

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗ ΚΑΘΗΓΗΤΩΝ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διπλωματική Εργασία

Η επικρατούσα άποψη για την φυσική πραγματικότητα είναι επηρεασμένη από την μηχανιστική αντίληψη (συμβατή με την Νευτώνεια φυσική). Πώς οι νέες εξελίξεις στην Κβαντομηχανική (πειραματική επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης) αλλάζουν την περιγραφή μας για την φυσική πραγματικότητα.

Γαλανού Αικατερίνη

Επιβλέπων καθηγητής:

Σκορδούλης Κωνσταντίνος

Συν επιβλέπων καθηγητής:

Κεχαγιάς Αλέξανδρος

ΑΘΗΝΑ ,

ΜΑΙΟΣ 2023

© Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, 2017

Η παρούσα Εργασία καθώς και τα αποτελέσματά αυτής, αποτελούν συνιδιοκτησία του ΕΑΠ και του φοιτητή, ο καθένας από τους οποίους έχει το δικαίωμα ανεξάρτητης χρήσης, αναπαραγωγής και αναδιανομής τους (στο σύνολο ή τμηματικά) για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, σε κάθε περίπτωση αναφέροντας τον τίτλο και το συγγραφέα της Εργασίας καθώς και το όνομα του ΕΑΠ όπου εκπονήθηκε.



Η επικρατούσα άποψη για την φυσική πραγματικότητα είναι επηρεασμένη από την μηχανιστική αντίληψη (συμβατή με την Νευτώνεια φυσική). Πώς οι νέες εξελίξεις στην Κβαντομηχανική (πειραματική επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης) αλλάζουν την περιγραφή μας για την φυσική πραγματικότητα.

Γαλανού Αικατερίνη

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
Σκορδούλης Κωνσταντίνος

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
Κεχαγιάς Αλέξανδρος

ΑΘΗΝΑ ,

ΜΑΙΟΣ 2023

Ευχαριστώ πολύ τους καθηγητές μου κυρίους Σκορδούλη Κωνσταντίνο και Κεχαγιά Αλέξανδρο για τη βοήθεια τους κατά την εκπόνηση της διπλωματικής μου εργασίας.

Περίληψη

Στην εργασία αυτή διερευνάται η μορφή που παίρνει η περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας μετά την πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης. Αρχικά γίνεται αναφορά στον τρόπο με τον οποίο η κλασική φυσική περιγράφει τον φυσικό κόσμο και στα χαρακτηριστικά αυτής της περιγραφής. Στη συνέχεια γίνεται ανασκόπηση των γεγονότων που προηγήθηκαν και των επιστημονικών απόψεων που διατυπώθηκαν, ξεκινώντας από τη χρήση του φαινομένου της σύμπλεξης από τον Einstein για να καταδείξει τη μη πληρότητα της κβαντικής περιγραφής, μέχρι και την πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης από τον Alain Aspect. Ακολούθως αφού περιγραφεί το φαινόμενο της σύμπλεξης, διερευνώνται οι διαφορές στον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε και εξηγούμε τις οντότητες και τα φαινόμενα του μικρόκοσμου, σε σχέση με την κλασική αντίληψη, διαφορές που προέκυψαν μετά την πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου αυτού. Συγκεκριμένα διερευνάται αν η περιγραφή αυτή περιλαμβάνει ή όχι μια σειρά χαρακτηριστικών της κλασικής περιγραφής των φυσικών φαινομένων. Στο πλαίσιο αυτό εξετάζεται η διαχωρισσιμότητα των φυσικών συστημάτων, δηλαδή το κατά πόσο οι ιδιότητές τους μπορούν να αναχθούν στις ιδιότητες που έχουν τα υποσυστήματά τους όταν τα μελετούμε ξεχωριστά. Διερευνάται αν η κβαντική περιγραφή των φυσικών συστημάτων χαρακτηρίζεται όπως η αντίστοιχη κλασική από τοπικότητα, ή αντίθετα συστήματα που είναι πολύ απομακρυσμένα μεταξύ τους μπορεί να συσχετίζονται κατά τρόπο ώστε η μέτρηση που πραγματοποιείται στο ένα σύστημα να επιδρά στο άλλο. Επιπλέον εξετάζεται η ισχύς της αιτιότητας, ο ρόλος του πειραματικού πλαισίου κατά τη μέτρηση και ο συνεπαγόμενος πλαισιακός χαρακτήρας της κβαντικής περιγραφής αλλά και η δυνατότητα εφαρμογής της αναγωγιστικής λογικής στην κβαντική περιγραφή των σύνθετων συστημάτων, ή αντίθετως η ανάγκη για μια ολιστική θεώρησή τους, που προϋποθέτει την ανάδυση των ιδιοτήτων των συστατικών μερών τους από τις ιδιότητες του όλου. Για το σκοπό αυτό γίνονται αναφορές σε επιστημονικές απόψεις και θεωρίες που έχουν διατυπωθεί σχετικά.

Λέξεις – Κλειδιά

Σύμπλεξη, τοπικότητα, πλαισιακότητα, αιτιότητα, διαχωρισσιμότητα, ανάδυση, ολισμός, αναγωγισμός, επιγένεση.

THESIS TITLE

The prevailing view of physical reality is influenced by the mechanistic view (compatible with Newtonian physics). How new developments in Quantum Mechanics (experimental confirmation of quantum entanglement) are changing our description of physical reality.

Aikaterini Galanou

ABSTRACT

This paper investigates the form that the description of physical reality takes after the experimental confirmation of the phenomenon of quantum entanglement. At first, reference is made to the way in which classical physics describes the physical world and the characteristics of this description. Then there is a review of the events that preceded and the scientific opinions that were formulated, starting with the use of the entanglement effect by Einstein to demonstrate the incompleteness of the quantum description, up to the experimental confirmation of the quantum entanglement effect by Alain Aspect . Next, after describing the phenomenon of entanglement, the differences in the way we perceive and explain the entities and phenomena of the microcosm, in relation to the classical perception, are investigated. These differences emerged after the experimental confirmation of quantum entanglement. In particular, it is investigated whether or not this description includes a series of characteristics of the classical description of natural phenomena. In this context, the separability of complex physical systems is examined, i.e. whether their constituents can be reduced to the properties of their subsystems when we study them separately. It is also investigated whether the quantum description of physical systems is characterized like the corresponding classical one by locality, or systems that are very far apart may be correlated in such a way that a measurement made in one system affects the other. In addition causality and also the role of the experimental context during measurement and the consequent contextual character of the quantum description are examined, as well as the possibility of applying reductionist logic to the quantum description of complex systems, or on the contrary, the need for a holistic view of them, which presupposes the emergence of the properties of their constituent parts from the properties of the whole. For this purpose, references are made to scientific opinions and theories that have been formulated in this regard.

Keywords

Entanglement, locality, contextuality, causality, separability, emergence, holism, reductionism, supervenience.

Περιεχόμενα

Περίληψη	v
Abstract	vi
Περιεχόμενα	vii
Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων	ix
Εισαγωγή.....	1
1. Η κλασική μηχανιστική περιγραφή της πραγματικότητας του φυσικού κόσμου..	2
1.1 Κλασική οντολογία	2
1.2 Επιστημολογικές συνέπειες των οντολογικών χαρακτηριστικών της κλασικής περιγραφής.....	4
2. Επισκόπηση της πειραματικής επιβεβαίωσης του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης.	6
2.1 Το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης.....	6
2.2 Πριν τη δημοσίευση της πραγματείας EPR.....	6
2.3 Το περιεχόμενο της εργασίας EPR.....	10
2.4 Η απάντηση του Bohr.....	15
2.5 Η εκδοχή του Bohm.....	16
2.6 Το θεώρημα του John Bell.....	18
2.7. Η πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της σύμπλεξης από τον Alain Aspect.....	19
3. Οι επιπτώσεις της πειραματικής επιβεβαίωσης του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης στην κατανόηση και την περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας.....	21
3.1 Μια πιο προσεκτική «ματιά» στο φαινόμενο της σύμπλεξης.....	22
3.2 Ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας στις καταστάσεις κβαντικής σύμπλεξης;.....	25
3.3 Το φαινόμενο της σύμπλεξης συνεπάγεται μη αιτιακές σχέσεις μεταξύ των φυσικών συστημάτων.....	29
3.4 Η σύμπλεξη συνεπάγεται τον ολιστικό χαρακτήρα των κβαντικών συστημάτων.....	30
3.5 Η πλαισιακότητα στην κβαντική περιγραφή της πραγματικότητας.....	33
3.6 Η κβαντική σύμπλεξη συνεπάγεται την ανάδυση ;.....	38
3.7 Η προτεραιότητα των μερών σε σχέση με το όλον κατά την περιγραφή της πραγματικότητας	42

3.8 Ανάδυση και παραβίαση των προϋποθέσεων του θεωρήματος Bell στις καταστάσεις σύμπλεξης από τις θεωρίες που ερμηνεύουν την κβαντική μηχανική	44
3.9 Εξετάζοντας ξανά την ύπαρξη αναγωγιστικών χαρακτηριστικών και ανάδυσης στην κβαντική	49
3.10 Μπορεί μετά την επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης να είναι η περιγραφή της πραγματικότητας τοπική;	54
3.11 Παραβιάζει η κβαντική μη τοπικότητα την ειδική θεωρία της σχετικότητας;.....	60
Συμπεράσματα.....	61
Βιβλιογραφικές αναφορές.....	64

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1.1: Ο μηχανισμός που πρότεινε ο Einstein.

Σχήμα 3.1: Ζεύγη σωματιδίων εκπέμπονται από μια πηγή στην κατάσταση singlet.

Σχήμα 3.2: Η κοινή αιτία στο πείραμα EPR/B για τα συσχετισμένα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι η κατάσταση λ.

Σχήμα 3.3: Διάγραμμα χωροχρόνου ενός τοπικού μοντέλου του πειράματος EPR/B.

1.

Εισαγωγή.

Η κλασική άποψη για τη φυσική πραγματικότητα ήταν η κυρίαρχη άποψη για τον κόσμο πριν τη διατύπωση της κβαντικής μηχανικής και στηριζόταν στη μηχανική του Νεύτωνα που αποτέλεσε το θεμέλιο της μηχανιστικής φιλοσοφίας στη δυτική επιστημονική σκέψη. Η πιο βασική της θέση συνοψίζεται στην παραδοχή ότι η πολυμορφία της φυσικής πραγματικότητας ανάγεται κατά τρόπο απόλυτο τέλειο και πλήρη στη λειτουργία ενός συστήματος καθαρά ποσοτικών νόμων, οι οποίοι προσδιορίζουν τη συμπεριφορά ορισμένων, ποιοτικά αναλλοίωτων δομικών λίθων (όπως σωματίων μάζας) ή μηχανικών παραμέτρων (όπως θέσης, ταχύτητας κ.λπ.), (Αναπολιτάνος, Καρακώστας, Αραμπατζής & Κιντή, 2003, σελ. 206).

Σύμφωνα με τη μηχανιστική άποψη τα φυσικά αντικείμενα και φαινόμενα μπορούν να μελετηθούν και να γίνουν κατανοητά ανεξάρτητα από τις αλληλεπιδράσεις τους με άλλα αντικείμενα. Η αντίληψη αυτή για τη φυσική πραγματικότητα παρουσιάζει μια σειρά από χαρακτηριστικά όπως είναι η αντικειμενικότητα, η αιτιοκρατία, η τοπικότητα, η διαχωριστικότητα και άλλα και αποτέλεσε για μεγάλο χρονικό διάστημα τη βάση για σημαντική πρόοδο της φυσικής επιστήμης και της τεχνολογίας. Η εφαρμογή της κλασικής φυσικής ήταν και είναι πολύ επιτυχής στην εξήγηση της συμπεριφοράς των μακροσκοπικών αντικειμένων όπως οι πλανήτες ή οι μηχανές αλλά αντιμετωπίζει σοβαρούς περιορισμούς όσον αφορά την ερμηνεία της συμπεριφοράς συστημάτων σε μικροσκοπική κλίμακα όπως τα άτομα και τα υποατομικά σωματίδια. Η συμπεριφορά τέτοιων συστημάτων είναι θεμελιωδώς διαφορετική από αυτήν των κλασικών συστημάτων. Μετά μάλιστα και από την πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης σύμφωνα με το οποίο οι ιδιότητες δύο ή περισσότερων συστημάτων μπορεί να συσχετίζονται, ακόμη κι όταν τα συστήματα είναι πολύ απομακρυσμένα μεταξύ τους, έχουν τεθεί σε αμφισβήτηση κάποιες από τις θεμελιώδεις υποθέσεις της κλασικής μηχανικής με αποτέλεσμα να οδηγούμαστε σε μια νέα κατανόηση της φυσικής πραγματικότητας.

1 . Η κλασική – μηχανιστική περιγραφή της πραγματικότητας του φυσικού κόσμου.

1.1. Κλασική οντολογία.

Η κλασική αντίληψη για τη φυσική πραγματικότητα απεικονίζει τον κόσμο μας χρησιμοποιώντας εξατομικευμένες οντότητες που υπάρχουν ανεξάρτητα και αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Οι οντότητες της κλασικής φυσικής έχουν κάθε χρονική στιγμή καλά καθορισμένες ιδιότητες όπως η θέση η ταχύτητα και η μάζα και ακολουθούν αιτιοκρατικούς νόμους κίνησης. Η μελλοντική τους κατάσταση μπορεί να προβλεφθεί με ακρίβεια εάν γνωρίζουμε τις αρχικές τους συνθήκες και τους νόμους αυτούς .

Κάθε κατάσταση τώρα ,έστω S , ενός κλασικού φυσικού συστήματος είναι καταρχήν μια πραγματική συνάρτηση φυσικών παρατηρήσιμων μεγεθών ,που ονομάζονται καταστατικές μεταβλητές έστω o_s και αντιπροσωπεύονται από πραγματικούς αριθμούς : $S(o_{s1} , o_{s2} \dots , o_{sn})$.

Η κατάσταση S καθορίζει με μοναδικό τρόπο την τιμή κάθε άλλου παρατηρήσιμου φυσικού μεγέθους $o_s \notin \{o_s\}$ που σχετίζεται με το σύστημα στην κατάσταση S , ώστε στην πραγματικότητα οι τιμές όλων των παρατηρήσιμων μεγεθών που σχετίζονται με ένα σύστημα να είναι συναρτήσεις των καταστατικών μεταβλητών του. Τα μεγέθη αυτά έχουν καθορισμένες τιμές .Δηλαδή κάθε κλασικό σύστημα χαρακτηρίζεται κάθε χρονική στιγμή από απολύτως καθορισμένες τιμές για κάθε παρατηρήσιμο φυσικό μέγεθος που το αφορά. Με αυτόν τον τρόπο οι τιμές των φυσικών μεγεθών θεωρούνται ως εγγενείς ιδιότητες του συστήματος. Οι ιδιότητες αυτές είναι, (ως εγγενείς του συστήματος), ανεξάρτητες από το κατά πόσο ή όχι πραγματοποιούμε μια οποιαδήποτε μέτρηση . Η περιγραφή δε των παρατηρούμενων και των μη παρατηρούμενων φυσικών συστημάτων και των ποσοτήτων που σχετίζονται με αυτά γίνεται με τον ίδιο ακριβώς τρόπο. Δηλαδή τα παρατηρούμενα περιγράφονται με τον ίδιο τρόπο που θα περιγράφονταν εάν δεν τα παρατηρούσαμε ,ενώ τα μη παρατηρούμενα σαν να υπόκεινται σε συνεχή παρατήρηση. Αυτό σημαίνει ότι η μέτρηση ή η παρατήρηση δεν διαδραματίζουν κανένα ουσιαστικό ή μη εξαλείψιμο ρόλο στη θεωρητική περιγραφή. Πιο συγκεκριμένα σύμφωνα με τα παραπάνω :

α) Δεν εμφανίζεται πρόβλημα μέτρησης .Το παρατηρούμενο σύστημα μπορεί να περιγραφεί θεωρώντας ότι η αλληλεπίδραση εξαιτίας της μέτρησης είναι μηδενική.

β) Κάθε μη παρατηρούμενο σύστημα μπορεί να περιγραφεί σαν να υπόκειται σε οπτική εξιδανικευμένη παρατήρηση.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ο μη πλαισιακός χαρακτήρας της κλασικής θεώρησης. Σύμφωνα με τον Καρακώστα (2012) εάν ένα κλασικό σύστημα κατέχει μια ιδιότητα (μια τιμή ενός φυσικού μεγέθους),η ιδιότητα αυτή είναι ανεξάρτητη από το πλαίσιο μέτρησης δηλαδή ανεξάρτητη από τη διαδικασία της μέτρησης.

Η κλασική φυσική συνάδει επίσης με τον καρτεσιανό δυισμό σύμφωνα με τον οποίο η πραγματικότητα συνίσταται σε δύο υποστάσεις ή ουσίες: την έκταση (χώρος, υλικά σώματα) και τη νόηση (ψυχή, νους, ιδέες) , υποστηρίζοντας αντίστοιχα πως υπάρχει σαφής διαχωρισμός μεταξύ του εξωτερικού υλικού κόσμου και του σκεπτόμενου υποκειμένου που τον μελετά.

Τα κλασικά συστήματα συμπεριφέρονται αιτιοκρατικά. Ο καθορισμός των χαρακτηριστικών της κατάστασης ενός συστήματος μια οποιαδήποτε χρονική στιγμή, προσδιορίζει με μοναδικό τρόπο μέσω δυναμικών νόμων, (οι οποίοι μπορεί να έχουν τη μορφή διαφορικών εξισώσεων), την κατάσταση του συστήματος σε κάθε άλλη χρονική στιγμή, όταν πρόκειται για ένα απομονωμένο σύστημα. Τα δε φαινόμενα στα συστήματα αυτά συμβαίνουν με μια ορισμένη αιτιώδη ακολουθία κατά την οποία η αιτία και το αποτέλεσμα συμβαίνουν με συγκεκριμένη σειρά, συμπεριφέρονται δηλαδή σύμφωνα με την αρχή της αιτιότητας.

Τα κλασικά συστήματα υπόκεινται επίσης στην αρχή της τοπικότητας σύμφωνα με την οποία όταν φυσικά συστήματα είναι χωρικά διαχωρισμένα, η μέτρηση (ή η απουσία μέτρησης) στο ένα σύστημα δεν επηρεάζει άμεσα την πραγματικότητα των υπολοίπων συστημάτων. Η κλασική αντίληψη προϋποθέτει ότι η φυσική αλληλεπίδραση συμβαίνει μέσω απευθείας επαφής ανάμεσα στα αντικείμενα. Η υπόθεση της τοπικότητας περιλαμβάνει και την απαίτηση (της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας) ότι μια αιτία δεν μπορεί να προκαλέσει ένα αποτέλεσμα δρώντας με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του φωτός.

Μια επιπλέον βασική αρχή που διέπει το οικοδόμημα της κλασικής φυσικής είναι αυτή της διαχωρισιμότητας σύμφωνα με την οποία κάθε κατάσταση ενός σύνθετου συστήματος είναι διαχωρίσιμη, δηλαδή το σύνθετο σύστημα μπορεί σε κάθε χρονική στιγμή t να θεωρείται ότι αποτελείται από ανεξαρτήτως υπάρχουσες, χωρικά εντοπισμένες και φυσικώς καλά καθορισμένες υποκαταστάσεις που αντιστοιχούν σε :

(α) τα συστατικά της υποσυστήματα και (β) σε κάθε χωρική τοποθεσία του υπό εξέταση σύνθετου συστήματος. Οι καταστάσεις του σύνθετου συστήματος καθορίζονται ολοκληρωτικά και αποκλειστικά από τις υποκαταστάσεις των υποσυστημάτων του και τις χωροχρονικές τους σχέσεις. Τα παραπάνω δεν αναφέρονται σε αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων οπότε δεν αποτελούν αρχή τοπικότητας¹. Η έννοια της διαχωρισιμότητας είναι κομβικής σημασίας στο πλαίσιο της κλασικής σύλληψης για την πραγματικότητα και χαρακτηρίζει σύμφωνα με τον Καρακώστα (2012), τον τρόπο με τον οποίο αναγνωρίζουμε τη φυσική ταυτότητα των απομακρυσμένων αντικειμένων και με τον οποίο τους αποδίδουμε αμοιβαία ανεξάρτητη αντικειμενική πραγματικότητα.

Ωστόσο, η διαχωρισιμότητα συνεπάγεται ότι κάθε σύνθετο φυσικό σύστημα του κλασικού σύμπαντος μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από, μεμονωμένα τμήματα που αλληλεπιδρούν μέσω δυνάμεων. Οι δυνάμεις αυτές μπορούν να κωδικοποιηθούν στη χαμιλτονιανή συνάρτηση του συνολικού συστήματος κι αν η πλήρης χαμιλτονιανή είναι γνωστή τότε η γνώση των τιμών των φυσικών μεγεθών που αφορούν κάθε ένα από τα συστατικά τμήματα μας παρέχει πλήρη γνώση για το σύνθετο σύστημα σε συμμόρφωση με την αρχή της διαχωρισιμότητας.

Ένα άλλο χαρακτηριστικό της κλασικής θεώρησης του κόσμου μας που συνάδει με την αρχή της διαχωρισιμότητας είναι η αναγωγιστική λογική² σύμφωνα με την οποία ένα

¹ Οι αρχές της γενικής τοπικότητας, δηλαδή η μη ύπαρξη δράσης από απόσταση, καθώς και της σχετικιστικής τοπικότητας που απαγορεύει τις αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες της ταχύτητας του φωτός

² Αναγωγισμός (Reductionism). Είναι μια προσέγγιση για την κατανόηση της φύσης των πολύπλοκων πραγμάτων με την αναγωγή τους στις αλληλεπιδράσεις των μερών τους ή σε πιο απλά η θεμελιώδη πράγματα. Μπορεί επίσης να περιγραφεί ως η φιλοσοφική θέση σύμφωνα με την οποία ένα σύνθετο

κλασικό σύστημα μπορεί να αναλυθεί στα συστατικά του μέρη. Οι ιδιότητες και οι καταστάσεις αυτών των μερών προσδιορίζουν τις ιδιότητες και την κατάσταση του συνολικού συστήματος. Πιο γενικά μπορούμε να πούμε ότι η κλασική αντίληψη πρεσβεύει τον οντολογικό αναγωγισμό, σύμφωνα με τον οποίο ένα σημαντικό υποσύνολο των φυσικών οντοτήτων του κόσμου μαζί με τις εγγενείς τους ιδιότητες και τις χωροχρονικές τους σχέσεις, καθορίζουν μέσω μιας σειράς διαδοχικών αναγωγών, τη φύση και τη συμπεριφορά του σύμπαντος ως όλου. Σύμφωνα με αυτήν την οπτική ο κόσμος κατηγοριοποιείται σε ατομικά συστήματα αντικειμένων, που χαρακτηρίζονται από ξεχωριστή ύπαρξη και κάθε τι άλλο επιγεννάται³ - προκύπτει από αυτά σε συνδυασμό με τις χωροχρονικές σχέσεις μεταξύ τους. Έτσι αν προσδιορίσουμε τις εγγενείς ιδιότητες των ατομικών αντικειμένων στο χώρο και το χρόνο, μπορούμε να περιγράψουμε πλήρως τον κόσμο μας.

1.2 Επιστημολογικές συνέπειες των οντολογικών χαρακτηριστικών της κλασικής περιγραφής :

A) Ως προς την πληρότητα της περιγραφής του φυσικού κόσμου:

Μια οποιαδήποτε έλλειψη στον καθορισμό των τιμών των ιδιοτήτων στην περιγραφή είναι κατά συνέπεια αποτέλεσμα του ατελούς και της μη πληρότητας της περιγραφής αυτής.

B) Ως προς την αντικειμενικότητα της περιγραφής του φυσικού κόσμου:

Μια φυσική περιγραφή ενός φυσικού συστήματος S, είναι αντικειμενική εάν η περιγραφή αυτή παρουσιάζει το σύστημα S όπως είναι αφ' εαυτού του, δηλαδή όσο αντιπροσωπεύει τη φύση και την κατάσταση του S όπως θα ήταν ανεξαρτήτως της συγκεκριμένης περιγραφής, συμπεριλαμβανομένων των τυχόν πειραμάτων που πιθανώς την υποστηρίζουν. Με άλλα λόγια η αντικειμενική γνώση των παρατηρούμενων αντικειμένων επιτυγχάνεται όταν περιγράφουμε τα αντικείμενα αυτά σαν ανεξάρτητες και διακριτές χωροχρονικά οντότητες απομονωμένες από το περιβάλλον τους, οι οποίες κατέχουν τις εγγενώς δικές του ιδιότητες. Οι ιδιότητες αυτές δεν εξαρτώνται από τα μέσα που χρησιμοποιούμε για να τις περιγράψουμε, όπως για παράδειγμα τα πειράματα και οι μετρήσεις.

Γ) Όσον αφορά τον κλασικό ρεαλισμό :

Ο κλασικός ρεαλισμός υπαγορεύει ότι τα φυσικά συστήματα :

(α) υφίστανται αντικειμενικά, δηλαδή ανεξάρτητα από οποιαδήποτε φυσική περιγραφή καθώς και από οποιαδήποτε είδος επίγνωσης ή συνειδητότητας,

(β) υπάρχουν πάντα κατά τρόπο αντικειμενικό σε καλά καθορισμένες καταστάσεις και συνεπώς,

(γ) χαρακτηρίζονται αντικειμενικά από καθορισμένες τιμές για κάθε παρατηρήσιμο μέγεθος που σχετίζεται με το σύστημα. Επιπλέον οι παγκόσμιες σταθερές, όταν υπάρχουν (όπως η c στη σχετικότητα), είναι ενσωματωμένες στην περιγραφή της κατάστασης και συνεπώς υπάρχουν αντικειμενικά.

σύστημα δεν είναι τίποτε άλλο από το άθροισμα των μερών του και η ερμηνεία του μπορεί να αναχθεί σε αυτήν των επιμέρους συστημάτων.

³ Επιγένεση (supervenience) : Η αντίληψη σύμφωνα με την οποία ένα σύνολο ιδιοτήτων E -επιγενείς ιδιότητες – επιγεννάται επί ενός συνόλου ιδιοτήτων B-βασικές ή υποκειμένες ιδιότητες -εάν και μόνο εάν δεν μπορεί να επέλθει καμία αλλαγή ή διαφοροποίηση στις ιδιότητες E, χωρίς προηγουμένως, να έχει επέλθει μια ορισμένη αλλαγή ή διαφοροποίηση στις ιδιότητες B. (Πελεγρίνης, 2013, σ.238)

Ο κλασικός ρεαλισμός αξιώνει την ανεξαρτησία της φυσικής πραγματικότητας από το υποκείμενο που τη μελετά (π.χ. τον παρατηρητή ή τον πειραματικό επιστήμονα), ανεξαρτησία υπό την έννοια ότι η φυσική πραγματικότητα υπάρχει με την μορφή που υπάρχει ,ανεξάρτητα από το εάν την παρατηρούμε ή όχι και ασχέτως από τις διαδικασίες που πραγματοποιούμε γι' αυτό. Ο κλασικός ρεαλισμός συνάδει με τη συνηθισμένη εμπειρική κοινή λογική όσον αφορά το μακροσκοπικό μας περιβάλλον .Εξαιτίας αυτού αποτελεί το είδος εννοιολογικής δομής που βρίσκεται βαθιά ριζωμένο στον ενστικτώδη τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε το φυσικό κόσμο.

Η κβαντική μηχανική από την άλλη μεριά μας παρέχει μια πολύ διαφορετική εννοιολογική κατασκευή στην περίπτωση που αυτή θεωρηθεί ως μια ρεαλιστική περιγραφή της πραγματικότητας.

2. Επισκόπηση της πειραματικής επιβεβαίωσης του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης.

2.1. Το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης.

Η κβαντική σύμπλεξη είναι ένα φαινόμενο που αφορά τη συσχετισμένη συμπεριφορά δύο ή περισσότερων κβαντικών συστημάτων. Η συσχέτισή τους είναι τέτοια που είναι αδύνατον να περιγράψουμε την κατάσταση του ενός συστήματος ανεξάρτητα από την κατάσταση του άλλου. Η συσχετισμένη συμπεριφορά των συστημάτων παραμένει ακόμη κι όταν τα συστήματα βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους, παραβιάζει την τοπικότητα και δεν μπορεί να ερμηνευθεί με όρους κλασικής αιτιότητας. Στο φαινόμενο αυτό αναφέρθηκαν πρώτοι οι Einstein, Podolsky και Rosen το 1935 σε μια κοινή τους δημοσίευση, προκειμένου να αποδείξουν την μη πληρότητα της κβαντικής θεωρίας. Η κβαντική σύμπλεξη έχει επιβεβαιωθεί πολλές φορές πειραματικά και αποτελεί μια από τις πλευρές της κβαντικής θεωρίας που έρχεται σε αντίθεση με τη διαισθητική αντίληψη που έχουμε για τη φυσική πραγματικότητα, ενώ ταυτόχρονα οδηγεί σε μια νέα κατανόηση της φύσης, της αιτιότητας, αλλά και του χώρου και του χρόνου στον φυσικό κόσμο.

2.2. Πριν τη δημοσίευση της πραγματείας EPR

Στο τεύχος της 15^{ης} Μαΐου του 1935, του επιστημονικού περιοδικού *Physical Review* δημοσιεύτηκε μια εργασία την οποία ο Einstein συνέγραψε με τους δύο παραπάνω συνεργάτες του. Η εργασία έφερε τον τίτλο: «Μπορεί η κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας να θεωρηθεί πλήρης;» «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?» (Einstein, Podolsky and Rosen, 1935). Η εργασία αυτή κατατάσσεται μεταξύ των δέκα κορυφαίων δημοσιεύσεων του περιοδικού *Physical Review* και λόγω του ρόλου που έπαιξε στην ανάπτυξη της θεωρίας της κβαντικής πληροφορίας είναι ακόμη στην κορυφή της λίστας με τις πιο επίκαιρες δημοσιεύσεις.

Στην εργασία αυτή χρησιμοποιούν την έννοια της κβαντικής σύμπλεξης των φυσικών συστημάτων για να αμφισβητήσουν την πληρότητα της κβαντικής θεωρίας και για να υποστηρίξουν την άποψη ότι αυτή οφείλει να συμπληρωθεί με επιπλέον μεταβλητές. Μέσω αυτών των μεταβλητών θα αποκατασταθούν στην κβαντική θεωρία τόσο η αιτιότητα όσο και η τοπικότητα που όπως είδαμε είναι η απαίτηση ότι όταν φυσικά συστήματα είναι χωρικά διαχωρισμένα, η μέτρηση (ή η απουσία μέτρησης), στο ένα σύστημα να μην επηρεάζει το άλλο.

Συγκεκριμένα στην εργασία παρουσιάζεται η περίπτωση κατά την οποία δύο κβαντικά συστήματα αλληλεπιδρούν με τέτοιο τρόπο ώστε να συνδέονται τόσο οι χωρικές συντεταγμένες τους σε μια ορισμένη διεύθυνση όσο και οι γραμμικές ορμές τους στην ίδια διεύθυνση ακόμη κι όταν τα συστήματα είναι πολύ απομακρυσμένα μεταξύ τους. Σαν αποτέλεσμα αυτής της σύμπλεξης ο προσδιορισμός είτε της θέσης είτε της ορμής στο ένα σύστημα έχει ως αποτέλεσμα τον καθορισμό της θέσης ή της ορμής αντίστοιχα στο άλλο σύστημα. Οι EPR διερευνώντας την περίπτωση της σύμπλεξης συνδέουν τις ισχυρές συσχετίσεις μεταξύ των διαχωρισμένων συστημάτων με την κατοχή καθορισμένων

ιδιοτήτων από αυτά. Έτσι καταλήγουν στο γενικό συμπέρασμα ότι δεν μπορεί κανείς να διατηρήσει τη διαισθητική αντίληψη της τοπικής δράσης και παράλληλα να αποδέχεται την πληρότητα στην περιγραφή της πραγματικότητας από την κβαντική μηχανική, με την έννοια της περιγραφής της μέσω της κυματοσυνάρτησης. Η σύλληψη αυτή όταν διατυπώνεται μαθηματικά αποδεικνύεται ασυμβίβαστη με τις στατιστικές προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας. Η προϋπόθεση μάλιστα της τοπικότητας, ακριβέστερα του ότι το αποτέλεσμα μιας μέτρησης σε ένα σύστημα πρέπει να είναι ανεπηρέαστο από τις διεργασίες σε ένα άλλο απομακρυσμένο σύστημα με το οποίο είχε αλληλεπιδράσει στο παρελθόν, είναι αυτή που δημιουργεί τις πιο ουσιαστικές δυσκολίες.

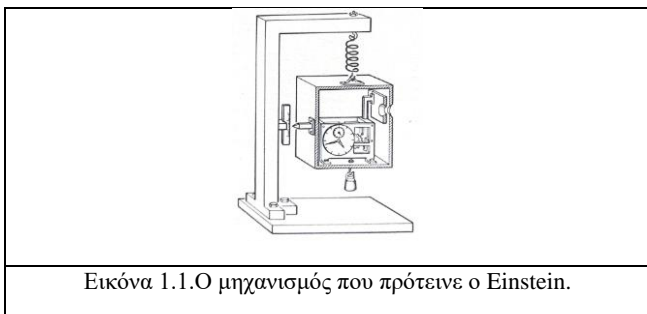
Θα αναφερθούμε τώρα στις ιδέες του Einstein καθώς και στα γεγονότα που προηγήθηκαν της δημοσίευσης του EPR και οδήγησαν τελικά σε αυτήν.

Μέχρι το 1935 στην ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας κυριαρχούσαν οι απόψεις του Niels Bohr για τη συμπληρωματικότητα οι οποίες εστιάζονταν στην παρατήρηση και τη μέτρηση. Σύμφωνα με το Bohr η παρατήρηση ενός κβαντικού αντικειμένου προκαλεί μια σημαντική μεταλλαγή του αντικειμένου αυτού, λόγω της αλληλεπίδρασής του με τη μετρητική συσκευή. Η αλληλεπίδραση της μετρητικής συσκευής και του παρατηρούμενου αντικειμένου είναι ανεξέλεγκτη και επηρεάζει τόσο το αντικείμενο όσο και τη συσκευή.

Σαν συνέπεια το αποτέλεσμα της μέτρησης μπορεί να προβλεφθεί μόνο στατιστικά.

Επίσης όταν παρατηρούμε τη θέση ενός σωματιδίου επηρεάζουμε την ορμή του ανεξέλεγκτα και αντίστροφα, με συνέπεια να μην μπορούμε να προσδιορίσουμε με ακρίβεια και τα δύο. Δηλαδή στην κβαντική φυσική κάθε μέτρηση εμπεριέχει και μια επιλογή. Αν επιλέξουμε να μετρήσουμε το ένα παρατηρούμενο επιλέγουμε να μην μετρήσουμε ένα άλλο. Το ίδιο συμβαίνει όταν προσπαθούμε να καθορίσουμε ταυτόχρονα την ενέργεια και το χρόνο. Η συμπληρωματικότητα αυτή εκφράζει την ιδέα μιας ανεξέλεγκτης φυσικής αλληλεπίδρασης η οποία κατά τον Bohr εξασφαλίζει και εγγυάται τις σχέσεις απροσδιοριστίας του Heisenberg και έχει σαν συνέπεια το στατιστικό χαρακτήρα της κβαντικής θεωρίας. Ο Einstein όμως αν και αναγνώριζε τα επιτεύγματα της κβαντομηχανικής δεν μπορούσε να δεχτεί καταρχήν ότι μια φυσική θεωρία δεν είναι σε θέση να παρέχει πληροφορίες σχετικές με σημαντικές πτυχές της φύσης και οι οποίες να είναι ανεξάρτητες από τους παρατηρητές και τις παρατηρήσεις τους. Δηλαδή η κβαντομηχανική μέσω των πιθανοτήτων προβλέπει μόνο τα αποτελέσματα των μετρήσεων ενώ δεν αναφέρεται στο τι μπορεί να περιλαμβάνει η φυσική πραγματικότητα απουσία παρατήρησης και μέτρησης. Δηλαδή ο Einstein δεν μπορούσε να αποδεχθεί το ότι ενώ υπάρχουν φυσικοί νόμοι έστω και πιθανοκρατικοί όταν κάποιος παρατηρεί, δεν υπάρχουν καθόλου νόμοι, κανενός είδους για το πως είναι τα πράγματα ανεξαρτήτως παρατήρησης, καθώς αυτό δίνει στη θεωρία έναν χαρακτήρα μη ρεαλιστικό. Τον ενοχλούσε επίσης το γεγονός ότι ο χαρακτήρας της κβαντικής ήταν εγγενώς στατιστικός. Δεν ήταν η πρώτη φορά που μια φυσική θεωρία είχε στατιστικό χαρακτήρα. Όμως ενώ για παράδειγμα στην περίπτωση της κινητικής θεωρίας η χρήση της στατιστικής και των πιθανοτήτων οφείλεται στην έλλειψη επαρκούς πληροφορίας και γνώσης, η περίπτωση των κβαντικών πιθανοτήτων είναι εντελώς διαφορετική. Οι πιθανότητες που ενσωματώνονται στην κυματοσυνάρτηση είναι θεμελιώδεις, αποτελούν εγγενές χαρακτηριστικό των κβαντικών συστημάτων και δεν προκύπτουν ως αποτέλεσμα της άγνοιάς μας σχετικά με όλες τις λεπτομέρειες που σχετίζονται με το παρατηρούμενο σύστημα. Κατ' αυτήν την έννοια η κβαντομηχανική είναι μια μη αιτιοκρατική θεωρία. Έτσι ο Einstein άρχισε να διερευνά το κατά πόσο η κβαντομηχανική είναι μια μη

ρεαλιστική και μη αιτιοκρατική θεωρία και να εξετάζει τη δυνατότητα ύπαρξης μια πλήρους θεωρίας στην οποία να μπορούν να προβλεφθούν ταυτόχρονα τα ασύμβατα φυσικά μεγέθη της κβαντομηχανικής όπως η θέση και η ορμή. Αφού η κβαντική δεν παρέχει αυτή τη δυνατότητα είναι μη πλήρης θεωρία συμπεραίνει. Αναρωτιόταν κατά πόσο μπορούμε έστω καταρχήν να αποδώσουμε συγκεκριμένες ιδιότητες σε ένα κβαντικό σύστημα απουσία μέτρησης και κατά πόσο ο μαθηματικός φορμαλισμός της κβαντικής θεωρίας μπορεί να μας εφοδιάσει με μια πλήρη περιγραφή του κβαντικού συστήματος. Η διαμάχη του Einstein με τον Bohr ως προς την ερμηνεία της κβαντομηχανικής άρχισε στο συνέδριο Solvay τον Οκτώβριο του 1927, όπου παρόντων όλων των ιδρυτών της θεωρίας (Planck, Bohr, de Broglie, Dirac, Pauli, Heisenberg κ.ά.) επινοούσε νοητικά πειράματα ώστε να καταδείξει τις εσωτερικές αντιφάσεις της ερμηνείας της Κοπεγχάγης. Στο συνέδριο του Solvay το 1930 ο Einstein παρουσίασε ένα ακόμη ευφυές πείραμα σκέψης. Στο πείραμα αυτό περιγράφει ένα κουτί που μπορεί να εκπέμψει ένα φωτόνιο. Το κουτί έχει άνοιγμα σε μια από τις πλευρές του και περιέχει ένα ρολόι που καθορίζει τη χρονική στιγμή της εκπομπής του φωτονίου. Στο άνοιγμα αυτό τοποθετείται μια πόρτα που ελέγχεται από το ρολόι. Το κουτί κρέμεται από το ελατήριο μιας ζυγαριάς που μετράει το βάρος του. Το βάρος του είναι ανάλογο της μάζας ηρεμίας του m και συνεπώς ανάλογο της ενέργειάς του E σύμφωνα με τη σχέση του Einstein $E=mc^2$.



Εικόνα 1.1.Ο μηχανισμός που πρότεινε ο Einstein.

Τα επιχειρήματα του Einstein ήταν τα παρακάτω:

Έστω ότι περιμένουμε να ισοροπήσει το κουτί και κάνουμε μια ακριβή αρχική ζύγιση. Αφού εκπνευθεί το φωτόνιο και εγκαταλείψει το κουτί, πραγματοποιούμε μια τελική ακριβή ζύγιση του κουτιού. Από τη διαφορά βάρους υπολογίζουμε την ενέργεια του φωτονίου χρησιμοποιώντας τη σχέση $E=mc^2$. Επομένως, υποστηρίζει ο Einstein μπορεί κανείς να προσδιορίσει σε οποιοδήποτε επίπεδο ακρίβειας και την ενέργεια του φωτονίου αλλά και το χρόνο στον οποίο απελευθερώνεται. Συνεπώς παραβιάζεται η αρχή της απροσδιοριστίας.

