

**Διερευνώντας τη Δυνατότητα μιας Ρεαλιστικής Θεώρησης
της Κβαντικής Φυσικής**

παλαιοί και νέοι μύθοι

Μαρία Κ. Παναγιωτάτου

Επιβλέπων: Αριστείδης Μπαλτάς

Μέλη Συμβουλευτικής Επιτροπής: Αραμπατζής Θεόδωρος

Καρακώστας Βασίλειος

Διαπανεπιστημιακό Μεταπτυχιακό Πρόγραμμα

‘Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας’

**Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (ΣΕΜΦΕ)
Τομέας Ανθρωπιστικών και Κοινωνικών Επιστημών και Δικαίου (ΑΚΕΔ), ΕΜΠ
&**

Τμήμα Μεθοδολογίας, Ιστορίας και Θεωρίας της Επιστήμης, ΕΚΠΑ

Αθήνα, 2011

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

| | |
|--|-----|
| ΠΡΟΛΟΓΟΣ | iv |
| 1. Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΚΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ | 1 |
| 1.1. Το πείραμα Stern-Gerlach | 3 |
| 1.2. Το πείραμα των δύο σχισμών | 17 |
| 1.2.1. Το πείραμα Young – η φύση του φωτός – ο δυϊσμός κύμα- σωματίδιο | 17 |
| 1.2.2. Ανάλυση του πειράματος των δύο σχισμών με ηλεκτρόνια | 22 |
| 1.3. Το επιχείρημα EPR (1935) | 27 |
| 1.3.1. Το κριτήριο πραγματικότητας των EPR ως μη ικανή συνθήκη ... | 37 |
| 1.3.2. Η απάντηση του Bohr στο επιχείρημα EPR – Συμπληρωματικότητα | 39 |
| 1.4. Το θεώρημα Bell (1964) | 44 |
| 1.4.1. Στοχαστική εκδοχή του θεωρήματος Bell | 46 |
| 1.4.2. Τοπικότητα – Διαχωρισσιμότητα: η κβαντική ως τοπική μη διαχωρίσιμη θεωρία | 51 |
| 1.5. Το θεώρημα Kochen-Specker (1967) | 59 |
| 1.5.1. Η αρχή της συναρτησιακής σύνθεσης | 63 |
| 1.5.2. Τρόποι αποφυγής της αντίφασης στο θεώρημα Kochen-Specker – Πλαισιακότητα | 67 |
| 1.6. Το ‘πρόβλημα’ της κβαντικής μέτρησης | 71 |
| 1.7. Συγκρότηση της έννοιας της ‘κβαντικότητας’ με οδηγό τον καινοτόμο χαρακτήρα της κβαντικής μέτρησης | 76 |
| 2. Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΚΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ | 81 |
| 2.1. Η ιστορία της κλασικής φυσικής | 82 |
| 2.1.1. 17 ^{ος} αιώνας, μηχανοκρατία & μαθηματική περιγραφή. Καρτέσιος – Νεύτωνας | 83 |
| 2.1.2. 18 ^{ος} αιώνας, Lagrange – Laplace | 87 |
| 2.1.3. 19 ^{ος} αιώνας, ενέργεια – πεδίο | 90 |
| 2.1.4. 20 ^{ος} αιώνας, η κβαντική θεωρία στο προσκήνιο | 96 |
| 2.1.5. Σύνοψη της ιστορίας | 101 |
| 2.2. Η περιγραφή συστημάτων στην κλασική μηχανική | 104 |
| 2.2.1. Η έννοια της κλασικής κατάστασης συστήματος | 104 |
| 2.2.2. Ιδιότητες και φυσική περιγραφή | 105 |

| | |
|---|-----|
| 2.2.3. Επιστροφή στην κλασική έννοια της κατάστασης ενός συστήματος και της χρονικής της εξέλιξης | 109 |
| 2.3. Ανάλυση συγκεκριμένων θεμάτων | 113 |
| 2.3.1. Διαχωριστικότητα | 114 |
| 2.3.2. Αντικειμενικότητα στη μέτρηση – Αντικειμενικότητα και επιστήμη | 117 |
| 2.3.3. Αιτιοκρατία (ή ντετερμινισμός) – Αιτιότητα | 125 |
| 2.4. Συγκρότηση της έννοιας της ‘κλασικότητας’ βάσει των συγκεκριμένων θεμάτων που αναλύθηκαν | 147 |
| 3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΡΕΑΛΙΣΜΟΣ | 151 |
| 3.1. Η μεταφυσική θέση του επιστημονικού ρεαλισμού περί ανεξαρτησίας από τον νου | 152 |
| 3.1.1. Η ‘φύση’ της ανεξαρτησίας κατά τον ρεαλισμό | 154 |
| 3.1.2. Η αναφορά του ρεαλισμού στην καθορισμένη δομή του κόσμου | 159 |
| 3.2. Η υπαρκτική διάσταση στον ρεαλισμό και η σημασιολογική θέση του επιστημονικού ρεαλισμού | 169 |
| 3.2.1. Ο εξηγητικός ρόλος των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων | 172 |
| 3.3. Η γνωσιακή θέση του επιστημονικού ρεαλισμού | 174 |
| 3.3.1. Το επιχείρημα «δεν είναι θαύμα» | 176 |
| 3.3.2. Η εξηγητική ή απαγωγική υπεράσπιση του ρεαλισμού | 178 |
| 3.3.3. Ρεαλισμός και πρόοδος | 184 |
| 4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ– ΕΠΙΛΟΓΟΣ | 202 |
| ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ | 207 |

Κάποια φτερά, μια διαφορετική οργάνωση του αναπνευστικού συστήματος, που ίσως μας επέτρεπαν να διασχίσουμε την απεραντοσύνη, δεν θα μας χρησίμευαν σε τίποτε.

Γιατί αν πηγαίναμε στον Άρη ή την Αφροδίτη χρησιμοποιώντας τα ίδια αισθητήρια όργανα, τα πράγματα που θα βλέπαμε εκεί θα διέθεταν το ίδιο γήινο περίβλημα. Το μόνο αληθινό ταξίδι, το μόνο ελιξήριο νεότητας, δεν είναι να ταξιδέψουμε αναζητώντας καινούργια τοπία αλλά να αποκτήσουμε καινούργια μάτια, να δούμε το σύμπαν μέσα από το πρίσμα κάποιου άλλου, εκατό άλλων, να δούμε τα εκατό σύμπαντα που βλέπει ο καθένας τους, που είναι ο καθένας τους.

Αναζητώντας τον χαμένο χρόνο, V

M. Proust

(Μετάφραση Παύλος Α. Ζάννας & Παναγιώτης Πούλος)

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Όσοι και όσες έχουν ασχοληθεί συστηματικά με την εννοιολογική θεμελίωση της κβαντικής μηχανικής έχουν αναπόφευκτα βρει μπροστά τους το επίμαχο ζήτημα της ρεαλιστικής αντιμετώπισης της κβαντικής θεωρίας, τα καινοτόμα χαρακτηριστικά της οποίας θεωρήθηκε καλώς ή κακώς ότι περιέπλεκαν τη σχέση της με τον επιστημονικό ρεαλισμό καθιστώντας αυτή τη σχέση τουλάχιστον ασαφή. Και λέμε ‘καλώς ή κακώς’ διότι επί τούτου δεν υπάρχει συναίνεση.

Θα εξηγήσουμε τι εννοούμε λέγοντας ότι δεν υπάρχει συναίνεση. Αρκετοί από τους φιλοσόφους που υπερασπίζονται τον επιστημονικό ρεαλισμό δηλώνουν συνήθως ότι η κβαντική μηχανική δεν έφερε στο προσκήνιο κάποιο νέο σημαντικό πρόβλημα όσον αφορά τις ρεαλιστικές τους θέσεις. Απαντούν δε σε όσους και όσες ισχυρίζονται το αντίθετο, ότι βιάζονται να κρίνουν και πως θα πρέπει να περιμένουμε τη θεωρία να εξελιχθεί ή να της δοθεί κάποια βαθύτερη αποδεκτή ερμηνεία πριν καταλήξουμε σε συμπεράσματα. Ο Smart (1963, σελ. 46), για παράδειγμα, γράφει ότι είναι πολύ πιθανό η μικροφυσική να μην βρίσκεται στο τελικό της στάδιο· και σημειώνει πως ό,τι κι αν ισχύει «υπάρχουν σοβαροί λόγοι που εναντιώνονται στην εγκατάλειψη με ελαφριά καρδιά της ρεαλιστικής άποψης για τις οντότητες που τίθενται από μια φυσική θεωρία: μπορούμε να παραμένουμε φιλοσοφικοί ρεαλιστές ακόμα κι αν παραδεχτούμε ότι υπάρχουν πράγματι πολύ παράξενες οντότητες». Ο Devitt (2005, σελ. 768n) πάλι, αναφέρει ότι η διαβόητη ‘ερμηνεία της Κοπεγχάγης’ αντιλαμβάνεται τον κβαντικό κόσμο –τις ιδιότητες συγκεκριμένα των κβαντικών

οντοτήτων και όχι τις ίδιες τις οντότητες– εξαρτώμενο από τον παρατηρητή, γεγονός που εάν ισχύει πλήττει την περί ανεξαρτησίας από τον νου διάσταση του ρεαλισμού. Επισημαίνει όμως στη συνέχεια πως «αυτή η ερμηνεία της θεωρίας δεν είναι υποχρεωτική» και πως πολλές άλλες ερμηνείες έχουν προταθεί οι οποίες δεν περιλαμβάνουν τέτοιου είδους εξάρτηση· αν και, όπως έχει πληροφορηθεί, όλες τους με τον ένα ή τον άλλο τρόπο είναι αλλόκοτες. Ο Devitt χαρακτηρίζει την κατάσταση «συναρπαστική και ανησυχητική συνάμα» και διερωτάται το εξής: σε τι συμπεράσματα μπορούμε να καταλήξουμε από αυτήν για τον επιστημονικό ρεαλισμό; Κατά τη γνώμη του δεν πρέπει να καταλήξουμε σε κανένα πριν προηγουμένως καταλαγιάσει η σκόνη.

Από την άλλη μεριά, άλλοι φιλόσοφοι –αρκετοί από αυτούς φιλόσοφοι της φυσικής– θεωρούν δεδομένο ότι η κβαντική θεωρία σήμανε το τέλος ή στην καλύτερη περίπτωση την ανάγκη αναθεώρησης του επιστημονικού ρεαλισμού. Για παράδειγμα, ο van Fraassen (1982/1989, σελ. 97) αναφέρει ότι το επιχείρημα της ανισότητας Bell διαψεύδει τη γνωσιολογική διάσταση του ρεαλισμού και οι ρεαλιστές θα πρέπει να αλλάξουν τις απόψεις τους περί γνωσιολογίας αν επιθυμούν να αποφύγουν τη διάψευση. Ο Fine (1996, σελ. 112) δηλώνει με έμφαση ότι ο ρεαλισμός έχει πεθάνει και ότι «ο θάνατός του επισπεύστηκε από τις διαμάχες για την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας, όπου η μη ρεαλιστική φιλοσοφία του Bohr φάνηκε ότι επικράτησε του παθιασμένου ρεαλισμού του Einstein».

Κατά τη γνώμη μας και οι δύο πλευρές έχουν αφετηριακά δίκιο. Δηλαδή και οι μεν που ισχυρίζονται ότι η κβαντική θεωρία δεν εγείρει κάποια νέα σημαντική πρόκληση για τον ρεαλισμό, αλλά και οι δε που θεωρούν ότι κάτι τέτοιο αν μη τι άλλο δεν είναι εξ αρχής ολοφάνερο και θα πρέπει να διερευνηθεί. Στην παρούσα διατριβή επιχειρείται αυτού του είδους η διερεύνηση προκειμένου να ξεκαθαριστεί το θολό τοπίο της σχέσης ρεαλισμού και κβαντικής φυσικής. Η ανάγκη για αποσαφήνιση θεωρούμε ότι τίθεται επιτακτικά έστω κι αν τελικώς επιβεβαιώσει την αισιοδοξία των επιστημονικών ρεαλιστών.

Πριν περάσουμε λοιπόν στο κύριο μέρος της διατριβής είναι χρήσιμο να γίνουν δύο διευκρινίσεις. Η πρώτη αφορά τη διαφορετική χρήση, στις περισσότερες των περιπτώσεων, του όρου ‘ρεαλισμός’ στη βιβλιογραφία της φιλοσοφίας της φυσικής σε σχέση με τη βιβλιογραφία της γενικότερης φιλοσοφίας της επιστήμης. Παραδείγματος χάριν, στον Redhead (1995, σελ. 41-2) συναντούμε την έννοια του ‘τοπικού ρεαλισμού’ που όπως περιγράφεται σημαίνει ότι «οι ατομικές και

υποατομικές οντότητες, το αντικείμενο μελέτης της κβαντικής μηχανικής, διαθέτουν ανά πάσα χρονική στιγμή ακριβείς καθορισμένες τιμές για όλες τις ιδιότητές τους, και ότι, επιπλέον, αυτές οι ιδιότητες δεν μπορούν να επηρεαστούν ακαριαία από επεμβάσεις, όπως για παράδειγμα μετρήσεις, στις οποίες υποβάλλονται άλλες μικροοντότητες ευρισκόμενες σε θέσεις του χώρου διαφορετικές από τις θέσεις εκείνης για της οποίας τις ιδιότητες γίνεται λόγος». Με άλλα λόγια, όπως διευκρινίζει ο Redhead, «ο ρεαλισμός συμπληρώνεται με την άρνηση της δυνατότητας της ακαριαίας δράσης από απόσταση». Ο ‘τοπικός ρεαλισμός’ του Redhead προκύπτει από τη σύζευξη τουλάχιστον δύο αρχών οι οποίες θα μας απασχολήσουν στη συνέχεια ιδιαιτέρως, της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ και της ‘αρχής της τοπικότητας’. Προς αποφυγή παρεξηγήσεων θα προτιμούμε να αναφερόμαστε απευθείας σε αυτές και να μην χρησιμοποιούμε την έκφραση ‘τοπικός ρεαλισμός’. Θα χρησιμοποιούμε τον όρο ‘ρεαλισμός’ αποκλειστικά για τη φιλοσοφική θέση –και τις διάφορες εκδοχές της– σύμφωνα με την οποία, σε αδρές γραμμές, ο κόσμος είναι ανεξάρτητος από τον νου και οι θεωρίες μας για αυτόν αποτελούν κυριολεκτικές περιγραφές του.

Τέλος, η δεύτερη διευκρίνιση αφορά τη χρήση του όρου ‘κλασική’ φυσική που στην παρούσα διατριβή για λόγους ευκολίας θα χρησιμοποιείται συχνά εν γνώσει μας αναχρονιστικά. Θα χαρακτηρίζουμε δηλαδή ‘κλασική’ τη φυσική που αναπτύχθηκε από την επιστημονική επανάσταση του 17^{ου} αιώνα έως και τον 20^ο αιώνα, ώστε να μπορούμε με μια λέξη να την διακρίνουμε από την αριστοτελική φυσική και την επαναστατική κβαντική φυσική.

Ευχαριστίες

Η σχέση μου με τη φιλοσοφία τυπικά ξεκίνησε πριν από 20 περίπου χρόνια όταν το 1991 ως τεταρτοετής φοιτήτρια του Φυσικού Τμήματος του Πανεπιστημίου Αθηνών παρακολούθησα το μάθημα της Ιστορίας και Φιλοσοφίας των Φυσικών Επιστημών από τους Α. Μπαλά, Κ. Γαβρόγλου και Μ. Ασημακόπουλο. Τους ευχαριστώ όλους για τον ενθουσιασμό με τον οποίο έκαναν το μάθημα εκείνη τη χρονιά. Έναν ενθουσιασμό που ώθησε από τότε πολλούς και πολλές να στραφούν στα ερευνητικά ενδιαφέροντα των διδασκόντων και να ενταχθούν στο πιλοτικό πρόγραμμα του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου για την Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας. Ένα πρόγραμμα στο οποίο είχα την τύχη να συμμετάσχω και να γευτώ, μαζί με όσους και όσες επίσης συμμετείχαν, τον πρωτοποριακό χαρακτήρα του στον ελληνικό πανεπιστημιακό χώρο καθώς και να νιώσω μέλος μιας

επιστημονικής κοινότητας που δεν περιοριζόταν στα ελληνικά σύνορα. Μαθαίνοντας τότε για τους πρωτεργάτες μιας νέας ιστορικο-φιλοσοφικής θεώρησης της επιστήμης που ήταν στο επίκεντρο των συζητήσεων εκείνη την εποχή, για μένα οι Α. Μπαλτάς, Κ. Γαβρόγλου, Μ. Ασημακόπουλος, Α. Κουτούγκος και ο αείμνηστος Π. Νικολακόπουλος ήταν οι Τ. Kuhn, P. Feyerabend, I. Lacatos και Κ. Popper της Ελλάδος.

Αφήνοντας κατά μέρος τις νοσταλγικές αναφορές, θέλω να ευχαριστήσω συγκεκριμένα για τη διατριβή μου τον Α. Μπαλτά που την επέβλεψε, μια και ο ρόλος του τόσο στην εμπλοκή μου με τη φιλοσοφία των επιστημών όσο και στην ολοκλήρωση αυτής της εργασίας ήταν καθοριστικός. Τον Β. Καρακώστα για την υπομονή και την πολύτιμη καθοδήγησή του στα θέματα της κβαντικής μηχανικής. Τον Θ. Αραμπατζή για τις καίριες επισημάνσεις του όσον αφορά τα ιστορικά κομμάτια της εργασίας και όχι μόνο. Τον Α. Αραγεώργη ο οποίος είδε το σύνολο σχεδόν της εργασίας και έκανε σημαντικές παρατηρήσεις ως πολύτιμο οιονεί μέλος της συμβουλευτικής επιτροπής μου. Είχα ακόμα την καλή τύχη να επωφεληθώ από την παρουσία στο ελληνικό πανεπιστήμιο του Σ. Ψύλλου, κατ' εξοχήν εκπροσώπου του επιστημονικού ρεαλισμού διεθνώς, ο οποίος, στη δική μου περίπτωση, έδρασε ως καταλύτης ώστε μέσα σε 8 μήνες περίπου να ολοκληρώσω ό,τι δεν κατάφερα μέσα σε 12 χρόνια. Ευχαριστίες οφείλω και στην Κ. Ιεροδιακόνου για τη δυνατότητα που μου έδωσε, στην αρχή ακόμα του διδακτορικού μου, να βρεθώ στην Οξφόρδη και να γνωρίσω φιλοσόφους της φυσικής διεθνώς ανεγνωρισμένους. Επίσης, θέλω να ευχαριστήσω την «ομάδα μας», συνδεδεμένη με δεσμούς που, αν και αρχικά φιλοσοφικού χαρακτήρα, μέσα στα χρόνια βάθynαν ουσιαστικά και μετατράπηκαν σε δεσμούς άρρηκτης φιλίας. Ευχαριστώ λοιπόν τη Δ. Χατζηδάκη, τον Β. Λιβάνιο, τη Μ. Λογιοτάτου και ιδιαιτέρως τον Β. Σακελλαρίου για την ακούραστη συμπαράσταση και τη συνεχή ενθάρρυνση που μου πρόσφερε.

Τέλος, αυτή η εργασία στάθηκε δυνατόν να ολοκληρωθεί χάρις στην καρτερικότητα και την ολόπλευρη υποστήριξη των γονιών μου, Ελένης και Κωνσταντίνου, στους οποίους και την αφιερώνω.

Μ.Π.

Μοσχάτο, Φεβρουάριος 2011

1. Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΚΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Ο προσφιλέστερος τρόπος παρουσίασης –τουλάχιστον έως πολύ πρόσφατα– εργασιών που καταπιάνονται με τη σύγκριση της κλασικής φυσικής θεωρίας με την κβαντική, περιελάμβανε σχεδόν πάντα την περιγραφή ενός ‘ιδανικού’ και ‘απόλυτα σύμφωνου’ με την καθημερινή διαίσθηση χαρακτήρα της πρώτης, και την ‘ασυνήθιστη’, ακόμα και ‘αντιφατική’, φύση της δεύτερης. Ο κβαντικός χαρακτήρας, αντιμέτωπος με τις κλασικές διαισθήσεις και προκαταλήψεις μας, προέκυπτε ανέκαθεν ‘παράδοξος’ και δημιουργούσε στους φυσικούς επιστήμονες την επιτακτική ανάγκη της αιτιολόγησής του μέσω μιας ικανοποιητικής ερμηνείας του συνόλου της κβαντικής θεωρίας. Μία ερμηνεία μάλιστα η οποία θα επιτύγχανε –μεταξύ άλλων– και τη συμμόρφωση της κβαντικής με το κλασικό πρότυπο, θεωρήθηκε από πολλούς και πολλές ως προϋπόθεση για τη ρεαλιστική της αντιμετώπιση, ταυτίζοντας σχεδόν –αυθαίρετα όπως θα υποστηριχθεί– τον ρεαλισμό με την κλασικότητα ή την ερμηνεία με τη ρεαλιστική ανάγνωση.

Στην παρούσα εργασία το επιδιωκόμενο είναι να δειχθεί ότι η κβαντική θεωρία – αλλά και κάθε άλλη φυσική θεωρία– μπορεί να αντιμετωπισθεί ρεαλιστικά ξέχωρα από την όποια συμμόρφωσή της με την κλασική θεωρία και ανεξαρτήτως ερμηνείας.¹ Η συνήθεια και η εξοικείωση με την κλασική φυσική μάς έστρεψε στο να θεωρούμε τον κλασικό χαρακτήρα ‘απόλυτα σύμφωνο’ με την καθημερινή διαίσθηση. Αποτελεί πασίγνωστο ιστορικό γεγονός ότι ακόμα και για την κλασική φυσική,² στις απαρχές της τα πράγματα δεν ήταν ρόδινα. Ο Γαλιλαίος τον 17^ο αιώνα αναγκάστηκε προς

¹ Ενώ στην παρούσα εργασία υποστηρίζεται ότι το αίτημα της ρεαλιστικής ανάγνωσης μιας αποδεκτής φυσικής θεωρίας είναι ανεξάρτητο της όποιας ερμηνείας της, στο Αραγεώργης (2005, σελ. 123-8) επιχειρείται, με αναφορά στην οντολογική ερμηνεία μιας φυσικής θεωρίας, η υποστήριξη του ισοδύναμου κατά κάποιον τρόπο αντίστροφου ισχυρισμού. Όπως περιγράφει χαρακτηριστικά ο Αραγεώργης τις προθέσεις του, «θα περιοριστώ στο να εντοπίσω μian αντίληψη περί επιστήμης που καθιστά το αίτημα της οντολογικής ερμηνείας μιας φυσικής θεωρίας φιλοσοφικά νόμιμο και ενδιαφέρον και στο να δείξω ότι αυτή η αντίληψη είναι ανεξάρτητη από σύγχρονες εκδοχές ρεαλισμού και αντιρεαλισμού». [Αραγεώργης (2005) σελ. 123]

² Ο όρος ‘κλασική φυσική’ για τη φυσική του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα είναι αναμφίβολα αναχρονιστικός. Παρόλα αυτά, όπως διευκρινίστηκε στον πρόλογο, τον χρησιμοποιούμε επειδή πρόθεσή μας είναι η διάκριση της κβαντικής φυσικής από τη φυσική που επικρατούσε πριν από αυτήν και που η ανάπτυξή της άρχισε με την επιστημονική επανάσταση του 17^{ου} αιώνα. Όπως επισημαίνει ο Staley (2008), ο οποίος διερευνά την καταγωγή και τις πρώτες χρήσεις του όρου, «έως το 1911, μια ευρύτερη έννοια της κλασικής θεωρίας είχε αρθρωθεί για να διακρίνει την κβαντική θεωρία από τη βάση από την οποία αναδύθηκε». [Staley (2008) σελ. 299]

υπεράσπισή της να γράψει τον περίφημο *Διάλογό*³ του και να αντιπαρατεθεί –με τις γνωστές συνέπειες για τον ίδιο– με όσους εκπροσωπούσαν την εποχή εκείνη το κατεστημένο στην επιστήμη και καταλόγιζαν στις αντιλήψεις του για τη φύση ακριβώς το αντίθετο από αυτό που πιστεύουμε σήμερα, δηλαδή ότι αντιφάσκουν με την καθημερινή εμπειρία.

Η εξοικειώσή μας με την κλασική φυσική πλούτισε, κατά κάποιον τρόπο, τη διαίσθησή μας όσον αφορά τον μακρόκοσμο. Η εξοικειώσή μας με την κβαντική φυσική πλουτίζει συνεχώς τη διαίσθησή μας στο πεδίο του μικρόκοσμου. Όσοι και όσες θεωρούν ότι μια φυσική θεωρία, η οποία περιγράφει με επιτυχία ένα κομμάτι του κόσμου που μας περιβάλλει, δεν μπορεί παρά να είναι ρεαλιστική –δηλαδή, σε αδρές γραμμές, η περιγραφή του κόσμου από αυτήν είναι ανεξάρτητη από τον νου και αληθής ή προσεγγιστικά αληθής– είναι πεπεισμένοι ότι η κβαντική θεωρία δεν αποτελεί την εξαίρεση στον κανόνα. Η κβαντική, ως η πιο επιτυχημένη σύγχρονή μας θεωρία, οφείλει να είναι ρεαλιστική. Οι όροι ίσως με τους οποίους εκπληρώνεται η ‘οφειλή’ αυτή ενδεχομένως να μην είναι ακόμα απολύτως σαφείς. Η κατεύθυνση στην οποία πρέπει να κινηθούμε για να τους διευκρινίσουμε «προϋποθέτει την αποσύνδεση της έννοιας του ρεαλισμού από εδραιωμένες ιδέες της συνήθους αντίληψης ή των αντίστοιχων εξιδανικεύσεων τους στο πεδίο της κλασικής φυσικής».⁴

Ο Ψύλλος, αναφερόμενος στη ‘στρατηγική’ του ρεαλιστή, παρουσιάζει ως πρώτο του μέλημα τη *σύγκλιση*, δηλαδή την ανάδειξη της ύπαρξης συνέχειας κατά την αλλαγή θεωριών, καθώς επίσης ότι η εν λόγω συνέχεια δεν είναι απλώς εμπειρική.⁵ Στην περίπτωση όμως της κβαντικής θεωρίας, η απαίτηση για συνέχεια με την κλασική φυσική την όποια υποχρεούται να δείξει ο ρεαλιστής, καθίσταται λιγότερο επιτακτική από το γεγονός ότι οι δύο θεωρίες αφορούν ως γνωστόν *μέχρι στιγμής* διαφορετικής κλίμακας κόσμους⁶ η κλασική τον μακρόκοσμο και η κβαντική τον μικρόκοσμο.

³ *Διάλογος αναφορικά με τα δύο βασικά συστήματα του κόσμου - Πτολεμαϊκό και Κοπερνίκειο* (1632).

⁴ Καρακώστας (2005a), σελ. 224.

⁵ Psillos (2007b), σελ. 15.

⁶ Δίνεται έμφαση στο ‘μέχρι στιγμής’ διότι σύγχρονες ερευνητικές εργασίες που γίνονται στην περιοχή της κβαντικής βαρύτητας επιδιώκουν να επεκτείνουν την κβαντική θεωρία στον μακρόκοσμο. Καθώς επίσης, προσεγγίσεις ‘αποσυνοχής’ (decoherence approach) στο κβαντικό πλαίσιο διερευνούν τον τρόπο ανάδυσης του μεσόκοσμου από τον μικρόκοσμο. Όταν οι επιδιωκόμενοι στόχοι επιτευχθούν –και αν επιτευχθούν– και η κβαντική φυσική επεκταθεί στον μακρόκοσμο ή συνδεθεί εύληπτα με τον μεσόκοσμο, ο ρεαλιστής θα μπορεί τότε να αναζητήσει τη συνέχεια μεταξύ κλασικής και κβαντικής θεωρίας υπό άλλους όρους –και πολύ πιθανόν ευνοϊκότερους– από τους σημερινούς.

Επομένως η σύγκλιση θα ήταν εφικτό να αναζητηθεί στην πρόμη περίοδο της ανάπτυξης της κβαντικής θεωρίας και κατ' επέκταση στη μετάβαση από την παλιά στη νέα κβαντική θεωρία.

Σε τούτο το πρώτο μέρος της διατριβής θα επιχειρηθεί η διερεύνηση του κβαντικού χαρακτήρα, όχι ως 'παράδοξου' και 'αντιφατικού', αλλά ως αυτού που είναι. Ενόσ χαρακτήρα που μας περιγράφει ένα κομμάτι του κόσμου για πρώτη φορά. Η αρχή θα γίνει με τα πειράματα⁷ που ίσως παρέχουν τις πιο σαφείς ενδείξεις των στοιχείων που τον συγκροτούν –και άρα όψεις μιας πραγματικότητας μη αντιληπτής έως πρότινος. Στη συνέχεια θα παρουσιαστούν τα πιο σημαντικά επιχειρήματα και θεωρήματα που συνέβαλαν –παρά την πολλές φορές αντίθετη πρόθεση όσων τα διατύπωσαν– στην οριοθέτησή του.

1.1. Το πείραμα Stern-Gerlach

Το πείραμα Stern-Gerlach παραδοσιακά θεωρείται ότι επέδειξε τη χωρική κβάντωση, ενώ η ορθή ερμηνεία του επιτεύχθηκε μόνο μετά την εισαγωγή της ιδέας του σπιν του ηλεκτρονίου. Πραγματοποιήθηκε με επιτυχία στη Φρανκφούρτη το 1922 από τους Γερμανούς φυσικούς Otto Stern (1888-1969) και Walther Gerlach (1889-1979), οι οποίοι το σχεδίασαν και το εκτέλεσαν με σκοπό να παρέχουν μια αποφασιστικής σημασίας απόδειξη για τη φύση της μαγνητικής συμπεριφοράς του ατόμου.

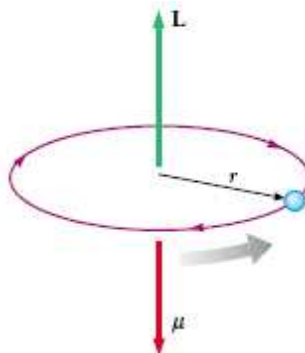
Σύμφωνα με το πλανητικό (κλασικής αντίληψης) μοντέλο του ατόμου, κάθε ηλεκτρόνιο περιστρέφεται γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Αποτέλεσμα της περιστροφής του αυτής και του γεγονότος ότι διαθέτει φορτίο –συνιστά ουσιαστικά έναν στοιχειώδη ρευματοφόρο βρόχο– είναι η δημιουργία μαγνητικής ροπής (σχήμα 1)⁸ και η εμφάνιση μαγνητικής συμπεριφοράς στο άτομο. Στο πείραμα Stern-Gerlach, μία δέσμη από άτομα αργύρου, τα οποία διαθέτουν 46 ηλεκτρόνια σε ζεύγη και ένα μονήρες ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στοιβάδα, περνάει μέσα από ένα ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο. Το εν λόγω πεδίο δημιουργεί ειδικός μαγνήτης, τύπου DuBois⁹, ο

⁷ Τα πειράματα τα οποία θα περιγράψουμε αναλυτικά είναι εκείνο των Stern και Gerlach καθώς και το πείραμα των δύο σχισμών, διότι, αν και δεν είναι ούτε τα πρώτα ούτε τα μοναδικά, είναι αυτά με τα οποία έχουν ασχοληθεί περισσότερο οι φιλόσοφοι της φυσικής.

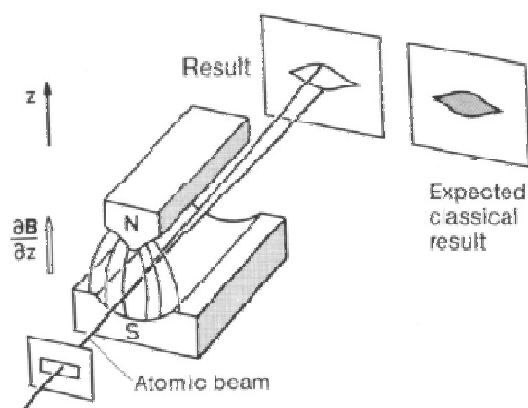
⁸ Serway & Jewett (2007), 6^η έκδοση σελ. 945.

⁹ Jammer (1966) σελ. 133, Hughes (1989) σελ. 2.

οποίος διαθέτει έναν πόλο σχήματος V με πολύ ισχυρό πεδίο κοντά σε αυτόν και έναν επίπεδο πόλο με το πεδίο κοντά του λιγότερο ισχυρό. (σχήμα 2)



Σχήμα 1: Το ηλεκτρόνιο κινείται σε κυκλική τροχιά ακτίνας r και έχει στροφορμή L και μαγνητική ροπή μ με αντίθετες κατευθύνσεις. Η φορά του ρεύματος που οφείλεται στην κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα είναι αντίθετη της κίνησης του ηλεκτρονίου.



Σχήμα 2: Ειδικός μαγνήτης του είδους που ανέπτυξε ο Henri duBois και που παραχώρησε η εταιρία Hartmann und Brawn στους Stern και Gerlach για την πραγματοποίηση του πειράματός τους. [Mehra & Rechenberg (1982) τόμος 1^{ος}, σελ. 440]

Η ένταση B του μαγνητικού πεδίου μεταβάλλεται κατά μήκος της κατεύθυνσής της, η οποία συμπίπτει με την κατεύθυνση του άξονα z και θεωρείται περίπου σταθερή. Κάθε ουδέτερο άτομο που διαθέτει μαγνητική ροπή μ , μόλις βρεθεί μέσα στο πεδίο, δέχεται δύναμη κατά τον άξονα z ίση με

$$F_z = \mu_z \frac{\partial B}{\partial z}$$

όπου μ_z είναι η συνιστώσα της μ στον άξονα z .

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία, ο προσανατολισμός των τροχιών του ηλεκτρονίου δεν είναι συγκεκριμένος και επομένως δεν είναι συγκεκριμένη ούτε η διεύθυνση του κάθετου άξονα στο επίπεδο αυτών. Κατά συνέπεια δεν υπάρχει προνομιακή διεύθυνση για τη διεύθυνση της μαγνητικής ροπής: μπορεί να σχηματίζει οποιαδήποτε αυθαίρετη γωνία θ με την κατεύθυνση \mathbf{B} του μαγνητικού πεδίου. Η κλασική πρόβλεψη, λοιπόν, για το πείραμα Stern-Gerlach ήταν η εξής: τα άτομα αργύρου, μετά την άσκηση της δύναμης από το ανομοιογενές μαγνητικό πεδίο και την έξοδό τους από αυτό, θα έδιναν κηλίδα μέγιστης έντασης –αφού συναντούσαν μια γυάλινη πλάκα– στο κέντρο της δέσμης. Αντιθέτως, η κβαντική θεωρία των Bohr-Sommerfeld προέβλεπε ότι ένα άτομο σε κατάσταση με κβαντικό αριθμό τροχιακής στροφορμής $\ell=1$ μπορεί να έχει μαγνητική ροπή με δύο μόνο διακριτές κατευθύνσεις σε σχέση με την κατεύθυνση του μαγνητικού πεδίου, μία παράλληλη και μία αντιπαράλληλη. Άρα, ανάλογα με τον προσανατολισμό της μαγνητικής ροπής σε σχέση με το μαγνητικό πεδίο, αναμενόταν είτε μια ελκτική είτε μια απωστική δύναμη και διαχωρισμός της δέσμης σε δύο συνιστώσες επιδεικνύοντας χωρική κβάντωση. Η παρατηρούμενη, ή όχι, απόκλιση της ατομικής δέσμης στη γυάλινη πλάκα θα επιβεβαίωνε μέσω του πειράματος τη μία από τις δύο θεωρίες. Ο ίδιος ο Stern περιγράφει την κατάσταση ως εξής:

«Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, η μ_z [δηλαδή, η μαγνητική ροπή στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου] μπορεί να είναι μόνο $\pm(e/2m_e)(h/2\pi)$. Επομένως, στην περίπτωση αυτή, η κηλίδα στην πλάκα υποδοχής θα διαχωριστεί σε δύο, έχοντας κάθε μία από αυτές το ίδιο μέγεθος αλλά τη μισή ένταση της αρχικής κηλίδας. ... Ακριβώς το αντίθετο συμβαίνει σύμφωνα με τη θεώρηση της κλασικής θεωρίας. Σε αυτήν η μ_z μπορεί να πάρει αυθαίρετες τιμές μεταξύ μηδέν και της κβαντοθεωρητικής τιμής $|\boldsymbol{\mu}|=(|e|/2m_e)(h/2\pi)$. Εάν συμβολίσουμε τη γωνία μεταξύ της $\boldsymbol{\mu}$ και της \mathbf{B} με θ , τότε $\mu_z=|\boldsymbol{\mu}|\cos\theta$. Ο αριθμός όμως των ατόμων, για τα οποία η θ έχει δεδομένη τιμή, είναι ανάλογος του $\sin\theta$. Συνεπώς, ο αριθμός των ατόμων έχει μια μέγιστη τιμή για $\theta=\pi/2$ Σύμφωνα με την κλασική θεωρία, για οποιαδήποτε ταχύτητα [των ατόμων της δέσμης] επομένως εμφανίζονται όλες οι δυνατές αποκλίσεις μεταξύ της τιμής μηδέν και της κβαντοθεωρητικής: και για κάθε ταχύτητα ο αριθμός των ατόμων, τα οποία αποκλίνουν με συγκεκριμένη γωνία, είναι μεγαλύτερος όσο μικρότερη είναι η απόκλιση. Ως εκ τούτου, η κηλίδα στην πλάκα υποδοχής απλώς θα

διευρυνθεί στο μαγνητικό πεδίο, αλλά θα διατηρήσει τη μέγιστη ένταση στη θέση τη αρχικής κηλίδας».¹⁰

Αν και η θεωρία των Bohr-Sommerfeld δεν ήταν ακριβής στο σύνολό της, περιείχε την ορθή υπόθεση περί χωρικής κβάντωσης –κι αυτό είναι ένα στοιχείο σύγκλισης της παλιάς με τη νέα κβαντική θεωρία–, η οποία συνετέλεσε στην ευνοϊκότερη αντιμετώπισή της έναντι της κλασικής θεωρίας μετά την εκτέλεση του πειράματος Stern-Gerlach στο οποίο παρατηρήθηκε όντως διαχωρισμός της δέσμης. Στη θεωρία τους είχε λανθασμένα θεωρηθεί ότι άτομα τροχιακής στροφορμής με $l=1$ θα οδηγούσαν σε διαχωρισμό της δέσμης σε δύο συνιστώσες. Η νέα κβαντική θεωρία αργότερα θα προβλέψει τρεις συνιστώσες μαγνητικής ροπής για $l=1$ και το αποτέλεσμα των Stern και Gerlach θα φανεί ότι εν μέρει διέψευδε και την κβαντική θεώρηση. Το ζήτημα θα λυθεί μετά την πρόταση το 1925 από τους Uhlenbeck (George Eugene, 1900-1988) και Goudsmit (Samuel Abraham, 1902-1978) να αποδοθεί στο ηλεκτρόνιο μια εγγενής στροφορμή¹¹, σπιν, με δύο μόνο δυνατές τιμές προβολής σε δεδομένο άξονα. Οπότε, στο πείραμα Stern-Gerlach, ο παρατηρούμενος διαχωρισμός της δέσμης των ατόμων αργύρου σε δύο συνιστώσες οφειλόταν στη μαγνητική ροπή του σπιν του μονήρους ηλεκτρονίου τους, με τιμές $+\frac{1}{2}\hbar$ ('σπιν-πάνω') ή $-\frac{1}{2}\hbar$ ('σπιν-κάτω') σε σχέση με την κατεύθυνση της έντασης του μαγνητικού πεδίου. Ως εκ τούτου τα ηλεκτρόνια συγκαταλέγονται στα 'σπιν- $\frac{1}{2}$ σωματίδια'.

Το πείραμα Stern-Gerlach, με την έμμεση παρατήρηση που παρείχε της εγγενούς ιδιότητας του ηλεκτρονίου που ονομάστηκε σπιν, αποτελεί ίσως την πιο κατηγορηματική απόδειξη κβάντωσης στην κβαντική μηχανική. Θα πρέπει όμως να επισημανθούν δύο πράγματα σε σχέση με αυτό ώστε να αποφευχθεί ο σχηματισμός λαθεμένων –κλασικής προέλευσης– αντιλήψεων. Το πρώτο, έχει να κάνει με τη φυσική σημασία του σπιν του ηλεκτρονίου. Δεν θα πρέπει να παρασυρθούμε και να θεωρήσουμε ότι το ηλεκτρόνιο όντως περιστρέφεται γύρω από τον εαυτό του. Η έννοια της περιστροφής για ένα σημειακό σωματίδιο δεν έχει νόημα. Οπότε, κι αν ακόμα αντιμετωπίσουμε το ηλεκτρόνιο

¹⁰ Stern όπως παρατίθεται στο Mehra & Rechenberg (1982) τόμος 1^{ος}, σελ. 439.

¹¹ Οι Uhlenbeck και Goudsmit πρότειναν την ιδέα του σπιν του ηλεκτρονίου με πρόθεση να περιγράψουν με συνέπεια την παρατηρούμενη σύνθετη δομή των ατομικών φασμάτων. Το πείραμα Stern-Gerlach, αν και είχε πραγματοποιηθεί πριν από το 1925, δεν συμπεριλαμβανόταν στα ερευνητικά ενδιαφέροντά τους.

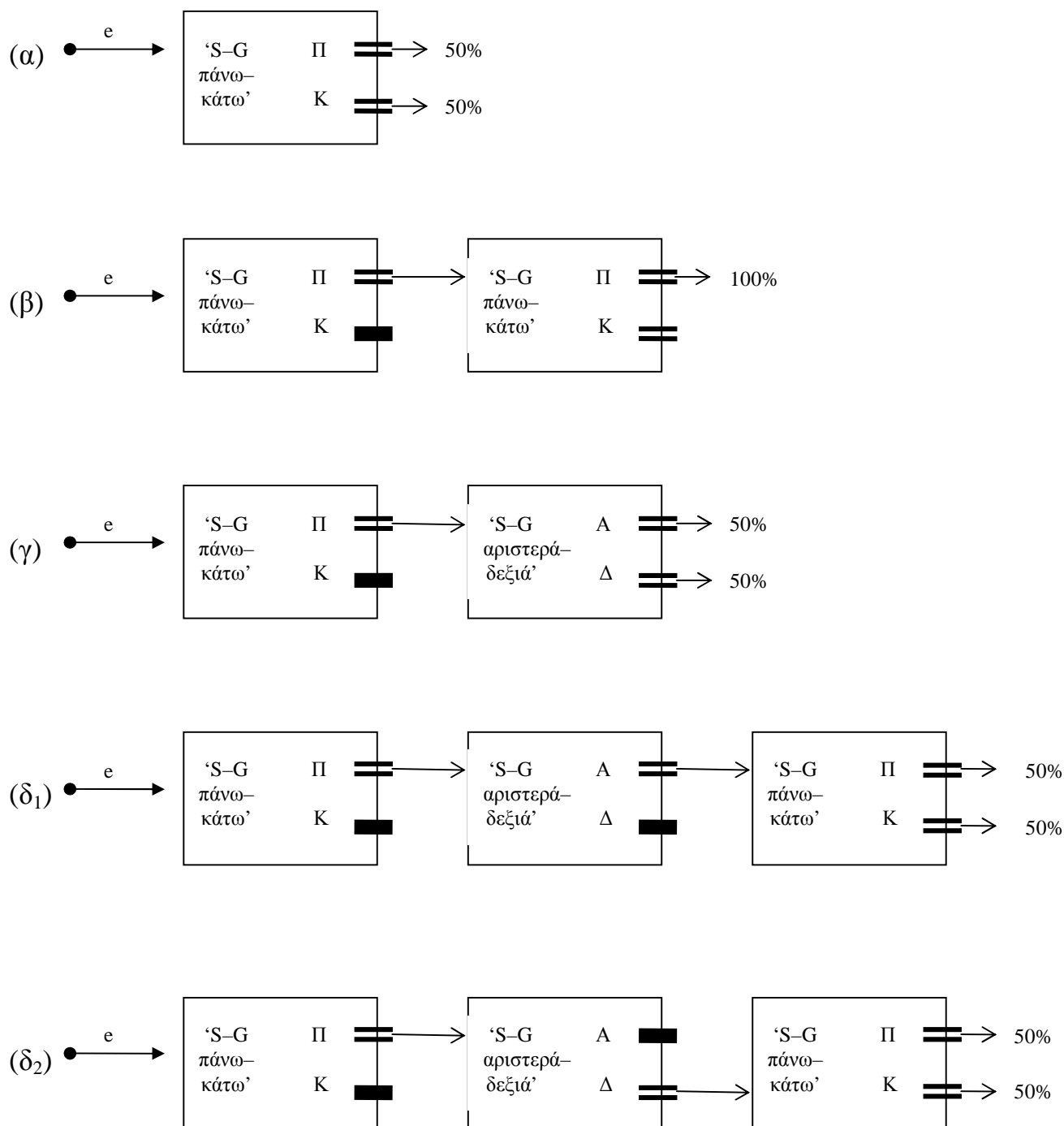
ως τέτοιο, παραβλέποντας τον κβαντομηχανικό χαρακτήρα του¹², λέμε ότι διαθέτει μια εγγενή στροφορμή σαν να περιστρεφόταν γύρω από τον εαυτό του. Το δεύτερο, έχει να κάνει με τον προσανατολισμό του σπιν των ηλεκτρονίων όταν δρα σε αυτά εξωτερικό μαγνητικό πεδίο. Η υπόθεση ότι, εισερχόμενα μέσα στο πεδίο κάποια από τα ηλεκτρόνια έχουν ‘σπιν-πάνω’ ή ‘σπιν-κάτω’ και το μόνο που κάνει το πεδίο είναι να τα διαχωρίσει ομαδοποιώντας τα, είναι λανθασμένη. Για να γίνει σαφέστερη η δεύτερη επισήμανση θα περιγράψουμε και θα σχολιάσουμε ορισμένες περιπτώσεις διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach (σχήμα 3).

Στην περίπτωση (α), μία δέσμη ηλεκτρονίων περνάει μέσα από μια συσκευή Stern-Gerlach κάθετα στη διεύθυνση του μαγνητικού πεδίου η οποία συμπίπτει με τον άξονα z. Για λόγους ευκολίας θα αναφέρουμε τη συσκευή αυτή ως ‘S-G, πάνω-κάτω’. Το 50% των ηλεκτρονίων της δέσμης μετά την έξοδο τους από τη συσκευή έχει σπιν-πάνω και το άλλο 50% έχει σπιν-κάτω. Αν μπλοκάρουμε την έξοδο των σπιν-κάτω ηλεκτρονίων, όπως γίνεται στην περίπτωση (β), και αφήσουμε τα σπιν-πάνω να περάσουν από μια δεύτερη συσκευή ‘S-G, πάνω-κάτω’, το 100% αυτών θα βγει από την έξοδο με σπιν-πάνω. Στην περίπτωση (γ) μπλοκάρουμε πάλι την έξοδο των σπιν-κάτω ηλεκτρονίων και διοχετεύουμε τα σπιν-πάνω ηλεκτρόνια σε μια νέα συσκευή Stern-Gerlach της οποίας ο προσανατολισμός έχει στραφεί 90° σε σχέση με την προηγούμενη και κατανέμει τα ηλεκτρόνια σε σπιν-αριστερά ή σπιν-δεξιά. Η σπιν-πάνω δέσμη των ηλεκτρονίων περνώντας μέσα από τη ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ θα δώσει 50% αυτών με σπιν-αριστερά και 50% με σπιν-δεξιά. Στις (δ₁) και (δ₂) περιπτώσεις βλέπουμε ότι αν μπλοκάρουμε είτε την σπιν-αριστερά είτε την σπιν-δεξιά δέσμη της περίπτωσης (γ) και διοχετεύσουμε τη μία από τις δύο ξανά σε μια συσκευή ‘S-G, πάνω-κάτω’, θα δώσει 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω, παρά το γεγονός ότι η δέσμη που εισήχθη αρχικά στη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ ήταν ‘καθαρή’ με σπιν-πάνω ηλεκτρόνια.

Ο Hughes, κατά την περιγραφή διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach, αναφέρεται σε παρόμοιες περιπτώσεις με τις παραπάνω υποστηρίζοντας ότι η στάση μας απέναντι σε αυτές περιλαμβάνει τουλάχιστον τέσσερις υποθέσεις οι οποίες απαιτείται να

¹² Στο κβαντομηχανικό πλαίσιο, όπως θα δούμε στη συνέχεια, τα ηλεκτρόνια, όπως και όλα τα θεμελιώδη συστατικά της ύλης, χαρακτηρίζονται από τον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό.

Σχήμα 3: Διαδοχικά πειράματα Stern-Gerlach



αξιολογηθούν προσεκτικά υπό το φως των πειραματικών αποτελεσμάτων. Οι τέσσερις αυτές υποθέσεις είναι οι εξής:¹³

- (1) Όταν αποδίδουμε μια αριθμητική τιμή σε μια φυσική ποσότητα για ένα σύστημα (όπως όταν λέμε ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν ενός ηλεκτρονίου είναι $+\frac{1}{2}\hbar$), μπορούμε να θεωρούμε αυτήν την ποσότητα ως ιδιότητα του συστήματος· δηλαδή, ο λόγος μας ότι το ηλεκτρόνιο *διαθέτει* την τάδε κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν, έχει νόημα.
- (2) Μπορούμε να αποδίδουμε μια τιμή για κάθε φυσική ποσότητα σε ένα σύστημα οποιαδήποτε δεδομένη χρονική στιγμή –για παράδειγμα, μπορούμε να αναφερόμαστε σε ένα άτομο αργύρου ως έχων και τις δύο τιμές σπιν-πάνω και σπιν-αριστερά.
- (3) Η συσκευή ταξινομεί τα άτομα σύμφωνα με τις τιμές μιας συγκεκριμένης ποσότητας (όπως οι τιμές της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν), με άλλα λόγια, σύμφωνα με τις ιδιότητες που αυτά κατέχουν.
- (4) Κατά την ταξινόμηση μιας συγκεκριμένης ιδιότητας από μια συσκευή, οι άλλες ιδιότητες του συστήματος παραμένουν αμετάβλητες.

Τα συμπεράσματα στα οποία οδηγούμαστε από τα διαδοχικά πειράματα Stern-Gerlach, μας ωθούν να αναθεωρήσουμε τις παραπάνω υποθέσεις ώστε να είναι συνεπείς με τα αποτελέσματά τους. Θα ασχοληθούμε με την αναθεώρηση της κάθε υπόθεσης ξεχωριστά. Η πρώτη είναι η ακόλουθη:

- (1') Όταν αποδίδουμε μια αριθμητική τιμή σε μια φυσική ποσότητα για ένα σύστημα που αλληλεπίδρασε με μια συσκευή (όπως όταν λέμε ότι η κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν ενός ηλεκτρονίου περνώντας μέσα από μια συσκευή 'S-G, πάνω-κάτω' είναι σπιν-πάνω), μπορούμε να θεωρούμε αυτήν την ποσότητα ως ιδιότητα που προέκυψε από την αλληλεπίδραση του συστήματος και της συσκευής· δηλαδή, δεν έχει νόημα να πούμε ότι το ηλεκτρόνιο έχει την τάδε κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν χωρίς να αναφερθούμε στη συσκευή αλληλεπίδρασης.

Ας δούμε πως υποστηρίζεται η παραπάνω αναθεωρημένη πρόταση από τις περιπτώσεις (α) έως (δ₂). Τα αποτελέσματα των (α) και (β), παρά το γεγονός ότι

¹³ Hughes (1989), σελ. 6.

ικανοποιούν εκτός από την (1') και την (1), δεν επαρκούν για να αποφύγουμε την αναθεώρηση. Το αν μπορούμε, ή όχι, να αποδώσουμε στο σύστημα ως προϋπάρχουσα ιδιότητά του την αριθμητική τιμή της ποσότητας που απέκτησε μετά την αλληλεπίδρασή του με μια συσκευή 'S-G, πάνω-κάτω' μας το καθιστούν σαφές οι περιπτώσεις (δ_1) και (δ_2). Σε αυτές, η δέσμη 100% σπιν-πάνω ηλεκτρονίων της αλληλεπίδρασης με την πρώτη συσκευή, μετά την αλληλεπίδρασή τους με την τρίτη συσκευή, δίνει 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω. Αν η ιδιότητα σπιν-πάνω αποτελούσε προϋπάρχουσα ιδιότητα του συστήματος, και όχι αποτέλεσμα που προέκυψε από την αλληλεπίδρασή του με συγκεκριμένη συσκευή, το ποσοστό στην έξοδο της τρίτης συσκευής θα ήταν 100% σπιν-πάνω. Εφόσον δεν είναι, το σπιν-πάνω δεν μπορεί να αποτελεί ιδιότητα της αρχικής κατάστασης του συστήματος και μόνο.

Η δεύτερη αναθεωρημένη υπόθεση είναι η εξής:

(2') Δεν μπορούμε να αποδίδουμε, οποιαδήποτε χρονική στιγμή, μια τιμή για κάθε φυσική ποσότητα ενός συστήματος, η οποία αποκτάται μόνο μετά την αλληλεπίδραση με συγκεκριμένη συσκευή –για παράδειγμα, μπορούμε να αναφερόμαστε στο ηλεκτρόνιο ως έχων σπιν- $1/2$, αλλά όχι ως έχων τις τιμές σπιν-πάνω και σπιν-αριστερά εφόσον αυτές είναι τιμές του σπιν που τις αποκτά τη στιγμή της αλληλεπίδρασής του με συγκεκριμένες συσκευές.

Και εδώ είναι φανερό ότι η αναθεώρηση της (2) σε (2') υποστηρίζεται από τις περιπτώσεις (δ_1) και (δ_2) ενώ δεν υπονομεύεται από τις (α), (β) και (γ). Αν μπορούσαμε κάθε χρονική στιγμή να αποδώσουμε τις τιμές σπιν-πάνω και σπιν-αριστερά σε κάποιο ηλεκτρόνιο που πέρασε από την πάνω έξοδο της δεύτερης συσκευής στην περίπτωση (δ_1), οι έξοδοι της τρίτης συσκευής δεν θα έδιναν 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω. Τις τιμές αυτές μπορούμε να τις αποδίδουμε στο ηλεκτρόνιο τη στιγμή της αλληλεπίδρασής του με τις κατάλληλες συσκευές, όχι όμως κάθε χρονική στιγμή.

Η τρίτη αναθεωρημένη υπόθεση είναι η εξής:

(3') Η συσκευή, αλληλεπιδρώντας με τα άτομα, τα ταξινομεί σύμφωνα με τις τιμές μιας συγκεκριμένης ποσότητας· με άλλα λόγια, σύμφωνα με τις ιδιότητες που κατέχουν μετά την αλληλεπίδρασή τους.

Και πάλι η αναθεωρημένη πρόταση (3') υποστηρίζεται από τις περιπτώσεις (δ_1) και (δ_2). Η συσκευή όντως ταξινομεί τα άτομα σύμφωνα με τις τιμές μιας συγκεκριμένης

ποσότητας. Οι τιμές όμως της συγκεκριμένης ποσότητας δεν προϋπάρχουν ως ιδιότητες του συστήματος αλλά κατέχονται από αυτό μετά την αλληλεπίδρασή του με τη συσκευή. Το ότι στην περίπτωση (β), η δεύτερη συσκευή ‘S-G, πάνω-κάτω’ επιβεβαιώνει το 100% τις εισαχθείσας σπιν-πάνω δέσμης από την πρώτη συσκευή, δεν μας δείχνει ότι το σπιν-πάνω αποτελεί προϋπάρχουσα ιδιότητα των ηλεκτρονίων που αποκάλυψαν οι δύο συσκευές, αλλά ότι η δεύτερη συσκευή επιβεβαιώνει την αλληλεπίδραση που επιτεύχθηκε από την πρώτη.

Τέλος, η τέταρτη αναθεωρημένη υπόθεση είναι η εξής:

- (4') Κατά την ταξινόμηση μιας συγκεκριμένης ιδιότητας από μια συσκευή, ιδιότητες που είχαν ανακύψει από την αλληλεπίδραση του συστήματος με άλλες συσκευές, διαταράσσονται.

Η υπόθεση (4) είναι ίσως η πιο ευάλωτη από όλες και η αναθεώρησή της αναπόφευκτη. Η σύγκριση της (β) με τις περιπτώσεις (δ₁) και (δ₂) μας καθοδηγεί στην αναζήτηση της αιτίας για τη διαφοροποίηση των αποτελεσμάτων μεταξύ της πρώτης και της τρίτης συσκευής ‘S-G, πάνω-κάτω’. Η αιτία δεν μπορεί παρά να είναι η παρεμβολή της συσκευής ‘S-G, αριστερά-δεξιά’, η οποία ανέτρεψε την προηγούμενη αλληλεπίδραση για να δημιουργήσει μια νέα. Το ότι η δεύτερη συσκευή στις περιπτώσεις (δ₁) και (δ₂) μετέβαλλε την αλληλεπίδραση των ηλεκτρονίων με την πρώτη συσκευή –και άρα την τιμή της φυσικής ποσότητας που συνδεόταν με αυτή– είναι ολοφάνερο από τα αποτελέσματα στην έξοδο της τρίτης συσκευής. Θα μπορούσε όμως κανείς να αναρωτηθεί το εξής: για ποιο λόγο μόνο τα μισά από τα ηλεκτρόνια με σπιν-πάνω αλλάζουν τιμή στην έξοδο της τρίτης συσκευής ενώ τα άλλα μισά περνούν ανεπηρέαστα; Το προαναφερθέν ερώτημα νομιμοποιείται μόνο εάν προϋποθέσουμε λανθασμένα δύο πράγματα. Πρώτον, εάν υποθέσουμε ότι η τιμή σπιν-πάνω αποτελεί προϋπάρχουσα ιδιότητα του συστήματος του κάθε ηλεκτρονίου, γεγονός που αναγκαστήκαμε να το αρνηθούμε και να διατυπώσουμε την (1'). Και δεύτερον, εάν υποθέσουμε ότι η αλληλεπίδραση που επέφερε την τιμή σπιν-πάνω δεν διαταράχτηκε από την αλληλεπίδραση με τη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’, γεγονός που αποκλείεται από την (4'). Από τη στιγμή που έχουμε αποδεχτεί την ισχύ τουλάχιστον των (1') και (4'), το ερώτημα ‘γιατί μεταβάλλεται το σπιν στον κατακόρυφο άξονα των μισών ηλεκτρονίων;’ δεν έχει νόημα. Το σπιν-πάνω υφίσταται μόνο μετά την αλληλεπίδραση με την πρώτη

συσκευή και η αλληλεπίδραση αυτή ‘διαλύεται’, για όλα τα ηλεκτρόνια, από τη νέα αλληλεπίδραση που επιβάλει η δεύτερη συσκευή. Οπότε, όταν η τρίτη συσκευή δίνει 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω, δεν αλλάζει κάποιες ιδιότητες που προϋπάρχουν, αλλά τις δημιουργεί ξανά –σύμφωνα με τις στατιστικές προβλέψεις της κβαντικής φυσικής– αλληλεπιδρώντας με τα συστήματα.

Όσα μόλις αναφέρθηκαν αφορούν την ύπαρξη ιδιοτήτων στην κβαντική μηχανική τις οποίες ονομάζουμε *ασύμβατες* (incompatible), δηλαδή ιδιότητες που αφορούν παρατηρήσιμα μεγέθη τα οποία δεν μπορούν να μετρηθούν ‘ταυτόχρονα’. Δύο παρατηρήσιμα μεγέθη A και B χαρακτηρίζονται *συμβατά* αν υπάρχει παρατηρήσιμο μέγεθος C και συναρτήσεις $f, g: \mathfrak{R} \rightarrow \mathfrak{R}$ με $A=f(C)$ και $B=g(C)$, διότι τότε μία μόνο μέτρηση του C αποδίδει ‘ταυτόχρονα’ τιμές στα A και B . Αποδεικνύεται ότι η συνθήκη συμβατότητας δύο παρατηρήσιμων μεγεθών ικανοποιείται στην περίπτωση που οι αντίστοιχοι αυτοσυζυγείς τελεστές A και B μετατίθενται –δηλαδή $AB-BA=0$.¹⁴

Η κατακόρυφη και η οριζόντια συνιστώσα του σπιν αποτελούν ασύμβατες ιδιότητες, γι αυτό και στα προαναφερθέντα πειράματα –όπου για λόγους ευκολίας περιγράφονταν ως ‘σπιν πάνω-κάτω’ και ‘σπιν αριστερά-δεξιά’ ιδιότητες– ο ‘ταυτόχρονος’ καθορισμός των τιμών τους δεν ήταν δυνατός. Το γεγονός αυτό αποτελεί παράδειγμα της περίφημης *αρχής της απροσδιοριστίας*¹⁵ του Heisenberg για την οποία θα έχουμε την ευκαιρία να πούμε πολύ περισσότερα στη συνέχεια του κεφαλαίου όπως και για τις ασύμβατες ιδιότητες.

Οι τέσσερις υποθέσεις του Hughes αναθεωρήθηκαν χωρίς να αναφερθούμε καθόλου στις περιπτώσεις (ε) και (στ) του σχήματος 4. Το τι υπαγορεύεται από αυτές θα αναζητηθεί ξέχωρα διότι τα αποτελέσματά τους απαιτούν μεγαλύτερη προσοχή. Θα πρέπει να εξετασθεί εάν αντιφάσκουν είτε μεταξύ τους είτε με τις προηγούμενες περιπτώσεις, καθώς και αν υπονομεύουν τις αναθεωρήσεις στις οποίες οδηγηθήκαμε. Θα σχολιάσουμε τις δύο αυτές επίμαχες περιπτώσεις ακολουθώντας τις περιγραφές δύο διαφορετικών συγγραφέων, του David Albert και του Lawrence Sklar.

¹⁴ Isham (1995) σελ. 115. Αραγεώργης (2006) σελ. 14.

¹⁵ Η αρχή της απροσδιοριστίας συνήθως καλείται αρχή της αβεβαιότητας. Στην παρούσα εργασία θα προτιμηθεί ο όρος ‘απροσδιοριστία’ από τον όρο ‘αβεβαιότητα’ διότι συμμερίζεται την άποψη ότι ο δεύτερος όρος προσδίδει στην αρχή χωρίς λόγο έναν ανεπιθύμητο υποκειμενικό χαρακτήρα.

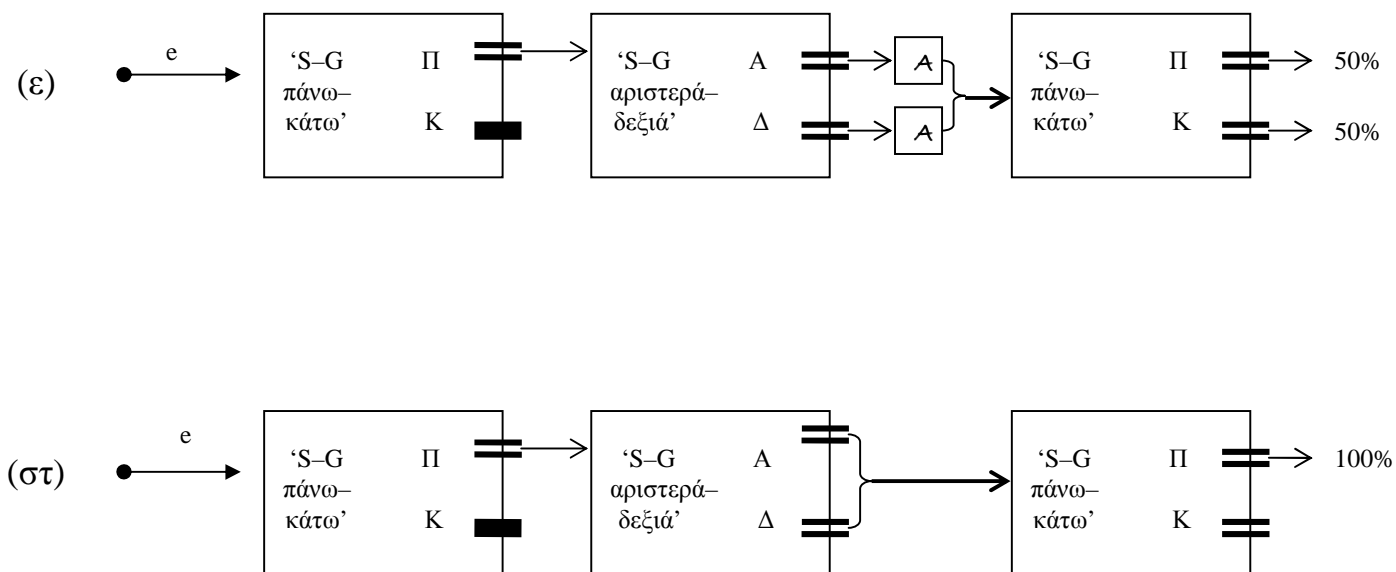
Η κατά Albert εκδοχή δύο περιπτώσεων διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach

Ο Albert¹⁶ αναφέρεται στην πειραματική διάταξη που φαίνεται στο σχήμα 5. Στη μια γωνία της διάταξης υπάρχει μια συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ και στην άλλη ένα ‘μαύρο κουτί’ στο οποίο συγκλίνουν οι δύο διαδρομές που ακολουθούν τα ηλεκτρόνια. Κάθε διαδρομή έχει σε κάποιο σημείο της έναν καθρέφτη στον οποίο προσπίπτουν τα σωματίδια αλλάζοντας μόνο την κατεύθυνση της κίνησής τους. Τη διαδρομή με την ένδειξη ‘α’, την ακολουθούν τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από τη συσκευή με σπιν-αριστερά, ενώ τη διαδρομή με την ένδειξη ‘δ’, την ακολουθούν τα ηλεκτρόνια που βγαίνουν από τη συσκευή με σπιν-δεξιά. Ο ρόλος του μαύρου κουτιού είναι η ένωση των δύο διαδρομών των ηλεκτρονίων που καταλήγουν σε αυτό σε μία, ‘α και δ’, χωρίς να μεταβάλλει την οριζόντια συνιστώσα του σπιν τους.

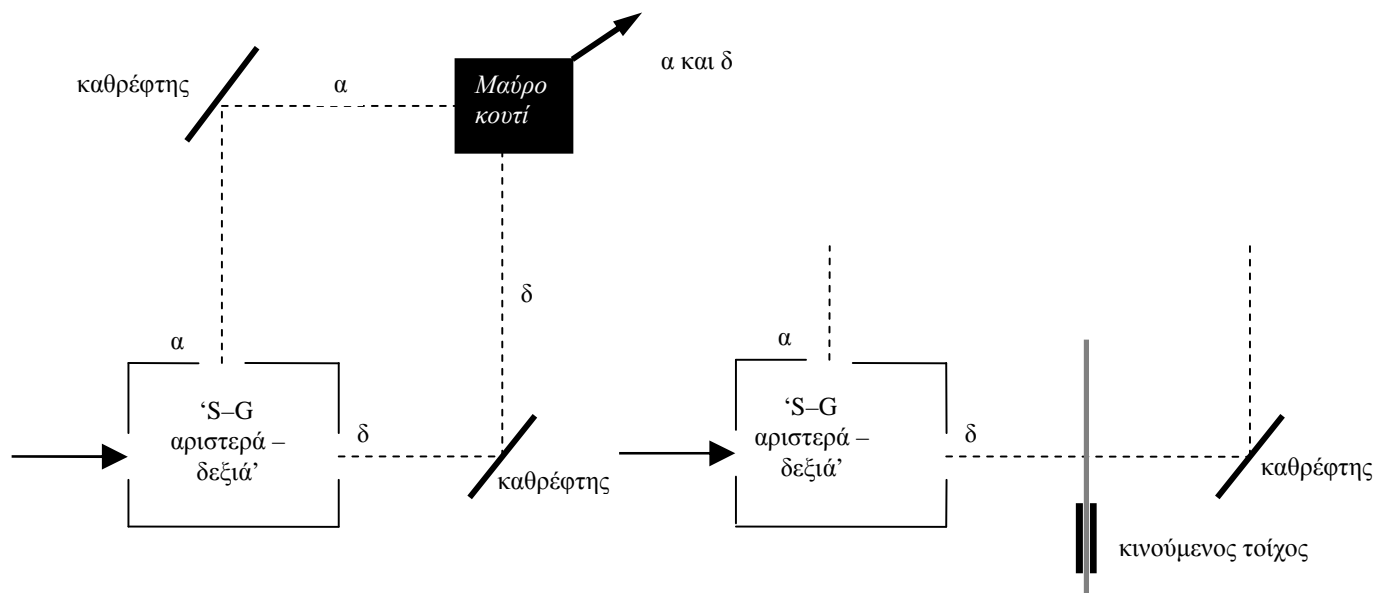
Με την παραπάνω διάταξη ο Albert περιγράφει το εξής πείραμα. Τροφοδοτούμε τη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ με σπιν-πάνω ηλεκτρόνια για τα οποία σκοπεύουμε να μετρήσουμε στο τέλος της διάταξης, και μετά την έξοδό τους ως ‘α και δ’, πάλι την κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν. Το αποτέλεσμα αυτής της τελευταίας μέτρησης μάς δίνει ξανά 100% σπιν-πάνω ηλεκτρόνια. Ο Albert θεωρεί ότι το αποτέλεσμα στην τελική έξοδο δεν είναι το αναμενόμενο. Θα παρουσιάσουμε το συλλογισμό του και θα εξηγήσουμε γιατί δεν συμφωνούμε.

Όπως αναφέρει ο Albert, αυτό που αναμένουμε αρχικά είναι το 50% αυτών των σπιν-πάνω ηλεκτρονίων να περάσει από τη διαδρομή σπιν-αριστερά και το άλλο 50% από τη διαδρομή σπιν-δεξιά. Στο σημείο αυτό δεν υπάρχει αντίρρηση, άλλωστε το ίδιο πράγμα υποδεικνύει και η περίπτωση (γ). Στη συνέχεια, εξηγεί ο Albert, περιμένουμε από το 50% των σπιν-αριστερά ηλεκτρονίων –αλλά και από το 50% των σπιν-δεξιά ηλεκτρονίων– μετά την έξοδό τους από το μαύρο κουτί και μετά τη μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν, να είναι χωρισμένα σε σπιν-πάνω και σπιν-κάτω. Κάτι τέτοιο δεν συμβαίνει, παραβιάζοντας, κατά τη γνώμη του, προηγούμενη διαπίστωση –από τις περιπτώσεις (δ₁) και (δ₂) – ότι η παρεμβολή μιας συσκευής ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ διασαλεύει την κατακόρυφη συνιστώσα. Ωστόσο, μόνο με την

¹⁶ Ο Albert [(1992), σελ. 7-11] χρησιμοποιεί στο βιβλίο του δύο υποθετικές ιδιότητες για τα ηλεκτρόνια που τις ονομάζει ‘σκληρότητα’ και ‘χρώμα’. Για λόγους ομοιογένειας της παρούσας εργασίας θα παρουσιαστούν όσα περιγράφει με τις ιδιότητες που έχουμε ήδη χρησιμοποιήσει.



Σχήμα 4: Οι περιπτώσεις (ε) και (στ) κατά Sklar



Σχήμα 5: Η κατά Albert εκδοχή δύο περιπτώσεων διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach.

παράβλεψη ενός σημαντικού στοιχείου μπορεί να οδηγηθεί κάποιος ή κάποια στο να θεωρήσει αναμενόμενη την κατά Albert αναμενόμενη κατάσταση. Το στοιχείο που παραβλέπεται από τον Albert είναι ότι στις περιπτώσεις (δ_1) και (δ_2) καθαρές δέσμες σπιν-αριστερά και σπιν-δεξιά, αντίστοιχα, ηλεκτρονίων, έδωσαν τα ποσοστά 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω. Τέτοιες δέσμες δεν διαθέτουμε στην περίπτωση του σχήματος 4, εφόσον οι δέσμες των δύο διαδρομών επανενώνονται στο μαύρο κουτί πριν εξέλθουν τα ηλεκτρόνια και μετρήσουμε ξανά την κατακόρυφη συνιστώσα τους. Η επανένωση της δέσμης καθιστά ξανά ασαφή την οριζόντια συνιστώσα, επαναφέροντας τα ηλεκτρόνια στην κατάσταση στην οποία ήταν όταν εισήλθαν στην αρχή του πειράματος στην συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’. Αυτή η αρχική τους κατάσταση ήταν ότι αποτελούσαν όλα σπιν-πάνω ηλεκτρόνια, και το 100%, μετά τη μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας στην έξοδο του μαύρου κουτιού, το επιβεβαιώνει. Η ‘επανένωση’ της δέσμης διατήρησε μία καθαρή κατάσταση που ονομάζουμε *υπέρθωση* (superposition) και που αποτελεί στην περίπτωση αυτή γραμμικό συνδυασμό των σπιν-αριστερά και σπιν-δεξιά ηλεκτρονίων.

$$|z_+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|x_+\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|x_-\rangle \quad (1.1)$$

Ο Albert, με σκοπό να ξεκαθαρίσει τα πράγματα, περιγράφει ένα νέο πείραμα (δεύτερη πειραματική διάταξη του σχήματος 5). Τοποθετεί στη διαδρομή ‘δ’ έναν μικρό τοίχο, ικανό να σταματά τα ηλεκτρόνια που διέρχονται από αυτήν. Ο μικρός αυτός τοίχος είναι κινητός, ώστε, ανάλογα με το τι επιθυμούμε, να μπορεί να τοποθετηθεί εντός ή εκτός της διάταξης μπλοκάροντας ή όχι αντίστοιχα τη διαδρομή ‘δ’. Το προηγούμενο πείραμα πραγματοποιείται ξανά έχοντας τοποθετήσει αυτή τη φορά τον μικρό τοίχο. Δηλαδή, τροφοδοτούμε τη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ με σπιν-πάνω ηλεκτρόνια και περιμένουμε το 50% αυτών να ακολουθήσει τη διαδρομή σπιν-αριστερά και να φτάσει στο μαύρο κουτί, ενώ το υπόλοιπο 50% που θα ακολουθήσει τη διαδρομή σπιν-δεξιά λόγω του τοίχου δεν θα φτάσει. Τι αναμένουμε όμως για το αποτέλεσμα της μέτρησης της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν των ηλεκτρονίων που φτάνουν και εξέρχονται από το μαύρο κουτί; Ο Albert ισχυρίζεται ότι περιμένουμε να δώσει 100% σπιν-πάνω ηλεκτρόνια –διότι, όπως λέει, αυτό ήταν το αποτέλεσμα του προηγούμενου πειράματος όπου όλα τα ηλεκτρόνια, είτε πήραν τη διαδρομή ‘α’ είτε πήραν τη διαδρομή ‘δ’, κατέληξαν με σπιν-πάνω– ισχυρισμό με τον οποίο ξανά θα διαφωνήσουμε. Ο Albert

παραβλέπει και πάλι το στοιχείο της επανένωσης το οποίο ήταν υπεύθυνο για το αποτέλεσμα που επικαλείται και που αυτή τη φορά απουσιάζει. Εφόσον στο μαύρο κουτί φτάνει μια καθαρή δέσμη σπιν-αριστερά ηλεκτρονίων, η δημιουργία της υπέρθεσης (1.1) είναι αδύνατη και αυτό που αναμένουμε σύμφωνα με την περίπτωση (δ_1), είναι το 50% αυτών να καταλήξουν με σπιν-πάνω και το άλλο 50% με σπιν-κάτω, και το πείραμα επιβεβαιώνει αυτή μας την προσδοκία. Αν είχαμε το αποτέλεσμα 100% σπιν-πάνω, θα γνωρίζαμε με βεβαιότητα ότι τα ηλεκτρόνια έχουν σπιν-αριστερά και σπιν-πάνω και θα παραβιαζόταν η αναθεωρημένη μας πρόταση (2') η οποία μας πληροφορεί ότι κάτι τέτοιο δεν γίνεται. Αντιθέτως, η κατάληξη του πειράματος επιβεβαιώνει την ισχύ της (2'), καθώς και την ύπαρξη ασύμβατων ιδιοτήτων όπου η κατηγορηματική γνώση της μιας δεν επιτρέπει τη γνώση της άλλης.

Περιπτώσεις (ε) και (στ) διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach κατά Sklar

Μέχρι στιγμής τα πράγματα δεν δείχνουν τόσο περίεργα για κάποιον ή κάποια που έχει αποδεχτεί τις προτάσεις (1') έως (4'). Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στις περιπτώσεις (ε) και (στ) του σχήματος 4 όπως περιγράφονται από τον Sklar.

Στην περίπτωση (στ) ο Sklar περιγράφει ένα πείραμα ανάλογο με αυτό του Albert στο σχήμα 5. Μία καθαρή, δηλαδή σπιν-πάνω, δέσμη που προέκυψε από μια συσκευή 'S-G, πάνω-κάτω', τροφοδοτεί μια συσκευή 'S-G, αριστερά-δεξιά', στις εξόδους της οποίας επανενώνουμε την αριστερή και δεξιά δέσμη στέλνοντας την επανενωμένη δέσμη σε μια δεύτερη συσκευή 'S-G, πάνω-κάτω'. Όπως ήδη γνωρίζουμε και έχουμε αιτιολογήσει παραπάνω, όλα τα ηλεκτρόνια θα βγουν από την τελευταία συσκευή με σπιν-πάνω. Ο Sklar σχολιάζει και αιτιολογεί με παρόμοιο τρόπο το αποτέλεσμα:

«Η αριστερή και δεξιά δέσμη εξερχόμενες από τη μηχανή αριστερά-δεξιά αλληλοσυσχετίζονται με έναν τρόπο που 'θυμάται' την αρχική καθαρή-πάνω φύση της εισερχόμενης δέσμης. Όταν οι δέσμες επανασυνδέονται, 'συμβάλλουν' μεταξύ τους (they 'interfere' with other) για να παράγουν, όχι ένα 'μείγμα' αριστερών και δεξιών σωματιδίων, αλλά μια δέσμη σωματιδίων όπου όλα είναι ρητά πάνω».¹⁷

Η περίπτωση (ε) είναι ίσως η δυσκολότερη ως προς την αιτιολόγησή της. Δείχνει ότι αν τοποθετήσουμε ανιχνευτές στις διαδρομές της αριστερής και της δεξιάς δέσμης για

¹⁷ Sklar (1992), σελ. 169.

να ταξινομηθούν τα ηλεκτρόνια στην έξοδό τους από τη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ ως αριστερά ή ως δεξιά σωματίδια και έπειτα επανενώσουμε τις δέσμες ώστε να τις προωθήσουμε σε μια συσκευή ‘S-G, πάνω-κάτω’, 50% αυτών θα εξέλθουν με σπιν-πάνω και 50% με σπιν-κάτω. Αυτή τη φορά, δηλαδή, η επανενωμένη δέσμη δεν ‘θυμάται’ την αρχική καθαρή-πάνω φύση της. Η επανένωση των δύο δεσμών δεν εκδήλωσε και σε αυτήν την περίπτωση την κατάσταση υπέρθεσης, αλλά δημιούργησε ένα μείγμα (mixture) καταστάσεων μακροσκοπικά διαχωρισμένων. Η διάκριση της περίπτωσης (ε) από αυτή της (στ) απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή. Πριν επιχειρήσουμε να διατυπώσουμε κάποια αιτιολόγηση για τη διαφοροποίησή τους, θα περιγράψουμε ένα ακόμα πείραμα όπου, υπό άλλες συνθήκες, παρατηρείται κάτι αντίστοιχο, το πείραμα των δύο σχισμών. Η αντιπαραβολή των δύο πειραμάτων ελπίζουμε ότι θα συμβάλει στην καλύτερη κατανόηση του κβαντικού χαρακτήρα.

1.2. Το πείραμα των δύο σχισμών

1.2.1. Το πείραμα Young - η φύση του φωτός - ο δυϊσμός¹⁸ κύμα-σωματίδιο

Το πρώτο πείραμα των δύο σχισμών αποδίδεται στον Thomas Young (1773-1829) το 1801. Ο Young πειραματίστηκε με την περίθλαση¹⁹ που υφίσταται το φως όταν στην πορεία του παρεμβληθεί ένα αντικείμενο. Συγκεκριμένα, διαπίστωσε ότι αν μπροστά από μια φωτεινή δέσμη τοποθετηθεί μια χάρτινη κάρτα, η παρατηρούμενη σκιά της, σε τοίχο ή πάνω σε κάποια άλλη επιφάνεια, αποτελείται από εναλλασσόμενες φωτεινές και σκοτεινές ζώνες. Οι ζώνες αυτές, όπως υποστήριξε ο Young, ήταν το αποτέλεσμα της συμβολής των τμημάτων φωτός που περνούσαν από κάθε πλευρά της κάρτας και ήταν δυνατόν να παρατηρηθούν ακόμα και σε περιπτώσεις που η ένταση του φωτός ήταν πολύ χαμηλή. Διαπίστωσε, επίσης, ότι με την τοποθέτηση ενός μικρού πετάσματος μερικές ίντσες από την κάρτα, ώστε το πέτασμα να μπορεί να δεχτεί στο περιθώριό του είτε τη μία είτε την άλλη άκρη της σχηματιζόμενης σκιάς, όλοι οι κροσσοί συμβολής που είχαν

¹⁸ Ο όρος ‘δυϊσμός’ που συχνά απαντά στην ελληνική βιβλιογραφία, αντιστοιχεί στον αγγλικό όρο ‘dualism’ και δεν είναι ικανοποιητικός διότι έχει συγκεκριμένο νόημα ως φιλοσοφικός όρος που δεν αποτυπώνει την ιδιομορφία των κβαντικών φαινομένων. Ωστόσο, τον διατηρούμε –ειδικά στην έκφραση ‘κυματοσωματιδιακός δυϊσμός’– διότι έχει παγιωθεί, ελπίζοντας ότι δεν θα προκληθεί σύγχυση.

¹⁹ Τα κύματα παρουσιάζουν φαινόμενα συμβολής και περίθλασης που προκύπτουν από την υπέρθεση δύο ή περισσότερων κυμάτων τα οποία προέρχονται από την ίδια πηγή. Η διαφορά μεταξύ συμβολής και περίθλασης είναι απλώς κλίμακας και όχι φυσικής συμπεριφοράς. Στην οπτική περίθλαση από στενή σχισμή, το άνοιγμα της σχισμής είναι της ίδιας τάξης μεγέθους με το μήκος κύματος του φωτός που υφίσταται περίθλαση.

προηγούμενως παρατηρηθεί στον τοίχο αμέσως εξαφανίζονταν, παρά το γεγονός ότι η πορεία του φωτός από την άλλη πλευρά της κάρτας δεν υφίστατο παρεμπόδιση. Η εμφάνιση του φαινομένου της συμβολής απαιτούσε την ανεμπόδιστη συμμετοχή και των δύο τμημάτων του φωτός. Ένα μόνο του δεν ήταν ικανό να αναπαράγει το φαινόμενο· ανικανότητα η οποία δεν θα μπορούσε να αποδοθεί σε ανεπαρκή ένταση του φωτός.²⁰

Ο Young χρησιμοποίησε το παραπάνω πείραμα, καθώς και άλλα παρόμοια, για να υπερασπιστεί μια κυματική αντίληψη για το φως η οποία ήδη από τον 17^ο αιώνα περίπου ανταγωνιζόταν σωματιδιακές αντιλήψεις.²¹ Σύμφωνα με τη σωματιδιακή θεώρηση –υποστηρικτής της οποίας υπήρξε και ο Νεύτωνας– το φως αποτελούνταν από μικρά υλικά σωματίδια που κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα. Αυτή ήταν και η επικρατούσα άποψη μέχρι τις αρχές περίπου του 19^{ου} αιώνα. Μετά τα πειράματα, όμως, του Young στην Αγγλία στις αρχές του ίδιου αιώνα, καθώς και του Fresnel (Augustin Jean Fresnel, 1788-1827) στη Γαλλία λίγα χρόνια αργότερα, τα δεδομένα θα αλλάξουν και η κυματική θεωρία για το φως θα υπερισχύσει σημαντικά της σωματιδιακής προσέγγισης. Με την έλευση της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας του Maxwell θα δειχτεί ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα και θα δημιουργηθεί η εντύπωση ότι ο αποκλεισμός των σωματιδιακών θεωριών ήταν πλέον οριστικός. Η νέα κυματική θεωρία για το φως θα περιγράψει τα αμιγώς οπτικά φαινόμενα με αξεπέραστη συνέπεια καλλιεργώντας την πεποίθηση ότι το μυστήριο της φύσης του φωτός έχει πια διαλευκανθεί.

Έμελλε όμως τα δεδομένα να αλλάξουν και πάλι στις αρχές του 20^{ου} αιώνα φέρνοντας την παλιά διαμάχη ξανά στο προσκήνιο. Υπεύθυνη αυτή τη φορά ήταν η μελέτη φαινομένων που αφορούσαν την αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη, με πιο χαρακτηριστικό παράδειγμα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Σύμφωνα με αυτό, παρατηρούνταν εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο όταν προσέπιπτε στην επιφάνεια του φωτεινή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ερμηνεία του φαινομένου από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία θα καταστεί αδύνατη. Η λύση θα δοθεί το 1905 από

²⁰ Young (1804), σελ. 2-3.

²¹ Θερμός εισηγητής μιας κυματικής θεωρίας για το φως τον 17^ο αιώνα υπήρξε ο Christiaan Huygens (1629-1695). Η κυματική θεωρία του όμως ήταν πολύ περιορισμένη για να καταφέρει στην εποχή του να επιβληθεί αποφασιστικά της σωματιδιακής. Το μόνο ίσως που εξηγούσε ικανοποιητικά ήταν η ευθύγραμμη διάδοση του φωτός, ενώ αδυνατούσε να αιτιολογήσει άλλα φαινόμενα που σχετίζονταν με αυτό όπως, για παράδειγμα, τα χρώματα. [Westfall (1977/1993), σελ. 85-90]

τον Einstein ο οποίος θα υποστηρίξει ότι τα φαινόμενα «που σχετίζονται με την εκπομπή ή το μετασχηματισμό του φωτός γίνονται πιο κατανοητά αν κανείς υποθέσει ότι η ενέργεια του φωτός κατανέμεται με ασυνεχή τρόπο στον χώρο»²² αντί του συνεχή τρόπου της κυματικής εικόνας. Η κβαντική υπόθεση που θα διατυπώσει –και που παρατίθεται παρακάτω– θα παρέχει τη δυνατότητα μιας νέας ερμηνευτικής οδού για φαινόμενα όπως το φωτοηλεκτρικό, η οποία θα στηρίζεται στην παραγκωνισμένη εκείνη την εποχή σωματιδιακή αντίληψη. Γράφει χαρακτηριστικά:

«Κατά την εδώ υπόθεσή μας, στη διάδοση μιας φωτεινής ακτίνας εκπεμπόμενης από μια σημειακή πηγή, η ενέργεια δεν κατανέμεται συνεχώς σε έναν ολοένα αυξανόμενο όγκο, αλλά αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό κβάντων ενέργειας, εντοπισμένων σε σημεία του χώρου, που κινούνται χωρίς να διαιρούνται και τα οποία μπορεί να απορροφηθούν ή να δημιουργηθούν μόνον ως πλήρεις μονάδες».²³

Η υπόθεση των κβάντων φωτός ή φωτονίων²⁴ του Einstein εξηγούσε απλά και χωρίς αντιφάσεις το μηχανισμό εξαγωγής των ηλεκτρονίων κατά το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η υπόθεση, δηλαδή, ότι η δέσμη φωτός που προσπίπτει στην επιφάνεια του μετάλλου αποτελεί ρεύμα φωτονίων ενέργειας $E=hn$ το καθένα –όπου h η σταθερά του Planck και ν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας– αιτιολογούσε, μέσω των συγκρούσεων που συντελούνταν μεταξύ φωτονίων και ηλεκτρονίων, την εκπομπή των ηλεκτρονίων. Συγκεκριμένα, ένα ηλεκτρόνιο αφού συγκρουστεί με ένα φωτόνιο απορροφά ολόκληρη την ενέργειά του ως ενιαία ποσότητα και την χρησιμοποιεί όλη ή μέρος της για την εξουδετέρωση του έργου εξαγωγής του μετάλλου.²⁵ ό,τι απομείνει – εάν απομείνει– θα αποτελεί την κινητική του ενέργεια κατά την έξοδό του από το μέταλλο. Η έξοδος του ηλεκτρονίου είναι δυνατή μόνο όταν η ενέργεια hn του φωτονίου που απορρόφησε είναι ίση ή μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής του μετάλλου, εφόσον δεν γίνεται να προσλάβει την απαιτούμενη ενέργεια σιγά-σιγά με συνεχή τρόπο, αλλά σε μια και μοναδική δόση από ένα φωτόνιο. Κατά συνέπεια, υπάρχει μια ελάχιστη συχνότητα για κάθε μέταλλο, όπου για τιμές μικρότερες αυτής, η ενέργεια των φωτονίων

²² Einstein (1905/2000), σελ. 166.

²³ Einstein (1905/2000), σελ. 166.

²⁴ Ο όρος 'φωτόνιο' προτάθηκε από τον G.N. Lewis το 1926. [Jammer (1966) σελ. 30]

²⁵ Έργο εξαγωγής του μετάλλου ονομάζεται η ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να απορροφήσει ένα ηλεκτρόνιο του μετάλλου για να μπορέσει να διαφύγει από αυτό.

δεν επαρκεί για να πετύχουμε εκπομπή ηλεκτρονίων από αυτό, όσο μεγάλη κι αν είναι η ένταση της ακτινοβολίας.²⁶

Σε έναν κόσμο όπου δεν θα ίσχυε η κβάντωση του φωτός όπως περιγράφεται παραπάνω, η σταθερότητα των ατομικών και μοριακών δομών θα ήταν αδύνατη. Τα ηλεκτρόνια των ατόμων και των μορίων θα απορροφούσαν συνεχώς ενέργεια από το φως οποιασδήποτε συχνότητας με αποτέλεσμα την πλήρη 'διάλυση' της ύλης. Η σταθερότητα εξασφαλίζεται μέσω της κβάντωσης.²⁷ Η αποδοχή της κβάντωσης του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, όπως και της κβάντωσης των ενεργειακών καταστάσεων των ατόμων, επιβάλλονται από φυσική αναγκαιότητα και κάνουν την σταθερότητα της ύλης να μη μοιάζει με θαύμα. Όπως αναφέρεται με έμφαση από τον Τραχανά, «χωρίς την κβάντωση δεν θα υπήρχαμε», και «η κβάντωση και η ατομική σταθερότητα δεν είναι παρά οι δύο όψεις του ίδιου νομίσματος».²⁸

Με την επαναφορά της σωματιδιακής αντίληψης –χωρίς όμως αυτή τη φορά να παραγκωνιστεί η αντίπαλη άποψη, η κυριαρχία της κυματικής θεωρίας στην ερμηνεία φαινομένων συμβολής και περίθλασης ουδέποτε αμφισβητήθηκε–, το ενδεχόμενο που διείδαν οι φυσικοί του 20^{ου} αιώνα για τη φύση του φωτός ήταν ο συγκερασμός των δύο αντιλήψεων σε μία, την *κυματοσωματιδιακή*. Η κλασική διχοτόμηση των οντοτήτων σε εντοπισμένες και αδιαίρετες, δηλαδή σωματιδιακού χαρακτήρα, και σε εκτεταμένες και διαιρετές, δηλαδή κυματικού χαρακτήρα, φάνηκε να καταρρέει. Η κατανόηση φαινομένων όπως η συμβολή στο πείραμα των δύο σχισμών του Young προϋπέθετε την αντιμετώπιση του φωτός ως κύμα, ενώ άλλες πειραματικές συνθήκες όπως αυτές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου προϋπέθεταν την αντιμετώπισή του ως σωματίδιο. Με άλλα λόγια, η ίδια φυσική οντότητα ανάλογα με τον τρόπο αλληλεπίδρασής της στο εκάστοτε φαινόμενο εκδήλωνε είτε τη μία είτε την άλλη φύση· γεγονός ανεπίτρεπτο στο κλασικό πλαίσιο, όχι όμως στο κβαντικό. Η παρουσίαση του φαινομένου Compton το 1923 – σκέδαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από φορτισμένα σωματίδια–, το οποίο επίσης θα σταθεί αδύνατο να εξηγηθεί από την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, θα

²⁶ Και εδώ, όπως και στην περίπτωση του πειράματος των δύο σχισμών του Young, η ένταση της ακτινοβολίας δε μετέχει ουσιαστικά στην εκδήλωση του φαινομένου.

²⁷ Τραχανάς (1985), σελ. 42-3.

²⁸ Τραχανάς (1985), σελ. 74-5.

ερμηνευθεί αβίαστα αποδιδόμενο σε ελαστικές κρούσεις φωτονίων με ηλεκτρόνια και θα παρέχει στη σωματιδιακή αντίληψη για το φως ακόμα πιο σταθερή πειραματική βάση.

Ο De Broglie (Louis Victor Pierre Raymond, Duc de Broglie, 1892-1987) στη διδακτορική του διατριβή το 1924 θα επιχειρήσει με την υπόθεση των υλικών κυμάτων, την υπόθεση δηλαδή ότι η κίνηση ενός σωματιδίου οποιουδήποτε είδους (φωτόνιο, ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο κλπ.) συνοδεύεται πάντα από τη διάδοση ενός κύματος, να επεκτείνει το κυματοσωματιδιακό δυϊσμό στην ύλη. Θα καταφέρει να δείξει ότι είναι δυνατό σε κάθε σωματίδιο ορμής $p=mv$ να αντιστοιχηθεί ένα μήκος κύματος λ ενός ‘υλικού’ πεδίου έτσι ώστε να προκύψει η γνωστή σχέση του $p=h/\lambda$.²⁹ Οι σχέσεις $E=hv$ και $p=h/\lambda$ –ή στην πιο ‘κομψή’ μορφή τους $E=\hbar\omega$ και $p=\hbar k$, όπου ω η κυκλική συχνότητα, k ο κυμαριθμός και $\hbar=h/2\pi$ – συνδέοντας τα κυματικά χαρακτηριστικά, συχνότητα (ν) και μήκος κύματος (λ), με τα σωματιδιακά, ενέργεια (E) και ορμή (p), θα συμβάλλουν στην ολοκλήρωση της κυματοσωματιδιακής περιγραφής τόσο των φωτονίων όσο και των μαζικών σωματιδίων.

Οι απόψεις του De Broglie, όντας ριζοσπαστικές, δεν βρήκαν αμέσως την αποδοχή που τους άξιζε. Ο Einstein, όμως, με το που τις πληροφορήθηκε από τον Paul Langevin, αντιλήφθηκε αμέσως τη σπουδαιότητά τους και συνέβαλε αποφασιστικά για τη διάδοσή τους στο σύνολο των φυσικών.³⁰ Ως εκ τούτου, η πειραματική επιβεβαίωσή τους λίγα χρόνια αργότερα δεν θα αργήσει να έρθει. Δύο ανεξάρτητα πειράματα το 1927 θα δείξουν ξεκάθαρα την κυματική φύση των ηλεκτρονίων και θα επιβεβαιώσουν την ύπαρξη υλικών κυμάτων. Το πρώτο, από τους Clinton Davisson και Lester Germer οι οποίοι παρατήρησαν φαινόμενα συμβολής κατά τη σκέδαση ηλεκτρονίων με κρύσταλλο νικελίου, και το δεύτερο, από τους George Thomson³¹ και Andrew Reid οι οποίοι παρήγαγαν εικόνες περίθλασης με ομόκεντρους δακτυλίους εκτοξεύοντας ηλεκτρόνια μέσα από λεπτά φύλλα χρυσού.

Η μακρόχρονη διαμάχη μεταξύ των υπερασπιστών των δύο διαφορετικών αντιλήψεων για το φως απεδείχθη ότι δεν μπορούσε να έχει νικητές και ηττημένους. Ο

²⁹ Η ίδια σχέση είχε δειχθεί από τον Einstein ότι εξέφραζε την ορμή ενός φωτονίου.

³⁰ Mehra & Rechenberg (1982) VI, p2, σελ. 603-4.

³¹ Ο George Paget Thomson ήταν γιος του Joseph John Thomson που ‘ανακάλυψε’ το σωματίδιο ηλεκτρόνιο το 1897 και πρότεινε το μοντέλο του ‘σταφιδόψωμου’ για το άτομο.

κυματοσωματιδιακός δυϊσμός³² θα αναγνωριστεί τον 20^ο αιώνα ως καθολικό χαρακτηριστικό των θεμελιωδών συστατικών της ύλης και ως η μόνη διέξοδος για την εξήγηση των φαινομένων κβάντωσής της. Το γεγονός ότι η κυματική φύση των σωματιδίων δεν γίνεται φανερή στα μακροσκοπικά αντικείμενα οφείλεται στην πολύ μικρή τιμή της σταθεράς του Planck ($h=6.62\cdot 10^{-34}$ J·s). Η μεγάλη σημασία των πειραμάτων των δύο σχισμών έγκειται στο ότι εκδηλώνουν σαφέστατα τον δυϊκό χαρακτήρα είτε πραγματοποιούνται με φως είτε πραγματοποιούνται με σωματίδια. Το πρώτο πείραμα σχισμών με ηλεκτρόνια, το οποίο παρήγαγε φαινόμενα συμβολής, πραγματοποιήθηκε το 1961 από τον Claus Jönsson.³³ Το 1989 ο Akira Tonomura με την ερευνητική του ομάδα πραγματοποίησε το πείραμα των δύο σχισμών στέλνοντας στην οθόνη ανίχνευσης ένα-ένα ηλεκτρόνιο τη φορά³⁴ δημιουργώντας και σε αυτήν την περίπτωση φαινόμενα συμβολής.³⁵

1.2.2. Ανάλυση του πειράματος των δύο σχισμών με ηλεκτρόνια

Ο χαρισματικός φυσικός Richard Feynman (1918-1988) σχολιάζοντας το πείραμα των δύο σχισμών είπε ότι περικλείει όλο το μυστήριο της κβαντομηχανικής συμπεριφοράς.³⁶ Η προσπάθεια, λοιπόν, διερεύνησης και οριοθέτησης της συμπεριφοράς αυτής, η οποία ξεκίνησε με το πείραμα Stern-Gerlach, επιβάλλει σχεδόν την αναλυτική περιγραφή των αποτελεσμάτων και αυτού του πειράματος.

Η πειραματική του διάταξη περιλαμβάνει, όπως φαίνεται στο σχήμα 6, μία πηγή ηλεκτρονίων από την οποία μπορούν να βάλονται ηλεκτρόνια ένα-ένα τη φορά και σε διάφορες κατευθύνσεις. Σε μικρή απόσταση μπροστά από την πηγή είναι τοποθετημένο διάφραγμα με δύο σχισμές, Α και Β. Αρκετά πιο πέρα από το διάφραγμα των δύο σχισμών υπάρχει φθορίζουσα οθόνη που λειτουργεί ως μετρητική συσκευή των θέσεων των ηλεκτρονίων εφόσον κάθε ηλεκτρόνιο αφήνει ένα φωτεινό σημάδι στο σημείο πρόσπτωσής του με αυτή.

³² Όπως θα δούμε στη συνέχεια, στο δυϊσμό κύμα-σωματίδιο στήριξε αρχικά ο Bohr την αρχή της συμπληρωματικότητας.

³³ Jönsson (1974).

