιακής διαδικασίας του πεδίου. Με βάση αυτές τις δύο απαιτήσεις προτείνουμε την εξής διατύπωση για την ταυτοποίηση της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά την αιτιακή διαδικασία του πεδίου Klein-Gordon.

Για μία συνάρτηση ϕ που είναι λύση της εξίσωσης (6.2.1) και περιγράφει τη διαμόρφωση του ελεύθερου βαθμωτού πεδίου Klein-Gordon, μία αιτιακή διαδικασία που χαρακτηρίζεται από την τετραορμή $P^a[\phi]$ του πεδίου ταυτίζεται γεωμετρικά με τις ολοκληρωτικές γραμμές του διανυσματικού πεδίου $P^a[\phi]$ που διέρχονται μόνο από χωροχρονικά σημεία στα οποία «υπάρχει» το πεδίο, δηλαδή, για κάθε σημείο p της χωροχρονικής γραμμής ισχύει $T_{ab}\big|_p[\phi] \neq 0$.

Σε σχέση με αυτό το κριτήριο μπορούν να τεθούν δύο προβλήματα. Το πρώτο έχει να κάνει με την ύπαρξη μίας τέτοιας γραμμής και το δεύτερο με τη μοναδικότητά της. Το πρόβλημα της ύπαρξης είναι πολύ σημαντικό διότι αφορά στην επάρκεια του κριτηρίου που θέσαμε. Ωστόσο, το δεύτερο πρόβλημα θεωρώ ότι είναι μικρής σημασίας. Η ταύτιση μίας χωροχρονικής γραμμής με γεωμετρική αναπαράσταση της αιτιακής διαδικασίας του πεδίου δεν γίνεται στη βάση τοπικών διατηρήσιμων μεγεθών που μπορούν, καταρχήν τουλάχιστον, να μετρηθούν σε κάθε σημείο της γραμμής και να βρεθεί ότι έχουν διαφορετική τιμή σε σημεία που δεν ανήκουν στην ίδια γραμμή. Σε αντίθεση με την τετραορμή του σωματιδίου που θεωρήσαμε ως τοπικό μέγεθος στην προηγούμενη ενότητα, η τετραορμή του πεδίου είναι καθολικό μέγεθος που αφορά σε όλο το πεδίο ενώ με τον ορισμό του διανυσματικού πεδίου της τετραορμής αποδώσαμε σε κάθε σημείο του χωροχρόνου το ίδιο διάνυσμα. Έτσι, δύο χωροχρονικές γραμμές που βρίσκονται «εντός του πεδίου» δεν μπορούν να διακριθούν ως αιτιακές διαδικασίες, διότι σε κάθε σημείο των γραμμών υπάρχει πεδίο και σε κάθε σημείο τους αποδίδουμε το ίδιο ποσό από τη διατηρήσιμη ποσότητα που χαρακτηρίζει την αιτιακή διαδικασία του πεδίου. Με βάση αυτές τις σκέψεις οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι η γεωμετρική αναπαράσταση της αιτιακής διαδικασίας του πεδίου που κατέχει ορισμένη τετραορμή είναι ένα σύνολο χωροχρονικών γραμμών. Εάν το σύνολο αυτό είναι μονοσύνολο, ή αν η αιτιακή διαδικασία έχει πολλούς «γεωμετρικούς εκπροσώπους», είναι ένα ενδεχομενικό χαρακτηριστικό που εξαρτάται από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση του πεδίου, ϕ.

Σε σχέση με το ερώτημα της ύπαρξης χωροχρονικής γραμμής που πληροί τις απαιτήσεις του κριτηρίου δεν μπορούμε να δώσουμε κατηγορηματική απάντηση. Ωστόσο, μπορούμε να κάνουμε μία χρήσιμη επισήμανση, καθώς και να

παρουσιάσουμε ένα επιχείρημα που ενισχύει την πεποίθησή μας ότι υπάρχουν χωροχρονικές γραμμές που πληρούν τις προϋποθέσεις του κριτηρίου. Καταρχάς, πρέπει να επισημάνουμε ότι κάθε λύση ϕ της εξίσωσης του ελεύθερου βαθμωτού πεδίου Klein-Gordon δεν αντιστοιχεί σε μία αιτιακή διαδικασία που χαρακτηρίζεται από την τετραορμή του πεδίου. Για παράδειγμα, στην περίπτωση των λύσεων επίπεδου κύματος της εξίσωσης,

$$\phi = \mathrm{A}\cos\left(p^a x_a\right), \tag{6.2.4}$$

όπου τα σταθερά τετρανύσματα p^a ικανοποιούν τη σχέση $p^a p_a = m^2$, η ενέργεια του πεδίου (δηλαδή, η μηδενική συνιστώρα του $P^a[\phi]$) είναι άπειρη. Έτσι, όπως αναφέραμε στην ενότητα 4.2, για να ορίσουμε την τετραορμή του πεδίου και τον αντίστοιχο καθολικό νόμο διατήρησης θα πρέπει να εργαστούμε σε ένα υποσύνολο των λύσεων της εξίσωσης Klein-Gordon που ικανοποιούν ορισμένες ασυμπτωτικές ή συνοριακές συνθήκες[7].

Το επιχείρημα που ενισχύει την πεποίθησή μας για την ύπαρξη χωροχρονικών γραμμών που ικανοποιούν το κριτήριο που θέσαμε βασίζεται στη μελέτη των Geroch και Jang (1975), για την κίνηση ενός μικρού σώματος σε χωροχρόνους της γενικής θεωρίας της σχετικότητας[8]. Στο άρθρο τους οι Geroch και Jang περιγράφουν, καταρχάς, την κίνηση ενός μικρού σώματος στο χωρόχρονο Minkowski. Υποθέτουν ότι το υλικό πεδίο που περιγράφει το μικρό σώμα είναι ένα συμμετρικό τανυστικό πεδίο T_{ab} ενέργειας-ορμής στο χωρόχρονο Minkowski για το οποίο ισχύει ο τοπικός νόμος διατήρησης $\partial^a T_{ab} = 0$. Ο χωροχρονικός σωλήνας που περιγράφει γεωμετρικά τη κίνηση του σώματος είναι ένα υποσύνολο των σημείων του χωροχρόνου που αποτελούν το στήριγμα του T_{ab}[9]. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια του διανυσματικού πεδίου της τετραορμής P^a και του τανυστικού πεδίου της

[7] Ο Rorlich χαρακτηρίζει τέτοιες λύσεις, όπως αυτή του επίπεδου κύματος, ως παθολογικές περιπτώσεις που προκύπτουν από εξιδανίκευση της πραγματικής κατάστασης: «το επίπεδο κύμα είναι αναμφίβολα μία εξιδανίκευση της πραγματικότητας, που είναι, όμως, πολύ χρήσιμη» (Rorlich 1965:99).

[8] Οι Geroch και Jang (1975) απέδειξαν, ότι αν το υλικό πεδίο ικανοποιεί κατάλληλες συνθήκες, και δεν επηρεάζει τη χωροχρονική γεωμετρία, τότε η κίνηση του μικρού σώματος αναπαριστάνεται από μία χρονοειδή γεωδαισιακή.

[9] Το στήριγμα μίας συνάρτησης f, $\mathrm{supp}\, f$, είναι το κλειστό σύνολο στοιχείων του πεδίου ορισμού της που είναι το συμπλήρωμα του μεγαλύτερου ανοικτού συνόλου στο οποίο η f μηδενίζεται.

στροφορμής J^{ab} ορίζουν τη χωροχρονική γραμμή του κέντρου μάζας του σώματος ως το σύνολο των σημείων της πολλαπλότητας για τα οποία ισχύει $P^a J_{ab} = 0$. Αν ισχύει για τον τανυστή ενέργειας-ορμής η ισχυρή συνθήκη αιτιότητας -δηλαδή, αν σε κάθε σημείο στο οποίο $T_{ab} \neq 0$, $T^{ab}\xi_a\xi_b > 0$, για ξ^a, ξ^b χρονοειδή διανύσματα με κατεύθυνση στο μέλλον-, τότε το P^a είναι χρονοειδές με κατεύθυνση στο μέλλον και η χωροχρονική γραμμή του κέντρου μάζας είναι χρονοειδής γεωδαισιακή με εφαπτόμενο διάνυσμα το P^a. Τέλος, οι συγγραφείς δείχνουν ότι η χωροχρονική γραμμή του κέντρου μάζας βρίσκεται στη κυρτή θήκη (convex hull) του χωροχρονικού σωλήνα, δηλαδή στο σύνολο των τμημάτων των χωροειδών γεωδαισιακών που έχουν και τα δύο τους άκρα εντός του χωροχρονικού σωλήνα. Επομένως, εφόσον το μικρό σώμα που περιγράφεται από ένα πεδίο ενέργειας-ορμής που ικανοποιεί τις συνθήκες προβλήματος των Geroch και Jang μπορεί να περιγραφεί από μία χρονογραμμή που βρίσκεται εντός της κυρτής θήκης του χωροχρονικού σωλήνα και έχει εφαπτόμενο διάνυσμα την τετραορμή του πεδίου, μπορούμε βασίμως να υποθέσουμε ότι και η χρονογραμμή που αναπαριστάνει γεωμετρικά την αιτιακή διαδικασία του ελεύθερου πραγματικού πεδίου Klein-Gordon στο χωρόχρονο Minkowski (και έχει ως εφαπτόμενο διάνυσμα την τετραορμή) θα διέρχεται από χωροχρονικά σημεία στα οποία ο τανυστής ενέργειας-ορμής είναι διάφορος του μηδενός.

Συνοψίζοντας, σε αυτή την ενότητα προσπαθήσαμε να ορίσουμε με βάση την προσέγγιση του Dowe την έννοια της αιτιακής διαδικασίας για το ελεύθερο βαθμωτό πεδίο Klein-Gordon. Το πεδίο είναι ένα αντικείμενο που έχει σταθερή τετραορμή και η χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει την αιτιακή διαδικασία είναι ολοκληρωτική καμπύλη του διανυσματικού πεδίου της τετραορμής. Τέλος, απαιτήσαμε η χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει το πεδίο ως αιτιακή διαδικασία να διέρχεται από σημεία στα οποία «υπάρχει» το πεδίο.

6.3 Αιτιακές διαδικασίες και πεδία: τοπική προσέγγιση

Ένα από τα βασικά χαρακτηριστικά της αιτιακής θεωρίας του Salmon είναι ο τοπικός χαρακτήρας της. Συγκεκριμένα, η αιτιακή επίδραση αναπαριστάνεται από ένα σταθερό ποσό κάποιας διατηρήσιμης ποσότητας, η οποία μετριέται σε ένα συγκεκριμένο σημείο ή σε μία περιοχή του χώρου σε κάποια χρονική στιγμή και διαδίδεται κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής - δηλαδή, στη βάση τοπικών μετρήσεων διαπιστώνεται ένα σταθερό ποσό της διατηρήσιμης ποσότητας σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής, σε απουσία εξωτερικής παρέμβασης.

Στην προηγούμενη ενότητα, ακολουθώντας τον ορισμό του Dowe, θεωρήσαμε ότι η αιτιακή διαδικασία του ελεύθερου βαθμωτού πεδίου Klein-Gordon είναι μία χρονοειδής καμπύλη που έχει ως εφαπτόμενο διάνυσμα την τετραορμή του πεδίου. Μολονότι η τετραορμή του πεδίου θεωρήθηκε ιδιότητα που μπορεί να αποδοθεί τοπικά σε κάθε σημείο του χωροχρόνου, εφόσον αναπαριστάνεται από ένα σταθερό διανυσματικό πεδίο, δεν είναι μία ιδιότητα που μπορεί να μετρηθεί τοπικά, διότι γενικώς προϋποθέτει τον υπολογισμό της ενέργειας-ορμής του πεδίου σε όλο το χώρο σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Άρα, ο Salmon δεν θα συμφωνούσε ότι η ολοκληρωτική καμπύλη του διανυσματικού πεδίου της τετραορμής αποτελεί γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας. Η προσέγγιση αυτή δεν μας λέει με ποιον τρόπο η ποσότητα τετραορμής, η οποία μπορεί να μετρηθεί σε μία συγκεκριμένη χωρική περιοχή σε μία ορισμένη χρονική στιγμή, διαδίδεται κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής.

Αυτό που θα περιμέναμε από μία τοπική θεώρηση των αιτιακών διαδικασιών, σε συμφωνία με τη θεωρία του Salmon, είναι να καθορίζεται ένας χωροχρονικός σωλήνας που προκύπτει από τη μετατόπιση μίας φραγμένης χωρικής περιοχής κατά μήκος μίας χρονοειδούς καμπύλης, για τον οποίο να ισχύει ότι η ποσότητα τετραορμής που μετριέται από κάθε αδρανειακό παρατηρητή σε κάθε περιοχή που ορίζεται από την τομή του σωλήνα με μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου να είναι σταθερή. Αν υποθέσουμε ότι αυτή η χρονοειδής καμπύλη είναι γεωδαισιακή τότε αναγκαία συνθήκη για τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας είναι *η ύπαρξη ενός αδρανειακού παρατηρητή στο ιδιοσύστημα του οποίου το ποσό του διατηρήσιμου*

μεγέθους που μετριέται σε μία φραγμένη χωρική περιοχή, σε κάθε χρονική στιγμή, να είναι σταθερό.

6.3.1 Αιτιακές διαδικασίες στην αλγεβρική κλασική θεωρία πεδίων

Για να επεξεργαστούμε περαιτέρω την τοπική θεώρηση των αιτιακών διαδικασιών ακολουθούμε την προσέγγιση στην κλασική θεωρία πεδίων που αναπτύχθηκε από τους Avishai, Ekstein και Moyal (1972). Στην προσέγγιση αυτή τα παρατηρήσιμα μεγέθη της θεωρίας αναπαριστάνονται από συνεχή συναρτησιακά σε έναν τοπολογικό χώρο των πραγματικών διανυσματικών συναρτήσεων. Έστω Ω το σύνολο των πραγματικών διανυσματικών συναρτήσεων με μεταβλητές στον $\mathbb{R}^3$, $\psi:\mathbb{R}^3\to\mathbb{R}^N$, που είναι φραγμένες και κατά τμήματα διαφορίσιμες. Το σύνολο Ω, εφοδιασμένο με τη νόρμα ,

$$\|\psi\| = \sup_{x\in\mathbb{R}^3}\left(\sum_{i=1}^{N}|\psi_i(x)|^2\right)^{1/2}, \tag{6.3.1}$$

ορίζει έναν τοπολογικό χώρο. Επιπλέον, θεωρούμε την τοπολογική άλγεβρα $C(\Omega)$ των πραγματικών συνεχών συναρτησιακών $F:\Omega\to\mathbb{R}$, που είναι εφοδιασμένη με την συμπαγή-ανοικτή (compact – open) τοπολογία[10]. Τα στοιχεία της $C(\Omega)$ αναπαριστάνουν τα παρατηρήσιμα της θεωρίας.

Ας δούμε αυτή την κατασκευή στην περίπτωση του πεδίου Klein-Gordon. Σε αυτή την περίπτωση ο τοπολογικός χώρος Ω αποτελείται από συναρτήσεις $\psi:\mathbb{R}^3\to\mathbb{R}^2$ με $\psi(\vec{x})=\left(\psi_1(\vec{x}),\psi_2(\vec{x})\right)$. Κάθε στοιχείο του Ω μπορεί να ερμηνευθεί ως μία δυνατή κατάσταση του πεδίου, σε μία χρονική στιγμή, σε κάποιο αυθαίρετα επιλεγμένο αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Δηλαδή, ο Ω αναπαριστάνει το φασικό χώρο του συστήματος του πεδίου. Έτσι, αν $\phi\left(\vec{x},t\right)$ είναι μία λύση της εξίσωσης Klein-Gordon, η κατάσταση του πεδίου μία χρονική στιγμή t_0 αναπαριστάνεται από ένα στοιχείο $\psi\in\Omega$ για το οποίο $\psi_1(\vec{x})=\phi\left(\vec{x},t_0\right)$ και $\psi_2(\vec{x})=\dot{\phi}\left(\vec{x},t_0\right)$.

[10] Η συμπαγής – ανοικτή τοπολογία ορίζεται ως εξής: Για κάθε ζεύγος συνόλων $A\subset\Omega$ και $B\subset\mathbb{R}$, έστω $(A,B)=\left\{F\in C(\Omega)\middle|F(A)\subset B\right\}$. Η συμπαγής ανοικτή τοπολογία στο $C(\Omega)$ είναι αυτή που έχει ως υπο-βάση (sub-basis) όλα τα σύνολα (A,B) όπου το A είναι συμπαγές υποσύνολο του Ω και το B ανοικτό υποσύνολο του $\mathbb{R}$.

Κάθε περιορισμός στις ιδιότητες των συναρτήσεων που είναι στοιχεία του Ω, αποτελεί περιορισμό για τις δυνατές καταστάσεις του πεδίου. Για παράδειγμα, θεωρείστε την ολική ενέργεια του ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon στην υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου t=0,

$$W = \frac{1}{2}\int_{\mathbb{R}^3} d^3x \left\{ \left(\dot{\phi}(\vec{x},0)\right)^2 + \left|\vec{\nabla}\phi(\vec{x},0)\right|^2 + m^2\phi(\vec{x},0)^2 \right\} \tag{6.3.2}$$

Αν θεωρήσουμε τον Ω ως τον χώρο των συναρτήσεων που μηδενίζονται στο άπειρο (δηλαδή, $\psi_i(\vec{x}) \to 0$ καθώς $|\vec{x}| \to \infty$ για $i = 1,2$), τότε η ενέργεια,

$$W[\psi] = \frac{1}{2}\int_{\mathbb{R}^3} d^3x \left\{ \left(\psi_2(\vec{x})\right)^2 + \left|\vec{\nabla}\psi_1(\vec{x})\right|^2 + m^2\psi_1(\vec{x})^2 \right\} \tag{6.3.3}$$

είναι πεπερασμένη για κάθε δυνατή κατάσταση του πεδίου.

Τα βασικά παρατηρήσιμα του πεδίου σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου δίνονται από τα συναρτησιακά,

$$F_{i,\vec{x}}[\psi] = \psi_i(\vec{x}), \;\; i = 1,2\,. \tag{6.3.4}$$

Σύμφωνα με τους Avishai et al. (1972), μπορούμε να εισάγουμε πιο γενικά παρατηρήσιμα ως ολοκληρώματα φραγμένων και συνεχών συναρτήσεων των βασικών παρατηρήσιμων με μία συνάρτηση βάρους, της μορφής

$$F[\psi] = \int_{\mathbb{R}^6} d\vec{x}_1 d\vec{x}_2 f(\vec{x}_1,\vec{x}_2) G_1[\psi_1(\vec{x}_1)] G_2[\psi_2(\vec{x}_2)]\,, \tag{6.3.5}$$

όπου f μία ολοκληρώσιμη συνάρτηση στον $\mathbb{R}^6$ και $G_i(y)$ $(i = 1,2)$ φραγμένες και συνεχείς πραγματικές συναρτήσεις πραγματικής μεταβλητής.

Γενικώς, μπορούμε να θεωρήσουμε ως δυνατό παρατηρήσιμο του πεδίου κάθε στοιχείο του $C(\Omega)$. Επιπλέον, η άλγεβρα των παρατηρήσιμων του πεδίου μπορεί να γίνει πιο πλούσια σε αλγεβρική αλλά και σε τοπολογική δομή, αν κάνουμε επιπλέον μαθηματικές υποθέσεις. Για παράδειγμα, αν θεωρήσουμε την άλγεβρα $C(\Omega)$ ως άλγεβρα *φραγμένων* και *συνεχών* συναρτησιακών, τότε αυτή γίνεται άλγεβρα Banach.

Επίσης, αν θεωρήσουμε τη $C(\Omega)$ ως την άλγεβρα των *μιγαδικών, φραγμένων και συνεχών* συναρτησιακών, τότε αυτή μπορεί να γίνει ενελικτική άλγεβρα Banach, τα αυτοσυζυγή στοιχεία της οποίας αναπαριστάνουν τα παρατηρήσιμα μεγέθη, όπως στην περίπτωση των κβαντικών παρατηρήσιμων. Το τελευταίο βήμα στην ιεραρχία εμπλουτισμού της άλγεβρας των παρατηρησίμων αφορά στην υπόθεση ότι ο Ω είναι ένας *συμπαγής τοπολογικός χώρος Hausdorff* και η $C(\Omega)$ η άλγεβρα των *μιγαδικών συνεχών συναρτησιακών* σε αυτόν το χώρο. Σε αυτή την περίπτωση η $C(\Omega)$ γίνεται μεταθετική C*-άλγεβρα, γεγονός που μας φέρνει ακόμα εγγύτερα στην αλγεβρική κβαντική θεωρία, όπως θα δούμε στο επόμενο κεφάλαιο.

Ακολούθως, θα πρέπει να ορίσουμε την τοπική υποάλγεβρα $\mathcal{A}(V)$ της άλγεβρας $C(\Omega)$, σε ένα φραγμένο όγκο V. Η $\mathcal{A}(V)$ αποτελείται από όλα τα παρατηρήσιμα που "βλέπουν" τη συμπεριφορά των στοιχείων του Ω μόνο στο εσωτερικό του V, ενώ είναι "τυφλά" σε σχέση με τη συμπεριφορά των συναρτήσεων εκτός του V. Συγκεκριμένα,

$$\mathcal{A}(V) = \left\{ F \middle| F(\psi) = F(\chi_V \psi) \right\} \subseteq C(\Omega) \tag{6.3.6}$$

Μπορεί να αποδειχθεί (Avishai et al. 1972) ότι για τις τοπικές υποάλγεβρες ισχύουν οι ακόλουθες ιδιότητες:

$$\overline{\mathcal{A}(V_1) \cup \mathcal{A}(V_2)}^{c-o \text{ topology}} = \mathcal{A}(V_1 \cup V_2), \tag{6.3.7}$$

$$\overline{\bigcup_V \mathcal{A}(V)}^{c-o \text{ topology}} = \mathcal{A}, \tag{6.3.8}$$

όπου $\mathcal{A}$ είναι η ολική άλγεβρα σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου, για την οποία έχουμε υποθέσει ότι ταυτίζεται με τη $C(\Omega)$.

Η δυναμική της θεωρίας καθορίζεται από μία ομάδα αυτομορφισμών $\{T(t)\}_{t\in\mathbb{R}}$ της άλγεβρας $C(\Omega)$, η οποία προκύπτει από μία ομάδα ομοιομορφισμών $\{\tau(t)\}_{t\in\mathbb{R}}$ του Ω[11]. Αναλυτικά,

$$\big(T(t)F\big)(\psi) = F\big(\tau(t)\psi\big) \quad \text{με} \quad \tau(t)\psi(\vec{x},t_0) = \psi(\vec{x},t_0+t). \tag{6.3.9}$$

Στην περίπτωση του πεδίου Klein-Gordon ο μετασχηματισμός $\tau(t)$ είναι ο διαδότης του πεδίου. Έτσι, για ένα χωρικό όγκο V η τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}(V,t)$, που είναι η χρονική μετάθεση της άλγεβρας $\mathcal{A}(V)$ σύμφωνα με τη δυναμική της θεωρίας, περιλαμβάνει τα στοιχεία της $C(\Omega)$ με την ιδιότητα,

$$\big(T(t)F\big)(\psi) = F\big(\chi_V \tau(t)\psi\big). \tag{6.3.10}$$

Σε αυτό το πλαίσιο τα παρατηρήσιμα είναι φυσικές ποσότητες που αναπαριστάνονται από στοιχεία της άλγεβρας $C(\Omega)$ και τα τοπικά παρατηρήσιμα σε μία χωρική περιοχή V μία ορισμένη χρονική στιγμή είναι, καταρχήν, τοπικά μετρήσιμες ποσότητες: ανήκουν στην τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}(V)$. Ένα παρατηρήσιμο F, τοπικό ή καθολικό, θα θεωρούμε ότι είναι *διατηρήσιμη ποσότητα* αν και μόνο αν για κάθε $t\in\mathbb{R}$ και κάθε $\psi\in\Omega$,

$$\big(T(t)F\big)(\psi) = F(\psi). \tag{6.3.11}$$

Είναι η ενέργεια του πεδίου τέτοιου είδους παρατηρήσιμο; Ή γενικότερα, υπάρχουν διατηρήσιμες ποσότητες της θεωρίας που αναπαριστάνουμε με στοιχεία της άλγεβρας $C(\Omega)$; Σε αυτά τα ερωτήματα δεν μπορούμε να δώσουμε σαφή απάντηση, παρά μόνο κάποιους περιορισμούς που προκύπτουν από το μαθηματικό πλαίσιο, εφόσον θεωρήσουμε ότι η απάντηση είναι καταφατική. Έτσι, αν η ενέργεια $W[\psi]$, (6.3.3), ανήκει στη $C(\Omega)$, τότε είναι ένα συνεχές συναρτησιακό στον Ω. Επίσης, αν τα

[11] Η συνθήκη να είναι ομάδα ομοιομορφισμών η ομάδα των μετασχηματισμών στο φασικό χώρο εκφράζει δύο απαιτήσεις. Η πρώτη είναι η απαίτηση αντιστρεπτότητας: για κάθε χρονικό διάστημα και για κάθε κατάσταση ψ, υπάρχει ακριβώς μία κατάσταση ψ_0 τέτοια ώστε $\tau(t)\psi_o=\psi$. Η δεύτερη απαίτηση είναι της συνέχειας: δύο καταστάσεις που είναι κοντινές ως προς την τοπολογία του φασικού χώρου θα εξελιχθούν, μετά από οποιοδήποτε χρονικό διάστημα, σε καταστάσεις που είναι επίσης κοντινές ως προς την ίδια τοπολογία (Kadison 1965).

παρατηρήσιμα αναπαριστάνονται από *φραγμένα* και συνεχή συναρτησιακά στον Ω, τότε η άλγεβρα των παρατηρήσιμων περιλαμβάνει μόνο φραγμένες συναρτήσεις της ενέργειας $W[\psi]$.

Για χάρη του επιχειρήματος, ας υποθέσουμε ότι υπάρχει κάποιο στοιχείο του $C(\Omega)$ που αναπαριστάνει μία διατηρήσιμη ποσότητα ικανοποιώντας την (6.3.11). Το στοιχείο αυτό θα είναι είτε τοπικό παρατηρήσιμο είτε καθολικό. Στην πρώτη περίπτωση, η διατηρήσιμη ποσότητα είναι "αδιάφορη" για την συμπεριφορά των στοιχείων του Ω έξω από ένα φραγμένο χωρικό όγκο V, οπότε δεν χρειάζεται να θέσουμε περιορισμούς στο χώρο συναρτήσεων Ω προκειμένου να διατυπώσουμε την αναγκαία συνθήκη για τον τοπικό ορισμό μίας αιτιακής διαδικασίας.

> Μία χρονοειδής γεωδαισιακή στο χωρόχρονο Minkowski αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία μόνο αν για ένα φραγμένο χωρικό όγκο V, σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου στο ιδιοσύστημα ενός αδρανειακού παρατηρητή που κινείται κατά μήκος της γεωδαισιακής, υπάρχει ένα τοπικό παρατηρήσιμο $F \in \mathcal{A}(V)$ τέτοιο ώστε για κάθε $\psi \in \Omega$ να ισχύει $\big(T(t)F\big)(\psi) = F(\psi)$.

Από την άλλη, για να θεωρήσουμε μία χρονοειδή γεωδαισιακή ως τη γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας, με βάση μία καθολικώς διατηρήσιμη ποσότητα, είναι αναγκαίο να θέσουμε επιπλέον περιορισμούς για τη χρονική εξέλιξη της $\psi \in \Omega$. Αυτοί οι περιορισμοί αφορούν σε συνθήκες που ικανοποιεί η χρονική εξέλιξη της ψ στο σύνορο της χωρικής περιοχής V κάθε χρονική στιγμή. Έτσι, η διατηρήσιμη ποσότητα στον όγκο V, την οποία μπορούμε να θεωρήσουμε ως τοπικό παρατηρήσιμο, έχει σταθερή τιμή για κάθε $t \in \mathbb{R}$.

> Μία χρονοειδής γεωδαισιακή στο χωρόχρονο Minkowski αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία μόνο αν (i) υπάρχει ένα παρατηρήσιμο $F \in C(\Omega)$ τέτοιο ώστε για κάθε $\psi \in \Omega$ να ισχύει $\big(T(t)F\big)(\psi) = F(\psi)$ στο ιδιοσύστημα ενός αδρανειακού παρατηρητή που κινείται επί της γεωδαισιακής και (ii) για μία φραγμένη χωρική περιοχή V μπορούμε να θέσουμε συγκεκριμένες συνθήκες για τη συμπεριφορά της χρονικής εξέλιξης κάποιου

$\psi_0 \in \Omega$ στο ∂V, τέτοιες ώστε για κάποιο $G \in \mathcal{A}(V)$ που ορίζεται με τη σχέση $G(\psi) = F(\chi_V \psi)$, για κάθε $\psi \in \Omega$, να ισχύει $\left(T(t)G\right)(\psi_0) = G(\psi_0)$.

Για να γίνουμε πιο συγκεκριμένοι ας θεωρήσουμε την περίπτωση της κυματικής εξίσωσης, δηλαδή του ελεύθερου βαθμωτού πεδίου Klein-Gordon με m=0. Σύμφωνα με την (6.3.3), η ενέργεια του πεδίου δίνεται από τη σχέση

$$W[\psi] = \frac{1}{2}\int_{\mathbb{R}^3} d^3x \left\{ \left(\psi_2(\vec{x})\right)^2 + \left|\vec{\nabla}\psi_1(\vec{x})\right|^2 \right\} \tag{6.3.12}$$

για κάθε $\psi \in \Omega$. Έστω ότι η ενέργεια του πεδίου αντιστοιχεί στη διατηρήσιμη ποσότητα F που αναφέραμε κατά τη διατύπωση της αναγκαίας συνθήκης για την αιτιακή διαδικασία. Η ενέργεια του πεδίου σε ένα φραγμένο όγκο V, δίνεται από τη σχέση

$$W_V[\psi] = \frac{1}{2}\int_{V} d^3x \left\{ \left(\psi_2(\vec{x})\right)^2 + \left|\vec{\nabla}\psi_1(\vec{x})\right|^2 \right\}, \tag{6.3.13}$$

για κάθε $\psi \in \Omega$, και υποθέτουμε ότι αντιστοιχεί στο παρατηρήσιμο $G \in \mathcal{A}(V)$ στη διατύπωση της αναγκαίας συνθήκης. Έστω ότι για μία συγκεκριμένη συνάρτηση $\psi_0 \in \Omega$ που έχει μη μηδενική τιμή μόνο εντός του όγκου V, και για κάθε χρονική στιγμή $t \in \mathbb{R}$, η χρονική εξέλιξη

$$\tau(t)\psi_0(\vec{x}) = \psi_t(\vec{x}) = \left(\psi_{1t}(\vec{x}), \psi_{2t}(\vec{x})\right) \tag{6.3.14}$$

ικανοποιεί, π.χ., συνθήκες Dirichlet στο σύνορο του V:

$$\psi_{1t}(\vec{x}) = 0, \;\; \vec{x} \in \partial V \,. \tag{6.3.15}$$

Σε αυτή την περίπτωση, η ενέργεια του πεδίου είναι χρονικά σταθερή,

$$\left(T(t)W_V\right)(\psi_0) = W_V(\psi_0). \tag{6.3.16}$$

Έτσι, δεδομένων κατάλληλων αρχικών και συνοριακών συνθηκών για το πεδίο, η αναγκαία συνθήκη ικανοποιείται.

Οι συνοριακές συνθήκες που επιβάλουμε στην εξέλιξη του ψ_0 εκφράζουν μία πιο ισχυρή συνθήκη από εκείνη της μη αλληλεπίδρασης που περιλαμβάνεται στον ορισμό του Salmon για τη διάδοση μίας διατηρήσιμης ποσότητας σε μία διαδικασία. Άλλωστε, η συνθήκη της μη αλληλεπίδρασης εξασφαλίζεται με την ισχύ του καθολικού νόμου διατήρησης για την ενέργεια του πεδίου και με τον τοπικό νόμο διατήρησης που μας λέει ότι η απόκλιση του τανυστή ενέργειας-ορμής είναι μηδέν σε κάθε σημείο του χωροχρόνου. Οι συνοριακές συνθήκες μάς λένε, επιπλέον, ότι για να εκδηλώνεται σταθερό ποσό ενέργειας κάθε χρονική στιγμή σε ένα χωροχρονικό σωλήνα θα πρέπει να μην εισέρχεται ενέργεια εντός του σωλήνα - δηλαδή, με όρους αιτιακών διαδικασιών, να μην έχουμε γεωμετρική τομή δύο διαδικασιών ανεξάρτητα από το αν λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Όπως είδαμε στην ενότητα 4.3, αυτή η επιπλέον συνθήκη, η οποία δεν περιλαμβάνεται στον ορισμό κατά Salmon, προκύπτει από το γεγονός ότι στην τομή δύο διαδικασιών έχουμε αύξηση της ποσότητας που εκδηλώνεται στο συγκεκριμένο χωροχρονικό σημείο.

6.4 Αιτιακές Διαδικασίες και Διάδοση Ασυνέχειας στο Ηλεκτρομαγνητικό Πεδίο

Μέχρι τώρα, στο παρόν κεφάλαιο, διερευνήσαμε κατά πόσον μπορεί να ορισθεί η έννοια της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο κλασικών θεωριών πεδίου, σε συμφωνία με την ύστερη αιτιακή θεωρία του Salmon και τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe. Χρησιμοποιώντας ως παράδειγμα τη θεωρία του ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon, παρουσιάσαμε αφενός την περίπτωση στην οποία η χωροχρονική γραμμή μπορεί να χαρακτηριστεί ως αιτιακή διαδικασία με βάση τη διατηρούμενη τετραορμή του πεδίου (σύμφωνα με τη θεωρία του Dowe), αφετέρου μία αναγκαία συνθήκη για να χαρακτηρίσουμε μία χωροχρονική γραμμή (χωροχρονικό σωλήνα) ως αιτιακή διαδικασία με όρους τοπικά μετρήσιμων μεγεθών (σε συμφωνία με την ύστερη θεωρία του Salmon). Σε αυτή την ενότητα, θα ασχοληθούμε με τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και, συγκεκριμένα, θα εξετάσουμε αν οι χωροχρονικές γραμμές που αναπαριστάνουν τη διάδοση

ασυνεχειών του ελεύθερου ηλεκτρομαγνητικού πεδίου μπορούν να θεωρηθούν ως γεωμετρικές αναπαραστάσεις αιτιακών διαδικασιών. Η προσέγγισή μας δεν θα περιοριστεί στις θεωρίες των διατηρήσιμων ποσοτήτων, αλλά θα αναφερθούμε και στην πρώιμη θεωρία του Salmon θεωρώντας την ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως διαδιδόμενο ίχνος.

Με τον όρο "ασυνέχεια" του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατανοούμε τη μη συνεχή μεταβολή των τιμών των συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά τη μετάβαση από μία περιοχή του χώρου σε μία άλλη που διαχωρίζεται από την πρώτη με μία διδιάστατη επιφάνεια. Τέτοιες ασυνέχειες προκύπτουν σε περιπτώσεις διάδοσης ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα σε δύο υλικά (π.χ., αέρα και νερό) που διαχωρίζονται από μία επιφάνεια (π.χ., την επιφάνεια μίας λίμνης). Μία διαφορετικού τύπου ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου αφορά σε περιπτώσεις που μία μη ακτινοβολούσα πηγή, αρχίζει να ακτινοβολεί κάποια χρονική στιγμή. Σε επόμενη χρονική στιγμή, η διαταραχή που προκύπτει από την ακτινοβολία έχει απλωθεί σε μία χωρική περιοχή γύρω από την πηγή. Το σύνορο της περιοχής στην οποία έχει διαδοθεί η ακτινοβολία τη δεδομένη χρονική στιγμή θεωρούμε ότι είναι μία διδιάστατη επιφάνεια, ένα μέτωπο κύματος. Στις περιοχές "μπροστά" από το μέτωπο κύματος, όπου η διαταραχή "δεν έχει φθάσει ακόμη", όλες οι συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι μηδέν, ενώ "πίσω" από αυτό κάποιες συνιστώσες έχουν τιμή διάφορη του μηδενός. Δηλαδή, το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εκδηλώνει ασυνέχεια στην επιφάνεια του μετώπου κύματος. Η βασική διαφορά ανάμεσα στις δύο περιπτώσεις είναι ότι ενώ στην πρώτη περίπτωση η επιφάνεια στην οποία εκδηλώνεται η ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου είναι ίδια κάθε χρονική στιγμή, στη δεύτερη περίπτωση η επιφάνεια διαφέρει κάθε χρονική στιγμή και θεωρούμε ότι κινείται στον τρισδιάστατο χώρο. Έτσι, στη δεύτερη περίπτωση μπορούμε να μιλήσουμε για διάδοση της ασυνέχειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.

Μία διδιάστατη επιφάνεια που κινείται στον τρισδιάστατο χώρο γενικά μπορεί να θεωρηθεί ως μία τρισδιάστατη υπερεπιφάνεια στον τετραδιάστατο χωρόχρονο η οποία περιγράφεται από μία εξίσωση της μορφής

$$F(x, y, z, t) = 0. \qquad (6.4.1)$$

Έστω ότι διακρίνουμε τα χωροχρονικά σημεία στις δύο όψεις της υπερεπιφάνειας με βάση τις ανισότητες $F>0$ και $F<0$. Αν στην επιφάνεια αυτή το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εκδηλώνει ασυνέχεια, τότε για την ένταση του ηλεκτρικού και του μαγνητικού πεδίου αντίστοιχα ισχύει

$$\vec{E}(x,y,z,t)=\begin{cases}\vec{E}_1(x,y,z,t) & \text{για } F(x,y,z,t)>0\\ \vec{E}_2(x,y,z,t) & \text{για } F(x,y,z,t)<0\end{cases} \tag{6.4.2}$$

και

$$\vec{H}(x,y,z,t)=\begin{cases}\vec{H}_1(x,y,z,t) & \text{για } F(x,y,z,t)>0\\ \vec{H}_2(x,y,z,t) & \text{για } F(x,y,z,t)<0\end{cases} \tag{6.4.3}$$

ενώ η μεταβολή του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πάνω στην επιφάνεια είναι

$$\Delta\vec{E}=\vec{E}_2-\vec{E}_1 \text{ και } \Delta\vec{H}=\vec{H}_2-\vec{H}_1.$$

Με τη βοήθεια των εξισώσεων Maxwell για το ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, αποδεικνύεται (Born and Wolf 1986:764) ότι

$$\left\{\frac{1}{c^2}\left(\frac{\partial F}{\partial t}\right)^2-\left(gradF\right)^2\right\}\Delta\vec{E}=0$$

και

$$\left\{\frac{1}{c^2}\left(\frac{\partial F}{\partial t}\right)^2-\left(gradF\right)^2\right\}\Delta\vec{H}=0\,.$$

Συνεπώς, για να εκφράζει η (6.4.1) μία διδιάστατη κινούμενη επιφάνεια στην οποία το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο εκδηλώνει ασυνέχεια, η συνάρτηση F θα πρέπει να ικανοποιεί την εξίσωση

$$\frac{1}{c^2}\left(\frac{\partial F}{\partial t}\right)^2-\left(gradF\right)^2=0. \tag{6.4.4}$$

Από την (6.4.4) προκύπτει η εξίσωση

$$\frac{\partial F}{\partial t}+c\sqrt{\left(\frac{\partial F}{\partial x}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial y}\right)^2+\left(\frac{\partial F}{\partial z}\right)^2}=0, \qquad (6.4.5)$$

όπου επιλέξαμε το αρνητικό πρόσημο της τετραγωνικής ρίζας[12].

Από κάθε σημείο της επιφάνειας F σε μία χρονική στιγμή, διέρχεται μία και μόνη χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει γεωμετρικά τη διάδοση της ασυνέχειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου από το σημείο αυτό σε άλλα χωροχρονικά σημεία. Αυτά τα σημεία ανήκουν στην F για διαφορετικές χρονικές στιγμές. Γενικά, η κλίση των γραμμών αυτών είναι διαφορετική σε κάθε σημείο της επιφάνειας σε μία ορισμένη χρονική στιγμή και καθορίζεται από τη μορφή της επιφάνειας τη δεδομένη χρονική στιγμή. Επίσης, αν η κίνηση της επιφάνειας στην οποία εκδηλώνεται ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου πραγματοποιείται σε ομογενές μέσο, τότε οι χωροχρονικές γραμμές είναι ευθείες. Ο προσδιορισμός αυτών των χωροχρονικών γραμμών βασίζεται στην εξής αναλογία: η εξίσωση που ικανοποιεί μία συνάρτηση F που περιγράφει τη διάδοση του μετώπου κύματος είναι της ίδιας μορφής με την εξίσωση Hamilton-Jacobi για ένα σχετικιστικό σωματίδιο μηδενικής μάζας.

Η εξίσωση Hamilton-Jacobi είναι μία πρώτης τάξης διαφορική εξίσωση που προκύπτει από την χαμιλτονιανή συνάρτηση $H(q,p,t)$ ενός μηχανικού συστήματος, αν εφαρμόσουμε έναν κανονικό μετασχηματισμό που οδηγεί σε νέες συντεταγμένες και ορμές (Q,P), οι οποίες είναι σταθερές που καθορίζονται από τις αρχικές συνθήκες του προβλήματος: $Q=q_0, P=p_0$. Η νέα χαμιλτονιανή συνάρτηση H' που προκύπτει από τον παραπάνω κανονικό μετασχηματισμό είναι ίση με μηδέν, $H'(Q,P,t)=0$. Η εξίσωση Hamilton-Jacobi προκύπτει από την εξίσωση που συνδέει τη νέα με την παλιά χαμιλτονιανή,

$$H'=H+\frac{\partial S}{\partial t}\Rightarrow 0=H+\frac{\partial S}{\partial t}$$

[12] Η επιλογή του αρνητικό πρόσημου της τετραγωνικής ρίζας, μολονότι καταρχάς αυθαίρετη, μπορεί να δικαιολογηθεί με βάση την απαίτηση η ενέργεια να είναι θετικά ορισμένη. Αυτή η απαίτηση προκύπτει αφού πρώτα υιοθετήσουμε την αναλογία ανάμεσα στις εξισώσεις (6.4.5) και (6.4.6) και ερμηνεύσουμε τον όρο $c\sqrt{(\partial F/\partial x)^2+(\partial F/\partial y)^2+(\partial F/\partial z)^2}$ ως τη χαμιλτονιανή ενός σχετικιστικού σωματιδίου με μηδενική μάζα ηρεμίας.

ή

$$H(q;\frac{\partial S}{\partial q};t)+\frac{\partial S}{\partial t}=0, \tag{6.4.6}$$

όπου η συνάρτηση S είναι η γεννήτρια του μετασχηματισμού. Επισημαίνουμε ότι η S διαφέρει το πολύ κατά μία σταθερά από τη συνάρτηση δράσης $S=\int L dt+\text{const.}$, όπου L η λαγκρανζιανή συνάρτηση του συστήματος.

Η αναλογία για τις εξισώσεις (6.4.5) και (6.4.6) προκύπτει αν θεωρήσουμε ως γεννήτρια συνάρτηση S τη συνάρτηση F που περιγράφει τη διάδοση του μετώπου κύματος και ως χαμιλτονιανή συνάρτηση την $H=c\sqrt{{p_x}^2+{p_y}^2+{p_z}^2}$, με $p_x=\frac{\partial S}{\partial x},\ p_y=\frac{\partial S}{\partial y},\ p_z=\frac{\partial S}{\partial z}$. Παρατηρούμε ότι η H είναι η χαμιλτονιανή ενός ελεύθερου σχετικιστικού σωματιδίου με μηδενική μάζα ηρεμίας.

Στις τροχιές των σχετικιστικών σωματιδίων αντιστοιχούν χωροχρονικές γραμμές των οποίων οι εξισώσεις είναι ανάλογες με τις εξισώσεις Hamilton για τις γενικευμένες συντεταγμένες,

$$\frac{dx}{dt}=\frac{\partial H}{\partial p_x}=c\frac{\partial F/\partial x}{\sqrt{\left(\partial F/\partial x\right)^2+\left(\partial F/\partial y\right)^2+\left(\partial F/\partial z\right)^2}}\ ,$$
$$\left(\text{αντιστοίχως για }\frac{dy}{dt}\text{ και }\frac{dz}{dt}\right). \tag{6.4.7}$$

Κατά μήκος καθεμιάς από αυτές τις χωροχρονικές γραμμές οι ποσότητες $\partial F/\partial x\,,\partial F/\partial y\,,\partial F/\partial z$ που αντιστοιχούν στις συνιστώσες p_x, p_y, p_z της γενικευμένης ορμής, είναι σταθερές, αφού ισχύει

$$\frac{d\left(\partial F/\partial x\right)}{dt}=-\frac{\partial H}{\partial x}=0,$$
$$\left(\text{αντιστοίχως για }\frac{d\left(\partial F/\partial y\right)}{dt}\text{ και }\frac{d\left(\partial F/\partial z\right)}{dt}\right). \tag{6.4.8}$$

Άρα, από τις εξισώσεις (6.4.7) και (6.4.8), προκύπτει ότι οι χωροχρονικές γραμμές είναι ευθείες με εξισώσεις,

$$x - x_0 = c\frac{\partial F/\partial x}{\sqrt{\left(\partial F/\partial x\right)^2 + \left(\partial F/\partial y\right)^2 + \left(\partial F/\partial z\right)^2}}\left(t - t_0\right), \quad \left(\text{αντιστοίχως για } y, z\right). \tag{6.4.9}$$

Από τις (6.4.9) προκύπτει η σχέση,

$$\left(x - x_0\right)^2 + \left(y - y_0\right)^2 + \left(z - z_0\right)^2 = c^2\left(t - t_0\right)^2. \tag{6.4.10}$$

Αυτή η σχέση ισχύει ανεξάρτητα από το ποια είναι η συγκεκριμένη μορφή της F και η κατεύθυνση των χωροχρονικών γραμμών που περιγράφονται από τις (6.4.9). Ουσιαστικά μας λέει ότι ανεξάρτητα από το ποια είναι η συγκεκριμένη μορφή της επιφάνειας ασυνέχειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, τα χωροχρονικά σημεία $\left(x, y, z, t\right)$ στα οποία είναι δυνατόν να διαδοθεί η ασυνέχεια που εμφανίζεται στο χωροχρονικό σημείο $\left(x_0, y_0, z_0, t_0\right)$ ικανοποιούν τη σχέση (6.4.10). Στον τρισδιάστατο χώρο πρόκειται για τα σημεία που ανήκουν σε μία σφαίρα με κέντρο το σημείο με χωρικές συντεταγμένες $\left(x_0, y_0, z_0\right)$ και ακτίνα $c\left(t - t_0\right)$.

Αυτό που θέλουμε να υποστηρίξουμε, σε συμφωνία με την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon, είναι ότι οι χωροχρονικές γραμμές που περιγράφονται από τις σχέσεις (6.4.9) αποτελούν γεωμετρικές αναπαραστάσεις αιτιακών διαδικασιών και ότι σε κάθε σημείο τους εμφανίζεται μία τροποποίηση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, μία ασυνέχεια, η οποία προκαλείται από την παρουσία της πηγής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου σε κάποιο χωροχρονικό σημείο, το οποίο αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή αλληλεπίδραση. Πράγματι, αυτό ισχύει στην περίπτωση που τα μέτωπα κύματος περιγράφονται στο χώρο από μία μονοπαραμετρική οικογένεια ομόκεντρων σφαιρικών επιφανειών με παράμετρο το χρόνο. Σε αυτή την περίπτωση η χωροχρονική γραμμή που αναπαριστάνει την αιτιακή διαδικασία εκκινεί από το κοινό κέντρο των σφαιρικών επιφανειών, κάποια χρονική στιγμή, και έχει διεύθυνση (στον τρισδιάστατο χώρο) τη διεύθυνση μίας ακτίνας τους. Το κέντρο των σφαιρικών επιφανειών, σε χωροχρονικό διάγραμμα, είναι το σημείο στο οποίο θεωρούμε ότι

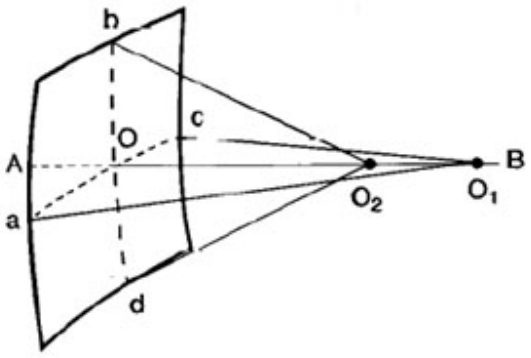
δημιουργείται η ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, το ίχνος, που διαδίδεται κατά μήκος της ακτίνας.

Ωστόσο, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ως γεωμετρική αναπαράσταση αιτιακής διαδικασίας *κάθε* χωροχρονική γραμμή που καθορίζεται από τις σχέσεις (6.4.9), ανεξάρτητα από τη συνάρτηση F που περιγράφει το μέτωπο κύματος. Η υπόθεση ότι η ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προκύπτει από μία χωροχρονικά σημειακή πηγή, γεγονός που ερμηνεύσαμε ως δημιουργία ίχνους με μία αιτιακή αλληλεπίδραση, δεν περιλαμβάνεται στις υποθέσεις που κάναμε για να συναγάγουμε τις σχέσεις (6.4.9). Οι σχέσεις αυτές ισχύουν όταν η ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου προκύπτει είτε από μία ή περισσότερες χωροχρονικά σημειακές πηγές είτε από μία χωροχρονικά εκτεταμένη πηγή, με την πληροφορία αυτή να ενσωματώνεται στη σχέση (6.4.1) που περιγράφει τη μορφή του μετώπου κύματος. Όμως, αυτή η επισήμανση δεν θα πρέπει να μας προβληματίσει. Σε καμιά από τις περιπτώσεις που εξετάσαμε στις προηγούμενες ενότητες δεν ορίσαμε αιτιακές διαδικασίες ανεξάρτητα από τη συγκεκριμένη διαμόρφωση του πεδίου.

Αντιθέτως, μας προβληματίζει το γεγονός ότι οι χωροχρονικές γραμμές που αναπαριστάνουν αιτιακές διαδικασίες στην περίπτωση του σφαιρικού κύματος (σύμφωνα με την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon) δεν μπορούν να χαρακτηριστούν ως αιτιακές διαδικασίες με βάση τις θεωρίες των Salmon και Dowe που θεμελιώνονται στις διατηρήσιμες ποσότητες. Σύμφωνα με την προσέγγιση του Dowe, για να αποτελεί μία χωροχρονική γραμμή γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας θα πρέπει να περιγράφει την ιστορία ενός αντικειμένου που κατέχει κάποια διατηρήσιμη ποσότητα. Στην περίπτωση της χωροχρονικής γραμμής που διέρχεται από ένα σημείο της επιφάνειας ασυνέχειας κάποια χρονική στιγμή και περιγράφεται από τις σχέσεις (6.4.9) δεν υπάρχει κάποιο αντικείμενο που να εντοπίζεται *αποκλειστικά* στα σημεία της γραμμής και να κατέχει μία διατηρήσιμη ποσότητα, μολονότι σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής εκδηλώνεται κάποια διατηρήσιμη ποσότητα, η πυκνότητα ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Δηλαδή, δεν μπορούμε να θεωρήσουμε ότι καθεμία χωροχρονική γραμμή αναπαριστάνει την ιστορία ενός αντικειμένου. Στην προσέγγισή μας, η μόνη οντότητα που μπορεί να αποτελέσει αντικείμενο είναι το ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό

πεδίο, το οποίο κάθε χρονική στιγμή καλύπτει τον όγκο της σφαίρας που έχει ως σύνορο το μέτωπο κύματος.

Όμως ακόμα κι αν αφήσουμε κατά μέρος της θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe, λόγω των περιορισμών που επιβάλλει η έννοια του αντικειμένου, και στραφούμε στη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών του Salmon, δεν θα έχουμε πολύ καλύτερη τύχη. Ο Salmon απαιτεί κατά μήκος μίας χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία να εκδηλώνεται, σε απουσία αλληλεπιδράσεων, το ίδιο ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας. Η ενέργεια και η τριορμή είναι ποσότητες που διατηρούνται στο ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Ωστόσο, κατά μήκος των χωροχρονικών γραμμών που περιγράφονται με τις σχέσεις (6.4.9) δεν έχουμε διάδοση ενός σταθερού ποσού ενέργειας. Για να το δούμε αυτό ας περιοριστούμε στον τρισδιάστατο χώρο και ας εξετάσουμε τι συμβαίνει στη χωρική γραμμή που είναι η προβολή της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά την αιτιακή διαδικασία. Σύμφωνα με τους Landau και Lifschitz (2003:144) σε κάθε τέτοιου είδους χωρική γραμμή AB, (βλ. Σχήμα 6.1),



Σχήμα 6.1: Μεταβολή της έντασης ακτινοβολίας κατά μήκος μίας φωτεινής ακτίνας. (Landau- Lifschitz 2003:144)

υπάρχουν ορισμένα σημεία O_1, O_2 που είναι τα κέντρα καμπυλότητας όλων των επιφανειών κύματος που τέμνουν τη συγκεκριμένη χωρική γραμμή. Οι αποστάσεις OO_1 και OO_2 από το σημείο O που μία επιφάνεια κύματος τέμνει τη συγκεκριμένη χωρική γραμμή είναι οι ακτίνες καμπυλότητας R_1, R_2 της επιφάνειας του μετώπου κύματος στο O. Η χρονική μέση τιμή της πυκνότητας ροής ενέργειας στη μονάδα του

χρόνου[13] - δηλαδή, η ένταση I της ακτινοβολίας - στο σημείο O είναι αντιστρόφως ανάλογη του γινομένου των αποστάσεων του O από τα ορισμένα σημεία O_1,O_2 της χωρικής γραμμής που εξετάζουμε:

$$I \propto \frac{1}{R_1 R_2}. \qquad (6.4.11)$$

Έτσι, μολονότι η διάδοση λαμβάνει χώρα σε απουσία αλληλεπιδράσεων, η ενέργεια, για την ακρίβεια η ένταση της ακτινοβολίας, δεν διατηρείται σταθερή σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής. Επίσης, το ίδιο ισχύει και για την τριορμή, αφού η πυκνότητα ροής ενέργειας είναι ανάλογη της πυκνότητας της τριορμής. Συνεπώς, κατά μήκος των χωροχρονικών γραμμών που περιγράφονται από τις σχέσεις (6.4.9) δεν εκδηλώνεται σταθερό ποσό ενέργειας ή τριορμής και, συνεπώς, οι γραμμές αυτές δεν αναπαριστάνουν αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν αυτές τις διατηρήσιμες ποσότητες. Ωστόσο, θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι λόγω της σχέσης (6.4.11) οι εν λόγω χωροχρονικές γραμμές μπορούν να θεωρηθούν ως γεωμετρικές αναπαραστάσεις αιτιακών γραμμών σύμφωνα με τη θεωρία του Russell. Μάλιστα, η σχέση (6.4.11) εκφράζει τον εσωτερικό αιτιακό νόμο που συνδέει οποιαδήποτε δύο συμβάντα κατά μήκος της γραμμής.

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι αιτιακές διαδικασίες που έχουν την ικανότητα να διαδίδουν ίχνος ενδέχεται να μη διαδίδουν διατηρήσιμες ποσότητες. Έτσι, το παράδειγμα των αιτιακών διαδικασιών που διαδίδουν ασυνέχειες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου επικυρώνει τη θέση που διατυπώσαμε στο τέταρτο κεφάλαιο ότι οι ορισμοί των αιτιακών διαδικασιών στην πρώιμη και στην ύστερη εκδοχή της θεωρίας του Salmon δεν έχουν την ίδια έκταση[14]. Επιπλέον, ο καθορισμός των αιτιακών διαδικασιών στη διάδοση σφαιρικών κυμάτων επικυρώνει τη θέση του Salmon ότι η παραγωγή της δομής που διαδίδεται από ένα σφαιρικό κύμα γίνεται από ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες που συζευγνύονται σε ένα χωροχρονικό σημείο.

[13] Η πυκνότητα ροής ενέργειας στη μονάδα του χρόνου εκφράζεται από το διάνυσμα Poynting του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου. Η χρονική μέση τιμή του διανύσματος αυτού αντιστοιχεί στην ενεργειακή ροή που μετριέται από έναν ανιχνευτή τοποθετημένο σε κάποιο σημείο του χώρου που έχει χρόνο απόκρισης πολύ μεγαλύτερο από την περίοδο ταλάντωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου.(Born and Wolf 1986:115)

[14] Εδώ θα μπορούσε κάποιος να προβάλλει την αντίρρηση ότι η θέση αυτή αφορά στις διατηρήσιμες ποσότητες της ενέργειας και της τριορμής του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και όχι γενικώς σε οποιαδήποτε διατηρήσιμη ποσότητα. Ωστόσο, για το ελεύθερο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο, η ενέργεια και η τριορμή μαζί με τη στροφορμή είναι οι βασικές διατηρήσιμες ποσότητες.

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάσαμε ορισμένα από τα προβλήματα που θα συναντήσει κάποιος αν προσπαθήσει να εξετάσει την έννοια της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο συγκεκριμένων φυσικών θεωριών.

Το πρώτο πρόβλημα αφορά στην τοπικότητα. Είναι απαραίτητο να ισχύουν συνθήκες τοπικότητας για μία φυσική θεωρία προκειμένου να μιλήσουμε για αιτιακές διαδικασίες σε συμφωνία με την προσέγγιση του Salmon. Αντιθέτως, ο Dowe δεν φαίνεται να έχει πρόβλημα στον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών σε φυσικές θεωρίες που δεν ικανοποιούν τέτοιου είδους συνθήκες. Στην περίπτωση του Dowe το μόνο πρόβλημα που υπάρχει αφορά στη θέση ότι σε απουσία αλληλεπιδράσεων η διατηρήσιμη ποσότητα που κατέχεται από ένα αντικείμενο παραμένει σταθερή, δεδομένου ότι ικανή συνθήκη για να ισχύει αυτή η θέση είναι να ικανοποιούνται συνθήκες τοπικότητας στον ορισμό της διατηρήσιμης ποσότητας. Ωστόσο, η θέση αυτή, καταρχάς, δεν φαίνεται να είναι απαραίτητη για τον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας κατά Dowe.

Το δεύτερο πρόβλημα αφορά στην ταυτοποίηση μίας χωροχρονικής γραμμής ως γεωμετρικής αναπαράστασης μίας αιτιακής διαδικασίας. Στο πλαίσιο πεδιακών θεωριών η ταυτοποίηση μπορεί να γίνει με δύο τρόπους: είτε με τη βοήθεια καθολικών διατηρήσιμων ποσοτήτων του πεδίου, όπως είναι η τετραορμή στο ελεύθερο πεδίο Klein-Gordon, είτε με τη βοήθεια τοπικών διατηρήσιμων ποσοτήτων. Προφανώς, σε κάθε περίπτωση η γεωμετρική αναπαράσταση της αιτιακής διαδικασίας είναι διαφορετική. Ωστόσο, μόνο η δεύτερη προσέγγιση είναι σε συμφωνία με τη θεωρία του Salmon, ενώ η πρώτη μπορεί να θεωρηθεί ως συμβατή με τη θεωρία του Dowe.

Στο πλαίσιο της δεύτερη προσέγγισης αναδεικνύεται το εξής πρόβλημα σε σχέση με τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών από τον Salmon: δεν αρκεί η συνθήκη μη αλληλεπίδρασης για την ταυτοποίηση μίας χωροχρονικής γραμμής ως γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας. Για να ικανοποιηθεί η συνθήκη σταθερής τιμής της διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας θα πρέπει στον ορισμό της έννοιας να τεθεί ως προϋπόθεση ότι η διαδικασία δεν τέμνεται με άλλες διαδικασίες που διαδίδουν την ίδια διατηρήσιμη

ποσότητα. Αυτό το πρόβλημα το έχουμε συναντήσει ξανά, στο τέταρτο κεφάλαιο, όταν προσπαθήσαμε να απαντήσουμε στα παραδείγματα μη αλληλεπιδρώντων τομών του Dowe.

Τέλος, είδαμε ότι μπορούμε να θεωρήσουμε τις χωροχρονικές γραμμές που διαδίδουν τις ασυνέχειες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν ίχνος. Αυτή η προσέγγιση είναι σε συμφωνία με όσα αναφέραμε στο τρίτο κεφάλαιο για την παραγωγή της δομής που εκδηλώνεται κατά τη διάδοση του σφαιρικού ηλεκτρομαγνητικού κύματος από ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες, οι οποίες συζευγνύονται σε ένα χωροχρονικό σημείο κατά το πρότυπο του συζευκτικού αιτίου. Ωστόσο, σε αυτή την περίπτωση διαπιστώνουμε ασυμφωνία ανάμεσα στην πρώιμη και στη ύστερη εκδοχή της θεωρίας του Salmon. Οι αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν τις ασυνέχειες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν διαδίδουν ενέργεια ή τριορμή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΒΔΟΜΟ

ΕΝΝΟΙΕΣ ΤΟΠΙΚΟΤΗΤΑΣ

ΣΤΗΝ ΤΟΠΙΚΗ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Στο προηγούμενο κεφάλαιο αναδείξαμε τη σημασία της τοπικότητας για τη θεωρία των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων. Οι φυσικές θεωρίες, στο πλαίσιο των οποίων επεξηγούνται οι αιτιακές έννοιες, θα πρέπει, κατά πρώτον, να αποδίδουν νόημα σε τοπικά φυσικά μεγέθη. Κατά δεύτερον, θα πρέπει να επιτρέπουν την αναγωγή των καθολικών μεγεθών σε τοπικά μεγέθη. Κατά τρίτον, θα πρέπει να περιορίζουν τις αλληλεπιδράσεις των φυσικών συστημάτων σε αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα τοπικά, σε σημεία ή φραγμένες περιοχές του χωροχρόνου και όχι από απόσταση.

Σε αυτό το κεφάλαιο θα προσπαθήσουμε να ορίσουμε με πιο αυστηρό τρόπο τις έννοιες της τοπικότητας που συναντάμε σε φυσικές θεωρίες. Θα αναφερθούμε τόσο σε κλασικές όσο και σε κβαντικές θεωρίες, δίνοντας μεγαλύτερο βάρος στη μελέτη των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής (local quantum physics). Γι' αυτό το λόγο, το κεφάλαιο αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί και ως εισαγωγή στην τοπική κβαντική φυσική. Υποστηρίζουμε ότι οι έννοιες τοπικότητας μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις μεγάλες κατηγορίες: στη *σημασιολογική τοπικότητα,* στην *τοπική ανεξαρτησία* και στην *τοπική εξάρτηση*. Σε αδρές γραμμές, θα μπορούσαμε να πούμε ότι η σημασιολογική τοπικότητα αφορά στην απόκτηση νοήματος των όρων "τοπικό μέγεθος" και "τοπική κατάσταση" στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας. Η τοπική ανεξαρτησία αφορά στις συνθήκες που εκφράζουν, στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας, τη θέση ότι δεν υπάρχει δράση από απόσταση. Η τοπική εξάρτηση αφορά κυρίως στο πρόβλημα του ντετερμινισμού. Τέλος, το ζήτημα της προτεραιότητας της τοπικής, έναντι της καθολικής, περιγραφής ενός φυσικού συστήματος διαπνέει

συνολικά την προσέγγιση της τοπικής κβαντικής φυσικής. Εδώ, πιο συγκεκριμένα, θα αναφερθούμε σε μη τοπικά φυσικά μεγέθη κατά την πραγμάτευση των παρατηρήσιμων που αναπαριστάνουν ανιχνεύσεις σωματιδίων ενώ στην περίπτωση των συνθηκών εξάρτησης, θα αναφερθούμε στη σχέση καθολικών και τοπικών συνθηκών εξάρτησης. Θα ολοκληρώσουμε το κεφάλαιο με τη διατύπωση μερικών σκέψεων σε σχέση με τις αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική.

7.1 Σημασιολογική Τοπικότητα και Τοπική Κβαντική Φυσική

Ως αφετηριακό σημείο της συζήτησης περί τοπικότητας θα μπορούσε να θεωρηθεί η ιδέα ότι οι μετρήσεις φυσικών ιδιοτήτων λαμβάνουν χώρα σε πεπερασμένες χωρικές περιοχές και έχουν καθορισμένη διάρκεια. Έτσι, τα μεγέθη που αναπαριστάνουν μετρήσιμες ιδιότητες θα πρέπει να ορίζονται σε συγκεκριμένες περιοχές του χωροχρόνου. Αυτά τα μεγέθη ονομάζουμε *τοπικά παρατηρήσιμα*. Αν τώρα θεωρήσουμε το σύνολο των τοπικών παρατηρήσιμων που είναι δυνατόν να μετρηθούν σε μία περιοχή του χωροχρόνου και επίσης μία απεικόνιση από το σύνολο αυτό στους πραγματικούς αριθμούς, τότε η απεικόνιση αυτή αναπαριστάνει μία *τοπική κατάσταση* του φυσικού συστήματος. Γενικά, ο πραγματικός αριθμός που αντιστοιχεί σε ένα τοπικό παρατηρήσιμο μέσω μίας τοπικής κατάστασης μπορεί να αναπαριστάνει είτε την καθορισμένη τιμή που λαμβάνει αυτό, στο πλαίσιο μίας θεωρίας στην οποία τα παρατηρήσιμα λαμβάνουν καθορισμένες τιμές, είτε την αναμενόμενη τιμή του παρατηρήσιμου, στο πλαίσιο μίας στατιστικής θεωρίας. Εξιδανίκευση αυτής της προσέγγισης αποτελεί η θεώρηση ότι τα τοπικά παρατηρήσιμα και οι τοπικές καταστάσεις ορίζονται σε σημεία και όχι σε περιοχές του χωροχρόνου.

Δεν υπάρχει κανένας λόγος που να επιβάλλει *a priori* ότι τα τοπικά παρατηρήσιμα και οι καταστάσεις θα πρέπει να ορίζονται σε χωροχρονικά σημεία. Ήδη από το ξεκίνημα της κβαντικής θεωρίας πεδίων, είχε υποστηριχθεί στη βάση της αρχής της απροσδιοριστίας, ότι η μέτρηση μίας πεδιακής ποσότητας σε ένα

χωροχρονικό σημείο είναι αδύνατη. Επίσης, έχουν αποδειχθεί θεωρήματα που δείχνουν ότι βασικά αιτήματα της κβαντικής θεωρίας πεδίων δεν είναι συμβατά με την υπόθεση ότι τα κβαντικά πεδία, οριζόμενα σε σημεία του χωροχρόνου, μπορούν να αναπαρασταθούν από τελεστές σε κάποιο κατάλληλο χώρο Hilbert (Halvorson and Müger, 2007:769). Με άλλα λόγια, αν δεχτούμε ότι τα παρατηρήσιμα στην κβαντική θεωρία πεδίων αναπαριστάνονται από τελεστές σε κάποιο κατάλληλο χώρο Hilbert, τότε δεν είναι δυνατόν να οριστούν σε χωροχρονικά σημεία. Όμως, ακόμα και στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής αμφισβητείται το κατά πόσον σε μία φυσική θεωρία τα θεμελιώδη μεγέθη πρέπει να θεωρούνται ως ενδογενείς ιδιότητες σημείων του χώρου ή του χωροχρόνου και τα μοντέλα της να ορίζονται με τον καθορισμό των τιμών των μεγεθών αυτών στα σημεία του χώρου ή του χωροχρόνου (Butterfield 2006).

Σημασιολογική τοπικότητα, ονομάζεται η απαίτηση οι όροι "τοπικό παρατηρήσιμο" και "τοπική κατάσταση" να έχουν νόημα στο πλαίσιο κάποιας φυσικής θεωρίας. Η ικανοποίηση αυτής της προϋπόθεσης επιτρέπει να αποδίδεται νόημα σε εκφράσεις όπως "τοπική μέτρηση ενός παρατηρήσιμου", καθώς και σε ερωτήματα που αφορούν στη συσχέτιση των τιμών παρατηρήσιμων και καταστάσεων που ορίζονται σε διαφορετικές περιοχές του χωροχρόνου που βρίσκονται σε συγκεκριμένες γεωμετρικές σχέσεις. Έτσι, η σημασιολογική τοπικότητα είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την διερεύνηση συνθηκών τοπικότητας στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας.

Ένα πρώτο βήμα για την ικανοποίηση της σημασιολογικής τοπικότητας είναι να απαιτήσουμε τα μοντέλα της φυσικής θεωρίας να περιλαμβάνουν μεταξύ των πρωταρχικών όρων μία τετραδιάστατη διαφορίσιμη πολλαπλότητα M και n πεδία γεωμετρικών αντικειμένων[1], έτσι ώστε να μπορεί να ορισθεί ένα μαθηματικό

[1] Ένα πεδίο γεωμετρικών αντικειμένων στην M ορίζεται ως μία αντιστοίχιση $F:(p,x^i)\rightarrow(F_1,F_2,...,F_N)\in\mathbb{R}^N$ που αποδίδει σε κάθε σημείο $p\in M$ και σε κάθε σύστημα συντεταγμένων x^i γύρω από το p, μία N-άδα πραγματικών αριθμών που ονομάζονται συνιστώσες του F στο p *στο* σύστημα συντεταγμένων x^i και που ικανοποιεί τη συνθήκη ότι οι νέες συνιστώσες $F_k{}'$ που δίδονται από την $F:(p,x'^i)\rightarrow(F'_1,F'_2,...,F'_N)\in\mathbb{R}^N$ στο νέο σύστημα συντεταγμένων x'^i προσδιορίζονται ως συναρτήσεις των παλαιών συνιστωσών F_j και του μετασχηματισμού συντεταγμένων $x'^k=f(x^j)$ (Earman 1989:158). Οικεία παραδείγματα τέτοιων πεδίων γεωμετρικών αντικειμένων είναι τα βαθμωτά, τα διανυσματικά και τα τανυστικά πεδία της κλασικής φυσικής.

αντικείμενο το οποίο να ερμηνευθεί ως χωρόχρονος[2]. Για παράδειγμα, για ένα φυσικό σύστημα το οποίο ορίζεται σε ένα σχετικιστικό χωρόχρονο υποβάθρου (δηλαδή, σε ένα σχετικιστικό χωρόχρονο που δεν θεωρείται δυναμικό αντικείμενο), αρκεί εκτός της διαφορίσιμης πολλαπλότητας να ορισθεί ένας ημι-ρημάννειος μετρικός τανυστής *g*. Δηλαδή τα μοντέλα αυτής της θεωρίας θα έχουν την μορφή <*M,g, ...*> και το ζεύγος < *M, g*> ερμηνεύεται ως ο χωρόχρονος υποβάθρου.

Παραπέρα, αν απαιτήσουμε, όπως προτείνει ο Earman (1987), η θεωρία να είναι *χωροχρονική*, τότε η έννοια του τοπικού παρατηρήσιμου και η έννοια της τοπικής κατάστασης που ορίζονται σε κάθε σημείο του χωροχρόνου αποκτά άμεσα νόημα. Δηλαδή, αν τα μοντέλα της θεωρίας είναι της μορφής,

$$\langle M, O_1, O_2, ... \rangle, \tag{7.1.1}$$

όπου M είναι μία διαφορίσιμη πολλαπλότητα και O_i είναι πεδία γεωμετρικών αντικειμένων στην M που αναπαριστάνουν τη δομή και το φυσικό περιεχόμενο του χωροχρόνου, τότε τα τοπικά παρατηρήσιμα σε ένα χωροχρονικό σημείο ορίζονται γενικά ως συναρτησιακά κάποιων εκ των θεμελιωδών μεγεθών σε αυτό το σημείο ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς. Για παράδειγμα, αν ϕ είναι ένα βαθμωτό πραγματικό πεδίο στην *M*, τότε μπορεί να ορισθεί το τοπικό παρατηρήσιμο $\Phi_{(p,x^i)}$ σε κάποιο σημείο $p \in M$ ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς x^i, $i = 1,...,4$, με την απεικόνιση

$$\phi \mapsto \Phi_{(p,x^i)}[\phi] = \phi(p, x^i). \tag{7.1.2}$$

Προφανώς σε κάθε μοντέλο μίας χωροχρονικής θεωρίας και σε κάθε τοπικό παρατηρήσιμο αντιστοιχεί ένας καθορισμένος πραγματικός αριθμός που ορίζεται ως προς κάποιο σύστημα συντεταγμένων[3]. Ας θεωρήσουμε το σύνολο των τοπικών

[2] Γενικά δεν αρκεί η χρήση μαθηματικών εννοιών από το εννοιολογικό οπλοστάσιο της διαφορικής γεωμετρίας για να μιλήσουμε για χωροχρονικές θεωρίες. Κάτι τέτοιο είναι δυνατόν και σε θεωρίες που περιγράφουν την συμπεριφορά δυναμικών συστημάτων στον φασικό χώρο. Οι γεωμετρικές έννοιες θα πρέπει να ερμηνεύονται ως περιγράφουσες τη φυσική γεωμετρία για να μπορούμε να αναφερθούμε σε χωροχρονικές θεωρίες.

[3] Η εξάρτηση της τιμής του τοπικού παρατηρήσιμου, όχι μόνο από το σημείο, αλλά και από την επιλογή συστήματος συντεταγμένων αποτελεί ένα από τα επιχειρήματα του Butterfield (2006) ενάντια

παρατηρήσιμων που ορίζονται σε κάποιο σημείο $p \in M$. Ο κανόνας με τον οποίο αποδίδονται τιμές σε αυτά τα τοπικά παρατηρήσιμα ορίζει την έννοια της τοπικής κατάστασης του συστήματος στο σημείο $p \in M$ του χωροχρόνου. Η τοπική (και η καθολική) κατάσταση του φυσικού συστήματος σε ένα μοντέλο της θεωρίας είναι ορισμένη για κάθε σημείο του χωροχρόνου.

Συνήθη παραδείγματα χωροχρονικών θεωριών αποτελούν η γενική θεωρία της σχετικότητας με μοντέλα της μορφής

$$\langle M, \nabla_a, g_{ab}, T_{ab} \rangle \tag{7.1.3}$$

όπου M μία 4-διάστατη πολλαπλότητα, g_{ab} είναι ένας μετρικός τανυστής Lorentz, ∇_a ένας τελεστής παραγώγου και T_{ab} ο τανυστής ενέργειας-ορμής καθώς και η σχετικιστική ηλεκτρομαγνητική θεωρία με μοντέλα

$$\langle M, \nabla_a, g_{ab}, F_{ab}, j^a \rangle \tag{7.1.4}$$

όπου F_{ab} ο τανυστής του πεδίου Maxwell, j^a η ροή φορτίου και g_{ab} η μετρική. Στα μοντέλα συχνά παραλείπεται ο τελεστής παραγώγου ∇_a δεδομένου ότι σε μία ημιρημάννεια πολλαπλότητα προσδιορίζεται κατά μοναδικό τρόπο από τη συνθήκη συμβατότητάς του με τη μετρική $\nabla_a g_{bc} = 0$. Γενικώς, οι κλασικές θεωρίες πεδίων αποτελούν πρότυπα χωροχρονικών θεωριών.

Στην βιβλιογραφία συναντά κανείς την άποψη ότι και η συνήθης κβαντική μηχανική είναι μία κλασική θεωρία πεδίων με επιπλέον υποθέσεις για την κβαντική μέτρηση (Burgess 2003:3). Είναι ορθή αυτή η θέση; Είναι δυνατόν η μη σχετικιστική κβαντική μηχανική να θεωρηθεί ως χωροχρονική θεωρία που ικανοποιεί τη σημασιολογική τοπικότητα; Στην ειδική περίπτωση ενός σωματιδίου χωρίς spin ο χώρος Hilbert των καταστάσεων είναι ισόμορφος με τον χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων μιγαδικών συναρτήσεων πάνω στον $\mathbb{R}^3$. Έτσι, τα καταστατικά διανύσματα αναπαριστάνονται από κυματοσυναρτήσεις $\psi(\vec{x}, t)$ των οποίων ο

στον πουαντιλισμό (pointillisme), δηλαδή στην θέση ότι τα θεμελιώδη φυσικά μεγέθη αναπαριστάνουν ενδογενείς φυσικές ιδιότητες σημείων του χωροχρόνου.

μετασχηματισμός $\psi'(\vec{x}',t')$ από ένα γαλιλαιϊκό σύστημα αναφοράς $(\vec{x},t)$ σε ένα άλλο $(\vec{x}',t')$ εξαρτάται από την τιμή της ψ στο πρώτο σύστημα αναφοράς, την σχέση των δύο συστημάτων και την μάζα m του σωματιδίου. Άρα, η κυματοσυνάρτηση $\psi(\vec{x},t)$ από μόνη της δεν αποτελεί γεωμετρικό αντικείμενο. Από την άλλη, το ζεύγος $\left(\psi(\vec{x},t),m\right)$ αποτελεί γεωμετρικό αντικείμενο. Συνεπώς, η κβαντική μηχανική ενός σωματιδίου χωρίς spin με μάζα m μπορεί να θεωρηθεί ως χωροχρονική θεωρία. Ωστόσο, σε αυτή την ειδική περίπτωση αρχίζει και τελειώνει η ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής ως κλασικής θεωρίας πεδίων. Στην περίπτωση που έχουμε δύο ή περισσότερα σωματίδια, ακόμα και αν αυτά δεν αλληλεπιδρούν, η κυματοσυνάρτηση $\psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2,t)$ μπορεί να θεωρηθεί ως συνάρτηση, όχι στον χωρόχρονο, αλλά στον 7-διάστατο «χώρο των διαμορφώσεων συν χρόνο», εκτός από την τετριμμένη περίπτωση όπου η κατάσταση του συστήματος μπορεί να γραφεί ως γινόμενο $\psi_1(\vec{x}_1,t)\psi_2(\vec{x}_2,t)$ δύο καταστάσεων ενός σωματιδίου, οπότε η κυματοσυνάρτηση $\psi(\vec{x}_1,\vec{x}_2,t)$ μπορεί να ερμηνευθεί ως ζεύγος γεωμετρικών αντικειμένων.