Σύμφωνα με τον Roselfeld, (ο οποίος σύντομα θα γινόταν βοηθός του Bohr), ο Bohr αν και όντας εξαιρετικά παραγμένος δεν είδε αμέσως τη λύση, η απάντησή του στην αμφισβήτηση της αρχής της απροσδιοριστίας από τον Einstein δεν άργησε να έρθει (Rosenfeld, 1968). Ο Bohr παρατήρησε ότι στο επιχείρημα του, ο Einstein δεν έλαβε υπόψη πως η ζύγιση του κουτιού ισοδυναμεί με την παρατήρηση της μετατόπισής του στο βαρυτικό πεδίο, με αποτέλεσμα η μετατόπιση αυτή να παράγει μια απροσδιοριστία στον προσδιορισμό της μάζας και συνεπώς στην ενέργεια του φωτονίου. Μαζί με το κουτί μετατοπίζεται και το ρολόι που περιέχει. Επομένως ο ρυθμός του χτύπου του ρολογιού

στη νέα θέση διαφέρει από τον αντίστοιχο ρυθμό στην αρχική θέση ,διότι τώρα βρίσκεται σε ένα ελαφρώς διαφορετικό βαρυτικό πεδίο. Έτσι προκύπτει απροσδιοριστία και στον προσδιορισμό του χρόνου. Ο Bohr απέδειξε ότι ισχύει η σχέση $\Delta E \cdot \Delta t > h$, σε συμφωνία με την αρχή της απροσδιοριστίας .Η απάντηση του Bohr στο επιχείρημα του Einstein ήταν εξαιρετικά ευφυής καθώς χρησιμοποίησε τη γενική θεωρία της σχετικότητας για να τον αντικρούσει.(Τα ρολόγια χτυπούν σε διαφορετικούς ρυθμούς αναλόγως του πεδίου βαρύτητας στο οποίο βρίσκονται σύμφωνα με τη γενική θεωρία της σχετικότητας.). Ο Bohr επίσης δεν αγνόησε τις πρακτικές λεπτομέρειες που αφορούσαν τις μετρήσεις, όπως την εξάρτηση του κουτιού από ένα ελατήριο ώστε να ζυγιστεί ,τις μεγάλες βίδες που στερεώνουν το ζυγό στη θέση του κ.λπ. Ο θρίαμβός του ήταν εντυπωσιακός και περιείχε σε πρώτη ματιά κι ένα τρομακτικό στοιχείο ! Πώς η κβαντομηχανική γνωρίζει τη γενική θεωρία της σχετικότητας; Η απάντηση είναι απλή. Για να μετρήσουμε τη μάζα του κουτιού και του περιεχομένου του το ζυγίσαμε. Η ενέργεια είναι ισοδύναμη με την αδρανειακή μάζα. Στο νοητικό πείραμα μετρήθηκε η βαρυτική μάζα . Με το να θεωρήσουμε ότι είναι ίσες, υποθέτουμε ότι ισχύει η αρχή της ισοδυναμίας ,ένα από τα αξιώματα της γενικής σχετικότητας. Αυτό το αξίωμα και η ισοδυναμία μάζας και ενέργειας υπαινίσσονται τη σχέση διαστολής του χρόνου της γενικής σχετικότητας. (Aharonov Y., pg.20).

Το παράδοξο του ρολογιού στο κουτί ήταν ένα σημείο καμπής για την κριτική του Einstein στην κβαντική θεωρία. Ενώ πριν τη διατύπωση του παραδόξου προσπαθούσε να αποδείξει ότι η κβαντική θεωρία ήταν ασυνεπής , στη συνέχεια έστρεψε τις προσπάθειές του στο να αποδείξει ότι η θεωρία δεν ήταν πλήρης. Οι προσπάθειές του αυτές τον οδήγησαν στη διατύπωση του παραδόξου E.P.R.

Μετά την αποτυχία του κατά τη διατύπωση του παραδόξου του ρολογιού στο κουτί στο συνέδριο του Solvey το 1933 ο Einstein παρακολούθησε μια διάλεξη του Bohr σχετική με την κβαντική θεωρία. Παρακολούθησε με προσοχή την επιχειρηματολογία κι όταν ξεκίνησε η συζήτηση την έστρεψε στην κατεύθυνση του νοήματος της κβαντομηχανικής. Ο Rosenfeld αναφέρει πως ο Einstein τον ρώτησε : «Τι θα έλεγες για την ακόλουθη κατάσταση; Ας υποθέσουμε ότι δύο σωματίδια τίθενται σε κίνηση το ένα προς το άλλο με την ίδια πολύ μεγάλη ορμή και ότι αλληλεπιδρούν μεταξύ τους για πολύ μικρό χρονικό διάστημα όταν διέρχονται από γνωστές θέσεις .Φαντάσου τώρα ένα παρατηρητή ο οποίος πιάνει ένα από τα σωματίδια πολύ μακριά από το σημείο της αλληλεπίδρασης ,και μετρά την ορμή του. Ύστερα από τις συνθήκες του πειράματος θα είναι σε θέση προφανώς να συμπεράνει την ορμή του άλλου σωματιδίου .Αν ωστόσο επιλέξει να μετρήσει τη θέση του πρώτου σωματιδίου θα είναι σε θέση να εντοπίσει τη θέση του άλλου σωματιδίου. Αυτό είναι ένα πολύ ορθό και άμεσο συμπέρασμα από τις αρχές της κβαντομηχανικής. Αλλά δεν είναι πολύ παράδοξο; Πώς μπορεί η τελική κατάσταση του δεύτερου σωματιδίου να επηρεασθεί από μια μέτρηση που πραγματοποιείται επί του πρώτου ,αφ' ότου έχει παύσει κάθε φυσική αλληλεπίδραση μεταξύ τους;» (Aczel A.,2001) .Η σύλληψη αυτής της αρχικής ιδέας που διατύπωσε ο Einstein κατά τη διάρκεια της παρουσίας του Bohr θα συνέχιζε να τον απασχολεί και θα έπαιρνε την τελική της μορφή δύο χρόνια αργότερα.

Με την άνοδο του Χίτλερ στην εξουσία ο Einstein εγκατέλειψε τη Γερμανία και τον Οκτώβριο του 1933 έφθασε στο Πρίνστον όπου εργάστηκε στο Ινστιτούτο Προχωρημένων Μελετών με βοηθό τον εικοσιτετράχρονο Αμερικανό φυσικό Νέιθαν

Ρόζεν. Συνεργάστηκε επίσης με τον εβραϊκής καταγωγής Ρώσο-Αμερικανό φυσικό Μπορίς Ποντόλσκι που είχε γνωρίσει νωρίτερα στο Καλτέκ. Παρά το γεγονός ότι ο Αϊνστάιν συνήθως εργαζόταν μόνος του ,επιστράτευσε τη βοήθεια τους ώστε να επιχειρηματολογήσει εναντίον της Κβαντικής θεωρίας.

2.3. Το περιεχόμενο της εργασίας *EPR*

Όπως αναφέραμε οι EPR δημοσίευσαν την εργασία τους με τίτλο « Can Quantum-Mechanical -Description of Physical Reality Be Considered Complete?», στο περιοδικό Physical Review ,τον Μάιο του 1935. Στην εργασία αυτή επεδίωξαν να αποδείξουν ότι η περιγραφή ενός φυσικού συστήματος από την κυματοσυνάρτησή του όπως αυτή καθορίζεται από την κβαντομηχανική, δεν προσδιορίζει πλήρως το σύνολο των παραμέτρων ή των στοιχείων που ονομάζουν στοιχεία πραγματικότητας τα οποία είναι απαραίτητα για μια πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας και προσδιορίζουν την ταυτότητα του φυσικού συστήματος.

Στην εισαγωγική περίληψη της πραγματείας τους οι EPR αναφέρουν ότι σύμφωνα με την κβαντομηχανική θεωρία στην περίπτωση φυσικών ποσοτήτων που περιγράφονται από μη μετατιθέμενους τελεστές η ακριβής γνώση της μιας αποκλείει την αντίστοιχη γνώση της άλλης και ισχυρίζονται ότι κατά συνέπεια μόνο ένας από τους δύο παρακάτω ισχυρισμούς μπορεί να ισχύει. Σύμφωνα με τον πρώτο ισχυρισμό :

(1)«*Η περιγραφή της πραγματικότητας που δίνεται από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι πλήρης*» ,

ενώ σύμφωνα με τον δεύτερο ισχυρισμό:

(2) «*Δύο φυσικές ποσότητες που περιγράφονται από μη μετατιθέμενους τελεστές δεν μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα*».

Οι EPR υποστηρίζουν στη συνέχεια ότι η μελέτη του προβλήματος να πραγματοποιούμε προβλέψεις που αφορούν ένα σύστημα ,κάνοντας μετρήσεις σε ένα άλλο σύστημα που είχε προηγούμενα αλληλεπιδράσει με το πρώτο ,οδηγεί στο συμπέρασμα ότι αν ο ισχυρισμός (1) είναι λανθασμένος τότε αποδεικνύεται ταυτόχρονα λανθασμένος και ο (2) οπότε καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι η περιγραφή που δίνεται από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι πλήρης.

Για να στηρίξουν τις ιδέες τους στην αρχή της εργασίας τους οι EPR διατυπώνουν τρεις συνθήκες που αφορούν :

α) Την πληρότητα μιας θεωρίας .

β) Την ύπαρξη ενός στοιχείου της φυσικής πραγματικότητας.

γ) Την αρχή της τοπικότητας.

Συγκεκριμένα πρώτα θέτουν μια απαραίτητη προϋπόθεση ώστε να θεωρηθεί μια φυσική θεωρία πλήρης . Γράφουν :

« *Όποιο κι αν είναι το νόημα που αποδίδεται στον όρο πλήρης η ακόλουθη απαίτησή για να είναι μια θεωρία πλήρης φαίνεται να είναι απαραίτητη : Κάθε στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας πρέπει να έχει ένα αντίστοιχο στη φυσική θεωρία*» (EPR 1935, σελ.777)

Ονομάζουν την πρόταση αυτή *κριτήριο πληρότητας*.

Στη συνέχεια για να προσδιορίσουν πότε μια φυσική ποσότητα έχει καθορισμένη τιμή διατυπώνουν μια συνθήκη χρησιμοποιώντας τον όρο *στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας*. Ξεκαθαρίζουν ότι κάτι τέτοιο δεν μπορεί να οριστεί μέσω a priori φιλοσοφικών θεωρήσεων, αλλά πάντα σε σχέση με τα αποτελέσματά πειραμάτων και μετρήσεων. Χωρίς να ορίζουν ρητά τον όρο *στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας* διατυπώνουν το παρακάτω κριτήριο που θεωρούν λογικό :

« Αν χωρίς να διαταράζουμε με κανένα τρόπο ένα σύστημα μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα, (δηλ. με πιθανότητα που ισούται με μονάδα), την τιμή μια φυσικής ποσότητας, τότε υπάρχει εκεί ένα στοιχείο φυσικής πραγματικότητας που αντιστοιχεί σε αυτήν την φυσική ποσότητα .» (EPR 1935, σελ.777) .

Η παραπάνω προϋπόθεση για το στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας αναφέρεται συχνά ως το κριτήριο της πραγματικότητας των EPR.

Ο Αναπολιτάνος παρατηρεί ότι το κριτήριο της πραγματικότητας που θέτουν οι EPR είναι μια συνθήκη ικανή και όχι αναγκαία για την ύπαρξη ενός στοιχείου φυσικής πραγματικότητας .Δηλαδή το κριτήριο δεν αξιώνει ότι η τιμή κάθε στοιχείου της πραγματικότητας είναι δυνατόν να προβλεφθεί με βεβαιότητα (δηλαδή με πιθανότητα ίση με ένα), μια αξίωση που θα ήταν απόλυτα σύμφωνη με μια αιτιοκρατική θεώρηση της φυσικής πραγματικότητας. Αυτό που απαιτεί το παραπάνω κριτήριο των EPR είναι ότι εάν η τιμή ενός φυσικού μεγέθους μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα ,τότε θα πρέπει να υπάρχει ένα αντίστοιχο στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας που να πραγματώνει αυτήν την δυνατότητα. (Αναπολιτάνος 2003 ,σ.295).

Σχετικά με τη συνθήκη ύπαρξης ενός στοιχείου φυσικής πραγματικότητας οι EPR σχολιάζουν πως αν και δεν εξαντλεί όλους τους πιθανούς τρόπους για να αναγνωρίσουμε μια φυσική πραγματικότητα ,μας παρέχει ωστόσο έναν τέτοιο τρόπο όποτε οι συνθήκες είναι οι κατάλληλες. Ισχυρίζονται δε πως το κριτήριο της πραγματικότητας χωρίς να είναι απαραίτητο αλλά απλώς επαρκές ,είναι σε συμφωνία τόσο με την κλασική όσο και με την κβαντική θεωρία. Διαπιστώνουμε ότι δεν ορίζουν με ακρίβεια το στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας ,αλλά χρησιμοποιούν την έκφραση αυτή για να αναφερθούν σε τιμές φυσικών μεγεθών (πχ. της θέσης και της ορμής) οι οποίες καθορίζονται πάντα από μια υποκείμενη φυσική πραγματικότητα. Δηλαδή θεωρούν ότι :*τα κβαντικά συστήματα βρίσκονται σε πραγματικές καταστάσεις , οι οποίες αποδίδουν συγκεκριμένες τιμές σε συγκεκριμένες φυσικές ποσότητες. Όταν οι φυσικές ποσότητες έχουν συγκεκριμένες τιμές τότε υπάρχει ένα στοιχείο φυσικής πραγματικότητας που αντιστοιχεί σε αυτές.* Η σχέση που συνδέει τις πραγματικές καταστάσεις με τον καθορισμό των τιμών των φυσικών ποσοτήτων είναι τέτοια που αν δεν μεταβληθεί η πραγματική κατάσταση δεν είναι δυνατόν να αλλάξουν οι αποδιδόμενες στις φυσικές ποσότητες τιμές .

Η τρίτη συνθήκη στην οποία εδράζουν τους ισχυρισμούς τους οι EPR είναι αυτή της τοπικότητας :

«Εάν κατά τη στιγμή της μέτρησης δύο συστήματα δεν αλληλεπιδρούν ,καμία πραγματική αλλαγή δεν μπορεί να συμβεί στο δεύτερο σύστημα ,σαν συνέπεια κάποιας επέμβασης στο πρώτο σύστημα.» (EPR., 1935,P.779)

Η αρχή της τοπικότητας είχε για τον Einstein ιδιαίτερη σημασία καθώς παίζει θεμελιώδη ρόλο στην ειδική θεωρία της σχετικότητας .

Για να επιδείξουν τις ιδέες τους οι EPR θεωρούν την κβαντομηχανική περιγραφή ενός

σωματιδίου με έναν βαθμό ελευθερίας. Σύμφωνα με αυτήν η κατάσταση του σωματιδίου περιγράφεται πλήρως από μια κυματοσυνάρτηση ψ η οποία είναι συνάρτηση των μεταβλητών με τις οποίες περιγράφουμε τη συμπεριφορά του. Σε κάθε παρατηρήσιμη φυσική ποσότητα A αντιστοιχεί ένας τελεστής που μπορεί να συμβολίζεται με το ίδιο γράμμα. Αν η ψ είναι ιδιοσυνάρτηση του τελεστή A , δηλαδή όταν ικανοποιείται η εξίσωση ιδιοτιμών του $A\psi = a\psi$, όπου a ένας αριθμός, τότε όταν το σωματίδιο βρίσκεται στην κατάσταση που περιγράφεται από την ψ , το φυσικό μέγεθος A παίρνει με βεβαιότητα (πιθανότητα 1) τη συγκεκριμένη τιμή a που λέγεται ιδιοτιμή. Αυτό σημαίνει ότι όταν το σωματίδιο βρίσκεται στην ιδιοκατάσταση ψ η τιμή του A μπορεί να προβλεφθεί με βεβαιότητα χωρίς να διαταράξουμε το σύστημα. Άρα σύμφωνα με το παραπάνω κριτήριο της πραγματικότητας για το σωματίδιο που βρίσκεται στην κατάσταση που αποδίδεται από την ψ , υπάρχει ένα στοιχείο πραγματικότητας που αντιστοιχεί στη φυσική ποσότητα A . Παίρνουν για παράδειγμα την περίπτωση που το σωματίδιο βρίσκεται σε μια ιδιοκατάσταση του τελεστή της ορμής με αποτέλεσμα σύμφωνα με τα παραπάνω η ορμή του σωματιδίου να έχει μια απόλυτα καθορισμένη τιμή έστω p_0 . Συνεπώς στην κατάσταση αυτή η ορμή είναι πραγματική. Επειδή σύμφωνα με την κβαντική θεωρία ο τελεστής της θέσης x δεν μετατίθεται με τον τελεστή της ορμής p , όταν το σωματίδιο βρίσκεται σε κατάσταση που είναι ιδιοκατάσταση της ορμής έστω ψ , η εξίσωση ιδιοτιμών δεν ικανοποιείται για τον τελεστή της θέσης με αποτέλεσμα σύμφωνα με τη θεωρία να μην μπορεί να αποδοθεί μια συγκεκριμένη τιμή σε αυτήν. Ο μόνος τρόπος για να προσδιορίσουμε την τιμή της θέσης είναι να πραγματοποιήσουμε μια άμεση μέτρηση. Η μέτρηση αυτή όμως θα διαταράξει το σωματίδιο με αποτέλεσμα να του μεταβάλλει την κατάσταση. Έτσι όταν η θέση μετρηθεί και προσδιοριστεί με ακρίβεια η κατάσταση του σωματιδίου δεν θα είναι πια η ιδιοκατάσταση της ορμής. Αναφέρουν :

«Το σύννηθες συμπέρασμα που προκύπτει στην κβαντομηχανική είναι ότι όταν είναι γνωστή η ορμή ενός σωματιδίου, η θέση του δεν έχει φυσική πραγματικότητα.» (EPR 1935,σελ.778)

Συνεχίζουν γενικεύοντας τα παραπάνω στην περίπτωση δύο τελεστών A και B , που αντιστοιχούν στα φυσικά μεγέθη A και B και οι οποίοι δεν μετατίθενται, δηλ. εάν $AB \neq BA$, οπότε η ακριβής γνώση του A αποκλείει την αντίστοιχη ακριβή γνώση της τιμής του B . Επιπλέον αν προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε πειραματικά την τιμή αυτή, η πράξη της μέτρησης θα μεταβάλλει την κατάσταση του συστήματος με τέτοιο τρόπο που δεν θα γνωρίζουμε πια τιμή του πρώτου.

Καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι :

«Είτε (1) η κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας από την κυματοσυνάρτηση δεν είναι πλήρης είτε (2) όταν οι τελεστές που αντιστοιχούν σε δύο φυσικές ποσότητες δεν μετατίθενται, οι φυσικές αυτές ποσότητες δεν μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα» (EPR.1935,σελ.779).

Γιατί αν και οι δύο φυσικές ποσότητες, (για παράδειγμα η ορμή και η θέση), είχαν ταυτόχρονη πραγματικότητα, (δηλαδή σύμφωνα με το κριτήριο πραγματικότητας ακριβείς τιμές), τότε θα έπρεπε να περιλαμβάνονται και οι δύο αυτές τιμές σε μια πλήρη περιγραφή σύμφωνα με το κριτήριο της πληρότητας. Δηλαδή αν η κυματοσυνάρτηση μας παρείχε μια πλήρη περιγραφή της πραγματικότητας θα έπρεπε να περιλαμβάνει αυτές τις τιμές, ώστε να μπορούν να προβλεφθούν με ακρίβεια. Αφού αυτό δεν συμβαίνει και καμία κυματοσυνάρτηση δεν περιλαμβάνει και τις δύο, (καμία κυματοσυνάρτηση για παράδειγμα

δεν είναι ταυτόχρονα ιδιοσυνάρτηση τόσο για την ορμή όσο και για τη θέση), τότε η περιγραφή από την κυματοσυνάρτηση δεν μπορεί να είναι πλήρης.

Συνεχίζοντας αποπειρώνται να αποδείξουν το ότι αν η κβαντική θεωρία ήταν πλήρης (δηλαδή ο πρώτος ισχυρισμός είναι ψευδής), τότε τα ασυμβίβαστα φυσικά μεγέθη θα μπορούσαν να έχουν ταυτόχρονα πραγματικές τιμές (οπότε είναι ψευδής και ο δεύτερος ισχυρισμός).

Συγκεκριμένα αναφέρουν ότι : « Στην κβαντομηχανική θεωρείται συνήθως ότι η κυματοσυνάρτηση περιλαμβάνει μια πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας του συστήματος στην κατάσταση την οποία περιγράφει. Με μια πρώτη ματιά το συμπέρασμα αυτό είναι εντελώς λογικό ,καθώς η πληροφορία που αντλείται από μια κυματοσυνάρτηση φαίνεται να αντιστοιχεί ακριβώς σε ότι μπορεί να μετρηθεί χωρίς να μεταβάλλει την κατάσταση του συστήματος. Θα αποδείξουμε ωστόσο ότι αυτή η υπόθεση μαζί με το κριτήριο της πραγματικότητας που τέθηκε παραπάνω, οδηγούν σε αντίφαση.

(EPR.1935,σελ.779)

Ωστόσο στη συνέχεια αντί να ξεκινήσουν από την υπόθεση ότι η κβαντική περιγραφή της πραγματικότητας είναι πλήρης και να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι ασυμβίβαστα φυσικά μεγέθη μπορεί να έχουν τότε ταυτόχρονη πραγματικότητα , αποδεικνύουν το τελευταίο χωρίς να χρησιμοποιήσουν την προϋπόθεση της πληρότητας. Αποδεικνύουν δηλαδή ότι κάτω από συγκεκριμένες συνθήκες ένα κβαντικό σύστημα μπορεί να έχει ταυτόχρονα καθορισμένες τιμές για ασυμβίβαστες φυσικές ποσότητες ,συγκεκριμένα για τη θέση και την ορμή. Αυτές οι συγκεκριμένες τιμές προσδιορίζονται από την πραγματική κατάστασή του συστήματος και άρα είναι στοιχεία της πραγματικότητας.

Για να αποδείξουν τους ισχυρισμούς τους επινόησαν ένα πείραμα σκέψης που οι παραλλαγές του εξακολουθούν να συζητιούνται ως σήμερα και είναι πολύ σημαντικές. Το νοητικό πείραμα αφορά δύο κβαντικά συστήματα ,I και II τα οποία αλληλεπιδρούν για ένα χρονικό διάστημα έστω από $t=0$ έως $t=T$ και στη συνέχεια δεν αλληλεπιδρούν πια. Θεωρούν γνωστή την κατάσταση του κάθε συστήματος πριν την $t=0$.Με τη βοήθεια της εξίσωσης Schrodinger αναφέρουν ότι είναι δυνατός ο προσδιορισμός της κατάστασης του σύνθετου συστήματος I+II σε οποιαδήποτε χρονική στιγμή $t>T$. Εξετάζουν ως παράδειγμα το σύνθετο σύστημα δύο σωματιδίων και τις μετρήσεις της ορμής στον άξονα $-x$ και της θέσης x στο ένα από αυτά.Η συνολική κυματοσυνάρτηση του σύνθετου συστήματος έστω Ψ συνδέει τόσο τις θέσεις των συστημάτων όσο και τις ορμές των συστημάτων ακόμη κι όταν αυτά βρίσκονται μακριά το ένα από το άλλο. Η συνολική ορμή στο νοητικό πείραμα των EPR είναι ίση με μηδέν στον άξονα x . Έτσι αν η ορμή ενός από τα συστήματα κατά τον άξονα x ισούται με p τότε η x -συνιστώσα της ορμής του άλλου συστήματος βρίσκεται ίση με $-p$.Την ίδια στιγμή οι x -συντεταγμένες των θέσεων είναι επίσης ισχυρά συσχετισμένες έτσι ώστε ο προσδιορισμός της θέσης x ενός από τα συστήματα να μας δίνει τη δυνατότητα να συμπεράνουμε τη θέση στον x - άξονα για το δεύτερο σύστημα.

Για να στηρίξουν τους ισχυρισμούς τους οι EPR στηρίζονται σε δύο παραδοχές.

Η μια ,(της διαχωρίσιμης πραγματικότητας) επιβάλλει ότι από τη στιγμή που τα συστήματα απομακρύνονται αρκετά μεταξύ τους ,το καθένα έχει τη δική του αυτόνομη πραγματικότητα. Κάθε σύστημα διατηρεί την ξεχωριστή του ταυτότητα που αντιστοιχεί σε μια πραγματική φυσική κατάσταση παρόλο που τα δύο συστήματα είναι ισχυρά συσχετισμένα μεταξύ τους ως προς τη θέση x και την ορμή στο x -άξονα.

Η δεύτερη παραδοχή είναι αυτή της τοπικότητας που αναφέραμε παραπάνω.

Συγκεκριμένα αναφέρουν ότι «τη στιγμή της μέτρησης τα δύο συστήματα δεν αλληλεπιδρούν πια». Παρατηρούμε πως η παραδοχή της τοπικότητας δεν επιβάλλει ότι απολύτως τίποτα δεν μπορεί να διαταραχθεί στο ένα σύστημα σαν αποτέλεσμα μιας μέτρησης στο άλλο. Αυτό που αποκλείει είναι ότι μια απομακρυσμένη μέτρηση μπορεί

άμεσα να διαταράξει ή να μεταβάλλει ότι υπολογίζεται ως πραγματικό σε σχέση με το σύστημα, την πραγματικότητα δηλαδή που εγγυάται η διαχωριστικότητα. Στηριζόμενοι σε αυτές τις δύο παραδοχές αποδεικνύουν ότι ένα σύστημα μπορεί να έχει ταυτόχρονα πραγματικές τιμές τόσο για τη θέση όσο και για την ορμή. Συγκεκριμένα, αφού η τοπικότητα επιβεβαιώνει ότι η πραγματική κατάσταση ενός συστήματος δεν επηρεάζεται από απομακρυσμένες μετρήσεις και ότι είναι η πραγματική κατάσταση του συστήματος αυτή που προσδιορίζει ποιες ποσότητες είναι καθορισμένες, συνάγεται ότι το σύνολο των καθορισμένων ποσοτήτων δεν μπορεί επίσης να επηρεαστεί από τις απομακρυσμένες μετρήσεις.

Όταν λοιπόν πραγματοποιώντας μια μέτρηση στο ένα από τα απομακρυσμένα συστήματα, έστω το I, διαπιστώνουμε ότι μια ποσότητα του συστήματος II είναι καθορισμένη, η ποσότητα αυτή ήταν καθορισμένη πριν τη μέτρηση.

Αφού η ποσότητα αυτή είναι καθορισμένη, η κατάσταση του συστήματος αποτελεί ιδιοκατάσταση για την ποσότητα αυτή. Στην περίπτωση των αυστηρών συσχετίσεων στο νοητικό πείραμα των EPR η μέτρηση που πραγματοποιούμε στο ένα σύστημα πυροδοτεί την κατάρρευση της ολικής κυματοσυνάρτησης των δύο συστημάτων, οπότε προκύπτει μια ιδιοκατάσταση για το απομακρυσμένο σύστημα.

Σαν αποτέλεσμα κάθε ποσότητα που έχει αυτήν την ιδιοκατάσταση θα έχει καθορισμένη τιμή. Έτσι η μέτρηση της ορμής στο σύστημα I έχει σαν αποτέλεσμα την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης σε μια ιδιοκατάσταση της ορμής στο σύστημα II κι έτσι η ορμή του II είναι καθορισμένη. Δεδομένης λοιπόν της διαχωριστικότητας των συστημάτων, ο συνδυασμός της τοπικότητας και του κριτηρίου της πραγματικότητας επιβάλλει το εξής συμπέρασμα :

«Όταν ποσότητες σε διαχωρισμένα συστήματα έχουν ισχυρά συσχετισμένες τιμές, αυτές οι ποσότητες είναι καθορισμένες».

Άρα οι ισχυρές συσχετίσεις ανάμεσα στα συστήματα I και II του πειράματος EPR εγγυώνται ότι τόσο η ορμή όσο και η θέση των συστημάτων είναι καθορισμένες, δηλαδή κάθε σύστημα έχει ταυτόχρονα καθορισμένη θέση και ορμή.

Οι EPR επισημαίνουν ότι η ορμή και η θέση δεν μπορούν μεν να μετρηθούν ταυτόχρονα αλλά μπορούν ωστόσο να έχουν ταυτόχρονα καθορισμένες τιμές.

Ισχυρίζονται επίσης ότι λόγω της ισχύος της τοπικότητας η πραγματικότητα του ενός συστήματος απομονώνεται από εκείνη του άλλου.

Συνεπώς οι μετρήσεις που πραγματοποιούμε στο I είναι απλώς αποδεικτικές των χαρακτηριστικών της πραγματικής κατάστασης του συστήματος II, αλλά δεν τα καθορίζουν.

Άρα ακόμη κι αν δεν πραγματοποιηθεί μέτρηση στο σύστημα I, τα χαρακτηριστικά αυτά εξακολουθούν να υφίστανται. Μεταξύ αυτών των χαρακτηριστικών συμπεριλαμβάνονται μια καθορισμένη θέση και μια καθορισμένη ορμή στην ίδια διεύθυνση.

Ολοκληρώνοντας την αποδεικτική τους διαδικασία αναφέρουν:

« Ξεκινώντας από την υπόθεση ότι η κυματοσυνάρτηση περιλαμβάνει μια πλήρη περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας, φθάσαμε στο συμπέρασμα ότι δύο φυσικές ποσότητες, με μη μετατιθέμενους τελεστές, μπορούν να έχουν ταυτόχρονη πραγματικότητα. Άρα η άρνηση του (1) οδηγεί στην άρνηση του (2)⁴.

Είμαστε επομένως αναγκασμένοι να συμπεράνουμε ότι η κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας από τις κυματοσυναρτήσεις δεν είναι πλήρης».

(EPR, 1935, σελ. 780)

⁴ Αναφέρονται στους εισαγωγικούς ισχυρισμούς (1) και (2).

Ισχυρίζονται δηλαδή πως ο φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής δεν είναι πλήρης αφού δεν επιτρέπει την ύπαρξη – πραγματικότητα- φυσικών μεγεθών σε καταστάσεις που δεν αποτελούν ιδιοκαταστάσεις των μεγεθών αυτών.

Στην τελευταία παράγραφο του EPR ,ασχολούνται με το πώς ασύμβατα μεγέθη είναι δυνατόν να παίρνουν ταυτόχρονα πραγματικές τιμές. Ισχυρίζονται ότι :

«...δεν θα φθάναμε σε αυτό το συμπέρασμα αν κάποιος επέμενε ότι δύο ή περισσότερες φυσικές ποσότητες μπορούν να θεωρηθούν ως ταυτόχρονα στοιχεία πραγματικότητας μόνο αν μπορούν να μετρηθούν ή να προβλεφθούν ταυτόχρονα.» Υπό αυτό το πρίσμα αφού μόνο ένα από τα δύο μεγέθη μπορεί να μετρηθεί ή να προβλεφθεί ,αλλά όχι και τα δύο ταυτόχρονα ,τα μεγέθη δεν μπορεί να είναι ταυτόχρονα πραγματικά. Αυτό όμως θα σήμαινε ότι :

«...η πραγματικότητα των μεγεθών αυτών εξαρτάται από τη διαδικασία της μέτρησης που πραγματοποιείται στο πρώτο σύστημα και η οποία όμως δεν διαταράσσει με κανένα τρόπο την πραγματικότητα του άλλου συστήματος.» Καταλήγουν διαπιστώνοντας ότι: «...κανένας λογικός ορισμός της πραγματικότητας δεν αναμένεται να επιτρέπει κάτι τέτοιο.» (EPR .1935,σελ.780)

Στην τελευταία παράγραφο εκκινώντας από την μη πληρότητα της κβαντικής θεωρίας θέτουν το ερώτημα του κατά πόσο μπορεί ή όχι να υπάρξει μια πλήρης περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας. Ολοκληρώνουν την πραγματεία διατυπώνοντας την πεποίθησή τους για τη δυνατότητα ύπαρξης μιας τέτοιας πλήρους θεωρίας.

Ανακεφαλαιώνοντας , οι EPR στην πραγματεία τους υποστηρίζουν ότι διαχωρισμένα συστήματα μπορούν να έχουν ταυτόχρονα καθορισμένες τιμές θέσης και ορμής .Από τη στιγμή που αυτό δεν περιλαμβάνεται σε καμία κυματοσυνάρτηση η κβαντομηχανική περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας των συστημάτων δεν είναι πλήρης.

2.4.Η απάντηση του Bohr

Τέσσερις μήνες μετά τη δημοσίευση της εργασίας EPR , ο Bohr απάντησε υπερασπιζόμενος την έννοια της συμπληρωματικότητας και του ολιστικού χαρακτήρα των κβαντικών φαινομένων. Στην απάντησή του υποστήριξε ότι ο φορμαλισμός της κβαντομηχανικής είναι κατ' ουσία ασυμβίβαστος με την αξίωση των EPR σχετικά με την ύπαρξη διαχωρισμένων στοιχείων της πραγματικότητας.

Ο Bohr υποστήριξε ότι το κριτήριο της διαχωρισιμότητας των EPR δεν είναι δυνατόν να εφαρμοστεί στην κβαντομηχανική, το οποίο σημαίνει ότι στη συγκεκριμένη θεωρία δεν υπάρχει χώρος ούτε για την ελάχιστη μορφή ρεαλισμού που επιδιώκουν οι EPR. Όπως υποστηρίζει "κατά την ανάλυση των τυπικά κβαντικών φαινομένων", βρισκόμαστε αντιμέτωποι με την αδυναμία "να χαράξουμε μια αισθητή διάκριση μεταξύ της ανεξάρτητης συμπεριφοράς των κβαντικών οντοτήτων και της αλληλεπίδρασης τους με τη συσκευή μέτρησης". Δηλαδή η σαφής αναφορά στην κατάσταση ενός μικροσυστήματος δεν είναι δυνατή παρά μόνο σε σχέση με ένα συγκεκριμένο πειραματικό πλαίσιο.

Σαν αποτέλεσμα η διαδικασία της μέτρησης στην κβαντική μηχανική δεν αποκαλύπτει όπως οι EPR υποστήριζαν, μια προϋπάρχουσα και προκαθορισμένη τιμή του μετρούμενου φυσικού μεγέθους.Η απόρριψη των θέσεων των EPR από τον Bohr , αφορά κυρίως την απόρριψη της συνθήκης της τοπικότητας.

Σε ένα σχετικό άρθρο της στο περιοδικό Physics Today , η M. Beller υποστηρίζει ότι οι φιλοσοφικές θέσεις του Bohr και των άλλων θεμελιωτών της κβαντομηχανικής δεν αποτελούν απλά μία αναχρονιστική ιδιομορφία αφού τα σύγχρονα κείμενα της Φυσικής

συνεχίζουν να αποδέχονται και να υποστηρίζουν την ορθότητα της αντίληψης του Bohr για τη φυσική πραγματικότητα, ακόμα και αν η "ορθόδοξη" ερμηνεία της σχολής της Κοπεγχάγης (η εγκατάλειψη της αρχής της αιτιότητας και της έννοιας της ανεξάρτητης φυσικής πραγματικότητας) μπορεί να μην είναι η τελική.

2.5. Η εκδοχή του Bohm

Για τα περίπου 15 χρόνια που ακολούθησαν τη δημοσίευσή του, το παράδοξο EPR επανερχόταν στη συζήτηση, κάθε φορά που πρόκυπταν δυσκολίες στην κατανόηση της κβαντομηχανικής. Το 1951 ο David Bohm⁵ δημοσίευσε ένα εγχειρίδιο για την κβαντική θεωρία στο οποίο ασχολήθηκε με το παράδοξο EPR. Ο Bohm παρουσίασε έναν τρόπο για να αντιληφθεί κανείς την εννοιολογική σύλληψη του νοητικού πειράματος EPR. Στην πραγματεία τους οι EPR χρησιμοποίησαν μη φραγμένα φυσικά μεγέθη, την θέση και την ορμή, τα οποία έχουν συνεχή φάσματα τιμών με αποτέλεσμα να αντιμετωπίσουν μαθηματικές δυσκολίες. Ο Bohm απέφυγε αυτές τις δυσκολίες αναδιατυπώνοντας το πρόβλημα με άλλο τρόπο. Χρησιμοποίησε ένα σημαντικό παράδειγμα σύμπλεξης μελετώντας το διαχωρισμό ενός διατομικού μορίου του οποίου η συνολική στροφορμή spin είναι και παραμένει μηδέν. Θεωρεί δηλαδή ένα κβαντικό σύστημα S με ολικό spin μηδέν, αποτελούμενο από δύο σωματίδια S_1 και S_2 , καθένα από τα οποία έχει spin $\frac{1}{2}$. (Η κατάσταση αυτή των δύο σωματιδίων ονομάζεται κατάσταση singlet). Τέτοιο σύστημα αποτελεί για παράδειγμα ένα διεγερμένο μόριο υδρογόνου που διαχωρίζεται σε δύο άτομα υδρογόνου μέσω μιας διαδικασίας η οποία δεν μεταβάλλει το spin του κάθε σωματιδίου αλλά ούτε το μηδενικό αρχικό συνολικό spin (Bohm, 1951).

Η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει την κατάσταση με ολικό spin μηδέν, ενός συστήματος δύο σωματιδίων με spin $\frac{1}{2}$ το καθένα είναι η :

$$\Psi(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_+(1)\psi_-(2) - \psi_-(1)\psi_+(2)) .$$

Ο πρώτος όρος $\psi_+(1)\psi_-(2)$ αντιστοιχεί στην κατάσταση κατά την οποία το σωματίδιο 1 έχει spin πάνω και το σωματίδιο 2 έχει spin κάτω, και ο δεύτερος όρος στο ανάποδο. Πραγματικά με αυτούς τους δύο τρόπους μπορούμε να φτιάξουμε μια κατάσταση με ολικό spin μηδέν. Οι καταστάσεις spin των δύο επιμέρους ατόμων είναι συμπλεγμένες. Στο πείραμα του Bohm τα άτομα αφού αλληλεπιδράσουν διαχωρίζονται και απομακρύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Στη συνέχεια σε κάθε μια από τις δύο αυτές κατευθύνσεις γίνονται μετρήσεις των συνιστωσών του spin, των οποίων οι τιμές μετά το διαχωρισμό θα πρέπει να είναι αντισυσχετισμένες. Στην κατάσταση singlet του ατομικού ζεύγους μετά τη διάσταση, εάν ένα από τα ατομικά spin βρεθεί θετικό σε έναν άξονα κάθετο στη διεύθυνση της διαδρομής του ατόμου, τότε το άλλο άτομο θα πρέπει να έχει αρνητικό spin στον ίδιο άξονα. Αυτό ισχύει για κάθε διεύθυνση και για παράδειγμα έστω ότι μετράμε το spin του ενός σωματιδίου κατά τον άξονα- z και το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι θετικό. Σύμφωνα με την κβαντική μηχανική μετά τη μέτρηση η κυματοσυνάρτηση καταρρέει και η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται από την: $\Psi_Z(1,2) = \psi_{Z+}(1)\psi_{Z-}(2)$. Συνεπώς το spin του σωματιδίου S_2 κατά τον άξονα- z θα είναι αρνητικό, γεγονός που μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα και χωρίς το S_2 να έχει υποστεί καμία διαταραχή.

⁵ Γεννήθηκε το 1917 και ήταν φοιτητής του Robert Oppenheimer. Τελείωσε το διδακτορικό του στο Berkeley και κατόπιν δέχτηκε μια θέση στο Princeton University.

Αν στη συνέχεια μετρηθεί μια άλλη συνιστώσα του spin του σωματιδίου S_1 , έστω η χ και βρεθεί για παράδειγμα θετική, ομοίως μετά τη μέτρηση η κυματοσυνάρτηση που θα περιγράφει το σύστημα καταρρέει και η χ -συνιστώσα του spin του άλλου σωματιδίου μπορεί να προβλεφθεί με πιθανότητα ίση με 1, ότι είναι αρνητική, χωρίς το σωματίδιο αυτό να έχει υποστεί καμία διαταραχή. Οι τελεστές του spin σε διαφορετικούς ορθογώνιους άξονες δεν μετατίθενται, όπως αντίστοιχα και οι τελεστές της θέσης και της ορμής.

