

ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΜΗΧΑΝΙΚΗ
 ΛΟΓΟΣ - ΑΝΤΙΛΟΓΟΣ
 ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Ανάμεσα στις αντιλήψεις για την πραγματικότητα, της κλασικής φυσικής και της θεωρίας των κβάντων υπάρχει ένα ρήγμα . Μπορεί με τη σύνθεση αυτών των αντιλήψεων να προκύψουν νέες αντιλήψεις για την πραγματικότητα , οι οποίες να γεφυρώνουν αυτό το ρήγμα ;

Η εργασία αυτή δεν έχει στόχο τη μαθηματική συνέπεια ούτε τη φιλοσοφική εμβάθυνση. Επιδιώκεται μέσω αυτής να καταδεχτεί η σχέση της φυσικής ερμηνείας με τις μαθηματικές και φιλοσοφικές ιδέες .

<< Φύσις δέ καθ' Ἡράκλειτον κρύπτεσθαι φιλεῖ >>.

ΟΙ ΔΥΟ ΔΡΟΜΟΙ [ΜΗΤΡΕΣ-ΚΥΜΑΤΑ]

Η παλιά κβαντική θεωρία σημείωσε επιτυχία για την κατανόηση πειραματικών δεδομένων, όπως του φάσματος του ατόμου του υδρογόνου , των υδρογονοειδών ατόμων και εν μέρει των φασμάτων περιστροφής και δόνησης των μορίων . Το 1924 ήταν διάχυτη η δυσaréσκεια για την εννοιακή και λογική δομή της παλιάς θεωρίας, που προέκυπτε από την αυθαίρετη εισαγωγή των συνθηκών Μπορ [1885-1962] - Ζόμμερφελντ [1868-1951] . Η δυσaréσκεια αυτή αυξήθηκε με τη συσσώρευση πειραματικών δεδομένων που δεν ήταν δυνατό να εξηγηθούν μόνο από αυτές τις συνθήκες πχ κανόνες επιλογής . Δημιουργήθηκε έτσι μια κατάσταση κρίσης στη μικρή κοινότητα των ατομικών φυσικών εκείνης της εποχής . Ο Μπορν [1882-1970] κατέληξε στην πεποίθηση ότι για το ξεπέρασμα αυτής της κρίσης όλο το σύστημα των εννοιών της φυσικής χρειάζεται εκ βάθρων ανασυγκρότηση . Σε μια εργασία του το καλοκαίρι του 1924 που καταγινόταν με τη μετάφραση των κλασικών τύπων στους ανάλογους κβαντικούς , με τη βοήθεια της αρχής της αντιστοιχίας , εισήγαγε την ονομασία κβαντική μηχανική για τη νέα θεωρία που προσδοκούσε να αντικαταστήσει την παλιά .

Το 1924 ο Κράμερς και Χάιζενμπεργκ δημοσίευσαν μια κβαντική θεωρία διασποράς με την οποία γενίκευσαν πρόσφατα αποτελέσματα των Μπορ και Κράμερς. Εφάρμοσαν την αρχή της αντιστοιχίας στην κλασική διασπορά του φωτός , η οποία διατυπώθηκε στη βάση εξισώσεων διαφορών αντί διαφορικών εξισώσεων . Μαζί όμως τέθηκε και το θέμα της αμφισβήτησης της τροχιακής κίνησης του ηλεκτρονίου.

Το ζήτημα της κβαντικής θεωρίας συζητήθηκε από τους Μπορ , Κράμερς [1894-1952] , Χάιζενμπεργκ [1901-1976] , Πάουλι [1900-1958] , στην Κοπεγχάγη το Μάρτιο του 1925 .

Λίγους μήνες αργότερα ο Χάιζενμπεργκ για την ακριβή μαθηματική διατύπωση της κβαντομηχανικής ακολούθησε το δρόμο που είχε αφετηρία την αρχή της αντιστοιχίας του Νιλς Μπόρ.

Ενώ ο Σραϊντιγκερ [1887-1961] ακολούθησε έναν άλλο δρόμο που είχε αφετηρία την άποψη του Λουί ντε Μπρέιγ [1892-1987] για τα υλικά κύματα.

ΜΗΤΡΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ο Χάιζενμπεργκ βρήκε ένα τρόπο να δώσει μια αφηρημένη μαθηματική διατύπωση της κβαντικής μηχανικής που δεν έπασχε από τις δυσκολίες του παρελθόντος. Σύμφωνα με την αρχή της αντιστοιχίας του Μπορ για μεγάλους κβαντικούς αριθμούς διατηρείται η έννοια της τροχιάς του ηλεκτρονίου, ώστε η κβαντική φυσική να ανάγεται στη κλασική φυσική. Αυτό συμβαίνει γιατί η ακτινοβολία που εκπέμπεται δίνει με τις συχνότητες της μια εικόνα της τροχιακής κίνησης του ηλεκτρονίου. Αυτό όμως δεν συμβαίνει σε μικρούς κβαντικούς αριθμούς. Η συχνότητα τότε της τροχιακής κίνησης του ηλεκτρονίου δεν εμφανίζεται και σαν συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας. Αυτό δείχνει ότι στο άτομο, η τροχιά του ηλεκτρονίου όπως την προσδιορίζουμε στη κλασική φυσική δεν είναι παρατηρήσιμη.

Ο Χάιζενμπεργκ συμφωνούσε με τη θετικιστική αντίληψη ότι η θεωρία πρέπει να οικοδομείται πάνω σε παρατηρήσιμα φυσικά μεγέθη.

Επομένως στην κβαντομηχανική η έννοια της τροχιάς του ηλεκτρονίου πρέπει να εγκαταλειφθεί και η θεωρία πρέπει να οικοδομηθεί πάνω στα παρατηρήσιμα μεγέθη, τις εντάσεις και τις συχνότητες της εκπεμπόμενης από το άτομο ακτινοβολίας.

Θέωρησε $X(n,t)$ την θέση ενός ηλεκτρονίου το οποίο εκτελεί περιοδική κίνηση με κυκλική συχνότητα $\omega(n)$, όπου το n δηλώνει ενέργεια. Μολονότι η $X(n,t)$ δεν αποτελεί παρατηρήσιμο μέγεθος μια εικόνα της θέσης του ηλεκτρονίου μας δίνει η εκπεμπόμενη από αυτό ακτινοβολία.

Η $X(n,t)$ μπορεί να γραφεί σαν σειρά Φουριέ $X(n,t) = \sum A_\alpha(n) \exp[i\alpha\omega(n)t]$.

Ο Χάιζενμπεργκ έδωσε στην κβαντομηχανική στο άθροισμα αυτό τη μορφή $X(n,t) = \sum q_{n,n-\alpha} = \sum A(n, n-\alpha) \exp[i\omega(n, n-\alpha)t]$ με $\omega = 2\pi f$, όπου η άθροιση γίνεται πάνω στις ακέραιες τιμές του δείκτη α .

Με αυτό τον τρόπο προέκυψε μια νέα μαθηματική οντότητα μια μήτρα συμβολών εξαρτώμενων από τις μεταβάσεις μεταξύ των κβαντικών καταστάσεων n και $n-\alpha$. Οι εντάσεις καθορίζουν τα πλάτη A και αυτά με τη σειρά τους τις πιθανότητες μετάβασης $P_{n,n-\alpha}$ μεταξύ των κβαντικών καταστάσεων n και $n-\alpha$. Οι πιθανότητες αυτές καταγράφονται σε μήτρες, οι οποίες είναι μια συλλογή πιθανοτήτων για τις ενδεχόμενες μεταβάσεις. Προέκυψε ότι το γινόμενο δυο μητρών με πιθανότητες επιμέρους μεταβάσεων δίνει μήτρα που περιλαμβάνει τις πιθανότητες των απευθείας μεταβάσεων.

Ο Χάιζενμπεργκ μεταχειριζόταν το άτομο σαν να αποτελείται από αρμονικούς ταλαντωτές, τα ηλεκτρόνια, των οποίων οι συχνότητες συμπίπτουν με τις συχνότητες που μπορεί αυτό το άτομο να εκπέμψει. Οι συχνότητες αυτές $f_{n,n-\alpha}$ αποτελούν στοιχεία μήτρας. Η θέση p και η ορμή q των ηλεκτρονίων παριστάνονται με τη μορφή μητρών όπου τα στοιχεία τους $q_{n,n-\alpha}$ και $p_{n,n-\alpha}$ αντιστοιχούν στις συχνότητες $f_{n,n-\alpha}$. Ο Χάιζενμπεργκ διαπίστωσε ότι ο πολλαπλασιασμός των δυο τέτοιων μητρών A, B δεν ικανοποιούσε τον αντιμεταθετικό νόμο, το γινόμενο AB διέφερε από το γινόμενο BA . Επρόκειτο για ένα παράξενο κατά τον Χάιζενμπεργκ αποτέλεσμα που αρχικά το θεώρησε περισσότερο ενοχλητικό παρά σημαντικό.

Στο Γκέτινγκεν ο Μπορν έδειξε ότι ο μη μεταθετικός πολλαπλασιασμός των μητρών του Χάιζενμπεργκ αφορούσε πίνακες, σύμφωνα με την άλγεβρα

των πινάκων την οποία δεν γνώριζε ο Χάιζενμπεργκ και ότι οι κβαντομηχανικές μεταβλητές είναι μήτρες. Με αυτή τη θεώρηση ο Μπορν και ο Γιόρνταν απέδειξαν για τις μήτρες θέσης και ορμής τη σχέση $p \cdot q - q \cdot p = i \hbar I$ (θεμελιώδης σχέση μετάθεσης) όπου I είναι η μοναδιαία μήτρα. Στην κλασική φυσική τα p και q είναι αριθμοί που αντιμετωπίζονται επομένως $p \cdot q - q \cdot p = 0$. Η μητρομηχανική τοποθετήθηκε σε στερεή βάση τον Νοέμβριο του 1925 με την περίφημη εργασία των τριών, Μπορν, Χάιζενμπεργκ και Γιόρνταν. Η θεμελιώδης σχέση μετάθεσης στη γενική της μορφή καταγράφει τα κβαντικά χαρακτηριστικά της μητρομηχανικής και εισάγει την κβάντωση στις εξισώσεις της κλασικής φυσικής.

Δημιουργούνται έτσι εξισώσεις ικανές να περιγράψουν τα ατομικά φαινόμενα, από τις οποίες προκύπτουν οι παρατηρούμενες τιμές των συχνοτήτων και των σχετικών εντάσεων των φασματικών γραμμών.

ΤΕΛΕΣΤΕΣ

Ο Ντιράκ [1902-1984] έδωσε το φθινόπωρο του 1925 μια άλλη εκδοχή της κβαντομηχανικής με την ίδια εξηγητική ικανότητα μεταφράζοντας τα γινόμενα Χάιζενμπεργκ δυο κβαντικών μεγεθών $[AB-BA]$ στις αγκύλες Πουασσόν της κλασικής δυναμικής. Η αλγεβρική αυτή εκδοχή της κβαντικής μηχανικής του Ντιράκ έγινε γνωστή ως άλγεβρα των κβ-αριθμών. Οι δυναμικές μεταβλητές που ικανοποιούν μια μη μεταθετική άλγεβρα αποκαλούνται από τον Ντιράκ κβαντικοί αριθμοί (q -numbers). Η άποψη που διατυπώνεται από τον Ντιράκ είναι ότι οι κβ-αριθμοί είναι στην ουσία τελεστές. Οι κβ-αριθμοί μπορεί να αναπαρασταθούν από πίνακες. Ο πίνακας θα πρέπει να γίνεται αντιληπτός σαν ένα σύνολο συντεταγμένων για τον κβ-αριθμό ακριβώς, όπως οι συντεταγμένες ενός διανύσματος. Όπως ένα διάνυσμα είναι ανεξάρτητο από κάθε σύστημα συντεταγμένων έτσι και ο τελεστής υπάρχει ανεξάρτητα από κάθε αναπαράσταση του με πίνακες.

Ο τελεστής μπορεί να θεωρηθεί ένα σύμβολο που όταν δρα σε μια συνάρτηση την αλλάζει εν γένει σε μια άλλη συνάρτηση των ίδιων μεταβλητών, με ένα καθορισμένο νόμο. Μερικές φορές ο τελεστής ορίζεται μόνο για μια ορισμένη τάξη συναρτήσεων χωρίς να έχει έννοια για άλλες συναρτήσεις.

Στην άλγεβρα γραμμικών τελεστών το γινόμενο δυο τελεστών $A \cdot B$ ορίζεται σαν το αποτέλεσμα της εφαρμογής σε μια συνάρτηση (διάνυσμα) πρώτα του τελεστή B και σε συνέχεια του τελεστή A . Για παράδειγμα έστω οι τελεστές $A = x$ και $B = d/dx$, $AB\psi = x d\psi/dx$ ενώ $BA\psi = dx\psi/dx = 1 \cdot \psi + xd\psi/dx = (1+xd/dx)\psi$, επομένως το γινόμενο AB είναι διάφορο του BA μάλιστα $AB-BA = -1$. Ο τελεστής $AB-BA$ καλείται αντιμεταθετής των τελεστών A, B και συμβολίζεται $[A, B]$. Όταν $[A, B] \neq 0$ πχ $[A, B] = AB-BA = -1$ οι τελεστές A, B δεν αντιμετωπίζονται. Όταν $[A, B] = 0$ τότε οι τελεστές A, B αντιμετωπίζονται. Οι συναρτήσεις στις οποίες η δράση ενός δεδομένου τελεστή ξαναδίνει απλώς τις ίδιες συναρτήσεις πολλαπλασιασμένες με ένα αριθμό είναι γνωστές σαν ιδιοσυναρτήσεις αυτού του τελεστή και οι αριθμοί με τους οποίους αυτές είναι πολλαπλασιασμένες είναι οι ιδιοτιμές του. Για παράδειγμα με τελεστή την παράγωγο d/dx να δρα στη συνάρτηση e^{nx} ισχύει $de^{nx}/dx = n e^{nx}$, η συνάρτηση e^{nx} είναι ιδιοσυνάρτηση του τελεστή και ο

αριθμός n είναι ιδιοτιμή του. Σε κάθε τελεστή αντιστοιχεί ένα σύνολο αριθμητικών τιμών που αποτελεί το φάσμα του. Αυτό το φάσμα μπορεί να είναι διακριτό όταν οι ιδιοτιμές σχηματίζουν μια διακριτή σειρά $n = 0, 1, 2 \dots$ και είναι αυτό που αφορά την κβαντική μηχανική.

ΚΥΜΑΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ

Ο Λουί ντε Μπρέιγ [1892-1987] το 1924 επέκτεινε το δυϊσμό κυματικής και σωματιδιακής περιγραφής που αρχικά αφορούσε το φως, στα σωματίδια της ύλης. Σε κάθε στοιχειώδες σωματίδιο προσάπτεται ένα κύμα, που έχει μήκος κύματος αντιστρόφως ανάλογο της ορμής του σωματιδίου. Η κβαντική συνθήκη του Μπορ που αφορά τις τροχιές των ηλεκτρονίων, ερμηνεύεται σαν συνθήκη για τη δημιουργία στασίμων κυμάτων. Σε κάθε ηλεκτρόνιο αντιστοιχεί ένα μήκος κύματος, ώστε η περίμετρος της τροχιάς του ηλεκτρονίου να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο αυτού του μήκους κύματος. Η παράσταση του ηλεκτρονίου από τον Χάιζενμπεργκ στη μητρομηχανική σαν σωματίδιο με τα συνοδά αναγκαία άλματα προκαλούσαν στον Σραϊντιγκερ βαθιά αποστροφή.

Στράφηκε για αυτό στην αντίληψη του ντε Μπρέιγ για τα υλικά κύματα και το 1926 παρουσίασε την κυματική του εξίσωση και μαζί την επίλυση του προβλήματος που αφορά τον υπολογισμό των ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Πίστευε ότι με αυτή είχε εξηγήσει τα άλματα των ηλεκτρονίων με όρους κυματικής θεωρίας. Αντιλαμβάνονταν τις κβαντικές μεταβάσεις σαν μια μεταφορά ενέργειας από τον ένα τρόπο δόνησης στον άλλο, παρά σαν άλματα ηλεκτρονίων. Η μεταβολή των τρόπων δόνησης είναι μια διαδικασία συνεχής στο χώρο και στο χρόνο που διαρκεί όσο συνεχίζεται η διαδικασία εκπομπής.