Μέχρι τώρα είδαμε πώς μπορεί να ικανοποιηθεί η απαίτηση της σημασιολογικής τοπικότητας από μία χωροχρονική θεωρία με τον ορισμό των τοπικών παρατηρήσιμων και των τοπικών καταστάσεων σε σημεία του χωροχρόνου. Η τοπική κβαντική φυσική υποδεικνύει έναν ακόμα τρόπο να αποκτήσουν νόημα οι όροι "τοπικό παρατηρήσιμο" και "τοπική κατάσταση", αυτή την φορά σε περιοχές του χωροχρόνου[4]. Συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε το σύνολο των πεπερασμένων περιοχών του χωροχρόνου < *M,g*> (δηλαδή, το σύνολο των ανοικτών περιοχών με συμπαγή κλειστότητα) και την απεικόνιση $O \mapsto \mathcal{A}(O)$ που απεικονίζει πεπερασμένες περιοχές O σε C* άλγεβρες $\mathcal{A}(O)$, τότε τα αυτοσυζυγή στοιχεία των αλγεβρών αυτών αναπαριστάνουν τοπικά παρατηρήσιμα στην περιοχή O. Το σύνολο των τοπικών παρατηρήσιμων του φυσικού συστήματος ορίζεται από την συνολοθεωρητική ένωση των αυτοσυζυγών στοιχείων των τοπικών αλγεβρών $\mathcal{A}(O)$.

[4] Στην ενότητα 6.3 εξετάσαμε μία αντίστοιχη προσέγγιση στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής. Στο πλαίσιο της αλγεβρικής κλασικής θεωρίας πεδίων μπορούμε, καταρχήν, να ορίσουμε τοπικά παρατηρήσιμα και τοπικές καταστάσεις σε πεπερασμένες περιοχές του τρισδιάστατου χώρου, σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου.

Αντίστοιχα, οι τοπικές καταστάσεις του φυσικού συστήματος $\Sigma(O)$ αποτελούν ένα υποσύνολο των μαθηματικών καταστάσεων – των κανονικοποιημένων θετικών γραμμικών συναρτησιακών – της C* άλγεβρας $\mathcal{A}(O)$. Επομένως, μπορεί να ορισθεί μία δεύτερη απεικόνιση $O \mapsto \Sigma(O)$ από τις πεπερασμένες περιοχές του χωροχρόνου στο σύνολο των τοπικών καταστάσεων φυσικού ενδιαφέροντος. Η βασική υπόθεση της τοπικής κβαντικής φυσικής είναι ότι το σύνολο των τοπικών παρατηρήσιμων και το σύνολο των τοπικών καταστάσεων μαζί με μία ομάδα συμμετριών G που αναπαριστάνεται κατάλληλα από ομάδα αυτομορφισμών στον αλγεβρικό φορμαλισμό επαρκούν για να περιγράψουν την φυσική στο χωρόχρονο $< M,g >$.

Στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής δεν ενδιαφερόμαστε, καταρχήν, για τον τρόπο κατασκευής των τοπικών αλγεβρών. Συνήθως, οι τοπικές άλγεβρες υποθέτουμε ότι περιλαμβάνουν ποσότητες που είναι αναλλοίωτες σε μετασχηματισμούς βάθμισης, οι οποίες προκύπτουν από πεδία που ορίζονται σε σημεία του χωροχρόνου και αθροίζονται με κατάλληλες δοκιμαστικές συναρτήσεις σε κάποια πεπερασμένη περιοχή του χωροχρόνου. Εκ κατασκευής, από το σύνολο των τοπικών παρατηρήσιμων εξαιρούνται όλες εκείνες οι ποσότητες που αναφέρονται σε μη πεπερασμένες περιοχές όπως, για παράδειγμα, η ολική ενέργεια, το ολικό φορτίο ή η συνολική μάζα του φυσικού συστήματος. Τέτοιες ποσότητες, ή, ορθότερα, φραγμένες συναρτήσεις αυτών των ποσοτήτων μπορούν να συμπεριληφθούν στη σχεδόν – τοπική άλγεβρα του συστήματος την οποία θα ορίσουμε στη συνέχεια.

Ένα χαρακτηριστικό της προσέγγισης, που έχει ιδιαίτερη σημασία για την διερεύνηση της σημασιολογικής τοπικότητας, είναι ότι τα αυτοσυζυγή στοιχεία που αναπαριστάνουν τα τοπικά παρατηρήσιμα δεν έχει νόημα να ταυτοποιηθούν και να διακριθούν μεταξύ τους. Δηλαδή, δεν έχει νόημα να λέμε ότι το αυτοσυζυγές στοιχείο $A \in \mathcal{A}(O)$ αναπαριστάνει το φυσικό μέγεθος X με τον τρόπο που στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό ένας τανυστής (0,2), ο τανυστής Maxwell, αναπαριστάνει το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο. Όπως παρατηρεί ο Horuzhy (1990:4), «... το γνήσιο αντικείμενο μελέτης δεν είναι ένα ξεχωριστό παρατηρήσιμο, αλλά το σύνολο των τοπικών παρατηρήσιμων που εντοπίζονται σε μία περιοχή».

Ο Haag (1996:5) παρουσιάζει ένα επιχείρημα υπέρ της θέσης ότι το θεμελιώδες αντικείμενο του μαθηματικού φορμαλισμού της κβαντικής θεωρίας είναι η άλγεβρα με νόρμα και όχι το μεμονωμένο παρατηρήσιμο. Το επιχείρημα στηρίζεται στο θεώρημα φασματικής απεικόνισης για κανονικά (normal) στοιχεία μίας C* άλγεβρας. Αν $\mathcal{A}$ μία C* άλγεβρα, $A \in \mathcal{A}$, $AA^* = A^*A$ και f μία συνεχής μιγαδική συνάρτηση στο φάσμα $\sigma_{\mathcal{A}}(A)$, τότε το φάσμα του $f(A) \in \mathcal{A}$ ταυτίζεται με την εικόνα του φάσματος του A από την f,

$$\sigma_{\mathcal{A}}\left(f(A)\right) = f\left(\sigma_{\mathcal{A}}(A)\right). \tag{7.1.5}$$

Επιπλέον, αν η άλγεβρα $\mathcal{A}$ είναι von Neumann υποάλγεβρα της άλγεβρας των φραγμένων τελεστών σε έναν χώρο Hilbert $\mathcal{H}$, τότε προσδιορίζεται κατά μοναδικό τρόπο ένα φασματικό μέτρο P στα Borel υποσύνολα του μιγαδικού επιπέδου που είναι μηδέν παντού εκτός από το $\sigma_{\mathcal{A}}(A)$ και για το οποίο ισχύει

$$f(A) = \int_{\sigma_{\mathcal{A}}(A)} f(\lambda) dP_{\lambda}, \ \forall f \in C(\sigma_{\mathcal{A}}(A)). \tag{7.1.6}$$

Σύμφωνα με τον Haag, αν αντικαταστήσουμε τον τελεστή A με τον τελεστή $f(A)$ αυτό δεν σημαίνει ότι αλλάζουμε μετρητική διάταξη· το μόνο που αλλάζει είναι ο τρόπος που αποδίδεται «ετικέτα» στα συμβάντα. Στην πρώτη περίπτωση αποδίδουμε σε κάποιο συμβάν την ετικέτα "a" ενώ στην δεύτερη περίπτωση στο ίδιο συμβάν την ετικέτα " $f(a)$". Επομένως, θα ήταν πιο κατάλληλο να θεωρήσουμε την αβελιανή άλγεβρα που παράγεται από το A και τη μονάδα I ως μαθηματική αναπαράσταση μίας μετρητικής διάταξης, παρά το μεμονωμένο αυτοσυζυγές στοιχείο A της άλγεβρας. Η επιλογή ενός συγκεκριμένου τελεστή από αυτή την άλγεβρα συγκεκριμενοποιεί μία επιλογή ετικέτας για τα μετρητικά αποτελέσματα.

Η ιδέα που παρουσιάζει ο Haag θα μπορούσε να συνοψιστεί ως εξής. Με κάθε μετρητική διάταξη συνδέονται με μοναδικό τρόπο ορισμένα μετρητικά αποτελέσματα (συμβάντα). Υπάρχουν διαφορετικοί τρόποι να περιγραφούν αυτά τα συμβάντα καθένας από τους οποίους αντιστοιχεί σε ένα παρατηρήσιμο (αυτοσυζυγές στοιχείο της άλγεβρας). Αν θέλουμε να αναπαραστήσουμε τη μετρητική διάταξη και κατ' επέκταση το σύνολο των συμβάντων με τρόπο ανεξάρτητο από μία

συγκεκριμένη περιγραφή, θα πρέπει σε κάθε μετρητική διάταξη να αποδώσουμε την αβελιανή άλγεβρα που παράγεται από ένα παρατηρήσιμο και την μονάδα. Στο σημείο αυτό θα πρέπει να επισημάνουμε την αναλογία ανάμεσα στην ιδέα που υπερασπίζεται την αλγεβρική διατύπωση της κβαντικής θεωρίας και στην τοπολογική δομή των χωροχρονικών θεωριών[5]. Η μετρητική διάταξη είναι ανάλογη με την περιοχή ενός σημείου μίας πολλαπλότητας M και το μεμονωμένο παρατηρήσιμο με έναν τοπικό χάρτη. Η ισοδυναμία των περιγραφών μίας περιοχής της πολλαπλότητας από διαφορετικούς χάρτες εξασφαλίζεται αν απαιτήσουμε οι χάρτες να είναι ομοιομορφικοί. Αντίστοιχα, η ισοδυναμία των περιγραφών που προσδιορίζονται από δύο αυτοσυζυγή στοιχεία A, B της άλγεβρας εξασφαλίζεται αν απαιτήσουμε να υπάρχει μία 1-1 και επί συνεχής συνάρτηση f, με συνεχή αντίστροφη συνάρτηση, από το φάσμα του A, $\sigma_{\mathcal{A}}(A)$, στο φάσμα του B, $\sigma_{\mathcal{A}}(B)$. Σε αυτή την περίπτωση τα στοιχεία A και B ανήκουν στην αβελιανή υποάλγεβρα που παράγει κάποιο από αυτά.

Ας εξετάσουμε τώρα με ποιον τρόπο προσδιορίζονται στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής τα καθολικά χαρακτηριστικά ενός φυσικού συστήματος από τις τοπικές άλγεβρες παρατηρήσιμων και τα σύνολα των τοπικών καταστάσεων. Έστω ότι το σύνολο $\mathcal{K}$ των πεπερασμένων περιοχών του χωροχρόνου $< M,g>$ εφοδιασμένο με την σχέση μερικής διάταξης "$\subset$", είναι ένα μερικώς διατεταγμένο σύνολο για το οποίο ισχύει ότι για οποιεσδήποτε δύο περιοχές $O_1, O_2 \in \mathcal{K}$ υπάρχει περιοχή $O_3 \in \mathcal{K}$ τέτοια ώστε $O_1 \subset O_3$ και $O_2 \subset O_3$. Θα λέμε τότε ότι το σύνολο $\mathcal{K}$ είναι ένα κατευθυνόμενο σύνολο (directed set) και η απεικόνιση $O \mapsto \mathcal{A}(O)$ ορίζει ένα δίκτυο (net) C* αλγεβρών $\{\mathcal{A}(O)\}_{O\in\mathcal{K}}$. Επιπλέον, έστω ότι για κάθε ζεύγος περιοχών O_1, O_2 με $O_1 \subset O_2$, υπάρχει μία απεικόνιση

$$i_{O_1O_2} : \mathcal{A}(O_1) \to \mathcal{A}(O_2) \tag{7.1.7}$$

που είναι * - ισομορφισμός[6] και ικανοποιεί την εξής ιδιότητα

$$i_{O_1O_2} \circ i_{O_2O_3} = i_{O_1O_3} \quad \text{για} \quad O_1 \subset O_2 \subset O_3. \tag{7.1.8}$$

[5] Για τις ανάγκες της αναλογίας δεν απαιτείται να αναφερθούμε στην διαφορίσιμη δομή της πολλαπλότητας. Αρκεί να θεωρήσουμε μία τοπολογική πολλαπλότητα.
[6] Διατηρεί πράξεις και ενέλιξη, απεικονίζει την μονάδα στην μονάδα και είναι 1-1.

Η ιδιότητα αυτή ονομάζεται *ισοτονία* (isotony) και η ισχύς της συνεπάγεται την σύγκλιση του δικτύου τοπικών C* αλγεβρών. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι για κάθε τέτοιο δίκτυο που ικανοποιεί την ισοτονία υπάρχει μία C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ και ένας *-ισομορφισμός $i_O : \mathcal{A}(O) \to \mathcal{A}$ τέτοιος ώστε για $O_1 \subset O_2$ να ισχύει $i_{O_1} \circ i_{O_1 O_2} = i_{O_2}$ με τον οποίο το δίκτυο $\{\mathcal{A}(O)\}_{O \in \mathcal{K}}$ εμφυτεύεται ισομορφικά στην $\mathcal{A}$ και ισχύει

$$\mathcal{A} = \overline{\bigcup_{O \in \mathcal{K}} i_o\left(\mathcal{A}(O)\right)}^{u} \tag{7.1.9}$$

(Kadison and Ringrose 1997, Πρτ. 11.4.1). Η C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ ονομάζεται *σχεδόν – τοπική άλγεβρα* (quasilocal algebra) του τοπικού κβαντικού συστήματος. Εκτός από την άλγεβρα των τοπικών παρατηρήσιμων, περιλαμβάνει στοιχεία τα οποία δεν ανήκουν σε τοπικές άλγεβρες αλλά μπορούν να προσεγγισθούν από στοιχεία των τοπικών αλγεβρών και γι' αυτό ονομάζονται *σχεδόν τοπικά* (almost local). Επιπλέον, όπως αναφέραμε προηγούμενα, περιλαμβάνει και φραγμένες συναρτήσεις καθολικών φυσικών μεγεθών όπως είναι η συνολική ενέργεια, η συνολική μάζα ή το συνολικό φορτίο.

Η ισοτονία είναι μία εύλογη απαίτηση για ένα τοπικό κβαντικό σύστημα. Αρκεί γι' αυτό να σκεφτούμε ότι μία μετρητική διαδικασία που λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή του χωροχρόνου O_1 μπορεί να θεωρηθεί ότι λαμβάνει χώρα σε μία ευρύτερη περιοχή O_2 που περιλαμβάνει την O_1. Σε μία τέτοια περίπτωση τα παρατηρήσιμα που αναπαριστάνουν την μετρητική διαδικασία στην πρώτη περιοχή είναι εύλογο να περιλαμβάνονται στην άλγεβρα που αναπαριστάνουν τις τοπικές μετρήσεις που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στη δεύτερη περιοχή.

Η οικογένεια συνόλων τοπικών καταστάσεων $\{\Sigma(O)\}_{O \in \mathcal{K}}$ επίσης αποτελεί δίκτυο, εφόσον το $\mathcal{K}$ είναι κατευθυνόμενο σύνολο. Για τις τοπικές καταστάσεις του συστήματος η ιδιότητα που αντιστοιχεί στην ισοτονία είναι ότι για κάθε δύο περιοχές $O_1, O_2 \in \mathcal{K}$ με $O_1 \subset O_2$ υπάρχει μία απεικόνιση

$$j_{O_2 O_1} : \Sigma(O_2) \to \Sigma(O_1) \tag{7.1.10}$$

που είναι απεικόνιση περιορισμού και ικανοποιεί την ιδιότητα: αν $O_1 \subset O_2 \subset O_3$ τότε

$$j_{O_3O_1} = j_{O_2O_1} \circ j_{O_3O_2}. \tag{7.1.11}$$

Η απεικόνιση περιορισμού αντιστοιχεί σε κάθε στοιχείο $\omega \in \Sigma(O_2)$ ένα στοιχείο $\phi \in \Sigma(O_1)$ για το οποίο ισχύει $\omega(A) = \phi(A), \ \forall A \in \mathcal{A}(O_1)$. Επιπλέον, σε κάθε τοπική κατάσταση $\phi \in \Sigma(O_1)$ αντιστοιχείται μία κλάση τοπικών καταστάσεων $\omega \in \Sigma(O_2)$, η οποία αποτελείται από τις καταστάσεις στην $\mathcal{A}(O_2)$ των οποίων ο περιορισμός στην $\mathcal{A}(O_1)$ ταυτίζεται με την ϕ. Δηλαδή, η απεικόνιση $j_{O_2O_1}$ απεικονίζει πολλά στοιχεία του συνόλου $\Sigma(O_2)$ στο ίδιο στοιχείο του $\Sigma(O_1)$.

Η απαίτηση για την ύπαρξη μίας απεικόνιση περιορισμού στο δίκτυο των τοπικών καταστάσεων $\{\Sigma(O)\}_{O \in \mathcal{K}}$ εκφράζει την απαίτηση μία διαδικασία προετοιμασίας μίας κατάστασης στην περιοχή O_1 να μπορεί να θεωρηθεί ως μέρος μίας ευρύτερης διαδικασίας προετοιμασίας του συστήματος σε μία κατάσταση στην O_2 . Για να γίνει πιο σαφές ας δώσουμε ένα παράδειγμα. Ας υποθέσουμε ότι θέλουμε να προετοιμάσουμε μία δέσμη ηλεκτρονίων σε μία κατάσταση που έχουν ορισμένη ταχύτητα και ορισμένο προσανατολισμό μίας χωρικής συνιστώσας του σπιν. Τα ηλεκτρόνια εξερχόμενα από την θερμαινόμενη επιφάνεια ενός μετάλλου διέρχονται από έναν επιλογέα ενεργειών που απορρίπτει όσα δεν έχουν ορισμένη ενέργεια. Ακολούθως, η δέσμη διέρχεται από ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο με κατάλληλο χωρικό προσανατολισμό και διακρίνει τα ηλεκτρόνια ως προς την τιμή της αντίστοιχης συνιστώσας του spin. Η όλη διαδικασία προετοιμασίας λαμβάνει χώρα σε ορισμένη χωρική έκταση και έχει ορισμένη διάρκεια ενώ το μέρος της προετοιμασίας που αντιστοιχεί στην επιλογή της ενέργειας των ηλεκτρονίων της δέσμης έχει μικρότερη διάρκεια και ενδεχομένως λαμβάνει χώρα σε μία χωρικά μικρότερη περιοχή. Η κατάσταση της δέσμης όταν εξέρχεται από τον επιλογέα ενεργειών, αποτελεί μία φυσικά αποδεκτή κατάσταση του συστήματος που υποθέτουμε ότι ανήκει στο σύνολο $\Sigma(O_1)$ ενώ αντίστοιχα η κατάσταση του συστήματος μετά το πέρας της όλης διαδικασίας αποτελεί φυσικά αποδεκτή κατάσταση που ανήκει στο σύνολο $\Sigma(O_2)$ με $O_1 \subset O_2$. Ο περιορισμός της τελικής

κατάστασης στην περιοχή O_1 μας δίνει την κατάσταση της δέσμης όταν αυτή εξέρχεται από τον επιλογέα ενεργειών. Επιπλέον, επειδή ο επιλογέας ενεργειών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως τμήμα διαφορετικών διαδικασιών προετοιμασίας, μία δυνατή επέκταση της κατάστασης της δέσμης στην περιοχή O_1 είναι η κατάστασή της στην περιοχή O_2.

Από το σύνολο Σ των καθολικών φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων του συστήματος, που είναι υποσύνολο των μαθηματικών καταστάσεων της σχεδόν – τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$, μπορούμε να καθορίσουμε το σύνολο $\Sigma(O)$ των φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων σε κάθε περιοχή του χωροχρόνου. Η κλάση των καθολικών καταστάσεων που ταυτίζονται σε σχέση με τα στοιχεία μίας τοπικής άλγεβρας αντιστοιχεί σε μία φυσικώς αποδεκτή τοπική κατάσταση της άλγεβρας αυτής. Ωστόσο, το αντίστροφο, δηλαδή ο καθορισμός του συνόλου Σ των καθολικών φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων, με βάση το δίκτυο $\{\Sigma(O)\}_{O\in\mathcal{K}}$ των τοπικών καταστάσεων, τίθεται συνήθως ως υπόθεση: «Για να είναι μία κατάσταση (καθολικώς) φυσικώς αποδεκτή, αρκεί να υπάρχει ένα ανοικτό κάλυμμα (από ανοικτές περιοχές με συμπαγή κλειστότητα) τέτοιο ώστε ο περιορισμός της κατάστασης στις τοπικές άλγεβρες για κάθε στοιχείο του καλύμματος να είναι φυσικώς αποδεκτός» (Kay 1992). Με άλλα λόγια, αρκεί να επιβάλλουμε τοπικούς περιορισμούς για να καθορισθεί το σύνολο των φυσικώς αποδεκτών καθολικών καταστάσεων.

Για να κατανοήσουμε με ποιον τρόπο συνθήκες που επιβάλλονται τοπικά καθορίζουν το σύνολο των καθολικών φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων θα εξετάσουμε ως παράδειγμα μία συνθήκη που ονομάζεται *τοπική κανονικότητα* (local normality). Ο περιορισμός όλων των φυσικώς πραγματοποιήσιμων καταστάσεων στην άλγεβρα μίας πεπερασμένης συσταλτής περιοχής ανήκει σε ένα μοναδικό κύριο φύλλωμα (primary folium) (Haag 1996:131). Έστω δύο οποιεσδήποτε φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις $\omega_1, \omega_2 \in \Sigma$ και $\omega_1\big|_{\mathcal{A}(O)}$, $\omega_2\big|_{\mathcal{A}(O)} \in \Sigma(O)$ οι περιορισμοί των ω_1, ω_2 στην άλγεβρα $\mathcal{A}(O)$ μίας πεπερασμένης και συσταλτής περιοχής O. Σύμφωνα με την τοπική κανονικότητα υπάρχει μία μοναδική κύρια αναπαράσταση $(\mathcal{H}, \pi)$ της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$ και δύο καταστάσεις $\omega_{1,O}$, $\omega_{2,O}$ που ανήκουν στο

φύλλωμα της αναπαράστασης $(\mathcal{H},\pi)$ τέτοιες ώστε $\omega_1\big|_{\mathcal{A}(O)} = \omega_{1,O}\big|_{\pi(\mathcal{A}(O))}$ και $\omega_2\big|_{\mathcal{A}(O)} = \omega_{2,O}\big|_{\pi(\mathcal{A}(O))}$. Δηλαδή, όλες οι καταστάσεις φυσικού ενδιαφέροντος τοπικά περιγράφονται από κανονικές καταστάσεις, από τελεστές πυκνότητας, σε μία μοναδικά ορισμένη κύρια αναπαράσταση της $\mathcal{A}$. Ωστόσο, θα πρέπει να τονίσουμε ότι οι περιορισμοί μίας φυσικώς αποδεκτής κατάστασης σε δύο οποιεσδήποτε πεπερασμένες περιοχές του χωροχρόνου δεν περιγράφονται γενικά από τον ίδιο τελεστή πυκνότητας στην εν λόγω αναπαράσταση, διότι αν ίσχυε κάτι τέτοιο τότε οι μόνες φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις θα ήταν οι κανονικές καταστάσεις της αναπαράστασης.

Οι θεωρίες της σχετικιστικής τοπικής κβαντικής φυσικής στη λεγόμενη *αφηρημένη ή Haag – Kastler περιγραφή* είναι της μορφής,

$$\left\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \Sigma(O), G, g \mapsto a_g \right\rangle \tag{7.1.12}$$

όπου M είναι μία ημι-ρημάννεια διαφορίσιμη πολλαπλότητα, g ένας μετρικός τανυστής υπογραφής Lorentz, $O \mapsto \mathcal{A}(O)$ και $O \mapsto \Sigma(O)$ απεικονίσεις από το σύνολο των πεπερασμένων περιοχών του χωροχρόνου $\langle M, g\rangle$ σε τοπικές C* άλγεβρες και σύνολα φυσικώς αποδεκτών τοπικών καταστάσεων σε αυτές (αντίστοιχα), G μία ομάδα μετασχηματισμών (συμμετρίες) και $g \mapsto a_g$ η αναπαράσταση της G από μία ομάδα αυτομορφισμών στο δίκτυο των C* αλγεβρών. Όπως και στις χωροχρονικές θεωρίες ένα μοντέλο μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας περιγράφει ένα φυσικό σύστημα σε ορισμένη κατάσταση. Άρα για να περιγράψουμε ένα μοντέλο της θεωρίας αρκεί στην (7.1.12) να θεωρήσουμε ότι κάθε $\Sigma(O)$ είναι μονοσύνολο που περιλαμβάνει την τοπική κατάσταση στην περιοχή O:

$$\left\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \{\phi_O\}, G, g \mapsto a_g \right\rangle. \tag{7.1.13}$$

Εκτός από την αφηρημένη περιγραφή των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής, υπάρχει και η *συγκεκριμένη ή Haag-Araki περιγραφή*, όπου οι τοπικές άλγεβρες $\mathcal{R}(O)$ είναι von Neumann υποάλγεβρες της άλγεβρας των φραγμένων τελεστών σε κάποιο χώρο Hilbert $\mathcal{H}$. Οι θεωρίες σε αυτή την περιγραφή είναι της μορφής

$$\left\langle M, g, \mathcal{H}, O \mapsto \mathcal{R}(O), O \mapsto \Sigma(O), G, g \mapsto U_g \right\rangle, \tag{7.1.14}$$

όπου $g \mapsto U_g$ είναι μία ισχυρώς συνεχής μοναδιαία αναπαράσταση της ομάδας G στον $\mathcal{H}$. Η μετάβαση από την αφηρημένη στην συγκεκριμένη περιγραφή των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής γίνεται με το να θεωρήσουμε μία αναπαράσταση $(\mathcal{H}, \pi)$ της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$ και να ορίσουμε τις von Neumann άλγεβρες $\mathcal{R}(O) = \pi(\mathcal{A}(O))''$. Αν μάλιστα η $(\mathcal{H}, \pi)$ είναι κύρια αναπαράσταση, τότε, όπως απαιτείται από την συνθήκη τοπικής κανονικότητας, κάθε στοιχείο του συνόλου των τοπικών καταστάσεων $\Sigma(O)$, αποτελεί περιορισμό μίας κανονικής κατάστασης της $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ και μπορεί να αναπαρασταθεί από έναν τελεστή πυκνότητας στον $\mathcal{H}$. Έτσι, ένα μοντέλο της θεωρίας στην Haag- Araki περιγραφή είναι της μορφής,

$$\left\langle M, g, \mathcal{H}, O \mapsto \mathcal{R}(O), O \mapsto \{\rho_O\}, G, g \mapsto U_g \right\rangle \tag{7.1.15}$$

όπου ρ_O ένας τελεστής πυκνότητας στον $\mathcal{H}$.

Οι πρωταρχικοί όροι των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής σε χωρόχρονο Minkowski $\left\langle \mathbb{R}^4, \eta_{\mu\nu} \right\rangle$ ικανοποιούν τα ακόλουθα αιτήματα.

α) Η *ισοτονία* στην οποία ήδη έχουμε αναφερθεί. Το μόνο που έχουμε να παρατηρήσουμε είναι ότι στην περίπτωση της περιγραφής Haag-Araki η ισοτονία αφορά σε von Neumann άλγεβρες και διατυπώνεται εντελώς ανάλογα με την περίπτωση των C* αλγεβρών. Επίσης υπάρχει το W* επαγωγικό όριο του δικτύου τοπικών αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}_{O \in \mathcal{K}}$ που είναι η *καθολική άλγεβρα* $\mathcal{R}$ του τοπικού κβαντικού συστήματος.

β) Η *ασθενής προσθετικότητα* (weak additivity), η οποία μας λέει ότι η ένωση των τοπικών αλγεβρών που προκύπτουν από την μετάθεση της άλγεβρας μίας πεπερασμένης περιοχής με κάθε διάνυσμα του $\mathbb{R}^4$ παράγει την σχεδόν – τοπική άλγεβρα .Έτσι,

$$\underset{O\in\mathcal{K}}{\forall}\ \overline{\underset{a\in\mathbb{R}^4}{\vee}\mathcal{A}(O+a)}^{u}=\mathcal{A} \tag{7.1.16}$$

$$\underset{O\in\mathcal{K}}{\forall}\ \overline{\underset{a\in\mathbb{R}^4}{\vee}\mathcal{R}(O+a)}^{u}=\mathcal{A} \tag{7.1.17}$$

όπου $O+a=\left\{x+a\in\mathbb{R}^4 : x\in O\right\}$.

γ) Η *τοπική μεταθετότητα* (local commutativity)[7]. Σύμφωνα με αυτή την συνθήκη οι τοπικές άλγεβρες δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών του χωροχρόνου μετατίθενται: αν O_1, O_2 δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου, τότε ισχύει

$$\left[\mathcal{A}(O_1),\mathcal{A}(O_2)\right]=0 \tag{7.1.18}$$

$$\left[\mathcal{R}(O_1),\mathcal{R}(O_2)\right]=0 \tag{7.1.19}$$

δηλαδή, $\forall A\in\mathcal{A}(O_1)\ \left(\text{ή }\mathcal{R}(O_1)\right)$, $B\in\mathcal{A}(O_2)\ \left(\text{ή }\mathcal{R}(O_2)\right)$, $\left[A,B\right]=0$.

Η τοπική μεταθετότητα, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, ερμηνεύεται ως συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας από διεργασία.

δ) Η *πρωτογενής αιτιοκρατία* (primitive causality), που μας λέει ότι η άλγεβρα μίας χρονικής φέτας πάχους ε ταυτίζεται με την σχεδόν-τοπική ή την καθολική άλγεβρα του συστήματος.

$$\mathcal{A}(S_\varepsilon^{(n)})=\mathcal{A}\ , \tag{7.1.20}$$

$$\mathcal{R}(S_\varepsilon^{(n)})=\mathcal{R}\ , \tag{7.1.21}$$

όπου

$$S_\varepsilon^{(n)}=\left\{x\in\mathbb{R}^4 : \left|\eta_{\mu\nu}n^\mu x^\nu\right|<\varepsilon\right\} \tag{7.1.22}$$

[7] Το αίτημα αυτό συναντάται στη βιβλιογραφία με διάφορα ονόματα όπως, «Αιτιότητα» (Causality), «Αιτιότητα ή Τοπικότητα Αϊνστάιν» (Einstein Locality - Causality), «Τοπική Μεταθετότητα» (Local Commutativity), «Μικρο-Αιτιότητα» (Micro causality).

η χρονική φέτα πάχους $\varepsilon > 0$ που ορίζεται από το μοναδιαίο κανονικοποιημένο χρονοειδές τετράνυσμα n^{μ}. Με την πρωτογενή αιτιοκρατία, θα ασχοληθούμε στην τέταρτη ενότητα του κεφαλαίου.

ε) Η *συνθήκη σχετικιστικού συναλλοίωτου* (relativistic covariance), που μας λέει ότι η ομάδα γεωμετρικών συμμετριών ενός τοπικού κβαντικού συστήματος είναι η κύρια ορθόχρονη (proper orthochronous) συνιστώσα της ομάδας Poincarè, $P_{+}^{\uparrow}$, με στοιχεία τους μετασχηματισμούς $g = (a, \Lambda) : x \mapsto gx = \Lambda x + a$ του $\mathbb{R}^4$:

$$a_g \mathcal{A}(O) = \mathcal{A}(gO) \tag{7.1.23}$$

$$U(a, \Lambda)\mathcal{R}(O)U(a, \Lambda)^{-1} = \mathcal{R}(\Lambda^{-1}(O - a)). \tag{7.1.24}$$

Αν ο Λ είναι ο ταυτοτικός πίνακας, τότε οι μετασχηματισμοί της μορφής $g = (a, 1) : x \mapsto gx = x + a$ ορίζουν την υποομάδα των μεταθέσεων.

στ) Η *συνθήκη φάσματος* (spectrum condition) εκφράζει την απαίτηση η ενέργεια του τοπικού κβαντικού συστήματος να είναι θετική. Στην περιγραφή Haag-Araki το φάσμα της ενέργειας – ορμής ή αλλιώς το στήριγμα του φασματικού μέτρου $E(p)$ της αναπαράστασης $U(a,1)$ της ομάδας μεταθέσεων κείται στον κλειστό κώνο φωτός μέλλοντος.

$$T(a) = \int \exp(ipa) dE(p) \ , \ \text{supp}E(p) \subset \overline{V^+} \equiv \left\{ p \in M : p^2 \geq 0, p^0 \geq 0 \right\}. \tag{7.1.25}$$

Τα αιτήματα (α) – (στ) αποτελούν τα βασικά αιτήματα των τοπικών κβαντικών θεωριών σε χωρόχρονο Minkowski και σε αυτά θα αναφερόμαστε στην συνέχεια του κεφαλαίου. Παρατηρούμε ότι μεταξύ αυτών δεν υπάρχουν αιτήματα που να αφορούν σε καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος, όπως η τοπική κανονικότητα. Αυτό έχει να κάνει με ιστορικούς λόγους. Στην δεκαετία του ’60, κατά την οποία αναπτύχθηκε η αλγεβρική κβαντική θεωρία πεδίων (ο πρόδρομος της τοπικής κβαντικής φυσικής), οι πρωταγωνιστές της υποστήριζαν ότι οι περιορισμοί που έχουν να κάνουν με την δομή των τοπικών αλγεβρών προσδιορίζουν επαρκώς ένα τοπικό

κβαντικό σύστημα και οι καταστάσεις του συστήματος είναι απλώς οι μαθηματικές καταστάσεις του δικτύου των τοπικών αλγεβρών.

Χαρακτηριστική κατάσταση σε μία τοπική κβαντική θεωρία είναι η *κατάσταση του κενού* (vacuum state). Πρόκειται για την κατάσταση που είναι αναλλοίωτη ως προς την υποομάδα των μεταθέσεων της $P_+^{\uparrow}$. Δηλαδή, για την κατάσταση του κενού ω_0 ισχύει $\omega_0\left(a_{(a,1)}A\right)=\omega_0\left(A\right)$. Η ύπαρξη της κατάστασης του κενού προκύπτει από την συνθήκη φάσματος. Στην GNS αναπαράσταση του δικτύου C* αλγεβρών που συνδέεται με την κατάσταση του κενού, $\left(\mathcal{H}_{\omega_0},\pi_{\omega_0}\right)$, εκ κατασκευής η κατάσταση του κενού είναι διανυσματική. Δηλαδή, υπάρχει ένα διάνυσμα $\Omega\in\mathcal{H}_{\omega_0}$ τέτοιο ώστε $\omega_0\left(A\right)=(\Omega,\pi_{\omega_0}(A)\Omega)$. Το διάνυσμα αυτό ονομάζεται *διάνυσμα του κενού* και είναι αναλλοίωτο ως προς τις μεταθέσεις, $U(a,1)\Omega=\Omega$. Μάλιστα, αποδεικνύεται ότι κάθε διάνυσμα που είναι αναλλοίωτο ως προς τις μεταθέσεις είναι "ανάλογο" με το διάνυσμα του κενού (ίσο με $\lambda\Omega$, $\lambda\in\mathbb{C}$). Τέλος, η κατάσταση του κενού είναι καθαρή κατάσταση και η αναπαράσταση $\left(\mathcal{H}_{\omega_0},\pi_{\omega_0}\right)$ είναι κύρια αναπαράσταση της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$.

Συνοψίζοντας όσα αναφέραμε σε αυτή την μάλλον εκτενή εισαγωγή, οι χωροχρονικές θεωρίες, με μοντέλα που έχουν την μορφή (7.1.1), μαζί με τις θεωρίες της τοπικής κβαντικής φυσικής (7.1.12) και (7.1.14), με μοντέλα της μορφής, (7.1.13) και (7.1.15) αντίστοιχα, αποτελούν δύο κλάσεις φυσικών θεωριών που ικανοποιούν τη σημασιολογική τοπικότητα που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για να συζητηθούν στο πλαίσιο μίας θεωρίας ζητήματα που αφορούν στην τοπικότητα. Δύο βασικές διαφορές ανάμεσα στις χωροχρονικές θεωρίες και στις θεωρίες της τοπικής κβαντικής φυσικής είναι οι εξής. Πρώτο, στις χωροχρονικές θεωρίες τα τοπικά παρατηρήσιμα ορίζονται σε σημεία του χωροχρόνου ενώ στις θεωρίες τις τοπικής κβαντικής φυσικής σε περιοχές του χωροχρόνου. Και δεύτερο στις θεωρίες της τοπικής κβαντικής φυσικής πρωταρχικό ρόλο δεν παίζει το μεμονωμένο τοπικό παρατηρήσιμο, αλλά η δομή, η τοπική άλγεβρα στην οποία ανήκει.

Στην συνέχεια θα αναφερθούμε σε συγκεκριμένες συνθήκες τοπικότητας όπως είναι οι συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας και οι συνθήκες τοπικής εξάρτησης. Θα προσπαθήσουμε να δούμε πώς εξειδικεύονται αυτές οι συνθήκες σε σχέση με τις δύο κλάσεις φυσικών θεωριών που αναφέραμε στην εισαγωγή και να κατανοήσουμε σε ποιες περιπτώσεις έχουμε παραβιάσεις κάποιων από αυτές τις συνθήκες. Στο πλαίσιο αυτής της προσέγγισης, η οποία, θα πρέπει να ομολογήσουμε, είναι ανισοβαρώς κατανεμημένη προς την μεριά των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής, θα αναλύσουμε την παραβίαση των ανισοτήτων Bell και την προσπάθεια εξήγησης των απομακρυσμένων συσχετίσεων με βάση την αρχή κοινού αιτίου. Τέλος, θα αναφερθούμε στην μορφή που λαμβάνει το επιχείρημα EPR στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής και θα επαναβεβαιώσουμε την ισχύ του διλήμματος ανάμεσα στην μη τοπικότητα και την μη πληρότητα της κβαντικής θεωρίας.

7.2 Τοπική Ανεξαρτησία

Στην προ-σχετικιστική φυσική, οι θεωρίες που αρνούνται την ύπαρξη ακαριαίας δράσης από απόσταση απαγορεύουν την στιγμιαία διάδοση αιτιακής επίδρασης, διαταραχής ή πληροφορίας από μία περιοχή του χώρου σε κάποια άλλη. Αντίστοιχα, στη συνήθη ερμηνεία της θεωρίας της σχετικότητας απαγορεύεται η ταχύτητα διάδοσης να υπερβαίνει ένα πεπερασμένο μη μηδενικό όριο που προσδιορίζεται από την ταχύτητα του φωτός στο κενό, η οποία είναι φυσική σταθερά. Τέτοιοι περιορισμοί συνεπάγονται ότι τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε ορισμένες περιοχές του χωροχρόνου παραμένουν ανεπηρέαστα από ό,τι συμβαίνει σε άλλες περιοχές του χωροχρόνου και εκφράζονται από συνθήκες διατυπωμένες στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας που είτε προκύπτουν ως συνέπειες των θεμελιωδών αρχών της θεωρίας είτε τίθενται αξιωματικά στο πλαίσιο των τελευταίων. Τέτοιες συνθήκες τις ονομάζουμε *συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας.*

Στην ενότητα αυτή θα εξετάσουμε δύο γενικές συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας. Η πρώτη, την οποία ονομάζουμε *συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων*, μας λέει ότι

> *Το αν ένα συμβάν λαμβάνει χώρα, ή γενικότερα η πιθανότητα που αποδίδεται σε ένα συμβάν, σε μία περιοχή του χωροχρόνου δεν επηρεάζεται από τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα, ή γενικότερα από την πιθανότητα που τους αποδίδεται, σε κάποια άλλη περιοχή του χωροχρόνου που συνδέεται με την πρώτη μέσω ορισμένων γεωμετρικών σχέσεων.*

Η δεύτερη συνθήκη σχετίζεται με την μέθοδο του ίχνους του Reichenbach (1956). Το ίχνος είναι μία διεργασία, μία παρέμβαση, που προκαλείται σε κάποιο συμβάν σε ένα σημείο ή μία περιοχή του χωροχρόνου. Η διάδοση του ίχνους σε κάποιο άλλο συμβάν συνεπάγεται την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα δύο συμβάντα ενώ η ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα σε δύο συμβάντα, την ύπαρξη στατιστικής σχέσης. Έτσι, σύμφωνα με τον Reichenbach (1956: 201) υπάρχει θετική στατιστική σχέση ανάμεσα στο συμβάν που δημιουργείται και στο συμβάν που διαδίδεται το ίχνος. Σε αυτό το πλαίσιο η συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας εκφράζει την απουσία επίδρασης στη στατιστική των συμβάντων από την δημιουργία του ίχνους. Συγκεκριμένα,

> *Μία διεργασία που λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή του χωροχρόνου δεν επηρεάζει την πιθανότητα να λάβει χώρα ένα συμβάν σε κάποια άλλη περιοχή του χωροχρόνου που συνδέεται με την πρώτη μέσω ορισμένων γεωμετρικών σχέσεων.*

Την συνθήκη αυτή θα την ονομάζουμε εφεξής *συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία*.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε πώς συγκεκριμενοποιούνται οι δύο αυτές γενικές συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας στο πλαίσιο των χωροχρονικών θεωριών και των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής. Επειδή, ως επί το πλείστον, θα αναφερθούμε σε σχετικιστικές φυσικές θεωρίες οι συνθήκες που θα διατυπωθούν

εκφράζουν την ανεξαρτησία ανάμεσα σε συμβάντα ή σε διεργασίες και συμβάντα τα οποία βρίσκονται σε χωροειδή απομάκρυνση.

7.2.1 Συνθήκη Ανεξαρτησίας συμβάντων και καταστάσεις ενός φυσικού συστήματος

Στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας ως συμβάν κατανοούμε την απόδοση καθορισμένης τιμής σε κάποιο τοπικό παρατηρήσιμο του φυσικού συστήματος σε ένα σημείο ή περιοχή του χωροχρόνου[8]. Επομένως, το σύνολο των δυνατών συμβάντων σε μία περιοχή του χωροχρόνου καθορίζεται από τα τοπικά παρατηρήσιμα στην περιοχή αυτή. Αντίστοιχα, η τοπική κατάσταση σε μία χωροχρονική περιοχή προσδιορίζει, για όλα τα δυνατά συμβάντα, αν κάποιο από αυτά λαμβάνει χώρα ή γενικότερα την πιθανότητα που έχει κάποιο συμβάν να λάβει χώρα στην περιοχή αυτή. Οι καθολικές καταστάσεις προσδιορίζουν τόσο το ποια συμβάντα λαμβάνουν χώρα ή γενικότερα την πιθανότητα που έχει ένα συμβάν να λάβει χώρα, όσο και σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε διαφορετικές περιοχές του χωροχρόνου και τις πιθανότητες που αποδίδονται σε αυτά. Με αυτές τις ερμηνευτικές διευκρινήσεις μπορούμε να διατυπώσουμε την συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων με όρους φυσικών καταστάσεων του συστήματος.

> [S.I] *Για οποιεσδήποτε φυσικώς αποδεκτές τοπικές καταστάσεις σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου, υπάρχει μία καθολική κατάσταση του συστήματος της οποίας αποτελούν περιορισμό.*

Αν τώρα θεωρήσουμε ότι κάθε κατάσταση του συστήματος, τοπική ή καθολική, είναι το αποτέλεσμα κάποιας διεργασίας, τότε η [S.I] μας λέει ότι για δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου, οποιεσδήποτε δύο τοπικές καταστάσεις

[8] Στο σημείο αυτό απαιτείται προσοχή στην ορολογία. Στα προηγούμενα κεφάλαια με τον όρο "συμβάν" κατανοούσαμε και μεταβολές των χαρακτηριστικών ενός φυσικού συστήματος που λαμβάνουν χώρα σε ορισμένα χωροχρονικά σημεία ή περιοχές. Έτσι, τόσο η εκδήλωση ενός χαρακτηριστικού κατά μήκος μίας διαδικασίας θεωρήθηκε ως συμβάν που λαμβάνει χώρα σε κάποιο χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία, όσο και η αιτιακή αλληλεπίδραση που τροποποιεί αυτό το χαρακτηριστικό σε κάποιο χωροχρονικό σημείο.

του συστήματος στις περιοχές αυτές μπορούν να πραγματοποιηθούν από την ίδια διεργασία προετοιμασίας κατάστασης. Επιπλέον, οι Avishai και Ekstein (1972) προτείνουν να κατανοηθεί η [S.I] ως απαγορευτική αρχή που δηλώνει τη μη δυνατότητα να πραγματοποιηθούν τοπικές επιλογές καταστάσεων σε μία περιοχή του χωροχρόνου που να αποτρέπουν την πραγματοποίηση κάποιας τοπικής κατάστασης σε άλλες περιοχές του χωροχρόνου σε χωροειδή απομάκρυνση από την πρώτη. Μάλιστα, οι Avishai και Ekstein συγκρίνουν τη συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας με τον $1^{ο}$ νόμο της θερμοδυναμικής που απαγορεύει την ύπαρξη αεικίνητου πρώτου είδους. Αμφότερες οι αρχές, θέτουν προκλήσεις σε όποιον τις αντιμετωπίζει με σκεπτικισμό: «Αν δεν πιστεύεις στην διατήρηση της ενέργειας να μας επιδείξεις μία μηχανή που να είναι αεικίνητο!... Προσπάθησε να αποτρέψεις μία δυνατή κατάσταση πραγμάτων *εδώ* και τώρα εκτελώντας διεργασίες *εκεί* και μόνον τώρα!» (Avishai and Ekstein 1972)

Στην προηγούμενη ενότητα αναφέραμε ότι κάθε μοντέλο μίας χωροχρονικής θεωρίας περιγράφει μία φυσικώς δυνατή κατάσταση ενός συστήματος. Επομένως, για μία χωροχρονική θεωρία η [S.I] μπορεί να διατυπωθεί με βάση τα μοντέλα της. Σύμφωνα με τον Earman (1987), η ιδέα για αυτό είναι να απαιτήσουμε ότι οποιαδήποτε τοπικά μοντέλα μίας θεωρίας σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές μπορεί να γίνουν καθολικά στο πλαίσιο του ίδιου μοντέλου. Η συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας μπορεί να διατυπωθεί ως εξής:

> Αν τα $\mathcal{M} = \langle M, g, O_2, O_3, ... \rangle$ και $\mathcal{M}' = \langle M, g, O_2', O_3', ... \rangle$ είναι μοντέλα μίας χωροχρονικής θεωρίας και $U, V \subset M$ χωροειδείς ανοικτές περιοχές, τότε υπάρχει ένα μοντέλο $\mathcal{M}'' = \langle M, g, O_2'', O_3'', ... \rangle$ της θεωρίας τέτοιο ώστε
>
> $$\mathcal{M}''|_U = \mathcal{M}|_U \quad \text{και} \quad \mathcal{M}''|_V = \mathcal{M}'|_V \qquad (7.2.1)$$
>
> όπου $\mathcal{M}''|_U, \mathcal{M}|_U$ ο περιορισμός των μοντέλων $\mathcal{M}''$, $\mathcal{M}$ στην περιοχή U και αντίστοιχα $\mathcal{M}''|_V, \mathcal{M}'|_V$ ο περιορισμός των μοντέλων $\mathcal{M}''$, $\mathcal{M}'$ στην περιοχή V.

Ο περιορισμός ενός μοντέλου $\mathcal{M}=\langle M, O_1, O_2, O_3, ...\rangle$ μίας χωροχρονικής θεωρίας σε μία συνεκτική ανοικτή περιοχή $U \subset M$, ο οποίος ορίζεται ως η δομή $\mathcal{M}|_U = \langle U, O_1|_U, O_2|_U, O_3|_U, ...\rangle$, δεν είναι κατ' ανάγκη μοντέλο της θεωρίας. Αν μεταξύ των αιτημάτων μίας θεωρίας συμπεριλαμβάνονται καθολικές υποθέσεις - όπως για παράδειγμα ότι όλα τα μοντέλα της θεωρίας ορίζονται στον χωρόχρονο Minkowski $< \mathbb{R}^4, \eta_{ab} >$ ή ότι οι φυσικώς αποδεκτοί χωρόχρονοι <*M,g*> είναι μη επεκτάσιμοι (inextendible)[9]-, τότε οι περιορισμοί ενός μοντέλου δεν είναι μοντέλα της θεωρίας. Επομένως, η διατύπωση της [S.I] από τον Earman έχει ως προϋπόθεση ότι κάθε εντοπισμός ενός καθολικού μοντέλου της θεωρίας είναι επίσης μοντέλο αυτής[10].

Στην περίπτωση μίας θεωρίας της τοπικής κβαντικής φυσικής,

$$\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \Sigma(O), G, g \mapsto a_g \rangle,$$

η [S.I] διατυπώνεται με όρους μοντέλων της θεωρίας ως εξής.

Για δύο οποιαδήποτε μοντέλα της τοπικής κβαντικής θεωρίας,

$$\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \{\omega_{1O}\}, G, g \mapsto a_g \rangle$$

$$\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \{\omega_{2O}\}, G, g \mapsto a_g \rangle$$

και για οποιεσδήποτε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου

O_1, O_2 υπάρχει ένα μοντέλο της θεωρίας

[9] Η καθολική υπόθεση ότι όλοι οι φυσικώς αποδεκτοί χωρόχρονοι είναι μη επεκτάσιμοι προκύπτει από την απαίτηση το ζεύγος <*M,g*> να αναπαριστάνει όλα τα μη ιδιόμορφα σημεία του χωροχρόνου. Έτσι, αν το ζεύγος <*M,g*> μπορεί να εμφυτευθεί ισομετρικά σε ένα άλλο ζεύγος <*M′,g′*> έτσι ώστε η εικόνα της *M* με την ισομετρική απεικόνιση να είναι διάφορη από τον *M′*, τότε θα έπρεπε και όλα τα σημεία του *M′* που δεν ανήκουν στην εικόνα του *M* να θεωρηθούν σημεία του χωροχρόνου. Για να αποφύγει κάποιος τέτοιες περιπτώσεις απαιτεί τα φυσικώς αποδεκτά μοντέλα χωροχρόνων <*M,g*> να είναι μη επεκτάσιμα - δηλαδή, να μην υπάρχει ισομετρική εμφύτευση του <*M,g*> στον <*M′,g′*> κατά την οποία η εικόνα της *M* να μην ταυτίζεται με την *M′* (Hawking and Ellis 1994:58).

[10] Σύμφωνα με τον Earman (1987) αυτή η συνθήκη αποτελεί μία διαφορετική αρχή τοπικότητας, (L6).

$$\left\langle M, g, O \mapsto \mathcal{A}(O), O \mapsto \{\phi_O\}, G, g \mapsto a_g \right\rangle$$

τέτοιο ώστε για τις τοπικές καταστάσεις στις περιοχές O_1, O_2 να ισχύει

$$\phi_{O_1} = \omega_{1O_1} \text{ και } \phi_{O_2} = \omega_{1O_2}.$$

Η πιο συνηθισμένη διατύπωση της [S.I] δεν αναφέρεται σε μοντέλα της θεωρίας αλλά σε φυσικώς αποδεκτές καθολικές καταστάσεις που αποτελούν κοινή επέκταση οποιωνδήποτε τοπικών καταστάσεων σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές. Συγκεκριμένα,

> Αν O_1, O_2 δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου και $\Sigma(O_1)$, $\Sigma(O_2)$ τα σύνολα των τοπικών, φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων στις άλγεβρες $\mathcal{A}(O_1)$ και $\mathcal{A}(O_2)$ αντίστοιχα, τότε για κάθε $\omega_1 \in \Sigma(O_1)$ και $\omega_2 \in \Sigma(O_2)$ υπάρχει φυσικώς αποδεκτή καθολική κατάσταση $\omega \in \Sigma$ στην σχεδόν τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}$ τέτοια ώστε
>
> $$\omega|_{\mathcal{A}(O_1)} = \omega_1 \text{ και } \omega|_{\mathcal{A}(O_2)} = \omega_2 .$$

Θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι, λόγω της ισοτονίας, η συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας συνεπάγεται την ύπαρξη μίας τοπικής κατάστασης σε μία περιοχή του χωροχρόνου που περιλαμβάνει τις δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές. Συγκεκριμένα, λόγω της ισοτονίας, ισχύει:

$$O_1, O_2 \subset O_1 \cup O_2 \Rightarrow \mathcal{A}(O_1) \subset \mathcal{A}(O_1 \cup O_2) \text{ και } \mathcal{A}(O_2) \subset \mathcal{A}(O_1 \cup O_2).$$

Άρα για την C* άλγεβρα που παράγεται από τις $\mathcal{A}(O_1)$ και $\mathcal{A}(O_2)$ ισχύει

$$\overline{\mathcal{A}(O_1) \cup \mathcal{A}(O_2)}^{u} \subseteq \mathcal{A}(O_1 \cup O_2) \subseteq \mathcal{A}.$$

Επομένως, η ύπαρξη μίας καθολικής κατάστασης $\omega \in \Sigma$ που να αποτελεί κοινή επέκταση δύο τοπικών καταστάσεων $\omega_1 \in \Sigma(O_1)$ και $\omega_2 \in \Sigma(O_2)$ συνεπάγεται ότι σε οποιαδήποτε τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}(O)$ περιοχής O που περιλαμβάνει τις O_1, O_2 υπάρχει

τοπική φυσικώς αποδεκτή κατάσταση $\omega \in \Sigma(O)$ που να αποτελεί κοινή επέκταση των ω_1 και ω_2.

Αν θεωρήσουμε ότι το σύνολο των φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων ταυτίζεται με τις μαθηματικές καταστάσεις στο δίκτυο των C* αλγεβρών, τότε, σύμφωνα με την [S.I], οι τοπικές άλγεβρες $\mathcal{A}(O_1)$, $\mathcal{A}(O_2)$ δύο οποιονδήποτε χωροχρονικών περιοχών είναι *C* ανεξάρτητες* (C* independent).

> Ένα ζεύγος C* υποαλγεβρών $\left(\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2\right)$ μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ λέμε ότι αποτελεί *ζεύγος C* ανεξάρτητων αλγεβρών* αν για κάθε κατάσταση ω_1 της $\mathcal{A}_1$ και κάθε κατάσταση ω_2 της $\mathcal{A}_2$ υπάρχει κατάσταση ω της $\mathcal{A}$ που είναι κοινή επέκταση αμφότερων των ω_1, ω_2.

Σύμφωνα με τους Florig και Summers (1997, Πρτ.3) η C* ανεξαρτησία ενός ζεύγους υποαλγεβρών $\left(\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2\right)$ μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ είναι ισοδύναμη με την συνθήκη: για κάθε $A \in \mathcal{A}_1, B \in \mathcal{A}_2$, ισχύει ότι $\|AB\| = \|A\|\|B\|$.

Ας επιστρέψουμε όμως στην περίπτωση που το σύνολο των φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων δεν ταυτίζεται με τις μαθηματικές καταστάσεις για να εξετάσουμε μία ακόμη μαθηματική συνθήκη που εκφράζει την [S.I]. Στην προηγούμενη ενότητα αναλύσαμε την συνθήκη της τοπικής κανονικότητας ως μία συνθήκη που περιορίζει το σύνολο των φυσικώς αποδεκτών καταστάσεων σε σχέση με τις μαθηματικές καταστάσεις της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας. Σύμφωνα με αυτήν, οι τοπικές, φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις σε μία τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}(O)$ του χωροχρόνου μπορούν να περιγραφούν από τελεστές πυκνότητας σε μία, μοναδική, κύρια αναπαράσταση $\left(\mathcal{H}, \pi\right)$ της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$. Ας θεωρήσουμε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου O_1, O_2 και μία περιοχή $O \supset O_1 \cup O_2$. Υποθέτουμε επίσης ότι οι άλγεβρες $\mathcal{A}(O_1)$ και $\mathcal{A}(O_2)$ ικανοποιούν την [S.I]. Επομένως, για κάθε ζεύγος κανονικών καταστάσεων ω_1, ω_2 που οι περιορισμοί τους στις $\pi\left(\mathcal{A}(O_1)\right)$ και $\pi\left(\mathcal{A}(O_2)\right)$ αντίστοιχα περιγράφουν τοπικές φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις στις άλγεβρες αυτές, υπάρχει κανονική κατάσταση

ω της οποίας ο περιορισμός στην $\pi(\mathcal{A}(O))$ περιγράφει μία τοπική φυσικώς αποδεκτή κατάσταση στην άλγεβρα αυτή και ισχύει $\omega\big|_{\pi(\mathcal{A}(O_1))} = \omega_1\big|_{\pi(\mathcal{A}(O_1))}$ και $\omega\big|_{\pi(\mathcal{A}(O_2))} = \omega_2\big|_{\pi(\mathcal{A}(O_2))}$. Επιπλέον, αντί να αναφερόμαστε στις C* άλγεβρες $\pi(\mathcal{A}(O_1)), \pi(\mathcal{A}(O_2))$ και $\pi(\mathcal{A}(O))$ μπορούμε να αναφερθούμε στις αντίστοιχες von Neumann άλγεβρες $\pi(\mathcal{A}(O_1))''$, $\pi(\mathcal{A}(O_2))''$ και $\pi(\mathcal{A}(O))''$ και σε κανονικές καταστάσεις σε αυτές χωρίς να αλλάξει τίποτα από όσα είπαμε.

Η C* ανεξαρτησία μάς λέει ότι για οποιεσδήποτε τοπικές καταστάσεις υπάρχει μία κοινή επέκταση, επομένως και για τις κανονικές καταστάσεις στις $\pi(\mathcal{A}(O_1))''$, $\pi(\mathcal{A}(O_2))''$. Ωστόσο, δεν μας λέει αν αυτή η κοινή επέκταση αποτελεί φυσικώς αποδεκτή κατάσταση - δηλαδή, αν ταυτίζεται με μία κανονική κατάσταση στην $\pi(\mathcal{A}(O))''$, όπως θα απαιτούσε η εφαρμογή της [S.I] δεδομένης της συνθήκης τοπικής κανονικότητας. Μία μαθηματική συνθήκη που ικανοποιεί αυτές τις απαιτήσεις είναι η *W* ανεξαρτησία* (*W** independence).

> Δύο W* υποάλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ μίας W* άλγεβρας $\mathcal{R}$ θα λέμε ότι αποτελούν *ζεύγος W* ανεξάρτητων αλγεβρών* αν για κάθε κανονική κατάσταση ω_1 της $\mathcal{R}_1$ και κάθε κανονική κατάσταση ω_2 της $\mathcal{R}_2$ υπάρχει κανονική κατάσταση ω της $\mathcal{R}$ που είναι κοινή επέκταση αμφότερων των ω_1, ω_2.

Η C* ανεξαρτησία δύο W* αλγεβρών δεν συνεπάγεται ότι αυτές είναι W* ανεξάρτητες, παρά μόνο στην ειδική περίπτωση που οι άλγεβρες μετατίθενται. Ωστόσο, ισχύει το αντίστροφο: δύο άλγεβρες που είναι W* ανεξάρτητες είναι και C* ανεξάρτητες (Goldstein *et al*. 1999).

Η [S.I] μας λέει ότι για δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές οι τιμές πιθανοτήτων που αποδίδονται στα δυνατά συμβάντα στην μία περιοχή δεν επηρεάζονται από τις τιμές πιθανοτήτων που αποδίδονται στα δυνατά συμβάντα στην άλλη περιοχή. Η *αυστηρή τοπικότητα* (strict locality) είναι μία συνθήκη ανεξαρτησίας που αναφέρεται στην ειδική περίπτωση όπου η πιθανότητα ενός συγκεκριμένου συμβάντος στην μία περιοχή είναι μονάδα, δηλαδή το συμβάν λαμβάνει χώρα. Μας

λέει ότι για κάθε κατανομή πιθανότητας στα δυνατά συμβάντα σε μία περιοχή του χωροχρόνου υπάρχει κατάσταση του συστήματος τέτοια ώστε οποιοδήποτε συμβάν σε μία περιοχή σε χωροειδή απομάκρυνση από αυτή να λαμβάνει χώρα. Η αυστηρή τοπικότητα αρχικά προτάθηκε από τον Knight (1961) στην θεμελίωση Wightman της κβαντικής θεωρίας πεδίων και αναπτύχθηκε για τοπικά κβαντικά συστήματα σε φορμαλισμό W* αλγεβρών από τους Licht (1963) και Kraus (1964).

> Δύο W* υποάλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ μίας W* άλγεβρας $\mathcal{R}$ θα λέμε ότι αποτελούν *ζεύγος W* αυστηρώς τοπικών αλγεβρών* αν για κάθε κανονική κατάσταση ϕ_1 της $\mathcal{R}_1$ και κάθε μη μηδενικό προβολικό στοιχείο $A \in \mathcal{R}_2$, υπάρχει κανονική κατάσταση ϕ της $\mathcal{R}$, που επεκτείνει την ϕ_1, τέτοια ώστε $\phi(A) = 1$.

Σημειώνουμε ότι στην περίπτωση των W* αλγεβρών τα συμβάντα αναπαριστάνονται από προβολικούς τελεστές που ανήκουν στην τοπική W* άλγεβρα της περιοχής και ότι κάθε κανονική κατάσταση στην τοπική άλγεβρα ορίζει ένα μη μεταθετικό μέτρο πιθανότητας στο πλέγμα των προβολικών τελεστών της W* άλγεβρας.

Γενικότερα, η πιθανότητα να λάβει χώρα *οποιοδήποτε* συμβάν σε μία χωροχρονική περιοχή δεν εξαρτάται από την πιθανότητα να λάβει χώρα ένα *ορισμένο* συμβάν σε μία άλλη χωροχρονική περιοχή. Αν $\left(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2\right)$ είναι ένα ζεύγος αυστηρώς τοπικών αλγεβρών, τότε για κάθε κανονική κατάσταση ϕ_1 της $\mathcal{R}_1$ και κάθε προβολικό στοιχείο $A \in \mathcal{R}_2$, υπάρχουν κανονικές καταστάσεις ϕ, ω στην $\mathcal{R}$ τέτοιες ώστε $\phi(A) = 1, \ \phi|_{\mathcal{R}_1} = \phi_1$ και $\omega(I - A) = 1, \ \omega|_{\mathcal{R}_1} = \phi_1$. Επομένως, για κάθε $0 \le a \le 1$ η κανονική κατάσταση $\rho = a\phi + (1-a)\omega$ στην $\mathcal{R}$ έχει την ιδιότητα, να αποδίδει πιθανότητα a στο ενδεχόμενο A χωρίς να επηρεάζεται η πιθανότητα που αποδίδεται στα ενδεχόμενα που αναπαριστάνονται από προβολικούς τελεστές της $\mathcal{R}_1$: $\rho(A) = a$, $\rho|_{\mathcal{R}_1} = \phi_1$.

Ωστόσο εύλογα κανείς αναρωτιέται αν η αυστηρή τοπικότητα μας λέει κάτι διαφορετικό για την ανεξαρτησία των τοπικών αλγεβρών χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών από την W* ανεξαρτησία ή αποτελεί απλά ειδική

περίπτωση. Καταρχάς πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η συνθήκη W* ανεξαρτησίας αντιμετωπίζει τις τοπικές άλγεβρες "συμμετρικά": επιλέγουμε μία κατάσταση σε κάθε άλγεβρα και απαιτούμε να υπάρχει καθολική κατάσταση που να αποτελεί κοινή επέκταση. Αντίθετα, η συνθήκη της αυστηρής τοπικότητας φαίνεται να εισάγει μία "ασυμμετρία" στην αντιμετώπιση των αλγεβρών: επιλέγουμε μία κατάσταση στη μία τοπική άλγεβρα και ένα προβολικό στοιχείο από την άλλη και ένα αριθμό $a \in [0,1]$ και απαιτούμε την ύπαρξη καθολικής κατάστασης που να αποτελεί επέκταση της τοπικής κατάστασης και να αντιστοιχεί τον αριθμό a στο προβολικό στοιχείο. Σύμφωνα με τον Rédei (1998:179) δεν είναι γνωστό αν στην γενική περίπτωση, για οποιεσδήποτε W* άλγεβρες, η ασυμμετρία αυτή είναι πραγματική ή μόνο φαινομενική – για αυτό απαιτείται στον ορισμό της W* αυστηρής τοπικότητας το ζεύγος $(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2)$ να είναι διατεταγμένο. Ωστόσο, στην περίπτωση που οι άλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ μετατίθενται η W* αυστηρή τοπικότητα είναι συμμετρική ιδιότητα του ζεύγους και αποδεικνύεται ισοδύναμη με την C* και την W* ανεξαρτησία.

Ο Rédei έχει διατυπώσει μία ακόμα συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων στο πλαίσιο του φορμαλισμού W* αλγεβρών, την *λογική ανεξαρτησία* (logical independence). Έστω $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ δύο τοπικές W* άλγεβρες που αντιστοιχούν σε περιοχές χωροειδώς απομακρυσμένες και $P \in \mathcal{R}_1, Q \in \mathcal{R}_2$ προβολικοί τελεστές που αναπαριστάνουν αντίστοιχα τα εξής συμβάντα: "Το παρατηρήσιμο $A \in \mathcal{R}_1$ λαμβάνει τιμή *a*" , "Το παρατηρήσιμο $B \in \mathcal{R}_2$ λαμβάνει τιμή *b*". Ας θεωρήσουμε τώρα την W* άλγεβρα $\mathcal{R}$ που παράγεται από αυτές τις τοπικές άλγεβρες, στην οποία μπορεί να αναπαρασταθεί το εξής φυσικό ενδεχόμενο: "Το παρατηρήσιμο $A \in \mathcal{R}_1$ λαμβάνει τιμή *a* *και* το παρατηρήσιμο $B \in \mathcal{R}_2$ λαμβάνει τιμή *b*". Το ενδεχόμενο αυτό αναπαριστάνεται από τον προβολικό τελεστή $P \wedge Q$, όπου η σύζευξη ορίζεται στο σύνολο των προβολικών τελεστών της άλγεβρας $\mathcal{R}$.

> Η λογική ανεξαρτησία μας λέει ότι για οποιαδήποτε μη τετριμμένα συμβάντα, που αναπαριστάνονται από μη μηδενικούς προβολικούς τελεστές P, Q, το φυσικό ενδεχόμενο να λαμβάνουν χώρα μαζί δεν είναι τετριμμένο, δηλαδή $P \wedge Q \neq 0$.

Οι μη μηδενικοί προβολικοί τελεστές αναπαριστάνουν μη τετριμμένα συμβάντα υπό την έννοια ότι υπάρχει κανονική κατάσταση στην οποία τα συμβάντα αυτά έχουν πιθανότητα ίση με μονάδα να λάβουν χώρα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι αν $0 \neq P \in \mathcal{R}_1$, τότε υπάρχει κανονική κατάσταση ω της $\mathcal{R}_1$ τέτοια ώστε $\omega(P) \neq 0$. Άρα, για την κανονική κατάσταση ϕ που ορίζεται από την σχέση $\phi(X) = \frac{\omega(PXP)}{\omega(P)}$, $X \in \mathcal{R}_1$ ισχύει ότι $\phi(P) = 1$. Επομένως, η λογική ανεξαρτησία συνεπάγεται ότι υπάρχει κατάσταση του συστήματος στην οποία το ενδεχόμενο να λαμβάνουν χώρα μαζί δύο οποιαδήποτε μη τετριμμένα συμβάντα έχει πιθανότητα μονάδα. Η κατάσταση αυτή στην άλγεβρα $\mathcal{R}$ ορίζεται από την σχέση $\rho(X) = \frac{\omega(CXC)}{\omega(C)}$, $X \in \mathcal{R}$, $C = P \wedge Q \neq 0$. Ο Rédei απέδειξε ότι η λογική ανεξαρτησία ενός ζεύγους W* αλγεβρών $(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2)$ αποτελεί αναγκαία συνθήκη για να αποτελεί ζεύγος W* ανεξάρτητων αλγεβρών και για να αποτελεί ζεύγος W* αυστηρώς τοπικών αλγεβρών (Rédei 1998, Πρτ.11.8).

7.2.2 Ανεξαρτησία Συμβάντων και Μεταθετότητα των Τοπικών Αλγεβρών

Στην τοπική κβαντική φυσική η συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας συνήθως δεν τίθεται ως ένα από τα βασικά αιτήματα της θεωρίας. Βεβαίως, προκύπτει για δίκτυα αλγεβρών με φυσικό ενδιαφέρον που κατασκευάζονται με συγκεκριμένο τρόπο και για συγκεκριμένους τύπους χωροχρονικών περιοχών (διπλοί κώνοι[11], σφηνοειδείς

[11] Για δύο σημεία $x, y \in \mathbb{R}^4$ που είναι χρονοειδώς απομακρυσμένα, αν $x^0 > y^0$, η περιοχή του χωροχρόνου που ορίζεται ως η τομή του ανοικτού κώνου φωτός μέλλοντος του $y \in \mathbb{R}^4$, V_y^+, με τον ανοικτό κώνο φωτός του παρελθόντος του $x \in \mathbb{R}^4$, V_x^-, ονομάζεται *ανοικτός διπλός κώνος D*: $D = D_{x,y} = V_y^+ \cap V_x^-$. Η γεωδαισιακή που συνδέει τα *x,y* ονομάζεται *άξονας* του διπλού κώνου ενώ η τομή του διπλού κώνου με το χωροειδές υπερεπίπεδο S, που είναι κάθετο στον άξονα του, ονομάζεται *βάση* του διπλού κώνου.

περιοχές[12]). Όπως είδαμε στην εισαγωγή, η συνθήκη που εκφράζει την σχέση ανάμεσα σε τοπικά παρατηρήσιμα που ανήκουν σε άλγεβρες χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών του χωροχρόνου και τίθεται ως βασικό αίτημα της θεωρίας είναι η τοπική μεταθετότητα (7.1.18), (7.1.19) .

Σε αυτή την υποενότητα δεν θα παρουσιάσουμε μία ερμηνεία της συνθήκης τοπικής μεταθετότητας. Θα προσπαθήσουμε να διερευνήσουμε τη σχέση ανάμεσα στην τοπική μεταθετότητα και στην τοπική ανεξαρτησία. Όμως, πριν προχωρήσουμε θα πρέπει να κάνουμε δύο γενικές παρατηρήσεις. Η πρώτη έχει να κάνει με τον ιδιάζοντα κβαντικό χαρακτήρα του αιτήματος. Στην κλασική φυσική όλα τα τοπικά παρατηρήσιμα μετατίθενται, γεγονός που καθιστά τη συνθήκη τετριμμένα αληθή. Αντιθέτως, στην κβαντική φυσική οι τοπικές άλγεβρες είναι μη μεταθετικές, κατά συνέπεια η συνθήκη αυτή μας λέει κάτι για τις σχέσεις ανάμεσα στις τοπικές άλγεβρες χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών. Ο ιδιάζων κβαντικός χαρακτήρας του αιτήματος υποδεικνύει και την βασική διαφορά του από τη συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας. Ενώ η ισχύς της συνθήκης τοπικής ανεξαρτησίας μπορεί να διερευνηθεί ή να απαιτηθεί τόσο σε κλασικές όσο και σε κβαντικές θεωρίες, η συνθήκη τοπικής μεταθετότητας αφορά αποκλειστικά στο πλαίσιο των κβαντικών θεωριών.

Η δεύτερη παρατήρηση έχει να κάνει με το γεγονός ότι ενώ σε άλλες θεμελιώσεις της σχετικιστικής κβαντικής θεωρίας πεδίων (θεμελίωση Wightman) απαιτείται τα πεδία που εντοπίζονται σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές να ικανοποιούν είτε σχέσεις μετάθεσης, είτε σχέσεις αντιμετάθεσης, ανάλογα με το αν πρόκειται για πεδία μποζονίων ή φερμιονίων[13], στην τοπική κβαντική φυσική

---

[12] Οι σφηνοειδείς περιοχές είναι μη φραγμένα υποσύνολα του $\mathbb{R}^4$. Το σύνολο των σφηνοειδών περιοχών αποτελείται από τις περιοχές που προκύπτουν με μετασχηματισμούς Poincarè της βασικής σφηνοειδούς περιοχής: $W_R = \left\{\left(x^0, x^1, x^2, x^3\right) \in \mathbb{R}^4 \middle| x^1 > \left|x^0\right|\right\}$.

[13] Το αντίστοιχο αξίωμα στην θεμελίωση Wightman για πεδία που δεν έχουν αθροιστεί με δοκιμαστικές συναρτήσεις (unsmeared fields) διατυπώνεται ως εξής: για σημεία *x*, *y* του χωροχρόνου με χωροειδή απομάκρυνση $(x-y)^2 < 0$, ισχύει $\left[\phi_j(x)^{(*)}, \phi_k(y)^{(*)}\right]_{\pm} = 0$, όπου η επιλογή " + " δηλώνει σχέση αντιμετάθεσης ενώ η επιλογή "– " σχέση μετάθεσης $\left([X,Y]_{\pm} = XY \pm YX\right)$. Επίσης, το σύμβολο (*) δηλώνει ότι οι σχέσεις ισχύουν για όλους τους συνδυασμούς των πεδίων και των συζυγών τους, όπου $\phi(x)^*$ είναι το πεδίο που αν αθροιστεί με δοκιμαστική συνάρτηση $g(y)$ δίνει τον τελεστή $[\phi(\bar{g})]^*$ (Streater and Wightman 1964:100 και Araki 1999:104).

απαιτούμε μόνον την συνθήκη τοπικής μεταθετότητας. Αυτό σχετίζεται με το ότι κατά την κατασκευή των τοπικών αλγεβρών από τα πεδία, η απαίτηση της τοπικής μεταθετότητας μπορεί να προκύψει ανεξάρτητα από το αν τα πεδία που εντοπίζονται σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές μετατίθενται ή αντιμετατίθενται. Και αντίστροφα, από ένα μοντέλο της τοπικής κβαντικής φυσικής μπορούν να προκύψουν τόσο πεδία που μετατίθενται όσο και πεδία που αντιμετατίθενται. Μάλιστα, όπως παρατηρεί ο Araki (1999:106), η δυνατότητα αυτή αποτελεί ένα από τα σημαντικά πλεονεκτήματα της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Οι Haag και Kastler (1964) θεωρούσαν ότι η C* ανεξαρτησία δύο τοπικών αλγεβρών σχετίζεται με την τοπική μεταθετότητα, χωρίς όμως να γνωρίζουν αν η τελευταία αποτελεί ικανή συνθήκη για την C* ανεξαρτησία ή απαιτούνται επιπλέον προϋποθέσεις για τη δομή των αλγεβρών. Αυτό που γνωρίζουμε σήμερα είναι ότι η μεταθετότητα και η C* ανεξαρτησία αποτελούν ανεξάρτητες μαθηματικές συνθήκες. Δηλαδή, η C* ανεξαρτησία ενός ζεύγους C* υποαλγεβρών $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ δεν συνεπάγεται ότι οι $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ μετατίθενται και, αντίστροφα, το γεγονός ότι οι δύο άλγεβρες $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ μετατίθενται δεν συνεπάγεται ότι είναι C* ανεξάρτητες. Η πρώτη από τις παραπάνω προτάσεις αποδεικνύεται με παραδείγματα C* ανεξάρτητων αλγεβρών που δεν μετατίθενται (Summers 1990). Η δεύτερη πρόταση προκύπτει από το ακόλουθο απλό επιχείρημα (Ekstein 1969). Έστω δύο C* υποάλγεβρες $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ για τις οποίες ισχύει $\left[\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2\right] = 0$ και $\mathcal{A}_1 \cap \mathcal{A}_2 \neq \mathbb{C}\mathrm{I}$ [14]. Θεωρούμε ένα ζεύγος καταστάσεων ω_1, ω_2 στις άλγεβρες $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ αντίστοιχα για τις οποίες ισχύει $\omega_1(\mathrm{A}) \neq \omega_2(\mathrm{A})$ για κάθε $A \in \mathcal{A}_1 \cap \mathcal{A}_2$, $A \neq \lambda \mathrm{I}$ με $\lambda \in \mathbb{C}$ [15]. Προφανώς, οι καταστάσεις ω_1, ω_2 δεν μπορούν να έχουν κοινή

[14] Δύο C* άλγεβρες που ικανοποιούν αυτές τις συνθήκες μπορούν εύκολα να κατασκευαστούν από μία W* άλγεβρα με μη τετριμμένο κέντρο. Έστω $\mathcal{R}$ μία W* άλγεβρα και $\mathcal{R}_1$ μία υποάλγεβρα της $\mathcal{R}$ με μη τετριμμένο κέντρο, $\mathcal{R}_1 \cap \mathcal{R}_1' \neq \mathbb{C}\mathrm{I}$. Αν θέσουμε $\mathcal{R}_2 = \mathcal{R}_1'$, τότε για το ζεύγος $\left(\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2\right)$ ισχύει εκ κατασκευής ότι $\left[\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2\right] = 0$ και $\mathcal{R}_1 \cap \mathcal{R}_2 \neq \mathbb{C}\mathrm{I}$.

[15] Η ύπαρξη τέτοιων καταστάσεων προκύπτει με βάση ένα θεώρημα που ισχύει για C* άλγεβρες με μονάδα. Σύμφωνα με αυτό για κάθε στοιχείο της άλγεβρας και για κάθε φασματική τιμή του στοιχείου αυτού υπάρχει κατάσταση της άλγεβρας που αποδίδει στο στοιχείο την συγκεκριμένη φασματική τιμή (Gohberg et al. 1993, II, Θεωρ. 5.6, σ. 853). Συνεπώς για το στοιχείο $A \in \mathcal{A}_1 \cap \mathcal{A}_2$ υπάρχουν

επέκταση. Συνεπώς, η μεταθετότητα των $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ δεν είναι ικανή συνθήκη C* ανεξαρτησίας. Επιπλέον, από το επιχείρημα συμπεραίνουμε ότι αν $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ είναι ένα ζεύγος C* ανεξάρτητων αλγεβρών, τότε $\mathcal{A}_1 \cap \mathcal{A}_2 = \mathbb{C}\mathrm{I}$, δηλαδή οι δύο άλγεβρες δεν έχουν μη τετριμμένα κοινά στοιχεία.