Συνεπώς χωρίς το σωματίδιο S_2 να διαταραχτεί, είναι δυνατόν να προβλεφθούν με βεβαιότητα οι τιμές δύο φυσικών ποσοτήτων (του spin στους άξονες z και χ), των οποίων οι τελεστές δεν μετατίθενται.

Σύμφωνα με το κριτήριο της πραγματικότητας των E.P.R οι δύο αυτές φυσικές ποσότητες είναι ταυτόχρονα πραγματικές, διότι οι τιμές τους προβλέπονται με βεβαιότητα χωρίς να διαταράσσεται το σύστημα. Σύμφωνα όμως με την ερμηνεία της Κοπεγχάγης η τιμή του spin στις δύο διαφορετικές διευθύνσεις δεν μπορεί να έχει ταυτόχρονη πραγματικότητα, αφού οι τελεστές των spin στις διευθύνσεις αυτές δεν μετατίθενται.

Η τροποποίηση του νοητικού πειράματος των E.P.R. από τον Bohm αποτελεί σημαντική συνεισφορά στην κατανόηση του φαινομένου της σύμπλεξης. Η εκδοχή αυτή του πειράματος είναι εκείνη που χρησιμοποιήθηκε πιο συχνά από τους πειραματιστές αλλά και τους θεωρητικούς που ασχολήθηκαν με το φαινόμενο της σύμπλεξης κατά τις επόμενες δεκαετίες.

Επιπλέον το 1957 ο Bohm με τον Aharonov σε μια δημοσίευσή τους περιέγραψαν το μηχανισμό ενός πειράματος με το οποίο ελέγχονται συμπλεγμένες συσχετίσεις. Πρότειναν έναν μηχανισμό «καθυστερημένης επιλογής» σύμφωνα με τον οποίο ο πειραματιστής επιλέγει την κατεύθυνση στην οποία θα μετρήσει την ιδιοστροφορμή, μόνον αφ' ότου τα σωματίδια θα έχουν ξεκινήσει την πορεία τους. Με αυτόν τον τρόπο εξασφαλίζεται ότι το ένα σωματίδιο, ή ο πειραματικός μηχανισμός δεν ειδοποιούν το άλλο σωματίδιο για το τι συμβαίνει. Αυτή η απαίτηση υιοθετήθηκε στη συνέχεια από τον John Bell το θεώρημα του οποίου θα άλλαζε τον τρόπο με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε την πραγματικότητα. Είναι σημαντικό ότι στο πείραμα που περιγράφεται από τον Bohm τα ατομικά θραύσματα απομακρύνονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους και συνεπώς καθίστανται κατάλληλα αντικείμενα για την διατύπωση υποθέσεων που περιορίζουν τις συνέπειες καθαρά τοπικών δράσεων. Έτσι το πείραμα του Bohm αντικατοπτρίζει τις συμπλεγμένες συσχετίσεις στο E.P.R. για συστήματα χωρικά διαχωρισμένα δίνοντας τη δυνατότητα για συμπεράσματα σχετικά με την τοπικότητα, τη διαχωρισιμότητα και την πληρότητα.

Οι παράξενες αυτές συσχετίσεις του πειράματος E.P.R/B⁶ φανερώνουν μη τοπικές επιρροές μεταξύ των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στα υποσυστήματα και πράγματι η θεωρία της κβαντικής κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης κατά την μέτρηση ενισχύει αυτό το συμπέρασμα. Σύμφωνα με τη θεωρία αυτή τα άτομα πριν τη μέτρηση δεν είχαν καθορισμένο spin. Τα άτομα δεν αποκτούν καθορισμένο spin παρά μόνο μετά την μέτρηση του spin του πρώτου ατόμου και το αποτέλεσμα της μέτρησης είναι τυχαίο. Ο Bohm ωστόσο επεδίωξε μια ερμηνεία του κβαντικού κόσμου μη τοπική μεν, αλλά ρεαλιστική και ντετερμινιστική. Ήθελε, όπως και ο Einstein να αποδείξει ότι τα κβαντικά αντικείμενα έχουν δική τους πραγματικότητα η οποία είναι ανεξάρτητη της μέτρησης. Ήταν

⁶ Έτσι συνηθίζεται να ονομάζουν την εκδοχή του Bohm για το πείραμα E.P.R: Πειράματα που ελέγχουν την παραβίαση των ανισοτήτων Bell, που χρησιμοποιούν συμπλεγμένα ζεύγη είτε φωτονίων, είτε μαζικών σωματιδίων με spin $\frac{1}{2}$ ονομάζονται EPR/B πειράματα, διότι η ικανότητα να της σύμπλεξης να προκαλεί την «περίεργη δράση από απόσταση» υποδείχθηκε πρώτα από τους EPR το 1935, και ο Bohm ήταν ο πρώτος που πρότεινε τη χρήση σωματιδίων με spin $\frac{1}{2}$ ώστε να γίνει ο αντίστοιχος έλεγχος.

αντίθετος με την άποψη ότι δεν υπάρχουν αντικειμενικές ιδιότητες στον κβαντικό κόσμο . Στην κατεύθυνση αυτή δεν μπορούσε παρά να συμφωνεί με τον Einstein ότι υπάρχουν κρυμμένες μεταβλητές που θα αποκαταστήσουν τον ρεαλισμό και την αιτιοκρατία. Ωστόσο η θεωρία του δεν ήταν τοπική. *Εισήγαγε δηλαδή μια νέα οπτική ,μιας ρεαλιστικής, ντετερμινιστικής ,αλλά μη τοπικής θεωρίας.*

2.6. Το θεώρημα του John Bell

Όπως έχουμε αναφέρει αυτό που ενοχλούσε τον Einstein ήταν ο θεμελιωδώς πιθανοκρατικός χαρακτήρας της κβαντομηχανικής και ως εναλλακτική πρότεινε την ύπαρξη μιας πλήρους θεωρίας που θα περιλάμβανε κρυμμένες παραμέτρους ,τις οποίες δεν γνωρίζουμε ακόμη και ακριβώς αυτή η άγνοια είναι που οδηγεί στην παρατηρούμενη πιθανοκρατική συμπεριφορά του μικρόκοσμου. Μια τέτοια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών αποδίδει λοιπόν τις πιθανότητες της κβαντικής σε ατελή γνώση. Για να είναι βεβαίως αξιόπιστη η όποια θεωρία λανθανουσών παραμέτρων, θα έπρεπε να συμφωνεί με τις προβλέψεις της κβαντομηχανικής σε όλο το φάσμα φαινομένων διότι οι προβλέψεις αυτές είχαν ελεγχθεί εξονυχιστικά και είχαν συστηματικά επιβεβαιωθεί. Μια τέτοια όμως θεωρία κρυμμένων μεταβλητών διατυπωμένη με σαφήνεια που να πληροί τα παραπάνω χαρακτηριστικά δεν διατυπώθηκε ποτέ. (Τραχανάς,2021)

Παρά την πεποίθησή του για την ύπαρξη θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών , ο Einstein είχε αντιληφθεί πως ότι οι κβαντικές πιθανότητες δεν είναι της ίδιας φύσης με τις κλασικές πιθανότητες. Για παράδειγμα οι κβαντικές πιθανότητες συνδέονται με κύματα πιθανότητας που μπορούν να συμβάλλουν και να αλληλοαναιρούνται ,κάτι που δεν ισχύει στην περίπτωση των κλασικών πιθανοτήτων. Έπρεπε λοιπόν να εντοπιστεί κάποια θεμελιώδης διαφορά μεταξύ των πιθανοτήτων της κλασικής και της κβαντικής Φυσικής που να ήταν δυνατόν να χρησιμοποιηθεί για να διακρίνει την κβαντομηχανική από οποιαδήποτε θεωρία κρυμμένων μεταβλητών. Θα έπρεπε δηλαδή να εντοπιστεί μια περιοχή φαινομένων στην οποία οι προβλέψεις της κβαντομηχανικής και της θεωρίας των κρυμμένων μεταβλητών να διαφέρουν και να επινοηθεί το κατάλληλο πείραμα που θα έκρινε με μετρήσιμο τρόπο τη διαφορά.

Σχετικά με τα πειράματα με τα spin των σωματιδίων ο Einstein υποστήριζε ότι τα σωματίδια είχαν συγκεκριμένο spin πριν την μέτρηση και όχι κάποιο «μίγμα των spin». Αυτά τα συγκεκριμένα spin που προϋπήρχαν της μέτρησης αποκάλυπταν οι μετρητικές συσκευές .Ωστόσο οι προβλέψεις του Einstein για τα spin μετά τη μέτρηση συμπίπτουν με αυτές της κβαντομηχανικής. Η διαφωνία λοιπόν εντοπίζεται στην κατάσταση του συστήματος πριν τη μέτρηση. Για άλλα 15 περίπου χρόνια μετά την παρέμβαση του Bohm το θέμα αγνοήθηκε καθώς θεωρήθηκε ότι είναι περισσότερο ένα φιλοσοφικό ζήτημα που δεν θα μπορούσε να ελεγχθεί μέσω πειραματικών μετρήσεων.

Μέχρι την εμφάνιση του John Bell , ο οποίος επινόησε τις περίφημες ανισότητες Bell μέσω των οποίων μπορούμε να διακρίνουμε πειραματικά οποιαδήποτε τοπική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών από την κβαντομηχανική. Με τον χαρακτηρισμό τοπική αναφερόμαστε σε κάθε θεωρία λανθανουσών παραμέτρων που δεν επιτρέπει ακαριαίες αλληλεπιδράσεις ή συσχετίσεις μεταξύ των απομακρυσμένων τμημάτων ενός συστήματος. Το 1964 ο Bell προσπαθώντας να διερευνήσει το γενικό πλαίσιο καθορισμού μιας τέτοιας αιτιοκρατικής τοπικής θεωρίας κρυμμένων μεταβλητών, έκανε μια δημοσίευση στην οποία υποστήριξε ότι η άποψη του Einstein για έναν κόσμο που οι ιδιότητες είναι πάντα επακριβώς καθορισμένες και ανεξάρτητες από τη διαδικασία της

μέτρησής τους ,παράγει μια πειραματικά μετρήσιμη διαφορά μεταξύ της κβαντομηχανικής πρόβλεψης και της πρόβλεψης που πραγματοποιείται από τις θεωρίες των κρυμμένων μεταβλητών. Στο περίφημο θεώρημά του ο John Bell το 1964 ισχυρίζεται ότι θεωρώντας ως δεδομένες κάποιες λογικές υποθέσεις ,κάθε τοπική εκδοχή του πειράματος E.P.R./B πρέπει να ικανοποιεί κάποιες ανισότητες σχετικά με τις πιθανότητες εμφάνισης των διαφόρων αποτελεσμάτων μέτρησης , τις «ανισότητες Bell » , οι οποίες δεν είναι συμβατές με τις κβαντομηχανικές προβλέψεις.

Ο Bell εισήγαγε την ιδέα της πραγματοποίησης ενός εργαστηριακού πειράματος στο οποίο να μετρούνται τα spin των σωματιδίων σε τρεις διαφορετικούς κι όχι σε δύο άξονες δεδομένου ότι μια τοπική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών δεν μπορούσε να διακριθεί από μια μη τοπική θεωρία μέσω των μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε δύο άξονες. Το κύριο αποτέλεσμα της διερεύνησής του ήταν η διατύπωση της ανισότητας Bell , η οποία θα έπρεπε να ικανοποιείται από κάθε αιτιοκρατική τοπική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που θα ικανοποιούσε το αίτημα των E.P.R για την ύπαρξη διαχωρίσιμων στοιχείων της πραγματικότητας. Το γεγονός ότι η ανισότητα Bell παραβιάζεται από την κβαντική μηχανική συνιστά το θεώρημα Bell:

« Καμία θεωρία λανθανουσών παραμέτρων ,που διατηρεί την τοπικότητα και τον αιτιοκρατικό προσδιορισμό ,δεν είναι δυνατόν να αναπαράγει το σύνολο των στατιστικών προβλέψεων της κβαντικής μηχανικής.» (Αναπολιτάνος,κ.ά.,2003)

Η ανισότητα Bell διερευνά τις ισχυρές συσχετίσεις που παρατηρούνται σε σύμπλεκτες καταστάσεις τύπου EPR. Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγει η μελέτη τους είναι ότι σε καταστάσεις σύμπλεξης ,η κβαντομηχανική προβλέπει συσχετίσεις πολύ ισχυρότερες από κάθε τοπική θεωρία κρυμμένων μεταβλητών (Τραχανάς, 2021)

Το γεγονός ότι η ανισότητα Bell παραβιάζεται από την κβαντική μηχανική είναι πολύ σημαντικό διότι συνεπάγεται τη δυνατότητα του πειραματικού ελέγχου και συνεπώς της αντίστοιχης πειραματικής σύγκρισης μεταξύ της κβαντικής μηχανικής και των τοπικών θεωριών κρυμμένων μεταβλητών. Δηλαδή η διατύπωση της ανισότητας Bell είχε ως αποτέλεσμα το ζήτημα της φύσης του κβαντικού κόσμου να μεταφερθεί από τη σφαίρα της θεωρίας στο πεδίο της πειραματικής διερεύνησης. Τα πειράματα σκέψης μετατράπηκαν έτσι σε πειραματικά επαληθεύσιμες προτάσεις. Σύμφωνα με το θεώρημα Bell αν η ανισότητα παραβιασθεί σε ένα πείραμα με πραγματικά συμπλεγμένα σωματίδια ή φωτόνια αυτό το αποτέλεσμα είναι απόδειξη μη τοπικότητας ,το οποίο σημαίνει ότι *κάτι που συμβαίνει στο ένα σωματίδιο επηρεάζει αυτομάτως αυτό που συμβαίνει στο δεύτερο σωματίδιο ανεξαρτήτως του πόσο μακριά μπορεί να βρίσκεται από το πρώτο.* Αυτό που έπρεπε να κάνουν τώρα οι πειραματιστές ,ήταν να επινοήσουν πειράματα που να κατέληγαν σε τέτοια αποτελέσματα.

2.7. Η πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της σύμπλεξης από τον Alain Aspect

Ο Alain Aspect ήταν αυτός , που αφού μελέτησε προσεκτικά το νοητικό πείραμα των EPR,τη δεκαετία του 80 πέτυχε να κατασκευάσει μια πειραματική διάταξη η οποία του επέτρεψε να αναπαράξει κατά το δυνατόν πιστότερα την εκδοχή του Bohm σχετικά με το νοητικό πείραμα EPR, ώστε να μετρήσει τις συσχετίσεις εκείνες για τις οποίες η κβαντομηχανική προβλέπει παραβίαση των ανισοτήτων Bell. Συγκεκριμένα κατασκεύασε μια πηγή συσχετισμένων φωτονίων και χρησιμοποίησε μετρητές πόλωσης αντί για μετρητές spin. Για να αποκλείσει το ενδεχόμενο οι μετρητές να αλληλεπιδρούν με τα

φωτόνια με αποτέλεσμα να δίνουν αποτελέσματα σύμφωνα με την τοπική πραγματικότητα επινόησε έναν μηχανισμό εναλλαγής των πολωτών της πειραματικής διάταξης ,ικανό να ανταποκριθεί σε τόσο μεγάλες ταχύτητες ,ώστε να αποκλείεται το ενδεχόμενο οι μετρητές να αλληλεπιδρούν με τα φωτόνια και σαν αποτέλεσμα αυτού να δίνουν αποτελέσματα συνεπή με την τοπική πραγματικότητα. Τα πειράματα του Aspect ήταν επιτυχημένα. Τα αποτελέσματά τους έδειχναν ότι παραβιάζεται η ανισότητα Bell επιβεβαιώνονται οι κβαντικές προβλέψεις ,ενώ οι προβλέψεις των τοπικών θεωριών κρυμμένων μεταβλητών δεν συνάδουν με την πειραματική μαρτυρία. Επομένως η κβαντομηχανική δικαιώθηκε , οι κρυφές μεταβλητές και η τοπικότητα ηττήθηκαν και η μη τοπική κβαντική σύμπλεξη προσδιορίστηκε ως ένα πραγματικό φαινόμενο.

3.

Οι επιπτώσεις της πειραματικής επιβεβαίωσης του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης στην κατανόηση και την περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας.

Η πειραματική επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης ως ένα πραγματικού και μη τοπικού φαινομένου είχε ως αποτέλεσμα τη δραστική αλλαγή του τρόπου με τον οποίο αντιλαμβανόμαστε τη φυσική πραγματικότητα. Ο τρόπος αυτός διαμορφώθηκε κυρίως μέσω της αισθητηριακής μας εμπειρίας και είναι εξαιρετικά παγιωμένος μέσα μας. Είναι αυτός ο τρόπος ερμηνείας της φυσικής πραγματικότητας που μας περιβάλλει που οδήγησε τον Einstein στο να αναζητήσει τις περίφημες κρυμμένες μεταβλητές για να «συμπληρώσει» την κβαντική θεωρία κατά τρόπο ώστε να περιλαμβάνει στοιχεία για τα οποία θα μπορούσαμε να είμαστε σίγουροι πως είναι στοιχεία της πραγματικότητας.

Ωστόσο μετά την επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης οδηγούμαστε στο συμπέρασμα πως η αντίληψη που έχουμε για την πραγματικότητα με βάση την αισθητηριακή μας εμπειρία δεν είναι επαρκής, ώστε να κατανοήσουμε τον τρόπο με τον οποίο συμβαίνουν τα φαινόμενα στον μικρόκοσμο, τον οποίο δεν βιώνουμε ευθέως. Το φαινόμενο της σύμπλεξης καταλύει την αντίληψη που έχουμε για τη χωρική απόσταση και την τοπικότητα, καθώς οι καταστάσεις σύμπλεξης μπορούν να περιγραφούν από μια κοινή κυματοσυνάρτηση που να περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα σωματίδια τα οποία λαμβάνονται ως σύστημα. Σε ένα τέτοιο σύστημα η χωρική απόσταση παύει να έχει το κλασικό της νόημα. Δύο συστήματα που βρίσκονται σε πολύ μεγάλη απόσταση μεταξύ τους συμπεριφέρονται με έναν συντονισμένο τρόπο και αυτό που συμβαίνει στο ένα επηρεάζει αυτά που συμβαίνουν στο άλλο ανεξάρτητα από την απόσταση αυτή. Μοιάζει σαν τα συστήματα που βρίσκονται σε σύμπλεξη να υπερβαίνουν το χώρο και χάνοντας την ατομικότητά τους να λειτουργούν ως ένα σύνολο, μια οντότητα, που δεν επηρεάζεται από τη φυσική απόσταση των συστατικών του.

Το παραδοσιακό λοιπόν φιλοσοφικό υπόβαθρο της επιστήμης κλονίζεται και ο τρόπος με τον οποίο περιγράφουμε τις οντότητες και τα φαινόμενα του μικρόκοσμου μεταβάλλεται καθώς αμφισβητούνται πλέον οι σχετικές συλλήψεις της κλασικής μηχανικής.

Οι έννοιες της τοπικότητας, της διαχωρισιμότητας των φυσικών συστημάτων, η αναπαράσταση των φυσικών αντικειμένων ως οντότητες που φέρουν πλήρως καθορισμένες ιδιότητες και των οποίων η συμπεριφορά είναι απολύτως προβλέψιμη και υπόκειται σε αιτιοκρατικούς νόμους οι αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μερών ενός συστήματος καθώς και η σχέση μέρους -όλου, και γενικότερα η αντίληψη μας για την φυσική πραγματικότητα μεταβάλλεται σημαντικά.

Υπό αυτό το πρίσμα λέγεται συχνά ότι η δυνατότητα σύλληψης της πραγματικότητας δεν είναι συμβατή με την κβαντομηχανική. Σε αυτό το συμπέρασμα καταλήγουν αρκετοί ερευνητές στηριζόμενοι κυρίως στις συνέπειες του θεωρήματος Bell όπως ο Michael Nielsen και ο Isaac Chuang στο βιβλίο τους « Quantum Computation and Quantum Information». Όπως αναφέρουν ανακεφαλαιώνοντας τις συνέπειες του θεωρήματος Bell, στη θεώρηση του κόσμου πρέπει να εγκαταλείψουμε την υπόθεση του ρεαλισμού ή της τοπικότητας ή και των δύο. (Nielsen & Chuang, 2010)

Θεωρούμε ωστόσο ότι είναι λάθος να συνδέουμε το φυσικό ρεαλισμό υποχρεωτικά με το είδος του ρεαλισμού που απορρέει από τις κλασικές αντιλήψεις. Αυτή η σύνδεση αποτελεί

ένα εννοιολογικό εμπόδιο ,(με την σημασία που του δίνει ο Bachelard ⁷), στην προσπάθειά μας να ερμηνεύσουμε τον φυσικό κόσμο με την κβαντομηχανική. Στη συνέχεια θα προσπαθήσουμε να περιγράψουμε το νέο αυτόν τρόπο θέασης της φυσικής πραγματικότητας , όπως προκύπτει μετά και την πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης. Στο πλαίσιο αυτό είναι λογικό να προσπαθήσουμε να αποσυνδέσουμε την έννοια της πραγματικότητας από κλασικές συλλήψεις όπως η διαχωριστικότητα ,η τοπικότητα ,ο διαχωρισμός μεταξύ παρατηρητή και παρατηρούμενου, η μηχανιστική αιτιοκρατία και ο οντολογικός αναγωγισμός.

3.1 Μια πιο προσεκτική «ματιά» στο φαινόμενο της σύμπλεξης.

Ας εξετάσουμε το σύστημα δύο σωματιδίων ,που δεν αλληλεπιδρούν. (Τα σωματίδια δεν είναι απαραίτητο να αλληλεπιδρούν ώστε να εμφανίζεται το φαινόμενο της σύμπλεξης.)

Έστω ότι το σωματίδιο (1) μπορεί να βρίσκεται σε κάποια από τις καταστάσεις :

$$|u_1\rangle , |u_2\rangle$$

Ενώ το σωματίδιο (2) μπορεί να βρίσκεται σε κάποια από τις καταστάσεις :

$$|v_1\rangle , |v_2\rangle$$

Αν θέλουμε να περιγράψουμε το συνολικό σύστημα, δηλαδή την κβαντική κατάσταση των δύο σωματιδίων ,στην περίπτωση που δεν αλληλεπιδρούν θα πρέπει η περιγραφή μας με κάποιο τρόπο να εξηγεί το «τι κάνει» το ένα και «τι κάνει» το άλλο σωματίδιο.

Για παράδειγμα να μας λέει ότι το ένα βρίσκεται στην κατάσταση $|u_1\rangle$ και το άλλο στην κατάσταση $|v_1\rangle$.

Μαθηματικά η κβαντική κατάσταση του ολικού συστήματος περιγράφεται συνεκτικά μέσω ενός γινομένου $|u_1\rangle \otimes |v_1\rangle$, που ονομάζεται ταυστικό γινόμενο.⁸

Φυσικά μπορούμε να έχουμε το σύνθετο σύστημα και σε άλλες καταστάσεις ,όπως στην κατάσταση:

$$|\Psi\rangle = (\alpha_1|u_1\rangle + \alpha_2|u_2\rangle) \otimes (\beta_1|v_1\rangle + \beta_2|v_2\rangle) = \alpha_1\beta_1|u_1\rangle \otimes |v_1\rangle + \alpha_1\beta_2|u_1\rangle \otimes |v_2\rangle + \alpha_2\beta_1|u_2\rangle \otimes |v_1\rangle + \alpha_2\beta_2|u_2\rangle \otimes |v_2\rangle .$$

Η παραπάνω κατάσταση αποτελεί υπέρθεση των καταστάσεων:

$$|u_1\rangle \otimes |v_1\rangle, |u_1\rangle \otimes |v_2\rangle, |u_2\rangle \otimes |v_1\rangle \text{ και } |u_2\rangle \otimes |v_2\rangle.$$

Ας θεωρήσουμε τώρα την περίπτωση μιας διαφορετικής κατάστασης του συνολικού συστήματος :

$$|\Psi'\rangle = |u_1\rangle \otimes |v_1\rangle + |u_2\rangle \otimes |v_2\rangle, \quad (1)$$

Θα διαπιστώσουμε ότι στην περίπτωση αυτή δεν είναι δυνατόν να αποφανθούμε σε ποια κατάσταση βρίσκεται το σωματίο (1) και σε ποια το σωματίο (2) όπως στις προηγούμενες.

Για παράδειγμα στην κατάσταση $|\Psi\rangle$, ξέραμε με βεβαιότητα ότι το (1) ήταν στην κατάσταση $(\alpha_1|u_1\rangle + \alpha_2|u_2\rangle)$ και το (2) στην κατάσταση $(\beta_1|v_1\rangle + \beta_2|v_2\rangle)$. Το μόνο που μπορούμε να συμπεράνουμε από τη μορφή της $|\Psi'\rangle$ είναι ότι όταν το (1) είναι στην κατάσταση $|u_1\rangle$, το (2) είναι στην κατάσταση $|v_1\rangle$ και αντίστοιχα όταν το (1) είναι στην

⁷ Είδη επιστημολογικών εμποδίων που εντοπίστηκαν από το έργο του Bachelard περιλαμβάνουν:

- Την τάση να βασίζεσαι σε παραπλανητικές διαισθητικές εμπειρίες.
- Την τάση γενίκευσης και
- Τα εμπόδια που προκαλούνται από τη φυσική γλώσσα

⁸ Είναι μια πράξη με την οποία πολλαπλασιάζουμε διανύσματα ket από διαφορετικούς διανυσματικούς χώρους.

κατάσταση $|u_2\rangle$, το (2) είναι στην κατάσταση $|v_2\rangle$.

Αλλά μπορώ άραγε να εκφράσω την $|\Psi'\rangle$ σε μια μορφή του τύπου :

$$|\Psi'\rangle = (\text{κατάσταση του σωματιδίου (1)}) \otimes (\text{κατάσταση του σωματιδίου (2)})$$

Ας το ελέγξουμε. Ίσως να μπορούμε να γράψουμε την $|\Psi'\rangle$ στη μορφή :

$$|\Psi'\rangle = (\alpha_1|u_1\rangle + \alpha_2|u_2\rangle) \otimes (\beta_1|v_1\rangle + \beta_2|v_2\rangle) = \alpha_1 \cdot \beta_1 |u_1\rangle \otimes |v_1\rangle + \alpha_1 \cdot \beta_2 |u_1\rangle \otimes |v_2\rangle + \alpha_2 \beta_1 |u_2\rangle \otimes |v_1\rangle + \alpha_2 \beta_2 |u_2\rangle \otimes |v_2\rangle . \quad (2)$$

Συγκρίνοντας τις (1) και (2) προκύπτουν οι παρακάτω :

$\alpha_1 \cdot \beta_1 = \alpha_2 \beta_2 = 1$ και $\alpha_1 \cdot \beta_2 = \alpha_2 \beta_1 = 0$, οι οποίες δεν είναι δυνατόν να ικανοποιούνται ταυτόχρονα. Εξ' αυτού προκύπτει ότι η κατάσταση $|\Psi'\rangle = |u_1\rangle \otimes |v_1\rangle + |u_2\rangle \otimes |v_2\rangle$ δεν είναι δυνατόν να παραγοντοποιηθεί. Πρόκειται δηλαδή για μια "περίεργη" κατάσταση του σύνθετου συστήματος στην οποία δεν μπορούμε να ξέρουμε το τι "κάνει" το πρώτο και τι το δεύτερο σωματίδιο ξεχωριστά. Η κατάσταση του ενός σωματιδίου εξαρτάται από την κατάσταση του άλλου σωματιδίου. Όταν το πρώτο βρίσκεται στην $|u_1\rangle$ το δεύτερο βρίσκεται στην $|v_1\rangle$ και όταν το πρώτο βρίσκεται στην $|u_2\rangle$ το δεύτερο βρίσκεται στην $|v_2\rangle$. Αυτή είναι μια κατάσταση σύμπλεξης.

Ας δούμε στη συνέχεια πιο αναλυτικά τα μαθηματικά που χρησιμοποιούμε για να περιγράψουμε το φαινόμενο της σύμπλεξης. Για το σκοπό αυτό θα χρησιμοποιήσουμε τις καταστάσεις spin δύο σωματιδίων. Οι καταστάσεις spin παριστάνονται μαθηματικά με τις μήτρες του Pauli. Οι τελευταίες περιγράφουν τον προσανατολισμό του spin, πάνω ή κάτω κατά μήκος ενός συγκεκριμένου άξονα x, y ή z και έχουν σε όλους τους άξονες δύο δυνατές ιδιοτιμές τις 1 και (-1), αφού οι άξονες αυτοί είναι ισοδύναμοι ανεξαρτήτως του ποιου εμείς επιλέγουμε σαν «άξονα κβάντωσης». (Τραχανάς, 2021). Επιλέγοντας ως άξονα κβάντωσης τον z , οι ιδιοκαταστάσεις των μητρών Pauli σε αυτόν τον άξονα παριστάνονται από τα ακόλουθα ιδιοδιανύσματα:

$$\begin{aligned} \text{Spin πάνω: } |\psi_+\rangle &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \\ \text{Spin κάτω: } |\psi_-\rangle &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

Ας θεωρήσουμε τώρα την κατάσταση singlet⁹ για ένα ζεύγος σωματιδίων που βρίσκονται σε σύμπλεξη, το ένα με spin-πάνω και το άλλο με spin-κάτω και ολικό spin $S=0$. Η κυματοσυνάρτηση για την κατάσταση singlet στην περίπτωση αυτή δίνεται από την :

$$|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_+\rangle_1 \otimes |\psi_-\rangle_2 - |\psi_-\rangle_1 \otimes |\psi_+\rangle_2), \quad (1)$$

Υπενθυμίζουμε πως $S=0$ είναι ο κβαντικός αριθμός του ολικού spin $\vec{S} = \vec{s}_1 + \vec{s}_2$ των δύο σωματιδίων με τυχούσες τιμές των κβαντικών αριθμών s_1 και s_2 , ο οποίος παίρνει όλες τις τιμές από $s_1 + s_2$ έως $|s_1 - s_2|$, προχωρώντας με βήμα μονάδα. Άρα στην περίπτωση που εξετάζουμε του συστήματος των δύο σωματιδίων με spin $\frac{1}{2}$ το καθένα, θα είναι $S=1$, ή $S=0$, με την πρώτη τιμή να αντιστοιχεί σε σωματίδια με παράλληλα spin και τη δεύτερη σε σωματίδια με αντίθετα spin. Για να προκύψει επομένως μια κατάσταση με ολικό spin

⁹ Singlet state : Αναφέρεται σε ένα σύστημα στο οποίο όλα τα ηλεκτρόνια είναι σε ζεύγη.

$S=0$,υπάρχουν δύο τρόποι. Ο πρώτος είναι να έχουμε το σωματίδιο (1) με spin πάνω και το σωματίδιο (2) με spin κάτω ($|\psi_+\rangle_1 \otimes |\varphi_-\rangle_2$) κι ο δεύτερος να έχουμε το σωματίδιο (1) με spin κάτω και το σωματίδιο (2) με spin πάνω ($|\psi_-\rangle_1 \otimes |\varphi_+\rangle_2$).Ο διπλός δείκτης 00 της ψ στο πρώτο μέλος αντιστοιχεί στις τιμές $S=0$ και $M=0$ των κβαντικών αριθμών του μέτρου του ολικού spin και του κβαντικού αριθμού της προβολής του spin στον άξονα z . Για $S=0$ έχουμε και $M=0$.

$$|\psi_+\rangle_1 \otimes |\varphi_-\rangle_2 = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 \times 0 \\ 1 \times 1 \\ 0 \times 0 \\ 0 \times 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, (2)$$

$$\text{Και } |\psi_-\rangle_1 \otimes |\varphi_+\rangle_2 = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \times 1 \\ 0 \times 0 \\ 1 \times 1 \\ 1 \times 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix}, (3)$$

Άρα από τις (1), (2), (3) παίρνουμε ότι :

$$|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right] \Rightarrow |\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix}, (4)$$

Η $|\psi_{00}\rangle$ της σχέσης (4) περιγράφει τη σύνθετη κατάσταση των δύο σωματιδίων. Θα προσπαθήσουμε τώρα να εργαστούμε προς τα πίσω και να διαχωρίσουμε την κατάσταση αυτή σε δύο ξεχωριστές καταστάσεις. Όπως εξηγήσαμε παραπάνω για ένα σύστημα με κυματοσυνάρτηση ψ ,προκειμένου αυτή να μπορεί να διαχωριστεί σε ξεχωριστές καταστάσεις θα πρέπει να μπορεί να διασπαστεί σε γινόμενα των καταστάσεων των δύο υποσυστημάτων $|\psi\rangle_1$ και $|\varphi\rangle_2$.

Δηλαδή να μπορεί να γραφτεί ως : $|\Psi\rangle = |\psi\rangle_1 \otimes |\varphi\rangle_2$

Η παραπάνω εξίσωση είναι γνωστή ως συνθήκη διαχωρισιμότητας .

Αν λοιπόν η ζητούμενη κατάσταση του πρώτου σωματιδίου περιγράφεται από την

$$\text{κυματοσυνάρτηση : } |\psi\rangle_1 = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix},$$

ενώ η ζητούμενη κατάσταση του δεύτερου σωματιδίου περιγράφεται από την

$$\text{κυματοσυνάρτηση : } |\varphi\rangle_2 = \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix}$$

για να ικανοποιείται η συνθήκη διαχωρισιμότητας θα πρέπει να ισχύει :

$$|\Psi\rangle = |\psi\rangle_1 \otimes |\varphi\rangle_2 \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \\ b \end{pmatrix} \otimes \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \Rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a \times c \\ a \times d \\ b \times c \\ b \times d \end{pmatrix} \Rightarrow$$

$$a \times c = 0$$

$$a \times d = \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$b \times c = -\frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$b \times d = 0$$

Το σύστημα των παραπάνω τεσσάρων εξισώσεων είναι αδύνατον. Εάν $a \times c = 0$

Τότε $a=0$ ή $c=0$ και δεδομένου ότι $a \times d \neq 0$ οπότε $a \neq 0$ και $b \times c \neq 0$, άρα $c \neq 0$

Αυτό σημαίνει πως δεν είναι δυνατόν να ικανοποιηθεί η συνθήκη διαχωρισιμότητας για την περίπτωση της κατάστασης singlet.

Παρακάτω θα διερευνήσουμε κατά πόσο στις περιπτώσεις των καταστάσεων σύμπλεξης παραβιάζεται η αρχή της διαχωρισιμότητας. Το παράδειγμα που θα χρησιμοποιήσουμε είναι αυτό των δύο ηλεκτρονίων στην κατάσταση singlet η οποία είναι μια κατάσταση σύμπλεξης όπως η $|\Psi'\rangle$

3.2. Ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας στις καταστάσεις κβαντικής σύμπλεξης;

Είδαμε στο 1.1 ότι τα κλασικά συστήματα υπακούουν στην αρχή της διαχωρισιμότητας. Σύμφωνα με αυτήν οι καταστάσεις των χωροχρονικά διαχωρισμένων υποσυστημάτων S_1, S_2, \dots, S_N ενός σύνθετου συστήματος S είναι ξεχωριστές και καλά καθορισμένες και οι καταστάσεις του σύνθετου συστήματος καθορίζονται πλήρως από αυτές και τις φυσικές τους αλληλεπιδράσεις και τις χωροχρονικές τους σχέσεις. Είδαμε παραπάνω ότι για να ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας η κατάσταση του σύνθετου συστήματος πρέπει να μπορεί να εκφραστεί σαν γινόμενο των καταστάσεων των ξεχωριστών υποσυστημάτων που το αποτελούν. Στην περίπτωση που αυτό είναι δυνατόν να γίνει, η συμπεριφορά του ενός υποσυστήματος δεν επηρεάζει και δεν εξαρτάται από τη συμπεριφορά του άλλου. Για παράδειγμα στην κλασική μηχανική, η κίνηση ενός συστήματος σωματιδίων μπορεί να περιγραφεί μέσω της κίνησης κάθε ξεχωριστού σωματιδίου και η συμπεριφορά του ενός σωματιδίου δεν εξαρτάται από τη συμπεριφορά του άλλου. Παρομοίως στον κλασικό ηλεκτρομαγνητισμό η συμπεριφορά ενός ηλεκτρομαγνητικού κύματος μπορεί να περιγραφεί μέσω της συμπεριφοράς του μαγνητικού και του ηλεκτρικού πεδίου που το αποτελούν.

Στην κβαντική μηχανική ωστόσο η αρχή της διαχωρισιμότητας παραβιάζεται συχνά. Στις περιπτώσεις σωματιδίων που βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξη, όπως για παράδειγμα δύο ηλεκτρόνια σε κατάσταση singlet, είδαμε στο Α ότι η κατάσταση του σύνθετου συστήματος δεν μπορεί να εκφραστεί σαν γινόμενο των καταστάσεων των ξεχωριστών συστατικών του υποσυστημάτων και η αρχή της διαχωρισιμότητας παραβιάζεται.

Συνεπώς μετά την πειραματική επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης, η μη διαχωρισιμότητα ανάγεται σε θεμελιώδες χαρακτηριστικό των κβαντικών συστημάτων. Έτσι λοιπόν στην περίπτωση συστημάτων που βρίσκονται σε σύμπλεξη, ακόμη κι αν πρόκειται για ένα σύστημα S που περιλαμβάνει μόνο δύο υποσυστήματα S_1 και S_2 , για παράδειγμα δύο σωματίδια τα οποία είχαν αλληλεπιδράσει για κάποιο χρονικό διάστημα στο παρελθόν, δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπίσουμε κάθε υποσύστημα ξεχωριστά ως ανεξάρτητο με αυτόνομη συμπεριφορά στο χώρο και το χρόνο. Αντιθέτως πρέπει να θεωρείται το σύνθετο σύστημα σαν μια ολότητα και μόνο σε αυτό μπορούμε να αντιστοιχίσουμε μια καλά καθορισμένη κατάσταση, διότι στις σύμπλεκτες καταστάσεις αποδίδεται μια κυματοσυνάρτηση η οποία έχει τη μορφή του γραμμικού συνδυασμού των γινομένων των επιμέρους μονοσωματιδιακών συναρτήσεων¹⁰. (Τραχανάς, 2021)
Πράγματι η μορφή γινομένου¹¹ είναι η μορφή της κυματοσυνάρτησης που περιγράφει

¹⁰ Δηλαδή κυματοσυναρτήσεων που εξαρτώνται μόνο από τις μεταβλητές του ενός σωματιδίου.

¹¹ Γινόμενο μονοσωματιδιακών κυματοσυναρτήσεων είναι κάθε γινόμενο της μορφής $\psi(\vec{r}_1)\phi(\vec{r}_2)$, όπου \vec{r}_1 και \vec{r}_2 τα διανύσματα θέσης των δύο σωματιδίων.

δύο σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και συνεπώς δεν εξαρτώνται το ένα από το άλλο, με συνέπεια η μελέτη τους να μπορεί γίνεται ξεχωριστά χωρίς να λαμβάνεται υπόψιν η κατάσταση του ενός όταν μελετούμε την κατάσταση του άλλου και να μην παραβιάζεται κατ' αυτόν τον τρόπο η αρχή της διαχωρισιμότητας. Έτσι το γεγονός ότι τα σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν περιγράφονται από μια κυματοσυνάρτηση που δεν έχει τη μορφή γινομένου, αλλά τη μορφή γραμμικού συνδυασμού τους, σημαίνει ότι η κατάσταση του ενός δεν είναι ανεξάρτητη αλλά επηρεάζεται από την κατάσταση του άλλου σωματιδίου, έστω κι αν δεν ασκείται καμία δύναμη μεταξύ τους.