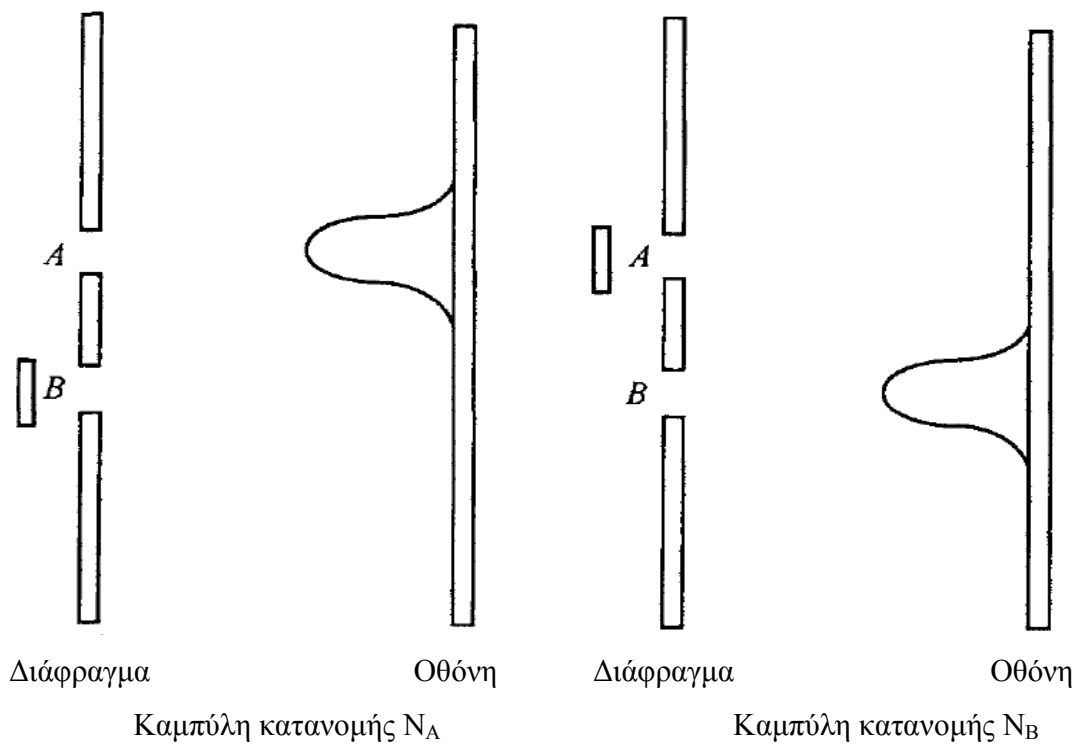
³⁴ Οι P. G. Merli, G. Missiroli και G. Pozzi στην Μπολόνια το 1974, δηλαδή 15 χρόνια νωρίτερα από τον Tonomura και την ομάδα του, παρατήρησαν επίσης συμβολή ηλεκτρονίων σε πείραμα με μονά ηλεκτρόνια. Ως εκ τούτου οι Ιταλοί ερευνητές διεκδίκησαν την πρωτιά στην παρατήρηση συμβολής μονών ηλεκτρονίων σε ένα πείραμα σχισμών. [Merli & others (1976)]

³⁵ Tonomura & others (1989).

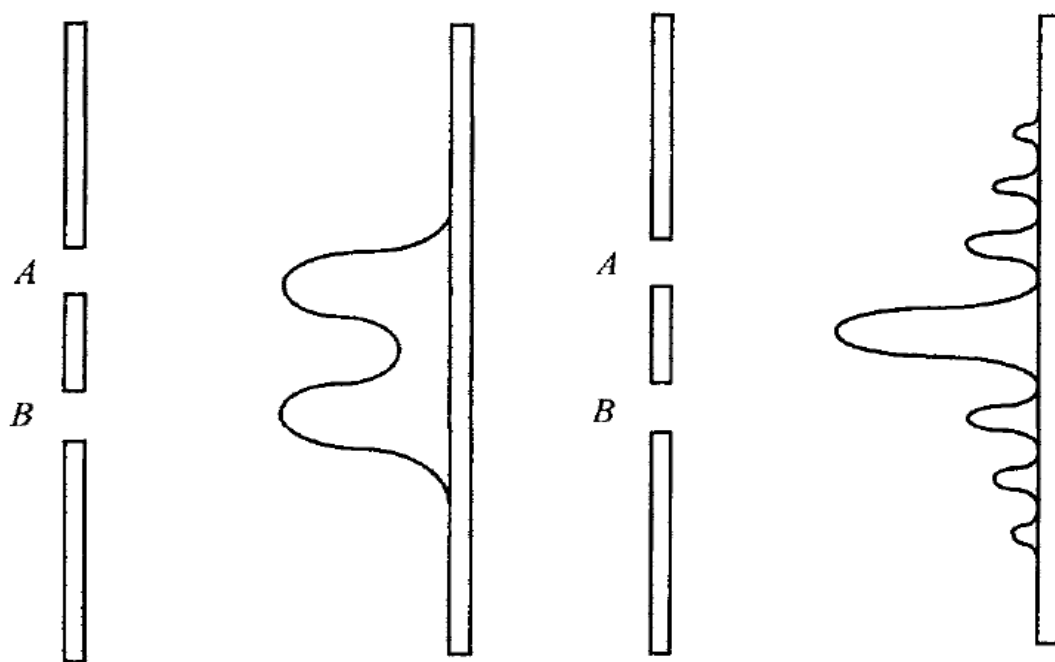
³⁶ Feynman (1967/1990), σελ. 112. Στη διάλεξη 6 του βιβλίου του *Ο χαρακτήρας του φυσικού νόμου*, ο Feynman αναλύει διεξοδικά το πείραμα των δύο σχισμών.

Στην αρχή τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την πηγή κατευθύνονται προς το διάφραγμα ενώ είναι ανοιχτή μόνο η μία, έστω η A, από τις δύο σχισμές. Ο τρόπος με τον οποίο κατανέμονται τα ηλεκτρόνια που περνούν από τη σχισμή A δίνεται από την καμπύλη N_A του σχήματος 6. Αν το πείραμα επαναληφθεί έχοντας ανοιχτή τη σχισμή B του διαφράγματος και κλειστή την A, η καμπύλη N_B αντιπροσωπεύει τη νέα κατανομή των ηλεκτρονίων καθώς περνούν αυτή τη φορά αποκλειστικά από τη σχισμή B. Υπό τις ίδιες πειραματικές συνθήκες, δηλαδή εναλλάξ ανοιχτές τις δύο διόδους, θα παρατηρούσαμε τις ίδιες καμπύλες κατανομής N_A και N_B , είτε πραγματοποιούσαμε το πείραμα με σώματα καθαρά σωματιδιακής φύσεως –όπως κόκκους άμμου– είτε το πραγματοποιούσαμε με υδάτινα κύματα. Συνεπώς, όταν επιτρέπεται στα ηλεκτρόνια να περάσουν μέσα από μία μόνο σχισμή, δεν αρκεί η μορφή της παρατηρούμενης κατανομής για να ισχυριστούμε ότι εκδήλωσαν μετά τη διέλευσή τους από τη σχισμή είτε τη σωματιδιακή είτε την κυματική φύση. Ίσως μόνο τη στιγμή που εκπέμπονται από την πηγή, καθώς και τη στιγμή που αλληλεπιδρούν με τη φθορίζουσα οθόνη αφήνοντας το καθένα από αυτά το δικό του σημάδι, μπορούμε να πούμε, λόγω της εντοπισμένης τους θέσης στις δύο αυτές περιπτώσεις, ότι συμπεριφέρονται ως σωματίδια. Μέχρι όμως να φτάσουν στη φθορίζουσα οθόνη μπορεί να διένυσαν την απόσταση από την πηγή συμπεριφερόμενα είτε ως κύματα είτε ως σωματίδια, αν μιλήσουμε κλασικά· ή συμπεριφερόμενα ως οντότητες ικανές να εκδηλώσουν, ανάλογα με τον τρόπο που θα κληθούν να αλληλεπιδράσουν, κυματικές ή σωματιδιακές ιδιότητες, αν μιλήσουμε κβαντομηχανικά.

Στη συνέχεια το πείραμα πραγματοποιείται ξανά έχοντας ανοιχτές και τις δύο σχισμές στο διάφραγμα. Αυτή τη φορά η κατανομή των ηλεκτρονίων στη φθορίζουσα οθόνη επιδεικνύει φαινόμενα συμβολής και αναπαρίσταται από την καμπύλη N του σχήματος 7· καμπύλη που θα έδιναν σε ένα παρόμοιο πείραμα τα υδάτινα κύματα. Έτσι, με τις δύο σχισμές ανοιχτές τα ηλεκτρόνια σχηματίζουν στην οθόνη ένα ‘κύμα πιθανότητας’. Η αλληλεπίδρασή τους βεβαίως με τη φθορίζουσα οθόνη είναι και πάλι σωματιδιακής φύσεως, αλλά αυτή τη φορά, αφού περάσουν το διάφραγμα των δύο σχισμών, μπορούμε ίσως να ισχυριστούμε ότι ‘ταξιδεύουν’ μέχρι την οθόνη με την κυματική τους ταυτότητα.



Σχήμα 6: Το πείραμα των δύο σχισμών με μόνο μία από τις δύο σχισμές ανοιχτή



Η κλασικώς αναμενόμενη κατανομή $N_{AB}=N_A+N_B$ Η πειραματική καμπύλη N συμβολής

Σχήμα 7: Τι αναμένεται να συμβεί στο πείραμα των δύο σχισμών και με τις δύο σχισμές ανοιχτές και τι συμβαίνει.

Η τοποθέτηση ενός ανιχνευτή ηλεκτρονίων πίσω από το διάφραγμα των δύο σχισμών, ώστε να μπορεί να καταγραφεί από ποια σχισμή περνάει το κάθε ηλεκτρόνιο, έχει ως αποτέλεσμα την αλλαγή της καμπύλης κατανομής στη $N_{AB}=N_A+N_B$ του σχήματος 7· καμπύλη που θα έδιναν σε ένα παρόμοιο πείραμα οι κόκκοι άμμου, δηλαδή σωματίδια. Τουτέστιν, η ύπαρξη του ανιχνευτή πίσω από το διάφραγμα εντοπίζει τα ηλεκτρόνια και τα αναγκάζει να απολέσουν την κυματική τους εκδήλωση, εξαφανίζοντας την εικόνα συμβολής της προηγούμενης περίπτωσης.

Η μορφή των κατανομών N_A και N_B που παίρνουμε όταν οι δύο σχισμές είναι εναλλάξ ανοιχτές, δεν δικαιολογεί την προσδοκία της N_{AB} , δηλαδή το άμεσο άθροισμά τους, όταν οι δύο σχισμές είναι ταυτόχρονα ανοιχτές· η προσδοκία αυτή οφείλεται στην προκατάληψη που μας διακατέχει –ή μας διακατείχε– να αντιλαμβανόμαστε τα ηλεκτρόνια ως κλασικά σωματίδια. Οι κατανομές N_A και N_B έχουν ακριβώς την ίδια μορφή στις περιπτώσεις που το πείραμα πραγματοποιείται με κόκκους άμμου ή με υδάτινα κύματα· αν και, για τους κόκκους άμμου οι καμπύλες δίνουν τον αριθμό αυτών που φτάνουν κατά μέσο όρο σε διάφορες θέσεις, ενώ για τα κύματα οι καμπύλες εκφράζουν την ένταση των κυμάτων στα διάφορα σημεία. Αγνοώντας, λοιπόν, την πειραματική διάταξη στο πρώτο στάδιο του πειράματος και γνωρίζοντας μόνο τη μορφή των εν λόγω κατανομών, αυτό που θα μπορούσε να ειπωθεί από τη σκοπιά ακόμη και της κλασικής φυσικής, είναι ότι μπορεί να προέκυψαν είτε από σωματίδια είτε από κύματα. Η πραγματοποίηση του πειράματος και με τις δύο σχισμές ανοιχτές οδηγεί στη διαπίστωση με κλασικούς όρους, ότι πρόκειται για σωματίδια αν έχουμε απλό άθροισμα ή ότι πρόκειται για κύματα αν έχουμε συμβολή.

Τα ηλεκτρόνια αποτελούν κβαντικές οντότητες, και ως τέτοιες, δεν μπορούμε να τους αποδίδουμε οποιαδήποτε χρονική στιγμή μια τιμή για κάθε ιδιότητα –(2'). Όπως έχει αναφερθεί, αποκτούν μια συγκεκριμένη ιδιότητα αλληλεπιδρώντας με κατάλληλη συσκευή, διαταράσσοντας όμως ταυτόχρονα άλλες ιδιότητες που είχαν ανακύψει από αλληλεπίδραση με άλλες συσκευές –(3'), (4'). Ένα ακόμα παράδειγμα που επιβεβαιώνει αυτή τους τη συμπεριφορά είναι ότι επιλέγοντας να προσδιορίσουμε τη θέση τους μέσω ανιχνευτών διαταράσσουμε τις ιδιότητες εκείνες που μπορούν να επιφέρουν φαινόμενα συμβολής. Αν πάλι αφήσουμε τα φαινόμενα συμβολής να εξελιχτούν αδιατάραχτα, δεν

έχει νόημα να αναφερόμαστε σε θέση, τροχιά και διαδρομή που ακολουθήθηκε από τα ηλεκτρόνια.

Πριν προχωρήσουμε στην επόμενη ενότητα, ας δούμε πώς η περίπτωση με τους ανιχνευτές πίσω από το διάφραγμα των δύο σχισμών συγγενεύει με την περίπτωση (ε) του πειράματος Stern-Gerlach. Η πρόταση ότι ένα ηλεκτρόνιο περνάει είτε από τη σχισμή A είτε από τη σχισμή B χωρίς αναφορά στη συσκευή ανίχνευσης είναι το ίδιο λανθασμένη και ανακριβής όσο ήταν στο πείραμα Stern-Gerlach ο ισχυρισμός ότι το σπιν του ηλεκτρονίου είναι είτε πάνω είτε κάτω χωρίς αναφορά στη συσκευή μέτρησης της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν. Όπως το ηλεκτρόνιο αποκτά την ιδιότητα σπιν-πάνω ή σπιν-κάτω μετά την αλληλεπίδρασή του με τη συγκεκριμένη συσκευή, έτσι αποκτά και τον εντοπισμό ‘πέρασε από την A’ ή ‘πέρασε από την B’ μετά την αλληλεπίδρασή του με τους ανιχνευτές. Με άλλα λόγια, δεν έχει καμία ισχύ το να θεωρούμε, στην απουσία της σχετικής αλληλεπίδρασης και του αποτελέσματος που επιφέρει, ότι το σπιν του ηλεκτρονίου είναι είτε πάνω είτε κάτω, παρά το γεγονός ότι όποτε η αλληλεπίδραση λαμβάνει χώρα βρίσκουμε σπιν-πάνω ή σπιν-κάτω. Το σπιν-πάνω ή το σπιν-κάτω αποκτάται τη στιγμή της αλληλεπίδρασης· δεν προϋπάρχει αυτής. Ομοίως, το να θεωρούμε για μια κβαντική οντότητα –και όχι κλασικό σωματίδιο– όπως το ηλεκτρόνιο, ότι περνάει, άνευ της σχετικής αλληλεπίδρασης με τον ανιχνευτή, είτε από τη σχισμή A είτε από τη σχισμή B, δεν έχει ισχύ· έστω κι αν όποτε υφίσταται η εν λόγω αλληλεπίδραση του αποδίδεται πέρασμα από την A ή από την B. Κάθε ηλεκτρόνιο, πριν από την αλληλεπίδραση με τον ανιχνευτή, βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθεσης των εναλλακτικών τρόπων που έχει για να περάσει το διάφραγμα και όντας σε αυτήν την κατάσταση το περνάει. Με την ανίχνευση, η κατάσταση υπέρθεσης καταστρέφεται, διαταράσσοντας ταυτόχρονα και τα φαινόμενα συμβολής. Τα ηλεκτρόνια ανιχνευμένα στέλνονται στη φθορίζουσα οθόνη ως μείγμα αυτών που πέρασαν από την A και αυτών που πέρασαν από την B, γι αυτό και η κατανομή που δίνουν είναι αυτή του άμεσου αθροίσματος. Το ίδιο συμβαίνει και στην περίπτωση (ε) του Stern-Gerlach όπου η επανένωση της δέσμης των ταξινομημένων σε σπιν-αριστερά και σπιν-δεξιά ηλεκτρονίων δημιουργεί μείγμα αυτών. Ωστε, το 50% των καθαρά αριστερών ηλεκτρονίων –αλλά και το 50% των καθαρά δεξιών– να δώσει 25% σπιν-πάνω και 25%

σπιν-κάτω κατά τη μέτρηση της κατακόρυφης συνιστώσας.³⁷ Η τελική κατανομή θα είναι 50% σπιν-πάνω και 50% σπιν-κάτω.

Το πείραμα των δύο σχισμών βοηθάει να αντιληφθούμε καλύτερα και την περίπτωση (στ) του πειράματος Stern-Gerlach, καθώς και τον λόγο για τον οποίο δίνει διαφορετικά αποτελέσματα από την (ε). Στην περίπτωση (στ), τα ηλεκτρόνια που περνούν από τη συσκευή ‘S-G, αριστερά-δεξιά’ χωρίς να ταξινομούνται στην έξοδό τους από ανιχνευτές, περνούν όπως περνούν και από το διάφραγμα των δύο σχισμών στην απουσία ανιχνευτών· δηλαδή σε κατάσταση υπέρθεσης των εναλλακτικών τρόπων που τους διατίθενται για να περάσουν τη συσκευή. Κατά συνέπεια, οδηγώντας την ‘επανενωμένη’ δέσμη τους σε μια δεύτερη συσκευή ‘S-G, πάνω-κάτω’ δεν ‘ενθυμούνται’ απλώς την 100% σπιν-πάνω καταγωγή τους όπως σχολιάζει ο Sklar, βρίσκονται ακόμα σε αυτήν εφόσον η κατάσταση υπέρθεσης δεν έχει διασαλευτεί.

1.3. Το επιχείρημα EPR (1935)

Το 1935 παρουσιάστηκε στο επιστημονικό περιοδικό Physical Review ένα άρθρο των Einstein, Podolsky και Rosen με τον επίμαχο τίτλο, «Μπορεί η κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας να θεωρηθεί πλήρης;». Οι συγγραφείς του άρθρου, ενοχλημένοι εκείνη την εποχή από τον στατιστικό χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής, προσπάθησαν να δείξουν ότι δεν συνιστούσε μια πλήρη φυσική θεωρία. Το επιχείρημα που ανέπτυξαν για να το επιτύχουν έμεινε γνωστό στην ιστορία της φυσικής ως επιχείρημα EPR –από τα αρχικά των ονομάτων των τριών συγγραφέων– και έμελλε να απασχολήσει σε υπερβολικό βαθμό στο μέλλον το σύνολο των φυσικών και των φιλοσόφων της φυσικής. Σε ό,τι ακολουθεί, θα παρουσιαστεί το επιχείρημα στη βάση κυρίως της πρωτότυπης μορφής του, αποφεύγοντας αναφορές –εκτός ελαχίστων εξαιρέσεων– στον τεράστιο όγκο της βιβλιογραφίας για αυτό και στις εναλλακτικές διατυπώσεις του. Κι αυτό διότι στόχος και της παρούσας ενότητας, δεν είναι η ενδελεχής ανάλυση του επιχειρήματος αυτού καθαυτού, αλλά η αναγνώριση του κβαντομηχανικού χαρακτήρα όπως ξεπροβάλλει αυτή τη φορά μέσα από το διάσημο επιχείρημα και την αντίδραση που άμεσα προκάλεσε. Η παρουσίαση της απάντησης του Bohr στο

³⁷ Τα ποσοστά αυτά προκύπτουν από τις περιπτώσεις (δ_1) και (δ_2) και αναφέρονται στο σύνολο των ηλεκτρονίων της αρχικής δέσμης.

επιχείρημα θα γίνει ώστε να εξυπηρετηθεί ο ίδιος στόχος. Με αφορμή τις πεποιθήσεις των Einstein και Bohr, θα αναφερθούν ξανά και θα αναλυθούν περισσότερο, γνώριμα χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας όπως οι ασύμβατες ιδιότητες και οι σχέσεις απροσδιοριστίας του Heisenberg.

Εφόσον το επιδιωκόμενο από τους συντάκτες του επιχειρήματος³⁸ ήταν να ελεγχθεί η πληρότητα της κβαντικής μηχανικής, το πρώτο πράγμα που κάνουν οι EPR είναι να διατυπώσουν μια *συνθήκη πληρότητας* (condition of completeness) που πρέπει να ικανοποιούν οι θεωρίες για να θεωρηθούν πλήρεις. Σύμφωνα με αυτήν: *για να είναι πλήρης μια φυσική θεωρία «κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας πρέπει να έχει το αντίστοιχο του στη φυσική θεωρία»*.³⁹ Η προαναφερθείσα συνθήκη χαρακτηρίζεται μάλιστα από τους EPR ως αναγκαία. Τουτέστιν, εάν δεν ισχύει, δηλαδή αν κάποιο στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας δεν έχει αντίστοιχο στη θεωρία, τότε η θεωρία δεν είναι πλήρης. Ή, με άλλα λόγια, η πληρότητα της θεωρίας συνεπάγεται την ύπαρξη σε αυτήν αντίστοιχου για κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας. Η συνθήκη πληρότητας των EPR είναι αναγκαία αλλά όχι ικανή: γεγονός που υποδηλώνει ότι μια θεωρία θα μπορούσε να διαθέτει το αντίστοιχο κάθε στοιχείου της φυσικής πραγματικότητας χωρίς εντούτοις να είναι πλήρης.

Ποια είναι όμως τα στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας για τους EPR; Το *κριτήριο πραγματικότητας* που προτείνουν στο επιχειρήμα –και περίφημο έκτοτε– τα καθιστά αναγνωρίσιμα ως εξής:

«Εάν, χωρίς να διαταράξουμε με οποιονδήποτε τρόπο ένα σύστημα, μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα (δηλαδή, με πιθανότητα ίση με τη μονάδα) την τιμή μιας φυσικής ποσότητας, τότε υπάρχει ένα στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας που αντιστοιχεί σε αυτή τη φυσική ποσότητα».⁴⁰

Κατά τους EPR, το παραπάνω κριτήριο συνιστά ικανή συνθήκη για την αναγνώριση πραγματικών στοιχείων, όχι όμως και αναγκαία αφού δεν εξαντλεί τους

³⁸ Αν και το επιχειρήμα προέκυψε από συζητήσεις των Einstein, Podolsky και Rosen, το άρθρο συντάχτηκε τελικά μόνο από τον Podolsky. Ο Fine παραθέτει [Fine (1996), σελ. 35] ένα απόσπασμα από γράμμα του Einstein προς τον Schrödinger στις 19 Ιουνίου του 1935, στο οποίο ο σπουδαίος φυσικός αναφέρει: «Για λόγους που είχαν να κάνουν με τη γλώσσα, το άρθρο γράφτηκε από τον Podolsky έπειτα από πολλές συζητήσεις. Ωστόσο, δεν προέκυψε τόσο καλό όσο το ήθελα αρχικά: μάλλον ό,τι ήταν ουσιαστικό καταπνίγηκε, που λέει ο λόγος, από τον φορμαλισμό».

³⁹ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 777.

⁴⁰ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 777.

τρόπους με τους οποίους μπορούν αυτά να αναγνωριστούν.⁴¹ Συνεπώς, η δυνατότητα βέβαιης πρόβλεψης –στην απουσία της οποιασδήποτε διαταραχής– της τιμής μιας φυσικής ποσότητας αποτελεί ικανή συνθήκη για την ύπαρξη αντίστοιχου της ποσότητας αυτής στη φυσική πραγματικότητα. Ή, με άλλα λόγια, αν μια φυσική ποσότητα δεν έχει αντίστοιχο στη φυσική πραγματικότητα τότε δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα χωρίς διατάραξη του συστήματος στο οποίο αναφέρεται. Επίσης, δεδομένου ότι η συνθήκη δεν είναι αναγκαία, υποδηλώνεται ότι μπορεί η τιμή μιας φυσικής ποσότητας να είναι πραγματική αλλά να μην μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα άνευ διαταραχής. (Όπως μπορεί να είναι κάτι έγχρωμο χωρίς να είναι κόκκινο.)

Στη συνέχεια του επιχειρήματος οι EPR αναφέρονται ενδεικτικά στην κβαντομηχανική περιγραφή της συμπεριφοράς ενός σωματιδίου με ένα βαθμό ελευθερίας⁴² –κίνηση σε μία μόνο διάσταση. Στην κβαντική μηχανική θεωρείται ότι η κατάσταση ενός συστήματος καθορίζεται πλήρως από την αντίστοιχη της κυματοσυνάρτηση Ψ . Η Ψ αποτελεί συνάρτηση των μεταβλητών που επιλέγονται για να περιγραφεί η συμπεριφορά του συστήματος. Στην περίπτωση όπου η Ψ αποτελεί ιδιοσυνάρτηση (eigenfunction) ενός τελεστή \mathbf{A} ο οποίος αντιστοιχεί σε μια παρατηρήσιμη φυσική ποσότητα A , τότε η τιμή της A στην κατάσταση που περιγράφεται από τη Ψ είναι με βεβαιότητα ίση με την ιδιοτιμή του τελεστή της. Συγκεκριμένα, έστω

$$\psi = e^{(2\pi i/h)p_0 x} \quad (1.3.I) \quad \text{και} \quad p = (h/2\pi i)\partial/\partial x$$

όπου Ψ η κυματοσυνάρτηση της κατάστασης του σωματιδίου, p ο τελεστής της ορμής του, h η σταθερά του Planck, p_0 κάποιος σταθερός αριθμός και x η ανεξάρτητη μεταβλητή. Ισχύει ότι

$$\psi' = p\psi = (h/2\pi i)\partial\psi/\partial x = p_0\psi$$

Οπότε, η κατάσταση που περιγράφεται από την εξίσωση (1.3.I) αποτελεί ιδιοσυνάρτηση του τελεστή p της ορμής, ενώ η ορμή στην κατάσταση αυτή έχει με βεβαιότητα την τιμή p_0 και άρα σύμφωνα με το κριτήριο πραγματικότητας των EPR είναι πραγματική.

Τα πράγματα είναι πολύ διαφορετικά για τη συντεταγμένη της θέσης του σωματιδίου. Η εξίσωση (1.3.I) δεν αποτελεί ιδιοσυνάρτηση του τελεστή της \mathbf{q} και η πρόβλεψη της τιμής της με βεβαιότητα δεν είναι εφικτή· ο προσδιορισμός της θέσης του

⁴¹ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 777-8.

⁴² Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 778.

σωματιδίου μπορεί να επιτευχθεί μόνο με άμεση μέτρηση. Μια μέτρηση όμως της θέσης θα διατάρασσε το σύστημα, και η κατάστασή του μετά την πραγματοποίησή της δεν θα περιγραφόταν πλέον από την εξίσωση (1.3.I), καθιστώντας έτσι απροσδιόριστη την ορμή του. Με άλλα λόγια, σύμφωνα με την κβαντική θεωρία, οι EPR σημειώνουν ότι, «*όταν η ορμή ενός σωματιδίου είναι γνωστή, η συντεταγμένη της θέσης του δεν διαθέτει φυσική πραγματικότητα*».⁴³

Στο σημείο αυτό του επιχειρήματος οφείλουμε να διευκρινίσουμε το εξής. Στην κβαντική θεωρία, ο λόγος για τον οποίο η συντεταγμένη της θέσης του σωματιδίου δεν διαθέτει φυσική πραγματικότητα όταν η ορμή του είναι γνωστή, δεν είναι επειδή αδυνατούμε να την προβλέψουμε με βεβαιότητα. Αντιθέτως, το ότι στερείται πραγματικότητας μας υπαγορεύει ότι η βέβαιη πρόβλεψή της, στην απουσία της οποιαδήποτε διαταραχής, είναι αδύνατη. Πέραν αυτού, ούτε το κριτήριο πραγματικότητας των EPR νομιμοποιεί τον ισχυρισμό ότι η συντεταγμένη της θέσης δεν διαθέτει φυσική πραγματικότητα επειδή δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα, διότι αυτό αποτελεί ικανή μόνο συνθήκη και όχι αναγκαία. Η άρνηση της συνθήκης συνεπάγεται την άρνηση αυτού που εξασφαλίζεται από τη συνθήκη μόνο στην περίπτωση που η συνθήκη είναι αναγκαία. Από το ότι δεν είναι κάτι κόκκινο δεν είναι δυνατό να συναχθεί το ότι δεν είναι έγχρωμο. Άρα και από το ότι δεν μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα άνευ διαταραχής η τιμή μιας φυσικής ποσότητας, δεν είναι δυνατό να συναχθεί το ότι αυτή στερείται πραγματικότητας.

Συνεχίζοντας το επιχειρήμα θα αναφερθούμε ξανά σε ασύμβατες ιδιότητες –ή αλλιώς φυσικές ποσότητες– της κβαντικής μηχανικής που δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα διότι η μέτρηση της μιας επηρεάζει τη μέτρηση της άλλης. Οι τελεστές τέτοιου είδους φυσικών ποσοτήτων χαρακτηρίζονται από *μη μεταθετικότητα*. Δηλαδή, για τους τελεστές **A**, **B**, δύο ασύμβατων φυσικών ποσοτήτων A, B, ισχύει ότι **AB≠BA**. Εφόσον, λοιπόν, οι τελεστές που αντιστοιχούν σε δύο φυσικές ποσότητες δεν μετατίθενται, η κατηγορηματική γνώση της μιας αποκλείει τη γνώση της άλλης με ακρίβεια μεγαλύτερη από αυτή που επιτρέπει η σχέση απροσδιοριστίας τους. Η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου αποτελούν χαρακτηριστικό παράδειγμα ασύμβατων ιδιοτήτων και η περίφημη σχέση απροσδιοριστίας τους είναι η εξής:

⁴³ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 778.

$$\Delta q_i \cdot \Delta p_i \geq \frac{\hbar}{2}$$

Οι EPR θεωρούν ότι η συνθήκη πληρότητας και το κριτήριο πραγματικότητας που διατύπωσαν, σε συνδυασμό με το τι ισχύει στην κβαντομηχανική, μας υπαγορεύουν δύο ενδεχόμενα⁴⁴:

Είτε, **(1)** η κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας που παρέχεται από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι πλήρης,

είτε, **(2)** όταν δεν μετατίθενται οι τελεστές που αντιστοιχούν σε δύο φυσικές ποσότητες, οι δύο αυτές ποσότητες δεν μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα.

Ο συλλογισμός με τον οποίο δικαιολογούν την κατάληξή τους στις δύο αυτές εναλλακτικές προτάσεις είναι ο ακόλουθος:

«Διότι, αν είχαν και οι δύο ταυτόχρονη πραγματικότητα⁴⁵ –και άρα ακριβείς τιμές– οι τιμές τους, σύμφωνα με τη συνθήκη πληρότητας, θα εντάσσονταν στην πλήρη περιγραφή. Εάν λοιπόν η κυματοσυνάρτηση παρείχε πλήρη περιγραφή της πραγματικότητας, θα συμπεριελάμβανε αυτές τις τιμές· κατά συνέπεια αυτές θα ήταν προβλέψιμες. Εφόσον δεν συμβαίνει κάτι τέτοιο, οι εναλλακτικές που διατυπώθηκαν είναι ότι μας απομένει».⁴⁶

Ο παραπάνω συλλογισμός των EPR έχει τη δομή ενός ‘modus tollens’ επιχειρήματος. Σύμφωνα με αυτόν, αν αρνηθούμε την **(2)** υποστηρίζοντας ότι δύο ασύμβατες φυσικές ποσότητες μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα και άρα ταυτόχρονα σαφώς ορισμένες τιμές, αυτές οι τιμές θα πρέπει να προβλέπονται από τη κυματοσυνάρτηση εφόσον αυτή παρέχει την πλήρη κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας ενός συστήματος. Αυτό όμως δεν συμβαίνει, διότι η ακριβής πρόβλεψη της τιμής μιας φυσικής ποσότητας μέσω της κυματοσυνάρτησης μπορεί να γίνει μόνο όταν αυτή αποτελεί ιδιοσυνάρτηση του τελεστή της φυσικής ποσότητας. Και όταν αποτελεί ιδιοσυνάρτηση του τελεστή μιας φυσικής ποσότητας, δεν μπορεί να αποτελεί και ιδιοσυνάρτηση του τελεστή μιας ασύμβατης φυσικής ποσότητας με την προηγούμενη. Ως εκ τούτου, είτε λανθασμένα θεωρήσαμε ότι δύο ασύμβατες ιδιότητες μπορούν να απολαμβάνουν ταυτόχρονη πραγματικότητα –δηλαδή είτε ισχύει η **(2)**– είτε η κβαντομηχανική περιγραφή που μας παρέχεται από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι

⁴⁴ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 778.

⁴⁵ Εννοείται οι δύο ασύμβατες φυσικές ποσότητες.

⁴⁶ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 778.

πλήρης –είτε ισχύει η (1). Οι EPR χρησιμοποιώντας ένα νοητικό πείραμα⁴⁷ θα προσπαθήσουν να δείξουν στη συνέχεια πως η κβαντική υπόθεση ότι η κυματοσυνάρτηση εμπεριέχει την πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας της κατάσταση ενός συστήματος, μαζί με το κριτήριο πραγματικότητας που έχουν προτείνει, οδηγεί σε **αντίφαση**.

Ας εξετάσουμε πώς οδηγούνται στην αντίφαση, παρουσιάζοντας το πείραμα του επιχειρήματος στην EPR-Bohm⁴⁸-Bell εκδοχή του για τρεις τουλάχιστον λόγους. Πρώτον, λόγω ομοιογένειας της παρούσας εργασίας αφού οι ασύμβατες ιδιότητες της εκδοχής αυτής αφορούν τις διαφορετικές συνιστώσες του σπιν σωματιδίων με σπιν- $\frac{1}{2}$ – όπως, για παράδειγμα, των ηλεκτρονίων–, ιδιότητες δηλαδή που μας απασχόλησαν και στο πείραμα Stern-Gerlach. Δεύτερον, στην εκδοχή αυτή το πείραμα καθίσταται εύκολα πραγματοποιήσιμο. Και τέλος, συνδέεται άμεσα με το θεώρημα Bell που θα μας απασχολήσει σε επόμενη ενότητα.

Θεωρούμε δύο σωματίδια με σπιν- $\frac{1}{2}$ τα οποία αφήνονται να αλληλεπιδράσουν μεταξύ των χρονικών στιγμών $t=0$ και $t=T$. Έστω ότι μετά το πέρας της αλληλεπίδρασής τους η κατάσταση του σύνθετου συστήματός τους είναι η *μονή κατάσταση του σπιν* (singlet spin state), στην οποία οι συνιστώσες του σπιν των δύο σωματιδίων είναι τέλεια αντισυζευγμένες (perfectly anticorrelated) ώστε το ολικό σπιν του ζεύγους, σε οποιαδήποτε διεύθυνση, να είναι 0. Τούτέστιν, αν η συνιστώσα του σπιν του 1^{ου} σωματιδίου στην κατακόρυφη διεύθυνση –τη διεύθυνση του άξονα z– είναι σπιν-πάνω ($\sigma_{1z}=+1$) τότε η συνιστώσα του σπιν του 2^{ου} σωματιδίου για την ίδια διεύθυνση θα είναι σπιν-κάτω ($\sigma_{2z}=-1$). Το διάνυσμα κατάστασης της μονής κατάστασης του σύνθετου συστήματος, αν η μεταβλητή που θα επιλέξουμε για να το περιγράψουμε είναι η συνιστώσα του σπιν κατά τη z-διεύθυνση, μπορεί να γραφεί

$$|\Psi_{\text{singlet}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\sigma_{1z}=+1\rangle|\sigma_{2z}=-1\rangle - |\sigma_{1z}=-1\rangle|\sigma_{2z}=+1\rangle) \quad (1.3.II)$$

Εάν είχαμε επιλέξει, για να περιγράψουμε την ίδια κατάσταση, την οριζόντια συνιστώσα του σπιν, τότε το αντίστοιχο διάνυσμα κατάστασης θα ήταν:

⁴⁷ Το νοητικό πείραμα των EPR ενέπνευσε πολλές πραγματοποιήσιμες εκδοχές του. Από το 1935 μέχρι σήμερα πραγματοποιήθηκαν πολλά σχετικά πειράματα με σημαντικότερο εξ αυτών το πείραμα του Aspect το 1981. [Aspect, Dalibard, Roger, «Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm gedanken experiment: a new violation of Bell's inequalities», *Physical Review Letters* 49, 1982: 91-4]

⁴⁸ Bohm (1951/1989), σελ. 614-5.

$$|\Psi_{\text{singlet}}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\sigma_{1x} = +1\rangle|\sigma_{2x} = -1\rangle - |\sigma_{1x} = -1\rangle|\sigma_{2x} = +1\rangle) \quad (1.3.III)$$

Θα ασχοληθούμε πρώτα με την εξίσωση (1.3.II). Είναι προφανές ότι η (1.3.II) δεν μας παρέχει τις ακριβείς τιμές του σπιν που διαθέτουν ξέχωρα τα δύο σωματίδια στην κατακόρυφη διεύθυνση· μόνο το ολικό σπιν του σύνθετου συστήματος που προέκυψε μετά την αλληλεπίδρασή τους είναι με βεβαιότητα γνωστό μέσω αυτής. Σύμφωνα με την ορθόδοξη κβαντική μηχανική, ο μόνος τρόπος για να μάθουμε το σπιν των σωματιδίων είναι να πραγματοποιήσουμε μια μέτρηση και να προκαλέσουμε εξαιτίας της *αναγωγή του διανύσματος κατάστασης* (reduction of the state vector) ή, όπως αλλιώς ονομάζεται, *συρρίκνωση –κατάρρευση– του διανύσματος κατάστασης* (collapse). Συγκεκριμένα, η διαδικασία της αναγωγής του διανύσματος κατάστασης στην περίπτωση της εξίσωσης (1.3.II) μπορεί να προκληθεί εάν μετρήσουμε, για παράδειγμα, την κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν του 1^{ου} σωματιδίου. Έστω, λοιπόν, ότι εκτελούμε μια τέτοια μέτρηση και βρίσκουμε ότι $\sigma_{1z}=+1$. Αμέσως μετά, το διάνυσμα κατάστασης (1.3.II) του σύνθετου συστήματος ανάγεται στην $|\Psi\rangle=|\sigma_{1z}=+1\rangle|\sigma_{2z}=-1\rangle$, από την οποία μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα ότι η τιμή του σπιν του 2^{ου} σωματιδίου κατά την z-διεύθυνση θα είναι $\sigma_{2z}=-1$ χωρίς να το έχουμε διαταράξει με οποιονδήποτε τρόπο.

Οι EPR συνεχίζουν το επιχείρημα διατυπώνοντας ουσιαστικά μια αντιγεγονοτική συνεπαγωγή (counterfactual conditional).⁴⁹ Θα μπορούσαμε, λένε, στη θέση της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν να είχαμε επιλέξει να μετρήσουμε την οριζόντια συνιστώσα. Οπότε, το σχετικό διάνυσμα κατάστασης θα ήταν αυτό της εξίσωσης (1.3.III) και η εκτέλεση της μέτρησης θα είχε προκαλέσει την δική του συρρίκνωση. Έστω λοιπόν ότι επιλέγουμε να μετρήσουμε την οριζόντια συνιστώσα του σπιν του 1^{ου} σωματιδίου⁵⁰ και την βρίσκουμε $\sigma_{1x}=+1$. Η αναγωγή του διανύσματος κατάστασης του σύνθετου συστήματος στην περίπτωση αυτή δίνει το $|\Psi\rangle=|\sigma_{1x}=+1\rangle|\sigma_{2x}=-1\rangle$, από το οποίο μπορεί

⁴⁹ Οι αντιγεγονοτικές συνεπαγωγές είναι υποθετικές προτάσεις της μορφής, «αν το p δεν είχε συμβεί, τότε το q δεν θα είχε συμβεί» ή «αν το p είχε συμβεί, τότε το q θα είχε συμβεί». Οι συνθήκες αληθείας τέτοιων προτάσεων δεν είναι δυνατό να καθοριστούν μέσω αληθοπινάκων διότι η ηγούμενή τους είναι ψευδής και η αντιγεγονοτική συνεπαγωγή θα προέκυπτε τετριμμένα αληθής. [Psillos (2007), σελ. 52-3]

⁵⁰ Παρακάτω θα παρουσιαστεί ξανά το πείραμα με διαφορετικές όμως μετρήσεις –ώστε να μη χρειαστεί να καταφύγουμε σε αντιγεγονοτικές υποθέσεις– για ναδειχθεί ότι το κριτήριο πραγματικότητας των EPR δεν είναι επαρκές. Δηλαδή, όχι μόνο δεν αποτελεί αναγκαία συνθήκη για να είναι κάτι πραγματικό, αλλά ούτε και ικανή, στην κβαντική και στην κλασική φυσική.

και πάλι να προβλεφθεί με βεβαιότητα ότι η τιμή του σπιν του 2^{00} σωματιδίου κατά την x-διεύθυνση είναι $\sigma_{2x}=-1$, χωρίς να το έχουμε διαταράξει με οποιονδήποτε τρόπο.

Όπως υποστηρίζουν οι EPR, οι δύο προηγούμενες μετρήσεις⁵¹ στο 1° σωματίδιο είχαν ως συνέπεια την απόδοση δύο διαφορετικών καταστάσεων στο 2° σωματίδιο, χωρίς να είναι μάλιστα εφικτό να αιτιολογηθεί η διαφορά τους σε αλληλεπίδραση μεταξύ των δύο σωματιδίων. Η αλληλεπίδραση των δύο σωματιδίων έχει πάψει προ πολλού και «καμία πραγματική αλλαγή δεν μπορεί να λάβει χώρα στο δεύτερο σύστημα σαν συνέπεια του οποιουδήποτε συμβάντος στο πρώτο σύστημα».⁵² Με άλλα λόγια, παρά την πραγματοποίηση είτε της μιας είτε της άλλης μέτρησης στο 1° σωματίδιο, η ‘πραγματικότητα’ του 2^{00} παραμένει ανέγγιχτη ενώ της αποδίδεται είτε η τιμή $\sigma_{2z}=-1$ είτε η τιμή $\sigma_{2x}=-1$. Έτσι για το 2° σωματίδιο, χωρίς να το διαταράξουμε, προβλέπονται με βεβαιότητα –όχι όμως ταυτόχρονα– οι τιμές δύο φυσικών ποσοτήτων, όπως είναι η κατακόρυφη και η οριζόντια συνιστώσα του σπιν, των οποίων οι τελεστές δεν μετατίθενται. Σύμφωνα με το κριτήριο πραγματικότητας των EPR, η πρόβλεψη με βεβαιότητα, και χωρίς διαταραχή, της τιμής μιας φυσικής ποσότητας είναι ικανή συνθήκη για να θεωρηθεί η τιμή της πραγματική. Οι τιμές $\sigma_{2z}=-1$ και $\sigma_{2x}=-1$, δύο ασύμβατων ιδιοτήτων, πληρώνοντας τις προϋποθέσεις του κριτηρίου μπορούν να θεωρηθούν πραγματικές και μάλιστα ταυτόχρονα εφόσον, βάσει των EPR, αφορούν την ίδια ανέγγιχτη ‘πραγματικότητα’ του δεύτερου σωματιδίου.

Πριν σχολιαστούν τα παραπάνω και κυρίως το γεγονός ότι οι EPR παραβλέπουν την αντιγεγονοτική συνεπαγωγή που αναγκάζονται να κάνουν κατά την περιγραφή του πειράματος, θα ολοκληρώσουμε το επιχειρήμα τους. Ξεκινώντας από την άρνηση της (1), δηλαδή από την υπόθεση ότι η κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας μέσω της κυματοσυνάρτησης είναι πλήρης, οδηγήθηκαν στην άρνηση της (2) –της μόνης εναλλακτικής– δείχνοντας, όπως υποστηρίζουν, ότι δύο ασύμβατες φυσικές ποσότητες

⁵¹ Στην πραγματικότητα μόνο η μία από τις δύο μετρήσεις εκτελείται σε ένα ζεύγος σωματιδίων, η δεύτερη υποτίθεται αντιγεγονοτικά.

⁵² Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 779. Οι EPR με την έκφραση αυτή διατυπώνουν μια συνθήκη ‘τοπικότητας’ που οφείλουν να ικανοποιούν δύο μη αλληλεπιδρώντα συστήματα. Μη αμφισβητώντας την ισχύ της συνθήκης στο πλαίσιο του επιχειρήματος, δεν θα θιγεί για την ώρα το μεγάλης σπουδαιότητας θέμα της τοπικότητας για να μην επισκιαστούν άλλα σημαντικά ζητήματα που εγείρει το επιχειρήμα. Η λεπτομερή αναφορά στην τοπικότητα θα αναβληθεί μέχρι την παρουσίαση του θεωρήματος Bell· άλλωστε μετά από αυτό συνδέθηκε ουσιαστικά και το επιχειρήμα EPR ξεκάθαρα με την τοπικότητα και τη διαχωρισσιμότητα.

μπορούν να είναι ταυτόχρονα πραγματικές. Κατέληξαν λοιπόν σε αντίφαση, αφού αυτό που αναμενόταν ήταν η άρνηση της (1) να επιβεβαιώσει την ισχύ της μόνης εναλλακτικής της, δηλαδή της (2), γεγονός που δεν συνέβη. Τέλος, λόγω της προκύπτουσας αντίφασης αναγκάζονται να συμπεράνουν ότι η (1) ισχύει και ότι η κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας μέσω της κυματοσυνάρτησης δεν είναι πλήρης.

Η αντιγεγονοτική συνεπαγωγή που γίνεται από τους EPR είναι η εξής: αν είχε μετρηθεί η οριζόντια συνιστώσα του σπιν του 1^{00} σωματιδίου –αντί της κατακόρυφης συνιστώσας του– τότε θα είχε προβλεφθεί με βεβαιότητα η τιμή της οριζόντιας συνιστώσας του σπιν για το 2^0 σωματίδιο. Οι EPR καταφεύγουν αναγκαστικά σε τούτη την αντιγεγονοτική υπόθεση, διότι η μέτρηση μιας οποιασδήποτε συνιστώσας του σπιν της μόνης κατάστασης του σύνθετου συστήματος, το διαταράσσει σε τέτοιο βαθμό ώστε το σύστημα να μην είναι πλέον διαθέσιμο στην ίδια κατάσταση για την πραγματοποίηση νέας μέτρησης σε αυτό. Εξ αιτίας, λοιπόν, του επεμβατικού χαρακτήρα της μέτρησης στην κατάσταση του σύνθετου συστήματος, ο πειραματιστής αφού μετρήσει την κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν, για να μετρήσει και την οριζόντια, θα πρέπει να χρησιμοποιήσει ένα άλλο σύστημα όμοια προετοιμασμένο με το πρώτο.⁵³ Στην περίπτωση όμως αυτή θα έχει καταστήσει και πάλι απροσδιόριστη την κατακόρυφη συνιστώσα του σπιν του 1^{00} σωματιδίου⁵⁴ και μη προβλέψιμη την αντίστοιχη συνιστώσα του 2^{00} .

Επομένως, όταν οι EPR αναφέρονται σε ίδια ‘πραγματικότητα’ όσον αφορά το 2^0 σωματίδιο, στην οποία αποδίδονται με βεβαιότητα και χωρίς να την διαταράξουμε οι τιμές $\sigma_{2z}=-1$ και $\sigma_{2x}=-1$, οι τιμές αυτές αφορούν ουσιαστικά τις ‘πραγματικότητες’ δύο διαφορετικών σωματιδίων που τις θεωρούμε ταυτόσημες μόνο και μόνο επειδή τα σωματίδια προετοιμάστηκαν με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Η αδυναμία μας να χρησιμοποιήσουμε κυριολεκτικά το *ίδιο* σύνθετο σύστημα για να πραγματοποιήσουμε τις δύο μετρήσεις –και άρα και τις δύο προβλέψεις– ταυτόχρονα, θα πρέπει ενδεχομένως να

⁵³ Ουσιαστικά ο πειραματιστής έχει και μια άλλη επιλογή. Να επαναφέρει το σύνθετο σύστημα στην αρχική του κατάσταση και να πραγματοποιήσει τη νέα μέτρηση. Η επιλογή αυτή όμως εδώ δεν ενδείκνυται διότι τα δύο σωματίδια θα πρέπει να αλληλεπιδράσουν ξανά και η προϋπόθεση της απουσίας της οποιαδήποτε αλληλεπίδρασης μεταξύ τους μετά το πέρας της χρονικής στιγμής $t=T$ δεν θα ισχύει.

⁵⁴ Η κατάσταση του νέου σύνθετου συστήματος θα περιγράφεται και πάλι από την εξίσωση της κυματοσυνάρτησης (1.3.Π) και η τιμή της σ_{1z} θα είναι είτε +1 με πιθανότητα $\frac{1}{2}$ είτε -1 με πιθανότητα επίσης $\frac{1}{2}$.

μας ωθήσει στο να εναντιωθούμε σε ένα κριτήριο πραγματικότητας που θεωρεί τη βέβαιη πρόβλεψη μιας τιμής ως ικανή συνθήκη για την πραγματικότητά της.

Ενστάσεις όπως η παραπάνω αναμένονταν από τους EPR, γι αυτό προς το τέλος του άρθρου αναφέρουν ότι θα μπορούσε κανείς να αντιδράσει στο συμπέρασμά τους περί μη πληρότητας της κβαντικής θεωρίας θεωρώντας το κριτήριο πραγματικότητας που χρησιμοποιείται ανεπαρκές. Αν κανείς, σημειώνουν, υποστηρίζει ότι δύο ή περισσότερες φυσικές ποσότητες έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα «μόνο όταν μπορούν να μετρηθούν ή να προβλεφθούν ταυτόχρονα», δεν θα καταλήξει στο ίδιο συμπέρασμα. Στην περίπτωση όμως αυτή, συμπληρώνουν, η πραγματικότητα της κατακόρυφης ή της οριζόντιας συνιστώσας του σπιν του 2^{ου} σωματιδίου θα εξαρτιόταν από τη μέτρηση που εκτελείται στο 1^ο σωματίδιο χωρίς καν να υφίσταται αλληλεπίδραση μεταξύ τους· όπως γράφουν χαρακτηριστικά «κανένας εύλογος ορισμός της πραγματικότητας δεν αναμένεται να επιτρέψει κάτι τέτοιο».⁵⁵ Στο σημείο αυτό οι EPR ίσως να υποπίπτουν σε λογικό λάθος. Η αποδοχή του δικού τους κριτηρίου πραγματικότητας, που θεωρεί τη βέβαιη πρόβλεψη μιας τιμής ικανή συνθήκη για να είναι πραγματική, καθιστά την πραγματικότητα του 2^{ου} σωματιδίου εξαρτώμενη από το τι συμβαίνει στο 1^ο –εκτός αν κάνουν λήψη του ζητουμένου, δηλαδή θεωρούν τις τιμές της κατακόρυφης και της οριζόντιας συνιστώσας πραγματικές πριν ακόμα τις προβλέψουν με βεβαιότητα. Εφόσον μετρούμε την κατακόρυφη συνιστώσα στο 1^ο σωματίδιο, η προβλεπόμενη με βεβαιότητα κατακόρυφη συνιστώσα στο 2^ο θεωρείται πραγματική· αν είχαμε μετρήσει την οριζόντια συνιστώσα στο 1^ο, η προβλεπόμενη με βεβαιότητα οριζόντια συνιστώσα στο 2^ο θα θεωρούνταν πραγματική. Η παραλλαγή του κριτηρίου, με την απαίτηση της ταυτόχρονης πρόβλεψης για ταυτόχρονη ύπαρξη, καθιστά την *πρόβλεψη*, και όχι την πραγματικότητα, της κατακόρυφης ή της οριζόντιας συνιστώσας του σπιν του 2^{ου} σωματιδίου εξαρτώμενη από τις μετρήσεις που διενεργούνται στο 1^ο σωματίδιο· και αυτό είναι κάτι που θα μπορούσε να επιτραπεί από οποιονδήποτε εύλογο ορισμό της πραγματικότητας.

Όσο για το αν υφίσταται αλληλεπίδραση μεταξύ των σωματιδίων και τι είδους, θα διευκρινιστεί στην παρουσίαση της απάντησης του Bohr στο επιχείρημα⁵⁶, καθώς και

⁵⁵ Einstein, Podolsky, Rosen (1935), σελ. 780.

⁵⁶ Η Mara Beller και ο Arthur Fine τονίζουν το εξής σε σχέση με την απάντηση του Bohr: «Η βασική πρόκληση που διέκρινε ο Bohr στο EPR δεν ήταν το θέμα των κρυμμένων μεταβλητών, ή της τοπικότητας, ή της σύλληψης μιας ανεξάρτητης πραγματικότητας για τα διαχωρισμένα συστατικά ενός σύνθετου

στο θεώρημα Bell σε επόμενη ενότητα. Σε ό,τι άμεσα ακολουθεί, θα επιχειρηθεί να δειχθεί η ανεπάρκεια του κριτηρίου πραγματικότητας των EPR στην κβαντική αλλά και στην κλασική φυσική.

1.3.1. Το κριτήριο πραγματικότητας των EPR ως μη ικανή συνθήκη

Έστω ότι διαθέτουμε ένα σύνθετο σύστημα δύο σωματιδίων στη μονή κατάσταση του σπιν όπως προηγουμένως. Εκτελούμε σε αυτό μέτρηση της σ_{1z} στο 1^ο σωματίδιο ταυτόχρονα με τη μέτρηση της σ_{2x} στο 2^ο σωματίδιο –έστω ότι βρίσκουμε $\sigma_{1z}=+1$ και $\sigma_{2x}=-1$ – και προβλέπουμε με βεβαιότητα από την αναγωγή των καταστατικών διανυσμάτων (1.3.II) και (1.3.III) τις τιμές των $\sigma_{2z}=-1$ και $\sigma_{1x}=+1$. Οπότε, η τιμή της $\sigma_{2x}=-1$ είναι αναμφίβολα πραγματική εφόσον είναι αποτέλεσμα μέτρησης, ενώ αν δεχτούμε το κριτήριο πραγματικότητας των EPR, και η τιμή της $\sigma_{2z}=-1$ θα πρέπει να θεωρηθεί πραγματική εφόσον προβλέπεται με πιθανότητα ίση με τη μονάδα· η μέτρηση της σ_{1z} που κατέστησε δυνατή την πρόβλεψη της σ_{2z} θεωρούμε ότι δεν διαταράσσει το 2^ο σωματίδιο. Η κατακόρυφη όμως και η οριζόντια συνιστώσα του σπιν στην κβαντομηχανική θυμίζουμε ότι αποτελούν ασύμβατες ιδιότητες, δηλαδή ιδιότητες που δεν μπορούν να μετρηθούν ‘ταυτόχρονα’ διότι η μέτρηση της τιμής της μιας επεμβαίνει στο σύστημα καθιστώντας την τιμή της άλλης απροσδιόριστη. Με άλλα λόγια, αν δεχτούμε τη συνήθη ερμηνεία της μη μεταθετικότητας των τελεστών ασύμβατων ιδιοτήτων, σύμφωνα με την οποία η σ_{2x} και η σ_{2z} δεν μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα, έχουμε προβλέψει με βεβαιότητα στο προηγούμενο πείραμα την τιμή μιας ιδιότητας η οποία στερείται πραγματικότητας. Αν μόνο μία από τις δύο φυσικές ποσότητες μπορεί να είναι πραγματική, τότε αυτή θα πρέπει να είναι η $\sigma_{2x}=-1$, διότι δεν προβλέφτηκε αλλά μετρήθηκε και η μέτρηση της τιμής μιας φυσικής ποσότητας θα πρέπει να αποτελεί πιο ισχυρή ένδειξη πραγματικότητας από την πρόβλεψη έστω κι αν η μέτρηση ‘δημιούργησε’ την ιδιότητα. Έτσι θα μπορούσαμε να πούμε ότι η βέβαιη πρόβλεψη μιας τιμής δεν αρκεί για να την θεωρήσουμε πραγματική και ότι το κριτήριο

συστήματος, ή οποιοδήποτε άλλο από τα θέματα με τα οποία καταλήξαμε να συνδέουμε το EPR. Αυτό που διέκρινε ο Bohr ήταν μια ρητή πρόκληση στην έννοια της διαταραχής, την έννοια γύρω από την οποία είχε χτίσει το φιλοσοφικό σκηνικό για την κβαντική θεωρία και από την οποία είχε μηχανευτεί (crafted) την ιδέα του περί συμπληρωματικότητας». [Beller & Fine (1994), σελ. 27-8]

πραγματικότητας των EPR δεν έχει ισχύ ικανής συνθήκης εντός του πλαισίου της κβαντικής μηχανικής.⁵⁷

Πριν περάσουμε να εξετάσουμε την ισχύ του κριτηρίου στο πλαίσιο και της κλασικής φυσικής, θα προηγηθεί ένα ακόμα σχόλιο στο πείραμα του επιχειρήματος όπως όμως περιγράφεται από τους EPR, δηλαδή με την αντιγεγονοτική συνεπαγωγή. Έστω ότι παρακάμπτουμε την αδυναμία που υπαγορεύει την αντιγεγονοτική υπόθεση, δηλαδή το να μην μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε το ίδιο σύστημα για τις μετρήσεις μας αλλά δύο συστήματα όμοια προετοιμασμένα. Η αναφορά και πάλι σε ίδια ‘πραγματικότητα’ στην οποία αποδίδονται οι τιμές $\sigma_{2z}=-1$ και $\sigma_{2x}=-1$ είναι παραπλανητική. Σύμφωνα με την κβαντική, οι τιμές αυτές δεν προϋπάρχουν στο σύστημα αλλά αποκτώνται από αυτό τη στιγμή που αλληλεπιδρά με συγκεκριμένες συσκευές. Η τιμή λοιπόν $\sigma_{2z}=-1$ δεν αφορά την ‘πραγματικότητα’ του 2^{ου} σωματιδίου⁵⁸ αλλά την πραγματικότητα όπως θα διαμορφωθεί μετά την αλληλεπίδρασή του με μια συσκευή μέτρησης της κατακόρυφης συνιστώσας του σπιν. Η βέβαιη πρόβλεψή της χωρίς να λάβει χώρα η συγκεκριμένη αλληλεπίδραση δεν συνιστά ικανή συνθήκη για να της αποδώσουμε πραγματικότητα.

Στην κλασική φυσική η βέβαιη πρόβλεψη της τιμής μιας φυσικής ποσότητας συνεπάγεται άραγε πάντοτε ότι η τιμή αυτή έχει αντίστοιχο στη φυσική πραγματικότητα; Θεωρούμε πως όχι και θα το υποστηρίξουμε με ένα παράδειγμα. Έστω ότι διαθέτουμε δύο ίσες ποσότητες αερίου σε διαφορετικές θερμοκρασίες. Η θερμοκρασία της μιας ποσότητας είναι 0°C και της άλλης 50°C. Μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα ότι το σύστημα που θα προκύψει από την ανάμειξη των δύο ποσοτήτων, όταν θα επέλθει θερμική ισορροπία, θα έχει θερμοκρασία 25°C. Η τιμή της θερμοκρασίας του σύνθετου συστήματος, παρά τη βέβαιη πρόβλεψή της, δεν έχει αντίστοιχο στη φυσική πραγματικότητα για το χρονικό διάστημα που μεσολαβεί της ανάμειξης των δύο ποσοτήτων και της επικείμενης θερμικής ισορροπίας, μόνο στο τέλος. Με το παράδειγμα

⁵⁷ Το επιχειρήμα EPR μπορεί να διατυπωθεί χωρίς αναφορά σε μη μετατιθέμενα μεγέθη. Ο Earman (1992) περιγράφει πώς: «Μετράται, φέρ’ ειπείν, το A_1 στα αριστερά και προκύπτει έστω η τιμή +1. Συνάγεται τότε με βεβαιότητα ότι το B_1 έχει την τιμή -1. Έτσι, από το Κριτήριο Πραγματικότητας, μετά τη μέτρηση το σωματίδιο στα δεξιά έχει για το B_1 την τιμή -1. Όμως, σύμφωνα με την Τοπικότητα (Loc), η μέτρηση στα αριστερά δεν μπορεί να ‘δημιουργήσει’ την τιμή που αντιστοιχεί στο B_1 στα δεξιά. Αυτή η τιμή πρέπει, λοιπόν, να προϋπήρχε της στιγμής κατά την οποία έγινε η μέτρηση, και αφού η Κβαντική Μηχανική δεν προβλέπει αυτή την τιμή με βεβαιότητα, η θεωρία δεν είναι πλήρης». [Earman (1992) σελ. 255, διορθωμένη ελληνική μετάφραση (1998) σελ. 349]

⁵⁸ Η ‘πραγματικότητα’ του 2^{ου} σωματιδίου είναι ακόμα αυτή της μονής κατάστασης του σπιν.

αυτό δεν επιδιώκεται η οποιαδήποτε αναλογία με την κβαντομηχανική περίπτωση. Απλώς επισημαίνεται ότι και στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής η βέβαιη πρόβλεψη μιας τιμής (σε δεδομένη χρονική στιγμή) δεν αποτελεί πάντοτε ικανή συνθήκη για την πραγματικότητά της (τη δεδομένη χρονική στιγμή).

1.3.2. Η απάντηση του Bohr στο επιχείρημα EPR - Συμπληρωματικότητα

Στις 15 Οκτωβρίου του 1935 δημοσιεύτηκε άρθρο του Bohr στο *Physical Review* με τον ίδιο ακριβώς τίτλο με αυτόν των EPR, «Μπορεί η κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας να θεωρηθεί πλήρης;». Η ‘επίσημη’ λοιπόν απάντηση στους EPR δόθηκε άμεσα από τον κυριότερο εκπρόσωπο της σχολής της Κοπεγχάγης⁵⁹, τον Δανό φυσικό Niels Bohr (1885-1962), ο οποίος υπερασπίστηκε ανεπιφύλακτα, όπως ήταν άλλωστε αναμενόμενο, την πληρότητα της κβαντομηχανικής περιγραφής. Από την απάντησή του θα ξεχωρίσουμε κυρίως δύο στοιχεία. Το ένα είναι η αναφορά στην έννοια της συμπληρωματικότητας (complementarity): έννοια εξαιρετικής σημασίας που εισήγαγε ο ίδιος στο ερμηνευτικό πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας το 1927. Το δεύτερο είναι η επισήμανσή του περί ουσιώδους ασάφειας στο κριτήριο πραγματικότητας των EPR: ασάφεια η οποία σχετίζεται με το ζήτημα της μη διαταραχής ενός συστήματος.

Ο Bohr χρησιμοποίησε για πρώτη φορά τον όρο συμπληρωματικότητα σε διάλεξή του τον Σεπτέμβριο του 1927 στο Διεθνές Συνέδριο Φυσικής στο Como⁶⁰ της Ιταλίας, με πρόθεση να διαχειριστεί μέσω της ομώνυμης αρχής τον ήδη, επί πολλά χρόνια ακόμα και τότε, διαπιστωμένο κυματοσωματιδιακό δυϊσμό του φωτός και της υποατομικής ύλης. Δεν ήταν τυχαίο ότι νωρίτερα την ίδια χρονιά, δηλαδή τον Φεβρουάριο του 1927, ο Heisenberg (Werner Heisenberg, 1901-1976) είχε ολοκληρώσει την εργασία του για τις περίφημες ‘σχέσεις απροσδιοριστίας’ των φυσικών μεγεθών θέσης-ορμής και χρόνου-ενέργειας. Και δεν ήταν τυχαίο διότι η στάση που τήρησε ο Bohr απέναντι σε αυτές, θεωρώντας ότι αποτελούν άμεση συνέπεια του διλήμματος κύμα-σωματίδιο, τον οδήγησε στην επινόηση της αρχής της συμπληρωματικότητας με απώτερο στόχο να άρει στην

⁵⁹ Το Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής στην Κοπεγχάγη υπό την διεύθυνση του Bohr βρέθηκε τις κρίσιμες δεκαετίες της ανάπτυξης της κβαντικής θεωρίας –1920ς και 30ς– στο επίκεντρο των εξελίξεων. Το σύνολο σχεδόν των σημαντικότερων φυσικών της εποχής πέρασαν από το ινστιτούτο για να συνεργαστούν με το μεγάλο Δανό φυσικό, προς τιμήν του οποίου ο κύκλος που δημιούργησαν ονομάστηκε ‘σχολή της Κοπεγχάγης’.

⁶⁰ Ο τίτλος της διάλεξης ήταν «Το κβαντικό αίτημα και η πρόσφατη ανάπτυξη της ατομικής θεωρίας» (The quantum postulate and the recent development of atomic theory).

κβαντική θεωρία τη λογική αντίφαση που δημιουργούν οι κλασικές έννοιες κύμα και σωματίδιο όταν αποδίδονται στο ίδιο αντικείμενο.

Ας δούμε πιο συγκεκριμένα πώς ο Bohr επιτυγχάνει το στόχο του. Έχει αναφερθεί προηγουμένως ότι σύμφωνα με τη σχέση απροσδιοριστίας $\Delta q \cdot \Delta p \geq \hbar/2$ θέσης-ορμής, με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορίζουμε τη θέση ενός σωματιδίου τόσο περισσότερο αυξάνουμε την ίδια χρονική στιγμή την αβεβαιότητα για την ορμή του και αντιστρόφως. Η προαναφερθείσα σχέση μας παρέχει το όριο, το οποίο δεν μπορούμε να υπερβούμε, όσον αφορά τον ακριβή καθορισμό των μεγεθών θέση και ορμή σε ατομικά και υποατομικά συστήματα. Η υιοθέτησή της άλλωστε είναι διαισθητικώς αναμενόμενη, διότι η ταυτόχρονη και ακριβής μέτρηση της θέσης και της ορμής ενός ηλεκτρονίου αποτελεί αναγκαία προϋπόθεση για το σχηματισμό συνεχών χωροχρονικών τροχιών από ένα σωματίδιο, κι αν *το ηλεκτρόνιο την ικανοποιούσε θα υπήρχε κατ' αρχήν η δυνατότητα να συλληφθεί νομίμως κατηγορηματικά ως σωματίδιο*. Επειδή όμως –όπως έδειξαν πειράματα με ηλεκτρόνια σαν αυτά που αναφέρονται στο τέλος της ενότητας 1.2.1.– ένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί κατηγορηματικά να συλληφθεί ως σωματίδιο, η θέση και η ορμή του δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα με ακρίβεια, παρά μόνο στο βαθμό που επιτρέπεται από την παραπάνω σχέση απροσδιοριστίας.⁶¹ Με άλλα λόγια, ο ακριβής προσδιορισμός της θέσης του ηλεκτρονίου το καθιστά 'σωματίδιο' έτσι ώστε, αποκλείοντας την κυματική εκδήλωση, να επικρατεί απροσδιοριστία στην ορμή. Το αντίστροφο συμβαίνει όταν μετράμε με ακρίβεια την ορμή του. Δηλαδή, καθιστούμε κυρίαρχη την κυματική εκδήλωση του ηλεκτρονίου χάνοντας τη δυνατότητα του εντοπισμού της θέσης, εφόσον αυτή σχετίζεται με την 'παραγκωνισμένη' υπό αυτές τις συνθήκες σωματιδιακή εκδήλωση. Οι δύο εκδηλώσεις, η κυματική και η σωματιδιακή, δεν εμφανίζονται ποτέ την ίδια χρονική στιγμή στο ίδιο κβαντικό αντικείμενο διότι συνιστούν συμπληρωματικές όψεις του και ως εκ τούτου είναι αμοιβαία αποκλειόμενες. Έτσι, ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός, αντιφατικός στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής – διότι συνενώνει κλασικές έννοιες που επινοήθηκαν για να χαρακτηρίσουν δύο απόλυτα διακριτές κατηγορίες αντικειμένων στον μακρόκοσμο– στην κβαντική φυσική, παρέχοντας μια διαισθητική εξήγηση της αρχής απροσδιοριστίας του Heisenberg,

⁶¹ Murdoch (1987), σελ. 52.

καθίσταται απαραίτητος.⁶² Οι σχέσεις απροσδιοριστίας «περιγράφουν τα εφικτά όρια, μέσα στα οποία η εφαρμογή των κλασικών εννοιών, που χαρακτηρίζουν τις δύο συμπληρωματικές εικόνες, είναι δυνατή χωρίς αντίφαση».⁶³

Ο Bohr, στο άρθρο του 1935, τονίζει πως σκοπός της έννοιας της συμπληρωματικότητας είναι ο χαρακτηρισμός μιας εξ ολοκλήρου νέας κατάστασης όσον αφορά την περιγραφή των φυσικών φαινομένων. Η νέα αυτή κατάσταση δεν έχει να κάνει βεβαίως με μη πλήρεις περιγραφές από αυθαίρετα επιλεγμένα στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας εις βάρος κάποιων άλλων στοιχείων της –όπως λίγο πολύ υποστηρίχθηκε από τους EPR. Αλλά, με την ορθολογική διάκριση μεταξύ ουσιωδώς διαφορετικών πειραματικών διατάξεων και διαδικασιών, οι οποίες δημιουργούν τις συνθήκες εκείνες που επιτρέπουν την εκδήλωση μόνο συγκεκριμένων φυσικών ποσοτήτων.⁶⁴ Το απόσπασμα που ακολουθεί είναι χαρακτηριστικό της άποψης του Bohr:

«Στην πραγματικότητα, η απόρριψη σε κάθε πειραματική διάταξη της μιας ή της άλλης των δύο πλευρών της περιγραφής των φυσικών φαινομένων, –ο συνδυασμός των οποίων χαρακτηρίζει τη μέθοδο της κλασικής φυσικής, και επομένως υπό την έννοια αυτή μπορούν να θεωρηθούν ως *συμπληρωματικές* η μια της άλλης,– εξαρτάται ουσιαστικά από τη μη δυνατότητα, στο πεδίο της κβαντικής θεωρίας, να ελεγχθεί με ακρίβεια η αντίδραση του αντικειμένου στις μετρητικές συσκευές, δηλαδή, η μεταφορά ορμής στην περίπτωση μετρήσεων θέσης, και η μετατόπιση στην περίπτωση μετρήσεων ορμής. Σε σχέση με αυτό, οποιαδήποτε σύγκριση κβαντικής μηχανικής και συνήθους στατιστικής μηχανικής, –όσο χρήσιμη κι αν είναι για την τυπική παρουσίαση της θεωρίας,– είναι κατά βάση άσχετη. Όντως, σε κάθε πειραματική διάταξη αρμόζουσα για τη μελέτη κατάλληλων κβαντικών φαινομένων, δεν έχουμε απλώς να κάνουμε με άγνοια της τιμής συγκεκριμένων φυσικών ποσοτήτων, αλλά με τη μη δυνατότητα να ορίσουμε αυτές τις ποσότητες με σαφή τρόπο».⁶⁵

Στο παραπάνω απόσπασμα ο Bohr δεν υποστηρίζει απλώς ότι ο ακριβής καθορισμός των τιμών της θέσης και της ορμής την ίδια χρονική στιγμή είναι αδύνατος διότι οι πειραματικές διατάξεις για τη μέτρηση των μεγεθών αυτών είναι αμοιβαία αποκλειόμενες· υποστηρίζει επιπλέον ότι *η απουσία των κατάλληλων πειραματικών συνθηκών μιας φυσικής ποσότητας δεν καθιστά ανέφικτη μόνο τη μέτρησή της αλλά και τη*

⁶² Murdoch (1987), σελ. 53-4.

⁶³ Καρακώστας (1998), σελ. 21.

⁶⁴ Bohr (1935), σελ. 699-700.

⁶⁵ Bohr (1935), σελ. 700.

με νόημα αναφορά σε αυτή. Όπως γράφει ο Murdoch, «οφείλουμε να μη λέμε ότι η ακριβής γνώση της μιας ιδιότητας συνεπάγεται την άγνοια της άλλης, διότι έχει νόημα να επικαλούμαστε άγνοια μόνο για κάτι που είναι διαθέσιμο να γίνει γνωστό: αν η μία ιδιότητα είναι γνωστή, τότε λόγος για την άλλη ιδιότητα, ακόμη κι ως ‘αναγκαία άγνωστης’, δεν είναι καλώς ορισμένος».⁶⁶

Το δεύτερο πολύ σημαντικό θέμα που προκύπτει από το άρθρο του Bohr το 1935 αφορούσε την επισήμανση δύο διαφορετικών τρόπων διαταραχής ενός συστήματος. Συγκεκριμένα, για τον Bohr, ο *μηχανικός τρόπος διαταραχής* ενός συστήματος, μέσω απευθείας μέτρησης σε αυτό ή μέσω φυσικής διαταραχής που διαδόθηκε από άλλο σύστημα με το οποίο δεν είναι χωροειδώς διαχωρισμένο, δεν αποτελεί τον μόνο τρόπο διαταραχής του. Εφόσον δύο συστήματα έχουν αλληλεπιδράσει στο παρελθόν, όταν θα κληθούν στο μέλλον να αλληλεπιδράσουν με κάποια μετρητική συσκευή, όσο μακριά κι αν βρίσκονται μεταξύ τους, τα αποτελέσματα του ενός θα επηρεάσουν τις προβλέψεις μας για το άλλο. Το γεγονός αυτό δεν έχει να κάνει με κάποιου είδους φυσική διαταραχή μεταξύ απομακρυσμένων γεγονότων αλλά με *διαταραχή γνωσιολογικής φύσεως*.⁶⁷ συνέπεια της κοινής κατάστασης που έφεραν τα δύο συστήματα εξαιτίας της παρελθούσας αλληλεπίδρασής τους. Η *ασάφεια* που καταλόγισε ο Bohr στο κριτήριο πραγματικότητας των EPR, πήγαζε από την αδυναμία τους να διακρίνουν μεταξύ αυτών των δύο διαφορετικών ειδών διαταραχής. Η προϋπόθεση για ‘μη διαταραχή’ που περιλαμβάνεται στο κριτήριο πραγματικότητας παραβιάζεται με τρόπο μη μηχανικό από τις εκάστοτε πειραματικές συνθήκες, εφόσον αυτές δημιουργούν για τα σωματίδια περιβάλλον συμβατό μόνο με μία εκ των δύο ασύμβατων φυσικών ποσοτήτων. Όταν διενεργείται μέτρηση στο 1^ο σωματίδιο δεν τίθεται θέμα φυσικής αλληλεπίδρασης ή μηχανικής διαταραχής του 2^{ου} σωματιδίου, αφού τα δύο σωματίδια είναι χωροειδώς διαχωρισμένα μεταξύ τους. Με άλλα λόγια, η μέτρηση στο 1^ο δεν επηρεάζει αιτιακά τη φυσική κατάσταση του 2^{ου} σωματιδίου. Η απουσία μηχανικής αλληλεπίδρασης δεν θέτει ζήτημα παραβίασης της θεωρίας της σχετικότητας, η οποία απαγορεύει την οποιαδήποτε αλληλεπίδραση μεταξύ χωροειδώς διαχωρισμένων συστημάτων. Επηρεάζει όμως, σύμφωνα με τον Bohr, μέσω της πειραματικής διάταξης που στήνεται, τις συνθήκες που

⁶⁶ Murdoch (1987), σελ. 169.

⁶⁷ Καρακώστας (1998), σελ. 41. Ο Fine χαρακτηρίζει τη διαταραχή αυτή σημασιολογική (semantic disturbance). [Fine (1996), σελ. 35]

καθορίζουν «τους δυνατούς τύπους των θεωρητικών προβλέψεων ως προς τη μελλοντική συμπεριφορά» του 2^{ου} σωματιδίου. Τουτέστιν, μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα την τιμή μιας φυσικής ποσότητας για το 2^ο σωματίδιο, χωρίς να διενεργήσουμε μέτρηση σε αυτό, μόνο σε σχέση με τις πειραματικές συνθήκες που διαμορφώθηκαν κατά τη διενεργούμενη μέτρηση στο 1^ο σωματίδιο. Δεν μπορούμε όμως με νόημα να αναφερθούμε στη συγκεκριμένη τιμή για το 2^ο σωματίδιο όταν απουσιάζουν για το ίδιο οι συνθήκες εκείνες, ή αλλιώς το πειραματικό πλαίσιο, που αποδίδουν νόημα στην αναφορά μας.⁶⁸ Το απόσπασμα που ακολουθεί είναι διαφωτιστικό της προσέγγισης του Bohr επί του θέματος:

«Υπό αυτή τη θεώρηση [της συμπληρωματικότητας] ... το κριτήριο της φυσικής πραγματικότητας των Einstein, Podolsky και Rosen περιέχει μια ασάφεια ως προς την έκφραση 'χωρίς να διαταράξουμε με οποιοδήποτε τρόπο το σύστημα'. Φυσικά, σε περιπτώσεις όπως η εξεταζόμενη [δηλαδή, χωρικά διαχωρισμένων συστημάτων] δεν τίθεται θέμα για μηχανική διαταραχή ... αλλά για μια επίδραση επί αυτών των ίδιων των συνθηκών, οι οποίες καθορίζουν τους δυνατούς τύπους των θεωρητικών προβλέψεων ως προς τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος. Επειδή αυτές οι συνθήκες [ότι, δηλαδή, μετρούμενο αντικείμενο και συσκευή μέτρησης, μετά την αλληλεπίδραση, αποτελούν μια αδιαίρετη ολότητα] συνιστούν εγγενές στοιχείο της περιγραφής οποιουδήποτε φαινομένου, στο οποίο μπορεί ορθά να αποδοθεί ο όρος 'φυσική πραγματικότητα', διαπιστώνουμε ότι η επιχειρηματολογία των ανωτέρω συγγραφέων [των EPR] δεν δικαιολογεί το συμπέρασμά τους, ότι η κβαντομηχανική περιγραφή δεν είναι πλήρης».⁶⁹

Η αναγνώριση αυτής και μόνο της ασάφειας που επισημάνθηκε από τον Bohr στο κριτήριο πραγματικότητας των EPR –το οποίο κατά τα λοιπά δεν αμφισβητούσε– αρκούσε κατά τη γνώμη του για να πληγεί το επιχείρημά τους. Το θέμα της διττής φύσης της διαταραχής –μηχανικής και γνωσιολογικής– θα μας απασχολήσει ξανά στην επόμενη ενότητα, διότι σχετίζεται με έννοιες που βρέθηκαν στο στόχαστρο του ενδιαφέροντος από το θεώρημα Bell. Οι σημαντικότερες εξ αυτών είναι οι έννοιες της 'τοπικότητας' και της 'διαχωρισιμότητας', για τις οποίες έχει γίνει πολύ λόγος και οι οποίες έχουν αποδοθεί όπως θα δούμε με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους.

⁶⁸ Καρακώστας (1998) σελ. 41. Murdoch (1987), σελ. 170.

⁶⁹ Bohr (1935), σελ. 699. Απόδοση και επεξηγηματικές παρενθέσεις, Καρακώστας (1998) σελ. 41-2.

1.4. Το θεώρημα Bell (1964)

Οι EPR έχοντας δείξει, κατά τη γνώμη τους, τη μη πληρότητα της κβαντομηχανικής περιγραφής μέσω της κυματοσυνάρτησης, ολοκλήρωναν το άρθρο τους διατυπώνοντας την πεποίθηση ότι μια θεωρία, η οποία θα αποκαθιστά την πληρότητα στην περιγραφή, είναι δυνατή. Έδωσαν έτσι πνοή στο πρόγραμμα συμπλήρωσης της κβαντικής μηχανικής από *θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών* (hidden variable theories).⁷⁰ Μια τέτοια θεωρία υποτίθεται ότι αφορά ένα βαθύτερο υποκβαντικό επίπεδο, στο οποίο οι διαφορετικές τιμές των μεταβλητών του συνδέονται αιτιακά με τις διακυμάνσεις των τιμών κάποιων ιδιοτήτων στο κβαντικό επίπεδο. Οι μεταβλητές αυτές, είτε προσωρινά μη μετρήσιμες είτε γενικά, θα καθορίζουν επακριβώς τις τιμές ιδιοτήτων –που αδυνατεί για τους υπέρμαχους της μη πληρότητας να καθορίσει η κβαντική μηχανική– σε συστήματα που η κβαντική τους κατάσταση περιγράφεται από την ίδια κυματοσυνάρτηση.⁷¹

Με το ‘ελπιδοφόρο’ πρόγραμμα των κρυμμένων μεταβλητών –ή ‘λανθανουσών παραμέτρων’ όπως αλλιώς αποδίδονται– σχετίστηκε το 1964 το άρθρο του Ιρλανδού φυσικού John Stuart Bell (1928-1990) «Περί του παραδόξου των Einstein, Podolsky και Rosen»: το περιεχόμενο του οποίου έμελλε επίσης να αφήσει εποχή και να επηρεάσει σε υπερβολικό βαθμό τις κοινότητες των φυσικών και των φιλοσόφων της φυσικής. Ο συγγραφέας του ανέπτυξε σε αυτό μαθηματικά την ιδέα της συμπλήρωσης της κβαντικής μηχανικής από πρόσθετες μεταβλητές, ώστε να εξασφαλίζεται η αιτιοκρατία και η ‘τοπικότητα’ που προέβλεπαν οι EPR, και κατέληξε σε μια *ανισότητα* που θα πρέπει να ικανοποιούν οι ‘συμπληρωμένες’ θεωρίες. Η παραγόμενη ανισότητα ονομάστηκε *ανισότητα Bell* και διαπιστώθηκε η παραβίασή της από την κβαντική μηχανική. Ως εκ τούτου, η εργασία του Bell έδειξε ότι μια ερμηνευτική θεωρία της κβαντικής μηχανικής μέσω κρυμμένων μεταβλητών, η οποία θα αποκαθιστά την αιτιοκρατία και θα ικανοποιεί μια συγκεκριμένη συνθήκη ‘τοπικότητας’,⁷² είναι ασύμβατη με τις στατιστικές

⁷⁰ Σύμφωνα με τον Fine, ο Einstein δεν θεωρούσε πιθανό το ενδεχόμενο διεξόδου από τον στατιστικό χαρακτήρα της κβαντικής θεωρίας με μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών. Ο Einstein πίστευε ότι η κβαντική θεωρία ασχολείται με λάθος έννοιες και κατά συνέπεια δεν απαιτείται η συμπλήρωσή τους αλλά η αντικατάστασή τους. [Fine (1996), σελ. 57-8]

⁷¹ Powers (1991/1995), σελ. 197.

⁷² Οι έννοιες τοπικότητα και διαχωρισιμότητα, ενώ θα έπρεπε να διακρίνονται, πολύ συχνά συγγέονται στη βιβλιογραφία. Ο Bell μάλλον δεν αποτελούσε εξαίρεση και τις χρησιμοποιούσε, τουλάχιστον στο άρθρο του 1964, χωρίς να τις διακρίνει. Ενδεικτικά στην εισαγωγή του «Περί του παραδόξου των EPR», γράφει, «χωρίς μια τέτοια απαίτηση διαχωρισιμότητας ή τοπικότητας ... » [Bell (1964/1987), σελ. 14]. Για την αποφυγή παρανοήσεων, όταν σημειώνεται ο όρος τοπικότητα με εισαγωγικά θα αναφέρεται σε ορισμούς

προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής. Υπεύθυνη για τη μη συμβατότητα θεωρήθηκε κατά τον Bell η συνθήκη ‘τοπικότητας’, από την οποία, σε γενικές γραμμές, απαιτείται «το αποτέλεσμα μιας μέτρησης σε ένα σύστημα να μην επηρεάζεται από λειτουργίες σε απομακρυσμένο σύστημα με το οποίο είχε αλληλεπιδράσει στο παρελθόν».⁷³ Με άλλα λόγια, το συμπέρασμά του ήταν ότι για να αναπαράγει μια αιτιοκρατική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών τις στατιστικές προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής θα πρέπει να είναι *μη τοπική*.⁷⁴

Από το 1964 μέχρι σήμερα έχουν παραχθεί αρκετές παραλλαγές της αρχικής ανισότητας του Bell. Μία από τις ανισότητες τύπου Bell όπως χαρακτηρίζονται, την οφείλουμε στους Clauser, Horne, Shimony και Holt οι οποίοι το 1969 επιδίωξαν τη γενίκευση της αρχικής ανισότητας ώστε να επιδέχεται επιβεβαίωση ή διάψευση με πραγματοποιήσιμα πειράματα. Ο πειραματικός έλεγχος επιβεβαίωσε τις κβαντομηχανικές προβλέψεις εις βάρος των ‘τοπικών’ θεωριών κρυμμένων μεταβλητών. Άλλες απόπειρες διατύπωσης ανισοτήτων τύπου Bell θέλησαν να δείξουν ότι θα ήταν λάθος να αποδώσουμε την ευθύνη για την ασυμβατότητα των ‘τοπικών’ θεωριών κρυμμένων μεταβλητών με τις κβαντομηχανικές προβλέψεις στην αιτιοκρατία και όχι στην ‘τοπικότητα’. Ο ίδιος ο Bell, σε επόμενο άρθρο του το 1971, «Εισαγωγή στο θέμα των κρυμμένων μεταβλητών», έδειξε ότι και μια στοχαστική θεωρία ‘τοπικού’ χαρακτήρα, δηλαδή μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που θα καθορίζει τις πιθανότητες των δυνατών αποτελεσμάτων των μετρήσεων και όχι τις ακριβείς τιμές τους, είναι επίσης ασύμβατη με την κβαντική μηχανική.⁷⁵

που χρησιμοποιήθηκαν χωρίς να τον διακρίνουν με σαφήνεια από τον όρο διαχωρισιμότητα. Οι ορισμοί που υιοθετεί η παρούσα εργασία για τις συγκεκριμένες έννοιες ώστε η διάκρισή τους να είναι όσο το δυνατό πιο ξεκάθαρη θα δοθούν στη συνέχεια χωρίς εισαγωγικά στους επίμαχους όρους.

⁷³ Bell (1964/1987), σελ. 14.

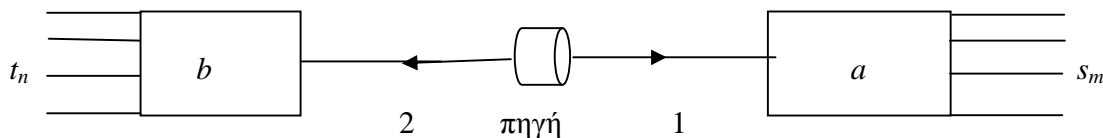
⁷⁴ Bell (1964/1987), σελ. 14. Του άρθρου του 1964 είχε προηγηθεί η συγγραφή ενός άλλου με συναφές περιεχόμενο το οποίο όμως εκδόθηκε αργότερα, το 1966. Ο τίτλος του ήταν «Περί του προβλήματος των κρυμμένων μεταβλητών στην κβαντική μηχανική» και σε αυτό ο Bell ασχολήθηκε με τρεις αποδείξεις για το ότι είναι μαθηματικά αδύνατο να υπάρξει μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών της κβαντικής μηχανικής. Κατά τον Bell η απόδειξη του von Neumann, η νεότερη εκδοχή της από τους Jauch και Piron και ένα συγκεκριμένο πόρισμα από το αξιοθαύμαστο μαθηματικό έργο του Gleason, είναι ουσιαστικά ανεπαρκή για να μας πείσουν για μια τέτοια μη δυνατότητα· κι αυτό διότι στη δομή των αποδείξεων περιέχονται κάποιες, όπως τις χαρακτηρίζει, αυθαίρετες υποθέσεις. Το γεγονός ότι διαθέτουμε μία τουλάχιστον θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που ερμηνεύει τη στοιχειώδη κβαντική θεωρία, όπως αυτή του Bohm, η οποία όμως δεν είναι προσφιλής διότι επιδεικνύει κατάφωρα μη τοπικό χαρακτήρα, θα έπρεπε να μας στρέψει, κατά τη γνώμη του, σε άλλες ‘αποδείξεις μη δυνατότητας’.

⁷⁵ Bell (1971). Clauser & Horne (1974), σελ. 526.

Εφόσον, όπως είναι πλέον ευρέως αποδεκτό, το καθοριστικό στοιχείο στο θεώρημα Bell είναι η έννοια της ‘τοπικότητας’ και όχι η αιτιοκρατία, θα επιλέξουμε να παρουσιάσουμε μια στοχαστική εκδοχή ανισότητας Bell, ώστε οι όποιες συνέπειες που θα προκύψουν να μην είναι δυνατό να αποδοθούν στον ντετερμινιστικό χαρακτήρα. Για την παρουσίαση θα ακολουθήσουμε γενικά –εκτός μικρών αλλαγών– τη δομή και τον συμβολισμό που χρησιμοποιεί ο Abner Shimony στην εργασία του «Μια ανάλυση του θεωρήματος του Bell».⁷⁶

1.4.1. Στοχαστική εκδοχή του θεωρήματος Bell

Έστω, λοιπόν, ένα στατιστικό σύνολο (ensemble) αποτελούμενο από ζεύγη σωματιδίων 1+2, όπου με ‘1’, ‘2’ συμβολίζονται τα σωματίδια του κάθε ζεύγους. Τα ζεύγη 1+2 του στατιστικού συνόλου είναι όλα προετοιμασμένα στην ίδια κβαντική κατάσταση φ , ενώ η πλήρης κατάσταση του κάθε ζεύγους –δηλαδή η κβαντική κατάσταση συμπληρωμένη από πρόσθετες μεταβλητές ώστε να καθορίζονται επακριβώς οι πιθανότητες των αποτελεσμάτων των διενεργούμενων μετρήσεων– συμβολίζεται με λ , όπου λ ανήκει στο χώρο Λ των πλήρων καταστάσεων. Τα ζεύγη των σωματιδίων εκπέμπονται με ομοιόμορφο τρόπο από μια πηγή όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Η μόνη υπόθεση που κάνουμε για τη δομή του χώρου Λ είναι ότι μπορούν να οριστούν σε αυτόν μέτρα πιθανότητας. Κάθε ζεύγος σωματιδίων που εκπέμπεται από την πηγή μπορεί να έχει, ή όχι, την ίδια πλήρη κατάσταση, οπότε στο στατιστικό σύνολο θα διαθέτουμε ένα μείγμα καταστάσεων λ . Έστω $\rho(\lambda)$ η κανονικοποιημένη πυκνότητα πιθανότητας επί του χώρου Λ που διέπει το στατιστικό σύνολο των ζευγών. Η σχετική συνθήκη κανονικοποίησης είναι

$$\int_{\Lambda} \rho(\lambda) d\lambda = 1$$

Το σωματίδιο 1 μετά την εκπομπή του από την πηγή εισάγεται σε αναλυτή με ελεγχόμενη παράμετρο a , την οποία καθορίζει ελεύθερα πειραματιστής μέσω ενός μοχλού. Ομοίως, το σωματίδιο 2 εισάγεται σε έτερο αναλυτή με ελεγχόμενη παράμετρο

⁷⁶ Shimony (1990), σελ. 33-43. Επαναδημοσίευση, Shimony (1993), σελ. 90-103.

b. Με s_m (όπου $m=1, 2, 3 \dots$ ο αύξων αριθμός για τα ζεύγη που εκπέμπονται από την πηγή) και t_n ($n=1, 2, 3 \dots$ όπως προηγουμένως) συμβολίζουμε τα δυνατά αποτελέσματα της ανάλυσης του σωματιδίου 1 και του σωματιδίου 2 αντίστοιχα. Για να διευκολυνθούμε από μαθηματικής άποψης θεωρούμε ότι όλες οι δυνατές τιμές των s_m και t_n περιέχονται στο διάστημα $[-1,1]$. Θεωρούμε επίσης ότι, από τη στιγμή που οι παράμετροι a , b και η πλήρης κατάσταση λ έχουν καθοριστεί, οι πιθανότητες των διαφόρων αποτελεσμάτων της ανάλυσης είναι καλά ορισμένες είτε αυτά αφορούν τα σωματίδια ξεχωριστά είτε αφορούν τη συζευγμένη τους κατάσταση. Εισάγουμε λοιπόν τους παρακάτω όρους:

$p^1(m/\lambda, a, b)$ είναι η πιθανότητα του αποτελέσματος s_m της ανάλυσης του σωματιδίου 1, δεδομένης της πλήρης κατάστασης λ και των παραμέτρων a και b .

$p^2(n/\lambda, a, b)$ είναι η πιθανότητα του αποτελέσματος t_n της ανάλυσης του σωματιδίου 2, δεδομένων και πάλι των λ , a και b .

$p(m, n/\lambda, a, b)$ είναι η πιθανότητα των συζευγμένων αποτελεσμάτων (joint outcomes) s_m και t_n , δεδομένων των λ , a και b .

$p^1(m/\lambda, a, b, n)$ είναι η πιθανότητα του αποτελέσματος s_m της ανάλυσης του σωματιδίου 1, δεδομένων των λ , a , b και του αποτελέσματος t_n της ανάλυσης του σωματιδίου 2.

$p^2(n/\lambda, a, b, m)$ είναι η πιθανότητα του αποτελέσματος t_n της ανάλυσης του σωματιδίου 2, δεδομένων των λ , a , b και του αποτελέσματος s_m της ανάλυσης του σωματιδίου 1.

Από τις γενικές αρχές της θεωρίας των πιθανοτήτων –χωρίς επιπλέον υποθέσεις– τίθεται ο ακόλουθος κανόνας γινομένου:

$$p(m, n/\lambda, a, b) = p^1(m/\lambda, a, b) p^2(n/\lambda, a, b, m) = p^2(n/\lambda, a, b) p^1(m/\lambda, a, b, n) \quad (1.4.I)$$

Στη συνέχεια ο Shimony διατυπώνει δύο συνθήκες ανεξαρτησίας. Την ‘ανεξαρτησία από παράμετρο’ (parameter independence) και την ‘ανεξαρτησία από αποτέλεσμα’ (outcome independence). Η εισαγωγή τους θα μας οδηγήσει σε μια μαθηματική έκφραση της υπόθεσης ‘τοπικότητας’ που έγινε από τον Bell η οποία τις εμπεριέχει χωρίς να τις διακρίνει. (Οι συνθήκες αυτές πρωτοπαρουσιάστηκαν διακρινόμενες μεταξύ τους –με διαφορετικό όμως συμβολισμό και ονομασία– από τον

Jarrett το 1984.⁷⁷ Ο Don Howard, επίσης, υιοθέτησε και ονόμασε με τη σειρά του διαφορετικά τις ίδιες συνθήκες ανεξαρτησίας, που σε αυτό το στάδιο απλά θα αναφερθούν αφήνοντας τη διεξοδική ανάλυσή τους για αργότερα. Μετά την ανάλυση θα διατηρήσουμε ουσιαστικά την ονοματολογία του Howard στην παρούσα εργασία θεωρώντας την καταλληλότερη να αποδώσει ό,τι αυτές αντιπροσωπεύουν.)

Ανεξαρτησία από παράμετρο κατά Shimony ή **απλή τοπικότητα** κατά Jarrett ή **τοπικότητα** κατά Howard: $p^1(m / \lambda, a, b) = p^1(m / \lambda, a)$, δηλαδή η πιθανότητα του αποτελέσματος s_m της ανάλυσης του σωματιδίου 1 δεδομένων των λ, a , είναι ανεξάρτητη από την παράμετρο b του έτερου αναλυτή. Ομοίως, $p^2(n / \lambda, a, b) = p^2(n / \lambda, b)$.

Ανεξαρτησία από αποτέλεσμα κατά Shimony ή **προβλεπτική πληρότητα** (predictive completeness) κατά Jarrett ή **διαχωρισιμότητα** (separability) κατά Howard:

$p^1(m / \lambda, a, b, n) = p^1(m / \lambda, a, b)$ δηλαδή η πιθανότητα του αποτελέσματος s_m της ανάλυσης του σωματιδίου 1 δεδομένων των λ, a, b είναι ανεξάρτητη του αποτελέσματος t_n της ανάλυσης του σωματιδίου 2. Ομοίως, $p^2(n / \lambda, a, b, m) = p^2(n / \lambda, a, b)$.

Η σύζευξη της ‘ανεξαρτησίας από αποτέλεσμα’ και της ‘ανεξαρτησίας από παράμετρο’ σε συνδυασμό με τη σχέση (1.4.I), δηλαδή τον κανόνα γινομένου από τη θεωρία των πιθανοτήτων, συνεπάγεται την ακόλουθη συνθήκη:

$$p(m, n / \lambda, a, b) = p^1(m / \lambda, a) p^2(n / \lambda, b) \quad (1.4.II)$$

Η σχέση (1.4.II) αποτελεί τη μαθηματική έκφραση της ‘**τοπικότητας**’ Bell και καλείται επίσης συνθήκη **παραγοντοποιησιμότητας** (factorizability condition) ή συνθήκη **ισχυρής τοπικότητας** (strong locality condition) κατά Jarrett.

Ορίζουμε τις παρακάτω αναμενόμενες τιμές βάσει των αποτελεσμάτων s_m και t_n και των κατάλληλων πιθανοτήτων:

$E^1(\lambda, a) = \sum_m p^1(m / \lambda, a) s_m$ είναι η αναμενόμενη τιμή του αποτελέσματος της ανάλυσης του σωματιδίου 1, δεδομένης της πλήρους κατάστασης λ και της παραμέτρου a .⁷⁸

$E^2(\lambda, b) = \sum_n p^2(n / \lambda, b) t_n$ είναι η αναμενόμενη τιμή του αποτελέσματος της ανάλυσης του σωματιδίου 2, δεδομένης της πλήρους κατάστασης λ και της παραμέτρου b .

$E(\lambda, a, b) = \sum_{m,n} p(m, n / \lambda, a, b) s_m t_n$ είναι η αναμενόμενη τιμή του γινομένου των αποτελεσμάτων της ανάλυσης των δύο σωματιδίων, δεδομένων των λ, a, b .

⁷⁷ Jarrett (1984), σελ. 569-589.

⁷⁸ Για παράδειγμα, έστω $m=1,2,3$ και $s_1=0.5, s_2=0.7, s_3=0.6$ όπου $p(s_1)=p(s_2)=p(s_3)=1/3$. Ισχύει ότι: $E^1(\lambda, a) = 1/3 \cdot 0.5 + 1/3 \cdot 0.7 + 1/3 \cdot 0.6 = 0.6$

Οι παραπάνω ορισμοί μαζί με την συνθήκη (1.4.II) δίνουν την ακόλουθη σχέση:

$$E(\lambda, a, b) = E^1(\lambda, a) E^2(\lambda, b) \quad (1.4.III)$$

Για να προχωρήσουμε στη διατύπωση μιας ανισότητας Bell θα χρειαστεί ένα απλό μαθηματικό λήμμα. Σύμφωνα με αυτό, αν τα x', y', x'' , και y'' ανήκουν στο διάστημα $[-1, 1]$, τότε το S , όπου $S = x'y' + x'y'' + x''y' - x''y''$, ανήκει στο διάστημα $[-2, 2]$.⁷⁹ Για να εφαρμόσουμε το λήμμα στο φυσικό μας πρόβλημα θέτουμε όπου x', y', x'' και y'' τα $E^1(\lambda, a')$, $E^2(\lambda, b')$, $E^1(\lambda, a'')$ και $E^2(\lambda, b'')$ αντίστοιχα. Εφόσον οι δυνατές τιμές των αποτελεσμάτων s_m και t_n ανήκουν στο διάστημα $[-1, 1]$, το ίδιο θα ισχύει και για τις τέσσερις προαναφερθείσες αναμενόμενες τιμές. Οπότε, η προϋπόθεση του λήμματος πληρείται. Κατά συνέπεια θα πρέπει να ικανοποιείται και το συμπέρασμά του, δηλαδή

$$-2 \leq E^1(\lambda, a') \cdot E^2(\lambda, b') + E^1(\lambda, a') \cdot E^2(\lambda, b'') + E^1(\lambda, a'') \cdot E^2(\lambda, b') - E^1(\lambda, a'') \cdot E^2(\lambda, b'') \leq 2$$

το οποίο σε συνδυασμό με την εξίσωση (1.4.III) δίνει:

$$-2 \leq E(\lambda, a', b') + E(\lambda, a', b'') + E(\lambda, a'', b') - E(\lambda, a'', b'') \leq 2 \quad (1.4.IV)$$

Εάν ολοκληρώσουμε την ανισότητα (1.4.IV) πάνω στον χώρο των πλήρων καταστάσεων \mathcal{A} , χρησιμοποιώντας την πυκνότητα πιθανότητας ρ , τη συνθήκη κανονικοποίησής της, καθώς και τον ορισμό της στατιστικώς αναμενόμενης τιμής (ensemble expectation value) $E_\rho(a, b)$ ως $E_\rho(a, b) = \int_{\mathcal{A}} E(\lambda, a, b) \rho(\lambda) d\lambda$, έχουμε:

$$-2 \leq E_\rho(a', b') + E_\rho(a', b'') + E_\rho(a'', b') - E_\rho(a'', b'') \leq 2 \quad (1.4.V)$$

Η σχέση (1.4.V) αποτελεί μια εκδοχή *ανισότητας Bell* την οποία θα πρέπει να ικανοποιεί μια στοχαστική και 'τοπική' κατά Bell θεωρία κρυμμένων μεταβλητών. Η παρουσίαση του θεωρήματος Bell θα ολοκληρωθεί με το να δείξουμε ότι οι στατιστικές προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής, υπό ορισμένες συνθήκες, συγκρούονται με την ανισότητα (1.4.V). Έστω λοιπόν ότι τα 'σωματίδια' του σχήματος στη σελίδα 46 είναι ζεύγος φωτονίων των οποίων η κβαντική κατάσταση πόλωσης περιγράφεται από τη συνάρτηση:

$$\phi = \frac{1}{\sqrt{2}} [u_x(1)u_x(2) + u_y(1)u_y(2)]$$

Όπου $u_x(1)$, $u_x(2)$, $u_y(1)$, $u_y(2)$, κανονικοποιημένα διανύσματα που αναπαριστούν για το φωτόνιο 1 ή το φωτόνιο 2 –ανάλογα με τον συμβολισμό– κβαντικές καταστάσεις γραμμικής πόλωσης κατά μήκος του άξονα- x ή του άξονα- y . Όπως είναι φανερό, η ϕ

⁷⁹ Απόδειξη του λήμματος υπάρχει στο Shimony (1990) σελ. 35.

