



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών
— ΙΔΡΥΘΕΝ ΤΟ 1837 —



Εθνικό
Μετσόβιο
Πολυτεχνείο

Σχολή Θετικών Επιστημών

**Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών**

**Τμήμα Ιστορίας και Φιλοσοφίας
της Επιστήμης**

**Τομέας Ανθρωπιστικών,
Κοινωνικών Επιστημών και
Δικαίου**

Διαπανεπιστημιακό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών:
«Ιστορία και Φιλοσοφία των Επιστημών και της Τεχνολογίας»

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

**«Ο Μύθος της Σχολής της Κοπεγχάγης:
Bohr, Heisenberg και η ερμηνεία της Κβαντικής Θεωρίας»**

Δημήτριος Γκούβας

A.M. 003/11

Τριμελής Συμβουλευτική Επιτροπή:
Θεόδωρος Αραμπατζής, Καθηγητής, Επιβλέπων Σύμβουλος
Βασίλειος Καρακώστας, Καθηγητής
Εμμανουήλ Πατηνιώτης, Καθηγητής

Αθήνα, Δεκέμβριος 2018

Περίληψη

Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιάσουμε τις φιλοσοφικές διαφορές μεταξύ του Niels Bohr και του Werner Heisenberg σε ζητήματα ερμηνείας της κβαντικής θεωρίας, έχοντας ως βάση τα κείμενα που γράφτηκαν από τους δύο επιστήμονες και τη σχετική δευτερογενή βιβλιογραφία. Πρώτο πεδίο ανίχνευσης των διαφορετικών απόψεων αποτελεί το ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού της ύλης και της οντολογίας των κυμάτων και των σωματιδίων. Έπειτα, οι αποκλίνουσες απόψεις των δύο επιστημόνων για το περιεχόμενο και τη χρήση των εννοιών στη κβαντική φυσική θα αναδείξουν τις κρυφές διαφωνίες ανάμεσα τους. Μετά από διάφορους μετασχηματισμούς στη σκέψη του, θα δούμε ότι ο Heisenberg συμφώνησε με την άποψη του Bohr για την αναγκαιότητα της χρήσης των κλασικών εννοιών στη σύγχρονη φυσική και την αδυναμία αντικατάστασής τους από νέες έννοιες. Η αντίληψη του Heisenberg όσον αφορά την πρόωμη άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα της χωροχρονικής και της αιτιακής περιγραφής θα αναδείξει το διαφορετικό τρόπο με τον οποίο ο νεαρός γερμανός φυσικός αντιλαμβανόταν το νόημα της αρχής αυτής, όπως διατυπώνεται από τον μέντορά του στη διάλεξη του Κόμο. Λαμβάνοντας υπόψη τις αποκλίνουσες απόψεις του Bohr και του Heisenberg, θα εξεταστεί αν έχει πραγματική βάση ο «Μύθος της Σχολής της Κοπεγχάγης», δηλαδή η ύπαρξη ή όχι μιας ενιαίας και ομοιογενούς σχολής, που συγκροτήθηκε γύρω από την ηγετική φυσιογνωμία του Bohr, η οποία και διαμόρφωσε την «ορθόδοξη» ή «καθιερωμένη» ερμηνεία για την κβαντική μηχανική. Τέλος θα προσπαθήσουμε να εντοπίσουμε το ρόλο του Heisenberg στην κατασκευή αυτού του μύθου και το σκοπό που εξυπηρετούσε, τη δεδομένη χρονική περίοδο, η δημιουργία του.

Λέξεις-κλειδιά: Σχολή της Κοπεγχάγης, κυματοσωματιδιακός δυισμός, αρχή της απροσδιοριστίας, αναγκαιότητα χρήσης κλασικών εννοιών, συμπληρωματικότητα, χωροχρονική περιγραφή, αιτιακή περιγραφή, ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας.

Abstract

The aim of this work is to present the philosophical differences between Niels Bohr and Werner Heisenberg on the interpretation of quantum theory, based on the writings of the two scientists and the pertinent secondary literature. The first field of detection of their different views is the question of the wave-particle duality of matter and the ontology of waves and particles. Then the divergent views of the two scientists on the content and use of concepts in quantum physics will reveal the hidden disagreements among them. After various transformations in his thought, we will see that Heisenberg agreed with Bohr's view of the indispensability of classical concepts in modern physics and the inability to replace them with new ones. Heisenberg's understanding of Bohr's early view of the complementarity of space-time and causal descriptions will highlight the different way in which the young German physicist understood the meaning of this principle, as expressed by his mentor in the Como lecture. Given the divergent views of Bohr and Heisenberg, I will then discuss the "Myth of the Copenhagen School", that is, the existence or not of a unified and homogeneous group, formed around Bohr's leading feature, which shaped the "orthodox" or "established" interpretation of quantum mechanics. Finally, I will try to identify the role of Heisenberg in the construction of that myth and the purpose served, in the given period, by its creation.

Keywords: Copenhagen School, wave-particle duality, indeterminacy principle, indispensability of classical concepts, complementarity, space-time description, causal description, interpretation of quantum theory.

*Στη μνήμη του πατέρα μου και της μητέρας μου,
Αποστολή και Ελευθερίας*

Περιεχόμενα

Περίληψη	i
Περιεχόμενα	vii
Ευχαριστίες	ix
Εισαγωγή	1
1 Διαφορές Bohr – Heisenberg πάνω στο ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυσισμού	8
1.1 Η φυσική πραγματικότητα για το ηλεκτρόνιο: είναι κύμα ή σωματίδιο;...	9
1.2 Τα κύματα πιθανότητας και η κβαντική μηχανική των σωματιδίων	11
1.3 Τα κβαντισμένα υλικά κύματα και η ισοδυναμία των εικόνων κύματος και σωματιδίου	17
1.4 Heisenberg και Bohr: αποκλίνουσες απόψεις για τον κυματοσωματιδιακό δυσισμό	22
2 Η αρχή της απροσδιοριστίας και το όριο των κλασικών εννοιών— οι μετασχηματισμοί της σκέψης του Heisenberg	31
2.1 Νέες έννοιες του χώρου και του χρόνου στη κβαντική μηχανική	33
2.2 Το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ	34
2.3 Η ανάλυση του Bohr για τα όρια της μέτρησης και για το νόημα των εννοιών	38
2.4 Το σημείο καμπής στη φιλοσοφία του Heisenberg και η μετατόπιση των απόψεών του κοντά στις απόψεις του Bohr	49
3 Η αρχή της συμπληρωματικότητας και οι αποκλίνουσες απόψεις των Bohr και Heisenberg	55
3.1 Η πρώτη άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα (συμπληρωματικότητα μεταξύ χωροχρονικής και αιτιακής περιγραφής)	60
3.2 Η ερμηνεία του Heisenberg για τη συμπληρωματικότητα	68
3.3 Αποκλίνουσες απόψεις των Bohr και Heisenberg στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής	72
3.4 Η αναδόμηση του Weizsäcker	82

Συμπεράσματα.....	87
Πρωτογενείς πηγές.	100
Δευτερογενής βιβλιογραφία:	103

Ευχαριστίες

Θα ήθελα να ευχαριστήσω όσους και όσες συνέβαλαν στην εκπόνηση αυτής της εργασίας.

Θα ήθελα πρωτίστως να ευχαριστήσω τον επιβλέποντα, Καθηγητή κ. Θόδωρο Αραμπατζή, για τη βοήθεια, την καθοδήγηση, τις εποικοδομητικές συζητήσεις αλλά και τη γενικότερη υποστήριξη καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης αυτής της διπλωματικής εργασίας. Ήταν πραγματικά τιμή για μένα η συνεργασία μαζί του. Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά, τον Καθηγητή κ. Βασίλειο Καρακώστα και τον Καθηγητή κ. Μανώλη Πατηνιώτη που συμμετείχαν στην Τριμελή Συμβουλευτική Επιτροπή, όπως και τον Καθηγητή κ. Κωνσταντίνο Δημητρακόπουλο, Διευθυντή του ΠΜΣ, για την παράταση που μου δόθηκε ώστε να ολοκληρώσω τις σπουδές μου. Θα ήθελα ακόμη να ευχαριστήσω τους συναδέλφους μου εκπαιδευτικούς της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης για τη βοήθειά τους στη φιλολογική επιμέλεια του κειμένου και για τις συζητήσεις πάνω σε θέματα κβαντικής φυσικής. Τέλος ευχαριστώ την οικογένειά μου και όλους εκείνους που μου συμπαραστάθηκαν με οποιονδήποτε τρόπο κατά τη διάρκεια των σπουδών μου.

Εισαγωγή

Στην ονομαστή του διάλεξη με τίτλο «Σύννεφα του 19^{ου} αιώνα πάνω από τη δυναμική θεωρία της θερμότητας και του φωτός» (“Nineteenth Century Clouds over the Dynamical Theory of Heat and Light”), που έδωσε ο Λόρδος Kelvin (William Thomson) στις 27 Απριλίου 1900 στο Βασιλικό Ίδρυμα του Λονδίνου, αναφέρθηκε σε δύο προβλήματα που αντιμετώπιζε η μηχανοκρατική θεωρία για τη φύση. Το πρώτο σύννεφο ήταν η αποτυχία να εξηγηθεί η κίνηση της γης δια μέσου του αιθέρα. Το δεύτερο ήταν η δυσκολία να εξηγηθούν τα πειραματικά αποτελέσματα που αφορούσαν τον προσδιορισμό των ειδικών θερμοτήτων διατομικών αερίων, υπό σταθερή πίεση (c_p) και υπό σταθερό όγκο (c_v), με βάση το θεώρημα ισοκατανομής ενέργειας το οποίο εδραζόταν στη μηχανική θεωρία. Τα δύο σύννεφα του Λόρδου Kelvin τελικά διαλύθηκαν, όχι με μια απλή αναθεώρηση της μηχανοκρατικής θεωρίας, αλλά με τη γέννηση μιας νέας φυσικής. Η θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Einstein απέρριψε ως περιττή την υπόθεση του αιθέρα ενώ η κβαντική θεωρία άλλαξε τελείως την εικόνα που είχαν οι επιστήμονες για τη δομή του ατόμου καταργώντας τους περιορισμούς της κινητικής θεωρίας (Kragh 2004, σελ. 24, 26 και Harman 1994, σελ. 223, 229). Την ίδια χρονιά, και συγκεκριμένα στις 14 Δεκεμβρίου 1900, ο Max Planck ανακοινώνει για πρώτη φορά δημοσίως το νόμο του για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, ημερομηνία η οποία «συχνά αναφέρεται ως η γενέθλια ημέρα της κβαντικής θεωρίας» (Kragh 2004, σελ. 85).

Από τις δύο θεωρίες που έφεραν την ανατροπή στη φυσική στις αρχές του 20^{ου} αιώνα, η θεωρία της ειδικής σχετικότητας είχε ως πρωταγωνιστή τον Albert Einstein. Αντίθετα κβαντική θεωρία ήταν αποτέλεσμα προσπαθειών και εργασιών διαφόρων επιστημόνων, κυρίως της κεντρικής γερμανόφωνης Ευρώπης, όπως οι Max Planck (1858-1947), Albert Einstein (1879-1955), Niels Bohr (1885-1962), Arnold Sommerfeld (1868-1951), Louis de Broglie (1892-1987), Erwin Schrödinger (1887-1961), Max Born (1882-1970), Werner Heisenberg (1901-1976), Pascual Jordan (1902-1980), Wolfgang Pauli (1900-1958) και Paul Dirac (1902-1984).¹ Ο Pauli, μάλιστα, αποκάλεσε κάποτε την κβαντική μηχανική *Knabenphysik* (φυσική των αγοριών) επειδή τόσοι πολλοί από τους πρωτεργάτες της διένυαν την τρίτη δεκαετία

¹ Όλοι οι παραπάνω επιστήμονες έχουν βραβευτεί με το βραβείο Νόμπελ φυσικής, εκτός από τους Sommerfeld και Jordan.

της ηλικίας τους. Τον Σεπτέμβριο του 1925, για παράδειγμα, ο Heisenberg ήταν μόλις 23 ετών, ο Pauli 25, ο Jordan 22, ενώ ο Dirac μόλις είχε μπει στα 22 (Kragh 2004, σελ. 203). Σε αντίθεση με τη σχετικότητα, η κβαντική μηχανική δεν προσέλκυσε άμεσα το ενδιαφέρον του ευρύτερου κοινού. Ωστόσο, πολλοί ευρωπαίοι επιστήμονες καταπιάστηκαν με την εις βάθος διερεύνηση των φιλοσοφικών συνεπειών της νέας μηχανικής και αφιέρωσαν πολύ χρόνο στην ανάλυση των μη κλασικών χαρακτηριστικών που διέκριναν τη θεωρία (Kragh 2004, σελ. 206). Στο βιβλίο του *Συναντήσεις με τον Einstein*, ο Werner Heisenberg αναφέρει ότι η κβαντική φυσική στη δεκαετία 1920 – 1930 αναπτύχθηκε σε τρία σημαντικά κέντρα. Στην Κοπεγχάγη με τον Niels Bohr, που ακολουθούσε μια εννοιολογική ή φιλοσοφική κατεύθυνση, στο Μόναχο με τον Arnold Sommerfeld πρωταγωνιστή της παλιάς κβαντικής θεωρίας, που ακολουθούσε μία φαινομενολογική προσέγγιση, και στο Γκέτινγκεν με τον Max Born, τον νεώτερο από τους τρεις που έδινε σημασία στο μαθηματικό φορμαλισμό (Heisenberg 1971, σελ. 38).² Στην Κοπεγχάγη, ιδρύθηκε το 1921 ένα νέο πανεπιστημιακό ινστιτούτο θεωρητικής φυσικής, γνωστό ως «Ινστιτούτο Bohr», το οποίο προσείλκυε πολυάριθμους επισκέπτες. Στο ινστιτούτο αυτό εργάστηκε με τον Niels Bohr και ο Werner Heisenberg κατά τις χρονικές περιόδους 1924-1925 και 1926-1927 (Kragh 2004, σελ. 193-194). Οι περίοδοι αυτές που οι Bohr και Heisenberg συνυπήρξαν στην Κοπεγχάγη ήταν πολύ σημαντικές, τόσο για την τελειοποίηση της κβαντικής μηχανικής όσο και για τη φιλοσοφική της ερμηνεία. Ειδικά η περίοδος 1926-1927 ήταν ιδιαίτερος κρίσιμη για τη διαμόρφωση της αποκαλούμενης «ορθόδοξης» ερμηνείας. Οι δύο επιστήμονες, Niels Bohr και Werner Heisenberg, ήταν οι δύο πρωταγωνιστές στη φιλοσοφική ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας.

Ο Niels Bohr γεννήθηκε στις 7 Οκτωβρίου 1885 στην Κοπεγχάγη, την ίδια χρόνια που ο Balmer δημοσίευσε το τύπο του για το φάσμα του ατόμου του υδρογόνου. Μεγάλωσε σε ακαδημαϊκή οικογένεια και το φθινόπωρο του 1903

² Κατά τον Heisenberg (1971, σελ. 38) «αν συγκρίνουμε τα τρία αυτά κέντρα, την Κοπεγχάγη, το Μόναχο και το Γκέτινγκεν . . . μπορούμε να τα συσχετίσουμε με τρεις κατευθύνσεις εργασίας της θεωρητικής φυσικής . . . Τη φαινομενολογική σχολή που προσπαθεί να ενοποιήσει τα νέα πειραματικά δεδομένα με έναν κατανοητό τρόπο, να παρουσιάσει τη σύνδεσή τους μέσω μαθηματικών σχέσεων που φαίνονται ως ένα βαθμό εύλογες από τη σκοπιά της σύγχρονης φυσικής. Τη μαθηματική σχολή, που προσπαθεί να παραστήσει τις φυσικές διεργασίες με προσεκτικά επεξεργασμένες μαθηματικές σχέσεις, οι οποίες με τη σειρά τους ικανοποιούν ως κάποιο βαθμό τις απαιτήσεις των μαθηματικών για αυστηρότητα . . . Και την τρίτη σχολή, η οποία μπορεί να ονομαστεί εννοιολογική ή φιλοσοφική, που προσπαθεί πάνω απ' όλα να αποσαφηνίσει τις έννοιες με τις οποίες περιγράφονται τελικά τα γεγονότα που συμβαίνουν στη φύση».

εισήχθη στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης. Στις 2 Δεκεμβρίου 1909 λαμβάνει το δίπλωμά του στη φυσική και στις 13 Μαΐου 1911 παρουσιάζει τη διδακτορική του διατριβή με θέμα «Μελέτες στην ηλεκτρονιακή θεωρία των μετάλλων». Στο τέλος Σεπτεμβρίου του ίδιου έτους μεταβαίνει στην Αγγλία για να κάνει μεταδιδακτορική έρευνα υπό τον J. J. Thomson, διευθυντή του εργαστηρίου Cavendish. Η παραμονή του στο εργαστήριο Cavendish δεν τον ικανοποιεί και έχοντας γνωρίσει τον Rutherford στις αρχές Νοεμβρίου του 1911, κανονίζει να μετακομίσει στο Μάντσεστερ κοντά στον Rutherford, όπου και φτάνει τον Μάρτιο του 1912. Στο Μάντσεστερ, που ήταν την εποχή εκείνη το σημαντικότερο κέντρο πειραματικών σπουδών στη ραδιενέργεια, μένει για τρεις μήνες και στις 24 Ιουλίου 1912 επιστρέφει στη Δανία. Στο Μάντσεστερ, ο Bohr έρχεται σε επαφή με το ατομικό μοντέλο του Rutherford και ξεκινά να δουλεύει πάνω σε μια εργασία που σχετίζεται με την διέλευση των σωματιδίων α και β μέσα από την ύλη. Η ενασχόλησή του αυτή, στη συνέχεια, θα τον οδηγήσει στις τρεις περίφημες εργασίες του με τον τίτλο «Περί της συστάσεως των ατόμων και των μορίων» (“On the Constitution of Atoms and Molecules”), τις οποίες θα δημοσιεύσει στο περιοδικό *Philosophical Magazine* τον Ιούλιο, Σεπτέμβριο και Νοέμβριο του 1913 και στις οποίες προτείνει το ατομικό του μοντέλο. Στις 10 Δεκεμβρίου 1922 του απονέμεται το βραβείο Νόμπελ³ για «τις μελέτες του για τη δομή των ατόμων και την ακτινοβολία που προέρχεται από αυτά» (Pais 1991).

Ο Werner Heisenberg γεννήθηκε στις 5 Δεκεμβρίου 1901 στην πόλη του Βύρτσμπουργκ στη βόρεια Βαυαρία, περίπου 240 χιλιόμετρα βορειοδυτικά του Μονάχου. Μεγάλωσε σε ακαδημαϊκό περιβάλλον, με τον πατέρα του να είναι καθηγητής κλασικών γλωσσών σε σχολεία της Γερμανίας. Το 1910, ο πατέρας του Heisenberg προσλαμβάνεται στο πανεπιστήμιο του Μονάχου, όπου και μετακομίζει μαζί με την οικογένειά του. Το φθινόπωρο του 1920, ο νεαρός Heisenberg εισάγεται στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου. Είναι η αρχή της περιόδου της «εύθραυστης» Δημοκρατίας της Βαϊμάρης, μιας ταραγμένης εποχής της σύγχρονης γερμανικής ιστορίας αφού η Γερμανία έβγαινε ηττημένη από τον πρώτο παγκόσμιο πόλεμο και μια οικονομική και πολιτική κρίση μάστιζε τη χώρα. Στο πανεπιστήμιο παρακολουθεί τις διαλέξεις του Sommerfeld που κάλυπταν σχεδόν όλους τους τομείς της κλασικής

³ Ο Bohr λαμβάνει το βραβείο Νόμπελ μαζί με τον Einstein, που δεν το παρέλαβε την προηγούμενη χρονιά. Κατά τον David Lindley (2011, σελ. 122) «ο Einstein τον επισκίασε [τον Bohr], όταν παρέλαβε, μαζί του, το βραβείο που του χρωστούσαν από το 1921».

θεωρητικής φυσικής και γνωρίζει τον Pauli, ο οποίος τον επηρέασε στην ενασχόλησή του με τη μελέτη της ατομικής φυσικής και με τον οποίο έκτοτε θα διατηρούσε στενή σχέση. Η πρώτη συνάντηση του Heisenberg με τον Bohr έλαβε χώρα στο Γκέτινγκεν τον Ιούνιο του 1922, πιθανώς στις 14 Ιουνίου, όταν ο τελευταίος πήγε εκεί για να δώσει μια σειρά διαλέξεων. Όπως αναφέρει ο Cassidy (1992, σελ. 127), «ήταν η αρχή μιας δια βίου, μερικές φορές δύσκολης, συνεργασίας και φιλίας που ήταν εξίσου σημαντική για τον Werner όπως η σχέση του με τον Pauli». Όταν ο Sommerfeld έφυγε για διαλέξεις στην Αμερική για κάποιο διάστημα το 1922-1923 έστειλε τον Heisenberg να εργαστεί στο Γκέτινγκεν μαζί με τον Born, με τη συμφωνία ότι θα επέστρεφε για την ολοκλήρωση της διδακτορικής του διατριβής. Πράγματι το Μάιο του 1923 ο Sommerfeld επέστρεψε στο Μόναχο και στο τέλος του ίδιου μήνα επέστρεψε και ο Heisenberg. Η διδακτορική του διατριβή ήταν στο πεδίο της μαθηματικής ρευστομηχανικής και είχε να κάνει με τον προσδιορισμό της μετάβασης από τη στρωτή ροή στην τυρβώδη ροή, για υγρά που διοχετεύονται σε κανάλια.⁴ Μετά από αρνητική κριτική από τον Wilhelm Wien ο Heisenberg λαμβάνει το διδακτορικό του τον Ιούλιο του 1923. Τον Οκτώβριο του ίδιου έτους επιστρέφει στο Γκέτινγκεν ως βοηθός του Born. Από το 1920 ως το 1927, ο Heisenberg μελέτησε και δίδαξε και στα τρία σημαντικότερα ερευνητικά κέντρα κβαντικής μηχανικής στον κόσμο—Μόναχο, Γκέτινγκεν και Κοπεγχάγη— υπό τους τρεις κορυφαίους θεωρητικούς της κβαντικής μηχανικής της εποχής: Sommerfeld, Born και Bohr. Σπούδασε και συνεργάστηκε με μερικούς από τους πιο λαμπρούς νέους θεωρητικούς της γενιάς του: Pauli, Jordan, Dirac και Kramers (Cassidy 1992). Οι περίοδοι που ο Heisenberg συνεργάστηκε με τον Bohr, στο Ινστιτούτο του τελευταίου στην Κοπεγχάγη, ήταν ιδιαίτερα σημαντικές επειδή τότε ο Heisenberg παρουσίασε δύο από τις πιο σημαντικές εργασίες του—τη γονιμοποιό εργασία του που δημοσιεύτηκε στις 18 Σεπτεμβρίου 1925 στο περιοδικό *Zeitschrift für Physik* με τίτλο «Περί της κβαντοθεωρητικής επανερμηνείας των κινηματικών και μηχανικών σχέσεων» (“On a Quantum - Theoretical Reinterpretation of Kinematic and Mechanical Relations”)⁵ και την εργασία του για την απροσδιοριστία που δημοσιεύτηκε στις 23 Μάρτιου του 1927. Το 1932 βραβεύεται με το Νόμπελ φυσικής για την προσφορά του στη φυσική και τη θεμελίωση της κβαντικής μηχανικής. Τα επιστημονικά του όμως ενδιαφέροντα

⁴ Ο τίτλος της διδακτορικής του διατριβής ήταν «Περί ευστάθειας και τύρβης υγρών ρευμάτων» (Lindley 2011, σελ. 133).

⁵ Ο αντίστοιχος γερμανικός τίτλος είναι: «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen».

δε σταματούν αφού μετά το 1930 ασχολείται με την κβαντική ηλεκτροδυναμική, την κβαντική θεωρία πεδίου, την πυρηνική φυσική και τελικά με την έρευνα για μια ενοποιημένη κβαντική θεωρία πεδίου των στοιχειωδών σωματιδίων (Camilleri 2009a, σελ. 3).

Στην παρούσα εργασία μας ενδιαφέρει, αφενός, η μελέτη των θεμάτων σχετικά με την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής που απασχόλησαν τους Bohr και Heisenberg, και αφετέρου, ο εντοπισμός διαφορετικών απόψεων μεταξύ των δύο αυτών σημαντικών επιστημόνων στα ζητήματα αυτά. Ιδιαίτερο ενδιαφέρον παρουσιάζει η περίοδος 1926 ως 1930, κατά την οποία οι δύο επιστήμονες συνεργάζονται στενά. Στο πλαίσιο αυτό θα εξετάσουμε τις αποκλίνουσες απόψεις μεταξύ Bohr και Heisenberg σε τρία βασικά θέματα: (i) στο ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού των υλικών σωματιδίων, (ii) στην έννοια της απροσδιοριστίας και η περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής των κλασικών εννοιών, και (iii) στην αρχή της συμπληρωματικότητας. Είναι γενικά παραδεκτό, ότι ο Bohr και ο Heisenberg είναι οι σημαντικότεροι εκπρόσωποι της λεγόμενης «Σχολής της Κοπεγχάγης» που διαμόρφωσε την «ορθόδοξη ερμηνεία» ή «ερμηνεία της Κοπεγχάγης», η οποία θεωρείται ως η επικρατούσα αντίληψη για το φυσικό περιεχόμενο της κβαντικής θεωρίας. Η ύπαρξη σημαντικών διαφορών ανάμεσα στις θέσεις των δύο θέτει το ερώτημα κατά πόσον είναι ακριβής η παραδεδεδγμένη άποψη ότι η λεγόμενη Σχολή της Κοπεγχάγης αποτελούσε μια συμπαγή και ομοιογενή ομάδα επιστημόνων που, με ηγέτη τον Niels Bohr, ενστερνιζόταν ταυτόσημες απόψεις σε φιλοσοφικά ζητήματα σχετικά με την κβαντική μηχανική.

Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας θα εστιάσουμε την προσοχή μας στις απόψεις που αφορούσαν τον κυματοσωματιδιακό χαρακτήρα των υλικών σωματιδίων μετά τη διατύπωση των θέσεων του de Broglie, το 1924. Ιδιαίτερα θα εστιάσουμε στην ερμηνεία του Schrödinger για την κυματοσυνάρτηση ψ , και στην κριτική της από τον Heisenberg. Θα μας απασχολήσει επίσης η οπτική με την οποία ο Heisenberg βλέπει τόσο την περίφημη πιθανοκρατική ερμηνεία του Born για την κυματοσυνάρτησης ψ , όσο και τις πρώτες εργασίες στη κβαντική θεωρία πεδίου των Jordan-Klein-Wigner, που οδηγούσαν σε αναπαράσταση των ηλεκτρονίων ως υλικά κύματα. Κατόπιν, η σύγκριση των απόψεων Bohr και Heisenberg θα μας αποκαλύψει τις κρυφές διαφωνίες τους για τον κυματοσωματιδιακό δυισμό. Η ευρέως γνωστή θέση του Bohr ότι για την πλήρη κατανόηση των φαινομένων είναι απαραίτητη η χρήση και της σωματιδιακής και της κυματικής εικόνας σε αμοιβαίως αποκλειόμενες

πειραματικές διατάξεις, θα έρθει σε αντίθεση με τη θέση του Heisenberg για την ισοδυναμία της κυματικής και σωματιδιακής περιγραφής.

Στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, θα ασχοληθούμε με τρεις διαφορετικές φάσεις από τις οποίες περνά η φιλοσοφική σκέψη του Heisenberg, σχετικά με το περιεχόμενο των εννοιών στην κβαντική φυσική. Θα αναφερθεί η πρώιμη προσπάθειά του, μετά το 1925, να δώσει καινούργιο περιεχόμενο στις έννοιες του χώρου και του χρόνου. Κατόπιν θα περιγραφεί το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ, που παρουσιάζει ο Heisenberg στο άρθρο του για την απροσδιοριστία. Μας ενδιαφέρει να τονίσουμε ότι ο Heisenberg, επηρεαζόμενος από τον οπερασιοναλιστικό ορισμό του ταυτόχρονου του Einstein, χρησιμοποιεί το πείραμα του μικροσκοπίου για να ορίσει με τον ίδιο τρόπο έννοιες όπως η θέση και η ορμή στην κβαντική μηχανική. Η επισήμανση από τον Bohr ενός λάθους στο πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ είναι ουσιώδης, γιατί θα αναδείξει το διαφορετικό τρόπο με τον οποίο αντιλαμβάνονται οι δύο τον ορισμό των εννοιών, αλλά και τη διαφορετική αντίληψη του καθενός για την κυματική και σωματιδιακή περιγραφή των φαινομένων. Στο τέλος του κεφαλαίου, θα δούμε ότι ο Heisenberg, μετά τη δημοσίευση του άρθρου του για την απροσδιοριστία, τελικά προσχωρεί στην άποψη του Bohr, ότι παρά τους περιορισμούς στη χρήση τους οι κλασικές έννοιες δεν μπορούν να αντικατασταθούν από νέες στην κβαντική φυσική.

Στη συνέχεια θα αναλύσουμε τον τρόπο που ο Heisenberg αντιλαμβάνεται την έννοια της συμπληρωματικότητας, όπως αυτή διατυπώνεται στη διάλεξη που δίνει ο Bohr στο Κόμο το 1927. Για το λόγο αυτό, θα δώσουμε έμφαση στη συμπληρωματικότητα μεταξύ αιτιακής και χωροχρονικής περιγραφής, που είναι η αρχική διατύπωση της έννοιας από τον Bohr και όχι στην περίπτωση των αμοιβαία αποκλειόμενων πειραματικών διατάξεων, που είναι η πιο συνηθισμένη εκδοχή συμπληρωματικότητας. Η συνήθης θέση, που βασίζεται σε κείμενα του ίδιου του Heisenberg, είναι ότι η άποψή του δε διαφέρει από εκείνη του Bohr. Ωστόσο, θα επισημανθεί ότι οι δύο επιστήμονες αναφέρονται με διαφορετικό τρόπο στην αιτιότητα, κάτι που ενδεχομένως οφείλεται σε παρανόηση του νοήματος της διάλεξης του Κόμο από τον Heisenberg. Επιπλέον, αποκλίσεις μεταξύ των απόψεων των δύο επιστημόνων θα εντοπιστούν στην κατανόηση της έννοιας της «κατάστασης» στην κβαντική θεωρία, αλλά και στη σαφήνεια ή ασάφεια που προσδίδει η έννοια της συμπληρωματικότητας στις περιγραφές στο μικρόκοσμο.

Ολοκληρώνοντας και αφού παραθέσουμε τα βασικά συμπεράσματα, θα προσπαθήσουμε να απαντήσουμε το ερώτημα που τέθηκε προηγουμένως για την ύπαρξη ή όχι μιας ομοιογενούς σχολής, της λεγόμενης «Σχολής της Κοπεγχάγης». Αρχικά θα αναφερθούν νεότερες και παλαιότερες απόψεις για το ζήτημα αυτό και θα δούμε πως εισήλθε στο λεξιλόγιο των φυσικών ο όρος «ερμηνεία της Κοπεγχάγης». Τέλος θα θίξουμε το «πως» και το «γιατί» δημιουργήθηκε ο «μύθος» μιας ενιαίας σχολής σκέψης και θα σχολιάσουμε αν είναι δόκιμο ή όχι να χρησιμοποιείται ακόμη η φράση «ερμηνεία της Κοπεγχάγης».

Κεφάλαιο 1. Διαφορές Bohr – Heisenberg πάνω στο ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού

Η επίσκεψη του Schrödinger στη Κοπεγχάγη, το Σεπτέμβριο του 1926, λειτούργησε ως καταλύτης για τις συζητήσεις μεταξύ Bohr και Heisenberg πάνω στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Κεντρικό θέμα των συζητήσεων αποτέλεσε, εκτός άλλων θεμάτων, το όριο στο οποίο ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να περιγραφεί ταυτόχρονα και ως κύμα και ως σωματίδιο. Μας ενδιαφέρει η εξέλιξη και η σημασία της έννοιας της *ισοδυναμίας κύματος και σωματιδίου* του Heisenberg για το ηλεκτρόνιο και με ποιον τρόπο η έννοια αυτή διαφέρει από την πιο ευρέως γνωστή άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα της κυματικής με τη σωματιδιακή εικόνα.⁶

Για τη διαμόρφωση των απόψεών του ο Heisenberg φαίνεται να επηρεάζεται από δύο ισοδύναμες προσεγγίσεις για το ηλεκτρόνιο. Η πρώτη βασίζεται στη στατιστική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης που αναπτύχθηκε από τον Born το 1926, σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο αντιμετωπίζεται ως *σωματίδιο*, αν και δεν είναι δυνατό να του αποδοθεί συγκεκριμένη τιμή για τη θέση και την ορμή σε μία δεδομένη χρονική στιγμή. Η δεύτερη βασίζεται στην προοπτική της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής που αναπτύχθηκε από τους Jordan, Klein και Wigner το 1927-1928 και σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο περιγράφεται ως ένα *κβαντισμένο πεδιακό κύμα (quantized wave-field)* σε τρισδιάστατο χώρο. Επειδή και οι δύο προσεγγίσεις αποδείχθηκαν μαθηματικά ισοδύναμες και οδήγησαν στα ίδια αποτελέσματα, ο Heisenberg φαίνεται να είναι πεπεισμένος ότι οι αναπαραστάσεις κύματος και σωματιδίου του ηλεκτρονίου ήταν απλά διαφορετικοί τρόποι περιγραφής του ίδιου πράγματος.

Ενώ ο Bohr ισχυριζόταν ότι ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν υποχρεωτικά οι δύο περιγραφές, του κύματος και του σωματιδίου, εναλλακτικά σε διαφορετικές πειραματικές διατάξεις, ο Heisenberg επέμενε ότι θα μπορούσε κανείς να ερμηνεύσει στην κβαντομηχανική το ίδιο σύνολο εξισώσεων με όρους είτε οντολογίας κύματος ή οντολογίας σωματιδίου. Η αποσαφήνιση των διαφορών μεταξύ Bohr και Heisenberg παρέχει μια βαθύτερη εικόνα των διαφορετικών απόψεων

⁶ Η αρχή της συμπληρωματικότητας του Bohr ανακοινώθηκε για πρώτη φορά από τον ίδιο στη διάλεξη του στο Κόμο (Beller 1999a σελ. 117) και θα αναφερθώ σε αυτή πιο αναλυτικά στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

διαμόρφωσαν τη λεγόμενη «ερμηνεία της Κοπεγχάγης» της κβαντικής μηχανικής (Camilleri 2009a, σελ. 63-65).

1.1. Η φυσική πραγματικότητα για το ηλεκτρόνιο: είναι κύμα ή σωματίδιο;

Το ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού εμφανίζεται ως κεντρικό θέμα στο διάστημα που ακολουθεί τη δημοσίευση των εργασιών του Schrödinger για την κυματική μηχανική. Επίσης, από τα γραπτά των Bohr και Heisenberg, φαίνεται ότι μετά την επίσκεψη Schrödinger στην Κοπεγχάγη εγείρονται ζητήματα φυσικής πραγματικότητας για το ηλεκτρόνιο. Επειδή πολλοί φυσικοί δεν συμφωνούσαν με την οπτική του δυισμού, στο συνέδριο Solvay του 1927 με θέμα «Ηλεκτρόνια και Φωτόνια», αναπτύχθηκαν διαφορετικές απόψεις, με τον Louis de Broglie⁷ να προσπαθεί να διατυπώσει μια ημικλασική ερμηνεία για το ηλεκτρόνιο αλλά τελικά να υποκύπτει στις απόψεις των Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Dirac και Jordan.⁸ Παρόλα αυτά όμως δεν ήταν ακόμη ξεκάθαρο ανάμεσα στους επιφανείς φυσικούς που υποστήριζαν τη νέα άποψη πώς να κατανοήσουν το ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού στο πλαίσιο της κβαντικής μηχανικής (ό.π., σελ. 65). Ο Heisenberg παρουσίασε, στην πιο ξεκάθαρη έκφρασή του, αυτό που ο ίδιος έβλεπε ως το πρόβλημα της πραγματικότητας που έθετε η κβαντική θεωρία, σε μια διάλεξή του στο Ντύσσελτορφ στις 23 Σεπτεμβρίου 1926. Συγκεκριμένα αναφέρει:

⁷ Σε μια προσπάθεια να γεφυρώσει την κβαντική θεωρία και την ειδική σχετικότητα, ο de Broglie, το 1924, είχε προτείνει να συνδυαστούν οι δύο τύποι που εισήγαγε ο Einstein το 1905 για την ενέργεια των κβάντων φωτός και την ενέργεια της ύλης μέσω της απλής αλλά υποθετικής σχέσης $h\nu=mc^2$. Δηλαδή, κατά τον de Broglie, σε κάθε σωματίδιο (σχετικιστικής) μάζας m μπορούσε να αποδοθεί μια συχνότητα και να συναφθεί με αυτό ένα φασικό κύμα που το χαρακτηρίζει. Ο de Broglie χρησιμοποίησε τούτη την ιδέα για να παρουσιάσει μια κυματική ερμηνεία της συνθήκης κβάντωσης του Sommerfeld, προέβλεπε δε ότι μια δέσμη κινούμενων ηλεκτρονίων με ορμή p θα εκδήλωνε κυματικά χαρακτηριστικά με μήκος κύματος που δίνεται από την έκφραση $\lambda=h/p$. Το αποτέλεσμα αυτό, που ισχύει για όλα τα είδη των σωματιδίων, και που εν συνεχεία εξήχθη και βάσει της κβαντικής μηχανικής, εισάγει το περίφημο μήκος κύματος de Broglie (Kragh 2004, σελ. 198).

⁸ Ο de Broglie πρότεινε το 1927 τη λεγόμενη «θεωρία της διπλής λύσης», η οποία στηριζόταν σε ένα διπλό σύστημα λύσεων για την εξίσωση του Schrödinger. Σύμφωνα με τη θεωρία του de Broglie, κάθε σωματίδιο μπορούσε να περιγραφεί ως ένα συγκεκριμένο δέμα ενέργειας, που αντιστοιχούσε σε μία ιδιόμορφη λύση, το οποίο καθοδηγούνταν από ένα συνεχές κύμα ψ (ένα «οδηγό κύμα») ερμηνευόμενο σε συμφωνία με την πιθανοκρατική άποψη του Bohr. Έτσι, ο de Broglie επέτυχε να διατυπώσει μια ντετερμινιστική θεωρία της μικροφυσικής χωρίς να εγκαταλείψει εντελώς τη διαίσθηση του Bohr σχετικά με την πιθανοκρατική φύση των κβαντικών διαδικασιών. Η θεωρία του de Broglie επικρίθηκε σφοδρά από τον Pauli στο Συνέδριο Solvay του 1927, και δεν την υποστήριζαν ούτε ο Einstein ούτε ο Schrödinger. Απογοητευμένος και αδυνατώντας να αντικρούσει τις αντιρρήσεις του Pauli, ο de Broglie εγκατέλειψε τη θεωρία του. Το 1928 είχε ήδη εγκαλωθεί την ερμηνεία της Κοπεγχάγης, την οποία εννοούσαν ο Born, ο Heisenberg και άλλοι, και παρέμεινε πιστός σε αυτή επί δύο δεκαετίες και πλέον (Kragh 2004, σελ. 243). Για τη μαθηματική επεξεργασία της θεωρίας της διπλής λύσης του de Broglie βλ. Jammer 1974, σελ. 44-49.

Τα ηλεκτρόνια και/ή τα άτομα δεν έχουν τέτοιο βαθμό άμεσης πραγματικότητας που αποδίδεται στα αντικείμενα καθημερινής εμπειρίας. Είναι αυτό ακριβώς το περιεχόμενο μελέτης της ατομικής φυσικής και, μαζί με αυτής, της κβαντικής μηχανικής, να διερευνήσει το είδος της φυσικής πραγματικότητας που ισχύει για τα ηλεκτρόνια και τα άτομα ...[Αν και μέχρι τώρα τα ηλεκτρόνια έχουν εννοηθεί ως σωματίδια που κινούνται σε καλώς προσδιορισμένες τροχιές στο άτομο,] οι ενδείξεις είναι ότι τα ηλεκτρόνια έχουν παρόμοιο βαθμό πραγματικότητας με αυτά των κβάντων φωτός ... Εδώ απλώς ήθελα να επισημάνω ότι η διερεύνηση αυτού του χαρακτηριστικά ασυνεχούς αντικειμένου και «το είδος της πραγματικότητας» είναι το πραγματικό πρόβλημα της ατομικής φυσικής και επομένως το θέμα όλων των συζητήσεων για την κβαντική μηχανική (ό.π., σελ. 66, η έμφαση προστέθηκε).

Η άποψη του Bohr είναι ότι ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν υποχρεωτικά οι δύο περιγραφές, του κύματος και του σωματιδίου, εναλλακτικά σε διαφορετικές πειραματικές διατάξεις.

Η άποψη του Schrödinger, μετά την άνοιξη του 1926,⁹ ήταν ότι μπορούμε να περιγράψουμε το ηλεκτρόνιο ως υλικό κύμα που εκτείνεται στο χώρο γύρω από τον πυρήνα. Ο Schrödinger ήλπιζε, επίσης, να κατασκευάσει κυματοπακέτα, δηλαδή υπέρθεση κυμάτων με διαφορετικές συχνότητες, τα οποία θα κινούνται σε Κεπλεριανές τροχιές. Με τον τρόπο αυτό ήλπιζε ότι θα αναπαριστούσε τα ηλεκτρόνια που κινούνται μέσα στο άτομο. Ωστόσο, ο Schrödinger συνειδητοποίησε ότι μια τέτοια άμεσα διαισθητική αναπαράσταση δε θα ήταν εφικτή (Beller 1999a σελ. 70). Μάλιστα σε μία εργασία του, αναγνώρισε ότι

Υπάρχει ακόμη μία ελπίδα ότι μπορούμε να αναπαραστήσουμε την εξίσωση κύματος για την ψ εξίσου καλά ως συνέπεια των εξισώσεων Maxwell-Lorentz, δηλαδή, ως εξίσωση συνέχειας για τον ηλεκτρισμό. Η δυσκολία σε σχέση με το πρόβλημα πολλών ηλεκτρονίων, που κυρίως έγκειται στο γεγονός ότι η ψ είναι μια συνάρτηση σε ένα μαθηματικό χώρο, όχι στον πραγματικό χώρο, πρέπει να αναφερθεί (Schrödinger 1928, σελ. 60, έμφαση στο πρωτότυπο).

Σε συνέχεια αυτού ερμήνευσε την κυματοσυνάρτηση ψ ως μια συνάρτηση βάρους και δήλωσε ξεκάθαρα πως η κυματοσυνάρτηση ψ «δεν μπορεί και δεν πρέπει να

⁹ Την άνοιξη του 1926 ο Schrödinger απέδειξε ότι κάθε εξίσωση της κυματομηχανικής μπορούσε να μεταφραστεί σε μια αντίστοιχη εξίσωση της κβαντικής μηχανικής ή της μηχανικής των μητρών, του Heisenberg, και αντίστροφα (Kragh 2004, σελ. 200). Ωστόσο άποψη αυτή έχει δεχτεί κριτική τα τελευταία χρόνια και έχει θεωρηθεί είτε ως ένας από του μύθους της κβαντικής μηχανικής, ή ότι στις προθέσεις του Schrödinger δεν ήταν να εκφράσει την ισοδυναμία της μητρομηχανικής και της κυματομηχανικής, αλλά να δείξει ότι οι δύο θεωρίες παράγουν ισοδύναμα αποτελέσματα για τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου του Bohr (Camilleri 2009a, σελ. 41).

ερμηνευτεί απευθείας με όρους τρισδιάστατου χώρου — όσο και αν το πρόβλημα του ενός ηλεκτρονίου μας παραπλανεί στο σημείο αυτό» (Beller 1999a, σελ. 70). Η άποψη του Schrödinger προέβλεπε ότι η κυματοσυνάρτηση ψ αποτελούσε κάποιου είδους συνάρτηση ηλεκτρικού βάρους, με την πυκνότητα φορτίου να παριστάνεται από το $e\psi\psi^*$ (Kragh 2004, σελ. 200). Ο ίδιος αναφέρει ότι «το φορτίο του ηλεκτρονίου δεν είναι συγκεντρωμένο σε ένα σημείο αλλά κατανέμεται σε όλο το χώρο, ανάλογο προς την ποσότητα $\psi\psi^*$ » (Schrödinger 1926, σελ. 1066).

Ο Heisenberg “βλέπει” μια αναλογία μεταξύ των ηλεκτρονίων και των κβάντων φωτός του Einstein, δηλαδή ότι όπως υπάρχουν φαινόμενα στα οποία δε μπορούμε να καθορίσουμε τροχιές για τα φωτόνια το ίδιο συμβαίνει και για τα ηλεκτρόνια στο εσωτερικό του ατόμου. Σχετικά με την άποψη του Schrödinger, ο Heisenberg πιστεύει ότι δεν αρκεί μια θεωρία υλικών κυμάτων (σαν αυτή του Schrödinger) για την πλήρη περιγραφή των φαινομένων. Σε ένα άρθρο του για το πρόβλημα των πολλών σωμάτων, τον Ιούνιο του 1926, εξηγεί την κριτική του για την κυματική ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας και εφιστά την προσοχή στην αναλογία μεταξύ φωτός και ύλης:

Ακόμη κι αν μπορούσε να αναπτυχθεί μια συνεπής κυματική θεωρία της ύλης στον συνήθη τρισδιάστατο χώρο, που αντιστοιχεί στο πρόγραμμα του Einstein και του de Broglie, αυτό δύσκολα θα μπορούσε να δώσει μια εξαντλητική περιγραφή των ατομικών διεργασιών από την άποψη των γνωστών μας χωροχρονικών εννοιών. Ακριβώς ενόψει της προκύπτουσας στενής αναλογίας μεταξύ φωτός και ύλης, κάποιος τείνει να πιστεύει ότι μια τέτοια θεωρία κυμάτων της ύλης δεν αποτελεί μια πλήρη περιγραφή των ατομικών μας εμπειριών περισσότερο απ’ ότι μια κυματική θεωρία φωτός παρέχει μια πλήρη ερμηνεία των οπτικών εμπειριών (ό.π., σελ. 67)

Όπως θα φανεί παρακάτω, μέχρι το 1928 ο Heisenberg συνειδητοποίησε ότι η ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής θα μπορούσε να επιτευχθεί με δύο *ξεχωριστούς* τρόπους, ο ένας τρόπος να έχει ως θεμελιώδη έννοια το «σωματίδιο» και ο άλλος το «κύμα» (ό.π., σελ. 65-68).

