



**ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ  
ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ**

**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ  
ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ  
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

**ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ  
ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ**

**ΕΚΕΦΕ «ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ»**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΝΑΝΟΕΠΙΣΤΗΜΗΣ  
ΚΑΙ ΝΑΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ**

**ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΚΑΙ  
ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ**



**Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών  
«Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές»**

**Θεμέλια και φιλοσοφικές πτυχές της  
ερμηνείας Bohm**

**ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ  
της Χριστοπούλου Βασιλικής**

Επιβλέπων: Αραγεώργης Αριστείδης

Τριμελής Επιτροπή: Αραγεώργης Α., Μπαλάς Α., Παρασκευαΐδης Κ.

Αθήνα, Ιούλιος, 2014



# Abstract

The theory of quantum mechanics and the problem of its metaphysical-ontological interpretation has played significant role in epistemology and in philosophy of sciences of the twentieth century. Causality and reality in microcosm are placed in the centre of this endless philosophical controversy. Realists, although not unified, have objected to the positivistic Copenhagen interpretation which has prevailed since the decade of the '30s.

In 1952 Bohm, following De Broglie's earlier work, postulated an alternative theory which proposes hidden variables and restores the causality and reality in the microscopic level. Bohm's theory along with the quantum equilibrium hypothesis agrees with the empirical predictions of quantum mechanics. But on the other hand it is a non local theory which comes into conflict with the special relativity.

Discussion over the matter of causality, realism, locality and generally about the foundations and the philosophical aspects of Bohm's interpretations, is the object of this essay. Before that, in order to make this discussion, we have to expound the basic formalism both of Copenhagen interpretation and Bohm's, present the different philosophical approaches and subsequently appreciate Bohm's theory according to specific criteria like those of empirical adequacy, internal consistency and compatibility with other theories. This discussion has to come into terms in a dialectic way with the demands, the questions and the theorems which have been put forward during the previous century and to take into account the historical background on which Bohm's theory has been developed. This discussion it is not neutral and we have not such an intention. On the contrary its perspective and point of evaluation rests on the grounds of realism and materialism.

# Περίληψη

Η θεωρία της κβαντικής μηχανικής και το πρόβλημα της μεταφυσικής-οντολογικής της ερμηνείας έχει σημαδέψει την επιστημολογία και τη φιλοσοφία των επιστημών του εικοστού αιώνα. Η αιτιότητα και η πραγματικότητα στον μικρόκοσμο βρίσκονται στο επίκεντρο αυτής της ατέλειωτης φιλοσοφικής διαμάχης. Στη θετικιστική "ορθόδοξη" ερμηνεία που ουσιαστικά επικράτησε από τη δεκαετία του '30 αντιπαρατέθηκε η ρεαλιστική σχολή, χωρίς να είναι ενιαία αλλά με τον ρεαλισμό να αποτελεί τον κοινό της παρονομαστή.

Το 1952 ο Bohm σε συνέχεια των εργασιών του De Broglie διατυπώνει μια εναλλακτική θεωρία, η οποία εισάγει κρυμμένες μεταβλητές και αποκαθιστά την πραγματικότητα και την αιτιότητα στο μικρόκοσμο. Η θεωρία του Bohm, κάτω από την υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας, συμφωνεί με τα εμπειρικά δεδομένα της κβαντικής μηχανικής. Είναι όμως μια μη τοπική θεωρία που έρχεται σε σύγκρουση με την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Η συζήτηση πάνω στην αιτιότητα, το ρεαλισμό και την τοπικότητα και γενικά τα θεμέλια και οι φιλοσοφικές πτυχές της ερμηνείας του Bohm αποτελούν το αντικείμενο της παρούσας εργασίας. Για να γίνει όμως αυτή η συζήτηση πρέπει πρώτα να επιχειρηθεί να παρουσιαστεί ο βασικός φορμαλισμός τόσο της ορθόδοξης όσο και της ερμηνείας του Bohm, να παρουσιαστούν οι διαφορετικές φιλοσοφικές προσεγγίσεις και στη συνέχεια να αξιολογηθεί η θεωρία με βάση συγκεκριμένα κριτήρια όπως η επιστημονική επάρκεια, η εσωτερική συνοχή καθώς και η συμβατότητα της με άλλες θεωρίες. Ακόμα αυτή η συζήτηση οφείλει να διαλεχθεί με τα αιτήματα, τα ερωτήματα και τα θεωρήματα που διατυπώθηκαν στη διάρκεια του τελευταίου αιώνα και να λάβει υπόψιν το ιστορικό πλαίσιο στο οποίο αναπτύχθηκε η ερμηνεία του Bohm. Αυτή η συζήτηση ούτε είναι, ούτε προσδοκεί να είναι ουδέτερη στη διαμάχη της κβαντικής μηχανικής αλλά η κρίση και η αξιολόγηση γίνεται από τη σκοπιά του ρεαλισμού και του υλισμού.

# Περιεχόμενα

Abstract . . . . .	i
Περίληψη . . . . .	ii
<b>1 Η πληρότητα ή μη της κβαντικής μηχανικής</b>	<b>3</b>
1.1 Εισαγωγή . . . . .	3
1.2 Βασικά χαρακτηριστικά του κβαντομηχανικού φορμαλισμού . . . . .	6
1.2.1 Το βασικό θεωρητικό πλαίσιο . . . . .	6
1.2.2 Η αρχή της απροσδιοριστίας . . . . .	8
1.2.3 Η φύση των κβαντικών πιθανοτήτων . . . . .	10
1.3 Το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης . . . . .	11
1.3.1 Περιγραφή της μετρητικής διαδικασίας . . . . .	12
1.3.2 Η γάτα του Schrödinger . . . . .	13
1.3.3 Διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης . . . . .	13
1.3.4 Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης κατά τον Von Neumann . . . . .	15
1.4 Το παράδοξο EPR . . . . .	17
1.4.1 Βασικές θέσεις για την πραγματικότητα και την πληρότητα . . . . .	17
1.4.2 Αναλυτική περιγραφή του EPR . . . . .	18
1.4.3 Τοποθετήσεις και συμπεράσματα με βάση το EPR . . . . .	20
1.5 Περιορισμοί που έχουν τεθεί για τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών . . . . .	23
1.5.1 Οι ανισότητες Bell . . . . .	23
1.5.2 Το θεώρημα Kochen-Specker . . . . .	26
1.5.3 Η έννοια της πλαισιακότητας . . . . .	29
1.6 Συμπεράσματα . . . . .	31
<b>2 Η οντολογική ερμηνεία του Bohm</b>	<b>33</b>
2.1 Αφετηρίες της θεωρίας του Bohm - Η θεωρία της διπλής λύσης του De Broglie . . . . .	33
2.2 Ο Βασικός φορμαλισμός της οντολογικής θεωρίας του Bohm . . . . .	37
2.2.1 Το σύστημα ενός σωματιδίου . . . . .	37
2.2.2 Συμφωνία με κβαντική μηχανική . . . . .	39
2.2.3 Το σύστημα πολλών σωματιδίων . . . . .	40
2.3 Η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας . . . . .	43
2.4 Η πληροφορία και ο ρόλος της στη θεωρία του Bohm . . . . .	45
2.5 Το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης στη θεωρία του Bohm . . . . .	47
2.6 Πλαισιακότητα μεγεθών στη θεωρία του Bohm . . . . .	51

2.7	Μη τοπικότητα στη θεωρία του Bohm . . . . .	54
2.7.1	Ανεξαρτησία από παράμετρο και ανεξαρτησία από αποτέλεσμα . . . . .	55
2.7.2	Ύπαρξη σημάτων και κβαντική ισορροπία . . . . .	57
2.8	Σχετικιστικό αναλλοίωτο, ειδική θεωρία της σχετικότητας και η θεωρία του Bohm . . . . .	59
2.8.1	Ειδική Θεωρία της σχετικότητας και οι αντίστοιχοι περιορισμοί . . . . .	59
2.8.2	Αναλλοίωτο κατά Lorentz . . . . .	61
2.8.3	Εισαγωγή προνομιακού συστήματος αναφοράς . . . . .	62
2.9	Συμπεράσματα . . . . .	63
<b>3</b>	<b>Φιλοσοφικές προεκτάσεις της ερμηνείας του Bohm</b>	<b>66</b>
3.1	Οντολογική ερμηνεία και ρεαλισμός . . . . .	66
3.2	Ρεαλισμός και κβαντική μηχανική . . . . .	69
3.3	Ντετερμινισμός και αιτιότητα . . . . .	71
3.3.1	Η έννοια της αιτιότητας . . . . .	71
3.3.2	Ντετερμινισμός και Ιντετερμινισμός . . . . .	74
3.3.3	Αιτιότητα και αιτιοκρατία στην κλασική και κβαντική φυσική: Η μηχανιστική αντίληψη, η θετικιστική άρνηση. . . . .	74
3.3.4	Τυχαίο και αναγκαιότητα . . . . .	76
3.4	Συμπεράσματα για την ερμηνεία του Bohm . . . . .	78
	<b>Βιβλιογραφία</b>	<b>84</b>

# Κεφάλαιο 1

## Η πληρότητα ή μη της κβαντικής μηχανικής

### 1.1 Εισαγωγή

Εννοιολογικά ερωτήματα και προβληματικές πάνω στην θεωρία της κβαντικής μηχανικής και στην ερμηνεία της τέθηκαν ουσιαστικά από τις απαρχές της. Η κβαντική μηχανική δεν μπορεί να κατανοηθεί εύκολα σε ένα παραδεδομένο, κλασικό πλαίσιο διαισθήσεων για τη φυσική πραγματικότητα. Έτσι τροφοδότησε και συνεχίζει να τροφοδοτεί διαμάχες πάνω στη φυσική της σημασία και στη φιλοσοφική της ερμηνεία.

Ο όρος "φιλοσοφική ερμηνεία μιας φυσικής θεωρίας" δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένος, καθώς και εν γένει η σχέση της φιλοσοφίας με τις επιστήμες αποτελεί πεδίο αντιπαραθέσεων και εν τέλει σχετίζεται με το ερώτημα τι είναι η ίδια η φιλοσοφία που απαντιέται με διαφορετικό τρόπο από τα διάφορα φιλοσοφικά ρεύματα στις ιστορικές συνθήκες που αυτά διαμορφώθηκαν. Τα "γενικά φιλοσοφικά ερωτήματα" εμφανίζονται ως ερωτήματα διαχρονικά, με αποτέλεσμα να υποστηρίζεται από ορισμένους ότι η φιλοσοφία δεν έχει ιστορία. Όμως τα ερωτήματα αυτά τίθενται κάθε φορά με νέους όρους, άρα τίθενται ιστορικά και συνεπώς διαφοροποιημένα. Ο τρόπος με τον οποίο τίθενται καθορίζεται τόσο από το επίπεδο της γνώσης όσο και από το σύνολο των κοινωνικών όρων μιας εποχής.

Αντικείμενο της φιλοσοφίας, από την αρχαιότητα μέχρι σήμερα, είναι ο κόσμος ως ολό-

τητα, και σε οργανική συνάρτηση με αυτό η γνωσιακή δυνατότητα της ανθρώπινης νόησης.<sup>1</sup> Κεντρικός στόχος μιας φιλοσοφικής ερμηνείας μιας φυσικής θεωρίας είναι να απαντηθεί το ερώτημα: Πώς θα μπορούσε να είναι ο κόσμος και η γνωσιακή μας πρόσβαση σε αυτόν, αν αυτή η θεωρία είναι αληθής; Και η απάντηση συγκροτεί μια οντολογική-γνωσιολογική ερμηνεία αυτής της φυσικής θεωρίας.

Συνοψίζοντας τα κύρια χαρακτηριστικά της κβαντικής μηχανικής από τα οποία εκκινούν και οι διαφορετικές ερμηνείες, θα μπορούσε κανείς να αναφερθεί στα ακόλουθα:

- Η αρχή της απροσδιοριστίας, η ισχύς των ανισοτήτων του Heisenberg καθώς επίσης και η ύπαρξη ασύμβατων παρατηρήσιμων μεγεθών
- Η αρχή της υπέρθεσης
- Ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντικής μηχανικής
- Η κβαντική εμπλοκή (quantum entanglement)

Ήδη από τις δεκαετίες του 1920 και του 1930 επικράτησε η λεγόμενη *ορθόδοξη ερμηνεία*, μια ερμηνεία ουσιαστικά θετικιστική, σύμφωνα με την οποία η κβαντική μηχανική είναι πλήρης. Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι δεν υπήρξε ομοιογενής ορθόδοξη σχολή και ότι βασικοί θεμελιωτές της τροποποίησαν τις θέσεις τους. Ακόμα στο πλαίσιο της συνυπήρξαν θετικιστές, ιδεαλιστές ακόμα και υλιστές. Έτσι ουσιαστικά εννοείται με τον όρο "ορθόδοξη ερμηνεία", η κυρίαρχη τάση και οι θέσεις της που όμως ένα από τα βασικά αξιώματα κατά αυτή τη θεώρηση είναι ότι: η καθαρή κατάσταση του κάθε συστήματος περιγράφεται πλήρως από το διάλυμα κατάστασης του, το οποίο περιέχει όλες τις πληροφορίες για την κατάσταση αυτή. Στοιχείο της επίσης είναι και η θέση που εισήγαγε ο Heisenberg ότι πρέπει να δίνεται προσοχή αποκλειστικά σε παρατηρήσιμα, δηλαδή μετρήσιμα, μεγέθη γιατί είναι τα μόνα για τα οποία πρέπει να μιλά η φυσική - θέση που είναι γενικά αποδεκτή στα πλαίσια αυτής της ερμηνείας.

Η ερμηνεία λοιπόν της λεγόμενης σχολής της Κοπεγχάγης χαρακτηρίζεται όπως αναφέρει και ο J. Cushing<sup>2</sup> από τρεις κεντρικές δεσμεύσεις. Πρώτη από αυτές, ότι σε γενικές γραμμές,

<sup>1</sup>Για το αντικείμενο της φιλοσοφίας και τις διαφορετικές προσεγγίσεις βλ. Μπιτσάκης ([1984] 1986)

<sup>2</sup>J. Cushing [1998] 2003, 437



δεν μπορούν να υπάρχουν τροχιές σωματιδίων σε χωροχρονικό υπόβαθρο. Δεύτερη, ότι δεν είναι δυνατή η ντετερμινιστική περιγραφή των θεμελιωδών φυσικών φαινομένων. Τέλος, τρίτη κεντρική δέσμευση είναι ότι υπάρχει στους νόμους των θεμελιωδών φυσικών φαινομένων μια μη εξαλείψιμη αυταρχία ή πιθανότητα (σε αντίθεση με την πιθανότητα της κλασικής φυσικής, η οποία αντανακλά την άγνοια μας για τις μικρές λεπτομέρειες των σύνθετων φυσικών φαινομένων).

Ωστόσο απέναντι σε αυτό το κυρίαρχο ρεύμα αντιπαρατίθενται άλλες ερμηνείες και προσεγγίσεις που θεωρούν ότι η κβαντική μηχανική δεν είναι πλήρης θεωρία και επιδέχεται συμπλήρωση. Στο επίκεντρο αυτής της διαμάχης μπαίνει αναπόφευκτα και το ζήτημα της αιτιότητας καθώς και της έννοιας της πραγματικότητας στη φυσική. Σε συνδυασμό με αυτά προκύπτει και το ζήτημα της τοπικότητας και του διαχωρίσιμου.

Μια από τις πρώτες προσπάθειες να εξεταστούν τα θεμέλια της σύγχρονης ερμηνείας του μικρόκοσμου έγινε στα 1927 από τον Louis de Broglie με την θεωρία της “διπλής λύσης”.<sup>3</sup> Αποτελεί μια προσπάθεια αιτιακής ερμηνείας που θέτει το πρόβλημα της μη πληρότητας της κβαντικής μηχανικής. Ο De Broglie αποθαρρύνθηκε από την αυστηρή κριτική που δέχθηκε στο συνέδριο του Solvay του 1927 και εγκατέλειψε την προσπάθεια.

Στην συνέχεια οι Einstein, Podolsky και Rosen (EPR) διατύπωσαν το ομώνυμο παράδοξο το 1935 σύμφωνα με το οποίο η κβαντομηχανική περιγραφή είτε δεν είναι πλήρης είτε είναι μη τοπική. Οι απαντήσεις που δόθηκαν από τον Bohr<sup>4</sup> βασίστηκαν στο επιχείρημα ότι τα δυο συστήματα και το όργανο μέτρησης συνιστούν ένα και μοναδικό σύστημα μη διαχωρίσιμο και μη αναλύσιμο, υπό την έννοια της μη δυνατότητας για μια περαιτέρω ανάλυση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο σύστημα και τη μετρητική συσκευή. Έτσι το ερώτημα πώς υπάρχουν οι συσχετίσεις απλώς στερείται νοήματος. Ο Bohr εισάγει την αρχή της συμπληρωματικότητας σύμφωνα με την οποία θεμελιώνεται ο αμοιβαίος αποκλεισμός οποιονδήποτε δυο πειραματικών διαδικασιών που επιτρέπουν τον σαφή καθορισμό συμπληρωματικών μεγεθών.

Γίνεται λοιπόν προφανές ότι πριν αναλυθεί πιο συγκεκριμένα το παράδοξο EPR και η απάντηση του Bohr πρέπει να συζητηθεί το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης και η φύση των

---

<sup>3</sup>De Broglie L. (1927)

<sup>4</sup>N. Bohr (1935)

κβαντικών πιθανοτήτων, αφού πρώτα διατυπωθούν οι βασικές αρχές του κβαντομηχανικού φορμαλισμού.

## 1.2 Βασικά χαρακτηριστικά του κβαντομηχανικού φορμαλισμού

### 1.2.1 Το βασικό θεωρητικό πλαίσιο

Το θεωρητικό πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής θεμελιώνεται πάνω σε προτάσεις - αιτήματα. Το ποιες είναι εκείνες οι προτάσεις που αφαιρετικά θεμελιώνουν το απαραίτητο πλαίσιο δεν είναι μονοσήμαντα καθορισμένο αλλά εξαρτάται άμεσα από την ερμηνεία. Με αυτό εννοείται ότι κάποια πρόταση που μπορεί από μια οπτική να θεωρηθεί αίτημα, για μια άλλη οπτική μπορεί να μην εντάσσεται στο βασικό πλαίσιο και να απομένει για διερεύνηση.<sup>5</sup> Επειδή όμως οι διάφορες ερμηνείες της κβαντομηχανικής γίνονται πάνω στη βάση που συγκροτούν αυτές οι προτάσεις κρίνεται αναγκαία η αναφορά τους, υιοθετώντας ένα ελάχιστο πλαίσιο πάνω στο οποίο μπορούν να τεθούν οι υπόλοιπες προτάσεις ως προβληματικές υπό διερεύνηση.

**Πρόταση 1:** Οι προβλέψεις για τα αποτελέσματα των μετρήσεων που γίνονται σε κατά τα άλλα (εκτός της διαδικασίας της μέτρησης) μεμονωμένα συστήματα είναι πιθανοκρατικές. Σε καταστάσεις όπου η μέγιστη πληροφορία είναι διαθέσιμη, αυτή η πιθανοτική πληροφορία αναπαρίσταται μαθηματικά από ένα διάνυσμα στο χώρο Hilbert που αποτελεί τον χώρο καταστάσεων στην κβαντική θεωρία. Αυτό το διάνυσμα κατάστασης είναι η μαθηματική αναπαράσταση αυτού που νοείται ως καθαρή φυσική κατάσταση του συστήματος.

**Πρόταση 2:** Τα παρατηρήσιμα μεγέθη του συστήματος αναπαρίστανται από ερμιτιανούς τελεστές τελεστές που δρουν στο χώρο Hilbert.

---

<sup>5</sup>Για άλλη συστηματοποίηση των θεμελιωδών αιτημάτων της κβαντομηχανικής βλ. Isham ([1995] 2011), σ.4-9 και Σ. Τραχανάς (2008), σ. 65-66

**Πρόταση 3:** Τα μόνα πιθανά αποτελέσματα μια μέτρησης ενός παρατηρούμενου μεγέθους είναι μια από τις ιδιοτιμές του αντίστοιχου τελεστή. Δεδομένου ότι το φάσμα των ιδιοτιμών του τελεστή είναι διακριτό τότε θα ισχύει:

$$\hat{A}|\psi_n\rangle = a_n|\psi_n\rangle$$

και οι αντίστοιχες πιθανότητες εμφάνισης  $P_n$  των ιδιοτιμών είναι

$$P_n = |c_n|^2$$

όπου

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle$$

**Πρόταση 4:** Για ένα δεδομένο, κανονικοποιημένο διάνυσμα κατάστασης  $|\psi\rangle$ , η αναμενόμενη τιμή της μέτρησης ενός παρατηρούμενου μεγέθους  $A$  που αντιστοιχεί στον τελεστή  $\hat{A}$  στο χώρο Hilbert δίνεται από τον τύπο

$$\langle A \rangle = \langle \psi | \hat{A} | \psi \rangle$$

**Πρόταση 5:** Το καταστατικό διάνυσμα, θεωρώντας ότι δεν υπάρχει καμία εξωτερική αλληλεπίδραση -για ένα, δηλαδή, κλειστό σύστημα- μεταβάλλεται με το χρόνο σύμφωνα με τη χρονοεξαρτημένη εξίσωση Schrödinger

$$i\hbar \frac{\partial |\psi(t)\rangle}{\partial t} = \hat{H} |\psi(t)\rangle$$

όπου  $\hat{H}$  ο χαμιλτονιανός τελεστής για το σύστημα.

Ολοκληρώνοντας το βασικό θεωρητικό πλαίσιο πρέπει να δοθεί ιδιαίτερη προσοχή στην αρχή της υπέρθεσης ή επαλληλίας, η οποία παίζει σημαντικό ρόλο στην διαμόρφωση των ερμηνειών της κβαντικής μηχανικής, και στις συνέπειες της οποίας θα γίνει εκτενής αναφορά στην επόμενη ενότητα που αφορά την κβαντική μέτρηση.

Η αρχή της υπέρθεσης ή επαλληλίας είναι συνέπεια της γραμμικότητας του χώρου Hilbert. Σύμφωνα με αυτή εάν υπάρχει ένα σύνολο διανυσμάτων κατάστασης σε ένα χώρο Hilbert τότε

και κάθε γραμμικός συνδυασμός

$$|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle$$

θα είναι διάνυσμα κατάστασης του χώρου αυτού. Μπορεί όμως να μην αντιστοιχεί σε πραγματοποιήσιμη κατάσταση (υπόκειται στους κανόνες υπερεπιλογής).

## 1.2.2 Η αρχή της απροσδιοριστίας

Στην κλασική φυσική τα διάφορα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα σύστημα μπορούν να προσδιοριστούν με ακρίβεια και ανεξάρτητα το ένα από το άλλο. Στο κβαντικό επίπεδο αυτή η ταυτόχρονη μέτρηση δυο μεγεθών με απόλυτη ακρίβεια δεν έχει γενική ισχύ και εξαρτάται από το εάν τα μεγέθη είναι συμβατά ή όχι. Για να είναι συμβατά δυο μεγέθη ικανή και αναγκαία συνθήκη είναι οι αντίστοιχοι τελεστές να μετατίθενται.

Τι σημαίνει όμως ταυτόχρονη μέτρηση; Ειδικά εάν ληφθεί υπόψιν το ότι η μέτρητική διαδικασία χρειάζεται ένα χρονικό διάστημα τα πράγματα περιπλέκονται. Για το λόγο αυτό κρίνεται αναγκαία η αναφορά ενός άλλου κριτηρίου για την συμβατότητα δυο μεγεθών.

Έστω  $A$  ένα παρατηρήσιμο μέγεθος του οποίου ο αντίστοιχος τελεστής έχει ένα μη εκφυλισμένο φάσμα ιδιοτιμών. Ακόμα έστω ότι  $f$  είναι μια συνάρτηση. Αν η  $f$  είναι "1-1" τότε και το  $f(A)$  θα έχει μη εκφυλισμένο φάσμα, αν πάλι δεν είναι "1-1" θα έχει εκφυλισμένο φάσμα. Υποθέτοντας τώρα ότι  $A$  και  $B$  είναι δυο συμβατά παρατηρήσιμα, τότε θα υπάρχει ένα  $C$  παρατηρήσιμο (μη εκφυλισμένο) τέτοιο ώστε  $A = f(C)$  και  $B = g(C)$  όπου  $f, g$  κατάλληλες συναρτήσεις.

Πρέπει να σημειωθεί εδώ ότι εάν  $A = F(B)$  τότε τα μεγέθη  $A$  και  $B$  είναι συμβατά, το αντίστροφο όμως δεν ισχύει. Δηλαδή αν  $A$  και  $B$  είναι συμβατά, δεν σημαίνει ότι υποχρεωτικά  $A = F(B)$  για κάποια συνάρτηση  $F$ . Εάν όμως  $f$  ή  $g$  είναι "1-1" τότε ένα από τα  $A, B$  έχει μη εκφυλισμένο φάσμα.

Χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα, έστω ότι η  $f$  είναι "1-1", τότε θα ισχύει

$$C = f^{-1}(A)$$

και άρα

$$B = g(C) = g(f^{-1}(A)) = F(A)$$

Εάν τώρα  $A = f(C) = g(B)$  με  $A$ ,  $B$  και  $C$  παρατηρήσιμα με μη εκφυλισμένο φάσμα τότε τα  $B$  και  $C$  είναι συμβατά.<sup>6</sup>

Εάν λοιπόν δυο μεγέθη δεν είναι συμβατά, οι τελεστές των δυο μεγεθών δεν μετατίθενται και υπάρχει ένα κατώτερο όριο για το γινόμενο των αβεβαιοτήτων τους σε κάθε κατάσταση. Με τον όρο *αβεβαιότητα* ή *απροσδιοριστία* για ένα μέγεθος  $A$  στην κατάσταση  $\psi$  αναφερόμαστε στην ποσότητα:

$$\Delta A^2 = \langle A^2 \rangle - \langle A \rangle^2$$

Έτσι για δυο μεγέθη  $A$  και  $B$  η γενικευμένη σχέση απροσδιοριστίας προσδιορίζει το κατώτερο όριο :

$$\Delta A \cdot \Delta B \geq \frac{1}{2} |\langle [A, B] | \psi \rangle|$$

Με αντικατάσταση των αντίστοιχων τελεστών για τα μεγέθη της θέσης και της ορμής προκύπτει η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg σύμφωνα με την οποία είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε ταυτόχρονα την θέση και την ορμή ενός σωματιδίου. Το ελαχιστο επιτρεπτό όριο για το γινόμενο των αβεβαιοτήτων τους δίνεται από τη σχέση

$$\Delta x \cdot \Delta p_x \geq \frac{\hbar}{2}$$

Αυτές οι σχέσεις ερμηνεύθηκαν με τη σειρά τους με διαφορετικούς τρόπους.

Μια ερμηνεία είναι η *τελεστική* ή *οπερασιοναλιστική*. Σύμφωνα με αυτή η μέτρηση διαταράσσει το σύστημα με απρόβλεπτο και μη ελέγξιμο τρόπο. Έτσι η προσπάθεια για επίτευξη μεγάλης ακρίβειας στην μέτρηση ενός μεγέθους, πχ. της θέσης, έχει ως αποτέλεσμα την ολοένα και μεγαλύτερη διαταραχή στην μέτρηση του άλλου - στο παράδειγμα, αυτό της ορμής. Αυτή η ερμηνεία μπορεί να συνδυαστεί με την ύπαρξη ταυτόχρονων τιμών για το σύστημα τις οποίες διαταράσσει η μέτρηση.

Μια δεύτερη ερμηνεία, *οντολογική* αυτή, θεωρεί ότι είναι εγγενής ιδιότητα των συζυγών παρατηρήσιμων μεγεθών να μην έχουν ταυτόχρονα ακριβείς τιμές για το ίδιο σύστημα. Έτσι αν ένα σωματίο έχει καθορισμένη θέση παρουσιάζει μεγάλη διασπορά στο χώρο των ορμών και αντίστροφα.

---

<sup>6</sup>Για την απόδειξη των αντίστοιχων θεωρημάτων βλ. Redhead (1987), σ.19-20

### 1.2.3 Η φύση των κβαντικών πιθανοτήτων

Στα πλαίσια της κλασικής μηχανικής οι πιθανότητες θεωρούνται συνήθως αποτέλεσμα ατελούς γνώσης. Η αδυναμία να προβλεφθεί το αποτέλεσμα ενός πειράματος ή φαινομένου έχει συγκεκριμένη αιτιολογία και οφείλεται στην ατελή γνώση των παραγόντων που επηρεάζουν το πείραμα ή το φαινόμενο αντίστοιχα. Αν όλοι αυτοί οι παράγοντες ήταν γνωστοί τότε με χρήση των κλασικών εξισώσεων κίνησης θα μπορούσε να προβλεφθεί το αποτέλεσμα.

Οι κβαντικοί νόμοι που συνδέουν την κατάσταση ενός συστήματος με τις ιδιότητες του ουσιαστικά έχουν στατιστικό χαρακτήρα, τέτοιο ώστε γενικά εκφράζονται με βάση ορισμένες πιθανότητες. Το ερώτημα που τίθεται για τις κβαντομηχανικές πιθανότητες είναι αν και αυτές αποτέλεσμα ατελούς γνώσης ή αν μπορούν να θεωρηθούν θεμελιώδεις. Σε αυτό το ερώτημα έχουν δοθεί και οι δυο δυνατές απαντήσεις.

Η λεγόμενη Σχολή της Κοπεγχάγης με κύριους εκφραστές της τους Bohr, Born και Heisenberg απαντά ότι οι κβαντομηχανικές πιθανότητες δεν είναι αποτέλεσμα ατελούς γνώσης αλλά είναι θεμελιώδεις. Η πιθανοκρατική συμπεριφορά είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της φύσης στο μικροσκοπικό επίπεδο.

Από την άλλη μεριά υπάρχει η απάντηση των Einstein, De Broglie, Bohm και πολλών άλλων που θεωρούν ότι οι κβαντικές πιθανότητες δεν είναι απαραίτητα μη περαιτέρω αναλύσιμες. Κατά τον Bohm, η πιθανοκρατική μορφή της σημερινής κβαντικής περιγραφής μπορεί να είναι το αποτέλεσμα μιας προσέγγισης σε κάποιο βαθύτερο σύνολο πιο προσεγγιστικών ντετερμινιστικών νόμων, εισάγοντας έτσι την έννοια του υποκβαντομηχανικού επιπέδου.

Στην σκέψη του Bohm<sup>7</sup>, η δυνατότητα πραγμάτευσης αιτιακών νόμων ως στατιστικές προσεγγίσεις των νόμων της τύχης εξισορροπείται από μια αντίστοιχη δυνατότητα χειρισμού των νόμων των πιθανοτήτων ως στατιστικών προσεγγίσεων αποτελεσμάτων που προκύπτουν από αιτιακούς νόμους. Αυτό έρχεται σε ευθεία αντιπαράθεση με την βασική ιδέα του von Mises ότι οι νόμοι των πιθανοτήτων που εφαρμόζονται σε μια κατανομή αντικειμένων ή γεγονότων, η οποία δεν υπακούει σε κανένα νόμο, δεν μπορεί να αποκτήσει σαφές νόημα για κανένα συγκεκριμένο πρόβλημα. Παραμένει, έτσι, πάντα ανοιχτή η δυνατότητα να διαπιστωθεί τελικά

---

<sup>7</sup>Bohm D. ([1984] 1996), σ. 106-107

ότι κάθε δεδομένο σύνολο νόμων πιθανοτήτων, οι οποίοι εφαρμόζονται σε δεδομένο πλαίσιο, είναι μια προσέγγιση νέων ειδών αιτιακών νόμων που εφαρμόζονται σε ευρύτερα πλαίσια. Στη φύση των πιθανοτήτων στην κβαντική μηχανική και ιδιαίτερα στο πώς αντιμετωπίζονται στην ερμηνεία του Bohm θα επανέλθουμε και στα επόμενα κεφάλαια της εργασίας.

### 1.3 Το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης

Ένα από τα πιο διάσημα προβλήματα στην κβαντική μηχανική και ταυτόχρονα πολύ σημαντικό για την θεμελίωση της είναι αυτό της μέτρησης. Η διαδικασία της μέτρησης στην κβαντική μηχανική διαφέρει σε σχέση με εκείνης στην κλασική φυσική.

Στην κλασική φυσική, τα φυσικά μεγέθη έχουν ορισμένες τιμές ανεξάρτητα από την διαδικασία της μέτρησης ή την ύπαρξη οποιουδήποτε παρατηρητή. Η ίδια η έννοια της μέτρησης, όπως υπεισέρχεται στην κλασική φυσική, υπονοεί συνήθως την αμεταβλητότητα της τιμής του παρατηρούμενου μεγέθους, πριν κατά και ακριβώς μετά την διαδικασία της μέτρησης. Αυτό βέβαια δεν έχει την ισχύ γενικού κανόνα χωρίς εξαιρέσεις και προϋποθέτει ότι η διαταραχή που μπορεί να προκαλεστεί στο μετρούμενο σύστημα είναι αμελητέα -κάτι που δεν ισχύει πάντα ακόμα και στα πλαίσια της κλασικής μηχανικής- και έτσι η μέτρηση δεν επηρεάζει το αποτέλεσμα.

Το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης συνίσταται στο γεγονός ότι ενώ στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής, το καταστατικό διάνυσμα εμπεριέχει όλες τις πληροφορίες και καθορίζει πλήρως την κατάσταση ενός συστήματος, η θεωρία της κβαντικής μηχανικής δεν μπορεί να καθορίσει επακριβώς το αποτέλεσμα που θα προκύψει έπειτα από την αλληλεπίδραση με την μετρητική συσκευή αλλά μπορεί μόνο να προβλέψει την πιθανότητα εμφάνισης κάθε αποτελέσματος. Υπάρχει λοιπόν ένα "λογικό άλμα" για το πώς προκύπτουν αυτά τα αποτελέσματα.