Αυτή είναι η «ανεξήγητη δράση εξ' αποστάσεως»¹² του Einstein. Η ύπαρξη δηλαδή αμοιβαίων συσχετίσεων μεταξύ σωματιδίων που δεν αλληλεπιδρούν πια, ακόμη κι αν βρίσκονται πολύ μακριά το ένα από το άλλο. Μια τέτοια κατάσταση σύμπλεξης είναι η περίπτωση που μελετήσαμε μαθηματικά στο 3.1, δηλαδή η κατάσταση singlet του συστήματος δύο σωματιδίων με spin $\frac{1}{2}$ το καθένα και ολικό spin $S=0$, η οποία περιγράφεται από την κυματοσυνάρτηση :

$$|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_{+}\rangle_1 \otimes |\varphi_{-}\rangle_2 - |\psi_{-}\rangle_1 \otimes |\varphi_{+}\rangle_2), \quad (1)$$

Τέτοιες καταστάσεις είναι γνωστές ως μη διαχωρίσιμες καταστάσεις και διαφέρουν ριζικά από εκείνες οι οποίες μπορούν να γραφούν με τη μορφή γινομένου που είναι γνωστές και ως διαχωρίσιμες καταστάσεις. Η διαφορά τους είναι ότι η μέτρηση μιας ιδιότητας του ενός μόνο σωματιδίου, έχει ως αποτέλεσμα να επιλέγεται μόνο ο όρος του γραμμικού συνδυασμού στον οποίο το σωματίδιο αυτό έχει την ιδιότητα με την τιμή που μετρήθηκε. Η επιλογή αυτή έχει σαν αποτέλεσμα να υποχρεώνεται το άλλο σωματίδιο να βρεθεί στην κατάσταση εκείνη με την οποία συμμετέχει στον όρο αυτό. Εξυπακούεται ότι μετά τη μέτρηση η σύμπλεξη καταστρέφεται και οι καταστάσεις των δύο σωματιδίων δεν είναι πια συσχετισμένες μεταξύ τους. Αυτό συμβαίνει διότι η κυματοσυνάρτηση καταρρέει στον ένα όρο του γραμμικού συνδυασμού των γινομένων των σωματιδιακών κυματοσυναρτήσεων, έχει πάρει δηλαδή πλέον τη μορφή γινομένου και συνεπώς οι μετρήσεις πάνω στο ένα σωματίδιο αφήνουν το άλλο ανεπηρέαστο. Δεν υπάρχει πια συσχετισμός μεταξύ τους.

Στο παράδειγμα που εξετάζουμε οι συνιστώσες των spin των δύο σωματιδίων έχουν πάντα αντίθετο προσανατολισμό. Έτσι όταν, έστω μια χρονική στιγμή t_0 , η συνιστώσα spin του σωματιδίου (1) κατά μήκος μιας δεδομένης διεύθυνσης (για παράδειγμα του άξονα z), μετριέται και βρίσκεται ίση με $\frac{1}{2}\hbar$, λόγω της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης ψ_{00} στον όρο $\psi_{+}(1)\psi_{-}(2)$ η συνιστώσα spin του σωματιδίου (2) λαμβάνει με βεβαιότητα την τιμή $-\frac{1}{2}\hbar$, κάθε φορά που μετά τη χρονική στιγμή t_0 το (2) υποβάλλεται σε κατάλληλη μέτρηση της ίδιας συνιστώσας του spin με το σωματίδιο (1). Αυτό προκύπτει από τον τρόπο με τον οποίο οι καταστάσεις ψ_{+} και ψ_{-} συνδυάζονται στην ψ_{00} και έχει ως αποτέλεσμα όχι μόνο την αλληλεξάρτηση των υποσυστημάτων (1) και (2), αλλά και τη διατήρηση της ολικής στροφορμής spin του ζεύγους των δύο σωματιδίων με τελική συνέπεια το ολικό spin του σύνθετου συστήματος να ισούται με μηδέν.

Με άλλα λόγια η ιδιότητα του σύνθετου συστήματος να χαρακτηρίζεται από την τιμή $S=0$ για το συνολικό spin, αποτελεί μια ιδιότητα η οποία αφορά το σύστημα ως αδιαίρετο όλον και δεν μπορεί να προσδιοριστεί από καμία φυσική ιδιότητα των συστατικών του υποσυστημάτων όταν αυτά θεωρούνται ανεξάρτητα.

Πραγματικά η ιδιότητα του σύνθετου συστήματος να έχει ολικό spin μηδέν δεν εξηγείται από τις ιδιότητες των spin των (1) και (2), εφόσον κανένα από αυτά δεν έχει συγκεκριμέ-

¹² Spooky action from a distance

νη τιμή spin στην κατάσταση singlet που περιγράφεται από την κυματοσυνάρτηση ψ_{00} . Στην κατάσταση αυτή κανένα από τα σωματίδια (1) και (2) δεν βρίσκεται σε καθαρή κατάσταση, καθώς οι $\psi_{\pm}(1)$ και $\psi_{\pm}(2)$ δεν είναι ιδιοκαταστάσεις τους. Η ψ_{00} ωστόσο είναι ιδιοκατάσταση του τελεστή του συνολικού spin και δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι αποτελείται από συγκεκριμένες ξεχωριστές τιμές των spin των δύο σωματιδίων. Συνεπώς στην κατάσταση που περιγράφεται από την ψ_{00} καμία από τις συνιστώσες spin των σωματιδίων (1) και (2) δεν υφίσταται πραγματικά, αλλά και οι τρεις συνιστώσες spin του κάθε σωματιδίου συνυπάρχουν σε δυνητική μορφή. Κάθε μια από αυτές τις συνιστώσες έχει την τάση να πραγματοποιηθεί στην περίπτωση που το σχετιζόμενο σωματίδιο αλληλεπιδράσει με την κατάλληλη μετρητική συσκευή. Από την άποψη αυτή η κατάσταση singlet -όπως και κάθε σύνθετη κατάσταση υπέρθεσης αντιπροσωπεύει επί της ουσίας τη μη διαχωρίσιμη συσχέτιση μεταξύ των δυνατών τιμών που μπορούν να αποδοθούν στις ιδιότητες spin των σωματιδίων (1) και (2). Επιπλέον οι κατανομές πιθανότητας που σχετίζονται με τις συνιστώσες spin των (1) και (2) κατά μήκος κάποιας διεύθυνσης δεν διασφαλίζουν με βεβαιότητα, δηλαδή με πιθανότητα 1 την ιδιότητα το σύστημα να έχει συνολικό spin ίσο με μηδέν. Θα μπορούσε κάποιος υποστηρικτής του αναγωγισμού να υποστηρίξει ότι η ιδιότητα το συνολικό spin του συστήματος να είναι μηδέν προκύπτει όταν εξετάζοντας τα υποσυστήματα (1) και (2) ξεχωριστά, θεωρήσουμε ότι υπάρχει μεταξύ τους μια σχέση τέτοια που να οδηγούσε στο αποτέλεσμα οι συνιστώσες spin των (1) και (2) να είναι πλήρως αντισυσχετισμένες¹³ ώστε το συνολικό spin του σύνθετου συστήματος να ισούται με μηδέν. Η άποψη αυτή όμως δεν είναι δυνατόν να γίνει αποδεκτή διότι ενώ η ιδιότητα του σύνθετου συστήματος να έχει ολικό spin μηδέν στη μη διαχωρίσιμη κατάσταση ψ_{00} είναι μια εγγενής ιδιότητά του, η παραπάνω υποτιθεμένη σχέση των (1) και (2) δεν αποτελεί εγγενή ιδιότητα που θα έπρεπε να έχουν τα υποσυστήματα αυτά. Με άλλα λόγια ενώ η σχέση πλήρους αντισυσχετισμού των υποσυστημάτων είναι κωδικοποιημένη μέσα στην κατάσταση ψ_{00} , το να αποδώσουμε τη σχέση αυτή στα επιμέρους ξεχωριστά τμήματα του συστήματος δεν ισοδυναμεί με το να βρίσκονται στην κατάσταση ψ_{00} . Η ιδιότητα του πλήρους αντισυσχετισμού είναι εγγενής στην ίδια τη σύμπλεκτη κατάσταση των υποσυστημάτων που περιγράφεται από την ψ_{00} και αναφέρεται στο συνολικό σύστημα. Οι συσχετίσεις που προκύπτουν από τη σύμπλεξη των επιμέρους υποσυστημάτων του σύνθετου συστήματος, δεν προκύπτουν από τις ιδιότητες των υποσυστημάτων αυτών όταν τα εξετάζουμε ξεχωριστά. Ο Bell απέδειξε ότι δεν είναι δυνατόν να παραχθούν όλες οι συσχετίσεις που παρατηρούμε στα ζεύγη συμπλεγμένων σωματιδίων, με το να αποδώσουμε κάποιες ιδιότητες στα μεμονωμένα σωματίδια των ζευγών αυτών. (Bell, 1964). Αντιθέτως οι καταστάσεις σύμπλεξης που η κβαντομηχανική αποδίδει σε τέτοια ζεύγη σωματιδίων προβλέπουν σωστά όλες τις συσχετίσεις που παρατηρούμε μεταξύ τους. Προκύπτει λοιπόν η ανάγκη να ερμηνεύσουμε τις παρατηρήσεις μας μέσω της παραδοχής ότι η ύπαρξη των ιδιοτήτων που εμφανίζουν τα ζεύγη των σωματιδίων δεν μπορούν να αναχθούν στις ιδιότητες που έχουν τα σωματίδια όταν τα μελετούμε ξεχωριστά. Διαπιστώνουμε λοιπόν ότι τα συστήματα των συμπλεγμένων σωματιδίων παραβιάζουν τη διαχωρισιμότητα κι επιπλέον εμφανίζουν το φαινόμενο της ανάδυσης.¹⁴

¹³ Τα spin σε αντίθετη κατεύθυνση .

¹⁴ Ανάδυση :Όρος που εισηγήθηκε κατά το 19^ο αιώνα ο Άγγλος φιλόσοφος Τζωρτζ Χένρι Λιούις, και ο οποίος αφορά στον τρόπο με τον οποίο σύνθετα συστήματα προκύπτουν -ή αλλιώς, αναδύονται -από την αλληλεπίδραση των μερών τους. Ειδικότερα ο Λιούις υποστήριξε ότι υπάρχουν βέβαια δομές που

Συμπερασματικά σε ένα συμπλεγμένο σύστημα δεν είναι δυνατόν να διακρίνουμε καθαρές καταστάσεις για τα συστατικά υποσυστήματα ξεχωριστά. Στην σύμπλεκτη κατάσταση αυτά δεν μπορεί να έχουν αυτόνομη πραγματικότητα και ύπαρξη.

Η φύση και οι ιδιότητες των υποσυστημάτων αυτών καθορίζονται μόνο μέσω του ρόλου τους στο συνολικό σύστημα. Έχουμε κατ' αυτόν τον τρόπο μια συμπληρωματική σχέση μέρους όλου στην οποία το μέρος εκδηλώνεται μέσω του ρόλου του στο όλο ενώ το όλο προκύπτει από την αλληλεξαρτώμενη συμπεριφορά των τμημάτων του. Η σχέση αυτή μέρους – όλου παραπέμπει στη φιλοσοφική θεωρία της μορφής (gestalt theory) ¹⁵ και υποδεικνύει ότι ο αναγωγισμός δεν αποτελεί αξιόπιστο τρόπο ερμηνείας των κβαντικών φαινομένων σε αντίθεση με ότι συνέβαινε στην κλασική φυσική.

Επανερχόμενοι στο παράδειγμά μας των δύο ηλεκτρονίων στη κατάσταση singlet, η ιδιότητα του ολικού spin να ισούται με μηδέν υποδηλώνει τον τρόπο με τον οποίο τα μέρη σχετίζονται μεταξύ τους ως προς την ιδιότητα του spin, παρά το γεγονός ότι κανένα από τα σχετιζόμενα υποσυστήματα δεν κατέχει μια καλά καθορισμένη αριθμητική τιμή του spin αντίθετη από το άλλο, σε οποιαδήποτε διεύθυνση. Είναι δηλαδή μόνο η ιδιότητα του spin του «όλου» που περιλαμβάνει όλα όσα μπορούμε να ξέρουμε σχετικά με τις ιδιότητες spin των μερών του, διότι μόνο η σύμπλεκτη κατάσταση του συνόλου περιλαμβάνει τις συσχετίσεις ανάμεσα στις κατανομές πιθανότητας που αντιστοιχούν στα μέρη. Συνεπώς η αναγωγή μέρους όλου σχετικά με την ιδιότητα του spin έχει αποτύχει. Άρα η ιδιότητα αυτή που χαρακτηρίζει το συνολικό σύστημα δεν είναι ούτε αναγώγιμη αλλά ούτε και προέρχεται από τις ιδιότητες των συστατικών μερών του. Τα ίδια ισχύουν και για τη συνολική ορμή και τη σχετική απόσταση του συστήματος ως προς τα αντίστοιχα τοπικά μεγέθη των μερών του.

Όπως προκύπτει από τα παραπάνω το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης κλονίζει τη βεβαιότητα για την ύπαρξη μεμονωμένων υποσυστημάτων, συνεπώς και την ίδια την ατομική θεωρία, υπό την έννοια ότι τα μέρη ενός κβαντικού όλου δεν υπάρχουν πλέον ως αυτόνομες εγγενώς καθορισμένες, ξεχωριστές οντότητες. Ο μη διαχωρίσιμος χαρακτήρας της συμπεριφοράς ενός κβαντικού συστήματος που βρίσκεται σε σύμπλεξη αποκλείει την δυνατότητα περιγραφής των υποσυστημάτων του με τη μορφή καθαρών καταστάσεών τους. Διότι για ένα σύνθετο σύστημα που βρίσκεται σε σύμπλεξη δεν είναι δυνατόν γενικά να προσδιορίσουμε με ακρίβεια εκείνες τις καθαρές καταστάσεις των υποσυστημάτων του μέσω των οποίων θα μπορούσαμε να καθορίσουμε πλήρως την κατάστασή του.

Συνεπώς καταρρέει η κλασική σύλληψη σύμφωνα με την οποία μπορούμε να περιγράψουμε τη φύση του όλου με αναγωγή στις ιδιότητες των μερών του. Σύμφωνα με την κβαντική θεώρηση η κατάσταση του συνολικού συστήματος δεν μπορεί γενικά να προσδιοριστεί από τις καταστάσεις των συστατικών μερών και αυτό ισχύει ακόμη κι όταν τα μέρη αυτά

προκύπτουν από το απλό άθροισμα των μερών τους, όπως για παράδειγμα το νερό που είναι αποτέλεσμα της ένωσης δύο μορίων υδρογόνου και ενός μορίου οξυγόνου, αλλά υπάρχουν και δομές που δεν συνίστανται απλώς στο άθροισμα των μερών τους. Οι δομές αυτές παρουσιάζουν χαρακτηριστικές ιδιότητες οι οποίες δεν εντοπίζονται στα μέρη τους, αλλά τις αποκτούν κατά τη διαδικασία της σύνθεσής τους, ή αλλιώς της ανάδυσής τους, με αποτέλεσμα να μην μπορούμε να τις εξηγήσουμε ανάγοντάς τις μόνο στα μέρη τους. (αναγωγισμός). Οι δομές που παρουσιάζουν αναδυόμενη συμπεριφορά, τα αναδυόμενα συστήματα παρουσιάζουν ενότητα και συγκροτημένο τρόπο λειτουργίας που αναδύονται μέσα από τις αλληλεπιδράσεις των μερών τους. (Πελεγκρίνης, 2013)

¹⁵ Κατά τη μορφολογική θεωρία η αντίληψη των παρατηρούμενων θα πρέπει να αντιμετωπίζεται ως μια συνολική μορφή, μια συμπαγής οντότητα, η οποία δεν διασπάται σε απλούστερα συστατικά. Η συνολική εμπειρία είναι κάτι παραπάνω από το άθροισμα των μερών της και συνεπώς η διαδικασία του αναγωγισμού της σε απλούστερα στοιχεία δεν αποτελεί αξιόπιστο και επαρκή τρόπο για την ερμηνεία και την κατανόηση της. (Πελεγκρίνης, 2013)

καταλαμβάνουν πολύ απομακρυσμένες μεταξύ τους περιοχές στο χώρο. Στο κβαντικό πλαίσιο μόνο η σύνθετη κατάσταση του συνολικού συστήματος μπορεί να προσδιορίσει τις συμπλεγμένες συσχετίσεις μεταξύ των καταστάσεων των μερών του. Συμπερασματικά σε κάθε περίπτωση κβαντικής σύμπλεξης παραβιάζεται η αρχή της διαχωρισιμότητας και αυτός είναι ο λόγος για τον οποίο η σύμπλεξη επάγει ένα είδος ολισμού¹⁶ στην κβαντική μηχανική.

3.3. Το φαινόμενο της σύμπλεξης συνεπάγεται μη αιτιακές σχέσεις μεταξύ των φυσικών συστημάτων.

Ανάλογες σκέψεις με την παραπάνω περίπτωση του ζεύγους ηλεκτρονίων στην κατάσταση singlet μπορούν να γίνουν σε κάθε περίπτωση κβαντικής σύμπλεξης. Η σύμπλεξη δεν είναι απαραίτητο να αφορά μέγιστο αντισυσχετισμό, όπως στην περίπτωση της κατάστασης singlet. Επίσης δεν χρειάζεται να περιορίζεται σε περιπτώσεις καταστάσεων κβαντικών συστημάτων του ίδιου είδους. Η σύμπλεξη κατά βάση αφορά τις καταστάσεις όλων των σύνθετων κβαντικών συστημάτων. Και όπως και στο παράδειγμα που δώσαμε οι συσχετίσεις μεταξύ των μερών τους δεν μπορούν να αναχθούν ή να εξηγηθούν υποθέτοντας προϋπάρχουσες σχέσεις ή αλληλεπιδράσεις ανάμεσα στα συστατικά αυτά μέρη. Η ύπαρξη των συσχετίσεων δεν μπορεί δηλαδή να αναζητηθεί σε αλληλεπιδράσεις στο παρελθόν, κι ενώ αντιθέτως και η παραμικρή αλληλεπίδραση μεταξύ των μερών κατά τη χρονική τους εξέλιξη προκαλεί τη σύμπλεξη, η ίδια η σύμπλεξη δεν απαιτεί προσφυγή στην αλληλεπίδραση για την ύπαρξή της. Δηλαδή η αλληλεπίδραση αποτελεί ικανή αλλά όχι και αναγκαία συνθήκη για την κβαντική σύμπλεξη. Η κβαντική σύμπλεξη συμβαίνει και κατά την απουσία οποιασδήποτε αλληλεπίδρασης διότι η πηγή του φαινομένου είναι κινηματικής κι όχι δυναμικής φύσης, όπως υποδεικνύεται από το γραμμικό χαρακτήρα της αρχής της υπέρθεσης των καταστάσεων:

«Η κβαντομηχανική είναι πολύ παράξενη ακόμη και σ' αυτό. Και δημιουργεί συνθήκες όπου τα σωματίδια ενός κβαντικού συστήματος παρ' ότι έχουν μηδενική αλληλεπίδραση εντούτοις οι νόμοι της κβαντομηχανικής τα αναγκάζουν να «χρησιμοποιούν» κυματο-ναρτήσεις που δεν έχουν τη μορφή γινομένου! Οπότε, το τι κάνει το ένα σωματίδιο επηρεάζεται από το τι κάνει το άλλο έστω κι αν ουδεμία δύναμη ασκείται ανάμεσά τους!!! Ίδου η... αλλόκοτη δράση εξ' αποστάσεως. Στην κβαντομηχανική λοιπόν -αυτή είναι η μεγάλη καινούργια ιδέα - οι κινήσεις δύο σωματιδίων ενός κβαντικού συστήματος μπορεί να έχουν ισχυρές αμοιβαίες συσχετίσεις χωρίς τη μεσολάβηση δυνάμεων.» (Τραχανάς, 2021, σ.101)

Εφόσον λοιπόν η αλληλεπίδραση δεν είναι αναγκαία συνθήκη για τη σύμπλεξη, οι συσχετίσεις που συνεπάγεται δεν έχουν το χαρακτήρα αιτιακά καθορισμένων σχέσεων. Ο προσδιορισμός των συσχετίσεων μεταξύ των καταστάσεων των συστατικών μερών του σύνθετου συστήματος γίνεται από την ίδια την κατάσταση σύμπλεξης, η οποία αναφέρεται στο συνολικό σύστημα. Πράγματι όταν έχουμε ένα σύνθετο σύστημα σε κατάσταση σύμπλεξης όπως η ψ_{00} της εξίσωσης (1) του 3.2, δεν υφίστανται καθαρές

¹⁶ Ολισμός είναι η φιλοσοφική θεωρία σύμφωνα με την οποία τα φυσικά συστήματα και οι ιδιότητές τους πρέπει να αντιμετωπίζονται ως ολότητα και όχι σαν σύνολα των τμημάτων τους με συνέπεια οι ιδιότητές και η λειτουργία τους να μην μπορούν να γίνουν πλήρως κατανοητές μέσω των ιδιοτήτων των συστατικών τους μερών. Σε αντίθεση σύμφωνα με τη φιλοσοφική θεωρία του αναγωγισμού ένα πολύπλοκο σύστημα μπορεί να εξηγηθεί με αναγωγή στις ιδιότητες των μερών του.

καταστάσεις των συστατικών μερών του συστήματος μέσω των οποίων να μπορούμε να προσδιορίσουμε αιτιακά την κατάσταση του σύνθετου αυτού συστήματος.

3.4. Η σύμπλεξη συνεπάγεται τον ολιστικό χαρακτήρα των κβαντικών συστημάτων.

Όπως είδαμε στην περίπτωση «συμπλεγμένων» κβαντικών συστημάτων τα υποσυστήματα που αποτελούν ένα σύνθετο σύστημα δεν μπορούν να θεωρούνται ως μεμονωμένα και ανεξάρτητα μεταξύ τους, και αντιμετωπίζονται πλέον ως μέρη ενός συνόλου. Τα μέρη αυτά δεν κατέχουν ξεχωριστές ιδιότητες. Ο Giancarlo Ghirardi (2004) περιγράφει την κατάσταση ενός συστήματος κβαντικής σύμπλεξης ως «ένα αδιάσπαστο σύνολο» ή «μια αδιαίρετη οντότητα». Μια τέτοια ερμηνεία οδηγεί σε μια ολιστική περιγραφή της πραγματικότητας στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής.

Ο ολισμός, όπως και η μη-διαχωρισσιμότητα, δεν αποδίδουν καμιά σημασία στα επιμέρους τμήματα του σύνθετου συστήματος και περιγράφει το σύνθετο σύστημα χρησιμοποιώντας ιδιότητες που αφορούν τη φύση του όλου κι όχι των μερών του. Σύμφωνα με αυτόν ένα σύστημα είναι κάτι που είναι περισσότερο από το άθροισμα των τμημάτων του. Ένα σύστημα συνεπώς αποτελεί μια οντότητα της οποίας η ταυτότητα δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μόνο από τα συστατικά της μέρη. Στην περίπτωση των κβαντικών συστημάτων αυτό σημαίνει πως η κατάσταση ενός συστήματος καθορίζεται από κάτι περισσότερο από τις καταστάσεις των υποσυστημάτων που το αποτελούν.

Σχετικά με τα κβαντικά συστήματα έχουν συζητηθεί διάφοροι τύποι ολισμού.

Σύμφωνα με τους Healey και Gomez διακρίνουμε δύο είδη ολισμού στην κβαντική μηχανική, τον *μεθοδολογικό* και τον *μεταφυσικό* ολισμό.

Ο μεθοδολογικός ολισμός αφορά τη μέθοδο με την οποία προσπαθούμε να κατανοήσουμε τη συμπεριφορά ενός συστήματος. Σύμφωνα με αυτόν προκειμένου κάποιος να κατανοήσει τη συμπεριφορά ενός σύνθετου συστήματος πρέπει να αναζητήσει τις αρχές που διέπουν το συνολικό σύστημα και όχι εκείνες που διέπουν τη δομή και τη συμπεριφορά των συστατικών του μερών. Αυτή η εκδοχή του ολισμού είναι χρήσιμη όταν προσπαθούμε να μελετήσουμε τη συμπεριφορά ενός σύνθετου συστήματος και έρχεται σε αντίθεση με τον μεθοδολογικό αναγωγισμό που χρησιμοποιείται από την κλασική φυσική.

Σύμφωνα με τον τελευταίο η κατανόηση ενός σύνθετου συστήματος πραγματοποιείται καλύτερα μέσω της κατανόησης της δομής και της συμπεριφοράς των συστατικών του μερών (Healey & Gomez, 2022, p.4)

Ο μεταφυσικός ολισμός σύμφωνα με τους ίδιους αντιπροσωπεύει την άποψη ότι η φύση του όλου δεν προσδιορίζεται μόνο από τη φύση των επιμέρους τμημάτων του και διακρίνεται στα εξής τρία είδη: α) Τον οντολογικό ολισμό, β) τον ολισμό των ιδιοτήτων και γ) τον νομολογικό ολισμό.

α) Σύμφωνα με το οντολογικό ολισμό ένα σύστημα είναι μια οντότητα η οποία είναι κάτι περισσότερο από τα συστατικά της μέρη. Οι απόψεις του Niels Bohr και του David Bohm έχει θεωρηθεί ότι περιέχουν στοιχεία οντολογικού ολισμού. Ο Bohr ισχυριζόταν ότι μια ιδιότητα όπως η ορμή ή η θέση δεν μπορεί να αποδοθεί σε ένα κβαντικό σύστημα ανεξάρτητα από το είδος της πειραματικής διάταξης που είναι σχεδιασμένη για να μετρήσει τη συγκεκριμένη ιδιότητα. Τόνισε ότι ο απρόβλεπτος και μη ελέγξιμος χαρακτήρας της αλληλεπίδρασης μεταξύ του παρατηρούμενου συστήματος και της συσκευής παρατήρησης κατά τη διαδικασία της μέτρησης συνεπάγεται την ανάγκη θεώρησης ενός κβαντικού φαινομένου ως ενιαίου και αδιαίρετου όλου. (Αναπολιτάνος

,2003). Σύμφωνα με τον Bohr «το παρατηρούμενο αντικείμενο, η συσκευή παρατήρησης και η μεταξύ τους αμοιβαία αλληλεπίδραση συνιστούν μια ολότητα ,μη περαιτέρω αναλύσιμη ,αφού κάθε προσπάθεια υποδιαίρεσης θα απαιτούσε μια τροποποίηση της πειραματικής συσκευής ,η οποία θα ήταν ασυμβίβαστη με την εκδήλωση του ίδιου του φαινομένου.»(Bohr, N.,1937, p.291)

Ο Bohm με τη σειρά του ,υποστήριζε επιπλέον ότι οποιαδήποτε συλλογή κβαντικών αντικειμένων συνιστούν από μόνα τους ένα ενιαίο σύνολο. Πίστευε πως ο ακριβής προσδιορισμός της κατάστασης ενός συστήματος ,όταν είναι γνωστές οι κυματοσυναρτήσεις των σωματιδίων είναι συνδεδεμένος με ένα πεδίο που οδηγεί τις τροχιές των σωματιδίων. Ο Bohm χρησιμοποιούσε την έκφραση «αδιαίρετο σύμπαν» όταν διατύπωνε τις απόψεις του σχετικά με τη φύση των κβαντικών συστημάτων .

β)Σύμφωνα με τους Healey και Gomez ο ολισμός των ιδιοτήτων υπαγορεύει ότι οι ιδιότητες του σύνθετου συστήματος δεν προσδιορίζονται από τις ιδιότητες των συστατικών του και είναι εκείνο το είδος του ολισμού που μπορεί πιο καθαρά να συνδεθεί με την κβαντική μηχανική.

Ο τύπος αυτός ολισμού περιγράφει τον τρόπο με τον οποίο οι ιδιότητες ενός φυσικού συστήματος δεν καθορίζονται από τις ιδιότητες των φυσικών του μερών. Εξετάζει επίσης τον τρόπο με τον οποίο οι σχέσεις μεταξύ των μερών επηρεάζουν τις ατομικές ιδιότητες τους καθώς και τις ιδιότητες του συνολικού συστήματος. Πιο απλά οι Healey και Gomez υποθέτουν πως η πραγματική κατάσταση ενός όλου δεν καθορίζεται πλήρως από τις πραγματικές καταστάσεις των μερών του. (Healey & Gomez, 2022, p.7)

γ) Τέλος οι Healey και Gomez αναφέρονται στο νομολογικό ολισμό που αφορά το γεγονός ότι μερικά αντικείμενα υπακούουν σε νόμους οι οποίοι δεν καθορίζονται από τη δομή και τη συμπεριφορά των φυσικών συστατικών τους τμημάτων.(Healey & Gomez, 2022, p.7).

Ο Paul Teller αναφέρεται σε ένα άλλο είδος ολισμού που εκφράζεται μέσω των σχέσεων. Ο τύπος αυτού ολισμού επίσης φαίνεται να συνάδει με τα όσα συνεπάγεται η κβαντική σύμπλεξη. Ορίζει τον *σχεσιακό ολισμό* ως την αξίωση τα αντικείμενα τα οποία σε κάποιες τουλάχιστον συνθήκες μπορούν να αναγνωριστούν ως ξεχωριστά και μεμονωμένα ,έχουν σύμφυτες σχέσεις μεταξύ τους ,δηλαδή σχέσεις οι οποίες δεν μπορούν να αποδοθούν στις μη σχεσιακές τους ιδιότητες . Ο Teller διακρίνει τις ιδιότητες των αντικειμένων σε σχεσιακές και μη .Ως μη σχεσιακές θεωρεί εκείνες τις ιδιότητες οι οποίες είναι εγγενείς ιδιότητες των μεμονωμένων αντικειμένων και υφίστανται ανεξαρτήτως της ύπαρξης και της κατάστασης άλλων αντικειμένων.

Στην ανάλυσή του αναφέρεται στον φυσικαλισμό ¹⁷ και εξειδικεύει στο είδος εκείνο που ονομάζει «τοπικό φυσικαλισμό». Σύμφωνα με τον τελευταίο κάθε φορά που δύο μεμονωμένα άτομα-αντικείμενα τα οποία είναι επακριβώς εντοπισμένα ,έχουν τις ίδιες φυσικές μη σχεσιακές ιδιότητες (με την έννοια που τους απέδωσε παραπάνω) ,σαν συνέπεια θα έχουν και τις ίδιες μη σχεσιακές και μη φυσικές ιδιότητες .Δηλαδή ονομάζει «τοπικό φυσικαλισμό « την επιγένεση των μη φυσικών και μη σχεσιακών ιδιοτήτων επί των φυσικών σχεσιακών ιδιοτήτων.»(Teller,1976)

Στη συνέχεια αναφέρεται στην περίπτωση εκείνη κατά την οποία ο «τοπικός φυσικαλισμός» εφαρμόζεται όχι μόνο σε μεμονωμένα αντικείμενα αλλά σε ένα ευρύτερο πλαίσιο

¹⁷ «Ο φυσικαλιστής υποστηρίζει ότι όλα τα γεγονότα που σχετίζονται με ένα ή περισσότερα αντικείμενα μπορούν να αναχθούν στα φυσικά δεδομένα...Γενικότερα ο φυσικαλιστής υποστηρίζει πως όλα τα γεγονότα προκύπτουν μέσω επιγένεσης από τα φυσικά γεγονότα , εννοώντας με αυτό πως όποτε δύο αντικείμενα ή περιπτώσεις συμφωνούν σε όλα τους τα φυσικά χαρακτηριστικά ,τότε συμφωνούν και σε όλα τους τα άλλα χαρακτηριστικά επίσης.(P.Teller, p.71)

και διαπιστώνει τα προβλήματα του τοπικού φυσικαλισμού, που προκύπτουν σε σχέση με τις ιδιότητες εκείνες που έχει ονομάσει σχεσιακές. Για να αντιμετωπιστούν αυτά τα προβλήματα ισχυρίζεται ότι θα μπορούσε κανείς να υποθέσει, πως οι γενικές σχεσιακές ιδιότητες των μερών ενός συστήματος προκύπτουν από τις φυσικές σχεσιακές τους ιδιότητες, εφαρμόζοντας την ιδέα της επιγένεσης σε όλες τις φυσικές ιδιότητες σχεσιακές ή μη. Η ιδέα αυτή είναι δύσκολο να υλοποιηθεί συστηματικά λόγω του μεγάλου αριθμού των σχετιζόμενων αντικειμένων που συχνά εισέρχονται στις σχέσεις. Ο Teller αποκαλεί αυτή τη σύλληψη της επιγένεσης τόσο των γενικών σχεσιακών όσο και των μη σχεσιακών ιδιοτήτων, από τις φυσικές σχεσιακές και μη σχεσιακές ιδιότητες «παγκόσμιο φυσικαλισμό». Το είδος αυτό φυσικαλισμού δεν συνάδει με τη διαισθητική μας αντίληψη ότι ο κόσμος μας είναι φτιαγμένος από τα φυσικά χαρακτηριστικά που σχετίζονται με τα μεμονωμένα αντικείμενα ένα-ένα και ότι οι σχεσιακές ιδιότητες προκύπτουν από αυτά τα ατομικά φυσικά χαρακτηριστικά. Έτσι προσδιορίζοντας τις μη σχεσιακές ιδιότητες έχουμε προσδιορίσει τα πάντα. Αντιθέτως αν η είναι σωστή η σύλληψη του παγκόσμιου φυσικαλισμού ο κόσμος μας δεν μπορεί να περιγραφεί μέσω της μηχανιστικής μεταφοράς του 18^{ου} αιώνα, ως ένα καλοκουρδισμένο ρολόι. Μόνο εάν οι φυσικές σχέσεις και οι φυσικές σχεσιακές ιδιότητες προκύπτουν από τις μη σχεσιακές ιδιότητες των αντικειμένων ο παγκόσμιος φυσικαλισμός μπορεί να καταρρεύσει στον τοπικό.

Ο Teller υποστηρίζει πως κάτι τέτοιο δεν είναι δυνατόν και για να απορρίψει τον τοπικό φυσικαλισμό στρέφεται σε μια σειρά από εύλογες περιπτώσεις στις οποίες συλλογές αντικειμένων έχουν φυσικές σχέσεις που δεν προκύπτουν μέσω της επιγένεσης επί των μη -σχεσιακών ιδιοτήτων των αντικειμένων αυτών. Μια τέτοια περίπτωση είναι και η περίπτωση της κβαντικής σύμπλεξης κατά την οποία όπως είδαμε οι συσχετίσεις που προκύπτουν από τη σύμπλεξη των επιμέρους υποσυστημάτων του σύνθετου συστήματος, δεν προκύπτουν από τις ιδιότητες των υποσυστημάτων αυτών όταν τα εξετάζουμε ξεχωριστά.

Η απόρριψη του τοπικού φυσικαλισμού φαίνεται να οδηγεί σε κάποιου είδους αποσαφήνιση της έννοιας του ολισμού. Ο ολισμός προκαλεί αμηχανία καθώς φαίνεται να υποδεικνύει ότι δύο ξεχωριστά αντικείμενα μπορεί με κάποιο τρόπο συμπλέκονται ώστε να μην είναι τελικά ξεχωριστά. Ωστόσο η αποτυχία του τοπικού φυσικαλισμού σύμφωνα με τον Teller βοηθάει στο να προχωρήσουμε σε μια αναθεώρηση της έννοιας του ολισμού μέσω του ορισμού του σχεσιακού ολισμού που προαναφέραμε.

Ο σχεσιακός ολισμός είναι απαλλαγμένος από την ασάφεια των άλλων μορφών του διότι επιτρέπει σε ένα αντικείμενο να έχει τη δική του διακριτή ύπαρξη (και να διαθέτει μια μη σχεσιακή ιδιότητα), ενώ ταυτόχρονα μπορούμε να υποθέσουμε ότι δύο τέτοια διακριτά άτομα, καθένα από τα οποία έχει μια μη σχεσιακή ιδιότητα, θα μπορούσαν να έχουν και κάποια εγγενή σχέση μεταξύ τους. Έτσι οι εγγενείς σχέσεις μεταξύ των μερών ενός όλου παρέχουν έναν κατανοητό τρόπο προσέγγισης του ολισμού, τον σχεσιακό ολισμό ο οποίος μπορεί να εφαρμοστεί στην κβαντική φυσική και ιδιαίτερα στο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης. Οι «περίεργοι» τρόποι με τους οποίους τα αντικείμενα της κβαντικής θεωρίας φαίνεται να αλληλεξαρτώνται έχει συχνά οδηγήσει σε ολιστικές αναγνώσεις όσους προσπαθούν να την ερμηνεύσουν. Εξ' αιτίας όμως της ασάφειάς τους ήταν διστακτικοί. Με την εφαρμογή του σχεσιακού ολισμού γίνεται προσπάθεια για περισσότερη αποσαφήνιση και κριτική εξέταση του προβλήματος. Με την κβαντική θεωρία περιγράφονται ξεχωριστά αντικείμενα όπως τα ηλεκτρόνια της κατάστασης singlet, τα οποία -συχνά τουλάχιστον- μπορούμε να τα διακρίνουμε το ένα από το άλλο. Αλλά αυτά τα διακριτά αντικείμενα μπορεί επίσης να έχουν εγγενείς σχέσεις μεταξύ τους. Η ερμηνεία αυτών των συμφυών σχέσεων παίζει κεντρικό ρόλο όπως έχουμε δει στην ερμηνεία της κβαντομηχα-

νικής, διότι εμφανίζονται σε πολλά από τα αινιγματικά χαρακτηριστικά της. Τέτοιες είναι για παράδειγμα οι σχέσεις μεταξύ μετρητικών συσκευών και αντικειμένων που δημιουργούν το περίφημο πρόβλημα της μέτρησης. Είναι επίσης οι συσχετίσεις αυτού του είδους που οδηγούν στην παραβίαση των ανισοτήτων Bell και παίζουν κεντρικό ρόλο στο φαινόμενο της σύμπλεξης. Σε όλες αυτές τις περιπτώσεις είναι αναμεμιγμένη η υπέρθεση των κβαντικών καταστάσεων που εκδηλώνεται με τη μορφή των εγγενών σχέσεων. Η διαπίστωση βεβαίως ότι οι συμφυείς αυτές συσχετίσεις μεταξύ των τμημάτων ενός όλου, βρίσκονται στην καρδιά των γρίφων της κβαντικής θεωρίας δεν αποτελεί από μόνη της και τη λύση τους. Μέσω όμως της γνώσης της ύπαρξής τους μπορούμε να αντιληφθούμε καλύτερα τη ρήξη που υπάρχει ανάμεσα στην κβαντική θεωρία και τις κλασσικές συλλήψεις. Ο κλασικός φυσικαλισμός έχει τοπικό χαρακτήρα και αποδίδει όλες τις ιδιότητες και τα γεγονότα στα μη σχεσιακά δεδομένα που αφορούν τα φυσικά αντικείμενα. Εάν απορρίψουμε την εργαλειοκρατία¹⁸ και θεωρήσουμε ότι οι κυματοσυναρτήσεις αποδίδουν ιδιότητες και σχέσεις μεταξύ των αντικειμένων η κβαντομηχανική μας λέει ότι ο φυσικαλισμός μπορεί στην καλύτερη περίπτωση να αφορά την επιγένεση από εγγενείς ιδιότητες και πως ο κόσμος είναι ένα πολύ πιο βαθιά συμπλεγμένο δίκτυο. Πράγματι η σύμπλεξη μέσω εγγενών σχέσεων είναι διάχυτη σε μεγάλο βαθμό. Κάθε μια αλληλεπίδραση πυροδοτεί τη δημιουργία και νέων εγγενών σχέσεων, έτσι ώστε κάθε μη απομονωμένο αντικείμενο να εντάσσεται μαζί με άλλα στο δίκτυο των εγγενώς σχετιζόμενων αντικειμένων.

Ένα βασικό ερώτημα της κβαντικής μηχανικής τώρα, αφορά τον τρόπο με τον οποίο οι εγγενείς αυτές σχέσεις των συστημάτων συνδέονται με τις μη σχεσιακές ιδιότητες. Ίσως λοιπόν αυτό που απαιτείται πλέον προκειμένου να αναπτύξουμε τη φυσική θεωρία και το εννοιολογικό μας σχήμα για τον φυσικό κόσμο, να πρέπει να αποδεχτούμε την ύπαρξη αυτών των εγγενών ιδιοτήτων των συστημάτων και να επιχειρήσουμε να εξηγήσουμε τον τρόπο με τον οποίο αυτές προκαλούν τις μη σχεσιακές ιδιότητες οι οποίες μέχρι τώρα ήταν η βάση της κατανόησης του κόσμου μας.

3.5. Η πλαισιακότητα στην κβαντική περιγραφή της πραγματικότητας.