Αν ένα τοπικό κβαντικό σύστημα ικανοποιεί την τοπική μεταθετότητα, τότε οι λογικές σχέσεις ανάμεσα στις συνθήκες που εκφράζουν την ανεξαρτησία συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές εμπλουτίζονται.

Συγκεκριμένα, ισχύει η εξής μαθηματική πρόταση (Summers, 1990, Πρτ 3.2). Αν $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ είναι μετατιθέμενες C* υποάλγεβρες μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$, τότε οι ακόλουθες προτάσεις είναι ισοδύναμες:

(α_1) Οι $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$ είναι C* ανεξάρτητες.

(β_1) Ισχύει η ιδιότητα Schlieder: αν $0 \neq A \in \mathcal{A}_1$ και $0 \neq B \in \mathcal{A}_2$, τότε $AB \neq 0$.

(γ_1) Για κάθε κατάσταση ϕ_1 στην $\mathcal{A}_1$ και κάθε κατάσταση ϕ_2 στην $\mathcal{A}_2$ υπάρχει κατάσταση ϕ στην $\mathcal{A}$ τέτοια ώστε $\phi(AB) = \phi_1(A)\phi_2(\mathrm{B})$ για κάθε $A \in \mathcal{A}_1$ και για κάθε $B \in \mathcal{A}_2$.

Αντίστοιχα, στην περίπτωση που οι $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ είναι δύο μετατιθέμενες W* υποάλγεβρες μίας W* άλγεβρας $\mathcal{R}$ οι ακόλουθες συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα είναι ισοδύναμες (Florig-Summers 1997):

(α_2) Οι $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ είναι C* ανεξάρτητες.

(β_2) Οι $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ είναι W* ανεξάρτητες.

(γ_2) Οι $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ είναι W* αυστηρώς τοπικές.

καταστάσεις ω_1, ω_2 στις $\mathcal{A}_1, \mathcal{A}_2$, που αποδίδουν σε αυτό διαφορετικές φασματικές τιμές. Άρα $\omega_1(A) \neq \omega_2(A)$.

(δ_2) Οι $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ είναι λογικώς ανεξάρτητες.

Η ισοδυναμία ανάμεσα στις προτάσεις (α_1) και (γ_1) μας λέει ότι υπάρχει κοινή επέκταση δύο οποιονδήποτε τοπικών καταστάσεων ενός ζεύγους C* ανεξάρτητων αλγεβρών που μετατίθενται, η οποία είναι παραγοντοποιήσιμη κατάσταση - δηλαδή, μπορεί να γραφεί στην μορφή $\phi(AB) = \phi(A)\phi(\mathrm{B})$ για κάθε $A \in \mathcal{A}_1$ και για κάθε $B \in \mathcal{A}_2$. Με όρους τοπικών αλγεβρών, για κάθε ζεύγος αναμενόμενων τιμών $\langle A \rangle_{\phi_1}, \langle B \rangle_{\phi_2}$ οποιωνδήποτε τοπικών παρατηρησίμων A,B σε τοπικές καταστάσεις ϕ_1, ϕ_2 αντίστοιχα, υπάρχει καθολική κατάσταση ϕ που αποτελεί κοινή επέκταση των ϕ_1, ϕ_2 τέτοια ώστε η αναμενόμενη τιμή του γινομένου AB (που αποτελεί επίσης τοπικό παρατηρήσιμο) στη ϕ να είναι το γινόμενο των αναμενόμενων τιμών των A,B, $\langle AB \rangle_{\phi} = \langle A \rangle_{\phi_1} \langle B \rangle_{\phi_2}$. Μάλιστα προκύπτει ότι και η πιθανότητα το παρατηρήσιμο *A και* το παρατηρήσιμο *B* να λαμβάνουν ορισμένες τιμές από το φάσμα τους (δηλαδή, η πιθανότητα τα αντίστοιχα συμβάντα να λαμβάνουν χώρα μαζί) είναι ίση με το γινόμενο της πιθανότητας το παρατηρήσιμο *A* να λάβει την ορισμένη τιμή από το φάσμα του επί την πιθανότητα το παρατηρήσιμο *B* να λάβει την ορισμένη τιμή από το φάσμα του[16]. Επομένως, σε μία κατάσταση ϕ που αποτελεί κοινή επέκταση τοπικών καταστάσεων σε δύο C* ανεξάρτητες και μετατιθέμενες άλγεβρες ισχύει ότι τα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε κάθε περιοχή είναι στατιστικώς ανεξάρτητα: η πιθανότητα να συμβούν μαζί είναι ίση με το γινόμενο των πιθανοτήτων των συμβάντων.

Βεβαίως θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η παραπάνω συνθήκη στατιστικής ανεξαρτησίας των συμβάντων που ορίζονται από παρατηρήσιμα που ανήκουν σε ένα

[16] Στην κλασική θεωρία πιθανοτήτων για ένα ζεύγος τυχαίων μεταβλητών X, Y το γεγονός ότι $\langle XY \rangle = \langle X \rangle \langle Y \rangle$ δεν συνεπάγεται ότι η πυκνότητα πιθανότητας του ζεύγους XY είναι ίση με το γινόμενο των πυκνοτήτων κάθε μίας από αυτές. Ικανή και αναγκαία συνθήκη για το τελευταίο είναι η σχέση $\langle e^{i(xX+yY)} \rangle = \langle e^{ixX} \rangle \langle e^{iyY} \rangle$ για κάθε $x, y \in \mathbb{R}$. Ωστόσο, στην περίπτωση δύο μετατιθέμενων C* ανεξάρτητων αλγεβρών η σχέση $\phi(AB) = \phi_1(A)\phi_2(B)$ ισχύει για κάθε $A \in \mathcal{A}_1$ και για κάθε $B \in \mathcal{A}_2$ - άρα και για τα μοναδιαία στοιχεία e^{ixX}, e^{iyY} με $X \in \mathcal{A}_1$ και $Y \in \mathcal{A}_2$ αυτοσυζυγή στοιχεία και $x, y \in \mathbb{R}$. Με άλλα λόγια για κάθε ζεύγος τοπικών παρατηρησίμων X,Y εκτός της σχέσης $\langle XY \rangle_{\phi} = \langle X \rangle_{\phi_1} \langle Y \rangle_{\phi_2}$ ισχύει και $\langle e^{i(xX+yY)} \rangle = \langle e^{ixX} \rangle \langle e^{iyY} \rangle$, από όπου προκύπτει το ζητούμενο.

ζεύγος μετατιθέμενων C* ανεξάρτητων τοπικών αλγεβρών *δεν* ισχύει *για κάθε* κατάσταση του συστήματος. Κάτι τέτοιο θα σήμαινε ότι κάθε κατάσταση του συστήματος είναι παραγοντοποιήσιμη κατάσταση, γεγονός που δεν ισχύει διότι, όπως θα δούμε στην συνέχεια, υπάρχουν καταστάσεις των τοπικών κβαντικών συστημάτων που παραβιάζουν τις ανισότητες Bell. Δηλαδή, για κάποια ζεύγη καταστάσεων ϕ_1, ϕ_2 δύο μετατιθέμενων τοπικών αλγεβρών υπάρχει κοινή επέκταση ϕ' για την οποία ισχύει $\langle AB \rangle_{\phi'} \neq \langle A \rangle_{\phi_1} \langle B \rangle_{\phi_2}$ για κάποιο $A \in \mathcal{A}_1$ και για κάποιο $B \in \mathcal{A}_2$.

Μία αντίστοιχη συνθήκη με την (γ_1) για ένα ζεύγος W* αλγεβρών ονομάζεται *W* ανεξαρτησία με τη σημασία γινομένου* (W* independence in the product sense).

> Δύο μετατιθέμενες W* υποάλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ μίας W* άλγεβρας $\mathcal{R}$ είναι W* ανεξάρτητες με τη σημασία γινομένου αν για κάθε κανονική κατάσταση ϕ_1 στην $\mathcal{R}_1$ και κάθε κανονική κατάσταση ϕ_2 στην $\mathcal{R}_2$ υπάρχει κανονική κατάσταση ϕ στην $\mathcal{R}$ τέτοια ώστε $\phi(AB) = \phi_1(A)\phi_2(\mathrm{B})$ για κάθε $A \in \mathcal{R}_1$ και για κάθε $B \in \mathcal{R}_2$.

Σύμφωνα με τον Rédei (1998:179), η W* ανεξαρτησία με τη σημασία γινομένου είναι αυστηρώς ισχυρότερη από την W* ανεξαρτησία. Δηλαδή, η W* ανεξαρτησία με τη σημασία γινομένου δύο αλγεβρών συνεπάγεται ότι αυτές είναι W* ανεξάρτητες, ενώ το αντίστροφο γενικώς δεν ισχύει. Το τελευταίο προκύπτει από το γεγονός ότι υπάρχουν τοπικές άλγεβρες χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών του χωροχρόνου Minkowski στις οποίες οι ανισότητες Bell παραβιάζονται για όλες τις κανονικές καταστάσεις του συστήματος. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει κανονική κατάσταση για την οποία να ισχύει $\phi(AB) = \phi(A)\phi(\mathrm{B})$ για κάθε $A \in \mathcal{R}_1$ και $B \in \mathcal{R}_2$, όπου $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ οι αντίστοιχες τοπικές άλγεβρες των περιοχών αυτών.

7.2.3 Ανεξαρτησία συμβάντων και ανισότητες τύπου Bell στην τοπική κβαντική φυσική

Από την συζήτηση περί τοπικότητας στην τοπική κβαντική θεωρία δεν θα μπορούσε να λείψει η αναφορά στις παραβιάσεις των ανισοτήτων τύπου Bell. Οι ανισότητες τύπου Bell αποδεικνύονται μαθηματικά από υποθέσεις που διατυπώνονται στο πλαίσιο μοντέλων υποθετικών θεωριών και αφορούν την προσπάθεια εξήγησης συσχετίσεων μεταξύ παρατηρήσιμων που προβλέπονται στο πλαίσιο της θεωρίας. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε μία πειραματική διάταξη στην οποία ζεύγη σωματιδίων εκπέμπονται από μία πηγή έτσι ώστε κάθε ζεύγος να συγκροτεί ένα σύνθετο σύστημα. Στη συνέχεια τα σωματίδια του ζεύγους υποβάλλονται ξεχωριστά σε μετρήσεις σε χωρικά απομακρυσμένες περιοχές. Μία ανισότητα Α, της οικογένειας των *ανισοτήτων Bell* γενικώς αποδεικνύεται μαθηματικά από δύο σύνολα προκειμένων, τις πειραματικές προκείμενες $\Pi_{\pi\epsilon\iota\rho}$ και τις μεταφυσικές προκείμενες $\Pi_{\mu\epsilon\tau}$,

$$\Pi_{\pi\epsilon\iota\rho} \cup \Pi_{\mu\epsilon\tau} \vdash \mathrm{A}. \tag{7.2.2}$$

Το σύνολο των $\Pi_{\pi\epsilon\iota\rho}$ περιλαμβάνει προτάσεις που αφορούν μετρήσεις παρατηρήσιμων των δύο σωματιδίων και συσχετίσεις ανάμεσα σε πειραματικά αποτελέσματα. Έτσι, για παράδειγμα, υποθέτοντας ότι μετράμε στις δύο πτέρυγες του σύνθετου συστήματος δύο παρατηρήσιμα A, B με δυνατές τιμές $\{a_i\},\{b_j\}$ αντίστοιχα, μία πειραματική προκείμενη που αφορά σε συσχετίσεις που παρατηρούνται διατυπώνεται ως εξής:

$$\mathrm{P}(a_i \,\&\, b_j \,|\, A \,\&\, B) > \mathrm{P}(a_i \,|\, A)\,\mathrm{P}(b_j \,|\, B). \tag{7.2.3}$$

Το σύνολο των μεταφυσικών προκείμενων, $\Pi_{\mu\epsilon\tau}$, συνίσταται σε γενικές υποθέσεις για τον κόσμο που περιγράφει η θεωρία, οι οποίες δεν προκύπτουν επαγωγικά από το πείραμα ούτε μπορούν να ελεγχθούν άμεσα από αυτό. Για παράδειγμα, η υπόθεση της ύπαρξης λανθανουσών παραμέτρων που περιγράφουν την κατάσταση του συστήματος, αποδίδουν πιθανότητες στα παρατηρήσιμα και ικανοποιούν συγκεκριμένες στατιστικές σχέσεις (οι οποίες ερμηνεύονται ως συνθήκες

τοπικότητας, ντετερμινισμού κ.λπ.) ούτε προκύπτει ούτε μπορεί να ελεγχθεί άμεσα πειραματικά για το υποτιθέμενο φυσικό σύστημα.

Ωστόσο, οι μεταφυσικές προκείμενες μπορούν να ελεγχθούν έμμεσα στο πλαίσιο μίας πραγματικής φυσικής θεωρίας[17]. Συγκεκριμένα, αν μία φυσική θεωρία, όπως η κβαντική μηχανική, προβλέπει τις συσχετίσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο $\Pi_{\text{πειρ}}$ των πειραματικών προκείμενων και προβλέπει επίσης και παραβίαση της ανισότητας Α, για κάποιο σύστημα, τότε έπεται ότι η κβαντική μηχανική δεν είναι συμβατή με κάποια από τις μεταφυσικές υποθέσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο $\Pi_{\text{μετ}}$. Επιπλέον, αν τα πειραματικά αποτελέσματα επικυρώνουν τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής σε ικανοποιητικό βαθμό, τότε η σύζευξη των πειραματικών με τις μεταφυσικές προκείμενες βρίσκεται σε ασυμφωνία με το πείραμα. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι δεν υπάρχει θεωρία που να ικανοποιεί τις μεταφυσικές υποθέσεις που περιλαμβάνονται στο σύνολο $\Pi_{\text{μετ}}$ και να συμφωνεί με την κβαντική θεωρία ως προς τις παρατηρησιακές προβλέψεις: παραβίαση ανισότητας τύπου Bell, Α, και ικανοποίηση των πειραματικών προκείμενων $\Pi_{\text{πειρ}}$.

Για να δείξουμε την παραβίαση των ανισοτήτων τύπου Bell στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής θα πρέπει καταρχάς να μεταγράψουμε την ανισότητα σε φορμαλισμό C* ή von Neumann τοπικών αλγεβρών. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε την ανισότητα που αποδεικνύουν οι Clauser, Horne, Shimony και Holton (Clauser and Shimony 1978), η οποία έχει την μορφή

$$-1 \leq \mathrm{P}(a_1 b_1) - \mathrm{P}(a_2 b_2) + \mathrm{P}(a_2 b_1) + \mathrm{P}(a_1 b_2) - \mathrm{P}(a_1) - \mathrm{P}(b_1) \leq 0, \qquad (7.2.4)$$

όπου τα a_i με i=1,2 και b_j με j=1,2 αναπαριστάνουν φυσικά ενδεχόμενα-συμβάντα της μορφής "Το παρατηρήσιμο A_i λαμβάνει την τιμή a_i" (αντ. για τα b_j) που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα αντιστοίχως στις δύο πτέρυγες του σύνθετου συστήματος. Στην περίπτωση της τοπικής κβαντικής φυσικής, αντί να υποθέσουμε ένα σύνθετο σύστημα, θεωρούμε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου O_1 και O_2 και αναπαριστάνουμε τα συμβάντα $(A_1, a_1), (A_2, a_2)$ και $(B_1, b_1), (B_2, b_2)$ με

[17] Θα πρέπει να επισημάνουμε ότι εδώ η αντιδιαστολή είναι ανάμεσα σε πραγματικές φυσικές θεωρίες όπως οι θεωρίες της κλασικής και της κβαντικής μηχανικής και σε υποθετικές θεωρίες όπως είναι οι θεωρίες λανθανουσών παραμέτρων.

προβολικούς τελεστές $P_1, P_2 \in \mathcal{R}(O_1)$ και $Q_1, Q_2 \in \mathcal{R}(O_2)$. Λόγω του αξιώματος της τοπικής μεταθετότητας ισχύει ότι $[\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)] = 0$. Επιπλέον θεωρούμε ότι τα μεγέθη P_1, P_2 δεν είναι συμβατά, $\left[P_1, P_2\right] \neq 0$, και το ίδιο για τα Q_1, Q_2 $\left[Q_1, Q_2\right] \neq 0$. Με δεδομένο ότι η αναμενόμενη τιμή ενός προβολικού τελεστή, π.χ. του P_1, σε μία κανονική κατάσταση του συστήματος ω μας δίνει την πιθανότητα να λάβει χώρα το εν λόγω συμβάν όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση ω, $\mathrm{P}\left(\left(A_1, a_1\right)\right) = \omega(P_1)$, προκύπτει ότι για κάθε κανονική κατάσταση της άλγεβρας $\mathcal{R}(O_1) \vee \mathcal{R}(O_2) = \left(\mathcal{R}(O_1) \cup \mathcal{R}(O_2)\right)''$ η ανισότητα (7.2.4) γράφεται στην μορφή

$$0 \leq \omega(P_1) + \omega(Q_1) - \omega(P_1 Q_1) - \omega(P_1 Q_2) - \omega(P_2 Q_1) + \omega(P_2 Q_2) \leq 1. \qquad (7.2.5)$$

Με βάση τα $P_1, P_2 \in \mathcal{R}(O_1)$ και $Q_1, Q_2 \in \mathcal{R}(O_2)$ ορίζουμε δίτιμα παρατηρήσιμα $A_i = 2P_i - I$ και $B_j = 2Q_j - I$, για τα οποία ισχύει $-I \leq A_i, B_j \leq I$. Με αντικατάσταση στην (7.2.5) προκύπτει η ανισότητα τύπου Bell

$$\left|\omega\left(A_1(B_1 + B_2) + A_2(B_1 - B_2)\right)\right| \leq 2. \qquad (7.2.6)$$

Γενικά, για δύο μετατιθέμενες von Neumann άλγεβρες $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ ορίζουμε το *σύνολο Bell παρατηρήσιμων* $\mathcal{T}(\mathcal{A}, \mathcal{B})$ (Summers and Werner 1995),

$$\mathcal{T}(\mathcal{A}, \mathcal{B}) \equiv \left\{ \frac{1}{2}\left(A_1(B_1 + B_2) + A_2(B_1 - B_2)\right) \middle| A_i = A_i^* \in \mathcal{A},\ B_i = B_i^* \in \mathcal{B},\ -I \leq A_i, B_i \leq I \right\}$$

(7.2.7)

Ονομάζουμε *συσχέτιση Bell δύο von Neumann αλγεβρών* $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ *στην κατάσταση* ω την ποσότητα,

$$\beta(\omega, \mathcal{A}, \mathcal{B}) \equiv \sup\left\{\omega(\mathrm{T}) \middle|\ \mathrm{T} \in \mathcal{T}(\mathcal{A}, \mathcal{B})\right\} \qquad (7.2.8)$$

Θα λέμε ότι *για τις von Neumann άλγεβρες* $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ *ισχύει η ανισότητα Bell στην κατάσταση* ω αν και μόνο αν

$$\beta(\omega,\mathcal{A},\mathcal{B})=1 \tag{7.2.9}$$

Αν η (7.2.9) ισχύει *για κάθε κατάσταση* ω, τότε θα λέμε ότι *για τις von Neumann άλγεβρες* $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ *ισχύει η ανισότητα Bell*.

Επειδή η συσχέτιση Bell ορίζεται ως το ελάχιστο άνω φράγμα (supremum) της αναμενόμενης τιμής των παρατηρήσιμων Bell σε μία κατάσταση ω, αν ισχύει η ανισότητα Bell για τις $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ τότε για κάθε κατάσταση ω

$$\left|\omega(\mathrm{T})\right|\le 1,\quad \forall \mathrm{T}\in\mathcal{T}(\mathcal{A},\mathcal{B}).$$

Με άλλα λόγια η (7.2.6) ισχύει για κάθε τετράδα στοιχείων $\left(A_1,A_2,B_1,B_2\right)$ με $A_i\in\mathcal{A}$, $B_j\in\mathcal{B}$ και i,j=1,2. Επειδή $I\in\mathcal{T}(\mathcal{A},\mathcal{B})$ (για A_i=B_i=I) και $\omega(I)$=1 για κάθε κατάσταση ω, έχουμε $\beta(\omega,\mathcal{A},\mathcal{B})\ge 1$. Άρα η ανισότητα Bell είναι σε ισχύ όταν η συσχέτιση Bell λαμβάνει την ελάχιστη τιμή. Επιπλέον, αποδεικνύεται ότι η συσχέτιση Bell είναι και άνω φραγμένη (Landau 1987, Summers and Werner 1985, 1987). Συγκεκριμένα, για κάθε κατάσταση ω στην άλγεβρα $\mathcal{R}=\left(\mathcal{A}\cup\mathcal{B}\right)''$ ισχύει

$$\beta(\omega,\mathcal{A},\mathcal{B})\le\sqrt{2}. \tag{7.2.10}$$

Δηλαδή, για κάθε κατάσταση στην $\mathcal{R}$ ισχύει

$$\left|\omega(\mathrm{T})\right|\le\sqrt{2},\quad \forall \mathrm{T}\in\mathcal{T}(\mathcal{A},\mathcal{B}).$$

Έτσι, θα λέμε ότι *η ανισότητα Bell παραβιάζεται μεγιστικά στις μετατιθέμενες von Neumann άλγεβρες* $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ *στην κατάσταση* ω αν ισχύει

$$\beta(\omega,\mathcal{A},\mathcal{B})=\sqrt{2}.$$

Μάλιστα με την προϋπόθεση ότι για τις δύο μετατιθέμενες von Neumann άλγεβρες $\mathcal{A}$, $\mathcal{B}$ ισχύει η ιδιότητα Schlieder (ισοδύναμα, οι άλγεβρες είναι C* ανεξάρτητες), αποδεικνύεται ότι υπάρχει καθαρή κατάσταση ω στην οποία παραβιάζονται μεγιστικά οι ανισότητες Bell και επίσης υπάρχει παρατηρήσιμο Bell $\mathrm{T} \in \mathcal{T}(\mathcal{A},\mathcal{B})$ τέτοιο ώστε $|\omega(T)| = \sqrt{2}$ (Landau 1987).

Όπως αναφέραμε στην υποενότητα 7.2.2, η ύπαρξη καταστάσεων του τοπικού κβαντικού συστήματος στις οποίες παραβιάζεται η ανισότητα Bell σε δύο τοπικές άλγεβρες υποδεικνύει ότι δεν ισχύει η ακόλουθη συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων: *κάθε κοινή επέκταση των τοπικών καταστάσεων του συστήματος σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές είναι παραγοντοποιήσιμη.* Με άλλα λόγια, τα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του τοπικού κβαντικού συστήματος δεν είναι στατιστικώς ανεξάρτητα σε κάθε κατάσταση του συστήματος. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι ικανή συνθήκη για να μην παραβιάζεται η ανισότητα Bell σε μία κατάσταση ω της άλγεβρας $\mathcal{R} = (\mathcal{A} \cup \mathcal{B})''$ που παράγεται από τις μετατιθέμενες άλγεβρες $\mathcal{A},\mathcal{B}$ (δηλαδή, $\beta(\omega,\mathcal{A},\mathcal{B}) = 1$) είναι η ω να αποτελεί κυρτό συνδυασμό γινομένων καταστάσεων η_i , ξ_i των αλγεβρών $\mathcal{A},\mathcal{B}$ αντίστοιχα:

$$\omega(AB) = \sum_i \lambda_i \eta_i(A)\xi_i(B), \quad , 0 \le \lambda_i \le 1, \sum_i \lambda_i = 1 \text{ για } A \in \mathcal{A}\ ,\ B \in \mathcal{B}. \qquad (7.2.11)$$

Άρα, αν για μία κατάσταση ω παραβιάζεται η ανισότητα Bell, τότε η κατάσταση αυτή δεν είναι παραγοντοποιήσιμη.

Οι Halvorson και Clifton (2000) έχουν αποδείξει ότι σε μία άλγεβρα που παράγεται από δύο μεταθετικές von Neumann άλγεβρες $\mathcal{A},\mathcal{B}$ που είναι C* ανεξάρτητες και απείρου τύπου, οι περισσότερες κανονικές καταστάσεις παραβιάζουν τις ανισότητες Bell. Πιο συγκεκριμένα απέδειξαν ότι υπάρχει ένα ανοικτό πυκνό υποσύνολο του

$$\mathcal{H}^{(1)} = \{\psi \in \mathcal{H} \mid \ \|\psi\| = 1\}$$

τα στοιχεία το οποίου ορίζουν καταστάσεις που παραβιάζουν τις ανισότητες Bell στην άλγεβρα $\{\mathcal{A} \cup \mathcal{B}\}''$. Άρα το σύνολο των κανονικών καταστάσεων στην $\{\mathcal{A} \cup \mathcal{B}\}''$ για τις οποίες παραβιάζεται η ανισότητα Bell στις $\mathcal{A}, \mathcal{B}$ είναι πυκνό ως προς τη νόρμα στον χώρο των κανονικών καταστάσεων της $\{\mathcal{A} \cup \mathcal{B}\}''$. Στην περίπτωση των τοπικών κβαντικών συστημάτων αποδεικνύεται ότι αν ισχύουν τα συνήθη αιτήματα της θεωρίας (ισοτονία, ασθενής προσθετικότητα, τοπική μεταθετότητα, σχετικιστικό συναλλοίωτο και συνθήκη φάσματος) και η καθολική von Neumann άλγεβρα έχει ένα κυκλικό διάνυσμα, τότε οι άλγεβρες των πεπερασμένων περιοχών είναι απείρου τύπου (Horuzhy 1990, Πρτ. 1.3.9). Επιπλέον, οι άλγεβρες των χωροειδώς απομακρυσμένων διπλών κώνων καθώς και των συμπληρωματικών σφηνοειδών περιοχών[18] είναι C* ανεξάρτητες. Δηλαδή, όλες οι πεπερασμένες περιοχές που μπορούν να εγκλειστούν σε διπλούς κώνους ικανοποιούν αμφότερες τις προϋποθέσεις της πρότασης για τις άλγεβρες $\mathcal{A}, \mathcal{B}$. Επίσης, οι φυσικώς αποδεκτές καθολικές καταστάσεις του συστήματος είναι τοπικά κανονικές καταστάσεις. Επομένως, συμπεραίνουμε ότι οι ανισότητες Bell για διπλούς κώνους (ή περιοχές που εγκλείονται σε διπλούς κώνους) παραβιάζεται για τις περισσότερες φυσικώς αποδεκτές καθολικές καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος.

Μάλιστα, αποδεικνύεται (Summers and Werner 1988) ότι στην περίπτωση των εφαπτόμενων σφηνοειδών περιοχών ή των εφαπτόμενων διπλών κώνων, για τοπικές κβαντικές θεωρίες που προκύπτουν από μία μεγάλη κλάση πεδίων Wightman, η οποία περιλαμβάνει και τα ελεύθερα πεδία, υπάρχει μέγιστη παραβίαση των ανισοτήτων Bell σε *κάθε* κανονική κατάσταση στην άλγεβρα που παράγεται από τις τοπικές άλγεβρες των περιοχών αυτών και κατά συνέπεια σε κάθε φυσικώς αποδεκτή κατάσταση. Δηλαδή, αν O_1 και O_2 δύο εφαπτόμενοι διπλοί κώνοι (ή σφηνοειδείς περιοχές) τότε για κάθε φυσικώς αποδεκτή κατάσταση του δικτύου τοπικών αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}$, ισχύει $\beta(\omega, \mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)) = \sqrt{2}$. Από τα παραπάνω προκύπτει το συμπέρασμα ότι η W* ανεξαρτησία με την έννοια του γινομένου δεν μπορεί να

[18] Αν O μία περιοχή του χωροχρόνου Minkowski, τότε το *αιτιακό συμπλήρωμα* (causal complement) της O είναι το σύνολο των σημείων του χωροχρόνου που είναι σε χωροειδή απομάκρυνση από κάθε σημείο της O και το συμβολίζουμε με O'. Το αιτιακό συμπλήρωμα μίας σφηνοειδούς περιοχής W είναι επίσης σφηνοειδής περιοχή. Το ζεύγος (W, W') είναι ένα ζεύγος συμπληρωματικών σφηνοειδών περιοχών.

απαιτηθεί ως συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων που να ισχύει για οποιαδήποτε θεωρία της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Η μέγιστη παραβίαση των ανισοτήτων Bell στην κατάσταση του κενού ω_0 για θεωρίες πεδίων Bose και Fermi σε συμπληρωματικές σφηνοειδείς περιοχές είναι ένα από τα πρώτα αποτελέσματα που συναντά κανείς στην βιβλιογραφία της τοπικής κβαντικής φυσικής (Summers and Werner 1985). Σε αυτό το άρθρο, υποστηρίζεται επίσης η πρακτική αδυναμία να ανιχνεύσουμε συσχετίσεις που προβλέπονται από τις ανισότητες Bell στην κατάσταση του κενού. Με βάση μία πρόταση που απέδειξε ο Fredenhagen (1985b), προκύπτει ότι σε μία τοπική κβαντική θεωρία στην οποία το φάσμα της χρονικής συνιστώσας του γεννήτορα H των μεταθέσεων (ο οποίος αναπαριστάνει την ενέργεια του συστήματος που περιγράφει η θεωρία) έχει τη μορφή

$$spH \subset \{0\} \cup [m, \infty) \text{ , } m > 0 \text{ ,}$$

ισχύει

$$\beta(\omega_0, \mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)) \leq 1 + 2e^{-m\tau} \qquad (7.2.12)$$

για τη συσχέτιση Bell των τοπικών αλγεβρών δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών O_1, O_2, όπου m η μάζα του ελαφρύτερου σωματιδίου της θεωρίας και τ μία παράμετρος η οποία εκφράζει την μέγιστη απόσταση στην οποία μπορούμε να μεταθέσουμε χρονικά τη μία περιοχή, π.χ. την O_2, ώστε να παραμείνει σε χωροειδή απομάκρυνση από την O_1.

Η (7.2.12) μας λέει ότι για την κατάσταση του κενού το άνω φράγμα της συσχέτισης Bell εξαρτάται από την γεωμετρία των περιοχών που εξετάζουμε. Επίσης, αν $\tau \to \infty$ (δηλαδή, όταν η απόσταση των δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών τείνει στο άπειρο), η ανισότητα Bell τείνει να ισχύει στην κατάσταση του κενού. Τέλος, από την (7.2.12) προκύπτει ότι αν οι περιοχές O_1, O_2 απέχουν απόσταση τ μεγαλύτερη από την απόσταση μερικών μηκών Compton του ελαφρύτερου σωματιδίου της θεωρίας, $\lambda_c = 1/m$ ($\hbar$=c=1), τότε η συσχέτιση Bell είναι πρακτικά μη παρατηρήσιμη. Σημειώνουμε επίσης ότι και στις περιπτώσεις που η θεωρία δεν έχει σωματίδια ελάχιστης μάζας, τον ρόλο της m τον παίζει το

ενεργειακό κατώφλι του ανιχνευτή και το αποτέλεσμα είναι ανάλογο με αυτό που παρουσιάσαμε.

Αν συγκρίνουμε την παραβίαση των ανισοτήτων τύπου Bell στη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική με τις αντίστοιχες παραβιάσεις στην τοπική κβαντική φυσική μπορούμε, καταρχάς, να συναγάγουμε μία βασική ομοιότητα σε σχέση με την απόρριψη κάποιων μεταφυσικών αρχών που διατυπώνονται στο πλαίσιο υποθετικών θεωριών. Οι τύποι θεωριών που ενσωματώνουν αυτές τις αρχές σύμφωνα με την (7.2.2) οδηγούν στις ανισότητες Bell και δεν συμφωνούν με τις προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας. Αυτό ισχύει είτε στο πλαίσιο της μη σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής είτε, όπως είδαμε, στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Όμως, σε αντίθεση με τη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική που *δεν* είναι σημασιολογικά τοπική θεωρία και στο πλαίσιό της τα συμπεράσματα για την τοπικότητα προκύπτουν μόνον έμμεσα με τη σύγκριση με υποθετικές θεωρίες (στις οποίες κάποια εκ των μεταφυσικών προκείμενων θεωρείται ότι εκφράζει την τοπική ανεξαρτησία), στην τοπική κβαντική φυσική μπορούμε να διατυπώσουμε συγκεκριμένες συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας. Είδαμε λοιπόν ότι υπάρχουν συνθήκες ανεξαρτησίας συμβάντων που δεν ισχύουν στην τοπική κβαντική φυσική και αυτό αποτελεί συνέπεια της παραβίασης των ανισοτήτων Bell. Συγκεκριμένα, διαπιστώσαμε ότι δεν είναι παραγοντοποιήσιμη κάθε κοινή επέκταση των τοπικών καταστάσεων του συστήματος σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές και ακόμα ότι οι τοπικές von Neumann άλγεβρες δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών δεν είναι W* ανεξάρτητες με την έννοια του γινομένου.

Επιπλέον, λόγω του τοπικού χαρακτήρα της θεωρίας είναι δυνατόν να μελετήσουμε τις παραβιάσεις των ανισοτήτων Bell όχι μόνο σε σχέση με τις καταστάσεις του κβαντικού συστήματος (ποιες και πόσες είναι οι καταστάσεις του συστήματος που οδηγούν σε παραβίαση των ανισοτήτων Bell), αλλά και σε σχέση με τις περιοχές του χωροχρόνου. Έτσι, αναφερθήκαμε στην πρόβλεψη μεγιστικών συσχετίσεων Bell για συγκεκριμένους τύπους περιοχών του χωροχρόνου Minkowski και στη μεταβολή της μέγιστης τιμής της συσχέτισης Bell στην κατάσταση του κενού ως συνάρτηση της απόστασης δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών.

7.2.4 Επιχείρημα EPR και τοπική κβαντική φυσική

Στην προηγούμενη υποενότητα, θεωρήσαμε ως δεδομένο το αίτημα της σύγκρισης των προβλέψεων της κβαντικής μηχανικής με τις στατιστικές προβλέψεις υποθετικών θεωριών. Πώς όμως προκύπτει αυτό το αίτημα; Έχουμε επαναλάβει πολλές φορές ότι στη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική δεν έχει σαφές νόημα η συζήτηση περί τοπικότητας, διότι δεν έχει νόημα να μιλάμε για τοπικά παρατηρήσιμα στο πλαίσιο αυτής της θεωρίας. Ωστόσο, αυτό το πρόβλημα δεν επιλύεται κατ' ανάγκη με την επίκληση θεωριών λανθανουσών παραμέτρων. Επιλύεται επίσης στο πλαίσιο των κβαντικών θεωριών πεδίου και της τοπικής κβαντικής φυσικής. Γιατί λοιπόν καταφεύγουμε σε υποθετικές θεωρίες και με ποιον τρόπο συναρτάται αυτή η κίνηση με τη συζήτηση για την τοπικότητα; Η απάντηση σε αυτά τα ερωτήματα έχει να κάνει με το δίλημμα που προκύπτει από το επιχείρημα των Einstein, Podolsky και Rosen (1935): *είτε δεν ισχύει η τοπικότητα είτε η κβαντική μηχανική δεν είναι πλήρης θεωρία.* Αν κάποιος δεχθεί την τοπικότητα, τότε η κβαντική μηχανική δεν είναι πλήρης θεωρία. Αυτό οδηγεί στο αίτημα διατύπωσης θεωριών που θα είναι *πλήρεις* και *τοπικές* και θα έχουν τουλάχιστον την *εμπειρική επάρκεια* της κβαντικής μηχανικής. Σε αυτή την κατεύθυνση κινούνται οι θεωρίες λανθανουσών παραμέτρων, στο πλαίσιο των οποίων διατυπώνονται συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας που οδηγούν στις ανισότητες τύπου Bell. Το ζητούμενο αυτής της υποενότητας είναι να εξετάσουμε κατά πόσον το επιχείρημα EPR , και κατά συνέπεια το δίλημμα που προκύπτει από αυτό, διατηρεί την ισχύ του στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Το επιχείρημα EPR συγκροτείται με βάση τρεις προτάσεις και αποτελείται από δύο προκείμενες και το συμπέρασμα. Οι προτάσεις αυτές για να γίνουν κατανοητές απαιτείται ένας ορισμός και ένα κριτήριο. Το κριτήριο μας λέει πότε ένα φυσικό μέγεθος αντιστοιχεί σε κάποιο στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας:

> Αν χωρίς να διαταραχθεί καθ' οιονδήποτε τρόπο ένα σύστημα μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα (δηλαδή, με πιθανότητα ίση με την μονάδα) την τιμή ενός φυσικού μεγέθους, τότε υπάρχει ένα στοιχείο φυσικής πραγματικότητας που αντιστοιχεί σε αυτό το μέγεθος.

Ο δε ορισμός μάς λέει ποιες φυσικές θεωρίες θα πρέπει να θεωρούνται πλήρεις:

> Μία θεωρία είναι πλήρης αν κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας έχει το αντίστοιχο του στην θεωρία.

Οι δύο από τις προτάσεις που συγκροτούν το επιχείρημα αφορούν την κβαντική μηχανική. Συγκεκριμένα, η πρώτη αναφέρεται σε μία ιδιότητα που προκύπτει από τη μαθηματική αναπαράσταση φυσικών μεγεθών από μη μετατιθέμενους τελεστές:

> (ΜΚ) *Μη Καθορισιμότητα Τιμών Μη Μετατιθέμενων Μεγεθών*
>
> Αν δύο τελεστές που αντιστοιχούν σε δύο φυσικά μεγέθη δεν μετατίθενται τότε δεν υπάρχει κατάσταση του συστήματος στην οποία να έχουν αμφότερα καθορισμένες τιμές.

Η δεύτερη πρόταση αφορά στην πληρότητα της κβαντικής μηχανικής

> (ΜΠ) *Μη πλήρης περιγραφή της πραγματικότητας από την κυματοσυνάρτηση*
>
> Η κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι πλήρης.

Τέλος, η τρίτη πρόταση εκφράζει την απουσία ακαριαίας δράσης από απόσταση:

> (ΤΟΠ) *Τοπικότητα*
>
> Καμία πραγματική αλλαγή δεν μπορεί να λάβει χώρα σε ένα σύστημα ως αποτέλεσμα οποιασδήποτε επέμβασης την ίδια χρονική στιγμή σε ένα χωρικά απομακρυσμένο σύστημα.

Η λογική δομή του επιχειρήματος EPR σύμφωνα με την ανασυγκρότηση του Earman (1995:347) έχει ως εξής:

$$\begin{array}{l} \sim(\text{ΜΚ}) \rightarrow (\text{ΜΠ}) \\ \underline{(\text{ΤΟΠ}) \rightarrow \sim(\text{ΜΚ})} \\ \therefore (\text{ΤΟΠ}) \rightarrow (\text{ΜΠ}). \end{array} \qquad (7.2.13)$$

Το συμπέρασμα του επιχειρήματος συνιστά το δίλημμα ανάμεσα στη μη πληρότητα της κβαντικής μηχανικής και τη μη τοπικότητα στο οποίο ήδη αναφερθήκαμε και η αλήθεια του, δεδομένης της εγκυρότητας του επιχειρήματος, προκύπτει από την αλήθεια των προκείμενων. Η κβαντική μηχανική υποστηρίζει ότι οι δύο προκείμενες είναι αληθείς, άρα και το συμπέρασμα. Σε ό,τι μας αφορά θα παρουσιάσουμε με ποιον τρόπο υποστηρίζονται *αντίστοιχες* προκείμενες στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Καταρχάς θεωρούμε μία τοπική κβαντική θεωρία σε χωρόχρονο Minkowski

$$\left\langle \mathbb{R}^4, \eta_{\mu\nu}, O \to \mathcal{A}(O), O \to \Sigma(O), G, g \mapsto a_g \right\rangle$$

που ικανοποιεί τα βασικά αιτήματα. Έστω μία μη αναγώγιμη αναπαράσταση $(\mathcal{H}, \pi)$ του δικτύου των τοπικών C* αλγεβρών. Λόγω της μη αναγωγιμότητας της αναπαράστασης κάθε διανυσματική κατάσταση ω της σχεδόν τοπικής άλγεβρας $\mathcal{A}$ που ορίζεται από ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ με την σχέση $\omega(A) = (\psi, \pi(A)\psi)$ για κάθε $A \in \mathcal{A}$ αναπαριστάνει μία καθαρή κατάσταση του συστήματος (Emch 1971:88). Έτσι, στο φορμαλισμό της μη σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής ένα βασικό αίτημα είναι ότι οι καθαρές καταστάσεις αναπαριστάνονται από διανύσματα του χώρου Hilbert, ενώ στον αλγεβρικό φορμαλισμό της τοπικής κβαντικής φυσικής τα διανύσματα του χώρου Hilbert αναπαριστάνουν καθαρές καταστάσεις μόνο εάν η αναπαράσταση είναι μη αναγώγιμη. Επίσης, η κυματοσυνάρτηση στην οποία αναφέρονται η πρόταση (ΜΠ) αποτελεί την αναπαράσταση ενός διανύσματος του χώρου Hilbert του συστήματος στον χώρο των τετραγωνικά ολοκληρώσιμων μιγαδικών συναρτήσεων στον $\mathbb{R}^n$. Με βάση αυτές τις παρατηρήσεις η πρόταση (ΜΠ) θα πρέπει να τροποποιηθεί ως εξής:

(ΜΠ1) *Μη πλήρης περιγραφή της πραγματικότητας από διανυσματικές καταστάσεις*

Η περιγραφή της πραγματικότητας από τις διανυσματικές καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος σε μία μη αναγώγιμη αναπαράσταση δεν είναι πλήρης.

Επιπλέον, στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής θα πρέπει να τροποποιήσουμε και την πρόταση (ΤΟΠ) ώστε να μην αφορά μόνο στην ακαριαία δράση από απόσταση αλλά και την επίδραση σε ένα φυσικό σύστημα από μεταβολές που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδή απόσταση από αυτό.

(ΤΟΠ1) *Τοπικότητα*

Καμία πραγματική αλλαγή δεν μπορεί να λάβει χώρα σε ένα σύστημα ως αποτέλεσμα οποιασδήποτε επέμβασης σε ένα σύστημα που βρίσκεται σε χωροειδή απομάκρυνση από αυτό.

Έτσι, οι προκείμενες που θα πρέπει να υποστηρίξουμε στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής είναι:

$$\sim (\text{ΜΚ}) \rightarrow (\text{ΜΠ1}) \qquad (7.2.14)$$

$$(\text{ΤΟΠ1}) \rightarrow \sim (\text{ΜΚ}) \qquad (7.2.15)$$

Το επιχείρημα για την υποστήριξη της (7.2.14) είναι αντίστοιχο με αυτό που διατυπώνεται στην μη σχετικιστική κβαντική μηχανική. Συγκεκριμένα, αν δεν ισχύει η (ΜΚ), τότε για δύο μη μετατιθέμενους τελεστές υπάρχει φυσική κατάσταση στην οποία τα μεγέθη που αναπαριστάνονται από τους τελεστές έχουν καθορισμένη τιμή. Σύμφωνα με το κριτήριο πραγματικότητας αυτά τα φυσικά μεγέθη είναι στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας. Όμως η διανυσματική κατάσταση που ορίζεται από οποιοδήποτε διάνυσμα του χώρου Hilbert μίας μη αναγώγιμης αναπαράστασης δεν μπορεί να αποδώσει καθορισμένες τιμές σε μη μετατιθέμενους τελεστές. Άρα, αυτή η καθαρή κατάσταση δεν μπορεί να περιγράψει το σύνολο των στοιχείων της φυσικής πραγματικότητας - δηλαδή, (ΜΠ1).

Για την υποστήριξη της δεύτερης προκείμενης (7.2.15) του επιχειρήματος, θα πρέπει να θεωρήσουμε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές του χωροχρόνου O_1, O_2 . Λόγω της (ΤΟΠ1) τα στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας στην μία περιοχή, π.χ. στην O_2, δεν επηρεάζονται από μεταβολές που λαμβάνουν χώρα στην O_1. Άρα η εκτέλεση μετρήσεων στην περιοχή O_1 δεν επηρεάζει στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας στην O_2. Συνεπώς, αν δείξουμε ότι μετρώντας διαδοχικά δύο

κατάλληλα παρατηρήσιμα στην περιοχή O_1 μπορούμε να συνάγουμε με βεβαιότητα την αναμενόμενη τιμή για δύο μη μετατιθέμενα παρατηρήσιμα στην περιοχή O_2, τότε τα παρατηρήσιμα στην O_2 αποτελούν στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας του συστήματος στην O_2. Άρα, η (ΜΚ) δεν είναι αληθής.

Οι Redhead και Wagner (1998), για να υποστηρίξουν την (7.2.15), αποδεικνύουν μία πρόταση που ονομάζουν *ριζικό θεώρημα* (root theorem). Στην διατύπωση του θεωρήματος αναφέρονται σε ένα δίκτυο von Neumann αλγεβρών που ικανοποιούν τα συνήθη αξιώματα της τοπικής κβαντικής φυσικής. Για να συνδέσουμε αυτή την προσέγγιση με όσα αναφέραμε προηγούμενα, αρκεί να θεωρήσουμε τη μη αναγώγιμη αναπαράσταση $\left(\mathcal{H}_{\omega_0}, \pi_{\omega_0}\right)$ του δικτύου C* αλγεβρών στην κατάσταση του κενού ω_0. Σύμφωνα με το ριζικό θεώρημα, για δύο χωροειδώς απομακρυσμένες ανοικτές και φραγμένες περιοχές O_1 και O_2, κάθε $A \in \mathcal{R}(O_2)$ με $A^* = A$ και κάθε μοναδιαίο διάνυσμα ψ, αν $\left(\psi, A\psi\right) = \mathrm{K}$, τότε για κάθε $\varepsilon > 0$ υπάρχουν προβολικοί τελεστές $P_1, P_1^{\#}$ στην $\mathcal{R}(O_1)$ τέτοιοι ώστε:

$$\left(\Omega, AP_1\Omega\right) > \left(\mathrm{K} - \varepsilon\right)\left(\Omega, P_1\Omega\right) \tag{7.2.16}$$

και

$$\left(\Omega, AP_1^{\#}\Omega\right) < \left(\mathrm{K} + \varepsilon\right)\left(\Omega, P_1^{\#}\Omega\right), \tag{7.2.17}$$

όπου Ω είναι το διάνυσμα της κατάστασης του κενού. Οι ανισοτικές σχέσεις (7.2.16), (7.2.17) του ριζικού θεωρήματος μπορούν να γραφούν στη μορφή

$$\frac{\left(\Omega, AP_1\Omega\right)}{\left(\Omega, P_1\Omega\right)} > \left(\psi, A\psi\right) - \varepsilon \quad , \quad \frac{\left(\Omega, AP_1^{\#}\Omega\right)}{\left(\Omega, P_1^{\#}\Omega\right)} < \left(\psi, A\psi\right) + \varepsilon. \tag{7.2.18}$$

Αν το σύστημα βρίσκεται στη διανυσματική κατάσταση που ορίζεται από ένα μοναδιαίο διάνυσμα $\phi \in \mathcal{H}$, τότε η αναμενόμενη τιμή ενός τοπικού παρατηρήσιμου A μετά τη μέτρηση με επιλογή αποτελέσματος σε μία περιοχή O_1 ενός άλλου παρατηρήσιμου, το οποίο αναπαριστάνεται από έναν τοπικό προβολικό τελεστή

$P \in \mathcal{R}(O_1)$, είναι, σύμφωνα με τον κανόνα Lüders, $\frac{\langle P\phi, A\,P\phi\rangle}{\langle P\phi, P\phi\rangle}$. Με βάση αυτή την παρατήρηση οι σχέσεις (7.2.18) μας λένε ότι *η αναμενόμενη τιμή οποιουδήποτε τοπικού παρατηρήσιμου A σε μία περιοχή O_2 και σε μία διανυσματική κατάσταση που ορίζεται από ένα μοναδιαίο διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$, μπορεί να προσεγγισθεί αυθαίρετα κοντά από ανώτερες (αντ. από κατώτερες) τιμές με τη μέτρηση με επιλογή αποτελέσματος ενός τοπικού παρατηρήσιμου σε χωροειδή απομάκρυνση από την O_2, στην κατάσταση Ω του κενού*[19].

Το επόμενο βήμα για να υποστηριχθεί η δεύτερη προκείμενη του επιχειρήματος EPR, (7.2.15), είναι να θεωρήσουμε έναν προβολικό τελεστή $P_2 \in \mathcal{R}(O_2)$ και μία διανυσματική κατάσταση που ορίζεται από ένα μοναδιαίο διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ τέτοια ώστε $(\psi, P_2\psi) = 1$ και να εφαρμόσουμε το ριζικό θεώρημα για $A = P_2$ και $K = (\psi, P_2\psi) = 1$. Έτσι, από την (7.2.16) προκύπτει

$$1 \geq \frac{(\Omega, P_1P_2\Omega)}{(\Omega, P_1\Omega)} > (1-\varepsilon) \qquad (7.2.19)$$

Δηλαδή, *μετρώντας ένα κατάλληλα επιλεγμένο παρατηρήσιμο στην περιοχή O_1 που η τιμή του αναπαριστάνεται από τον προβολικό τελεστή τον P_1 συμπεραίνουμε, με πιθανότητα που προσεγγίζει την βεβαιότητα οσοδήποτε κοντά, την τιμή ενός συγκεκριμένου παρατηρήσιμου που αναπαριστάνεται από τον προβολικό τελεστή τον P_2 στην περιοχή O_2.* Αυτό το συμπέρασμα είναι επαρκές για να διατυπωθεί το επιχείρημα EPR στην τοπική κβαντική φυσική για την κατάσταση του κενού. Διότι, μπορούμε να επαναλάβουμε τη μέτρηση στην περιοχή O_1 ενός δεύτερου κατάλληλα επιλεγμένου προβολικού τελεστή P_3 και να συμπεράνουμε με προσεγγιστική βεβαιότητα την τιμή ενός άλλου παρατηρήσιμου που αναπαριστάνεται από προβολικό τελεστή P_4 στην περιοχή O_2 για τον οποίο ισχύει $[P_2, P_4] \neq 0$. Επειδή, λόγω της (ΤΟΠ1), η δεύτερη

[19] Επειδή γενικά $P_1 \neq P_1^{\#}$ το θεώρημα δεν υποστηρίζει ότι η αναμενόμενη τιμή του A στην κατάσταση ψ μπορεί να προσεγγισθεί οσοδήποτε κοντά. Για να υποστηρίξουμε κάτι τέτοιο πρέπει να ισχύει

$$\left|\frac{(\Omega, P_1AP_1\Omega)}{(\Omega, P_1\Omega)} - (\psi, A\psi)\right| < \varepsilon \quad \forall \varepsilon > 0.$$

μέτρηση O_1 δεν επηρεάζει την αναμενόμενη τιμή των παρατηρήσιμων στην O_2, συμπεραίνουμε ότι δύο τοπικά παρατηρήσιμα στην O_2, τα οποία αναπαριστάνονται από μη μετατιθέμενα αυτοσυζυγή στοιχεία, έχουν μαζί καθορισμένες τιμές.

Το συμπέρασμα από την ανασυγκρότηση του επιχειρήματος EPR στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής είναι ότι το δίλημμα μη τοπικότητα ή μη πληρότητα της θεωρίας ισχύει όπως και στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής. Επιπλέον, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η τοπικότητα όπως διατυπώνεται στην (ΤΟΠ1) δεν μπορεί να εκφραστεί από κάποια συνθήκη ανεξαρτησίας συμβάντων. Ουσιαστικά η (ΤΟΠ1) εκφράζει την ανεξαρτησία των στοιχείων της φυσικής πραγματικότητας από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδή απομάκρυνση, δηλαδή αποτελεί συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπικές διεργασίες.

7.2.5 Συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία

Ο όρος "διεργασία" (operation) χρησιμοποιήθηκε για πρώτη φορά από τους Haag και Kastler (1964) στο πλαίσιο της αλγεβρικής προσέγγισης στην κβαντική θεωρία πεδίων για να εκφράσει την επίδραση μίας φυσικής διάταξης για περιορισμένο χρονικό διάστημα στα συστήματα μίας συλλογής – επίδραση που προκαλεί τη μεταβολή της αρχικής κατάστασης της συλλογής σε μία τελική κατάσταση. Πέρα όμως από την φυσική αλληλεπίδραση ανάμεσα στα συστήματα της συλλογής και τη φυσική διάταξη, οι Haag και Kastler περιέλαβαν στην έννοια της διεργασίας και μη φυσικές διαδικασίες επιλογής ενός ορισμένου μέρους της συλλογής που προκύπτει μετά το πέρας της φυσικής αλληλεπίδρασης. Αυτές οι διαδικασίες επιλογής έχουν να κάνουν με το υποκειμενικό ενδιαφέρον του πειραματιστή η τελική κατάσταση της συλλογής να περιγράφει συστήματα που έχουν μία ορισμένη φυσική ιδιότητα, η οποία εν γένει προκύπτει από τη φυσική αλληλεπίδραση μόνο για ένα μέρος της αρχικής συλλογής. Έτσι, μπορούμε να διακρίνουμε ανάμεσα σε αμιγώς φυσικές διεργασίες οι οποίες εκφράζουν τη φυσική αλληλεπίδραση μίας συλλογής συστημάτων με ένα διαφορετικό φυσικό σύστημα και σε διεργασίες που συνίστανται από φυσικές διεργασίες ακολουθούμενες από νοητικές διεργασίες επιλογής μέρους της συλλογής που προκύπτει από τη φυσική διεργασία. Ακολουθώντας τους Clifton

και Halvorson (2001) θα ονομάσουμε τις μεν πρώτες *μη επιλεκτικές διεργασίες* (non-selective operations) και τις δεύτερες *επιλεκτικές διεργασίες* (selective operations).

Από μαθηματική σκοπιά οι διεργασίες αναπαριστάνονται από απεικονίσεις του δυϊκού χώρου μίας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ στον εαυτό του, οι οποίες απεικονίζουν γραμμικά θετικά συναρτησιακά σε γραμμικά θετικά συναρτησιακά χωρίς να τους αυξάνουν τη νόρμα. Δηλαδή, η απεικόνιση

$$T^*: \mathcal{A}^* \to \mathcal{A}^*, \quad \omega \mapsto T^*\omega \tag{7.2.20}$$

αναπαριστάνει μία διεργασία εφόσον ισχύουν τα παρακάτω:

- αν $\omega(A^*A) \geq 0,\ A \in \mathcal{A}$ τότε $(T^*\omega)(A^*A) \geq 0,\ A \in \mathcal{A}$
- $\|\omega\| \geq \|T^*\omega\|$.

Οι μαθηματικές καταστάσεις της C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ είναι κανονικοποιημένα γραμμικά θετικά συναρτησιακά. Επομένως, η εικόνα μίας κατάστασης ω από μία διεργασία δεν αποτελεί γενικά μαθηματική κατάσταση του συστήματος, διότι $\|T^*\omega\| \leq 1$. Ο θετικός αριθμός $\|T^*\omega\|$ εκφράζει το κλάσμα των συστημάτων της αρχικής συλλογής που λαμβάνουμε μετά το πέρας της διεργασίας και συνήθως ερμηνεύεται ως *πιθανότητα μετάβασης* (transition probability). Έτσι, σε μία επιλεκτική διεργασία, όπου το πλήθος των συστημάτων της συλλογής πριν και μετά την διεργασία παραμένει το ίδιο ισχύει ότι $\|T^*\omega\| = 1$. Δηλαδή, η εικόνα μίας κατάστασης της $\mathcal{A}$ με μία μη επιλεκτική διεργασία είναι κατάσταση της $\mathcal{A}$. Αντίθετα, σε μία μη επιλεκτική διεργασία όπου το πλήθος των συστημάτων της συλλογής μετά το πέρας της διεργασίας μειώνεται ισχύει $\|T^*\omega\| < 1$. Αν $\|T^*\omega\| \neq 0$ (δηλαδή, η τελική στατιστική συλλογή περιλαμβάνει κάποια από τα συστήματα της αρχικής συλλογής), τότε η κατάσταση της άλγεβρας $\mathcal{A}$ που την περιγράφει είναι η $\dfrac{T^*\omega}{\|T^*\omega\|}$.

Μία διεργασία μπορεί να προκύψει από μία απεικόνιση T στην C* άλγεβρα $\mathcal{A}$, $T: \mathcal{A} \to \mathcal{A}$. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι η T είναι μία γραμμική,

$$T(\lambda A+\mu A)=\lambda T(A)+\mu T(B),\ \ \lambda,\mu\in\mathbb{C},\ \ A,B\in\mathcal{A}\,, \tag{7.2.21}$$

θετική απεικόνιση,

$$T(A^{*}A)\geq 0,\ \ A\in\mathcal{A}\,, \tag{7.2.22}$$

για την οποία ισχύει

$$0\leq T(I)\leq I, \tag{7.2.23}$$

τότε από αυτή προκύπτει η διεργασία $T^{*}:\mathcal{A}^{*}\to\mathcal{A}^{*}$, που ορίζεται ως εξής:

$$T^{*}\omega=\begin{cases}\dfrac{\omega\circ T}{(\omega\circ T)(I)} & \text{αν } (\omega\circ T)(I)\neq 0\\ 0 & \text{σε διαφορετική περίπτωση}\end{cases} \tag{7.2.24}$$

Αν η T διατηρεί την μονάδα, $T(I)=I$, τότε η διεργασία T^{*} είναι μη επιλεκτική ενώ αν $T(I)<I$, η διεργασία T^{*} είναι επιλεκτική. Επειδή σε μία επιλεκτική διεργασία ορισμένες καταστάσεις του συστήματος απεικονίζονται στο μηδενικό συναρτησιακό της $\mathcal{A}$, επιβεβαιώνεται ότι οι επιλεκτικές διεργασίες δεν αποτελούν μετασχηματισμούς στο σύνολο των καταστάσεων της $\mathcal{A}$.

Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα διεργασίας σε ένα κβαντικό σύστημα αναπαριστάνεται από τον κανόνα Lüders που περιγράφει την μεταβολή της κατάστασης ενός συστήματος κατά την μέτρηση ενός παρατηρήσιμου. Συγκεκριμένα, έστω ότι A είναι ένας αυτοσυζυγής τελεστής σε κάποιο διαχωρίσιμο χώρο Hilbert $\mathcal{H}$ που αναπαριστάνει ένα παρατηρήσιμο του συστήματος με διακριτό φάσμα και φασματική ανάλυση $A=\sum_i a_i P_i^{A}$, όπου $a_i (i=1,2,...,N\leq\infty)$ οι διακριτές ιδιοτιμές και P_i^{A} οι αντίστοιχοι προβολικοί τελεστές που διαμερίζουν την μονάδα,

$$\sum\nolimits_i P_i^{A}=I. \tag{7.2.24}$$

Μία ιδανική μέτρηση του A χωρίς επιλογή αποτελέσματος απεικονίζει την αρχική κατάσταση του συστήματος ω που ορίζεται από έναν τελεστή πυκνότητας ρ

σύμφωνα με τη σχέση $\omega(X) = tr(\rho X)$ στην κατάσταση $T_{n-s} * \omega$ που ορίζεται από τον τελεστή πυκνότητας ρ_{n-s} ,

$$\begin{aligned} &\omega \mapsto T_{n-s} * \omega, \\ &\rho_{n-s} = \sum\nolimits_i P_i^A \rho P_i^A . \end{aligned} \tag{7.2.25}$$

Λόγω της (7.2.24), η διεργασία $T_{n-s} *$ είναι μία μη επιλεκτική διεργασία που μπορούμε να θεωρήσουμε ότι προκύπτει από έναν αντίστοιχο μετασχηματισμό T_{n-s} στην άλγεβρα $\mathcal{B}(\mathcal{H})$,

$$T_{n-s}(X) = \sum\nolimits_i P_i^A X P_i^A , \;\; X \in \mathcal{B}(\mathcal{H}). \tag{7.2.26}$$

Αντίστοιχα, η διεργασία που αναπαριστάνει μία μέτρηση με επιλογή αποτελέσματος, στην οποία τα συστήματα της στατιστικής συλλογής που προκύπτουν από την μέτρηση εμφανίζουν ορισμένη τιμή a_k για το παρατηρήσιμο A, μετασχηματίζει την κατάσταση ω στην κατάσταση $\dfrac{T_s * \omega}{\left\| T_s * \omega \right\|}$ που ορίζεται από τον τελεστή πυκνότητας ρ_s ,

$$\begin{aligned} &\omega \mapsto \frac{T_s * \omega}{\left\| T_s * \omega \right\|}, \\ &\rho_s = \frac{P_k^A \rho P_k^A}{tr(\rho P_k^A)}, \end{aligned} \tag{7.2.27}$$

όπου $tr(\rho P_k^A)$ το ίχνος του τελεστή ρP_k^A το οποίο είναι ίσο με τη νόρμα του συναρτησιακού $T_s * \omega$.

Μία ειδική κατηγορία μη επιλεκτικών διεργασιών είναι οι *δυναμικές απεικονίσεις* (dynamical maps). Οι δυναμικές απεικονίσεις είναι μετασχηματισμοί των καταστάσεων της άλγεβρας $\mathcal{A}$ που προκύπτουν από γραμμικές, πλήρως θετικές απεικονίσεις που διατηρούν την μονάδα, $T : \mathcal{A} \to \mathcal{A}$. Η έννοια της πλήρους θετικότητας μίας απεικόνισης T είναι πιο ισχυρή απαίτηση από την θετικότητα και

ορίζεται ως εξής: Αν θεωρήσουμε την άλγεβρα M_n των $n\times n$ μιγαδικών πινάκων, τότε το σύνολο $M_n(\mathcal{A})$ των πινάκων με στοιχεία από την C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ είναι μία C* άλγεβρα. Με βάση μία απεικόνιση $T:\mathcal{A}\to\mathcal{A}$ μπορούμε να ορίσουμε την απεικόνιση $T_n : M_n(\mathcal{A})\to M_n(\mathcal{A})$ με βάση την σχέση

$$T_n\begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ . & . & . \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} T(a_{11}) & \dots & T(a_{1n}) \\ . & . & . \\ T(a_{n1}) & \dots & T(a_{nn}) \end{pmatrix}. \qquad (7.2.28)$$

Θα λέμε ότι η απεικόνιση $T:\mathcal{A}\to\mathcal{A}$ είναι *πλήρως θετική* αν η T_n είναι θετική *για κάθε* $n\in\mathbb{N}$.

Στη συνέχεια θα θεωρήσουμε ότι οι φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε ένα κβαντικό σύστημα αποτελούν δυναμικές απεικονίσεις, δηλαδή ικανοποιούν την συνθήκη της πλήρους θετικότητας. Για τη φυσική ερμηνεία της συνθήκης παραπέμπουμε τον αναγνώστη στο Lindblad (1976). Ωστόσο θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι η συνθήκη αυτή από μαθηματική άποψη αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό των μη μεταθετικών αλγεβρών και από φυσική άποψη των κβαντικών συστημάτων. Συγκεκριμένα, αποδεικνύεται ότι αν η $\mathcal{A}$ είναι αβελιανή άλγεβρα, τότε κάθε θετική απεικόνιση $T:\mathcal{A}\to\mathcal{A}$ είναι πλήρως θετική (Takesaki, 2000:199). Ένα παράδειγμα δυναμικής απεικόνισης είναι η μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος όπως περιγράφεται από τον κανόνα Lüders.

Στην περίπτωση που η C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ είναι παράγων (factor) τύπου I (δηλαδή, είναι von Neumann άλγεβρα ισόμορφη με την άλγεβρα των φραγμένων τελεστών σε κάποιο διαχωρίσιμο χώρο Hilbert) και η δυναμική απεικόνιση T* είναι κανονική (δηλαδή, απεικονίζει τις κανονικές καταστάσεις της άλγεβρας σε κανονικές καταστάσεις), υπάρχει ένα θεώρημα αναπαράστασης[20] για την απεικόνιση $T:\mathcal{B}(\mathcal{H})\to\mathcal{B}(\mathcal{H})$. Σύμφωνα με αυτό κάθε κανονική πλήρως θετική απεικόνιση T έχει την μορφή

[20] Το θεώρημα αναπαράστασης αποτελεί συνέπεια του θεωρήματος Stinespring (Holevo 2001:73).

$$T(X)=\sum_{n=1}^{\infty}V_n^{*}XV_n, \tag{7.2.29}$$

όπου $V_n\in\mathcal{B}(\mathcal{H})$ και η σειρά $\sum_{n=1}^{\infty}V_n^{*}V_n$ συγκλίνει ισχυρά στη μονάδα.

Όσα έχουμε αναφέρει μέχρι τώρα αρκούν για να ορίσουμε, στο πλαίσιο μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας, την έννοια της τοπικής δυναμικής απεικόνισης και να διατυπώσουμε τη συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία. Έστω το τοπικό δίκτυο von Neumann αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}$ ενός τοπικού κβαντικού συστήματος στην Haag-Araki περιγραφή. Υποθέτουμε ότι η καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$ είναι ισόμορφη με την άλγεβρα των φραγμένων τελεστών σε κάποιο χώρο Hilbert. Θα λέμε ότι μία κανονική δυναμική απεικόνιση T^* είναι *τοπική δυναμική απεικόνιση σε μία περιοχή O* αν η απεικόνιση T από την οποία προκύπτει μπορεί να αναπαρασταθεί με στοιχεία της τοπικής άλγεβρας $\mathcal{R}(O)$ - δηλαδή,

$$T(X)=\sum_{n=1}^{\infty}V_n^{*}XV_n,\quad V_n\in\mathcal{R}(O). \tag{7.2.30}$$

Τώρα:

> Σε μία τοπική κβαντική θεωρία θα λέμε ότι ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία αν για κάθε χωροχρονική περιοχή O_1 και για οποιαδήποτε καθολική κατάσταση ω του συστήματος, κάθε τοπική δυναμική απεικόνιση στην O_1 δεν επηρεάζει τις αναμενόμενες τιμές των τοπικών παρατηρήσιμων σε χωροειδή απόσταση από την O_1. Δηλαδή, για κάθε περιοχή $O_2\subseteq O_1'$ ισχύει
>
> $$\omega(T(X))=\omega(X), \tag{7.2.31}$$
>
> για κάθε $X\in\mathcal{R}(O_2)$ και $T(X)=\sum_{n=1}^{\infty}V_n^{*}XV_n,\ V_n\in\mathcal{R}(O_1)$.

Ικανή συνθήκη για να ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία είναι το αίτημα της τοπικής μεταθετότητας. Αυτό προκύπτει άμεσα αν αντικαταστήσουμε την (7.2.30) στην (7.2.31) και παρατηρήσουμε ότι τα V_n, X μετατίθενται και η σειρά $\sum_{n=1}^{\infty} V_n^* V_n$ συγκλίνει στην μονάδα.

Μπορεί επίσης να αποδειχθεί και το αντίστροφο: αν ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία, τότε οι τοπικές άλγεβρες δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών μετατίθενται. Αρκεί γι' αυτό να θεωρήσουμε τοπικές δυναμικές απεικονίσεις στην O_1 της μορφής

$$T(X) = \sum_{n=1}^{k} V_n^* X V_n, \quad V_n \in \mathcal{R}(O_1), \quad \sum_{n=1}^{k} V_n^* V_n = I, \tag{7.2.32}$$

όπου k πεπερασμένο. Προφανώς, εφόσον ισχύει η (7.2.31) για κάθε T της μορφής (7.2.30), θα ισχύει και για κάθε T της μορφής (7.2.32). Επιπλέον, επειδή η (7.2.31) ισχύει για κάθε καθολική κατάσταση ω του συστήματος (σύμφωνα με την συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία), έπεται ότι για κάθε $X \in \mathcal{R}(O_2)$ θα πρέπει να ισχύει ότι $T(X) = X$. Επομένως, αρκεί να δείξουμε ότι αν για κάθε T της μορφής (7.2.30) ισχύει $T(X) = X$ για κάθε $X \in \mathcal{R}(O_2)$, τότε $[\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)] = 0$. Ο Lindblad (1999) έχει αποδείξει ότι για οποιονδήποτε μετασχηματισμό T της μορφής (7.2.30), αν $T(X) = X$ τότε $[X, V_n] = 0$ για $n = 1,\ldots,k$. Όμως επειδή κάθε στοιχείο $A \in \mathcal{R}(O_1)$ μπορεί να αναλυθεί ως γραμμικός συνδυασμός τεσσάρων μοναδιαίων στοιχείων της $\mathcal{R}(O_1)$,

$$A = a_1 U_1 + a_2 U_2 + a_3 U_3 + a_4 U_4$$

όπου $a_i \in \mathbb{C}$, $|a_i| \leq \frac{\|A\|}{2}$, (Bratteli and Robinson 2002, I, Λήμ. 2.2.14), έχουμε ότι

$$[A, \mathrm{B}] = a_1 [U_1, \mathrm{B}] + a_2 [U_2, \mathrm{B}] + a_3 [U_3, \mathrm{B}] + a_4 [U_4, \mathrm{B}]. \tag{7.2.33}$$

Σύμφωνα με την υπόθεσή μας, για κάθε μετασχηματισμό T της μορφής (7.2.30) ισχύει ότι $T(X) = X \;\; \forall X \in \mathcal{R}(O_2)$. Συνεπώς, το ίδιο θα ισχύει για την απεικόνιση $T_i(X) = U_i^* X U_i$, όπου $U_i \in \mathcal{R}(O_1)$ τυχόν μοναδιαίο στοιχείο. Τότε όμως, σύμφωνα με τον Lindblad (1999), ισχύει $\left[U_i, \mathcal{R}(O_2)\right] = 0$ για κάθε μοναδιαίο στοιχείο $U_i \in \mathcal{R}(O_1)$ - άρα, και $\left[A, \mathrm{B}\right] = 0$ σύμφωνα με την (7.2.33). Επειδή όμως τα A και B είναι τυχαία στοιχεία των $\mathcal{R}(O_1)$ και $\mathcal{R}(O_2)$ αντίστοιχα, συμπεραίνουμε ότι $\left[\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)\right] = 0$. Με βάση τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι το αίτημα της τοπικής μεαθετότητας στην τοπική κβαντική φυσική εκφράζει τη συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία.

Ας προχωρήσουμε όμως λίγο παραπέρα. Αποτελεί καθιερωμένη υπόθεση ότι σε ένα απομονωμένο – κλειστό κβαντικό σύστημα η δυναμική περιγράφεται από μοναδιαίους τελεστές - δηλαδή, από δυναμικές απεικονίσεις της μορφής

$$T(X) = U^* X U, \tag{7.2.34}$$

όπου $UU^* = U^* U = I, \;\; U \in \mathcal{B}(\mathcal{H})$ σε κάποιο χώρο Hilbert $\mathcal{H}$. Όμως αυτή η περιγραφή μας περιορίζει όταν θέλουμε να περιγράψουμε μη αντιστρεπτές φυσικές διεργασίες όπως είναι η εκπομπή ενός ασταθούς σωματιδίου, η προσέγγιση στην ισορροπία ενός θερμοδυναμικού συστήματος, ή οι διεργασίες μέτρησης ενός παρατηρήσιμου που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε ανοικτά κβαντικά συστήματα, σε συστήματα που βρίσκονται σε αλληλεπίδραση με το περιβάλλον τους. Στη γενική περίπτωση, η οποία περιλαμβάνει τόσο αντιστρεπτές όσο και μη αντιστρεπτές φυσικές διεργασίες, θεωρείται ότι η δυναμική περιγράφεται από δυναμικές απεικονίσεις. Με άλλα λόγια μία δυναμική απεικόνιση η οποία δεν προκύπτει από μοναδιαίους τελεστές μπορεί να αναπαραστήσει μία μη αντιστρεπτή διεργασία (Holevo 2001:74). Όμως όπως παρατηρεί ο Davies (1976:26) «η μη αντιστρεπτή εξέλιξη είναι λιγότερο θεμελιώδους φύσης από τη χαμιλτονιανή εξέλιξη. Αν κάποιος πρόκειται να κβαντίσει τον εξωτερικό κόσμο, τότε θα υπάρχει μία χαμιλτονιανή για το ολικό σύστημα που θα περιλαμβάνει όρους που περιγράφουν την αλληλεπίδραση του συστήματος με τον εξωτερικό κόσμο». Αυτήν ακριβώς την δυνατότητα της διεύρυνσης μίας δυναμικής απεικόνισης που αναπαριστάνει μία μη αντιστρεπτή

διεργασία σε μία αντιστρεπτή διεργασία ενός σύνθετου συστήματος που περιλαμβάνει το αρχικό σύστημα και το περιβάλλον του, περιγράφει η ακόλουθη πρόταση (Holevo, 2001:75): μία απεικόνιση κανονικών καταστάσεων σε κανονικές καταστάσεις σε έναν χώρο Hilbert $\mathcal{H}$ είναι δυναμική απεικόνιση αν και μόνο αν υπάρχει ένας χώρος Hilbert $\mathcal{H}_0$, ένας τελεστής πυκνότητας ρ_0 στον $\mathcal{H}_0$ και ένας μοναδιαίος τελεστής S στον $\tilde{\mathcal{H}} = \mathcal{H} \otimes \mathcal{H}_0$, έτσι ώστε η εικόνα μίας κανονικής κατάσταση στον $\mathcal{H}$ που αναπαριστάνεται από έναν τελεστή πυκνότητας ρ να αναπαριστάνεται από έναν τελεστή ρ' που ορίζεται από τη σχέση

$$\rho' = Tr_{\mathcal{H}_0} S(\rho \otimes \rho_0) S^* \tag{7.2.35}$$

όπου $Tr_{\mathcal{H}_0}$ είναι το μερικό ίχνος στον $\mathcal{H}_0$.

Στην περίπτωση ενός τοπικού κβαντικού συστήματος που περιγράφεται από ένα δίκτυο von Neumann αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}$, μία εύλογη απαίτηση για την περιγραφή μίας τοπικής διεργασίας που λαμβάνει χώρα σε μία πεπερασμένη περιοχή O είναι ο μοναδιαίος τελεστής S που περιγράφει την αλληλεπίδραση ανάμεσα στο τοπικό κβαντικό σύστημα και το περιβάλλον στην O να ανήκει στην άλγεβρα $\mathcal{R}(O) \otimes \mathcal{B}(\mathcal{H}_0)$,

$$S \in \mathcal{R}(O) \otimes \mathcal{B}(\mathcal{H}_0). \tag{7.2.36}$$

Σε αυτή την περίπτωση, η δυναμική απεικόνιση που περιγράφει τον μετασχηματισμό κανονικών καταστάσεων σε κανονικές καταστάσεις είναι τοπική δυναμική απεικόνιση στην O (Hellwig and Kraus 1968).

Στην εισαγωγή αυτής της ενότητας αναφέραμε ότι η έννοια της τοπικής διεργασίας σε μία περιοχή O σχετίζεται με την μέθοδο του ίχνους του Reichenbach. Τώρα μπορούμε να γίνουμε πιο σαφείς. Στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, η δημιουργία ίχνους σε ένα συμβάν που είναι δυνατόν να λάβει χώρα σε μία περιοχή O συνίσταται στην εκτέλεση μίας φυσικής τοπικής διεργασίας στην περιοχή O, η οποία αναπαριστάνεται από μία τοπική δυναμική απεικόνιση και μεταβάλλει την

πιθανότητα να λάβει χώρα το εν λόγω συμβάν. Έτσι, μία τοπική δυναμική απεικόνιση που ορίζεται από την (7.2.30) δημιουργεί ένα ίχνος σε οποιοδήποτε συμβάν στην O, το οποίο με τη σειρά του αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή στην $\mathcal{R}(O)$ που *δεν μετατίθεται* με τα στοιχεία $V_n \in \mathcal{R}(O)$ για $n = 1, 2, ...$

Από αυτό έπεται ότι η τοπική διεργασία που προκύπτει από μία μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος, σύμφωνα με τον κανόνα Lüders, *δεν δημιουργεί* ίχνος σε κανένα συμβάν που αναπαριστάνεται από προβολικούς τελεστές που ανήκουν στη φασματική ανάλυση του μετρούμενου παρατηρήσιμου. Συγκεκριμένα, ας θεωρήσουμε τη μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος ενός παρατηρήσιμου $A \in \mathcal{R}(O)$ που αναλύεται σύμφωνα με την σχέση $A = \sum_i a_i P_i^A$, $P_i^A \in \mathcal{R}(O)$ για $i = 1, 2, ..., N < \infty$. Η τοπική δυναμική απεικόνιση που περιγράφει αυτή την διεργασία ορίζεται με τον μετασχηματισμό (7.2.26). Έστω ένα συμβάν που αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή $P_j^A \in \mathcal{R}(O)$ που ανήκει στη φασματική ανάλυση του A. Λόγω της (7.2.24), η (7.2.26) μπορεί να γραφεί στην μορφή

$$T(X) = P_j^A X P_j^A + \left(I - \sum_{i \neq j} P_i^A X P_i^A\right) X \left(I - \sum_{i \neq j} P_i^A X P_i^A\right) \quad \text{ή}$$

$$T(X) = P_j^A X P_j^A + \left(I - P_j^A\right) X \left(I - P_j^A\right). \tag{7.2.37}$$

Επειδή $T(P_j^A) = P_j^A$, συμπεραίνουμε ότι και για κάθε κανονική κατάσταση ω ισχύει ότι $\omega\left(T(P_j^A)\right) = \omega\left(P_j^A\right)$. Άρα η πιθανότητα να λάβει χώρα το συμβάν που αναπαριστάνεται από τον προβολικό τελεστή $P_j^A \in \mathcal{R}(O)$ δεν μεταβάλλεται - κατά συνέπεια, η μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος του A δεν δημιουργεί ίχνος σε αυτό το συμβάν.