Με άλλα λόγια το πρόβλημα συμπυκνώνεται και στην παρακάτω θέση, βασική στα πλαίσια της κβαντικής θεωρίας: Οποιαδήποτε και αν ήταν η κατάσταση ενός κβαντικού συστήματος πριν από μια μέτρηση, η κατάσταση του μετά τη μέτρηση θα περιγράφεται από το ιδιοδιάνυσμα που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή που μετρήθηκε.

Στον πυρήνα του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης βρίσκεται η γραμμικότητα της

εξίσωσης του Schrödinger και η αρχή της υπέρθεσης. Η γραμμικότητα συνίσταται στο ότι κάθε γραμμικός συνδυασμός λύσεων μιας δεδομένης εξίσωσης Schrödinger επίσης είναι λύση αυτής. Το πώς αυτή η ιδιότητα της εξίσωσης του Schrödinger εμπλέκεται στο πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης θα φανεί στη συνέχεια όπου θα περιγραφεί η μετρητική διαδικασία.

### 1.3.1 Περιγραφή της μετρητικής διαδικασίας

Εστω, λοιπόν ένα υπό μελέτη σύστημα  $\mathbf{S}$ , μια μετρητική συσκευή  $\mathbf{M}$  που χρησιμοποιεί έναν παρατηρητή για να μετρήσει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος  $\mathbf{A}$ . Αν πριν από την μέτρηση, το σύστημα  $\mathbf{S}$  περιγράφεται από μια ιδιοκατάσταση  $|\psi_n\rangle$  του μετρούμενου μεγέθους  $\mathbf{A}$  με ιδιοτιμή  $\alpha_n$  ενώ η μετρητική συσκευή βρίσκεται στην κατάσταση  $\Phi_0$  τότε η αρχική κατάσταση  $|\Psi_a\rangle$  του  $\mathbf{S} + \mathbf{M}$  θα περιγράφεται από την σχέση  $|\Psi_a\rangle = |\psi_n\rangle|\Phi_0\rangle$  και μετά την μέτρηση θα εξελιχθεί στην  $|\Psi_t\rangle = |\psi_n\rangle|\Phi_n\rangle$ , αφού η  $|\psi_n\rangle$  θα μείνει ίδια και η  $|\Phi_n\rangle$  θα είναι η ιδιοκατάσταση της συσκευής που αντιστοιχεί στην ιδιοτιμή  $\alpha_n$ .

Η αρχική και τελική κατάσταση του  $\mathbf{S} + \mathbf{M}$  θα συνδέονται με τον τελεστή χρονικής εξέλιξης  $U$  του σύνθετου συστήματος

$$|\Psi_t\rangle = U|\Psi_a\rangle$$

Αν τώρα το σύστημα βρίσκεται σε μια κατάσταση υπέρθεσης  $|\psi\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle$ , τότε για την αρχική και την τελική κατάσταση του συστήματος θα έχουμε αντίστοιχα:

$$|\Psi_a\rangle = |\psi\rangle|\Phi_0\rangle = \sum_n c_n (|\psi_n\rangle|\Phi_0\rangle)$$

και

$$|\Psi_t\rangle = U(\sum_n c_n (|\psi_n\rangle|\Phi_0\rangle)) = \sum_n c_n |\psi_n\rangle|\Phi_n\rangle$$

Έτσι η τελική κατάσταση παρουσιάζει μια επαλληλία μετρητικών ιδιοκαταστάσεων  $|\Phi_n\rangle$  το οποίο σημαίνει ότι δεν υπάρχει καθορισμένη ένδειξη. Αυτό το παράδοξο αποτυπώνεται με δραματικό τρόπο στην "γάτα του Schrödinger".



### 1.3.2 Η γάτα του Schrödinger

Το νοητικό πείραμα του Schrödinger τέθηκε το 1935 και παρουσιάζεται ως προβληματική πάνω στην ορθόδοξη ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης για μακροσκοπικά αντικείμενα, όπου εάν εφαρμοστεί η θεωρία οδηγείται κανείς σε παράδοξα αποτελέσματα που αντιτίθενται στην κοινή "λογική".

Το πείραμα έχει ως εξής: Μια γάτα είναι κλεισμένη σε ένα ατσάλινο κουτί και μαζί της υπάρχει μια συσκευή, που συνδυάζει έναν μετρητή Geiger με μια πολύ μικρή ραδιενεργή ποσότητα τέτοια ώστε με ίση πιθανότητα ένα ή κανένα άτομα να διασπώνται και εάν διασπασθεί ένα, με μηχανικό τρόπο σπάει ένα φιαλίδιο με υδροκυάνιο και σκοτώνει τη γάτα.

Η τελική κατάσταση της γάτας τότε θα περιγράφεται από την κατάσταση υπέρθεσης

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\nu\epsilon\kappa\rho\eta\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\zeta\omega\nu\tau\alpha\nu\eta\rangle$$

που σημαίνει ότι η αρχική απροσδιοριστία στο ατομικό επίπεδο μπορεί να μεταφερθεί στην μακροσκοπική κλίμακα ενώ αυτή η απροσδιοριστία φαίνεται να λύνεται με άμεση παρατήρηση.

Έτσι ο Schrödinger καταλήγει ότι κάτι τέτοιο μας αποτρέπει από το να δεχθούμε ένα τόσο "θολό" μοντέλο για την αναπαράσταση της πραγματικότητας. Και καταλήγει emphaticά ότι υπάρχει διαφορά ανάμεσα σε μια μη εστιασμένη φωτογραφία και σε μια απεικόνιση μιας ομίχλης και νεφών μέσω μιας φωτογραφίας<sup>8</sup>.

### 1.3.3 Διαφορετικές προσεγγίσεις στο πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης

Η προσπάθεια κατάταξης των διαφορετικών ερμηνειών και προσεγγίσεων που έχουν δοθεί στο πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης και η εισαγωγή ενός μεθοδολογικού κριτηρίου οδηγεί στην εξέταση των συνεπειών της άρνησης εκείνων των βασικών αρχών που επισυνάπτονται στη βασική θεωρία και οδηγούν τελικά σε αντίφαση. Αυτές οι βασικές αρχές ρητά ή άρρητα αποδεκτές είναι εκείνες που οδηγούν στο πρόβλημα που περιγράφηκε. Οι αρχές

---

<sup>8</sup>"There is a difference between a shaky or out-of-focus photograph and a snapshot of clouds and fog banks." Trimmer J. (1980)

αυτές είναι:<sup>9</sup> α) *Καθολική Ισχύς Γραμμικής Δυναμικής Εξέλιξης*. Η δυναμική εξέλιξη κάθε φυσικού συστήματος στο σύμπαν είναι γραμμική (μοναδιαία ή περιγράφεται από την εξίσωση του Schrödinger).

β) *Αξιοπιστία των αισθήσεων των Παρατηρητών*. Αυτό που εκλαμβάνει ως γεγονός ένας παρατηρητής κατά την ολοκλήρωση μιας μέτρησης όντως αποτελεί φυσικό γεγονός.

γ) *Σύνδεσμος Ιδιοκατάστασης - Ιδιοτιμής*. Ένα παρατηρήσιμο μέγεθος ενός κβαντικού συστήματος έχει καθορισμένη τιμή σε μια χρονική στιγμή, αν η κατάσταση του συστήματος εκείνη τη χρονική στιγμή αναπαριστάνεται από ιδιοδιάνυσμα του αντίστοιχου ερμιτιανού τελεστή, οπότε η καθορισμένη τιμή ισούται με την ιδιοτιμή που αντιστοιχεί στο ιδιοδιάνυσμα αυτό.

Η αντίφαση συνίσταται στο ότι εάν ισχύει καθολικά η Γραμμική Δυναμική Εξέλιξη τότε όπως φάνηκε στην υποενότητα 1.3.2 η τελική κατάσταση είναι η

$$|\Psi_t\rangle = \sum_n c_n |\psi_n\rangle |\Phi_n\rangle$$

ενώ ο παρατηρητής αξιόπιστα μετρά μια ιδιοτιμή που με βάση τον σύνδεσμο ιδιοκατάστασης-ιδιοτιμής αντιστοιχεί σε μια κατάσταση

$$|\Psi_t\rangle = |\psi_n\rangle |\Phi_n\rangle$$

Αν αρνηθεί κανείς την βασική πρόταση της Καθολικής Ισχύος της Γραμμικής Δυναμικής Εξέλιξης, τότε ανοίγεται ο δρόμος για τις θεωρίες κατάρρευσης ή αναγωγής του διανύσματος κατάστασης και για την θεωρία αυθόρμητου εντοπισμού που εισήχθη από τους Ghirardi, Rimini και Weber το 1985 και είναι γνωστή ως θεωρία GRW<sup>10</sup>. Κρίνεται σκόπιμο να γίνει εκτενέστερη αναφορά στην κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης όπως τέθηκε από τον von Neumann στη συνέχεια του κεφαλαίου ενώ η ανάπτυξη της θεωρίας GRW ξεφεύγει από τους σκοπούς και τα όρια αυτής της διπλωματικής εργασίας.

Αν πάλι αρνηθεί κανείς ως γεγονός την αξιοπιστία των αισθήσεων των παρατηρητών, τότε εύκολα ανοίγεται ο δρόμος για θεωρίες πολλαπλών κόσμων όπως αυτή του Everett ή για

---

<sup>9</sup>Η παρουσίαση του προβλήματος της κβαντικής μέτρησης ως πρόβλημα που απαιτεί την αντιμετώπιση μιας αντίφασης όπως παρουσιάζεται εδώ οφείλεται στον Clifton (1996). Μια διαφορετική προσέγγιση του προβλήματος που θεμελιώνεται πάνω σε διαφορετικά αιτήματα δίνεται από τον Maudlin (1995).

<sup>10</sup>Για την αρχική προσέγγιση βλ. Ghirardi, Rimini, Weber (1986)

θεωρίες συνειδησιακής αναγωγής. Κατά τη θεώρηση των πολλαπλών κόσμων του Everett όλα τα δυνατά αποτελέσματα είναι πραγματικά αλλά πραγματώνονται σε διαφορετικούς κόσμους, με ισάριθμους αξιόπιστους παρατηρητές. Στην δεύτερη περίπτωση η συνείδηση του παρατηρητή επεμβαίνει και καταρρέει εκεί η κυματοσυνάρτηση. Η περαιτέρω ανάλυση αυτών των θεωριών επίσης είναι εκτός των ορίων αυτής της εργασίας.

Αν τέλος αρνηθεί κανείς τον σύνδεσμο ιδιοκατάστασης - ιδιοτιμής, τότε μπορεί να καταλήξει εύλογα στο συμπέρασμα ότι υπάρχουν στοιχεία της πραγματικότητας που δεν αντιπροσωπεύονται στο διάνυμα κατάστασης και με βάση αυτό να αναζητήσει αυτά τα στοιχεία. Εν γένει ανοίγει δηλαδή το δρόμο για τις τροπικές ερμηνείες (modal interpretations). Με τον όρο αυτό εννοούνται θεωρίες όπου τα φυσικά συστήματα κάθε στιγμή κατέχουν έναν αριθμό από σαφώς ορισμένες φυσικές ιδιότητες, δηλαδή καθορισμένες τιμές των φυσικών μεγεθών, πέραν αυτών που προβλέπει ο σύνδεσμος ιδιοκατάστασης-ιδιοτιμής. Από αυτή την αφετηρία εκκινούν και οι *θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών* ή *λανθανουσών παραμέτρων* (hidden variables), οι οποίες ανήκουν στις τροπικές θεωρίες υπό την ευρεία έννοια, που υποστηρίχθηκαν από τον Einstein και περιγράφηκαν πληρέστερα από τον Bohm. Σε μια τέτοια θεώρηση οι τιμές αυτών των μεταβλητών καθορίζουν και το αποτέλεσμα της μέτρησης.

### **1.3.4 Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης κατά τον Von Neumann**

Στο πλαίσιο της ορθόδοξης ερμηνείας ο John von Neumann το 1932 στο βιβλίο *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* στην προσπάθεια του να εξηγήσει την εξέλιξη των κβαντικών συστημάτων εισάγει μια διάκριση, σύμφωνα με την οποία ενώ για ένα σύστημα και την κυματοσυνάρτηση του ισχύει η γραμμική δυναμική εξέλιξη όταν δεν λαμβάνει χώρα μια μέτρηση, στην περίπτωση πραγματοποίησης μιας μέτρησης το σύστημα μεταπίπτει ακαριαία σε μια ιδιοκατάσταση του μετρούμενου μεγέθους. Εδώ βέβαια υπεισέρχεται το θέμα τους σαφούς ορισμού της μέτρησης και στο τι συνιστά τη διαφορά αυτής της διαδικασίας από τις άλλες δυναμικές αλληλεπιδράσεις.

Βασικό στοιχείο στην ανάπτυξη της σκέψης του von Neumann αποτελεί η παραδοχή του ότι η κβαντική μηχανική είναι μια πλήρης θεωρία και ως εκ τούτου έπρεπε να εξηγήσει, χωρίς να εισάγει συμπληρωματικά στοιχεία, όπως εκείνα που περιλαμβάνουν οι θεωρίες κρυμμένων

μεταβλητών, το πρόβλημα της μέτρησης.

Συγκεκριμένα λοιπόν ο von Neumann καταλήγει στο συμπέρασμα ότι το διάνυσμα κατάστασης ενός συστήματος ακολουθεί δυο διαφορετικές διαδικασίες

- την ντετερμινιστική, γραμμική, συνεχής χρονική εξέλιξη η οποία υπακούει στην εξίσωση του Schrödinger, όταν δεν υπεισέρχεται μέτρηση
- την πιθανοκρατική, ασυνεχής, μη γραμμική, ακαριαία και μη αντιστρέψιμη μετάβαση σε μια από τις ιδιοκαταστάσεις του όταν γίνεται μέτρηση

Κατά τον von Neumann η μέτρηση λαμβάνει μέρος σε δυο διακριτά αλλά συνεχόμενα στάδια. Στο πρώτο στάδιο, το μετρούμενο σύστημα  $S$  αλληλεπιδρά με τη μακροσκοπική συσκευή μέτρησης  $M$  για την μέτρηση ενός μεγέθους  $A$ . Η αλληλεπίδραση υπακούει στην γραμμική εξίσωση Schrödinger και έτσι έχουμε θεωρώντας  $t$  τον χρόνο που τελειώνει το πρώτο στάδιο η αλληλεπίδραση, το μετρούμενο σύστημα να αναπαρίσταται στο χώρο  $H(S+M)$  από την

$$|\Psi_t\rangle = U\left(\sum_n c_n(|\psi_n\rangle|\Phi_0\rangle)\right) = \sum_n c_n|\psi_n\rangle|\Phi_n\rangle$$

με την ίδια μαθηματική ανάλυση που δόθηκε και στην υποενότητα 1.3.1.

Στη συνέχεια ερχόμαστε στο δεύτερο στάδιο της μέτρησης που με ένα τρόπο μη γραμμικό μεταπίπτει στην

$$\Psi_2 = |\psi_n\rangle|\Phi_n\rangle$$

που αντιστοιχεί στον χρόνο  $t_2$  ο χρόνος που τελειώνει το δεύτερο στάδιο. Για όλη την παραπάνω διαδικασία, δηλαδή για τα τελικά της αποτελέσματα ισχύει η στατιστική κατανομή τους με βάση τις προβλέψεις από τη θεωρία του Born.

Εδώ πρέπει να αναφερθεί ότι η όλη αυτή θεωρία έρχεται αντιμέτωπη με το ερώτημα "τι είναι η μέτρηση;" και "τι είναι αυτό που την κάνει διαφορετική από τις υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις;"

Από αυτή την προβληματική και στην προσπάθεια να βρεθεί εκείνος ο καθοριστικός παράγοντας δόθηκε και ιδιαίτερος ρόλος στον παρατηρητή. Έτσι ο Eugene Wigner καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η κατάρρευση λαμβάνει χώρα στην συνείδηση του παρατηρητή. Παρεμβαίνει έτσι στην μετρητική διαδικασία η συνείδηση του παρατηρητή.

Εδώ πρέπει αφενός μεν να δει κανείς ότι έτσι προϋποτίθεται ένας χωρισμός των φυσικών συστημάτων σε εκείνα που έχουν συνείδηση και σε εκείνα που δεν έχουν και αφετέρου ότι έτσι η συνείδηση ενός παρατηρητή καθορίζει τη φυσική (υλική) πραγματικότητα η οποία δεν υφίσταται αυτοτελώς. Η θεώρηση αυτή είναι στη βάση της δυϊστικής. Πρέπει εδώ βέβαια να τονιστεί ότι ο καθοριστικός ρόλος του παρατηρητή δεν είναι κατ' ανάγκην αποδεκτό στην κυρίαρχη, ορθόδοξη ερμηνεία και ότι οι θεωρίες κατάρρευσης δεν χρειάζονται εγγενώς τον ρόλο της συνείδησης του παρατηρητή.

## 1.4 Το παράδοξο EPR

### 1.4.1 Βασικές θέσεις για την πραγματικότητα και την πληρότητα

Η διαμάχη γύρω από την κβαντική μηχανική και από την ερμηνεία της ξεκίνησε σχεδόν από την διατύπωση της ως φυσική θεωρία. Το πρόβλημα της πληρότητάς της τέθηκε ήδη από το 1927 και τον Louis De Broglie ο οποίος πρότεινε μια εναλλακτική ερμηνεία, αυτή της διπλής λύσης. Δέχθηκε όμως αυστηρή κριτική και έτσι εγκατέλειψε τις προτάσεις του για μεγάλο χρονικό διάστημα. Το 1935 οι Einstein, Podolsky και Rosen μέσω ενός νοητικού πειράματος<sup>11</sup> έθεσαν ξανά και με μεγαλύτερη ένταση το θέμα της πληρότητας της κβαντικής μηχανικής.

Οι τρεις συγγραφείς διατυπώνουν από την αρχή ορισμένες θέσεις και βασικές έννοιες:

- Υπάρχει μια αντικειμενική πραγματικότητα, ανεξάρτητη από κάθε θεωρία και από τις φυσικές έννοιες με τις οποίες λειτουργεί η θεωρία
- Αν χωρίς να διαταράξουμε καθόλου ένα σύστημα, μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα, δηλαδή με πιθανότητα ίση με τη μονάδα, την τιμή ενός φυσικού μεγέθους, τότε υπάρχει ένα στοιχείο φυσικής πραγματικότητας, το οποίο αντιστοιχεί σε αυτό το φυσικό μέγεθος (ορισμός του στοιχείου πραγματικότητας)
- Για να είναι πλήρης μια θεωρία κάθε στοιχείο φυσικής πραγματικότητας πρέπει να έχει ένα αντίστοιχό του στη φυσική θεωρία.

---

<sup>11</sup>Einstein A. Podolsky B. Rosen N. (1935)

## 1.4.2 Αναλυτική περιγραφή του EPR

Το παράδοξο EPR αφορά δύο σωματίδια τα οποία έχουν αλληλεπιδράσει επί ένα ορισμένο χρονικό διάστημα και που στη συνέχεια έχουν αποχωριστεί. Η ουσία του παράδοξου έγκειται στο γεγονός ότι η κατάσταση του ενός συστήματος εξαρτάται από μετρήσεις που έγιναν στο άλλο σύστημα και με το οποίο θεωρείται ότι δεν αλληλεπιδρά πλέον. Στην αρχική του εκδοχή το επιχείρημα EPR αφορά ένα σύστημα δύο σωματιδίων και θέτει ένα νοητικό πείραμα, σύμφωνα με το οποίο είναι δυνατό να προβλεφθεί με βεβαιότητα, χωρίς να διαταραχθεί ένα σωματίδιο και η θέση και η ορμή του, αντιβαίνοντας έτσι στην αρχή της απροσδιοριστίας.

Ένα εννοιολογικά ισοδύναμο νοητικό πείραμα παρουσιάστηκε αργότερα από τον Bohm<sup>12</sup> και περιλαμβάνει ένα σύστημα δυο σωματιδίων όπου το μέγεθος που μελετάται είναι το σπιν. Επειδή είναι πιο εύκολο στην διατύπωση και πειραματικά ελέγξιμο, αλλά και επειδή μετέπειτα θεωρήματα, όπως οι ανισότητες του Bell, βασίστηκαν σε αυτή την εκδοχή του EPR, κρίνεται σκόπιμο να παρουσιαστεί αυτή η εκδοχή, που καλείται συνήθως EPRB και ως έτσι θα αναφέρεται στη συνέχεια.

Το σύστημα EPR είναι ένα σύστημα δυο σωματιδίων με σπιν 1/2 το καθένα και ολικό σπιν  $S = 0$ . Ισχύει η αρχή διατήρησης της στροφορμής και άρα η κατάσταση του συστήματος θα περιγράφεται από τη συνάρτηση

$$|\psi(1, 2)\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|+\rangle|-\rangle - |-\rangle|+\rangle)$$

Αυτά τα δυο σωματίδια μπορούν να έχουν προκύψει από την διάσπαση ενός σωματιδίου με μηδενικό σπιν. Έτσι τα δυο σωματίδια θα έχουν αντίθετες ορμές και άρα θα απομακρύνονται στο σύστημα αναφοράς του αρχικού σωματιδίου. Όμως συνεχώς πρέπει να εκδηλώνουν κατά τις μετρήσεις αντίθετα σπιν ως προς οποιονδήποτε άξονα.

Έστω λοιπόν ότι τα δύο σωματίδια έχουν απομακρυνθεί αρκετά μεταξύ τους μετά από κάποιο εύλογο χρονικό διάστημα. Πριν γίνει οποιαδήποτε μέτρηση κάθε σωματίδιο μπορεί να έχει σπιν πάνω ή κάτω κατά μήκος οποιουδήποτε άξονα. Όταν όμως γίνει μια μέτρηση, με έναν μετρητή Stern-Gerlach στο ένα σωματίδιο και βρεθεί το σπιν του, τότε ακαριαία "υποχρε-

---

<sup>12</sup>Bohm (1951) σ. 614-619

ώνεται" το άλλο σωματίδιο να επιλέξει την αντίθετη προς το πρώτο τιμή προβολής του σπιν στον ίδιο άξονα.

Αν λοιπόν παράγει κανείς ένα ζεύγος σωματιδίων με συσχετισμένα σπιν, τότε η μέτρηση της μιας συνιστώσας του ενός σωματιδίου θα του επιτρέψει την συναγωγή της τιμής της αντίστοιχης συνιστώσας του σπιν του άλλου. Εφόσον μπορεί κανείς να επιλέξει ποια συνιστώσα θα μετρήσει, με βάση το κριτήριο πραγματικότητας του Einstein συνεπάγεται ότι κάθε συνιστώσα είναι στην πραγματικότητα καθορισμένη, κάτι που δεν προσδιορίζεται από την κβαντική μηχανική.

Το παράδοξο αυτό αναπτύχθηκε περαιτέρω από τον Bohm και τον Aharonov <sup>13</sup> στην ταυτόχρονη μέτρηση δύο συνιστωσών του σπιν, κάτι που σύμφωνα με την κβαντική θεωρία δεν είναι δυνατό με βάση την αρχή της απροσδιοριστίας. Πάλι στο ίδιο σύστημα των δύο σωματιδίων, και αφού έχουν απομακρυνθεί, τοποθετούμε δύο μετρητές Stern-Gerlach, έναν σε κάθε σωματίδιο, αλλά σε διαφορετικό άξονα, έστω στους  $x$  και  $\psi$ . Από τα αποτελέσματα των δύο αυτών μετρήσεων, και πάντα με το ότι τα δυο σωματίδια θα έχουν αντίθετες τις προβολές του σπιν σε κάθε άξονα μπορούμε να συνάγουμε την προβολή του σπιν και στους δυο άξονες, χωρίς να γίνεται σεβαστή η αρχή της απροσδιοριστίας. Τη μια με άμεση μέτρηση, έστω στον άξονα  $x$ , και την άλλη με συναγωγή από το αποτέλεσμα της μέτρησης στο άλλο σωματίδιο στον άξονα  $\psi$ .

Πριν τα συμπεράσματα πρέπει να αναφερθεί η έννοια της τοπικότητας. Εάν ισχύει η αρχή της τοπικότητας τότε στοιχεία της πραγματικότητας που αφορούν ένα σύστημα δεν μπορούν να επηρεαστούν από μετρήσεις που διεξάγονται σε απόσταση σε άλλο σύστημα. Το ιδίωμα "σε απόσταση" μπορεί να κατανοηθεί με δυο τρόπους που διακρίνονται μεταξύ τους ως η *τοπικότητα Bell* ή η *τοπικότητα Einstein*.<sup>14</sup>

Κατά την πρώτη εκδοχή το "σε απόσταση", σημαίνει την απουσία αιτιακών επιδράσεων που περιγράφονται από τρέχουσες φυσικές θεωρίες. Κατά τον Einstein σημαίνει σε "απόσταση χωρικού τύπου" μεταξύ της χωροχρονικής θέσης όπου εντοπίζεται το στοιχείο πραγματικότη-

---

<sup>13</sup>Bohm, Aharonov (1957)

<sup>14</sup>Η έννοια της τοπικότητας έχει πολλές προσεγγίσεις στην βιβλιογραφία. Εδώ αναφέρεται ουσιαστικά η προσέγγιση του Redhead (1987)

τας για το ένα σύστημα και της χωροχρονικής θέσης όπου πραγματοποιείται η μέτρηση στο άλλο σύστημα. Αν δεχθεί κανείς την δεύτερη εκδοχή και την ειδική θεωρία της σχετικότητας τότε δεν μπορεί μια αιτιακή επίδραση που υπόκειται στους αντίστοιχους περιορισμούς να είναι αποτελεσματική στην επαγωγή της αλλαγής του στοιχείου της πραγματικότητας όπως απαιτείται κατά το EPR.

### 1.4.3 Τοποθετήσεις και συμπεράσματα με βάση το EPR

Με βάση αυτό το νοητικό πείραμα το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι είτε η θεωρία της κβαντικής θεωρίας δεν είναι πλήρης, και υπάρχουν στοιχεία της πραγματικότητας που δεν περιγράφονται σε αυτή, είτε δεν είναι τοπική, και μπορεί η μια μέτρηση ακαριαία να έχει επίπτωση στην δεύτερη μέτρηση.

Για να τεθούν πιο συγκεκριμένα τα παραπάνω συμπεράσματα πρέπει πρώτα να δοθεί ένας ορισμός για το διαχωρίσιμο σημειώνοντας εδώ ότι υπάρχουν διαφορετικές προσεγγίσεις για την έννοια του διαχωρίσιμου.<sup>15</sup>

*Διαχωρίσιμο κατάσταση:* Κάθε σύστημα κατέχει μια χωριστή κατάσταση η οποία καθορίζει τις ποιοτικές εγγενείς ιδιότητες του, και η κατάσταση κάθε σύνθετου συστήματος ολικά καθορίζεται από τις χωριστές ιδιότητες των υποσυστημάτων του (και τις σχέσεις μεταξύ των υποσυστημάτων του).

*Χωροχρονικό διαχωρίσιμο:* Το περιεχόμενο οποιονδήποτε δυο περιοχών του χωροχρόνου που χωρίζονται από ένα μη μηδενικό χωροχρονικό διάστημα συνιστά δύο χωριστά φυσικά συστήματα. Καθένα από αυτά κατέχει τη δική του διακριτή κατάσταση και η κοινή κατάσταση οποιονδήποτε δυο ολικά καθορίζεται από τις χωριστές καταστάσεις των συστημάτων των περιοχών αυτών.

Αν λοιπόν κάνει κανείς την παραδοχή του χωροχρονικού διαχωρίσιμου, ότι δηλαδή όταν γίνεται η μέτρηση στο ένα σύστημα (1), υπάρχουν στοιχεία της πραγματικότητας που αφορούν το δεύτερο σύστημα (2) ανεξάρτητα από το πρώτο και ότι ισχύει η τοπικότητα, η οποία απαγορεύει τις ακαριαίες αλληλεπιδράσεις, δεν μπορεί να εξηγηθεί η πρόβλεψη με συναγωγή για

---

<sup>15</sup>Για τους ορισμούς και για περαιτέρω ανάλυση του θέματος βλ. Berkovitz (2013)



το δεύτερο σύστημα και έτσι τίθεται θέμα πληρότητας της κβαντικής μηχανικής.

Η απάντηση του Bohr στο παράδοξο EPR δόθηκε την ίδια χρονιά <sup>16</sup> και βασίστηκε στην αρχή του μη διαχωρίσιμου και σε αυτή της συμπληρωματικότητας. Ο Bohr στο άρθρο αυτό αμφισβητεί το τι σημαίνει στοιχείο πραγματικότητας, όπως αυτό τίθεται από τους συγγραφείς του EPR, και θεωρεί ότι υπάρχει ασάφεια στο νόημα της φράσης "χωρίς να διαταράξουμε με κανένα τρόπο το σύστημα". Δηλαδή επειδή το παράδοξο συνίσταται στο συνδυασμό των αποτελεσμάτων μιας άμεσης μέτρησης για το σύστημα (1) και μιας έμμεσης μέτρησης του, δηλαδή της λογικής συναγωγής από τη μέτρηση στο σύστημα (2), ο Bohr θεωρεί ότι η έμμεση μέτρηση, μπορεί να μην περιλαμβάνει μηχανική διαταραχή αλλά περιλαμβάνει μια επίδραση στις συνθήκες του συστήματος (1) η οποία καθορίζει τους πιθανούς τύπους πρόβλεψης σε σχέση με την μελλοντική του συμπεριφορά. Αν επιπλέον αυτές οι συνθήκες συγκροτούν ένα εγγενές στοιχείο, της περιγραφής κάθε φαινομένου, στο οποίο μπορεί να αποδοθεί ο όρος στοιχείο πραγματικότητας, τότε δεν ευσταθεί η επιχειρηματολογία των EPR.

Ο Bohr παρουσιάζει με έναν εκτενή τρόπο τους πιθανούς τρόπους πειραμάτων για τη μέτρηση της ορμής και της θέσης ενός σωματιδίου θέλοντας μέσα από αυτό να υποδείξει ότι δεν μπορούν να καθοριστούν ταυτόχρονα. Αυτό βέβαια μπορεί να έχει και μια τελεστική και μια οντολογική ερμηνεία όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα.

Ο Bohr εκκινώντας από αυτό καταλήγει στην αρχή της συμπληρωματικότητας σύμφωνα με την οποία: η παραίτηση σε κάθε πειραματική διάταξη από τη μια ή την άλλη πτυχή των φυσικών φαινομένων - ο συνδυασμός των οποίων χαρακτηρίζει τη μέθοδο της κλασικής φυσικής και οι οποίες έτσι μπορούν να θεωρηθούν ως συμπληρωματικές μεταξύ τους- θεμελιώνεται στο ανέφικτο, για το πεδίο της κβαντικής θεωρίας, του ακριβούς ελέγχου της αντίδρασης του αντικειμένου με το όργανο μέτρησης, δηλαδή τη μεταφορά ορμής στην περίπτωση των μετρήσεων θέσης και της μετατόπισης στην περίπτωση μέτρησης της ορμής.

Εισάγει την αρχή του μη διαχωρίσιμου, υπό την έννοια της μη δυνατότητας για μια περαιτέρω ανάλυση της αλληλεπίδρασης ανάμεσα στο σύστημα και στη μετρητική συσκευή. Έτσι το σύστημα των δυο σωματιδίων και το μετρητικό όργανο αποτελούν ένα, μοναδικό και μη διαχωρίσιμο σύστημα ακόμα και μετά το χωρικό χωρισμό τους. Εδώ εντάσσονται και οι

---

<sup>16</sup>Bohr (1935)

σημασιολογικές διαταραχές σε διάκριση από τις μηχανικές. Στη σκέψη του Bohr ισχύει ο ολισμός των κβαντικών φαινομένων<sup>17</sup>: το κβαντικό αίτημα συνεπάγεται ότι κάθε παρατήρηση ατομικών φαινομένων θα έχει μια, όχι αμελητέα, αλληλεπίδραση με το δρων υποκείμενο της παρατήρησης. Κατά συνέπεια δεν μπορεί να αποδοθεί ανεξάρτητη πραγματικότητα ούτε στα φαινόμενα, ούτε στα υποκείμενα της παρατήρησης. Με τον όρο "υποκείμενα της παρατήρησης" ο Bohr εννοεί και τις μετρητικές συσκευές.