Η μαθηματική αναλογία Χάμιλτον μεταξύ γεωμετρικής οπτικής και κλασικής μηχανικής, επεκτείνεται και στις κυματικές ιδιότητες της φωτός. Η αναλογία Χάμιλτον καθίσταται φανερή με τη σύγκριση της αρχής του ελαχίστου χρόνου της οπτικής και της αρχής της ελαχίστης δράσης της κλασικής μηχανικής.

Ο Σραϊντιγκερ θεώρησε ότι όπως συμβαίνει με το φως, έτσι και όταν το κατά ντε Μπρέιγ μήκος κύματος των υλοκυμάτων $\lambda \rightarrow 0$, η νέα θεωρία θα δώσει οριακά ίδια αποτελέσματα με αυτά της κλασικής μηχανικής.

Στο πλαίσιο αυτής της επέκτασης, η κίνηση ενός σωματιδίου με δεδομένη ενέργεια εντός στατικού πεδίου δυνάμεων μοιάζει με τη διάδοση μιας μονοχρωματικής φωτεινής δέσμης σε ένα οπτικό μέσο με μεταβαλλόμενο δείκτη διάθλασης. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα η ζητούμενη από τον Σραϊντιγκερ εξίσωση να έχει την ίδια μορφή με την ανεξάρτητη του χρόνου κυματική εξίσωση $\nabla^2 \phi(r) + K^2 \phi(r) = 0$, $k = 2\pi/\lambda$.

Η εξίσωση αυτή προκύπτει από τις εξισώσεις του Μάξγουελ για τη διάδοση ηλεκτρομαγνητικού κύματος μέσα σε μέσο στο οποίο δεν υπάρχουν πηγές και με το μήκος κύματος του να είναι αρκετά μικρό, σε σχέση με την απόσταση μέσα στην οποία ο δείκτης διάθλασης του μέσου υφίσταται ουσιώδη μεταβολή.

Με την επέκταση της αναλογίας Χάμιλτον μπορούμε να υποθέσουμε ότι η ανεξάρτητη του χρόνου κυματοσυνάρτηση $\psi(r) = u_E(r)$, η οποία αντιστοιχεί σε σωματίδιο ενέργειας E που κινείται μέσα σε πεδίο δυναμικού $V = V(r)$ έχει τη

μορφή $\nabla^2 \psi(r) + K^2 \psi(r) = 0$, $k=2\pi/\lambda$. Με τη βοήθεια των σχέσεων $p=\hbar k$ και $p^2/2m + V(r) = E$ προκύπτει $k^2 = p^2/\hbar^2 = 2m(E-V(r))/\hbar^2$ και με την αντικατάσταση στην εξίσωση αυτή του k^2 με το ίδιο του, προκύπτει μια γραμμική και ομογενής εξίσωση δευτέρας τάξης με μερικές παραγώγους. Η εξίσωση αυτή αποκαλείται ως η ανεξάρτητη του χρόνου εξίσωση του Σραίντιγκερ $[-\hbar^2 \nabla^2 \psi / 2m + V(r)] \psi = E\psi$. Το δυναμικό στην εξίσωση του είναι το δυναμικό Κουλόμπ $V(r) = -e/r^2$.

Η κβάντωση δεν εισαγόταν αξιωματικά αλλά υπό μια έννοια εξηγούνταν συγκεκριμένα μέσω της απαίτησης η συνάρτηση ψ που ικανοποιεί την κυματική εξίσωση να είναι μονότιμη, συνεχής και τετραγωνικά ολοκληρώσιμη [συνθήκες κανονικότητας]

Η χαμιλτονιανή συνάρτηση $H = P^2/2m + V(r,t)$ δεν μπορεί πια να είναι μόνο μια συνάρτηση της θέσης και της ορμής όπως στην κλασική φυσική. Αν ήταν έτσι θα μπορούσαμε δίνοντας στις θέσεις και στις ορμές ελάχιστα διαφορετικές τιμές να κάνουμε την ενέργεια να μεταβάλλεται συνεχώς, αλλά δεν συμβαίνει αυτό γιατί όπως αποκαλύπτει η παρατήρηση μόνο διακριτά επίπεδα ενέργειας υπάρχουν. Στη χαμιλτονιανή συνάρτηση αντιστοιχεί ο τελεστής Χάμιλτον $H = -\hbar^2 \nabla^2 / 2m + V(r,t)$. Η ανεξάρτητη του χρόνου εξίσωση του Σραίντιγκερ $[-\hbar^2 \nabla^2 \psi / 2m + V(r)] \psi = E \psi$ με τη βοήθεια του τελεστή Χάμιλτον $H = -\hbar^2 \nabla^2 / 2m + V(r)$ γράφεται $H \psi = E \psi$.

Η ολική ενέργεια αναπαριστάνεται από τον χαμιλτονιανό τελεστή H και τα ενεργειακά επίπεδα, δηλαδή οι παρατηρούμενες τιμές της ενέργειας, ταυτίζονται με το διακριτό φάσμα των ιδιοτιμών E που αντιστοιχούν σε αυτόν τον τελεστή. Η κυματική εξίσωση που κατασκεύασε για το δεσμευμένο ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου έχει λύσεις $\psi = \psi(n, l, m)$ εξαρτώμενες από τρεις ακέραιους αριθμούς n, l, m [κβαντικοί αριθμοί].

Το 1925 ο Πάουλι διατύπωσε την απαγορευτική του αρχή. Σύμφωνα με αυτή δεν μπορούν τα ηλεκτρόνια του ατόμου να έχουν ίδιους όλους τους κβαντικούς αριθμούς n, l, m, s .

Ακολουθεί η αναζήτηση της εξαρτημένης από το χρόνο κυματικής εξίσωσης για ελεύθερο σωματίδιο στο οποίο δηλαδή δεν ασκείται καμιά δύναμη.

Η ορμή p και η ενέργεια $E = p^2/2m$ του σωματιδίου είναι σταθερές, άρα το κυματόνισμα $k=p/\hbar$ και η συχνότητα $\omega=E/\hbar$ του αντίστοιχου κύματος ψ είναι σταθερά μεγέθη. Το κύμα τότε θα έχει τη μορφή $\psi = \text{σταθ} \exp[i(kr - \omega t)]$ ή $\psi = \text{σταθ} \exp[(i/\hbar)(pr - Et)]$. Όπως το οπτικό κύμα προσεγγίζει την οπτική ακτίνα όταν $\lambda \rightarrow 0$ έτσι και το υλικό κύμα ψ πρέπει να προσεγγίζει την κλασική τροχιά όταν $\hbar \rightarrow 0$ [αρχή της αντιστοιχίας]. Σε ένα σύμπαν όπου $\hbar = 0$ δεν θα υπάρχει κβαντοφυσική και θα ισχύει μόνο η κλασική φυσική.

Η αρχή του ντετερμινισμού με την έννοια ότι το παρόν πρέπει να καθορίζει το μέλλον απαιτεί η κυματική εξίσωση να είναι της μορφής $F(\psi) = \theta\psi/\theta t$.

Τότε η τιμή της ψ η οποία επιθυμούμε να χαρακτηρίζει πλήρως την κατάσταση του φυσικού συστήματος σε μια χρονική στιγμή $t=0$ είναι επαρκής για να καθορίσουμε τη χρονική εξέλιξη του συστήματος. Αν η εξίσωση ήταν δευτέρας τάξης ως προς το χρόνο θα απαιτείτο επί πλέον να δοθεί και η τιμή της $\theta\psi/\theta t$ για $t=0$. Το φαινόμενο της συμβολής των υλικών κυμάτων επιβάλλει η εξίσωση

να ικανοποιεί την αρχή της επαλληλίας . Η αρχή της επαλληλίας επιτρέπει, πχ αν η ψ_1 και ψ_2 παριστάνουν δυο δυνατές καταστάσεις του συστήματος τότε και ένας γραμμικός συνδυασμός αυτών των καταστάσεων $\psi=c_1\psi_1+c_2\psi_2$ να παριστάνει επίσης μια δυνατή κατάσταση του. Για την ικανοποίηση αυτής της αρχής η κυματική εξίσωση πρέπει να είναι γραμμική και ομογενής, δηλαδή η $F(\psi)$ να εξαρτάται γραμμικά από την ψ . Πρέπει η $F(\psi)$ να περιέχει μόνο την πρώτη δύναμη του ψ και την πρώτη δύναμη των χωρικών παραγώγων του ψ , $F(\psi) = A_0\psi + A_1[\theta\psi/\theta x + \theta\psi/\theta y + \theta\psi/\theta z] + A_2[\theta^2\psi/\theta x^2 + \theta^2\psi/\theta y^2 + \theta^2\psi/\theta z^2] + \dots$ Επειδή $F(\psi) = \theta\psi/\theta t$, $\theta\psi/\theta t = A_0\psi + A_1[\theta\psi/\theta x + \theta\psi/\theta y + \theta\psi/\theta z] + A_2[\theta^2\psi/\theta x^2 + \theta^2\psi/\theta y^2 + \theta^2\psi/\theta z^2] + \dots$ (α) αντικαθιστώντας $\psi = \text{σταθ} \exp[(i/\hbar)(p r - E t)]$ λαμβάνουμε

$$-i E / \hbar = A_0 + A_1 i (p_x + p_y + p_z) / \hbar + A_2 i^2 (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) / \hbar^2 + A_3 i^3 (p_x^3 + p_y^3 + p_z^3) / \hbar^3 + \dots$$

Λαμβάνοντας υπόψη την $E = (p_x^2 + p_y^2 + p_z^2) / 2m$ προκύπτει από την προηγούμενη σχέση ότι οι σταθερές $A_0 = A_1 = A_3 = \dots = 0$ και $A_2 = i\hbar/2m$.

Θέτοντας $A_0 = A_1 = A_3 = \dots = 0$ και $A_2 = i\hbar/2m$ η (α) παίρνει τη μορφή $\theta\psi/\theta t = i\hbar [\theta^2\psi/\theta x^2 + \theta^2\psi/\theta y^2 + \theta^2\psi/\theta z^2] / 2m$.

Η εξαρτημένη από το χρόνο κυματική εξίσωση του Σραίντιγκερ για ελεύθερο σωματίδιο $V(r,t)=0$ έχει τελικά τη μορφή $i\hbar \theta\psi/\theta t = -\hbar^2 [\theta^2\psi/\theta x^2 + \theta^2\psi/\theta y^2 + \theta^2\psi/\theta z^2] / 2m$ ή $-\hbar^2 \nabla^2 \psi / 2m = i\hbar \theta\psi / \theta t$.

Η εξαρτημένη από τον χρόνο κυματική εξίσωση του Σραίντιγκερ για σωματίδιο που του ασκείται δύναμη που προέρχεται από δυναμικό $V(r,t)$ είναι $-\hbar^2 \nabla^2 \psi / 2m + V(r,t)\psi = i\hbar \theta\psi / \theta t$.

Ο Σραίντιγκερ το 1926 εισήγαγε το μιγαδικό τελεστή ενέργειας $E = i\hbar \theta/\theta t$ που προέκυψε από τη μιγαδική μορφή της κυματοσυνάρτησης ψ . Με τους τελεστές ενέργειας E και Χάμιλτον H η εξίσωση του Σραίντιγκερ παίρνουν τη μορφή $H\psi = E\psi$.

Οι συνθήκες κανονικότητας που πρέπει να πληροί η κυματοσυνάρτηση ψ είναι α) Να είναι τετραγωνικά ολοκληρώσιμη.

Για να είναι μια κυματοσυνάρτηση ψ_m τετραγωνικά ολοκληρώσιμη πρέπει για όλο το χώρο $\int |\psi_m|^2 dV = c$, δηλαδή πεπερασμένο. Αυτό σημαίνει ότι για μεγάλες αποστάσεις η κυματοσυνάρτηση ψ πρέπει να τείνει αρκετά γρήγορα στο μηδέν. Η συνθήκη αυτή εφαρμόζεται σε προβλήματα δεσμευμένων καταστάσεων, στις οποίες η κίνηση του σωματιδίου εξαιτίας των δυνάμεων οι οποίες ασκούνται σε αυτό περιορίζεται σε ένα ορισμένο τμήμα του χώρου. Επίσης αυτή εφαρμόζεται σε ελεύθερο σωματίδιο όταν κατά την κίνηση του η θέση του είναι αρχικά καλά καθορισμένη, οπότε η κυματοσυνάρτηση του είναι ένα κυματόδεμα. Για να είναι $c=1$ πρέπει στη θέση της ψ_m να θέσουμε $\psi_m = c^{1/2} \psi$, τότε η ψ λέγεται κανονικοποιημένη και $\int |\psi|^2 dV = 1$. Οι κυματοσυναρτήσεις ψ στις οποίες αναφερόμαστε είναι κανονικοποιημένες.

β) Η ψ καθώς και οι πρώτες μερικές παράγωγοι της να είναι συνεχείς και μονότιμες. Η συνθήκη αυτή όσον αφορά τις μερικές παραγωγούς ισχύει μόνο όταν το δυναμικό είναι πεπερασμένο [συνεχές η μη].

Στην κυματική οπτική η ένταση της ακτινοβολίας μετρείται με το τετράγωνο του μέτρου της έντασης του ηλεκτρικού πεδίου η του μαγνητικού πεδίου. Στην περίπτωση του υλοκύματος αντί πχ $|E|^2$ θα έχουμε αντίστοιχα

$|\psi(r,t)|^2 = \psi\psi^*$ (όπου ψ^* η μιγαδική συζυγής της ψ).

Στην κυματοσυνάρτηση $\psi(r,t)$ αυτή καθαυτή δεν μπορεί να δοθεί φυσική ερμηνεία [η οποία άλλωστε είναι μιγαδική], αλλά μπορεί η ερμηνεία αυτή να δοθεί μέσω του γινομένου $\psi\psi^*$.

Στη βάση του δυϊσμού κύματος-σωματιδίου ο Μπορν [1926] θεώρησε το $|\psi|^2$ μέγεθος το οποίο αναφέρεται στο σωματίδιο και το όρισε ως πυκνότητα πιθανότητας $\rho = dW/dV = |\psi|^2$. Ακολούθως προσέδωσε στο γινόμενο $|\psi|^2 dV$ ερμηνεία στατιστικού χαρακτήρα.

Αν ένα σωματίδιο αντιστοιχεί σε υλόκυμα κυματοσυναρτήσεως ψ τότε κατά τη μέτρηση της θέσης του σωματιδίου, η πιθανότητα dW να βρεθεί το σωματίδιο τη χρονική στιγμή t εντός στοιχειώδους όγκου dV γύρω από θέση r είναι $dW = \rho dV = |\psi|^2 dV$.

Η ερμηνεία της $|\psi|^2$ ως πυκνότητας πιθανότητας ρ δίνει τη δυνατότητα να διατυπωθεί η εξίσωση συνέχειας $\nabla j = -\theta\rho/\theta t$. Το διάνυσμα j στην εξίσωση συνέχειας ορίζεται σαν πυκνότητα ρεύματος πιθανότητας. Η φυσική σημασία της εξίσωσης συνέχειας είναι η εξής, αν η πιθανότητα να βρεθεί ένα σωματίδιο μέσα σε μια περιοχή όγκου dV ελαττώνεται με την πάροδο του χρόνου, τότε η πιθανότητα να βρεθεί έξω από αυτή την περιοχή αυξάνει κατά το ίδιο ποσό. Επειδή η κυματοσυνάρτηση ψ πληροί τη συνθήκη κανονικότητας α και είναι κανονικοποιημένη ισχύει $\int |\psi|^2 dV = 1$. Επομένως μπορούμε να ισχυριστούμε ότι η πιθανότητα W να βρεθεί το σωματίδιο σε όλο το χώρο είναι $W = \int |\psi|^2 dV = 1$. Επειδή $W=1$, η πιθανότητα αυτή καθίσταται βεβαιότητα της ύπαρξης του σωματιδίου στο χώρο αυτό.

Η πιθανοκρατική ερμηνεία που έδωσε ο Μπορν επιτρέπει στο σωματίδιο να είναι αδιαίρετο και ενιαίο, αλλά και να μπορούμε να του αποδίδουμε και κυματικές ιδιότητες όπως επιβάλλει το πείραμα. Η συνάρτηση πιθανότητας $|\psi|^2$ δεν περιγράφει την κατανομή του ίδιου του σωματιδίου αλλά την κατανομή της πιθανότητας να το βρούμε εδώ ή εκεί πχ την πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο σε μια ορισμένη απόσταση από τον πυρήνα του ατόμου. Οι συνθήκες κανονικότητας α, β που επιβάλλονται στην κυματοσυνάρτηση ψ εξασφαλίζουν τα μεγέθη ρ και j να έχουν συμπεριφορά η οποία να υπαγορεύεται από τη φυσική τους ερμηνεία. Αυτό συνδέεται και με τη συνθήκη ο τελεστής Χάμιλτον να είναι ερμιτιανός. Οι ιδιοτιμές ενός ερμιτιανού τελεστή είναι πραγματικοί αριθμοί και αντιστρόφως.

Οι ερμιτιανοί τελεστές είναι θεμελιώδους σημασίας στην κβαντομηχανική εξαιτίας των ιδιοτήτων τους.

Η ερμηνεία του Μπορν την οποία γρήγορα υιοθέτησαν και ανέπτυξαν περαιτέρω, ο Πάουλι, ο Γιόρνταν, ο Ντιράκ και άλλοι, υπήρξε τεραστίας σημασίας, γιατί εισάγαγε στην κβαντική μηχανική ένα μόνιμο πιθανοκρατικό χαρακτηριστικό.

Οι ρεαλιστής Αϊνστάιν και Σραϊντιγκερ δυσφορούσαν με τη μιγαδικότητα της ψ , ακόμα και ο Σραϊντιγκερ που την εισήγαγε, προτιμούσαν εκείνη τη μορφή της κυματικής εξίσωσης που η λύση της ψ προκύπτει πραγματική συνάρτηση. Αλλά δυσφορούσαν και με τη συνδεόμενη με την κυματοσυνάρτηση πιθανοκρατική ερμηνεία.

Ο Σραίντιγκερ απέδειξε τη μαθηματική [όχι φυσική] ισοδυναμία της μητρομηχανικής με την κυματομηχανική, άλλωστε τα κύματα στην κυματομηχανική του έχουν το χαρακτήρα μητρών ή τελεστών και όχι απλών πεδιακών μεγεθών. Έδειξε ότι κάθε εξίσωση της κυματομηχανικής μπορούσε να μεταφραστεί σε μια αντίστοιχη εξίσωση της μητρομηχανικής και αντίστροφα. Η διαφορική εξίσωση του Σραίντιγκερ εμπεριέχεται στο φορμαλισμό του Χάιζενμπεργκ σαν μια ισοδύναμη εξίσωση υπό μορφή μητρών. Η κυματομηχανική του Σραίντιγκερ έχει την ίδια εξηγητική ικανότητα με τη μητρομηχανική του Χάιζενμπεργκ. Πλεονεκτούσε όμως από τη μητρομηχανική γιατί διευκόλυνε τους μαθηματικούς υπολογισμούς, ήταν λιγότερο αφηρημένη από αυτή και κατά τη γνώμη πολλών φυσικών προτιμότερη από εννοιολογική άποψη.

Μετά τη στατιστική ερμηνεία της κυματομηχανικής απαιτήθηκε η γενίκευση αυτής της ερμηνείας και η σύνδεση της με τη μητρομηχανική.

Η προσπάθεια αυτή κατέληξε στα τέλη του 1926 από τον Ντιράκ και ανεξάρτητα από τον Γιόρνταν, σε ένα καινούριο ενιαίο μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής τη θεωρία των μετασχηματισμών.

Με τη θεωρία αυτή οι διαφορές ανάμεσα στις διατυπώσεις των Σραίντιγκερ και Χάιζενμπεργκ γεφυρώθηκαν. Όπως απέδειξε ο Ντιράκ η μητρομηχανική και η κυματομηχανική είναι ειδικές περιπτώσεις της θεωρίας μετασχηματισμών.

ΕΠΙΤΥΧΙΕΣ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Ο Χάιζενμπεργκ αντιμετώπισε ικανοποιητικά το πρόβλημα του μονοδιάστατου αναρμονικού ταλαντωτή.

Εξήγαγε το ενεργειακό φάσμα του αρμονικού ταλαντωτή αποδεικνύοντας έτσι την ύπαρξη της ενέργειας του μηδενικού σημείου, η οποία είχε υποστηριχτεί πειραματικά από τη μοριακή φασματοσκοπία. Πέτυχε να δώσει μια εξήγηση για τη συνθήκη συχνοτήτων του Μπορ $E_n - E_m = hf_{nm}$ και για τις συνθήκες κβάντωσης Μπορ – Ζόμμερφελντ.

Ο Πάουλι και ο Ντιράκ στη βάση της κβαντικής μηχανικής το 1926 ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο βρήκαν με βάση τις σωστές τιμές των συχνοτήτων και των σχετικών εντάσεων των φασματικών γραμμών για το άτομο του υδρογόνου, σε συμφωνία με τη θεωρία του Μπορ.

Για την ερμηνεία των διπλών φασματικών γραμμών όπως πχ οι γραμμές D του Na οι Ολλανδοί φυσικοί Samuel Goudmist και George Uhlenbeck πρότειναν το 1925 ότι το ηλεκτρόνιο έχει δική του περιστροφική κίνηση [σπιν] γύρω από άξονα που διέρχεται από το κέντρο του. Η ενδογενής αυτή κίνηση είναι κβαντισμένη. Το μέτρο του διανύσματος της στροφορμής του σπιν σε πρώτη προσέγγιση δίνεται από τη σχέση $|s| = s \hbar$, όπου s ο κβαντικός αριθμός του σπιν που έχει τιμή 1/2 ή -1/2.

Το 1926 ο Χάιζενμπεργκ και ο Γιόρνταν χρησιμοποίησαν μια απλή μορφή κβαντικής μηχανικής του σπιν για να εξαγάγουν τη λεπτή υφή του υδρογόνου, σε μια κατά προσέγγιση συμφωνία με τον τύπο του Ζόμμερφελντ.

Επίσης κατάφεραν να εξηγήσουν το ανώμαλο φαινόμενο Zeeman το γρίφο της παλιάς κβαντικής θεωρίας.

Οι προηγούμενες ερμηνείες δόθηκαν μέσα στο πλαίσιο που είχε αφετηρία τη

μητρομηχανική . Η κυματομηχανική όμως του Σραϊντιγκερ πέτυχε να ερμηνεύσει τα περισσότερα από αυτά τα πειραματικά δεδομένα με πολύ κομψότερο τρόπο.

ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΕΓΧΑΓΗΣ.

Με την ανάπτυξη της κβαντομηχανικής η μαθηματική τυπολογία έδινε τη δυνατότητα ερμηνείας των στάσιμων καταστάσεων ενός ατόμου. Η ερμηνεία όμως ενός απλού συμβάντος σύμφωνα με τη θεωρία αυτή πχ της κίνησης ενός ηλεκτρονίου μέσα από ένα θάλαμο νεφώσεως ,παρέμενε ασαφής .

Στο διάστημα 1924 -1927 ο Χάιζενμπεργκ εργαζόταν μαζί με τον Μπορ στο ινστιτούτο θεωρητικής φυσικής της Κοπεγχάγης. Κάτω από την επιρροή της θεωρίας μετασχηματισμού των Ντιράκ και Γιόρνταν και των συζητήσεων με τους Μπορ , Ντιράκ, Γιόρνταν και Πάουλι , πάνω στα θεμέλια της κβαντικής φυσικής, οδηγήθηκε την άνοιξη του 1927 στη διατύπωση της αρχής της απροσδιοριστίας. Η αρχή αυτή αναφέρεται και ως αρχή της αβεβαιότητας , αν και οι έννοιες αβεβαιότητα και απροσδιοριστία διαφέρουν , χρησιμοποιούνται για τον ίδιο σκοπό αδιακρίτως .

Θεωρούμε αβέβαιη κάθε παρατηρήσιμη μεταβλητή όταν η αδυναμία να μετρηθεί με ακρίβεια δεν εξαρτάται από την διαδικασία μέτρησης της, αλλά οφείλεται στην ίδια τη φύση της. Τον όρο αβεβαιότητα επέβαλε ο Μπορ , ενώ ο Χάιζενμπεργκ ξεκίνησε από τον όρο ανακρίβεια που αναφέρεται στις μετρήσεις για να καταλήξει στην απροσδιοριστία που συνδέεται με την εφαρμογή των εννοιών της κλασικής φυσικής στην ερμηνεία των κβαντικών φαινομένων.

Στην κλασική φυσική από τη γνώση των θέσεων x και των χρονικών στιγμών t που το σωματίδιο βρίσκεται σε αυτές τις θέσεις , υπολογίζουμε με ακρίβεια την ταχύτητα $v=dx/dt$ και μετά την ορμή $p=mv$ σώματος που έχει μάζα m .

Στην κβαντική φυσική οι τελεστές που αντιστοιχούν στα δυο αυτά παρατηρήσιμα μεγέθη θέσης και ορμής δεν αντιμετατίθενται .

Δεν μπορούμε δηλαδή να βρούμε μια συνάρτηση ψ που να είναι ιδιοσυνάρτηση του τελεστή θέσης αλλά και του τελεστή ορμής. Το φυσικό νόημα αυτής της μαθηματικής έλλειψης έδωσε ο Χάιζενμπεργκ με την αρχή της απροσδιοριστίας

<< Αν δυο ερμιτιανοί τελεστές που αντιστοιχούν σε δυο παρατηρήσιμα φυσικά μεγέθη ενός κβαντικού συστήματος δεν αντιμετατίθενται , το γινόμενο των απροσδιοριστιών κατά τη μέτρηση των δυο αυτών μεγεθών είναι μεγαλύτερο ή ίσο από την ελάχιστη τιμή $h/4\pi$ πχ $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ >> .

Η ανισότητα αυτή αποδεικνύεται εποπτικότερα στη κυματομηχανική μέσω της έννοιας του κυματοδέματος όπως την παρουσίασε ο Μπορ . Όσο πιο εντοπισμένο είναι ένα κύμα σε μια περιοχή του χώρου , δηλαδή όσο μικρότερο είναι το εύρος του κυματοδέματος τόσο μεγαλύτερο είναι το εύρος των κυματοανυσμάτων άρα και των μηκών κύματος που αυτό περιέχει και αντίστροφα. Από το θεώρημα μετασχηματισμού Φουριέ αποδεικνύεται η ανισότητα $\Delta x \Delta k \geq 1/2$. Επειδή $p = \hbar k / 2\pi$ και $\Delta p = \hbar \Delta k / 2\pi$ ή $\Delta k = \Delta p \cdot 2\pi / \hbar$ προκύπτει ότι $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$.

Με άλλα λόγια όσο πιο μεγάλη είναι η ακρίβεια που προσπαθούμε να μετρήσουμε τη θέση του σωματιδίου, τόσο πιο μικρή είναι η ακρίβεια που

μπορούμε να μετρήσουμε την ταχύτητα του και αντίστροφα.

Το συμπέρασμα είναι ότι η θέση και οι ορμή δεν θεωρούνται ανεξάρτητες μεταβλητές όπως στη κλασική μηχανική, αφού οι μετρήσεις τους είναι αλληλοεξαρτούμενες. Είναι αδύνατο να μετρήσουμε την ίδια στιγμή ή διαδοχικά και με απεριόριστη ακρίβεια την τιμή αυτών των μεγεθών. Μπορούμε να πούμε ότι στην κβαντική μηχανική διαιρείται ο αριθμός των παρατηρήσιμων μεταβλητών με το συντελεστή με δυο. Προκύπτουν έτσι τα ζευγάρια των μη συμβατών ή συζυγών μεταβλητών πχ θέση –ορμή, συνιστώσες στροφορμής.

Με βάση την ανισότητα $\Delta x \cdot \Delta p \geq h/4\pi$ προκύπτει η χρησιμότερη σχέση $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$, με το χρόνο t να παραμένει αριθμός και όχι τελεστής.

Σύμφωνα με την αρχή αβεβαιότητας ενεργείας- χρόνου $\Delta E \cdot \Delta t \geq h/4\pi$ και αφού το γινόμενο $\Delta E \cdot \Delta t$ έχει διαστάσεις δράσης, καμιά δράση στο σύμπαν δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από την τάξη μεγέθους της σταθεράς του Πλανκ h . Η σταθερά αυτή αποτελεί το κβάντο δράσης, το οποίο εκφράζει την ύπαρξη μιας αναπόφευκτης οριακής σύζευξης ανάμεσα σε ένα παρατηρούμενο αντικείμενο και σε μια συσκευή μέτρησης. Δεν μπορεί δηλαδή αυτά να αλληλεπιδράσουν χωρίς ανταλλαγή μιας ποσότητας ενέργειας, η οποία όμως δεν μπορεί να γίνει μικρότερη από μια συγκεκριμένη ποσότητα, το κβάντο ενέργειας. Αφού υπάρχει κβάντο αλληλεπίδρασης και απαιτείται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις, οι συνθήκες παρατηρήσεις συνδιαμορφώνουν το τελικό αποτέλεσμα.

Η παραδοχή της αρχής του Χάιζενμπεργκ μετατρέπει το υπόβαθρο της Νευτώνειας μηχανικής. Τα αποτελέσματα που δίνουν οι μετρήσεις των μεγεθών σε μεμονωμένα σωματίδια εμφανίζουν μια μη κανονική διακύμανση από τη μια παρατήρηση στην άλλη και μια κανονική μέση συμπεριφορά στα στατιστικά σύνολα που περιλαμβάνουν πολλές παρατηρήσεις. Συνάγεται από την αρχή απροσδιοριστίας ότι ο ακριβής τρόπος εμφάνισης των μη κανονικών διακυμάνσεων δεν μπορεί να αποδοθεί σε καμιά αιτία. Αυτό καθιστά το τυχαίο εγγενές χαρακτηριστικό της φύσης των διαδικασιών στις οποίες μετέχουν τα σωματίδια. Η αρχή της απροσδιοριστίας θεωρείται ότι περιορίζει οριστικά την ικανότητα μας να προσδιορίζουμε απόλυτα την κατάσταση των σωματιδίων μέσω κάθε είδους μετρήσεων οι οποίες είναι σήμερα εφικτές ή οποιονδήποτε άλλων μετρήσεων που θα γίνουν εφικτές στο μέλλον.

Μετά από έντονες συζητήσεις γύρω από τις σχέσεις της απροσδιοριστίας, οι Μπορ και Χάιζενμπεργκ με τη βοήθεια του Κλάιν κατέληξαν στο συμπέρασμα, ότι η γενίκευση αυτών των σχέσεων εκφράζεται με μια άλλη αρχή την αρχή της συμπληρωματικότητας. Η αρχή της συμπληρωματικότητας γεννήθηκε από τους στοχασμούς του Μπορ γύρω από τα θεμέλια της κβαντικής θεωρίας, πριν ο Χάιζενμπεργκ διατυπώσει την ομώνυμη αρχή του. Ο Μπορ παρουσίασε πρώτη φορά τις ιδέες του για την αρχή της συμπληρωματικότητας, στο διεθνές συνέδριο φυσικής στο Κόμο τον Σεπτέμβριο του 1927.

Ο Μπορ θεωρούσε την αρχή της συμπληρωματικότητας απαραίτητη και θεμελιώδη στην κβαντομηχανική. Το οικόσημο του φέρει την αναπαράσταση αυτής της αρχής που προέρχεται από την ανατολική φιλοσοφία, με τα

σύμβολα Γιν και Γιανκ και το ρητό *Contraria sunt complementa* [τα αντίθετα είναι συμπληρωματικά] που πρόσθεσε ο ίδιος πάνω από αυτά. Τα αντίθετα δρουν ανεξάρτητα μεταξύ τους, όχι όμως ανταγωνιστικά αλλά συμπληρωματικά, ώστε η πραγματικότητα να διαμορφώνεται και από τα δυο μαζί. Θεώρησε με τη φιλοσοφική αυτή αρχή την εικόνα του σωματιδίου και την εικόνα του κύματος σαν δυο συμπληρωματικές περιγραφές της ίδιας πραγματικότητας που καθεμία από αυτές είναι κατά ένα μέρος σωστή και διαθέτει μια περιορισμένη εμβέλεια εφαρμογής. Κάθε εικόνα είναι απαραίτητη για να δοθεί μια πλήρης περιγραφή αλλά και οι δυο εφαρμόζονται μέσα στα όρια των περιορισμών που εκφράζει η αρχή της αβεβαιότητας. Το σωματίδιο είναι ύλη περιορισμένη σε ένα σημείο, το κύμα εκτείνεται στο χώρο, οι δυο αυτές εικόνες αλληλοσυμπληρώνονται. Πηγαίνοντας από τη μια εικόνα στη άλλη, από το κύμα στο σωματίδιο ή από το σωματίδιο στο κύμα, δημιουργούμε τη σωστή εντύπωση για αυτό το παράξενο είδος πραγματικότητας που εμφανίζεται στα πειράματα. Ο Μπορ θεωρούσε θεμελιωδέστερη την κυματική εικόνα του φωτονίου από τη σωματιδιακή και θεμελιωδέστερη τη σωματιδιακή εικόνα του ηλεκτρονίου από την κυματική. Ο Χάιζενμπεργκ θεωρούσε τις δυο μαθηματικές περιγραφές του κύματος και του σωματιδίου συμμετρικές και επομένως ισοδύναμες.

Η εφαρμογή αυτών των δυο αρχών φαίνεται στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ που σχεδίασε ο Χάιζενμπεργκ.

Τον οπερασιοναλιστικό προσδιορισμό του ταυτόχρονου που εφάρμοσε ο Αϊνστάιν στην ειδική θεωρία σχετικότητας, εφάρμοσε ο Χάιζενμπεργκ για τον προσδιορισμό της θέσης στη κβαντική μηχανική. Σύμφωνα με την αντίληψη αυτή η έννοια της θέσης προσδιορίζεται μόνο από το σύνολο των πειραματικών διαδικασιών που εκτελούνται για να την καθορίσουν. Για να εντοπίσουμε τη θέση ενός ηλεκτρονίου με ακρίβεια χρειαζόμαστε φωτόνια μικρού μήκους κύματος, δηλαδή μεγάλης συχνότητας και ενεργείας όπως είναι τα φωτόνια των ακτίνων γ . Γνωρίζουμε ότι η θέση του ηλεκτρονίου δεν μπορεί να μετρηθεί με καλύτερη προσέγγιση από την απόσταση μεταξύ των κορυφών του προσπίπτοντος κύματος, δηλαδή από το μήκος κύματος των ακτίνων γ . Το μικρό μήκος κύματος των ακτίνων γ προσδίδει μικρή αβεβαιότητα στη θέση του ηλεκτρονίου.

Η θέση του ηλεκτρονίου υποδεικνύεται σύμφωνα με το φαινόμενο Κόμπτον όταν μετά τη σύγκρουση του με το ηλεκτρόνιο, το σκεδαζόμενο φωτόνιο φτάσει στο μικροσκόπιο. Το μεγάλο ποσό ενέργειας που διαθέτει το φωτόνιο που προσπίπτει καθιστά σημαντικά ακαθόριστο το κβάντο ενέργειας που μεταβιβάζει στο ηλεκτρόνιο. Η αλληλεπίδραση αυτή μειώνει σημαντικά την ακρίβεια υπολογισμού της ορμής του ηλεκτρονίου. Ενώ ο Μπορ και ο Ντιράκ συμφωνούν με την μαθηματική έκφραση της αρχής της απροσδιοριστίας, άσκησαν κριτική στη ερμηνεία του πειράματος που έδωσε ο Χάιζενμπεργκ. Η σημειακότητα του φωτονίου και του ηλεκτρονίου αλλά και η εφαρμογή των αρχών διατήρησης της ενεργείας και της ορμής καθιστούν ακριβή τον υπολογισμό της θέσης και της ορμής του ηλεκτρονίου. Το πρόβλημα για τον Μπορ αντιμετωπίζεται σωστά όταν οι ακτίνες γ νοούνται τόσο ως κύμα όσο

και ως σωματίδια. Το φωτόνιο των ακτίνων γ αλληλεπιδρά με το ηλεκτρόνιο, η αβεβαιότητα όμως της ορμής του ηλεκτρονίου δεν σχετίζεται με το φωτόνιο σαν κβάντο αλληλεπίδρασης. Σχετίζεται με την αποκλίνουσα κυματική δέσμη που προσάπτεται στο φωτόνιο, η οποία καθιστά αβέβαιη μετά την σκέδαση την κατεύθυνση της κίνησης του φωτονίου. Πρέπει όμως εκτός από την αλληλεπίδραση του φωτονίου με το ηλεκτρόνιο να λάβουμε υπόψη και αυτή με το όργανο παρατήρησης. Το φωτόνιο προσπίπτει στο ηλεκτρόνιο σαν σωματίδιο αλλά σκεδάζεται σαν κύμα σχηματίζοντας μια αποκλίνουσα δέσμη ακτινών η οποία μετά συγκλίνει διαθλώμενη από το φακό του μικροσκοπίου. Επειδή όμως η παρατήρηση γίνεται με τη βοήθεια του μικροσκοπίου, γνωρίζουμε από την οπτική ότι η ελάχιστη απόσταση d που μπορούμε να διακρίνουμε δυο σημεία επί του εστιακού επίπεδου είναι $d = \lambda / \eta \mu \phi$, όπου λ είναι το μήκος κύματος των ακτινών γ και ϕ το άνοιγμα του μικροσκοπίου. Όπως έδειξε ο Μπορ επειδή $d \approx \Delta x$, $\Delta x \approx \lambda / \eta \mu \phi$ και επειδή η αβεβαιότητα της ορμής του ηλεκτρονίου υπολογίζεται $\Delta p \approx h \eta \mu \phi / \lambda'$, αν $\lambda \approx \lambda'$ (ευνοϊκή περίπτωση) τότε $\Delta p \cdot \Delta x \approx h$.

Ο Χάιζενμπεργκ κάτω από την επιρροή του Μπορ εγκατέλειψε τον οπερασιοναλισμό και προσέφυγε για την ερμηνεία των κβαντικών φαινομένων στη χρήση των κλασικών εννοιών, με τους περιορισμούς όμως που επιβάλλει η αρχή της απροσδιοριστίας.

Για να στηρίξει τις απόψεις του προσάρμοσε τη θεωρία του Καντ στις δικές του απαιτήσεις. Η διαμόρφωση των μορφών εποπτείας και νόησης είναι έμμεσα συνδεδεμένη με την εμπειρία, αφού συσχετίστηκε με την εξέλιξη της ανθρώπινης σκέψης στην προσπάθεια κατανόησης της φύσης. Τη θέση του πράγματος καθεαυτό, που ο Καντ θεωρεί ότι δεν μπορεί να γνωσθεί μέσω των αισθήσεων πάρα μόνο να νοηθεί, παίρνει μια μαθηματική δομή που παράγεται με αναστοχασμό έμμεσα από την εμπειρία. Η *a priori* εφαρμογή των εννοιών της κλασικής φυσικής, του χώρου, του χρόνου και του νόμου της αιτιότητας, είναι προϋπόθεση για την παρατήρηση των ατομικών φαινομένων. Ταυτόχρονα όμως ο τομέας εφαρμογής τους εξαιτίας των σχέσεων απροσδιοριστίας είναι περιορισμένος. Σύμφωνα με αυτές τις αντιλήψεις οι συνθετικές *a priori* κρίσεις δεν μεταβιβάζουν γνώση απόλυτης αλήθειας, όπως ήθελε ο Καντ, αλλά σχετικής αλήθειας όσον αφορά τη φυσική πραγματικότητα. Για αυτό είναι δυνατό να διατυπωθούν τέτοιες προτάσεις χωρίς να διαθέτουν πλήρη λογική σαφήνεια σε αντίθεση με αυτά που επιτάσσει ο λογικός θετικισμός. Άλλωστε η εμμονή στο αίτημα για πλήρη λογική σαφήνεια θα έκανε πιθανώς αδύνατη την επιστήμη.

Ο πρακτικός ρεαλισμός όπως προσδιόρισε ο Χάιζενμπεργκ το φιλοσοφικό του προσανατολισμό παρέχει την δυνατότητα σε αυτές τις προτάσεις να μπορούν να αντικειμενοποιηθούν. Από τις ερμηνείες κατά τον Χάιζενμπεργκ που προκύπτουν μέσω αυτών των προτάσεων αναδεικνύεται ο στατιστικός χαρακτήρας της κβαντικής φυσικής. Οι απόψεις όμως, λέει ο Χάιζενμπεργκ, να εγκαταλειφθούν οι κλασικές έννοιες και να δημιουργηθεί μια τεχνητή κβαντική γλώσσα, ώστε να είναι εφικτή μια μη στατιστική αντικειμενική περιγραφή της φύσης δεν είναι πρόσφορες. Η απόπειρα αυτή προϋποθέτει την

αντικατάσταση της δίτιμης λογικής του Αριστοτέλη όσον αφορά τους χαρακτηρισμούς αληθής- ψευδής πρόταση.

Ο Μπορ εξέφρασε την άποψη ότι η κατάσταση του κβαντικού συστήματος καθορίζεται πάντα σε σχέση με τις συνθήκες με τις οποίες πραγματοποιείται η παρατήρηση, ενώ η αβεβαιότητα είναι αυτή που δημιουργεί στην κβαντική φυσική τα πιθανά ενδεχόμενα.

Ο Χάιζενμπεργκ προσεγγίζοντας μαθηματικά το ζήτημα, ισχυρίστηκε ότι μπορούμε με την παρατήρηση να προβούμε σε χωροχρονικούς προσδιορισμούς και να καταστρώσουμε τη συνάρτηση πιθανότητας που αφορά την αρχική κατάσταση του παρατηρούμενου συστήματος. Η συνάρτηση αυτή συνενώνει αντικειμενικά και υποκειμενικά χαρακτηριστικά.

Οι αποφάνσεις που αφορούν τη γνώση μας για το σύστημα είναι υποκειμενικές γιατί διαφέρουν για διαφόρους παρατηρητές πχ χαρακτηριστικά της συσκευής μέτρησης. Οι αποφάνσεις όμως για τις πιθανότητες, όταν η συνάρτηση αυτή έχει καταστρωθεί, είναι αντικειμενικές γιατί δεν εξαρτώνται από τον παρατηρητή.

Η συνάρτηση πιθανότητας στην κβαντομηχανική είναι ανάλογη της εξίσωσης κίνησης στη Νευτώνεια μηχανική. Η συνάρτηση πιθανότητας κατόπιν εξελίσσεται αιτιοκρατικά αλλά δεν παρέχει μια χωροχρονική περιγραφή του συστήματος. Η χωροχρονική περιγραφή του κβαντικού συστήματος απαιτεί κάθε φορά νέες μετρήσεις.

Η κυματική συνάρτηση Ψ περιλαμβάνει σύμφωνα με την αρχή της επαλληλίας όλες τις δυνατές καταστάσεις στις οποίες μπορεί να βρεθεί το σύστημα [κβαντική υπέρθεση], ενώ η μέτρηση πραγματώνει κάποια η κάποιες από αυτές καταστάσεις [κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης]. Αυτό που μπορεί να προβλέψει κανείς είναι την πιθανότητα αυτής της πραγμάτωσης πχ την πιθανότητα κάποιου χωροχρονικού εντοπισμού ενός παρατηρούμενου ηλεκτρονίου. Η κρίση για την πιθανότητα αυτή μπορεί να ελεγχθεί επαναλαμβάνοντας πολλές φορές το πείραμα, εκδηλώνεται έτσι ο στατιστικός χαρακτήρας της κβαντικής θεωρίας.

Αν με τη μέτρηση επιλέγεται κάποια από τις δυνατές καταστάσεις που ενυπάρχουν αρχικά, μετά τη μέτρηση το σύστημα παραμένει όχι στην αρχική του κατάσταση αλλά σε αυτή που έχει επιλεγεί. Κάθε μέτρηση δρα σαν ένα φίλτρο που αφήνει να περάσουν στο μέλλον μόνο εκείνες οι δυνατότητες που είναι συμβατές με το αποτέλεσμα της μέτρησης.

Έτσι για την παρακολούθηση του ηλεκτρονίου μετά τη μέτρηση απαιτείται η κατασκευή νέας κυματοσυνάρτησης. Έστω ότι η κατάσταση συστήματος περιγράφεται από την κυματοσυνάρτηση $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2$ πριν κάνουμε τη μέτρηση, η πιθανότητα να εμφανιστεί η 1 είναι c_1^2 ενώ η πιθανότητα να εμφανιστεί η 2 είναι c_2^2 , ισχύει $c_1^2 + c_2^2 = 1$. Όταν με τη πράξη της μέτρησης εμφανιστεί από τις δυο δυνατότητες πχ η 1, τότε η κατάσταση του συστήματος περιγράφεται μετά τη μέτρηση από την Ψ_1 και όχι από την αρχική Ψ . Η ασυνεχής μεταβολή της γνώσης μας για το σύστημα αλλά και η ασυνεχής μαθηματική παράσταση αυτής της γνώσης, δικαιολογούν κατά τον Χάιζενμπεργκ τη χρήση της έννοιας κβαντικό άλμα.

Αποτελεί αντικειμενική διαπίστωση ότι η αιτιοκρατική και η χωροχρονική

περιγραφή είναι συμπληρωματικές και αμοιβαία αποκλειόμενες μεταξύ τους περιγραφές .

Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης με την παρατήρηση συνιστά το ζήτημα της μέτρησης στην κβαντική φυσική, γιατί εισάγει ένα υποκειμενικό στοιχείο στην περιγραφή των ατομικών φαινομένων. Ο Μπόρ διατύπωσε την άποψη ότι στην κβαντική φυσική αυτό που παρατηρούμε δεν είναι η φύση όπως συμβαίνει στη κλασική φυσική, αλλά η φύση που είναι εκτεθειμένη στον τρόπο που ρωτάμε να μάθουμε για αυτήν. Ο διαχωρισμός σε σωματίδιο και όργανο μέτρησης δηλαδή αντικείμενο και παρατηρητή δεν είναι αυθαίρετος όπως στη κλασική φυσική, είναι καθορισμένος, αντικείμενο όμως και παρατηρητής αποτελούν συμπληρωματικά ένα ενιαίο μη διαχωρίσιμο σύστημα. Δεν πρέπει να ξεχνάμε λέει ο Μπόρ πως στο έργο της ζωής είμαστε ταυτόχρονα θεατές και ηθοποιοί. Σε μια ακραία ερμηνεία για τη διαδικασία μέτρησης ο Γιόρνταν υποστήριξε ότι η παρατήρηση όχι μόνο διαταράσσει το μετρούμενο μέγεθος αλλά κυριολεκτικά το παράγει .

Η αρχή της συμπληρωματικότητας είναι ο ακρογωνιαίος λίθος για την Κοπεγχάγιανή ερμηνεία των κβαντικών διαδικασιών. Η κβαντική περιγραφή θεωρείται οριστική και αποκλείει κάποια πληρέστερη αιτιοκρατική περιγραφή. Ο όρος ερμηνεία της Κοπεγχάγιης μπήκε για πρώτη φορά στο λεξιλόγιο των φυσικών το 1955 όταν τη χρησιμοποίησε ο Χάιζενμπεργκ για να υποστηρίξει την ορθόδοξη ερμηνεία. Άλλα στον όρο αυτό αναφέρονται και αυτοί που αντιτάσσονται στην ορθόδοξη άποψη.

ΣΧΕΤΙΚΙΣΤΙΚΗ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ [ΤΟ ΓΕΜΑΤΟ ΚΕΝΟ]

Το ζήτημα όμως της σχετικιστικής εκδοχής της κβαντομηχανικής εξακολουθούσε να παραμένει προς επίλυση. Η εξίσωση Σραϊντιγκερ είναι δευτέρας τάξης ως προς τις χωρικές παραγώγους και πρώτης τάξης ως προς τη χρονική παράγωγο, σε αντίθεση με ότι υπαγορεύει η θεωρία της σχετικότητας. Μια σχετικιστική κυματική εξίσωση όμοια με αυτή που ήδη είχε φτιάξει ο Σραϊντιγκερ, γνωστή ως η εξίσωση των Klein-Gordon, την επεξεργαστήκαν οι Klein-Gordon μαζί με άλλους φυσικούς την περίοδο 1926-1927. Η εξίσωση αυτή δεν οδηγούσε στο σωστό φάσμα λεπτής υφής για το υδρογόνο και δεν μπόρεσε να συνδυαστεί με τη θεωρία του σπιν που είχε παρουσιάσει ο Πάουλι το 1927.

Ο Ντιράκ τον Ιανουάριο του 1928 δημοσίευσε την κλασική του εργασία << η κβαντική θεωρία του ηλεκτρονίου >> στην οποία παρουσίασε τη σχετικιστική κυματική του εξίσωση. Η εξίσωση του Dirac έχει την ίδια γενική μορφή με την εξίσωση του Σραϊντιγκερ $H\psi = i\hbar \partial\psi/\partial t$. Διαφέρει όμως από αυτή ως προς τη συγκρότηση της χαμιλτονιανής συνάρτησης ενώ παραμένει αμετάβλητη στους μετασχηματισμούς Λόρεντς. Η χαμιλτονιανή συνάρτηση τώρα είναι πρώτης τάξης ως προς τις χωρικές παραγώγους $\partial\psi/\partial x_i$ με $i=1,2,3$ και περιείχε μήτρες με τέσσερις γραμμές και τέσσερις στήλες, κατά συνέπεια η κυματοσυνάρτηση Ντιράκ είχε τέσσερις συνιστώσες.

Το σημαντικότερο ήταν ότι χωρίς το σπιν του ηλεκτρονίου να έχει εισαχτεί ad hoc στην εξίσωση Ντιράκ, αυτή απέδιδε στο ηλεκτρόνιο τη σωστή τιμή του σπιν. Η άποψη που διατυπώνεται είναι ότι αν το σπιν δεν είχε υποδειχτεί

από το πείραμα, αυτό θα πρόεκυπτε παραγωγικά από την εξίσωση Ντιράκ. Από τις λύσεις της εξίσωσης Ντιράκ καθορίζονται πλήρως τα τροχιακά που αντικατέστησαν τις τροχιές των ηλεκτρονίων του Μπορ, $\psi = \psi(n, l, m, s)$. Η θεωρία του Ντιράκ έγινε γρήγορα αποδεκτή γιατί ήταν σε συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα που αφορούν το σπιν και τη λεπτή υφή των φασματικών γραμμών.

Η εξίσωση του Ντιράκ είναι το κβαντομηχανικό ισοδύναμο της σχετικιστικής εξίσωσης $E = \pm(p^2 c^2 + m_0^2 c^4)^{1/2} + V$. Αν το δυναμικό είναι ίσο με το μηδέν και $p^2 = 0$, κανένα ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να κατέχει ενέργεια στο διάστημα $-m_0 c^2 < E < +m_0 c^2$. Ο Ντιράκ έδωσε φυσικό νόημα στο αποτέλεσμα αυτό υποθέτοντας ότι στην κατάσταση του κενού όλες οι στάθμες αρνητικής ενέργειας είναι κατειλημμένες από ηλεκτρόνια. Ο «ωκεανός» Ντιράκ των ηλεκτρονίων με αρνητικές ενέργειες έχει παρατηρήσιμες συνέπειες, αν και το άπειρο αρνητικό φορτίο και η άπειρη αρνητική ενεργεία του είναι μεγέθη όχι άμεσα παρατηρήσιμα. Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας (ακτίνα γ) μπορεί να διεγείρει κάποιο ηλεκτρόνιο από μια στάθμη αρνητικής ενέργειας, με αποτέλεσμα αυτό να παρουσιασθή σαν ένα κανονικό ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια. Η «οπή» που δημιουργείται μέσα στον «ωκεανό» Ντιράκ συμπεριφέρεται σαν σωματίδιο θετικού φορτίου, που έχει αντίθετο φορτίο από αυτό του ηλεκτρονίου και μάζα ίση με αυτή του ηλεκτρονίου [αντιηλεκτρόνιο]. Το φαινόμενο αυτό της «υλοποίησης» του φωτονίου που αποκαλείται δίδυμη γένεση, έχει σαν αποτέλεσμα από ένα φωτόνιο να δημιουργείται ένα ζευγάρι που αποτελείται από ένα ηλεκτρόνιο και από ένα αντιηλεκτρόνιο. Υπάρχει όμως και η δυνατότητα ένα ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια να πέσει μέσα σε μια οπή στον ωκεανό Ντιράκ. Αυτό αντιστοιχεί σε μια διαδικασία ακριβώς αντίστροφη της προηγούμενης, στη διαδικασία της «εξαΰλωσης» ενός ζεύγους ηλεκτρονίου - αντιηλεκτρονίου, η οποία παράγει φωτόνια υψηλής ενέργειας. Η ισοδυναμία μάζας-ενέργειας επιβεβαιώνεται σε αυτές τις μετατροπές των μορφών της ύλης.

Το αντιηλεκτρόνιο, το σωματίδιο που την ύπαρξη του πρόβλεψε ο Ντιράκ και βρέθηκε από τον Άντερσον το 1932 στη κοσμική ακτινοβολία ονομάστηκε ποζιτρόνιο. Από τότε μέχρι σήμερα παρατηρούνται ποζιτρόνια συνεχώς στη φύση. Η θεωρία αυτή αποκάλυψε τη θεμελιώδη συμμετρία ανάμεσα στην ύλη και στη λεγόμενη αντιύλη. Πρόέβλεψε τις δυο διαδικασίες δημιουργίας και εκμηδενισμού των σωματιδίων ύλης-αντιύλης πολύ πριν αυτές αποδειχτούν πειραματικά. Οι διαδικασίες αυτές ανέδειξαν το ρόλο του κενού χ η υλοποίηση ενός φωτονίου πραγματοποιείται με τη συμμετοχή του κενού σε αυτό το φαινόμενο. Η εξίσωση Ντιράκ μπορούσε εξίσου να περιγράψει στοιχειώδεις οντότητες, όπως ελευθέρως ηλεκτρόνια ή ελευθέρως κουάρκ ή ακόμα ελεύθερες σύνθετες οντότητες όπως πρωτόνια και νετρόνια. Ελεύθερα με την έννοια ότι δεν αλληλεπιδρούν με όμοια σωματίδια. Ο ωκεανός Ντιράκ με τη φαινομενική απειρία αρνητικού φορτίου και μάζας εξαφανίστηκε όταν ο Φάινμαν [1918-1988] διατύπωσε την κβαντική ηλεκτροδυναμική.

Η κβαντική ηλεκτροδυναμική συνδυάζει τις εξισώσεις του Μάξγουελ για τον ηλεκτρομαγνητισμό με την σχετικότητα και την κβαντική μηχανική.

Στη συγκεκριμένη αυτή εκδοχή ο Φάινμαν αντικαθιστά τη μονοσωματιδιακή κυματομηχανική του Ντιράκ με τον αρμόζοντα φορμαλισμό των πολλών σωματιδίων. Στον κενό χώρο το κβαντικό πεδίο δεν μπορεί να διατηρείται ακριβώς ίσο με το μηδέν, γιατί σύμφωνα με την αρχή της απροσδιοριστίας του Χάιζενμπεργκ, πρέπει να υπάρχει κβαντική διακύμανση στην τιμή και στο ρυθμό μεταβολής του πεδίου. Αφού η ελάχιστη ενεργεία του κενού δεν μπορεί να διατηρείται ίση με το μηδέν, αυτό σημαίνει ότι το κενό είναι γεμάτο από απεριόριστο αριθμό δυνάμει σωματιδίων ύλης και αντιύλης. Τα δυνάμει αυτά σωματίδια που προκύπτουν δανειζόμενα ποσό ενεργείας ΔE από το << τίποτα >> φαίνεται να παραβιάζουν την αρχή διατήρησης της ενεργείας, αλλά η εγγενής αβεβαιότητα εξασφαλίζει εφόσον αυτό το δάνειο επιστραφεί μέσα σε χρόνο $\Delta t = h/\Delta E$ να μείνει απαρατήρητο.

Τα δυνάμει σωματίδια αυτά δεν ανιχνεύονται άμεσα αλλά η ύπαρξη τους επιφέρει μετρήσιμες επιπτώσεις στα πραγματικά σωματίδια. Στην κβαντική ηλεκτροδυναμική οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις απεικονίζονται με τη βοήθεια των διαγραμμάτων Φάινμαν, από τα οποία καθίσταται δυνατό να υπολογιστεί η πιθανότητα πραγματοποίησης αυτών των διαδικασιών. Σε ένα τέτοιο διάγραμμα η διαδικασία σκέδασης ηλεκτρονίου – πρωτονίου αναπαριστάνεται με την ανταλλαγή ενός δυνάμει φωτονίου μεταξύ του ηλεκτρονίου και ενός από τα κουάρκ που υπάρχουν στο πρωτόνιο. Το φωτόνιο αυτό που είναι ο φορέας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης, δημιουργείται από την διαδικασία εκπομπής του και καταστρέφεται από τη διαδικασία απορρόφησης του.

Η κβαντική ηλεκτροδυναμική είναι το πρωτότυπο για όλες τις κβαντικές θεωρίες πεδίου του καθιερωμένου προτύπου. Τα πεδία είναι δυνάμει φορείς, της μάζας, της ενέργειας, του φορτίου και γενικά όλων των φυσικών μεγεθών που αποδίδονται στα σωματίδια. Τα σωματίδια θεωρούνται ιδιομορφίες των αντίστοιχων πεδίων, οι τοπικές διεγέρσεις των οποίων αντιστοιχούν σε αυτά. Οι τελεστές δημιουργίας και καταστροφής που εμπεριέχονται στον φορμαλισμό των κβαντικών θεωριών πεδίου, καθιστούν επιτρεπτές ευθύς εξαρχής τις διαδικασίες δημιουργίας και καταστροφής των σωματιδίων. Το κενό ταυτίζεται με το απόθεμα απεριόριστου αριθμού δυνάμει σωματιδίων τα οποία έχουν ενεργό ρολό στον σχηματισμό των πραγματικών σωματιδίων. Τα σωματίδια διαρκώς δημιουργούνται καταστρέφονται και μετατρέπονται το ένα στο άλλο. Η θεωρία του κβαντικού πεδίου μας υποχρεώνει να εγκαταλείψουμε την κλασική διάκριση ανάμεσα στα σωματίδια και το κενό. Δεν μπορούν να ξεχωρίσουν χώρος, πεδίο και ύλη, όπως το είχε προαναγγείλλει ο Καρτέσιος όταν ταύτισε χώρο, έκταση και ύλη. Συμπερασματικά για να ισχύει η μηχανική του Νεύτωνα επειδή η σταθερά του Πλανκ h έχει εξαιρετικά μικρή τιμή, απαιτούνται δυο προϋποθέσεις, τα αντικείμενα να έχουν μεγάλη μάζα [πολλά σωματίδια] και να κινούνται με μικρές ταχύτητες σε σύγκριση με εκείνη του φωτός. Όπου απουσιάζει η πρώτη προϋπόθεση στη θέση της μηχανικής του Νεύτωνα εφαρμόζεται η κβαντική μηχανική. Όπου μαζί με την πρώτη απουσιάζει και η δεύτερη προϋπόθεση, απαιτείται η σύνδεση της κβαντικής μηχανικής με τη θεωρία της ειδικής

σχετικότητας . Η κβαντομηχανική ήταν η φυσική των αγοριών όπως την αποκάλεσε ο Πάουλι γιατί το 1925 ο Χάιζενμπεργκ ήταν 23 χρονών, ο Πάουλι 25, ενώ ο Γιόρνταν και ο Ντιράκ ήταν μόλις 22. Ο Μπορ ο Σραϊντιγκερ και ο Μπορν ήταν αρκετά μεγαλύτεροι, αντίστοιχα 40, 38 και 43 χρονών. Η σχετικιστική κυματική εξίσωση του Dirac ήταν όμως αυτή που έφερε το τέλος της γόνιμης νεωτεριστικής φάσης της κβαντομηχανικής και σηματοδότησε την περαιτέρω ανάπτυξη της.

ΚΡΙΤΙΚΗ ΚΑΙ ΑΝΤΙΠΡΟΤΑΣΕΙΣ ΣΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΟΠΕΓΧΑΓΗΣ.

Η ερμηνεία των Μπορ-Χάιζενμπεργκ παρουσιάστηκε στο πέμπτο συνέδριο Σολβέ το 1927, εκεί ο Αϊνστάιν [1879-1955] άκουσε για πρώτη φορά τις ιδέες του Μπορ για την συμπληρωματικότητα χωρίς η ερμηνεία αυτή να τον πείσει. Για να δείξει την ασυνέπεια αυτής της ερμηνείας παρουσίασε και ανέλυσε νοητικά πειράματα, στα οποία θέλησε να δείξει ότι η απροσδιοριστία μπορεί να μειωθεί κάτω από τα όρια που θέτει η αρχή του Χάιζενμπεργκ. Δεν χωρεί αμφιβολία ότι ο Μπορ εξήλθε νικητής από αυτές τις συζητήσεις και ότι οι περισσότεροι από τους συμμετέχοντες πείστηκαν από τα επιχειρήματα του. Στο έκτο συνέδριο το 1930 αμφισβήτησε τη σχέση αβεβαιότητας-ενέργειας-χρόνου. Με ένα νοητικό πείραμα ο Αϊνστάιν ισχυρίστηκε ότι όταν ένα φωτόνιο εξέρχεται από μια μικρή οπή ενός κουτιού που περιέχει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, το γινόμενο της αβεβαιότητας της ενεργείας του επί την αβεβαιότητα του χρόνου εκπομπής του ΔΕ. Δι' μπορεί να γίνει μικρότερο από αυτό που καθορίζεται από την αρχή της αβεβαιότητας. Αυτό συμβαίνει κατά τη γνώμη του γιατί δεν υπάρχει περιορισμός στην ακρίβεια μέτρησης των μεγεθών E και t . Όσον αφορά την ακρίβεια της μέτρησης του χρόνου εκπομπής του φωτονίου, ο Μπορ απάντησε διαψεύδοντας τον Αϊνστάιν χρησιμοποιώντας μια ιδέα του ίδιου από τη θεωρία της γενικής σχετικότητας, την επίδραση του βαρυτικού πεδίου στην καταγραφή του χρόνου από ρολόγια. Η έξοδος του φωτονίου από την οπή δημιουργεί αβεβαιότητα στη θέση του κουτιού, μετά αυτή δημιουργεί αβεβαιότητα στο βαρυτικό δυναμικό και αυτό με τη σειρά του δημιουργεί την αβεβαιότητα στο χρόνο εκπομπής του φωτονίου. Η έκβαση της διαμάχης και στους δυο γύρους υπήρξε η ίδια, η μποριανή αντίληψη της κβαντικής μηχανικής ενισχύθηκε και ο σκεπτικισμός του Αϊνστάιν φάνηκε αδικαιολόγητος. Μέχρι τότε ο Αϊνστάιν είχε ελπίσει να καταρρίψει την κβαντική μηχανική αποδεικνύοντας ότι οι σχέσεις αβεβαιότητας δεν ευσταθούσαν. Παρότι δεν το πέτυχε, η πίστη του στην έσχατη αιτιότητα παρέμεινε ακλόνητη και τη δεκαετία του 1930 μετατόπισε την αιτία των ενστάσεων του από την ασυνέπεια στην πληρότητα.

Την άνοιξη του 1935 ο Αϊνστάιν εγκατεστημένος πλέον στις ΗΠΑ, δημοσίευσε μια εργασία μαζί με τους νεαρούς συναδέλφους του Podolsky και Rosen στο Πανεπιστήμιο του Πρίστον. Η εργασία αυτή περιέγραφε το νοητικό πείραμα EPR που πήρε το όνομα του από τα αρχικά των επωνύμων των εισηγητών του. Το πείραμα EPR έχει να κάνει με μια διαπλεγμένη κατάσταση δυο ηλεκτρονίων τα οποία υποχρεωτικά πρέπει να έχουν συνολικό spin μηδέν. Τα δυο ηλεκτρόνια απομακρύνονται σε μεγάλη απόσταση

μεταξύ τους. Με τη μέτρηση της τιμής του σπιν ενός ηλεκτρονίου \uparrow $1/2$ γίνεται ταυτόχρονα και η επιλογή της τιμής του σπιν \downarrow $-1/2$ του άλλου απομακρυσμένου ηλεκτρονίου.

Σύμφωνα με την κβαντική θεωρία πριν τη μέτρηση δεν ξέρουμε την τιμή του σπιν κάθε ηλεκτρονίου χωριστά, αλλά γνωρίζουμε ότι είναι επιτρεπτοί οι συνδυασμοί στους οποίους το άθροισμα των τιμών του σπιν για το ζευγάρι των ηλεκτρονίων είναι μηδέν. Το σύστημα βρίσκεται σε κατάσταση υπέρθεσης αυτών των συνδυασμών. Η τιμή του σπιν αποδίδεται σε κάθε ηλεκτρόνιο μόνο με τη διαδικασία της μέτρησης. Με τη διαδικασία μέτρησης, της τιμής του σπιν ενός ηλεκτρονίου καταρρέει συνολικά η κυματοσυνάρτηση. Πραγματώνεται έτσι ο ένας από τους δυο δυνατούς συνδυασμούς των τιμών του σπιν $1/2, -1/2$ ή $-1/2, 1/2$, ώστε τα δυο απομακρυσμένα ηλεκτρόνια να αποκτούν ταυτόχρονα αντιπαράλληλα σπιν. Αυτό σύμφωνα με την κοπεγχαγιανή ερμηνεία δικαιολογείται, γιατί η συσκευή παρατήρησης και το παρατηρούμενο αντικείμενο θεωρούνται ενιαίο μη διαχωρίσιμο σύστημα.

Ο Αϊνστάιν θεώρησε ότι καμιά διαταραχή της κατάστασης του πρώτου ηλεκτρονίου δεν θα μπορούσε να επηρεάσει ακαριαία την κατάσταση του άλλου ηλεκτρονίου, καθώς αυτό θα συνεπαγόταν παραβίαση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας αφού η ταχύτητα μετάδοσης πληροφοριών δεν μπορεί να υπερβαίνει την ταχύτητα του φωτός. Σύμφωνα με τη ρεαλιστική άποψη του Αϊνστάιν τα πράγματα έχουν συγκεκριμένες ιδιότητες πριν τη διαδικασία της παρατήρησης. Επομένως ο Αϊνστάιν θα προτιμούσε οι τιμές του σπιν για κάθε σωματίδιο να είναι προκαθορισμένες και να μην καθορίζονται με τη διαδικασία της μέτρησης. Η άποψη αυτή δείχνεται στο παρακάτω παράδειγμα με ένα ζευγάρι γάντια κατασκευασμένο \uparrow στην Αθήνα, όπου το ένα γάντι αφήνεται στην Αθήνα και το άλλο γάντι μεταφέρεται στη Μεμβούρνη. Αν ένας παρατηρητής βρει το δεξί στην Αθήνα, ένας άλλος παρατηρητής στη Μεμβούρνη θα βρει αναγκαστικά το αριστερό. Εδώ η συσχέτιση δεξί γάντι - αριστερό γάντι δεν εξηγείται με καμιά δράση από απόσταση, γιατί αυτή είναι εξαρχής προκαθορισμένη από την κατασκευή του ζευγαριού. Το πείραμα EPR ισχυρίζεται ο Αϊνστάιν περιορίζει την ισχύ της αρχής της απροσδιοριστίας και επιβεβαιώνει τη δυνατότητα των αιτιακών ερμηνειών.

Η ακαριαία δράση από απόσταση [μη τοπικότητα] και το αναίτιο [ιντετερμινισμός] της ορθόδοξης ερμηνείας καθιστούν ανέφικτη μια αντικειμενική περιγραφή της πραγματικότητας.

Ο ιντετερμινισμός επιτρέπει στη φύση να δρουν μυστικές δυνάμεις οι οποίες από το μέλλον επιδρούν στο παρόν για την εκπλήρωση κάποιου σκοπού.

Τα άτομα του Επικούρου εκτός από το μέγεθος και το σχήμα έχουν και το βάρος για βασική τους ιδιότητα. Καθώς πέφτουν, χωρίς αιτία ξεφεύγουν από την πορεία τους και συγκρούονται με άλλα άτομα, από αυτές όμως τις συγκρούσεις φτιάχνεται ο κόσμος.

Η φυσική πραγματικότητα για τον Αϊνστάιν είναι αντικειμενικά δοσμένη, υπάρχει καθεαυτή και αντλεί την ύπαρξη της από τον εαυτό της, δεν είναι προϊόν του

υποκειμένου ή της συνείδησης γιατί υπήρξε πριν από αυτή. Ο αντικειμενισμός που στη σημασία αυτή συμπίπτει με το ρεαλισμό οδήγησε τον Αϊνστάιν στο συμπέρασμα ότι η κβαντική θεωρία δεν είναι πλήρης.

Με το πείραμα EPR τέθηκε το ζήτημα της πληρότητας της κβαντικής μηχανικής και μαζί η υπόθεση των λανθανουσών –κρυμμένων μεταβλητών. Υποστήριξε την ύπαρξη των κρυμμένων μεταβλητών, οι οποίες είναι στοιχεία της πραγματικότητας αλλά δεν είναι προς το παρόν μέρος της κβαντικής θεωρίας. Πρέπει επομένως να κατασκευαστεί μια θεωρία που να τις περιέχει για την εξασφάλιση της αιτιακής ερμηνείας.

Ο Χάιζενμπεργκ ασκώντας κριτική θεώρησε τον ρεαλισμό του Αϊνστάιν μεταφυσικό, γιατί σύμφωνα με τη θετικιστική ερμηνεία δεν υπάρχουν τα πράγματα και οι ιδιότητες τους ανεξάρτητα από την καθαρά εμπειρική τους καταγραφή από το υποκείμενο. Η ανάλυση όμως αυτή παρόλο που δεν εγκαταλείπει το έδαφος της εμπειρίας οδηγεί σε μια μορφή γνωσιολογικού ιδεαλισμού.

Το 1927 στο συνέδριο του Κόμο ο Ντε Μπρέιγ σε αντίθεση με τη καθιερωμένη ερμηνεία παρουσίασε τη θεωρία της διπλής λύσης, η οποία στηριζόταν σε ένα διπλό σύστημα λύσεων για την εξίσωση Σραίντιγκερ. Είναι μια ντετερμινιστική θεωρία που όμως διατηρεί την πιθανοκρατούμενη φύση των κβαντικών διαδικασιών. Κάθε σωματίδιο περιγράφεται σαν ένα συγκεντρωμένο πακέτο ενέργειας το οποίο οδηγείται –πιλοτάρεται από ένα συνεχές κύμα, το οδηγητικό κύμα –κύμα πιλότος. Εγκατέλειψε όμως τη θεωρία αυτή γιατί στο συνέδριο Σολβέ επικρίθηκε σφοδρά από τον Πάουλι ενώ δεν τον υποστήριξαν ούτε ο Αϊνστάιν, ούτε ο Σραίντιγκερ. Τη θεωρία αυτή επανάφερε τροποποιημένη ο Ντε Μπρέιγ το 1952.

Ο Ντέιβιντ Μπομ [1917- 1992] στην εργασία του το 1952 διεύρυνε τις ιδέες του Ντε Μπρέιγ και κατάφερε να διατυπώσει σοβαρά επιχειρήματα υπέρ μιας επανερμηνείας της κβαντικής φυσικής. Στην κλασική φυσική ένα υπέρτατο ον [δαίμονας του Λαπλάς] που θα γνώριζε όλες τις θέσεις και τις ταχύτητες των σωμάτων, θα γνώριζε με απόλυτη ακρίβεια οτιδήποτε συνέβαινε, συμβαίνει ή θα συμβεί στο σύμπαν. Αυτό υπονοείται γιατί οι αιτιακοί νόμοι έχουν θεμελιώδη χαρακτήρα στην κλασική φυσική. Αυτό όμως δεν μπορεί να συμβεί στη κβαντική μηχανική που έχουν θεμελιώδη χαρακτήρα οι νόμοι των πιθανοτήτων. Η διαλεκτική σύνθεση του Μπομ απαιτεί την έννοια της αλληλεπίδρασης και της αλληλοσύνδεσης όλων των πραγμάτων με κάποιο τρόπο και σε κάποιο βαθμό σαν βάση για την άρση της αντίθεσης ανάμεσα στο αιτιατό και το τυχαίο. Οι αιτιακοί νόμοι είναι οι αναγκαίες σχέσεις που συνδέουν, αντικείμενα, γεγονότα, συνθήκες ή οτιδήποτε άλλο, σε μια δεδομένη χρονική στιγμή και σε επόμενες άλλες χρονικές στιγμές. Κάθε πραγματική αιτιακή σχέση η οποία ισχύει αναγκαστικά σε περιορισμένο πλαίσιο υπόκειται σε συμπτώσεις που προέρχονται έξω από το πλαίσιο αυτό. Οι συμπτώσεις αυτές εμφανίζονται μέσα στο περιορισμένο πλαίσιο σαν να μην υπόκεινται σε κανένα νόμο. Η τάση αυτών των συμπτώσεων να προκαλούν διακυμάνσεις στις αιτιακές σχέσεις εντός του πλαισίου, μπορεί να θεωρηθεί ως αρχή του τυχαίου. Επειδή λόγω των

διακυμάνσεων οι αιτιακοί νόμοι δεν επαρκούν για να προβλέψουμε με ακρίβεια όσα συμβαίνουν μέσα στο πλαίσιο εφαρμογής τους απαιτούνται για την πρόβλεψη και οι νόμοι της τύχης. Οι νόμοι της τύχης εκφράζονται με ένα μαθηματικό εργαλείο τη θεωρία των πιθανοτήτων. Πιθανότητα δεν σημαίνει τυχαιότητα χωρίς κανόνες αλλά ακριβώς το αντίθετο, δηλαδή ότι υπάρχουν νόμοι μέσα στο τυχαίο. Οι πιθανότητες συνδέονται με την εμφάνιση κανονικών στατιστικών ροπών σε μεγάλα σύνολα αντικειμένων η γεγονότων και οδηγούν στους λεγόμενους στατιστικούς νόμους. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι οι αιτιακοί νόμοι και οι νόμοι της τύχης, είναι δυο αδιαχώριστες πλευρές μιας ενιαίας βαθύτερης και πιο περιεκτικής δομής ενός νόμου που τους ξεπερνά. Μπορούμε όμως να υιοθετήσουμε και μια άλλη άποψη ότι οι στατιστικοί νόμοι είναι προσεγγιστικοί αιτιακοί νόμοι, με την προϋπόθεση να θεωρήσουμε ότι το πλαίσιο εφαρμογής τους αφορά την ολότητα. Η ολότητα θεωρείται ως απομονωμένη οντότητα όλων των αντικειμένων ή γεγονότων ενός στατιστικού συνόλου. Επομένως παρατηρούμε πως τα ίδια φαινόμενα μπορεί να θεωρηθούν είτε από τη μια είτε από την άλλη προαναφερόμενη άποψη, ανάλογα με το πλαίσιο που τα εξετάζουμε.

Σύμφωνα με αυτή τη θεώρηση πρότεινε για τη μελέτη ενός κβαντικού συστήματος στη θέση του εκτός πλαισίου περιβάλλοντος, το υποκβαντικό επίπεδο και τις κρυμμένες σε αυτό μεταβλητές. Με τις κρυμμένες μεταβλητές καθίσταται δυνατή η εφαρμογή του θεωρητικού σχήματος που προαναφέραμε στη κβαντική μηχανική.

Κάθε στοιχειώδες σωματίδιο πχ ένα ηλεκτρόνιο αποτελείται από ένα σώμα και από ένα κύμα που είναι συνδεδεμένο με το σώμα. Το σώμα βρίσκεται σε μια μικρή περιοχή του χώρου το οποίο στην πράξη μπορεί να θεωρηθεί μαθηματικό σημείο. Το σώμα συνδέεται αναπόσπαστα με το κύμα, δηλαδή το σώμα δεν βρίσκεται ποτέ μόνο του χωρίς αυτό το συνοδό κύμα. Το κύμα είναι μια ταλάντωση σε ένα νέο είδος πεδίου το οποίο μαθηματικά αντιπροσωπεύεται από το πεδίο ψ του Σραϊντιγκερ. Το πεδίο ψ είναι ένα αντικειμενικά πραγματικό πεδίο όπως το βαρυτικό ή το ηλεκτρομαγνητικό με τα δικά του βέβαια χαρακτηριστικά. Το πεδίο ψ ασκεί στο σώμα ένα νέο είδος κβαντομηχανικής δύναμης. Η δύναμη αυτή αρχίζει να εκδηλώνεται σθεναρά στην ατομική περιοχή γιαυτό δεν εμφανίζεται κατά τη μελέτη των φαινομένων μεγάλης κλίμακας. Το σώμα αμοιβαία επιδρά στο πεδίο ψ , η επίδραση αυτή είναι αγνοήσιμη στην κβαντική περιοχή αλλά υπάρχει η πιθανότητα αντίστοιχα να γίνει σημαντική στην υποκβαντική περιοχή. Στις περιπτώσεις που το πεδίο ψ σχετίζεται με το υποκβαντικό επίπεδο η δύναμη που ασκεί το σώμα στο πεδίο ψ δεν είναι αμελητέα. Όταν το πεδίο ψ σχετίζεται με το υποκβαντικό επίπεδο, η προσέγγιση κατά την οποία θεωρούμε το σώμα σημείο, παραλείπουμε δηλαδή την εσωτερική του δομή, στις διαδικασίες που συντελούνται στο υποκβαντικό επίπεδο πρέπει να εγκαταλειφθεί.

Η εγκατάλειψη αυτή δίνει νέες δυνατότητες ανάπτυξης στη νέα θεωρία. Η δύναμη που ασκεί το πεδίο ψ στο σώμα είναι τέτοια ώστε να δημιουργεί σε αυτό την τάση να κινηθεί σε περιοχές όπου το $|\psi|$ είναι μέγιστο. Η τάση αυτή είναι ανθεκτική στις τυχαίες κινήσεις που υφίσταται το σώμα, οι οποίες

οφείλονται σε τυχαίες διακυμάνσεις του πεδίου ψ και σε μια κίνηση ανάλογη της κίνησης Brown . Οι διακυμάνσεις του πεδίου ψ αλλά και η κίνηση Brown στο κβαντικό επίπεδο , καθορίζονται από τις κρυμμένες μεταβλητές του υποκβαντικού επιπέδου . Η κίνηση Brown οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις των σωμάτων του κβαντικού επιπέδου με νέες οντότητες που υπάρχουν στο υποκβαντικό επίπεδο . Αποδεχόμενοι την ύπαρξη αυτών των τυχαίων κινήσεων , βλέπουμε ότι θα προκαλέσουν στο σώμα την τάση να κινείται με περισσότερο ή λιγότερο τυχαίο τρόπο σε όλο τον διαθέσιμη χώρο. Από τη σύνθεση των ανθεκτικών τάσεων για κινήσεις από το πεδίο ψ και των τάσεων για τυχαίες κινήσεις σε ένα στατιστικό σύνολο σωμάτων θα προκύψει μέση κατανομή , η οποία ευνοεί τις περιοχές όπου το πεδίο ψ έχει τη μέγιστη ένταση αλλά δίνει σε ένα σώμα κάποια πιθανότητα να βρίσκεται για κάποιο χρονικό διάστημα σε θέσεις όπου το πεδίο ψ είναι σχετικά ασθενές. Οι φυσικές αλλά και λογικές παραδοχές για την κβαντική δύναμη και τις τυχαίες κινήσεις που προέρχονται από το υποκβαντικό επίπεδο εξηγούν την κατανομή πιθανότητας του Μπορν $\rho=|\psi|^2$. Η κατανομή πιθανότητας του Μπορν δεν είναι ιδιότητα απόλυτη και ανεξήγητη , γιατί όπως ισχυρίζεται ο Μπομ αυτή προκύπτει από τη σχέση του κβαντικού επιπέδου με το υποκβαντικό επίπεδο .

Με τη νέα θεωρία περιγράφεται με φυσικό τρόπο όπως ισχυρίζεται ο Μπομ η κυματο-σωματιδιακή δυαδικότητα παρακάμπτοντας την αρχή της συμπληρωματικότητας, που θέλει το ηλεκτρόνιο οντότητα η οποία να συμπεριφέρεται παραδόξως ταυτόχρονα σαν σωματίδιο και σαν κύμα. Αυτή η δυνατότητα δείχνεται με το πείραμα στο οποίο ηλεκτρόνια που εκπέμπονται χωριστά από πηγή προσπίπτουν σε ένα σύστημα που περιλαμβάνει δυο σχισμές. Τα κύματα που συνδέονται με τα ηλεκτρόνια διέρχονται μέσω του συστήματος των δυο σχισμών περιθλώνται και στο πέτασμα λαμβάνεται μια εικόνα με έντονους και ασθενείς κροσσούς συμβολής [στατιστικό διάγραμμα συμβολής]. Το σώμα όμως που συνδέεται με κάθε ηλεκτρόνιο φτάνει στο πέτασμα σε συγκεκριμένο σημείο ακλουθώντας μια μοναδική διαδρομή. Το σώμα καθοδηγείται από την κβαντομηχανική δύναμη που προέρχεται από τα συμβαλλόμενα πεδία , υπό την επίδραση των τυχαίων διακυμάνσεων. Ας υποθέσουμε ότι κλείνουμε τη μια σχισμή , στο πέτασμα τότε δεν εμφανίζονται κροσσοί συμβολής άλλα διακριτές κηλίδες . Το σώμα που αντιστοιχεί σε κάθε ηλεκτρόνιο φτάνει στο πέτασμα ακολουθώντας πάλι μια μοναδική διαδρομή καθοδηγούμενο από την κβαντομηχανική δύναμη που προέρχεται μόνο από το πεδίο ψ , υπό την επίδραση των τυχαίων διακυμάνσεων. Οι ταλαντώσεις των συστημάτων του υποκβαντικού επιπέδου ικανοποιούν μη γραμμικές εξισώσεις. Ο τύπος μη γραμμικότητας είναι τέτοιος ώστε να οδηγεί σε διακριτές σταθερές συχνότητες ταλάντωσης ανάμεσα σε ασταθείς περιοχές συχνοτήτων. Κάθε σύστημα του υποκβαντικού επιπέδου μεταβαίνει συνεχώς από τη μια συχνότητα στη άλλη. Τα επηρεαζόμενα όμως από το υποκβαντικό επίπεδο συστήματα του κβαντικού επιπέδου τείνουν να κινηθούν ασυνεχώς από τον ένα διακριτό σταθερό τρόπο ταλάντωσης στον άλλο , ώστε οι ταλαντώσεις να ικανοποιούν

γραμμικές εξισώσεις . Στο επίπεδο αυτό ισχύει η σχέση του Αϊνστάιν $E=hf$ όπως και η σχέση του ντε Μπρειν $p=h/\lambda$, εξηγούνται δηλαδή τα κβάντα και οι διακριτές ενεργειακές στάθμες . Τελικά αυτό το μοντέλο δεν εμμένει σε μια αμιγώς αιτιακή θεωρία γιατί στηρίζεται στην παραδοχή ότι οι τυχαίες διακυμάνσεις πηγάζουν από ένα βαθύτερο επίπεδο. Ωστόσο το ουσιώδες σημείο εδώ είναι ότι οι νόμοι του υποκβαντικού επιπέδου αιτιακοί και στατιστικοί είναι ποιοτικά διαφορετικοί από τους νόμους του κβαντικού επιπέδου και μόνο προσεγγιστικά οδηγούν σε αυτούς. Μέσα στο πλαίσιο του κβαντικού επιπέδου η αρχή του Χάιζενμπεργκ είναι αντικειμενικά αναγκαία. Διευρύνοντας όμως αυτό το πλαίσιο με το υποκβαντικό επίπεδο το όριο που θέτει η αρχή της απροσδιοριστίας μπορεί να μειωθεί . Για τη μείωση αυτού του ορίου πρέπει να ληφθούν υπόψη νέα είδη φυσικών διαδικασιών οι οποίες εξαρτώνται σημαντικά από όσα συμβαίνουν στο υποκβαντικό επίπεδο. Το σημαντικό είναι ότι με βάση την ιδέα του υποκβαντικού επιπέδου αντιμετωπίζεται η συνήθη μορφή της κβαντικής θεωρίας στη νέα θεωρία, σαν προσέγγιση που ισχύει σε οριακές περιπτώσεις .

Οι διαδικασίες του υποκβαντικού επιπέδου πειραματικά είχε αναφέρει ο Μπομ , ότι μπορεί να αποκαλυφθούν στην περιοχή των πολύ υψηλών ενεργειών πάνω από 10^8 eV και των πολύ μικρών αποστάσεων κάτω από 10^{-13} cm.

Στο κβαντικό επίπεδο οι διαδικασίες στις πολύ υψηλές ενέργειες και πολύ υψηλές συχνότητες γίνονται ταχύτερες από αυτές που συντελούνται στο υποκβαντικό επίπεδο. Σε τέτοιες περιπτώσεις οι λεπτομέρειες του υποκβαντικού επιπέδου γίνονται σημαντικές και η διατύπωση της κβαντικής θεωρίας που είναι σε χρήση καταρρέει.

Πληροφορικά αναφέρεται ότι με πειράματα που διεξήχθησαν στον επιταχυντή $SppS$ και αργότερα στον LHC του CERN με θεωρητικό υπόβαθρο τις κβαντικές θεωρίες πεδίου, στη περιοχή ενεργειών της τάξης των 10^{11} eV, έγινε δυνατό να ανακαλυφθούν το 1983 οι φορείς της ασθενούς πυρηνικής δύναμης W^- W^+ και Z^0 ενώ το 2012 το σωματίδιο Higgs.

Στην εν χρήσει κβαντική θεωρία λέει ο Μπομ η δημιουργία και η καταστροφή των σωματιδίων αντιμετωπίζεται σαν ένα είδος εμφάνισης και εξαφάνισης με ένα τρόπο που δεν επιδέχεται περαιτέρω περιγραφή. Αυτό γίνεται με τη βοήθεια των τελεστών δημιουργίας και καταστροφής που περιγράφουν τη δημιουργία ενός σωματιδίου με την απλή δήλωση ότι ο αριθμός των σωματιδίων έχει αυξηθεί κατά μια μονάδα, ενώ η καταστροφή του περιγράφεται με την αναφορά ότι ο αριθμός τους μειώνεται κατά μια μονάδα . Σύμφωνα με την θεώρηση του Μπομ η δημιουργία και η καταστροφή των σωματιδίων λογίζονται σαν καλά καθορισμένες διαδικασίες που συντελούνται στο υποκβαντικό επίπεδο.

Ο Χάιζενμπεργκ ασκώντας κριτική στο Μπομ βρίσκει λάθος την άποψη του να θεωρεί τα σωματίδια σαν αντικειμενικές πραγματικές δομές ακριβώς όπως τα υλικά σημεία στη νευτώνεια μηχανική , γιατί τέτοιες δομές μπορεί να προσδιοριστούν στον συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο και όχι σε κάποιο αφηρημένο χώρο συναπεικόνισης .

Αυτό συμβαίνει γιατί ακόμα και στις χαμηλές ενέργειες η επέκταση της

θεωρίας σε περισσότερα από ένα ηλεκτρόνια παρουσιάζει την παρακάτω δυσκολία. Η εξίσωση Σραϊντιγκερ δεν περιγράφει ένα κύμα στο συνήθη τρισδιάστατο χώρο αλλά σε κάποιο αφηρημένο $3N$ διάστατο χώρο, όπου N είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων.

Ο Μπομ θεωρεί ότι αυτό είναι προσωρινό τέχνασμα έως ότου διατυπωθεί μια πιο ικανοποιητική θεωρία στην οποία τα πάντα θα εκφράζονται πάλι στο τρισδιάστατο χώρο.

Για την επέκταση της νέας θεωρίας στην περιοχή των υψηλών ενεργειών αναγνωρίζει ο Μπομ ότι αυτή πρέπει να επιτευχθεί περιλαμβάνοντας την έννοια του σπιν και τη σχετικότητα χρησιμοποιώντας την εξίσωση του Ντιράκ. Οι κβαντοθεωρητικοί νόμοι για τον Χάιζενμπεργκ είναι τέτοιας υφής που οι κρυμμένες παράμετροι που επινοήθηκαν ad hoc δεν μπορούν ποτέ να παρατηρηθούν. Ο Χάιζενμπεργκ αναφέρει ότι ο Μπομ ορίζει σαν δυνατές τροχιές των σωματιδίων αυτές που διέρχονται κάθετα από τις ισοφασικές επιφάνειες. Η πραγματική τροχιά όμως εξαρτάται από τη γνώση της ιστορίας του σωματιδίου και της συσκευής μέτρησης. Η εξάρτηση αυτή κατά την άποψη του Χάιζενμπεργκ καθιστά αναγκαίες τις κρυμμένες μεταβλητές πριν το πείραμα αποφανθεί.

Καταστρέφονται κατά την άποψη του Χάιζενμπεργκ επίσης αποφασιστικές ιδιότητες συμμετρίας όταν ο Μπομ εισάγει τις κρυμμένες παραμέτρους σαν επινόημα στη θεωρία του. Μάλιστα η γλώσσα που χρησιμοποιεί ο Μπομ καταστρέφει τη συμμετρία μεταξύ θέσης-ορμής αλλά και κύματος-σωματιδίου η οποία αποτελεί ιδιαίτερο χαρακτηριστικό γνώρισμα στο μαθηματικό σχήμα της θεωρίας των κβάντων.

Ο Μπομ αναγνώρισε ότι το μοντέλο του κύμα – σώμα ουσιαστικά δυο διαφορετικές οντότητες που η αλληλεπίδραση τους δεν είναι θεμελιώδης για τον τρόπο ύπαρξης του, δεν φαίνεται εύλογο. Το ότι το κύμα και το σώμα δεν απαντώνται ποτέ ξεχωριστά υποδεικνύει ότι και τα δυο, είναι δυο διαφορετικές όψεις μιας νέας οντότητας που έχει αντικειμενική ύπαρξη. Πιθανόν εντελώς διαφορετικής οντότητας από ένα απλό κύμα η ενώ απλό σωματίδιο, η οποία οδηγεί όμως σε αυτές τις δυο οριακές εκδηλώσεις ως προσεγγίσεις που ισχύουν υπό κατάλληλες συνθήκες.

Στα πειράματα θεωρεί ο Χάιζενμπεργκ πάνω σε ατομικά συμβάντα δεν έχουμε να κάνουμε με οντότητες και δεδομένα φαινομένων που είναι εξίσου πραγματικά όπως αυτά στη καθημερινή ζωή. Θεωρεί ψευδαίσθηση την επέκταση της αντίληψης περί πραγματικότητας της κλασικής φυσικής στην κβαντική φυσική. Την αντίληψη δηλαδή ενός αντικειμενικού κόσμου που τα μικρότερα κομμάτια του υπάρχουν αντικειμενικά με τον ίδιο τρόπο όπως οι πέτρες και τα δένδρα αδιάφορο αν τα παρατηρούμε ή όχι. Αυτά αποτελούν μάλλον ένα κόσμο τάσεων η δυνατοτήτων παρά ένα κόσμο πραγμάτων η γεγονότων.

Η παραδοχή της πραγματικότητας των σωματιδίων και των τροχιών τους είναι περιττό ιδεολογικό εποικοδόμημα. Ο Χάιζενμπεργκ εξέφρασε νεοπλατωνικές απόψεις λέγοντας ότι τα στοιχειώδη σωματίδια δεν είναι φυσικά σώματα αλλά μορφές που μπορούν να εκφραστούν μαθηματικά.

Επειδή η φύση κατά τον Χάιζενμπεργκ βάζει φραγμό στον αναγωγισμό,

το 1943 για την περιγραφή των αδρονίων και των αλληλεπιδράσεων τους πρότεινε μια κβαντική θεωρία πεδίου τη μήτρα S. Η σχετικιστική αυτή θεωρία δίνει έμφαση στα γεγονότα παρά στα αντικείμενα, δηλαδή στις αντιδράσεις των σωματιδίων παρά στα ίδια τα σωματίδια. Η λέξη μήτρα αναφέρεται σε μήτρα πιθανοτήτων για ενδεχόμενες αντιδράσεις που αφορούν τα αδρόνια και το γράμμα S είναι το αρχικό της λέξης scattering, η οποία αναφέρεται στο διασκορπισμό που περιγράφει την οπτική εικόνα μιας σωματιδιακής σύγκρουσης. Στις δεκαετίες που ακολούθησαν η μήτρα S αναπτύχθηκε παίρνοντας τη μορφή μιας περιπλοκής μαθηματικής διατύπωσης συμβατή με την εικόνα του Χάιζενμπεργκ για τη φυσική πραγματικότητα.

Μια σύγχρονη εκδοχή του EPR έδωσε με ένα νοητικό πείραμα ο Μπομ. Αντί να καταπιαστεί με ηλεκτρόνια και τις κβαντικές καταστάσεις των σπιν τους ασχολήθηκε με φωτόνια και τις σχετικές με την πόλωση ιδιότητες τους. Ένα άτομο που βρίσκεται σε κατάσταση ηρεμίας διεγείρεται εκπέμποντας ταυτόχρονα δυο φωτόνια σε αντίθετες κατευθύνσεις. Η πόλωση των φωτονίων προσδιορίζεται από δυο πολωτές που βρίσκονται εκατέρωθεν του ατόμου. Μέχρι να εκτελέσουμε κάποια μέτρηση και να καταρρεύσει η κυματοσυνάρτηση η πόλωση των φωτονίων είναι απροσδιόριστη. Η πρόοδος της φωτονικής τεχνολογίας κατέστησε δυνατό στο εργαστήριο τον προσδιορισμό της πόλωσης των φωτονίων. Το πείραμα έδειξε ότι αν και οι δυο πολωτές εκατέρωθεν του ατόμου έχουν τις χαρακτηριστικές διευθύνσεις πόλωσης τους παράλληλες με κατακόρυφο προσανατολισμό είτε με οριζόντιο προσανατολισμό και τα δυο φωτόνια διέρχονται. Αν ο ένας πολωτής έχει τη χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης του κάθετη και ο άλλος οριζόντιο τότε δεν διέρχεται κανένα φωτόνιο. Οι προηγούμενες μετρήσεις αποκαλύπτουν ένα υψηλό συσχετισμό στις πολώσεις των φωτονίων. Πάνω στην εκδοχή του πειράματος του Μπομ ο Τζον Στιούαρτ Μπελ [1928-1990] το 1964 κατέστρωσε μια ανισότητα για το θεωρητικό έλεγχο των συσχετισμών, στην ουσία για τον έλεγχο της ύπαρξης των κρυμμένων μεταβλητών. Σχετικά με το παράδοξο EPR ο Μπελ αναφέρει, ο Αϊνστάιν και ο Μπορ εξέτασαν τις συσχετίσεις όσον αφορά τις πολώσεις στις 0 στις 90 μοίρες, ενώ εγώ τις εξέτασα στις 37 μοίρες. Η απόδειξη της ανισότητας προέρχεται από μια εκλαϊκευμένη διάλεξη του ιδίου πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Απαιτείται για το νοητικό πείραμα ένας αριθμός N εκπεμπόμενων ζευγαριών φωτονίων από το άτομο και η έννοια της πόλωσης στην κβαντομηχανική. Αν η διεύθυνση πόλωσης του φωτονίου σχηματίζει γωνία θ με τη χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης του πολωτή στην κλασική φυσική η ένταση του φωτός που διέρχεται από αυτή μεταβάλλεται ως $\cos^2\theta$. Στην κβαντική φυσική το $\cos^2\theta$ εκφράζει την πιθανότητα να διέλθει το φωτόνιο από αυτή. Αν $\theta=30^\circ$ η πιθανότητα να διέλθει είναι $\cos^2 30^\circ = 0,75$ ή 75% και η πιθανότητα να μην διέλθει είναι $\sin^2 30^\circ = 0,25$ ή 25%. Φωτόνιο που έχει ίδια διεύθυνση πόλωσης με τη χαρακτηριστική διεύθυνση πόλωσης του πολωτή $\theta=0$ $\cos^2 0=1$ περνά 100% μέσα από αυτόν, ενώ αν η διεύθυνση πόλωσης του είναι κάθετη σε αυτή του πολωτή $\theta=90^\circ$, $\cos^2 90^\circ = 0$ ή $\sin^2 90^\circ = 1$ απορροφάται από αυτόν. Οι συμφωνίες αφορούν συσχετισμένα

φωτόνια στις οποίες τα φωτόνια του ζεύγους διέρχονται ή δεν διέρχονται και τα δυο μαζί μέσα από τους εκατέρωθεν του ατόμου πολωτές .

Οι ασυμφωνίες αφορούν μη συσχετισμένα φωτόνια στις οποίες όταν περνά το ένα φωτόνιο του ζεύγους από τον ένα πολωτή , δεν περνά το άλλο από τον άλλο πολωτή .Οι πολωτές αρχικά έχουν τις χαρακτηριστικές διευθύνσεις πόλωσης τους κάθετες στο οριζόντιο επίπεδο άρα και παράλληλες μεταξύ τους .Στην περίπτωση αυτή τα φωτόνια διέρχονται όλα και από τους δυο πολωτές , ο αριθμός των ασυμφωνιών δηλαδή είναι μηδέν.

Ασυμφωνίες παρατηρούνται με τη στροφή της διεύθυνσης πόλωσης των πολωτών . Η στροφή επιτυγχάνεται στρέφοντας το πλακίδιο του πολωτή γύρω από άξονα που διέρχεται κάθετα από το κέντρο του , ο οποίος είναι παράλληλος στο οριζόντιο επίπεδο.

Για την περιγραφή της ανισότητας του Μπελ θεωρούμε πχ τον αριθμό των ζευγαριών των φωτονίων $N=20$ και τη γωνία στροφής $\theta=30^\circ$.

Το συνολικό πλήθος A_1 των ασυμφωνιών , όταν ο δεξιός πολωτής στραφεί κατά 30° και ο αριστερός μείνει στη θέση του , ενώ από τον αριστερό διέρχονται όλα τα φωτόνια είναι $A_1= N \eta \mu^2 30^\circ = 5$.

Το συνολικό πλήθος A_2 των ασυμφωνιών, όταν ο αριστερός πολωτής στραφεί κατά -30° και ο δεξιός μείνει στη θέση του , ενώ από τον δεξιό διέρχονται όλα τα φωτόνια είναι $A_2= N \eta \mu^2 30^\circ = 5$.

Αν και οι δυο πολωτές στραφούν ταυτόχρονα με αντίθετες φορές κατά 30° [30° , -30°] τότε δεν διέρχονται 5 φωτόνια από τον αριστερό πολωτή και 5 φωτόνια από το δεξιό πολωτή. Στην περίπτωση αυτή γίνεται δυνατό από τη σύμπτωση δυο μη διελεύσεων μια από κάθε πολωτή να προκύψει μια συμφωνία. Έτσι γίνεται δυνατό να προκύψουν συμφωνίες από τη σύμπτωση μερικών ή όλων των εκατέρωθεν μη διελεύσεων .Ο αριθμός των ασυμφωνιών A ανάλογα με τον βαθμό σύμπτωσης των εκατέρωθεν μη διελεύσεων είναι $0 \leq A \leq 10$. Το συμπέρασμα που προκύπτει είναι ότι $A \leq A_1 + A_2$.

Η ανισότητα του Μπελ πχ για $\theta=30^\circ$ διατυπώνεται ως εξής \ll το πλήθος των ασυμφωνιών A αν οι δυο πολωτές στραφούν ταυτόχρονα κατά 30° με αντίθετες φορές [30° , -30°] είναι μικρότερο ή ίσο του αθροίσματος των ασυμφωνιών $A_1 + A_2$, που προκύπτει όταν ο ένας στραφεί χωριστά ως προς το άλλο αντίστοιχα κατά 30° , -30° δηλαδή $A \leq A_1 + A_2 \gg$.

Το τελικό βήμα είναι ο θεωρητικός έλεγχος της ανισότητας Μπελ.

Αν αντί της ταυτόχρονης στροφής [30° , -30°] στραφεί ο ένας μόνο πολωτής ως προς το άλλο κατά 60° η ανισότητα αυτή παραβιάζεται . Στην περίπτωση αυτή από τον πολωτή που έμεινε στη θέση του διέρχονται όλα τα φωτόνια , ενώ από το άλλο που στράφηκε κατά 60° δεν διέρχονται $B = N \eta \mu^2 60^\circ = 15$ φωτόνια . Οι ασυμφωνίες που γίνονται τώρα 15 και αυξάνονται σε σχέση με το μέγιστο άθροισμα των προηγούμενων ασυμφωνιών $A_1 + A_2 = 10$. Αυτή η παραβίαση εκφράζεται μαθηματικά ως εξής $B > A_1 + A_2$ ή $15 > 10$. Διαπιστώνεται θεωρητικά ότι σύμφωνα με την ορθόδοξη ερμηνεία παραβιάζεται η ανισότητα του Μπελ γιατί μειώνεται ο αριθμός των συζευγμένων φωτονίων. Αν τα φωτόνια είχαν πολώσεις προκαθορισμένες όπως θα ήθελε ο Αϊνστάιν δεν θα είχαμε παραβίαση της ανισότητας του Μπελ .

Ο αποσυσχετισμός συμβαίνει γιατί οι αλλαγές που λαμβάνουν χώρα στο όργανο μέτρησης, δηλαδή οι στροφές του πολωτή, επηρεάζουν την πόλωση του φωτονίου. Η πόλωση του φωτονίου σύμφωνα με την ορθόδοξη ερμηνεία εξαρτάται από τη διαδικασία μέτρησης της.

Επομένως με τον πειραματικό έλεγχο της ανισότητας του Μπελ ελέγχεται μαζί και η ορθότητα αυτής της ερμηνείας. Καθίσταται με αυτό τον τρόπο δυνατή η αποδοχή ή η απόρριψη των κρυμμένων μεταβλητών.

Στα τέλη της δεκαετίας του 1970 και στις αρχές της δεκαετίας του 1980 ο Αλέν Ασπέκ [1947-] και η ομάδα του πραγματοποίησαν στο Παρίσι μια σειρά πειραμάτων που έδειξαν την παραβίαση της ανισότητας του Μπελ. Παρότι η αναπαραγωγή του νοητικού πειράματος στην πράξη δεν ήταν τέλεια, οι ανιχνευτές φωτονίων δεν είχαν απόδοση 100%, με τα πειράματα αυτά θεωρήθηκε ότι επιβεβαιώνεται η ορθόδοξη ερμηνεία που δεν περιλαμβάνει τις κρυμμένες μεταβλητές. Παρέμεινε όμως πιθανή η ιδιόμορφη δυνατότητα των φωτονίων με τη διέλευση τους από τους πολωτές, να ανταλλάσσουν ακαριαία πληροφορίες ώστε να ρυθμίζουν τις πολώσεις τους παραβιάζοντας τη θεωρία της ειδικής σχετικότητας.

Ο Μπομ συμφώνησε ότι με το πείραμα του Ασπέκ οι έννοιες της τοπικότητας και του ντετερμινισμού στην κβαντική θεωρία έχουν καταρρεύσει. Στη δική του διαλεκτική σύνθεση ένα σύστημα σωματιδίων και το περιβάλλον τους μπορούν να θεωρηθούν αδιαίρετη ολότητα. Η ολότητα ισχυρίζεται ο Μπομ γίνεται εμφανής από την ύπαρξη μη τοπικών αλληλεπιδράσεων ανάμεσα σε όλα τα σωματίδια του συστήματος.

Το όλο προηγείται από τα μέρη και τα μερικά πρέπει να ερμηνεύονται από το όλο και σε αναφορά προς αυτό. Τα μέρη είναι εκείνα που οργανώνονται με τρόπο που απορρέει από την ολότητα, άποψη που θυμίζει τη σχέση του οργανισμού με τα μέρη που τον αποτελούν. Για τις σχέσεις μεταξύ των μερών που απορρέουν από την ολότητα δεν υφίσταται μηχανιστικός ντετερμινισμός, δηλαδή από συγκεκριμένες αιτίες δεν προκύπτουν συγκεκριμένα αποτελέσματα. Γνωρίζοντας την αιτία δεν μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα το αποτέλεσμα γιατί η αιτιότητα είναι όψη της γενικότερης κατηγορίας της αλληλεπίδρασης.

Η ολότητα περιλαμβάνει σαν μέρη τον παρατηρητή και το παρατηρούμενο σύστημα, επομένως δεν απαιτείται καμία κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης στη διαδικασία της μέτρησης. Η κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης εισάγει διαρκώς ένα νέο παρατηρητή που να παρατηρεί την προηγούμενη κατάσταση. Το σύμπαν σαν ολότητα [κλειστό σύμπαν] μπορεί να αυτοπροσδιορίζεται.

Η ολότητα περιγράφεται με την εισαγωγή της έννοιας της αναδιπλωμένης τάξης. Σύμφωνα με αυτή κάθε μέρος σχετίζεται εσωτερικά με την ολότητα υπό την έννοια ότι η ολότητα αναδιπλώνεται ενεργά σε αυτό. Έτσι όλα τα αντικείμενα οντότητες και μορφές της εμπειρίας μας θεωρούνται αναδιπλωμένα στο συνολικό πεδίο και δημιουργούνται, διατηρούνται και τελικά εξαφανίζονται, με μια σταθερή κίνηση αναπτύγματος και αναδίπλωσης. Οι ιδιότητες του χωροχρόνου θεωρούνται αναπτύγματα από μια βαθύτερη αναδιπλωμένη δομή για τη μελέτη της οποίας αναπτύχθηκαν νέες μαθηματικές μορφές.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Ο φον Νόιμαν είχε αποδείξει με το ομώνυμο θεώρημα του ότι καμιά θεωρία λανθανουσών παραμέτρων για την ερμηνεία του παρατηρούμενου συστήματος, δεν θα μπορούσε να οδηγήσει στα ίδια ακριβώς αποτελέσματα με αυτά που προκύπτουν από την κυματική εξίσωση του Σραϊντιγκερ και την πιθανοκρατική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης.

Ο ντε Μπρέιγ , Μπομ , Μπελ και άλλοι διατύπωσαν την άποψη ότι το περίφημο θεώρημα του φον Νόιμαν δεν ευσταθούσε , γιατί ο φον Νόιμαν στην απόδειξη του ξεκίνησε από αυτό που ήθελε να αποδείξει , πήρε δεδομένο τον ιντετερμινιστικό χαρακτήρα της κβαντομηχανικής.

Ο Μπομ μάλιστα απέδειξε ότι θεωρίες με λανθάνουσες παραμέτρους δεν είναι αδύνατες όπως ισχυριζόταν ο φον Νόιμαν. Η θεωρία του Μπομ με λανθάνουσες παραμέτρους αναπαράγει την ίδια στατιστική κατανομή με αυτή της κβαντομηχανικής. Φυσικοί που θεωρούν δυνατή την αντικειμενική περιγραφή του μικρόκοσμου δέχονται τις θεωρίες με λανθάνουσες παραμέτρους . Παραδέχονται ότι η αρχή της απροσδιοριστίας είναι απλά μια συνέπεια της κβαντικής θεωρίας στο παρόν στάδιο ανάπτυξης της, που θα μπορούσαν όμως να περιοριστούν τα όρια εφαρμογή της. Αυτό θα γίνει δυνατό εάν αποκαλυφθεί αργότερα ότι η σημερινή μορφή της θεωρίας πρέπει να τροποποιηθεί να διορθωθεί ή να διευρυνθεί. Τον Αϊνστάιν τον δυσαρεστούσε η από μέρους του Μπορ άρνηση μιας βαθύτερης πραγματικότητας και πίστευε παθιασμένα ότι τα φυσικά αντικείμενα έχουν πραγματικές φυσικές ιδιότητες ανεξάρτητες από τη διαδικασία της μέτρησης. Οπωσδήποτε όμως το ζήτημα της πληρότητας της θεωρίας παραμένει για τους ρεαλιστές ανοικτό σε θεωρητικό και πειραματικό επίπεδο.

Αλλά και στην αρχή της συμπληρωματικότητας ασκείται κριτική ότι δεν είναι φυσική αρχή , αφού δεν υπάρχει τρόπος να επαληθευτεί πειραματικά , αλλά είναι αρχή επιστημολογική. Ο Ντιράκ ο οποίος διατηρούσε στενές σχέσεις με τους κοπεγκαγιανούς και έτρεφε μεγάλο σεβασμό για τον Μπορ, δεν έβλεπε τίποτα άξιο λόγου σε όλη την κουβέντα για τη συμπληρωματικότητα.

Δεν οδηγούσε σε καινούργιες εξισώσεις ούτε και μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς τους οποίους ο Ντιράκ έτεινε να ταυτίζει με τη φυσική.

Αλλά ούτε και όλοι οι σπουδαστές του ινστιτούτου του Μπορ ασπαστήκαν τη φιλοσοφία της συμπληρωματικότητας. Κράτησαν από την ερμηνεία του Μπορ την άποψη ότι το θεωρητικό σχήμα πρέπει να εκλαμβάνεται ως ένα εργαλείο για την εξαγωγή προβλέψεων στατιστικού χαρακτήρα, σχετικά με τις πληροφορίες που λαμβάνονται από τα διενεργούμενα πειράματα , όταν οι συνθήκες εκτέλεσης τους περιγράφονται με κλασικούς όρους . Την ίδια στάση τήρησαν πολλοί κβαντικοί φυσικοί ,άλλωστε στις ΗΠΑ η φήμη του Μπορ ως γκουρού της κβαντικής φυσικής ήταν πολύ πιο περιορισμένη από ότι στην Ευρώπη. Αυτοί είχαν απέναντι στη κβαντομηχανική μια στάση περισσότερο πραγματιστική όπως ο Ντιράκ και επικέντρωναν την προσοχή τους σε πειράματα και σε συγκεκριμένους υπολογισμούς. Για τους λόγους αυτούς η αρχή της συμπληρωματικότητας δεν φαίνονταν να έχει για αυτούς την παραμικρή χρησιμότητα. Αλλά και για τις κρυμμένες μεταβλητές όσο τα διενεργούμενα πειράματα τις αγνοούν , έστω και αν αυτές αναπαράγουν

ακριβώς την ίδια στατιστική κατανομή με αυτή της ορθόδοξης ερμηνείας , η επικρατούσα άποψη είναι ότι αυτές δεν έχουν πρακτικά κανένα ρόλο ύπαρξης.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

ΜΑΘΗΜΑΤΑ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ ΤΟΜΟΣ Α ΜΙΧΑΗΛ ΕΛ. ΓΡΥΠΑΙΟΥ
 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ WERNER HEISENBERG
 DAVID BOHM Αιτιότητα και Τύχη στη Μοντέρνα Φυσική . Προλογίζει ο Louis de Broglie
 Χ ΑΝΑΣΤΟΠΟΥΛΟΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ
 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗΝ ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ Σ ΧΑΡΑΛΑΜΠΟΥΣ
 Ο ΜΥΘΟΣ ΤΗΣ ΣΧΟΛΗΣ ΤΗΣ ΚΟΠΕΓΧΑΓΗΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ ΓΚΟΥΒΑΣ
 ΤΟ ΝΕΟ ΚΒΑΝΤΙΚΟ ΣΥΜΠΑΝ ΤΟΝΥ HEY ,PATRICK WALTERS
 ΟΙ ΓΕΝΙΕΣ ΤΩΝ ΚΒΑΝΤΩΝ HELGE KRAGH
 ΤΑΞΗ ΜΕΣΑ ΑΠΟ ΤΟ ΧΑΟΣ Ilya Prigogine - Isabelle stengers
 Η ΕΞΕΛΙΞΗ ΤΩΝ ΙΔΕΩΝ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ ALBERT EINSTEIN -LEOPOLD INFELD
 ΜΕΤΑΦΡΑΣΗ- ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑ ΕΥΤ. ΜΠΙΤΣΑΚΗ
 ΦΥΣΙΚΗ ΣΗΜΕΡΑ Ε.Ν.ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ
 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΥΣΙΚΗ Γ ΤΟΜΟΣ Ν ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ
 ΦΥΣΙΚΗ ΚΑΙ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ SIR JAMES JEANS
 ΤΟ ΤΑΟ ΚΑΙ Η ΦΥΣΙΚΗ FRITJOF CAPRA
 ΤΟ ΧΡΟΝΙΚΟ ΤΟΥ ΧΡΟΝΟΥ Stephen W. Hawking
 ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΤΗ ΦΙΛΟΣΟΦΙΑ Χ ΘΕΟΔΩΡΙΔΗ
 ΟΙ ΠΑΓΚΟΣΜΙΕΣ ΣΤΑΘΕΡΕΣ GILLES COHEN –TANNOUDJI
 ΕΝΟΠΙΗΣΗ ΤΩΝ ΘΕΜΕΛΙΩΔΩΝ ΔΥΝΑΜΕΩΝ ABDUS SALAM