Το ίχνος διαδίδεται σε όλα τα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε μία περιοχή O_1 και αναπαριστάνονται από προβολικούς τελεστές στην $\mathcal{R}(O_1)$ που *δεν μετατίθενται* με τα στοιχεία $V_n \in \mathcal{R}(O)$ για κάθε $n = 1, 2, ...$ Άρα, λόγω της ισχύος της τοπικής μεταθετότητας στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, το ίχνος που δημιουργείται σε οποιοδήποτε συμβάν σε μία περιοχή O *δεν διαδίδεται σε περιοχές*

που βρίσκονται σε χωροειδή απόσταση από την O. Έτσι, αν (όπως θεωρεί ο Reichenbach) η διάδοση (και *μόνον* αυτή) σε κάποιο συμβάν του ίχνους που δημιουργείται σε ένα άλλο συμβάν εκφράζει αιτιακή σχέση ανάμεσα στα δύο συμβάντα, τότε θα πρέπει να συμπεράνουμε, σε συμφωνία με την θεωρία της σχετικότητας, ότι *δεν υπάρχει αιτιακή σχέση ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε περιοχές που βρίσκονται σε χωροειδή απομάκρυνση*.

Τέλος, όπως παρατηρεί ο Reichenbach (1956:198), «το ίχνος είναι το αποτέλεσμα μίας παρέμβασης μέσω μίας μη αντιστρεπτής διαδικασίας». Η απαίτηση η διεργασία με την οποία δημιουργείται το ίχνος να είναι μη αντιστρεπτή έχει να κάνει με τον αιτιακό ορισμό της κατεύθυνσης του χρόνου. Αν και το ζήτημα αυτό δεν μας απασχολεί στο παρόν πλαίσιο, θα πρέπει να επισημάνουμε ότι και αυτή η απαίτηση ικανοποιείται με τον ορισμό του ίχνους με βάση τοπικές δυναμικές απεικονίσεις που λαμβάνουν χώρα σε μία πεπερασμένη χωροχρονική περιοχή. Εφόσον οι τοπικές δυναμικές απεικονίσεις εν γένει περιγράφουν μη αντιστρεπτές τοπικές διεργασίες, όπως ήδη έχουμε εξηγήσει, το ίχνος που δημιουργούμε σε ένα συμβάν προκύπτει στην γενική περίπτωση από μη αντιστρεπτές διεργασίες.

7.2.6 Τοπική Ανεξαρτησία και το θεώρημα Reeh-Schlieder

Το θεώρημα Reeh – Schlieder [RS] είναι μία πρόταση της τοπικής κβαντικής φυσικής ιδιαιτέρως "προσφιλής" στους φιλοσόφους. Από το 1990 μέχρι σήμερα έχει σχολιαστεί αρκετά και έχει χρησιμοποιηθεί με πολλούς τρόπους για την εξαγωγή διαφόρων συμπερασμάτων που έχουν ως κοινή συνισταμένη την ανάδειξη του *παράδοξου χαρακτήρα του κβαντικού κενού.*

Για μία τοπική κβαντική θεωρία στον χωρόχρονο Minkowski και σε εκδοχή Haag-Araki που ικανοποιεί τα συνήθη αιτήματα, το θεώρημα [RS][21] λέει:

[21] Στο Παράρτημα 2 της εργασίας παραθέτουμε μία απόδειξη του θεωρήματος Reeh-Schlieder.

> [RS] Για κάθε διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ αναλυτικό ως προς τον τελεστή της ενέργειας και κάθε περιοχή O του χωροχρόνου Minkowski (πεπερασμένη ή μη) (α) το ψ είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}(O)$ αν και μόνο αν είναι κυκλικό για την καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$ και (β) αν η O έχει μη κενό αιτιακό συμπλήρωμα, $O' \neq \varnothing$, τότε το ψ είναι διαχωρίζον για την $\mathcal{R}(O)$.

Καταρχάς θα πρέπει να εξηγήσουμε την έννοια του κυκλικού και του διαχωρίζοντος διανύσματος. Ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ ονομάζεται *κυκλικό διάνυσμα* για μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ αν το σύνολο $\{A\psi : A \in \mathcal{R}\}$ είναι πυκνό στον $\mathcal{H}$. Δηλαδή,

$$\forall \phi \in \mathcal{H},\ \forall \varepsilon > 0,\ \exists A \in \mathcal{R}:\ \|\phi - A\psi\| < \varepsilon. \tag{7.2.38}$$

Ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ ονομάζεται *διαχωρίζον διάνυσμα* της $\mathcal{R}$ αν για κάθε $A, B \in \mathcal{R}$

$$A\psi = B\psi \Rightarrow A = B \quad \text{ή ισοδύναμα } A\psi = 0 \Rightarrow A = 0 \tag{7.2.39}$$

Χωρίς να εισέλθουμε σε πιο τεχνικά ζητήματα επισημαίνουμε ότι το διάνυσμα του κενού αποτελεί αναλυτικό διάνυσμα ως προς την ενέργεια[22] και κυκλικό διάνυσμα της καθολικής άλγεβρας $\mathcal{R}$. Επίσης κάθε διάνυσμα αναλυτικό ως προς την ενέργεια στην αναπαράσταση του κενού είναι κυκλικό διάνυσμα της καθολικής άλγεβρας $\mathcal{R}$. Άρα, σύμφωνα με το [RS], στην αναπαράσταση του κενού κάθε διάνυσμα αναλυτικό ως προς την ενέργεια είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}(O)$. Επιπλέον θα λέμε ότι από ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ προκύπτει μία κατάσταση ω_ψ πεπερασμένης ενέργειας αν υπάρχει ένα συμπαγές υποσύνολο $[M_1,M_2]$ του φάσματος του τελεστή της ενέργειας H, τέτοιο ώστε ο αντίστοιχος προβολικός τελεστής $E_{[M_1,M_2]}$, που ανήκει στην καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$, να αφήνει το ψ αναλλοίωτο, $E_{[M_1,M_2]}\psi = \psi$. Κάθε διάνυσμα από το οποίο προκύπτει μία κατάσταση πεπερασμένης ενέργειας είναι αναλυτικό ως προς τον τελεστή ενέργειας. Αν επίσης σκεφτούμε ότι η προετοιμασία ενός συστήματος σε

[22] Ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ ονομάζεται αναλυτικό ως προς τον τελεστή της ενέργειας H αν $\psi \in \bigcap_{n=1}^{\infty} D(H^n)$ και $\sum_{n=0}^{\infty} \frac{\|H^n\psi\|}{n!} t^n < \infty$, όπου $D(H^n)$ είναι το πεδίο ορισμού του H^n. Τα διανύσματα που είναι αναλυτικά ως προς την ενέργεια είναι πυκνά στον χώρο Hilbert $\mathcal{H}$ (Reed and Simon 1975, τ.II:201).

μία κατάσταση απαιτεί την ανταλλαγή πεπερασμένων ποσών ενέργειας, συμπεραίνουμε ότι οι διανυσματικές καταστάσεις πεπερασμένης ενέργειας ταυτίζονται με τις φυσικώς αποδεκτές διανυσματικές καταστάσεις. Συνεπώς, οι φιλοσοφικές συνέπειες του θεωρήματος [RS], στις οποίες θα αναφερθούμε στην συνέχεια, δεν ισχύουν μόνο για την κατάσταση του κενού αλλά και για το σύνολο των φυσικώς αποδεκτών διανυσματικών καταστάσεων του συστήματος στην αναπαράσταση του κενού.

Οι τρεις πρώτες συνέπειες[23] του θεωρήματος Reeh –Schlieder προκύπτουν από την ιδιότητα του διανύσματος του κενού να είναι διαχωρίζον διάνυσμα της τοπικής άλγεβρας $\mathcal{R}(O)$ για κάθε πεπερασμένη περιοχή O .

[RS_1] Στην κατάσταση του κενού το σύστημα έχει μη μηδενική πιθανότητα να εκδηλώσει σε μέτρηση οποιαδήποτε τοπική ιδιότητα. Με άλλα λόγια, στην κατάσταση του κενού στο σύστημα είναι δυνατόν να λάβει χώρα οποιοδήποτε συμβάν.

[RS_2] Ένας στατιστικώς αξιόπιστος, τοπικός ανιχνευτής σωματιδίων παριστάνεται από ένα παρατηρήσιμο C που είναι τέτοιο ώστε (i) ο C να είναι θετικός τελεστής, (ii) η αναμενόμενη τιμή του C στην κατάσταση του κενού να είναι μηδέν, $\left(\Omega, C\Omega\right)=0$ και (iii) ο C είναι τοπικός τελεστής (δηλαδή, $C\in\mathcal{R}(O)$ για κάποια πεπερασμένη περιοχή O του $\mathbb{R}^4$). Το θεώρημα [RS] συνεπάγεται ότι οι (i), (ii), (iii) συγκροτούν ένα ασυνεπές σύνολο προτάσεων.

[RS_3] Οι ερωτήσεις "Είναι το σύστημα στην κατάσταση του κενού;" ή αντίστοιχα "Είναι το σύστημα σε μία κατάσταση πεπερασμένης ενέργειας;" δεν μπορούν να απαντηθούν τοπικά. Οι προβολικοί τελεστές $P_\Omega=\left|\Omega\right\rangle\left\langle\Omega\right|$ και $P_\psi=\left|\psi\right\rangle\left\langle\psi\right|$ όπου ψ ένα διάνυσμα με το οποίο ορίζεται μία κατάσταση πεπερασμένης ενέργειας και είναι ορθογώνιο στο διάνυσμα του κενού, δεν

[23] Η ανασυγκρότηση των συνεπειών του θεωρήματος [RS] βασίστηκε σε μία διάλεξη του Αραγεώργη (2008) στο πλαίσιο του μαθήματος Φιλοσοφία Φυσικής της ΣΕΜΦΕ του ΕΜΠ και στα άρθρα των Redhead (1995) και Redhead and Wagner (1998).

είναι τοπικοί τελεστές. Δηλαδή, δεν υπάρχει πεπερασμένη περιοχή O στην άλγεβρα της οποίας να ανήκουν οι τελεστές αυτοί.

Το παράδοξο για το κβαντικό κενό που προκύπτει από την [RS1] έχει να κάνει με την κλασική διαίσθηση ότι το κενό είναι ο χωρόχρονος στερημένος από οποιοδήποτε υλικό περιεχόμενο (πεδία ή σωματίδια). Κατά συνέπεια κανένα παρατηρήσιμο δεν είναι δυνατόν να έχει μη μηδενική πιθανότητα να λάβει ορισμένη τιμή στην κατάσταση του κενού - δηλαδή, κανένα συμβάν δεν είναι δυνατόν να λάβει χώρα. Αντίθετα, το θεώρημα [RS] μας λέει ότι το κβαντικό κενό είναι *πλήρες*: όλα τα συμβάντα έχουν μη μηδενική πιθανότητα να λάβουν χώρα.

Η $[RS_2]$ αντίκειται στις διαισθήσεις μας για την ανίχνευση σωματιδίων. Η αναπαράσταση ενός ανιχνευτή σωματιδίων από ένα θετικό παρατηρήσιμο με μηδενική αναμενόμενη τιμή στο κενό αποτελεί εύλογη υπόθεση δεδομένου ότι στο κενό δεν περιμένουμε να ανιχνεύονται σωματίδια. Επίσης, οι ανιχνευτές είναι διατάξεις με πεπερασμένη χωρική έκταση – όγκο και η ανίχνευση σωματιδίων μία διεργασία που διαρκεί πεπερασμένο χρονικό διάστημα. Επομένως, η ανίχνευση σωματιδίων σχετίζεται με μία πεπερασμένη χωροχρονική περιοχή. Άρα η υπόθεση ότι ο τελεστής που αναπαριστάνει τον ανιχνευτή ανήκει στην τοπική άλγεβρα είναι επίσης εύλογη. Ωστόσο, σύμφωνα με το [RS], από αυτές τις τρεις εύλογες υποθέσεις καταλήγουμε σε άτοπο.

Για να ξεπεραστεί το πρόβλημα που προκύπτει από το θεώρημα [RS] διατηρώντας τον γενικό χαρακτήρα των ευλόγων υποθέσεών μας για την ανίχνευση σωματιδίων θεωρούμε (Haag 1996:72) ότι ένας ανιχνευτής σωματιδίων που το κέντρο του βρίσκεται στην αρχή του συστήματος συντεταγμένων αναπαριστάνεται από ένα στοιχείο C της καθολικής άλγεβρας που είναι θετικό ($C>0$), κανονικοποιημένο ($\|C\|=1$), με αναμενόμενη τιμή στο κενό ίση με μηδέν $\left((\Omega, C\Omega)=0\right)$ και, επιπλέον, είναι *σχεδόν – τοπικό* παρατηρήσιμο - δηλαδή, προσεγγίζεται στη νόρμα, για οποιονδήποτε βαθμό ακρίβειας, από κάποιο τοπικό στοιχείο $C_r \in \mathcal{R}(D_r)$, όπου D_r είναι ένας διπλός κώνος με βάση τη τρισδιάστατη σφαίρα ακτίνας r και κέντρο την αρχή του συστήματος συντεταγμένων:

$$\forall \varepsilon > 0,\ \exists r = r(\varepsilon) \text{ και } C_r \in \mathcal{R}(D_r):\ \left\| C - C_r \right\| < \varepsilon. \qquad (7.2.40)$$

Η ακτίνα r εκφράζει το ενεργό μέγεθος του ανιχνευτή που είναι συνάρτηση της επιθυμητής ακρίβειας ε. Η (7.2.40) συνεπάγεται ότι για κάθε κατάσταση ω του συστήματος ισχύει

$$\left| \omega(C) - \omega(C_r) \right| < \varepsilon, \qquad (7.2.41)$$

δηλαδή, για δεδομένη σταθερή τιμή ακρίβειας ε ισχύει ότι για κάθε κατάσταση του συστήματος η αναμενόμενη τιμή του τοπικού παρατηρήσιμου $C_r \in \mathcal{R}(D_r)$ διαφέρει από την αναμενόμενη τιμή του C λιγότερο από την ακρίβεια της μέτρησης. Άρα, οι αναμενόμενες τιμές αυτών των παρατηρήσιμων «πρακτικά» ταυτίζονται.

Ο Αραγεώργης (Arageorgis 1995:336) απέδειξε ότι μία δυναμική απεικόνιση η οποία ορίζεται με την βοήθεια σχεδόν τοπικών στοιχείων και περιγράφει μία μη επιλεκτική διεργασία ανίχνευσης σωματιδίων μεταβάλλει τις αναμενόμενες τιμές τοπικών παρατηρήσιμων σε χωροειδή απόσταση από την περιοχή στην οποία λαμβάνει χώρα. Με άλλα λόγια, *στην τοπική κβαντική φυσική δεν ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από σχεδόν – τοπική διεργασία*. Η απόδειξη είναι *reductio ad absurdum* και ξεκινάει με την υπόθεση ότι για οποιαδήποτε αρχική διανυσματική κατάσταση του συστήματος, η μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος που ορίζεται με τον κανόνα του Lüders για έναν σχεδόν- τοπικό προβολικό τελεστή P που εκμηδενίζει το διάνυσμα του κενού, $P\Omega = 0$, δεν επηρεάζει τις αναμενόμενες τιμές των τοπικών παρατηρήσιμων σε μία οποιαδήποτε πεπερασμένη περιοχή O. Από την υπόθεση αυτή προκύπτει ότι τα στοιχεία της $\mathcal{R}(O)$ μετατίθενται με τον προβολικό τελεστή P. Ακολούθως αποδεικνύεται με την βοήθεια του θεωρήματος [RS], και συγκεκριμένα λόγω της κυκλικότητας του κενού για την $\mathcal{R}(O)$, ότι επειδή ο τελεστής P που εκμηδενίζει το διάνυσμα του κενού θα πρέπει να είναι τετριμμένος, P=0. Από αυτό το άτοπο προκύπτει ότι θα πρέπει να εγκαταλείψουμε την αρχική μας υπόθεση.

Στο σημείο αυτό θέλουμε να επισημάνουμε ότι η παραπάνω απόδειξη μπορεί να γενικευτεί για την περίπτωση γενικευμένων μη επιλεκτικών διεργασιών ανίχνευσης σωματιδίων όπου το παρατηρήσιμο που αναπαριστάνει τον ανιχνευτή δεν

είναι προβολικός τελεστής[24] αλλά ένα θετικό κανονικοποιημένο στοιχείο της C καθολικής άλγεβρας με μηδενική αναμενόμενη τιμή στο κενό. Στην περίπτωση αυτή αντί του συνηθισμένου κανόνα Lüders θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε τον γενικευμένο κανόνα Lüders (Busch and Singh 1998). Σε αυτή την περίπτωση η δυναμική απεικόνιση προκύπτει από τον μετασχηματισμό,

$$T(X) = C^{1/2} X C^{1/2} + (I - C)^{1/2} X (I - C)^{1/2}, \quad X \in \mathcal{R}. \qquad (7.2.42)$$

Η υπόθεση ότι οι αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων σε οποιαδήποτε περιοχή $\mathcal{R}(O)$ οδηγεί στο συμπέρασμα ότι τα στοιχεία της $\mathcal{R}(O)$ μετατίθενται με το C και, με πανομοιότυπο τρόπο με τα προηγούμενα, καταλήγουμε στο άτοπο ότι C=0.

Η συνέπεια [RS_3] δεν είναι τόσο παράδοξη όσο οι προηγούμενες. Η ερώτηση «είναι το σύστημα στην κατάσταση του κενού;» δεν μπορεί να είναι τοπική ερώτηση ούτε στην κλασική φυσική. Για ένα οποιοδήποτε κλασικό σύστημα δεν μπορούμε να διαπιστώσουμε αν αυτό βρίσκεται σε μία κατάσταση με ορισμένη ενέργεια διενεργώντας μετρήσεις σε μία πεπερασμένη περιοχή του χώρου σε δεδομένη χρονική στιγμή. Θα πρέπει επιπλέον να κάνουμε υποθέσεις για την κατάσταση του συστήματος, τη συγκεκριμένη χρονική στιγμή, στις περιοχές του χώρου έξω από την αυτή τη χωρική περιοχή. Για παράδειγμα, για να υπολογίσουμε την ολική ενέργεια ενός κλασικού ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon σε χωρόχρονο Minkowski θα πρέπει να ολοκληρώσουμε την πυκνότητα ενέργειας T^{00} στο υπερεπίπεδο σταθερού χρόνου.

Στο επιχείρημα του Αραγεώργη, η κυκλικότητα του κενού για κάθε τοπική άλγεβρα $\mathcal{R}(O)$ χρησιμοποιείται για την εξαγωγή συμπερασμάτων που αφορούν στην ανεξαρτησία από διεργασίες. Στη συνέχεια θα παρουσιάσουμε πιο άμεσες συνέπειες της κυκλικότητας του κενού για κάθε τοπική άλγεβρα $\mathcal{R}(O)$, που προβλέπονται από το θεώρημα [RS], σε σχέση με την τοπική ανεξαρτησία:

[RS_4] Οποιαδήποτε διανυσματική κατάσταση του συστήματος μπορεί να προσεγγισθεί με όση ακρίβεια θέλουμε από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα

[24] Σε παλιότερες προσεγγίσεις, π.χ. (Robinson,1966), (Haag,1972), διατυπώνονταν ρητά η απαίτηση ο ανιχνευτής να αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή. Ωστόσο στην συνέχεια η απαίτηση αυτή εγκαταλείφθηκε ως μη αναγκαία.

σε μία περιοχή O του χωροχρόνου όταν το σύστημα βρίσκεται στην κατάσταση του κενού. Άρα, με διεργασίες σε μία περιοχή O μπορούμε να προετοιμάσουμε την καθολική κατάσταση του συστήματος (*όποια* και αν είναι αυτή) και κατά συνέπεια να επηρεάσουμε τις αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων σε οποιαδήποτε περιοχή του χωροχρόνου.

[RS_5] Το θεώρημα [RS] συνεπάγεται ότι το κενό εκδηλώνει «τέλειες» συσχετίσεις μεταξύ συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές, οσοδήποτε απομακρυσμένες και αν είναι αυτές.

Ο παράδοξος χαρακτήρας της συνέπειας [RS_4] έγκειται στο γεγονός ότι αυτό που θα περίμενε κανείς εκτελώντας διεργασίες στο κενό, σε μία περιοχή του χωροχρόνου, είναι να προκύπτει ως αποτέλεσμα μία τοπική διαταραχή η οποία να περιγράφεται από μία εντοπισμένη κατάσταση. Δηλαδή, για ένα τοπικό κβαντικό σύστημα στην κατάσταση του κενού και για κάθε πεπερασμένη περιοχή O, η κατάσταση που προκύπτει από το $A\Omega,\ A\in\mathcal{R}(O),\ \|A\|\le 1$, με το τοπικό στοιχείο A να περιγράφει την εν λόγω διεργασία στην O, αναμένεται να μην μεταβάλλει αναμενόμενες τιμές παρατηρήσιμων σε χωροειδή απομάκρυνση από την O:

$$\left(A\Omega, BA\Omega\right)=\left(\Omega, B\Omega\right)\quad \forall B\in\mathcal{R}(O'), \tag{7.2.43}$$

όπου O' το αιτιακό συμπλήρωμα της O. Ωστόσο, σύμφωνα με το θεώρημα [RS], κάθε διανυσματική κατάσταση που προκύπτει από κάποιο $\phi\in\mathcal{H}$, άρα και αυτές για τις οποίες

$$\left(\phi, B\phi\right)\neq\left(\Omega, B\Omega\right)\quad B\in\mathcal{R}(O'),$$

μπορεί να προσεγγισθεί με οποιαδήποτε ακρίβεια $\varepsilon>0$ από την κατάσταση που προκύπτει από ένα διάνυσμα $A\Omega,\ A\in\mathcal{R}(O),\ \|A\|\le 1$. Άρα συμπεραίνουμε ότι αντίθετα με τις όποιες διαισθήσεις μας υπάρχουν διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε μία περιοχή O οι οποίες έχουν ως αποτέλεσμα μη εντοπισμένες καταστάσεις.

Η λύση του παραδόξου που προτείνουν οι Clifton και Halvorson (2001) βασίζεται στη διάκριση που έχουμε ήδη αναφέρει ανάμεσα σε επιλεκτικές και μη

επιλεκτικές διεργασίες. Συγκεκριμένα, οι *αμιγώς φυσικές διεργασίες* που μπορούν να λάβουν χώρα σε μία περιοχή O του χωροχρόνου είναι *μη επιλεκτικές διεργασίες*. Οι επιλεκτικές διεργασίες είναι αμιγώς φυσικές διεργασίες, οι οποίες όμως ακολουθούνται από νοητικές διεργασίες επιλογής. Η διεργασία που λαμβάνει χώρα στην O στο κενό και μετασχηματίζει το διάνυσμα κατάστασης σύμφωνα με τον μετασχηματισμό

$$\Omega \mapsto W\Omega,\ W \in \mathcal{R}(O),\ \|W\| \leq 1,$$

για τον οποίο ισχύει

$$W^*W = I,$$

όπου I η μονάδα της άλγεβρας, είναι μη επιλεκτική διεργασία και ως εκ τούτου αμιγώς φυσική διεργασία. Ωστόσο, οι μη επιλεκτικές διεργασίες, όπως είδαμε στην προηγούμενη υποενότητα, δεν επηρεάζουν τις αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων σε χωροειδή απομάκρυνση. Άρα το παράδοξο που αφορά σε μη εντοπισμένες καταστάσεις ως αποτέλεσμα διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε μία περιοχή του χωροχρόνου προκύπτει μόνο εφόσον οι διεργασίες στις οποίες αναφερόμαστε δεν είναι αμιγώς φυσικές.

Στην ύπαρξη τέλειων συσχετίσεων ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές, [RS5], έχουμε αναφερθεί στην υποενότητα 7.2.4 κατά την υποστήριξη της δεύτερης προκείμενης του επιχειρήματος EPR στην τοπική κβαντική φυσική. Το ριζικό θεώρημα από το οποίο συνάγεται η (7.2.19) αποδεικνύεται από τους Redhead και Wagner (1998) με την βοήθεια του θεωρήματος [RS].

Τέλος, ανακεφαλαιώνοντας θα πρέπει να τονίσουμε ότι η ύπαρξη συσχετίσεων (τέλειων ή μη) παραβιάζει την εξής συνθήκη ανεξαρτησίας από συμβάντα: κάθε κοινή επέκταση των τοπικών καταστάσεων του συστήματος σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές είναι παραγοντοποιήσιμη – γεγονός που προκύπτει και από την παραβίαση των ανισοτήτων Bell. Ωστόσο, αυτό προϋποθέτει την ισχύ της ανεξαρτησίας από τοπικές φυσικές διεργασίες, όπως αυτή εκφράζεται με

το αίτημα της τοπικής μεταθετότητας. Η ανεξαρτησία από τοπικές διεργασίες αμφισβητείται από το επιχείρημα EPR, το οποίο αξιοποιώντας την ύπαρξη τέλειων συσχετίσεων θέτει το εξής δίλημμα: είτε ισχύει η ανεξαρτησία από τοπικές διεργασίες είτε η τοπική κβαντική φυσική μας δίνει μη πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας. Ωστόσο, και σε αυτή την περίπτωση, δεν αμφισβητείται η ανεξαρτησία από τοπικές *φυσικές* διεργασίες, όπως εκφράζεται με την τοπική μεταθετότητα. Για την απόδειξη των προκείμενων του επιχειρήματος EPR απαιτήσαμε τόσο την ισχύ της τοπικής μεταθετότητας, όσο και ότι οι τοπικές διεργασίες που εκτελούνται είναι μετρήσεις *με επιλογή αποτελέσματος*. Συγκεκριμένα, για να αποδείξουμε τη δεύτερη προκείμενη του επιχειρήματος EPR θα πρέπει να υποθέσουμε ότι η μέτρηση με επιλογή αποτελέσματος είναι *πραγματική* παρέμβαση σε ένα φυσικό σύστημα, όπως απαιτεί η (ΤΟΠ1). Ωστόσο, αν με τον όρο "πραγματική" κατανοούμε κάτι ανεξάρτητο από το νου, τότε αυτή η υπόθεση δεν είναι ορθή διότι η μέτρηση με επιλογή αποτελέσματος δεν αποτελεί αμιγώς φυσική διεργασία. Συνεπώς, θα μπορούσε κάποιος να πει ότι στο επίπεδο της ανεξάρτητης από το νου πραγματικότητας, η τοπικότητα δεν συνεπάγεται τη μη πληρότητα, όπως υποστηρίζει το επιχείρημα EPR.

7.3 Τοπική εξάρτηση

Στην προηγούμενη ενότητα εξετάσαμε τις συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας που αφορούν τη μη επίδραση συμβάντων ή διεργασιών που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε μία περιοχή στα συμβάντα μίας άλλης περιοχής. Οι *συνθήκες εξάρτησης* περιγράφουν σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε δύο περιοχές O_1 και O_2 σύμφωνα με τις οποίες το σύνολο των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην O_1 (ή η πιθανότητα που έχουν τα δυνατά συμβάντα στην O_1) *καθορίζει* τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή O_2 (ή, αντιστοίχως, την πιθανότητα που έχουν δυνατά συμβάντα στην O_2). Δηλαδή, η τοπική κατάσταση ενός συστήματος σε μία περιοχή του χωροχρόνου καθορίζει είτε την καθολική κατάσταση

του συστήματος, είτε την τοπική κατάσταση σε κάποια άλλη περιοχή και αυτό ισχύει για κάθε φυσικώς δυνατή κατάσταση του συστήματος.

Μπορούμε να διακρίνουμε τις συνθήκες εξάρτησης σε *καθολικές* και σε *τοπικές*. Οι πρώτες περιγράφουν σχέσεις ανάμεσα σε κάποιο υποσύνολο του χωροχρόνου και ολόκληρο τον χωρόχρονο. Το πιο συνηθισμένο παράδειγμα καθολικής συνθήκης εξάρτησης για μία φυσική θεωρία συνίσταται στην υπόθεση ότι αυτή είναι ντετερμινιστική. Ο ντετερμινισμός γενικά μας λέει ότι τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα κάποια χρονική στιγμή καθορίζουν το σύνολο των συμβάντων που έχουν ήδη λάβει και θα λάβουν χώρα κάθε άλλη χρονική στιγμή. Στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής το αίτημα που εκφράζει την υπόθεση του ντετερμινισμού είναι η πρωτογενής αιτιοκρατία. Εκτός όμως από αυτό το αίτημα, στις τοπικές κβαντικές θεωρίες σε χωρόχρονο Minkowski προκύπτουν και άλλες καθολικές συνθήκες εξάρτησης. Για παράδειγμα, από τα συνήθη αιτήματα της θεωρίας συνάγεται ότι από το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε μία πεπερασμένη περιοχή του χώρου σε άπειρη χρονική διάρκεια καθορίζεται το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στον χωρόχρονο Minkowski.

Οι τοπικές συνθήκες εξάρτησης περιγράφουν σχέσεις ανάμεσα στα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε πεπερασμένες περιοχές του χωροχρόνου. Έτσι, στην περίπτωση του τοπικού ντετερμινισμού αξιώνουμε το σύνολο των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα κάποια χρονική στιγμή σε κάποια χωροειδή περιοχή να καθορίζει τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε μία πεπερασμένη χωροχρονική περιοχή που αποτελεί το πεδίο εξάρτησης της πρώτης. Αντιστοίχως, στην τοπική κβαντική φυσική διατυπώνεται το αίτημα της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας. Επίσης μπορεί να αποδειχθεί ότι το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε ορισμένο χρονικό διάστημα σε μία πεπερασμένη χωρική περιοχή καθορίζουν το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στον διπλό κώνο που αποτελεί την αιτιακή πλήρωση[25] αυτής της χωροχρονικής περιοχής.

[25] Αν *O* μία περιοχή του χωροχρόνου Minkowski, η *αιτιακή πλήρωση* (causal completion) της περιοχής *O* είναι το σύνολο *το* σύνολο των σημείων του χωροχρόνου που είναι χωροειδώς απομακρυσμένα από την *O΄*, δηλαδή *O΄΄*=(*O΄*)*΄*. Ο διπλός κώνος είναι η αιτιακή πλήρωση της βάσης του. Για παράδειγμα η

Παρατηρούμε ότι στις περιπτώσεις συνθηκών εξάρτησης που αναφέραμε υπάρχει αντιστοιχία ανάμεσα σε καθολικές και τοπικές συνθήκες εξάρτησης. Με δεδομένο αυτό, το ζητούμενο σε σχέση με την τοπικότητα είναι να εξετάσουμε κατά πόσον οι αντίστοιχες καθολικές και τοπικές συνθήκες εξάρτησης ισχύουν μαζί στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας. Έτσι, ακολουθώντας τον Earman (1987) μπορούμε να διατυπώσουμε την ακόλουθη συνθήκη για την τοπικότητα σε σχέση με κάποια συνθήκη εξάρτησης:

> Αν σε μία θεωρία T ισχύει μία καθολική συνθήκη εξάρτησης, τότε ισχύει και η αντίστοιχη τοπική συνθήκη εξάρτησης και αντίστροφα: αν σε μία θεωρία T ισχύει μία τοπική συνθήκη εξάρτησης, τότε ισχύει και η αντίστοιχη καθολική συνθήκη εξάρτησης.

Τα ερωτήματα που προκύπτουν από αυτή την συνθήκη τοπικότητας σε σχέση, για παράδειγμα, με τον ντετερμινισμό έχουν την εξής μορφή: "Μία ντετερμινιστική θεωρία είναι και τοπικά ντετερμινιστική;" καθώς επίσης το αντίστροφο ερώτημα "Μία τοπικά ντετερμινιστική θεωρία είναι και καθολικά ντετερμινιστική;". Ανάλογα με το ποιες απαντήσεις δίδονται σε τέτοιου είδους ερωτήματα στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας συμπεραίνουμε κατά πόσον ισχύει η προαναφερθείσα συνθήκη τοπικότητας.

7.3.1 Καθολικές συνθήκες εξάρτησης

Ο Earman στο εξαιρετικό βιβλίο του *A primer on determinism* (1986) διατύπωσε την έννοια του λαπλασιανού ντετερμινισμού με όρους δυνατών κόσμων. Οι δυνατοί κόσμοι θεωρούνται συλλογές δυνάμει συμβάντων – με κάθε στοιχείο της συλλογής

αιτιακή πλήρωση της μπάλας $|\vec{x}| < R$ στο υπερεπίπεδο $x^0 = 0$ είναι ο διπλός κώνος $D_{x,y}$ με $x = (R, \vec{0})$, $y = (-R, \vec{0})$. Επίσης, η αιτιακή πλήρωση της ορθογώνιας περιοχής που αποτελείται από τα $x \in \mathbb{R}^4$ για τα οποία $|\vec{x}| < R$ και $|x^0| < \varepsilon$, δηλαδή αποτελεί μία πεπερασμένη περιοχή που περιλαμβάνεται στη χρονική φέτα S_ε είναι ο διπλός κώνος $D_{x,y}$ με $x = (R + \varepsilon, \vec{0})$, $y = (-R - \varepsilon, \vec{0})$. Μία περιοχή του χωροχρόνου Minkowski για την οποία ισχύει $O'' = O$ ονομάζεται *αιτιακώς πλήρης περιοχή* (causally complete). Το πρότυπο μίας αιτιακώς πλήρους περιοχής είναι το «διαμάντι» ή διπλός κώνος. Άλλο παράδειγμα αιτιακώς πλήρους περιοχής είναι μία σφηνοειδής περιοχή *W*.

να αντιστοιχεί σε κάποιο σημείο του χωροχρόνου – που αναπαριστάνουν δυνατές εναλλακτικές ιστορίες του πραγματικού κόσμου. Ο πραγματικός κόσμος είναι εκείνη η συλλογή συμβάντων που περιλαμβάνει όλα τα συμβάντα που έχουν ήδη λάβει χώρα, λαμβάνουν χώρα στο παρόν και θα λάβουν χώρα στο μέλλον. Έτσι, αν με $\mathcal{W}$ συμβολίσουμε το σύνολο των δυνατών κόσμων που ικανοποιούν τους φυσικούς νόμους που ισχύουν στον ενεργεία κόσμο, τότε

[D] Ένας κόσμος $W \in \mathcal{W}$ είναι ντετερμινιστικός κατά Laplace ακριβώς στην περίπτωση που για κάθε δυνατό κόσμο $W' \in \mathcal{W}$, αν οι W και W' συμφωνούν κάποια χρονική στιγμή ως προς όλες τις σχετικές φυσικές ιδιότητες, τότε συμφωνούν και κάθε άλλη χρονική στιγμή.

Στο πλαίσιο της σημασιολογικής προσέγγισης των φυσικών θεωριών, οι δυνατοί κόσμοι αναπαριστάνονται από μοντέλα μίας φυσικής θεωρίας. Αυτή η αντιστοίχηση δυνατών κόσμων – μοντέλων μίας θεωρίας μας επιτρέπει να ορίσουμε την έννοια της ντετερμινιστικής θεωρίας κατά Montague (Earman 1986:21):

[DT] Μία θεωρία T θα λέμε ότι είναι ντετερμινιστική κατά Laplace αν για κάθε ζεύγος μοντέλων της T ισχύει ότι αν τα μοντέλα αυτά συμφωνούν σε μία χρονική στιγμή, τότε θα συμφωνούν και σε κάθε άλλη χρονική στιγμή.

Ένα παράδειγμα χωροχρονικής θεωρίας που είναι ντετερμινιστική κατά Laplace είναι η θεωρία που περιγράφει ένα βαθμωτό πεδίο που ικανοποιεί την κυματική εξίσωση σε καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο.

Πιο συγκεκριμένα ας θεωρήσουμε έναν χωρόχρονο $< M, g >$. Αν $R \subset M$ τότε το πεδίο εξάρτησης μέλλοντος της περιοχής R , $D^{+}(R)$, ορίζεται ως το σύνολο των σημείων $p \in M$ για τα οποία ισχύει ότι κάθε αιτιακή καμπύλη με κατεύθυνση το μέλλον που διέρχεται από το p και δεν έχει πέρατα στο παρελθόν (μη επεκτάσιμη προς το παρελθόν) συναντάει την R. Αντιστοίχως ορίζεται το πεδίο εξάρτησης παρελθόντος της R , $D^{-}(R)$, αν στον παραπάνω ορισμό εναλλάξουμε τους όρους "παρελθόν" και "μέλλον". Το ολικό πεδίο εξάρτησης της R είναι

$D(R) = D^+(R) \cup D^-(R)$. Ας θεωρήσουμε τώρα ένα κλειστό άχρονο[26] υποσύνολο Σ της M (δηλαδή, ένα κλειστό υποσύνολο που τέμνεται το πολύ μία φορά από μία αιτιακή καμπύλη με κατεύθυνση στο μέλλον) για το οποίο ισχύει $D(\Sigma) = M$. Το Σ ονομάζεται επιφάνεια Cauchy. Ένας χωρόχρονος που έχει μία επιφάνεια Cauchy ονομάζεται καθολικά υπερβολικός[27]. Επίσης αποδεικνύεται (Hawking and Ellis 1973:212) ότι η πολλαπλότητα M ενός καθολικά υπερβολικού χωροχρόνου είναι ομοιομορφική με την $\mathbb{R} \times S$, όπου S μία τρισδιάστατη πολλαπλότητα και ότι για κάθε $a \in \mathbb{R}$, το σύνολο $\Sigma = \{a\} \times S$ είναι μία επιφάνεια Cauchy. Έτσι, για έναν καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο $< M, g >$, μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάθε επιφάνεια Cauchy Σ της μορφής $\{a\} \times S$ αναπαριστάνει το σύνολο των σημείων της M που αντιστοιχούν στην χρονική στιγμή a.

Τα μοντέλα της θεωρίας που περιγράφει ένα βαθμωτό πεδίο που ικανοποιεί την κυματική εξίσωση σε ένα καθολικά υπερβολικά χωρόχρονο είναι της μορφής

$$< M, g, A^a, B, C, \phi > \tag{7.3.1}$$

με το πεδίο ϕ να ικανοποιεί την υπερβολική διαφορική εξίσωση

$$g^{ab}\nabla_a\nabla_b\phi + A^a\nabla_a\phi + B\phi + C = 0, \tag{7.3.2}$$

όπου ∇_a ο τελεστής παραγώγισης που προκύπτει από την μετρική, A^a ένα λείο διανυσματικό πεδίο και B, C λείες συναρτήσεις. Αν Σ είναι μία λεία, χωροειδής επιφάνεια Cauchy και n^a το μοναδιαίο κάθετο διάνυσμα σε αυτή τότε για οποιεσδήποτε ομαλές αρχικές συνθήκες $\left(\phi, n^a\nabla_a\phi\right)$ στην Σ υπάρχει μοναδική λύση της διαφορικής εξίσωσης στην M και το πρόβλημα αρχικών τιμών είναι καλώς τοποθετημένο: η λύση εξαρτάται συνεχώς, στην κατάλληλη τοπολογία, από τις αρχικές συνθήκες (Wald 1984:250-1, Θεωρ. 10.1.2). Η μοναδικότητα της λύσης του

[26] Ένα υποσύνολο Σ της M ονομάζεται *άχρονο* αν δεν υπάρχει ζεύγος σημείων του Σ που να μπορούν να συνδεθούν με μία χρονοειδή καμπύλη.

[27] Λόγω των καλών ιδιοτήτων που έχουν οι καθολικά υπερβολικοί χωρόχρονοι όπως είναι η δυνατότητα ορισμού μίας καθολικής χρονικής συνάρτησης, η απουσία κλειστών χρονογραμμών, κ.ά., έχει υποστηριχθεί ότι όλοι οι φυσικώς πραγματοποιήσιμοι χωρόχρονοι είναι καθολικά υπερβολικοί (Wald 1984:202).

προβλήματος αρχικών τιμών εκφράζει την απαίτηση του ντετερμινισμού κατά Laplace, σύμφωνα με την οποία αν δύο μοντέλα της θεωρίας

$$< M, g, A^a, B, C, \phi_1 >, \ < M, g, A^a, B, C, \phi_2 > \tag{7.3.3}$$

συμφωνούν κάποια χρονική στιγμή ως προς τις τιμές όλων των σχετικών φυσικών ποσοτήτων, οι οποίες στην συγκεκριμένη περίπτωση είναι η τιμή του πεδίου στην επιφάνεια Cauchy

$$\phi_1\big|_\Sigma = \phi_2\big|_\Sigma \tag{7.3.4}$$

και η τιμή της παραγώγου κατά τη διεύθυνση που είναι κάθετη στην επιφάνεια

$$n^a \nabla_a \phi_1 = n^a \nabla_a \phi_2, \tag{7.3.5}$$

τότε τα δύο μοντέλα θα συμφωνούν σε κάθε άλλη χρονική στιγμή, δηλαδή πάνω σε οποιαδήποτε άλλη επιφάνεια Cauchy.

Στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, το αίτημα της πρωτογενούς αιτιοκρατίας θεωρείται ότι εκφράζει μία συνθήκη ανάλογη με το λαπλασιανό ντετερμινισμό [D]. Υπενθυμίζουμε ότι σε μία τοπική κβαντική θεωρία σε χωρόχρονο Minkowski, η πρωτογενής αιτιοκρατία μάς λέει ότι η άλγεβρα μίας χρονικής φέτας $S_\varepsilon^{(n)}$ πάχους ε,

$$S_\varepsilon^{(n)} = \left\{ x \in \mathbb{R}^4 : \left| \eta_{\mu\nu} n^\mu x^\nu \right| < \varepsilon \right\}, \tag{7.3.6}$$

ταυτίζεται με την σχεδόν-τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}$ (στην εκδοχή Haag-Kastler) ή την καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$ (στην εκδοχή Haag-Araki). Δηλαδή ισχύουν οι σχέσεις

$$\mathcal{A}(S_\varepsilon^{(n)}) = \mathcal{A} \tag{7.1.20}$$

και

$$\mathcal{R}(S_\varepsilon^{(n)}) = \mathcal{R}. \tag{7.1.21}$$

Ο χωρόχρονος Minkowski είναι καθολικά υπερβολικός και οι επιφάνειες Cauchy είναι χωροειδή υπερεπίπεδα που ορίζονται από την συνθήκη x^0= σταθ. ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς. Η χρονική φέτα είναι η μη φραγμένη περιοχή του χωροχρόνου που περιέχεται ανάμεσα σε δύο χωροειδή υπερεπίπεδα. Τα παρατηρήσιμα που παράγουν την άλγεβρα της χρονικής φέτας $S_\varepsilon^{(n)}$ προσδιορίζουν τα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χρονικό διάστημα εύρους $\varepsilon/2$ γύρω από κάποια χρονική στιγμή. Το αίτημα της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας μάς λέει ότι τα παρατηρήσιμα που προσδιορίζουν αυτά τα συμβάντα για οποιαδήποτε χρονική στιγμή *είναι ισοδύναμα* με το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στο τοπικό κβαντικό σύστημα.

Η έννοια της ισοδυναμίας παρατηρήσιμων που χρησιμοποιείται για την ερμηνεία της πρωτογενούς αιτιοκρατίας ορίστηκε για πρώτη φορά από τον Ekstein (1969). Καταρχήν τα συμβάντα όπως και τα παρατηρήσιμα είναι τοπικά, δηλαδή έχουν συγκεκριμένους χωροχρονικούς προσδιορισμούς. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει τα τοπικά παρατηρήσιμα αντιστοιχούν σε μετρητικές διατάξεις που είναι εντοπισμένες σε κάποια χωροχρονική περιοχή και τα συμβάντα σε ορισμένα μετρητικά αποτελέσματα. Ας θεωρήσουμε για κάθε τοπικό παρατηρήσιμο την κλάση που ορίζεται από το σύνολο των παρατηρήσιμων του συστήματος, ανεξάρτητα από τους χωροχρονικούς προσδιορισμούς τους, που σε κάθε καθολική κατάσταση του συστήματος λαμβάνουν την ίδια τιμή, η οποία αναπαριστάνει την αναμενόμενη τιμή του παρατηρήσιμου. Η κλάση αυτή είναι η κλάση ισοδυναμίας ενός τοπικού παρατηρήσιμου και όλα τα στοιχεία της έχουν τις ίδιες στατιστικές ιδιότητες. Μάλιστα, όταν αναφερόμαστε σε ένα στοιχείο της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας, ουσιαστικά αναφερόμαστε σε οποιονδήποτε εκπρόσωπο της κλάσης ισοδυναμίας των τοπικών παρατηρήσιμων. Με αυτή την έννοια δύο παρατηρήσιμα τα οποία, για παράδειγμα, είναι δυνατόν να μετρηθούν σε διαφορετικές χρονικές στιγμές μπορούν να θεωρηθούν ισοδύναμα, δηλαδή να ταυτιστούν ως προς την στατιστική τους για κάθε καθολική κατάσταση του συστήματος. Παραπέρα, επειδή οι συγκεκριμένοι χωροχρονικοί προσδιορισμοί των τοπικών αλγεβρών δεν εγγράφονται στη μαθηματική δομή τους[28] μπορούμε να ταυτίσουμε δύο άλγεβρες για τις οποίες ισχύει

[28] Με αυτό δεν εννοούμε ότι η μαθηματική δομή της σχεδόν- τοπικής άλγεβρας δεν είναι διαφορετική από την δομή μίας τοπικής άλγεβρας, ούτε ότι δεν μπορούμε να μιλήσουμε για ιδιαιτερότητες της

ότι η κλάση κάθε αυτοσυζυγούς στοιχείου[29] της μίας άλγεβρας εκπροσωπείται από κάποιο στοιχείο της άλλης άλγεβρας. Οι σχέσεις (7.1.20) και (7.1.21) θα πρέπει να κατανοηθούν με αυτόν τον τρόπο.

Για να κατανοήσουμε πώς η συνθήκη της πρωτογενούς αιτιοκρατίας εκφράζει τον ντετερμινιστικό χαρακτήρα ενός τοπικού κβαντικού συστήματος, ας θεωρήσουμε δύο μοντέλα μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας στην περιγραφή Haag-Kastler,

$$\begin{aligned}&\left\langle M, g, O \to \mathcal{A}(O), O \to \{\phi_{1O}\}, G, g \mapsto a_g \right\rangle,\\ &\left\langle M, g, O \to \mathcal{A}(O), O \to \{\phi_{2O}\}, G, g \mapsto a_g \right\rangle.\end{aligned} \tag{7.3.7}$$

Τα μοντέλα αυτά διαφέρουν ως προς τις τοπικές, φυσικώς αποδεκτές, καταστάσεις του τοπικού κβαντικού συστήματος. Ας υποθέσουμε τώρα ότι η κατάσταση των συστημάτων που περιγράφονται από τα δύο μοντέλα της θεωρίας είναι ίδια στην χρονική φέτα $S_\varepsilon = \left\{ x \in \mathbb{R}^4 : \left| x^0 \right| < \varepsilon \right\}$ που περιορίζεται από τα υπερεπίπεδα $x^0 = \pm\varepsilon$ $(\varepsilon > 0)$ ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς,

$$\phi_{1S_\varepsilon} = \phi_{2S_\varepsilon}. \tag{7.3.8}$$

Δηλαδή, οι πιθανότητες που αποδίδονται στα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα την χρονική στιγμή t=0 είναι ίδιες για τα δύο συστήματα. Λόγω της πρωτογενούς αιτιότητας, η κατάσταση κάθε συστήματος στην χρονική φέτα S_ε είναι *καθολική* κατάσταση, διότι αποτελεί γραμμικό θετικό κανονικοποιημένο συναρτησιακό της σχεδόν-τοπικής άλγεβρας. Άρα τα δύο συστήματα που περιγράφονται από τα μοντέλα (7.3.7) βρίσκονται στην ίδια καθολική κατάσταση και, επειδή ο περιορισμός της καθολικής κατάστασης σε μία περιοχή του χωροχρόνου

μαθηματικής δομής ορισμένου τύπου περιοχών. Κάθε άλλο, για παράδειγμα οι von Neumann άλγεβρες των διπλών κώνων είναι τύπου III. Ωστόσο, δεν καταγράφονται στην μαθηματική δομή των αλγεβρών ενικοί χωροχρονικοί προσδιορισμοί. Για παράδειγμα, δεν παρουσιάζει κάποια ιδιαιτερότητα η τοπική άλγεβρα ενός διπλού κώνου που έχει ως κέντρο ένα ορισμένο σημείο του χωροχρόνου, σε σχέση με την άλγεβρα ενός διπλού κώνου που έχει τα ίδια γεωμετρικά χαρακτηριστικά αλλά διαφορετικό κέντρο.

[29] Στο σημείο αυτό, για λόγους απλότητας, ταυτίζουμε τα αυτοσυζυγή στοιχεία μίας άλγεβρας με τα παρατηρήσιμα που αναπαριστάνουν.

ορίζεται μονοσήμαντα και αποτελεί την τοπική κατάσταση του συστήματος στην περιοχή αυτή, συμπεραίνουμε ότι για κάθε πεπερασμένη περιοχή *O* ισχύει

$$\phi_{1O} = \phi_{2O}. \tag{7.3.9}$$

Με άλλα λόγια, συστήματα που περιγράφονται από τα μοντέλα (7.3.7) ταυτίζονται παντού στον χωρόχρονο Minkowski.

Ας εξετάσουμε τώρα τις διαφορές ανάμεσα σε ένα κλασικό ντετερμινιστικό σύστημα στο χωρόχρονο Minkowski και στη δυναμική που προσδιορίζεται από το αίτημα της χρονικής φέτας. Μία προφανής διαφορά είναι ότι ενώ στην κλασική περίπτωση μιλάμε για χρονικές στιγμές και υπερεπίπεδα Cauchy που αντιστοιχούν σε αυτές, στην κβαντική περίπτωση αναφερόμαστε σε χρονικές φέτες. Δηλαδή, ενώ στην κλασική περίπτωση η κατάσταση του συστήματος πάνω σε ένα υπερεπίπεδο Cauchy καθορίζει την κατάσταση του συστήματος οποιαδήποτε άλλη χρονική στιγμή, στην κβαντική περίπτωση η κατάσταση του συστήματος σε μία αυθαίρετα στενή χρονική φέτα καθορίζει την κατάσταση σε οποιαδήποτε άλλη χρονική φέτα. Η διαφορά αυτή προκύπτει από το γεγονός ότι η τοπική άλγεβρα των παρατηρήσιμων κατασκευάζεται με κατάλληλη "άθροιση" ημιγραμμικών μορφών από δοκιμαστικές συναρτήσεις (smearing) που έχουν συμπαγές στήριγμα σε μία πεπερασμένη χωροχρονική περιοχή. Όπως επισημαίνει ο Haag (1996:57) ενώ για ελεύθερα πεδία η "άθροιση" μπορεί να γίνει πάνω σε ένα υπερεπίπεδο σταθερού χρόνου σε μία πεπερασμένη χωρική περιοχή, στην περίπτωση των αλληλεπιδρώντων πεδίων η θεωρία της επανακανονικοποίησης επιβάλλει η άθροιση να γίνει τόσο στο χώρο όσο και στο χρόνο. Ωστόσο, οι Halvorson και Müger (2007:780) παρατηρούν ότι ο ισχυρισμός του Haag είναι υποθετικός, διότι δεν υπάρχουν θεωρήματα που να επιβάλλουν κάτι τέτοιο.

Υπάρχει μία ακόμα διαφορά η οποία είναι πιο σημαντική γιατί θέτει υπό αμφισβήτηση το κατά πόσον θα πρέπει να μιλάει κανείς για ντετερμινισμό γενικώς στο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας. Όταν στην αρχή αυτής της υποενότητας παρουσιάσαμε τον κατά Earman ορισμό του λαπλασιανού ντετερμινισμού, αναφερθήκαμε στη συμφωνία δύο δυνατών κόσμων ως προς όλες τις φυσικές τους ιδιότητες κάποια χρονική στιγμή. Η συμφωνία αυτή προϋποθέτει ότι κάθε χρονική

στιγμή οι ιδιότητες των δύο κόσμων είναι καθορισμένες, ώστε να μπορούν να συγκριθούν, και συνεπάγεται ότι τη δεδομένη χρονική στιγμή οι δύο κόσμοι βρίσκονται στην ίδια κατάσταση. Τώρα ας υποθέσουμε οι κόσμοι αυτοί είναι μη αναγώγιμα στατιστικοί ως προς την συμπεριφορά τους, δηλαδή εν γένει η κατάσταση ενός δυνατού κόσμου προσδιορίζει την πιθανότητα ο κόσμος αυτός να έχει κάποια φυσική ιδιότητα και μόνον εφόσον η πιθανότητα είναι μονάδα λέμε ότι ο κόσμος αυτός κατέχει την εν λόγω ιδιότητα. Σε αυτή την περίπτωση, οι δύο κόσμοι μπορούν να συγκριθούν και να βρεθεί ότι συμφωνούν ως προς την κατάσταση στην οποία βρίσκονται - δηλαδή, να βρεθεί ότι στις αντίστοιχες φυσικές ιδιότητες αποδίδεται η ίδια τιμή πιθανότητας. Ωστόσο, οι δύο κόσμοι δεν μπορούν να συγκριθούν ως προς τις σχετικές φυσικές ιδιότητες διότι αυτές δεν είναι καθορισμένες για κάθε δυνατή κατάσταση καθενός από αυτούς. Έτσι, η συμφωνία δύο δυνατών κόσμων ως προς την κατάσταση στην οποία βρίσκονται δεν συνεπάγεται την συμφωνία τους ως προς τις σχετικές φυσικές ιδιότητες. Όμως αν δεν μπορούν να συγκριθούν δύο δυνατοί κόσμοι ως προς το σύνολο των φυσικών ιδιοτήτων τους, τότε ο λαπλασιανός ντετερμινισμός υπονομεύεται από την μη καθορισιμότητα των φυσικών ιδιοτήτων κάθε δυνατού κόσμου.

Με βάση αυτή την προσέγγιση η τοπική κβαντική φυσική δεν είναι ντετερμινιστική θεωρία μολονότι ισχύει η πρωτογενής αιτιοκρατία. Αν θεωρήσουμε ότι τα στοιχεία της σχεδόν-τοπικής C* άλγεβρας αναπαριστάνουν ιδιότητες ενός τοπικού κβαντικού συστήματος, τότε αν η άλγεβρα είναι απλή[30] (δηλαδή, αν δεν έχει μη τετριμμένα αμφίπλευρα ιδεώδη), τότε δεν υπάρχει κατάσταση της άλγεβρας στην οποία όλα τα παρατηρήσιμα να έχουν καθορισμένες τιμές (Rédei 1998:149, Πρτ. 9.3). Άρα, δύο μοντέλα της θεωρίας δεν συμφωνούν ποτέ ως προς όλες τις φυσικές ιδιότητες με την έννοια ότι δεν είναι δυνατόν το σύνολο των φυσικών ιδιοτήτων των συστημάτων που αναπαριστάνουν να είναι καθορισμένο. Μολαταύτα, τα δύο μοντέλα είναι δυνατόν να περιγράφουν συστήματα που βρίσκονται στην ίδια κατάσταση. Μάλιστα, αν προκειμένου να αναφερθούμε στον ντετερμινιστικό χαρακτήρα ενός τοπικού κβαντικού συστήματος θεωρήσουμε ότι δύο μοντέλα του συστήματος πρέπει

[30] Πρέπει να επισημάνουμε ότι η μαθηματική συνθήκη σύμφωνα με την οποία η σχεδόν – τοπική άλγεβρα είναι απλή ικανοποιείται από πολλά μοντέλα της αλγεβρικής κβαντικής θεωρίας πεδίων, π.χ. από την άλγεβρα των κανονικών μεταθετικών σχέσεων. Οι Haag και Kastler (1964) έθεσαν μεταξύ των αιτημάτων της θεωρίας μία αναγκαία συνθήκη για την απλότητα της άλγεβρας απαίτησαν να είναι πρωτογενής (primitive), δηλαδή να έχει μία πιστή και μη αναγώγιμη αναπαράσταση.

να συμφωνούν ως προς τις τοπικές ιδιότητες σε κάθε πεπερασμένη περιοχή που περιλαμβάνεται σε μία χρονική φέτα, τότε τα πράγματα μπορούν να γίνουν ακόμα χειρότερα. Αν οι φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος είναι καταστάσεις των οποίων η προετοιμασία απαιτεί πεπερασμένη ενέργεια, τότε για ένα σύστημα σε αυτή την κατάσταση προκύπτει, λόγω της συνέπειας [RS_1] του θεωρήματος Reeh-Schlieder, ότι δεν υπάρχει τοπικό παρατηρήσιμο το οποίο να έχει καθορισμένη τιμή. Δηλαδή, σε μία κατάσταση πεπερασμένης ενέργειας *κανένα* συμβάν δεν λαμβάνει χώρα: η πιθανότητα που αποδίδεται σε κάθε συμβάν είναι διαφορετική από 0 και 1!

Όμως, αυτή η θεώρηση για τον ντετερμινισμό δεν είναι η μοναδική ούτε είναι καθολικά αποδεκτή. Ο Nagel υποστήριζε ότι κάθε θεωρία θα πρέπει να κρίνεται αν είναι ή δεν είναι ντετερμινιστική σε σχέση με την προσίδια περιγραφή της κατάστασης των φυσικών συστημάτων που διέπονται από αυτή και με κριτήριο το αν οι φυσικοί νόμοι της θεωρίας επιτρέπουν να συναγάγουμε παραγωγικά την κατάσταση του συστήματος κάποια χρονική στιγμή από την κατάσταση του συστήματος σε κάποια πρότερη χρονική στιγμή. Έτσι, η κβαντική μηχανική ενός σωματιδίου που ικανοποιεί την εξίσωση Schrödinger και του οποίου η κατάσταση αναπαριστάνεται από την κυματοσυνάρτηση είναι ντετερμινιστική θεωρία «με την ίδια έννοια που η κλασική μηχανική είναι ντετερμινιστική σε σχέση με την μηχανική περιγραφή της κατάστασης» (Nagel 1961:306). Ο Bunge επίσης έχει διατυπώσει μία θέση υπέρ της γενίκευσης της έννοιας του ντετερμινισμού σύμφωνα με την οποία:

> Αυτό που απαιτείται ώστε να διατηρηθεί ο ντετερμινισμός με τη γενική έννοια είναι να ισχύει η υπόθεση ότι τα συμβάντα λαμβάνουν χώρα με έναν ή περισσότερους ορισμένους (καθορισμένους) τρόπους και ότι αυτοί οι τρόποι του γίγνεσθαι δεν είναι αυθαίρετοι αλλά σύμφωνοι με κάποιο νόμο (lawful), και ότι οι διαδικασίες με τις οποίες κάθε αντικείμενο αποκτά τα χαρακτηριστικά του προκύπτει από προϋπάρχουσες συνθήκες. (Bunge 1979:13)

Άραγε είμαστε έτοιμοι να δεχθούμε και το συμπέρασμα που προκύπτει από θεωρήσεις για τον ντετερμινισμό σαν αυτές του Nagel και του Bunge; Ας σημειωθεί ότι ο τελευταίος, λίγες γραμμές πιο κάτω από το προηγούμενο παράθεμα, συνοψίζει:

> Στα παιχνίδια τύχης, τα τελικά αποτελέσματα προκύπτουν από καθορισμένες συνθήκες και σε συμφωνία με ορισμένους νόμους. Συνεπώς δεν μπορούν να χρησιμοποιούνται για να

> επεξηγήσουν ή να υποστηρίξουν τη μη καθορισιμότητα (indeterminism), όπως γίνεται συχνά. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι παιχνίδια τύχης δεν ακολουθούν ένα συγκεκριμένο συνήθη τύπο νόμου, συγκεκριμένα τον νευτώνειο. Αντιθέτως, ακολουθούν στατιστικούς νόμους είναι στατιστικώς καθοριζόμενα. (ό.π.)

Είμαστε λοιπόν διατεθειμένοι να συμπεριλάβουμε ένα ζάρι ή μία ρουλέτα στην κατηγορία των φυσικών συστημάτων που θεωρούμε ντετερμινιστικά; Νομίζω ότι κάτι τέτοιο είναι αντίθετο στις κοινές μας διαισθήσεις.

Ολοκληρώνοντας αυτή την μικρή αναφορά στο πρόβλημα του ντετερμινισμού θα ήθελα να επιμείνω λίγο περισσότερο στο ντετερμινιστικό χαρακτήρα της εξίσωσης Schrödinger. Δεν θα είχα καμία αντίρρηση να αποδεχθώ ότι ένα κλασικό πεδίο Schrödinger σε νευτώνειο χωρόχρονο αποτελεί ένα ντετερμινιστικό σύστημα εφόσον το πεδίο ερμηνευτεί ότι εκφράζει μία φυσική ιδιότητα που αποδίδεται στα σημεία του χωροχρόνου. Η αντίρρηση ως προς τον ντετερμινισμό εγείρεται αν θεωρήσουμε ότι το πεδίο Schrödinger περιγράφει την κβαντική μηχανική ενός σωματιδίου χωρίς spin και υιοθετήσουμε τον κανόνα του Born για την απόδοση πιθανοτήτων σε ιδιότητες του σωματιδίου. Με αυτή την παρατήρηση θέλουμε να επισημάνουμε ότι το ερώτημα για το αν ένα σύστημα είναι ντετερμινιστικό ή όχι δεν εξαντλείται στα συντακτικά στοιχεία της θεωρίας που το περιγράφει –τις μαθηματικές εξισώσεις που ικανοποιεί η κυματοσυνάρτηση– αλλά αφορά και στη σημασιολογία της θεωρίας – εν προκειμένω, στη στατιστική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης.

Ανεξάρτητα όμως από την στάση που θα υιοθετήσει κανείς σε σχέση με το αν η πρωτογενής αιτιοκρατία εκφράζει το λαπλασιανό ντετερμινισμό, είναι πέραν κάθε αμφισβήτησης ότι το αίτημα αυτό εκφράζει μία καθολική συνθήκη εξάρτησης συμβάντων. Όπως όμως έχουμε ήδη αναφέρει αυτή δεν είναι η μοναδική καθολική συνθήκη εξάρτησης που συναντά κανείς στην τοπική κβαντική φυσική. Ο Horuzhy (1990:42) ορίζει την έννοια της *πλήρους περιοχής* του χωροχρόνου Minkowski ως το γνήσιο υποσύνολο O του $\mathbb{R}^4$ για το οποίο ισχύει $\mathcal{R}(O)=\mathcal{R}$, όπου $\mathcal{R}$ η καθολική άλγεβρα στην Haag-Araki περιγραφή. Εκτός από την χρονική φέτα, πλήρης περιοχή είναι και ο σωλήνας I που περιλαμβάνει μία χρονοειδή καμπύλη ℓ χωρίς πέρατα:

$$\ell=\left\{x\in\mathbb{R}^4 : x=x(s),\ s\in\mathbb{R}\ ,\ \underset{s_1\neq s_2}{\forall}\left(x(s_2)-x(s_1)\right)^2>0,\ \lim_{s\to\pm\infty}x^0(s)=\pm\infty\right\}.$$

Μάλιστα, ο σωλήνας I μπορεί να είναι όσο "λεπτός" θέλουμε αρκεί να περιέχει την ℓ. Η πρόταση αυτή ονομάζεται *θεώρημα του σωλήνα του Borchers* και αποδεικνύεται στο πλαίσιο μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας που ικανοποιεί τα αιτήματα της ισοτονίας, της ασθενούς προσθετικότητας, του σχετικιστικού συναλλοίωτου και τη συνθήκη φάσματος. Το γεγονός ότι το θεώρημα του σωλήνα δεν προϋποθέτει την ισχύ του αιτήματος της πρωτογενούς αιτιοκρατίας για την απόδειξη του συνεπάγεται ότι εκφράζει μία διαφορετική, ανεξάρτητη, καθολική συνθήκη εξάρτησης: Αν η κατάσταση κατά μήκος ενός χρονοειδούς σωλήνα είναι ίδια για οποιαδήποτε δύο μοντέλα μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας, τότε τα μοντέλα ταυτίζονται σε κάθε περιοχή του χωροχρόνου Minkowski.

7.3.2 Τοπικές συνθήκες εξάρτησης

Η τοπική ισχύς του ντετερμινισμού απαιτεί η κατάσταση του συστήματος σε μία περιοχή R να καθορίζεται από την κατάσταση του συστήματος σε μία χωροειδή περιοχή S για την οποία ισχύει $S \subset J^{\mp}(R)$ και $R \subset D^{\pm}(S)$[31]. Με άλλα λόγια, το σύνολο των συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην περιοχή R (ή γενικότερα των πιθανοτήτων που αποδίδονται σε δυνατά συμβάντα στην R) καθορίζεται από τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα (ή αντίστοιχα τις πιθανότητες δυνατών συμβάντων να λάβουν χώρα) σε μία περιοχή S τέτοια ώστε η S να περιέχεται γνησίως στο αιτιακό παρελθόν ή στο αιτιακό μέλλον της R και η R να περιέχεται γνησίως στο πεδίο εξάρτησης μέλλοντος ή παρελθόντος αντίστοιχα της περιοχής S.

Στην περίπτωση της θεωρίας που περιγράφει ένα βαθμωτό πεδίο που ικανοποιεί την κυματική εξίσωση σε καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο το θεώρημα που παραθέτει ο Wald (1984:250-1, Θεωρ. 10.1.2) μάς λέει ότι ο ντετερμινισμός ισχύει τοπικά για περιοχές που αποτελούν υποσύνολα μίας επιφάνειας Cauchy. Συγκεκριμένα, μία μεταβολή των αρχικών τιμών έξω από ένα κλειστό υποσύνολο S

[31] Το αιτιακό μέλλον (παρελθόν), $J^{+}(p)$, $(J^{-}(p))$ ενός σημείου p μίας χωροχρονικής περιοχής R ορίζεται ως το σύνολο των σημείων q της διαφορίσιμης πολλαπλότητας M, για τα οποία υπάρχει μία αιτιακή καμπύλη $\lambda(s)$ με κατεύθυνση στο μέλλον τέτοια ώστε $\lambda(0) = p$ και $\lambda(1) = q$. Επιπλέον, $J^{\pm}(R) = \bigcup_{p \in R} J^{\pm}(p)$. (Wald 1984:190)

μίας επιφάνειας Cauchy Σ δεν επηρεάζει τη λύση στο $D(S)$. Δηλαδή, το πεδίο (και οι παράγωγοι του) σε οποιαδήποτε περιοχή $R \subset D(S)$ καθορίζεται αποκλειστικά από την τιμή του πεδίου και της παραγώγου του πεδίου στην διεύθυνση του κάθετου διανύσματος n^a της Σ εντός της *S*. Άρα για κάθε περιοχή *R* ενός καθολικά υπερβολικού χωροχρόνου υπάρχει κλειστή περιοχή *S* η οποία ορίζεται ως η τομή μίας επιφάνειας Cauchy Σ με το αιτιακό παρελθόν ή το αιτιακό μέλλον, $J^{\mp}(R)$, τέτοια ώστε ο καθορισμός της κατάστασης του πεδίου στην *S* να καθορίζει την κατάσταση του πεδίου στην *R*. Δηλαδή, δύο μοντέλα της θεωρίας που συμφωνούν ως προς τις σχετικές φυσικές ιδιότητες στην περιοχή *S* και ενδεχομένως διαφέρουν εκτός αυτής θα συμφωνούν και στην περιοχή *R*.

Το συμπέρασμα λοιπόν στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι στην περίπτωση της θεωρίας του βαθμωτού πεδίου σε καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο ο ντετερμινισμός ισχύει τόσο καθολικά όσο και τοπικά. Άρα, στο πλαίσιο αυτής της χωροχρονικής θεωρίας η αρχή τοπικότητας που αναφέραμε στην αρχή της ενότητας αυτής ισχύει.

Δεν θα εξετάσουμε γενικά περιπτώσεις χωροχρονικών θεωριών στις οποίες ο ντετερμινισμός ισχύει τοπικά χωρίς να ισχύει καθολικά. Θα αναφερθούμε μόνο στο γεγονός ότι για κάθε χωρόχρονο, ανεξάρτητα από το αν είναι καθολικά υπερβολικός, υπάρχουν περιοχές στις οποίες ισχύει τοπικά ο ντετερμινισμός για την θεωρία του βαθμωτού πεδίου. Συγκεκριμένα, για κάθε σημείο του χωροχρόνου $< M, g >$ υπάρχει περιοχή *U* του σημείου αυτού τέτοια ώστε το ζεύγος $< U, g|_U >$ να αναπαριστάνει έναν καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο, δηλαδή να περιλαμβάνει μία επιφάνεια Cauchy (Earman 1986:185). Αν θεωρήσουμε ότι δύο μοντέλα της θεωρίας του βαθμωτού πεδίου ταυτίζονται ως προς τις αρχικές συνθήκες πάνω στην επιφάνεια Cauchy του $< U, g|_U >$, τότε με βάση όσα έχουμε αναφέρει προηγούμενα θα ταυτίζονται σε ολόκληρη την περιοχή *U*. Επομένως, ο ντετερμινισμός ισχύει σε κάποια περιοχή οποιουδήποτε σημείου του χωροχρόνου χωρίς να προϋποτίθεται ότι ισχύει καθολικά.

Σε μία τοπική κβαντική θεωρία σε χωρόχρονο Minkowski,

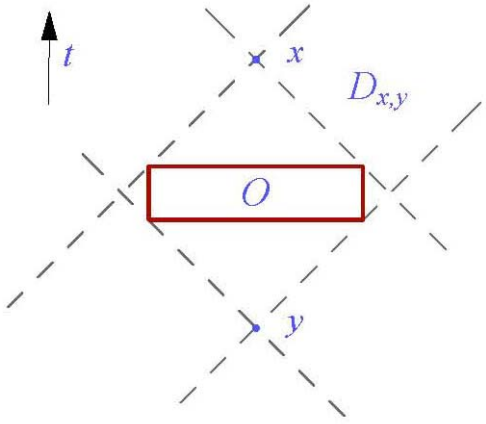
$$\left\langle \mathbb{R}^4, \eta_{\alpha\beta}, O \to \mathcal{A}(O), O \to \Sigma(O), G, g \mapsto a_g \right\rangle,$$

η τοπική σχέση εξάρτησης που είναι ανάλογη με τον τοπικό ντετερμινισμό των κλασικών συστημάτων περιγράφεται από το αίτημα της *τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας*:

> Για κάθε χωροχρονική περιοχή O η C* άλγεβρα της περιοχής αυτής $\mathcal{A}(O)$ είναι ίδια με την C* άλγεβρα της αιτιακής πλήρωσης O'' της περιοχής αυτής. Δηλαδή,

$$\mathcal{A}(O) = \mathcal{A}(O''). \tag{7.3.10}$$

Για παράδειγμα η αιτιακή πλήρωση μίας ορθογώνιας περιοχής O που περιλαμβάνεται σε μία χρονική φέτα S_ε και αποτελείται από τα $x \in \mathbb{R}^4$ για τα οποία $|\vec{x}| < R$ και $|x^0| < \varepsilon$, είναι ο διπλός κώνος $D_{x,y}$ με $x = (R+\varepsilon, \vec{0})$, $y = (-R-\varepsilon, \vec{0})$ (βλ. Σχήμα 7.1). Άρα, η τοπική πρωτογενής αιτιοκρατία μάς λέει ότι $\mathcal{A}(O) = \mathcal{A}(D_{x,y})$.



Σχ. 7.1 Η αιτιακή πλήρωση μίας ορθογώνιας περιοχής

Η αναλογία του αιτήματος της πρωτογενούς αιτιοκρατίας με τον τοπικό ντετερμινισμό της υπερβολικής διαφορικής εξίσωσης σε καθολικά υπερβολικούς χωροχρόνους είναι προφανής. Ο καθορισμός της τοπικής κατάστασης του κβαντικού συστήματος στην ορθογώνια περιοχή O καθορίζει την τοπική κατάσταση του συστήματος στον διπλό κώνο που αποτελεί την αιτιακή πλήρωση της O. Μάλιστα αν

θεωρήσουμε δύο μοντέλα της θεωρίας (7.3.7), για τα οποία ισχύει ότι οι τοπικές καταστάσεις τους ταυτίζονται στην περιοχή *O*, χωρίς ωστόσο να ταυτίζονται και οι καθολικές καταστάσεις των συστημάτων που περιγράφουν, δηλαδή

$$\phi_{1O} = \phi_{2O} \quad \text{και} \quad \phi_1 \neq \phi_2 ,$$

όπου ϕ_1, ϕ_2 οι επεκτάσεις των ϕ_{1O}, ϕ_{2O} στην σχεδόν τοπική άλγεβρα $\mathcal{A}$, τότε οι τοπικές καταστάσεις των συστημάτων θα ταυτίζονται στην αιτιακή πλήρωση της *O*,

$$\phi_{1D_{x,y}} = \phi_{2D_{x,y}} .$$

Το ερώτημα που προκύπτει για την τοπικότητα έχει να κάνει με το αν η πρωτογενής αιτιοκρατία και η τοπική πρωτογενής αιτιοκρατία ισχύουν ή δεν ισχύουν μαζί σε μία τοπική κβαντική θεωρία. Οι Haag-Schroer (1962) αποδεικνύουν ότι η τοπική πρωτογενής αιτιοκρατία μπορεί να προκύψει από την πρωτογενή αιτιοκρατία για ένα δίκτυο von Neumann αλγεβρών που ικανοποιούν την υπόθεση της δυϊκότητας (duality). Σύμφωνα με αυτή την υπόθεση η τοπική άλγεβρα του αιτιακού συμπληρώματος μίας πεπερασμένης περιοχής ταυτίζεται με τον μεταθέτη της άλγεβρας της περιοχής: $\mathcal{R}(O') = \mathcal{R}(O)'$ [32]. Άρα, στην κλάση των τοπικών κβαντικών θεωριών υπάρχουν θεωρίες για τις οποίες η ισχύς της πρωτογενούς αιτιοκρατίας συνεπάγεται την τοπική εκδοχή της. Το αντίστροφο, δηλαδή η ισχύς της πρωτογενούς αιτιοκρατίας εφόσον υποθέσουμε την ισχύ της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας, προκύπτει άμεσα από το γεγονός ότι η αιτιακή πλήρωση μίας χωροειδούς φέτας $S_{\varepsilon}^{(n)}$ είναι ολόκληρος ο χωρόχρονος Minkowski.

Η τοπική εκδοχή της συνθήκης καθολικής εξάρτησης που προκύπτει από το θεώρημα του σωλήνα του Borchers διατυπώνεται ως εξής για μία τοπική κβαντική θεωρία (Araki 1999:102). Έστω $D_{x,y}$ ο διπλός κώνος με κορυφές τα σημεία *x, y* που είναι χρονοειδώς απομακρυσμένα και $I_{x,y}$ ένα ανοικτό υποσύνολο που περιλαμβάνει

[32] Ο Haag (1996:144) υιοθετεί το αίτημα της δυϊκότητας ως μία εκ των υποθέσεων της τοπικής κβαντικής φυσικής σε χωρόχρονο Minkowski που προκύπτει από την εξής δοκιμαστική υπόθεση: ο τομέας του κενού (vacuum sector) της θεωρίας περιγράφεται από έναν ομομορφισμό από το ορθοσυμπληρωμένο πλέγμα των περιοχών του χωροχρόνου Minkowski που είναι αιτιακώς πλήρεις στο πλέγμα των von Neumann αλγεβρών ενός χώρου Hilbert.

το ανοικτό τμήμα χρονοειδούς καμπύλης που συνδέει τα *x* και *y*. Για κάθε τοπική κβαντική θεωρία στην εκδοχή Haag-Araki στην οποία ισχύει η ισοτονία, η ασθενής προσθετικότητα, το σχετικιστικό συναλλοίωτο και η συνθήκη φάσματος, έχουμε

$$\mathcal{R}(D_{x,y}) = \mathcal{R}(I_{x,y}). \tag{7.3.11}$$

Αν ισχύει η (7.3.11), τότε οι τοπικές καταστάσεις στον κώνο $D_{x,y}$ ταυτίζονται για οποιαδήποτε δύο μοντέλα των οποίων οι τοπικές καταστάσεις ταυτίζονται στο τμήμα σωλήνα $I_{x,y}$, ακόμα και αν οι αντίστοιχες καθολικές καταστάσεις διαφέρουν. Επειδή τόσο η καθολική όσο και η τοπική εκδοχή αυτής της συνθήκης εξάρτησης αποδεικνύονται από τα ίδια αιτήματα συμπεραίνουμε ότι είτε θα ισχύουν μαζί είτε καμιά από τις δύο δεν θα ισχύει. Επιπλέον, παρατηρούμε ότι αν υποθέσουμε ότι η τοπική κβαντική θεωρία ικανοποιεί το αίτημα της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας, τότε η σχέση (7.3.11) προκύπτει άμεσα από αυτό το αίτημα αν $O = I_{x,y}$.

Σε αυτή την ενότητα αναφερθήκαμε σε καθολικές και τοπικές συνθήκες εξάρτησης που είναι δυνατόν να ισχύουν στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας. Συγκεκριμένα αναφερθήκαμε στην περίπτωση του ντετερμινισμού για κλασικές θεωρίες και στο ανάλογο του στις θεωρίες της τοπικής κβαντικής φυσικής και στην περίπτωση της συνθήκης εξάρτησης που προκύπτει από το θεώρημα του σωλήνα του Borchers στην τοπική κβαντική φυσική. Επιπλέον, θεωρήσαμε ότι το γεγονός ότι σε μία θεωρία ισχύει τόσο η καθολική όσο και η τοπική εκδοχή μίας συνθήκης εξάρτησης αποτελεί κριτήριο τοπικότητας για τη θεωρία αυτή. Ως παράδειγμα κλασικής χωροχρονικής θεωρίας που είναι τοπική με αυτή την έννοια ως προς τον ντετερμινισμό αναλύσαμε τη θεωρία που περιγράφει ένα βαθμωτό πεδίο σε καθολικά υπερβολικούς χωροχρόνους που ικανοποιεί την κυματική διαφορική εξίσωση. Επίσης στην περίπτωση της τοπικής κβαντικής φυσικής είδαμε ότι υπάρχουν θεωρίες που ικανοποιούν τόσο την πρωτογενή όσο και την τοπική πρωτογενή αιτιότητα. Τέλος, είδαμε ότι η συνθήκη εξάρτησης που προκύπτει από το θεώρημα του σωλήνα είτε ισχύει στην καθολική και στην τοπική εκδοχή της είτε δεν ισχύει καθόλου.