Ο Bohr θεωρεί ακόμα ότι θα ήταν παρανόηση να πιστεύει κανείς ότι οι δυσκολίες της ατομικής θεωρίας ίσως θα μπορούσαν να αποφευχθούν με αντικατάσταση των εννοιών της κλασικής φυσικής με νέες εννοιολογικές μορφές<sup>18</sup>. Η προτεραιότητα στην έννοιες της κλασικής φυσικής, αν και τα φαινόμενα μπορεί να υπερβαίνουν τον ορίζοντα της έχει ένα απλό λόγο:

"Με τη λέξη 'πείραμα' αναφερόμαστε σε μια κατάσταση όπου μπορούμε να πούμε σε άλλους τι έχουμε κάνει και τι έχουμε μάθει και επομένως η περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των αποτελεσμάτων των παρατηρήσεων πρέπει να εκφραστεί σε μη αμφίσημη γλώσσα και με κατάλληλη εφαρμογή της ορολογίας της κλασικής φυσικής"<sup>19</sup>

Το ερώτημα λοιπόν της τοπικότητας ή της πληρότητας για το σύστημα EPR απαντιέται μέσω του μη διαχωρίσιμου και της συμπληρωματικότητας. Για τον Bohr η κβαντική μηχανική είναι πλήρης. Η αρχή της συμπληρωματικότητας για τον Bohr γενικεύεται στην ιδέα ότι κανένα μεμονωμένο συνεκτικό σύστημα ανθρώπινων εννοιών δεν μπορεί να αντιμετωπίσει την πολυπλοκότητα των πραγμάτων, έτσι ώστε σε κάθε κλάδο της διανοητικής προσπάθειας πρέπει να καταφεύγουμε σε ζεύγη εννοιών που προσφέρουν αμοιβαία ασυνεπείς αλλά συμπληρωματικές προοπτικές.<sup>20</sup>

Ακόμα πρέπει να ειπωθεί εδώ ότι ο Bohr δεν είχε ενιαία τοποθέτηση και υπήρχαν σαφείς μετατοπίσεις ανάμεσα στα επιστημονικά έργα του. Συχνά υποστήριζε ότι η συμπληρωματικότητα δεν αποκλείει την αντικειμενικότητα, τόσο την οντολογική όσο και την γνωσιολογική.<sup>21</sup>

---

<sup>17</sup>Bohr (1928)

<sup>18</sup>Bohr (1934) σ.16

<sup>19</sup>Bohr (1949) σ.209

<sup>20</sup>Για περισσότερη ανάλυση πάνω σε αυτή την φιλοσοφική προέκταση των ιδεών του Bohr βλ. Torretti R. ([1999] 2012) σ. 444-449

<sup>21</sup>Μπιτσάκης ([1980] 1987)

Πέρα από αυτή τη γενίκευση στην σκέψη του Bohr, το κύριο είναι να εστιάσει κανείς στο μεθοδολογικό κριτήριο που εισάγεται με την αρχή της συμπληρωματικότητας. Αυτή η αρχή θέτει δογματικά περιορισμούς στην επιστημονική θεώρηση από την αφετηρία μιας θολής φιλοσοφικής ερμηνείας. Επίσης η ανάλυση αυτή, ακόμα και αν δεν είναι αποδεκτή από το σύνολο των υποστηρικτών της ορθόδοξης ερμηνείας, αποτέλεσε το σημείο αφετηρίας για μη αιτιοκρατικές και αντιρεαλιστικές θεωρητικές επεξεργασίες.

Από την άλλη μεριά, αν κανείς θέλει να υιοθετήσει το συμπέρασμα της μη πληρότητας της κβαντικής μηχανικής, έρχεται αντιμέτωπος με το ερώτημα, με το τι πρέπει αυτή να συμπληρωθεί. Μια λογική συνέπεια αυτού είναι η διατύπωση μιας θεωρίας με συμπληρωματικές ή κρυμμένες μεταβλητές.

## **1.5 Περιορισμοί που έχουν τεθεί για τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών**

### **1.5.1 Οι ανισότητες Bell**

Το θεώρημα του Bell, το οποίο διατυπώθηκε το 1964 είναι βασισμένο στο νοητικό πείραμα των Einstein, Podolsky και Rosen (EPR) όπως αυτό διαμορφώθηκε από τον Bohm -το οποίο αναφέρθηκε εκτενώς στην προηγούμενη ενότητα- και αποτελεί μία προσπάθεια ελέγχου, πειραματικού και ποσοτικού της ύπαρξης τοπικών κρυμμένων μεταβλητών. Σε αυτή την κατεύθυνση προσπάθησε να συμπεριλάβει κάθε δυνατή θεωρία τέτοιου είδους, δηλαδή τοπικών κρυμμένων μεταβλητών, ώστε να μπορεί να γίνει η διάκριση με γενικό τρόπο.

Αυτό που πρότεινε ο Bell ουσιαστικά μπορεί να αποδοθεί ως εξής. Αρχικά να βρεθεί ένα κατάλληλο μέγεθος με το οποίο θα γίνει η εν δυνάμει διάκριση των προβλέψεων της κβαντομηχανικής από τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών. Στην συνέχεια να υπολογιστεί το μέγεθος αυτό όπως προκύπτει από την κβαντομηχανική και τέλος να βρεθεί ένας τρόπος να δοθούν μαθηματικές σχέσεις ή περιορισμοί που όλες οι θεωρίες κρυμμένων τοπικών μεταβλητών οφείλουν να σέβονται. Η σύγκριση των αποτελεσμάτων θα μπορεί να αποφανθεί για την συμβατότητα της κβαντομηχανικής με θεωρίες τοπικών κρυμμένων μεταβλητών. Η αναλυτική

περιγραφή του θεωρήματος του Bell δίνεται αμέσως παρακάτω.<sup>22</sup>

Για το νοητικό του πείραμα ο Bell θεώρησε μία πειραματική διάταξη όπου η μέτρηση του σπιν των δυο σωματιδίων του EPR δεν γίνεται στον ίδιο άξονα αλλά οι δύο διατάξεις Stern-Gerlach σχηματίζουν μία γωνία  $\theta$ . Επιλέχθηκε το σύστημα EPR γιατί σε αυτό ο ιντετερμινισμός ή και η ακραία μη τοπικότητα είναι έκδηλα. Το μέγεθος που κρίθηκε κατάλληλο ήταν το γινόμενο των προβολών του σπιν και ιδιαίτερα η αναμενόμενη τιμή του  $P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}})$  όπου  $\hat{\mathbf{a}}$  και  $\hat{\mathbf{b}}$  είναι οι κατευθύνσεις μέτρησης των προβολών του σπιν των δυο σωματιδίων.

Αν, δηλαδή, οι ανιχνευτές τοποθετηθούν παράλληλα το αποτέλεσμα που θα προκύψει για το γινόμενο στην κατάσταση singlet του ολικού σπιν θα είναι  $P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) = -1$  ενώ στην περίπτωση που είναι αντιπαράλληλα τοποθετημένοι  $P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) = 1$ .

Με μαθηματικές πράξεις, που κρίνεται ότι μπορούν να παραληφθούν, προκύπτει ότι τελικά η αναμενόμενη τιμή του γινομένου των προβολών του σπιν, όπως προκύπτει από την κβαντική θεωρία δίνεται από τον ακόλουθο τύπο :

$$P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) = -\cos \theta$$

Επειδή ισχύει όμως ότι

$$\hat{\mathbf{a}} \cdot \hat{\mathbf{b}} = \cos \theta$$

τελικά θα ισχύει

$$P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) = -\hat{\mathbf{a}} \cdot \hat{\mathbf{b}}$$

Όπως αναφέρθηκε εισαγωγικά, αυτό το αποτέλεσμα της κβαντομηχανικής πρέπει να βρεθεί αν συμβαδίζει με μια θεωρία τοπικών κρυμμένων μεταβλητών. Για να ειπωθεί αυτό το πρόβλημα στη γενικότητα του ο Bell προσπαθήσε να εισάγει στον πειραματικό του έλεγχο μόνο τη βασική λογική και τις αντίστοιχες μαθηματικές σχέσεις που απορρέουν σε κάθε τέτοια περίπτωση.

Έτσι για κάθε τέτοια τιμή μιας κρυμμένης παραμέτρου  $\lambda$  θα υπάρχουν δυο συναρτήσεις  $A(\hat{\mathbf{a}}, \lambda)$  και  $B(\hat{\mathbf{b}}, \lambda)$  των οποίων οι τιμές θα δίνουν τις προβολές των σπιν στα  $\hat{\mathbf{a}}$  και  $\hat{\mathbf{b}}$

---

<sup>22</sup>Για το θεώρημα του Bell υπάρχουν στην βιβλιογραφία πολλές ισοδύναμες περιγραφές του, εδώ ακολουθήθηκε ο τρόπος με τον οποίο εισήχθη από τον Bell (1964)

αντίστοιχα. Να τονιστεί εδώ ότι είναι αδιάφορο για την απόδειξη εάν το  $\lambda$  αναφέρεται σε μια παράμετρο ή σε ένα σύνολο παραμέτρων, όπως επίσης και το αν είναι διακριτή ή συνεχής μεταβλητή. Ακόμα οι τιμές των  $A(\hat{\mathbf{a}}, \lambda)$  και  $B(\hat{\mathbf{b}}, \lambda)$  δεν εξαρτώνται η μια από την άλλη. Αυτό προκύπτει από την παραδοχή της τοπικότητας.

Οι μόνες δυνατές τιμές που μπορούν να προκύψουν είναι  $A(\hat{\mathbf{a}}, \lambda) = \pm 1$  και αντίστοιχα  $B(\hat{\mathbf{b}}, \lambda) = \pm 1$  και από την στατιστική προκύπτει ότι η αναμενόμενη μέση τιμή για το γινόμενο

$$P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) = \int A(\hat{\mathbf{a}}, \lambda)B(\hat{\mathbf{b}}, \lambda)\rho(\lambda)d\lambda$$

όπου  $\rho(\lambda)$  είναι η πυκνότητα πιθανότητας για την οποία ισχύει η σχέση

$$\int \rho(\lambda)d\lambda = 1.$$

Θεωρώντας τώρα ένα τρίτο μοναδιαίο διάνυσμα  $\hat{\mathbf{c}}$  σε άλλη κατεύθυνση αποδεικνύεται (η απόδειξη θα παραληφθεί) η ανισότητα Bell:

$$|P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{b}}) - P(\hat{\mathbf{a}}, \hat{\mathbf{c}})| \leq 1 + P(\hat{\mathbf{b}}, \hat{\mathbf{c}}).$$

Μένει η σύγκριση των δυο σχέσεων που προέκυψαν : η μια από την κβαντική μηχανική και η άλλη από την στατιστική κατανομή των αποτελεσμάτων που προκύπτουν από κάθε θεωρία τοπικών κρυμμένων μεταβλητών. Παραλείποντας την αυστηρή μαθηματική σύγκριση των αποτελεσμάτων, και παραθέτοντας το τελικό συμπέρασμα, αυτό που προκύπτει είναι ότι η κβαντομηχανική θεωρία δεν μπορεί να συμβιβαστεί με μια θεωρία τοπικών κρυμμένων μεταβλητών.

Είναι σημαντικό εδώ να τονιστεί ότι το θεώρημα Bell αποτέλεσε τη βάση πάνω στην οποία η πειραματική διάκριση μεταξύ της κβαντομηχανικής και μιας οποιασδήποτε τοπικής θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών είναι επί της αρχής δυνατή.

Πολλά πειράματα έκτοτε έγιναν για να επιβεβαιωθούν ή να διαψευστούν οι ανισότητες του Bell, με σημαντικότερο από αυτά, εκείνο των Aspect, Grangier και Roger που έγινε το 1982. Με χρήση φωτονίων αντί για ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου, επειδή η χρήση πολωτών κάνει πολύ πιο εύκολο τον πειραματικό χειρισμό τους το πείραμα επιβεβαιώνει τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής, κάτι που από μεγάλο μέρος της επιστημονικής κοινότητας εκλήφθηκε ως το τέλος των θεωριών με τοπικές κρυμμένες μεταβλητές.

Χωρίς να μειώνεται η σημασία τους, οι συνέπειες των ανισοτήτων του Bell πρέπει να τεθούν στην σωστή τους βάση. Έτσι το θεώρημα Bell ούτε απέρριψε τελεσίδικα τις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, αλλά ανέδειξε τον μη τοπικό τους χαρακτήρα, ούτε πολύ περισσότερο απεφάνθη πάνω στο ζήτημα της αιτιότητας στην κβαντική μηχανική. Ακόμα ανέδειξε την τοπικότητα ως ένα σημείο κρίσης της ίδιας της κβαντικής μηχανικής.<sup>23</sup>

## 1.5.2 Το θεώρημα Kochen-Specker

Το θεώρημα Kochen-Specker προτάθηκε από τους S. Kochen και E. Specker το 1967 και μπορεί να ειπωθεί ως συμπληρωματικό των ανισοτήτων Bell υπό το πρίσμα ότι και αυτό θέτει ορισμένους περιορισμούς για τους επιτρεπτούς τύπους θεωριών που εισάγουν κρυμμένες μεταβλητές. Στη βιβλιογραφία απαντάται συχνά ως *Bell-KS θεώρημα* και αυτό γιατί ο Bell το 1966 είχε προτείνει μια εναλλακτική διατύπωση που κατέληγε σε παρόμοια συμπεράσματα.<sup>24</sup> Το γεγονός ότι έχει επικρατήσει να αναφέρεται ως Kochen-Specker έγκειται κυρίως στο ότι στο άρθρο τους οι προαναφερόμενοι έθεσαν ένα συγκεκριμένο σύνολο 117 διανυσμάτων όπου γινόταν εμφανές το άτοπο που υποδεικνύει το αντίστοιχο θεώρημα.<sup>25</sup>

Με βάση λοιπόν αυτό το θεώρημα αποδεικνύεται ότι υπάρχει λογική αντίφαση αν κανείς δεχθεί ως αληθείς δυο βασικές παραδοχές που συνήθως τίθενται στις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών και οι οποίες σκοπό έχουν να αναπαράγουν τα αποτελέσματα της κβαντικής μηχανικής.

Πρώτη παραδοχή:

Οι κρυμμένες μεταβλητές έχουν καθορισμένες τιμές για κάθε δεδομένη στιγμή.

Δεύτερη παραδοχή:

Οι τιμές των κρυμμένων μεταβλητών είναι εγγενείς και ανεξάρτητες από την μετρητική διαδικασία.

---

<sup>23</sup> Δεν υπάρχει σύμφωνη γνώμη όλης της επιστημονικής κοινότητας πάνω σε αυτό αλλά μεγάλο της κομμάτι θεωρεί ότι το θεώρημα του Bell δείχνει τον μη τοπικό χαρακτήρα συνολικά για την κβαντική μηχανική. Για περισσότερη ανάλυση ας ανατρέξει κανείς στο Shimony (2009)

<sup>24</sup> Bell (1966)

<sup>25</sup> Mermin (1993) σ. 808

Σύμφωνα με τους Kochen και Specker αν δεχθεί κανείς αυτές τις δύο παραδοχές και ότι υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοιχία ανάμεσα στις ιδιότητες ενός κβαντικού συστήματος και στην αναπαράστασή του σε ένα χώρο Hilbert διάστασης μεγαλύτερης ή ίσης του τρία οδηγείται σε αντίφαση.

Η αντίφαση προκαλείται από το γεγονός ότι τα παρατηρήσιμα μεγέθη στην κβαντική μηχανική είναι ταυτόχρονα μετρήσιμα εάν οι τελεστές τους μετατίθενται. Ορίζεται, δηλαδή μια αλγεβρική δομή των κβαντομηχανικών παρατηρήσιμων μεγεθών η οποία θα πρέπει να διατηρείται σε μια θεωρία που περιλαμβάνει κρυμμένες μεταβλητές. Το σύνολο των παρατηρήσιμων μεγεθών αντιστοιχούν σε τελεστές στον χώρο Hilbert και δείχνεται ότι υπάρχει μια πεπερασμένη μερική άλγεβρα των παρατηρήσιμων μεγεθών για την οποία δεν μπορεί να γίνει υπαγωγή όλων των επιμέρους αλγεβρών, δηλαδή η άλγεβρα είναι μη αντιμεταθετική. Η απόδειξη του αντίστοιχου θεωρήματος γίνεται γεωμετρικά όπου αποδεικνύεται ότι υπάρχει ένα σύνολο πεπερασμένου αριθμού διανυσμάτων που δεν μπορούν να τους δωθούν τιμές ανεξάρτητα (συνήθως στη βιβλιογραφία δίνεται χρώμα και αυτό παίρνει τις τιμές κόκκινο και μπλε) και παράλληλα κάθε υποσύνολο αμοιβαία ορθογώνιων διανυσμάτων να περιέχει συγκεκριμένο αριθμό διανυσμάτων από κάθε χρώμα. Για διάσταση με  $n=3$  στην πρωτότυπη απόδειξη δίνεται ένα σύνολο 117 διανυσμάτων. Αργότερα και για μεγαλύτερη διάσταση δίνονται απλοποιημένα σύνολα διανυσμάτων με μικρότερο αριθμό διανυσμάτων. Ακολουθώντας και τον απαραίτητο φορμαλισμό το θεώρημα Kochen-Specker γράφεται ως εξής:

Έστω ένας χώρος Hilbert των διανυσμάτων κατάστασης διάστασης μεγαλύτερης ή ίσης του τρία. Υπάρχει ένα σύνολο  $M$  παρατηρήσιμων μεγεθών στον χώρο  $H$  που είναι τέτοιο ώστε οι παρακάτω δυο προτάσεις οδηγούν σε αντίφαση :

- (1) Όλα τα στοιχεία του  $M$  έχουν ταυτόχρονα καθορισμένες τιμές (για τα παρατηρήσιμα μεγέθη  $A, B, C \dots$  είναι αντίστοιχα  $v(A), v(B), v(C) \dots$ ) ανεξάρτητα από την κατάσταση  $|\psi\rangle$ .
- (2) Οι τιμές των παρατηρήσιμων μεγεθών συμμορφώνονται με τους ακόλουθους περιορισμούς
  - α) Εάν τα  $A, B$  και  $C$  είναι συμβατά και  $C=A+B$  τότε  $v(C)=v(A)+v(B)$
  - β) Εάν τα  $A, B$  και  $C$  είναι συμβατά και  $C=A \cdot B$  τότε  $v(C)=v(A) \cdot v(B)$

Η πρόταση (2) απορρέει από μια πιο γενική αρχή αυτή της συναρτησιακής σύνθεσης FUNC (Functional Composition Principle) η οποία ισχύει για έναν ερμιτιανό τελεστή  $\hat{A}$  σε ένα χώρο Hilbert και για μια συνάρτηση  $f : R \rightarrow R$  τέτοια ώστε ο  $f(\hat{A})$  να είναι και πάλι ερμιτιανός τελεστής. Υποθέτοντας επιπλέον ένα ερμιτιανό τελεστή ο οποίος αντιστοιχεί σε ένα παρατηρήσιμο της κβαντικής μηχανικής, η αρχή αυτή μπορεί να γραφεί ως εξής. Έστω  $\hat{A}$  ένας ερμιτιανός τελεστής που αντιστοιχεί στο παρατηρήσιμο μέγεθος  $A$ . Έστω  $f : R \rightarrow R$  μια τυχαία συνάρτηση, τέτοια ώστε  $f(\hat{A})$  να είναι ένας άλλος ερμιτιανός τελεστής που αντιστοιχεί στο μέγεθος  $f(A)$  τότε ισχύει (FUNC):

$$\nu(f(A))^{|\psi\rangle} = f(\nu(A))^{|\psi\rangle}.$$

Αυτή η αρχή, ο FUNC, θεμελιώνεται πάνω στην αντίστοιχη στατιστική εκδοχή (STAT FUNC), δηλαδή στην:

$$prob[\nu(f(A))^{|\psi\rangle} = a] = prob[f(\nu(A))^{|\psi\rangle} = a],$$

η οποία προκύπτει από τον φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής και από τρεις επιπλέον παραδοχές: τον ρεαλισμό της τιμής (value realism), το καθορισμένο της τιμής (value definiteness) και τη μη πλαίσιακότητα (non contextuality).

Σύμφωνα με τον ρεαλισμό της τιμής (value realism) αν υπάρχει ένας οπερασιοναλιστικά ορισμένος πραγματικός αριθμός  $a$ , ιδιοτιμή ενός ερμιτιανού τελεστή  $\hat{A}$ , και αν, για μια δεδομένη κατάσταση  $|\psi\rangle$ , ο στατιστικός αλγόριθμος της κβαντικής μηχανικής για τον  $\hat{A}$  δίνει ένα πραγματικό αριθμό  $b$  τέτοιο ώστε  $prob[\nu(\hat{A})^{|\psi\rangle} = a] = b$ , τότε υπάρχει ένα παρατηρήσιμο μέγεθος του οποίου ο  $a$  να είναι μια τιμή.

Λόγω της πολυπλοκότητας η απόδειξη του θεωρήματος θα παραληφθεί. Σε κάθε περίπτωση αυτό που ενδιαφέρει εδώ δεν είναι να επιμείνουμε στην απόδειξη του θεωρήματος αλλά στη διατύπωση, στις παραδοχές που κάνει και στις συνέπειες του.<sup>26</sup>

Αφού λοιπόν το θεώρημα υποδεικνύει μια αντίφαση δυο προκείμενων προτάσεων το συμπέρασμα που προκύπτει είναι η άρνηση τουλάχιστον μιας από αυτές. Η λογική συνέπεια

<sup>26</sup>Για την απόδειξη του εν λόγω θεωρήματος μπορεί κανείς να συμβουλευτεί το Held (2013)



αυτού είναι λοιπόν είτε ότι δεν ισχύει με γενικό τρόπο το καθορισμένο της τιμής είτε ότι οι θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών οφείλουν να είναι πλαισιακές. Η άρνηση του καθορισμένου της τιμής έχει αρχικά να αντιμετωπίσει το γεγονός ότι είναι μια από τις βασικές παραδοχές που κάνουν όλες οι θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών. Υπάρχουν και εδώ δυο δρόμοι με τους οποίους μπορεί να την αρνηθεί κανείς. Στην πρώτη περίπτωση να δεχθεί μερικό καθορισμό των τιμών, με επιλογή κάποιων από τα παρατηρήσιμα μεγέθη, ή να δεχθεί ότι η κβαντική κατάσταση καθορίζει ποια παρατηρήσιμα μεγέθη έχουν καθορισμένες τιμές. Η θεωρία του Bohm, ανήκει στην πρώτη περίπτωση και δεν αντιβαίνει στο θεώρημα Kochen-Specker.

Η άρνηση της δεύτερης παραδοχής, της μη πλαισιακότητας, όπως μπορεί τελικά να προκύψει αν αρθεί η επικάλυψη με την πρώτη, θέτει ότι *καμία μη πλαισιακή θεωρία κρυμμένων μεταβλητών δεν μπορεί να αναπαράγει τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής σε ένα χώρο Hilbert που έχει διάσταση τουλάχιστον ίση με τρία*. Εισάγει έτσι την έννοια της πλαισιακότητας για όλες τις δυνατές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, δηλαδή ότι οι τιμές των μεταβλητών αυτών συνδέονται άρρηκτα και με το κβαντικό σύστημα που μετριέται στην αλληλεπίδραση του με την συσκευή μέτρησης.

### 1.5.3 Η έννοια της πλαισιακότητας

Η έννοια της πλαισιακότητας εισάγεται στην κβαντική μηχανική από τους Kochen και Specker το 1967 και παίζει κομβικό ρόλο στην ανάπτυξη των θεωριών της κβαντικής μηχανικής. Η πλαισιακή εξάρτηση των αποδιδόμενων τιμών στα κβαντικά μεγέθη ενός φυσικού συστήματος, υπογραμμίζεται ήδη από τον Bohr και είναι βασικό στοιχείο και στην θεωρία του Bohm, χωρίς αυτές οι οπτικές γωνίες να συμπιπτουν. Στην έννοια της πλαισιακότητας, όπως αυτή υπεισέρχεται στη θεωρία του Bohm, θα γίνει εκτενέστερη αναφορά στο δεύτερο κεφάλαιο.

Η έννοια της πλαισιακότητας αναφέρεται εν γένει στην εξάρτηση των τιμών που προκύπτουν για τα διάφορα παρατηρούμενα μεγέθη ενός κβαντικού συστήματος από την αλληλεπίδραση του με τη μετρητική συσκευή. Πάρα τούτα η έννοια της πλαισιακότητας δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένη. Η αναφορά εδώ θα περιοριστεί στα βασικά είδη πλαισιακότητας που αναφέρονται στη βιβλιογραφία και που σχετίζονται με την παρούσα ανάλυση, την αιτιακή και

την οντολογική. Πριν από αυτό όμως θα αναφερθεί εδώ η αρχή της αξιόπιστης μέτρησης που χρειάζεται για την εν λόγω παρουσίαση : η κβαντική μέτρηση ενός παρατηρούμενου μεγέθους αξιόπιστα μεταφέρει την τιμή που το μέγεθος είχε ακριβώς πριν την μέτρηση.

Κατά την *Αιτιακή πλαισιακότητα*, μια ιδιότητα (τιμή ενός παρατηρούμενου μεγέθους) μπορεί να είναι πλαισιακά εξαρτώμενη υπό την έννοια ότι είναι αιτιακά ευαίσθητη στο πώς έχει μετρηθεί. Η βασική ιδέα είναι ότι οι παρατηρούμενες τιμές είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συστήματος με την μετρητική συσκευή. Η διαφορά των παρατηρούμενων τιμών εξηγείται με όρους εξάρτησης από το πλαίσιο του παρατηρούμενου μεγέθους. Εάν μια ερμηνεία θέλει να υπερασπιστεί την αιτιακή πλαισιακότητα πρέπει συνακόλουθα να εγκαταλείψει την αξιόπιστία της μέτρησης τουλάχιστον για παρατηρήσιμα μεγέθη με εκφυλισμένο φάσμα.

Αφού οι τιμές εξαρτώνται αιτιακά από την παρουσία συγκεκριμένης πειραματικής διάταξης, αυτές οι διατάξεις είναι αιτιακά απαραίτητες για να προκύψουν οι τιμές και έτσι οι τιμές δεν μπορούν να υπάρξουν πριν από τη μέτρηση, δηλαδή την αλληλεπίδραση του συστήματος με την συσκευή. Η αιτιακή πλαισιακότητα δεν υπαγορεύει ότι η οντολογική κατάσταση των φυσικών ιδιοτήτων που εμπλέκονται πρέπει να αλλάξει, δηλαδή ότι γίνονται σχεσιακές. Εάν μια ιδιότητα ενός αντικείμενου έχει εμφανιστεί μέσω της αλληλεπίδρασης με ένα άλλο αντικείμενο, μπορεί το αντικείμενο να διατηρήσει την ιδιότητα αυτή και μετά τη λήξη της αλληλεπίδρασης.

Κατά την *Οντολογική πλαισιακότητα*, μια ιδιότητα (τιμή ενός παρατηρούμενου μεγέθους) μπορεί να είναι οντολογικά πλαισιακά εξαρτώμενη υπό την έννοια ότι, για να είναι καλά καθορισμένος ο προσδιορισμός της, η έννοια του πλαισίου είναι εγγενώς απαραίτητη. Έτσι για να είναι καλά καθορισμένο ένα παρατηρούμενο μέγεθος που αντιστοιχεί στους μαθηματικά ταυτόσημους τελεστές  $f(\hat{Q}) = g(\hat{P})$  πρέπει να γνωρίζει κανείς αν φυσικά πραγματώνεται μέσω του  $Q$  ή του  $P$ , και τα οποία δεν είναι συμβατά. Έτσι υπάρχουν τόσα παρατηρήσιμα και είδη φυσικών ιδιοτήτων για ένα τελεστή  $f(\hat{Q})$  όσοι είναι και οι τρόποι να δομηθεί ο τελεστής  $f(\hat{Q})$  από τελεστές με μη εκφυλισμένο φάσμα. Ένας υπερασπιστής της οντολογικής πλαισιακότητας πρέπει να δώσει μια πιο πλήρη εξήγηση της εξάρτησης του παρατηρούμενου  $f(Q)$

από το μέγεθος  $Q$ . Οι πιο πιθανές επεξηγήσεις για αυτό είναι: α) η τιμή  $\nu(f(Q))$  δεν είναι μια αυθύπαρκτη φυσική ιδιότητα αλλά μια που οντολογικά εξαρτάται από μια άλλη  $\nu(Q)$  και β) για να είναι καλά καθορισμένο το παρατηρήσιμο  $f(Q)$  είναι απαραίτητη μια συγκεκριμένη μετρητική διάταξη και όχι εκείνη που αντιστοιχεί στο παρατηρούμενο  $g(P)$ .

Αυτή η ιδέα είναι πολύ κοντά σε αυτό που πρότεινε ο Bohr στην απάντηση του για το παράδοξο EPR. Σε αυτή την εκδοχή της οντολογικής πλαισιακότητας η ιδιότητα  $\nu(f(Q))$  δεν εξαρτάται από την τιμή  $\nu(Q)$  αλλά από την παρουσία της μετρητικής διάταξης του  $Q$ . Παραμένει ανοιχτό το ερώτημα σε αυτή την εκδοχή εάν σε μια μετρηση-  $P$  δεν έχει νόημα να μιλάμε για καθορισμένη τιμή όχι μόνο του  $f(Q)$ , αλλά και του  $Q$ . Η απάντηση που θα δοθεί σε αυτό το ερώτημα κρίνει σε μεγάλο βαθμό και τις αντίστοιχες ερμηνείες.

Οι δύο αυτοί τύποι οντολογικής πλαισιακότητας, σε αντίθεση με την αιτιακή πλαισιακότητα, συνεπάγονται ότι οι ιδιότητες του συστήματος γίνονται σχεσιακές υπό την έννοια ότι το σύστημα μπορεί να έχει αυτές τις ιδιότητες μόνο εάν είτε έχει και κάποιες άλλες συγκεκριμένες ιδιότητες είτε αυτές είναι συσχετισμένες με συγκεκριμένη πειραματική διάταξη.

## 1.6 Συμπεράσματα

Η ανάλυση που προηγήθηκε εστιάζει στην πληρότητα ή μη της κβαντικής μηχανικής. Η διαμάχη σε αυτό το θέμα κρατάει σχεδόν ένα αιώνα, όσο δηλαδή και η ύπαρξη της κβαντικής θεωρίας. Η κυρίαρχη τάση αποδέχεται άμεσα ή έμμεσα ότι δεν έχει νόημα να μιλάει κανείς για μεγέθη που δεν είναι παρατηρήσιμα και ότι η κβαντική μηχανική είναι πλήρης, θέτοντας υπό αίρεση την αιτιότητα στο επίπεδο της κβαντικής μηχανικής. Από την άλλη μεριά υπάρχει ένα αντίθετο ρεύμα που αμφισβητεί την πληρότητα και προσπαθεί να διατυπώσει εναλλακτικές αιτιοκρατικές ερμηνείες. Σε αυτή την κατεύθυνση, τίθενται μια σειρά από παράδοξα με χαρακτηριστικότερα την λεγόμενη "γάτα του Schrödinger" και το EPR, τα οποία προσπαθούν να αναδείξουν τις "αντιφάσεις" της κβαντικής μηχανικής αν αυτή θεωρηθεί πλήρης.

Καθοριστικό σημείο για όλη αυτή τη συζήτηση είναι αυτό της κβαντικής μέτρησης. Οι διαφορετικές προσεγγίσεις της μετρητικής διαδικασίας συνιστούν και διαφορετικές ερμηνείες για την κβαντική μηχανική, που αν είναι συνεπείς αίρουν κάποια βασική της παραδοχή.

Οι θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, εκκινούν από την θέση ότι υπάρχουν στοιχεία της πραγματικότητας που δεν περιγράφονται από τη σημερινή μορφή της κβαντικής θεωρίας. Το 1952 ο Bohm εισάγει μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που προσπαθεί να αποκαταστήσει την αιτιότητα. Το ερώτημα για το εάν μπορεί να υπάρξει θεωρία κρυμμένων μεταβλητών τέθηκε με ακόμα μεγαλύτερη ένταση μετά από αυτό και πήρε νέα τροπή τη δεκαετία του '70 με τη διατύπωση δύο θεωρημάτων που έθεσαν περιορισμούς, τους οποίους οφείλουν να σέβονται τέτοιες θεωρίες.

Το θεώρημα του Bell, γνωστότερο ως οι ανισότητες του Bell απέδειξε ότι δεν μπορούν να υπάρξουν θεωρίες τοπικών κρυμμένων μεταβλητών που να αναπαράγουν τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής. Αυτό το θεώρημα είναι καθοριστικής σημασίας και αποτελεί κομβικό σημείο για την τοπικότητα ή μη συνολικά της κβαντικής μηχανικής. Από την άλλη το θεώρημα Kochen-Specker θέτοντας ως παραδοχή το καθορισμένο και εγγενές ανεξαρτήτως πειραματικών διαδικασιών των τιμών των κρυμμένων μεταβλητών οδήγησε σε αντίφαση και ανέδειξε την έννοια της πλαισιακότητας ως κεντρική για αυτού του τύπου τις θεωρίες.

Η θεωρία του Bohm αναμετράται με τα δυο αυτά θεωρήματα: δεν είναι τοπικές οι μεταβλητές και αποδεχεται το καθορισμένο της τιμής για ένα υποσύνολο από αυτές. Αυτό βέβαια δεν σημαίνει και την δικαίωση της ερμηνείας αυτής. Πριν την κρίση της όμως πρέπει να προηγηθεί η παρουσίαση της στο κεφάλαιο που ακολουθεί.

## Κεφάλαιο 2

# Η οντολογική ερμηνεία του Bohm

### 2.1 Αφετηρίες της θεωρίας του Bohm - Η θεωρία της διπλής λύσης του De Broglie

Η οντολογική ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας του David Bohm προτάθηκε το 1952, όμως βρίσκει τις ρίζες της στις επεξεργασίες του Louis De Broglie, ο οποίος το 1927 παρουσίασε τη θεωρία της "διπλής λύσης" σύμφωνα με την οποία υπάρχει ένα φυσικά πραγματικό κύμα που υπακούει στην εξίσωση του Schrödinger μαζί με ένα σωματίδιο που ακολουθεί μια καθορισμένη τροχιά. Το κύμα αυτό καλείται *οδηγόν κύμα* (pilot wave) κάτι που ανταποκρίνεται στο γεγονός ότι είναι αυτό που οδηγεί την κίνηση του σωματιδίου.