Η περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας μέσω της ερμηνείας μιας φυσικής θεωρίας προϋποθέτει τη δυνατότητα να πραγματοποιούμε μετρήσεις και να εξάγουμε συμπεράσματα από αυτές. Ένα από τα κεντρικά ζητήματα της κβαντικής μηχανικής είναι το πρόβλημα του διαχωρισμού των παρατηρούμενων αντικειμένων από τα όργανα μέτρησης με τα οποία αλληλεπιδρούν και γενικότερα τις πειραματικές διατάξεις που χρησιμοποιούμε για να πραγματοποιήσουμε μετρήσεις. Διότι αν η πειραματική διάταξη μεταβληθεί, εισάγονται νέες συνθήκες αλληλεπίδρασης μεταξύ του αντικειμένου και των οργάνων μέτρησης οι οποίες δεν μπορούν να ελεγχθούν εξαρχής. Έτσι κάθε φορά που πραγματοποιούμε μια μέτρηση σε διαφορετικό πλαίσιο θα λαμβάνουμε και μια διαφορετική εικόνα για το αντικείμενο που παρατηρούμε. Τα συμπεράσματα των παρατηρήσεων που πραγματοποιούμε κάθε φορά θα πρέπει να εξετάζονται συμπληρωματικά καθώς δεν μπορούν να γίνουν κατανοητά από μόνα τους, και μόνο το σύνολο των παρατηρήσεών μας θα μας δώσει την πλήρη εικόνα για το παρατηρούμενα αντικείμενα. Ο Bohr είχε υποστηρίξει την άποψη αυτή, ότι δηλαδή ότι οι ενδείξεις που λαμβάνονται για τα αντικεί-

¹⁸ Εργαλειοκρατία :Οι θεωρίες που διατυπώνονται δεν μας ενδιαφέρει κατά πόσο αντιστοιχούν στην πραγματικότητα αλλά το σημαντικό είναι να είναι χρήσιμες, δηλαδή οι προβλέψεις τους να επαληθεύονται πειραματικά και να λύνουν εννοιολογικά προβλήματα.

μενα ατομικού μεγέθους, κάτω από διαφορετικές συνθήκες πρέπει να θεωρούνται ως συμπληρωματικές. Επιπλέον το δεδομένο ότι η σταθερά του Planck είναι διάφορη του μηδενός τον οδήγησε στο συμπέρασμα ότι είναι αδύνατον να διαχωριστεί το παρατηρούμενο αντικείμενο από το υποκείμενο που το παρατηρεί καθώς σε κάθε πράξη μέτρησης θα συμβαίνει μια όχι αμελητέα αλληλεπίδραση μεταξύ του μετρούμενου και της μετρητικής συσκευής.

«Κατά συνέπεια, δεν μπορεί να αποδοθεί ανεξάρτητη πραγματικότητα ούτε στα φαινόμενα ούτε στους φορείς της παρατήρησης.» (Bohr 1937). Η κβαντική θεωρία μελετά συνολικά το σύστημα που αποτελείται από την συσκευή μέτρησης και το παρατηρούμενο αντικείμενο. Αυτό οδηγεί στο συμπέρασμα ότι πριν τη μέτρηση η κατάσταση του παρατηρούμενου συστήματος και οι ιδιότητές του είναι αντικειμενικά απροσδιόριστες και μόνο μέσω της μέτρησης αποκαλύπτονται τα χαρακτηριστικά του. Η μέτρηση ωστόσο δεν αποκαλύπτει μια προυπάρχουσα ιδιότητα ενός ανεξάρτητου αντικειμένου το οποίο παρατηρούμε, καθώς η πεπερασμένη και μη αμελητέα αλληλεπίδραση του μετρούμενου με την μετρητική συσκευή προκαλεί μια μη εκ των προτέρων αντίδραση του αντικειμένου στο όργανο μέτρησης. Το ερώτημα λοιπόν που προκύπτει κι έχει απασχολήσει πολλές φορές τους φυσικούς επιστήμονες είναι κατά πόσο μπορούμε να συμπεράνουμε ακόμη και την πραγματική ύπαρξη ενός αντικειμένου και των χαρακτηριστικών του ιδιοτήτων εάν αυτές δεν έχουν μετρηθεί.

Αυτά τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά της κβαντικής θεωρίας οδήγησαν όπως είδαμε στις θεωρίες μη πληρότητας της κβαντικής και των κρυμμένων μεταβλητών.

Όπως όμως είδαμε η μελέτη του φαινομένου της σύμπλεξης και των συσχετίσεων που αυτό συνεπάγεται οδήγησε τον Bell στο συμπέρασμα πως υπάρχουν περιπτώσεις συστημάτων που βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξη, των οποίων η συμπεριφορά δεν ερμηνεύεται μέσω των θεωριών των κρυμμένων μεταβλητών. Μετά τον Bell σε μια δημοσίευσή τους οι Kochen και Specker έθεσαν την κβαντομηχανική υπό το πρίσμα μιας άλλης έννοιας, της έννοιας της πλαισιακότητας. Η έννοια αυτή αναφέρεται στην εξάρτηση των μετρούμενων τιμών από την αλληλεπίδραση του μετρούμενου αντικειμένου του μικρόκοσμου με τη συσκευή μέτρησης. Οι Kochen- Specker διατύπωσαν ένα θεώρημα σύμφωνα με το οποίο υπάρχει αντίφαση μεταξύ των προϋποθέσεων των θεωριών των κρυμμένων μεταβλητών. Η πιο κατηγορηματική προϋπόθεση των θεωριών των κρυμμένων μεταβλητών είναι η εξής:

«Όλα τα παρατηρούμενα ενός κβαντικού συστήματος έχουν καλά προσδιορισμένες τιμές σε κάθε χρονική στιγμή.» (I)

Η αρχή αυτή προκύπτει από την πεποίθηση ότι όλα τα παρατηρούμενα μεγέθη έχουν καλά καθορισμένες τιμές που απλά αποκαλύπτονται κατά την πειραματική διαδικασία και υφίστανται ανεξαρτητως της διαδικασίας της μέτρησης, σύμφωνα και με τις πεποιθήσεις των EPR. Σημειώνουμε ότι δεν χρειάζεται να υποθέσουμε εδώ πως οι τιμές αποκαλύπτονται πιστά από τη μέτρηση, αλλά μόνο ότι πραγματικά υπάρχουν. Αυτό υπαγορεύει μια δεύτερη φαινομενικά αβλαβή προϋπόθεση, αυτή της μη πλαισιακότητας:

«Εάν ένα κβαντικό σύστημα κατέχει μια ιδιότητα όπως η τιμή ενός παρατηρούμενου μεγέθους, αυτό ισχύει ανεξαρτητως του πλαισίου μέτρησης, δηλαδή ανεξαρτητως του τρόπου με τον οποίο έγινε η μέτρηση του μεγέθους αυτού.» (II)

Έστω τώρα ότι υιοθετούμε επιπλέον τη συνήθη σύνδεση μεταξύ παρατηρούμενων μεγεθών και τελεστών προβολής στο χώρο Hilbert του συστήματος:

«Υπάρχει μια ένα προς ένα αντιστοιχία μεταξύ των μεγεθών ενός κβαντικού συστήματος και των τελεστών προβολής στο χώρο Hilbert του συστήματος.» (III)

Το θεώρημα των Kochen – Specker αναδεικνύει ότι υπάρχει αντίφαση ανάμεσα στις προτάσεις (I)+(II)+(III) και την κβαντομηχανική. Αν δεχτούμε την κβαντομηχανική πρέπει να απορρίψουμε την (I) ή τη (II) ή την (III). (Carsten, 2022).

Αυτό οφείλεται στο ότι στην κβαντική μηχανική για να είναι ταυτοχρόνως μετρήσιμα δύο ή περισσότερα μεγέθη, οι τελεστές τους στο χώρο Hilbert πρέπει να μετατίθενται και αυτή η αλγεβρική δομή θα έπρεπε να διατηρείται και στις θεωρίες των κρυμμένων μεταβλητών. Το τελευταίο αποδείχτηκε αδύνατο για έναν χώρο Hilbert διάστασης $n \geq 3$. Το θεώρημα των Kochen -Specker αποδεικνύει συνεπώς ότι μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που να ικανοποιεί και τις τρεις προτάσεις δεν είναι δυνατή αλλά σε μια τέτοια θεωρία πάντα παραβιάζεται κάποια από τις (I), (II) ή (III).

Εάν μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που να ικανοποιεί και τις τρεις προϋποθέσεις ήταν εφικτή θα μπορούσαμε να έχουμε μια φυσική ερμηνεία του στατιστικού χαρακτήρα της κβαντομηχανικής και έναν τρόπο να λύσουμε το περίφημο πρόβλημα της μέτρησης. Από το θεώρημα των Kochen και Specker προέκυψε και μια δεύτερη παραδοχή για κάθε υποψήφια ερμηνεία κρυμμένων μεταβλητών:

«Καμία μη πλαισιακή θεωρία κρυμμένων μεταβλητών δεν είναι δυνατόν να αναπαράξει όλες τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής, σε ένα χώρο Hilbert, που έχει διάσταση τουλάχιστον ίση με τρία.»

Το χαρακτηριστικό αυτό των κβαντικών συστημάτων, δηλαδή το γεγονός πως οι μετρήσεις των κβαντικών παρατηρούμενων δεν μπορεί να θεωρούνται απλώς ως η διαδικασία με την οποία αποκαλύπτονται οι προϋπάρχουσες καλά καθορισμένες τιμές τους, αναδείχθηκε σε ουσιώδες χαρακτηριστικό της κβαντικής ερμηνείας και είναι γνωστό ως «κβαντική πλαισιακότητα». Γενικότερα πλαισιακότητα είναι η ιδιότητα μιας φυσικής θεωρίας τα αποτελέσματα των μετρήσεων να μην καθορίζονται μόνο από την επιλογή του μετρούμενου μεγέθους και τις μεταβλητές της κατάστασης του μετρούμενου συστήματος. Το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης και η συνδεόμενη με αυτό μη διαχωρισιμότητα των κβαντικών συστημάτων, σχετίζονται με το χαρακτηριστικό αυτό, δηλαδή με το κατά πόσο τελικά οι αποφάνσεις μας για την πραγματικότητα που παρατηρούμε, είναι ανεξάρτητες από το πλαίσιο υπό το οποίο πραγματοποιούμε τις παρατηρήσεις μας.

Το φαινόμενο της σύμπλεξης περιλαμβάνει συσχετίσεις, δυναμικότητες και κβαντικές υπερθέσεις οι οποίες δεν υπακούουν σε μια δυαδική λογική δομή τύπου Bool.

Στην περίπτωση αυτή δεν είναι a priori αποδεκτή η άποψη ότι ένα αντικείμενο μπορεί να περιγραφεί πλήρως και με τρόπο αντικειμενικό, ανεξάρτητα από το φαινόμενο στο οποίο βρίσκεται ενσωματωμένο όταν το παρατηρούμε. Όπως προαναφέραμε στην κβαντομηχανική προκειμένου να αναφερθούμε σε ένα αντικείμενο και να το περιγράψουμε, ή για να αναφερθούμε σε γεγονότα τα οποία ελέγχονται πειραματικά, πρέπει αποσυνθέσουμε την υποκείμενη φυσική ολότητα σε υποσυστήματα που αλληλεπιδρούν μεταξύ τους. Τα καλά καθορισμένα διακριτά αντικείμενα όμως, καθώς και τα περιβάλλοντά τους παράγονται μέσω ενός είδους τομής του Heisenberg¹⁹, που στην περίπτωση αυτή είναι μια διαδικασία σκόπιμης προβολής της μη διαχωρίσιμης -μη δυαδικής λογικής σφαίρας σε ένα πλαίσιο δυαδικής λογικής δομής. Το πλαίσιο αυτό απαιτεί την ελαχιστοποίηση των συσχετίσεων που συνεπάγεται η σύμπλεξη ανάμεσα στο αντικείμενο και το περιβάλλον του. Ενώ όμως στο πεδίο της κλασικής φυσικής, όπου ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας πληρούνται οι

¹⁹ Ο Bohr και ο Heisenberg στο πλαίσιο της ερμηνείας της κβαντομηχανικής από τη σχολή της Κοπεγχάγης τα κβαντικά και τα μακροσκοπικά αντικείμενα υπάρχουν σε δύο διαφορετικές σφαίρες καθεμία από τις οποίες διέπεται από τους δικούς της νόμους. Στο μικρόκοσμο εφαρμόζονται οι κβαντικοί νόμοι και στο μακρόκοσμο οι νόμοι της κλασικής φυσικής. Οι δύο κόσμοι αυτοί είναι κάπου διαχωρισμένοι από την τομή του Heisenberg. (Jaeger, L., 2018, p.246)

προϋποθέσεις ώστε να μπορούμε να εφαρμόσουμε μια τέτοια τομή του Heisenberg ,στην περίπτωση της κβαντομηχανικής δεν ισχύει αυτομάτως κάτι τέτοιο. Με δεδομένο ότι δεν ισχύει η αρχή της διαχωρισιμότητας μια τέτοιου είδους τομή παίζει το ρόλο μιας κανονιστικής αρχής μέσω της οποίας γίνεται δυνατή η προσέγγιση της εμπειρικής πραγματικότητας. Η τομή αυτή καθώς και ο συνδεδεμένος με αυτήν διαχωρισμός του αντικειμένου από το περιβάλλον του είναι υποχρεωτική για την περιγραφή των μετρήσεων και για να μπορέσουμε να εξηγήσουμε την εμπειρική πραγματικότητα. Ακόμη και για να οργανώσουμε μια πειραματική διαδικασία την οποία να μπορούμε να ελέγχουμε είναι απαραίτητο να πραγματοποιηθεί ένας τέτοιος διαχωρισμός υποκειμένου (παρατηρητή) και αντικειμένου(παρατηρούμενου). Χωρίς αυτήν την αποσύνδεση υποκειμένου-αντικειμένου , ο απτός κόσμος της καθημερινής μας εμπειρίας ,των «πραγματικών» δεδομένων και γεγονότων θα ήταν ακατανόητος καθώς θα έπρεπε να γίνει αντιληπτός με έναν τελειώς «συμπλεγμένο» τρόπο. Υπό αυτήν την έννοια ένα φυσικό σύστημα μπορεί να λογίζεται ως πειραματική ή μετρητική συσκευή μόνο εάν δεν βρίσκεται ολιστικά συσχετισμένο ή σε σύμπλεξη με το υπό μέτρηση αντικείμενο. Κατά συνέπεια κάθε ατομικό δεδομένο ή γεγονός που «συμβαίνει» , περνάει στο εμπειρικό επίπεδο ,μόνο σε συνδυασμό με ένα πειραματικό πλαίσιο το οποίο ακολουθεί δυαδική λογική .Δηλαδή δεν είναι δυνατόν να υπάρχουν καλά καθορισμένα γεγονότα στη κβαντομηχανική παρά μόνο όταν ένα συγκεκριμένο σύνολο παρατηρούμενων μεγεθών τα οποία μετρούνται μαζί , επιλέγεται ξεχωριστά από το όλον που αποτελείται από το σύστημα και το πειραματικό πλαίσιο. Αυτό είναι απόρροια του ότι στην κβαντομηχανική δεν είναι δυνατόν κάποιος να ισχυριστεί χωρίς να πέσει σε αντιφάσεις ότι τα παρατηρούμενα αντικείμενα έχουν μια καλά καθορισμένη και ξεχωριστή ταυτότητα ανεξάρτητα από το περιβάλλον τους. Δεν μπορούμε δηλαδή να αποδίδουμε συγκεκριμένες τιμές σε όλα τα παρατηρούμενα μεγέθη που αφορούν ένα μικροσκοπικό σύστημα ,ειδικά αν πρόκειται για ζεύγη μεγεθών των οποίων οι τελεστές δεν μετατίθενται ,ανεξαρτήτως του πλαισίου στο οποίο πραγματοποιούμε τις μετρήσεις. Το θεώρημα των Koehen και Specker υπαγορεύει ότι δεν είναι δυνατόν να αποδώσουμε σε ένα κβαντικό σύστημα μη πλαισιακές ιδιότητες που να αφορούν όλες τις δυνατές μετρήσεις. Δηλαδή δεν είναι δυνατόν να αποδώσουμε μια συγκεκριμένη τιμή σε κάθε σε ένα μέγεθος που αντιπροσωπεύεται από έναν τελεστή ,ανεξαρτήτως του υποσύνολου των αμοιβαία μετατιθέμενων τελεστών στο οποίο ανήκει αυτός ο τελεστής.

Για παράδειγμα έστω A, B, C τρία παρατηρούμενα μεγέθη του ίδιου κβαντικού συστήματος που αντιπροσωπεύονται αντιστοίχως από τους τελεστές \hat{A}, \hat{B} και \hat{C} . Εάν ο \hat{A} μετατίθεται με τους \hat{B} και \hat{C} ,δηλαδή ισχύει ότι $[\hat{A}, \hat{B}] = [\hat{A}, \hat{C}] = 0$,αλλά ο \hat{B} δεν μετατίθεται με τον \hat{C} ,δηλαδή $[\hat{B}, \hat{C}] \neq 0$, τότε το αποτέλεσμα μιας μέτρησης του μεγέθους A εξαρτάται από το κατά πόσο στο σύστημα έχει προηγουμένως πραγματοποιηθεί μέτρηση του μεγέθους B ή του μεγέθους C , ή κανενός από τα δύο μεγέθη. Το συμπέρασμα που εξάγεται είναι ότι δεδομένου πως η τιμή του παρατηρούμενου μεγέθους A εξαρτάται από το σε ποιο υποσύνολο μεγεθών με αμοιβαία μετατιθέμενους τελεστές θεωρούμε ότι εντάσσεται , αυτό σημαίνει ότι η τιμή αυτή εξαρτάται από το σύνολο των μετρήσεων που επιλέχθηκε να πραγματοποιηθεί. Άρα η τιμή του A δεν μπορεί να θεωρηθεί ότι είναι καθορισμένη πριν τη μέτρηση και ανεξάρτητη από το πειραματικό πλαίσιο που επιλέγουμε κάθε φορά να πραγματοποιήσουμε τις μετρήσεις μας ,στο παράδειγμά μας το πλαίσιο B ή το πλαίσιο C των αμοιβαία με το A μετατιθέμενων μεγεθών.

Από τα παραπάνω συνάγεται πως η θέση της κλασικής φυσικής που αναφέραμε στο (1) ότι δηλαδή κάθε κλασικό σύστημα χαρακτηρίζεται κάθε χρονική στιγμή από καλά

καθορισμένες τιμές για κάθε παρατηρήσιμο φυσικό μέγεθος που το αφορά ανεξαρτήτως από το πλαίσιο μέτρησης ,δεν μπορεί να θεωρηθεί αξιόπιστη στην κβαντομηχανική καθώς δεν είναι συμβατή με την δομή της άλγεβρας που χρησιμοποιείται για να περιγράψει τα μεγέθη της . Καλά καθορισμένες τιμές έχουν τα μεγέθη που χρησιμοποιούμε στην περιγραφή των κβαντικών αντικειμένων ,όταν αναφερόμαστε σε ένα συγκεκριμένο πλαίσιο το οποίο περιλαμβάνει τις πειραματικές συνθήκες. Αυτή η προϋπόθεση είναι απαραίτητη ώστε να είναι δυνατόν να ισχυριστούμε πως οι ιδιότητες που αποδίδουμε στα υπό μελέτη κβαντικά αντικείμενα είναι μέρος της φυσικής πραγματικότητας. Συνεπώς η εκδήλωση των ιδιοτήτων των κβαντικών αντικειμένων είναι ένα ζήτημα που εξαρτάται από τις εκάστοτε συνθήκες και η πειραματική διαδικασία παρέχει το απαραίτητο φυσικό πλαίσιο για την πραγματοποίηση των ιδιοτήτων αυτών.

Η κλασική εξιδανίκευση των αυστηρά διακριτών μεμονωμένων αντικειμένων που κατέχουν εγγενείς ιδιότητες και τη δική τους ξεχωριστή και αυτόνομη πραγματικότητα , καταρρέει στην κβαντική επικράτεια , όπου η φυσική πραγματικότητα περιγράφεται με έναν οντολογικώς εξαρτώμενο από το πλαίσιο τρόπο. Δηλαδή τα καλά καθορισμένα κβαντικά αντικείμενα δεν μπορούν να θεωρηθούν σαν απολύτως ανεξάρτητοι φορείς της πραγματικότητας ,που διαθέτουν εγγενή ατομικότητα και διαχρονική ταυτότητα. Αντιθέτως αντιπροσωπεύουν μοτίβα ιδιοτήτων τα οποία αναδύονται μόνο κατά την αλληλεπίδρασή τους με το πειραματικό πλαίσιο που αποτελεί το περιβάλλον τους κάθε φορά , ή πιο γενικά κατά την αλληλεπίδρασή τους με τον υπόλοιπο κόσμο. Η φύση της ύπαρξής τους σε ότι αφορά την απόδοση των καταστατικών τους ιδιοτήτων ,εξαρτάται από το πλαίσιο στο οποίο ενσωματώνονται και τις επακόλουθες συσχετίσεις σύμπλεξης με το πλαίσιο αυτό .Έτσι το «πλαισιακό αντικείμενο» ,που προκύπτει είναι ένα κβαντικό αντικείμενο που εκδηλώνει μια συγκεκριμένη ιδιότητα σε σχέση με τις συγκεκριμένες πειραματικές συνθήκες. Το γεγονός ότι η διαδικασία με την οποία αποδίδουμε ιδιότητες σε ένα αντικείμενο εξαρτάται από το εκάστοτε πειραματικό πλαίσιο , υπονοεί ότι αυτές δεν είναι καλά καθορισμένες ιδιότητες που κατείχε το αντικείμενο αυτό πριν να ενταχθεί στο κατάλληλο πλαίσιο. Το ίδιο κβαντικό αντικείμενο παρουσιάζει πολλές δυνατές όψεις ανάλογα με το εκάστοτε πλαίσιο καθώς του αποδίδονται διαφορετικές καθορισμένες ιδιότητες μη συγκρίσιμες μεταξύ τους ,πάντα σε σχέση με διακριτά πειραματικά πλαίσια που αποκλείουν το ένα το άλλο. Συνεπώς σε αντιδιαστολή με τη μηχανιστική ή την απλοϊκή ρεαλιστική αντίληψη, καταλήγουμε στην ακόλουθη γενική σύλληψη της έννοιας ενός αντικειμένου στην κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με αυτήν ένα κβαντικό αντικείμενο όσον αφορά τις καταστατικές του ιδιότητες ,αποτελεί μια ολότητα που προσδιορίζεται από όλες τις πιθανές σχέσεις στις οποίες μπορεί το αντικείμενο αυτό να συμμετέχει. Επομένως ένα κβαντικό αντικείμενο μπορεί να θεωρηθεί ως φορέας έμφυτων διαθέσιμων ιδιοτήτων .Το να αποδώσουμε μια συγκεκριμένη ιδιότητα σε ένα κβαντικό αντικείμενο σημαίνει ότι αναγνωρίζουμε στο αντικείμενο την οντική δυναμικότητα να παράγει αποτελέσματα κάθε φορά που συμμετέχει σε ποικίλες πιθανές σχέσεις με άλλα πράγματα ή όποτε ενσωματώνεται σε ένα κατάλληλο πειραματικό πλαίσιο.Σαν συνέπεια ένα κβαντικό αντικείμενο δεν είναι μια μεμονωμένη οντότητα η οποία κατέχει καλά καθορισμένες εγγενείς ιδιότητες συνεχώς και ανεξάρτητα από τις μετρητικές αλληλεπιδράσεις και ούτε επίσης μπορεί να θεωρηθεί ως μια καλά εντοπισμένη οντότητα στο χώρο και το χρόνο που διατηρεί αιτιώδεις συνδέσεις με τις προηγούμενες αλλά και τις επακόλουθες καταστάσεις του. Δηλαδή ένα κβαντικό αντικείμενο υπάρχει με την έννοια της «δυναμικότητας» που σημαίνει πως χαρακτηρίζεται από ποικίλες διαφορετικές τιμές των φυσικών μεγεθών που το περιγράφουν οι οποίες ενεργοποιούνται όταν το αντικείμενο αλληλεπιδρά με το περιβάλλον του ή με ένα πειραματικό πλαίσιο.

Είδαμε λοιπόν πως η κβαντομηχανική χαρακτηρίζεται από την ιδιότητα της μη διαχωρισιμότητας και από την πλαισιακού χαρακτήρα περιγραφή της πραγματικότητας. Η μη διαχωρισιμότητα αφορά ένα βαθύτερο επίπεδο της πραγματικότητας ανεξάρτητης από το νου, ενώ η πλαισιακότητα συνδέεται με το εξωτερικό επίπεδο της πραγματικότητας, αυτό που σχετίζεται με την εμπειρική πραγματικότητα.

3.6. Η κβαντική σύμπλεξη συνεπάγεται την ανάδυση ;

A) Αναφερθήκαμε στο 3.2, στο φαινόμενο της ανάδυσης που παρουσιάζεται σε συστήματα τα οποία βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξη. Είδαμε πως στις περιπτώσεις σωματιδίων που βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξης, όπως για παράδειγμα δύο ηλεκτρόνια σε κατάσταση singlet, προκύπτει η ανάγκη να ερμηνεύσουμε τις παρατηρήσεις μας μέσω της παραδοχής ότι οι ιδιότητες που εμφανίζουν τα ζεύγη αυτών των σωματιδίων δεν μπορούν να αναχθούν στις ιδιότητες που έχουν τα σωματίδια όταν τα μελετούμε ξεχωριστά. Διαπιστώσαμε έτσι ότι στα συστήματα των συμπλεγμένων σωματιδίων εμφανίζεται το φαινόμενο της ανάδυσης. Ο όρος ανάδυση χρησιμοποιείται με πολλούς διαφορετικούς τρόπους σε μια μεγάλη ποικιλία περιπτώσεων. Οι Silberstein και Mc Geever αναφέρονται στην «οντολογική ανάδυση», δηλαδή την ανάδυση που αφορά συστήματα ή σύνολα τα οποία κατέχουν αιτιώδεις δυνατότητες που δεν ανάγονται σε καμία από τις αιτιώδεις εγγενείς δυνατότητες των μερών τους, ούτε και σε καμία από τις αναγωγίμες σχέσεις μεταξύ των μερών αυτών. Με αυτήν την έννοια η ανάδυση σχετίζεται στενά με τον ολισμό των φυσικών ιδιοτήτων (Healey et al, 2022) στον οποίο αναφερθήκαμε παραπάνω. Όπως είδαμε ο όρος αυτός αναφέρεται στην ύπαρξη φυσικών αντικειμένων των οποίων οι ποιοτικές εγγενείς ιδιότητες δεν προκύπτουν όλες μέσω της επιγένεσης επί των ποιοτικών εγγενών ιδιοτήτων και σχέσεων των βασικών φυσικών τους μερών. Σύμφωνα με τον Lewis αν κάνουμε κάποιες λογικές παραδοχές, η ανάδυση και ο ολισμός όταν θεωρούνται με τις παραπάνω έννοιες ισοδυναμούν μεταξύ τους. Αναφέρει «... αν οι αιτιώδεις δυνατότητες είναι ένα είδος ιδιότητας και η έλλειψη της δυνατότητας αναγωγισμού συνεπάγεται την επιγένεση, τότε ένα σύστημα που παρουσιάζει ανάδυση παρουσιάζει και ολισμό. Και αν κάθε φυσική ιδιότητα συνεπάγεται τουλάχιστον μια μοναδική αιτιώδη δυνατότητα και η έλλειψη επιγένεσης συνεπάγεται την μη αναγωγισιμότητα τότε ένα σύστημα που παρουσιάζει ολισμό παρουσιάζει και ανάδυση. Έτσι θα χρησιμοποιώ τους δύο όρους ισοδύναμα... Ένα σύστημα εκδηλώνει ανάδυση (ολισμό) εάν έχει ιδιότητες που δεν ανάγονται στις εγγενείς ιδιότητες των μερών του» (Lewis J., 2017, p.55)

Χρησιμοποιώντας τον όρο ανάδυση με την παραπάνω έννοια θα επανέλθουμε για μια ακόμη φορά την περίπτωση των δύο ηλεκτρονίων στην κατάσταση singlet. Όπως είδαμε η κυματοσυνάρτηση που την περιγράφει είναι η :

$$|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_{+}\rangle_1 \otimes |\varphi_{-}\rangle_2 - |\psi_{-}\rangle_1 \otimes |\varphi_{+}\rangle_2), \quad (1)$$

Υπενθυμίζουμε εδώ ότι η (1) δεν είναι δυνατόν να παραγοντοποιηθεί, γεγονός που αντικατοπτρίζεται στο ότι οι πιθανότητες το κάθε ηλεκτρόνιο να αποκτήσει spin -πάνω ή spin -κάτω δεν είναι πια ανεξάρτητες μεταξύ τους και το αποτέλεσμα για το spin του ενός προκύπτει «πάνω» όταν το spin του άλλου βρίσκεται μέσω μιας μέτρησης «κάτω» και αντίστροφα. Φαίνεται λογικό να θεωρήσουμε εδώ ότι η κβαντική σύμπλεξη αποτελεί απόδειξη της ύπαρξης ανάδυσης. Μπορούμε να θεωρήσουμε την κατάσταση σύμπλεξης σαν μια ιδιότητα του ζεύγους των συμπλεγμένων σωματιδίων, σαν μια αιτιώδη δυνατότητα του ζεύγους των ηλεκτρονίων, που είναι υπεύθυνη για τις συσχετίσεις μεταξύ των

αποτελεσμάτων των μετρήσεων που παρατηρούμε. Με δεδομένο ότι η κυματοσυνάρτηση (1) δεν παραγοντοποιείται ώστε να διαχωριστεί σε μια καθαρή κατάσταση για το ηλεκτρόνιο (1) και μια καθαρή κατάσταση για το ηλεκτρόνιο (2) προκύπτει ότι δεν είναι δυνατόν να εφαρμόσουμε αναγωγισμό στην κατάσταση σύμπλεξης, είναι δηλαδή αυτή μια μη αναγώγιμη στις επιμέρους καταστάσεις των μεμονωμένων ηλεκτρονίων κατάσταση του ζεύγους αυτών. Φυσικά η κβαντομηχανική επιτρέπει να αποδώσουμε καταστάσεις στα ξεχωριστά ηλεκτρόνια, μέσω των τελεστών πυκνότητας²⁰, αλλά οι ξεχωριστές καταστάσεις των ηλεκτρονίων δεν συνεπάγονται τις συσχετίσεις που εμφανίζουν τα αποτελέσματα των μετρήσεών μας.

Φαίνεται λοιπόν ότι οι συσχετίσεις αυτές οφείλονται σε μια κοινή ιδιότητα του ζεύγους των ηλεκτρονίων η οποία δεν είναι δυνατόν να αναχθεί στις ιδιότητες των καταστάσεων των μεμονωμένων ηλεκτρονίων που απαρτίζουν το ζεύγος αυτό.

Θα μπορούσαμε να υποθέσουμε πως ακόμη και αν δεν γνωρίζουμε τις ιδιότητες των ξεχωριστών ηλεκτρονίων οι οποίες συνεπάγονται τις συσχετίσεις που παρατηρούμε μέσω των μετρήσεων, αυτό δεν σημαίνει ότι αυτές δεν υπάρχουν. Να επανέλθουμε δηλαδή στις απόψεις των Einstein, Podolsky και Rosen σχετικά με τις κρυμμένες μεταβλητές και την μη πληρότητα της κβαντικής θεωρίας, αλλά όπως είδαμε κάτι τέτοιο έχει αποκλειστεί από το θεώρημα του Bell (Bell, 1964). Δεν είναι λοιπόν δυνατόν να αποδώσουμε τις παρατηρούμενες συσχετίσεις των σωματιδίων που βρίσκονται σε σύμπλεξη, σε «κρυμμένες» ιδιότητες των καταστάσεων των μεμονωμένων σωματιδίων.

Οι παρατηρούμενες συσχετίσεις εξηγούνται μόνο αν υπάρχουν εγγενείς ιδιότητες του ζεύγους των σωματιδίων που δεν μπορούν να αναχθούν στις εγγενείς ιδιότητες τους όταν λαμβάνονται μεμονωμένα. Παρατηρούμε εδώ λοιπόν να εκδηλώνεται το φαινόμενο της ανάδυσης των ιδιοτήτων του συστήματος των σωματιδίων που βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξη.

Σε ένα άρθρο τους οι Kronz και Tiehen (2002) υποστηρίζουν την άποψη ότι εκτός από την κβαντική σύμπλεξη, η οποία συνεπάγεται την μη διαχωρισιμότητα των κβαντικών καταστάσεων, η μη διαχωρισιμότητα της Χαμιλτονιανής των κβαντικών συστημάτων προκαλεί επίσης ανάδυση. Το είδος αυτό της ανάδυσης ονομάζουν *δυναμική ανάδυση*. Για να επιχειρηματολογήσουν σχετικά, ισχυρίζονται ότι η μη διαχωρισιμότητα της κατάστασης ενός σύνθετου συστήματος αποτελεί τον πρώτο βαθμό, αλλά όχι και την πιο ισχυρή μορφή μη διαχωρισιμότητας που συναντάμε στην κβαντική μηχανική. Ένας δεύτερος και πιο ισχυρός βαθμός μη διαχωρισιμότητας προκύπτει όταν η Χαμιλτονιανή ενός σύνθετου κβαντικού συστήματος είναι μη διαχωρίσιμη. Στην περίπτωση αυτή η χρονική εξέλιξη του τελεστή πυκνότητας $\rho_{1(t)=T_r^{(2)}\rho(t)$, που συνδέεται με ένα ξεχωριστό τμήμα S_1 ενός σύνθετου συστήματος S , δεν μπορεί γενικά να προσδιοριστεί κατά τρόπο ανεξάρτητο από τη χρονική εξέλιξη του όλου. Αποδεικνύουν ότι όταν η χαμιλτονιανή του συστήματος είναι διαχωρίσιμη, αφού ο τελεστής εξέλιξης U του συστήματος μπορεί να γραφτεί σαν το τανυστικό γινόμενο των τελεστών εξέλιξης των συστατικών υποσυστημάτων, $U=U_1 \otimes U_2$, η μη διαχωρίσιμη κατάσταση είναι απαραίτητη μόνο μια χρονική στιγμή για να περιγραφεί η χρονική εξέλιξη τους. Αντίθετα αν η Χαμιλτονιανή δεν είναι διαχωρίσιμη, η μη διαχωρίσιμη κατάσταση του συστήματος απαιτείται κάθε χρονική στιγμή ώστε να είναι δυνατή η περιγραφή της χρονικής εξέλιξης των υποσυστημάτων και γιαυτό το λόγο η μη διαχωρισιμότητα της Χαμιλτονιανής οδηγεί σε ισχυρότερη ανάδυση από τη μη διαχωρισιμότητα των καταστάσεων σύμπλεξης. Η χρονική εξέλιξη των μερών δηλαδή εξαρτάται από τη χρονική εξέλιξη του όλου. Το είδος αυτό της ανάδυσης το ονομάζουν *δυναμική ανάδυση*. Εννοούν με αυτό ότι το μη διαχωρίσιμο της Χαμιλτονιανής συνεπάγεται μια

²⁰ $\rho = \sum p_k |\psi_k\rangle \langle \psi_k|$

συνεχή αλληλεπίδραση των συστατικών του συστήματος ,μέσω της οποίας προκύπτει ανάδυση. Αναδυόμενα σύνολα παράγονται δηλαδή μέσα από την ουσιώδη και διαρκή αλληλεπίδραση των μερών τους , η οποία έχει ως επακόλουθο τα ανεξάρτητα μέρη να παύουν να υπάρχουν ως μεμονωμένα και ανεξάρτητα .(Kronz ,F.et all,2002).

Ωστόσο πρέπει εδώ να προσθέσουμε ότι είναι επικίνδυνο να χρησιμοποιείται ιδιαίτερος το φαινόμενο της ανάδυσης ,όπως και γενικότερα η κβαντική μηχανική της οποίας η ερμηνεία δεν έχει ακόμη διευθετηθεί, για να εξάγουμε μεταφυσικά συμπεράσματα.

B) Έχουν φυσικά διατυπωθεί και αντίθετες απόψεις σχετικά με την εμφάνιση ανάδυσης. Μια περίπτωση είναι η θεωρία - θέση που περιγράφεται από τον Lewis ως ρεαλισμός του θεσεογραφικού χώρου.(Lewis,2017,p.58). Οι οπαδοί της άποψης αυτής θεωρούν ότι η μαθηματική δομή μιας θεωρίας αποτελεί αντανάκλαση της δομής του κόσμου. Το spin ενός ηλεκτρονίου συνηθίζεται να το παρουσιάζουμε σαν ένα διάνυσμα. Στη φυσική τα διανύσματα είναι φυσικά μεγέθη που διαθέτουν μέτρο και κατεύθυνση. Έτσι τείνουμε να φανταζόμαστε το spin με τον ίδιο τρόπο που χρησιμοποιούμε για παράδειγμα την ταχύτητα ενός σωματιδίου ,δηλαδή σαν ένα διανυσματικό μέγεθος που περιγράφει μια ιδιότητα του ηλεκτρονίου. Ωστόσο στην περίπτωση του spin η κατάσταση π.χ. $|\psi_+\rangle_1$ ενός μοναδικού ηλεκτρονίου με spin πάνω ,περιγράφεται από ένα διάνυσμα στήλης δύο διαστάσεων ,δηλαδή είναι ένα διάνυσμα σε ένα χώρο δύο διαστάσεων και όχι σε έναν τρισδιάστατο χώρο, όπως θα περίμενε κανείς .Η κατάσταση τώρα $|\psi_+\rangle_1 \otimes |\varphi_-\rangle_2$ που περιγράφει το ζεύγος των ηλεκτρονίων είναι ένα μοναδικό διάνυσμα σε χώρο τεσσάρων διαστάσεων. Η κατάσταση $|\psi_+\rangle_1 \otimes |\varphi_-\rangle_2$, έχει τη μορφή γινομένου ,οπότε μπορεί να αποσυντεθεί σε ένα διάνυσμα δύο διαστάσεων για κάθε ηλεκτρόνιο .