7.4 Μερικές σκέψεις για τις αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική

Στην τελευταία ενότητα αυτού του κεφαλαίου θα μας απασχολήσει το ζήτημα των αιτιακών διαδικασιών στην τοπική κβαντική φυσική. Με τη βοήθεια της μεθόδου του ίχνους θα προσπαθήσουμε να προσεγγίσουμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας, σε συμφωνία με την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon. Θα εξετάσουμε μία περίπτωση στην οποία μπορούμε να διαπιστώσουμε συνεχή διάδοση του ίχνους στον κώνο φωτός της κυρτής πεπερασμένης περιοχής στην οποία το ίχνος δημιουργείται. Επίσης, θα δείξουμε ότι το ίχνος που δημιουργείται σε μία χωροχρονική περιοχή δεν διαδίδεται "πολύ πέραν" αυτής της περιοχής κατά μήκος μίας χρονοειδούς γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία. Το γεγονός αυτό θεωρούμε ότι αποτελεί αρνητική ένδειξη για την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών. Τέλος, θα προτείνουμε μία εναλλακτική προσέγγιση στις αιτιακές διαδικασίες που διαφέρει από τις προηγούμενες ως προς την περιγραφή του χαρακτηριστικού που υποθέτουμε ότι εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας.

7.4.1 Συνεχής διάδοση ίχνους στον κώνο φωτός

Υπενθυμίζουμε ότι στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, η δημιουργία ίχνους σε ένα συμβάν που είναι δυνατόν να λάβει χώρα σε μία περιοχή O συνίσταται στην εκτέλεση μίας φυσικής τοπικής διεργασίας στην περιοχή O που μεταβάλλει την πιθανότητα να λάβει χώρα το εν λόγω συμβάν. Στο πλαίσιο της εκδοχής Haag-Araki μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας, με βασικό αντικείμενο το δίκτυο von Neumann αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}$ και την καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$ να είναι ισόμορφη με την άλγεβρα των φραγμένων τελεστών σε κάποιο χώρο Hilbert, μία φυσική τοπική διεργασία στην περιοχή O περιγράφεται από μία τοπική δυναμική απεικόνιση στην O - δηλαδή, από μία κανονική δυναμική απεικόνιση T^*,

$$\omega \mapsto T^* \omega ,$$

για την οποία για κάθε $A \in \mathcal{R}$ ισχύει:

$$T^*\omega(A) = \omega(T(A)),$$

με $T(A) = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^* A V_n$, $V_n \in \mathcal{R}(O)$, και τη σειρά $\sum_{n=1}^{\infty} V_n^* V_n$ να συγκλίνει ισχυρά στη μονάδα.

Η μεταβολή της καθολικής κατάστασης του τοπικού κβαντικού συστήματος από ω σε $T^*\omega$ που λαμβάνει χώρα στην περιοχή O είναι το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή αυτή. Το ίχνος εκδηλώνεται σε ορισμένα συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στην O και σε οποιαδήποτε άλλη χωροχρονική περιοχή O_1. Τα συμβάντα αυτά αναπαριστάνονται από προβολικούς τελεστές στην $\mathcal{R}(O_1)$ που *δεν μετατίθενται* με τα στοιχεία $V_n \in \mathcal{R}(O)$ για κάθε $n = 1, 2, \ldots$. Αν A είναι ένα τέτοιος προβολικός τελεστής, τότε γι' αυτόν θα ισχύει

$$\omega(A) \neq \omega(T(A)). \qquad (7.3.12)$$

Από τα παραπάνω και τη συνθήκη της τοπικής μεταθετότητας, προκύπτει ότι αν το ίχνος δημιουργείται σε μία περιοχή O, τότε δεν εμφανίζεται σε καμία περιοχή O_1 που είναι σε χωροειδή απομάκρυνση από την O.

Ας θεωρήσουμε μία κυρτή πεπερασμένη περιοχή O στο χωρόχρονο Minkowski, η οποία περιγράφεται σε κάποιο σύστημα αναφοράς που έχουμε επιλέξει ως εξής:

$$O = \left\{ (x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^4 : |x_0| < \varepsilon \text{ και } (x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 < r \right\}, \qquad (7.3.13)$$

όπου x_0 η συντεταγμένη του συστήματος αναφοράς που αναπαριστάνει το χρόνο και x_1, x_2, x_3 οι μεταβλητές που αναπαριστάνουν τις χωρικές συντεταγμένες (βλ. Σχήμα 7.4a). Η περιοχή O περιέχεται σε μία χρονική φέτα πάχους ε γύρω από τη χρονική στιγμή t=0. Ορίζουμε για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$ μία πεπερασμένη περιοχή

$$O_t = \left\{ (x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^4 : |x_0 - t| < \varepsilon \text{ και } (x_1)^2 + (x_2)^2 + (x_3)^2 < (r + t)^2 \right\}, \qquad (7.3.14)$$

θέτοντας c=1 για την ταχύτητα του φωτός. Για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$ η περιοχή O_t περιέχεται

στην τομή του κώνου φωτός του μέλλοντος της περιοχής O [33], $C^+(O)$, με τη χρονική φέτα πάχους ε περί τη χρονική στιγμή t,

$$S_{t,\varepsilon} = \left\{ (x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^4 : |x_0 - t| < \varepsilon \right\}, \quad t \in \mathbb{R}_+^* .$$

Επίσης, για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$ η αιτιακή πλήρωση της O_t , O_t'', είναι ένας διπλός κώνος που περιέχει την περιοχή O. Δηλαδή, για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$, ισχύει

$$O_t \subseteq S_{t,\varepsilon} \cap C^+(O) \quad \text{και} \quad O \subseteq O_t'' . \tag{7.3.15}$$

Σύμφωνα με την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία ισχύει,

$$\mathcal{R}(O_t) = \mathcal{R}(O_t'') ,$$

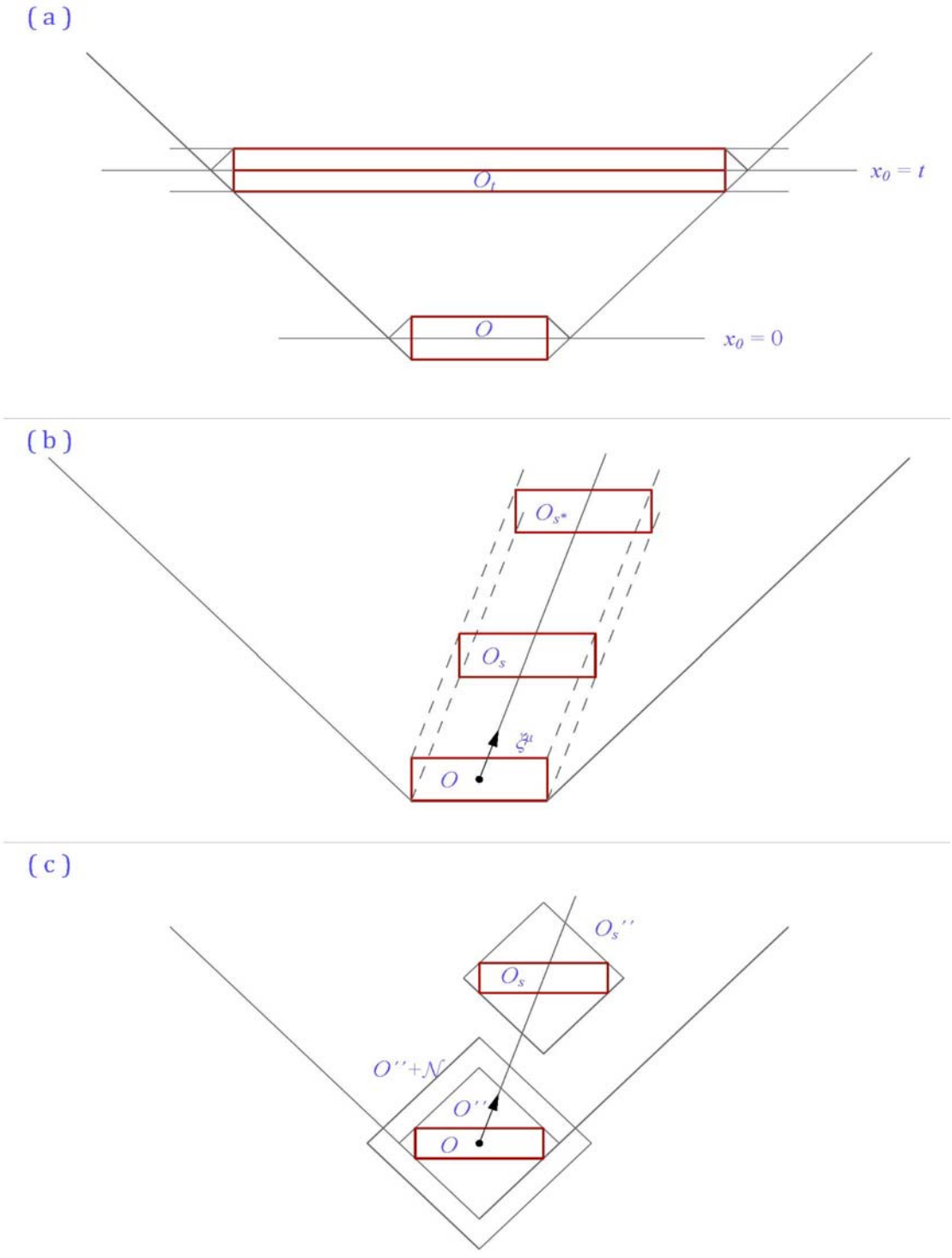
και λόγω του αιτήματος της ισοτονίας,

$$\mathcal{R}(O) \subseteq \mathcal{R}(O_t). \tag{7.3.16}$$

Έστω ότι δημιουργούμε ίχνος σε ένα συμβάν A ή γενικότερα σε ένα τοπικό παρατηρήσιμο στην περιοχή O. Υποθέτουμε ότι το ίχνος εκδηλώνεται στην περιοχή O , στο στοιχείο A - δηλαδή, μεταβάλλεται η πιθανότητα (ή η αναμενόμενη τιμή) του A, σύμφωνα με τη σχέση (7.3.12). Ικανή συνθήκη για να συμβαίνει αυτό είναι τα στοιχεία $V_n \in \mathcal{R}(O)$ με τα οποία ορίζεται η τοπική δυναμική απεικόνιση να μην μετατίθενται με το A. Λόγω της σχέσης (7.3.16), το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή O θα εκδηλώνεται και σε κάθε περιοχή O_t, για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$, διότι το στοιχείο A ανήκει στην άλγεβρα $\mathcal{R}(O_t)$ για κάθε $t \in \mathbb{R}_+^*$. Επομένως, το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε είναι ότι έχουμε συνεχή εκδήλωση του ίχνους στην

[33] Ο κώνος φωτός του μέλλοντος (παρελθόντος) ενός σημείου p της διαφορίσιμης πολλαπλότητας M , $C^+(p)$, $\left(C^-(p)\right)$ είναι το υποσύνολο της M που παράγεται από φωτοειδείς γεωδαισιακές με κατεύθυνση στο μέλλον (παρελθόν). Ο κώνος φωτός του μέλλοντος (παρελθόντος) μιας περιοχής O ορίζεται ως την ένωση των κώνων φωτός του μέλλοντος (παρελθόντος) κάθε σημείου της O, $C^{\pm}(O) = \bigcup_{p \in O} C^{\pm}(p)$.

οικογένεια περιοχών $\{O_t\}_{t\in\mathbb{R}_+^*}$ που περιλαμβάνονται στον κώνο φωτός της περιοχής O.



Σχ. 7.2 Αιτιακές Διαδικασίες στην Τοπική Κβαντική Φυσική

7.4.2 Όρια στη διάδοση του ίχνους

Η διάδοση του ίχνους στον κώνο φωτός μίας περιοχής δεν επαρκεί για τον ορισμό της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας. Για να επιτύχουμε κάτι τέτοιο, σύμφωνα με την πρώιμη θεωρία του Salmon, θα πρέπει να καθορίσουμε μία χωροχρονική γραμμή κατά μήκος της οποίας λαμβάνει χώρα η διάδοση του ίχνους. Αυτό που αναμένουμε είναι ότι η γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας στην τοπική κβαντική φυσική είναι ένας χωροχρονικός σωλήνας που ορίζεται από τη μεταφορά μίας πεπερασμένης περιοχής O κατά μήκος των ολοκληρωτικών γραμμών ενός διανυσματικού πεδίου. Κατά μήκος του χωροχρονικού αυτού του σωλήνα θα πρέπει να εκδηλώνεται συνεχώς το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή O, σε απουσία περαιτέρω παρεμβάσεων[34]. Ωστόσο, όπως θα δούμε, αυτό ενδέχεται να είναι εφικτό μόνο σε περιοχές που είναι "αρκετά κοντά" στην περιοχή O που δημιουργείται το ίχνος.

Καταρχάς, ας δώσουμε ένα απλό παράδειγμα ενός χωροχρονικού σωλήνα που θα μπορούσε να αποτελεί τη γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας (βλ. σχ. 7.4b). Έστω ότι το διανυσματικό πεδίο ορίζεται από ένα χρονοειδές μοναδιαίο διάνυσμα με κατεύθυνση προς το μέλλον $\xi^\mu = (\xi_0, \xi_1, \xi_2, \xi_3)$, και η γραμμή κατά μήκος της οποίας μεταφέρεται η περιοχή O είναι η χρονοειδής γεωδαισιακή που έχει εφαπτόμενο διάνυσμα το ξ^μ. Για κάθε $s \in \mathbb{R}$ η περιοχή O_s είναι η μετάθεση της O στην κατεύθυνση του ξ^μ,

$$O_s = \left\{ (x_0, x_1, x_2, x_3) \in \mathbb{R}^4 : |x_0 - s\xi_0| < \varepsilon \text{ και } (x_1 - s\xi_1)^2 + (x_2 - s\xi_2)^2 + (x_3 - s\xi_3)^2 < r \right\}. \tag{7.3.17}$$

Παρατηρείστε ότι η περιοχή O_s περιέχεται στην περιοχή O_t που ορίσαμε με την (7.3.14) για $t = s\xi_0$. Για να θεωρήσουμε ότι η γεωδαισιακή που ορίζεται από το

[34] Η συνθήκη της απουσίας παρεμβάσεων-αλληλεπιδράσεων, που θέτει ο Salmon στον ορισμό της διάδοσης, θεωρούμε ότι ικανοποιείται εκ των προτέρων. Με άλλα λόγια, δεν εξετάζουμε αν το ίχνος που εκδηλώνεται σε μία χωροχρονική περιοχή είναι προϊόν αλληλεπίδρασης σε αυτή την περιοχή ή αν διαδίδεται στη συγκεκριμένη περιοχή με τη βοήθεια άλλων αιτιακών διαδικασιών. Ο αναγνώστης θα πρέπει να αποδεχθεί άνευ επερώτησης, ότι το ίχνος που εκδηλώνεται σε μία περιοχή είναι προϊόν μίας και μόνης φυσικής τοπικής διεργασίας.

διάνυσμα ξ^{μ} αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία, θα πρέπει να μπορούμε να υποθέσουμε ότι αν στην περιοχή O δημιουργηθεί ίχνος και το ίχνος εμφανίζεται σε μία περιοχή O_{s*} για κάποιο $s^* \in \mathbb{R}$, τότε θα εμφανίζεται συνεχώς για κάθε $s \in (0, s^*)$, σε απουσία επιπλέον παρεμβάσεων.

Όμως, οι περιοχές O_s, στις οποίες εκδηλώνεται το ίχνος, δεν βρίσκονται "πολύ μακρυά" από την περιοχή O. Συγκεκριμένα, το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή O δεν διαδίδεται σε περιοχές O_s που η αιτιακή τους πλήρωση (δηλαδή, ο διπλός κώνος O_s'' στον οποίο περιέχονται) είναι ξένη ως προς μία περιοχή που είναι λίγο πιο εκτεταμένη από την αιτιακή πλήρωση, O'', της περιοχής O (βλ. σχ. 7.4c). Αυτό προκύπτει από την ακόλουθη πρόταση που απέδειξε Landau (1969):

> Έστω ότι τα αιτήματα της ισοτονίας, της ασθενούς προσθετικότητας, της τοπικής μεταθετότητας, του σχετικιστικού συναλλοίωτου και της συνθήκης φάσματος ισχύουν και ότι η καθολική von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ του τοπικού κβαντικού συστήματος είναι παράγων (factor). Επίσης, έστω D_1, D_2, δύο διπλοί κώνοι τέτοιοι ώστε $(D_1 + \mathcal{N}) \cap D_2 = \varnothing$, δηλαδή, η επέκταση του διπλού κώνου D_1, που προκύπτει από τη μετάθεση όλων των σημείων του ως προς κάθε διάνυσμα που ανήκει σε μία περιοχή $\mathcal{N}$ της αρχής των αξόνων, είναι ξένη με τον κώνο D_2. Τότε, θα ισχύει ότι $\mathcal{R}(D_1) \cap \mathcal{R}(D_2) = \{aI\}$, όπου I το μοναδιαίο στοιχείο και $a \in \mathbb{C}$ (Horuzhy 1990:77).

Η πρόταση μας λέει ότι δεν υπάρχει μη τετριμμένο κοινό στοιχείο των αλγεβρών περιοχών O και O_s, στο οποίο να εκδηλώνεται το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή O, εφόσον οι προκείμενες της πρότασης ικανοποιούνται και οι περιοχές O και O_s ικανοποιούν συγκεκριμένες γεωμετρικές προϋποθέσεις.

Πέραν των συνηθισμένων αιτημάτων της τοπικής κβαντικής φυσικής, η πρόταση του Landau προϋποθέτει ότι η καθολική von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ του τοπικού κβαντικού συστήματος είναι παράγων. Η συνθήκη αυτή δεν είναι εξεζητημένη. Είναι ισοδύναμη με τη συνθήκη ότι η σχεδόν-τοπική άλγεβρα του κβαντικού συστήματος είναι απλή και ικανοποιείται από την άλγεβρα Weyl των

κανονικών μεταθετικών σχέσεων για το ελεύθερο κβαντικό πεδίο Klein-Gordon, (Horuzhy 1990:145 και 241). Δηλαδή, η συνθήκη της πρότασης ικανοποιείται στην απλούστερη και πλέον συνηθισμένη περίπτωση κβαντικού πεδίου που θα συναντήσει κάποιος στη βιβλιογραφία.

Ο Landau (1969) παρουσιάζει δύο ακόμα ικανές συνθήκες για την παραγωγή του ίδιου συμπεράσματος. Η πρώτη από αυτές μας λέει ότι στην ένωση των τοπικών αλγεβρών πεπερασμένων περιοχών συστήματος δεν υπάρχουν μη τετριμμένα στοιχεία που να είναι αναλλοίωτα ως προς τις χωροχρονικές μεταθέσεις. Δηλαδή, στο σύνολο $\bigcup_{O}\mathcal{R}(O)$, όπου O πεπερασμένες περιοχές του χωροχρόνου, δεν υπάρχει στοιχείο B τέτοιο ώστε $B=U(a^{\mu})BU(a^{\mu})^{-1}$ για κάθε διάνυσμα a^{μ} του χωροχρόνου Minkowski, όπου $a^{\mu}\mapsto U(a^{\mu})$ η μοναδιαία αναπαράσταση της ομάδας των χωροχρονικών μεταθέσεων. Η σημασία αυτής της συνθήκης είναι προφανής. Αν υπάρχει ένα στοιχείο που να είναι αναλλοίωτο ως προς τις χωροχρονικές μεταθέσεις και ανήκει στην τοπική άλγεβρα μίας πεπερασμένης περιοχής, τότε θα ανήκει και στην άλγεβρα κάθε χωροχρονικής μετάθεσης της περιοχής αυτής, ανεξάρτητα από την "απόσταση" στην οποία η περιοχή αυτή μεταφέρεται. Κατά συνέπεια, οι δύο περιοχές θα έχουν μη τετριμμένα κοινά στοιχεία ανεξάρτητα από τις γεωμετρικές σχέσεις που ικανοποιούν και σε αντίθεση με την πρόταση που διατυπώσαμε. Η δεύτερη προκείμενη που παραθέτει ο Landau αφορά στην ικανοποίηση από το κβαντικό σύστημα μίας ασυμπτωτικής συνθήκης που μας λέει ότι η αναμενόμενη τιμή οποιουδήποτε τοπικού παρατηρήσιμου, σε οποιαδήποτε διανυσματική κβαντική κατάσταση, τείνει στην αναμενόμενη τιμή στην κατάσταση του κενού, καθώς το παρατηρήσιμο "μεταφέρεται" σε άπειρη απόσταση από την περιοχή εντοπισμού του.

Το ενδεχόμενο η διάδοση του ίχνους να λαμβάνει χώρα μόνο "αρκετά κοντά" στην περιοχή που δημιουργείται το ίχνος είναι προβληματικό για τον ορισμό των αιτιακών διαδικασιών. Θα μπορούσε κάποιος να υποστηρίξει ότι αν επιλέγαμε διαφορετικού τύπου περιοχές, αντί των περιοχών O και O_s $(s\in\mathbb{R})$, ως περιοχές εντοπισμού των συμβάντων στα οποία δημιουργείται και εκδηλώνεται το ίχνος, τότε θα συμπεραίναμε ότι, κατά προσέγγιση, το ίχνος δεν διαδίδεται πέραν της περιοχής στην οποία δημιουργείται. Για παράδειγμα, σκεφτείτε την περίπτωση που η ίδια η

περιοχή O ήταν ένας συμμετρικός διπλός κώνος. Τότε, σε ένα διπλό κώνο που προκύπτει από τη μετάθεση της O και βρίσκεται σε μικρή απόσταση από αυτή, το ίχνος δεν διαδίδεται, ανεξάρτητα από το αν η μετάθεση γίνεται σε χωροειδή ή σε χρονοειδή κατεύθυνση. Υπό αυτές τις προϋποθέσεις μπορούμε να διατυπώσουμε το γενικό συμπέρασμα ότι στην τοπική κβαντική φυσική δεν υπάρχουν διαδικασίες με την ικανότητα να διαδίδουν ίχνος σε κάποια απόσταση από την περιοχή που το ίχνος δημιουργήθηκε.

Θα κλείσουμε αυτή την ενότητα με δύο παρατηρήσεις. Η πρώτη μας λέει ότι η πρόταση του Landau δεν αντιφάσκει με το γεγονός ότι το ίχνος διαδίδεται συνεχώς στην οικογένεια περιοχών $\{O_t\}_{t\in\mathbb{R}_+^*}$ εντός του κώνου φωτός της O. Διότι για τις αιτιακές πληρώσεις των περιοχών O και O_t, ισχύει,

$$O'' \subset \ldots \subset O_{t_1}'' \subset O_{t_2}'' \subset \ldots \text{ για } t_1 < t_2 < \ldots,$$

και, άρα, δεν πληρούνται οι γεωμετρικές προϋποθέσεις της πρότασης. Ωστόσο, η πρόταση του Landau θέτει έναν περιορισμό στον περαιτέρω εντοπισμό της περιοχής που εκδηλώνεται το ίχνος: για κάθε $t\in\mathbb{R}$, δεν υπάρχει περιοχή $F\subset O_t$ στην οποία να εκδηλώνεται το ίχνος που δημιουργείται σε ένα συγκεκριμένο συμβάν στην περιοχή O και για την οποία να ισχύει $(F''+\mathcal{N})\cap O''=\varnothing$. Έτσι, για να διαπιστώσουμε την εκδήλωση του ίχνους που δημιουργείται στην περιοχή O, σε επόμενες χρονικές στιγμές, θα πρέπει να επιλέγουμε όλο και πιο "μεγάλες" περιοχές για να πραγματοποιούμε την ανίχνευση.

Η δεύτερη παρατήρηση αφορά συνολικότερα στην προσέγγιση που υιοθετήσαμε. Σύμφωνα με όσα αναφέραμε, ο λόγος που δεν υπάρχουν αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική είναι ότι δεν υπάρχουν καν διαδικασίες, είτε αιτιακές είτε ψευδο-διαδικασίες, που να εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και να αναπαριστάνονται γεωμετρικά από χωροχρονικές γραμμές. Πράγματι, θεωρήσαμε ότι μία διαδικασία S που διέρχεται από μία χωροχρονική περιοχή O περιγράφεται γεωμετρικά από ένα διανυσματικό πεδίο, κατά μήκος των ολοκληρωτικών γραμμών του οποίου μεταφέρεται η O, και από ένα χαρακτηριστικό ως προς το οποίο η S εκδηλώνει ομοιομορφία, το οποίο

αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή A που ανήκει στην τοπική άλγεβρα της περιοχής O. Επιπλέον, θεωρήσαμε ότι μία διαδικασία είναι αιτιακή αν το ίχνος που δημιουργείται από μία τοπική φυσική διεργασία στο συμβάν A στην περιοχή O θα εκδηλώνεται στο ίδιο συμβάν κατά τη μεταφορά της O κατά μήκος του διανυσματικού πεδίου που ορίζει την S, σε απουσία περαιτέρω παρεμβάσεων. Αυτό που δείξαμε είναι ότι στην τοπική άλγεβρα μίας περιοχής O_s, η οποία προκύπτει από τη μεταφορά της O κατά μήκος των ολοκληρωτικών γραμμών του διανυσματικού πεδίου και δεν είναι «πολύ απομακρυσμένη» από την O, δεν ανήκει ο προβολικός τελεστής A. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει διαδικασία που να ξεκινάει από την περιοχή O, να διέρχεται από την περιοχή O_s και να εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς το χαρακτηριστικό A. Μάλιστα, αν υπήρχε τέτοια διαδικασία θα συμπεραίναμε άμεσα ότι είναι αιτιακή, διότι το ίχνος που υποθέτουμε ότι δημιουργείται στην O εκδηλώνεται στο συμβάν A. Επαναλαμβάνουμε, ωστόσο, ότι παραμένει *ανοιχτό* ζήτημα το εάν υπάρχουν βραχείας διάδοσης αιτιακές διαδικασίες.

Από την άλλη, θα μπορούσε κάποιος να υποθέσει ότι μία διαδικασία στην τοπική κβαντική φυσική καθορίζεται αφενός από ένα διανυσματικό πεδίο κατά μήκος των ολοκληρωτικών γραμμών του οποίου μεταφέρεται η περιοχή O, αφετέρου από μία μονοπαραμετρική οικογένεια προβολικών τελεστών A_s, $(s \in \mathbb{R})$, που θα θεωρήσουμε ότι αναπαριστάνουν την εκδήλωση του *ίδιου* χαρακτηριστικού, στις *διαφορετικές* χωροχρονικές περιοχές O_s $(s \in \mathbb{R})$. Έτσι, θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και εκτείνονται είτε σε χωροειδή είτε σε χρονοειδή κατεύθυνση ανάλογα με τα χαρακτηριστικά του διανυσματικού πεδίου. Σε αυτή την περίπτωση το βάρος θα πέσει στη διάκριση ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες και σε ψευδο-διαδικασίες και στην υλοποίηση αυτής της διάκρισης μέσω της μεθόδου του ίχνους. Ας εξετάσουμε ένα παράδειγμα αυτής της προσέγγισης.

7.4.3 Μία διαφορετική προσέγγιση στις αιτιακές διαδικασίες

Ας θεωρήσουμε την περιοχή O που ορίζεται από την (7.3.13) και την οικογένεια περιοχών O_s $(s \in \mathbb{R})$, που αποτελούν τη χωροχρονική μετάθεση της O κατά μήκος του μοναδιαίου χρονοειδούς διανύσματος ξ^μ σύμφωνα με την (7.3.17). Έστω ότι δημιουργούμε ένα ίχνος στο συμβάν A, το οποίο συνίσταται στη μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος του προβολικού τελεστή $A \in \mathcal{R}(O)$. Έτσι, η καθολική κατάσταση του συστήματος μετασχηματίζεται από

$$\omega \mapsto T^*\omega \text{ με } T^*\omega(B) = \omega(T(B)), \text{ για κάθε } B \in \mathcal{R},$$

$$\text{και } T(B) = ABA + (I - A)B(I - A).$$

Λόγω της συνθήκης του σχετικιστικού συναλλοίωτου, ισχύει ότι $\mathcal{R}(O_s) = U(s)\mathcal{R}(O)U(s)^*$, όπου $U(s) = \exp\{isP^\mu\xi_\mu\}$ ο μοναδιαίος τελεστής που αναπαριστάνει τις μεταθέσεις στην κατεύθυνση του ξ^μ για κάθε $s \in \mathbb{R}$. Το προβολικό στοιχείο A_s που ανήκει στην $\mathcal{R}(O_s)$ είναι η εικόνα του A στην άλγεβρα της περιοχής O_s, $A_s = U(s)AU(s)^*$.

Στις προηγούμενες υποενότητες υποθέσαμε ότι στην περιοχή O λαμβάνει χώρα μία τοπική δυναμική διεργασία που δημιουργεί ίχνος σε ένα συμβάν A, δηλαδή μεταβάλλει την πιθανότητα να λάβει χώρα το A. Τώρα, υποθέτουμε ότι η τοπική διεργασία που δημιουργεί το ίχνος στην περιοχή O είναι μία μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος του A. Κατά συνέπεια, το ίχνος δεν εκδηλώνεται σε αυτό το συμβάν, υπό την έννοια ότι δεν μεταβάλλεται η πιθανότητα του A να λάβει χώρα στην περιοχή O. Αυτό που μας ενδιαφέρει είναι να εξετάσουμε αν η εκδήλωση του ίχνους λαμβάνει χώρα στα συμβάντα A_s μέσα στις περιοχές O_s $(s \in \mathbb{R}^*)$. Αυτή είναι η πρώτη διαφορά ανάμεσα σε αυτή την προσέγγιση και στην προηγούμενη[35].

[35] Η στάση του Salmon σε σχέση με το εάν το ίχνος θα πρέπει εκδηλώνεται στο χωροχρονικό σημείο που δημιουργείται είναι αμφίθυμη. Από τη μία, όταν αναφέρεται στη διάδοση του ίχνους κατά μήκος μίας διαδικασίας δεν ενδιαφέρεται για την εκδήλωση του ίχνους στο σημείο που λαμβάνει χώρα η αλληλεπίδραση σήμανσης, αλλά μόνο σε ένα διάστημα της χωροχρονικής γραμμής που έπεται της

Για να θεωρήσουμε τη χρονογραμμή που ορίζεται από το διάνυσμα ξ^{μ} ως αιτιακή διαδικασία, θα πρέπει να υπάρχει $s^* \in \mathbb{R}^*$ τέτοιο ώστε το ίχνος που δημιουργείται από τη μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος κάποιου προβολικού τελεστή A να εκδηλώνεται στο συμβάν A_{s^*} μέσα στην περιοχή O_{s^*} και στα συμβάντα A_s μέσα σε κάθε περιοχή O_s για $s \in (0, s^*)$.

Έστω ότι το τοπικό κβαντικό σύστημα βρίσκεται σε μία κατάσταση ω και υπάρχει $s^* \in \mathbb{R}^*$ τέτοιο ώστε

$$\omega(A_{s^*}) \neq \omega(T(A_{s^*})).$$

Θα δείξουμε ότι υπάρχει κάποιο $s_0 \in (0, s^*)$ τέτοιο ώστε

$$\omega(A_{s_0}) \neq \omega(T(A_{s_0})).$$

Δηλαδή, υπάρχει συμβάν A_{s_0} που εντοπίζεται ανάμεσα στις περιοχές O και O_{s^*}, κατά μήκος της χρονογραμμής, στο οποίο να εκδηλώνεται το ίχνος.

Έστω ότι αυτό δεν ισχύει, δηλαδή, για κάθε $s \in (0, s^*)$ το ίχνος δεν εκδηλώνεται σε κανένα A_s. Τότε, σύμφωνα με όσα έχουμε αναφέρει στην ενότητα 7.2.5, θα ισχύει $[A, A_s] = 0$ για κάθε $s \in (0, s^*)$. Επειδή οι μοναδιαίοι τελεστές $U(s)$ αναπαριστάνουν την *ομάδα* των μεταθέσεων στην κατεύθυνση του ξ^{μ}, θα ισχύει

$$[A, A_s] = 0, \text{ για } |s| < s^*.$$

Σύμφωνα όμως με ένα θεώρημα του Borchers (1967), αν $U(s)$ είναι μία ισχυρά συνεχής μοναδιαία αναπαράσταση μίας μονοπαραμετρικής ομάδας σε ένα χώρο Hilbert $\mathcal{H}$, της οποίας ο γεννήτωρ έχει κάτω φραγμένο φάσμα – προϋποθέσεις που ισχύουν για την ομάδα των χρονικών μεταθέσεων σε μία Haag-Araki θεωρία που ικανοποιεί τη συνθήκη του σχετικιστικού συναλλοίωτου και τη συνθήκη φάσματος –

αιτιακής αλληλεπίδρασης. Από την άλλη, σε μία ψευδο-διαδικασία το ίχνος εκδηλώνεται τοπικά, στην περιοχή που δημιουργείται, χωρίς να διαδίδεται κατά μήκος της διαδικασίας.

και P_1, P_2 δύο προβολικοί τελεστές στον $\mathcal{H}$ τέτοιοι ώστε (i) $P_1P_2 = 0$ και (ii) $\exists \varepsilon > 0$ τέτοιο ώστε για κάθε $s \in \mathbb{R}$ με $|s| < \varepsilon$ να ισχύει $[P_1, U(s)P_2U(s)^*] = 0$, τότε θα ισχύει $P_1U(s)P_2U(s)^* = 0 \ \forall s \in \mathbb{R}$.

Εφαρμόζοντας αυτό το θεώρημα για $P_1 = A$ και $P_2 = A^{\perp} = I - A$ και $\varepsilon = s^*$, καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι $[A, A_s] = 0 \ \forall s \in \mathbb{R}$ - δηλαδή, ότι το ίχνος που δημιουργείται στην περιοχή *O* με βάση τη μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος του *A* δεν εκδηλώνεται στο συμβάν A_s μέσα στην περιοχή O_s για *κανένα* $s \in \mathbb{R}$. Αυτό όμως αντιφάσκει με την υπόθεσή μας ότι εκδηλώνεται στο συμβάν A_{s^*}, στην περιοχή O_{s^*}. Συνεπώς, η υπόθεση ότι $[A, A_s] = 0$ για $|s| < s^*$ δεν ισχύει και υπάρχει $s_0 \in (0, s^*)$ τέτοιο ώστε το ίχνος να εκδηλώνεται στο συμβάν A_{s_0}. Με αυτό τον τρόπο αποδεικνύουμε ότι ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε συμβάντα που εντοπίζονται σε περιοχές O_s κατά μήκος της χρονογραμμής που ορίζεται από το διάνυσμα ξ^μ, υπάρχει τουλάχιστον ένα συμβάν στο οποίο εκδηλώνεται το ίχνος που δημιουργείται στο ένα από τα δύο ακραία συμβάντα και εκδηλώνεται στο άλλο ακραίο συμβάν.

Ωστόσο, αυτή η διαπίστωση δεν αρκεί για να μιλήσουμε, όχι μόνο για συνεχή, αλλά ούτε καν για πυκνή εκδήλωση του ίχνους κατά μήκος της χρονογραμμής. Δεν έχουμε αποδείξει ότι για $s \in (s_0, s^*)$ υπάρχει συμβάν A_s που εντοπίζεται σε μία περιοχή O_s στο οποίο να εκδηλώνεται το ίχνος που δημιουργείται με τη μέτρηση χωρίς επιλογή του *A* στην περιοχή *O*. Έτσι, αυτό που δείξαμε δεν αρκεί για να θεωρήσουμε ότι η χρονογραμμή αναπαριστάνει αιτιακή διαδικασία. Αυτό που δείξαμε είναι ότι γύρω από την περιοχή *O* στην οποία δημιουργείται το ίχνος, "συσσωρεύονται" περιοχές που αποτελούν χωροχρονικές μεταθέσεις της *O* σε μία συγκεκριμένη χρονοειδή κατεύθυνση στις οποίες εκδηλώνεται το ίχνος. Με άλλα λόγια, το σημείο s=0, το οποίο αντιστοιχεί στην περιοχή *O* είναι σημείο συσσώρευσης, με τη μαθηματική έννοια[36], του υποσυνόλου των πραγματικών

[36] Έστω ένα υποσύνολο *A* ενός τοπολογικού χώρου (*X*,τ). Ένα σημείο $x \in X$ ονομάζεται *σημείο συσσώρευσης* του *A* αν σε *κάθε* περιοχή του *x* περιλαμβάνεται ένα σημείο $a \in A$, με $a \neq x$.

αριθμών $s \in \mathbb{R}$ που αντιστοιχούν στις χωροχρονικές περιοχές O_s στις οποίες εκδηλώνεται το ίχνος.

Ένας βασικός λόγος για τον οποίο αναφερθήκαμε σε αυτή τη μάλλον ανεπιτυχή προσπάθεια καθορισμού μίας αιτιακής διαδικασίας ήταν για να δείξουμε ότι είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι το ίδιο χαρακτηριστικό εκδηλώνεται σε διαφορετικές περιοχές του χωροχρόνου, κατά μήκος μίας διαδικασίας, από διαφορετικά προβολικά στοιχεία. Πλέον, η ταυτοποίηση των προβολικών στοιχείων δεν γίνεται στη βάση της θέσης που υποστηρίξαμε στην υποενότητα 7.3.1, σύμφωνα με την οποία, αν για κάθε καθολική κατάσταση του τοπικού κβαντικού συστήματος δύο τοπικά παρατηρήσιμα έχουν την ίδια αναμενόμενη τιμή, τότε ανήκουν στην ίδια κλάση ισοδυναμίας και αναπαριστάνονται στη σχεδόν-τοπική άλγεβρα από το ίδιο αυτοσυζυγές στοιχείο. Στην παρούσα υποενότητα η ταυτοποίηση έγινε με βάση το γεγονός ότι τα προβολικά στοιχεία που περιγράφουν τα συμβάντα στα οποία εκδηλώνεται το ίχνος είναι χωροχρονικές μεταθέσεις ενός προβολικού τελεστή από την περιοχή στην οποία δημιουργείται το ίχνος στην κατεύθυνση του διανύσματος ξ^{μ} [37]. Αυτή είναι η δεύτερη διαφορά ανάμεσα σε αυτή την προσέγγιση της αιτιακής διαδικασίας και σε εκείνες που εξετάσαμε στις προηγούμενες υποενότητες.

Σύνοψη

Η βασική μεταφυσική εικόνα που υποφώσκει στην ανάλυση των εννοιών τοπικότητας που επιχειρήσαμε είναι ότι ο κόσμος είναι μία συλλογή δυνατών συμβάντων τα οποία συνδέονται μεταξύ τους με ορισμένες σχέσεις. Θεωρούμε ότι τα συμβάντα περιέχονται στον χώρο και τον χρόνο και ενδεχομένως καθορίζουν την φύση του. Επίσης, κάθε συμβάν είναι δυνατόν να λάβει χώρα σε μία περιοχή του χώρου και να έχει πεπερασμένη χρονική διάρκεια.

[37]Αυτή η ασθενέστερη έννοια ταυτοποίησης δύο προβολικών στοιχείων που εντοπίζονται σε διαφορετικές χωροχρονικές περιοχές με ένα χαρακτηριστικό που εκδηλώνεται τοπικά μπορεί να γίνει κατανοητή αν σκεφτούμε ότι λόγω του γεγονότος ότι οι προβολικοί τελεστές συνδέονται με βάση την ομάδα των χωροχρονικών μεταθέσεων, θα ισχύει ότι για κάθε τοπική κανονική κατάσταση στη μία χωροχρονική περιοχή υπάρχει τοπική κανονική κατάσταση στην άλλη περιοχή τέτοια ώστε τα συμβάντα που αναπαριστάνουν οι προβολικοί τελεστές να έχουν την ίδια πιθανότητα να λάβουν χώρα. Αυτή η ιδέα ορίζει μία σχέση ισοδυναμίας ανάμεσα στα δύο προβολικά στοιχεία.

Οι φυσικές θεωρίες περιγράφουν την φύση των συμβάντων καθώς και τις μεταξύ τους σχέσεις. Η τοπικότητα είναι μία έννοια που αφορά στις φυσικές θεωρίες. Απαραίτητη προϋπόθεση οποιασδήποτε συζήτησης για την τοπικότητα είναι ότι κάθε μοντέλο της θεωρίας περιγράφει ένα φυσικό χωρόχρονο μαζί με τα υλικά του περιεχόμενα: πεδία, σωματίδια ή οτιδήποτε άλλο. Παραπέρα, για να μπορέσει κάποιος να μιλήσει για τοπικότητα, θα πρέπει να έχουν νόημα στο πλαίσιο της θεωρίας οι έννοιες του τοπικού φυσικού μεγέθους – παρατηρήσιμου καθώς και η έννοια της τοπικής κατάστασης ενός φυσικού συστήματος. Αυτή την προϋπόθεση ονομάσαμε σημασιολογική τοπικότητα. Ένα τοπικό φυσικό μέγεθος αντιστοιχεί σε μία συλλογή συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην ίδια περιοχή του χωροχρόνου και κάθε συμβάν της συλλογής αντιστοιχεί στην απόδοση ορισμένης τιμής στο συγκεκριμένο τοπικό φυσικό μέγεθος. Η κατάσταση ενός φυσικού συστήματος είναι ο κανόνας με τον οποίο αποδίδονται καθορισμένες τιμές ή πιθανότητες στα τοπικά φυσικά μεγέθη. Η τοπική κατάσταση είναι ο κανόνας που αποδίδει καθορισμένες τιμές ή πιθανότητες στο υποσύνολο των τοπικών φυσικών μεγεθών που αναπαριστάνουν συμβάντα τα οποία είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στην ίδια περιοχή του χωροχρόνου. Στο πλαίσιο της εργασίας διαπιστώσαμε ότι η συνθήκη της σημασιολογικής τοπικότητας ικανοποιείται τόσο στις χωροχρονικές θεωρίες όσο και στις θεωρίες της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Μία κατηγορία συνθηκών τοπικότητας που μπορούν να διατυπωθούν στο πλαίσιο μίας θεωρίας εκφράζει περιορισμούς στις σχέσεις ανάμεσα στα συμβάντα οι οποίες προκύπτουν από τις γεωμετρικές σχέσεις των περιοχών στις οποίες τα συμβάντα αυτά είναι δυνατόν να λάβουν χώρα. Σε αυτή την κατηγορία ανήκουν οι συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας από συμβάντα και διεργασίες που στο πλαίσιο των σχετικιστικών θεωριών εκφράζουν την μη επίδραση συμβάντων και διεργασιών που λαμβάνουν χώρα σε κάποια περιοχή του χωροχρόνου σε συμβάντα σε χωροειδή απομάκρυνση.

Οι συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής εξειδικεύονται με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους που έχουν να κάνουν τόσο με το αν η θεωρία είναι διατυπωμένη στην περιγραφή Haag-Kastler ή στην περιγραφή Haag-Araki όσο και με το είδος των τοπικών καταστάσεων της θεωρίας

στις οποίες είναι εύλογο να επιβάλλουμε περιορισμούς. Έτσι, αναφερθήκαμε στην C* και την W* ανεξαρτησία, στην αυστηρή τοπικότητα και τη λογική ανεξαρτησία. Υπάρχει όμως ένας κοινός πυρήνας για όλες αυτές τις συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας ο οποίος είναι η συνθήκη [S.I] σύμφωνα με την οποία για οποιεσδήποτε φυσικώς αποδεκτές τοπικές καταστάσεις σε δύο περιοχές του χωροχρόνου χωροειδώς απομακρυσμένες υπάρχει μία καθολική κατάσταση του συστήματος της οποίας αποτελούν περιορισμό.

Για να διατυπώσουμε τη συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία διακρίναμε ανάμεσα σε *φυσικές* διεργασίες και σε διεργασίες που είναι εν μέρει φυσικές και εν μέρει *νοητικές* υιοθετώντας την διάκριση των Clifton και Halvorson. Οι φυσικές διεργασίες που μπορούν να λάβουν χώρα σε μία περιοχή του χωροχρόνου αναπαριστάνονται από τοπικές δυναμικές απεικονίσεις. Ακολούθως, ορίσαμε ότι σε μία τοπική κβαντική θεωρία ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία αν για κάθε χωροχρονική περιοχή O_1 και για οποιαδήποτε καθολική κατάσταση ω του συστήματος, δεν υπάρχει τοπική δυναμική απεικόνιση στην O_1 που να επηρεάζει τις αναμενόμενες τιμές των τοπικών παρατηρήσιμων σε χωροειδή απόσταση από την O_1. Επίσης δείξαμε ότι ικανή και αναγκαία συνθήκη για να ισχύει η συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπική διεργασία είναι το αίτημα της τοπικής μεταθετότητας. Από εδώ προκύπτει η ερμηνεία του βασικού αιτήματος τοπικότητας της τοπικής κβαντικής φυσικής. Επιπλέον, θεωρήσαμε ότι η συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία εκφράζει τη μη διάδοση ίχνους που δημιουργείται σε οποιοδήποτε συμβάν σε μία περιοχή του χωροχρόνου σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χωροειδή απομάκρυνση. Έτσι, τόσο η συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία όσο και το αίτημα της τοπικής μεταθετότητας εκφράζουν τη μη ύπαρξη αιτιακής σχέσης *á la Reichenbach* ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές.

Οι συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα και διεργασίες είναι δυνατόν να ισχύουν μαζί σε μία τοπική κβαντική θεωρία. Σε αυτή την περίπτωση, οι συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα που αναφέραμε προηγουμένως καθίστανται ισοδύναμες. Η παραβίαση των ανισοτήτων Bell στην τοπική κβαντική φυσική δεν είναι ασύμβατη με την ισχύ της C* ανεξαρτησίας, της W* ανεξαρτησίας, της αυστηρής τοπικότητας ή

της λογικής ανεξαρτησίας αλλά και της τοπικής μεταθετότητας. Ωστόσο, είδαμε ότι υπάρχουν άλλες συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα οι οποίες δεν ισχύουν ως αποτέλεσμα της παραβίασης των ανισοτήτων Bell. Αυτές είναι η W* ανεξαρτησία με τη σημασία του γινομένου και το αίτημα να είναι παραγοντοποιήσιμη κάθε κοινή επέκταση των τοπικών καταστάσεων του συστήματος σε δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές. Η παραβίαση της τελευταίας συνθήκης συνεπάγεται την ύπαρξη θετικής στατιστικής σχέσης ανάμεσα σε συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές και δεν έχουν άμεση αιτιακή σύνδεση.

Επίσης, αναφερθήκαμε στις παράδοξες ιδιότητες της κατάστασης του κβαντικού κενού όπως αναδεικνύονται με το θεώρημα Reeh-Schlieder. Το γεγονός ότι το κενό είναι κυκλικό διάνυσμα κάθε τοπικής άλγεβρας έχει ως συνέπεια να μπορεί να προσεγγισθεί με οποιαδήποτε ακρίβεια, κάθε διανυσματική κατάσταση του συστήματος "επιδρώντας" με κατάλληλους τελεστές που ανήκουν σε μία τοπική άλγεβρα στην κατάσταση του κενού. Ωστόσο, η "επίδραση" αυτή δεν αντιστοιχεί σε φυσικές διεργασίες που μπορούν να λάβουν χώρα σε μία χωροχρονική περιοχή. Αυτή η ιδιότητα του κβαντικού κενού μάς επιτρέπει να προβλέπουμε με πιθανότητα που προσεγγίζει την μονάδα την τιμή μίας τοπικής ιδιότητας σε μία περιοχή του χωροχρόνου "επιδρώντας" με κατάλληλους τελεστές σε μία περιοχή σε χωροειδή απομάκρυνση. Από εδώ, ακολουθώντας τους Redhead και Wagner, διατυπώσαμε το επιχείρημα EPR στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής και διαπιστώσαμε ότι το δίλημμα ανάμεσα στη μη τοπικότητα και τη μη πληρότητα της θεωρίας ισχύει. Η έννοια της τοπικότητας που τίθεται σε αμφισβήτηση με αυτό το δίλημμα αφορά στην ισχύ της συνθήκης ανεξαρτησίας από διεργασίες που δεν είναι αμιγώς φυσικές.

Μία άλλη συνέπεια του θεωρήματος Reeh-Schlieder είναι ότι οι τελεστές που αναπαριστάνουν την ανίχνευση σωματιδίων δεν είναι δυνατόν να ανήκουν σε μία τοπική άλγεβρα. Οι διεργασίες που αναπαριστάνουν ανιχνεύσεις σωματιδίων και αναπαριστάνονται από δυναμικές απεικονίσεις που ορίζονται με σχεδόν-τοπικούς τελεστές επηρεάζουν τις αναμενόμενες τιμές των τοπικών παρατηρήσιμων σε χωροειδή απομάκρυνση. Με άλλα λόγια, η συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία δεν ισχύει για διεργασίες που περιγράφονται με τέτοιους είδους τελεστές.

Επίσης, αναφερθήκαμε σε ένα δεύτερο είδος τοπικότητας που αφορά στο κατά πόσον μία καθολική συνθήκη που διατυπώνεται στο πλαίσιο μίας θεωρίας και αναφέρεται σε συστήματα που εκτείνονται σε ολόκληρο τον χωρόχρονο ισχύει και τοπικά, δηλαδή σε μία περιοχή του χωροχρόνου. Συγκεκριμένα, αναφερθήκαμε σε καθολικές και τοπικές συνθήκες εξάρτησης. Οι καθολικές συνθήκες εξάρτησης αφορούν στον καθορισμό των συμβάντων (ή των πιθανοτήτων δυνατών συμβάντων) σε ολόκληρο τον χωρόχρονο από τα συμβάντα (ή τις πιθανότητες δυνατών συμβάντων) σε μία περιοχή του χωροχρόνου. Εξετάσαμε τη συνθήκη ντετερμινισμού στην περίπτωση της χωροχρονικής θεωρίας του βαθμωτού πεδίου σε καθολικά υπερβολικό χωρόχρονο που ικανοποιεί την κυματική εξίσωση και το ανάλογο αίτημα της πρωτογενούς αιτιοκρατίας στην τοπική κβαντική φυσική καθώς και την καθολική συνθήκη εξάρτησης που προκύπτει από το θεώρημα του σωλήνα του Borchers. Για όλες αυτές τις περιπτώσεις, διατυπώσαμε αντίστοιχες τοπικές συνθήκες εξάρτησης, τον τοπικό ντετερμινισμό, την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία και την τοπική εκδοχή του θεωρήματος του σωλήνα του Borchers. Οι τοπικές συνθήκες εξάρτησης αναφέρονται στον καθορισμό των συμβάντων (ή των πιθανοτήτων δυνατών συμβάντων) σε μία περιοχή του χωροχρόνου, η οποία δεν είναι κατ' ανάγκη ολόκληρος ο χωρόχρονος, από τα συμβάντα ή τις πιθανότητες δυνατών συμβάντων σε μία άλλη περιοχή του χωροχρόνου. Τα συμπεράσματα μας είναι ότι στην περίπτωση της θεωρίας του βαθμωτού πεδίου ισχύει τόσο η καθολική όσο και η τοπική εκδοχή του ντετερμινισμού. Από την άλλη, στην τοπική κβαντική φυσική υπάρχουν θεωρίες στις οποίες ισχύουν αμφότερες οι συνθήκες πρωτογενούς αιτιοκρατίας. Μάλιστα, είναι δυνατόν να συναχθεί η πρωτογενής αιτιοκρατία από την τοπική εκδοχή της ενώ η αντίστροφη συναγωγή προϋποθέτει την ισχύ επιπλέον απαιτήσεων όπως, π.χ., της δυϊκότητας. Επίσης τόσο η καθολική όσο και η τοπική συνθήκη εξάρτησης που εκφράζεται από το θεώρημα του σωλήνα του Borchers συνάγεται από ορισμένα από τα βασικά αιτήματα των θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Τέλος, διατυπώσαμε μερικές σκέψεις που αποδίδουν στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής την έννοια της αιτιακής διαδικασίας, όπως αυτή επεξηγείται με βάση τη διάδοση του ίχνους στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon. Καταρχάς, δείξαμε ότι το ίχνος που δημιουργείται σε μία κυρτή πεπερασμένη περιοχή διαδίδεται

συνεχώς στον κώνο φωτός της περιοχής αυτής. Όμως, το γεγονός αυτό δεν αρκεί για να περιγράψουμε μία αιτιακή διαδικασία, διότι ο Salmon απαιτεί η διάδοση του ίχνους να λαμβάνει χώρα κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία. Έτσι, περιοριστήκαμε στη διερεύνηση του εάν το ίχνος μπορεί να διαδοθεί σε χωροχρονικές περιοχές που είναι μεταθέσεις της περιοχής στην οποία το ίχνος δημιουργείται, στην κατεύθυνση ενός χρονειδούς διανύσματος. Σε αυτή την περίπτωση το ίχνος ενδέχεται μεν να διαδίδεται, αλλά δεν είναι δυνατό να φθάσει σε «μεγάλη απόσταση» από την περιοχή που δημιουργήθηκε. Το γεγονός αυτό αποτελεί μία αρνητική ένδειξη για την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών σε ορισμένα πολύ συνηθισμένα τοπικά κβαντικά συστήματα, όπως είναι το ελεύθερο κβαντικό πεδίο Klein-Gordon. Ακολούθως, προτείναμε μία διαφορετική προσέγγιση για την αιτιακή διαδικασία στην τοπική κβαντική φυσική. Η βασική διαφορά με την προηγούμενη προσέγγιση είναι ότι δεν ταυτίζει το χαρακτηριστικό το οποίο εκδηλώνει η διαδικασία σε κάθε χωροχρονική περιοχή με τον ίδιο προβολικό τελεστή, αλλά με μία οικογένεια προβολικών τελεστών που εντοπίζονται σε διαφορετικές χωροχρονικές περιοχές κατά μήκος της διαδικασίας. Σε αυτή την περίπτωση, καταφέραμε να αποδείξουμε ότι το ίχνος που δημιουργείται σε μία χωροχρονική περιοχή μπορεί να εκδηλωθεί όσο κοντά θέλουμε στην περιοχή που δημιουργήθηκε. Βεβαίως, αυτό το συμπέρασμα δεν επαρκεί για να μιλήσουμε για την ύπαρξη αιτιακής διαδικασίας.

Υπάρχει ένα ακόμα ζήτημα σε σχέση με την τοπικότητα στο οποίο δεν αναφερθήκαμε σε αυτό το κεφάλαιο. Το ζήτημα αφορά στην αρχή του κοινού αιτίου και στην ερμηνεία της ως συνθήκης τοπικότητας που μας λέει ότι στον κόσμο μας, όπως περιγράφεται από τις καλύτερες φυσικές θεωρίες που διαθέτουμε, δεν υπάρχει προκαθορισμένη αρμονία (pre-established harmony). Η προκαθορισμένη αρμονία συνίσταται στην ύπαρξη δύο παράλληλων αιτιακών αλυσίδων που καταλήγουν σε μη αιτιακώς αλληλεπιδρώντα, συσχετιζόμενα συμβάντα, οι οποίες είναι αιτιακώς ανεξάρτητες και ανάγουν τη συσχέτιση των συμβάντων σε χωροχρονικώς διακριτά συμβάντα στο χρονικό παρελθόν - δηλαδή, σε τυχαίες αρχικές συνθήκες. Στο επόμενο κεφάλαιο θα εξετάσουμε την αρχή του κοινού αιτίου στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής και θα προτείνουμε μία νέα ερμηνεία της αρχής αυτής.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΟΓΔΟΟ

ΑΡΧΗ ΤΟΥ ΚΟΙΝΟΥ ΑΙΤΙΟΥ ΚΑΙ

ΤΟΠΙΚΗ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Στο δεύτερο κεφάλαιο (ενότητα 2.2), αναφερθήκαμε στην αρχή του κοινού αιτίου του Reichenbach, σύμφωνα με την οποία, για δύο συμβάντα *A,B* που δεν βρίσκονται σε αιτιακή σχέση (σχέση αιτιακής συνάφειας) και εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση, υπάρχει ένα τρίτο συμβάν *C* που είναι το κοινό αίτιο των *A,B*, συγκροτεί με αυτά δίκρανο σύζευξης και εξηγεί τη θετική στατιστική συσχέτιση. Υπενθυμίζουμε ότι για δύο συμβάντα *A,B*, ένα δίκρανο σύζευξης με κοινό αίτιο *C* ορίζεται από τις ακόλουθες στατιστικές σχέσεις:

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B \,|\, C) = \mathrm{P}(A \,|\, C)\,\mathrm{P}(B \,|\, C), \tag{8.1.1}$$

$$\mathrm{P}(A \,\&\, B \,|\, \tilde{C}) = \mathrm{P}(A \,|\, \tilde{C})\,\mathrm{P}(B \,|\, \tilde{C}), \tag{8.1.2}$$

$$\mathrm{P}(A \,|\, C) > \mathrm{P}(A \,|\, \tilde{C}), \tag{8.1.3}$$

$$\mathrm{P}(B \,|\, C) > \mathrm{P}(B \,|\, \tilde{C}). \tag{8.1.4}$$

Για να ερμηνεύσουμε την αρχή του κοινού αιτίου ως μία αρχή τοπικότητας, θα πρέπει θεωρήσουμε τα συμβάντα *A,B,C* στο χωροχρονικό πλαίσιο στο οποίο λαμβάνουν χώρα καθώς και να ερμηνεύσουμε με βάση τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά των συμβάντων τόσο την αιτιακή ανεξαρτησία των *A* και *B* (δηλαδή, την απουσία αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα *A* και *B*) όσο και την ύπαρξη αιτιακής σχέσης, την αιτιακή εξάρτηση, ανάμεσα στο κοινό αίτιο *C* και στα συμβάντα *A,B*. Έτσι, πέραν από τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης, τα συμβάντα *A,B* και το κοινό

αίτιο *C* θα πρέπει να ικανοποιούν ορισμένες ακόμα προϋποθέσεις που επεξηγούν χωροχρονικά, τις αιτιακές σχέσεις, ή την απουσία τους.

Οι συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας που ενδέχεται να ισχύουν σε μία φυσική θεωρία εκφράζουν την απουσία αιτιακής σχέσης ανάμεσα σε συμβάντα και διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε χωροχρονικές περιοχές που ικανοποιούν συγκεκριμένες γεωμετρικές σχέσεις. Άρα, όταν τα συμβάντα *A*,*B* περιγράφονται στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας που ικανοποιεί συνθήκες τοπικής ανεξαρτησίας, ικανή συνθήκη για να είναι τα συμβάντα αιτιακώς ανεξάρτητα είναι να εντοπίζονται χωροχρονικά σε περιοχές που ικανοποιούν συγκεκριμένες γεωμετρικές σχέσεις που προσδιορίζονται από τις προϋποθέσεις εφαρμογής των συνθηκών τοπικής ανεξαρτησίας, π.χ., σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές.

Από την άλλη, έχουμε αναφερθεί στις συνθήκες εξάρτησης δύο χωροχρονικών περιοχών στο πλαίσιο μίας φυσικής θεωρίας. Σύμφωνα με αυτές τις συνθήκες το σύνολο των συμβάντων που είναι δυνατό να λάβουν χώρα σε μία χωροχρονική περιοχή *καθορίζει* τα συμβάντα, ή τις πιθανότητες των συμβάντων, που λαμβάνουν χώρα στην άλλη χωροχρονική περιοχή. Οι σχέσεις εξάρτησης δύο χωροχρονικών περιοχών δεν συνεπάγονται, απαραιτήτως, την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα συμβάντα που είναι δυνατό να λάβουν χώρα σε αυτές τις περιοχές. Διότι η εξάρτηση μίας χωροχρονικής περιοχής από μία άλλη χωροχρονική περιοχή δεν σημαίνει ότι η χωροχρονική περιοχή από τα συμβάντα της οποίας εξαρτώνται τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα στην άλλη χωροχρονική περιοχή ανήκει στο χρονικό παρελθόν της εξαρτημένης χωροχρονικής περιοχής[1]. Και για να μπορέσουμε να μιλήσουμε για αιτιακές σχέσεις θέλουμε να ικανοποιείται αυτού του είδους η χρονική ασυμμετρία.

Ωστόσο, η συνθήκη της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας, στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, είναι ικανή συνθήκη για να εντοπισθεί το κοινό αίτιο σε μία περιοχή του χρονικού παρελθόντος δύο συσχετιζόμενων: το κοινό αίτιο εντοπίζεται σε μία περιοχή του χωροχρόνου που είναι τέτοια ώστε το κοινό αίτιο να επιδρά αιτιακά *στο ένα ή στο άλλο* από τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Επιπλέον, με βάση συνθήκες ανεξαρτησίας που ικανοποιεί η θεωρία, μπορούμε αποκλείσουμε την

[1] Αρκεί να θυμηθούμε το θεώρημα του σωλήνα του Borchers, όπως εκφράζεται στην τοπική κβαντική φυσική με τη σχέση (7.3.10).

περίπτωση εντοπισμού του κοινού αιτίου σε περιοχές από τις οποίες η αιτιακή επίδραση μπορεί να διαδοθεί *μόνο* στη περιοχή του ενός από τα συσχετιζόμενα συμβάντα.

Τα βήματα που έχουν γίνει για τη θεμελίωση της αρχής του κοινού αιτίου στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής, μολονότι είναι πολύ σημαντικά, δεν επαρκούν. Αυτό που θα θέλαμε είναι το κοινό αίτιο να εντοπίζεται σε μία περιοχή του χρονικού παρελθόντος των συσχετιζόμενων συμβάντων που να είναι τέτοια ώστε η αιτιακή επίδραση να μεταφέρεται από την περιοχή αυτή *και στα δύο* συμβάντα που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση. Αυτό δεν μπορεί να επιτευχθεί με την προσέγγιση των Rédei και Summers που στηρίζεται στα συνήθη αιτήματα της τοπικής κβαντικής φυσικής.

Στο σημείο αυτό υπάρχουν δύο κατευθύνσεις. Η μία κατεύθυνση, την οποία προτείνει ο Rédei[2], είναι να εμπλουτίσουμε την τοπική κβαντική φυσική με ένα ακόμα αίτημα που θα υποστηρίζει την αρχή του κοινού αιτίου. Μάλιστα, για να μην είναι αυτό το αίτημα αυθαίρετη προσθήκη, προτείνει να κατασκευασθούν από πεδία τοπικές κβαντικές θεωρίες που να το ικανοποιούν. Η δεύτερη κατεύθυνση, την οποία υιοθετούμε στην εργασία, είναι πιο συντηρητική, όσον αφορά στις φυσικές θεωρίες. Προτείνουμε μία τροποποίηση της ερμηνείας της αρχής του κοινού αιτίου. Αντί να θεωρούμε το κοινό αίτιο ως *ένα* συμβάν που λαμβάνει χώρα στο κοινό παρελθόν των συσχετιζόμενων συμβάντων προτείνουμε να το θεωρήσουμε ως συνθήκη που απαιτεί την εξήγηση της στατιστικής συσχέτισης από κάποιο *σύνολο* συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στο κοινό παρελθόν των συσχετιζόμενων συμβάντων.

Ωστόσο, η προσέγγισή μας έχει ένα πρόβλημα που αφορά στη θεώρηση της αρχής κοινού αιτίου ως συνθήκης τοπικότητας. Όπως αναφέραμε στο προηγούμενο κεφάλαιο, η αρχή του κοινού αιτίου αποκλείει την προκαθορισμένη αρμονία. Σύμφωνα με το Reichenbach, η προκαθορισμένη αρμονία μπορεί να κατανοηθεί «είτε ως στιγμιαία σύζευξη απομακρυσμένων συμβάντων, δηλαδή ως δράση από απόσταση, που απλώνεται χωρίς ενδιάμεσα αποτελέσματα, είτε πρέπει να θεωρηθεί ως παραλληλία συμβάντων που είχαν "κατά τύχη" τις ίδιες αρχικές συνθήκες και έκτοτε ξεκουρδίζονται σαν συγχρονισμένα ρολόγια» (Reichenbach 1957:65). Έτσι,

[2] Σε προσωπική επικοινωνία.

αν διαπιστωθεί οποιαδήποτε σύζευξη συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε περιοχές του χωροχρόνου οι οποίες αποκλείουν την ύπαρξη αιτιακής σχέσης ανάμεσα στα συμβάντα αυτά· και η σύζευξη των συμβάντων αυτών εκφράζεται με τη θετική στατιστική συσχέτισή τους, τότε δεν θα πρέπει να αποδώσουμε τη σύζευξη ούτε σε στιγμιαία δράση από απόσταση ούτε σε κοινές αρχικές συνθήκες παράλληλων ακολουθιών συμβάντων που καταλήγουν στα συγκεκριμένα συμβάντα, αλλά σε κάποιο κοινό αίτιο που είναι υπαρκτό, διότι ο κόσμος μας περιγράφεται από μία φυσική θεωρία που ικανοποιεί την αρχή κοινού αιτίου.

Αν όμως το κοινό αίτιο δεν είναι ένα συμβάν αλλά περισσότερα, τότε δεν μπορούμε να αποκλείσουμε *a priori* την περίπτωση η στατιστική συσχέτιση ανάμεσα σε συμβάντα που δεν έχουν αιτιακή σχέση να εξηγείται από ένα άλλο ζεύγος συμβάντων που λαμβάνουν χώρα στην ένωση των κώνων φωτός παρελθόντος των πρώτων και τα οποία επίσης εμφανίζουν θετική στατιστική συσχέτιση. Με άλλα λόγια, δεν μπορούμε να αποκλείσουμε την προκαθορισμένη αρμονία η οποία προκύπτει από την χρονική εξέλιξη δύο συζευγμένων συμβάντων όπου η σύζευξη δύο συμβάντων κάποια χρονική στιγμή εξηγεί τη σύζευξη συμβάντων σε κάποια επόμενη χρονική στιγμή. Αυτό φαίνεται να είναι το κόστος που θα πρέπει να επωμισθεί κανείς αν αποδεχθεί ότι το κοινό αίτιο είναι ένα *σύνολο* συμβάντων.

8.1 Κοινά Αίτια και τοπική κβαντική φυσική

Στο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας, επικαλούμαστε την αρχή του κοινού αιτίου για να εξηγήσουμε τις συσχετίσεις ανάμεσα σε χωροειδώς απομακρυσμένα (και, συνεπώς, μη αιτιακώς συναφή) συμβάντα, οι οποίες προβλέπονται από την παραβίαση των ανισοτήτων Bell. Συγκεκριμένα, στην τοπική κβαντική φυσική, όπως ήδη έχουμε αναφέρει, οι περισσότερες κανονικές καταστάσεις στην άλγεβρα $\mathcal{R}_1 \vee \mathcal{R}_2 = \left(\mathcal{R}_1 \cup \mathcal{R}_2\right)''$ που παράγεται από δύο C* ανεξάρτητες μετατιθέμενες von Neumann άλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ τύπου III παραβιάζουν τις ανισότητες Bell στις άλγεβρες αυτές (Halvorson and Clifton 2000). Έπεται ότι οι καταστάσεις αυτές δεν μπορούν να

γραφούν ως κυρτός συνδυασμός γινομένων καταστάσεων των δύο υποαλγεβρών $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$. Με άλλα λόγια, για τις περισσότερες κανονικές καταστάσεις ω της άλγεβρας $\mathcal{R}_1 \vee \mathcal{R}_2$ υπάρχουν προβολικοί τελεστές $A \in \mathcal{R}_1,\ B \in \mathcal{R}_2$ τέτοιοι ώστε να ισχύει

$$\omega(A \wedge B) > \omega(A)\omega(B), \tag{8.1.5}$$

όπου $A \wedge B$ ο μέγιστος προβολικός τελεστής που περιέχεται στους A,B, ο οποίος ταυτίζεται με το γινόμενο AB αν οι A,B μετατίθενται. Ακολουθώντας τη συνήθη ερμηνεία σύμφωνα με την οποία οι προβολικοί τελεστές αναπαριστάνουν συμβάντα και οι κανονικές καταστάσεις μίας von Neumann άλγεβρας ορίζουν μέτρα πιθανότητας στο πλέγμα των προβολικών τελεστών της, προκύπτει ότι

$$\mathrm{P}_\omega(A \,\&\, B) > \mathrm{P}_\omega(A)\,\mathrm{P}_\omega(B) \tag{8.1.6}$$

για τις περισσότερες κανονικές καταστάσεις ω της άλγεβρας $\mathcal{R}_1 \vee \mathcal{R}_2$.

Έστω τώρα μία τοπική κβαντική θεωρία σε χωρόχρονο Minkowski,

$$\left\langle \mathbb{R}^4, \eta_{\alpha\beta}, O \to \mathcal{R}(O), O \to \Sigma(O), G, g \mapsto a_g \right\rangle, \tag{8.1.7}$$

που ικανοποιεί τα συνήθη αιτήματα και επιπλέον α) την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία και β) την υπόθεση ότι στην θεωρία υπάρχει κατάσταση του κενού. Αν οι τοπικές άλγεβρες $\mathcal{R}(O_1)$, $\mathcal{R}(O_2)$ δύο χωροειδώς απομακρυσμένων περιοχών O_1, O_2 είναι C* ανεξάρτητες και τύπου III τότε, σύμφωνα με όσα είπαμε προηγούμενα, σχεδόν για κάθε κανονική κατάσταση της $\mathcal{R}(O_1) \vee \mathcal{R}(O_2)$ υπάρχουν προβολικοί τελεστές $A \in \mathcal{R}(O_1)$, $B \in \mathcal{R}(O_2)$ που αναπαριστάνουν συμβάντα που είναι δυνατόν να λάβουν χώρα στις περιοχές O_1, O_2 αντίστοιχα και τα οποία έχουν θετική στατιστική συσχέτιση. Η τοπική μεταθετότητα, ερμηνευόμενη ως συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία –καμιά τοπική δυναμική απεικόνιση στην περιοχή O_1 (αντ. O_2) δεν επηρεάζει τη στατιστική των συμβάντων στην περιοχή O_2 (αντ. O_1)–, συνηγορεί υπέρ της υπόθεσης ότι η θετική στατιστική συσχέτιση δύο συμβάντων στις περιοχές O_1, O_2 δεν εκφράζει άμεση αιτιακή σχέση των συμβάντων αυτών. Άρα, με βάση την αρχή κοινού αιτίου, θα πρέπει να υπάρχει κοινό αίτιο που να εξηγεί την θετική στατιστική συσχέτιση.

Οι Rédei και Summers (2002, 2005) υποθέτουν ότι η αιτιακή πλήρωση των περιοχών O_1 , O_2 στις οποίες λαμβάνουν χώρα τα συσχετιζόμενα συμβάντα είναι χωροειδώς απομακρυσμένοι διπλοί κώνοι. Οι άλγεβρες των περιοχών αυτών, οι οποίες ταυτίζονται με τις άλγεβρες των χωροειδώς απομακρυσμένων διπλών κώνων λόγω της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας, έχουν ορισμένες "καλές" ιδιότητες. Πρώτο, οι εν λόγω άλγεβρες είναι C* ανεξάρτητες, άρα και λογικώς ανεξάρτητες (Summers 1990, Θεωρ. 6.7). Δεύτερο, υπάρχει μία μεγάλη κλάση θεωριών της τοπικής κβαντικής φυσικής στις οποίες οι άλγεβρες των διπλών κώνων και των σφηνοειδών περιοχών είναι τύπου III (Driessler 1977, Fredenhagen 1985a και Rédei and Summers 2005). Επιπλέον, με αφετηρία τα αιτήματα που ικανοποιούν τα μοντέλα της τοπικής κβαντικής θεωρίας, οι Rédei και Summers καταλήγουν ότι όλες οι καταστάσεις φυσικού ενδιαφέροντος είναι τοπικά πιστές (locally faithful) καταστάσεις, δηλαδή καταστάσεις για τις οποίες ισχύει

$$\forall \mathrm{X} \in \mathcal{R}(O), \quad \phi(XX^*) = 0 \Rightarrow X = 0. \tag{8.1.8}$$

Στο πλαίσιο του φορμαλισμού von Neumann αλγεβρών το στατιστικό κοινό αίτιο δύο συμβάντων που έχουν θετική στατιστική συσχέτιση ορίζεται ως εξής (Rédei and Summers 2002, 2005).

> Έστω $\mathcal{R}$ είναι μία von Neumann άλγεβρα και $\mathcal{P}(\mathcal{R})$ το πλέγμα των προβολικών τελεστών της. Για δύο μετατιθέμενους προβολικούς τελεστές της $\mathcal{R}$ που είναι θετικά συσχετιζόμενοι στην κανονική κατάσταση ω,
>
> $$\omega(A \wedge B) > \omega(A)\omega(B), \tag{8.1.9}$$
>
> θα λέμε ότι ο προβολικός τελεστής $C \in \mathcal{P}(\mathcal{R})$ αποτελεί κοινό αίτιο της συσχέτισης, αν ο C μετατίθεται με αμφότερους τους A και B και ικανοποιεί τις ακόλουθες σχέσεις:
>
> $$\frac{\omega(A \wedge B \wedge C)}{\omega(C)} = \frac{\omega(A \wedge C)}{\omega(C)} \cdot \frac{\omega(B \wedge C)}{\omega(C)}, \tag{8.1.10}$$
>
> $$\frac{\omega(A \wedge B \wedge C^{\perp})}{\omega(C^{\perp})} = \frac{\omega(A \wedge C^{\perp})}{\omega(C^{\perp})} \cdot \frac{\omega(B \wedge C^{\perp})}{\omega(C^{\perp})}, \tag{8.1.11}$$

$$\frac{\omega(A\wedge C)}{\omega(C)}>\frac{\omega(A\wedge C^{\perp})}{\omega(C^{\perp})}, \tag{8.1.12}$$

$$\frac{\omega(B\wedge C)}{\omega(C)}>\frac{\omega(B\wedge C^{\perp})}{\omega(C^{\perp})}. \tag{8.1.13}$$

Οι παραπάνω σχέσεις αντιστοιχούν στις κλασικές σχέσεις πιθανοτήτων που ορίζουν το δίκρανο σύζευξης κατά τον Reichenbach. Η υπό συνθήκη πιθανότητα $\mathrm{P}(A\,\&\,B\,|\,C)=\frac{\mathrm{P}(A\,\&\,B\,\&\,C)}{\mathrm{P}(C)}$ εκφράζεται από τον όρο $\frac{\omega(A\wedge B\wedge C)}{\omega(C)}$, σύμφωνα με την στατιστική ερμηνεία της κατάστασης στην οποία αναφερθήκαμε προηγουμένως. Η μόνη προφανής διαφορά είναι ότι στο πλαίσιο των μη μεταθετικών von Neumann αλγεβρών οι Rédei και Summers απαιτούν ρητά το στατιστικό κοινό αίτιο να μετατίθεται με τους συσχετιζόμενους τελεστές. Αν και η απαίτηση αυτή δεν χρειάζεται στην περίπτωση των κλασικών πιθανοτήτων (όπου δεν τίθεται ζήτημα μεταθετότητας) και επίσης μπορεί να δικαιολογηθεί με βάση την αναλογία με το κλασικό πλαίσιο, αυτό δεν σημαίνει ότι είναι τετριμμένη. Περιορίζει το στατιστικό κοινό αίτιο, αλλά και γενικώς τις στατιστικές σχέσεις που εκφράζουν αιτιακές σχέσεις σε συμβάντα τα οποία αναπαριστάνονται από μετατιθέμενους προβολικούς τελεστές. Ας μας επιτραπεί να πούμε ότι η απαίτηση αυτή είναι ένα απομεινάρι κλασικής προσέγγισης στην αιτιότητα σε ένα μη κλασικό, κβαντικό, πλαίσιο. Ωστόσο, αυτός ο περιορισμός είναι σε γνώση των Rédei και Summers που επιλέγουν να μην επεκτείνουν την προσέγγιση τους αναφερόμενοι σε μη μεταθετικές υπό συνθήκη πιθανότητες. Τέλος, πρέπει να παρατηρήσουμε ότι για να ικανοποιεί ο προβολικός τελεστής C τις σχέσεις (8.1.10) - (8.1.13), θα πρέπει να ισχύει ότι $0<\omega(C)<1$. Αυτός ο περιορισμός ισχύει για όλους τους μη τετριμμένους ($0\neq C\neq I$) προβολικούς τελεστές C σε όλες τις φυσικώς αποδεκτές καταστάσεις ω των μοντέλων της τοπικής κβαντικής φυσικής που είναι τοπικά πιστές.

Ας εξετάσουμε τώρα σε ποια περίπτωση θα λέμε ότι στο πλαίσιο μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας ισχύει η αρχή κοινού αιτίου. Αν επρόκειτο απλώς για μία αλγεβρική κβαντική θεωρία, η οποία είναι διατυπωμένη σε φορμαλισμό von Neumann αλγεβρών, θα αρκούσε να απαιτήσουμε την ύπαρξη του στατιστικού κοινού αιτίου για κάθε ζεύγος συσχετισμένων προβολικών τελεστών της άλγεβρας.

Ωστόσο, στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής θα πρέπει να λάβουμε υπόψη τις χωροχρονικές περιοχές στις οποίες λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα καθώς και τον εντοπισμό του στατιστικού κοινού αιτίου στο χρονικό παρελθόν των περιοχών αυτών. Έτσι, ας θεωρήσουμε ένα δίκτυο τοπικών von Neumann αλγεβρών $\{\mathcal{R}(O)\}$ στον χωρόχρονο Minkowski, δύο χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές O_1 , O_2 του χωροχρόνου και μία τοπικά κανονική κατάσταση ω του δικτύου. Αν για κάθε ζεύγος προβολικών τελεστών $A \in \mathcal{R}(O_1)$, $B \in \mathcal{R}(O_2)$ για τους οποίους ισχύει η (8.1.9), υπάρχει προβολικός τελεστής C, σε κάποια τοπική von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}(O)$, που αναπαριστάνει το στατιστικό κοινό αίτιο των A και B, δηλαδή ικανοποιεί τις σχέσεις (8.1.10) - (8.1.13), τότε θα λέμε ότι το τοπικό σύστημα συσχετίσεων $\left(\mathcal{R}(O_1) ,\mathcal{R}(O_2),\omega\right)$[3] ικανοποιεί την

1. *ασθενή αρχή κοινού αιτίου* αν $O \subseteq \left(C^-(O_1)\setminus O_1\right)\cup\left(C^-(O_2)\setminus O_2\right)$,
2. *αρχή κοινού αιτίου* αν $O \subseteq \left(C^-(O_1)\setminus O_1\right)\cap\left(C^-(O_2)\setminus O_2\right)$,
3. *ισχυρή αρχή κοινού αιτίου* αν $O \subseteq \bigcap_{x\in O_1\cup O_2} C^-(x)$,

όπου για μία περιοχή $R \subset \mathbb{R}^4$, το σύνολο $C^-(R)$ είναι ο κώνος φωτός του παρελθόντος της R, δηλαδή η ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος κάθε σημείου της R. Επιπλέον, θα λέμε ότι η αρχή του κοινού αιτίου (αντιστοίχως, η ασθενής αρχή ή η ισχυρή αρχή) ισχύει για το δίκτυο $\{\mathcal{R}(O)\}$ ή για την τοπική κβαντική θεωρία (8.1.7), αν και μόνο αν για κάθε ζεύγος χωροειδώς απομακρυσμένων κυρτών περιοχών του χωροχρόνου O_1 , O_2 και κάθε κανονική κατάσταση ω η αρχή του κοινού αιτίου ισχύει για το τοπικό σύστημα συσχετίσεων $\left(\mathcal{R}(O_1) ,\mathcal{R}(O_2),\omega\right)$ (αντιστοίχως υπό την ασθενή ή την ισχυρή εκδοχή).

Στον παραπάνω ορισμό, εκτός από την αρχή κοινού αιτίου, προτείνονται δύο ακόμα παραλλαγές της, η ασθενής και η ισχυρή αρχή κοινού αιτίου, οι οποίες προβλέπουν διαφορετικές περιοχές εντοπισμού του στατιστικού κοινού αιτίου. Η ικανοποίηση της μίας ή της άλλης αρχής στο πλαίσιο μίας θεωρίας, πιστεύω ότι έχει

[3] Υπενθυμίζουμε ότι η συσχέτιση Bell (7.2.8) αναφέρεται σε ένα τοπικό σύστημα συσχετίσεων.

να κάνει τόσο με την ερμηνεία των χωροχρονικών χαρακτηριστικών των συμβάντων όσο και με την ερμηνεία του στατιστικού κοινού αιτίου.

Πιο συγκεκριμένα, αν θεωρήσουμε τα συμβάντα *A*, *B* και *C* ως *χωροχρονικώς εκτεταμένα* στις περιοχές O_1 , O_2 και *O*, αντιστοίχως, τότε αρκεί να θεωρήσουμε ότι το κοινό αίτιο *C* εντοπίζεται σε ένα υποσύνολο της περιοχής που περιλαμβάνει το σύνολο των σημείων που μπορούν να επιδράσουν αιτιακά *τουλάχιστον σε ένα σημείο των* O_1 *και* O_2 - δηλαδή, η περιοχή *O* είναι υποσύνολο της τομής των αιτιακών παρελθόντων των περιοχών O_1 και O_2. Με άλλα λόγια, σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ισχύει η *αρχή κοινού αιτίου*.

Από την άλλη, αν θεωρήσουμε τα συμβάντα *A*, *B* και *C* *χωροχρονικώς σημειακά*, αλλά ασαφώς εντοπισμένα στις περιοχές O_1 , O_2 και *O*, αντιστοίχως, τότε η περιοχή στην οποία εντοπίζεται ασαφώς το κοινό αίτιο *C* είναι υποσύνολο της περιοχής που περιλαμβάνει το σύνολο των σημείων που μπορούν να επιδράσουν αιτιακά *σε κάθε σημείο των περιοχών* O_1 και O_2. Δηλαδή, η περιοχή *O* είναι υποσύνολο της τομής των αιτιακών παρελθόντων κάθε σημείου των περιοχών O_1 και O_2. Σε αυτή την περίπτωση θα πρέπει να ισχύει η *ισχυρή αρχή κοινού αιτίου*. Η ασάφεια ως προς τον εντοπισμό των σημειακών συμβάντων μπορεί να ερμηνευθεί και ως υποκειμενική άγνοια του ακριβούς εντοπισμού τους.[4] Επίσης, θα πρέπει να σημειώσουμε ότι η ισχυρή αρχή κοινού αιτίου δεν ισχύει αν οι O_1 και O_2 είναι συμπληρωματικές σφηνοειδείς περιοχές του χωροχρόνου, διότι σε αυτή την περίπτωση $\bigcap_{x\in O_1\cup O_2} C^-(x) = \varnothing$.

Σε σχέση με την *ασθενή αρχή κοινού αιτίου* τα πράγματα είναι λίγο πιο σύνθετα. Καταρχάς, η περιοχή στην οποία εντοπίζεται το κοινό αίτιο αποτελείται από το σύνολο των σημείων που μπορούν να επιδράσουν αιτιακά στα σημεία της O_1 ή στα σημεία της O_2. Ωστόσο, το κοινό αίτιο, νοούμενο ως συμβάν, θα πρέπει να εντοπίζεται σε μία περιοχή που μπορεί να επιδράσει αιτιακά σε αμφότερες τις O_1 και O_2. Έτσι, με μία πρώτη ματιά η ασθενής αρχή κοινού αιτίου φαίνεται να μην έχει κάποια ιδιαίτερη σημασία για την αιτιότητα. Βεβαίως, θα μπορούσαμε να τη θεωρήσουμε ως ένα ενδιάμεσο βήμα για την απόδειξη της αρχής κοινού αιτίου ή της

[4] Φυσικά, το γεγονός ότι στην τοπική κβαντική φυσική τα παρατηρήσιμα μεγέθη δεν ορίζονται σε χωροχρονικά σημεία περιορίζει τη δυνατότητα αυτής της ερμηνείας.

ισχυρής αρχής κοινού αιτίου, αφού σε κάθε περίπτωση που ισχύει κάθε μία από αυτές τις δύο αρχές θα ισχύει και η ασθενής αρχή κοινού αιτίου. Αυτό, όμως, δεν σημαίνει ότι έχει κάποια σημασία από μόνη της.

Αν θεωρήσουμε ότι το κοινό αίτιο δεν είναι ένα συμβάν, αλλά ένα *σύνολο συμβάντων* τα οποία επηρεάζουν αιτιακά τα A και B, τότε η ασθενής αρχή κοινού αιτίου μπορεί να αποκτήσει αυτοτελή σημασία για την αιτιότητα. Το σύνολο των συμβάντων εξηγεί την στατιστική σχέση των A και B, ενώ κανένα από τα συμβάντα του συνόλου δεν είναι απαραιτήτως κοινό αίτιο. Άρα, δεν χρειάζεται να απαιτήσουμε κάθε συμβάν που ανήκει σε αυτό το σύνολο να ανήκει στην τομή των κώνων φωτός του παρελθόντος των περιοχών O_1 και O_2 στις οποίες είναι δυνατόν να λάβουν χώρα τα A και B αντίστοιχα. Επειδή τα συμβάντα αυτά έχουν αιτιακή σχέση με κάποιο από τα A και B θα πρέπει να ανήκουν στον κώνο φωτός παρελθόντος της O_1 είτε στον κώνο φωτός παρελθόντος της O_2, δηλαδή στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των δύο περιοχών.

Σε αυτή την κατεύθυνση κινείται η προσέγγιση του Butterfield (1989, 2007) που προτείνει να θεωρήσουμε ως κοινό αίτιο δύο συμβάντων τη φυσική κατάσταση μίας κατάλληλα επιλεγμένης χωροχρονικής περιοχής. Αυτή η περιοχή δεν περιέχεται υποχρεωτικά στην τομή των κώνων φωτός του παρελθόντος των περιοχών που λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα αλλά είναι ένα υποσύνολο της ένωσης αυτών. Μάλιστα, ο Butterfield υποστηρίζει ότι το κοινό αίτιο, αντί να ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις (8.1.1) - (8.1.4), ορίζει μία κατανομή πιθανότητα $\Pr_C$ ως προς την οποία τα συσχετιζόμενα συμβάντα είναι στατιστικώς ανεξάρτητα.

Δεν θα παρακολουθήσουμε τον Butterfield σε όλο το εύρος της προβληματικής του και δεν θα ταυτίσουμε το κοινό αίτιο με τη φυσική κατάσταση σε μία χωροχρονική περιοχή. Εμμένοντας στην κατεύθυνση της θεώρησης του κοινού αιτίου της στατιστικής σχέσης ως συνόλου συμβάντων, θα ανατρέξουμε στην έννοια του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach, την οποία παρουσιάσαμε στο πλαίσιο της κλασικής πιθανοκρατικής θεωρίας στο επίμετρο του δεύτερου κεφαλαίου. Για μία δεδομένη στατιστική σχέση δύο συμβάντων ένα σύστημα κοινών αιτίων είναι ένα σύνολο συμβάντων που εξηγεί τη στατιστική σχέση υπό την έννοια ότι συνεπάγεται παραγωγικά αυτή τη σχέση. Μπορούμε να ταυτίσουμε το κοινό αίτιο

με την τομή των συμβάντων που ορίζουν ένα σύστημα κοινών αιτίων; Αν ναι, τότε το κοινό αίτιο, που αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή C και εκφράζει τη συνθήκη ότι τα συμβάντα στα οποία αναλύεται λαμβάνουν χώρα μαζί[5], μπορεί να ικανοποιεί την ασθενή αρχή κοινού αιτίου και να εντοπίζεται στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των περιοχών που εντοπίζονται τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να αποκτήσει σημασία για την αιτιότητα η ασθενής αρχή κοινού αιτίου. Ωστόσο, όπως θα δείξουμε στην επόμενη ενότητα, ο προβολικός τελεστής που ικανοποιεί τις συνθήκες του στατιστικού κοινού αιτίου δεν είναι δυνατό να αναλυθεί σε προβολικούς τελεστές στη βάση των οποίων, και με κριτήριο το αν τα συμβάντα που αναπαριστάνουν λαμβάνουν χώρα, να ορίζεται ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για τη δεδομένη στατιστική σχέση. Επομένως, υπό αυτές τις προϋποθέσεις, η ασθενής αρχή του κοινού αιτίου που αναπαριστάνεται από έναν προβολικό τελεστή παραμένει σε εκκρεμότητα όσον αφορά τη σημασία της για την αιτιότητα.

Τι γίνεται όμως αν "χαλαρώσουμε" λίγο αυτές τις προϋποθέσεις; Τι γίνεται αν δεν απαιτήσουμε με βάση την ανάλυση του κοινού αιτίου σε διακριτά συμβάντα να ορίζεται ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach; Μπορούμε να υποθέσουμε ότι ερμηνεύουμε το κοινό αίτιο ως συνθήκη που, αφενός εκφράζει ότι κάποια συμβάντα λαμβάνουν χώρα μαζί, αφετέρου ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του ορισμού του κοινού αιτίου. Δεν απαιτούμε με βάση τα συμβάντα στα οποία αναλύεται το κοινό αίτιο να ορίζεται μία διαμέριση, το σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach, που να εξηγεί, να συνεπάγεται, τη θετική στατιστική συσχέτιση. Με άλλα λόγια, η εξηγητική συνάφεια *αφορά* στα συσχετιζόμενα συμβάντα και στο κοινό αίτιο ερμηνευμένο ως συνθήκη και *δεν αφορά* στα συσχετιζόμενα συμβάντα και στη διαμέριση που συγκροτείται από την ανάλυση του κοινού αιτίου. Μία τέτοια υπόθεση είναι εφικτό να γίνει, διότι, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα, η ανάλυση του κοινού αιτίου και ο εντοπισμός των προβολικών τελεστών στους οποίους αυτό αναλύεται στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των συσχετιζόμενων συμβάντων είναι ανεξάρτητη από τη θεώρηση του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach. Όμως αυτό σημαίνει ότι η ασθενής αρχή κοινού αιτίου μπορεί να έχει αυτοτελή σημασία για

[5] Στην τοπική κβαντική φυσική, η τομή οσωνδήποτε προβολικών τελεστών σε μία von Neumann άλγεβρα (ακόμα και απείρως αριθμήσιμου πλήθους) είναι προβολικός τελεστής. Άρα, το στατιστικό κοινό αίτιο που ικανοποιεί τις σχέσεις (8.1.10) - (8.1.13) μπορεί να κατανοηθεί ως τομή συμβάντων που αναπαριστάνονται από προβολικούς τελεστές.

την αιτιότητα με το κοινό αίτιο να εκφράζει τη συνθήκη ότι δύο ή περισσότερα συμβάντα λαμβάνουν χώρα μαζί.

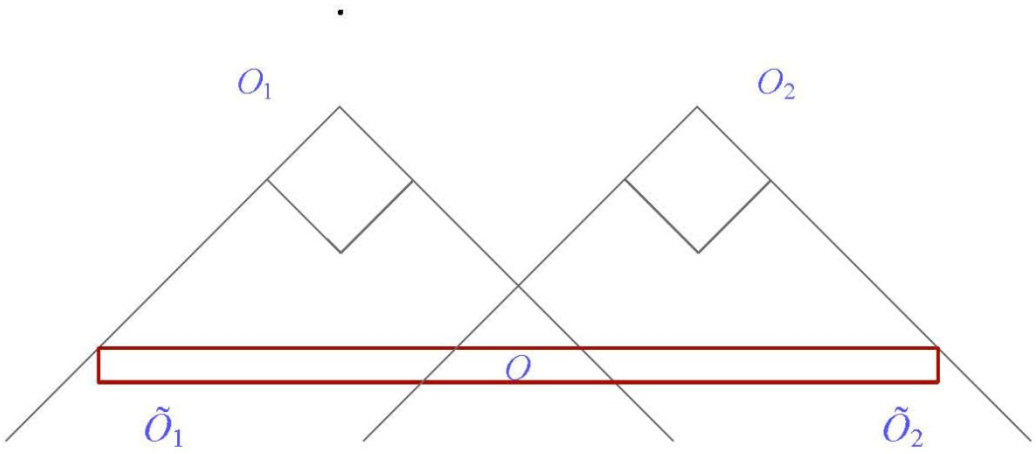
Ας δούμε όμως πώς αποδεικνύεται η ασθενής αρχή του κοινού αιτίου στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής. Οι Rédei και Summers (2002, 2005, Πρτ. 3) αποδεικνύουν ότι σε μία τοπική κβαντική θεωρία (8.1.7) που ικανοποιεί τις συνθήκες που προαναφέραμε, κάθε τοπικό σύστημα συσχετίσεων $\left(\mathcal{R}(O_1)\ ,\mathcal{R}(O_2),\omega\right)$ με O_1 και O_2 μη κενά κυρτά ανοικτά σύνολα, των οποίων οι αιτιακές πληρώσεις σχηματίζουν ένα ζεύγος χωροειδώς απομακρυσμένων διπλών κώνων, και ω μία τοπικά κανονική, τοπικά πιστή κατάσταση, ικανοποιεί την ασθενή αρχή κοινού αιτίου.

Για να αποδείξουν την πρόταση, αρχικά αποδεικνύουν δύο λήμματα. Το πρώτο (2001, 2003, Λήμ. 3) μάς δίνει δύο συνθήκες που πρέπει να ισχύουν για ένα προβολικό τελεστή C ώστε να ικανοποιεί τις σχέσεις (8.1.10) - (8.1.13) του στατιστικού κοινού αιτίου. Συγκεκριμένα αν ω μία πιστή κατάσταση σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ που περιέχει δύο αμοιβαία μετατιθέμενες υποάλγεβρες $\mathcal{R}_1, \mathcal{R}_2$ οι οποίες είναι λογικά ανεξάρτητες και $A \in \mathcal{R}_1, B \in \mathcal{R}_2$ προβολικοί τελεστές για τους οποίους ισχύει $\omega(\mathrm{A} \wedge \mathrm{B}) > \omega(\mathrm{A})\omega(\mathrm{B})$, τότε ικανή συνθήκη για να αποτελεί ένας προβολικός τελεστής C κοινό αίτιο είναι:

$$C < A \wedge B \quad \text{και} \quad \omega(C) = \frac{\omega(\mathrm{A} \wedge \mathrm{B}) - \omega(\mathrm{A})\omega(\mathrm{B})}{1 - \omega(\mathrm{A} \vee \mathrm{B})}. \tag{8.1.14}$$

Στο δεύτερο λήμμα (2002, 2005, Λήμ. 4) αποδεικνύεται ότι με δεδομένο ότι οι προβολικοί τελεστές *A, B* ανήκουν σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ τύπου III σε ένα διαχωρίσιμο χώρο Hilbert και η ω είναι μία πιστή κανονική κατάσταση στην $\mathcal{R}$, υπάρχει ένας προβολικός τελεστής $C \in \mathcal{R}$ που ικανοποιεί τις συνθήκες (8.1.14) και κατά συνέπεια αποτελεί στατιστικό κοινό αίτιο.

Η κυρίως απόδειξη της πρότασης ξεκινάει με την αναζήτηση μίας περιοχής O που έχει τα εξής χαρακτηριστικά: α) $O \subseteq \left(C^{-}(O_1) \setminus O_1\right) \cup \left(C^{-}(O_2) \setminus O_2\right)$, β) η αιτιακή της πλήρωση O'' είναι διπλός κώνος και γ) $O_1, O_2 \subset O''$. Μία τέτοια περιοχή φαίνεται στο Σχήμα 8.1.



Σχ. 8.1 Ο εντοπισμός του κοινού αιτίου στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος δύο διπλών κώνων

Στην συνέχεια, οι Rédei και Summers δείχνουν με τα αιτήματα της ισοτονίας και της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας ότι οι προβολικοί τελεστές $A \in \mathcal{R}(O_1)$, $B \in \mathcal{R}(O_2)$ που έχουν θετική στατιστική συσχέτιση στην τοπικά κανονική και τοπικά πιστή κατάσταση ω ανήκουν στην $\mathcal{R}(O)$:

$$O_1, O_2 \subset O'' \Rightarrow \mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2) \subset \mathcal{R}(O'') = \mathcal{R}(O). \qquad (8.1.15)$$

Επειδή η O'' είναι διπλός κώνος, έπεται ότι η $\mathcal{R}(O)$ είναι von Neumann άλγεβρα τύπου III. Επομένως, σύμφωνα με τα προκαταρκτικά λήμματα, υπάρχει ένας προβολικός τελεστής $C \in \mathcal{R}(O)$ που ικανοποιεί τις προϋποθέσεις (8.1.14) και αποτελεί στατιστικό κοινό αίτιο. Επομένως, το τοπικό σύστημα συσχετίσεων $\left(\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2), \omega\right)$ ικανοποιεί την ασθενή αρχή κοινού αιτίου. Επειδή η ω μπορεί να είναι μία οποιαδήποτε φυσικώς αποδεκτή καθολική κατάσταση ενός τοπικού κβαντικού συστήματος και οι περιοχές O_1, O_2 οποιαδήποτε κυρτά ανοικτά σύνολα περιέχονται σε χωροειδώς απομακρυσμένους διπλούς κώνους, συμπεραίνουμε ότι η ασθενής αρχή κοινού αιτίου ισχύει για κάθε τοπικό σύστημα συσχετίσεων $\left(\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2), \omega\right)$ της τοπικής κβαντικής θεωρίας (8.1.7).

Οι Rédei και Summers κάνουν ένα βήμα παραπέρα και αποδεικνύουν, στηριζόμενοι στην λογική ανεξαρτησία των τοπικών αλγεβρών χωροειδώς απομακρυσμένων διπλών κώνων, ότι το κοινό αίτιο $C \in \mathcal{R}(O)$ δεν είναι δυνατόν να εντοπιστεί στην περιοχή

$$\widetilde{O}_1 = \left(C^-(O_1) \cap O\right) \setminus \left(C^-(O_1) \cap C^-(O_2)\right)$$

ή στην περιοχή

$$\widetilde{O}_2 = \left(C^-(O_2) \cap O\right) \setminus \left(C^-(O_1) \cap C^-(O_2)\right).$$

Άρα η περιοχή O δεν είναι δυνατόν να περιέχεται στην περιοχή $\widetilde{O}_1$ ή στην $\widetilde{O}_2$. Αυτό το αποτέλεσμα είναι διαισθητικά εύλογο διότι αν θεωρήσουμε ότι το στατιστικό κοινό αίτιο είναι δυνατόν να εντοπιστεί σε μία από τις παραπάνω περιοχές, π.χ. στην $\widetilde{O}_1$, τότε παύει να είναι κοινό αίτιο αφού βρίσκεται εκτός του κώνου φωτός παρελθόντος της O_2. Ωστόσο, το γεγονός ότι $C \notin \mathcal{R}(\widetilde{O}_i)$, για $i = 1,2$ *δεν* σημαίνει ότι δεν ανήκει στην άλγεβρα του γεννάται από τις $\mathcal{R}(\widetilde{O}_i)$, δηλαδή στην $\left\{\mathcal{R}(\widetilde{O}_1) \cup \mathcal{R}(\widetilde{O}_2)\right\}''$. Η απόδειξη των Rédei και Summers δεν αποκλείει να υπάρχουν προβολικοί τελεστές στις άλγεβρες $\mathcal{R}(\widetilde{O}_i)$, οι οποίοι αναπαριστάνουν δυνατά συμβάντα στις περιοχές $\widetilde{O}_i$ τέτοια ώστε η σύζευξη τους να είναι κοινό αίτιο. Σε αυτή την περίπτωση ο προβολικός τελεστής που αναπαριστάνει το κοινό αίτιο ανήκει στην $\left\{\mathcal{R}(\widetilde{O}_1) \cup \mathcal{R}(\widetilde{O}_2)\right\}''$ και το κοινό αίτιο δεν θα πρέπει να κατανοείται ως ένα συμβάν αλλά ως σύνολο συμβάντων.

Το κοινό αίτιο δύο συμβάντων που έχουν θετική στατιστική συσχέτιση δεν εντοπίζεται σε μία μοναδική περιοχή της ένωσης των κώνων φωτός παρελθόντος των δύο συμβάντων. Αυτό προκύπτει αν σκεφτούμε ότι η περιοχή O στην οποία εντοπίσαμε το κοινό αίτιο περιέχεται σε κάποια χρονική φέτα και αντίστοιχες περιοχές εντοπισμού του κοινού αιτίου μπορούν να βρεθούν σε άλλες χρονικές φέτες που αντιστοιχούν σε επόμενες ή προηγούμενες χρονικές στιγμές ως προς το συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Ο μοναδικός μας περιορισμός είναι η αιτιακή πλήρωση της O να είναι διπλός κώνος που περιλαμβάνει τις O_1, O_2. Συνεπώς,

καταλήγουν οι Rédei και Summers υπάρχουν άπειρα κοινά αίτια που ικανοποιούν την ασθενή αρχή κοινού αιτίου και εντοπίζονται σε διαφορετικές περιοχές της ένωσης των κώνων φωτός παρελθόντος των περιοχών O_1, O_2.

Ολοκληρώνοντας την παρουσίαση της αρχής κοινού αιτίου στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής θα αναφερθούμε στην απάντηση του Rédei και των συνεργατών του, Hofer-Szabó και Szabó, στην κριτική που έχει ασκηθεί όσον αφορά το αν είναι δυνατόν να εξηγηθούν οι συσχετίσεις συμβάντων σε χωροειδή απομάκρυνση που προκύπτουν από την παραβίαση της ανισότητας Bell με την βοήθεια της αρχής κοινού αιτίου. Συγκεκριμένα, ο van Fraassen (1989) έχει υποστηρίξει ότι από την συμπλήρωση της κβαντικής θεωρίας με λανθάνουσες παραμέτρους οι οποίες αναπαριστάνουν το κοινό αίτιο και ικανοποιούν υποθέσεις οι οποίες είναι ανάλογες με τις στατιστικές σχέσεις (8.1.1) - (8.1.4) συνάγεται η ισχύς της ανισότητας Bell. Επομένως, σύμφωνα με το γενικό σχήμα του επιχειρήματος (7.2.2), μία από τις γενικές υποθέσεις που στηρίζουν την συναγωγή της ανισότητας Bell θα πρέπει να απορριφθεί και η υπόθεση ότι ισχύει η αρχή κοινού αιτίου είναι η πιο ευάλωτη από αυτές. Άρα, η θετική στατιστική συσχέτιση ανάμεσα σε συμβάντα που αποτελεί συνέπεια της παραβίασης των ανισοτήτων Bell δεν μπορεί να εξηγηθεί με βάση την αρχή κοινού αιτίου διότι η ίδια η υπόθεση ότι ισχύει η αρχή αυτή είναι ασύμβατη με την παραβίαση της ανισότητας Bell και κατά συνέπεια με την κβαντική θεωρία.

Καταρχάς θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι στην τοπική κβαντική φυσική η αρχή κοινού αιτίου δεν εφαρμόζεται σε σχέση με μία θεωρία λανθανουσών παραμέτρων. Το κοινό αίτιο αναπαριστάνεται στο πλαίσιο της θεωρίας από έναν προβολικό τελεστή, και όχι από κάποια λανθάνουσα παράμετρο που καθορίζει τις στατιστικές σχέσεις των συμβάντων. Όμως το πιο σημαντικό μέρος της κριτικής στο επιχείρημα του van Fraassen έχει να κάνει με το γεγονός ότι υποθέτει ότι η στατιστική σχέση *οποιωνδήποτε* δύο συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές μπορεί να εξηγηθεί με βάση την προετοιμασία κατάστασης του συστήματος στο χρονικό παρελθόν που περιλαμβάνει και τον καθορισμό πιθανοτήτων ως προς τις τιμές της λανθάνουσας παραμέτρου. Διαφορετικά δεν είναι δυνατόν να παραχθούν οι ανισότητες Clauser-Horne που αναφέρονται σε τέσσερα ζεύγη συσχετιζόμενων συμβάντων (ή αντιστοίχως οι ανισότητες Bell που

αναφέρονται στα αντίστοιχα δίτιμα παρατηρήσιμα). Με άλλα λόγια, το κοινό αίτιο του van Fraassen, η λανθάνουσα παράμετρος, δεν είναι κοινό αίτιο δύο συσχετιζόμενων συμβάντων, αλλά κοινό αίτιο *οποιωνδήποτε* δύο συσχετιζόμενων συμβάντων, ή στην ορολογία που υιοθετεί ο Rédei και οι συνεργάτες του, *κοινό – κοινό αίτιο* (common-common cause). Η διαφορά ανάμεσα στο κοινό αίτιο και το κοινό – κοινό αίτιο φαίνεται στο παρακάτω σχήμα:

ζεύγη συμβάντων	(A_1, B_1)	(A_2, B_2)	...	(A_n, B_n)
κοινό αίτιο	C_{A_1,B_1}	C_{A_2,B_2}	...	C_{A_n,B_n}
κοινό-κοινό αίτιο		C		

Η διάκριση ανάμεσα στην έννοια του κοινού αιτίου και στην έννοια του κοινού-κοινού αιτίου επιτρέπει στον Rédei και στους συνεργάτες του να υποστηρίξουν τρεις διαφορετικές θέσεις.

Πρώτον, ότι στην τοπική κβαντική φυσική εφαρμόζεται η αρχή κοινού αιτίου και όχι κάποια υποτιθέμενη αρχή κοινού-κοινού αιτίου. Η αρχή κοινού αιτίου δεν απαιτεί την ύπαρξη κοινού-κοινού αιτίου για τα ζεύγη συσχετιζόμενων συμβάντων που δεν έχουν αιτιακή σύνδεση, αλλά την ύπαρξη διαφορετικού κοινού αιτίου για κάθε ζεύγος συμβάντων που έχουν θετική στατιστική συσχέτιση και δεν συνδέονται αιτιακά. Αυτό απαίτησε να ισχύει ο Reichenbach, ο οποίος δεν υπαινίχθηκε πουθενά την ύπαρξη κοινού-κοινού αιτίου διαφορετικών συσχετίσεων, και αυτό *εφαρμόζεται* στην τοπική κβαντική φυσική.

Δεύτερον, ότι το αίτημα να υπάρχει κοινό-κοινό αίτιο δεν είναι συμβατό με την παραβίαση της ανισότητας Bell. Αν υποθέσουμε ότι για ένα τοπικό σύστημα συσχετίσεων $(\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2), \omega)$ υπάρχει κοινό-κοινό αίτιο C όλων των συσχετίσεων που προκύπτουν στην κατάσταση ω, τότε η *υπό συνθήκη C* κατάσταση, ω_C, που ορίζεται με την σχέση $\omega_C(X) = \dfrac{\omega(CXC)}{\omega(C)}$ είναι παραγοντοποιημένη κατάσταση στις άλγεβρες $\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)$. Αυτό όμως σημαίνει, σύμφωνα με την (7.2.11), ότι στην κατάσταση αυτή ισχύει η ανισότητα Bell για τις άλγεβρες $\mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)$ - ακριβέστερα ότι $\beta(\omega, \mathcal{R}(O_1), \mathcal{R}(O_2)) = 1$. Όμως στην περίπτωση που οι περιοχές

O_1, O_2 είναι εφαπτόμενες χωροειδώς απομακρυσμένες σφηνοειδείς περιοχές ή διπλοί κώνοι, τότε σε κάθε κανονική κατάσταση έχουμε παραβίαση των ανισοτήτων Bell. Άρα και στην υπό συνθήκη *C* κατάσταση που προκύπτει από μία κανονική κατάσταση έχουμε παραβίαση της ανισότητας Bell. Άρα, δεν υπάρχει κοινό-κοινό αίτιο *C* όλων των συσχετίσεων που προκύπτουν στην κατάσταση ω για οποιεσδήποτε περιοχές O_1, O_2.

Τέλος, υποστηρίζεται ότι από την ύπαρξη κοινού-κοινού αιτίου *C* για τέσσερα ζεύγη μετατιθέμενων προβολικών τελεστών (A_1, B_1), (A_2, B_1), (A_1, B_2), (A_2, B_2) που ανήκουν σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$, το οποίο ικανοποιεί τις σχέσεις, (8.1.10) και (8.1.11) σε μία κανονική κατάσταση ω, μπορούμε να συνάγουμε την ισχύ της ανισότητας Bell. Ωστόσο, η απόδειξη της τελευταίας θέσης (παρατίθεται στο Szabó *et al.* 1999:223) είναι προβληματική, διότι η ανισότητα που αποδεικνύεται δεν είναι η ανισότητα Bell για δίτιμα παρατηρήσιμα, όπως θα δούμε αναλυτικά στην υποενότητα 8.2.2. Μάλιστα, θα προτείνουμε μία εναλλακτική απόδειξη των ανισοτήτων Clauser-Horne από την υπόθεση της ύπαρξης κοινού-κοινού αιτίου για τέσσερα ζεύγη συσχετιζόμενων συμβάντων και θα επιχειρηματολογήσουμε ότι αυτή η ανισότητα προκύπτει με πιο φυσικό τρόπο από την εν λόγω υπόθεση.

Συμπερασματικά θα λέγαμε ότι η απάντηση του Rédei και των συνεργατών του, αφενός δικαιολογεί την εφαρμογή της αρχής κοινού αιτίου για την εξήγηση της στατιστικής σχέσης ανάμεσα σε συμβάντα όπως προκύπτει από την παραβίαση των ανισοτήτων Bell, αφετέρου υποστηρίζει ότι δεν είναι δυνατόν η αρχή κοινού-κοινού αιτίου να ισχύει για το δίκτυο $\{\mathcal{R}(O)\}$.

8.2 Συστήματα Κοινών Αιτίων του Reichenbach και Τοπική Κβαντική Φυσική[6]

Στην προηγούμενη ενότητα υποστηρίξαμε ότι η ασθενής αρχή του κοινού αιτίου δεν έχει νόημα για την αιτιότητα, εφόσον θεωρήσουμε το κοινό αίτιο ως ένα συμβάν που λαμβάνει χώρα στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος δύο χωροειδώς απομακρυσμένων συμβάντων που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση. Αυτό που προτείναμε, καταρχάς, είναι να ερμηνεύσουμε το κοινό αίτιο με βάση ένα σύνολο συμβάντων. Επιπλέον, απαιτήσαμε με βάση αυτό το σύνολο συμβάντων να μπορεί να καθορισθεί ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach που να εξηγεί τη θετική στατιστική συσχέτιση.

Στο επίμετρο του δεύτερου κεφαλαίου παρουσιάσαμε τον ορισμό του Hofer-Szabó και του Rédei (2004, 2006) για το σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach της θετικής στατιστικής συσχέτισης δύο συμβάντων, A,B

$$\mathrm{P}(A \cap B) > \mathrm{P}(A)\,\mathrm{P}(B)\,, \tag{8.2.1}$$

ως τη διαμέριση $\{C_1,...,C_n\}$ του χώρου των ενδεχομένων που ικανοποιεί τις ακόλουθες μαθηματικές σχέσεις:

$$\mathrm{P}(A \cap B|C_i) = \mathrm{P}(A|C_i)\,\mathrm{P}(B|C_i) \quad \text{για κάθε } i = 1,...,n, \tag{8.2.2}$$

$$\left[\mathrm{P}(A|C_i) - \mathrm{P}(A|C_j)\right]\left[\mathrm{P}(B|C_i) - \mathrm{P}(B|C_j)\right] > 0 \qquad (i \neq j)\,. \tag{8.2.3}$$

Για να γενικεύσουμε την έννοια του συστήματος κοινών αιτίων στην αλγεβρική κβαντική θεωρία θα θεωρήσουμε ένα κβαντικό χώρο πιθανοτήτων,

$$\langle \mathcal{R}, \mathcal{P}(\mathcal{R}), \phi \rangle \tag{8.2.4}$$

όπου $\mathcal{P}(\mathcal{R})$ το πλέγμα των προβολικών τελεστών της άλγεβρας von Neumann $\mathcal{R}$ και ϕ μία κανονική κατάσταση στην $\mathcal{R}$. Για κάθε προβολικό τελεστή $A \in \mathcal{P}(\mathcal{R})$ η ποσότητα $\phi(A)$ μας δίνει την τιμή της πιθανότητας να λάβει χώρα το συμβάν που

[6] Αυτή και η επόμενη ενότητα βασίστηκαν στο υλικό της ομιλίας μου στο δεύτερο συνέδριο της European Philosophy of Science Association (Άμστερνταμ, 2009). Βλ. (Stergiou 2009)

αναπαριστάνεται από τον προβολικό τελεστή A. Επειδή η κανονική κατάσταση ϕ της άλγεβρας $\mathcal{R}$ έχει ανάλογες ιδιότητες με αυτές του κλασικού μέτρου πιθανότητας, θεωρούμε ότι αποτελεί ένα *μη-μεταθετικό μέτρο πιθανότητας* στο πλέγμα των προβολικών τελεστών της $\mathcal{R}$.

Σε αυτό το πλαίσιο η διαμέριση του $\mathcal{P}(\mathcal{R})$ ορίζεται ως μία οικογένεια προβολικών τελεστών $\{C_i\}_{i\in I} \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{R})$ που έχει άθροισμα ίσο με το μοναδιαίο στοιχείο της $\mathcal{R}$,

$$C_1 + C_2 + ... + C_n + ... = I. \tag{8.2.5}$$

Για να κατανοήσουμε τον παραπάνω ορισμό θα πρέπει να σκεφτούμε ότι η "φυσική" μεταφορά της έννοιας της διαμέρισης από την άλγεβρα Boole της κλασικής συνολοθεωρίας στο πλέγμα των προβολικών τελεστών $\mathcal{P}(\mathcal{R})$, θα απαιτούσε ως αναγκαία και ικανή συνθήκη για να αποτελεί μία οικογένεια προβολικών τελεστών $\{C_i\}_{i\in I}$ διαμέριση του $\mathcal{P}(\mathcal{R})$ τις σχέσεις:

$$C_i \wedge C_j = 0, \text{ για } i \neq j \quad \text{και} \quad \bigvee_{i\in I} C_i = I\,. \tag{8.2.6}$$

Όμως, για τους προβολικούς τελεστές σε ένα χώρο Hilbert, ισχύει το εξής θεώρημα (Halmos 1951:46, Θεωρ.2):

> Αν C είναι ένας τελεστής και $\{C_i\}_{i\in I}$ είναι μία οικογένεια προβολικών τελεστών τέτοια ώστε $\sum_{i\in I} C_i = C$, τότε αναγκαία και ικανή συνθήκη για να είναι ο C προβολικός τελεστής είναι $C_j \perp C_k$ για $j \neq k$ - με άλλα λόγια, ότι η $\{C_i\}_{i\in I}$ είναι μία οικογένεια ορθογώνιων προβολικών τελεστών.

Έτσι, επειδή ο ταυτοτικός τελεστής είναι προβολικός, αρκεί να απαιτήσουμε να ισχύει η (8.2.5) για να είναι η $\{C_i\}_{i\in I}$ διαμέριση. Το αντίστροφο, προκύπτει άμεσα από τη συνθήκη (8.2.6) και την πρόταση: αν C_i $(i = 1, 2, ...)$ είναι ανά ζεύγη ορθογώνιοι προβολικοί τελεστές, τότε $\bigvee_i C_i = \sum_i C_i$ (Rédei 1998:57, Πρτ. 4.15).

Με βάση τον ορισμό της διαμέρισης του πλέγματος των προβολικών τελεστών μίας άλγεβρας von Neumann $\mathcal{R}$, μπορούμε πλέον να ορίσουμε, στο πλαίσιο της αλγεβρικής κβαντικής θεωρίας, το σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για δύο μετατιθέμενους προβολικούς τελεστές της A,B που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση σε μία κανονική κατάσταση ϕ,

$$\phi(A \wedge B) > \phi(A)\phi(B)\,. \tag{8.2.7}$$

Θα λέμε ότι μία διαμέριση $\{C_i\}_{i\in I}$ του $\mathcal{P}(\mathcal{R})$ αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για τα A,B αν και μόνο αν

$$\left[A, C_i\right] = \left[B, C_i\right] = 0 \;\text{ για κάθε } i \in I, \tag{8.2.8}$$

$$\phi(A \wedge B \,|\, C_i) = \phi(A \,|\, C_i)\phi(B \,|\, C_i) \quad \text{για κάθε } i \in I, \tag{8.2.9}$$

$$\left[\phi(A \,|\, C_i) - \phi(A \,|\, C_k)\right]\left[\phi(B \,|\, C_i) - \phi(B \,|\, C_k)\right] > 0 \quad (i \neq k), \tag{8.2.10}$$

όπου $\phi(X \,|\, K) = \dfrac{\phi(X \wedge K)}{\phi(K)}$ για $\phi(K) \neq 0$.

Για να ερμηνεύσουμε το στατιστικό κοινό αίτιο που ικανοποιεί την ασθενή αρχή του κοινού αιτίου ως τομή συμβάντων με βάση τα οποία καθορίζεται ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach που, με τη σειρά του, εξηγεί τη θετική στατιστική συσχέτιση, προτείνουμε να ακολουθήσουμε τα εξής τρία βήματα. Πρώτον, να αναλύσουμε τον προβολικό τελεστή που αναπαριστάνει το κοινό αίτιο σε δύο ή περισσότερους μετατιθέμενους προβολικούς τελεστές που αναπαριστάνουν συμβάντα, έτσι ώστε η τομή των συμβάντων αυτών να ισούται με το στατιστικό κοινό αίτιο. Δεύτερον, να δείξουμε ότι είναι δυνατό να θεωρήσουμε ότι οι προβολικοί τελεστές στους οποίους αναλύεται το στατιστικό κοινό αίτιο αναπαριστάνουν διακριτά συμβάντα, ως προς τα χωροχρονικά χαρακτηριστικά τους, τα οποία λαμβάνουν χώρα στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των συμβάντων που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση. Τρίτον, να ορίσουμε μία διαμέριση με βάση τα συμβάντα αυτά. Ο προβολικός τελεστής που αναπαριστάνει το στατιστικό κοινό αίτιο θα είναι ένα κελί αυτής της διαμέρισης. Αφού ακολουθήσουμε τα

παραπάνω βήματα, θα δείξουμε ότι η διαμέριση που ορίσαμε *δεν* αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach.

Το πρώτο βήμα βασίζεται σε ένα θεώρημα για τις άλγεβρες von Neumann (ή για το αφηρημένο σύστοιχο τους, τις W* άλγεβρες) που δεν έχουν αβελιανούς προβολικούς τελεστές: κάθε προβολικός τελεστής S μπορεί να γραφτεί ως άθροισμα δύο ορθογώνιων ισοδύναμων προβολικών τελεστών R, Q : $S=Q+R$ (Sakai 1971:86).

Η τοπική von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}(O)$ της φραγμένης περιοχής O στην οποία εντοπίζεται, σύμφωνα με τους Rédei και Summers, το κοινό αίτιο της θετικής στατιστικής συσχέτισης είναι τύπου III και, συνεπώς, δεν έχει αβελιανούς προβολικούς τελεστές. Έτσι, μπορούμε να αναλύσουμε το ορθογώνιο συμπλήρωμα του προβολικού τελεστή που αναπαριστάνει το κοινό αίτιο,

$$C^{\perp} = Q + R = Q \vee R\,, \tag{8.2.11}$$

σε δύο ορθογώνιους ισοδύναμους προβολικούς τελεστές Q, R. Με εφαρμογή του κανόνα De Morgan καταλήγουμε στην

$$C = C_1 \wedge C_2\,, \tag{8.2.12}$$

όπου $C_1 = Q^{\perp}$, $C_2 = R^{\perp}$ και $\left[C, C_1\right] = \left[C, C_2\right] = \left[C_1, C_2\right] = 0$. Η ανάλυση αυτή μπορεί να συνεχιστεί ώστε το C να γραφεί τελικώς ως τομή 2^m προβολικών τελεστών, $m \in \mathbb{N}^*$, της $\mathcal{R}\left(O\right)$: $C = \bigwedge_{j=1}^{2^m} C_j^{(m)}$.

Το επόμενο βήμα συνίσταται στην απόδειξη ότι τα στοιχεία της οικογένειας προβολικών τελεστών $\left\{C_j^{(m)}\right\}_{j=1\ldots 2^m} \subseteq \mathcal{R}\left(O\right)$ ανήκουν σε ξένες μεταξύ τους περιοχές της ένωσης των κώνων φωτός του παρελθόντος των περιοχών O_1, O_2 (όπως απαιτεί η ασθενής αρχή του κοινού αιτίου). Στην ανάλυσή μας θα ακολουθήσουμε την προσέγγιση των Rédei και Summers (2002) για τον εντοπισμό κοινών αιτίων σε ξένες μεταξύ τους, ανοικτές, περιοχές οι οποίες είναι υποσύνολα της $\left(C^{-}(O_1) \setminus O_1\right) \cup \left(C^{-}(O_2) \setminus O_2\right)$.

Συγκεκριμένα, επειδή οι O_1, O_2, είναι φραγμένες και κυρτές περιοχές έχουμε ότι $C^-(O_i)=C^-(O_i'')$, $i\in\{1,2\}$. Επιπλέον, επειδή η O_i'' είναι διπλός κώνος μπορούμε να τη θεωρήσουμε ως την τομή των κώνων φωτός του παρελθόντος και του μέλλοντος δύο χρονοειδώς απομακρυσμένων σημείων $x^{(i)}, y^{(i)}$ του χωροχρόνου. Δηλαδή, $O_i''=C^-(x^{(i)})\cap C^+(y^{(i)})$ (Horuzhy 1990:24), οπότε

$$C^-(O_i)=C^-(O_i'')=C^-(x^{(i)}),\ i\in\{1,2\}. \tag{8.2.13}$$

Έστω $y^{(i)}=\left(y_0^{(i)},y_1^{(i)},y_2^{(i)},y_3^{(i)}\right)$, $i\in\{1,2\}$ και $t=\min\left\{y_0^{(1)},y_0^{(2)}\right\}$. Για $T>0$ και ένα φυσικό αριθμό $n=2^m\in\mathbb{N}^*$, ο οποίος εκφράζει τον πληθικό αριθμό της οικογένειας των προβολικών τελεστών στους οποίους αναλύσαμε το κοινό αίτιο C, ορίζουμε μία οικογένεια χρονικών φετών $\{S_{\lambda T}\}_{\lambda\in\{1,\ldots,n\}}$ πάχους T,

$$S_{\lambda T}=\left\{(x_0,x_1,x_2,x_3)\in\mathbb{R}^4 : t-(\lambda+1)T<x_0<t-\lambda T\right\},\ \lambda\in\{1,\ldots,n\}, \tag{8.2.14}$$

και μία αντίστοιχη οικογένεια ανοικτών περιοχών που είναι η τομή των $S_{\lambda T}$ με την ένωση των κώνων φωτός παρελθόντος των περιοχών O_1, O_2 στις οποίες εντοπίζονται τα συμβάντα που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση:

$$O_\lambda=S_{\lambda T}\cap\left(C^-(x^{(1)})\cup C^-(x^{(2)})\right)=S_{\lambda T}\cap\left(C^-(O_1)\cup C^-(O_2)\right). \tag{8.2.15}$$

Άρα, για κάθε $\lambda\in\{1,\ldots,n\}$, η περιοχή O_λ περιέχεται στην ένωση των κώνων φωτός παρελθόντος των συμβάντων που εκδηλώνουν στατιστική σχέση, είναι ξένη με τις περιοχές O_1 και O_2 που εντοπίζονται τα συμβάντα,

$$O_\lambda\subseteq\left(C^-(O_1)\setminus O_1\right)\cup\left(C^-(O_2)\setminus O_2\right), \tag{8.2.16}$$

και το αιτιακό συμπλήρωμα της O_λ περιλαμβάνει τις O_1, O_2,

$$O_1\cup O_2\subset O_\lambda''\ ,\ \lambda\in\{1,\ldots,n\}. \tag{8.2.17}$$

Επιπλέον, η οικογένεια $\{O_\lambda{}''\}_{\lambda\in\{1,\ldots,n\}}$ των αιτιακών συμπληρωμάτων των περιοχών O_λ είναι ένα κατευθυνόμενο σύνολο, αφού

$$O_\lambda{}'' \subset O_{\lambda+1}{}'' \ , \ \lambda \in \{1,...,n\}. \tag{8.2.18}$$

Από την ισοτονία και την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία, αιτήματα που ισχύουν για το δίκτυο $\{\mathcal{R}(O)\}$, έπονται οι ακόλουθες σχέσεις για τις τοπικές von Neumann άλγεβρες:

$$\mathcal{R}\left(O_1 \cup O_2\right) \subset \mathcal{R}\left(O_\lambda{}''\right) = \mathcal{R}\left(O_\lambda\right) \subset \mathcal{R}\left(O_{\lambda+1}{}''\right) = \mathcal{R}\left(O_{\lambda+1}\right), \tag{8.2.19}$$

για κάθε $\lambda \in \{1,2,...,n\}$.

Επιπλέον, ακολουθώντας τη συλλογιστική των Rédei και Summers (2002), μπορούμε να συμπεράνουμε ότι για κάθε $\lambda \in \{1,...,n\}$ οι τοπικές άλγεβρες $\mathcal{R}\left(O_\lambda\right)$ είναι τύπου III. Αυτό συνεπάγεται ότι υπάρχει ένας προβολικός τελεστής $C \in \mathcal{R}\left(O_\lambda\right)$ που αναπαριστάνει ένα χωροχρονικά διαφορετικό συμβάν, για κάθε διαφορετικό $\lambda \in \{1,...,n\}$, το οποίο ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του κοινού αιτίου. Ωστόσο, σύμφωνα με την προηγούμενη ανάλυσή μας, κάθε τοπική άλγεβρα $\mathcal{R}\left(O_\lambda\right)$, περιλαμβάνει ολόκληρη την οικογένεια $\left\{C_j^{(m)}\right\}_{j=1\ldots 2^m}$ των προβολικών τελεστών, υπό τους όρους της οποίας αναλύεται το στατιστικό κοινό αίτιο *C*. Έτσι, αν υποθέσουμε ότι κάθε προβολικός τελεστής αυτής της οικογένειας $C_\lambda^{(m)} \in \left\{C_j^{(m)}\right\}_{j=1\ldots 2^m}$, $\lambda \in \{1,...,n\}$ περιγράφει ένα συμβάν, τότε μπορούμε να θεωρήσουμε ότι αυτό το συμβάν λαμβάνει χώρα στην περιοχή του χωροχρόνου O_λ που περιέχεται στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των O_1,O_2.

Από τα δύο πρώτα βήματα που περιγράψαμε, γίνεται φανερό ότι υπάρχει κάποιου είδους *αυθαιρεσία* σε σχέση με τα συμβάντα στα οποία μπορούμε να αναλύσουμε το κοινό αίτιο. Κατά πρώτον, υπάρχει αυθαιρεσία σε σχέση με το πλήθος των συμβάντων. Το κοινό αίτιο μπορεί να θεωρηθεί ως τομή δύο, τεσσάρων ή οποιουδήποτε αριθμού συμβάντων, αρκεί να είναι ακέραια δύναμη του 2. Κατά

δεύτερον, αυτά τα συμβάντα ενδέχεται να λαμβάνουν χώρα σε οποιεσδήποτε ξένες μεταξύ τους χωροχρονικές περιοχές στην ένωση των κώνων φωτός των συσχετιζόμενων συμβάντων, αρκεί να ισχύουν οι προϋποθέσεις που επιτρέπουν την εφαρμογή της τοπικής πρωτογενούς αιτιοκρατίας. Ωστόσο, αυτή η αίσθηση αυθαιρεσίας μπορεί να μετριαστεί, αν σκεφτούμε ότι η αιτιακή σχέση είναι μία σχέση "πολλά προς ένα": ένα συμβάν μπορεί να είναι αποτέλεσμα πολλών διαφορετικών αιτίων. Έτσι, διαφορετικοί συνδυασμοί συμβάντων που λαμβάνουν χώρα σε διαφορετικές χωροχρονικές περιοχές μπορεί να έχουν το ίδιο σωρευτικό αποτέλεσμα, τα υπό συσχέτιση συμβάντα.

Ας υποθέσουμε, για λόγους απλούστευσης, ότι το στατιστικό κοινό αίτιο αναλύεται σε ένα ζεύγος συμβάντων C_1,C_2 που ικανοποιούν τις (8.2.11) και (8.2.12). Σύμφωνα με το τρίτο βήμα που περιγράψαμε, θα πρέπει με βάση αυτά τα συμβάντα να ορίσουμε μία διαμέριση που να αποτελείται από υποσυλλογές που καθορίζονται από τις εξής συνθήκες: α) και τα δύο συμβάντα C_1,C_2 λαμβάνουν χώρα, β) το C_1 λαμβάνει χώρα αλλά το C_2 δεν λαμβάνει χώρα, γ) το C_2 λαμβάνει χώρα αλλά το C_1 δεν λαμβάνει χώρα, δ) κανένα από τα συμβάντα C_1,C_2 δεν λαμβάνει χώρα. Με όρους προβολικών τελεστών αυτές οι συνθήκες διατυπώνονται αντιστοίχως ως εξής:

$$C_1 \wedge C_2 ,\ C_1^{\perp} \wedge C_2 ,\ C_1 \wedge C_2^{\perp} , C_1^{\perp} \wedge C_2^{\perp} .$$

Λόγω της ορθογωνιότητας των προβολικών τελεστών $C_1^{\perp}, C_2^{\perp}$ ισχύει ότι $C_1^{\perp} \wedge C_2^{\perp} = 0$ καθώς και $C_1^{\perp} \wedge C_2 = C_1^{\perp}$ και $C_1 \wedge C_2^{\perp} = C_2^{\perp}$. Έπεται ότι η ζητούμενη διαμέριση είναι το σύνολο προβολικών τελεστών,

$$\left\{ C, C_1^{\perp}, C_2^{\perp} \right\}. \qquad (8.2.20)$$

Αυτό που μένει να δείξουμε είναι ότι *επειδή* ο προβολικός τελεστής C αναπαριστάνει το κοινό αίτιο, δηλαδή ικανοποιεί τις σχέσεις (8.1.10) - (8.1.13), η διαμέριση (8.2.20) *δεν* είναι ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για τα συμβάντα A,B.

Λόγω του γεγονότος ότι ο C αναπαριστάνει το κοινό αίτιο, θα ικανοποιεί και τη σχέση (8.2.9), ενώ για το ορθογώνιο συμπλήρωμα $C^{\perp}$ ισχύει ότι

$$\phi(A \wedge B \left| C^{\perp}\right.) = \phi(A \left| C^{\perp}\right.)\phi(B \left| C^{\perp}\right.). \qquad (8.2.21)$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση (8.2.11) αναλύουμε τον $C^{\perp}$ στους $C_1^{\perp}, C_2^{\perp}$ οπότε προκύπτει για το αριστερό μέλος της (8.2.21),

$$a\phi(A \wedge B \left| C_1^{\perp}\right.) + (1-a)\phi(A \wedge B \left| C_2^{\perp}\right.) = \phi(A \wedge B \left| C^{\perp}\right.) \qquad (8.2.22)$$

και για το δεξιό μέλος της (8.2.21),

$$\begin{aligned} a^2\phi(A \left| C_1^{\perp}\right.)\phi(B \left| C_1^{\perp}\right.) + (1-a)^2\,\phi(A \left| C_2^{\perp}\right.)\phi(B \left| C_2^{\perp}\right.) \\ + a(1-a)\phi(A \left| C_1^{\perp}\right.)\phi(B \left| C_2^{\perp}\right.) + a(1-a)\phi(A \left| C_2^{\perp}\right.)\phi(B \left| C_1^{\perp}\right.) \\ = \phi(A \left| C^{\perp}\right.)\phi(B \left| C^{\perp}\right.) \end{aligned}$$

(8.2.23)

με $a = \dfrac{\phi(C_1^{\perp})}{\phi(C_1^{\perp}) + \phi(C_2^{\perp})}$.

Ακολούθως αντικαθιστούμε τις (8.2.22) και (8.2.23) στη σχέση (8.2.21) και παραγοντοποιούμε τις ποσότητες $\phi(A \wedge B \left| C_1^{\perp}\right.)$, $\phi(A \wedge B \left| C_2^{\perp}\right.)$ κατά το πρότυπο της (8.2.9). Έτσι, με απλούς υπολογισμούς, καταλήγουμε στην παρακάτω σχέση για τις υπό συνθήκη πιθανότητες των C_1, C_2 :

$$\phi(A \left| C_1^{\perp}\right.)\left\{\phi(B \left| C_1^{\perp}\right.) - \phi(B \left| C_2^{\perp}\right.)\right\} = \phi(A \left| C_2^{\perp}\right.)\left\{\phi(B \left| C_1^{\perp}\right.) - \phi(B \left| C_2^{\perp}\right.)\right\}.$$

Αυτή συνεπάγεται ότι

$$\phi(A \left| C_1^{\perp}\right.) = \phi(A \left| C_2^{\perp}\right.) \quad \text{ή} \quad \phi(B \left| C_1^{\perp}\right.) = \phi(B \left| C_2^{\perp}\right.). \qquad (8.2.24)$$

Ωστόσο, αν οποιαδήποτε από τις σχέσεις (8.2.24) ισχύει, τότε δεν θα ισχύει η (8.2.10) και κατά συνέπεια η διαμέριση (8.2.20) που ορίζεται με βάση τα C_1, C_2 δεν θα είναι σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach.

Το αποτέλεσμα αυτό είναι αναμενόμενο.[7] Οι Hofer- Szabó και Rédei έχουν αποδείξει, στο πλαίσιο των κλασικών χώρων πιθανότητας, ότι αν μία πεπερασμένη διαμέριση είναι σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για ένα ζεύγος συμβάντων που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση, τότε δεν υπάρχει ούτε αυστηρώς λεπτότερη ούτε αυστηρώς αδρότερη διαμέριση που επίσης να αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για τα ίδια συμβάντα (Hofer-Szabó and Rédei 2004: Πρτ.4).

Ο ορισμός της λεπτότερης και της αδρότερης διαμέρισης μίας στατιστικής συλλογής που παρουσιάζεται από τους Hofer-Szabó και Rédei μπορεί να μεταγραφεί στο πλαίσιο της αλγεβρικής κβαντικής θεωρίας ως εξής.

> Έστω δύο διαμερίσεις $P_1 = \left\{C_i^1\right\}_{i\in I}, P_2 = \left\{C_j^2\right\}_{j\in J}$ του $\mathcal{P}(\mathcal{R})$. Θα λέμε ότι η διαμέριση $P_1 = \left\{C_i^1\right\}_{i\in I}$ είναι *λεπτότερη* (finer) της $P_2 = \left\{C_j^2\right\}_{j\in J}$, και θα γράφουμε "$P_1 \preceq P_2$", αν και μόνο αν για κάθε προβολικό τελεστή $C_j^2 \in P_2$ υπάρχουν προβολικοί τελεστές $C_{i_l^j}^1 \in P_1,\ (i_l^j \in L \subseteq I)$ τέτοιοι ώστε
>
> $$C_j^2 = \sum_{i_l^j \in L} C_{i_l^j}^1 \quad \text{για κάθε } j \in J. \tag{8.2.25}$$

Σε αυτή την περίπτωση η διαμέριση P_2 λέγεται *αδρότερη* (coarser) από την P_1. Επιπλέον, μία διαμέριση P_1 ονομάζεται *αυστηρώς* λεπτότερη (αδρότερη) από μία διαμέριση P_2, αν η P_1 είναι λεπτότερη (αδρότερη) από την P_2 και $P_1 \neq P_2$. Στην περίπτωσή μας, η διαμέριση $\left\{C, C_1^{\perp}, C_2^{\perp}\right\}$ είναι αυστηρώς λεπτότερη από την $\left\{C, C^{\perp}\right\}$ και με βάση την πρόταση των Hofer-Szabó και Rédei (2004: Πρτ.4), η οποία είναι εύκολο να διατυπωθεί και να αποδειχθεί στο πλαίσιο της αλγεβρικής κβαντικής θεωρίας, προκύπτει το αποτέλεσμα που εδώ αποδείξαμε απευθείας.

Το συμπέρασμα που συνάγεται από τα παραπάνω είναι ότι αν θέλουμε να βρούμε ένα ορθό σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach για μία στατιστική σχέση

[7] Την επισήμανση αυτού του γεγονότος την οφείλω στον Miklòs Rédei κατά τη διάρκεια του 2ου συνεδρίου EPSA (Amsterdam, Νοέμβρης 2009).

που εκδηλώνεται ανάμεσα σε συμβάντα στην τοπική κβαντική φυσική, θα πρέπει να το επιχειρήσουμε απευθείας, *χωρίς αναφορά* στο στατιστικό κοινό αίτιο που εξηγεί τη στατιστική σχέση. Σε αυτή την περίπτωση, οι προβολικοί τελεστές που συγκροτούν τη διαμέριση θα εντοπιστούν με βάση την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των συσχετιζόμενων συμβάντων, χωρίς να προκύπτει ανάλογο πρόβλημα με την αιτιακή ερμηνεία του ασθενούς κοινού αιτίου. Βέβαια, η εύρεση ορθών συστημάτων κοινών αιτίων του Reichenbach στην τοπική κβαντική φυσική, με τις παραπάνω προϋποθέσεις, παραμένει ακόμη ζητούμενο. Και φυσικά δεν υπάρχει καμία εκ των προτέρων εγγύηση ότι τα αιτήματα που περιορίζουν τα μοντέλα της τοπικής κβαντικής φυσικής επαρκούν για κάτι τέτοιο.

8.3 Κοινά-Κοινά Αίτια και Ανισότητες Clauser-Horne

Στην ενότητα 7.2 δείξαμε με ποιον τρόπο οι ανισότητες των Clauser, Horne, Shimony και Holton (7.2.4), μεταγράφονται στο πλαίσιο της αλγεβρικής κβαντικής θεωρίας στις ανισότητες (7.2.5), οι οποίες ισχύουν για τέσσερις προβολικούς τελεστές και, στη συνέχεια, πώς μπορούμε να ορίσουμε τις αντίστοιχες ανισότητες Bell (7.2.5) για μία τετράδα κατάλληλα ορισμένων δίτιμων παρατηρήσιμων. Σε αυτή την ενότητα θα προτείνουμε μία απόδειξη των ανισοτήτων των Clauser, Horne, Shimony και Holton (CHSH) από την υπόθεση της ύπαρξης κοινού-κοινού αιτίου για την τετράδα συμβάντων που αναπαριστάνονται από τους προβολικούς τελεστές των ανισοτήτων.

Συγκεκριμένα, έστω μία τετράδα προβολικών τελεστών $\left(P_1, P_2, Q_1, Q_2\right)$ που ανήκουν σε μία άλγεβρα von Neumann $\mathcal{R}$ και μία κανονική κατάσταση ϕ της άλγεβρας. Επιπλέον, υποθέτουμε ότι για κάθε *i,j*, $\left[P_i, Q_j\right] = 0$ και

$$\phi(P_i \wedge Q_j) > \phi(P_i)\phi(Q_j). \tag{8.3.1}$$

Σύμφωνα με την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου θεωρούμε ότι υπάρχει ένας προβολικός τελεστής C, ο οποίος αναπαριστάνει το κοινό-κοινό αίτιο των στατιστικών σχέσεων (8.3.1) και ικανοποιεί τις εξής μαθηματικές σχέσεις:

$$[C, P_i] = [C, Q_j] = 0 \tag{8.3.2}$$

$$\phi(P_i \wedge Q_j | C) = \phi(P_i | C)\phi(Q_j | C), \tag{8.3.3}$$

$$\phi(P_i \wedge Q_j | C^{\perp}) = \phi(P_i | C^{\perp})\phi(Q_j | C^{\perp}), \tag{8.3.4}$$

$$\phi(P_i | C) > \phi(P_i | C^{\perp}), \tag{8.3.5}$$

$$\phi(Q_j | C) > \phi(Q_j | C^{\perp}), \tag{8.3.6}$$

για $i, j = 1, 2$.

Ας προχωρήσουμε τώρα στην απόδειξη των ανισοτήτων CHSH. Καταρχάς θα πρέπει να παρατηρήσουμε ότι για κάθε i,j ισχύει

$$\phi(P_i \wedge Q_j) = \phi(P_i \wedge Q_j | C)\phi(C) + \phi(P_i \wedge Q_j | C^{\perp})\phi(C^{\perp}).$$

Με τη βοήθεια των (8.3.3) και (8.3.4) η παραπάνω σχέση λαμβάνει τη μορφή

$$\phi(P_i \wedge Q_j) = \phi(P_i | C)\phi(Q_j | C)\phi(C) + \phi(P_i | C^{\perp})\phi(Q_j | C^{\perp})\phi(C^{\perp}). \tag{8.3.7}$$

Οι Clauser-Horne (1974) απέδειξαν το εξής λήμμα: για έξι αριθμούς $\kappa_1, \kappa_2, \lambda_1, \lambda_2, \kappa, \lambda$, τέτοιους ώστε, $0 \le \kappa_1, \kappa_2 \le \kappa$ και $0 \le \lambda_1, \lambda_2 \le \lambda$ ισχύουν οι ανισότητες

$$-\kappa\lambda \le U \le 0, \tag{8.3.8}$$

όπου $U = \kappa_1\lambda_1 - \kappa_1\lambda_2 + \kappa_2\lambda_1 + \kappa_2\lambda_2 - \lambda\kappa_1 - \kappa\lambda_1$. Εφαρμόζουμε το λήμμα δύο φορές. Την πρώτη φορά για

$$\kappa = \lambda = 1,\ \kappa_1 = \phi(P_1|C),\ \kappa_2 = \phi(P_2|C),\ \lambda_1 = \phi(Q_1|C),\ \lambda_2 = \phi(Q_2|C),$$

και τη δεύτερη συνθηκοποιώντας ως προς $C^{\perp}$. Έτσι προκύπτουν οι ανισότητες:

$$\begin{aligned} -1 \le\ & \phi(P_1|C)\phi(Q_1|C) - \phi(P_1|C)\phi(Q_2|C) \\ & + \phi(P_2|C)\phi(Q_1|C) + \phi(P_2|C)\phi(Q_2|C) - \phi(P_1|C) - \phi(Q_1|C) \le 0, \end{aligned} \tag{8.3.9}$$

$$\begin{aligned} -1 \le\ & \phi(P_1|C^{\perp})\phi(Q_1|C^{\perp}) - \phi(P_1|C^{\perp})\phi(Q_2|C^{\perp}) \\ & + \phi(P_2|C^{\perp})\phi(Q_1|C^{\perp}) + \phi(P_2|C^{\perp})\phi(Q_2|C^{\perp}) - \phi(P_1|C^{\perp}) - \phi(Q_1|C^{\perp}) \le 0 \end{aligned}.$$

(8.3.10)

Ακολούθως, πολλαπλασιάζουμε τη διπλή ανισότητα (8.3.9) με την ποσότητα $\phi(C)$ και την (8.3.10) με $\phi(C^{\perp})$ και αθροίζουμε κατά μέλη. Με τη βοήθεια της (8.3.7) καταλήγουμε στις ανισότητες CHSH,

$$-1 \le \phi(P_1 \wedge Q_1) - \phi(P_1 \wedge Q_2) + \phi(P_2 \wedge Q_1) + \phi(P_2 \wedge Q_2) - \phi(P_1) - \phi(Q_1) \le 0.$$

(8.3.11)

Η απόδειξη αυτή μπορεί εύκολα να επεκταθεί στη γενική περίπτωση ενός *κοινού συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach* $\{C_i\}_{i\in I}$ οποιασδήποτε τάξης *n* *που* εξηγεί τις θετικές στατιστικές σχέσεις (8.3.1)[8]. Στην περίπτωση αυτή γράφουμε την (8.3.7) ως ένα άθροισμα *n*-όρων ως προς C_i και εφαρμόζουμε το λήμμα των Clauser-Horne *n*-φορές, μία φορά για κάθε C_i. Έτσι, προκύπτουν *n* ανισότητες, αντίστοιχες των (8.3.9) και (8.3.10), τις οποίες πολλαπλασιάζουμε, αντιστοίχως, με $\phi(C_i)$ την καθεμία και τις αθροίζουμε κατά μέλη, οπότε καταλήγουμε στην (8.3.11). Από τη γενίκευση συμπεραίνουμε ότι όχι μόνο η ύπαρξη κοινού-κοινού αιτίου αλλά και γενικότερα η ύπαρξη ενός κοινού συστήματος κοινών αιτίων για μία τετράδα θετικών στατιστικών συσχετίσεων οδηγεί στην ικανοποίηση των ανισοτήτων CHSH.

[8] Συμπεριλαμβάνεται και η τιμή "$n = \infty$" για ένα άπειρο αριθμήσιμο σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach. Η κανονική κατάσταση μίας von Neumann άλγεβρας είναι πλήρως αθροιστική στο πλέγμα των προβολικών τελεστών της άλγεβρας (Araki 1999:23).

Οι Hofer-Szabó και Rédei (1999) απέδειξαν μία διαφορετική ανισότητα από αυτή που μόλις αποδείξαμε ακολουθώντας μία παρόμοια διαδικασία[9]. Συγκεκριμένα, αντί να χρησιμοποιήσουν το λήμμα των Clauser και Horne, χρησιμοποίησαν μία διαφορετική αριθμητική ανισότητα σύμφωνα με την οποία,

$$\left|a_i b_i + a_i b_j + a_j b_i - a_j b_j\right| \leq 2 \tag{8.3.12}$$

για οποιουσδήποτε αριθμούς $a_i, b_j \in [0,1]$ $(i, j = 1,2)$. Η ανισότητα στην οποία καταλήγουν έχει τη μορφή των ανισοτήτων Bell με ορίσματα των καταστάσεων προβολικούς τελεστές. Συγκεκριμένα,

$$\left|\phi(P_1 \wedge Q_1) + \phi(P_1 \wedge Q_2) + \phi(P_2 \wedge Q_1) - \phi(P_2 \wedge Q_2)\right| \leq 2. \tag{8.3.13}$$

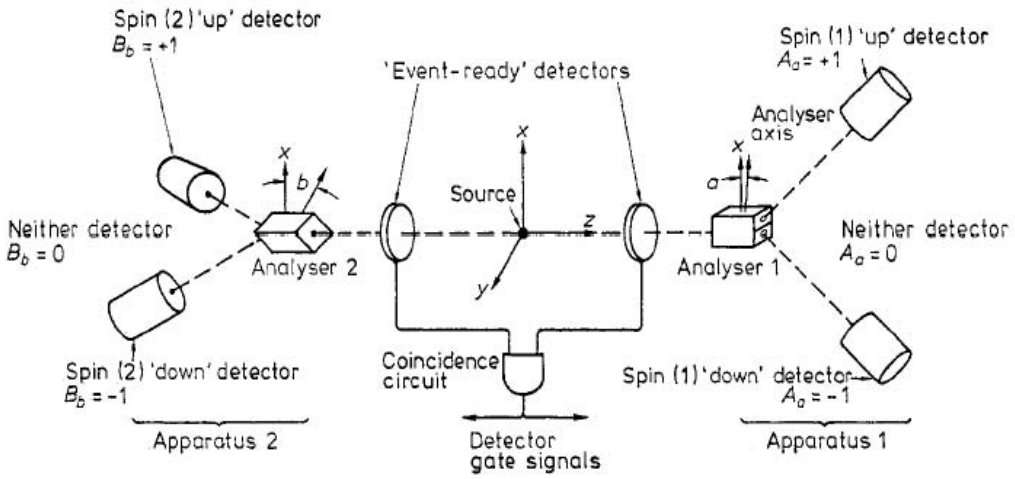
Από μαθηματική άποψη τόσο η συναγωγή των ανισοτήτων CHSH (8.3.11), όσο και των ανισοτήτων Bell (8.3.13), από την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου είναι ορθή. Ωστόσο, θεωρούμε ότι ανάμεσα στις δύο ανισότητες θα πρέπει να επιλέξουμε ως πιο φυσική, από ερμηνευτική άποψη, τη συναγωγή των ανισοτήτων CHSH από την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου.

Για να υποστηρίξουμε αυτή τη θέση ας θυμηθούμε τη διαφορά των ανισοτήτων Bell από τις ανισότητες CHSH, με βάση την ερμηνεία τους ως ανισότητες που υπόκεινται σε πειραματικό έλεγχο. Ο Bell θεώρησε μία πειραματική διάταξη δύο πτερύγων με έναν αναλυτή spin και δύο ανιχνευτές σωματιδίων σε κάθε πτέρυγα (Σχήμα 8.2). Για δεδομένη θέση του άξονα *a* του αναλυτή, ένα σωματίδιο μπορεί να διεγείρει κάποιον από τους ανιχνευτές ή να μη διεγείρει κανένα ανιχνευτή. Έτσι, υπάρχουν τρία δυνατά αποτελέσματα μέτρησης για το παρατηρήσιμο σε κάθε πτέρυγα: $(+1)$ – "spin πάνω", (-1) – "spin κάτω", (0) – "δεν αποκρίνεται ο ανιχνευτής". Οι ανισότητες Bell διατυπώνονται με όρους αναμενόμενων τιμών για τα τρίτιμα παρατηρήσιμα στην κάθε πτέρυγα. Αν οι παράμετροι *a, a΄* δηλώνουν τους δυνατούς προσανατολισμούς του άξονα του αναλυτή στη διάταξη 1 και *b, b΄*, τις δυνατές διατάξεις του άξονα του αναλυτή στη διάταξη 2, οι ανισότητες Bell έχουν τη μορφή,

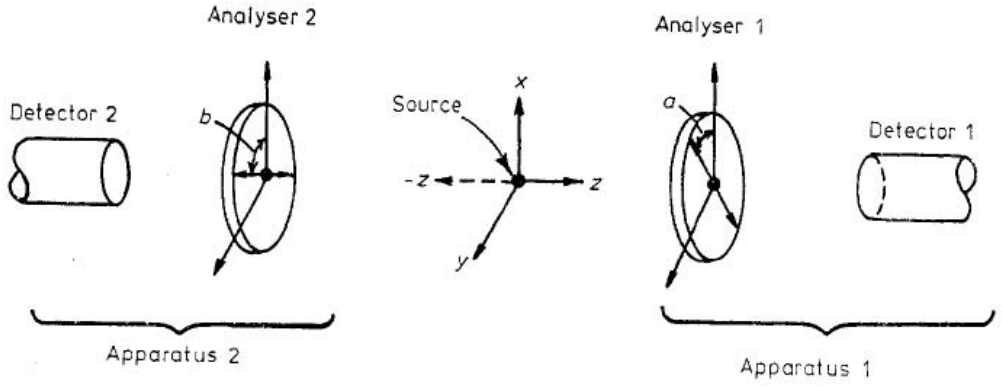
[9] Για την ακρίβεια η απόδειξη που παρουσιάσαμε *είναι* εμπνευσμένη από την απόδειξη των Hofer-Szabó και Rédei και προτείνεται μόνο ως διόρθωση / βελτίωση της δικής τους απόδειξης.

$$-2 \le E(a,b) - E(a',b') + E(a',b) + E(a,b') \le 2\,, \qquad (8.3.14)$$

όπου $E(a,b), E(a',b),$ κ.ο.κ. είναι οι αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων που αντιστοιχούν σε κάθε πτέρυγα του πειράματος.



Σχ. 8.2 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την απόδειξη των ανισοτήτων Bell (Clauser and Shimony 1978)



Σχ. 8.3 Πειραματική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε για την απόδειξη των ανισοτήτων Clauser-Horne (Clauser and Shimony 1978)

Από την άλλη, οι Clauser και Horne θεώρησαν ένα απλούστερο πείραμα που αποτελείται από δύο αναλυτές και δύο ανιχνευτές, ένα ζεύγος συσκευών για κάθε

πτέρυγα του πειράματος (Σχήμα 8.3). Οι ανισότητες που προκύπτουν περιλαμβάνουν πιθανότητες συζευγμένων ή απλών συμβάντων που ενδέχεται να λάβουν χώρα σε καθένα από τους ανιχνευτές για δύο διαφορετικού προσανατολισμούς του άξονα του αναλυτή,

$$-1 \leq \mathrm{P}_{12}(P_a \,\&\, Q_b) - \mathrm{P}_{12}(P_{a'} \,\&\, Q_{b'}) + \mathrm{P}_{12}(P_a \,\&\, Q_{b'}) + \mathrm{P}_{12}(P_{a'} \,\&\, Q_b) - \mathrm{P}_1(P_a) - \mathrm{P}_2(Q_b) \leq 0. \tag{8.3.15}$$

Στις παραπάνω ανισότητες οι αριθμητικοί δείκτες δηλώνουν τις δύο διατάξεις, στις αντίστοιχες πτέρυγες του πειράματος, ενώ οι γραμματικοί δείκτες *a*,*a΄* και *b*,*b΄* δηλώνουν τους διαφορετικούς προσανατολισμούς των αναλυτών spin στις πτέρυγες 1 και 2, αντιστοίχως.

Με δεδομένο ότι οι ανισότητες Bell αναφέρονται σε αναμενόμενες τιμές τρίτιμων (ή δίτιμων[10]) παρατηρήσιμων και ότι οι ανισότητες CHSH σε πιθανότητες συμβάντων, για να επιλέξουμε ποια ανισότητα είναι ορθό να συναγάγουμε από ένα ορισμένο σύνολο προκείμενων απαιτούμε να υπάρχει συνέπεια ως προς την ερμηνεία των μαθηματικών όρων. Έτσι, αν στις προκείμενες της απόδειξης οι προβολικοί τελεστές αναπαριστάνουν συμβάντα, το ίδιο θα πρέπει να ισχύει και κατά την ερμηνεία της ανισότητας. Επίσης, αν η δράση μίας κανονικής κατάστασης της von Neumann άλγεβρας πάνω σε ένα προβολικό τελεστή ερμηνεύεται στις προκείμενες ως η πιθανότητα να λάβει χώρα ένα συμβάν, η ίδια ερμηνεία θα υιοθετηθεί και στην ανισότητα που συνάγουμε από αυτές τις προκείμενες. Επομένως, αν η υπόθεση κοινού-κοινού αιτίου είναι η προκείμενη της συναγωγής της ανισότητας, τότε θα πρέπει να συνάγουμε την ανισότητα CHSH για να διασφαλιστεί η συνέπεια ως προς την ερμηνεία των μαθηματικών όρων.

Αυτό το επιχείρημα υπέρ της απόδειξης των ανισοτήτων CHSH από την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου έναντι της προτεινόμενης από τους Hofer-Szabó

[10] Στο Παράρτημα Β της εργασίας τους, οι Clauser και Horne (1974) προσπαθούν να αποδείξουν την ισοδυναμία των ανισοτήτων CHSH με τις ανισότητες Bell. Υποστηρίζουν ότι στο πείραμα Bell αντιστοιχούν τέσσερα σύνολα ανισοτήτων CHSH και με τον κατάλληλο συνδυασμό των πιθανοτήτων για τα δυνατά αποτελέσματα μέτρησης κατασκευάζουν τις αναμενόμενες τιμές των παρατηρησίμων Bell. Ωστόσο, για να αποδείξουν το αντίστροφο, δηλαδή τις ανισότητες CHSH από τις ανισότητες Bell, προτείνουν μία τροποποίηση του ορισμού της ανισότητας Bell που αντιστοιχεί στη θεώρηση των παρατηρήσιμων Bell ως δίτιμα και όχι ως τρίτιμα, όπως τα περιγράψαμε. Αυτό που επιχειρούν με αυτή την τροποποίηση είναι να λάβουν υπόψη τους *αποκλειστικά* τις πιθανότητες να λάβουν χώρα συμβάντα, και όχι την πιθανότητα να μη συμβεί τίποτα. Για αυτό το λόγο, αναφέρουμε και την περίπτωση των δίτιμων παρατηρήσιμων.

και Rédei απόδειξης των ανισοτήτων Bell στηρίζεται στην προϋπόθεση ότι οι ανισότητες (8.3.11) δεν είναι ισοδύναμες με τις ανισότητες (8.3.13). Αυτό που είναι εύκολο να διαπιστώσουμε είναι ότι οι (8.3.11) συνεπάγονται τις (8.3.13). Συγκεκριμένα, ισχύει

$$-1+\phi(P_1)+\phi(Q_1)\le\phi(P_1Q_1)+\phi(P_1Q_2)+\phi(P_2Q_1)-\phi(P_2Q_2)\le\phi(P_1)+\phi(Q_1),$$

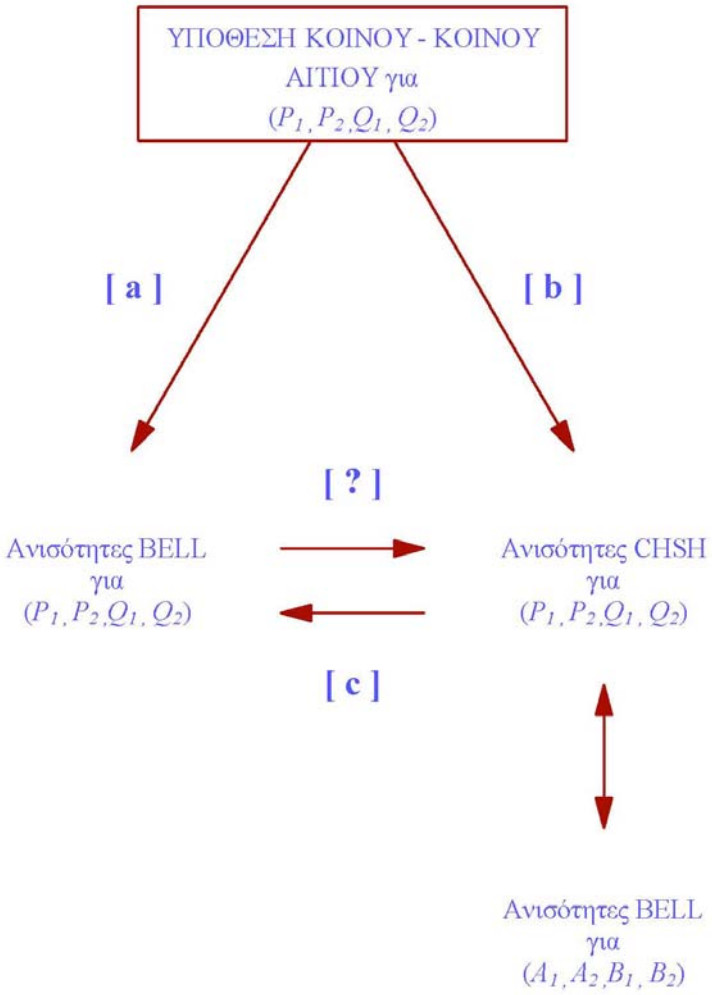
και επειδή, $0\le\phi(P_i),\phi(Q_j)\le 1$, έχουμε,

$$-2\le -1\le\phi(P_1Q_1)+\phi(P_1Q_2)+\phi(P_2Q_1)-\phi(P_2Q_2)\le 2.$$

Ωστόσο, το αντίστροφο δεν είναι το ίδιο προφανές και *πιστεύω* ότι δεν ισχύει.

Τα συμπεράσματα της συζήτησης για τη συναγωγή των ανισοτήτων CHSH και των ανισοτήτων Bell από την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου μπορούν να συνοψιστούν στο διάγραμμα που ακολουθεί και στις εξής, διευκρινιστικές, θέσεις:

[1] Η χρήση της υπόθεσης του κοινού-κοινού αιτίου καθιστά πιο φυσική, από ερμηνευτική άποψη, τη συναγωγή των ανισοτήτων CHSH [b] από τη συναγωγή των ανισοτήτων Bell [a] για μία τετράδα προβολικών τελεστών.
[2] Αν μία τετράδα προβολικών τελεστών ικανοποιεί τις ανισότητες CHSH, τότε ικανοποιεί και τις ανισότητες Bell [c]. Αν ισχύει και το αντίστροφο, τότε ο πρώτος ισχυρισμός μου είναι σημαντικά ασθενέστερος.
[3] Μία τετράδα προβολικών τελεστών ικανοποιεί τις ανισότητες CHSH αν και μόνο αν η τετράδα των δίτιμων παρατηρήσιμων (A_1, A_2, B_1, B_2), τα οποία ορίζονται με τις σχέσεις $A_i = 2P_i - I$ και $B_j = 2Q_j - I$ $(i, j = 1, 2)$, ικανοποιεί τις ανισότητες Bell.



Σχ. 8.4 Μαθηματικές σχέσεις ανάμεσα στις ανισότητες Bell και στις ανισότητες Clauser-Horne

Σύνοψη

Σε αυτό το κεφάλαιο προτείναμε μία διαφορετική ερμηνεία της αρχής του κοινού αιτίου σύμφωνα με την οποία το κοινό αίτιο θεωρείται ως μία *οικογένεια* συμβάντων αντί για ένα μεμονωμένο συμβάν. Ο λόγος που μας ώθησε σε αυτή τη γενίκευση είναι η αδυναμία αυτοτελούς ερμηνείας του γεγονότος ότι το κοινό αίτιο μίας στατιστικής συσχέτισης μπορεί να βρεθεί στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος των συσχετιζόμενων συμβάντων και όχι στην τομή τους, όπως θα ήταν εύλογο από τη σκοπιά της φυσικής ερμηνείας.

Αυτό που δείξαμε είναι ότι το σύνολο των συμβάντων στα οποία μπορεί να αναλυθεί το κοινό αίτιο δεν είναι δυνατό να ορίζουν ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach. Το αποτέλεσμα αυτό, μολονότι ήταν αναμενόμενο με βάση την κλασική προσέγγιση στην έννοια του συστήματος κοινών αιτίων, αποδεικνύεται για πρώτη φορά στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής. Επίσης, για τις ανάγκες αυτής της απόδειξης, διατυπώσαμε την έννοια του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach στο ίδιο θεωρητικό πλαίσιο. Το γεγονός ότι δεν μπορεί να προκύψει ένα σύστημα κοινών αιτίων από την ανάλυση του κοινού αιτίου, δεν σημαίνει ότι δεν υπάρχουν συστήματα κοινών αιτίων μίας δεδομένης στατιστικής συσχέτισης στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής. Απλώς, σημαίνει ότι η συγκεκριμένη οδός είναι άγονη.

Τέλος, προσπαθήσαμε να αποσαφηνίσουμε τη σχέση ανάμεσα στις ανισότητες CHSH και στις ανισότητες Bell, και να επιχειρηματολογήσουμε ότι η συναγωγή των πρώτων από προκείμενες που αφορούν στο κοινό-κοινό αίτιο μίας στατιστικής σχέσης είναι πιο φυσιολογική από τη συναγωγή των ανισοτήτων του δεύτερου είδους. Με βάση αυτή τη θέση ασκήσαμε κριτική στη απόδειξη των ανισοτήτων Bell που προτείνει ο Hofer-Szabó και οι συνεργάτες του και προτείναμε μία διαφορετική απόδειξη των ανισοτήτων CHSH. Η απόδειξη αυτή ισχύει και για συστήματα κοινών-κοινών αιτίων οποιουδήποτε αριθμήσιμου πλήθους

ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΕΝΑΤΟ

ΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ ΚΑΙ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η εργασία χωρίζεται σε δύο μέρη. Στο πρώτο μέρος, που περιλαμβάνει τα πέντε πρώτα κεφάλαια, επιχειρήσαμε μία κριτική ανασυγκρότηση των αιτιακών θεωριών που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και αλληλεπιδράσεις. Στο δεύτερο μέρος (κεφάλαια 6, 7, 8) προσπαθήσαμε να εξετάσουμε τα προβλήματα που προκύπτουν για τις θεωρίες αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων όταν επιχειρούμε με αυστηρό τρόπο να θεμελιώσουμε βασικές αιτιακές έννοιες, όπως είναι η έννοια της αιτιακής διαδικασίας και του συζευκτικού κοινού αιτίου, στο πλαίσιο κλασικών και κβαντικών φυσικών θεωριών. Σε αυτό το πλαίσιο εξετάσαμε το ζήτημα της τοπικότητας στις φυσικές θεωρίες, όπως εκφράζεται στη θεμελίωση τοπικών κλασικών και κβαντικών θεωριών, στη σχέση ανάμεσα σε καθολικές και σε τοπικές συνθήκες που ισχύουν για τα φυσικά συστήματα και στο ζήτημα της δράσης εξ επαφής, το οποίο συνιστά μία απαραίτητη προϋπόθεση για να ισχύουν οι αιτιακές θεωρίες στις οποίες αναφερόμαστε.

Στο πρώτο κεφάλαιο, αναλύσαμε την έννοια της αιτιακής γραμμής του Russell και τη θεμελίωση της αιτιότητας στο ύστερο έργο του *Human Knowledge*. Η αιτιακή γραμμή, που θεωρήθηκε πρόδρομος της αιτιακής διαδικασίας, είναι μία χωροχρονικά συνεχής, χρονική σειρά συμβάντων που διέπονται από μία κανονικότητα. Η κανονικότητα που διέπει τα συμβάντα μίας αιτιακής γραμμής εκφράζει τη σταθερότητα ή τη βαθμιαία μεταβολή ποιοτήτων ή δομής κατά μήκος της γραμμής. Η σχέση αιτίου-αποτελέσματος είναι μία σχέση που συνδέει δύο συμβάντα της ίδιας αιτιακής γραμμής. Οι αιτιακές γραμμές αλληλεπιδρούν και στα χωροχρονικά σημεία όπου λαμβάνει χώρα αλληλεπίδραση δεν ισχύει η κανονικότητα που διέπει καθεμιά από τις αλληλεπιδρώσες αιτιακές γραμμές.

Η διάκριση των χρονικών σειρών συμβάντων σε αιτιακές γραμμές και σε μη

αιτιακές γραμμές δεν ταυτίζεται με τη διάκριση των διαδικασιών σε αιτιακές και σε ψευδο-διαδικασίες. Κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής είναι δυνατό να λαμβάνουν χώρα αλληλεπιδράσεις αρκεί τα συμβάντα που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή, είτε αυτά εκφράζουν τη συνεχή εκδήλωση της ίδιας ποιότητας είτε μεταβολές της ποιότητας, να μπορούν να περιγραφούν από τον ίδιο εσωτερικό νόμο. Ο Russell δεν ενδιαφέρεται για το πώς προκαλούνται τα συμβάντα που συγκροτούν την συνεχή χωροχρονική σειρά αλλά μόνο για το αν τα συμβάντα αυτά, με δεδομένο ότι λαμβάνουν χώρα, διέπονται από μία κανονικότητα που δεν εξαρτάται *ρητώς* από εξωτερικά συμβάντα, ακόμα κι αν τα τελευταία είναι εν μέρει υπεύθυνα, σε μία πιο ενδελεχή οντική ανάλυση, για τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα κατά μήκος της γραμμής. Έτσι, κατά μήκος μίας αιτιακής γραμμής ενδέχεται να έχουμε μη υποβοηθούμενη εμμενή εκδήλωση των ίδιων χαρακτηριστικών (όπως σε μία μη αλληλεπιδρώσα αιτιακή διαδικασία), αλλά ενδέχεται επίσης να έχουμε υποβοηθούμενη μεταβολή χαρακτηριστικών (όπως στις αλληλεπιδρώσες αιτιακές διαδικασίες), ή υποβοηθούμενη εκδήλωση του ίδιου χαρακτηριστικού (όπως συμβαίνει στις ψευδο-διαδικασίες), αρκεί τα συμβάντα που συγκροτούν την αιτιακή γραμμή να διέπονται από μία κανονικότητα που δεν εξαρτάται από ό,τι συμβαίνει έξω από την αιτιακή γραμμή. Η αλληλεπίδραση των αιτιακών γραμμών για τον Russell δεν συνεπάγεται απλώς τη μεταβολή κάποιων χαρακτηριστικών που εκδηλώνονται κατά μήκος της αιτιακής γραμμής, όπως για τους Salmon και Dowe, αλλά την "καταστροφή" του νόμου που διέπει την ίδια την αιτιακή γραμμή.

Η προσέγγιση του Reichenbach στην αιτιότητα αποτέλεσε το αντικείμενο του δεύτερου κεφαλαίου της εργασίας. Εξετάσαμε τους ορισμούς της σχέσης αιτιακής συνάφειας με βάση τη μέθοδο του ίχνους και με βάση τις στατιστικές σχέσεις που διέπουν τα συμβάντα στον κόσμο. Η μέθοδος του ίχνους στηρίζεται στην ιδέα ότι μία μεταβολή στο αίτιο επιφέρει αντίστοιχη μεταβολή στο αποτέλεσμα και θεμελιώνεται σε αντιγεγονικές προτάσεις που περιγράφουν τι θα συνέβαινε στο μέλλον ενός συμβάντος, αν πραγματοποιούσαμε μία μεταβολή, τώρα, στο συμβάν αυτό. Στο ύστερο έργο του, ο Reichenbach υποστήριξε ότι η μέθοδος του ίχνους αποτελεί ικανή συνθήκη για την ύπαρξη αιτιακής συνάφειας ανάμεσα σε δύο συμβάντα, σε αντίθεση με πρώιμες θεωρήσεις της μεθόδου στις οποίες αυτή παρουσιάζεται ως αναγκαία συνθήκη. Η θεώρηση του ίχνους ως αναγκαίας συνθήκης της αιτιακής σχέσης προσφέρει ένα κριτήριο διάκρισης ανάμεσα σε πραγματικές και μη πραγματικές

ακολουθίες συμβάντων που αποτελούν πρόδρομο των αιτιακών διαδικασιών και των ψευδο-διαδικασιών, αντιστοίχως.

Ο Reichenbach υποστήριζε ότι τα συμβάντα του κόσμου συγκροτούν ένα αιτιακό δίκτυο που επιδέχεται ως όλον δύο καθολικές κατευθύνσεις (παρελθόν-μέλλον) και δεν περιλαμβάνει κλειστές αιτιακές αλυσίδες. Η περιγραφή της διάταξης των συμβάντων στο δίκτυο γίνεται με βάση τη σχέση "αιτιακώς ανάμεσα", η οποία ορίζεται με τη βοήθεια στατιστικών σχέσεων που ικανοποιούν τα συμβάντα. Επίσης, με την αρχή της τοπικής συγκρισιμότητας της χρονικής τάξης, ο Reichenbach υποστήριζε ότι μπορούμε να αποδώσουμε καθολική κατεύθυνση στο αιτιακό δίκτυο με βάση παρατηρησιακά δεδομένα. Με δεδομένο ότι το δίκτυο είναι δυνατό να έχει δύο καθολικές κατευθύνσεις, απαιτείται μία εμπειρική υπόθεση που να επιλέγει μία συγκεκριμένη κατεύθυνση για το αιτιακό δίκτυο του κόσμου, να "δείχνει" προς το μέλλον. Η υπόθεση αυτή προκύπτει από την έννοια του δικράνου σύζευξης που επεξηγεί με βάση στατιστικές σχέσεις την έννοια του κοινού αιτίου. Ο Reichenbach θεωρεί ότι ένα απλό δίκρανο σύζευξης που αποτελείται από το κοινό αίτιο δύο συμβάντων, τα οποία εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση, είναι πάντα ανοικτό προς το μέλλον. Επομένως, αρκεί να μελετήσουμε την κατεύθυνση απλών δικράνων σύζευξης για να διαπιστώσουμε ποια είναι η καθολική κατεύθυνση του αιτιακού δικτύου στον κόσμο μας. Ο Salmon, θα ενισχύσει αυτή την υπόθεση υποστηρίζοντας ότι ισχύει όχι μόνο για τα απλά δίκρανα σύζευξης αλλά και για τα διπλά - δηλαδή, τα δίκρανα σύζευξης που περιλαμβάνουν και κοινά αποτελέσματα. Υποστηρίζει ότι οι αιτιακές σχέσεις σε όλες τις διατάξεις που περιγράφονται από τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης έχουν κατεύθυνση προς το μέλλον. Με την προϋπόθεση ότι η κατεύθυνση του αιτιακού δικτύου στον κόσμο μας είναι ορισμένη και δείχνει πάντα προς το μέλλον, ο Reichenbach καταλήγει στην πιθανοκρατική θεμελίωση της σχέσης αιτιακής συνάφειας. Και σε αυτή την περίπτωση, όπως και με τη μέθοδο του ίχνους, ο Reichenbach διατυπώνει μία ικανή συνθήκη για την αναγωγή της σχέσης αιτιακής συνάφειας σε στατιστικές σχέσεις που δεν είναι όμως αναλλοίωτη ως προς τις αλλαγές συστημάτων αναφοράς στην ΕΘΣ, αφού περιλαμβάνει την έννοια της ταυτοχρονίας.

Μία πολύ σημαντική συμβολή του Reichenbach στην ανάλυση της αιτιότητας είναι η αρχή του κοινού αιτίου που λέει ότι δύο συμβάντα που λαμβάνουν χώρα μαζί

πιο συχνά απ' ό,τι είναι αναμενόμενο, είτε βρίσκονται σε αιτιακή σχέση (σχέση αιτιακής συνάφειας) είτε συνδέονται αιτιακά μέσω ενός τρίτου συμβάντος που είναι το κοινό αίτιο. Η έννοια του δίκρανου σύζευξης προσδιορίζει τις στατιστικές σχέσεις που ισχύουν ανάμεσα στο κοινό αίτιο και στα συσχετιζόμενα συμβάντα. Ωστόσο, είδαμε ότι οι στατιστικές σχέσεις δεν αποτελούν αναγκαία συνθήκη της ύπαρξης κοινού αιτίου, αν δεν υπάρχει στατιστική σχέση ανάμεσα στα αποτελέσματά του. Επιπλέον, ακόμα κι αν διαπιστώνεται τέτοια στατιστική σχέση, το κοινό αίτιο μπορεί να είναι μία αιτιακή αλληλεπίδραση και το δίκρανο μπορεί να είναι δίκρανο αλληλεπίδρασης (κατά Salmon), οπότε και οι στατιστικές σχέσεις του δικράνου σύζευξης παραβιάζονται. Επίσης, σύμφωνα με την κριτική του Salmon, οι στατιστικές σχέσεις δεν αποτελούν ούτε ικανή συνθήκη για να χαρακτηριστεί ένα συμβάν ως κοινό αίτιο των συσχετιζόμενων συμβάντων (παράδειγμα του Ellis Crasnow).

Τέλος, στο επίμετρο του δεύτερου κεφαλαίου αναφερθήκαμε στην έννοια του συστήματος κοινών αιτίων του Reichenbach, το οποίο αποτελεί μία επέκταση του δίκρανου σύζευξης που διατυπώθηκε από τους Hofer-Szabò και Rédei. Τα συστήματα κοινών αιτίων του Reichenbach γενικεύουν την αρχή κοινού αιτίου υποστηρίζοντας ότι η στατιστική συσχέτιση που εκδηλώνουν δύο συμβάντα, η οποία δεν εκφράζει την ύπαρξη αιτιακής σχέσης, μπορεί να είναι αποτέλεσμα περισσότερων του ενός αιτιακών παραγόντων που ικανοποιούν ορισμένες στατιστικές σχέσεις. Επίσης, δώσαμε μερικά παραδείγματα συστημάτων κοινών αιτίων και υποστηρίξαμε ότι ένα μειονέκτημα του συγκεκριμένου ορισμού της έννοιας αυτής είναι ότι δεν απαιτεί οι αιτιακοί παράγοντες που αποτελούν το εξηγούν να είναι στατιστικώς συναφείς με καθένα από τα συμβάντα που εκδηλώνουν την προς εξήγηση στατιστική σχέση.

Στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon συναντάμε έντονα ίχνη από τις απόψεις του Russell και του Reichenbach. Κατά πρώτον, ο Salmon κατανοεί την έννοια της διαδικασίας με βάση την αιτιακή γραμμή του Russell και την έννοια της αντικειμενικά συνοριζόμενης κλάσης, η οποία επεξηγεί τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται κατά μήκος μίας διαδικασίας. Η αντικειμενικά συνοριζόμενη κλάση προκύπτει από την κριτική θεώρηση της έννοιας της συνοριζόμενης κλάσης του Reichenbach. Δεύτερον, χρησιμοποιεί τη μέθοδο του ίχνους για να διακρίνει τις

αιτιακές διαδικασίες από τις ψευδο-διαδικασίες. Έτσι, κληρονομεί τον αντιγεγονικό χαρακτήρα της μεθόδου, ενώ απορρίπτει την απαίτηση το ίχνος να δημιουργείται από μη αντιστρεπτές αλληλεπιδράσεις. Τρίτον, κατανοεί τη διάδοση του ίχνους με βάση την "at-at" θεωρία της κίνησης που αποτελεί τη λύση του Russell στο ζηνώνειο παράδοξο του βέλους. Τέταρτον, συνθέτει την έννοια της δομής που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας (κατά το πρότυπο της αιτιακής γραμμής του Russell) με την έννοια του δίκρανου σύζευξης του Reichenbach υποστηρίζοντας ότι η παραγωγή δομής γίνεται από συζευκτικά κοινά αίτια.

Στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας αναλύσαμε την έννοια της διαδικασίας που αποτελεί θεμέλιο της πρώιμης αιτιακής θεωρίας του Salmon, προτείνοντας τη διάκριση ανάμεσα σε διαδικασίες που εκδηλώνουν ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και αυτές που εκδηλώνουν ομοιομορφία δομής. Η διαφορά ανάμεσα στα δύο είδη διαδικασιών έγκειται (α) στο γεγονός ότι για να μιλήσουμε για δομή θα πρέπει να εκδηλώνονται τουλάχιστον δύο χαρακτηριστικά κατά μήκος μίας διαδικασίας, (β) στο γεγονός ότι η εκδήλωση ομοιομορφίας δομής δεν συνεπάγεται και εκδήλωση ομοιομορφίας ως προς κάποιο χαρακτηριστικό και (γ) στο γεγονός ότι η δομή ενδέχεται να ορίζεται από χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία και να αποδίδεται σε ένα χωροχρονικό σημείο της γραμμής που αναπαριστάνει γεωμετρικά μία διαδικασία, ενώ τα χαρακτηριστικά εκδηλώνονται στα σημεία της γραμμής που αναπαριστάνουν τη διαδικασία.

Η διάκριση επεκτείνεται και στην περίπτωση των αιτιακών διαδικασιών. Τα κριτήρια για να χαρακτηρίσουμε μία διαδικασία ως αιτιακή είναι διαφορετικά σε κάθε περίπτωση. Η αρχή διάδοσης του ίχνους μάς λέει ότι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς κάποιο χαρακτηριστικό είναι αιτιακή αν και μόνο αν είναι ικανή να διαδώσει το ίχνος που δημιουργείται σε ένα χωροχρονικό σημείο αυτής. Το ίχνος σε αυτή την περίπτωση κατανοείται ως τροποποίηση ενός χαρακτηριστικού. Η αρχή διάδοσης αιτιακής επίδρασης μάς λέει ότι μία διαδικασία που εκδηλώνει ομοιομορφία ως προς τη δομή είναι αιτιακή αν και μόνο αν είναι ικανή να διαδώσει τη δομή της. Σε αυτή την περίπτωση, η διάδοση τροποποίησης της δομής μίας διαδικασίας θεωρείται απλώς ως ικανή συνθήκη για να είναι μία διαδικασία αιτιακή.

Η διάκριση ανάμεσα στις αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν κάποιο χαρακτηριστικό και σε εκείνες που διαδίδουν τη δομή τους γίνεται ακόμα πιο φανερή όταν ο Salmon αναφέρεται στην παραγωγή αιτιακής επίδρασης. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις λαμβάνουν χώρα στα χωροχρονικά σημεία που τέμνονται δύο αιτιακές διαδικασίες και μεταβάλλουν τα χαρακτηριστικά που εκδηλώνονται σε κάθε μία από τις διαδικασίες αυτές. Προϋπόθεση για να έχουμε αιτιακή αλληλεπίδραση είναι οι τροποποιήσεις που δημιουργούνται σημειακά να διαδίδονται κατά μήκος των διαδικασιών που αλληλεπιδρούν. Ο Salmon θεωρεί ότι η δημιουργία ίχνους είναι ένα είδος αιτιακής αλληλεπίδρασης. Ωστόσο, αυτή η θέση είναι προβληματική διότι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε αιτιακές διαδικασίες ενώ ίχνος μπορεί να δημιουργηθεί και σε μία ψευδο-διαδικασία.

Από την άλλη πλευρά, η δομή παράγεται από συζευκτικά κοινά αίτια. Τα συζευκτικά κοινά αίτια είναι συμβάντα που βρίσκονται σε σημεία που τέμνονται, χωρίς να αλληλεπιδρούν, δύο ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες. Οι διαδικασίες αυτές καταλήγουν σε συμβάντα που εκδηλώνουν θετική στατιστική συσχέτιση και ικανοποιούν μαζί με το κοινό αίτιο τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Η δομή που εκδηλώνεται ορίζεται από σχέσεις που ικανοποιούν τα χαρακτηριστικά που περιγράφουν τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Με την έννοια του συζευκτικού κοινού αιτίου ο Salmon φαίνεται να προτείνει κάποιου είδους αναγωγή των αιτιακών διαδικασιών που διαδίδουν δομή σε αιτιακές διαδικασίες που διαδίδουν συσχετιζόμενα χαρακτηριστικά. Αυτό που προσπαθήσαμε να δείξουμε με το παράδειγμα του κρυστάλλου είναι ότι η διάδοση δομής δεν προϋποθέτει την ύπαρξη ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών, όπως υποστηρίζει ο Salmon. Επίσης, με την πραγμάτευση της διάδοσης του ηλεκτρομαγνητικού κύματος δείξαμε ότι η δομή είναι δυνατό να παραχθεί από ανεξάρτητες αιτιακές διαδικασίες χωρίς να ικανοποιούνται, μη τετριμμένα, οι στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Αυτό σημαίνει ότι τόσο η χωροχρονική σύμπτωση ανεξάρτητων αιτιακών διαδικασιών όσο και η ικανοποίηση των στατιστικών σχέσεων του δίκρανου σύζευξης δεν αποτελούν αναγκαίες συνθήκες για την παραγωγή δομής.

Η έννοια της δομής εγκαταλείπεται από το Salmon στην ύστερη αιτιακή θεωρία που διατυπώνεται με όρους αναλλοίωτων, αρχικά, και με όρους διατηρήσιμων, στη συνέχεια, ποσοτήτων. Ο Salmon, όπως αναλύσαμε στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, υποστήριξε αρχικά ότι η αιτιότητα, επειδή εκφράζει

αντικειμενικές σχέσεις ανάμεσα σε συμβάντα, θα πρέπει να είναι αναλλοίωτη ως προς την περιγραφή της από διαφορετικούς παρατηρητές. Επομένως, θα πρέπει να περιγράφεται με όρους αναλλοίωτων ποσοτήτων. Στη συνέχεια, χωρίς επαρκή δικαιολόγηση, άλλαξε άποψη και, συμφωνώντας με τον Dowe, υποστήριξε ότι για την περιγραφή της αιτιότητας επαρκούν οι διατηρήσιμες ποσότητες, παρ' όλο που οι τιμές τους εξαρτώνται από την επιλογή παρατηρητή σύμφωνα με την ΕΘΣ. .

Ωστόσο, εκτός από την επεξήγηση των αιτιακών εννοιών, η πρώιμη και οι ύστερες εκδοχές της θεωρίας του Salmon διαφέρουν και ως προς την έκταση των εννοιών στις οποίες θεμελιώνονται. Αν σε τυχόν σημείο μίας διαδικασίας λάβει χώρα μία αλληλεπίδραση που δημιουργεί ίχνος , το οποίο διαδίδεται σε απουσία περαιτέρω παρεμβάσεων, τότε η διαδικασία είναι αιτιακή, σύμφωνα με την πρώιμη αιτιακή θεωρία, και στο σημείο δημιουργίας του ίχνους λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση με μία δεύτερη αιτιακή διαδικασία. Αντιθέτως, στην περίπτωση των ύστερων θεωριών μία αιτιακή διαδικασία διαδίδει αναλλοίωτη ή διατηρήσιμη ποσότητα από ένα χωροχρονικό σημείο στο οποίο λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση, χωρίς να ταυτοποιείται εκατέρωθεν του σημείου αλληλεπίδρασης με κάποια άλλη αιτιακή διαδικασία. Μάλιστα, όπως αναφέραμε απαντώντας στο επιχείρημα του Dowe για τις μη αλληλεπιδρώσες τομές δύο διαδικασιών, στη θεωρία του Salmon που διατυπώνεται με όρους διατηρήσιμων ποσοτήτων μία αιτιακή διαδικασία δεν είναι δυνατόν ούτε καν να τέμνεται με μία άλλη αιτιακή διαδικασία που διαδίδει την ίδια διατηρήσιμη ποσότητα, ανεξάρτητα από το αν αλληλεπιδρά με αυτή. Σε σχέση με την αιτιακή αλληλεπίδραση, οι ύστερες αιτιακές θεωρίες του Salmon είναι πιο πλούσιες από την πρώιμη αιτιακή θεωρία, αφού περιλαμβάνουν εκτός από αλληλεπιδράσεις τύπου "Χ" (όπως είναι, π.χ. η σύγκρουση δύο σφαιρών μπιλιάρδου) και αλληλεπιδράσεις τύπου "Υ" (όπως είναι, π.χ., η διάσπαση ενός σωματιδίου σε δύο άλλα σωματίδια) καθώς και τύπου "λ" (όπως είναι, π.χ., η απορρόφηση ενός φωτονίου από ένα άτομο).

Στη διαμόρφωση της ύστερης αιτιακής θεωρίας του Salmon επέδρασε καταλυτικά η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων του Dowe. Ωστόσο, οι δύο θεωρίες έχουν βασικές διαφορές. Πρώτον, η θεωρία του Salmon στηρίζεται στην έννοια της διάδοσης, ενώ η θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων στηρίζεται σε μία αναλύσιμη μεν, αλλά πρωταρχική για την αιτιακή θεωρία, έννοια διαχρονικής ταυτότητας ενός αντικειμένου. Δεύτερον, στη θεωρία του Salmon οι αιτιακές

διαδικασίες διαδίδουν *ορισμένο, μη μηδενικό, σταθερό* ποσό από μία αναλλοίωτη ή διατηρήσιμη ποσότητα, ενώ στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων αρκεί το αντικείμενο που περιγράφει η αιτιακή διαδικασία να κατέχει *ορισμένο,* αλλά *όχι κατ' ανάγκη σταθερό*, ποσό μίας διατηρήσιμης ποσότητας κάθε χρονική στιγμή. Τρίτον, η διάδοση της αναλλοίωτης-διατηρήσιμης ποσότητας προϋποθέτει τη μη αλληλεπίδραση της αιτιακής διαδικασίας (ούτε καν την τομή της, θα προσθέταμε) με άλλες αιτιακές διαδικασίες, ενώ στη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων μία αιτιακή διαδικασία επιτρέπεται να αλληλεπιδρά με άλλες διαδικασίες. Τέταρτον, οι αιτιακές διαδικασίες στη θεωρία του Salmon είναι χωροχρονικά συνεχείς (δηλαδή, διαδίδουν την αναλλοίωτη ή διατηρήσιμη ποσότητα που τις χαρακτηρίζει σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που τις αναπαριστάνει), ενώ ο Dowe δεν θεωρεί τη χωροχρονική συνέχεια ως αναγκαία συνθήκη. Οι αιτιακές διαδικασίες σύμφωνα με τον Dowe μπορούν να είναι διακοπτόμενες και χωροχρονικά ασυνεχείς. Αυτές οι διαφορές, που σημειώστε ότι αφορούν στην έννοια της αιτιακής διαδικασίας και όχι στην έννοια της αιτιακής αλληλεπίδρασης, συνεπάγονται τη διαφοροποίηση της έκτασης των βασικών εννοιών στις δύο θεωρίες.

Ένα τελευταίο ζήτημα, με το οποίο ασχοληθήκαμε στο τρίτο και στο τέταρτο κεφάλαιο της εργασίας, αφορά στην αιτιακή συνάφεια, στην εξηγητική συνάφεια και στο ζήτημα των αιτιακών εξηγήσεων. Ο Kitcher, ασκώντας κριτική στην πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon για το ζήτημα της αιτιακής συνάφειας των διαδικασιών που περιγράφουν τη σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα, θεώρησε ότι για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε αιτιακώς ένα συμβάν θα πρέπει να το συνδέσουμε μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας με ένα άλλο συμβάν, το «αίτιο», το οποίο είναι αιτιακώς συναφές με το εξηγητέο. Για να εξασφαλίσουμε την αιτιακή συνάφεια δεν αρκεί να διαπιστώσουμε ότι η διαδικασία που συνδέει τα συμβάντα είναι αιτιακή, αλλά πρέπει επιπλέον να είναι αληθείς συγκεκριμένες αντιγεγονικές προτάσεις. Γι' αυτό, σύμφωνα με τον Kitcher, οι αντιγεγονικές συνθήκες που εκφράζουν την αιτιακή συνάφεια είναι πιο σημαντικές από τη σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα μέσω αιτιακών διαδικασιών για να περιγράψουμε την αιτιακή σχέση. Στις ύστερες αιτιακές θεωρίες, ο Salmon, επιλύει μερικώς το ζήτημα της αιτιακής συνάφειας με την αποσαφήνιση των χαρακτηριστικών που περιγράφουν τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης, τις αναλλοίωτες και τις διατηρήσιμες ποσότητες, κατά μήκος της διαδικασίας που συνδέει δύο συμβάντα. Ωστόσο, αυτό δεν αρκεί διότι μπορεί να

υπάρχουν πολλές αιτιακές διαδικασίες οι οποίες έχουν την ίδια γεωμετρική αναπαράσταση, συνδέουν συμβάντα με κοινά χωροχρονικά χαρακτηριστικά, αλλά διαδίδουν διαφορετικές αναλλοίωτες ή διατηρήσιμες ποσότητες.

Ο Hitchcock άσκησε κριτική στο Salmon σε σχέση με αυτό το ζήτημα, επικεντρώνοντας σε διαφορετική κατεύθυνση από εκείνη του Kitcher. Ενώ ο στόχος του Kitcher ήταν να δείξει ότι η μηχανιστική ανάλυση της αιτιότητας δεν επαρκεί για τον καθορισμό της συνάφειας του αιτίου με το αποτέλεσμα (και συνεπώς οδηγεί σε ανεπαρκείς αιτιακές εξηγήσεις), ο Hitchcock επικεντρώνεται στην έλλειψη εξηγητικής συνάφειας ανάμεσα στο εξηγούν και στο εξηγητέο *εφόσον* υιοθετήσουμε ως εξήγηση την ένταξη δύο συμβάντων στο αιτιακό πλέγμα που περιγράφεται με βάση τις αιτιακές διαδικασίες και τις αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ο Salmon αποδέχεται την κριτική του Hitchcock και, αντί να αναθεωρήσει την έννοια της αιτιακής σχέσης, όπως ζητούσε ο Kitcher, διεύρυνε την έννοια της επιστημονικής εξήγησης. Η επιστημονική εξήγηση δεν συνίσταται μόνο σε αιτιακές εξηγήσεις που προκύπτουν από την ένταξη συμβάντων στο αιτιακό πλέγμα, αλλά και από σχέσεις στατιστικής συνάφειας, οι οποίες υποκαθιστούν συνθήκες που διατυπώνονται με αντιγεγονικές προτάσεις. Έτσι, ο Salmon καταλήγει στη διπλή φύση της επιστημονικής εξήγησης.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας προσπαθήσαμε να εξετάσουμε τις θεωρίες των αιτιακών διαδικασιών και των αιτιακών αλληλεπιδράσεων με βάση γενικότερες ταξινομήσεις σε σχέση με την αιτιότητα. Καταρχάς, εξετάσαμε τη φύση των όρων της αιτιακής σχέσης [causal relata], του αιτίου και του αποτελέσματος, στις θεωρίες που θεμελιώνονται σε αιτιακές διαδικασίες και σε αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Για τον Russell, οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι συμβάντα στα οποία εκδηλώνονται χαρακτηριστικά (ποιότητες) σε σημεία ή περιοχές του χωροχρόνου και τα οποία ανήκουν στην ίδια αιτιακή γραμμή. Για τον Salmon, οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι αιτιακές αλληλεπιδράσεις: συμβάντα στα οποία μεταβάλλονται χαρακτηριστικά και ιδιότητες που διαδίδονται κατά μήκος των διαδικασιών που αλληλεπιδρούν. Ο Dowe προτείνει να θεωρήσουμε ως όρους της αιτιακής σχέσης *είτε* συμβάντα τα οποία ανήκουν στην ίδια αιτιακή διαδικασία (σύμφωνα με την πρόταση του Russell) *είτε* διαφορετικές αιτιακές διαδικασίες που έχουν θέση αιτίου και αποτελέσματος (σύμφωνα με το χιουμιανό παράδειγμα των σφαιρών του μπιλιάρδου στο οποίο η

κίνηση της πρώτης σφαίρας είναι αίτιο της κίνησης της δεύτερης σφαίρας) *είτε* αιτιακές αλληλεπιδράσεις (σύμφωνα με την πρόταση του Salmon).

Στη συνέχεια εξετάσαμε τη σύνδεση ανάμεσα στους όρους της αιτιακής σχέσης. Ο Salmon θεωρεί ότι η σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα γίνεται με μία αιτιακή διαδικασία που συνδέει τις αντίστοιχες αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ωστόσο, αυτή η σύνδεση είναι μόνο μία ειδική περίπτωση. Στην περίπτωση που οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι συμβάντα τα οποία, αφενός ανήκουν στην ίδια αιτιακή διαδικασία ή στην ίδια αιτιακή γραμμή, αφετέρου εκδηλώνουν το ίδιο χαρακτηριστικό σε διαφορετικά χωροχρονικά σημεία, η αιτιακή σύνδεση είναι η αιτιακή διαδικασία ή, αντιστοίχως, η αιτιακή γραμμή στην οποία ανήκουν. Επίσης, στην περίπτωση που οι όροι της αιτιακής σχέσης είναι αιτιακές διαδικασίες, τότε η αιτιακή σύνδεση ενδέχεται να είναι ένα σύνολο αιτιακών διαδικασιών και αιτιακών αλληλεπιδράσεων που παρεμβάλλονται ανάμεσα στο αίτιο και στο αποτέλεσμα. Ο Dowe υποστηρίζει αυτή τη θέση και μάς λέει ότι ικανές και αναγκαίες συνθήκες για να αποτελεί αυτό το σύνολο αιτιακή σύνδεση είναι (α) οποιαδήποτε αλλαγή αιτιακής διαδικασίας, είτε ως προς το αντικείμενο είτε ως προς τη διατηρήσιμη ποσότητα, να λαμβάνει χώρα σε κατάλληλες αιτιακές αλληλεπιδράσεις και (β) στην περίπτωση που έχουμε σύμπτωση αιτιακών αλληλεπιδράσεων σε ένα χωροχρονικό σημείο, να υπάρχει ένας φυσικός νόμος που να συνδέει τις διατηρήσιμες ποσότητες που ανταλλάσσονται σε αυτές.

Ο Salmon υποστηρίζει ότι η σύνδεση του αιτίου με το αποτέλεσμα είναι η σύνδεση που αναζητούσε ο Hume και δεν μπορούσε να ανακαλύψει στα πράγματα. Μολονότι, η σύνδεση δεν είναι αναγκαία, υπό την έννοια ότι η παρουσία του αιτίου δεν οδηγεί κατ' ανάγκη στην εμφάνιση του αποτελέσματος, ωστόσο, πρόκειται για μία φυσική σύνδεση. Δηλαδή, υπάρχει ένας φυσικός μηχανισμός που περιγράφεται από αιτιακές διαδικασίες, ο οποίος διαδίδει αιτιακή επίδραση από το αίτιο στο αποτέλεσμα χωρίς να απαιτείται οποιαδήποτε εξωτερική παρέμβαση. Μάλιστα, σε αντίθεση με τη διάδοση της αιτιακής επίδρασης μέσω μίας αιτιακής αλυσίδας με διακριτούς κρίκους-συμβάντα που έχουν σχέση αιτίου-αποτελέσματος, στην οποία παραμένει ανεξήγητο το πώς διαδίδεται η αιτιακή επίδραση από κάθε κρίκο στον επόμενο, στην περίπτωση της αιτιακής διαδικασίας λόγω της χωροχρονικής συνέχειας που χαρακτηρίζει τη διάδοση δεν απαιτείται τέτοια εξήγηση διότι στο συνεχές δεν υπάρχει επόμενος κρίκος-συμβάν.

Ωστόσο, υπάρχουν δύο προβλήματα σε σχέση με την επίλυση του χιουμιανού προβλήματος της αιτιότητας από τον Salmon. Το πρώτο πρόβλημα αφορά στην προϋπόθεση της χωροχρονικής απομάκρυνσης του αιτίου από το αποτέλεσμα στη λύση που προτείνει ο Salmon. Ο Hume μάς λέει ότι το αίτιο είναι χωροχρονικώς γειτονικό με το αποτέλεσμα, ενώ στην περίπτωση που είναι χωροχρονικώς απομακρυσμένα, τότε υπάρχει μία αιτιακή αλυσίδα που τα συνδέει έτσι ώστε η χωροχρονική γειτονία του αιτίου με το αποτέλεσμα να ισχύει για διαδοχικούς κρίκους της αλυσίδας. Όμως, αν το αίτιο και το αποτέλεσμα συνδέονται μέσω μίας αιτιακής διαδικασίας, όπως υποστηρίζει ο Salmon, τότε θα πρέπει απαραιτήτως να είναι χωροχρονικώς απομακρυσμένα, σε αντίθεση με ό,τι αναφέρει ο Hume. Το δεύτερο πρόβλημα, αφορά στην αντικατάσταση της αιτιακής αλυσίδας από την αιτιακή διαδικασία, κατά τη σύνδεση χωροχρονικώς απομακρυσμένων συμβάντων. Κατά μήκος μίας αιτιακής αλυσίδας κάθε κρίκος συνδέεται με τον επόμενο με την ίδια αιτιακή σχέση. Αντιθέτως, η σχέση ανάμεσα στα συμβάντα σε μία αιτιακή διαδικασία δεν θα πρέπει να θεωρείται αιτιακή, διότι κατά μήκος της αιτιακής αλυσίδας δεν λαμβάνουν χώρα αιτιακές αλληλεπιδράσεις. Ακόμη, όμως, κι αν θεωρήσουμε ότι η σχέση είναι αιτιακή, όπως προτείνουν οι Russell και Dowe, πρόκειται για ένα άλλο είδος αιτιότητας, την εμμενή αιτιότητα.

Η αιτιακή θεωρία του Salmon συνδυάζει την ενική αιτιότητα, η οποία θεμελιώνεται σε ενικές αιτιακές διαδικασίες που συνδέουν ενικές αιτιακές αλληλεπιδράσεις, με τη γενική αιτιότητα, η οποία θεμελιώνεται στις στατιστικές σχέσεις που ικανοποιούν τα συμβάντα των δίκρανων σύζευξης. Η αιτιακή σχέση, σύμφωνα με το Salmon, δεν είναι εγγενής σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα. Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι η θεωρία αναφέρεται σε στατιστικές κανονικότητες και από το γεγονός ότι στην πρώιμη εκδοχή της η θεωρία προϋποθέτει την ισχύ αντιγεγονικών προτάσεων για τον ορισμό των βασικών αιτιακών εννοιών. Επίσης, στη θεωρία του Salmon οι αιτιακές διαδικασίες και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις είναι αναγώγιμες σε μη αιτιακά φυσικά γεγονότα τα οποία ισχύουν στον κόσμο μας, ενώ οι δομές συζευκτικών κοινών αιτίων επιγίγνονται σε στατιστικές κανονικότητες. Με βάση αυτές τις διαπιστώσεις, η θεωρία του Salmon μπορεί να χαρακτηριστεί, εν μέρει, ως θεωρία ενδεχομενικής ταυτότητας και, εν μέρει, ως θεωρία αναλυτικού αναγωγισμού υπό την έννοια της λογικής επιγένεσης, σύμφωνα με την ταξινόμηση

του Tooley. Τέλος η χιουμιανή επιγένεση είναι ένα κοινό χαρακτηριστικό τόσο της ενικής όσο και της γενικής συνιστώσας της αιτιότητας στο Salmon.

Από την άλλη, η θεωρία του Dowe είναι μία θεωρία αμιγώς ενικής αιτιότητας που θεμελιώνεται σε μία οντολογία αιτιακών διαδικασιών και αλληλεπιδράσεων και αντιμετωπίζει την αιτιακή σχέση ως εγγενή σχέση ανάμεσα σε δύο συμβάντα. Οι βασικοί όροι της θεωρίας επεξηγούνται με αναφορά σε μη αιτιακά γεγονότα του πραγματικού κόσμου. Έτσι, πρόκειται για μία θεωρία ενδεχομενικής ταυτότητας. Ωστόσο, η θεωρία του Dowe δεν ικανοποιεί απαραιτήτως τη συνθήκη της χιουμιανής επιγένεσης, στο βαθμό που δεν υιοθετείται κάποια ανάλυση της έννοιας του αντικειμένου στην οποία στηρίζεται η θεωρία.

Με αυτές τις παρατηρήσεις ολοκληρώνεται το πρώτο μέρος της εργασίας. Στα επόμενα κεφάλαια ασχοληθήκαμε με την εξέταση των αιτιακών θεωριών των Salmon και Dowe στο πλαίσιο ενεργών θεωριών της κλασικής και της κβαντικής φυσικής.

Καταρχάς, εξετάσαμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας στο πλαίσιο μίας σχετικιστικής κλασικής σωματιδιακής θεωρίας. Σε αυτό το πλαίσιο, σύμφωνα με τις κοινές διαισθήσεις μας, οι αιτιακές διαδικασίες θα πρέπει να ταυτίζονται με τις κινήσεις των σωματιδίων και οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις με τις κρούσεις ανάμεσα στα σωματίδια. Επίσης, η τετραορμή του κάθε σωματιδίου μπορεί να θεωρηθεί ως η διατηρήσιμη ποσότητα που χαρακτηρίζει την αιτιακή διαδικασία της κίνησής του. Όμως, όπως είδαμε, αυτή η θεώρηση, τουλάχιστον για την προσέγγιση του Salmon, εξαρτάται από τον ορισμό της ολικής τετραορμής του συστήματος σωματιδίων.

Συγκεκριμένα, μπορούν να διατυπωθούν δύο ορισμοί της ολικής τετραορμής. Σύμφωνα με τον πρώτο ορισμό η ολική τετραορμή, η οποία είναι ένα καθολικό μέγεθος του συστήματος σωματιδίων, ανάγεται πλήρως, κάθε χρονική στιγμή, σε τοπικώς μετρήσιμα μεγέθη που είναι οι τετραορμές των σωματιδίων που απαρτίζουν το σύστημα. Από την άλλη, κατά τον δεύτερο ορισμό της ολικής τετραορμής, κάθε χρονική στιγμή, υπάρχει ένα μέρος της τετραορμής που δεν ανάγεται στις επιμέρους τετραορμές των σωματιδίων. Στην πρώτη περίπτωση, οι van Dam και Wigner απέδειξαν ότι εάν διατηρείτεια η ολική τετραορμή, τότε θα διατηρείται και η τετραορμή του καθενός σωματιδίου εφόσον τα σωματίδια δεν συγκρούονται. Αντιθέτως, στη δεύτερη περίπτωση, μολονότι η ολική τετραορμή είναι διατηρήσιμη και τα σωματίδια δεν συγκρούονται, η τετραορμή του κάθε σωματιδίου δεν

παραμένει σταθερή διότι λαμβάνει χώρα δράση από απόσταση ανάμεσα στα σωματίδια. Έτσι, στην πρώτη περίπτωση, σύμφωνα με τον Salmon, η χρονογραμμή ενός σωματιδίου αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία, ενώ στη δεύτερη περίπτωση, αυτό δεν ισχύει. Μάλιστα, στη δεύτερη περίπτωση δεν είναι δυνατόν να θεωρήσουμε τη κίνηση ενός σωματιδίου ούτε ως ψευδο-διαδικασία, διότι τότε οδηγούμαστε σε παράδοξο με βάση την υπόθεση των van Dam και Wigner ότι τα σωματίδια είναι ασυμπτωτικώς ελεύθερα. Αυτό σημαίνει ότι στην περίπτωση που επιτρέπεται η δράση από απόσταση δεν ισχύει η εξαντλητική διάκριση των διαδικασιών σε αιτιακές και σε ψευδο-διαδικασίες.

Το να θεωρήσουμε τις κινήσεις των σωματιδίων ως αιτιακές διαδικασίες δεν αποτελεί πρόβλημα για τον Dowe *ανεξάρτητα* από τον ορισμό της ολικής τετραορμής. Τα σωματίδια κατέχουν κάποιο ποσό από τη διατηρήσιμη ποσότητα κατά την κίνηση τους και, άρα, συνιστούν αιτιακές διαδικασίες, σύμφωνα με τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων, ανεξάρτητα από το αν αλληλεπιδρούν εξ επαφής ή από απόσταση. Το πρόβλημα του Dowe είναι διαφορετικό και αφορά στον ισχυρισμό του ότι εφόσον μία ποσότητα είναι καθολικώς διατηρήσιμη, είναι και τοπικώς διατηρήσιμη. Με αυτό τον ισχυρισμό ο Dowe προσπαθεί να δείξει ότι η προϋπόθεση της σταθερότητας της διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας σε απουσία αλληλεπιδράσεων, την οποία ενσωματώνει ο Salmon στον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας, είναι περιττή. Όμως, όπως προκύπτει από το παράδειγμα της σχετικιστικής σωματιδιακής θεωρίας, αυτό δεν ισχύει.

Το γενικό συμπέρασμα που προκύπτει απ’ όσα αναφέραμε έχει να κάνει με τις συνθήκες τοπικότητας που πρέπει να ικανοποιούν οι φυσικές θεωρίες που περιγράφουν τον κόσμο για να θεωρήσουμε ότι προσφέρουν εννοιολογικά εργαλεία ικανά να επεξηγήσουν την έννοια της αιτιακής διαδικασίας. Τα καθολικά φυσικά μεγέθη θα πρέπει να ανάγονται πλήρως σε τοπικώς μετρήσιμα μεγέθη για να μπορούμε να περιγράψουμε αιτιακές διαδικασίες, σύμφωνα με την προσέγγιση του Salmon, αλλά και για να μην προκύπτουν αντιφάσεις με τις υποθέσεις του Dowe, στο πλαίσιο μίας σχετικιστικά συναλλοίωτης σωματιδιακής θεωρίας.

Ένα διαφορετικό ζήτημα τοπικότητας προκύπτει σε σχέση με την ταυτοποίηση αιτιακών διαδικασιών μεταξύ των φυσικών γεγονότων που πραγματεύονται οι κλασικές σχετικιστικές θεωρίες πεδίων. Συγκεκριμένα, στην περίπτωση του ελεύθερου πεδίου Klein-Gordon προτείναμε να θεωρήσουμε ως

γεωμετρική αναπαράσταση της αιτιακής διαδικασίας του πεδίου σε μία συγκεκριμένη διαμόρφωση, την ολοκληρωτική γραμμή της σταθερής τετραορμής που διέρχεται από σημεία στα οποία το πεδίο υπάρχει το πεδίο. Σε αυτή την περίπτωση το πεδίο θεωρείται ως ένα αντικείμενο που κατέχει ορισμένο ποσό από μία διατηρήσιμη ποσότητα, την τετραορμή, η οποία αποδίδεται σε κάθε σημείο της χωροχρονικής γραμμής που αναπαριστάνει τη διαδικασία. Αυτή η πρόταση είναι συμβατή με την αιτιακή θεωρία του Dowe. Από την άλλη, ο Salmon απαιτεί κατά μήκος της αιτιακής διαδικασίας να εκδηλώνεται σταθερό ποσό από μία διατηρήσιμη ποσότητα. Δηλαδή, η διατηρήσιμη ποσότητα με την οποία χαρακτηρίζεται μία αιτιακή διαδικασία πρέπει να είναι ένα τοπικώς μετρήσιμο μέγεθος. Αυτή η απαίτηση δεν ικανοποιείται από την πρότασή μας για το πεδίο Klein-Gordon.

Για να προσδιορίσουμε αιτιακές διαδικασίες σε μία πεδιακή θεωρία, σε συμφωνία με την απαίτηση της τοπικής μετρησιμότητας, ακολουθήσαμε μία εναλλακτική θεώρηση της κλασικής θεωρίας πεδίων που προτάθηκε από τους Avishai, Ekstein και Moyal. Σε αυτή την προσέγγιση, τα παρατηρήσιμα ορίζονται ως συναρτησιακά στο χώρο των καταστάσεων του πεδίου και τα τοπικά παρατηρήσιμα σε μία φραγμένη χωρική περιοχή ως συναρτησιακά που "βλέπουν" μόνο την τοπική κατάσταση του πεδίου σε αυτή τη χωρική περιοχή. Υπάρχουν δύο τρόποι να προσεγγίσουμε την έννοια της αιτιακής διαδικασίας σε αυτό το πλαίσιο. Ο πρώτος αφορά σε τοπικά παρατηρήσιμα που αναπαριστάνουν τοπικά διατηρήσιμες ποσότητες. Έτσι, μία χρονοειδής γεωδαισιακή στο χωρόχρονο Minkowski αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία μόνο αν για μία φραγμένη χωρική περιοχή, σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου στο ιδιοσύστημα ενός αδρανειακού παρατηρητή που κινείται κατά μήκος της γεωδαισιακής, υπάρχει ένα τοπικό παρατηρήσιμο που περιγράφει μία διατηρήσιμη ποσότητα για κάθε κατάσταση του πεδίου.

Ο δεύτερος τρόπος αφορά σε παρατηρήσιμα που είναι καθολικά διατηρήσιμες ποσότητες και ο περιορισμός τους σε ένα φραγμένο χωρικό όγκο πάνω σε μία υπερεπιφάνεια σταθερού χρόνου διατηρείται για ορισμένες μόνο καταστάσεις του πεδίου. Έτσι, μία χρονοειδής γεωδαισιακή στο χωρόχρονο Minkowski αναπαριστάνει γεωμετρικά μία αιτιακή διαδικασία μόνο αν υπάρχει (α) ένα παρατηρήσιμο F που έχει σταθερή τιμή κάθε χρονική στιγμή για τον παρατηρητή που κινείται επί της γεωδαισιακής και (β) μία συγκεκριμένη κατάσταση του συστήματος που ικανοποιεί

κατάλληλες συνθήκες στο σύνορο μίας φραγμένης χωρικής περιοχής, κάθε χρονική στιγμή, τέτοια ώστε η τιμή του τοπικού παρατηρήσιμου που ορίζεται από τον περιορισμό F στη περιοχή αυτή να παραμένει σταθερή.

Στη δεύτερη περίπτωση διαπιστώσαμε ένα πρόβλημα που συναντήσαμε ξανά στο τέταρτο κεφάλαιο, με τα παραδείγματα των τεμνόμενων, χωρίς αμοιβαία αλληλεπίδραση, αιτιακών διαδικασιών. Για να ικανοποιηθεί η συνθήκη σταθερής τιμής της διατηρήσιμης ποσότητας κατά μήκος μίας αιτιακής διαδικασίας δεν αρκεί η συνθήκη μη αλληλεπίδρασης της αιτιακής διαδικασίας. Θα πρέπει στον ορισμό της έννοιας να τεθεί ως προϋπόθεση ότι η διαδικασία δεν τέμνεται με άλλες διαδικασίες που διαδίδουν την ίδια διατηρήσιμη ποσότητα.

Στο τελευταίο μέρος του έκτου κεφαλαίου ασχοληθήκαμε με τη διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος. Σε αυτή την περίπτωση προτείναμε τη θεώρηση των χωροχρονικών γραμμών κατά μήκος των οποίων διαδίδονται ασυνέχειες του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου ως γεωμετρικές αναπαραστάσεις αιτιακών διαδικασιών που διαδίδουν ίχνος. Με τον όρο "ασυνέχεια του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου" κατανοήσαμε τη μη συνεχή μεταβολή των τιμών των συνιστωσών του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου κατά τη μετάβαση από μία περιοχή του χώρου σε μία άλλη που διαχωρίζεται από την πρώτη με μία διδιάστατη επιφάνεια (π.χ., το μέτωπο κύματος). Αν η πηγή του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι σημειακή, τότε στο χωροχρονικό σημείο όπου εντοπίζεται η πηγή, θεωρήσαμε ότι λαμβάνει χώρα αιτιακή αλληλεπίδραση. Από την πηγή του κύματος ξεκινούν χωροχρονικές γραμμές που περιγράφουν τη διάδοση του κύματος στα σημεία του χώρου σε επόμενες χρονικές στιγμές. Κάθε σημείο μίας γραμμής ανήκει στην επιφάνεια του μετώπου κύματος στη δεδομένη χρονική στιγμή και απεικονίζεται μονοσήμαντα σε ένα άλλο σημείο της ίδια γραμμής που ανήκει στο μέτωπο κύματος σε επόμενη χρονική στιγμή. Η απεικόνιση αυτή περιγράφει τη διάδοση της ασυνέχειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, του «ίχνους», στην αιτιακή διαδικασία.

Όμως αυτή η θεώρηση εμπνέεται από την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon. Εξετάζοντας το πρόβλημα από τη σκοπιά των διατηρήσιμων ποσοτήτων διαπιστώσαμε ότι κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής πάνω στην οποία διαδίδεται το ίχνος, δεν διαδίδονται διατηρήσιμες ποσότητες. Η ποσότητα της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου ανά μονάδα επιφάνειας που διέρχεται από μία στοιχειώδη επιφάνεια κατά μήκος της χωρικής γραμμής, σε κάθε χρονική στιγμή, μειώνεται όσο περισσότερο απομακρυνόμαστε από την πηγή. Βεβαίως, ο Dowe δεν

θα είχε πρόβλημα με τη μεταβολή της ενέργειας ανά μονάδα χρόνου και ανά μονάδα επιφάνειας, αφού δεν υποθέτει τη σταθερότητα της διατηρήσιμης ποσότητας στον ορισμό της αιτιακής διαδικασίας. Το πρόβλημα με τη θεωρία των διατηρήσιμων ποσοτήτων αφορά στην προϋπόθεση της ύπαρξης του αντικειμένου που κατέχει τη διατηρήσιμη ποσότητα. Κατά μήκος της χωροχρονικής γραμμής δεν εντοπίζεται κάποιο αντικείμενο που να κατέχει την ποσότητα της διατηρήσιμης ποσότητας που διαπιστώνουμε. Συμπεραίνουμε, λοιπόν, ότι τόσο με βάση την ύστερη θεωρία του Salmon όσο και με τη θεωρία του Dowe, οι χωροχρονικές γραμμές που περιγράφουν τη διάδοση της ασυνέχειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου δεν αναπαριστάνουν αιτιακές διαδικασίες. Θεωρούμε ότι η διάδοση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος είναι ένα απτό παράδειγμα της εκτασιακής διαφοροποίησης των αιτιακών εννοιών ανάμεσα στην πρώιμη και στην ύστερη εκδοχή της θεωρίας του Salmon – μία θέση που έχουμε ήδη υποστηρίξει με ένα διαφορετικό επιχείρημα.

Είναι κοινός τόπος ότι οι θεωρίες της αιτιότητας που έχουν αναπτυχθεί μέχρι σήμερα αντιμετωπίζουν προβλήματα όταν έρχονται αντιμέτωπες με τα γεγονότα του κβαντικού κόσμου. Τα προβλήματα αυτά, σύμφωνα με το Salmon, είναι τρία. Το πρώτο προκύπτει από το στατιστικό χαρακτήρα της κβαντικής θεωρίας που είναι ασύμβατος με όσες παραδοσιακές προσεγγίσεις για την αιτιότητα υποστηρίζουν ότι το αίτιο καθορίζει πλήρως το αποτέλεσμα. Το δεύτερο πρόβλημα έχει να κάνει με την *αρχή της ανωμαλίας* του Reichenbach: η υιοθέτηση της σωματιδιακής ή της κυματικής περιγραφής για τα κβαντικά συστήματα συνεπάγεται την ύπαρξη αιτιακών ανωμαλιών, δηλαδή δράσης από απόσταση. Οι ανωμαλίες μπορούν να εκλείψουν εφόσον επιλέξουμε, κατάλληλα, για κάθε φαινόμενο μία από τις δύο περιγραφές. Ωστόσο, δεν υπάρχει ενιαία περιγραφή που να εξαλείφει το σύνολο των αιτιακών ανωμαλιών για κάποιο φυσικό σύστημα. Τέλος, το τρίτο πρόβλημα που επισημαίνει ο Salmon προκύπτει από το παράδοξο EPR και την αδυναμία διατύπωσης αιτιακών εξηγήσεων για τις στατιστικές συσχετίσεις που εκδηλώνουν χωροειδώς απομακρυσμένα υποσυστήματα ενός κβαντικού συστήματος.

Εκτός από το πρώτο πρόβλημα, που επιλύεται με την υιοθέτηση μίας πιθανοκρατικής προσέγγισης στην αιτιότητα, τα άλλα δύο προβλήματα αφορούν σε ζητήματα τοπικότητας - δηλαδή, σε ζητήματα (α) τοπικής περιγραφής των φυσικών συστημάτων με τη βοήθεια εννοιών όπως τα τοπικά φυσικά μεγέθη (παρατηρήσιμα) και οι τοπικές καταστάσεις και (β) σε ζητήματα τοπικού χαρακτήρα της αλληλεπίδρασης ανάμεσα σε φυσικά συστήματα. Το ζήτημα της τοπικής περιγραφής

των φυσικών συστημάτων μάς ώθησε στην απομάκρυνση από τη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική, στο πλαίσιο της οποίας διατυπώθηκαν αρχικώς τα προβλήματα που αφορούν στην αιτιότητα, διότι η μη σχετικιστική κβαντική μηχανική είναι μία θεωρία που εκ της δομής της περιγράφει τα φυσικά συστήματα σε ένα χώρο καταστάσεων. Οι έννοιες "τοπικό παρατηρήσιμο" και "τοπική κατάσταση" δεν έχουν νόημα στο πλαίσιο της μη σχετικιστικής κβαντικής μηχανικής, παρά μόνο σε ειδικές περιπτώσεις (π.χ., στην αναπαράσταση θέσης και για πεπερασμένο, το πολύ, πλήθος μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων). Έτσι, απαιτώντας να ικανοποιείται η «σημασιολογική τοπικότητα» στραφήκαμε στην τοπική κβαντική φυσική που διατυπώθηκε, καταρχάς, από τους Haag και Kastler ως αλγεβρική προσέγγιση στην κβαντική θεωρία πεδίων στο χωρόχρονο Minkowski και στη συνέχεια επεκτάθηκε στην περιγραφή κβαντικών πεδίων σε καμπύλους χωροχρόνους καθώς και σε ζητήματα κβαντικής στατιστικής μηχανικής συστημάτων με άπειρους βαθμούς ελευθερίας (με την προσδοκία, για ορισμένους, να καταπιαστεί επίσης με το ζήτημα της ενοποίησης της ΓΘΣ με τη κβαντική θεωρία).

Στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής έχουν διατυπωθεί διαφορετικές συνθήκες -ως αιτήματα της θεωρίας ή απλώς ως προτάσεις που ισχύουν σε ορισμένα μοντέλα της θεωρίας– οι οποίες εκφράζουν είτε την απουσία δράσης από απόσταση ανάμεσα σε αυτά που συμβαίνουν σε δύο χωροχρονικές περιοχές που ικανοποιούν συγκεκριμένες γεωμετρικές σχέσεις είτε την επίδραση των συμβάντων από μία χωροχρονική περιοχή σε μία άλλη. Ονομάσαμε, ακολουθώντας τον Horuzhy, την πρώτη κατηγορία συνθηκών, *συνθήκες ανεξαρτησίας*, και τη δεύτερη κατηγορία συνθηκών, *συνθήκες εξάρτησης*. Ένα χαρακτηριστικό παράδειγμα συνθήκης εξάρτησης είναι ο ντετερμινισμός, που στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσική εκφράζεται με το αίτημα της πρωτογενούς αιτιοκρατίας. Σύμφωνα με την πρωτογενή αιτιοκρατία οι πιθανότητες των συμβάντων που είναι δυνατό να λάβουν χώρα σε οποιαδήποτε περιοχή του χωροχρόνου καθορίζονται από τις πιθανότητες που αποδίδονται στα συμβάντα που είναι δυνατό να λάβουν χώρα σε μία χρονική φέτα οσοδήποτε μικρού πάχους «γύρω από» κάποια χρονική στιγμή.

Οι συνθήκες ανεξαρτησίας διακρίνονται σε συνθήκες ανεξαρτησίας από συμβάντα και σε συνθήκες ανεξαρτησίας από διεργασίες. Η σημασία του όρου "συμβάν" σε αυτή την περίπτωση αφορά αποκλειστικώς στην εκδήλωση ενός

τοπικού χαρακτηριστικού ή μίας ιδιότητας. Από την άλλη, οι διεργασίες ερμηνεύονται ως μεταβολές στην κατάσταση ενός συστήματος, οι οποίες είτε προκαλούνται από φυσικές αλληλεπιδράσεις είτε προκύπτουν από το συνδυασμό φυσικών αλληλεπιδράσεων με νοητικές διεργασίες επιλογής στατιστικών συλλογών και επηρεάζουν την πιθανότητα να λάβουν χώρα ορισμένα συμβάντα. Οι συνθήκες ανεξαρτησίας από τοπικές διεργασίες που προκαλούνται από φυσικές αλληλεπιδράσεις περιγράφουν αυτό που γίνεται πραγματικά στον κόσμο, στα φυσικά συστήματα, ανεξάρτητα από την ύπαρξη ή το υποκειμενικό ενδιαφέρον του παρατηρητή. Η γενική διατύπωση μίας συνθήκης ανεξαρτησίας συμβάντων μάς λέει ότι το αν ένα συμβάν λαμβάνει χώρα (ή, γενικότερα, η πιθανότητα που αποδίδεται σε συμβάντα) σε μία περιοχή του χωροχρόνου δεν επηρεάζεται από τα συμβάντα που λαμβάνουν χώρα (ή, γενικότερα, από την πιθανότητα που τους αποδίδεται) σε κάποια άλλη περιοχή του χωροχρόνου που συνδέεται με την πρώτη με ορισμένες γεωμετρικές σχέσεις. Αντιστοίχως, μία συνθήκη ανεξαρτησίας από διεργασία μάς λέει ότι μία διεργασία που λαμβάνει χώρα σε μία περιοχή του χωροχρόνου δεν επηρεάζει την πιθανότητα να λάβει χώρα ένα συμβάν σε κάποια άλλη περιοχή του χωροχρόνου που συνδέεται με την πρώτη με ορισμένες γεωμετρικές σχέσεις.

Η παραβίαση των ανισοτήτων Bell αποτελεί εγγενές χαρακτηριστικό των τοπικών κβαντικών συστημάτων. Για χωροειδώς απομακρυσμένους διπλούς κώνους (ή περιοχές που εγκλείονται σε διπλούς κώνους) οι ανισότητες παραβιάζονται για τις περισσότερες φυσικώς αποδεκτές καθολικές καταστάσεις ενός τοπικού κβαντικού συστήματος. Το γεγονός αυτό είναι αποτέλεσμα της παραβίασης ορισμένων συνθηκών ανεξαρτησίας από συμβάντα. Έτσι, ενώ από τη μία διαπιστώνουμε ότι ισχύουν ορισμένες συνθήκες ανεξαρτησίας για τις άλγεβρες ορισμένων περιοχών σε χωροειδή απομάκρυνση (π.χ., η τοπική μεταθετότητα, η C* ή η W* ανεξαρτησία των τοπικών αλγεβρών), από την άλλη προκύπτουν στατιστικές συσχετίσεις ανάμεσα σε απομακρυσμένα συμβάντα, ως συνέπεια της παραβίασης των ανισοτήτων Bell, λόγω της παραβίασης άλλων συνθηκών ανεξαρτησίας (π.χ., της W* ανεξαρτησίας με την έννοια του γινομένου). Επίσης, διαπιστώσαμε ότι οι στατιστικές συσχετίσεις ανάμεσα σε συμβάντα που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδώς απομακρυσμένες περιοχές εξαρτώνται από την απόσταση των περιοχών στις οποίες λαμβάνουν χώρα τα συμβάντα. Υπό ορισμένες συνθήκες (ύπαρξη ελάχιστης μάζας), οι στατιστικές συσχετίσεις δεν είναι πρακτικά ανιχνεύσιμες (όταν η απόσταση γίνεται συγκρίσιμη με

μερικά μήκη Compton που αντιστοιχούν στην ελάχιστη μάζα). Θεωρούμε ότι τα χαρακτηριστικά που αναφέραμε σε σχέση με την παραβίαση των ανισοτήτων Bell εμπλουτίζουν την απλούστερη προσέγγιση που συναντάμε στη συνήθη κβαντική μηχανική και θέτουν πιο επιτακτικά το ζήτημα της αιτιακής εξήγησης των ανισοτήτων με βάση την αρχή του κοινού αιτίου.

Στη συνέχεια παρουσιάσαμε το επιχείρημα EPR στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής καθώς και την απόδειξη των προκείμενων του επιχειρήματος από τους Redhead και Wagner στο πλαίσιο μίας τοπικής κβαντικής θεωρίας. Από την ανάλυση του επιχειρήματος προέκυψε ότι η συνθήκη τοπικότητας που υπεισέρχεται στο επιχείρημα δεν αποτελεί συνθήκη ανεξαρτησίας από συμβάντα. Η συνθήκη τοπικότητας εκφράζει την ανεξαρτησία των στοιχείων της φυσικής πραγματικότητας από διεργασίες που λαμβάνουν χώρα σε χωροειδή απομάκρυνση, δηλαδή αποτελεί συνθήκη ανεξαρτησίας από τοπικές διεργασίες. Έτσι, το δίλημμα στο οποίο καταλήγει το επιχείρημα EPR είναι το εξής: είτε δεν ισχύει η ανεξαρτησία από τοπικές διεργασίες είτε η τοπική κβαντική φυσική μάς δίνει μη πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας.

Η διάκριση των τοπικών διεργασιών σε αμιγώς φυσικές διεργασίες και σε διεργασίες που είναι εν μέρει φυσικές και εν μέρει νοητικές, συνεπάγεται μία ανάλογη διάκριση και σε σχέση με τις συνθήκες ανεξαρτησίας από τοπικές διεργασίες. Ερμηνεύσαμε το αίτημα της τοπικής μεταθετότητας, που είναι βασικό αίτημα για κάθε τοπική κβαντική θεωρία, ως ικανή και αναγκαία συνθήκη για την ανεξαρτησία από *τοπικές φυσικές διεργασίες*. Στην περίπτωση του EPR, οι Redhead και Wagner αποδεικνύουν τις προκείμενες, με βάση το θεώρημα Reeh-Schlieder, αναφερόμενοι σε διεργασίες που περιγράφουν μετρήσεις κατάλληλων παρατηρήσιμων με επιλογή αποτελέσματος. Οι διεργασίες αυτές, σύμφωνα με τους Clifton και Halvorson, δεν είναι αμιγώς φυσικές, αλλά περιλαμβάνουν την ενεργό παρέμβαση του παρατηρητή κατά την επιλογή αποτελέσματος. Επομένως, η συνθήκη ανεξαρτησίας που πρέπει να αμφισβητηθεί χάριν της πληρότητας της θεωρίας δεν αφορά σε φυσικές διεργασίες και το συμπέρασμα του επιχειρήματος EPR –ότι η τοπικότητα συνεπάγεται μη πληρότητα– δεν αφορά στο επίπεδο της ανεξάρτητης από το νου πραγματικότητας.

Η ανίχνευση σωματιδίων στην τοπική κβαντική φυσική περιγράφεται μόνο

κατά προσέγγιση από τοπικές διεργασίες. Σύμφωνα με το θεώρημα Reeh-Schlieder δεν υπάρχει θετικό παρατηρήσιμο με μηδενική αναμενόμενη τιμή στο κενό που να ανήκει στην τοπική άλγεβρα μίας φραγμένης περιοχής. Αυτό σημαίνει ότι δεν υπάρχει τοπικό παρατηρήσιμο που να μπορεί να αναπαραστήσει την ανίχνευση ενός σωματιδίου. Τα μεγέθη που ικανοποιούν αυτές τις προϋποθέσεις σε μία τοπική κβαντική θεωρία είναι *σχεδόν-τοπικά*: μπορούν απλώς να προσεγγισθούν, σε οποιοδήποτε βαθμό ακρίβειας, από τοπικά παρατηρήσιμα που ανήκουν στην άλγεβρα της περιοχής στην οποία θεωρούμε ότι λαμβάνει χώρα η ανίχνευση. Έτσι, υπό την προϋπόθεση ότι τα μεγέθη που μπορούμε να μετρήσουμε ανήκουν στις τοπικές άλγεβρες της περιοχής που λαμβάνει χώρα η μέτρηση, η ανίχνευση σωματιδίων περιγράφεται μόνο κατά προσέγγιση από τοπικές διεργασίες, δηλαδή, μετράμε ένα παρατηρήσιμο που για δεδομένη ακρίβεια μπορεί να ερμηνευθεί ότι περιγράφει τον ανιχνευτή. Ο Αραγεώργης απέδειξε ότι μία διεργασία που περιγράφεται από τον κανόνα Lüders ως *μέτρηση χωρίς επιλογή αποτελέσματος* ενός σχεδόν-τοπικού παρατηρήσιμου επηρεάζει την αναμενόμενη τιμή κάποιου τοπικού παρατηρήσιμου σε οποιαδήποτε περιοχή του χωροχρόνου. Το συμπέρασμα αυτό μας λέει ότι η συνθήκη τοπικής ανεξαρτησίας από μη επιλεκτική διεργασία ισχύει μόνο αν η διεργασία αυτή περιγράφεται από τοπικά μεγέθη. (Η συνεισφορά μας σε αυτό το συμπέρασμα συνίσταται στην επέκταση της απόδειξης του Αραγεώργη για αποτελέσματα (effects) με βάση το γενικευμένο κανόνα Lüders.)

Με βάση τις τοπικές φυσικές διεργασίες, ορίσαμε την έννοια του ίχνους σε συμβάντα που εντοπίζονται σε μία χωροχρονική περιοχή. Η δημιουργία ίχνους σε ένα συμβάν που είναι δυνατόν να λάβει χώρα σε μία χωροχρονική περιοχή συνίσταται στην εκτέλεση μίας φυσικής τοπικής διεργασίας σε αυτή την περιοχή, η οποία περιγράφεται από μία τοπική δυναμική απεικόνιση και μεταβάλλει την πιθανότητα να λάβει χώρα το εν λόγω συμβάν. Λόγω τους αιτήματος της τοπικής μεταθετότητας, το ίχνος δεν εκδηλώνεται σε χωροειδή απομάκρυνση από την περιοχή που δημιουργήθηκε. Επίσης, με βάση την τοπική πρωτογενή αιτιοκρατία, που αποτελεί μία τοπική συνθήκη εξάρτησης, δείξαμε ότι το ίχνος διαδίδεται (δηλαδή, εκδηλώνεται συνεχώς σε απουσία επιπλέον παρεμβάσεων) στον κώνο φωτός της περιοχής που δημιουργήθηκε. Συγκεκριμένα, αν το ίχνος δημιουργείται σε μία περιοχή που εγκλείεται σε μία χρονική φέτα πάχους ε γύρω από τη χρονική στιγμή t=0 (ως προς κάποιο σύστημα αναφοράς) και έχει ορισμένη χωρική έκταση, τότε το

ίχνος θα εκδηλώνεται σε κάθε περιοχή που ορίζεται από την τομή της χρονικής φέτας, σε οποιαδήποτε επόμενη χρονική στιγμή, με τον κώνο φωτός της αρχικής περιοχής. Ωστόσο, το γεγονός αυτό δεν επαρκεί για να μιλήσουμε για αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική σύμφωνα με την πρώιμη αιτιακή θεωρία του Salmon. Θα πρέπει, επιπλέον, να δείξουμε ότι η διάδοση του ίχνους λαμβάνει χώρα στη χωροχρονική μετάθεση της περιοχής που δημιουργείται κατά μήκος ενός χρονοειδούς διανύσματος. Και αυτό δεν ισχύει. Σύμφωνα με μία πρόταση του Landau, αν θεωρήσουμε τη χωροχρονική μετάθεση μίας πεπερασμένης περιοχής σε απόσταση τέτοια ώστε η αιτιακή πλήρωση της αρχικής περιοχής να βρίσκεται σε μικρή απόσταση από την αιτιακή πλήρωση της περιοχής που προκύπτει από τη μετάθεση, τότε οι άλγεβρες των δύο περιοχών δεν μοιράζονται μη τετριμμένα κοινά στοιχεία. Αυτό σημαίνει ότι το ίχνος που δημιουργείται σε οποιοδήποτε συμβάν στην αρχική χωροχρονική περιοχή δεν μπορεί να εκδηλωθεί σε συμβάν που είναι δυνατό να λάβει χώρα σε μία περιοχή ανάλογου μεγέθους, σε κάποια απόσταση από την αρχική περιοχή. Επομένως, δεν είναι δυνατό να προσδιορισθούν αιτιακές διαδικασίες στην τοπική κβαντική φυσική, τουλάχιστον με βάση τις προϋποθέσεις που υιοθετήσαμε σε αυτή την προσέγγιση.

Η αδυναμία να θεωρήσουμε μία οποιαδήποτε χωροχρονική γραμμή ως γεωμετρική αναπαράσταση μίας αιτιακής διαδικασίας που διαδίδει ίχνος, σε συνδυασμό με το γεγονός ότι το ίχνος εκδηλώνεται συνεχώς, κάθε χρονική στιγμή, σε μία διευρυνόμενη χωρική περιοχή εντός του κώνου φωτός της χωροχρονικής περιοχής στη οποία δημιουργήθηκε, μας οδηγεί να υιοθετήσουμε μία ερμηνεία που είναι ανάλογη με την κυματική ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Αν θεωρήσουμε, στη συνήθη κβαντική μηχανική την κυματική ερμηνεία για ένα κβαντικό σωματίδιο που εντοπίζεται σε ένα σημείο του χώρου κάποια χρονική στιγμή, τότε θα πρέπει να υποθέσουμε ότι σε επόμενες χρονικές στιγμές το σωματίδιο εξαπλώνεται σε όλο και ευρύτερες χωρικές περιοχές. Σύμφωνα με το Reichenbach, η ανίχνευση του σωματιδίου σε ένα σημείο του χώρου κάποια χρονική στιγμή, αποτελεί αιτιακή ανωμαλία για την κυματική περιγραφή αφού θα πρέπει να υποθέσουμε ότι το κύμα "καταρρέει" στιγμιαία στο σημείο που είναι τοποθετημένος ο ανιχνευτής τη δεδομένη χρονική στιγμή. Με ανάλογο τρόπο στην τοπική κβαντική φυσική, ένα τοπικό παρατηρήσιμο που ανήκει στην τοπική άλγεβρα μίας πεπερασμένης περιοχής ανήκει και στην τοπική άλγεβρα κάθε περιοχής που ορίζεται από την τομή μίας χρονικής

φέτας με τον κώνο φωτός της αρχικής περιοχής. Και, βεβαίως, το ίχνος που δημιουργείται σε ένα συμβάν στην αρχική περιοχή διαδίδεται σε κάθε άλλη περιοχή στην οποία εντοπίζεται το εν λόγω συμβάν. Το γεγονός ότι το συμβάν αυτό δεν μπορεί να εντοπιστεί σε μία χωροχρονική περιοχή που αποτελεί χωροχρονική μετάθεση της αρχικής περιοχής κατά ορισμένο διάνυσμα, είναι ανάλογο με το γεγονός ότι η ανίχνευση του σωματιδίου σε κάποιο σημείο του χώρου κάποια χρονική στιγμή δεν μπορεί να περιγραφεί στο πλαίσιο της κυματικής ερμηνείας και αποτελεί αιτιακή ανωμαλία.

Στη συνέχεια παρουσιάσαμε μία δεύτερη προσπάθεια ορισμού αιτιακών διαδικασιών στην τοπική κβαντική φυσική. Σε αυτή την προσέγγιση επιλέξαμε μία συγκεκριμένη τοπική φυσική διεργασία για τη δημιουργία του ίχνους που είναι η μέτρηση χωρίς επιλογή ενός παρατηρήσιμου (προβολικού τελεστή) σε μία πεπερασμένη χωροχρονική περιοχή. Ακολούθως ταυτοποιήσαμε το χαρακτηριστικό που εκδηλώνεται κατά μήκος μίας διαδικασίας που περιγράφεται γεωμετρικά από ένα σταθερό χρονοειδές διάνυσμα με την οικογένεια παρατηρήσιμων που προκύπτουν από τη χωροχρονική μετάθεση του μετρηθέντος παρατηρήσιμου στην κατεύθυνση αυτού του διανύσματος. Αυτό που δείξαμε είναι ότι το ίχνος εκδηλώνεται σε περιοχές που είναι χωροχρονικές μεταθέσεις της αρχικής περιοχής και βρίσκονται όσο κοντά θέλουμε στην αρχική περιοχή. Προφανώς, αυτό το αποτέλεσμα δεν επαρκεί για να μιλήσουμε για αιτιακές διαδικασίες και γι' αυτό θεωρούμε ότι η προσέγγιση αυτή, καταρχάς, δεν είναι επιτυχημένη. Ωστόσο, έχει ένα πλεονέκτημα έναντι της προηγούμενης προσέγγισης που προτείναμε: μας επιτρέπει να ορίσουμε την έννοια της διαδικασίας στην τοπική κβαντική φυσική ανεξάρτητα από το αν αυτή είναι αιτιακή διαδικασία ή ψευδο-διαδικασία - κάτι που δεν είναι εφικτό στο πλαίσιο της πρώτης προσέγγισης λόγω της πρότασης του Landau.

Στο τελευταίο κεφάλαιο της εργασίας αναφερθήκαμε στη δυνατότητα αιτιακής εξήγησης των κβαντικών συσχετίσεων που προκύπτουν από την παραβίαση των ανισοτήτων Bell με τη βοήθεια της αρχής του κοινού του Reichenbach. Οι Rédei και Summers απέδειξαν ότι υπάρχει ένα συμβάν που εντοπίζεται στην ένωση των κώνων φωτός του παρελθόντος δύο συσχετιζόμενων συμβάντων και ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις που ορίζουν ένα δίκρανο σύζευξης, από τις οποίες συνάγεται παραγωγικά η ύπαρξη της προς εξήγηση στατιστικής συσχέτισης. Μάλιστα, οι Rédei

και Summers έδειξαν ότι το κοινό αίτιο δεν βρίσκεται σε περιοχές εκτός της τομής των κώνων φωτός του παρελθόντος των συσχετιζόμενων συμβάντων. Ωστόσο, το αποτέλεσμα αυτό δεν αρκεί για την ικανοποίηση των διαισθήσεών μας σε σχέση με τις αιτιακές εξηγήσεις των κβαντικών συσχετίσεων. Αυτό που θα θέλαμε είναι να αποδειχθεί ότι το κοινό αίτιο εντοπίζεται στο κοινό αιτιακό παρελθόν (δηλαδή, στην τομή των κώνων φωτός του παρελθόντος, των συσχετιζόμενων συμβάντων) ώστε να μπορούμε να λέμε ότι το συμβάν αυτό αποτελεί αίτιο και των δύο συμβάντων.

Η ιδέα που προτείναμε στο όγδοο κεφάλαιο της εργασίας είναι να θεωρήσουμε το υποτιθέμενο κοινό αίτιο της κβαντικής συσχέτισης, όχι ως ένα συμβάν, αλλά ως μία συνθήκη που εκφράζει ότι περισσότερα από ένα συμβάντα λαμβάνουν χώρα, τα οποία συλλογικά μπορούν να εξηγήσουν τη στατιστική συσχέτιση. Σε αυτό το πλαίσιο ερμηνείας τα συμβάντα δεν απαιτείται να ανήκουν στην τομή των κώνων φωτός του παρελθόντος, δηλαδή, να είναι όλα κοινά αίτια των υπό συσχέτιση συμβάντων. Κάποια από αυτά ενδέχεται να είναι κοινά αίτια και κάποια άλλα να επιδρούν ως αιτιακοί παράγοντες μόνο σε κάποιο από τα συσχετιζόμενα συμβάντα – ή, γενικότερα, όλα τα συμβάντα μπορούν να θεωρηθούν ως αιτιακοί παράγοντες που επιδρούν σε τουλάχιστον ένα από τα συσχετιζόμενα συμβάντα. Βεβαίως, σε αυτή την περίπτωση δεν μπορούμε να αποκλείσουμε a priori την περίπτωση η κβαντική συσχέτιση να είναι το τυχαίο αποτέλεσμα της ύπαρξης ανεξάρτητων αιτιακών αλυσίδων που καταλήγουν σε καθένα από τα υπό συσχέτιση συμβάντα. Δηλαδή, η ερμηνεία που προτείναμε δεν μπορεί να αποκλείσει την περίπτωση της «προκαθορισμένης αρμονίας» που αποτελούσε τον κύριο στόχο του Reichenbach όταν πρότεινε την αρχή του κοινού αιτίου.

Αυτό που δείξαμε είναι ότι το κοινό αίτιο μπορεί να αναλυθεί στο πλαίσιο της τοπικής κβαντικής φυσικής ως σύζευξη συμβάντων τα οποία λαμβάνουν χώρα σε ξένες μεταξύ τους περιοχές του χωροχρόνου Minkowski και, κατά συνέπεια, μπορούν να θεωρηθούν ως διακριτά συμβάντα. Επιπλέον, εξετάσαμε αν τα διακριτά συμβάντα ορίζουν μία διαμέριση της μονάδας, έτσι ώστε να αποτελούν ένα σύστημα κοινών αιτιών του Reichenbach, και, άρα, να συνάγεται παραγωγικά από αυτά η κβαντική συσχέτιση. Το συμπέρασμα σε αυτή την περίπτωση ήταν αρνητικό. Τα συμβάντα που προκύπτουν από την ανάλυση του κοινού αιτίου δεν μπορούν να προσδιορίσουν μία διαμέριση που να αποτελεί σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach. Προτείναμε

ακολούθως μία πιο περιοριστική ερμηνεία: αρκεί να πούμε ότι το κοινό αίτιο μπορεί να θεωρηθεί ως συνθήκη που αφορά σε περισσότερα από ένα χωροχρονικώς διακρίσιμα συμβάντα, η οποία ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης. Βεβαίως, σε αυτή την περίπτωση δεν λέμε τίποτα για τις στατιστικές σχέσεις που ικανοποιούν τα συμβάντα στα οποία αναλύεται το κοινό αίτιο. Όμως για να κάνουμε κάτι τέτοιο θα πρέπει να κινηθούμε διαφορετικά: να αποπειραθούμε να "χαλαρώσουμε" τις συνθήκες που ισχύουν για ένα σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach ώστε αφενός να συνάγεται παραγωγικά η κβαντική συσχέτιση και αφετέρου να μην υπάρχει ασυνέπεια ανάμεσα στις συνθήκες αυτές και στο γεγονός ότι τα συμβάντα που ορίζουν το σύστημα κοινών αιτίων του Reichenbach προέρχονται από την ανάλυση του κοινού αιτίου. Θεωρούμε ότι αυτή η κατεύθυνση αξίζει περαιτέρω έρευνα.

Τέλος, προτείναμε μία απόδειξη των ανισοτήτων Clauser-Horne για τέσσερα συσχετιζόμενα συμβάντα, καθώς και των ανισοτήτων Bell για τα αντίστοιχα δίτιμα παρατηρήσιμα, από την υπόθεση ότι υπάρχει ένα κοινό σύστημα κοινών αιτιών του Reichenbach που εξηγεί τις στατιστικές συσχετίσεις που εκδηλώνονται ανάμεσα στα συμβάντα αυτά. Οι Hofer-Szabò και Rédei έχουν αποδείξει για μία τετράδα προβολικών τελεστών που αναπαριστάνουν συσχετιζόμενα συμβάντα, αριθμητικές ανισότητες, παρόμοιες από μαθηματική σκοπιά με εκείνες του Bell, από την υπόθεση της ύπαρξης κοινού-κοινού αιτίου –ακριβέστερα, από την υπόθεση ότι υπάρχει ένα συμβάν που ικανοποιεί τις στατιστικές σχέσεις του δίκρανου σύζευξης για κάθε ζευγάρι που σχηματίζεται από τα τέσσερα συσχετιζόμενα συμβάντα. Με βάση ένα επιχείρημα που στηρίζεται στην ερμηνεία των μαθηματικών αναπαραστάσεων των συμβάντων και των πιθανοτήτων στην τοπική κβαντική φυσική ασκήσαμε κριτική σε αυτή την απόδειξη και υποστηρίξαμε ότι είναι ορθότερο να αποδεικνύονται, από την υπόθεση του κοινού-κοινού αιτίου, οι ανισότητες τύπου Clauser-Horne για μία τετράδα συμβάντων και όχι ανισότητες τύπου Bell. Έτσι, η απόδειξη που προτείνουμε, αφενός υλοποιεί μία ερμηνευτικώς ορθότερη επιλογή από αυτή των Hofer-Szabò και Rédei, αφετέρου συνάγεται από γενικότερες προκείμενες, υπό την έννοια ότι απαιτεί την ύπαρξη ενός κοινού συστήματος κοινών αιτίων και όχι απλώς ενός κοινού-κοινού αιτίου.

Ας αναζητήσουμε όμως μία ευρύτερη οπτική στην οποία εντάσσονται τα

επιμέρους συμπεράσματα. Σίγουρα, δεν είναι καινοφανές να υποστηρίξει κανείς ότι οι φιλοσοφικές πραγματεύσεις της αιτιότητας δεν βρίσκουν πάντα ανταπόκριση στις φυσικές θεωρίες. Στην εργασία προσπαθήσαμε να διερευνήσουμε με λεπτομέρεια το κατά πόσον οι σύγχρονες φυσικές θεωρίες αποτελούν φιλόξενο έδαφος για έννοιες αιτιακής διαδικασίας, όπως αυτές αναλύονται στο πλαίσιο της φιλοσοφικής παράδοσης των Russell, Reichenbach, Salmon και Dowe. Τα νέα είναι καλά και κακά. Από τη μία, οι σύγχρονες φυσικές θεωρίες – ειδικότερα, οι σχετικιστικές θεωρίες σε αντιδιαστολή με τη μη σχετικιστική κβαντική μηχανική – προσφέρουν το εννοιολογικό οπλοστάσιο για την επεξήγηση της έννοιας της αιτιακής διαδικασίας και τη διατύπωση συνθηκών τις οποίες προϋποθέτει η ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών στο φυσικό κόσμο. Από την άλλη, διαπιστώνεται ότι μία φιλοσοφική έννοια, όπως αυτή της αιτιακής διαδικασίας, μπορεί να επεξηγηθεί με παραπάνω από ένα, μη ισοδύναμους τρόπους, στο πλαίσιο της ίδιας φυσικής θεωρίας. Ωστόσο, μία καταρχήν αισιόδοξη στάση θα πρέπει να μετριαστεί για τρεις λόγους. Πρώτον, μερικές θεωρίες αποκλείουν την υιοθέτηση φυσικών υποθέσεων που είναι αναγκαίες για την ύπαρξη αιτιακών διαδικασιών. Δεύτερον, μερικές φυσικές θεωρίες, μολονότι δεν αποκλείουν την προσθήκη τέτοιων υποθέσεων, απαιτούν η εν λόγω προσθήκη να γίνεται ad hoc προκειμένου να διασωθεί η αιτιακή ερμηνεία των μοντέλων τους. Τρίτον, οι ιδιαιτερότητες μερικών φυσικών θεωριών υποδεικνύουν νέες κατευθύνσεις για αναθεώρηση των ίδιων των αιτιακών εννοιών που μας κληροδότησε η φιλοσοφική παράδοση. Για μία ακόμη φορά η φυσική επιστήμη στέκεται αμφίθυμη στη φιλοσοφία της αιτιότητας.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑΤΑ

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΠΡΩΤΟ

ΣΤΟΙΧΕΙΑ ΑΠΟ ΤΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΩΝ C* ΚΑΙ ΤΩΝ VON NEUMANN ΑΛΓΕΒΡΩΝ[1]

1. Γενικοί Ορισμοί

Μιγαδική προσεταιριστική άλγεβρα είναι ένας γραμμικός διανυσματικός χώρος $\mathcal{A}$ στους μιγαδικούς αριθμούς εφοδιασμένος με έναν εσωτερικό πολλαπλασιασμό που ικανοποιεί τις εξής ιδιότητες: (i) επιμεριστικότητα (γραμμικότητα), $(v+\lambda w)z = vz + \lambda wz$ και $z(v+\lambda w) = zv + \lambda zw$ για κάθε $v, w, z \in \mathcal{A},\ \lambda \in \mathbb{C},$ και (ii) προσεταιριστικότητα, $(vw)z = v(wz)$ για κάθε $v, w, z \in \mathcal{A}$.

Μία άλγεβρα $\mathcal{A}$ ονομάζεται *άλγεβρα με νόρμα*, αν ορίζεται σε αυτή μία απεικόνιση $\|\ \|: \mathcal{A} \to \mathbb{R}_+$ με τις εξής ιδιότητες: (i) $\|A\| = 0$ αννˢ $A = 0$, (ii) $\|\lambda A\| = |\lambda|\|A\|,\ \lambda \in \mathbb{C}$, (iii) $\|A+B\| \le \|A\| + \|B\|$, (iv) $\|AB\| \le \|A\| \cdot \|B\|$, (v) $\|I\| = 1$, όπου I το ουδέτερο (ταυτοτικό) στοιχείο ως προς τον πολλαπλασιασμό (εφόσον υπάρχει).

Μία άλγεβρα $\mathcal{A}$ ονομάζεται *ενελικτική ή *-άλγεβρα* αν είναι εφοδιασμένη με μία απεικόνιση (ενέλιξη) $A \mapsto A^*$ που ικανοποιεί τις εξής ιδιότητες: (i) $(\lambda A + \mu B)^* = \overline{\lambda} A^* + \overline{\mu} B^*$, (ii) $A^{**} = A$ (iii) $(AB)^* = B^* A^*$.

[1] Για τη συγγραφή του παραρτήματος χρησιμοποιήσαμε τα εξής εγχειρίδια (Takesaki 2000), (Brattelli and Robinson 1987), (Horuzhy 1990), (Haag 1996), (Redei 1998) το άρθρο των (Halvorson and Müger 2007) και τις διδακτικές σημειώσεις του Σ. Καρανάσιου για το μεταπτυχιακό μάθημα της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε (2006), "C* άλγεβρες".

[2] Συντομογραφία του "αν και μόνο αν".

Μία άλγεβρα $\mathcal{A}$, με νόρμα, ονομάζεται *άλγεβρα Banach* αν είναι πλήρης ως προς τη νόρμα, δηλαδή αν κάθε ακολουθία Cauchy $\{A_n\} \subseteq \mathcal{A}$ έχει όριο, ως προς τη νόρμα, κάποιο στοιχείο $A \in \mathcal{A}$.

Μία ενελικτική άλγεβρα Banach για την οποία ισχύει $\|A^* A\| = \|A\|^2$ ονομάζεται *C* άλγεβρα*.

Έστω $\mathcal{A}$ μία C* άλγεβρα με μονάδα. Το στοιχείο $A \in \mathcal{A}$ ονομάζεται *αυτοσυζυγές* αν $A^* = A$, *κανονικό* αν $A^* A = AA^*$, *ισομετρία* αν $A^* A = I$, *μοναδιαίο* αν $A^* A = AA^* = I$, *προβολικό* αν $A^2 = A$, *θετικό* αν $A = B^* B$ για κάποιο στοιχείο $B \in \mathcal{A}$.

Ένας υπόχωρος $\mathcal{B}$ μιας C* άλγεβρας $\mathcal{A}$ ονομάζεται *αμφιμερές ιδεώδες* αν οι $A \in \mathcal{A},\ B \in \mathcal{B}$ συνεπάγονται τις $AB \in \mathcal{B}$ και $BA \in \mathcal{B}$. Μία C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ ονομάζεται *απλή* αν τα μοναδικά κλειστά αμφιμερή ιδεώδη της άλγεβρας είναι τα $\{0\}, \mathcal{A}$.

2. Αναπαραστάσεις και Καταστάσεις

Έστω $\mathcal{A}$ μία C* άλγεβρα. Ονομάζουμε * - *αναπαράσταση* της $\mathcal{A}$ σε ένα χώρο Hilbert $\mathcal{H}$ έναν *-ομομορφισμό π από την $\mathcal{A}$ στο χώρο $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ των φραγμένων τελεστών του $\mathcal{H}$ - δηλαδή, μια απεικόνιση $\pi : \mathcal{A} \to \mathcal{B}(\mathcal{H})$ με τις εξής ιδιότητες: (i) $\pi(\lambda A + \mu B) = \lambda \pi(A) + \mu \pi(B)$, (ii) $\pi(AB) = \pi(A)\pi(B)$, (iii) $\pi(A^*) = \pi(A)^*$.

Μία αναπαράσταση $(\mathcal{H}, \pi)$ ονομάζεται *πιστή*, αν το σύνολο $\ker \pi = \{A \in \mathcal{A} : \pi(A) = 0\}$ είναι το $\{0\}$. Οι εικόνες των στοιχείων μιας C* άλγεβρας με μία πιστή αναπαράσταση έχουν την ίδια νόρμα με τα αρχέτυπα, $\|\pi(A)\| = \|A\|$. Μία απλή άλγεβρα έχει μόνο πιστές αναπαραστάσεις.

Έστω $(\mathcal{H}, \pi)$ μία αναπαράσταση της $\mathcal{A}$. Αν $\mathcal{K}$ είναι ένας κλειστός υπόχωρος του $\mathcal{H}$, τότε θα λέμε ότι αποτελεί *αναλλοίωτο υπόχωρο της αναπαράστασης* $(\mathcal{H}, \pi)$ αν για κάθε $A \in \mathcal{A}$ και για κάθε $\psi \in \mathcal{K}$, $\pi(A)\psi \in \mathcal{K}$. Για κάθε αναπαράσταση υπάρχουν

τουλάχιστον δύο αναλλοίωτοι υπόχωροι: ο $\{0\}$ και ο $\mathcal{H}$. Μία αναπαράσταση $(\mathcal{H},\pi)$ της $\mathcal{A}$ ονομάζεται *μη αναγώγιμη* αν οι μοναδικοί αναλλοίωτοι υπόχωροι αυτής είναι ο $\{0\}$ και ο $\mathcal{H}$.

Μία C* άλγεβρα $\mathcal{A}$ που έχει μία πιστή και μη αναγώγιμη αναπαράσταση ονομάζεται *πρωτογενής* (primitive). Κάθε απλή άλγεβρα είναι πρωτογενής

Μία αναπαράσταση $(\mathcal{H},\pi)$ της $\mathcal{A}$ ονομάζεται *μη εκφυλισμένη* αν το σύνολο $\{\psi\in\mathcal{H}:\pi(A)\psi=0, A\in\mathcal{A}\}$ είναι το $\{0\}$. Κάθε μη αναγώγιμη αναπαράσταση είτε είναι τετριμμένη ($\pi=0$) είτε είναι μη εκφυλισμένη.

Ένα διάνυσμα $\Omega\in\mathcal{H}$ ονομάζεται *κυκλικό διάνυσμα* του $\mathcal{M}\subseteq\mathcal{B}(\mathcal{H})$ αν το σύνολο $\{A\Omega : A\in\mathcal{M}\}$ είναι πυκνό στον $\mathcal{H}$ - δηλαδή, $\forall\varepsilon>0,\psi\in\mathcal{H},\exists A\in\mathcal{M}:\|A\Omega-\psi\|<\varepsilon$. Η αναπαράσταση $(\mathcal{H},\pi)$ ονομάζεται *κυκλική αναπαράσταση* της $\mathcal{A}$, αν υπάρχει κυκλικό διάνυσμα $\Omega\in\mathcal{H}$ της $\pi(\mathcal{A})$. Κάθε κυκλική αναπαράσταση είναι μη εκφυλισμένη.

Μια απεικόνιση $\omega:\mathcal{A}\to\mathbb{C}$ για την οποία ισχύουν οι εξής ιδιότητες: (i) είναι γραμμική, $\omega(\lambda_1A+\lambda_2B)=\lambda_1\omega(A)+\lambda_2\omega(B)$, (ii) είναι θετική, $\omega(B^*B)\geq 0,\ \forall B\in\mathcal{A}$, και (iii) είναι κανονικοποιημένη $\|\omega\|=\sup\{|\omega(A)|:\|A\|=1\}=1$ ονομάζεται *κατάσταση* της $\mathcal{A}$. Δηλαδή, οι καταστάσεις μιας C* άλγεβρας είναι γραμμικά, θετικά κανονικοποιημένα συναρτησιακά της άλγεβρας.

Θα λέμε ότι η ω είναι *καθαρή κατάσταση* της $\mathcal{A}$ αν για κάθε $\lambda\in(0,1)$ και οποιεσδήποτε καταστάσεις ω_1, ω_2 της $\mathcal{A}$, αν $\omega=\lambda\omega_1+(1-\lambda)\omega_2$ τότε $\omega=\omega_1=\omega_2$. Διαφορετικά, η ω ονομάζεται *κατάσταση μίγματος*.

Μία κατάσταση ω ονομάζεται *πιστή* αν $\omega(B^*B)=0\Rightarrow B=0$ για κάθε $B\in\mathcal{A}$.

Έστω $(\mathcal{H},\pi)$ μία μη εκφυλισμένη αναπαράσταση μία C* άλγεβρας $\mathcal{A}$. Για κάθε $\psi\in\mathcal{H},\ \|\psi\|=1$ ορίζεται μία κατάσταση ω_ψ της $\mathcal{A}$ με βάση τη σχέση

$\omega(A) = (\psi, \pi(A)\psi)$, $A \in \mathcal{A}$. Η ω_ψ ονομάζεται *διανυσματική κατάσταση της* $\mathcal{A}$ *στην αναπαράσταση* $(\mathcal{H}, \pi)$.

Κάθε κατάσταση ω της $\mathcal{A}$ μπορεί να γραφεί ως διανυσματική κατάσταση σε κατάλληλα επιλεγμένη αναπαράσταση $(\mathcal{H}, \pi)$. Αυτό προκύπτει από μία πρόταση που είναι γνωστή ως *κατασκευή GNS* (Gel'fand-Naimark-Segal).

> Αν ω μία κατάσταση της C* άλγεβρας $\mathcal{A}$, τότε υπάρχει αναπαράσταση $(\mathcal{H}_\omega, \pi_\omega)$ της $\mathcal{A}$ και ένα μοναδιαίο διάνυσμα Ω_ω του $\mathcal{H}_\omega$ τέτοια ώστε (i) $\forall A \in \mathcal{A},\ \omega(A) = (\Omega_\omega, \pi_\omega(A)\Omega_\omega)$, (ii) το Ω_ω είναι κυκλικό διάνυσμα της αναπαράστασης $(\mathcal{H}_\omega, \pi_\omega)$, (iii) η τριάδα $(\mathcal{H}_\omega, \pi_\omega, \Omega_\omega)$ είναι μοναδική μέχρι μοναδιαίας ισοδυναμίας. Δηλαδή, για κάθε άλλη τριάδα $(\mathcal{H}_\omega', \pi_\omega', \Omega_\omega')$ που ικανοποιεί τις (i) και (ii) υπάρχει μοναδιαία απεικόνιση $U : \mathcal{H}_\omega \to \mathcal{H}_\omega'$ τέτοια ώστε $\pi_\omega'(A) = U\pi_\omega(A)U^*$ και $U\Omega_\omega = \Omega_\omega'$.

3. Άλγεβρες von Neumann

Μία C*- υποάλγεβρα $\mathcal{R}$ του $\mathcal{B}(\mathcal{H})$, κλειστή ως προς την ασθενή τοπολογία, που περιλαμβάνει τον ταυτοτικό τελεστή I ονομάζεται *von Neumann άλγεβρα*. Η κλειστότητα ως προς την ασθενή τοπολογία σημαίνει ότι για κάθε δίκτυο (γενίκευση της ακολουθίας) $\{B_a\} \subseteq \mathcal{R}$ για την οποία υπάρχει $A \in \mathcal{B}(\mathcal{H})$ τέτοιο ώστε $(y, (B_a - A)x) \to 0\ \forall x, y \in \mathcal{H}$ ισχύει $A \in \mathcal{R}$. Οι W* άλγεβρες είναι το αφηρημένο αντίστοιχο των von Neumann αλγεβρών, δηλαδή είναι άλγεβρες που δεν ορίζονται με αναφορά σε ένα συγκεκριμένο χώρο Hilbert.

Αν S είναι ένα υποσύνολο του $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ κλειστό ως προς την ενέλιξη ($A \in S \Rightarrow A^* \in S$), τότε το σύνολο S' των στοιχείων του $\mathcal{B}(\mathcal{H})$ που μετατίθενται με κάθε στοιχείο του S, $S' = \{A \in \mathcal{B}(\mathcal{H}) : [B, A] = 0\ \forall B \in S\}$, είναι von Neumann άλγεβρα ("commutant of S"). Επιπλέον, το σύνολο των στοιχείων που μετατίθενται με το S' ("double commutant of S") είναι η μικρότερη von Neumann άλγεβρα που

περιλαμβάνει το S, $S \subseteq S''$. Μάλιστα, αν το S είναι von Neumann άλγεβρα, τότε $S = S''$. Επιπλέον, έστω $(\mathcal{H}, \pi)$ μια αναπαράσταση της C* άλγεβρας $\mathcal{A}$. Το σύνολο $\pi(\mathcal{A})''$ έχει δομή von Neumann άλγεβρας.

Έστω $\mathcal{R}$ μία von Neumann άλγεβρα και ω μία κατάσταση της $\mathcal{R}$. Η κατάσταση ονομάζεται *κανονική* αν υπάρχει τελεστής πυκνότητας ρ τέτοιος ώστε $\omega(A) = Tr(\rho A)$, $A \in \mathcal{R}$. Αν $(\mathcal{H}, \pi)$ είναι μία αναπαράσταση της C* άλγεβρας $\mathcal{A}$, τότε η κατάσταση ω ονομάζεται *π-κανονική* αν υπάρχει μια κανονική κατάσταση ϕ στη von Neumann άλγεβρα $\pi(\mathcal{A})''$ τέτοια ώστε $\omega(A) = \phi(\pi(\mathcal{A}))$, $A \in \mathcal{A}$. Το σύνολο των π-κανονικών καταστάσεων ονομάζεται *φύλλωμα* [folium] της αναπαράστασης π.

Η κλειστότητα, στην τοπολογία νόρμας, του κυρτού καλύματος των διανυσματικών καταστάσεων είναι το σύνολο των κανονικών καταστάσεων. Δηλαδή, κάθε κανονική κατάσταση ω μπορεί να γραφεί είτε ως κυρτός συνδυασμός διανυσματικών καταστάσεων, $\omega(A) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i (\psi_i, A\psi_i)$, $\psi_i \in \mathcal{H}, \|\psi_i\| = 1$, $A \in \mathcal{R}$, $N \in \mathbb{N}$ με $\sum_{i=1}^{N} \lambda_i = 1$, είτε ως όριο ακολουθιών κυρτών συνδυασμών διανυσματικών καταστάσεων στην τοπολογία της νόρμας.

Ένα διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ ονομάζεται *διαχωρίζον διάνυσμα* της von Neumann άλγεβρας $\mathcal{R}$ αν $A\psi = B\psi \Rightarrow A = B$ ή ισοδύναμα $A\psi = 0 \Rightarrow A = 0$.

4. Το πλέγμα των προβολικών τελεστών

Ένα ζεύγος $(\mathcal{L}, \leq)$ ονομάζεται *μερικώς διατεταγμένο σύνολο* αν μία ανακλαστική, μεταβατική και αντισυμμετρική σχέση $\leq$ ορίζεται μεταξύ των στοιχείων του $\mathcal{L}$. Το στοιχείο $A \in \mathcal{L}$ ονομάζεται *άνω (κάτω) φράγμα* ενός $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{L}$, αν $\forall B \in \mathcal{S},\ B \leq A$ (αντ. $B \geq A$). Το στοιχείο A είναι το *ελάχιστο άνω φράγμα (μέγιστο κάτω φράγμα)* του $\mathcal{S} \subseteq \mathcal{L}$ αν για κάθε A' που είναι άνω (κάτω) φράγμα του $\mathcal{S}$ ισχύει $A \leq A'$ (αντ. $A \geq A'$). Κάθε σύνολο $\mathcal{S}$ έχει το πολύ ένα ελάχιστο άνω (μέγιστο κάτω) φράγμα. Το μερικώς διατεταγμένο σύνολο $(\mathcal{L}, \leq)$ ονομάζεται *πλέγμα*

αν για κάθε δύο στοιχεία A,B υπάρχει το ελάχιστο άνω φράγμα $A \vee B$ και το μέγιστο κάτω φράγμα $A \wedge B$ των A,B. Το πλέγμα λέγεται ότι έχει *μηδενικό στοιχείο* και *μοναδιαίο στοιχείο* αν υπάρχουν στοιχεία $0, I \in \mathcal{L}$ τέτοια ώστε $0 \le A$ και $A \le I$ για κάθε $A \in \mathcal{L}$. Ένα πλέγμα $(\mathcal{L}, \le)$ ονομάζεται *ορθοσυμπληρωμένο* αν ορίζεται στο $\mathcal{L}$ απεικόνιση $A \mapsto A^{\perp}$ με ιδιότητες: (i) $\left(A^{\perp}\right)^{\perp} = A$, (ii) αν $A \le B$ τότε $B^{\perp} \le A^{\perp}$ (iii) $A \wedge A^{\perp} = 0$, (iv) $A \vee A^{\perp} = I$.

Έστω $\mathcal{P}(\mathcal{H}) \subseteq \mathcal{B}(\mathcal{H})$ το σύνολο των προβολικών τελεστών σε ένα χώρο Hilbert $\mathcal{H}$ και P_1, P_2 δύο προβολικοί τελεστές στον $\mathcal{H}$ επί των κλειστών υποχώρων $\mathcal{H}_1, \mathcal{H}_2$ αντίστοιχα. Ορίζεται η σχέση μερικής διάταξης "$\le$" ως εξής: $P_1 \le P_2$ ανν $\mathcal{H}_1 \subseteq \mathcal{H}_2$. Κάθε οικογένεια $\{P_a\} \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{H})$ έχει ελάχιστο άνω φράγμα $\vee_a P_a$ που είναι ο προβολικός τελεστής που προβάλλει από τον $\mathcal{H}$ στον κλειστό υπόχωρο που γεννάται από το σύνολο $\cup_a \mathcal{H}_a$ όπου $\mathcal{H}_a = P_a \mathcal{H}$. Αντίστοιχα, υπάρχει το μέγιστο κάτω φράγμα $\wedge_a P_a$ που αντιστοιχεί στον κλειστό υπόχωρο $\cap_a \mathcal{H}_a$.Το ζεύγος $(\mathcal{P}(\mathcal{H}), \le)$ είναι πλέγμα. Ορίζεται στο $\mathcal{P}(\mathcal{H})$ η απεικόνιση $P \mapsto P^{\perp}$ όπου ο προβολικός τελεστής $P^{\perp}$ προβάλλει τα στοιχεία του $\mathcal{H}$ στον υπόχωρο που είναι ορθογώνιος με τον $P\mathcal{H}$, δηλαδή $P^{\perp}\mathcal{H} = \{\psi \in \mathcal{H} : (\phi, \psi) = 0 \ \forall \phi \in P\mathcal{H}\}$. Το πλέγμα $(\mathcal{P}(\mathcal{H}), \le)$ είναι ορθοσυμπληρωμένο.

Έστω $A, B \in \mathcal{P}(\mathcal{H})$. Ισχύουν τα εξής: (i) $A \le B$ ανν $AB = BA = A$, (ii) $A^{\perp} = I - A$, (iii) αν $AB = BA$, τότε $A \wedge B = AB$ και $A \vee B = A + B - AB$, (iv) αν $A \le B$, τότε $B \wedge A^{\perp} = B - A$ και (v) $A \perp B$ ανν $AB = BA = 0$.

Το πλέγμα των προβολικών τελεστών μίας άλγεβρας von Neumann $\mathcal{R}$ γεννά την άλγεβρα υπό την έννοια ότι $\mathcal{P}(\mathcal{R})'' = \mathcal{R}$.

5. Τύποι αλγεβρών von Neumann

Έστω $\mathcal{R}$ μία von Neumann άλγεβρα. Το σύνολο, $Z = \mathcal{R} \cap \mathcal{R}' = \{A \in \mathcal{R} : AB = BA \ \forall B \in \mathcal{R}\}$ ονομάζεται *κέντρο* της $\mathcal{R}$. Μία von Neumann άλγεβρα της οποίας το κέντρο αποτελείται μόνο από πολλαπλάσια του ταυτοτικού τελεστή ονομάζεται *παράγων* (factor).

Έστω $\mathcal{R}$ μία von Neumann άλγεβρα και P_1, P_2 δύο προβολικοί τελεστές της άλγεβρας. Θα λέμε ότι αυτοί είναι *ισοδύναμοι* στην $\mathcal{R}$, $P_1 \sim P_2$, αν υπάρχει τελεστής $V \in \mathcal{R}$ τέτοιος ώστε $P_1 = V^*V$ και $P_2 = VV^*$. Σημειώνουμε ότι ο $V : \mathcal{H}_1 \to \mathcal{H}_2$ απεικονίζει τον υπόχωρο $\mathcal{H}_1 = P_1\mathcal{H}$ ισομετρικά στον $\mathcal{H}_2 = P_2\mathcal{H}$ και μηδενίζει τα διανύσματα που ανήκουν στο ορθογώνιο συμπλήρωμα του $\mathcal{H}_1$ - γι' αυτό ονομάζεται *μερική ισομετρία***.**

Αν $\mathcal{R}$ είναι μία von Neumann άλγεβρα και P_1, P_2 δύο προβολικοί τελεστές της άλγεβρας, θα λέμε ότι ο P_1 είναι *ασθενέστερος του* P_2 ($P_1 \precsim P_2$) αν υπάρχει προβολικός τελεστής P_0 τέτοιος ώστε να είναι ισοδύναμος με τον P_1 ($P_1 \sim P_0$) και περιέχεται στον P_2, $P_0 \le P_2$. Ο P_1 θα ονομάζεται *γνησίως ασθενέστερος του* P_2 αν επιπλέον ισχύει, $P_1 \neq P_2$. Αν $P_1 \precsim P_2$ και $P_2 \precsim P_1$, τότε $P_1 \sim P_2$.

Ένας προβολικός τελεστής P σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ ονομάζεται *πεπερασμένος* αν δεν υπάρχει προβολικός τελεστής ισοδύναμος με τον P που να προβάλλει σε κάποιο γνήσιο υποσύνολο του υποχώρου στον οποίο προβάλλει ο P. Δηλαδή, ο P είναι πεπερασμένος αν $P \sim P_0 \le P \Rightarrow P = P_0$.

Ένας προβολικός τελεστής P σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ ονομάζεται *άπειρος* αν υπάρχει προβολικός τελεστής P_0 που προβάλλει σε ένα γνήσιο υποσύνολο του $P\mathcal{H}$, $P_0 < P$ και $P_0 \sim P$.

Ένας προβολικός τελεστής P σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$ ονομάζεται *αμιγώς άπειρος* (*purely infinite*) αν δεν υπάρχει μη μηδενικός πεπερασμένος προβολικός τελεστής P_0 στην $\mathcal{R}$, τέτοιος ώστε $P_0 \le P$.

Ένας προβολικός τελεστής P ονομάζεται *ελαχιστικός* **(**minimal) σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$, αν δεν υπάρχει μη-μηδενικός προβολικός τελεστής που να προβάλλει σε κάποιο γνήσιο υποσύνολο του υποχώρου που προβάλλει ο P.

Ένας προβολικός τελεστής P ονομάζεται *αβελιανός* σε μία von Neumann άλγεβρα $\mathcal{R}$, αν η άλγεβρα $P\mathcal{R}P$ είναι μεταθετική.

Μία άλγεβρα von Neumann $\mathcal{R}$ ονομάζεται *πεπερασμένη, άπειρη* ή *αμιγώς άπειρη* αναλόγως με τις αντίστοιχες ιδιότητες του ταυτοτικού προβολικού τελεστή *I*.

Οι άλγεβρες von Neumann που είναι *παράγοντες* διακρίνονται στους εξής τύπους:

Μία άλγεβρα von Neumann $\mathcal{R}$ που είναι *παράγων* θα ονομάζεται *παράγων τύπου* I αν περιλαμβάνει έναν αβελιανό προβολικό τελεστή· *παράγων τύπου* II αν περιλαμβάνει έναν πεπερασμένο προβολικό τελεστή και δεν περιλαμβάνει αβελιανό προβολικό τελεστή· και *παράγων τύπου* III αν δεν είναι ούτε τύπου I ούτε τύπου II.

Στη γενική περίπτωση οι τύποι των von Neumann αλγεβρών ορίζονται ως εξής:

Μία άλγεβρα von Neumann $\mathcal{R}$ ονομάζεται *τύπου I* αν κάθε μη-μηδενικός προβολικός τελεστής E που ανήκει στο κέντρο της $\mathcal{R}$ $(E \in Z = \mathcal{R} \cap \mathcal{R}')$ περιέχει ένα μη-μηδενικό αβελιανό προβολικό τελεστή P που ανήκει στην $\mathcal{R}$ $(E \geq P)$. Η $\mathcal{R}$ λέγεται *τύπου II* , αν δεν έχει κανένα μη-μηδενικό αβελιανό προβολικό τελεστή P και κάθε μη-μηδενικός προβολικός τελεστής E που ανήκει στο κέντρο της $\mathcal{R}$ $(E \in Z = \mathcal{R} \cap \mathcal{R}')$ περιέχει έναν πεπερασμένο μη-μηδενικό προβολικό τελεστή P $(E \geq P)$. Τέλος, η $\mathcal{R}$ λέγεται *τύπου III* , αν δεν υπάρχει μη-μηδενικός πεπερασμένος προβολικός τελεστής στην $\mathcal{R}$ - δηλαδή, αν είναι αμιγώς άπειρη.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ ΔΕΥΤΕΡΟ

ΤΟ ΘΕΩΡΗΜΑ REEH-SCHLIEDER

Έστω μία τοπική κβαντική θεωρία σε χωρόχρονο Minkowski διατυπωμένη στην περιγραφή Haag-Araki,

$$\left\langle \mathbb{R}^4, \eta_{\mu\nu}, \mathcal{H}, O \mapsto \mathcal{R}(O), O \mapsto \Sigma(O), G, g \mapsto U_g \right\rangle,$$

για την οποία ισχύουν τα εξής αιτήματα: (α) ισοτονία, (β) η ασθενής προσθετικότητα, (γ) η συνθήκη του σχετικιστικού συναλλοίωτου, (δ) η συνθήκη φάσματος και (ε) η τοπική μεταθετότητα. Το θεώρημα Reeh-Schlieder (R-S) λέει:

> Για κάθε διάνυσμα $\psi \in \mathcal{H}$ αναλυτικό ως προς τον τελεστή της ενέργειας και για κάθε περιοχή O του χωροχρόνου Minkowski (φραγμένη ή μη), (1) το ψ είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}(O)$ αν και μόνο αν είναι κυκλικό για την καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$ και (2) αν η O έχει μη κενό αιτιακό συμπλήρωμα, $O' \neq \varnothing$, τότε το ψ είναι διαχωρίζον για την $\mathcal{R}(O)$.

Απόδειξη

Θα αποδείξουμε το θεώρημα για το διάνυσμα του κενού Ω[1]. Για την απόδειξη του (1) απαιτείται η ισχύς των αιτημάτων (α) - (δ), ενώ για να αποδείξουμε το (2) απαιτείται επιπλέον να ισχύει και το (ε).

(1) *Το διάνυσμα του κενού είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}(O)$ αν και μόνο αν είναι κυκλικό για την καθολική άλγεβρα $\mathcal{R}$.*

[1] Η απόδειξη του θεωρήματος στη γενική περίπτωση είναι παραλλαγή της απόδειξης που παραθέτουμε (βλ. Horuzhy 1990:26).

Το ευθύ της παραπάνω ισοδυναμίας είναι προφανές. Αν ένα διάνυσμα είναι κυκλικό για οποιαδήποτε υποάλγεβρα της καθολικής άλγεβρας $\mathcal{R}$, τότε προφανώς θα είναι κυκλικό και για την $\mathcal{R}$.

Για το αντίστροφο, δηλαδή ότι αν το Ω είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}$ τότε θα είναι κυκλικό και για την $\mathcal{R}(O)$, αρκεί να δείξουμε ότι το μοναδικό διάνυσμα που είναι ορθογώνιο σε κάθε διάνυσμα που προκύπτει από την δράση ενός τελεστή από την $\mathcal{R}(O)$ στο διάνυσμα του κενού, είναι το μηδενικό διάνυσμα . Δηλαδή,

$$\forall A \in \mathcal{R}(O),\ \left(\phi, A\Omega\right) = 0 \ \Rightarrow \phi = 0 \qquad (\Pi\ 2.1)$$

Διότι ισχύει ότι για κάθε σύνολο διανυσμάτων $\mathcal{D} \subseteq \mathcal{H}$, ο υπόχωρος $\mathcal{D}^{\perp\perp}$ που είναι ορθογώνιος στον ορθογώνιο υπόχωρο $\mathcal{D}^{\perp}$ του $\mathcal{D}$ είναι ίσος με την κλειστότητα του $\mathcal{D}$ (Jauch 1968:25).

$$\mathcal{D}^{\perp\perp} = \overline{\mathcal{D}} \qquad (\Pi\ 2.2)$$

Άρα αν ισχύει η (Π 2.1) τότε

$$\left\{A\Omega\right\}_{\mathcal{R}(O)}{}^{\perp} = \left\{0\right\} \Rightarrow \left\{A\Omega\right\}_{\mathcal{R}(O)}{}^{\perp\perp} = \left\{0\right\}^{\perp} = \mathcal{H} \overset{(A.2)}{\Rightarrow} \overline{\left\{A\Omega\right\}_{\mathcal{R}(O)}} = \mathcal{H}.$$

Παραπέρα, αν δείξουμε την εξής συνεπαγωγή

$$\forall A \in \mathcal{R}(O),\ \left(\phi, A\Omega\right) = 0 \ \Rightarrow\ \forall A \in \mathcal{R},\ \left(\phi, A\Omega\right) = 0\ , \qquad (\Pi\ 2.3)$$

τότε επειδή, εξ υποθέσεως, το Ω είναι κυκλικό για την $\mathcal{R}$, συνεπάγεται ότι $\phi = 0$.

Για να αποδειχθεί η (Π 2.3) το πρώτο βήμα είναι να δείξουμε ότι

$$\forall \phi \in \mathcal{H},\ \forall A_1, ..., A_n \in \mathcal{R}(O_1),\ \forall \left(x_1, ..., x_n\right) \in \mathbb{R}^{4n},\quad \left(\phi, A_1(x_1)...A_n(x_n)\Omega\right) = 0$$

$$(\Pi\ 2.4)$$

όπου O_1 μία ανοικτή περιοχή του $\mathbb{R}^4$ της οποίας η κλειστότητα περιέχεται στην περιοχή O, δηλαδή $\overline{O_1} \subset O$. Επίσης, $A_i(x_i)$ είναι η μετάθεση του στοιχείου A_i κατά

το τετράνυσμα x_i, για $i=1,\ldots,n$. Δηλαδή, $A_i(x_i)=U(x_i)A_iU(x_i)^*$, όπου $U(x_i)=\exp\{ix_iP\}$, ο μοναδιαίος τελεστής που αναπαριστάνει τις μεταθέσεις στον $\mathbb{R}^4$. Σημειώνουμε ότι λόγω της συνθήκης του σχετικιστικού συναλλοίωτου, $A_i(x_i)\in\mathcal{R}(O_1+x_i)$.

Ορίζουμε τη συνάρτηση,

$$F(x_1,\ldots,x_n)=\left(\phi, A_1(x_1)\ldots A_n(x_n)\Omega\right) \qquad (\Pi\ 2.5)$$

Λόγω της συνθήκης $\overline{O_1}\subset O$, συμπεραίνουμε ότι υπάρχει περιοχή $N_1\times\ldots\times N_n$ του $\mathbb{R}^{4n}$ τέτοια ώστε για κάθε $x_i\in N_i$ να ισχύει $O_1+x_i\subset O$ και λόγω της ισοτονίας $\mathcal{R}(O_1+x_i)\subset\mathcal{R}(O)$ για $i=1,\ldots,n$. Επειδή, όμως, $\forall A\in\mathcal{R}(O),\ \left(\phi,A\Omega\right)=0$ συμπεραίνουμε ότι υπάρχει περιοχή $N_1\times\ldots\times N_n$ του $\mathbb{R}^{4n}$ τέτοια ώστε $F(x_1,\ldots,x_n)=0$.

Η (Π 2.5) μπορεί να γραφεί στην εξής μορφή

$$F(x_1,x_2-x_1,\ldots,x_n-x_{n-1})=\left(\phi,e^{ix_1P}A_1e^{i(x_2-x_1)P}\ldots e^{i(x_n-x_{n-1})P}A_n\Omega\right). \qquad (\Pi\ 2.6)$$

Αποδεικνύεται ότι ο μετασχηματισμός Fourier της $F(x_1,x_2-x_1,\ldots,x_n-x_{n-1})$ υπάρχει και ορίζεται από την σχέση

$$F(x_1,x_2-x_1,\ldots,x_n-x_{n-1})=\int dk_1\ldots dk_n\ \widetilde{F}(k_1,\ldots,k_n)\exp\left\{-i\left(k_1x_1+\sum_{j=2}^{n}k_j(x_j-x_{j-1})\right)\right\}. \qquad (\Pi\ 2.7)$$

Ως συνέπεια της συνθήκης φάσματος η συνάρτηση $\widetilde{F}(k_1,\ldots,k_n)$ έχει την ιδιότητα να είναι παντού μηδέν εκτός από τα σημεία του $\mathbb{R}^4$ που βρίσκονται στον εμπρόσθιο κώνο φωτός: $(k_i)^2\geq 0,\ k_i^0\geq 0,\ i=1,\ldots,n$.

Με τη βοήθεια της συνάρτησης $\widetilde{F}(k_1,\ldots,k_n)$ ορίζουμε την ακόλουθη μιγαδική συνάρτηση πολλών μεταβλητών,

$$F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1}) = \int dk_1 ... dk_n \widetilde{F}(k_1, ..., k_n) \exp\left\{-i\left(k_1 z_1 + \sum_{j=2}^{n} k_j (z_j - z_{j-1})\right)\right\} \quad (\Pi\ 2.8)$$

στον σωλήνα $\mathcal{T}_n \subseteq \mathbb{C}^{4n}$,

$$\mathcal{T}_n = \left\{ \begin{array}{l} (z_1, ..., z_n) \in \mathbb{C}^{4n} : \mathrm{Re}\, z_i = x_i \in \mathbb{R}^4 \ \ (i = 1, ..., n) \\ \qquad\qquad \text{και} \qquad \mathrm{Im}\, z_1 \in V_+, \mathrm{Im}\,(z_j - z_{j-1}) \in V_+, \ (j = 2, ..., n) \end{array} \right\},$$

όπου V_+ ο εμπρόσθιος κώνος φωτός.

Ο περιορισμός του φανταστικού μέρους των μιγαδικών τετρανυσμάτων $z_1,\ z_j - z_{j-1}$ για $j = 2, ..., n$ στον V_+ καθώς και των τετρανυσμάτων $k_i,\ i = 1, ..., n$ στον $\overline{V}_+$ συνεπάγεται ότι το πραγματικό μέρος του εκθετικού στην (Π 2.8) δεν μπορεί να είναι θετικό. Από εδώ προκύπτει ότι το ολοκλήρωμα συγκλίνει και η $F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1})$ ορίζεται στο σωλήνα $\mathcal{T}_n \subseteq \mathbb{C}^{4n}$. Επίσης από το ίδιο επιχείρημα προκύπτει ότι οι παράγωγοι οποιασδήποτε τάξης της συνάρτησης $F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1})$ υπάρχουν, οπότε συμπεραίνουμε ότι:

Η συνάρτηση $F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1})$ *που ορίζεται με την* (Π 2.8) *είναι αναλυτική συνάρτηση στον σωλήνα* $\mathcal{T}_n \subseteq \mathbb{C}^{4n}$. *Επιπλέον, όταν* $\mathrm{Im}\, z_1 \to 0$ *και* $\mathrm{Im}\,(z_j - z_{j-1}) \to 0$ *η* $F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1})$ *τείνει στην* $F(x_1, x_2 - x_1, ..., x_n - x_{n-1})$ *που δίδεται από την* (Π 2.7).

Επειδή , η $F(x_1, x_2 - x_1, ..., x_n - x_{n-1})$ μηδενίζεται στην περιοχή $N_1 \times ... \times N_n$ του $\mathbb{R}^{4n}$ συμπεραίνουμε ότι $F(z_1, z_2 - z_1, ..., z_n - z_{n-1}) \to 0$ για $\mathrm{Re}\, z_i \in N_i \quad i = 1, ..., n$ και $\mathrm{Im}\, z_1 \to 0$ και $\mathrm{Im}\,(z_j - z_{j-1}) \to 0$ για $j = 2, ..., n$.

Από την αρχή της αναλυτικής συνέχειας αποδεικνύεται το εξής θεώρημα (Streater and Wightman 1964:84)

> Έστω D είναι ένα ανοικτό υποσύνολο του $\mathbb{C}^m$ που περιλαμβάνει ένα ανοικτό υποσύνολο E του $\mathbb{R}^m$. Υποθέτουμε ότι η F είναι μία αναλυτική συνάρτηση στο σύνολο $K = \left(\mathbb{R}^m + iL\right) \cap D$, όπου το σύνολο L είναι ένας ανοικτός κυρτός κώνος του $\mathbb{R}^m$, για την οποία ισχύει,
>
> $$\lim_{y \to 0} F(x + iy) = 0 \quad \text{για} \quad x \in E,$$
>
> τότε F=0 σε όλο το K.

Με βάση το παραπάνω θεώρημα επιλέγοντας το D ώστε να περιλαμβάνει ολόκληρο το $\mathbb{R}^{4n}$ και θέτοντας $E = N_1 \times ... \times N_n$ και $K = \mathcal{T}_n \cap D$ συμπεραίνουμε ότι

$$F(x_1, x_2 - x_1, ..., x_n - x_{n-1}) = 0 \quad \text{για } x_i \in \mathbb{R}^4 \quad \text{και} \quad i = 1, ...n. \qquad (\Pi\ 2.9)$$

Δηλαδή, αποδείχθηκε η (Π 2.4).

Για να περάσουμε από την (Π 2.4) στην απόδειξη της (Π 2.3) απαιτείται ένα δεύτερο βήμα που στηρίζεται στο αξίωμα της ασθενούς προσθετικότητας. Καταρχάς παρατηρούμε ότι η *- άλγεβρα $\bigcup_{x \in \mathbb{R}^4} \mathcal{R}(O_1 + x)$ παράγεται από μονώνυμα του τύπου, $A_1(x_1)...A_n(x_n)$. Άρα, λόγω της (Π 2.4), το τυχόν διάνυσμα ϕ είναι ορθογώνιο με το σύνολο των διανυσμάτων που προκύπτουν από τη δράση ενός στοιχείου της $\bigcup_{x \in \mathbb{R}^4} \mathcal{R}(O_1 + x)$ στο διάνυσμα του κενού Ω. Όμως, λόγω του αξιώματος της ασθενούς προσθετικότητας, η κλειστότητα της $\bigcup_{x \in \mathbb{R}^4} \mathcal{R}(O_1 + x)$ είναι η καθολική άλγεβρα – δηλαδή, $\left(\bigcup_{x \in \mathbb{R}^4} \mathcal{R}(O_1 + x) \right)'' = \mathcal{R}$. Άρα, το τυχόν διάνυσμα ϕ είναι ορθογώνιο με το σύνολο των διανυσμάτων $\mathcal{R}\Omega$ - δηλαδή, ισχύει η (Π 2.3).

Έτσι ολοκληρώνεται η απόδειξη του πρώτου μέρους του θεωρήματος Reeh-Schlieder.

Ας περάσουμε τώρα στην απόδειξη του δεύτερου μέρους:

(2) *Αν η* O *έχει μη κενό αιτιακό συμπλήρωμα,* $O' \neq \varnothing$*, τότε το διάνυσμα του κενού είναι διαχωρίζον για την* $\mathcal{R}(O)$.

Αρκεί να δείξουμε ότι αν η O έχει μη κενό αιτιακό συμπλήρωμα, $O' \neq \varnothing$ τότε ισχύει ότι

$$\forall A, B \in \mathcal{R}(O),\ \ A\Omega = B\Omega \Rightarrow A = B. \qquad (\Pi\ 2.10)$$

Έστω περιοχή $O_2 \subset O' \neq \varnothing$, τότε, λόγω της ισοτονίας, $\mathcal{R}(O_2) \subset \mathcal{R}(O')$ και λόγω της τοπικής μεταθετότητας $\mathcal{R}(O_2) \subset \mathcal{R}(O)'$. Δηλαδή, για κάθε $C \in \mathcal{R}(O_2)$ και $A, B \in \mathcal{R}(O)$ ισχύει $AC = CA$, $BC = CB$ και από την υπόθεση $\forall A, B \in \mathcal{R}(O),\ \ A\Omega = B\Omega$ προκύπτει ότι

$$\forall A, B \in \mathcal{R}(O),\ \forall C \in \mathcal{R}(O_2),\ \ (A - B)C\Omega = 0. \qquad (\Pi\ 2.11)$$

Όμως από το πρώτο μέρος του θεωρήματος Reeh-Schlieder το σύνολο $\mathcal{R}(O_2)\Omega$ είναι πυκνό στον $\mathcal{H}$, δηλαδή για κάθε $\phi \in \mathcal{H}$ υπάρχει ακολουθία $\{C_n\} \subseteq \mathcal{R}(O_2)$ τέτοια ώστε $\phi = \lim_{n\to\infty} C_n\Omega$. Άρα λόγω της (Π 2.11) προκύπτει ότι για κάθε $\phi \in \mathcal{H}$, $(A - B)\phi = \lim_{n\to\infty} (A - B)C_n\Omega = 0$, δηλαδή $A = B$.

Στο σημείο αυτό ολοκληρώνεται η απόδειξη και του δεύτερου μέρους του θεωρήματος.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Anscombe, G.E.M. 1981 [1971]. "Causality and Determination", στο *The Collected Philosophical Papers of G.E.M Anscombe vol.two: Metaphysics and the Philosophy of Mind*, Oxford: Basil Blackwell, σ.133-147.
2. Arageorgis, A. 1995. *Fields, Particles and Curvature: Foundations and Philosophical Aspects of Quantum Field Theory in Curved Spacetime*, PhD Dissertation, University of Pittsburgh.
3. Araki, H. 1999. *Mathematical Theory of Quantum Fields*, Oxford: Oxford University Press.
4. Arnord, V.I. 1978. *Mathematical Methods of Classical Mechanics*, New York, Heidelberg, Berlin: Springer-Verlag.
5. Aronson, J. 1971. "On the Grammar of 'Cause'", *Synthese* 22:414-430.
6. Avishai, Y. and Ekstein, H. 1972. "Causal Independence", *Foundations of Physics* 2 (4): 257-270.
7. Avishai, Y., Ekstein, H., Moyal, J. E. 1972. "Is the Maxwell field local?", *Journal of Mathematical Physics* 13: 1139-1145.
8. Bennett, J. 2003. *Learning from Six Philosophers: Descartes, Spinoza, Leibniz, Locke, Berkeley, Hume*, Oxford: Oxford University Press.
9. Berestetskii, V.B., Lifshitz, E.M., Pitaevskii, L.P. 1982. *Quantum Electrodynamics*, Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt: Pergamon Press.
10. Born, M. and Wolf, E. 1986: *Principles of Optics*, Oxford-New York-Toronto-Sydney-Paris-Frankfurt: Pergamon Press.
11. Bratteli, O. and Robinson, D. W. 1987 [1979]. *Operator Algebras and Quantum Statistical Mechanics I: C* - and W* -Algebras, Symmetry Groups, Decomposition of States.* Berlin, Heidelberg, New York: Springer–Verlag.
12. Bunge, M. 1979 [1959]. *Causality and Modern Science*, New York: Dover Publications, Inc.
13. Burgess, M. 2003. *Classical Covariant Fields, Cambridge*: Cambridge University Press.

14. Burgess, C.P. and Moore, G.D. 2007. *The Standard Model: A primer*, Cambridge: Cambridge University Press.
15. Busch, P. and Singh, J. 1998. "Lüders Theorem for Unsharp Quantum Measurements", *Physics Letters* A 249: 10-12.
16. Butterfield, J. 1989. "A space-time approach to the Bell Inequality", στο Cushing, J.T. and Mc Mullin, E. (eds), *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*, Notre Dame: University of Notre Dame Press, σ.114-144.
17. Butterfield, J. 1992. "David Lewis meets John Bell", *Philosophy of Science,* 59: 26-43.
18. Butterfield, J. 2006. "Against Pointillisme about Mechanics", *British Journal for the Philosophy of Science*, 57: 709-753.
19. Butterfield, J. 2007. "Stochastic Einstein Locality Revisited", *British Journal for the Philosophy of Science*, 58:805-867.
20. Cartwright, N. 1983. *How the Laws of Physics Lie,* Oxford, New York: Clarendon Press.
21. Choi, S. 2003. "The Conserved Quantity Theory of Causation and Closed Systems", *Philosophy of Science,* 70: 510-530.
22. Clauser, J. F. and Shimony, A. 1978. "Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications", *Reports on Progress in Physics* 41: 1881-1927.
23. Clifton, R. and Halvorson, H. 2001. "Entanglement and Open Systems in Algebraic Quantum Field Theory", *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 32: 1-31.
24. Davies, E. B. 1976. *Quantum Theory of Open Systems*, London: Academic Press.
25. Dowe, P. 1992. "Wesley Salmon's Process Theory of Causality and the Conserved Quantity Theory", *Philosophy of Science* 59:195-216.
26. Dowe, P. 1995. "Causality and Conserved Quantities: A Reply to Salmon" *Philosophy of Science* 62: 321– 33.
27. Dowe, P. 1999. "Good Connections: Causation and Causal Processes" στο Sankey, H. (ed), *Causation and Laws of Nature*, Dordrecht-Boston-London: Kluwer Academic Publishers, σ.247-263.
28. Dowe, P. 2000. *Physical Causation*. Cambridge: Cambridge University Press.

29. Driessler, W. 1977. “On the type of Local Algebras in Quantum Field Theory”, *Communications in Mathematical Physics* 53: 295-297
30. Earman, J. 1986. *A primer on determinism*, Dordrecht: D. Reidel Publishing Company.
31. Earman, J. 1987. “Locality, Non-Locality, and Action-at-a-Distance: A Skeptical Review of Some Philosophical Dogmas”, στο Achinstein, P. and Kargon R. (eds), *Theoretical Physics in the 100 Years since Kelvin’s Baltimore Lectures*. Cambridge, MA: MIT Press, σ. 449-490.
32. Earman, J. 1989. *World Enough and Space-Time*, Cambridge, Massachusetts and London: MIT Press.
33. Earman, J. 1995. “Το πρόβλημα του ντετερμινισμού στις φυσικές επιστήμες”, στο Salmon, M.H., Earman, J., Glymour, C., Lennox, J.G., Machamer, P., Mc Guire, J.E., Norton, J. D., Salmon, W.C., Schaffner, K.F. 2003 [1998]. *Εισαγωγή στη Φιλοσοφία της Επιστήμης,* Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, σ.317-369.
34. Earman, J. and Butterfield, J. (eds), 2007. *Philosophy of Physics*, Elsevier-North Holland, Netherlands 2007.
35. Einstein, A. 1952 [1905]. “On the electrodynamics of moving bodies”, στο Lorentz, H.A., Einstein, A., Minkowski, H., Weyl, H., *The Principle of Relativity*, μτφ Perrett, W. and Jeffery, G.B., New York: Dover Publications, Inc.
36. Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. 1935. “Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?”, *Physical Review* 47: 777-780.
37. Eisberg, R. and Resnick, R. 1985 [1974]. *Quantum Physics of Atoms, Molecules, Solids, Nucleus and Particles,* (2nd ed.) New York: John Wiley and Sons.
38. Ekstein, H. 1969. “Presymmetry II”, *Physical Review* 184: 1315-37.
39. Elmore, W.C. and Heald, M.A. 1985. *Physics of Waves*, New York: Dover Publications, Inc.
40. Emch, G.G. 1971. *Algebraic Methods in Statistical Mechanics and Quantum Field Theory*, Wiley-Interscience.
41. Fair, D. 1979: “Causation and the Flow of Energy”, *Erkenntnis* 14:219-250.
42. Florig, M. and Summers, S. J. 1997. “On the Statistical Independence of Algebras of Observables”, *Journal of Mathematical Physics* 38 (3): 1318-1328.

43. Fredenhagen, K. 1985a. "On the modular structure of local algebras of observables", *Communications in Mathematical Physics* 84: 79-89.
44. Fredenhagen, K. 1985b. "A Remark on the Cluster Theorem", *Communications in Mathematical Physics* 97: 461-463.
45. Friedman, M. 1983. *Foundations of Space-Time Theories: Relativistic Physics and Philosophy of Science*, Princeton, New Jersey: Princeton University Press.
46. Geroch, R. and Jang, P.S., 1975. "Motion of a small body in general relativity", *Journal of Mathematical Physics* 16 (1): 65-67.
47. Gohberg, I., Goldberg, S. and Kaashoek, M.A. 1993. *Classes of Linear Operators II*, Basel: Birkhauser.
48. Goodman, N. 1983 [1979]. *Fact, Fiction and Forecast*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts and London, England.
49. Goldstein, S., Luczak, A. and Wilde, I.F., 1999. "Independence in Operator Algebras", *Foundations of Physics* 29 (1): 79-89.
50. Gyenis, Z. and Rédei, M. (2010). "Characterizing common cause closed probability space" [Preprint] URL: http://philsci-archive.pitt.edu/id/eprint/5390 .
51. Haag, R. 1996 [1992]. *Local Quantum Physics: Fields, Particles, Algebras, Berlin*, Heidelberg and New York: Springer.
52. Haag, R. and Kastler, D., 1964. "An Algebraic Approach to Quantum Field Theory", *Journal of Mathematical Physics* 5: 848-61.
53. Haag, R. and Schroer, B. 1962. "Postulates of Quantum Field Theory", *Journal of Mathematical Physics* 3 (2): 248-256.
54. Halmos, P. R. 1951. *Introduction to Hilbert Space and the Theory of Spectral Multiplicity*, New York: Chelsea Publishing Company.
55. Halvorson, H. and Clifton, R. 2000. "Generic Bell Correlation Between Arbitrary Local Algebras in Quantum Field Theory", *Journal of Mathematical Physics* 41: 1711-1717.
56. Halvorson, H. and Müger, M. 2007. "Algebraic Quantum Field Theory", στο Earman, J. and Butterfield, J. (eds), *Philosophy of Physics*, Netherlands: Elsevier-North Holland, σ.731-922.
57. Hawking, S.W. and Ellis, G.F.R. 1973. *The Large Structure of Space-time*, Cambridge: Cambridge University Press.

58. Hellwig, K.E. Kraus, K. 1969. "Pure Operations and Measurements", *Communications in Mathematical Physics* 11: 214-220.
59. Hitchcock, C.R. 1995. "Discussion: Salmon on Explanatory Relevance" *Philosophy of Science 62*: 304– 20.
60. Hofer – Szabò, G., Rédei, M., Szabò, L., 1999. "On Reichenbach's Common Cause Principle and Reichenbach's notion of Common Cause", *The British Journal for the Philosophy of Science* 50: 377 – 99.
61. Hofer-Szabó, G. and Rédei, M. 2004. "Reichenbachian Common Cause Systems", *International Journal of Theoretical Physics* 43:1819-1826.
62. Hofer-Szabó, G. and Rédei , M. 2006. "Reichenbachian Common Cause Systems of Arbitrary Finite Size Exist", *Foundations of Physics* 36: 745-756.
63. Holevo, A. S. 2001. *Statistical Structure of Quantum Theory*, Berlin, Heidelberg: Springer.
64. Horuzhy, S. S. 1990 [1986]. *Introduction to Algebraic Quantum Field Theory.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
65. Hume, D. 1998 [1739]. *Πραγματεία για την Ανθρώπινη Νόηση*, μτφ Μ. Πουρνάρη. Αθήνα: Εκδόσεις Πατάκη.
66. Hume, D. 2006 [1740]. *Σύνοψη του βιβλίου Πραγματεία για την Ανθρώπινη Φύση*, στο *Κείμενα: Αυτοβιογραφικά, Γνωσιολογικά, Ηθικά*, επιμ Μ. Πουρνάρη, μτφ Μ. Πουρνάρη – Χ. Μητσοπούλου, Αθήνα: Εκκρεμές.
67. Jauch, J.M. 1968. *Foundations of Quantum Mechanics*, Reading-Massachusetts: Addison-Wesley Publ. Co.
68. Kadison, R. V. 1965. "Transformations of states in operator theory and dynamics". *Topology* 3, 177-198.
69. Kadison, R. V. and Ringrose, J. R., 1997 [1986]. *Fundamentals of the Theory of Operator Algebras. 2 vol.* American Mathematical Society.
70. Kay, B. 1992. "The Principle of Locality and Quantum Field Theory on (non Globally Hyperbolic) Curved Spacetimes", *Reviews in Mathematical Physics*, Special Issue: 167-195.
71. Kitcher, P. 1989. "Explanatory Unification and the Causal Structure of the World" στο *Minnesota Studies in the Philosophy of Science, 13: Scientific Explanation,* Kitcher, P. and Salmon, W. (eds.), Minneapolis: University of Minnesota Press, σ.410-505.

72. Knight, J. M. 1961. “Strict Localization in Quantum Field Theory”, *Journal of Mathematical Physics* 2 (4): 459-471.
73. Kraus K, 1964. “General quantum field theories and strict locality”, *Z. Phys., 181*: 1–12.
74. Landau, L.D. and Lifschitz, E.M., 2003. *The Classical Theory of Fields*: *Course of Theoretical Physics vol.2*, 4η ανανεωμένη έκδοση, Oxford: Butterworth-Heinemann.
75. Landau, L.J. 1969. “A note on extended locality”, *Communications in Mathematical Physics* 13:246-253.
76. Landau, L. J. 1987. “On the Violation of Bell’s Inequalities in Quantum Theory”, *Physics Letters A* 120 (2): 54-56.
77. Leibniz, G.W. 2006 [1714]. *Μοναδολογία*, μτφ Σ. Λαζαρίδης, Αθήνα: Εκκρεμές.
78. Lewis, D. 1973. *Counterfactuals*, Oxford: Blackwell Publishers.
79. Lewis, D. 1999. *Papers in Metaphysics and Epistemology*. Cambridge: Cambridge University Press.
80. Licht, A. L. 1963. “Strict Localization”, *Journal of Mathematical Physics* 4 (11):1443-1447.
81. Lindblad, G. 1976. “On the generators of quantum dynamical semigroups”, *Communications in Mathematical Physics* 48: 119-130.
82. Lindblad, G. 1999. “A general No-Cloning Theorem”, *Letters in Mathematical Physics* 47: 189–196.
83. Moore, M. 2009. “Introduction: the nature of singularist theories of causation”. *The Monist* 92.1:3-20.
84. Mühlhölzer, F. 1994. “Scientific Explanation and Equivalent Descriptions” στο Salmon, W. and Wolters, G. (eds), *Logic , Language and the Structure of Scientific Theories*, Pittsburgh: University of Pittsburgh Press, σ. 119-138.
85. Nagel, E. 1961. *The Structure of Science*, New York: Harcourt, Brace and World.
86. Norton, J. 2007. “Causation as Folk Science”, στο Price, H. and Corry, R. (eds), *Causation, Physics, and the Constitution of Reality: Russell’s Republic Revisited*, Oxford: Oxford University Press, σ.11-44.
87. Price, H. and Corry, R. (eds) 2007. *Causation, Physics, and the Constitution of Reality: Russell’s Republic Revisited*, Oxford: Oxford University Press.
88. Psillos, S. 1999. *Scientific Realism*. *How science tracks truth.* London: Routledge.

89. Psillos, S. 2002. *Causation and Explanation*, Acumen.

90. Ψύλλος, Σ. 2008. *Επιστήμη και Αλήθεια: Δοκίμια στη Φιλοσοφία της Επιστήμης*, Αθήνα: Εκδόσεις Οκτώ.

91. Rédei, M. 1993. "Are prohibitions of superluminal causation by Stochastic Einstein Locality and by absence of Lewisian Probabilistic Counterfactual Causality Equivalent? *Philosophy of Science* 60: 608-618.

92. Rédei, M. 1998. *Quantum Logic in Algebraic Approach*, Netherlands: Kluwer Academic Publishers.

93. Rédei, M. and Summers, S. J. 2002. "Local Primitive Causality and the Common Cause Principle in Quantum Field Theory", *Foundations of Physics* 32: 335-55.

94. Rédei, M. and Summers, S. J. 2005. "Remarks on Causality in Relativistic Quantum Field Theory", *International Journal of Theoretical Physics* 44:1029-1039.

95. Redhead, M. 1995. "More Ado about Nothing", *Foundations of Physics* 25 (1): 123-137.

96. Redhead, M. and Wagner, F. 1998. "Unified Treatment of EPR and Bell Arguments in Algebraic Quantum Field Theory", *Foundations of Physics Letters* 11(2): 111-125.

97. Reed, M. and Simon,, B. 1975. *Methods of Mathematical Physics II: Fourier Analysis, Self-Adjointness*, San Diego: Academic Publishers, Inc.

98. Reichenbach, H. 1954. *Nomological Statements and Admissible Operations*, Amsterdam: North Holland.

99. Reichenbach, H. 1958 [1927]). *The Philosophy of Space and Time*, New York: Dover Publications, Inc.

100. Reichenbach, H. 1999 [1956]). *The Direction of Time*, Mineola-New York: Dover Publications, Inc.

101. Reichenbach, H. 1978a [1932]. "The Principle of Causality and the possibility of its Empirical Confirmation" στο Reichenbach, M. and Cohen, R.S. (eds). *H. Reichenbach Selected Writings, 1909-1953* [vol. two], Dordrecht: D.Reidel Publishing Company, σ.345-371.

102. Reichenbach, H. 1978b [1929]. "The aims and Methods of Physical Knowledge" στο Reichenbach, M. and Cohen, R.S. (eds). *H. Reichenbach*

Selected Writings, 1909-1953 [vol. two], Dordrecht: D.Reidel Publishing Company, σ.120-225.

103. Reichenbach, H. 2006 [1926], "Response to a Publication of Mr. Hj. Mellin" στο Gimbel, S. and Walz, A. (eds). *Defending Einstein : Hans Reichenbach's writings on space, time, and motion*, Cambridge: Cambridge University Press, σ.205-213.

104. Robinson, D.W. 1966. "Algebraic aspects of relativistic quantum field theory", στο Chretien, M. and Deser, S. (eds) *Axiomatic Field Theory*, New York, London and Paris: Gordon and Breach, σ 389-516.

105. Rohrlich, F. 1965. *Classical charged particles: Foundations of their Theory*, Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.

106. Russell, B. 1920. *Introduction to Mathematical Philosophy,* London: George Allen & Unwin Ltd., NewYork: The Macmillan Co.

107. Russell, B. 2003 [1913]. "On the notion of cause" στο Mumford, S. (ed). *Russell on Metaphysics*: *Selections from the writings of Bertrand Russell,* London-New York: Routledge, σ.163-182.

108. Russell, B. 1992 [1948]. *Human Knowledge*, London: Routledge.

109. Sakai, S. 1971. *C*-Algebras and W*-Algebras*, Berlin-Heidelberg-New York: Springer-Verlag.

110. Salmon, M.H., Earman, J., Glymour, C., Lennox, J.G., Machamer, P., Mc Guire, J.E., Norton, J. D., Salmon, W.C., Schaffner, K.F. 2003 [1998]. *Εισαγωγή στη Φιλοσοφία της Επιστήμης,* Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

111. Salmon, W.C. 1966. *The Foundations of Scientific Inference,* Pittsburgh: University of Pittsburgh Press.

112. Salmon, W.C. 1984. *Scientific Explanation and the Causal Structure of the World*, Princeton: Princeton University Press.

113. Salmon, W.C. 1994. "Causality without Counterfactuals", *Philosophy of Science* 61: 297-312.

114. Salmon, W.C. 1997. "Causality and Explanation: A Reply to Two Critiques", *Philosophy of Science* 64: 461-477.

115. Salmon, W.C. 1998. *Causality and Explanation*, Oxford: Oxford University Press.

116. Salmon, W.C. (ed.) 2001, [1970]. *Zeno's Paradoxes*, Hackett Publishing Company, Inc. Indianapolis.

117. Smolin, L. 2006. *The Trouble with Physics: The Rise of String Theory, the Fall of a Science, and What Comes Next,* Boston-NewYork: Houghton Mifflin Company.

118. Spinoza, B. 1992 [1677]. *Ethics,* στο *Ethics, Treatise on The Emendation of the Intellect and Selected Letters*, μτφ. Samuel Shirley, Indianapolis-Cambridge: Hackett.

119. Stergiou, C. 2007. "Some remarks on Causal Processes in Classical Physics and in Local Quantum Physics", *αδημοσίευτο*.

120. Stergiou, C. 2009. "Two Comments on the Common Cause Principle in Algebraic Quantum Field Theory" *υπό δημοσίευση*.

121. Στεργίου, Χ. 2010. "Στατιστικές Συσχετίσεις και Συστήματα Κοινών Αιτίων" *αδημοσίευτο.*

122. Streater, R.F. and Wightman, A.S. 1964. *PCT, Spin and Statistics, and all that*, New York: W.A. Benjamin, Inc.

123. Summers, S. J. 1990. "On the Independence of Local Algebras in Quantum Field Theory", *Reviews in Mathematical Physics 2*: 201-47.

124. Summers, S. J. and Werner, R. 1985. "The Vacuum Violates Bell's Inequalities", *Physics Letters* A 110 (5): 257-259.

125. Summers, S. J. and Werner, R. 1987. "Bell's Inequalities and Quantum Field Theory. I. General setting", *Journal of Mathematical Physics* 28 (10): 2440-2447.

126. Summers, S. J. and Werner, R. 1988. "Maximal Violations of Bell's Inequalities for algebras of observables in tangent spacetime regions", *Annales de 'l I. H. P.* A 49 (2):215-243.

127. Summers, S. J. and Werner, R. 1995. "On Bell's Inequalities and Algebraic Invariants", *Letters in Mathematical Physics* 33: 321-334.

128. Suppes, P. 1999 [1957]. *Introduction to Logic*, Mineola- New York: Dover Publications, Inc.

129. Takesaki, M. 2000 [1979]. *Theory of Operator Algebras I*, Berlin, Heidelberg and New York: Springer.

130. Teller, P. 1995. *An Interpretive Introduction to Quantum Field Theory,* Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

131. Tooley, M. 1987. *Causation: A realist approach*, Oxford, New York: Clarendon Press.

132. Tooley, M. 2005. "Causation and Supervenience", στο Loux, M.J. and Zimmerman, D.W. (eds), *The Oxford Handbook of Metaphysics*. Oxford: Oxford University Press, σ.386-434.

133. Uffink J., 1999. "The Principle of the Common Cause faces the Bernstein Paradox", *Philosophy of Science*, 66: S512-S525.

134. van Dam, H. and Wigner, E.P. 1966. "Instantaneous and Asymptotic Conservation Laws for Classical Relativistic Mechanics of Interacting Point Particles", *Physical Review* 142 (4):838-843.

135. van Fraassen, B.C. 1989. "The Charybdis of Realism: Epistemological Implications of Bell's Inequality", στο Cushing J. T. and Mc Mullin E. (eds), *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*, Notre Dame: University of Notre Dame Press, σ.97-113.

136. Wald, R.M. (1984). *General Relativity*, Chicago: The University of Chicago Press.

137. Woodward, J. 1989. "The Causal Mechanical Model of Explanation", στο Kitcher, P. and Salmon, W. (eds.). *Minnesota Studies in the Philosophy of Science,* 13*: Scientific Explanation,* Minneapolis: University of Minnesota Press, σ.357-383.

138. Woodward, J. 2003. *Making Things Happen*. *A theory of Causal Explanation*, Oxford: Oxford University Press.

139. Wronski, L. and Marczyk, M., 2010. "Only Countable Reichenbachian Common Cause Systems Exist", *Foundations of Physics* 40 (8):1155-1160.

140. Yovel, Y. 1989. *Spinoza and Other Heretics: The Marrano of Reason,* Princeton: Princeton University Press.