Η ορμή του σωματιδίου, στην πρόταση του De Broglie συνδέεται με το κύμα μέσω της σχέσης:

$$\mathbf{p} = \hbar \nabla \Phi$$

όπου  $\Phi$  η φάση της κυματοσυνάρτησης. Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό προτείνεται η αναλογία με ένα πλοίο που καθοδηγείται από τα κύματα ενός ραντάρ.<sup>1</sup> Είναι σημαντικό εδώ να τονιστεί ότι ο νόμος αυτός που προτείνει ο De Broglie είναι πρώτης τάξης, δηλαδή είναι νόμος για την ταχύτητα του σώματος, και όχι δεύτερης τάξης, όπως ο νόμος του Νεύτωνα που είναι νόμος για την επιτάχυνση του σώματος.

---

<sup>1</sup>Για περαιτέρω ανάλυση πάνω στη θεωρία του De Broglie βλ. Bohm, Hiley (1982)

Στη πραγματικότητα ο De Broglie είχε προτείνει αυτό το νόμο ήδη από το 1923 για την περίπτωση του ενός σωματιδίου. Αυτό που προσπαθούσε να κάνει ήταν να φτάσει σε μια ενοποιημένη δυναμική σωματιδίων και κυμάτων. Πειράματα που αφορούσαν την περίθλαση των ακτίνων X και η αδυναμία εξήγησης των παρατηρούμενων φαινομένων οδήγησε τον De Broglie στην αναζήτηση μιας διαφορετικής δυναμικής από την νευτώνεια.

Η θεωρία αυτή εγκαταλείφθηκε από τον Louis De Broglie μετά το συνέδριο του Solvay στο οποίο δέχθηκε σκληρή κριτική, ιδιαίτερα από τον Pauli, στην εφαρμογή αυτής της θεωρίας σε συστήματα πολλών σωματιδίων και στα αδιέξοδα που εκεί οδηγείται. Αυτό προκάλεσε κάποιες ενστάσεις και από τον ίδιο τον De Broglie και έτσι αυτή η προσπάθεια σταμάτησε.

Στην συνέχεια ο Bohm το 1952 με ένα διπλό άρθρο του δίνει μια πλήρη περιγραφή της θεωρίας του που εκκινεί από τη θεώρηση του De Broglie και αφορά συστήματα και ενός και περισσότερων σωματιδίων και η οποία θα περιγραφεί εκτενώς στην συνέχεια του κεφαλαίου. Για τον Bohm υπάρχουν βασικές διαφορές ανάμεσα στη δική του θεωρία και την αντίστοιχη του De Broglie<sup>2</sup> αλλά αναγνωρίζει τη συνάφεια αυτών των θεωριών και επιπλέον θεωρεί ότι όλες οι αντιρρήσεις και του Pauli και του ίδιου του De Broglie μπορούν να απαντηθούν αν οι υποθέσεις που γίνονται οδηγηθούν ως την τελική τους κατάληξη.<sup>3</sup>

Πριν την αναλυτική περιγραφή της θεωρίας του Bohm κρίνεται απαραίτητη η αναφορά στη βάση της φιλοσοφικής θεώρησης του ίδιου για την κβαντική μηχανική και για την επιστήμη γενικότερα, αν και η συζήτηση των φιλοσοφικών πτυχών αποτελεί θέμα επόμενου κεφαλαίου.

Κατά τον Bohm λοιπόν, η ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής κατέστη δύσκολη επειδή είχε ανακαλυφθεί ένας ιδιόμορφος συνδυασμός κυματικών και σωματιδιακών ιδιοτήτων της ύλης που ήταν δύσκολο να εξηγηθούν καθώς επίσης είχε παρατηρηθεί ένας παράξενος συνδυασμός ντετερμινιστικών και στατιστικών όψεων. Έτσι η αναζήτηση μιας αιτιακής ερμηνείας πρέπει να ξεκινήσει ακριβώς από αυτό. Με την έννοια ότι η στατιστική διακύμανση θεωρείται ότι έχει αιτίες που είναι προς το παρόν άγνωστες αλλά θα μπορούσαν να ανακαλυ-

---

<sup>2</sup>Bohm, Hiley (1993)

<sup>3</sup>Bohm (1952b) σ. 193

φθούν με την πάροδο του χρόνου.<sup>4</sup> Θα μπορούσε δηλαδή να υποθέσει κανείς ότι η κβαντική μηχανική στο παρόν στάδιο της εξέλιξης της δεν είναι αρκετά πλήρης ώστε να περιγράψει λεπτομερώς τις κινήσεις μεμονωμένων σωματίων κλπ. και για να γίνει κάτι τέτοιο πρέπει να προχωρήσουμε σε ένα άγνωστο, βαθύτερο επίπεδο, το υποκβαντομηχανικό.

Αν λοιπόν υπάρχει αυτό το επίπεδο, τότε, σύμφωνα με τον Bohm, υπάρχουν εκτός από τα παρατηρήσιμα μεγέθη και άλλες προς το παρόν κρυμμένες μεταβλητές που θα βοηθούσαν στον καλύτερο ορισμό της κατάστασης ενός κβαντομηχανικού συστήματος. Η ανακάλυψη τους ακόμα και εαν δεν μπορεί να οδηγήσει άμεσα σε νέες πειραματικές προβλέψεις είναι πολύτιμη γιατί επιτρέπει νέους δρόμους κατανόησης της πραγματικότητας. Σε αυτό το σημείο έρχεται σε ρήξη με την επικρατούσα αντίληψη, θετικιστική στη βάση της, που γίνεται αποδεκτή άμεσα ή έμμεσα, ότι δεν πρέπει να θέτουμε αξιωματικά οντότητες τις οποίες δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε. Σύμφωνα λοιπόν με τον Bohm:

Η ιστορία της επιστημονικής έρευνας βρίθει παραδειγμάτων όπου θα ήταν πράγματι πολύ γόνιμο να αποδεκτούμε ότι ορισμένα αντικείμενα ή στοιχεία είναι ενδεχομένως πραγματικά, πολύ πριν γνωρίσουμε κάποια διαδικασία που θα επέτρεπε την άμεση παρατήρησή τους. Η ατομική θεωρία αποτελεί ένα τέτοιο παράδειγμα. (Bohm, 1984, σελ.152)

Η φιλοσοφία του για την επιστήμη γενικότερα και για την προσέγγιση της πραγματικότητας μπορεί να φανεί και από το παρακάτω ενδεικτικό απόσπασμα που γράφεται στις αμέσως επόμενες σελίδες του ίδιου έργου:

Ο κόσμος, ως ολότητα, είναι αντικειμενικά πραγματικός και εξ όσων γνωρίζουμε, η δομή του έχει απεριόριστη πολυπλοκότητα η οποία μπορεί να περιγραφεί και να αναλυθεί με ακρίβεια. Αυτή η δομή πρέπει να κατανοηθεί με τη βοήθεια μιας σειράς από προοδευτικά πιο θεμελιώδεις, εκτενείς και ακριβείς έννοιες, οι οποίες θα παρέχουν, ούτως ειπείν, βαθμιαία πιο ικανοποιητικές όψεις της άπειρης δομής της αντικειμενικής πραγματικότητας. Ωστόσο για αυτή τη δομή δεν αναμένουμε να επιτύχουμε μια πλήρη θεωρία, αφού είναι σχεδόν βέβαιο ότι θα περιλαμβάνει περισσότερα στοιχεία από όσα μπορούμε ενδεχομένως να αντιληφθούμε σε κάθε συγκεκριμένο στάδιο ανάπτυξης της επιστήμης. Θεωρητικά όμως, μπορεί να ανακαλυφθεί τελικά οποιοδήποτε καθοριζόμενο στοιχείο, αλλά ποτέ όλα τα στοιχεία. (Bohm, 1984, σελ.154)

Αυτή η θεώρηση του Bohm δεν υπονοεί ότι η κβαντική θεωρία δεν ισχύει ή ότι δεν είναι χρήσιμη στην περιοχή της. Απλώς θέτει το γενικότερο πλαίσιο στο οποίο πρέπει να εντάσσεται κάθε φυσική θεωρία.

---

<sup>4</sup>Θα μπορούσε να δει κανείς εδώ, όπως θέτει και ο Bohm, μια αντιστοιχία με κίνηση Brown.

Σύμφωνα με τον Bohm, είναι καθαρό ότι η κβαντική μηχανική περιλαμβάνει έναν αλγόριθμο για τον υπολογισμό των πιθανοτήτων των πειραματικών αποτελεσμάτων. Αλλά δεν δίνει καμία φυσική εξήγηση για τις μεμονωμένες φυσικές διαδικασίες. Στην πραγματικότητα, χωρίς τα μετρητικά όργανα στα οποία εμφανίζονται τα προβλεπόμενα αποτελέσματα, οι εξισώσεις της κβαντικής μηχανικής θα ήταν καθαρά μαθηματικά χωρίς κανένα φυσικό νόημα. Η προσέγγιση του Bohr και του Heisenberg ήταν βασικά επιστημολογική που εστίαζε στο ερώτημα πώς αποκτάμε την γνώση για τον κόσμο και επομένως η κβαντική μηχανική απαντάει ελάχιστα έως καθόλου το ερώτημα για την ίδια την πραγματικότητα. Δεν δίνει καμία οντολογική ερμηνεία, που πρωτεύοντως απαντάει στο ερώτημα "τι είναι;" και δευτερευόντως στο "πώς αποκτιέται η γνώση σε σχέση με αυτό;"

Στοιχεία τα οποία η θεωρία σκοπεύει να δια φωτίσει είναι, σύμφωνα με τους Bohm και Hiley (1993) τα εξής. Πρώτο η κβαντική θεωρία παρόλο που πραγματεύεται στατιστικά σύνολα με ικανοποιητικό τρόπο, δεν μπορεί να περιγράψει μεμονωμένες κβαντικές διαδικασίες χωρίς να εισάγει μη ικανοποιητικές υποθέσεις όπως την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης. Δεύτερο υπάρχει η μη τοπικότητα όπως αυτή περιγράφεται από τον Bell σε σχέση με το EPR. Τρίτο υπάρχει ένας μυστήριος δυισμός σωματιδίου - κύματος στις ιδιότητες της ύλης ο οποίος εμφανίζεται στα πειράματα της κβαντικής μηχανικής και, τέλος, τέταρτο υπάρχει η ανικανότητα να δοθεί μια σαφής κατανόηση του τι η πραγματικότητα ενός κβαντικού συστήματος θα έπρεπε να είναι.

Το πρωτότυπο άρθρο είχε προταθεί ως ερμηνεία με όρους κρυμμένων μεταβλητών και αργότερα είχε αναφερθεί ως αιτιακή ερμηνεία. Κατα τους εισηγητές όμως οι όροι αυτοί ήταν περιοριστικοί. Οι μεταβλητές δεν είναι ακριβώς κρυφές αλλά αυτό που ισχύει είναι ότι υπάρχει ένα όριο αβεβαιότητας στην παρατήρησή τους. Ακόμα στο μεταγενέστερο έργο τους οι Bohm και Hiley το 1993 θεωρούν ότι δεν είναι απαραίτητα αιτιακή η ερμηνεία και δίνουν μια στοχαστική εκδοχή της. Σε κάθε περίπτωση προκρίνουν τον οντολογικό της χαρακτήρα επειδή το αντίστοιχο ερώτημα κρίνεται πρωτεύον, δηλαδή το εάν μπορούμε να έχουμε επαρκή εικόνα της πραγματικότητας ενός κβαντικού συστήματος σε σχέση με το ερώτημα της αιτιότητας.

Η φιλοσοφική θεώρηση που ενέχει η θεωρία του Bohm και τα ζητήματα του ρεαλισμού και της αιτιότητας που ανακύπτουν άμεσα, θα αναλυθούν εκτενέστερα στο τελευταίο κεφάλαιο.



λαιο της παρούσας εργασίας.

## 2.2 Ο Βασικός φορμαλισμός της οντολογικής θεωρίας του Bohm

### 2.2.1 Το σύστημα ενός σωματιδίου

Η θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που παρουσιάστηκε από τον Bohm το 1952 οδηγεί στα ίδια αποτελέσματα με αυτά που προβλέπει η κβαντική μηχανική υπό κάποιες συγκεκριμένες προϋποθέσεις που θα αναλυθούν σε επόμενη παράγραφο, αφού η εξίσωση Schrödinger διατηρείται, παρέχει όμως ένα ευρύτερο πλαίσιο από εκείνη, κάνοντας δυνατή μια πιο ακριβή και συνεχή περιγραφή όλων των διαδικασιών ακόμα και στο κβαντικό επίπεδο.

Στον πυρήνα της λογικής αυτής της θεωρίας, κάθε μεμονωμένο σύστημα βρίσκεται σε μια ακριβώς ορισμένη κατάσταση της οποίας η αλλαγή με το χρόνο καθορίζεται από συγκεκριμένους νόμους, ανάλογους αλλά όχι όμοιους με τις κλασσικές εξισώσεις κίνησης. Έτσι οι πιθανότητες της κβαντικής μηχανικής δεν θεωρούνται εγγενείς. Χρησιμοποιώντας τον απαραίτητο μαθηματικό φορμαλισμό και ακολουθώντας την πρώτη εκδοχή<sup>5</sup> για ένα σωματίδιο η εξίσωση Schrödinger είναι:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(\mathbf{x})\psi$$

όπου

$$\psi = Re^{iS/\hbar}$$

και  $R$  και  $S$  πραγματικές συναρτήσεις, οι οποίες ικανοποιούν τις εξισώσεις

$$\frac{\partial R}{\partial t} = -\frac{1}{2m} [R \nabla^2 S + 2 \nabla R \cdot \nabla S]$$

και

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\left[ \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \right].$$

---

<sup>5</sup>Η θεωρία του Bohm προτείνεται με διαφορετικούς και ισοδύναμους τρόπους στη βιβλιογραφία. Ο φορμαλισμός της παρουσιάζεται όπως προτάθηκε το 1952 με το διπλό άρθρο Bohm (1952)

Εαν τώρα τεθεί  $P(\mathbf{x}) = R^2(\mathbf{x})$  όπου  $P(\mathbf{x})$  η πυκνότητα πιθανότητας θα προκύψει ότι

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \nabla \cdot \left( P \frac{\nabla S}{m} \right) = 0$$

και

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}) - \frac{\hbar^2}{4m} \left[ \frac{\nabla^2 P}{P} - \frac{1}{2} \frac{(\nabla P)^2}{P^2} \right] = 0.$$

Για το κλασικό όριο αυτές οι εξισώσεις υπόκεινται σε απλή ερμηνεία. Η  $S(\mathbf{x})$  είναι η λύση της εξίσωσης Hamilton-Jacobi. Συνεχίζοντας την ανάλυση αυτό θα φανεί και ευκρινέστερα. Εδώ να σημειωθεί ότι ισχύει για την ταχύτητα :

$$v(\mathbf{x}) = \frac{\nabla S(\mathbf{x})}{m}$$

Αυτή η σχέση είναι γενίκευση της εκείνης που είχε προτείνει ο Louis De Broglie στην θεωρία της "διπλής λύσης". Επιπλέον εισάγει την έννοια του κβαντικού δυναμικού  $U(\mathbf{x})$  το οποίο δίνεται από την σχέση

$$U(\mathbf{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R}$$

και έτσι επιστρέφοντας στην προηγούμενη εξίσωση προκύπτει τελικά :

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}) + U(\mathbf{x}) = 0$$

Αυτή είναι η τροποποιημένη εξίσωση Hamilton - Jacobi που προκύπτει μετά και την εισαγωγή του κβαντικού δυναμικού. Στο κλασικό όριο, το κβαντικό δυναμικό μπορεί να θεωρηθεί πολύ ασθενέστερο σε σχέση με το κλασικό και μπορεί να αγνοηθεί.

Η λύση της τροποποιημένης Hamilton - Jacobi ορίζει ένα σύνολο πιθανών τροχιών για το σωματίδιο που μπορεί να βρεθεί από την  $S(\mathbf{x})$  με ολοκλήρωση της ταχύτητας. Η εξίσωση αυτή υποδεικνύει ότι το σωματίδιο κινείται κάτω από την επίδραση δύναμης, η οποία δεν προκύπτει μόνο από το κλασικό αλλά και από το κβαντικό δυναμικό. Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η  $R(\mathbf{x})$  και  $S(\mathbf{x})$  αλληλοκαθορίζονται. Η δύναμη όπως προκύπτει λοιπόν με βάση αυτή την ανάλυση εξαρτάται από την  $R(\mathbf{x})$  και συνεπώς μπορεί να ειπωθεί ως η μαθηματική αναπαράσταση

ενός πραγματικού πεδίου. (Ο Bohm κάνει και μια αναλογία με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο την οποία επεκτείνει σε διάφορα επίπεδα).

Επίσης να σημειωθεί εδώ ότι μπορεί εναλλακτικά κανείς να λύσει την βασική εξίσωση:

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\nabla \left[ V(\mathbf{x}) - \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R} \right].$$

Είναι σημαντικό εδώ να τονιστεί ότι το κβαντικό δυναμικό  $U(\mathbf{x})$  που δρα πάνω σε ένα μεμονωμένο σωματίδιο δεν μεταβάλλεται όταν το πεδίο  $\psi$  πολλαπλασιαστεί με μια αυθαίρετη σταθερά (αυτό γιατί το  $\psi$  εμφανίζεται και στον αριθμητή και στον παρονομαστή του κβαντικού δυναμικού). Αυτό σημαίνει ότι το αποτέλεσμα του κβαντικού δυναμικού είναι ανεξάρτητο της έντασης του κβαντικού πεδίου και εξαρτάται μόνο από τη μορφή του. Αυτό είναι ριζικά αντίθετο από ότι συμβαίνει στην κλασική κυματική όπου τα αποτελέσματα είναι σε μεγάλο βαθμό αναλογικά με την ένταση του πεδίου.

Συνοψίζοντας λοιπόν με βάση αυτή την ερμηνεία το ηλεκτρόνιο είναι ένα σωματίδιο με καλά προσδιορισμένη θέση η οποία μεταβάλλεται συνεχώς και καθορίζεται αιτιακά. Το σωματίδιο αυτό δεν είναι ποτέ χωρισμένο από ένα νέου τύπου κβαντικό πεδίο που το επηρεάζει. Αυτό το πεδίο δίνεται από τη σχέση  $\psi = Re^{iS/\hbar}$ . Ακόμα το σωματίδιο έχει εξίσωση κίνησης

$$m \frac{d^2 \mathbf{x}}{dt^2} = -\nabla V(\mathbf{x}) - \nabla U(\mathbf{x})$$

που σημαίνει ότι πάνω στο σωματίδιο δρα μια κλασική δύναμη αλλά και μια κβαντική.

## 2.2.2 Συμφωνία με κβαντική μηχανική

Όπως έχει ήδη αναφερθεί η θεωρία αυτή οδηγεί στα ίδια πειραματικά αποτελέσματα με αυτά που προβλέπει η κβαντική μηχανική και έτσι δεν υπάρχει και πειραματική διάκριση μεταξύ τους. Σύμφωνα με τον Bohm, η θεωρία αναπαράγει τα αποτελέσματα της κβαντικής μηχανικής εαν τεθούν τρεις παραδοχές:

- Η  $\psi$  ικανοποιεί την εξίσωση Schrödinger
- Ισχύει  $\mathbf{p} = \nabla S(\mathbf{x})$

- Δεν γίνεται να προβλεφθεί η ακριβής θέση του μεμονωμένου σωματιδίου και ισχύει  $P(\mathbf{x}) = R^2(\mathbf{x})$ . Εδώ όμως οι πιθανότητες εκλαμβάνονται όπως και στην κλασική στατιστική φυσική και δεν θεωρούνται εγγενείς

Εάν δηλαδή δεχθεί κανείς τις παραπάνω παραδοχές τότε αυτή η ερμηνεία οδηγεί στα ίδια φυσικά αποτελέσματα με αυτά που προβλέπει η κβαντική μηχανική. Εάν όμως δεν δεχθεί αυτές τις παραδοχές τότε μπορεί κανείς να έχει μια πιο ευρεία θεωρία που δεν είναι συμβατή με τη συνήθη στα αποτελέσματα της. Αυτή η γενίκευση υποδεικνύεται από τον Bohm ως απαραίτητη για την κατανόηση φαινομένων σε αποστάσεις υποατομικής τάξης. Σε αυτή την τάξη μεγέθους οι θεωρητικές προβλέψεις της θεωρίας του Bohm διαφοροποιούνται από τις αντίστοιχες της κβαντικής μηχανικής και σύμφωνα με τον Bohm πειράματα στο μέλλον μπορούν να κάνουν εμφανείς τις διαφορετικές προσεγγίσεις των δυο θεωριών.<sup>6</sup>

### 2.2.3 Το σύστημα πολλών σωματιδίων

Η θεωρία αυτή μπορεί να επεκταθεί και για συστήματα πολλών σωμάτων. Ξεκινώντας με την εξίσωση Schrödinger για δύο σωματίδια (για ευκολία και χωρίς να βλάπτεται η γενικότητα της απόδειξης υποτίθεται ότι έχουν ίσες μάζες) ισχύει:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} (\nabla_1^2 \psi + \nabla_2^2 \psi) + V(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \psi$$

όπου

$$\psi = R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) \cdot e^{iS(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)/\hbar}.$$

Έτσι λαμβάνοντας υπόψιν ότι  $P = R^2$ , προκύπτουν οι παρακάτω εξισώσεις:

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{m} [\nabla_1 \cdot P \nabla_1 S + \nabla_2 \cdot P \nabla_2 S] = 0$$

και

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla_1 S)^2 + (\nabla_2 S)^2}{2m} + V(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) - \frac{\hbar^2}{2mR} [\nabla_1^2 R + \nabla_2^2 R] = 0.$$

---

<sup>6</sup>Bohm (1952a) σ.171, 179

Οι παραπάνω εξισώσεις είναι γενίκευση σε έξι διαστάσεις των αντίστοιχων εξισώσεων που δόθηκαν για το ένα σωματίδιο. Η ταχύτητα για το καθένα από αυτά τα σωματίδια είναι αντίστοιχα  $\mathbf{v}_1 = \frac{\nabla_1 S}{m}$  και  $\mathbf{v}_2 = \frac{\nabla_2 S}{m}$ .

Η  $P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  έχει διττή σημασία. Πρώτον καθορίζει ένα κβαντικό μηχανικό δυναμικό το οποίο επιδρά σε κάθε σωματίδιο και το οποίο δίνεται από τη σχέση

$$U(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2) = -\frac{\hbar^2}{2mR}[\nabla_1^2 R + \nabla_2^2 R].$$

Αυτό το δυναμικό εισάγει μια επιπλέον αλληλεπίδραση ανάμεσα στα σωματίδια, πέρα από εκείνη λόγω του κλασικού δυναμικού  $V(\mathbf{x})$ . Δεύτερον μπορεί να ειπωθεί ως πυκνότητα πιθανότητας για τα σημεία  $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ . Κατά την ερμηνεία Bohm η πρώτη σημασία-αυτή που καθορίζει το κβαντικό δυναμικό- κρίνεται ως πρωτεύουσα και πιο θεμελιώδης ενώ η δεύτερη σημασία-αυτή της πυκνότητας πιθανότητας- κρίνεται ως δευτερεύουσα. Η εν λόγω πιθανότητα αυτή, στο πλαίσιο της θεωρίας του Bohm, είναι η πιθανότητα να είναι ένα σωματίδιο σε μια συγκεκριμένη θέση και όχι να βρεθεί εκεί με μια κατάλληλη μέτρηση όπως εννοείται στα πλαίσια της συνήθους ερμηνείας.

Για παραπάνω από δύο σωματίδια τα αντίστοιχα αποτελέσματα μπορούν να γενικευθούν. Σε αυτή την περίπτωση το σύστημα περιγράφεται από την

$$\psi = R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) \cdot e^{iS(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)/\hbar}$$

και η  $P(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = R^2$  έχει και πάλι τις ίδιες δυο ερμηνείες. Καθορίζει το κβαντικό μηχανικό δυναμικό

$$U(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n) = -\frac{\hbar^2}{2mR} \sum_{k=1}^n \nabla_k^2 R(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$$

και είναι ίση με την πυκνότητα πιθανότητας για τα σημεία  $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_n)$ .

Η κυματοσυνάρτηση δεν έχει το ίδιο νόημα στην ερμηνεία του Bohm με αυτό που έχει στην συνήθη ερμηνεία. Ερμηνεύεται ως η μαθηματική αναπαράσταση ενός αντικειμενικά πραγματικού πεδίου το οποίο καθορίζει ένα μέρος από την δύναμη που ασκείται στο σωματίδιο. Ως εκ τούτου, η κυματοσυνάρτηση  $\psi$  είναι παντού καθορισμένη, μονότιμη και συνεχής.

Στο άρθρο αυτό ο Bohm περιγράφει με βάση αυτή την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής, μια σειρά από φαινόμενα όπως το πείραμα της διπλής σχισμής ή το πείραμα Franck-Hertz. Η ερμηνεία αυτή περιγράφει όλες τις διαδικασίες βασικά ως αιτιακές και συνεχείς.

Το 1914 οι James Franck και Gustav Hertz εκτέλεσαν ένα πείραμα στο οποίο κατέδειξαν το αντίστροφο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Αποδείχθηκε ότι κατά τη σύγκρουση ενός επιταχυνόμενου ηλεκτρονίου με ένα άτομο για να αποσπαστεί ένα ηλεκτρόνιο από το άτομο πρέπει η ενέργεια του ηλεκτρονίου να είναι πάνω από μια ορισμένη τιμή. Η ενέργεια αυτή η οποία καλείται ενέργεια ιονισμού ποικίλλει από άτομο σε άτομο. Επίσης έδειξαν ότι για την εκπομπή φωτονίων από άτομα του υδραργύρου τα οποία συγκρούονται με ηλεκτρόνια, απαιτείται η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων να υπερβαίνει μια ορισμένη ενέργεια που αντιστοιχεί στη μικρότερη συχνότητα του φάσματος Hg. Η προσφορά του πειράματος αυτού είναι ότι βοήθησε στην επιβεβαίωση της κβαντικής θεωρίας που προέβλεπε ότι τα ηλεκτρόνια καταλαμβάνουν μόνο καθορισμένες διακριτές ενεργειακές καταστάσεις. Εμφάνισαν δηλαδή ότι είναι διακριτές και καθορισμένες οι ενεργειακές στάθμες των ατόμων.

Στο πείραμα Franck-Hertz φαίνεται να υπάρχει μεταφορά ενέργειας και ορμής με ασυνεχή τρόπο. Η φαινόμενη αυτή ασυνεχής φύση της διαδικασίας μεταφοράς ενέργειας από το σωματίδιο στο ατομικό ηλεκτρόνιο, σύμφωνα με τον Bohm, επιτυγχάνεται από το κβαντικό μηχανικό δυναμικό

$$U(\mathbf{x}) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\nabla^2 R}{R},$$

το οποίο δεν γίνεται απαραίτητα μικρό όταν η ένταση του κύματος γίνεται μικρή. Έτσι, ακόμα και εαν τα δυο σώματα αλληλεπιδρούν με ασθενή δύναμη και άρα η κυματοσυνάρτηση του Schrödinger υφίσταται μικρή διαταραχή, αυτή η μικρή διαταραχή είναι ικανή να επιφέρει πολύ μεγάλη μεταφορά ενέργειας και ορμής σε μικρό χρόνο και αυτό εαν κανείς δει μόνο τα αποτελέσματα μπορεί να φανεί ως ασυνέχεια. Επειδή η αρχική θέση δεν μπορεί να καθοριστεί επακριβώς είναι αδύνατον να προβλεφθεί το τελικό αποτέλεσμα και πάλι μπορεί να αποδοθεί μόνο με πιθανότητες. Αλλά αφού η πιθανότητα να εισέλθει σε μια περιοχή με συντεταγμένες  $(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$  είναι ανάλογη με το  $R^2(\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2)$ , συμπεραίνεται ότι η διαδικασία μεταφοράς μεγάλου ποσού ενέργειας με αντίστοιχη κυματοσυνάρτηση χαμηλής έντασης είναι ιδιαίτερα απίθανη αλλά όχι αδύνατη.

## 2.3 Η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας

Ο τρόπος με τον οποίο παρουσιάστηκε ως εδώ η θεωρία του Bohm έγινε με βάση το πώς αυτή είχε αρχικά προταθεί και περιγραφεί από τον ίδιο στα δυο βασικά του άρθρα το 1952. Εναλλακτικά και ισοδύναμα η θεωρία μπορεί να παρουσιαστεί με βάση τις δυο εξισώσεις που καθορίζουν την εξέλιξη του συστήματος, την εξίσωση του Schrödinger την *καθοδηγητική εξίσωση* (guidance equation). Υπάρχουν στην βιβλιογραφία διάφοροι τρόποι με τους οποίους αυτές οι εξισώσεις μπορούν να προκύψουν. Θα παρουσιαστεί εδώ η εκδοχή που ακολουθήθηκε από τον Dürr<sup>7</sup>. και με βάση αυτή στη συνέχεια θα παρουσιαστεί η υπόθεση της *κβαντικής ισορροπίας* (quantum equilibrium hypothesis).

Έστω λοιπόν ένα σύστημα με  $N$  σωματίδια με μάζες  $m_1, \dots, m_N$ , γενικευμένες μεταβλητές στο χώρο διαμορφώσεων  $x = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$  και κυματοσυνάρτηση  $\psi$ . Η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από τη  $(x, \psi)$  όπου  $x = (\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$  είναι η ακριβής διαμόρφωση των σωματιδίων και η  $\psi$  ικανοποιεί την εξίσωση του Schrödinger. Οι δυο εξισώσεις που περιγράφουν την εξέλιξη του συστήματος είναι οι ακόλουθες (Dürr, 1992):

$$\frac{d\mathbf{x}_k}{dt} = \frac{\hbar}{m_k} \operatorname{Im} \frac{\nabla_k \psi}{\psi}(\mathbf{x}_1, \dots, \mathbf{x}_N)$$

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = - \sum_{k=1} \frac{\hbar^2}{2m_k} \Delta_k \psi + V \psi$$

όπου  $\Delta_k = \nabla_k \cdot \nabla_k$ .

Παρατηρώντας το δεύτερο μέλος της πρώτης εξίσωσης γίνεται εμφανές ότι το διανυσματικό πεδίο είναι χρόνο-εξαρτώμενο (η κυματοσυνάρτηση  $\psi$  είναι χρονικά εξαρτημένη) και έτσι η εξέλιξη στο χώρο διαμόρφωσης δεν μπορεί να έχει σταθερή κατανομή. Αυτό που μπορεί να αποδειχθεί όμως είναι ότι η πυκνότητα πιθανότητας  $P = |\psi|^2$  είναι "ισαλλοίωτη" ("equivariant"), δηλαδή διατηρεί τη μορφή της σε σχέση με την κυματοσυνάρτηση  $\psi$ . Ακριβέστερα, προκύπτει ότι εάν ισχύει

$$P(\mathbf{x}, t_0) = |\psi(\mathbf{x}, t_0)|^2$$

<sup>7</sup>Περιγράφηκε αναλυτικά στο άρθρο Dürr, Goldstein, Zanghi (1992)

για κάποια χρονική στιγμή  $t_0$ , τότε και για κάθε άλλη επόμενη στιγμή  $t$  θα ισχύει

$$P(\mathbf{x}, t) = |\psi(\mathbf{x}, t)|^2.$$

Έτσι προκύπτει και η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας: Όταν για ένα σύστημα που έχει κυματοσυνάρτηση  $\psi$  για την πυκνότητα πιθανότητας ισχύει η σχέση  $P = |\psi|^2$  τότε το σύστημα βρίσκεται σε κβαντική ισορροπία.

Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη υποενότητα αν ισχύει η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας, δηλαδή αν ακριβώς πριν την μέτρηση ή καλύτερα το πείραμα οι θέσεις των σωματιδίων είναι τυχαία κατανομημένες σύμφωνα με το στατιστικό νόμο του Born, τότε η θεωρία του Bohm, οδηγεί στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με αυτά της κβαντικής μηχανικής.

Είναι αξιοσημείωτο ότι η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας σχετίζεται στα δυο μέλη της εξίσωσης που την περιγράφει αντικείμενα που ανήκουν σε διαφορετικές εννοιολογικές κατηγορίες. Το δεύτερο μέλος αναφέρεται σε ένα δυναμικό αντικείμενο που στη θεωρία του Bohm αντιμετωπίζεται ως αντικειμενικά υπαρκτό ενώ το πρώτο μέλος αναφέρεται σε κατανομή πιθανότητας, της οποίας η φυσική σημασία παραμένει αμφιλεγόμενη. Έτσι προκύπτει η αναγκαιότητα για εξήγηση και παράλληλα δικαιολόγηση αυτής της υπόθεσης. Αυτή η εξήγηση και δικαιολόγηση είναι με τη σειρά της αμφιλεγόμενη και σε κάθε περίπτωση η εμβάθυνση σε αυτή την κατεύθυνση δεν αποτελεί αντικείμενο της παρούσας εργασίας και για το λόγο αυτό θα παρουσιαστεί ακροθιγώς.