Αντιθέτως η $|\psi_{00}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\psi_+\rangle_1 \otimes |\varphi_-\rangle_2 - |\psi_-\rangle_1 \otimes |\varphi_+\rangle_2)$ είδαμε ότι δεν είναι παραγοντοποιήσιμη. Όπως αναφέραμε παραπάνω υποστηρίζεται από τους ρεαλιστές ότι στη δομή του κόσμου αντικατοπτρίζεται η μαθηματική δομή μιας θεωρίας. Έτσι αν η μαθηματική αναπαράσταση του συστήματος των δύο ηλεκτρονίων γίνεται σε έναν τετραδιάστατο διανυσματικό χώρο ,αυτό σημαίνει ότι η θεμελιώδης οντολογία του συστήματος αντιστοιχεί σε ένα χώρο τεσσάρων διαστάσεων επίσης. Στην περίπτωση όμως αυτή μπορούμε να θεωρήσουμε ότι το σύστημα των δύο ηλεκτρονίων αποτελεί ένα μοναδικό αντικείμενο με την ιδιότητα ενός τετραδιάστατου διανύσματος spin , αντί να το θεωρούμε σαν δύο αντικείμενα που το καθένα έχει την ιδιότητα ενός διανύσματος spin δύο διαστάσεων. Από αυτό προκύπτει ότι το σύστημα των ηλεκτρονίων αυτών δεν είναι σύνθετο ,παρά τα φαινόμενα και συνεπώς το επιχείρημα της ανάδυσης καταρρέει. Όπως αναφέρει ο Lewis η άποψη αυτή σχετικά με τη θεμελιώδη οντολογία αναφέρεται συνήθως στην ιδιότητα της θέσης ,παρά στην ιδιότητα του spin των σωματιδίων. Όπως είναι γνωστό η κατάσταση της θέσης ενός μοναδικού σωματιδίου είναι δυνατόν να περιγράφεται από μια κυματοσυνάρτηση ,η οποία λαμβάνει μιγαδικές τιμές στις τρεις χωρικές διαστάσεις. Μπορούμε να φανταστούμε την κυματοσυνάρτηση σαν ένα πεδίο το οποίο σε κάθε σημείο του τρισδιάστατου χώρου περιγράφεται από ένα πλάτος και μια φάση .Όταν όμως θέλουμε να περιγράψουμε την κατάσταση 2 σωματιδίων θα πρέπει να χρησιμοποιήσουμε μια μιγαδική συνάρτηση έξι διαστάσεων και γενικά για την περιγραφή της κατάστασης θέσης N σωματιδίων χρειαζόμαστε μια μιγαδική συνάρτηση 3N διαστάσεων. Αυτό σημαίνει ότι η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει ένα σύνθετο σύστημα περιγράφεται σε έναν θεσεογραφικό χώρο , δηλαδή σε έναν χώρο τέτοιο που κάθε σημείο του αντιστοιχεί σε μια συγκεκριμένη διαμόρφωση όλων των σωματιδίων που απαρτίζουν το σύστημα. Έχουμε δηλαδή εδώ μια οντολογική ερμηνεία κατά την οποία ο θεμελιώδης χώρος είναι ένας χώρος πολλών διαστάσεων και η κυματοσυνάρτηση είναι ένα πεδίο στο χώρο αυτό. Η άποψη αυτή διατυπώθηκε από τον Albert (1996) και

ονομάστηκε από αυτόν «ρεαλισμός της κυματοσυνάρτησης»²¹ (Keming,2019). Όταν η κυματοσυνάρτηση αντιστοιχεί σε κατάσταση σύμπλεξης δεν είναι δυνατόν να παραγοντοποιηθεί σε ξεχωριστές κυματοσυναρτήσεις των επιμέρους τμημάτων του συμπλεγμένου συστήματος και συνεπώς δεν μπορεί να γίνει περιγραφή του συστήματος αυτού στο χώρο των τριών διαστάσεων. Σύμφωνα με τον Albert (1996,2013) δεδομένου ότι η κυματοσυνάρτηση είναι ένα πεδίο σε έναν πολυδιάστατο θεσεογραφικό χώρο ,θα πρέπει να θεωρούμε τις ιδιότητες που αποδίδονται στα σημεία αυτού του χώρου σαν τη θεμελιώδη οντολογία που περιγράφεται από την κβαντομηχανική. Τα σημεία του θεσεογραφικού χώρου είναι οι βασικές φυσικές οντότητες. Σε αυτήν την περίπτωση όμως ακόμη και οι καταστάσεις σύμπλεξης προκύπτουν με επιγένεση επί των ιδιοτήτων των βασικών αυτών φυσικών αυτών μερών του συστήματος. Προκύπτει λοιπόν πως κάθε ιδιότητα ενός συστήματος είναι αποτέλεσμα των ιδιοτήτων των σημείων του θεσεογραφικού χώρου που αποτελούν τα βασικά του τμήματα. Πρέπει όμως εδώ να παρατηρήσουμε ότι αυτά τα σημεία δεν είναι σημεία ενός συνηθισμένου χώρου τριών διαστάσεων . Αν τα πράγματα είναι έτσι τότε η κβαντική μηχανική δεν συνεπάγεται την επιγένεση ,διότι απλώς έχουμε προσδιορίσει με λανθασμένο τρόπο τα βασικά συστατικά μέρη του συστήματος. Αντί να αναφερόμαστε σε ένα σύνθετο σύστημα που αποτελείται από δύο θεμελιώδεις οντότητες που είναι τα δύο ηλεκτρόνια της κατάστασης singlet, έχουμε ένα απλό σύστημα που αποτελεί ένα μόνο σημείο του θεσεογραφικού χώρου, δηλαδή το σύστημα των δύο συμπλεγμένων σωματιδίων αποτελεί μια οντότητα. Κατά συνέπεια δεν ενδιαφέρει το γεγονός ότι το καταστατικό διάνυσμα $|\psi_{00}\rangle$ που περιγράφει την κατάσταση σύμπλεξης δεν είναι δυνατόν να παραγοντοποιηθεί σε ξεχωριστές καταστάσεις για το κάθε ηλεκτρόνιο, καθώς αντιστοιχεί πλήρως σε μια μοναδική σημειακή οντότητα . Τα ίδια τα ξεχωριστά ηλεκτρόνια ,ενώ υφίστανται ,ωστόσο δεν αποτελούν πια τις θεμελιώδεις οντότητες του συστήματος. Αντιθέτως τα μεμονωμένα ηλεκτρόνια μπορούμε να ισχυριστούμε ότι προκύπτουν με επιγένεση επί των θεμελιωδών οντοτήτων ,δεδομένου ότι οι τελεστές πυκνότητάς τους μπορούν να παραχθούν από την $|\psi_{00}\rangle$.

Σχετικά με την προηγούμενη επιχειρηματολογία εναντίον της ανάδυσης – ολισμού, ο Lewis παρατηρεί ότι χαρακτηρίζεται από την εξής ανακολουθία. Σύμφωνα με αυτήν η πιο θεμελιώδης οντολογική μονάδα είναι το μοναδικό σημείο του θεσεογραφικού χώρου. Το σημείο αυτό ωστόσο αντιπροσωπεύει μια δυνατή διαμόρφωση σωματιδίων από ολόκληρο το σύμπαν .Αυτό όμως φαίνεται να παραπέμπει στην ολιστική θεώρηση, ενώ ο ρεαλισμός του θεσεογραφικού χώρου διατυπώνεται εναντίον του ολισμού .

Πραγματικά αυτό που προτείνει ο ρεαλισμός του θεσεογραφικού χώρου είναι να αναθεωρήσουμε τους ορισμούς του μέρους και του όλου και να θεωρούμε ως βασική οντολογική μονάδα το σημείο του θεσεογραφικού χώρου , ενώ για παράδειγμα ένα μοναδικό ηλεκτρόνιο είναι σύνθετο αντικείμενο υπό την έννοια ότι η κατάστασή του περιέχει συνεισφορές από διακριτά σημεία του χώρου αυτού. Σύμφωνα με τον Lewis όμως όταν περιγράφουμε την ανάδυση ,ως την κατοχή από τα συνολικά συστήματα ιδιοτήτων, που δεν ανάγονται στις ιδιότητες των τμημάτων τους ,αναφερόμαστε στο μέρος και το όλον με την απλή διαισθητική έννοια κατά την οποία για παράδειγμα ένα άτομο είναι τμήμα ενός μορίου. Κατά τη διερεύνηση της ύπαρξης ανάδυσης στα κβαντικά φαινόμενα , προσπαθούμε να καταλάβουμε αν είναι σωστή η άποψη των αναγωγιστών ότι στον φυσικό κόσμο οι ιδιότητες των αντικειμένων προκύπτουν με επιγένεση επί των

²¹ Έννοια που αναπτύχθηκε και υποστηρίχθηκε από τους Loewer (1996) ,Ney (2012 ,2013) και North (2013) αν και οι Ney και North ασχολούνται κυρίως με την άποψη ότι ο θεμελιώδης χώρος είναι ένας πολυδιάστατος χώρος.

ιδιοτήτων των σωματιδίων τους .Είναι ένα είδος κατανόησης του φυσικού κόσμου που προϋποθέτει ολότητες και τμήματα εντοπισμένα στον συνήθη χώρο των τριών διαστάσεων . Όταν λοιπόν η προϋπόθεση αυτή δεν ισχύει όπως στην περίπτωση των σημειακών βασικών οντοτήτων του θεσεογραφικού χώρου , ο αναγωγισμός καταρρέει . «Μια επιλογή όρων δεν μπορεί να υπονομεύει την επιχειρηματολογία για την ανάδυση»(Lewis P.J.2017,p.61), όπου λέγοντας επιλογή όρων εννοεί να χρησιμοποιήσουμε την κατάλληλη ορολογία ώστε το όλον να γίνει μέρος και αντίστροφα. Προτείνει δε μια τροποποίηση στον ορισμό της ανάδυσης /ολισμού σύμφωνα με την οποία :

«Ένα φυσικό σύστημα εμφανίζει ανάδυση εάν έχει ιδιότητες οι οποίες δεν ανάγονται στις εγγενείς ιδιότητες των χωρικά εντοπισμένων μερών του.»

3.7. Η προτεραιότητα των μερών σε σχέση με το όλον κατά την περιγραφή της πραγματικότητας .

Από την παραπάνω επιχειρηματολογία προκύπτει πως το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης και η ανάδυση που αυτό φαίνεται να συνεπάγεται ,δημιουργεί ερωτηματικά σχετικά με την μεταφυσική προτεραιότητα των μερών σε σχέση με το όλο. Σύμφωνα με τη φιλοσοφία του μονισμού , το όλον προηγείται των μερών του και συνεπώς η αρχή και η ουσία του κόσμου είναι μια και μοναδική .

Αντιθέτως σύμφωνα με τον πλουραλισμό τα μέρη είναι προγενέστερα του όλου και συνεπώς τα σωματίδια θεωρούνται ως θεμελιώδη. (Schaffer ,2010).

Φαίνεται ότι η τρέχουσα εμπειρική έρευνα ευνοεί τον πλουραλισμό στο βαθμό που η φυσική υποτίθεται ότι περιγράφει πλήρως την αιτιώδη ιστορία του κόσμου μέσω των στοιχειωδών σωματιδίων.

Έτσι οι Paul Oppenheim και Hillary Putnam μιλούν για μια ιεραρχία επιστημονικών επιπέδων όπου κάθε τι , που βρίσκεται σε κάποιο επίπεδο εκτός από το τελευταίο πρέπει να είναι δυνατόν να αποσυντίθεται σε αντικείμενα που ανήκουν στο αμέσως επόμενο επίπεδο και στην ιεραρχία αυτή πρέπει να υπάρχει ένα μοναδικό κατώτατο επίπεδο που ονομάζουν στοιχειώδη σωματίδια. (Schaffer J.,2010.,p.50).Σύμφωνα μάλιστα με τον Jaegwon Kim, «Το θεμελιώδες επίπεδο συνήθως θεωρείται ότι αποτελείται από στοιχειώδη σωματίδια ,ή ότι η πιο προχωρημένη μας φυσική θα υποδείξει ότι αποτελούν τις βασικές ψηφίδες της ύλης από τις οποίες συντίθενται όλα τα υλικά αντικείμενα.».

Ο Schaffer υποστηρικτής του μονισμού, ισχυρίζεται ότι στην παραπάνω επιχειρηματολογία πραγματοποιείται ένα λογικό άλμα διότι είναι διαφορετικό το να ισχυρίζεται κανείς ότι η φυσική είναι θεμελιώδης και διαφορετικό να υποστηρίζει ότι η περιγραφή της φύσης από αυτή τη θεμελιώδη φυσική οφείλει να γίνεται μέσω σωματιδίων.

Ο μονισμός ισχυρίζεται ,επιτρέπει η φυσική να περιγράφει πλήρως την αιτιώδη ιστορία του κόσμου μας με έναν καλύτερο τρόπο ,δηλαδή μέσω πεδίων που διαχέονται σε όλο το σύμπαν και όχι μέσω των σωματιδίων. Ο Schaffer υποστηρίζει τη συνέχεια ότι η κβαντική σύμπλεξη και η μελέτη της οδηγούν στο συμπέρασμα ότι η κβαντική μηχανική είναι ολιστική κατά τρόπο που συνάδει με το μονισμό. Αναφέρεται στο γεγονός πως το μη παραγοντοποιήσιμο της κυματοσυνάρτησης συνεπάγεται ότι η κβαντική κατάσταση του συμπλεγμένου συστήματος περιέχει περισσότερες και σημαντικότερες πληροφορίες από τις κβαντικές καταστάσεις των συστατικών του μερών και υποστηρίζει την άποψη ότι ο κόσμος μπορεί να θεωρηθεί ως ένα σύστημα σε σύμπλεξη .Θεωρώντας δε κάθε σύστημα που βρίσκεται σε σύμπλεξη ως ένα θεμελιώδες όλο καταλήγει στο συμπέρασμα ότι

ο κόσμος είναι ένα θεμελιώδες όλο.(Scafffer J.2010,p.55). Στηρίζει την άποψή του αυτή με αναφορά στη μεγάλη έκρηξη κατά την οποία τα πάντα αλληλεπιδράσαν .

Αυτές οι αλληλεπιδράσεις οδήγησαν σε μια αρχική σύμπλεξη η οποία διατηρήθηκε αφού ο κόσμος εξελίσσεται σύμφωνα με την εξίσωση Schrodinger.Κατά την εξέλιξη αυτή οι συμπλέξεις πολλαπλασιάζονταν έτσι ώστε κάθε σωματίδιο στο σύμπαν να βρίσκεται τελικά σε σύμπλεξη με οποιοδήποτε άλλο.(Penrose , 2004) . Έτσι με δεδομένο ότι η κβαντική μηχανική αποτελεί προς το παρόν τον καλύτερο οδηγό μας για την περιγραφή της πραγματικότητας ,φαίνεται τελικά πως η εμπειρική έρευνα υποστηρίζει τον μονισμό. Στη συνέχεια υποστηρίζει ότι τα συμπλεγμένα συστήματα δεν επιδέχονται αναγωγή στα μέρη τους και κατά συνέπεια στην κβαντική μηχανική το όλο προηγείται των μερών του. Συγκεκριμένα ισχυρίζεται θα πρέπει να θεωρούμε σαν θεμελιώδες ,οτιδήποτε μπορεί να λειτουργήσει ως η σχετική βάση επιγένεσης .Φαίνεται ότι ούτε τα μεμονωμένα σωματίδια αλλά ούτε και τα μεμονωμένα χωροχρονικά σημεία μπορούν να αποτελέσουν βάση επιγένεσης στην κβαντική μηχανική. Σε μια κατάσταση σύμπλεξης όπως είδαμε η κατάσταση του όλου δεν προκύπτει από τις καταστάσεις των σημειακών του τμημάτων. Αν όμως στο σύστημα των δύο ηλεκτρονίων που βρίσκονται σε σύμπλεξη, αντιστρέψουμε την οντολογία , η κατάσταση του κάθε ηλεκτρονίου ξεχωριστά μπορεί να προκύψει μέσω επιγένεσης από την κατάσταση του συμπλεγμένου ζεύγους, θεωρώντας το τελευταίο σαν θεμελιώδες. (Πάντα με το δεδομένο και υπό την έννοια ότι ο τελεστής πυκνότητας του κάθε ηλεκτρονίου μπορεί να προκύψει από την κατάσταση σύμπλεξης $|\psi_{00}\rangle$).

Με παρόμοιο τρόπο ο τελεστής πυκνότητας και άρα η κατάσταση καθενός από τα έστω Ν σωματίδια που απαρτίζουν ένα σύστημα ,μπορεί να προκύψουν από την κυματοσυνάρτηση του συστήματος αυτού. Γενικεύοντας μπορούμε να θεωρήσουμε το σύμπαν ως ένα θεμελιώδες σύστημα από το οποίο να προκύπτουν οι ιδιότητες όσων ανήκουν σ' αυτό. Αυτή του τη θέση ο Schaffer την ονομάζει *μονισμό προτεραιότητας*. Ο μονισμός προτεραιότητας δεν θίγει τη διαισθητική αντίληψη που έχουμε για τα μέρη και το όλο, δηλαδή όπως αναφέρει ο Lewis,ένα δόντι ενός πιρουνιού εξακολουθεί να είναι τμήμα του πιρουνιού ,ακόμη και αν το πιρούνι είναι πιο θεμελιώδες. Ο μονισμός προτεραιότητας συνεπώς δεν φαίνεται καταρχήν να έρχεται σε αντίθεση με τα επιχειρήματα για την ύπαρξη ανάδυσης καθώς δέχεται και δεν αντιστρέφει τη συνήθη αντίληψη που έχουμε για το μέρος και το όλο και μοιάζει να προκύπτει από την αποτυχία της επιγένεσης των ιδιοτήτων του όλου από τις ιδιότητες των τμημάτων του. Ωστόσο η υιοθέτηση της αντίληψης που εκφράζεται μέσω του μονισμού προτεραιότητας συνεπάγεται τον παρακάτω συλλογισμό , που θα μπορούσε να οδηγήσει στο να θεωρηθεί η ανάδυση άσχετη με την αποτυχία αυτή.

Η ανάδυση γίνεται κατανοητή ως αποτυχία εξάρτησης του όλου από τα μέρη του ,καθώς σύμφωνα με αυτήν οι ιδιότητες σε ένα ανώτερο επίπεδο δεν εξαρτώνται μόνο από τις ιδιότητες σε ένα πιο θεμελιώδες επίπεδο. Ενώ όμως η κβαντική μηχανική μπορεί να συνεπάγεται την αποτυχία της επιγένεσης των ιδιοτήτων των όλων από τις ιδιότητες των μερών τους ,αυτό σύμφωνα με τον μονισμό προτεραιότητας δεν αποτελεί μια γνήσια αποτυχία της εξάρτησης των ιδιοτήτων ,διότι σύμφωνα με τον τελευταίο η εξάρτηση μεταξύ των ιδιοτήτων του όλου και των τμημάτων του , υπάρχει και απλώς κατευθύνεται αντίστροφα. Οι ιδιότητες των μερών εξαρτώνται από τις ιδιότητες του όλου. Συνεπώς δεν υπάρχει αποτυχία της εξάρτησης και η αποτυχία της επιγένεσης των όλων επί των μερών τους δεν θα έπρεπε να μας απασχολεί .Εάν δεχτούμε τις απόψεις που εκφράζει ο μονισμός προτεραιότητας ως σωστές τότε δεν υπάρχουν σε ανώτερο επίπεδο ανεξάρτητες ιδιότητες. Κάθε τέτοια ιδιότητα όπως υποστηρίζει είναι προσδεμένη μέσω εξαρτήσεων, με ιδιότητες σε ένα πιο θεμελιώδες επίπεδο, απλά με έναν αντίστροφο τρόπο.(Τα μέρη εξαρτώνται από το όλο και το όλο θεωρείται το θεμελιώδες).

Θα μπορούσε συνεπώς κανείς να οδηγηθεί στο συμπέρασμα ότι, εφόσον οι ιδιότητες σε

ένα ανώτερο επίπεδο δεν είναι ανεξάρτητες από τις ιδιότητες σε ένα πιο βασικό επίπεδο, δεν υπάρχει ολισμός ή ανάδυση εδώ. Τα επιχειρήματα αυτά όμως δεν ευσταθούν σύμφωνα με τον Lewis. (Lewis, 2017, p.63). Όπως ισχυρίζεται είναι αντιφατικό να υποστηρίζεται ότι η απουσία της ανεξαρτησίας των ιδιοτήτων συνεπάγεται την αποτυχία της ανάδυσης και του ολισμού, δεδομένου ότι ο ολισμός είναι η ύπαρξη όλων που θεωρούνται ως θεμελιώδη. Δηλαδή ενώ είναι προφανές ότι η ύπαρξη όλων που θεωρούνται ως θεμελιώδη αποτελεί ολισμό, καταλήγει κανείς στο παράλογο συμπέρασμα ότι η ύπαρξη όλων που δεν ανάγονται στα μέρη τους δεν αποτελεί ολισμό. Φαίνεται ότι η ανακατασκευή των σχέσεων εξάρτησης ανάμεσα στα μέρη και όλο όπως στον μονισμό προτεραιότητας δεν υπονομεύει τον ύπαρξη ανάδυσης.

3.8 Ανάδυση και παραβίαση των προϋποθέσεων του θεωρήματος Bell στις καταστάσεις σύμπλεξης από τις θεωρίες που ερμηνεύουν την κβαντική μηχανική.

Ας δούμε τώρα την περίπτωση της ύπαρξης ανάδυσης στα κβαντικά φαινόμενα από μια άλλη σκοπιά. Ας επανέλθουμε στο θεώρημα του Bell το οποίο υπαγορεύει ότι θεωρώντας δεδομένες κάποιες ευλογοφανείς υποθέσεις κάθε τοπική εκδοχή του πειράματος EPR/B (εκδοχή Bohm για το πείραμα EPR), πρέπει σχετικά με τις πιθανότητες των αποτελεσμάτων μέτρησης να επαληθεύει συγκεκριμένες ανισότητες. Ένας τρόπος να διατυπώσουμε τις υποθέσεις αυτές είναι ο εξής:

Έστω ένα ζεύγος σωματιδίων που διέρχονται από δύο χωροειδώς διαχωρισμένα σημεία του χωροχρόνου, χ_1 και χ_2 αντίστοιχα. Ας υποθέσουμε ότι μπορούμε να πραγματοποιήσουμε στα σωματίδια αυτά μια μέτρηση, από ένα σύνολο ξεχωριστών μετρήσεων κι ότι κάθε μέτρηση έχει ένα σύνολο διαφορετικών αποτελεσμάτων. Το θεώρημα του Bell προκύπτει από τις ακόλουθες τρεις υποθέσεις:

1) *Την υπόθεση της τοπικότητας :*

Οι ιδιότητες του σωματιδίου 2 που βρίσκεται στο σημείο χ_2 δεν εξαρτώνται από το αποτέλεσμα της μέτρησης που πραγματοποιείται στο σωματίδιο 1 στη θέση χ_1 .

2) *Την υπόθεση της ανεξαρτησίας από το είδος της μέτρησης:*

Οι ιδιότητες που κατείχαν τα σωματίδια πριν τη μέτρηση δεν εξαρτώνται από την επιλογή του είδους των μετρήσεων που πραγματοποιούνται στα σωματίδια στα σημεία χ_1 και χ_2 .

3) *Την υπόθεση της μοναδικότητας του αποτελέσματος της μέτρησης:*

Κάθε καλή μέτρηση έχει ένα μόνο αποτέλεσμα.

Θα εξετάσουμε τις υποθέσεις αυτές. Σύμφωνα με την ειδική θεωρία της σχετικότητας, για τα χωροειδώς διαχωρισμένα σημεία χ_1 και χ_2 του χωροχρόνου δεν υπάρχει τρόπος να αποφανθούμε σχετικά με το ποιο από τα γεγονότα χ_1 ή χ_2 συμβαίνει χρονικά νωρίτερα. Σύμφωνα με έναν παρατηρητή μπορεί να συμβαίνει πρώτο το χ_1 , ενώ για ένα δεύτερο το χ_2 και για κάποιον τρίτο τα δύο γεγονότα μπορεί να συμβαίνουν ταυτόχρονα. Άρα με βάση την λογική υπόθεση ότι μια αιτία πρέπει να συμβαίνει νωρίτερα από το

αποτελέσμά της ,καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι είναι αδύνατον μια αιτία στο χ_1 να προκαλέσει ένα αποτέλεσμα στο χ_2 . Το γεγονός αυτό εξασφαλίζει την ισχύ της αρχής της τοπικότητας.

Με την ίδια λογική αν μια αιτία πρέπει να συμβαίνει νωρίτερα από το αποτέλεσμα της, τότε είναι αδύνατον η επιλογή της μέτρησης να επηρεάσει τις προγενέστερες ιδιότητες των σωματιδίων , γεγονός που εγγυάται την ανεξαρτησία της μέτρησης.

Όσο για την μοναδικότητα αυτή φαίνεται να είναι αυταπόδεικτη όσον αφορά τις καλές μετρήσεις. Εάν μια μέτρηση καταλήγει με κάποιο τρόπο σε περισσότερα του ενός ξεχωριστά αποτελέσματα ,τότε δεν είναι μια καλή μέτρηση.

Θεωρώντας τις παραπάνω υποθέσεις δεδομένες προκύπτει το συμπέρασμα του Bell σύμφωνα με το οποίο όταν τα σωματίδια προετοιμάζονται σε μια κατάσταση σύμπλεξης , καμία απόδοση ιδιοτήτων στα μεμονωμένα σωματίδια δεν είναι δυνατόν να παράξει τις συσχετίσεις που παρατηρούμε στα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Το πρόβλημα που προκύπτει είναι ότι δεν ξέρουμε πώς να εξηγήσουμε τις παρατηρούμενες συσχετίσεις παρά μόνο αν επικαλεστούμε τις ιδιότητες των ξεχωριστών σωματιδίων. Οι ολιστικές ιδιότητες του ζεύγους δεν μας βοηθούν απ' αυτήν την άποψη. Πράγματι όπως έχουμε δει η κατάσταση σύμπλεξης μπορεί να θεωρηθεί ως μια ολιστική ιδιότητα του ζεύγους των σωματιδίων .Μια τέτοια ιδιότητα συνεπάγεται υποθέσεις του τύπου: «εάν το αποτέλεσμα μιας μέτρησης του spin του σωματιδίου 1 σε κάποια κατεύθυνση είναι spin-πάνω , τότε το αποτέλεσμα μιας μέτρησης του spin του σωματιδίου 2στην ίδια κατεύθυνση είναι spin-κάτω». Ωστόσο η ολιστική αυτή ιδιότητα δεν συνεπάγεται κάποιο χωρίς όρους αποτέλεσμα της μέτρησης για το σωματίδιο 1 ή για το σωματίδιο 2. Δεν εξηγεί δηλαδή για ποιο λόγο το αποτέλεσμα της μέτρησης του spin του σωματιδίου 1 ήταν spin-πάνω αντί για spin-κάτω. Προκειμένου να ερμηνεύσουμε το τελευταίο χρειαζόμαστε μια εγγενή ιδιότητα του σωματιδίου 1.Έτσι ακόμη κι αν επωφεληθούμε από τις ολιστικές ιδιότητες του ζεύγους των σωματιδίων ,δεχόμενοι τα συμπεράσματα του θεωρήματος Bell αφήνουμε ανεξήγητα τα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Για να ξεπεραστεί αυτό το εμπόδιο πολλοί επιστήμονες που προσπάθησαν να ερμηνεύσουν την κβαντική μηχανική ,συμπεριλαμβανομένου του ίδιου του Bell , προτίμησαν να απορρίψουν μια από τις τρεις προϋποθέσεις του .Έτσι όμως μπορεί μεν να αποκαθίσταται η δυνατότητα να ερμηνευτούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων σε καταστάσεις σύμπλεξης με τη βοήθεια των εγγενών ιδιοτήτων των σωματιδίων , όμως ταυτόχρονα υπονομεύεται η περίπτωση της ανάδυσης. Το περίεργο είναι ωστόσο, πως ενώ ακόμη και οι κυριότερες προσπάθειες ερμηνείας της κβαντομηχανικής παραβιάζουν μία από τις υποθέσεις του Bell,δεν αποφεύγουν με τον τρόπο αυτό την ανάγκη να υποθέσουν την ύπαρξη ανάδυσης.

Ας εξετάσουμε για παράδειγμα την υπόθεση της *τοπικότητας* . Εάν την απορρίψουμε τότε γίνεται ξεκάθαρο το ότι οι ιδιότητες των μεμονωμένων σωματιδίων εξηγούν τα αποτελέσματα των μετρήσεων ,τα οποία παρατηρούνται. Μια μέτρηση στο σωματίδιο 1 στο χ_1 , μπορεί τώρα να μεταβάλλει τις ιδιότητες του σωματιδίου 2 στο χ_2 και να επιφέρει με τον τρόπο αυτό μια συσχέτιση ανάμεσα στα αποτελέσματα των μετρήσεων που λαμβάνουμε για το σωματίδιο 1 και το σωματίδιο 2.

Δύο από τις κυριότερες απόπειρες ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής είναι η θεωρία του Bohm και η θεωρία των GRW(Ghirardi,Rimini and Weber 1986). Και οι δύο θεωρίες παραβιάζουν την τοπικότητα. Συνεπώς ,θα μπορούσαμε να πούμε ότι για να ερμηνεύσουν

τα αποτελέσματα των μετρήσεων των spin δεν χρειάζεται να καταφύγουν σε ολιστικές προσεγγίσεις των ιδιοτήτων του ζεύγους. Ωστόσο μια τέτοια *αιτιακή και μη τοπική* προσέγγιση της ερμηνείας των συσχετίσεων σύμπλεξης δεν ευσταθεί και η ιδιαίτερη φύση της κβαντικής σύμπλεξης είναι ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει αυτό. Σε μια τέτοια κατάσταση σύμπλεξης αν θέλουμε να εξηγήσουμε τις συσχετίσεις μεταξύ των σωματιδίων μια παρέμβαση σε ένα από τα σωματίδια (π.χ. μια μέτρηση), πρέπει να επηρεάζει το συγκεκριμένο απομακρυσμένο σωματίδιο με το οποίο βρίσκεται σε σύμπλεξη.

Το πρόβλημα που εμφανίζεται εδώ είναι ότι οι αιτιακές αλληλεπιδράσεις δεν δρουν με αυτόν τον επιλεκτικό τρόπο αλλά επηρεάζουν κάθε σωματίδιο κάποιου συγκεκριμένου είδους. Για παράδειγμα, ως θεωρήσουμε τη νευτώνεια βαρύτητα. Η κίνηση ενός σώματος που έχει μάζα επηρεάζει αμέσως την κίνηση κάθε άλλου σώματος που έχει κι αυτό μάζα. Προκειμένου τώρα μια αιτιώδης επίδραση να επηρεάσει ακαριαία ακριβώς σε ένα συγκεκριμένο απομακρυσμένο σωματίδιο πρέπει να εφοδιάσουμε τη θεωρία μας με μια μη αναγώγιμη σχέση μεταξύ των δύο σωματιδίων που σχετίζονται. Συμπεραίνουμε λοιπόν ότι μη τοπικές θεωρίες όπως αυτή του Bohm και των GRW πρέπει να συμπεριλαμβάνουν την ανάδυση.

Σε κάθε περίπτωση ο τρόπος με τον οποίο πραγματώνεται η ανάδυση είναι ότι η κατάσταση κβαντικής σύμπλεξης διατηρείται ως περιγραφική του συστήματος των δύο σωματιδίων. Η κατάσταση σύμπλεξης αντιπροσωπεύει μια ολιστική ιδιότητα που συνδέει τα δύο σωματίδια μεταξύ τους. Η κάθε τέτοια μη τοπική θεωρία χρειάζεται επιπλέον έναν αιτιώδη μηχανισμό που να συνδέει τις ολιστικές ιδιότητες με τα παρατηρούμενα αποτελέσματα των μετρήσεων.

Στην περίπτωση της θεωρίας του Bohm²² ο μηχανισμός αυτός είναι ένας νόμος, ο οποίος υπαγορεύει πως η κβαντική κατάσταση «κατευθύνει» τις θέσεις των σωματιδίων. Ο νόμος είναι μη τοπικός (κατά το ότι η ταχύτητα του ενός σωματιδίου εξαρτάται από την κβαντική κατάσταση που υπολογίζεται στη θέση που βρίσκεται το άλλο σωματίδιο), οπότε μια μέτρηση στο ένα σωματίδιο μπορεί ακαριαία να επηρεάσει την κίνηση του άλλου.

Η εξάρτηση της κίνησης του κάθε σωματιδίου από την κβαντική κατάσταση σύμπλεξης υποδεικνύει πως μια ολιστική ιδιότητα ενδυναμώνει τις συσχετίσεις που παρατηρούμε ανάμεσα σε αυτό το συγκεκριμένο ζεύγος σωματιδίων. Εάν ένα σωματίδιο κατευθύνεται προς το αποτέλεσμα spin – πάνω, τότε η ολιστική σύνδεση μεταξύ των δύο σωματιδίων σημαίνει ότι το άλλο κατευθύνεται προς ένα αποτέλεσμα spin -κάτω.

Στην δε περίπτωση της θεωρίας GRW²³ ο επιπλέον αιτιώδης μηχανισμός είναι ένας νόμος ο οποίος προκαλεί ξαφνικές και τυχαίες καταρρεύσεις της κυματοσυνάρτησης.

Ο νόμος αυτός είναι επίσης μη τοπικός: μια κατάρρευση που πυροδοτείται από μια

²² Η ερμηνεία του κβαντικού κόσμου από τον Bohm ήταν ρεαλιστική, αιτιοκρατική και μη τοπική. Υπέθετε ότι οι κυματικές ιδιότητες που παρατηρούνται στα πειράματα δεν είναι μια έκφραση των ηλεκτρονίων που εξαρτάται από τη μέτρηση, αλλά αντιπροσωπεύουν πραγματικά υπάρχοντα κύματα στα οποία τα εξίσου πραγματικά ηλεκτρόνια που έχουν σωματιδιακή φύση φαίνεται να «κολυμπούν». Αυτά τα «οδηγά κύματα» ερμήνευαν επίσης την ακαριαία δράση από απόσταση. Καθώς δεν ήταν δυνατόν να τα μετρήσει απευθείας σαν φυσική ποσότητα, ο Bohm αρχικά περιέγραψε τη θεωρία του σαν μια θεωρία κρυμμένων μεταβλητών. Οι εξισώσεις της θεωρίας του μπορούσαν να προβλέψουν και να εξηγήσουν τα αποτελέσματα όλων των γνωστών πειραμάτων όπως και η μη αιτιοκρατική θεωρία της Κοπεγχάγης. (Jaeger L., 2018, p.274)

²³ Σύμφωνα με την θεωρία των GRW (Ghirardi, Rimini, Weber) ένα σύστημα εξελίσσεται σύμφωνα με την εξίσωση Schrodinger διαρκώς εκτός από όταν συμβαίνει μια στιγμιαία κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης που την ονομάζουν hit (χτύπημα). Η κρίσιμη υπόθεση της θεωρίας είναι ότι αυτό το χτύπημα συμβαίνει στο επίπεδο των μικροσκοπικών σωματιδίων που συνθέτουν το σύστημα.

μέτρηση στο ένα σωματίδιο αυτομάτως επηρεάζει την κατάσταση του άλλου. Και ξανά η κατάσταση σύμπλεξης του ζεύγους των σωματιδίων είναι απαραίτητη ώστε να εξηγηθεί για ποιο λόγο τα αποτελέσματα των μετρήσεων για τα δύο σωματίδια είναι συσχετισμένα. Η σύμπλεξη σημαίνει ότι μια κατάρρευση σε ένα spin -πάνω αποτέλεσμα για το πρώτο σωματίδιο είναι επίσης μια κατάρρευση σε ένα spin-κάτω αποτέλεσμα για το δεύτερο σωματίδιο. Δηλαδή τόσο στη θεωρία του Bohm όσο και στη θεωρία των GRW οι ιδιότητες προκύπτουν μέσω της ολιστικής σύνδεσης των σωματιδίων και η παραβίαση της τοπικότητας δεν αναιρεί την αναγκαιότητα της ανάδυσης.

Ας εξετάσουμε τώρα την υπόθεση της μοναδικότητας. Εάν απορριφθεί, μετά δεν χρειαζόμαστε μια ειδική εγγενή ιδιότητα του σωματίου 1 που να εξηγεί γιατί το αποτέλεσμα της μέτρησης του spin του σωματιδίου 1 ήταν spin -πάνω αντί για spin -κάτω. Αντ' αυτού μπορούμε να πούμε ότι και τα δύο αποτελέσματα είναι εξίσου πραγματωμένα και το συγκεκριμένο αποτέλεσμα που βλέπουμε είναι συνέπεια της θέσης μας στη διακλαδισμένη δομή της πραγματικότητας. Αυτή είναι η προσέγγιση των πολλών κόσμων (Everett 1957)²⁴.

Θα μπορούσε να σκεφτεί κανείς ότι η παραβίαση της μοναδικότητας επιτρέπει τη διατύπωση μιας ερμηνείας των αποτελεσμάτων των μετρήσεων σε συζευγμένα ζεύγη που δεν αναφέρεται σε ολιστικές ιδιότητες του ζεύγους. Όμως παρά το ότι η ερμηνεία των πολλών κόσμων αποφεύγει την ανάγκη για εγγενείς ιδιότητες του κάθε σωματίου, απαιτεί κι αυτή έναν ειδικό σύνδεσμο μεταξύ των σωματιδίων του συγκεκριμένου ζεύγους ώστε να εξηγήσει τις συσχετίσεις που παρατηρούνται σε κάθε κλάδο της πραγματικότητας.

Εάν τα spin των σωματιδίων είναι μετρημένα στην ίδια κατεύθυνση, τότε οι κλάδοι στους οποίους το σωματίδιο 1 έχει spin -πάνω είναι επίσης κλάδοι στους οποίους το σωματίδιο 2 έχει spin-κάτω. Άρα και η ερμηνεία των πολλών κόσμων διατηρεί την κβαντική κατάσταση σύμπλεξης για την περιγραφή των δύο σωματιδίων, έτσι ώστε να αντιπροσωπεύει μια ολιστική ιδιότητα που συνδέει το σύστημα των δύο σωματιδίων. Η προσέγγιση των πολλών κόσμων δεν χρησιμοποιεί κάποιον επιπλέον αιτιακό μηχανισμό αλλά αντ' αυτού ερμηνεύει την κβαντική κατάσταση ως περιγράφοσα μια διακλαδιζόμενη πραγματικότητα. Και στην περίπτωση αυτής της προσέγγισης οι ολιστικές ιδιότητες είναι αναγκαίες για να παραχθούν οι παρατηρούμενες συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων των spin σε κάθε κλάδο της πραγματικότητας.

Όπως είδαμε και στις τρεις παραπάνω σημαντικές προσεγγίσεις της ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής εμπεριέχεται η έννοια της ανάδυσης.

Αφήσαμε την υπόθεση της ανεξαρτησίας από την επιλογή της μέτρησης τελευταία διότι δεν υπάρχει μέχρι στιγμής κάποια ολοκληρωμένη θεωρία ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής η οποία να παραβιάζει την υπόθεση αυτή. Για να μπορέσει να γίνει κάτι τέτοιο θα πρέπει να βρεθεί ένας τρόπος οι ιδιότητες των σωματιδίων να συσχετίζονται με το είδος των μετρήσεων που πραγματοποιούνται σε αυτά. Σύμφωνα με τον Lewis, δεδομένου

²⁴ Η ερμηνεία των πολλών κόσμων διατυπώθηκε για πρώτη φορά από τον Hue Everett το 1957 και το 1970 ανασύρθηκε από τον Witt που της έδωσε και το όνομα με το οποίο έκτοτε έγινε γνωστή. Πέρα από την εξίσωση Schrodinger δεν δέχεται τίποτε άλλο, άρα ούτε το μετρητικό αξίωμα ούτε και τον τύπο του Born της στατιστικής ερμηνείας. Η βασική ιδέα της θεωρίας είναι ότι η κυματοσυνάρτηση δεν καταρρέει ποτέ και όλα τα ενδεχόμενα που προβλέπει μια επαλληλία πραγματώνονται σε διαφορετικά σύμπαντα - διαφορετικούς κλάδους της πραγματικότητας. Η κυματοσυνάρτηση υπολογίζει δηλαδή πολλές εκδοχές της πραγματικότητας που πραγματοποιούνται ταυτόχρονα σε διαφορετικούς κλάδους ενός πολλαπλού σύμπαντος. (Τραχανάς, 2021)

ότι οι μετρητικές διαδικασίες μπορούν προφανώς να επιλεγούν ελεύθερα ,θα μπορούσε να υποθέσει κάποιος ότι μια τέτοια θεωρία υπονομεύει την ελεύθερη βούληση υπό την έννοια ότι οι προγενέστερες ιδιότητες των σωματιδίων περιορίζουν την μετέπειτα επιλογή των μετρήσεων. Επίσης κάθε μηχανισμός που θα εξασφάλιζε τέτοιες συσχετίσεις μοιάζει να ισοδυναμεί με ένα είδος «...παγκόσμιας φυσικής συνομοψίας» (Lewis , 2017,p.69) Μια άλλη πρόταση είναι αυτή του Price (1994), ο οποίος προτείνει ότι κάποιος μπορεί να θεωρήσει ότι η ελεύθερη επιλογή των μετρήσεων στα σωματίδια μπορεί να προκαλεί τις ιδιότητές τους. Εφόσον οι μετρήσεις μπορούν να επιλεγούν αφού πρώτα τα δύο σωματίδια έχουν παραχθεί και για να αποφύγουμε την ανάγκη μη τοπικών-αιτιακών επιδράσεων, αυτό σημαίνει ότι η αιτιακή επίδραση λειτουργεί αντίστροφα στο χρόνο.

Ο Price διατυπώνει την άποψη ότι η πεποίθηση πως το παρελθόν δεν εξαρτάται από το μέλλον είναι ιδιαίτερος ανθρωποκεντρική και την αποδίδει σε προβολή της χρονικής μας ασυμμετρίας (Price,1994). Αυτή είναι η προσέγγιση της αντιστροφής της αιτιότητας (retrocausal approach²⁵) , στην κβαντική μηχανική. Με την προσέγγιση αυτή της κβαντικής μηχανικής αποφεύγουμε την μη-τοπικότητα του Bohm και των GRW ,καθώς και την περίεργη διακλαδιζόμενη πραγματικότητα του πολλαπλού κόσμου του Everett. Η παραβίαση της τοπικότητας από τους Bohm και GRW δημιουργεί προβλήματα γιατί δεν συνάδει με την ειδική θεωρία της σχετικότητας. Όσο για τη θεωρία των πολλών κόσμων το σημαντικότερο πρόβλημα είναι ο υπολογισμός των πιθανοτήτων και η εξήγηση του πραγματικού κόσμου από μια μαθηματική εξίσωση, την εξίσωση Schrodinger, θεώρηση που οδηγεί σε μια καθαρά ντετερμινιστική πραγματικότητα στην οποία δεν έχει θέση η τυχαιότητα.