1.2. Τα κύματα πιθανότητας και η κβαντική μηχανική των σωματιδίων

Η κριτική του Heisenberg απέναντι στην κυματική θεωρία της ύλης του Schrödinger

το 1926, εδράζεται κυρίως στο γεγονός ότι η κυματοσυνάρτηση δεν αντιπροσωπεύει γενικά ένα κυματικό πεδίο σε ένα συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο αλλά περισσότερο ένα σύστημα σε έναν n -διάστατο αφηρημένο μαθηματικό χώρο όπου το n αντιπροσωπεύει τους βαθμούς ελευθερίας. Μόνο στην απλή περίπτωση του ατόμου του υδρογόνου, το οποίο έχει μόνο ένα ηλεκτρόνιο, μπορεί να ερμηνευτεί η κυματική εξίσωση σε τρισδιάστατο χώρο, αν αγνοηθεί το σπιν του ηλεκτρονίου (Camilleri 2006, σελ. 302).¹⁰ Θεωρεί επίσης ότι την περίοδο εκείνη κανείς δεν είχε δείξει μια σαφή αναλογία μεταξύ των κυμάτων του Schrödinger και των υλικών κυμάτων του de Broglie. Δηλαδή για τον Heisenberg η κυματική μηχανική δεν μπορεί να οδηγήσει σε αναπαράσταση του ηλεκτρονίου ως υλικού κύματος (Camilleri 2009a, σελ. 68). Στο άρθρο που έγραψε τον Ιούνιο του 1926, σχολιάζει: «απ' όσο μπορώ να καταλάβω, η μέθοδος του Schrödinger δεν αναπαριστά μια συνεπή κυματική θεωρία της ύλης με την έννοια αυτής του de Broglie» (ό.π., σελ. 68). Σε μια διάλεξή του για την κβαντική μηχανική τον Σεπτέμβριο του 1926, συνεχίζοντας την κριτική του στην κυματική μηχανική του Schrödinger, εστιάζει στη σύγκρισή της με τη θεωρία του de Broglie:

Είναι δυνατόν να προσδιοριστεί μια εξίσωση κύματος στο χώρο συντεταγμένων $3n$ διαστάσεων για το πρόβλημα της κίνησης n σωματιδίων, που στη συνέχεια αντικαθιστά πλήρως το κβαντομηχανικό πρόβλημα μαθηματικά ... Μέχρι τώρα, κανείς δεν κατάφερε γενικά να συνδέσει απευθείας το κύμα του Schrödinger στο χώρο των φάσεων με το κύμα de Broglie σε συνηθισμένο [τρειςδιάστατο] χώρο, το οποίο τότε θα έπρεπε να είναι ανάλογο του φωτός. Επομένως, το κύμα σε ένα q -χώρο [μαθηματικό] έχει μέχρι τώρα μόνο φορμαλιστικό νόημα (ό.π., σελ. 68).

¹⁰ Ένα άλλο σημείο κριτικής του Heisenberg απέναντι στην κυματική θεωρία του Schrödinger ήταν ότι δεν είχε τη δυνατότητα να εξηγήσει συγκεκριμένα πειραματικά φαινόμενα όπως ο νόμος της ακτινοβολίας του Planck και η σκέδαση Compton. Ο Heisenberg γράφει στον Pauli, στις 28 Ιουλίου 1926, μετά από μια δημόσια διαφωνία του με τον Schrödinger: «Ο Schrödinger ρίχνει στη θάλασσα καθετί που έχει κβαντικό χαρακτήρα: ειδικότερα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τις συγκρούσεις Franck, το φαινόμενο Stern–Gerlach κλπ. Δεν είναι δύσκολο έπειτα να θεμελιώσεις μια θεωρία. Πάντως δε συμφωνεί με την εμπειρία» (Camilleri 2009a, σελ. 42). Για περισσότερες λεπτομέρειες για την κριτική του Heisenberg στην κυματική θεωρία του Schrödinger βλ. Camilleri 2009a, σελ. 36-48. Στις διαλέξεις που έδωσε στο Σικάγο το 1929 ο Heisenberg αναφέρεται σε ορισμένα πειράματα που επιβεβαιώνουν «τις πιο σημαντικές έννοιες της ατομικής φυσικής» (Heisenberg 1930, σελ. 4). Μία περίπτωση είναι και «τα πειράματα Franck και Hertz» τα αποτελέσματα των οποίων δημοσιεύτηκαν το 1913. Ο Heisenberg (1930, σελ. 9) λέει ότι «μια δέσμη βραδέως κινούμενων ηλεκτρονίων . . . περνά μέσα από αέριο και το ρεύμα ηλεκτρονίων. . . αλλάζει ασυνεχώς σε συγκεκριμένες τιμές της ταχύτητας (ενέργειας)». Αυτό συνιστά απόδειξη ότι «τα άτομα στο αέριο μπορούν να λαμβάνουν μόνο διακριτές τιμές ενέργειας (αξίωμα του Bohr)» (ό.π., σελ. 9). Πρόκειται για το γνωστό πείραμα που θεωρείται ως το αντίστροφο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Ο Heisenberg φαίνεται να προτιμά τη σωματιδιακή αναπαράσταση για την κβαντική μηχανική παρά την κυματική που προτείνει ο Schrödinger. Στην εργασία του Ιουνίου του 1926 αναφέρει ότι «μια από τις σημαντικότερες πλευρές της κβαντικής μηχανικής είναι ότι βασίζεται στη σωματιδιακή αναπαράσταση της ύλης» (ό.π., σελ. 68). Σε αυτή την κατεύθυνση έρχεται να βοηθήσει τον Heisenberg η ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης από τον Max Born τον Ιούνιο και Ιούλιο του 1926, ο οποίος, σε δύο εργασίες του με θέμα τη σκέδαση¹¹ εισήγαγε τη στατιστική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης. Στις εργασίες του αυτές ο Born έδωσε μια θεωρητική αντιμετώπιση του προβλήματος της σύγκρουσης του ηλεκτρονίου με ένα άτομο χρησιμοποιώντας την κυματοσυνάρτηση ψ του Schrödinger. Ο Born ήταν ικανός να αναπαραστήσει τη σύγκρουση με σκεδαζόμενα κύματα, αλλά ερμήνευσε το τετράγωνο του πλάτους του σκεδαζόμενου κύματος ως την πιθανότητα να βρούμε το ηλεκτρόνιο σε μία διεύθυνση εκτροπής (ό.π., σελ.69). Όπως φαίνεται και από την προηγούμενη ενότητα (1.1), το πρόβλημα της κυματικής μηχανικής του Schrödinger ήταν ότι δεν ήταν σαφής η σημασία της κυματοσυνάρτησης. Πρόβλημα που παρόλο και ο ίδιος ο Schrödinger προσπάθησε, απέτυχε να επιλύσει. Η αινιγματική φύση της κυματοσυνάρτησης ψ , αποτυπώνεται σε ένα τετράστιχο του Eric Hückel, νεαρού συνεργάτη του Debye:

Ο Erwin με το δικό του ψ ,
μπορεί να κάνει αρκετά.
Ένα όμως δεν έχει ακόμη δει,
τι σημαίνει αυτό πραγματικά (Segrè 1997b, σελ. 191-192).

Το πρόβλημα αυτό ήρθε να το λύσει ο Max Born με την περίφημη στατιστική ή πιθανοκρατική ερμηνεία του, ότι δηλαδή αν ψ είναι η κυματοσυνάρτηση και ψ^* η συζυγής της τότε το $\psi(\mathbf{r})\psi^*(\mathbf{r})dV$ παριστά την πιθανότητα με την οποία αναμένεται ένα σωματίδιο που βρίσκεται στην κατάσταση ψ να κείται εντός του στοιχείου όγκου dV γύρω από τη θέση $\mathbf{r}$. (Kragh 2004, σελ.. 200). Μια περισσότερο θετικιστική επανερμηνεία της ιδέας αυτής θα ήταν ότι η κυματοσυνάρτηση ψ δεν υποδεικνύει την

¹¹Οι εργασίες του Born ήταν:

Born, M. (1926a). Zur Quantenmechanik der Stossvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 37, 863–867.
Born, M. (1926b). Quantenmechanik der Stossvorgänge. *Zeitschrift für Physik*, 38, 803–827.

πιθανότητα να είναι το σωματίδιο σε μια συγκεκριμένη θέση, αλλά την πιθανότητα να είναι εκεί αν προσπαθήσει κανείς να το εντοπίσει (Powers 1995, σελ. 183-184).

Ο Schrödinger είχε προσπαθήσει να περιγράψει την κλασική κίνηση ενός σωματιδίου θεωρώντας ότι «τα υλικά σημεία αποτελούνται από, ή δεν είναι τίποτε άλλο παρά, κυματικά συστήματα» (Schrödinger 1926, σελ. 1049). Όπως ανέφερα και προηγουμένως, είχε προσπαθήσει να αναπαραστήσει το ηλεκτρόνιο με ένα κυματοπακέτο το οποίο παραμένει εντοπισμένο κατά την κίνησή του στο χώρο. Όπως όμως επεσήμανε και ο Lorentz, σε αλληλογραφία του με τον Schrödinger, σύμφωνα με την κλασική θεωρία «ένα κυματοπακέτο δεν μπορεί ποτέ να είναι μαζί και να παραμένει εντοπισμένο σε ένα μικρό όγκο σε μια μακρά διαδρομή» (Camilleri 2009a, σελ. 70). Τα πειραματικά δεδομένα επίσης, από ένα θάλαμο νεφώσεως Wilson έδειχναν αντίθετα ότι όντως τα ηλεκτρόνια παρέμεναν εντοπισμένα κατά τη διάρκεια της κίνησής τους. Όπως ο Lorentz εξήγησε στον Schrödinger, το κυματοπακέτο του θα υφίστατο διασπορά κατά τη διάδοσή του, άρα δε μπορούσε να ήταν συμβατό ούτε με τα πειραματικά αποτελέσματα ούτε με τις θεωρητικές προβλέψεις. Ο Schrödinger αντέτεινε ότι στην περίπτωση του αρμονικού ταλαντωτή το κυματοπακέτο θα έμενε ενωμένο. Αυτή όμως ήταν μία και μοναδική περίπτωση, όπως έδειξε ο Heisenberg στην εργασία του για την αρχή της αβεβαιότητας (ό.π., σελ. 70 και Heisenberg [1927] 1983, σελ. 74-75).

Οπλισμένος με την πιθανοκρατική ερμηνεία του Born για την κυματοσυνάρτηση ψ , ο Heisenberg μπορούσε να δείξει ότι για καταστάσεις υψηλής ενέργειας του ατόμου το κυματοπακέτο που αναπαριστά την κίνηση του ηλεκτρονίου αναπόφευκτα «απλώνεται» στο χώρο στην τροχιά του κατά την περιοδική κίνηση γύρω από τον ατομικό πυρήνα. Αλλά, όπως εξήγησε, το κυματοπακέτο αναπαριστά την πιθανότητα εύρεσης του ηλεκτρονίου σε ένα συγκεκριμένο σημείο στο χώρο: «όλες οι θέσεις [του σωματιδίου] θεωρούνται ως πιθανές (με πιθανότητα που επιδέχεται υπολογισμού) που βρίσκονται εντός των ορίων του εκτεταμένου κυματοπακέτου» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 74). Για το λόγο αυτό το κυματοπακέτο δεν πρέπει να θεωρηθεί ότι συνιστά ένα σωματίδιο, αλλά πρέπει να κατανοηθεί ότι αναπαριστά μια περιοχή του χώρου εντός της οποίας μπορεί το σωματίδιο να βρίσκεται εντοπισμένο. Με άλλα λόγια η επέκταση του κυματοπακέτου στο χώρο αναπαριστά πλέον την αβεβαιότητα, ή καλύτερα την απροσδιοριστία, της θέσης του ηλεκτρονίου. Έχει διατυπωθεί η άποψη πως σύμφωνα με την ερμηνεία του

Heisenberg, το «κυματοπακέτο» του Schrödinger μετατράπηκε επανερμηνευόμενο σε «πακέτο πιθανότητας» (ό.π., σελ. 70).

Ο Heisenberg έβγαλε το συμπέρασμα ότι το «πακέτο πιθανότητας» διασπείρεται κατά την τροχιά του ηλεκτρονίου, μέχρι το ηλεκτρόνιο να αλληλεπιδράσει με κάποια συσκευή μέτρησης που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό της θέσης του. Ο προσδιορισμός της θέσης του ηλεκτρονίου «ανάγει το κυματοπακέτο στην αρχική του έκταση» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 74). Στις συζητήσεις που έγιναν στο συνέδριο του Κόμο το 1927, ο Heisenberg και πάλι τόνισε την «αναγωγή του κυματοπακέτου» κατά την περιγραφή της κίνησης του ηλεκτρονίου:

Αυτό το κυματοπακέτο μετακινείται μακριά όχι μόνο σε ευθεία γραμμή στο χώρο, αλλά επίσης εξαπλώνεται με την πάροδο του χρόνου. Για μια νέα παρατήρηση, το κυματοπακέτο δίνει την *πιθανότητα* να βρεθεί το ηλεκτρόνιο σε συγκεκριμένη θέση. Η ίδια η νέα παρατήρηση, ωστόσο, μειώνει το πακέτο στο αρχικό του μέγεθος Δq , πράγμα το οποίο κάνει μια επιλογή από ένα σύνολο δυνατοτήτων και έτσι μειώνει τις δυνατότητες για το μέλλον. Αυτή η συνεχής αλλαγή της κυματικής εικόνας σε μια παρατήρηση μου φαίνεται ένα βασικό χαρακτηριστικό της κβαντικής μηχανικής. Κάποιος πρέπει απλώς να εφαρμόσει στην πράξη την έννοια των «*κυμάτων πιθανότητας*». Τα κύματα δεν έχουν άμεση πραγματικότητα, του είδους που είχαμε προηγουμένως αποδώσει στα κύματα της θεωρίας του Maxwell. Πρέπει να τα ερμηνεύσουμε ως κύματα πιθανότητας και ως εκ τούτου να αναμένουμε μια ξαφνική αλλαγή σε κάθε παρατήρηση (Camilleri 2009a, σελ. 71).

Επίσης, και στο πέμπτο συνέδριο Solvay τον Οκτώβριο του 1927, ο Born και ο Heisenberg εξήγησαν πως το πρόβλημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού μπορεί να επιλυθεί από «την άποψη της στατιστικής αντίληψης της κβαντικής μηχανικής». Όπως δήλωσαν: «Τα κύματα είναι κύματα πιθανότητας» (ό.π., σελ. 71).

Όπως εξήγησε αργότερα ο Heisenberg, ενώ ένα ηλεκτρόνιο μόνο μπορεί να περιγραφεί από ένα κυματοπακέτο (πιθανότητας) σε τρεις διαστάσεις, γενικά η κυματική εξίσωση της κβαντικής μηχανικής περιγράφει ένα σύστημα σε αφηρημένο πολυδιάστατο μαθηματικό χώρο, όχι στον απλό τρισδιάστατο χώρο. Συγκεκριμένα αναφέρει:

Αργότερα, όταν θεμελιώθηκε το μαθηματικό πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας, ο Born συνέλαβε την ιδέα του κύματος πιθανότητας και έδωσε έναν σαφή ορισμό της μαθηματικής ποσότητας σύμφωνα με το φορμαλισμό, δηλαδή ότι έπρεπε να ερμηνευτεί ως το κύμα

πιθανότητας. Δεν ήταν ένα τρισδιάστατο κύμα όπως τα ελαστικά ή ραδιοκύματα, αλλά ένα κύμα στον πολυδιάστατο μαθηματικό χώρο, και ως εκ τούτου μια μάλλον αφηρημένη μαθηματική ποσότητα. (Heisenberg 1958a, σελ. 42-43, η έμφαση προστέθηκε).

Η ερμηνεία του Born βοηθά τον Heisenberg να ενισχύσει τα επιχειρήματά του υπέρ της σωματιδιακής εικόνας στη κβαντική μηχανική, παρά τις αντιδράσεις των Schrödinger, Planck και von Laue. Οι τελευταίοι, σε αντίθεση με τον Heisenberg, ισχυρίζονταν ότι δε μπορεί να περιγραφεί το ηλεκτρόνιο είτε ως σωματίδιο ή ως ένα υλικό σημείο τη στιγμή που δε μπορεί να του αποδοθεί μια καλώς ορισμένη τροχιά (Camilleri 2009a, σελ. 72). Το 1931 ο Schrödinger έθιξε το ζήτημα αυτό:

Με λίγη σκέψη θα γινόταν σαφές ότι το αντικείμενο που αναφέρεται στην κβαντική μηχανική εν προκειμένω δεν είναι ένα υλικό σημείο με την παλιά έννοια της λέξης. Ένα υλικό σημείο με αυτή την έννοια είναι ένα αντικείμενο που βρίσκεται σε ένα δεδομένο μέρος ... Και αν έχει μια δεδομένη θέση σε οποιαδήποτε δεδομένη [χρονική] στιγμή, τότε σίγουρα πρέπει να έχει μια ορισμένη τροχιά, και επίσης, όπως θα μπορούσε να υποτεθεί, μια ορισμένη ταχύτητα. Ωστόσο, ενδεχομένως, η κβαντική μηχανική απαγορεύει την ιδέα μιας καλά καθορισμένης τροχιάς ... Έχουμε πάψει να πιστεύουμε στις κυκλικές και ελλειπτικές τροχιές μέσα στο άτομο. Το να μιλάμε για ηλεκτρόνια ... ως υλικά σημεία και ακόμα να αρνούμαστε ότι έχουν καθορισμένες τροχιές εμφανίζεται τόσο αντιφατικό όσο και παράλογο (ό.π., σελ. 72, η έμφαση προστέθηκε).

Όπως εξήγησε αργότερα ο Schrödinger, «σε μένα το να εγκαταλείψω την τροχιά φαίνεται σα να εγκαταλείπω το σωματίδιο» (ό.π., σελ. 72). Ο Born και ο Heisenberg, ωστόσο, ήταν κατηγορηματικοί ότι η στατιστική ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης ψ είχε φέρει την ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής σε ικανοποιητικό σημείο. Στην κοινή τους εργασία στο συνέδριο Solvay το 1927, δήλωσαν: «Πιστεύουμε ότι η μηχανική των κβάντων είναι μια πλήρης θεωρία, της οποίας οι θεμελιώδεις φυσικές και μαθηματικές υποθέσεις δεν επιδέχονται τροποποιήσεις» (ό.π., σελ. 72). Ο Heisenberg διατεινόταν ότι αν και στο ηλεκτρόνιο δεν μπορούσε να αποδοθεί μια καλά καθορισμένη τροχιά, ήταν ακόμα δυνατό να μιλήσουμε για το ηλεκτρόνιο ως ένα «σωματίδιο», του οποίου η κίνηση περιγραφόταν από τους νόμους της κβαντικής μηχανικής.

1.3. Τα κβαντισμένα υλικά κύματα και η ισοδυναμία των εικόνων κύματος και σωματιδίου

Το 1927 είναι η χρονιά που ο Paul Dirac προτείνει τη κβάντωση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου, που αργότερα ονομάστηκε «δεύτερη κβάντωση» ή καλύτερα «κβαντική θεωρία πεδίου». Η εργασία του που παρουσιάστηκε από τον Bohr στην Κοπεγχάγη, το Φεβρουάριο του 1927, είχε τίτλο «Η Κβαντική Θεωρία της Εκπομπής και Απορρόφησης της Ακτινοβολίας». Η εργασία αυτή επρόκειτο να έχει τεράστιο αντίκτυπο στην ανάπτυξη της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής. Ο Dirac πρότεινε μια μέθοδο για την κβάντωση του ηλεκτρομαγνητικού κύματος (Camilleri 2009a, σελ. 73). Αντιμετωπίζοντας το φωτεινό κύμα ως «κβαντισμένο κύμα», ο Dirac ήταν σε θέση να δείξει ότι μπορούσε κανείς να οδηγηθεί στα ίδια αποτελέσματα που θα μπορούσαν να ληφθούν με τη συνηθισμένη «αντιμετώπιση των κβάντων φωτός» (Dirac 1927, σελ. 265). Ο ίδιος ο Dirac επεσήμανε ότι με την κβάντωση των κυμάτων ήταν τώρα δυνατό να καταλάβουμε πώς «η κυματική θεώρηση είναι συνεπής με τη θεώρηση των κβάντων φωτός» (ό.π., σελ.263). Μια σημαντική ανακάλυψη συνέβη έτσι στην κατανόηση του κυματοσωματιδιακού δυισμού του φωτός (Camilleri 2009a, σελ. 73). Η εργασία αυτή του Dirac είχε γραφεί κατά το τέλος της παραμονής του στο ινστιτούτο του Bohr στην Κοπεγχάγη, δηλαδή τον Ιανουάριο και Φεβρουάριο του 1927 (Kragh 1990, σελ. 120). Στο τέλος της εργασίας του μάλιστα, ο Dirac (1927, σελ. 265) ευχαριστεί τον Niels Bohr για το ενδιαφέρον που έδειξε για τη δουλειά του Dirac αλλά και για τις φιλικές συζητήσεις σχετικά με αυτή. Ωστόσο, η θεωρία του Dirac του Φεβρουαρίου 1927 δεν ήταν το ντεμπούτο του στην κβαντική ηλεκτροδυναμική. Η θεωρία αυτή θα πρέπει μάλλον να θεωρηθεί ως η ανεπτυγμένη εκδοχή μιας πιο προκαταρκτικής θεωρίας που πάει πίσω στο καλοκαίρι του 1926 (Kragh 1990, σελ. 120).

Η μέθοδος του Dirac προσέφερε το έναυσμα για μια νέα πρόοδο στην ανάπτυξη μιας κυματικής θεωρίας της ύλης. Το καλοκαίρι του 1927 ο Jordan οικειοποιήθηκε τη μέθοδο της δεύτερης κβάντωσης του Dirac και την εφάρμοσε στην κυματική εξίσωση για πολλαπλά ηλεκτρόνια σε τρισδιάστατο χώρο. Τον Ιούλιο έγραψε στον Schrödinger, αναφέροντας ότι με την κβάντωση του κυματικού πεδίου των ηλεκτρονίων «θα μπορούσε να προκύψει μια πλήρης θεωρία του φωτός και της ύλης στην οποία, ως βασικό συστατικό, αυτό το πεδιακό κύμα λειτουργεί με ένα κβαντικό μη κλασικό τρόπο» (Camilleri 2009a, σελ. 73). Ο Jordan δημοσίευσε την

ιδέα αυτή σε μια εργασία του για τον Ιούλιο του 1927, στην οποία εξήγησε ότι τώρα είναι δυνατόν να αναπαραστήσουμε τα ηλεκτρόνια, ανάλογα με τα κβάντα φωτός, «με κβαντισμένα κύματα στον συμβατικό τρισδιάστατο χώρο» (ό.π., σελ. 73, έμφαση στο πρωτότυπο). Ο Jordan κατέληξε ως εξής:

μπορεί να αναπτυχθεί μια κβαντομηχανική κυματική θεωρία της ύλης που αναπαριστά τα ηλεκτρόνια με κβαντισμένα κύματα στο συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο. Η φυσική διατύπωση της κβαντικής θεωρίας των ηλεκτρονίων θα επιτευχθεί με τη σύλληψη του φωτός και της ύλης ως αλληλεπιδρώντα κύματα στον τρισδιάστατο χώρο. Το βασικό γεγονός της θεωρίας των ηλεκτρονίων, η ύπαρξη διακριτών ηλεκτρικών σωματιδίων, εμφανίζεται στο πλαίσιο αυτό ως χαρακτηριστικό των κβαντικών φαινομένων, δηλαδή να είναι ισοδύναμο με το γεγονός ότι τα υλικά κύματα εμφανίζονται μόνο σε διακεκριμένες κβαντικές καταστάσεις (ό.π., σελ. 74).

Τον Οκτώβριο του 1927, ο Jordan και ο Klein δημοσίευσαν ένα σημαντικό άρθρο στο οποίο ήταν σε θέση να εξαγάγουν την κυματική εξίσωση για περισσότερα από ένα σωματίδια, χρησιμοποιώντας τη μέθοδο κβάντωσης του Dirac, ξεκινώντας από μια κλασική κυματική εξίσωση για τα ηλεκτρόνια στον τρισδιάστατο χώρο. Τον Ιανουάριο του 1928, ο Jordan και ο Wigner ανέπτυξαν περαιτέρω την ιδέα των κβαντισμένων υλικών κυμάτων. Τώρα ήταν δυνατή η μαθηματική διατύπωση της αλληλεπίδρασης του πεδιακού κύματος των ηλεκτρονίων με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο με έναν τρόπο που «αποφεύγει την αναπαράσταση των κυμάτων στον αφηρημένο [πολυδιάστατο] χώρο συντεταγμένων, υπέρ μιας αναπαράστασης με κβαντικά κύματα στο συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο» (ό.π., σελ. 74). Επίσης ήταν δυνατή μια εξήγηση για «την ύπαρξη υλικών σωματιδίων ... παρόμοια με την εξήγηση του Dirac για την ύπαρξη κβάντων φωτός, δηλαδή μέσω της κβάντωσης των κυμάτων» (ό.π., σελ. 74).

Αυτή η κρίσιμη ανακάλυψη στην κβαντική θεωρία του ηλεκτρονίου άνοιξε το δρόμο για μια μετάβαση από την κυματική εξίσωση του Schrödinger σε μαθηματικό χώρο, σε μια κυματική θεωρία ύλης στον τρισδιάστατο χώρο. Ωστόσο, αυτά τα «κύματα» δεν έπρεπε να γίνουν κατανοητά με την κλασική έννοια. Ακριβώς όπως ο Heisenberg είχε κβαντώσει την κλασική εξίσωση κίνησης για ένα σωματίδιο το 1925 (με αποτέλεσμα το σωματίδιο να μην έχει πλέον μια καλά καθορισμένη θέση ή ορμή), έτσι ο Jordan κβάντωσε την κλασική κυματική εξίσωση (με αποτέλεσμα το πλάτος του κύματος να μη λαμβάνει πλέον μια καλά καθορισμένη τιμή). Ο Heisenberg

διατύπωσε το ακόλουθο συμπέρασμα το 1929: «προκύπτει ότι εξακολουθούν να υπάρχουν *σχέσεις απροσδιοριστίας* για την κυματική εικόνα, που μπορούν να εξαχθούν με μαθηματικό τρόπο από τις μεταθετικές σχέσεις του πλάτους των κυμάτων» (ό.π., σελ. 74, έμφαση στο πρωτότυπο).

Αν και ο Heisenberg είχε απορρίψει το 1926 την πιθανότητα μιας κλασικής κυματικής ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής σύμφωνα με τις απόψεις του de Broglie και του Schrödinger, ανταποκρίθηκε με ενθουσιασμό στη θεωρία των Klein-Jordan για τα κβαντισμένα υλικά κύματα. Έχουμε ήδη δει ότι μία από τις κύριες αντιρρήσεις του Heisenberg για την αρχική κυματική ερμηνεία του Schrödinger ήταν ότι η κυματική εξίσωση παρείχε μόνο μια αναπαράσταση σε μαθηματικό χώρο πολλών διαστάσεων. Όπως τόνισε επανειλημμένα ο Heisenberg, δεν ήταν ακόμα δυνατό να δοθεί μια κυματική ερμηνεία όπως του de Broglie σε συνηθισμένο τρισδιάστατο χώρο (ό.π., σελ. 74-75).

Σε συζητήσεις που είχε ο Heisenberg με τον Pauli στις αρχές του 1927 είχε διαβλέψει τη δυνατότητα ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής μέσω κβαντισμένων υλικών κυμάτων. Μόνο όμως με τις εργασίες των Jordan – Klein και Jordan – Wigner το 1927 και 1928 έγινε πραγματικότητα η δυνατότητα αυτή. Όπως εξήγησε ο Heisenberg στον Kuhn σε μία συνέντευξή του το 1963, «ήμουν σε κάποιο βαθμό ενθουσιασμένος από την ιδέα της κβάντωσης των κυμάτων του Schrödinger, αλλά αυτό συνέβαινε εξαιτίας [της επίλυσης] του προβλήματος της ερμηνείας» (ό.π., σελ. 75). Γι' αυτόν τον λόγο, ο Heisenberg ισχυρίστηκε ότι «βρήκα εξαιρετικά ικανοποιητικές αυτές τις ιδιαίτερες εργασίες των Klein-Jordan-Wigner» (ό.π., σελ. 75). Ειδικότερα, το άρθρο των Jordan - Klein θεωρήθηκε «ένα ασυνήθιστα σημαντικό έργο», όχι μόνο γιατί άνοιξε το δρόμο για την κβαντική ηλεκτροδυναμική, αλλά και επειδή έριξε νέο φως στον κυματοσωματιδιακό δυισμό της ύλης (ό.π., σελ. 75). Με τα παραπάνω αποσπάσματα ο Heisenberg θέλει να πει ότι το πρόβλημα της ερμηνείας της κυματοσυνάρτησης ψ βρίσκει λύση με τη κβάντωση της ψ από τους Klein-Jordan-Wigner.

Υπήρχε, για τον Heisenberg, μια σημαντική διαφορά μεταξύ των κυμάτων του Schrödinger και των κβαντισμένων κυμάτων των Jordan, Klein και Wigner. Η κυματική εξίσωση του Schrödinger, θα μπορούσε να ερμηνευτεί μόνο ως ένα κύμα πιθανότητας σε έναν αφηρημένο μαθηματικό χώρο και επομένως προϋπέθετε την ύπαρξη σωματιδίων. Από την άλλη πλευρά, η κυματική θεωρία της ύλης που αναπτύχθηκε από τον Jordan, τον Klein και τον Wigner δεν έπρεπε να ερμηνευτεί

κατ' αυτόν τον τρόπο. Εδώ τα πλάτη των κυμάτων δεν έπρεπε να ερμηνευτούν ως πλάτη πιθανοτήτων, αλλά μάλλον ως να αντιπροσωπεύουν «πραγματικά» πεδία υλικών κυμάτων στον τρισδιάστατο χώρο. Έτσι, από την άποψη της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής των Jordan, Klein και Wigner, η έννοια του κύματος ήταν, οντολογικά μιλώντας, πιο θεμελιώδης από την έννοια του σωματιδίου (ό.π., σελ.75).

Στο βιβλίο του *Φυσική και Φιλοσοφία*,¹² που συχνά αναφέρεται και ως διαλέξεις Gifford,¹³ ο Heisenberg εξηγεί:

Ήδη από το 1928, ο Jordan, ο Klein και ο Wigner έδειξαν ότι ο μαθηματικός φορμαλισμός μπορεί να ερμηνευθεί όχι μόνο ως κβάντωση της σωματιδιακής κίνησης αλλά και ως κβάντωση τρισδιάστατων υλικών κυμάτων. Επομένως, δεν υπάρχει κανένας λόγος να θεωρήσουμε ότι τα υλικά κύματα είναι λιγότερο πραγματικά από τα σωματίδια ... Μεταξύ των εναπομεινάντων αντιπάλων της αποκαλούμενης «ορθόδοξης» ερμηνείας της κβαντικής θεωρίας, ο Schrödinger έχει μια εξαιρετική θέση στο βαθμό που θα μπορούσε να αποδώσει την «αντικειμενική πραγματικότητα», όχι στα σωματίδια, αλλά στα κύματα και δεν είναι διατεθειμένος να ερμηνεύσει τα κύματα ως «κύματα πιθανότητας» μόνο ... Ο Schrödinger παραβλέπει το γεγονός ότι μόνο τα κύματα σε μαθηματικό χώρο (ή οι μήτρες μετασχηματισμού) είναι στη συνηθισμένη ερμηνεία κύματα πιθανότητας, ενώ τα τρισδιάστατα υλικά κύματα ή τα κύματα ακτινοβολίας δεν είναι. *Τα τελευταία έχουν τόσο πολλή ή τόσο λίγη «πραγματικότητα» όσο τα σωματίδια.* Δεν έχουν άμεση σχέση με τα κύματα πιθανότητας, αλλά έχουν συνεχή πυκνότητα ενέργειας και ορμής, όπως ένα ηλεκτρομαγνητικό πεδίο στη θεωρία του Maxwell (Heisenberg 1958a, σελ. 118, 125-126, η έμφαση προστέθηκε).

Αυτό το απόσπασμα καθιστά σαφές ότι για τον Heisenberg, τα τρισδιάστατα κύματα ύλης, σε αντίθεση με τα κύματα πιθανότητας στη συνήθη ερμηνεία, πρέπει να νοούνται ως «πραγματικά» κύματα, με τον ίδιο τρόπο που κατανοείται το «σωματίδιο» στην πιθανοκρατική ερμηνεία ως «πραγματικό». Γράφοντας στον Bohr στις 23 Ιουλίου 1928, ο Heisenberg δήλωσε: «Τώρα πιστεύω ότι τα θεμελιώδη

¹² Η αναφορά αυτή στο Schrödinger γίνεται στο όγδοο κεφάλαιο του βιβλίου με τίτλο «Κριτική και Αντιπροτάσεις στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης για την Κβαντική Θεωρία». Στο κεφάλαιο αυτό ο Heisenberg διακρίνει τρεις ομάδες κριτικής απέναντι στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης και αναφέρει τον Schrödinger ως μια ειδική περίπτωση αντιπάλου χωρίς να τον εντάξει σαφώς σε κάποια από τις τρεις περιπτώσεις αντιπροτάσεων.

¹³ Το έργο αυτό του Werner Heisenberg αναφέρεται συχνά και ως «διαλέξεις Gifford» (Gifford Lectures). Αυτό γιατί περιέχει τις διαλέξεις που είχε δώσει ο συγγραφέας κατά τη χειμερινή περίοδο 1955-56 στο πανεπιστήμιο Saint Andrews της Σκωτίας, όταν του ζητήθηκε να εξηγήσει τις σχέσεις ανάμεσα στη σύγχρονη ατομική Φυσική και γενικότερα φιλοσοφικά προβλήματα. Οι διαλέξεις Gifford σύμφωνα με τη διαθήκη του ιδρυτή τους έχουν σαν αντικείμενο τους την τοποθέτηση απέναντι στα σύγχρονα προβλήματα και γίνονται κάθε χρόνο σε πανεπιστήμια της Σκωτίας (Heisenberg 1958b).

ερωτήματα απαντώνται πλήρως» (ό.π., σελ. 76), ένα συμπέρασμα το οποίο επανέλαβε στη συνέντευξή του με τον Kuhn: «Έκανα κάποια προσπάθεια να εξηγήσω στον Bohr ότι αυτές οι εργασίες των Klein-Jordan-Wigner ήταν απλώς μια πολύ καλή εικόνα του τι θέλησε [να κάνει ο Bohr] με τη συμπληρωματικότητα επειδή υπήρχε μια πλήρης συμμετρία μεταξύ των κυμάτων και των σωματιδίων» (ό.π., σελ. 76). Ωστόσο, όπως θυμάται ο Heisenberg, ο Bohr αρχικά, «δεν αισθανόταν ακριβώς έτσι», αν και ήταν δύσκολο να αποφανθεί κανείς ποιες ήταν ακριβώς οι απόψεις του Bohr. Όπως θα αναφέρω στη συνέχεια, η αντίληψη του Bohr για τον κυματοσωματιδιακό дуισμό διέφερε σημαντικά από αυτή του Heisenberg (ό.π., σελ. 76).

Με την ανάδειξη της θεωρίας των κβαντισμένων υλικών κυμάτων, ήταν τώρα δυνατό να φανεί ότι θα μπορούσε κανείς να φτάσει σε πανομοιότυπες εξισώσεις είτε μέσω της στατιστικής ερμηνείας της εξίσωσης του Schrödinger ή με μια κβαντική τροποποίηση της κυματικής θεωρίας σε τρισδιάστατο χώρο μέσω της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής. Αυτό είναι το βασικό σημείο για τον ισχυρισμό του Heisenberg το 1929 σχετικά με την «πλήρη ισοδυναμία της κυματικής και της σωματιδιακής εικόνας στην κβαντική μηχανική» (ό.π., σελ. 76). Στο βιβλίο του *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας*,¹⁴ ο Heisenberg υποστήριξε ότι στην κβαντική θεωρία «η σωματιδιακή εικόνα και η κυματική εικόνα είναι απλώς δύο διαφορετικές όψεις της μίας και ίδιας φυσικής πραγματικότητας» με την έννοια ότι «το ένα και το αυτό σύνολο μαθηματικών εξισώσεων μπορεί να ερμηνευτεί κατά βούληση με όρους είτε τις μιας είτε της άλλης εικόνας» (Heisenberg 1930, σελ. 177-178). Στη συνέντευξή του με τον Kuhn το 1963, εξήγησε πως είχε παρουσιάσει το πρόβλημα:

Έγραψα αυτές τις διαλέξεις που έδωσα το 1929. Εκεί νομίζω ότι γινόταν πάντα [ερμηνευόταν] με τις δύο δυνατότητες. Δεν ήταν ο дуισμός με την έννοια ότι χρειάζονται και τα δύο, ήταν μάλλον ένας дуισμός, με την έννοια ότι μπορείς να το κάνεις με τον ένα ή τον άλλο τρόπο. Μπορείς είτε να ξεκινήσεις από την κυματική εικόνα [Jordan-Klein-Wigner] ή μπορείς να ξεκινήσεις από τη σωματιδιακή εικόνα [Born]. Κάθε μια από τις δύο εικόνες μπορεί να τα βγάλει πέρα μέχρι το τέλος [ή να κβαντιστεί] και θα σου δώσει σωστές απαντήσεις. Στο τέλος θα ανακαλύψεις ότι, τελικά, έκανες το ίδιο πράγμα, σε μια διαφορετική γλώσσα. Νομίζω ότι αυτές οι διαλέξεις ήταν τουλάχιστον ξεκάθαρα γραμμένες με την έννοια ότι έδειξαν όχι ότι έχουμε ένα дуισμό, αλλά ότι έχεις τις δύο δυνατότητες (Camilleri 2009a, σελ. 77).

¹⁴ Πολλές φορές το βιβλίο αυτό αναφέρεται και ως διαλέξεις του Σικάγο το 1929, επειδή αποτελεί μια «πλήρη και αναλλοίωτη αναδημοσίευση του έργου που δημοσιεύθηκε για πρώτη φορά από το Πανεπιστήμιο του Σικάγο το 1930», όπως αναφέρεται στην αρχή του βιβλίου (Heisenberg 1930).

Όπως υποδηλώνει το παραπάνω απόσπασμα, ο Heisenberg δεν πίστευε ότι στην κβαντική μηχανική ο φυσικός βρίσκεται αντιμέτωπος με έναν κυματοσωματιδιακό δυισμό υπό την έννοια ότι υπάρχουν ταυτόχρονα τόσο υλικά κύματα όσο και υλικά σωματίδια, αλλά πίστευε στην ισοδυναμία των δύο τρόπων περιγραφής. Όπως το έθεσε αργότερα, είτε θεωρούμε το ηλεκτρόνιο ως σωματίδιο ή κύμα, στην κβαντική μηχανική «πρέπει να κβαντώσουμε και τα δύο και τότε είναι το ίδιο πράγμα» (ό.π., σελ. 77). Στην περιγραφή της στάσιμης κατάστασης, για παράδειγμα, μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε είτε τη γλώσσα των σωματιδίων, σύμφωνα με την οποία η κυματοσυνάρτηση ψ περιγράφει την πιθανότητα εύρεσης ενός ηλεκτρονίου σε ένα σημείο στο χώρο, ή εναλλακτικά, τη γλώσσα της κυματικής θεωρίας, σύμφωνα με την οποία μιλάμε για την κατανομή της πυκνότητας φορτίου γύρω από τον πυρήνα. Επομένως, το «ηλεκτρόνιο» μπορεί να αντιμετωπιστεί ως ένα σωματίδιο, του οποίου η θέση και η ορμή μπορούν να καθοριστούν μόνο μέσα σε ορισμένα όρια ακρίβειας ή αντιστρόφως, ως ένα χωρικά εκτεταμένο, κβαντισμένο πεδιακό κύμα σε τρισδιάστατο χώρο (ό.π., σελ.77).

1.4. Heisenberg και Bohr: αποκλίνουσες απόψεις για τον κυματοσωματιδιακό δυισμό

Η αντίληψη του Heisenberg για τον δυισμό κύματος-σωματιδίου συνδέεται στενά με τη μαθηματική φυσική των Born, Pauli, Jordan και Klein. Οι απόψεις του Bohr, από την άλλη πλευρά, διαμορφώθηκαν περισσότερο από την ανησυχία του για πειραματικά φαινόμενα, όπως η συμβολή και η περίθλαση ηλεκτρονίων στο πείραμα των Davisson και Germer τον Απρίλιο του 1927,¹⁵ που φάνηκε να επιβεβαιώνουν την

¹⁵ Η ανακάλυψη της περίθλασης των ηλεκτρονίων το 1927, η οποία κρίθηκε άξια ενός βραβείου Νόμπελ, είχε την αφετηρία της σε ένα ερευνητικό πρόγραμμα των Clinton J. Davisson και του βοηθού του Lester Germer που πραγματοποιήθηκε στο τεχνικό τμήμα της Western Electric (αργότερα Bell Labs). Οι Davisson και Germer χρειάστηκε να μελετήσουν την εκπομπή ηλεκτρονίων από μεταλλικές επιφάνειες οι οποίες βομβαρδίζονταν με ηλεκτρόνια. Το 1924, αυτά τα πειράματα σκέδασης ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου οδήγησαν σε εικόνες περίθλασης οι οποίες, κατά την ερμηνεία του Davisson, έπρεπε να αποδοθούν στην κρυσταλλική δομή του μετάλλου. Πέραν τούτου, όμως, τα πειράματα δεν φαινόταν να επιτρέπουν την εξαγωγή κάποιων πιο συγκεκριμένων συμπερασμάτων. Η εσφαλμένη αυτή εκτίμηση οφειλόταν στο ότι οι φυσικοί των Εργαστηρίων Bell δεν θεωρούσαν τα ηλεκτρόνια ως κύματα. Τα πράγματα δεν άλλαξαν παρά μόνο την άνοιξη του 1926, όταν ο Davisson, έχοντας πάει στην Αγγλία για διακοπές, έτυχε να μάθει για τις ιδέες που είχε διατυπώσει ο Louis de Broglie το 1924, σύμφωνα με τις οποίες τα ηλεκτρόνια ενδέχεται να υφίστανται περίθλαση όταν προσπίπτουν σε κρυστάλλους. Εκείνη την εποχή ο Davisson αγνοούσε τη νέα κβαντική μηχανική, αλλά κάποιοι ευρωπαίοι συνάδελφοί του του είπαν ότι ίσως η θεωρία του Schrödinger να ήταν το κλειδί για την κατανόηση των πειραμάτων του. Μόλις επέστρεψε στη Νέα Υόρκη ο Davisson

κυματική φύση της ύλης. Με άλλα λόγια, ενώ ο Bohr ανησυχούσε πρωτίστως για τα πειραματικά φαινόμενα που αφορούν την έννοια του κυματοσωματιδιακού δυισμού, για τον Heisenberg, ο δυισμός απεικονιζόταν μέσω των διαφορετικών μετασχηματισμών του μαθηματικού φορμαλισμού της κβαντικής μηχανικής. Όπως είναι γνωστό, ο δυισμός κύματος-σωματιδίου αποτέλεσε αντικείμενο έντονων συζητήσεων μεταξύ των Bohr και Heisenberg κατά την άνοιξη του 1927, διάστημα στο οποίο ο Bohr διατύπωσε την έννοια της «συμπληρωματικότητας».¹⁶ Στη συζήτηση μεταξύ Bohr και Heisenberg την άνοιξη του 1927 θεωρείται συχνά από τους μελετητές ότι ο Heisenberg είχε τελικά πειστεί για τη σημασία της έννοιας της συμπληρωματικότητας κύματος και σωματιδίου, στην κβαντική θεωρία. Αυτό στηρίζεται κυρίως στην προσθήκη που επέβαλε ο Bohr στο τέλος της εργασίας του Heisenberg για την απροσδιοριστία.¹⁷ Όπως όμως θα δούμε στη συνέχεια, το ζήτημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού, ακόμη και μετά τις συζητήσεις του 1927, αποτελούσε πεδίο διαφωνίας και παρερμηνειών (Camilleri 2006, σελ. 309).

Σε μετέπειτα αφηγήσεις του, ο Heisenberg υπογράμμισε ότι μέχρι την άνοιξη του 1927 «παρέμεναν εννοιολογικές διαφορές» μεταξύ του ίδιου και του Bohr, αν και αυτοί «απλώς αναφέρθηκαν στα διαφορετικά σημεία εκκίνησης ή στους διαφορετικούς τρόπους έκφρασης των πραγμάτων, αλλά όχι πια σε διαφορετική ερμηνεία της θεωρίας» (ό.π., σελ. 309). Το 1928 ο Oscar Klein, ο οποίος ήταν παρών κατά τη διάρκεια των συζητήσεων στην Κοπεγχάγη, εξήγησε ότι η διαμάχη μεταξύ Bohr και Heisenberg είχε περιστραφεί γύρω από το αν ήταν πιο θεμελιώδους σημασίας στην κβαντική θεωρία η συμπληρωματικότητα κύματος-σωματιδίου ή η ασυνέχεια. (ό.π., σελ. 309). Το γράμμα του Heisenberg στον Pauli στις 16 Μαΐου 1927 επιβεβαιώνει αυτή την αφήγηση. Εκεί ο Heisenberg εξέφρασε κάπως κριτική στάση απέναντι στη νέα οπτική γωνία του Bohr:

καταπιάστηκε αμέσως με τη μελέτη της νέας κβαντικής μηχανικής. Η νέα κατεύθυνση που πήρε το παλιό ερευνητικό πρόγραμμα οδήγησε στο περίφημο πείραμα Davisson-Germer, το οποίο προσέφερε πειραματική απόδειξη για τον τύπο του de Broglie, βάσει του οποίου σε ηλεκτρόνια κινούμενα με ταχύτητα v μπορεί να αποδοθεί μήκος κύματος $\lambda = h/mv$. Όπως άρμοζε, η πρώτη πλήρης αναφορά για την ανακάλυψη δημοσιεύτηκε στο τεύχος Απριλίου 1927 του *Bell Laboratories Record*. Μία δεκαετία αργότερα, το 1937, ο Davisson έλαβε, από κοινού με τον George P. Thomson, το βραβείο Νόμπελ γι' αυτή την ανακάλυψη (Kragh 2004, σελ. 161-162).

¹⁶ Για την έννοια της συμπληρωματικότητας θα αναφέρω περισσότερα στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας.

¹⁷ Ο Max Jammer (1974, σελ. 69) αναφέρει ότι «επήλθε συμβιβασμός μόλις ο Heisenberg συνειδητοποίησε τη θέση του Bohr».

συζητήσαμε εδώ την κβαντική θεωρία διεξοδικά. Ο Bohr σχεδιάζει να γράψει μια γενική πραγματεία για την «εννοιολογική δομή» της κβαντικής θεωρίας, από την άποψη ότι «υπάρχουν κύματα και σωματίδια». ... Όσον αφορά αυτό το έργο, ο Bohr επέστησε την προσοχή μου στο γεγονός ότι ... ορισμένα σημεία θα μπορούσαν να εκφραστούν και να συζητηθούν καλύτερα με κάθε λεπτομέρεια, μόνο αν κάποιος αρχίσει μία ποσοτική συζήτηση που να αφορά ξεκάθαρα τα κύματα. Παρ' όλα αυτά, είμαι φυσικά τώρα όπως και πριν της άποψης ότι οι ασυνέχειες είναι τα μόνα ενδιαφέροντα πράγματα στην κβαντική θεωρία και ότι κανείς δεν μπορεί ποτέ να τα τονίσει αρκετά (ό.π., σελ. 309).

Φαίνεται ότι ακόμη και μετά την προσθήκη του Bohr στην εργασία της αβεβαιότητας του Heisenberg δεν υπάρχει ταύτιση απόψεων μεταξύ των δύο. Όπως ο ίδιος ο Heisenberg θυμάται αργότερα, «το βασικό σημείο ήταν ότι ο Bohr ήθελε να κάνει αυτό το δυϊσμό ανάμεσα στα κύματα και τα σωματίδια ως το κεντρικό σημείο αυτού του προβλήματος και να πει: “Αυτό είναι το κέντρο της όλης ιστορίας και πρέπει να ξεκινήσουμε από αυτή την πλευρά της ιστορίας για να το καταλάβουμε”» (ό.π., σελ. 309). Αντίθετα ο Heisenberg είχε διαφορετική άποψη: «για μένα ήταν ξεκάθαρο ότι τελικά δεν υπήρχε κανένας δυϊσμός» (με την έννοια ότι ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν και οι δύο έννοιες, και του κύματος και του σωματιδίου, στην περιγραφή του ίδιου αντικειμένου) και «γι' αυτό ήμουν πάντα λίγο αναστατωμένος από αυτή την τάση του Bohr να το θέσει σε μια δυαδική μορφή» (ό.π., σελ. 310)

Ο Bohr, στο άρθρο του για τη συμπληρωματικότητα, που δημοσιεύτηκε στο περιοδικό *Nature* στις 14 Απριλίου 1928, αφού αναφέρθηκε στα πειραματικά αποτελέσματα που αποδείκνυαν την κυματική φύση των ηλεκτρονίων,¹⁸ δήλωσε ξεκάθαρα ότι η σωματιδιακή και η κυματική εικόνα δεν ήταν αντιφατικές αλλά συμπληρωματικές μεταξύ τους:

Παρ όλα αυτά, η πρόσφατη εμπειρία, πάνω από όλα η ανακάλυψη της επιλεκτικής ανάκλασης ηλεκτρονίων από μεταλλικούς κρυστάλλους, απαιτεί τη χρήση της αρχής της υπέρθεσης της κυματικής θεωρίας ... Στην πραγματικότητα, πάλι εδώ δεν ασχολούμαστε με αντιφατικές αλλά με συμπληρωματικές εικόνες των φαινομένων, που μόνο μαζί προσφέρουν μια φυσική γενίκευση του κλασικού τρόπου περιγραφής (Bohr 1928, σελ. 581, η έμφαση προστέθηκε).

¹⁸ Εκτός από το πείραμα Davisson-Germer ήταν γνωστά από το 1928 και άλλα πειράματα που αφορούσαν την περίθλαση υλικών κυμάτων όπως των G. P. Thomson, Rupp και Kikuchi (Heisenberg 1930, σελ. 5-6 και 76-79).

Ωστόσο, ο Heisenberg φαίνεται να είχε υιοθετήσει μια διαφορετική άποψη. Το 1929, απέδειξε ότι ήταν δυνατό να προσδιοριστούν τα όρια της έννοιας του σωματιδίου στην κβαντική θεωρία με την προσφυγή στην έννοια του κυματοπακέτου.

Έτσι, η δήλωση ότι η θέση ενός ηλεκτρονίου είναι γνωστή με μια ορισμένη ακρίβεια Δx τη στιγμή t μπορεί να απεικονιστεί από την εικόνα ενός πακέτου κύματος στην κατάλληλη θέση με μια κατά προσέγγιση έκταση Δx (Heisenberg 1930, σελ. 13)

Απέδειξε δηλαδή τις σχέσεις αβεβαιότητας με τη χρήση της έννοιας του κυματοπακέτου, αλλά στη συνέχεια υποστήριξε ότι ήταν επίσης δυνατό οι σχέσεις αυτές να εξαχθούν χωρίς τη χρήση της κυματικής εικόνας αλλά μέσα από το φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής. Συγκεκριμένα δηλώνει:

Οι σχέσεις αβεβαιότητας μπορούν επίσης να συναχθούν χωρίς τη ρητή χρήση της κυματικής εικόνας, επειδή είναι εύκολα αποκτήσιμες από το μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντικής θεωρίας και της φυσικής της ερμηνείας (ό.π., σελ. 15-16).

Σύμφωνα λοιπόν με τον Heisenberg δεν υπάρχει λόγος να επικαλείται κανείς και την κυματική εικόνα της ύλης.

Μια πιο προσεκτική εξέταση όσων ο Heisenberg θυμόταν, όσον αφορά τις συζητήσεις του με τον Bohr σχετικά με αυτό το θέμα, ενισχύει περαιτέρω την άποψη ότι ο Heisenberg δεν δέχθηκε ποτέ το επιχείρημα της συμπληρωματικότητας του Bohr. Στη συνέντευξή του με τον Kuhn, ο Heisenberg παραδέχτηκε ότι στις συνομιλίες του με τον Bohr είχε συμφωνήσει ότι «ήταν βολικό να μιλάμε για κύματα» όταν περιγράφουμε την κίνηση των ηλεκτρονίων, αν και δήλωσε ότι «δεν ήταν απαραίτητο να το κάνουμε» (Camilleri 2006, σελ. 310, η έμφαση προστέθηκε). Κάποιος θα μπορούσε εξίσου εύκολα να μιλάει αποκλειστικά για τη σωματιδιακή κίνηση στην κβαντική μηχανική. Πράγματι, ο Heisenberg εξήγησε ότι στην πραγματικότητα δεν είχε δεχθεί πλήρως την άποψη ότι ήταν απολύτως απαραίτητο να χρησιμοποιηθούν και οι δύο έννοιες, δηλαδή και του κύματος και του σωματιδίου, αν και αναγνώρισε ότι ίσως ήταν χρήσιμο για τους φυσικούς να σκάφτονται με αυτούς τους όρους (ό.π., σελ. 310). Στην ίδια συνέντευξη αναφέρεται στην κρίσιμη περίοδο του 1927 και στον συμβιβασμό του με τον Bohr:

Θα μπορούσα ίσως να πω ότι εκείνη την εποχή είχα καταλάβει ότι δεν βλάπτει την δική μου εξήγηση αν το κάνω με αυτό τον τρόπο. Ένιωσα, «Λοιπόν, θα μπορούσε κανείς να το κάνει και έτσι. Γιατί όχι;» Ως εκ τούτου, δεν ήθελα να διαμαρτυρηθώ τόσο έντονα απέναντι σε αυτό. Είπα, «Εντάξει, μπορεί να είναι κάπως βοηθητικό να παίζετε πάντα ανάμεσα στις δύο εικόνες». Για μένα το βασικό σημείο ήταν ότι είχα καταλάβει ότι παίζοντας ανάμεσα στις δύο εικόνες, τίποτα δεν μπορεί να πάει στραβά. Επομένως, δεν προέβαλα ένσταση στο να παίζω με τις δύο εικόνες. Ταυτόχρονα, ένιωσα ότι *δεν ήταν απαραίτητο*. Θα έλεγα ότι ήταν δυνατό, αλλά όχι απαραίτητο (ό.π., σελ. 310, ή έμφαση προστέθηκε).

Ενώ ο Heisenberg συχνά φαίνεται να έχει υιοθετήσει την άποψη του Bohr για τον κυματοσωματιδιακό δυισμό κατά τη δεκαετία του 1930, παρέμειναν ουσιαστικές διαφορές οι οποίες δεν επιλύθηκαν ποτέ πλήρως. Στα χέρια του Heisenberg, η συμπληρωματικότητα κύματος-σωματιδίου μετατράπηκε από γενική φιλοσοφική άποψη σε παιδαγωγική αρχή. Το 1963 είπε στον Kuhn: «Για να εξηγήσουμε το μικροσκόπιο ακτίνων γ στους φυσικούς, ήταν χρήσιμο να παίζουμε ανάμεσα και στις δύο εικόνες. Αυτό θα μπορούσα να το καταλάβω. Αλλά δεν ήταν απολύτως απαραίτητο» (ό.π., σελ. 310) Στη σκέψη του Heisenberg ήταν δυνατό να μιλήσει κανείς αποκλειστικά με όρους κβάντων φωτός ή εναλλακτικά με όρους ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Με αυτόν τον τρόπο, κάτω από την επίφαση της συμφωνίας, ο Bohr και ο Heisenberg διέθεταν διαφορετικές απόψεις για τη διπλή φύση του φωτός και της ύλης (ό.π., σελ. 310).

Όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη ενότητα (1.3), ο Heisenberg θεωρεί ισοδύναμες οντολογικά τις έννοιες του υλικού κύματος που περιγράφει ένα σωματίδιο και του σωματιδίου που περιγράφεται από ένα κύμα πιθανότητας. Όπως θα δούμε όμως αμέσως, δε φαίνεται να ισχύει το ίδιο και για τον Bohr. Τα συγγράμματα του Bohr και οι διαλέξεις του, όπως θα πιστοποιήσουν πολλοί μελετητές αλλά και σύγχρονοί του, είναι σε πολλές περιπτώσεις εξαιρετικά ασαφή και δεν υπάρχει γενικότερη συμφωνία στην ερμηνεία τους.¹⁹ Η Mara Beller αναφέρει ότι «η αμφισημία, η αδιαφάνεια και η ασάφεια των γραπτών του Bohr είναι θρυλικές» (1999b, σελ. 266). Είναι πάντως ευρέως αποδεκτό ότι, μετά το 1927, η ερμηνεία της «συμπληρωματικότητας» του Bohr βασιζόταν στην άποψη ότι τόσο οι εικόνα του «κύματος» όσο και του «σωματιδίου» ήταν και οι δύο απαραίτητες για μια πλήρη περιγραφή των πειραματικών φαινομένων (Camilleri 2006, σελ. 311). Ωστόσο, ο

¹⁹ Όπως θα δούμε και στο τρίτο κεφάλαιο, η αμφισημία αυτή χαρακτηρίζει ειδικά τα σχετικά με την αρχή της συμπληρωματικότητας.

Bohr έχει υποστηρίξει ότι παρά τη μεγάλη τους επιτυχία στην ερμηνεία πειραματικών φαινομένων τα «υλικά κύματα» δεν έχουν καμία αναλογία με τη «διάδοση κυμάτων σε υλικά μέσα» ούτε και με τα «ηλεκτρομαγνητικά κύματα» και ως εκ τούτου, όπως και «κβάντα ακτινοβολίας που συχνά αναφέρονται και ως φωτόνια» και τα δύο πρέπει να θεωρηθούν απλώς ως «σύμβολα χρήσιμα για τη διατύπωση των νόμων των πιθανοτήτων» (Bohr 1932, σελ. 370). Τα παραπάνω έχουν διατυπωθεί σε μια σπάνια αναφερόμενη διάλεξη του Bohr²⁰ στην οποία συνεχίζει:

Με αυτή την έννοια, φράσεις όπως η «σωματιδιακή φύση του φωτός» ή η «κυματική φύση των ηλεκτρονίων» είναι διφορούμενες, δεδομένου ότι τέτοιες έννοιες όπως το σωματίδιο και το κύμα είναι καλά καθορισμένες μόνο στο πεδίο της κλασικής φυσικής, όπου, φυσικά, το φως και τα ηλεκτρόνια είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα και υλικά σωματίδια αντίστοιχα (Bohr 1932, σελ. 370).

Ο Bohr παρουσιάζει και ένα παρόμοιο συμπέρασμα στη διάλεξή του «Ο Maxwell και η Μοντέρνα Θεωρητική Φυσική» το 1931.²¹ Στη διάλεξη αυτή υποστήριξε ότι για την κβαντική μηχανική ισχύουν τα εξής:

δεν πρέπει να λησμονούμε ότι μόνο οι κλασικές ιδέες των υλικών σωματιδίων και των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων έχουν ένα πεδίο με σαφή εφαρμογή, ενώ οι έννοιες των φωτονίων και των κυμάτων ηλεκτρονίου δεν έχουν (Bohr 1931, σελ. 691).

Ο Dugald Murdoch επίσης καταλήγει στο συμπέρασμα ότι η ιδέα ότι το ηλεκτρόνιο είναι ουσιαστικά ένα «σωματίδιο» και ότι το φως είναι ουσιαστικά ένα «κύμα» αντιπροσωπεύει την πιο προσεκτικά θεμελιωμένη θέση του Bohr για το δυισμό κύματος και σωματιδίου, θέση που εκφράζεται πιο ξεκάθαρα στα γραπτά του Bohr μετά το 1929. Θέλει δηλαδή να πει ο Murdoch ότι παρά το γεγονός ο Bohr δέχεται το δυισμό κύματος και σωματιδίου, θεωρεί ότι για το φως είναι πιο θεμελιώδη η κυματική εικόνα, ενώ για το ηλεκτρόνιο πιο θεμελιώδη η σωματιδιακή. Αν δεχτούμε την ανάγνωση του Bohr από τον Murdoch, που βασίζεται τόσο σε δημοσιευμένα όσο και σε μη δημοσιευμένα γραπτά του, μπορούμε να καταλήξουμε στο συμπέρασμα ότι

²⁰ Πρόκειται για ομιλία του στο πλαίσιο των διαλέξεων Faraday που δόθηκε στις 8 Μαΐου του 1930 (Bohr 1932, σελ. 349)

²¹ Η διάλεξη αυτή εκφωνήθηκε στην εκδήλωση για τον εορτασμό της εκατονταετηρίδας από τη γέννηση του Maxwell, στο Cambridge την 1 Οκτωβρίου 1931 (Bohr 1931, σελ. 691).

ο Bohr και ο Heisenberg διατηρούσαν έντονα διαφορετικές απόψεις όσον αφορά την «πραγματικότητα» των κυμάτων και των σωματιδίων (Camilleri 2006, σελ. 311-312).

Η άποψη του Murdoch ενισχύεται και από αφηγήσεις των συνεργατών του Bohr, συγκεκριμένα των Oscar Klein και Léon Rosenfeld,²² που επιβεβαιώνουν ότι ο Bohr ήταν αντίθετος με την ιδέα των υλικών κυμάτων και του φωτονίου. Σε μια συνέντευξη με τον Kuhn, στις 16 Ιουλίου 1963, ο Klein υπενθύμισε ότι στις συζητήσεις για τη συμπληρωματικότητα το 1927 ο Bohr υπογράμμισε ότι ήταν απαραίτητο να χρησιμοποιήσει την έννοια των υλικών κυμάτων για την περιγραφή των ηλεκτρονίων, αλλά πάντα το έκανε «με την επίγνωση ότι αυτά δεν ήταν κύματα με την κυριολεκτική έννοια και τόνισε πολύ έντονα ότι κατά την κυριολεκτική έννοια μπορεί κανείς να πει ότι τα ηλεκτρόνια είναι σωματίδια και ότι τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα είναι κύματα» (ό.π., σελ. 312). Ο Rosenfeld, ο οποίος συνεργάστηκε στενά με τον Bohr κατά τη διάρκεια της δεκαετίας του 1930, υποστήριξε επίσης ότι, λαμβάνοντας υπόψη τον κυματοσωματιδιακό δυισμό του φωτός ο Bohr έτεινε να θεωρεί ότι «το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι κατά κάποιο τρόπο πιο θεμελιώδες από την έννοια του φωτονίου». Ενώ υπάρχει γενική συμφωνία ότι ο Bohr είχε μια τέτοια άποψη πριν από το 1927, ο Rosenfeld υποστηρίζει ότι: «Αυτή είναι μια άποψη που ο Bohr δεν εγκατέλειψε ποτέ» (ό.π., σελ. 312). Σύμφωνα με τον Rosenfeld, ο Bohr δεν δέχθηκε ποτέ τη συμμετρία της κυματικής και της σωματιδιακής περιγραφής για την ύλη — στην περίπτωση δε του ηλεκτρονίου υποστήριζε ότι η έννοια του σωματιδίου είναι πιο θεμελιώδης, «ενώ η πτυχή του κύματος είναι η συμβολική» (ό.π., σελ. 312). Οι αφηγήσεις των Klein και Rosenfeld είναι σημαντικές, όχι μόνο επειδή μας δίνουν τη δυνατότητα να αμφισβητήσουμε την τυποποιημένη άποψη περί συμπληρωματικότητας, αλλά και επειδή αποδίδουν στον Bohr μια άποψη που έρχεται σε έντονη αντίθεση με την αντίληψη του Heisenberg για την ισοδυναμία κύματος και σωματιδίου (ό.π., σελ. 312).

Είναι σαφές ότι ο Bohr ποτέ δεν απέδωσε την ίδια σημασία στις εργασίες των Jordan, Klein και Wigner σχετικά με την κβάντωση των κυμάτων, όπως έκανε ο Heisenberg. Το 1955, ο Heisenberg, αναγνωρίζοντας την αξία των εργασιών των Jordan, Klein και Wigner, γράφει ότι «Η *πλήρης ισοδυναμία* των εικόνων των σωματιδίων και των κυμάτων στην κβαντική θεωρία απεδείχθη με τον τρόπο αυτό για πρώτη φορά» (Heisenberg 1955, σελ. 15, η έμφαση προστέθηκε). Η ισοδυναμία αυτή

²² Οι Heisenberg, Klein και Rosenfeld υπήρξαν διαδοχικά, οι βοηθοί του Bohr στην Κοπεγχάγη (Pais 1991, σελ. 257, 297, 360 και Lindley 2011, σελ. 207).

είναι για τον Heisenberg μια δυνατότητα ερμηνείας του φορμαλισμού της κβαντομηχανικής με δύο τρόπους χωρίς να δημιουργείται κανένα πρόβλημα στη ερμηνεία της Κοπεγχάγης, (ό.π., σελ. 312). Στο βιβλίο του *Φυσική και Φιλοσοφία* αναφέρει:

Ο δυϊσμός μεταξύ των δύο συμπληρωματικών εικόνων — κυμάτων και σωματιδίων — εξάγεται επίσης σαφώς μέσω της ευελιξίας του μαθηματικού φορμαλισμού. Ο φορμαλισμός συνήθως γράφεται για να μοιάζει με τη Νευτώνεια μηχανική, δηλαδή με εξισώσεις κίνησης για τις συντεταγμένες και την ορμή των σωματιδίων.²³ Αλλά με έναν απλό μετασχηματισμό μπορεί να ξαναγραφεί ώστε να μοιάζει με μία κυματική εξίσωση για ένα συνηθισμένο τρισδιάστατο υλικό κύμα.²⁴ Για το λόγο αυτό η δυνατότητα να παίζει κάποιος με διαφορετικές συμπληρωματικές εικόνες έχει το ανάλογο της στους διαφορετικούς μετασχηματισμούς του μαθηματικού φορμαλισμού. Στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης για την κβαντική θεωρία δεν οδηγεί σε δυσκολίες (Heisenberg 1958a, σελ. 50-51).

Αρα, για τον Heisenberg, το γεγονός ότι μπορούμε να θεωρήσουμε το ηλεκτρόνιο *είτε ως κύμα ή ως σωματίδιο* δεν δημιουργεί δυσκολίες στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης (Camilleri 2006, σελ. 312).

Κατά τον Heisenberg, το ηλεκτρόνιο δε συμπεριφέρεται άλλες φορές ως κύμα και άλλες ως σωματίδιο αλλά μπορεί σε κάθε περίπτωση να περιγραφεί είτε ως υλικό κύμα ή ως σωματίδιο, χωρίς να χρειάζεται να γίνει κατανοητό με την κλασική έννοια. Αντί να χρησιμοποιήσουμε *μαζί* τις δύο κλασικές εικόνες σε μία συμπληρωματική περιγραφή ή σε πειραματικές διατάξεις που αποκλείουν αμοιβαία τη μία ή την άλλη εικόνα, ο Heisenberg ισχυρίζεται ότι μπορούμε, στη κβαντική μηχανική, να ερμηνεύσουμε τις μαθηματικές εξισώσεις για το ηλεκτρόνιο *είτε* θεωρώντας το ένα κβαντισμένο υλικό κύμα σε τρισδιάστατο χώρο *ή* θεωρώντας το ένα κβαντικό σωματίδιο. Για τον Heisenberg, η εμφάνιση της νέας κβαντικής ηλεκτροδυναμικής έδωσε μαθηματική έκφραση σε αυτό που ο ίδιος ονόμασε «πλήρης ισοδυναμία των εικόνων κύματος και σωματιδίου στην κβαντική θεωρία» (ό.π., σελ. 313). Η διάκριση μεταξύ της ισοδυναμίας του Heisenberg και της συμπληρωματικότητας του Bohr συγκαλύφθηκε από το γεγονός ότι στα επόμενα χρόνια ο Heisenberg χρησιμοποίησε συχνά τον όρο «συμπληρωματικότητα» με τρόπους που τον έφερναν πιο κοντά στην δική του έννοια της ισοδυναμίας (ό.π., σελ. 313). Η διαφορά αυτή στη θεώρηση του

²³ Εδώ ο Heisenberg αναφέρεται στην εξίσωση του Schrödinger (Camilleri 2006, σελ. 312).

²⁴ Εδώ προφανώς αναφέρεται στη δεύτερη κβάντωση.

κυματοσωματιδιακού δυισμού από τους Bohr και Heisenberg είναι μια πρώτη ένδειξη διαφορετικών απόψεων στο εσωτερικό της λεγόμενης Σχολής της Κοπεγχάγης

Κεφάλαιο 2. Η αρχή της απροσδιοριστίας και το όριο των κλασικών εννοιών— οι μετασχηματισμοί της σκέψης του Heisenberg

Η δημοσίευση του περίφημου άρθρου του Werner Heisenberg «*Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik*» το Μάρτιο του 1927 θεωρείται ότι συνέβαλε σημαντικά στην ορθόδοξη ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής (Heisenberg 1927).²⁵ Στο άρθρο του ο Heisenberg υποστήριξε ότι η ακρίβεια με την οποία μπορούμε να γνωρίζουμε τόσο τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου, όπως ένα ηλεκτρόνιο, υπόκειται σε έναν αρχικό περιορισμό (Camilleri 2009a, σελ. 85). Ο Heisenberg απέδειξε ότι η ελάχιστη ακρίβεια με την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε τη θέση ενός σωματιδίου, έστω Δq , και η ελάχιστη ακρίβεια με την οποία μπορούμε να προσδιορίσουμε την ορμή του, έστω Δp , συνδέονται με την σχέση $\Delta q \Delta p \sim h$.²⁶ Η σχέση αυτή ισχύει με την προϋπόθεση ότι μιλάμε για τις συνιστώσες της θέσης και της ορμής στην ίδια διεύθυνση. Απέδειξε επίσης ότι μια αντίστοιχη σχέση υπάρχει ανάμεσα στη αβεβαιότητα κατά τη μέτρηση της ενέργειας μιας κατάστασης και στην αντίστοιχη αβεβαιότητα κατά τη μέτρηση του χαρακτηριστικού χρόνου μεταβολής ενός μεγέθους στη συγκεκριμένη κατάσταση: $\Delta E \Delta t \sim h$ (Kragh 2004, σελ. 245).²⁷

Το διάστημα που ο Heisenberg μορφοποιούσε τις απόψεις του για την αρχή της απροσδιοριστίας, δηλαδή την κρίσιμη περίοδο μεταξύ 1926 και 1928 η φιλοσοφική σκέψη του για τις έννοιες του χώρου και της ορμής περνά από τρεις διαφορετικές φάσεις. Η πρώτη φάση είναι μετά την ανάπτυξη της μηχανικής των μητρώων το 1925, κατά την οποία ο Heisenberg ήταν πεπεισμένος ότι η κβαντική

²⁵ Ο τίτλος του άρθρου στην αγγλική είναι «The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics» και η απόδοση στα ελληνικά είναι συνήθως «Περί του Φυσικού Περιεχομένου της Κβαντικής Κινηματικής και Μηχανικής», ή «Περί του *Αντιληπτού...*», ή «Περί του *Διαισθητικού...*». Μοιάζει σαν μια μοναδική λέξη να δηλώνει τόσο το χειροπιαστό όσο και το αφηρημένο (Lindley 2011, σελ. 183–184).

²⁶ Στο πρωτότυπο κείμενο του άρθρου οι συμβολισμοί είναι q_1 και p_1 αντίστοιχα. Συγκεκριμένα ο Heisenberg αναφέρει: «βλέπουμε μία άμεση φυσική ερμηνεία της εξίσωσης $pq - qp = -i\hbar$. Ας είναι q_1 η ακρίβεια με την οποία το μέγεθος q είναι γνωστό (q_1 λέμε, τη διασπορά του q), επομένως εδώ το μήκος κύματος του φωτός. Ας είναι p_1 η ακρίβεια με την οποία το μέγεθος p είναι προσδιορίσιμο. Αυτή είναι στην περίπτωσή μας η ασυνεχής αλλαγή του p στο φαινόμενο Compton. Τότε, σύμφωνα με τους στοιχειώδεις νόμους του φαινομένου Compton τα q_1 και p_1 υπακούουν στη σχέση: $q_1 p_1 \sim h$ (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 64-65).

²⁷ Ομοίως οι αντίστοιχοι συμβολισμοί στο άρθρο είναι E_1 , t_1 και η αντίστοιχη σχέση $E_1 t_1 \sim h$ (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 66-68).

μηχανική απαιτούσε μια θεμελιωδώς νέα αντίληψη του χώρου και του χρόνου. Αυτό έγινε σαφές στην αλληλογραφία του με τον Pauli, στο δεύτερο μισό του 1926, περίοδο κατά την οποία ο Heisenberg εξέφρασε την άποψη ότι ο χώρος και ο χρόνος μπορεί να είναι στατιστικές έννοιες, ή εναλλακτικά ότι ο χωρόχρονος μπορεί να έχει ασυνεχή δομή. Παρ' όλα αυτά, μέχρι το Φεβρουάριο του 1927 εγκαταλείπει αυτή την προσέγγιση. Η δεύτερη φάση της σκέψης του Heisenberg είναι αυτή που στρέφει την προσοχή του στον επαναπροσδιορισμό των εννοιών της θέσης και της ταχύτητας μέσω μιας οπερασιοναλιστικής²⁸ ανάλυσης. Αυτή η προσέγγιση, που τη συναντάμε στο άρθρο του για την αρχή της αβεβαιότητας, αντιπροσωπεύει μια συνειδητή απόπειρα του Heisenberg να χρησιμοποιήσει την ίδια μέθοδο ανάλυσης για την κβαντική μηχανική, όπως είχε κάνει ο Einstein όταν επαναπροσδιόριζε την έννοια του ταυτόχρονου στη θεωρία της ειδικής σχετικότητας. Ωστόσο, η αφοσίωση του Heisenberg στην οπερασιοναλιστική οπτική ήταν βραχύβια. Εγκαταλείπει την οπτική αυτή και περνά στην τρίτη φάση της σκέψης του. Μετά από εξαντλητικές συνομιλίες με τον Bohr το 1927, ο Heisenberg συνειδητοποίησε σταδιακά ότι αυτή η μέθοδος ορισμού των εννοιών ήταν αβάσιμη. Αυτό είχε ως επακόλουθο να εγκαταλείψει την οπερασιοναλιστική θεωρία νοήματος των εννοιών που χαρακτήριζε το άρθρο του 1927 και να κάνει τελικά δεκτό το δόγμα του Bohr σχετικά με την αναγκαιότητα της χρήσης των κλασικών εννοιών και στην κβαντική μηχανική.

Ένα πρώτο σημαντικό σημείο που πρέπει να τονιστεί, είναι ότι ο αρχικός σκοπός της εισαγωγής του νοητικού πειράματος του μικροσκοπίου από τον Heisenberg ήταν για να ορίσει με οπερασιοναλιστικό τρόπο την έννοια της θέσης και όχι για να καθορίσει τα όρια της ακρίβειας της μέτρησης στην κβαντική φυσική. Σαφώς βέβαια επιτυγχάνεται και το τελευταίο. Ένα δεύτερο σημαντικό σημείο είναι ότι οι συζητήσεις μεταξύ Heisenberg και Bohr πάνω στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου των ακτίνων γ, δεν αφορούν μόνο το πρόβλημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού. Οι συζητήσεις αυτές έπεισαν τον Heisenberg για το αναπόφευκτο της χρήσης των εννοιών της θέσης και της ορμής, με την κλασική τους σημασία, και στη κβαντική μηχανική, πράγμα που σηματοδοτεί ένα κρίσιμο σημείο καμπής στη φιλοσοφική του σκέψη (Camilleri 2009a, σελ. 85-87).

²⁸ Ο οπερασιοναλισμός (operationalism) είναι πρόγραμμα στη φιλοσοφία της επιστήμης που έχει ως στόχο να ερμηνεύσει τις επιστημονικές έννοιες μέσω πειραματικών διαδικασιών και παρατηρησιακών αποτελεσμάτων. Τον όρο εισήγαγε ο P. W. Bridgman, με την απαίτηση να ταυτίζονται οι θεωρητικές έννοιες με τις διαδικασίες που τις προσδιορίζουν (Τ. Φ. Α. του Cambridge 2011, σελ. 834).

2.1 Νέες έννοιες του χώρου και του χρόνου στη κβαντική μηχανική

Όπως είδαμε και στο προηγούμενο κεφάλαιο, την περίοδο μεταξύ 1925 και 1927, κατά την οποία αναπτύχθηκε η κβαντική μηχανική, ο Heisenberg εγκατέλειψε την άποψη ότι το ηλεκτρόνιο είναι ένα σημειακό σωματίδιο με την κλασική έννοια. Στην περίφημη εργασία των τριών (*Dreimännerarbeit*), των Born, Heisenberg και Jordan, υποστηρίζεται ότι «η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν μπορεί να περιγραφεί με τους όρους των οικείων εννοιών του χώρου και του χρόνου» (Born, Heisenberg και Jordan [1926] 1967, σελ. 322).

Αν δούμε προσεκτικά τις προσπάθειες του Heisenberg πριν από το 1927 που αφορούν την ανάπτυξη νέων εννοιολογικών βάσεων και την επίλυση δυσκολιών στη κβαντική μηχανική, μέσα από δύο αποσπάσματα της αλληλογραφίας του με τον Pauli, οι προσπάθειες αυτές καταλήγουν σε μια απόπειρα δημιουργίας μιας νέας αντίληψης του χώρου και του χρόνου στην κβαντική θεωρία.

Σε επιστολή του προς τον Pauli, που γράφτηκε στις 28 Οκτωβρίου 1926, ο Heisenberg αναφέρει:

[Στην κβαντική θεωρία] δεν έχει νόημα, για παράδειγμα να μιλάμε για τη θέση ενός σωματιδίου με καθορισμένη ταχύτητα. Ωστόσο, έχει νόημα αν κάποιος δεν εξετάζει την ταχύτητα και τη θέση με πολύ μεγάλη ακρίβεια. Είναι πολύ σαφές ότι, μακροσκοπικά, είναι σημαντικό να μιλάμε για τη θέση και την ταχύτητα ενός σώματος (όλα αυτά φυσικά για σένα δεν είναι τίποτα καινούργιο). Έχω για όλα αυτά μια ελπίδα για μια μεταγενέστερη λύση περίπου με τον ακόλουθο τρόπο, (αλλά κανείς δεν πρέπει να το φωνάξει δυνατά): *ότι ο χώρος και ο χρόνος είναι στην πραγματικότητα μόνο στατιστικές έννοιες*, όπως η θερμοκρασία, η πίεση κ.λπ. σε ένα αέριο. Θέλω να πω, οι έννοιες που μοιάζουν με το χώρο και οι έννοιες που μοιάζουν με το χρόνο δεν έχουν νόημα για ένα και μόνο σωματίδιο, και ότι έχουν όλο και πιο πολύ νόημα όσο πιο πολλά σωματίδια μελετάμε. Προσπαθώ συχνά να προσεγγίζω από αυτήν την κατεύθυνση και περαιτέρω, αλλά μέχρι στιγμής δεν θέλει να πετύχει (Camilleri 2009a, σελ. 88-89, η έμφαση προστέθηκε).

Εδώ έχουμε και τις πρώτες ενδεικτικές σκέψεις του Heisenberg για την αρχή της αβεβαιότητας. Ωστόσο, η άποψή του για νέες έννοιες θεμελιώνεται κυρίως από τη δυνατότητα ο χώρος και ο χρόνος να έχουν στατιστικό χαρακτήρα. Ο N. V. Rashevsky επίσης, σε ένα άρθρο που δημοσιεύθηκε το 1926, είχε προτείνει στην πραγματικότητα ο χώρος και ο χρόνος να είναι μόνο στατιστικές έννοιες στη μηχανική των μητρών.

Ο Heisenberg, αναφέροντας περαιτέρω την πιθανότητα να χρειαστεί κάποιος να τροποποιήσει τη θεμελιώδη μας αντίληψη για το χώρο και το χρόνο στον ατομικό κόσμο, υπέθεσε ότι το πρόβλημα της ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής μπορεί να έγκειται στην ασυνέχεια του ίδιου του χωροχρόνου. Η έννοια της ταχύτητας στην κλασική κινηματική, εξηγεί ο Heisenberg σε μια επιστολή προς τον Pauli τον Νοέμβριο του 1926, εξαρτάται *εξ ορισμού* από την άπειρη διαιρετότητα του χώρου και του χρόνου. Ωστόσο, αν η ιδέα ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε μια τροχιά στο χώρο και στο χρόνο δεν ήταν πλέον εφαρμόσιμη στο άτομο, τότε θα πρέπει να διαμορφωθούν νέες έννοιες χώρου και χρόνου. Γράφοντας στον Pauli στις 15 Νοεμβρίου 1926, ο Heisenberg έθεσε η δυνατότητα να κατανοήσει κανείς την κβαντική μηχανική μέσω της εισαγωγής ενός πολλαπλά ασυνεχούς χωροχρόνου:

Αν διατηρήσουμε το χωρόχρονο ασυνεχή, τότε είναι πολύ ικανοποιητικό ότι δεν έχει νόημα να μιλάμε, για παράδειγμα, για την ταχύτητα v [ενός ηλεκτρονίου] σε ένα μία συγκεκριμένη θέση x . Για να ορίσουμε την ταχύτητα πρέπει πάντα να έχουμε τουλάχιστον δύο σημεία, τα οποία [σε ένα κβαντισμένο χωρόχρονο] μπορεί να βρίσκονται σε ασυνεχή σχέση, αλλά *όχι* απειροελάχιστα κοντά. Όταν μιλάμε για τη θέση ή την ταχύτητα, χρειαζόμαστε πάντοτε λέξεις που προφανώς δεν ορίζονται καθόλου σε έναν ασυνεχή κόσμο (Camilleri 2009a, σελ. 89).

Με άλλα λόγια σε έναν ασυνεχή χωρόχρονο η ταχύτητα ενός σωματιδίου που είναι η χρονική παράγωγος της θέσης ($\frac{dx}{dt}$) δεν μπορεί να οριστεί αφού δε μπορώ να βρω δύο σημεία οσοδήποτε κοντά θέλω το ένα στο άλλο (σημείο x και σημείο $x+dx$) (Camilleri 2009a, σελ. 87-91 και Beller 1985, σελ. 342-344).

2.2 Το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ

Η ιδέα ότι οι φυσικές έννοιες έχουν νόημα μόνο αν αντιστοιχούν σε μετρήσιμες ποσότητες είχε αποκτήσει αξία μεταξύ των φυσικών στις πρώτες δύο δεκαετίες του εικοστού αιώνα αλλά και ευρεία αποδοχή μεταξύ των λογικών θετικιστών καθ' όλη τη δεκαετία του 1920. Η ιδέα αυτή διατυπώθηκε στη σαφέστερη έκφρασή της στη δεκαετία του 1920 από τον Percy Bridgman, στο βιβλίο του *Η Λογική της Σύγχρονης Φυσικής*. Σε αυτό το έργο, ο Bridgman χρησιμοποίησε τον όρο «οπερασισιοναλισμός» για να περιγράψει τη νέα φιλοσοφική αντιμετώπιση απέναντι στις έννοιες που ο

Einstein είχε εισαγάγει στη φυσική. Στο κεφάλαιο με τίτλο «Η συνεισφορά του Einstein στην αλλαγή της στάσης μας απέναντι στις έννοιες», ο Bridgman υποστήριξε ότι το νόημα της έννοιας του μήκους καθορίζεται όταν «οι πειραματικές διαδικασίες με τις οποίες μετράται το μήκος είναι καθορισμένες: αυτό σημαίνει ότι, η έννοια του μήκους περιλαμβάνει τόσο όσο και τίποτα περισσότερο από το σύνολο των πειραματικών διαδικασιών με τις οποίες καθορίζεται το μήκος». Συνέχισε με το συμπέρασμα ότι στη φυσική «εννοούμε με οποιαδήποτε έννοια, τίποτα περισσότερο από ένα σύνολο πειραματικών διαδικασιών. Η έννοια είναι συνώνυμη με το αντίστοιχο σύνολο πειραματικών διαδικασιών» (Bridgman 1927, σελ. 5, η έμφαση στο πρωτότυπο).

Σε αυτή τη θεωρία νοήματος, η οποία εκδηλώνεται σαφέστερα στη θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Einstein, ο Heisenberg είδε μια ορθολογική διαφυγή από τα προβλήματα που βασάνιζαν την κβαντική θεωρία από το 1924. Η οπερασιοναλιστική άποψη βασιζόταν σε νοητικά πειράματα, τα πιο περίφημα χαρακτηριστικά δείγματα των οποίων βρισκόταν στην ανάλυση του Einstein σχετικά με τον ορισμό του ταυτόχρονου. Για τον Heisenberg, το νόημα των εννοιών όπως η θέση και η ταχύτητα ενός ηλεκτρονίου θα αποκτούσε μια νέα σημασία ακριβώς με αυτόν τον τρόπο. Σε μια επιστολή του προς τον Pauli με ημερομηνία 23 Φεβρουαρίου 1927, που αποτέλεσε το προσχέδιο για το άρθρο της απροσδιοριστίας, που τελικά στάλθηκε για δημοσίευση, ο Heisenberg παραθέτει δύο τρόπους να διαμορφώσει το ερώτημα: «Τι κατανοεί κάποιος με τις λέξεις “θέση του ηλεκτρονίου;” Αυτό το ερώτημα μπορεί να αντικατασταθεί σύμφωνα με το γνωστό μοντέλο από το άλλο: “Πώς καθορίζεται η θέση του ηλεκτρονίου;”» (Camilleri 2009a, σελ. 93). Ο Heisenberg παρουσίασε το ίδιο, θετικιστικό, επιχείρημα στο άρθρο του για την απροσδιοριστία που υπέβαλε για δημοσίευση τον Μάρτιο του 1927:

Όταν κάποιος θέλει να είναι σαφής για το τι πρέπει να γίνει κατανοητό από τις λέξεις «θέση του αντικειμένου», για παράδειγμα του ηλεκτρονίου, τότε πρέπει να προσδιορίσει συγκεκριμένα πειράματα με τη βοήθεια των οποίων σχεδιάζει να μετρήσει τη «θέση του ηλεκτρονίου»: *διαφορετικά η λέξη αυτή δεν έχει νόημα. Δεν υπάρχει έλλειψη τέτοιων πειραμάτων, τα οποία κατ' αρχήν επιτρέπουν σε κάποιον να προσδιορίσει «τη θέση του ηλεκτρονίου» με αυθαίρετη ακρίβεια. Για παράδειγμα, κάποιος μπορεί να φωτίσει το ηλεκτρόνιο και να το παρατηρήσει κάτω από ένα μικροσκόπιο (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 64, η έμφαση προστέθηκε).*

Χρησιμοποιώντας το παράδειγμα του φανταστικού μικροσκοπίου ακτίνων γ , ο Heisenberg εξήγησε ότι «η υψηλότερη δυνατή ακρίβεια στη μέτρηση της θέσης του ηλεκτρονίου διέπεται από το μήκος κύματος του φωτός». Εντούτοις, σε ένα τέτοιο σενάριο μπορούμε μόνο να μετρήσουμε τη θέση ενός ηλεκτρονίου εις βάρος του ακριβούς προσδιορισμού της ορμής του. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τη «στιγμή που καθορίζεται η θέση - επομένως, τη στιγμή που το φωτόνιο σκεδάζεται από το ηλεκτρόνιο - το ηλεκτρόνιο υφίσταται μια ασυνεχή μεταβολή στην ορμή του». Η ασυνεχής ανταλλαγή της ενέργειας μεταξύ του εισερχόμενου κβάντου φωτός και του ηλεκτρονίου σημαίνει ότι οποιαδήποτε μέτρηση της θέσης του ηλεκτρονίου καθιστά την ορμή του απροσδιόριστη «μέχρι του μεγέθους που αντιστοιχεί σε αυτή την ασυνεχή αλλαγή» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 64). Και σε αυτό το βαθμό, «όσο ακριβέστερα προσδιορίζεται η θέση, με τόσο λιγότερη ακρίβεια είναι γνωστή η ορμή και αντίστροφα» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 64).

Δεν πρέπει να πέσουμε στην παγίδα, της ανάγνωσης της σκέψης του Heisenberg ανεξάρτητα από το πλαίσιο των πειραματικών διαδικασιών στο οποίο προτάθηκε. Για να γίνει αυτό, πρέπει να ερμηνεύσουμε το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου των ακτίνων γ όχι με καθαρά *επιστημικούς* όρους, ως απόδειξη των ορίων της γνώσης μας για τη θέση και την ορμή του ηλεκτρονίου, αλλά με *σημασιολογικούς* όρους. Η ακριβής μέτρηση της θέσης ενός ηλεκτρονίου, στο άρθρο του Heisenberg, καθιστά την έννοια της ταχύτητας *χωρίς νόημα*. Η στιγμιαία ασυνεχής μεταβολή της ορμής του ηλεκτρονίου στο σημείο παρατήρησης, σημαίνει ότι δεν μπορούμε να αποδώσουμε μια καλά ορισμένη σημασία στην έννοια της ορμής, όταν καθορίζεται η θέση. Σε αυτό το βαθμό, ο Heisenberg ισχυρίζεται ότι το ίδιο το νόημα της έννοιας της θέσης είναι ασυμβίβαστο με την έννοια της ταχύτητας στην κβαντική μηχανική, αν και οι δύο έννοιες έχουν μια πολύ καλά καθορισμένη σημασία όταν τις μελετάμε ξεχωριστά. Ο πρωταρχικός σκοπός του πειράματος σκέψης ήταν να εξασφαλίσει το νόημα αυτών των εννοιών. Στο εισαγωγικό τμήμα της εργασίας του, ο Heisenberg πρότεινε οπερασιοναλιστικούς ορισμούς για μια σειρά άλλων εννοιών στην κβαντική μηχανική, συμπεριλαμβανομένης της τροχιάς του ηλεκτρονίου, της ταχύτητας και της ενέργειας του ατόμου.

Ο Heisenberg πρόθυμα αναγνώρισε την επίδραση της θεωρίας της ειδικής σχετικότητας του Einstein στην προσέγγισή του στον ορισμό των εννοιών. Στο

άρθρο του για την αρχή της απροσδιοριστίας, ο Heisenberg έδωσε ιδιαίτερη προσοχή σε αυτή την αναλογία:

Είναι φυσικό με αυτόν τον τρόπο να συγκρίνουμε την κβαντική θεωρία με την ειδική σχετικότητα. Σύμφωνα με τη σχετικότητα, η λέξη «ταυτόχρονος» δεν μπορεί να οριστεί παρά μόνο με πειράματα σκέψης στα οποία η ταχύτητα του φωτός υπεισέρχεται με έναν ουσιαστικό τρόπο. Εάν υπήρχε ένας «πιο αυστηρός» προσδιορισμός του ταυτόχρονου, όπως για παράδειγμα, σήματα που διαδίδονται απείρως γρήγορα, τότε η σχετικότητα θα ήταν αδύνατη. . . Συναντούμε μια παρόμοια κατάσταση με τον ορισμό των εννοιών «θέση του ηλεκτρονίου» και «ταχύτητας» στην κβαντική θεωρία. Όλα τα πειράματα που μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε για τον ορισμό αυτών των όρων περιέχουν απαραίτητα την αβεβαιότητα που συνεπάγεται η σχέση $\Delta p \Delta q \sim h$. . . αν και επιτρέπουν σε κάποιον να προσδιορίσει ακριβώς τις έννοιες p και q όταν λαμβάνονται ξεχωριστά (Heisenberg [1927] rose83, σελ. 68).

Αυτό το απόσπασμα δείχνει σαφώς ότι ο Heisenberg προσπάθησε να διαμορφώσει τη δική του προσέγγιση στην κβαντική μηχανική πάνω στην οπερασιοναλιστική άποψη του Einstein, η οποία οδήγησε την ανάπτυξη της ειδικής σχετικότητας. Χρησιμοποιώντας το φανταστικό μικροσκόπιο ακτίνων γ , ο Heisenberg ήταν πλέον σε θέση να καθορίσει πειράματα προσδιορισμού της «θέσης του ηλεκτρονίου».

Το κρίσιμο σημείο για τον Heisenberg στο να επινοήσει το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ δεν ήταν πρωτίστως να καθορίσει τα όρια της ακρίβειας της μέτρησης αλλά μάλλον να καθορίσει το ακριβές νόημα των εννοιών της θέσης και της ταχύτητας στην κβαντική μηχανική μέσω μιας οπερασιοναλιστικής ανάλυσης. Σε αυτό το βαθμό, το μικροσκόπιο ακτίνων γ , όπως παρουσιάστηκε στο άρθρο του 1927, δεν προοριζόταν κυρίως για να αποδείξει τα όρια της γνώσης μας για το ηλεκτρόνιο στην κβαντική θεωρία. Είναι μία σημασιολογική και όχι μία επιστημική, ανησυχία που βρίσκεται πίσω από τη διατύπωση του Heisenberg για το νοητικό πείραμα στο άρθρο του σχετικά με την αρχή της απροσδιοριστίας (Camilleri 2009a, σελ. 92-95).

2.3 Η ανάλυση του Bohr για τα όρια της μέτρησης και για το νόημα των εννοιών

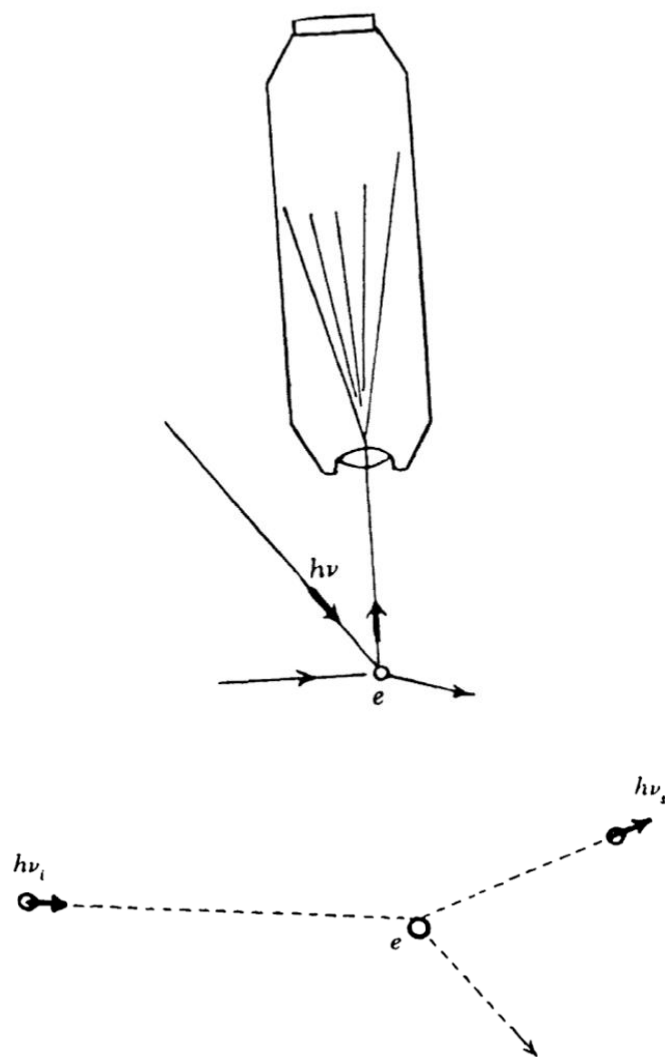
Όπως έχω αναφέρει και σε προηγούμενη ενότητα οι συζητήσεις μεταξύ των Niels Bohr και Werner Heisenberg στην Κοπεγχάγη, κατά το πρώτο εξάμηνο του 1927, έθεσαν τα θεμέλια για αυτό που συνήθως αναφέρεται σήμερα ως «ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης για την κβαντική μηχανική». Στις συζητήσεις αυτές έλαβαν μέρος και άλλοι επιστήμονες, όπως ο Erwin Schrödinger που επισκέφτηκε την Κοπεγχάγη το Σεπτέμβριο του 1926, αλλά και ο Paul Dirac που ήταν εκεί στις αρχές του 1927. Περί τα μέσα Φεβρουαρίου 1927, ο Bohr και ο Heisenberg ένωσαν εξαντλημένοι από τις μεταξύ τους έντονες συζητήσεις. Πολύ αργότερα ο Heisenberg περιέγραψε αυτή την κόπωση:

Δεδομένου ότι οι συζητήσεις μας συνεχίζονταν συχνά ακόμη και αργά μετά τα μεσάνυχτα και δεν παρήγαγαν κάποιο ικανοποιητικό συμπέρασμα παρά τις παρατεταμένες προσπάθειες εδώ και αρκετούς μήνες, και οι δυο μας είχαμε εντελώς εξαντληθεί και μάλλον εκνευριστεί. Ως εκ τούτου, ο Bohr αποφάσισε το Φεβρουάριο του 1927 να πάει για σκι στη Νορβηγία, και ήμουν αρκετά χαρούμενος που έμεινα πίσω στην Κοπεγχάγη, όπου θα μπορούσα να σκεφτώ ανενόχλητος γι' αυτά τα απελπιστικά περίπλοκα προβλήματα (Heisenberg 1971, σελ. 77).

Το Μάρτιο του 1927, ο Bohr επέστρεψε από τη Νορβηγία για να διαπιστώσει ότι ο Heisenberg είχε γράψει το άρθρο του σχετικά με την αρχή της απροσδιοριστίας. Ο Bohr αναγνώρισε αναμφισβήτητα ότι ο Heisenberg είχε κάνει ένα αποφασιστικό βήμα στην αναζήτηση μιας φυσικής ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής. Αλλά ορισμένες πτυχές του άρθρου τον προβλημάτιζαν. Τις εβδομάδες αμέσως μετά την επιστροφή του Bohr, οι σχέσεις απροσδιοριστίας θα γίνονταν αντικείμενο έντονων συζητήσεων και διαφωνιών μεταξύ του Bohr και του Heisenberg. Στο επίκεντρο της διαφωνίας ήταν ο τρόπος με τον οποίο ο Heisenberg αντιμετώπισε τα όρια της ακρίβειας της μέτρησης στο μικροσκόπιο ακτίνων γ. Αν και η διαμάχη αυτή έχει μελετηθεί από πολλούς ιστορικούς της φυσικής, ωστόσο, αξίζει να επανεξεταστούν με προσοχή τα βασικά σημεία της διαφωνίας.

Στην περιγραφή του για το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ο Heisenberg διέπραξε ένα λάθος, το οποίο του επισήμαναν, τόσο ο Bohr όσο και ο Dirac, που βρισκόταν στην Κοπεγχάγη εκείνο το διάστημα. Ο Heisenberg είχε αντιμετωπίσει

τόσο τα φωτόνια όσο και τα ηλεκτρόνια σαν κανονικά σημειακά σωματίδια και υποστήριξε ότι κατά τη στιγμή της σύγκρουσής τους, το φωτόνιο μεταφέρει στο ηλεκτρόνιο ένα διακριτό αλλά μη ελεγχόμενο ποσό ορμής, σύμφωνα με το φαινόμενο Compton. Με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια προσδιορίζεται η θέση του ηλεκτρονίου, τόσο μεγαλύτερη είναι η απροσδιοριστία, εξαιτίας της ασυνεχούς αλλαγής της ορμής, στην ορμή του ηλεκτρονίου. Μάλιστα δε επεσήμανε ότι κάποιος μπορεί να «πραγματοποιήσει τον προσδιορισμό της θέσης [του ηλεκτρονίου] με τόση ακρίβεια όση το επιθυμεί» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 64, έμφαση δική μου).



Εικόνα 1. Στην αρχική του λανθασμένη ανάλυση για το μικροσκόπιο των ακτίνων γ , ο Heisenberg αντιμετώπισε τόσο τα φωτόνια όσο και τα ηλεκτρόνια σαν σωματίδια χωρίς να λάβει υπόψη του τις κυματικές τους ιδιότητες. Η ανάλυση αυτή είναι ισοδύναμη με τη σκέδαση ενός κβάντου φωτός από ένα εσωτερικό ατομικό ηλεκτρόνιο στο φαινόμενο Compton (κάτω σχήμα), και δεν οδηγεί σε απροσδιοριστία αλλά σε επακριβώς μετρήσιμες αλλαγές (Beller 1999a, σελ. 72).

Εντούτοις η σκέδαση Compton δεν οδηγεί σε απροσδιοριστία αλλά οδηγεί μάλλον σε ακριβή υπολογισμό της αλλαγής της ορμής. Με τη βοήθεια των αρχών διατήρησης της ορμής και ενέργειας και γνωρίζοντας για το σκεδαζόμενο φωτόνιο την ενέργεια και την ορμή του, μπορεί κανείς να υπολογίσει ακριβώς την αλλαγή στην ορμή του ηλεκτρονίου. Δεν υπάρχει τρόπος να ξεπεραστεί το κλασικό ντετερμινιστικό πλαίσιο άπαξ και υποτεθεί ότι τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια είναι σημειακά σωματίδια που υπακούουν στους νόμους διατήρησης (Beller 1999a, σελ. 71-72).

Η κριτική του Bohr στη θεώρηση του Heisenberg για το μικροσκόπιο ακτίνων γ βασίστηκε στην άποψη ότι οι ακτίνες φωτός που προσκρούουν πάνω στο ηλεκτρόνιο πρέπει να νοηθούν τόσο ως κύμα όσο και ως σωματίδιο - κάτι που ο Heisenberg απέτυχε να κάνει. Ο Bohr επέμεινε ότι έπρεπε να ληφθούν υπόψη οι περιορισμοί της διακριτικής ικανότητας του οπτικού οργάνου που οφείλονται στην ανταλλαγή ενέργειας - ορμής μεταξύ του εισερχόμενου κβάντου φωτός και του ηλεκτρονίου κατά τη διάρκεια της μέτρησης. Για τους σκοπούς του νοητικού πειράματος, ο Heisenberg αντιμετώπισε απλώς το ηλεκτρόνιο ως ένα σημειακό σωματίδιο που υπέστη μια ασυνεχή μεταφορά ενέργειας και ορμής κατά την αλληλεπίδραση με ένα κβάντο φωτός. Αντίθετα, ο Bohr στη διάλεξή του στο Como δείχνει τη δυσaráσκειά του για την άποψη του Heisenberg, αν και το κάνει με ένα λεπτό τρόπο. Στη εξέταση του ζητήματος της απροσδιοριστίας, ο Bohr τονίζει το λάθος του Heisenberg στην εξαγωγή των σχέσεων της απροσδιοριστίας στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου των ακτίνων γ.

Μια ασυνεχής αλλαγή της ενέργειας και της ορμής κατά τη διάρκεια της παρατήρησης δεν θα μας απέκλειε από το να αποδώσουμε ακριβείς τιμές στις συντεταγμένες του χωροχρόνου, καθώς και στις συνιστώσες της ορμής και της ενέργειας πριν και μετά τη διαδικασία. Η αμοιβαία αβεβαιότητα που πάντα επηρεάζει τις τιμές αυτών των δύο ποσοτήτων είναι . . . ουσιαστικά αποτέλεσμα της περιορισμένης ακρίβειας με την οποία οι αλλαγές σε ενέργεια και ορμή μπορούν να ορισθούν, στην περίπτωση που τα κυματικά πεδία που χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό των χωροχρονικών συντεταγμένων του σωματιδίου είναι αρκετά μικρά (Bohr 1928, σελ. 583).

Σύμφωνα με τον Bohr, ενώ οι σχέσεις απροσδιοριστίας του Heisenberg για τη θέση και την ορμή ενός σωματιδίου ήταν ουσιαστικά σωστές ως μαθηματική διατύπωση,

δεν ήταν σωστή η συλλογιστική της διαδικασίας μέτρησης που οδηγεί σε αυτές. Στην λεπτομερή εννοιολογική ανάλυση του μικροσκοπίου ακτίνων γ , ο Bohr υποστηρίζει ότι όταν μια δέσμη φωτός προσκρούει σε ένα ηλεκτρόνιο, το φως πρέπει να το αντιλαμβανόμαστε όχι μόνο ως σωματίδιο αλλά και ως κύμα. Στην πρώτη περίπτωση είναι απαραίτητο να σκεφτούμε την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και της ακτίνας του φωτός ως μια περίπτωση της σκέδασης Compton, σύμφωνα με την οποία ένα φωτόνιο (ή ένα κβάντο φωτός) που συγκρούεται με το ηλεκτρόνιο θα εκτραπεί σε μια δεδομένη γωνία. Ωστόσο, η κβαντική ερμηνεία του φωτός από μόνη της, δεν μπορεί να εξηγήσει τη διάθλαση της δέσμης των ακτίνων φωτός, ούτε μπορεί να χρησιμοποιηθεί σχετικά με τη διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου. Σύμφωνα με την κλασική οπτική, η διαθλώμενη δέσμη φωτός δεν σκεδάζεται σε μια ορισμένη κατεύθυνση, αλλά μάλλον “ανοίγει” σε μια συγκεκριμένη γωνία. Στο πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ , ο Bohr υποστήριξε ότι η ακτίνα φωτός “απλώνεται” σαν ένα κύμα μετά την αλληλεπίδραση με το ηλεκτρόνιο και επομένως είναι αδύνατο να προσδιοριστεί με ακρίβεια σε ποια γωνία σκεδάζεται το φωτόνιο. Στη συνέχεια, η δέσμη φωτός εστιάζεται σε ένα μόνο σημείο αφού περάσει μέσα από το φακό του μικροσκοπίου. Αυτό είναι ερμηνεύσιμο μόνο με τον τύπο του Rayleigh για τη διακριτική ικανότητα ενός οπτικού οργάνου, ο οποίος με τη σειρά του εξαρτάται από την κυματική θεωρία του φωτός. Για τον Bohr δεν είναι η ασυνέχεια στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και του κβάντου φωτός, αλλά μάλλον ο *κυματοσωματιδιακός δυισμός του φωτός* που μας αποτρέπει από τη μέτρηση της θέσης και της ορμής του ηλεκτρονίου με απερίοριστη ακρίβεια (Camilleri 2009a, σελ. 95-96 και Beller 1992, σελ. 171-175). Στη διάλεξή του στο Como ο Bohr τονίζει ότι πρέπει να λάβουμε υπόψη μας σοβαρά τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου:

Κατά τη χρήση ενός οπτικού οργάνου για τον προσδιορισμό της θέσης, είναι απαραίτητο να θυμόμαστε ότι ο σχηματισμός της εικόνας απαιτεί πάντοτε μια συγκλίνουσα δέσμη φωτός (Bohr 1928, σελ. 583).

Συγκεκριμένα, ο Bohr υποστηρίζει ότι ένα μικροσκόπιο εστιάζει ένα φωτεινό κύμα. Για μια περιγραφή αυτής της συμπεριφοράς στρεφόμαστε στην κλασική κυματική θεωρία, η οποία μας λέει ότι η διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου είναι $\lambda/2\varepsilon$ (όπου λ είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας και το ε είναι το ημίτονο της μισής γωνίας του ανοίγματος). Αλλά τότε έχουμε το ακόλουθο αποτέλεσμα:

Ακόμα και αν το αντικείμενο φωτίζεται από παράλληλο φως, έτσι ώστε η ορμή h/λ του εισερχομένου κβάντου φωτός να είναι γνωστή τόσο σε τιμή όσο και σε κατεύθυνση, η τελική τιμή του ανοίγματος θα εμποδίσει την ακριβή γνώση της ανάκρουσης που συνοδεύει τη σκέδαση (Bohr 1928, σελ. 583).

Η χρήση ενός φακού για την εστίαση της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας αποκλείει κάθε γνώση της πραγματικής ορμής της ακτινοβολίας γ πέρα από το γεγονός ότι εισήλθε στο μικροσκόπιο κάπου στη γωνία της εστίασης. Ένα μικρότερο άνοιγμα θα μας έλεγε πιο συγκεκριμένα τη γωνία ανάκλασης της ακτίνων γ , αλλά ένα μικρότερο άνοιγμα θα παρείχε επίσης μια μικρότερη διακριτική ικανότητα για τον προσδιορισμό της θέσης του ηλεκτρονίου. Ο Bohr ανέφερε ότι η αβεβαιότητα στη συνιστώσα της ορμής παράλληλα προς το εστιακό επίπεδο είναι $2\epsilon h/\lambda$, υποθέτοντας ότι ήδη γνωρίζαμε ακριβώς την ορμή του ηλεκτρονίου πριν από τη σύγκρουση με το κβάντο φωτός. Χωρίς να παρέχει πολλές λεπτομέρειες για τους υπολογισμούς αυτούς ο Bohr μας λέει ότι το γινόμενο αυτού του μεγέθους και της διακριτικής ικανότητας του μικροσκοπίου ισούται με τη σταθερά h του Planck, σε συμφωνία με την αρχή της αβεβαιότητας: $(2\epsilon h/\lambda) \cdot (\lambda/2\epsilon) = h$ (Tanona, 2004, σελ. 488). Συγκεκριμένα αναφέρει:

Το γινόμενο των ελάχιστων ανακριβειών με τις οποίες η συντεταγμένη θέσης και η συνιστώσα της ορμής σε συγκεκριμένη κατεύθυνση μπορούν να εξακριβωθούν δίνεται επομένως από τον τύπο (2) [σχέσεις απροσδιοριστίας] (Bohr 1928, σελ. 583).

Η συζήτηση στην Κοπεγχάγη μεταξύ Bohr και Heisenberg ήταν τόσο έντονη που ο Heisenberg θυμάται ότι «Ο Bohr προσπάθησε να εξηγήσει ότι δεν ήταν σωστό και δεν έπρεπε να δημοσιεύσω το άρθρο. Θυμάμαι ότι [η συζήτηση] τελείωσε με το ξέσπασμά μου σε κλάματα, επειδή απλώς δεν μπορούσα να αντέξω αυτή την πίεση από τον Bohr» (Beller 1999b, σελ. 259-260 και Segrè 2009, σελ. 208).

Ο Heisenberg, γράφοντας στον Pauli στις 4 Απριλίου 1927 αναφέρει το επίκεντρο της αντιπαράθεσής του με τον Bohr:

Διαφωνώ με τον Bohr σχετικά με το βαθμό στον οποίο η σχέση $p_1 q_1 \sim h$ έχει τις ρίζες της στην κυματική διάσταση - ή στην άποψη περί ασυνεχειών της κβαντικής μηχανικής. Ο Bohr τονίζει ότι στο μικροσκόπιο των ακτίνων γ η διάθλαση των

κυμάτων είναι απαραίτητη. Εγώ τονίζω ότι η θεωρία των κβάντων φωτός και ακόμη και τα πειράματα των Geiger-Bothe²⁹ είναι απαραίτητα (Beller 1992, σελ. 173).

Μετά από αρκετές βδομάδες συζητήσεων ο Heisenberg αναγνώρισε την ένσταση του Bohr: Απαντώντας σε επιστολή του Dirac (που και αυτός του είχε επισημάνει προβλήματα στο άρθρο του για την απροσδιοριστία) στις 27 Απριλίου 1927, ο Heisenberg εξήγησε ότι ο Bohr τον είχε πείσει ότι «δεν μπορεί κανείς να υπολογίσει την ταχύτητα» του ηλεκτρονίου αφού μέτρησε τη θέση του στην περίπτωση του μικροσκοπίου ακτίνων γ, όχι λόγω της ασυνεχούς ανταλλαγής της ορμής, αλλά «επειδή η κατεύθυνση του σκεδαζόμενου κβάντου φωτός μετά τη σύγκρουση δεν είναι γνωστή . . . η ακρίβειά σου δε θα είναι λ αλλά λ/ϕ » (Bohr 1985, σελ. 17-18, η έμφαση προστέθηκε). Όπως εξηγεί ο Heisenberg, στην ίδια επιστολή, με το ϕ εννοεί το λεγόμενο αριθμητικό άνοιγμα του μικροσκοπίου, που πρέπει να παίρνει μικρές τιμές για να ισχύει η προσέγγιση λ/ϕ για την ακρίβεια στη θέση του ηλεκτρονίου. Στη συνέντευξή του με τον Kuhn το 1963, ο Heisenberg υπενθύμισε ότι, μετά από συζητήσεις με τον Bohr, είχε «συμφωνήσει για την ερμηνεία του μικροσκοπίου ακτίνων γ— ότι όχι μόνο οι ασυνέχειες ήταν σημαντικές, αλλά και αυτό το πρόβλημα του ανοίγματος και της συμβολής» (Camilleri 2009a, σελ. 97). Γράφοντας στον Pauli στις 16 Μαΐου 1927, ο Heisenberg παραδέχτηκε και πάλι το προηγούμενο λάθος του:

Σε σχέση με αυτή την εργασία, ο Bohr επέστησε την προσοχή μου στο γεγονός ότι στο άρθρο μου ακόμη ένα άλλο σημαντικό σημείο έχει παραβλεφθεί (επίσης και ο Dirac με ρώτησε σχετικά με αυτό αργότερα): Με το μικροσκόπιο των ακτίνων γ θα μπορούσαμε αρχικά να φανταστούμε ότι κάποιος καθορίζει την κατεύθυνση του εισερχομένου κβάντου φωτός καθώς και του ανακλώμενου κβάντου φωτός. Στη συνέχεια, μετά το φαινόμενο Compton, τόσο η θέση όσο και η ταχύτητα είναι γνωστές με μεγάλη ακρίβεια (με μεγαλύτερη ακρίβεια από ότι $\Delta p \cdot \Delta q \sim h$). Ωστόσο, αυτό δεν μπορεί πραγματικά να γίνει, λόγω της περίθλασης του φωτός (κυματική θεωρία!). Για να επιτευχθεί ακρίβεια λ , το μικροσκόπιο πρέπει να έχει διάφραγμα τάξης 1. Έτσι, η σχέση $\Delta p \cdot \Delta q \sim h$ φυσικά αποκτάται, αλλά όχι με τον τρόπο που σκέφτηκα (Bohr 1985, σελ. 19, η έμφαση στο πρωτότυπο).

²⁹ Πρόκειται για πειράματα στα οποία οι Geiger-Bothe ανέπτυξαν τεχνικές προσδιορισμού της σύμπτωσης περιστατικών για να ελέγξουν αν στο φαινόμενο Compton το δευτερεύον φωτόνιο και το ηλεκτρόνιο παράγονται ταυτόχρονα, όπως απαιτεί η αιτιότητα (Pais 1991, σελ. 237).

Στα χρόνια που ακολούθησαν, ακόμη και ο Heisenberg αναφερόταν στην ανάλυση του Bohr για τη μέτρηση στην κβαντική θεωρία, όχι στη δική του αρχική διατύπωση.

Η αντιπαράθεση Bohr-Heisenberg σχετικά με το μικροσκόπιο ακτίνων γ δεν σήμαινε μια πλήρη αναθεώρηση του άρθρου, το οποίο είχε ήδη στείλει προς δημοσίευση ο Heisenberg, αλλά απλά μια επισυναπτόμενη σημείωση στο τέλος του άρθρου. Εκεί ο Heisenberg έγραφε: «Ο Bohr επέστησε την προσοχή μου στο ότι παρέβλεψα ουσιώδη σημεία στη διάρκεια διαφόρων συζητήσεων για αυτό το άρθρο». Συγκεκριμένα, εξήγησε, «στη χρήση ενός ιδεατού μικροσκοπίου ακτίνων γ, για παράδειγμα, πρέπει κανείς να λάβει υπόψη την απαραίτητη απόκλιση της δέσμης ακτινοβολίας. Αυτό έχει ως συνέπεια, ότι στην παρατήρηση της θέσης των ηλεκτρονίων, η διεύθυνση της σκέδασης Compton είναι γνωστή μόνο με μια εξάπλωση που κατόπιν οδηγεί στη σχέση (1) $[Δp·Δq \sim h]$ ». Ένα δεύτερο λάθος που αναγνώρισε ο Heisenberg και το αναφέρει στο υστερόγραφο του άρθρου του είναι το γεγονός ότι «δεν τονίζεται επαρκώς ότι η απλή θεωρία του φαινομένου Compton, αυστηρά μιλώντας, εφαρμόζεται μόνο σε ελεύθερα [και όχι σε δέσμια, δηλαδή ατομικά] ηλεκτρόνια» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 83). Στην περίπτωση αυτή, θα πρέπει να σκέφτηκε ο Bohr, ο Heisenberg απέτυχε πλήρως να παρέχει μια φυσική ερμηνεία για το εσωτερικό του ατόμου (Camilleri 2009a, σελ. 96-98 και Beller 1992, σελ. 173).

Ότι ένας φυσικός του αναστήματος του Heisenberg μπορεί να διέπραξε ένα λάθος σε μια τέτοια λεπτομέρεια είναι αρκετά αινιγματικό. Αλλά η σκληρή άρνησή του να διορθώσει αυτό το λάθος, παρά την έντονη πίεση του Bohr, γίνεται ακατανόητη, εκτός αν συνειδητοποιήσουμε ότι το άρθρο του Heisenberg ήταν ιδεολογικά, αντίθετο στις αιτιάσεις και τις προσδοκίες του Schrödinger. Σε αντίθεση με τις αιτιάσεις του Schrödinger για την υπεροχή της κυματικής περιγραφής, το άρθρο του Heisenberg αποσκοπούσε στο να καταδείξει ότι η «τρομακτικά» αφηρημένη μηχανική των μητρών είναι δεκτική σε μια απεικονιστική, διαισθητική ερμηνεία, εάν κάποιος «επαναπροσδιορίσει» τι σημαίνει διαίσθηση. Σε αντίθεση με το πρόγραμμα της κυματικής οντολογίας του Schrödinger, που είχε στόχο την εξάλειψη της πιο περίπλοκης προσέγγισης με μήτρες, το άρθρο για την αβεβαιότητα του Heisenberg παρείχε μια αποκλειστικά σωματιδιακή και κινηματική ερμηνεία. Σε αυτή την προσπάθεια, ο Heisenberg ήθελε να αποφύγει τα κύματα του Schrödinger. Είναι σαφές ότι η διόρθωση των λαθών με τον τρόπο του Bohr, που εξαρτώνταν ουσιαστικά από κυματικές έννοιες, θα υπονόμει τελείως τους στόχους του

Heisenberg. Ούτε ο έντονα φιλόδοξος Heisenberg θα απέσυρε την εργασία του και θα έχανε την ευκαιρία να πετύχει μία άλλη ουσιαστική συνεισφορά, αφήνοντας έτσι τον Bohr να δρέψει όλους τους καρπούς της ερμηνευτικής προσπάθειάς τους. Όπως το έθεσε ο ίδιος ο Heisenberg: «Ίσως ήταν επίσης ένας αγώνας για το ποιος έκανε το όλο θέμα πρώτος» (Beller 1992, σελ. 173).

Επιπλέον, η Beller (1999a, σελ. 121-140) ισχυρίζεται ότι στην απάντησή του στο μικροσκόπιο του Heisenberg, ο Bohr τάχτηκε υπέρ της εικόνας του Schrödinger για το κυματοπακέτο σε αντίθεση με τη σωματιδιακή εικόνα του Heisenberg. Ένας από τους κύριους λόγους, για την Beller, που ο Bohr υποστήριξε αυτή την άποψη ήταν ότι προσπαθούσε να αναβιώσει τη "δυσφημισμένη" θεωρία των Bohr-Kramers-Slater (BKS)³⁰ και να βάλει τον Heisenberg στη θέση του επειδή δεν είχε αναγνωρίσει ότι η αρχή της αντιστοιχίας είχε σημαντική επιρροή στο άρθρο του για τη μηχανική των μητρών. Το πρώτο μέρος αυτού του ισχυρισμού συνάδει με τη μεταγενέστερη ερμηνεία του Heisenberg για την αντιπαράθεση, όπου υποστηρίζει ότι αφενός ο Bohr θεωρούσε ότι ο ρόλος της κυματικής μηχανικής ήταν κεντρικός, και αφετέρου ότι ξεκίνησε από τη φιλοσοφική ιδέα του κυματοσωματιδιακού δυισμού ενώ ο Heisenberg βασίστηκε στη μαθηματική θεωρία της μηχανικής των μητρών και μόνο. Ένα σχετικό ζήτημα αφορά τη στάση του Bohr απέναντι στον μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής. Η Beller (1999a, σελ. 259-262) ισχυρίζεται ότι ο Bohr απέφευγε τις πιο τεχνικές πτυχές της κβαντικής φυσικής επειδή δεν ήταν πολύ έμπειρος με τα μαθηματικά. Η ίδια υποστηρίζει επίσης ότι ένας λόγος για τον οποίο ο Bohr κινήθηκε προς τη θεωρία του Schrödinger ήταν ότι απλώς δεν ήταν εξοικειωμένος με τα αφηρημένα μαθηματικά της μηχανικής των μητρών. Μάλιστα υπάρχουν στοιχεία στην επιχειρηματολογία της τα οποία συμφωνούν με άλλες κοινές απόψεις για τον Bohr. Συγκεκριμένα, υποστηρίχθηκε συχνά ότι ο Heisenberg θεωρούσε ότι για να υποστηρίξουμε και να κατανοήσουμε τις σχέσεις απροσδιοριστίας το μόνο που χρειαζόμαστε είναι ο κβαντομηχανικός φορμαλισμός, ενώ ο Bohr θεωρούσε ότι ο φορμαλισμός ελάχιστα χρειάζεται, αλλά ότι μάλλον πρέπει να ξεκινήσουμε με μια λογική και εννοιολογική ανάλυση της κατάστασης με όρους προγενέστερους ή εξωτερικούς του φορμαλισμού (Tanona 2004, σελ. 485-486).

³⁰ Η θεωρία των BKS αναφέρεται πιο αναλυτικά στην επόμενη ενότητα (3.1).

Αν και ο Heisenberg αποδέχτηκε τελικά την ένσταση του Bohr ότι η θεωρία της διασποράς του φωτός ήταν θεμελιώδης για την απροσδιοριστία στη μέτρηση της θέσης και της ορμής, όπως έχω υποστηρίξει και σε προηγούμενη ενότητα, ο ίδιος ποτέ δεν πείστηκε ότι ήταν απαραίτητη η ταυτόχρονη χρήση και της κυματικής και της σωματιδιακής περιγραφής του φωτός (Beller 1999a, σελ. 226, Camilleri 2009a, σελ. 63-84). Όπως ανέφερα και στην ενότητα 1.4, αργότερα, ο ίδιος ο Heisenberg είπε στον Kuhn: «Για να εξηγήσουμε το πείραμα ακτίνων γ, ήταν χρήσιμο να παίζουμε και με τις δύο εικόνες. . . αλλά δεν ήταν απολύτως απαραίτητο. Θα μπορούσατε να χρησιμοποιήσετε και τις δύο γλώσσες ανεξάρτητα» (Camilleri 2009a, σελ. 98). Γράφοντας στον Pauli στις 4 Απριλίου 1927, ο Heisenberg ανέφερε ότι αυτός και ο Bohr συνέχισαν να διαφωνούν σχετικά με το βαθμό στον οποίο η σχέση της απροσδιοριστίας «έχει τα θεμέλιά της στην πλευρά της κυματικής ή της ασυνέχειας της κβαντικής μηχανικής». Ωστόσο, την περίοδο εκείνη ο Heisenberg θεώρησε ότι από μια τέτοια συζήτηση δεν θα υπήρχαν σημαντικά οφέλη. Όπως εξήγησε στο γράμμα του στον Pauli, «Με το να δίνουμε έμφαση στη μία ή στην άλλη πλευρά μπορούμε να συζητήσουμε πολύ χωρίς κάτι το καινούργιο». Μόνο μήνες αργότερα ο Heisenberg κατανόησε πλήρως τη φιλοσοφική άποψη που βρισκόταν πίσω από την κριτική του Bohr για το μικροσκόπιο ακτίνων γ (ό.π., σελ. 98).

Η διαφωνία μεταξύ του Bohr και του Heisenberg ήταν, επιφανειακά τουλάχιστον, σχετικά με την ανάγκη επίκλησης του κυματοσωματιδιακού δυισμού του φωτός για να εξηγηθούν τα όρια της ακρίβειας της μέτρησης. Αλλά για να κατανοήσουμε καλύτερα τη φύση της διαφωνίας τους, πρέπει να εξετάσουμε πιο προσεκτικά τις αντίστοιχες φιλοσοφικές θέσεις τους. Μόλις γίνει αυτό, μπορούμε να έχουμε μια σαφέστερη εικόνα του τρόπου με τον οποίο ο Bohr επηρέασε τις φιλοσοφικές απόψεις του Heisenberg. Ενώ για τον Heisenberg η ίδια η έννοια των λέξεων «θέση του ηλεκτρονίου» εξαρτάται από τη δυνατότητα μέτρησης της θέσης του ηλεκτρονίου, ο Bohr διατύπωσε εντελώς διαφορετική άποψη. Όπως εξηγεί ο Max Jammer, η «η αναγωγή της δυνατότητας προσδιορισμού στην δυνατότητα μέτρησης ήταν απαράδεκτη για τον Bohr. . . ο περιορισμός της δυνατότητας μέτρησης επιβεβαιώνει τον περιορισμό της δυνατότητας προσδιορισμού αλλά δεν προηγείται λογικά» (Jammer 1974, σελ. 69). Αυτό είναι σαφές από τη διάλεξη του Como,³¹ όπου

³¹ Το απόσπασμα αυτό από τη διάλεξη του Como έχει αναφερθεί και πιο πριν όταν ο Bohr αναφερόταν στο τεχνικό λάθος του Heisenberg στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου. Επαναλαμβάνω εδώ την

ο Bohr δήλωσε ότι «η αβεβαιότητα που πάντα επηρεάζει» τη μέτρηση της θέσης των ηλεκτρονίων είναι «ουσιαστικά αποτέλεσμα της περιορισμένης ακρίβειας με την οποία οι αλλαγές στην ενέργεια και την ορμή μπορούν να *ορισθούν*» (η έμφαση προστέθηκε) κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ της σκεδαζόμενης δέσμης φωτός και του ηλεκτρονίου (Bohr 1928, σελ. 583). Σύμφωνα με τον Bohr, η χρήση κλασικών εννοιών όπως η θέση και η ορμή θεωρείται ως προϋπόθεση για την περιγραφή της αλληλεπίδρασης.

Η διαφωνία μεταξύ Bohr και Heisenberg δεν πρέπει τότε να ερμηνευθεί, όπως έκαναν ορισμένοι μελετητές, ως μια διαμάχη μεταξύ της επιστημικής θεώρησης του Heisenberg και της σημασιολογικής θεώρησης του Bohr, αλλά μάλλον ως μεταξύ *δύο διαφορετικών σημασιολογικών αντιλήψεων*. Τα γραπτά του Bohr μετά το 1927 περιέχουν πολυάριθμα αποσπάσματα που επιβεβαιώνουν μια τέτοια ανάγνωση. Σε ένα άρθρο που δημοσιεύτηκε το 1929, ο Bohr έγραψε: «Είναι επομένως, μια αναπόφευκτη συνέπεια της περιορισμένης δυνατότητας εφαρμογής των κλασικών εννοιών ότι τα αποτελέσματα που μπορούν να επιτευχθούν με οποιαδήποτε μέτρηση των ατομικών ποσοτήτων υπόκεινται σε εγγενή περιορισμό» (Camilleri 2009a, σελ. 99). Εδώ βρίσκουμε ίσως τη σαφέστερη δήλωση της άποψης του Bohr για τη λογική σχέση μεταξύ των ορίων των κλασικών εννοιών και των ορίων της μέτρησης. Όπως τίθεται από τον John Hendry, «η ανάλυση του Bohr έδειξε ότι. . . ένας οπερασιοναλιστικός ορισμός των κινηματικών εννοιών που απαιτούνται ήταν αδύνατος» (Hendry 1984, σελ. 126).

Αν ψάξουμε βαθύτερα στη θεμελιώδη διαφωνία μεταξύ Bohr και Heisenberg, βλέπουμε ότι όχι μόνο εμπεριέχει διαφορετικές απόψεις σχετικά με τον ορισμό των εννοιών, αλλά και τη διαφορετική αντίληψη με την οποία ο Bohr και ο Heisenberg τείνουν να χρησιμοποιούν τη φράση «ορισμός μιας έννοιας» στα γραπτά τους. Αυτό είναι ένα σημείο που δεν αξιολογήθηκε πάντοτε από τους μελετητές που εξέτασαν τη αντιπαράθεση των Heisenberg και Bohr. Αν και οι Jammer και Hendry είναι σίγουρα ακριβείς όταν υποστηρίζουν ότι ο Bohr απέρριψε πλήρως την οπερασιοναλιστική αναγωγή, της δυνατότητας ορισμού των εννοιών στη δυνατότητα της μέτρησης, που κάνει ο Heisenberg, δεν είναι απολύτως σαφές, σύμφωνα με τους μελετητές αυτούς, ότι όταν ο Heisenberg αναφερόταν στον «ορισμό» μιας έννοιας είχε κατά νου κάτι πολύ διαφορετικό από αυτό που είχε ο Bohr. Εδώ αξίζει να αναφέρουμε την

αναφορά για να τονιστεί η διαφορά στον προσδιορισμό των εννοιών της ενέργειας και ορμής από τον Bohr και τον Heisenberg.

διευκρίνιση του σημείου αυτού από τον Edward MacKinnon ο οποίος παραθέτει με λεπτομέρεια τη θέση του Bohr:

Ο Bohr δεν πίστευε ότι θα μπορούσε να καθορισθεί μέσω οπερασιοναλιστικών ορισμών ποιο είναι το νόημα εννοιών όπως η «θέση» και η «τροχιά». Αυτοί οι όροι έχουν ήδη καθορισμένη σημασία πριν και ανεξάρτητα από οποιαδήποτε συγκεκριμένα ατομικά πειράματα. Το βασικό νόημα αυτών των όρων καθορίζεται από τη συνήθη χρήση της γλώσσας στην κλασική φυσική. Συνεπώς το κρίσιμο πρόβλημα που απαιτεί ανάλυση είναι το πώς τέτοιες ήδη σημαντικές κλασικές έννοιες λειτουργούν σε κβαντικά πλαίσια. . . Όταν ο Bohr μιλάει για «ορισμό». . . δεν εννοεί ότι *καθορίζουμε* το νόημα κάποιου όρου ή κάποιας έννοιας. Αναφέρεται μάλλον στους κανόνες που διέπουν τη χρήση, σε κβαντικό πλαίσιο, ενός όρου του οποίου το κλασικό νόημα έχει ήδη καθοριστεί (Camilleri 2009a, σελ. 99, η έμφαση προστέθηκε).

Η ερμηνεία αυτή φέρνει στο φως τις εντελώς διαφορετικές θεωρίες νοήματος που βρίσκονται πίσω από τη διαφωνία Heisenberg-Bohr. Όταν ο Heisenberg μιλούσε για τον «ορισμό» των εννοιών στο άρθρο του, όντως εννοούσε τον καθορισμό του νοήματος των εννοιών της «θέσης» και της «ταχύτητας». Ενώ ο Heisenberg είχε αποδεχτεί μια οπερασιοναλιστική θεωρία νοήματος, ο Bohr υιοθέτησε τη άποψη ότι «το νόημα μιας έννοιας προέρχεται από τη χρήση της στην κοινή γλώσσα και την εξιδανίκευση αυτής της χρήσης στην κλασική φυσική» (ό.π., σελ. 99). Έτσι, όταν ο Bohr λέει ότι η έννοια της θέσης δεν είναι «καλώς ορισμένη», δεν σημαίνει ότι δεν καταλαβαίνουμε την έννοια της λέξης «θέση», αλλά ότι η έννοια αυτή δεν μπορεί, αυστηρά μιλώντας, να εφαρμοστεί σε ένα ατομικό σωματίδιο. Στο πλαίσιο αυτό ο Bohr, στη διάλεξή του στο Como, υποστήριξε ότι, «ένας σαφής ορισμός» της έννοιας της ταχύτητας «αποκλείεται από το κβαντικό αξίωμα» (Bohr 1928, σελ. 583).

Ο Pauli επισκέφθηκε την Κοπεγχάγη στις αρχές Ιουνίου 1927 και έπαιξε σημαντικό ρόλο στο συμβιβασμό και την κατανόηση της βαρύτητας της άποψης του Bohr, από τον Heisenberg, όπως γνωρίζουμε από μια επιστολή του Heisenberg στον Bohr που γράφτηκε λίγο μετά την επίσκεψη του Pauli (Bohr 1985, σελ. 19). Συγκεκριμένα ο Heisenberg γράφει: «Τώρα κατάλαβα πολύ καλύτερα ότι είναι πραγματικά πολύ σημαντικό να βάλεις τις έννοιες με τη σειρά προτεραιότητας που εσύ θέλεις και όχι όπως τις έβαλα στο άρθρο μου. Βλέπω επίσης πολύ καλά ότι με αυτόν τον τρόπο έχει γίνει πολύ πιο όμορφο» (Heisenberg σε Bohr, 18 Ιουνίου 1927,

Mehra και Rechenberg 2000, σελ. 186). Οι Mehra και Rechenberg θεωρούν ότι με το απόσπασμα αυτό «Ο Heisenberg τονίζει τη συμφωνία που έχει αποκατασταθεί μεταξύ των απόψεων τους». Πιθανώς, ο Heisenberg εδώ δέχεται ότι η απροσδιοριστία στον προσδιορισμό ορισμένων μεγεθών προκύπτει πρωτίστως από την περιορισμένη δυνατότητα της χρήσης των κλασικών εννοιών και όχι από τους περιορισμούς που υπάρχουν στη διαδικασία της μέτρησης. Στις συζητήσεις που διεξήχθησαν στο τέλος της διάλεξης του Bohr στο Como το Σεπτέμβριο του 1927, ο Heisenberg εξήγησε: «Η φυσική ερμηνεία της σχέσης αβεβαιότητας $\Delta p \cdot \Delta q \sim h$ και η σχέση της με τις γενικές απόψεις που έθεσε ο Bohr έχουν αποσαφηνισθεί για πρώτη φορά μέσα από τις διευκρινίσεις του Bohr» (Bohr 1985, σελ. 141). Στη συνέντευξή του με τον Kuhn, ο Heisenberg παραδέχτηκε ότι «πραγματικά, σε όλη αυτήν την περίοδο, είχα διαφωνήσει με τον Bohr και η σοβαρότερη διαφωνία ήταν την περίοδο των σχέσεων αβεβαιότητας» (Camilleri 2009a, σελ. 98-100).

2.4 Το σημείο καμπής στη φιλοσοφία του Heisenberg και η μετατόπιση των απόψεών του κοντά στις απόψεις του Bohr

Πριν από τη λεπτομερή εξέταση της μεταστροφής του Heisenberg προς τη φιλοσοφική οπτική του Bohr, αξίζει να ανακεφαλαιώσουμε με συντομία τα διαδοχικά στάδια από τα οποία πέρασε η φιλοσοφική σκέψη του Heisenberg, τους μήνες που προηγήθηκαν της σύγκρουσής του με τον Bohr στην Κοπεγχάγη. Πριν από την εργασία του το 1927, τον Heisenberg είχε απασχολήσει η ανάπτυξη ενός νέου εννοιολογικού πλαισίου για την κινηματική, που περιελάμβανε μια νέα κατανόηση του χώρου και του χρόνου στο υποατομικό επίπεδο. Επομένως, το άρθρο του 1927 θα πρέπει να μελετηθεί στο πλαίσιο αυτών των ανησυχιών. Εκείνη τη στιγμή ο Heisenberg εξέφρασε την ανησυχία του, σε γράμμα του στον Pauli στις 23 Φεβρουαρίου 1927, για το θεμελιώδες ερώτημα: «Τι κατανοεί κάποιος με την έκφραση “θέση του ηλεκτρονίου;”». Τον Οκτώβριο και Νοέμβριο του 1926 ο Heisenberg προσανατολιζόταν στη δυνατότητα ενός «ασυνεχούς» χωρόχρονου ή μιας στατιστικής ερμηνείας των εννοιών του χώρου και του χρόνου. Εντούτοις, μέχρι τον Φεβρουάριο του 1927 προσέγγιζε το ερώτημα από διαφορετική πλευρά. Ο Heisenberg ήλπιζε ότι το οπερασιοναλιστικό πρόγραμμα, που ο Einstein είχε εφαρμόσει με επιτυχία στη θεωρία της σχετικότητας, θα αποδείκνυε και πάλι την αξία του στην κβαντική μηχανική.

Ο Bohr, από την άλλη πλευρά, δεν είχε ποτέ προσεγγίσει το πρόβλημα με αυτό τον τρόπο. Για τον Bohr, η τεταμένη κατάσταση μεταξύ των κλασικών εννοιών και του κβαντικού κόσμου δεν ήταν κάτι που θα μπορούσε να εξηγηθεί έξω από ένα βαθύτερο επίπεδο φυσικής ή φιλοσοφικής ανάλυσης, αλλά κάτι που έπρεπε να δεχτούμε και να θεωρήσουμε ως το δεδομένο σημείο εκκίνησης. Η περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής των κλασικών εννοιών ήταν γι' αυτόν μια κατάσταση που δεν μπορούσε να ξεπεραστεί μέσα από μια οπερασιοναλιστική ανάλυση του νοήματος των εννοιών. Μπορούμε να τονίσουμε την αντίθεση μεταξύ των δύο: ενώ στο άρθρο του για την απροσδιοριστία ο Heisenberg είχε δηλώσει ότι «δεν είναι δυνατή η ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής που χρησιμοποιεί συνήθεις κινηματικές και μηχανικές έννοιες» (Heisenberg [1927] 1983, σελ. 62) στο άρθρο του στη διάλεξη του Como ο Bohr είχε ως σημείο εκκίνησης την άποψη ότι οποιαδήποτε «ερμηνεία των πειραμάτων βασίζεται ουσιαστικά στις κλασικές έννοιες» (Bohr 1928, σελ. 580).

Ήταν μόλις λίγους μήνες μετά τη δημοσίευση του άρθρου σχετικά με την αρχή της απροσδιοριστίας όταν Heisenberg εκτίμησε τη φιλοσοφική θέση που βρισκόταν πίσω από τις επικρίσεις του Bohr για το μικροσκόπιο των ακτίνων γ. Στη συνέντευξή του με τον Kuhn το 1963, ο Heisenberg υπενθύμισε ότι ο ίδιος και ο Bohr είχαν αρχικά προσεγγίσει το πρόβλημα του ορισμού των εννοιών με αρκετά διαφορετικούς τρόπους. Όπως εξήγησε, στο άρθρο του για την αρχή της απροσδιοριστίας, δεν είχε «εγκαταλείψει ακόμη εντελώς» την ελπίδα του να αντικαταστήσει τις έννοιες της κλασικής φυσικής με τις κβαντικές έννοιες. Ενώ πρέπει να έχουμε επίγνωση του γεγονότος ότι οι μεταγενέστερες αναμνήσεις του Heisenberg δεν είναι πάντοτε αξιόπιστες, αξίζει να παραθέσουμε εκτενώς κάποια αποσπάσματα από τη συνέντευξή του με τον Kuhn το 1963, όπου ο Heisenberg αναλύει τη μετατόπιση στη σκέψη του κατά τη διάρκεια των συζητήσεών του με τον Bohr στην Κοπεγχάγη:

Λοιπόν, αυτό που είναι σαφές σε αυτό το άρθρο είναι η δική μου παρανόηση ότι δεν θα μπορούσε κανείς να χρησιμοποιήσει τις λέξεις «θέση» και «ταχύτητα» με τον ίδιο τρόπο που είχε κάνει και πριν.³² Έτσι αυτές οι λέξεις έπαψαν να εξαρτώνται από τα φαινόμενα. Τώρα η γενική αντιμετώπιση είναι *ότι πρέπει κανείς να κρατήσει τις λέξεις παρά το γεγονός ότι έχουν αυτούς τους περιορισμούς* – αυτή ήταν η θέση του Bohr. Ο

³² Εννοεί ότι στο άρθρο του για την απροσδιοριστία ο ίδιος υποστηρίζει ότι δεν μπορεί να χρησιμοποιούνται οι έννοιες της θέσης και της ορμής με την κλασική τους σημασία.

Bohr θα επέμενε: «Λοιπόν, παρά τη δική σου Αρχή της Αβεβαιότητας, πρέπει να χρησιμοποιήσεις τις λέξεις «θέση» και «ταχύτητα», μόνο και μόνο επειδή «δεν έχεις τίποτε άλλο». Λοιπόν αυτή ήταν η άποψη του Bohr που αναδείχτηκε κατά τη διάρκεια των συζητήσεων, η οποία κατά πάσα πιθανότητα, για μένα τον ίδιο δεν ήταν τόσο ξεκάθαρη στο άρθρο, όπως ήταν μερικούς μήνες αργότερα. Ήταν μόνο σε αυτό το στάδιο της εξέλιξης των πραγμάτων που σταδιακά κανείς συνήθιζε στην ιδέα ότι ποτέ δεν μπορούμε πραγματικά να βγούμε από αυτή την ατμόσφαιρα απόγνωσης και απελπισίας επειδή δεν έχουμε ποτέ τις λέξεις με τις οποίες μπορούμε πραγματικά να καταφέρουμε κάτι τέτοιο (Camilleri 2009a, σελ. 101, η έμφαση προστέθηκε).

Νωρίτερα στη συνέντευξη με τον Kuhn, ο Heisenberg είχε διατυπώσει μια παρόμοια άποψη:

. . . είναι επίσης αλήθεια ότι, απλά και μόνο από τις συζητήσεις με τον Bohr, έμαθα ότι αυτό που προσπάθησα να κάνω δεν μπορούσε να γίνει. Δηλαδή, δεν μπορεί κανείς να εγκαταλείψει εντελώς τις παλιές λέξεις διότι πρέπει να μιλήσει για κάτι που παρατηρεί. Το είδα αυτό πολύ καθαρά σε αυτό το μικροσκόπιο ακτίνων γ. Στο μικροσκόπιο ακτίνων γ πρέπει να πεις τι συμβαίνει στο μικροσκόπιο σου. . . Έτσι θα μπορούσα να συνειδητοποιήσω ότι δεν θα μπορούσα να αποφύγω τη χρήση αυτών των αδύναμων όρων που έχουμε χρησιμοποιήσει πάντα εδώ και πολλά χρόνια για να περιγράψουμε αυτό που βλέπω. . . Συνειδητοποίησα κατά τη συζήτηση αυτών των προβλημάτων με τον Bohr, πόσο απελπιστική είναι η κατάσταση. Από τη μία πλευρά γνωρίζουμε ότι οι έννοιές μας δεν λειτουργούν και από την άλλη πλευρά, δεν έχουμε τίποτα εκτός από τις έννοιες με τις οποίες θα μπορούσαμε να μιλήσουμε για αυτό που βλέπουμε (ό.π., σελ. 102, η έμφαση προστέθηκε).

Σε άλλο σημείο της συνέντευξης αναφέρει: «οι λέξεις μας [οι κλασικές έννοιες] δεν ταιριάζουν [στην κβαντική φυσική]». Μόνο μέσα από τη διατύπωση της κβαντικής μηχανικής με γνωρίμους όρους, όπως ο Bohr επέμενε, θα μπορούσαν οι φυσικοί να ελπίζουν ότι θα έβγαζαν νόημα από αυτήν ως κάτι παραπάνω από ένα απλό σύνολο μαθηματικών σχέσεων (Lindley 2011, σελ. 184). Μόνο μετά από συζητήσεις με τον Bohr, ο Heisenberg συνειδητοποίησε ότι οι έννοιες της κλασικής φυσικής —της θέσης και της ορμής— είναι απαραίτητες για μια *περιγραφή* του τι συμβαίνει κατά την αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και ενός κβάντου φωτός στο μικροσκόπιο των ακτίνων γ. Στα τέλη του 1927, ίσως στις αρχές του 1928, ο

Heisenberg εγκατέλειψε πλήρως την προηγούμενη του ελπίδα, που είχε εκφραστεί στο άρθρο του για την απροσδιοριστία, ότι θα μπορούσαμε να έχουμε νέες εμπειρικές έννοιες για την κβαντική μηχανική (Camilleri 2009a, σελ. 102).

Μπορούμε να βρούμε ισχυρά αποδεικτικά στοιχεία για αυτή τη μετατόπιση στη σκέψη του Heisenberg αντιπαραβάλλοντας τη φιλοσοφική θέση που διατυπώθηκε στο άρθρο του 1927 με εκείνη των διαλέξεών του, το 1929 στο Σικάγο, οι οποίες δημοσιεύθηκαν με τον τίτλο *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας*. Αυτή η μετατόπιση στη σκέψη του Heisenberg είναι εμφανής με τρεις στενά συνδεδεμένους, αλλά διακριτούς μεταξύ τους, τρόπους. Ο πρώτος είναι η ρητή απόρριψη της οπερασιοναλιστικής λογικής του ορισμού των εννοιών. Αναφερόμενος στις προηγούμενες προσπάθειές του να «αποφύγει τις αντιφάσεις» στην κβαντική μηχανική, ο Heisenberg επανέλαβε την οπερασιοναλιστική άποψη που είχε καθοδηγήσει τις προσπάθειές του το 1927, δηλαδή ότι «είναι απαραίτητο να απαιτηθεί να μην εισάγεται καμία έννοια σε μια θεωρία που να μην έχει πειραματικά επιβεβαιωθεί τουλάχιστον στον ίδιο βαθμό ακρίβειας όπως τα πειράματα που εξηγούνται από τη θεωρία». Αλλά τώρα παραδέχτηκε ότι: «Δυστυχώς, είναι αδύνατο να εκπληρώσουμε την απαίτηση αυτή, καθώς συχνά αποκλείονται οι συνηθέστερες ιδέες και λέξεις» (Heisenberg 1930, σελ. 1). Από το 1929 ο Heisenberg δεν όριζε πλέον τις έννοιες, αλλά τα όρια της δυνατότητας εφαρμογής τους. Αυτή η εννοιολογική μετατόπιση συμπίπτει με την μετατόπιση της χρήσης των όρων από τον Heisenberg. Ενώ το 1927 ήταν περισσότερο διατεθειμένος να χρησιμοποιήσει τον όρο *Ungenauigkeit* (ανακρίβεια) σε σχέση με τις πειραματικές μετρήσεις, μετά το 1930 ήταν πολύ πιο διατεθειμένος να χρησιμοποιήσει τον όρο *Unbestimmtheit* (απροσδιοριστία, προέρχεται από το ρήμα *bestimmen* που σημαίνει προσδιορίζω) σε σχέση με τη χρήση κλασικών εννοιών. Τον όρο αυτό βέβαια τον χρησιμοποιεί και στην εργασία του, αναφερόμενος σε θεωρητικές επισημάνσεις των Dirac και Pauli σχετικά με την απουσία βεβαιότητας στη θεωρητική περιγραφή ενός συστήματος. Με άλλα λόγια έκανε διάκριση ανάμεσα στην «ανακρίβεια» των πειραματικών αποτελεσμάτων και την απροσδιοριστία των μαθηματικών περιγραφών. Τη λέξη *Unsicherheit* (αβεβαιότητα) την είχε επιλέξει ο Bohr και ο Heisenberg τη χρησιμοποιεί στο τέλος του άρθρου του, στην υποσημείωση που αναγκάζεται να προσθέσει μετά την πίεση που δέχτηκε από τον Bohr. Έτσι η λέξη αυτή περνά μέσω του Bohr στο λεξιλόγιο των φυσικών. (Lindley 2011, σελ. 183-184).

Ο δεύτερος τρόπος με τον οποίο εκδηλώνεται αυτή η μετατόπιση στη σκέψη του Heisenberg αφορά την αναλογία που είχε περιγράψει μεταξύ της θεωρίας της σχετικότητας και της κβαντικής μηχανικής. Στην εργασία του 1927, ο Heisenberg τόνισε ρητά τη σημασία της χρήσης ενός οπερασιοναλιστικού ορισμού των εννοιών και στις δύο θεωρίες. Ωστόσο, μέχρι το 1929 η αναλογία μεταξύ της κβαντικής μηχανικής και της σχετικότητας σε αυτό το πλαίσιο εξαφανίζεται εντελώς από τα γραπτά του Heisenberg. Αξίζει να σημειωθεί ότι στις διαλέξεις του 1929 ο Heisenberg απέφυγε να υποστηρίξει, όπως είχε κάνει το 1927, ότι η θεωρία της ειδικής σχετικότητας του Einstein στηριζόταν σε έναν οπερασιοναλιστικό ορισμό του ταυτόχρονου. Αντ' αυτού, δέχθηκε τώρα το αμετάβλητο της ταχύτητας του φωτός ως ένα αξίωμα, χωρίς καμία αναφορά στον οπερασιοναλιστικό ορισμό του ταυτόχρονου.

Η αφετηρία της κριτικής της θεωρίας της σχετικότητας ήταν το αξίωμα ότι δεν υπάρχει ταχύτητα σήματος μεγαλύτερη από αυτή του φωτός. Με παρόμοιο τρόπο, αυτό το χαμηλότερο όριο στην ακρίβεια με την οποία μπορούν να γίνουν ορισμένες μεταβλητές γνωστές ταυτόχρονα, μπορεί να θεωρηθεί ως νόμος της φύσης (με τη μορφή των λεγόμενων σχέσεων αβεβαιότητας) Αυτές οι σχέσεις αβεβαιότητας, μας δίνουν το βαθμό της ελευθερίας από τους περιορισμούς των κλασικών εννοιών, που είναι απαραίτητος για μια συνεκτική περιγραφή των ατομικών διεργασιών (Heisenberg 1930, σελ. 3-4).

Το πιο σημαντικό όμως είναι ότι τώρα αντιδιαστέλλει τη θεωρία της σχετικότητας με την κβαντική μηχανική. Ενώ στην περίπτωση της σχετικότητας οι έννοιες του χώρου και του χρόνου είχαν αποκτήσει νέο νόημα, στην περίπτωση της κβαντικής μηχανικής η κατάσταση ήταν αρκετά διαφορετική. Όπως εξηγεί στον Kuhn:

Ίσως να θυμάσαι ότι αργότερα προσπάθησα να συγκρίνω αυτή τη θέση στη σχετικότητα και στην κβαντική μηχανική. Στη σχετικότητα, σε κάποιο βαθμό, η υπαρκτή γλώσσα έχει προσαρμοστεί στο μαθηματικό σχήμα. Οι άνθρωποι λένε ότι δύο γεγονότα είναι ταυτόχρονα αναφορικά με το τάδε σύστημα. Στην κβαντική θεωρία, η γλώσσα δεν έχει προσαρμοστεί ποτέ σε αυτή. Αυτό είναι τόσο ενδιαφέρον (Camilleri 2007a, σελ. 196).

Σχολιάζοντας τις μεταγενέστερες προσπάθειες ανάπτυξης μιας νέας γλώσσας προσαρμοσμένης στην κβαντική μηχανική, ο Heisenberg τόνισε ότι οι φιλόσοφοι

είχαν συνειδητοποιήσει ότι θα ήταν απαραίτητο να εγκαταλείψουμε την Αριστοτελική λογική με τις δύο τιμές, κόστος όμως που πολλοί δεν ήταν διατεθειμένοι να πληρώσουν. Η ανάγκη να οδηγηθεί σε τέτοιες υπερβολές, όπως παραδέχθηκε ο Heisenberg, «δεν ήταν τόσο σαφής εκείνη τη στιγμή». Αλλά μετά από συζητήσεις με τον Bohr, φαινόταν ότι «το μόνο λογικό πράγμα που έπρεπε να κάνουμε ήταν να χρησιμοποιήσουμε τις παλιές λέξεις και να θυμηθούμε πάντα τους περιορισμούς τους» (ό.π., σελ. 196). Στη δική του διάλεξη με θέμα «Ο ρόλος των Σχέσεων της Απροσδιοριστίας στη Σύγχρονη Φυσική» που έδωσε στη Λειψία το 1930, ο Heisenberg εξηγεί: «οι σχέσεις της απροσδιοριστίας υποδηλώνουν ότι η εφαρμογή των λέξεων “θέση, ταχύτητα” χάνει κάθε εύλογο νόημα πέρα από συγκεκριμένα όρια» (ό.π., σελ. 197).

Ο τρίτος τρόπος με τον οποίο μπορούμε να διακρίνουμε το μετασχηματισμό στη σκέψη του Heisenberg μπορεί να διαπιστωθεί στο ρόλο που του παρείχε το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ακτίνων γ στις διαλέξεις του 1929. Στο άρθρο του 1927, ο Heisenberg είχε αρχικά προτείνει το πείραμα σκέψης ως μέσο για την καθιέρωση ενός οπερασιοναλιστικού ορισμού της έννοιας της «θέσης». Αλλά στις διαλέξεις του 1929 παρουσίασε απλά το μικροσκόπιο ακτίνων γ ως μια απεικόνιση των εγγενών ορίων της ακρίβειας στη μέτρηση της θέσης και της ορμής ενός ηλεκτρονίου. Έχει περάσει σε μεγάλο βαθμό απαρατήρητο το γεγονός ότι στις διαλέξεις του Heisenberg στο Σικάγο το 1929, το μικροσκόπιο ακτίνων γ δεν εξυπηρετεί πλέον το σκοπό για τον οποίο προοριζόταν αρχικά— δηλαδή, να παρέχει έναν οπερασιοναλιστικό ορισμό των εννοιών της θέσης και της ταχύτητας. Ούτε επίσης αποτελεί κάποια προσπάθεια να κατανοήσουμε το νόημα των εννοιών όπως η «θέση» και η «ταχύτητα». Στις διαλέξεις του 1929, το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου των ακτίνων γ, απλώς χρησιμεύει για την διευκρίνιση της απροσδιοριστίας στη θέση και την ορμή ενός ηλεκτρονίου (ό.π., σελ. 197).

Κεφάλαιο 3. Η αρχή της συμπληρωματικότητας και οι αποκλίνουσες απόψεις των Bohr και Heisenberg

Εάν η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg συνιστά απόρροια της κβαντικής μηχανικής, δεν ισχύει το ίδιο και για την αρχή συμπληρωματικότητας του Bohr. Πρόκειται για μια σημαντικά ευρύτερη αλλά όχι τόσο αυστηρά ορισμένη έννοια, η οποία είναι πρωτίστως φιλοσοφικής φύσεως. Μολονότι ελάχιστη αμφιβολία χωρεί όσον αφορά το ότι η διατύπωση της αρχής οφείλει πολλά στο έργο του Heisenberg πάνω στις κβαντικές αβεβαιότητες, η ιδέα της συμπληρωματικότητας δεν ήταν απλώς μία γενίκευση της αρχής του Heisenberg. Γεννήθηκε από στοχασμούς γύρω από την κβαντική θεωρία που απασχολούσαν τον Bohr, προτού ο Heisenberg αρχίσει το έργο του (Kragh 2004, σελ. 246). Ο Max Jammer αναφέρει σχετικά: «Η συχνά επαναλαμβανόμενη δήλωση, ότι ο Bohr παρήγαγε την έννοια της συμπληρωματικότητας από τις σχέσεις αβεβαιότητας του Heisenberg είναι εσφαλμένη τόσο από ιστορική όσο και από εννοιολογική άποψη. Οι σχέσεις αβεβαιότητας του Heisenberg ήταν για τον Bohr μάλλον μια επιβεβαίωση των αντιλήψεων που είχε ψηλαφίσει, πολύ πριν ο Heisenberg εξαγάγει την αρχή του από τη θεωρία μετασχηματισμού των Dirac-Jordan. Είναι αλήθεια ότι το έργο του Heisenberg ώθησε τον Bohr να δώσει στις σκέψεις του για τη συμπληρωματικότητα μια συνεπή και τελική διατύπωση, αλλά αυτές οι σκέψεις, μπορούν να ανιχνευθούν πίσω στο χρόνο τουλάχιστον μέχρι και τον Ιούλιο του 1925» (Jammer 1966, σελ. 345).

Ο Bohr δημοσίευσε για πρώτη φορά τις ιδέες του για την κβαντική μηχανική και εισήγαγε μια νέα φιλοσοφική άποψη την οποία ονόμασε «συμπληρωματικότητα» σε ένα διεθνές συνέδριο φυσικής στην Ιταλική πόλη Κόμο το φθινόπωρο του 1927, το οποίο διοργανώθηκε για να τιμηθεί η εκατοστή επέτειος του θανάτου του Alessandro Volta, ο οποίος είχε γεννηθεί και πεθάνει στο Κόμο. Ανάμεσα στους φυσικούς που παρευρέθησαν στο συνέδριο αυτό, όπου προήδρευσε ο Quirino Majorana, ήταν παρόντες οι Niels Bohr, Max Born, Satyandra Nath Bose, William Lawrence Bragg, Marcel Brillouin, Louis de Broglie, Arthur Holly Compton, Peter Debye, William Duane, Enrico Fermi, James Franck, Yakov Fraenkel, Walter Gerlach, Werner Heisenberg, Max von Laue, Hendrik Antoon Lorentz, Robert Andrews Millikan, Friedrich Paschen, Wolfgang Pauli, Max Planck, Owen Williams Richardson, Ernest

Rutherford, Arnold Sommerfeld, Otto Stern, Richard Chase Tolman, Robert Williams Wood, και Pieter Zeeman. Μια πραγματική συνάντηση κορυφής του κόσμου των φυσικών της εποχής εκείνης. Μόνο ο Einstein και ο Ehrenfest, αν και προσκλήθηκαν δεν ήταν παρόντες (Jammer 1974, σελ. 86). Συγκεκριμένα ο Bohr, στις 16 Σεπτεμβρίου 1927, παρουσίασε τη φημισμένη εργασία του σε αυτό το συνέδριο με τίτλο «Το κβαντικό αξίωμα και οι πρόσφατες εξελίξεις στην ατομική θεωρία».³³

Πολλοί από τους σημαντικούς φυσικούς της δεκαετίας του 1930, μεταξύ των οποίων οι Pauli, Heisenberg, Jordan, Rosenfeld και ο Rudolf Peierls έγιναν ενθουσιώδεις υποστηρικτές της μποριανής φιλοσοφίας της συμπληρωματικότητας και την έβλεπαν ως τον αληθινό εννοιολογικό πυρήνα της κβαντικής μηχανικής. Η αρχή της συμπληρωματικότητας έγινε ο ακρογωνιαίος λίθος αυτού που αργότερα καθιερώθηκε να αναφέρεται ως η ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής της Σχολής της Κοπεγχάγης. Ο Pauli, μάλιστα, έφτασε μέχρι του σημείου να δηλώσει: «Μπορούμε να αποκαλέσουμε τη σύγχρονη κβαντική θεωρία ως "Η θεωρία της συμπληρωματικότητας" (σε αναλογία με την ορολογία "Θεωρία της Σχετικότητας")» (Pauli 1980, σελ. 7). Ο Peierls αργότερα ισχυρίστηκε: «όταν αναφέρεσαι στην ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης της μηχανικής, αυτό που στ' αλήθεια εννοείς είναι η κβαντική μηχανική». Το σε τι ακριβώς συνίσταται η ερμηνεία της Κοπεγχάγης, ωστόσο, δεν είναι διόλου σαφέστερο από τη φύση της ίδιας της αρχής της συμπληρωματικότητας. Πρόκειται για ένα ζήτημα που ακόμα συζητούν οι φιλόσοφοι και λίγοι φυσικοί οι οποίοι ρέπουν προς το φιλοσοφείν. Στην πραγματικότητα βέβαια, όπως αναφέρει ο Helge Kragh «ο όρος "ερμηνεία της Κοπεγχάγης" δεν χρησιμοποιούνταν κατά τη δεκαετία του 1930. Πρωτομπήκε στο λεξιλόγιο των φυσικών το 1955, όταν τον χρησιμοποίησε ο Heisenberg για να αντιδιαστείλει την ορθόδοξη άποψη από ορισμένες ανορθόδοξες ερμηνείες στις οποίες ασκούσε κριτική» (Kragh 2004, σελ. 248).

³³ Ο αγγλικός τίτλος είναι «The Quantum Postulate and the Recent Developments in Atomic Theory». Η έκδοση στα αγγλικά περιέχεται στα πρακτικά του συνεδρίου: *Atti del Congresso Internazionale dei Fisici 11-20 Settembre 1927, Como-Pavia-Roma, Volume Secondo*, Nicola Zanichelli, Bologna 1928, σελ. 565-588. Επίσης πάλι η αγγλική έκδοση περιέχεται τελειοποιημένη στο *Bohr's Collected Works* vol. 6, σελ. 113 - 136. Η διάλεξη του Κόμο, σε αγγλική έκδοση, δημοσιεύεται σε άρθρο στο *Nature* 121 (1928), σελ. 580-590 και είναι σε κάποια σημεία διαφοροποιημένη από την αρχική διάλεξη του Κόμο. Για τις διαφοροποιήσεις μεταξύ της διάλεξης του Κόμο και του άρθρου που δημοσιεύεται στο *Nature*, βλ. Bohr 1985, σελ. 111. Για τις διάφορες αποδόσεις της διάλεξης του Κόμο που δημοσιεύτηκαν στα αγγλικά, γερμανικά, δανικά, γαλλικά και ρωσικά βλ. Bohr 1985, σελ. 110 αλλά και Jammer 1974, σελ. 86.

Είναι αξιοσημείωτο ότι όλοι οι φυσικοί που ανεπιφύλακτα υιοθέτησαν τη σκοπιά του Bohr διατηρούσαν προσωπική επαφή με το Δανό φυσικό και είχαν φιλοξενηθεί στο Ινστιτούτο του. Έξω όμως από το στενό κύκλο της Κοπεγχάγης, η φιλοσοφία της συμπληρωματικότητας έτυχε σημαντικά ψυχρότερης υποδοχής, η οποία κυμαινόταν από ευγενική αδιαφορία ως και, σε λιγοστές περιπτώσεις, την εχθρότητα. Ο Dirac, ο οποίος διατηρούσε στενές σχέσεις με τους υποστηρικτές της Σχολής της Κοπεγχάγης, και έτρεφε μεγάλο σεβασμό στον Bohr, δεν έβλεπε τίποτα αξιόλογο σε όλη την κουβέντα περί συμπληρωματικότητας. Δεν οδηγούσε σε καινούργιες εξισώσεις και δεν μπορούσε να χρησιμοποιηθεί στους υπολογισμούς, τους οποίους ο Dirac έτεινε να ταυτίζει με τη φυσική (ό.π., σελ.248). Ο ίδιος ο Dirac, σε συνέντευξή του, λέει: «Ποτέ δεν μου άρεσε η συμπληρωματικότητα . . . Δεν μας δίνει κανένα νέο τύπο . . . Πιστεύω ότι η τελευταία λέξη δεν ειπώθηκε ακόμη σχετικά με τα κύματα και σωματίδια» (Beller 1999a, σελ. 119). Ακόμη και ο ίδιος ο Heisenberg, και αυτός ερωτώμενος σε συνέντευξη, αναφέρει: «Γνωρίζω ότι, εκτός από τον Landé, πολλοί άλλοι φυσικοί είχαν αναστατωθεί από αυτή την κατάσταση, και αισθάνθηκαν ότι ήταν μια δυαδική περιγραφή της φύσης» (ό.π., σελ. 119). Αλλά ούτε και όλοι οι σπουδαστές του Ινστιτούτου του Bohr ασπάστηκαν τη φιλοσοφία της συμπληρωματικότητας. Ας πάρουμε ως παράδειγμα την περίπτωση του Christian Møller, ο οποίος φοίτησε στο Ινστιτούτο από το 1926 ως το 1932 και παρέμεινε εκεί καθ' όλη τη σταδιοδρομία του. Καίτοι ο Møller ήταν τυπικό προϊόν της σχολής της Κοπεγχάγης και είχε επηρεαστεί βαθιά από το εργασιακό πνεύμα της, τα επιχειρήματα που στηρίζονταν στη συμπληρωματικότητα δεν άφησαν το παραμικρό ίχνος στα δημοσιευμένα έργα του. Ο Møller ήταν ασφαλώς εξοικειωμένος με αυτού του είδους τα επιχειρήματα, όμως δεν έτρεφε ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τα ευρέα εννοιολογικά προβλήματα στα οποία απέδιδε μεγάλη σημασία ο Bohr. Όπως αναθυμόταν σε μία συνέντευξή του το 1963, «Μολονότι γινόμασταν ακροατές εκατοντάδων επί εκατοντάδων συζητήσεων γύρω από αυτά τα θέματα [τη συμπληρωματικότητα και τα προβλήματα των μετρήσεων], και μας ενδιέφεραν, δεν νομίζω ότι κανένας από εμάς, εκτός από τον Rosenfeld ίσως, αφιέρωνε πολύ χρόνο σε αυτή την υπόθεση [...] Όταν είσαι νέος, έχει περισσότερο ενδιαφέρον να καταπιάνεσαι με συγκεκριμένα προβλήματα. Εννοώ ότι επρόκειτο για κάτι υπερβολικά γενικό, σχεδόν φιλοσοφικό» (Kragh 2004, σελ. 248).

Παρά τις ισχυρές αντιδράσεις που προκάλεσε, το τι ακριβώς σημαίνει η αρχή της συμπληρωματικότητας του Bohr εξακολουθεί να παραμένει ένα αίνιγμα (Beller

1992, σελ. 148). Ο M. Jammer, σχολιάζοντας την εξαιρετική δυσκολία κατανόησης της αρχής συμπληρωματικότητας, περιέγραψε την εκτεταμένη προσπάθεια του Carl Friedrich von Weizsäcker να αποσαφηνίσει την αρχική έννοια της συμπληρωματικότητας. Εντούτοις, όταν ο Weizsäcker ρώτησε τον Bohr «αν η ερμηνεία του παρουσιάζει με ακρίβεια αυτό που είχε ο Bohr στο μυαλό του, ο Bohr του έδωσε μια σίγουρα αρνητική απάντηση» (Jammer 1974, σελ. 90).³⁴ Οι πιο πρόσφατοι μαθητές της σκέψης του Bohr συνεχίζουν να βιώνουν την «ανυπέρβλητη δυσκολία» (Beller 1992, σελ. 148), ακόμα και ακατανοησία, εκείνων των γραπτών του Bohr που ασχολούνται με τη συμπληρωματικότητα. Έτσι, ο H. Folse ισχυρίζεται: «Ακόμη και με σχεδόν ένα ολόκληρο χρόνο δουλειάς σε αυτή την εργασία, αναρίθμητες αναδιατυπώσεις, δύο δημόσιες διαλέξεις και τρεις διαφορετικές πηγές δημοσίευσης, το δοκίμιο περιέχει πολλές ασάφειες και ποτέ δεν καθιστά πολύ σαφές τι υποτίθεται ότι είναι αυτή η νέα “άποψη”» (ό.π., σελ. 148). Ομοίως απαισιόδοξο είναι το συμπέρασμα του Peter Gibbins: «Ο Niels Bohr έκανε τα πάντα για να τελειοποιήσει, και στη συνέχεια να αποσαφηνίσει τις σκέψεις του, σχετικά με την κβαντική μηχανική, αλλά, δυστυχώς, τα γραπτά του δεν φαίνεται να έχουν ωφεληθεί από τις προσπάθειες αυτές. Είναι πολύ δύσκολο να πω. . . πώς οι ιδέες του έχουν συνέπεια» (ό.π., σελ. 148). Ο Don Howard, το 1994, επίσης αναφέρει: «Τώρα υπάρχουν σημάδια αυξανόμενης απογοήτευσης.... για το ότι μπορούμε ποτέ να κατανοήσουμε καλά τη φιλοσοφική του [του Bohr] θεώρηση» (Beller 1999a, σελ. 119). Ωστόσο, ακόμη και οι σύγχρονοι του Bohr, πολλοί από τους οποίους είδαν τους εαυτούς τους ως υποστηρικτές της συμπληρωματικότητας, συχνά απέτυχαν να κατανοήσουν την αρχική σημασία των απόψεων του Bohr. Αυτό ισχύει ακόμη και για τον Pauli, ο οποίος έγραψε στον Bohr στις 13 Ιανουαρίου 1928, επιμένοντας ότι η έννοια της «συμπληρωματικότητας της αιτιώδους και της χωροχρονικής περιγραφής απαιτεί περαιτέρω αποσαφήνιση» (Bohr 1985, σελ. 41). Ο P. Ehrenfest, όπως θα αναφέρω και παρακάτω, αν και αποδέχεται την ανωτερότητα των επιχειρημάτων του Bohr³⁵ αναφέρεται σε αυτά ως «τα απαίσια ξόρκια της ορολογίας Bohr. Αδύνατο για κάποιον άλλο να συνοψίσει» (Bohr 1985, σελ. 38). Σε πιο πρόσφατη εργασία του, το 2004, ο Howard υποστηρίζει: «Το ξεμπέρδεμα των απόψεων του Bohr από εκείνους που ισχυρίζονται ότι μιλούν για λογαριασμό του και η κατανόηση του τι η

³⁴ «Το ιστορικό αυτό γεγονός πρέπει να είναι μία προειδοποίηση προς εμάς ώστε να είμαστε εξαιρετικά προσεκτικοί στην ανάλυσή μας για την αρχική σύλληψη της ιδέας της συμπληρωματικότητας του Bohr» (Jammer 1974, σελ. 90).

³⁵ Στο πέμπτο συνέδριο Solvay.

συμπληρωματικότητα πραγματικά συνεπάγεται είναι σημαντικά» (Howard 2004, σελ. 670). Στο κεφάλαιο αυτό θα εξετάσουμε ακριβώς τον τρόπο με τον οποίο ο Heisenberg ερμηνεύει την άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα.

Παρόλο που ο Heisenberg, δημοσίως, υπερασπίστηκε την άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και τη δεκαετία του 1930, η κατανόησή του όσον αφορά την πρώτη διατύπωση της συμπληρωματικότητας, φαίνεται τελικά να αποκλίνει σημαντικά από την αρχική άποψη του Bohr. Όπως αναφέρθηκε και σε προηγούμενη ενότητα, οι Bohr και Heisenberg υποστήριζαν αρκετά διαφορετικές απόψεις για τον κυματοσωματιδιακό δυισμό, σε αυτό όμως το κεφάλαιο θα εστιάσω αποκλειστικά στις αντίστοιχες ερμηνείες τους για τη συμπληρωματικότητα, που αφορούν τη χωροχρονική και την αιτιακή περιγραφή. Συχνά, κυρίως από την παλαιότερη βιβλιογραφία, δεν έχει τονισθεί ότι στην εισαγωγή της διάλεξης του Κόμο, στην οποία ο Bohr για πρώτη φορά παρουσίασε την άποψή του για τη συμπληρωματικότητα, ο ίδιος επεδίωξε να ασχοληθεί με το πρόβλημα των στάσιμων καταστάσεων. Δηλαδή οι πιο συνηθισμένες απόψεις για τη συμπληρωματικότητα, που σχετίζονται είτε με τη χρήση αμοιβαία αποκλειόμενων πειραματικών διατάξεων, ή με το πρόβλημα του κυματοσωματιδιακού δυισμού ή ακόμη και με την «ολότητα» των κβαντικών φαινομένων που απαγορεύει τη διάκριση μεταξύ παρατηρούμενου αντικειμένου και συσκευής παρατήρησης και οι οποίες βρίσκονται σε μεταγενέστερα κείμενα του Bohr, δεν παρουσιάζονται στη διάλεξη του Κόμο. Χωρίς να υπερεκτιμήσουμε τη σημασία των διαφορετικών προσεγγίσεων της έννοιας της συμπληρωματικότητας του Bohr, σε σχέση με τις καθιερωμένες, αξίζει να επισημανθεί ότι οι ερευνητές έτειναν να αγνοούν την αρχική διατύπωση της συμπληρωματικότητας στην εισαγωγή της διάλεξης του Κόμο, αλλά προτιμούσαν να επικεντρώσουν την ανάλυσή τους στη συμπληρωματικότητα των αμοιβαία αποκλειόμενων πειραματικών διατάξεων που τόνιζε ο Bohr σε όλη τη δεκαετία του 1930. Αυτή η τάση είναι εμφανής ακόμα και στα έργα των συγχρόνων του Bohr, ιδιαίτερα του Pauli (1980, σελ. 7) και του Jordan (Beller 1992, σελ. 148-149 και Camilleri 2007b, σελ. 515).

Στη διάλεξη του Κόμο, του 1927, ο Bohr χρησιμοποίησε τον όρο «αιτιακή περιγραφή» για να αναφερθεί στη διατήρηση της ενέργειας, ενώ χρησιμοποίησε τον όρο χωροχρονική περιγραφή για να αναφερθεί στον εντοπισμό της θέσης του ηλεκτρονίου στο χώρο, μια δεδομένη χρονική στιγμή. Ο Heisenberg παρουσίασε μια διαφορετική εξήγηση της έννοιας της συμπληρωματικότητας του Bohr στα τέλη της

δεκαετίας του 1920 και στις αρχές της δεκαετίας του 1930, προσπαθώντας να ανακατασκευάσει το βασικό επιχείρημα του Bohr. Έτσι ερμηνεύει την αιτιακή περιγραφή ενός συστήματος ως την περιγραφή της εξέλιξης της κυματοσυνάρτησης ψ . Σύμφωνα με τον Heisenberg, η ιδέα της συμπληρωματικότητας δεν εκφράζει μια σχέση μεταξύ των κλασικών εννοιών, αλλά μάλλον αναφέρεται στην αναγκαιότητα να επικαλούνται δύο τρόποι περιγραφής στην κβαντομηχανική— ο πειραματικός (εκφραζόμενος σε κλασικές έννοιες) και ο φορμαλιστικός (εκφραζόμενος μέσω της εξίσωσης του Schrödinger). Αναδεικνύοντας τις αποκλίνουσες απόψεις του Bohr και του Heisenberg σχετικά με τη συμπληρωματικότητα μεταξύ χωροχρονικής και αιτιακής περιγραφής, μπορούμε να αποκομίσουμε μια καλύτερη εικόνα των διαφορετικών φιλοσοφικών τους στάσεων απέναντι στην έννοια της συμπληρωματικότητας και στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής γενικότερα (Camilleri 2007b, σελ. 515).

3.1 Η πρώτη άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα (συμπληρωματικότητα μεταξύ χωροχρονικής και αιτιακής περιγραφής)

Προ αυτού του περίφημου ακροατήριου, στο Κόμο, που ήταν συγκεντρωμένο στην αίθουσα του Istituto Carducci, ο Bohr, ξεκίνησε την παρουσίασή του με τα εξής λόγια:

Θα προσπαθήσω, χρησιμοποιώντας μόνο απλές σκέψεις και χωρίς να αναφερθώ σε λεπτομέρειες τεχνικού μαθηματικού χαρακτήρα, να σας περιγράψω μια γενική άποψη που πιστεύω ότι είναι κατάλληλη για να δώσει μια εντύπωση για τη γενική τάση της ανάπτυξης της θεωρίας από την αρχή της και που ελπίζω ότι θα είναι χρήσιμη για την εναρμόνιση των φαινομενικά αντικρουόμενων απόψεων διαφόρων επιστημόνων (Bohr 1985, σελ. 113 και Jammer 1974, σελ. 86).³⁶

Στη συνέχεια αναφέρει ότι η κβαντική θεωρία «χαρακτηρίζεται από την παραδοχή ενός θεμελιώδους περιορισμού στις κλασικές φυσικές ιδέες, όταν εφαρμόζονται σε ατομικά φαινόμενα» (Bohr 1928, σελ. 580). Κάτι τέτοιο όμως συνεχίζει, δημιουργεί μια ιδιόμορφη θέση «καθώς η ερμηνεία του πειραματικού υλικού βασίζεται εκτενώς στις κλασικές έννοιες» (ό.π., σελ. 580). Αναγνωρίζοντας

³⁶ Η εισαγωγή της διάλεξης του Κόμο δεν υπάρχει στο αντίστοιχο άρθρο που δημοσιεύεται στο *Nature* στις 14 Απριλίου 1928.

τις δυσκολίες που προκύπτουν στη διαμόρφωση της κβαντικής θεωρίας υποστηρίζει ότι «η ουσία της μπορεί να εκφραστεί με το λεγόμενο *κβαντικό αξίωμα*, το οποίο σε οποιαδήποτε ατομική διαδικασία αποδίδει μια απαραίτητη *ασυνέχεια* ή μάλλον *ατομισμό*,³⁷ εντελώς ξένη προς τις κλασικές θεωρίες και συμβολισμένη με το κβάντο δράσης του Planck» (ό.π., σελ. 580, η έμφαση προστέθηκε). Με αυτή την ευκαιρία, ο Bohr τόνισε ότι στον κβαντικό κόσμο, εν αντιθέσει προς τον κλασικό κόσμο η παρατήρηση ενός συστήματος δεν μπορεί ποτέ να γίνει χωρίς να διαταραχθεί το εν λόγω σύστημα. Πώς είναι, λοιπόν, δυνατόν να γνωρίζουμε την κατάσταση του συστήματος; Το κβαντικό αυτό αξίωμα φαινόταν να συνεπάγεται πως η κλασική διάκριση ανάμεσα στον παρατηρητή και στο παρατηρούμενο αντικείμενο έπανε πλέον να είναι βάσιμη (Kragh 2004, σελ. 247).

Αν και είχε συζητήσει ιδιωτικά την ιδέα της συμπληρωματικότητας με τον Heisenberg, τον Pauli και τον Klein στην Κοπεγχάγη, ως τον Φεβρουάριο του 1927 πότε του δεν είχε δημοσιεύσει κάποιο κείμενο για αυτή, ή εκθέσει δημόσια τις απόψεις του, πριν τις 16 Σεπτεμβρίου 1927. *Η κεντρική απόκλιση από την κλασική φυσική, όπως την είδε τώρα ο Bohr, ήταν ο διαχωρισμός της χωροχρονικής περιγραφής στην κβαντική μηχανική από αυτό που χαρακτήρισε ως αιτιακή περιγραφή* (Camilleri 2007b, σελ. 516). Στην πρώτη ενότητα της εργασίας του χαρακτήρισε αυτούς τους δύο τρόπους περιγραφής ως *συμπληρωματικούς* αλλά *αμοιβαία αποκλειόμενους*:

Αφενός, ο ορισμός μιας κατάστασης ενός φυσικού συστήματος, όπως συνήθως κατανοείται, απαιτεί την εξάλειψη όλων των εξωτερικών διαταραχών. Αλλά στην περίπτωση αυτή, σύμφωνα με τον κβαντικό αξίωμα, οποιαδήποτε παρατήρηση θα είναι αδύνατη και πάνω απ' όλα, οι έννοιες του χώρου και του χρόνου χάνουν την άμεση αίσθησή τους. Αφ' ετέρου, αν για να καταστεί δυνατή η παρατήρηση, επιτρέπουμε ορισμένες αλληλεπιδράσεις με κατάλληλες μετρητικές διατάξεις, που δεν ανήκουν στο σύστημα, δεν είναι πλέον δυνατός ένας σαφής προσδιορισμός της κατάστασης του συστήματος και δεν μπορεί να υπάρξει θέμα αιτιότητας με τη συνήθη σημασία της λέξης. Η ίδια η φύση της κβαντικής θεωρίας μας αναγκάζει να θεωρούμε τις χωροχρονικές συντεταγμένες και την απαίτηση για αιτιότητα, η σύζευξη των οποίων χαρακτηρίζει τις κλασικές θεωρίες, ως *συμπληρωματικά* αλλά *αποκλειόμενα* [αμοιβαία] χαρακτηριστικά της περιγραφής, συμβολίζοντας την εξιδανίκευση της παρατήρησης και του προσδιορισμού, αντίστοιχα (Bohr 1928, σελ. 580, η έμφαση προστέθηκε).

³⁷ Μετάφραση της αγγλικής λέξης individuality.

Θεωρείται ευρέως ότι αυτό το απόσπασμα περιέχει τον πυρήνα των πρώιμων προσπαθειών του Bohr για να παράσχει μια ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Αναφερόμενος στο απόσπασμα αυτό, ο Max Jammer επισημαίνει: «Αυτή η δήλωση στην οποία ο όρος “συμπληρωματικότητα” εμφανίζεται για πρώτη φορά, και στην οποία η χωροχρονική περιγραφή αναφέρεται ως συμπληρωματική ως προς την αιτιακή περιγραφή, περιείχε την ουσία αυτού που αργότερα έγινε γνωστό ως “Η ερμηνεία της Κοπεγχάγης” της κβαντικής μηχανικής» (Jammer 1966 σελ. 351-352). Ωστόσο, υπάρχει αξιόλογη διαφωνία σήμερα μεταξύ των μελετητών σχετικά με τη σημασία της έννοιας της συμπληρωματικότητας του Bohr. Ένα μεγάλο μέρος της σύγχυσης που περιβάλλει τις απόψεις του Bohr πηγάζει από τη διφορούμενη διατύπωση πολλών από τα κρίσιμα αποσπάσματα στα γραπτά του. Πράγματι, όπως ανέφερα και στην αρχή του κεφαλαίου, οι σύγχρονοι του Bohr, ακόμη και εκείνοι που συνεργάστηκαν στενά μαζί του, ένιωθαν έντονα τις δυσκολίες που παρουσιάζονταν στην ερμηνεία των λεγομένων του. Όπως θα δούμε, η κατανόηση του ίδιου του Heisenberg, για το κρίσιμο αυτό απόσπασμα, αποδεικνύεται αρκετά διαφορετική από αυτή που επεδίωκε ο Bohr (Camilleri 2007b, σελ. 516).

Αρχικά, είναι απαραίτητο να εξετάσουμε προσεκτικά την ιδέα του Bohr ότι η χωροχρονική και η αιτιακή περιγραφή είναι συμπληρωματικές μεταξύ τους. Η χωροχρονική περιγραφή για τον Bohr σήμαινε τον προσδιορισμό της θέσης ενός ηλεκτρονίου στο χώρο σε δεδομένη χρονική στιγμή. Με άλλα λόγια, σήμαινε τον προσδιορισμό της συνάρτησης $x(t)$ όπου x η θέση του ηλεκτρονίου και t ο χρόνος. Κάτι τέτοιο δεν είναι προβληματικό. Αλλά, η κατανόηση του Bohr για το τι εννοεί η «αιτιακή περιγραφή» απαιτεί περαιτέρω αποσαφήνιση. Για τον Bohr, *η αιτιότητα στη φυσική, ήταν ουσιαστικά συνώνυμη με τη διατήρηση της ορμής και της ενέργειας* (ό.π., σελ. 516). Όπως ο ίδιος το έθεσε: «Το γεγονός ότι ένα τέτοιο κλειστό σύστημα συνδέεται με μια συγκεκριμένη τιμή ενέργειας, μπορεί να θεωρηθεί ως μια άμεση έκφραση της απαίτησης για αιτιότητα που εμπεριέχεται στο θεώρημα της διατήρησης της ενέργειας» (Bohr 1928, σελ. 587). Σε επιστολή του προς τον Schrödinger, στις 23 Μαΐου 1928, ο Bohr κατέστησε ξανά σαφές ότι το επιχείρημά του βασιζόταν στον «συμπληρωματικό χαρακτήρα των συντεταγμένων του χωροχρόνου και των νόμων διατήρησης» (Bohr 1985, σελ. 48, έμφαση προστέθηκε). Εδώ ερμήνευσε την αιτιακή περιγραφή στη φυσική μέσω της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής - μια άποψη που είχε εκφράσει ήδη από το 1924 στο κοινό του άρθρο με τους Kramers και Slater για το μοντέλο του εικονικού ταλαντωτή του ατόμου. (Camilleri 2007b, σελ. 516).

Κάνοντας αναφορά στη θεωρία των Bohr-Kramers-Slater (θεωρία BKS) που δημοσιεύτηκε με τον τίτλο «Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας»,³⁸ πρέπει να τονίσουμε ότι ο δρόμος προς την κβαντική μηχανική περνούσε από τη θεωρία ακτινοβολίας η οποία αντιμετώπιζε προβλήματα, ιδίως λόγω της ανακάλυψης από τον αμερικάνο Arthur Holly Compton, το Μάιο του 1923, του ομώνυμου φαινομένου. Ο Compton το 1923 διαπίστωσε ότι οι παλμοί μονοχρωματικών ακτίνων Χ συμπεριφέρονται ως σωματίδια με ορμή και ενέργεια σύμφωνα με την παλιά υπόθεση του Einstein για τα κβάντα φωτός ($p=h\nu/c$ και $E=h\nu$, όπου ν η συχνότητα). Σε παρόμοιο συμπέρασμα με τον Compton κατέληξε ανεξάρτητα και ο Debye στη Ζυρίχη (Kragh 2004, 193). Η θεωρία ή πρόταση³⁹ των BKS, αποτελεί την κορύφωση της διαμάχης Bohr και Einstein για την ύπαρξη του κβάντου φωτός ή του φωτονίου, όπως αργότερα καθιερώθηκε να ονομάζεται (το όνομα αυτό πρότεινε το 1926 ο αμερικανός χημικός Gilbert Lewis).⁴⁰

Η πρώτη φορά που ο Bohr συναντά τον Einstein είναι τον Απρίλιο του 1920. Στις 27 Απριλίου 1920 σε ομιλία του στην Εταιρία Φυσικής του Βερολίνου με τίτλο

³⁸ Bohr, N., Kramers, H. A., & Slater, J. C. (1924). Η κβαντική θεωρία της ακτινοβολίας. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47(281), σελ. 785-802. Στα γερμανικά, Bohr, N., Kramers, H. A., & Slater, J. C. (1924). Über die quantentheorie der strahlung. *Zeitschrift für Physik*, 24(1), 69-87. Επίσης αναδημοσιεύεται στο Bohr 1984, σελ. 99-118. Για περισσότερες λεπτομέρειες γενικότερα βλ. Bohr 1984, σελ. 3-216.

³⁹ Ο A. Pais (1991, σελ. 236) αναφέρει: «Μου αρέσει να αποκαλώ την εργασία των BKS μια πρόταση και όχι μια θεωρία, διότι προτείνει μάλλον παρά επεξεργάζεται ένα ερευνητικό πρόγραμμα. Το άρθρο είναι σκοτεινό σε ύφος και δεν περιέχει καθόλου μαθηματικές λεπτομέρειες».

⁴⁰ Η εργασία του Gilbert Lewis από το Berkeley είχε ως τίτλο «Η διατήρηση των φωτονίων». Το θέμα: μια υπόθεση ότι το φως αποτελείται από «ένα νέο είδος ατόμου ... άκτιστο και άφθαρτο [για το οποίο] προτείνω το όνομα φωτόνιο». Το νέο όνομα έγινε σχεδόν αμέσως τμήμα της επιστημονικής γλώσσας. Όσον αφορά για την εννοιολογική διαφορά μεταξύ κβάντου φωτός και φωτονίου μπορούμε να πούμε τα εξής. Ο Einstein εισήγαγε τα κβάντα φωτός στην εργασία του που υπέβαλε προς δημοσίευση στο περιοδικό *Annalen der Physik*, το Μάρτιο του 1905, με τίτλο «Μια ευρετική άποψη για την εκπομπή και το μετασχηματισμό του φωτός». Τότε, τα κβάντα φωτός ήταν ακόμη μόνο κβάντα ενέργειας, δηλαδή ικανοποιούσαν μόνο την εξίσωση $\mathcal{E}=h\nu$. (Για την ακρίβεια η εξίσωση αυτή, με ν να είναι η συχνότητα του κβάντου φωτός, εμφανίζεται σε μια διορθωτική εργασία του Einstein το 1906, με την οποία η θεωρία του Planck συμβαδίζει πλέον με τα κβάντα φωτός). Αλλά, ένα πραγματικό σωματίδιο έχει όχι μόνο ενέργεια αλλά και ορμή. Όμως, καμία αναφορά δεν υπάρχει στην εργασία του 1905 για τις εξισώσεις είτε της ορμής $\vec{p} = h\vec{k}$, (k είναι το κυματικό διάνυσμα) ή της σχέσης ενέργειας ορμής για σωματίδιο μηδενικής μάζας $E = c \cdot |\vec{p}|$. Με άλλα λόγια δεν υπάρχει η πλήρης έννοια του σωματιδίου που ενσωματώνεται στον όρο φωτόνιο. Σε μια άλλη εργασία του το 1909 ο Einstein εξήγαγε τις ενεργειακές διακυμάνσεις της ακτινοβολίας του μελανός σώματος. Αξίζει να μνημονευτεί ότι μία όψη της εργασίας του αυτής είναι πως μαζί με τις ενεργειακές διακυμάνσεις συνεξετάζονταν και οι διακυμάνσεις της ορμής, δηλαδή το 1909 ο Einstein σαφώς σκεπτόταν το κβάντο φωτός ως σωματίδιο υπό την έννοια με το οποία είναι σωματίδια τα ηλεκτρόνια και τα άτομα. Τελικά το 1916 ο Einstein έγραψε την μαθηματική εξίσωση της ορμής του φωτονίου που προκύπτει άμεσα από τη θεωρία της σχετικότητας. Θα επιστήσουμε την προσοχή στο γεγονός ότι, στον πατέρα της θεωρίας της σχετικότητας, πήρε δώδεκα χρόνια για να γράψει δίπλα-δίπλα την εξίσωση $E = \frac{h\nu}{c}$ με την εξίσωση $\mathcal{E}=h\nu$ (Kragh 2004, σελ. 91- 93 και Pais 1983, σελ. 407- 408).

«Σχετικά με τις φασματικές σειρές των στοιχείων» ο Bohr αναφέρει: «Δε θα συζητήσω εδώ τις γνωστές δυσκολίες στις οποίες οδηγεί η ‘υπόθεση των κβάντων φωτός’ σε σχέση με τα φαινόμενα της συμβολής, για την εξήγηση των οποίων η κλασική θεωρία της ακτινοβολίας έχει αποδειχθεί ότι είναι τόσο εντυπωσιακά κατάλληλη. Πάνω απ’ όλα δεν θα εξετάσω το πρόβλημα της φύσης της ακτινοβολίας» (Bohr [1920] 1976, σελ. 244, η έμφαση προστέθηκε). Βλέπουμε, δηλαδή, ότι ο Bohr, αφενός θεωρεί ως υπόθεση τα κβάντα φωτός και αφετέρου τονίζει τη σημασία της κλασικής κυματικής θεωρίας. Οι δύο συνεργάτες του Bohr στη διατύπωση της BKS θεωρίας ήταν οι Hendrik A. Kramers και ο John Slater. Ο Kramers ήταν ένας νεαρός Ολλανδός επιστήμονας που στις 25 Αυγούστου 1916 έγραψε στον Bohr ότι επιθυμεί να συνεργαστεί μαζί του για την εκπόνηση της διδακτορικής του διατριβής. Ο Bohr, με την παρότρυνση του αδελφού του, δέχτηκε την πρόταση του νεαρού Ολλανδού που έγινε και ο στενότερος βοηθός του για μια περίπου δεκαετία (Dresden 1987, σελ. 34-35).⁴¹ Ο Slater, που μόλις είχε πάρει το διδακτορικό του από το Harvard, ήταν ο πρώτος Αμερικανός που επισκέφτηκε το Ινστιτούτο του Bohr στην Κοπεγχάγη λίγο πριν τα Χριστούγεννα του 1923 (Pais 1991, σελ. 235). Αναπτύσσοντας μια ιδέα του Slater η θεωρία των BKS εγκαταλείπει την έννοια των κβάντων φωτός, αντικαθιστώντας τα με ένα εικονικό πεδίο ακτινοβολίας, «σύμφωνα με τον Slater. . . το άτομο, ακόμη και πριν από τη διαδικασία μετάβασης μεταξύ των στάσιμων καταστάσεων είναι ικανό να επικοινωνεί με μακρινά άτομα μέσω ενός εικονικού πεδίου ακτινοβολίας» (Pais 1991, σελ. 236). Το άτομο σε κάθε στάσιμη κατάσταση έφερε το πεδίο αυτό, το οποίο είχε την ιδιότητα να γνωρίσει και να περιέχει όλες τις δυνατές συχνότητες μετάβασης σε χαμηλότερες στάσιμες καταστάσεις, σαν να αποτελούνταν από ένα πλήθος αρμονικών ταλαντωτών. Όλος ο μηχανισμός που περιγραφόταν οδηγούσε σε απόρριψη της αιτιότητας και παραβίαση των νόμων διατήρησης (Jammer 1966, σελ. 184 και Pais 1991, σελ. 236).

Η επικοινωνία με ένα μακρινό άτομο, η λήψη ενός φωτεινού σήματος που εκπεμποταν από ένα άλλο άτομο «ακόμη και πριν λάβει χώρα η μετάβαση» παραβίαζε την αιτιότητα. Οι BKS υποστήριζαν ότι «Εγκαταλείπουμε κάθε προσπάθεια για μια αιτιώδη σύνδεση ανάμεσα σε μεταβάσεις σε απομακρυσμένα άτομα, και ιδιαίτερα μια άμεση εφαρμογή των αρχών διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, τόσο χαρακτηριστικές των κλασικών θεωριών. . . Όχι μόνο η διατήρηση της

⁴¹ Πρόκειται για τη βιογραφία του Kramers.

ενέργειας. . . αλλά επίσης και η διατήρηση της ορμής [ανάγονται σε] έναν στατιστικό νόμο» (Bohr, Kramers & Slater 1924 σελ. 791, 793, η έμφαση προστέθηκε). Η απόρριψη της θεωρίας αυτής ήρθε σχετικά γρήγορα όχι όμως άμεσα, επειδή τα πειράματα του Compton επιβεβαίωναν τις αρχές διατήρησης κατά μέσο όρο και όχι σε κάθε μεμονωμένο γεγονός. Ο Einstein, βέβαια, στις 29 Απριλίου 1924 γράφει στον Born: «Η γνώμη του Bohr σχετικά με την ακτινοβολία έχει μεγάλο ενδιαφέρον. Αλλά δεν θα ήθελα να αναγκασθώ να εγκαταλείψω την αυστηρή αιτιότητα χωρίς να την υπερασπιστώ πιο σθεναρά απ' ότι έχω κάνει μέχρι τώρα. Θεωρώ ότι η ιδέα είναι αρκετά ανυπόφορη ότι ένα ηλεκτρόνιο που εκτίθεται στην ακτινοβολία θα μπορεί να επιλέξει με τη δική του ελεύθερη βούληση, όχι μόνο τη στιγμή που θα μεταπηδήσει, αλλά και την κατεύθυνσή του. Σε αυτή την περίπτωση, θα προτιμούσα να είμαι ένας τσαγκάρης, ή ακόμα και ένας υπάλληλος σε μια χαρτοπαικτική λέσχη, από φυσικός. Σίγουρα οι προσπάθειές μου να δώσω χειροπιαστή μορφή στα κβάντα έχουν καταποντιστεί ξανά και ξανά, αλλά απέχω από το να εγκαταλείψω την ελπίδα» (Bohr 1984, σελ. 26, η έμφαση προστέθηκε). Τους πρώτους μήνες του 1925 δύο σημαντικά πειράματα έδειξαν ότι οι BKS ήταν σε λάθος κατεύθυνση. Οι Walther Bothe και Hans Geiger ανέπτυξαν τεχνικές προσδιορισμού της σύμπτωσης περιστατικών για να ελέγξουν αν στο φαινόμενο Compton το δευτερεύον φωτόνιο και το ηλεκτρόνιο παράγονται ταυτόχρονα, όπως απαιτεί η αιτιότητα. Βρήκαν ότι αυτά τα δύο σωματίδια δημιουργούνται αμφοτέρωθεν μέσα σε ένα χρονικό διάστημα μικρότερο από 10^{-3} δευτερόλεπτα. (Τα πιο πρόσφατα πειράματα έχουν μειώσει αυτό το διάστημα σε λιγότερο από 10^{-11} δευτερόλεπτα). Η αιτιότητα καθιερώθηκε και η τυχειότητα που απαιτήσαν οι BKS διαψεύστηκε. Οι μελέτες του Compton και του Alfred Simon για το φαινόμενο Compton σε θάλαμο νεφώσεως, τους επέτρεψαν να ελέγξουν και να επαληθεύσουν την διατήρηση ενέργειας και ορμής σε μεμονωμένα ατομικά γεγονότα. Παρόλη την απόρριψή της η θεωρία των BKS εξυπηρέτησε έναν καλό σκοπό, που ήταν να διεγείρει το ενδιαφέρον των επιστημόνων για τα πρώτα πειράματα, στα οποία η αιτιότητα καθώς και οι νόμοι διατήρησης επαληθεύτηκαν σε διαδικασίες μεμονωμένων στοιχειωδών σωματιδίων (Pais 1991, σελ. 237). Επίσης σύμφωνα με τον Jammer, (1966, σελ. 183-184) αυτή η εργασία αποδείχθηκε εξαιρετικά σημαντική για την εννοιολογική ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας για τους ακόλουθους τρεις λόγους: (1) ήταν η πρώτη σημαντική εργασία στη φυσική, που σκόπιμα και προγραμματικά απέρριψε μεθόδους εξήγησης καθώς και θεμελιώδεις αρχές της κλασικής θεωρίας. (2) Προκάλεσε, κατά συνέπεια, μεγάλη συζήτηση μεταξύ των

φυσικών και έστρεψε έτσι την προσοχή των θεωρητικών της κβαντικής σε ερωτήσεις που αφορούν τα επιστημολογικά θεμέλια της ατομικής φυσικής και (3) ήταν το σημείο εκκίνησης του Kramers για μια λεπτομερή θεωρία της διασποράς, της οποίας η περαιτέρω επεξεργασία από τους Kramers και Heisenberg οδήγησε τον τελευταίο στην ανακάλυψη της μηχανικής των μητρών, δηλαδή στην πρώτη διαμόρφωση της κβαντικής μηχανικής. Ο Bohr, μόλις λαμβάνει γράμμα από τον Geiger για τα πειράματά του, γράφει στον Darwin ότι «Φαίνεται . . . ότι δεν υπάρχει τίποτα άλλο να κάνουμε, παρά να κάνουμε στις επαναστατικές μας προσπάθειες, όσο το δυνατό αξιέπαινες, μια κηδεία» (Bohr 1984, σελ. 82).⁴²

Το κρίσιμο σημείο της συμπληρωματικής περιγραφής του Bohr βρίσκεται στην πρώτη ενότητα της διάλεξής του στο Κόμο με τίτλο ενότητας «Κβαντικό αξίωμα και αιτιότητα», όπου εκεί καθορίζεται η έννοια της κατάστασης ενός φυσικού συστήματος ως η κατάσταση εκείνη που είναι απομονωμένη από εξωτερικές επιδράσεις.⁴³ Εδώ ο Bohr δεν αναφέρεται σε μία κατάσταση ενός σωματιδίου που περιγράφεται από μια κυματοσυνάρτηση ψ σε ένα μαθηματικό χώρο, όπως θα δούμε ότι κάνει ο Heisenberg, αλλά μάλλον για την καλά ορισμένη *ενέργεια* μιας *στάσιμης κατάστασης*. Στην προτελευταία ενότητα του άρθρου του με τίτλο «Πραγματικότητα των στάσιμων καταστάσεων», χρησιμοποιώντας τον όρο *στάσιμη κατάσταση* και όχι απλώς *κατάσταση*, εξηγεί ότι «η έννοια των στάσιμων καταστάσεων περιλαμβάνει, αυστηρά μιλώντας, τον αποκλεισμό όλων των αλληλεπιδράσεων με οντότητες που δεν ανήκουν στο σύστημα» (Bohr 1928, σελ. 587). Το γεγονός αυτό υποστηρίζει ο Bohr «συνιστά την απαραίτητη προϋπόθεση για ένα *σαφή ορισμό της ενέργειας του ατόμου*» (ό.π., σελ. 587, η έμφαση προστέθηκε). Η έννοια της στάσιμης κατάστασης κατά τον Bohr επίσης «σημαίνει μια πλήρη εγκατάλειψη όσον αφορά την περιγραφή του χρόνου» (ό.π., σελ. 587). Η ίδια η έννοια της στάσιμης κατάστασης, με μια καλά προσδιορισμένη ενέργεια, είναι ασύμβατη με μια περιγραφή της τροχιάς του ηλεκτρονίου στο άτομο (Camilleri 2007b, σελ. 516-517). Κάτι τέτοιο φαίνεται λογικό αφού για τον προσδιορισμό της τροχιάς του ηλεκτρονίου του ατόμου, πρέπει να επιδράσουμε στο ηλεκτρόνιο (άρα στο ατομικό σύστημα) για να προσδιορίσουμε τη θέση του κάθε χρονική στιγμή. Στο γράμμα του προς τον Schrödinger στις 23 Μαΐου

⁴² Για το ρόλο του Kramers στη διερεύνηση του φαινομένου Compton και στη θεωρία των BKS βλ. Lindley 2011, σελ. 121 – 132 και Dresden 1987.

⁴³ Η έννοια της στάσιμης κατάστασης όπως θα δούμε και στη συνέχεια είναι σημαντική και για τον Heisenberg και δίδει και ο ίδιος μια περιγραφή της.

1928, ο Bohr υπογράμμισε ότι η έννοιά του της συμπληρωματικότητας μπορούσε να συμπεριλάβει και τις στάσιμες καταστάσεις:

Παραμένει πάντοτε - όπως αναφέρεται στο άρθρο - ένας απόλυτος αποκλεισμός μεταξύ της εφαρμογής της έννοιας των στάσιμων καταστάσεων και της παρακολούθησης της συμπεριφοράς ενός μεμονωμένου σωματιδίου στο άτομο. Αυτός ο αποκλεισμός αποτελεί κατά τη γνώμη μου ένα ιδιαίτερα εντυπωσιακό παράδειγμα της γενικής συμπληρωματικής φύσης της περιγραφής. Όπως έχω προσπαθήσει να δείξω στο άρθρο μου, ένα αρκετά συγκεκριμένο νόημα μπορεί να αποδοθεί στην έννοια των στάσιμων καταστάσεων καθώς και στις διακριτές ενεργειακές τιμές στο πεδίο εφαρμογής τους (Bohr 1985, σελ. 49, η έμφαση προστέθηκε).

Είναι σημαντικό εδώ να τονισθεί ότι αυτή η μορφή συμπληρωματικότητας δεν εξαρτάται από τις αμοιβαία αποκλειόμενες πειραματικές διατάξεις. Υπάρχει μάλλον μια συμπληρωματική σχέση μεταξύ της στάσιμης κατάστασης του ατόμου, που χαρακτηρίζεται από την ενέργειά του, και τον πειραματικό προσδιορισμό της θέσης του ηλεκτρονίου στο χώρο σε μια δεδομένη χρονική στιγμή (Camilleri 2007b, σελ. 517). Στις διαλέξεις Faraday που δόθηκαν στα μέλη της Χημικής Εταιρίας τον Μάιο του 1930, ο Bohr τόνισε και πάλι: «Η ιδέα των στάσιμων καταστάσεων βρίσκεται σε μια αμοιβαία αποκλειόμενη σχέση με την εφαρμογή των χωροχρονικών εικόνων» (ό.π., σελ. 517). Εδώ αναγνώρισε ότι η εφαρμογή της έννοιας της ενέργειας για τη στάσιμη κατάσταση είναι κάπως παράδοξη, όταν θεωρούμε «ότι η ίδια η ιδέα της κίνησης, στην οποία στηρίζεται ο κλασικός ορισμός της κινητικής ενέργειας, έχει γίνει ασαφής στον τομέα της ατομικής σύνθεσης» (ό. π. σελ. 517).

Είναι ενδιαφέρον να σημειώσουμε ότι, αν και ο Bohr εξετάζει την έννοια της στάσιμης κατάστασης στο απόσπασμα που παρατέθηκε πιο πάνω, ένα ελεύθερο σωματίδιο μπορεί επίσης να χρησιμεύσει ως παράδειγμα για τη συμπληρωματικότητα με παρόμοιο τρόπο. Από την άποψη αυτή, ένα σωματίδιο (π.χ. ένα ηλεκτρόνιο) μπορεί επίσης να έχει μια καλά καθορισμένη ενέργεια και ορμή, υπό την προϋπόθεση ότι δεν υπόκειται σε παρατήρηση. Στην περίπτωση αυτή το ίδιο το ηλεκτρόνιο είναι το σύστημα που εξετάζεται. Αν το ηλεκτρόνιο έχει μια καλά καθορισμένη ενέργεια και ορμή, δεν αντιπροσωπεύεται από ένα εντοπισμένο κυματοπακέτο, αλλά από ένα απλό αρμονικό επίπεδο κύμα που εκτείνεται σε όλο τον χώρο σε μία διάσταση. Υπάρχει όμως η άποψη ότι ο Bohr δεν παρουσίασε ρητά τη συμπληρωματικότητα για ένα ελεύθερο σωματίδιο με αυτόν τον τρόπο. Στις περιπτώσεις που εξέτασε την περίπτωση της συμπληρωματικότητας που αφορούσε τη θέση και την ορμή ενός

σωματιδίου στην κβαντομηχανική, το έκανε από την σκοπιά των αμοιβαία αποκλειόμενων πειραματικών ρυθμίσεων (ο. π. σελ. 517).

Ενώ μεγάλο μέρος της προσοχής πάνω στη συμπληρωματικότητα επικεντρώθηκε στην ιδέα του Bohr για την ανάγκη αμοιβαία αποκλειόμενων πειραματικών ρυθμίσεων για τον προσδιορισμό της θέσης και της ορμής ενός σωματιδίου, εδώ αυτό που ενδιαφέρει είναι ο τρόπος με τον οποίο ο Heisenberg ερμήνευσε την εκδοχή της συμπληρωματικότητας που παρουσίασε ο Bohr την εισαγωγή στη διάλεξη του Κόμο. Με μία πρώτη ματιά, η περιγραφή του Heisenberg για την κατάσταση των ζητημάτων στην κβαντική θεωρία φαίνεται να είναι μια απλή παράφραση της εισαγωγής του Bohr. Ωστόσο, με μια πιο αυστηρή εξέταση, μπορούμε να διακρίνουμε μια θεμελιώδη διαφορά μεταξύ των δύο (Camilleri 2007b, σελ. 518).

3.2 Η ερμηνεία του Heisenberg για τη συμπληρωματικότητα

Η πρώτη αναφορά του Heisenberg στην επιχειρηματολογία της συμπληρωματικότητας του Bohr, μπορεί να βρεθεί σε μια διάλεξή του, που δόθηκε στη Λειψία το 1928. Απηχώντας τα λόγια του Bohr, ο Heisenberg δήλωσε ότι «η αιτιακή περιγραφή ενός συστήματος είναι συμπληρωματική προς τη χωροχρονική περιγραφή, επειδή, για να πάρουμε μια χωροχρονική περιγραφή, πρέπει να το παρατηρήσουμε και αυτή η παρατήρηση διαταράσσει το σύστημα. Εάν το σύστημα διαταραχθεί, δεν μπορούμε πλέον να ακολουθήσουμε την αιτιακή σύνδεσή του με καθαρό τρόπο» (ο. π. σελ. 517). Ομοίως, στις διαλέξεις που έδωσε στο πανεπιστήμιο του Σικάγο την άνοιξη του 1929,⁴⁴ οι οποίες δημοσιεύθηκαν με τον τίτλο *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας* το 1930, ο Heisenberg εξήγησε ότι: «Ο νόμος της αιτιότητας, λόγω της φύσης του, μπορεί να οριστεί μόνο για μεμονωμένα συστήματα και στην ατομική φυσική, ακόμη και κατά προσέγγιση, απομονωμένα συστήματα, δεν μπορούν να παρατηρηθούν» (Heisenberg 1930, σελ. 63).

Στη συνέχεια παρουσίασε αυτό που ο ίδιος θεωρούσε ως έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr:

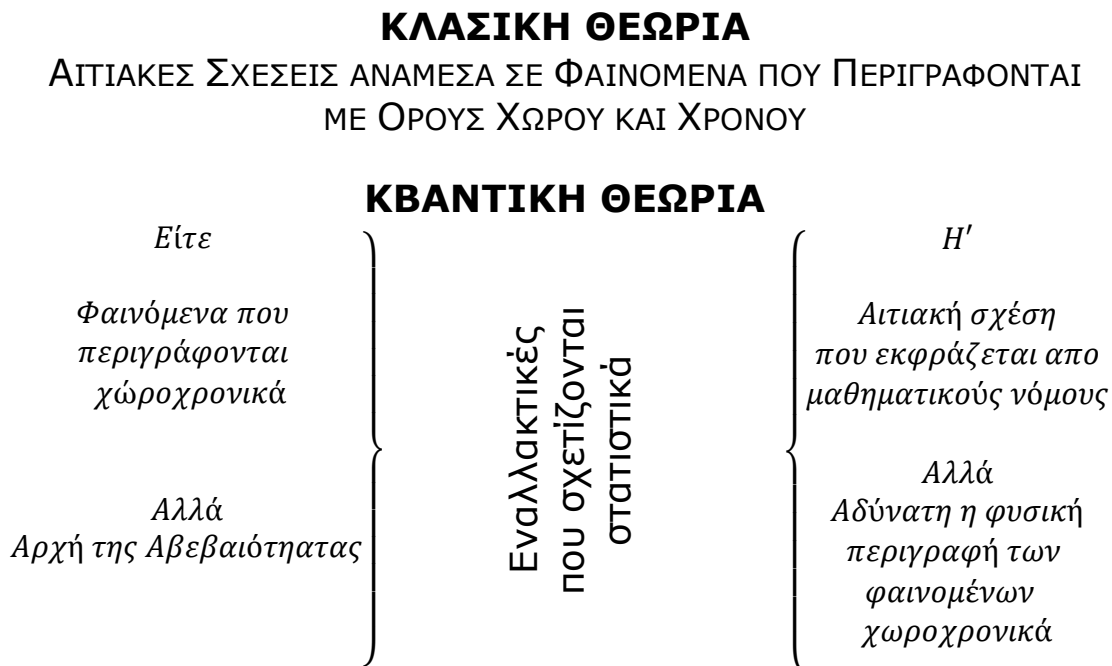
⁴⁴ Όπως αναφέρει ο ίδιος ο Heisenberg στην εισαγωγή του βιβλίου του *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας* οι διαλέξεις αυτές δόθηκαν την άνοιξη του 1929 στο πανεπιστήμιο του Σικάγο και του έδωσαν την ευκαιρία να επανεξετάσει τις θεμελιώδεις αρχές της κβαντικής θεωρίας (Heisenberg 1930, εισαγωγή).

Όπως είναι σαφές από όσα ειπώθηκαν, η επίλυση των παραδόξων της ατομικής φυσικής μπορεί να επιτευχθεί μόνο με την περαιτέρω παραίτηση από παλιές και αγαπημένες ιδέες. Η πιο σημαντική από αυτές είναι η ιδέα ότι τα φυσικά φαινόμενα υπακούουν ακριβείς νόμους — *η αρχή της αιτιότητας* ... Δεύτερη μεταξύ των απαιτήσεων που παραδοσιακά επιβάλλονται σε μια φυσική θεωρία, είναι ότι αυτή πρέπει να εξηγήσει όλα τα φαινόμενα ως σχέσεις μεταξύ αντικειμένων που υπάρχουν *στο χώρο και το χρόνο*. ... Ο Bohr έχει επισημάνει ότι για το λόγο αυτό είναι αδύνατο να απαιτηθεί και οι δύο προϋποθέσεις να εκπληρωθούν [ταυτόχρονα] στην κβαντική θεωρία. Αντιπροσωπεύουν *συμπληρωματικές και αμοιβαία αποκλειόμενες* όψεις των ατομικών φαινομένων. Η κατάσταση αυτή αντικατοπτρίζεται σαφώς στη θεωρία που έχει αναπτυχθεί. Υπάρχει ένα σύνολο από ακριβείς μαθηματικούς νόμους, αλλά αυτοί δεν μπορούν να ερμηνευτούν ότι εκφράζουν απλές σχέσεις μεταξύ αντικειμένων που υπάρχουν στο χώρο και στο χρόνο (Heisenberg 1930, σελ. 62-64, η έμφαση προστέθηκε).

Είναι σαφές από το παραπάνω απόσπασμα ότι ο Heisenberg αναγνώρισε τη διάλεξη του Bohr στο Κόμο σχετικά με τη συμπληρωματικότητα, ως σημαντική συμβολή στη φιλοσοφική κατανόηση της κβαντικής μηχανικής. Όπως εξήγησε ο Heisenberg (1930, σελ. 65): «Μόνο αφού επιχειρήσουμε να ταιριάξουμε αυτή τη θεμελιώδη συμπληρωματικότητα της χωροχρονικής περιγραφής και της αιτιότητας στο εννοιολογικό σχήμα κάποιου, τότε αυτός είναι σε θέση να κρίνει τον βαθμό συνέπειας των μεθόδων της κβαντικής θεωρίας». Παρατηρήσεις όπως αυτές διαβάζονται συνήθως ως ένδειξη ότι ο Heisenberg αποδέχεται την άποψη του Bohr για συμπληρωματικότητα. Στη μελέτη του για τη φιλοσοφία της κβαντικής μηχανικής του Heisenberg, ο Patrick Heelan γράφει κάπως υποτιμητικά για αυτό που ο ίδιος ορίζει ως «συνθηκολόγηση [του Heisenberg] στη φιλοσοφία της συμπληρωματικότητας» (Camilleri 2007b, σελ. 519). Με παρόμοιο τρόπο, οι Mehra και Rechenberg καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι οι διαλέξεις του Heisenberg του 1929 δεν αντιπροσωπεύουν «τίποτε έκτος από παραλλαγές στο θέμα της συμπληρωματικότητας ως δεσπόζουσα έννοια» (ό.π., σελ. 519). Ο ίδιος ο Heisenberg δίνει αυτή την εντύπωση στην εισαγωγή του έργου του *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας*, γράφοντας ότι «Σε γενικές γραμμές το βιβλίο δεν περιέχει τίποτα που να μην μπορεί να βρεθεί σε προηγούμενες δημοσιεύσεις, ιδίως στις έρευνες του Bohr.» (Heisenberg 1930, εισαγωγή).

Ωστόσο, μια προσεκτική ανάγνωση δείχνει ότι η ερμηνεία του Heisenberg για την συμπληρωματικότητα διέφερε από την ερμηνεία του Bohr. Η απόκλιση αυτή επικεντρώνεται στους διάφορους τρόπους με τους οποίους αναφέρθηκαν στην

«αιτιότητα». Αναφερόμενος στην εργασία του Bohr σε μια ενότητα με τίτλο «Η έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr» (ό.π.,σελ. 62-64), ο Heisenberg επανερμήνευσε την αιτιακή περιγραφή στην κβαντική μηχανική ως περιγραφή από την άποψη της ντετερμινιστικής εξέλιξης της κυματοσυνάρτησης του *Schrödinger*. Αυτό είναι προφανές στη διαγραμματική αναπαράσταση της συμπληρωματικότητας στις διαλέξεις του το 1929 (Σχήμα 1, ό.π., σελ. 65).



Σχήμα 1: Διαγραμματική αναπαράσταση συμπληρωματικών περιγραφών της κβαντικής μηχανικής από τον Heisenberg (1930, σελ. 65)

Με βάση αυτή τη διαγραμματική αναπαράσταση μπορούμε είτε να περιγράψουμε τα φαινόμενα από πλευράς χώρου και χρόνου, αλλά εντός των ορίων που καθορίζονται από την αρχή της αβεβαιότητας, ή εναλλακτικά μπορούμε να δώσουμε μια αιτιακή περιγραφή χρησιμοποιώντας τους μαθηματικούς νόμους της κβαντομηχανικής, καθιστώντας όμως έτσι αδύνατη τη χωροχρονική περιγραφή. Σε αυτή την αναδόμηση των ιδεών του Bohr, ο Heisenberg απομακρύνεται από την άποψη ότι η αρχή της αβεβαιότητας παρουσιάζει μια ειδική περίπτωση της συμπληρωματικότητας. Αντί για αυτό αναφέρει την αρχή της αβεβαιότητας ως να εκφράζει έναν περιορισμό στη χωροχρονική περιγραφή των φαινομένων, η οποία είναι συμπληρωματική ως προς την αιτιακή περιγραφή (Camilleri 2007b, σελ. 519).

Για την αναδόμηση της άποψης του Bohr για τη συμπληρωματικότητα, ο Heisenberg ερμήνευσε την κυματοσυνάρτηση ως να παρέχει μια αιτιακή περιγραφή στην κβαντική θεωρία. Ο ορισμός αυτός της αιτιότητας δεν συναντάται μόνο στον Heisenberg, αλλά είχε προταθεί και από διάφορους άλλους φυσικούς κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου. Στο δεύτερη και πιο αναλυτική εργασία του Max Born⁴⁵ για τις συγκρούσεις το 1926, αναφέρει ότι «Η κίνηση των σωματιδίων συμμορφώνεται με τους νόμους των πιθανοτήτων, όμως οι ίδιες οι πιθανότητες εξελίσσονται στο χρόνο σε συμφωνία με το νόμο της αιτιότητας» (Jammer 1966, 285). Ομοίως, στις συζητήσεις στο πέμπτο συνέδριο Solvay τον Οκτώβριο του 1927,⁴⁶ ο Dirac είχε υποστηρίξει ότι η κβαντική μηχανική «περιγράφει την κατάσταση του κόσμου σε οποιαδήποτε στιγμή μέσω μιας κυματικής συνάρτησης ψ η οποία αναπτύσσεται κανονικά σύμφωνα με έναν αιτιακό νόμο έτσι ώστε η αρχική της τιμή να καθορίζει την τιμή της σε οποιαδήποτε μεταγενέστερη στιγμή» (Camilleri 2007b, σελ. 520). Στο έργο του *Φυσική και Φιλοσοφία*, ο Heisenberg επανερμήνευσε την άποψη του Bohr για τη συμπληρωματικότητα με αυτόν ακριβώς τον τρόπο:

Ο Bohr χρησιμοποιεί την έννοια της «συμπληρωματικότητας» σε πολλά σημεία στην ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας. ... Η χωροχρονική περιγραφή των ατομικών γεγονότων είναι συμπληρωματική ως προς την αιτιοκρατική τους περιγραφή. Η συνάρτηση πιθανότητας υπακούει σε μια εξίσωση κίνησης, όπως και οι συντεταγμένες στη Νευτώνεια μηχανική. Η μεταβολή της στο χρόνο καθορίζεται πλήρως από την κβαντομηχανική εξίσωση, αλλά δεν επιτρέπει χωροχρονική περιγραφή. Από την άλλη μεριά, η παρατήρηση, επιβάλλει την χωροχρονική περιγραφή, αλλά διακόπτει την καθορισμένη συνέχεια της συνάρτησης πιθανότητας, με το να αλλάζει τις γνώσεις μας για το σύστημα (Heisenberg 1958a, σελ. 50).

Να σημειωθεί εδώ, ότι στην εισαγωγή του σημαντικού αυτού έργου του Heisenberg, ο F. S. C. Northrop επιστρά την προσοχή στη διάκριση μεταξύ της χρήσης του

⁴⁵ Ο Born ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τον όρο «κβαντική μηχανική ή κβαντομηχανική» σε μια εργασία του το καλοκαίρι του 1924 που είχε τον τίτλο *Zur Quantenmechanik* (Περί της κβαντομηχανικής). Στην εργασία του αυτή καταγινόταν με την προβληματική μετάφραση των κλασικών τύπων σε ανάλογους κβαντομηχανικούς με τη βοήθεια της αρχής της αντιστοιχίας (Kragh 2004, σελ. 193)

⁴⁶ Το πέμπτο συνέδριο Solvay έλαβε χώρα στις Βρυξέλλες από 24 ως 29 Οκτωβρίου 1927 και είχε θέμα «Ηλεκτρόνια και φωτόνια» (Jammer 1974, σελ. 109). Ήταν η πρώτη φορά που ο Bohr συμμετείχε σε συνέδριο Solvay όπως και οι Louis de Broglie, Dirac, Paul Ehrenfest, Werner Heisenberg, Kendrick Kramers, Wolfgang Pauli, και Erwin Schrodinger. Πρόεδρος ήταν ο Hendrik Lorentz που απεβίωσε λίγους μήνες αργότερα (Pais 1991, σελ. 316). Η ισχυρότερη εντύπωση του Ehrenfest από το συνέδριο ήταν ότι «ο BOHR [τα κεφαλαία δικά του] υπερείχε εντελώς όλων. Αρχικά δεν έγινε καθόλου κατανοητός. . . κατόπιν βήμα-βήμα νικούσε τους πάντες». Στο συνέδριο αυτό δεσπόζει η αρχή της θρυλικής διαμάχης Bohr-Einstein για τις θεμελιώδεις αρχές της κβαντικής θεωρίας (Pais 1991, σελ. 316).

Heisenberg των όρων «αιτιότητα» και «ντετερμινισμός». Είναι προφανές από το παραπάνω απόσπασμα ότι ο Heisenberg ερμηνεύει τη συμπληρωματικότητα των χωροχρονικών και αιτιακών περιγραφών εντελώς διαφορετικά από τον Bohr. Για τον Heisenberg, όπως και για τον Bohr, όλη η εμπειρία μας πρέπει να περιγραφεί μέσω των συνηθισμένων εννοιών του χώρου και του χρόνου και αυτό θα σήμαινε μια περιγραφή χρησιμοποιώντας τις έννοιες της κλασικής φυσικής - θέση, χρόνο, ορμή και ενέργεια, πάντα βέβαια εντός των ορίων που καθορίζονται από τις σχέσεις αβεβαιότητας. Για τον Heisenberg όμως, το μη παρατηρούμενο σύστημα, στο οποίο δεν επιδρούμε με κάποια διαδικασία μέτρησης, από την άλλη πλευρά, μπορεί να περιγραφεί μόνο από την εξίσωση Schrödinger σε έναν πολυδιάστατο μαθηματικό χώρο. Η μετάβαση από μια αιτιακή περιγραφή με όρους κυματοσυνάρτησης σε μια κλασική χωροχρονική περιγραφή χαρακτηρίζεται από την ασυνεχή αλλαγή που συμβαίνει στην διαδικασία μέτρησης. Στο σημείο αυτό, μεταβαίνουμε από τον έναν τρόπο περιγραφής στον άλλο. Κατά συνέπεια μπορούμε να πούμε, ότι οι δύο τρόποι περιγραφής είναι συμπληρωματικοί μεταξύ τους (Camilleri 2007b, σελ. 520).

3.3 Αποκλίνουσες απόψεις των Bohr και Heisenberg στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής

Στην ομιλία του για την απονομή του βραβείου Νόμπελ, στις 11 Δεκεμβρίου 1933, ο Heisenberg υποστήριξε ότι «οφείλουμε χάρη στον Bohr», για την ανακάλυψή του «της έννοιας της συμπληρωματικότητας» η οποία παρέχει «την πιο σαφή ανάλυση των εννοιολογικών αρχών της κβαντικής μηχανικής» (Camilleri 2009a, σελ. 119). Ωστόσο, ο Bohr και ο Heisenberg υιοθέτησαν θεμελιωδώς διαφορετικές στάσεις στην κατανόηση της συμπληρωματικότητας (ό.π., σελ. 119).

Θα μπορούσε να υποστηριχθεί, ότι αν και οι απόψεις του Heisenberg διαφέρουν από αυτές του Bohr, δίνοντας ένα πιο φορμαλιστικό νόημα στην αιτιότητα, κάτι τέτοιο αντιπροσωπεύει μια απλή επέκταση των αντιλήψεων του Bohr, και σίγουρα, οι απόψεις του Heisenberg, δεν είναι ασυμβίβαστες με αυτές. Όμως αυτή η απόκλιση μεταξύ των δύο φυσικών είναι στην πραγματικότητα ενδεικτική μιας πιο θεμελιώδους διαφοράς στην επιστημολογική προσέγγισή τους στην κβαντική μηχανική (Camilleri 2007b, σελ. 520-521).

Θα πρέπει να θυμόμαστε ότι ο Bohr ποτέ δεν έδωσε ένα ξεκάθαρο και λεπτομερή ορισμό για τον όρο «συμπληρωματικότητα». Ανάμεσα σε όλες τις

αναφορές του, πιθανώς η κοντινότερη σε έναν τέτοιο ορισμό έγινε το 1929, δύο χρόνια μετά τη διάλεξη του Κόμο, όταν διακήρυξε ότι το κβαντικό αξίωμα «μας αναγκάζει να υιοθετήσουμε ένα νέο τρόπο περιγραφής που τιτλοφορείται ως *συμπληρωματικότητα*, με την έννοια ότι κάθε δοσμένη εφαρμογή των κλασικών εννοιών καθιστά αδύνατη την ταυτόχρονη χρήση άλλων κλασικών εννοιών, οι οποίες σε διαφορετικό πλαίσιο είναι εξίσου αναγκαίες για την αποσαφήνιση των φαινομένων» (Jammer 1974, σελ. 95). Σύμφωνα με τη δήλωση αυτή, οι τρόποι περιγραφής ή οι περιγραφές είναι συμπληρωματικές. Αυτή υπήρξε και η σαφέστερη μάλλον διατύπωση της αρχής της συμπληρωματικότητας, ενός δόγματος περιλάλητου για την ασάφεια και την αμφισημία του (Jammer 1974, σελ. 95 και Kragh 2004, σελ. 247). Για τον Heisenberg η έννοια της συμπληρωματικότητας, μεταξύ της χωροχρονικής περιγραφής και της αιτιότητας, αντιπροσωπεύει μια κάπως διαφορετική άποψη. Κάτι τέτοιο εκφράζεται σε άρθρο του το 1955 στο οποίο γράφει: «Ο χαρακτηρισμός ενός [κβαντικού] συστήματος από το αντίστοιχο διάνυσμα Hilbert [ή από την κυματοσυνάρτηση ψ σε ένα μαθηματικό χώρο] είναι *συμπληρωματικός* της περιγραφής του με όρους κλασικών εννοιών» (Heisenberg 1955, σελ. 27). Όπως έχει αναφερθεί και σε προηγούμενες ενότητες, την άνοιξη του 1927 οι Bohr και Heisenberg συμμετείχαν σε έντονες συζητήσεις στην Κοπεγχάγη για την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Όπως αργότερα ο Heisenberg θυμάται, η προσέγγιση του Bohr στο πρόβλημα της ερμηνείας ήταν από την αρχή αρκετά διαφορετική από τη δική του:

Η διορατικότητα [του Bohr] σχετικά με τη δομή της θεωρίας δεν ήταν αποτέλεσμα μιας μαθηματικής ανάλυσης των βασικών υποθέσεων, αλλά μάλλον έντονης ενασχόλησης με τα πραγματικά φαινόμενα, έτσι ώστε να είναι σε θέση να αντιληφθεί τη σχέση διαισθητικά, παρά να την παράγει φορμαλιστικά... Ο Bohr ήταν πρωτίστως φιλόσοφος, όχι φυσικός... Παρατήρησα ότι η μαθηματική σαφήνεια δεν είχε από μόνη της καμία αξία για τον Bohr. Φοβόταν ότι η τυπική μαθηματική δομή θα επισκίαζε τον φυσικό πυρήνα του προβλήματος και σε κάθε περίπτωση ήταν πεπεισμένος ότι μια *πλήρης φυσική εξήγηση θα έπρεπε να προηγείται απόλυτα της μαθηματικής διατύπωσης* (Camilleri 2007b, σελ. 521, η έμφαση προστέθηκε).

Όπως έχει επισημανθεί και από κάποιους μελετητές, ένα από τα βασικά ζητήματα που χώριζαν τους δύο φυσικούς ήταν η έμφαση του Heisenberg στην ανάγκη να κατανοηθεί η σημασία του κβαντικού φορμαλισμού, που ερχόταν σε ευθεία αντίθεση

με την αναζήτηση του Bohr για μια βαθύτερη κατανόηση των αμοιβαία αποκλειόμενων καταστάσεων, ώστε να επιτευχθεί μια πλήρης και εξαντλητική περιγραφή του αντικειμένου στη κβαντική μηχανική. Νεώτερες απόψεις μελετητών αμφισβητούν την τυποποιημένη άποψη ότι μετά από μια περίοδο διαφωνίας, οι Bohr και Heisenberg επίλυσαν με επιτυχία τις διαφορές τους (Beller 1999a, σελ. 143 και Camilleri 2006). Η επανερμηνεία από τον Heisenberg της συμπληρωματικότητας των εννοιών του χώρου και του χρόνου και της αιτιακής περιγραφής του Bohr, αντικατοπτρίζει μια σημαντική, αλλά σε μεγάλο βαθμό παραβλεφθείσα, πλευρά των αποκλινουσών απόψεων των Bohr και Heisenberg για την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής (Camilleri 2007b, σελ. 521).

Οι υποκείμενες διαφορές στις απόψεις μεταξύ του Bohr και του Heisenberg σχετικά με τη σημασία του φορμαλισμού για την κατανόηση της κβαντικής μηχανικής μπορούν να φανούν και στις διαφορετικές απόψεις τους σχετικά με την έννοια της «κατάστασης» στην κβαντική μηχανική. Σε μια διάλεξη που δόθηκε σε συνέδριο στη Βαρσοβία το 1938, ο Bohr υποστήριξε ότι «μη καλώς ορισμένη χρήση της έννοιας της 'κατάστασης' μπορεί να γίνει με αναφορά στο αντικείμενο που διαχωρίζεται από το σώμα με το οποίο είναι σε επαφή, μέχρις ότου οι εξωτερικές συνθήκες που εμπλέκονται στον ορισμό της εν λόγω έννοιας είναι σαφώς καθορισμένες από έναν περαιτέρω κατάλληλο έλεγχο του βοηθητικού σώματος» (ό. π. σελ. 521). Δεν μπορούμε να ορίσουμε λοιπόν καλά την έννοια της κατάστασης, σύμφωνα με το Bohr, αν διαχωρίσουμε το αντικείμενο της παρατήρησης από τη διάταξη που χρησιμοποιούμε για την παρατήρησή του. Στο άρθρο του στο περιοδικό *Dialectica*,⁴⁷ ο Bohr επεσήμανε και πάλι ότι, όταν εξετάζει κανείς το πρόβλημα της αιτιότητας στην κβαντική μηχανική, ο «ορισμός της κατάστασης απαιτεί ιδιαίτερη προσοχή» (ό. π. σελ. 521). Είναι χρήσιμο να αντιπαραθέσουμε αυτή την άποψη με τον ορισμό του Heisenberg για την έννοια της «κατάστασης» στην κβαντική μηχανική. Σε ένα ιδιωτικό χειρόγραφο που γράφτηκε γύρω στο 1942, ο Heisenberg εξήγησε:

⁴⁷ Το άρθρο του Bohr είχε τίτλο «Σχετικά με τις έννοιες της αιτιότητας και της συμπληρωματικότητας». Δημοσιεύτηκε στο *Dialectica* 2, σελ. 312-319, Νοέμβριος 1948. Το τεύχος 3-4 είχε τίτλο «Η Έννοια της Συμπληρωματικότητας» και υπεύθυνος της έκδοσης ήταν ο Pauli. Μάλιστα ο Pauli πριν απαντήσει θετικά στην πρόταση που του έγινε από τον εκδότη του περιοδικού ζήτησε τη γνώμη του Bohr. Σε γράμμα του στον Bohr στις 5 Μαΐου 1947 αναφέρει ότι «Η απάντησή μου στον εκδότη θα εξαρτηθεί πάρα πολύ από την αντίδρασή σου σε αυτή την πρόταση» (Mehra & Rechenberg 2001, σελ. 1198, 1276)

Η «κατάσταση» ενός ατομικού συστήματος μπορεί να περιγραφεί μέσω καθορισμένων «καταστατικών μεγεθών» ή «καταστατικών συναρτήσεων». Αλλά αυτά τα καταστατικά μεγέθη δεν παρουσιάζουν αμέσως μια κατάσταση ή μια χωρο-χρονική διαδικασία, όπως κάνει η κλασική μηχανική. Για παράδειγμα, δεν είναι απλώς οι θέσεις και οι ταχύτητες των σωματιδίων που χαρακτηρίζουν μια κατάσταση. Αυτά τα μεγέθη ... μας πληροφορούν γενικά μόνο για την πιθανότητα με την οποία μπορεί κάποιος να αναμένει να βρει τέτοιες θέσεις και τέτοιες ταχύτητες των στοιχειωδών σωματιδίων αν παρατηρήσει αυτά τα μεγέθη (ο. π., σελ. 521-522).

Επίσης, στο βιβλίο *Συναντήσεις με τον Einstein* ο Heisenberg αναφέρεται στην έννοια της κατάστασης και μάλιστα διαχωρίζει την έννοια αυτή, όπως αρχικά δόθηκε από τον Bohr, με το περιεχόμενο που δίδει ο ίδιος αργότερα.⁴⁸ Αρχικά τονίζει πόσο σημαντικές είναι οι έννοιες στην ιστορία της φυσικής λέγοντας ότι «η ιστορία της φυσικής δεν είναι μόνο μία σειρά πειραματικών ανακαλύψεων και παρατηρήσεων που ακολουθούνται από τη μαθηματική τους περιγραφή. Είναι επίσης μία ιστορία εννοιών. Για την κατανόηση των φαινομένων, η πρώτη προϋπόθεση είναι η εισαγωγή κατάλληλων εννοιών. Μόνο με τη βοήθεια των ορθών εννοιών μπορούμε πραγματικά να γνωρίσουμε τι παρατηρήθηκε» (Heisenberg 1989, σελ. 19). Κατόπιν αναφέρει ότι για τις δικές του εργασίες, σημαντικές ήταν τρεις περιπτώσεις εννοιών και ανάμεσα σε αυτές τις τρεις περιπτώσεις ήταν σημαντική η έννοια της κατάστασης.

Πρώτα η έννοια της *διακριτής στάσιμης κατάστασης*, μία καταφανώς θεμελιώδη έννοια στην κβαντική θεωρία. Κατόπιν η *έννοια της κατάστασης όχι απαραίτητα στάσιμης ή διακριτής* η οποία μπόρεσε να γίνει κατανοητή μόνο μετά την ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής και της κυματικής μηχανικής (ό.π.,σελ. 20, η έμφαση προστέθηκε).⁴⁹

Από την αρχή λοιπόν ο Heisenberg θέλει να διαχωρίσει την έννοια της κατάστασης κατά τον Bohr, την όποια ονομάζει διακριτή στάσιμη κατάσταση, και την έννοια της κατάστασης κατά τον ίδιο που δεν είναι απαραίτητα στάσιμη ή διακριτή και για το λόγο αυτό δίδει διαφορετικές ονομασίες. Κατόπιν μας δίνει μια περιγραφή της

⁴⁸ Τα σχετικά με την κατάσταση αναφέρονται στο δεύτερο κεφάλαιο του βιβλίου *Συναντήσεις με τον Einstein* που έχει τίτλο «Η εξέλιξη των εννοιών στην ιστορία της κβαντικής μηχανικής». Το κεφάλαιο αυτό είναι από το *The Physicist's Conception of Nature*, επιμ. J. Mehra, D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Boston, 1973, σελ. 264-275. (Διάλεξη που δόθηκε στο Συμπόσιο για την Ανάπτυξη της Αντίληψης του Φυσικού για τη Φύση στον 20ό αιώνα. Το συμπόσιο αυτό έγινε στο Διεθνές Κέντρο για τη Θεωρητική Φυσική, στο Miramare, στην Τεργέστη της Ιταλίας, από τις 18 έως τις 25 Σεπτεμβρίου 1972.) (Heisenberg 1989, σελ. 19).

⁴⁹ Η τρίτη έννοια που ήταν σημαντική για τη δουλειά του Heisenberg ήταν η έννοια του στοιχειώδους σωματιδίου (ό.π.,σελ. 20).

έννοιας της στάσιμης κατάστασης όταν για πρώτη φορά ορίστηκε αρχικά από τον Bohr,.

Όπως γνωρίζετε η έννοια της διακριτής στάσιμης κατάστασης εισήχθη από τον Niels Bohr το 1913. Αποτελούσε την κεντρική ιδέα της θεωρίας του για το άτομο.....Ο Bohr για ένα πολύ μεγάλο διάστημα δεν ήταν διατεθειμένος να πιστέψει στην ιδέα των κβάντων φωτός [του Einstein] και επομένως θεωρούσε τις στάσιμες καταστάσεις του ως σταθμούς κατά τη διάρκεια της κίνησης του ηλεκτρονίου, το οποίο στην τροχιά του γύρω από τον πυρήνα χάνει ενέργεια λόγω ακτινοβολίας. Η υπόθεση ήταν ότι, κατά την εν λόγω διαδικασία ακτινοβολίας, το ηλεκτρόνιο παύει να ακτινοβολεί σε ορισμένους σταθμούς, που ονομάζονται διακριτές στάσιμες καταστάσεις. Για κάποια άγνωστη αιτία το ηλεκτρόνιο δεν ακτινοβολεί σε αυτούς τους σταθμούς, και ο τελευταίος σταθμός είναι η κανονική κατάσταση του ατόμου. Όταν εκπέμπεται ακτινοβολία το ηλεκτρόνιο πηγαίνει από μία στάσιμη κατάσταση στην επόμενη (ό.π.,σελ. 20, η έμφαση προστέθηκε).

Στη συνέχεια περιγράφει συνοπτικά τις εξελίξεις στην κβαντική μηχανική, μετά την εισαγωγή της έννοιας των στάσιμων καταστάσεων από τον Bohr το 1913, μέχρι την πλήρη ανάπτυξη της κβαντικής μηχανικής το 1925 και αναφέρει το πρόβλημα της τροχιάς του ηλεκτρονίου που είχε το παλιό περιεχόμενο της έννοιας.

Μέχρι την εποχή εκείνη [1925] η ιδέα της τροχιάς του ηλεκτρονίου, που ήταν συνδεδεμένη με τη διακριτή στάσιμη κατάσταση, είχε πρακτικά εγκαταλειφθεί. Ωστόσο, η έννοια της διακριτής στάσιμης κατάστασης είχε επιβιώσει. Η έννοια αυτή ήταν αναγκαία και βασιζόταν στις παρατηρήσεις. Η τροχιά του ηλεκτρονίου όμως δε μπορούσε να συνδεθεί με παρατηρήσεις και έπρεπε να εγκαταλειφθεί (ό.π.,σελ. 26).

Για να αντιμετωπίσει το πρόβλημα της τροχιάς ο Heisenberg αναπαριστά το ηλεκτρόνιο ως ένα κυματοπακέτο⁵⁰ που διαδίδεται στο χώρο και το χρόνο και

⁵⁰ Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά της διάλεξης του Κόμο είναι ότι περιείχε την εξαγωγή των σχέσεων αβεβαιότητας από τον Bohr, με ένα δικό του τρόπο, χρησιμοποιώντας την κλασική κυματική θεωρία και το φορμαλισμό του de Broglie (Bohr 1928, σελ. 581-582). Η άποψη της κλασικής κυματικής θεωρίας, η σχετιζόμενη με την μαθηματική επεξεργασία του Bohr είναι γνωστή ως *θεώρημα εύρους ζώνης*, το οποίο αφορά κύματα πεπερασμένου μήκους —δηλαδή, κυματοπακέτα ή παλμούς. Το θεώρημα εύρους ζώνης καθορίζει ότι οι κυματικοί παλμοί, σε αντίθεση με τα ιδανικά απεριόριστα εκτεταμένα κύματα, δεν αποτελούνται από μία συγκεκριμένη συχνότητα ή μήκος κύματος αλλά συνθέτονται από ένα σύνολο συχνοτήτων, γνωστό ως φάσμα συχνοτήτων. Η διασπορά στη συχνότητα ή στο εύρος ζώνης, ενός παλμού ($\Delta\nu$) σχετίζεται αντίστροφα με τη διάρκεια του παλμού (Δt), και η διασπορά στο μήκος κύματος ($\Delta\lambda_x$), σε μία διάσταση, σχετίζεται με την έκταση του παλμού στο χώρο (Δx): $\Delta\nu \cdot \Delta t \approx 1$ και $\Delta\lambda_x \cdot \Delta x \approx 1$. Αυτές οι σχέσεις εύρους ζώνης βασίζονται στην αναπαράσταση κυματικών παλμών από την ανάλυση κατά Fourier, σύμφωνα με την οποία κάθε περιοδική συνάρτηση είναι ισοδύναμη με ένα άθροισμα άπειρων ημιτονοειδών κυμάτων ποικίλων συχνοτήτων και μηκών κύματος. Οι μόνες λύσεις σε μια κυματική εξίσωση είναι άπειρα ημιτονοειδή κύματα ή αθροίσματα

συγκεκριμένα αναφέρει: «Στην αρχική του θέση το ηλεκτρόνιο θα ήταν δυνατό να παρασταθεί από ένα κυματοπακέτο. Αυτό το κυματοπακέτο θα μπορούσε να διαδοθεί και αυτό σημαίνει ότι θα είχε να κάνει κανείς με κάτι σαν την τροχιά του ηλεκτρονίου» (ό.π.,σελ. 28). Όμως το κυματοπακέτο έχει το πρόβλημα ότι κατά τη διάδοσή του εξαιτίας της διασποράς «θα μπορούσε να γίνει ολοένα και μεγαλύτερο, έτσι ώστε, αν το ηλεκτρόνιο έτρεχε για αρκετό χρόνο, ίσως να αποκτούσε διάμετρο ενός εκατοστού και περισσότερο» (ό.π.,σελ. 28). Επειδή βεβαίως κάτι τέτοιο δεν ισχύει, θεωρούμε ότι «το κυματοπακέτο που αναπαριστά το ηλεκτρόνιο αλλάζει σε κάθε σημείο της παρατήρησης» (ό.π.,σελ. 29) οπότε «Σε κάθε σημείο παίρνουμε νέα πληροφορία για την κατάσταση του ηλεκτρονίου. Επομένως, πρέπει να αντικαταστήσουμε το αρχικό κυματοπακέτο με ένα καινούργιο, που αναπαριστά αυτή τη νέα πληροφορία». (ό.π.,σελ. 29-30). Μετά από την περιγραφή αυτή ο Heisenberg προχωρά στον νέο ορισμό της έννοιας της κατάστασης.

Η κατάσταση του ηλεκτρονίου, όταν παρίσταται κατ' αυτόν τον τρόπο, δεν μας επιτρέπει να αποδώσουμε στο ηλεκτρόνιο, όταν βρίσκεται στην τροχιά του, συγκεκριμένες ιδιότητες, όπως συντεταγμένες, ορμή κ.λ.π. Το μόνο που μπορούμε να κάνουμε είναι να μιλήσουμε για την πιθανότητα να βρούμε —κάτω από κατάλληλες πειραματικές συνθήκες— το ηλεκτρόνιο σε ένα συγκεκριμένο σημείο, ή με μία ορισμένη τιμή ταχύτητας. Έτσι, καταλήγουμε σ' έναν ορισμό της κατάστασης που είναι πολύ περισσότερο αφηρημένη από ό,τι η αρχική τροχιά του ηλεκτρονίου. Από μαθηματική άποψη, *την περιγράφουμε με ένα διάνυσμα σε ένα χώρο Hilbert* και το διάνυσμα αυτό καθορίζει τις πιθανότητες για τα αποτελέσματα κάθε είδους πειράματος που μπορεί να διεξαχθεί σ' αυτή την κατάσταση. Η κατάσταση μπορεί να αλλάξει με κάθε νέα προσθήκη στις πληροφορίες μας (ό.π.,σελ. 30, η έμφαση προστέθηκε).

Από το τελευταίο απόσπασμα αλλά και από το απόσπασμα από το ιδιωτικό χειρόγραφο του Heisenberg που αναφέραμε παραπάνω, φαίνεται ότι ο Heisenberg ορίζει την «κατάσταση» ενός κβαντικού συστήματος μέσω της κυματοσυνάρτησης ψ ή ενός διανύσματος σε χώρο Hilbert (στην ουσία πρόκειται για ισοδύναμες περιγραφές αφού ο χώρος Hilbert μπορεί να έχει ως βάση του κυματοσυναρτήσεις). Το τετράγωνο του πλάτους της κυματοσυνάρτησης αντιπροσωπεύει την πιθανότητα ανεύρεσης ενός σωματιδίου σε ένα σημείο στο χώρο ή με μια ορισμένη ορμή σε μια

τέτοιων κυμάτων. Κάθε κυματικός παλμός είναι έτσι μια σύνθεση ή υπέρθεση ενός άπειρου αριθμού κυμάτων των οποίων οι συχνότητες και τα μήκη κύματος εκτείνονται σε ένα εύρος τέτοιο ώστε να συμβάλουν ενισχυτικά μόνο το περιοχή του παλμού. Δεν μπορεί να υποστηριχθεί επομένως ότι ίδιος ο κυματικός παλμός ότι έχει ένα μια μόνο ακριβώς συχνότητα ή μήκος κύματος (Tanona 2004, σελ. 489).

δεδομένη χρονική στιγμή. Δεν μας δίδει όμως ο Heisenberg μια χωροχρονική περιγραφή της κίνησης του σωματιδίου. Σε αυτό το σημείο, οι Bohr και Heisenberg τείνουν να εκφράζουν με διαφορετικούς τρόπους το υποκείμενο παράδοξο της κβαντικής μηχανικής. Κατά την άποψη του Bohr, η έννοια της «κατάστασης» του ίδιου του ηλεκτρονίου, ανεξάρτητα από τις συνθήκες της πειραματικής του παρατήρησης, δεν έχει μια καλά καθορισμένη σημασία στην κβαντική μηχανική. Ο Heisenberg, από την άλλη πλευρά, ισχυρίζεται ότι μπορούμε πάντα να καθορίσουμε την «κατάσταση» ενός συστήματος μέσω της κυματοσυνάρτησης ψ , αν και αυτό μπορεί να αντιπροσωπεύει μόνο μια *πιθανότητα*. Κάτι τέτοιο δεν αποτελεί από μόνο του την αντικειμενική πραγματικότητα στο χώρο και στο χρόνο. Αντιλαμβάνονται δηλαδή, οι δύο, διαφορετικά την έννοια της κατάστασης. Παρόλο που αυτή η διαφορά απόψεων μεταξύ Bohr και Heisenberg μπορεί να φανεί ασήμαντη, στην πραγματικότητα προέρχεται από διαφορετικές απόψεις ως προς το τι ακριβώς σημαίνει «να ερμηνεύσει» κανείς την κβαντική μηχανική (Camilleri 2007b, σελ. 522).

Μια άλλη απόκλιση, στο πως ερμηνεύουν ο Bohr και ο Heisenberg την κβαντική μηχανική φαίνεται στις διαφορετικές απόψεις τους για τη σαφήνεια που προσδίδει η έννοια της συμπληρωματικότητας στις περιγραφές στο μικρόκοσμο, σε σχέση και με την επίθεση που δέχτηκε η νέα φυσική από τον Einstein στα τέλη της δεκαετίας του 1920 και τις αρχές της δεκαετίας του 1930. Στην πρώτη αυτή φάση της διαμάχης των Bohr–Einstein, η αντιπαράθεση επικεντρώθηκε γύρω από τα αν υπάρχουν συγκεκριμένα όρια στην ακρίβεια της μέτρησης. Ο πρώτος γύρος της αντιπαράθεσης Bohr–Einstein ήταν στο πέμπτο συνέδριο Solvay όπου πολλοί εξέχοντες φυσικοί συζήτησαν τη θεμελίωση της κβαντικής μηχανικής. Ο Bohr έδωσε διάλεξη πάνω στις νέες του ιδέες για τη συμπληρωματικότητα, περί της οποίας πρώτη φορά άκουσε ο Einstein. Ο Einstein δεν πείσθηκε από τα λεχθέντα και υποστήριξε ότι η ερμηνεία Bohr–Heisenberg, κατά την οποία η κβαντική μηχανική αποτελούσε μια πλήρη θεωρία των επιμέρους διαδικασιών, αντέφασκε προς τη θεωρία της σχετικότητας. Παρουσίασε και ανέλυσε διάφορα νοητικά πειράματα με την ελπίδα να καταδείξει ότι οι σχέσεις της απροσδιοριστίας δεν ήταν κατ’ ανάγκην ισχυρές και ότι ορισμένα ατομικά φαινόμενα μπορούσαν να αναλυθούν λεπτομερέστερα απ’ ό,τι επέτρεπαν οι σχέσεις του Heisenberg. Όταν ο Bohr απέδειξε την αβασιμότητα των επιχειρημάτων του Einstein, εκείνος επανήλθε με νέο νοητικό πείραμα, το οποίο και πάλι αντέκρουσε ο Bohr. Σύμφωνα με τον Bohr, η κβαντική μηχανική (συμπεριλαμβανομένων και των σχέσεων απροσδιοριστίας) συνιστούσε μια πλήρη

θεωρία που εξαντλούσε όλες τις δυνατότητες ερμηνείας των παρατηρήσιμων φαινομένων. Δεν χωρεί αμφιβολία ότι ο Bohr εξήλθε «νικητής» από τις συζητήσεις του 1927 και ότι οι περισσότεροι από τους συμμετέχοντες αναγνώρισαν τη δύναμη των επιχειρημάτων του (Kragh 2004, σελ. 250).⁵¹ Η διαφωνία αυτή επρόκειτο να είναι κεντρική στην εξελισσόμενη αντιπαράθεση με τον Einstein πάνω στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Η αντιπαράθεση αυτή έχει ως αξιοσημείωτο σταθμό και το έκτο συνέδριο Solvay. Μέχρι τότε, η προσπάθεια του Bohr ήταν αφιερωμένη στο να αποτρέψει τις απόπειρες του Einstein να αποδείξει ότι οι σχέσεις απροσδιοριστίας παραβιάζονται. Χαρακτηριστικό παράδειγμα της πρώιμης αντιπαράθεσης μεταξύ Bohr–Einstein ήταν και το νοητικό πείραμα στο έκτο συνέδριο Solvay το 1930 (Camilleri 2009a, σελ. 120). Το συνέδριο αυτό ήταν αφιερωμένο στο μαγνητισμό, κάτι που φυσικά δεν απέτρεπε τους συμμετέχοντες να συζητούν και άλλα θέματα στους διαδρόμους. Κάτι τέτοιο έγινε όταν ο Einstein είπε στον Bohr ότι είχε βρει ένα αντιπαράδειγμα για τη σχέση απροσδιοριστίας μεταξύ ενέργειας και χρόνου (Pais 1991, σελ. 427).⁵² Όπως τόνισαν πολλοί μελετητές, αυτή η έμφαση στις συνθήκες για

⁵¹ Ο P. Ehrenfest μετά το συνέδριο σε γράμμα του στους S. Goudsmit, G. E. Uhlenbeck και G. H. Dieke γράφει ότι ο «BOHR [τα κεφαλαία δικά του] υπερείχε τελείως όλων. Στην αρχή δεν ήταν καταννητός υστέρα όμως βήμα-βήμα τους νικούσε όλους. ... Ήταν απολαυστικό για μένα να είμαι παρών κατά τη διάρκεια των συζητήσεων μεταξύ του Bohr και Einstein. Ξαν μία παρτίδα σκάκι. Ο Einstein όλη την ώρα με νέα παραδείγματα. ... Ο Bohr μέσα από όλα τα φιλοσοφικά σύννεφα καπνού σταθερά να αναζητεί τα εργαλεία για να κατατροπώσει το ένα παράδειγμα μετά το άλλο. Ο Einstein σαν σούστα: ξεπηδούσε φρέσκος κάθε πρωί. Ω! ήταν ανεκτίμητο. Αλλά σχεδόν χωρίς καμία επιφύλαξη είμαι υπέρ του Bohr και κατά του Einstein» (Bohr 1985, σελ. 38). Δεν μπορώ σε αυτό το σημείο να μην αναφέρω και ένα τραγικό περιστατικό που αφορά το τέλος του Paul Ehrenfest. Στις 20 Σεπτεμβρίου 1933 μετά την καθιερωμένη ετήσια συνάντηση της Κοπεγχάγης ο Ehrenfest επέστρεψε κατευθείαν στην Ολλανδία. Στις 25 του ίδιου μήνα ταξίδεψε από το Λέιντεν στο Άμστερνταμ, για να επισκεφτεί το μικρότερο γιο του, που βρισκόταν σε ίδρυμα με παιδιά με σοβαρή νοητική στέρση. Υπό το πρίσμα μιας φρικαλέα στρεβλωμένης αντίληψης των πραγμάτων, σύμφωνα με την οποία ο γιος του έπρεπε να απαλλαγεί από τη δυστυχία του ταυτοχρόνως με αυτόν, ο Ehrenfest, τον πήγε σε ένα διπλανό πάρκο πυροβόλησε πρώτα τον γιο του και στη συνέχεια έστρεψε το όπλο πάνω του. Ο γιος του έχασε την όρασή του από τη σφαίρα, αλλά δεν πέθανε. Ο θάνατος του πατέρα ήταν ακαριαίος (Segrè 2009, σελ. 53 και 345). Συμπτωματικά αναφέρω ότι και ο Ludwig Boltzmann δάσκαλος του Ehrenfest έδωσε τέλος στη ζωή του στις 5 Σεπτεμβρίου 1906, ενώ ήταν σε διακοπές στο Ντουίνο, κοντά στην Τεργέστη (Segrè 1987a, σελ. 283).

⁵² Στο καινούργιο νοητικό πείραμα που αργότερα έγινε γνωστό ως το πείραμα του κουτιού με το φωτόνιο, ο Einstein επικαλέστηκε τη σχέση μάζας-ενέργειας της ειδικής σχετικότητας, $E=mc^2$, και υποστήριξε ότι η ενέργεια ενός φωτονίου και ο χρόνος άφιξής του σε μία οθόνη μπορούσαν να προβλεφθούν με απεριόριστη ακρίβεια, σε αντίφαση με τις σχέσεις απροσδιοριστίας (Kragh 2004, σελ. 251). Ο Rosenfeld που ήταν στις Βρυξέλες τότε θυμάται: «ήταν ένα σοκ για τον Bohr ... δεν είδε τη λύση αμέσως. Όλο το βράδυ ήταν εξαιρετικά δυστυχισμένος, πηγαίνοντας από τον ένα στον άλλο και προσπαθούσε να τους πείσει ότι αυτό δεν μπορούσε να είναι αλήθεια, ότι θα ήταν το τέλος της φυσικής αν ο Einstein ήταν σωστός: αλλά δεν μπορούσε να εμφανίσει καμία αντίκρουση. Δεν θα μπορούσα να ξεχάσω ποτέ τη θέα των δύο ανταγωνιστών φεύγοντας [από το Fondation Universitaire], ο Einstein μια ψηλή επιβλητική φιγούρα, που περπατούσε ήσυχα, με κάπως ειρωνικό χαμόγελο, και ο Bohr αεικίνητος κοντά του, πολύ αναστατωμένος. ... Το επόμενο πρωί ήρθε ο θρίαμβος του Bohr» (Pais 1991, σελ. 427). Ο Bohr απάντησε λαμπρά στην πρόκληση επικαλούμενος τον τύπο της ερυθράς βαρυτικής μετατόπισης του Einstein. Η έκβαση του πρώτου γύρου της αντιπαράθεσης υπήρξε η ίδια

τη *σαφή χρήση* των εννοιών βρίσκεται στην καρδιά της απάντησης του Bohr στην πρόκληση του Einstein απέναντι στην κβαντική μηχανική στη δεκαετία του 1930 και του 1940. Ενώ όμως ο Bohr απέκλειε τη δυνατότητα ταυτόχρονης ακριβούς μέτρησης της θέσης και της ορμής για ένα σωματίδιο, σύμφωνα με τον Camilleri (2009a, σελ. 120, η έμφαση στο πρωτότυπο), τόνισε ότι οι αμοιβαία αποκλειόμενες πειραματικές διατάξεις χρησιμεύουν στον *ορισμό ακριβώς εκείνων των συνθηκών* κάτω από τις οποίες μπορούμε σαφώς να χρησιμοποιήσουμε έννοιες όπως η ενέργεια και η ορμή. Σε μία εργασία του που παρουσιάστηκε το 1936 στο συνέδριο της «Ενότητας της Επιστήμης» στην Κοπεγχάγη, ο Bohr εξήγησε πως το αίτημα ότι «η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου δεν μπορούν να μετρηθούν ταυτόχρονα με αυθαίρετη ακρίβεια» είναι κάπως παραπλανητικό. Δεν είναι απλά ότι δεν μπορούμε να *μετρήσουμε* τις δύο καλώς ορισμένες ιδιότητες ενός αντικείμενου, αλλά μάλλον ότι «η όλη κατάσταση στην ατομική φυσική στερεί από κάθε νόημα τέτοιες ιδιότητες όπως η εξιδανικεύσεις της κλασικής φυσικής θα απέδιδαν στο αντικείμενο» (ό.π., σελ.120-121). Μετά το 1935 ο Bohr, υπογραμμίζει ότι στην κβαντική μηχανική όταν σκοπεύουμε να καθορίσουμε τη θέση και την ορμή ενός ηλεκτρονίου, είναι απαραίτητο «να χρησιμοποιούμε *δύο διαφορετικές πειραματικές διατάξεις*, εκ των οποίων μόνο μία επιτρέπει την αδιαμφισβήτητη χρήση της έννοιας της θέσης, ενώ μόνο η άλλη επιτρέπει την εφαρμογή της έννοιας της ορμής οριζόμενη έτσι όπως είναι, αποκλειστικά από το νόμο της διατήρησης» (Bohr 1937, σελ. 293, η έμφαση προστέθηκε). Το σημείο κλειδί για τον Bohr ήταν ότι οι έννοιες της θέσης και της ορμής έχουν καλώς ορισμένη δυνατότητα εφαρμογής μόνο στις αμοιβαία αποκλειόμενες διατάξεις (Camilleri 2009a, σελ. 121). Πάλι το 1948, ο Bohr έδωσε βάση στο γεγονός ότι διαφορετικές πειραματικές διατάξεις παρέχουν τις «αμοιβαία αποκλειόμενες συνθήκες για μια *σαφή χρήση* των χωροχρονικών συντεταγμένων, από τη μία πλευρά, και των δυναμικών νόμων διατήρησης, από την άλλη πλευρά» (ό.π., σελ. 121). Μέσω της συμπληρωματικής περιγραφής, μαθαίνουμε «τις μη αναγνωρισμένες προϋποθέσεις για μια *σαφή χρήση* των πολύ απλών εννοιών» (Bohr 1937, σελ. 290, η έμφαση προστέθηκε). Από τα παραπάνω αποσπάσματα βλέπουμε ότι ο Bohr θεωρούσε πως η συμπληρωματικότητα προσδίδει σαφήνεια στην περιγραφή των κβαντικών διαδικασιών.

όπως του πρώτου: η μοριακή αντίληψη της κβαντικής μηχανικής ενισχύθηκε, και ο σκεπτικισμός του Einstein φάνηκε αδικαιολόγητος (Kragh 2004, σελ. 251).

Ωστόσο, ο Heisenberg φαίνεται να παρεκκλίνει από αυτή την άποψη του Bohr. Όπως λέει στον H. Stapp το 1972, «ίσως είναι ένα θέμα στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης ότι η γλώσσα της έχει έναν ορισμένο βαθμό αοριστίας, και αμφιβάλλω να μπορεί να γίνει πιο ξεκάθαρη προσπαθώντας να αποφύγει αυτή την αοριστία» (Stapp 1972, σελ. 1113). Πράγματι, από τη δεκαετία του 1950 μπορούμε να διακρίνουμε στα γραπτά του Heisenberg μια μάλλον κριτική στάση απέναντι στη γνήσια εκδοχή συμπληρωματικότητας του Bohr. Σε ένα αξιοσημείωτο απόσπασμα από το βιβλίο του *Φυσική και Φιλοσοφία*, ο Heisenberg κατηγορηματικά διαφωνεί με τον ισχυρισμό του Bohr ότι η συμπληρωματικότητα προκάλεσε μια σαφή περιγραφή των ατομικών φαινομένων (Camilleri 2009a, σελ. 121):

Μπορεί κανείς να πει ότι η έννοια της συμπληρωματικότητας, που εισήγαγε ο Bohr στην ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας, ενθάρρυνε τους φυσικούς να χρησιμοποιήσουν μια *διφορούμενη*, παρά μία σαφή γλώσσα, να χρησιμοποιούν της κλασικές έννοιες με ένα κάπως *αόριστο* τρόπο, σύμφωνα με την αρχή της αβεβαιότητας, να εφαρμόζουν εναλλάξ διαφορετικές κλασικές έννοιες που θα οδηγούσαν σε αντιφάσεις, αν χρησιμοποιούνταν ταυτόχρονα. Με αυτόν τον τρόπο μιλάμε για ηλεκτρονικές τροχιές, για τα κύματα ύλης και την πυκνότητα φορτίου, για την ενέργεια και την ορμή κλπ., έχοντας πάντα επίγνωση του γεγονότος ότι οι έννοιες αυτές έχουν πολύ περιορισμένο πεδίο εφαρμογής. Όταν αυτή η *αόριστη και μη συστηματική* χρήση της γλώσσας οδηγεί σε δυσκολίες, ο φυσικός πρέπει να αποσυρθεί στο μαθηματικό σχήμα και να χρησιμοποιήσει την μονοσήμαντη σύνδεσή του με τα πειραματικά δεδομένα (Heisenberg 1958a, σελ. 50, η έμφαση προστέθηκε).

Η άποψη του Heisenberg ότι η έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr ενθάρρυνε μια «αόριστη» και «διφορούμενη» χρήση της γλώσσας έρχεται σε έντονη αντίθεση με τους επαναλαμβανόμενους ισχυρισμούς του Bohr ότι η συμπληρωματικότητα μας επιτρέπει να αποκαλύψουμε «μη αναγνωρισμένες προϋποθέσεις για μια *σαφή χρήση* των πολύ απλών εννοιών» (Bohr 1937, σελ. 290, η έμφαση προστέθηκε). Ο Bohr, οραματιζόταν τη συμπληρωματικότητα σαν ένα μέσο για να αντιμετωπίσει τη θεμελιώδη ασάφεια στην περιγραφή της φύσης, ενώ ο Heisenberg την έβλεπε σαν μία απεικόνιση της εγγενούς ασάφειας εξαιτίας της αναγκαιότητας της χρήσης των κλασικών εννοιών την κβαντική μηχανική. Θα φαινόταν λοιπόν ότι ο Heisenberg, καταφεύγοντας στον φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής και επαναπροσδιορίζοντας την έννοια της συμπληρωματικότητας, για να συμπεριλάβει την αιτιακή περιγραφή με όρους της κυματοσυνάρτησης ψ , εκφράζει μια ριζικά

διαφορετική στάση σε σχέση με τον Bohr όσον αφορά την θέση της συμπληρωματικότητας στην ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής (Camilleri 2009a, σελ. 122).

3.4 Η αναδόμηση του Weizsäcker

Η επανερμηνεία του Heisenberg για τη συμπληρωματικότητα του χώρου και του χρόνου και την αιτιώδη περιγραφή στην κβαντική μηχανική έχει μερικές φορές, λανθασμένα, αποδοθεί στον Bohr. Αυτό φαίνεται ίσως καλύτερα μέσα από ένα άρθρο του Weizsäcker που δημοσιεύτηκε για το θέμα αυτό το 1955 (Camilleri 2009a, σελ. 116). Με την ευκαιρία των εβδομηκοστών γενεθλίων του Bohr (7 Οκτωβρίου 1955), ο Weizsäcker, που εργαζόταν τότε στο Ινστιτούτο Φυσικής Max Planck στο Göttingen, έγραψε ένα πλήρες άρθρο για τη συμπληρωματικότητα και τη λογική. Παρόλο που ο Weizsäcker δεν ήταν παρών στη συνάντηση του Κόμο το 1927, η στενή του σχέση και μαθητεία του υπό τον Heisenberg στη Λειψία, σύντομα τον έφερε σε αρκετά κοντινή επαφή με τις αντιλήψεις της συμπληρωματικότητας του Bohr. Για το σκοπό του μόλις αναφερόμενου άρθρου, όπως αναφέρθηκε ρητά εκεί, ο Weizsäcker ξαναμελέτησε τις πρώτες εργασίες του Bohr σχετικά με την ιδέα αυτή και κατέληξε στο συμπέρασμα ότι για πάνω από 25 χρόνια είχε παρερμηνεύσει την έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr, το πραγματικό νόημα της οποίας τώρα θεώρησε ότι είχε ανακαλύψει. Αλλά όπως ανέφερα και στην αρχή του κεφαλαίου όταν ρώτησε τον Bohr αν η ερμηνεία του, που θα παρουσιάσω αναλυτικότερα παρακάτω, πραγματικά αντιπροσωπεύει με ακρίβεια αυτό που έχει ο Bohr στο μυαλό του, ο Bohr του έδωσε μια σίγουρα αρνητική απάντηση (Jammer 1974, σελ. 90). Στο άρθρο του ο Weizsäcker διακρίνει μεταξύ δύο μορφών συμπληρωματικότητας και τις οποίες αποδίδει αμφότερες στον Bohr. «Η συμπληρωματικότητα μεταξύ της χωροχρονικής περιγραφής και της απαίτησης της αιτιότητας», έγραψε ο Weizsäcker, «είναι ακριβώς η συμπληρωματικότητα μεταξύ της περιγραφής της φύσης με όρους κλασικών εννοιών και με όρους της κυματοσυνάρτησης ψ » (Camilleri 2007b, σελ. 524). Ο Weizsäcker ονόμασε αυτό το είδος της συμπληρωματικότητας «κυκλική συμπληρωματικότητα». Εισήγαγε τον όρο «παράλληλη συμπληρωματικότητα» για το είδος της συμπληρωματικότητας μεταξύ ζευγών κλασικών εννοιών όπως είναι είτε η θέση και η ορμή ή η ενέργεια και ο χρόνος. Οι κλασικές αυτές έννοιες εφαρμόζονται

σε διαφορετικές πειραματικές διατάξεις και είναι αμοιβαία αποκλειόμενες μεταξύ τους (ό.π., σελ. 524).

Σύμφωνα με τα συμπεράσματα του Weizsäcker η αρχική ιδέα της συμπληρωματικότητας του Bohr ήταν αυτή της κυκλικής συμπληρωματικότητας. Όταν ο Heisenberg βρήκε τις σχέσεις απροσδιοριστίας ο Bohr τις ερμήνευσε, στη βάση της κυκλικής συμπληρωματικότητας, σαν μία ένδειξη ότι το κλασικό μοντέλο ενός σωματιδίου δεν μπορεί αυστηρά να εφαρμοστεί στο μικρόκοσμο. Προχωρώντας παραπέρα στη μελέτη της συμπληρωματικότητας ο Weizsäcker θεώρησε ότι ο Bohr ενέπλεξε την ενέργεια και την ορμή λανθασμένα με την κυματική εικόνα πιθανώς στη βάση των σχέσεων του Planck και του de Broglie. Έτσι κάποιος μπαίνει στον πειρασμό να ταυτίζει τη συμπληρωματικότητα μεταξύ σωματιδίων και κυμάτων με αυτή μεταξύ θέσης και ορμής. Κατά τον Weizsäcker η συμπληρωματικότητα μεταξύ σωματιδίου και κύματος είναι ένα τρίτο σκέλος συμπληρωματικότητας και δεν μπορεί λογικά να αναχθεί στα δύο προηγούμενα είδη (Jammer 1974, σελ. 103).

Η κυκλική συμπληρωματικότητα ήταν, σύμφωνα με τον Weizsäcker, η πιο διεισδυτική και διορατική έμπνευση του Bohr για την κβαντική μηχανική. Μια τέτοια άποψη, όμως, όπως έχουμε ήδη δει, βασίζεται σε μια εσφαλμένη ερμηνεία της διάλεξης του Bohr στο Κόμο —μια παρερμηνεία που οφείλει την προέλευση της στον Heisenberg (Camilleri 2007b, σελ. 524).

Ο Bohr⁵³ απέρριψε κατηγορηματικά τη διαφοροποίηση του Weizsäcker μεταξύ των ποικίλων ειδών της συμπληρωματικότητας, με το σκεπτικό ότι ο μαθηματικός φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής με τη συμπερίληψη της κυματοσυνάρτησης του Schrödinger είναι αποκλειστικά και μόνο ένας αλγόριθμος που παρέχει «μια εξαντλητική περιγραφή των κβαντικών φαινομένων σε μια ευρεία περιοχή εμπειρίας», δεδομένου όμως ότι δεν είναι ένα φυσικό φαινόμενο από μόνος του, δεν μπορεί να σταθεί στη σχέση συμπληρωματικότητας με άμεσα καταγεγραμμένες παρατηρήσεις. Η συμπληρωματικότητα, σύμφωνα με τον Bohr, μπορεί να διατηρηθεί μόνο μεταξύ φαινομένων. Η απάντηση του Bohr δεν ικανοποίησε τον Weizsäcker, για τον οποίο ο φορμαλισμός της κβαντικής μηχανικής ήταν πολύ περισσότερο από απλώς ένας αλγόριθμος. Σε επιστολή του προς τον Pauli, ο Weizsäcker συγκρίνει τον Bohr με τον Κολόμβο, ο οποίος έπλευσε προς τα δυτικά

⁵³ Γράμμα από τον Bohr στο Weizsäcker, με ημερομηνία 5 Μαρτίου 1956, ως απάντηση σε γράμμα του Weizsäcker στον Bohr την 17^η Ιανουαρίου 1956 (Jammer 1974, σελ. 90).

σύμφωνα με μια σωστή θεωρία, αλλά έφτασε σε μια απροσδόκητη ήπειρο χωρίς να εντοπίσει το λάθος (Jammer 1974, σελ. 104)

Φαίνεται όμως ότι τελικά ο Weizsäcker κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είχε παρανοήσει τη βασική θέση του Bohr. Σε μια μεταγενέστερη έκδοση του βιβλίου του Weizsäcker (1963), *Zum Weltbild der Physik* (Για την κοσμοθεωρία της Φυσικής), στο οποίο εμφανίστηκε το άρθρο του, ο Weizsäcker επισύναψε μια διόρθωση στο τέλος της εργασίας, όπου εξήγησε ότι αντίθετα με την άποψη που εκφράζεται στο άρθρο του, η «συμπληρωματικότητα μεταξύ της χωροχρονικής περιγραφής και αιτιότητας» αντιπροσωπεύει στην πραγματικότητα τη συμπληρωματική σχέση μεταξύ των συντεταγμένων του χώρου και του χρόνου και των άρχων διατήρησης ορμής και ενέργειας (Camilleri 2007b, σελ. 525). «Εφόσον πρέπει να παραδεχτώ ότι εγώ παρερμήνευσα τον Bohr σε αυτά τα σημεία, είναι αμφισβητήσιμο αν θα πρέπει να διατηρηθεί η έκφραση της κυκλικής συμπληρωματικότητας» (ό.π., σελ. 525). Στη συνέντευξή του με τον Kuhn το 1963, ο Weizsäcker εξήγησε το λάθος του ερμηνεύοντας την άποψη του Bohr για την «συμπληρωματικότητα μεταξύ μιας περιγραφής με έννοιες του χώρου και χρόνου και μιας περιγραφής με αιτιακές έννοιες» (ό.π., σελ. 525). Όπως εξήγησε ο Weizsäcker, αρχικά δόθηκε σε αυτόν η εντύπωση ότι σύμφωνα με τον Bohr,

... η περιγραφή σε χωροχρονικές έννοιες ήταν μια περιγραφή με βάση την κλασική φυσική ενώ η άλλη [αιτιακή περιγραφή] ήταν μια περιγραφή με βάση την κυματοσυνάρτηση του Schrödinger η οποία υπακούει σε μια διαφορετική εξίσωση. Αυτό το είχα πάρει από το βιβλίο του Heisenberg του 1931, ο Bohr μου έγραψε έπειτα [1956] ότι αυτό ήταν λανθασμένο, ότι τον παρερμήνευσα εδώ, γιατί μια περιγραφή με βάση χωροχρονικές έννοιες, για αυτόν σήμαινε μόνο περιγραφή των εννοιών με βάση το χρόνο και τη θέση και η περιγραφή στο πλαίσιο της αιτιότητας σήμαινε μια περιγραφή σύμφωνα με τους νόμους διατήρησης (ό.π., σελ. 525, η έμφαση προστέθηκε).

Είναι σημαντικό ότι ο Weizsäcker αναφέρει εδώ το βιβλίο του Heisenberg *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας* ως πηγή της δικής του παρερμηνείας για την έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr. Πράγματι, στην συνέντευξή του με τον Kuhn, ο Weizsäcker εξηγεί: «Το πρώτο λάθος ήταν του Heisenberg, αλλά νομίζω ότι ήταν ένα πολύ φυσιολογικό λάθος». Στην ανάλυση της ιδέας της συμπληρωματικότητας, ο Max Jammer (1974, σελ. 103-104), αναφέρθηκε στην παρανόηση του Weizsäcker για

τη συμπληρωματικότητα, χωρίς όμως να επισημάνει την αρχική παρερμηνεία που αποδίδεται στον Heisenberg (Camilleri 2007b., σελ. 525)

Παραμένει το ερώτημα εάν η επανερμηνεία του Heisenberg για την έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr στηρίχθηκε σε μια παρανόηση ή ήταν αποτέλεσμα της σκόπιμης συσκότισης των απόψεων του Bohr. Αυτό το ερώτημα είναι δύσκολο να απαντηθεί, καθώς υπάρχουν ελάχιστα άμεσα αποδεικτικά στοιχεία υπέρ μιας από τις δύο απόψεις. Η Mara Beller (1999a, σελ. 143-144) ισχυρίστηκε ότι φυσικοί όπως ο Bohr, ο Heisenberg και ο Born —από το «ορθόδοξο» στρατόπεδο— συχνά επίτηδες υπέκρυπταν τις πιο φιλοσοφικές διαφορές μεταξύ τους προσπαθώντας να παρουσιάσουν την εντύπωση της ενότητας και της συμφωνίας. Ενώ στην πραγματικότητα, όπως ανέφερα και προηγουμένως, δεν τις είχαν επιλύσει. Υπάρχει κάποια ένδειξη ότι αυτό συνέβη μέχρι τα μέσα της δεκαετίας του 1930. Στην περίπτωση της συμπληρωματικότητας, όμως, φαίνεται πιο πιθανό ότι ο Heisenberg είχε αρχικά παρερμηνεύσει τη διατύπωση του Bohr, ως αποτέλεσμα της κάπως διαφορούμενης διατύπωσης, του κρίσιμου αποσπάσματος, της διάλεξης του Bohr στο Κόμο (ό.π., σελ. 525).

Όπως έχω αναφέρει και στην αρχή του κεφαλαίου, οι μελετητές έχουν από καιρό αναγνωρίσει, ότι η κατανόηση αυτών που ακριβώς εννοούσε ο Bohr στα δημοσιευμένα γραπτά του είναι ένα εξαιρετικά δυσχερές έργο. Σε αυτό το πλαίσιο, θα επαναλάβω ότι πολλοί από τους συγχρόνους του Bohr, ακόμη και εκείνοι που συμπαθούσαν τις ιδέες του, βρήκαν επίσης τα έργα του δυσνόητα και τον ώθησαν να εκφράσει τον εαυτό του με μεγαλύτερη σαφήνεια. Σε μια προσπάθεια να διατυπώσει πιο προσεκτικά τις απόψεις του, το 1929 ο Bohr εγκατέλειψε προσωρινά τον όρο «συμπληρωματικότητα» και τον αντικατέστησε με τον όρο «αμοιβαιότητα» (Camilleri 2007b, σελ. 525). Ωστόσο, σύντομα μετά τη δημοσίευση της εργασίας του, ο Bohr σε γράμμα του προς τον Pauli, στις 29 Ιουλίου 1929, παραδέχτηκε ότι «η αλλαγή ονόματος ήταν σφάλμα» και στη συνέχεια επέστρεψε στον αρχικό του όρο «συμπληρωματικότητα» (Bohr 1985, σελ. 195). Λαμβάνοντας υπόψη τη γενική κατάσταση της σύγχυσης που περιβάλλει την έννοια της συμπληρωματικότητας του Bohr, φαίνεται ότι η ερμηνεία του Heisenberg, τουλάχιστον αρχικά, προέρχεται από μια λανθασμένη ανάγνωση του εν λόγω κρίσιμου αποσπάσματος και όχι από μια απόπειρα απόκρυψης της διαφωνίας του με την ερμηνεία του Bohr. Ωστόσο, τα μεταγενέστερα γραπτά του Heisenberg δείχνουν ότι μέχρι τη δεκαετία του 1950 είχε

αποκτήσει μεγαλύτερη επίγνωση του βαθμού στον οποίο οι απόψεις του ήταν σε αντίθεση με αυτές του Bohr (Camilleri 2007b, σελ. 526).

Συμπεράσματα

Με την εισαγωγή της ιδέας ότι το φως είχε σωματιδιακές ιδιότητες, ενώ συγχρόνως η κυματική θεωρία ήταν πλήρως εδραιωμένη, ο Einstein άνοιξε ένα εννοιολογικό κουτί της Πανδώρας. Και ακριβώς τον καιρό που η υπόθεση των κβάντων φωτός του Einstein άρχισε να γίνεται ευρέως αποδεκτή, το μυστήριο βάθαινε με την διδακτορική διατριβή του Louis de Broglie (1924), ο οποίος διατύπωσε την άποψη ότι και τα σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια, μπορούν να παρασταθούν ως κυματοπακέτα. Ο ίδιος ο Einstein αναγνώρισε αμέσως τη σπουδαιότητα του έργου του de Broglie, σε αντίθεση με εκείνους που θεωρούσαν ότι η ιδέα του δεν ήταν τίποτα άλλο από κάποια όμορφα μαθηματικά. Μέσα σε λίγα χρόνια όμως υπήρξαν αδιάσειστες πειραματικές μαρτυρίες ότι ο de Broglie είχε δίκιο. Από εμπειρική άποψη, ο δυισμός κύματος και σωματιδίου εμφανιζόταν ως ένα χαρακτηριστικό των θεμελιωδών συστατικών της ύλης. Το πρόβλημα ήταν να γίνει κάτι τέτοιο κατανοητό από θεωρητική άποψη (Powers 1995, σελ. 174-175). Ο Schrödinger το 1926, εμπνεόμενος από τον κυματοσωματιδιακό δυισμό του de Broglie, εισήγαγε την δική του κυματική μηχανική για την περιγραφή των ατομικών φαινομένων. Παρά τα πλεονεκτήματα που παρουσίαζε η κυματική μηχανική του Schrödinger,⁵⁴ έθετε ένα σημαντικό πρόβλημα, την ερμηνεία της λύσης της εξίσωσης που είχε προτείνει.

Ο Heisenberg ήταν αντίθετος στην ερμηνεία που έδωσε ο Schrödinger για την κυματοσυνάρτηση, ότι δηλαδή η λύση της αναπαριστά το ηλεκτρόνιο ως ένα υλικό κύμα. Αντ' αυτού, όπως είδαμε και στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας, θεωρούσε ότι η κυματοσυνάρτηση ψ αντιπροσωπεύει ένα σύστημα σε ένα μαθηματικό χώρο n διαστάσεων, και όχι ένα κανονικό υλικό κύμα σε τρισδιάστατο χώρο. Επιπλέον, δεν έβλεπε καμία αντιστοιχία της κυματοσυνάρτησης ψ με τα υλικά κύματα του de Broglie. Η πιθανοκρατική ερμηνεία του Born για την κυματοσυνάρτηση ψ ήταν πολύ σημαντική για τον Heisenberg, που ήταν είναι οπαδός της σωματιδιακής αναπαράστασης. Με τη βοήθεια του Born ερμήνευσε τα κυματοπακέτα του Schrödinger ως πακέτα πιθανότητας που μας επιτρέπουν να προσδιορίσουμε, με

⁵⁴ Η κυματομηχανική του Schrödinger παρουσίαζε μεγάλα πλεονεκτήματα απέναντι στα ανταγωνιστικά προς αυτή συστήματα κβαντικής μηχανικής. Ειδικότερα, στηριζόταν σε μαθηματικές έννοιες και πρακτικές οικείες από άλλες περιοχές της θεωρητικής φυσικής και ως εκ τούτου πολύ πιο εύχρηστες σε πρακτικούς υπολογισμούς. Επιπλέον, ήταν λιγότερο αφηρημένη από τη μητρομηχανική και, κατά τη γνώμη πολλών φυσικών, προτιμότερη από εννοιολογική άποψη (Kragh 2004, σελ. 199).

κάποια πιθανότητα, τη θέση του ηλεκτρονίου θεωρώντας το ως σωματίδιο. Η δεύτερη κβάντωση, που πρότεινε ο Dirac το 1927, και η συνέχεια της θεωρίας του από τους Jordan-Klein-Wigner έδωσαν στον Heisenberg την ευκαιρία να ερμηνεύσει την κυματική εικόνα στο πλαίσιο τη κβαντικής θεωρίας. Υποστήριξε ότι τα πεδιακά κύματα που περιγράφονται από τους Jordan-Klein-Wigner είναι κύματα σε κανονικό τρισδιάστατο χώρο. Κατά δική του δήλωση: *«έχουν τόσο πολύ όσο ή τόσο λίγη “πραγματικότητα” όσο τα σωματίδια»*. Θεωρούσε δηλαδή τα υλικά αυτά κύματα εξίσου πραγματικά με τα σωματίδια, και τις δύο περιγραφές ισοδύναμες. Για τον Heisenberg δεν υπάρχει δισμός με την έννοια της υποχρεωτικής χρήσης και των δύο εικόνων, κυματικής και σωματιδιακής, αλλά υπάρχουν δύο δυνατότητες αρκούντως επαρκείς, ξεχωριστά η μία από την άλλη, για την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας.

Ο Bohr από την άλλη μεριά, ξεκινώντας από τα πειραματικά αποτελέσματα των τελευταίων χρόνων της δεκαετίας του 1920, εντάσσει τον κυματοσωματιδιακό δισμό στο πλαίσιο της αρχής της συμπληρωματικότητας που διατυπώνει την περίοδο εκείνη. Για την ολοκληρωμένη ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας πρέπει, κατά τον Bohr, να λάβουμε *απαραίτητα* υπόψη και τις δύο περιγραφές που δεν είναι αντιφατικές αλλά συμπληρωματικές μεταξύ τους. Επιπλέον ο Bohr, όπως φαίνεται από γραπτά του ίδιου αλλά και αφηγήσεις των συνεργατών του, δεν αποδίδει τον ίδιο βαθμό ρεαλισμού στα υλικά κύματα, όπως αποδίδει ο Heisenberg σε αυτά, ούτε φυσικά και στα κβάντα φωτός.

Η άποψη του Heisenberg για τον κυματοσωματιδιακό δισμό είναι σημαντική για δύο λόγους. Πρώτον, επειδή προσφέρει μια πρωτότυπη και μοναδική εικόνα για το πρόβλημα του κυματοσωματιδιακού δισμού, που μέχρι και σήμερα αποτελεί ένα από τα κεντρικά παράδοξα της κβαντικής μηχανικής. Και δεύτερον, όπως αποδεικνύεται, η έννοια του Heisenberg για την ισοδυναμία κύματος-σωματιδίου διέφερε αρκετά από την έννοια του Bohr ως προς τη συμπληρωματικότητα κύματος-σωματιδίου. Αυτή η απόκλιση μεταξύ των δύο επιστημόνων θέτει υπό αμφισβήτηση την επικρατούσα ιστορική άποψη ότι μετά από μια σύντομη περίοδο έντονης διαφωνίας, την άνοιξη του 1927, ο Heisenberg αποδέχθηκε το επιχείρημα συμπληρωματικότητας του Bohr (Camilleri 2006, σελ. 313).

Είναι αλήθεια ότι τόσο ο Bohr όσο και ο Heisenberg αποδέχονταν κάποια μορφή κυματοσωματιδιακού δισμού. Ωστόσο, η έμφαση του Bohr στη συμπληρωματική χρήση των περιγραφών κύματος και σωματιδίου προέκυψε από τη συνεχή του ενασχόληση για το πειραματικό αντικείμενο της κβαντικής μηχανικής. Το

ηλεκτρόνιο παρουσιάζει τόσο φαινόμενα κυματικής φύσης, όπως της συμβολής και της περίθλασης, όσο και σωματιδιακά φαινόμενα σε διαφορετικές πειραματικές διατάξεις. Ο Heisenberg, από την άλλη πλευρά, αντιλήφθηκε τη δυνατότητα να ερμηνεύσει το αντικείμενο της κβαντικής μηχανικής ως κύμα ή ως σωματίδιο, εξαιτίας των διαφορετικών μετασχηματισμών των μαθηματικών εξισώσεων της κβαντικής μηχανικής. Σε αυτό το βαθμό, η κατανόησή του για το δυισμό προέκυψε από τη δυνατότητα ερμηνείας του μαθηματικού φορμαλισμού με δύο διαφορετικούς, αλλά εμπειρικά ισοδύναμους τρόπους. Υπογραμμίζοντας τις κρυφές διαφωνίες μεταξύ Bohr και Heisenberg, μπορούμε να δούμε πιο ξεκάθαρα τις διαφορετικές απόψεις εντός της Σχολής της Κοπεγχάγης (ό.π., σελ. 313)

Την επίλυση του προβλήματος του κυματοσωματιδιακού δυισμού εξέχοντες φυσικοί, όπως ο de Broglie και ο Einstein, την είδαν ως ένα ζήτημα θεμελιώδους σημασίας για την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Ο Heisenberg την είδε ως μια εκδήλωση ενός βαθύτερου προβλήματος, δηλαδή της ανεπάρκειας κλασικών όρων όπως το «κύμα» και το «σωματίδιο». Στο βιβλίο του *Οι Φυσικές Αρχές της Κβαντικής Θεωρίας* αναφέρει:

Η λύση της δυσκολίας είναι ότι οι δύο διανοητικές εικόνες ... είναι αμφοτέρως ατελείς Υπάρχει ένα παλιό ρητό που λέει ότι «οι αναλογίες δεν μπορούν να ωθηθούν πολύ μακριά», όμως μπορεί δικαιολογημένα να χρησιμοποιούνται για να περιγράψουν πράγματα για τα οποία η γλώσσα μας δεν έχει λέξεις. Το φως και η ύλη είναι και οι δύο μοναδικές οντότητες, και ο φαινομενικός δυισμός απορρέει από τους περιορισμούς της γλώσσας μας (Heisenberg 1930, σελ. 10).

Στη συνέντευξή του με τον Kuhn, ο Heisenberg εξηγεί και πάλι ότι «το γεγονός ότι μπορούμε να χρησιμοποιούμε δύο είδη λέξεων [όπως κύμα και σωματίδιο] για να περιγράψουμε την κβαντική μηχανική δεν είναι παρά μόνο μία ένδειξη της ανεπάρκειας των λέξεων» (Camilleri 2009a, σελ. 84). Τα όρια των κλασικών εννοιών είναι κεντρικό θέμα στη φιλοσοφία της κβαντικής μηχανικής του Heisenberg (ό.π., σελ. 84).

Η περιορισμένη δυνατότητα χρήσης των κλασικών εννοιών, όμως, δεν αποτελούσε για τον Heisenberg μια φιλοσοφική θέση με την οποία είχε ασχοληθεί συστηματικά πριν το 1927. Όπως είδαμε στο δεύτερο κεφάλαιο της εργασίας, ο Heisenberg προσπάθησε, μετά τη δημοσίευση της κβαντικής μηχανικής των μητρών (1925), είτε να δώσει στις έννοιες του χώρου και του χρόνου στατιστικό χαρακτήρα

ή να εισαγάγει την ιδέα ενός ασυνεχούς χωροχρόνου, εξηγώντας έτσι την αδυναμία προσδιορισμού μεγεθών όπως η ταχύτητα ενός σωματιδίου. Δε εμμένει όμως στις απόψεις του αυτές, αλλά το 1927, στο άρθρο του για την απροσδιοριστία και με την ευκαιρία της απουσίας του Bohr από την Κοπεγχάγη, αναπτύσσει τη θετικιστική άποψη ότι έννοιες όπως η θέση και η ταχύτητα έχουν νόημα όταν μπορούν να ορισθούν μέσα από νοητικά πειράματα. Όπως γράφει ο Jonathan Powers (1995, σελ. 188) «έχοντας ως πρότυπο την οπερασιοναλιστική ανάλυση της συγχρονικότητας» του Einstein, ο Heisenberg ορίζει τη θέση του ηλεκτρονίου με τη βοήθεια του περίφημου νοητικού πειράματος του μικροσκοπίου ακτίνων γ. Μετά την επιστροφή όμως του Bohr στην Κοπεγχάγη, και τον εντοπισμό λαθών από τον τελευταίο στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου, ο Heisenberg δεν θα επιμείνει στον οπερασιοναλιστικό τρόπο ορισμού των μεγεθών.

Μετά από συζητήσεις με τον Bohr, οι φιλοσοφικές απόψεις του Heisenberg υπέστησαν μια σημαντική αλλαγή. Μέσα από τη διεισδυτική κριτική του Bohr για στο νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου, ο Heisenberg συνειδητοποίησε ότι δεν μπορούσε να εγκαταλείψει τις κλασικές έννοιες όπως η θέση και η ταχύτητα στην κβαντική μηχανική, παρά τους περιορισμούς στην εφαρμογή τους. Η εφαρμογή αυτών των εννοιών μπορεί να υπόκειται σε εγγενείς περιορισμούς, πράγμα που συμβαίνει στην κβαντική μηχανική. Αυτή θα συνέχιζε να είναι η άποψη του Heisenberg στα επόμενα χρόνια. Πράγματι, αναγνώρισε ότι αυτή η άποψη έχει θεμελιώδη σημασία για την κατανόηση της κβαντικής μηχανικής. Όπως επισήμανε στις «διαλέξεις Gifford» το 1955-1956, «Η ερμηνεία της Κοπεγχάγης για την κβαντική μηχανική αρχίζει με ένα παράδοξο». Από τη μία πλευρά πρέπει να «περιγράψουμε την εμπειρία μας με όρους κλασικής φυσικής», ενώ από την άλλη γνωρίζουμε «ότι αυτές οι έννοιες δεν ταιριάζουν με ακρίβεια στη φύση» (Heisenberg 1958a, σελ. 55). Αυτό το παράδοξο, το οποίο ο Heisenberg εκτίμησε πλήρως μόνο μετά τη δημοσίευση του άρθρου της αρχής της απροσδιοριστίας το 1927, ήταν η παντοτινή κληρονομιά των συζητήσεών του με τον Bohr στην Κοπεγχάγη. Θα αποτελούσε το σημείο εκκίνησης για όλες τις μεταγενέστερες επιστημολογικές σκέψεις του για την κβαντική μηχανική (Camilleri 2009a, σελ. 100-107). Ο Camilleri αναφέρει ότι «από το τη δεκαετία του 1930 έχει εξαφανιστεί η έμφαση του Heisenberg στην παρατηρησιμότητα και στον οπερασιοναλισμό, που φανερώνει ένα σαφή “θετικισμό” της πρώιμης σκέψης του» (2009a, σελ. 106). Πράγματι στις διαλέξεις Gifford, ο Heisenberg θα δηλώσει ότι «πρέπει να τονισθεί ... ότι η ερμηνεία

της Κοπεγχάγης για την κβαντική θεωρία δεν είναι με κανένα τρόπο θετικιστική» (Heisenberg 1958a, σελ. 127).

Τις τελευταίες δεκαετίες η σχετική βιβλιογραφία με την ιστορία της κβαντικής θεωρίας παρουσίασε σημαντική αύξηση. Στην καρδιά αυτού που ονομάζεται «ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης» της κβαντικής θεωρίας βρίσκεται η έννοια της συμπληρωματικότητας. Αν και υπάρχουν πολλές εργασίες που υποδεικνύουν το γεγονός ότι αυτό που συνήθως αναφέρεται ως ερμηνεία της Κοπεγχάγης περιλαμβάνει μια σειρά διαφορετικών φιλοσοφικών απόψεων και ερμηνειών, λίγη προσοχή έχει αφιερωθεί στους τρόπους με τους οποίους η άποψη του Bohr για την συμπληρωματικότητα ήταν παρεξηγημένη και παρερμηνευμένη από τους συγχρόνους του, ακόμη και εκείνους που εργάστηκαν πιο κοντά μαζί του (Camilleri 2007b, σελ. 526).

Αν και τα γραπτά του Heisenberg στη δεκαετία του 1930 δίνουν την εντύπωση ότι συμμερίζονταν τη γενική άποψη της συμπληρωματικότητας του Bohr, η ερμηνεία του Heisenberg διέφερε σε κρίσιμα σημεία από αυτή του Bohr. Ο ισχυρισμός του Bohr ότι η χωροχρονική και η αιτιακή περιγραφή ήταν συμπληρωματικές μεταξύ τους ερμηνεύτηκε από τον Heisenberg ότι μια περιγραφή με όρους ντετερμινιστικής εξέλιξης της κυματικής συνάρτησης ήταν αμοιβαία αποκλειόμενη με μια χωροχρονική περιγραφή των παρατηρούμενων φαινομένων, αν και οι δύο ήταν απαραίτητες. Αυτό ήταν αρκετά διαφορετικό από την ερμηνεία που παρουσίασε ο Bohr, σύμφωνα με την οποία οι συνθήκες που απαιτούνται για τον προσδιορισμό της ενέργειας ή της ορμής ενός συστήματος ήταν αμοιβαία αποκλειόμενες με εκείνες που απαιτούνται για μια αναπαράσταση στο χώρο και το χρόνο (ό.π., σελ. 526).

Όπως ανέφερα στο τρίτο κεφάλαιο, η ουσιώδης απόκλιση μεταξύ του Heisenberg και του Bohr για την έννοια της συμπληρωματικότητας πιθανώς να οφείλεται στην εσφαλμένη ανάγνωση του Heisenberg του κρίσιμου αποσπάσματος της διάσημης ανακοίνωσης του Bohr στο Κόμο. Ωστόσο, δεν πρέπει να παραβλέψουμε το γεγονός ότι για τον Heisenberg, όχι λιγότερο απ' ό,τι για τον Bohr, η ιδέα της συμπληρωματικότητας παρείχε ένα φιλοσοφικό πλαίσιο για την ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής. Από τη μια, ο Heisenberg θεώρησε ότι ήταν απαραίτητο να περιγράψει ένα απομονωμένο κβαντομηχανικό σύστημα με όρους της εξίσωσης του Schrödinger, αλλά από την άλλη πλευρά, όπως πολύ συχνά επεσήμανε ο Bohr, τα αποτελέσματα όλων των πειραμάτων πρέπει τελικά να εκφραστούν με όρους

κλασικών εννοιών. Υπό αυτή την έννοια, ο Heisenberg υποστήριξε ότι αυτοί οι δύο τρόποι περιγραφής, που τους θεωρούσε αμοιβαία αποκλειόμενους αλλά συμπληρωματικούς, ήταν ουσιώδεις για τη φυσική και επιστημολογική ερμηνεία της κβαντικής μηχανικής (ό.π., σελ. 526).

Επιπλέον, ο Heisenberg, ενώ αποδέχθηκε την άποψη του Bohr για αμοιβαίως αποκλειόμενες πειραματικές διατάξεις, οι οποίες ήταν αναγκαίες για τη μέτρηση της ορμής και της θέσης του ηλεκτρονίου, ποτέ δε φαίνεται να ακολουθεί την ερμηνεία του Bohr για τη συμπληρωματικότητα, σύμφωνα με την οποία τέτοιες πειραματικές διατάξεις χρησιμεύουν για να ορίσουμε αυτές ακριβώς τις συνθήκες για τη *σαφή χρήση* των κλασικών εννοιών. Αντίθετα ο Heisenberg τόνισε την αναγκαία *ασάφεια*, εγγενή στη χρήση τέτοιων εννοιών στην κβαντική μηχανική. Μέχρι αυτό το σημείο, ο Heisenberg δεν φαίνεται ποτέ να έχει κατανοήσει τη λογική στην οποία ο Bohr στήριζε τη γενική «άποψη» ή το «πλαίσιο» της συμπληρωματικότητας, σύμφωνα με την οποία ήταν *απαραίτητη* και *θεμελιώδης* στην κβαντική μηχανική. Εντούτοις, όπως φαίνεται και από τα προηγούμενα, έμεινε προσκολλημένος στην άποψη του Bohr, ότι οι κλασικές έννοιες, αν και έχουν περιορισμένη δυνατότητα εφαρμογής, είναι αναγκαίες στην περιγραφή της εμπειρίας. Η άποψη αυτή είναι ουσιαστικά ένας σημαντικός πυλώνας στην μετέπειτα επιστημολογία του Heisenberg (Camilleri 2009a, σελ. 129).

Στις τρεις βασικές ενότητες της εργασίας αναλύσαμε τις αποκλίνουσες απόψεις των Bohr και Heisenberg σχετικά με ζητήματα που αφορούν την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας. Σύμφωνα με τον Camilleri, «οι συζητήσεις μεταξύ Niels Bohr και Werner Heisenberg στην Κοπεγχάγη, κατά το πρώτο εξάμηνο του 1927, έθεσαν τα θεμέλια για αυτό που συνήθως αναφέρεται σήμερα ως “ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης” για την κβαντική μηχανική» (2009a, σελ. 1). Πράγματι οι συζητήσεις αυτές ήταν ιδιαίτερα σημαντικές επειδή οδήγησαν στην τελική διατύπωση των δύο σημαντικότερων, κατά τη γνώμη μου, εργασιών που αφορούν την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας. Δηλαδή της εργασίας του Heisenberg που αφορά την αρχή της απροσδιοριστίας, αλλά και της εργασίας του Bohr για την αρχή της συμπληρωματικότητας. Η έννοια της συμπληρωματικότητας, όπως ανέφερα στο τρίτο κεφάλαιο της εργασίας, παρουσιάστηκε το 1927 στο συνέδριο του Κόμο στην Ιταλία αλλά και στο πέμπτο συνέδριο Solvay από τον ίδιο τον Bohr, και κατά την αντίληψη του «παρείχε ένα νέο εννοιολογικό πλαίσιο για την κατανόηση της κβαντικής μηχανικής» (ό.π., σελ. 1). Η έννοια της συμπληρωματικότητας μετά το 1927

απασχόλησε τόσο τον Bohr αλλά και παρά πολλούς από τους σύγχρονους του και θεμελιωτές της κβαντικής θεωρίας, όπως τους Heisenberg, Pauli, και Jordan, αλλά και πολλούς άλλους επιστήμονες όπως ο Weizsäcker και ο Rosenfeld. Οι παραπάνω ασχολήθηκαν κυρίως με τη συμπληρωματικότητα σε σχέση με την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας και ένας μεγάλος αριθμός κειμένων και εργασιών τους έχει να κάνει με την επεξήγηση της έννοιας αυτής και την ερμηνεία της κβαντικής φυσικής. Ο Jordan, προχωρώντας ακόμη πιο πέρα και φέρνοντας τον Bohr σε απολογητική θέση, «προεξέτεινε τη συμπληρωματικότητα σε πεδία της ψυχολογίας, της φιλοσοφίας και της βιολογίας» (Kragh 2004, σελ. 247). Σύμφωνα με τη γενικότερη αντίληψη των μελετητών, η ερμηνεία της Σχολής της Κοπεγχάγης, βασικός πυλώνας της οποίας ήταν η συμπληρωματικότητα, κατέστη τελικά και η δεσπόζουσα ερμηνεία για την κβαντική θεωρία (Camilleri 2009a, σελ. 1).

Παρά την εκτενή βιβλιογραφία και τα πολλά γραπτά για τη συμπληρωματικότητα και την ερμηνεία της Κοπεγχάγης, τελικά «τι είναι η ερμηνεία της Κοπεγχάγης, ή τι μας λέει για τον κόσμο των ατόμων και των ηλεκτρονίων, καταλήγει να είναι ένα δύσκολο ερώτημα για να απαντηθεί» (ό.π., σελ.1). Κατά τον Camilleri (2009a, σελ. 2 και 2009b, σελ. 27), η ευθύνη για το αναπάντητο του ερωτήματος οφείλεται στο γεγονός ότι οι Bohr και Heisenberg σε κανένα κείμενό τους δεν έθεσαν με σαφήνεια και καθαρότητα τα βασικά σημεία της ερμηνείας της Σχολής της Κοπεγχάγης για την κβαντική φυσική. Στο θέμα αυτό, συνεχίζει ο Camilleri (2009b, σελ. 27), «τα γραπτά τους είναι με κάποιο τρόπο αμφίσημα και στερούνται ευθύτητας».

Ακόμη και παλαιότεροι μελετητές συμφωνούν στο ότι η ερμηνεία της Κοπεγχάγης δεν αποτελεί ένα καλά συγκροτημένο και συνεκτικό δόγμα, αλλά παρουσιάζει μια ποικιλομορφία φιλοσοφικών απόψεων, ορισμένες από τις οποίες είναι μεταξύ τους αντιφατικές. Ο Max Jammer στο βιβλίο του *Η Φιλοσοφία της Κβαντικής Μηχανικής* τονίζει:

η ερμηνεία της Κοπεγχάγης δεν είναι ένα ενιαίο, ξεκάθαρο, σαφώς καθορισμένο σύνολο ιδεών, αλλά ένας κοινός παρονομαστής για μια ποικιλία σχετικών απόψεων. Ούτε συνδέεται απαραίτητα με μια συγκεκριμένη φιλοσοφική ή ιδεολογική θέση. Μπορεί να διακηρυχθεί και έχει διακηρυχθεί από τους υποστηρικτές των πιο αποκλινουσών φιλοσοφικών απόψεων, που κυμαίνονται από τον αυστηρό υποκειμενισμό και τον καθαρό ιδεαλισμό μέσω του νέο-Καντιανισμού, του κριτικού ρεαλισμού, ως τον θετικισμό και το διαλεκτικό υλισμό (Jammer 1974, σελ. 87, η έμφαση προστέθηκε).

Η Mara Beller, στο βιβλίο της *Κβαντικός Διάλογος*, αναφέρει ότι «κάτω από εξονυχιστικό έλεγχο το παράδειγμα της Κοπεγχάγης δεν έχει ούτε συνεκτικότητα ούτε σταθερότητα» (1999a, σελ. 173). Επισημαίνει επιπλέον ότι, αν και η εγκυρότητα της σύγχρονης φυσικής σε σχέση με την κλασική δεν αμφισβητείται, είναι πολύ δύσκολο να βρούμε μια κοινή βάση ή ένα κοινό ιδεολογικό πλαίσιο στα οποία να συμφωνούν οι επιστήμονες που εκφράζουν τη Σχολή της Κοπεγχάγης. Συγκεκριμένα τονίζει:

Η πλήρης αναγνώριση των αντιφάσεων της δημιουργεί *μεγάλη αμφιβολία για την ύπαρξη μιας κοινής βάσης* για την ερμηνεία της Κοπεγχάγης και ίσως για την ιδέα ενός εννοιολογικού πλαισίου εν γένει. Οι κεντρικοί πυλώνες της φιλοσοφίας της Κοπεγχάγης είναι η απροσδιοριστία, ο κυματοσωματιδιακός δυισμός και η αναγκαιότητα των κλασικών εννοιών.... *Είναι δύσκολο να βρεθεί ένας κοινός παρονομαστής*, οποιαδήποτε ιδέα, που απολάμβανε φαινομενική δέσμευση, που δεν συνοδευόταν επίσης με το σπάσιμο της δέσμευσης αυτής κάποια στιγμή. Αυτό δεν σημαίνει ότι δεν υπήρξε συναίνεση στο ότι η έλευση της κβαντικής θεωρίας απαιτούσε μια ριζική απομάκρυνση από την κλασική φυσική. Είναι η ακριβής και συνεπής συμφωνία για το τι θα αποτελούσε μια τέτοια παρέκκλιση που λείπει (Beller 1999a, σελ. 187-188, η έμφαση προστέθηκε).

Είναι λοιπόν επόμενο να διερωτηθούμε πώς είναι τόσο σύνηθες να γίνεται αναφορά σε μια ενιαία σχολή—ερμηνεία της σύγχρονης φυσικής ή αν η «ερμηνεία της Κοπεγχάγης» και κατ' επέκταση η «Σχολή της Κοπεγχάγης», όπως πολύ εύστοχα το θέτει ο Don Howard, «είναι ένας μεταπολεμικός μύθος» (2004, σελ. 675, η έμφαση προστέθηκε). Αν όμως πρόκειται για ένα μύθο που σχετίζεται με την ιστορία της φιλοσοφίας της σύγχρονης φυσικής αναπόφευκτα τίθενται και άλλα ερωτήματα: Πώς δημιουργήθηκε ο μύθος της υποτιθέμενης «Σχολής της Κοπεγχάγης»; Ποιος είναι ο σκοπός που εξυπηρετούσε η δημιουργία του; Πώς είναι δυνατό τόσο διαφορετικές απόψεις επιστημόνων να θεωρείται, έστω και φαινομενικά, ότι συγκροτούν μία ενιαία τάση; Αν και δεν να γίνεται λεπτομερής ανάλυση των παραπάνω ερωτημάτων στο πλαίσιο της εργασίας αυτής, θα κάνω μια σύντομη αναφορά.

Τόσο ο Don Howard (2004), όσο και ο Kristian Camilleri (2009b) συμφωνούν ότι ο Heisenberg είναι ο κύριος «υπεύθυνος», έστω από «τεχνικής» πλευράς, για τη δημιουργία του μύθου της Σχολής της Κοπεγχάγης ως ο πρώτος που εισήγαγε τον όρο «ερμηνεία της Κοπεγχάγης» το 1955. Ειδικά για τον Howard «θέτοντάς το απλά, η

εικόνα μιας ενιαίας ερμηνείας της Κοπεγχάγης είναι ένας μεταπολεμικός μύθος, που επινοήθηκε από τον Heisenberg» (2004, σελ. 675). Η εργασία του 1955, στην οποία ο Heisenberg εισάγει τον όρο «ερμηνεία της Κοπεγχάγης», είχε τον τίτλο «Η εξέλιξη της ερμηνείας της κβαντικής θεωρίας» και ήταν ένα δοκίμιο για ένα τόμο εργασιών προς τιμή του Niels Bohr. Στη εργασία του αυτή ο Heisenberg αναφέρει ότι:

θα περιγράψουμε εν συντομία την ιστορία αυτής της αποσαφήνισης [των αρχών της κβαντικής θεωρίας] από το 1924 έως το 1927, και στη συνέχεια θα διερευνήσουμε τις επικρίσεις που έγιναν πρόσφατα κατά της «ερμηνείας της Κοπεγχάγης» για την κβαντική θεωρία . . . Οι μήνες που ακολούθησαν την επίσκεψη του Schrödinger ήταν μια εποχή της πιο έντονης εργασίας στην Κοπεγχάγη, από την οποία τελικά προέκυψε η αποκαλούμενη «ερμηνεία της Κοπεγχάγης για την κβαντική θεωρία», και θυμάμαι με χαρά τις εξαντλητικές συζητήσεις με την Bohr, που συχνά διαρκούσαν μέχρι αργά το βράδυ . . . Από την άνοιξη του 1927, λοιπόν, υπήρξε επιτέλους μια πλήρης και σαφής μαθηματική διαδικασία για την ερμηνεία των πειραμάτων πάνω στα άτομα ή για την πρόβλεψη των αποτελεσμάτων τους . . . από τη Διάσκεψη Solvay του 1927, η «ερμηνεία της Κοπεγχάγης» ήταν σχεδόν αποδεκτή γενικά και διαμόρφωσε τη βάση όλων των πρακτικών εφαρμογών της κβαντικής θεωρίας. Έχει, ενίοτε, αντικρουστεί και επικριθεί ως η «ορθόδοξη» θεωρία . . . Αυτό που γεννήθηκε στην Κοπεγχάγη το 1927 δεν ήταν μόνο μια σαφής συνταγή για την ερμηνεία των πειραμάτων, αλλά επίσης μια γλώσσα στην οποία μιλήσαμε για τη Φύση σε ατομική κλίμακα, και μέχρι τώρα ένα μέρος της φιλοσοφίας (Heisenberg 1955, σελ. 12, 14, 16, η έμφαση προστέθηκε).

Από το παραπάνω απόσπασμα μπορούμε να επισημάνουμε ότι το συνέδριο Solvay του 1927 αποτέλεσε, όπως είναι και γενικά παραδεκτό, το συνέδριο στο οποίο η επιστημονική κοινότητα αποδέχθηκε την κβαντική μηχανική όπως παρουσιάστηκε από τους υποστηρικτές της ορθόδοξης άποψης. Κατά τον Camilleri (2009b, σελ. 41), η αφήγηση αυτή του Heisenberg εξυπηρετεί αφενός τη συγκάλυψη των διαφορών μεταξύ των πρωταγωνιστών της εποχής όπως είναι ο Bohr, ο Heisenberg, ο Born και ο Dirac, αλλά επίσης προσπαθεί και να δώσει «την εντύπωση ότι μια συγκεκριμένη φιλοσοφική άποψη εμφανίστηκε στην Κοπεγχάγη κατά τη διάρκεια αυτής της περιόδου» (ό.π., 2009b, σελ. 42). Ο Howard, σχολιάζοντας το κείμενο του 1955, αναφέρει ότι «το καινούργιο ήταν ότι ο Heisenberg αποκάλεσε ως "ερμηνεία της Κοπεγχάγης", το αμάλγαμα των ιδεών του, αλλά αφού το αποκάλεσε έτσι, ο Heisenberg ενίσχυσε κανονικά το εφεύρημα μιας ενιαίας άποψης της Κοπεγχάγης και έθεσε τον εαυτό του ως κύριο εκπρόσωπό της» (Howard 2004, σελ. 677).

Για ποιο λόγο όμως η συγκεκριμένη χρονική στιγμή επιλέγεται από τον Heisenberg για να παρουσιάσει μια ενιαία στάση μιας ομάδας επιστημόνων; Η απάντηση που δίνεται από τον Camilleri (2009b, σελ. 34-40) σχετίζεται με τις επιθέσεις που δέχεται η ορθόδοξη άποψη εκείνη την εποχή και είναι κατά τη γνώμη μου καλά τεκμηριωμένη. Είναι γεγονός ότι μετά το πέμπτο και έκτο συνέδριο Solvay, το 1927 και 1930 αντίστοιχα, δεν υπήρξαν έντονες αντιδράσεις στις απόψεις του κύκλου της Κοπεγχάγης. Το Μάιο του 1935 ο Einstein επανήλθε στην κριτική του για την κβαντική μηχανική όταν, στο περιοδικό *Physical Review*, «δημοσίευσε μαζί με τους νεαρούς συναδέλφους του στο Πανεπιστήμιο του Πρίνστον, Boris Podolsky και Nathan Rosen, μια σύντομη αλλά περίφημη εργασία με τον τίτλο “Can Quantum - Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?” (“Μπορεί να Θεωρείται Πλήρης η Κβαντομηχανική Περιγραφή της Φυσικής Πραγματικότητας;”))» (Kragh 2004, σελ. 253). Τη δεκαετία όμως του 1930 η εργασία αυτή δεν προκάλεσε τόσο μεγάλο ενδιαφέρον ανάμεσα στους φυσικούς και δεν πέτυχε να τους πείσει να εγκαταλείψουν την ερμηνεία της Κοπεγχάγης (ό.π., σελ. 254). Η κατάσταση αυτή αλλάζει όμως τις αρχές της δεκαετίας του 1950 όταν η ορθόδοξη άποψη δέχεται πολλαπλές επιθέσεις. Κατά τον Camilleri (2009b) οι επιθέσεις γίνονται από φυσικούς όπως ο David Bohm και Jean-Vigier, που αναπτύσσουν αιτιοκρατικές θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών, αλλά σημαντικότερες αυτών είναι επιθέσεις από Φυσικούς της Σοβιετικής Ένωσης όπως οι D. I. Blokhintsev, A. A. Maksimov και A. D. Aleksandrov. Η ιδεολογική αυτή επίθεση από τους επιστήμονες της Σοβιετικής Ένωσης, εμπνεόμενη από το έργο του Λένιν *Υλισμός και Εμπειριοκριτικισμός*, γίνεται στο πλαίσιο της Σοβιετικής κριτικής στις θετικιστικές φιλοσοφικές απόψεις. Οι επικριτές αυτοί δεν εξέταζαν ενδελεχώς, ή δεν θεωρούσαν απαραίτητο να εξετάσουν, τις φιλοσοφικές απόψεις των Bohr, Heisenberg και Pauli αλλά «απλά επέκριναν τον υποκειμενικό ιδεαλισμό που είδαν ως θεμέλιο της άποψης της Κοπεγχάγης» (Camilleri 2009b, σελ. 37). Η πιο σημαντική κριτική, κατά τον Camilleri προέρχεται από τον Blokhintsev, στο άρθρο του με τίτλο «Κριτική των Φιλοσοφικών Απόψεων της Σχολής της Κοπεγχάγης» που δημοσιεύτηκε στη Ρωσία το 1952. Μάλιστα, κατά τον Camilleri στο άρθρο αυτό γίνεται για πρώτη φορά η χρήση της φράσης «Σχολή της Κοπεγχάγης». Το άρθρο αυτό μεταφράστηκε στα γερμανικά το 1953. Στην εργασία αυτή ο Blokhintsev δηλώνει: «Μεταξύ των διαφορετικών ιδεαλιστικών τάσεων στη σύγχρονη φυσική, η αποκαλούμενη “Σχολή της Κοπεγχάγης” είναι η πιο αντιδραστική. Το παρόν άρθρο είναι αφιερωμένο στο ξεμασκάρεμα ιδεαλιστικών και

αγνωστικιστικών σοφιστειών αυτής της σχολής σχετικά με τα θεμελιώδη προβλήματα της κβαντικής μηχανικής» (Camilleri 2009b, σελ. 37). Το απόσπασμα αυτό αναφέρεται έτσι ακριβώς και από τον Heisenberg (1958a, σελ. 120) ως ένδειξη οξείας κριτικής απέναντι στην ερμηνεία της Κοπεγχάγης. Από το κείμενο αυτό φαίνεται ότι δεν πρόκειται για μια απλή κριτική στον θετικισμό αλλά για το «ξεμασκάρεμα» του κρυμμένου ιδεαλισμού που κρύβεται πίσω από τις απόψεις της Σχολής της Κοπεγχάγης για την κβαντική φυσική (Camilleri 2009b, σελ. 37). Οι επιθέσεις αυτές όμως είχαν διπλή επίδραση. Πρώτον, είχαν σαν αποτέλεσμα πολλοί σχολιαστές των απόψεων του Bohr, βλέποντας την επίθεση που είχαν να αντιμετωπίσουν, αντέδρασαν και «πύκνωσαν τις τάξεις τους ταυτίζοντας τις απόψεις τους με του Bohr – του αναγνωρισμένου συγγραφέα - τα γραπτά των οποίων ελήφθησαν ως άμεση έκφραση της “αυθεντικής” ερμηνείας της Κοπεγχάγης» (Camilleri 2009b, σελ. 33). Επίσης, με τις πολλές αυτές επιθέσεις, οι αντίπαλοι έδιναν την εντύπωση ότι είχαν να αντιμετωπίσουν μια ενιαία φιλοσοφική άποψη. Κατά τον Camilleri «η “ερμηνεία της Κοπεγχάγης” ήταν εξίσου μια κατασκευή εκείνων που αντιτάχθηκαν στην ορθόδοξη άποψη, όπως εκείνων που την υπερασπίστηκαν» (2009b, σελ. 36).

Κατά τον Camilleri, βέβαια, ενώ οι εσωτερικές διαφωνίες της επονομαζόμενης Σχολής της Κοπεγχάγης δεν έπαψαν ποτέ να υπάρχουν ουσιαστικά, ταυτόχρονα παρουσιαζόταν ένα ενιαίο μέτωπο κατά των διαφόρων επιθέσεων. Οι πρωταγωνιστές που εμπλέκονταν το κατάφεραν αυτό επειδή «σπάνια δημοσίευαν τις φιλοσοφικές τους διαφωνίες κατά τη διάρκεια της κρίσιμης περιόδου» άλλα «τις απέκρυπταν από τη δημόσια θέα» (2009a, σελ. 43). Να επισημάνουμε εδώ ότι την ίδια άποψη εκφράζει και η Beller για τη διάλεξη του Bohr στο Κόμο (όπως έχω ήδη αναφέρει στην ενότητα 3.4). Όπως χαρακτηριστικά γράφει «η ανάγκη να προσφερθεί μια ενιαία εξήγηση, ικανή να αντιμετωπίσει την αντίπαλη, ήταν ένας από τους λόγους για την ασάφεια της διάλεξης του Bohr στο Κόμο . . . Τέτοια ασάφεια ήταν αναγκαία για να καλύψει το εννοιολογικό κενό μεταξύ των ερμηνειών τους» (Beller 1999a, σελ. 143).

Η άποψη του Howard για το κίνητρο που οδήγησε τον Heisenberg να παρουσιάσει μια ενιαία σχολή το 1955 είναι αρκετά πιο ριζοσπαστική και κατά τη γνώμη μου όχι προφανής. Ο Howard θεωρεί ότι παρά τη στενή σχέση μεταξύ Bohr και Heisenberg τη δεκαετία του 1920, ο τελευταίος ήταν κατά κάποιο τρόπο «εξόριστος» από το στενό κύκλο της Κοπεγχάγης τα μεταπολεμικά χρόνια. Αυτό το αποδίδει ο Howard στη διακοπή των σχέσεων μεταξύ των δύο, μετά την αποτυχημένη

επίσκεψη του Heisenberg στην Κοπεγχάγη τον Σεπτέμβριο του 1941. Ήταν η περίοδος που ο Heisenberg είχε αναλάβει την ηγεσία του προγράμματος της Γερμανίας για την κατασκευή ατομικής βόμβας. Θέτοντας τον εαυτό του ως την επίσημη φωνή της ερμηνείας της Κοπεγχάγης, ο «περήφανος» και «άλλοτε φιλόδοξος» Heisenberg διεκδικούσε, κατά τον Howard, την επανένταξή του στην οικογένεια της Κοπεγχάγης (Howard 2004, σελ. 677). Ασχέτως όμως των κινήτρων του Heisenberg, ο Howard παρατηρεί ότι πολλοί επιστήμονες και μελετητές αποδέχτηκαν την ύπαρξη ενιαίας άποψης ώστε να προωθήσουν τη δική τους θεματολογία. Συγκεκριμένα ο Howard αναφέρει τους Bohm, Feyerabend, Hanson και Popper.

Στο πλαίσιο των προηγούμενων απόψεων, αλλά και με βάση τα όσα έχω αναφέρει στις τρεις ενότητες της εργασίας, θα ήθελα να σχολιάσω ότι όντως μέσα στην επονομαζόμενη στη Σχολή της Κοπεγχάγης μπορεί να βρει κάποιος αρκετές διαφορές, ανάμεσα στον τρόπο που ερμηνεύουν οι επιστήμονες την κβαντική θεωρία. Αν κάποιος σκεφτεί ότι πολλές από αυτές απαντώνται ανάμεσα στον Bohr και τον Heisenberg, δύο βασικούς πρωταγωνιστές της ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής, που επιπροσθέτως συνεργάζονταν πολύ στενά την κρίσιμη περίοδο 1925-1927, είναι δυνατόν να ισχυριστούμε ότι δεν υπήρξε, αυστηρά μιλώντας, μία ενιαία σχόλη ερμηνείας της σύγχρονης φυσικής που οι βασικές φιλοσοφικές απόψεις των σημαντικότερων εκπροσώπων της να ταυτίζονται μεταξύ τους. Δικαιολογείται λοιπόν στο πλαίσιο αυτό η φράση «Ο Μύθος της Σχολής της Κοπεγχάγης». Θεωρώ πιο πειστική την άποψη του Kristian Camilleri (2009b, σελ. 27), ότι δηλαδή τα κείμενα των σημαντικών επιστημόνων της εποχής εκείνης Bohr, Heisenberg, Pauli, Born, Jordan και von Neumann), γράφτηκαν με βάση το «*Kopenhagener Geist der Quantentheorie*»,⁵⁵ δηλαδή το «πνεύμα της Κοπεγχάγης» για τη κβαντική θεωρία, παρά ότι οι επιστήμονες αυτοί αποτελούσαν μια συμπαγή ομάδα. Αυτό επειδή, κατά τη γνώμη μου, η έκφραση «πνεύμα της Κοπεγχάγης» δε συνεπάγεται την ύπαρξη μιας ενιαίας ερμηνείας της θεωρίας, αλλά αφήνει περιθώρια διαφοροποιήσεων. Σίγουρα η μελέτη των διαφορών μεταξύ του Bohr και του Heisenberg δεν εξαντλείται στο πλαίσιο αυτής της εργασίας. Ζητήματα όπως η στάση τους απέναντι στο επιχείρημα των EPR, μια λεπτομερέστερη ανάλυση για τις απόψεις τους απέναντι στην κυματική θεωρία του Schrödinger, αλλά και οι θέσεις για την ερμηνεία της κβαντικής θεωρίας

⁵⁵ Η έκφραση αυτή χρησιμοποιείται από τον Heisenberg (1930, πρόλογος).

που διατυπώνονται από άλλους φυσικούς της εποχής, όπως ο Pauli, πιστεύω πως αποτελούν εξαιρετικά ενδιαφέροντα θέματα για περαιτέρω έρευνα.

Πρωτογενείς πηγές.

1. Bohr, N. (1920). Über die serienspektren der elemente. *Zeitschrift für Physik*, 2, 423-469, (μτφρ. στην αγγ. ως Bohr, N. (1974), 241-282, οι σελίδες αναφέρονται στο Bohr, N. (1974)).
2. Bohr, N. (1928). The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory. *Nature*, 121, 580–590.
3. Bohr, N. (1931). Maxwell and modern theoretical physics. *Nature*, 128, 691–692 .
4. Bohr, N. (1932). Chemistry and the quantum theory of atomic constitution. *Journal of Chemical Society* (1932), 349–384.
5. Bohr, N. (1937). Causality and complementarity. *Philosophy of Science*, 4, 289–298.
6. Bohr, N. (1976). On the series spectra of the elements. J. Nielsen (Eds), *Bohr's Collected works* (Vol. 3), (σελ. 241-282). Amsterdam: North-Holland.
7. Bohr, N. (1984). *Niels Bohr's Collected works*. Vol. 5, K. Stolzenburg (Eds). Amsterdam: North-Holland.
8. Bohr, N. (1985). *Niels Bohr's Collected works*. Vol. 6, J. Kalckar (Eds). Amsterdam: North-Holland.
9. Bohr, N., Kramers, H. A., & Slater, J. C. (1924). The quantum theory of radiation. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 47, 785-802.
10. Born, M., Heisenberg, W., & Jordan, P. (1926). Zur Quantenmechanik. II. *Zeitschrift für Physik*, 35, 557-615, (μτφρ. στην αγγ. ως Born, M.,

- Heisenberg, W. και Jordan, P. (1967), 321-385, οι σελίδες αναφέρονται στο Born, M., Heisenberg, W. και Jordan, P. (1967)).
11. Born, M., Heisenberg, W. & Jordan, P. (1967). On Quantum Mechanics II. In van der Waerden (Eds), *Sources of Quantum Mechanics* (σελ. 321-385). Amsterdam: North-Holland.
 12. Compton, A. (1923). “A quantum theory of the scattering of X-rays by light elements”. *Physical review*, 21, 483-502.
 13. Dirac, P. (1927). The quantum theory of the emission and absorption of radiation. *Proceedings of the Royal Society*, A114, 243-265.
 14. Heisenberg, W. (1927). Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik. *Zeitschrift für Physik*, 43, 172–198, (μτφρ. στην αγγ. ως Heisenberg, W. (1983), οι σελίδες αναφέρονται στο Heisenberg, W. (1983)).
 15. Heisenberg, W. (1930). *The Physical Principles of the Quantum Theory* (μτφρ. C. Eckhart & F. Hoyt). New York: Dover Publications (πρώτη έκδοση από University of Chicago Press 1930).
 16. Heisenberg, W. (1955). The development of the interpretation of quantum theory. W. Pauli, L. Rosenfeld, & V. Weisskopf (Eds), *Niels Bohr and the development of physics* (σελ. 12–29). New York: McGraw-Hill.
 17. Heisenberg, W. (1958a). *Physics and philosophy: The revolution in modern science*. London: George Allen & Unwin.
 18. Heisenberg, W. (1958b). *Φυσική και φιλοσοφία* (μτφρ. Δ. Κούρτοβικ). Αθήνα: Εκδόσεις Κάλβος.
 19. Heisenberg, W. (1971). *Physics and Beyond* (μτφρ. A. Pomerans). New York: Harper & Row.

20. Heisenberg, W. (1983). The Physical Content of Quantum Kinematics and Mechanics. In J. A. Wheeler & W.H. Zuker (Eds), *Quantum Theory and Measurement*, (σελ. 62-84). Princeton: Princeton University Press.
21. Heisenberg, W. (1989). *Encounters with Einstein: And other essays on people, places, and particles*. Princeton: Princeton University Press.
22. Pauli, W. (1980). *General principles of quantum mechanics* (μτφρ. P. Achuthan & K. Venkatesan). Berlin: Springer.
23. Schrödinger, E. (1926). An undulatory theory of the mechanics of atoms and molecules. *Physical review*, 28, 1049-70.
24. Schrödinger, E. (1928). On the relationship of the quantum mechanics of Heisenberg, Born, and Jordan, and that of Schrödinger. *In Collected papers on wave mechanics* (σελ. 45–61), (μτφρ. J. F. Schearer & W. M. Deans). London: Blackie & Son Ltd.

Δευτερογενής βιβλιογραφία:

25. Beller, M. (1985). Pascual Jordan's influence on the discovery of Heisenberg's indeterminacy principle. *Archive for History of Exact Sciences*, 33, 337-349.
26. Beller, M. (1992). The birth of Bohr's complementarity: The context and the dialogues. *Studies in the History and Philosophy of Science*, 23, 147-180.
27. Beller, M. (1999a). *Quantum dialogue: The making of a revolution*. Chicago: University of Chicago Press.
28. Beller, M. (1999b). Jocular Commemorations: The Copenhagen Spirit. *Osiris*, 14, 252-273.
29. Bridgman, P. W. (1927). *The logic of modern physics*. New York: Macmillan.
30. Camilleri, K. (2006) Heisenberg and the wave-particle duality. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 37, 298-315.
31. Camilleri, K. (2007a). Indeterminacy and the limits of classical concepts: The transformation of Heisenberg's thought. *Perspectives on Science*, 15, 178-201.
32. Camilleri, K. (2007b). Bohr, Heisenberg and the divergent views of complementarity. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 38, 514-528.
33. Camilleri, K. (2009a). *Heisenberg and the Interpretation of Quantum Mechanics - The Physicist as Philosopher*. Cambridge: Cambridge University Press.
34. Camilleri, K. (2009b). Constructing the myth of the Copenhagen interpretation. *Perspectives on Science*, 17, 26-57.

35. Cassidy, D. C. (1992). *Uncertainty: The life and science of Werner Heisenberg*. New York: Freeman.
36. Dresden, M. (1987). *H. A. Kramers Between Tradition and Revolution*. New York: Springer-Verlag.
37. Harman, P. (1994). *Ενέργεια Δύναμη και Ύλη: Η εννοιολογική εξέλιξη της Φυσικής κατά τον 19^ο αιώνα* (μτφρ. Τ. Τσιαντούκλα). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
38. Hendry, J. (1984). *The Creation of Quantum Theory and the Bohr-Pauli Dialogue*. Dordrecht: D. Reidel.
39. Howard, D. (2004). Who invented the “Copenhagen interpretation”? A study in mythology. *Philosophy of Science*, 71, 669–682.
40. Jammer, M. (1966). *The conceptual development of quantum theory*. New York: McGraw-Hill.
41. Jammer, M. (1974). *The philosophy of quantum mechanics*. New York: Wiley.
42. Kragh, H. (1990). *Dirac: a scientific biography*. New York: Cambridge University Press.
43. Kragh, H. (2004). *Οι γενιές των κβάντων – Η ιστορία της φυσικής του εικοστού αιώνα* (μτφρ. Γ. Κατσιλιέρη). Αθήνα: Εκδόσεις Κάτοπτρο.
44. Lindley, D. (2011). *Η αρχή της αβεβαιότητας* (μτφρ. Κ. Σίμου). Αθήνα: Εκδόσεις Τραυλός.
45. Mehra, J., & Rechenberg, H. (2000). *The Historical Development of Quantum Theory*. Vol. 6: The Completion of Quantum Mechanics 1926–1941. Part I: The Probabilistic Interpretation and the Empirical and Mathematical Foundation of Quantum Mechanics, 1926–1932. New York: Springer.

46. Mehra, J., & Rechenberg, H. (2001). *The Historical Development of Quantum Theory*. Vol. 6: The Completion of Quantum Mechanics 1926–1941. Part II: The Completion and Extensions of Quantum Mechanics 1932–1941. New York: Springer.
47. Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford: Clarendon Press.
48. Pais, A. (1991). *Niels Bohr's times: In physics, philosophy, and polity*. Oxford: Clarendon Press.
49. Powers, J. (1995). *Φιλοσοφία και Νέα Φυσική* (μτφρ. Τ. Κυπριανίδη & Τ. Τσαντούκλα). Ηράκλειο: Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης.
50. Segrè, E. (1997a). *Ιστορία της Φυσικής τόμος Α΄. Από την πτώση των σωμάτων στα ραδιοκύματα* (μτφρ. Κ. Μεργιά). Αθήνα: Εκδόσεις Διάυλος.
51. Segrè, E. (1997b). *Ιστορία της Φυσικής τόμος Β΄. Από τις ακτίνες Χ ως τα κουάρκ*. (μτφρ. Ν. Κοτρίδης). Αθήνα: Εκδόσεις Διάυλος.
52. Segrè, G. (2009). *Ο Φάουστ στην Κοπεγχάγη. Η κβαντική ψυχή της φυσικής* (μφρ. Κ. Σίμου). Αθήνα: Τραυλός.
53. Stapp, H. P. (1972). The Copenhagen interpretation. *American Journal of Physics*, 40, 1098-1116.
54. Tanona, S. (2004). Uncertainty in Bohr's response to the Heisenberg microscope. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, 35, 483-507.
55. Τ. Φ. Λ του Cambridge, (2011). Επιμέλεια Robert Audi, Στέλιος Βιρβιδάκης και Γιώργος Ξηροπαΐδης. Αθήνα: Εκδόσεις Κέδρος.