Κατά τον Dürr η πυκνότητα πιθανότητας εξηγείται με όρους στατιστικών μοντέλων για στατιστικά σύνολα που περιλαμβάνουν ένα πλήθος από υποσυστήματα. Από εδώ ξεκινάει μια ολόκληρη προβληματική για τον αν μπορούν και πώς να οριστούν υποσυστήματα. Η συμπεριφορά μερών του σύμπαντος, των υποσυστημάτων που ενδιαφέρουν, πρέπει να ξεκινάει από τη συμπεριφορά του όλου που εξελίσσεται σύμφωνα με τους νόμους εξέλιξης του Bohm. Προκύπτει ότι πολλές φορές και για τα υποσυστήματα ισχύουν οι νόμοι του Bohm, αλλά αν θεωρηθεί εν γένει ότι τα υποσυστήματα υπακούουν στη μηχανική του Bohm τότε μπορεί να υπάρξει ασυνέπεια. Λόγω του μη διαχωρίσιμου, που είναι ένα χαρακτηριστικό που υπεισέρχεται στην θεωρία του Bohm, η εφαρμογή των αντίστοιχων νόμων δεν είναι θέμα επιλογής αλλά μπορεί να ισχύει ή όχι. Αυτός ο χαρακτήρας ολισμού είναι και η απάντηση για την προέλευση της



τυχειότητας στην κβαντική μηχανική σε αυτή τη θεώρηση. Η πυκνότητα πιθανότητας συνδέεται με εμπειρικές κατανομές των διαμορφώσεων που προκύπτουν από επαναλαμβανόμενα πειράματα στο χώρο και το χρόνο<sup>8</sup>.

Κατά τον Valentini, η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας είναι η θεωρία της κατάστασης ισορροπίας στην οποία βρίσκεται το σύμπαν και στην οποία περιήλθε κάποιο χρόνο μετά το big bang. Σε αυτή την ανάλυση υπάρχουν προγενέστερες καταστάσεις στις οποίες  $P \neq |\psi|^2$ , όπου η θεωρία του Bohm οδηγεί και σε διαφορετικά αποτελέσματα από αυτά της κβαντικής μηχανικής. Με βάση αυτή την ανάλυση εξηγεί και διάφορα παρατηρησιακά δεδομένα που σχετίζονται με την κοσμολογία, όπως είναι το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο.<sup>9</sup>

## 2.4 Η πληροφορία και ο ρόλος της στη θεωρία του Bohm

Ο όρος "πληροφορία" δεν υπάρχει στα αρχικά άρθρα με τα οποία προτάθηκε η θεωρία από τον Bohm το 1952. Σε μεταγενέστερα έργα του<sup>10</sup> όμως δίνει βαρύτητα σε αυτό τον όρο σε μια προσπάθεια διασαφήνισης των κύριων χαρακτηριστικών της ερμηνείας του.

Το κβαντικό δυναμικό, όπως αναφέρθηκε και παραπάνω, εξαρτάται από τη μορφή και όχι από το πλάτος του πεδίου. Αυτή η συμπεριφορά είναι έξω από την κοινή εμπειρία σε πρώτη ματιά. Κατά τον Bohm αυτό γίνεται κοινό σε περιπτώσεις που υπεισέρχεται η πληροφορία. Για τον λόγο αυτό αλλά και γιατί η λέξη *πληροφορία* στα αγγλικά είναι *information* από το ρήμα *in-form*, ο Bohm τη χρησιμοποιεί δίνοντας έμφαση στο ότι η πληροφορία δίνει μορφή.

Έτσι λοιπόν το κβαντικό δυναμικό περιέχει πληροφορία και αυτή η ενεργός πληροφορία καθορίζει την κίνηση του σωματιδίου. Η βασική ιδέα έγκειται στο ότι μια μορφή με πολύ μικρή ενέργεια καθορίζει και οδηγεί μια με πολύ μεγαλύτερη ενέργεια. Αυτή είναι μια αντικειμενική διαδικασία και δεν έχει να κάνει με το επίπεδο της γνώσης για το τι συμβαίνει. Η πληροφορία είναι εν δυνάμει ενεργή παντού, αλλά πραγματικά ενεργή μόνο εκεί που μπορεί να δώσει μορφή στην ενέργεια. Για την καλύτερη κατανόηση παρουσιάζεται το παράδειγμα ενός πλοίου που καθοδηγείται από ραδιοκύματα. Το βασικό σημείο σε αυτό το παράδειγμα

---

<sup>8</sup>Για περαιτέρω ανάλυση της κβαντικής ισορροπίας βλ. Dürr, Goldstein, Zanghi (1995)

<sup>9</sup>Για περαιτέρω ανάλυση βλ. Valentini, (2002)

<sup>10</sup>Για μια πιο ολοκληρωμένη ανάλυση βλ. Bohm, Hiley (1993)

είναι ότι το πλοίο κινείται με τη δική του ενέργεια και ότι τα ραδιοκύματα με την μορφή τους καθοδηγούν το πλοίο. Ένα δεύτερο παράδειγμα είναι η δομή και η λειτουργία του ανθρώπινου DNA όπου ένα μέρος του εκφράζεται, αυτό που θα μπορούσαμε να πούμε ότι περιέχει την ενεργό πληροφορία καθε φορά.

Το σωματίδιο κινείται από τη δική του ενέργεια αλλά οδηγείται από την πληροφορία του κβαντικού πεδίου. Αυτό υποθέτει ότι το σωματίδιο έχει σύνθετη εσωτερική δομή. Επιπλέον η έννοια της ενεργού πληροφορίας υπαινίσσεται άμεσα ότι ένα πείραμα πρέπει να ειπωθεί ως ένα αξεχώριστο όλο. Αυτό απορρέει από το γεγονός ότι η κίνηση του σωματιδίου μπορεί να επηρεαστεί σε μεγάλο βαθμό από μακρινά χαρακτηριστικά του περιβάλλοντος που επηρεάζουν με τη σειρά τους το κβαντικό δυναμικό, το οποίο καθορίζει την κίνηση με διαφορετικό τρόπο. Έτσι η κίνηση του σωματιδίου δεν μπορεί να απομονωθεί από την πειραματική διάταξη. Αυτό θυμίζει τον ολισμό του Bohr, αλλά διαφέρει στο ότι η όλη διαδικασία είναι ανοιχτή για την κατανόηση της και άρα μπορεί να αναλυθεί στη σκέψη, ακόμα και εαν δεν μπορούμε να την διαχωρίσουμε στην πραγματικότητα χωρίς τη δραματική αλλαγή στη φύση της.

Στην πρόταση που είχε κάνει το 1927 ο De Broglie είχε υποθέσει μια μη γραμμική εξίσωση για το πεδίο, η οποία στην γραμμική της προσέγγιση οδηγούσε στην εξίσωση Schrödinger, αλλά για μεγάλα πλάτη η μη γραμμικότητα γινόταν σημαντική. Έτσι υπέθεσε ότι θα μπορούσαν να υπάρχουν λύσεις που θα αντιστοιχούσαν σε ένα σταθερό σύστημα ή παλμό όταν το πλάτος ήταν μεγάλο και το οποίο βαθμιαία θα έπεφτε σε λύσεις της Schrödinger για μεγαλύτερες αποστάσεις. Αυτός ο παλμός θα αντιστοιχούσε στο σωματίδιο.

Σύμφωνα με τον Bohm, για να μπορεί να είναι ισχυρό το φαινόμενο της οδήγησης του σωματιδίου, είναι απαραίτητη η ανάλυση με τη χρήσιμη πληροφορία. Η φάση  $S$  εξαρτάται από την μορφή και όχι από το πλάτος του πεδίου και αυτή η μορφή δίνει την πληροφορία για την αυτο-κίνηση του σωματιδίου. Ο όρος "αυτο-κίνηση" χρησιμοποιείται εδώ για να υποδηλώσει ότι η κίνηση γίνεται με τη ενέργεια του ίδιου του σωματιδίου. Η βασική διαφορά από τον De Broglie έγκειται στο ότι δεν προσπαθεί να εξηγήσει την οδήγηση με ένα μηχανικό τρόπο ως αποτέλεσμα μιας μη γραμμικής διάδοσης του πεδίου αλλά εστιάζει στη σύνθετη εσωτερική δομή η οποία αλληλεπιδρά με την πληροφορία και με αυτό τον τρόπο οδηγεί την κίνηση του σωματιδίου.

## 2.5 Το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης στη θεωρία του Bohm

Η φύση της κβαντικής μέτρησης όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο είναι αναπόσπαστο μέρος όλων των ερμηνειών της κβαντικής θεωρίας. Η μετρητική διαδικασία στην οντολογική ερμηνεία του Bohm αντιμετωπίζεται όπως όλες οι άλλες διαδικασίες λαμβάνοντας υπόψιν τα ειδικά χαρακτηριστικά της. Αυτό που είναι ιδιαίτερα σημαντικό να λάβουμε υπόψιν όταν γίνεται λόγος για μέτρηση είναι ότι γενικά από ένα μεγάλης κλίμακας αποτέλεσμα το οποίο παρατηρείται από ένα τμήμα της μετρητικής συσκευής μπορούμε να συνάγουμε συμπεράσματα για την κατάσταση του συστήματος ή τουλάχιστον για την κατάσταση του μετά την ολοκλήρωση της μετρητικής διαδικασίας.

Το βασικό χαρακτηριστικό της κβαντικής μέτρησης σε αυτή τη θεωρία είναι η αμοιβαία και μη αναγώγιμη αλληλεπίδραση του παρατηρούμενου συστήματος και της μετρητικής συσκευής. Αποτέλεσμα αυτού είναι να μην έχει νόημα, κατά τον Bohm, η μέτρηση μιας δεδομένης ιδιότητας ενός μεμονωμένου συστήματος. Έτσι η μέτρηση μπορεί να ειπωθεί ως η πραγματοποίηση μιας δυνατότητας του σύνθετου συστήματος (μαζί με τη μετρητική συσκευή) και μπορεί να καθορισθεί το αποτέλεσμα της από τις ιδιότητες των σωματιδίων και της σύνθετης κυματοσυνάρτησης ως όλο.

Η συσκευή πρέπει να είναι κατασκευασμένη ώστε για κάθε δεδομένη κατάσταση του συστήματος να οδηγεί σε ένα συγκεκριμένο εύρος καταστάσεων της συσκευής. Έτσι η αλληλεπίδραση εισάγει συσχετίσεις ανάμεσα στην κατάσταση του παρατηρούμενου συστήματος και στην κατάσταση της συσκευής. Το εύρος του μη καθορισμού σε αυτή τη συσχέτιση μπορεί να ονομαστεί "αβεβαιότητα" ή "σφάλμα της μέτρησης".

Ας υποθέσουμε ένα πείραμα που σχεδιάστηκε για την μέτρηση ενός αυθαίρετου παρατηρήσιμου μεγέθους  $Q$  που αντιστοιχεί σε έναν ερμιτιανό τελεστή και αφορά ένα σωματίδιο. Έστω  $\mathbf{x}$  η θέση του σωματιδίου και  $\mathbf{y}$  η συντεταγμένη της συσκευής που μας ενδιαφέρει. Η αρχική κυματοσυνάρτηση του συστήματος υπό παρατήρηση είναι:

$$\Psi_\alpha = \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x})$$

όπου  $\Psi_n(\mathbf{x})$  είναι οι ιδιοσυναρτήσεις του αντίστοιχου τελεστή. Υποθέτουμε μια αλληλεπίδραση ανάμεσα στο σύστημα και τη συσκευή, η οποία διαρκεί μόνο για μικρό χρονικό διάστημα  $\Delta t$  και είναι τόσο ισχυρή ώστε οι αλλαγές που θα έχουν κατά το  $\Delta t$  τόσο το παρατηρούμενο σύστημα όσο και η συσκευή πέρα από την μεταξύ τους αλληλεπίδραση να μπορούν να αμεληθούν.

Η αρχική κυματοσυνάρτηση για το σύνθετο σύστημα (σύστημα-συσκευή) θα είναι:

$$\Psi_{\alpha, \sigma\nu\nu} = \Phi_0(\mathbf{y}) \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x}),$$

όπου  $\Phi_0(\mathbf{y})$  είναι η αρχική κυματοσυνάρτηση της συσκευής. Η  $\Phi_0(\mathbf{y})$  μπορεί να πάρει τη μορφή κυματοπακέτου που είναι κεντραρισμένο στο  $y = 0$  και έχει εύρος  $\Delta y$ . Κανονικά αφού η συσκευή είναι κλασικά περιγράψιμη, ο ορισμός αυτός του κυματοπακέτου είναι λιγότερο ακριβής από το όριο που τίθεται από την αρχή της αβεβαιότητας. Μετά την αλληλεπίδραση η κυματοσυνάρτηση γίνεται:

$$\Psi_{\tau, \sigma\nu\nu} = \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x}) \Phi_n(\mathbf{y}),$$

όπου  $\Phi_n(\mathbf{y})$  είναι τα διαφορετικά κυματοπακέτα τα οποία ανταποκρίνονται στα διαφορετικά αποτελέσματα της μέτρησης. Τα κυματοπακέτα αυτά δίνονται από τη σχέση:

$$\Phi_n(\mathbf{y}) = \Phi_0(\mathbf{y} - \lambda q_n \Delta t).$$

όπου  $\lambda$  κατάλληλη σταθερά και  $q$  οι ιδιοτιμές του τελεστή  $\hat{Q}$ .<sup>11</sup> Για να είναι "καλή" μια μέτρηση πρέπει αυτά τα κυματοπακέτα να είναι διακριτά και μη επικαλυπτόμενα. Με αντικατάσταση αυτής της σχέσης προκύπτει για το σύνθετο σύστημα:

$$\Psi_{\tau, \sigma\nu\nu}(\mathbf{x}, \mathbf{y}, t) = \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x}) \Phi_0(\mathbf{y} - \lambda q_n \Delta t)$$

Υπό την υπόθεση  $\lambda \Delta t \Delta q_n \gg 1$  (όπου  $\Delta q_n$  είναι η μεταβολή στις  $q_n$  για διαδοχικές τιμές του  $n$ ), μετά την αλληλεπίδραση τα διάφορα κυματοπακέτα διαχωρίζονται και το σωματίδιο της συσκευής  $y$  έχει εισέλθει σε ένα από αυτά, έστω στο  $\Phi_m(\mathbf{y})$ , στο οποίο θα παραμείνει αφού

<sup>11</sup> Προκύπτει με λύση της εξίσωσης Schrödinger  $i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = i\hbar \lambda Q \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{y}}$  όπου η χαμιλτονιανή για το  $\Delta t$  ισούται με την χαμιλτονιανή αλληλεπίδρασης  $H_I = i\hbar \lambda Q \frac{\partial \Psi}{\partial \mathbf{y}}$

η πιθανότητα να είναι μεταξύ των πακέτων είναι μηδέν. Από εκεί και μετά η δράση του κβαντικού δυναμικού θα καθορίζεται μόνο από το πακέτο  $\Psi_m(\mathbf{x})\Phi_m(\mathbf{y})$  γιατί όλα τα άλλα πακέτα (τα οποία δεν επικαλύπτονται με αυτό) δεν συνεισφέρουν στο κβαντικό δυναμικό. Έτσι τα υπόλοιπα κυματοπακέτα μπορούν να αγνοηθούν, τουλάχιστον όσον αφορά τα σωματίδια, και να θεωρηθούν ως μη ενεργή, ή αλλιώς φυσικά μη αποτελεσματική, πληροφορία.

Μια άλλη ερμηνεία που δίνουν οι Bohm και Hiley στο βιβλίο τους *The undivided universe* είναι ότι κάθε πακέτο  $\Phi_n(\mathbf{y})$  δημιουργεί ένα είδος καναλιού. Κατά την αλληλεπίδραση του συστήματος με την συσκευή, το κβαντικό δυναμικό αναπτύσσει μια δομή διακλαδισμένων "άκρων". Οι τροχιές των σωματιδίων της συσκευής στη μια πλευρά ενός εξ' αυτών των άκρων εισάγονται σε ένα κανάλι ενώ οι άλλες όχι.

Τελικά κάθε σωματίδιο εισέρχεται σε ένα από τα κανάλια αποκλείοντας τα άλλα και από εκεί και πέρα παραμένει στο κανάλι. Μετά από αυτό, το υπό παρατήρηση σωματίδιο συμπεριφέρεται σαν η κυματοσυνάρτηση του να ήταν η  $\Psi_m(\mathbf{x})$ . Αυτά τα κανάλια αντιστοιχούν στα διαφορετικά αποτελέσματα που μπορούν να προκύψουν από τη διαδικασία της μέτρησης.

Αυτό που περιγράφηκε ως εδώ είναι το πρώτο στάδιο της μέτρησης. Για να γίνει όμως παρατηρήσιμο το αποτέλεσμα μιας μέτρησης πρέπει να μεγεθυνθεί η διαφοροποίηση της κατάστασης των σωματιδίων σε μακροσκοπικό επίπεδο. Αυτό το στάδιο της μεγέθυνσης αποτελεί το δεύτερο στάδιο της μετρητικής διαδικασίας. Για να υπάρξει λοιπόν το αποτέλεσμα είναι απαραίτητη μια ανιχνευτική συσκευή που θα κάνει και την καταγραφή. Μια τέτοια ανιχνευτική συσκευή περιέχει ένα πολύ μεγάλο αριθμό σωματιδίων  $N$  με συντεταγμένες  $z_i$ . Όταν αλληλεπιδρά με το σωματίδιο της συσκευής  $y$  τότε η κυματοσυνάρτηση του ανιχνευτή  $\lambda(z_1, \dots, z_N)$  θα αλλάζει. Για κάθε διακριτή κατάσταση  $n$  θα υπάρχει και μια αντίστοιχη κατάσταση  $\chi_n(\mathbf{y}, z_1, \dots, z_N)$  για το σύνθετο σύστημα συσκευής και ανιχνευτή. Έτσι η τελική κυματοσυνάρτηση του όλου σύνθετου συστήματος θα δίνεται από τη σχέση

$$\Psi = \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x}) \chi_n(\mathbf{y}, z_1, \dots, z_N).$$

Απλοποιώντας αυτή τη σχέση μπορεί να προκύψει η ακόλουθη τελική μορφή

$$\Psi = \sum_n C_n \Psi_n(\mathbf{x}) \Phi'_n(\mathbf{y}) \lambda_n(z_1, \dots, z_N)$$

όπου  $\Phi'_n(\mathbf{y})$ , υποδηλώνει την ενδεχόμενη αλλαγή του πακέτου της συσκευής ως αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του με την ανιχνευτική διάταξη και  $\lambda_n(z_1, \dots, z_N)$  είναι η κυματοσυνάρτηση του ανιχνευτή που αντιστοιχεί στην  $\Phi'_n(\mathbf{y})$ . Κάθε μια από τις  $\lambda_n$  δεν αλληλεπικαλύπτεται με τις άλλες και έτσι ακόμα και εάν οι  $\Phi'_n(\mathbf{y})$  τύχει και αλληλεπικαλύπτονται αυτό δεν θα επηρεάσει το κβαντικό δυναμικό που δρα πάνω στα σωματίδια  $\mathbf{x}$  και  $\mathbf{y}$  καθώς τα σωματίδια του ανιχνευτή θα είναι σε διακριτά κανάλια.

Όταν η καταγραφή ολοκληρωθεί τα πακέτα που δεν περιέχουν σωματίδια θα είναι μόλις ανενεργά ή φυσικώς μη αποτελεσματικά. Έτσι δεν εισάγεται καμία κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης για να εξηγηθεί η μετρητική διαδικασία. Με βάση την συμπεριφορά όλων των σωματιδίων, το υπο παρατήρηση σύστημα δρα σαν να ήταν στην αντίστοιχη κβαντική κατάσταση.

Η όλη διαδικασία συνίσταται σε ένα "χορό", συσχετισμένο των σωματιδίων οδηγούμενων από στοιχεία πληροφορίας που αναπαρίστανται από την κυματοσυνάρτηση. Αυτό που συμβαίνει κατά τη διαδικασία της μέτρησης μπορεί να θεωρηθεί ως μια αμοιβαία πληροφορία συστήματος- συσκευής. Αυτή η πολύπλοκη πληροφορία καθορίζει ένα σύνολο διακλαδώσεων που ακολουθούν τα σωματίδια και με αυτό τον τρόπο καθορίζεται και το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Σε αυτή την ερμηνεία η βασική πραγματικότητα δεν περιγράφεται, από την κυματοσυνάρτηση. Γίνεται η παραδοχή ότι υπάρχουν σωματίδια που ακολουθούν καθορισμένες τροχιές. Η κυματοσυνάρτηση  $\psi$  περιγράφει ένα ποιοτικά νέο είδος κβαντικού πεδίου, το οποίο καθορίζει το κβαντικό δυναμικό που δρα στο σωματίδιο. Δεν απορρίπτεται όμως η πραγματικότητα αυτού του πεδίου όταν αποδεχόμαστε ότι το εν λόγω πεδίο οδηγεί το σωματίδιο στην κίνηση του με την δική του ενέργεια. Το αποτέλεσμα αυτού του κβαντικού πεδίου παρουσιάζεται στο κλασικό επίπεδο στην συλλογική κίνηση μεγάλου αριθμού σωματιδίων.

Εγκαταλείποντας λοιπόν την ιδέα ότι η κβαντική συνάρτηση περιγράφει όσο το δυνατόν καλύτερα την πραγματικότητα, η απώλεια της δυνατότητας για δράση μπορεί να φανεί φυσικό και αναμενόμενο χαρακτηριστικό. Η κυματοσυνάρτηση δίνει τους στατιστικούς υπολογισμούς, χωρίς αναφορά στα σωματίδια, αυτό όμως δεν σημαίνει ότι είναι πλήρης για μια οντολογική ερμηνεία.

Ο Bohm συνηθίζει να κάνει αναλογίες με την ανθρώπινη συμπεριφορά, όπου η πληροφορία, ενεργή και μη ενεργή, είναι κατανοητή στο πώς καθορίζει τα αποτελέσματα. Για να δώσει λοιπόν πώς βλέπει την κυματοσυνάρτηση και τον στατιστικό της χαρακτήρα, συνεχίζει αυτή την αναλογία και λέει πως με τον ίδιο τρόπο που μπορούμε να δούμε ότι η στατιστική συμπεριφορά ανθρώπων, οι οποίοι κινούνται σε δρόμους με οδικά σήματα που τους πληροφορούν, μπορεί να υπολογιστεί από τα σήματα χωρίς κανείς να πρέπει να καταφύγει στη λεπτομερή περιγραφή της κίνησης του ανθρώπινου σώματος (νεύρα, μύες, εγκέφαλος, κλπ), όμοια μπορεί να ειπωθούν και οι στατιστικοί υπολογισμοί από την κυματοσυνάρτηση χωρίς αναφορά στα σωματίδια.

## 2.6 Πλαισιακότητα μεγεθών στη θεωρία του Bohm

Όπως ειπώθηκε και εισαγωγικά στην προηγούμενη ενότητα, συνήθως η μέτρηση υπονοεί ότι αποδίδεται μια ιδιότητα σε ένα αντικείμενο μέσω των μακροσκοπικών παρατηρήσιμων αποτελεσμάτων. Ενώ στην κλασική φυσική κάτι τέτοιο μπορεί να αποτελεί κανόνα με ικανοποιητική προσέγγιση (με εξαίρεση εκεί όπου η διαδικασία μέτρησης προκαλεί μη ελέγξιμη και μη προβλέψιμη διαταραχή στο σύστημα), κατά τον Bohm στην κβαντική μέτρηση αυτό δεν ισχύει με γενικό τρόπο.

Όπως αναφέρει και ο Bell (Bell, 1987) έχει γίνει κατάχρηση του όρου "μέτρηση". Αυτή η λέξη υπονοεί τον καθορισμό προϋπαρχουσών ιδιοτήτων ενός πράγματος και οποιοδήποτε όργανο συμμετέχει στη μέτρηση θεωρείται ότι έχει έναν τελείως παθητικό ρόλο. Στην κβαντική μηχανική όμως δεν ισχύει κάτι τέτοιο. Τα αποτελέσματα της μέτρησης πρέπει να ειπωθούν ως το αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης συστήματος-συσκευής. Η κατάχρηση του όρου "μέτρηση" κάνει εύκολο το να ξεχαστεί αυτό και να περιμένει κανείς ότι τα αποτελέσματα ακολουθούν μια απλή λογική στην οποία η συσκευή δεν αναφέρεται. Κατά τον Bell, ολόκληρο το θέμα της φιλοσοφίας της κβαντικής μηχανικής ανακύπτει από την κατάχρηση αυτού του όρου και θεωρεί ότι θα έπρεπε να αντικατασταθεί από τη λέξη "πείραμα".

Στην θεωρία του Bohm κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης υπάρχει ένας γραμμικός συνδυασμός των κυματοσυναρτήσεων. Έτσι τα δυο συστήματα καθοδηγούνται από μια

κοινή δεξαμενή πληροφορίας και το αντίστοιχο κβαντικό δυναμικό. Οι τροχιές είναι συσχετισμένες και δεν υπάρχει τρόπος να προβλεφθεί ή να ελεγχθεί η μεμονωμένη περίπτωση για ένα σωματίδιο που εισέρχεται σε ένα κανάλι. Αφού οι αρχικές συνθήκες του παρατηρούμενου συστήματος και της συσκευής δεν μπορούν να καθοριστούν επακριβώς, δεν μπορεί να προβλεφθεί και το τελικό αποτέλεσμα.

Η μέτρηση με βάση την ερμηνεία του Bohm είναι σαφές ότι δεν μετράει μια προγενέστερη ιδιότητα της κατάστασης του συστήματος. Γενικά λοιπόν οι κβαντικές μετρήσεις δεν είναι αξιόπιστες, με βάση και τον ορισμό της αξιοπιστίας της μέτρησης που δόθηκε στο προηγούμενο κεφάλαιο. Περισσότερο ακριβές θα ήταν να πούμε ότι συσκευή και το σύστημα αλληλεπιδρούν, με αυτή τη διαδικασία επηρεάζει και τα δύο- αμφότερα συμμετέχουν στο σύνθετο σύστημα. Μετά την αλληλεπίδραση οι καταστάσεις είναι συσχετισμένες σύμφωνα με το κανάλι στο οποίο έχουν εισέλθει. Για αυτό γίνεται λόγος για *δυναμικότητες* του συστήματος. Το ποια δυναμικότητα τελικά πραγματοποιείται εξαρτάται από κοινού από το σύστημα και από τη συσκευή.

Με βάση αυτό απορρέει το συμπέρασμα ότι οι ιδιότητες έχουν νόημα να αποδίδονται στο συνολικό πλαίσιο. Αυτό ισχύει για όλα τα άλλα μεγέθη εκτός από τη θέση ενός σωματιδίου. Αυτή είναι εγγενής γιατί με βάση την ερμηνεία του Bohm η θέση είναι ανεξάρτητη της κυματοσυνάρτησης. Η θέση επιπλέον μπορεί να μετρηθεί χωρίς να μεταβληθεί. Όλες οι άλλες ιδιότητες και τα μεγέθη που χαρακτηρίζουν ένα σωματίδιο ή ένα σύστημα εξαρτώνται τόσο από τη θέση όσο και από την κυματοσυνάρτηση. Συνεπώς πρέπει υπό αυτή την έννοια να θεωρούνται πλαισιακά τα υπόλοιπα μεγέθη.

Στο πλαίσιο αυτής της θεωρίας για τη μέτρηση για παράδειγμα, ενός μεγέθους  $A$ , διαφορετικού από τη θέση, που ο τελεστής του μετατίθεται με τους αντίστοιχους δυο άλλων μεγεθών  $B$  και  $C$ , οι οποίοι όμως δεν μετατίθενται μεταξύ τους, αυτό που προκύπτει είναι το εξής: Το αποτέλεσμα που προκύπτει για το  $A$  σε ένα πείραμα που μετράει το  $A$  και το  $B$  μπορεί να είναι διαφορετικό από το αποτέλεσμα που προκύπτει για το μέγεθος  $A$  από ένα πείραμα που είναι σχεδιασμένο για την μέτρηση του  $A$  και του  $C$ . Η θεωρία του Bohm που δέχεται μερικό καθορισμό τιμών ανεξαρτήτως πλαισίου, και πιο συγκεκριμένα μόνο για το μέγεθος της θέσης, δεν έρχεται σε αντιπαράθεση με το θεώρημα Kochen-Specker, που όπως φάνηκε και στο πρώτο



κεφάλαιο έθεσε περιορισμούς με την διατύπωση του στις θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών.

Σε αυτή τη θεώρηση, λοιπόν, η θέση έχει διαφορετικό οντολογικό status σε σχέση με όλα τα άλλα μεγέθη. Είναι χαρακτηριστικό αυτό που γράφει ο Dürr : σε αντίθεση με τη θέση, το σπιν δεν είναι πρωτεύον, δηλαδή δεν είναι ένας πραγματικά διακριτός βαθμός ελευθερίας για το σωματίδιο ισότιμος με τη θέση που προστίθεται για να αντιμετωπίσει κανείς ένα σωματίδιο με σπιν. Σε αδρές γραμμές, το σπιν εμπεριέχεται στην κυματοσυνάρτηση.<sup>12</sup>

Η θεωρία του Bohm, λοιπόν, προϋποθέτει ένα αριθμό κρυμμένων μεταβλητών που δεν είναι τελικά άλλες από τις θέσεις όλων των σωματιδίων, οι οποίες όμως δεν μπορούν να μετρηθούν ποτέ άμεσα. Κάθε υλικό σωματίδιο έχει μια τελείως καθορισμένη θέση, η οποία μπορεί να καθορίσει και την χρονική εξέλιξη αυτής της θέσης λαμβάνοντας υπόψιν το αντίστοιχο κβαντικό πεδίο. Όμως αυτές οι θέσεις δεν είναι γνωστές και από εκεί προκύπτει και ο στατιστικός χαρακτήρας των αποτελεσμάτων των μετρήσεων, κατά αναλογία με την κίνηση Brown.

Η πλαισιακότητα των μεγεθών όπως αυτή υπεισέρχεται στη θεωρία του Bohm είναι κατα βάση αιτιακή πλαισιακότητα. Οι παρατηρούμενες τιμές είναι αποτέλεσμα της αλληλεπίδρασης του συστήματος με την μετρητική συσκευή. Εγκαταλείπει την αξιοπιστία της μέτρησης και θέτει ως αιτιακά απαραίτητη την πειραματική διάταξη για να προκύψει η αντίστοιχη τιμή, δηλαδή το αποτέλεσμα της μέτρησης. Σε μεταγενέστερα κείμενα, και με βασικό εξ' αυτών το *The Undivided Universe*, οι Bohm και Hiley δίνουν και μια στοχαστική ερμηνεία της θεωρίας τους, θέτοντας ως πρωταρχικό τον οντολογικό της χαρακτήρα και όχι τον αιτιακό. Σε αυτές τις μεταγενέστερες προσεγγίσεις, η πλαισιακότητα τίθεται με οντολογικά χαρακτηριστικά και η έννοια του πλαισίου γίνεται εγγενώς απαραίτητη.

Η πλαισιακότητα σε κάθε περίπτωση απομακρύνεται όμως από τις αρχές της κλασικής φυσικής. Κατά τους ίδιους τους εισηγητές της, Bohm και Hiley, η πλαισιακή εξάρτηση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων είναι μια παραπάνω ένδειξη ότι η ερμηνεία τους δεν είναι μια απλή επιστροφή στις βασικές αρχές της κλασικής φυσικής.

---

<sup>12</sup>(Dürr (1996))

## 2.7 Μη τοπικότητα στη θεωρία του Bohm

Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά πάνω στα οποία βασίζεται η κριτική της θεωρίας του Bohm είναι η μη τοπικότητα της. Το ενδιαφέρον του Bell για τη μη τοπικότητα και τη κβαντική μηχανική είχε προκληθεί από την ανάλυση των θεωριών κρυμμένων μεταβλητών, ανάμεσα στις οποίες κεντρική θέση κατέχει η θεωρία του Bohm.

Η θεωρία του Bohm για συστήματα που αποτελούνται από περισσότερα του ενός σωματίδια γίνεται μη τοπική. Στην ειδική περίπτωση των δύο σωματιδίων που περιγράφηκε και σε προηγούμενη ενότητα, η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου εξαρτάται εν γένει από τη θέση και των δυο σωματιδίων, ανεξάρτητα από τη μεταξύ τους απόσταση. Αυτό δεν συμβαίνει στην περίπτωση κατά την οποία η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει το σύστημα των δυο σωματιδίων είναι διαχωρίσιμη. Σε αυτή την περίπτωση μπορεί ναδειχθεί ότι η ταχύτητα του κάθε σωματιδίου εξαρτάται από την δική του θέση και μόνο.<sup>13</sup>

Η μη τοπικότητα που αφορά τις ταχύτητες είναι μόνο η μια όψη για τη μη τοπικότητα στην μηχανική του Bohm. Υπάρχει μη τοπικότητα και στην ίδια την κυματοσυνάρτηση που είναι εμφανής ακόμα και χωρίς την ακριβή δομή. Στην θεωρία του Bohm η μη τοπική σύνδεση των σωματιδίων γίνεται μέσω του κβαντικού δυναμικού (Bohm και Hiley, 1993). Όπως γράφει και ο Bell (Bell, 1987):

Το γεγονός ότι το κύμα - πιλότος, στη γενική περίπτωση διαδίδεται όχι στον τρισδιάστατο χώρο, αλλά σε ένα πολλαπλών διαστάσεων χώρο διαμόρφωσης είναι η προέλευση της διαβόητης μη τοπικότητας της κβαντικής μηχανικής. Είναι προτέρημα της θεωρίας των De Broglie-Bohm που κάνει αυτό το χαρακτηριστικό τόσο εμφανές που δεν μπορεί να αγνοηθεί.