Η προσέγγιση της αντιστροφής αιτιότητας έχει το δικό της αντίκτυπο στη συζήτηση μας για την ανάδυση. Το σημαντικότερο χαρακτηριστικό μιας τέτοιας ερμηνείας είναι ότι σ' αυτήν την περίπτωση δεν χρειάζεται να υποθέσουμε μια ειδική ολιστική ιδιότητα που να συνδέει τα δύο σωματίδια που συμμετέχουν στην κατάσταση σύμπλεξης. Υπάρχει ένας απευθείας αιτιακός σύνδεσμος που συνδέει τη μέτρηση στο δεύτερο σωματίδιο με τις ιδιότητες του πρώτου σωματιδίου με τη μεσολάβηση του ίδιου του δεύτερου σωματιδίου. Διότι ,με τον ίδιο τρόπο που ένα σωματίδιο μπορεί να μεταφέρει τα ίχνη προγενέστερων μετρήσεων που πραγματοποιήθηκαν σε αυτό ,μπορεί να μεταφέρει σύμφωνα με την αντίστροφη αιτιότητα και τα ίχνη μεταγενέστερων μετρήσεων που θα πραγματοποιηθούν σ' αυτό. Τα συμπλεγμένα σωματίδια προέρχονται από την ίδια πηγή και εξ' αυτού επηρεάζουν το πρώτο σωματίδιο. Το γεγονός ότι τα ίδια τα σωματίδια μεταφέρουν τις αιτιακές επιδράσεις σημαίνει ότι η ειδική σύνδεση μεταξύ των δύο αυτών σωματιδίων ενσωματώνεται στην αιτιακή τους εξέλιξη μέσω της κοινής τους προέλευσης. Δεν είναι λοιπόν απαραίτητη μια ολιστική ιδιότητα του ζεύγους για να ερμηνεύσουμε τις παρατηρούμενες, συσχετίσεις. Η προσέγγιση της αντιστροφής αιτιότητας παρουσιάζει πολύ καθαρά γιατί δεν προκύπτει από τον κβαντικό φορμαλισμό απευθείας επιχείρημα για την ύπαρξη της ανάδυσης. Αν απορρίψουμε την υπόθεση της ανεξαρτησίας δεν υπάρχει λόγος κατ' αρχήν οι συσχετίσεις που παρατηρούμε από τα συμπλεγμένα ζεύγη να μην εξηγούνται χωρίς να επικαλούμαστε την ανάδυση. Όμως η εξηγητική αυτή επιλογή δεν μπορεί ακόμη να ενσωματωθεί σε μια πλήρως αναπτυγμένη και ολοκληρωμένη ερμηνεία

²⁵ Retrocausality: Η αντιστροφή της αιτιότητας είναι μια σύλληψη σύμφωνα με την οποία η χρονική σειρά αιτίας και το αποτελέσματος αντιστρέφεται ,δηλαδή το αποτέλεσμα προηγείται χρονικά της αιτίας που το προκάλεσε. Με αυτόν τον τρόπο ένα γεγονός μεταγενέστερο επηρεάζει ένα γεγονός προγενέστερο .

αντίστροφης αιτιότητας στην κβαντική μηχανική. Η θεωρητική αυτή προσέγγιση δεν βρίσκεται ακόμη στο στάδιο στο οποίο θα μπορούσε να παράγει αποτελέσματα μετρήσεων ισοδύναμα με αυτά της τυπικής κβαντικής μηχανικής.

3.9. Εξετάζοντας ξανά την ύπαρξη αναγωγιστικών χαρακτηριστικών και ανάδυσσης στην κβαντική μηχανική.

Η προηγούμενη επιχειρηματολογία οδηγεί στο συμπέρασμα πως με την επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης μπαίνει τέλος στον αναγωγισμό, τουλάχιστον με τη μορφή αυτή που εφαρμόζεται στην ερμηνεία του φυσικού κόσμου από την κλασική φυσική.

Έχουν παρ' όλα αυτά διατυπωθεί και αντίθετες απόψεις. Έχει ενδιαφέρον να αναφερθούμε στις απόψεις που διατυπώθηκαν από τον Huttemann σχετικά με το θέμα αυτό.

Ισχυρίζεται ότι η κβαντομηχανική μας παρέχει ένα πλήθος αναγωγιστικών εξηγήσεων και δίνει παραδείγματα από τη φυσική της στερεάς κατάστασης, όπου η συμπεριφορά των σύνθετων συστημάτων (κρυστάλλων, υγρών και μετάλλων) εξηγείται μέσω της συμπεριφοράς των συστατικών τους (μορίων, ιόντων κ.λπ.). Αναπτύσσει λοιπόν μια επιχειρηματολογία, κάνοντας διάκριση μεταξύ δύο ειδών «μικροερμηνειών» ή «μικροαναγωγών» (Huttemann, 2005, p.115).

Με τους όρους αυτούς αναφέρεται στην ερμηνεία της συμπεριφοράς των σύνθετων συστημάτων μέσω της συμπεριφοράς των συστατικών τους υποσυστημάτων. Διακρίνει την «ταυτόχρονη ή συγχρονική μικροερμηνεία» και την «διαχρονική μικροερμηνεία». Αντίστοιχα ισχυρίζεται ότι υπάρχουν και δύο είδη ανάδυσσης.

Η κβαντική σύμπλεξη σύμφωνα με τον Huttemann αποτελεί παράδειγμα της αποτυχίας της ταυτόχρονης μικροερμηνείας αλλά δεν επηρεάζει το άλλο είδος. Το ενδιαφέρον είναι ότι διατυπώνει τον ισχυρισμό, πως όσον αφορά την διαχρονική μικροερμηνεία η κβαντική μηχανική είναι τόσο αναγωγιστική όσο και το κλασικό της αντίστοιχο. Θεωρεί την ανάδυση ως μια οντολογική έννοια, η οποία αφορά τη σχέση ανάμεσα στα μέρη και στο όλο και αναφέρει ότι αναδύομενη είναι η συμπεριφορά, που προκύπτει όταν είναι αδύνατον να ερμηνευτεί η συμπεριφορά των σύνθετων συστημάτων μέσω της συμπεριφοράς των συστατικών τους. Για να μελετήσει την έννοια της συμπεριφοράς των συστημάτων στο παραπάνω πλαίσιο, ορίζει την κατάσταση ενός συστήματος μια χρονική στιγμή ως τη γνώση των τιμών των φυσικών μεγεθών που περιγράφουν το σύστημα τη χρονική αυτή στιγμή. Έτσι η συμπεριφορά ενός συστήματος προσδιορίζεται από την κατάστασή του μια χρονική στιγμή, τις φυσικές σταθερές και τους δυναμικούς νόμους που συσχετίζουν μεταξύ τους τις φυσικές ποσότητες -μεγέθη και περιγράφουν τη χρονική εξέλιξη του συστήματος.

Με τη βοήθεια των παραπάνω διευκρινήσεων ορίζει ως :

α) *ταυτόχρονη ή συγχρονική μικροερμηνεία* την ερμηνεία της κατάστασης ενός σύνθετου συστήματος τη χρονική στιγμή t , μέσω των καταστάσεων των συστατικών του τμημάτων την ίδια χρονική στιγμή t .

και

β) *διαχρονική μικροερμηνεία* αυτήν που εξηγεί γιατί ένα σύνθετο σύστημα βρίσκεται σε μια συγκεκριμένη κατάσταση τη χρονική στιγμή t , μέσω μιας προγενέστερης κατάστασης

του σύνθετου συστήματος και της δυναμικής του συστήματος ,η οποία συνδέεται με την δυναμική των συστατικών του μερών. (Hutemann 2005,p.116)

Πράγματι στην περίπτωση της κλασικής μηχανικής είναι δυνατόν να εξηγηθεί η συμπεριφορά ενός συστήματος με αναγωγή στη συμπεριφορά των συστατικών του μερών.

Σαν πρώτο σχετικό παράδειγμα ,θεωρούμε το σύστημα δύο σωματιδίων που δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους (για λόγους απλότητας) . Αφού πρώτα έχουμε αναγνωρίσει ποια είναι τα τμήματα που συνθέτουν το σύστημα, αυτό που έπεται είναι να προσδιοριστεί η δυναμική του κάθε τμήματος ,δηλαδή στην περίπτωση μας ,η δυναμική καθενός από τα δύο απομονωμένα σωματίδια. Σύμφωνα με την κλασική μηχανική η συμπεριφορά του κάθε σωματιδίου προσδιορίζεται πλήρως ,από την τροχιά του σε ένα χώρο φάσεων έξι διαστάσεων (τρεις διαστάσεις για την ορμή και τρεις για τη θέση του). Κάθε σημείο στο χώρο φάσεων αντιπροσωπεύει μια κατάσταση του κλασικού συστήματος. Η χαμιλτονιανή προσδιορίζει την χρονική εξέλιξη του συστήματος ,δηλαδή τη δυναμική του και συνεπώς την τροχιά του στο χώρο των φάσεων. Η δυναμική λοιπόν του απομονωμένου σωματιδίου θα περιγράφεται από μια κλασική χαμιλτονιανή της μορφής $H = \frac{p^2}{2m}$, όπου p είναι η ορμή και m η μάζα του απομονωμένου σωματιδίου. Για το σύστημα τώρα ,των δύο μη αλληλεπιδρώντων σωματίων ,πρέπει πρώτα να καθορίσουμε δύο χώρους φάσεων έξι διαστάσεων ,έναν για κάθε σωματίδιο του συστήματος και μια κλασική Χαμιλτονιανή της παραπάνω μορφής για καθένα από αυτά.

Αυτή ωστόσο είναι η περιγραφή δύο ξεχωριστών σωματιδίων και όχι η περιγραφή του συστήματός τους. Πρέπει λοιπόν να συνδυαστούν κατάλληλα οι περιγραφές των δύο υποσυστημάτων έτσι ώστε να προκύψει η περιγραφή της συμπεριφοράς του σύνθετου συστήματος. Σύμφωνα με το βασικό νόμο σύνθεσης της κλασικής μηχανικής , ο χώρος φάσεων του σύνθετου συστήματος είναι το άθροισμα των χώρων φάσεων των υποσυστημάτων. Συνεπώς για το σύστημα των δύο σωματιδίων προκύπτει ένας χώρος φάσεων δώδεκα διαστάσεων. Αντίστοιχα η Χαμιλτονιανή του συστήματος ισούται με το άθροισμα των Χαμιλτονιανών των απομονωμένων συστατικών του συστήματος.

Δηλαδή η δυναμική του σύνθετου συστήματος περιγράφεται από μια Χαμιλτονιανή της μορφής :

$$H = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} .$$

Παρατηρούμε πως η μικροερμηνεία (κατά Hutemann) της δυναμικής του συστήματος των δύο σωματιδίων που δεν αλληλεπιδρούν προκύπτει μέσω της πρόσθεσης των ανεξάρτητων συνεισφορών των δύο σωματιδίων στην Χαμιλτονιανή του συστήματος. Όλη δε η πληροφορία που ενσωματώνεται στην μικροερμηνεία της δυναμικής του συστήματος, σχετίζεται με τους δυναμικούς νόμους που διέπουν τη συμπεριφορά των υποσυστημάτων και τους νόμους της σύνθεσης .Αν μάλιστα τα υποσυστήματα αλληλεπιδρούν η πληροφορία συμπεριλαμβάνει και τους νόμους της αλληλεπίδρασης μεταξύ τους. Ωστόσο στην ερμηνεία της δυναμικής συμπεριφοράς του σύνθετου συστήματος δεν παίζουν κανένα ρόλο οι καταστάσεις των υποσυστημάτων.

Από τα παραπάνω συμπεραίνουμε ότι δεν είναι απαραίτητο να προσδιοριστούν οι καταστάσεις των υποσυστημάτων για να διατυπωθεί η διαχρονική μικροερμηνεία. Ένα δεύτερο πιο ρεαλιστικό παράδειγμα τέτοιας μικροερμηνείας έχουμε στην περίπτωση του ιδανικού κρυστάλλου . Για την περιγραφή του υποθέτουμε ότι οι θέσεις ισορροπίας των ιόντων είναι τα πλεγματικά σημεία , ενός κρυσταλλικού πλέγματος. Οι ταλαντώσεις των ιόντων γύρω από τη θέση ισορροπίας τους θεωρείται ότι είναι μικρού πλάτους σε σχέση με την απόσταση μεταξύ των ιόντων με αποτέλεσμα αυτά να αλληλεπιδρούν μόνο

με τα πιο γειτονικά τους ιόντα. Επιπλέον το δυναμικό που περιγράφει αυτή την αλληλεπίδραση θεωρείται αρμονικό. Από τις παραπάνω υποθέσεις εξάγεται η κλασική Χαμιλτονιανή του ιδανικού κρυστάλλου . Δηλαδή οι απαιτούμενες πληροφορίες για την κατασκευή της Χαμιλτονιανής αφορούν τη δυναμική των υποσυστημάτων θεωρουμένων ως απομονωμένων αφενός , (κινητικοί όροι της Χαμιλτονιανής) και τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των υποσυστημάτων στον κρύσταλλο ,δηλαδή την δυναμική ενέργεια αφετέρου. Οι συνεισφορές αυτές προστίθενται με βάση τον αντίστοιχο νόμο σύνθεσης .Με αφετηρία τις υποθέσεις αυτές αποδεικνύεται ότι η ειδική θερμότητα σε έναν κρύσταλλο είναι ανεξάρτητη από τη θερμοκρασία του. Η διαδικασία της περιγραφής του ιδανικού κρυστάλλου είναι λοιπόν στην ουσία της ίδια με την περίπτωση του συστήματος των δύο σωματιδίων που δεν αλληλεπιδρούν που περιγράψαμε παραπάνω. Συνίσταται δηλαδή στον προσδιορισμό της δυναμικής του σύνθετου συστήματος μέσω της δυναμικής των υποσυστημάτων που το αποτελούν. Για αυτό το λόγο η στρατηγική αυτή εξήγησης της συμπεριφοράς του σύνθετου συστήματος μπορεί να χαρακτηριστεί μικροερμηνεία ή μικροαναγωγισμός σύμφωνα με τον ορισμό που δίνει ο Huttemann. Από τα δύο παραπάνω παραδείγματα αναδεικνύεται όχι μόνο ο αναγωγιστικός χαρακτήρας της κλασικής φυσικής αλλά και το γεγονός ότι η κλασική φυσική μπορεί να χαρακτηριστεί αναγωγιστική κατά δύο διαφορετικές έννοιες. Είδαμε μέσω των παραδειγμάτων αυτών ότι η κλασική μηχανική επιτρέπει όχι μόνο τη συγχρονική-ταυτόχρονη μικροερμηνεία, (την ερμηνεία δηλ. της κατάστασης ενός σύνθετου συστήματος τη χρονική στιγμή t , μέσω των καταστάσεων των συστατικών του τμημάτων την ίδια χρονική στιγμή t), αλλά περιλαμβάνει και μια αναλυτική μεθοδολογία που εξηγεί τη χρονική εξέλιξη των σύνθετων συστημάτων (τη δυναμική τους), χρησιμοποιώντας τη χρονική εξέλιξη των τμημάτων τους και τους απαραίτητους νόμους σύνθεσης και αλληλεπίδρασης. Δηλαδή η διαχρονική μικροερμηνεία μας παρέχει έναν δεύτερο τρόπο κατά τον οποίο η κλασική φυσική είναι ένα παράδειγμα αναγωγισμού.

Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι η διαχρονική μικροερμηνεία , αναδεικνύει καθαρότερα τον αναγωγισμό που εμπεριέχεται στην κλασική αντίληψη από ότι η ταυτόχρονη μικροερμηνεία .Αυτό προκύπτει από το γεγονός ότι όπως είδαμε στην περίπτωση της ειδικής θερμότητας στο παράδειγμα του ιδανικού κρυστάλλου , μπορούμε χρησιμοποιώντας τη μέθοδο της διαχρονικής μικροερμηνείας να περιγράψουμε μακροσκοπικές ιδιότητες (π.χ. την ειδική θερμότητα) , ενός συστήματος (κρύσταλλος) ,μέσω της συμπεριφοράς των συστατικών μερών του (ιόντα).

Ανακεφαλαιώνοντας μια διαχρονική μικροερμηνεία πραγματοποιείται σε τρία στάδια:

α) Το διαχωρισμό του σύνθετου συστήματος σε υποσυστήματα, για παράδειγμα του ιδανικού κρυστάλλου σε ιόντα.

β) Τον προσδιορισμό της δυναμικής του κάθε υποσυστήματος ,θεωρώντας ότι αυτά είναι απομονωμένα (κινητικοί όροι).

γ) Τέλος την πρόσθεση των συνεισφορών των υποσυστημάτων ,όπως επίσης και της δυναμικής ενέργειας λόγω της μεταξύ τους αλληλεπίδρασης ,προκειμένου να περιγράψουμε τη δυναμική του σύνθετου συστήματος.

Αυτή είναι μια εντελώς γενική διαδικασία που ακολουθούμε για να προσδιορίσουμε την εξέλιξη ενός σύνθετου συστήματος. Δηλαδή προκειμένου να επιτύχει μια τέτοια μικροερμηνεία χρειάζεται πρώτα γνώση για τον τρόπο με τον οποίο θα συμπεριφέρονταν τα υποσυστήματα εάν ήταν απομονωμένα, στη συνέχεια πληροφορίες σχετικά με τον

τρόπο με τον οποίο αυτή η συμπεριφορά συνεισφέρει στη συμπεριφορά του σύνθετου συστήματος, δηλαδή οι κατάλληλοι νόμοι σύνθεσης και τέλος πληροφορίες σχετικές με το είδος των αλληλεπιδράσεων που εμφανίζονται όταν τα υποσυστήματα δεν είναι απομονωμένα.

Θα διερευνήσουμε τώρα αν η εφαρμογή της διαχρονικής μικροερμηνείας είναι δυνατή στο κβαντικό παράδειγμα.

Η κβαντική σύμπλεξη είναι ένα αντιπαράδειγμα της ταυτόχρονης μικροερμηνείας. Για να υποστηρίξει κανείς το τελευταίο μπορεί να αναφερθεί στη γνωστή μας κατάσταση singlet και το γεγονός ότι αυτή μπορεί να γραφτεί μόνο ως υπέρθεση (γραμμικό συνδυασμό) των ταυστικών γινομένων των καταστάσεων spin των σωματιδίων που συμμετέχουν στην κατάσταση σύμπλεξης. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι ενώ το σύνθετο σύστημα βρίσκεται σε μια καθορισμένη κατάσταση, αυτή δεν είναι δυνατόν να ερμηνευτεί μέσω καθορισμένων καταστάσεων των συστατικών σωματιδίων. Άρα, αυτό που συμβαίνει εδώ είναι η αποτυχία της ταυτόχρονης μικροερμηνείας και συνεπώς στην περίπτωση αυτή έχουμε ένα παράδειγμα ανάδυσης.

Είναι, αυτή η αποτυχία της ταυτόχρονης μικροερμηνείας που λειτουργεί σαν βάση για την αποτυχία της επιγένεσης των ιδιοτήτων του όλου επί των ιδιοτήτων των τμημάτων του και την εισαγωγή του ολισμού στην κβαντική μηχανική. Η κβαντική μηχανική στην περίπτωση αυτή δηλώνει ότι υπάρχουν καταστάσεις των σύνθετων συστημάτων, οι οποίες δεν επιτρέπουν την ερμηνεία τους μέσω των καθαρών καταστάσεων των μερών τους και την αδυναμία αυτή, συνεπάγεται ο φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής.

Όσον αφορά όμως τώρα τη διαχρονική μικροερμηνεία, δηλαδή την ερμηνεία της δυναμικής εξέλιξης ενός σύνθετου συστήματος, χρησιμοποιώντας τη δυναμική των συστατικών του μερών του ο Huttemann υποστηρίζει πως η κβαντική μηχανική είναι εξίσου αγωγιστική με την κλασική φυσική. Για να υποστηρίξει την άποψη αυτή εξετάζει την περίπτωση ενός σύνθετου κβαντικού συστήματος σωματιδίων. Η κατάσταση ενός τέτοιου συστήματος σε μια χρονική στιγμή αντιπροσωπεύεται όπως είναι γνωστό από ένα διάστημα στο χώρο Hilbert. Η εξίσωση Schrodinger περιγράφει τη δυναμική του συστήματος, δηλαδή τον τρόπο με τον οποίο εξελίσσεται χρονικά.

Για την λύση της εξίσωσης Schrodinger πρέπει να προσδιορίσουμε την κβαντική χαμιλτονιανή του συστήματος. Εάν πρόκειται για ένα απομονωμένο σωματίδιο αυτή είναι η

$$\hat{H} = \frac{\hat{p}^2}{2m}, \text{ όπου } \hat{p}, \text{ ο τελεστής της ορμής του σωματιδίου. Έστω τώρα ότι θέλουμε να}$$

προσδιορίσουμε τη συμπεριφορά του κβαντικού συστήματος δύο σωματιδίων, που πάλλι για λόγους απλότητας θεωρούμε ότι δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους.

Ο προσδιορισμός αυτός γίνεται μέσω της ίδιας διαδικασίας όπως και στην κλασική μηχανική. Επικαλούμαστε έναν κβαντικό νόμο σύνθεσης ο οποίος υπαγορεύει να πάρουμε το ταυστικό γινόμενο των δύο χώρων Hilbert ώστε να προκύψει ένας νέος χώρος Hilbert στον οποίο να αναπαρίσταται η κατάστασή του συστήματος των δύο σωματιδίων. (Bohm, 1986). Η χαμιλτονιανή του συστήματος των μη αλληλεπιδρώντων σωματιδίων είναι τότε το άθροισμα των αντίστοιχων χαμιλτονιανών των δύο απομονωμένων υποσυστημάτων.

Από τα προηγούμενα προκύπτει ότι η περίπτωση της διαχρονικής μικροερμηνείας της κβαντικής μηχανικής δεν διαφέρει σε πολλά από την αντίστοιχη στην κλασική μηχανική. Και στις δύο περιπτώσεις η δυναμική του σύνθετου συστήματος μπορεί να ερμηνευθεί

από τη δυναμική των υποσυστημάτων ,όταν αυτά θεωρούνται ως απομονωμένα χρησιμοποιώντας επιπλέον νόμους σύνθεσης και αλληλεπίδρασης .

Το ίδιο ισχύει και στην περίπτωση του δεύτερου παραδείγματος που αναπτύξαμε, αυτού του ιδανικού κρυστάλλου , με την αλλαγή μόνο των εργαλείων που χρησιμοποιούνται για την περιγραφή του συστήματος και των υποσυστημάτων. Η κβαντική χαμιλτονιανή για τον ιδανικό κρύσταλλο υπολογίζεται μέσω του προσδιορισμού των όρων της κινητικής ενέργειας για τα ιόντα καθώς και των όρων που σχετίζονται με τις μεταξύ τους αλληλεπιδράσεις. Βλέπουμε ότι ενώ τα μαθηματικά εργαλεία που χρησιμοποιούμε για την περιγραφή των ιδιοτήτων των κρυστάλλων στην κβαντική μηχανική διαφέρουν από τα αντίστοιχα της κλασικής μηχανικής ,η βασική ερμηνευτική στρατηγική παραμένει η ίδια. Οι τελεστές της κβαντικής μηχανικής αντικαθιστούν τα αντίστοιχα μεγέθη της κλασικής μηχανικής. Εκείνο που αλλάζει είναι τα μαθηματικά εργαλεία. Ακόμη κι αν τα νέα μαθηματικά εργαλεία οδηγούν σε καινούργιες εμπειρικές προβλέψεις ,όπως την εξάρτηση της ειδικής θερμότητας από τη θερμοκρασία (νόμος Debye) , το γεγονός παραμένει ότι η ερμηνευτική στρατηγική είναι η ίδια.

Συμπερασματικά , η κβαντική σύμπλεξη συνεπάγεται την αποτυχία της ταυτόχρονης μικροερμηνείας ,αλλά δεν υπονομεύει τη διαχρονική μικροερμηνεία. Στην κβαντική μηχανική το ίδιο είδος μικροαναγωγιστικής στρατηγικής μπορεί να χρησιμοποιηθεί όπως και στην κλασική μηχανική. Οι Χαμιλτονιανές κατασκευάζονται σύμφωνα με την ίδια διαδικασία ,δηλαδή χρησιμοποιώντας νόμους που αφορούν τη χρονική εξέλιξη των συστατικών υποσυστημάτων όταν αυτά θεωρούνται απομονωμένα ,νόμους σύνθεσης και νόμους αλληλεπίδρασης. Το αποτέλεσμα είναι ότι η κβαντομηχανική ερμηνεία της δυναμικής ενός σύνθετου συστήματος είναι εξίσου αναγωγιστική με την αντίστοιχη της κλασική . Η κβαντομηχανική όπως και η κλασική φυσική έχει νόμους σύνθεσης που υπαγορεύουν πώς να υπολογίζουμε τη συνεισφορά των μερών στη συνολική συμπεριφορά του συστήματος. Άρα διαθέτει τα απαραίτητα μαθηματικά εργαλεία για εφαρμοστεί η διαχρονική μικροερμηνεία. Επιπλέον ο μαθηματικός φορμαλισμός της κβαντομηχανικής δεν μας απαγορεύει να αποδώσουμε νόμους χρονικής εξέλιξης στα μέρη ενός σύνθετου συστήματος (που τα θεωρούμε απομονωμένα).

Τα παραπάνω παρ' όλα αυτά δεν σημαίνουν ότι η ανάδυση είναι αδύνατη. Θα μπορούσε να προκύπτει εξαιτίας κάποιας επιπλέον αναγκαίας απαίτησης, (όπως η απαίτηση οι νόμοι της χρονικής εξέλιξης ,της σύνθεσης και της αλληλεπίδρασης μεταξύ των υποσυστημάτων ,να είναι γενικής και όχι ειδικής ισχύος²⁶) . Για παράδειγμα θα μπορούσε να είναι απαραίτητο να υποθέσουμε την ύπαρξη μια ειδικής δύναμης που να δρα σε κάποιο συγκεκριμένο είδος σύνθετου συστήματος . Όμως στην περίπτωση αυτή σε αντίθεση με την περίπτωση της ταυτόχρονης μικροερμηνείας , η πηγή της ανάδυσης δεν είναι η ίδια η κβαντική μηχανική. Δεν είναι δηλαδή ο μαθηματικός φορμαλισμός εκείνος ο οποίος υποδεικνύει ότι δεν μπορούμε να τα καταφέρουμε μόνο με τους γενικούς νόμους των αλληλεπιδράσεων. Αντιθέτως στην περίπτωση της κβαντικής σύμπλεξης , ο μαθηματικός

²⁶ Σύμφωνα με τον C.D.Broad προϋπόθεση μιας μικροερμηνείας είναι οι νόμοι που χρησιμοποιεί να είναι γενικοί κι όχι ειδικοί νόμοι διότι η εξειδίκευση των νόμων συνεπάγεται την ανάδυση.

Δίνει το εξής παράδειγμα : εάν προκειμένου να ερμηνεύσουμε τη συμπεριφορά του χλωριούχου αργύρου, χρειαζόμαστε έναν ειδικό νόμο για αυτήν την συγκεκριμένη ουσία ,έναν νόμο δηλαδή που να μην μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να εξηγήσει τη συμπεριφορά των συνδυασμών του χλωρίου ή του αργύρου όταν συμμετέχουν σε άλλα μόρια , τότε η συμπεριφορά του χλωριούχου αργύρου εμφανίζει ανάδυση διότι δεν προκύπτει από τις ιδιότητες του αργύρου ή του χλωρίου ξεχωριστά (Broad 1925,p.64-65)

φορμαλισμός είναι αυτός που υπαγορεύει πως όταν πρόκειται για κβαντικά συμπλεγμένα υποσυστήματα , είναι αδύνατον να τους αποδοθούν καθαρές καταστάσεις .

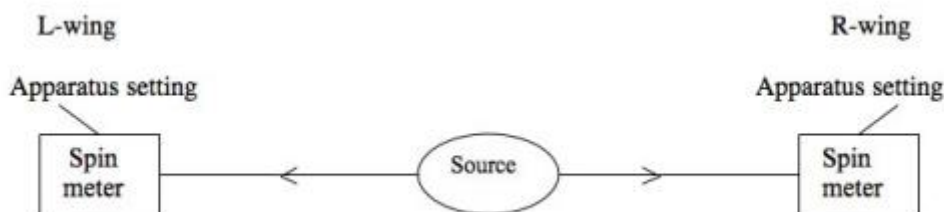
Ο Huttemann καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η διαχρονική μικροερμηνεία είναι μια αναγωγιστική ερμηνευτική στρατηγική ,η οποία είναι επιτυχημένη τόσο στην κλασική όσο και στην κβαντική μηχανική καθώς και οι δύο διαθέτουν τα απαιτούμενα εργαλεία για την εφαρμογή της και η κβαντική μηχανική δεν συνεπάγεται καταρχήν την αποτυχία μιας τέτοιας στρατηγικής περισσότερο από ότι η κλασική μηχανική.

3.10 Μπορεί μετά την επιβεβαίωση της κβαντικής σύμπλεξης να είναι η περιγραφή της πραγματικότητας τοπική;

Όταν ο Bell απέδειξε το θεώρημά του ,το EPR/B πείραμα ήταν μόνο ένα πείραμα σκέψης. Αλλά χάρη στις τεχνολογικές εξελίξεις ,όπως είδαμε έχουν πραγματοποιηθεί πολλές εκδοχές αυτού του πειράματος από το 1970 και μετά και τα αποτελέσματα αυτών των πειραμάτων έχουν συντριπτικά επιβεβαιώσει τις κβαντομηχανικές προβλέψεις . Μετά δε από τον πειραματικό έλεγχο και από τον Ασπαί το 1984 το αποτέλεσμα ήταν αναμφί-βολο και αποκλείστηκαν οριστικά όλες οι τοπικές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών.Το αναπόφευκτο συμπέρασμα είναι ότι η κβαντική θεώρηση της φυσικής πραγματικότητας εμπεριέχει στοιχεία μη τοπικότητας.

Ας επανέλθουμε στη βασική ιδέα της θεωρίας του Bell . Η κατάσταση singlet είδαμε ότι περιλαμβάνει πληροφορίες σχετικές με τις πιθανότητες για τα αποτελέσματα των μετρήσεων του spin σε διάφορες διευθύνσεις .

Στην εκδοχή του Bohm για το πείραμα EPR ζεύγη σωματιδίων εκπέμπονται από μια πηγή στην γνωστή μας κατάσταση singlet. Στη συνέχεια τα σωματίδια απομακρύνονται προς αντίθετες κατευθύνσεις όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα 1:



Σχήμα 3.1: Ζεύγη σωματιδίων εκπέμπονται από μια πηγή στην κατάσταση singlet.

Όταν πια βρίσκονται σε μεγάλη απόσταση μεταξύ τους , υπάρχει μια μετρητική διάταξη για το καθένα ,με την οποία μπορούν να μετρηθούν οι συνιστώσες του spin τους σε διάφορες διευθύνσεις. Παρά το γεγονός ότι τα γεγονότα των μετρήσεων των spin είναι τόσο απομακρυσμένα μεταξύ τους ,ώστε κανένα σήμα με ταχύτητα μικρότερη ή ίση με την ταχύτητα του φωτός δεν μπορεί να ταξιδέψει μεταξύ τους (χωροειδώς διαχωρισμένα σημεία του χωροχρόνου) ,τα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι κατά ένα περίεργο τρόπο όπως έχουμε δει ,συσχετισμένα μεταξύ τους. Δηλαδή ενώ το αποτέλεσμα της κάθε μιας απομακρυσμένης μέτρησης του spin μοιάζει να είναι τυχαίο ,τα αποτελέσματα των δύο μετρήσεων είναι συσχετισμένα μεταξύ τους. Η από κοινού (μεικτή) πιθανότητα των

απομακρυσμένων αποτελεσμάτων δεν ισούται με το γινόμενο των επιμέρους πιθανοτήτων. Για παράδειγμα η πιθανότητα καθένα από τα σωματίδια να έχει δεξιόστροφο spin κατά τον άξονα -z είναι $\frac{1}{2}$, ωστόσο τα αποτελέσματα τέτοιων μετρήσεων είναι πλήρως αντισυσχετισμένα. Αν δηλαδή το σωματίδιο που βρίσκεται στη δεξιά πτέρυγα έχει δεξιόστροφο spin κατά τον άξονα -z, (spin-άνω) τότε το σωματίδιο που βρίσκεται στην αριστερή πτέρυγα έχει αριστερόστροφο spin κατά τον άξονα -z (spin-κάτω).

Το γεγονός αυτό ισχύει ακόμη κι αν οι μετρήσεις πραγματοποιηθούν ταυτόχρονα. Από τα παραπάνω προκύπτει ότι αυτές οι περίεργες συσχετίσεις που εμφανίζονται στο πείραμα EPR/B συνεπάγονται την ύπαρξη μη τοπικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα στα δύο γεγονότα μέτρησης και μάλιστα οι μη τοπικές αυτές συσχετίσεις συνάδουν με την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης κατά τη μέτρηση και το μετρητικό αξίωμα της ορθόδοξης ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής.²⁷ Σύμφωνα με την τελευταία, πριν τις μετρήσεις τα σωματίδια δεν είχαν κανένα καθορισμένο spin. Τα σωματίδια αποκτούν spin μόνο με την πρώτη μέτρηση και το αποτέλεσμα αυτής της μέτρησης είναι τυχαίο. Αν για παράδειγμα η πρώτη μέτρηση αφορά τη z-συνιστώσα του spin του L-σωματιδίου, το αποτέλεσμα θα μπορούσε να είναι δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο spin με ίσες πιθανότητες. Το αποτέλεσμα αυτό της μέτρησης της z-συνιστώσας του spin του L-σωματιδίου, προκαλεί αυτομάτως μια αλλαγή στις ιδιότητες του spin του απομακρυσμένου R-σωματιδίου τέτοια που αν το σωματίδιο που βρίσκεται στη δεξιά πτέρυγα έχει δεξιόστροφο ή αριστερόστροφο spin κατά τον άξονα -z, τότε το σωματίδιο που βρίσκεται στην αριστερή πτέρυγα έχει αριστερόστροφο ή δεξιόστροφο spin αντιστοίχως κατά τον άξονα -z. Θα μπορούσε κανείς να ισχυριστεί ότι η ορθόδοξη ερμηνεία της κβαντομηχανικής είναι λανθασμένη και συνεπώς ότι η μη τοπικότητα που αξιώνει δεν αντανακλάται στην φυσική πραγματικότητα. Δεδομένων όμως των εξαιρετικών της προβλέψεων μια τέτοια άποψη είναι δύσκολο να υποστηριχτεί.

Οι EPR υποστήριζαν ότι δεν υπάρχουν τέτοιες μη τοπικές αλληλεπιδράσεις. Ισχυρίζονταν πως η περιγραφή που μας παρέχει η κβαντική κατάσταση singlet (αλλά και γενικότερα κάθε κβαντική κατάσταση), δεν είναι πλήρης και οι περίεργες συσχετίσεις μεταξύ των συμπλεγμένων συστημάτων δεν ισοδυναμούν με δράση από απόσταση μεταξύ τους. Η παρατηρούμενη αλλαγή στις ιδιότητες του ενός σωματιδίου, έστω S_2 (το σωματίδιο στην R- πτέρυγα του πειράματος), όταν συμβαίνει μια μέτρηση των ιδιοτήτων του άλλου σωματιδίου, έστω S_1 (το σωματίδιο στην L- πτέρυγα του πειράματος), δεν είναι στην πραγματικότητα μια αλλαγή ιδιοτήτων, αλλά μεταβολή της γνώσης μας για το σωματίδιο αυτό. Για παράδειγμα εάν το αποτέλεσμα της μέτρησης για το S_1 είναι z-spin-κάτω ξέρουμε ότι το S_2 έχει z-spin- άνω και εάν υποθέσουμε όπως έκαναν οι EPR ότι δεν υπάρχει κάποια περίεργη δράση από απόσταση μεταξύ των απομακρυσμένων σωματιδίων (κι ότι η μεταβολή στην κατάσταση του S_2 μετά τη μέτρηση του spin του S_1 είναι απλά μια μεταβολή τη γνώση μας για το σύστημα), οδηγούμαστε στο συμπέρασμα ότι και η ιδιότητα z-spin-πάνω του σωματιδίου S_2 προϋπήρχε της μέτρησης στο S_1 . Πώς όμως το αποτέλεσμα της μέτρησης στο S_1 μπορεί να μεταβάλλει την κατάσταση της γνώσης/άγνοιας μας σχετικά με το S_2 , αν δεν έχει καμιά επίδραση σ' αυτό; Η απλούστερη και πλέον άμεση απάντηση είναι ότι υπάρχει μια κοινή αιτία που προκαλεί το συσχετισμό των αποτελεσμάτων μέτρησης στα S_1 και S_2 , οπότε η γνώση του ενός

²⁷ Ορθόδοξη ερμηνεία: Η ερμηνεία της κβαντομηχανικής από τη σχολή της Κοπεγχάγης.

αποτελέσματος παρέχει αντίστοιχη γνώση για το άλλο. Παρόλα αυτά όμως το ερώτημα παραμένει κατά πόσο οι προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής, οι οποίες έχουν επιβεβαιωθεί επανειλημμένως πειραματικά, μπορεί να είναι συμβατές με μια τέτοια τοπική εκδοχή της κβαντομηχανικής υπό την έννοια ότι αυτή δεν περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις ανάμεσα σε απομακρυσμένα συστήματα, μεταξύ των οποίων δεν μπορούν να μεταδοθούν μηνύματα με ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με την ταχύτητα του φωτός; (χωροειδώς-διαχωρισμένα συστήματα). Πιο συγκεκριμένα το ερώτημα είναι κατά πόσο είναι δυνατόν να κατασκευαστεί ένα τοπικό και αιτιακό μοντέλο του πειράματος EPR/B που να αποδίδει τις συσχετίσεις των αποτελεσμάτων μέτρησης στα απομακρυσμένα συστήματα σε μια κοινή αιτία. Δηλαδή ένα μοντέλο τέτοιο που να μην περιλαμβάνει αλληλεπιδράσεις μεταξύ των απομακρυσμένων συστημάτων και να αποδίδει τις παρατηρούμενες συσχετίσεις στην κατάσταση του ζεύγους των σωματιδίων στην πηγή που το παρήγαγε. Όπως έχουμε δει οι EPR, το 1935 πίστευαν ότι κάτι τέτοιο είναι δυνατόν αλλά το 1964 ο John Bell απέδειξε ότι μια τέτοια άποψη είναι δύσκολο να υποστηριχθεί.

Υπενθυμίζουμε εδώ ότι ο Bell απέδειξε ότι, με δεδομένες κάποιες εύλογες υποθέσεις κάθε τοπική εκδοχή του πειράματος EPR/B πρέπει να ικανοποιεί ορισμένες ανισότητες, οι οποίες είναι ασύμβατες με τις κβαντομηχανικές προβλέψεις.

Η βασική συλλογιστική του θεωρήματος Bell είναι η ακόλουθη. Κάθε εκδοχή του πειράματος EPR/B, απαιτεί ότι η κατάσταση του ζεύγους των σωματιδίων μαζί με την πειραματική διάταξη με την οποία θα μετρηθούν (ή δεν θα μετρηθούν) συγκεκριμένες ιδιότητες του spin, προσδιορίζει τις πιθανότητες για την εξαγωγή συγκεκριμένων αποτελεσμάτων των μετρήσεων του spin τόσο του κάθε σωματιδίου ξεχωριστά όσο και του συστήματος των σωματιδίων από κοινού. Επιπλέον κάθε τοπική εκδοχή ερμηνείας του πειράματος Bell αξιώνει οι από κοινού πιθανότητες για το σύστημα των σωματιδίων, να είναι δυνατόν να παραγοντοποιούνται στη μορφή του γινομένου των πιθανοτήτων των αποτελεσμάτων μέτρησης για κάθε σωματίδιο ξεχωριστά.

Έστω λοιπόν ότι το λ παριστάνει την κατάσταση του συστήματος του ζεύγους των σωματιδίων, πριν να συμβεί οποιαδήποτε μέτρηση, το I υποδηλώνει την πειραματική διάταξη με την οποία μετράμε το το spin του σωματιδίου S_1 κατά τον άξονα I , (δηλαδή το I -spin του L -σωματιδίου) και r την πειραματική διάταξη με την οποία μετράμε το spin του σωματιδίου S_2 κατά τον άξονα r , (δηλαδή το r -spin του R -σωματιδίου). Αν x_I είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός I -spin του σωματιδίου S_1 και έστω y_r είναι το αποτέλεσμα της μέτρησης ενός r -spin του σωματιδίου S_2 . Το x_I μπορεί να είναι είτε το αποτέλεσμα μέτρησης για το S_1 , I -spin-άνω ή το αποτέλεσμα μέτρησης για το S_1 , I -spin-κάτω. Αντίστοιχα το y_r μπορεί να είναι είτε το αποτέλεσμα μέτρησης για το S_2 , r -spin-κάτω ή το αποτέλεσμα μέτρησης για το S_2 , r -spin-άνω.