αποτελεί υπέρθεση δύο καταστάσεων, στη μία από τις οποίες και τα δύο φωτόνια είναι γραμμικά πολωμένα κατά μήκος του άξονα- x ενώ στην άλλη και τα δύο φωτόνια είναι γραμμικά πολωμένα κατά μήκος του άξονα- y . Κανένα από τα δύο φωτόνια όντας στην κατάσταση φ δεν έχει καθορισμένη πόλωση σε σχέση με τους άξονες x και y . Τα αποτελέσματα όμως των μετρήσεων για την πόλωσή τους, όσον αφορά τους άξονες αυτούς, είναι *αυστηρώς συσχετισμένα* (strictly correlated). Δηλαδή, αν το φωτόνιο 1 είναι γραμμικά πολωμένο κατά μήκος του άξονα- x , θα περάσει μέσω του αντίστοιχου πολωτικού φίλτρου και το ίδιο θα συμβεί στο φωτόνιο 2· στην περίπτωση που θα ανακοπεί η διέλευση του φωτονίου 1 από το πολωτικό φίλτρο, θα ανακοπεί και η διέλευση του φωτονίου 2 από το αντίστοιχο πολωτικό φίλτρο.

Συνεπώς, μετά την εκπομπή των δύο φωτονίων του κάθε ζεύγους από την πηγή, διαδίδονται σε αντίθετες κατευθύνσεις κατά μήκος του άξονα- z , προς πολωτικά φίλτρα τοποθετημένα κάθετα στη διεύθυνση του εν λόγω άξονα. Η παράμετρος a είναι η γωνία μεταξύ του άξονα- x και του άξονα μετάδοσης του φίλτρου πόλωσης για το φωτόνιο 1· η παράμετρος b έχει αντίστοιχη σημασία για το φωτόνιο 2. Η διέλευση ή όχι των φωτονίων από τα φίλτρα στα οποία κατευθύνονται, αποδίδεται με τις αριθμητικές τιμές 1 και -1 αντίστοιχα. Υπολογίζεται ότι για την κατάσταση φ το κβαντομηχανικό ανάλογο της στατιστικώς αναμενόμενης τιμής δίνεται από τη σχέση:

$$E_{\varphi}(a, b) = \cos 2(b-a)$$

Επιλέγοντας $a' = \pi/4$, $b' = \pi/8$, $a'' = 0$ και $b'' = 3\pi/8$, βρίσκουμε χρησιμοποιώντας την προηγούμενη σχέση, ότι:

$$E_{\varphi}(a', b') = E_{\varphi}(a', b'') = E_{\varphi}(a'', b') = -E_{\varphi}(a'', b'') = 0.707$$

Οπότε, το άθροισμα που οριοθετείται από την ανισότητα Bell μεταξύ -2 και 2 –σχέση (1.4.V)– υπολογίζεται στην περίπτωση που περιγράψαμε

$$E_{\varphi}(a', b') + E_{\varphi}(a', b'') + E_{\varphi}(a'', b') - E_{\varphi}(a'', b'') = 2.828,$$

εκδηλώνοντας την ασυμφωνία των κβαντομηχανικών προβλέψεων με την ανισότητα Bell.

Το γεγονός της παραβίασης της ανισότητας Bell από την κβαντική μηχανική είναι εξαιρετικής σημασίας, διότι μας παρέχει τη δυνατότητα να ελέγξουμε πειραματικά και να επιβεβαιώσουμε –κατά κάποιον τρόπο– την ισχύ είτε των θεωριών κρυμμένων μεταβλητών ‘τοπικού’ χαρακτήρα είτε της κβαντικής μηχανικής. Η συντριπτική

πλειονότητα των πειραμάτων που πραγματοποιήθηκαν έδωσαν αποτελέσματα εναρμονισμένα με τις κβαντομηχανικές προβλέψεις.⁸⁰ Οπότε, η διερεύνηση της ασυμφωνίας της ανισότητας Bell με την πειραματική μαρτυρία πια και όχι απλώς με τις κβαντομηχανικές προβλέψεις, έστρεψε το ενδιαφέρον κυρίως στις συνθήκες ανεξαρτησίας ‘τοπικού’ χαρακτήρα που προϋποτίθενται κατά την παραγωγή της ανισότητας. Στο πνεύμα αυτό, πραγματοποιήθηκε το 1982 ένα καθοριστικό πείραμα από τους Aspect, Dalibard και Roger,⁸¹ το οποίο αφορούσε την πόλωση ζευγών φωτονίων, οι αναλυτές των οποίων βρίσκονταν σε απόσταση 13m περίπου μεταξύ τους. Η επιλογή των παραμέτρων μεταξύ των τιμών a' και a'' στον αναλυτή του φωτονίου 1, και των τιμών b' και b'' στον έτερο αναλυτή, άλλαξε στο πείραμά τους κάθε 10nsec (10^{-9} sec) μέσω οπτικο-ακουστικών διακόπτων. Στόχος τους ήταν να καταστήσουν τα γεγονότα της ανάλυσης των δύο φωτονίων στα δύο απομακρυσμένα πολωτικά φίλτρα χωροειδώς (spacelike) διαχωρισμένα, ώστε να αποκλείσουν το ενδεχόμενο –σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας– να συνδέονται αιτιακά. Κι αυτό διότι, το χρονικό διάστημα που θα απαιτούνταν για να διανυθεί η μεταξύ τους απόσταση από κάποιο σήμα με σχετικιστικώς επιτρεπόμενη ταχύτητα, δεν θα μπορούσε να είναι μικρότερο από 40nsec. Οι αναμενόμενες τιμές που προέκυψαν από το πείραμά τους, παραβίασαν και αυτή τη φορά την ανισότητα Bell, ενώ επιβεβαίωσαν –μέσα στο πλαίσιο του επιτρεπόμενου πειραματικού σφάλματος– τις κβαντομηχανικές προβλέψεις. Το πείραμα αυτό αποτέλεσε, όπως γράφει χαρακτηριστικά ο Shimony, «εκπληκτική επιβεβαίωση της κβαντικής μηχανικής σε ένα σημείο που έδειχνε εκτεθειμένη σε κίνδυνο, καθώς και εκπληκτική εκδήλωση της ύπαρξης κάποιου είδους μη τοπικότητας στον φυσικό κόσμο».⁸² Επομένως, η ‘τοπικότητα’ και οι διάφορες εκφάνσεις της θα είναι το θέμα της ενότητας που ακολουθεί.

1.4.2. Τοπικότητα - Διαχωρισιμότητα: η κβαντική μηχανική ως τοπική μη διαχωρίσιμη θεωρία

Συνοψίζοντας το θεώρημα Bell και τις άμεσες συνέπειές του, οφείλουμε μάλλον να αποδεχτούμε ότι μια ‘τοπική’ κατά Bell θεωρία κρυμμένων μεταβλητών, σύμφωνη με τις

⁸⁰ Στο Redhead (1987), σελ. 108, υπάρχει σχετικός πίνακας όπου παρουσιάζονται συνοπτικά τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν μέχρι το 1985 για να ελεγχθεί η ανισότητα Bell.

⁸¹ Aspect, Dalibar & Roger (1982).

⁸² Shimony (1990), σελ. 38.

προσδοκίες των EPR, αποτυγχάνει να περιγράψει τον μικρόκοσμο. Κι αυτό επειδή, όταν αντιπαραβάλλεται με την πειραματική μαρτυρία αποδεικνύεται ανεπαρκής, άσχετα από το αν διαθέτει αιτιοκρατικό ή στοχαστικό χαρακτήρα. Η διαπίστωση ότι μια τέτοια θεωρία διαφοροποιείται σε σχέση με το σύνολο των στατιστικών προβλέψεων της κβαντικής μηχανικής ήταν βεβαίως αναμενόμενη δεδομένου του σκοπού για τον οποίο επινοήθηκαν, δηλαδή τη συμπλήρωση της κβαντικής θεωρίας ώστε να αποκατασταθεί η πληρότητα στις προβλέψεις της όσον αφορά τις ιδιότητες των οντοτήτων του μικρόκοσμου. Ωστόσο, το γεγονός ότι τα πειράματα επιβεβαίωσαν τις κβαντομηχανικές προβλέψεις επέφερε καθοριστικό πλήγμα στην υπόθεση ότι οι ιδιότητες αυτές είναι καθορισμένες ανεξαρτήτως της μετρητικής διαδικασίας, ενίσχυσε την πεποίθηση για την πληρότητα της κβαντικής θεωρίας και τοποθέτησε στο επίκεντρο του ενδιαφέροντος το ζήτημα της ‘τοπικότητας’. Η προσπάθεια να αποσαφηνιστεί ο ‘τοπικός’ χαρακτήρας έφερε αναπόφευκτα στο φως αξιοσημείωτα χαρακτηριστικά του μικρόκοσμου.

Η πρώτη αποτελεσματική απόπειρα να διερευνηθεί η έννοια της ‘τοπικότητας’, όπως έχει ήδη αναφερθεί, οφείλεται στον Jarrett το 1984. Ο Jarrett έδειξε ότι η συνθήκη ‘τοπικότητας’ του θεωρήματος Bell –ή αλλιώς ‘ισχυρή τοπικότητα’, σύμφωνα με τη δική του ορολογία– αποτελεί σύζευξη δύο ασθενέστερων συνθηκών με διακριτό ρόλο ως προς τις απαιτήσεις που θέτουν: της (απλής) ‘τοπικότητας’ ή ‘ανεξαρτησίας από παράμετρο’ και της (προβλεπτικής) ‘πληρότητας’ ή ‘ανεξαρτησίας από αποτέλεσμα’.

Η ‘τοπικότητα’ κατά Jarrett ή ‘ανεξαρτησία από παράμετρο’ κατά Shimony, απαιτεί η πιθανότητα για το αποτέλεσμα μιας μέτρησης σε ένα σύστημα, να μην εξαρτάται από τη ρύθμιση της παραμέτρου μιας απομακρυσμένης από αυτό μετρητικής συσκευής. Αν το υπό εξέταση σύστημα αποτελεί υποσύστημα ενός σύνθετου συστήματος –όπως το σωματίδιο 1 στην περίπτωση του ζεύγους σωματιδίων– τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε αυτό, ή οι πιθανότητές τους, θα πρέπει να εξαρτώνται αποκλειστικά από την πλήρη κατάσταση του σύνθετου συστήματος και από τη ρύθμιση της παραμέτρου στη δική του συσκευή μέτρησης. Με άλλα λόγια, το αν θα διενεργηθεί μέτρηση, ή το είδος της μέτρησης που θα διενεργηθεί σε κάθε υποσύστημα, δεν θα πρέπει να επηρεάζει τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο άλλο. Η ανεξαρτησία από παράμετρο ή (απλή) τοπικότητα αποκλείει συνεπώς τη δυνατότητα να ασκηθεί αιτιακή επίδραση από την προετοιμασία της μετρητικής συσκευής του ενός υποσυστήματος στις

πιθανότητες των δυνατών αποτελεσμάτων των μετρήσεων του άλλου υποσυστήματος. Το περιεχόμενο αυτής της συνθήκης ανεξαρτησίας, στην πιο γενική της μορφή, θα αποτελέσει για τη συνέχεια ό,τι θα αποκαλούμε, ακολουθώντας τον Howard, *αρχή τοπικότητας* (locality principle):

«... η αρχή τοπικότητας (η οποία δεν θα πρέπει να συγχέεται με τη συνθήκη ‘τοπικότητας’ Bell) διακηρύσσει ότι η κατάσταση ενός συστήματος δεν επηρεάζεται από γεγονότα σε περιοχές του σύμπαντος τόσο απομακρυσμένες από το δεδομένο σύστημα ώστε κανένα σήμα να μην μπορεί να τα συνδέσει».⁸³

Η μη παραβίαση της παραπάνω *αρχής τοπικότητας* από την κβαντική μηχανική είναι ιδιαίτερος σημαντική διότι μάλλον⁸⁴ εξασφαλίζει την ειρηνική συνύπαρξή της με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Το ενδεχόμενο της φυσικής επίδρασης ενός γεγονότος στα αποτελέσματα των μετρήσεων συστήματος με το οποίο είναι χωροειδώς διαχωρισμένο, θα συγκρουόταν με τη σχετικιστική αρχή του πρώτου-σήματος (first-signal principle of special relativity). Σύμφωνα με αυτήν, δεν είναι δυνατόν να έχουμε διάδοση σήματος με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός και στην περίπτωση χωροειδώς διαχωρισμένων γεγονότων μόνο ένα σήμα που θα την παραβίαζε, δηλαδή ένα σήμα με υπερφωτεινή ταχύτητα, θα μπορούσε να τα συνδέσει αιτιακά.⁸⁵

Επιπρόσθετα, η ‘πληρότητα’ κατά Jarrett ή ‘ανεξαρτησία από αποτέλεσμα’ κατά Shimony, απαιτεί η πιθανότητα ενός αποτελέσματος μέτρησης σε ένα σύστημα να μην εξαρτάται από το αποτέλεσμα της μέτρησης σε ένα άλλο σύστημα με το οποίο είχε αλληλεπιδράσει στο παρελθόν.⁸⁶ Ο Howard ισχυρίστηκε ότι αυτού του είδους η ανεξαρτησία συνεπάγεται, ή προϋποθέτει, ό,τι αυτός ονομάζει *αρχή χωροχρονικής*

⁸³ Howard (1989), σελ. 226-7.

⁸⁴ Ο Maudlin στο βιβλίο του *Quantum Non-Locality and Relativity* διερευνά τη συμβατότητα μεταξύ της θεωρίας της σχετικότητας και της παραβίασης της ανισότητας Bell. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει είναι το ακόλουθο: «Η κβαντική θεωρία και η σχετικότητα φαίνεται να μην αντικρούουν άμεσα η μία την άλλη, αλλά ούτε μπορούν εύκολα να συμφιλιωθούν. Κάτι πρέπει να θυσιάσει: είτε η σχετικότητα είτε κάποιο θεμελιώδες στοιχείο της κοσμολογίας μας πρέπει να τροποποιηθεί». [Maudlin (1994) σελ. 242]

⁸⁵ Σειρά άρθρων [ενδεικτικά αναφέρουμε, Ghirardi, Rimini & Weber (1980), Bussey (1982)] ασχολείται με το γεγονός ότι δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τις κβαντομηχανικές συσχετίσεις για να στείλουμε μήνυμα με υπερφωτεινή ταχύτητα, δηλαδή με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. Οι διάφορες αποδείξεις του ‘no-signaling’ θεωρήματος όπως ονομάστηκε δείχνουν ότι η κβαντική μηχανική δεν επιτρέπει την υπερφωτεινή επικοινωνία και κατά συνέπεια ικανοποιεί την αρχή τοπικότητας εφόσον η παραβίασή της προϋποθέτει υπερφωτεινή δράση.

⁸⁶ Ο όρος ‘πληρότητα’ που χρησιμοποιούσε ο Jarrett για να αποδώσει την ανεξαρτησία από αποτέλεσμα θεωρήθηκε γενικώς μη επιτυχημένος. Όπως επισημαίνει ο Shimony [(1984)/1993 σελ. 132] μια θεωρία μπορεί να μην ικανοποιεί τη συγκεκριμένη ανεξαρτησία και παρόλα αυτά να είναι ‘πλήρης’ υπό την έννοια ότι η περιγραφή της για ένα σύστημα περιέχει ό,τι είναι δυνατόν να ειπωθεί για αυτό.

διαχωρισιμότητας –ή απλά **αρχή διαχωρισιμότητας** (separability principle)– σύμφωνα με την οποία:

« ... το περιεχόμενο δύο οποιωνδήποτε περιοχών του χωρόχρονου, διαχωρισμένων από μη μηδενικό χωροχρονικό διάστημα, συνιστά διαχωρίσιμα φυσικά συστήματα, υπό την έννοια ότι (1) καθένα κατέχει τη δική του, ξεχωριστή (distinct) φυσική κατάσταση, και (2) η σύνθετη κατάσταση (joint state) των δύο συστημάτων καθορίζεται πλήρως από αυτές τις ξεχωριστές καταστάσεις». ⁸⁷

Η ανεξαρτησία της πιθανότητας ενός αποτελέσματος μέτρησης σε ένα σύστημα από το αποτέλεσμα που μετρήθηκε σε ένα άλλο σύστημα –με το οποίο είχε αλληλεπιδράσει στο παρελθόν– προϋποθέτει τα δύο συστήματα να διαθέτουν, παρά την παρελθούσα αλληλεπίδρασή τους, ξεχωριστές καταστάσεις. Είναι σαν μετά το χωροχρονικό διαχωρισμό τους να επιβλήθηκε και διαχωρισμός της κοινής κατάστασης που δημιούργησαν αλληλεπιδρώντας. Οι διαχωρίσιμες αυτές καταστάσεις καθορίζουν πλήρως την κοινή κατάσταση, υπό την έννοια ότι καμιά πρόβλεψη δεν μπορεί να γίνει βάσει αυτών η οποία δεν έχει ήδη γίνει βάσει της κοινής κατάστασης. Στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής κάτι τέτοιο δεν ισχύει. Για παράδειγμα, η πρόβλεψη για το σπιν του 2^ο σωματιδίου κατά τη διεύθυνση του άξονα z σύμφωνα με τη μονή κατάσταση του σπιν –συνάρτηση (1.3.II) σελ. 32– δίνει πιθανότητα ½ για το αποτέλεσμα $\sigma_{2z}=+1$ αν γίνει μέτρηση. Μια μέτρηση όμως στο 1^ο σωματίδιο η οποία θα έδινε αποτέλεσμα $\sigma_{1z}=+1$ θα μετέβαλε την προηγούμενη πιθανότητα σε 0. Η παραβίαση της ανεξαρτησίας από αποτέλεσμα στην κβαντική μηχανική υποδεικνύει την ύπαρξη μη διαχωρισιμότητας.

Ο Καρακώστας ⁸⁸ τονίζει ότι ο μη διαχωρίσιμος χαρακτήρας της κβαντικής μηχανικής οφείλεται σε δύο δομικά στοιχεία του φορμαλισμού της. Πρώτον, στη δομή του τανυστικού γινομένου του χώρου Hilbert, και δεύτερον, στην αρχή της υπέρθεσης των καταστάσεων. Δύναται να διαπιστωθεί ότι η παραβίαση της αρχής της διαχωρισιμότητας αποτελεί απόρροια των δύο αυτών χαρακτηριστικών, αποφεύγοντας την όποια αναφορά στο θεώρημα Bell και τα συνεπακόλουθά του. Η μόνη περίπτωση όπου στην κβαντική θεωρία ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας είναι όταν η κατάσταση του σύνθετου συστήματος «αποκτά τη μορφή μιας παραγοντοποιημένης κατάστασης (ή

⁸⁷ Howard (1989), σελ. 225-6. Παράβαλε την αντίστοιχη αρχή από το Καρακώστας (2005a) σελ. 115 της παρούσας εργασίας.

⁸⁸ Karakostas (2004) σελ. 285-7, Καρακώστας (2005a) σελ. 230-1.

κατάστασης γινομένου, product state) και συνεπώς αναπαριστά μία εξατομικευμένη, μεμονωμένη κατάσταση ... η οποία είναι αναγώγιμη στις επιμέρους καταστάσεις των υποσυστημάτων του». Η περίπτωση αυτή είναι όμως «τετριμμένη από φυσική άποψη διότι προϋποθέτει την απουσία οποιασδήποτε αλληλεπίδρασης μεταξύ των συνιστώντων υποσυστημάτων ενός σύνθετου συστήματος». ⁸⁹ Η παραμικρή αλληλεπίδραση ενός υποσυστήματος με το περιβάλλον του οδηγεί το σύνθετο σύστημα σε συζευγμένη κατάσταση (entangled state), η οποία, αντίθετα από την κατάσταση γινομένου, δεν μπορεί να αναχθεί σε καλώς ορισμένες 'καθαρές καταστάσεις' (pure states) των υποσυστημάτων του. ⁹⁰

Ο Howard θεωρεί ότι υπάρχουν δύο τρόποι άρνησης της αρχής της διαχωρισιμότητας: ένας *μετριοπαθής* που αφορά τη *μη διαχωρισιμότητα των καταστάσεων* και ένας *ριζικός* που αφορά τη *μη διαχωρισιμότητα των συστημάτων*. ⁹¹ Πιο συγκεκριμένα, ο *μετριοπαθής* υποστηρίζει ότι τα χωροχρονικά διαχωρισμένα συστήματα δεν διαθέτουν πάντοτε χωριστές καταστάσεις, ή ισοδύναμα, η σύνθετη κατάστασή τους δεν καθορίζεται πλήρως από τις χωριστές καταστάσεις τους. Ο *ριζικός* υποστηρίζει ότι ο χωροχρονικός διαχωρισμός δεν αποτελεί ικανή συνθήκη για την εξατομίκευση συστημάτων και υπό ορισμένες συνθήκες δύο απομακρυσμένες περιοχές του χωρόχρονου συνιστούν ένα και μόνο σύστημα.

Ο Healey ορίζει τη διαχωρισιμότητα καταστάσεων ως εξής:

«Διαχωρισιμότητα καταστάσεων: η κατάσταση που αποδίδεται σε ένα σύνθετο φυσικό σύστημα κάθε χρονική στιγμή επιγίνεται των καταστάσεων που αποδίδονται στα υποσυστήματα που το συνθέτουν». ⁹²

Όπως σημειώνει ο Healey, η κβαντική μηχανική παραβιάζει την παραπάνω αρχή με δύο τρόπους. Πρώτον, στα υποσυστήματα δεν είναι δυνατόν να αποδοθούν πάντοτε χωριστές καταστάσεις, και δεύτερον, οι καταστάσεις που τους αποδίδονται, όταν αυτό είναι εφικτό, αποτυγχάνουν να καθορίσουν την κατάσταση του σύνθετου συστήματος. ⁹³

Η παρούσα εργασία ασπάζεται τη μετριοπαθή εκδοχή της μη διαχωρισιμότητας καταστάσεων για την κβαντική μηχανική. Η κυρίαρχη διαίσθηση είναι ότι όταν

⁸⁹ Καρακώστας (2005a), σελ. 231.

⁹⁰ Karakostas (2004), σελ. 287.

⁹¹ Howard (1989), σελ. 226.

⁹² Healey (2008), σελ. 8.

⁹³ Healey (2008), σελ. 8.

εκτελούμε μια μέτρηση στη χωροχρονική επικράτεια του ενός από τα δύο υποσυστήματα, μετρούμε μια ιδιότητα για το ένα μόνο, αυτό που αλληλεπιδρά με τη μετρητική συσκευή, και όχι μια ιδιότητα του ενιαίου συστήματος που υποτίθεται ότι αποτελούν σύμφωνα με τη ριζική εκδοχή της μη διαχωρισιμότητας των συστημάτων. Η μέτρηση γίνεται στο ένα από τα δύο, όχι και στα δύο, αφού μια μετρητική συσκευή είναι μακροσκοπικό αντικείμενο που δρα σε περιορισμένης έκτασης χώρο. Άλλωστε, θα μπορούσαμε ίσως να ισχυριστούμε και ότι η συσκευή μέτρησης μαζί με το μετρούμενο σύστημα αποτελούν παράδειγμα της μετριοπαθούς εκδοχής της μη διαχωρισιμότητας. Η κατάσταση που αποκτάται από το σύστημα μετά τη μέτρηση συνιστά μη διαχωρίσιμη πραγματικότητα με τη συσκευή, αν και μετρητική συσκευή-μετρούμενο σύστημα είναι αναμφίβολα διακριτά μεταξύ τους συστήματα.

Το μη μηδενικό χωροχρονικό διάστημα, λοιπόν, φαίνεται να επαρκεί για να διαχωρίσει τα συστήματα, όχι όμως και τις καταστάσεις τους· γι αυτό και το αποτέλεσμα μιας μέτρησης στο ένα σύστημα επηρεάζει την πρόβλεψή μας για το αποτέλεσμα αντίστοιχης μέτρησης στη χωροχρονική επικράτεια του άλλου συστήματος. Η εξατομίκευση των συστημάτων προϋποτίθεται κατά τη μέτρηση, ενώ η διάκριση των καταστάσεών τους επέρχεται για το καθένα από αυτά με τη μετρητική διαδικασία, η οποία επιτυγχάνει τη ‘λύση’ της αρχικής σύνθετης –και μη διαχωρίσιμης– κατάστασής τους που δεν στάθηκε ικανός ο χωροχρονικός διαχωρισμός να επιτύχει. Για να γίνει η συγκεκριμένη αντίληψη κατανοητή ας θυμηθούμε ξανά το παράδειγμα με τα δύο σωματίδια. Η κατάσταση που περιγράφει την ιδιότητα σπιν-πάνω αποκτάται –με πιθανότητα $\frac{1}{2}$ – από το 1^ο σωματίδιο όταν αυτό αλληλεπιδρά με την κατάλληλη μετρητική συσκευή. Η ιδιότητα όμως σπιν-κάτω, αν και προβλέπεται με βεβαιότητα για το 2^ο σωματίδιο λόγω του μη διαχωρίσιμου της κατάστασής του με το 1^ο σωματίδιο, δεν αποκτάται από αυτό με τη μέτρηση στο 1^ο. Διότι, εάν συνέβαινε κάτι τέτοιο, θα έπρεπε τότε να αποδεχτούμε ένα ενδεχόμενο που έχουμε αποκλείσει, δηλαδή εκείνο της μηχανικής διαταραχής μεταξύ χωροειδώς διαχωρισμένων περιοχών του σύμπαντος· ή να αποδεχτούμε ότι οι ιδιότητες αυτές προϋπάρχουν των διαδικασιών μέτρησης, το οποίο επίσης έχουμε αποκλείσει. Η κατάσταση της ιδιότητας σπιν-κάτω θα αποκτηθεί από το 2^ο σωματίδιο με μια μέτρηση σε αυτό με την κατάλληλη μετρητική συσκευή και μέχρι να συμβεί αυτή ή κάποια άλλη

μέτρηση, δηλαδή μέχρι να πραγματοποιήσει το σωματίδιο μια νέα αλληλεπίδραση, χαρακτηρίζεται από τη σύνθετη κατάσταση που απέκτησε από την αλληλεπίδρασή του με το 1^ο σωματίδιο. Όπως επισημαίνεται από τον Καρακώστα, «υπάρχει ένα είδος σύζευξης μεταξύ των αρχικά αλληλεπιδρώντων και στη συνέχεια διαχωρισμένων σωματιδίων 1 και 2, που δεν είναι δυνατό να αναχθεί στο κλασικώς αναμενόμενο γεγονός ότι κάθε ένα από τα σωματίδια, ανεξαρτήτως του άλλου, μεταφέρει μια καταγραφή της προηγούμενης κοινής αρχικής τους κατάστασης», δηλαδή, η κοινή αρχική τους κατάσταση «δεν είναι δυνατό να επιμερισθεί σε ανεξάρτητα χαρακτηριστικά των δύο σωματιδίων».⁹⁴

Θα ήταν ίσως διαφωτιστικό να επισημανθεί η συνάφεια των αντιλήψεων του Bohr, όπως παρουσιάζονται στην απάντησή του προς τους EPR, με όσα αναφέρθηκαν στην παρούσα ενότητα. Η αναφορά του στην ύπαρξη ουσιώδους ασάφειας στον τρόπο με τον οποίο οι EPR θίγουν το ζήτημα της ‘τοπικότητας’, λέγοντας δηλαδή ‘χωρίς να διαταράζουμε με οποιονδήποτε τρόπο το σύστημα’, θα μπορούσε να θεωρηθεί προπομπός της διάκρισης που γίνεται πια μεταξύ τοπικότητας και διαχωρισιμότητας. Θυμίζουμε ότι η ασάφεια που καταλογίζει ο Bohr στους EPR αφορούσε τη μη διάκριση δύο διαφορετικών ειδών ‘διαταραχής’ ενός συστήματος: της μηχανικής διαταραχής του και της διαταραχής των συνθηκών εκείνων που καθορίζουν τις μελλοντικές προβλέψεις για τη συμπεριφορά του.

Οι δύο αυτοί τρόποι ‘διαταραχής’ συνδέονται άμεσα με τις έννοιες της τοπικότητας και διαχωρισιμότητας. Η μηχανική διαταραχή, η οποία μπορεί να προκληθεί είτε με απευθείας μέτρηση στο σύστημα είτε μέσω επίδρασης διαδιδόμενης με υποφωτεινή ταχύτητα από άλλο σύστημα χωρικώς διαχωρισμένο από το πρώτο, σχετίζεται με την τοπικότητα. Η ύπαρξη μηχανικής διαταραχής μεταξύ χωροειδώς απομακρυσμένων συστημάτων προϋποθέτει τη διάδοσή της με υπερφωτεινή ταχύτητα και ακολούθως την παραβίαση της συνθήκης τοπικότητας και της σχετικιστικής αρχής του πρώτου-σήματος. Το είδος αυτό της διαταραχής απουσιάζει κατά τον Bohr στην περίπτωση των συσχετίσεων τύπου EPR και έχουμε την εμφάνιση μιας άλλης ‘διαταραχής’, γνωσιολογικής φύσεως όπως χαρακτηρίστηκε. Δηλαδή, τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε ένα σύστημα μεταβάλλουν τις προβλέψεις μας για τα αποτελέσματα

⁹⁴ Καρακώστας (1998), σελ. 47.

μετρήσεων σε ένα άλλο σύστημα με το οποίο είχε, πριν την πραγματοποίηση των μετρήσεων, αλληλεπιδράσει. Το γεγονός αυτό αποδόθηκε στη μη διαχωρισιμότητα των καταστάσεών τους που προκλήθηκε με την αλληλεπίδρασή τους. Επομένως, η επίδραση, για την οποία κάνει λόγο ο Bohr, στις συνθήκες «που καθορίζουν τις δυνατές προβλέψεις όσον αφορά τη μελλοντική συμπεριφορά του συστήματος» όταν διενεργείται μέτρηση στο άλλο σύστημα, ταυτίζεται με την εκδήλωση της εξάρτησης από αποτέλεσμα που οφείλεται στη μη διαχωρισιμότητα και δεν απαιτεί υπερφωτεινή δράση. Με άλλα λόγια, η γνωσιολογικής φύσεως ‘διαταραχή’ του Bohr υποδεικνύει την ύπαρξη μη διαχωρίσιμων στοιχείων της πραγματικότητας. Και αυτό, σύμφωνα με αρκετούς σχολιαστές, ήταν το κυριότερο σημείο της διαμάχης του με τον Einstein, ο οποίος θεωρούσε ιδιαίτερος σημαντική για την άσκηση της φυσικής επιστήμης τη δυνατότητα θεώρησης διαχωρίσιμων στοιχείων στον φυσικό κόσμο.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα, ας αναφέρουμε απλώς ότι το ζήτημα της εξατομίκευσης των συστημάτων και των καταστάσεών τους άνοιξε νέους προβληματισμούς, όπως τι συνιστά εξατομίκευση (individuality) και τι συνιστά διακρισιμότητα (distinguishability) και εάν αυτές οι δύο έννοιες θα πρέπει να διακρίνονται ή όχι. Για την ώρα, οφείλουμε να αναγνωρίσουμε από ό,τι προηγήθηκε, πως «οι σύγχρονες αναλύσεις του επιχειρήματος EPR, ιδιαίτερα, υπό το φως των ανισοτήτων του Bell, έχουν αποκαλύψει ότι η κβαντική θεωρία –πλήρης ή μη– δεν συμβιβάζεται με τη θεώρηση ότι ο μικρόκοσμος αντιστοιχεί σε μια διαχωρίσιμη, αναλύσιμη στα συνιστώσα μέρη της, πραγματικότητα».⁹⁵

⁹⁵ Καρακώστας (1998), σελ. 47.

1.5. Το θεώρημα Kochen-Specker (1967)

Το θεώρημα Kochen-Specker αποτελεί, μαζί με εκείνο του Bell, το δεύτερο πιο σημαντικό θεώρημα ‘αποκλεισμού των κρυμμένων μεταβλητών’ (‘no-hidden-variables’ theorem) –ή αλλιώς ‘απαγορευτικό’ (‘no-go’) θεώρημα. Συνιστά δηλαδή απόδειξη για το ότι μια επανερμηνεία της κβαντικής μηχανικής μέσω μιας θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών δεν είναι εφικτή άνευ αντιφάσεων με την κλασική εικόνα του κόσμου που είχαμε συνηθίσει μέχρι τώρα. Γεγονός οξύμωρο αν αναλογιστεί κανείς ότι το βασικό κίνητρο για την ανεύρεση τέτοιων θεωριών ήταν και παραμένει η αποκατάσταση αυτής της εικόνας. Οι κρυμμένες μεταβλητές υποτίθεται ότι αναφέρονται σε ένα βαθύτερο επίπεδο περιγραφής του κόσμου. Το βαθύτερο αυτό υποκβαντικό επίπεδο προσεγγίζεται κλασικά και ενώ διατηρεί ανέπαφη την κβαντική μηχανική, καταστεί ταυτοχρόνως κατανοητή την παρατηρούμενη στο κβαντικό επίπεδο διασπορά των τιμών κάποιων παρατηρήσιμων μεγεθών. Οι υποθετικές ‘καταστάσεις μηδενικής διασποράς’ (dispersion free states) μιας επιτυχημένης θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών, προσδοκείται ότι θα συνδέονται με τη στατιστικού χαρακτήρα κβαντική μηχανική όπως συνδέονται οι καταστάσεις της κλασικής μηχανικής με την κλασική στατιστική μηχανική. Δηλαδή, θα αντιπροσωπεύουν την πραγματική κατάσταση ενός συστήματος, για το οποίο οι πιθανοκρατικές προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας εκφράζουν απλώς το μέτρο της άγνοιάς μας για αυτήν. Τα ‘απαγορευτικά’ θεώρημα θέτουν υπό αμφισβήτηση τη δυνατότητα εκπλήρωσης της προαναφερθείσας προσδοκίας.

Ιστορικά το πρώτο ‘απαγορευτικό’ θεώρημα διατυπώθηκε από τον von Neumann το 1932. Διατήρησε μάλιστα την επιρροή του αμείωτη τουλάχιστον για τρεις δεκαετίες – αποτρέποντας πολλούς φυσικούς της εποχής εκείνης να εργαστούν σε προγράμματα κρυμμένων μεταβλητών– πριν αναγνωρισθεί ως ανεπαρκές, κι αυτό ως ένα μεγάλο βαθμό εξαιτίας του αδιαμφισβήτητου επιστημονικού κύρους του συντάκτη του. Αν και η Γερμανίδα μαθηματικός και φιλόσοφος Grete Hermann (1901-1984) είχε ήδη από το 1935 ανακαλύψει ένα ολοφάνερο ελάττωμα στην απόδειξη του von Neumann, η διαπίστωσή της αγνοήθηκε παντελώς έως ότου το ψεγάδι της απόδειξης ανακαλύφθηκε ξανά το 1966 από τον Bell.⁹⁶

⁹⁶ Mermin (1993), σελ. 805. Βλέπε και υποσημείωση 74 σελ. 45.

Ο Bell υπογραμμίζει ότι ο von Neumann απέδειξε τη μη δυνατότητα να έχουμε καταστάσεις μηδενικής διασποράς –και άρα κρυμμένες μεταβλητές– στηριζόμενος στην εξής αυθαίρετη υπόθεση:

*Κάθε πραγματικός γραμμικός συνδυασμός δύο οποιωνδήποτε Ερμιτιανών τελεστών αναπαριστά ένα παρατηρήσιμο μέγεθος, και ο ίδιος γραμμικός συνδυασμός των αναμενόμενων τιμών αποτελεί την αναμενόμενη τιμή του συνδυασμού.*⁹⁷

Η παραπάνω υπόθεση, όντας αληθής για τις στατιστικού χαρακτήρα κβαντομηχανικές καταστάσεις, υποστηρίχθηκε από τον von Neumann –χωρίς να θέσει κάποιον περιορισμό– ότι θα πρέπει να είναι αληθής και για τις υποθετικές καταστάσεις μηδενικής διασποράς. Για τις τελευταίες όμως δεν υφίσταται στατιστικός χαρακτήρας, οπότε οι αναμενόμενες τιμές των παρατηρήσιμων μεγεθών σε αυτές δεν μπορεί παρά να είναι οι εκάστοτε ιδιοτιμές των αντίστοιχων τελεστών.⁹⁸ ο γραμμικός συνδυασμός των οποίων δεν ικανοποιεί την υπόθεση του von Neumann παρά μόνο στην περίπτωση που οι τελεστές των μεγεθών μετατίθενται ώστε να διαθέτουν ιδιοτιμές ταυτόχρονα. Συνεπώς, η υπόθεση καθίσταται αυθαίρετη εάν δεν περιορίζεται σε ερμιτιανούς τελεστές –και άρα στα παρατηρήσιμα μεγέθη που αυτοί αναπαριστούν– οι τιμές των οποίων μπορούν να καθοριστούν ταυτόχρονα· με άλλα λόγια, εάν δεν περιορίζεται σε τελεστές συμβατών παρατηρήσιμων μεγεθών.⁹⁹

Θα δοθεί ένα παράδειγμα για να γίνει σαφές ό,τι μόλις αναφέρθηκε. Έστω δύο συμβατά παρατηρήσιμα μεγέθη A, B και ο γραμμικός συνδυασμός τους $C=A+B$. Αν συμβολίσουμε με $\nu(A)$, $\nu(B)$, $\nu(C)$ τις αντίστοιχες τιμές ενός συστήματος για τα παρατηρήσιμα μεγέθη A, B, C, τότε σύμφωνα με την παραπάνω υπόθεση θα πρέπει να ισχύει ότι

$$\nu(C) = \nu(A) + \nu(B).$$

Όταν έχουμε να κάνουμε με συμβατά παρατηρήσιμα μεγέθη, δηλαδή με μεγέθη που μπορούν να μετρηθούν μαζί, η προηγούμενη σχέση ικανοποιείται από τις ιδιοτιμές των αντίστοιχων τελεστών. Στην περίπτωση όμως που τα A, B δεν αποτελούν συμβατά

⁹⁷ Bell (1966/1987), σελ. 4.

⁹⁸ Οι δυνατές τιμές παρατηρήσιμων μεγεθών με διακριτό φάσμα περιορίζονται στις ιδιοτιμές του αντίστοιχου τελεστή [κανόνας φάσματος (spectrum rule)]. Επίσης, αν η κατάσταση ενός συστήματος αποτελεί ιδιοδιάνυσμα τελεστή που αναπαριστά κάποιο παρατηρήσιμο μέγεθος, τότε η τιμή του μεγέθους ισούται με την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στο ιδιοδιάνυσμα [σχέση ιδιοτιμής-ιδιοκατάστασης (eigenvalue-eigenstate link)].

⁹⁹ Bell (1966/1987), σελ. 4-5.

παρατηρήσιμα μεγέθη, η ταυτόχρονη μέτρησή τους αποκλείεται εφόσον οι τελεστές τους δεν μετατίθενται και δεν μπορούν να έχουν ταυτόχρονες ιδιοτιμές· συνέπεια όλων αυτών είναι να μην ικανοποιείται η προσθετικότητα των τιμών τους. Όπως σημειώνεται από τον Bell: «Δεν ήταν οι αντικειμενικές μετρήσιμες προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής που απέκλεισαν τις κρυμμένες μεταβλητές. Ήταν η αυθαίρετη υπόθεση μιας συγκεκριμένης (και αδύνατης) σχέσης μεταξύ των αποτελεσμάτων ασύμβατων μετρήσεων που καθεμία εξ αυτών *θα μπορούσε* να πραγματοποιηθεί σε μια δεδομένη περίπτωση, αλλά μόνο μία εξ αυτών *μπορεί* πραγματικά να πραγματοποιηθεί».¹⁰⁰

Οι Kochen και Specker δηλώνουν απερίφραστα το 1967 στο άρθρο τους, «Το πρόβλημα των κρυμμένων μεταβλητών στην κβαντική μηχανική», ότι κύριος σκοπός τους είναι να παρέχουν μια απόδειξη για τη μη ύπαρξη κρυμμένων μεταβλητών και για να το επιτύχουν θα πρέπει αρχικά να διατυπώσουν μία τουλάχιστον αναγκαία συνθήκη για την ύπαρξή τους.¹⁰¹

*Αναγκαία συνθήκη ύπαρξης κρυμμένων μεταβλητών για την κβαντική μηχανική αποτελεί η δυνατότητα ένθεσης (ή εμφύτευσης, imbedding) της μερικής (partial) άλγεβρας Q των κβαντομηχανικών παρατηρήσιμων μεγεθών σε μια μεταθετική (commutative) άλγεβρα.*¹⁰²

Η κλασική δομή των θεωριών κρυμμένων μεταβλητών οφείλει να αναπαρίσταται από μια μεταθετική άλγεβρα, ενώ η προαναφερθείσα μερική άλγεβρα Q προκύπτει εάν περιορίσουμε τις πράξεις του αθροίσματος και του γινομένου σε τελεστές –ενός συνόλου κβαντομηχανικών παρατηρήσιμων μεγεθών– του χώρου Hilbert που μετατίθενται.¹⁰³ Οι Kochen και Specker δείχνουν τελικώς ότι υπάρχει μια πεπερασμένη μερική άλγεβρα κβαντομηχανικών μεγεθών για την οποία η ένθεση, που χαρακτηρίζεται ως αναγκαία από την παραπάνω συνθήκη, είναι αδύνατη.¹⁰⁴ Και το δείχνουν εργαζόμενοι στον τρισδιάστατο χώρο Hilbert με ένα σύνολο παρατηρήσιμων μεγεθών για τα οποία αποδεικνύεται ότι δεν γίνεται να τους αποδοθούν τιμές με τέτοιο τρόπο ώστε όλες οι

¹⁰⁰ Bell (1966/1987), σελ. 5. Ο Bell διορθώνοντας το ελάττωμα της απόδειξης συνέταξε ένα δικό του 'απαγορευτικό' θεώρημα, στο ίδιο πνεύμα με αυτό που ανέπτυξαν λίγο αργότερα, και ανεξάρτητα, οι Kochen και Specker. Γι αυτό το λόγο πολλοί συγγραφείς αναφέρονται σε Bell-Kochen-Specker θεώρημα.

¹⁰¹ Kochen & Specker (1967), σελ. 59.

¹⁰² Kochen & Specker (1967), σελ. 66.

¹⁰³ Είναι προφανές ότι ο περιορισμός σε συμβατά παρατηρήσιμα μεγέθη λειτουργεί διορθωτικά σε σχέση με την απόδειξη του von Neumann που τον παρέλειψε αδικαιολόγητα.

¹⁰⁴ Kochen & Specker (1967), σελ. 60.

συναρτησιακές σχέσεις, μεταξύ αμοιβαία μετατιθέμενων υποσυνόλων των αντίστοιχων τελεστών, να ικανοποιούνται από αυτές.

Λόγω της πολυπλοκότητας της πρωτότυπης απόδειξης, στην οποία εμπλέκονται 117 τρισδιάστατα διανύσματα, θα παρουσιαστεί μια απλούστερη εκδοχή της στον τετραδιάστατο χώρο με 18 διανύσματα που οφείλεται στον Adán Cabello και τους συνεργάτες του.¹⁰⁵ Έστω λοιπόν ένα μεμονωμένο φυσικό σύστημα όπου με $v(\mathbf{u})$ συμβολίζεται η απάντηση στην πρόταση που αντιστοιχεί στον τελεστή προβολής $P_{\mathbf{u}}$ σε μια μη-πλαισιακή θεωρία κρυμμένων μεταβλητών (non-contextual hidden-variables theory): για $v(\mathbf{u})=1$ η απάντηση είναι 'ναι' ενώ για $v(\mathbf{u})=0$ 'όχι'. Το διάνυσμα \mathbf{u} με συνιστώσες u_i και $i=1,2,3,4$ αντιπροσωπεύει την κατάσταση του συστήματος.

Οι προκείμενες που ενέχονται στο θεώρημα Kochen-Specker διατυπώνονται από τους Cabello, Estebaranz & García-Alcaine ως εξής:

(**α**) Σε ένα μεμονωμένο σύστημα κάθε πρόταση P_{u_i} έχει μία και μοναδική απάντηση, 0 ή 1, η οποία είναι ανεξάρτητη από το ποια άλλα παρατηρήσιμα μεγέθη λαμβάνονται από κοινού υπόψη. (non-contextuality, μη-πλαισιακότητα ή πλαισιακή ανεξαρτησία)

(**β**) Για κάθε σύνολο μονοδιάστατων τελεστών προβολής το άθροισμα των οποίων είναι ο μοναδιαίος πίνακας στο n -διάστατο χώρο Hilbert των καταστάσεων του συστήματος, η απάντηση σε έναν και μόνο έναν από τους τελεστές προβολής είναι 1 ενώ οι απαντήσεις στους άλλους $n-1$ είναι 0.¹⁰⁶

Στον τετραδιάστατο χώρο η σχέση που προκύπτει σύμφωνα με την προκείμενη (**β**) είναι:

$$v(P_{u_1}) + v(P_{u_2}) + v(P_{u_3}) + v(P_{u_4}) = 1$$

Έστω οι παρακάτω απαντήσεις στους τελεστές προβολής των 9 ακόλουθων συνόλων από ορθογώνια τετραδιάστατα διανύσματα:

$$v(0,0,0,1) + v(0,0,1,0) + v(1,1,0,0) + v(1,-1,0,0) = 1 \quad (1)$$

$$v(0,0,0,1) + v(0,1,0,0) + v(1,0,1,0) + v(1,0,-1,0) = 1 \quad (2)$$

$$v(1,-1,1,-1) + v(1,-1,-1,1) + v(1,1,0,0) + v(0,0,1,1) = 1 \quad (3)$$

$$v(1,-1,1,-1) + v(1,1,1,1) + v(1,0,-1,0) + v(0,1,0,-1) = 1 \quad (4)$$

¹⁰⁵ Cabello, Estebaranz & García-Alcaine (1996), σελ. 183-7. Αν και οι αποδείξεις για περισσότερες διαστάσεις είναι ευκολότερες, είναι επίσης και ασθενέστερες: η αποδεδειγμένη αντίφαση στις τρεις διαστάσεις αποτελεί αντίφαση και σε περισσότερες διαστάσεις χωρίς να ισχύει το αντίστροφο. Από φιλοσοφικής απόψεως όμως τα συμπεράσματα που προκύπτουν είναι τα ίδια ανεξαρτήτως διαστάσεων.

¹⁰⁶ Cabello, Estebaranz & García-Alcaine (1996), σελ. 183-4.

$$v(0,0,1,0) + v(0,1,0,0) + v(1,0,0,1) + v(1,0,0,-1) = 1 \quad (5)$$

$$v(1,-1,-1,1) + v(1,1,1,1) + v(1,0,0,-1) + v(0,1,-1,0) = 1 \quad (6)$$

$$v(1,1,-1,1) + v(1,1,1,-1) + v(1,-1,0,0) + v(0,0,1,1) = 1 \quad (7)$$

$$v(1,1,-1,1) + v(-1,1,1,1) + v(1,0,1,0) + v(0,1,0,-1) = 1 \quad (8)$$

$$v(1,1,1,-1) + v(-1,1,1,1) + v(1,0,0,1) + v(0,1,-1,0) = 1 \quad (9)$$

Στις προηγούμενες 9 ισότητες υπάρχουν 18 διαφορετικά διανύσματα ενώ κάθε ισότητα έχει ένα κοινό διάνυσμα με κάποια άλλη. Εάν συμβολίσουμε με P το σύνολο των προτάσεων που αντιστοιχούν στα 18 διανύσματα, η ανεξάρτητη κατάσταση (state-independent)¹⁰⁷ εκδοχή του θεωρήματος Kochen-Specker από τον Cabello και τους συνεργάτες του διατυπώνεται ως εξής:

Δεν υπάρχει σύνολο απαντήσεων που να ικανοποιούν τις (α) και (β) στο σύνολο των προτάσεων P .

Απόδειξη: το άθροισμα των δεξιών μελών των ισοτήτων 1-9 είναι περιττό, ενώ το άθροισμα των αριστερών είναι απαραίτητα άρτιο, διότι κάθε απάντηση εμφανίζεται δυο φορές. Αντίφαση.

Τέτοιου είδους είναι και η αντίφαση που αναδεικνύει το θεώρημα Kochen-Specker και η οποία αναπαράχθηκε εδώ στην ασθενέστερη εκδοχή του με τα 18 διανύσματα.

1.5.1. Η αρχή της συναρτησιακής σύνθεσης

Το θεώρημα Kochen-Specker μπορεί να διατυπωθεί συνοπτικά ως εξής:

«Εστω H ο χώρος Hilbert των κβαντομηχανικών καταστατικών διανυσμάτων διάστασης $x \geq 3$. Υπάρχει σύνολο M παρατηρήσιμων μεγεθών στον H , με y στοιχεία, τέτοιο ώστε οι δύο ακόλουθες υποθέσεις να αντιφάσκουν:

(KS1) Όλα τα y μέλη του M έχουν τιμές ταυτόχρονα, δηλαδή απεικονίζονται από κοινού με πραγματικούς αριθμούς (που συμβολίζονται για τα παρατηρήσιμα μεγέθη A, B, C, \dots , με $v(A), v(B), v(C), \dots$).

(KS2) Οι τιμές των παρατηρήσιμων μεγεθών συμμορφώνονται με τους ακόλουθους περιορισμούς:

(α) Εάν τα A, B, C , αποτελούν όλα συμβατά μεγέθη και $C = A + B$,

¹⁰⁷ Περίπτωση ανεξαρτήτως κατάστασης έχουμε και στην πρωτότυπη απόδειξη των Kochen και Specker, δηλαδή περίπτωση όπου το σύστημα δεν είναι προετοιμασμένο σε μια καθορισμένη κατάσταση. Ο καθορισμός της κατάστασης θα μείωνε τον αριθμό των διανυσμάτων της απόδειξης από 18 σε 10.

τότε $v(C) = v(A) + v(B)$ (κανόνας αθροίσματος, sum rule).

(β) Εάν τα A, B, C , αποτελούν όλα συμβατά μεγέθη και $C = A \cdot B$, τότε $v(C) = v(A) \cdot v(B)$ (κανόνας γινομένου, product rule)». ¹⁰⁸

Μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών, ερμηνεύοντας τον στατιστικό χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής, θα αποκαθιστά ουσιαστικά την ισχύ της άποψης που καλείται –ακολουθώντας την ορολογία του Held¹⁰⁹– *καθοριστικότητα τιμής* (KT) (value definiteness):

(KT) Όλα τα παρατηρήσιμα μεγέθη που ορίζονται για ένα κβαντομηχανικό σύστημα έχουν κάθε χρονική στιγμή καθορισμένες τιμές. ¹¹⁰

Η υπόθεση KS1 προκύπτει άμεσα από την KT διότι, πώς θα ήταν δυνατόν να θεωρεί κανείς ότι τα μέλη ενός συνόλου παρατηρήσιμων μεγεθών δεν έχουν ταυτόχρονα πραγματικές τιμές, εάν αποδέχεται ότι δεν υπάρχουν παρατηρήσιμα μεγέθη που να μην έχουν για κάποια χρονική στιγμή καθορισμένη τιμή. Η αποδοχή λοιπόν της KT συνεπάγεται την αποδοχή της KS1, χωρίς να είναι προφανές ότι ισχύει και το αντίστροφο. Το γεγονός ότι κάποιες χρονικές στιγμές τα μέλη ενός συνόλου παρατηρήσιμων μεγεθών έχουν ταυτόχρονα καθορισμένες τιμές δεν νομιμοποιεί τον ισχυρισμό ότι μπορεί, για παράδειγμα, να ισχύει το ίδιο και για το καθένα μέγεθος χωριστά σε άλλες χρονικές στιγμές. Άλλωστε τα y στοιχεία του συνόλου M , αποτελώντας συμβατά μεγέθη, δεν εξαντλούν το σύνολο των παρατηρήσιμων μεγεθών που μπορούν να οριστούν σε ένα κβαντομηχανικό σύστημα. Με άλλα λόγια, η θέση που εκφράζεται από την KT δεν φαίνεται να είναι ισοδύναμη της KS1 αλλά ευρύτερη αυτής. ¹¹¹

Οι κανόνες αθροίσματος και γινομένου της υπόθεσης KS2 που αντιφάσκουν, όπως μας δείχνει το Kochen-Specker, με την KS1, προκύπτουν ¹¹² από τη γενικότερη

¹⁰⁸ Held (2006), σελ. 5.

¹⁰⁹ Held (2006), σελ. 2.

¹¹⁰ Την εν λόγω άποψη δεν τη συναντούμε πρώτη φορά. Αποτελεί την υπόθεση (2) στη σελίδα 9, την οποία, υπό το φως των αποτελεσμάτων διαδοχικών πειραμάτων Stern-Gerlach για τον καθορισμό των τιμών ασύμβατων παρατηρήσιμων μεγεθών, αναγκαστήκαμε να τη μετατρέψουμε στην αναθεωρημένη υπόθεση (2').

¹¹¹ Ο Held ισχυρίζεται ότι η υπόθεση KS1 είναι ισοδύναμη της KT και μάλιστα ολοφάνερα γι αυτό και δεν αιτιολογεί την ισοδυναμία τους την οποία η παρούσα εργασία δεν αναγνωρίζει. [Held (2006), σελ. 5]

¹¹² Οι αποδείξεις για το πώς προκύπτουν υπάρχουν στο Redhead (1987) σελ. 121 και 123.

Αρχή της Συναρτησιακής Σύνθεσης (Functional Composition Principle, για συντομία FUNC) που διατυπώνεται ως εξής:¹¹³

(FUNC): Έστω \mathbf{A} ένας αυτοσυζυγής τελεστής σχετιζόμενος με το παρατηρήσιμο μέγεθος A . Έστω $f: \mathbf{R} \rightarrow \mathbf{R}$ μια αυθαίρετη συνάρτηση τέτοια ώστε $f(\mathbf{A})$ ένας άλλος αυτοσυζυγής τελεστής, και έστω $|\varphi\rangle$ μια αυθαίρετη κατάσταση· τότε ο $f(\mathbf{A})$ σχετίζεται μοναδικά¹¹⁴ με ένα παρατηρήσιμο μέγεθος $f(A)$ τέτοιο ώστε:

$$v(f(\mathbf{A}))^{|\varphi\rangle} = f(v(\mathbf{A})^{|\varphi\rangle})$$

Η FUNC εκφράζει ουσιαστικά την ιδέα ότι οι συναρτησιακές σχέσεις που υφίστανται μεταξύ των τελεστών θα πρέπει να υφίστανται και μεταξύ των τιμών που κατέχονται από τα παρατηρήσιμα μεγέθη που εκπροσωπούν· δηλαδή, εφόσον ο $f(\mathbf{A})$ αποτελεί συνάρτηση του \mathbf{A} θα πρέπει και η τιμή του αντίστοιχου μεγέθους να αποτελεί, στην ίδια κατάσταση, συνάρτηση της τιμής του A . Συνεπώς, οι αντιφατικές υποθέσεις του θεωρήματος θα μπορούσαμε να πούμε ότι είναι η KS1 και η FUNC, η προέλευση της οποίας θα μας απασχολήσει στη συνέχεια.

Ο φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής αν και δεν δικαιολογεί την FUNC, δικαιολογεί τη στατιστική εκδοχή της,¹¹⁵ την *Αρχή της Στατιστικής Συναρτησιακής Σύνθεσης* (Statistical Functional Composition Principle, για συντομία STAT FUNC), στην οποία αναφέρεται ότι:

(STAT FUNC): Δεδομένων των A , f , $|\varphi\rangle$ όπως ορίστηκαν στην FUNC, για έναν αυθαίρετο πραγματικό αριθμό b ισχύει:

$$\text{prob}[v(f(\mathbf{A}))^{|\varphi\rangle} = b] = \text{prob}[f(v(\mathbf{A})^{|\varphi\rangle}) = b]$$

Η FUNC συνεπάγεται την STAT FUNC, διότι αν ισχύει η FUNC οι παραπάνω πιθανότητες που ορίζονται από την STAT FUNC μόνο ίσες μπορεί να είναι. Η STAT FUNC όμως από μόνη της δεν ικανοποιεί την αντίστροφη συνεπαγωγή· έστω κι αν είναι ίσες οι πιθανότητες να έχουν οι $v(f(\mathbf{A}))^{|\varphi\rangle}$ και $f(v(\mathbf{A})^{|\varphi\rangle})$ μια συγκεκριμένη τιμή, δεν αποτελούν παρά πιθανότητες και στην περίπτωση που είναι μικρότερες της μονάδας δεν αποκλείεται το ενδεχόμενο οι επίμαχες τιμές σε κάποια κατάσταση να είναι

¹¹³ Held (2006), σελ. 13. Redhead (1987), σελ. 121.

¹¹⁴ Για να καλύψει το γεγονός αυτής της μοναδικής συσχέτισης, που εδώ συμπεριλαμβάνεται στον ορισμό της FUNC, ο Redhead διατυπώνει τον κανόνα αντιστοίχισης [correspondence rule, Redhead (1987) σελ. 133] σύμφωνα με τον οποίο υπάρχει 1:1 αντιστοίχιση μεταξύ του συνόλου των αυτοσυζυγών τελεστών και του συνόλου των παρατηρήσιμων μεγεθών.

¹¹⁵ Απόδειξη στο Redhead (1987), σελ. 18.

διαφορετικές. Επομένως είναι απαραίτητη η συμπλήρωση της ‘στατιστικής εκδοχής’ με συγκεκριμένες παραδοχές για να προέλθει η FUNC. Οι παραδοχές αυτές –κάποιες από τις οποίες έχουν αναφερθεί ξανά– συγκεντρώνονται παρακάτω:

- *Αρχή πραγματικότητας* (ΑΠ) (reality principle): εάν υπάρχει ένας οπερασιοναλιστικά ορισμένος πραγματικός αριθμός¹¹⁶ a , συσχετιζόμενος με έναν αυτοσυζυγή τελεστή \mathbf{A} , και αν, για μια δεδομένη κατάσταση, ο στατιστικός αλγόριθμος της κβαντικής μηχανικής για τον \mathbf{A} αποδίδει έναν πραγματικό αριθμό β με $\beta = \text{prob}(v(\mathbf{A})=a)$, τότε υπάρχει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος A με τιμή a .¹¹⁷
- *Καθοριστικότητα τιμής* (ΚΤ): όλα τα παρατηρήσιμα μεγέθη που ορίζονται για ένα κβαντομηχανικό σύστημα έχουν κάθε χρονική στιγμή καθορισμένες τιμές.
- *Μη πλαισιακότητα* (ΜΠ): εάν ένα κβαντομηχανικό σύστημα κατέχει μια ιδιότητα, την κατέχει ανεξάρτητα από οποιοδήποτε μετρητικό πλαίσιο.

Ο συνδυασμός των παραπάνω παραδοχών με την STAT FUNC μπορεί να οδηγήσει στην FUNC ως εξής: έστω μια κατάσταση $|\phi\rangle$ ενός κβαντομηχανικού συστήματος και ένα παρατηρήσιμο μέγεθος A σε αυτό. Η ΚΤ μας επιτρέπει να θεωρήσουμε ότι το A κατέχει μια τιμή στην $|\phi\rangle$: θα την συμβολίσουμε $v(\mathbf{A})^{|\phi\rangle}$. Για μια οποιαδήποτε συνάρτηση f μπορούμε να φτιάξουμε τον αριθμό $f(v(\mathbf{A})^{|\phi\rangle}) = b$. Για τον αριθμό αυτό, μέσω της STAT FUNC, ισχύει $\text{prob}[f(v(\mathbf{A})^{|\phi\rangle}) = b] = \text{prob}[v(f(\mathbf{A}))^{|\phi\rangle} = b]$. Συνεπώς έχει δημιουργηθεί ένας νέος αυτοσυζυγής τελεστής $\mathbf{f}(\mathbf{A})$, στον οποίο αποδίδονται δύο πραγματικοί αριθμοί, b και $\text{prob}[f(v(\mathbf{A})^{|\phi\rangle}) = b]$. Σύμφωνα λοιπόν με την αρχή πραγματικότητας, υπάρχει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος με τιμή b που αντιστοιχεί στον $\mathbf{f}(\mathbf{A})$ και για το οποίο $f(v(\mathbf{A})^{|\phi\rangle}) = v(\mathbf{f}(\mathbf{A}))^{|\phi\rangle}$. Η σημασία της μη πλαισιακότητας για την ολοκλήρωση της παραγωγής της FUNC είναι ότι εξασφαλίζει τη μοναδικότητα αυτού του παρατηρήσιμου μεγέθους. Αν δεν προϋποθέταμε τη ΜΠ, δηλαδή αν θεωρούσαμε ότι η τιμή ενός παρατηρήσιμου μεγέθους εξαρτάται από το μετρητικό πλαίσιο, τότε θα έπρεπε να αρνηθούμε την 1:1 αντιστοιχία μεταξύ παρατηρήσιμων

¹¹⁶ ‘Οπερασιοναλιστικά ορισμένος αριθμός’ στην παρούσα περίπτωση σημαίνει αριθμός για τον οποίο γνωρίζουμε ότι καταδεικνύει μια πραγματική ιδιότητα. [Held (2006), σελ. 14]

¹¹⁷ Στο Held (2006) σελ. 13-4, η ΑΠ ονομάζεται *ρεαλισμός ως προς την τιμή* (value realism). Στο Redhead (1987) σελ. 133, χρησιμοποιείται η έκφραση *αρχή πραγματικότητας* την οποία σαφώς προτιμούμε.

μεγεθών και τελεστών και να αναγνωρίσουμε ως πιθανό να ισχύει $f(v(A)^{|\phi|}) \neq v(f(A)^{|\phi|})$.¹¹⁸

1.5.2. Τρόποι αποφυγής της αντίφασης στο θεώρημα Kochen-Specker -

Πλαισιακότητα

Σε μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών η ισχύς της FUNC είναι δεδομένη. Αντιθέτως στην κβαντική μηχανική ισχύει μόνο η στατιστική εκδοχή της, δηλαδή η STAT FUNC. Εφόσον η αντίφαση που αναδεικνύει το θεώρημα Kochen-Specker προκαλείται εν μέρει από τη FUNC, οι δυνατότητες που ανοίγονται από την ανάλυσή της για να παραγκωνιστούν τα δυσάρεστα συμπεράσματα του θεωρήματος για τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, έχουν να κάνουν με την απόρριψη κάποιας από τις τρεις προτάσεις –ΑΠ, ΚΤ, ΜΠ– που υπεισέρχονται στην παραγωγή της. Την αντίφαση βεβαίως η FUNC τη δημιουργεί σε συνδυασμό με την KS1, η οποία όμως συνδέεται άμεσα με την ΚΤ και ο σχολιασμός της τελευταίας αφορά κατά κάποιον τρόπο και την KS1.

Η άρνηση της ΑΠ θα σήμαινε ότι δεν αντιστοιχείται πάντοτε ένα καλώς ορισμένο παρατηρήσιμο μέγεθος σε κάθε αυτοσυζυγή τελεστή. Στην περίπτωση αυτή όμως θα πρέπει να αιτιολογηθεί γιατί, για παράδειγμα, αποδίδουμε ένα φυσικό μέγεθος στον τελεστή \mathbf{A} αλλά όχι στον $\mathbf{f(A)}$, όταν μάλιστα υπάρχει μεταξύ τους συναρτησιακή σχέση και η τιμή του δεύτερου μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια μέσω αυτής – χρησιμοποιώντας απλά μαθηματικά– από την τιμή του πρώτου. Η αιτιολόγηση θα μπορούσε ενδεχομένως να βασιστεί σε μια σημαντική επισήμανση του θεωρήματος Kochen-Specker: ο ίδιος τελεστής είναι δυνατόν να κατασκευαστεί από διαφορετικά μη εκφυλισμένα και ασύμβατα μεταξύ τους παρατηρήσιμα μεγέθη. Έστω, λοιπόν $\mathbf{f(A)}$ και $\mathbf{g(B)}$ ταυτόσημοι τελεστές και $\mathbf{AB} - \mathbf{BA} \neq 0$ η σχέση μετάθεσης των τελεστών των μεγεθών που τους κατασκεύασαν. Θεωρούμε ότι, για ένα συγκεκριμένο πλαίσιο, μόνο η κατασκευή του $\mathbf{f(A)}$ από το \mathbf{A} , και όχι του ταυτόσημου τελεστή μέσω του \mathbf{B} , οδηγεί σε ένα καλώς ορισμένο παρατηρήσιμο μέγεθος· ομοίως για τον $\mathbf{g(B)}$ σε κάποιο άλλο πλαίσιο, που θα καθορίζεται από το \mathbf{B} . Τελικώς τα πράγματα έχουν ως εξής: στην προσπάθεια να αποδώσουμε αληθοφάνεια στην άρνηση της ΑΠ καταλήξαμε,

¹¹⁸ Held (2006), σελ. 14.

καθιστώντας τα παρατηρήσιμα μεγέθη εξαρτώμενα από το πλαίσιο, σε μια μορφή πλαισιακότητας. Εάν λοιπόν αυτό που θα πρέπει κατ' ουσίαν να αποδεχτούμε είναι η άρνηση της μη πλαισιακότητας, θα μπορούσε να συμβεί θίγοντας απευθείας την ίδια και αφήνοντας απείρακτο τον στατιστικό αλγόριθμο των τελεστών. Άρα, η άρνηση της ΑΠ δεν ενδείκνυται ως τρόπος διαφυγής από τη δυσάρεστη αντίφαση του θεωρήματος Kochen-Specker.¹¹⁹

Η ΚΤ, η θέση δηλαδή ότι όλα τα παρατηρήσιμα μεγέθη έχουν πάντοτε καθορισμένες τιμές, εκφράζει τη θεμελιώδη αρχή που η κβαντική θεωρία έθεσε υπό αμφισβήτηση και που η ερμηνεία της κβαντικής από μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών θέλησε να αποκαταστήσει. Το να πλήξουμε τη συγκεκριμένη θέση ισοδυναμεί με το να εγκαταλείψουμε το πρόγραμμα των κρυμμένων μεταβλητών και να στραφούμε σε ερμηνείες που θεωρούν ότι δεν διαθέτουν όλα τα παρατηρήσιμα μεγέθη καθορισμένες τιμές αλλά μόνο ένα σύνολο αυτών. Οι ερμηνείες οι οποίες ακολούθησαν την οδό της 'μερικής καθορισιμότητας τιμής' (partial value definiteness) ονομάστηκαν *τροπικές ερμηνείες* (modal interpretations). Ένα από τα μειονεκτήματα των ερμηνειών αυτών είναι ότι δεν αιτιολογούν ξεκάθαρα πώς επιλέγουν το σύνολο των παρατηρήσιμων μεγεθών στα οποία αποδίδουν καθορισμένες τιμές. Πέραν αυτού όμως θεωρείται ότι είναι δυνατόν να προκύψει θεώρημα Kochen-Specker ακόμα και για κάποιες από αυτές.¹²⁰

Αν λοιπόν η άρνηση της ΑΠ μας οδηγεί σε πλαισιακότητα και η άρνηση της ΚΤ –εκτός από το ότι αποτελεί από μόνη της μια πράξη 'αποκλεισμού των κρυμμένων μεταβλητών'– πιθανότατα δεν αρκεί για να αποφύγουμε το επιχείρημα Kochen-Specker, τότε η μόνη δυνατότητα διαφυγής που μας απομένει είναι η απόρριψη της ΜΠ. Πράγματι, η αντίφαση στο θεώρημα Kochen-Specker μπορεί να αρθεί αν υποθέσουμε ότι δύο ταυτόσημοι, από μαθηματικής απόψεως, τελεστές $\mathbf{f}(\mathbf{A})$ και $\mathbf{g}(\mathbf{B})$ αντιστοιχούν σε διαφορετικά παρατηρήσιμα μεγέθη. Τα μεγέθη $f(\mathbf{A})$ και $g(\mathbf{B})$ δύναται να θεωρηθούν μη ταυτόσημα τα ίδια αφού ο καθορισμός της τιμής του πρώτου $v(f(\mathbf{A}))$ προκύπτει μέσω της μέτρησης του \mathbf{A} ενώ ο καθορισμός της τιμής του δεύτερου $v(g(\mathbf{B}))$ μέσω της μέτρησης του \mathbf{B} . Με άλλα λόγια, όντας τα \mathbf{A} , \mathbf{B} ασύμβατα μεταξύ τους, δεν μπορούν να μετρηθούν

¹¹⁹ Held (2006), σελ. 15-6.

¹²⁰ Held (2006), σελ. 15. Bacciagaluppi, G. (1995): «Kochen-Specker Theorem in the Modal Interpretation», *International Journal of Theoretical Physics* 34: 1205-15. Clifton, R.K. (1996): «The Properties of Modal Interpretations of Quantum Mechanics», *British Journal for Philosophy of Science* 47: 371-98.

ταυτόχρονα λόγω των αμοιβαία αποκλειόμενων διαδικασιών μέτρησής τους. Και επομένως, ο καθορισμός των τιμών $v(f(A))$ και $v(g(B))$, προκύπτοντας μέσα από διαφορετικές μετρητικές διαδικασίες, νομιμοποιεί την υπόθεση ότι αφορούν διαφορετικά παρατηρήσιμα μεγέθη καθιστώντας παράλληλα την ισότητα των τιμών τους μη δεδομένη.

Η πλαισιακότητα κατά τον Held μπορεί να αναγνωρισθεί είτε ως αιτιακή είτε ως οντολογική.¹²¹ **Αιτιακή πλαισιακότητα** (causal contextuality) αναγνωρίζουμε αν δεχτούμε ότι το παρατηρήσιμο μέγεθος εξαρτάται αιτιακά από το πλαίσιο μέτρησής του και θεωρείται καλώς ορισμένο *μόνο* σε αυτό το πλαίσιο· η παρατηρούμενη τιμή του προκύπτει ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης ενός συστήματος και συγκεκριμένης μετρητικής συσκευής. Δηλαδή, χρησιμοποιώντας το παράδειγμα που αναφέρθηκε λίγο παραπάνω, τα $f(A)$ και $g(B)$ αποτελούν διαφορετικά παρατηρήσιμα μεγέθη παρά το ότι αντιστοιχούν σε ταυτόσημους τελεστές και ο καθορισμός των τιμών τους εξαρτάται αιτιακά από τη μετρητική διαδικασία· η συσκευή μέτρησης του A καθορίζει την τιμή του $f(A)$, ενώ η συσκευή μέτρησης του B καθορίζει την τιμή του $g(B)$. Άρα, το ποιο παρατηρήσιμο μέγεθος θα επιτευχθεί από φυσικής απόψεως σχετίζεται με το μετρητικό πλαίσιο. Δηλαδή, έχει να κάνει με ποια μετρητική συσκευή θα κληθεί να αλληλεπιδράσει το σύστημα, επηρεάζοντας το ίδιο και τις παρατηρούμενες ιδιότητες.

Η αιτιακή πλαισιακότητα πλήττει ολοφάνερα την *αρχή της αξιόπιστης μέτρησης* (principle of faithful measurement) σύμφωνα με την οποία το αποτέλεσμα μιας μέτρησης είναι αριθμητικά ίσο με την τιμή που κατέχει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος ακριβώς πριν από αυτή.¹²² Θεωρώντας ότι η τιμή παρατηρήσιμων μεγεθών όπως το $f(A)$ διαμορφώνεται κατά την αλληλεπίδραση ενός συστήματος με συγκεκριμένη συσκευή μέτρησης, δεν αφήνεται περιθώριο να αντιμετωπισθεί η τιμή τους ως προϋπάρχουσα. Δεν καθίσταται όμως και *αμιγώς σχεσιακή* (relational) ιδιότητα. Παραμένει δηλαδή ιδιότητα του συστήματος και μόνο, η οποία προκύπτει μετά την αλληλεπίδρασή του με τη συγκεκριμένη μετρητική συσκευή.

Η **οντολογική πλαισιακότητα** (ontological contextuality) αντιμετωπίζει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος ως καλώς ορισμένο εφόσον έχει καθορισμένη προέλευση. Για

¹²¹ Held (2006), σελ. 16-8.

¹²² Redhead (1987), σελ. 89.

παράδειγμα, το $f(A)$ θεωρείται καλώς ορισμένο από τη στιγμή που γνωρίζουμε ότι πραγματώνεται από φυσικής απόψεως μέσω του παρατηρήσιμου μεγέθους A . Έτσι, από οντολογικής σκοπιάς, τα παρατηρήσιμα μεγέθη για τον τελεστή $f(A)$ είναι τόσα όσοι είναι και οι τρόποι κατασκευής του από τελεστές που αντιστοιχούν σε μη εκφυλισμένα παρατηρήσιμα μεγέθη όπως το A . Κατά αυτόν τον τρόπο, δηλαδή *ad hoc*, πολλαπλασιάζεται αδικαιολόγητα το πλήθος των φυσικών μεγεθών. Αυτή η εκδοχή της πλαισιακότητας δεν θα μας απασχολήσει στη συνέχεια για δύο λόγους. Πρώτον, διότι δεν αιτιολογεί την εξάρτηση μεταξύ των παρατηρήσιμων μεγεθών τύπου $f(A)$ και A . Δεύτερον, θα μπορούσε να ισχυριστεί κανείς ότι εμπεριέχεται μερικώς στην αιτιακή, αφού η συσχέτιση με το πλαίσιο μέτρησης του A και προέλευση δηλώνει και αιτιολογεί την εξάρτηση των μεγεθών με την αλληλεπίδραση συστήματος-μετρητική συσκευή. Με την αιτιακή προσέγγιση πλήττεται βεβαίως ανεπανόρθωτα η αρχή της αξιόπιστης μέτρησης.¹²³ κάτι που η οντολογική το αποφεύγει, και το αποφεύγει ίσως διότι η προσέγγισή της, όπως περιγράφηκε, θα μπορούσε μάλλον να θεωρηθεί τετριμμένη.

Τα θεωρήματα Kochen-Specker και Bell χαρακτηρίζονται από μια ουσιαστική διαφορά που οφείλεται στο πλήθος των συστημάτων στο οποίο αναφέρεται το καθένα. Το θεώρημα Kochen-Specker ασχολείται με παρατηρήσιμα μεγέθη ενός συστήματος και μας ωθεί να αναγνωρίσουμε πλαισιακότητα κατά την απόδοση τιμών σε αυτά εάν θέλουμε να αποφύγουμε την αντίφαση που αναδεικνύει. Ως εκ τούτου, δεν προκύπτουν σε αυτό ζητήματα μη διαχωρισιμότητας ή τοπικότητας όπως στο θεώρημα Bell, το οποίο στοιχειοθετείται αναφερόμενο στις ιδιότητες δύο (υπο)συστημάτων, χωροειδώς διαχωρισμένων, που πριν από την απομάκρυνσή τους είχε προηγηθεί μεταξύ τους αλληλεπίδραση. Τα συμπεράσματα του θεωρήματος μαζί με την πειραματική μαρτυρία, μας ώθησαν να ερμηνεύσουμε την εξάρτηση των προβλέψεών μας για τις ιδιότητες του ενός υποσυστήματος από τα αποτελέσματα των μετρήσεων στο άλλο ως μη διαχωρισιμότητα. Δηλαδή, να αναγνωρίσουμε, υπό άλλη οπτική γωνία, ότι «δεν υφίστανται σύνθετα, μη τετριμμένα, κβαντικά συστήματα των οποίων τα υποσυστήματα χαρακτηρίζονται από καλώς ορισμένες καθαρές καταστάσεις, έτσι ώστε, η κατάσταση του συνολικού συστήματος να καθορίζεται πλήρως μέσω των καταστάσεων των

¹²³ Η 'αρχή της αξιόπιστης μέτρησης' συγγενεύει με την 'αρχή περί των εγγενών τιμών' και με την 'καθορισιμότητα τιμής' οι οποίες όντας οι ίδιες αναξιόπιστες στο κβαντικό πλαίσιο δεν θα την άφηναν έτσι κι αλλιώς αλώβητη.

υποσυστημάτων του και των φυσικών τους αλληλεπιδράσεων». ¹²⁴ Η απόδοση καλώς ορισμένων τιμών κάποιων παρατηρήσιμων μεγεθών για τα υποσυστήματα είναι δυνατόν να συμβεί μόνο εντός ενός καθορισμένου πειραματικού πλαισίου, το οποίο θα λειτουργήσει ως μορφοποιητικός παράγοντας αυτών και όχι διαμεσολαβητικά για την πιστοποίηση ή την αποκάλυψη προορισμένων στοιχείων. ¹²⁵ Συνεπώς, η αναπόφευκτη πλαισιακότητα για την απόδοση καθορισμένων καταστάσεων στα υποσυστήματα, καθιστά τις καταστάσεις αυτές μια ‘όψη’ μόνο –η οποία αναλογεί στο πειραματικό πλαίσιο που χρησιμοποιήθηκε– του σύνθετου συστήματος χωρίς να το εξαντλεί. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι η πλαισιακότητα μας επιστρέφεται στο θεώρημα Bell ως μη διαχωρισιμότητα.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα θα πρέπει να τονισθεί ιδιαίτερος ότι η μη διαχωρισιμότητα και η πλαισιακότητα αποτελούν αναπόδραστα χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας που οφείλουν να διαχειριστούν όλες οι ερμηνείες της οι οποίες εγείρουν αξιώσεις για τα στοιχεία της πραγματικότητας, και όχι ιδιόρρυθμα στοιχεία της ‘ορθόδοξης ερμηνείας της Κοπεγχάγης’. Αντιθέτως, η αντιμετώπιση των εννοιών της μη διαχωρισιμότητας και της πλαισιακότητας όπως παρουσιάστηκε δεν είναι όμοια με αυτήν της ‘ερμηνείας της Κοπεγχάγης’.

1.6. Το ‘πρόβλημα’ της κβαντικής μέτρησης

Η διαδικασία της μέτρησης στην κβαντική φυσική έχει απασχολήσει επί μακρόν την κοινότητα των φυσικών και των φιλοσόφων της φυσικής. Με αφορμή την περιγραφή των πειραμάτων Stern-Gerlach και διπλής σχισμής, καθώς και της ανάλυσης του επιχειρήματος EPR και των θεωρημάτων Bell και Kochen-Specker, έγιναν ήδη αρκετές έμμεσες ή άμεσες αναφορές σε χαρακτηριστικά της κβαντικής μετρητικής διαδικασίας που φανερώνουν την ιδιόμορφη, σε αντιδιαστολή με το κλασικό πρότυπο, φύση της. Είναι καιρός πια να αναφερθούμε και στο διαβόητο ‘πρόβλημα’ που της αποδίδεται.

Ο von Neumann, στο μνημειώδες έργο του «*Μαθηματικά θεμέλια της κβαντικής μηχανικής*», επεσήμανε ότι η κβαντομηχανική κατάσταση ενός συστήματος εξελίσσεται στο πέρασμα του χρόνου με δύο ριζικά διαφορετικούς τρόπους: ¹²⁶

¹²⁴ Καρακώστας (2005a), σελ. 230.

¹²⁵ Καρακώστας (2005a), σελ. 240.

¹²⁶ Von Neumann (1955), σελ. 417-8. Καρακώστας (2000), σελ. 96-7.

I. *Συνεχώς, αιτιοκρατικά και αντιστρεπτά*, σύμφωνα με τους νόμους της κβαντικής δυναμικής οι οποίοι εκπροσωπούνται από τη χρονοεξαρτημένη εξίσωση του Schrödinger $(i\hbar \frac{\partial}{\partial t} |\Psi\rangle = H|\Psi\rangle$ όπου H ο Χαμιλτονιανός τελεστής της ενέργειας), για όσο χρονικό διάστημα το σύστημα αφεθεί μόνο του δηλαδή δεν αλληλεπιδράσει με κάποιο άλλο σύστημα.

II. *Ασυνεχώς, πιθανοκρατικά και μη αντιστρεπτά*, κατά την πραγματοποίηση μέτρησης σε αυτό, υποσκελίζοντας τη δυναμική εξέλιξη και επιβάλλοντας ό,τι κατονομάζεται ως *αίτημα προβολής* (projection postulate). Ως εκ τούτου, αν η κυματοσυνάρτηση η οποία περιγράφει την κατάσταση ενός συστήματος αποτελεί υπέρθεση καταστάσεων – γραμμικό συνδυασμό άλλων δυνατών καταστάσεων του συστήματος– όπως η παρακάτω

$$|\Psi\rangle = \sum_i c_i |\psi_i\rangle \text{ όπου } i=1, 2, \dots, k, \dots, \quad (1.6.I)$$

τότε η μέτρηση ενός μεγέθους A στην κατάσταση αυτή, παρέχοντας ως αποτέλεσμα κάποια από τις ιδιοτιμές α_k , συρρικνώνει ταυτόχρονα την αρχική κυματοσυνάρτηση –με πιθανότητα $|c_k|^2$ – στην $|\psi_k\rangle$ συνιστώσα της. Με άλλα λόγια, μία μέτρηση στην $|\Psi\rangle$ –την κυματοσυνάρτηση της αρχικής καθαρής κατάστασης (pure state) του συστήματος– ανάγει ακαριαία το αρχικό καταστατικό διάνυσμα στο ιδιοδιάνυσμα της ιδιοτιμής που μετρήθηκε,¹²⁷ καθιστώντας *ενεργεία* μία από τις αρχικές $\{|\psi_i\rangle\}$ *δυνάμει* καταστάσεις του συστήματος. Η προκύπτουσα *ενεργεία* κατάσταση συνιστά αποτέλεσμα στοχαστικής συμπεριφοράς ρυθμιζόμενης από τις πιθανότητες που διέπουν την ενεργό εκδήλωση των *δυνάμει* καταστάσεων.

Η έννοια του *δυνάμει* (potentia), ή αλλιώς της *δυνητικότητας* (potentiality), η οποία αφορά τη συνένωση του ακαθόριστου της τιμής μιας ιδιότητας με καθορισμένες πιθανότητες δυνατών αποτελεσμάτων αυτής¹²⁸, προτάθηκε στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής από τον Heisenberg.¹²⁹ Θα πρέπει να σημειωθεί ότι «δεν αναφέρεται στην ελλειπτική ή ανεπαρκή γνώση του πειραματιστή ή του θεωρητικού επιστήμονα ως προς την ακριβή φύση ενός δοθέντος συστήματος, αλλά ανήκει στον τρόπο ύπαρξης του

¹²⁷ Η μετάβαση που προκαλείται εξαιτίας της μέτρησης και περιγράφεται από το αίτημα προβολής αποδίδεται επίσης και με τις εκφράσεις –όπως έχει ήδη αναφερθεί στη σελ. 33– αναγωγή του κυματοπακέτου ή του καταστατικού διανύσματος, συρρίκνωση (ή κατάρρευση) της κυματοσυνάρτησης.

¹²⁸ Shimony (1993), σελ. 142.

¹²⁹ Heisenberg (1958), σελ. 185.

συστήματος καθαυτόν».¹³⁰ Επίσης, θα πρέπει να γίνει σαφής η διάκριση μεταξύ μιας καθαρής κατάστασης και ενός *μείγματος* καταστάσεων (mixture) στην περίπτωση ενός στατιστικού συνόλου (ensemble) όμοια προπαρασκευασμένων κβαντικών συστημάτων. Μια κατάσταση s λέγεται *μείγμα* των καταστάσεων s_1 και s_2 στην περίπτωση που υπάρχουν πραγματικοί αριθμοί $w_1, w_2 \geq 0$ τέτοιοι ώστε $w_1 + w_2 = 1$ και

$$\Pr_s = w_1 \Pr_{s_1} + w_2 \Pr_{s_2} .$$

Μια κατάσταση s λέγεται *μεικτή* (mixed state) αν και μόνο αν αποτελεί μη τετριμμένο μείγμα άλλων διαφορετικών καταστάσεων s_1 και s_2 ($w_1 \neq 0, w_2 \neq 0$ και $\Pr_{s_1} \neq \Pr_{s_2}$). Μια κατάσταση λέγεται *καθαρή* αν και μόνο αν δεν είναι μεικτή. Με απλά μαθηματικά, αποδεικνύεται ότι αν η s είναι μείγμα των s_1 και s_2 , τότε για κάθε ενδεχομενικότητα (A, Δ) –δηλαδή για κάθε ‘δίτιμο ενδεχόμενο’ της μορφής ‘η τιμή του παρατηρήσιμου μεγέθους A ανήκει στο σύνολο πραγματικών αριθμών Δ ’– ισχύει:

$$\Pr_s(A, \Delta) = 1 \Rightarrow [\Pr_{s_1}(A, \Delta) = 1 \text{ ή } \Pr_{s_2}(A, \Delta) = 1] .$$

Με αυτή την έννοια, το πλήθος των «βέβαιων ενδεχομενικοτήτων» είναι μέγιστο για τις καθарές καταστάσεις. Έτσι μια καθαρή κατάσταση ενός συστήματος μπορεί να νοηθεί ως μια *μέγιστη εξειδίκευση της περιγραφής τους συστήματος*.¹³¹

Μια καθαρή κατάσταση περιγράφεται από ένα και μόνο καταστατικό διάνυσμα και αντιπροσωπεύει κάτι μη αναγώγιμο, ενώ οι πιθανότητες που την διέπουν συνιστούν αποκλειστικά δυνάμει πιθανότητες. Τουτέστιν, η εξίσωση (1.6.I), όντας συνάρτηση καθαρής κατάστασης, δεν ανάγεται στο σύνολο των συνιστωσών της, επιδεικνύοντας το φαινόμενο της κβαντικής μη διαχωρισιμότητας. Αντιθέτως, ένα μείγμα καταστάσεων συντίθεται από διαφορετικές καθарές καταστάσεις πλήρως διαχωρισμένες και με τις πιθανότητες που τις διέπουν να εκφράζουν τη συχνότητα πραγματομένης εμφάνισης της κάθε μιας από αυτές ανάμεσα σε καταστάσεις ήδη μετρούμενες.¹³²

Το αίτημα προβολής εισήχθη στη χρονική εξέλιξη ενός κβαντομηχανικού συστήματος για να ξεπεραστεί η λογική αντίφαση που συνιστά το πρόβλημα της

¹³⁰ Καρακώστας (2005a), σελ. 236.

¹³¹ Αραγεώργης (2006a) σελ. 3. Η διάζευξη στη σχέση είναι περιεκτική.

¹³² London & Bauer (1939/1983), σελ. 235. Καρακώστας (2000), σελ. 98-9.

κβαντικής μέτρησης και που προκύπτει από τη σύζευξη των τριών αρχών που ακολουθούν:¹³³

1. *Καθολική Ισχύς Γραμμικής Δυναμικής Εξέλιξης*: Η δυναμική εξέλιξη κάθε φυσικού συστήματος στο σύμπαν είναι γραμμική (μοναδιαία ή περιγράφεται από την εξίσωση του Schrödinger).
2. *Αξιοπιστία των Αισθήσεων των Παρατηρητών*: Αυτό που εκλαμβάνει ως γεγονός ένας παρατηρητής κατά την ολοκλήρωση μιας μέτρησης –π.χ. ότι ο δείκτης ενός οργάνου έχει στραφεί σε ορισμένη κατεύθυνση και δίνει ορισμένη ένδειξη για την τιμή του μετρούμενου μεγέθους– όντως αποτελεί *φυσικό γεγονός*.
3. *Σύνδεσμος Ιδιοκατάστασης-Ιδιοτιμής*: Ένα παρατηρήσιμο μέγεθος ενός κβαντικού συστήματος έχει καθορισμένη τιμή σε μια χρονική στιγμή αν, και μόνο αν, η κατάσταση του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή αναπαρίσταται από ιδιοδιάνυσμα του αντίστοιχου αυτοσυζυγούς τελεστή, οπότε η καθορισμένη τιμή ισούται με την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στο ιδιοδιάνυσμα αυτό.

Ο Αραγεώργης σημειώνει ότι, πρώτον, η αντίφαση επιβάλλεται από τη ‘μόνο αν’ συνιστώσα της τρίτης αρχής και, δεύτερον, εφόσον πρόκειται για λογική αντίφαση, κάθε *συνεπής* ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής πρέπει να *αρνηθεί* τουλάχιστον μία από τις παραπάνω αρχές.¹³⁴

Ο δυϊσμός που επήλθε με την ένταξη του αιτήματος προβολής στη χρονική εξέλιξη ενός κβαντομηχανικού συστήματος είναι ολοφάνερος, καθώς και ο *ad hoc* χαρακτήρας του αιτήματος. Η εισαγωγή του εν λόγω αιτήματος από τον von Neumann ήταν επιβεβλημένη εφόσον οι γραμμικοί δυναμικοί νόμοι της θεωρίας αδυνατούσαν να αιτιολογήσουν, στις περισσότερες των περιπτώσεων, την παρατηρούμενη έκβαση μιας μέτρησης. Συγκεκριμένα, σύμφωνα με αυτούς, τα φαινόμενα συμβολής που χαρακτηρίζουν το προς μέτρηση αντικείμενο, μεταφέρονται στο σύνθετο σύστημα που θα δημιουργηθεί κατά την αλληλεπίδρασή του με τη μετρητική συσκευή, διατηρώντας την κατάσταση υπέρθεσης. Δηλαδή, οι δυναμικοί νόμοι προβλέπουν τη διατήρηση της επαλληλίας των δυνάμει καταστάσεων ακόμη και μετά την αλληλεπίδραση με τη

¹³³ Η έκθεση του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης βάσει της λογικής αντίφασης των τριών αρχών παρουσιάζεται όπως αποδίδεται στο Αραγεώργης (2006b).

¹³⁴ Αραγεώργης (2006b) σελ. 1.

συσκευή μέτρησης, γεγονός που δεν συμβαίνει αφού η μέτρηση δίνει πάντα κάποιο αποτέλεσμα.

Ο von Neumann προσπαθώντας να συμβιβάσει τις δύο διαδικασίες με τις οποίες εξελίσσεται χρονικά ένα κβαντικό σύστημα, αναφέρθηκε στη σημασία της συνείδησης του παρατηρητή. Υποστήριξε ότι η συρρίκνωση του καταστατικού διανύσματος συντελείται όταν ο παρατηρητής αποκτά συνείδηση του αποτελέσματος της μέτρησης. Είναι προφανές ότι μια τέτοια συμβιβαστική λύση η οποία αποδίδει επίδραση του ανθρώπινου νου επί της ύλης δεν ήταν δυνατόν να γίνει αποδεκτή. Ακολουθώντας τον Heisenberg θα δεχτούμε ότι:

« ... η μετάβαση από το δυνατό στο πραγματικό γίνεται μόλις εμφανισθεί η αμοιβαία επίδραση του αντικειμένου με τη μετρητική διάταξη και μέσω αυτής με τον υπόλοιπο κόσμο. Η μετάβαση δεν συνδέεται με την καταγραφή του αποτελέσματος της παρατήρησης στο μυαλό του παρατηρητή. Η ασυνεχής μεταβολή της συνάρτησης πιθανότητας γίνεται βέβαια με την πράξη της καταγραφής· γιατί εδώ πρόκειται για την ασυνεχή μεταβολή της γνώσης μας τη στιγμή της καταγραφής, που απεικονίζεται με την ασυνεχή μεταβολή της συνάρτησης πιθανότητας».¹³⁵

Γενικά, το πρόβλημα της μέτρησης στην κβαντική «εντοπίζεται ακριβώς στην αδυναμία μιας συνεπούς συναγωγής του διακριτού και σαφώς καθορισμένου χαρακτήρα των μακροσκοπικών σωμάτων από τη συμπεριφορά των μικροσκοπικών συστατικών τους».¹³⁶ Έχουν γίνει πολυάριθμες προσπάθειες για την επίλυσή του χωρίς να έχει καταφέρει κάποια από αυτές να κερδίσει την καθολική συναίνεση της επιστημονικής κοινότητας.¹³⁷ Έχει επίσης αποδειχθεί η μη δυνατότητα επίλυσής του στο πλαίσιο της πρότυπης κβαντικής θεωρίας.¹³⁸ Γι αυτό και δεν θα μας απασχολήσει περισσότερο.

¹³⁵ Heisenberg (1958/1978) σελ. 41. Περισσότερα για την ανεξαρτησία των μετρητικών αποτελεσμάτων από τον παρατηρούντα νου, στο 3^ο κεφάλαιο του επιστημονικού ρεαλισμού.

¹³⁶ Καρακώστας (2000) σελ. 96.

¹³⁷ Κάποιες από τις προσπάθειες αυτές αναφέρονται στο Καρακώστας (2000) σελ. 110-1.

¹³⁸ Fine (1970), Brown (1986).

1.7. Συγκρότηση της έννοιας της ‘κβαντικότητας’ με οδηγό τον καινοτόμο χαρακτήρα της κβαντικής μέτρησης

Στόχος στην παρούσα ενότητα είναι η συγκρότηση της έννοιας της ‘κβαντικότητας’ μέσω της συγκεκριμενοποίησης του καινοτόμου χαρακτήρα της κβαντικής μέτρησης και της αναγνώρισής του ως αναπόσπαστο κομμάτι του τρόπου ύπαρξης των κβαντικών αντικειμένων.

Μέτρηση, χωρίς επιθετικούς προσδιορισμούς, συνιστά «οποιαδήποτε φυσική λειτουργία μέσω της οποίας μπορεί να καθοριστεί (ίσως μόνο σε κάποιο βαθμό ακρίβειας) και να καταγραφεί η τιμή μιας φυσικής ποσότητας».¹³⁹ ή, όπως τίθεται από τον Redhead, «αποστολή της μέτρησης είναι να συσχετίσει την τιμή για κάτι που δεν είναι ‘άμεσα’ παρατηρήσιμο με κάτι που είναι ‘άμεσα’ παρατηρήσιμο».¹⁴⁰ Πώς και με ποιούς περιορισμούς η μέτρηση εκπληρώνει την αποστολή της στην κβαντική μηχανική διαμορφώνοντας τον κβαντικό χαρακτήρα; Με ό,τι ακολουθεί, ανακεφαλαιώνοντας όλες τις καίριες αναφορές στην κβαντική μέτρηση που έχουν προηγηθεί, επιδιώκεται να δοθεί μια όσο το δυνατόν πληρέστερη απάντηση στο παραπάνω ερώτημα.

Η ύπαρξη ασύμβατων ιδιοτήτων μας υπαγόρευσε το εξής σε σχέση με την κβαντική μετρητική διαδικασία:

1. Στην κβαντική μηχανική είναι αδύνατον να μετρήσουμε ταυτόχρονα όλες τις ιδιότητες για ένα σύστημα. Αυτό δεν σημαίνει ότι η κβαντική θεωρία δεν μπορεί να μας παρέχει την πλήρη περιγραφή ενός συστήματος, αλλά ότι στην επικράτειά της επιτρέπεται η μέτρηση συγκεκριμένων μόνο ιδιοτήτων από τις συνθήκες που δημιουργούν συγκεκριμένες μετρητικές διατάξεις.

Οι σχέσεις απροσδιοριστίας που διέπουν τις ασύμβατες ιδιότητες –όπως είναι η θέση και η ορμή ενός κβαντικού συστήματος– αποτυπώνουν την ισχύ της ακόλουθης πρότασης:

2. Στην κβαντική μηχανική είναι αδύνατον να μειώσουμε την επίδραση της μετρητικής συσκευής πάνω στο μετρούμενο σύστημα χωρίς να επηρεάσουμε αρνητικά την ακρίβεια της μέτρησης: ούτε μπορούμε να προβλέψουμε την επίδραση αυτή ώστε να την λάβουμε υπόψη μας εκ των υστέρων.¹⁴¹

¹³⁹ Isham (1995), σελ.68.

¹⁴⁰ Redhead (1987) σελ. 51.

¹⁴¹ Τραχανάς (1985), σελ. 155-6.

Τουτέστιν, με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μετράμε, για παράδειγμα, τη θέση ενός ηλεκτρονίου, τόσο πιο απροσδιόριστη καθίσταται η τιμή της ορμής του. Εάν θελήσουμε να μετριάσουμε την απροσδιοριστία της ορμής αλλάζοντας τις συνθήκες μέτρησης της θέσης, όση ακρίβεια κερδίσουμε για την πρώτη ιδιότητα θα την στερηθούμε αναπόφευκτα από τη δεύτερη. Το γεγονός ότι είναι αδύνατον να μετρήσουμε ταυτόχρονα και με μηδενική διασπορά τη θέση και την ορμή ενός κβαντικού αντικειμένου, δεν αποτελεί αδυναμία της κβαντικής θεωρίας που οφείλουμε κάποια στιγμή να ξεπεράσουμε, αλλά αδιάσειστη απόδειξη πως ο τρόπος ύπαρξης των κβαντικών αντικειμένων δεν μπορεί να υπαχθεί σε αυτόν των κλασικών εννοιών κύμα και σωματίδιο.

Η μέτρηση, λοιπόν, της θέσης ενός ηλεκτρονίου αποκλείει κάθε δυνατότητα να του αποδώσουμε μια συγκεκριμένη ορμή. Ως εκ τούτου, σε ορισμένες περιπτώσεις είναι ολοφάνερο ότι η μέτρηση μιας ιδιότητας επηρεάζεται από το εάν προηγουμένως έχει μετρηθεί κάποια άλλη ιδιότητα. Επομένως, η κυρίαρχη πεποίθηση της κλασικής φυσικής, σύμφωνα με την οποία οι τιμές των φυσικών μεγεθών κατέχονται έτσι κι αλλιώς από το σύστημα πριν καταστούν με την πράξη της μέτρησης ‘άμεσα’ παρατηρήσιμες (possessed values principle, αρχή περί των εγγενών τιμών),¹⁴² στην κβαντική θα πρέπει να εγκαταλειφθεί. Κάτι που δεν είναι ‘άμεσα’ παρατηρήσιμο, καθίσταται ‘άμεσα’ παρατηρήσιμο μέσω της αντίστοιχης μέτρησης, μόνο που στην κβαντική μηχανική δεν θα πρέπει πάντοτε να θεωρείται ότι η τιμή του προϋπήρχε της μέτρησής της. Όπως σημειώνουν οι Βουδούρης και Μπαλτάς, «δεν έχει πια νόημα να μιλάμε για ‘παρατήρηση’ ενός συστήματος ‘από τα έξω’» και «η φράση ‘τιμή της παρατηρήσιμης’ θα έπρεπε να αντικατασταθεί με τη φράση ‘τιμή που παίρνει η παρατηρήσιμη ευθύς μετά από μια μέτρηση’». ¹⁴³ Εν ολίγοις:

3. Στην κβαντική μηχανική η μέτρηση επιδεικνύει ξεκάθαρα επεμβατικό χαρακτήρα επιδρώντας στο μετρούμενο σύστημα, στις περισσότερες των περιπτώσεων, με δύο τρόπους. Πρώτον, μεταβάλλει την κατάσταση στην οποία βρισκόταν πριν από τη μέτρηση διαταράσσοντας προηγούμενες ή επόμενες μετρήσεις σε αυτό, και δεύτερον,

¹⁴² Τούτη την κυρίαρχη πεποίθηση της κλασικής φυσικής θα επιχειρήσουμε να την κλονίσουμε λίγο στο δεύτερο κεφάλαιο.

¹⁴³ Βουδούρης-Μπαλτάς (1985), σελ. 61 και 62.

συνδιαμορφώνει με το σύστημα τις τιμές φυσικών μεγεθών για τις οποίες θα ήταν άτοπο να ισχυριστούμε ότι προϋπήρχαν της μέτρησης.

Όλα τα παραπάνω χαρακτηριστικά επισημάνθηκαν επανειλημμένα και σχολιάστηκαν εκτενώς στις περιγραφές των δύο βασικών πειραμάτων, Stern-Gerlach και εκείνο των δύο σχισμών. Η άρνηση της ‘καθορισιμότητας τιμής’ ή της ισοδύναμης ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ είναι γεγονός στην κβαντική· κάθε παρατηρήσιμο μέγεθος δεν έχει καθορισμένη τιμή κάθε χρονική στιγμή. Το επιχείρημα EPR δεν καταφέρνει να μας πείσει ότι υπάρχουν στοιχεία της πραγματικότητας τα οποία δεν περιλαμβάνονται στην κβαντική περιγραφή μέσω της κυματοσυνάρτησης. Είτε εξαιτίας της ασάφειας που εμπερικλείει το κριτήριο πραγματικότητας που χρησιμοποιεί όσον αφορά τον τρόπο διαταραχής, είτε διότι το συγκεκριμένο κριτήριο, όπως προσπαθήσαμε να δείξουμε, είναι ανεπαρκές στο να υποδείξει τα στοιχεία της πραγματικότητας. Κάποιες ιδιότητες που προβλέπονται με βεβαιότητα δεν προϋπάρχουν απαραίτητα της μέτρησής τους και άρα δεν μπορούν να αποτελούν στοιχεία της πραγματικότητας. Η βέβαιη πρόβλεψή τους –μολονότι δεν έχει λάβει χώρα η μετρητική αλληλεπίδραση που μετέχει στη διαμόρφωσή τους– αποτελεί συνέπεια του μη διαχωρίσιμου χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής:

4. Στην κβαντική μηχανική τα υποσυστήματα ενός σύνθετου συστήματος, έστω κι αν είναι χωρικός διαχωρισμένα, διαθέτουν μία από κοινού μη διαχωρίσιμη κατάσταση. Η πραγματοποίηση μετρήσεων σε αυτά μεταβάλλει την αρχική σύνθετη κατάστασή τους καθότι τους αποδίδει χωριστές καταστάσεις οι οποίες όμως δεν καθορίζουν πλήρως την αρχική.

Η κατάσταση ενός σύνθετου συστήματος –ως κατάσταση υπέρθεσης– αποτελείται από ένα σύνολο δυνητικοτήτων το οποίο αδυνατούν να εξαντλήσουν οι ενεργεία καταστάσεις που θα προκύψουν με μετρήσεις που θα πραγματοποιηθούν στο σύστημα. Όπως αναφέρει ο Howard, θα ήταν προτιμότερο να μη σκεφτόμαστε «μια φυσική κατάσταση ως ένα σμήνος καθορισμένων ιδιοτήτων (όπως οι καταστάσεις της κλασικής μηχανικής, οι οποίες αναπαρίστανται από σημεία ενός φασικού χώρου, που αντιστοιχούν σε καθορισμένες τιμές θέσης και ορμής), αλλά γενικότερα ως καταστάσεις ενός συνόλου προδιαθέσεων του συστήματος να εμφανίσει συγκεκριμένες ιδιότητες κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες, οι οποίες περιλαμβάνουν ως ειδική περίπτωση,

καταστάσεις συλληφθέντες ως σμήνη καθορισμένων ιδιοτήτων».¹⁴⁴ Θα μπορούσαμε λοιπόν να υποστηρίξουμε το εξής:

5. Η κβαντομηχανική δυνητικότητα αποτελεί ουσιώδες χαρακτηριστικό του τρόπου ύπαρξης των οντοτήτων του μικρόκοσμου.¹⁴⁵ Ως εκ τούτου, οι κβαντικές οντότητες θα πρέπει να θεωρηθούν ως φορείς εγγενών προδιαθεσιακών ιδιοτήτων (inherent dispositional properties).¹⁴⁶

Το θεώρημα Kochen-Specker μας ώθησε να αναγνωρίσουμε στην κβαντική μέτρηση πλαίσιακό χαρακτήρα:

6. Στην κβαντική μηχανική ο τρόπος εκδήλωσης των αντικειμένων είναι πλαισιοκρατικός. Δηλαδή, οι παρατηρούμενες ιδιότητές τους εξαρτώνται αιτιακά από το πλαίσιο μέτρησής τους και θεωρούνται καλώς ορισμένες μόνο σε αυτό το πλαίσιο.

Η πλαισιακότητα της κβαντικής μηχανικής, αν και καθιστά κάποιες ιδιότητες συστημάτων καλώς ορισμένες μόνο υπό συγκεκριμένες συνθήκες μέτρησης, δεν διαμορφώνει, όπως έχει αναφερθεί, αμιγώς σχεσιακές ιδιότητες. Οι ιδιότητες πλαισιακού χαρακτήρα αφορούν το σύστημα και ορίζονται σε αυτό καλώς μόνο για συγκεκριμένο μετρητικό πλαίσιο· λαμβάνονται δε από αυτό μόνο μετά την αλληλεπίδρασή του με την καθορισμένη από το πλαίσιο συσκευή μέτρησης. Η πλαισιακότητα που χαρακτηρίζει κάποιες από τις ιδιότητες ενός συστήματος, εκδηλώνεται ως μη διαχωρισιμότητα όταν πρόκειται για ιδιότητες των υποσυστημάτων ενός σύνθετου συστήματος.

Μολονότι, η επιλογή της τάδε ή της δείνα μετρητικής διαδικασίας από τον παρατηρητή μπορεί να διαμορφώσει το πειραματικό πλαίσιο και κατ' επέκταση τις ιδιότητες που δύναται να καταστούν 'άμεσα' παρατηρήσιμες μέσω αυτού, δεν θα πρέπει να παρασυρθούμε και να υποθέσουμε ότι η ανθρώπινη συνείδηση επιδρά στον εξωτερικό κόσμο διαμορφώνοντας με μετρήσεις τις ιδιότητες των κβαντικών αντικειμένων. Η επιλογή του παρατηρητή έχει αποτέλεσμα μόνο εάν εφαρμοστεί· εν κενώ δεν εγείρει τίποτα. Κάποιες ιδιότητες, και άρα τα στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας που αυτές εκπροσωπούν, εξαρτώνται ολοφάνερα από το πώς μετρώνται, δεν εξαρτώνται όμως – επίσης ολοφάνερα – από τη συνείδηση ή τον νου του πειραματιστή. Η διαδικασία της μέτρησης αυτή καθαυτή, ως ενεργή φυσική λειτουργία, προκαλεί με το μετρούμενο

¹⁴⁴ Howard (1989), σελ. 226, υποσημείωση 2.

¹⁴⁵ Karakostas (2007), σελ. 286.

¹⁴⁶ Karakostas (2007), σελ. 289.

αντικείμενο τις αποδιδόμενες ιδιότητες, ενώ η παρουσία ή όχι ενσυνείδητων παρατηρητών είναι ουσιαστικά αμέτοχη.¹⁴⁷ Με άλλα λόγια, οι ιδιότητες μετρώνται όταν τα επιλεγμένα φυσικά συστήματα –μετρούμενο αντικείμενο και μετρητική συσκευή– αλληλεπιδράσουν, στην αλληλεπίδραση των οποίων η συνείδηση του παρατηρητή δεν μετέχει μη όντας κι η ίδια φυσικό (physical) σύστημα. Επομένως:

7. Στην κβαντική μηχανική η συνείδηση του παρατηρητή που διενεργεί μετρήσεις σε κβαντικές οντότητες δεν μετέχει στη λήψη των ιδιοτήτων τους.

Αν και η εξίσωση του Schrödinger, η βασική εξίσωση για τη χρονική εξέλιξη ενός κβαντικού συστήματος, είναι αιτιοκρατική (ντετερμινιστική), αναφέρθηκε ότι με την πραγματοποίηση μιας μέτρησης η κατάσταση του συστήματος μεταβάλλεται ασυνεχώς, πιθανοκρατικά και μη αντιστρεπτά. Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης τροφοδότησε τις απόψεις που καταλόγιζαν μη πληρότητα στην κβαντική μηχανική. Ίσως όμως και σε αυτήν την περίπτωση οφείλουμε να αναγνωρίσουμε όπως σημειώνει ο Earman ότι η υποτιθέμενη «μη πληρότητα της κβαντικής μηχανικής δεν αποτελεί ελάττωμα της θεωρίας αλλά μάλλον αντανάκλαση του τρόπου με τον οποίο λειτουργεί η Φύση στο κβαντικό επίπεδο».¹⁴⁸ Επομένως:

8. Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης υποδηλώνει τον πιθανοκρατικό χαρακτήρα των φυσικών φαινομένων του μικρόκοσμου. Η πιθανοκρατία στην κβαντική μηχανική είναι εγγενής και όχι συνέπεια ελλιπούς γνώσης.

Η παράθεση των παραπάνω χαρακτηριστικών φιλοδοξεί να παρουσιάσει την έννοια της ‘κβαντικότητας’ όπως αυτή αποκαλύφθηκε στα κρίσιμα πειράματα και στοιχειοθετήθηκε από τα επίμαχα θεωρήματα. Από το πρώτο έως το τελευταίο, δεν μας επιβλήθηκαν αυθαίρετα, αλλά παρατηρήθηκαν επανειλημμένα και εμφιατικά συγκροτώντας τη νέα εικόνα του κόσμου. Συνιστούν, λίγο πολύ, όλα εκείνα που η πιο επιτυχημένη σύγχρονη επιστημονική μας θεωρία, η κβαντική, μας λέει για τον κόσμο που καλείται να περιγράψει. Κατά συνέπεια αποτελούν το υλικό που ο επιστημονικός ρεαλιστής θα πάρει από τον επιστήμονα για να επιτύχει σύμφωνα με τον Ψύλλο το δεύτερο μέλημά του· να δείξει ότι η εμπειρική επιτυχία ενός σταθερού δικτύου θεωρητικών υποθέσεων εξηγείται καλύτερα εάν θεωρηθεί προσεγγιστικά αληθές.¹⁴⁹

¹⁴⁷ Redhead (1995), σελ. 42.

¹⁴⁸ Earman (1992) σελ. 257. Ελληνική έκδοση σελ. 352.

¹⁴⁹ Psillos (2007b) σελ. 15-6.

2. Η ΕΙΚΟΝΑ ΤΟΥ ΚΟΣΜΟΥ ΣΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

Όπως έχει αναφερθεί ξανά, ένας από τους στόχους της παρούσας εργασίας είναι να δειχθεί ότι με την έλευση της κβαντικής θεωρίας οι αντιλήψεις που τέθηκαν υπό αμφισβήτηση δεν ήταν οι ρεαλιστικές αλλά οι κλασικές. Το πλήγμα από τον ‘παράδοξο’ χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής –αν και θέλουμε να πιστεύουμε ότι υπό το ‘ερμηνευτικό’ σχήμα που παρουσιάστηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο δεν δείχνει παράδοξος, αλλά συνεπής και με εξηγητικές αρετές– το υφίσταται η κλασικότητα και όχι ο ρεαλισμός. Επομένως, μετά την παρουσίαση της εικόνας του κόσμου στην κβαντική φυσική και την προσπάθεια συγκρότησης της έννοιας της κβαντικότητας, σειρά έχει ένα παρόμοιο εγχείρημα στην κλασική φυσική. Η παρουσίαση δηλαδή της κλασικής εικόνας του κόσμου και η αποσαφήνιση της έννοιας της ‘κλασικότητας’. Η παρουσίαση αυτή θα μας βοηθήσει να δούμε, μεταξύ άλλων, πώς με την εισαγωγή των μαθηματικών στην περιγραφή των φυσικών φαινομένων οδηγηθήκαμε σταδιακά στη σχεδόν πλήρη μαθηματικοποίηση των νόμων της φύσης. Οι σοβαρότερες εναρκτήριες θεωρίες συγκρότησης της έννοιας της ‘κλασικότητας’¹⁵⁰ θα μπορούσαμε να πούμε ότι διαμορφώνονται τον 17^ο αιώνα –τον αιώνα της πρώτης επιστημονικής επανάστασης–, ενώ η περίοδος ωρίμανσής της εκτείνεται αναμφίβολα μέχρι τις αρχές του 20^{ου} αιώνα. Η ανασυγκρότησή της καθιστά την ιστορική αφήγηση των φάσεων από τις οποίες διήλθε αναπόφευκτη όσο και διαφωτιστική.

¹⁵⁰ Όπως αναφέρθηκε στον πρόλογο, αλλά και στο πρώτο κεφάλαιο, ο όρος ‘κλασική’ θα χρησιμοποιείται αναχρονιστικά για τη φυσική του 17^{ου} αιώνα.

2.1. Η ιστορία της κλασικής φυσικής

Είναι ευρέως γνωστό ότι η νίκη της νευτώνειας φυσικής επί της αριστοτελικής,¹⁵¹ από τον 17^ο αιώνα περίπου και μετά, άλλαξε ριζικά τις απόψεις μας για τη φύση της πραγματικότητας. Τα χαρακτηριστικά που άρχισαν να αποδίδονται στον κόσμο με την επικράτηση του νευτώνειου Παραδείγματος,¹⁵² καθώς και οι άρρητες προϋποθέσεις που περιέβαλαν, δεν γαλούχησαν απλώς, αλλά θα λέγαμε ότι κάποια από αυτά στοίχειωσαν την επιστημονική σκέψη –και πιθανότατα συνεχίζουν να την στοιχειώνουν– τους αιώνες που ακολούθησαν την επιστημονική επανάσταση του 17^{ου} αιώνα. Το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα, μάλιστα, με την εμφάνιση των δύο τελευταίων κατά μία έννοια κλασικών θεωριών, της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας,¹⁵³ αλλά και του αντίπαλου

¹⁵¹ Ο Γαβρόγλου (1994), στην εισαγωγή του στο εναρκτήριο τεύχος της *Νεύσις* [σελ. 16-7], τονίζει ότι αφετηρία της επιστημονικής επανάστασης του 17^{ου} αιώνα δεν ήταν η ανακάλυψη νέων φαινομένων τα οποία διέψευσαν την αριστοτελική φυσική εφόσον αυτή αδυνατούσε να τα ερμηνεύσει ικανοποιητικά. Στο χώρο της φυσικής –αλλά όχι της αστρονομίας– τα ίδια ακριβώς φαινόμενα που είχαν ερμηνευθεί με συνέπεια από τους Αριστοτελικούς στο δικό τους πλαίσιο εννοιών, ερμηνεύθηκαν διαφορετικά από τους φυσικούς φιλοσόφους του 17^{ου} αιώνα μέσα σε ένα νέο πλαίσιο εννοιών και χρησιμοποιώντας νέους κανόνες. Όπως θα φανεί στη συνέχεια, κάποιοι από αυτούς τους νέους κανόνες ήταν η χρησιμοποίηση πειραμάτων –νοητικών και πραγματικών– και η εισαγωγή των μαθηματικών στη φυσική περιγραφή. Ο λόγος για τον οποίο γίνεται η συγκεκριμένη αναφορά είναι για να επισημανθεί απλώς το εξής. Η εμφάνιση κρίσιμων νέων φαινομένων ή πειραμάτων δεν αποτελεί απαραίτητη προϋπόθεση για να αρχίσει μια επιστημονική αναδίπλωση. Η ιστορία της επιστημονικής επανάστασης του 17^{ου} αιώνα μάλλον έδειξε ότι η παρουσία νέων κρίσιμων φαινομένων μπορεί να αποτελεί ικανή συνθήκη αλλά όχι αναγκαία για να μπει η επιστημονική κοινότητα στη διαδικασία να επανερμηνεύσει τα δεδομένα της για τη φυσική πραγματικότητα.

¹⁵² Παράδειγμα με την κουνιανή έννοια, δηλαδή ως το σύνολο των νόμων, των θεωριών, των αναγνωρισμένων αξιών και των τεχνικών που ασπάζονται τα μέλη μιας επιστημονικής κοινότητας.

¹⁵³ Θα προσπαθήσουμε να εξηγήσουμε υπό ποια έννοια οι θεωρίες της σχετικότητας του Einstein αποτελούν κλασικές θεωρίες, παρά τις πολλές και βασικές διαφορές τους με τη νευτώνεια φυσική. Οι λόγοι για τους οποίους έχει διαμορφωθεί η διαδεδομένη αντίληψη ότι οι θεωρίες της σχετικότητας δεν ανήκουν στις κλασικές θεωρίες είναι κυρίως δύο. Ο πρώτος έχει να κάνει με το γεγονός ότι βασικές έννοιες της φυσικής, όπως η μάζα, ο χώρος και ο χρόνος, χρησιμοποιούνται μετασχηματισμένες στη σχετικότητα θυμίζοντας ελάχιστα τα καθιερωμένα κλασικά τους αντίστοιχα και επομένως, εξ αιτίας του μετασχηματισμού τους, οι θεωρίες που τις ενσωματώνουν καθίστανται μη κλασικές. Ο δεύτερος αφορά το καθεστώς κάποιων φυσικών σχέσεων, όπως είναι οι χωρικές αποστάσεις και τα χρονικά διαστήματα, που ενώ στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής θεωρούνται απόλυτες, στο σχετικιστικό πλαίσιο διαφέρουν ως προς διαφορετικά συστήματα αναφοράς και επομένως καθίστανται σχετικές. Ας εξετάσουμε τον κάθε λόγο ξεχωριστά.

Ο πρώτος λόγος σχετίζεται ευθέως με το ακανθώδες θέμα τού αν έχουμε συνέχεια στην αναφορά κατά την αλλαγή θεωριών (referential continuity in theory-change). Στην προκειμένη περίπτωση θα περιοριστούμε στο να πούμε ότι κεντρικές έννοιες όπως η μάζα ή η ενέργεια συνεχώς μετασχηματίζονται κατά την πορεία ωρίμανσης ενός Παραδείγματος και των θεωριών που περιλαμβάνει. Οπότε, αν ο μετασχηματισμός εννοιών συνιστούσε επαρκή συνθήκη για να έχουμε αλλαγή Παραδείγματος, τότε κάτι τέτοιο θα είχε συμβεί ήδη αρκετές φορές από τον 17^ο έως τον 20^ο αιώνα. Θα μπορούσε να είχε συμβεί όταν η ‘ζώσα δύναμη’ (vis viva) οδήγησε μετασχηματισμένη στην έννοια της ενέργειας ή όταν η θερμοκρασία συνδέθηκε με την κινητική ενέργεια. Επομένως, μπορούμε να έχουμε μετασχηματισμούς εννοιών ακόμα και στο πλαίσιο του ίδιου Παραδείγματος, μια και η ιστορία έχει δείξει ότι είναι αναπόφευκτοι. Ως εκ

δέους, δηλαδή της κβαντικής θεωρίας, το κλασικό ιδεώδες διατυπώθηκε επανειλημμένα με τη μεγαλύτερη δυνατή σαφήνεια αποκαλύπτοντας επίμονα και τα άρρητα στοιχεία του όσο αυτονόητα κι αν θεωρούνταν.

Πριν από την ιστορική παρουσίαση των χαρακτηριστικών της κλασικής φυσικής, είναι χρήσιμο να έχουμε κατά νου μια διάκριση μεταξύ τους. Υπάρχουν εκείνα τα χαρακτηριστικά που οφείλονται στη φυσική φιλοσοφία του Νεύτωνα και προωθούσαν έναν μη αυστηρό μηχανοκρατικό ατομισμό, αλλά και εκείνα που αναδύθηκαν από τη φυσική της θερμότητας και του ηλεκτρομαγνητισμού τον 19^ο αιώνα και κυρίως από την απaráμιλλη πεδιακή προσέγγιση του ηλεκτρομαγνητισμού από τον Maxwell και την ηλεκτρομαγνητική θεώρηση της φύσης από τον Lorentz. Η πρόθεση είναι να εντοπιστούν και να συγκεντρωθούν τα χαρακτηριστικά αυτά μέσα από το έργο και τις πεποιθήσεις των φυσικών φιλοσόφων και αργότερα επιστημόνων¹⁵⁴ που έπαιξαν πρωταγωνιστικό ρόλο στην ανάπτυξη της φυσικής επιστήμης.

2.1.1. 17^{ος} αιώνας, μηχανοκρατία & μαθηματική περιγραφή. Καρτέσιος-Νεύτωνα

Τον 17^ο αιώνα διαμορφώνονται δύο ισχυρές αντιλήψεις –αντικρουόμενες μάλιστα συχνά μεταξύ τους– σε σχέση με την άσκηση της φυσικής επιστήμης. Η πρώτη, οφείλεται στον Γαλιλαίο (Galileo Galilei, 1564-1642) και έχει να κάνει με την εφαρμογή στη φυσική της

τούτου, ίσως ο ισχυρισμός ότι ο μετασχηματισμός κάποιων εννοιών κατά τη διατύπωση νέων θεωριών οδηγεί πάντοτε σε αλλαγή Παραδείγματος είναι παρακινδυνευμένος.

Όσον αφορά τον δεύτερο λόγο, όπως αναφέρει ο Redhead [(1995) σελ. 24] η ύπαρξη *σχετικών* σχέσεων, δηλαδή σχέσεων που υπολογίζονται διαφορετικά σε διαφορετικά συστήματα αναφοράς, δεν αποτελεί αποκλειστικό χαρακτηριστικό της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας του Einstein. Παρόμοιες σχετικές σχέσεις εμφανίζονται και στην κλασική μηχανική στην οποία οι μετασχηματισμοί του Γαλιλαίου αναδεικνύουν τη σχετικότητα της θέσης και της ταχύτητας ενός σώματος ως προς διαφορετικά συστήματα αναφοράς. Για να δώσουμε ένα απλό παράδειγμα, η θέση της Ακρόπολης είναι διαφορετική αν θεωρήσουμε για τον καθορισμό της ως σύστημα αναφοράς το κτίριο E του Πολυτεχνείου στον Ζωγράφου ή το κεντρικό κτίριο του Πολυτεχνείου στην Πατησίων. Επίσης, η ταχύτητα ενός πλοίου είναι διαφορετική για ένα γήινο σύστημα αναφοράς και για ένα σύστημα αναφοράς εκτός της γης. Όπως ισχυρίζεται ο Redhead [(1995) σελ. 24-5], η πραγματική διαφορά ανάμεσα στη γαλιλαϊκή θεώρηση και σε εκείνη του Einstein δεν έγκειται στο ότι η μία αρνείται τις σχετικές σχέσεις ενώ η άλλη καθιστά κάθε σχέση σχετική, αλλά στην ανακατανομή τους. Δηλαδή, ενώ στην κλασική μηχανική οι χωρικές αποστάσεις και τα χρονικά διαστήματα είναι απόλυτα ή μη σχετικά, στη θεωρία του Einstein καθίστανται σχετικά ενώ έχουμε απόλυτα άλλα μεγέθη όπως το μέτρο της ταχύτητας του φωτός στο κενό και τα χωροχρονικά διαστήματα.

¹⁵⁴ Ο νεολογισμός ‘επιστήμονας’ (scientist) εισήχθη σε συνεδρίαση του Βρετανικού Συνδέσμου για την Προαγωγή της Επιστήμης το 1834 μετά από πρόταση του William Whewell (1794-1866). Ο Whewell πρότεινε τον νέο όρο διότι ο παραδοσιακός όρος ‘φυσικός φιλόσοφος’ θεωρήθηκε ‘εξαιρετικά ευρύς και υψηλός’ για να περιγράψει τη δραστηριότητα της επιστήμης της εποχής του. [Heimann ή Harman (1979, ελληνική έκδοση 1994 σελ. 22)]

πυθαγόρειας παράδοσης περί μαθηματικής περιγραφής.¹⁵⁵ Ο Γαλιλαίος υποστήριζε ότι το βιβλίο της φύσης είναι γραμμένο στη γλώσσα των μαθηματικών, γι αυτό και χρησιμοποιούσε τα μαθηματικά ως εργαλείο για τη μελέτη και την κατανόησή της.

Η δεύτερη, δεν είναι άλλη από τη μηχανοκρατική ή μηχανιστική αντίληψη με κυριότερο εκπρόσωπο τον Καρτέσιο (Renè Descartes, 1596-1650). Με τον Καρτέσιο έχουμε τη ριζική διάκριση μεταξύ ψυχής και σώματος ή πνεύματος και ύλης, τα οποία αποτελούν στο φιλοσοφικό του έργο δύο διακριτές υποστάσεις. Οι δύο αυτές υποστάσεις χαρακτηρίζονται από γνωρίσματα τελείως ξέχωρα μεταξύ τους, γεγονός που καθιστά τη διάκρισή τους αναμφίβολη και την αιτιολόγηση της ένωσης και της αλληλεπίδρασής τους προβληματική.¹⁵⁶ Η ψυχή –ή πνεύμα– διέπεται από τη σκέψη και τους τρόπους της, όπως είναι η αμφιβολία, η αντίληψη, η βούληση, η επιθυμία, η φαντασία, η νόηση κ.ά. Το σώμα –ή ύλη– έχει σαν βασικό της γνώρισμα την έκταση και ιδιότητες που συνδέονται με αυτήν, όπως το σχήμα, η διαιρετότητα, η θέση, η κίνηση κ.ά. Με αυτόν τον τρόπο, ο Καρτέσιος, διχοτομώντας τον κόσμο σε *res cogitans* (σκεπτόμενη υπόσταση) και *res extensa* (εκτεινόμενη υπόσταση) αφαίρεσε από τον υλικό κόσμο ψυχικά χαρακτηριστικά και ‘απόκρυφες’ δυνάμεις που του απέδιδε η επικρατούσα τότε φυσιοκρατική αντίληψη για τη φύση.¹⁵⁷

Ένα άλλο στοιχείο των αντιλήψεων του Καρτέσιου –επίσης πολύ σημαντικό– ήταν ότι εφόσον ένα σώμα χαρακτηρίζεται από έκταση και καταλαμβάνει μια θέση στο χώρο, «μπορεί να μετακινηθεί με πολλούς τρόπους, όχι από μόνο του, αλλά από κάτι ξένο ως προς αυτό με το οποίο έρχεται σε επαφή»¹⁵⁸ και από το οποίο λαμβάνει την ώθηση. Έτσι, με τον καρτεσιανό δυϊσμό δεν έχουμε μόνο τον καίριας σημασίας για τη φυσική επιστήμη αποκλεισμό των ‘απόκρυφων’ ιδιοτήτων από την ύλη, αλλά και τον συνακόλουθο αποκλεισμό κάθε δράσης από απόσταση. Ο κόσμος για τους επιγόνους του μηχανοκρατικούς θα είναι πλέον αντιληπτός ως μια «μηχανή που απαρτίζεται από αδρανή σώματα και κινείται από φυσική αναγκαιότητα, ανεξάρτητα από το αν υπάρχουν

¹⁵⁵ Ο Lindberg (1992) σελ. 44, αναφέρει: «... μπορούμε τουλάχιστον να βεβαιώσουμε ότι οι Πυθαγόρειοι θεωρούσαν τον αριθμό ως τη θεμελιώδη όψη της πραγματικότητας και τα μαθηματικά ως το πλέον σημαντικό εργαλείο για τη διερεύνηση αυτής της πραγματικότητας».

¹⁵⁶ Εκτενής αναφορά για την ένωση και την αλληλεπίδραση ψυχής και σώματος στον Καρτέσιο και το πώς αντιμετώπισαν το θέμα αυτό οι σύγχρονοί του αλλά και μεταγενέστεροι φιλόσοφοι υπάρχει στην εισαγωγή του Γιάννη Πρελορέντζου για την ελληνική έκδοση των *Παθών της Ψυχής* του Καρτέσιου.

¹⁵⁷ Χαρακτηριστική περίπτωση αυτής της αντίληψης ήταν η μαγνητική ψυχή που απέδιδε στον κόσμο ο William Gilbert (1544-1603).

νοήμονα όντα».¹⁵⁹ Γι αυτό και επικέντρωσαν τις προσπάθειες τους στο να επινοήσουν μικροσκοπικούς μηχανισμούς για να αιτιολογήσουν, στηριζόμενοι στην ύλη και την κίνηση, κάθε είδους φυσικό φαινόμενο.

Οι υποστηρικτές της μηχανοκρατίας επανέφεραν μια εικόνα για τον κόσμο η οποία αντλούσε εν μέρει την καταγωγή της από τους ατομικούς φιλοσόφους της αρχαιότητας, όπως ήταν ο Λεύκιππος ο Μιλήσιος και ο Δημόκριτος ο Αβδηρίτης. Και είτε θεωρούσαν τους μικροσκοπικούς μηχανισμούς τους έσχατα δομικά στοιχεία της ύλης, άτμητα –‘άτομα’–, αδιαπέραστα και άρα μη επιδεχόμενα περαιτέρω αναγωγής, ακολουθώντας τον έτερο μηχανοκρατικό φιλόσοφο του 17^{ου} αιώνα Pierre Gassendi (Πιερ Γκασαντί, 1592-1655) και επιτρέποντας την ύπαρξη κενού ανάμεσα σε αυτά· είτε, ακολουθώντας τον Καρτέσιο, αποκήρυσσαν την ύπαρξη των έσχατων ατόμων και του κενού και θεωρούσαν τους μικροσκοπικούς μηχανισμούς σωματίδια μιας συνεχούς και άπειρα διαιρετής ύλης σε ένα χώρο απόλυτα γεμάτο από αυτήν.¹⁶⁰ Όμως, είτε στη μία είτε στην άλλη περίπτωση, στη βάση της μηχανοκρατικής αντίληψης βρίσκονταν απόψεις που συνδέονταν με σωματιδιακές θεωρίες.

Νεύτωνας

Ο Νεύτωνας (Isaac Newton, 1642-1727) οδηγείται σε ρήξη με την παραδοσιακή μηχανοκρατική αντίληψη προσθέτοντας τη ‘δύναμη’, πέραν της ύλης και της κίνησης, στην περιγραφή των φυσικών φαινομένων. Η δύναμη για τους μηχανοκρατικούς εξέφραζε απλά τη δράση που διέθεταν τα κινούμενα σώματα καθώς πίεζαν ή ωθούσαν άλλα σώματα με τα οποία έρχονταν σε επαφή. Για τον Νεύτωνα η δύναμη θα αποτελεί πλέον επίδραση που *ασκείται* στα σώματα ακόμα κι από απόσταση και μεταβάλλει την κινητική τους κατάσταση· μπόρεσε δε να της προσδώσει μαθηματική περιγραφή και να τη μετρήσει από την ποσότητα της κίνησης που μπορεί να παράγει.¹⁶¹

Με την αποδοχή της έννοιας της δύναμης ο Νεύτωνας κατάφερε να ‘ανακαλύψει’ τον νόμο της παγκόσμιας έλξης και να περιγράψει την ελκτική δύναμη της βαρύτητας. Κατηγορήθηκε όμως από τους μηχανοκρατικούς ότι επανέφερε τις ‘απόκρυφες’ ιδιότητες εφόσον δεν παρείχε κάποιου είδους μηχανική αιτία ως εξήγηση της βαρυτικής

¹⁵⁸ Δεύτερος Μεταφυσικός Στοχασμός, Descartes (1641/1996) σελ. 17.

¹⁵⁹ Westfall (1977/1993) σελ. 47.

¹⁶⁰ Butterfield H. (1980/1988) σελ. 120-1.

¹⁶¹ Westfall (1977/1993) σελ. 197, 204.

έλξης. Αντιδρώντας στην κατηγορία εξέφρασε την άποψη ότι πρωταρχικό του μέλημα ήταν η ακριβής περιγραφή –με ποσοτικούς όρους– των φαινομένων που σχετίζονται με τη βαρύτητα και όχι η αιτία της βαρύτητας· η αιτία των φαινομένων δεν του είχε αποκαλυφθεί και δεν ήταν διατεθειμένος να κάνει υποθέσεις.¹⁶² Η στάση του αυτή συνοψίζεται στην περίφημη φράση του ‘*hypotheses non fingo*’ (δεν επινοώ υποθέσεις).¹⁶³ Για τον Νεύτωνα η βαρύτητα, αν και υπήρχε πραγματικά, δεν αποτελούσε ουσιώδη ιδιότητα της ύλης όπως η έκταση, η ακαμψία (*rigidity*), η αδιαπερατότητα (*impenetrability*), η κινητικότητα και η αδράνεια (*inertia*) –η ικανότητα δηλαδή των σωμάτων να διατηρούν την κίνηση ή την ηρεμία τους.

Οι δυνάμεις από απόσταση ήρθαν λοιπόν με αυτόν τον τρόπο ξανά στο προσκήνιο και παρόλο που καθιστούσαν ‘*ανωμαλία*’¹⁶⁴ στο μηχανοκρατικό σύμπαν προκαλώντας στην αρχή έντονη αμφισβήτηση, στο τέλος αφομοιώθηκαν χωρίς να κλονίσουν περαιτέρω τη μηχανοκρατική αντίληψη. Η εικόνα του κόσμου ως μηχανή, εμπλουτισμένη με τη νευτώνεια έννοια της δύναμης, επικράτησε και τον 18^ο αιώνα, τον αιώνα του Διαφωτισμού.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα, αξίζει να τονισθεί ότι για τον Νεύτωνα πρωταρχικό μέλημα ήταν η αναζήτηση νόμων –που περιγράφουν αντί να εξηγούν– μέσω του πειράματος και της παρατήρησης και όχι η αναζήτηση αιτίων, δραστηριότητα που υπόκειται στη δικαιοδοσία της φιλοσοφίας. Ήταν μάλιστα ο πρώτος που διατύπωσε επιτυχώς καθολικούς νόμους, δηλαδή νόμους που αναφέρονται στη (φυσική) συμπεριφορά *κάθε* σώματος, είτε επίγειου είτε ουράνιου, ‘*κομίζοντας*’ στην κοινότητα των φυσικών, λόγω της αποτελεσματικότητας του εγχειρήματός του, το μικρόβιο της δυνατότητας μιας ενιαίας φυσικής περιγραφής του κόσμου· μιας περιγραφής που δεν κάνει διάκριση μεταξύ μικρού και μεγάλου. Όπως αναφέρει ο Westfall, η συνεισφορά του Νεύτωνα ήταν μεγάλη και όσον αφορά τη διάλυση της αντιθετικής τάσης μεταξύ της πυθαγόρειας παράδοσης της μαθηματικής περιγραφής και της μηχανοκρατίας. Η διάλυση

¹⁶² Ο Νεύτωνα, παρά τις εκάστοτε δηλώσεις του, προσπάθησε αρκετές φορές να εξηγήσει τη δύναμη της βαρύτητας επεξεργαζόμενος την υπόθεση της ύπαρξης στο σύμπαν ενός αιθέρα με μεταβλητή πυκνότητα, ανάλογη με την κατανομή της ύλης σε αυτό. Όπως γνωρίζουμε, ελάχιστα ικανοποιημένος με την υπόθεση του αιθέρα –διότι την εισαγωγή της δεν την επέβαλλε κάποια καθοριστική πειραματική ή παρατηρησιακή ένδειξη, αλλά η τυφλή προσκόλληση στη μηχανοκρατία– την παράλλαξε επανειλημμένα ανεπιτυχώς. [βλέπε Cohen (1980) σελ. 109-120] Κάποια στιγμή την εγκατέλειψε τελείως και απέδιδε την αιτία του φαινομένου της βαρύτητας σε θεϊκή ενέργεια.

¹⁶³ Westfall (1977/1993), σελ. 224-7.

επήλθε μέσω του επιτυχούς αρμονικού συνδυασμού τους στο επιστημονικό του έργο.¹⁶⁵ Επιπλέον, η αρμονική αυτή συνύπαρξη μαθηματικής περιγραφής και μηχανοκρατίας, αν συνυπολογίσουμε την πρόοδο των μαθηματικών στην αναλυτική γεωμετρία –η οποία εγκαινιάζεται από τον Fermat και τον Καρτέσιο– και την ανάπτυξη του απειροστικού λογισμού –ο οποίος επινοείται από τον Νεύτωνα και τον Leibniz ανεξάρτητα–, θα βοηθήσει ώστε να καταστεί δυνατή στους αιώνες που θα ακολουθήσουν η σχεδόν πλήρης μαθηματικοποίηση των νόμων της φύσης.

2.1.2. 18^{ος} αιώνας, Lagrange - Laplace

Το 1788 ο Lagrange (Joseph-Louis Lagrange, 1736-1813) στο έργο του *Αναλυτική Μηχανική*, θα χρησιμοποιήσει τον απειροστικό λογισμό¹⁶⁶ για να παρουσιάσει με διαφορικές εξισώσεις τους τρεις νόμους της κίνησης του Νεύτωνα. Ότι δεν επιδίωξε ο Νεύτωνα, αν και ήταν ένας από τους εφευρέτες του λογισμού, το επιδίωξε ο Lagrange¹⁶⁷ ο οποίος θα γράψει για το επίτευγμά του:

«Δεν υπάρχουν σχήματα στο βιβλίο αυτό. Οι μέθοδοι που περιγράφω εδώ δεν χρειάζονται κατασκευές, ούτε γεωμετρικό ή μηχανικό τρόπο σκέψης, παρά μόνο αλγεβρικές πράξεις, υποκείμενες σε κανονική και ομοιόμορφη ανάπτυξη».¹⁶⁸

Ο Lagrange με τις εξισώσεις του εγκαινιάζει μια νέα στάση των φυσικών όσον αφορά την επίτευξη μηχανοκρατικών εξηγήσεων για τα φυσικά φαινόμενα. Σύμφωνα με αυτήν, όσοι επιθυμούσαν να αποφύγουν τη διατύπωση θεωριών που αναπαριστούν μηχανικά τα φαινόμενα ή την επινόηση υποθετικών μηχανικών μοντέλων ως απόδειξη της κατ' αρχήν δυνατότητας μιας τέτοιας αναπαράστασης, μπορούσαν πια να καταφύγουν στον αφηρημένο φορμαλισμό της αναλυτικής δυναμικής. Οι εξισώσεις που προέκυπταν για ένα σύστημα χρησιμοποιώντας την ανάλυση, εξασφάλιζαν με βεβαιότητα την υποταγή στις αρχές της μηχανοκρατίας των φαινομένων που αναπαριστούσαν, αποφεύγοντας εικασίες και ατυχείς δεσμεύσεις σχετικά με τη φυσική δομή του συστήματος.¹⁶⁹ Με άλλα λόγια, η μαθηματική αναπαράσταση αυτού του τύπου, αν και ήταν απαλλαγμένη από φυσικές υποθέσεις που είχαν να κάνουν με

¹⁶⁴ 'Ανωμαλία' με την κουνιανή έννοια δηλαδή εκτροπή από το αναμενόμενο.

¹⁶⁵ Westfall (1977/1993), σελ. 50.

¹⁶⁶ Ο απειροστικός λογισμός περιλαμβάνεται στον κλάδο των μαθηματικών που ονομάζεται ανάλυση και που άνθησε την περίοδο του 18^{ου} αιώνα παραγκωνίζοντας τη γεωμετρία.

¹⁶⁷ Hankins (1989/ελληνική μετάφραση 1998) σελ. 28-9, Truesdell (1960) σελ. 34-5.

¹⁶⁸ Lagrange, όπως παρατίθεται στο έργο του Hankins (1989/1998) σελ. 43.

¹⁶⁹ Harman (1982/1994) σελ. 15-6.

μικροσκοπικούς μηχανισμούς και τη συμπεριφορά τους, εξυπηρετούσε επάξια το ιδανικό της μηχανοκρατικής προσέγγισης.

Όπως επισημαίνει ο Truesdell, ενώ η σπουδαιότητα των εξισώσεων Lagrange στην εξέλιξη της φυσικής είναι γνωστή, αυτό που ίσως είναι λιγότερο γνωστό είναι ότι ο αφηρημένος χαρακτήρας της διατύπωσής τους αποκρύπτει τα κύρια εννοιολογικά προβλήματα της κλασικής μηχανικής: συγκεκριμένα «ο ρόλος των αδρανειακών συστημάτων και η έννοια της ακαμψίας (rigidity), ουσιώδη στην κλασική ιδέα του ‘παρατηρητή’,¹⁷⁰ είναι κρυμμένα εντός του αναλλοίωτου της άλγεβρας».¹⁷¹ Οι επιπτώσεις αυτής της απόκρυψης ίσως να εκδηλώνονται εντονότερα σήμερα με τα πολύ μεγαλύτερα εννοιολογικά προβλήματα της σύγχρονης φυσικής. Η υπερβολική χρήση των μαθηματικών στη φυσική αποτέλεσε αντικείμενο διαμάχης την περίοδο του Διαφωτισμού όπου πολλοί εξέφραζαν φόβους ότι οδηγούσε τον επιστήμονα μακριά από τη φύση και του ενέπνεε μια ψεύτικη εμπιστοσύνη στις αφηρημένες μορφές.¹⁷² Ενδεχομένως, οι φόβοι αυτοί να επιβεβαιώνονται στην κβαντική φυσική του 20^{ου} αιώνα και στη μακρόχρονη δυσκολία μας να της αποδώσουμε μια ικανοποιητική και καθολικά αποδεκτή φυσική ερμηνεία. Δεν αποκλείεται βεβαίως, όπως παρατηρεί ο Μπαλτάς, τα πράγματα να μην είναι υποχρεωτικά έτσι και το ‘πρόβλημα’ ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής να μην έγκειται στην υπερβολική χρήση των μαθηματικών ή να μην είναι καν πρόβλημα.¹⁷³ Άλλωστε, η μαθηματικοποίηση των νόμων της φύσης στην κλασική μηχανική, έστω κι αν αντιμετωπίστηκε από μερίδα διανοητών με μεγάλη επιφύλαξη, δεν έγειρε ερμηνευτικά προβλήματα για την ίδια τη θεωρία.

Συνεχίζοντας την αναφορά στον 18^ο αιώνα θα σχολιάσουμε τον ντετερμινισμό (ή αιτιοκρατία). Το να ορίσει κανείς τον ντετερμινισμό αποτελεί ‘ολισθηρό’ εγχείρημα. Όταν όμως αναφερόμαστε στον ντετερμινισμό του 18^{ου} αιώνα το εγχείρημα καθίσταται ευκολότερο εφόσον ο Laplace (Pierre Simon Laplace, 1749-1827), που αποτελεί τον κυριότερο εκφραστή του, τον έχει περιγράψει ως εξής:

«Οφείλουμε να θεωρούμε την τωρινή κατάσταση του σύμπαντος ως το αποτέλεσμα της προηγούμενης κατάστασής του και ως την αιτία της κατάστασης που θα ακολουθήσει. Μια

¹⁷⁰ Οφείλουμε να επισημάνουμε προς αποφυγή παρεξηγήσεων ότι εδώ με τον όρο ‘παρατηρητής’ δηλώνεται ένα σύστημα αναφοράς και όχι ένα ον με συνείδηση και αισθήσεις.

¹⁷¹ Truesdell (1960) σελ. 34.

¹⁷² Hankins (1989/1998), σελ. 69-70.

¹⁷³ Ιδιωτική συνομιλία.

διάνοια γνωρίζοντας όλες τις δυνάμεις που δρουν στη φύση μια δεδομένη στιγμή, καθώς και τις στιγμιαίες θέσεις όλων των πραγμάτων στο σύμπαν, θα μπορούσε να συλλάβει σε έναν και μόνο τύπο τις κινήσεις των μεγαλύτερων σωμάτων αλλά και των ελαφρύτερων ατόμων στον κόσμο, υπό τον όρο ότι η νόσή της είναι επαρκώς ισχυρή ώστε να υποβάλει σε ανάλυση όλα τα δεδομένα· γι αυτήν δεν θα ήταν τίποτα αβέβαιο, το μέλλον καθώς και το παρελθόν θα ήταν παρόντα μπροστά στα μάτια της».¹⁷⁴

Ας σημειωθεί ότι η μηχανοκρατική ή μηχανιστική αντίληψη για τον κόσμο είναι άμεσα συνδεδεμένη με τον ντετερμινισμό αυτού του τύπου, αν και δεν προϋποτίθεται από αυτόν.¹⁷⁵ Άλλωστε ο Laplace διαμόρφωσε την άποψή του περί αιτιοκρατίας επηρεασμένος από την επιτυχία του μηχανοκρατικού προγράμματος στη φυσική της εποχής του. Υλικά σωματίδια που βρίσκονται σε κίνηση και αλληλεπιδρούν με τα γειτονικά τους σωματίδια μέσω γνωστών νόμων συνιστούν την ιδανικότερη βάση για να στηριχθεί απεικονιστικά η συγκρότηση αιτιακών αλυσίδων. Επιπλέον, με τις εξισώσεις Lagrange –το κατεξοχήν αναγνωριστικό στοιχείο ακόμα και σήμερα της κλασικής μηχανικής που προέρχεται από τη μηχανική του 18^{ου} αιώνα– η αιτιοκρατική θεώρηση για τον κόσμο παύει να είναι μόνο λόγια και βρίσκει μια αυστηρή μαθηματική διατύπωση, εφόσον οι νόμοι που περιγράφουν τα φαινόμενα αντιπροσωπεύονται πια από εξισώσεις που υπόκεινται σε «κανονική και ομοιόμορφη ανάπτυξη». Η κανονική και ομοιόμορφη εξέλιξη των εξισώσεων εισάγεται στη φύση και καθιστά και αυτήν κανονική και ομοιόμορφη. Η φύση μπαίνει σε καλούπι είτε αυτό της ταιριάζει απολύτως είτε όχι. Η κανονικότητα και η ομοιομορφία –χαρακτηριστικά των εξισώσεων– γίνονται εμμέσως και χαρακτηριστικά του κόσμου, ο οποίος, λόγω αυτών, λογίζεται πλέον ως απόλυτα προβλέψιμος, τουλάχιστον κατ' αρχήν. Παραβλέποντας πώς τα χαρακτηριστικά αυτά επιβλήθηκαν στον κόσμο –χωρίς αυτό να σημαίνει ότι τα μαθηματικά εισήχθηκαν αυθαίρετα στην περιγραφή του κόσμου, κάθε άλλο μάλιστα, αλλά ότι μπορεί να περιγράφουν κάποιες πλευρές του προσεγγιστικά– θεωρήθηκε ότι μόνον ελλείπουσες πληροφορίες σε σχέση με τις αρχικές συνθήκες (κάποιου είδους 'κρυμμένες μεταβλητές' που δεν τις έχουμε προσεγγίσει παρατηρησιακά, σαν αυτές που τίθενται από τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών στην κβαντική μηχανική) ή αδυναμία επεξεργασίας όλων των

¹⁷⁴ Laplace, όπως παρατίθεται στο έργο του Earman (1986) σελ. 7.

¹⁷⁵ Η έννοια του ντετερμινισμού δεν χρειάζεται την ύπαρξη μηχανιστικού υποστρώματος· εφαρμόζεται το ίδιο καλά στον υλικό όσο και στον νοητικό κόσμο. Βλέπε Earman (1992) σελ. 235-6.

δεδομένων (μη πλήρεις νόμοι ή θεωρίες) μπορούσαν να εμποδίσουν τον ακριβή προσδιορισμό του και την αλάνθαστη πρόβλεψη όλων των φαινομένων του.

2.1.3. 19^{ος} αιώνας, ενέργεια - πεδίο

Τον 19^ο αιώνα έχουμε την εισαγωγή δύο νέων φυσικών εννοιών θεμελιώδους σημασίας, της *ενέργειας* και του *πεδίου*. Η γενική και πολύ βασική έννοια της ενέργειας –νέα όπως διαμορφώθηκε τον 19^ο αιώνα αν και αντλεί την καταγωγή της από τη ‘ζώσα δύναμη’ (vis viva) του Leibniz¹⁷⁶– θα παίξει ουσιαστικό ρόλο στην ενσωμάτωση της θερμότητας, του φωτός, του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού, στο μηχανοκρατικό τρόπο θεώρησης του κόσμου, σύμφωνα με τον οποίο η κινούμενη ύλη θα πρέπει να αποτελεί τη βάση εξήγησης αλλά και εκδήλωσης όλων των φυσικών φαινομένων. Η έννοια του πεδίου, βοηθητική στην αρχή και χωρίς φυσικό υπόβαθρο, θα αναπτυχθεί από τους φυσικούς στην προσπάθεια τους να χειριστούν το πάντα ‘δύσπεπτο’ ζήτημα της δράσης από απόσταση, το οποίο θα τεθεί ξανά, πέραν των βαρυτικών δυνάμεων, στις ηλεκτρικές και μαγνητικές δυνάμεις.

Ενέργεια

Πριν αναφερθεί ο ενοποιητικός ρόλος της ενέργειας και η πρώτη διατύπωση της αρχής διατήρησής της, θα γίνει μια σύντομη αναφορά στην ονοματολογία που χρησιμοποιήθηκε τον 19^ο αιώνα για τις διάφορες μορφές της. Οι δύο κατηγορίες που σήμερα ονομάζουμε ‘δυναμική’ και ‘κινητική’ ενέργεια ονομάστηκαν στο παρελθόν με πολλούς διαφορετικούς τρόπους προτού επικρατήσουν οι σύγχρονοι όροι τους. Ο William Thomson (William Thomson, Lord Kelvin, 1824-1907) είχε αρχικά προτείνει να ονομάζεται ‘στατική’ η ενέργεια που διαθέτουν ανυψωμένα βάρη, ηλεκτρισμένα σώματα, ποσότητες καυσίμου, και ‘δυναμική’ η ενέργεια που διαθέτουν υλικές κινούμενες μάζες, κύματα ακτινοβολούμενης θερμότητας, κ.ά. Ο Rankine (J. W. Macquorn Rankine, 1820-1872) πρότεινε αντί του όρου ‘στατική’ τους όρους ‘δυναμική’ ή ‘λανθάνουσα’ (potential ή latent) και αντί του ‘δυναμική’ τους ‘πραγματική’ ή ‘αισθητή’ (actual ή sensible). Τέλος, πάλι ο Thomson, μαζί με τον Tait (Peter Guthrie Tait, 1831-1901) αυτή τη φορά, στο έργο τους *Πραγματεία περί φυσικής φιλοσοφίας*

¹⁷⁶ Hankins (1989/1998) σελ. 43-5.

(1867) εισήγαγαν τους όρους ‘δυναμική’ και ‘κινητική’ που χρησιμοποιούμε και σήμερα για τα αντίστοιχα είδη ενέργειας.¹⁷⁷

Η προτεινόμενη ονοματολογία με το μεγαλύτερο φιλοσοφικό αλλά και φυσικό ενδιαφέρον, έστω κι αν τελικά οι όροι δεν υιοθετήθηκαν, είναι αναμφίβολα αυτή του Rankine. Ο Rankine γράφει στο ημερολόγιό του ότι την περίοδο 1836-38 διάβασε στον ελεύθερο χρόνο του πολύ μεταφυσική και κυρίως Αριστοτέλη, Locke, Hume, Stewart και Degerando.¹⁷⁸ Οπότε πιθανότατα πρότεινε τους παραπάνω όρους έχοντας υπόψη του τη φιλοσοφική διάκριση μεταξύ *δυνάμει* και *ενεργεία* υπάρξεως στον Αριστοτέλη. Χωρίς να υπεισέλθουμε σε λεπτομέρειες αναφέρουμε ότι στον Αριστοτέλη υπάρχουν τρεις κατηγορίες σχετικές με το *είναι*: (1) το μη-είναι, (2) το είναι δυνάμει και (3) το είναι ενεργεία. Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση αυτή, μια μεταβολή λαμβάνει χώρα μεταξύ του δυνάμει και του ενεργεία είναι. Ως εκ τούτου αποτελεί μετάβαση από τη δύναμη στην ενέργεια και όχι από το μη-είναι στο είναι. Για παράδειγμα, ένας σπόρος είναι δυνάμει και όχι ενεργεία δέντρο· όταν γίνεται δέντρο, αυτό που ήταν ήδη δυνάμει γίνεται ενεργεία.¹⁷⁹ Οι όροι του Rankine εμπνευσμένοι πιθανότατα από την προαναφερθείσα φιλοσοφική διάκριση, αποσκοπούσαν στο να αποδώσουν όσο το δυνατόν πιο καθαρά, δύο ολοφάνερα –σε φυσικό επίπεδο– διακριτές μορφές ενέργειας. Πρώτον, μια μορφή ενέργειας –*δυναμική* ή *λανθάνουσα*– όπου η παρατηρησιακή εκδήλωσή της είναι θεωρητικώς προβλέψιμη, ή που αποτελεί όπως γράφει ο ίδιος ο Rankine «ενέργεια διάταξης» (energy of configuration).¹⁸⁰ (Παραδείγματος χάριν, κρατάμε ένα σώμα σε ύψος h από την επιφάνεια της γης· θεωρούμε ότι το σώμα στη θέση αυτή διαθέτει βαρυτική δυναμική ενέργεια mgh διότι *εάν* αφεθεί ελεύθερο θα κινηθεί προς τη γη μετατρέποντας τη δυναμική του ενέργεια μέσω του έργου της δύναμης του βάρους σε κινητική ενέργεια.) Και δεύτερον, μια μορφή ενέργειας –*πραγματική* ή *αισθητή*– όπου η παρατηρησιακή εκδήλωσή της είναι υπαρκτή, ή που αποτελεί σύμφωνα με τα λεγόμενα του Rankine «ενέργεια δράσης» (energy of activity).¹⁸¹ (Αποδίδουμε, παραδείγματος χάριν, κινητική ενέργεια στα σώματα όταν τα παρατηρούμε να διαθέτουν ταχύτητα.)

¹⁷⁷ Harman (1982/1994) σελ. 88-89.

¹⁷⁸ Rankine (1881) σελ. xxi.

¹⁷⁹ Lindberg (1992/1997) σελ. 74.

¹⁸⁰ Rankine (1881) σελ. 230.

¹⁸¹ Rankine (1881) σελ. 230.

Λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω, θα μπορούσαμε ίσως να ισχυριστούμε ότι μια από τις πιο θεμελιώδεις έννοιες της κλασικής φυσικής διαθέτει *δυνάμει* και *ενεργεία* ύπαρξη.¹⁸²

Ο Joule (James Prescott Joule, 1818-1889) κατά τη δεκαετία του 1840 επιβεβαίωσε πειραματικά την ποσοτική ισοδυναμία θερμότητας και μηχανικού έργου ενώ υποστήριξε ότι η θερμότητα οφείλεται στην κίνηση των σωματιδίων που απαρτίζουν τα σώματα. Έτσι άνοιξε το δρόμο για την πειραματική επιβεβαίωση και τη μαθηματική διατύπωση της αρχής διατήρησης της ενέργειας η οποία ήρθε με τη συμβολή του Helmholtz.

Ο Helmholtz (Hermann von Helmholtz, 1821-1894) αν και αναφερόταν στη μαθηματική διατύπωσή του σε ‘ζώσα δύναμη’, ‘εντατική δύναμη’ –οι σύγχρονοι όροι είναι ‘κινητική ενέργεια’ και ‘δυναμική ενέργεια’ αντίστοιχα, όπως έχει ήδη ειπωθεί– και σε ‘αρχή διατήρησης της δύναμης’, αυτό στο οποίο παρείχε ουσιαστικά μαθηματική έκφραση ήταν η αρχή διατήρησης της ενέργειας. Στη θεωρία του ερμήνευσε κι αυτός τη θερμότητα βάσει της κινούμενης ύλης, όπως είχε κάνει και ο Joule, συνδέοντας ρητά τα θερμικά και μηχανικά φαινόμενα μέσω της υπαγωγής και των δύο στη μηχανοκρατική θεώρηση της φύσης.¹⁸³

Τον 19^ο αιώνα ένας νέος κλάδος της φυσικής αναδύεται, η θερμοδυναμική. Ο Clausius (Rudolf Clausius, 1822-1888) –ένας από τους σημαντικότερους φυσικούς που ασχολήθηκαν με το νέο αυτό κλάδο–, στηριζόμενος εν μέρει και στο έργο του Joule, οδηγείται στη διατύπωση των δύο θεμελιωδών αρχών της. Η πρώτη, γνωστή και ως πρώτος νόμος της θερμοδυναμικής, εκφράζει τη διατήρηση της ενέργειας στο σύμπαν. Ενώ η δεύτερη εκφράζει την υποβάθμιση (ή διάχυση) της ενέργειας σε αυτό, περιγράφοντάς την ως μια τάση για αύξηση της εντροπίας στις φυσικές διεργασίες. Η αύξηση της εντροπίας αντιπροσωπεύει την τάση της θερμότητας να μεταφέρεται αποκλειστικά από θερμότερα σε ψυχρότερα σώματα και ο Clausius εισήγαγε την έννοια της εντροπίας για να τονίσει αυτό ακριβώς το χαρακτηριστικό, δηλαδή τη μη

¹⁸² Μετά τη διατύπωση του διάσημου νόμου της πυρηνικής φυσικής $E=mc^2$ από τον Einstein περί ισοδυναμίας μάζας-ενέργειας, οι όροι *δυνάμει* και *ενεργεία* γίνονται ίσως ακόμη πιο κρίσιμοι για την ενέργεια. Ακολουθώντας και τον Heisenberg (1959/1981, σελ. 162-3) θα μπορούσε να πει κανείς πως η μάζα αποτελεί την υλική πραγματικότητα της ενέργειας, την *ενεργεία* κατάστασή της ή ότι η ενέργεια αποτελεί *δυνάμει* κατάσταση της μάζας/ύλης.

¹⁸³ Harman (1982/1994) σελ. 57-67.

αντιστρεψιμότητα των φυσικών διεργασιών. Η μη αντιστρεψιμότητα συνιστούσε για αυτόν θεμελιώδες χαρακτηριστικό της φύσης.¹⁸⁴

Αν και ο Clausius ενστερνιζόταν τη μηχανοκρατική οντολογία που είχε υποστηρίξει ο Joule, ότι δηλαδή η θερμότητα οφείλεται στην κίνηση των σωματιδίων που απαρτίζουν τα σώματα, δεν την τόνιζε ιδιαίτερω. Κι αυτό διότι έκανε, όπως αναφέρει ο Harman, «... σαφή διαχωρισμό ανάμεσα στις αρχές που θεωρούσε βασικούς νόμους της θερμοδυναμικής και στις ειδικές παραδοχές για τη φύση της ύλης και της θερμότητας».¹⁸⁵ Στην περίπτωση όμως της εντροπίας, προσπάθησε να εξηγήσει το φυσικό της νόημα καταφεύγοντας στην ιδέα της αταξίας των μορίων. Η αταξία συνιστούσε έναν τρόπο μέτρησης της κατανομής των μορίων σε ένα σώμα και η αύξηση της εντροπίας εξηγούνταν μηχανοκρατικά συνδεδεμένη με την αύξηση της αταξίας των μορίων. Η προσπάθεια του Clausius να ορίσει την εντροπία στη βάση μοριακών κινήσεων και διατάξεων προκάλεσε έντονα επικριτικά σχόλια από τους φυσικούς της εποχής του, για τους οποίους αναφορές στη μοριακή σύσταση των σωμάτων ήταν περιττές στη θερμοδυναμική.

Πεδίο

Η σύλληψη της έννοιας του ‘πεδίου’ οφείλεται στον Faraday (Michael Faraday, 1791-1867), τον άνθρωπο που ανακάλυψε το φαινόμενο της ηλεκτρομαγνητικής επαγωγής. Ο Faraday αρχικά υποστήριξε ότι η μετάδοση των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων είναι συνεχής, προοδευτική, και γίνεται με τη διαμεσολάβηση ενός πεδίου που ‘γεμίζει’ το χώρο μεταξύ ηλεκτρισμένων και μαγνητισμένων σωμάτων. Έπειτα συνέλαβε την ιδέα των ‘δυναμικών γραμμών’ μέσω των οποίων αναπαρίσταται αλλά και συντελείται αυτή η συνεχής και προοδευτική διάδοση των δυνάμεων. Επομένως, η έννοια των δυναμικών γραμμών είχε για τον Faraday δύο όψεις:¹⁸⁶ (1) Μία *αναπαραστατική* (representative) εφόσον αναπαριστούσαν την ένταση και την κατεύθυνση της δύναμης σε κάθε σημείο του πεδίου, και (2) μία *φυσική*, δηλαδή αποτελούσαν τον ‘φυσικό τρόπο’ μετάδοσης της δύναμης, είτε ως ‘τροχιές’ (paths) είτε ως ‘φορείς’ (vehicles) της μετάδοσης.

Η ‘αναπαραστατική’ τους όψη ήταν ουδέτερη και ήταν δυνατόν να υποστηριχθεί και πειραματικά. Εν αντιθέσει, η ‘φυσική’ τους όψη ήταν υποθετική και συνιστούσε την

¹⁸⁴ Harman (1982/1994) σελ. 98-99.

¹⁸⁵ Harman (1982/1994) σελ. 83.

¹⁸⁶ Nersessian (1984) σελ. 58.

πρόταση του Faraday για την αιτία των ηλεκτρομαγνητικών φαινομένων. Στόχος του ήταν η απόρριψη της διόλου αρεστής, και εξίσου υποθετικής κατά τη γνώμη του, δράσης από απόσταση. Δηλαδή της απευθείας και απρόσκοπτης άσκησης δυνάμεων μεταξύ ηλεκτρισμένων και μαγνητισμένων σωμάτων. Ο περιορισμός των δυναμικών γραμμών μόνο στον αναπαραστατικό τους ρόλο, τον διανυσματικό επί της ουσίας, δεν παράλλαζε ιδιαίτερα την άποψη του Faraday από τη δράση από απόσταση, στην οποία θα μπορούσε επίσης να χρησιμοποιηθεί κάλλιστα διανυσματική αναπαράσταση. Η ουσιαστική διαφοροποίησή του είχε να κάνει με την έννοια του πεδίου και τη ‘φυσική’ αντιμετώπιση των δυναμικών γραμμών του· στο πλαίσιο της οποίας, όπως υποστηρίζεται από τη Nersessian, υπέθετε τα ακόλουθα:

« ... είναι καταστάσεις έντασης και τάσης στο χώρο, ο οποίος μπορεί να είναι ή μπορεί και να μην είναι γεμάτος από αιθέρα. Το ότι οι δυναμικές γραμμές είναι υποστάσεις που υπάρχουν σε ‘απλό χώρο’ φαίνεται να είναι η άποψη που προτιμούσε ο Faraday και αποτελούσε ουσιώδες μέρος της ‘μεγάλης ενοποιημένης’ σύλληψής του για την ενότητα και την αλληλομετατροπή όλων των δυνάμεων της φύσης».¹⁸⁷

Η συμβολή του Maxwell (James Clerk Maxwell, 1831-1879) στην ανάπτυξη της έννοιας του πεδίου ήταν καθοριστική καθώς διατύπωσε μαθηματικά την ‘αναπαραστατική’ και τη ‘φυσική’ όψη των δυναμικών γραμμών του Faraday. Με το έργο του κατέστησε την έννοια του πεδίου απαραίτητη για την περιγραφή των ηλεκτρομαγνητικών δράσεων παρέχοντας μια εξαιρετικά αξιόλογη εναλλακτική πρόταση της έννοιας της δράσης από απόσταση. Στην προσπάθειά του όμως να προσδώσει στο πεδίο μια μηχανική αναπαράσταση και να εντάξει τις ηλεκτρομαγνητικές δράσεις στο νευτώνειο πλαίσιο, έκανε την επιπλέον υπόθεση ότι οι δυναμικές γραμμές αποτελούν καταστάσεις ενός μηχανικού αιθέρα,¹⁸⁸ η ύπαρξη του οποίου ποτέ μέχρι σήμερα δεν επαληθεύθηκε. Αντιθέτως μάλιστα, το μηδενικό αποτέλεσμα των πειραμάτων των Michelson και Morley κατά τη δεκαετία του 1880, στα οποία επιχειρήθηκε η ανίχνευση της σχετικής κίνησης της γης ως προς τον αιθέρα ώστε να ελεγχθούν οι ανταγωνιστικές θεωρίες που αφορούσαν τον τρόπο ύπαρξής του, έδειξε ότι είναι αδύνατο να ανιχνευθεί η παραμικρή κίνηση της γης ως προς αυτόν. Έτσι, τα πειράματα τούτα αποτέλεσαν ισχυρή ένδειξη, μεταξύ άλλων, και για τη μη ύπαρξη του αιθέρα.

¹⁸⁷ Nersessian (1984) σελ. 65-6.

¹⁸⁸ Nersessian (1984) σελ. 92-3.

Τους Faraday και Maxwell ‘διαδέχτηκε’ ο Lorentz (Hendrik Antoon Lorentz, 1853-1928) ο οποίος θεωρούσε ότι οι ηλεκτρομαγνητικές δράσεις δεν ταίριαζαν στο νευτώνειο πλαίσιο και δεν υπάγονταν στους νευτώνειους νόμους. Κι αυτό διότι υπέθετε την ύπαρξη ενός αιθέρα στατικού, καθιστώντας αδύνατη μια μηχανική αναπαράσταση των ηλεκτρομαγνητικών δυνάμεων μέσω αυτού.¹⁸⁹ Για τον Lorentz το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο αποτελούσε κατάσταση αυτού του μη νευτώνειου αιθέρα,¹⁹⁰ με ιδιότητες διαφορετικές από αυτές της συνήθους ύλης την οποία αντιλαμβάνοταν αποτελούμενη από φορτισμένα σωματίδια.¹⁹¹ Η πίστη του στον συγκεκριμένο αιθέρα εξυπηρετούσε την ερμηνεία που ο ίδιος επιθυμούσε να αποδίδει στους περίφημους κανόνες μετασχηματισμού που φέρουν το όνομά του. Δηλαδή, ο στατικός αιθέρας συνιστούσε ένα ιδανικό σύστημα αναφοράς σύμφωνα με το οποίο θα μπορούσαμε, κατ’ αρχήν τουλάχιστον, να καθορίσουμε τον πραγματικό (real) χρόνο των συμβάντων (events) και τις πραγματικές διαστάσεις των αντικειμένων.¹⁹² Η ηλεκτρομαγνητική θεώρηση του κόσμου από τον Lorentz, σύμφωνα με την οποία τα εννοιολογικά θεμέλια της φυσικής προσέφερε η ηλεκτροδυναμική και όχι η μηχανική, προκάλεσε τα πρώτα ουσιαστικά ρήγματα στην παντοκρατορία της μηχανοκρατικής θεώρησης της φύσης. Βάσει αυτής ο Lorentz όρισε ακόμα και την έννοια της μάζας με ηλεκτρομαγνητικούς όρους, αρνούμενος μάλιστα τη σταθερότητά της¹⁹³ παρά το γεγονός ότι συνιστά θεμελιώδη αρχή της νευτώνειας μηχανικής. Ο ηλεκτρομαγνητικός του αιθέρας, ακίνητος και απαλλαγμένος από μηχανικές ιδιότητες, θα μπορούσε να λειτουργήσει ως το απόλυτο σύστημα αναφοράς για την περιγραφή όλων των κινήσεων στο σύμπαν. Για τον Lorentz η δυνατότητα αυτή ήταν εξαιρετικά σημαντική για να την εγκαταλείψει, γι αυτό και παρέμεινε προσκολλημένος στις πεποιθήσεις του ακόμα και μετά τη διατύπωση των θεωριών του Einstein. Με την ειδική θεωρία της σχετικότητας ο Einstein αποβάλλει την έννοια του αιθέρα και αξιώνει την ισοδυναμία των αδρανειακών συστημάτων αναφοράς αποδίδοντας στο σύνολό τους προνομιακό καθεστώς. Κατά συνέπεια καταργείται η ύπαρξη του ενός και μόνο προνομιακού συστήμα αναφοράς –τη θέση του οποίου κατείχε στη θεωρία του Lorentz το ακίνητο σύστημα του αιθέρα. Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο δεν

¹⁸⁹ Nersessian (1984) σελ. 98.

¹⁹⁰ Nersessian (1984) σελ. 113.

¹⁹¹ Nersessian (1984) σελ. 115. Harman (1982/1994) σελ. 175.

¹⁹² Nersessian (1984) σελ. 117, 119.

απαιτεί κάποιο υπόστρωμα, αλλά συλλαμβάνεται πλέον ως κατάσταση του ίδιου του χώρου, καθιστώντας την ύπαρξη του αιθέρα περιττή. Ωστόσο, στη θεωρία της γενικής σχετικότητας απορρίπτεται και το προνομιακό καθεστώς των αδρανειακών συστημάτων αναφοράς.

2.1.4. 20^{ος} αιώνας, η κβαντική θεωρία στο προσκήνιο

Τον 20^ο αιώνα έχουμε την εμφάνιση μιας κατεξοχήν μη κλασικής θεωρίας, της κβαντικής μηχανικής. Συνεχίζοντας την ιστορική αναφορά, δεν θα αναφερθούμε παρά μόνο αδρομερώς στα χαρακτηριστικά της νέας αυτής θεωρίας¹⁹⁴ και πιο λεπτομερώς –στην ενότητα αυτή αλλά και σε άλλες στη συνέχεια του κεφαλαίου– στις αντιλήψεις των επιστημόνων που έπαιξαν πρωταγωνιστικό ρόλο την περίοδο της ανάπτυξής της.

Όπως έχει ήδη ειπωθεί, κάποια από τα χαρακτηριστικά που υπάρχουν στην περιγραφή του κόσμου από την κλασική φυσική¹⁹⁵ επηρέασαν σε μεγάλο βαθμό τη σκέψη ακόμα και πολύ σημαντικών φυσικών, οι οποίοι μπορεί κιόλας να συνέβαλαν το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα στη θεμελίωση του αντίπαλου δέους, δηλαδή της κβαντικής θεωρίας. Ο Franco Selleri¹⁹⁶ επισημαίνει τα πιο επίμονα, κατά τη γνώμη του, από αυτά τα χαρακτηριστικά, κάνοντας μικρά πορτραίτα σε δώδεκα φυσικούς που βρέθηκαν στο επίκεντρο των εξελίξεων. Τα πορτραίτα του αφορούν τη συμβολή τους στη νέα θεωρία αλλά και τη στάση που κράτησαν απέναντι σε αυτή σε τρία επίμαχα θέματα. Πρώτον, στο θέμα της *φυσικής πραγματικότητας* όπως το ονομάζει, δηλαδή στο εάν οι βασικές οντότητες της ατομικής φυσικής –όπως τα ηλεκτρόνια για παράδειγμα– υπάρχουν πραγματικά, ανεξάρτητα από εμάς και τις εργαστηριακές μας παρατηρήσεις. Δεύτερον, στο θέμα της *κατανοησιμότητας (comprehensibility)*, δηλαδή στο αν είναι δυνατόν να συλλάβουμε (comprehend) τη δομή των ατομικών αντικειμένων και την εξέλιξη των ατομικών διαδικασιών συγκροτώντας χωροχρονικές απεικονίσεις σε αντιστοιχία με την πραγματικότητά τους. Και τέλος, στο θέμα της *αιτιότητας (causality)*, δηλαδή στο αν θα

¹⁹³ Lorentz (1909/1916) σελ. 38, 40.

¹⁹⁴ Άλλωστε αυτά έχουν ήδη περιγραφεί αναλυτικά στο πρώτο κεφάλαιο.

¹⁹⁵ Θυμίζουμε ότι οι επιτυχημένες επιστημονικές θεωρίες περιγράφουν τα χαρακτηριστικά του κόσμου προσεγγιστικά. Οπότε ενδέχεται να σφάλουν στην περιγραφή κάποιων από αυτά και να αποδίδουν στα χαρακτηριστικά του κόσμου στοιχεία που δεν τους αρμόζουν. Η επόμενη επιτυχημένη επιστημονική θεωρία προσεγγίζοντας τον κόσμο ακόμα περισσότερο, διορθώνει στοιχεία στα οποία έσφαλε η προηγούμενη.

¹⁹⁶ Selleri (1990), σελ. 2-30.

πρέπει η διατύπωση των φυσικών νόμων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδεται τουλάχιστον μία αιτία για κάθε παρατηρούμενο αποτέλεσμα.

Ο Selleri ομαδοποιώντας τους διακεκριμένους φυσικούς σε παλιότερη γενιά (Max Planck, Arnold Sommerfeld), μεσαία γενιά (Paul Ehrenfest, Albert Einstein, Max Born, Erwin Schrödinger, Niels Bohr) και νεότερη γενιά (Louis de Broglie, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Pascual Jordan, Paul Dirac), καταλήγει στα εξής συμπεράσματα. Οι πολέμοι της κβαντικής θεωρίας (Planck, Ehrenfest, Einstein, Schrödinger και de Broglie) αντιμετώπιζαν γενικώς θετικά τις παραπάνω θέσεις περί φυσικής πραγματικότητας, κατανοησιμότητας και αιτιότητας, και αντιτάχθηκαν σθεναρά¹⁹⁷ στα ‘παράδοξα’ χαρακτηριστικά της νέας θεωρίας διότι πίστευαν ότι τις υπονόμειαν. Το γεγονός αυτό δεν συνεπάγεται ότι είχαν ενιαία κριτική στάση απέναντι στην κβαντική μηχανική. Μπορούμε να διακρίνουμε αρκετές ποιοτικές διαφορές μεταξύ τους, οι οποίες όμως ήταν αναμενόμενες λόγω του ότι έχουμε να κάνουμε με λαμπρούς επιστήμονες που διέθεταν ισχυρές προσωπικότητες. Αντιθέτως, οι υπέρμαχοι της κβαντικής μηχανικής (Sommerfeld, Bohr, Born, Pauli, Heisenberg, Jordan και Dirac), υπερασπιζόμενοι τα αποκαλούμενα ως ‘παράδοξα’ χαρακτηριστικά της, φαίνεται ότι αντιμετώπιζαν αρνητικά τις θέσεις περί κατανοησιμότητας και αιτιότητας, ενώ κρατούσαν μια μάλλον διφορούμενη στάση όσον αφορά το θέμα της φυσικής πραγματικότητας· με εξαίρεση τον Heisenberg –σύμφωνα πάντα με τον Selleri– ο οποίος αντιστεκόταν ξεκάθαρα σε αυτή.

Κατά τον Selleri οι θεμελιώδεις διαφωνίες των φυσικών το πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα έγειραν ουσιαστικά το πρόβλημα της φύσης της ίδιας της φυσικής επιστήμης. Λέει χαρακτηριστικά:

« ... Αν η επιστήμη ήταν μια καθαρή αντανάκλαση της αντικειμενικής πραγματικότητας, μόλις και μετά βίας θα υπήρχε χώρος για διαφωνία (εκτός αυτής που θα οφειλόταν σε λάθος) μεταξύ ευφυών ατόμων. Αν όμως η επιστήμη πρέπει να περιλαμβάνει από λογικής απόψεως αυθαίρετα στοιχεία (όπως φιλοσοφικές προκαταλήψεις) μαζί με αμετάκλητα γνωστικά επιτεύγματα, τότε η διαφωνία καθίσταται δυνατή».¹⁹⁸

¹⁹⁷ Αν και κάποιοι από αυτούς (Schrödinger, de Broglie, Ehrenfest) δεν κράτησαν σταθερή στάση κατά τη διάρκεια της ζωής τους. Με εξαίρεση τον Ehrenfest, οι δύο άλλοι προς το τέλος του βίου τους επέστρεψαν στην κριτική αντιμετώπιση της κβαντικής θεωρίας.

¹⁹⁸ Selleri (1990) σελ. 25.

Ας εξετάσουμε όμως αναλυτικότερα το ζήτημα της φυσικής πραγματικότητας διότι, όπως διατυπώνεται από τον Selleri, αιτείται λανθασμένα η ανεξαρτησία της αδιακρίτως από παρατηρητές και εργαστηριακές παρατηρήσεις αυτές καθαυτές. Οι παρατηρητές αποτελούν τα υποκείμενα που διενεργούν μετρήσεις σε ένα εργαστήριο, ενώ οι αλληλεπιδράσεις των μετρητικών συσκευών με τα υπό μέτρηση συστήματα συνιστούν τις εργαστηριακές παρατηρήσεις τους. Επομένως, μια θετική ή αρνητική θέση στο εν λόγω ζήτημα όπως τίθεται από τον Selleri, είναι μάλλον παραπλανητική εάν δεν παρέχονται περαιτέρω διευκρινήσεις. Είναι δυνατόν κάποιοι από τους υπέρμαχους ή τους πολέμιους της ‘φυσικής πραγματικότητας’ να υπερασπίζονται την ανεξάρτητη πραγματικότητα των ιδιοτήτων των βασικών οντοτήτων έναντι των υποκειμένων που διενεργούν τις μετρήσεις, αλλά να αναγνωρίζουν την εξάρτηση της πραγματικότητάς τους από τις μετρητικές αλληλεπιδράσεις που λαμβάνουν χώρα.

Ο Heisenberg, από τη μεριά των υπέρμαχων της κβαντικής θεωρίας, αν ανατρέξουμε σε όσα γράφει, φαίνεται ότι αποτελεί μια τέτοια περίπτωση. Το παρακάτω εκτενές απόσπασμα από το βιβλίο του *Φυσική και Φιλοσοφία* συνηγορεί υπέρ αυτής της άποψης:

«Η κλασική φυσική βασιζόταν στην παραδοχή –ή θα έπρεπε να πούμε στην ψευδαίσθηση;– πως μπορούμε να περιγράψουμε τον κόσμο ή τουλάχιστον τμήματα του κόσμου χωρίς να μιλήσουμε για τους εαυτούς μας. Αυτό πραγματικά είναι δυνατό σε μεγάλη έκταση. Ξέρουμε για παράδειγμα πως η πόλη Λονδίνο υπάρχει, ανεξάρτητα από το αν τη βλέπουμε ή δεν τη βλέπουμε. Μπορεί να πει κανείς, πως η κλασική φυσική παριστάνει ακριβώς την εξιδανίκευση του κόσμου, στην οποία μπορούμε να μιλήσουμε για τον κόσμο ή για τα τμήματά του χωρίς να αναφερθούμε στον εαυτό μας. Η επιτυχία της οδήγησε στο γενικό ιδανικό μιας αντικειμενικής περιγραφής του κόσμου. Η αντικειμενικότητα θεωρείται από καιρό σαν το ανώτατο κριτήριο για την αξία ενός επιστημονικού αποτελέσματος. Εξακολουθεί η ερμηνεία της Κοπεγχάγης για τη θεωρία των κβάντων να ανταποκρίνεται σε αυτό το ιδανικό; Μπορεί ίσως να πει κανείς, πως η θεωρία των κβάντων ανταποκρίνεται σε αυτό το ιδανικό όσο γίνεται. Σίγουρα η θεωρία των κβάντων δεν περιέχει αποκλειστικά υποκειμενικά γνωρίσματα, δεν εισάγει το πνεύμα ή τη συνείδηση του φυσικού σαν ένα μέρος του ατομικού φαινομένου. Αρχίζει όμως με τη διαίρεση του κόσμου στο αντικείμενο και στον υπόλοιπο κόσμο και με το γεγονός, πως, όπως και να έχει το πράγμα, πρέπει να περιγράψουμε αυτόν τον υπόλοιπο κόσμο με τις κλασικές έννοιες. Η διαίρεση αυτή είναι κατά κάποιο τρόπο αυθαίρετη και ιστορικά μια άμεση συνέπεια της φυσικοεπιστημονικής μεθόδου που ασκήθηκε

στους περασμένους αιώνες. *Η χρήση των κλασικών εννοιών είναι συνεπώς σε τελευταία ανάλυση μια συνέπεια της γενικής πνευματικής εξέλιξης της ανθρωπότητας. Αλλά με αυτόν τον τρόπο ωστόσο αναφερόμαστε σε εμάς τους ίδιους, κι από αυτήν την άποψη δεν μπορεί κανείς να ονομάσει την περιγραφή μας εντελώς αντικειμενική».*¹⁹⁹

Στο παραπάνω απόσπασμα δηλώνεται ρητά από τον Heisenberg ότι ο νους ή η συνείδηση του φυσικού δεν επηρεάζει το φαινόμενο.²⁰⁰ Στο ίδιο πνεύμα αναφέρει κι άλλου ότι κατά τη διαδικασία μιας παρατήρησης «η μετάβαση από το δυνατό στο πραγματικό γίνεται μόλις εμφανισθεί η αμοιβαία επίδραση του αντικειμένου με τη μετρητική διάταξη και μέσω αυτής με τον υπόλοιπο κόσμο» και ότι «δεν συνδέεται με την καταγραφή του αποτελέσματος της παρατήρησης στο μυαλό του παρατηρητή».²⁰¹ Συνεπώς όταν ο Heisenberg μιλάει για υποκειμενικότητα στην κβαντική θεωρία δεν εννοεί ότι έχουμε εξάρτηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεών μας από τα υποκείμενα που τις διενεργούν. Βεβαίως, σε κάποιο άλλο απόσπασμα, αναφερόμενος στη συνάρτηση πιθανότητας, γράφει τα εξής:

«Η συνάρτηση πιθανότητας συνενώνει αντικειμενικά και υποκειμενικά στοιχεία. Περιέχει αποφάνσεις για πιθανότητες ή καλύτερα τάσεις («δύναμεις» στην αριστοτελική φυσική), κι οι αποφάνσεις αυτές είναι απόλυτα αντικειμενικές, δεν εξαρτώνται από κανένα παρατηρητή. Εκτός από αυτό περιέχει αποφάνσεις για τη γνώση μας για το σύστημα, που φυσικά θα είναι υποκειμενικές, αφού μπορεί να διαφέρουν για διάφορους παρατηρητές».²⁰²

Η αναφορά σε υποκειμενικές αποφάνσεις που «διαφέρουν για διάφορους παρατηρητές», δεν μπορεί να υπονοεί ότι οι ‘διάφοροι παρατηρητές’ αποτελούν διαφορετικά υποκείμενα: υπονοεί διαφορετικές μετρητικές διατάξεις που θα επιλεγούν για να καταστήσουν από δυνάμει σε ενεργεία διαφορετικές όψεις του ίδιου παρατηρούμενου συστήματος. Κι αυτό μπορούμε να συμπεράνουμε με ασφάλεια ότι είναι έτσι, διότι δεν θα ήταν δυνατόν να είναι διαφορετικά και να πιστευε ταυτόχρονα ο Heisenberg –αντιφάσκοντας ολοφάνερα– ότι η συνείδηση του παρατηρητή δεν μετέχει στο αποτέλεσμα της παρατήρησης. Για παράδειγμα, εάν επέλεγε κάποιος πειραματιστής να πραγματοποιήσει μια συγκεκριμένη μέτρηση σε ένα σύστημα μια δεδομένη χρονική

¹⁹⁹ Heisenberg (1959/1978), σελ. 41-2. Όπου υπάρχει έμφαση είναι δική μου.

²⁰⁰ Το θέμα της ανεξαρτησίας της φυσικής πραγματικότητας ή αλλιώς του κόσμου από τον νου ή τη συνείδηση του παρατηρητή μας απασχόλησε και στο πρώτο κεφάλαιο της κβαντικής εικόνας του κόσμου και θα μας απασχολήσει και στο τρίτο του επιστημονικού ρεαλισμού.

²⁰¹ Heisenberg (1959/1978), σελ. 41.

²⁰² Heisenberg (1959/1978), σελ. 39. Η έμφαση δική μου.

στιγμή, δεν έχουμε λόγο να πιστεύουμε ότι το αποτέλεσμα θα είναι διαφορετικό αν τελικά πραγματοποιούσε τη μέτρηση κάποιος άλλος ή άλλη την ίδια χρονική στιγμή. Έχουμε όμως λόγο να πιστεύουμε, βασιζόμενοι στα συμπεράσματα που αντλήσαμε από τη μελέτη των δύο βασικών πειραμάτων –Stern-Gerlach και των δύο σχισμών– στο πρώτο κεφάλαιο, ότι τα αποτελέσματα θα είναι διαφορετικά και ίσως τελείως ασύμβατα μεταξύ τους, αν, παραδείγματος χάριν, πριν από τη μέτρηση του φυσικού μεγέθους που θέλουμε να βρούμε, έχουμε μετρήσει ή όχι στο ίδιο σύστημα κάποιο ασύμβατο φυσικό μέγεθος με αυτό. Είδαμε στο πρώτο κεφάλαιο ότι η αρχή της απροσδιοριστίας και ο μη διαχωρίσιμος και πλαισιακός χαρακτήρας της κβαντικής μηχανικής αποτελούν στοιχεία που επηρεάζουν τις μετρήσεις που εκτελούνται στα κβαντικά συστήματα. Η εξάρτηση όμως αυτή των μετρήσεών μας από τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιούνται δεν σχετίζεται με τον παρατηρούμενο και, όπως θα αναλυθεί διεξοδικότερα στην ενότητα ‘αντικειμενικότητα και μέτρηση’, δεν θεωρούμε ότι πλήττει την πολυπόθητη επιστημονική αντικειμενικότητα.

Συνεπώς όταν ο Heisenberg μιλάει για υποκειμενικότητα έχει υπόψη του δύο διακριτές εκφάνσεις της, οι οποίες όμως δεν συνάγουν λόγους ανησυχίας όσον αφορά την οντολογική ανεξαρτησία των ατομικών φαινομένων από το γνωρίζον υποκείμενο. Η πρώτη αναφέρθηκε ήδη και έχει να κάνει με το γεγονός ότι διαμορφώνονται όψεις των συστημάτων ανάλογα με το πως θα κληθούν να αλληλεπιδράσουν μετρητικά. Η δεύτερη περιγράφεται στο τέλος του εκτενούς αποσπάσματος που παρατίθεται παραπάνω, όπου υποστηρίζει ότι η περιγραφή των ατομικών φαινομένων δεν μπορεί να είναι εντελώς αντικειμενική εφόσον η πνευματική μας εξέλιξη δεν μας επιτρέπει να ξεπεράσουμε τη χρήση των κλασικών εννοιών, έστω κι αν αυτές δεν ταιριάζουν με ακρίβεια σε αυτά. Όμως κάτι τέτοιο επιφέρει τον κίνδυνο μιας μη ακριβούς περιγραφής –προσεγγιστικής με άλλα λόγια– και όχι μιας υποκειμενικής περιγραφής. Ως εκ τούτου, ίσως σχετίζεται περισσότερο με το δεύτερο θέμα που θέτει ο Selleri, εκείνο της κατανοησιμότητας.

Για το θέμα της ‘φυσικής πραγματικότητας’ εστίασαμε την προσοχή μας στην περίπτωση του Heisenberg διότι, σύμφωνα με τον Selleri, αντιστεκόταν ξεκάθαρα σε αυτό. Η αντίληψη αυτή δυστυχώς είναι ευρέως διαδεδομένη και μάλλον αδικεί τις διαισθήσεις του σπουδαίου φυσικού για τη φυσική πραγματικότητα. Θέλουμε να πιστεύουμε ότι με όσα προηγήθηκαν δείξαμε ότι ο Selleri δεν έχει απόλυτο δίκιο για τον

Heisenberg. Ο Heisenberg αναγνώριζε την εξάρτηση της φυσικής πραγματικότητας από τις εργαστηριακές παρατηρήσεις αυτές καθαυτές, όπως αναγνώριζε επίσης και την ανεξαρτησία της από τα υποκείμενα-παρατηρητές που τις διενεργούσαν.

Οι περισσότερες φιλοσοφικές προκαταλήψεις στις οποίες αναφέρεται ο Selleri και από τις οποίες δεν μπόρεσαν να αποστασιοποιηθούν στις αρχές του 20^{ου} αιώνα πάρα πολλοί λαμπροί φυσικοί, προέρχονται αναμφίβολα από την εικόνα που αποδόθηκε στον κόσμο μέσω της κλασικής φυσικής. Η εικόνα αυτή ‘εκπαίδευσε’ σταδιακά την επιστημονική σκέψη για τρεις αιώνες περίπου και υπαγόρευσε λίγο πολύ το τι συνιστά αποδεκτή ερμηνεία μιας επιστημονικής θεωρίας. Οι προσπάθειές μας θα πρέπει να έχουν ως στόχο την αποκάλυψη των προκαταλήψεων και την τοποθέτηση αυτών στο ‘εδώλιο του κατηγορουμένου’ για τη μακρόχρονη αδυναμία μας να αντιμετωπίσουμε την κβαντική μηχανική ρεαλιστικά και όχι τα καινοτόμα χαρακτηριστικά της.

2.1.5. Σύνοψη της ιστορίας

Με την προηγηθείσα ιστορική ανασκόπηση επιχειρήθηκε η αναζήτηση των πρακτικών και των αντιλήψεων, φιλοσοφικών και μη, που περιέβαλλαν βαθμιαία μέσα στους αιώνες την κλασική κοσμοθεωρία. Ότι αξιόλογο επισημάνθηκε όσον αφορά τις νέες διανοητικές συνήθειες που επέφερε η επιστημονική επανάσταση του 17^{ου} αιώνα, γίνεται προσπάθεια να συγκεντρωθεί στις παρακάτω θέσεις:

Αντίδραση στη φυσιοκρατία της Αναγέννησης και στροφή προς μια μηχανοκρατική αντίληψη για τη φύση: η φυσιοκρατία της Αναγέννησης η οποία πρόβαλε τον ανθρώπινο ψυχισμό στη φύση και «απεικόνιζε ολόκληρη τη φύση σαν μια τεράστια φαντασμαγορία ψυχικών δυνάμεων»²⁰³ παραμερίζεται. Για τους επιστήμονες που έβαλαν πρώτοι τα θεμέλια της κλασικής φυσικής, τα φυσικά φαινόμενα συμβαίνουν στον κόσμο από φυσική αναγκαιότητα. Η συμβολή του Καρτέσιου υπήρξε καθοριστική ώστε να αφαιρεθούν από την ύλη ψυχικά χαρακτηριστικά τα οποία εκτοπίζονται ακολούθως κι από τη φυσική περιγραφή. Η εκδήλωση δράσεων ή κινήσεων δεν αποδίδεται πλέον σε ‘απόκρυφες’ δυνάμεις που δεσπόζουν σε ένα ανιμιστικό σύμπαν, αλλά, σύμφωνα με τη μηχανοκρατική θεώρηση, αποδίδεται σε μηχανισμούς οι οποίοι απαρτίζονται από αδρανή σώματα.

²⁰³ Westfall (1977/1993) σελ. 40.

Μαθηματική προσέγγιση της φύσης: τα φυσικά φαινόμενα μελετώνται και περιγράφονται χρησιμοποιώντας τα μαθηματικά, ενώ οι ποσοτικοί προσδιορισμοί υποσκελίζουν τους ποιοτικούς. Αρχικά η γεωμετρία και έπειτα η ανάλυση γίνονται τα εργαλεία των φυσικών στη μελέτη της φύσης, καθιστώντας τη φυσική πρότυπο ακριβούς επιστήμης. Η μαθηματική αναπαράσταση ενός φαινομένου μέσω μιας διαφορικής εξίσωσης κίνησης θεωρείται πλέον επαρκής εξήγησή του, σύμφωνη μάλιστα με το μηχανοκρατικό ιδεώδες. Ενισχύεται η αντίληψη ότι δεν είναι απαραίτητο να γνωρίζουμε τις αιτίες των φαινομένων για να είμαστε σε θέση να τα επεξεργαστούμε και να τα αποδώσουμε μαθηματικά –αυτά και μόνο θα έπρεπε να μας αρκούν.

Δράση εξ επαφής: ο εξοβελισμός των ψυχικών ιδιοτήτων από την ύλη επέβαλε την επαφή ως προϋπόθεση της δράσης. Η αλληλεπίδραση μεταξύ άψυχων σωμάτων απομακρυσμένων στο χώρο θεωρείται αδιανόητη όταν δεν παρεμβάλλεται τίποτα ανάμεσά τους. Η παρεμβολή κάποιου μέσου κρίνεται ως απαραίτητη για τη μεταφορά ενέργειας και την άσκηση δύναμης από ένα σώμα σε κάποιο άλλο. Ακόμα και η αποδοχή της βαρυτικής έλξης, με την τόσο ισχυρή εμπειρική θεμελίωση, δεν κατάφερε να καταστήσει το ενδεχόμενο της δράσης από απόσταση λιγότερο παράλογο στον νου των φυσικών. Τον 17^ο αιώνα υποψήφιοι για το ρόλο του ‘μέσου’ ήταν ο μηχανικός αιθέρας ή κάποιο άυλο ανώτερο ον όπως ο Θεός. Τον 18^ο αιώνα εμφανίζεται η έννοια των ‘αβαρών’ ή ‘ασυμπίεστων’ ρευστών. Τα αβαρή ρευστά αποτελούσαν ουσίες οι οποίες διέθεταν φυσικές ιδιότητες χωρίς όμως να συνιστούν κανονική ύλη· σημαντικότερα παραδείγματα αυτών ήταν ο ηλεκτρισμός και η θερμότητα.²⁰⁴ Στα τέλη του 19^{ου} αιώνα, αβαρή ρευστά και άυλες παρεμβάσεις έχουν παραμεριστεί και μόνο η διερεύνηση της υπόθεσης του αιθέρα συνεχίζεται, μέχρι να παραμεριστεί λίγο αργότερα και αυτή. Η κατάληξη όλων των προσπαθειών για την αντιμετώπιση της ‘ενοχλητικής’ δράσης από απόσταση θα είναι να οδηγηθεί η κλασική σκέψη στην εισαγωγή της έννοιας του πεδίου και των δυναμικών γραμμών που θα γίνουν οι ‘φορείς’ των αλληλεπιδράσεων μεταξύ των απομακρυσμένων σωμάτων. Αν και η έννοια του πεδίου θέτει ένα νέο πρόβλημα προς επίλυση –το πρόβλημα της φυσικής σύστασής του– κατόρθωσε να υποκαταστήσει με αξιώσεις, τουλάχιστον στον χώρο των ηλεκτρομαγνητικών δράσεων, έστω και προσωρινά, την ακατανόητη δράση από απόσταση.

²⁰⁴ Hankins (1989/1998) σελ. 73-78.

Πειραματική μέθοδος: η φυσική επιστήμη γίνεται πειραματική και οι φυσικοί θέτουν στην υπηρεσία τους πειράματα είτε για να ελέγξουν και να καταδείξουν την ισχύ των νόμων που έχουν συναγάγει με συλλογιστικές διαδικασίες είτε για να ανακαλύψουν τους νόμους που διέπουν τα φαινόμενα που μελετούν. Κάθε πείραμα, πραγματοποιούμενο επανειλημμένα στο εργαστήριο υπό ελεγχόμενες συνθήκες, οδηγεί στη διατύπωση επαγωγικών συμπερασμάτων προάγοντας την επιστήμη. Από τα νοητικά πειράματα του Γαλιλαίου έως τα συστηματικά πειράματα του Faraday στον ηλεκτρομαγνητισμό και τα πειράματα των Michelson και Morley για τον αιθέρα, η κλασική φυσική βρήκε από επινοητικότητα όσον αφορά την εφαρμογή της πειραματικής μεθόδου για την ανακάλυψη της δομής του κόσμου. Οι διάφορες πειραματικές παραδόσεις που αναπτύχθηκαν υπήρξαν ιδιαίτερες σημαντικές που συνιστούν ολόκληρη ιστορική γραμμή από μόνες τους. Παρόλα αυτά δεν αναφερθήκαμε λεπτομερώς σε αυτές, μια και αυτό που κυρίως μας ενδιαφέρει για τη συνέχεια είναι απλώς η επισήμανση του κεντρικού ρόλου του πειράματος στην ανάπτυξη της φυσικής επιστήμης.

Σωματιδιακή αντίληψη της φύσης: όλα σχεδόν τα φυσικά φαινόμενα γίνονται αντιληπτά ως εκδηλώσεις της κίνησης, του τρόπου διαμόρφωσης ή γενικότερα της δράσης μικροσκοπικών υλικών σωματιδίων. Η εκπλήρωση του ζητούμενου της μηχανικής αναπαράστασης του κόσμου βρήκε, από φυσικής απόψεως, πρόσφορο έδαφος στην απεικονιστική δύναμη κινούμενων σωματιδίων που απαρτίζουν μεγαλύτερα σώματα και παρέχουν μέσω των ιδιοτήτων τους επαρκείς εξηγήσεις για τις ιδιότητες και για τη συμμετοχή στις λειτουργίες της φύσης των μεγαλύτερων σωμάτων. Η επίκληση της σωματιδιακής μηχανοκρατίας, όπως ονομάζεται, ήταν σχεδόν επιβεβλημένη για να κατανοηθεί κάθε σχεδόν μορφή δράσης που παρατηρούνταν στον κόσμο.²⁰⁵

²⁰⁵ Το ζήτημα της 'ατομικής θεωρίας' και της αποδοχής της από την επιστημονική κοινότητα είναι τεράστιο ιστορικά και φιλοσοφικά. Οπότε αποφύγαμε να το θίξουμε αφού μια σύντομη αναφορά σε αυτό εκτός του ότι θα το αδικούσε, δεν θα πρόσφερε στην προκειμένη περίπτωση κάτι ουσιαστικό στην επιχειρηματολογία μας.

2.2. Η περιγραφή συστημάτων στην κλασική μηχανική

Έχοντας υπόψη ό,τι επισημάνθηκε από τη σύντομη ιστορική ανασκόπηση της κλασικής φυσικής, θα περάσουμε στον τρόπο με τον οποίο παρουσιάζεται σήμερα ένα φυσικό σύστημα μέσω της κλασικής μηχανικής, ώστε να δημιουργηθούν οι προϋποθέσεις για τη συγκρότηση της έννοιας της κλασικότητας στο τέλος του κεφαλαίου. Η συγκρότηση αυτή θα συνεισφέρει στη συνέχεια σε δύο πράγματα. Πρώτον, θα βοηθήσει στην ανάδειξη των διαφορών –αλλά και των όποιων ομοιοτήτων– μεταξύ κλασικότητας και κβαντικότητας τουλάχιστον στο χώρο της μηχανικής. Δεύτερον, θα χρησιμοποιηθεί για να διερευνηθεί κατά πόσο η αντίληψη περί επιστημονικού ρεαλισμού είναι στενά συνδεδεμένη ή όχι με την κλασικότητα. Ο απώτερος σκοπός βεβαίως είναι να δειχθεί εάν υπάρχουν όντως ανυπέρβλητα εμπόδια για τη ρεαλιστική αντιμετώπιση της κβαντικής μηχανικής, της πιο επιτυχημένης ίσως σύγχρονης θεωρίας μας.

2.2.1. Η έννοια της κλασικής κατάστασης συστήματος

Σύστημα στη φυσική χαρακτηρίζεται ένα τμήμα του φυσικού κόσμου που διαχωρίζεται²⁰⁶ από τον υπόλοιπο κόσμο με πραγματικά ή νοητά όρια. Ο ‘υπόλοιπος κόσμος’, ό,τι εκτείνεται δηλαδή πέραν των ορίων του συστήματος, αποτελεί το περιβάλλον του. Εάν για την περιγραφή και τη μελέτη ενός συστήματος χρησιμοποιηθούν μεγέθη από την κλασική φυσική, το σύστημα χαρακτηρίζεται επιπλέον ως *κλασικό*. Ένα κλασικό σύστημα μπορεί να αποτελείται από ένα σωματίδιο ή από πλήθος σωματιδίων τα οποία συγκροτούν σώματα μεγαλύτερων διαστάσεων. Για λόγους απλότητας θα ασχοληθούμε με την περίπτωση του ενός σωματιδίου. Κάθε τέτοιο σύστημα χαρακτηρίζεται από ένα σύνολο σταθερών ιδιοτήτων, δηλαδή ιδιοτήτων που δεν μεταβάλλονται με το χρόνο –όπως η τιμή της μάζας²⁰⁷ του και του ηλεκτρικού του φορτίου²⁰⁸– και ένα σύνολο ιδιοτήτων που μεταβάλλονται με το χρόνο –όπως οι τιμές της θέσης και της ορμής του.

²⁰⁶ Με τον όρο ‘διαχωρίζεται’ στον ορισμό του συστήματος ήδη εισάγεται στην περιγραφή του από πολύ νωρίς το μεγάλο θέμα της διαχωρισιμότητας των συστημάτων στη φυσική. Λόγω της μεγάλης σημασίας της η κλασική διαχωρισιμότητα θα αναλυθεί σε επόμενη ενότητα.

²⁰⁷ Θεωρούμε ότι το σωματίδιο είναι μη σχετικιστικό και άρα έχει σταθερή μάζα.

²⁰⁸ Λέγοντας ότι η τιμή της μάζας ή η τιμή του ηλεκτρικού φορτίου αποτελούν ιδιότητες του συστήματος, θα μπορούσε να προβάλει κάποιος ή κάποια την ένσταση ότι ήδη παίρνουμε θέση ρεαλιστική και ως εκ τούτου γίνεται λήψη του ζητούμενου. Αντικρούοντας την ένσταση θυμίζουμε ότι το ζητούμενο της παρούσας εργασίας δεν είναι η ρεαλιστική αντιμετώπιση της κλασικής φυσικής και των ιδιοτήτων που αυτή χρησιμοποιεί αλλά η ρεαλιστική αντιμετώπιση της κβαντικής φυσικής. Θεωρούμε δεδομένο ότι η κλασική φυσική μπορεί να αντιμετωπιστεί ρεαλιστικά και διερευνούμε κατά πόσο η κβαντική θεωρία, όντας πολύ διαφορετική της κλασικής, υπονομεύει τον ρεαλισμό.

Πριν συνεχίσουμε την κλασική περιγραφή της κατάστασης ενός συστήματος βάσει των σταθερών και μεταβλητών ιδιοτήτων του στο χρόνο –αλλά και στο χώρο– είναι απαραίτητο να παρεμβληθεί μια ενότητα στην οποία θα δοθούν ορισμοί για τα είδη των ιδιοτήτων που θα χρησιμοποιηθούν.

2.2.2. Ιδιότητες και φυσική περιγραφή

Ακολουθώντας λοιπόν τους Langton και Lewis,²⁰⁹ δύο πράγματα –και κατ' επέκταση δύο συστήματα– θα θεωρούνται (εγγενώς) *αντίγραφα* ή *πανομοιότυπα* (duplicates) αν και μόνο αν έχουν ακριβώς τις ίδιες βασικές εγγενείς ιδιότητες. Μια ιδιότητα θα θεωρείται *εγγενής* (intrinsic) αν και μόνο αν δεν μπορεί ποτέ να διαφέρει μεταξύ δύο αντιγράφων· ή, με άλλα λόγια, αν και μόνο αν όποτε δύο πράγματα (ενεργά ή δυνάμει) είναι πανομοιότυπα, είτε και τα δύο διαθέτουν την ιδιότητα είτε και τα δύο δεν την διαθέτουν. Ως *βασικές εγγενείς ιδιότητες* (basic intrinsic properties) ορίζονται οι ιδιότητες εκείνες που είναι (1) ανεξάρτητες από τη συνοδεία ή τη μοναχικότητα (accompaniment ή loneliness), (2) δεν αποτελούν διαζευκτικές (disjunctive) ιδιότητες και (3) δεν αποτελούν αρνήσεις διαζευκτικών ιδιοτήτων. Όλες οι εγγενείς ιδιότητες ενός πράγματος επιγίνονται των βασικών εγγενών ιδιοτήτων του.²¹⁰

Αφετηρία των Langton και Lewis για τον ορισμό της βασικής εγγενούς ιδιότητας που προτείνουν στάθηκε ο ορισμός της εγγενούς ιδιότητας από τον Jaegwon Kim (1982). Σύμφωνα με τον Kim²¹¹ εγγενής²¹² χαρακτηρίζεται η ιδιότητα ενός αντικειμένου η οποία του ανήκει χωρίς να πρέπει να συνυπάρχει με οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο εξ ολοκλήρου διακριτό από αυτό. Το κίνητρο των Langton και Lewis να επεξεργαστούν τον ορισμό του Kim ήταν η επιθυμία τους να λύσουν την κυκλικότητα που χαρακτήριζε τους δύο παλαιότερους ορισμούς τους για τα πανομοιότυπα πράγματα και τις εγγενείς ιδιότητες. Συγκεκριμένα, όριζαν δύο πράγματα ως πανομοιότυπα –ή αντίγραφα– αν και μόνο αν όλες οι εγγενείς ιδιότητες –και μόνο αυτές– του ενός ήταν εγγενείς ιδιότητες και του άλλου. Από την άλλη, όριζαν ως εγγενείς ιδιότητες, οδηγούμενοι αναπόφευκτα σε κυκλικότητα, τις ιδιότητες που δεν μπορούν ποτέ να διαφέρουν μεταξύ αντιγράφων. Οι

²⁰⁹ Langton & Lewis (1998), σελ. 333-346.

²¹⁰ Langton & Lewis (1998), σελ. 336-7.

²¹¹ Όπως αναφέρεται από τους Langton και Lewis (1998) σελίδα 333.

²¹² Ο όρος του Kim είναι 'εσωτερική' (internal) και όχι 'εγγενής' (intrinsic).

δύο συγγραφείς ευελπιστούν ότι με τους νέους ορισμούς τους ο προηγούμενος κύκλος ανοίγει και γίνεται μια μικρή σπείρα.²¹³

Η πορεία που ακολούθησαν οι Langton και Lewis για να καταλήξουν στον ορισμό των βασικών εγγενών ιδιοτήτων αρχίζει με μια ένσταση που πρόβαλε ο Lewis σχετικά με τον ορισμό της εγγενούς ιδιότητας από τον Kim. Ο Lewis παρατήρησε ορθά ότι η ‘μοναχικότητα’ η ίδια αποτελεί ιδιότητα την οποία διαθέτει κάτι ασυνόδευτο, δεν μπορούμε όμως να την χαρακτηρίσουμε εγγενή ιδιότητά του. Επομένως, η μοναχικότητα δεν μπορεί να αποτελεί προϋπόθεση για την κατοχή μιας βασικής εγγενούς ιδιότητας. Το ίδιο ισχύει και για τη συνοδεία. Ένα πράγμα που δεν είναι μόνο του, δηλαδή τυχαίνει να συνοδεύεται από άλλα πράγματα, μπορεί να κατέχει αλλά μπορεί και να μην κατέχει μια συγκεκριμένη βασική εγγενή ιδιότητα. Η κατοχή ή η έλλειψη μιας βασικής εγγενούς ιδιότητας είναι συμβατή και με τη μοναχικότητα αλλά και με τη συνοδεία, και άρα ανεξάρτητη κι από τις δύο.²¹⁴ Στη συνέχεια οι Langton και Lewis παρατήρησαν ότι διαζευκτικές ιδιότητες του είδους ‘κάτι είναι στρογγυλό και μόνο ή δεν είναι στρογγυλό και συνοδεύεται’, ή οι αρνήσεις τους –παραδείγματος χάριν, ‘το να μην είναι στρογγυλό και μόνο ή να μην είναι μη-στρογγυλό με συνοδεία’, δεν είναι δυνατόν να αποτελούν εγγενείς ιδιότητες παρόλο που είναι ανεξάρτητες από τη μοναχικότητα ή από τη συνοδεία. Γι αυτό και συμπλήρωσαν τον ορισμό τους αποκλείοντας τις διαζευκτικές ιδιότητες και τις αρνήσεις τους. Θεώρησαν επίσης ότι οι βασικές εγγενείς ιδιότητες δεν είναι οι μόνες εγγενείς ιδιότητες που μπορούμε να έχουμε: οι διαζεύξεις ή οι συζεύξεις των βασικών εγγενών ιδιοτήτων συνιστούν άλλες εγγενείς ιδιότητες. Όπως λένε χαρακτηριστικά, «οι βασικές εγγενείς ιδιότητες παρέχουν τη βάση πάνω στην οποία όλες οι εγγενείς ιδιότητες επιγίνονται».²¹⁵ Οι εγγενείς ιδιότητες ενός πράγματος αναγνωρίζονται ως μη σχεσιακές ιδιότητές του ενώ οι εξωγενείς (extrinsic) ως σχεσιακές.²¹⁶

Οι Langton και Lewis επισημαίνουν ότι θα πρέπει να εκλάβουμε τον προαναφερθέντα ορισμό τους ως έναν τρόπο να διακρίνουμε τις εγγενείς και τις

²¹³ Langton & Lewis (1998), σελ. 337.

²¹⁴ Langton & Lewis (1998), σελ. 334.

²¹⁵ Langton & Lewis (1998), σελ. 337.

²¹⁶ Κατά πόσο οι χαρακτηρισμοί μη σχεσιακές και σχεσιακές ιδιότητες αρμόζουν στις εγγενείς και εξωγενείς ιδιότητες αντίστοιχα, είναι ένα από τα θέματα που διερευνά ο Humberstone στο άρθρο του

εξωγενείς ιδιότητες μεταξύ των καθαρών ή ποιοτικών (pure ή qualitative) ιδιοτήτων, αφήνοντας κατά μέρος τις μη καθарές ή μη ποιοτικές (impure ή non-qualitative ή haecceitistic) ιδιότητες.²¹⁷ *Καθαρές ή ποιοτικές* χαρακτηρίζονται οι ιδιότητες για τις οποίες οι περιπτώσεις εκδήλωσης δεν εξαρτώνται από την ύπαρξη κάποιας συγκεκριμένης εξατομικευμένης οντότητας (individual). Για παράδειγμα, η ιδιότητα του ‘να είσαι ο σύζυγος της Ξανθίππης’, αποτελεί μη ποιοτική εξωγενή ιδιότητα διότι εξαρτάται από την ύπαρξη της Ξανθίππης· σε αντίθεση με την ιδιότητα του ‘να είσαι σύζυγος’ η οποία αποτελεί ποιοτική εξωγενή ιδιότητα. Επίσης, η ιδιότητα του ‘να είσαι η Ξανθίππη’ αποτελεί μη ποιοτική εγγενή ιδιότητα, έναντι της ποιοτικής εγγενούς ιδιότητας του ‘να είσαι άνθρωπος’.

Στη φυσική το ενδιαφέρον μας στρέφεται κυρίως σε ποιοτικές ιδιότητες. Όταν αναφέρεται ότι η μάζα ενός σώματος είναι 60kg, από φυσικής απόψεως είναι αδιάφορο αν το εν λόγω σώμα είναι κάποιος συγκεκριμένος άνθρωπος ή η ντουλάπα του γραφείου του. Ας ασχοληθούμε όμως λίγο παραπάνω με το πώς αντιμετωπίζει η φυσική τα φαινόμενα που μελετά καθώς και τα σώματα που μετέχουν σε αυτά. Και κατ’ επέκταση πώς ξεχωρίζει το είδος των ιδιοτήτων τους που την αφορά.

Ο Μπαλτάς²¹⁸ αναφέρει ότι ο τρόπος με τον οποίο προσεγγίζει ο κλάδος της φυσικής τα φαινόμενα που μελετά αποκόπτοντας μέρος των χαρακτηριστικών τους, αποτελεί στοιχείο της μεθοδολογικής της διάστασης για τον καθορισμό της ταυτότητάς της. Για να διευκρινίσει τη θέση του, διακρίνει τα φαινόμενα σε ‘φαινόμενα της φύσης’ (natural phenomena) και σε ‘φαινόμενα της φυσικής’ (physical phenomena). Τα *φαινόμενα της φύσης* προσφέρονται στη γνωσιακή (cognitive) δικαιοδοσία της φυσικής μέσω της εμπειρίας ανεξαρτήτως του τι έχει να πει η ίδια. Τα *φαινόμενα της φυσικής* είναι φαινόμενα της φύσης όπως τα βλέπει και τα χειρίζεται η φυσική. Για παράδειγμα, φαινόμενο της φύσης είναι η πτώση εδώ και τώρα ενός μήλου στο έδαφος και φαινόμενο της φυσικής η ‘ελεύθερη πτώση’ –για την οποία η πτώση του μήλου αποτελεί περίπτωση εκδήλωσης. Κατά τη μελέτη του φαινομένου της ελεύθερης πτώσης η φυσική αδιαφορεί αν το σώμα που πέφτει είναι ένα συγκεκριμένο μήλο ή μια πέτρα. Από τη στιγμή που οι

Intrinsic/Extrinsic (1998). Ο προβληματισμός του όμως ξεπερνά την ανάγκη χρήσης των όρων στην παρούσα εργασία.

²¹⁷ Langton & Lewis (1998), σελ. 335.

²¹⁸ Baltas (1998), σελ. 4.

αρχικές συνθήκες της πτώσης των δύο σωμάτων είναι ταυτόσημες, για τη φυσική είναι ταυτόσημα –πανομοιότυπα– και τα φαινόμενα. Αυτό ισχύει παρά το γεγονός ότι τα μήλα ως αντικείμενα της φύσης δεν είναι δυνατόν να θεωρηθούν πανομοιότυπα με τις πέτρες που υπάρχουν σε αυτή· μήλα και πέτρες διακρίνονται στη φύση απολύτως μεταξύ τους με ουσιαστικές διαφορές που μας παρέχονται μέσω της εμπειρίας.²¹⁹ Η φυσική επιστήμη δεν είναι σε θέση να χειριστεί συγκεκριμένες εξατομικευμένες οντότητες της φύσης και κατά συνέπεια επιδεικνύει μια μορφή *ριζικού επιστημικού κυνισμού* αντιμετώπιζοντάς τες ως εναλλασσόμενους αντιπροσώπους των φαινομένων που μελετά.²²⁰ Έτσι η φυσική, αλλά και κάθε επιστήμη, προκειμένου να ιδιοποιηθεί γνωσιακά τα φαινόμενα ή τα αντικείμενα²²¹ επιτυγχάνει μια ριζική ρήξη με την εμπειρία αποκόποντας από αυτά εκείνα τα χαρακτηριστικά ή τις ιδιότητές τους που εμπίπτουν στη δικαιοδοσία της.²²² Η αντιμετώπιση αυτή δεν σημαίνει ότι δεν ασχολείται με πραγματικά αντικείμενα. Σημαίνει ότι *δεν ασχολείται με όλες τις διαστάσεις της πραγματικότητας των αντικειμένων*, παρά μόνο με αυτές που έχουν να κάνουν με τη γνωσιακή της σκόπευση.

Ένας ορισμός λοιπόν εγγενών ιδιοτήτων που στοχεύει στο να διακρίνει τις ποιοτικές εγγενείς ιδιότητες από τις εξωγενείς, ίσως να είναι ο καταλληλότερος για την περίπτωση της φυσικής. Εφόσον, όπως σχολιάστηκε, αποτελεί μεθοδολογική στάση και της ίδιας να περιορίζεται κατά τη μελέτη φαινομένων ή συστημάτων στις ποιοτικές ιδιότητές τους. Στις ιδιότητές τους, με άλλα λόγια, που δεν αφορούν συγκεκριμένες εξατομικευμένες οντότητες. Δρα μάλιστα επιλεκτικά και σε αυτό καθαυτό το σύνολο των ποιοτικών τους ιδιοτήτων, στοχεύοντας μόνο εκείνες για τις οποίες είναι αρμόδια και οι οποίες αποτελούν –μεταξύ άλλων– ό,τι ο κλάδος ονομάζει ‘φυσικές έννοιες’ ή ‘φυσικά μεγέθη’ (physical concepts ή magnitudes), αδιαφορώντας για όλες τις υπόλοιπες. Για παράδειγμα, η ποιοτική εγγενής ιδιότητα του ‘να είναι κάτι θρεπτικό’ η οποία κατέχεται από ένα μήλο, δεν αφορά τη φυσική και γι αυτό δεν υφίσταται φυσική έννοια που να σχετίζεται με τη ‘θρεπτικότητα’.

Ένας άλλος τρόπος διάκρισης των ιδιοτήτων που θα μας φανεί χρήσιμος στη συνέχεια είναι μεταξύ *καθορίσιμων* (determinables) και *καθορισμένων* (determinates)

²¹⁹ Baltas (1998), σελ. 5.

²²⁰ Baltas (1998), σελ. 7.

²²¹ Μπαλτάς (1991), σελ. 44.

ιδιοτήτων. Παραδείγματος χάριν, η ιδιότητα της μάζας αποτελεί καθορίσιμη ιδιότητα, ενώ μια συγκεκριμένη τιμή της –όπως το να έχει κάτι μάζα 60kg– αποτελεί καθορισμένη ιδιότητα. Διαφορετικές καθορισμένες ιδιότητες της ίδιας καθορίσιμης θεωρούνται ασύμβατες μεταξύ τους όταν αφορούν ένα αντικείμενο ή ένα σύστημα μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ένα αντικείμενο δεν μπορεί να έχει ταυτόχρονα μάζα 50kg και 60kg ή ένα σύστημα δεν μπορεί να διαθέτει ταυτόχρονα ολική ενέργεια 5J και 10J. Τα φυσικά μεγέθη αποτελούν τις καθορίσιμες ιδιότητες. Οι τιμές τους ή τα διανύσματα που τα αναπαριστούν αποτελούν τις καθορισμένες ιδιότητες των μονόμετρων (βαθμωτών) και διανυσματικών φυσικών μεγεθών αντίστοιχα.

Ολοκληρώνοντας την ενότητα, ας αναφέρουμε ότι στην περιγραφή των φυσικών συστημάτων θα χρησιμοποιούνται οι όροι εγγενείς (μη σχεσιακές) και εξωγενείς (σχεσιακές) ιδιότητες σύμφωνα με τους ορισμούς που τους δόθηκαν στην παρούσα ενότητα. Επίσης, λόγω του ότι ο κλάδος της φυσικής δεν ασχολείται –σχεδόν εξ ολοκλήρου– με ιδιότητες που εξατομικεύουν συγκεκριμένες οντότητες, όλες οι εγγενείς και εξωγενείς ιδιότητες των συστημάτων εξυπακούεται ότι θα είναι ποιοτικές, εκτός εάν αναφέρεται κάτι διαφορετικό. Όσο για τη διάκριση μεταξύ καθορίσιμων και καθορισμένων ιδιοτήτων, αν και ίσως να δείχνει τετριμμένη, θα φανεί η χρησιμότητά της όταν θα επανέλθουμε στις κβαντικές οντότητες και στα μεγέθη με τα οποία τις περιγράφουμε, όπως το σπιν και οι προβολές του ως προς συγκεκριμένο άξονα.

2.2.3. Επιστροφή στην κλασική έννοια της κατάστασης ενός συστήματος και της χρονικής της εξέλιξης

Η πλήρης περιγραφή ενός συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή και της συμπεριφοράς του, από κλασικής απόψεως, προϋποθέτει τη γνώση τριών συνόλων:²²³

- A) το σύνολο των τιμών των σταθερών ιδιοτήτων του,
- B) το σύνολο των στιγμιαίων τιμών των ιδιοτήτων του που μεταβάλλονται με το χρόνο, και
- Γ) το σύνολο των νόμων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του καθώς και τις αλληλεπιδράσεις του με το περιβάλλον του.

Η γνώση των παραπάνω μας εξασφαλίζει, θεωρητικά τουλάχιστον, τον ακριβή προσδιορισμό δύο πραγμάτων: της κατάστασης του συστήματος μια δεδομένη χρονική

²²² Με αυτόν τον τρόπο βεβαίως επιτυγχάνεται και η γενικότητα, αναπόσπαστο συστατικό της φυσικής επιστήμης.

²²³ Hughes (1989), σελ. 57.

στιγμή t και της εξέλιξής της στο χρόνο. Ο προσδιορισμός δε αυτός χρίζεται ως *αντικειμενικός*: η σαφής διάκριση μεταξύ του υποκειμένου που εξετάζει και του συστήματος που εξετάζεται προϋποτίθεται ως αυτονόητη, όπως και η πλήρη ανεξαρτησία τους. Με άλλα λόγια, θεωρείται αναμφίβολο το γεγονός ότι η παρατήρηση για την εύρεση κάποιων ιδιοτήτων του συστήματος δεν επηρεάζει τις τιμές τους και δεν διαμορφώνει αναλόγως την αιτιακή του αλυσίδα.

Στην κλασική μηχανική δύο ιδιότητες, από το σύνολο των ιδιοτήτων που μεταβάλλονται με το χρόνο, είναι ιδιαίτερες σημαντικές: η θέση και η ορμή. Ο λόγος για τον οποίο είναι ιδιαίτερες σημαντικές έχει να κάνει με το γεγονός ότι αρκεί ο καθορισμός μια χρονική στιγμή t της θέσης και της ορμής –αναφορικά με ένα κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων– κάθε σωματιδίου του συστήματος, για να έχουμε ό,τι ονομάζουμε *κατάσταση* του συστήματος τη δεδομένη χρονική στιγμή t . Ο συνδυασμός της κατάστασης του συστήματος με τις σταθερές ιδιότητές του και τους νόμους που το διέπουν, οδηγεί στον περαιτέρω καθορισμό των στιγμιαίων τιμών όλων των άλλων ιδιοτήτων του²²⁴ –εκείνων που μεταβάλλονται με το χρόνο– όχι μόνο για τη δεδομένη χρονική στιγμή αλλά και για όλες τις επόμενες χρονικές στιγμές. Υπό την προϋπόθεση βεβαίως το σύστημα να είναι απομονωμένο, δηλαδή να μην του ασκούνται εξωτερικές επιδράσεις. Ωστόσο, ακόμα και στην περίπτωση που το σύστημα δεν είναι απομονωμένο και δεχτεί κάποια εξωτερική επίδραση, η γνώση της επίδρασης και των νόμων που τη διέπουν μπορεί να επανακαθορίσει τις ιδιότητες του συστήματος και τη συμπεριφορά του στο χρόνο.

Ας ασχοληθούμε όμως πιο συγκεκριμένα με την περίπτωση του πολύ απλού συστήματος του ενός σωματιδίου σταθερής μάζας. Ο προσδιορισμός της κατάστασής του μια δεδομένη χρονική στιγμή, στον τρισδιάστατο φυσικό χώρο, απαιτεί τη γνώση έξι αριθμών: των τριών συντεταγμένων της θέσης και των τριών αντίστοιχων συνιστωσών της ορμής, σύμφωνα με ένα κατάλληλο σύστημα συντεταγμένων. Μία τέτοια εξάδα πραγματικών αριθμών –δηλαδή αριθμών $\in \mathfrak{R}$ – αναπαριστά ένα σημείο σε έναν εξαδιάστατο χώρο ο οποίος καλείται *καταστατικός* ή *φασικός χώρος* (phase space) του

²²⁴ Δεν καθορίζονται μόνο οι στιγμιαίες τιμές ιδιοτήτων που μεταβάλλονται με το χρόνο αλλά και οι τιμές κάποιων ιδιοτήτων, όπως η ολική ενέργεια ενός κλειστού (ή διατηρητικού) συστήματος, οι οποίες, αν και είναι σταθερές όσον αφορά το χρόνο, δεν συγκαταλέγονται απαραίτητα στο σύνολο A της σελίδας 109, διότι δεν αποτελούν εγγενείς ιδιότητες του συστήματος.

συγκεκριμένου συστήματος, αφού τα σημεία του αναπαριστούν τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος. Πάλι για λόγους απλότητας, αλλά χωρίς απώλεια γενικότητας, θα περιορίσουμε την κίνηση του σωματιδίου σε έναν μόνο άξονα –μία διάσταση– ώστε δύο αριθμοί, ένας για τη θέση και ένας για την ορμή, να αρκούν για την περιγραφή της κατάστασης του σωματιδίου. Στην περίπτωση αυτή, ο φασικός ή καταστατικός χώρος του σωματιδίου μπορεί να αναπαρασταθεί από ένα επίπεδο. Δηλαδή από έναν οικείο δυσδιάστατο χώρο αντί του αφηρημένου εξαδιάστατου.

Αν συμβολίσουμε λοιπόν με S τον καταστατικό χώρο και με s –όπου $s \in S$ – τις δυνατές καταστάσεις του συστήματος, μπορούμε να περιγράψουμε την κατάστασή του μια δεδομένη χρονική στιγμή t ως εξής:

$$s(t) = \{x(t), p(t)\}$$

όπου x , p η θέση του και η ορμή του αντίστοιχα, στη μία διάσταση. Η θέση x του σωματιδίου ανήκει στα μεγέθη που θεωρούνται παρατηρήσιμα και μας αποκαλύπτεται άμεσα με μια μέτρηση. Αποτελεί δε εξωγενή ιδιότητα του συστήματος, εφόσον μετράται πάντοτε σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο αδρανειακό σύστημα αναφοράς²²⁵ και άρα δεν πληροί την πρώτη προϋπόθεση των Langton και Lewis για τις βασικές εγγενείς ιδιότητες. Ούτε συνιστά επιγινόμενη εγγενή ιδιότητα των βασικών εγγενών ιδιοτήτων. Η τιμή της, λοιπόν, μπορεί να ποικίλει, όχι μόνο γιατί είναι δυνατόν να μεταβάλλεται με το χρόνο, αλλά και γιατί σχετίζεται άμεσα με το σύστημα αναφοράς που θα επιλεγεί για τον υπολογισμό της –γεγονός που ισχύει για κάθε φυσικό μέγεθος καταστατικώς εξαρτώμενο. Η ορμή p αποτελεί παράγωγο μέγεθος. Ορίζεται από το γινόμενο της μάζας του σωματιδίου επί την ταχύτητά του, δηλαδή $p=mv$. Η τιμή της μάζας m του σωματιδίου, για το μη σχετικιστικό πλαίσιο, ανήκει στο σύνολο των σταθερών ιδιοτήτων του συστήματος και αποτελεί εγγενή ιδιότητά του. Δεν μεταβάλλεται με το χρόνο, είναι ανεξάρτητη της κατάστασης του σωματιδίου και ανταποκρίνεται μάλιστα στις προϋποθέσεις που θέτουν οι Langton και Lewis για τις βασικές εγγενείς ιδιότητες. Δηλαδή η τιμή της δεν εξαρτάται από τη συνοδεία ή τη μοναχικότητα και δεν συνιστά ούτε διαζευκτική ιδιότητα ούτε άρνηση διαζευκτικής ιδιότητας. Η τιμή της ταχύτητας

²²⁵ Αδρανειακά ονομάζονται τα συστήματα αναφοράς στα οποία ισχύει ο πρώτος νόμος της κίνησης –ή νόμος της αδράνειας– του Νεύτωνα. Κάθε αναφορά σε σύστημα αναφοράς υπονοεί ότι είναι αδρανειακό εκτός αν δηλώνεται κάτι διαφορετικό.

$v = \frac{dx}{dt}$ ανήκει στο σύνολο των ιδιοτήτων του συστήματος που μπορεί να μεταβάλλονται με το χρόνο και αποτελεί εξωγενή ιδιότητά του αφού και αυτή υπολογίζεται πάντα σε σχέση με κάποιο συγκεκριμένο σύστημα αναφοράς. Ο υπολογισμός της προκύπτει από τις μετρήσεις της μεταβολής της θέσης του συστήματος σε συγκεκριμένα χρονικά διαστήματα. Ακολουθώντας με την ταχύτητα, και η ορμή p συγκαταλέγεται στις εξωγενείς ιδιότητες του συστήματος που εξαρτώνται από την κατάστασή του –την καθορίζει άλλωστε όπως είπαμε η ταχύτητα μαζί με τη θέση. Η ορμή αποτελεί επίσης παρατηρήσιμο μέγεθος, αν και όχι άμεσα μετρήσιμο όπως η θέση.

Στη συνέχεια θα εξετάσουμε, αρχικά, πώς προκύπτουν οι άλλες ιδιότητες του συστήματος από τον συνδυασμό της κατάστασής του s με το σύνολο των σταθερών του ιδιοτήτων, και έπειτα, πώς περιγράφεται η χρονική του εξέλιξη.

Κάθε καθορίσιμη ιδιότητα στη φυσική αντιπροσωπεύεται από κάποιο φυσικό μέγεθος A . Σε κάθε φυσικό μέγεθος A αντιστοιχεί μια συνάρτηση $f_A: S \rightarrow \mathfrak{R}$ τέτοια ώστε για κάθε κατάσταση του συστήματος να δίνεται από τη συνάρτηση ένας πραγματικός αριθμός, η τιμή δηλαδή του A . Με $f_A(s)$ συμβολίζεται η τιμή που κατέχει το μέγεθος ή η ιδιότητα A όταν η κατάσταση του συστήματος είναι s . Για παράδειγμα, η συνάρτηση που μας δίνει την κινητική ενέργεια T του συστήματος του ενός σωματιδίου που κινείται σε μία διάσταση είναι η εξής:

$$T = f_T(x,p) = \frac{p^2}{2m}$$

Αν ένα σύστημα αποτελείται από πολλά σωματίδια, η ολική του κινητική ενέργεια θα ισούται με το άθροισμα των κινητικών ενεργειών όλων των σωματιδίων που το αποτελούν.

Ας υποθέσουμε ότι το σωματίδιο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του και έστω $F(x) = -\frac{dV(x)}{dx}$ όπου $F(x)$ η δύναμη αλληλεπίδρασης και $V(x)$ η δυναμική ενέργεια. Η ολική ενέργεια του συστήματος στην περίπτωση αυτή –το σύστημα χαρακτηρίζεται ως διατηρητικό– θα ισούται με το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας:

$$E(x, p) = \frac{p^2}{2m} + V(x)$$

Αποδεικνύεται ότι η ολική ενέργεια ενός οποιουδήποτε διατηρητικού συστήματος είναι σταθερή. Δηλαδή αποτελεί μέγεθος ανεξάρτητο του χρόνου και κατά συνέπεια δεν μεταβάλλεται κατά τη χρονική εξέλιξη της κατάστασης του συστήματος. Έχουμε λοιπόν ένα παράδειγμα χρονικά σταθερής ιδιότητας του συστήματος, η οποία όμως δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητά του όπως η μάζα, εφόσον μπορεί να διαφέρει μεταξύ πανομοιότυπων συστημάτων.

Όσον αφορά την περιγραφή της χρονικής εξέλιξης του συστήματος, θα την παρουσιάσουμε –ακολουθώντας τους Βουδούρη και Μπαλά²²⁶– επιλέγοντας την κατά Hamilton διατύπωση ως την πιο προσοδοφόρα για τη σύγκριση της κλασικής με την κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με τη διατύπωση αυτή, η συνάρτηση $E(x, p)$ της ενέργειας ονομάζεται Χαμιλτονιανή συνάρτηση, συμβολίζεται με $H(x, p)$ και η μερική παραγωγή της δίνει τις παρακάτω εξισώσεις κίνησης κατά Hamilton:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\partial}{\partial p} H(x, p)$$

$$\frac{dp}{dt} = -\frac{\partial}{\partial x} H(x, p)$$

Η λύση των δύο παραπάνω διαφορικών εξισώσεων πρώτης τάξης ορίζει μοναδικά την κατάσταση του συστήματος μέσω των τιμών των μεταβλητών x, p για κάποια δεδομένη χρονική στιγμή t . Με άλλα λόγια, οι κατά Hamilton εξισώσεις κίνησης είναι αιτιοκρατικές²²⁷ και απηχούν την πεποίθηση ότι αρκεί η γνώση της αρχικής κατάστασης του συστήματος και των δυνάμεων που ασκούνται σε αυτό ώστε η χρονική του εξέλιξη να είναι, τουλάχιστον κατ' αρχήν, απολύτως καθορισμένη.

2.3. Ανάλυση συγκεκριμένων θεμάτων

Πριν περάσουμε στη σύνοψη των ρητών και άρρητων παραδοχών που είναι δυνατόν να αναδυθούν από την κλασική περιγραφή ενός συστήματος, επιβάλλεται να αναφερθούμε αναλυτικότερα σε τρία επίμαχα θέματα: τη διαχωρισιμότητα,²²⁸ την αντικειμενικότητα

²²⁶ Βουδούρης-Μπαλάς (1985), σελ. 19.

²²⁷ Στην πραγματικότητα είναι 'μετριοπαθώς' αιτιοκρατικές διότι ενδέχεται σε κάποιες ακραίες περιπτώσεις να μην παρέχουν αποτελέσματα. Περισσότερα όμως στην ενότητα περί αιτιοκρατίας (ντετερμινισμού).

²²⁸ Το θέμα της κβαντικής μη διαχωρισιμότητας έχει αναλυθεί στην ενότητα 1.4.2 (Τοπικότητα – Διαχωρισιμότητα: η κβαντική ως τοπική μη διαχωρίσιμη θεωρία) του πρώτου κεφαλαίου. Η αναφορά στην κλασική διαχωρισιμότητα συμπληρώνει την εν λόγω ενότητα.

της μέτρησης –και γενικότερα της επιστήμης– και την αιτιοκρατία. Στην ανάλυση που ακολουθεί θα ρίξουμε μεγαλύτερο βάρος στην περιγραφή του τρόπου με τον οποίο αντιλαμβάνονται οι φυσικοί επιστήμονες τις προαναφερθείσες έννοιες, αναφέροντας παράλληλα τις επικρατούσες φιλοσοφικές προσεγγίσεις σε αυτές εφόσον υπάρχουν.

2.3.1. Διαχωρισιμότητα

Στην αρχή-αρχή της κλασικής περιγραφής ενός συστήματος ειπώθηκε από πολύ νωρίς ότι στη φυσική ως σύστημα χαρακτηρίζεται ένα τμήμα του φυσικού κόσμου το οποίο *διαχωρίζεται* από τον υπόλοιπο κόσμο με πραγματικά ή νοητά όρια. Οπότε, τουλάχιστον από την κλασική φυσική και μετά –αν όχι νωρίτερα– εκδηλώθηκε ξεκάθαρα η πρόθεση των φυσικών όταν μελετούν τον κόσμο να τον διαιρούν σε μικρότερα τμήματα, τα οποία θεωρούν κιόλας ότι είναι δυνατόν να τα αντιμετωπίζουν ως διαχωρίσιμα κομμάτια του. Η δυνατότητα μάλιστα διαχωρισμού των συστημάτων μεταξύ τους ή από το περιβάλλον τους, έχει καταγραφεί στη συνείδηση των φυσικών ως βασική προϋπόθεση για την πραγματοποίηση της μελέτης τους. Κατά συνέπεια, αποτελεί ζήτημα μεγάλης σημασίας ο τρόπος με τον οποίο θεωρείται ότι διαχωρίζονται δύο συστήματα μεταξύ τους. Δηλαδή η συνθήκη που πρέπει να ικανοποιούν για να θεωρούνται είτε αυτά είτε οι καταστάσεις τους διαχωρίσιμα στοιχεία. Στο πρώτο κεφάλαιο έχει ήδη αναφερθεί η κατά Howard *αρχή διαχωρισιμότητας* (separability principle), η διατύπωση της οποίας επιδιώκει να συλλάβει τις διαισθήσεις των κλασικών φυσικών όταν αναφέρονται σε διαχωρίσιμα συστήματα. Θυμίζουμε ότι σύμφωνα με αυτήν:

« ... το περιεχόμενο δύο οποιωνδήποτε περιοχών του χωρόχρονου, διαχωρισμένων από μη μηδενικό χωροχρονικό διάστημα, συνιστά διαχωρίσιμα φυσικά (physical) συστήματα, υπό την έννοια ότι (1) καθένα κατέχει τη δική του, ξεχωριστή (distinct) φυσική κατάσταση, και (2) η σύνθετη κατάσταση (joint state) των δύο συστημάτων καθορίζεται πλήρως από αυτές τις ξεχωριστές καταστάσεις». ²²⁹

Η παραπάνω αρχή εκφράζει όσα θεωρούν αυτονόητα οι φυσικοί, έστω κι αν δεν τα διατυπώνουν ρητά, κάθε φορά που αναφέρονται σε συστήματα και υποσυστήματα. Για κάθε φυσικό, η ύπαρξη ενός μη μηδενικού χωροχρονικού διαστήματος στο πλαίσιο της σχετικιστικής φυσικής ή ενός μη μηδενικού χωρικού διαστήματος στο πλαίσιο της κλασικής προ-σχετικιστικής φυσικής, αποτελεί ικανή συνθήκη για την *εξατομίκευση* των

²²⁹ Howard (1989) σελ. 225-6.

φυσικών (physical) συστημάτων και των καταστάσεών τους. Επιπλέον, θεωρείται ολότελα προφανές πως η κατάσταση ενός σύνθετου συστήματος δεν είναι τίποτα περισσότερο από το λογικό 'άθροισμα' των καταστάσεων των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Με άλλα λόγια, όπως εκφράζεται στην αρχή διαχωρισιμότητας του Καρακώστα:

«Οι καταστάσεις των υποσυστημάτων S_1, S_2, \dots, S_N ενός σύνθετου κλασικού συστήματος S είναι ατομικώς καλώς-ορισμένες, ενώ οι καταστάσεις του σύνθετου συστήματος καθορίζονται πλήρως και επακριβώς μέσω αυτών και των φυσικών τους αλληλεπιδράσεων συμπεριλαμβανομένων των χωρο-χρονικών τους σχέσεων».²³⁰

Έτσι διατυπωμένη η αρχή διαχωρισιμότητας, εμπερικλείει τη θέση περί αναγωγής του όλου στα μέρη του· κατάλοιπο των σωματιδιακών αντιλήψεων που διαδραμάτισαν πρωταγωνιστικό ρόλο τους αιώνες της ανάπτυξης και κυριαρχίας της κλασικής φυσικής. Μία ολότητα ανάγεται στα συνιστώσα μέρη της και στις χωροχρονικές και αιτιακές σχέσεις αυτών. Η βάση της εξήγησης όλων των ιδιοτήτων της ολότητας συνίσταται από το συνδυασμό των ιδιοτήτων και των σχέσεων των συστατικών της. Ο προβληματισμός περί της αναγωγής του όλου στα μέρη του υπήρξε πάντοτε ιδιαίτερα παραγωγικός και οδήγησε μάλιστα στην εισαγωγή νέων παραπλήσιων εννοιών στη φιλοσοφία, με ποιο πρόσφατο παράδειγμα αυτό της έννοιας της επιγένεσης.

Ας ξαναγυρίσουμε όμως στο κριτήριο εξατομίκευσης που εμπεριέχεται στην αρχή διαχωρισιμότητας του Howard. Όπως αναφέρθηκε, η συγκεκριμένη αρχή προσπαθεί να συλλάβει τις διαισθήσεις των κλασικών φυσικών όταν διακρίνουν συστήματα μεταξύ τους. Οι διαισθήσεις αυτές, σύμφωνα με τον Howard, χαρακτήριζαν ακόμα και φυσικούς του διαμετρήματος ενός Einstein. Το παρακάτω απόσπασμα είναι ενδεικτικό:

«Χωρίς μια τέτοια υπόθεση της αμοιβαία ανεξάρτητης ύπαρξης (des 'So-Seins') χωρικός απομακρυσμένων πραγμάτων, μια υπόθεση η οποία προέρχεται από την καθημερινή σκέψη, η φυσική σκέψη δεν θα ήταν δυνατή με μια οικεία για μας έννοια. Ούτε μπορεί να δει κανείς πώς θα μπορούσαν οι φυσικοί νόμοι να διατυπωθούν και να ελεγχθούν χωρίς έναν τέτοιο ξεκάθαρο διαχωρισμό. Η θεωρία πεδίου εφάρμοσε αυτή την αρχή στο έπακρο, εντοπίζοντας μέσα σε απείρως μικρά (τετραδιάστατα) χωρικά-στοιχεία τόσο τα στοιχειώδη πράγματα που

²³⁰ Καρακώστας (2005a) σελ. 225.

θεωρεί σημαντικά υπάρχοντας ανεξάρτητα το ένα από το άλλο, όσο και τους στοιχειώδεις νόμους που θέτει για αυτά».²³¹

Ωστόσο, η ίδια η κλασική φυσική έχει δείξει ότι η προσφυγή στην ‘καθημερινή σκέψη’ που επικαλείται ο Einstein δεν στάθηκε πάντοτε καλός σύμβουλος. Για παράδειγμα, μέχρι τον Γαλιλαίο, αποτελούσε ‘καθημερινή σκέψη’ η λανθασμένη πεποίθηση ότι αν αφήσουμε δύο σώματα διαφορετικού βάρους –για τα οποία η αντίσταση του αέρα μπορεί να θεωρηθεί αμελητέα– να πέσουν στον ίδιο τόπο από το ίδιο ύψος, το βαρύτερο σώμα θα φτάσει πιο γρήγορα στο έδαφος. Τώρα πια γνωρίζουμε πολύ καλά ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει και ότι τα δύο σώματα θα πέσουν ταυτόχρονα· η πίστη όμως στην προαναφερθείσα ‘καθημερινή σκέψη’ δεν έχει απολύτως ‘ξεριζωθεί’. Εάν ερωτηθεί σχετικά κάποιος άνθρωπος, που δεν έχει διδαχθεί ποτέ στη ζωή του το φαινόμενο της ελεύθερης πτώσης στη φυσική ούτε έχει τύχει να πειραματιστεί ποτέ με αυτό, δεν θα δηλώσει άγνοια, αλλά θα απαντήσει με απόλυτη σιγουριά ότι το βαρύτερο σώμα θα πέσει γρηγορότερα. Η σιγουριά του μάλιστα είναι συνήθως τόσο μεγάλη που μόνο μέσω μιας επίδειξης του φαινομένου είναι δυνατόν να πειστεί για το λάθος του. Όπως λέει χαρακτηριστικά ο Κογιέ «ο κοινός νους είναι –και ήταν πάντοτε– μεσαιωνικός».²³²

Το παραπάνω παράδειγμα αποσκοπεί στο να δείξει ότι, εφόσον η ‘καθημερινή σκέψη’ έχει φανεί αναξιόπιστη στο παρελθόν, είναι πιθανόν να πλανάται και στο θέμα της διαχωρισιμότητας των καταστάσεων φυσικών (physical) συστημάτων. Κατά συνέπεια η επίκλησή της δεν συνιστά ισχυρό επιχείρημα για την ορθότητα υποθέσεων που έχουν να κάνουν με τη φυσική. Η παραβίαση της αρχής της διαχωρισιμότητας από την κβαντική φυσική αποτελεί ίσως το εναρκτήριο λάκτισμα για τη διάλυση μιας ακόμα πλάνης, τουλάχιστον στην επικράτεια του μικρόκοσμου. Ο διαχωρισμός των κλασικών συστημάτων και κυρίως των καταστάσεών τους, μπορεί απλώς να αποτελεί μια βολική μεθοδολογία για την άσκηση της φυσικής επιστήμης χωρίς να αντικατοπτρίζει ένα γενικό χαρακτηριστικό της φύσης. Στο πρώτο κεφάλαιο αναφερθήκαμε εκτενώς στον τοπικό μη διαχωρίσιμο χαρακτήρα της κβαντικής μηχανικής και υπερασπιστήκαμε την άποψη ότι ένα μη μηδενικό χωροχρονικό διάστημα επαρκεί για να διαχωρίσει δύο κβαντικά συστήματα που έχουν αλληλεπιδράσει στο παρελθόν, όχι όμως και τις καταστάσεις τους

²³¹ Einstein (1948) σελ. 321. Παρατίθεται στο Howard (1989) σελ. 233.

οι οποίες παραμένουν συζευγμένες έως ότου αλληλεπιδράσουν με τον έναν ή τον άλλο τρόπο ξανά με άλλα συστήματα. Ίσως το όφελος από την πλήρη κατανόηση του φαινομένου της μη διαχωρισιμότητας στην κβαντική φυσική να είναι η αναγνώριση μιας φύσης που δεν είναι διαχωρίσιμη ούτε πλήρως αναγώγιμη στα στοιχεία που τη συγκροτούν.

2.3.2. Αντικειμενικότητα στη μέτρηση - Αντικειμενικότητα και επιστήμη

Αν το θέμα της διαχωρισιμότητας των φυσικών (physical) συστημάτων και των καταστάσεών τους είναι σημαντικό διότι έχει να κάνει με τον τρόπο με τον οποίο μεθοδεύει η φυσική επιστήμη τη μελέτη της, το θέμα της αντικειμενικότητας είναι ακόμα πιο σημαντικό διότι σχετίζεται με το ιδανικό που επιδιώκει κάθε επιστήμη, την αντικειμενική γνώση του κόσμου. Οι θεωρίες οι οποίες υποπίπτουν στο ‘αμάρτημα’ της υποκειμενικότητας απλά δεν είναι επιστημονικές θεωρίες. Επιστήμη σίγουρα δεν σημαίνει, μεταξύ άλλων, ‘είμαστε σε θέση να διαχωρίζουμε φυσικά συστήματα και τις καταστάσεις τους με χωροχρονικά διαστήματα’, αλλά σημαίνει χωρίς αμφιβολία ‘είμαστε σε θέση να περιγράψουμε τον κόσμο αντικειμενικά’.

Ως εκ τούτου, σε κάποιο από τα στάδια της κλασικής περιγραφής ενός συστήματος αναφέρθηκε ότι ο ακριβής προσδιορισμός του, ο υπολογισμός δηλαδή τόσο των σταθερών όσο και των μεταβλητών ιδιοτήτων του μια δεδομένη χρονική στιγμή καθώς και της εξέλιξης των δευτέρων μέσα στο χρόνο βάσει των κατάλληλων νόμων, χρίζεται ως *αντικειμενικός*. Θα αναφερθούμε πιο συγκεκριμένα στο τι περιλαμβάνει ο λόγος περί αντικειμενικότητας, αρχικά, ειδικά στην κλασική φυσική, και έπειτα, γενικότερα στην επιστήμη, επιδιώκοντας τη διάκρισή τους.

Η έννοια της αντικειμενικότητας σχετίζεται άμεσα με την ανεξαρτησία.²³² Χαρακτηρίζουμε κάτι ως αντικειμενικό όταν δεν εξαρτάται από συγκεκριμένες απόψεις, αντιλήψεις, προτιμήσεις και άλλα παρόμοια. Η αντικειμενικότητα για την οποία ‘καυχιέται’ η κλασική φυσική σχετίζεται άμεσα με τη διαδικασία της μέτρησης σε αυτήν. Ας θυμηθούμε ότι *μέτρηση*, όπως ορίζεται από τον Isham, χαρακτηρίζεται «οποιαδήποτε φυσική λειτουργία μέσω της οποίας μπορεί να καθοριστεί (ίσως μόνο σε κάποιο βαθμό ακρίβειας) και να καταγραφεί η τιμή μιας φυσικής ποσότητας».²³⁴ Ο προφανής αυτός

²³² Κογρέ (1955/1991) σελ. 20.

²³³ Ορισμός της αντικειμενικότητας στο Psillos (2007) σελ. 168-9.

²³⁴ Isham (1995), σελ.68.

ορισμός της μέτρησης αφορά χωρίς διαφοροποιήσεις το σύνολο της φυσικής. Δηλαδή, οποτεδήποτε πραγματοποιείται μέτρηση, είτε στο κλασικό είτε στο κβαντικό πλαίσιο, αυτό το οποίο εξ ορισμού πληροφορούμαστε ότι θα επιτύχουμε είναι ο προσδιορισμός και η καταγραφή της τιμής ενός φυσικού μεγέθους· τίποτα λιγότερο και τίποτα περισσότερο. Στο κλασικό πλαίσιο όμως, είθισται να προσαρτώνται στην έννοια της μέτρησης παραδοχές οι οποίες αξιολογούνται συνήθως αβασάνιστα ως πεποιθήσεις υπεράνω υποψίας. Οι πιο σημαντικές από τις παραδοχές αυτές²³⁵ είναι κατά τη γνώμη μας οι εξής:

1. Το υποκείμενο που διενεργεί μέτρηση με μια μετρητική συσκευή και το υπό εξέταση σύστημα είναι πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους, πριν από, κατά τη διάρκεια και μετά τη μέτρηση.
2. Η μετρητική συσκευή και το υπό εξέταση σύστημα είναι πλήρως ανεξάρτητα μεταξύ τους, πριν από, κατά τη διάρκεια και μετά τη μέτρηση.
3. Η πλήρης ανεξαρτησία της μετρητικής συσκευής και του μετρούμενου συστήματος μας εξασφαλίζει ότι οι τιμές που αποκαλύπτονται κατά τη μέτρηση προϋπάρχουν· δηλαδή δεν υφίστανται παρέμβαση και αποτελούν τιμές που διαθέτουν τα φυσικά μεγέθη τη στιγμή που μετρώνται, αλλά και λίγο πριν μετρηθούν.

Οι μετρήσεις οι οποίες ικανοποιούν τις παραπάνω παραδοχές, σύμφωνα με την κλασική φυσική, μας διασφαλίζουν δίχως άλλο τις ‘αντικειμενικές’ ιδιότητες των συστημάτων. Ας ασχοληθούμε όμως λίγο περισσότερο με την κάθε μια από αυτές. Σχετικά με την πρώτη, αναφέρουμε προς υπεράσπισή της τα εξής. Είναι γεγονός ότι η μέτρηση μιας ιδιότητας ενός συστήματος, όπως για παράδειγμα η τιμή της θέσης του, σχετίζεται με την επιλογή από τη μεριά του πειραματιστή –του υποκειμένου που διενεργεί τη μέτρηση– του συστήματος αναφοράς ως προς το οποίο θα τη μετρήσει. Το γεγονός όμως αυτό δεν καθιστά το αποτέλεσμα της μέτρησης υποκειμενικό εφόσον διαφορετικοί πειραματιστές (υποκείμενα) βρίσκουν το ίδιο αποτέλεσμα για τη θέση εάν επιλέξουν το ίδιο σύστημα αναφοράς. Μπορεί κάποιες ιδιότητες, όπως η θέση, να αποτελούν σχετικές ιδιότητες του συστήματος, η σχετικότητα τους όμως δεν έχει να κάνει με το γνωρίζων υποκείμενο και επομένως δεν πλήττει την αντικειμενικότητα. Στο

²³⁵ Η δεύτερη και η τρίτη παραδοχή σχετίζονται άμεσα με τις θέσεις της μη πλαισιακότητας [σελ. 66], της αρχής της αξιόπιστης μέτρησης [σελ. 69] και της αρχής περί των εγγενών τιμών [σελ. 77] που μας απασχόλησαν στο πρώτο κεφάλαιο.

συμπέρασμα αυτό καταλήξαμε και στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής,²³⁶ στην οποία αν και παρατηρείται το φαινόμενο της πλαισιακότητας ή πλαισιακής εξάρτησης (contextuality) –σύμφωνα με αυτό τα αποτελέσματα των μετρήσεων εξαρτώνται από το πειραματικό πλαίσιο– τούτο σχετίζεται όπως τονίστηκε με τη μετρητική διαδικασία και όχι με το υποκείμενο που διενεργεί τη μέτρηση. Ο Redhead αναφέρει χαρακτηριστικά επί του θέματος:

«Στην κβαντική μηχανική, οι πειραματικές διατάξεις επιτελούν ρόλο ανάλογο με εκείνον των συστημάτων αναφοράς (των μετρητικών ράβδων και των ρολογιών) στη θεωρία της σχετικότητας, θεμελιώνοντας έτσι κάτι που θα μπορούσαμε να ονομάσουμε προοπτική έποψη της πραγματικότητας. Και πάλι, όμως, αυτό δεν εισάγει κανένα υποκειμενικό στοιχείο».²³⁷

Στην κλασική φυσική, σύμφωνα με τη δεύτερη παραδοχή, το σύστημα που εξετάζεται θεωρείται ανεξάρτητο και από τη μετρητική συσκευή. Κατ' αρχάς έχουμε την προφανή ανεξαρτησία του από το σύστημα των μονάδων μέτρησης που ενδέχεται να χρησιμοποιούν διαφορετικές μετρητικές συσκευές. Ενώ, για παράδειγμα, η τιμή της θέσης ενός αντικειμένου μπορεί να διαφέρει, ακόμα και ως προς το ίδιο σύστημα αναφοράς, αν χρησιμοποιηθούν διαφορετικές μονάδες μέτρησης, οι διαφορετικές τιμές που προκύπτουν είναι ισοδύναμες μεταξύ τους και μεταφράσιμες η μία στην άλλη. Όμως το μετρούμενο σύστημα θεωρείται ανεξάρτητο από τη μετρητική συσκευή και με έναν άλλο πολύ πιο ουσιαστικό τρόπο. Στην κλασική φυσική η μέτρηση για παράδειγμα της x-συνιστώσας της θέσης, δεν επηρεάζεται από το εάν προηγουμένως το σύστημα είχε υποβληθεί σε μια μέτρηση της x-συνιστώσας της ορμής του. Στο πρώτο κεφάλαιο είδαμε επισταμένα ότι κάτι τέτοιο δεν ισχύει στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής. Η ύπαρξη ασύμβατων ιδιοτήτων, οι σχέσεις απροσδιοριστίας και ο πλαισιοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης δείχνουν σαφέστατα ότι τα αποτελέσματα κάποιων μετρήσεων επηρεάζονται από τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιούνται οι μετρήσεις. Κατά συνέπεια στην κβαντική μηχανική μπορούμε να μιλάμε για ξεκάθαρη παραβίαση της δεύτερης παραδοχής.

Παρόλα αυτά θα προσπαθήσουμε να δείξουμε ότι ακόμα και στην κλασική φυσική σε ορισμένες περιπτώσεις έχουμε κάποιου είδους παραβίαση της ανεξαρτησίας των τιμών τού υπό εξέταση αντικειμένου ή συστήματος από τη μετρητική διάταξη. Στην

²³⁶ Βλέπε σελίδα 80 της ενότητας 1.7.

περίπτωση της μέτρησης αποστάσεων, η μετρητική διαδικασία θα μπορούσε να θεωρηθεί τετριμμένη διότι δεν περιλαμβάνει κανενός είδους αλληλεπίδραση. Έχουμε απλώς μια διαδικασία σύγκρισης της μετρούμενης απόστασης –*επίθεσης* (congruence)– με τη μονάδα μέτρησης μήκους που έχει επιλεγθεί. Αντιθέτως, στην περίπτωση της μέτρησης της θερμοκρασίας ενός αερίου σε δοχείο με κάποιο θερμόμετρο συντελείται μια μη τετριμμένη φυσική λειτουργία. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι τα συστήματα που συμμετέχουν στη μετρητική διαδικασία αλληλεπιδρούν για να δώσουν το αποτέλεσμα της μέτρησης. Κάθε τέτοια μέτρηση πραγματοποιείται παραβλέποντας το γεγονός ότι η θερμοκρασία του θερμομέτρου μπορεί να επηρεάσει τη θερμοκρασία του αερίου και να άρει κατά κάποιον τρόπο την ανεξαρτησία μετρητικής συσκευής και μετρούμενου συστήματος διαμορφώνοντας την τιμή της μέτρησης. Το θερμόμετρο δεν μετρά τη θερμοκρασία που είχε το αέριο πριν το ίδιο τοποθετηθεί στο εσωτερικό του δοχείου του αερίου· μετρά τη θερμοκρασία του αερίου στην κατάσταση της θερμικής ισορροπίας που θα προκύψει από τη συνύπαρξη του ίδιου με το αέριο. Η ένδειξη του θερμομέτρου βεβαίως στην κατάσταση της θερμικής ισορροπίας μάς δίνει τη θερμοκρασία στην οποία βρίσκεται το αέριο εκείνη τη στιγμή. Δεν μας δίνει όμως τη θερμοκρασία του αερίου πριν ξεκινήσει η μέτρηση και πριν επηρεάσει η δική του θερμοκρασία τη θερμοκρασία του αερίου. Συνήθως θεωρούμε ότι η διαμόρφωση της τιμής σε σχέση με την πραγματική που προϋπήρχε είναι αμελητέα και κατ' αρχήν προβλέψιμη εφόσον μπορούμε να γνωρίζουμε τη θερμοκρασία του θερμομέτρου πριν το χρησιμοποιήσουμε –ενδεχομένως να την καταγράψει το ίδιο. Έστω όμως κι αν είναι έτσι, δηλαδή μπορούμε εκ των υστέρων να 'διορθώσουμε' το αποτέλεσμα της μέτρησης λαμβάνοντας υπόψη μας τους παράγοντες που το αλλοίωσαν, τα πράγματα για την τρίτη παραδοχή περιπλέκονται διότι αυτή αποδίδει παθητικότητα στο σύνολο των κλασικών μετρήσεων πρεσβεύοντας ότι αποκαλύπτουν κάθε φορά ό,τι ήδη υπάρχει.

Κλασικά η οποιαδήποτε διαταραχή κατά τη μετρητική αλληλεπίδραση «εάν μη εξαλείψιμη, ασκείται κατά τρόπο συνεχή στον χώρο φάσεων του συστήματος και είναι συνεπώς κατ' αρχήν προβλέψιμη» και άρα το σύστημα «διατηρεί την ταυτότητά του αναλλοίωτη» και οι καταστάσεις του «είναι όντως πραγματικές και όχι δυνάμει

²³⁷ Redhead (1995), ελλ. μετ. σελ. 34.

υπαρκτές».²³⁸ Η θέση ενός αντικειμένου Α σε σχέση με ένα αντικείμενο Β είναι πραγματική, ενώ η μέτρησή της την αποκαλύπτει χωρίς να τη διαμορφώνει. Με το παράδειγμα όμως της θερμοκρασίας ίσως φαίνεται ότι τόσο η δεύτερη όσο και η τρίτη παραδοχή –μια και η αποκάλυψη τιμών που προϋπάρχουν των μετρήσεων προϋποθέτει την πλήρη ανεξαρτησία μετρητικής συσκευής και μετρούμενου συστήματος και κατά συνέπεια οι δύο παραδοχές συνδέονται– όσον αφορά τις κλασικές μετρήσεις είναι κατά περίπτωση και κατά προσέγγιση αποδεκτές. Η μέτρηση αποτελεί φυσική λειτουργία κατά την οποία κάποιες φορές διενεργείται μια απλή σύγκριση και κάποιες άλλες λαμβάνει χώρα μια ήπια ή λιγότερο ήπια αλληλεπίδραση. Ο όρος αλληλεπίδραση είναι συνυφασμένος με τον όρο εξάρτηση, χωρίς αυτό να σημαίνει ότι ταυτίζονται. Δύο συστήματα που αλληλεπιδρούν μοιραία καθίστανται με κάποιον τρόπο εξαρτημένα τουλάχιστον κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Η μετρητική συσκευή και το μετρούμενο σύστημα δύναται να είναι ανεξάρτητα μεταξύ τους πριν από τη μέτρηση και μετά από τη μέτρηση ή έπειτα από το πέρας ικανού χρονικού διαστήματος, αλλά όχι κατά τη διάρκεια. Το αέριο και το θερμόμετρο είναι ανεξάρτητα πριν από τη μέτρηση ενώ για κάποιο χρονικό διάστημα οι θερμοκρασίες τους θα είναι αυτές που διαμορφώθηκαν με την αλληλεπίδρασή τους. Εφόσον απομακρυνθεί το ένα από το άλλο, το θερμόμετρο θα αλληλεπιδράσει βαθμιαία με το νέο περιβάλλον στο οποίο θα βρεθεί, μην έχοντας την παραμικρή ‘ανάμνηση’ –έτσι τουλάχιστον πιστεύουμε– από το αέριο. Ο λόγος για τον οποίο θεωρούμε στις κλασικές μετρήσεις –στις οποίες εκδηλώνονται ήπιες μορφές αλληλεπίδρασης– τη μετρητική συσκευή και το μετρούμενο σύστημα ανεξάρτητα, οφείλεται στο γεγονός ότι η εξάρτησή τους η οποία εκδηλώνεται στα αποτελέσματα των μετρήσεων αξιολογείται μικρού εύρους και προβλέψιμη, και όχι γιατί είναι πράγματι τα συστήματα απολύτως ανεξάρτητα μεταξύ τους κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Αν ήταν απολύτως ανεξάρτητα η θερμοκρασία του θερμομέτρου δεν θα επηρέαζε τη θερμοκρασία του αερίου που πρόκειται να μετρήσει. Το να είναι δύο συστήματα ανεξάρτητα πριν από και μετά την αλληλεπίδραση, αλλά όχι κατά τη διάρκεια, μας νομιμοποιεί άραγε να ισχυριζόμαστε ότι αποκαλύπτουμε προϋπάρχουσες τιμές ιδιοτήτων; Αποκαλύπτουμε τιμές πραγματικές τη στιγμή που αποκαλύπτονται, αλλά αποκλίνουσες από τις προϋπάρχουσες πραγματικές; το γεγονός ότι οι αποκλίσεις

²³⁸ Καρακώστας (2005a), σελ. 226.

στις τιμές μπορούν να προβλεφθούν δεν ακυρώνει την αλλοίωση που υπέστη ο υπολογισμός τους από την αλληλεπίδραση των συστημάτων. Κάποιες μορφές παρατήρησης επηρεάζουν τις τιμές των ιδιοτήτων ακόμα και στο κλασικό πλαίσιο και ο μόνος λόγος για τον οποίο συνηθίσαμε να λέμε και να πιστεύουμε το αντίθετο είναι διότι μπορούμε να υπολογίσουμε τον βαθμό επιρροής ή να τον καταστήσουμε πολύ μικρό. Ο βαθμός επιρροής στο παράδειγμά μας με το θερμόμετρο και το αέριο στο δοχείο θα είναι μικρότερος εάν δεν επιλέξουμε να θερμομετρήσουμε ένα θερμό αέριο με ένα ψυχρό θερμόμετρο.

Οι αποκλίνουσες τιμές από τις προϋπάρχουσες πραγματικές θα μπορούσαν άραγε να αποδοθούν απλώς σε στατιστικά σφάλματα ή άλλα; Τα σφάλματα στις μετρήσεις της φυσικής οφείλονται κυρίως σε δύο λόγους. Ο πρώτος λόγος έχει να κάνει με το ότι οι μετρητικές συσκευές μας δεν είναι ιδανικές. Ακόμα και στην απλούστερη περίπτωση ενός χάρακα μήκους ενός μέτρου, μπορεί να μην έχουμε ένα τέλειο αντίγραφο του πρότυπου μέτρου που βρίσκεται στο Διεθνές Γραφείο Μέτρων και Σταθμών των Σεβρών. Ο δεύτερος λόγος έχει να κάνει με την ανάγνωση των ενδείξεων των μετρητικών συσκευών. Η ανάγνωση μπορεί να μην είναι ακριβής και να οδηγεί, όπως και η χρήση μιας ατελούς μετρητικής συσκευής, σε αποκλίσεις από τις πραγματικές τιμές –κοινώς σε σφάλματα. Οι αποκλίσεις όμως στις οποίες αναφερθήκαμε στα παραδείγματα με τη θερμοκρασία είναι άλλης φύσεως και υποδηλώνουν όπως υποστηρίξαμε εξάρτηση της τιμής της θερμοκρασίας του μετρούμενου συστήματος από τη θερμοκρασιακή κατάσταση της μετρητικής συσκευής. Αν, παραδείγματος χάριν, μετρήσουμε τη θερμοκρασία ενός θερμού αερίου με ένα παγωμένο θερμόμετρο που δείχνει μηδέν βαθμούς Celsius, η διαμόρφωση της τιμής της θερμοκρασίας του αερίου όταν θα επέλθει κατάσταση θερμικής ισορροπίας δεν είναι δυνατόν να αποδοθεί σε στατιστικό σφάλμα, αλλά στην επίδραση που είχε σε αυτήν η πολύ χαμηλή θερμοκρασία του θερμομέτρου· επίδραση που μπορεί να γίνει μικρότερη ή μεγαλύτερη ανάλογα με το πόση ήταν αρχικά η πραγματική διαφορά θερμοκρασίας των δύο συστημάτων.

Επομένως, εάν τις ιδιότητες ενός φυσικού (physical) συστήματος αποτελούν οι τιμές των διαφόρων φυσικών μεγεθών που αφορούν το σύστημα, η μέτρηση της θερμοκρασίας ενός αερίου, υπό τις συνθήκες που περιγράφηκαν παραπάνω –θερμό αέριο και παγωμένο θερμόμετρο–, δεν αποκαλύπτει μια προϋπάρχουσα ιδιότητά του αλλά την

ιδιότητα που αποκτά αλληλεπιδρώντας με το θερμόμετρο. Η έκφραση ‘προϋπάρχουσα’ δηλώνει ότι η μετρούμενη τιμή υπήρχε στο σύστημα πριν από τη μέτρηση, γεγονός που δεν ισχύει. Η τιμή της θερμοκρασίας δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα ενός συστήματος διότι μπορεί να διαφέρει μεταξύ πανομοιότυπων συστημάτων· συστημάτων δηλαδή που σύμφωνα με τον ορισμό των Langton και Lewis έχουν τις ίδιες βασικές εγγενείς ιδιότητες. Ωστόσο, η τιμή της θερμοκρασίας, αν και εξωγενής ιδιότητα του συστήματος, ανήκει στο σύστημα καθαυτό τη στιγμή που μετράται και δεν αποτελεί σχεσιακή ιδιότητά του. Στην κβαντική μηχανική η έκφραση ‘προϋπάρχουσα’ αποκτά επιπλέον περιεχόμενο. Σύμφωνα με τον Καρακώστα δηλώνει ότι η μετρούμενη τιμή ανήκει στο σύστημα καθαυτό και δεν αποτελεί συνδιαμορφωτικό στοιχείο του πειραματικού πλαισίου.²³⁹ Συνεπώς, για να αρνηθούμε ότι η μέτρηση στην κλασική φυσική αποκαλύπτει κάποιες φορές μη προϋπάρχουσες ιδιότητες, θα πρέπει να αποδώσουμε στον όρο ‘προϋπάρχουσα’ το επιπλέον περιεχόμενο που τις αποδίδεται στο κβαντικό πλαίσιο. Εάν όμως αντιληφθούμε τον όρο ‘προϋπάρχουσα’ με τη σημασία ‘αυτού που δεν υπάρχει πριν από κάτι’ τότε και οι μετρήσεις της κλασικής φυσικής αποκαλύπτουν σε κάποιες περιπτώσεις μη προϋπάρχουσες ιδιότητες.

Με όσα αναφέρθηκαν παραπάνω, προσπαθήσαμε να δείξουμε ότι η δεύτερη και η τρίτη παραδοχή που συνδέονται ‘αβασάνιστα’ με την έννοια της μέτρησης στο κλασικό πλαίσιο δεν μένουν πάντα αλώβητες ακόμα και σε αυτό. Εάν επομένως υποστηρίχθηκε επιτυχώς ότι οι δύο παραδοχές μπορούν να θεωρηθούν μόνο κατά προσέγγιση αποδεκτές για κάποιες περιπτώσεις μετρήσεων στο κλασικό πλαίσιο, δεν μπορούμε να τις επικαλούμαστε για να στηρίξουμε μια αδιαφιλονίκητη αντικειμενικότητα στην κλασική φυσική. Όμως η αντικειμενικότητα έτσι κι αλλιώς δεν τις χρειάζεται. Η αντικειμενικότητα γενικότερα στην επιστήμη υπαγορεύει την ικανοποίηση της πρώτης παραδοχής και μόνο. Δηλαδή την ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων από το υποκείμενο – τον παρατηρητή με άλλα λόγια– που διενεργεί μετρήσεις ή γενικότερα παρατηρήσεις. Αυτή αρκεί για τη διασφάλιση της αντικειμενικότητας σε κάθε φυσική θεωρία και ικανοποιείται και από την κλασική και από την κβαντική φυσική χωρίς προϋποθέσεις. Όπως διαπιστώνεται και από τον Redhead στο βιβλίο του *Από τη Φυσική στη Μεταφυσική*:

²³⁹ Ιδιωτική συνομιλία.

« ... οι εξελίξεις στη σύγχρονη θεωρητική φυσική δεν φαίνεται να παρέχουν βάση για τη διατύπωση πειστικών επιχειρημάτων που να μας υποχρεώνουν να παραδεχθούμε ότι η ανθρώπινη συνείδηση και η υποκειμενική αυτεπίγνωση διαδραματίζουν στον φυσικό κόσμο έναν ρόλο βαθύτερο από ό,τι πιστευόταν παλιότερα».²⁴⁰

Ολοκληρώνοντας την ενότητα για την αντικειμενικότητα οφείλουμε να διευκρινίσουμε ότι, αναγνωρίζοντας εξάρτηση της μετρητικής συσκευής και του μετρούμενου συστήματος κατά τη διάρκεια της πράξης της μέτρησης, δεν ταυτίζουμε την έννοια της αλληλεπίδρασης με την έννοια της εξάρτησης. Υπάρχουν διάφορες μορφές αλληλεπίδρασης όπως και υπάρχουν διάφορες μορφές εξάρτησης. Δεν θεωρούμε ότι υπάρχει 'ένα προς ένα' αντιστοιχία των μορφών της μίας με τις μορφές της άλλης, αλλά ότι κάθε αλληλεπίδραση συνοδεύεται αναπόφευκτα από κάποιας μορφής εξάρτηση. Η τιμή ενός φυσικού μεγέθους ενός κλασικού συστήματος εξαρτάται κάποιες φορές από την ήπια αλληλεπίδρασή του με τη μετρητική συσκευή. Εξαρτάται διότι, όπως είδαμε στην περίπτωση της θερμοκρασίας, οι τιμές που αποκαλύπτονται δεν προϋπάρχουν αλλά μπορούν να ποικίλουν ανάλογα με τη θερμοκρασιακή κατάσταση του θερμομέτρου που χρησιμοποιήθηκε. Στην περίπτωση της κβαντικής μέτρησης πάλι, έχουμε άλλη μορφή αλληλεπίδρασης, λιγότερο ήπια, και άλλη μορφή εξάρτησης. Ο όρος 'προϋπάρχουσα' αποκτά άλλη σημασία και η τιμή που λαμβάνεται 'δεν προϋπάρχει' υπό την έννοια ότι συνδιαμορφώνεται με το πειραματικό πλαίσιο και δεν ανήκει στο μετρούμενο σύστημα καθαυτό· χωρίς όμως να αποτελεί όπως έχουμε ξαναγράψει και αμιγώς σχεσιακή ιδιότητά του. Το γεγονός ότι η πλαισιακότητα όπως εκδηλώνεται στην κβαντική φυσική δεν έχει αντίστοιχο στην κλασική, δεν μας νομιμοποιεί να υποστηρίζουμε ότι οι αλληλεπιδράσεις της κλασικής φυσικής δεν συνοδεύονται από κάποιας μορφής εξάρτηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων από τις μετρητικές συσκευές –και κατ' επέκταση εξάρτηση των μετρούμενων συστημάτων, αφού πρόκειται για τις δικές τους ιδιότητες, από τις μετρητικές συσκευές.

Στο σημείο αυτό θα αποτολμήσουμε ένα πρόωρο σχόλιο σε σχέση με τον ρεαλισμό. Δεν χρειαζόμαστε πάσης φύσεως ανεξαρτησία για να είμαστε ρεαλιστές – άλλωστε δεν την είχαμε ποτέ. Αρκεί, αρχικά τουλάχιστον, να μην πλήττεται η αντικειμενικότητα που σχετίζεται με την ανεξαρτησία από την ανθρώπινη συνείδηση που

²⁴⁰ Redhead (1995), σελ. 40.

επιζητά κάθε επιστήμη. Μπορούμε να παραμένουμε ρεαλιστές αναγνωρίζοντας εξαρτήσεις και τις συνέπειες αυτών.

Τέλος, το απόσπασμα από τον Fock που ακολουθεί, συνοψίζει σε κάποιο βαθμό ό,τι προσπαθήσαμε να υπερασπιστούμε όσον αφορά την αντικειμενικότητα:

«Είναι απολύτως σαφές ότι η σχετικότητα δεν αποκλείει την αντικειμενικότητα. Ακόμα και στην κλασική φυσική απλές έννοιες όπως η τροχιά ενός υλικού σημείου, όντας ολότελα αντικειμενικές, είναι την ίδια στιγμή σχετικές, διότι έχουν καθορισμένη σημασία μόνο σε ένα ορισμένο σύστημα αναφοράς. Ομοίως, η σχετικότητα της κβαντικής φυσικής ως προς τους τρόπους παρατήρησης απλώς καθιστά τις φυσικές έννοιες πιο ακριβείς και επιτρέπει την εισαγωγή νέων εννοιών, αλλά σε καμιά περίπτωση δεν στερεί από αυτές την αντικειμενικότητά τους. Τα αντικείμενα του μικρόκοσμου είναι το ίδιο πραγματικά και οι ιδιότητές τους το ίδιο αντικειμενικές όσο είναι τα αντικείμενα και οι ιδιότητές τους στην κλασική φυσική».²⁴¹

2.3.3. Αιτιοκρατία (ή ντετερμινισμός)²⁴² – Αιτιότητα

Ήδη από την ιστορική ανασκόπηση έχει δοθεί η λαπλασιανή διατύπωση του ντετερμινιστικού δόγματος.²⁴³ Θυμίζουμε ότι σύμφωνα με αυτήν, η κατάσταση ενός συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή ορίζει μονοσήμαντα (χωρίς αβεβαιότητα) μέσω του δυναμικού νόμου της εξέλιξής της την κατάσταση από την οποία προήλθε και την κατάσταση στην οποία θα οδηγηθεί. Η κατά Hamilton διατύπωση της χρονικής εξέλιξης ενός συστήματος στην κλασική μηχανική υποτίθεται ότι αντικατοπτρίζει αυτόν ακριβώς τον ισχυρισμό δίνοντας με κάθε εφαρμογή της μοναδικά αποτελέσματα. Μία υπέρ-διάνοια που γνωρίζει επακριβώς τους νόμους που διέπουν ένα σύστημα ώστε να εφαρμόσει τις κατάλληλες εξισώσεις σε αυτό, κατά τον Laplace, είναι σε θέση να προβλέψει απόλυτα τη μελλοντική συμπεριφορά του.

Ο Earman εφιστά την προσοχή στο ότι η αναφορά στον ορισμό του Laplace σε μια διάνοια με απόλυτη γνώση που την καθιστά δυνατή για κάθε πρόβλεψη, εξισώνει λανθασμένα τον ντετερμινισμό με την προβλεψιμότητα (predictability). Τις δύο έννοιες οφείλουμε να τις διακρίνουμε μεταξύ τους αφού *ο ντετερμινισμός αποτελεί οντολογικό ισχυρισμό ενώ η προβλεψιμότητα γνωσιολογικό*. Με άλλα λόγια, αυτό που υποστηρίζεται

²⁴¹ Fock (1957) σελ. 648.

²⁴² Όπως ίσως έχει γίνει ήδη αντιληπτό, χρησιμοποιούμε τους όρους ντετερμινισμός ή αιτιοκρατία και ντετερμινιστικός ή αιτιοκρατικός εναλλακτικά αποδίδοντάς τους την ίδια σημασία.

από την ντετερμινιστική θέση είναι απλώς ότι η τωρινή κατάσταση ενός συστήματος, ή και του σύμπαντος ολόκληρου, προδιαγράφει το μέλλον του –αλλά και το παρελθόν του– μοναδικά, χωρίς εναλλακτικές δυνατότητες. Η επιβεβαίωση της θέσης αυτής εξαρτάται αποκλειστικά από τη δομή του κόσμου και όχι από το τι γνωρίζουμε εμείς ή τι μπορούμε να γνωρίσουμε. Η αδυναμία πρόβλεψης ή η δυνατότητά της, δεν καθιστά αντίστοιχα μη αιτιοκρατικό ή αιτιοκρατικό ένα σύστημα, διότι μπορεί να οφείλονται σε λόγους ξέχωρους από το ίδιο. Όπως λέει χαρακτηριστικά ο Earman, «ο οντολογικός ντετερμινισμός έχει βεβαίως γνωσιολογικές επιπτώσεις ... ας μην συγχέουμε όμως τις επιπτώσεις του δόγματος με το ίδιο το δόγμα».²⁴⁴

Οι θεμελιώδεις νόμοι της κλασικής φυσικής θεωρείται ότι είναι αιτιοκρατικοί· ότι υπακούουν δηλαδή στον λαπλασιανό ντετερμινισμό και εξασφαλίζουν την ύπαρξη και τη μοναδικότητα των αποτελεσμάτων για όλες τις χρονικές στιγμές του παρελθόντος και του μέλλοντος. Ο Earman όμως μας καλεί και πάλι να αναλογιστούμε αν κάτι τέτοιο ισχύει πραγματικά.²⁴⁵ Το παράδειγμα που επιλέγει να ελέγξει προσεκτικότερα είναι ο νευτώνειος νόμος της βαρυτικής έλξης, σύμφωνα με τον οποίο η ελκτική δύναμη που ασκείται μεταξύ δύο σωματιδίων είναι ανάλογη του γινομένου των μαζών τους και αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασής τους. Υποστηρίζει ότι έχουμε δύο λόγους να πιστεύουμε πως ο συγκεκριμένος νόμος υποσκάπτει την εμπιστοσύνη μας στον ντετερμινιστικό χαρακτήρα του. Ο πρώτος λόγος έχει να κάνει με το γεγονός ότι δεν μπορεί να συμπεριλάβει περιπτώσεις στις οποίες συμβαίνουν συγκρούσεις μεταξύ σημειακών σωματιδίων. Ο νόμος ισχύει υπό την προϋπόθεση ότι οι θέσεις των σωματιδίων δεν συμπίπτουν· ότι η απόσταση δηλαδή μεταξύ τους είναι διάφορη του μηδενός ή δεν τείνει στο μηδέν όπως θα συνέβαινε στο ενδεχόμενο της σύγκρουσης δύο εξ αυτών. Στις περιπτώσεις αυτές είτε ο νόμος δεν ορίζεται καν είτε δίνει τιμή που τείνει στο άπειρο και επομένως δεν μπορεί να μας παρέχει τη ‘νευτώνεια ιστορία’ των σωματιδίων. Ο δεύτερος λόγος, αν θεωρήσουμε ότι ο πρώτος αποτελεί σημείο ανωμαλίας (singularity) όχι ιδιαίτερα ανησυχητικό που μπορούμε να το παρακάμψουμε, αφορά τον βαθμό στον οποίο μπορούμε να εξασφαλίσουμε την κλειστότητα του

²⁴³ Ο λαπλασιανός ντετερμινισμός είναι και το είδος του ντετερμινισμού που θα μας απασχολήσει σε σχέση με τη φυσική, μια και, αφού αποτέλεσε την πηγή για την έμπνευσή του, συνδέετε άμεσα με αυτήν.

²⁴⁴ Earman (1986), σελ. 7-8.

²⁴⁵ Earman (1992) σελ. 243-245, Earman (1986) σελ. 23-53.

συστήματος ώστε να αποφύγουμε εξωτερικές επιδράσεις που θα κατέλυαν τον ντετερμινιστικό χαρακτήρα του νόμου. Ο Earman υποστηρίζει ότι κι αν ακόμα το σύστημά μας είναι το σύμπαν ολόκληρο, μπορεί να μην είναι ούτε τότε αρκετά κλειστό για την αποφυγή ορισμένων επιδράσεων. Οι επιδράσεις που έχει κατά νου αφορούν τη δυνατότητα των σωματιδίων να αποκτήσουν πολύ μεγάλες ταχύτητες μέσα σε πεπερασμένο χρονικό διάστημα –η νευτώνεια φυσική δεν θέτει ανώτατο όριο στην ταχύτητά τους– και να διαφύγουν στο άπειρο μεταβάλλοντας τον συνολικό αριθμό των σωματιδίων του συστήματος. Το αποτέλεσμα και σε αυτήν την περίπτωση θα είναι η υπονόμηση της ‘νευτώνειας ιστορίας’ του.

Οι δύο προαναφερθέντες λόγοι δεν αφορούν μόνο τον νευτώνειο νόμο της βαρύτητας, αλλά αποτελούν ευρέως διαδεδομένα χαρακτηριστικά της κλασικής φυσικής στη σωματιδιακή της αλλά και στην πεδιακή της διατύπωση.²⁴⁶ Από όσα επομένως σχολιάστηκαν παραπάνω, θα μπορούσαμε να συμπεράνουμε, μάλλον με ασφάλεια, ότι η κλασική φυσική είναι ντετερμινιστική μόνο εάν επενδυθεί με ορισμένες *ad hoc* προϋποθέσεις. *Ελλείπει αυτών, δεν αποδίδει έναν ντετερμινιστικό κόσμο, ασχέτως αν ο κόσμος που επιδιώκει να περιγράψει –και περιγράφει προσεγγιστικά– είναι τελικά ντετερμινιστικός ή όχι.*

Διάκριση ντετερμινισμού/αιτιοκρατίας, αιτιότητας και αιτιακής αρχής

Για τη συνέχεια είναι χρήσιμο σε μια ενότητα περί αιτιοκρατίας να διερευνηθεί και να ξεκαθαριστεί όσο γίνεται καλύτερα η διάκριση αυτής από την *αιτιότητα* (causality) και από την *αιτιακή αρχή* (causal principle). Διακρίσεις οι οποίες στην κοινότητα των φυσικών επιστημόνων –από τον 19^ο αιώνα περίπου και μετά αφότου εισήχθη ο νεολογισμός επιστήμονας, αν όχι νωρίτερα– ήταν και είναι ελάχιστα φανερές. Αργότερα θα υποστηρίξουμε ότι και την περίοδο της θεμελίωσης της κβαντικής μηχανικής οι διακεκριμένοι φυσικοί που πρωταγωνίστησαν σε αυτήν δεν διέκριναν επαρκώς τις εν λόγω έννοιες.

Ο David Hume στο έργο του *Έρευνα για την ανθρώπινη κατανόηση* (Enquiry concerning human understanding) δίνει δύο ορισμούς για την αιτιότητα.²⁴⁷ Συγκεκριμένα προσπαθώντας να συλλάβει τη σχέση μεταξύ αιτίας και αποτελέσματος γράφει ότι:

²⁴⁶ Earman (1992), σελ. 245.

²⁴⁷ Η αιτιότητα αποτελεί μία από τις έννοιες της φιλοσοφίας για τις οποίες έχει χυθεί πολύ μελάνι και ο όγκος της βιβλιογραφίας γι αυτήν είναι τεράστιος. Ωστόσο, επιλέγετε εδώ ο Hume για την παρουσίασή της

«Παρόμοια αντικείμενα πάντοτε συνενώνονται με παρόμοια. Επί αυτού έχουμε εμπειρία. Καταλλήλως με την εμπειρία αυτή, λοιπόν, μπορούμε να ορίσουμε ότι αιτία είναι ένα αντικείμενο, ακολουθούμενο από ένα άλλο, και όπου όλα τα αντικείμενα παρόμοια με το πρώτο ακολουθούνται από αντικείμενα παρόμοια με το δεύτερο».²⁴⁸

Καθώς επίσης, λίγο παρακάτω από τον πρώτο ορισμό γράφει τον δεύτερο, σύμφωνα με τον οποίο:

«Η εμφάνιση μιας αιτίας μεταφέρει πάντοτε τον νου, μέσω μιας συνηθισμένης μετάβασης, στην ιδέα του αποτελέσματος. Επίσης έχουμε εμπειρία επί αυτού. Μπορούμε, λοιπόν, καταλλήλως με αυτήν την εμπειρία, να φτιάξουμε έναν άλλο ορισμό της αιτίας, και να την ονομάσουμε, ένα αντικείμενο ακολουθούμενο από ένα άλλο, και του οποίου η εμφάνιση πάντοτε μεταφέρει τη σκέψη σε αυτό το άλλο».²⁴⁹

Επιδιώκοντας να αναφερθούμε όσο γίνεται πιο συνοπτικά στο σύνολο των ερμηνειών και των σχολιασμών που έχουν προκαλέσει οι δύο παραπάνω ορισμοί, θα περιοριστούμε σε τρεις μόνο, σημαντικές κατά τη γνώμη μας, επισημάνσεις σχετικά με αυτούς:

1. Αν και ο Hume επέλεξε στους ορισμούς του να ονομάσει τις αιτίες και τα αποτελέσματα 'αντικείμενα' (objects), δεν θα σφάλουμε αν θεωρούσαμε ότι αντιλαμβανόταν και τις μεν και τα δε κυρίως ως 'γεγονότα' (events). Συγκεκριμένα, μπορεί οι εκφράσεις που συνήθως χρησιμοποιούμε να φαίνεται ότι αποδίδουν αιτίες και αποτελέσματα σε αντικείμενα, παρόλα αυτά οι αιτίες και τα αποτελέσματα είναι γεγονότα που αφορούν αντικείμενα. Για παράδειγμα, όταν δύο μπάλες του μπιλιάρδου συγκρούονται, μπορεί να συνηθίζουμε να λέμε ότι η πρώτη μπάλα μετακίνησε τη δεύτερη, στην πραγματικότητα όμως εννοούμε ότι το γεγονός της σύγκρουσης της πρώτης μπάλας με τη δεύτερη ήταν η αιτία για το παρατηρούμενο αποτέλεσμα, δηλαδή το γεγονός της μετακίνησης της δεύτερης μπάλας.²⁵⁰
2. Ο Hume στην *Πραγματεία περί της ανθρώπινης νόησης* (Treatise on human nature) δίνει δύο διαφορετικούς ορισμούς της αιτιότητας, τους οποίους όμως εγκαταλείπει αργότερα στην *Έρευνά* του. Οι ορισμοί αυτοί είναι οι εξής:

κυρίως διότι, πρώτον, η θεωρία του περί αιτιότητας διατυπώνεται μια περίοδο που η επιρροή του Νεύτωνα ακόμα και στη φιλοσοφία είναι αδιαμφισβήτητη, και δεύτερον, διότι η προσέγγισή του έχει σταθεί μέχρι σήμερα η πιο σημαντική και η πιο γόνιμη στο χώρο της φιλοσοφίας για το συγκεκριμένο θέμα.

²⁴⁸ Hume (1748/1975), σελ. 76.

²⁴⁹ Hume (1748/1975), σελ. 76-7.

²⁵⁰ Dicker (1998), σελ. 112.

«Μπορούμε να ορίσουμε ότι αιτία είναι ‘Ένα αντικείμενο πρότερο και γειτονικό σε ένα άλλο, και όπου όλα τα αντικείμενα που μοιάζουν με το πρώτο διαθέτουν τις ίδιες σχέσεις προτεραιότητας και γειτνίασης με εκείνα τα αντικείμενα που μοιάζουν με το δεύτερο’. Εάν αυτός ο ορισμός εκτιμηθεί ατελής, διότι προέρχεται από αντικείμενα ξένα στην αιτία, μπορούμε να αντικαταστήσουμε στη θέση του άλλον ορισμό, δηλαδή ‘Μια αιτία είναι ένα αντικείμενο πρότερο και γειτονικό σε ένα άλλο, και έτσι ενωμένο με αυτό, ώστε η ιδέα του ενός καθορίζει τον νου να φτιάξει την ιδέα του άλλου, και η εντύπωση του ενός να φτιάξει μια πιο ζωντανή ιδέα του άλλου’». ²⁵¹

Εύκολα διακρίνουμε συγκρίνοντας τα δύο ζευγάρια ορισμών ότι, ενώ η αιτία στους ορισμούς της *Πραγματείας* είναι ένα αντικείμενο (γεγονός) ‘πρότερο και γειτονικό’ (precedent and contiguous) του αποτελέσματός της, στην *Έρευνα* γίνεται λόγος για ένα αντικείμενο (γεγονός) απλώς ‘ακολουθούμενο από’ (followed by) ένα άλλο αντικείμενο (γεγονός), το αποτέλεσμα. Πιθανότατα ο Hume προτίμησε να αποφύγει στους νεότερους ορισμούς του –αυτούς της *Έρευνας*– ρητή αναφορά σε χρονική προτεραιότητα και χωρική γειτνίαση, ²⁵² μια και το πλήθος των περιπτώσεων αιτιότητας που δείχνουν να μην ικανοποιούν τις δύο αυτές προϋποθέσεις στο χρόνο και στο χώρο τούς καθιστούσαν προβληματικούς. Παραδείγματος χάριν, η έλξη των ρινισμάτων σιδήρου από μαγνήτες ή η βαρυτική έλξη των ουράνιων σωμάτων, αποτελούν μερικά μόνο από τα παραδείγματα όπου φαίνεται –αν δεν λάβουμε υπόψη την πεδιακή τους αντιμετώπιση η οποία δεν είχε διατυπωθεί την περίοδο που έζησε ο Hume– ότι έχουμε δράση από απόσταση και άρα αιτίες απομακρυσμένες στο χώρο από τα αποτελέσματά τους. Όσο για τη χρονική προτεραιότητα της αιτίας έναντι του αποτελέσματος, έχουμε περιπτώσεις, όχι βέβαια αντιστροφής αυτής της σχέσης, αλλά ταυτόχρονης εκδήλωσης. Υπάρχουν δηλαδή περιπτώσεις όπου μπορούμε να θεωρήσουμε ότι κάποιες αιτίες συνοδεύονται από τα αποτελέσματά τους αφού αυτά είναι ταυτόχρονα με αυτές, όπως στο παράδειγμα της βάρδισης στην άμμο και των αποτυπωμάτων που δημιουργούνται εξαιτίας της ή στο παράδειγμα ενός σεισμού και της πρόκλησης ζημιών σε μια κατοικία.

²⁵¹ Hume (1739-40/1978), σελ.170.

²⁵² Η διαμάχη μεταξύ των σχολιαστών του Hume για το αν ήταν αυτή πραγματικά η πρόθεσή του, δηλαδή η αποφυγή της ρητής αναφοράς σε χρονική προτεραιότητα και χωρική γειτνίαση, δεν αφορά την παρούσα εργασία η οποία συντάσσεται με αυτό που θεωρεί ότι υποδηλώνεται σε πρώτο επίπεδο από τους ίδιους τους ορισμούς.

Αν λάβουμε υπόψη δε την πρώτη επισήμανση περί αντικειμένων και γεγονότων, οφείλουμε να παρατηρήσουμε ότι η 'χωρική γειτνίαση' θα πρέπει να υφίσταται –εάν υφίσταται– με διαφορετικό τρόπο ανάλογα με το εάν οι αιτίες και τα αποτελέσματα στα οποία αποδίδεται συλλαμβάνονται ως γεγονότα ή ως αντικείμενα. Η χωρική γειτνίαση δύο αντικειμένων υπονοεί την ύπαρξη επαφής τους στο χώρο· στην περίπτωση όμως δύο γεγονότων ο λόγος περί επαφής τους στο χώρο είναι μάλλον άνευ νοήματος. Τα γεγονότα δεν μπορούν να 'εφάπτονται'. Γι αυτό άλλωστε ο χαρακτηρισμός 'γειτονικά' δεν συνηθίζεται για αυτά, ενώ τις ελάχιστες φορές που μπορεί να τους αποδοθεί δεν χρησιμοποιείται με την κυριολεκτική του σημασία. Επομένως, αφού η σχέση της 'γειτονίας' μπορεί να αποδοθεί μόνο μεταφορικά σε γεγονότα, έχει να κάνει με χρονική 'επαφή' και όχι χωρική. Δυο γεγονότα μπορούν να 'γειτνιάζουν' στο χρόνο –με την έννοια ότι διαδέχεται χρονικά το ένα το άλλο– αλλά όχι στο χώρο. Στο χώρο μπορούν ίσως να γειτνιάζουν οι περιοχές στις οποίες διαδραματίστηκαν ή διαδραματίζονται γεγονότα· αν και ακόμα κι αυτές μάλλον δύσκολα οριοθετούνται επακριβώς ώστε να μας δίνεται η δυνατότητα να μιλήσουμε έστω για 'επαφή' περιοχών. Παραδείγματος χάριν, τι θα μπορούσαμε να πούμε όσον αφορά τη χωρική γειτνίαση περιοχών εκτύλιξης γεγονότων όπως στην περίπτωση της εκδήλωσης ενός σεισμού και της πρόκλησης ζημιών εξαιτίας του σε μια κατοικία; Έως που μας επιτρέπεται να οριοθετήσουμε την περιοχή όπου εκτυλίσσεται η αιτία δηλαδή το γεγονός του σεισμού; Στο επίκεντρό του; Η μήπως σε όλη την ακτίνα δράσης του; δηλαδή έως εκεί που ο σεισμός γίνεται αντιληπτός. Εάν την οριοθετήσουμε σε σχέση με το επίκεντρό του, είναι δυνατόν η περιοχή του αποτελέσματος –η πρόκληση ζημιών σε κάποια κατοικία– να είναι πολύ απομακρυσμένη από την περιοχή της αιτίας. Εάν πάλι την οριοθετήσουμε μέχρι εκεί που ο σεισμός γίνεται αντιληπτός, θα πρέπει να συμπεριλάβουμε ολόκληρη τη Γη, εφόσον σεισμοί μεγαλύτεροι των 4 βαθμών της κλίμακας του Ρίχτερ (Richter) δύναται να καταγραφούν, και άρα να γίνουν αντιληπτοί, από όλους τους εν λειτουργία σειсмоγράφους της Γης. Τότε όμως, η περιοχή του αποτελέσματος θα εμπεριέχεται στην περιοχή της αιτίας, μαζί με πολλές άλλες περιοχές στις οποίες η αιτία δεν θα έχει προκαλέσει το παραμικρό αποτέλεσμα.

Συνεπώς, οι δύο ορισμοί της *Έρευνας* με την οικονομικότερη έκφραση ‘ακολουθούμενο από’, αποφεύγουν κυρίως τη ρητή αναφορά στη χωρική γειτνίαση, η οποία, όπως επιχειρήθηκε παραπάνω να δειχθεί, δεν αποτελεί καθολικό γνώρισμα του συνόλου των περιπτώσεων αιτιότητας, ιδιαίτερα μάλιστα όταν οι αιτίες και τα αποτελέσματα δεν μπορούν παρά να συλληφθούν ως γεγονότα. Ο λόγος για τον οποίο επιμείνουμε στο θέμα της χωρικής γειτνίασης είναι διότι πιστεύουμε πως ακόμα και σε περιπτώσεις όπου δεν ικανοποιείται η προϋπόθεση της χωρικής γειτνίασης –όταν έχουμε δράση από απόσταση για παράδειγμα– μπορούμε να έχουμε αιτιώδη δράση. Η αναφορά βεβαίως στη χρονική προτεραιότητα της αιτίας δεν είναι τόσο εύκολο να απαλειφθεί, αφού πιθανότατα σχετίζεται με την ‘αιτιακή αρχή’ (κάθε γεγονός έχει μια αιτία) που θα σχολιασθεί παρακάτω και τη βαθιά ριζωμένη πεποίθησή μας για την ισχύ της.

3. Ένα ακόμα καίριο ζήτημα που τίθεται από τους σχολιαστές του Hume, είναι το κατά πόσο οι δύο ορισμοί της *Έρευνας* –ή αντίστοιχα οι δύο ορισμοί της *Πραγματείας*– είναι ισοδύναμοι μεταξύ τους. Η διαπίστωση ότι είναι δυνατόν δύο γεγονότα να ικανοποιούν τον πρώτο ορισμό και να μην ικανοποιούν τον δεύτερο ή το αντίστροφο, συνηγορεί υπέρ της μη ισοδυναμίας τους. Ας σκεφτούμε για παράδειγμα, την περίπτωση όπου κάποια μακροσκοπική αιτία έχει ως αποτέλεσμα κάποιο μικροσκοπικό γεγονός που η επιστήμη δεν έχει ακόμα ανακαλύψει. Τότε, παρόλο που θα είναι αληθές ότι παρόμοιες αιτίες ακολουθούνται από παρόμοια αποτελέσματα, θα είναι ψευδές ότι παρόμοιες αιτίες μεταφέρουν τη σκέψη μας σε παρόμοια αποτελέσματα. Άρα ενώ ικανοποιείται ο πρώτος ορισμός δεν ικανοποιείται ο δεύτερος.²⁵³ Πέραν αυτού, εάν επιθυμούμε έναν ορισμό της αιτιότητας που να την αποδίδει αντικειμενικά, δηλαδή ανεξάρτητα από παρατηρητές ή όντα που συναισθάνονται, οφείλουμε να περιοριστούμε στον πρώτο ορισμό του Hume. Για το θέμα αυτό ο Stroud αναφέρει:

«Επιπλέον, πράγματα θα μπορούσαν να πληρούν τις συνθήκες του πρώτου ‘ορισμού’ ακόμα κι αν δεν υπήρχαν καθόλου νόες, ή αν οι νόες ήταν πολύ διαφορετικοί από το πώς είναι πραγματικά. Η ύπαρξη και η ακριβής φύση των νοών είναι άσχετη με το ζήτημα κατά πόσο μέλη μιας κατηγορίας πραγμάτων ακολουθούνται τακτικά από μέλη μιας άλλης

²⁵³ Dicker (1998), σελ. 114.

κατηγορίας πραγμάτων. Όμως μόνο επειδή υπάρχουν νόες τουλάχιστον κάποια πράγματα (that any things at all) συμβαίνει να πληρούν τις συνθήκες του δεύτερου 'ορισμού', και μόνο επειδή αυτοί οι νόες είναι έτσι όπως είναι, πράγματα πληρούν τις συνθήκες του δεύτερου 'ορισμού' κάθε φορά που παρατηρούνται να πληρούν τις συνθήκες του πρώτου. ... Και ο Hume θεωρεί πως έδειξε ότι μόνο επειδή πράγματα πληρούν τις συνθήκες του δεύτερου 'ορισμού' συμβαίνει κάποια πράγματα στον κόσμο να θεωρείται καν ότι σχετίζονται αιτιακά ή αναγκαία. Σχηματίζουμε την ιδέα της αναγκαίας σύνδεσης μόνο εξαιτίας του περάσματος του νου από τη σκέψη τινός στη σκέψη του 'συνήθους συνοδού του'». ²⁵⁴

Υποστηρίζεται λοιπόν ότι ο πρώτος ορισμός αφορά μόνο τη *σταθερή σύζευξη* (constant conjunction) γεγονότων –γεγονότα παρόμοια με κάποιο ακολουθούνται ή συνοδεύονται από γεγονότα παρόμοια με κάποιο άλλο– και δεν συνεπάγεται *αναγκαία σύνδεση* (necessary connection) μεταξύ τους. Η αναγκαία σύνδεση παρεισφρεί στον δεύτερο ορισμό μέσω της αναφοράς περί μετάβασης του νου ή, αλλιώς, μέσω του αισθήματος της προσμονής του ενός γεγονότος από το άλλο. Όπως λέει ο Dicker με έμφαση:

«Η ουσία της αιτιότητας, λοιπόν, δεν είναι η αναγκαία σύνδεση (η οποία υπάρχει στον νου μας μόνο), αλλά η σταθερή σύζευξη. Ή, για να το θέσουμε διαφορετικά, η ουσία της αιτιότητας δεν είναι η αναγκαιότητα, αλλά η *τακτική διαδοχή* ή *κανονικότητα* (regular succession or regularity)». ²⁵⁵

Σύμφωνα λοιπόν με τα παραπάνω, η αιτιότητα –δηλαδή η σχέση αιτίας και αποτελέσματος– στην παρούσα εργασία θα γίνεται αντιληπτή όπως περιγράφεται στον πρώτο ορισμό του Hume, συμπεριλαμβανομένων κάποιων ερμηνευτικών στοιχείων που υποστηρίχθηκαν στις προηγούμενες μακροσκελείς επισημάνσεις. Συγκεκριμένα:

- Αιτία είναι ένα γεγονός που ακολουθείται (*χρονική προτεραιότητα*) ή συνοδεύεται (*ταυτόχρονη εκδήλωση, με το αποτέλεσμα συνοδό και την αιτία συνοδευόμενη*) από ένα άλλο, και που όλα τα γεγονότα παρόμοια με το πρώτο ακολουθούνται ή συνοδεύονται από γεγονότα παρόμοια με το δεύτερο (*σταθερή σύζευξη*). Δύο τέτοια γεγονότα, που συνιστούν με αντικειμενικό τρόπο αιτία και αποτέλεσμα εφόσον δεν υπεισέρχονται νόες στον ορισμό τους, δεν προϋποτίθεται –επίσης από τον ορισμό τους– ότι γειτνιάζουν στο χώρο ούτε συνεπάγεται ότι είναι αναγκαία συνδεδεμένα. Η ουσία της

²⁵⁴ Stroud (1977), σελ. 90.

αιτιότητας, δηλαδή της σχέσης αιτίας-αποτελέσματος, είναι η κανονικότητα και όχι η αναγκαιότητα.

Έχοντας λοιπόν κατά νου την παραπάνω θέση περί αιτιότητας, θα επιχειρηθεί η διάκριση αυτής από την (λαπλασιανή) αιτιοκρατία²⁵⁶ (ή ντετερμινισμό) –διάκριση που οφείλει να υπάρχει και μόνο λόγω οικονομίας της γλώσσας, αλλιώς τι νόημα θα είχε η εισαγωγή ενός όρου αν δεν διαφοροποιείται στο ελάχιστο από κάποιον άλλο.²⁵⁷ Ας θυμηθούμε ότι η αιτιοκρατία συνιστά οντολογικό ισχυρισμό, σύμφωνα με τον οποίο η κατάσταση ενός συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή, μέσω του δυναμικού νόμου της εξέλιξής της, ορίζει μονοσήμαντα –δηλαδή δρα καθοριστικά για ένα μόνο αποτέλεσμα– την κατάσταση από την οποία προήλθε και την κατάσταση στην οποία θα οδηγηθεί το σύστημα. Με την πρώτη ματιά διαπιστώνουμε ότι ο ντετερμινισμός αφορά και τις δύο κατευθύνσεις στο χρόνο, εφόσον συλλαμβάνει κάθε τωρινό γεγονός ως αιτία ενός συγκεκριμένου μελλοντικού γεγονότος (κατεύθυνση από το ‘τώρα’ στο μέλλον) και παράλληλα ως αποτέλεσμα ενός συγκεκριμένου γεγονότος του παρελθόντος (κατεύθυνση από το ‘τώρα’ στο παρελθόν). Μπορούμε λοιπόν να θεωρήσουμε ότι κατά τον ντετερμινισμό θεωρείται δεδομένη η δυνατότητα ύπαρξης μιας ξεχωριστής αιτιακής σειράς γεγονότων, η οποία εκτείνεται με μονοσήμαντο τρόπο οσοδήποτε μακριά στο χρόνο, είτε προς το μέλλον, καθορίζοντας συνεχώς στις διάφορες χρονικές στιγμές το αποτέλεσμα της αιτίας, είτε προς το παρελθόν, καθορίζοντας αντίστοιχα συνεχώς στις διάφορες παρελθούσες χρονικές στιγμές την αιτία της αιτίας. Μια τέτοιου τύπου αιτιακή ‘αλυσίδα’ θα χαρακτηρίζεται *αιτιοκρατική*. Συνεπώς, μπορούμε να διακρίνουμε την πρώτη ουσιαστική διαφορά μεταξύ αιτιοκρατίας και αιτιότητας στον ισχυρισμό που χαρακτηρίζει τη ντετερμινιστική θέση ότι μια τέτοια αλληλοδιαδοχή αιτίων και αποτελεσμάτων έχει μονοσήμαντη συγκρότηση και άρα δεν επιδέχεται εναλλακτικά στοιχεία στο σχηματισμό της. Με τον ισχυρισμό της ‘μονοσήμαντης συγκρότησης’, ο ντετερμινιστής φαίνεται να αντιλαμβάνεται στη σύνθεση των αιτιακών αλυσίδων την ύπαρξη αναγκαιότητας, και εξαιτίας αυτού, υπερβαίνοντας την αιτιότητα,

²⁵⁵ Dicker (1998), σελ. 115.

²⁵⁶ Σύγκριση της αιτιότητας, όπως παρουσιάζεται εδώ, με την κατά Selleri ‘αιτιότητα’ της ενότητας 2.1.4. δεν θα γίνει. Κι αυτό διότι θα υποστηριχθεί ότι η κατά Selleri ‘αιτιότητα’ σχετίζεται με την αιτιακή αρχή. Ως εκ τούτου, θα σχολιαστούν μαζί μετά την παρουσίαση της εν λόγω αρχής.

²⁵⁷ Παρόμοια παρατήρηση γίνεται και από τον Earman [Earman (1986), σελ. 8] σε σχέση με τους όρους αιτιοκρατία (determinism) και προβλεψιμότητα (predictability).

διαφοροποιείται ταυτόχρονα από αυτήν. Η ουσία της αιτιότητας, όπως σχολιάσθηκε, είναι η κανονικότητα –η σταθερή σύζευξη δηλαδή παρόμοιων γεγονότων με άλλα παρόμοια γεγονότα– στην οποία το αίτημα του μονοσήμαντου δεν υφίσταται. Ας σκεφτούμε το παράδειγμα ενός αναμμένου σπύριου για να δούμε καθαρότερα τη διαφορά. Έχει παρατηρηθεί ότι σε χώρους με περίσσεια οξυγόνου και άπνοια, μπορεί να ανάψει ένα στεγνό σπύριτο είτε μέσω επαρκούς τριβής με κατάλληλη επιφάνεια²⁵⁸ είτε με την τοποθέτησή του μέσα σε μια φλόγα. Όσες φορές λοιπόν ένα στεγνό σπύριτο έχει τριφτεί επαρκώς σε κατάλληλη επιφάνεια (γεγονός C), το αποτέλεσμα ήταν το σπύριτο να ανάψει (γεγονός E), οπότε γεγονότα όμοια με το C ακολουθούνται σταθερά από γεγονότα όμοια με το E. Ομοίως, όσες φορές έχει τοποθετηθεί ένα σπύριτο μέσα σε φλόγα (γεγονός C') επίσης το αποτέλεσμα ήταν το άναμμα του σπύριου (γεγονός E). Άρα, εκτός των C, έχουμε και τα γεγονότα C' να συνοδεύονται σταθερά από γεγονότα E. Από την άποψη της αιτιότητας, αν μια δεδομένη χρονική στιγμή παρατηρηθεί ένα αναμμένο σπύριτο σε χώρο με περίσσεια οξυγόνου και άπνοια, δεν έχει σημασία αν η αιτία του ανάμματος ήταν ένα γεγονός όμοιο με το C ή ένα γεγονός όμοιο με το C'. Και οι δύο περιπτώσεις πληρούν ό,τι αυτή πρεσβεύει –αφού και τα C και τα C' συνδέονται σταθερά με τα E– ικανοποιώντας τον ορισμό της. Αντιθέτως, η πρόβλεψη για το ποια από τις δύο αιτίες συνέβη, καθώς και ο ισχυρισμός ότι μόνο μία από τις δύο δύναται να έχει συμβεί, αποτελούν υπέρβαση του ορισμού της. Ο μονοσήμαντος καθορισμός είναι επιπρόσθετο στοιχείο που χαρακτηρίζει τον ντετερμινισμό. Όσο για τη δυνατότητα πρόβλεψης, ξεπερνάει ακόμα κι αυτόν, εφόσον, όπως έχει αναφερθεί, η φύση του ντετερμινισμού είναι οντολογική και όχι γνωσιολογική.

Μέχρι στιγμής, αναζητώντας τις διαφορές της αιτιοκρατίας με την αιτιότητα, κάναμε λόγο για υπέρβαση της αιτιότητας στην αιτιοκρατία. Πριν περάσουμε στη δεύτερη διαφορά τους, ας αναλογιστούμε τι θα συνιστούσε παραβίαση της αιτιότητας. Παραβίασή της, λοιπόν, θα συνιστούσε κατ' αρχάς η μη εμφάνιση του γεγονότος E ενώ συντρέχουν τα σταθερά συζευγμένα με αυτό γεγονότα C ή C'. Δηλαδή να μην ανάψει το

²⁵⁸ Ενδεχομένως να χρειάζεται εδώ να διευκρινιστεί τι περιλαμβάνει η αναφορά σε 'επαρκή' τριβή και 'κατάλληλη' επιφάνεια· ωστόσο δεν θα γίνει διευκρίνιση. Κι αυτό διότι ο στόχος δεν είναι η εξαντλητική ανάλυση και κριτική της έννοιας της αιτιότητας και των στοιχείων που την αφορούν, αλλά η σύγκρισή της με την αιτιοκρατία, η οποία είναι δυνατόν να επιτευχθεί χωρίς να υπεισέλθουμε σε τέτοιου είδους λεπτομέρειες. Ας περιοριστούμε μόνο στο να πούμε ότι τα επίθετα 'επαρκές' και 'κατάλληλο'

στεγνό σπύρτο παρόλο που έχει τριφτεί επαρκώς σε κατάλληλη επιφάνεια ή έχει τοποθετηθεί μέσα σε μια φλόγα. Επίσης, παραβίασή της θα μπορούσε να αποτελέσει και το ενδεχόμενο να μην ακολουθήσει το αναμμένο σπύρτο από ένα γεγονός C ή ένα γεγονός C', αλλά από ένα γεγονός C'' με το οποίο δεν ήταν σταθερό συζευγμένο στο παρελθόν. Βεβαίως, η δεύτερη περίπτωση παραβίασης, πριν θεωρηθεί ως τέτοια, θα πρέπει να ελεγχθεί προηγουμένως προσεκτικά μήπως γεγονότα C'' πάντα συνοδεύονταν από γεγονότα E, απλά δεν το είχαμε παρατηρήσει έως τώρα. Από τα προαναφερθέντα καταλαβαίνουμε ότι ουσιαστικά η κατάλυση, με τον έναν ή τον άλλον τρόπο, των παρατηρούμενων κανονικοτήτων θα υπεδείκνυε σε κάποιες περιπτώσεις παραβίαση της αιτιότητας.

Θα αναζητήσουμε τη δεύτερη διαφορά αιτιότητας και αιτιοκρατίας²⁵⁹ διερευνώντας τις σχέσεις που υπαγορεύουν μεταξύ των γεγονότων ή των καταστάσεων που περιλαμβάνουν. Αν εστιάσουμε την προσοχή μας σε δύο διαδοχικές καταστάσεις μιας αιτιοκρατικής 'αλυσίδας' θα δούμε ότι συνδέονται με σχέση διπλής συνεπαγωγής. Πιο συγκεκριμένα, σύμφωνα με τον ντετερμινισμό, μια κατάσταση S_1 τη χρονική στιγμή t_1 οδηγεί μονοσήμαντα σε μια κατάσταση S_2 τη χρονική στιγμή t_2 , δηλαδή ισχύει «αν S_1 τότε S_2 ». Όμως, πάλι σύμφωνα με τον ντετερμινισμό, μια κατάσταση ορίζει μονοσήμαντα και το παρελθόν της. Οπότε, μπορούμε να πούμε για την κατάσταση S_2 της χρονικής στιγμής t_2 ότι προήλθε από την κατάσταση S_1 της χρονικής στιγμής t_1 και πως ισχύει επίσης «αν S_2 τότε S_1 ». Η σύζευξη των δύο προηγούμενων συνεπαγωγών μας δίνει τον προτασιακό τύπο της διπλής συνεπαγωγής, « S_1 αν και μόνο αν S_2 » ($S_1 \leftrightarrow S_2$). Όπως είναι γνωστό από τον πίνακα αληθείας της διπλής συνεπαγωγής, στην περίπτωση που η S_1 είναι ψευδής και η S_2 αληθής τότε η πρόταση « S_1 αν και μόνο αν S_2 » είναι ψευδής και η αιτιοκρατική σχέση καταλύεται. Σε αυτό έγκειται η δεύτερη διαφορά με την αιτιότητα, η οποία, αν ιδωθεί ως απλή συνεπαγωγή, δύναται να συμπεριλάβει περιπτώσεις αληθείς όπου η S_1 είναι ψευδής και η S_2 αληθής. Για να γίνει πιο σαφές ας χρησιμοποιήσουμε ξανά το παράδειγμα με το σπύρτο. Σύμφωνα με την αιτιοκρατία ισχύει: 'σπύρτο τρίβεται σε κατάλληλη επιφάνεια' αν και μόνο αν 'αναμμένο σπύρτο'.

περιγράφουν απλώς το ικανό να επιφέρει το επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή, στο παράδειγμά μας, το άναμμα του σπύρτου.

Συνεπώς, εάν είναι ψευδές το ‘σπίρτο τρίβεται σε κατάλληλη επιφάνεια’ και αληθές το ‘αναμμένο σπύρτο’ η αιτιοκρατία παραβιάζεται αφού η διπλή συνεπαγωγή καθίσταται ψευδής.²⁶⁰ Δεν ισχύει όμως το ίδιο για την αιτιότητα η οποία μπορεί να συμπεριλάβει περιπτώσεις αληθείς όπου το ‘σπίρτο τρίβεται σε κατάλληλη επιφάνεια’ είναι ψευδές και το ‘αναμμένο σπύρτο’ αληθές διότι απλά άναψε από την τοποθέτηση του μέσα σε μια φλόγα. Έχοντας υπόψη τα παραπάνω, θα μπορούσαμε ίσως να πούμε ότι ο πίνακας αληθείας της αιτιοκρατικής σχέσης δύο γεγονότων ταυτίζεται με τον πίνακα αληθείας της διπλής συνεπαγωγής, ενώ ο αντίστοιχος της αιτιακής σχέσης ταυτίζεται με αυτόν της απλής συνεπαγωγής. Συνταυτίζοντας όμως την αιτιότητα με την απλή συνεπαγωγή της λογικής χρειάζεται πολύ προσοχή εάν υιοθετούμε τη χιουμιανή θέση ότι τα θεμέλια της πρώτης προέρχονται από την παρατήρηση και την εμπειρία. Δεν θα πρέπει να ξεχνούμε λοιπόν πως οι έστω και υπό προϋποθέσεις αιτιοκρατικοί νόμοι της κλασικής φυσικής καθιστούν την αλληλοδιαδοχή καταστάσεων αποδείξιμη και λογικά συνεπαγόμενη, σε αντίθεση με την αιτιότητα, οι σχέσεις της οποίας, αν υιοθετήσουμε την άποψη του Hume, ούτε αποδεικνύονται ούτε μπορούν να θεωρηθούν γνωστές *a priori*.²⁶¹ Και αυτή η διαπίστωση συνιστά την τρίτη διαφορά που μπορούμε να διακρίνουμε μεταξύ αιτιοκρατίας και αιτιότητας.

Ας αφήσουμε όμως την αιτιότητα, προς το παρόν, για να περάσουμε στην *αιτιακή αρχή*. Η αιτιακή αρχή –στην πιο απλή μορφή της– πρεσβεύει ότι «κάθε γεγονός έχει μια αιτία» (every event has a cause) και έχει διατυπωθεί κατά καιρούς από τους φιλοσόφους

²⁵⁹ Η δεύτερη διαφορά, όπως θα φανεί στη συνέχεια, αποτελεί ουσιαστικά συνέπεια της πρώτης. Δηλαδή του μονοσήμαντου καθορισμού του ‘πριν’ και του ‘μετά’ μιας κατάστασης: χαρακτηριστικό της αιτιοκρατίας που υπερβαίνει την αιτιότητα.

²⁶⁰ Θα μπορούσε κανείς να αντιτείνει ότι στο παράδειγμα δεν λαμβάνεται υπόψη το πλήθος των αιτιών που οδηγούν στο ‘αναμμένο σπύρτο’. Αυτό όμως δεν χαρακτηρίζει έτσι κι αλλιώς την αιτιοκρατία; Δηλαδή δεν έχει να κάνει με τον μονοσήμαντο καθορισμό της αιτίας ή του αποτελέσματος; Έστω κι αν συντρέχουν δύο ή περισσότερες αιτίες για το ‘άναμμα του σπύρτου’ ο ντετερμινισμός διεκδικεί τον καθορισμό μίας εξ αυτών ως υπεύθυνης για το παρατηρούμενο αποτέλεσμα.

²⁶¹ Η διαφορά αυτή επισημαίνεται και από τον Hoefler [Hoefler (2004), σελ. 2]. Επιπλέον, ο Hoefler συγκρίνοντας την αιτιότητα με τον ντετερμινισμό θεωρεί ότι το χαρακτηριστικό του ντετερμινισμού των δύο κατευθύνσεων στο χρόνο τον διαφοροποιεί από την αιτιότητα. Δεν συμεριζόμαστε την άποψη του διότι θεωρούμε ότι θα τον διαφοροποιούσε εάν η δεύτερη κατεύθυνση, από το ‘τώρα’ προς το ‘παραλθόν’, υπεδείκνυε στον ντετερμινισμό ότι το τωρινό γεγονός είναι αιτία κάποιου συγκεκριμένου γεγονότος του παρελθόντος. Με άλλα λόγια, αν αντέστρεφε τη χρονική προτεραιότητα της αιτίας έναντι του αποτελέσματος. Δεν υποδεικνύει όμως κάτι τέτοιο –το τωρινό γεγονός είναι αποτέλεσμα κάποιου συγκεκριμένου γεγονότος του παρελθόντος– και επομένως το στοιχείο διάκρισής τους είναι ο μονοσήμαντος καθορισμός. Ακόμα και στην αιτιότητα θα μπορούσαμε να εκφραστούμε ανάλογα και να κάνουμε λόγο για γεγονότα που ακολουθούνται σταθερά από γεγονότα στο μέλλον ή που ακολουθούν σταθερά γεγονότα από το παρελθόν.

με αρκετούς διαφορετικούς τρόπους. Στην παρούσα περίπτωση θα περιοριστούμε σε δύο εκδοχές της που οφείλονται η μία στον Hume και η άλλη στον Kant. Συνεπώς, η αιτιακή αρχή διατυπώνεται από τον Hume, ως εξής:

« ... ο,τιδήποτε αρχίζει να υπάρχει, πρέπει να έχει μια αιτία ύπαρξης». ²⁶²

Χωρίς πρόθεση και πάλι να εμπλακούμε σε λεπτομέρειες, θυμίζουμε ότι τον Hume τον απασχόλησαν δύο βασικά ερωτήματα σχετικά με την αιτιακή αρχή. Το πρώτο είχε να κάνει με την αναζήτηση του λόγου βάσει του οποίου οι άνθρωποι πιστεύουν ακράδαντα ότι υπάρχει *αναγκαία* μια αιτία για κάθε τι που αρχίζει να υπάρχει. Ο Hume, αντίθετα από ό,τι υποστήριζαν προγενέστεροι ή σύγχρονοί του φιλόσοφοι, δεν θεωρούσε ότι η συγκεκριμένη αρχή ήταν διαισθητικώς ή αποδεικτικώς σίγουρη, εφόσον δεν αποτελούσε ό,τι ο ίδιος ονόμαζε σχέση ιδεών. *Σχέσεις ιδεών* (relations of ideas) συνιστούσαν για τον Hume οι προτάσεις της Γεωμετρίας, της Άλγεβρας και της Αριθμητικής διότι ήταν δυνατό να ανακαλυφθούν με τη λειτουργία της σκέψης και μόνο, χωρίς να απαιτούν την οποιαδήποτε παραπομπή σε κάτι άλλο υπαρκτό στον κόσμο.²⁶³ Η πρόταση, ‘σε ένα ορθογώνιο τρίγωνο το τετράγωνο της υποτεινουσας είναι ίσο με το άθροισμα των τετραγώνων των δύο κάθετων πλευρών’, εκφράζει μια σχέση ιδεών η οποία είναι αποδεικτικά σίγουρη· με τρόπο μάλιστα που δεν θα μπορούσε ποτέ να ισχύσει για την αιτιακή αρχή, δηλαδή ανεξάρτητα της εμπειρίας. Αν και ο Hume ποτέ δεν αρνήθηκε ότι η εν λόγω αρχή αποτελεί μια αληθή πρόταση, δεν δέχτηκε κιόλας ότι μπορεί να είναι γνωστή a priori. Διατύπωσε ένα σύνθετο επιχειρήμα για να δείξει ότι δεν είναι αποδείξιμη και άσκησε κριτική σε τρία παλιότερα επιχειρήματα –των Hobbes, Clarke και Locke– που διατείνονταν ότι την αποδεικνύουν. Ισχυρίστηκε επιτυχώς ότι τουλάχιστον τα δύο από τα τρία επιχειρήματα θεμελιώνονταν στην ίδια πλάνη χρησιμοποιώντας το ζητούμενο και ως δεδομένο.²⁶⁴

Εφόσον, λοιπόν, η αναγκαιότητα της αιτίας για κάθε ύπαρξη, σύμφωνα με τον Hume, δε φαίνεται να αποτελεί ανταπόδεικτη γνώση, ούτε προκύπτει από επιστημονικό συλλογισμό, δεν μένει παρά να προέρχεται από την παρατήρηση και την εμπειρία. Ως εκ τούτου, το δεύτερο βασικό ερώτημα που τον απασχόλησε, ήταν το πώς μέσω αυτών,

²⁶² Hume (1739-40/1978), σελ. 78.

²⁶³ Hume (1777/1975), σελ. 25.

²⁶⁴ Hume (1739-40/1978) σελ. 78-82. Όπως έχει ήδη αναφερθεί η λεπτομερής αναφορά των επιχειρημάτων απομακρύνεται κατά πολύ από τον στόχο της παρούσας ενότητας, που είναι η διάκριση των όρων ντετερμινισμός / αιτιοκρατία, αιτιότητα και αιτιακή αρχή, γι αυτό και παραλείπεται.

δηλαδή της παρατήρησης και της εμπειρίας, συμπεραίνουμε ότι συγκεκριμένα αποτελέσματα έχουν αναγκαία συγκεκριμένες αιτίες και αντλούμε εν συνεχεία από την επαλήθευση των συμπερασμάτων μας τη βεβαιότητα για την ισχύ της αιτιακής αρχής. Ο Hume υποστήριξε ότι βασιζόμαστε στην πεποίθησή μας περί *ομοιομορφίας της φύσης* και εξάγουμε ουσιαστικά επαγωγικά –και όχι λογικά– συμπεράσματα. Το ότι έχουμε επανειλημμένα παρατηρήσει κάποια γεγονότα να ακολουθούνται σταθερά από κάποια άλλα γεγονότα, μας οδηγεί στο να υποθέσουμε μέσω της επαγωγής ότι αυτό θα συνεχίσει να συμβαίνει για πάντα. Η συνήθεια, λέει ο Hume, μας ωθεί ώστε να αναγάγουμε την παρατηρούμενη σταθερή σύζευξη κάποιων γεγονότων σε αναγκαία σύνδεση, να τα χαρακτηρίζουμε αίτιο και αποτέλεσμα και να θεωρούμε αυτονόητο ότι πάντα κάποιο γεγονός υπάρχει λόγω κάποιου άλλου γεγονότος.

Η σημαντικότερη ‘απάντηση’ στην κριτική που άσκησε ο Hume στην αιτιακή αρχή ήταν αυτή του Kant. Η δική του διατύπωση της αρχής είναι η εξής:

«Καθετί που συμβαίνει (που αρχίζει να υπάρχει) προϋποθέτει κατιτί στο οποίο επακολουθεί σύμφωνα προς έναν κανόνα».²⁶⁵

Ο Kant συμπλέει με τον Hume στο ότι η εν λόγω αρχή δεν είναι αυταπόδεικτη. Γι αυτό λοιπόν, σύμφωνα με τη δική του ορολογία, δεν την συγκαταλέγει στις αναλυτικές κρίσεις –η αλήθειά της δεν εξαντλείται στο νόημα των λέξεών της– αλλά στις συνθετικές κρίσεις, φρονώντας ότι επεκτείνει τη γνώση. Η διαφοροποίηση των δύο φιλοσόφων έγκειται στο ότι ο Kant θεωρεί αποδείξιμη μια περιορισμένη εκδοχή της αρχής, η οποία αφορά μόνο τα παρατηρήσιμα γεγονότα,²⁶⁶ μέσω ενός υπερβατολογικού (transcendental) επιχειρήματος. Το επιχείρημα χαρακτηρίζεται ως υπερβατολογικό διότι επιδιώκει να δείξει ότι η αλήθεια της συγκεκριμένης αρχής είναι αναγκαία συνθήκη της εμπειρίας ή, με άλλα λόγια, ότι δεν θα μπορούσαμε να έχουμε το είδος της εμπειρίας που έχουμε – δηλαδή την εμπειρική γνώση, μέσω των κατ’ αίσθηση αντιλήψεων, ότι ένα γεγονός συνέβη– αν η αιτιακή αρχή δεν ήταν αληθής.²⁶⁷ Κατά συνέπεια, το κεντρικό στοιχείο της ‘απάντησης’ του Kant είναι ότι η αιτιακή αρχή δεν προέρχεται από την επανειλημμένη πρόσληψη γεγονότων με σταθερή διαδοχή όπως διατεινόταν ο Hume, αλλά προϋποτίθεται ώστε να μπορούμε να προσλαμβάνουμε γεγονότα. Ο τρόπος με τον οποίο

²⁶⁵ Kant (1787, A189/1979) σελ. 217, υποσημείωση 2.

²⁶⁶ Η αιτιακή αρχή παραμένει και για τον Kant μη αποδείξιμη για γεγονότα εκτός των ορίων της εμπειρίας όπως η απαρχή του σύμπαντος ή η ύπαρξη του Θεού.

στήνει ο Kant το υπερβατολογικό επιχείρημα για την αιτιακή αρχή και η αποτελεσματικότητά του έχει προκαλέσει, όπως είναι αναμενόμενο, πλήθος ερμηνειών και σχολιασμών.²⁶⁸

Πέραν όλων αυτών, δηλαδή ανεξάρτητα αν έχει δίκιο ο Hume που υποστηρίζει ότι η πίστη μας στην αιτιακή αρχή δεν είναι λογικά αποδείξιμη αλλά πηγάζει από τη συνεχή πρόσληψη παραδειγμάτων αιτιότητας, ή ο Kant που διατείνεται πως μπορεί να αποδείξει ότι η αιτιακή αρχή αποτελεί προϋπόθεση για την πρόσληψη γεγονότων που εμπεριέχουν σχέσεις αιτίας και αποτελέσματος υπό τη μορφή κανόνων, η σύγκριση με την αιτιοκρατία οδηγεί στα εξής συμπεράσματα. Η αιτιοκρατική αντίληψη θεωρεί δεδομένη την εγκυρότητα της αιτιακής αρχής, αποδείξιμη ή όχι. Δεν περιορίζεται όμως στο να επαναλάβει ότι υπάρχει κάποια αιτία για κάθε ύπαρξη, αλλά πηγαίνοντας παραπέρα δηλώνει ότι για κάθε υπάρχουσα κατάσταση μπορούμε να έχουμε μόνο *μία* αιτία. Συνεπώς, θα μπορούσε και σε αυτήν την περίπτωση να υποστηριχθεί, ότι μια ενδεχόμενη παραβίαση της αιτιοκρατίας δεν πλήττει απαραίτητα και την αιτιακή αρχή εφόσον αυτή δεν φαίνεται να υποδεικνύει μονοσήμαντο καθορισμό της αιτίας.

Πριν από την ολοκλήρωση της ενότητας θα σχολιάσουμε το κατά Selleri θέμα της 'αιτιότητας'. Θυμίζουμε ότι σε αυτό θέτεται το εξής ερώτημα: κατά πόσο θα πρέπει η

²⁶⁷ Dicker (2004), σελ. 163-4.

²⁶⁸ Ακολουθώντας τον Dicker, θα περιοριστούμε στο να αναφέρουμε το επιχείρημα που αντλεί ο Paul Guyer από το κείμενο του Kant, αφού από πολλούς σχολιαστές η ανάλυση του Guyer θεωρείται ως η πιο πολλά υποσχόμενη [Dicker (2004), σελ. 170]. Ο Dicker το συνοψίζει ως εξής:

«(1) Δεν μπορούμε να γνωρίζουμε μέσω παρατήρησης ότι ένα γεγονός –δηλαδή μια μετάβαση από μια κατάσταση A σε μια κατάσταση B– συμβαίνει, γνωρίζοντας ότι οι κατ' αίσθηση αντιλήψεις των A και B συμβαίνουν με τη σειρά A, B· γνωρίζοντας ότι οι κατ' αίσθηση αντιλήψεις των A και B είναι μη αντιστρέψιμες· γνωρίζοντας ότι η A προηγείται της B με αναφορά τον απόλυτο χρόνο· ή γνωρίζοντας ότι αυτές οι κατ' αίσθηση αντιλήψεις είναι διαδοχικές καταστάσεις πραγμάτων καθ'αυτών.

(2) Εάν (1), τότε ο μόνος τρόπος που μπορούμε να γνωρίζουμε μέσω της αντίληψης ότι ένα γεγονός – δηλαδή μια μετάβαση από μια κατάσταση A σε μια κατάσταση B– συμβαίνει είναι γνωρίζοντας ότι η B ακολουθεί την A σύμφωνα προς έναν κανόνα, δηλαδή, ότι το γεγονός έχει μια αιτία.

(3) Εάν ο μόνος τρόπος που μπορούμε να γνωρίζουμε μέσω της αντίληψης ότι ένα γεγονός –δηλαδή μια μετάβαση από μια κατάσταση A σε μια κατάσταση B– συμβαίνει είναι γνωρίζοντας ότι η B ακολουθεί την A σύμφωνα προς έναν κανόνα, δηλαδή, ότι το γεγονός έχει μια αιτία, τότε κάθε τέτοιο γεγονός που μπορούμε να γνωρίζουμε την εμφάνισή του μέσω της αντίληψης πρέπει να έχει μια αιτία.

∴ (4) Κάθε τέτοιο γεγονός για να μπορούμε να γνωρίζουμε την εμφάνισή του μέσω της αντίληψης πρέπει να έχει μια αιτία». [Dicker (2004), σελ. 173]

Όπως μας διαφωτίζει ο Dicker, η κατάσταση B (π.χ. η ύπαρξη ενός σπασμένου αυγού) ακολουθεί την κατάσταση A (π.χ. την ύπαρξη ενός ανέπαφου αυγού) 'σύμφωνα προς έναν κανόνα' δεν σημαίνει ότι η A είναι η αιτία της B, ούτε ότι οπότε υπάρχει η A υπάρχει και η B. Αυτό που σημαίνει είναι, οπότε η A υπάρχει και η C συμβαίνει (π.χ. η πτώση ενός ανέπαφου αυγού), η B ακολουθεί την A. [Dicker (2004), σελ. 174].

διατύπωση των φυσικών νόμων να γίνεται με τέτοιο τρόπο ώστε να αποδίδεται τουλάχιστον *μία* (one) αιτία για κάθε παρατηρημένο αποτέλεσμα; Είναι εύκολο να διακρίνει κανείς ότι το θέμα της ‘αιτιότητας’ όπως παρουσιάζεται από τον Selleri σχετίζεται άμεσα με την αιτιακή αρχή. Επομένως, αυτό που ίσως θίγεται επί της ουσίας είναι το κατά πόσο οι φυσικοί νόμοι πρέπει να διατυπώνονται με τέτοιο τρόπο ώστε να μην θέτουν την αιτιακή αρχή υπό αμφισβήτηση, καθώς θα αποδίδουν τουλάχιστον μία αιτία για ό,τι παρατηρείται. Η άποψη του Selleri, όπως έχει ήδη αναφερθεί, είναι ότι οι υπέρμαχοι της κβαντικής θεωρίας (Sommerfeld, Born, Bohr, Pauli, Heisenberg, Jordan, και Dirac) αντιμετώπιζαν, κατά πως φαίνεται, αρνητικά τη θέση αυτή περί ‘αιτιότητας’, ενώ οι πολέμοί της (Planck, Ehrenfest, Einstein, Schrödinger, και de Broglie) γενικώς θετικά. Έχοντας υπόψη τη γενικότερη σύγχυση που επικρατεί στην κοινότητα των φυσικών σε σχέση με τις έννοιες αιτιοκρατία, αιτιακή αρχή και αιτιότητα,²⁶⁹ ίσως το πρώτο πράγμα που οφείλει να διερευνήσει κανείς, πριν κατατάξει τους προαναφερθέντες διακεκριμένους φυσικούς ως προς τις απόψεις τους για το εν λόγω ερώτημα, είναι το ακόλουθο: οι απόψεις τους, στις οποίες στηρίζεται ο Selleri για να υποστηρίξει την αρνητική ή τη θετική στάση τους στο θέμα της ‘αιτιότητας’, αναφέρονταν στην αιτιότητα αυτή καθαυτήν ή μήπως σε κάποια από τις άλλες δύο έννοιες; Η πλειονότητα των φυσικών επιστημόνων δεν διακρίνει με σαφήνεια τις έννοιες της αιτιότητας και της αιτιοκρατίας ή τις αντιλαμβάνεται με διαφορετικό τρόπο από τους φιλοσόφους. Οι περισσότεροι από τους σημαντικούς φυσικούς που συνέβαλαν στη θεμελίωση της κβαντικής θεωρίας δεν αποτελούσαν εξαίρεση όσον αφορά τη συγκεκριμένη σύγχυση. Ανατρέχοντας ενδεικτικά στο έργο κάποιων από τους προαναφερθέντες φυσικούς, θα προσπαθήσουμε να δείξουμε τι είχαν κατά νου όταν αναφέρονταν σε ‘αιτιότητα’ ώστε να στηρίξουμε τον προηγούμενο ισχυρισμό περί διαφορετικής προσέγγισης ή σύγχυσης των εννοιών.

²⁶⁹ Η Yemima Ben-Menahem σε άρθρο της αναφέρει ότι τουλάχιστον τρεις διακριτές έννοιες αιτιότητας εμφανίζονται στη βιβλιογραφία της φιλοσοφίας της κβαντικής μηχανικής. Πρώτον, η παραδοσιακή έννοια αιτιότητας ή αλλιώς κανονικότητα που απορρέει από τις απόψεις του Hume. Δεύτερον, η σχετικιστική έννοια της αιτιότητας ή τοπικότητα σύμφωνα με την οποία οτιδήποτε συμβαίνει σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο μπορεί να επηρεαστεί άμεσα μόνο από γεγονότα του τοπικού περιβάλλοντός του· δεν μπορούν να υπάρξουν ακαριαίες συνδέσεις μεταξύ απομακρυσμένων γεγονότων. Και τέλος, η κατά Bohr έννοια της αιτιότητας η οποία έχει να κάνει με τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. [Ben-Menahem (1989), σελ. 310].

Ο Schrödinger, για παράδειγμα, στο έργο του *Επιστήμη και Ανθρωπισμός* (1961) αναφέρει ως αρχή της αιτιότητας:

«Η αρχή της αιτιότητας, ... , έχει δε ως εξής: η επακριβής φυσική κατάσταση σε *κάθε* σημείο P σε μια δεδομένη χρονική στιγμή t καθορίζεται μονοσήμαντα από την επακριβή φυσική κατάσταση σε μια συγκεκριμένη περιοχή του P οποιαδήποτε προηγούμενη στιγμή, έστω t-t. Εάν το t είναι μεγάλο, δηλαδή αν ο προηγούμενος χρόνος βρίσκεται πολύ πίσω στο παρελθόν, ίσως κριθεί αναγκαία η γνώση της προηγούμενης κατάστασης σε μια ευρύτερη περιοχή του P. Όμως η “ζώνη επιρροής” συρρικνώνεται ολοένα και περισσότερο καθώς ελαττώνεται το t, και γίνεται απειροστή όταν το t γίνει απειροστό. ...

Προφανώς, αν το ιδεώδες της συνεχούς, “χωρίς κενά”, περιγραφής καταρρέει, τότε καταρρέει και αυτή η ακριβής διατύπωση της αρχής της αιτιότητας και δεν θα πρέπει να μας εκπλήσσει το ότι, μέσα σε αυτό το εννοιολογικό πλαίσιο, συναντάμε νέες, πρωτοφανείς δυσκολίες αναφορικά με την αιτιότητα».²⁷⁰

Είναι νομίζουμε φανερό ότι η ‘αρχή της αιτιότητας’ όπως διατυπώνεται από τον Schrödinger συνιστά την αιτιοκρατική θέση και ο λόγος περί κατάρρευσης της αιτιότητας αποτελεί ουσιαστικά λόγο περί κατάρρευσης της αιτιοκρατίας. Στο ίδιο κείμενό του άλλωστε αναφέρεται τότε σε αιτιότητα και τότε σε αιτιοκρατία ή σε ‘έλλειψη αυστηρής αιτιότητας’ και ‘φυσική μη αιτιοκρατία’ αντιμετωπίζοντας τις έννοιες κατά πως φαίνεται ως συνώνυμες.²⁷¹

Ο Heisenberg, ασκώντας κριτική στον Kant, γράφει σε κάποιο σημείο του βιβλίου του *Φυσική και Φιλοσοφία*:

«Σαν παράδειγμα ας συζητήσουμε το νόμο της αιτιότητας. Ο Καντ λέει: “Όταν πληροφορούμαστε πως κάτι συμβαίνει, προϋποθέτουμε κάθε φορά, πως κάτι προηγείται, στο οποίο αυτό ακολουθεί σύμφωνα μ’ ένα νόμο”. Αυτή είναι, όπως ισχυρίζεται ο Καντ, η βάση για κάθε επιστημονική εργασία. Δεν έχει σημασία εδώ, αν μπορούμε να βρούμε πάντοτε αυτό το προηγούμενο συμβάν, από το οποίο έπεται το άλλο σύμφωνα μ’ ένα νόμο. Στην πραγματικότητα μπορεί να το υποδηλώσει κανείς σε πολλές περιπτώσεις. Αλλά ακόμα κι όταν αυτό δεν είναι δυνατό, τίποτα δεν μπορεί να μας εμποδίσει να ρωτάμε τι πάνω-κάτω μπορούσε να είναι αυτό το προηγούμενο συμβάν και να ψάχνουμε γι’ αυτό. Μ’ αυτό τον τρόπο ο νόμος της αιτιότητας ανάγεται απλώς στη μέθοδο της επιστημονικής έρευνας. Είναι ο

²⁷⁰ Schrödinger (1961-4/ 1996), σελ. 36.

²⁷¹ Schrödinger (1961-4/1996), σελ. 46, 62, 68.

όρος, που καθιστά δυνατή γενικά την επιστήμη. Επειδή πραγματικά εφαρμόζουμε αυτή τη μέθοδο, ο νόμος της αιτιότητας είναι a priori και δεν συνάγεται από την εμπειρία».²⁷²

Στη συνέχεια ο Heisenberg εξετάζοντας την περίπτωση της εκπομπής ενός σωματιδίου α από ένα άτομο ραδίου στην ατομική φυσική και σχολιάζοντας ότι ο χρόνος για την εκπομπή του σωματιδίου α δεν μπορεί να προβλεφθεί, διερωτάται για την αλλαγή της επιστημονικής μεθόδου από τον καιρό του Kant δίνοντας δύο απαντήσεις:

«Στην ερώτηση αυτή μπορεί να δώσει κανείς δύο δυνατές απαντήσεις. Η πρώτη είναι: Με τις εμπειρίες, με τα πειράματα φθάσαμε στην πεποίθηση, πως οι νόμοι της θεωρίας των κβάντων είναι σωστοί· κι αν είναι σωστοί, τότε ξέρουμε, πως δεν υπάρχει κανένα προηγούμενο συμβάν, το οποίο να έπρεπε να συνεπάγεται αναγκαστικά την εκπομπή σ' έναν ορισμένο χρόνο. Η άλλη δυνατή απάντηση είναι: Γνωρίζουμε το προηγούμενο συμβάν, αλλά δεν το γνωρίζουμε ακριβώς. Γνωρίζουμε πραγματικά τις δυνάμεις στον ατομικό πυρήνα, που είναι υπεύθυνες για την εκπομπή του σωματιδίου α , αλλά η γνώση αυτή περιέχει την απροσδιοριστία, που προέρχεται από την αμοιβαία επίδραση του πυρήνα με τον υπόλοιπο κόσμο. Αν θέλουμε να ξέρουμε το λόγο, γιατί το σωματίδιο α εκπέμπεται ίσα-ίσα αυτή τη στιγμή, τότε θα έπρεπε να ξέρουμε επιπρόσθετα τη μικροσκοπική κατάσταση ολόκληρου του κόσμου, στον οποίο ανήκουμε κι εμείς οι ίδιοι, κι αυτό σίγουρα είναι αδύνατο. Γι αυτό τα επιχειρήματα του Καντ για τον a priori χαρακτήρα του νόμου της αιτιότητας δεν μπορούν πια να εφαρμοσθούν».²⁷³

Παρατηρούμε ότι στα δύο προηγούμενα αποσπάσματα ο Heisenberg σχολιάζει ουσιαστικά την αιτιακή αρχή, όπως διατυπώνεται και υποστηρίζεται από τον Kant, σε σχέση με την κβαντική θεωρία. Οι δύο δυνατές απαντήσεις που δίνει αφορούν διαφορετικά επίπεδα. Η πρώτη αναφέρεται στο οντολογικό επίπεδο εφόσον αρνείται την ύπαρξη αιτίας –το ‘προηγούμενο συμβάν’ βάσει του οποίου συνεπάγεται αναγκαστικά κάποιο άλλο– για κάποια φαινόμενα στην ατομική φυσική και επομένως θέτει υπό αμφισβήτηση την ισχύ της αρχής στον μικρόκοσμο. Η οντολογική απάντηση όμως δεν είναι η μόνη δυνατή. Κάποιος ή κάποια που θα επιθυμούσε να διατηρήσει την ισχύ της αιτιακής αρχής θα μπορούσε να υιοθετήσει τη δεύτερη απάντηση. Η δεύτερη απάντηση αναφέρεται κυρίως στο γνωσιολογικό επίπεδο εφόσον αναγνωρίζει ότι η αιτία υπάρχει αλλά απλώς η γνώση της καθίσταται απροσδιόριστη λόγω της συμμετοχής ολόκληρου του υπόλοιπου κόσμου σε αυτήν.

²⁷² Heisenberg (1958/1978), σελ. 80-81.

Εξετάζοντας την περίπτωση του Born –του ανθρώπου στον οποίο οφείλουμε την πιθανοκρατική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης– διαβάζουμε σε κείμενά του τα εξής:

«Στην κλασική μηχανική η γνώση της κατάστασης ενός κλειστού συστήματος (η θέση και η ταχύτητα όλων των σωματιδίων του) σε κάθε χρονική στιγμή καθορίζει ξεκάθαρα τη μελλοντική κίνηση του συστήματος· αυτή τη μορφή παίρνει η αρχή της αιτιότητας στη φυσική. Μαθηματικά τούτο εκφράζεται με το γεγονός ότι οι φυσικές ποσότητες ικανοποιούν διαφορικές εξισώσεις ενός συγκεκριμένου τύπου.²⁷⁴ ...

Τώρα ας θυμηθούμε ότι η γνώση της θέσης και της ταχύτητας μια δεδομένη χρονική στιγμή αποτελούσε προϋπόθεση της κλασικής μηχανικής για τον καθορισμό της μελλοντικής κίνησης. Οι κβαντικοί νόμοι διαψεύδουν αυτή την προϋπόθεση και τούτο συνεπάγεται την κατάρρευση της αιτιότητας και του ντετερμινισμού. Μπορούμε να πούμε ότι αυτές οι προϋποθέσεις δεν είναι απλώς λανθασμένες, αλλά κενές: η προκειμένη δεν εκπληρώνεται ποτέ.

Η κατάληξη ότι η ανακάλυψη των κβαντικών νόμων θέτει ένα τέλος στον αυστηρό ντετερμινισμό που ήταν αναπόφευκτος την κλασική περίοδο, είναι μεγάλης φιλοσοφικής σημασίας από μόνη της».²⁷⁵

Ενώ ο Born στα παραπάνω αποσπάσματα μπορούμε να πούμε ότι ταυτίζει την αρχή της αιτιότητας με τον λαπλασιανό ντετερμινισμό, σε αυτό που ακολουθεί προσπαθεί να διακρίνει τις δύο έννοιες θεωρώντας ότι ο ‘ντετερμινισμός’, όπως τον ορίζει, λανθασμένα ταυτίζεται με την έννοια της αιτιότητας στην οποία ο ίδιος αποδίδει δύο διαφορετικές χρήσεις:

« ... ας επιστρέψουμε στην αιτιότητα και στους δύο τρόπους εφαρμογής της, ο ένας ως μια άχρονη (timeless) σχέση εξάρτησης, ο άλλος ως μια σταθερή εξάρτηση ενός γεγονότος στο χρόνο και στο χώρο με ένα άλλο γεγονός. Νομίζω ότι η αφηρημένη, άχρονη έννοια της αιτιότητας είναι η θεμελιώδης. ... Για παράδειγμα: Η δήλωση ότι μια κακή σοδειά ήταν η αιτία του λιμού των Ινδών έχει νόημα μόνο αν κάποιος έχει κατά νου την άχρονη δήλωση ότι οι κακές σοδειές αποτελούν εν γένει αιτίες λιμών. ... Εάν παραλειφθεί τούτη η αναφορά σε έναν γενικό κανόνα, η σύνδεση μεταξύ δύο διαδοχικών γεγονότων χάνει τον αιτιώδη της χαρακτήρα, μολοντί μπορεί να διατηρεί ακόμα το χαρακτηριστικό της τέλει κανονικότητας, όπως στη διαδοχή της μέρας και της νύχτας. Άλλο παράδειγμα αποτελεί το ωρολόγιο πρόγραμμα μιας σιδηροδρομικής γραμμής. Μπορείς να προβλέψεις με τη βοήθειά

²⁷³ Heisenberg (1958/1978), σελ. 81-82.

²⁷⁴ Born (1927/1956) σελ. 6-7.

²⁷⁵ Born (1936-7/1956) σελ. 47.

του την άφιξη στον σταθμό του King's Cross του τρένου των 10 από το Waverlay· όμως μετά βίας μπορείς να πεις ότι το ωρολόγιο πρόγραμμα αποκαλύπτει μια αιτία του γεγονότος αυτού. Με άλλα λόγια, ο νόμος του ωρολογίου προγράμματος είναι ντετερμινιστικός: Μπορείς να προβλέψεις μελλοντικά γεγονότα από αυτό, η ερώτηση όμως 'γιατί;' δεν έχει νόημα.

Επομένως, νομίζω ότι δεν θα έπρεπε κανείς να ταυτίζει την αιτιότητα και τον ντετερμινισμό. Ο τελευταίος αναφέρεται σε κανόνες που επιτρέπουν σε κάποιον να προβλέψει από τη γνώση ενός γεγονότος A την εμφάνιση ενός γεγονότος B (και αντιστρόφως), χωρίς όμως την ιδέα ότι υπάρχει ένας φυσικός (physical) άχρονος (και εκτός χώρου, spaceless) σύνδεσμος μεταξύ όλων των γεγονότων του είδους του A και όλων των γεγονότων του είδους του B. Προτιμώ να χρησιμοποιώ την έκφραση 'αιτιότητα' κυρίως για τούτη την άχρονη εξάρτηση. Αποτελεί ακριβώς ό,τι οι πειραματιστές και οι παρατηρητές εννοούν όταν αποδίδουν ένα συγκεκριμένο φαινόμενο σε μια συγκεκριμένη αιτία μέσω συστηματικών παραλλαγών των συνθηκών. Η άλλη χρήση της λέξης για δύο γεγονότα που ακολουθούν το ένα το άλλο είναι, ωστόσο, τόσο συνηθισμένη που δεν μπορεί να αποκλειστεί. Συνεπώς συνιστώ ότι θα πρέπει επίσης να χρησιμοποιείται αλλά συμπληρωμένη με κάποιες 'ιδιότητες' αναφορικά με το χρόνο και το χώρο. Υποτίθεται πάντα ότι η αιτία προηγείται του αποτελέσματος· προτείνω αυτό να το ονομάσουμε αρχή προτεραιότητας (antecedence). Επιπλέον, γενικώς θεωρείται απεχθές να υποθέτουμε ότι ένα πράγμα προκαλεί ένα αποτέλεσμα σε έναν τόπο όπου δεν είναι παρών, ή σε κάποιο με το οποίο δεν μπορεί να συνδεθεί μέσω άλλων πραγμάτων· αυτό θα το ονομάζω αρχή γειτνίασης».²⁷⁶

Ο Born, λοιπόν, όπως διαπιστώνουμε από το παραπάνω εκτενές απόσπασμα, προτιμάει να μην χρησιμοποιεί την έκφραση 'αιτιότητα' για γεγονότα που είναι σταθερά συζευγμένα· αν και αναγκάζεται να το κάνει διότι αποτελεί συνηθισμένη χρήση του όρου. Η αιτιότητα γι αυτόν συνιστά μια άχρονη εξάρτηση μεταξύ όμοιων γεγονότων με άλλα όμοια γεγονότα. Ενώ ο ντετερμινισμός, όπως τον παρουσιάζει, καθίσταται μάλλον τετριμμένος. Τον ταυτίζει με την προβλεψιμότητα, η οποία επιτυγχάνεται βάσει κανόνων και ποσοτικών υπολογισμών, αφαιρώντας από αυτόν τον όποιο οντολογικό χαρακτήρα. Όπως λέει χαρακτηριστικά κάπου αλλού, ο ντετερμινισμός αποτελεί «μια πρόσθετη, και σχεδόν συμπτωματική ιδιότητα των μηχανικών νόμων».²⁷⁷ Ο Born, αντιλαμβανόμενος με αυτόν τον τρόπο τον ντετερμινισμό και την αιτιότητα, θα αναφερθεί στα κείμενά του

²⁷⁶ Born (1949), σελ.7-8.

²⁷⁷ Born (1956) σελ. 96.

επανελημμένα στην εγκατάλειψη του πρώτου και στη διατήρηση της δεύτερης από την κβαντική θεωρία.²⁷⁸

Ας περάσουμε όμως να εξετάσουμε και την περίπτωση του Bohr. Ο Bohr γράφει για την αιτιακή περιγραφή:

«Στη φυσική, η αιτιακή περιγραφή, αρχικά προσαρμοσμένη στα προβλήματα της μηχανικής, στηρίζεται στην υπόθεση ότι η γνώση της κατάστασης ενός υλικού συστήματος μια δεδομένη χρονική στιγμή επιτρέπει την πρόβλεψη της κατάστασής του σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη χρονική στιγμή».²⁷⁹

Η παρατήρηση όμως ενός συστήματος στην κβαντική μηχανική με σκοπό τον καθορισμό της κατάστασής του προϋποθέτει τη διαταραχή του. Οι συνέπειες της προκαλούμενης διαταραχής είναι αναπόφευκτες και ο Bohr τις περιγράφει, αναφερόμενος και στην αιτιότητα, ως εξής:

«Από τη μια πλευρά, ο ορισμός της κατάστασης ενός φυσικού συστήματος, όπως συνήθως κατανοείται, αξιώνει την εξάλειψη όλων των εξωτερικών διαταραχών. Στην περίπτωση όμως αυτή, σύμφωνα με το κβαντικό αίτημα,²⁸⁰ κάθε παρατήρηση θα είναι αδύνατη, και, πάνω από όλα, οι έννοιες του χώρου και του χρόνου χάνουν την άμεση σημασία τους. Από την άλλη πλευρά, εάν για να καταστήσουμε την παρατήρηση δυνατή επιτρέπουμε ορισμένες αλληλεπιδράσεις με κατάλληλους φορείς μέτρησης, μη ανήκοντες στο σύστημα, ένας σαφής ορισμός της κατάστασης του συστήματος δεν είναι φυσικά πλέον δυνατός, και δεν μπορεί να τεθεί ζήτημα αιτιότητας με τη συνήθη έννοια της λέξης. Ως εκ τούτου, η ίδια η φύση της κβαντικής θεωρίας μας υποχρεώνει να θεωρήσουμε τον χωροχρονικό εντοπισμό βάσει συντεταγμένων και την αξίωση της αιτιότητας, η ένωση των οποίων χαρακτηρίζει τις κλασικές θεωρίες, ως συμπληρωματικά αλλά αποκλειόμενα χαρακτηριστικά της περιγραφής, συμβολίζοντας την εξιδανίκευση της παρατήρησης και του ορισμού αντιστοίχως».²⁸¹

Όσο για τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνονταν ο Bohr την 'αξίωση της αιτιότητας' παραθέτουμε το παρακάτω απόσπασμα στο οποίο αναφέρεται σε στάσιμες καταστάσεις:

«Στη σύλληψη των στάσιμων καταστάσεων ασχολούμαστε, όπως αναφέρθηκε, με μια χαρακτηριστική εφαρμογή του κβαντικού αιτήματος. Η σύλληψη αυτή από την ίδια της τη

²⁷⁸ Ενδεικτικά αναφέρουμε Born (1949) σελίδες 17, 102, Born (1956) σελίδες 33, 35, 77, 97.

²⁷⁹ Bohr (1948) σελ. 312.

²⁸⁰ Σύμφωνα με το 'κβαντικό αίτημα' κάθε παρατήρηση των ατομικών φαινομένων θα αφορά απλώς μια εξατομικευμένη διαδικασία, η οποία έχει ως αποτέλεσμα μια ουσιώδη αλληλεπίδραση, οπότε δεν μπορούμε να μιλάμε για ανεξάρτητα μετρητικά μέσα. [Bohr (1927/1985) σελ. 75]

φύση συνεπάγεται μια πλήρη παραίτηση όσον αφορά τη χρονική περιγραφή. Υπό την άποψη που υιοθετείται εδώ, ακριβώς αυτή η παραίτηση διαμορφώνει την αναγκαία συνθήκη για έναν σαφή ορισμό της ενέργειας του ατόμου. Επιπλέον, η σύλληψη μιας στάσιμης κατάστασης ενέχει, αυστηρά μιλώντας, τον αποκλεισμό όλων των αλληλεπιδράσεων με πράγματα (individuals) που δεν ανήκουν στο σύστημα. Το γεγονός ότι ένα τέτοιο κλειστό σύστημα σχετίζεται με μια συγκεκριμένη τιμή ενέργειας μπορεί να θεωρηθεί ως μια άμεση έκφραση για την αξίωση της αιτιότητας εμπεριέχουσα στο θεώρημα διατήρησης της ενέργειας». ²⁸²

Και για τη συμπληρωματικότητα της χωροχρονικής με την αιτιακή περιγραφή παραθέτουμε το ακόλουθο απόσπασμα:

«Έχουμε λοιπόν είτε χωροχρονική περιγραφή είτε περιγραφή όπου μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής. Είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους. Δεν μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε και τις δύο την ίδια χρονική στιγμή. Εάν θέλουμε να χρησιμοποιήσουμε την ιδέα του χωρόχρονου θα πρέπει να έχουμε ρολόγια και ράβδους τα οποία είναι εξωτερικά και ανεξάρτητα του υπό εξέταση αντικειμένου, υπό αυτή την έννοια οφείλουμε να παραβλέψουμε την αλληλεπίδραση μεταξύ του αντικειμένου και της μετρητικής ράβδου που χρησιμοποιήθηκε. Πρέπει να αποστειρωθούμε τον καθορισμό του ποσού της ορμής που μεταβιβάζεται στο όργανο προκειμένου να έχουμε τη δυνατότητα να εφαρμόσουμε τη χωροχρονική προσέγγιση». ²⁸³

Συνοψίζοντας τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνεται ο Bohr την αιτιότητα ²⁸⁴ έχουμε να πούμε τα εξής. Στο πρώτο απόσπασμα που παραθέσαμε –το οποίο είναι και το πιο πρόσφατο χρονολογικά– ο Bohr παρουσιάζει την αιτιακή περιγραφή με έναν τρόπο που παραπέμπει στην αιτιοκρατική θέση. Άλλωστε και ο Fock σημειώνει ότι ο όρος ‘αιτιότητα’ χρησιμοποιείται από τον Bohr με τη στενή μηχανιστική έννοια του λαπλασιανού ντετερμινισμού και ότι υπό αυτή την έννοια τη θεωρούσε ασύμβατη με την κβαντική μηχανική. ²⁸⁵ Ωστόσο, ο τρόπος με τον οποίο την παρουσίαζε συνήθως δεν είναι αυτός. Ο Bohr συνέδεε την έννοια της αιτιότητας με την εφαρμοσιμότητα των νόμων διατήρησης. Θεωρούσε τη δυνατότητα μιας αιτιακής περιγραφής ισοδύναμη με τη δυνατότητα εφαρμογής των νόμων διατήρησης ενέργειας και ορμής, καθώς επίσης

²⁸¹ Bohr (1928/1985) σελ. 148.

²⁸² Bohr (1928/1985) σελ. 155.

²⁸³ Bohr (1931/1985) σελ. 369.

²⁸⁴ Για την έννοια της αιτιότητας στον Bohr έχει γράψει η Ben-Menahem (1989) σελίδες 313-316.

²⁸⁵ Fock (1957) σελ. 646.

συμπληρωματική της χωροχρονικής περιγραφής. Μια αιτιακή χωροχρονική περιγραφή για τον Bohr ενώ είναι εφικτή στο κλασικό πλαίσιο, δεν είναι στο κβαντικό.²⁸⁶

Κατά συνέπεια, το να πούμε ότι η στάση των υπέρμαχων και των πολέμιων της κβαντικής θεωρίας απέναντι στην ‘αιτιότητα’ ήταν αρνητική και θετική αντιστοίχως, δεν είναι ακριβές ούτε μας δια φωτίζει ιδιαίτερος εάν δεν εξετάσουμε προσεκτικά τι αντιλαμβάνονταν ο καθένας από αυτούς ως αιτιότητα. Θέλουμε να πιστεύουμε πως με τα παραπάνω αποσπάσματα των περιπτώσεων που εξετάστηκαν δείξαμε ότι, πρώτον, δεν υπήρχε ομοιόμορφη προσέγγιση στο θέμα της αιτιότητας, δεύτερον, αναφέρονταν σε αιτιότητα ή αρχή της αιτιότητας και διατύπωναν ορισμένοι από αυτούς την αιτιοκρατική θέση ή την αιτιακή αρχή, και τρίτον, κάποιοι την αντιλαμβάνονταν με έναν τρόπο ο οποίος ήταν αρκετά απομακρυσμένος –έως πολύ– από την παραδοσιακή φιλοσοφική έννοιά της.

2.4. Συγκρότηση της έννοιας της ‘κλασικότητας’ βάσει των συγκεκριμένων θεμάτων που αναλύθηκαν

Στις ενότητες που προηγήθηκαν, αν και ο κύριος στόχος ήταν η αποσαφήνιση της έννοιας της ‘κλασικότητας’ βάσει συγκεκριμένων θεμάτων, επιχειρήθηκε παράλληλα και η αποψίλωσή της από διάφορες εξιδανικεύσεις. Συνοψίζοντας όσα αναφέρθηκαν, θα αρχίσουμε με όσα προϋποθέτονται σχετικά με την κλασική περιγραφή ενός φυσικού (physical) συστήματος. Οπότε, όπως γράφουν οι Βουδούρης και Μπαλτάς στο βιβλίο τους *Σύντομη Κβαντική Μηχανική*,²⁸⁷ θεωρείται ότι:

1. Η κλασική κατάσταση ενός συστήματος συνδέεται απευθείας με ορισμένα ‘παρατηρήσιμα μεγέθη’· τη θέση x και την ορμή p του συστήματος κάποια χρονική στιγμή t . Τα παρατηρήσιμα μεγέθη x και p μπορούν να μετρηθούν ‘ταυτόχρονα’ (την ίδια χρονική στιγμή t) με θεωρητικά απόλυτη ακρίβεια· δηλαδή, θεωρητικά, τίποτα δεν μας εμποδίζει να δεχόμαστε ότι το πειραματικό σφάλμα μπορεί να μηδενιστεί.

²⁸⁶ Η διαφορά αυτή μεταξύ κλασικού και κβαντικού πλαισίου στηρίζει τον ισχυρισμό ότι οι θεωρίες της σχετικότητας του Einstein συγκαταλέγονται στις κλασικές θεωρίες εφόσον σε αυτές μια αιτιακή χωροχρονική περιγραφή όπως την αντιλαμβάνονταν ο Bohr είναι εφικτή.

²⁸⁷ Βουδούρης-Μπαλτάς (1985) σελ. 18.

Η ‘ταυτόχρονη’ μέτρηση²⁸⁸ παρατηρήσιμων μεγεθών όπως είναι η θέση και η ορμή, για την αποκάλυψη των τιμών που διαθέτουν και διέθεταν έτσι κι αλλιώς πριν από τη μέτρηση, στην κλασική φυσική θεωρείται δυνατή και απολύτως μη προβληματική. Όλα τα κλασικά παρατηρήσιμα μεγέθη είναι *συμβατά* και τα αποτελέσματα των μετρήσεών τους δεν επηρεάζονται από τη σειρά με την οποία θα τις πραγματοποιήσουμε. Καθώς επίσης δεν επηρεάζεται και η ακρίβεια των αποτελεσμάτων, η οποία, θεωρητικά, μπορεί να είναι απόλυτη. Ο βαθμός στον οποίο η μετρητική συσκευή ενός παρατηρήσιμου μεγέθους επιδρά στην κατάσταση ενός συστήματος δεν μπορεί να καταστήσει τις τιμές άλλων μεγεθών απροσδιόριστες. Μπορούμε να πούμε λοιπόν:

2. Θεωρητικά πάντοτε, μια κλασική μέτρηση δεν διαταράσσει με ουσιαστικό τρόπο το σύστημα που βρίσκεται υπό παρατήρηση.

Με άλλα λόγια, η κλασική ιδανική²⁸⁹ μέτρηση αποτελεί εξωτερική διαδικασία, μη επεμβατική, που απλώς αποκαλύπτει την προϋπάρχουσα της μέτρησης τιμή του μετρούμενου μεγέθους. Η τιμή του μεγέθους θεωρείται προκαθορισμένη και ανεξάρτητη της μετρητικής διαδικασίας. Παρόλα αυτά, προσπαθήσαμε να δείξουμε ότι ακόμα και στην κλασική μέτρηση, η μετρητική συσκευή και το μετρούμενο σύστημα δεν λειτουργούν απολύτως ανεξάρτητα. Σε κάποιες περιπτώσεις όπου η διαδικασία της μέτρησης περιλαμβάνει μια ήπια αλληλεπίδραση μεταξύ των φυσικών (physical) συστημάτων που μετέχουν σε αυτή, το μετρητικό αποτέλεσμα εξαρτάται από την κατάσταση της μετρητικής συσκευής σε σχέση με την κατάσταση του μετρούμενου συστήματος, καθότι μπορεί να έχουμε απόδοση τιμών οι οποίες δεν προϋπήρχαν της μέτρησής τους. Βεβαίως, το εν λόγω είδος εξάρτησης τονίσαμε ότι δεν είναι της ίδιας φύσεως με αυτό που συναντούμε στην κβαντική μέτρηση. Στο κβαντικό πλαίσιο, όπως έχουμε ξαναγράψει, ο όρος ‘προϋπάρχουσα’ τιμή αποκτά επιπλέον περιεχόμενο δηλώνοντας ότι η μετρούμενη τιμή ανήκει στο σύστημα και δεν αποτελεί συνδιαμορφωτικό στοιχείο του πειραματικού πλαισίου. Κατά την κβαντική μέτρηση έχουμε απόδοση τιμών που δεν ‘προϋπήρχαν’ υπό αυτή την έννοια.

²⁸⁸ ‘Ταυτόχρονη’ μέτρηση υπό την έννοια που παρουσιάστηκε στο πρώτο κεφάλαιο στη σελίδα 12. Δηλαδή μέσω ενός τρίτου παρατηρήσιμου μεγέθους του οποίου αποτελούν συναρτήσεις και που ο καθορισμός της τιμής του αποδίδει ‘ταυτόχρονα’ τιμές και σε αυτά.

²⁸⁹ Ιδανικές χαρακτηρίζονται οι μετρήσεις χωρίς πειραματικές ατέλειες.

Επομένως, η ενότητα για την αντικειμενικότητα της μετρητικής διαδικασίας και γενικότερα της επιστήμης μας οδήγησε στο εξής συμπέρασμα:

3. Η αντικειμενικότητα κάθε επιστημονικής θεωρίας εξασφαλίζεται μέσω της ανεξαρτησίας των αποτελεσμάτων και των περιγραφών της από τον νου των παρατηρητών και όχι αξιώνοντας τον αποκλεισμό κάθε μορφής εξάρτησης.

Σε σχέση με την πλήρη περιγραφή ενός συστήματος και της συμπεριφοράς του στην κλασική μηχανική, αναφέρθηκε ότι προϋποτίθεται ο προσδιορισμός τριών συνόλων. Του συνόλου των τιμών των σταθερών ιδιοτήτων του, του συνόλου των στιγμιαίων τιμών των μεταβλητών ιδιοτήτων του και τέλος, του συνόλου των νόμων που διέπουν τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων του καθώς και τις αλληλεπιδράσεις με το περιβάλλον του. Οπότε, η κλασική αιτιοκρατία –συνώνυμη του λαπλασιανού ντετερμινισμού– περιγράφεται πολύ περιληπτικά στην παρακάτω θέση:

4. Η χρονική εξέλιξη ενός συστήματος εάν γνωρίζουμε την αρχική του κατάσταση και το σύνολο των δυνάμεων που δρουν σε αυτό είναι απολύτως προσδιορισμένη.

Ωστόσο, ακολουθώντας τον Earman, σχολιάσαμε ότι, πρώτον, δεν θα πρέπει να εξισώνουμε τον ντετερμινισμό με την προβλεψιμότητα και, δεύτερον, ο ντετερμινισμός στην κλασική φυσική «δεν βασίζεται στα δικά του θεμέλια, αλλά χρειάζεται βοήθεια από διάφορα δεκανίκια».²⁹⁰ Εφόσον η κλασική φυσική αποτελεί το κατ' εξοχήν παράδειγμα αιτιοκρατικής θεωρίας, το γεγονός ότι για να περισωθεί ο αιτιοκρατικός της χαρακτήρας είναι απαραίτητη η εισαγωγή διαφόρων *ad hoc* προϋποθέσεων, υποσκάπτει την εμπιστοσύνη μας σε μια αιτιοκρατική εικόνα του κόσμου.

Κυρίαρχο χαρακτηριστικό της κλασικής φυσικής αναφέρθηκε επίσης ότι συνιστά η δυνατότητα διαχωρισμού των κλασικών συστημάτων και των καταστάσεών τους όπως αυτή εκφράζεται από την ακόλουθη αρχή διαχωρισιμότητας:

5. Οι καταστάσεις των υποσυστημάτων S_1, S_2, \dots, S_N ενός σύνθετου κλασικού συστήματος S είναι ατομικώς καλώς-ορισμένες, ενώ οι καταστάσεις του σύνθετου συστήματος καθορίζονται πλήρως και επακριβώς μέσω αυτών και των φυσικών τους αλληλεπιδράσεων συμπεριλαμβανομένων των χωροχρονικών τους σχέσεων.²⁹¹

²⁹⁰ Earman (1992) σελ. 245, ελληνική έκδοση σελ. 336.

²⁹¹ Καρακώστας (2005a) σελ. 225.

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η παραπάνω αρχή παραβιάζεται στην κβαντική μηχανική όπου η κατάσταση ενός σύνθετου συστήματος δεν ανάγεται στις καταστάσεις των υποσυστημάτων που το αποτελούν· το *όλο* δεν καθορίζεται πλήρως και επακριβώς από τα *μέρη* του. Στην κλασική φυσική ο χωροχρονικός διαχωρισμός συστημάτων συνεπάγεται και διαχωρισμό των καταστάσεών τους, χωρίς να εγείρονται στο πλαίσιο της αμφισβητήσεις ή προβλήματα. Τούτο όμως δεν σημαίνει απαραίτητως ότι αντικατοπτρίζει ένα γενικό χαρακτηριστικό της φύσης· μπορεί να αποτελεί απλώς μια χρήσιμη συνθήκη για την άσκηση της φυσικής επιστήμης που ήρθε ο καιρός να την αναθεωρήσουμε.

3. ΕΠΙΣΤΗΜΟΝΙΚΟΣ ΡΕΑΛΙΣΜΟΣ

Ο επιστημονικός ρεαλισμός, σε αδρές γραμμές, ασχολείται με το γνωσιολογικό²⁹² ερώτημα στη φιλοσοφία της επιστήμης, δηλαδή με το τι είδους γνώση μας παρέχουν –αν μας παρέχουν– οι επιστημονικές θεωρίες μας για τον φυσικό κόσμο. Ένα ερώτημα το οποίο έχει δεχτεί ποικίλες απαντήσεις, κυρίως τον 20^ο αιώνα με τις μεγάλες, όσο και ριζοσπαστικές, επιστημονικές ανακαλύψεις, αλλά και λόγω της αναζωπύρωσης του ενδιαφέροντος για την αξιολόγηση της επιστήμης. Οι απαντήσεις αυτές, όχι πάντοτε ρεαλιστικές, απαρτίζουν έναν μεγάλο αριθμό και εύρος απόψεων και εκπροσωπούν σε διάφορα επίπεδα λιγότερο ή περισσότερο αντιμαχόμενες στάσεις.

Η σύγχρονη στάση του επιστημονικού ρεαλισμού απέναντι στο γνωσιολογικό ερώτημα για την επιστήμη συνοψίζεται κυρίως, σύμφωνα με τον Ψύλλο²⁹³, στις τρεις παρακάτω θέσεις:

- **Μεταφυσική θέση:** ο κόσμος διαθέτει μια καθορισμένη και ανεξάρτητη από τον νου δομή.
- **Σημασιολογική θέση:** οι επιστημονικές θεωρίες θα πρέπει να εκλαμβάνονται κυριολεκτικά (at face value). Αποτελούν περιγραφές του γνωστικού πεδίου για το οποίο προορίζονται, τόσο παρατηρήσιμου όσο και μη παρατηρήσιμου, και μπορούν να λάβουν αληθοτιμές –δηλαδή να είναι αληθείς ή ψευδείς. Οι θεωρητικοί όροι που εμφανίζονται στις θεωρίες έχουν *δυναμική* (putative) γεγονοτική αναφορά. Αν λοιπόν οι επιστημονικές θεωρίες είναι αληθείς, τότε οι μη παρατηρήσιμες οντότητες που θέτουν ‘κατοικούν’ στον κόσμο.
- **Γνωσιακή θέση:** οι ώριμες και επιτυχείς στις προβλέψεις τους *επιστημονικές θεωρίες* είναι καλά επικυρωμένες και προσεγγιστικά αληθείς για τον *κόσμο*. Επομένως, οι οντότητες που θέτουν ή, εν πάση περιπτώσει, οντότητες οι οποίες είναι παρεμφερείς με εκείνες που θέτουν, ‘κατοικούν’ στον κόσμο.

Θα μας απασχολήσει η ανάλυση των τριών αυτών βασικών θέσεων του επιστημονικού ρεαλισμού και η διάκρισή τους από κάποιες μη ρεαλιστικές προσεγγίσεις

²⁹² Οι όροι ‘epistemological’ και ‘epistemic’ μεταφράζονται ως ‘γνωσιολογικός’ και ‘γνωσιακός’ αντίστοιχα, παρά το γεγονός ότι αποτελούν δάνειο της αγγλικής από την ελληνική γλώσσα, θεωρώντας ότι έτσι αποδίδεται η σημασία τους καθαρότερα αφού αναφέρονται στη γνώση και όχι στην επιστήμη.

²⁹³ Psillos (1999) σελ. xix, Psillos (2000) σελ. 706, Ψύλλος (2004) σελ. 121-2, Ψύλλος (2008) σελ. 37.

με τις οποίες διαφωνεί η κάθε μια. Λόγω του ότι σχετίζονται άμεσα μεταξύ τους²⁹⁴, κατά την ανάλυσή τους θα υπάρξουν κοινά θέματα στα οποία αναπόφευκτα θα επανερχόμαστε. Παράλληλα, θα εξετασθεί κατά πόσο τα χαρακτηριστικά της ‘κβαντικότητας’, όπως συγκεντρώθηκαν στο πρώτο μέρος της διατριβής, ενισχύουν ή υπονομεύουν τις συγκεκριμένες θέσεις. Τέλος, θα διερευνηθεί με ποιον τρόπο η πιο ώριμη τρέχουσα επιστημονική θεωρία που ακούει στο όνομα ‘κβαντική’, ‘προσεγγίζοντας την αλήθεια’ περισσότερο από τις προηγούμενές της, μπορεί ή όχι να συμβάλει στη διαμάχη ρεαλιστών και μη ρεαλιστών.

3.1. Η μεταφυσική θέση του επιστημονικού ρεαλισμού περί ανεξαρτησίας από τον νου

Η μεταφυσική συνιστώσα του επιστημονικού ρεαλισμού αναφέρεται στον φυσικό κόσμο και στην ανεξάρτητη ύπαρξή του. Μέσω αυτής δηλώνεται ουσιαστικά ότι, αν όντως υφίστανται τα παρατηρήσιμα και τα μη παρατηρήσιμα φυσικά είδη που θέτουν οι θεωρίες μας, τότε αυτό συμβαίνει ανεξάρτητα από εμάς και τις γνωστικές μας ικανότητες. Προτείνει, δηλαδή, έναν οντολογικό ρεαλισμό σύμφωνα με τον οποίο η πραγματικότητα δεν αποτελεί δημιούργημα του νου μας, αποκλείοντας τον παραδοσιακό ιδεαλισμό –εισηγητής του οποίου υπήρξε ο Berkeley– ή τις επαληθευσιοκρατικές θεωρήσεις των Michael Dummett και Hilary Putnam.

Ο Ιρλανδός επίσκοπος George Berkeley (1685-1753), μαζί με τον Locke και τον Hume αποτελούν τους τρεις ονομαστούς εμπειριστές του 18^{ου} αιώνα. Ο Berkeley, θεωρώντας ότι υποστήριζε με τους στοχασμούς του τον κοινό νου, αρνήθηκε κατηγορηματικά την ύπαρξη της ύλης (αύλοκράτης) και προσπάθησε να πλήξει τις φιλοσοφικές θέσεις του Locke –καθώς και άλλων φιλοσόφων της εποχής του– επειδή θεωρούσε ότι οδηγούσαν στον σκεπτικισμό και την αθεΐα. Ο σκεπτικισμός που θέλησε να αποφύγει ήταν γνωσιολογικής φύσεως και διατείνονταν ότι δεν μπορούμε να γνωρίσουμε την αληθινή φύση των πραγμάτων· κι αυτό διότι, εξαιτίας της σχετικότητας της αντίληψης –ό,τι φαίνεται κρύο σε μένα μπορεί να φαίνεται ζεστό σε κάποια άλλη ή

²⁹⁴ Η διαπλοκή των τριών θέσεων είναι τόσο έντονη που υποδηλώνεται κι από το γεγονός ότι άλλοι φιλόσοφοι, όπως ο Horwich (1982, σελ. 181-2) και ο Kukla (1998, σελ. 8-9) αντιλαμβάνονται τις τρεις συνιστώσες του ρεαλισμού –σημασιολογική, μεταφυσική και γνωσιακή ή γνωσιολογική– διαφορετικά από

κάποιον άλλο– είμαστε υποχρεωμένοι να διακρίνουμε το φαίνεσθαι από την πραγματικότητα, έτσι ώστε η γνώση της τελευταίας να καθίσταται αν όχι αδύνατη, τουλάχιστον προβληματική. Η απάντηση του Berkeley στον σκεπτικισμό θα είναι η άρνηση της διάκρισης μεταξύ των αντικειμένων της αντίληψης και της πραγματικότητας. Με άλλα λόγια, για να διασώσει τη δυνατότητα να γνωρίζουμε τον κόσμο θα θυσιάσει την ανεξαρτησία του από τον νου.

Η φιλοσοφία του χαρακτηρίζεται από τη ρήση ‘esse est percipi’. Δηλαδή, με την ταύτιση της λέξης ‘είναι’ με τις λέξεις ‘αντιλαμβάνομαι’ και ‘γίνομαι αντιληπτός’. Ως εκ τούτου, η ύπαρξη ενός πράγματος συμπίπτει με το ότι γίνεται αντιληπτό. Όπως γράφει στην *Πραγματεία περί των αρχών της ανθρώπινης γνώσης*:

«Όλο το χοροστάσι του ουρανού και η επίπλωση της γης, με μια λέξη όλα εκείνα τα σώματα που συνθέτουν τον ισχυρό σκελετό του κόσμου, χωρίς κάποιον νου στερούνται οποιασδήποτε υπόστασης».²⁹⁵

Σύμφωνα λοιπόν με τον Berkeley, ερχόμαστε σε επαφή απευθείας με τα αισθητά πράγματα και ενδεχομένως δεν υπάρχει διαφορά ανάμεσα στο πώς τα αντιλαμβανόμαστε και στο πώς είναι. Συνεπώς, ο ισχυρισμός ότι τα πράγματα καθαυτά υπάρχουν ανεξάρτητα από τον νου δεν ισχύει· τα πράγματα είναι συλλογές ιδεών μέσα σε κάποιον νου, άρα δεν διαθέτουν υλική υπόσταση, μόνο πνευματική. Ο Berkeley αρνούμενος την ύπαρξη της ύλης δεν απέρριπτε συνάμα την ύπαρξη του εξωτερικού κόσμου και των αντικειμένων που περιέχει –όπως τραπέζια, καρέκλες, βουνά κ.τ.λ. Ούτε υποστήριζε πως ο κόσμος υπάρχει μόνο επειδή γίνεται αντιληπτός από έναν ή περισσότερους πεπερασμένους νόες. Και για τον Berkeley η ύπαρξη του φυσικού κόσμου ήταν ανεξάρτητη από τους πεπερασμένους νόες, εξαρτιόταν όμως από τον νου ενός αιώνιου πνεύματος, τον Νου του Θεού.²⁹⁶

Ο Berkeley θεωρούσε, κατά τον Alquié, ότι με την αυλοκρατία του, την άρνηση δηλαδή της ιδέας μιας ύλης στην οποία οι φιλοσοφικοί του αντίπαλοι τοποθετούσαν την πραγματικότητα έξω από το πνεύμα, υπερέβαινε εκτός από τον σκεπτικισμό και την αντίθεση ρεαλισμού-ιδεαλισμού. Η υπέρβαση οφειλόταν στο συνδυασμό δύο πεποιθήσεων· της πεποίθησης του κοινού νου ότι αντιλαμβανόμαστε άμεσα την

τον Ψύλλο. Η μόνη συνιστώσα στην οποία και οι τρεις φιλόσοφοι αποδίδουν λίγο πολύ τα ίδια χαρακτηριστικά –κυριολεκτική ανάγνωση των θεωριών– είναι η σημασιολογική.

²⁹⁵ Berkeley (1710/1998) σελ. 105. Woolhouse (1988/2003) σελ. 171, ελληνική έκδοση.

πραγματικότητα με την πεποίθηση των φιλοσόφων ότι το μόνο που αντιλαμβανόμαστε άμεσα είναι οι ιδέες μας. Συνδυάζοντας τις δύο αυτές πεποιθήσεις, ο Berkeley πρέσβευε πως συλλαμβάνουμε άμεσα το πραγματικό μέσω των ιδεών μας οι οποίες δεν είναι αναπαραστατικές αλλά το ίδιο το πραγματικό.²⁹⁷

3.1.1. Η ‘φύση’ της ανεξαρτησίας κατά τον ρεαλισμό

Οι ρεαλιστές, από τη δική τους σκοπιά, αρνούνται κατηγορηματικά τον ιδεαλισμό του Berkeley στον οποίο ταυτίζεται η ύπαρξη ενός πράγματος με το ότι γίνεται αντιληπτό· απορρίπτουν, εν ολίγοις, το ‘esse est percipi’ για τα πράγματα που πιστεύουν. Εάν κάτι υπάρχει ανεξαρτήτως του νου, τότε μπορεί να υπάρχει χωρίς να έχει παρατηρηθεί, ως μη παρατηρημένο (unobserved)²⁹⁸, καθώς και ως μη παρατηρήσιμο (unobservable). Οι ρεαλιστές δεν θεωρούν ότι θα πρέπει να θυσιαστεί η ανεξαρτησία του κόσμου από τον νου για να διασωθεί η δυνατότητα να γνωρίζουμε τον κόσμο.

Ο Devitt, ως εκπρόσωπος του ρεαλισμού, διερευνώντας τη διάστασή του περί ανεξαρτησίας από τον νου, προκρίνει δύο στοιχεία ως τα πιο σημαντικά χαρακτηριστικά της. Το πρώτο είναι η απόδοση *αντικειμενικής ύπαρξης στα πράγματα*. Συγκεκριμένα, αναφερόμενος ο Devitt σε αντικειμενική ύπαρξη, υποστηρίζει ότι ένα αντικείμενο, εφόσον υπάρχει, υπάρχει ανεξάρτητα από τις γνωστικές ικανότητες του νου, χωρίς αυτό να σημαίνει πως είναι επίσης μη γνώσιμο (unknowable). Σημαίνει απλώς ότι «δεν συγκροτείται από τη γνώση μας, από τις γνωστικές μας αξίες (values), από την ικανότητά μας να αναφερόμαστε σε αυτό, από τη συνθετική δύναμη του νου, από την επιβολή εννοιών, θεωριών ή γλωσσών».²⁹⁹ Αν όλα ή κάποια από τα προαναφερθέντα δραστηριοποιούνται ώστε να γνωρίσουμε ένα αντικείμενο, για έναν ρεαλιστή το γεγονός αυτό έχει να κάνει με γνωσιακά θέματα τα οποία θα πρέπει να διακρίνονται από το οντολογικό ερώτημα της ανεξάρτητης ύπαρξης του αντικειμένου.³⁰⁰ Ο Devitt σημειώνει πως σύγχρονοι φυσικαλιστές, οι οποίοι αρνούνται τις θέσεις περί «μη-διορθώσιμου» και «εμφάνειας» – ‘incorrigibility thesis’ και ‘self-intimation thesis’ – για τα νοητικά συμβάντα, υποστηρίζουν πως και οι νοητικές οντότητες χαίρουν της αντικειμενικής

²⁹⁶ Crayling (2005) σελ. 168.

²⁹⁷ Alquié στο Châtelet (1979/1990) σελ. 245, ελληνική έκδοση.

²⁹⁸ Devitt (1997) σελ. 16.

²⁹⁹ Devitt (1997) σελ. 15.

³⁰⁰ Devitt (1997) σελ. 15.

ύπαρξης που μόλις περιγράφηκε.³⁰¹ Συνεπώς δεν επαρκεί το εν λόγω χαρακτηριστικό για να καλύψει την περί ανεξαρτησίας διάσταση του ρεαλισμού. Τα αντικείμενα θα πρέπει να διαθέτουν και ένα δεύτερο, να μην είναι νοητικά.³⁰²

Ο Ψύλλος ομοίως επισημαίνει ότι από την ανεξαρτησία του κόσμου από τον ανθρώπινο νου δεν έπεται ότι ο κόσμος είναι μη γνώσιμος ή «ότι οι επιστήμονες είναι γνωσιακά κλειστοί» ως προς αυτόν· ούτε ότι οι επιστήμονες στην προσπάθειά τους να γνωρίσουν τον κόσμο, όντας αυτός ανεξάρτητος, δεν γνωρίζουν ουσιαστικά τον ίδιο αλλά συγκροτούν με τις μεθόδους τους το αντικείμενο έρευνάς τους³⁰³ –όπως θα διακήρυσσε μια κατασκευασιοκρατική (constructivist) θέση. Ο ρεαλιστικός ισχυρισμός της ανεξαρτησίας από τον νου θα πρέπει να κατανοηθεί ως εξής:

«Πρέπει να θεωρηθεί ότι υποστηρίζει τη *λογική-εννοιολογική ανεξαρτησία* του κόσμου, υπό την έννοια ότι δεν υπάρχει κανένας εννοιολογικός ή λογικός δεσμός ανάμεσα στην αλήθεια μιας πρότασης και στην ικανότητά μας να την αναγνωρίζουμε, να τη βεβαιώνουμε, να την υπερβεβαιώνουμε ή τα συναφή. Οι οντότητες που η επιστήμη μελετά και για τις οποίες ανακαλύπτει αλήθειες κρίνονται ως ανεξάρτητες από μας (ή από τον νου εν γένει) όχι υπό μια αιτιακή έννοια, αλλά μόνον υπό μια *λογική* έννοια: δεν είναι το λογικό επακόλουθο (ό,τι κι αν σημαίνει αυτό) των δικών μας εννοιολογήσεων και θεωρήσεων».³⁰⁴

Στο ίδιο πνεύμα ο Devitt τονίζει ότι οι ρεαλιστές υποστηρίζοντας την ανεξαρτησία και την αντικειμενικότητα του κόσμου δεν αρνούνται «ορισμένες οικείες αιτιακές σχέσεις στις οποίες υπεισέρχονται νόες». Και συμπληρώνει ότι:

«Πεποιθήσεις, επιθυμίες, αισθήσεις, και ούτω καθεξής, προκαλούν συμπεριφορές οι οποίες επηρεάζουν την εξωτερική πραγματικότητα, δημιουργώντας ακόμα και κάποια επιμέρους στοιχεία (γόνους). Η πραγματικότητα δρα και αυτή στους νόες, προξενώντας πεποιθήσεις, επιθυμίες, αισθήσεις και τα λοιπά. Οι σχέσεις αυτές, καιρό παρατηρημένες από την παραδοσιακή θεωρία (folk theory) και μελετημένες από την επιστήμη, δεν αποτελούν απειλή για τον ρεαλισμό».³⁰⁵

³⁰¹ Η θέση του «μη διορθώσιμου» ή «αλάθητου»: ένα υποκείμενο δεν μπορεί να κάνει λάθος για τις νοητικές του καταστάσεις, δηλαδή, εάν πιστεύει ότι πονάει τότε όντως πονάει, ενώ εάν πιστεύει ότι δεν πονάει, τότε δεν πονάει. Η θέση της «εμφάνειας»: οι νοητικές καταστάσεις είναι εμφανείς στα υποκείμενα τα οποία τις υφίστανται. [Kim (1998), ελληνική έκδοση 2005, σελίδες 40-3, Devitt (1997), σελ. 15]

³⁰² Devitt (1997) σελ. 15.

³⁰³ Psillos (2000) σελ. 713, Ψύλλος (2008) σελ. 46.

³⁰⁴ Psillos (2000) σελ. 713, Ψύλλος (2008) σελ. 46-7.

³⁰⁵ Devitt (1997) σελ. 16.

Ο Fine, σε αντίθεση με τους ρεαλιστές, θεωρεί ότι η αιτιακή αλληλεπίδρασή μας με τον κόσμο δεν είναι άμοιρη συνεπειών. Συνεπάγεται ότι, πρώτον, υπάρχει *αμοιβαία* (ή *αλληλοπαθής, reciprocal*) σχέση ανάμεσα σε εμάς και τον κόσμο, και δεύτερον, όποια πληροφορία αποκτούμε για τα αντικείμενα με τα οποία αλληλεπιδρούμε *μολύνεται* λόγω της αλληλεπίδρασης. Τα δύο αυτά στοιχεία οδηγούν τον Fine στο συμπέρασμα ότι δεν μπορούμε από την αλληλεπίδρασή μας με τον κόσμο να παίρνουμε οντότητες που είναι ταυτόχρονα ανεξάρτητες και αντικειμενικές.³⁰⁶

Σύμφωνα με τον Ψύλλο η θέση του Fine επιδέχεται διαφορετικών ερμηνειών.³⁰⁷ Υπό μια ερμηνεία, λοιπόν, εάν αυτό που ισχυρίζεται ο Fine είναι ότι υπάρχει αιτιακή εξάρτηση των θεωρήσεών μας για τον κόσμο από τον κόσμο, τότε δεν απειλεί τον ρεαλισμό, αντιθέτως μάλιστα τον ενδυναμώνει:

«Η αιτιακή αλληλεπίδραση δεν καθιστά απαγορευτικό το να γνωρίσουμε πράγματα για τις οντότητες με τις οποίες αλληλεπιδρούμε. Αντιθέτως, λόγω της αιτιακής αλληλεπίδρασής μας με τον κόσμο διαθέτουμε αξιόπιστα μέσα με τα οποία ανακαλύπτουμε γεγονότα για αυτόν, μπορούμε να έχουμε εν πρώτοις γνωστική πρόσβαση στον κόσμο και μπορούμε να διατεινόμεσθε –με τρόπο που επιδέχεται να σφάλουμε– για το πότε λαμβάνονται οι συνθήκες αληθείας των πεποιθήσεών μας. ... Δεδομένου ότι αιτιακές αλληλεπιδράσεις και συνδέσεις αποτελούν την πηγή της γνώσης μας για τον κόσμο, η πρόσβασή μας σε αλήθειες που τον αφορούν δεν είναι προβληματική. Σε κάθε περίπτωση, η κεντρική ρεαλιστική θέση για την αλήθεια δεν σχετίζεται με το αιτιακό πάρε-δώσε μας με τον κόσμο. Όπως έχει ήδη επανειλημμένα τονιστεί, η αλήθεια δεν εξαρτάται *λογικά* από την ανθρώπινη κρίση: δεν υπάρχει εννοιολογικός ή λογικός σύνδεσμος ανάμεσα στην αλήθεια μιας δήλωσης και την ικανότητά μας να την αναγνωρίζουμε, να την υποστηρίζουμε και τα παρόμοια. Οι πεποιθήσεις μας αφορούν αντικείμενα με τα οποία αλληλεπιδρούμε –εφόσον δεν γίνεται να αφορούν αντικείμενα με τα οποία *δεν* αλληλεπιδρούμε. Ωστόσο, η αλήθειά τους –στο μέτρο που αληθεύουν– είναι λογικά ανεξάρτητη των μεθόδων επαλήθευσης, δικαιολόγησης, κ.τ.λ.: η αλήθειά τους δεν έπεται από το γεγονός ότι (στην ιδανική περίπτωση) δικαιολογούμεσθε να ισχυριζόμεσθε ό,τι ισχυριζόμεσθε για τα αντικείμενα με τα οποία αλληλεπιδρούμε».³⁰⁸

Αντίθετα από ό,τι ίσως θα αναμενόταν, η κβαντική θεωρία ενισχύει την παραπάνω θέση περί λογικής-εννοιολογικής ανεξαρτησίας των όσων αληθώς γνωρίζουμε

³⁰⁶ Fine (1986) σελ. 151.

³⁰⁷ Psillos (1999) σελ. 245-6.

³⁰⁸ Psillos (1999) σελ. 245-6.

για τον κόσμο αλληλεπιδρώντας αιτιακά με αυτόν· δηλαδή την ανεξαρτησία από τις μεθόδους επαλήθευσης που χρησιμοποιήθηκαν ή από τις εννοιολογήσεις και τις θεωρήσεις που μας χαρακτήριζαν και μας ώθησαν να χρησιμοποιήσουμε τις συγκεκριμένες μεθόδους.³⁰⁹ Κι αυτό διότι, πριν από την κβαντική, αρκετές από αυτές διέφεραν από τις αλήθειες που μας απεκάλυψε για τον κόσμο η διατύπωση της θεωρίας. Με άλλα λόγια, αν και η αλληλεπίδρασή μας με τον κόσμο στο κβαντικό επίπεδο διενεργήθηκε αρχικά χρησιμοποιώντας πρακτικές με εννοιολογικό υπόβαθρο κλασικές αντιλήψεις που θεωρούνταν στέρεα εδραιωμένες, τα χαρακτηριστικά που ανακαλύφθηκαν και οι νέες πεποιθήσεις που διαμορφώθηκαν για τον μικρόκοσμο συγκρούστηκαν σε μικρό ή σε μεγάλο βαθμό με πολλές από αυτές τις αντιλήψεις. Για του λόγου το αληθές θα αναφέρουμε μερικά παραδείγματα. Μια στέρεα κλασική αντίληψη που αναθεωρήθηκε ήταν ότι η ενέργεια απορροφάται και εκπέμπεται από τα σώματα με συνεχή τρόπο. Η λύση του προβλήματος του μέλανος σώματος από τον Planck έφερε εν σπέρματι την έννοια του κβάντου ενέργειας, η οποία θα συγκρουστεί ολοφάνερα με την προαναφερθείσα αντίληψη υποδεικνύοντας, παρά τις αντίθετες προσδοκίες, ότι στον μικρόκοσμο μπορεί η απορρόφηση και η πρόσληψη ενέργειας να γίνεται ασυνεχώς. Ή, όταν οι φυσικοί είχαν πια πειστεί λόγω της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας ότι η φύση του φωτός ήταν κυματική, υπό την πίεση νέων φαινομένων και της αναπόφευκτης κβαντικής ερμηνείας τους αναγκάστηκαν να αναγνωρίσουν ότι υπό συγκεκριμένες συνθήκες το φως δεν εκδήλωνε κυματική αλλά σωματιδιακή φύση. Ένα ακόμα εξαιρετικά σημαντικό παράδειγμα σύγκρουσης αντιλήψεων αφορά τη διαδικασία της μέτρησης που μας έχει ήδη απασχολήσει και θα μας απασχολήσει περισσότερο στη συνέχεια. Ο χαρακτήρας της μέτρησης, παθητικός στην κλασική φυσική όπου η μετρητική συσκευή αποκαλύπτει ιδιότητες που ‘προϋπάρχουν’³¹⁰ στο μετρούμενο σύστημα, στο κβαντικό επίπεδο εκδηλώνεται επεμβατικός αφού η μετρητική συσκευή συνδιαμορφώνει με το μετρούμενο σύστημα ιδιότητες που εξαρτώνται από το μετρητικό πλαίσιο και δεν ‘προϋπάρχουν’ πάντοτε της μέτρησής τους.

³⁰⁹ Οι μέθοδοι που χρησιμοποιούμε εξαρτώνται από τη θεωρία μας, η γνώση όμως που μας παρέχουν μπορεί να είναι αντικειμενική [Boyd (1989) σελ. 7-9]. Θα αναφερθούν περισσότερα στην παραγωγική υπεράσπιση του ρεαλισμού.

Αν και στην περίπτωση της κβαντικής θεωρίας το είδος αυτό της ανεξαρτησίας – λογικής-εννοιολογικής– εκδηλώνεται πιο έντονα, δεν είναι η πρώτη φορά που το συναντούμε στην ιστορία της φυσικής. Το πέρασμα από την αριστοτελική φυσική στη φυσική του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα μπορούμε να πούμε ότι χαρακτηρίστηκε κι αυτό στην αρχή από συγκεκριμένες αντιλήψεις για τον κόσμο, αριστοτελικές και άρα μη κλασικές, που όμως δεν απέτρεψαν τη σύνθεση της κλασικής θεωρίας. Μια σύνθεση η οποία στηρίχθηκε στη διενέργεια πειραμάτων –νοητικών και μη– εκ μέρους των πρωταγωνιστών της, δηλαδή στην αιτιακή αλληλεπίδρασή τους με τον κόσμο. Όμως πιθανότατα δεν θα σκεφτόταν ποτέ κανείς να αναφερθεί σε αλληλοπαθή σχέση και μολυσμένη πληροφορία εξαιτίας της αιτιακής αλληλεπίδρασης που ασκήθηκε από τους κλασικούς φυσικούς προκειμένου να γνωρίσουν καλύτερα τον κόσμο. Ο λόγος δεν μπορεί παρά να είναι ότι κατά τη διενέργεια πειραμάτων στην κλασική επικράτεια υπάρχει η αντίληψη που αναφέρθηκε παραπάνω, πως οι μετρήσεις μας αποκαλύπτουν ‘προϋπάρχουσες’ ιδιότητες³¹¹ και κατά συνέπεια ο ‘νους’ μας δεν δύναται να επηρεάσει το αποτέλεσμά τους. Όμως, κι αν ακόμα στην κβαντική δεν ισχύει το ίδιο, δηλαδή οι μετρήσεις εξ αιτίας του επεμβατικού χαρακτήρα τους δεν αποκαλύπτουν πάντοτε, όπως έχει τονισθεί, ‘προϋπάρχουσες’ ιδιότητες των κβαντικών αντικειμένων³¹², δεν είναι ορθό να μεταβαίνουμε από το γεγονός αυτό στο συμπέρασμα ότι ο ‘νους’ διαδραματίζει κάποιο ενεργό ρόλο καταλύοντας παράλληλα την ανεξαρτησία των κβαντικών αντικειμένων. Οι μη ‘προϋπάρχουσες’ ιδιότητες διαμορφώνονται ως υπάρχουσες παρουσία των πειραμάτων που πραγματοποιούνται και όχι παρουσία των πειραματιστών³¹³, και το γεγονός ότι μπορούν να διαμορφώνονται μας δίνει μια πολύτιμη

³¹⁰ ‘Προϋπάρχουσες’ ιδιότητες με τη διευρυμένη σημασία που τους έχει δοθεί για το κβαντικό πλαίσιο στο δεύτερο κεφάλαιο, σελίδα 123.

³¹¹ Η αντίληψη αυτή θυμίζουμε ότι αντανακλάται και στη λεγόμενη ‘αρχή περί των εγγενών τιμών’ (possessed values principle) σύμφωνα με την οποία οι τιμές των φυσικών μεγεθών κατέχονται έτσι κι αλλιώς από το σύστημα πριν καταστούν με την πράξη της μέτρησης ‘άμεσα’ παρατηρήσιμες (βλέπε ενότητα 1.7. σελ. 77)· ή, όπως διατυπώνεται στο Καρακώστας (2005b) σελ. 62, «οι τιμές των φυσικών μεγεθών θεωρούνται ως ανήκουσες στο αντικείμενο ανεξαρτήτως οποιουδήποτε πειραματικού πλαισίου ή πλαισίου παρατήρησης». Βλέπε επίσης De Muynck (2002) σελ. 86.

³¹² Θυμίζουμε ότι η μόνη περίπτωση στην οποία μπορούμε να θεωρήσουμε ότι η μετρούμενη τιμή ενός φυσικού μεγέθους ‘προϋπάρχει’ της μέτρησης είναι όταν η αρχική κατάσταση του συστήματος αποτελεί ιδιοκατάσταση του μεγέθους.

³¹³ Πώς μπορούμε να γνωρίζουμε κάτι τέτοιο; Μα από το γεγονός ότι η παρουσία των πειραματιστών και η επιλογή από μέρους τους πραγματοποίησης ενός συγκεκριμένου πειράματος χωρίς το πείραμα να λαμβάνει χώρα δεν συνδιαμορφώνει ιδιότητες με τα κβαντικά αντικείμενα. Ενώ η ρύθμιση μιας συσκευής να πραγματοποιήσει με τυχαίο τρόπο μια σειρά πειραμάτων καταγράφοντας τα αποτελέσματά τους,

πληροφορία για τον τρόπο ύπαρξης των κβαντικών αντικειμένων. Την πληροφορία ότι οι υπερθέσεις αποτελούν καταστάσεις των κβαντικών αντικειμένων μη άμεσα παρατηρημένες αλλά υπαρκτές γι αυτά, εξ ου και η ασυνεχής πιθανοκρατική έκβαση τους κάθε φορά που συντελείται μια μέτρηση. Η εν λόγω πληροφορία, αν και προέκυψε αλληλεπιδρώντας αιτιακά με οντότητες στο κβαντικό επίπεδο, πώς θα μπορούσε να είναι ‘μολυσμένη’ λογικά ή εννοιολογικά από εμάς εφόσον είναι τόσο διαφορετική από ό,τι μας είχε συνηθίσει έως τώρα η κλασική φυσική;³¹⁴

3.1.2. Η αναφορά του ρεαλισμού στην καθορισμένη δομή του κόσμου

Η αποτυχία της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ στην κβαντική μηχανική αποτελεί ίσως την πιο κρίσιμη διαφορά της με την κλασική μηχανική. Συναφείς με αυτήν είναι οι προτάσεις περί *καθορισιμότητας τιμής* (όλα τα παρατηρήσιμα μεγέθη που ορίζονται για ένα κβαντομηχανικό σύστημα έχουν κάθε χρονική στιγμή καθορισμένες τιμές) και *αξιόπιστης μέτρησης* (το αποτέλεσμα μιας μέτρησης είναι αριθμητικά ίσο με την τιμή που κατέχει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος ακριβώς πριν από αυτή)³¹⁵ οι οποίες αναφέρθηκαν στην παρουσίαση του θεωρήματος Kochen-Specker –στο πλαίσιο του οποίου δείχθηκε ότι υπάρχουν ισχυρά επιχειρήματα για την παραβίασή τους.³¹⁶ Ο Healey αναφέρει την καθορισσιμότητα τιμής ως *αρχή περί των ακριβών τιμών* [precise values principle: για κάθε κβαντικό σύστημα s , και για κάθε δυναμική μεταβλητή A που ορίζεται (pertaining) στο s , εάν η t αποτελεί χρονική στιγμή εντός της διάρκειας ζωής τού s , τότε η A διαθέτει μία μοναδική πραγματική τιμή στο s τη χρονική στιγμή t] και ισχυρίζεται ότι μαζί με την αρχή της αξιόπιστης μέτρησης βρίσκονται στο κέντρο μιας αφελούς ρεαλιστικής προσέγγισης της κβαντικής μηχανικής η οποία είναι καταδικασμένη να αποτύχει.³¹⁷ Ό,τι μας περιγράφουν οι δύο αρχές απλώς συγκρούεται με τον τρόπο ύπαρξης των κβαντικών

συνδιαμορφώνει ιδιότητες με τα κβαντικά αντικείμενα χωρίς να προϋποθέτει, από τη στιγμή που θα τεθεί σε λειτουργία, ούτε την παρουσία πειραματιστών ούτε τη γνώση των καταγεγραμμένων αποτελεσμάτων από αυτούς. (Όπως λέει χαρακτηριστικά ο Devitt, είμαστε ρεαλιστές για τα δέντρα ακόμα κι αν κάποιες φορές τα φυτεύουμε εμείς [Devitt (1997) σελ. 247]. Γιατί λοιπόν να μην μπορούμε να έχουμε μια αντίστοιχη στάση και για τα κβαντικά αντικείμενα;)

³¹⁴ Η θέση που υποστηρίζεται στην προκειμένη περίπτωση δεν είναι πως από την εννοιολογική ‘μόλυνση’ της όποις πληροφορίας προκύπτει ότι πρέπει να είναι συμβατή με τον συνήθη τρόπο σκέψης, αλλά ότι η μη συμβατότητα μιας πληροφορίας με κάποιον τρόπο σκέψης αποτελεί ένδειξη ότι δεν είναι εννοιολογικά ‘μολυσμένη’ από αυτόν.

³¹⁵ Παράβαλε van Fraassen (1991) σελ. 108.

³¹⁶ Βλέπε την ενότητα 1.5, σελ. 59-71.

αντικειμένων. Ο Held αναφερόμενος στις θέσεις περί καθορισιμότητας τιμής και μη πλαισιακότητας (εάν ένα κβαντομηχανικό σύστημα κατέχει μια ιδιότητα, την κατέχει ανεξάρτητα από οποιοδήποτε μετρητικό πλαίσιο) οδηγείται σε παρόμοια συμπεράσματα. Θεωρεί ότι οι δύο αυτές θέσεις –οι οποίες όπως καταδεικνύεται στο θεώρημα Kochen-Specker οδηγούν σε αντίφαση– ωθούνται από έναν φαινομενικά άκακο (innocuous) ρεαλισμό και συγκρούονται με την κβαντική θεωρία. Ο ρεαλισμός αυτός συνίσταται στην υπόθεση πως οτιδήποτε υπάρχει στον φυσικό κόσμο δεν εξαρτάται αιτιακά από τις μετρήσεις μας οι οποίες αποσκοπούν να μας παρέχουν πληροφορίες γι αυτόν.³¹⁸ Ο Ψύλλος επισημαίνει, σωστά κατά τη γνώμη μας, ότι μια υπόθεση σαν αυτή που μόλις αναφέραμε από τον Held είναι λανθασμένη ακόμα και για την κλασική φυσική. Οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις αποτελούν το μέσο για να γνωρίσουμε τον κόσμο και υφίστανται τόσο στην κλασική όσο και στην κβαντική επικράτεια. Ακόμα και μια αφελής ρεαλιστική άποψη δεν θα υποστήριζε απαραίτητα ότι τα πάντα στον κόσμο είναι καθορισμένα με τέτοιο τρόπο ώστε οι τιμές του να μην εξαρτώνται από τα είδη των μετρήσεων που πραγματοποιούμε. Επομένως, η διαφορά μεταξύ κλασικής και κβαντικής φυσικής έχει να κάνει με τη φύση της εξάρτησης κατά τη μετρητική διαδικασία και όχι με το αν υπάρχει εξάρτηση ή δεν υπάρχει. Η διαταραχή που μπορεί να προκληθεί σε ένα κλασικό σύστημα με τη διαδικασία της μέτρησης «εάν μη εξάλειψιμη, ασκείται κατά τρόπο συνεχή στον χώρο φάσεων του συστήματος και είναι συνεπώς κατ' αρχήν προβλέψιμη».³¹⁹ Οπότε, παρά την επίδρασή της, μπορούμε να γνωρίσουμε πλήρως την κατάσταση του συστήματος πριν από αυτήν. Στην περίπτωση της κβαντικής μέτρησης δεν έχουμε τη δυνατότητα εξάλειψης της αλληλεπίδρασης ή της πρόβλεψής της και της εκ των υστέρων αντιμετώπισής της. Η μέτρηση στην κβαντική φυσική μεταβάλλει την κατάσταση του μετρούμενου συστήματος ανεπιστρεπτί με ασυνεχή και πιθανοκρατικό τρόπο.³²⁰ Όμως, ακόμα κι αυτός ο πρωτοφανής για τα κλασικά δεδομένα επεμβατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης, αφορά την αιτιακή αλληλεπίδραση μετρούμενου συστήματος και μετρητικής συσκευής χωρίς να υποδηλώνει καθοιονδήποτε

³¹⁷ Healey (1979), σελ. 122. Ο Healey χρησιμοποιεί τη δουλειά των Gleason και Kochen-Specker καθώς και των Bell και Wigner για να δείξει ότι μια αφελής ρεαλιστική προσέγγιση της κβαντικής μηχανικής που περιλαμβάνει την αρχή περί των ακριβών τιμών και της αξιόπιστης μέτρησης είναι λανθασμένη.

³¹⁸ Held (2006), σελ. 2.

³¹⁹ Καρακώστας (2005a) σελ. 226.

³²⁰ Καρακώστας (2000) σελ. 97.

ενδιαφέροντα τρόπο εξάρτηση από τον νου του πειραματιστή. Με άλλα λόγια, η ανεξαρτησία του κόσμου από τον νου ή τη συνείδηση του γνωρίζοντος υποκειμένου δεν παραβιάζεται ούτε στην περίπτωση της κβαντικής φυσικής παρά τον ομολογουμένως επαναστατικό χαρακτήρα της μέτρησης σε αυτήν. Όποια άποψη υποστηρίζει το αντίθετο, όπως για παράδειγμα του Wigner σύμφωνα με την οποία η συνείδηση του παρατηρητή μεταβάλλει το διάνυμα κατάστασης του μετρούμενου συστήματος, είναι απλώς λανθασμένη. Όπως γράφει χαρακτηριστικά ο Καρακώστας:

«Η θέση ότι μια πλήρης και λογικά συνεπής θεωρία της κβαντικής μέτρησης θα θεωρούσε το δείκτη της μετρητικής συσκευής αντικειμενικά απροσδιόριστο, αιωρούμενο μεταξύ των εναλλακτικών δυνατών καταστάσεών του, έως ότου ένας παρατηρητής θα αποκτούσε συνείδηση του αποτελέσματος της μέτρησης, εναρμονίζεται με μια σολιμιστική υποκειμενική εικόνα της φύσης, η οποία αποδίδει στην εξωτερική πραγματικότητα μια έκδηλα ιδεαλιστική χροιά. Εάν θεωρηθεί ότι κανονιστική αρχή της φυσικής επιστήμης είναι η αντικειμενική αποτίμηση του εξωτερικού κόσμου στην μακροσκοπική και μικροσκοπική του διάσταση, η άποψη αυτή θα πρέπει είτε να απορριφθεί είτε να αγνοηθεί».³²¹

Στη δημιουργία της παρεξήγησης σε σχέση με το ρόλο της συνείδησης του παρατηρητή κατά τη μετρητική διαδικασία συνέβαλε και ο τρόπος με τον οποίο περιέγραφαν τον καινοτόμο χαρακτήρα της κβαντικής μέτρησης πολλοί από τους θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας. Ο Schrödinger, αποτελώντας εξαίρεση, στο έργο του *Επιστήμη και Ανθρωπισμός* σχολιάζει την υποτιθέμενη κατάρρευση του φράγματος μεταξύ υποκειμένου και αντικειμένου κατά την παρατήρηση ενός φυσικού συστήματος, αφού προηγουμένως έχει παρουσιάσει τις απόψεις των Bohr και Heisenberg επί του θέματος. Σύμφωνα με τον Schrödinger δεν θα πρέπει να χαρακτηρίζουμε ως ‘υποκείμενο’ το ένα από τα δύο φυσικά συστήματα που μετέχουν στη μετρητική διαδικασία –τον καινοτόμο χαρακτήρα της οποίας δεν αρνείται– αλλά να φυλάξουμε τον όρο για τον παρατηρούντα νου ο οποίος δεν δύναται να μετέχει στην αλληλεπίδραση:

« ... αυτό που εννοούν [οι Bohr, Heisenberg και όσοι συμφωνούν μαζί τους] είναι ότι το αντικείμενο δεν υπάρχει ανεξάρτητα από το υποκείμενο-παρατηρητή. Θεωρούν ότι οι πρόσφατες ανακαλύψεις στη Φυσική μάς έφεραν πιο κοντά στη μυστηριώδη μεθόριο ανάμεσα

³²¹ Καρακώστας (2000) σελ. 104-5. Αν και, όπως επισημαίνει ο Αραγεώργης, το πρόβλημα δεν είναι η υποκειμενικότητα/σολιμισμός αλλά η εξηγητική κλειστότητα. Δηλαδή, η αδυναμία της θεωρίας να παρέχει στο πλαίσιο της μια ικανοποιητική εξήγηση για το γεγονός ότι κάθε φορά που πραγματοποιείται μια

σε *υποκείμενο* και *αντικείμενο* και έδειξαν ότι τελικά τα μεταξύ τους σύνορα δεν είναι καθόλου σαφώς καθορισμένα· ότι οφείλουμε να καταλάβουμε πως δεν παρατηρούμε ποτέ ένα αντικείμενο χωρίς, μέσω της ίδιας της πράξης της παρατήρησης, να το τροποποιούμε ή να το διαταράσσουμε ελαφρώς· ότι αυτά τα μυστηριώδη σύνορα μεταξύ υποκειμένου και αντικειμένου *έχουν καταρρεύσει* κάτω από το βάρος των βελτιωμένων μεθόδων παρατήρησης και της σκέψης σχετικά με τα αποτελέσματα των πειραμάτων μας.³²²

... Αντίθετα, στο σημερινό πλαίσιο ιδεών, η άμεση, φυσική, αιτιακή επίδραση μεταξύ των δύο [υποκειμένου-αντικειμένου] θεωρείται *αμοιβαία*. Λέγεται επίσης ότι το *υποκείμενο* αφήνει ένα αναπόφευκτο και ανεξέλεγκτο αποτύπωμα πάνω στο *αντικείμενο*. Αυτό το χαρακτηριστικό *είναι* πράγματι νέο, και πιο κατάλληλο θα πρόσθετα, γιατί η φυσική δράση είναι πάντοτε μια *αλληλεπίδραση*, είναι πάντοτε αμοιβαία. Αυτό που συνεχίζει να μου φαίνεται αμφίβολο είναι μόνο το εξής: κατά πόσο το χαρακτηριστικό αυτό είναι κατάλληλο για να ορίσουμε το ένα από τα δύο αλληλεπιδρώντα συστήματα ως “υποκείμενο”. *Διότι ο παρατηρών νους δεν είναι ένα φυσικό σύστημα, δεν μπορεί να αλληλεπιδράσει με οποιοδήποτε φυσικό σύστημα. Υπ’ αυτή την έννοια ίσως είναι καλύτερο να φυλάζουμε τον όρο “υποκείμενο” για να τον αποδώσουμε στον παρατηρούντα νου*».³²³

Ας ξαναγυρίσουμε όμως στην αποτυχία της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ –και των συναφών αυτής– στην επικράτεια της κβαντικής θεωρίας. Έχοντάς την κατά νου μήπως θα έπρεπε να μας απασχολήσει περισσότερο –εφόσον επιθυμούμε μια ρεαλιστική προσέγγιση της θεωρίας στο πλαίσιο των τριών θέσεων του επιστημονικού ρεαλισμού που παρουσιάστηκαν στην αρχή– το ενδεχόμενο να πλήττεται η αναφορά της μεταφυσικής συνιστώσας στην καθορισμένη δομή του κόσμου και κατά συνέπεια η ανεξαρτησία του; Στη συνέχεια αναφέρονται ορισμένες περιπτώσεις επιστημονικών ρεαλιστών οι οποίοι εξηγούν γιατί θεωρούν ότι δεν απειλούνται από τέτοιου είδους ερωτήματα. Η δομή του κόσμου γι αυτούς είναι όπως –ή κατά προσέγγιση– μας την περιγράφουν οι καλύτερες επιστημονικές θεωρίες μας, αφού πιστεύουν ότι αυτές είναι αληθείς. Ο Smart είναι διαφωτιστικός σε ένα χωρίο για μονόκερους και στοιχειώδη σωματίδια:

«Θα προσπαθήσω να κρατήσω μια ρεαλιστική άποψη για αυτές τις θεωρητικές οντότητες και θα προσπαθήσω να καταδείξω ότι τα στοιχειώδη σωματίδια της φυσικής αποτελούν οντότητες

μέτρηση έχουμε μεταβολή του διανύσματος κατάστασης και λήψη συγκεκριμένου αποτελέσματος από το μετρούμενο σύστημα. (ιδιωτική συνομιλία)

³²² Schrödinger (1961-4/1996) σελ. 55.

³²³ Schrödinger (1961-4/1996) σελ. 57. [σελ. 157 (1996) CUP]

το ίδιο αξιосέβαστες με τα τραπέζια και τα γαλβανόμετρα. Με την έκφραση ‘το ίδιο αξιосέβαστες’ εννοώ εδώ ‘φιλοσοφικά το ίδιο αξιосέβαστες’. Οι μονόκεροι είναι φιλοσοφικά το ίδιο αξιосέβαστοι με τις αγελάδες: εναπόκειται στο ζωολόγο, και όχι στο φιλόσοφο, να αποφασίσει ότι δεν υπάρχουν μονόκεροι. Ομοίως, ο φυσικός ενδέχεται να αντικαταστήσει την παρούσα θεωρία του για τα στοιχειώδη σωματίδια με κάποια άλλη θεωρία που θα περιγράφει τι συμβαίνει στο υπό-ατομικό επίπεδο. Εν τούτοις, θα θέσει μάλλον κάποιο νέο σύνολο θεωρητικών οντοτήτων για να αντικαταστήσει τις παλιές. Δεν είναι έργο του φιλοσόφου να αποφασίσει ανάμεσα στη μια και στην άλλη φυσική θεωρία όπως δεν είναι έργο του να κάνει το ζωολόγο και να αποφασίσει υπέρ ή κατά της ύπαρξης των μονόκερων».³²⁴

Ο Ψύλλος, επίσης, επισημαίνει ότι δεν είναι οι φιλόσοφοι αυτοί που θα αποφασίσουν ποιους επιστημονικούς ισχυρισμούς πρέπει να αποδεχθούμε, αλλά η καλύτερή μας επιστήμη.³²⁵ Εάν λοιπόν η καλύτερή μας επιστήμη είναι η κβαντική θεωρία και τα συμπεράσματα που αντλούμε από αυτήν φανερώνουν ότι οι καταστατικές ιδιότητες των κβαντικών αντικειμένων δεν προϋπάρχουν όλες τις φορές της μέτρησής τους –το σύνολο δηλαδή των δυναμικών μεταβλητών (ή ιδιοτήτων) ενός συστήματος σε καταστάσεις υπέρθεσης, όπως για παράδειγμα ο προσανατολισμός του σπιν ως προς δεδομένη διεύθυνση–, οφείλουμε να το ασπαστούμε.

Ωστόσο, ας θεωρήσουμε χάριν του επιχειρήματος νόμιμη την ένσταση όσων υποστηρίζουν ότι η πεποίθηση σε μια καθορισμένη δομή του κόσμου ανατρέπεται από την παραβίαση της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ στη σύγχρονη επιστήμη καταφέροντας ισχυρό πλήγμα στον ρεαλισμό. Σύμφωνα με αυτούς ο ρεαλισμός ενσωματώνει την άποψη ότι όλες οι ιδιότητες των αντικειμένων υπάρχουν πριν από τη μέτρησή τους και ανεξάρτητα από αυτήν. Στο πλαίσιο αυτό επομένως, ο ρεαλισμός θα μπορούσε να διασωθεί μόνο εάν γινόταν να διευκρινιστεί τι εννοεί ο ρεαλιστής όταν αναφέρεται σε καθορισμένη δομή και δείχθει πως ό,τι εννοεί διαφοροποιείται ή δεν σχετίζεται καν με την προαναφερθείσα άποψη.

Είναι δύσκολο –ή τουλάχιστον στάθηκε δύσκολο για μένα– να βρει κανείς χωρία στα οποία οι υποστηρικτές του ρεαλισμού περιγράφουν πώς αντιλαμβάνονται την καθορισμένη δομή του κόσμου. Τούτο ίσως να αποτελεί ένδειξη για ό,τι αναφέρθηκε παραπάνω, δηλαδή πως οι φιλόσοφοι δεν επιθυμούν να ανακατευτούν στη δουλειά των

³²⁴ Smart (1963), σελ. 27.

³²⁵ Ψύλλος (2008), σελ. 48.

φυσικών· δεν είναι αυτοί που αποφασίζουν –αν και μπορεί να ασκούν κριτική– ποιες νέες επιστημονικές θεωρίες για τη δομή του κόσμου θα γίνουν αποδεκτές. Η επιστημονική κοινότητα ανακαλύπτει, διατυπώνει και επιλέγει τις νέες θεωρίες, οι οποίες, εάν ερμηνευθούν ρεαλιστικά και αναγνωστούν κυριολεκτικά, μας περιγράφουν (προσεγγιστικά) τον κόσμο. Επομένως, εάν τα μέλη της επιστημονικής κοινότητας των φυσικών πιστεύουν ότι συνιστά αληθές χαρακτηριστικό της δομής του κόσμου το γεγονός ότι καταστατικές ιδιότητες των κβαντικών αντικειμένων δεν προϋπάρχουν πάντοτε της μέτρησής τους, μόνο υιοθετώντας μια ρεαλιστική στάση δεν προδίδουν αυτή τους την πεποίθηση.³²⁶ Με άλλα λόγια, ο *μη ρεαλιστής* δεν αντιμετωπίζει κυριολεκτικά την παραβίαση της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’, αλλά ως ένα φαινόμενο το οποίο ενδέχεται να ψεύδεται για το πώς είναι πραγματικά ο κόσμος· δεν θεωρεί λοιπόν ότι αυτή αποκαλύπτει ένα αληθές στοιχείο της δομής του κόσμου και άρα δεν νομιμοποιείται να τη χρησιμοποιήσει για να βλάψει οποιαδήποτε φιλοσοφική θέση, πολύ περισσότερο τη ρεαλιστική. Διότι, αν δεν πιστεύει σε αυτήν, πώς μπορεί να την συμπεριλάβει στις προκείμενες του επιχειρήματός του για να πλήξει μια φιλοσοφική θέση που κατά τη γνώμη του εκδηλώνει την ίδια δυσπιστία με αυτόν όσον αφορά την παραβίαση. Αν πάλι αντιμετωπίζει την παραβίαση κυριολεκτικά τότε συντάσσεται με θέσεις του ρεαλισμού και θα ήταν παράλογο να επιθυμεί, όντας μη ρεαλιστής, να τον διαψεύσει συνολικά.

Στους Boyd και Ψύλλο συναντούμε την άποψη ότι ο κόσμος έχει μια αντικειμενική δομή φυσικών ειδών (objective natural-kind structure)· είναι τεμαχισμένος σε φυσικά είδη.³²⁷ Οι ρεαλιστές αντιλαμβάνονται τον κόσμο αποτελούμενο από φυσικά είδη³²⁸ τα οποία ανταποκρίνονται στις θεωρητικές περιγραφές που παρέχουν οι θεωρίες. Επιπλέον ισχυρίζονται ότι οι ταξινομίες φυσικών ειδών των νεότερων θεωριών αποτελούν καλύτερες προσεγγίσεις της αντικειμενικής δομής φυσικών ειδών του κόσμου.³²⁹

Η άποψη που υιοθετεί ο Boyd για τα φυσικά είδη είναι ότι αποτελούν ομοιοστατικές δέσμες ιδιοτήτων (homeostatic property clusters). Στο Boyd (1990) περιγράφεται αναλυτικά μια τέτοια δέσμη ιδιοτήτων. Αναφέρουμε, πολύ συνοπτικά, ότι

³²⁶ Όπως επεσήμανε ο Αραγεώργης το πρόβλημα είναι η μεταφυσική σχέση ιδιότητας-αντικειμένου· η δομή μπορεί να μην αφορά κατηγορικές ιδιότητες.

³²⁷ Boyd (1980) σελ. 642-644, Psillos (1999) σελ. 40.

³²⁸ Φυσικά είδη με την έννοια του ‘natural’ και όχι του ‘physical’.

ομοιοστατική δέσμη ιδιοτήτων αποτελεί μια οικογένεια από ιδιότητες οι οποίες εκδηλώνονται ταυτόχρονα στη φύση για έναν σημαντικό αριθμό περιπτώσεων και που κάποιες από τις ιδιότητες της οικογένειας τείνουν να ευνοούν την παρουσία των άλλων ή των υποκείμενων μηχανισμών που τείνουν να ευνοούν την από κοινού παρουσία των ιδιοτήτων της οικογένειας.³³⁰ Ο Ψύλλος³³¹ αναφέρεται στα φυσικά είδη υπό όρους αντικειμενικών ομοιοτήτων και διαφορών στον κόσμο. Θεωρεί ότι υπάρχουν αντικειμενικές σχέσεις μεταξύ ιδιοτήτων –ή οιονεί αντικειμενικές. Όλα τα ηλεκτρόνια, για παράδειγμα, έχουν τις ίδιες θεμελιώδεις ιδιότητες και είναι διαφορετικά από τα νετρίνα.

Τα ηλεκτρόνια, επομένως, μπορούμε να πούμε ότι συνιστούν ένα παράδειγμα φυσικού είδους –όπως το νερό, οι τίγρεις κ.α. Τα μέλη του φυσικού είδους ‘ηλεκτρόνιο’ μοιράζονται *ορισμένες* από τις ιδιότητές τους· αυτές που χαρακτηρίζουμε θεμελιώδεις όντας αναλλοίωτες και ανεξάρτητες από την κατάσταση του συστήματος. Η αναφορά σε καθορισμένη δομή δεν συνδέεται απαραίτητα με έναν κόσμο όπου *όλες* οι ιδιότητες, των ηλεκτρονίων για παράδειγμα, είναι καλώς ορισμένες και προϋπάρχουν της μέτρησής τους. Οι εγγενείς ιδιότητες³³² που συγκροτούν το φυσικό είδος ‘ηλεκτρόνιο’ είναι οι τιμές της μάζας του, $m=9,1 \cdot 10^{-31}$ kg, του φορτίου του, $q=-1,6 \cdot 10^{-19}$ C και του σπιν του που είναι $\hbar/2$. Το σπιν ενός ηλεκτρονίου ως προς δεδομένη διεύθυνση μπορεί να πάρει μόνο δύο δυνατές τιμές προβολής –παραδείγματος χάριν, η προβολή του σπιν του ηλεκτρονίου ως προς τη z διεύθυνση είναι $+\hbar/2$ ή $-\hbar/2$ – και δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητά του, δηλαδή δεν ‘προϋπάρχει’ πάντοτε της μέτρησής της και εξαρτάται από το μετρητικό πλαίσιο. Το ηλεκτρόνιο, όπως και κάθε αντικείμενο εν γένει, κβαντικό ή μη, διαθέτει λοιπόν κάποιες αναλλοίωτες (invariant) και κάποιες μεταβλητές (variable) ιδιότητες.³³³ Ο

³²⁹ Psillos (1999) σελ. 280.

³³⁰ Boyd (1990) σελ. 235-236.

³³¹ Ιδιωτική συνομιλία.

³³² Εγγενείς ιδιότητες όπως τις ορίζουν οι Langton & Lewis (1998). Βλέπε ενότητα 2.2.2.

³³³ Ακόμα και στον μακρόκοσμο συναντούμε παραδείγματα φυσικών ειδών των οποίων οι μεταβλητές ιδιότητες διαμορφώνονται και εξαρτώνται από τις συνθήκες παρατήρησης, με τρόπο μάλιστα που θυμίζει έντονα –χωρίς φυσικά να ταυτίζεται– την κβαντική περίπτωση. Ο χαμαιλέοντας, για παράδειγμα, αποτελεί το πιο γνωστό είδος σαύρας λόγω της ικανότητάς του να αλλάζει χρώμα ώστε να προσαρμόζεται στο φυσικό του περιβάλλον. Το εκάστοτε περιβάλλον, με άλλα λόγια, αποτελεί το πλαίσιο στο οποίο αποκτά υπόσταση –γίνεται ενεργεία– κάποια από τις *δυνάμεις* καταστάσεις χρωματισμού του χαμαιλέοντα. Το χρώμα επομένως που παρατηρούμε σε έναν χαμαιλέοντα εξαρτάται από το περιβάλλον στο οποίο τον παρατηρούμε και συνιστά για αυτόν μεταβλητή ιδιότητα. Ένα άλλο παράδειγμα που θα μπορούσαμε να

προσανατολισμός του σπιν ως προς δεδομένη διεύθυνση ανήκει στις μεταβλητές ιδιότητές του. Θα μπορούσαμε να πούμε ότι αυτό το τελευταίο χαρακτηριστικό –η αναγνώριση μεταβλητών ιδιοτήτων που διαμορφώνονται και εξαρτώνται από τις συνθήκες παρατήρησης– μαζί με τις εγγενείς ιδιότητες του ηλεκτρονίου –και άλλα ενδεχομένως χαρακτηριστικά όπως η ύπαρξη σε καταστάσεις υπέρθεσης– συγκροτούν την ομοιοστατική δέσμη ιδιοτήτων του φυσικού είδους που αποκαλούμε ‘ηλεκτρόνιο’.

Ο ρεαλισμός του Devitt πάλι αφορά δείγματα (tokens) οντοτήτων και όχι τύπους (types), δηλαδή αφηρημένες μορφές οντοτήτων όπως ‘άνθρωπος’, ‘ζώο’, ‘στοιχειώδες σωματίδιο’. Τα δείγματα ως γνωστόν αποτελούν παραδειγματικές περιπτώσεις ενός ή περισσότερων τύπων. Οπότε, ο Devitt δεσμεύεται ως προς την ύπαρξη δειγμάτων των περισσότερων φυσικών τύπων του κοινού νου και της επιστήμης, και θεωρεί ότι η δέσμευση σε τύπους είναι απλώς βολική και όχι αναγκαία.³³⁴ Για την ύπαρξη ή όχι των τύπων προτιμά να μείνει ουδέτερος όπως λέει.³³⁵ Και αυτός θεωρεί πως δεν οφείλει να μιλήσει για τις ιδιότητες που θα πρέπει να διαθέτουν τα δείγματα ενός συγκεκριμένου τύπου. Το γεγονός ότι θα διαθέτουν κάποιες ιδιότητες το χαρακτηρίζει αυτονόητο, αλλά δεν θέλει να δεσμευτεί ως προς το ποιες είναι αυτές αφού κάτι τέτοιο δεν αποτελεί έργο της φιλοσοφίας αλλά της επιστήμης. Όπως γράφει χαρακτηριστικά:

«Προτιμώ μια μορφή *a posteriori* ουσιοκρατίας (essentialism) για τους τύπους αυτούς (αν και η υπεράσπισή μου του ρεαλισμού δεν εξαρτάται σε καμία περίπτωση από αυτό). Σύμφωνα με την άποψη αυτή, υπάρχουν κάποιες ουσιώδεις ιδιότητες του να είσαι τίγρη, καθορισμένες από τη γενετική δομή των τίγρεων, και είναι καθήκον της επιστήμης να ανακαλύψει ποιες είναι αυτές οι ιδιότητες. Θα μπορούσαμε να κάνουμε λάθος για τις ουσιώδεις ιδιότητες των τίγρεων, όπως θα μπορούσαμε να κάνουμε λάθος και για οποιεσδήποτε άλλες. Συνεπώς, δεσμεύοντας τον ρεαλισμό για τις τίγρεις με οποιαδήποτε από τις ιδιότητες που πιστεύεται ότι διαθέτουν οι τίγρεις, εκτός από το να είναι τίγρεις, αποτελεί ολοφάνερη ισχυροποίηση του δόγματος. Νομίζω ότι ένα ισχυρότερο δόγμα είναι σωστό, όμως, παρόλα αυτά, δεν θα ήταν συνετό να δεσμεύσω τον ρεαλισμό σε κάτι περισσότερο από την ύπαρξη των οντοτήτων συγκεκριμένων ειδών».³³⁶

αναφέρουμε, είναι το χρώμα των αριθμών σε κάποια χαρτονομίσματα το οποίο εξαρτάται από τη γωνία παρατήρησης του χαρτονομίσματος.

³³⁴ Devitt (1997), σελ. 21.

³³⁵ Devitt (1997), σελ. 20.

³³⁶ Devitt (1997), σελ. 22.

Επομένως, η καθορισμένη δομή του κόσμου μπορεί να περιλαμβάνει ό,τι μας λείπει για τις ιδιότητες των αντικειμένων η καλύτερή μας επιστήμη. Εφόσον αυτή για τον μικρόκοσμο είναι η κβαντική θεωρία, στοιχεία της καθορισμένης δομής μπορούν να αποτελούν οι καταστάσεις υπέρθεσης, η ύπαρξη ασύμβατων ιδιοτήτων, οι σχέσεις απροσδιοριστίας, η εξάρτηση ιδιοτήτων από το μετρητικό πλαίσιο (πλαισιακότητα) και η μη διαχωρισσιμότητα· χαρακτηριστικά της καθορισμένης δομής που δεν εξαρτώνται από εμάς. Το να παραμένουμε πεισματικά προσκολλημένοι σε πεποιθήσεις όπως για παράδειγμα ότι οι οντότητες του μικρόκοσμου διαθέτουν κάθε χρονική στιγμή επακριβώς καθορισμένες τιμές για όλες τις φυσικές ποσότητες που τις χαρακτηρίζουν, δεν συνιστά ρεαλισμό αλλά κλασική προκατάληψη. Ρεαλισμό συνιστά η αναγνώριση όσων μαρτυρούν τα πειράματα και τα θεωρήματα και η αποδοχή ότι ορισμένα φυσικά μεγέθη δεν δύναται να θεωρηθούν καλώς ορισμένα ανεξάρτητα από τη διαδικασία μέτρησής τους· δηλαδή ρεαλισμό συνιστά η αποδοχή όσων μας λείπει για τον κόσμο και για τη δομή του ή τη φύση του, έστω και προσεγγιστικά, η καλύτερή μας επιστημονική θεωρία. Εν κατακλείδι, καθορισμένη δομή για τον ρεαλιστή είναι ό,τι καθορίζεται από την τρέχουσα επιστήμη καθώς εκείνη προσεγγίζει την αλήθεια.

Χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας, όπως εκείνο της εξάρτησης ιδιοτήτων από το μετρητικό πλαίσιο, κατηγορήθηκαν ότι υπό το πρίσμα της ερμηνείας της Κοπεγχάγης εκδήλωναν έναν κβαντικό κόσμο εξαρτώμενο από τον παρατηρητή (observer-dependent). Καθότι κάτι τέτοιο έθιγε άμεσα την περί ανεξαρτησίας από τον νου διάσταση του ρεαλισμού, ως πιθανή διέξοδος θεωρήθηκε η υιοθέτηση κάποιας άλλης ερμηνείας η οποία θα απέφευγε αυτή τη δυσάρεστη ‘συνέπεια’.³³⁷ Οφείλουμε να επισημάνουμε για μια ακόμη φορά ότι η πλαισιακότητα –καθώς και η μη διαχωρισσιμότητα– αποτελεί αναπόδραστο χαρακτηριστικό όλων των ερμηνειών της κβαντικής θεωρίας και όχι ιδιότυπο στοιχείο της ορθόδοξης ερμηνείας. Τουτέστιν, αποτελεί χαρακτηριστικό του κόσμου στο μικροσκοπικό επίπεδο, όπως αυτός περιγράφεται, προσεγγίζοντας την αλήθεια, από την κβαντική θεωρία ανεξαρτήτως ερμηνείας της. Επομένως, άλλες ερμηνείες, όχι μόνο δεν αποφεύγουν τα αποκαλούμενα ‘μυστήρια’ της κβαντικής μηχανικής αυτού του είδους, αλλά δημιουργούν κιόλας νέες αντιφάσεις και ασυμβίβαστα. Ως γνωστόν, η θεωρία του Bohm επιδιώκοντας να

³³⁷ Devitt (2005), υποσημείωση 1, σελίδες 768-9.

αποδώσει αιτιοκρατικό χαρακτήρα στην κβαντική μηχανική με την εισαγωγή στο υποκβαντικό επίπεδο κρυμμένων μεταβλητών, καθίσταται μια ισχυρά μη τοπική θεωρία η οποία οδηγεί στην παραβίαση της αρχής του πρώτου σήματος³³⁸ της θεωρίας της σχετικότητας και κατά συνέπεια συγκρούεται με μια από τις καλύτερα επικυρωμένες φυσικές θεωρίες μας. Η θεωρία κρυμμένων μεταβλητών του Bohm δεν είναι η μόνη που αντιμετωπίζει προβλήματα. Οι τοπικές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, εν γένει, έρχονται αντιμέτωπες με τα θεωρήματα Bell και Kochen-Specker.³³⁹ Η ερμηνεία πάλι των ‘πολλαπλών κόσμων’ του Everett, εκτός από την ασάφεια που την χαρακτηρίζει, με την ακραία υπόθεση της διακλάδωσης του σύμπαντος κάθε φορά που συντελείται κβαντική μέτρηση ώστε να πραγματώνονται όλα τα δυνατά αποτελέσματα αυτής, αυξάνει σε υπερβολικό βαθμό την οντολογία των κόσμων χωρίς να παρέχει την παραμικρή ένδειξη για την ύπαρξή τους, δεδομένου ότι η αλληλεπίδραση μεταξύ τους είναι μηδενική.

Συνοψίζοντας, ακόμα κι αν παραμεριστεί η ερμηνεία της Κοπεγχάγης –η οποία αν όντως αναγνωρίζει εξάρτηση του κόσμου από τον νου του πειραματιστή θα πρέπει να απορριφθεί διότι τουλάχιστον έως τώρα τέτοιου είδους εξάρτηση δεν έχει διαπιστωθεί–, μέχρι στιγμής η υιοθέτηση άλλων ‘βαθύτερων’ ερμηνευτικών πλαισίων περιπλέκει την κατάσταση αντί να την ξεδιαλύνει. Αυτό που ίσως θα πρέπει να κάνουμε είναι να κατανοήσουμε τη φύση της εκδηλωμένης εξάρτησης έχοντας υπόψη την πρότυπη κβαντική φυσική και όχι τις ερμηνείες της. Είναι άλλο πράγμα να εξαρτάται κάτι από το πειραματικό πλαίσιο και άλλο να εξαρτάται από τον παρατηρητή. Η εξάρτηση από το πειραματικό πλαίσιο δεν συνεπάγεται ότι ο κόσμος κατασκευάζεται από ‘ιδέες’ ή ότι εξαρτάται λογικά από τις γνωστικές μας δραστηριότητες ή τις ικανότητές του νου μας.³⁴⁰ Αν κάποιος από τους θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας θεωρούσαν πράγματι ότι ο

³³⁸ Περί ‘ισχυρής τοπικότητας’ (ή αλλιώς ‘συνθήκη παραγοντοποιησιμότητας’ –factorizability condition) βλέπε την ενότητα 1.4.1. για το θεώρημα Bell, σελ. 48 και την ενότητα 1.4.2. σελ. 52. Για την ανάλυση της συνθήκης σε ‘τοπικότητα’ και ‘διαχωρισσιμότητα’ βλέπε την ενότητα 1.4.2. Για τη σχετικιστική αρχή του πρώτου σήματος βλέπε την ενότητα 1.4.2. σελ. 53.

³³⁹ Βλέπε τις αντίστοιχες ενότητες 1.4 και 1.5.

³⁴⁰ Όταν η τιμή ενός και του αυτού φυσικού μεγέθους ενός κβαντικού συστήματος συναρτάται από το είδος της επιλεγόμενης μέτρησης, το στοιχείο αυτό συνιστά αιτιακή ή φυσική εξάρτηση από τη μετρητική διαδικασία. Η μετρητική διαδικασία για να θεωρηθεί γνωστική δραστηριότητα προϋποθέτει την ύπαρξη ενός υποκειμένου και τη γνώση των αποτελεσμάτων της από αυτό. Η λήψη της τιμής ενός φυσικού μεγέθους η οποία εξαρτάται αιτιακά από τη μετρητική διαδικασία προϋποθέτει τη διενέργεια και μόνο της μέτρησης και κανένα γνωρίζων υποκείμενο.

κόσμος εξαρτάται από τον νου, τότε το μόνο που μπορούμε ίσως να πούμε είναι ότι μπροστά στην αποκάλυψη τέτοιων πρωτοφανών χαρακτηριστικών υπερέβαλαν, συνειδητά ή ασυνείδητα, για τον ρόλο του παρατηρητή.

3.2. Η υπαρκτική διάσταση στον ρεαλισμό και η σημασιολογική θέση του επιστημονικού ρεαλισμού.

Ο Devitt σημειώνει ότι ο ρεαλισμός παράλληλα με τη διάστασή του περί ανεξαρτησίας διαθέτει και μια υπαρκτική³⁴¹, η οποία είναι εξίσου σημαντική. Προσθέτει ενδιαφέρον σε μια μάλλον αδιάφορη εκδοχή ‘ασθενούς ρεαλισμού’ (weak realism) που απλώς υποστηρίζει ότι *κάτι* αντικειμενικά υπάρχει ανεξάρτητα από τον νου, αφήνοντας αυτό το *κάτι* εντελώς απροσδιόριστο.

Επομένως, ο ρεαλιστής, επιδιώκοντας έναν ισχυρότερο ρεαλισμό, δεσμεύεται στην ύπαρξη των ‘φυσικών οντοτήτων του κοινού νου’ (common-sense physical entities), όπως είναι τα δέντρα, οι γάτες, το νερό κ.τ.λ. Επίσης, ως επιστημονικός ρεαλιστής δεσμεύεται στην ύπαρξη των οντοτήτων που θέτουν οι επιστημονικές θεωρίες μας, είτε αυτές είναι παρατηρήσιμες είτε είναι μη παρατηρήσιμες. Στις παρατηρήσιμες συμπεριλαμβάνονται ακόμα και οντότητες που είναι απομακρυσμένες από την καθημερινή ζωή, όπως για παράδειγμα οι δορυφόροι του Δία, ενώ στις μη παρατηρήσιμες έχουμε τα ηλεκτρόνια, τα μίονια, τον καμπύλο χωρόχρονο κ.ά. Η διάκριση μεταξύ παρατηρήσιμων και μη παρατηρήσιμων οντοτήτων δεν υπήρξε ποτέ σαφής και αποτελεί φλέγον ζήτημα όσων φιλοσοφικών θέσεων οφείλουν να την υπερασπιστούν. Τέτοιου είδους φιλοσοφική θέση συνιστά η εργαλειοκρατία (instrumentalism), υιοθετώντας ρεαλιστική στάση για τις παρατηρήσιμες και αντιρεαλιστική³⁴² για τις μη παρατηρήσιμες οντότητες, εφόσον αντιμετωπίζει τις τελευταίες απλώς ως χρήσιμα εφευρήματα (useful fictions) για τη συστηματοποίηση των

³⁴¹ Devitt (1997), σελίδες 17-22.

³⁴² Με τον όρο ‘αντιρεαλισμός’ υπάρχει μάλλον σύγχυση, αφού χρησιμοποιείται από τον Michael Dummett που τον εισήγαγε και τους Αμερικανούς φιλοσόφους της επιστήμης με διαφορετική σημασία. Όπως εξηγεί ο Papineau, «ο ‘αντιρεαλισμός’ του Dummett, όπως ο πιο παραδοσιακός ιδεαλισμός και η επαληθευσιοκρατία, επιδιώκει να *στηρίζει* τους ισχυρισμούς μας για τη γνώση, επιχειρηματολογώντας ότι τέτοιοι ισχυρισμοί δεν θα πρέπει να ερμηνεύονται ως αντίστοιχοι ενός κόσμου πέραν των νοητικών μας δυνατοτήτων. Αντιθέτως, ο ‘αντιρεαλισμός’ των Αμερικάνων επιθυμεί να *απορρίψει* κάθε επιστημονικό ισχυρισμό για τη γνώση του μη παρατηρήσιμου κόσμου, ακριβώς με το σκεπτικό ότι τέτοιοι ισχυρισμοί *αντιστοιχούν* σε έναν κόσμο πέραν των νοητικών μας δυνατοτήτων» [Papineau (1996) σελ. 5]. Ο όρος ‘αντιρεαλισμός’ όπου θα χρησιμοποιηθεί στη συνέχεια δεν αφορά την περίπτωση του Dummett εκτός αν δηλώνεται κάτι διαφορετικό.

παρατηρήσεών μας. Κατά συνέπεια, θεωρεί ότι οι προτάσεις για τις μη παρατηρήσιμες οντότητες δεν επιδέχονται συνθηκών αληθείας και άρα αληθοτιμών. Ο ρεαλιστής αποδεχόμενος την ύπαρξη των παρατηρήσιμων και μη οντοτήτων που θέτει η επιστήμη, αποφεύγει το ζήτημα της διάκρισής τους ή τουλάχιστον δεν το καθιστά κρίσιμο γι αυτόν. Ο Devitt ισχυρίζεται ότι το βασικό επιχείρημα για την αποδοχή των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων είναι ο εξηγητικός τους ρόλος:

«Υποθέτοντας ότι υπάρχουν, μπορούμε να δώσουμε ικανοποιητικές εξηγήσεις για τη συμπεριφορά και τα χαρακτηριστικά των παρατηρημένων οντοτήτων, συμπεριφορά και χαρακτηριστικά που σε διαφορετική περίπτωση θα παρέμεναν τελείως ανεξήγητα. Επιπλέον, μια τέτοια υπόθεση οδηγεί σε παρατηρήσιμες προβλέψεις, οι οποίες επιβεβαιώνονται επιτυχώς: η υπόθεση είναι ‘επιτυχής από παρατηρησιακής απόψεως’. Ως εκ τούτου, η απαγωγή (abduction) μας οδηγεί από υποθέσεις για τον παρατηρημένο κόσμο σε υποθέσεις για τον μη παρατηρήσιμο».³⁴³

Ωστόσο, ο επιστημονικός ρεαλιστής δεν δεσμεύεται στην ύπαρξη όλων των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων της σύγχρονης επιστήμης, αναγνωρίζοντας το ενδεχόμενο να συμβούν οντολογικά λάθη κατά την άσκηση αυτής.³⁴⁴ Το φλογιστόν αποτελεί μια πολύ γνωστή περίπτωση λάθους. Τα λάθη δεν αποφεύγονται ακόμα κι όταν τίθενται μη παρατηρήσιμες οντότητες από τον κοινό νου, όπως στην περίπτωση των ιπτάμενων δίσκων. Η δέσμευση του επιστημονικού ρεαλιστή αφορά τις περισσότερες από τις μη παρατηρήσιμες οντότητες που έχουν ‘με σιγουριά’ (confidently) και ‘αναγκαία’ τεθεί από τις σύγχρονες θεωρίες.³⁴⁵

Όσα μόλις αναφέρθηκαν δεν θα πρέπει να παρερμηνευθούν και να θεωρηθεί ο ρεαλισμός συμβατός με τον αναγωγιστικό εμπειρισμό (reductive empiricism). Ο Ψύλλος είναι σαφής σε σχέση με αυτό.³⁴⁶ Οι αναγωγιστικοί εμπειριστές, σε αντίθεση με τους

³⁴³ Devitt (1997), σελ. 108-9. Επίσης Devitt (2005) σελ. 776-7.

³⁴⁴ Η *πεσιμιστική μετά-επαγωγή* (pessimistic meta-induction) –ή απλώς *απαισιόδοξη επαγωγή*– λόγω παρελθούσας πλάνης αποτελεί ένα ισχυρό επιχείρημα εναντίον του επιστημονικού ρεαλισμού. Η αρχική ανάπτυξή του οφείλεται στον Laudan (1981) και υπονομεύει την πίστη στον ρεαλισμό ως εξής: η ιστορία των επιστημών μάς έχει διδάξει ότι πολλές από τις μη παρατηρήσιμες οντότητες που έθεσαν παλιότερες επιστημονικές θεωρίες αποδείχθηκαν ψευδείς ή εγκαταλείφθηκαν· συνεπώς, το πιθανότερο είναι ότι θα συμβεί το ίδιο και για τις μη παρατηρήσιμες οντότητες που θέτουν οι σημερινές επιστημονικές θεωρίες, δηλαδή οι περισσότερες από αυτές θα αποδειχτούν στο μέλλον ψευδείς.

³⁴⁵ Devitt (1997), σελίδες 18, 109.

³⁴⁶ Psillos (1999), σελίδες 12-4. Επίσης Kukla (1998) σελ. 8-9.

εργαλειοκράτες, μπορεί να αποδέχονται τις μη παρατηρήσιμες οντότητες³⁴⁷ και να μην τις κατατάσσουν στις νοητικές, όμως θεωρούν ότι αυτές μπορούν να αναχθούν πλήρως στις παρατηρήσιμες –συγκρουόμενοι έτσι και αυτοί υπό άλλους όρους με τη σημασιολογική θέση του ρεαλισμού. Δεν αναγνωρίζουν τις μη παρατηρήσιμες οντότητες όπως οι ρεαλιστές ως μη αναγώγιμες, αλλά ως ‘συντομεύσεις στενογραφικού τύπου’ της περίπλοκης συμπεριφοράς, πραγματικής ή δυνητικής, κάποιων παρατηρήσιμων οντοτήτων ή φαινομένων. Κατά συνέπεια, θεωρούν ότι διαθέτουν συνθήκες αληθείας – τις συνθήκες αληθείας των προτάσεων του παρατηρήσιμου κόσμου στις οποίες ανάγονται– και άρα αληθοτιμές. Έτσι όμως οι μη παρατηρήσιμες οντότητες καθίστανται εξαρτώμενες από τον νου υπό μια ευρύτερη έννοια: η ύπαρξή τους συνδέεται με τη δυνατότητα της επαλήθευσης ή της ορθολογικής αποδοχής των ισχυρισμών που τις αφορούν· το ποιες οντότητες υπάρχουν στον κόσμο καθορίζεται από το τι μπορεί να γίνει γνωστό, να επαληθευτεί και τα παρόμοια. Για τον αναγωγιστικό εμπειριστή, όπως και για τον εργαλειοκράτη, ο κόσμος και ο παρατηρήσιμος κόσμος ταυτίζονται. Ο ρεαλιστής, κάνοντας διάκριση μεταξύ των *συνθηκών αληθείας* (truth conditions) και των *συνθηκών επαλήθευσης* (verification conditions), διαφοροποιεί τη θέση του ως εξής. Υποστηρίζει ότι θεωρητικοί και παρατηρησιακοί ισχυρισμοί θα πρέπει *σημασιολογικά* να αντιμετωπίζονται *το ίδιο* αφού και τα δύο είδη ισχυρισμών επιδέχονται συνθηκών αληθείας.³⁴⁸ Η απόδοση συνθηκών αληθείας αξιώνει απλά και μόνο δυνητική γεγονοτική αναφορά. Οι παρατηρησιακοί όροι αναφέρονται δυνητικά σε παρατηρήσιμες οντότητες ενώ η δυνητική γεγονοτική αναφορά των θεωρητικών όρων είναι οι μη παρατηρήσιμες οντότητες· οι συνθήκες αληθείας των όρων δεν θα πρέπει να ταυτίζονται ή να συγχέονται με τις συνθήκες επαλήθευσης της γεγονοτικής αναφοράς τους. Ο ρεαλιστής αρνείται λοιπόν ότι οι μη παρατηρήσιμες οντότητες και οι θεωρητικοί ισχυρισμοί ανάγονται στο παρατηρησιακό λεξιλόγιο· θεωρεί κατ’ αρχήν δυνατό να υπάρχει στον κόσμο επιπλέον περιεχόμενο από όσο μπορούμε να παρατηρήσουμε –χωρίς να συνεπάγεται τη μη

³⁴⁷ Ο van Fraassen [(1980) σελ. 14, ελλ. μετ. σελ. 21-22] επιστρά την προσοχή στο ότι εκφράσεις του τύπου ‘θεωρητική οντότητα’ θα πρέπει να αποφεύγονται και να γίνεται λόγος είτε περί ‘θεωρητικών όρων’ είτε περί ‘μη παρατηρήσιμων οντοτήτων’. Το ίδιο παρατηρούν και οι Earman και Salmon [(1992) σελ. 44].

³⁴⁸ Το ίδιο υποστηρίζεται και από τον κατασκευαστικό εμπειρισμό του van Fraassen, γι αυτό και δεν τον συμπεριλάβαμε στις φιλοσοφικές θέσεις που αντιτίθενται στη σημασιολογική συνιστώσα του επιστημονικού ρεαλισμού. Ο κατασκευαστικός εμπειριστής διαφοροποιείται από τον ρεαλιστή στην τρίτη συνιστώσα του ρεαλισμού, τη γνωσιακή, όπου μη συμμεριζόμενος την αισιοδοξία του υιοθετεί σκεπτικιστική στάση.

γνωσιμότητά του. Οι θεωρητικοί όροι είναι το αποτέλεσμα της προσπάθειας να συλληφθεί αυτό το επιπλέον περιεχόμενο. Όπως τονίζει ο Ψύλλος –σχετίζοντας τη διάκριση συνθηκών αληθείας και επαλήθευσης με την ανεξαρτησία:

«Το να λες για μια μη νοητική οντότητα που παίζει σημαντικό ρόλο στην οντολογία κάποιου ότι είναι *ανεξάρτητη από τον νου* ισοδυναμεί με το να λες ότι οι ισχυρισμοί γύρω από την οντότητα αυτή είναι αληθείς επειδή και στο βαθμό που οι συνθήκες αληθείας τους επιτυγχάνονται, και όχι επειδή και στο βαθμό που τέτοιοι ισχυρισμοί μπορούν να επαληθευτούν, να γίνουν ορθολογικά αποδεκτοί, πιστευτοί και άλλες συγγενείς γνωσιακές έννοιες. Με άλλα λόγια, αυτό που καθιστά τέτοιους ισχυρισμούς αληθείς είναι το ότι συλλαμβάνουν με ορθό τρόπο γεγονότα που έχουν να κάνουν με ανεξάρτητες οντότητες και τη συμπεριφορά τους».³⁴⁹

Η σημασιολογική θέση του επιστημονικού ρεαλισμού λοιπόν τον διακρίνει από εργαλειοκρατικές όσο και αναγωγιστικές θεωρήσεις. Ο ρεαλισμός, σε αντίθεση με αυτές, αναγνωρίζοντας στον κόσμο επιπλέον περιεχόμενο από όσο μπορούμε να παρατηρήσουμε, συνιστά μια οντολογικά πληθωριστική θεώρηση. Ο κόσμος κατά τον ρεαλιστή ‘κατοικείται’ –ή μπορεί να ‘κατοικείται’– από μη παρατηρήσιμες οντότητες και περιλαμβάνει μη παρατηρήσιμες διαδικασίες. Στη συνέχεια θα ασχοληθούμε με το βασικότερο επιχείρημα σύμφωνα με τον Devitt για την αποδοχή των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων: τον εξηγητικό τους ρόλο. Η φύση του επιχειρήματος είναι απαγωγική. Δεν ταυτίζεται όμως με τα δημοφιλή απαγωγικά επιχειρήματα υπεράσπισης του ρεαλισμού – αν και αυτό τον υπερασπίζεται με τον δικό του τρόπο– που θα μας απασχολήσουν παρακάτω.

3.2.1. Ο εξηγητικός ρόλος των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων

Ο επιστημονικός ρεαλισμός έχει σε πολύ μεγάλο βαθμό να κάνει με τις μη παρατηρήσιμες οντότητες. Η υπεράσπιση αφενός των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων και διαδικασιών που θέτουν οι επιστημονικές θεωρίες μας και η άρνηση αφετέρου της σκεπτικιστικής στάσης απέναντί τους αποτελούν κύριο μέλημά του. Οι θεωρητικοί ισχυρισμοί και οι μη παρατηρήσιμες οντότητες λοιπόν συλλαμβάνοντας με ορθό τρόπο τα γεγονότα, τα εξηγούν. Ο εξηγητικός τους ρόλος συγκροτεί ένα σημαντικό επιχείρημα για την παρουσία τους και την αποδοχή τους στις επιστημονικές θεωρίες. Οι εξηγήσεις δε που συγκροτούνται μέσω των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων, διαφοροποιούνται από

τις αναγωγιστικές αφού δεν καθιστούν τα μη παρατηρήσιμα στοιχεία αναγωγή στο παρατηρησιακό λεξιλόγιο. Η υιοθέτηση της αντιστοιχιστικής θεωρίας της αλήθειας –ή κάποιας άλλης ενδεχομένως θεωρίας αλήθειας– δεν έχει να κάνει με τον εξηγητικό ρόλο των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων διότι αυτός αφορά το σημασιολογικό επίπεδο, ενώ μια θεωρία αλήθειας, σχετιζόμενη με την επαλήθευση των θεωρητικών και μη ισχυρισμών, αφορά το γνωσιολογικό επίπεδο. Όπως λέει ο McMullin, «ο ρεαλισμός αποτελεί κατά πρώτον λόγο αξίωση για την ύπαρξη παρά για την αλήθεια».³⁵⁰

Ο Devitt περιγράφει την κατάσταση ως εξής.³⁵¹ Παρατηρούμε λέει διάφορα φαινόμενα P και αναζητούμε μια αιτιακή εξήγηση. Υποθέτουμε την ύπαρξη μιας μη παρατηρήσιμης οντότητας U προκειμένου να εξηγήσουμε τα P. Συχνά η εξήγηση που μας παρέχεται από την U δεν είναι απλώς καλή, αλλά η καλύτερη που διαθέτουμε. Ως εκ τούτου, η U πιθανότατα υπάρχει πραγματικά. Αν μπορούμε δε χρησιμοποιώντας την υπόθεση της ύπαρξης της U να παράγουμε ενεργά τα P και όχι απλώς να τα παρατηρήσουμε παθητικά, τότε η εξήγηση που μας παρέχει για τα φαινόμενα είναι ιδιαιτέρως καλή. Με άλλα λόγια, αν υποθέτοντας την ύπαρξη της U, κάνουμε το A το οποίο θα αναγκάσει την U με τη σειρά της να κάνει κάτι που θα μας οδηγήσει στα P, τότε έχουμε ισχυρές ενδείξεις για την ύπαρξη της U. Το επιχείρημα είναι ουσιαστικά απαγωγικό: το γεγονός ότι καταφέραμε όντως να χειριστούμε την U αποτελεί κατά τον Devitt την καλύτερη εξήγηση των P, και επομένως η U υπάρχει πραγματικά. Ο Hacking υποστηρίζει ότι είμαστε απολύτως πεπεισμένοι για την πραγματικότητα μιας μη παρατηρήσιμης οντότητας όπως το ηλεκτρόνιο «όταν αρχίζουμε τακτικά να κατασκευάζουμε –και αρκετά συχνά τα καταφέρνουμε– νέα είδη συσκευών που χρησιμοποιούν διάφορες επαρκώς κατανοητές αιτιακές ιδιότητες των ηλεκτρονίων για να παρέμβουν σε άλλα περισσότερο υποθετικά τμήματα της φύσης».³⁵²

Εάν λοιπόν αντιμετωπίζουμε κυριολεκτικά τις αιτιακές εξηγήσεις που μας παρέχουν κάποιες μη παρατηρήσιμες οντότητες τότε αυτές υπάρχουν για εμάς, διότι οι εξηγήσεις ισχύουν ή απορρίπτονται μαζί τους.

³⁴⁹ Psillos (1999), σελ. 14.

³⁵⁰ McMullin (1991) σελ. 101.

³⁵¹ Devitt (1997) σελ. 112-3.

³⁵² Hacking (1983) σελ. 265.

3.3. Η γνωσιακή θέση του επιστημονικού ρεαλισμού

Μέχρι στιγμής είδαμε ότι οι δύο πρώτες συνιστώσες του επιστημονικού ρεαλισμού υπερασπίζονται την κυριολεκτική ανάγνωση των επιστημονικών θεωριών οι οποίες αφορούν μια πραγματικότητα ανεξάρτητη από τον νου μας και τις γνωστικές μας μεθόδους και ικανότητες. Ο γνωσιακός ή γνωσιολογικός ρεαλισμός της τρίτης θέσης επεκτείνει τη ρεαλιστική στάση πέραν των αξιώσεων ανεξαρτησίας και ύπαρξης, δηλώνοντας επιπλέον ότι δικαιολογούμαστε να αναγνωρίζουμε τις προτάσεις της επιστήμης ως αληθείς ή προσεγγιστικά αληθείς στον κόσμο. Οι αντίπαλοι του ρεαλισμού αρνούνται φυσικά ότι είμαστε σε θέση να γνωρίζουμε κάτι τέτοιο. Υποστηρίζουν δηλαδή πως δεν μπορούμε να είμαστε βέβαιοι για το εάν οι ισχυρισμοί των επιστημονικών θεωριών μας για τον κόσμο είναι αληθείς ή έστω προσεγγιστικά αληθείς. Κατά συνέπεια, υιοθετούν μια αγνωστικιστική ή σκεπτικιστική στάση απέναντι στις προτάσεις της επιστήμης.

Σύμφωνα με τον Kukla μπορούμε να διακρίνουμε τέσσερις βαθμίδες γνωσιακού ρεαλισμού.³⁵³ Η πρώτη –και ισχυρότερη– υποστηρίζει πως *γνωρίζουμε* ότι οι καλύτερες σύγχρονες επιστημονικές θεωρίες μας *είναι* αληθείς. Είναι προφανές ότι η εκδοχή αυτή υπόκειται στην αυστηρή κριτική της απαισιόδοξης επαγωγής. Αν οι παρελθούσες θεωρίες αποδείχθηκαν ψευδείς και αντικαταστάθηκαν από νεώτερες, πώς μπορούμε να είμαστε βέβαιοι ότι δεν θα συμβεί το ίδιο και με τις τωρινές μας θεωρίες; Ο ισχυρισμός πως γνωρίζουμε μέσω αυτών την αλήθεια είναι υπερβολικά αισιόδοξος τη στιγμή που η απαισιόδοξη επαγωγή υποδεικνύει ότι οι υπάρχουσες θεωρίες πιθανότατα θα αποδειχθούν στο μέλλον ψευδείς και θα αντικατασταθούν από άλλες θεωρίες. Το εν λόγω επιχείρημα ανάγκασε πολλούς γνωσιακούς ρεαλιστές να υιοθετήσουν μια δεύτερη, λιγότερο ισχυρή, εκδοχή: *ό,τι γνωρίζουμε* είναι πως οι καλύτερες σύγχρονες θεωρίες μας *προσεγγίζουν* την αλήθεια. Και τούτη η διαβάθμιση όμως, δεν αντιμετωπίζει αποτελεσματικά την απαισιόδοξη επαγωγή εάν οι θεωρητικοί όροι των προσεγγιστικά αληθών θεωριών αναφέρονται σε πραγματικές οντότητες. Διότι, σύμφωνα με τους επικριτές της, ακόμα και οι οντολογίες των καλύτερων θεωριών του παρελθόντος έχουν ανατραπεί μέσα στους αιώνες από τις θεωρίες που τις αντικατέστησαν. Τα παραδείγματα που δίνονται σχεδόν κάθε φορά είναι το φλογιστόν, ο αιθέρας, ο απόλυτος χώρος κ.τ.λ.

³⁵³ Kukla (1998), σελ. 10-1.

Επιπλέον, αν και ασθενέστερη, η δεύτερη εκδοχή για να γίνει αποδεκτή οφείλει να ορίσει καθαρά την έννοια της προσεγγιστικής αλήθειας· οφειλή που δεν είναι καθόλου απλή.

Η τρίτη διαβάθμιση του γνωσιακού ρεαλισμού διατείνεται ότι δικαιολογούμαστε ευλόγως να πιστεύουμε πως οι καλύτερες σύγχρονες θεωρίες μας είναι αληθείς ή προσεγγιστικά αληθείς. Τούτη η εκδοχή, υποκαθιστώντας τη γνώση με την ορθολογικά δικαιολογημένη πεποίθηση (*rationaly warranted belief*), είναι πιο ανθεκτική στην επίθεση της απαισιόδοξης επαγωγής. Κι αυτό διότι, όπως γράφει ο Kukla, «δεν είναι καθόλου προφανές πως δεν υπάρχει μια χρονική αλληλουχία θεωρητικών πεποιθήσεων, οι αλλαγές μεταξύ των οποίων ωθούνται από εμπειρικές ανακαλύψεις και εννοιολογικές καινοτομίες, τέτοια ώστε (1) κάθε μέλος της αλληλουχίας είναι ψευδές, και ωστόσο (2) η πίστη σε κάθε ένα από αυτά δικαιολογούνταν ορθολογικά στην εποχή του».³⁵⁴ Όσον αφορά την κατηγορία περί ασάφειας στην έννοια της προσεγγιστικής αλήθειας ο Kukla λέει χαρακτηριστικά πως «σίγουρα δικαιούμαστε κάποιες φορές να κάνουμε ό,τι καλύτερο μπορούμε με ασαφείς έννοιες».³⁵⁵ Τέλος, η τέταρτη εκδοχή –η οποία προτιμάται κι από τον Kukla– είναι ακόμα ασθενέστερη. Υποστηρίζει απλώς ότι είναι λογικά και νομολογικά *δυνατό* να φτάσουμε σε μια κατάσταση όπου η πίστη σε μια θεωρία θα είναι δικαιολογημένη.³⁵⁶ Μια τόσο ασθενής εκδοχή γνωσιακού ρεαλισμού, όπως επισημαίνει ο Ψύλλος, «δεν μπορεί να επιτρέψει εγγυημένη ή δικαιολογημένη πεποίθηση στην ύπαρξη των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων που τίθενται από την επιστήμη (και στους ισχυρισμούς που γίνονται σχετικά με αυτές)» και επομένως «δεν μπορεί να αποτελεί χαρακτηριστικό γνώρισμα του επιστημονικού ρεαλισμού».³⁵⁷

Συνεπώς, η υιοθέτηση μιας ισχυρότερης εκδοχής γνωσιακού ρεαλισμού επιβάλλεται, ώστε η εμπιστοσύνη μας στους θεωρητικούς ισχυρισμούς και στην ύπαρξη των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων της επιστήμης να είναι δικαιολογημένη.³⁵⁸ Η

³⁵⁴ Kukla (1998) σελ. 10.

³⁵⁵ Kukla (1998) σελ. 11.

³⁵⁶ Ο Jarrett Leplin την ονομάζει «ελάχιστο γνωσιακό ρεαλισμό» (*minimal epistemic realism*) και σημειώνει πως είναι συμβατή με την ιδέα ότι η απόδοση αλήθειας στις θεωρίες μπορεί να μην είναι επιτεύξιμη. [Leplin (1997) σελ. 102]

³⁵⁷ Ψύλλος (2008) σελ. 48-9.

³⁵⁸ Devitt (2005) σελ. 770· αντί του ισχυρισμού ότι τα περισσότερα από τα μη παρατηρήσιμα μεγέθη της επιστήμης υπάρχουν, έχουμε τον ισχυρισμό ότι η πεποίθηση πως υπάρχουν είναι δικαιολογημένη. Για αυτό το λόγο ο Devitt θεωρεί ότι οι γνωσιακοί ορισμοί σχετίζονται γενικώς παρασιτικά των μεταφυσικών. Όπως έχουμε ήδη αναφέρει, για τον Devitt ο εξηγητικός ρόλος των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων αποτελεί το καλύτερο επιχείρημα για την αποδοχή τους και δικαιολογεί την πίστη μας σε αυτές.

‘γνωσιακή αισιοδοξία’ λοιπόν της τρίτης συνιστώσας του επιστημονικού ρεαλισμού χρησιμοποιήθηκε από τους φιλοσόφους για να εξηγήσουν την επιτυχία της επιστήμης και να επιχειρηματολογήσουν αποτελεσματικότερα υπέρ του ρεαλισμού.

3.3.1. Το επιχείρημα «δεν είναι θαύμα»

Στον Grover Maxwell και στον J.J.C. Smart συναντούμε αρχικές διατυπώσεις του δημοφιλέστερου επιχειρήματος υπέρ του ρεαλισμού που στηρίζεται στην επιτυχία της επιστήμης. Συγκεκριμένα ο Maxwell αναφέρει:

«Η μόνη λογική εξήγηση για την επιτυχία των θεωριών της οποίας είμαι γνώστης είναι ότι οι καλά επικυρωμένες θεωρίες αποτελούν συνδυασμούς καλά επικυρωμένων, γνήσιων δηλωτικών προτάσεων και του ότι οι οντότητες στις οποίες αναφέρονται, κατά πάσα πιθανότητα, υπάρχουν».³⁵⁹

Μια άλλη εκδοχή του επιχειρήματος δίνεται από τον Smart με αφορμή την κριτική που ασκεί στον φαινομεναλισμό για τα υποατομικά αντικείμενα –όπως είναι τα ηλεκτρόνια για παράδειγμα. Θεωρεί ότι η επιτυχία της επιστήμης να προβλέπει, θα πρέπει να ειπωθεί ως *κοσμική σύμπτωση* (cosmic coincidence) εάν κάποιος ασπάζεται την φαινομεναλιστική άποψη· την άποψη δηλαδή ότι οι θεωρητικοί όροι αποτελούν απλώς βολικούς τρόπους για να μιλήσουμε περί μακροσκοπικών αντικειμένων:

«Εάν ο φαινομεναλιστής για τις θεωρητικές οντότητες έχει δίκιο, θα πρέπει να πιστέψουμε σε μια *κοσμική σύμπτωση*. Δηλαδή, αν έτσι έχουν τα πράγματα, οι δηλωτικές προτάσεις για τα ηλεκτρόνια, κ.τ.λ., διαθέτουν μόνο εργαλειακή αξία: μας καθιστούν απλώς ικανούς να προβλέπουμε φαινόμενα στο επίπεδο των γαλβανομέτρων και των θαλάμων ιονισμού. Δεν κάνουν τίποτα για να αφαιρέσουν τον *απροσδόκητο χαρακτήρα* αυτών των φαινομένων. ... Από την άλλη πλευρά, εάν ερμηνεύσουμε μια θεωρία με ρεαλιστικό τρόπο, τότε δεν έχουμε ανάγκη μια τέτοια κοσμική σύμπτωση: δεν μας εκπλήσσει ότι τα γαλβανόμετρα και οι θάλαμοι ιονισμού συμπεριφέρονται με τον τρόπο που συμπεριφέρονται, διότι εάν υπάρχουν πράγματι ηλεκτρόνια, κ.τ.λ., αυτό ακριβώς θα έπρεπε να αναμένουμε. Πολλά απροσδόκητα γεγονότα δεν δείχνουν πλέον απροσδόκητα».³⁶⁰

Η ‘κοσμική σύμπτωση’ του Smart μετονομάζεται σε ‘θαύμα’ στον Putnam, ο οποίος, υπερασπιζόμενος τον επιστημονικό ρεαλισμό, διατυπώνει τη δημοφιλέστερη εκδοχή του επιχειρήματος «δεν είναι θαύμα» (‘no miracle’ argument)³⁶¹:

³⁵⁹ Maxwell (1962) σελ. 18.

³⁶⁰ Smart (1963), σελ. 39.

³⁶¹ Putnam (1975) σελ. 73, Putnam (1978) σελ. 18-9.

«Το θετικό επιχείρημα για το ρεαλισμό είναι ότι αποτελεί τη μόνη φιλοσοφία που δεν καθιστά την επιτυχία της επιστήμης θαύμα. Το γεγονός ότι οι όροι των ώριμων επιστημονικών θεωριών κατά κανόνα έχουν αναφορά (η διατύπωση αυτή οφείλεται στον Richard Boyd), ότι οι θεωρίες που γίνονται αποδεκτές από μια ώριμη επιστήμη είναι κατά κανόνα προσεγγιστικά αληθείς, ότι ο ίδιος όρος μπορεί να αναφέρεται στο ίδιο πράγμα ακόμα κι όταν απαντάται σε διαφορετικές θεωρίες –τούτες οι δηλωτικές προτάσεις δεν εκτιμώνται από τον επιστημονικό ρεαλιστή ως αναγκαίες αλήθειες αλλά ως μέρος της μόνης επιστημονικής εξήγησης για την επιτυχία της επιστήμης και επομένως ως μέρος κάθε επαρκούς επιστημονικής περιγραφής της επιστήμης και των σχέσεων της με τα αντικείμενά της».³⁶²

Ο van Fraassen αντέδρασε στους ισχυρισμούς των παραπάνω φιλοσόφων βάζοντας στο στόχαστρο την επιλογή να συντάξουν τα επιχειρήματά τους με την απαγωγική-ενισχυτική μέθοδο (ή συναγωγή στην καλύτερη εξήγηση), για την αξιοπιστία της οποίας οι αντιρεαλιστές, όπως σημειώνει, αμφιβάλλουν. Υποστήριξε επίσης ότι έστω κι αν παραμεριστούν οι αμφιβολίες για την απαγωγική-ενισχυτική μέθοδο «ο ρεαλιστής χρειάζεται κάποια επιπλέον προκείμενη για το επιχείρημά του».³⁶³ Τουτέστιν, θα πρέπει να πει περισσότερα για να πείσει τους αντιπάλους του ότι μπορούμε να συναγάγουμε την αλήθεια των θεωριών –και όχι κάτι άλλο όπως την εμπειρική τους επάρκεια– από την εξηγητική τους επιτυχία.

Ουσιαστικά ο van Fraassen αμφισβήτησε τη ‘γνωσιακή αισιοδοξία’ των ρεαλιστών εφόσον αυτή συμβαδίζει με την πεποίθηση ότι οι απαγωγικές-ενισχυτικές μέθοδοι που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες είναι αξιόπιστες και οδηγούν σε αληθείς ή προσεγγιστικά αληθείς θεωρίες για τις μη παρατηρήσιμες οντότητες και διαδικασίες.³⁶⁴ Αρνούμενος λοιπόν τη γνωσιολογική διάσταση του επιστημονικού ρεαλισμού, δηλώνει αγνωστικιστής ως προς την αλήθεια των θεωριών και συνηγορεί υπέρ ενός κατασκευαστικού εμπειρισμού (constructive empiricism), σύμφωνα με τον οποίο υποστηρίζεται ότι «η επιστήμη σκοπεύει να μας δώσει θεωρίες που είναι εμπειρικά επαρκείς και η αποδοχή μιας θεωρίας ενέχει ως πεποίθηση μόνον ότι αυτή είναι εμπειρικά επαρκής».³⁶⁵ Αρκετοί ρεαλιστές, και κυρίως ο Boyd, εκλέπυναν τις αρχικές

³⁶² Putnam (1975) σελ. 73.

³⁶³ Van Fraassen (1980) σελ. 21, ελληνική μετάφραση σελ. 33.

³⁶⁴ Psillos (1999) σελ. xx, Ψύλλος (2008) σελ. 38-9.

³⁶⁵ Van Fraassen (1980) σελ. 12, ελλ. μετ. σελ. 18.

διατυπώσεις του επιχειρήματος περί μη θαύματος για να αντιμετωπίσουν την πρόκληση του van Fraassen –και όχι μόνο.³⁶⁶

3.3.2. Η εξηγητική ή απαγωγική υπεράσπιση του ρεαλισμού³⁶⁷

Η πιο συστηματική απόπειρα απαγωγικής υπεράσπισης του ρεαλισμού –μιας εκλεπτυσμένης δηλαδή εκδοχής του επιχειρήματος «δεν είναι θαύμα»– συναντάται στο έργο του πολυγραφότατου Boyd.³⁶⁸ Ο Boyd προσπάθησε να δείξει ότι καλύτερη εξήγηση της εργαλειακής και προβλεπτικής επιτυχίας των ώριμων επιστημονικών θεωριών, συμπεριλαμβανομένων των πεποιθήσεων που αφορούν τους θεωρητικούς τους όρους, αποτελεί η προσεγγιστική τους αλήθεια. Ο κορμός του επιχειρήματός του, όπως αναδομείται και συνοψίζεται από τον Ψύλλο, περιλαμβάνει τα ακόλουθα:

«Το ότι οι μέθοδοι, με τις οποίες οι επιστήμονες βρίσκουν και ελέγχουν θεωρητικές προβλέψεις, είναι φορτισμένες με θεωρία, αποτελεί αδιαφιλονίκητο γεγονός. Οι επιστήμονες χρησιμοποιούν αποδεκτές θεωρίες υποβάθρου ώστε να διαμορφώσουν τις προσδοκίες τους, να επιλέξουν τις σχετικές μεθόδους για τον έλεγχο των θεωριών, να επινοήσουν πειραματικές διατάξεις, να βαθμονομήσουν όργανα, να αποτιμήσουν την πειραματική ένδειξη, να επιλέξουν μεταξύ ανταγωνιστικών θεωριών, να αξιολογήσουν νεοπροτεινόμενες υποθέσεις, κ.τ.λ. Όλες οι πλευρές της επιστημονικής μεθοδολογίας διαπνέονται και φορτίζονται βαθιά από τη θεωρία. Κατ' ουσίαν, η επιστημονική μεθοδολογία είναι σχεδόν ευθέως εξαρτώμενη από τις αποδεκτές θεωρίες υποβάθρου: τούτες οι θεωρίες είναι που ωθούν τους επιστήμονες να υιοθετήσουν, να προάγουν ή να τροποποιήσουν τις μεθόδους τους αλληλεπίδρασης με τον κόσμο και τις διαδικασίες που χρησιμοποιούν με σκοπό να πραγματοποιήσουν μετρήσεις και να ελέγξουν θεωρίες.

Τούτες οι φορτισμένες με θεωρία μέθοδοι οδηγούν σε ορθές προβλέψεις και πειραματική επιτυχία.

Πώς μπορούμε να το εξηγήσουμε;

Η καλύτερη εξήγηση της εργαλειακής αξιοπιστίας της επιστημονικής μεθοδολογίας είναι η εξής: οι θεωρητικές δηλώσεις που αποφαίνονται των συγκεκριμένων αιτιακών συνδέσεων ή

³⁶⁶ Παρόμοιες προκλήσεις υπήρξαν κι από τους Laudan (1981) και Fine (1996/1st ed. 1986).

³⁶⁷ Ο Devitt σημειώνει ότι έχουμε δύο δημοφιλή απαγωγικά επιχειρήματα υπεράσπισης του ρεαλισμού. Το ένα επιδιώκει να εξηγήσει την επιτυχία των θεωριών –και άρα κατ' επέκταση της επιστήμης– ενώ το άλλο επιδιώκει να εξηγήσει την επιτυχία της επιστημονικής μεθοδολογίας να παράγει επιτυχείς θεωρίες και αναπτύχθηκε κυρίως από τον Boyd. [Devitt (2005) σελ. 776]. Σε ό,τι ακολουθεί τις περισσότερες φορές θα αναφέρονται αδιακρίτως.

³⁶⁸ Boyd (1980), Boyd (1983), Boyd (1989), Boyd (1990).

μηχανισμών ένεκα των οποίων οι επιστημονικές μέθοδοι αποδίδουν επιτυχείς προβλέψεις είναι προσεγγιστικά αληθείς». ³⁶⁹

Ας ασχοληθούμε όμως αναλυτικότερα με κάποια σημεία του επιχειρήματος του Boyd που μόλις παρουσιάστηκε. ³⁷⁰ Στην επιστημονική πρακτική ένα από τα κριτήρια που εφαρμόζουμε κατά την επιλογή μιας θεωρίας είναι η συμφωνία της με τα παρατηρησιακά δεδομένα. Για να ξεχωρίσουμε όμως κάποια θεωρία από το σύνολο όσων πληρούν ή νομίζουμε ότι πληρούν τούτο το κριτήριο, τίθενται προφανώς σε λειτουργία κι άλλα κριτήρια. Ο Boyd εξετάζει, αναρωτώμενος που οφείλουν την αποτελεσματικότητά τους, τρεις –από τις πολλές όπως λέει– μεθοδολογικές αρχές στις οποίες θεωρητικοί παράγοντες επηρεάζουν την επιστημονική πρακτική μας. ³⁷¹

Η πρώτη αποτελεί κοινό τόπο όπως λέει και είναι η εξής: οι επιστήμονες αντιμετωπίζουν σοβαρά μόνο εκείνες τις *θεωρίες που μοιάζουν με τις υπάρχουσες* όσον αφορά τις οντολογικές τους δεσμεύσεις και τους νόμους που περιέχουν. Προτιμούν δηλαδή θεωρίες που έχουν να κάνουν με οικείες μη παρατηρήσιμες οντότητες και τις ιδιότητές τους ή τουλάχιστον με οντότητες και ιδιότητες που είναι παρόμοιες με ό,τι τους είναι οικείο. Το ίδιο ισχύει και για τους νόμους: προτιμούν να είναι σύμφωνοι ή τουλάχιστον συμβατοί με όσους έχουν ήδη υιοθετηθεί. Όπως λέει χαρακτηριστικά ο Boyd, «απορρίπτουμε απερίφραστα οποιαδήποτε προτεινόμενη θεωρία αντιφάσκει με τους νόμους που θεωρούμε καλά επικυρωμένους, εκτός εάν μια γνήσια κρίση βρίσκεται προ των πυλών –ακόμη και τότε όμως θα προτιμήσουμε αποφασιστικά νέες θεωρίες που διατηρούν τους παλιούς νόμους ως προσεγγίσεις». ³⁷² Εάν, επομένως, οι ήδη αποδεκτές θεωρίες είναι προσεγγιστικά αληθείς και παρέχουν μια ικανοποιητική εικόνα της ‘επίπλωσης του κόσμου’ και της λειτουργίας του, ακολουθώντας την εν λόγω αρχή καθιστούμε πολύ πιθανό οι θεωρίες που θα προτιμήσουμε να έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά.

Ο Boyd κάνει δύο παρατηρήσεις όσον αφορά την πρώτη μεθοδολογική αρχή. Η προτίμησή μας λέει για θεωρίες παρόμοιες θεωρητικά με τις υπάρχουσες σχετίζεται με το κριτήριο της ‘απλότητας’. Η επιθυμία μας για ‘απλούστερες’ θεωρίες αποτελεί επιθυμία

³⁶⁹ Psillos (1999) σελ. 78.

³⁷⁰ Παρόμοιες απόψεις με αυτές που υπάρχουν στο επιχείρημα συναντούμε και στους McMullin (1984), Glymour (1985), Musgrave (1985), Churchland (1985), Psillos (1999).

³⁷¹ Boyd (1980) σελ. 618-622.

³⁷² Boyd (1980) σελ. 618-9.

για θεωρίες που συνιστούν ‘απλές’ σχετικά τροποποιήσεις των θεωριών που ήδη υπάρχουν και όχι επιθυμία για θεωρίες απλές στη δομή τους και τα χαρακτηριστικά τους. Η ‘απλότητα’ επιδιώκεται στη μετάβαση και όχι κατ’ ανάγκη στη συγκρότηση των θεωριών. Ωστόσο, η ‘απλότητα’ διαθέτει και μια γνωσιολογική διάσταση, αφού επιδιώκοντάς την επιλέγουμε να διατηρούμε εκείνα τα χαρακτηριστικά των υπαρχουσών θεωριών που δείχνουν καλύτερα επικυρωμένα ενώ δεχόμαστε αλλαγές σε εκείνα που διαθέτουν λιγότερο ασφαλείς ενδείξεις. Κατά συνέπεια, η ‘απλότητα’ δεν αποτελεί ουδέτερη έννοια αλλά εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από την υπάρχουσα θεωρητική παράδοση.

Η δεύτερη παρατήρηση του Boyd –την οποία αποδίδει στον Putnam– είναι η εξής: κατά την πορεία της επιστημονικής έρευνας για κάποιο συγκεκριμένο θέμα, θεωρίες που αποτελούν μια ‘μικρή χούφτα’ βρίσκονται ‘στο πεδίο της μάχης’ *ταυτοχρόνως* οποιαδήποτε χρονική περίοδο. Η απαίτηση για ‘απλότητα’ διαμορφώνει τα κριτήρια σύμφωνα με τα οποία το ‘πεδίο μάχης’ περιορίζεται, προκειμένου να κάνουμε την επιλογή μας ανάμεσα στις αντίπαλες θεωρίες μέσω συνετούς παρατήρησης και πειραματισμού.

Η δεύτερη μεθοδολογική αρχή, η οποία είναι επίσης φορτισμένη με θεωρία, έχει να κάνει με την άσκηση *θεωρητικής κριτικής*, τροποποίησης ή επέκτασης των διαδικασιών μέτρησης και ανίχνευσης μη παρατηρήσιμων οντοτήτων και θεωρητικών μεγεθών. Αντλεί την αξιοπιστία της από το γεγονός ότι υιοθετούνται διαδικασίες μέτρησης και ανίχνευσης που προήλθαν από νόμιμες τροποποιήσεις αντίστοιχων διαδικασιών αποδεκτών θεωριών και άρα δεν θα έπρεπε να θεωρούνται γνωσιολογικά περισσότερο προβληματικές από αυτές. Η υποβολή μιας θεωρίας σε θεωρητική κριτική περιλαμβάνει, μεταξύ άλλων, την αναζήτηση –υπό το φως των καλύτερων διαθέσιμων θεωριών– εναλλακτικών μηχανισμών από αυτούς που η ίδια θέτει, την αντιπαράθεση των διαδικασιών της με άλλες γνωστές διαδικασίες ώστε να ελεγχθεί το ενδεχόμενο ‘παραφωνίας’ τους, την εξέταση μήπως η αληθοφάνεια της θεωρίας στηρίζεται σε θεωρητικούς παράγοντες οι οποίοι με τη σειρά τους στηρίζονται σε αμφισβητούμενες θεωρίες, κ.τ.λ.

Η τρίτη μεθοδολογική αρχή αφορά το θεμελιώδη ρόλο του *πειραματικού σχεδιασμού* στην αξιολόγηση των παρατηρησιακών προβλέψεων μιας αληθοφανούς

θεωρίας ως προσεγγιστικά αληθών. Εφόσον η θεωρία που πρόκειται να ελεγχθεί πειραματικά έχει υποβληθεί προηγουμένως σε εξαντλητική θεωρητική κριτική, διεξάγονται πειράματα υπό συνθήκες που υπέδειξε η θεωρητική κριτική ότι ίσως αποδείξουν τη θεωρία λανθασμένη ή γενικότερα την εκθέσουν. Η πραγματοποίηση, κατόπιν σχεδιασμού, πολλών αντιπροσωπευτικών πειραμάτων, εξασφαλίζει ότι οι θεωρίες που τελικά θα αποδεχτούμε αποτελούν πολύ καλά εργαλεία πρόβλεψης.

Ο Boyd υποστηρίζει ότι η μόνη ικανοποιητική εξήγηση της εργαλειακής αξιοπιστίας των παραπάνω μεθοδολογικών αρχών –της ικανότητάς τους όταν εφαρμόζονται στην πράξη να συνεισφέρουν στην παραγωγή γνώσης– είναι ότι οι θεωρίες οι οποίες τις στηρίζουν είναι προσεγγιστικά αληθείς και επίσης εργαλειακά αξιόπιστες –ικανές, με άλλα λόγια, να παρέχουν προσεγγιστικά αληθείς παρατηρησιακές προβλέψεις για τη συμπεριφορά παρατηρήσιμων φαινομένων. Η ρεαλιστική εξήγηση της αξιοπιστίας της επιστημονικής μεθοδολογίας έχει δύο σημαντικές συνέπειες. Πρώτον, «η επιστημονική έρευνα, όταν επιτυγχάνει, είναι *συσσωρευτική μέσω διαδοχικών (αλλά όχι αναγκαία συγκλινουσών, convergent) προσεγγίσεων στην αλήθεια*».³⁷³ Δεύτερον, «αυτή η συσσωρευτική ανάπτυξη είναι δυνατή διότι *υπάρχει μια διαλεκτική σχέση ανάμεσα στην τρέχουσα θεωρία και στη μεθοδολογία για τη βελτίωσή της*».³⁷⁴ Η επιστημονική μεθοδολογία εν γένει, ιδωμένη με τον τρόπο που περιγράφηκε, δηλαδή εξαρτώμενη από τη θεωρία, δεν έχει στατικό χαρακτήρα αλλά *διαλεκτικό*. Τουτέστιν, στηριζόμενη σε προσεγγιστικά αληθείς θεωρίες οδηγεί υπεύθυνα στη βελτίωση των παλιότερων θεωριών και βελτιώνοντας τη γνώση μας για τον κόσμο αναβαθμίζεται και η ίδια καθώς γίνεται ακόμα πιο αξιόπιστη ώστε να μας οδηγήσει προοδευτικά σε ακόμα πιο ακριβείς θεωρίες για τον κόσμο, και ούτω καθεξής.³⁷⁵ Στο πλαίσιο αυτό ο Boyd κάνει έναν ίσως τολμηρό ισχυρισμό για να πλήξει ένα βασικό εμπειριστικό επιχείρημα που διατείνεται ότι εμπειρικά ισοδύναμες θεωρίες είναι όσον αφορά τα τεκμήρια μη διακρίσιμες.³⁷⁶ Ο

³⁷³ Boyd (1989) σελ. 8, Boyd (1990) σελ. 222.

³⁷⁴ Boyd (1989) σελ. 8, Boyd (1990) σελ. 222.

³⁷⁵ Boyd (1983) σελ. 65. Ο Shapere (1982) έχει υποστηρίξει μια παρόμοια θέση: όπως λέει χαρακτηριστικά, «μπορούμε να πούμε ότι, στην επιστήμη, δεν μαθαίνουμε μόνο, μαθαίνουμε επίσης πώς να μαθαίνουμε: και μέρος αυτής της εκμάθησης συνιστά γνώση για το πώς να μιλάμε και να σκεφτόμαστε για τον κόσμο» [Shapere (1982) σελ. 13].

³⁷⁶ Το βασικό εμπειριστικό επιχείρημα κατά του επιστημονικού ρεαλισμού είναι εκείνο του *υποκαθορισμού των θεωριών από τις ενδείξεις* (underdetermination of theories by evidence ή απλώς underdetermination argument). Το επιχείρημα του υποκαθορισμού στηρίζεται στην αντίληψη ότι μπορούμε να έχουμε τουλάχιστον δύο εμπειρικά ισοδύναμες ανταγωνιστικές θεωρίες –δηλαδή ικανές να ενσωματώσουν το ίδιο

ισχυρισμός του διευρύνει την έννοια των τεκμηρίων επισημαίνοντας ότι μια θεωρία μπορεί να τεκμηριωθεί με δύο τρόπους: ‘άμεσα’ από τις πειραματικές ενδείξεις και ‘έμμεσα’ από τις θεωρητικές αρετές της. Όπως γράφει ο Boyd χαρακτηριστικά:

« ... εάν η ρεαλιστική και διαλεκτική σύλληψη της επιστημονικής μεθοδολογίας είναι ορθή, τότε θεωρήσεις περί της θεωρητικής ευλογοφάνειας μιας προτεινόμενης θεωρίας υπό το φως της *πραγματικής* (actual) (και προσεγγιστικά αληθούς) θεωρητικής παράδοσης αποτελούν θεωρήσεις με *ισχύ τεκμηρίων* (evidential): αποτελέσματα τέτοιων αποτιμήσεων αληθοφάνειας συνιστούν τεκμήρια υπέρ ή κατά προτεινόμενων θεωριών. ... Ως εκ τούτου, μια ‘ολική επιστήμη’ της οποίας η θεωρητική σύλληψη βρίσκεται εμφιατικά σε σύγκρουση με την αναγνωρισμένη θεωρητική παράδοση υπόκειται, για το λόγο αυτό, σε ‘έμμεση’, αλλά απολύτως υπαρκτή εκ πρώτης όψεως, διάγνωση σε σχέση με μια εμπειρικά ισοδύναμη ολική επιστήμη η οποία απηχεί την υπάρχουσα παράδοση. Η θέση της μη διακρισιμότητας όσον αφορά τα τεκμήρια είναι συνεπώς λανθασμένη και το βασικό εμπειριστικό αντιρεαλιστικό επιχείρημα πλήρως αντικρουόμενο». ³⁷⁷

Οι απόψεις του Boyd προκάλεσαν την κριτική του Fine –μεταξύ άλλων– τον οποίο ένα από αυτά που τον απασχόλησαν ήταν το πρόβλημα της ‘μικρής χούφτας’ όπως το ονόμασε. Θυμίζουμε πως ένα από τα χαρακτηριστικά των μεθοδολογικών αρχών που παρουσιάστηκαν παραπάνω είναι ότι μια ‘μικρή χούφτα’ από εναλλακτικές θεωρίες ανταγωνίζονται ταυτοχρόνως κάποια χρονική περίοδο στην πορεία της επιστημονικής έρευνας. Οι αντίπαλες θεωρίες μοιάζουν μάλιστα μεταξύ τους διότι διατηρούν τα καλά επικυρωμένα στοιχεία των παλαιότερων θεωριών και αποκλίνουν στα λιγότερο επικυρωμένα. Έτσι, η προσεγγιστική αλήθεια των παλαιότερων θεωριών καθιστά πολύ πιθανό οι νεότερες που θα προκύψουν από την αντιπαράθεση να είναι επίσης προσεγγιστικά αληθείς. Κατά τον Fine το πρόβλημα της ‘μικρής χούφτας’ εγείρει τρία

σύνολο τεκμηρίων και δυνατών παρατηρήσεων– οπότε, στην περίπτωση αυτή, οι δύο θεωρίες υποστηρίζονται εξίσου από όλες τις δυνατές παρατηρησιακές ενδείξεις και κατά συνέπεια καθίστανται και γνωσιακά ισοδύναμες. Η εξηγητική υπεράσπιση του ρεαλισμού είναι πολύ σημαντική για την αποδυνάμωση του προαναφερθέντος επιχειρήματος, καθώς στο πλαίσιο της δύναται να υποστηριχθεί ότι δύο εμπειρικά ισοδύναμες ανταγωνιστικές θεωρίες μπορούν να διακριθούν από τις εξηγητικές τους αρετές: αρετές που οφείλονται σε μεγάλο βαθμό στη ‘θεωρητική’ γνώση, δηλαδή τη γνώση των μη παρατηρήσιμων οντοτήτων και των θεωρητικών όρων εν γένει. [Ψύλλος (2008) σελ. 53, Devitt (2005) σελ. 777-8]

Το επιχείρημα του υποκαθορισμού αποτελεί έκφραση του μεταφυσικού σκεπτικισμού. Όπως αναφέρει ο Glymour, «ο μεταφυσικός σκεπτικισμός παρουσιάζεται κάθε φορά που φαίνεται να υπάρχουν δύο ή περισσότεροι δυνατοί τρόποι συγκρότησης του κόσμου, και όλα τα δυνατά τεκμήρια δεν θα ήταν αρκετά για να προσδιοριστεί με ποιον από αυτούς τους τρόπους είναι πραγματικά συγκροτημένος ο κόσμος» [Glymour (1992) σελ. 142 της ελλ. μετ.].

ερωτήματα³⁷⁸: (1) γιατί μόνο μια μικρή χούφτα από τον (θεωρητικά) άπειρο αριθμό δυνατοτήτων; (2) γιατί υπάρχει η συντηρητική οικογενειακή ομοιότητα μεταξύ των μελών της χούφτας; και (3) γιατί τούτη η στρατηγική περιορισμού των επιλογών είναι τόσο αποτελεσματική;

Για το πρώτο ερώτημα θα λέγαμε ότι ο Fine παραβλέπει το ‘ταυτοχρόνως’ που βάζει ο Boyd. Μπορούμε να έχουμε για κάποια χρονική περίοδο *ταυτοχρόνως* μια ‘μικρή χούφτα’ από θεωρίες που ανταγωνίζονται σε κάποιο θέμα ή πρόβλημα. Αν δεν ξεχωρίσει σύντομα κάποια από τις προτεινόμενες θεωρίες επιλύοντας με ικανοποιητικό τρόπο το θέμα με το οποίο καταπιάνονταν όλες, η ‘μικρή χούφτα’, μέσα σε ένα εκτεταμένο χρονικό διάστημα, μπορεί να γίνει αθροιστικά ιδιαίτερος μεγάλη. Κι αυτό είναι κάτι που ένας ρεαλιστής προφανώς το αποδέχεται αφού γνωρίζει ότι αναπόφευκτα κάποιες θεωρίες θα εγκαταλειφθούν και νέες θα προταθούν έως ότου επιτευχθεί ο στόχος. Όσον αφορά το δεύτερο ερώτημα, θα πρέπει να ξεκαθαριστεί ότι δεν είναι ο ρεαλιστής αυτός που επιλέγει τα μέλη της ‘μικρής χούφτας’ να μοιάζουν μεταξύ τους και όλα, αν είναι δυνατόν, να μοιάζουν με τις υπάρχουσες αποδεκτές θεωρίες. Δεν προτείνει ο ρεαλιστής επιστημονικές θεωρίες αλλά ο επιστήμονας. Ο ρεαλιστής απλώς επισημαίνει ότι οι επιστήμονες ακολουθούν την εν λόγω μεθοδολογική αρχή και εξηγεί την επιτυχία της από το γεγονός ότι οι υπάρχουσες θεωρίες στις οποίες στηρίζονται οι προτεινόμενες είναι προσεγγιστικά αληθείς. Το να μην στηρίζονται οι επιστήμονες στα καλά επικυρωμένα χαρακτηριστικά και στους νόμους των θεωριών που διαθέτουν για να εξηγήσουν νέα φαινόμενα ή να λύσουν προβλήματα θα ήταν παράλογο.³⁷⁹ Τι θα έκαναν στην αντίθετη περίπτωση; Θα γύριζαν την πλάτη στα αποτελέσματα μιας επιστημονικής έρευνας αιώνων και θα αναζητούσαν λύσεις αρχίζοντας από το μηδέν; Τέλος, σχετικά με το τρίτο ερώτημα –γιατί η στρατηγική που ακολουθείται είναι αποτελεσματική– ο ρεαλιστής απαντά πως είναι αποτελεσματική διότι οι υπάρχουσες θεωρίες είναι προσεγγιστικά αληθείς. Ο Fine επιμένει υποστηρίζοντας ότι ο ρεαλιστής θα πρέπει «να εξηγήσει την *περιστασιακή επιτυχία* μιας στρατηγικής που *συνήθως αποτυγχάνει*».³⁸⁰ Η απάντηση του ρεαλιστή και πάλι μπορεί να είναι ότι οι συχνές αποτυχίες –το αν είναι βέβαια συχνές ή

³⁷⁷ Boyd (1983) σελ. 67.

³⁷⁸ Fine (1996) σελ. 117.

³⁷⁹ Κριτήριο ορθολογικότητας στη συγκεκριμένη περίπτωση είναι η συμβατότητα των νέων πεποιθήσεων με τα καλώς επικυρωμένα χαρακτηριστικά των υπαρχουσών θεωριών.

όχι είναι σχετικό— οφείλονται στο ότι οι θεωρίες μας στο σύνολό τους είναι προσεγγιστικά αληθείς και όχι αληθείς. Το ποσοστό των χαρακτηριστικών μιας θεωρίας που διατηρείται στην επόμενη μπορεί να θεωρηθεί ανάλογο του βαθμού προσέγγισης της θεωρίας στην αλήθεια. Ως εκ τούτου, δεν διατηρήθηκαν χαρακτηριστικά της αριστοτελικής φυσικής διότι ο βαθμός προσέγγισής της στην αλήθεια ήταν πάρα πολύ μικρός. Ωστόσο, όσο βελτιώνεται η προσεγγιστική αλήθεια των θεωριών μας τόσο περισσότερα χαρακτηριστικά αυτών διατηρούνται και τόσο μειώνεται η συχνότητα των αποτυχιών. Επομένως η ‘περιστασιακή επιτυχία’ και η ‘συχνή αποτυχία’ του παρελθόντος μετατράπηκαν κατά πως φαίνεται από τη ραγδαία ανάπτυξη των επιστημών στον 20^ο αιώνα σε ‘συχνή επιτυχία’ και ‘περιστασιακή αποτυχία’. Οι θεωρίες μας είναι πλέον ωριμότερες, γεγονός αναμενόμενο λόγω της συστηματικής και εντατικής έρευνας πολλών επιστημόνων που αξιολογούν, τροποποιούν, ελέγχουν και ξαναελέγχουν τα επικυρωμένα και μη επικυρωμένα χαρακτηριστικά των θεωριών που έχουν αποδεχθεί, ώστε να προσεγγίσουν με αυτόν τον τρόπο ακόμα περισσότερο την αλήθεια και να μειώσουν ακόμα περισσότερο τις αποτυχίες τους.

3.3.3. Ρεαλισμός και πρόοδος

Ένα ακόμα στοιχείο που αμφισβητεί ο Fine σε σχέση με τον ρεαλισμό είναι το κατά πόσο υπήρξε πάντοτε συντελεστής προόδου στην ανάπτυξη της επιστήμης.³⁸¹ Αναφέρεται, λοιπόν, στις δύο σημαντικότερες φυσικές θεωρίες του 20^{ου} αιώνα, τη σχετικότητα και την κβαντική θεωρία, για να δείξει πως αποτελούν ζωντανή απόδειξη της άρνησης του ισχυρισμού ότι η ρεαλιστική άποψη για την επιστήμη είναι η μόνη που εξηγεί την πρόοδο της. Τα αποσπάσματα στα οποία περιγράφει τι πρόκειται να υποστηρίξει είναι τα ακόλουθα:

«Στις επόμενες δύο ενότητες, θα προσπαθήσω να δείξω ... ότι ο ρεαλισμός δεν υπήρξε πάντοτε συντελεστής προόδου στην ανάπτυξη της επιστήμης ... ».³⁸²

Στην αρχή της πρώτης από τις δύο ενότητες στις οποίες αναφέρεται –με επικεφαλίδα ‘Ρεαλισμός και Πρόοδος’– γράφει:

«Εάν εξετάσουμε τους δύο γίγαντες του εικοστού αιώνα μεταξύ των φυσικών θεωριών, τη σχετικότητα και την κβαντική θεωρία, βρίσκουμε μια ζωντανή απόδειξη άρνησης του

³⁸⁰ Fine (1996) σελ. 119.

³⁸¹ Fine (1996) σελ. 122-6.

³⁸² Fine (1996) σελ. 122.

ισχυρισμού του ρεαλιστή ότι μόνο η άποψή του για την επιστήμη εξηγεί την πρόοδο της...».³⁸³

Ήδη από τα αποσπάσματα φαίνεται πως ο Fine ταυτίζει δύο διαφορετικά θέματα: το ένα εξ αυτών αφορά τους επιστήμονες και το άλλο τις θεωρίες. Η εξέταση του εάν η ρεαλιστική στάση εκ μέρους των επιστημόνων υπήρξε πάντοτε παράγοντας προόδου στην ανάπτυξη της επιστήμης μεταθέτει την προσοχή από τις θεωρίες στα πρόσωπα που τις διατύπωσαν. Ο ρεαλιστικός ισχυρισμός όμως περί εξήγησης της προόδου της επιστήμης σχετίζεται με τις θεωρίες αυτές καθαυτές και δεν αντικρούεται έστω κι αν ο Fine έχει δίκιο για το προηγούμενο θέμα. Επομένως, η επιχειρηματολογία του Fine έχοντας επίκεντρό της τους επιστήμονες και τις φιλοσοφικές τους πεποιθήσεις και όχι τις θεωρίες, δεν πλήττει τον ρεαλιστικό ισχυρισμό. Δημιουργείται ίσως το ερώτημα μήπως πλήττεται η κατά Boyd εκδοχή του απαγωγικού επιχειρήματος που στηρίζεται στην επιστημονική μεθοδολογία. Θεωρούμε ότι ούτε σε αυτήν την περίπτωση δημιουργείται πρόβλημα, διότι οι μεθοδολογικές αρχές που ξεχωρίζει ο Boyd είναι γενικές, δεν εξαντλούν το σύνολο των μεθοδολογικών αρχών και αφορούν όλους τους επιστήμονες είτε χαρακτηρίζονται από ρεαλιστική στάση όταν προτείνουν ή θεμελιώνουν θεωρίες είτε όχι. Ο ρεαλισμός υπεισέρχεται για να εξηγηθεί η επιτυχία της επιστημονικής μεθοδολογίας να παράγει επιτυχείς θεωρίες, δεν βρίσκεται εντός της μεθοδολογίας, δεν αποτελεί για το επιχείρημα και ο ίδιος μεθοδολογική αρχή: η επιτυχία αποδίδεται στο ότι οι υπάρχουσες θεωρίες με τις οποίες συνδιαλέγεται και από τις οποίες φορτίζεται η επιστημονική μεθοδολογία είναι προσεγγιστικά αληθείς. Παρόλα αυτά θα προσπαθήσω να δείξω στη συνέχεια ότι ούτε και στην περίπτωση των επιστημόνων ο Fine είναι αρκετά πειστικός, διότι δεν ήταν η ‘μη ρεαλιστική’ στάση τους που συνετέλεσε στην ανάπτυξη της επιστήμης αλλά η *μη κλασική*.

Για τη σχετικότητα, ο Fine υποστηρίζει ότι η εργαλειοκρατική-θετικιστική στάση που υιοθέτησε ο Einstein κατά την ανάπτυξη της ειδικής και γενικής θεωρίας της σχετικότητας έπαιξε καθοριστικό ρόλο στη διατύπωσή τους, η οποία ίσως να μην ήταν καν εφικτή στην απουσία μιας τέτοιας στάσης. Το γεγονός ότι αργότερα ο Einstein ενστερνίστηκε τον ρεαλισμό για το ‘τελικό προϊόν’ των προσπαθειών του δεν ακυρώνει το ότι η ‘μη ρεαλιστική’ στάση του ήταν αυτή που υπήρξε σημαντική κατά την ανάπτυξη

³⁸³ Fine (1996) σελ. 122.

των εν λόγω θεωριών. Σχετικά με την κβαντική θεωρία, ο Fine ισχυρίζεται ότι οι δημιουργοί της, άλλοι πρόθυμα και άλλοι απρόθυμα, απέφυγαν κατά τη διατύπωσή της οποιαδήποτε αναφορά σε κάποια υποκείμενη πραγματικότητα. Καθώς επίσης και ότι, κάποιοι από αυτούς –όπως ο Bohr και οι συν αυτό, Sommerfeld, Heisenberg, Pauli και Born– πίστευαν πως, εάν ο ‘ρεαλισμός’ του Einstein κέρδιζε έδαφος, θα εμπόδιζε την πρόοδο της επιστήμης και θα οδηγούσε σε αδιέξοδο τους νέους λαμπρούς επιστήμονες. Η μεγάλη σημασία της ‘μη ρεαλιστικής’ στάσης τους για την ανάπτυξη και την πρακτικώς τεράστια επιτυχία της κβαντικής θεωρίας, κατά τον Fine, είναι αδιαμφισβήτητη.

Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να δείξουμε, χρησιμοποιώντας το ιστορικό παράδειγμα της θεμελίωσης της κβαντικής θεωρίας, ότι ο Fine δεν έχει δίκιο όταν υποστηρίζει ότι η ‘μη ρεαλιστική’ στάση των επιστημόνων συνετέλεσε στην ανάπτυξη της θεωρίας. Θα υποστηρίξουμε ότι η στάση των θεμελιωτών της κβαντικής θεωρίας όταν έκαναν τις ανακαλύψεις τους δεν ήταν ‘μη ρεαλιστική’, παρά μόνο μη κλασική. Όπως, αντιστοίχως, η στάση των θεμελιωτών της ‘κλασικής’³⁸⁴ θεωρίας, τον 17^ο αιώνα, δεν ήταν ‘μη ρεαλιστική’ όταν υποστήριζαν παραδείγματος χάριν ότι η γη κινείται –αφού πράγματι κινείται!– αλλά μη αριστοτελική. Θα πρέπει όμως προηγουμένως να γίνει η εξής γενική παρατήρηση. Η ρεαλιστική, η θετικιστική ή η όποια φιλοσοφική στάση απέναντι στην επιστήμη, έχει να κάνει με το πώς βλέπουμε τις ώριμες και επιτυχείς επιστημονικές θεωρίες μας. Αν τις αντιμετωπίζουμε δηλαδή κυριολεκτικά ή όχι και αν τις θεωρούμε προσεγγιστικά αληθείς περιγραφές του κόσμου ή απλώς χρήσιμα εφευρήματα ή εργαλεία με μόνο απώτερο σκοπό τις επιτυχείς προβλέψεις. Συνεπώς, αποτελεί μια στάση που αφορά κατ’ εξοχήν το ‘τελικό προϊόν’ και όχι τόσο τη μεθοδολογία που ακολουθήθηκε για να οδηγηθούν οι επιστήμονες σε αυτό. Οι βασικές μεθοδολογικές αρχές που ακολουθούνται κάθε φορά είναι λίγο πολύ οι ίδιες –και χαρακτηρίζονται από μια διαλεκτική σχέση με την τρέχουσα θεωρία όπως τονίζει ο Boyd– είτε ο επιστήμονας είναι εργαλειοκράτης είτε ρεαλιστής είτε κάτι άλλο. Ο τρόπος με τον οποίο αντιλαμβάνονται το τελικό αποτέλεσμα των προσπαθειών τους είναι αυτός που αλλάζει.

³⁸⁴ Θυμίζουμε ότι ο όρος ‘κλασική’, αν και αναχρονιστικός όταν αναφέρεται στη φυσική του 17^{ου} αιώνα, τον χρησιμοποιούμε για να χαρακτηρίσουμε το σύνολο της φυσικής από την εποχή του Γαλιλαίου έως την επιστημονική επανάσταση του 20^{ου} αιώνα.

Οι φυσικοί επιστήμονες ανέκαθεν έκαναν ανακαλύψεις και έλεγχαν τις θεωρίες τους με μεθόδους σαν αυτές που επιχείρησε να περιγράψει συνοπτικά, χωρίς να τις εξαντλεί, ο Boyd. Επομένως, στα τέλη του 19^{ου} και στο πρώτο μισό του 20^{ου} αιώνα, για να αντιμετωπίσουν άλυτα προβλήματα στην επικράτεια της φυσικής, διατύπωσαν θεωρίες αρχικά παρόμοιες με αυτήν που διέθεταν, την κλασική θεωρία. Τις φορές που διαπίστωσαν ότι κάποια από αυτά τα προβλήματα δεν μπορούσαν να λυθούν ικανοποιητικά εντός του κλασικού πλαισίου, τροποποίησαν τις προτεινόμενες θεωρίες τους φροντίζοντας να διατηρούν τα χαρακτηριστικά εκείνα των κλασικών θεωριών που πίστευαν ότι είναι καλά επικυρωμένα και να αλλάζουν όσα πίστευαν ότι ήταν λιγότερο καλά επικυρωμένα.³⁸⁵ Στην περίπτωση που και πάλι οδηγούνταν σε αδιέξοδο, είτε διότι η προτεινόμενη θεωρία δεν συμφωνούσε απόλυτα με τα παρατηρησιακά δεδομένα είτε διότι δεν παρείχε επιτυχείς προβλέψεις, κάποιοι, ίσως πιο προικισμένοι, επιστήμονες γίνονταν πιο τολμηροί. Αναγνωρίζοντας ενώπιόν τους μια πραγματική κρίση της υπάρχουσας θεωρίας, προχωρούσαν σε τροποποιήσεις ακόμα και κάποιων θεωρητικά επιβεβαιωμένων χαρακτηριστικών. Έχοντας όμως πάντα υπόψη τους το καθιερωμένο μέχρι στιγμής πλαίσιο, καθότι, όπως ειπώθηκε παραπάνω, είναι παράλογο να πιστεύουμε ότι οι επιστήμονες όταν αναζητούν νέες θεωρίες ξεκινούν –ή πρέπει να ξεκινούν– από το μηδέν περιφρονώντας τα αποτελέσματα επιστημονικής έρευνας αιώνων. Ταυτοχρόνως με τις τροποποιήσεις που αποπειρώνται, ελέγχουν και αξιολογούν πειραματικά, οι ίδιοι ή άλλοι, από τις πιο μικρές μέχρι τις πιο τολμηρές, και ενίοτε μη κλασικές, επιλογές τους, μια και ισχυρό μεθοδολογικό κριτήριο επιλογής μιας θεωρίας αποτελεί η συμφωνία της με τα παρατηρησιακά δεδομένα. Όπως γράφει χαρακτηριστικά ο Worrall «... σε τελευταία ανάλυση τα τεκμήρια δείχνουν το δρόμο: εάν, παρά τις προσπάθειες που έχουν γίνει, δεν μπορεί να κατασκευαστεί καμιά επιστημονική θεωρία η οποία να ενσωματώνει τις αγαπημένες μας μεταφυσικές υποθέσεις, τότε, ασχέτως από το πόσο ακράδαντα

³⁸⁵ Η διάκριση των χαρακτηριστικών γίνεται τις περισσότερες φορές από τους επιστήμονες ‘επιστρατεύοντας’ τη φυσική τους διαίσθηση όσο κοινότοπο κι αν ακούγεται. Παρά το πρόβλημα των Duhem-Quine [Αραμπατζής (2000) σελ. 83-84], σύμφωνα με το οποίο όταν υπάρχει σύγκρουση ή σύμπτωση μεταξύ θεωρίας και εμπειρίας το θεωρητικό σύμπλεγμα διαψεύδεται ή επικυρώνεται αντιστοίχως συνολικά, οι επιστήμονες καταφέρνουν να απομονώνουν στοιχεία του συμπλέγματος που διαισθάνονται ότι ίσως είναι ψευδή και διατυπώνοντας νέες θεωρίες ελέγχουν κατά πόσο λύνονται τα προβλήματα που ήθελαν να λύσουν.

παγιωμένες μπορεί να είναι αυτές οι αρχές και ασχέτως από το πόσο γόνιμες μπορεί να αποδείχθηκαν στο παρελθόν, θα πρέπει εν τέλει να εγκαταλειφθούν».³⁸⁶

Άρα, αυτό που χαρακτηρίζει την αλλαγή θεωριών σε κρίσιμες περιόδους είναι η σταδιακή και μερική αποστασιοποίηση από την παλιά θεωρία –πολλά στοιχεία της οποίας όμως παραμένουν πάντα σεβαστά– για να λυθούν προβλήματα και όχι η εγκατάλειψη του ρεαλισμού. Το ίδιο συνέβη και στην περίπτωση της παλιάς κβαντικής θεωρίας –η οποία είναι ημι-κλασικής φύσεως– και κατ' επέκταση της κβαντομηχανικής. Για να το διαπιστώσουμε θα αναφερθούμε σε δύο σημαντικούς σταθμούς της ιστορικής ανάπτυξης της κβαντικής θεωρίας, την πρώιμη 'κβαντική' υπόθεση του Planck³⁸⁷ το 1900 και την υπόθεση των κβάντων φωτός του Einstein το 1905, και σε τρία φαινόμενα, την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton.

Η ιστορική διαδρομή³⁸⁸ που ολοκληρώνεται με τον Planck και την παρουσίαση του τρόπου εξαγωγής της περίφημης εξίσωσής του για το μέλαν σώμα τον Δεκέμβριο του 1900 σε συνεδρίαση της Γερμανικής Φυσικής Εταιρείας, θα μπορούσαμε να πούμε ότι ξεκινάει το 1859 με τον Gustav Kirchhoff. Ο Kirchhoff μελέτησε το φαινόμενο της εκπομπής φωτός ίδιου χρώματος στην ίδια θερμοκρασία από διάφορα θερμά αντικείμενα. Στην πορεία της μελέτης του ανέπτυξε την έννοια του μέλανος σώματος – ενός τέλει απορροφητή και εκπομπού ακτινοβολίας– και κληροδότησε στις επερχόμενες γενιές φυσικών ένα πρόβλημα, το πρόβλημα του μέλανος σώματος όπως ονομάστηκε: τη μέτρηση της φασματικής κατανομής της ενέργειας της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, το ποσό της ενέργειας δηλαδή σε κάθε μήκος κύματος του φάσματος από την υπέρυθη έως την υπεριώδη περιοχή, και την εύρεση ενός τύπου που θα αναπαράγει την κατανομή σε κάθε θερμοκρασία.

³⁸⁶ Worrall (1989) σελ. 163.

³⁸⁷ Ο Kuhn (1978/1987) υποστήριξε, αμφισβητώντας την παραδοσιακή ιστοριογραφική ερμηνεία για τον Planck, ότι η θεωρία του Planck –τουλάχιστον στα πρώτα άρθρα του το 1900 και 1901– ήταν κλασική και πως τα 'αντηχεία' του (resonators) απορροφούσαν και εξέπεμπαν ενέργεια συνεχώς συντασσόμενα με τις εξισώσεις του Maxwell [Kuhn (1978/1987) σελ. viii]. Παρόλα αυτά ο Kuhn επισημαίνει ότι ο Ehrenfest και ο Einstein ήταν «οι δύο φυσικοί που πρώτοι αναγνώρισαν ότι ο νόμος του Planck για το μέλαν σώμα δεν μπορούσε να εξαχθεί χωρίς να περιοριστεί η ενέργεια των αντηχείων σε ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $h\nu$ ή χωρίς κάποιο ισοδύναμο μη κλασικό βήμα» [Kuhn (1978/1987) σελ. ix]. Οπότε, μπορεί, σύμφωνα με τον Kuhn, η ασυνέχεια ή η κβάντωση της ενέργειας να μην προήλθε αρχικά από τον Planck, ωστόσο θεωρούμε ότι υπήρχε εντός της θεωρίας του για το μέλαν σώμα σε πρώιμο στάδιο, γι αυτό και αναγνωρίστηκε αργότερα από άλλους φυσικούς.

³⁸⁸ Η αφήγηση στηρίζεται κυρίως στον Kumar (2008).

Το 1893 ο Wilhelm Wien ανακάλυψε το ‘νόμο της μετατόπισης’ σύμφωνα με τον οποίο καθώς αυξάνεται η θερμοκρασία ενός μέλανος σώματος, το μήκος κύματος στο οποίο εκπέμπει ακτινοβολία με τη μεγαλύτερη ένταση συνεχώς ελαττώνεται, ενώ το γινόμενο αυτού του μήκους κύματος επί τη θερμοκρασία του μέλανος σώματος παραμένει σταθερό. Μετέχοντας στην αναζήτηση της θρυλικής εξίσωσης του Kirchhoff για την κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, το 1896 ο Wien βρίσκει ένα ‘νόμο κατανομής’. Ο ‘νόμος της κατανομής’ του Wien επιβεβαιώνεται από τα πειραματικά δεδομένα που θα συλλέξει ο Friedrich Paschen για τα μικρά μήκη κύματος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος. Τον Φεβρουάριο του 1899, όμως, οι Otto Lummer και Ernst Pringsheim, κάνοντας πειράματα με ένα υπερσύγχρονο για την εποχή εκείνη μέλαν σώμα, ανακοινώνουν ότι οι μετρήσεις τους επιβεβαιώνουν το ‘νόμο της μετατόπισης’ του Wien αλλά δείχνουν σημαντικές ανακολουθίες του ‘νόμου της κατανομής’ στην υπέρυθη περιοχή του φάσματος. Την ίδια χρονιά, τρεις μήνες μετά, ο Paschen ανακοινώνει ότι οι δικές του μετρήσεις ήταν σε απόλυτη συμφωνία με τις προβλέψεις του ‘νόμου κατανομής’ του Wien. Τον Νοέμβριο του 1899 οι Lummer και Pringsheim, αφού επέκτειναν τις μετρήσεις τους σε μεγαλύτερα μήκη κύματος και ευρύτερες περιοχές θερμοκρασιών, βρίσκουν συστηματικής φύσεως ασυμφωνίες της θεωρίας του Wien και του πειράματος στα μεγάλα μήκη κύματος. Μέσα σε λίγο μόνο καιρό ο Paschen τους αντέκρουσε και πάλι παρουσιάζοντας κάποιο άλλο σύνολο νέων δεδομένων. Οι πειραματιστές δεν έλεγαν να συμφωνήσουν, μέχρι που τον Φεβρουάριο του 1900 η πλάστιγγα έγερσε ξανά εις βάρος του ‘νόμου της κατανομής’ του Wien όταν οι Lummer και Pringsheim παρουσίασαν τα τελευταία τους αποτελέσματα. Είχαν διαπιστώσει συστηματικές ανακολουθίες των μετρήσεων τους στην υπέρυθη περιοχή με τις προβλέψεις του νόμου του Wien· ανακολουθίες που δεν θα μπορούσαν να οφείλονται σε πειραματικά σφάλματα. Οπότε, ξεκίνησε ένας σκληρός ανταγωνισμός μεταξύ των φυσικών για να βρεθεί η εξίσωση που θα αντικαθιστούσε το ‘νόμο της κατανομής’ του Wien. Κάποιοι επιδόθηκαν σε πρόχειρες εναλλακτικές λύσεις που όμως αποδείχθηκαν ανεπαρκείς τροφοδοτώντας τις αξιώσεις για περαιτέρω έλεγχο. Τον Σεπτέμβριο του 1900 οι Heinrich Rubens και Ferdinand Kurlbaum διαπιστώνουν κι αυτοί αξιοσημείωτη διαφορά του νόμου του Wien με τις μετρήσεις τους σε μήκη κύματος της απόστατης περιοχής του υπέρυθρου φάσματος –από 0.03mm έως και 0.06mm. Επιβεβαιώνουν

συνεπώς την αποτυχία του νόμου και διαλύουν αποφασιστικά οποιαδήποτε αμφιβολία για το αντίθετο.

Έτσι είχαν τα πράγματα όταν ο Planck ξαναμπήκε στη ‘μάχη’ για την εύρεση της σωστής εξίσωσης, έχοντας στη διάθεσή του τρεις κρίσιμες πληροφορίες. Πρώτον, ο ‘νόμος της μετατόπισης’ του Wien ήταν σωστός. Δεύτερον, ο ‘νόμος της κατανομής’ του Wien εξηγούσε την ένταση της ακτινοβολίας στα μικρά μήκη κύματος. Και τρίτον, όπως είχε ενημερωθεί από το στενό του φίλο Rubens, στην υπέρυθρη περιοχή όπου αποτύγχανε ο ‘νόμος της κατανομής’ του Wien, οι Rubens και Kurlbaum είχαν διαπιστώσει ότι η ένταση της ακτινοβολίας ήταν ανάλογη της θερμοκρασίας. Έπειτα από εντατική προσπάθεια κατέληξε σε έναν τύπο τον οποίο έθεσε στη διάθεση του Rubens για να τον ελέγξει. Οι Rubens και Kurlbaum συγκρίνοντάς τον με τα πειραματικά δεδομένα τους διαπίστωσαν σχεδόν τέλεια συμφωνία. Επιπλέον, αποδείχθηκε πολύ πιο ακριβής μεταξύ πέντε διαφορετικών τύπων που υπέβαλαν επίσης σε έλεγχο. Ο Paschen επιβεβαίωσε και αυτός ότι ο τύπος του Planck συμφωνούσε με τα δεδομένα του.

Αν και η εξίσωση είχε επιτέλους βρεθεί από τον Planck, εάν δεν κατάφερνε να την αιτιολογήσει στηριζόμενος σε θεμελιώδεις αρχές –και σε κάποιες υποθέσεις κατά πάσα πιθανότητα– δεν θα ήταν παρά ένα *ad hoc* κατασκευάσμα που είχε επινοηθεί για να αναπαράγει τα πειραματικά αποτελέσματα. Είναι προφανές ότι κάτι τέτοιο δεν αρκούσε στον Planck γι αυτό και κατέβαλε όλες του τις δυνάμεις για να της αποδώσει τη φυσική σημασία που της έλλειπε. Στην αναζήτηση θεωρητικής αιτιολόγησης στράφηκε αρχικά σε θεωρίες που θα συμφιλίωναν την εξίσωσή του με τις δύο μεγάλες κλασικές θεωρίες του 19ου αιώνα, τη θερμοδυναμική και τον ηλεκτρομαγνητισμό· δεν κατάφερε όμως πολλά. Συνδυάζοντας τη θεωρία του ηλεκτρομαγνητισμού, σύμφωνα με την οποία όταν ένα ηλεκτρικό φορτίο ταλαντώνεται με μια ορισμένη συχνότητα εκπέμπει και απορροφά ακτινοβολία αυτής και μόνο της συχνότητας, με τη φυσική των απλών αρμονικών ταλαντώσεων, αντιλήφθηκε τα τοιχώματα του μέλανος σώματος ως μια τεράστια συστοιχία ταλαντωτών όπου τα ταλαντούμενα σώματα είναι ηλεκτρικά φορτία. Κάθε ένας τέτοιος ταλαντωτής εξέπεμπε μία και μόνο συχνότητα και όλοι μαζί εξέπεμπαν ολόκληρο το φάσμα των συχνοτήτων που βρίσκονταν εντός του μέλανος σώματος. Η ενεργειακή φασματική κατανομή της ακτινοβολίας αντιπροσωπεύει την κατανομή της ολικής ενέργειας μεταξύ των διαφορετικών συχνοτήτων. Ο Planck υπέθεσε ότι τη

διαθέσιμη ενέργεια για κάθε συχνότητα την καθόριζε ο αριθμός των ταλαντωτών της. Αυτό που απέμενε να βρει ήταν έναν τρόπο για να κατανείμει τη διαθέσιμη ενέργεια στους ταλαντωτές. Έπειτα από εξαντλητικές προσπάθειες συνειδητοποίησε ότι η φυσική που αποδεχόταν έως τώρα δεν μπορούσε να τον βοηθήσει, οπότε στράφηκε στις ιδέες του Ludwig Boltzmann. Ο Boltzmann εκείνη την εποχή ήταν ο πλέον ονομαστός συνήγορος του ατόμου και ο άνθρωπος που είχε ορίσει την εντροπία ως το μέτρο της πιθανότητας να βρεθεί ένα σύστημα σε μια συγκεκριμένη κατάσταση.

Ο Planck ανακάλυψε³⁸⁹, εφαρμόζοντας τις τεχνικές του Boltzmann, ότι θα μπορούσε να εξαγάγει τον τύπο του για την κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος εάν οι ταλαντωτές του απορροφούσαν και εξέπεμπαν πακέτα ενέργειας ανάλογα με τη συχνότητα ταλάντωσής τους. Τα πακέτα ενέργειας δίνονταν από τον τύπο $E=h\cdot\nu$, όπου ν η συχνότητα του ταλαντωτή και h μια σταθερά που αργότερα ονομάστηκε σταθερά του Planck. Έτσι, γνωρίζοντας τη διαθέσιμη ολική ενέργεια για μια δεδομένη συχνότητα ν και διαιρώντας με την ποσότητα $h\cdot\nu$ μπορούσε να υπολογίσει τον αριθμό των πακέτων που της αντιστοιχούσαν. Έπειτα, ακολουθώντας τον Boltzmann, μπόρεσε να προσδιορίσει την πιθανότερη κατανομή των πακέτων αυτών στους ταλαντωτές αυτής της συχνότητας. Στην πορεία διαπίστωσε ότι οι ταλαντωτές μπορούσαν να έχουν ενέργειες μόνο ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $h\cdot\nu$, δηλαδή, 0 , $h\cdot\nu$, $2h\cdot\nu$, $3h\cdot\nu$, κ.τ.λ., γεγονός που έθετε περιορισμούς στο πλάτος των ταλαντώσεών τους. Η διαπίστωση αυτή ερχόταν σε σύγκρουση με τη φυσική εκείνης της εποχής, η οποία δεν έθετε περιορισμούς στο μέγεθος των ταλαντώσεων και επομένως στο ποσό της ενέργειας που ένας ταλαντωτής μπορεί να εκπέμψει ή να απορροφήσει· μπορούσε να εκπέμψει ή να απορροφήσει ενέργεια *συνεχώς*. Αντιθέτως, οι ταλαντωτές του Planck μπορούσαν να προσλάβουν και να χάσουν ενέργεια μόνο *ασυνεχώς*, σε μικρές αδιαίρετες μονάδες μεγέθους $E=h\cdot\nu$. Με άλλα λόγια, ο Planck, έστω κι αν δεν το αναγνώρισε αμέσως, είχε κβαντώσει τον τρόπο με τον οποίο οι υποθετικοί ταλαντωτές του μπορούσαν να λάβουν και να εκπέμψουν ενέργεια. Η περίφημη κβαντική υπόθεση στην οποία οδήγησε το έργο του Planck, συγκρουόμενη με την καθιερωμένη κλασική θεωρία του τέλους του 19ου αιώνα, είχε αναμφίβολα *μη κλασικό* χαρακτήρα. Θα μπορούσαμε όμως να την χαρακτηρίσουμε, ή την στάση –στην συγκεκριμένη περίπτωση– του Planck, και μη

ρεαλιστική;³⁹⁰ Ασχέτως αν ο Planck πίστευε ή όχι ότι η ενέργεια της ακτινοβολίας είναι όντως διαιρεμένη σε κβάντα, νομίζω ότι δεν μπορούμε. Η επινόηση και η αξιολόγηση μιας επιστημονικής θεωρίας έχει να κάνει με το περιεχόμενο των υποθέσεών της και όχι με τη στάση που κρατά ο επιστήμονας γι αυτές. Η κβαντική υπόθεση αποτελούσε την πιο ουσιαστική λεπτομέρεια για την εξαγωγή του εμπειρικού τύπου του Planck, οι προβλέψεις του οποίου –του τύπου– συμφωνούσαν απόλυτα με τα πειραματικά δεδομένα. Με τούτο δεδομένο για την εν λόγω υπόθεση πώς θα μπορούσε να είναι ‘μη ρεαλιστική’ και να μην προσεγγίζει ένα ουσιώδες χαρακτηριστικό του κόσμου; Εξάλλου, η χρήση της έννοιας της κβάντωσης δεν περιορίστηκε μόνο στη λύση του προβλήματος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος. Χρησιμοποιήθηκε από τον Einstein, ο οποίος μάλιστα κβάντωσε την ίδια την ενέργεια, για να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αλλά κι από άλλους για άλλους λόγους, οικοδομώντας έτσι σιγά-σιγά τη θεωρία της κβαντομηχανικής.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο³⁹¹ –η εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο κατά την πρόσπτωση φωτεινής ή υπεριώδους ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στην επιφάνειά του– παρατηρήθηκε για πρώτη φορά το 1887 από τον Heinrich Hertz πραγματοποιώντας πειράματα που είχαν ως σκοπό να επιβεβαιώσουν την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Αργότερα, από το 1899 και μετά, ο Philipp Lenard, πρόην βοηθός του Hertz, ασχολήθηκε με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και ανακάλυψε γεγονότα που συγκρούονταν με την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία. Ένα από αυτά ήταν ότι ενώ με την αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας φωτεινής δέσμης κλασικά αναμενόταν να εκπέμπεται ίδιος αριθμός ηλεκτρονίων αλλά με περισσότερη ενέργεια για το καθένα, ο Lenard παρατήρησε ότι εκπεμπόταν μεγαλύτερος αριθμός ηλεκτρονίων χωρίς καμιά αλλαγή στην ενέργεια που διέθετε το καθένα. Έτσι ανακάλυψε ότι η

³⁸⁹ Σύμφωνα με την παραδοσιακή ιστοριογραφική του προσέγγιση.

³⁹⁰ Είναι γνωστό βεβαίως ότι ο Planck συγκαταλέγεται στους ‘ρεαλιστές’. Αυτό όμως δεν αποκλείει το ότι θα μπορούσε σε κάποιες περιπτώσεις να υιοθετήσει μια ‘μη ρεαλιστική’ στάση. Αν και αυτό που επιδιώκουμε εδώ και στη συνέχεια να δείξουμε, είναι ότι την εποχή εκείνη οι πιστοί των κλασικών αντιλήψεων ταυτίζονταν με τον ρεαλισμό ενώ όσοι διαφοροποιούνταν από αυτές με τον αντιρεαλισμό. Πιστεύουμε ότι η ταύτιση αυτή ήταν καταχρηστική και θα ήταν ορθότερο όσον αφορά την ερευνητική συμπεριφορά των επιστημόνων της εποχής να γίνεται διάκριση μεταξύ ‘κλασικής’ και ‘μη κλασικής’ στάσης. Επομένως, θα μπορούσε κάποιος να υιοθετεί ‘μη κλασική’ στάση και να είναι ρεαλιστής ή να υιοθετεί ‘κλασική’ στάση και να είναι αντιρεαλιστής.

³⁹¹ Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μας απασχόλησε και στο πρώτο μέρος της διατριβής στην ενότητα 1.2.1. (σελ. 18-9) για τη φύση του φωτός.

ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων δεν εξαρτιόταν από την ένταση της φωτεινής δέσμης αλλά από τη συχνότητά της. Επίσης, ο Lenard διαπίστωσε ότι για κάθε μέταλλο υπάρχει μια ελάχιστη συχνότητα, η ‘συχνότητα κατωφλίου’, κάτω από την οποία δεν εκπέμπονται καθόλου ηλεκτρόνια, ανεξάρτητα από το πόσο έντονα και για πόσο χρονικό διάστημα φωτίζεται το μέταλλο· άπαξ και το εν λόγω ‘κατώφλι’ του κάθε μετάλλου ξεπερνιόταν, τα ηλεκτρόνια εκπέμπονταν όσο αμυδρή κι αν ήταν η φωτεινή δέσμη.

Όπως έχουμε ξαναγράψει, μια ερμηνεία της κλασικής ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο θα καταστεί αδύνατη. Οπότε, το 1905, ο Einstein επεκτείνοντας την έννοια του κβάντου στο φως, θα το εξηγήσει απλά και άνευ αντιφάσεων. Συγκεκριμένα, αν το φως αποτελείται από κβάντα, η αύξηση της έντασης της φωτεινής δέσμης συνεπάγεται την αύξηση του αριθμού των κβάντων που την αποτελούν, τα οποία προσπίπτοντας στη μεταλλική επιφάνεια προκαλούσαν αντίστοιχη αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων που εκπέμπονταν. Επίσης, κάθε ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται, το καταφέρνει αφού απορροφήσει ένα ακέραιο κβάντο φωτός του οποίου η ενέργεια θα πρέπει να επαρκεί ώστε να υπερνικήσει το ηλεκτρόνιο τις δυνάμεις που το συγκρατούν εντός του μετάλλου. Εφόσον η ενέργεια ενός κβάντου φωτός σύμφωνα με τη σχέση $E=h\cdot\nu$ είναι ανάλογη της συχνότητάς του, τα κβάντα φωτός με πολύ χαμηλή συχνότητα δεν έχουν αρκετή ενέργεια για την εξαγωγή των ηλεκτρονίων. Το γεγονός ότι η ενέργεια των κβάντων φωτός που θα απορροφήσουν τα ηλεκτρόνια για να διαφύγουν από το μέταλλο εξαρτάται από τη συχνότητα τους, εξηγεί γιατί και η ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων εξαρτάται από τη συχνότητα της φωτεινής δέσμης.

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein για το φαινόμενο ($h\cdot\nu=W+\frac{1}{2}m\nu^2$, ενέργεια φωτονίου = έργο εξαγωγής + κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου στην έξοδο) θα υποβληθεί –και μαζί με αυτήν και η υποκείμενη υπόθεση των κβάντων φωτός ή φωτονίων όπως ονομάστηκαν αργότερα– σε εξαντλητικό πειραματικό έλεγχο από τον Robert Millikan επί δέκα χρόνια, από το 1905 έως το 1915. Ο Millikan, αν και ανήκε σε αυτούς που θεωρούσαν τον χαρακτήρα της παράλογο, θα υποχρεωθεί στο τέλος της έρευνάς του να επιβεβαιώσει την κατηγορηματική επαλήθευσή της.

Η πειραματική επιβεβαίωση της υπόθεσης των κβάντων φωτός δεν ολοκληρώνεται με τα πειράματα του Millikan. Η δημοσίευση του φαινομένου Compton

το 1923 παρείχε μια αδιάσειστη μαρτυρία της ύπαρξης των κβάντων φωτός³⁹² τα οποία αντιμετωπίζονταν ακόμα μέχρι τότε με μεγάλη δυσπιστία. Το φαινόμενο Compton αφορά τη σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από φορτισμένα σωματίδια όταν αυτή προσπίπτει σε μεταλλικό στόχο. Ο Compton μη καταφέροντας κι αυτός να αιτιολογήσει ό,τι του αποκάλυπταν τα πειράματά του χρησιμοποιώντας την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία, στράφηκε στα κβάντα φωτός του Einstein. Με αυτά κατόρθωσε να εξηγήσει γιατί η δευτερογενής ακτινοβολία που παρατηρούσε κατά τη σκέδαση είχε μεγαλύτερο μήκος κύματος από την πρωτογενή ακτινοβολία που είχε προσπέσει στον στόχο. Προέβλεψε κιόλας στηριζόμενος στην αρχή διατήρησης της ενέργειας ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία θα πρέπει να συνοδεύεται από εκτινασόμενα ηλεκτρόνια τα οποία όμως δεν είχαν έως τότε παρατηρηθεί. Ο Compton τα αναζήτησε και τα βρήκε χαρίζοντας στη θεωρία του και στην υπόθεση των κβάντων φωτός μια καινοφανή πρόβλεψη.

Με την παραπάνω εκτενή ιστορική αναφορά ένας από τους στόχους ήταν να δειχθεί ότι σχεδόν όλες οι σοβαρές αρχικές προσπάθειες να επιλυθεί κάποιο πρόβλημα στη φυσική έχουν ως αφετηρία την υπάρχουσα αποδεκτή θεωρία: το ίδιο έγινε και στην περίπτωση της κβαντικής θεωρίας. Οι φυσικοί αναπόφευκτα στηρίζονται στις παλιές επιβεβαιωμένες θεωρίες τους για να προτείνουν νέες. Δεν μένουν όμως μόνο σε αυτό. Σχεδιάζουν πειράματα και ελέγχουν στα εργαστήρια τις προτεινόμενες θεωρίες. Οι νόμοι της μετατόπισης και της κατανομής του Wien προτάθηκαν για να επιλύσουν το πρόβλημα του μέλανος σώματος εντός του πλαισίου της κλασικής θεωρίας. Από τον πειραματικό έλεγχο όμως στον οποίο υποβλήθηκαν μόνο ο ‘νόμος της μετατόπισης’ επιβίωσε ενώ ο ‘νόμος της κατανομής’ αποδείχθηκε ανεπαρκής. Νέες θεωρίες διατυπώθηκαν για να αντικαταστήσουν τον ‘νόμο της κατανομής’ ενώ παράλληλα η αποτυχία του νόμου τροφοδότησε την πραγματοποίηση νέων πειραμάτων ώστε να διαπιστωθεί το εύρος της. Οι τροποποιήσεις που εισηγούνταν οι νέες αυτές θεωρίες,

³⁹² Ο Bohr αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα όσων συνέχισαν να δυσπιστούν για την ύπαρξη των κβάντων φωτός και μετά τη δημοσίευση του φαινομένου Compton. Οπότε, προσπάθησε να αιτιολογήσει τα φαινόμενα σκέδασης, σαν αυτά που εμπλέκονται στο φαινόμενο Compton, θεωρώντας ότι δεν ισχύουν οι αρχές διατήρησης ενέργειας και ορμής στο μικροσκοπικό επίπεδο. Στην προσπάθειά του αυτή ‘παρέσυρε’ τους φυσικούς H.A. Kramers και J.C. Slater. Η θεωρία που διατύπωσαν μαζί το 1924 έμεινε γνωστή ως θεωρία Bohr-Kramers-Slater και διαψεύστηκε πολύ σύντομα από τα πειραματικά αποτελέσματα αρχικά των Bothe και Geiger το 1925 καθώς και από εκείνα των Compton και Simon αργότερα την ίδια χρονιά. [Stuewer (2000) σελ. 986-988]

άλλοτε μικρές και άλλοτε μεγάλες, μη παρεκκλίνοντας του κλασικού πλαισίου, αποδεικνύονταν και πάλι ανεπαρκείς. Ακόμα κι ο Planck, μόνο αφότου κατάφερε να βρει έναν εμπειρικό τύπο που συμφωνούσε με τις πειραματικές μετρήσεις, τόλμησε, αντί να προτείνει μια τροποποίηση της υπάρχουσας θεωρίας, να διαφοροποιηθεί μερικώς από αυτήν. Προκειμένου να αιτιολογήσει τον τύπο του, έθεσε τις βάσεις για τη διατύπωση μιας μη κλασικής υπόθεσης. Όμως, παρά την τόλμη του, στηρίχθηκε κι αυτός σε κλασικά στοιχεία όπως ο ηλεκτρομαγνητισμός, η φυσική των απλών αρμονικών ταλαντώσεων και ο 'νόμος της μετατόπισης' του Wien. Ομοίως, η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein, παρά τον ριζοσπαστικό χαρακτήρα της, αποτελεί έκφραση της αρχής διατήρησης της ενέργειας και η ανάλυση του Compton για το φαινόμενο που φέρει το όνομα του στηρίχθηκε στην ίδια τούτη αρχή κλασικής προέλευσης. Ένας σημαντικός λόγος που η κβαντική υπόθεση και η υπόθεση των φωτονίων του Einstein αντιμετωπίστηκαν με δυσπιστία και χαρακτηρίστηκαν ως γενέθλιες πράξεις μιας μη ρεαλιστικής προσέγγισης του κόσμου, ήταν η εξοικείωση των φυσικών της εποχής εκείνης με την κλασική φυσική και η προσκόλλησή τους στις αντιλήψεις που εκείνη έθρεψε. Στα τέλη του 19ου αιώνα υπήρχαν φυσικοί οι οποίοι υποστήριζαν ότι δεν είχε απομείνει πλέον τίποτα σημαντικό να ανακαλυφθεί και όσα προβλήματα ενδεχομένως υπήρχαν γρήγορα θα ενέδιδαν στην καθιερωμένη φυσική. Το 'κβάντο' τούς προέκυψε ως κεραυνός εν αιθρία διότι απεδείκνυε ακριβώς το αντίθετο.

Η εισαγωγή του κβάντου ενέργειας και η υπόθεση των κβάντων φωτός του Einstein εγκαινιάζουν στη φυσική την εποχή της κβαντικής μηχανικής. Άλλοι σημαντικοί σταθμοί κατά την ιστορική της ανάπτυξη είναι ως γνωστόν, το ατομικό πρότυπο του Bohr, η υπόθεση των υλικών κυμάτων του De Broglie, η μηχανική των πινάκων του Heisenberg, η κυματομηχανική του Schrödinger, η πιθανοκρατική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης του Born, η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg, η αρχή της συμπληρωματικότητας του Bohr κ.τ.λ. Σε όλη αυτήν την πορεία οι θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας απέφυγαν, κατά τον Fine, την οποιαδήποτε αναφορά στην υποκείμενη πραγματικότητα. Τι θα μπορούσε όμως να αναγνωριστεί εκείνη την εποχή ως αναφορά στην υποκείμενη πραγματικότητα; Εξ αιτίας της υπερβολικής εμπιστοσύνης των τότε φυσικών στην κλασική θεωρία, αποδεκτή αναφορά στην υποκείμενη πραγματικότητα θα συνιστούσε η διατύπωση υποθέσεων ώστε να συμφιλιωθούν τα καινοτόμα

χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας με την καθιερωμένη κλασική εικόνα του κόσμου που τους ήταν εδώ και τρεις αιώνες τόσο οικεία. Όλοι όσοι απέφυγαν πρόθυμα να κάνουν τέτοιου είδους υποθέσεις, γύρισαν ουσιαστικά την πλάτη στην αντίληψη που ανέμενε η κλασική φυσική να έχει τον πρώτο λόγο στον μικρόκοσμο όπως και στον μακρόκοσμο, και όχι στον ρεαλισμό. Όσοι πάλι δεν ήταν διατεθειμένοι να εγκαταλείψουν αμαχητί την κλασική εικόνα του κόσμου, μπήκαν στη διαδικασία να κάνουν υποθέσεις για μια υποκείμενη πραγματικότητα που θα την αποκαθιστούσε στον μικρόκοσμο, χωρίς όμως επιτυχία. Έτσι, διέγνωσαν κι αυτοί απρόθυμα ότι κάτι τέτοιο ήταν εξαιρετικά δύσκολο αν όχι αδύνατο. Την εποχή εκείνη δεν ήταν καθόλου εύκολο να αλλάξει η νοοτροπία και να γίνει αποδεκτό ότι η υποκείμενη πραγματικότητα αποκαλυπτόταν κατά προσέγγιση από την κβαντική θεωρία και είχε τα χαρακτηριστικά που εκείνη τις απέδιδε. Αυτό που κυρίως διακυβευόταν λοιπόν δεν ήταν ο ρεαλισμός αλλά η κλασικότητα.³⁹³

Γιατί όμως οι ίδιοι οι φυσικοί είτε ήταν υπέρμαχοι της κβαντικής θεωρίας είτε πολέμιοι αναφέρονταν, σύμφωνα με τον Fine, σε ρεαλισμό και μη ρεαλισμό ή σε ρεαλιστική και μη ρεαλιστική στάση; Πρώτα από όλα, οι φυσικοί εκείνης της εποχής δεν αναφέρονταν σε ρεαλισμό και μη ρεαλισμό αλλά σε ό,τι θεωρούσαν πραγματικό – ‘φορώντας κλασικά γυαλιά’ συχνά– και στο ποια πίστευαν ότι είναι η φύση της πραγματικότητας. Αυτό που κυρίως τους απασχολούσε ήταν πόσο ριζικά άλλαζε τις αντιλήψεις τους για τη φύση της πραγματικότητας η κβαντική θεωρία και όχι αν έθετε υπό αμφισβήτηση κάποια ρεαλιστική φιλοσοφική προσέγγιση. Δεύτερον, ακόμα και όσοι από αυτούς είχαν κάποια διαμορφωμένη έννοια φιλοσοφικού ρεαλισμού, αυτή απείχε

³⁹³ Παρόμοιες απόψεις συναντούμε και στον Worrall ο οποίος στο πλαίσιο του δομικού ρεαλισμού λέει τα εξής: «Η άποψη αυτή θα διαχωριστεί ρητώς από τις ‘κλασικές’ μεταφυσικές προκαταλήψεις του Einstein: ότι οι δυναμικές μεταβλητές θα πρέπει να διαθέτουν πάντοτε ακριβείς τιμές και ότι όλα τα φυσικά συμβάντα καθορίζονται πλήρως από τις συνθήκες που προηγήθηκαν. Απεναντίας, η άποψη απλώς είναι ότι η κβαντική μηχανική φαίνεται να έχει συλλάβει την αληθινή δομή του σύμπαντος, ότι όλα τα είδη των φαινομένων που εκθέτονται από μικροσυστήματα εξαρτώνται πράγματι από την κβαντική κατάσταση του συστήματος, η οποία πράγματι εξελίσσεται και αλλάζει με τον τρόπο που περιγράφει η κβαντική μηχανική. Είναι, βεβαίως, αληθές ότι η κατάσταση αυτή αλλάζει ασυνεχώς, με έναν τρόπο που η θεωρία δεν εξηγεί περαιτέρω, όταν το σύστημα αλληλεπιδρά με ένα ‘μακροσκοπικό σύστημα’ –από την άλλη όμως μεριά η θεωρία του Νεύτωνα δεν εξηγεί τη βαρυτική αλληλεπίδραση, αλλά αποφαίνεται απλώς ότι συμβαίνει. (Όντως, καμιά θεωρία, φυσικά, δεν μπορεί να εξηγεί τα πάντα με άπειρη αναδρομή ως τίμημα.) Εάν τέτοιες ασυνεχείς μεταβολές της κατάστασης φαίνεται να ζητούν επιτακτικά εξήγηση, είναι λόγω της βαθιά ριζωμένης φύσης ορισμένων κλασικών μεταφυσικών υποθέσεων (όπως ακριβώς η ιδέα ότι η δράση-από-απόσταση ‘ζητούσε επιτακτικά’ εξήγηση αποτελούσε αντανάκλαση μιας βαθιά ριζωμένης προκατάληψης για μηχανική Καρτεσιανού τύπου)». [Worrall (1989) σελ. 162-3]

πολύ του επιστημονικού ρεαλισμού που επιδιώκουμε να υπερασπιστούμε. Ο Heisenberg, για παράδειγμα, αναφέρεται σε δύο μορφές ρεαλισμού, του ‘πρακτικού’ και του ‘δογματικού’:

« ... μπορεί ίσως να ξεχωρίσει κανείς τις διάφορες μορφές του ρεαλισμού με τον ακόλουθο τρόπο: Αντικειμενοποιούμε μια κρίση, όταν ισχυριζόμαστε πως το περιεχόμενό της δεν εξαρτάται απ’ τους όρους, κάτω απ’ τους οποίους μπορεί να επαληθευθεί. Ο πρακτικός ρεαλισμός δέχεται, πως υπάρχουν διαπιστώσεις που μπορούν ν’ αντικειμενοποιηθούν, και πως στην πραγματικότητα το μεγαλύτερο μέρος των εμπειριών μας στην καθημερινή ζωή αποτελείται από παρόμοιες διαπιστώσεις. Ο δογματικός ρεαλισμός ισχυρίζεται, πως δεν υπάρχουν λογικές κρίσεις πάνω στον υλικό κόσμο που να μη μπορούν ν’ αντικειμενοποιηθούν. Ο πρακτικός ρεαλισμός υπήρξε πάντοτε μια ουσιώδης βάση για τη φυσική επιστήμη και θα μείνει και στο μέλλον. Ο δογματικός ρεαλισμός όμως, όπως βλέπουμε τώρα, δεν είναι απαραίτητη προϋπόθεση για τη φυσική επιστήμη. Έπαιξε αναμφίβολα στο παρελθόν ένα πολύ σπουδαίο ρόλο στην εξέλιξη της φυσικής επιστήμης. Πραγματικά, η αντίληψη της κλασικής φυσικής είναι πιθανώς αυτή του δογματικού ρεαλισμού. Μόλις ίσως με τη θεωρία των κβάντων μάθαμε, πως ακριβής φυσική επιστήμη είναι δυνατή και χωρίς τη βάση του δογματικού ρεαλισμού».³⁹⁴

Το παραπάνω απόσπασμα μας δίνει μια ιδέα για το ποια ήταν η άποψη του Heisenberg για τον ρεαλισμό. Η έννοια της αντικειμενοποίησης μιας κρίσης που εισάγει θυμίζει τη διάκριση των συνθηκών αληθείας και των συνθηκών επαλήθευσης. Η αντικειμενοποίηση ανεξαρτητοποιεί το περιεχόμενο μιας κρίσης από τις συνθήκες επαλήθευσής της. Ο πρακτικός ρεαλισμός ο οποίος αφήνει περιθώρια και για μη αντικειμενοποιημένες κρίσεις ήταν, είναι και θα είναι ουσιώδης βάση για τη φυσική επιστήμη. Αντιθέτως ο δογματικός ρεαλισμός που θεωρεί ότι όλες οι λογικές κρίσεις μπορούν να αντικειμενοποιηθούν εγκαταλείφθηκε από τη φυσική επιστήμη.

Στο έργο του Bohr και του Einstein βρίσκουμε αμέτρητες αναφορές στην πραγματικότητα και τη φύση της,³⁹⁵ αλλά μόνο λιγοστές έμμεσες αναφορές στον

³⁹⁴ Heisenberg (1958/1978) σελ. 72-3. Heisenberg (1958) σελ. 44.

³⁹⁵ Οι απόψεις του Bohr και του Einstein για τη φύση της πραγματικότητας μας έχουν απασχολήσει ήδη στο πρώτο μέρος της διατριβής στην ενότητα 1.3. για το πείραμα EPR. Αποτελούν απόψεις ανθρώπων που δρουν ως επιστήμονες, διερωτώμενοι για τις ιδιότητες και τη φύση των αντικειμένων κατά την άσκηση της επιστήμης τους, και όχι ανθρώπων που αξιολογούν ως φιλόσοφοι επιστημονικές θεωρίες που έχουν γίνει αποδεκτές από την επιστημονική κοινότητα.

ρεαλισμό.³⁹⁶ Οι σχολιαστές τους είναι αυτοί που κυρίως αναφέρονται σε ρεαλισμό και μη ρεαλισμό και προσπαθούν να διαγνώσουν κατά πόσο η φιλοσοφική στάση των δύο διάσημων φυσικών για την επιστήμη είναι ρεαλιστική ή όχι. Ο Murdoch επισημαίνει ότι, το να πούμε αν ο Bohr ήταν ρεαλιστής ή δεν ήταν, εξαρτάται από το πώς ακριβώς συλλαμβάνουμε τον ρεαλισμό.³⁹⁷ Ο Fine από την άλλη θεωρεί ότι η γλώσσα με την οποία εκφράζεται ρεαλιστικά ο Einstein εκδηλώνει μια θέση πιο κοντά στον κατασκευαστικό εμπειρισμό του van Fraassen παρά στον μεταφυσικό ή επιστημονικό ρεαλισμό.³⁹⁸ Οπότε προτείνει τον όρο «ενθαρρυντικός ρεαλισμός» (motivational realism) για την άποψη του Einstein.³⁹⁹ Όπως γράφει, «ο Einstein κατανοεί τον ρεαλισμό ως ένα πρόγραμμα: τουτέστιν, ως το πρόγραμμα που προσπαθεί να κατασκευάσει ρεαλιστικές θεωρίες οι οποίες, στην ιδανική περίπτωση, θα είναι εμπειρικά επαρκείς για όλα τα δυνατά εμπειρικά δεδομένα»⁴⁰⁰ και επομένως «ο ρεαλισμός είναι το βασικό κίνητρο πίσω από τη δημιουργική επιστημονική εργασία και καθιστά την άσκησή της να αξίζει τον κόπο».⁴⁰¹ Ασχέτως αν οι σχολιαστές τους έχουν δίκιο ή άδικο, αυτό που μας ενδιαφέρει στο κάτω-κάτω της γραφής είναι αν η κβαντική μηχανική συγκρούεται με τις τρεις συνιστώσες του επιστημονικού ρεαλισμού και όχι αν ο Bohr, ο Einstein, ο Heisenberg ή ο Schrödinger ήταν ή δεν ήταν επιστημονικοί ρεαλιστές.

Τα χαρακτηριστικά που ο Einstein θεωρούσε ότι πρέπει να διαθέτουν οι ‘ρεαλιστικές θεωρίες’, σύμφωνα με τον Fine,⁴⁰² ήταν, κατά πρώτο λόγο, αιτιοκρατική περιγραφή και ανεξαρτησία από τον παρατηρητή, και κατά δεύτερο λόγο, χωροχρονική αναπαράσταση και μονιστική οντολογία. Η χωροχρονική αναπαράσταση συνδέεται με μια αρχή διαχωρισμού (principle of separation) –όπως την ονομάζει ο Fine– που κατά τον Einstein θα πρέπει να ικανοποιείται από μια φυσική περιγραφή στο χώρο και στο

³⁹⁶ Για την ακρίβεια σε ένα κείμενο του Einstein το 1944 για τον Bertrand Russell βρίσκουμε μια αναφορά σε ‘αφελή ρεαλισμό’ (naive realism), στο δόγμα δηλαδή που σύμφωνα με τον Russell πρεσβεύει ότι τα πράγματα είναι όπως φαίνονται [Einstein (1954) σελ. 20]. Όσο για έμμεσες αναφορές στον ρεαλισμό, ο Einstein το 1948 [Born (1971) σελ. 170] γράφει στο *Κβαντική Μηχανική και Πραγματικότητα*: «οι έννοιες της φυσικής σχετίζονται με έναν πραγματικό εξωτερικό κόσμο, δηλαδή, σχηματίζονται ιδέες σε σχέση με πράγματα όπως σώματα, πεδία, κ.τ.λ., τα οποία διεκδικούν ‘πραγματική ύπαρξη’ ανεξάρτητη από το παρατηρούν υποκείμενο –ιδέες οι οποίες, από την άλλη μεριά, έχουν υπεισέλθει σε όσο το δυνατόν ασφαλέστερη σχέση με τα αισθητηριακά δεδομένα».

³⁹⁷ Murdoch (1987) σελ. 215.

³⁹⁸ Fine (1996) σελ. 108.

³⁹⁹ Fine (1996) σελ. 109.

⁴⁰⁰ Fine (1996) σελ. 95.

⁴⁰¹ Fine (1996) σελ. 110.

χρόνο: η πραγματική γεγονοτική κατάσταση του συστήματος S_2 είναι ανεξάρτητη από το τι συμβαίνει στο σύστημα S_1 , το οποίο είναι χωρικά (spatially) διαχωρισμένο από το προηγούμενο.⁴⁰³ Όσο για το μονισμό, ο Einstein προτιμούσε να μην υπάρχουν περισσότερες από μία κατηγορίες πραγματικών αντικειμένων, δηλαδή και σημειακά σωματίδια (point-particles) και συνεχή πεδία (continuous fields). Αν εξαιρέσουμε την ανεξαρτησία από τον νου του παρατηρητή, στην οποία έχουμε εκτενώς αναφερθεί και υποστηρίζει ότι δεν παραβιάζεται από την κβαντική θεωρία, τα χαρακτηριστικά που αποδίδει ο Einstein σε ό,τι ονομάζει ‘ρεαλιστική θεωρία’ είναι είτε χαρακτηριστικά που καθιέρωσε η κλασική φυσική (αιτιοκρατία, διαχωρισμός φυσικών συστημάτων και χωροχρονική περιγραφή) είτε προσωπικές του προτιμήσεις (μονισμός). Η αντίθεσή του για παράδειγμα στον πιθανοκρατικό χαρακτήρα της κβαντικής θεωρίας δεν υπαγορευόταν από την υιοθέτηση κάποιας ρεαλιστικής προκειμένης, αλλά από τον εθισμό του –εθισμός που χαρακτήριζε κι άλλους φυσικούς της εποχής– στον αιτιοκρατικό χαρακτήρα της κλασικής φυσικής. Ένας αιτιοκρατικός χαρακτήρας που, αν λάβουμε υπόψη τις επισημάνσεις του Earman,⁴⁰⁴ ακόμα και στην περίπτωση της κλασικής φυσικής επιτυγχάνεται μόνο εάν αυτή επενδυθεί με ορισμένες *ad hoc* προϋποθέσεις –‘δεκανίκια’ όπως τις χαρακτηρίζει ο Earman– είτε ο κόσμος που επιδιώκει να περιγράψει είναι τελικά ντετερμινιστικός είτε όχι. Εφόσον η πραγματικότητα του μικρόκοσμου όπως αποκαλυπτόταν απέκλινε εν μέρει από την κλασική φυσική, το να παραμένει κανείς προσκολλημένος όπως ο Einstein σε κάποια κλασικά χαρακτηριστικά δεν συνιστούσε ρεαλισμό και ενδεχομένως να εμπόδιζε και την πρόοδο της επιστήμης. Ο Einstein δεν ήταν ρεαλιστής με τη σύγχρονη έννοια του όρου αλλά ‘δέσμιος’ κλασικών αντιλήψεων. Όταν ο Sommerfeld προειδοποιούσε τους μαθητές του να μην ασχοληθούν με τον ανέλπιδο σκοπό να ‘εξηγήσουν’ το κβάντο αλλά απλώς να το αποδεχθούν, ουσιαστικά δεν τους προέτρεπε να ακολουθήσουν μια μη ρεαλιστική στάση αλλά μη κλασική. Η κβαντική θεωρία με την εισαγωγή του κβάντου εξήγησε με υποδειγματικό τρόπο κάποια προηγουμένως ανεξήγητα φαινόμενα όπως τη σταθερότητα των ατόμων και τα ατομικά φάσματα, μόνο που ο τρόπος δεν ήταν

⁴⁰² Fine (1996) σελ. 97-105.

⁴⁰³ Einstein (1949) σελ. 85.

⁴⁰⁴ Earman (1986), Earman (1992). Βλέπε δεύτερο μέρος της διατριβής, ενότητα 2.3.3.

κλασικός. Η εμμονή στην κλασική εικόνα του κόσμου θα οδηγούσε σε αδιέξοδο τους νέους λαμπρούς επιστήμονες και όχι η ρεαλιστική στάση απέναντι στην επιστήμη τους.

Από τις παραπάνω αναφορές διαπιστώνουμε ότι οι φυσικοί χρησιμοποιούσαν τις φιλοσοφικές έννοιες ανομοιογενώς και χωρίς αυστηρότητα. Η περίπτωση του ρεαλισμού ούτε η μόνη είναι ούτε η πιο χαρακτηριστική. Έχει επισημανθεί ήδη ότι το ίδιο παρατηρείται με τις έννοιες αιτιότητα και αιτιοκρατία ή ντετερμινισμός.⁴⁰⁵ Οι φυσικοί αναφέρονταν σε αιτιακή περιγραφή και στην αρχή της αιτιότητας έχοντας κατά νου τις περισσότερες φορές την αιτιοκρατία. Ο Bohr, συγκεκριμένα, θυμίζουμε ότι αντιλαμβανόταν την αιτιότητα με έναν μάλλον ιδιοσυγκρασιακό τρόπο συνδέοντάς την με τους νόμους διατήρησης της ενέργειας και της ορμής· εκλάμβανε τη δυνατότητα εφαρμογής των δύο αυτών νόμων ισοδύναμη με τη δυνατότητα μιας αιτιακής περιγραφής. Στο πλαίσιο αυτό θεωρούσε ότι μια αιτιακή περιγραφή των ατομικών φαινομένων είναι συμπληρωματική της χωροχρονικής τους αναπαράστασης και ως εκ τούτου δεν μπορούμε να έχουμε και τις δύο ταυτόχρονα. Μια αιτιακή χωροχρονική περιγραφή αποκλείεται από την κβαντική θεωρία.⁴⁰⁶

Συνοψίζοντας, κατά την ιστορική περίοδο στην οποία αναφέρεται ο Fine, τροχοπέδη για την πρόοδο της επιστήμης δεν ήταν η ρεαλιστική στάση απέναντι στις φυσικές θεωρίες, αλλά η εμμονή σε ένα κλασικό πρότυπο θεωριών που δεν μπορούσε να οδηγήσει σε συνεπείς λύσεις προκειμένου να εξηγηθούν νέα –αλλά και κάποια παλιά– παρατηρησιακά δεδομένα και πειράματα σαν αυτά που μας απασχόλησαν –η ακτινοβολία του μέλανος σώματος, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton. Η στάση που υιοθέτησαν οι θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας για να πορευθούν στο δρόμο της επιστημονικής ανάπτυξης ήταν ουσιαστικά μη κλασική και όχι μη ρεαλιστική. Οι ανακαλύψεις τους, ασχέτως με το τι μπορεί να πίστευαν οι ίδιοι, δεν έπληξαν τον ρεαλισμό αλλά την κλασική εικόνα του κόσμου η οποία είχε τόσο καλά εδραιωθεί στη συνείδηση των φυσικών. Αποστασιοποιούμενοι μέσω αυτών μερικώς από την κλασική φυσική και όχι από την πραγματικότητα, καθίστανται κατ' ουσίαν ρεαλιστές με την καθημερινή έννοια του όρου. Η μερική αποστασιοποίηση από την παλιά θεωρία

⁴⁰⁵ Οι έννοιες της αιτιότητας και της αιτιοκρατίας (ή ντετερμινισμού) μας απασχόλησαν εκτενώς στο δεύτερο μέρος της διατριβής στην ενότητα 2.3.3. Εκεί είδαμε κιόλας αναλυτικά και με αποσπάσματα τους τρόπους με τους οποίους τις αντιλαμβάνονταν πολέμιοι και κυρίως υπέρμαχοι της κβαντικής μηχανικής.

σε περιόδους κρίσης είναι μεθοδολογικά επιβεβλημένη και δεν θα πρέπει κατ' ανάγκην να εκλαμβάνεται ως μη ρεαλιστική.

⁴⁰⁶ Bohr (1928/1985) σελ. 148. Bohr (1929/1985) σελ. 247-8. Bohr (1931/1985) σελ. 369. Ben Menahem (1989) σελ. 313.

4. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ– ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Στόχος της παρούσας διατριβής, όπως έχει αναφερθεί ήδη από την αρχή, ήταν η διερεύνηση του ζητήματος κατά πόσο η κβαντική θεωρία, η πιο εμπειρικά επιτυχής επιστημονική θεωρία μας, μπορεί να αντιμετωπισθεί ρεαλιστικά παρά τα καινοτόμα μη κλασικά χαρακτηριστικά της: χαρακτηριστικά τα οποία κατά καιρούς από πολλούς και πολλές θεωρήθηκαν τροχοπέδη μιας ρεαλιστικής αντιμετώπισης της θεωρίας. Αφού πρώτα συγκροτήσαμε την έννοια της ‘κβαντικότητας’ ώστε να είμαστε σε θέση να ελέγξουμε εάν αντιφάσκει ή όχι με τη σύγχρονη στάση περί επιστημονικού ρεαλισμού, έπειτα προχωρήσαμε στη στοιχειώδη συγκρότηση της έννοιας της ‘κλασικότητας’ ώστε να μπορέσουμε να διαπιστώσουμε σε τι βαθμό οι θέσεις του επιστημονικού ρεαλισμού εξαρτώνται από αυτήν. Τα συμπεράσματα στα οποία καταλήξαμε είναι τα ακόλουθα.

Όσον αφορά την ανεξαρτησία των κβαντικών αντικειμένων, και κατ’ επέκταση του κόσμου, από τον νου ή τη συνείδηση του παρατηρητή τονίστηκε επανειλημμένα ότι ο επεμβατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης δεν την παραβιάζει. Όπως εξηγήθηκε, οι μη ‘προϋπάρχουσες’ ιδιότητες που λαμβάνονται από τα κβαντικά συστήματα μέσω της διεξαγωγής μετρήσεων, διαμορφώνονται ως υπάρχουσες παρουσία των πειραμάτων που πραγματοποιούνται και όχι παρουσία των πειραματιστών. Στην κβαντική, όπως και στην κλασική φυσική, από τη στιγμή που οι μετρήσεις ή τα πειράματα τεθούν σε λειτουργία, οι πειραματιστές καθίστανται περιττοί για την αποκάλυψη ή τη λήψη ιδιοτήτων από τα αντικείμενα. Υποστηρίχθηκε ότι η αιτιακή αλληλεπίδραση είναι απαραίτητη για να γνωρίσουμε τον κόσμο, τόσο στην κλασική όσο και στην κβαντική επικράτεια, τον οποίο γνωρίζουμε έστω κι αν αυτή παίρνει την ακραία μορφή της συνδιαμόρφωσης ιδιοτήτων ή της πλαισιακής εξάρτησής τους από τη μετρητική διαδικασία. Η λογική ή εννοιολογική ανεξαρτησία των όσων γνωρίζουμε για τον κόσμο, η ανεξαρτησία δηλαδή από τις μεθόδους επαλήθευσης που χρησιμοποιήθηκαν ή από τις εννοιολογήσεις και τις θεωρήσεις που μας χαρακτήριζαν και μας ώθησαν να χρησιμοποιήσουμε τις συγκεκριμένες μεθόδους, δεν πλήττεται από την κβαντική φυσική –παρά τον καινοφανή τρόπο παραβίασης, μέσω μετρήσεων ή πειραμάτων, της φυσικής ανεξαρτησίας σε αυτήν. Και στην περίπτωση της κβαντικής, όπως και στην περίπτωση της μετάβασης από την αριστοτελική φυσική στη φυσική του Γαλιλαίου και του Νεύτωνα, η αλληλεπίδραση με τον κόσμο διενεργήθηκε βάσει στέρεα

εδραιωμένων αντιλήψεων που δεν εμπόδισαν όμως την ανάδυση νέων πεποιθήσεων για αυτόν έστω κι αν συγκρούονταν με παλιές. Ποιο άλλο γεγονός εκτός από αυτό θα μπορούσε να θεωρηθεί ως πειστικότερη απόδειξη της λογικής-εννοιολογικής ανεξαρτησίας όσων πιστεύουμε για τον κόσμο; Οι επιστημονικές θεωρίες μας περιγράφουν τον κόσμο προσεγγίζοντας την αλήθεια για αυτόν όλο και περισσότερο· δεν αποτελούν νοητικά κατασκευάσματα απλά και μόνο για την περιγραφή των φαινομένων του –κατασκευάσματα τα οποία δεν έχουν καμιά σχέση με την πραγματική φύση του.

Για το επίμαχο θέμα, κατά πόσο η παραβίαση της ‘αρχής περί των εγγενών τιμών’ στην κβαντική μηχανική πλήττει την αναφορά του ρεαλιστή σε καθορισμένη δομή του κόσμου, υποστηρίξαμε τα εξής. Η καθορισμένη δομή του κόσμου μπορεί να περιλαμβάνει ό,τι μας υπαγορεύει για τις ιδιότητες των αντικειμένων η καλύτερη επιστημονική θεωρία μας. Επομένως, εφόσον η καλύτερη θεωρία μας για τον μικρόκοσμο είναι η κβαντική θεωρία, στοιχεία της καθορισμένης δομής του κόσμου αποτελούν μεταξύ άλλων οι καταστάσεις υπέρθεσης, η ύπαρξη ασύμβατων ιδιοτήτων, οι σχέσεις απροσδιοριστίας, η πλαισιακότητα και η μη διαχωρισιμότητα. Θα επαναλάβουμε πως καθορισμένη δομή για τον ρεαλιστή είναι ό,τι καθορίζεται από την τρέχουσα επιστήμη μας καθώς εκείνη προσεγγίζει την αλήθεια περισσότερο από τις προηγούμενες.

Στο δεύτερο κεφάλαιο μας απασχόλησε ένα ακόμα θέμα που άπτεται της ανεξαρτησίας, το θέμα της αντικειμενικότητας μιας επιστημονικής θεωρίας. Η άποψη που υπερασπιστήκαμε ήταν ότι μια επιστημονική θεωρία είναι αντικειμενική εφόσον είναι εξασφαλισμένη η ανεξαρτησία των αποτελεσμάτων και των περιγραφών της από τον νου του παρατηρητή και όχι εφόσον αποκλείει κάθε μορφή εξάρτησης. Η σχετικότητα ως προς το μετρητικό πλαίσιο ή ο επεμβατικός χαρακτήρας της κβαντικής μέτρησης δεν πλήττει την αντικειμενικότητα. Όπως αναφέρεται χαρακτηριστικά στο απόσπασμα που παραθέσαμε από τον Fock, «τα αντικείμενα του μικρόκοσμου είναι το ίδιο πραγματικά και οι ιδιότητές τους το ίδιο αντικειμενικές όσο είναι τα αντικείμενα και οι ιδιότητές τους στην κλασική φυσική».

Διακρίνοντας τον ρεαλισμό από αντίπαλες φιλοσοφικές θέσεις αξίζει ίσως να αναφερθούμε ξανά στη διάκρισή του από τον αναγωγιστικό εμπειρισμό, ο οποίος, ενώ αποδέχεται τις μη παρατηρήσιμες οντότητες και τους θεωρητικούς όρους που θέτουν οι επιστημονικές θεωρίες, θεωρεί ότι ανάγονται πλήρως σε παρατηρήσιμες οντότητες ή φαινόμενα. Ο κόσμος και ο παρατηρήσιμος κόσμος για τον αναγωγιστικό

εμπειριστή –όπως και για τον εργαλειοκράτη– ταυτίζονται· δεν θεωρεί κατ’ αρχήν δυνατό, όπως ο ρεαλιστής, να υπάρχει στον κόσμο επιπλέον περιεχόμενο από όσο μπορούμε να παρατηρήσουμε. Οι θεωρητικοί όροι ως γνωστόν αποτελούν το αποτέλεσμα της προσπάθειας από τη μεριά του ρεαλιστή να συλληφθεί αυτό το ‘επιπλέον περιεχόμενο’.

Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μηχανικής πλήττει άραγε τη ρεαλιστική θέση; Όχι, εφόσον αυτός ενδέχεται να αντανακλά τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί η Φύση στο κβαντικό επίπεδο. Πώς μπορούμε όμως να γνωρίζουμε κάτι τέτοιο με βεβαιότητα; Δεν μπορούμε, όπως δεν μπορούσαμε και στην περίπτωση της κλασικής φυσικής. Η επιβεβαίωση της πιθανοκρατίας ή της αιτιοκρατίας εξαρτάται αποκλειστικά από τη δομή του κόσμου και όχι από το τι γνωρίζουμε εμείς ή τι μπορούμε να γνωρίσουμε –αποτελούν οντολογικούς ισχυρισμούς και όχι γνωσιολογικούς. Ακόμα και η κλασική φυσική απέδιδε ντετερμινιστικό χαρακτήρα στον κόσμο μόνο εάν επενδύονταν με ορισμένες *ad hoc* προϋποθέσεις, ασχέτως αν ο κόσμος που επεδίωκε να περιγράψει, και που περιέγραφε προσεγγιστικά, ήταν τελικά ντετερμινιστικός ή όχι.

Ένα άλλο θέμα που μας απασχόλησε αρκετά ήταν η στάση των θεμελιωτών της κβαντικής θεωρίας την περίοδο της θεμελίωσης και ανάπτυξής της. Υποστηρίξαμε ότι, η εξέταση του εάν η ρεαλιστική στάση εκ μέρους των επιστημόνων υπήρξε πάντοτε παράγοντας προόδου στην ανάπτυξη της επιστήμης μεταθέτει την προσοχή από τις θεωρίες στα πρόσωπα που τις διατύπωσαν. Ο ρεαλιστικός ισχυρισμός όμως περί εξήγησης της προόδου της επιστήμης σχετίζεται με τις θεωρίες αυτές καθαυτές και δεν πλήττεται ούτε ενισχύεται από μια αρνητική ή θετική απάντηση στο προαναφερθέν ζήτημα. Παρόλα αυτά, διαφωνώντας με τον Fine, υποστηρίξαμε ότι η ουσιαστική διάκριση μεταξύ των θεμελιωτών της κβαντικής θεωρίας, κατά την άσκηση της επιστήμης τους, δεν ήταν ρεαλιστές έναντι αντιρεαλιστών αλλά ‘προσκολλημένοι στις κλασικές αντιλήψεις’ και μη. Οπότε, υποστηρίξαμε στη συνέχεια ότι δεν ήταν η μη ρεαλιστική στάση κάποιων από αυτούς που συνετέλεσε στην πρόοδο της επιστήμης αλλά η *μη κλασική*. Αν παραδοσιακά οι πολέμιοι της κβαντικής μηχανικής ταυτίζονται με τον ρεαλισμό και οι υπέρμαχοι αυτής με τον αντιρεαλισμό, τούτο οφείλεται κυρίως στη σύγχυση που υπήρχε, και υπάρχει ακόμα, και που σύμφωνα με αυτήν αποδίδονται ως μη όφειλε χαρακτηριστικά της ‘κλασικότητας’ στη θέση του επιστημονικού ρεαλισμού. Αυτό δεν σημαίνει ότι ορισμένοι από τους θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας δεν ήταν

όντως ρεαλιστές ή αντιρεαλιστές. Σημαίνει απλώς ότι θα μπορούσε κάποιος να είναι πολέμιος της κβαντικής θεωρίας λόγω του ολοφάνερα μη κλασικού χαρακτήρα της και ταυτόχρονα να είναι αντιρεαλιστής· να μην αντιμετωπίζει για παράδειγμα ρεαλιστικά τις μη παρατηρήσιμες οντότητες ή τους θεωρητικούς όρους ούτε της κλασικής ούτε της κβαντικής φυσικής.

Δύο σημαντικά θέματα του ρεαλισμού, το θέμα της αξιοπιστίας των απαγωγικών-ενισχυτικών συναγωγών και το θέμα της συνέχειας στην αναφορά κατά την αλλαγή θεωριών δεν μας απασχόλησαν. Κι αυτό κυρίως διότι θεωρούμε πως η σχέση τους με τον ρεαλισμό είναι γενικότερη και δεν άπτονται ειδικώς της σχέσης ρεαλισμού και κβαντικής φυσικής. Ελπίζουμε να ασχοληθούμε ίσως στο μέλλον με αυτά.

Ωστόσο, θα τολμήσουμε να δώσουμε εδώ μια υποτυπώδη απάντηση στο ζήτημα της συνέχειας κατά την αλλαγή θεωριών και συγκεκριμένα κατά την αλλαγή από την κλασική στην κβαντική θεωρία. Η κλασική φυσική συνέλαβε το γεγονός ότι στον κόσμο έχουμε εκπομπή και απορρόφηση ακτινοβολίας. Η κβαντική φυσική πήγε ένα βήμα παραπέρα και εξήγησε γιατί η εκπομπή και η απορρόφηση της ακτινοβολίας, αλλά και η διάδοση της ελεύθερης ακτινοβολίας, γίνεται με ασυνεχή τρόπο. Στην κλασική φυσική δεν τίθεται θέμα παραβίασης της αρχής της τοπικότητας ούτε της αρχής της διαχωρισιμότητας. Η κβαντική φυσική, υπό ορισμένες ερμηνείες, συνεχίζει να ικανοποιεί την αρχή τοπικότητας αλλά εκδηλώνεται μη διαχωρίσιμη. Προβλήματα που ανέκυψαν στην κλασική, ήρθε η κβαντική φυσική να τα απαντήσει. Οι απαντήσεις στα προβλήματα οφείλουν να έχουν στοιχεία συνέχειας όπως και ασυνέχειας μεταξύ των δύο θεωριών, αφού αφορούν προβλήματα που ανακύπτουν στη μία θεωρία και επιλύονται στην άλλη. Η συνέχεια υπάρχει και διαπιστώνεται εφόσον την αναζητούμε.

Είναι άραγε η σύγχρονη στάση του επιστημονικού ρεαλισμού που υπερασπιστήκαμε αφελής ή απλοϊκή; Κατά τη γνώμη μας αφελής είναι ο επιστημονικός ρεαλισμός ο οποίος είναι προσαρμοσμένος στην κλασική ή την κβαντική εικόνα του κόσμου. Μια βιώσιμη αντίληψη περί επιστημονικού ρεαλισμού θα πρέπει να στέκει υπεράνω των επιστημονικών θεωριών και θα πρέπει, χωρίς να είναι τετριμμένος, να έχει την 'ευελιξία' να ερμηνεύσει ρεαλιστικά όλες τις επιτυχημένες επιστημονικές θεωρίες μας. Με άλλα λόγια, οφείλει στην προκειμένη περίπτωση να ερμηνεύει ρεαλιστικά την κλασική και την κβαντική θεωρία συνηγορώντας υπέρ της προσεγγιστικής τους αλήθειας. Ένας επιστημονικός

ρεαλισμός 'κομμένος και ραμμένος' είτε στη μία είτε στην άλλη επιστημονική θεωρία, εκτός του ότι είναι μάλλον καταδικασμένος από την επόμενη επιστημονική επανάσταση –διότι δεν μπορούμε να αποκλείσουμε ότι δεν θα υπάρξει 'επόμενη'–, θα πρέπει να αντιμετωπίζεται με καχυποψία ως μια φιλοσοφική θέση εξαρτώμενη από τις επιστημονικές ανακαλύψεις του παρελθόντος όπως και του μέλλοντος. Η κβαντική φυσική επέτυχε να αλλάξει την εικόνα μας για τον κόσμο χωρίς να αλλάξει ουσιωδώς τη φιλοσοφική μας θέση για τις επιστημονικές θεωρίες είτε αυτή είναι ρεαλιστική είτε είναι αντιρεαλιστική.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- Albert, D. Z. (1992). *Quantum mechanics and experience*, Harvard University Press.
- Αραγεώργης, Α. (2005). «Φιλοσοφία και Σύγχρονη Φυσική», *Δευκαλίων* 23/2: 117-141.
- Αραγεώργης, Α. (2006α). «Θεμέλια και Καινοτομίες της Κβαντικής Μηχανικής», σημειώσεις για το μάθημα *Φιλοσοφίας της Φυσικής*, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Αραγεώργης, Α. (2006β). «Το Πρόβλημα της Κβαντικής Μέτρησης», σημειώσεις για το μάθημα *Φιλοσοφίας της Φυσικής*, ΣΕΜΦΕ, ΕΜΠ.
- Αραμπατζής, Θ. (2000). «Ιστορία της Επιστήμης και Σχετικισμός», *Νεύσις* 9: 75-93.
- Aspect, A., Dalibard, J., & Roger, G. (1982). «Experimental Tests of Bell's Inequalities Using Time-Varying Analyzers», *Physical Review Letters*, 49: 1804-7.
- Βουδούρης Γ., Μπαλτάς Α. (1985). *Σύντομη Κβαντική Μηχανική*, έκδοση Τεχνικού Επιμελητηρίου Ελλάδος.
- Baltas, A. (1998). «Physics as Historiography *in Actu*: Assuring the Identity Conditions for the Discipline», (αδημοσίευτο κείμενο).
- Μπαλτάς, Α. (1991). «Πρόταση για τη συγκρότηση της έννοιας 'επιστήμη'», *περιοδικό λόγου χάριν*.
- Bell, J.S. (1964). «On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox», *Physics* 1:195-200. [Bell (1987), σελ. 14-19]
- Bell, J.S. (1966). «On the problem of hidden variables in quantum mechanics», *Rev. Mod. Phys.* 38: 447-52. [Bell (1987), σελ. 1-13]
- Bell, J.S. (1987). *Speakable and unspeakable in quantum mechanics*, Cambridge University Press.
- Beller, M. & Fine, A. (1994). «Bohr's response to EPR», στο J. Faye & H.J. Folse (editors), *Niels Bohr and Contemporary Philosophy*, Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 153: 1-31. Kluwer Academic Publishers.
- Ben-Menahem, Y. (1989). «Struggling with Causality: Schrödinger's Case»,

- Studies in History and Philosophy of Science*, Vol. 20, No. 3: 307-334.
- Berkeley, G. (1710/1998). *A Treatise Concerning the Principles of Human Knowledge*, edited by Jonathan Dancy, Oxford University Press.
- Bohm, D. (1951/1989). *Quantum Theory*, Dover Publications, Inc., New York.
- Bohr, N. (1927/1985). «Fundamental problems of the quantum theory», στο *Collected Works*, Vol. 6, *Foundations of Quantum Physics I (1926-1932)*, σελ. 75-80, Jørgen Kalckar (ed.). Amsterdam: North-Holland.
- Bohr, N. (1928/1985). «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory», *Nature* **121**: 580-590, στο *Collected Works*, Vol. 6, *Foundations of Quantum Physics I (1926-1932)*, σελ. 148-158, Jørgen Kalckar (ed.). Amsterdam: North-Holland.
- Bohr, N. (1929/1985). «The Atomic Theory and the Fundamental Principles underlying the Description of Nature», στο *Collected Works*, Vol. 6, *Foundations of Quantum Physics I (1926-1932)*, σελ. 236-253, Jørgen Kalckar (ed.). Amsterdam: North-Holland.
- Bohr, N. (1931/1985). «Space–Time–Continuity and Atomic Physics», στο *Collected Works*, Vol. 6, *Foundations of Quantum Physics I (1926-1932)*, σελ. 361-370, Jørgen Kalckar (ed.). Amsterdam: North-Holland.
- Bohr, N. (1935). «Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review* **48**: 696-702.
- Bohr, N. (1948). «On the Notions of Causality and Complementarity», *Dialectica* **2**, 312-19.
- Bohr, N. (1985). *Collected Works*, E. Rüdinger (ed.). Amsterdam: North-Holland.
- Born, M. (1949). *Natural Philosophy of Cause and Chance*, Oxford: Clarendon Press.
- Born, M. (1956). *Physics in my Generation*, A selection of papers, PERGAMON PRESS, London & New York.
- Born, M. (1971). *The Born-Einstein letters*, New York: Walter and Co.
- Boyd, R. (1980). «Scientific Realism and Naturalistic Epistemology», *PSA: Proceedings of the Biennial Meeting of the Philosophy of Science*

- Association*, Vol. 1980, Volume Two: Symposia and Invited Papers (1980), σελ. 613-662.
- Boyd, R. (1983). «On the Current Status of the Issue of Scientific Realism», *Erkenntnis* 19: 45-90.
- Boyd, R. (1989). «What Realism Implies and What it Does Not», *Dialectica* Vol.43, No 1-2: 5-29.
- Boyd, R. (1990). «Realism, Approximate Truth, and Philosophical Method», reprinted in Papineau (ed.) (1996) *The Philosophy of Science*, Oxford University Press.
- Bussey, P.J. (1982). «“Super-luminal communication” in Einstein-Podolsky-Rosen experiments», *Physics Letters 90A*, number1,2: 9-12.
- Butterfield, H. (1980/1988). *Η καταγωγή της σύγχρονης επιστήμης, μετάφραση Ιορδάνης Αρζόγλου, Αντώνης Χριστοδουλίδης, εκδόσεις Μορφωτικό Ίδρυμα Εθνικής Τραπέζης.*
- Γαβρόγλου, Κ. (1994). «Εισαγωγή, Αφιέρωμα: Η επιστημονική επανάσταση», *Νεύσις 1* σελ. 9-17, εκδόσεις Νεφέλη.
- Cabello, A., Estebaran J. M., García-Alcaine G. (1996). «Bell-Kochen-Specker theorem: A proof with 18 vectors», *Physics Letters A*, Vol. 212, 4, 183-7.
- Châtelet, F. (ed) (1979/1990). *Η Φιλοσοφία: από τον Γαλιλαίο ως τον Ζ. Ζ. Ρουσσώ*, τόμος Β', 2^η έκδοση, μετάφραση Κωστής Παπαγιώργης, εκδόσεις Γνώση.
- Churchland, P.M. (1985). «The Ontological Status of Observables: In Praise of the Superempirical Virtues», in Churchland P.M. and Hooker C.A. (eds.) (1985). *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*. Chicago: University of Chicago Press.
- Churchland P.M., Hooker C.A. (eds.) (1985). *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*. Chicago: University of Chicago Press.
- Cohen, I.B. (1980). *The Newtonian Revolution*, Cambridge University Press.
- Crayling, A.C. (2005). «Berkeley's argument for immaterialism», *The Cambridge Companion to Berkeley*, edited by Kenneth P. Winkler, Cambridge

- University Press.
- De Muynck, W.M. (2002). *Foundations of Quantum Mechanics, an Empiricist Approach*, Kluwer Academic Publishers.
- Descartes, R. (1641/1996). *Meditations on First Philosophy*, translated and edited by John Cottingham, Cambridge University Press.
- Descartes, R. (1649/1996). *Τα Πάθη της Ψυχής*, εισαγωγή-μετάφραση Γιάννης Πρελορέντζος, εκδόσεις Κριτική.
- Devitt, M. (1997). *Realism and Truth*, 2nd ed., Repr. Princeton University Press.
- Devitt, M. (2005). Scientific Realism, *The Oxford Handbook of Contemporary Philosophy*, edited by Frank Jackson & Michael Smith, Oxford University Press.
- Dicker, G. (1998). *Hume's Epistemology & Metaphysics: an introduction*, London: Routledge.
- Dicker, G. (2004). *Kant's theory of Knowledge: an analytical introduction*, Oxford University Press.
- Earman, J. (1986). *A primer on determinism*, Western Ontario Series in Philosophy of Science, vol. 32, D. Reidel.
- Earman, J. (1992). «Determinism in the Physical Sciences», στο *Introduction to the Philosophy of Science* (a text by members of the Department of the History and Philosophy of Science of the University of Pittsburgh). Prentice Hall, σελ. 232-268. (ελληνική μετάφραση, Εισαγωγή στη φιλοσοφία της επιστήμης (1998), Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.)
- Einstein, A. (1905/2000). «Μια ευρετική άποψη για την εκπομπή και τον μετασχηματισμό του φωτός», στο *Αϊνστάιν 1905 annus mirabilis*, πρόλογος Roger Penrose, επιμέλεια και εισαγωγή John Stachel, ελληνική μετάφραση Νίκος Ταμπάκης, εκδόσεις Γκοβόστη.
- Einstein, A., Podolsky, B., Rosen, N. (1935). «Can quantum mechanical description of physical reality be considered complete?», *Physical Review* 47:777-80.
- Einstein, A. (1948). «Quantenmechanik und Wirklichkeit», *Dialectica* 2:320-324.
- Einstein, A. (1949). «Autobiographical Notes», στο *Albert Einstein: Philosopher*

- Scientist*, P.A. Schilpp (ed.), MJF Books, New York.
- Einstein, A. (1954). *Ideas and opinions*, New York: Crown Publishing Co.
- Feynman, R. (1967/1990). *Ο χαρακτήρας του φυσικού νόμου*, μετάφραση Ελένη Πιπίνη, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Fine, A. (1986). «Unnatural Attitudes: Realist and Instrumentalist Attachments to Science», *Mind* 95: 149-179.
- Fine, A. (1996). *The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theory*. 2nd ed. Chicago: University of Chicago Press. [1st ed. 1986]
- Fock, V. A. (1957). «On the Interpretation of Quantum Mechanics», *Czechoslovak Journal of Physics* 7: 643-656.
- Franklin, A. (2007). Appendix 5: Right Experiment, Wrong Theory: The Stern-Gerlach Experiment,
<http://plato.stanford.edu/entries/physics-experiment/app5.html>
- Ghirardi, G.C., Rimini, A., Weber, T. (1980). «A General Argument against Superluminal Transmission through the Quantum Mechanical Measurement Process», *Lettere al Nuovo Cimento* 27, N.10: 293-298.
- Glymour, C., (1985). «Explanation and Realism», in Churchland P.M. and Hooker C.A. (eds.) (1985). *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*. Chicago: University of Chicago Press.
- Glymour, C., (1992). «Realism and the Nature of Theories», *Introduction to the Philosophy of Science*, Prentice Hall. [Εισαγωγή στη Φιλοσοφία της Επιστήμης, ελλ. μετ. Θεοδώρου, Παγωνδιώτης, Φουρτούνης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης (1998)].
- Hacking, I. (1983). *Representing and Intervening: Introductory Topics in the Philosophy of Natural Science*. Cambridge University Press. [ελλ. μετ., Αναπαριστώντας & Παρεμβαίνοντας: Εισαγωγικά θέματα στη Φιλοσοφία της Φυσικής Επιστήμης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.Αθήνα (2002)]
- Hankins, T.L. (1989/1998). *Επιστήμη και Διαφωτισμός*, μετάφραση Γιώργος Γκουνταρούλης, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Harman, P.M. (1982/1994). *Ενέργεια Δύναμη και Ύλη: η εννοιολογική εξέλιξη της*

- φυσικής κατά τον 19^ο αιώνα, μετάφραση Τάσος Τσιαντούλας,
Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Healey, R. (1979). «Quantum Realism: naïveté is no excuse», *Synthese* **42**: 121-144.
- Healey, R. (2008). Holism and Nonseparability in Physics, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Heimann, P.M. (Harman P.M.) (1979/1994). «Οι επιστημονικές επαναστάσεις», μετάφραση Ηλίας Μαρκολέφας, Αφιέρωμα: Η επιστημονική επανάσταση *Νέυσις 1* σελ. 19-49, εκδόσεις Νεφέλη.
- Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy*. Penguin Classics 2000.
- Heisenberg, W. (1958/1978). *Φυσική και φιλοσοφία*, μετάφραση Δημοσθένης Κούρτοβικ, εκδόσεις Κάλβος.
- Held, C. (2006). The Kochen-Specker Theorem, *Stanford Encyclopedia of Philosophy*.
- Hofer, C. (2004). *Causality and Determinism: Tension, or outright Conflict?* Draft.
- Horwich, P. (1982). «Three Forms of Realism», *Synthese* **51**: 181-201.
- Howard, D. (1989). «Holism, separability, and the metaphysical implications of the Bell experiments», στο J. Cushing and E. McMullin (eds.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press, σελ. 224-253.
- Hughes, R.I.G. (1989), *The structure and interpretation of quantum mechanics*, Cambridge Mass.: Harvard University Press.
- Humberstone, I. L. (1996). «Intrinsic/Extrinsic», *Synthese* **108**, 205-67.
- Hume, D. (1739-40/1978). *A Treatise of Human Nature*, ed. L. A. Selby-Bigge and P. H. Nidditch, Oxford: Oxford University Press, 2nd edn.
- Hume, D. (1748/1975). *Enquiries Concerning Human Understanding and Concerning the Principles of Morals*, ed. L. A. Selby-Bigge and P. H. Nidditch, Oxford: Oxford University Press, 3rd edn.
- Isham, C. J. (1995). *Lectures on Quantum Theory*, Imperial College Press.

- Jammer, M. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill Book Company.
- Jarrett, J. P. (1984). «On the Physical Significance of the Locality Conditions in the Bell Arguments», *Noûs* 18, 569-589.
- Jönsson, C. (1974). «Electron Diffraction at Multiple Slits», translated by D. Brandt and S. Hirschi, *American Journal of Physics* 42, 4-11.
- Kant, I. (1781/1979), *Κριτική του Καθαρού Λόγου*, μετάφραση Αναστάσιος Γιανναράς, εκδόσεις Παπαζήση.
- Καρακώστας, Β. (1998). *Φιλοσοφία κβαντικής μηχανικής*, (Σχέδιο θεματικής ενότητας: ΕΑΠ)
- Καρακώστας, Β. (2000). «Επί του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης: Πραγματικότητα, αντικειμενικότητα και πιθανοκρατία στη σύγχρονη φυσική», *Νεύσις* 9 σελ. 95-115, εκδόσεις Νεφέλη.
- Karakostas, V. (2004). «Forms of Quantum Nonseparability and Related Philosophical Consequences», *Journal for General Philosophy of Science* 35: 283-312.
- Καρακώστας, Β. (2005a). «Περί της φύσεως και ερμηνείας της κβαντικής πραγματικότητας», *ΔΕΥΚΑΛΙΩΝ* 23/2, σελ. 223-57, εκδόσεις Στιγμή.
- Καρακώστας, Β. (2005b). «Περί της φύσεως και ερμηνείας της κβαντικής πραγματικότητας: Το πρότυπο του ενεργού επιστημονικού ρεαλισμού», *Νεύσις* 14 σελ. 48-77, εκδόσεις Νεφέλη.
- Karakostas, V. (2007). «Nonseparability, Potentiality, and the Context-Dependence of Quantum Objects», *Journal for General Philosophy of Science* 38:279-297.
- Kim, J. (1982). «Psychophysical Supervenience», *Philosophical Studies* 41, σελ. 51-70.
- Kim, J. (1998/2005). *Η Φιλοσοφία του Νου*, μετάφραση Ελένη Μανωλακάκη, επιστημονική επιμέλεια Στάθης Ψύλλος, εκδόσεις Leader Books.
- Kochen, S., & Specker, E. P. (1967). «The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics». *Journal of Mathematics and Mechanics*, Vol. 17, No. 1, 59-87.

- Koyré, A. (1991), *Δυτικός πολιτισμός*, μετάφραση Βασίλης Κάλφας, Ζήσης Σαρίκας, εκδόσεις ύψιλον/βιβλία.
- Kuhn, T.S. (1962/1981). *Η δομή των επιστημονικών επαναστάσεων*, μετάφραση Γ. Γεωργακόπουλος, Β. Κάλφας, εισαγωγή-επιμέλεια Βασίλης Κάλφας, εκδόσεις Σύγχρονα Θέματα.
- Kuhn, T.S. (1978/1987). *Black-Body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912, With a new Afterword*, The University of Chicago Press.
- Kukla, A. (1998). *Studies in Scientific Realism*, Oxford University Press.
- Kumar, M. (2008). *Quantum: Einstein, Bohr and the Great Debate about the Nature of Reality*, Icon books. [ελλ. μετ. Μαρία Παναγιωτάτου, υπό έκδοση, εκδόσεις Πατάκη].
- Langton, R., & Lewis, D. (1998). «Defining ‘intrinsic’». *Philosophy and Phenomenological Research*, 58, 333-345.
- Laudan, L. (1981). «A confutation of convergent realism». *Philosophy of Science* 48,19-48. Επαναδημοσιευμένο στο Papineau D. (ed.) (1996), σελ.107-138.
- Leplin, J. (1997). *A Novel Defense of Scientific Realism*. Oxford: Oxford University Press.
- Lindberg, D. C. (1992/1997). *Οι απαρχές της δυτικής επιστήμης*, μετάφραση Ηλίας Μαρκολέφας, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π.
- London, F., Bauer, E., (1939/1983). *The Theory of Observation in Quantum Mechanics*, Paris: Hermann. Επαναδημοσιευμένο στο J. Wheeler και W. Zurek (eds) (1983), σελ. 217-259.
- Lorentz, H. A. (1909/1916). *The Theory of Electrons and its Applications to the Phenomena of Light and Radiant Heat*, 2nd edn. 1916, Leipzig: Teubner.
- Maudlin, T. (1994). *Quantum Non-Locality and Relativity*. Oxford: Blackwell.
- Maxwell, G. (1962). «The Ontological Status of Theoretical Entities». *Minnesota Studies in the Philosophy of Science* 3. Minneapolis: University of Minnesota Press.
- McMullin, E. (1984). «A Case for Scientific Realism», in Jarrett Leplin (ed.), *Scientific Realism*. Berkeley: University of California Press.
- McMullin, E. (1991). «Comment: Selective Anti-Realism», *Philosophical Studies*

61: 97-108.

- Mehra, J., & Rechenberg, H. (1982). *The Historical Development of Quantum Theory*, Springer-Verlag.
- Merli, P. G., Missiroli, G., Pozzi, G., (1976). «On the statistical aspect of electron interference phenomena», *American Journal of Physics* 44, 306-7.
- Mermin, N. D. (1993). «Hidden variables and the two theorems of John Bell», *Reviews of Modern Physics*, Vol. 65, No. 3, 803-815.
- Murdoch, D. (1987). *Niels Bohr's philosophy of physics*, Cambridge University Press.
- Musgrave, A. (1985). «Realism versus Constructive Empiricism», in Churchland P.M. and Hooker C.A. (eds.) (1985). *Images of Science: Essays on Realism and Empiricism, with a Reply from Bas C. van Fraassen*. Chicago: University of Chicago Press.
- Nersessian, Nancy. J. (1984). *Faraday to Einstein: Constructing Meaning in Scientific Theories*, Kluwer Academic Publishers.
- Papineau, D. (ed.) (1996). *The Philosophy of Science*, Oxford University Press.
- Peirce, C. S. (1992). *The Essential Peirce: Selected Philosophical Writings*, Volume 1 (1867-1893), edited by Nathan Houser & Christian Kloesel, Indiana University Press.
- Powers, J. (1991/1995). *Φιλοσοφία και Νέα Φυσική, μετάφραση Τάσος Κυπριανίδης και Τάσος Τσιαντούλας*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Psillos, S. (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, London: Routledge.
- Psillos, S. (2000). «The Present State of the Scientific Realism Debate», *British Journal for the Philosophy of Science*, 51, 705-728.
- Psillos, S. (2002). *Causation & Explanation*, Acumen.
- Ψύλλος, Σ. (2004). «Μετριοπάθεια και τόλμη: Πώς η επιστήμη ιχνηλατεί την αλήθεια», *Φιλοσοφία και Θετικές Επιστήμες στον 20ό αιώνα*, ΕΙΕ: ΕΙΔΙΚΕΣ ΜΟΡΦΩΤΙΚΕΣ ΕΚΔΗΛΩΣΕΙΣ.
- Psillos, S. (2007). *Philosophy of Science A-Z*, Edinburgh University Press.
- Psillos, S. (2007b). How to be a Scientific Realist: A Proposal to Empiricists,

αδημοσίευτο κείμενο.

- Ψύλλος, Σ. (2008). *Επιστήμη και Αλήθεια: Δοκίμια στη φιλοσοφία της επιστήμης*, εκδόσεις Οκτώ.
- Putnam, H. (1975). *Philosophical Papers*, Vol. 1: *Mathematics, Matter and Method*, Cambridge: Cambridge University Press.
- Putnam, H. (1978). *Meaning and the Moral Sciences*, Routledge & Kegan Paul.
- Rankine, W.J.M (1881). *Miscellaneous Scientific Papers by W.J. Macquorn Rankine*, edited by W.J. Millar. London: Charles Griffin and Company.
- Redhead, M. (1987). *Incompleteness, Nonlocality, and Realism*, Oxford: Clarendon Press.
- Redhead, M. (1995). *From Physics to Metaphysics*, Cambridge University Press. [ελλ. μετ., *Από τη φυσική στη μεταφυσική*, Π.Ε.Κ., Ηράκλειο (2006)]
- Salmon M.H., Earman J., Glymour C., Lennox J.G., Machamer P., McGuire J.E., Norton J.D., Salmon W.C., Schaffner K.F. (1992). *Introduction to the Philosophy of Science*, Prentice Hall. [ελλ. μετ., *Εισαγωγή στη Φιλοσοφία της Επιστήμης*, Π.Ε.Κ., Ηράκλειο (1998)]
- Schilpp, P.A. (ed.) (1949). *Albert Einstein: Philosopher Scientist*, MJF Books, New York.
- Schrödinger, E. (1961-4/1996). *Κοντά στον άνθρωπο: Επιστήμη και Ανθρωπισμός, Η κοσμοθεωρία μου*, μετάφραση Θεοφάνης Γραμμένος, Μάριος Βερέττας, εκδόσεις Π. Τραυλός - Ε. Κωσταράκη.
- Selleri, F. (1990). *Quantum Paradoxes and Physical Reality*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- Serway R.A., Jewett J. (2007). *Physics for Scientists and Engineers: Chapters 1-39*, 6th edition, Brooks/Cole.
- Shapere, D. (1982). «Reason, Reference, and the Quest for Knowledge», *Philosophy of Science*, Vol. 49, No. 1: 1-23.
- Shimony, A. (1984). «Controllable and uncontrollable non-locality», *Επαναδημοσιευμένο στο Shimony A. (1993)*, σελ. 130-139.
- Shimony, A. (1990). «An exposition of Bell's theorem», στο Arthur I. Miller (ed.), *Sixty-two Years of Uncertainty*, New York: Plenum Publishing Corp.

- [Επαναδημοσιευμένο στο Shimony A. (1993), σελ. 90-103.]
- Shimony, A. (1993). *Search for a naturalistic world view*, Volume II: Natural science and metaphysics, Cambridge University Press.
- Sklar, L. (1992). *Philosophy of Physics*, Westview Press.
- Smart, J. J. C. (1963). *Philosophy and Scientific Realism*, London: RKP.
- Staley, R. (2008). «Worldviews and physicists' experience of disciplinary change: on the uses of 'classical' physics», *Studies in History and Philosophy of Science* 39: 298-311.
- Stuewer, R.H. (2000). «The Compton effect: Transition to quantum mechanics», *Ann. Phys. (Leipzig)* 9 (2000) 11-12: 975-989.
- Stroud, B. (1977). *Hume*, London: Routledge & Kegan Paul.
- Tonomura A., Endo J., Matsuda T., Kawasaki T., Ezawa H. (1989). «Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern», *American Journal of Physics* 57 (2), p. 117-120.
- Τραχανάς, Σ. (1985). *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Truesdell, C. (1960). «A program toward rediscovering the rational mechanics of the age of reason», *Archive for History of Exact Science* 1(1960-2), 1-36.
- Van Fraassen, B.C. (1980). *The Scientific Image*, Oxford: Clarendon Press. [ελλ. μετ. Κώστας Στεργιόπουλος, Εκδόσεις Leader Books, Αθήνα (2008)].
- Van Fraassen, B.C. (1982/1989). «The Charybdis of Realism: Epistemological Implications of Bell's Inequality», στο J. Cushing and E. McMullin (eds.), *Philosophical Consequences of Quantum Theory: Reflections on Bell's Theorem*. Notre Dame, Indiana: University of Notre Dame Press, σελ. 97-113.
- Van Fraassen, B.C. (1991). *Quantum Mechanics: An Empiricist View*, Oxford: Oxford University Press.
- Von Neumann, J. (1955). *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton: Princeton University Press. (Αρχική έκδοση στη Γερμανική γλώσσα, 1932).
- Westfall, R. S. ([1977]/1993). *Η συγκρότηση της σύγχρονης επιστήμης, μετάφραση Κρινώ Ζήση*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.

- Wheeler, J.A., Zurek, W.H. (eds) (1983). *Quantum Theory and Measurement*, Princeton: Princeton University Press.
- Woolhouse, R. S. (1988/2003). *Οι Εμπειριστές*, μετάφραση Σοφία Τσούρτη, Εκδόσεις Πολύτροπον.
- Worrall, J. (1989). «Structural Realism: The Best of Both Worlds?», στο *The Philosophy of Science* (1996), Papineau D. (ed.), Oxford University Press.
- Young, T. (1804). The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, Vol. 94, 1-16.