Η μη τοπικότητα όπως αναλύθηκε και στο πρώτο κεφάλαιο υπεισέρχεται και στη συνήθη ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής όπως αυτή εκφράστηκε από τους Bohr και Heisenberg. Υπάρχει ένα είδος μη τοπικότητας που υπονοείται από τον Bohr, ο οποίος θεωρεί το σύστημα και τη μετρητική συσκευή ως μη διαχωρίσιμο και μη αναλύσιμο όλο. Η προσέγγιση του von Neumann με την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης, εφαρμοζόμενη σε ένα σύστημα EPR είναι μη τοπική όσον αφορά το πώς επηρεάζεται το ένα σωματίδιο από τη διαταραχή που υφίσταται το άλλο. Υπό αυτή την έννοια είναι ένα χαρακτηριστικό με το οποίο πρέπει να

---

<sup>13</sup>D. Albert (1994) σελ. 156-157

αναμετρηθούν όλες οι ερμηνείες της κβαντικής μηχανικής.

### 2.7.1 Ανεξαρτησία από παράμετρο και ανεξαρτησία από αποτέλεσμα

Όπως έχει ήδη φανεί και από τα προηγούμενα η ανάλυση των ανισοτήτων του Bell είναι κομβικής σημασίας συνολικά για την κβαντομηχανική και για τον τοπικό ή μη χαρακτήρα της. Μια προσεκτικότερη προσέγγιση σε αυτό λοιπόν που έδειξε ο Bell είναι απαραίτητη. Ας επανέλθουμε για λίγο στο πείραμα EPRB και πιο συγκεκριμένα στην αντίστοιχη εκδοχή του με φωτόνια, όπως αυτή ακολουθήθηκε και στο πείραμα Aspect. Υποθέτοντας ότι στο δεξί μέρος μπορούμε να επιλέξουμε ελεύθερα την μετρητική συσκευή σε οποιαδήποτε κατάσταση  $a \in A$ . Το  $A$  μπορεί να περιλαμβάνει όλους τους δυνατούς προσανατολισμούς του δεξιά πολωτή και το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι μια αριθμητική τιμή  $s \in S$ . Αντίστοιχα για τον αριστερά πολωτή θα είναι  $b \in B$  και  $t \in T$ . Έστω  $k$  μια μεταβλητή συνολικού καθορισμού της κατάστασης του ζεύγους που περιλαμβάνει όλες τις κρυμμένες μεταβλητές που κάποιος θέλει να περιλάβει.

Ο Bell εξετάζει την ακόλουθη ταυτότητα για την πιθανότητα να συμβεί το αποτέλεσμα  $(s, t)$  για τα  $(a, b)$  δεδομένου του  $k$  :

$$prob(s, t/a, b, k) = prob(s/a, k) * prob(t/b, k).$$

Αυτή η *συνθήκη παραγοντοποίησης* (factorization) γίνεται όπως αναφέρει και ο Maudlin<sup>14</sup> με δεδομένη την τοπική αιτιότητα μαζί με μια αρχή εξήγησης συσχετίσεων που βασίζονται σε κοινές αιτίες. Η αρχή της τοπικής αιτιότητας, όπως εννοείται εδώ, θέτει ότι όλες οι αιτίες ενός γεγονότος πρέπει να βρίσκονται στον παρελθοντικό κώνο φωτός του. Σε ένα τοπικά αιτιακό κόσμο τα γεγονότα σε μια περιοχή δεν μπορούν να επηρεάσουν απευθείας γεγονότα σε μια άλλη περιοχή ή αντίστροφα. Ακόμα οποιαδήποτε κοινή αιτία θα πρέπει να βρίσκεται στην τομή των παρελθοντικών τους κώνων φωτός. Ένας τοπικά αιτιατός κόσμος μπορεί να είναι μη αναγώγιμα στοχαστικός αλλά η αιτιακή δομή θα έδινε τις πιθανότητες για τη στατιστική ανεξαρτησία χωροειδώς απομακρυσμένων γεγονότων.

<sup>14</sup>Η ανάλυση που παρατίθεται εδώ είναι με βάση το Maudlin (1994).

Επειδή αυτή η συνθήκη είναι κλειδί για τις ανισότητες του Bell αξίζει περισσότερης προσοχής και ανάλυσης με τη σειρά της. Σε αυτό το σημείο είναι σημαντική η συνεισφορά του Jarrett.<sup>15</sup> Σύμφωνα με τον Jarrett αυτή η συνθήκη μπορεί να ειπωθεί ως συνδυασμός δυο διαφορετικών αρχών καθεμια από τις οποίες έχει τη δική της φυσική σημασία.

Η πρώτη, την οποία ο Jarrett ονόμασε *τοπικότητα* και αργότερα ο Shimony *ανεξαρτησία από παράμετρο*, δηλώνει ότι το αποτέλεσμα μιας δεδομένης μέτρησης είναι στατιστικά ανεξάρτητο από την ρύθμιση του μακρινού ανιχνευτή. Θέτει δηλαδή ότι ισχύουν οι σχέσεις:

$$prob(s/a, b, k) = prob(s/a, k)$$

και αντίστοιχα

$$prob(t/a, b, k) = prob(t/b, k).$$

Η δεύτερη, την οποία ο Jarrett καλεί *πληρότητα* και ο Shimony *ανεξαρτησία από αποτέλεσμα*, διατηρεί την πιθανότητα κάθε αποτελέσματος στη μια πλευρά του πειράματος ανεξάρτητη από το αποτέλεσμα στην άλλη, μακρινή πλευρά του πειράματος. Έτσι ισχύουν οι παρακάτω σχέσεις:

$$prob(s/a, b, k, t) = prob(s/a, b, k)$$

και αντίστοιχα

$$prob(t/a, b, k, s) = prob(t/a, b, k).$$

Αν τώρα ισχύουν και οι δύο προηγούμενες συνθήκες μπορεί κανείς να καταλήξει στην συνθήκη παραγοντοποίησης του Bell. Πράγματι τότε θα ισχύει:

$$\begin{aligned} prob(s, t/a, b, k) &= prob(s/a, b, k, t) * prob(t/a, b, k) = \\ &= prob(s/a, b, k) * prob(t/a, b, k) = \\ &= prob(s/a, k) * prob(t/b, k) \end{aligned}$$

Με βάση αυτή την ανάλυση, η παραβίαση των ανισοτήτων του Bell οδηγεί στην απόρριψη είτε της ανεξαρτησίας από παράμετρο είτε της ανεξαρτησίας από αποτέλεσμα. Η πρώτη ερώτηση

---

<sup>15</sup>Jarrett (1984)

είναι κατα πόσο τα πειραματικά αποτελέσματα καταδεικνύουν ποια από τις δυο παραβιάζε-  
ται. Αλλά δεν το κάνουν. Υπάρχουν θεωρίες που σώζουν τα φαινόμενα της κβαντικής μηχανι-  
κής και παραβιάζουν το ένα είδος ανεξαρτησίας και άλλες που παραβιάζουν το άλλο είδος. Η  
ορθόδοξη ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής σέβεται την ανεξαρτησία από παράμετρο αλλά  
όχι την ανεξαρτησία από αποτέλεσμα. Σε αυτή την περίπτωση  $k$  είναι η κυματοσυνάρτηση, και  
εαν αυτή είναι γνωστή, επιπρόσθετες πληροφορίες για το τι μετριέται σε μια μακρινή συσκευή  
δεν επηρεάζει τις στατιστικές προβλέψεις για το τι παρατηρείται εδώ. Από την άλλη πλευρά  
η θεωρία του Bohm δεν σέβεται ως γενική αρχή την ανεξαρτησία από παράμετρο, αλλά μόνο  
στο πλαίσιο που ισχύει η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας. Αλλά σε αυτό θα επανέλθουμε  
στη συνέχεια.

Τι σημασία έχουν οι συνθήκες ανεξαρτησίας από παράμετρο και από αποτέλεσμα; Κά-  
νοντας κανείς την υπόθεση ότι η σχετική παράμετρος είναι η απομακρυσμένη ανιχνευτική  
διάταξη και ότι το αποτέλεσμα είναι η καταγραφή ή όχι από τον ανιχνευτή, κάθε συνθηκη  
αντανακλά μια απαίτηση που αφορά τον αιτιακό ρόλο ενός συγκεκριμένου γεγονότος. Η ανε-  
ξαρτησία από παράμετρο ισχύει εαν η ενέργεια της ρύθμισης του μακρινού ανιχνευτή δεν έχει  
αιτιακό ρόλο, ενώ η ανεξαρτησία από αποτέλεσμα ισχύει εαν το μετρητικό γεγονός δεν έχει  
μακρινά αποτελέσματα.

Είναι κάπως αυθαίρετη αυτή η όλη ανάλυση και η παραγοντοποίηση μπορεί να δοθεί  
και με άλλους ισοδύναμους τρόπους που παρουσιάζονται στην βιβλιογραφία (βλ. Maudlin,  
1994). Το συμπέρασμα όμως που προκύπτει είναι ότι η μη τοπικότητα εμφανίζεται σε όλες της  
εκδοχές της κβαντικής μηχανικής και δεν είναι στοιχείο μόνο της θεωρίας του Bohm. Απλώς  
σε αυτή είναι πολύ πιο εμφανής.

## 2.7.2 Ύπαρξη σημάτων και κβαντική ισορροπία

Αυτή η μη τοπική σύνδεση ανάμεσα στα σωματίδια, που υπάρχει και στη θεωρία του  
Bohm, θα μπορούσε ενδεχομένως να εξηγηθεί με την ύπαρξη σημάτων που μεταδίδονται με  
άπειρη ή πεπερασμένη πολύ μεγάλη ταχύτητα, από το ένα σωματίδιο στο άλλο με τρόπο που  
δεν είναι ακόμα γνωστός.

Μεταφορά ενέργειας με μεγαλύτερη ταχύτητα από αυτή του φωτός θα παρουσίαζε μια

απειλή για τις υπάρχουσες φυσικές θεωρίες. Αν συνέβαινε κάτι τέτοιο, για κάποια συστήματα αναφοράς θα έπρεπε να υπάρχουν σωματίδια με αρνητική ενέργεια που κινούνται προς τα πίσω στο χρόνο. Η ενέργεια, η ορμή, η μάζα, το φορτίο είναι φυσικά μεγέθη που εμφανίζονται στις θεμελιώδεις εξισώσεις της φυσικής. Αλλά ποια αρχή είναι αυτή που καθορίζει πότε μια μεταφορά είναι περίπτωση σήματος; Χωρίς ξεκάθαρα κριτήρια για τον καθορισμό του σήματος, αναπόφευκτα και οι αντίστοιχες θεωρίες, στις οποίες η έννοια του σήματος παίζει ρόλο, θα είναι θολές.

Η μετάδοση σήματος είναι η διαδικασία εκείνη μέσω της οποίας οι άνθρωποι (ή άλλα όντα) μπορούν να επικοινωνήσουν μεταξύ τους. Όταν χαρακτηρίζουμε ένα σύστημα ως *πομπό* και ένα άλλο ως *δέκτη ενός σήματος* απαιτούμε ρητά ή άρρητα ότι μια ελεγχόμενη πτυχή του πομπού συσχετίζεται με μια παρατηρούμενη πτυχή του δέκτη. Η έννοια του σήματος είναι κατα συνέπεια διπλά ανθρωποκεντρική: εξαρτάται από μια πρότερη συγκεκριμενοποίηση του τι μπορεί ο αποστολέας να χειριστεί και του τι μπορεί να δει ο παρατηρητής.

Στα πλαίσια της υπάρχουσας θεωρίας της κβαντικής μηχανικής, αυτό θα απαιτούσε να μπορεί κανείς να επιδράσει στο ένα σωματίδιο με τέτοιο τρόπο ώστε να επηρεαστεί το στατιστικό αποτέλεσμα της μέτρησης για το άλλο σωματίδιο. Το 1978 ο Eberhard έδειξε, με μια απόδειξη που εδώ θα παραληφθεί <sup>16</sup>, ότι κάτι τέτοιο είναι αδύνατον. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι στο κβαντικό επίπεδο, όταν για ένα σύνολο συστημάτων ισχύει η αρχική συνθήκη  $P(\mathbf{x}, 0) = |\Psi(\mathbf{x}, 0)|^2$ , πράγμα που εγγυάται ότι ισχύει και η συνθήκη για κάθε μελλοντική χρονική στιγμή  $P(\mathbf{x}, t) = |\Psi(\mathbf{x}, t)|^2$ , οι χειρισμοί στο ένα σύστημα δεν μπορεί να έχει στατιστικό αποτέλεσμα στο άλλο σύστημα. Αυτό σημαίνει ότι η κβαντική σύζευξη, εάν κάνει κανείς την παραδοχή της κβαντικής ισορροπίας, δεν μπορεί να είναι συμβατή με την μετάδοση σημάτων από απόσταση.

Για να γίνει πιο κατανοητό αυτό είναι κατατοπιστικό το παράδειγμα που δίνει ο Valentini <sup>17</sup>. Ας αναλογιστούμε ένα κουτί το οποίο περιέχει ένα μεγάλο αριθμό κερμάτων που το καθένα έχει δυο όψεις, κορώνα και γράμματα αντίστοιχα. Ας φανταστούμε ότι κάποιος μακριά χτυπάει τα χέρια του και αυτό μέσω μιας δράσης από απόσταση έχει ως αποτέλεσμα να αναπο-

---

<sup>16</sup>Eberhard (1978)

<sup>17</sup>Valentini (2009) σελ. 32-37

δογυρίζει κάθε κέρμα που είναι μέσα στο κουτί. Εάν τα κέρματα είναι αρχικά ισόποσα κατανεμημένα σε κορώνα και γράμματα, τότε και μετά το χτύπημα των χεριών και το συνακόλουθο αναποδογύρισμα, το αποτέλεσμα θα παραμείνει το ίδιο σε στατιστικό επίπεδο και δεν θα είναι παρατηρήσιμη η δράση. Αντίθετα, εάν τα κέρματα είχαν αρχικά μια άνιση κατανομή, αν για παράδειγμα ήταν 90% κορώνα και 10 % γράμματα, μετά το χτύπημα των χεριών και το αναποδογύρισμα το αποτέλεσμα θα ήταν 10% κορώνα και 90 % γράμματα και συνεπώς θα ήταν στατιστικά αξιοπρόσεκτο.

Στη σκέψη του Valentini, λοιπόν η μη παρατήρηση του φαινομένου είναι χαρακτηριστικό που ισχύει στην κατάσταση ισορροπίας. Δεν είναι θεμελιώδες για την θεωρία. Σε επίπεδο αρχής μπορεί να θεωρηθεί η κβαντική ισορροπία ως ειδική περίπτωση, και να επιτραπεί η κβαντική μη-ισορροπία όπου οι στατιστικές προβλέψεις του κανόνα του Born παραβιάζονται. Σε αυτή την περίπτωση η μετάδοση σημάτων μπορεί να επιτραπεί και η αρχή της αβεβαιότητας να παραβιαστεί. Υπό αυτό το πρίσμα η θεωρία του De Broglie και του Bohm μπορεί να θεωρηθεί γενικότερη και η κβαντική μηχανική ως μια ειδική περίπτωση.<sup>18</sup>

## **2.8 Σχετικιστικό αναλλοίωτο, ειδική θεωρία της σχετικότητας και η θεωρία του Bohm**

### **2.8.1 Ειδική Θεωρία της σχετικότητας και οι αντίστοιχοι περιορισμοί**

Ένα από τα βασικά σημεία πάνω στα οποία κρίνεται η θεωρία του Bohm είναι το κατά πόσο είναι συνεπής με το σχετικιστικό αναλλοίωτο κατά Lorentz και με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Όπως κάθε μη σχετικιστική κβαντική θεωρία, έτσι και η βασική θεωρία του Bohm δεν είναι καταρχήν συμβατή με την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Ποιο όμως είναι οι περιορισμοί που θέτει η ειδική θεωρία της σχετικότητας; Αυτό είναι ένα ζήτημα πάνω στο οποίο υπάρχει διαμάχη. Πολλοί φυσικοί και φιλόσοφοι θα συμφωνούσαν ότι η σχετικότητα απαγορεύει σε "κάτι" να ταξιδεύει με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός αλλά θα διαφωνούσαν στο ποιο είναι αυτό το "κάτι".

<sup>18</sup>Για περαιτέρω ανάλυση αυτού βλ. Valentini (2002).

Όπως γράφει και ο Maudlin (Maudlin, 1994 σ.2-3), η ειδική θεωρία της σχετικότητας θα μπορούσε να ερμηνευτεί ως θεωρία που επιβάλλει ότι :

α) Η ύλη και η ενέργεια δεν μπορούν να μεταφερθούν πιο γρήγορα από το φως.

β) Σήματα δεν μπορούν να σταλούν πιο γρήγορα από το φως.

γ) Αιτιακές διαδικασίες δεν μπορούν να διαδοθούν πιο γρήγορα από το φως.

δ) Πληροφορία δεν μπορεί να μεταδοθεί πιο γρήγορα από ότι το φως.

Αυτές οι διατυπώσεις δεν είναι εν γένει ισοδύναμες. Για παράδειγμα υπερφωτεινές αιτιακές διαδικασίες θα μπορούσαν να υπάρχουν αλλά εξαιτίας της μη ελεγχιμότητας τους να μην μπορούσαν να αξιοποιηθούν για μετάδοση σήματος. Υπάρχει και μια άλλη ερμηνεία για την ειδική θεωρία της σχετικότητας, την οποία ο ίδιος ο Einstein ονόμασε καθολική αρχή της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας και η οποία περιέχεται στο αίτημα: "Οι νόμοι της φυσικής είναι αναλλοίωτοι σε σχέση τους μετασχηματισμούς του Lorentz." Αυτό με τη σειρά του είναι συμβατό με την παραβίαση καθεμιάς από τις απαγορεύσεις που τέθηκαν παραπάνω.

Αυτό που σίγουρα θέτει η ειδική θεωρία της σχετικότητας είναι ότι κάθε ακτίνα φωτός στο κενό έχει την ίδια ταχύτητα  $c$  σε όλα τα αδρανειακά συστήματα αναφοράς. Μια συνέπεια αυτού είναι και ότι το ταυτόχρονο γίνεται σχετικό με το σύστημα αναφοράς. Ο "χώρος" και ο "χρόνος" είναι σχετικοί ως προς το σύστημα αναφοράς, και αυτό είναι το κυρίαρχο χαρακτηριστικό που εισάγει η ειδική θεωρία της σχετικότητας. Το πιο σημαντικό εδώ, όμως, είναι όχι το τι καθίσταται σχετικό αλλά το τι καθίσταται απόλυτο, αμετάβλητο. Η σχετικότητα σημαίνει λοιπόν αμεταβλητότητα, ανεξαρτησία της μορφής των νόμων από το σύστημα αναφοράς.

Το παλαιό χωροχρονικό πλαίσιο δεν ήταν κατάλληλο για την περιγραφή των σχετικιστικών φαινομένων. Το νέο πλαίσιο όπως διατυπώθηκε από τον Minkowski το 1908, αποτελεί ένα είδος σύνθεσης των χωρικών και της χρονικής συντεταγμένης. Σε αυτό το πλαίσιο, το μήκος και ο χρόνος δεν είναι μεγέθη απόλυτα. Όμως η "απόσταση", δηλαδή το χωροχρονικό διάστημα, είναι ανεξάρτητο από το σύστημα αναφοράς. Η νέα μετρική, σε αντίθεση με την ευκλείδεια, προβλέπει διαστήματα θετικά ή χρονοειδή (χρονικού τύπου), αρνητικά ή χωροειδή (χωρικού τύπου) και μηδενικά ή φωτοειδή. Ο χαρακτήρας των διαστημάτων είναι επίσης ανεξάρτητος από το σύστημα αναφοράς. Η χρονική σειρά μεταξύ δυο γεγονότων, από τα οποία το ένα βρίσκεται εντός του μελλοντικού ή του παρελθοντικού κώνου φωτός του άλλου είναι



αμετάβλητη.

Η θεωρία της σχετικότητας, υπερβαίνοντας τη σχετικότητα των κλασικών μεγεθών (μετασχηματισμοί Γαλιλαίου), δημιούργησε νέα μεγέθη που έχουν απόλυτο χαρακτήρα υπό την έννοια ότι δεν εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς. Γεννήθηκε από τη σύγκρουση των μηχανιστικών αντιλήψεων με την ηλεκτρομαγνητική πραγματικότητα. Παρουσιάζει όμως δυο βασικές ιδιομορφίες. Πρώτον, περιορίζει την αμεταβλητότητα μόνο στα αδρανειακά συστήματα αναφοράς και δεύτερον, περιγράφει είναι ένα σύμπαν με σταθερή επίπεδη μετρική, η οποία δεν λαμβάνει υπόψη την κατανομή της ύλης στο χωροχρόνο. Αμφότερα ξεπεράστηκαν από την γενική θεωρία της σχετικότητας. Αποτελεί βασικό χαρακτηριστικό της ότι διατυπώνει τους φυσικούς νόμους με τέτοιο τρόπο που να μην εξαρτώνται από το σύστημα αναφοράς. Αυτό δεν σημαίνει ότι τα διάφορα συστήματα αναφοράς είναι ισοδύναμα από φυσική άποψη.

## **2.8.2 Αναλλοίωτο κατά Lorentz**

Ο Bohm υποστηρίζει ότι είναι δυνατόν να υπάρξει μια Lorentz αναλλοίωτη θεωρία για την κατάσταση ενός σώματος. Για ένα σύστημα όμως πολλών σωματιδίων οι νόμοι δεν είναι αναλλοίωτοι ως προς τους μετασχηματισμούς του Lorentz. Όπως έχει παρουσιαστεί προηγούμενα, διαμορφώσεις που ορίζονται με ταυτόχρονα προσδιορισμένες θέσεις όλων των σωματιδίων παίζουν πολύ κομβικό ρόλο στον φορμαλισμό της μηχανικής του Bohm με την καθοδηγητική εξίσωση να εξαρτάται από αυτές και ταυτόχρονα να ορίζει την εξέλιξη του συστήματος στο χώρο των διαμορφώσεων.

Αυτό που ο Bohm δείχνει είναι ότι είναι δυνατόν να έχουμε μια περιγραφή αναλλοίωτη κατά Lorentz σε φαινόμενα μεγάλης κλίμακας, στον αισθητό κόσμο όπου η εξάρτηση από το πεδίο- $\psi$  είναι δυνατόν να αμεληθεί. Για τα εμπειρικά δεδομένα και για όσο ισχύουν οι τρεις παραδοχές που κάνουν τη θεωρία αυτή συμβατή με τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής δεν υπάρχει ασυνέπεια με την ειδική θεωρία της σχετικότητας γιατί, αν και προκύπτουν μη τοπικές συσχετίσεις στο κβαντικό επίπεδο, στο όριο προς το κλασικό επίπεδο αυτές μπορούν να αγνοηθούν (Bohm, 1952).

Στην ερμηνεία λοιπόν αυτή οι στατιστικές προβλέψεις για κάθε μετρητική διαδικασία, η οποία αποτελεί εκδήλωση του πραγματικού κόσμου, είναι σύμφωνες με αυτές που προκύ-

πουν από την καθιερωμένη, ορθόδοξη ερμηνεία. Και ακριβώς επειδή στο κβαντικό επίπεδο τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι στατιστικής φύσης ο Bohm θεωρεί ότι η ερμηνεία μπορεί να είναι συνεπής με το σχετικιστικό αναλλοίωτο κατά Lorentz και με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Αυτό δεν σημαίνει ότι για ένα σωματίδιο μιας καθορισμένης τροχιάς ισχύει απαραίτητα το αναλλοίωτο. Στη βάση λοιπόν αυτής της ανάλυσης προκύπτει το ερώτημα κατά πόσο είναι συμβατή με την ειδική θεωρία της σχετικότητας με βάση το παραπάνω επιχείρημα. Ας αφήσουμε τον Dürr απαντήσει, όπως το κάνει σε ένα πρόσφατο άρθρο <sup>19</sup>:

Πολλοί υποστηρικτές των ιδεών του Bohm έχουν συμφιλιωθεί με την ιδέα ότι οι σχετικιστικές θεωρίες του Bohm θα είναι σχετικιστικές μόνο στο σχετικά επιφανειακό επίπεδο των εμπειρικών προβλέψεων: οι θεωρίες θα κάνουν σχετικιστικά καλές προβλέψεις (περιλαμβάνοντας, για παράδειγμα, το σωστό είδος πρόβλεψης για το πείραμα Michelson-Morley) αλλά θα εμπλέκουν κάτι σαν μια κρυμμένη, εμπειρικά μη ανιχνεύσιμη έννοια απόλυτου ταυτόχρονου. Αυτές οι θεωρίες, είναι συχνά παραδεκτό, είναι σχετικιστικές μόνο με τον τρόπο που η θεωρία του αιθέρα των Lorentz-Fitzgerald είναι σχετικιστική -συγκεκριμένα, δεν είναι σχετικιστικές όχι με ένα σοβαρό και θεμελιώδη τρόπο.

### 2.8.3 Εισαγωγή προνομιακού συστήματος αναφοράς

Σε σύστημα πολλών σωματιδίων, όπως αναλύθηκε και στην προηγούμενη ενότητα υπάρχουν μη τοπικές συσχετίσεις και άρα η μηχανική του Bohm δεν είναι σχετικιστικά αναλλοίωτη κατά Lorentz. Προκύπτει έτσι η ύπαρξη ενός συστήματος αναφοράς στο οποίο αυτές οι συσχετίσεις είναι ακαριαίες. Υπάρχει δηλαδή ένα προνομιακό σύστημα αναφοράς και αυτό το στοιχείο είναι πολύ βασικό για την ερμηνευτική προσέγγιση του Bohm.

Η συμπεριφορά αυτών των συσχετίσεων σε άλλα συστήματα αναφοράς λαμβάνεται μετασχηματίζοντας τα αποτελέσματα τους από αυτό το προνομιακό σύστημα αναφοράς, στο οποίο αυτές οι συσχετίσεις είναι ακαριαίες, στα ζητούμενα συστήματα. Αν και στο κβαντικό επίπεδο απαιτείται η ύπαρξη ενός προνομιακού συστήματος, όλα τα στατιστικά αποτελέσματα της κβαντικής θεωρίας για τα φυσικά μεγέθη θα παραμένουν συναλλοίωτα.

Ως προς το διάνυσμα κατάστασης, δεν είναι ισοδύναμα όλα τα Lorentz συστήματα αναφοράς παρόλο που οι προβλέψεις για τα παρατηρούμενα μεγέθη είναι. Η κυματοσυνάρτηση η ίδια δεν είναι αναλλοίωτη και εαν θεωρηθεί ότι αυτή αναπαριστά μια φυσική πραγματικό-

---

<sup>19</sup>Dürr (2013) σ. 2

τητα, τότε τα συστήματα Lorentz δεν είναι ισοδύναμα όσον αφορά τις μεμονωμένες διαδικασίες. Η δυναμική που καθορίζει την κίνηση ενός σωματιδίου εξαρτάται από την κυματοσυνάρτηση με έναν μη τοπικό τρόπο. Όπως αναφέρει και ο James Cushing<sup>20</sup> παρόλο που υπάρχει ένα μοναδικό αλλά πειραματικά μη διακριτό σύστημα αναφοράς όπου οι συσχετίσεις είναι ακαριαίες, οι στατιστικοί νόμοι είναι συναλλοίωτοι καθώς όλες οι προβλέψεις περιλαμβάνουν κλασικές μετρητικές συσκευές. Αφού το συναλλοίωτο ως προς Lorentz σπάει στο επίπεδο των μεμονωμένων διαδικασιών, στιγμιαία σήματα μπορούν να υπάρξουν μόνο σε αυτό το επίπεδο, και όχι στο στατιστικό, και το αναλλοίωτο μπορεί να είναι μια συμμετρία που μπορεί να υπάρχει μόνο στα πλαίσια της υπόθεσης της κβαντικής ισορροπίας. Υπό αυτό το πρίσμα ο Valentini<sup>21</sup> καταλήγει ότι το αναλλοίωτο ως προς Lorentz είναι περισσότερο κάτι που συμβαίνει στο πλαίσιο της κβαντικής ισορροπίας παρά είναι θεμελιώδης νόμος της φύσης.

Για τον Bohm η εισαγωγή ενός τέτοιου προνομιακού συστήματος αναφοράς δεν είναι παράξενη, αλλά αντίθετα είναι συνεπής και αποτελεί κάτι που απαντά συχνά στην εξέλιξη τη φυσικής επιστήμης, όσον αφορά τον τρόπο εισαγωγής νέων επιπέδων πραγματικότητας - όπως συνέβη με το ατομικό επίπεδο, για να εξηγηθούν παλαιότερα επίπεδα πραγματικότητας, αυτά της συνεχούς ύλης, σε μια νέα ποιοτική βάση (Bohm, Hiley 1993).

Κατά τον Bohm ο περιορισμός που τίθεται για την ταχύτητα του φωτός και το ανώτατο αυτό όριο της μπορεί να μην έχει καθολική ισχύ και ενδεχομένως να εξαρτάται και από το πεδίο  $\psi$ . Εκεί λοιπόν που οι παραδοχές που κάνουν την θεωρία συμβατή με τη συνήθη ερμηνεία καταρρίπτονται μπορεί και η ειδική θεωρία της σχετικότητας να καταρρίπτεται, κρατώντας όμως όπως επισημαίνει ο Bohm το πνεύμα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας.<sup>22</sup>

## 2.9 Συμπεράσματα

Η ανάλυση που προηγήθηκε σε αυτό το κεφάλαιο ήταν μια σύντομη παρουσίαση της ερμηνείας του Bohm στην κβαντομηχανική. Η ερμηνεία αυτή έχει ουσιαστικά την αφετηρία της στις επεξεργασίες του De Broglie και τη διπλή λύση. Προτάθηκε το 1952 και αποτέλεσε

---

<sup>20</sup>Cushing (1996)

<sup>21</sup>Valentini (1991)

<sup>22</sup>Bohm (1952a) σ. 187

μια ολοκληρωμένη προσπάθεια απάντησης στην ορθόδοξη ερμηνεία από ρεαλιστική σκοπιά που στον πυρήνα της είχε την αποκατάσταση της αιτιοκρατίας στην κβαντική μηχανική. Χαρακτηρίζεται από τους ίδιους τους εισηγητές της *αιτιακή* ή *οντολογική* ερμηνεία, με το βάρος να μετατοπίζεται στην οντολογική πλευρά σε μεταγενέστερα έργα, με χαρακτηριστικότερο το *The Undivided universe* (1993) των Bohm και Hiley όπου εκτός από την περιγραφή της θεωρίας (όπως αυτή είχε αρχικά προταθεί) υπάρχει και μια στοχαστική προσέγγιση του ζητήματος.

Η θεωρία του Bohm οδηγεί στις ίδιες προβλέψεις με την κβαντομηχανική εάν θεωρηθεί ότι ισχύει η κβαντική ισορροπία ότι δηλαδή  $P(\mathbf{x}, t) = |\Psi(\mathbf{x}, t)|^2$  - συνθήκη που αποδεικνύεται ότι εάν ισχύει για μια χρονική στιγμή θα ισχύει και για τις μεταγενέστερες. Δοθέντος ότι ισχύει η κβαντική ισορροπία, η θεωρία του Bohm δεν μπορεί να διακριθεί από την κβαντική μηχανική με τη συνήθη ερμηνεία της.

Η ερμηνεία του Bohm, είναι μια αιτιοκρατική ερμηνεία όπου τα μικροσκοπικά σωματίδια, όπως τα ηλεκτρόνια ακολουθούν σαφώς καθορισμένες τροχιές μέσα στο χωροχρόνο. Ωστόσο λόγω της επίδρασης του κβαντικού δυναμικού αυτές οι τροχιές είναι πολύ ευαίσθητες στις αρχικές συνθήκες. Στην ερμηνεία του Bohm δεν υπάρχει κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης κατά την παρατήρηση ούτε και αυταρχία. Οι σχέσεις αβεβαιότητας του Heisenberg αποτελούν περιορισμούς στην ακρίβεια των μετρήσεων μας, λόγω της επίδρασης του κβαντικού δυναμικού. Έτσι προκύπτουν και οι στατιστικές προβλέψεις της επίσημης κβαντομηχανικής.

Ένα από τα κύρια στοιχεία στα οποία δέχεται κριτική η μηχανική του Bohm είναι ότι εισάγει ένα περίπλοκο φορμαλισμό, στον οποίο κεντρικό ρόλο παίζει το κβαντικό δυναμικό, και τα στοιχεία αυτού δεν μπορούν ούτε να επιβεβαιωθούν, ούτε όμως και να απορριφθούν πειραματικά. Στην ερμηνεία του Bohm όλα τα μεγέθη εκτός της θέσης είναι πλαισιακά. Τίθεται, λοιπόν, ως κυρίαρχος ο ρόλος της αλληλεπίδρασης του συστήματος με την μετρητική συσκευή, με τρόπο όμως που διαφέρει από το μη αναλύσιμο όλο του Bohm. Ως συνέπεια αυτού, η ερμηνεία δεν έρχεται σε αντίθεση με το θεώρημα Kochen-Specker.

Τέλος η ερμηνεία του Bohm είναι διακηρυγμένα μη τοπική και αυτό είναι το βασικό στοιχείο πάνω στο οποίο δέχεται σκληρή κριτική. Εισάγει την ύπαρξη προνομιακού συστήματος αναφοράς όπου οι αλληλεπιδράσεις είναι ακαριαίες. Ενώ εμπειρικά δεν αντίκειται με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, για τα μεμονωμένα συστήματα δεν είναι αναλλοίωτη κατά

Lorentz.

Είδαμε βέβαια ότι το θέμα της αιτιότητας και της τοπικότητας τίθεται συνολικά για την κβαντομηχανική και όχι μόνο για την ερμηνεία του Bohm. Τις φιλοσοφικές προεκτάσεις αυτής της ερμηνείας θα τις αναλύσουμε περισσότερο στο επόμενο κεφάλαιο της παρούσας εργασίας.

## Κεφάλαιο 3

# Φιλοσοφικές προεκτάσεις της ερμηνείας του Bohm

### 3.1 Οντολογική ερμηνεία και ρεαλισμός

Μια απόπειρα οντολογικής ερμηνείας μιας φυσικής θεωρίας περιλαμβάνει δυο στάδια.<sup>1</sup> Το πρώτο είναι η έρευνα των θεμελίων της φυσικής θεωρίας, δηλαδή η διασάφηση των εννοιολογικών δομών με τις οποίες συγκροτείται η θεωρία και το δεύτερο έχει σημασιολογικό χαρακτήρα, με στόχο την περιγραφή των κόσμων που είναι φυσικώς δυνατοί σύμφωνα με τη φυσική αυτή θεωρία. Τέλος η προσπάθεια ολοκληρώνεται με την ένταξη της φυσικής θεωρίας σε ένα ευρύτερο κατηγορικό πλαίσιο, σε ένα πλαίσιο που εντάσσονται οι οντότητες και οι σχέσεις μεταξύ τους όπως απαντώνται στους φυσικώς δυνατούς κόσμους. Ωστόσο οι αναζητήσεις των οντολογικών ερμηνειών ακολουθούν διαφορετικούς δρόμους που εξαρτώνται εν μέρει και από τη συνολική αντίληψη της επιστήμης που υιοθετεί κανείς.

Πριν συνεχίσουμε την ανάλυση πάνω στις οντολογικές ερμηνείες καθώς και στο πως αυτές κρίνονται είναι αναγκαίο να διερευνήσουμε την έννοια του επιστημονικού ρεαλισμού. Θα μπορούσε κανείς να διακρίνει τρεις θέσεις ως κύριες συνιστώσες του επιστημονικού ρεαλισμού.<sup>2</sup> Καθεμιά από αυτές επιδιώκει να διακρίνει το ρεαλισμό από μια συγκεκριμένη μη

---

<sup>1</sup>Αραγεώργης (2005)

<sup>2</sup>Στάθης Ψύλλος (2008)

ρεαλιστική προσέγγιση.

*Μεταφυσική θέση:* Ο κόσμος έχει μια καθορισμένη και ανεξάρτητη από το νου δομή.

*Σημασιολογική θέση:* Οι επιστημονικές προτάσεις πρέπει να κατανοούνται κυριολεκτικά. Είναι περιγραφές ενός προσδιορισμένου γνωστικού πεδίου τόσο παρατηρήσιμου όσο και μη παρατηρήσιμου και μπορούν να λάβουν αληθοτιμές. Ως εκ τούτου μπορούν να είναι αληθείς ή ψευδείς. Αν οι επιστημονικές θεωρίες είναι αληθείς τότε οι μη παρατηρήσιμες οντότητες που θέτουν κατοικούν τον κόσμο.

*Γνωσιακή θέση:* Οι ώριμες και επιτυχημένες στις προβλέψεις τους επιστημονικές θεωρίες είναι καλά επικυρωμένες και προσεγγιστικώς αληθείς για τον κόσμο. Επομένως οι οντότητες που αυτές θέτουν, ή εν πάση περιπτώσει οντότητες οι οποίες είναι παρεμφερείς με εκείνες που θέτουν, κατοικούν τον κόσμο.

Η πρώτη θέση διακρίνει τον επιστημονικό ρεαλισμό από αντι-ρεαλιστικές θεωρήσεις της επιστήμης είτε πρόκειται για παραδοσιακές ιδεαλιστικές και φαινομεναλιστικές θεωρήσεις είτε για πιο σύγχρονες επαληθευσιοκρατικές θεωρήσεις. Υπαινίσσεται ότι αν τα μη παρατηρήσιμα φυσικά είδη που τίθενται από τις θεωρίες όντως υφίστανται, τότε αυτά υπάρχουν ανεξάρτητα από την ικανότητα μας να μπορούμε να τα γνωρίσουμε, επαληθεύσουμε, αναγνωρίσουμε κλπ.

Η δεύτερη θέση διακρίνει τον επιστημονικό ρεαλισμό από εργαλειοκρατικές και αναγωγιστικές θεωρήσεις. Για την εργαλειοκρατία οι θεωρητικές προτάσεις είναι συντακτικο - μαθηματικές κατασκευές που δεν έχουν τιμές αληθείας. Από την άλλη ο αναγωγιστικός εμπειρισμός είναι συμβατός με το ότι οι θεωρητικές προτάσεις έχουν τιμές αληθείας αλλά τις κατανοεί αναγωγιστικά μέσω ενός παρατηρησιακού λεξιλογίου. Αντίθετα ο επιστημονικός ρεαλισμός υποστηρίζει ότι μια επιστημονική θεωρία επιδέχεται κυριολεκτική ερμηνεία σύμφωνα με την οποία ο κόσμος κατοικείται από ένα πλήθος μη παρατηρήσιμων οντοτήτων και διαδικασιών. Σύμφωνα με τον Στάθη Ψύλλο,<sup>3</sup> ο σημασιολογικός ρεαλισμός δεν διακυβεύεται πλέον. Ο θεωρητικός λόγος θεωρείται μη αναγώγιμος και δηλωτικός (έχει περιεχόμενο δηλαδή), από όλες τις πλευρές που λαμβάνουν μέρος στη σύγχρονη διαμάχη.

Η τρίτη θέση διακρίνει τον επιστημονικό ρεαλισμό από αγνωστικιστικές ή σκεπτικιστι-

---

<sup>3</sup>Στάθης Ψύλλος (2008) σ.39.

κές εκδοχές του εμπειρισμού. Η ουσία της είναι ότι η επιστήμη μπορεί να οδηγεί στην ανεύρεση της αλήθειας όσον αφορά τις παρατηρήσιμες και τις μη παρατηρήσιμες οντότητες.

Με βάση όσα προαναφέρθηκαν μπορεί να συναχθεί ότι η αποδοχή της θέσης ότι η γλώσσα μιας φυσικής θεωρίας επιδέχεται κυριολεκτική ερμηνεία, νομιμοποιεί το αίτημα οντολογικής ερμηνείας χωρίς να δεσμεύει περισσότερο σε κάποια εκδοχή του επιστημονικού ρεαλισμού και αυτό γιατί έρχεται σε ευθεία αντιπαράθεση μόνο με τη δεύτερη θέση. Μπορεί έτσι να συμφωνήσει κανείς ότι οι φυσικές θεωρίες αναλαμβάνουν οντολογικές δεσμεύσεις, αλλά να αρνηθεί ότι οι φυσικές θεωρίες είναι αληθείς, έστω και κατά προσέγγιση, ή ότι έχουμε λόγους να πιστεύουμε στην αλήθεια τέτοιων θεωριών ακόμα και αν είναι εμπειρικά επαρκείς.

Στις φυσικές θεωρίες ενυπάρχουν πρότερες οντολογικές δεσμεύσεις και αυτό καθιστά δύσκολη την κρίση της φυσικής θεωρίας, των αντίστοιχων ερμηνειών καθώς και της εικόνας που αυτές δίνουν για τον κόσμο. Τίθεται έτσι το ερώτημα : πώς αξιολογούνται οι διάφορες οντολογικές ερμηνείες για μια φυσική θεωρία; Τα κριτήρια με τα οποία γίνεται αυτό μπορούν να ταξινομηθούν σε *εσωτερικά* και *εξωτερικά*<sup>4</sup>. Τα εσωτερικά κριτήρια έχουν να κάνουν με την εσωτερική συνοχή της προτεινόμενης ερμηνείας (όχι μόνο με τη μορφή της λογικής συνέπειας, αλλά και με την έννοια της αλληλουποστηριξιμότητας των διάφορων θέσεων και της οντολογικής οικονομίας), την εμπειρική επάρκεια, τη μαθηματική αυστηρότητα κλπ. Από την άλλη μεριά τα εξωτερικά κριτήρια είναι αυτά που αφορούν τη σχέση της ερμηνείας με άλλες φυσικές θεωρίες και την συμβατότητα ή όχι με αυτές καθώς και τις προϋποθέσεις μιας τέτοιας συμβατότητας.

Πρέπει εδώ να τονιστεί ότι η ενδεχόμενη ύπαρξη παραπάνω της μιας οντολογικής ερμηνείας για μια φυσική θεωρία δεν υπονομεύει τον ρεαλισμό. Ο επιστημονικός ρεαλισμός δεν επιβάλλει την ύπαρξη μιας μοναδικής αληθινής οντολογίας. Επιτρέπει δυο ή περισσότερες καθολικές και αληθείς οντολογίες εφόσον είναι ισοδύναμες με την έννοια ότι οι οντότητες της μιας συγκροτούνται αιτιακά από εκείνες της άλλης.

---

<sup>4</sup>Αραγεώργης (2005).



## 3.2 Ρεαλισμός και κβαντική μηχανική

Η ερμηνεία του Bohm εντάσσεται στο ρεαλιστικό ρεύμα. Το ρεύμα αυτό δεν είναι ομογενές φιλοσοφικά αλλά έχει ως κοινό παρονομαστή τον ρεαλισμό και αντιτίθεται σχεδόν στο σύνολο των θέσεων της Σχολής της Κοπεγχάγης. Αντίθετα με εκείνη, δέχεται την ύπαρξη μιας πραγματικότητας η οποία είναι ανεξάρτητη από τα όργανα της μέτρησης και από τη συνείδηση του παρατηρητή και η οποία είναι το αντικείμενο της ερευνητικής δραστηριότητας. Για το ρεαλιστικό ρεύμα, υπάρχουν μικροφυσικά συστήματα αντικειμενικά, τα οποία κατέχουν αντικειμενικές ιδιότητες ανεξάρτητες από την πράξη της μέτρησης.

Η οντολογική αυτή αντικειμενικότητα αποτελεί το θεμέλιο της γνωσιολογικής, της δυνατότητας δηλαδή για ανακάλυψη ιδιοτήτων και νόμων που εκφράζουν σε κάποιο βαθμό σωστά τη μικροφυσική πραγματικότητα. Για το ρεαλιστικό ρεύμα ο ρόλος της κβαντικής μηχανικής δεν μπορεί να περιορίζεται στην καταγραφή δεδομένων και στην διατύπωση τυπικών σχέσεων ανάμεσα τους. Η κβαντική μηχανική δεν είναι μόνο φορμαλισμός, είναι μια επιστημονική θεωρία που αφορά το πραγματικό, θεωρούμενο σε ένα ορισμένο επίπεδο οργάνωσης του.<sup>5</sup> Εν γένει αυτό το ρεύμα θεωρεί τη μέτρηση αντικειμενική διαδικασία, ως αλληλεπίδραση ανάμεσα σε φυσικά συστήματα, και απορρίπτει τον "υποκειμενισμό" που συνδέεται με την ορθόδοξη σχολή σε ότι αφορά τον παρατηρητή και την ανυπαρξία ιδιοτήτων ανεξάρτητων από το όργανο μέτρησης.

Η ορθόδοξη ερμηνεία έθεσε σε αμφισβήτηση την ίδια την πραγματικότητα στο επίπεδο της μικροφυσικής. Χωρίς να είναι ομοιογενής, στο πλαίσιο της αναπτύχθηκε τόσο μια γνωστικιστική θέση ότι δεν μπορεί κανείς να αποφανθεί για την πραγματικότητα πριν από τη μέτρηση όσο και μια πιο ακραία θέση ότι το κβαντικό σύστημα δεν έχει ύπαρξη ανεξάρτητη από το όργανο μέτρησης ή τον παρατηρητή.

Οι μικροφυσικές οντότητες μπορεί να τροποποιούνται ή να μετασχηματίζονται ποιοτικά από τη μέτρηση, αλλά αυτή η αλληλεπίδραση ανάμεσα στο κβαντικό σύστημα και το όργανο μέτρησης δεν έχει σχέση με την θέση της ορθόδοξης ερμηνείας. Αντίθετα προϋποθέτει την αντικειμενική ύπαρξη του κβαντικού συστήματος και λαμβάνει υπόψιν τις ποικίλες δυναμι-

---

<sup>5</sup>Μπιτσάκης Ε. ([1980] 1987)

κότητες του που εκφράζονται στις συγκεκριμένες συνθήκες.

Απέναντι στη σχολή της Κοπεγχάγης, όπως φάνηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, αντιτάχθηκαν πολλοί φυσικοί και αυτή η διαμάχη συνεχίζεται με αμείωτη ένταση. Η αντίληψη για την πραγματικότητα και ο ρεαλισμός είναι από τα κομβικά σημεία αυτής της αντιπαράθεσης. Είναι χαρακτηριστική η τοποθέτηση του Bohm (Bohm 1984), ότι υπάρχουν εναλλακτικές θεωρίες που παρέχουν την δυνατότητα να δείξουμε ότι τα κβαντομηχανικά φαινόμενα προκύπτουν από ένα αντικειμενικά πραγματικό υπόστρωμα συνεχούς κίνησης η οποία υπάρχει σε ένα χαμηλότερο επίπεδο και ικανοποιεί νέους νόμους, τέτοιους ώστε να οδηγούν σε αυτούς της σημερινής κβαντικής ως προσεγγίσεις ικανοποιητικές μόνο στο λεγόμενο κβαντομηχανικό επίπεδο. Ο στατιστικός χαρακτήρας της τρέχουσας κβαντικής πηγάζει, κατά τον Bohm από τις τυχαίες διακυμάνσεις νέων ειδών οντοτήτων, που υπάρχουν στο βαθύτερο επίπεδο.

Κάνοντας εδώ μια πολύ σύντομη ιστορική ανασκόπηση στη διατύπωση των εναλλακτικών αυτών ερμηνειών πρέπει να σταθεί κανείς στις επεξεργασίες του De Broglie και του Madelung στη δεκαετία του 1930, μετά στις αντίστοιχες των Blokhinzhev και Terletzky στη δεκαετία του 1950. Αυτοί υποστήριξαν ότι δεν είναι αναγκαίο να αποδεχτεί κανείς την ερμηνεία του Bohr και του Heisenberg και ότι η υπάρχουσα θεωρία παρέχει μια στατιστική αντιμετώπιση, η οποία θα συμπληρωθεί με μια λεπτομερή θεωρία που θα επιτρέπει πληρέστερη διαπραγμάτευση της συμπεριφοράς των μεμονωμένων συστημάτων. Δεν πρότειναν όμως ειδικές θεωρίες ή μοντέλα. Στη συνέχεια, το 1952 όπως είδαμε, εισάγεται η ερμηνεία του Bohm που αποτελεί ολοκληρωμένη διατύπωση εναλλακτικής θεωρίας ενώ η ιστορία συνεχίζεται με τους Vigier, Takabayasi, Fenyés και Weisel.<sup>6</sup>

Έχει ήδη αναφερθεί και προηγούμενα ότι οι Bohm και Hiley σε μεταγενέστερο έργο τους (Bohm και Hiley 1993), χαρακτηρίζουν την ερμηνεία αυτή "οντολογική" σε αντιδιαστολή με δυο προηγούμενους όρους "ερμηνεία με όρους κρυμμένων μεταβλητών" όπως αρχικά είχε προταθεί και "αιτιακή ερμηνεία" που ήταν η συνήθης αναφορά της. Η επιλογή αυτή τεκμηριώνεται γιατί ο μεν όρος "κρυμμένη μεταβλητή" κρίνεται ατυχής (η θέση του συστήματος

---

<sup>6</sup>Η αναφορά εδώ γίνεται με βάση το βιβλίο Μπιτσάκης (1987). Στη βιβλιογραφία όμως υπάρχουν πολλά έργα που παρουσιάζουν εναλλακτικές προς την εκδοχή της Κοπεγχάγης προτάσεις για την κβαντομηχανική. Θα αναφερθούν εδώ ενδεικτικά J. Baggott (1992) και Cushing (1994)

είναι η κρυμμένη μεταβλητή), ο δε όρος "αιτιακός" προκρίνει την αιτιότητα σε σχέση με την οντολογία. Για τους συγγραφείς όμως η κβαντική μηχανική των Bohr και Heisenberg αφορά την γνώση μας για την πραγματικότητα - και ειδικότερα το πώς να προβλέψουμε και να ελέγξουμε αυτήν την πραγματικότητα τουλάχιστον όσο είναι δυνατόν - και λέει λίγα ή τίποτα για την πραγματικότητα καθ' εαυτή. Η ερμηνεία των Bohm και Hiley πρωτευόντως στοχεύει στο να δώσει μια οντολογική εικόνα του κβαντικού συστήματος.

### **3.3 Ντετερμινισμός και αιτιότητα**

Στο πλαίσιο αυτής της εργασίας θα κάνουμε μια προσπάθεια αδρής περιγραφής της έννοιας της αιτιοκρατίας και της αιτιότητας, όχι με τη μορφή αυστηρού ορισμού, και με βάση αυτή στη συνέχεια θα αναφερθούμε στην κβαντική μηχανική και στο πώς τίθεται εκεί το ζήτημα καθώς και στο πώς τοποθετείται η ερμηνεία του Bohm σε σχέση με την αιτιότητα. Ακόμα, όπως θα φανεί και στη συνέχεια, οι όροι της αναγκαιότητας και του τυχαίου επίσης χρήζουν αναφοράς και ανάλυσης καθώς και αυτές οι έννοιες εμπλέκονται στη κβαντική μηχανική και στη φυσική εν γένει. Οποιαδήποτε ανάλυση για την ερμηνεία του Bohm και τις φιλοσοφικές της προεκτάσεις οφείλει να διαλεχθεί με αυτές τις έννοιες που, όπως προαναφέρθηκε, δεν είναι μονοσήμαντα ορισμένες.

#### **3.3.1 Η έννοια της αιτιότητας**

Η αιτιακή γλώσσα των φυσικών θεωριών δεν φαίνεται να διασώζει ακέραια κάποια καθολική και μοναδική έννοια αιτιότητας όπως την αντιλαμβάνεται ο κοινός νους ή την επεξηγούν οι φιλόσοφοι.<sup>7</sup> Ακόμα σε πολλές περιπτώσεις θα μπορούσαν κάποιες αιτιακές εκφράσεις να εκλείπουν στις αντίστοιχες φυσικές θεωρίες. Το γεγονός της μη ύπαρξης καθολικά αποδεκτής άποψης για την αιτιότητα καθιστά αναγκαία τη, μερική τουλάχιστον, αποσαφήνιση της έννοιας της αιτιότητας πριν αναφερθεί κανείς στο πώς αναδύεται ως κεντρικό ζήτημα στη φυσική και με ιδιαίτερο τρόπο στην κβαντική μηχανική. Η έννοια αυτή προσεγγίζεται διαφορετικά από τα διάφορα φιλοσοφικά ρεύματα και αποτελεί συχνά σημείο διαμάχης και

---

<sup>7</sup>Αραγεώργης (2010)

αντιπαράθεσης τους.

Στη φύση παρατηρείται πως ένα φαινόμενο κάτω από ορισμένες συνθήκες γεννάει κάποιιο άλλο. Η σχέση αυτή δεν είναι απλά σχέση χρονικής διαδοχής. Η φυσική (και γενικότερα η επιστήμη) εξηγεί γιατί και πώς το πρώτο γεννάει το δεύτερο. Ανακαλύπτει δηλαδή μια γενετική και αναγκαία σχέση ανάμεσα στα δυο φαινόμενα. Αυτή τη σχέση την καλούμε "αιτιακή". Τα φαινόμενα που συνδέονται με αιτιακή σχέση τα καλούμε αντίστοιχα "αίτιο" και "αποτέλεσμα". Έκφραση των αιτιακών σχέσεων ανάμεσα στα φαινόμενα είναι ο νόμος.<sup>8</sup>

Είναι χαρακτηριστικό της μηχανιστικής σκέψης, κυρίως έτσι όπως αναπτύχθηκε τον 17ο αιώνα, ότι επιχειρεί να εξηγήσει όλα τα φαινόμενα με ένα είδος "γραμμικής" αιτιακής συσχέτισης<sup>9</sup>, κάτι που ισχύει κατά προσέγγιση για ορισμένες μόνο πλευρές των φαινομένων. Και τούτο γιατί η μηχανιστική σκέψη δεν λαμβάνει υπόψιν τον αμοιβαίο καθορισμό και τη συνθετότητα των φαινομένων, όπου λαμβάνουν χώρα και ποσοτικές και ποιοτικές αλλαγές.

Υπό αυτό το πρίσμα η "γραμμική" αιτιακή συσχέτιση εντάσσεται μέσα στην αλληλεπίδραση και τον αμοιβαίο καθορισμό που την περιέχουν αλλά και την υπερβαίνουν. Η αλληλεπίδραση αποκτά περιεχόμενο μέσα στη διαρκή κίνηση και εξέλιξη των φαινομένων όπου τίποτα δεν γεννιέται από το τίποτα και τίποτα δεν καταλήγει στο τίποτα. Η αιτία και το αποτέλεσμα είναι στιγμές της καθολικής αλληλεξάρτησης, που την εκφράζουν με ατελή και συχνά μονοσήμαντο τρόπο. Η αλληλεπίδραση είναι γενικότερη κατηγορία, της οποίας όψη είναι η αιτιότητα και η αναγκαιότητα.<sup>10</sup>

Χωρίς την πρόθεση εκτεταμένης ανάλυσης του θέματος, κάτι που κρίνεται ότι είναι έξω από τα πλαίσια της παρούσας εργασίας, θα επιχειρήσουμε επιγραμματικά μια ενδεικτική αναφορά πάνω στο πώς διάφορα ρεύματα αντιμετωπίζουν την αιτιότητα. Ο κλασικός εμπειρισμός απορρίπτει την αιτιότητα ανάγοντάς την σε συνήθη για τον άνθρωπο αλληλουχία αισθημάτων και θεωρεί ότι ο αιτιακός νόμος περιγράφει μια κανονικότητα και τίποτα περισσότερο (Hume). Ο υπερβατολογικός ιδεαλισμός θεωρεί την αιτιότητα προεμπειρική κατηγορία μέσω της οποίας το υποκείμενο τακτοποιεί τον χαώδη κόσμο των φαινομένων (Kant). Ο Russell σε

---

<sup>8</sup>Μπιτσάκης Ε.([1965] 1975)

<sup>9</sup>Αναφερόμαστε εδώ στην αιτιοκρατική-μηχανιστική παράδοση σε ό,τι αφορά την επιστημονική εξήγηση. Για περαιτέρω ανάλυση βλ. Salmon ([1992] 1998) σ.40

<sup>10</sup>Μπιτσάκης Ε. ([1973] 2001)

πρώιμα κείμενά του υποστήριξε ότι η έννοια της αιτιότητας ήταν "ασυνάρτητη" και χαρακτηριστικά έγραψε: " Ο νόμος της αιτιότητας, πιστεύω, όπως πολλά από όσα ικανοποιούν τους φιλοσόφους είναι ένα λείψανο μιας περασμένης εποχής που επιβιώνει όπως η μοναρχία, μόνο επειδή λανθασμένα θεωρείται ότι δεν κάνει κακό."<sup>11</sup> Τον σκεπτικισμό για την έννοια της αιτιότητας τον κληρονόμησε το κίνημα του Λογικού Θετικισμού.

Ο Popper παίρνει μια πιο αγνωστικιστική θέση γύρω από την αιτιότητα. "Δεν αποδέχομαι και δεν απορρίπτω την αρχή της αιτιότητας. Θα περιοριστώ απλώς να την αποκλείσω ως 'μεταφυσική' από τη σφαίρα της επιστήμης".<sup>12</sup> Ο αντικειμενικός ιδεαλισμός παραδέχεται την ύπαρξη ανεξάρτητης από το υποκείμενο αιτιότητας ως εκδήλωση του πνεύματος, της απόλυτης ιδέας (Χέγκελ). Κατά τον διαλεκτικό υλισμό η νόηση μέσα από τη διαλεκτική της ανάπτυξης αποκαλύπτει διαρκώς την αιτιότητα που διέπει την αντικειμενική πραγματικότητα.

Η ιστορία της φιλοσοφίας σημαδεύεται και από δυο αντίθετες απόψεις για τον φυσικό νόμο. Από τη μια είναι η τυπική άποψη που θεωρεί τους νόμους βολικές σχέσεις για περιγραφή και πρόβλεψη που δεν απαιτείται να διαθέτουν αντίστοιχο στη φύση. Αυτή η θέση χαρακτηρίζει το αγνωστικιστικό και θετικιστικό ρεύμα. Για τον υλισμό ο νόμος είναι η αντανάκλαση των σχέσεων του πραγματικού στη συνείδηση γιατί η συνείδηση είναι προϊόν του κόσμου και όχι το αντίστροφο. Ο νόμος είναι έκφραση του φαινομένου, αλλά δεν αγκαλιάζει όλο τον πλούτο του.

Αυτό συμβαίνει γιατί ο νόμος είναι προϊόν αφαιρετικής διαδικασίας κατά την οποία απομονώνουμε και συλλαμβάνουμε το ουσιαστικό, παραμερίζοντας τις δευτερεύουσες πλευρές, που όμως καθιστούν την ιδιομορφία του. Ωστόσο αυτή η αφαίρεση είναι απαραίτητη για την κατάκτηση της γνώσης. Με αδιάκοπες αφαιρέσεις από το ειδικό στο γενικό συλλαμβάνεται το κοινό μέσα στην πολυμορφία των πραγμάτων. Η πορεία αυτή όμως μπορεί να οδηγήσει σε μηχανιστικές απλουστεύσεις στην προσπάθεια να περιλάβουμε σε μια ποσοτική σχέση, σχέσεις ποιοτικά διαφορετικές. Έτσι μπορεί κανείς έτσι να παραγνωρίσει την οργάνωση της φύσης σε διαφορετικά ποιοτικά επίπεδα (Μπιτσάκης [1965] 1975).

---

<sup>11</sup>Russell (1917).

<sup>12</sup>Popper (1934) σ. 61.

### 3.3.2 Ντετερμινισμός και Ιντετερμινισμός

*Ντετερμινισμός ή αιτιοκρατία* είναι η φιλοσοφική θέση σύμφωνα με την οποία τα φαινόμενα καθορίζονται με ορισμένο τρόπο από τις αιτίες τους. Παραδέχεται δηλαδή την ύπαρξη της αιτιότητας, την καθολική αιτιώδη και νομοτελειακή συνάφεια των φαινομένων. Το ευθέως αντίθετο της αιτιοκρατίας είναι ο *ιντετερμινισμός*. Ο ιντετερμινισμός δεν αποκλείει υποχρεωτικά την αιτιότητα αλλά είναι η αντίθεση της αιτιοκρατίας. Αν δηλαδή δεχτεί κανείς ότι τα φαινόμενα δεν προσδιορίζονται από τις αιτίες τους ή ότι δεν έχουν αιτίες τότε δέχεται την αρχή του ιντετερμινισμού.

Οι Γάλλοι υλιστές, ο Νεύτων, ο Descartes κλπ προσέδωσαν στην αιτιοκρατία έναν μηχανιστικό χαρακτήρα με την απολυτοποίηση της μορφής της (η οποία περιγράφεται από τους αυστηρά δυναμικούς όρους της μηχανικής). Συνεπώς, ταύτισαν την αιτιοκρατία με την αναγκαιότητα, απορρίπτοντας έτσι τον αντικειμενικό χαρακτήρα του τυχαίου. Κατά τον ντετερμινισμό του Laplace η γνώση των συντεταγμένων και της κινητικής κατάστασης όλων του σωμάτων σε μια στιγμή επιτρέπει την γνώση της κατάστασης του σε μια μελλοντική ή μια παρελθοντική στιγμή (μονοσήμαντος καθορισμός).

Αυστηρότερα ο Earman <sup>13</sup> ορίζει ότι ένας φυσικώς δυνατός κόσμος  $W$  είναι *ντετερμινιστικός κατά Laplace* ακριβώς στην περίπτωση που για κάθε φυσικώς δυνατό κόσμο  $W'$  αν οι  $W$  και  $W'$  συμφωνούν (ως προς όλες τις συναφείς φυσικές ιδιότητες) σε μια χρονική στιγμή τότε θα συμφωνούν σε όλες τις χρονικές στιγμές.

### 3.3.3 Αιτιότητα και αιτιοκρατία στην κλασική και κβαντική φυσική: Η μηχανιστική αντίληψη, η θετικιστική άρνηση.

Για τη μηχανιστική αντίληψη η αρχή της αιτιότητας είναι ένα από τα θεμέλια της κλασικής φυσικής. Οι εξισώσεις της είναι αιτιοκρατικές, και οι τυπικοί νόμοι της είναι νόμοι μηχανικοί ή δυναμικοί. Γνωρίζοντας την αιτία, μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα το αποτέλεσμα. Ο χαρακτήρας αυτής της επιστήμης έχει επίσης συμβάλει αποφασιστικά στη διαμόρφωση της κλασικής αντίληψης της αιτιοκρατίας. Από τέτοια αιτία, τέτοιο αποτέλε-

---

<sup>13</sup>Earman (1986) σ.13

σμα. Πρόκειται όμως για μηχανιστική αντίληψη, και αυτό για δύο λόγους κυρίως<sup>14</sup>. Υπάρχει καταρχήν μια γραμμική αντίληψη των σχέσεων αιτίας - αποτελέσματος και μια απόλυτη αιτιοκρατία, η οποία αποκλείει την πολλαπλότητα των δυνατοτήτων που μπορεί να περικλείει ένα δοσμένο σύστημα. Δεύτερον, κάθε κίνηση θεωρείται κίνηση μηχανική και με αυτόν τον τρόπο περιορίζεται ο πλούτος του σύμπαντος σε ένα τεράστιο μηχανισμό από μάζες και ενέργεια. Οι ποιοτικές μεταβολές είναι ασυμβίβαστες με αυτό το σχήμα. Η οντολογική αυτή πλευρά του μηχανιστικού ντετερμινισμού συνδέεται οργανικά και με τη γνωσιολογική πλευρά, όπου η επιστήμη με γραμμικό τρόπο εξελίσσεται και τελειοποιεί το οικοδόμημα της.

Η κβαντική μηχανική στάθηκε, όπως παρουσιάστηκε και στα προηγούμενα κεφάλαια, το αφετηριακό σημείο για ένα κύμα αντιλήψεων που εμπεριέχουν το στοιχείο της αυταρχίας και οι οποίες τράφηκαν κυρίως από δύο βασικά χαρακτηριστικά της θεωρίας: τον πιθανοκρατικό χαρακτήρα της και τις σχέσεις αβεβαιότητας του Heisenberg - δύο χαρακτηριστικά οργανικά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Έτσι ο von Neumann γράφει: "η κβαντική μηχανική βρίσκεται σε λογική αντίφαση με την αιτιότητα[.] Θα μπορούσαμε να πούμε ότι δεν υπάρχει ευκαιρία ή λόγος να μιλάμε, για την ώρα, για αιτιότητα στη φύση γιατί δεν υπάρχει πείραμα που να υποδηλώνει την παρουσία της"<sup>15</sup>. Η άποψη αυτή του von Neumann είναι μετριοπαθής σε σχέση με άλλες που διαμορφώθηκαν μέσα στη Σχολή της Κοπεγχάγης. Ο Max Born χαρακτηρίζει την αιτιότητα "μύθο". Αντίστοιχα ο Heisenberg γράφει: "Ο νόμος της αιτιότητας δεν εφαρμόζεται πια στην κβαντική μηχανική και ο νόμος της διατήρησης της ύλης δεν είναι πια αληθινός για τα στοιχειώδη σωματίδια".<sup>16</sup> Σε ένα άλλο απόσπασμα λίγο παρακάτω συμπυκνώνεται η θέση του για την αιτιότητα:

Η χρήση αυτών των εννοιών, συμπεριλαμβάνοντας σε αυτές τον χώρο, τον χρόνο και την αιτιότητα είναι πραγματικά ο όρος για να παρατηρήσουμε φαινόμενα ατομικά και έτσι είναι a priori μέσα σε αυτό το νόημα του όρου. Αυτό που ο Kant δεν είχε προβλέψει είναι ότι αυτές οι a priori έννοιες μπορούσαν να είναι όροι της επιστήμης και ταυτόχρονα ότι δεν έχουν παρά μια περιορισμένη σημασία εφαρμογής.

Όταν κάνουμε ένα πείραμα μάς επιβάλλεται να θεωρήσουμε μια αιτιώδη αλυσίδα φαινομένων η οποία ξεκινώντας από το ατομικό φαινόμενο οδηγεί δια μέσω του μηχανισμού ως το μάτι του παρατηρητή, αν αρνούμαστε την ύπαρξη αυτής της αλυσίδας τίποτε δεν θα μπορούσε να γνωσθεί από το ατομικό φαινόμενο. Αλλά οφείλουμε οπωσδήποτε να διατηρήσουμε στο πνεύμα την έννοια

---

<sup>14</sup>Μπιτσάκης ([1973] 2001) σ. 211

<sup>15</sup>von Neumann (1955) σ. 327-328

<sup>16</sup>Heisenberg ([1958] 1971) σ. 80

ότι η κλασική φυσική και η αιτιότητα δεν έχουν παρά μια σημασία περιορισμένης εφαρμογής. Αυτό είναι το βασικό παράδοξο της κβαντικής θεωρίας που δεν μπορούσε να προβλεφθεί από τον Kant. Η σύγχρονη φυσική άλλαξε το αίτημα του Kant πάνω στη δυνατότητα συνθετικής κρίσης a priori και το έκανε να περάσει από την τάξη του μεταφυσικού αιτήματος στην τάξη του πρακτικού αιτήματος. Οι συνθετικές a priori κρίσεις έχουν λοιπόν τον χαρακτήρα μιας σχετικής αλήθειας<sup>17</sup>

Από την παραπάνω παρουσίαση του ζητήματος της αιτιότητας στη φύση και στις φυσικές θεωρίες γίνεται εμφανές ότι η κβαντική μηχανική μάς οδηγεί στο να ξεπεράσουμε την απλοϊκή γραμμική αντίληψη της αιτιότητας. Αντί όμως να οδηγηθούμε στην αυταρχία, και χωρίς να καταρρίψουμε την αιτιότητα, οφείλουμε να διαλεχθούμε με τις έννοιες του τυχαίου και της αναγκαιότητας.

### 3.3.4 Τυχαίο και αναγκαιότητα

Για την τυπική σκέψη, το τυχαίο και το αναγκαίο είναι αλληλοαποκλειόμενες κατηγορίες. Για τη διαλεκτική, το τυχαίο είναι η συνολική έκφραση πλήθους αναγκαιών καθορισμών και αντίστροφα το αναγκαίο μπορεί να είναι το συνολικό αποτέλεσμα πλήθους τυχαίων προσδιορισμών.<sup>18</sup> Έτσι το τυχαίο δεν είναι η απουσία αιτιότητας αλλά η απουσία αναγκαιότητας. Το τυχαίο είναι οντολογική και όχι γνωσιολογική κατηγορία, όπως και η αναγκαιότητα, πλευρά της αλληλεξάρτησης και του αμοιβαίου καθορισμού των φαινομένων. Δεν αποτελεί δηλαδή έκφραση άγνοιας αλλά εκφράζει μια αντικειμενική κατάσταση. Τόσο το τυχαίο όσο και το αναγκαίο υπάρχουν αντικειμενικά μέσα στην αλληλεπίδραση των πραγμάτων.

Η αλληλεπίδραση είναι μια κατηγορία ευρύτερη από την κατηγορία της αιτιότητας. Το ίδιο και οι νόμοι του τυχαίου είναι πιο γενικοί από τους δυναμικούς νόμους. Ο δυναμικός νόμος εκφράζει μια κατάσταση "καθαρή" απομονωμένη, αποκομμένη από το σύνολο των προσδιοριστικών της όρων. Οι πιθανοκρατικοί νόμοι της κβαντικής μηχανικής είναι το αποτέλεσμα του πλούτου των σχέσεων των κβαντικών οντοτήτων με το περιβάλλον τους, οι οποίες δεν καθορίζουν τη συμπεριφορά τους με μοναδικό τρόπο αλλά σύμφωνα με ένα μεγαλύτερο ή μικρότερο βαθμό δυνατοτήτων. Το γεγονός ότι ένα κβαντικό σύστημα μπορεί να περάσει, λόγω

---

<sup>17</sup>Heisenberg ([1958] 1971) σ. 81-82

<sup>18</sup>Μπιτσάκης ([1965] 1975)



κάποιας αλληλεπίδρασης σε διαφορετικές αλλά καθορισμένες καταστάσεις μπορεί να θεωρηθεί ως ένα γεγονός οφειλόμενο στις πολλαπλές δυνατότητες που κατέχει το σύστημα στις συνθήκες των πολύμορφων συνδέσεων του με το περιβάλλον. Έτσι αυτό που φαίνεται σαν αναίτιο τυχαίο είναι στην πραγματικότητα προϊόν συγκεκριμένων αιτιών και καθορισμένων συνθηκών. Το τυχαίο, δεν είναι η άρνηση της αιτιότητας, αλλά η έκφραση του πλούτου των προσδιορισμών του όντος μέσα στους όρους πραγματοποίησης του.

Το τυχαίο είναι το συνολικό αποτέλεσμα των αλληλεπιδράσεων και έχει ως έκφραση τον στατιστικό νόμο. Αυτό δεν σημαίνει πως μια στατιστική κατανομή δεν μπορεί να αναχθεί σε αιτιακές σχέσεις. Η πιθανότητα είναι μέτρο των δυνατοτήτων και όχι άγνοιας. Οι νόμοι του τυχαίου είναι αντικειμενικοί όπως και οι δυναμικοί νόμοι. Οι πιθανοκρατικοί νόμοι δεν είναι εξαντλητικοί, δηλαδή εκφράζουν μια συγκεκριμένη πλευρά του μικρόκοσμου μέσα σε ένα συγκεκριμένο σύνολο συνθηκών. Σύμφωνα με αυτή την ανάλυση, η ύπαρξη πιθανοτήτων στην κβαντική μηχανική δεν αποτελεί επιχείρημα υπέρ του ιντετερμινισμού της φύσης αλλά δείχνει την αλληλεπίδραση των συστημάτων με το περιβάλλον σε αυτό το επίπεδο.<sup>19</sup>

Μαζί με την αναγκαιότητα και το τυχαίο θα πρέπει να εξετάσουμε και τη φιλοσοφική κατηγορία της συμπτωμатικότητας. Η κατηγορία αυτή αφορά φαινόμενα που δεν υπόκεινται ούτε σε δυναμικούς ούτε σε στατιστικούς νόμους, φαινόμενα νέα ή εξαιρετικά. Η εμφάνιση της ζωής είναι παράδειγμα τέτοιου φαινομένου. Η συμπτωμатικότητα δεν είναι η τυπική άρνηση της αιτιότητας και της αναγκαιότητας καθώς και εδώ υπάρχουν ένα πλήθος από αιτιακές αλυσίδες που εξελίσσονται, λίγο πολύ ανεξάρτητα μεταξύ τους, και που καθορίζουν, με τη σύμπτωση τους, τα δύο γεγονότα ή το πλήθος των γεγονότων που συμπίπτουν στο χώρο και το χρόνο. Η συσχέτιση μπορεί να πάρει τη μορφή μιας απλής σύμπτωσης που δημιουργεί ένα εξαιρετικό φαινόμενο ή και φαινόμενα πιο περίπλοκα και σύνθετα όπως η εμφάνιση ζωής ή η εξαφάνιση κάποιου είδους. Δρα μέσα από την εσωτερική δυναμική των συστημάτων δημιουργώντας ταυτόχρονα νέες δυνατότητες, νέες σχέσεις και νέες πραγματικότητες.

Με την έννοια της *δυναμικότητας* έχει ασχοληθεί αρκετά και ο Heisenberg. Όμως η προσέγγιση του η χωρίζει τη δυνατότητα από την πραγματικότητα χωρίς να βλέπει τη διαλεκτική

---

<sup>19</sup>Η ανάλυση που προηγήθηκε βασίστηκε στην προσέγγιση του Ε. Μπιτοάκη, για περαιτέρω ανάλυση βλ. Μπιτοάκης ([1973] 2001)

σύνδεση τους. Όπως γράφει ο Heisenberg <sup>20</sup>: "Στα πειράματα που αφορούν τα ατομικά φαινόμενα έχουμε να κάνουμε με πράγματα και με γεγονότα, με φαινόμενα της καθημερινής ζωής. Αλλά τα άτομα ή τα στοιχειώδη σωματίδια δεν είναι το ίδιο πραγματικά. Αποτελούν μάλλον ένα κόσμο δυναμικότητων ή δυνατοτήτων παρά ένα κόσμο πραγμάτων ή γεγονότων." Η πραγματικότητα όμως προκύπτει από τη δυνατότητα και το δυνατό προβάλλει από το υπόβαθρο του πραγματικού. Το πραγματικό είναι το δυνατό που πραγματοποιήθηκε και το δυνατό είναι το πραγματικό στην πορεία μετατροπής του σε άλλη μορφή.

### 3.4 Συμπεράσματα για την ερμηνεία του Bohm

Με βάση όλη την ανάλυση που προηγήθηκε και τα κριτήρια που τέθηκαν, μπορούμε τώρα να επιχειρήσουμε να βγάλουμε κάποια συμπεράσματα για την ερμηνεία του Bohm. Σε κάθε περίπτωση, η κριτική και τα συμπεράσματα εμπλέκονται ρητά ή άρρητα όχι μόνο με την οπτική που υιοθετεί κανείς για τη θεωρία της κβαντικής μηχανικής αλλά και με τη συνολική τοποθέτηση απέναντι στην επιστήμη και τη φιλοσοφία. Η προσπάθεια λοιπόν εμπεριέχει αυτά τα στοιχεία και δεν διεκδικεί κάποιου είδους ουδετερότητα ή απόλυτη κρίση που δεν μπορεί ούτως ή άλλως να επιτευχθεί.

Η κβαντική μηχανική αποτέλεσε μια επαναστατική θεωρία στις αρχές του εικοστού αιώνα, η οποία ήρθε να καλύψει την αδυναμία και τα όρια της κλασικής φυσικής στην περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας στο επίπεδο του μικρόκοσμου. Η πειραματική διαδικασία έθεσε ερωτήματα προς απάντηση που η κλασική φυσική δεν μπορούσε να απαντήσει. Αναδείχθηκε έτσι η αναγκαιότητα εισαγωγής μιας νέας θεωρίας η οποία με πληρέστερο τρόπο θα περιέγραφε τα φαινόμενα.

Από την ίδια χρονική περίοδο κατά την οποία θεμελιωνόταν η κβαντική μηχανική ένα μέρος της επιστημονικής κοινότητας στο οποίο ανήκαν και θεμελιωτές της - με χαρακτηριστικότερο ίσως παράδειγμα τον Schrödinger - δεν έπαψαν να υπογραμμίζουν τα αδύνατα σημεία αυτής της "νέας" θεωρίας. Αυτό που αμφισβητήθηκε δεν ήταν η προγνωστική της δυνατότητα αλλά τα φιλοσοφικά της θεμέλια. Αυτή η αντιπαράθεση συνεχίζεται με την ίδια σφοδρότητα

---

<sup>20</sup>Heisenberg ([1958] 1971).

και εμπλουτίζεται συνεχώς με νέα στοιχεία μέχρι σήμερα.

Το θετικιστικό πνεύμα της ορθόδοξης ερμηνείας που έγινε κυρίαρχη από τη δεκαετία του 1930 αμφισβητεί θεμελιακά την αιτιότητα και την τοπικότητα, θεωρεί την κβαντική μηχανική πλήρη θεωρία και θέτει σχεδόν αξιωματικά (αν και όχι με ενιαίο τρόπο μολονότι ο τόνος της ορθόδοξης ερμηνείας εκεί δίνεται) ότι τα μη παρατηρήσιμα μεγέθη δεν "υπάρχουν" για τη φυσική, θέτοντας τα πλαίσια ενός γενικότερου αντιρεαλισμού.

Το ρεαλιστικό ρεύμα προσπάθησε να καταδείξει τις αδυναμίες και τις ανεπάρκειες της κβαντικής μηχανικής αναδεικνύοντας μια σειρά από παράδοξα - με χαρακτηριστικότερα την "γάτα του Schrödinger" και το EPR - αλλά και να δώσει εναλλακτικές ρεαλιστικές ερμηνείες. Η ερμηνεία του Bohm εντάσσεται σε αυτή την προσπάθεια και πρέπει να ειπωθεί σε αυτό το πλαίσιο. Αποτελεί συνέχεια των επεξεργασιών του De Broglie. Αποτελεί όμως και μια ολοκληρωμένη θεωρία. Είναι μια απόπειρα να αποκατασταθεί ο ρεαλισμός και η αιτιότητα στην φυσική και ιδιαίτερα στην κβαντική μηχανική από την οποία είχαν εξοβελιστεί από την ορθόδοξη ερμηνεία.

Επιχειρεί και καταφέρνει να δώσει μια οντολογική ερμηνεία, να δώσει μια περιγραφή της αντικειμενικής πραγματικότητας που υπάρχει ανεξαρτήτως του παρατηρητή και της μετρητικής συσκευής. Αναγνωρίζει επίσης την δυνατότητα να γίνουν γνωστά τα στοιχεία αυτής της πραγματικότητας. Εξηγεί το πρόβλημα της εξέλιξης ενός κβαντικού συστήματος ανεξάρτητα από το εάν λαμβάνει χώρα κάποια μέτρηση. Λύνει έτσι το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης (χωρίς να θέτει την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης) που όπως φάνηκε στο πρώτο κεφάλαιο είναι κεντρικό ζήτημα - σημείο εκκίνησης πολλών εκ των διάφορων ερμηνειών, και σε κάθε περίπτωση, σημείο σύγκρισής τους.

Για να το κάνει αυτό, εισάγει την έννοια του κβαντικού δυναμικού και θέτει ένα σωματίδιο και ένα κύμα ως ένα καλά προσδιορισμένο σύστημα. Διατηρεί τις δυναμικές εξισώσεις: δεν τις θεωρεί απλώς μαθηματικές περιγραφές αλλά απεικόνιση των δυνατών μετασχηματισμών φυσικών καταστάσεων του συστήματος. Τέλος εξηγεί τη στατιστική κατανομή που προκύπτει και στο δικό της φορμαλισμό, όχι ως αυταρχία και ένδειξη ιντετερμινισμού στη φύση, αλλά ως ένα σύνολο δυνατών τρόπων εξέλιξης που καθορίζονται όμως αιτιακά.<sup>21</sup>

---

<sup>21</sup>Σε μεταγενέστερα έργα του (*The Undivided universe*, 1993), σε σχέση με τα άρθρα στα οποία εισάγει την

Η ερμηνεία του Bohm έχει εννοιολογική συνοχή. Είναι εσωτερικά συνεπής θεωρία παρά κάποιες μετατοπίσεις που υπάρχουν στα δημοσιευμένα έργα του Bohm στη διάρκεια των πενήντα χρόνων της συγγραφικής και ερευνητικής δραστηριότητάς του. Επιπλέον, η ερμηνεία του Bohm, εφόσον γίνεται δεκτή η υπόθεση της κβαντικής ισορροπίας, συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα που προβλέπει η κβαντική μηχανική. Ως εκ τούτου είναι εμπειρικά επαρκής, αφού η κβαντική μηχανική δεν διαψεύδεται από τα πειραματικά δεδομένα. Ασφαλώς αυτό το στοιχείο της εμπειρικής αξίας μιας ερμηνείας δεν πρέπει να παραγνωρίζεται στο βωμό της συνολικής αμφισβήτησης των θεμελίων της. Βέβαια το γεγονός ότι στο πλαίσιο της υπόθεσης της κβαντικής ισορροπίας δεν μπορεί να γίνει διάκριση ανάμεσα στη θεωρία του Bohm και την κβαντική μηχανική καθιστά την αποδοχή της ερμηνείας και λίγο θέμα "πίστης" ή μεταφυσικής προτίμησης. Αυτό γίνεται μάλιστα έχοντας ένα σχετικά σύνθετο φορμαλισμό που απαιτεί νέα μεγέθη (κβαντικό δυναμικό) με "περίεργες" ιδιότητες (δεν εξασθενεί με την απόσταση αλλά εξαρτάται μόνο από την μορφή κλπ).

Ολόκληρη όμως η ιστορία της επιστήμης καταδεικνύει τη σημασία τέτοιων υποθέσεων. Αυτό δεν αναιρεί τον στόχο της πειραματικής επαλήθευσης ή διάψευσης. (Μάλιστα ο ίδιος ο Bohm (Bohm, 1952) διερευνά την πειραματική επικύρωση και καταλήγει στο συμπέρασμα πως το σημερινό τεχνολογικό επίπεδο δεν επιτρέπει κάτι τέτοιο αλλά μπορεί στο μέλλον να το επιτρέψει.) Παράδειγμα τέτοιας υπόθεσης είναι η ατομική θεωρία η οποία έθεσε οντότητες που δεν είχαν παρατηρηθεί. Εντούτοις η θεωρία αυτή είχε εξηγητική ισχύ και μέσω αυτής ερμηνεύτηκαν φαινόμενα που ως τότε δεν μπορούσαν να εξηγηθούν. Οι οντότητες που η θεωρία προέβλεπε παρατηρήθηκαν σε μεταγενέστερα πειράματα.

Η ερμηνεία του Bohm δίνει μεγάλη σημασία στην έννοια της αλληλεπίδρασης. Όλα τα μεγέθη εκτός της θέσης είναι πλασιακά υπό την έννοια ότι εξαρτώνται από το πλαίσιο αναφοράς τους. Έτσι κατά τη διαδικασία της μέτρησης (νοούμενης ως αλληλεπίδρασης) το σύστημα με τη μετρητική συσκευή θεωρείται ως ολότητα, που όμως μπορεί να αναλυθεί αντίθετα με ό,τι υποστηρίζει ο Bohr. Η απομόνωση του συστήματος από το περιβάλλον του είναι προϊόν αφαιρετικής διαδικασίας, η οποία έχει νόημα και με την οποία αποδίδονται ιδιότητες στο σύστημα, ο Bohm δίνει και μια στοχαστική προσέγγιση της θεωρίας που μετατοπίζει το βάρος στην οντολογική πλευρά της ερμηνείας σε σχέση με την αιτιακή.

στημα. Η αλληλεπίδραση ενός συστήματος με το περιβάλλον του δεν αναιρεί την αιτιότητα αλλά, όπως αναλύθηκε και σε προηγούμενη παράγραφο, την προϋποθέτει.

Η ερμηνεία του Bohm, θεωρώντας όλα τα μεγέθη εκτός της θέσης πλαισιακά, δεν έρχεται σε αντιπαράθεση με το θεώρημα Kochen-Specker όπως αυτό αναλύθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια. Όμως θέτει την παράμετρο της θέσης ως εγγενή ποσότητα- ιδιότητα του συστήματος και της προσδίδει διαφορετικό status από όλα τα υπόλοιπα μεγέθη. Έτσι η πλήρης και καλώς ορισμένη ύπαρξη και γνώση της φυσικής κατάστασης του συστήματος είναι απολύτως εξαρτώμενη από τη θέση και την κυματοσυνάρτηση. Το προνομιακό καθεστώς αυτό για τη θέση είναι προβληματικό ως προς το γιατί κάτι τέτοιο συμβαίνει αλλά και ως προς την εξήγηση των φαινομένων που μπορεί να εξαρτώνται και από άλλες παραμέτρους.

Τελευταίο σημείο αξιολόγησης της ερμηνείας του Bohm είναι η τοπικότητα και η μη συμφωνία της με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Η ερμηνεία του Bohm είναι μη τοπική. Επιτρέπει μια αιτιακή κατανόηση του κόσμου θέτοντας σε αμφισβήτηση, ή καλύτερα ερχόμενη σε ρήξη, με την τοπικότητα. Το θεώρημα του Bell κατέδειξε με σαφή τρόπο ότι μια θεωρία με "κρυμμένες" μεταβλητές πρέπει να είναι μη τοπική για να αναπαράγει τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής. Ως εκ τούτου η ερμηνεία του Bohm δεν αντιφάσκει με το θεώρημα του Bell. Η κβαντική μηχανική είναι μη τοπική (συζευγμένες καταστάσεις και EPR). Υπό αυτό το πρίσμα, τόσο για την ερμηνεία του Bohm, όσο και για την ορθόδοξη κβαντική μηχανική, το ζήτημα της τοπικότητας παραμένει. Απλώς στην ερμηνεία του Bohm η μη τοπικότητα είναι πιο εμφανής και πρόδηλη.

Η ερμηνεία του Bohm δεν συμφωνεί με την ειδική θεωρία της σχετικότητας με βάση την ανάλυση που έχει προηγηθεί στο προηγούμενο κεφάλαιο. Δεν είναι αναλλοίωτη κατά Lorentz και εισάγει ένα προνομιακό σύστημα αναφοράς όπου οι δράσεις είναι ακαριαίες. Το ότι τα εμπειρικά δεδομένα δεν έρχονται σε αντίθεση με την ειδική θεωρία της σχετικότητας δεν αίρει την αντίφαση. Κρινόμενη λοιπόν εξωτερικά, δηλαδή σε σχέση με τις υπόλοιπες θεωρίες, είναι μάλλον προφανές και κοινά αποδεκτό ότι αυτό είναι από τα μελανότερα χαρακτηριστικά της. Σύμφωνα με τον ίδιο τον εισηγητή της, η ερμηνεία κρατάει το πνεύμα της γενικής θεωρίας της σχετικότητας και η ταχύτητα του φωτός μπορεί να μην είναι ένα ανώτερο όριο ταχύτητας με καθολική ισχύ. Ο Bohm θεωρεί ότι ακολουθώντας το πνεύμα της γενικής σχετικότητας το

όριο της ταχύτητας του φωτός δεν κρατάει απαραίτητα σταθερή τιμή, και αυτό γιατί υπό αυτό το πρίσμα όπου οι ιδιότητες του χώρου εξαρτώνται από τη μάζα που κινείται στο χώρο, έτσι και το όριο της ταχύτητας του φωτός μπορεί να εξαρτάται από το  $\psi$ -πεδίο όπως και από τους μετρικούς συντελεστές  $g_{\mu\nu}$ .<sup>22</sup>

Η αξιολόγηση και η εκτίμηση της συνεισφοράς της ερμηνείας του Bohm οφείλουν να έχουν και μια διάσταση ιστορικότητας χωρίς αυτό να καταλήγει στο σχετικισμό. Χωρίς να υπονοείται εδώ μια εν γένει ασυμμετρία μεταξύ διαδοχικών θεωριών, η αξιολόγηση μιας θεωρίας οφείλει να λαμβάνει υπόψιν τις ιστορικές συνθήκες στις οποίες αυτή αναπτύχθηκε, τις επιρροές που είχε και τον ρόλο που αυτή διαδραμάτισε στην εξέλιξη της επιστήμης. Υπό αυτό το πρίσμα είναι σημαντικό να ειπωθεί η ερμηνεία του Bohm ως κομβικής σημασίας στην ανάπτυξη μιας ολοκληρωμένης ρεαλιστικής εναλλακτικής ερμηνείας που αμφισβήτησε το κυρίαρχο θετικιστικό πνεύμα. Παρόλα αυτά οι αδυναμίες που αναφέρθηκαν δεν πρέπει να παραγνωριστούν με σκοπό να αναγορευθεί αυτή η ερμηνεία, λίγο δογματικά, ως η απάντηση στη Σχολή της Κοπεγχάγης.

Το να κατανοηθεί η εικόνα που δίνει για τον κόσμο η κβαντική μηχανική αποτελεί ένα στόχο, ο οποίος επιδιώκεται κυρίως από τον επιστημονικό ρεαλιστή. Ο επιστημονικός ρεαλιστής πιστεύει ότι οι επιτυχημένες επιστημονικές θεωρίες μας δίνουν μια αξιόπιστη άποψη ακόμη και για τις οντότητες του μικρόκοσμου. Η θεωρία του Bohm υποστηρίζει ότι η θέση είναι η μόνη μη πλαισιακή (κεκτημένη) ιδιότητα και αποδέχεται τη μη τοπικότητα των κβαντικών φαινομένων, αποφεύγει το πρόβλημα της κβαντικής μέτρησης και έχει μια οντολογία η οποία δεν έρχεται σε ρήξη με πολλές από τις κλασικές αναπαραστάσεις του πραγματικού κόσμου με τις αντικειμενικά κεκτημένες ιδιότητες του. Αυτό δίνει μια συγκεκριμένη, απεικονίσιμη και πιο παραδοσιακή (σχεδόν κλασική σε ορισμένα χαρακτηριστικά της) ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Είναι μια αιτιοκρατική θεωρία στην οποία τα σωματίδια έχουν αντικειμενικές, υπάρχουσες τροχιές πάντοτε και αλληλεπιδρούν μέσω ενός κβαντικού δυναμικού. Το τίμημα είναι η μη τοπικότητα παρόλο που δεν έρχεται σε σύγκρουση με τη σχετικότητα στα εμπειρικά δεδομένα. Το μη διαχωρίσιμο που εδώ εισάγεται οδηγεί στην έννοια της αδιάσπαστης ολότητας για ολόκληρο το σύμπαν.

---

<sup>22</sup>Bohm (1952b) σ. 187

Κλείνοντας την εργασία αυτή, είναι σημαντικό να αναφερθούμε ξανά στον τρόπο με τον οποίο προσεγγίζει ο Bohm την πραγματικότητα και τη γνώση της (με την μερικότητα που μπορεί να διακρίνουν δυο αποσπάσματα και χωρίς να μπορεί εδώ να μεταφερθεί η πλήρης εικόνα). Χαρακτηριστικά λοιπόν αναφέρει : <sup>23</sup> " Η ιδέα της ποιοτικής απειρίας της φύσης καταργεί ουσιαστικά τη μηχανιστική αντίληψη." Και μερικές σελίδες πιο κάτω :

Ωστόσο για να εκφραστούν οι νόμοι της φύσης με κάποιους όρους είναι αναγκαίο τα πράγματα στα οποία αναλύονται να έχουν τουλάχιστον κάποιο βαθμό προσέγγισης και σχετικής αυτονομίας ως προς τους τρόπους ύπαρξής τους, η οποία να διατηρείται σε μια ορισμένη περιοχή μεταβολών των συνθηκών υπό τις οποίες υπάρχουν. <sup>24</sup>

---

<sup>23</sup>Bohm (1984) σελ.203

<sup>24</sup>Bohm (1984) σελ.207

# Βιβλιογραφία

- Αραγεώργης Α. (2005): "Φιλοσοφία και σύγχρονη φυσική." *Δευκαλίων*, 23/2 : 117-141
- Αραγεώργης Α. (2010): "Προοπτικές για την αιτιότητα στη θεμελιώδη φυσική" στο Κ. Θεολόγου και Ι. Μηλιός (επιμ.) *Οι ανθρωπιστικές και κοινωνικές επιστήμες στο Εθνικό Μετσόβιο Πολυτεχνείο: Γόνιμες εξακτινώσεις*. Αθήνα : Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Ε.Μ.Π., 41-72
- Μπιτσάκης Ε. Ι. ([1965] 1975): *Το είναι και το γίνεσθαι*. 2<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Δωδώνη.
- Μπιτσάκης Ε. Ι. ([1973] 2001): *Διαλεκτική και νεώτερη φυσική*. 5<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Δαίδαλος, Ι. Ζαχαρόπουλος.
- Μπιτσάκης Ε. Ι. ([1980] 1984): *Η δυναμική του ελάχιστου*. Α' 3<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Ζαχαρόπουλος.
- Μπιτσάκης Ε. Ι. ([1980] 1987): *Η δυναμική του ελάχιστου*. Β' 3<sup>η</sup> έκδοση. Αθήνα: Εκδόσεις Ζαχαρόπουλος.
- Μπιτσάκης Ε. Ι. (2000): *Ο Δαίμων του Αϊνστάιν: Αιτιότητα και Τοπικότητα στη Φυσική*. Αθήνα: Gutenberg.
- Μπιτσάκης Ε. Ι. ([1984] 1986): *Τι είναι Φιλοσοφία*. 2<sup>η</sup>. Αθήνα: Σύγχρονη Εποχή.
- Τραχανάς Σ. (2005): *Κβαντομηχανική Ι*. Ηράκλειο Κρήτης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Τραχανάς Σ. (2008): *Κβαντομηχανική ΙΙ*. Ηράκλειο Κρήτης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
- Ψύλλος Σ. (2008): *Επιστήμη και Αλήθεια. Δοκίμια στη Φιλοσοφία της Επιστήμης*. Αθήνα: Εκδόσεις Οκτώ.
- Albert D. Z. (1992): *Quantum mechanics and experience*. Cambridge: Harvard University Press



- Baggott J. E. (1992): *The meaning of Quantum Theory: A Guide for students of Chemistry and Physics*. Oxford: Oxford University Press
- Bell J. S. (1964): "On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox." *Physics I*: 195-200
- Bell J. S. (1966): "On the problem of hidden variables in Quantum Mechanics." *Review of Modern Physics* **38**: 447-452
- Berkovitz J. (2013): "Action at a distance in quantum mechanics" στο E. N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu>
- Bohm D. (1951): *Quantum Theory*. Englewood Cliffs. New Jersey: Prentice Hill.
- Bohm D. (1952): "A suggested Interpretation of the Quantum Theory in terms of 'hidden variables' I, II.": *Physical Review* **85**: 166-193
- Bohm D. Aharonov Y. (1957): "Discussion of Experimental Proof for the paradox of Einstein, Rosen and Podolsky." *Physical Review* **108**: 1070-1076
- Bohm D. ([1984] 1996): *Αιτιότητα και Τύχη στη Μοντέρνα Φυσική*. Μτφρ. Σαββόπουλος Γ. Αθήνα: Εκδόσεις Σύνταγμα
- Bohm D. and Hiley B. J. (1982): "The de Broglie Pilot Wave Theory and the further development of New Insights arising out of it." *Foundations of Physics* **12**: 1001-1016
- Bohm D., Hiley B. J., Kaloyerou P.N. (1987): " An ontological Basis for the Quantum theory." *Physics Report* **144**: 321-375
- Bohm D., Hiley B. J. (1993): *The Undivided Universe: An ontological Interpretation of Quantum Theory*. London: Routledge
- Bohr N. (1928): "The quantum postulate and the recent development of atomic theory." *Nature* **121**: 580-590
- Bohr N. (1934): *Atomic Nature and theory and the description of Nature*. Cambridge: Cambridge University Press
- Bohr N. (1935): "Can Quantum mechanical Description of Physical reality be considered complete?" *Physical Review* **48**: 696-702
- Bohr N. (1949): "Discussion with Einstein on epistemological problems in atomic physics" στο P.A. Schipp σελ. 199-241
- Cliffon R. (1996): "The properties of modal interpretations of quantum mechanics" *British Journal*

*for the philosophy of science* **47**: 371-398

Cushing J. T. (1994): *Quantum mechanics: Historical Contingency and the Copenhagen Hegemony*. Chicago: University of Chicago Press

Cushing J. T. (1996): "What measurement problem?" στο R. Clifton (ed.) *Perspectives on Quantum Reality: Non-Realativistic, Relativistic and Field Theoretic* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 167-181

Cushing J.T. ([1998] 2003): *Φιλοσοφικές έννοιες στη Φυσική*. Μτφρ. Μ. ορφανού, Σ. Γιαννέλης. Επιμ. Κ. Σκορδούλης. Αθήνα: Εκδόσεις Leader Books

De Broglie L. (1927): "La mécanique ondulatoire et la structure atomique de la matière et du rayonnement", *Journal de Physique* **8**(5) :225-241

Dürr (1996) "Bohmian mechanics as the foundations of quantum mechanics" στο Cushing, Fine, Goldstein (ed.) *Bohmian Mechanics and Quantum Theory: An Appraisal* : 21-44

Dürr D., Goldstein S. and Zanghi N. (1992): "Quantum Equilibrium and the origin of the absolute uncertainty." *Journal of Statistical Physics* **68**: 843-907

Dürr D., Goldstein S. and Zanghi N. (1995): "Bohmian mechanics and the Quantum Equilibrium." *Stochastic Processes, Physics and Geometry II*

Dürr D., Goldstein S., Norsen T., Struyve W. and Zanghi N. (2013): "Can Bohmian mechanics be made relativistic?" "Preprint. ArXiv : 1307.1714v1 [quant-ph] 5 Jul 2013"

Earman J. (1986): *A Primer on Determinism*. Dordrecht: D. Reidel

Eberhard P. (1978): "Bell's Theorem and different concepts of locality." *Nuovo cimento* **46B**:392-419

Einstein A., Podolsky B., and Rosen N. (1935): "Can Quantum mechanical Description of Physical reality be considered complete?" *Physical Review* **47**: 777-780

Ghirardi G. C, Rimini A. and Weber T. (1986): "Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems." *Physical review D* **34**: 470-491

Heisenberg W. ([1958] 1971): *Φυσική και φιλοσοφία*. Μτφρ. Γρ. Λιόνη. Επιμ. Κ. Μετρινού. Αθήνα: Εκδόσεις Αναγνωστίδη.

Held C. (2013): "The Kochen Specker Theorem" στο E.N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu>

Isham C. J. ([1995] 2011): *Lectures on Quantum Theory*. London: Imperial College Press.

- Jarrett J. P. (1984): "On the physical significance of the locality conditions in the Bell argument" *Nous* **18**: 569-590
- Maudlin T. (1994): *Quantum non locality and relativity*. Oxford: Basil Blackwell Publishers
- Maudlin T. (1995): "Three measurement problems", *Topoi* **14**: 7-15
- Mermin D. (1993): "Hidden variables and the two theorems of John Bell" *Reviews of Modern Physics* **65**: 803-815
- Popper ([1934] 1959): *The Logic of Scientific Discovery*. London: Hutchinson
- Redhead M.L.G (1987): *Incompleteness, Nonlocality and Realism*. Oxford: Clarendon Press
- Russell B. (1917): *Mysticism and Logic and other and other essays*. London: Allen and Unwin
- Shalmon W. ([1992] 1998): "Επιστημονική εξήγηση" στο Α. Μπαλτάς (επιμ.) *Εισαγωγή στη Φιλοσοφία της Επιστήμης*. Κρήτη: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
- Shimony A. (2009): "Bell's Theorem" στο E. N. Zalta (ed.) *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*. <http://plato.stanford.edu>
- Torretti R. ([1999] 2012): *Η Φιλοσοφία της Φυσικής*. Μτφρ. Α. Σπανού. Επιμ. Α. Αραγεώργης. Ηράκλειο Κρήτης: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης
- Trimmer J. (1980): "The Present Situation in Quantum Mechanics : a translation of Schrödinger's cat paradox paper." *Proceedings of American Philosophical Society* **124** : 323-338
- Valentini A. (1991a): "Signal locality, uncertainty and the subquantum H-Theorem I" *Physics Letters A* **156**: 5-11
- Valentini A. (1991b): "Signal locality, uncertainty and the subquantum H-Theorem II" *Physics Letters A* **158**: 1-8
- Valentini A. (1997): "On Galillean and Lorentz invariance in pilot wave dynamics." *Physics Letters* **228**: 215-222
- Valentini A. (2002): "Signal-Locality and the Subquantum Information in Deterministic Hidden-Variables Theories" στο Non-Locality and Modality Placek T. and Butterfield J. (eds) Kluwer Academic Publishers
- Valentini A. (2009): "Beyond the Quantum." *Physics World* **22**, 11 : 32-37