Έστω τώρα $P_{\lambda, I, r}(x_I \& y_r)$ η μεικτή (από κοινού) πιθανότητα των αποτελεσμάτων για τα S_1 και S_2 και $P_{\lambda, I}(x_I)$ και $P_{\lambda, r}(y_r)$ οι ξεχωριστές πιθανότητες των αποτελεσμάτων για το σωματίδιο S_1 και το σωματίδιο S_2 αντίστοιχα, όπου οι δείκτες λ, I και r υποδηλώνουν τους παράγοντες οι οποίοι είναι σχετικοί με τις πιθανότητες των αποτελεσμάτων x_I και y_r .

Τότε για κάθε λ, I, r, x_I και y_r :

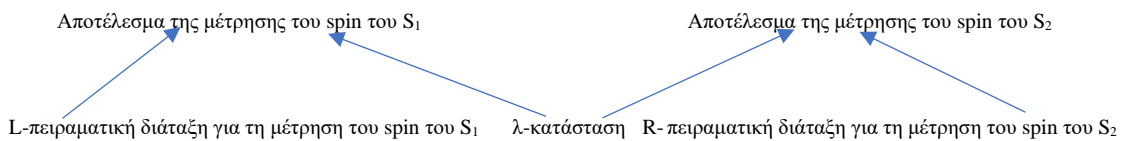
Παραγοντοποιήσιμη μεικτή πιθανότητα:

$$P_{\lambda, I, r}(x_I \& y_r) = P_{\lambda, I}(x_I) \cdot P_{\lambda, r}(y_r).$$

(Η προηγούμενη είναι απαραίτητη συνθήκη ώστε η ερμηνεία του πειράματος να έχει τοπικό χαρακτήρα.). Η κατάσταση λ τυπικά θεωρείται σαν η κατάσταση του ζεύγους τη

στιγμή της εκπομπής και υποθέτουμε ότι δεν μεταβάλλεται μεταξύ της εκπομπής και της πρώτης μέτρησης. Είναι γενικά διαφορετική από την κβαντομηχανική κατάσταση του ζεύγους ψ . Η ψ θεωρείται ότι είναι μια ελλειπής κατάσταση του ζεύγους, ενώ η λ θεωρείται μια πιο πλήρης κατάσταση του ζεύγους. Συνεπώς ζεύγη με την ίδια κατάσταση ψ μπορεί να έχουν διαφορετικές καταστάσεις λ , με αποτέλεσμα για τον ίδιο τύπο μετρήσεων να προκύπτουν διαφορετικές πιθανότητες. Επιπλέον οι καταστάσεις λ μπορεί να είναι άγνωστες, κρυμμένες, μη προσδιορίσιμες ή μη ελεγχόμενες.

Η παραγοντοποιησιμότητα της από κοινού πιθανότητας θεωρείται όπως αναφέραμε ως προϋπόθεση τοπικότητας. Σε μη τοπικές εκδοχές του πειράματος EPR/B, οι συσχετίσεις μεταξύ των απομακρυσμένων αποτελεσμάτων αιτιολογούνται με μη τοπικές επιδράσεις μεταξύ των μετρούμενων απομακρυσμένων γεγονότων. Για παράδειγμα στην ορθόδοξη κβαντική μηχανική η πρώτη μέτρηση του spin, S_1 , πούμε του σωματιδίου S_1 προκαλεί μια αυτόματη μεταβολή στις ιδιότητες του spin του σωματιδίου S_2 καθώς και στις πιθανότητες των αποτελεσμάτων των μελλοντικών μετρήσεων στο S_2 . Σε αντίθεση με τα προηγούμενα, στις τοπικές εκδοχές του πειράματος EPR/B οι συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων απομακρυσμένων μετρήσεων οφείλουν να εξηγούνται από μια κοινή αιτία, την κατάσταση του ζεύγους των σωματιδίων λ , όπως παριστάνεται στο παρακάτω σχήμα 1:



Σχήμα 3.2 : Η κοινή αιτία στο πείραμα EPR/B για τα συσχετισμένα αποτελέσματα των μετρήσεων είναι η κατάσταση λ . Τα βέλη δηλώνουν αιτιακές συνδέσεις.

Η κατάσταση του ζεύγους λ και η L-πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του spin του S_1 , καθορίζουν την πιθανότητα του αποτελέσματος της μέτρησης του spin του S_1 .

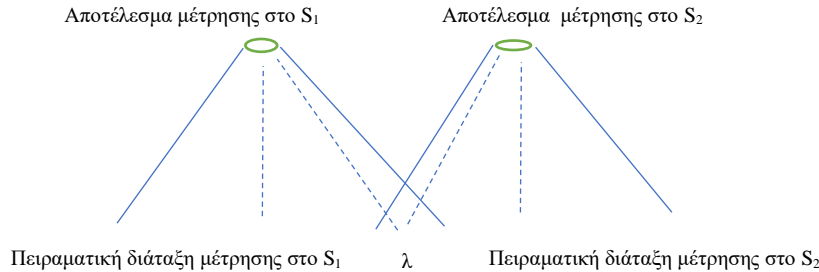
Η κατάσταση του ζεύγους λ και η R-πειραματική διάταξη που χρησιμοποιείται για τη μέτρηση του spin του S_2 , καθορίζουν την πιθανότητα του αποτελέσματος της μέτρησης του spin του S_2 .

Τέλος η κατάσταση του ζεύγους λ και οι πειραματικές διατάξεις L και R για τις μετρήσεις των spin των S_1 και S_2 , προσδιορίζουν την από κοινού (μεικτή) πιθανότητα των αποτελεσμάτων, η οποία όπως προαναφέραμε, είναι απλά το γινόμενο των ξεχωριστών πιθανοτήτων.

Η βασική ιδέα εδώ είναι ότι η πιθανότητα του κάθε αποτελέσματος προσδιορίζεται από τοπικά γεγονότα, δηλαδή γεγονότα που περιορίζονται στον κώνο φωτός του παρελθόντος του και τα οποία μπορούν να επιδρούν με ταχύτητες μικρότερες ή ίσες με την ταχύτητα του φωτός στο μετρούμενο αποτέλεσμα. (Σχήμα 2).

Επίσης τα αποτελέσματα των μετρήσεων στα απομακρυσμένα συστήματα είναι θεμελιωδώς ανεξάρτητα μεταξύ τους και συνεπώς η από κοινού πιθανότητά τους μπορεί να παραγοντοποιηθεί.

Ένα μοντέλο Bell του πειράματος EPR/B, απαιτεί επίσης ότι για κάθε κβαντομηχανική κατάσταση ψ , υπάρχει μια κατανομή ρ πάνω σε όλες τις δυνατές λ καταστάσεις του ζεύγους, η οποία είναι ανεξάρτητη από τις πειραματικές διατάξεις.



Σχήμα 3.3: Διάγραμμα χωροχρόνου ενός τοπικού μοντέλου του πειράματος EPR/B. Οι κύκλοι αναπαριστούν τα γεγονότα των μετρήσεων στα απομακρυσμένα συστήματα S_1 και S_2 και οι κώνοι τους κώνους φωτός του παρελθόντος τους, δηλαδή τα όρια όλων των επιδράσεων σε αυτά τα γεγονότα, που διαδίδονται με ταχύτητες μικρότερες ή ίσες της ταχύτητας του φωτός. Οι διακεκομμένες γραμμές υποδεικνύουν τη διάδοση των επιδράσεων από την κατάσταση λ του ζεύγους κατά την εκπομπή του και από τις μετρητικές διατάξεις, στα αποτελέσματα των μετρήσεων. (Bercovitz 2016, p.9)

Δηλαδή η κατανομή των (“πλήρων”) καταστάσεων λ , εξαρτάται από την κατάσταση ψ (που δεν είναι πλήρης), ενώ η κατανομή αυτή δεν εξαρτάται από τη συγκεκριμένη επιλογή των μετρήσεων στις πτέρυγες L και R , (συμπεριλαμβανόμενης και της επιλογής να μην γίνει μέτρηση κανενός μεγέθους). Δηλαδή για κάθε κβαντομηχανική κατάσταση ψ , L -πειραματικές διατάξεις έστω l και l' , R -πειραματικές διατάξεις έστω r και r' , ισχύει ότι :

Ανεξαρτησία του λ από την επιλογή των μετρήσεων στις L και R πτέρυγες:

$$\rho_{\psi l r}(\lambda) = \rho_{\psi l' r}(\lambda) = \rho_{\psi l r'}(\lambda) = \rho_{\psi l' r'}(\lambda) = \rho_{\psi}(\lambda)$$

όπου οι δείκτες υποδεικνύουν τους παράγοντες τους οποίους είναι πιθανόν να σχετίζονται με την κατανομή των καταστάσεων λ . Παρότι οι πιθανότητες των αποτελεσμάτων που προβλέπονται από τις καταστάσεις λ , είναι διαφορετικές από τις αντίστοιχες κβαντομηχανικές πιθανότητες των αποτελεσμάτων που υπαγορεύουν οι κβαντομηχανικές καταστάσεις ψ , οι κβαντομηχανικές πιθανότητες οι οποίες έχουν συστηματικά επιβεβαιωθεί, ανακτώνται βρίσκοντας το μέσο όρο των πιθανοτήτων των αποτελεσμάτων που προβλέπονται από τις καταστάσεις λ . Δηλαδή οι κβαντομηχανικές πιθανότητες $P_{\psi l r}(x_l \& y_r)$, $P_{\psi l}(x_l)$, $P_{\psi r}(y_r)$ υπολογίζονται από τις $P_{\lambda l r}(x_l \& y_r)$, $P_{\lambda l}(x_l)$, $P_{\lambda r}(y_r)$ ως εξής :

Εμπειρική επάρκεια:

$$P_{\psi l r}(x_l \& y_r) = \int_{\lambda} P_{\lambda l r}(x_l \& y_r) \cdot \rho_{\psi l r}(\lambda)$$

$$P_{\psi l}(x_l) = \int_{\lambda} P_{\lambda l}(x_l) \cdot \rho_{\psi l}(\lambda)$$

$$P_{\psi r}(y_r) = \int_{\lambda} P_{\lambda r}(y_r) \cdot \rho_{\psi r}(\lambda)$$

Η υπόθεση της ανεξαρτησίας του λ είναι ευλογοφανής. Αξιώνει ότι οι πλήρεις καταστάσεις λ των ζευγών στην πηγή παραγωγής τους δεν σχετίζονται με τις διαμορφώσεις των

πειραματικών διατάξεων. Υποδεικνύεται από την εμπειρία μας, σύμφωνα με την οποία φαίνεται δυνατόν να προετοιμάσουμε την κατάσταση του ζεύγους των σωματιδίων στην πηγή ανεξάρτητα από τη διαμόρφωση των πειραματικών συσκευών μέτρησης.

Ποιοι άραγε θα μπορούσαν να είναι οι τρόποι για να προκύψει μια τυχόν αποτυχία της υπόθεσης της ανεξαρτησίας του λ ; Ένας τρόπος θα ήταν να ισχυριστεί κανείς ότι η κατάσταση του συστήματος του ζεύγους και οι ρυθμίσεις των πειραματικών διατάξεων έχουν κοινή εξάρτηση από κάποια αιτία, η οποία συνδέει πάντα συγκεκριμένα είδη καταστάσεων λ των ζευγών με συγκεκριμένους τύπους L και R πειραματικών διατάξεων. Αυτή όμως η αιτιακή υπόθεση είναι δύσκολο να συνδυαστεί με την κοινή πίστη ότι οι πειραματικές συσκευές ελέγχονται από τη στρατηγική των πειραματιστών με συνέπεια να μπορούν να ρυθμιστούν ανεξάρτητα από την κατάσταση του ζεύγους των σωματιδίων στην πηγή. Αν επιπλέον αναλογιστούμε όλους τους διαφορετικούς τρόπους με τους οποίους μπορούμε να μετρήσουμε την ιδιότητα του spin και την ποικιλία των τρόπων με τους οποίους μπορούν να επιλεγούν οι πειραματικές διατάξεις, η απαίτηση της εξήγησης της αποτυχίας της ανεξαρτησίας του λ , μέσω μιας τέτοιας κοινής αιτίας που επιδρά στις καταστάσεις των ζευγών και στις πειραματικές διατάξεις, μοιάζει εξαιρετικά *ad hoc* και η ύπαρξή της σχεδόν συνωμοτική.

Ας προσπαθήσουμε τώρα να εξηγήσουμε την αποτυχία της ανεξαρτησίας της κατάστασης λ υποθέτοντας ότι οι πειραματικές διατάξεις επηρεάζουν την κατάσταση του συστήματος στην πηγή και ακολούθως η κατανομή των δυνατών καταστάσεων λ εξαρτάται από τις διατάξεις αυτές. Αφού οι πειραματικές διατάξεις μπορούν να διευθετηθούν μετά την εκπομπή του ζεύγους των σωματιδίων από την πηγή, αυτός ο τύπος της παραβίασης της ανεξαρτησίας της κατάστασης λ , απαιτεί ανάστροφη αιτιότητα. Υπάρχουν αρκετοί υποστηρικτές αυτού του είδους διεξόδου από τη μη τοπικότητα. Σύμφωνα με τον John Cramer (1980) μια τέτοια παραβίαση της λ -ανεξαρτησίας μπορεί να ερμηνευτεί ως εξής. Η πηγή στέλνει κύματα προς τις συσκευές μέτρησης και οι συσκευές στέλνουν κύματα επιβεβαίωσης από τις περιοχές του χωροχρόνου στις οποίες συμβαίνουν τα γεγονότα της μέτρησης, πίσω στην πηγή, επηρεάζοντας έτσι τις καταστάσεις των εκπεμπομένων ζευγών ανάλογα με τη διαμόρφωση των πειραματικών διατάξεων. Το ζήτημα αν μια τέτοια θεωρία μπορεί να αναπαράγει τις προβλέψεις της κβαντικής θεωρίας είναι αμφιλεγόμενο. Είναι όμως αξιοσημείωτο ότι ενώ η παραβίαση της λ -ανεξαρτησίας είναι αρκετή για να καταστρατηγηθεί το θεώρημα του Bell, δεν τεκμηριώνει ωστόσο από μόνη της την ύπαρξη τοπικότητας διότι είναι συμβατή με την αποτυχία της παραγοντοποιησιμότητας. Σε κάθε περίπτωση όπως καταδεικνύει το θεώρημα του Bell, η παραγοντοποιησιμότητα, η λ -ανεξαρτησία και η εμπειρική επάρκεια, από κοινού συνεπάγονται τις ανισότητες Bell, οι οποίες παραβιάζονται από τις προβλέψεις της κβαντομηχανικής. Με δεδομένο τη συστηματική επιβεβαίωση των προβλέψεων αυτών και την ευλογοφάνεια της λ -ανεξαρτησίας, ο Bell συμπέρανε ότι αυτό που δεν ισχύει στο EPR/B πείραμα είναι η παραγοντοποιησιμότητα. Συνεπώς ερμηνεύοντας την παραγοντοποιησιμότητα σαν προϋπόθεση της τοπικότητας, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι η κβαντική επικράτεια είναι μη τοπική.

3.11 Παραβιάζει η κβαντική μη τοπικότητα την ειδική θεωρία της σχετικότητας;

Το ζήτημα της συμβατότητας της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας με την κβαντική μηχανική είναι δύσκολο να επιλυθεί. Η απάντηση στο ερώτημα αυτό ,εξαρτάται από την ερμηνεία της ειδικής σχετικότητας και της φύσης των ακριβών περιορισμών που επιβάλλει στις αλληλεπιδράσεις μεταξύ γεγονότων.

Έχουν διατυπωθεί διάφορες απόψεις σχετικά . Σύμφωνα με μια από αυτές η ειδική σχετικότητα απαγορεύει οποιεσδήποτε αλληλεπιδράσεις πραγματοποιούνται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός. Συνεπώς η κβαντομηχανική δεν είναι συμβατή με τη θεωρία της σχετικότητας αφού περιλαμβάνει τέτοιου είδους μη τοπικές αλληλεπιδράσεις , όπως η δράση από απόσταση στο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης . (Κάθε θεωρία που παραβιάζει τη δυνατότητα παραγοντοποίησης της κβαντικής κατάστασης ενός συστήματος περιλαμβάνει τέτοιες αλληλεπιδράσεις .)

Κατά μια άλλη άποψη η ειδική θεωρία της σχετικότητας απαγορεύει μόνο κάποιους τύπους υπερφωτεινών αλληλεπιδράσεων²⁸. Πολλοί πάλι ισχυρίζονται ότι η ειδική σχετικότητα απαγορεύει την υπερφωτεινή μετάδοση της πληροφορίας .Έχει διατυπωθεί επίσης η άποψη ότι η σχετικότητα δεν επιτρέπει τη μεταφορά ύλης και ενέργειας, ούτε επίσης τη δράση από απόσταση. (Berkovitz 2016,p.71).

Σύμφωνα με τον Τραχανά οι μη τοπικές συσχετίσεις ,(το κατεξοχήν χαρακτηριστικό της μετρητικής διαδικασίας στην κβαντομηχανική λόγω της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης) , που αποστρεφόταν ο Einstein και οι οποίες εμφανίζονται κατά το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης είναι επιτρεπτές και δεν παραβιάζουν την ειδική σχετικότητα.

Ο λόγος είναι ότι η κυματοσυνάρτηση η οποία καταρρέει απότομα κατά τη μέτρηση δεν είναι ένα φυσικό κύμα , ώστε η ακαριαία του συρρίκνωση να έρχεται σε αντίθεση με τη σχετικότητα ,αλλά ένα κύμα πιθανότητας .Δηλαδή ένα κύμα «πληροφορίας» για το φυσικό σύστημα το οποίο θα πρέπει να προσαρμοστεί άμεσα στη νέα πληροφορία που προκύπτει κατά τη μέτρηση.(Τραχανάς ,2021,σ.116). Σχετικά δε με τις τοπικές θεωρίες των κρυμμένων μεταβλητών υποστηρίζει ότι όπως καταδεικνύει η εργασία του Bell, καμιά από αυτές δεν είναι δυνατόν βεβαίως να αναπαράγει τις ακραίες και πειραματικά επιβεβαιωμένες συσχετίσεις που προβλέπει η κβαντομηχανική θεωρία. Ο λόγος είναι ότι οι συσχετίσεις αυτές είναι συνέπεια της ακραίας μη τοπικότητας της θεωρίας αυτής , που οφείλεται αποκλειστικά στην κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης. (Εδώ συνάγεται επιπλέον ότι η πειραματική επιβεβαίωση των συσχετίσεων που προβλέπονται από την κβαντομηχανική συνιστούν και ισχυρή επιβεβαίωση του μετρητικού αξιώματος).

Ακόμη όμως κι αν υιοθετηθεί μια μη τοπική θεωρία λανθανουσών μεταβλητών, δεδομένου ότι αυτή η μη τοπικότητα διατυπώνεται σε ένα κλασικότροπο πλαίσιο ,δεν είναι συμβατή με την ειδική σχετικότητα. Δηλαδή , κατά τον Τραχανά το μόνο είδος μη τοπικότητας που επιδέχεται σχετικιστικής γενίκευσης είναι αυτό που οφείλεται στην κβαντομηχανική αρχή της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης. Ο λόγος είναι ότι «...εκείνο που υφίσταται την κατάρρευση -την *ακαριαία συρρίκνωση* ,αν προτιμάται – δεν είναι ένα φυσικό κύμα ,αλλά ένα κύμα πιθανότητας ,ένα κύμα πληροφορίας .» (Τραχανάς ,2021)

²⁸ Αλληλεπιδράσεις πραγματοποιούνται με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Τα πειράματα του Ασπαί και των προκατόχων του επιβεβαίωσαν το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης και οδήγησαν σε μια εντελώς διαφορετική εικόνα του κόσμου μας από αυτή που μας παρέχει η καθημερινότητα. Οι αντιλήψεις μας για τον κόσμο που μας περιβάλλει και οι οποίες έχουν δημιουργηθεί και παγιωθεί μέσω της καθημερινής αισθητηριακής μας εμπειρίας ανατρέπονται και αποδεικνύονται ανεπαρκείς στην περίπτωση που προσπαθούμε να κατανοήσουμε τι συμβαίνει στη μικροκλίμακα ,την οποία δεν βιώνουμε άμεσα.

Η κβαντική σύμπλεξη πρώτα απ' όλα καταλύει την ύπαρξη του νοήματος που αποδίδουμε στη χωρική απόσταση. Μπορεί να περιγραφεί σαν μια αρχή υπέρθεσης ,η οποία περιλαμβάνει δύο ή περισσότερα σωματίδια .Πιο συγκεκριμένα ως υπέρθεση των καταστάσεων δύο ή περισσότερων σωματιδίων τα οποία λαμβάνονται ως ένα αδιαίρετο σύστημα ανεξάρτητα της απόστασης στην οποία βρίσκονται. Η χωρική απόσταση μεταξύ τους παύει να παίζει οποιονδήποτε ρόλο και αυτό που συμβαίνει στο ένα από αυτά επηρεάζει άμεσα και αυτομάτως αυτό που συμβαίνει στο άλλο.

Έτσι τα χαρακτηριστικά της νέα περιγραφής διαφέρουν ριζικά από εκείνα του κλασικού παραδείγματος .Συγκεκριμένα :

α) Η μη διαχωριστικότητα ανάγεται σε θεμελιώδες χαρακτηριστικό της νέας περιγραφής της πραγματικότητας . Όπως είδαμε στην περίπτωση συστημάτων που βρίσκονται σε σύμπλεξη δεν είναι δυνατόν να αντιμετωπιστεί η κατάσταση του κάθε υποσυστήματος , ξεχωριστά .Η ίδια η άλγεβρα της σύμπλεξης επιβάλλει η κυματοσυνάρτηση που περιγράφει την κατάσταση του σύνθετου συστήματος να είναι ένας γραμμικός συνδυασμός ,μια υπέρθεση , των γινομένων των επιμέρους μονοσωματιδιακών κυματοσυναρτήσεων , που δεν είναι δυνατόν να παραγοντοποιηθεί .Δεν μπορεί δηλαδή η συνολική κυματοσυνάρτηση να πάρει τη μορφή γινομένου , η οποία είναι εκείνη η μορφή κυματοσυνάρτησης που περιγράφει σωματίδια που δεν αλληλεπιδρούν μεταξύ τους και μπορούν να θεωρηθούν ως αυτόνομα. Έτσι είμαστε υποχρεωμένοι να αντιμετωπίζουμε το σύνθετο σύστημα σαν μια ολότητα μη διαχωρίσιμων μεταξύ τους υποσυστημάτων.

β) Η κβαντική σύμπλεξη συνεπάγεται τον ολιστικό χαρακτήρα των κβαντικών συστημάτων. Σε συμφωνία με την μη διαχωριστικότητα των κβαντικών συστημάτων και σαν επακόλουθο αυτής η περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας από την κβαντομηχανική αποκτά ολιστικό χαρακτήρα. Η εικόνα που αποκτούμε για τη φυσική πραγματικότητα προκύπτει από τη μελέτη των ιδιοτήτων του σύνθετου συστήματος κι όχι από εκείνη των μερών που το αποτελούν.Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με τη μέθοδο της κλασικής φυσικής η οποία περιγράφει τις ιδιότητες των σύνθετων συστημάτων ,ανάγοντάς τες στις ιδιότητες των συστατικών τους τμημάτων. Το φαινόμενο της σύμπλεξης μας υποχρεώνει να δεχτούμε πως η κατάσταση ενός συστήματος είναι κάτι παραπάνω από το άθροισμα των καταστάσεων των υποσυστημάτων που το αποτελούν.

γ) Στενά συνδεδεμένο με τον ολισμό που παρουσιάζουν τα φυσικά συστήματα ,είναι το φαινόμενο της ανάδυσης . Ένα σύστημα εκδηλώνει ανάδυση εάν έχει ιδιότητες που δεν ανάγονται στις εγγενείς ιδιότητες των συστατικών του μερών. Η κβαντική σύμπλεξη αποτελεί απόδειξη ύπαρξης ανάδυσης καθώς όπως είδαμε μπορούμε να θεωρήσουμε την κατάσταση σύμπλεξης σαν μια εγγενή ολιστική ιδιότητα του ζεύγους των συμπλεγμένων σωματιδίων , υπεύθυνη για τις συσχετίσεις μεταξύ των αποτελεσμάτων των μετρήσεων τα οποία λαμβάνουμε και η οποία δεν είναι δυνατόν να αναχθεί στις εγγενείς ιδιότητες των μεμονωμένων σωματιδίων.

δ) Η περιγραφή της φυσικής πραγματικότητας αποκτά πλαισιακό χαρακτήρα. Από το θεώρημα των Kochen και Specker προκύπτει το συμπέρασμα πως καμία μη πλαισιακή θεωρία κρυμμένων μεταβλητών δεν είναι δυνατόν να αναπαράξει όλες τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής σε έναν χώρο Hilbert, που έχει διάσταση τουλάχιστον ίση με τρία. Πλαισιακότητα σημαίνει ότι μια φυσική θεωρία προβλέπει αποτελέσματα μετρήσεων τα οποία δεν καθορίζονται μόνο από το ποια είναι τα μετρούμενα μεγέθη και οι μεταβλητές του συστήματος που μελετάμε. Οι μετρήσεις δεν θεωρούνται απλά ως οι διαδικασίες μέσω των οποίων αποκαλύπτονται οι προϋπάρχουσες καλά καθορισμένες τιμές των παρατηρούμενων ιδιοτήτων των κβαντικών αντικειμένων.

Η κβαντική σύμπλεξη και η συνεπαγόμενη από αυτήν μη διαχωρισιμότητα των κβαντικών συστημάτων ενισχύουν την άποψη μιας πλαισιακής κβαντικής περιγραφής. Το φαινόμενο της σύμπλεξης περιλαμβάνει συσχετίσεις μεταξύ των συστατικών μερών ενός φυσικού συστήματος που επιβάλλουν οι τελικές αποφάνσεις μας για την παρατηρούμενη πραγματικότητα να μην ανεξάρτητες από το πλαίσιο στο οποίο πραγματοποιούμε τις παρατηρήσεις μας. Οι πειραματικές διατάξεις θεωρούνται σε σύμπλεξη με το υπό μέτρηση αντικείμενο. Έτσι δεν είναι πια αποδεκτή η άποψη πως ένα αντικείμενο είναι δυνατόν να περιγραφεί αντικειμενικά και με πλήρη τρόπο ανεξάρτητα από το φαινόμενο στο οποίο είναι ενσωματωμένο όταν πραγματοποιούμε την παρατήρηση.

ε) Οι συσχετίσεις μεταξύ των μερών ενός συστήματος, τα οποία βρίσκονται σε κβαντική σύμπλεξη δεν ανάγονται σε προϋπάρχουσες σχέσεις ή αλληλεπιδράσεις μεταξύ των μερών αυτών. Η κατάσταση ενός υποσυστήματος επηρεάζεται από την κατάσταση των άλλων υποσυστημάτων ακόμη κι αν δεν υπάρχει καμιά αλληλεπίδραση μεταξύ τους. Συνεπώς οι συσχετίσεις που συνεπάγεται η κβαντική σύμπλεξη δεν έχουν το χαρακτήρα αιτιακά καθορισμένων σχέσεων. Οδηγούμαστε λοιπόν πλέον σε μια μη αιτιακή περιγραφή του φυσικού κόσμου.

στ) Όσον αφορά την προτεραιότητα των μερών ενός συστήματος σε σχέση με το όλο σύστημα, αν δεχτούμε ότι τα συμπλεγμένα συστήματα δεν επιδέχονται αναγωγή στα μέρη τους, θα μπορούσαμε να υποστηρίξουμε ότι το όλον προηγείται των μερών του και μπορεί να θεωρηθεί θεμελιώδες, διότι μπορεί να λειτουργήσει ως βάση επιγένεσης των ιδιοτήτων των συστατικών του μερών. Γενικεύοντας δε μπορούμε να θεωρήσουμε το σύμπαν ως ένα θεμελιώδες όλον από το οποίο να προκύπτουν οι ιδιότητες όσων ανήκουν σ' αυτό. Αυτό έρχεται σε πλήρη αντίθεση με την κοσμοεικόνα που μας παρέχει το κλασικό παράδειγμα, κατά την οποία τα συστατικά μέρη είναι προγενέστερα του όλου και συνεπώς τα σωματίδια θεωρούνται ως θεμελιώδη. Η αντιστροφή στην προτεραιότητα μέρους όλου ωστόσο δεν μπορεί να ερμηνευθεί ως έλλειψη εκδήλωσης ανάδυσης, ή της μη ύπαρξης ολισμού. Η ανάδυση μπορεί να ερμηνευτεί σαν αποτυχία της εξάρτησης των ιδιοτήτων σε ένα επίπεδο από τις ιδιότητες σε ένα πιο θεμελιώδες επίπεδο. Με την παραπάνω θεώρηση υπάρχει εξάρτηση των ιδιοτήτων των μερών από το όλον που εδώ είναι το πιο θεμελιώδες επίπεδο (η εξάρτηση δηλαδή απλώς κατευθύνεται αντίστροφα.) Ωστόσο είναι αντιφατικό να ισχυριστούμε ότι έχουμε αποτυχία της ανάδυσης ή του ολισμού. Είναι παράλογο να συμπεράνουμε πως η ύπαρξη όλων που δεν ανάγονται στα μέρη τους δεν αποτελεί ολισμό. Έτσι καταλήγουμε πως η ανακατασκευή των σχέσεων και της προτεραιότητας μέρους όλου δεν υπονομεύει την ύπαρξη ολισμού και ανάδυσης.

ζ) Εστιάζοντας στο θέμα των ισχυρών συσχετίσεων που παρατηρούνται στις σύμπλεκτες καταστάσεις, συμπεραίνουμε ότι χαρακτηρίζονται από έντονη μη τοπικότητα.

Μετά και την πειραματική επιβεβαίωση των κβαντομηχανικών προβλέψεων από τον Ασπαί αποκλείστηκαν οριστικά όλες οι τοπικές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών.

Οι μόνες θεωρίες που ερμηνεύουν τις ισχυρές συσχετίσεις που προβλέπει η κβαντομηχανική είναι μη τοπικές θεωρίες. Είναι δηλαδή εκείνες οι θεωρίες που

επιτρέπουν ακαριαίες συσχετίσεις μεταξύ των απομακρυσμένων συστημάτων που βρίσκονται σε σύμπλεξη. Ωστόσο αυτές οι μη τοπικές συσχετίσεις δεν παραβιάζουν την ειδική σχετικότητα ,διότι η ακαριαία κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης του συστήματος κατά την μέτρηση ,δεν συνεπάγεται μια τέτοια παραβίαση .Το τελευταίο είναι αποτέλεσμα του ότι η κυματοσυνάρτηση δεν αντιστοιχεί σε ένα φυσικό κύμα ,αλλά σε ένα «κύμα πληροφορίας». Τα παραπάνω εισάγουν τη μη τοπικότητα στην κβαντομηχανική περιγραφή της πραγματικότητας.

η) Τέλος η πειραματική επιβεβαίωση του φαινομένου της κβαντικής σύμπλεξης οδηγεί σε συμπεράσματα σχετικά με τη θεμελιώδη πιθανοκρατία που χαρακτηρίζει την κβαντική περιγραφή του φυσικού κόσμου ,σε αντίθεση με τις πιθανότητες που εμφανίζονται στην κλασική μηχανική. Οποιαδήποτε κλασική τοπική και αιτιακή θεωρία λανθανουσών μεταβλητών ,αποδίδει τις παρατηρούμενες συσχετίσεις της κατάστασης σύμπλεξης σε ελλιπή γνώση. Η κλασική θεωρία δηλαδή θεωρεί ότι στην περίπτωση των συμπλεγμένων σωματιδίων ,αυτά φεύγουν από την πηγή με καθορισμένες τις τιμές των μετρούμενων μεγεθών, π.χ. των spin. Οι μετρητικές διατάξεις το μόνο που κάνουν είναι να διαπιστώνουν τις καθορισμένες αυτές τιμές .Οι πιθανότητες δηλαδή που αποδίδονται στα αποτελέσματα των μετρήσεων οφείλονται σε ατελή γνώση των καθορισμένων τιμών των μετρούμενων μεγεθών. Όπως όμως είδαμε , τα συμπλεγμένα σωματίδια φεύγουν από την πηγή παραγωγής τους ,σε κατάσταση αμοιβαίας σύμπλεξης ,τέτοιας ώστε το τι κάνει το ένα σωματίδιο να εξαρτάται από το τι κάνει το άλλο ,με αποτέλεσμα οι τιμές των μετρούμενων φυσικών ιδιοτήτων να μην είναι καθορισμένες πριν την μέτρηση. Έτσι η μέτρηση των φυσικών αυτών ιδιοτήτων δεν έχει απλώς τον διαπιστωτικό χαρακτήρα της μέτρησης του κλασικού παραδείγματος .Η μέτρηση τώρα είναι εκείνη που πραγματώνει κάποια από τις δυνατές τιμές που μπορούν να πάρουν τα μετρούμενα μεγέθη. Συνεπώς γίνεται φανερό ότι μετά την πειραματική επιβεβαίωση της παραβίασης των ανισοτήτων Bell , αναδεικνύονται ο εγγενώς πιθανοκρατικός χαρακτήρας του κβαντικού παραδείγματος καθώς και η άμεση σύνδεση του χαρακτήρα αυτού με το μετρητικό αξίωμα ²⁹ και την κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης. Η περιγραφή του φυσικού μας κόσμου αντίστοιχα αποκτά εγγενώς πιθανοκρατική μορφή.

²⁹ Μετρητικό αξίωμα ,(κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης) : έστω τυχούσα κατάσταση ψ ενός κβαντικού συστήματος. Η ψ γράφεται ως κατάσταση επαλληλίας $\sum c_n \psi_n$ των ιδιοσυναρτήσεων ψ_n του μετρούμενου μεγέθους ,έστω A . Η πρώτη μέτρηση του μεγέθους A που θα πραγματοποιήσουμε ,μπορεί να δώσει όλα τα δυνατά αποτελέσματα a_n ($n=1,2,3,\dots$) με πιθανότητες $P_n = |c_n|^2$, όπου a_n οι ιδιοτιμές του A . Όμως , κάθε φορά που η μέτρηση δίνει ένα από αυτά τα αποτελέσματα ,η κυματοσυνάρτηση μετά τη μέτρηση συρρικνώνεται στην αντίστοιχη ιδιοσυνάρτηση της ιδιοτιμής που μετρήθηκε. Συνεπώς σε μια επόμενη μέτρηση το αποτέλεσμα θα είναι με βεβαιότητα 1 ίδιο με το αποτέλεσμα της πρώτης μέτρησης. Αυτή είναι η αρχή της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης γνωστή και ως μετρητικό αξίωμα. (Τραχανάς. Σ. ,σ.34)

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΚΕΣ ΑΝΑΦΟΡΕΣ

Αναπολιτάνος, Δ., Καρακώστας, Β., Αραμπατζής, Θ. & Κιντή, Β., (2003), *Η εξέλιξη των ιδεών στις φυσικές επιστήμες*. Πάτρα: Ε.Α.Π.

Άξελ, Α. (2008). *Κβαντικός εναγκαλισμός*. Αθήνα: Εκδόσεις ενάλιος

Πελεγρίνης, Θ. (2013), *Λεξικό της Φιλοσοφίας*, Αθήνα: Πεδίο

Τραχανάς, Σ. (2021). *ΟΙ ΕΡΜΗΝΕΙΕΣ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ*. Ηράκλειο: Π.Ε.Κ.

Aharonov, Y., Rohrlich, D., (2005), *Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed*. Wiley-VCH

Bell, J.S. (1964). On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox. *Physics*, Vol. 1, 195-200.

Beller, M., (1999). *Quantum Dialogue: The Making of a Revolution*. Chicago: University of Chicago Press.

Berkovitz, J. "Action at a Distance in Quantum Mechanics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2016 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2016/entries/qm-action-distance/>>.

Bohm, D., (1951) *Quantum Theory*, Prentice-Hall, Inc. Republished in 1989 by Dover.

Bohr, N. (1937). Causality and Complementarity. *Philosophy of Science*, 4(3), 289–298. <http://www.jstor.org/stable/18444514>

Broad, C. (1925). *The Mind and its Place in Nature*. London: KEGAN PAUL, TRENCH, TRUBNER & CO., LTD.

Carsten, H. (2022), "The Kochen-Specker Theorem", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Fall 2022 Edition), Edward N. Zalta & Uri Nodelman (eds.), retrieved from URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/fall2022/entries/kochen-specker/>>.

Einstein, A., Podolsky, R. and Rosen, N. (1935) "Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?", *Physics Review* 47, 777-780.

Fine, A. and Ryckman, T., "The Einstein-Podolsky-Rosen Argument in Quantum Theory", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Summer 2020 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/sum2020/entries/qt-epr/>>.

Ghirardi, G. (2005), *Sneaking a Look at God's Cards: Unraveling the Mysteries of Quantum Mechanics*. Princeton, New Jersey: Princeton University Press.

Ghirardi, G.-C., Rimini, A. and Weber, T. (1986) Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems. *Physical Review D*, 34, 470-491. <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.34.470>

Greenberger, D.M., Brigitte, Falkenburg, Hentschel, K., & Weinert, F. (2017). Roman Frigg : ‘ GRW Theory ’ , in :

Healey, R., and Gomes, H., "Holism and Nonseparability in Physics", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy* (Spring 2022 Edition), Edward N. Zalta (ed.), URL = <<https://plato.stanford.edu/archives/spr2022/entries/physics-holism/>>.

Hüttemann, Andreas (2005). Explanation, Emergence, and Quantum Entanglement. *Philosophy of Science* 72 (1):114-127.

Jaeger ,L. (2018), *The Second Quantum Revolution*, Copernicus Cham ,
DOI<https://doi.org/10.1007/978-3-319-98824-5>

Karakostas, V. (2012). Realism and Objectivism in Quantum Mechanics. *Journal for General Philosophy of Science*, Vol 43, 45–65.
<https://doi.org/10.1007/s10838-012-9173-5>

Keming, K. (2019) .Realism about the Wave Function .*Philosophy Compass*. Volume 14, Issue 7, July 2019, e12611; doi:10.1111/phc3.12611October 13.

Kronz ,Frederic,and Justin Tiehen,(2002), “Emergence and Quantum Mechanics”
,Philosophy of Science 69 : 324-347.

Lewis,J., (2017)."Quantum Mechanics, Emergence, and
Fundamentality", *Philosophica* 92: 53–75

Marras, A. (2000). Jaegwon Kim Mind in a Physical World: An Essay on the Mind-Body Problem and Mental Causation. Cambridge: The MIT Press 1998. Pp. viii 146. *Canadian Journal of Philosophy*, 30(1), 137-159. doi:10.1080/00455091.2000.10717528

Nielsen ,M.& Chuang ,I.,(2010). *Quantum Computation and Quantum Information*,
United Kingdom : Cambridge University Press.

Oppenheim, P. &Putnam, H. (1991). “Unity of Science as a Working Hypothesis.” ,
Philosophy of Science, ed. Richard Boyd, Phillip Gasper, and J. D. Trout, 405–27.
Cartridge, MA: MIT Press.

Price, Huw. (1994). A neglected route to realism about quantum mechanics. *Mind* 103 (411):303-336.

Penrose, R.(2004).*The road to reality, A Complete Guide to the Laws of the Universe*,
London :Jonathan Cape

Schaffer, Jonathan (2010). Monism: The Priority of the Whole. *Philosophical Review* 119 (1):31-76.

Silberstein, M., & McGeever, J.J. (1999). The Search for Ontological Emergence. *The Philosophical Quarterly*, 49, 182-200.

Teller, P., 1986, “Relational Holism and Quantum Mechanics,” *British Journal for the Philosophy of Science*, 37: 71–81.

Υπέθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν. 1599/1986 και τα άρθρα 2,4,6 παρ. 3 του Ν. 1256/1982, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής εργασίας και δεν προσβάλλει κάθε μορφής πνευματικά δικαιώματα τρίτων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον.