



«Σχολή Θετικών Επιστημών & Τεχνολογίας »

«Μεταπτυχιακή Ειδίκευση Καθηγητών Φυσικών Επιστημών »

Διπλωματική Εργασία

«Η ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ»

1ο μέρος: Αδιέξοδα της κλασικής φυσικής, «Γέννηση Κβαντομηχανικής», Ιστορία της διαμάχης για την ερμηνεία της Κβαντομηχανικής (Einstein-Bohr), Άλλοι σπουδαίοι επιστήμονες (Planck, Schrodinger, Heisenberg, Pauli, Dirac)

2ο μέρος: Η Κβαντομηχανική στη Δευτεροβάθμια, 2 σενάρια διδασκαλίας: Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο και Αρχή Αβεβαιότητας Θέσης-Ορμής

«Αντωνία Μπίτσιου»

Επιβλέπων καθηγητής: «Σπυρίδων Τζαμαρίας»

Πάτρα, «Σεπτέμβριος» «2026»

Η παρούσα εργασία αποτελεί πνευματική ιδιοκτησία του/της φοιτητή/φοιτήτριας («συγγραφέας/δημιουργός») που την εκπόνησε. Στο πλαίσιο της πολιτικής ανοικτής πρόσβασης ο συγγραφέας/δημιουργός εκχωρεί στο ΕΑΠ, μη αποκλειστική άδεια χρήσης του δικαιώματος αναπαραγωγής, προσαρμογής, δημόσιου δανεισμού, παρουσίας στο κοινό και ψηφιακής διάχυσής τους διεθνώς, σε ηλεκτρονική μορφή και σε οποιοδήποτε μέσο, για διδακτικούς και ερευνητικούς σκοπούς, άνευ ανταλλάγματος και για όλο το χρόνο διάρκειας των δικαιωμάτων πνευματικής ιδιοκτησίας. Η ανοικτή πρόσβαση στο πλήρες κείμενο για μελέτη και ανάγνωση δεν σημαίνει καθ' οιονδήποτε τρόπο παραχώρηση δικαιωμάτων διανοητικής ιδιοκτησίας του συγγραφέα/δημιουργού ούτε επιτρέπει την αναπαραγωγή, αναδημοσίευση, αντιγραφή, αποθήκευση, πώληση, εμπορική χρήση, μετάδοση, διανομή, έκδοση, εκτέλεση, «μεταφόρτωση» (downloading), «ανάρτηση» (uploading), μετάφραση, τροποποίηση με οποιονδήποτε τρόπο, τμηματικά ή περιληπτικά της εργασίας, χωρίς τη ρητή προηγούμενη έγγραφη συναίνεση του συγγραφέα/δημιουργού. Ο συγγραφέας/δημιουργός διατηρεί το σύνολο των ηθικών και περιουσιακών του δικαιωμάτων.



«Η ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗ»

«Αντωνία Μπίτσιου»

Επιτροπή Επίβλεψης Διπλωματικής Εργασίας

Επιβλέπων Καθηγητής:
«Σπυρίδων Τζαμαρίας»

Συν-Επιβλέπων Καθηγητής:
«Απόστολος Τσιριγώτης»

Πάτρα, «Σεπτέμβριος» «2026»

«Στην οικογένειά μου»

Θα ήθελα να πω ένα μεγάλο ευχαριστώ στον επιβλέποντα καθηγητή μου κ.Σπύρο Τζαμαρία για την βοήθειά του αυτό το διάστημα,την προθυμία και το κλίμα συνεργασίας που υπήρχε στην επικοινωνία μας.Επίσης,να ευχαριστήσω τον συνεπιβλέποντα καθηγητή μου κ.Απόστολο Τσιριγώτη.

Ακόμη ευχαριστώ το σύζυγό μου και τα παιδιά μου για την υποστήριξη και την υπομονή τους ειδικά το τελευταίο διάστημα που πλησίαζε η προθεσμία για την ολοκλήρωση της εργασίας.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία αποτελεί μια προσπάθεια μέσα από ιστορικά και βιογραφικά στοιχεία των σπουδαίων επιστημόνων στις αρχές του εικοστού αιώνα να έρθουμε πιο κοντά στις βασικές αρχές της κβαντομηχανικής. Προσεγγίζοντας το ιστορικό πλαίσιο της εποχής, τα αδιέξοδα, τις απόψεις, τις διαφωνίες, τα νοητικά πειράματα, τις εργασίες των επιστημόνων, προσδοκάμε να κατανοήσουμε τους φυσικούς νόμους που διέπουν το μικρόκοσμο, να κατανοήσουμε γιατί η «καταδίκη» των μικροσκοπικών σωματιδίων σε αιώνια κίνηση οδηγεί τελικά στη σταθερότητα της ύλης, να συνειδητοποιήσουμε την πιθανοκρατία της Κβαντομηχανικής, όπως διατυπώθηκε από τη Σχολή της Κοπενχάγης. Επιπλέον, στο τελευταίο μέρος της ΔΕ θα παρουσιαστούν δύο ολοκληρωμένα σενάρια διδασκαλίας φαινομένων κβαντομηχανικής-το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η Αρχή της Αβεβαιότητας θέσης-ορμής- που αποτελούν διδακτέα ύλη του προγράμματος σπουδών της Φυσικής Γ Λυκείου και εξεταστέα ύλη για τις πανελλήνιες εξετάσεις. Σκοπός είναι να αξιοποιηθούν βασικές αρχές της Διερευνητικής Μάθησης και να αναδειχθεί η συμβολή της ιστορίας των φυσικών επιστημών στη διδασκαλία της φυσικής στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση.

Λέξεις – Κλειδιά

Αδιέξοδα Κλασικής Φυσικής

Κβαντικά άλματα

Θεμελιώδεις Πιθανότητες

Διαμάχη Bohr Einstein

Συνέδριο Σολβέ

Σχολή Κοπενχάγης

Αρχή Αβεβαιότητας

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

«THE QUANTUM REVOLUTION»

«Antonia Bitsiou»

Abstract

This thesis is an attempt, through historical and biographical data of the great scientists of the early twentieth century, to come closer to the basic principles of quantum mechanics. Approaching the historical context of the era, the impasses, the opinions, the disagreements, the thought experiments, the works of scientists, we expect to understand the physical laws that govern the microcosm, to understand why the "condemnation" of microscopic particles in eternal motion ultimately leads to the stability of matter, to realize the probabilism of Quantum Mechanics, as formulated by the Copenhagen School.

In addition, in the last part of the course, two complete scenarios for teaching quantum mechanical phenomena will be presented-the photoelectric effect and the position-momentum Uncertainty Principle-, which are part of the syllabus of the Physics 3rd grade curriculum and exam material for the national exams. The aim is to utilize basic principles of Inquiry Learning and to highlight the contribution of the history of natural sciences to the teaching of physics in secondary education.

Keywords

Deadlocks of Classical Physics
Quantum Jumps
Fundamental Probabilities
Bohr Einstein Controversy
Solvay Conference
Copenhagen School
Uncertainty Principle
Photoelectric Effect

Περιεχόμενα

Περίληψη.....	v
Abstract.....	vi
Περιεχόμενα.....	vii
Κατάλογος Εικόνων/Σχημάτων.....	viii
Συντομογραφίες & Ακρωνύμια.....	ix
ΕΙΣΑΓΩΓΗ.....	1
1.ΑΔΙΕΞΟΔΑ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ-ΓΕΝΝΗΣΗ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ.....	1
1.1Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος.....	2
1.2 Ερμηνεία του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου.....	6
1.3 Σταθερότητα του Ατόμου-Ατομικά Φάσματα.....	9
2.Η ΔΙΑΜΑΧΗ BOHR-EINSTEIN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ.....	16
2.1Σταθμοί στην εξέλιξη της κβαντικής θεωρίας.....	16
2.2Πρώτες συναντήσεις Bohr-Einstein.....	21
2.3 5ο Συνέδριο Σολβέ.....	22
2.4Νοητικά πειράματα Einstein.....	24
2.4.1Πείραμα μονής σχισμής-Πείραμα διπλής σχισμής.....	24
2.4.2Το κουτί των φωτονίων.....	28
2.4.3Το παράδοξο EPR.....	30
2.5Ανισότητες Bell.....	33
3.ΒΙΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΑΓΩΝΙΣΤΩΝ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗΣ.....	38
3.1Max Planck.....	38
3.2Albert Einstein.....	40
3.3Niels Bohr.....	44
3.4Erwin Schrödinger.....	49
3.5Werner Heisenberg.....	53
3.6Wolfgang Pauli.....	57
3.7Paul Dirac.....	60
4.Η ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΟ ΛΥΚΕΙΟ.....	63
4.1Σενάριο διδασκαλίας του Φωτοηλεκτρικού Φαινομένου.....	63
4.2Σενάριο διδασκαλίας της Αρχής της Αβεβαιότητας θέσης-ορμής.....	76
ΕΠΙΛΟΓΟΣ.....	81
Βιβλιογραφία.....	82

Κατάλογος Εικόνων / Σχημάτων

Εικόνα 1: Κοιλότητα μέλανος σώματος.....	2
Εικόνα 2: Γραφική παράσταση έντασης θερμικής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για 3 διαφορετικές θερμοκρασίες.....	3
Εικόνα 3: Γραφική παράσταση,Σύγκριση της κλασικής πρόβλεψης για την φασματική κατανομή της θερμικής ακτινοβολίας με τον εμπειρικό τύπο του Planck.Οι δύο καμπύλες συμφωνούν μόνο στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος.....	5
Εικόνα 4: Στάθμες ενέργειας ενός ταλαντωτή συχνότητας f	6
Εικόνα 5: Διάγραμμα της $K_{\max}$ συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός..	8
Εικόνα 6: Διάταξη του πειράματος του Rutherford.....	10
Εικόνα 7: Το πλανητικό μοντέλο:Τα περισσότερα σωμάτια α υφίστανται ελάχιστη εκτροπή και κάποια εκτρέπονται ακόμη και 180 μοίρες.....	11
Εικόνα 8: Σκέδαση Compton.....	17
Εικόνα 9: Από την κυματική φύση των ηλεκτρονίων στην συνθήκη κβάντωσης του Bohr.....	18
Εικόνα 10: Διάταξη πειράματος Davisson-Germer.....	18
Εικόνα 11: Φωτογραφία επιστημόνων που έλαβαν μέρος στο 5ο Συνέδριο Σολβέ.....	22
Εικόνα 12: Σχηματική παράσταση του νοητικού πειράματος της μονής σχισμής του Einstein.....	24
Εικόνα 13: Νοητικό πείραμα δύο σχισμών του Einstein.....	25
Εικόνα 14: Συμβολή ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σε διπλή σχισμή.....	26
Εικόνα 15: Νοητικό πείραμα Einstein με το κουτί φωτονίων.....	28
Εικόνα 16: Το σχέδιο του Bohr για το κουτί φωτονίων του Einstein.....	29
Εικόνα 17: Το πείραμα του Aspect.....	35
Εικόνα 18: Στιγμιότυπο κύματος.....	78
Εικόνα 19: Κυματοπακέτο.....	78

Συντομογραφίες & Ακρωνύμια

ΔΕ	Διπλωματική Εργασία
EPR	Einstein-Podolsky-Rosen
ETH	Eidgenonische Technische Hochschule
PTR	Physikalisch-Technische Reichsanstalt (Αυτοκρατορικό Ινστιτούτο Φυσικής και Τεχνολογίας)

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Το 2025 κηρύχθηκε διεθνές έτος κβαντικής επιστήμης και τεχνολογίας αφού συμπληρώνονται εκατό χρόνια από τη διατύπωση σπουδαίων αρχών της κβαντομηχανικής από τον Heisenberg και τον Schrodinger που μας έφεραν πιο κοντά στην γνώση της δομής και της εξέλιξης του σύμπαντος.

Σε αυτή τη ΔΕ θα γίνει μια ιστορική αναδρομή ξεκινώντας περίπου στο 1900 όταν ο Planck ανακάλυψε το κβάντο φωτός και ξεκίνησε την επιστημονική επανάσταση. Θα γίνει περιγραφή των μεγάλων επιστημονικών ιδεών και της ζωής των επιστημόνων χάρη στους οποίους θεμελιώθηκε η κβαντομηχανική. Ο Einstein με την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και τα φωτόνια, ο Rutherford με το πλανητικό μοντέλο του ατόμου που ήταν η τελειωτική απόδειξη ότι η κλασική φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τη σταθερότητα των ατόμων, ο Bohr με το κβαντικό μοντέλο του ατόμου, ο Compton που απέδειξε πειραματικά τη σωματιδιακή φύση του φωτός, ο Louis de Broglie με τα υλικά κύματα, ο Schrödinger με την κυματοσυνάρτησή του, ο Born με τα κύματα πιθανότητας, ο Heisenberg με την μηχανική των μητρών και την Αρχή της Αβεβαιότητας, ο Pauli με την Απαγορευτική Αρχή του και τέλος ο Dirac με την σχετικιστική εξίσωση Schrödinger μας έφεραν πιο κοντά στην περιγραφή των φυσικών νόμων του ατομικού και πυρηνικού μικροκόσμου.

Θα γίνει επίσης εκτενής αναφορά της διαμάχης ανάμεσα στον Bohr και τον Einstein για τη φύση της πραγματικότητας, για το αν οι πιθανότητες της νέας θεωρίας είναι θεμελιώδεις-μη περαιτέρω εξηγήσιμες-ή οφείλονται σε ατελή γνώση. Ο Bohr και ο Einstein πρεσβεύουν δύο ασυμβίβαστες θεωρίες, την πιθανοκρατούμενη κβαντομηχανική και την αιτιοκρατούμενη σχετικότητα αντίστοιχα. Και θα φτάσουμε στο 5ο Συνέδριο Σολβέ το 1927 που αποτέλεσε την κορύφωση της διαμάχης μεταξύ τους και αποτελεί την ιδρυτική πράξη της Νέας Φυσικής με την «Ερμηνεία της Κοπενχάγης» όπως διατυπώθηκε τη δεκαετία του 1920 από τον Bohr και τους συνεργάτες του και ισχύει έως σήμερα να είναι η κυρίαρχη ερμηνεία της Κβαντομηχανικής. Τελικά, ο Dirac το 1930 με την εξίσωσή του θα πετύχει τη σύνθεση κβαντομηχανικής και ειδικής θεωρίας της σχετικότητας.

Θα μελετηθούν στη συνέχεια οι Ανισότητες Bell που ανακάλυψε ο Bell το 1964 και κατάφερε να ξαναφέρει μια διαμάχη που είχε πάρει φιλοσοφικό χαρακτήρα ξανά στο επιστημονικό πλαίσιο, την έκανε διαφωνία μεταξύ φυσικών που μπορούσε να ελεγχθεί πειραματικά. Αυτό τον πειραματικό έλεγχο ανέλαβαν όπως θα αναφερθεί οι επιστήμονες Clauser, Aspect και Zeilinger, οι οποίοι απέδειξαν πέρα από κάθε αμφιβολία ότι οι κβαντομηχανικές πιθανότητες είναι θεμελιώδεις και τιμήθηκαν με το βραβείο Νόμπελ το 2022.

Στο τελευταίο μέρος της ΔΕ θα αναπτυχθούν δύο σενάρια διδασκαλίας, το πρώτο πάνω στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το δεύτερο στην Αρχή Αβεβαιότητας θέσης-ορμής που και τα δύο αυτά θέματα αποτελούν διδακτέα και εξεταστέα ύλη στη Φυσική Προσανατολισμού των μαθητών της Γ Λυκείου. Η μεθοδολογία που θα παρουσιαστεί θα είναι η διερευνητική μέθοδος σε ομαδοσυνεργατικό πλαίσιο.

Το θέμα της ΔΕ εντάσσεται στην ΚΦΕ 60. Πιο συγκεκριμένα, το πρώτο μέρος ανήκει στην ιστορία των φυσικών επιστημών και το δεύτερο μέρος στην εκπαιδευτική μεθοδολογία.

1.ΑΔΙΕΞΟΔΑ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

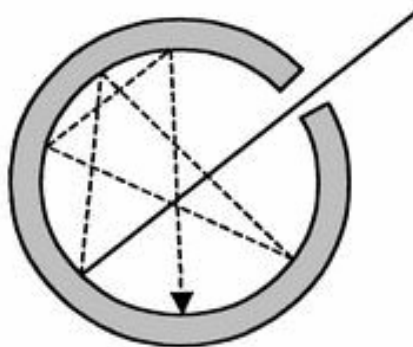
ΓΕΝΝΗΣΗ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

1.1Ακτινοβολία μέλανος σώματος

Κάθε σώμα ,σε οποιαδήποτε θερμοκρασία,ακόμα και λίγο μεγαλύτερη από το απόλυτο μηδέν εκπέμπει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που την ονομάζουμε θερμική ακτινοβολία.Αυτό που προκάλεσε το έντονο ενδιαφέρον των επιστημόνων λίγο πριν το 1900 ήταν η παγκοσμιότητα της μορφής του φάσματος της θερμικής ακτινοβολίας.Όλα τα πυρακτωμένα σώματα,ανεξάρτητα από την χημική τους σύσταση,εκπέμπουν το ίδιο ακριβώς φάσμα!Δεν παίζει κανένα ρόλο το υλικό από το οποίο είναι φτιαγμένο το σώμα και οι ιδιότητές του.Αντίθετα η φασματική κατανομή εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

Πολλές φορές χρησιμοποιείται ο όρος μέλαν σώμα στη φυσική,εννοώντας εκείνο το ιδεατό σώμα που απορροφά όλη την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που φτάνει σε αυτό.Τα περισσότερα πυκνά υλικά σε θερμοκρασίες από την θερμοκρασία περιβάλλοντος έως την θερμοκρασία πυρακτώσεώς τους συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα.Πρακτικά,κάθε σώμα με αιθαλωμένη την επιφάνειά του μπορεί να θεωρηθεί μέλαν σώμα.Ο ήλιος ,με θερμοκρασία στην επιφάνειά του περίπου 5800 K , είναι ένα μέλαν σώμα.

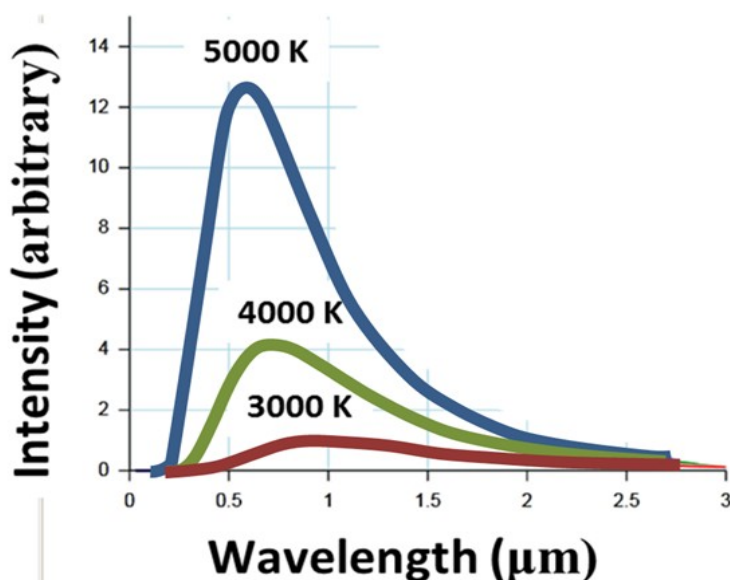
Μια καλή προσέγγιση μέλανος σώματος μπορεί να θεωρηθεί η εσωτερική κοιλότητα ενός αντικειμένου που διαθέτει ένα μικρό άνοιγμα-οπή.Μετά από μερικές ανακλάσεις στα εσωτερικά τοιχώματα της κοιλότητας,απορροφάται όλο το φως που εισήλθε στην οπή.Επιπλέον,η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται λόγω της θερμικής κίνησης των τοιχωμάτων της κοιλότητας πριν εξέλθει από την μικρή οπή υφίσταται διαδοχικές ανακλάσεις(απορροφήσεις και επανεκπομπές) σε διάφορα σημεία αυτών ,δηλαδή έχει αλληλεπιδράσει επανειλημμένα με την ύλη του και έχει έρθει σε θερμική ισορροπία με αυτό.



Εικόνα 1: κοιλότητα μέλανος σώματος.
(Serway,τόμος 4,ΣΥΓΧΡΟΝΗ
ΦΥΣΙΚΗ,σελ.49)

Αυτή η μικρή οπή μοιάζει σαν επιφάνεια μαύρου σώματος που μπορεί να εκπέμπει και να απορροφά όλα τα μήκη κύματος. Πρόκειται για την ακτινοβολία μέλανος σώματος.

Αν αναλογιστούμε το ιστορικό πλαίσιο της εποχής βρισκόμαστε γύρω στο 1880 ,όταν οι γερμανοί στην προσπάθεια ανάπτυξης στόχευσαν στην κατασκευή λαμπτήρων πυρακτώσεως καλύτερων και πιο αποδοτικών από τους αντίστοιχους των βρετανών και αμερικανών. Ήταν λοιπόν δεδομένη η σημασία της ερμηνείας της φασματικής κατανομής του μέλανος σώματος και πρακτικά αλλά και λόγω της θεμελιώδους σημασίας που της προσέδιδε η παγκοσμιότητά της. Ομάδα, λοιπόν, επιστημόνων με επικεφαλής τον Gustav Kirchhoff το 1859 ξεκίνησαν τις θεωρητικές τους έρευνες προς αυτή την κατεύθυνση. (Kumar, 2018, σελ. 27). Η παγκοσμιότητα της φασματικής κατανομής της θερμικής ακτινοβολίας αποτέλεσε πρόκληση για την κλασική φυσική και πολύ σύντομα φάνηκε ότι η κλασική προσέγγιση όχι μόνο δεν επαρκούσε ,αλλά οδηγούσε και σε παράλογα αποτελέσματα. Το γεγονός αυτό σήμανε την έναρξη μιας νέας εποχής για την επιστήμη, την κβαντομηχανική.



Εικόνα 2: Ένταση θερμικής ακτινοβολίας σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για 3 διαφορετικές θερμοκρασίες.

Στην παραπάνω εικόνα φαίνεται η ένταση ανά μονάδα μήκους κύματος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος σε σχέση με το μήκος κύματος. Για μια δεδομένη θερμοκρασία όλα τα σώματα εκπέμπουν την ίδια θερμική ακτινοβολία. Πρόκειται για μια παγκόσμια καμπύλη η οποία πρέπει να ερμηνευτεί. Αν θέλαμε να κάνουμε κάποιες συνοπτικές παρατηρήσεις, αυτές θα ήταν οι παρακάτω:

α) Για δεδομένη θερμοκρασία η ένταση της ακτινοβολίας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος. Υπάρχει κάποιο μήκος κύματος για το οποίο η ακτινοβολία γίνεται μέγιστη (μήκος κύματος αιχμής, $\lambda_{\max}$). Όσο μεγαλύτερη είναι η θερμοκρασία, τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος αιχμής. Πρόκειται για το Νόμο μετατόπισης του Wien που περιγράφεται από τη μαθηματική σχέση:

$\lambda_{\max} \cdot T = 0,29$ (όπου το $\lambda_{\max}$ είναι σε cm και το T σε K)

β) Η ένταση της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη σε υψηλότερες θερμοκρασίες. Συγκεκριμένα, όπως περιγράφεται από το Νόμο των Stefan-Boltzman η ολική ένταση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας -η οποία εκφράζεται επίσης από το εμβαδόν που περικλείεται από την γραφική παράσταση που απεικονίζεται στην Εικόνα 2-είναι ανάλογη με την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας του.

$$I = \sigma \cdot T^4$$

Το πρόβλημα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος προσπάθησαν αρχικά να ερμηνεύσουν με την κλασική μηχανική και την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell οι Rayleigh-Jeans καταλήγοντας στην μαθηματική σχέση:

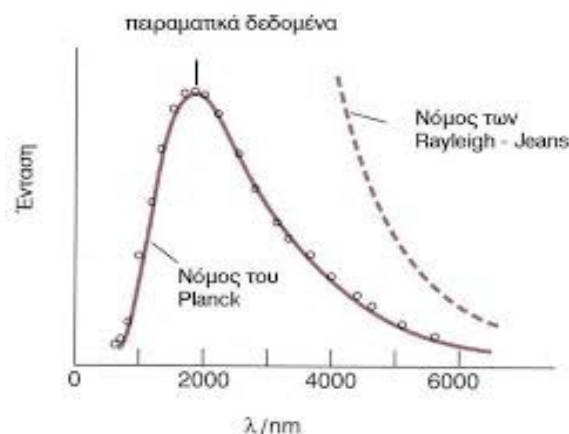
$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi c k T}{\lambda^4}$$

όπου k είναι η σταθερά του Boltzmann.

Σύμφωνα με την κλασική φυσική, θεωρήθηκε ότι τα άτομα των τοιχωμάτων της κοιλότητας ταλαντώνονται και το πλάτος ταλάντωσης τους εξαρτάται από την θερμοκρασία. Τα άτομα μπορούν να θεωρηθούν ηλεκτρικά δίπολα που εξαιτίας των ταλαντώσεών τους εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητικά κύματα με συχνότητα ίση με την συχνότητα της ταλάντωσής τους. Αυτή η θεώρηση ωστόσο οδηγεί σε συμπεράσματα που όχι μόνο έρχονται σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα αλλά οδηγούν και σε παράλογα αποτελέσματα τα οποία αναφέρονται στην συνέχεια:

1. Σύμφωνα με την κλασική θεωρία όλα τα μήκη κύματος είναι επιτρεπτά επομένως προβλέπεται άπειρη πυκνότητα ολικής ενέργειας το οποίο είναι προφανώς αδύνατον.

2. Σύμφωνα με το Νόμο των Rayleigh-Jeans στις υψηλές συχνότητες -στα μικρά μήκη κύματος, για παράδειγμα στην περιοχή του υπεριώδους- θα παρατηρείται ακατάσχετη αύξηση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται το οποίο επίσης δεν επαληθεύεται πειραματικά. Πρόκειται για αυτό που ονομάζουμε “υπεριώδη καταστροφή” για να δείξουμε την πλήρη αποτυχία της κλασικής φυσικής στην περιοχή των χαμηλών μηκών κύματος.



Εικόνα 3: Σύγκριση της κλασικής πρόβλεψης για την φασματική κατανομή της θερμικής ακτινοβολίας με τον εμπειρικό τύπο του Planck. Οι δύο καμπύλες συμφωνούν μόνο στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος

Ο Max Planck το 1900 ανακάλυψε τον εμπειρικό Νόμο που περιγράφει τα πειραματικά δεδομένα για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος σε όλα τα μήκη κύματος.

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

Έχοντας ως δεδομένα τον παραπάνω ακριβή εμπειρικό τύπο και αναγνωρίζοντας την πλήρη αδυναμία της κλασικής φυσικής να τον εξηγήσει συνειδητοποίησε ότι έπρεπε να ξεφύγει από τα όρια της φυσικής όπως είχε διαμορφωθεί ως τότε και να προσπαθήσει να δώσει την κατάλληλη θεωρητική ερμηνεία. Ο ίδιος λέει: “Έξι χρόνια πάλενα με το συγκεκριμένο πρόβλημα χωρίς επιτυχία. Αυτό το πρόβλημα είχε θεμελιώδη σημασία για την φυσική. Ήξερα τον εμπειρικό τύπο της ενεργειακής κατανομής του φάσματος. Μια θεωρητική ερμηνεία έπρεπε να βρεθεί με οσοδήποτε υψηλό κόστος.”

Και αυτή ήταν η στιγμή που μίλησε για τα φωτεινά κβάντα, μια εξήγηση με την οποία ο ίδιος δεν συμφιλιώθηκε ποτέ. (Τραχανάς, 2025, σελ.30). Στις 14 Δεκεμβρίου του 1900 στο Ινστιτούτο Φυσικής του Πανεπιστημίου του Βερολίνου μίλησε ο Planck στα μέλη της Γερμανικής Φυσικής Εταιρείας και παρουσίασε το φυσικό μοντέλο των ατομικών ταλαντωτών και των “αδιαίρετων στοιχείων ενέργειας”, όπως ο ίδιος ονόμασε αρχικά τα κβάντα. (Manjit Kumar, σελ.56,59). Όπως ο ίδιος εκμνηστεύτηκε στο γιο του, διαισθανόταν την σπουδαιότητα της ανακάλυψής του, του πήρε ωστόσο δέκα χρόνια για να αποδεχτεί την κβάντωση της ενέργειας και τις ασυνεχείς μεταβολές στη φυσική. (Powers, 1991, σελ.171)

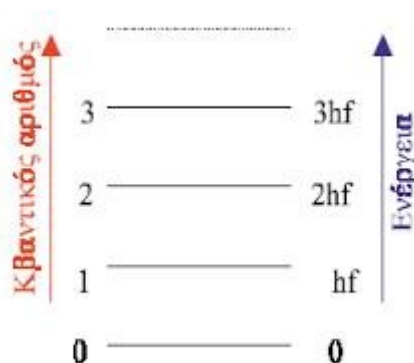
Η παραδοχή του Planck συνοψίζεται στις δύο ακόλουθες προτάσεις:

1. Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπει το μέλαν σώμα (η ενέργεια των ταλαντούμενων μορίων της κοιλότητας του μέλανος σώματος) είναι κβαντωμένη, μη συνεχής, δεν μπορεί να πάρει όλες τις τιμές. Αντίθετα, οι μόνες επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας είναι τα ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $h \cdot f$ όπου f είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας και h η σταθερά του Planck.

$$E = n \cdot h \cdot f$$

(n είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός που παίρνει θετικές ακέραιες τιμές)

2. Όταν ένα άτομο παραμένει στην ίδια ενεργειακή κατάσταση δεν εκπέμπει, ούτε απορροφά ενέργεια. Όταν όμως το άτομο μεταβαίνει από μια διακριτή τιμή ενέργειας σε μια άλλη απορροφά ή εκπέμπει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας η οποία μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές. Τα άτομα κάνουν “ άλματα ” από μια ενεργειακή κατάσταση σε άλλη όταν εκπέμπουν ή ακτινοβολούν ενέργεια, με κβαντισμένες μεταβολές ενέργειας.



Εικόνα 4: Στάθμες ενέργειας ενός ταλαντωτή συχνότητας f
(πηγή: Φυσική Προσανατολισμού Γ Λυκείου, σελ. 228)

Αν για παράδειγμα ο κβαντικός αριθμός n μεταβληθεί κατά μια μόνο μονάδα, η διαφορά ενέργειας ανάμεσα σε δύο διαδοχικές κβαντικές καταστάσεις θα είναι $\Delta E = h \cdot f$.

1.2 Ερμηνεία φωτοηλεκτρικού φαινομένου

Κι ενώ ο Planck χρησιμοποίησε την κβάντωση μόνο στην απορρόφηση και εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας προκειμένου να ερμηνεύσει με τους ατομικούς ταλαντωτές την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, ο Einstein στη συνέχεια εξέλιξε την ιδέα της κβάντωσης. Κβάντωσε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και συνεπώς το ίδιο το φως ώστε να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Όταν το φως προσπίπτει πάνω σε μεταλλικές επιφάνειες, τότε οι επιφάνειες αυτές εκπέμπουν ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια). Το φαινόμενο αυτό ονομάζεται φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Πρώτος ο Herz το 1887 παρατήρησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και αργότερα ο Φίλιπ Λέναρντ, το 1902 μελετώντας το φαινόμενο-μάλιστα το 1905 τιμήθηκε με βραβείο Νόμπελ για την πειραματική του δουλειά στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο- ήρθε μπροστά σε

πειραματικά δεδομένα που ερχόντουσαν σε πλήρη αντίφαση με τις προβλέψεις της κλασικής φυσικής που αδυνατούσε να τα ερμηνεύσει.

Κάποια από τα πειραματικά δεδομένα,μαζί με την αδυναμία εξήγησής τους από την κλασική φυσική και την λύση που πρότεινε σε κάθε περίπτωση ο Einstein περιγράφονται παρακάτω.

1.Φωτοηλεκτρικό ρεύμα παρατηρείται μόνο εφόσον η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός είναι μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή που ονομάζεται συχνότητα κατωφλίου και εξαρτάται από το υλικό της φωτοκαθόδου.Όσο μεγάλη και να είναι η ένταση του φωτός και για όσο χρονικό διάστημα και να φωτίζουμε το μέταλλο, αν η συχνότητα είναι μικρότερη από την συχνότητα κατωφλίου δεν θα έχουμε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.Αυτό το πειραματικό δεδομένο δεν είναι δυνατόν να ερμηνευτεί κλασικά.Στην κλασική φυσική η φωτεινή δέσμη είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα που το ηλεκτρικό του πεδίο ασκεί δύναμη στα ηλεκτρόνια,τα επιταχύνει και αυξάνει σταδιακά την κινητική τους ενέργεια.Οπότε όσο ασθενής και να είναι η ένταση του φωτός κάποια στιγμή τα ηλεκτρόνια θα αποκτήσουν την απαραίτητη ενέργεια ώστε να αποσπαστούν από το μέταλλο.Δηλαδή κλασικά εκπομπή φωτοηλεκτρονίων θα έχουμε για οποιαδήποτε συχνότητα ,εφόσον η φωτεινή ένταση είναι αρκετή.

2.Πειραματικά επιβεβαιώνεται ότι η κινητική ενέργεια που αποκτούν τα φωτοηλεκτρόνια εξαρτάται από την συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός-αυξάνοντας την συχνότητα,αυξάνεται και η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων- και όχι από την ένταση της φωτεινής δέσμης.Για την κλασική φυσική αυτή η συμπεριφορά είναι αδιανόητη.Εκεί θα περίμενε κάποιος η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων να προσδιορίζεται κυρίως από την ένταση της δέσμης γιατί μεγαλύτερη ένταση φωτός συνεπάγεται ισχυρότερο ηλεκτρικό πεδίο ,μεγαλύτερη δύναμη και επιτάχυνση στα ηλεκτρόνια και επομένως μεγαλύτερη κινητική ενέργεια.

3.Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν αμέσως μετά την πρόσπτωση του φωτός στην μεταλλική επιφάνεια,για την ακρίβεια σε λιγότερο από 1 ns ακόμη και για πολύ μικρή ένταση φωτός.Και εδώ η κλασική φυσική αποτυγχάνει να ερμηνεύσει το πείραμα αφού σύμφωνα με την κλασική φυσική η μεταβίβαση ενέργειας από την φωτεινή δέσμη στα ηλεκτρόνια γίνεται βαθμιαία.Οπότε θα έπρεπε να μεσολαβήσει ένα χρονικό διάστημα από την πρόσπτωση της δέσμης φωτός μέχρι να δούμε τα πρώτα φωτοηλεκτρόνια,τα οποία θα έχουν απορροφήσει ικανό ποσό ενέργειας για να μπορέσουν να αποσπαστούν από την επιφάνεια του μετάλλου.(Τραχανάς,2005σελ.20 και Serway,τόμος 4,σελ.52)

Με την θεωρία των κβάντων ο Einstein απάντησε στα αδιέξοδα της κλασικής φυσικής και ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.Μίλησε για «ενεργειακά κβάντα,που μπορούν να παραχθούν και να απορροφηθούν μόνο ως ολόκληρες μονάδες(Einstein,1905,Annalen der Physik,σελ.91-107)τα οποία ονόμασε φωτόνια.Το ηλεκτρομαγνητικό κύμα αποτελείται από φωτόνια με ενέργεια $E=h*f$ (h :η σταθερά του Planck και f :η συχνότητα του κύματος).

Σύμφωνα με την φωτονιακή θεωρία ο μηχανισμός της εξαγωγής ηλεκτρονίων από το μέταλλο εξηγείται πολύ απλά.Ένα φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο και του μεταβιβάζει όλη του την ενέργεια.Αυτή η απορρόφηση γίνεται ακαριαία και όχι αργά και συσσωρευτικά όπως υποστήριζε η κλασική θεωρία.Η φωτεινή ενέργεια μεταφέρεται σε αδιαίρετα κομμάτια.Το ηλεκτρόνιο έχει 2 επιλογές.Ή θα απορροφήσει όλη την ενέργεια του φωτονίου ή καθόλου.Αν η συχνότητα και η ενέργεια του φωτονίου είναι ίση ή μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής του μετάλλου φ(την ελάχιστη ενέργεια ώστε να υπερνικηθούν οι δυνάμεις που συγκρατούν το ηλεκτρόνιο στο μέταλλο) θα παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό

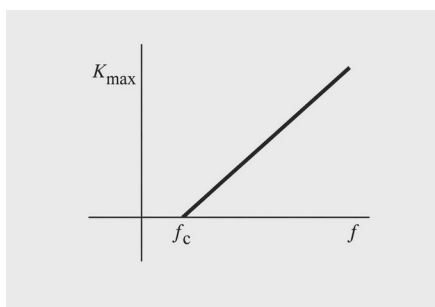
φαινόμενο. Σε αντίθετη περίπτωση δεν θα εξαχθούν ηλεκτρόνια όσο μεγάλη και να είναι η ένταση της φωτεινής δέσμης. Εξάλλου για τα περισσότερα μέταλλα η απόσπαση είναι αδύνατη με ορατό φως ενώ αν χρησιμοποιηθεί υπεριώδες φως που έχει μεγαλύτερη συχνότητα θα εξαχθεί μεγάλο πλήθος ηλεκτρονίων.

Τα ηλεκτρόνια που αποσπώνται από το μέταλλο θα έχουν κινητική ενέργεια:

$$K_{\max} = h \cdot f - \phi \quad \text{ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΗ ΕΞΙΣΩΣΗ EINSTEIN}$$

Με την παραπάνω εξίσωση εξηγείται και το πειραματικό δεδομένο ότι η κινητική ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός όπως υποστήριζε η κλασική φυσική, αλλά από την συχνότητά του και μάλιστα η σχέση μεταξύ τους είναι γραμμική! Πρόκειται για μια σχέση εξαιρετικά απλή και ξεκάθαρη! Ακόμη από την παραπάνω εξίσωση γίνεται φανερό πως η συχνότητα κατωφλίου ($K_{\max}=0$), δίνεται από την σχέση $f_0 = \phi/h$, δηλαδή εξαρτάται από το μέταλλο της καθόδου. (Τραχανάς, 2005 και Serway, τόμος 4)

Παρακάτω φαίνεται ένα απλό διάγραμμα της $K_{\max}$ σε σχέση με την συχνότητα της φωτεινής δέσμης σε ένα πείραμα φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Και από την γραφική παράσταση γίνεται φανερό πως αν το φως έχει συχνότητα κάτω από την συχνότητα κατωφλίου δεν εξαγονται ηλεκτρόνια γιατί τα φωτόνια δεν έχουν την απαραίτητη ενέργεια να τους μεταβιβάσουν. Αν η συχνότητα είναι ίση ή μεγαλύτερη από f_0 θα παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η $K_{\max}$ των φωτοηλεκτρονίων θα αυξάνεται γραμμικά με την συχνότητα. Η κλίση της γραφικής παράστασης μας υπολογίζει την σταθερά του Planck και το σημείο που η γραφική τέμνει τον οριζόντιο άξονα είναι η συχνότητα κατωφλίου.



Εικόνα 5: Διάγραμμα της $K_{\max}$ συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός (πηγή: Serway, τόμος 4, ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ, σελ. 54)

Ήταν λοιπόν πια αδιαμφισβήτητη η υπόθεση των φωτεινών κβάντων παρόλο που η κοινότητα των φυσικών της εποχής-ακόμη και ο Planck- την αντιμετώπιζε με δυσπιστία. Γιατί οι επιστήμονες είχαν βαθιά στο νου τους ριζωμένη την ρήση του Leibniz ότι “η φύση ουδέποτε κάνει άλματα” (Powers, 1991, σελ. 167)

Ο Robert Millikan ,Αμερικανός πειραματικός φυσικός(βραβείο Νόμπελ 1923) λέει: «Ξόδεψα δέκα χρόνια από τη ζωή μου για τον έλεγχο της φωτοηλεκτρικής εξίσωσης του Einstein και δεν είχα άλλη επιλογή από το να επιβεβαιώσω την ισχύ της ,παρά τον παράλογο χαρακτήρα της ».(Pais,1982,σελ.357)

1.3 Σταθερότητα του ατόμου-Ατομικά φάσματα

Σύμφωνα με την κλασική φυσική ,ένα ηλεκτρόνιο-που είναι φορτισμένο σωματίδιο- όταν κινείται σε καμπύλη τροχιά θα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία και θα χάνει συνεχώς ενέργεια με αποτέλεσμα να κινείται σε τροχιά ολοένα και μικρότερης ακτίνας και τελικά να πέσει πάνω στον πυρήνα εκτελώντας μια σπειροειδή κίνηση.Μάλιστα η πτώση δεν θα πάρει χρόνο περισσότερο από 10^{-10} sec. Με αυτή την παραδοχή ,αφού τα ηλεκτρόνια δεν θα μπορούσαν να κρατηθούν σε σταθερή τροχιά,δεν θα υπήρχαν τα άτομα,τα μόρια και σίγουρα και εμείς οι άνθρωποι.(Τραχανάς,2025,σελ.49).Στην πραγματικότητα ωστόσο η σταθερότητα των ατόμων και της ύλης γενικότερα είναι δεδομένη.Το “μυστήριο” λοιπόν της ατομικής σταθερότητας δεν μπορούσε να ερμηνευτεί με τα δεδομένα της κλασικής φυσικής.

Άλλο ένα αδιέξοδο για την κλασική φυσική αποτέλεσε η μελέτη των ατομικών φασμάτων.Τα ατομικά φάσματα εκπομπής προκύπτουν όταν ένα αέριο υπό χαμηλή πίεση διεγείρεται μέσω ηλεκτρικών εκκενώσεων και τα άτομα εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.Όταν εξετάσουμε το φως που εκπέμπει το αέριο παρατηρούμε ότι το φάσμα είναι γραμμικό,δηλαδή αποτελείται από ορισμένες διακριτές έγχρωμες γραμμές πάνω σε σκοτεινό υπόστρωμα.Μάλιστα,τα μήκη κύματος των φασματικών γραμμών είναι χαρακτηριστικά και μοναδικά για το κάθε στοιχείο,αποτελούν την “ταυτότητά” του με αποτέλεσμα η φασματική ανάλυση να θεωρείται μέθοδος προσδιορισμού των στοιχείων που υπάρχουν σε ένα άγνωστο δείγμα.(Serway,τόμος 4,ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ,σελ.58).

Σύμφωνα με την κλασική φυσική ένα φορτισμένο σωματίδιο που εκτελεί επιταχυνόμενη κίνηση ,θα χάνει διαρκώς ενέργεια ,το πλάτος της ταλάντωσής του θα μειώνεται,η κίνησή του θα γίνει απεριοδική και το φάσμα της ακτινοβολίας που θα εκπέμπει θα περιλαμβάνει όλες τις συχνότητες και θα είναι αναγκαστικά συνεχές.(Τραχανάς,2005,σελ.54).Με την ανάλυση επομένως των φασματικών δεδομένων έγινε ακόμη πιο ξεκάθαρη η αδυναμία της κλασικής αντίληψης να ερμηνεύσει τα πειραματικά δεδομένα.

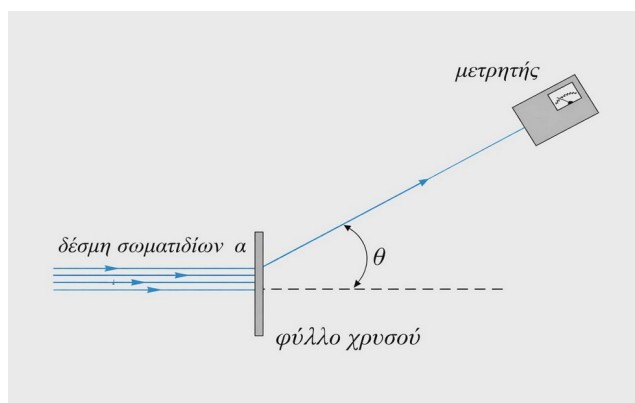
Στο σημείο αυτό αξίζει να σημειωθεί πως από τα μέσα του δέκατου ένατου αιώνα η φασματοσκοπία ήταν πεδίο έντονης έρευνας από πολλούς επιστήμονες όπως ο Balmer που ανακάλυψε έναν εμπειρικό τύπο που υπολογίζει τις 4 φασματικές γραμμές του ατόμου του υδρογόνου,αλλά και οι Lyman,Paschen και Brackett.Οι επιστήμονες οδηγήθηκαν στην *Συνδυαστική Αρχή* σύμφωνα με την οποία: Το φάσμα κάθε στοιχείου χαρακτηρίζεται από μια ακολουθία φασματικών όρων $f_1, f_2, \dots, f_n$ ώστε κάθε φασματική γραμμή να μπορεί να γραφτεί ως διαφορά δύο φασματικών όρων.Πρόκειται για μια ακόμη επιβεβαίωση της κβάντωσης των ατομικών καταστάσεων.

Αδιαμφισβήτητο το τελειωτικό πλήγμα στην κλασική φυσική το έδωσε το πείραμα που πραγματοποίησε ο Rutherford το 1911 για να καταλήξει σε ένα μοντέλο για την δομή του

ατόμου το οποίο έφερε την επιστημονική κοινότητα μπροστά στο πρόβλημα της ατομικής σταθερότητας. Πρόκειται για το έναυσμα που οδήγησε στην κβαντική επανάσταση. Την εποχή εκείνη κυριαρχούσε το μοντέλο του Thomson -ο οποίος είχε ανακαλύψει το ηλεκτρόνιο το 1895- για την εσωτερική δομή του ατόμου σύμφωνα με το οποίο το θετικό φορτίο ήταν κατανομημένο σε μια διάχυτη μάζα και πάνω του διάσπαρτα βρίσκονταν τα ηλεκτρόνια. (μοντέλο “σταφιδόψωμου”). Αυτό το ατομικό μοντέλο είχε το πλεονέκτημα της ευστάθειας αφού τα ηλεκτρόνια μπορούσαν να ισορροπούν ως αποτέλεσμα των ηλεκτροστατικών δυνάμεων, της έλξης από το θετικό φορτίο και των απώσεων μεταξύ τους.

Ο Rytherford, μαζί με τους Geiger και Marsden, πήρε μια καλά ευθυγραμμισμένη και μονοενεργειακή δέσμη σωματιδίων α (πυρήνες ηλίου, 2 πρωτόνια και 2 νετρόνια) που εκπεμπούσαν από μια ραδιενεργό πηγή και βομβάρδισε ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Με έναν μετρητή που τοποθέτησε σε διάφορες γωνίες μελέτησε την γωνιακή κατανομή των σωματιδίων μετά την σκέδασή τους. Συγκεκριμένα μετρούσαν τις μικρές εκλάμψεις φωτός που παράγονταν από τα σωματίδια α όταν χτυπούσαν πάνω σε μια χάρτινη οθόνη επικαλυμμένη με θειούχο ψευδάργυρο. (Kumar, 2018, σελ. 127)

Οι παρατηρήσεις τους ήταν οι εξής. Τα περισσότερα σωματίδια α περνούσαν μέσα από το φύλλο χρυσού χωρίς να υποστούν σχεδόν καμία απόκλιση. Συνέβαινε όμως και κάποια να εκτρέπονταν πολύ από την αρχική τους τροχιά, κάποια εκτρέπονταν ακόμη και κατά 180°! Η έκπληξη του ίδιου του Rutherford ήταν τόσο μεγάλη ώστε να χαρακτηρίζει αυτό που παρατήρησε ως το πιο απίστευτο γεγονός που του συνέβη στη ζωή του. Ο ίδιος λέει: “Αυτό που συνέβαινε ήταν σχεδόν τόσο απίστευτο όσο το να ρίξεις μια οβίδα 38 εκατοστών πάνω σε τσιγαρόχαρτο και να γυρίσει πίσω να σε χτυπήσει!” (Rhodes, 1986, σελ. 49)



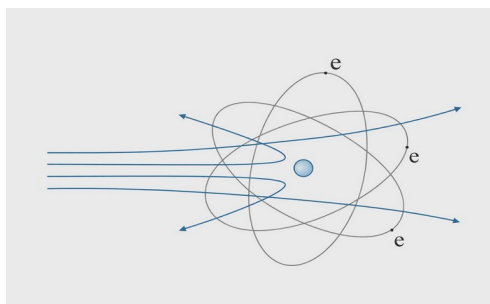
Εικόνα 6: Διάταξη του πειράματος του Rutherford
(πηγή: Στέφανος Τραχανάς, Κβαντομηχανική I, 2005, σελ. 56)

Αυτή η παρατήρηση ήταν αδύνατο να ερμηνευτεί με το ατομικό μοντέλο του Thomson. Σε αυτό η κρούση που ήταν δυνατό να πραγματοποιηθεί ήταν ανάμεσα στο σωματίδιο α και το πρωτόνιο. Όμως το πρωτόνιο είναι ελαφρύτερο, άρα δεν θα μπορούσε να προκαλέσει μεγάλη γωνιακή εκτροπή στο σωματίδιο α. Η σκέδαση θα περιοριζόταν σε 1° ή 2° από την αρχική κατεύθυνση των σωματιδίων α. Έπρεπε να υπάρχουν επομένως μέσα στον πυρήνα βαριά φορτισμένα σωματίδια ικανά να δημιουργήσουν ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο στο εσωτερικό του

ατόμου και να ασκήσουν μεγάλη ηλεκτροστατική δύναμη στα σωμάτια α ώστε να αλλάξουν πολύ την πορεία τους.

Η μόνη λοιπόν λογική εξήγηση που πρότεινε ο Rutherford είναι αυτή που ονομάζουμε πλανητικό μοντέλο του ατόμου, σύμφωνα με το οποίο στον πυρήνα του ατόμου θα είναι συγκεντρωμένο το θετικό φορτίο σε μια πολύ μικροσκοπική περιοχή. Εκεί θα είναι συγκεντρωμένη και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Ο πυρήνας θα είναι 100.000 φορές μικρότερος σε μέγεθος από το άτομο, το οποίο στην ουσία θα είναι «κούφιο». Γύρω από τον πυρήνα σε διάφορες τροχιές θα περιφέρονται τα ηλεκτρόνια με το αρνητικό φορτίο.

Αν σκεφτούμε ότι ο χρυσός έχει ατομικό αριθμό $Z=79$ και μαζικό αριθμό $A=197$ είναι φανερό ότι τα σωμάτια α που θα βρεθούν στην πορεία τους κοντά στους πυρήνες των ατόμων χρυσού θα δεχτούν τέτοια ηλεκτροστατική άπωση που θα είναι ικανή να αλλάξει την πορεία τους, ακόμη και να τα γυρίσει πίσω. Ενώ ο πυρήνας θα μείνει πρακτικά ακίνητος αφού έχει τόσο μεγαλύτερη μάζα. (Τραχανάς, 2005, σελ. 59)



Εικόνα 7: Το πλανητικό μοντέλο: Τα περισσότερα σωμάτια α υφίστανται ελάχιστη εκτροπή και κάποια εκτρέπονται ακόμη και 180 μοίρες (πηγή: Στέφανος Τραχανάς, Κβαντομηχανική I, 2005, σελ. 59)

Σύμφωνα με την κλασική φυσική το άτομο του Rutherford δεν θα έπρεπε να υπάρχει, θα ήταν ανέφικτο για τους λόγους που αναφέρθηκαν πιο πάνω (επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο, ακτινοβολούμενη ενέργεια, σπειροειδής τροχιά, πτώση στον πυρήνα, κατάρρευση ατόμου). Εντούτοις, γνωρίζουμε ότι η βασική ιδέα του ατόμου είναι αδιαμφισβήτητη αυτή που έδωσε ο Rutherford. Καταλήγουμε λοιπόν στο συμπέρασμα ότι το πείραμα του Rutherford και η πλήρης αδυναμία της εξήγησης του ατομικού μοντέλου σε κλασικό πλαίσιο οδήγησε στην αναγκαιότητα μιας νέας θεωρίας, την γέννηση της κβαντομηχανικής!

Το 1911 ο Bohr πληροφορείται από τον Rutherford τα αποτελέσματα του πειράματός του. Αυτός σύντομα αντιλαμβάνεται πως η ατομική σταθερότητα και στην ουσία η ύπαρξη των ατόμων όπως την γνωρίζουμε είναι αδύνατο να υπάρξει στα πλαίσια της κλασικής μηχανικής όχι μόνο λόγω της συνεχούς εκπομπής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αλλά και λόγω των συνεχών κρούσεων. Υπό την επίδραση των θερμικών τους κρούσεων θα περιμέναμε τα άτομα να αλλάζουν συνεχώς μορφή. Ενδεικτικά αναφέρουμε το παράδειγμα πως η συχνότητα των κρούσεων μεταξύ των μορίων του ατμοσφαιρικού αέρα είναι 1.000.000.000 Hz, δηλαδή κάθε μόριο αέρα υφίσταται 1.000.000.000 κρούσεις σε κάθε s. (Τραχανάς, 2005, σελ. 65). Στην πραγματικότητα συμβαίνει ακριβώς το αντίθετο. Τα άτομα των χημικών στοιχείων μετά από αλεπάλληλες και σφοδρές συγκρούσεις παραμένουν εντελώς ίδια, αμετάβλητα. Στα δύο παραπάνω δεδομένα έρχεται να προστεθεί και ένα τρίτο, επίσης

δεδομένο, ένα «καθαρό θαύμα» από την σκοπιά της κλασικής φυσικής όπως περιγράφει ο ίδιος ο Bohr. Τα άτομα δεν έχουν ιστορία. Είναι τα ίδια όπως κι αν δημιουργήθηκαν. Όσες φορές κι αν διασπαστεί ένα άτομο για παράδειγμα οξυγόνου, ώστε να αποσπαστούν και τα 8 του ηλεκτρόνια, όταν αυτά θα ξαναπλησιάσουν στον πυρήνα και θα δημιουργηθεί ένα νέο άτομο οξυγόνου αυτό θα είναι πανομοιότυπο με το παλιό. (Τραχανάς, 2025, σελ. 61).

Ο Bohr, λοιπόν, βασιζόμενος στην αρχική κβαντική θεωρία του Planck, στην θεωρία των φωτονίων του Einstein και στο ατομικό μοντέλο του Rutherford παρουσίασε μια εργασία δύο χρόνια αργότερα, το 1913, στην οποία διατυπώνει κάποια επαναστατικά αξιώματα πέρα από τα όρια της κλασικής φυσικής για το άτομο του υδρογόνου και λύνει το πρόβλημα της ατομικής σταθερότητας με την κβάντωση των τροχιών και των επιτρεπόμενων ενεργειών.

Σύμφωνα με τον Bohr:

1. Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα και ρόλο κεντρομόλου δύναμης παίζει η δύναμη Coulomb.

$$k \cdot e^2 / r^2 = m \cdot u^2 / r \quad (1)$$

2. Μόνο μερικές τροχιές επιτρέπονται και όταν το ηλεκτρόνιο βρίσκεται σε αυτές δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Επιτρεπτές τροχιές είναι αυτές που ικανοποιούν την συνθήκη

$$m \cdot u \cdot r = n \cdot h / 2\pi \quad (2)$$

δηλαδή οι τροχιές εκείνες για τις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντισμένη.

3. Εκπομπή ακτινοβολίας από το ηλεκτρόνιο παρατηρείται μόνο όταν μεταβαίνει από μια επιτρεπτή τροχιά σε άλλη επιτρεπτή τροχιά χαμηλότερης ενέργειας, δηλαδή όταν πραγματοποιεί ένα «κβαντικό άλμα». Το φωτόνιο που εκπέμπεται έχει συχνότητα (f) που δίνεται από την σχέση:

$$E_i - E_f = h \cdot f \quad (3)$$

όπου E_i και E_f είναι η αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου πριν την εκπομπή φωτονίου και η τελική ενέργεια του ηλεκτρονίου αντίστοιχα.

Γνωρίζοντας ότι η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος πυρήνας-ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου δίνεται από την σχέση $U = -k \cdot e^2 / r$ (4), η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι $K = m \cdot u^2 / 2 = k \cdot e^2 / 2r$ (5) (από την σχέση 1) και η ολική ενέργεια του ατόμου είναι $E = K + U = -k \cdot e^2 / 2r$ (6) από τις σχέσεις (2), (5) και (6) μπορούν να υπολογιστούν οι επιτρεπόμενες τροχιές και οι επιτρεπόμενες τιμές που μπορεί να πάρουν οι ενέργειες στο άτομο του υδρογόνου.

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΤΡΟΧΙΕΣ:

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{m k e^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(7)

Για $n=1$ προκύπτει η τροχιά με την μικρότερη ακτίνα που έχει την τιμή $a_0 = 0,0529$ nm, ονομάζεται ακτίνα Bohr και προσδιορίζει το μέγεθος του ατόμου.

Επομένως η ακτίνα κάθε διεγερμένης κατάστασης θα δίνεται από την σχέση: $r_n = n^2 \cdot a_0$.

Για παράδειγμα για $n=2$ θα είναι $r=4 a_0$, για $n=3$ $r=9 a_0$ κτλ.

ΕΠΙΤΡΕΠΟΜΕΝΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ:

$$E_n = -\frac{k \cdot e^2}{2a_0} \cdot \left(\frac{1}{n^2}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

(8)

Παρατηρούμε ότι και οι ενεργειακές καταστάσεις είναι κβαντωμένες. Κάθε επιτρεπόμενη ενέργεια περιγράφεται ως μια “στάσιμη κατάσταση” στην οποία όταν βρίσκεται το ηλεκτρόνιο δεν ακτινοβολεί. Η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης είναι $E_1 = -13,6 \text{ eV}$.

Η ενέργεια κάθε διεγερμένης κατάστασης είναι $E_n = -13,6/n^2 \text{ eV}$.

Για παράδειγμα $E_2 = -13,6/4 = -3,4 \text{ eV}$, $E_3 = -1,85 \text{ eV}$ κτλ.

Αν το n τείνει στο άπειρο η ενέργεια τείνει στο μηδέν και το ηλεκτρόνιο έχει φύγει από το άτομο (ιοντισμός). Η ενέργεια ιοντισμού είναι $13,6 \text{ eV}$.

Αν κάποιο ηλεκτρόνιο βρεθεί σε διεγερμένη κατάσταση , θα αποδιεγερθεί (μέσος χρόνος παραμονής 10^{-9} s) αποβάλλοντας την πλεονάζουσα ενέργεια με μορφή φωτονίου.

Από τις σχέσεις (3), (8) και τον θεμελιώδη νόμο της κυματικής $c = \lambda \cdot f$, υπολογίζεται το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται κατά την αποδιέγερση του ατόμου.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{f}{c} = \frac{ke^2}{2a_0hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

(9)

Η θεωρία του Bohr εκτός από το υδρογόνο επεκτείνεται και σε άλλα άτομα που έχουν χάσει όλα τους τα ηλεκτρόνια εκτός από ένα. Για την περίπτωση που το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από ακίνητο πυρήνα φορτίου $+Ze$, θα είναι:

$$E_n = - \frac{k \cdot e^2}{2 a_0} \cdot \left(\frac{z^2}{n^2} \right) \quad n = 1, 2, 3, \dots$$

όπου Z ο ατομικός αριθμός του στοιχείου.

Παρόλο που η θεωρία του Bohr ήταν ένα ενδιάμεσο στάδιο μέχρι να φτάσουμε στην νέα κβαντική θεωρία και το κβαντομηχανικό μοντέλο του ατόμου, η σημασία της ήταν σπουδαία και πέτυχε να ερμηνεύσει επιτυχώς πολλά δεδομένα κάποια από τα οποία αναφέρονται παρακάτω.

1. Υπολογίζοντας την ακτίνα της μικρότερης τροχιάς έκανε σωστή πρόβλεψη για το μέγεθος του ατόμου.
2. Σύμφωνα με το ατομικό μοντέλο του ο Bohr υπολόγισε την ενέργεια ιοντισμού του ατόμου του υδρογόνου (13,6 eV) και η τιμή που βρήκε ήταν σε συμφωνία με την ήδη γνωστή πειραματική τιμή.
3. Η εξίσωση (9) για το μήκος κύματος του εκπεμπόμενου φωτονίου είχε την ίδια μορφή με την γενικευμένη εξίσωση Balmer που ήταν ήδη γνωστή.
4. Απέδειξε ότι οι φασματικές γραμμές του υδρογόνου που είχαν παρατηρηθεί είναι φυσική απόρροια της θεωρίας του.

Η βασική επιτυχία της θεωρίας του Bohr είναι ότι με την κβάντωση των τροχιών και των ενεργειών κατάφερε να λύσει το μυστήριο της ατομικής σταθερότητας! Στην κλασική προσέγγιση τα άτομα είτε λόγω των θερμικών κρούσεων μεταξύ τους, είτε λόγω της απορρόφησης φωτός μπορούν να απορροφούν βαθμιαία ενέργεια, να μεταβάλλουν σιγά σιγά την ακτίνα τους και να αλλάζουν συνεχώς μορφή. Το σύμπαν τότε θα ήταν μια άναρχη κίνηση σωματιδίων, δεν θα μπορούσαν να σχηματιστούν μόρια και γενικά θα ήταν αδύνατος ο σχηματισμός κάθε ευσταθούς μακροσκοπικού συστήματος και κατά συνέπεια δεν θα υπήρχαμε και εμείς οι άνθρωποι. Κάτι τέτοιο όλοι γνωρίζουμε ότι δεν συμβαίνει στην πραγματικότητα!

Με την παραδοχή της κβάντωσης των ενεργειών αποκλείονται οι μικρές βαθμιαίες μεταβολές των ατόμων, αφού τα ηλεκτρόνιά τους ή θα απορροφήσουν αρκετό ποσό ενέργειας και κάνοντας ένα κβαντικό άλμα θα μεταβούν στην επόμενη επιτρεπόμενη ενεργειακή κατάσταση ή δεν θα απορροφήσουν καθόλου ενέργεια και το άτομο δεν θα αλλάξει καθόλου. Ούτε όμως μικρότερο μπορεί να γίνει το μέγεθός τους, αφού δεν υπάρχει επιτρεπόμενη κατάσταση με τροχιά μικρότερη από την θεμελιώδη. Το άτομο αν και όλο σχεδόν είναι κενός χώρος είναι ευσταθές, μια “απαραμόρφωτη ατσάλινη σφαίρα” (Τραχανάς, 2005, σελ. 83)

Εδώ αξίζει να αναφέρουμε και ένα απλό αριθμητικό παράδειγμα. Στο άτομο του υδρογόνου η ενέργεια της θεμελιώδους κατάστασης είναι, όπως αναφέρθηκε παραπάνω, -13,6 eV και η ενέργεια της πρώτης διεγερμένης ενεργειακής στάθμης είναι -3,4 eV. Επομένως, για να μεταβεί το ηλεκτρόνιο από την θεμελιώδη στην πρώτη διεγερμένη στάθμη πρέπει να απορροφήσει ενέργεια τουλάχιστον 10,2 eV. Αν υποθέσουμε τώρα ότι συγκρούονται δύο άτομα υδρογόνου η ενέργεια λόγω αυτών των θερμικών κρούσεων είναι της τάξης 1/40 eV, δηλαδή αμελητέα σε σχέση με τα 10,2 eV.

Ο Bohr έθεσε ως αξίωμα την ύπαρξη ακαριαίων αλμάτων των ηλεκτρονίων από τη μια τροχιά στην άλλη ενσωματώνοντας την ασυνέχεια στη φυσική όχι απλά ως μια ασυνεχή μεταβολή στην τιμή μιας φυσικής ιδιότητας αλλά θεωρώντας ότι η ίδια η υπόσταση ενός αντικειμένου μπορεί να είναι ασυνεχής. (Powers, 1991, σελ. 173)

Ωστόσο, πέρα από τα σημερινά δεδομένα με τα οποία γνωρίζουμε ότι η θεωρία του Bohr απέχει πολύ από την πραγματική κβαντομηχανική εικόνα για το άτομο, και στην εποχή του ο Bohr δέχτηκε αρκετή κριτική και ενστάσεις για το μοντέλο του ατόμου που πρότεινε. Ο Pauli την χαρακτήρισε “καθαρή τρέλα” ενώ ο Schrödinger λέει πως αν αυτά τα “καταραμένα άλματα” παρέμεναν στην φυσική θα μετάνιωνε που ασχολήθηκε με την κβαντική θεωρία. Δεν μπορούσαν να αποδεχτούν ότι η μετάβαση του ηλεκτρονίου από την αρχική στην τελική κατάσταση γίνεται στιγμιαία, άρα πρόκειται για μια ασυνεχή μεταβολή. Ακόμη και ο ίδιος ο Planck που πρώτος μίλησε για την κβάντωση και τους ατομικούς ταλαντωτές δεν κατάφερε ποτέ να αποδεχτεί αυτήν και τα κβαντικά άλματα που αυτή συνεπάγεται.

Επιπλέον, η θεωρία του Bohr μπορεί να δεχτεί κριτική και σε καθαρά επιστημολογικό πλαίσιο. Πρόκειται για ένα μείγμα κλασικής και κβαντικής φυσικής. Εισάγει κάποιες παραδοχές σε σχέση με την κβάντωση, αλλά όλες είναι μέσα σε καθαρά κλασικό πλαίσιο. Λέει ότι το ηλεκτρόνιο όταν κινείται σε συγκεκριμένη τροχιά δεν εκπέμπει καθόλου ακτινοβολία χωρίς να εξηγεί γιατί σε αυτή την περίπτωση δεν ισχύουν οι κανόνες του ηλεκτρομαγνητισμού και παρουσιάζει τα κβαντικά άλματα που γίνονται με εκπομπή κάθε φορά μόνο ενός φωτονίου χωρίς καμία θεωρητική θεμελίωση.

Συμπερασματικά, η θεωρία του Bohr γνώρισε αρχικά μεγάλη επιτυχία αφού κατάφερε να εξηγήσει τα ατομικά φάσματα του ατόμου του υδρογόνου και των υδρογονοειδών ατόμων καθώς και την σταθερότητα των ατόμων και κατ'επέκταση της ύλης. Όμως, έχει πολλές αδυναμίες καθώς δεν μπορεί να εξηγήσει τα φάσματα των μη αλκαλικών ατόμων και την διαφορετική ένταση των φασματικών γραμμών. Το αδύναμο σημείο της θεωρίας ήταν οι επιτρεπόμενες τροχιές, αφού σήμερα γνωρίζουμε πως τα ηλεκτρόνια δεν κινούνται σε τροχιές συγκεκριμένων ακτίνων γύρω από τον πυρήνα-δεν μπορούμε να γνωρίζουμε με βεβαιότητα την θέση τους- αλλά περιγράφονται ως κύματα πιθανότητας. Πέρα όμως από κάθε αμφιβολία ήταν το σημαντικότερο βήμα για την εδραίωση και την εξέλιξη της νέας θεωρίας, της κβαντομηχανικής.

2.Η ΔΙΑΜΑΧΗ BOHR EINSTEIN ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ

Βρισκόμαστε στο έτος 1927 όταν ξέσπασε ο «κβαντομηχανικός εμφύλιος» για την ερμηνεία της κβαντομηχανικής, όταν ο μαθηματικός φορμαλισμός της κβαντομηχανικής είχε πλέον εδραιωθεί, αλλά η ερμηνεία του παρέμενε ανοιχτό ζήτημα. (Pais, 1979). Από την μια πλευρά ο Einstein με υποστηρικτές τον Planck, τον de Broglie και τον Schrodinger υποστήριζαν την αιτιοκρατία της νευτώνειας φυσικής και της σχετικότητας και από την άλλη ο Bohr με τους Heisenberg, Pauli και Dirac να υποστηρίζουν την θεμελιώδη πιθανοκρατία της κβαντομηχανικής. Οι πρώτοι πίστευαν ότι η πιθανοκρατική συμπεριφορά των φαινομένων του μικροκόσμου οφείλεται σε ατελή γνώση των παραγόντων που υπεισέρχονται σε αυτά και οι δεύτεροι πρέσβευαν πως οι πιθανότητες είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό της φύσης σε μικροσκοπικό επίπεδο. (Τραχανάς, 2025, σελ. 19). Ο Einstein δεν αμφισβητούσε τον μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντομηχανικής τον οποίο θεωρούσε επιτυχή, αλλά είχε ενστάσεις στην ερμηνευτική πληρότητα της νέας θεωρίας.

Ο Einstein δεν μπορούσε να αποδεχτεί ότι η φύση δεν ήταν αιτιοκρατική. Είναι χαρακτηριστική η φράση του που έχει μείνει στην ιστορία: “Ο Θεός δεν γίνεται να παίζει ζάρια με τον κόσμο!” Υποστήριζε πως υπήρχαν κάποιες κρυμμένες μεταβλητές των σωματιδίων που αν γίνονταν γνωστές θα προσδιόριζαν μονοσήμαντα την εξέλιξη ενός κβαντικού συστήματος και άρα θα μπορούσε να αποκατασταθεί ο ντετερμινισμός της κλασικής φυσικής. (Pais, 1979) Και άρα η κβαντομηχανική δεν ήταν ακόμη μια ολοκληρωμένη θεωρία και θα γινόταν ολοκληρωμένη όταν απαλλασσόταν από τις κβαντομηχανικές πιθανότητες. Ο Bohr και οι υποστηρικτές του συμπυκνώνουν στις ιδέες τους σε αυτό που ονομάζουμε σήμερα Σχολή της Κοπενχάγης και επιμένουν ότι σε μικροσκοπικό επίπεδο η φύση είναι εγγενώς πιθανοκρατούμενη. (Τραχανάς, 2025, σελ. 142).

2.1 Σταθμοί στην εξέλιξη της κβαντικής θεωρίας

Πριν όμως φτάσουμε στο Συνέδριο του Σολβέ που πραγματοποιήθηκε τον Οκτώβριο του 1927 στις Βρυξέλλες το οποίο αποτέλεσε την κορύφωση της διαμάχης μεταξύ Bohr και Einstein για τη φύση της πραγματικότητας και αποτέλεσε την ιδρυτική πράξη της Νέας Φυσικής αξίζει να αναφέρουμε ορισμένους σταθμούς στην εξέλιξη της κβαντομηχανικής και την εδραίωση της από τότε που ο Bohr παρουσίασε το κβαντικό μοντέλο του ατόμου μέχρι το 1927.

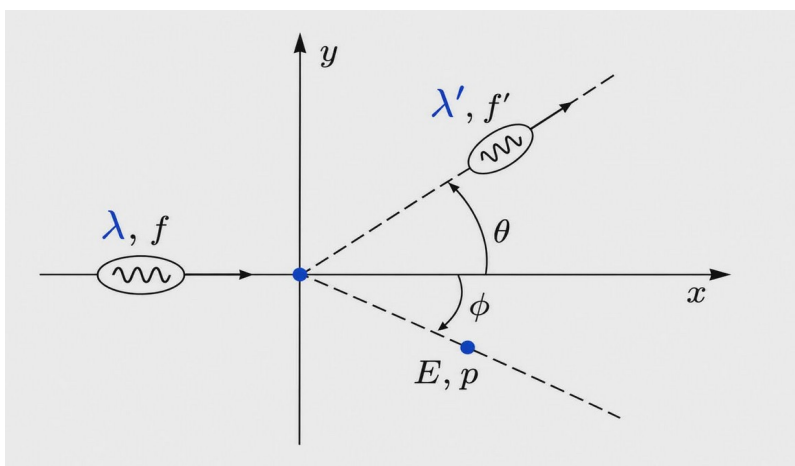
Το 1923 ο **Arthur Compton**, αμερικανός φυσικός, απέδειξε πειραματικά ότι τα φωτεινά κβάντα για τα οποία μίλησε ο Einstein είναι σωματίδια με όλη τη σημασία του όρου. Σχεδίασε και εκτέλεσε ένα πείραμα κατά το οποίο φωτόνια μεγάλης συχνότητας- ακτίνων X ή ακτίνων γ-έπεφταν πάνω σε ηλεκτρόνια, άλλαζαν κατεύθυνση και μειωνόταν η συχνότητά τους, αυξανόταν το μήκος κύματός τους και συγχρόνως μεταβίβαζαν στα ηλεκτρόνια ένα μέρος της ενέργειάς τους. Όσο μεγαλύτερη ήταν η γωνία σκέδασης, τόσο μεγαλύτερη ήταν και η αύξηση του μήκους κύματος.

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos\theta)$$

Εφαρμόζοντας την αρχή διατήρησης της ορμής και την αρχή διατήρησης της ενέργειας κατέληξε στους τύπους :

$$E=h*f \quad \text{και} \quad p=h/\lambda$$

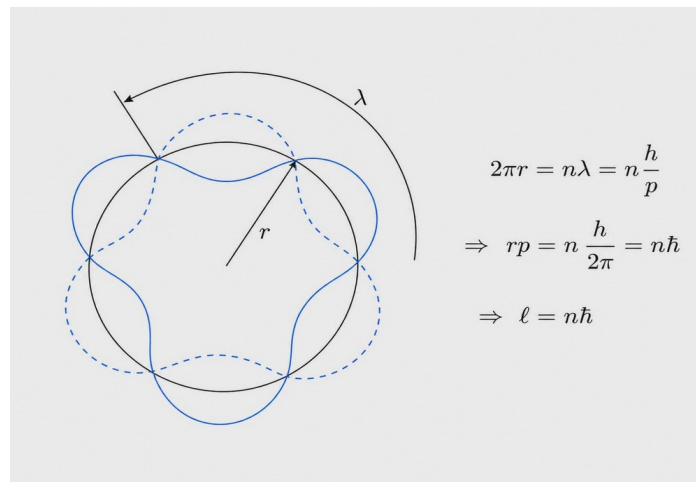
οι οποίοι είναι πολύ σημαντικοί γιατί συνδέουν την συχνότητα f και το μήκος κύματος λ που είναι καθαρά κυματικά μεγέθη με την ενέργεια E και την ορμή p που είναι σωματιδιακά μεγέθη. Το φως λοιπόν είναι σωματίδιο και κύμα ταυτόχρονα. (κυματοσωματιδιακός δυισμός του φωτός)



Εικόνα 8: Σκέδαση Compton (Κβαντομηχανική Ι, Στέφανος Τραχανάς, σελ. 35)

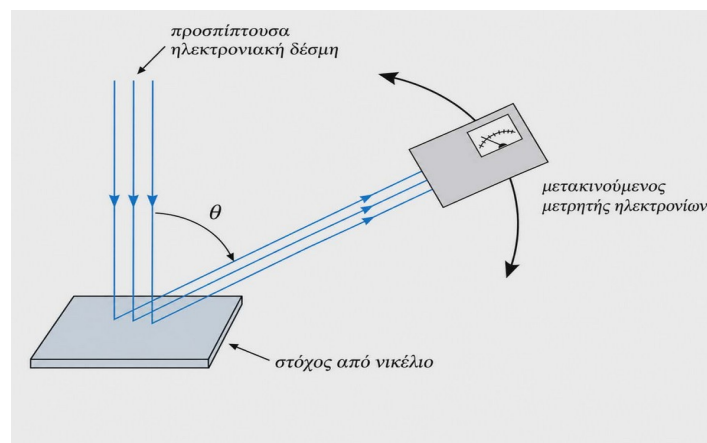
Το 1924 ο **Louis de Broglie** στην διδακτορική του διατριβή υποστήριξε-σε συνέχεια της διπλής φύσης του φωτός-ότι όλα τα υλικά σωματίδια με ορμή $p=m*u$ θα έχουν ταυτόχρονα και κυματική συμπεριφορά (υπόθεση των υλικών κυμάτων) με μήκος κύματος $\lambda=h/p$.

Επίσης, γνωρίζοντας σε βάθος την δουλειά του Bohr για την κβάντωση των τροχιών και των ενεργειών των ηλεκτρονίων των ατόμων υπέθεσε ότι αφού το ηλεκτρόνιο συνοδεύεται από ένα υλικό κύμα, οι τροχιές του Bohr είναι οι νοητές γραμμές που πάνω τους σχηματίζεται ένα στάσιμο ηλεκτρονιακό κύμα. Σε κάθε τροχιά χωράει ένας ακέραιος αριθμός κυμάτων: $2*\pi*r=n*\lambda$. Με άλλα λόγια τα υλικά κύματα του ηλεκτρονίου δημιουργούν στάσιμο κύμα, μόνο όταν η περίμετρος της κυκλικής τροχιάς είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος. Και αφού τα κύματα de Broglie έχουν συχνότητες $f=E/h$, η συνθήκη για τα στάσιμα κύματα μας οδηγεί και στην κβάντωση της ενέργειας.



Εικόνα 9: Από την κυματική φύση των ηλεκτρονίων στην συνθήκη κβάντωσης του Bohr (Κβαντομηχανική Ι, Στέφανος Τραχανάς, σελ.92)

Το 1927 οι Davisson και Germer απέδειξαν πειραματικά την ύπαρξη υλικών κυμάτων, όταν παρατήρησαν φαινόμενα συμβολής-περίθλαση- σε μια δέσμη ηλεκτρονίων που ανακλώνταν από μια κρυσταλλική επιφάνεια.



Εικόνα 10: Διάταξη πειράματος Davisson-Germer (Κβαντομηχανική Ι, Στέφανος Τραχανάς, σελ.98)

Ο **Schrödinger** το 1925 ανακάλυψε την κυματική εξίσωση των υλικών κυμάτων. Απέδειξε ότι η κβάντωση της ενέργειας των ηλεκτρονίων στο άτομο προκύπτει από την απαίτηση να έχουμε λύσεις της εξίσωσης στάσιμα ηλεκτρονικά κύματα. Το μυστικό του ατόμου βρισκόταν στην κυματική φύση του ηλεκτρονίου.

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(x) \right] \Psi$$

Όπου Ψ είναι η κυματοσυνάρτηση, V η δυναμική ενέργεια του σωματιδίου και το ανάδελτα στο τετράγωνο το άθροισμα της δεύτερης παραγώγου ως προς x, y, z .

Η κυματοσυνάρτηση Ψ όμως δεν μπορούσε να παριστάνει ένα φυσικό κύμα. Ο **Max Born** το 1926 έδωσε μια στατιστική ερμηνεία της κβαντομηχανικής, μίλησε για κύμα πιθανότητας. Στις περιοχές που η κυματοσυνάρτηση Ψ παίρνει μεγάλες τιμές εκεί έχουν μεγαλύτερη πιθανότητα να βρεθούν τα ηλεκτρόνια. Η θεώρηση του Born, βασισμένη στην εξίσωση Schrodinger, δεν προβλέπει τα φαινόμενα, αλλά μιλάει για την πιθανότητα να συμβούν. Στην πραγματικότητα το $|\Psi|^2$ δίνει την πυκνότητα πιθανότητας να βρούμε το ηλεκτρόνιο σε μια περιοχή του χώρου. Άλλη μια απόδειξη ότι η κβαντομηχανική είναι μια θεμελιωδώς πιθανοκρατική φυσική. Ο Schrödinger φυσικά δεν ένιωθε άνετα με αυτή την ιδέα αφού συνειδητοποιούσε ότι υπονόμει τα θεμέλια της Αιτιότητας, δημιουργούσε ρήγμα στην πανάρχαια σύνδεση αιτίου-αποτελέσματος. (Ανδρέας Ιωάννου Κασσέτας, Einstein Bohr)

Ο **Heisenberg** το 1925-πριν τους Schrodinger και Born-γνωρίζοντας την θεωρία του Bohr προσπαθεί να κάνει ένα εννοιολογικό ξεκαθάρισμα και να απομακρύνει από την νέα θεωρία τις κβαντωμένες τροχιές που δεν έχουν κάποια πειραματική επιβεβαίωση. Ο ίδιος στην εργασία που δημοσίευσε στο Zeitschrift für Physik τον Ιούλιο του 1925-γνωστό ως Umdeutung- λέει ότι στόχευε σε μια θεωρία κβαντομηχανικής που θα βασιζόταν αποκλειστικά σε «παρατηρήσιμες ποσότητες». Εδώ φαίνεται η θετικιστική στάση του.

Όμως, οι κβαντωμένες ενέργειες και οι μεταβάσεις μεταξύ των επιτρεπόμενων ενεργειακών καταστάσεων είχαν επιβεβαιωθεί επομένως ο Heisenberg αναζήτησε μαθηματικά εργαλεία που μπορούσαν να συνδέουν τις δύο καταστάσεις της μετάβασης, την αρχική(n) και την τελική(m). Αυτά ονομάζονται μήτρες ή πίνακες, είναι μια διάταξη με γραμμές και στήλες και πρόκειται για την γλώσσα του κβαντικού κόσμου. Τα δύο βασικά φυσικά μεγέθη -θέση και ορμή- αντικαθίστανται από τις κατάλληλες μήτρες X και P . Για τις μήτρες δεν ισχύει γενικά η αντιμεταθετική ιδιότητα του πολλαπλασιασμού που ισχύει στους πραγματικούς αριθμούς. Ο Heisenberg, λοιπόν, με την βοήθεια των Born και Jordan κατέληξε στη θεμελιώδη σχέση της μηχανικής των μητρώων:

$$XP - PX = i\hbar/2\pi$$

Από αυτή απορρέει η Αρχή της Αβεβαιότητας σύμφωνα με την οποία στο μικρόκοσμο είναι αδύνατον να γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια συγχρόνως την θέση και την ορμή ενός σωματιδίου. Και αυτό δεν οφείλεται σε ατελείς μετρήσεις και σε σφάλματα των οργάνων μέτρησης, αλλά είναι αποτέλεσμα της ίδιας της κβαντικής δομής της ύλης. Η παραδοσιακή έννοια της αιτιότητας δεν μπορεί να εφαρμοστεί στα κβαντικά φαινόμενα.

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{4\pi}$$

Όπου Δx είναι η αβεβαιότητα της θέσης και Δp η αβεβαιότητα της ορμής του σωματιδίου.

Μάλιστα, περιέγραψε ένα ιδεατό πείραμα (gedankenexperiment) για να εξηγήσει την Αρχή της Απροσδιοριστίας. Έστω ότι θέλουμε να μετρήσουμε με όσο το δυνατόν μεγαλύτερη ακρίβεια την θέση και την ορμή ενός ηλεκτρονίου. Για να μετρήσουμε τη θέση στέλνουμε ένα φωτόνιο να σκεδαστεί πάνω στο ηλεκτρόνιο, με συνέπεια όμως αυτό να μεταφέρει ενέργεια και ορμή στο ηλεκτρόνιο. Το διαταράξαμε, λοιπόν, και προκαλέσαμε μεγάλη αβεβαιότητα στην ορμή του. Αν χρησιμοποιήσουμε φως μεγαλύτερου μήκους κύματος ώστε να μειώσουμε την απότομη μεταβολή της ορμής του ηλεκτρονίου θα μεγαλώσει η αβεβαιότητα της θέσης του.

Υπάρχουν και άλλοι τρόποι να εκφράσουμε την αρχή της απροσδιοριστίας.

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{h}{4\pi}.$$

Όπου ΔE είναι η αβεβαιότητα στην ενέργεια και Δt είναι ο χρόνος που παραμένει το σύστημα στην κατάσταση που θέλουμε να μετρήσουμε την ενέργειά του.

Ο **Pauli** συνέβαλε στην επίλυση του προβλήματος του ατόμου του υδρογόνου με την μηχανική των μητρών αλλά κυρίως το όνομά του είναι συνδεδεμένο με την Απαγορευτική Αρχή σύμφωνα με την οποία στο ίδιο άτομο δεν μπορούν να υπάρξουν δύο ηλεκτρόνια που να έχουν και τους τέσσερις κβαντικούς αριθμούς ίδιους. Σύμφωνα μάλιστα με την Γενικευμένη Αρχή του Pauli όλα τα ταυτόσημα σωματίδια με ημιακέραιο spin (φερμιόνια) υπακούουν στην Αρχή του Pauli που αναφέρθηκε παραπάνω, ενώ τα ταυτόσημα σωματίδια με ακέραια τιμή spin (μποζόνια) μπορούν να βρεθούν ακριβώς στην ίδια κβαντική κατάσταση χωρίς περιορισμό. Τα σωματίδια της ύλης όπως τα ηλεκτρόνια, τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι φερμιόνια, ενώ τα σωματίδια-φορείς δυνάμεων, όπως το φωτόνιο, είναι μποζόνια.

Το 1926 ο **Paul Dirac**, ο οποίος είχε μελετήσει την εργασία του Heisenberg πάνω στην Αρχή της Αβεβαιότητας και είχε καταλάβει τον κεντρικό ρόλο του μεταθέτη στην νέα μηχανική και ότι οι μήτρες X και P δεν μετατίθενται ($XP - PX = i \cdot h / 2\pi$) δημοσίευσε έναν πρώτο μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντομηχανικής (φορμαλισμός Dirac). Βέβαια, το βιβλίο του *Αρχές της Κβαντομηχανικής* που αναδεικνύει τα θεμελιώδη στοιχεία της Νέας Μηχανικής και την μαθηματική τους έκφραση εκδόθηκε το 1930. Ακόμη, ο Dirac με την βοήθεια των Heisenberg και Pauli κατάφερε να συμβιβάσει την πιθανοκρατούμενη κβαντομηχανική με την αιτιοκρατούμενη σχετικότητα (σχετικιστική κβαντομηχανική) και να ανακαλύψει την νέα σχετικιστική κυματική εξίσωση Schrodinger.

2.2 Πρώτες συναντήσεις Bohr-Einstein

Ο Bohr και ο Einstein συναντήθηκαν για πρώτη φορά τον Απρίλιο του 1920, όταν ο πρώτος έλαβε μια πρόσκληση από τον Planck για να δώσει μια διάλεξη στο Βερολίνο για το κβαντικό μοντέλο του ατόμου. Ήδη ο Einstein είχε δηλώσει την εκτίμησή του στο πρόσωπο του Bohr χαρακτηρίζοντάς τον “μυαλό πρώτης τάξης” με “κριτική ικανότητα και οξυδέρκεια”. Είχαν και οι δύο υψηλή αίσθηση του χιούμορ, αμέσως απέκτησαν μεγάλη συμπάθεια ο ένας για τον άλλον αλλά σε θέματα επιστημολογίας δεν τα βρήκαν ποτέ. Η διαμονή του Bohr στο Βερολίνο ήταν μια ευκαιρία για ατελείωτες “συζητήσεις απ’το πρωί ως το βράδυ” όπως ο ίδιος περιγράφει με τους Planck και Einstein αλλά και με νεώτερους φυσικούς του πανεπιστημίου. Η συζήτησή τους κυρίως είχε θέμα τα κβάντα και την Αιτιότητα όμως και οι δύο επιστήμονες έμεναν αμετακίνητοι στα πιστεύω τους. Ο Einstein, Πάπας της επιστήμης προσπαθούσε με κάθε τρόπο να διαφυλάξει την τάξη και την Αιτιότητα στην Φυσική, ενώ ο Bohr μετέπειτα Πατριάρχης της Κβαντομηχανικής δήλωνε ότι θα ακολουθούσε το ένστικτό του πως δεν υπάρχει κάτι ιερό και απαραβίαστο. (Ανδρέας Ιωάννου Κασσέτας, Einstein και Bohr)

Ο Einstein σε εργασία του το 1916 περιέγραφε τις μεταβάσεις των ηλεκτρονίων στο άτομο μεταξύ των ενεργειακών σταθμών αλλά παρόλο που αδυνατούσε να προβλέψει τον χρόνο και την κατεύθυνση εκπομπής των φωτονίων πίστευε ότι τελικά με κάποιον τρόπο θα οδηγούνταν στην αποκατάσταση της αιτιότητας. Η τραγική ειρωνεία είναι ότι στην ουσία ήταν ο πρώτος που εισήγαγε τις πιθανότητες στην κβαντική φυσική. Αντίθετα, ο Bohr υποστήριζε πως ο ακριβής καθορισμός του χρόνου και της κατεύθυνσης εκπομπής της ακτινοβολίας ήταν αδύνατος. Τότε έγινε φανερή πρώτη φορά η διάσταση των απόψεών τους και παρόλο ο ένας προσπάθησε να πείσει τον άλλον δεν κατάφεραν να έρθουν σε συμφωνία. (Kumar, 2018, σελ. 202)

Η εκτίμηση φυσικά του ενός στο πρόσωπο του άλλου ήταν αδιαμφισβήτητη. Σε γράμμα που έλαβε ο Bohr από τον Einstein μετά την επιστροφή του στην Κοπενχάγη δήλωνε ενθουσιασμένος και ότι “ποτέ δεν άντλησε τόση ευχαρίστηση από την παρουσία ενός ανθρώπου”. Σε απάντησή του ο Bohr χαρακτηρίζει τον Einstein “πηγή έμπνευσης”. (Fölsing, 1997, σελ. 477).

Τα επόμενα χρόνια συνέχισαν τις συναντήσεις τους μεταξύ Βερολίνου και Κοπενχάγης. Τον Ιούνιο του 1922 ο Bohr έδωσε μια σειρά επτά διαλέξεων στο Πανεπιστήμιο του Γκέτινγκεν -«Φεστιβάλ Bohr»- για το ατομικό του μοντέλο. Ο Einstein δεν κατάφερε να παρευρεθεί στις διαλέξεις γιατί φοβόταν για τη ζωή του λόγω της έκρυθμης πολιτικής κατάστασης που επικρατούσε στην Γερμανία εκείνη την εποχή, αλλά διάβασε τα δημοσιευμένα άρθρα του Bohr στο Zeitschrift für Physik και χαρακτήρισε την θεωρία του “θαύμα”.

Την ημέρα που ο Bohr έλαβε το Βραβείο Νόμπελ το 1922 στην Μεγάλη Αίθουσα της Μουσικής Ακαδημίας της Στοκχόλμης, έγινε και η τελετή απονομής του βραβείου του 1921 στον Einstein, πράγμα που προκάλεσε ανακούφιση στον Bohr ο οποίος δεν ήθελε σε καμιά περίπτωση να βραβευτεί πριν τον Einstein. Ο Bohr, ωστόσο δεν αποδεχόταν την υπόθεση των κβάντων φωτός του Einstein μέχρι το 1923 που ο Αμερικανός πειραματικός φυσικός Arthur Compton σχεδίασε και πραγματοποίησε ένα πείραμα που απέδειξε την σωματιδιακή φύση του φωτός. Σ’αυτή την διαμάχη ο Einstein είχε δίκιο και ο Bohr άδικο. Το 1924 ο Einstein έγραψε στο Berliner Tageblatt για την διπλή φύση του φωτός, την κυματική και την σωματιδιακή. (Pais, 1982, σελ. 414)

2.3 5ο Συνέδριο Σολβέ

Φτάνουμε,λοιπόν,στον Οκτώβριο του 1927,στις Βρυξέλλες όπου πραγματοποιήθηκε το 5ο Συνέδριο του Σολβέ το οποίο διήρκεσε 6 ημέρες.Το θέμα του συνεδρίου ήταν:«Ηλεκτρόνια και Φωτόνια».Σ 'αυτό συμμετείχαν 29 επιστήμονες από τους οποίους οι 17 είναι κάτοχοι Βραβείου Νόμπελ.



Εικόνα 11: Από τα αριστερά προς τα δεξιά:Πίσω: Auguste Piccard, Émile Henriot, Paul Ehrenfest, Édouard Herzen, Théophile de Donder, Erwin Schrödinger, JE Verschaffelt, Wolfgang Pauli, Werner Heisenberg, Ralph Fowler, Léon Brillouin.Στη μέση: Peter Debye, Martin Knudsen, William Lawrence Bragg, Hendrik Anthony Kramers, Paul Dirac, Arthur Compton, Louis de Broglie, Max Born, Niels Bohr.Μπροστά: Irving Langmuir, Max Planck, Marie Curie, Hendrik Lorentz, Albert Einstein, Paul Langevin, Charles-Eugène Guye, CTR Wilson, Owen Richardson

Το συνέδριο ήταν αφιερωμένο στη νέα κβαντική μηχανική .Σ'αυτό λοιπόν θα παρευρίσκονταν τόσο παλιοί δάσκαλοι της κβαντικής θεωρίας αλλά και νέοι υποστηρικτές της κβαντικής μηχανικής.Στο συνέδριο παρουσιάστηκαν πέντε εισηγήσεις.Μίλησαν ο William Bragg για την ένταση των ανακλώμενων ακτίνων X,ο Arthur Compton για την αποτυχία της ηλεκτρομαγνητικής θεωρίας να εξηγήσει την αύξηση του μήκους κύματος των ακτίνων X όταν σκεδάζονταν από ηλεκτρόνια,ο Louis de Broglie για την «νέα δυναμική των κβάντων»,ο Born και Heisenberg για την κβαντική μηχανική και τέλος ο Schrödinger για την κυματομηχανική.

Τόσο ο Einstein όσο και ο Bohr δεν ήταν από τους βασικούς εισηγητές του συνεδρίου.Ο Einstein υποστήριξε ότι δεν είχε εμπλακεί ιδιαίτερα και δυσκολεύεται να παρακολουθήσει τις τελευταίες εξελίξεις της κβαντικής θεωρίας και δεν συμφωνούσε με τον στατιστικό τρόπο σκέψης της ,άρα δεν ήταν αρκετά ειδικός για να μιλήσει στο συνέδριο. Η αλήθεια είναι ότι είχε παρακολουθήσει τις εξελίξεις και συνέβαλε στις εργασίες των de Broglie και Schrödinger.Από την άλλη ο Bohr μπορεί να μην είχε ασχοληθεί άμεσα με την θεμελίωση της νέας κβαντικής μηχανικής ,ωστόσο είχε επηρεάσει τους θεμελιωτές της Heisenberg,Pauli και Dirac.(Kumar,2018,σελ.376)

Το συνέδριο διήρκεσε έξι μέρες, από τις 24/10 έως τις 29/10. Μετά το καλωσόρισμα των παρευρισκομένων από τον Lorentz, πρόεδρο της επιστημονικής επιτροπής και του συνεδρίου-που είχε μεσολαβήσει ώστε ο βασιλιάς του Βελγίου να εγκρίνει την εκλογή του Einstein στην επιστημονική επιτροπή του Διεθνούς Ινστιτούτου Φυσικής-ο πρώτος εισηγητής που πήρε τον λόγο ήταν ο William Bragg που μίλησε για την χρήση των ακτίνων X στην έρευνα της δομής των κρυστάλλων. Ακολούθησαν ερωτήματα και διεξοδική συζήτηση, όπως συνέβαινε μετά από κάθε ομιλία και το ίδιο απόγευμα ο Arthur Compton μίλησε για το «φαινόμενο Compton» και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και την αδυναμία της κλασικής προσέγγισης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας να τα ερμηνεύσει.

Την δεύτερη μέρα εισηγητής ήταν ο Louis de Broglie που μίλησε για τον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό της ύλης και πρότεινε μια νέα προσέγγιση για την ερμηνεία της κυματοσυνάρτησης του Schrödinger, την «θεωρία του κύματος οδηγού» που επανέφερε στην ουσία την κλασική αιτιοκρατία. Σύμφωνα με αυτόν, τα κβαντικά σωματίδια κινούνταν πάνω σε ορισμένες τροχιές οι οποίες προσδιορίζονταν από το κύμα Ψ που προέκυπτε από την λύση της εξίσωσης Schrödinger. Τα ηλεκτρόνια υπήρχαν ως σωματίδια και κύματα ταυτόχρονα και τα κβαντικά κύματα δεν ήταν κύματα πιθανότητας όπως υποστήριζε «η Σχολή της Κοπενχάγης», αλλά κύματα οδηγοί (pilot waves). Η θεωρία του de Broglie δέχτηκε σφοδρή κριτική αφού παραβίαζε τους πιο θεμελιώδεις νόμους της φυσικής, την Αρχή Διατήρησης της Ορμής και της Ενέργειας. (Τραχανάς, 2025, σελ. 189).

Το πρωί της τρίτης μέρας μίλησαν οι Heisenberg και Born. Ανάλυσαν τον μαθηματικό φορμαλισμό της κβαντικής μηχανικής-την μηχανική των πινάκων- και την πιθανοκρατική της ερμηνεία. Τόνισαν ότι η βασική διαφορά μεταξύ της κλασικής φυσικής και της κβαντομηχανικής είναι η ύπαρξη στην δεύτερη ασυνεχειών. Στη συνέχεια παρουσίασαν την Αρχή της Αβεβαιότητας και την σημασία της σταθεράς του Planck. Κλείνοντας δήλωσαν ότι η κβαντομηχανική είναι μια κλειστή θεωρία που καμιά μελλοντική εξέλιξη δεν θα άλλαζε τις θεμελιώδεις μαθηματικές και φυσικές της παραδοχές. Φυσικά ο Einstein δε συμφωνούσε με αυτή την άποψη. Πίστευε ότι η νέα μηχανική παρόλο που ήταν ένα εντυπωσιακό επιστημονικό επίτευγμα, δεν μπορούσε να θεωρηθεί μια πλήρης θεωρία και πως οι κβαντικές πιθανότητες δεν ήταν θεμελιώδεις αλλά οφείλονταν σε ατελή γνώση. Αν ανακαλύπτονταν αυτές οι «κρυμμένες ιδιότητες της μικροσκοπικής ύλης», η φύση θα αποδεικνυόταν ξανά αιτιοκρατική. Παρόλα αυτά δεν πήρε μέρος στην συζήτηση την παρούσα στιγμή. (Kumar, 2018, σελ. 381). Το ίδιο απόγευμα ο Schrödinger παρουσίασε την εργασία του πάνω στην κυματομηχανική και αμφισβήτησε τα κβαντικά άλματα. Η ομιλία του προκάλεσε ενστάσεις από τους υποστηρικτές της Σχολής της Κοπενχάγης, Bohr, Born και Heisenberg.

Μετά από μια μικρή διακοπή του συνεδρίου του Σολβέ για μιάμιση μέρα ώστε να μπορέσουν πολλοί επιστήμονες να ταξιδέψουν στην Γαλλία για την επέτειο των εκατό χρόνων από τον θάνατο του φυσικού Augustin Fresnel, η τελική εφ'όλης της ύλης συζήτηση ξεκίνησε την Παρασκευή στις 28 Οκτωβρίου από τον Lorentz που έθεσε ερωτήματα για την αιτιοκρατία και τις πιθανότητες.

Τον λόγο πήρε ο Bohr που μίλησε για την συμπληρωματικότητα στον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό της ύλης. Ανάλογα με το πείραμα εκδηλώνεται η κυματική ή η σωματιδιακή φύση του φωτός. Είναι αδύνατο να μετρήσουμε ταυτόχρονα τις σωματιδιακές και τις κυματικές ιδιότητες του φωτός. Το «κβαντικό αίτημα», η ύπαρξη ασυνέχειας στη φύση οδηγεί σε ασαφή διαχωρισμό μεταξύ παρατηρητή και αντικειμένου παρατήρησης. Δεν υπάρχει ανεξάρτητη πραγ-

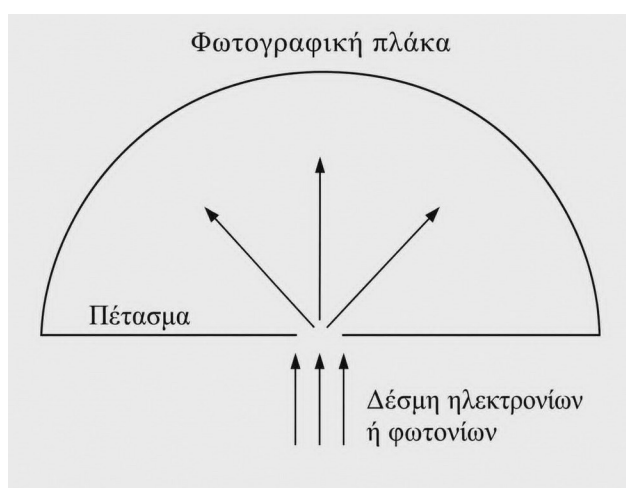
ματικότητα,αφού αυτή εξαρτάται από την πράξη της μέτρησης.(Zinkernagel,2016)
Αντίθετα,ο Einstein πίστευε στην ύπαρξη μιας πραγματικότητας όπως ακριβώς είναι που δεν εξαρτάται από τον παρατηρητή ή τη μετρητική συσκευή.

2.4 Νοητικά πειράματα Einstein

Στην προσπάθειά του ο Einstein να διαψεύσει τις υποθέσεις του Bohr κατέφυγε σε μια σειρά από νοητικά πειράματα.Βασικός του στόχος ήταν να αποδείξει ότι η Αρχή της Αβεβαιότητας ήταν λάθος,δηλαδή δεν αποτελεί θεμελιώδες όριο της φύσης αλλά είναι αποτέλεσμα πρακτικών περιορισμών της μέτρησης και επομένως η κβαντική μηχανική είναι ασυνεπής.Ωστόσο,σε κάθε νοητικό πείραμα που παρουσίαζε ο Einstein,ο Bohr μαζί με τους άλλους υποστηρικτές της ερμηνείας της Κοπενχάγης έβρισκαν το λάθος στο συλλογισμό του στην χρήση κλασικών εννοιών πέρα από τα όριά τους.

2.4.1 Πείραμα μονής σχισμής-Πείραμα διπλής σχισμής

Αρχικά ,ο Einstein παρουσίασε το νοητικό πείραμα μονής σχισμής.Συγκεκριμένα σχεδίασε ένα αδιαφανές πέτασμα με μια μικρή οπή μέσα από την οποία θα διέρχονταν δέσμη φωτονίων ή ηλεκτρονίων που στην συνέχεια θα κατέληγαν πάνω σε μια ημικυκλική φωτογραφική πλάκα.Λόγω του γεγονότος ότι η σχισμή ήταν πολύ μικρή τα ηλεκτρόνια που θα περνούσαν μέσα από αυτή θα χτυπούσαν πάνω στην πλάκα αφού θα είχαν υποστεί περίθλαση(κυματικό φαινόμενο).Κατά την πρόσπτωσή τους ωστόσο πάνω στην πλάκα θα χτυπούσαν ως μεμονωμένα σωματίδια.(σωματιδιακό φαινόμενο)



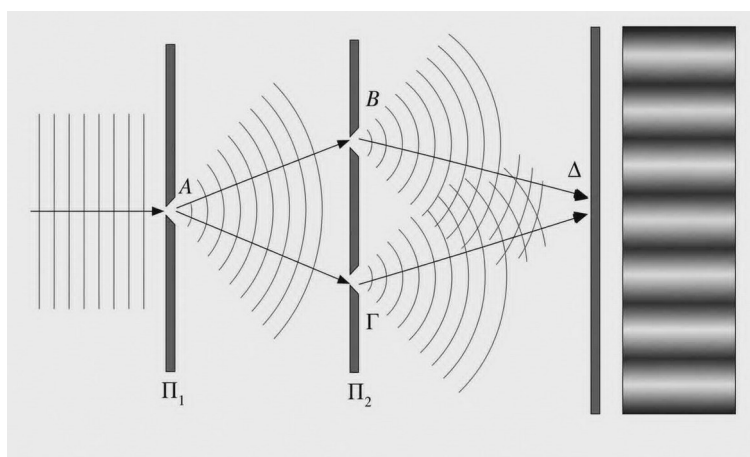
Εικόνα 12: Σχηματική παράσταση του νοητικού πειράματος της μονής σχισμής του Einstein(Kumar,σελ.388)

Σύμφωνα με την ερμηνεία της κβαντομηχανικής υπάρχει η πιθανότητα να ανιχνευτεί το ηλεκτρόνιο σε κάθε σημείο της πλάκας και η συμπεριφορά του περιγράφεται από μια Διπλωματική Εργασία

κυματοσυνάρτηση. Τη στιγμή όμως που θα ανιχνεύσουμε ένα συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο σε κάποιο σημείο της πλάκας, μηδενίζεται αυτομάτως-χωρίς να μεσολαβεί κανένα χρονικό διάστημα-η πιθανότητα να το βρούμε οπουδήποτε αλλού. Πρόκειται για μια ακαριαία «κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης» που ερχόταν σε αντίθεση με την Ειδική Θεωρία της Σχετικότητας, υποστήριζε ο Einstein. Και επομένως, η ερμηνεία της Κοπενχάγης δεν μπορεί να θεωρηθεί μια πλήρης θεωρία. Ο ίδιος έδωσε και μια εναλλακτική εξήγηση πως το $|\Psi|^2$ εκφράζει την πυκνότητα πιθανότητας να βρεθεί όχι ένα συγκεκριμένο ηλεκτρόνιο σε κάποιο σημείο της πλάκας αλλά ένα οποιοδήποτε ηλεκτρόνιο (στατιστική ερμηνεία) (Kumar, 2018, σελ. 390)

Η απάντηση του Bohr ήταν ότι η κυματοσυνάρτηση καταρρέει ακαριαία, αλλά δεν περιγράφει ένα πραγματικό κύμα στο χώρο, αλλά ένα κύμα πιθανότητας. Το αδύναμο σημείο στο νοητικό πείραμα του Einstein, είτε ο Bohr, είναι ότι θεωρούσε ότι γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια την θέση του πετάσματος και της φωτογραφικής πλάκας (άρα αυτά θα έχουν άπειρη μάζα) και τον χρόνο που το ηλεκτρόνιο περνά από την σχισμή. Σύμφωνα όμως με την Αρχή της Αβεβαιότητας η ορμή και η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα έχουν άπειρη απροσδιοριστία. Ο Bohr πρότεινε ένα πέτασμα όχι άπειρης μάζας, το οποίο θα μπορούσε να κινηθεί από το πέραςμα του ηλεκτρονίου μέσα από αυτό και κατέληξε και πάλι ότι η κβαντική μηχανική βασισμένη στην αρχή της αβεβαιότητας δίνει την πληρέστερη περιγραφή του φαινομένου. (Kumar, 2018, σελ. 391)

Ο Einstein απάντησε με ένα νέο νοητικό πείραμα με δύο σχισμές. Ανάμεσα στο κινητό πια πρώτο πέτασμα και την φωτογραφική πλάκα τοποθέτησε ένα ακόμη πέτασμα με δύο σχισμές. Μείωσε την ένταση της δέσμης ώστε ένα ηλεκτρόνιο να περνά κάθε φορά από το πρώτο πέτασμα και από την μία ή την άλλη σχισμή του δεύτερου πετάσματος και να φτάνει στην φωτογραφική πλάκα. Όταν πολλά σωματίδια αφήσουν το στίγμα τους πάνω στην πλάκα, αυτό που θα παρατηρήσουμε είναι φωτεινούς και σκοτεινούς κροσσούς, δηλαδή μια εικόνα συμβολής.



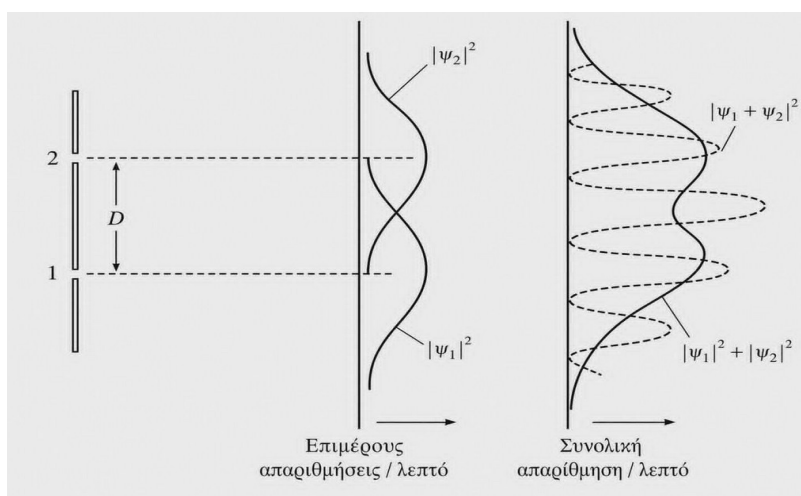
Εικόνα 13: Νοητικό πείραμα δύο σχισμών του Einstein. Δεξιά φαίνεται η εικόνα συμβολής (Kumar, σελ. 393)

Το επιχείρημα του Einstein ήταν το εξής: Αν μετρήσουμε την μεταβίβαση ορμής ανάμεσα στο σωματίδιο και το πρώτο πέτασμα, την κίνηση του πρώτου πετάσματος και το σημείο που

προσπίπτει το σωματίδιο στην φωτογραφική πλάκα ,θα μπορέσουμε να πούμε προς ποια σχισμή του δεύτερου πετάσματος εκτρέπεται το σωματίδιο και από ποια σχισμή τελικά διήλθε.Και άρα έχουμε μπροστά μας ένα πείραμα με οποίο προσδιορίζουμε την θέση και την ορμή του σωματιδίου χωρίς τον περιορισμό της Αρχής της Αβεβαιότητας. (Kumar,2018,σελ.394)

Και εδώ ο Bohr είχε την απάντησή του.Για να μετρήσουμε είτε την μεταβίβαση ορμής μεταξύ σωματιδίου και πρώτου πετάσματος θα πρέπει να παρατηρήσουμε την κατακόρυφη κίνηση του πετάσματος.Αυτό θα γίνει αν αναρτήσουμε το πέτασμα σε ζεύγος ελατηρίων. Και πάλι όμως ,σύμφωνα με την Αρχή της Αβεβαιότητας με όσο μεγαλύτερη ακρίβεια μετρήσουμε την ορμή του πετάσματος,τόσο μεγαλύτερη απροσδιοριστία θα έχουμε στην κατακόρυφη θέση του.Αν όμως δεν γνωρίζουμε την θέση του πρώτου πετάσματος ακόμα και αν μπορούμε να ανιχνεύσουμε την τροχιά του σωματιδίου και την σχισμή από την οποία θα διέλθει αυτόματα καταστρέφεται η εικόνα συμβολής.Εδώ ο Bohr «διασώζει» και την συμπληρωματικότητα,εξασφαλίζοντας ότι σε ένα συγκεκριμένο πείραμα είναι αδύνατο να μετρήσουμε ταυτόχρονα τις κυματικές και τις σωματιδιακές ιδιότητες των φωτονίων ή ηλεκτρονίων.(Bohr,1949,σελ.218)Το φως είναι και κύμα και σωματίδιο ,αλλά το ποιες ιδιότητες θα εκδηλώσει κάθε φορά εξαρτάται από τον τύπο του πειράματος που διεξάγεται. (Kumar,2018,σελ.395)

Αν κλείσουμε μια από τις δύο σχισμές το φαινόμενο συμβολής θα εξαφανιστεί γιατί το κάθε ηλεκτρόνιο θα διέλθει αναγκαστικά από την ανοιχτή κάθε φορά οπή και θα πάρουμε μια συμμετρική καμπύλη το μέγιστο της οποίας θα είναι μπροστά από το κέντρο της ανοιχτής σχισμής.Επομένως αν μπορούμε να πούμε ποια τροχιά θα ακολουθήσει το ηλεκτρόνιο και διαμέσου ποιας σχισμής θα περάσει,δεν θα σχηματιστεί καμιά εικόνα συμβολής.Στο παρακάτω σχήμα φαίνεται το αποτέλεσμα της πρόσπτωσης ηλεκτρονίων σε διπλή σχισμή και η κατανομή των ανιχνεύσεων τους αλλά όταν καθεμιά από τις σχισμές είναι κλειστή για τον μισό χρόνο(απλή άθροιση δύο διαμορφωμάτων συμβολής).Στο ίδιο σχήμα με διακεκομμένη γραμμή φαίνεται το αποτέλεσμα,δηλαδή οι στενές φωτεινές και σκοτεινές γραμμές, όταν και οι δύο σχισμές είναι ταυτόχρονα ανοιχτές. (Serway,τόμος 4,ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ,σελ.77)



Εικόνα 14: Συμβολή ηλεκτρονίων που προσπίπτουν σε διπλή σχισμή(Serway,τόμος 4,ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ,σελ.78)

Ο μόνος τρόπος εφόσον είναι ανοιχτές και οι δύο σχισμές να παρατηρηθεί η εικόνα συμβολής που περιγράψαμε είναι αν το ηλεκτρόνιο αλληλεπιδρά και με τις δύο σχισμές ταυτόχρονα και είναι αδύνατο να προσδιορίσουμε πειραματικά από ποια σχισμή θα περάσει, ώστε τελικά να μπορούμε μάλιστα να πούμε ότι το ηλεκτρόνιο διέρχεται μέσα και από τις δύο σχισμές!

Ο Bohr εφάρμοσε την Αρχή της Συμπληρωματικότητας στον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό της ύλης. Κάθε πείραμα με το οποίο ανιχνεύουμε τα σωματιδιακά χαρακτηριστικά, αυτόματα αποκλείει την ανίχνευση των κυματικών χαρακτηριστικών. Τα κβαντικά φαινόμενα δεν μπορούν να είναι ανεξάρτητα από τις πειραματικές διατάξεις. Στο πείραμα των δύο σχισμών η θέση του φωτονίου ή ηλεκτρονίου παραμένει «διφορούμενη» και κάποιες πληροφορίες για αυτό μπορούμε να έχουμε μόνο με την αλληλεπίδρασή του με διάφορες πειραματικές διατάξεις. Κάποιοι μάλιστα ισχυρίζονται ότι η κλασική λογική του Αριστοτέλη σύμφωνα με την οποία μια πρόταση μπορεί να είναι είτε αληθής είτε ψευδής πρέπει να επεκταθεί και να μιλήσουμε για μια νέα λογική της συμπληρωματικότητας η οποία θα περιλαμβάνει εκτός από το αληθές και το ψευδές και το απροσδιόριστο. (Powers, 1991, σελ. 180)

Η «διαμάχη» Bohr Einstein συνεχιζόταν και έξω από τις αίθουσες του συνεδρίου, καθώς έπαιρναν το πρωινό τους στο ξενοδοχείο όπου διέμεναν, καθώς περπατούσαν προς το Ινστιτούτο Φυσιολογίας, στα διαλλείματα, την ώρα του γεύματος και του δείπνου. Κάθε πρωί ο Einstein εμφανιζόταν με μια καινούρια πρόταση του νοητικού πειράματος και μέχρι το βράδυ ο Bohr μαζί με τους υπόλοιπους υποστηρικτές της Ερμηνείας της Κοπενχάγης έβρισκαν ένα αντεπιχείρημα στο συλλογισμό του Einstein. Ο Ehrenfest, στενός φίλος και των δύο λέει πως ήταν «πραγματική απόλαυση» για κάποιον να είναι παρών στις συζητήσεις μεταξύ

Einstein και Bohr με τον Einstein να εφευρίσκει διαρκώς νέα παραδείγματα για να αποδείξει πως η Αρχή της Αβεβαιότητας-εκεί βρισκόταν η καρδιά της κοπενχαγιανής ερμηνείας- είναι λάθος και τον Bohr να αναζητά εργαλεία για να απορρίψει τα παραδείγματα του πρώτου. (Bohr, 1948, σελ. 218)

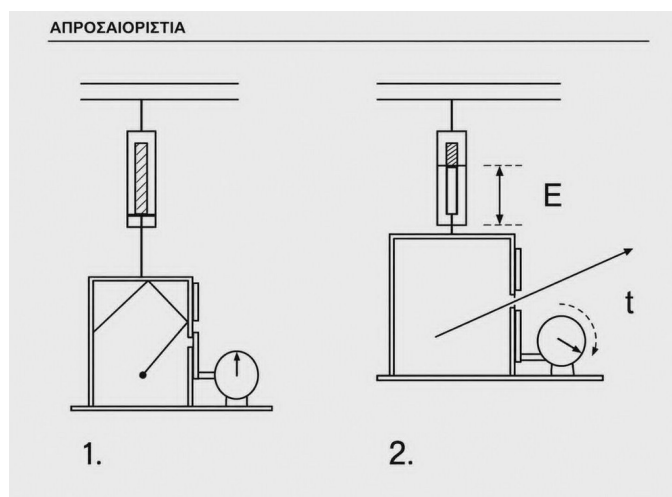
Το 5ο Συνέδριο του Σολβέ, λοιπόν, έφτασε στο τέλος του και η επιχειρηματολογία του Bohr είχε ξεκάθαρα υπερισχύσει. Ο Einstein ωστόσο δεν είχε πειστεί ότι η Νέα θεωρία της Κβαντομηχανικής ήταν μια πλήρης και κλειστή θεωρία. Μετά το τέλος του συνεδρίου όλες οι προϋποθέσεις οδήγησαν στην ταχεία διάδοση της κοπενχαγιανής ερμηνείας της Κβαντομηχανικής. Πρώτον το ινστιτούτο του Bohr, όπου ο ίδιος εργαζόταν μαζί με τους Heisenberg, Pauli, Dirac και άλλους επιστήμονες αναδείχτηκε στο παγκόσμιο κέντρο της κβαντικής φυσικής. Ακόμη, την εποχή εκείνη πολλές καθηγητικές θέσεις ήταν κενές και συμπληρώθηκαν από επιστήμονες που είχαν διαμορφώσει την Νέα Φυσική, επομένως όχι μόνο υποστήριζαν την ερμηνεία της Κοπενχάγης αλλά και συνασπίζονταν κάθε φορά που κάποιος προσπαθούσε να την αμφισβητήσει. (Kumar, 2018, σελ. 405-7)

2.4.2 Το κουτί των φωτονίων

Η επόμενη συνάντηση των Einstein και Bohr έγινε το 1930 στο 6ο Συνέδριο Σολβέ που είχε θέμα τις μαγνητικές ιδιότητες της ύλης, όπου ο Einstein παρουσίασε ένα νέο απλό αλλά εξαιρετικά ευφυές νοητικό πείραμα, το κουτί φωτονίων.

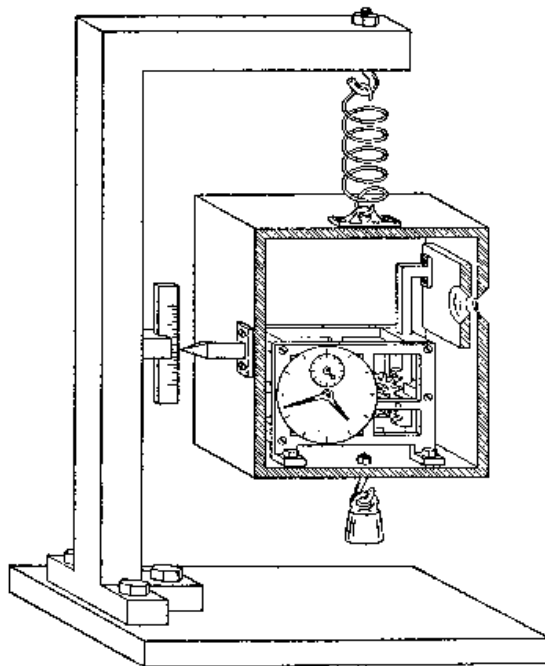
Στο 6ο Συνέδριο Σολβέ ήταν παρόντες και οι δύο επιστήμονες, αφού πλέον και ο Bohr συμμετείχε στην εννιάμελή επιστημονική επιτροπή της οποίας ο Einstein ήταν ήδη μέλος. Στη διάρκεια του συνεδρίου θα γινόταν ο «δεύτερος γύρος» της διαμάχης τους για την ερμηνεία της Κβαντομηχανικής και την αιτιοκρατική ή πιθανοκρατική φύση της πραγματικότητας. Στόχος του Einstein ήταν και πάλι η Αρχή της Αβεβαιότητας -αφού αυτή βρισκόταν στο επίκεντρο της Ερμηνείας της Κοπενχάγης- τώρα όμως αντί για τα μεγέθη θέση-ορμή διάλεξε το ζεύγος ενέργεια-χρόνος.

Το νοητικό πείραμα ήταν το εξής: Διαθέτουμε ένα κουτί γεμάτο φως που σε ένα από τα τοιχώματά του υπάρχει μια μικρή οπή η οποία με την βοήθεια κινητού διαφράγματος μπορεί να ανοιγοκλείνει. Μέσα στο κουτί υπάρχει ωρολογιακός μηχανισμός που είναι συγχρονισμένος με ένα άλλο ρολόι στο εργαστήριο. Κάνουμε μια αρχική ζύγιση στο κουτί. Στη συνέχεια ανοίγουμε την οπή για μια ελάχιστη χρονική διάρκεια ώστε μόνο ένα φωτόνιο να διαφύγει και ζυγίζουμε ξανά το κουτί. Από την διαφορά της μάζας Δm υπολογίζουμε με ακρίβεια την ενέργεια του φωτονίου που διέφυγε μέσω της εξίσωσης $E = \Delta m \cdot c^2$ και από το εργαστηριακό ρολόι γνωρίζουμε την ακριβή χρονική στιγμή διαφυγής του φωτονίου. Άρα, σύμφωνα με τον Einstein, η ταυτόχρονη γνώση της ενέργειας και του χρόνου με όση ακρίβεια θέλουμε ερχόταν σε αντίθεση με την Αρχή της Αβεβαιότητας του Heisenberg και επομένως η κβαντική μηχανική είναι ασυνεπής και όχι μια πλήρης θεωρία. (Kumar, 2018, σελ. 412-14)



Εικόνα 15: Νοητικό πείραμα Einstein με το κουτί φωτονίων (Φιλοσοφία και Νέα Φυσική, Powers, σελ. 193)

Ο Leon Rosenfeld, συνεργάτης του Bohr που εκείνες τις μέρες βρισκόταν στις Βρυξέλλες περιγράφει πως ο Bohr βρισκόταν σε βαθιά απόγνωση και βάλθηκε με κάθε τρόπο να βρει το σφάλμα που ήλπιζε να υπάρχει στο νοητικό πείραμα του Einstein. (Rosenfeld, 1968, σελ. 232) Εξέταζε όλες τις λεπτομέρειες και σχεδίασε ένα διάγραμμα της πειραματικής διάταξης.



Εικόνα 16: Το σχέδιο του Bohr για το κουτί φωτονίων του Einstein (Αρχείο Niels Bohr, Κοπεγχάγη)

Ο Bohr, λοιπόν, επικεντρώθηκε στη διαδικασία της ζύγισης του κουτιού. Πρότεινε το κουτί να αναρτηθεί σε κατακόρυφο ελατήριο και προσάρτησε έναν δείκτη στο κουτί και μια βαθμονομημένη κλίμακα στο υποστηρικτικό πλαίσιο όπως φαίνεται στο παραπάνω σχήμα. Στο κάτω μέρος του κουτιού κρέμασε ένα βαρίδιο ώστε στην αρχική ζύγιση ο δείκτης να δείχνει το μηδέν της κλίμακας. Μετά την διαφυγή του φωτονίου, το κουτί γίνεται ελαφρύτερο και ανεβαίνει προς τα πάνω. Για να δείχνει και πάλι η ακμή του δείκτη το μηδέν της κλίμακας αναρτά στην βάση του κουτιού ένα άλλο βαρίδιο μεγαλύτερης μάζας. Η διαφορά μάζας των δύο βαριδιών είναι η μάζα του φωτονίου που διέφυγε, οπότε μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια και η ενέργειά του. Όμως, η ακριβής μέτρηση της θέσης του κουτιού προϋποθέτει τον φωτισμό της συσκευής και επομένως μια αβεβαιότητα στην ορμή του που μπορούσε να το θέσει σε κίνηση με αποτέλεσμα να έχουμε αβεβαιότητα στον προσδιορισμό του βάρους του κουτιού και της μάζας και της ενέργειας του φωτονίου. (Kumar, 2018, σελ. 417)

Μετά από σχεδόν όλη τη νύχτα που έμεινε άγρυπνος ο Bohr κατάφερε να εντοπίσει το σφάλμα του Einstein. Ο Einstein είχε παραβλέψει την ίδια του την θεωρία, την γενική θεωρία της σχετικότητας. Αφού το κουτί κινείται μέσα στο βαρυτικό πεδίο της Γης, θα επηρεαστεί ο ρυθμός του ρολογιού που βρίσκεται μέσα σε αυτό με αποτέλεσμα να μην είναι συγχρονισμένο πια με το ρολόι του εργαστηρίου. Επομένως, η εκπομπή του φωτονίου κάνει αδύνατη την μέτρηση του χρόνου εκπομπής του με ακρίβεια. Το πείραμα του κουτιού φωτονίων του Einstein δεν ήταν δυνατό να μετρήσει συγχρόνως την ενέργεια του

εκπεμπόμενου φωτονίου και την χρονική στιγμή που αυτό θα διαφύγει με απόλυτη ακρίβεια. Ο Bohr επικαλούμενος την θεωρία βαρύτητας του Einstein βγήκε θριαμβευτής και η Αρχή της Αβεβαιότητας παρέμεινε ακέραιη. (Powers, 1991, σελ. 193). Το επιχείρημα του Einstein στο κουτί φωτονίων καταρρίπτεται μέσα στο φυσικό πλαίσιο που ο ίδιος είχε θεμελιώσει (Pais, 1979).

Μετά και από αυτή την αποτυχημένη προσπάθεια του Einstein να υπονομεύσει την κοπενχαγιανή ερμηνεία της κβαντομηχανικής έπαψε να προσπαθεί να δείξει ότι η Αρχή της Αβεβαιότητας ήταν λάθος και επικεντρώθηκε στο να αποδείξει ότι η νέα θεωρία δεν ήταν πλήρης. Και επομένως δεν μπορεί να απεικονίζει την φυσική πραγματικότητα σε όλη της την έκταση. Τα επόμενα χρόνια ελάχιστες ήταν οι φορές που οι δύο πρωταγωνιστές της διαμάχης επικοινωνήσαν άμεσα μεταξύ τους.

2.4.3 Το παράδοξο EPR

Βρισκόμαστε πια στο 1935, η ερμηνεία της Κοπενχάγης είναι το νέο επιστημονικό καθεστώς στη φυσική και οι επιστήμονες προσπαθούν να εφαρμόσουν τη νέα κβαντομηχανική στον ατομικό και το μοριακό μικρόκοσμο αλλά και μέσα στους πυρήνες. Ο Einstein ωστόσο, που ακόμη δεν είχε αποδεχτεί τον εννοιολογικό πυρήνα της Κβαντομηχανικής και την θεμελιώδη πιθανοκρατία, μαζί με τους Podolsky και Rosen δημοσίευσαν μια εργασία που έχει μείνει γνωστή ως το «παράδοξο EPR» από τα αρχικά των ονομάτων τους. Ο αμερικάνος Rosen 25 ετών φτάνει από το MIT και είναι υπεύθυνος για την συγγραφή του τελικού άρθρου και ο ρώσος Podolsky που είχε ξανασυνεργαστεί με τον Einstein στο Caltech αναλαμβάνει τους αναγκαίους μαθηματικούς υπολογισμούς. Με αυτή την εργασία που είχε έκταση μόλις τέσσερις σελίδες και δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Physical Review η διαμάχη του Einstein με τον Bohr ξεκινά μια καινούρια φάση. Μάλιστα, το νοητικό πείραμα που περιέγραφε ο Einstein σ' αυτή είχε την διαρκέστερη επίδραση και έφερε τον Bohr σε πραγματική αμηχανία.

Στην αρχή του άρθρου οι EPR ορίζουν τις δύο προϋποθέσεις για να είναι μια φυσική θεωρία επιτυχημένη. Πρώτον, να είναι ορθή και δεύτερον να είναι πλήρης. Η κβαντομηχανική επαληθεύει την πρώτη προϋπόθεση αφού οι θεωρητικές της προβλέψεις και τα συμπεράσματά της είναι σε αντιστοιχία με τα πειράματα. Αυτό που θέλουν να εξετάσουν είναι αν ισχύει για την κβαντομηχανική η δεύτερη προϋπόθεση, δηλαδή αν είναι πλήρης. Και σκοπός τους είναι να αποδείξουν την ύπαρξη «στοιχείων της φυσικής πραγματικότητας» (στοιχείο φυσικής πραγματικότητας: φυσική ποσότητα που μπορούμε να προβλέψουμε με βεβαιότητα χωρίς να διαταράξουμε το σύστημα) που η κβαντική μηχανική αδυνατεί να καλύψει, άρα δεν είναι μια πλήρης θεωρία. (Kumar, 2018, σελ. 443)

Το νοητικό πείραμα που παρουσίασαν οι EPR ήταν το παρακάτω. Δύο σωματίδια αλληλεπιδρούν για λίγο και έπειτα απομακρύνονται μεταξύ τους. Σε μια πιο σύγχρονη εκδοχή όπως την επινόησε ο Bohm το 1951- , ένα αρχικά ακίνητο σωματίδιο (με spin μηδέν) κάποια στιγμή διασπάται σε δύο άλλα που αρχίζουν να κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις και λόγω της Αρχής Διατήρησης της Στροφορμής αποκτούν αντίθετα spin. Εάν το ένα σωματίδιο του ζεύγους κινείται δεξιόστροφα, τότε το άλλο θα κινείται αριστερόστροφα και το αντίθετο. Στην πραγματικότητα, τα σωματίδια βρίσκονται σε κατάσταση σύμπλεξης όσο κι αν απομακρυνθούν. Η μέτρηση της κατάστασης του ενός καθορίζει ακαριαία την κατάσταση του άλλου. Ο Einstein, λοιπόν, μαζί με τους συνεργάτες του προσπαθεί να αποδείξει ότι είτε η κβαντομηχανική παραβιάζει την Αρχή της τοπικότητας καθώς φαινόταν να υπονοεί την

ύπαρξη μιας δράσης εξ αποστάσεως ή δεν μπορεί να θεωρηθεί μια πλήρης θεωρία περιγραφής της φυσικής πραγματικότητας.

Αν κάποια στιγμή μετρήσουμε την ορμή-ή το spin του πρώτου σωματιδίου στη δεύτερη διατύπωση του νοητικού πειράματος- του πρώτου σωματιδίου με την εφαρμογή της Αρχής Διατήρησης της Ορμής μπορούμε με ακρίβεια να πούμε την ορμή του δεύτερου σωματιδίου χωρίς να το διαταράξουμε. Άρα η ορμή του δεύτερου είναι στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας σύμφωνα με τους EPR. Με την ίδια λογική και η θέση του δεύτερου είναι στοιχείο της φυσικής πραγματικότητας αφού μπορούμε να την υπολογίσουμε με ακρίβεια και χωρίς να το διαταράξουμε, έμμεσα μετρώντας την θέση του πρώτου σωματιδίου. Οι EPR δεν έκαναν προσπάθεια να χρησιμοποιήσουν το νοητικό τους πείραμα εναντίον της Αρχής της Αβεβαιότητας. Αντίθετα, υποστήριζαν ότι η ορμή και η θέση μπορούν να έχουν καθορισμένη υπόσταση ως στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας ανεξάρτητα από την παρατήρηση ενώ στην κβαντική μηχανική το σωματίδιο δεν μπορεί να κατέχει συγχρόνως και τις δύο ιδιότητες, δηλαδή η θεωρία αδυνατεί να καλύψει κάποια στοιχεία της πραγματικότητας και επομένως δεν συνιστά, μια πλήρη θεωρία. (Kumar, 2018, σελ. 446)

Εξάλλου, στο νοητικό πείραμα που περιγράφουν οι EPR μετρώντας μια ιδιότητα του ενός σωματιδίου επηρεάζουμε ακαριαία την αντίστοιχη ιδιότητα του άλλου σωματιδίου του ζεύγους που μπορεί να βρίσκεται πολύ μακριά. Πρόκειται για την «αλλόκοτη δράση εξ αποστάσεως» όπως ονόμασε το φαινόμενο ο Einstein και έμεινε γνωστό ως το παράδοξο EPR. Φυσικά, δεν υπάρχει κάποιο παράδοξο, ούτε και παραβιάζεται η θεωρία της σχετικότητας. Αυτό που ο Einstein χαρακτήρισε spooky action at a distance ήταν μια εφαρμογή της κατάρρευσης της κυματοσυνάρτησης σε μια μέτρηση. Η Ψ περιγράφει ένα κύμα πιθανότητας και όχι φυσικό κύμα, οπότε η στιγμιαία κατάρρευσή της με την μέτρηση (μετράμε π.χ. την ορμή του πρώτου σωματιδίου και αμέσως γνωρίζουμε την ορμή του δεύτερου) δεν παραβιάζει την Αρχή της Σχετικότητας αφού δεν υπάρχει ακαριαία μεταφορά ενέργειας. (Τραχανάς, 2025, σελ. 194-197)

Μετά την δημοσίευση του άρθρου των EPR όλοι οι επιστήμονες υποστηρικτές της κβαντικής θεωρίας βρέθηκαν σε κατάσταση συναγερμού προκειμένου να υπερασπιστούν την Ερμηνεία της Κοπενχάγης. Ο Bohr άφησε κατά μέρος όλες τις άλλες ασχολίες του και για έξι εβδομάδες μέρα και νύχτα βάλθηκε να εξετάζει διεξοδικά το νοητικό πείραμα των EPR προκειμένου να ανακαλύψει πού έκανε το λάθος ο Einstein. Ωστόσο, η αντίκρουση των επιχειρημάτων των EPR αποδεικνυόταν δύσκολη υπόθεση.

Ο Bohr απάντησε στο πείραμα EPR υπερασπιζόμενος την Αρχή της Συμπληρωματικότητας και τον ολιστικό χαρακτήρα των φαινομένων στην κβαντομηχανική. (Powers, 1991, σελ. 199). Υποστήριξε πως οι ενδείξεις που παρουσίαζε ο Einstein για να υποστηρίξει ότι η κβαντομηχανική δεν ήταν πλήρης θεωρία δεν ήταν αρκετά ισχυρές. Η κβαντική περιγραφή είναι πλήρης εφόσον λαμβάνει υπόψη τον αναπόσπαστο ρόλο της πειραματικής διάταξης. Αν γνωρίζουμε με σαφήνεια την πειραματική διάταξη και κάνουμε στη συνέχεια την παρατήρηση, τότε μπορούμε να μιλάμε για ένα αδιαίρετο σύνολο, το «φαινόμενο». (Bohr, 1949, σελ. 234) Εγκατέλειψε όμως την «διαταραχή» του αντικειμένου παρατήρησης ως συνέπεια της πράξης της μέτρησης (Heisenberg, 1971, σελ. 105) κάτι στο οποίο είχε βασιστεί πολλές φορές προκειμένου να αποδομήσει τα παλιότερα νοητικά πειράματα του Einstein. Σύμφωνα με τον Bohr προκειμένου να προσδιοριστούν τα στοιχεία της φυσικής πραγματικότητας των EPR σημαντικό ρόλο έπαιζε η μετρητική συσκευή. Για παράδειγμα, χρησιμοποιώντας μετρητική συσκευή που μετράει την θέση του πρώτου σωματιδίου στο νοητικό πείραμα και επομένως επιτρέπει τον ακριβή υπολογισμό της θέσης

του δεύτερου σωματιδίου την ίδια στιγμή αποκλείει αυτόματα την μέτρηση της ορμής του πρώτου και τον υπολογισμό της ορμής του δεύτερου. Ακόμη, οι ιδιότητες του δεύτερου σωματιδίου ορίζονται από την μέτρηση και την μετρητική συσκευή του πρώτου. (Kumar, 2018, σελ. 450-455)

Το άρθρο των EPR, βασισμένο στα αξιώματα της τοπικότητας και της διαχωρισιμότητας, εκφράζει την πεποίθηση του Einstein για μια αντικειμενική πραγματικότητα ανεξάρτητη από τον παρατηρητή. Όμως, σύμφωνα με την Ερμηνεία της Κοπενχάγης οι ιδιότητες και η ίδια η υπόσταση των σωματιδίων δεν υπάρχουν πριν από την πράξη της μέτρησης. Η αλλαγή της οπτικής που επέβαλε η κβαντική μηχανική ήταν ριζική. Και αυτός ο γύρος της διαμάχης μπορούμε να πούμε ότι τελείωσε με νικητή τον Bohr.

Το 1937 οι Einstein και Bohr συναντήθηκαν στο Princeton όπου ο Bohr προσπάθησε και πάλι να πείσει τον Einstein για την πληρότητα της κβαντομηχανικής, όμως όπως επισημαίνει ο Valentine Bargmann, βοηθός του Einstein, οι δύο επιστήμονες απλά «αναλώθηκαν σε παράλληλους μονολόγους». Το 1939, όταν ο Bohr επέστρεψε στο Princeton, οι σχέσεις μεταξύ τους ήταν φιλικές, ήταν όμως αναμενόμενο η συνεχής διαφωνία για τα ζητήματα της κβαντικής φυσικής να δημιουργήσει μια ψυχρότητα μεταξύ τους ώστε όταν συναντιόντουσαν να μη μιλούν πλέον για θέματα φυσικής. Όταν η αμερικανική κυβέρνηση το 1941 αποφάσισε την κατασκευή ατομικής βόμβας-Πρόγραμμα Μανχάταν-δεν ζητήθηκε στον Einstein να εργαστεί σ' αυτό, αλλά ζήτησαν στον Bohr να συμμετέχει. Το 1943, ο Bohr πέρασε από το Princeton στη διάρκεια του ταξιδιού του προς το Νέο Μεξικό που κατασκευαζόταν η βόμβα, και δείπνησε με τον Einstein και τον Pauli.

Μετά τον πόλεμο ο Bohr επισκέφτηκε το Princeton αρκετές φορές και ο Einstein ήταν ξανά πρόθυμος να μιλήσει για το νόημα της κβαντικής μηχανικής. Μάλιστα, ο Einstein έδωσε άδεια στον Bohr να χρησιμοποιεί το χώρο εργασίας του, το παλιό γραφείο του και εκείνος είχε μετακινηθεί σε ένα γειτονικό, μικρότερο γραφείο. Όπως αναφέρει ο νεαρός ολλανδός φυσικός Abraham Pais, ο Bohr εργαζόταν πάνω σε ένα άρθρο προς τιμήν του Einstein για τα γενέθλιά του που ήθελε να εκφράσει την ευγνωμοσύνη του και να δηλώσει ότι του χρωστούσε κάποιες από τις εμπνεύσεις του. Υπαγόρευε, λοιπόν, στον Pais και επαναλάμβανε την ίδια σκέψη αρκετές φορές. Κάποια στιγμή κοιτούσε έξω απ' το παράθυρο επαναλαμβάνοντας την λέξη «Einstein» απορροφημένος ώστε δεν αντιλήφθηκε την είσοδο του Einstein στο γραφείο. Όταν γύρισε προς το μέρος τους η έκπληξή του ήταν μεγάλη. Έμοιαζε σαν να τον καλούσε κι εκείνος εμφανίστηκε. Ο Einstein εξήγησε τον σκοπό της επίσκεψής του, να πάρει λίγο καπνό, και όπως διηγείται ο Pais ξέσπασαν σε γέλια.

Στις 18 Απριλίου του 1955 ο Einstein πέθανε. Ο Bohr απέτισε φόρο τιμής στον Einstein λέγοντας πως η ανθρωπότητα θα είναι πάντα υποχρεωμένη απέναντί του που αφαίρεσε τα εμπόδια περί απόλυτου χώρου και χρόνου και έδωσε νέα εικόνα στον κόσμο πέρα από τα πιο τολμηρά όνειρα του παρελθόντος. Αλλά και μετά τον θάνατο του, ο Einstein βρισκόταν στο επίκεντρο της σκέψης του Bohr. Όταν κάποιο θεμελιώδες ζήτημα φυσικής τον απασχολούσε αναρωτιόταν εσωτερικά ποια θα ήταν η άποψη του Einstein πάνω στο συγκεκριμένο θέμα. Το 1962, στις 17 Νοεμβρίου, ο Bohr απεβίωσε. Στον μαυροπίνακα του γραφείου του το σχέδιο που είχε σχεδιάσει το προηγούμενο βράδυ ήταν το νοητικό πείραμα με το κουτί φωτονίων του Einstein. (Kumar, 2018, 466-76 και Ανδρέας Ιωάννου Κασσέτας, Einstein και Bohr)

Η διαμάχη μεταξύ Einstein και Bohr για τον εννοιολογικό πυρήνα της κβαντομηχανικής και την φύση της πραγματικότητας εντοπίζεται στην αντίθεση μεταξύ μιας ρεαλιστικής και μιας μη ρεαλιστικής ερμηνείας της κβαντομηχανικής. Ο Einstein εκφράζει τον επιστημονικό ρεαλισμό και την ύπαρξη μιας αντικειμενικής πραγματικότητας ανεξάρτητα από τον παρατηρητή την οποία πρέπει να αναζητήσουμε. Πρεσβεύει μια κλασική εικόνα του κόσμου, όπου τα φυσικά μεγέθη έχουν καθορισμένες τιμές, ανεξάρτητα από την πειραματική συσκευή που χρησιμοποιείται και επιμένει στην αιτιοκρατία και την τοπικότητα.

Από την άλλη ο Bohr δίνει έμφαση στη συμπληρωματικότητα και τονίζει ότι η γνώση των φαινομένων είναι αναπόσπαστα συνδεδεμένη με την πειραματική διάταξη και τις συνθήκες παρατήρησης. Μας λέει πως «δεν υπάρχει κβαντικός κόσμος», αλλά μια «αφηρημένη κβαντομηχανική περιγραφή». Υποστηρίζει την θεμελιώδη πιθανοκρατία της κβαντομηχανικής και αρνείται την απόλυτη αιτιοκρατία του κλασικού κόσμου.

Αυτή η διαμάχη λειτούργησε ως παραγωγικό πλαίσιο για τις μετέπειτα εξελίξεις στην επιστήμη της φυσικής.

2.5 Ανισότητες Bell

Το 1964 ο John Bell εστίασε την προσοχή του στο «παράδοξο EPR» και στο φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης και κατάλαβε ότι αυτό ήταν το ιδανικό σύστημα που θα οδηγούσε στη διάκριση της κβαντομηχανικής από κάθε άλλη εναλλακτική δυνατή θεωρία κρυμμένων μεταβλητών που αποδίδουν σε κλασικού τύπου άγνοια -ελλιπή γνώση- τις πιθανότητες που παρατηρούνται στο μικρόκοσμο. Μια διαμάχη για την φύση της πραγματικότητας ανάμεσα στον Einstein και τον Bohr που είχε πάρει φιλοσοφικό πια χαρακτήρα, ο Bell κατάφερε να την μετατρέψει σε ένα ερώτημα που θα μπορούσε να απαντηθεί πειραματικά. Ανακάλυψε ένα μαθηματικό θεώρημα η εφαρμογή του οποίου θα μπορούσε να μας πει ποια από τις δύο ανταγωνιστικές θεωρίες ήταν η σωστή.

Στην αρχή του έργου του ο Bell επηρεάστηκε από τον David Bohm, έναν από τους σπουδαιότερους θεωρητικούς φυσικούς του εικοστού αιώνα. Το 1951 ο Bohm είχε εκδώσει το βιβλίο του με τίτλο *Κβαντική Θεωρία* στο οποίο μελετούσε με λεπτομέρεια το νοητικό πείραμα των EPR και την ερμηνεία της κβαντομηχανικής. Ενώ αρχικά συντασσόταν με την επικρατούσα άποψη της Κοπενχάγης, στην πορεία, η λεπτότητα και η οξυδέρκεια του πειράματος των EPR τον οδήγησε στο να την αμφισβητήσει. Μετά από συζητήσεις με τον Einstein έγραψε δύο άρθρα που δημοσίευσε στο *Physical Review* στα οποία παρουσίαζε μια εναλλακτική νέα ερμηνεία της κβαντομηχανικής που από μαθηματική άποψη έμοιαζε με το μοντέλο του κύματος-οδηγού του de Broglie.

Όταν ο Bell μελέτησε τα άρθρα του Bohm αναρωτήθηκε γιατί να έχει αποκλειστεί η ερμηνεία του ως αδύνατη. Ο λόγος πρέπει να αναζητηθεί αρκετά χρόνια νωρίτερα, το 1932, όταν ο John Von Newmann, διακεκριμένος μαθηματικός, εξέδωσε ένα βιβλίο με τίτλο *Μαθηματικά θεμέλια της κβαντικής μηχανικής*. Σε αυτό παρουσίαζε μια μαθηματική απόδειξη σύμφωνα με την οποία η κβαντομηχανική δεν θα μπορούσε να προσεγγιστεί με την εισαγωγή κρυμμένων μεταβλητών και να διατυπωθεί ξανά ως μια αιτιοκρατική θεωρία. Λόγω των εξαιρετικών του ικανοτήτων στα μαθηματικά και της αναγνώρισης του, οι περισσότεροι επιστήμονες της εποχής αποδέχτηκαν το επιχείρημά του. Είκοσι χρόνια αργότερα ο Bohm έκρινε ότι η προσέγγιση του Von Newmann ήταν εσφαλμένη. Ωστόσο, ο Bell ήταν αυτός που απέδειξε ότι μια παραδοχή της επιχειρηματολογίας του Von Newmann ήταν λάθος και

επομένως η απόδειξή του ότι καμία θεωρία κρυμμένων μεταβλητών δεν μπορεί να αντικαταστήσει την κβαντική μηχανική δεν ευσταθούσε.

Φτάνουμε λοιπόν στο 1964 όταν ο Bell δημοσίευσε την ιστορική εργασία του. Σ' αυτή έδειξε πως η συσχέτιση των περιστροφών σε ένα σύμπλεκτο ζεύγος σωματιδίων σαν αυτό που περιέγραφαν οι EPR και αργότερα ο Bohm, αν προσεγγιστεί με κλασικό μηχανισμό και την εισαγωγή των λεγόμενων κρυμμένων μεταβλητών, ικανοποιεί μια ανισότητα (ανισότητα Bell). Στη συνέχεια αυτή η ανισότητα γενικεύτηκε και για σύμπλεκτο ζεύγος φωτονίων. Συνολικά, οι μαθηματικές σχέσεις που εκφράζουν τα όρια συσχέτισης των τοπικών ρεαλιστικών θεωριών ονομάστηκαν «ανισότητες Bell». (Powers, 1991, σελ. 208)

Άρα αυτό που θα ακολουθούσε ήταν ο πειραματικός έλεγχος αυτών των ανισοτήτων. Με την εκτέλεση ενός αποφασιστικού πειράματος θα μπορούσε η κβαντομηχανική, ως πλήρης και ορθή θεωρία να διακριθεί πειραματικά από ολόκληρες κλάσεις θεωριών που αποδίδουν την πιθανοκρατική συμπεριφορά στο μικρόκοσμο σε ατελή γνώση. Αν ίσχυε η ανισότητα Bell ο Einstein που υποστήριζε ότι η κβαντική μηχανική δεν είναι πλήρης θα είχε δίκιο, ενώ αν παραβιαζόταν η ανισότητα το δίκιο θα ήταν με το μέρος του Bohr. Τα πειράματα έγιναν και έδειξαν ότι η κβαντομηχανική συσχέτιση των περιστροφών του ζεύγους σωματιδίων ήταν πολύ πιο ισχυρή από αυτή που προέβλεπε ο κλασικός μηχανισμός και η ανισότητα Bell παραβιαζόταν. Το «δικαστήριο της φύσης», το πείραμα έδειξε ότι η κοπενχαγιανή κβαντομηχανική είναι η ορθή θεωρία και οι κβαντομηχανικές πιθανότητες είναι θεμελιώδεις. (Τραχανάς, 2025, σελ. 199).

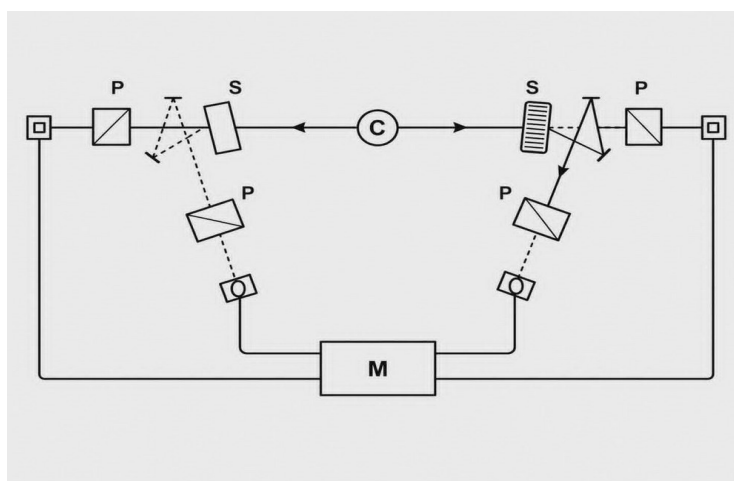
Ο Bell αρχικά μελέτησε το νοητικό πείραμα του Bohm με το κβαντικό spin. Ένα σωματίδιο με αρχικό spin μηδέν διασπάται και τα δύο ηλεκτρόνια που προκύπτουν αποκτούν αντίθετο spin και αρχίζουν να κινούνται προς αντίθετες κατευθύνσεις. Όταν βρεθούν πολύ μακριά με ανιχνευτές spin μετριέται το spin του καθενός και αναζητούνται συσχετίσεις από τις ταυτόχρονες μετρήσεις. Σε μια προσπάθεια να διασώσει την τοπικότητα και να απορρίψει την «μυστήρια δράση από απόσταση» που κατέκρινε ο Einstein ο ίδιος λέει: «ό,τι κι αν δοκίμασα, δεν δούλεψε».

Η λύση που σκέφτηκε ήταν η αλλαγή του σχετικού προσανατολισμού των ανιχνευτών του spin των δύο σωματιδίων του ζεύγους. Αν οι ανιχνευτές του spin τοποθετηθούν παράλληλα, τότε η συσχέτιση που θα προκύψει θα είναι 100%, δηλαδή απόλυτη. Αυτό δεν μας εκπλήσσει αφού εφόσον το αρχικό σωματίδιο έχει spin μηδέν, αν το spin του ενός ηλεκτρονίου μετρηθεί και είναι «πάνω», τότε ο ανιχνευτής θα ανιχνεύσει το δεύτερο ηλεκτρόνιο να έχει spin «κάτω». Αν στρέψουμε λίγο τον έναν ανιχνευτή, ώστε να μετράμε το spin του ενός ηλεκτρονίου ως προς έναν άξονα και το spin του δεύτερου ως προς άλλο άξονα λίγο στραμμένο ως προς τον πρώτο, θα υπάρχει συσχέτιση αλλά δεν θα είναι απόλυτη. Θα είναι όμως μεγαλύτερη από οποιαδήποτε συσχέτιση θα προέβλεπε ένας κλασικός μηχανισμός. Η αύξηση της γωνίας των δύο ανιχνευτών έχει συνέπεια την μείωση του βαθμού συσχέτισης του spin των δύο ηλεκτρονίων του ζεύγους. Φυσικά επρόκειτο για ένα νοητικό πείραμα, αλλά αν ήταν δυνατό να μετρηθούν οι συσχετίσεις του spin στο σύμπλεκτο ζεύγος ηλεκτρονίων για κάποιο προσανατολισμό των ανιχνευτών και μετά να ξαναμετρηθούν με διαφορετική διάταξη των ανιχνευτών θα μπορούσε κάποιος να συμπεράνει αν οι προβλέψεις των θεωριών κρυμμένων μεταβλητών ή της κβαντικής μηχανικής ήταν οι σωστές. Ο Bell κατέληξε στο περίφημο θεώρημά του σύμφωνα με το οποίο καμία θεωρία που βασίζεται στην τοπικότητα και στην εισαγωγή κρυμμένων μεταβλητών δεν μπορεί να αναπαράγει προβλέψεις και τις συσχετίσεις της κβαντικής μηχανικής. (Kumar, 2018, σελ. 501)

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στη συνέχεια όπου τέθηκε υπό δοκιμή η ανισότητα Bell επιβεβαίωσαν τις κβαντικές προβλέψεις. Το 1969 ο John Clauser μαζί με τους Horn, Shimony και Holt σκέφτηκαν ένα πείραμα με το οποίο θα μπορούσε να ελεγχθεί η ανισότητα Bell σε πραγματικό εργαστήριο. Με βοηθό τον Stuart Freedman θέρμαναν άτομα ασβεστίου τα οποία διεγείρονταν και όταν κάθε ηλεκτρόνιο ξαναγύριζε στην θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποταν ένα ζεύγος φωτονίων. Αυτά κινούνταν σε αντίθετες κατευθύνσεις και με ανιχνευτές μπορούσαν να μετρηθούν οι πολώσεις τους. Συγκεκριμένα, αρχικά οι προσανατολισμοί των δύο ανιχνευτών σχημάτιζαν γωνία $22,5^\circ$, ενώ στο δεύτερο σύνολο μετρήσεων $67,5^\circ$. Η κβαντομηχανική προέβλεπε μεγαλύτερο αριθμό φωτονίων να διέρχονται από τα πολωτικά φίλτρα, μεγαλύτερα επίπεδα φωτονιακών συσχετίσεων απ' ότι αν η πόλωση τους καθοριζόταν από θεωρίες κρυμμένων μεταβλητών. Πήραν μετρήσεις για 200 ώρες και κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι η ανισότητα Bell παραβιάζόταν. Επομένως η κοπενχαγιανή ερμηνεία του Bohr για την κβαντική μηχανική ήταν σωστή και η τοπική πραγματικότητα της οποίας υποστηρικτής ήταν ο Einstein αποδεικνυόταν εσφαλμένη. (Kumar, 2018, σελ. 506)

Τα αποτελέσματα του πειράματος των Clauser και Freedman επιβεβαιώθηκαν και με επιπλέον πειράματα από τους Alain Aspect και Anton Zeilinger. Ο Aspect και οι συνεργάτες του επανέλαβαν το πείραμα του Clauser με μεγαλύτερη ακρίβεια χρησιμοποιώντας πιο εξελιγμένη τεχνολογία, λέιζερ και υπολογιστές και μετρώντας πολύ μεγαλύτερο αριθμό σύμπλεκτων φωτονίων.

Συγκεκριμένα, τα δύο φωτόνια του ζεύγους που παράγονταν από διεγερμένα άτομα ασβεστίου κινούνταν σε αντίθετες κατευθύνσεις για έξι μέτρα και έπεφταν πάνω σε ζεύγος οπτικών διακοπών (S). Κάθε διακόπτης είτε έστελνε το φωτόνιο απευθείας να περάσει από έναν πολωτή (P) είτε με τη βοήθεια ζεύγους καθρεφτών το φωτόνιο ανακλόνταν και περνούσε από έναν δεύτερο πολωτή ο οποίος ήταν τοποθετημένος σε διαφορετική γωνία από τον πρώτο. Οι διακόπτες είχαν ρυθμιστεί να δουλεύουν σε ασυσχέτιστους ρυθμούς κάτι το οποίο είχε το ίδιο αποτέλεσμα με την τυχαία αλλαγή κατάστασης των πολωτών. Στη συνέχεια υπήρχαν ανιχνευτές (D) οι οποίοι συνδέονταν με έναν καταγραφέα συμπτώσεων (M). Περιοδικά αφαιρούνταν ο ένας ή και οι δύο πολωτές. Ο καταγραφέας κατέγραφε τις συμπτώσεις για χρονικά διαστήματα 12.000s κάθε φορά. Ο ρυθμός σύμπτωσης, συσχέτισης των φωτονίων παραβίαζε τις ανισότητες Bell, ήταν πέντε φορές πιο μεγάλος από το μέγιστο που επέτρεπαν, βρισκόταν όμως σε «εξαιρετική»-όπως τονίζει ο Aspect (Aspect, 1982, σελ. 94)-συμφωνία με τις προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής. (Powers, 1991, σελ. 208)



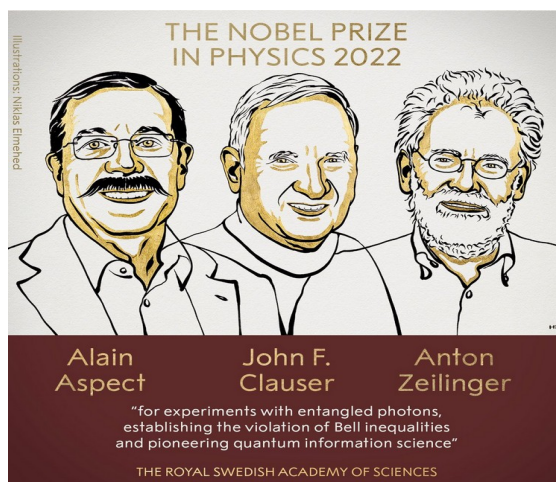
Εικόνα 17: Το πείραμα του Aspect (Powers, σελ. 209)

Όταν ο Bell κατασκεύασε την ανισότητά του είχε στο μυαλό του δύο πράγματα. Πρώτον, τον ρεαλισμό, ότι δηλαδή τα φυσικά συστήματα έχουν καθορισμένες τιμές για διάφορες ιδιότητες, όπως το spin, πριν και ανεξάρτητα από την μέτρηση και υπάρχει μια πραγματικότητα ανεξάρτητη από τον παρατηρητή. Δεύτερον, την διατήρηση της τοπικότητας, ότι τίποτα δεν μπορεί να διαδοθεί ακαριαία, καμία επίδραση δεν μπορεί να διδοθεί ταχύτερα από το φως. Η παραβίαση της ανισότητας όπως αποδείχθηκε πειραματικά από τους Clauser και Aspect οδηγεί στην απόρριψη τουλάχιστον μιας από τις δύο παραπάνω υποθέσεις. Ο Bell διάλεξε να αφήσει την τοπικότητα γιατί δεν μπορούσε να φανταστεί μια μη ρεαλιστική άποψη για την πραγματικότητα. (Davies και Brown, 1986, σελ. 50) Το συμπέρασμά του βέβαια ήταν πως η άποψη του Einstein για τη φύση της πραγματικότητας «δεν ήταν βιώσιμη» (Davies και Brown, 1986, σελ. 47) ωστόσο πίστευε ότι η κβαντομηχανική ήταν μια προσωρινή θεωρία που στο μέλλον θα αντικαθιστούνταν από μια άλλη καλύτερη. (Kumar, 2018, σελ. 509)

Από την άλλη εμείς θα μπορούσαμε να πούμε ότι η εμμονή στον ρεαλισμό είναι αυτή που μπορεί να δημιουργεί το πρόβλημα και να στραφούμε στον ολιστικό αγνωστικισμό του Bohr. Σύμφωνα με αυτόν, τα ηλεκτρόνια και τα φωτόνια δεν διαθέτουν κάποιο spin ή πόλωση αντίστοιχα πριν από την διαδικασία της μέτρησης. Αντίθετα, υπάρχουν σε ένα καθεστώς υπέρθεσης καταστάσεων. Μόνο όταν γίνει μια μέτρηση, η οποία θα επιφέρει κατάρρευση της κυματοσυνάρτησης θα μπορούσαμε να πούμε για παράδειγμα ότι το ένα ηλεκτρόνιο του ζεύγους έχει π.χ. spin πάνω και άρα το άλλο ηλεκτρόνιο που βρίσκεται σε σύμπλεξη με το πρώτο θα έχει αντίθετο spin, δηλαδή spin κάτω, ακόμα κι αν βρίσκεται πολύ μακριά.

Το 2003 ο Anthony Legget δημοσίευσε μια νέα ανισότητα τροποποιώντας το θεώρημα Bell αφού υπέθεσε την ύπαρξη ακαριαίων δράσεων ανάμεσα στα σωματίδια που βρίσκονται σε σύμπλεξη, δηλαδή ότι η πραγματικότητα είναι μη τοπική. Πρόκειται για μια πιο αυστηρή δοκιμασία και η διαφορά με τις ανισότητες Bell έγκειται στο γεγονός ότι ενώ η παραβίαση της ανισότητας Bell αποκλείει τον τοπικό ρεαλισμό στην κβαντομηχανική, με την ανισότητα Legget γίνεται προσπάθεια να αποκλειστούν ακόμη και μη τοπικές θεωρίες που υποθέτουν ότι τα σωματίδια έχουν προκαθορισμένες ιδιότητες. Πειράματα που διεξήχθησαν το 2007 και το 2010 από από μια ομάδα αυστριακών και πολωνών επιστημόνων με επικεφαλής τους

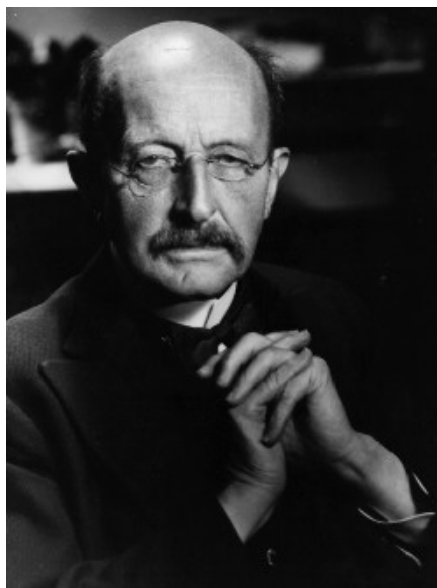
Markus Aspelmeyer και Anton Zeilinger στα οποία ελέγχθηκαν οι συσχετίσεις σε ζεύγη σύμπλεκτων φωτονίων απέδειξαν την παραβίαση της ανισότητας Legget. Έτσι αποκλείστηκε ένα υποσύνολο μη τοπικών θεωριών κρυμμένων μεταβλητών και επιβεβαιώθηκαν για άλλη μια φορά οι προβλέψεις της κβαντικής μηχανικής. (Kumar, 2018, σελ. 515)



Τα πειράματα του Clauser και η επιπλέον επιβεβαίωσή τους με άλλα πειράματα αργότερα από τους Aspect και Zeilinger απέδειξαν χωρίς αμφιβολία ότι στην διαμάχη Einstein-Bohr για τη φύση της πραγματικότητας νικητής είχε βγει ο Bohr με την εγγενώς πιθανοκρατική συμπεριφορά των φαινομένων του μικροκόσμου. Ο αντίκτυπος αυτών των πειραμάτων, ωστόσο, δεν αναγνωρίστηκε αμέσως αλλά χρειάστηκε να περάσουν 50 χρόνια από τη διατύπωση της Ανισότητας Bell μέχρι η σουηδική Ακαδημία να βραβεύσει τους τρεις πειραματικούς φυσικούς και να τους απονείμει το βραβείο Νόμπελ το 2022!

3.ΒΙΟΓΡΑΦΙΕΣ ΤΩΝ ΠΡΩΤΑΓΩΝΙΣΤΩΝ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΕΠΑΝΑΣΤΑΣΗΣ

3.1 Max Planck



Ο Max Planck γεννήθηκε το 1858 στο Κίελο της Γερμανίας. Οι γονείς του ήταν ο Julius Wilhelm-καθηγητής συνταγματικού δικαίου- και η Emma Patzig. Η οικογένειά του ήταν ευκατάστατη και πολλοί είχαν πανεπιστημιακή μόρφωση και αυτή την ακαδημαϊκή παράδοση συνέχισε και ο ίδιος και στράφηκε προς τις φυσικές επιστήμες. Η άλλη μεγάλη του αγάπη ήταν η μουσική. Ήταν ταλαντούχος πιανίστας και συνέθετε τραγούδια και όπερες. Φοίτησε στο Γυμνάσιο Μαξιμιλιανού, φημισμένο σχολείο του Μονάχου και στη συνέχεια σε ηλικία 16 ετών πήγε στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου. Παρά την συμβουλή του πανεπιστημιακού καθηγητή του ότι «τίποτε δεν έμενε να ανακαλυφθεί στη φυσική» και επομένως καλύτερα να μην ασχοληθεί κάποιος μ'αυτή -ήταν μια κακή συμβουλή- ο Planck πήγε στο Πανεπιστήμιο του Βερολίνου για να συνεχίσει τις σπουδές του στη φυσική. (Kumar, 2018, σελ. 32-3)

Στο Βερολίνο καθηγητές του υπήρξαν οι Helmholtz και Kirchhoff, αυτός που τον ενέπνευσε ωστόσο ήταν ο Clausius και οι εργασίες του στην Θερμοδυναμική. (Planck, 1949, σελ. 15-6) Και ειδικά στην θερμότητα και την εντροπία. Μετά από ένα χρόνο επέστρεψε στο Μόναχο και επέλεξε την θερμότητα ως πεδίο για ειδίκευση. Πάνω σ'αυτό ήταν η διδακτορική του διατριβή το 1879, η οποία όπως ο ίδιος διηγούνται αργότερα με πικρία «είχε μηδενική επίδραση» στους καθηγητές του της φυσικής. (Planck, 1949, σελ. 19). Η θερμοδυναμική ήταν το αντικείμενο της έρευνάς του αρχικά στην ακαδημαϊκή του καριέρα. (Heilbron, 2000, σελ. 10) Το 1880 έγινε Privatdozent στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου και το 1885 διορίστηκε έκτακτος καθηγητής στο Κίελο. Αργότερα, το 1889, ανέλαβε τη θέση του καθηγητή θεωρητικής φυσικής στο Βερολίνο με την υποστήριξη του Helmholtz, θέση που

νωρίτερα κατείχε ο Kirchhoff. Εκεί έμεινε ως το 1926. Στα καθήκοντά του ήταν και αυτό του συμβούλου θεωρητικής φυσικής στο γερμανικό επιστημονικό περιοδικό *Annalen der Physik*. (Kumar, 2018, σελ. 34-9)

Την εποχή εκείνη στο Βερολίνο βρισκόταν σε εξέλιξη ένα ερευνητικό πρόγραμμα για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος στο PTR επικεφαλής του οποίου ήταν ο Helmholtz. Ο Planck που η θερμοδυναμική ήταν η μεγάλη του αγάπη άρχισε να ασχολείται με το πρόβλημα του μέλανος σώματος όταν ο Wien ανακάλυψε το Νόμο μετατόπισης που φέρει το όνομά του και έδειξε την εξάρτηση της κατανομής της ακτινοβολίας από την θερμοκρασία. Στη συνεδρίαση της Γερμανικής Φυσικής Εταιρείας ο Planck παρουσίασε το Νόμο του για το φάσμα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος. (Planck, 1900a, σελ. 81) Στην εξαγωγή της εξίσωσής του σημαντικό ρόλο έπαιξε ο αυστριακός θεωρητικός φυσικός Ludwig Boltzmann. Λίγο αργότερα έκανε ίσως την σημαντικότερη ανακάλυψη στην ιστορία της επιστήμης, υπέθεσε ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν απορροφάται και εκπέμπεται συνεχώς όπως προέβλεπε η κλασική φυσική, αλλά σε μικροσκοπικά αδιαίρετα κομμάτια ενέργειας («στοιχεία ενέργειας») που τα ονόμασε «κβάντα» από την λατινική λέξη quantum. (Planck, 1900b, σελ. 81). Κάθε κβάντο έχει ενέργεια $h \cdot f$, όπου f η συχνότητά του και h μια σταθερά που πήρε το όνομά του και θα έπαιξε σπουδαίο ρόλο στην μετέπειτα εξέλιξη της κβαντικής θεωρίας που τώρα γεννιόταν. Ήταν τότε 42 ετών, σε αρκετά μεγαλύτερη ηλικία σε σχέση με την ηλικία που οι άλλοι επιστήμονες έκαναν τις σπουδαίες ανακαλύψεις τους. Για αυτή του την ανακάλυψη τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ το 1918.

Ο Planck δεν συμφιλιώθηκε ποτέ με την ιδέα του κβάντου την εισαγωγή του οποίου στη φυσική χαρακτήρισε «πράξη απελπισίας». Θεώρησε ότι είναι μια υπόθεση φορμαλιστικού χαρακτήρα χωρίς αληθινή φυσική σημασία. Στη συνέχεια της ζωής του, πιθανόν λόγω του εγγενούς συντηρητισμού του, προσπάθησε να το εξηγήσει με όρους της κλασικής φυσικής. (Τραχανάς, 2014). Για τον ίδιο λόγο ο Kumar τον ονομάζει «απρόθυμο επαναστάτη».

Ο Planck ήταν ένας άνθρωπος με συντηρητικές αρχές, πράος και φιλήσυχος και δύσκολο να αποδεχτεί νέες ανατρεπτικές ιδέες. Ήταν πολύ προσεκτικός, πριν διατυπώσει μια ιδέα του εξέταζε κάθε βήμα προσεκτικά. Αν όμως πίστευε ότι έχει δίκιο δεν άλλαζε εύκολα γνώμη. (Kumar, 2018, σελ. 26)

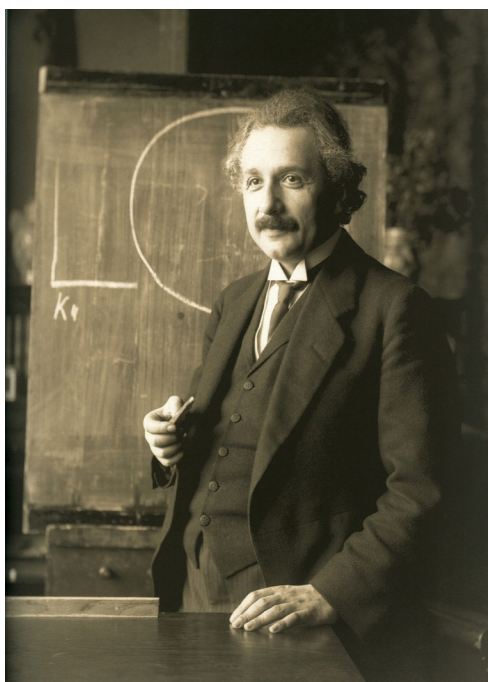
Κατά την περίοδο της ναζιστικής κυβέρνησης της Γερμανίας δέχτηκε κατηγορίες από ναζιστές συναδέλφους του όπως ο Stark ότι διδάσκει εβραϊκές θεωρίες όπως η θεωρία της Σχετικότητας. Η είσοδος των ναζί στον ακαδημαϊκό χώρο ήταν δυστυχώς γεγονός. Μάλιστα σε μια «μελέτη» του Hayptamt Wissenschaft-γραφείο ναζί για την επιστήμη- βρέθηκε στο γενεαλογικό δέντρο του Planck ότι ήταν κατά 1/16 εβραίος.

Ο Planck έκανε δύο γάμους. Το 1887 παντρεύτηκε την παιδική του φίλη Marie Merck με την οποία απέκτησε τέσσερα παιδιά. Δυστυχώς στην προσωπική του ζωή δεν στάθηκε τυχερός. Κατά τον Α Παγκόσμιο Πόλεμο σκοτώθηκε ο πιο μεγάλος του γιος, η κόρη του Γκρέτε πέθανε στην διάρκεια της γέννας του πρώτου της παιδιού και το ίδιο συνέβη και στην αδελφή της δύο χρόνια μετά. Η σύζυγός του απεβίωσε και αργότερα νυμφεύτηκε την Marga von Hoesslin με την οποία απέκτησε έναν γιο. Το 1945 ο γιος του Planck, Erwin, εκτελέστηκε από τους ναζί για την συμμετοχή του σε μια απόπειρα δολοφονίας του Χίτλερ. (NobelPrize.org)

Ο Planck έγινε μέλος της Πρωσικής Ακαδημίας Επιστημών το 1894 και μόνιμος γραμματέας της το 1912. Όταν όμως η ακαδημία έπαψε να είναι ανεξάρτητη και βρέθηκε υπό το Διπλωματική Εργασία

καθεστώς των ναζί,παραιτήθηκε και άρχισε να ταξιδεύει σε διάφορα μέρη και να δίνει ομιλίες.Την τελευταία περίοδο του πολέμου το σπίτι στο οποίο ζούσε με την οικογένειά του για 50 χρόνια στο Βερολίνο καταστράφηκε από αεροπορικούς βομβαρδισμούς μαζί και όλο το επιστημονικό του αρχείο.Κατέφυγε στο εξοχικό του και μετά στο Γκέτινγκεν.Μετά το τέλος του πολέμου η Γερμανία για να τον τιμήσει ίδρυσε το *Ίδρυμα Max Planck*,ένα από τα πιο σημαντικά επιστημονικά ερευνητικά ιδρύματα στον κόσμο. Πέθανε στο Γκέτινγκεν το 1947 σε ηλικία 89 ετών.

3.2 Albert Einstein



Ο Albert Einstein γεννήθηκε στο Ulm της Γερμανίας,πόλη στις όχθες του Δούναβη,το 1879.Λόγω μιας δυσμορφίας του κρανίου του καθώς και της καθυστερημένης έναρξης της ομιλίας του-μίλησε φυσιολογικά όταν έγινε 7 ετών-οι γονείς του ανησυχούσαν.Δύο χρόνια μετά την γέννησή του η οικογένεια απέκτησε άλλο ένα παιδί,την αδελφή του.Τα πρώτα χρόνια της ζωής του τα πέρασε στο Μόναχο εκεί που ο πατέρας του με τον θείο του διατηρούσαν μια επιχείρηση ηλεκτρικών ειδών.(Kumar,2018,σελ.67)

Στο καθολικό δημοτικό σχολείο που πήγαινε υπήρχε έντονος αντισημιτισμός κυρίως από τους συμμαθητές του-οι δάσκαλοί του ήταν γενικά φιλελεύθεροι χωρίς να κάνουν θρησκευτικές διακρίσεις-με αποτέλεσμα να έχει πολύ λίγους φίλους στο σχολείο.Αργότερα στην ζωή του χαρακτήρισε τον εαυτό του εκείνη την εποχή einspanner ,δηλαδή μοναχικό ταξιδευτή.Προτιμούσε τις μοναχικές ασχολίες και η αγαπημένη του ήταν να φτιάχνει ψηλούς πύργους από τραπουλόχαρτα.Βασικά στοιχεία του χαρακτήρα του ήταν το πείσμα και η παθιασμένη περιέργεια τα οποία τον βοήθησαν και εκείνη την περίοδο αλλά και αργότερα να

αποζητά συνεχώς απαντήσεις και να μην παραιτείται εύκολα από τις επιστημονικές του ιδέες.

Όταν έγινε εννιά ετών άρχισε να φοιτά στο Γυμνάσιο Luitpold. Παρόλο που η διδακτέα ύλη στρεφόταν περισσότερο στις ανθρωπιστικές επιστήμες και οι δάσκαλοί του χρησιμοποιούσαν κάποιες αυταρχικές μεθόδους, σε γενικές γραμμές είχε υψηλές βαθμολογίες στα μαθήματα. Στο σπίτι του έκανε ιδιαίτερα μαθήματα βιολιού. Όταν ο Einstein ήταν δέκα ετών γνώρισε τον Max Talmud, έναν πολωνό φοιτητή ιατρικής, που θα γινόταν ο μέντοράς του. Ο Talmud επισκεπτόταν το σπίτι των Einstein μια φορά την εβδομάδα και δειπνούσε μαζί τους. Βρήκε στον Einstein το αδελφό του πνεύμα, του έδινε βιβλία να διαβάσει και αυτός τον μύησε στην ευκλείδεια γεωμετρία.

Οι γονείς του Einstein δεν ήταν θρησκευόμενοι εβραίοι. Έτσι, τον μεγάλωσαν σε κλίμα ανεξιθρησκείας, ίσως και αγνωστικισμού. Η φοίτησή του όμως στο ρωμαιοκαθολικό σχολείο τον οδήγησε να αναπτύξει μια βαθιά θρησκευτικότητα. Όταν όμως άρχισε να μελετά επιστημονικά βιβλία αμφισβήτησε πολλές αναφορές της Βίβλου. (Kumar, 2018, σελ. 67-70)

Ενώ αρχικά η επιχείρηση του πατέρα του βρισκόταν σε άνθιση, με την επικράτηση του εναλλασσόμενου ρεύματος και την άνοδο μεγάλων εταιρειών ηλεκτρισμού που εξαγόραζαν τις μικρές επιχειρήσεις, η οικονομική τους κατάσταση χειροτέρευσε και η οικογένεια Einstein το 1894 μετακόμισε στο Μιλάνο. Ο Albert που ήταν τότε 15 χρονών έμεινε αρχικά στο Μόναχο για να τελειώσει το σχολείο αλλά μετά από 6 μόλις μήνες πήγε κι αυτός στη Ιταλία. Οι λόγοι ήταν δύο. Πρώτον ήθελε να φύγει από το γυμνάσιο που φοιτούσε και δεύτερον να αποφύγει την στρατιωτική θητεία στη Γερμανία που θα ήταν σε λίγα χρόνια υποχρεωμένος να υπηρετήσει. Στο Μιλάνο είχε σκοπό να προετοιμαστεί για να δώσει εισαγωγικές εξετάσεις στο Ομοσπονδιακό Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης και να αποποιηθεί την γερμανική υπηκοότητα. Από την ανέμελη ζωή στο Μιλάνο ο Einstein κράτησε όμορφες αναμνήσεις. (Fösling, 1997, σελ. 35)

Δυστυχώς απέτυχε στις εξετάσεις για την εισαγωγή του στο Πολυτεχνείο. Ενώ οι επιδόσεις του στη φυσική και τα μαθηματικά ήταν εντυπωσιακές, τα αποτελέσματα στα γλωσσικά μαθήματα ήταν πολύ άσχημα. Αποφάσισε λοιπόν να πάει άλλον ένα χρόνο σχολείο στο Άαραου της Ελβετίας και να μείνει με τον Γιοστ Βίντελερ και την οικογένειά του, τους οποίους θεωρούσε δεύτερους γονείς του (Kumar, 2018, σελ. 74). Με την δεύτερη προσπάθειά του πέτυχε να εισαχθεί και ξεκίνησε τις σπουδές του στη Ζυρίχη με αρχικό σκοπό να γίνει δάσκαλος φυσικής και μαθηματικών.

Στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης γνώρισε την Μιλέβα Μάριτς, ουγγαρέζα σερβικής καταγωγής, που θα γινόταν η μελλοντική γυναίκα του και έγινε φίλος με τον Μαρσέλ Γκρόσμαν, ο οποίος χάρη στις μαθηματικές του ικανότητες βοήθησε και αργότερα τον Einstein με τα μαθηματικά που απαιτούσε η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, μιας και ο Einstein είχε σταματήσει να ενδιαφέρεται πλέον για τα μαθηματικά καθεαυτά, ίσως γιατί ακόμη δεν είχε συνειδητοποιήσει πόσο άρρηκτα συνδεδεμένες είναι οι βασικές αρχές της φυσικής με την γνώση μαθηματικών μεθόδων. (Einstein, 1949a, σελ. 17)

Ο Einstein αποφάσισε ότι δεν ήθελε πια να γίνει δάσκαλος αλλά ήθελε να γίνει φυσικός. Προσπάθησε να βρει κάποια θέση βοηθού στο Πολυτεχνείο ή σε κάποιο γειτονικό πανεπιστήμιο, αλλά όλοι τον απέρριπταν, πράγμα που ίσως εν μέρει να οφειλόταν στις κακές συστάσεις του Βέμπερ, καθηγητή του στο Πολυτεχνείο. Κι ενώ ο Einstein βίωνε το αίσθημα ματαιώσης, ο πατέρας Γκρόσμαν μεσολάβησε στον Φρίντριχ Χάλλερ που ήταν διευθυντής του Γραφείου Ευρεσιτεχνιών της Βέρνης να προσφέρει δουλειά στον Einstein. (Kumar, 2018, σελ. 78)

Το 1901 ο Einstein πήρε την ελβετική υπηκοότητα, έπιασε δουλειά ως δάσκαλος στο σχολείο του Βίντερτουρ και έκανε αίτηση για να εργαστεί στο γραφείο ευρεσιτεχνιών. Το 1902 αφού μετακόμισε στη Βέρνη άρχισε να εργάζεται εκεί. Η φύση της εργασίας του, η κριτική Διπλωματική Εργασία

επαγρύπνιση απέναντι στις νέες εφευρέσεις, «η πολύπλευρη σκέψη» όπως έλεγε ο ίδιος τον έκαναν ακόμη περισσότερο διορατικό και με μεγαλύτερη διαίσθηση απ' ό,τι από την φύση του διέθετε (Fösling, 1997, σελ. 102, 104). Όπως ανέφερε ο φίλος του θεωρητικός φυσικός Max Born «είχε την ικανότητα να βλέπει το νόημα που άλλοι δεν θα πρόσεχαν πίσω από τα γεγονότα» (Born, 1978, σελ. 167). Ήταν μια δουλειά με αρκετές απολαβές και συγχρόνως του άφηνε ελεύθερο χρόνο μεταξύ των ευρεσιτεχνιών να αφιερώνει χρόνο και στην δική του έρευνα. Στο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών, εκτός από εφευρέσεις, εξέταζε ηλεκτρομηχανικές μεθόδους με σκοπό τον συγχρονισμό ρολογιών σε απομακρυσμένες πόλεις κάτι το οποίο ζητούσαν οι σιδηροδρομικές εταιρείες για να ρυθμίζουν με ακρίβεια τα δρομολόγια των τρενών. (Τραχανάς, 2014, σελ. 19)

Το 1902 ο Einstein ταξίδεψε στην Ιταλία, όταν ο πατέρας του αρρώστησε βαριά για να τον δει. Τότε οι γονείς του έδωσαν συγκατάθεση να παντρευτεί την Μιλέβα Μάριτς και ο γάμος τους έγινε το 1903 στο ληξιαρχείο της Βέρνης. Μαζί απέκτησαν δύο γιους και μια κόρη.

Ενώ εργαζόταν στο Γραφείο Ευρεσιτεχνιών, διάβασε την εργασία του Planck για την λύση που πρότεινε για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος και την εισαγωγή του κβάντου και εξέλιξε την ιδέα του κβάντου υποθέτοντας ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία -επομένως και το φως- είναι κβαντωμένη, δηλαδή η κβάντωση δεν είναι μια ιδιότητα που εμφανίζεται μόνο κατά την απορρόφηση και εκπομπή ακτινοβολίας. Μάλιστα, ο Einstein πρωτοχρησιμοποίησε τον όρο φωτόνια.

Βρισκόμαστε, λοιπόν, στο 1905, το θαυμαστό έτος του Einstein, που έγραψε τέσσερις θεμελιώδεις εργασίες που δείχνουν την ευφυΐα του και τον καθιστούν τον πιο σπουδαίο επιστήμονα του εικοστού αιώνα. Στο πρώτο άρθρο εξηγούσε την έννοια του κβάντου, το δεύτερο ήταν η διδακτορική του διατριβή για το μέγεθος των ατόμων, στο τρίτο άρθρο ανέλυε την κίνηση Brown και στο τέταρτο άρθρο παρουσίαζε ένα προσχέδιο της θεωρίας της σχετικότητας. Τα άρθρα αυτά μετά από την έγκριση του Planck που ήταν σύμβουλος του Annalen der Physik δημοσιεύτηκαν παρόλο που ο Planck διαφωνούσε έντονα με την ιδέα του κβάντου φωτός. Την ίδια χρονιά ο Einstein δημοσίευσε στο περιοδικό 21 κριτικές βιβλίων και έγραψε και πέμπτο άρθρο στο οποίο συμπεριλαμβανόταν η διάσημη εξίσωσή του $E=mc^2$. Ο Einstein περιγράφει την δημιουργικότητά του το 1905 λέγοντας: «Μια καταιγίδα ξέσπασε στο μυαλό μου!» (Kumar, 2018, σελ. 65)

Στα επόμενα χρόνια, ο Einstein διορίστηκε Privatdozent-άμισθος λέκτορας-το 1908 στο Πανεπιστήμιο της Βέρνης. Ένα χρόνο αργότερα μετακόμισε με την οικογένειά του στη Ζυρίχη καθώς αποδέχτηκε την θέση του έκτακτου καθηγητή. Εκεί όμως λόγω του γεγονότος ότι έπρεπε να προετοιμάζει τις παραδόσεις του στους φοιτητές, είχε λιγότερο ελεύθερο χρόνο να αφιερώσει στην έρευνα. Με τους φοιτητές του είχε καλή σχέση, ήταν ενθαρρυντικός και είχε κερδίσει τον σεβασμό τους. Κάποιες φορές μετά το μάθημα πήγαινε μαζί τους στο Cafe Terrasse και συζητούσαν. (Kumar, 2018, σελ. 110)

Το 1911 έγινε τακτικός καθηγητής στο Γερμανικό Πανεπιστήμιο της Πράγας. Μετακόμισαν εκεί με την Μιλέβα και τους δυο γιους τους, αφού στο μεταξύ είχε γεννηθεί και το δεύτερό τους παιδί. Στο πανεπιστήμιο στην Πράγα που φαινόταν η αμοιβαία καχυποψία και δυσπιστία μεταξύ Τσέχων και Γερμανών ο Einstein ένιωθε άβολα και ένα αίσθημα απομόνωσης. Μετά από ένα χρόνο, το 1912, όταν ο Γκρόσμαν του πρόσφερε θέση καθηγητή στο Ελβετικό Ομοσπονδιακό Τεχνικό Πανεπιστήμιο, αυτή ήταν η νέα ονομασία για το Πολυτεχνείο της Ζυρίχης, επέστρεψε ως διάσημος και κορυφαίος πια φυσικός.

Το 1913 οι Planck και Nernst τον επισκέφτηκαν για να του προσφέρουν μια θέση καθηγητή στο Πανεπιστήμιο του Βερολίνου, όπου δεν θα είχε διδακτικά καθήκοντα και θα μπορούσε να ασχοληθεί μόνο με την έρευνα. Επίσης, του πρόσφεραν έμμισθη θέση στην Πρωσική Ακαδημία Επιστημών και του πρότειναν να διευθύνει το Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής Κάιζερ Βίλχελμ. Ο Einstein δέχτηκε τις προτάσεις τους και το έδειξε κρατώντας ένα κόκκινο Διπλωματική Εργασία

τριαντάφυλλο, σύμφωνα με την ιστορία, όταν τους ξαναείδε. Επέστρεψε, λοιπόν, το 1914 στη Γερμανία και μάλιστα ξαναέγινε γερμανός υπήκοος. Για τον Einstein συνέτρεχε και ένας ακόμη λόγος για την επιστροφή του. Στο Βερολίνο ζούσε η ξαδέρφη του Έλσα με την οποία διατηρούσε σχέση τα δύο τελευταία χρόνια. (Kumar, 2018, σελ. 184-5)

Το 1915 ολοκλήρωσε την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας, όπου ερμηνεύει το βαρυτικό πεδίο ως αποτέλεσμα καμπύλωσης του χωροχρόνου. Επίσης, έθεσε τις βάσεις στην σύγχρονη κοσμολογία. (Τραχανάς, 2014, σελ. 16)

Η προσωπική ζωή του Einstein μπορεί να χαρακτηριστεί ταραχώδης και με αρκετές δυσκολίες. Στο Βερολίνο όταν επέστρεψε τον ακολούθησαν η Μιλέβα και οι γιοι του. Όμως εκείνος απομακρύνθηκε, εξαφανιζόταν για μέρες και μάλιστα παρουσίασε έναν κατάλογο με απαιτήσεις και όρους που πραγματικά θα μετέτρεπαν την γυναίκα του σε υπάλληλό του. Η Μιλέβα αρχικά αποδέχτηκε τους «όρους συμβίωσής» του, δεν άντεξε όμως πάνω από τρεις μήνες και στη συνέχεια επέστρεψαν με τους γιους της στην Ζυρίχη. (Kumar, 2018, σελ. 186). Η σχέση του Einstein με τον μεγάλο του γιο καλυτέρευσε με τα χρόνια. Ο μικρός του γιος έπασχε από κάποια σοβαρή ψυχική ασθένεια και νοσηλευόταν ένα μέρος της ζωής του πράγμα που είχε σημαντικό αντίκτυπο στον Einstein.

Το 1917 λόγω της έντονης πνευματικής εργασίας αλλά και του γενικότερου τρόπου ζωής ο Einstein εμφάνισε προβλήματα υγείας. Οι γιατροί συνέστησαν ξεκούραση και δίαιτα. Τότε μετακόμισε δίπλα στην ξαδέρφη του Έλσα η οποία θα τον φρόντιζε. Προκειμένου να πάρει διαζύγιο από τη Μιλέβα θα της πρόσφερε τα χρήματα από το Βραβείο Νόμπελ που σύντομα θα κέρδιζε. Την ίδια χρονιά που πήρε το διαζύγιο, το 1919, παντρεύτηκε την Έλσα. Έμειναν μαζί μέχρι τον θάνατό της το 1936. (Kumar, 2018, σελ. 195)

Το 1919 μια επιστημονική ομάδα με επικεφαλής τον Arthur Eddington ξεκίνησε από τη Βρετανία για να παρατηρήσει την έκλειψη ηλίου που θα γινόταν στις 29 Μαΐου. Σκοπός ήταν να φωτογραφίσουν αστέρες που ήταν κοντά στον ήλιο και θα ήταν ορατοί για λίγα λεπτά λόγω του σκοταδιού που θα προκαλούσε η έκλειψη και στη συνέχεια να συγκρίνουν αυτές τις φωτογραφίες με άλλες που είχαν τραβήξει έξι μήνες πριν, όταν το φως αυτών πέρασε σε μεγάλη απόσταση από τον ήλιο. Από μικρές αλλαγές στην θέση των αστερών οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι όντως οι φωτεινές ακτίνες κάμπτονται όταν περνούν κοντά από τον ήλιο λόγω του βαρυτικού του πεδίου (Τραχανάς, 2014, σελ. 21). Οι συνάδελφοί του αντιμετώπισαν με ενθουσιασμό την Γενική Θεωρία της Σχετικότητας.

Το 1921 ο Einstein κέρδισε το Βραβείο Νόμπελ ούτε για την Θεωρία της Σχετικότητας, ούτε για τα φωτόνια αλλά για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Την δεκαετία του 1920 ξεκίνησε την ενασχόλησή του με την κατασκευή ενοποιημένων θεωριών πεδίου. Ποτέ δεν σταμάτησε να τον απασχολεί η κβαντική θεωρία και οι πιθανότητες και σε καμιά περίπτωση δεν αποδεχόταν την εγκατάλειψη της αιτιότητας. Έχει επιτύχει σημαντικό έργο σχετικά με τις πιθανότητες ατομικής μετάβασης, την στατιστική μηχανική, την κίνηση Brown και φυσικά με την Γενική του Θεωρία της Σχετικότητας συνέβαλε στην σχετικιστική κοσμολογία. Στο τέλος της καριέρας του προσέγγισε την ενοποίηση των βασικών εννοιών της φυσικής με γεωμετροποίηση. (NobelPrize.org)

Με την άνοδο του ναζιστικού καθεστώτος και του Χίτλερ στη Γερμανία ο Einstein μετανάστευσε στις Ηνωμένες Πολιτείες και έγινε καθηγητής στο Princeton στο Ινστιτούτο Προχωρημένων Σπουδών. Παρόλο που ήταν ειρηνιστής και υπέρμαχος της προστασίας των ανθρώπινων δικαιωμάτων, μπροστά στην απειλή του ναζισμού και των πυρηνικών όπλων από την πλευρά της Γερμανίας προσπάθησε να πείσει τον αμερικανό πρόεδρο Franklin Roosevelt για την έναρξη ενός αμερικανικού πυρηνικού προγράμματος.

Αφού τελείωσε ο Δεύτερος Παγκόσμιος πόλεμος, ο ισραηλινός πρωθυπουργός πρόσφερε στον Einstein την Προεδρία του ισραηλινού κράτους, εκείνος όμως αρνήθηκε. Συνέβαλε ωστόσο στην δημιουργία εβραϊκού Πανεπιστημίου στην Ιερουσαλήμ.

Πέθανε το 1955,στις 18 Απριλίου στο Princeton από ανεύρισμα της αορτής και σύμφωνα με την επιλογή του,αποτεφρώθηκε.(NobelPrize.org)

3.3 Niels Bohr



Ο Niels Bohr,σπουδαίος δανός θεωρητικός φυσικός γεννήθηκε στην Κοπεγχάγη στις 7 Οκτωβρίου του 1885.Καταγόταν από ακαδημαϊκή οικογένεια.Ο πατέρας του ,Christian Bohr ήταν διακεκριμένος φυσιολόγος και η μητέρα του Elen Adler καταγόταν από εύπορη οικογένεια διακεκριμένη στον τομέα της εκπαίδευσης με πατέρα τραπεζίτη και πολιτικό. (Kumar,2018,σελ.115).Ο Bohr είχε δύο αδέρφια,την Τζένη και τον Χάραλντ με τον οποίο ήταν αχώριστοι.

Ο Niels και τα αδέρφια του είχαν μια άνετη και αξιοζήλευτη παιδική ηλικία.Ο πατέρας τους ενθάρρυνε να γνωρίσουν τη φύση,έβγαιναν περιπάτους σε εξωτερικούς χώρους,κωπηλατούσαν και έπαιζαν μαζί ποδόσφαιρο.(Niels Bohr Institute-University of Copenhagen,Niels Bohr's childhood).Μάλιστα τόσο ο Χάραλντ όσο και ο Niels ήταν ποδοσφαιρικά ταλέντα,ώστε για μια σεζόν έπαιζαν μαζί στο εθνικό πρωτάθλημα της Δανίας. (Τραχανάς,2014,σελ.28).Ακόμη στον Bohr άρεσε σαν παιδί να ασχολείται με πρακτικές εργασίες.Επισκεύαζε ξύλινα αντικείμενα,τα ρολόγια της οικογένειας,ποδήλατα και γενικά ό,τι χρειαζόταν επισκευή.

Λόγω της ακαδημαϊκής και κοινωνικής θέσης των γονιών του,ο Bohr ήρθε από νωρίς σε επαφή με αξιόλογους διανοητές, συγγραφείς, καλλιτέχνες και επιστήμονες (Pais,1991,σελ.99).Το ενδιαφέρον για την επιστήμη ήταν κομμάτι της καθημερινής του ζωής,αφού του δινόταν η ευκαιρία να παρακολουθεί τις πνευματικές ανησυχίες,τις επιστημονικές συζητήσεις και αντιπαραθέσεις των ενηλίκων.Ο πατέρας του,ο οποίος είχε δύο φορές προταθεί για βραβείο Νόμπελ,είχε συχνά καλεσμένους άτομα της Βασιλικής

Ακαδημίας των Επιστημών και Γραμμάτων της Δανίας.Ακόμη ο θαυμασμός που έτρεφε για τον Γκαίτε και το έργο του μεταδόθηκε και στον Bohr.(Niels Bohr Institute-University of Copenhagen,Niels Bohr's childhood)

Όταν έγινε εφτά χρονών γράφτηκε στο σχολείο Gammelholm.Παρόλο που το σχολείο ήταν αυστηρό και τυπικό δεν αντιμετώπισε προβλήματα.Οι επιδόσεις του στα μαθηματικά και στις φυσικές επιστήμες ήταν άριστες,αλλά δυσκολευόταν με τις γλώσσες.Μάλιστα κυκλοφορούν αστείες ιστορίες σχετικά με την δανική γραφή που ήταν το χειρότερο μάθημά του.Όταν του ζητήθηκε να γράψει έκθεση με θέμα ένα ταξίδι στο λιμάνι αυτός έγραψε:«Πήγαμε με τον αδερφό μου στο λιμάνι και είδαμε πλοία να έρχονται και να φεύγουν».(Niels Bohr Institute-University of Copenhagen,Niels Bohr's school years και Kumar,2018,σελ116) Η αλήθεια είναι ότι και στην μετέπειτα ζωή του είχε δυσκολία στην γραπτή έκφραση.Απέφευγε το γράψιμο και όσο ανέπτυσσε τις ιδέες του μιλούσε φωναχτά ενώ κάποιος άλλος έγραφε τις σκέψεις του.Όταν καλούνταν να γράψει μια διάλεξη ή μια επιστολή την ξαναέγραφε πολλές φορές προκειμένου να εξασφαλίσει την ακρίβεια και σαφήνεια που επιθυμούσε. (Kumar,2018,σελ.150)

Το 1903 γράφτηκε στο Πανεπιστήμιο της Κοπενχάγης με σκοπό να σπουδάσει φυσική.Παρακολούθησε μαθήματα αστρονομίας ,μαθηματικών, χημείας και φιλοσοφίας. Σταδιακά το ενδιαφέρον του άρχισε να προσανατολίζεται προς την θεωρητική φυσική .Σπούδασε δίπλα στον καθηγητή Christian Christiansen που ήταν και φίλος του πατέρα του(Niels Bohr Institute-University of Copenhagen,Life as a student).Το 1907 κέρδισε χρυσό μετάλλιο από την Δανική Ακαδημία Επιστημών για την πειραματική και θεωρητική έρευνά του πάνω στην επιφανειακή τάση ρευστού(Pais,1991,σελ.44).Το 1909 πήρε το μεταπτυχιακό του δίπλωμα και στη συνέχεια ,το 1911,το διδακτορικό του.Και τα δύο ήταν πάνω στη φυσική(Kumar,2018,σελ.117).Μάλιστα,ο Bohr είχε βρει εξαιρετικά ενδιαφέροντα τα άρθρα του Thomson ο οποίος είχε ανακαλύψει το ηλεκτρόνιο και αποφάσισε το θέμα της διατριβής του να είναι η ηλεκτρονιακή θεωρία των μετάλλων. (NobelPrize.org)

Μεταξύ του μεταπτυχιακού και του διδακτορικού του ο Bohr γνώρισε την μελλοντική σύζυγό του,την Μαργκρέτε Νέρλαντ με την οποία παντρεύτηκαν το 1912 και απέκτησαν μαζί έξι παιδιά.Τα δύο παιδιά χάθηκαν.Οι υπόλοιποι τέσσερεις διακρίθηκαν και αυτοί στις επιστήμες.Ο γιος τους Aage τιμήθηκε κι αυτός με Βραβείο Νόμπελ το 1975 για την εργασία του στην πυρηνική φυσική.(Niels Bohr Institute-University of Copenhagen,Life as a student).Ο Bohr παρόλο που αρχικά βαφτίστηκε χριστιανός και εντάχθηκε στην Λουθηρανική εκκλησία ,έπαψε από έφηβος να πιστεύει στο θεό ώστε στην πορεία της ζωής του να δηλώνει άθεος.Παντρεύτηκαν λοιπόν στο δημοτικό μέγαρο γιατί δεν επιθυμούσε θρησκευτική τελετή.(Kumar,2018,σελ.149)

Η Margrete ήταν για τον Bohr η ιδανική σύντροφος.Ο γάμος τους ήταν ευτυχισμένος και κράτησε πολλά χρόνια.Πολλές φορές μάλιστα υπαγόρευε σ'αυτή τις σκέψεις του κι εκείνη τον διόρθωνε βελτιώνοντας τα αγγλικά του.(Kumar,2018,σελ.150).Και η σχέση του με τον αδελφό του Χάραλντ ήταν πολύ καλή.Σε όλη τους τη ζωή ήταν οι στενότεροι φίλοι.Συχνά ο Bohr του έγραφε γράμματα.Ο Χάραλντ απέκτησε το διδακτορικό του ένα χρόνο πριν το Bohr,στα μαθηματικά.Συχνά μελετούσαν μαζί.(Kumar,2018,σελ.117)

Ως άνθρωπος ο Bohr ήταν φιλικός και αυτή την εγκάρδια και χαλαρή ατμόσφαιρα διατήρησε και αργότερα στο Ινστιτούτο του στην Κοπενχάγη.Είχε χιούμορ,του άρεσε να παρακολουθεί γουέστερν και αγαπούσε το ποδόσφαιρο και την ορειβασία.Είναι γνωστό το περιστατικό ένα βράδυ στην Κοπενχάγη όταν ένας αστυνομικός τον βρήκε σκαρφαλωμένο

στον τοίχο ενός καταστήματος τράπεζας να προσπαθεί να εξηγήσει στους άλλους φυσικούς της παρέας πόσο εύκολο ήταν να τη ληστέψει.(Τραχανάς,2014,σελ.28).

Όταν ο Bohr απέκτησε το διδακτορικό του το 1911 επέλεξε το Πανεπιστήμιο του Cambridge για την συνέχιση των σπουδών του.Η ελπίδα του ήταν να βρεθεί κοντά στον Thomson,διευθυντή του Εργαστηρίου Cavendish και κάτοχο του Βραβείου Νόμπελ για την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου.Έτσι και έγινε,ωστόσο ο Thomson καθυστέρησε προς απογοήτευση του Bohr να διαβάσει την διατριβή του.Την ίδια χρονιά επισκέφτηκε το Πανεπιστήμιο του Manchester και γνώρισε τον Rutherford.(Kumar,2018,σελ.119)

Από τον ίδιο τον Rutherford πληροφορήθηκε τα αποτελέσματα του πειράματός του και το πλανητικό μοντέλο του ατόμου που εκείνος πρότεινε.Συνέλαβε αμέσως την κρισιμότητα του προβλήματος της σταθερότητας των ατόμων.Στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής τα άτομα δεν θα μπορούσαν να υπάρχουν.Το ατομικό μοντέλο του Rutherford θα έφερνε κρίση στην φυσική και ο Bohr ήταν αυτός που θα έφερνε τη λύση.(Τραχανάς,2025,σελ.60).Γιατί σε αντίθεση με άλλους επιστήμονες που η σταθερότητα ή όχι του πυρηνικού μοντέλου του Rutherford τους οδηγούσε στην απόρριψή του,ο Bohr κατάλαβε πως η πρόταση του Rutherford έκανε ξεκάθαρους τους περιορισμούς της κλασικής φυσικής και την επικείμενη κατάρυσή της.(Kumar,2018,σελ.153).Έτσι στράφηκε στο κβάντο του Planck.

Αφού πήρε την άδεια του Thomson το 1912 μετακινήθηκε στο Manchester και έγινε μέλος της ερευνητικής ομάδας του Rutherford.Παρακολούθησε για επτά εβδομάδες έναν κύκλο μαθημάτων για τη ραδιενέργεια,περνούσε ώρες πάνω στη μελέτη της φυσικής των ηλεκτρονίων των μετάλλων και με την υποστήριξη και καθοδήγηση του Rutherford εκπόνησε ένα μικρό ερευνητικό πρόγραμμα.

Ο Rutherford έγινε πρότυπο για τον Bohr,μπορεί να χαρακτηριστεί ο μέντοράς του.Είχε καταφέρει να καλλιεργήσει στην ομάδα του κλίμα συνεργασίας και ελευθερίας,όπου όλοι μπορούσαν να συζητούν και να λένε τη γνώμη τους ανοιχτά (Bohr, 1963b,σελ.32).«Ενδιαφερόταν πραγματικά» για την ομάδα του όπως λέει ο Bohr και τακτικά επισκεπτόταν το εργαστήριο για να συζητήσει κάθε ιδέα και ανακάλυψη.(Kumar,2018,σελ.136)

Επέστρεψε στην Κοπεγχάγη το 1912 ο Bohr ως βοηθός διδασκάλου στο Τεχνικό Κολλέγιο και ως Privatdozent στο Πανεπιστήμιο.Η διδασκαλία,η προετοιμασία των διαλέξεων και τα καθήκοντα του βοηθού δεν του άφηναν χρόνο να ασχοληθεί με το άτομο του Rutherford και το πρόβλημα της αστάθειας.Ζήτησε λοιπόν άδεια και εγκαταστάθηκε με τη Μαγκρέτε σε μια απομονωμένη αγροικία στην εξοχή όπου θα είχε περισσότερο χρόνο για μελέτη.(Kumar,2018,σελ.152-156)

Το 1913 δημοσίευσε μια πραγματικά επαναστατική εργασία για το άτομο του υδρογόνου.Επρόκειτο για μια τριλογία άρθρων που δημοσιεύτηκαν στο Philosophical Magazine με τίτλο:Περί της σύστασης ατόμων και μορίων στα οποία ο Bohr εισάγει τις κβαντικές αντιλήψεις στην ατομική θεωρία.(Kumar,2018,σελ.167).Σύμφωνα με την ριζοσπαστική ιδέα που πρότεινε το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου μπορούσε να κινείται μόνο σε ορισμένες κβαντωμένες τροχιές-στάσιμες τροχιές-χωρίς να εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.Μόνο κατά την μετάβαση από μια υψηλότερη σε μια χαμηλότερη τροχιά-κβαντικό άλμα-εκπέμπεται ακτινοβολία.Εκτός από την κβάντωση στις τροχιές πρότεινε και την κβάντωση της ενέργειας του ηλεκτρονίου και σ'αυτή βρίσκεται όλη η εξήγηση της σταθερότητας των ατόμων και της ύλης γενικά.(Τραχανάς, 2025,σελ.67).Ακόμη μπόρεσε να εξάγει όλα τα πα-

ρατηρήσιμα χαρακτηριστικά του, όπως το μέγεθός του, την ενέργεια ιοντισμού και τις φασματικές γραμμές. (Τραχανάς, 2014, σελ. 26)

Το 1913, όταν δημοσιεύτηκε το πρώτο μέρος της τριλογίας εξασφάλισε θέση λέκτορα στο Πανεπιστήμιο της Κοπενχάγης. Στη συνέχεια από το 1914 έως το 1916 μετακόμισε με την γυναίκα του στο Manchester σε μια παρόμοια θέση στο Πανεπιστήμιο Βικτώρια και το 1916 επέστρεψε στην Κοπενχάγη και διορίστηκε στην θέση καθηγητή θεωρητικής φυσικής στο πανεπιστήμιο εκεί. Αμέσως, άρχισε να συγκεντρώνει χρήματα και απευθύνθηκε στο δανικό κοινοβούλιο με σκοπό την κατασκευή ενός νέου ινστιτούτου. Τον Μάρτιο του 1921 ξεκίνησε τη λειτουργία του το Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής στο οποίο διετέλεσε διευθυντής ως το τέλος της ζωής του. (NobelPrize.org)

Το Ινστιτούτο έγινε ο δημιουργικός παράδεισος που ονειρευόταν ο Bohr, μια διεθνής συνεργασία στην επιστήμη. Πολλοί ξένοι ερευνητές επισκέπτονταν την Κοπενχάγη, όπως οι Heisenberg, Schrödinger, Dirac και Pauli και συζητούσαν τα θεμελιώδη ζητήματα της κβαντομηχανικής και της φυσικής ερμηνείας της που είναι γνωστή ως η Σχολή της Κοπενχάγης. (Τραχανάς, 2014, σελ. 26). Ο Bohr εγκαινίασε μια νέα εποχή στην επιστήμη, όπου την κυρίαρχη θέση που κατείχαν ως τότε μεμονωμένοι ιδιοφυείς επιστήμονες αντικατέστησαν οι ερευνητικές ομάδες που οι επιστήμονες συνεργάζονταν μεταξύ τους. (Τραχανάς, 2025, σελ. 148) Το Ινστιτούτο λειτουργεί μέχρι και σήμερα και η έρευνά του επεκτείνεται και σε άλλους τομείς όπως η αστρονομία, η σωματιδιακή φυσική, η γεωφυσική και η βιοφυσική.

Ακόμη, το 1934, δίπλα στο Ινστιτούτο Bohr εγκαινιάστηκε το Μαθηματικό Ινστιτούτο της Κοπενχάγης επικεφαλής του οποίου ήταν ο Χάραλντ, αδελφός του Bohr, που ήταν πια ένας διακεκριμένος μαθηματικός. Έτσι, τα δύο Ινστιτούτα μπορούσαν να έχουν στενότερη συνεργασία και να μοιράζονται κοινές έρευνες. (Niels Bohr Institute-University of Copenhagen, Niels Bohr's Institute)

Το 1922 ο Niels Bohr τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ για τη συμβολή του στη μελέτη της δομής των ατόμων και της ακτινοβολίας τους. Προσπάθησε να ερμηνεύσει τις ιδιότητες των χημικών στοιχείων του περιοδικού πίνακα καθώς και τα φάσματα εκπομπής τους.

Με τα χρήματα του βραβείου αγόρασε ένα εξοχικό σπίτι στην άκρη του δάσους που έμεναν με την οικογένειά του κατά τη διάρκεια των διακοπών. Με τους γιους του έπαιζαν μπάλα, έκαναν βόλτες και κολυπούσαν. Βέβαια, και πολλοί συνάδελφοι και φοιτητές από το Ινστιτούτο πήγαιναν εκεί και εργάζονταν μαζί με τον Bohr. (Niels Bohr Institute-University of Copenhagen, The Nobel Prize)

Την δεκαετία του 1930 το αντικείμενο της μελέτης του Bohr μεταφέρθηκε από το άτομο στον πυρήνα. Η έρευνά του στράφηκε προς την σύσταση των πυρήνων, τις μεταστοιχειώσεις και τις αποσυνθέσεις τους και άλλαξε τις προτεραιότητες του Ινστιτούτου. Η συμβολή του στην κατανόηση της πυρηνικής φυσικής και ειδικότερα στο φαινόμενο της πυρηνικής σχάσης υπήρξε καθοριστική.

Το 1939 όταν ξεκίνησε ο Δεύτερος Παγκόσμιος Πόλεμος και οι γερμανοί κατέλαβαν τη Δανία, ο Bohr αρχικά έμεινε στη χώρα του. Όμως στη συνέχεια το Ινστιτούτο καταλήφθηκε από τους γερμανούς και λόγω της εβραϊκής καταγωγής της μητέρας του και των γνωστών αντιναζιστικών του αντιλήψεων αναγκάστηκε να εκπατριστεί. Πρώτα μετακινήθηκε για λίγο στη Σουηδία και στη συνέχεια στην Αγγλία και τις Ηνωμένες Πολιτείες, όπου συμμετείχε

στο Manhattan Project, το πρόγραμμα των αμερικανών για την κατασκευή ατομικής βόμβας. (Niels Bohr Institute-University of Copenhagen, Nuclear Physics and War)

Παρόλο που δέχτηκε να συμμετάσχει, η ανησυχία του για τις επιπτώσεις στην ανθρωπότητα της πυρηνικής ενέργειας ήταν έντονη. Προσπάθησε να πείσει τον πρωθυπουργό της Αγγλίας Τσόρτσιλ και τον αμερικανό πρόεδρο Ρούσβελτ ότι ήταν αναγκαία μια διεθνής συνεργασία για τον έλεγχο των πυρηνικών εξοπλισμών. Για το σκοπό αυτό αγωνίστηκε μέχρι το τέλος της ζωής του. Τα έργα του των τελευταίων χρόνων ήταν αφιερωμένα στην ειρηνική εφαρμογή της πυρηνικής φυσικής. (sansimera.gr, ΒΙΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΕΙΣΤΗΜΗ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Niels Bohr)

Στο σημείο αυτό αξίζει να αναφερθεί η σχέση Bohr-Heisenberg οι οποίοι υπήρξαν καλοί φίλοι και συνεργάτες αλλά την περίοδο του πολέμου βρέθηκαν σε «αντίπαλα στρατόπεδα». Ο Heisenberg ήταν επικεφαλής του γερμανικού προγράμματος για την κατασκευή πυρηνικής βόμβας και ο Bohr συμμετείχε στο αντίστοιχο πρόγραμμα της Αμερικής. Σύμφωνα με την εκδοχή του Heisenberg οι δύο επιστήμονες συναντήθηκαν μυστικά στην Κοπενχάγη προκειμένου να αποτρέψουν από κοινού την κατασκευή της βόμβας και φυσικά η ιστορία έδειξε ότι η έκβαση της συνάντησης ήταν οδυνηρή και για τις δύο πλευρές. (Τραχανάς, 2014, σελ. 30)

Τα τελευταία χρόνια της ζωής του επέστρεψε στη Δανία και επικεντρώθηκε στην αποκατάσταση του Ινστιτούτου του. Επίσης, συνέβαλε στη δημιουργία του Ευρωπαϊκού Κέντρου Πυρηνικών Ερευνών (CERN) στη Γενεύη. (Niels Bohr Institute-University of Copenhagen, The Final Years)

Πέθανε στην Κοπενχάγη το 1962 σε ηλικία 77 ετών. Προς τιμήν του έχουν έχει ονομαστεί το χημικό στοιχείο με ατομικό αριθμό 107 και ένας αστεροειδής του ηλιακού μας συστήματος. (Τραχανάς, 2014, σελ. 31)

3.4 Erwin Schrödinger



Ο Erwin Schrödinger γεννήθηκε το 1887 στη Βιέννη. Ήταν μοναχοπαίδι. Ο πατέρας του, ένας ιδιαίτερα χαρισματικός άνθρωπος, είχε ενδιαφέρον για τις επιστήμες και είχε σπουδάσει χημεία στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης ενώ ασχολήθηκε και με την βοτανική. Ωστόσο, τελικά ανέλαβε την οικογενειακή επιχείρηση που πρόσφερε στην οικογένειά του μια άνετη ζωή. Η μητέρα του, κόρη του Αλεξάντερ Μπάουερ, καθηγητή χημείας, είχε καλλιτεχνική παιδεία. Μάλιστα, ήθελε αρχικά να ονομάσει τον Schrödinger Βόλφγκανγκ προς τιμήν του Γκαίτε. (Kumar, 2018, σελ. 301)

Όταν έγινε 11 ετών ξεκίνησε να φοιτά στο Ακαδημαϊκό Γυμνάσιο, ενώ μέχρι τότε την μόρφωσή του είχαν αναλάβει ιδιωτικοί δάσκαλοι στο σπίτι. Οι εξαιρετικές πνευματικές του ικανότητες φάνηκαν από νωρίς. Διέθετε μια ιδιαίτερη ικανότητα κατανόησης και διαρκώς αρίστευε ειδικά στα μαθηματικά και την φυσική. (Moore, 1989, σελ. 23). Έμαθε να μιλά ξένες γλώσσες, αγγλικά, γαλλικά και ισπανικά και εκτιμούσε την αυστηρή λογική στη γραμματική των αρχαίων ελληνικών. Απεχθανόταν τη μάθηση μέσω αποστήθισης. (Kumar, 2018, σελ. 302)

Το 1906 τελείωσε το γυμνάσιο και άρχισε τις σπουδές του στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης. Και εκεί οι επιδόσεις του ήταν υψηλές και απέκτησε γνώσεις στα προβλήματα ιδιοτιμών των συνεχών μέσων, στην θερμοδυναμική, τον ηλεκτρομαγνητισμό και την θεωρητική φυσική. Παρόλο που το όνειρό του ήταν να σπουδάσει υπό τον Λούντβιχ Μπόλτσμαν-αυτός αυτοκτόνησε λίγο πριν ξεκινήσει το μάθημά του ο Schrödinger-δέχτηκε την επιρροή άλλων σημαντικών φυσικών της εποχής όπως ο Φριτς Χάζενερλ και Φραντς Έξνερ. (NobelPrize.org). Παρόλο που κάποιος θα χαρακτήριζε τον Schrodinger θεωρητικό

φυσικό, η διδακτορική του διατριβή το 1910 ήταν μια πειραματική έρευνα. (Kumar, 2018, σελ. 303)

Αφού υπηρέτησε την στρατιωτική του θητεία για ένα χρόνο ως έφεδρος αξιωματικός, επέστρεψε στη Βιέννη το 1911 και άρχισε να εργάζεται αρχικά ως βοηθός καθηγητής πειραματικής φυσικής στο πανεπιστήμιο που είχε σπουδάσει. Όπως αναφέρει ο ίδιος παρότι θεωρητικός ήξερε «τι σήμαινε να κάνεις μια μέτρηση» από πρώτο χέρι. (Moore, 1989, σελ. 58-59). Στη συνέχεια έγινε Privatdozent το 1914, όμως με την έναρξη του Πρώτου Παγκοσμίου Πολέμου αναγκάστηκε να καταταγεί ως αξιωματικός του στρατού. Γύρισε το 1917 για να διδάξει φυσική στο Πανεπιστήμιο της Βιέννης και μετεωρολογία σε ένα άλλο σχολείο αεράμυνας. Το 1920 έγινε βοηθός του Μαξ Βιν στο πανεπιστήμιο και μετά από λίγους μήνες έκτακτος καθηγητής στη Στουτγκάρδη. Το 1921 ανέλαβε θέση καθηγητή στο Μπρέσλαου και μετά έγινε καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Ζυρίχης που αντικαθιστούσε τον Φον Λάουε. (Kumar, 2018, σελ. 303-5)

Όταν έφτασε στην Ελβετία αρρώστησε και με εντολή των γιατρών μετακόμισε στην Αρόζα σε ένα σανατόριο. Αρχικά η υγεία του ήταν σε άσχημη κατάσταση, ώστε όπως περιγράφει στον Pauli να μην μπορεί να σκεφτεί καμιά σοβαρή ιδέα. (Moore, 1989, σελ. 145). Αργότερα όμως βρήκε την δύναμη να δημοσιεύσει κάποια άρθρα.

Στην Ζυρίχη έμεινε έξι χρόνια τα οποία αργότερα στη ζωή του αναπολούσε με νοσταλγία και ευχαρίστηση. Ασχολήθηκε με πολλά θέματα θεωρητικής φυσικής και απόλαυσε την επαφή και τη φιλία με πολλούς συναδέλφους όπως οι Weyl και Debye. (NobelPrize.org). Προς το τέλος της διαμονής του εκεί βέβαια είχε αρχίσει να αγχώνεται και να αναρωτιέται αν τελικά θα κατάφερνε να κάνει κάποια σπουδαία ανακάλυψη και συνεισφορά στην επιστήμη που θα του εξασφάλιζε μια θέση ανάμεσα στους μεγάλους σύγχρονους φυσικούς. (Kumar, 2018, σελ. 305). Στη Ζυρίχη ανέπτυξε το σπουδαιότερο έργο του, την διάσημη κυματική εξίσωση, που θα γινόταν το θεμέλιο της κβαντομηχανικής όπως οι Νόμοι του Νεύτωνα είναι για την κλασική φυσική.

Το 1925 ο Schrödinger άρχισε να ενδιαφέρεται όλο και περισσότερο για θέματα ατομικής και κβαντικής φυσικής. Μεγάλη εντύπωση του προκάλεσε η μελέτη της διδακτορικής διατριβής του Louis de Broglie που μιλούσε για τον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό της ύλης. Στη Ζυρίχη, κάθε δεκαπέντε μέρες γινόταν ένα σεμινάριο φυσικής-το κολόκιουμ-στο οποίο προσέρχονταν τόσο φυσικοί του πανεπιστημίου όσο και της τεχνικής σχολής (ETH) προκειμένου να παρουσιαστεί και να αναλυθεί ένα θέμα ή μια επιστημονική εργασία, πάνω στην οποία μετά οι επιστήμονες θα συζητούσαν, θα αντάλλασαν τις απόψεις τους και θα γίνονταν ερωτήσεις. Ο Debye διηύθυνε αυτές τις συναντήσεις. Ζητήθηκε λοιπόν στον Schrödinger να δώσει μια διάλεξη πάνω στην εργασία του de Broglie για τα υλικά κύματα. (Kumar, 2018, σελ. 306)

Το περιστατικό που ακολουθεί το διηγείται ο 21 ετών τότε φοιτητής Felix Bloch. Όταν ο Schrödinger έκανε την παρουσίασή του για το πώς ο de Broglie συνέδεσε κάθε σωματίδιο με ένα κύμα και πώς με αυτό το δεδομένο κατέληξε στις συνθήκες κβάντωσης Bohr-Sommerfeld θεωρώντας ότι κάθε στάσιμη τροχιά περιέχει ακέραιο αριθμό κυμάτων, ο Debye προέβαλε την ένσταση ότι για να μιλάει κάποιος για κύμα θα πρέπει να μπορεί να παρουσιάσει και μια κυματική εξίσωση που να το περιγράφει. Και ο de Broglie δεν είχε βρει καμιά κυματική εξίσωση για τα υλικά κύματα. Σύμφωνα με τον Debye η όλη σύλληψη ήταν παρατραβηγμένη, ίσως και «παιδαριώδης». Μετά από μερικές εβδομάδες ο Schrödinger, γνωρίζοντας ότι ο Debye είχε δίκιο στην υπόδειξη ότι δεν μπορούμε να μιλάμε για κύματα χωρίς κυματική εξίσωση, στην επόμενη συνάντηση του σεμιναρίου παρουσίασε την κυματική του εξίσωση που αποτέλεσε το θεμέλιο στο οικοδόμημα της Wellenmechanik-κυματομηχανικής. (Bloch, 1976, σελ. 23-4)

Οι επόμενοι μήνες ήταν περίοδος μεγάλης δημιουργικότητας για τον Schrödinger. Αμέσως εφάρμοσε την κυματική εξίσωση στο άτομο του υδρογόνου και ξεκινώντας από την υπόθεση οι λύσεις της πρέπει να είναι στάσιμα-και όχι οδεύοντα κύματα-γύρω απ'τον πυρήνα, κατέληξε αβίαστα στην κβάντωση της ενέργειας. Οι επιτρεπόμενες ενέργειες που προέκυπταν από την λύση της εξίσωσης Schrödinger είναι ίδιες με αυτές που είχε βρει ο Bohr και είχαν επιβεβαιωθεί και πειραματικά. Οι επιτρεπόμενες τροχιές φυσικά έπρεπε να αποσυρθούν γιατί ήταν εννοιολογικά προβληματικές αλλά και δεν επιβεβαιώνονταν πειραματικά. (Τραχανάς, 2025, σελ. 89).

Το άρθρο του Schrödinger «Η κβάντωση ως πρόβλημα ιδιοτιμής» δημοσιεύτηκε στο περιοδικό Annalen der Physik τον Ιανουάριο του 1926. Την ίδια χρονιά δημοσίευσε συνολικά 256 σελίδες στις οποίες εξηγούσε τον τρόπο που η κυματομηχανική του έλυνε προβλήματα της ατομικής φυσικής. Επίσης παρουσίασε την χρονοεξαρτημένη κυματική εξίσωσή του. Συγκεκριμένα, μετά το πρώτο άρθρο του με την κυματική εξίσωση και την εφαρμογή της στο άτομο του υδρογόνου, ο Schrödinger δημοσίευσε δεύτερη εργασία που δίνει την λύση του κβαντικού αρμονικού ταλαντωτή καθώς και τρίτη που αποδεικνύει ότι η κυματομηχανική του ήταν ισοδύναμη με την μηχανική των πινάκων του Heisenberg. (Τραχανάς, 2014, σελ. 40)

Μπορεί οι δύο θεωρίες από τεχνική άποψη να είναι μαθηματικά ισοδύναμες, η φυσική τους ερμηνεία όμως είναι διαφορετική. Η κυματομηχανική του Schrödinger βασίζεται σε κυματικές εξισώσεις για να περιγράψει κύματα και να υπερασπιστεί τη συνέχεια, ενώ η άλγεβρα των πινάκων του Heisenberg περιγράφει σωματίδια και ασυνέχεια. Μεταξύ τους υπήρχαν έντονες αντιπαράθεσεις με τον Schrödinger να λέει ότι η μηχανική των μητρών του δημιουργούσε «αισθήματα αποθάρρυνσης, ίσως και αποστροφής» (Moore, 1989, σελ. 211) και τον Heisenberg να λέει στον Pauli ότι βρίσκει τη φυσική ερμηνεία της θεωρίας του Schrödinger «αποκρουστική» (Cassidy, 1992, σελ. 215). Όταν ο Schrödinger έλαβε πρόσκληση από τον Sommerfeld να δώσει δύο διαλέξεις στο Μόναχο, αυτός δέχτηκε. Κατά τη διάρκεια των διαλέξεων ο Heisenberg που παρακολουθούσε αντέδρασε έντονα και ο μεγαλύτερος σε ηλικία Wien αναγκάστηκε να επέμβει και να τον βάλει στη θέση του. (Moore, 1989, σελ. 222)

Αλλά και ο Bohr όταν προσκάλεσε τον Schrödinger στην Κοπενχάγη για να μιλήσει στο Ινστιτούτο για την κυματομηχανική του έδειξε την βαθιά αντίθεσή του στην φυσική ερμηνεία που πρότεινε ο Schrödinger για τη νέα φυσική. Μάλιστα, ο Bohr τον πίεσε τόσο πολύ που φαίνεται να είπε την γνωστή έκφραση ότι αν τα «καταραμένα κβαντικά άλματα» ήταν να μείνουν στην φυσική, αυτός λυπόταν που ασχολήθηκε με την κβαντική θεωρία. (Heisenberg, 1971, σελ. 73-5)

Ο Schrödinger όπως εξάλλου και ο Einstein υπερασπιζόταν μια κλασική εικόνα της φυσικής πραγματικότητας βασισμένη στη συνέχεια και την αιτιοκρατία. Όμως δεν έβρισκε απάντηση στο ερώτημα τι ακριβώς αντιπροσωπεύει η κυματοσυνάρτηση Ψ στην εξίσωσή του. Και την απάντηση την έδωσε ο Max Born όταν διαπίστωσε ότι στο κέντρο του κβαντικού κόσμου βρίσκονται οι πιθανότητες.

Η επιστημονική κοινότητα δέχτηκε με ενθουσιασμό την κυματομηχανική του Schrödinger. Ο Einstein τη χαρακτήρισε «αληθινή μεγαλοφυΐα» (Moore, 1989, σελ. 209), ο Sommerfeld έλεγε ότι η κυματομηχανική ήρθε για να μας σώσει από την μηχανική πινάκων. (Cassidy, 1992, σελ. 213). Ο Born αναγνώρισε την ανωτερότητά της ως μαθηματικό εργαλείο αφού έδινε εύκολα σχετικές λύσεις για το άτομο του υδρογόνου. (Born, 1978, σελ. 229). Αλλά και πολλοί άλλοι επιστήμονες ανακουφίστηκαν με την έλευση της εξίσωσης Schrödinger γιατί τα μαθηματικά που χρησιμοποιούσε ήταν πολύ πιο απλά από αυτά των πινάκων αλλά και οι ιδέες πιο οικείες σε σχέση με την δυσνόητη διατύπωση του Heisenberg. (Pais, 2000, σελ. 306) (Kumar, 2018, σελ. 312)

Για την συμβολή του στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ το 1933, το οποίο μοιράστηκε με τον Paul Dirac. Σαν άνθρωπος ο Schrödinger ήταν ανεξάρτητος, διασκεδαστικός, ευγενικός και γενναιόδωρος. Είχε αυτοποποιήσει και σύμφωνα με τον Born ήταν τέλειο και αποδοτικό μυαλό. Αγαπούσε το θέατρο, την ποίηση και την τέχνη και ενδιαφερόταν για τομείς όπως η λογοτεχνία και η φιλοσοφία. (Kumar, 2018, σελ. 302). Ήταν όμως γνωστός και για την ελευθεριάζουσα ερωτική του ζωή και η συμβίωση με την γυναίκα του, Άνναμαρί Μπέρτελ που παντρεύτηκε το 1920, και την εκάστοτε ερωμένη του που δημιουργούσε πολλές φορές πρόβλημα στις ακαδημαϊκές του διεκδικήσεις. (Τραχανάς, 2025, σελ. 89)

Το 1927 ανέλαβε την έδρα του Planck στο Βερολίνο. Με την επιβολή του ναζιστικού καθεστώτος στη Γερμανία αναγκάστηκε να φύγει και αρχικά πήγε στην Αγγλία, στην Οξφόρδη με υποτροφία. Αργότερα έδωσε μια σειρά διαλέξεων στο Πρίνστον και του προσφέρθηκε εκεί θέση μόνιμου καθηγητή αλλά δεν τη δέχτηκε. Το 1936 έγινε καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Γκρατς, αλλά έφυγε σύντομα για την Ιταλία, μετά στην Αγγλία και αργότερα στο Βέλγιο στο Πανεπιστήμιο της Γάνδης. Τελικά μετακόμισε στην Ιρλανδία, και ανέλαβε τη θέση του διευθυντή της Σχολής Θεωρητικής Φυσικής στο Ινστιτούτο Προχωρημένων Σπουδών στο Δουβλίνο. Εκεί έμεινε μέχρι την συνταξιοδότησή του το 1955. (NobelPrize.org)

Μετά την δημοσίευση της διάσημης εξίσωσής του συνέχισε τις έρευνες και δημοσίευσε πολλές εργασίες. Ασχολήθηκε και με το πρόβλημα της ενοποίησης βαρύτητας και ηλεκτρομαγνητισμού που απασχόλησε και τον Einstein. Το 1935 δημοσίευσε μια εργασία στην οποία πρωταγωνιστούσε μια «κβαντική γάτα», η γάτα του Schrödinger με τίτλο «Η παρούσα κατάσταση στην Κβαντική Μηχανική». Ήθελε να δείξει πως η Σχολή της Κοπενχάγης οδηγεί σε παράλογα συμπεράσματα, γάτα ζωντανή και νεκρή συγχρόνως μέχρι η πράξη της μέτρησης να πραγματώσει τη μια ή την άλλη εκδοχή. (Τραχανάς, 2014, σελ. 40). Βέβαια μια τέτοια γάτα που συμπεριφέρεται σαν κβαντικό αντικείμενο δεν υπάρχει οπότε δεν κινδυνεύει να βρεθεί σε κατάσταση επαλληλίας και να θεωρείται ταυτόχρονα ζωντανή και νεκρή. (Τραχανάς, 2025, σελ. 203). Αυτή η εργασία μαζί με το παράδοξο EPR που δημοσιεύτηκε την ίδια χρονιά στόχευαν να αμφισβητήσουν τον εννοιολογικό πυρήνα της Ερμηνείας της Κοπενχάγης για την Κβαντομηχανική.

Το 1944 βλέποντας ότι οι συνέπειες της κβαντικής επανάστασης επηρέαζαν και άλλες επιστήμες όπως η χημεία και η βιολογία δημοσίευσε το βιβλίο «What Is Life?» στο οποίο προσπαθεί να εξηγήσει πώς οι νόμοι της φυσικής μπορούν να επηρεάσουν την κληρονομικότητα. Σ' αυτό διατυπώνεται πρώτη φορά η σύλληψη ότι οι γενετικές πληροφορίες ίσως είναι εγγεγραμμένες σε ένα γραμμικό μακρομόριο και έτσι μεταφέρονται. (Τραχανάς, 2014, σελ. 41)

Μετά την συνταξιοδότησή του επέστρεψε από την Ιρλανδία στη Βιέννη. Πέθανε από φυματίωση το 1961 σε ηλικία 73 ετών. Ένας τεράστιος κρατήρας στο πίσω μέρος της Σελήνης, στην αθέατη πλευρά της έχει πάρει το όνομα του Schrödinger.

3.5 Werner Heisenberg



Ο Werner Heisenberg γεννήθηκε το 1901 στο Βίρτσμπουργκ στη Γερμανία. Καταγόταν από ακαδημαϊκή οικογένεια και οι γονείς του ήταν ο Άουγκουστ Χάιζενμπεργκ και η Άνι Βέκλειν. Ο πατέρας του είχε τη θέση τακτικού καθηγητή μεσαιωνικών και σύγχρονων ελληνικών σπουδών στο Μόναχο στο Πανεπιστήμιο. Ο Heisenberg απέκτησε από νωρίς μια λαμπρή κλασική παιδεία και αγάπη προς την πλατωνική φιλοσοφία. (Τραχανάς, 2025, σελ. 107)

Φοίτησε στο Γυμνάσιο Μαξιμιλιανού μέχρι το 1920 μαζί με τον κατά δύο χρόνια μεγαλύτερο αδελφό του και από νωρίς έδειξε εξαιρετική κλίση στα μαθηματικά, τις θετικές επιστήμες και την κλασική φιλοσοφία. Διευθυντής του σχολείου ήταν ο παππούς τους που δημιουργούσε διαρκώς μαθηματικές προκλήσεις στους δύο νέους. Ο Heisenberg από 12 χρονών μάθαινε απειροστικό λογισμό. Ο πατέρας του τον εφοδίαζε με βιβλία μαθηματικών και βιβλία αρχαίων ελληνικών και λατινικών από την βιβλιοθήκη του Πανεπιστημίου. (Kumar, 2018, σελ. 267)

Μετά την αποφοίτησή του από το γυμνάσιο η αρχική σκέψη του Heisenberg ήταν να σπουδάσει μαθηματικά. Η συνέντευξη όμως για την είσοδό του στη σχολή δεν πήγε καλά οπότε με την βοήθεια του πατέρα του που ήταν παλιός φίλος με τον Arnold Sommerfeld ξεκίνησε να σπουδάζει φυσική δίπλα του στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου. (Kumar, 2018, σελ. 269). Ο πατέρας Heisenberg είχε φροντίσει εκ των προτέρων να ενημερώσει τον Sommerfeld για το ενδιαφέρον που έδειχνε ο γιος του για την σχετικότητα και την ατομική φυσική. (Heisenberg, 1971, σελ. 16)

Από την πρώτη παράδοση ο Sommerfeld είχε αφήσει τον Heisenberg να παρακολουθήσει ένα μάθημα για πιο προχωρημένους φοιτητές-γνώρισε τον Pauli με τον οποίο στη συνέχεια συνδέθηκαν στενά και άσκησε μεγάλη επιρροή στη μετέπειτα ζωή του. Ο Pauli εξάλλου ήταν

εκείνος που έστρεψε το ενδιαφέρον του Heisenberg από την Θεωρία της Σχετικότητας στο κβαντικό άτομο του Bohr.

Ως χαρακτήρας ο Heisenberg ήταν αγαπητός, ήσυχος, φιλικός. Του άρεσαν οι κατασκευασίες και οι πεζοπορίες με τους φίλους του, αγαπούσε την κλασική μουσική και έπαιζε πιάνο. (Kumar, 2018, σελ. 270)

Όταν ο Sommerfeld ανέθεσε στον Heisenberg ένα πρόβλημα ατομικής φυσικής πάνω στο διαχωρισμό των φασματικών γραμμών μέσα σε μαγνητικό πεδίο, η εξήγηση που πρότεινε ο Heisenberg για το ανώμαλο φαινόμενο Zeeman κέντρισε το ενδιαφέρον του Bohr. Η γνωριμία τους έγινε το 1922 όταν η ομάδα του Sommerfeld πήγε να παρακολουθήσει μια σειρά διαλέξεων του Bohr για την ατομική φυσική. Ο Bohr και ο Heisenberg έκαναν έναν περίπατο και η επίδραση της συζήτησης στον νεαρό Heisenberg ήταν τόσο μεγάλη ώστε ο ίδιος να πει αργότερα ότι μόλις εκείνο το απόγευμα ξεκινούσε πραγματικά η επιστημονική του σταδιοδρομία. (Heisenberg, 1971, σελ. 38)

Την ίδια χρονιά μετακόμισε στο Γκέτινγκεν για να συνεχίσει τις σπουδές του στη φυσική δίπλα στον Max Born που διέκρινε αμέσως την αξία του. Σε γράμμα του στον Einstein γράφει πως ο Heisenberg αναμφισβήτητα ήταν «τόσο προικισμένος όσο ο Pauli». (Born, 1978, σελ. 212). Επέστρεψε το 1923 στο Μόναχο και ολοκλήρωσε την διδακτορική του διατριβή με θέμα την τυρβώδη ροή. Λόγω κάποιων αδυναμιών στην διάρκεια της παρουσίας ο Wien, πρόεδρος του τμήματος πειραματικής φυσικής, απογοητεύτηκε από τον Heisenberg και του έδωσε χαμηλή βαθμολογία. (Kumar, 2018, σελ. 272)

Ο Heisenberg λοιπόν νιώθοντας ταπεινώση ξεκίνησε απογοητευμένος το ταξίδι του προς το Γκέτινγκεν όπου θα γινόταν βοηθός του Max Born. Την περίοδο εκείνη οι επιστήμονες που ασχολούνταν με την κβαντική θεωρία στόχευαν σε ένα εννοιολογικό ξεκαθάρισμα και προβληματίζονταν για την ανάμειξη κβαντικών κανόνων και κλασικής φυσικής στο κβαντικό άτομο των Bohr-Sommerfeld. Ο Born πίστευε πως η φυσική έπρεπε να ανοικοδομηθεί από τα θεμέλιά της. (Kumar, 2018, σελ. 273). Ο Pauli μιλούσε για την ανάγκη να δημιουργηθεί κάτι «θεμελιωδώς καινούριο» (Cassidy 1992, σελ. 168). Εκείνος βρισκόταν στην Κοπεγχάγη, ως βοηθός του Bohr, αλλά αντάλλαζαν γράμματα με τον Heisenberg και ενημέρωναν ο ένας τον άλλον για τις επιστημονικές εξελίξεις στα Ινστιτούτα τους πάνω στο ανώμαλο φαινόμενο Zeeman.

Το 1923 ο Heisenberg έλαβε πρόσκληση από τον Bohr να περάσει ένα διάστημα λίγων εβδομάδων στην Κοπεγχάγη. Παρά την αρχική του απογοήτευση επειδή από τη μια δεν κατάφερε να συναντήσει αμέσως τον Bohr και από την άλλη στο Ινστιτούτο-που το χαρακτήριζε μια κοσμικότητα που εκείνος δεν διέθετε-οι περισσότεροι κατανοούσαν την ατομική φυσική περισσότερο απ' αυτόν, όταν τελικά κατάφερε να συναντήσει τον Bohr μαγεύτηκε από την προσωπικότητά του. Ο Pauli είχε γράψει για τον Heisenberg στον Bohr ότι επρόκειτο για μια προικισμένη ιδιοφυΐα, οπότε ίσως σ' αυτό να οφειλόταν η θερμή υποδοχή από τον Bohr. (Kumar, 2018, σελ. 272-7)

Το διάστημα 1924-1925 ο Heisenberg, αφού ο καθηγητής Born θα έφευγε για να διδάξει στην Αμερική εκείνο το εξάμηνο, πήγε στην Κοπεγχάγη για να εργαστεί δίπλα στο Niels Bohr. Δούλεψε κυρίως πάνω στα προβλήματα της θεωρίας των Bohr-Sommerfeld και κυρίως πάνω στο πρόβλημα της ερμηνείας της διαφορετικής έντασης των φασματικών γραμμών που δεν μπορούσε να εξηγήσει η παραπάνω θεωρία. Επιστρέφοντας στο Γκέτινγκεν το 1925, έχοντας αποκομίσει σημαντικά οφέλη από τις συζητήσεις του με τον Bohr και τον διάλογό του με τον Pauli, μαζεύοντας νέα δεδομένα όπως το φαινόμενο Compton που επιβεβαίωνε τα κβάντα φωτός του Einstein και ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός της ύλης προσπάθησε με όλες του τις δυνάμεις να θεμελιώσει την κβαντική θεωρία σε νέες βάσεις.

Σ'εκείνη τη φάση δύο ήταν οι σημαντικές του αποφάσεις.Πρώτον ότι η ιδέα των τροχίων πάνω στις οποίες κινούνταν τα ηλεκτρόνια έπρεπε να εγκαταλειφθεί και δεύτερον η θεωρία του θα έπρεπε να στηρίζεται αποκλειστικά σε παρατηρήσιμες ποσότητες.Βρισκόταν σε κακή διάθεση,ασφυκτιούσε στο Γκέτινγκεν καταβάλλοντας έντονες προσπάθειες να εξηγήσει την διαφορετική ένταση των φασματικών γραμμών στο άτομο του υδρογόνου και την πίεσή του έκανε ακόμη μεγαλύτερη μια κρίση αλλεργικής καταρροής.

Αφού δεν μπορούσε να δουλέψει πήρε άδεια για δύο εβδομάδες και πήγε σε ένα μικρό νησί της Βόρειας Θάλασσας,την Ελιγολάνδη.Εκεί μπόρεσε να ξεκουραστεί,κολυμπούσε,έκανε περιπάτους,η υγεία του βελτιώθηκε και μπόρεσε να επικεντρωθεί ξανά στα προβλήματα της ατομικής φυσικής.(Kumar,2018,σελ.283)Στην Ελιγολάνδη ο Heisenberg συνέλαβε τον μαθηματικό φορμαλισμό της μηχανικής των πινάκων-μητρών-για να περιγράψει τις μεταβάσεις,τα άλματα των ηλεκτρονίων μεταξύ των ενεργειακών σταθμών του ατόμου.Και η σύλληψή του που έθεσε τις βάσεις της νέας μηχανικής γίνεται ακόμη πιο σπουδαία αν σκεφτούμε πως ο Heisenberg δεν γνώριζε τους πίνακες ως μαθηματικά εργαλεία.Ο ίδιος περιγράφει πώς αισθάνθηκε μπροστά στη νέα του ανακάλυψη.Ένωθε πολύ χαρούμενος αλλά και αναστατωμένος,γεμάτος με την αδρεναλίνη της ανακάλυψης.(Heisenberg,1971,σελ.61)

Γυρνώντας στο Γκέτινγκεν απευθύνθηκε στον Pauli για να του πει τη γνώμη του και εισέπραξε ενθαρρυντικά σχόλια για την εργασία του.(Cassidy,1992,σελ.204)Στη συνέχεια έδωσε το άρθρο του στον Born ο οποίος γοητεύτηκε αμέσως.(Kumar,2018,σελ.289)Αρχικά ο Born,όπως έγραφε στον Einstein, δεν μπορούσε να ερμηνεύσει την σχέση $X \cdot P - P \cdot X = i \cdot \hbar / 2\pi$ (Born,2005,σελ.82) σύντομα όμως ενθουσιάζονταν μια διάλεξη που είχε παρακολουθήσει παλιότερα κατάλαβε πως επρόκειτο για πολλαπλασιασμό πινάκων που δεν ισχύει η αντιμεταθετική ιδιότητα.Ο Born ζήτησε τότε βοήθεια από τον Jordan που είχε σημαντικό μαθηματικό υπόβαθρο στη θεωρία των πινάκων και μαζί κατάφεραν να εξελίσσουν τις ιδέες του Heisenberg σε μια νέα,συστηματική θεωρία κβαντικής μηχανικής ,την μηχανική των πινάκων.(Matrizenphysik)(Kumar,2018,σελ.293)

Οι τρεις λοιπόν σπουδαίοι επιστήμονες,Heisenberg,Born και Jordan δημοσίευσαν την εργασία *Drei Männer Arbeit* στην οποία παρουσίαζαν τη νέα κβαντική μηχανική.(Kumar,2018,σελ.294)Ο Pauli στη συνέχεια εφάρμοσε την μηχανική των πινάκων για να εξάγει το γραμμικό φάσμα του υδρογόνου υπολογίζοντας μάλιστα και την επίδραση του φαινομένου Stark πράγμα που στεναχώρησε κάπως τον Heisenberg που θα επιθυμούσε να εξάγει ο ίδιος πρώτος το φάσμα του υδρογόνου από την θεωρία του.(Pais,2000,σελ.224)

Τον Απρίλιο του 1926 ο Heisenberg έδωσε διάλεξη στο Πανεπιστήμιο του Βερολίνου,το «προπύργιο της φυσικής στη Γερμανία»,όπως ο ίδιος το χαρακτήριζε (Heisenberg,1971,σελ.62)Την διάλεξη παρακολούθησε και ο Einstein που εξέφρασε τις αντιρρήσεις του στη θεωρία των πινάκων και την άποψη ότι αυτή πρέπει να βασίζεται αποκλειστικά σε παρατηρήσιμα μεγέθη.Μάλιστα ο Einstein υποστήριξε πως «η θεωρία αποφασίζει τί μπορούμε να παρατηρήσουμε» (Heisenberg,1971,σελ.63).Αυτή η φράση του Einstein αποτέλεσε κομβικό σημείο για να φτάσει ο Heisenberg λίγο αργότερα στην Αρχή της Αβεβαιότητας.(Kumar,2018,σελ.352)

Το Μάιο του 1926 ο Heisenberg έγινε Λέκτορας στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης.Εκεί έδινε διαλέξεις και βρισκόταν σε στενή συνεργασία με τον Bohr για να αναλύσουν τα νέα δεδομένα και τις προοπτικές της κβαντικής θεωρίας.Ο Heisenberg συχνά επισκεπτόταν το σπίτι των Bohr και πολλές φορές ο Bohr πήγαινε στο δωμάτιό του και συζητούσαν ως αργά τη νύχτα.(Pais,1991,σελ.297).Αυτό που τους απασχολούσε,ιδιαίτερα μετά την επίσκεψη του Schrödinger ήταν η φυσική ερμηνεία της μηχανικής των πινάκων και της κυματομηχανικής.Το βασικότερο πρόβλημα ήταν ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός.

Όσο περνούσε ο καιρός η ένταση μεταξύ τους μεγάλωνε αφού υιοθέτησαν διαφορετική προσέγγιση στην επίλυση του προβλήματος.Ο Heisenberg ήταν προσηλωμένος στην Διπλωματική Εργασία

σωματιδιακή φύση με τα κβαντικά άλματα και την ασυνέχεια ενώ ο Bohr έψαχνε τρόπο συνύπαρξης κυμάτων και σωματιδίων. Και ενώ είχαν καθηλωθεί σε μια ατελείωτη αντιπαράθεση, όταν κάποια στιγμή ο Bohr έλειπε σε άδεια, ο Heisenberg συνέλαβε την απάντηση που θα έλυνε τα προβλήματά τους. Ήταν η Αρχή της Αβεβαιότητας. (Kumar, 2018, σελ. 339-44)

Ο Heisenberg έστειλε πρώτα την εργασία του στον Pauli και αφού τα σχόλια ήταν πολύ θετικά μετά την έδειξε στον Bohr. Ήταν ένα ακόμη σημάδι ότι οι σχέσεις τους ήταν τεταμένες. (Pais, 1991, σελ. 304). Όταν ο Bohr διάβασε το άρθρο είπε πως «μάλλον δεν είναι σωστό» (Cassidy, 1992, σελ. 241) και έθεσε τους προβληματισμούς του κυρίως όσον αφορά την παράλειψη του Heisenberg να συμπεριλάβει στη μελέτη του και την κυματική ερμηνεία. Την περίοδο εκείνη ο Bohr εργαζόταν πάνω στη συμπληρωματικότητα. Τελικά, μετά από πολλά επιχειρήματα και από τις δύο πλευρές, στο τελικό άρθρο που δημοσίευσε ο Heisenberg για την Αρχή της Αβεβαιότητας παραδέχτηκε ότι ο Bohr του είχε επισημάνει κάποια κρίσιμα σημεία τα οποία ο ίδιος είχε παραβλέψει. (Kumar, 2018, σελ. 365)

Τον Ιούνιο του 1927 έγινε τακτικός καθηγητής στο Πανεπιστήμιο της Λειψίας σε ηλικία μόλις 26 ετών. (Kumar, 2018, σελ. 366) Το 1928 χρησιμοποιώντας την Απαγορευτική Αρχή του Pauli εξήγησε το φαινόμενο του σιδηρομαγνητισμού. Αργότερα, μαζί με τον Pauli έβαλαν τις βάσεις της σχετικιστικής θεωρίας πεδίων. Το 1932 με τρεις εργασίες βασιζόμενος στην ισοτοπική συμμετρία-ότι το πρωτόνιο και το νετρόνιο από πλευράς ισχυρών πυρηνικών δυνάμεων μπορούν να αντιμετωπιστούν ως εννιαίο πυρηνικό σωματίδιο, το νουκλεόνιο-έθεσε τις βάσεις για την μετέπειτα ανάπτυξη της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων. Μαζί με τον Dirac θεωρούνται οι θεμελιωτές της σχετικιστικής κβαντομηχανικής. (Τραχανάς, 2014, σελ. 49)

Για την δημιουργία της κβαντομηχανικής και τις εφαρμογές της ο Heisenberg τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ το 1932. Το 1937 παντρεύτηκε την Ελίζαμπεθ Σουμάχερ και απέκτησαν μαζί 7 παιδιά (NobelPrize.org).

Με την επιβολή του ναζιστικού καθεστώτος στη Γερμανία κατηγορήθηκε αρχικά από τους ναζί ότι διδάσκει «εβραϊκές θεωρίες», όπως η κβαντομηχανική και η θεωρία της σχετικότητας. Στη συνέχεια όμως τον έθεσαν επικεφαλής του γερμανικού πυρηνικού προγράμματος που σύμφωνα με τον ίδιο είχε στόχο την παραγωγή ενέργειας και όχι την κατασκευή ατομικής βόμβας (Uranprojekt) (Τραχανάς, 2014, σελ. 51)

Μετά το τέλος του πολέμου ο Heisenberg συνελήφθη από τις αμερικανικές δυνάμεις και μαζί με άλλους επιστήμονες μεταφέρθηκαν στην Αγγλία, όπου κρατήθηκαν για οκτώ μήνες αιχμάλωτοι και ανακρίθηκαν για να διαπιστωθεί πόσο κοντά είχαν φτάσει οι γερμανοί στην κατασκευή της ατομικής βόμβας (Operation Epsilon) (Τραχανάς, 2014, σελ. 52)

Το 1946 επέστρεψε στη Γερμανία, στο Γκέτινγκεν. Ήταν διευθυντής του Ινστιτούτου Κάιζερ Βίλχελμ-που αργότερα μετονομάστηκε σε Ινστιτούτο Max Planck-το οποίο αναδιοργάνωσε με τους συνεργάτες του. Το 1948 βρέθηκε στο Cambridge για να δώσει διαλέξεις και στη συνέχεια την περίοδο 1950 έως 1954 στις Ηνωμένες Πολιτείες. Επιστρέφοντας στη Γερμανία οργάνωσε την μεταφορά του Ινστιτούτου στο Μόναχο και συνέχισε να είναι διευθυντής εκεί και συγχρόνως το 1958 έγινε και καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Μονάχου. (NobelPrize.org)

Μετά τον πόλεμο αντιστάθηκε στον εξοπλισμό του στρατού της Δυτικής Γερμανίας με πυρηνικά όπλα (Διακήρυξη Γκέτινγκεν, 1957). Πέθανε στο Μόναχο το 1976.

3.6 Wolfgang Pauli



Ο Wolfgang Pauli γεννήθηκε το 1900 στη Βιέννη. Καταγόταν από ευκατάστατη οικογένεια, εβραϊκής κυρίως καταγωγής-την οποία ο ίδιος δεν γνώριζε, αφού η οικογένειά του προσηλυτίστηκε στον καθολικισμό για να αποφύγει τον αντισημιτισμό-, με επιστημονική παιδεία. Ο πατέρας του ήταν γιατρός, αλλά στην πορεία στράφηκε προς τις φυσικές επιστήμες. Μάλιστα, ήταν επικεφαλής ενός πανεπιστημιακού ινστιτούτου ιατρικής χημείας στη Βιέννη. Η μητέρα του, Μπέρτα, ήταν δημοσιογράφος και συγγραφέας. Ο Pauli επομένως και η μικρότερη αδελφή του μεγάλωσαν μέσα σε ένα πνευματικό περίγυρο από σημαντικά πρόσωπα των τεχνών και της επιστήμης. Νονός του ήταν ο διάσημος φυσικός και φιλόσοφος της επιστήμης Ernst Mach. (Kumar, 2018, σελ. 238) Την επαφή μαζί του χαρακτήριζε ο Pauli το σημαντικότερο γεγονός της πνευματικής του ζωής (Pais, 2000, σελ. 213)

Τα σχολικά χρόνια ήταν πληκτικά γι' αυτόν, το σχολείο δεν του προκαλούσε κανένα ενδιαφέρον. Πολλές φορές κατά τη διάρκεια κάποιου ανιαρού μαθήματος διάβαζε κρυφά άρθρα του Einstein. Το 1918 όταν τελείωσε το λύκειο έφυγε από τη Βιέννη και μετακόμισε στο Μόναχο για να σπουδάσει στο τμήμα θεωρητικής φυσικής υπό την καθοδήγηση του Arnold Sommerfeld. Ο Sommerfeld αναγνώρισε αμέσως την αξία του Pauli. Όταν ήταν 19 ετών δημοσίευσε την πρώτη του εργασία με θέμα την γενική θεωρία της σχετικότητας. Δύο χρόνια αργότερα ο Sommerfeld του ζήτησε να γράψει ένα άρθρο για την γενική θεωρία της σχετικότητας που θα δημοσιευόταν στην Encyclopädie der Mathematischen Wissenschaften, το οποίο ήταν τόσο πλήρες και εμπεριστατωμένο που εντυπωσίασε και τον Einstein. (Kumar, 2018, σελ. 241) Το 1921 ολοκλήρωσε την διδακτορική του διατριβή με θέμα την εφαρμογή της κβαντικής θεωρίας στο ιοντισμένο μοριακό υδρογόνο. (Τραχανάς, 2025, σελ. 127). Αυτή αποτέλεσε την πρώτη σοβαρή ένδειξη ότι το μοντέλο Bohr-Sommerfeld για το κβαντικό άτομο δεν μπορούσε να είναι πλέον αποδεκτό αφού δεν έδινε σωστές προβλέψεις ούτε για το ιοντισμένο μόριο υδρογόνου. (Kumar, 2018, σελ. 243)

Στη συνέχεια πέρασε ένα χρόνο στο Γκέτινγκεν ως βοηθός καθηγητής θεωρητικής φυσικής δίπλα στον Max Born που ήταν διευθυντής του ινστιτούτου θεωρητικής φυσικής του πανεπιστημίου. Ο Born ήταν ενθουσιασμένος με την ευφυΐα και τις ικανότητές του, όπως έγραφε σε ένα γράμμα στον Einstein. (Born, 2005, σελ. 56). Αργότερα, το 1922 έγινε βοηθός καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Αμβούργου. Το 1922 ήταν επίσης η χρονιά που πρωτοσυνάντησε τον Bohr ο οποίος τον προσκάλεσε στην Κοπενχάγη για ένα χρόνο ως βοηθό του.

Η μετάβασή του στην Κοπενχάγη θα σηματοδοτούσε την αρχή μιας «νέας φάσης» στη ζωή του. (Pauli, 1946a, σελ. 213). Εκεί ασχολήθηκε με το ανώμαλο φαινόμενο Zeeman και προσπάθησε να εξηγήσει το διαχωρισμό των γραμμών των ατομικών φασμάτων όταν τα άτομα βρεθούν μέσα σε ισχυρό μαγνητικό πεδίο. Έφτανε όμως συνεχώς μπροστά σε αδιέξοδα και βρισκόταν σε απόγνωση (Pais, 2000, σελ. 221).

Ο Pauli ως επιστήμονας διακρινόταν από μεγάλη διαισθητική σύλληψη της φυσικής. Όταν αναζητούσε ένα λογικό και έγκυρο επιχείρημα για την επίλυση κάποιου προβλήματος φυσικής βασιζόταν πολύ στη φυσική του διαίσθηση η οποία μόνο με του Einstein μπορούσε να παρομοιαστεί. (Kumar, 2018, σελ. 240) Ήταν επίσης γνωστή η αυστηρή και τελειομανής κριτική που ασκούσε στις νέες ιδέες που του έδειχναν οι συνάδελφοί του θέλοντας να τους οδηγήσει στη σωστή κατεύθυνση ώστε πολλοί να τον αποκαλούν «συνείδηση της φυσικής». Και ιδιαίτερα όταν αυτές οι ιδέες διακρίνονταν από ασάφεια και περιείχαν εικασίες. Είναι γνωστή η φράση του: «Όχι απλά δεν είναι σωστή, αλλά δεν είναι καν λάθος!» προκειμένου να σχολιάσει με περιφρόνηση μια εργασία με ασαφείς και συγκεχυμένες ιδέες. Βέβαια αυτή η τελειοθηρική αυστηρότητα στρεφόταν και προς τον εαυτό του ώστε να γίνεται ακόμη δριμύτερος επικριτής της δικής του δουλειάς. (Τραχανάς, 2025, σελ. 127)

Οι συνήθειές του και παλιότερα ως φοιτητής και αργότερα ως καθηγητής ήταν να ξενυχτάει απόλαμβάνοντας τη νυχτερινή ζωή στα μπαρ και τα καφέ και γενικά υιοθετούσε έναν μποέμικο τρόπο ζωής. Αργούσε να ξυπνήσει και να σηκωθεί απ' το κρεβάτι και σπάνια παρακολουθούσε διαλέξεις το επόμενο πρωί. Βέβαια είχε και τη συνήθεια επιστρέφοντας από τις εξόδους να εργάζεται στο διαμέρισμά του το μεγαλύτερο μέρος της νύχτας. (Kumar, 2018, σελ. 242). Μεταξύ των συναδέλφων του κυκλοφορούσε και ένα αστείο, το «φαινόμενο Pauli», δηλαδή τα ατυχήματα που συνέβαιναν στα εργαστήρια και οι ανεξήγητες βλάβες στον εξοπλισμό που προκαλούνταν από την παρουσία του (Τραχανάς, 2014, σελ. 58).

Επιστρέφοντας στο Αμβούργο το 1923 έγινε Privatdozent. Το 1924, αφού μελέτησε την εργασία του Edmund Stoner, μεταπτυχιακού φοιτητή στο Cambridge, που είχε δημοσιευτεί στο Philosophical Magazine και εξέφραζε την ιδέα ότι μια ηλεκτρονιακή στιβάδα θα είναι συμπληρωμένη αν ο αριθμός των ηλεκτρονίων γίνει διπλάσιος, ο Pauli υποστήριξε την ύπαρξη ενός τέταρτου κβαντικού αριθμού που μπορούσε να πάρει δύο μόνο τιμές και γι' αυτό τον ονόμασε -Zweideutigkeit- διτιμία. (Kumar, 2018, σελ. 252) Μ' αυτό τον τρόπο “διπλασίασε” την χωρητικότητα των ενεργειακών επιπέδων πράγμα που όπως φάνηκε σύντομα οφειλόταν στο spin και τη δυνατότητα του ηλεκτρονίου να έχει spin πάνω ή κάτω. (Τραχανάς, 2025, σελ. 128)

Το 1924 ο Pauli συνέλαβε την περίφημη Απαγορευτική Αρχή που φέρει το όνομά του, η οποία αποκλείει την ύπαρξη στο άτομο δύο ηλεκτρονίων που να έχουν και τους τέσσερις κβαντικούς αριθμούς ίδιους και μπόρεσε να εξηγήσει το ατομικό μοντέλο με τις ηλεκτρονιακές στιβάδες του Bohr αλλά και τη διάταξη των χημικών στοιχείων στον περιοδικό πίνακα.

Το 1925 οι Γκούντσμιτ και Ούλενμπεκ υποστήριζαν πως η “διτιμία” που πρότεινε ο Pauli ήταν μια εγγενής ιδιότητα για το ηλεκτρόνιο που ονόμασαν spin. Αλλά και λίγο νωρίτερα ο

Ραλφ Κρόνιχ είχε πρωτοαναφέρει την ιδέα του ηλεκτρονιακού spin. Ωστόσο, αρχικά ο Pauli απέρριψε χλευαστικά την πρόταση. Όταν στη συνέχεια το ηλεκτρονιακό spin έγινε αποδεκτό, ο Κρόνιχ θυμωμένος παραπονέθηκε πως ο Pauli και η δριμύτατη αποδοκιμασία του ήταν η αιτία που δεν είχε δημοσιεύσει την ιδέα του. (Pais, 2000, σελ. 305)

Όταν το 1928 ο Pauli έγινε καθηγητής στο Πολυτεχνείο της Ζυρίχης ζήτησε από τον Κρόνιχ να γίνει βοηθός του και εκείνος δέχτηκε. Μεγάλο διάστημα πέρασε και στην Αμερική ως επισκέπτης καθηγητής στο Πανεπιστήμιο του Μίσιγκαν και στο Ινστιτούτο Προχωρημένων σπουδών στο Πρίνστον. Το 1934 παντρεύτηκε την γυναίκα του Franciska Bertram. Όταν ξεκίνησε ο Β Παγκόσμιος Πόλεμος μετακόμισε και πάλι στις Ηνωμένες Πολιτείες και επέστρεψε στην Ευρώπη το 1946.

Εκτός από την διατύπωση της Απαγορευτικής Αρχής του-για την οποία τιμήθηκε με Βραβείο Νόμπελ το 1945- και την κβαντική περιγραφή του spin η συνεισφορά του στον τομέα της θεωρητικής φυσικής και ειδικά της κβαντομηχανικής και της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων δεν σταματά εκεί. Ο Pauli ήταν αυτός που βοήθησε τους Heisenberg, Born και Jordan όταν χρειάστηκε να επιλύσουν μαθηματικά το πρόβλημα του ατόμου του υδρογόνου με τη χρήση της μηχανικής μητρών και η λύση που πρότεινε ήταν πραγματικά μαθηματικά ιδιοφυής ώστε αυτή η εργασία του να θεωρείται μια από τις σημαντικότερες ιδρυτικές εργασίες της Νέας Μηχανικής. (Τραχανάς, 2025, σελ. 127).

Ακόμη ο Pauli αναγνώρισε πρώτος την ύπαρξη του νετρίνου, ενός σωματιδίου χωρίς μάζα και φορτίο, το οποίο παραγόταν κατά τη διάσπαση β λύνοντας μ' αυτό τον τρόπο το φαινομενικό πρόβλημα της παραβίασης της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας. Επιπλέον ήταν σπουδαία η συμβολή του στη θεμελίωση της κβαντικής θεωρίας πεδίων. Πέθανε το 1958 στη Ζυρίχη. (NobelPrize.org)

3.7 Paul Dirac



Ο Paul Dirac γεννήθηκε το 1902 στο Μπρίστολ της Αγγλίας. Σε αντίθεση με τους περισσότερους επιστήμονες της εποχής αυτός καταγόταν από μια οικογένεια χωρίς το οικονομικό και πνευματικό υπόβαθρο των υπολοίπων. Ο πατέρας του, Σαρλ, γαλλόφωνος ελβετός ήταν δάσκαλος γαλλικών και η αγγλίδα μητέρα του, Φλόρενς, εργαζόταν ως βιβλιοθηκάριος στη δημόσια τοπική βιβλιοθήκη. (Τραχανάς, 2025, σελ. 144)

Ο Dirac πέρασε δύσκολα παιδικά χρόνια. Αυτό οφειλόταν κυρίως στον ψυχρό και αυταρχικό πατέρα του ο οποίος εκτός των άλλων υποχρέωνε τα παιδιά του να του μιλούν μόνο στα γαλλικά. Το αποτέλεσμα για τον Dirac που από τη φύση του ήταν κλειστός και μοναχικός χαρακτήρας ήταν να σταματήσει να μιλάει κάτι που συνεχίστηκε και στην ενήλικη ζωή του που υπήρξε εξαιρετικά λιγομίλητος και προσηλωμένος στην ακρίβεια του λόγου. Όταν ο μεγαλύτερος αδελφός του αυτοκτόνησε το 1925 ο Dirac παρατήρησε έκπληκτος ότι οι γονείς του είχαν ταραχτεί και νοιάζονταν τόσο πολύ. Επίσης ο ίδιος παραδέχεται ότι αισθανόταν πολύ πιο ελεύθερος μετά τον θάνατο του πατέρα του. (Kumar, 2018, σελ. 296)

Ο Dirac φοίτησε στο τεχνικό Γυμνάσιο Merchant Venturer's στο Μπρίστολ και στη συνέχεια σπούδασε ηλεκτρολόγος μηχανικός και πήρε το πτυχίο του το 1921. Παρόλο που αποφοίτησε με άριστα δεν κατάφερε να βρει δουλειά λόγω της οικονομικής ύφεσης μετά τον Πρώτο Παγκόσμιο Πόλεμο. Αν και είχε κερδίσει υποτροφία και πέρασε τις εισαγωγικές εξετάσεις, τα χρήματα δεν επαρκούσαν για να φοιτήσει στο κολλέγιο St John's στο Cambridge οπότε έμεινε στο Μπρίστολ και σπούδασε μαθηματικά για τα επόμενα δύο χρόνια. Το 1923 πήρε το Διπλωματική Εργασία

πτυχίο του και έχοντας την υποτροφία και μια επιπλέον κυβερνητική επιχορήγηση από το Ίδρυμα επιστημονικής και βιομηχανικής έρευνας κατάφερε να πάει στο Cambridge και να σπουδάσει θεμελιώδη φυσική.(Kumar,2018,σελ.296)

Ως χαρακτήρας ο Dirac ήταν εσωστρεφής και συνεσταλμένος.Από τη φύση του λιγομίλητος,διάλεγε με ιδιαίτερη προσοχή τις λέξεις όταν ήθελε να εκφραστεί προφορικά ή γραπτά.Όντας εσωστρεφής και μοναχικός περνούσε στο Cambridge τις ώρες κυρίως μόνος του στο δωμάτιό του ή στη βιβλιοθήκη.Τις Κυριακές έκανε μόνος του περιπάτους στην εξοχή.(Kumar,2018,σελ.297)Επίσης,αγαπούσε πολύ την ορειβασία και πολλές φορές αναρριχώνταν στα ψηλά δέντρα που υπήρχαν στο χώρο του Πανεπιστημίου.Όσον αφορά στη σχέση του με την θρησκεία,ο Dirac δήλωνε άθεος.Πίστευε πως η θρησκεία δεν πρόσφερε κάτι στον σύγχρονο άνθρωπο που γνώριζε τους νόμους που κυβερνούν τη φύση και ο μόνος λόγος που υπάρχει είναι γιατί χρησιμεύει στις εκμεταλλεύτριες τάξεις.(Τραχανάς,2025,σελ.146)

Στο Cambridge επιβλέπων καθηγητής του ήταν ο Ραλφ Φάουλερ που συνέβαλε στην μύηση του Dirac στην κβαντική φυσική αφού έστρεψε την προσοχή του στη δουλειά του Heisenberg όταν το 1925 του έδωσε να μελετήσει μια εργασία του.Όταν ο Dirac μελέτησε την εργασία του Heisenberg ήταν ο πρώτος που συνειδητοποίησε ότι η μη μεταθετικότητα των πινάκων θέσης και ορμής ($XP \neq PX$) ήταν η βάση της νέας μηχανικής και «το κλειδί όλου του μυστηρίου»(Dirac,1977,σελ.116).Το 1926 έλαβε το διδακτορικό του και η διατριβή του είχε θέμα την κβαντική μηχανική.

Μάλιστα,από το 1925 ο Dirac-φοιτητής στο Κέντρο Ανωτέρων Σπουδών στο Cambridge-είχε στείλει γράμμα στον Born με το άρθρο του που περιείχε τα βασικά εργαλεία της κβαντικής μηχανικής,μια μη αντιμεταθετική άλγεβρα που υπολόγιζε τις ατομικές ιδιότητες,το οποίο εξέπληξε βαθιά τον Born και το χαρακτήρισε σε όλα τα σημεία του τέλει.(Born,1978,σελ.226).Είναι σημαντικό να αναφερθεί ότι την εργασία αυτή ο Dirac την ολοκλήρωσε και την έστειλε για δημοσίευση εννιά μέρες πριν ολοκληρωθεί το άρθρο των Heisenberg,Born και Jordan Drei Männer Arbeit.(Kumar,2018,σελ.295)

Το 1928 ο Dirac παρουσίασε την κυματική εξίσωσή για τα σωματίδια με spin $1/2$,μια σχετικιστική εξίσωση Schrödinger και πέτυχε τη σύνθεση της κβαντομηχανικής με τη σχετικότητα.Για να λύσει το πρόβλημα των αρνητικών ενεργειών και την πιθανότητα μετάβασης με ένα κβαντικό άλμα ενός σωματιδίου θετικής ενέργειας στο χώρο των αρνητικών ενεργειών υιοθέτησε την ιδέα της θάλασσας Fermi,όπου όλες οι στάθμες αρνητικής ενέργειας ήταν γεμάτες με ζεύγη σωματιδίων με αντίθετο spin και έτσι το άλμα προς τις αρνητικές ενέργειες μπορούσε να αποφευχθεί.(Τραχανάς,2025,σελ.153).Προέβλεψε την ύπαρξη αντισωματιδίων και την ανάγκη τα ηλεκτρόνια-για να είναι δυνατή η «πλήρωση» της θάλασσας Fermi -να είναι φερμιόνια και να υπακούν επομένως στην Απαγορευτική Αρχή του Pauli.(Τραχανάς,2014,σελ.59-60)

Το κορυφαίο του επίτευγμα όπως ο ίδιος το χαρακτηρίζει είναι το βιβλίο του *Αρχές της Κβαντομηχανικής* που εξέδωσε το 1930 στο οποίο παρουσιάζεται ο φορμαλισμός Dirac και γίνεται φανερή η φυσική και μαθηματική ιδιοφυΐα του ώστε να προκαλεί τον θαυμασμό ακόμα και σήμερα.Ο Dirac έκανε αυτό που χρειαζόταν εκείνη τη στιγμή η κβαντομηχανική,ένα «νοικοκύρεμα» που μπορεί να συγκριθεί μόνο με αυτό που έκανε ο Ευκλείδης στη γεωμετρία.(Τραχανάς,2025,σελ.148)

Η δουλειά του Dirac έθεσε τις βάσεις της κβαντικής θεωρίας πεδίων και ειδικότερα της κβαντικής ηλεκτροδυναμικής.Ανάμεσα στις θεμελιώδεις ανακαλύψεις του είναι και η θεωρία των μαγνητικών μονοπόλων καθώς και η κβάντωση του ηλεκτρικού φορτίου.Το 1933 Διπλωματική Εργασία

τιμήθηκε με το Βραβείο Νόμπελ για την «ανακάλυψη γόνιμων μορφών ατομικής θεωρίας» μαζί με τον Erwin Schrödinger. (Τραχανάς,2014,σελ.61).

Στη διάρκεια της ακαδημαϊκής του ζωής ταξίδεψε και σπούδασε σε πολλά πανεπιστήμια,στην Κοπενχάγη,το Γκέτινγκεν,αλλά και στην Αμερική στο Μίσιγκαν και στο Πρίνστον ως Επισκέπτης Καθηγητής,και στη συνέχεια σε πολλά μέρη του κόσμου όπως στην Ιαπωνία με τον Heisenberg.(NobelPrize.org).Το 1932 πήρε τη Λουκασιανή έδρα μαθηματικών στο Πανεπιστήμιο του Cambridge το οποίο αποτελούσε ιδιαίτερη τιμή και έγινε μέλος στη Βασιλική Εταιρεία του Λονδίνου.Αργότερα,το 1970 μετακόμισε στην Αμερική για να διδάξει στο Πανεπιστήμιο της Φλόριντα και εκεί έμεινε μέχρι το τέλος της ζωής του.Τάφηκε αρχικά εκεί αλλά στη συνέχεια μεταφέρθηκε στο Λονδίνο στο αββαείο Ουέστμινστερ.

4.Η ΚΒΑΝΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗ ΣΤΟ ΛΥΚΕΙΟ

4.1 Σενάριο διδασκαλίας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

ΤΙΤΛΟΣ:ΤΟ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

ΤΑΞΗ:Γ ΛΥΚΕΙΟΥ

**ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ:ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ Γ
ΛΥΚΕΙΟΥ,ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7,ΕΝΟΤΗΤΑ 7.3**

ΔΙΑΡΚΕΙΑ:3 ΔΙΔΑΚΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ

ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ:

Με την ολοκλήρωση της διδασκαλίας οι μαθητές θα πρέπει γνωστικά να είναι σε θέση να:

- 1.περιγράφουν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το αντίστοιχο κύκλωμα.
 - 2.ερμηνεύουν τα πειραματικά δεδομένα και τη σχέση των μεταβλητών και να αναγνωρίζουν την αδυναμία ερμηνείας τους από την κλασική φυσική.
 - 3.κατανοούν και να εφαρμόζουν σε ασκήσεις την φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein.
 - 4.σχεδιάζουν τις γραφικές παραστάσεις που περιγράφουν το φαινόμενο αξιοποιώντας τις πειραματικές μετρήσεις.
 - 5.να υπολογίζουν τη σταθερά του Planck h από την κλίση της γραφικής παράστασης $K=f(f)$
- Σε γενικότερο πλαίσιο σκοπος του διδακτικού σεναρίου είναι οι μαθητές:
- 1.Να εξασκηθούν σε πειραματικές διαδικασίες,να αναγνωρίζουν και να εφαρμόζουν πώς κάθε φορά αλλάζουμε μια παράμετρο και παρατηρούμε πώς επηρεάζονται οι άλλες μεταβλητές που υπεισέρχονται στο φαινόμενο και να εξασκηθούν στην επεξεργασία πραγματικών τιμών μέτρησης.
 - 2.Να εργάζονται ομαδικά και να αναπτύξουν κλίμα συνεργασίας.
 - 3.Να καλλιεργήσουν την κριτική σκέψη,να οδηγηθούν στην αποδοχή ή απόρριψη των αρχικών τους υποθέσεων,να ερμηνεύσουν,να εξηγήσουν και οδηγηθούν στην οικοδόμηση της γνώσης.

ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟΤΕΧΝΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ:

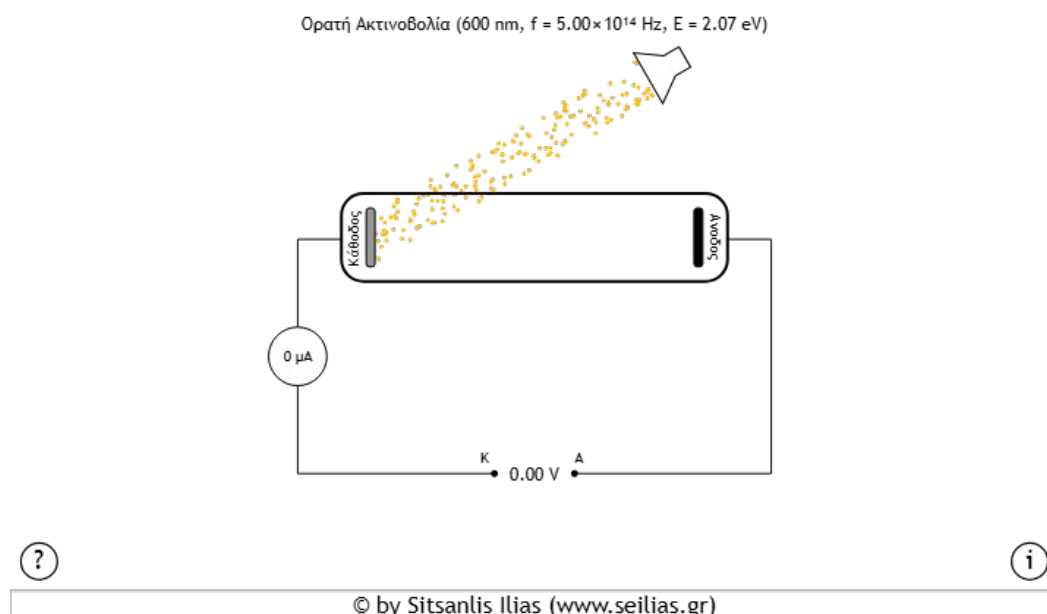
Το διδακτικό σενάριο θα υλοποιηθεί με την διερευνητική μέθοδο σε ομαδοσυνεργατικό πλαίσιο.Οι μαθητές θα χωριστούν σε ομάδες 4 ατόμων και θα γίνει προσπάθεια οι ομάδες να αποτελούνται από μαθητές διαφορετικής γνωσιακής ετοιμότητας,να υπάρχει διαφοροποίηση στο μαθησιακό τους επίπεδο ώστε να ωφεληθούν όλα τα μέλη από τη συνεργασία της ομάδας.

Ο ρόλος του εκπαιδευτικού θα είναι καθοδηγητικός και υποστηρικτικός.Ωστόσο,σε κάποια σημεία ίσως θα γίνει και μετωπική διδασκαλία μόνο αν αυτό κριθεί απαραίτητο.

Τα πιο πολλά Λύκεια διαθέτουν συσκευή φωτοηλεκτρικού φαινομένου και το πείραμα μπορεί να πραγματοποιηθεί από τις ομάδες εργασίας στο Εργαστήριο Φυσικών

Επιστημών. Αν αυτό δεν είναι δυνατό μπορούν να αξιοποιηθούν εικονικά εργαστήρια και προσομοιώσεις. Σε αυτή την περίπτωση το μάθημα μπορεί να πραγματοποιηθεί στη σχολική τάξη κάνοντας χρήση του διαδραστικού πίνακα και σύνδεσης στο διαδίκτυο. Στο παρόν διδακτικό σενάριο θα χρησιμοποιηθούν τα εικονικά πειράματα για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο από τον ιστότοπο:

https://www.seilias.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=735&Itemid=32



Γνωρίζουμε πως τίποτα δεν μπορεί να αντικαταστήσει το πραγματικό πείραμα, ωστόσο και η εργασία των ομάδων των μαθητών στο εικονικό εργαστήριο και η λήψη μετρήσεων έχει μεγάλη διδακτική αξία και γίνεται πολύ πιο γρήγορα εξοικονομώντας χρόνο για την διδασκαλία.

Η επεξεργασία των μετρήσεων και η σχεδίαση των γραφικών παραστάσεων μπορεί να γίνει και με τη χρήση του λογισμικού Excel. Βέβαια και το ίδιο το εικονικό εργαστήριο διαθέτει επιλογή σχεδιασμού γραφικών παραστάσεων.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι η διδασκαλία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου με τη διερευνητική μέθοδο προσφέρεται, αφού μπορούν να γίνουν πολλές διαφορετικές διερευνήσεις μεταξύ ανεξάρτητης και εξαρτημένης μεταβλητής και να εξαχθούν κάθε φορά τα αντίστοιχα συμπεράσματα για τις σχέσεις που τις συνδέουν.

ΠΡΟΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ:

Κυματική φύση του φωτός, συχνότητα, θεμελιώδης νόμος κυματικής $c = \lambda \cdot f$, θεώρημα μεταβολής της κινητικής ενέργειας ($\Theta.M.K.E.$, $\Delta K = \Sigma W_F$) $e \cdot V = K = \frac{1}{2} m \cdot u^2$, Υπόθεση Planck ότι η ενέργεια απορροφάται και εκπέμπεται από την ύλη κατά διακριτές τιμές
Καταγραφή πειραματικών μετρήσεων, σχεδιασμός διαγραμμάτων, υπολογισμός κλίσης ευθείας.

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΙΔΕΕΣ ΜΑΘΗΤΩΝ:

Σε αυτό το σημείο οι παρανοήσεις και οι εναλλακτικές ιδέες των μαθητών συνοψίζονται κυρίως στην κλασική προσέγγιση του φαινομένου. Οι μαθητές πιστεύουν ότι η εξαγωγή φωτοηλεκτρονίων θα γίνει αν αυξήσουμε την ένταση του φωτός. Επίσης, θεωρούν ότι με αύξηση της έντασης του φωτός, τα φωτοηλεκτρόνια θα εξέρχονται με μεγαλύτερη ταχύτητα και κινητική ενέργεια. Δυσκολεύονται να προβλέψουν και να κατανοήσουν το βασικό ρόλο της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός στο φαινόμενο.

Ακόμη, το κεφάλαιο της Κβαντομηχανικής διδάσκεται τελευταίο σύμφωνα με τις οδηγίες διδασκαλίας του μαθήματος. Οι μαθητές έχουν κάνει μια εισαγωγή στα κύματα από το γυμνάσιο και ήδη στη Γ Λυκείου έχουν διδαχθεί το κεφάλαιο των κυμάτων και τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα και έχουν καταφέρει να κατανοήσουν την κυματική φύση του φωτός και τότε έρχεται το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η ερμηνεία του από τον Einstein με την εισαγωγή των φωτονίων και οι μαθητές καλούνται να αποδεχτούν την διπλή φύση του φωτός και να κατανοήσουν και τις σωματιδιακές του ιδιότητες.

Τέλος, από τα προηγούμενα χρόνια έχουν διδαχθεί το Νόμο του Ohm για τους μεταλλικούς αγωγούς (φυσική γ γυμνασίου, Φυσική Γενικής Παιδείας Β Λυκείου) και δυσκολεύονται να αποδεχτούν την ύπαρξη φωτορεύματος ακόμη και όταν η τάση είναι μηδέν. Η παρανόηση έγκειται στην πεποίθησή τους ότι αν η τάση είναι μηδέν, τότε και το ρεύμα πρέπει να είναι μηδέν.

1η Διδακτική Ωρα

ΦΑΣΗ 1η: ΕΝΑΥΣΜΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Η ανάπτυξη του ενδιαφέροντος των μαθητών μπορεί να γίνει με την διατύπωση μιας ή περισσότερων ερωτήσεων από τον εκπαιδευτικό.

«Έχετε αναρωτηθεί ποτέ πώς ανοιγοκλείνει η πόρτα στο σουπερμάρκετ; Πώς δουλεύουν οι κυλιόμενες σκάλες; Το φωτοκύτταρο στον κήπο σας;»

Μ' αυτό τον τρόπο γίνεται προσπάθεια σύνδεσης της επιστήμης με τις εφαρμογές της τεχνολογίας και οι μαθητές βλέπουν την αξία της φυσικής ως κομμάτι της ζωής και όχι ως ένα μάθημα που απλά πρέπει να διαβάσουν για τις εξετάσεις.

Ένας επιπλέον τρόπος που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για να κινητοποιήσει ο εκπαιδευτικός το ενδιαφέρον των μαθητών είναι η αναφορά σε στοιχεία ιστορίας και φιλοσοφίας των φυσικών επιστημών. Όταν οι έννοιες τοποθετούνται σε ιστορικό πλαίσιο-στις συνθήκες που επικρατούσαν στη φυσική γύρω στο 1900- οι μαθητές αντιλαμβάνονται καλύτερα τα αδιέξοδα της κλασικής φυσικής, την αναγκαιότητα μιας νέας επαναστατικής θεωρίας, την γέννηση της κβαντικής θεωρίας και συνειδητοποιούν πως η επιστήμη δεν είναι κάτι στατικό και απόλυτο. Αντίθετα στη θέση μιας άποψης που ισχύει τώρα μπορεί παλιότερα να υπήρχε κάποια άλλη και στο μέλλον μια επόμενη να την αντικαταστήσει.

Τέλος, μπορεί να γίνει αναφορά σε βιογραφικά στοιχεία των Planck-που εισήγαγε την έννοια του κβάντου-και Einstein που ερμήνευσε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Με αυτό τον τρόπο

δίνεται πιο ανθρώπινο πρόσωπο στις επιστήμες, αυτές γίνονται πιο ελκυστικές προς τους μαθητές οι οποίοι συνειδητοποιούν ότι και οι σπουδαίοι επιστήμονες ήταν κι αυτοί άνθρωποι που συνάντησαν εμπόδια, αδυναμίες και αδιέξοδα μέχρι να κατακτήσουν τη γνώση. (Σκορδούλης, Στεφανίδου, 2021). Και αυτή η διαπίστωση για την επιμονή, την συνεχή προσπάθεια και τη γενικότερη στάση των επιστημόνων μέχρι να διατυπώσουν τις θεωρίες τους μπορεί να αποτελέσει παράδειγμα στους μαθητές για την ενήλικη ζωή τους.

ΦΑΣΗ 2η: ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΣΜΟΣ

Οι μαθητές χωρίζονται σε ομάδες. Αρχικά ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει στον διαδραστικό πίνακα το ηλεκτρικό κύκλωμα και εξηγεί στους μαθητές τα βασικά σημεία και τον τρόπο λειτουργίας του. Επίσης, είναι δυνατό να οριστούν και κάποιες έννοιες που θα χρειαστούν στην πορεία όπως φωτοηλεκτρόνια και τάση αποκοπής.

Στη συνέχεια οι μαθητές αναλαμβάνουν με την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού να κάνουν λήψεις μετρήσεων αλλάζοντας κάθε φορά κάποιον από τους παράγοντες που υπεισέρχονται στο φαινόμενο. Κάθε ομάδα διατυπώνει αρχικά τις προβλέψεις της για το πιθανό αποτέλεσμα κάθε πειράματος και καταγράφει τις υποθέσεις στο φύλλο εργασίας που της έχει δοθεί. Στη συνέχεια οι μαθητές καταγράφουν τα πειραματικά δεδομένα και συνεργάζονται, συζητούν και παρατηρούν ποιες από τις αρχικές τους υποθέσεις επιβεβαιώνονται και ποιες όχι.

Παρακάτω περιγράφονται κάποια εικονικά πειράματα που θα εκτελέσουν οι μαθητές:

ΠΕΙΡΑΜΑ 1:

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Κρατήστε τις αρχικές συνθήκες που φαίνονται στο κύκλωμα (την ένταση στη μέση της κλίμακας, $\lambda = 600\text{nm}$, τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου $V_{AK}=0$ και μέταλλο καθόδου Νάτριο)

Τι παρατηρείτε; Εμφανίζονται φωτοηλεκτρόνια;.....

Πιστεύετε πως αν περιμένουμε λίγο θα αρχίσουν να εξέρχονται μετά από κάποιο χρόνο ηλεκτρόνια από την κάθοδο;.....

Ξεκινήστε σταδιακά να μειώνετε το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (οπότε η συχνότητά της αυξάνεται).

Τι περιμένετε να συμβεί; Γράψτε τις υποθέσεις σας.....

Ποιο είναι το μέγιστο μήκος κύματος για το οποίο εξέρχονται φωτοηλεκτρόνια, δηλαδή το φωτοηλεκτρικό ρεύμα δεν είναι μηδέν; $\lambda_0 = \dots\dots\dots$

Συνεχίστε να μειώνετε σταδιακά το μήκος κύματος. Τι παρατηρείτε για την ένταση του φωτορεύματος i ;.....

Στο σημείο αυτό είναι δυνατόν να γίνει η πρώτη γνωστική σύγκρουση. Στο πλαίσιο της κλασικής φυσικής δεν δικαιολογείται η ύπαρξη συχνότητας κατωφλίου και αντίστοιχα μέγιστο μήκος κύματος για να παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Η απόσπαση ηλεκτρονίων από το μέταλλο θα γινόταν για οποιαδήποτε συχνότητα φωτός. Εξάλλου, για την κλασική φυσική το φως ως κύμα είναι μια συνεχής ροή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας οπότε οποιαδήποτε συχνότητα κι αν έχει έστω σταδιακά θα μεταφέρει ενέργεια στα ηλεκτρόνια του

μετάλλου τα οποία τελικά αμέσως ή μετά από λίγο χρόνο θα αποσπαστούν. Τίποτα όμως από αυτά δεν επιβεβαιώνεται πειραματικά. Η αδυναμία της κλασικής φυσικής να ερμηνεύσει το φαινόμενο είναι εμφανής.

ΠΕΙΡΑΜΑ 2:

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΚΙΝΗΤΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΑΠΟ ΤΟ ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ ΤΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

Επαναλάβετε τη σειρά ενεργειών του προηγούμενου πειράματος με σκοπό κάθε φορά να παρατηρήσετε την ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από το μέταλλο. Γράψτε τις υποθέσεις σας.....

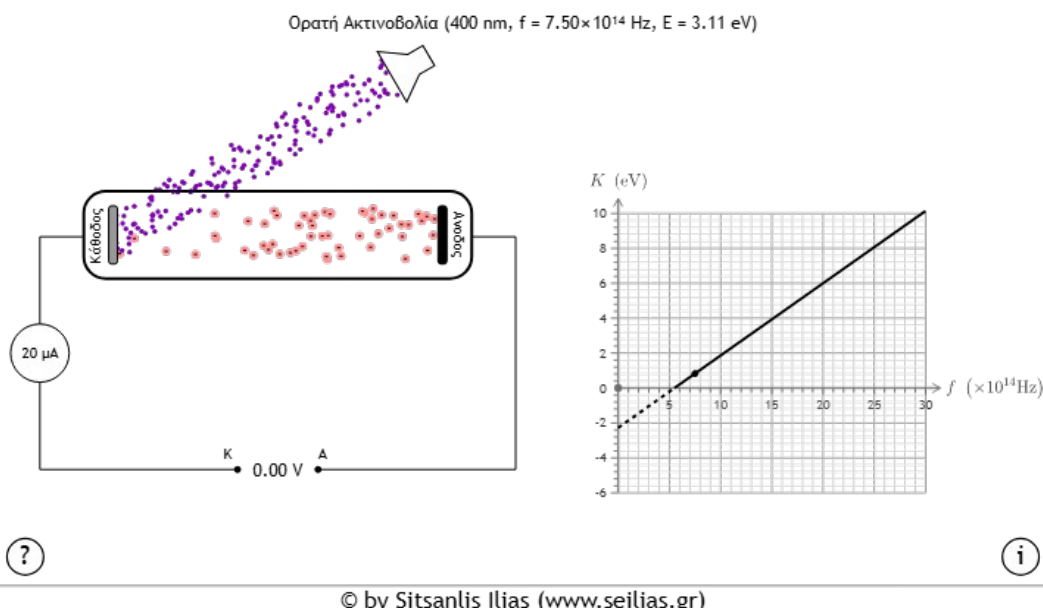
Μειώστε σταδιακά το μήκος κύματος του φωτός.

Παρατηρείτε και πάλι ότι για λ από 540nm και κάτω εκπέμπονται φωτοηλεκτρόνια από το νάτριο.

Για $\lambda=540$ nm, ποια είναι η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων;.....

Όσο μειώνεται το μήκος κύματος (δηλαδή αυξάνεται η συχνότητα του φωτός) τι συμβαίνει με την κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εξέρχονται;.....

Εδώ το εικονικό εργαστήριο δίνει την δυνατότητα άμεσης απεικόνισης της γραφικής παράστασης της Κινητικής Ενέργειας των φωτοηλεκτρονίων (εξαρτημένη μεταβλητή) συναρτήσει της συχνότητας του προσπίπτοντος φωτός (ανεξάρτητη μεταβλητή).



ΠΕΙΡΑΜΑ 3:

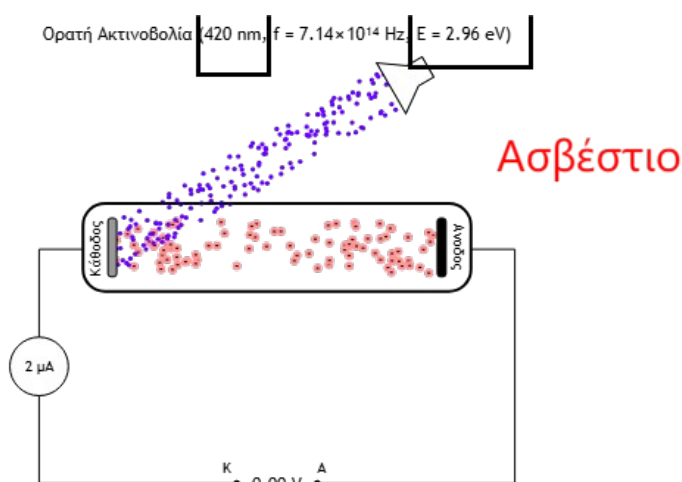
ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΟΥ ΕΡΓΟΥ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ϕ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΑ ΜΕΤΑΛΛΑ

Ο εκπαιδευτικός ορίζει το έργο εξαγωγής ϕ ως την ελάχιστη ενέργεια που πρέπει να απορροφηθεί από το ηλεκτρόνιο ώστε να υπερνικήσει τις δυνάμεις και να αποσπαστεί από το μέταλλο.

Πιστεύετε ότι αν αλλάξουμε το υλικό της καθόδου θα αλλάξει το έργο εξαγωγής; Γράψτε τις υποθέσεις σας.....

Επανερχόμαστε στην προσομοίωση και οι μαθητές πρώτα για το νάτριο και μετά για ακόμη δύο υλικά συμπληρώνουν το λο,το μέγιστο μήκος κύματος για το οποίο συμβαίνει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και υπολογίζουν το ϕ .

π.χ.ασβέστιο



© by Sitsanlis Ilias (www.seilias.gr)

Στη συνέχεια συμπληρώνουν τον ακόλουθο πίνακα:

ΥΛΙΚΟ ΚΑΘΟΔΟΥ	λ_0 (nm)	ϕ (eV)
ΝΑΤΡΙΟ	540	2,3
ΑΣΒΕΣΤΙΟ		
ΣΙΔΗΡΟΣ		

Εξηγούμε στους μαθητές ότι για να υπολογίσουμε το έργο εξαγωγής συλλογίζομαστε ως εξής. Θεωρούμε ότι για λ_0 η Κινητική Ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων είναι μηδέν και άρα όλη η ενέργεια του φωτονίου (π.χ. Για την παραπάνω εικόνα 2,96eV για το ασβέστιο) είναι το έργο εξαγωγής ϕ .

Οι μαθητές λοιπόν αλλάζοντας τις κατάλληλες παραμέτρους στην προσομοίωση συμπληρώνουν τον πίνακα και εξάγουν συμπεράσματα.

ΥΛΙΚΟ ΚΑΘΟΔΟΥ	λ_0 (nm)	ϕ (eV)
ΝΑΤΡΙΟ	540	2,3
ΑΣΒΕΣΤΙΟ	420	2,96
ΣΙΔΗΡΟΣ	270	4,6

ΠΕΙΡΑΜΑ 4:

ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ ΑΠΟ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΜΕΤΑΞΥ ΚΑΘΟΔΟΥ ΚΑΙ ΑΝΟΔΟΥ

Ζητείται από τους μαθητές για το νάτριο και ένα ακόμη υλικό καθόδου για $\lambda < \lambda_0$ συγκεκριμένα $\lambda = 250$ nm να μεταβάλλουν την τιμή της τάσης (V) και να καταγράψουν τις τιμές του φωτοηλεκτρικού ρεύματος (i) αφού αρχικά για μια ακόμα φορά διατυπώσουν τις προβλέψεις τους.

Αυξάνοντας διαρκώς την τάση V τί πιστεύετε θα συμβεί με το ρεύμα;.....
.....

Στη συνέχεια οι μαθητές συμπληρώνουν τον ακόλουθο πίνακα:

ΤΑΣΗ V_{AK} (V)	ΦΩΤΟΡΕΥΜΑ i (μA) νάτριο	ΦΩΤΟΡΕΥΜΑ i (μA) σίδηρος
0	44	23
0,2	47	32
0,4	51	42
0,6	54	52
0,8	55	55
1	55	55
1,2	55	55

Από τους μαθητές ζητείται ένα πρώτο σχόλιο για το αν οι αρχικές τους προβλέψεις επαληθεύτηκαν ή απορρίφθηκαν.

Παρατήρηση:Αν στη συνέχεια ζητηθεί να κατασκευάσουν γραφική παράσταση $i=f(V)$ θα πρέπει να καταγράψουν και τις τιμές της τάσης αποκοπής για αυτό το μήκος κύματος.

Για το νάτριο είναι $V_0=-2,7V$ και για τον σίδηρο $V_0=-0,5V$.(εδώ βάζουμε και το αρνητικό πρόσημο για να μπει στη γραφική παράσταση)

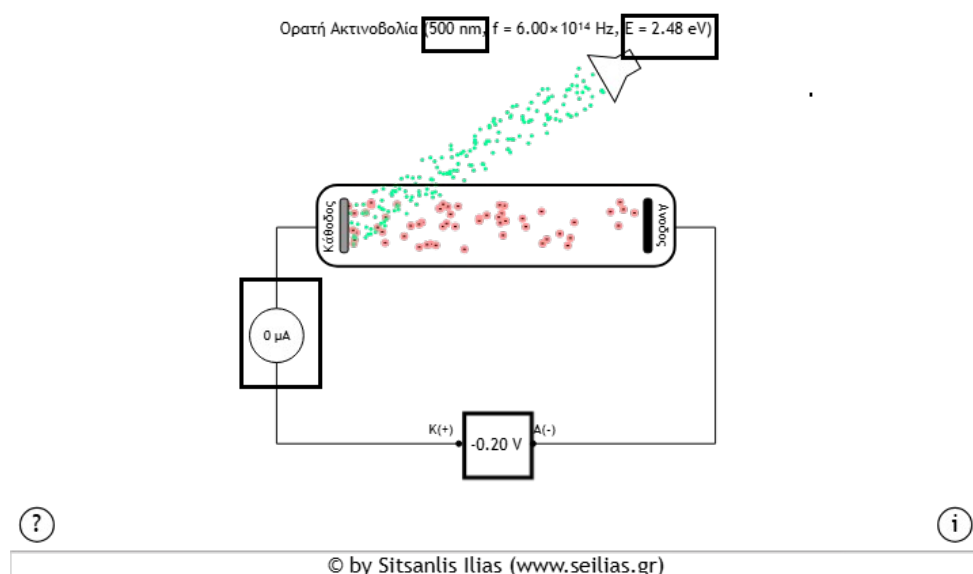
2η Διδακτική Ωρα

ΠΕΙΡΑΜΑ 5:

ΣΧΕΣΗ ΜΗΚΟΥΣ ΚΥΜΑΤΟΣ-ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ

Ξεκινώντας από ένα μήκος κύματος $\lambda < \lambda_0$ βρείτε την Τάση Αποκοπής (V_0), δηλαδή την ανάστροφη τάση που πρέπει να εφαρμόσουμε μεταξύ καθόδου και ανόδου ώστε το φωτορεύμα να μηδενιστεί, δηλαδή τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο να επιβραδύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο και να φτάνουν με μηδενική ταχύτητα και κινητική ενέργεια στην άνοδο. Οι μαθητές καταγράφουν τα πειραματικά δεδομένα για το Νάτριο και ένα ακόμη υλικό καθόδου και συμπληρώνουν τους παρακάτω πίνακες.

Για το Νάτριο για $\lambda=500 \text{ nm}$, είναι $i=0$ για $V_{AK}=-0,2 \text{ V}$, όπως φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Οι πίνακες παρουσιάζονται παρακάτω συμπληρωμένοι.

ΝΑΤΡΙΟ

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ λ (nm)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ f ($\cdot 10^{14} \text{ Hz}$)	ΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ V_0 (V)
------------------------------	--	-------------------------

500	6	-0,2
400	7,5	-0,9
300	10	-1,9

ΣΙΔΗΡΟΣ

ΜΗΚΟΣ ΚΥΜΑΤΟΣ λ (nm)	ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ f ($\cdot 10^{15}$ Hz)	ΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ V_0 (V)
250	1,2	-0,5
200	1,5	-1,7
150	2	-3,8

Παρατήρηση: Μπορεί να ζητηθεί από τους μαθητές να σχεδιάσουν την γραφική παράσταση $V_0=f(f)$ για το νάτριο και το σίδηρο.

ΠΕΙΡΑΜΑ 6:

ΣΧΕΣΗ ΕΝΤΑΣΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΜΕ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ

α) Με τάση $V=0$, ζητάμε από τους μαθητές να επιλέξουν το νάτριο και μήκος κύματος $\lambda < \lambda_0$ συγκεκριμένα $\lambda=500$ nm.

Τί περιμένετε να συμβεί με την ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος αν αυξήσουμε την ένταση του φωτός; Καταγράψτε τις υποθέσεις σας.....

Στη συνέχεια οι μαθητές καταγράφουν τις πειραματικές μετρήσεις και συμπληρώνουν τον παρακάτω πίνακα.

ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΣ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ i (μA)
I	6
2I	12

Στο σημείο αυτό οι προβλέψεις τους το πιθανότερο είναι να επαληθευτούν αφού αύξηση της έντασης του προσπίπτοντος φωτός, δηλαδή αύξηση του αριθμού των φωτονίων, οδηγεί σε αύξηση του αριθμού των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από το μέταλλο και επομένως σε αύξηση του φωτορεύματος. Η ιδέα αυτή υποστηρίζεται και κλασικά.

β) Με τάση $V=0$, ζητάμε από τους μαθητές να επιλέξουν και πάλι το νάτριο και μήκος κύματος $\lambda > \lambda_0$ συγκεκριμένα $\lambda=570$ nm.

Αφού κάνουν προβλέψεις, καταγράφουν τις πειραματικές τιμές στον πίνακα που ακολουθεί.

ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΣ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΡΕΥΜΑΤΟΣ i (μA)
--------------	--

I	0
2I	0

Εδώ σκοπός είναι οι μαθητές να κατανοήσουν πως αν το μήκος κύματος είναι μεγαλύτερο από λ_0 και η συχνότητα του προσπίπτοντος φωτός είναι μικρότερη από τη συχνότητα κατωφλίου δεν πρόκειται να παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο όσο μεγάλη κι αν είναι η ένταση της φωτεινής δέσμης.

γ)Επιλέγοντας το νάτριο και $\lambda=400\text{ nm}$ ζητάμε από τους μαθητές να ρυθμίσουν την τάση ώστε το φωτορεύμα να μηδενιστεί.Είναι $V_0=.....$ (τάση αποκοπής)

Τους ζητάμε να μεταβάλλουν την ένταση I.

Συμπληρώνουν τον πίνακα.

ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΣ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ
I	0
2I	0

δ)Τέλος για το νάτριο και $\lambda=400\text{ nm}$ θέτουμε $V_{AK}=-0,7\text{ V}$ (ώστε το φωτοηλεκτρικό ρεύμα να είναι πολύ μικρό) και οι μετρήσεις καταγράφονται στον πίνακα.

ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΣ	ΕΝΤΑΣΗ ΦΩΤΟΡΕΥΜΑΤΟΣ σε μA
I	3
2I	6

ΦΑΣΗ 3η:ΕΞΑΓΩΓΗ ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΩΝ

Κάθε ομάδα έχει μπροστά της το φύλλο εργασίας και ξεκινάει μια συζήτηση με την ολομέλεια της τάξης.Ο εκπαιδευτικός εισάγει την έννοια του φωτονίου με ενέργεια $E=h*f$ και την σωματιδιακή φύση του φωτός κατά την αλληλεπίδρασή του με την ύλη στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Οι μαθητές συζητούν,οι ομάδες ανταλλάσσουν ιδέες και από τα αποτελέσματα των πειραμάτων οδηγούνται σε συμπεράσματα.Ελέγχουν σε ποιες περιπτώσεις οι προβλέψεις τους επιβεβαιώθηκαν και πότε όχι.Έτσι γίνεται η εννοιολογική αλλαγή όπου χρειάζεται και οικοδομείται η γνώση.

Στο 1ο ΠΕΙΡΑΜΑ αποδεικνύεται πειραματικά η ύπαρξη συχνότητας κατωφλίου κάτι που δεν μπορεί να δικαιολογηθεί στην κλασική προσέγγιση.Όμως με την εισαγωγή του κβάντου φωτός με ενέργεια $h*f$,αν το φωτόνιο έχει ενέργεια μεγαλύτερη ή ίση από το έργο εξαγωγής του μετάλλου φ,τότε το ηλεκτρόνιο που απορροφά το φωτόνιο θα μπορέσει να αποσπαστεί.Σε αντίθετη περίπτωση,όσο μεγάλη και να είναι η ένταση της ακτινοβολίας και όσο χρόνο κι αν περιμένουμε δεν πρόκειται να συμβεί απολύτως τίποτα.Στο νέο πλαίσιο της κβαντικής θεωρίας η ύπαρξη μιας συχνότητας κατωφλίου είναι προφανής.

Ακόμη η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων αν συμβεί συμβαίνει σχεδόν ακαριαία(χρόνος της τάξης 1 ns), ταυτόχρονα με την πρόσπτωση του φωτός στην επιφάνεια του μετάλλου. Και αυτή η παρατήρηση εξηγείται μόνο στο πλαίσιο της νέας θεωρίας αφού για την κλασική φυσική η μεταβίβαση ενέργειας από την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στο ηλεκτρόνιο γίνεται βαθμιαία και επομένως θα μεσολαβούσε κάποιο χρονικό διάστημα μέχρι να αποσπαστούν τα φωτοηλεκτρόνια γύρω στο 1 s .

Στο 2ο ΠΕΙΡΑΜΑ εξάγεται η σχέση μεταξύ της κινητικής ενέργειας των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων σε σχέση με το μήκος κύματος και τη συχνότητα των φωτονίων. Οι μαθητές στις περισσότερες περιπτώσεις δυσκολεύονται να προβλέψουν την εξάρτηση της κινητικής ενέργειας από τη συχνότητα. Αντίθετα υποστηρίζουν ότι αν αυξήσουμε την ένταση του φωτός, τα ηλεκτρόνια θα εξέρχονται από το μέταλλο με μεγαλύτερη κινητική ενέργεια. Και σ' αυτό το σημείο συμβαίνει γνωστική σύγκρουση.

Ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει την φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein που η βασική της μορφή μπορεί να προβλεφτεί από τους μαθητές από τη γραφική παράσταση $K=f(f)$ που είναι μια ευθεία γραμμή.

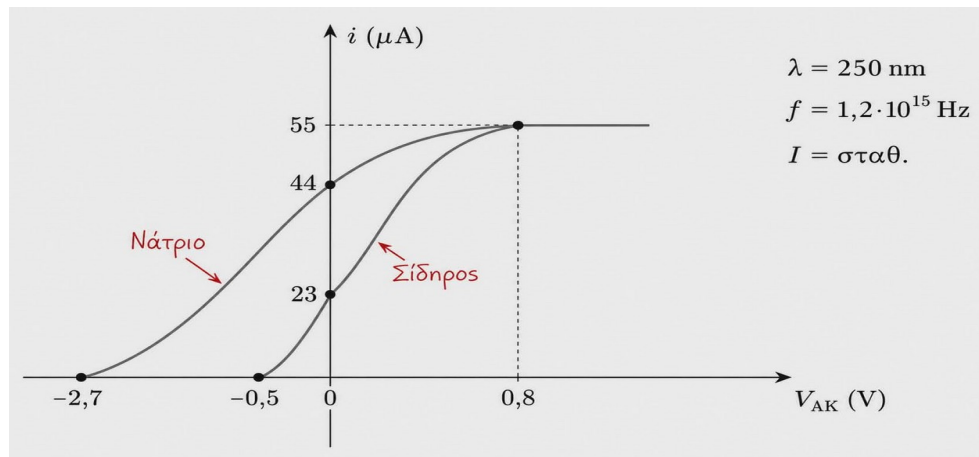
$$K=h\cdot f-\phi$$

και εξηγεί πως πρόκειται για μια έκφραση της Αρχής Διατήρησης της Ενέργειας. Επίσης, αιτιολογείται ξανά η ύπαρξη ελάχιστης συχνότητας (συχνότητας κατωφλίου) για να παρατηρηθεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Στο 3ο ΠΕΙΡΑΜΑ οι μαθητές καταλήγουν στο συμπέρασμα ότι το έργο εξαγωγής εξαρτάται μόνο από το είδος του μετάλλου στην κάθοδο. Ο εκπαιδευτικός μπορεί εδώ να δώσει και ορισμένες ακόμη πληροφορίες όπως ότι το έργο εξαγωγής αναφέρεται στην ενέργεια που πρέπει να προσλάβουν τα «πιο ενεργητικά» ηλεκτρόνια, δηλαδή αυτά που κινούνται με μεγαλύτερες ταχύτητες και βρίσκονται στις υψηλότερες ενεργειακές καταστάσεις, για να υπερνικήσουν τις ηλεκτροστατικές έλξεις και να διαφύγουν από το μέταλλο.

Στο 4ο ΠΕΙΡΑΜΑ οι μαθητές οδηγούνται με βάση τα πειραματικά αποτελέσματα και την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού στο συμπέρασμα ότι με αύξηση της τάσης μεταξύ καθόδου και ανόδου, αυξάνεται και το φωτοηλεκτρικό ρεύμα. Όμως αυτή η αύξηση δεν είναι συνεχής και κάποια στιγμή το ρεύμα σταθεροποιείται όσο κι αν αυξάνουμε την τιμή της τάσης. (ρεύμα κόρου). Ένα ακόμη σημείο που πρέπει εδώ να τονιστεί είναι η ύπαρξη φωτορεύματος όταν $V_{AK}=0$.

Κάθε ομάδα μπορεί να κατασκευάσει τη γραφική παράσταση $i=f(V_{AK})$ για τα δύο μέταλλα, το νάτριο και τον σίδηρο:

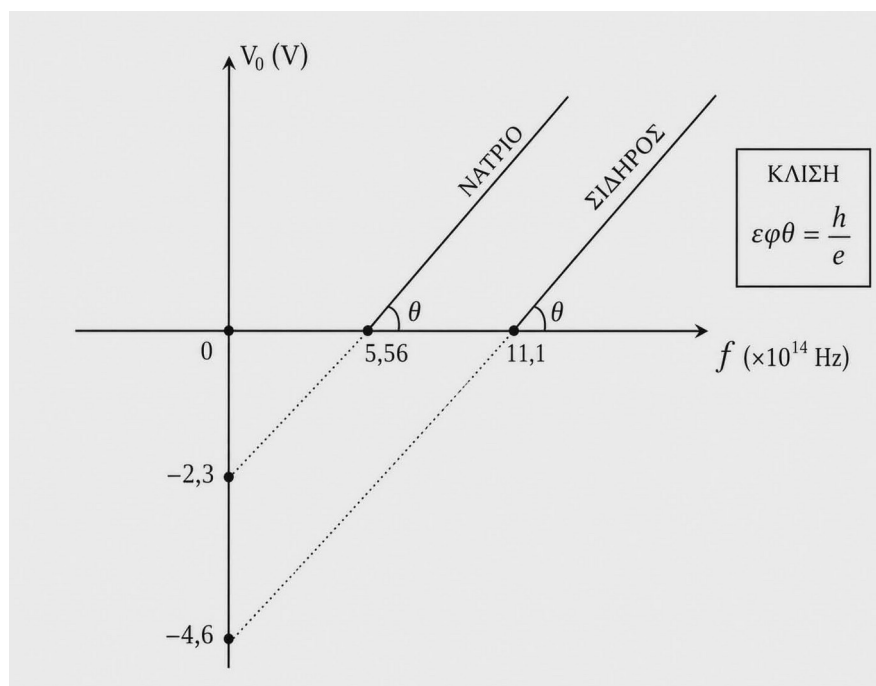


Στο 5ο ΠΕΙΡΑΜΑ κάθε ομάδα εργασίας συμπεραίνει από τα πειραματικά δεδομένα τη σχέση που συνδέει την τάση αποκοπής V_0 με την συχνότητα των φωτονίων που πέφτουν στην επιφάνεια του μετάλλου. Ζητείται από τον εκπαιδευτικό να σχεδιάσουν τη γραφική παράσταση $V_0 = f(f)$ αφού πρώτα γίνουν κάποιες επισημάνσεις.

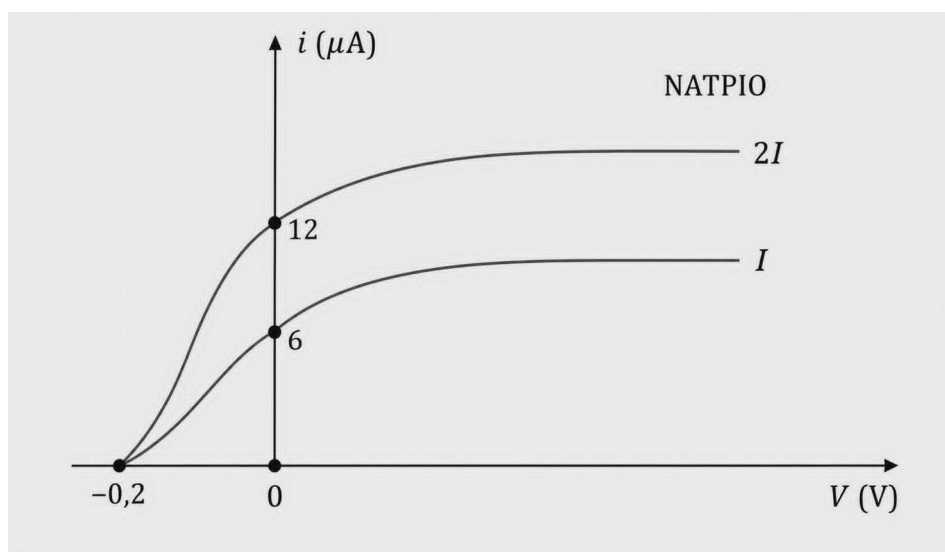
Από την φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein $K = h \cdot f - \phi$ (1) και το Θ.Μ.Κ.Ε. για την κίνηση του ηλεκτρονίου από την κάθοδο έως την άνοδο με την εφαρμογή της ανάστροφης τάσης $\Delta K = W_{F\eta\lambda}, 0 - K = -e \cdot V_0, K = eV_0$ (2) προκύπτει η σχέση:

$$V_0 = \frac{h}{e} \cdot f - \frac{\phi}{e}$$

Και η παρακάτω γραφική παράσταση:



Στο 6ο ΠΕΙΡΑΜΑ όπως αναφέρθηκε και παραπάνω οι μαθητές μετά από συζήτηση καταλήγουν ότι για $\lambda < \lambda_0$ που συμβαίνει φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με αύξηση της έντασης I της ακτινοβολίας, αυξάνεται και η ένταση του φωτοηλεκτρικού ρεύματος. Μπορεί να γίνει και η αντίστοιχη γραφική παράσταση που φαίνεται παρακάτω:



Αντίθετα, για $\lambda > \lambda_0$ όσο μεγάλη κι αν είναι η ένταση του φωτός δεν θα εξαχθούν ηλεκτρόνια από το μέταλλο ($i=0$)

Στις υποπεριπτώσεις γ και δ φαίνεται ότι αν εφαρμοστεί μεταξύ καθόδου-ανόδου η τάση αποκοπής το φωτορεύμα θα είναι $i=0$ ανεξάρτητα από την ένταση I ενώ για ανάστροφη τάση με απόλυτη τιμή λίγο μικρότερη από την τάση αποκοπής το φωτορεύμα i θα είναι ανάλογο με την ένταση του φωτός I .

3η Διδακτική Ώρα

ΦΑΣΗ 4η: ΕΠΕΚΤΑΣΗ

Στο σημείο αυτό θα γίνει μια τελική ανακεφαλαιωτική συζήτηση για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και θα γίνουν κάποιες ερωτήσεις και ασκήσεις του σχολικού βιβλίου ώστε τα παιδιά να κατανοήσουν ακόμη καλύτερα τη νέα γνώση.

Θα δοθεί στους μαθητές από τον εκπαιδευτικό φύλλο εργασίας για το σπίτι με υπολογιστικές ασκήσεις και αφού κάνουν μαζί μια πρώτη επίσκεψη στην σελίδα:

https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=70#1, τα ψηφιακά εκπαιδευτικά βοηθήματα του Υπουργείου Παιδείας που περιέχουν σημειώσεις, λυμένα παραδείγματα, θέματα για λύση και διαγωνίσματα, θα ζητηθεί από τους μαθητές και τις μαθήτριες να επεξεργαστούν και κάποια επιπλέον θέματα από εκεί.

Επιπλέον, η ολομέλεια της τάξης θα μπορούσε να συντάξει μια εργαστηριακή αναφορά.

Τέλος, αν υπάρχει ο απαραίτητος χρόνος οι μαθητές και οι μαθήτριες πάλι σε ομάδες εργασίας μπορούν να εκπονήσουν ερευνητική εργασία και να αναζητήσουν πληροφορίες για τις εφαρμογές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου στη σύγχρονη καθημερινή ζωή.

4.2 Σενάριο διδασκαλίας της Αρχής της Αβεβαιότητας

ΤΙΤΛΟΣ: ΑΡΧΗ ΤΗΣ ΑΒΕΒΑΙΟΤΗΤΑΣ ΘΕΣΗΣ-ΟΡΜΗΣ

ΤΑΞΗ: Γ ΛΥΚΕΙΟΥ

**ΕΜΠΛΕΚΟΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΤΙΚΕΣ ΠΕΡΙΟΧΕΣ: ΦΥΣΙΚΗ ΠΡΟΣΑΝΑΤΟΛΙΣΜΟΥ Γ
ΛΥΚΕΙΟΥ, ΚΕΦΑΛΑΙΟ 7, ΕΝΟΤΗΤΑ 7.6**

ΔΙΑΡΚΕΙΑ: 2 ΔΙΔΑΚΤΙΚΕΣ ΩΡΕΣ

ΔΙΔΑΚΤΙΚΟΙ ΣΤΟΧΟΙ:

Με την ολοκλήρωση διδασκαλίας της ενότητας οι μαθητές/μαθήτριες θα πρέπει να μπορούν:

1. Να διατυπώνουν και να εξηγούν την Αρχή της Αβεβαιότητας.
2. Να την εφαρμόζουν σε αριθμητικά παραδείγματα.
3. Να αναγνωρίζουν την σύγκρουση κλασικής και κβαντικής φυσικής και να ξεκαθαρίζουν ότι τα αποτελέσματα της Αρχής της Αβεβαιότητας πρακτικά έχουν νόημα στα σωματίδια του

μικροκόσμου, ενώ για τα μακροσκοπικά σώματα με απόλυτη ακρίβεια μπορούμε να γνωρίζουμε την θέση και την ορμή τους.

4. Να λειτουργούν σε κλίμα συνεργασίας, όπου τα άτομα των ομάδων θα ανταλλάσσουν ιδέες, θα διατυπώνουν υποθέσεις, θα συγκρίνουν, θα υπολογίζουν και τελικά θα οδηγούνται σε συμπεράσματα.

ΟΡΓΑΝΩΣΗ ΤΑΞΗΣ ΚΑΙ ΥΛΙΚΟΤΕΧΝΙΚΗ ΥΠΟΔΟΜΗ:

Οι μαθητές/μαθήτριες μπορούν να χωριστούν σε ομάδες και σε κάθε ομάδα να δοθεί από τον εκπαιδευτικό ένα φύλλο εργασίας, το οποίο στην πορεία θα συμπληρώσουν εκτελώντας δραστηριότητες καθοδηγούμενης ανακάλυψης. Το σενάριο θα υλοποιηθεί σύμφωνα με το μοντέλο πρόβλεψη, έλεγχος, συμπέρασμα που χρησιμοποιείται στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών. Ο εκπαιδευτικός με διάφορους τρόπους θα προσπαθήσει αρχικά να κεντρίσει το ενδιαφέρον των μαθητών, σε κάποια σημεία είναι απαραίτητη και η μετωπική διδασκαλία π.χ. για τον ορισμό του κυματοπακέτου και την διατύπωση της Αρχής της Αβεβαιότητας αλλά γενικά ο ρόλος του θα είναι βοηθητικός και υποστηρικτικός και θα επεμβαίνει μόνο όταν κρίνεται απαραίτητο. Έτσι, οι μαθητές σε κάθε ομάδα θα αναλαμβάνουν πρωτοβουλίες και μετά από συζήτηση και κριτική σκέψη θα οδηγούνται σε συμπεράσματα και στην οικοδόμηση της νέας γνώσης.

Η διδασκαλία μπορεί να γίνει στην σχολική τάξη με διαδραστικό πίνακα και σύνδεση στο διαδίκτυο.

ΠΡΟΑΠΑΙΤΟΥΜΕΝΕΣ ΓΝΩΣΕΙΣ:

Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός της ύλης, δηλαδή ότι τα σωματίδια εκτός από την σωματιδιακή έχουν και κυματική φύση, υλικά κύματα de Broglie με $\lambda = h/p$, μήκος κύματος, συχνότητα, θεμελιώδης νόμος κυματικής $c = \lambda \cdot f$ και φυσικά θέση (χ) και ορμή ($p = m \cdot u$)

ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΕΣ ΙΔΕΕΣ ΜΑΘΗΤΩΝ:

Οι προϋπάρχουσες ιδέες των μαθητών στο σημείο αυτό εστιάζονται κυρίως στην κλασική προσέγγιση του προσδιορισμού της θέσης και της ορμής του σωματιδίου, οι οποίοι τόσο από την καθημερινή τους εμπειρία όσο και από την φυσική που διδάσκονται όλα τα προηγούμενα χρόνια δυσκολεύονται να αποδεχτούν πως η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου δεν μπορούν να προσδιοριστούν ταυτόχρονα επακριβώς. Αλλά ακόμη κι αν αποδεχτούν την αβεβαιότητα πολλές φορές την αποδίδουν στα όργανα μέτρησης και σε σφάλματα μέτρησης και όχι θεωρώντας την ως εγγενή ιδιότητα της ύλης.

1η Διδακτική Ώρα

ΦΑΣΗ 1η: ΕΝΑΥΣΜΑ ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝΤΟΣ

Αρχικά ο εκπαιδευτικός μπορεί να δείξει στους μαθητές/μαθήτριες στο διαδραστικό πίνακα ένα μικρό βίντεο από ένα αυτοκίνητο που κινείται ή μια μπάλα και να κάνει την ερώτηση; Μπορούμε να γνωρίζουμε ταυτόχρονα την ακριβή θέση και την ταχύτητά τους; Και στη συνέχεια να κάνει την ίδια ερώτηση για το αν μπορούμε να γνωρίζουμε συγχρόνως την θέση και την ορμή ενός ηλεκτρονίου με απόλυτη ακρίβεια. Τα άτομα κάθε ομάδας θα

καταγράψουν τις υποθέσεις τους στο φύλλο εργασίας. Στόχος είναι η διάκριση ανάμεσα στα μακροσκοπικά και τα μικροσκοπικά σώματα. Είναι σχεδόν βέβαιο ότι οι μαθητές θα απαντήσουν καταφατικά στην πρώτη ερώτηση, αφού εφαρμόζοντας τους Νόμους του Νεύτωνα και τις εξισώσεις κίνησης μπορούν όντως να πουν ταυτόχρονα με απόλυτη ακρίβεια ποια είναι η θέση και η ορμή π.χ. του αυτοκινήτου. Εξάλλου ένα ραντάρ και ένα gps όπως είναι πιθανό να αναφέρουν θα μας έδιναν τις απαντήσεις. Από την άλλη θα προβληματιστούν για το αν μπορεί να γίνει το ίδιο με το ηλεκτρόνιο ή γενικά ένα μικροσκοπικό σωματίδιο.

Επίσης, είναι δυνατόν να παρουσιαστούν από τον εκπαιδευτικό ορισμένα στοιχεία βιογραφίας του Werner Heisenberg τα οποία θα κινήσουν το ενδιαφέρον των μαθητών. Σίγουρα για παράδειγμα θα προκαλέσει έκπληξη στα παιδιά ότι ο Heisenberg ήταν μόλις 24 ετών όταν συνέλαβε την μηχανική των πινάκων, την μαθηματική βάση της κβαντομηχανικής και μάλιστα χωρίς να γνωρίζει την θεωρία των πινάκων και ήταν μόλις 26 ετών όταν διατύπωσε την Αρχή της Αβεβαιότητας. Έτσι, οι μαθητές θα έρθουν πιο κοντά στο ανθρώπινο πρόσωπο της επιστήμης και των μεγάλων επιστημόνων και θα την αισθανθούν πιο οικεία.

Μια ακόμη προσέγγιση θα μπορούσε να είναι μια δήλωση από τον εκπαιδευτικό ότι «Η ανάδυση και η συνέχιση της ζωής στη Γη, η ίδια η ύπαρξή μας, οφείλεται στην Αρχή της Αβεβαιότητας!». Η σταθερότητα της ύλης, η βεβαιότητα που συναντάμε οφείλεται στην Αρχή της Αβεβαιότητας. Μια τέτοια πρόταση θα κεντρίσει το ενδιαφέρον των μαθητών και σίγουρα θα ανυπομονούν να μάθουν περισσότερα.

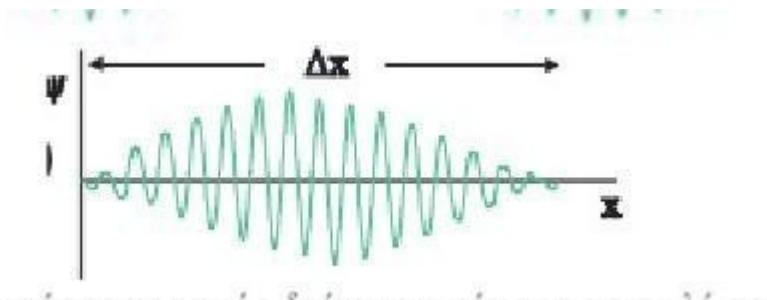
ΦΑΣΗ 2η: ΕΛΕΓΧΟΣ ΥΠΟΘΕΣΕΩΝ, ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στο σημείο αυτό μέσα από διάλογο ο εκπαιδευτικός μέσα από ένα παράδειγμα, μια οριακή περίπτωση, θα φτάσει στον ορισμό του «κυματοπακέτου». Με βάση τον κυματοσωματιδιακό δυϊσμό της ύλης, ένα σωματίδιο ορμής p συνδέεται και με ένα κύμα με μήκος κύματος $\lambda = h/p$. Το στιγμιότυπο αυτού του κύματος φαίνεται στο παρακάτω σχήμα.



Εικόνα 18: Στιγμιότυπο κύματος (Φυσική Προσανατολισμού Γ Λυκείου, σελ. 237)

Αφού όπως φαίνεται το κύμα εκτείνεται παντού στον άξονα x δεν μπορούμε να γνωρίζουμε τίποτα για την θέση του σωματιδίου, δηλαδή η αβεβαιότητα στην θέση του είναι άπειρη. Για να περιορίσουμε την αβεβαιότητα στη θέση αλλά και να μην καταστρέψουμε τελείως τη σωματιδιακή εικόνα θα πρέπει να κάνουμε συνδυασμό πολλών κυμάτων με διαφορετικά μήκη κύματος, πλάτη και φάσεις. Έτσι, θα κατασκευάσουμε ένα «κυματοπακέτο», δηλαδή ένα κύμα που όμως είναι περιορισμένο στο χώρο, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα. Έτσι θα πληριάζει στη σωματιδιακή υπόσταση αλλά συγχρόνως θα εμφανίζει και τις κυματικές ιδιότητες.



Εικόνα 19: Κυματοπακέτο (Φυσική Προσανατολισμού Γ Λυκείου,σελ.237)

Συνεχίζοντας το συλλογισμό,ο εκπαιδευτικός θα φέρει τους μαθητές μπροστά στη διαπίστωση ότι αφού τώρα έχουμε πολλά διαφορετικά μήκη κύματος λ ,θα έχουμε πια από τη σχέση $p=h/\lambda$ και αβεβαιότητα στην ορμή του σωματιδίου.

Οπότε αβίαστα οδηγούμαστε στην διατύπωση της Αρχής της Αβεβαιότητας θέσης-ορμής.

Στο σημείο αυτό πρέπει να τονιστούν 2 σημεία:

1.Τα Δx και Δp που εμφανίζονται στην μαθηματική σχέση δεν περιγράφουν μεταβολές των φυσικών μεγεθών-όπως έχουν συνηθίσει οι μαθητές μέχρι τώρα να χρησιμοποιούν το σύμβολο Δ -,αλλά δηλώνουν τις αβεβαιότητες θέσης και ορμής αντίστοιχα.

2.Η αδυναμία να προσδιορίσουμε με απόλυτη ακρίβεια την θέση και την ορμή του σωματιδίου,τα Δx και Δp ,δεν οφείλονται σε πειραματικές ατέλειες,στα συνήθη πειραματικά σφάλματα των οργάνων μέτρησης,αλλά είναι συνυφασμένη με την κβαντική δομή της ύλης.

Αν υπάρχει ο απαιτούμενος χρόνος μπορεί να γίνει αναφορά στο νοητικό πείραμα που χρησιμοποίησε ο Heisenberg.Εναλλακτικά μπορεί να δοθεί σαν εργασία-επέκταση στους μαθητές μετά το τέλος του μαθήματος.Η ιδέα του Heisenberg ήταν η εξής:Να φανταστούμε ένα μικροσκόπιο με το οποίο σκοπεύουμε να παρατηρήσουμε ένα ηλεκτρόνιο.Για να συμβεί αυτό πρέπει να το φωτίσουμε με φως πολύ μικρού μήκους κύματος τόσο όση και η ακρίβεια που θέλουμε να πετύχουμε στη μέτρηση της θέσης του.(λ περίπου ίσο με Δx).Αν όμως το λ είναι πολύ μικρό,η ορμή των φωτονίων αντίστοιχα θα είναι πολύ μεγάλη($p=h/\lambda$),οπότε με την αλληλεπίδραση του φωτονίου με το ηλεκτρόνιο θα μεταβιβαστεί στο δεύτερο ένα μέρος της ορμής του πρώτου, άρα θα έχουμε προκαλέσει μεγάλη απροσδιοριστία στη μέτρηση της ορμής του.Με το νοητικό πείραμα του μικροσκοπίου ο Heisenberg δείχνει ότι η Αρχή της Αβεβαιότητας είναι συνέπεια του κυματοσωματιδιακού διϊσμού της ύλης. (Τραχανάς,2025,σελ.116)

Στη συνέχεια υλοποίησης του σεναρίου κάθε ομάδα εργασίας θα εφαρμόσει την Αρχή της Αβεβαιότητας πάνω σε δύο αριθμητικά παραδείγματα.(Μπορεί να χρησιμοποιηθεί το παράδειγμα 7.4 του σχολικού βιβλίου σελ.238)

Παράδειγμα 1:Μπάλα του γκολφ $m=45\text{g}$, $v=20\text{m/s}$

Παράδειγμα 2:Ηλεκτρόνιο $m=9,1\cdot 10^{-31}\text{kg}$, $v=3\cdot 10^5\text{m/s}$

Και στις 2 περιπτώσεις η ταχύτητα έχει μετρηθεί με ακρίβεια 0,1% και ζητείται η ακρίβεια με την οποία μπορεί να προσδιοριστεί η θέση κάθε σώματος.

Για τη μπάλα του γκολφ η απροσδιοριστία της θέσης προκύπτει $\Delta x=1,16\cdot 10^{-27}\text{m}$ και για το ηλεκτρόνιο $\Delta x=0,38\cdot 10^{-4}\text{m}$.

Στο φύλλο εργασίας ζητείται από τους μαθητές να διατυπώσουν τα συμπεράσματά τους.Σκοπός είναι να γίνει η διάκριση μεταξύ μακροσκοπικών και μικροσκοπικών αντικειμένων.Αν λάβουμε υπόψη τις διαστάσεις του ηλεκτρονίου η αβεβαιότητα στη μέτρηση της θέσης είναι τεράστια.Αντίθετα,για τη μπάλα του γκολφ η αβεβαιότητα είναι

πρακτικά μηδενική. Στον ατομικό και πυρηνικό μικρόκοσμο έχει εφαρμογή η Αρχή της Αβεβαιότητας ενώ στο μακρόκοσμο αποκαθίσταται η κλασική τάξη πραγμάτων.

2η Διδακτική Ώρα

ΦΑΣΗ 3η: ΕΠΕΚΤΑΣΗ

Οι μαθητές/μαθήτριες καλούνται με την καθοδήγηση του εκπαιδευτικού να λύσουν τις ερωτήσεις και τις ασκήσεις του σχολικού βιβλίου, και κάποια θέματα από την τράπεζα θεμάτων του ΙΕΠ (Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής).

Επίσης μπορούν να επισκεφτούν τα Ψηφιακά Εκπαιδευτικά Βοηθήματα (study4exams)

https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=72#3

όπου θα βρουν σημειώσεις, λυμένα παραδείγματα και θέματα προς επίλυση. Κάποια θα δοθούν ως εργασία για το σπίτι για επιπλέον εξάσκηση.

Στο τέλος του σεναρίου θα γίνει και συζήτηση πάνω στην αρχική δήλωση του εκπαιδευτικού ότι η Αρχή της Αβεβαιότητας κάνει δυνατή την ύπαρξή μας! Αν σκεφτούμε το απειροστό μικρό μέγεθος του ατομικού πυρήνα θα καταλάβουμε πως τα νουκλεόνια-πρωτόνια και νετρόνια-που βρίσκονται εκεί μέσα έχουν πολύ μικρή αβεβαιότητα θέσης, επομένως τεράστια αβεβαιότητα στην ορμή και την ταχύτητά τους, δηλαδή τα σωματίδια του πυρήνα κινούνται με κατά μέσο όρο πολύ μεγάλες ταχύτητες και έχουν μεγάλες κινητικές ενέργειες. Αυτή η πυρηνική ενέργεια των ατόμων στο εσωτερικό των άστρων κρατάει τον ήλιο-που χωρίς αυτόν δεν θα υπήρχε ζωή-ζωντανό για δισεκατομμύρια χρόνια. (Τραχανάς, 2025, σελ. 112)

Αλλά και το μέγεθος και η σταθερότητα των ατόμων μπορεί να ερμηνευτούν με την Αρχή της Αβεβαιότητας. Τα άτομα, παρόλο που σχεδόν εξολοκλήρου αποτελούνται από κενό χώρο, είναι δηλαδή «κούφια», είναι σταθερά και ασυμπίεστα. Μάλιστα, έχει υπολογιστεί ότι για να μειώσουμε το μέγεθος ενός ατόμου στο μισό πρέπει να ασκήσουμε μια ασύλληπτα τεράστια πίεση 1.000.000 atm. Είναι λοιπόν τα άτομα ασυμπίεστα γιατί κάθε προσπάθεια να φέρουμε τα ηλεκτρόνια πιο κοντά στον πυρήνα, μειώνει το Δx και αυξάνει πολύ την αβεβαιότητα στην ταχύτητα, την ταχύτητα και την κινητική τους ενέργεια. Και επομένως θα ξαναερχόταν το άτομο στο κανονικό του μέγεθος, αυτό για το οποίο η ολική του ενέργεια-κινητική και δυναμική-θα είναι ελάχιστη και η ηλεκτρική έλξη του πυρήνα προς τα ηλεκτρόνια που θέλει να τα φέρει προς τα μέσα αντισταθμίζει την πίεση προς τα έξω λόγω της αντίστασης στον υπερβολικό εντοπισμό. (Τραχανάς, 2025, σελ. 113-4)

ΕΠΙΛΟΓΟΣ

Τα αδιέξοδα στα οποία είχε φτάσει η κλασική φυσική στις αρχές του εικοστού αιώνα, η μελέτη της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, η αδυναμία ερμηνείας του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, της ατομικής σταθερότητας και των ατομικών φασμάτων οδήγησαν σε μια επιστημονική επανάσταση, στην ανακάλυψη της κβαντικής θεωρίας. Όμως, δεν είναι σπουδαίο μόνο να εξηγήσουμε τις νέες επιστημονικές ιδέες που γεννήθηκαν αλλά εξίσου σημαντικό είναι να αναζητήσουμε στοιχεία της ζωής των μεγάλων επιστημόνων που οδηγήθηκαν σ'αυτές. Έτσι στην παρούσα ΔΕ παρουσιάστηκαν και βασικά βιογραφικά στοιχεία των ανθρώπων-Planck, Einstein, Bohr, Schrödinger, Heisenberg, Pauli, Dirac-που θεμελίωσαν την Κβαντομηχανική.

Σημαντικό μέρος της εργασίας αφιερώθηκε στην διαμάχη ανάμεσα στους Einstein και Bohr για την ερμηνεία της Κβαντομηχανικής με τον Einstein να επιμένει σε μια αιτιοκρατική φύση και να αρνείται ότι οι κβαντομηχανικές πιθανότητες είναι θεμελιώδεις. Σ'αυτή τη διαμάχη «νικητής» αναδείχτηκε ο Bohr με την πιθανοκρατική ερμηνεία της Κβαντομηχανικής. Είναι ωστόσο άδικο να μην τονιστεί η αξία και η συμβολή του Einstein στη θεμελίωση της νέας θεωρίας. Πέρα από την θεωρία της σχετικότητας-που ολοκλήρωσε την κλασική φυσική αφού συνδύασε τη νευτώνεια φυσική με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell-συνέβαλε αρχικά με την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου αλλά και την απόδειξη της ύπαρξης φωτονίων. Ο ρόλος του όμως κυρίως αναδεικνύεται στην προσπάθειά του να αποδείξει ότι η Κβαντομηχανική δεν είναι πλήρης θεωρία ώστε με το παράδοξο EPR να αναδείξει το φαινόμενο της κβαντικής σύμπλεξης με αφετηρία το οποίο τα επόμενα χρόνια

εδραιώθηκε η κβαντομηχανική και η ερμηνεία της Κοπενχάγης χωρίς αμφιβολία ως η μόνη αποδεκτή θεωρία και αποκλείστηκε κάθε ενδεχόμενο να επιστρέψουμε στην αιτιοκρατία της κλασικής φυσικής. (Τραχανάς, 2025, σελ. 199)

Ο Heisenberg με την Αρχή της Αβεβαιότητας που αποτελεί την «καρδιά» της νέας θεωρίας έδειξε ότι στα υποατομικά συστήματα υπάρχει καθορισμένο όριο στην ακρίβεια της γνώσης. Χωρίς αμφιβολία, για τις υποατομικές καταστάσεις η παγκόσμια αιτιότητα είχε ανατραπεί. (Powers, 1991, σελ. 189) Με την έλευση της Κβαντικής Θεωρίας και τα κβαντικά άλματα που ακόμα και ο Planck δυσκολευόταν να αποδεχτεί, η ασυνέχεια εισέρχεται στη φυσική σε αντίθεση με τη βαθιά χαραγμένη ιδέα της κλασικής φυσικής ότι κάθε αλλαγή στη φύση είναι συνεχής και ομαλή. (Powers, 1991, σελ. 165)

Φυσικά, η νευτώνεια κλασική φυσική συνεχίζει να εφαρμόζεται στο μακρόκοσμο, στα μακροσκοπικά αντικείμενα παρόλο που ανατράπηκε από την Κβαντομηχανική και τη Σχετικότητα. Η νέα θεωρία περιέχει την παλιά ως οριακή περίπτωση.

Και φτάνουμε στο σήμερα που το μεγάλο ερώτημα που πρέπει να απαντηθεί είναι αν η Κβαντομηχανική και η Γενική Θεωρία της Σχετικότητας θα μπορέσουν να συνυπάρξουν ώστε να διατυπωθεί μια νέα κβαντική θεωρία της βαρύτητας.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

Serway A.Raymond, 1983, *Physics for Scientists and Engineers, Τόμος 4, Σύγχρονη Φυσική*, Saunders College Publishing, Απόδοση στα ελληνικά Λεωνίδα Κ.Ρεσβάνη

Kumar Manjit, 2018, *Quantum Αινστέιν Μπορ και η μεγάλη διαμάχη για τη φύση της πραγματικότητας*, μετάφραση Μαρία Παναγιωτάτου, Αθήνα, Εκδόσεις Πατάκη

Τραχανάς Στέφανος, 2025, *Ο Βομβιστής και ο Στρατηγός*, Ηράκλειο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

Τραχανάς Στέφανος, 2005, *Κβαντομηχανική Ι*, Ηράκλειο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

Τραχανάς Στέφανος, 2014, *Μεγάλη Επιστήμη Ενδιαφέρουσες Ζωές*, Ηράκλειο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

Powers Jonathan, 1991, *Φιλοσοφία και Νέα Φυσική*, μετάφραση Τάσος Κυπριανίδης, Τάσος Τσιαντούλας, Ηράκλειο, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης

Einstein Albert, 1905, *On the heuristic point of view about the creation and conversion of light.*, Annalen der Physik

Einstein Albert, 1949a, *Autobiographical Notes*, στο Schilpp (1969)

Planck Max, 1900a, *On an Improvement of Wien's Equation for the Spectrum*, ανατυπωμένο στο Haar (1967)

Planck Max, 1900b, *On the Theory of the Energy Distribution Law of the Normal Spectrum*, ανατυπωμένο στο Haar (1967)

Planck Max, 1949, *Scientific Autobiography and other Papers*, Νέα Υόρκη, Philosophical Library

Heilbron John, 2000, *The Dilemmas of an Upright Man: Max Planck and the Fortunes of German Science*, ΗΠΑ, Harvard University Press

Pais, Abraham, 1979, *Einstein and the quantum theory, Reviews of Modern Physics*

Pais Abraham, 1982, *The Science and the Life of Albert Einstein*, Oxford University Press

Pais Abraham, 1991, *Niels Bohr's Times, in Physics, Philosophy and Polity*, Οξφόρδη, Clarendon Press

Pais Abraham, 2000, *The Genius of Science: A portrait gallery of twentieth century physicist*, Οξφόρδη, Oxford University Press

Rhodes Richard, 1986, *The making of the Atomic Bomb*, Νέα Υόρκη, Simon and Schuster

Fölsing Albrecht, 1997, *Albert Einstein: A Biography*, Λονδίνο, Viking

Bohr Niels. 1949, *Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics*, Schilpp

Bohr Niels, 1963b, *The Rutherford Memorial Lecture 1958: Reminiscences of the Founder of Nuclear Science and of Some Developments Based on his Work*, στο Bohr 1963a

Rosenfeld Leon, 1968, «*Some Concluding Remarks and Reminiscences*», Solve Institute

Heisenberg Werner, 1925, *Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen*, Zeitschrift für Physik

Heisenberg Werner, 1971, *Physics and Beyond: Encounters and Conversations*, Λονδίνο, George Allen and Unwin

Born Max, 1978, *My Life: Recollections of a Nobel Laureate*, Λονδίνο, Taylor and Francis

Born Max, 2005, *The Born-Einstein Letters 1916-1955: Friendship, Politics and Physics in Uncertain Times*, Νέα Υόρκη, Macmillan

Aspect Alain, Philippe Grangier και Gerard Roger, 1982, «*Experimental realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A new violation of Bell's inequalities*», Physical Review Letters

Davies Paul και Brown Julian, 1986, *The Ghost in the Atom*, Cambridge, Cambridge University Press

Moore Walter, 1989, *Schrodinger: Life and Thought*, Cambridge, Cambridge University Press

Bloch Felix, 1976, *Reminiscences of Heisenberg and The Early Days of Quantum Mechanics*, Physics Today

Cassidy David, 1992, *Uncertainty: The Life and Science of Werner Heisenberg*, Νέα Υόρκη, W.H. Freeman and Company

Pauli Wolfgang, 1946a, *Remarks on the History of the Exclusion Principle*, Science, 103, 213-215

Dirac Paul, 1977, *Recollections of an exciting era*, Weiner (1977)

Zinkernagel Henrik, 2016, *Niels Bohr on the wave function and the classical/quantum divide* Spain, Department of Philosophy University of Granada

ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΚΕΣ ΔΙΕΥΘΥΝΣΕΙΣ

Ανδρέας Ιωάννου Κασσέτας Einstein-Bohr : <https://users.sch.gr/kassetas/appleEinstBohr.htm>

Αρχείο Niels Bohr Κοπενχάγη: <https://nbarchive.ku.dk/>

ΒΙΟΓΡΑΦΙΕΣ/ΕΙΣΤΗΜΗ-ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑ, Niels Bohr:

<https://www.sansimera.gr/biographies/545>

<https://www.nobelprize.org/prizes/physics>

Για τα σενάρια:

Σκορδούλης Κώστας και Στεφανίδου Κωνσταντίνα, *Διδακτική Μεθοδολογία των Φυσικών Επιστημών*, 2021, Αθήνα, Εκδόσεις Προπομπός

Seilias Physics and Photography:

https://www.seilias.gr/index.php?option=com_content&task=view&id=735&Itemid=32

Ψηφιακά εκπαιδευτικά βοηθήματα:

https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=70#1

https://www.study4exams.gr/physics_k/course/view.php?id=72#3

Οδηγίες διδασκαλίας Φυσικής για το σχολικό έτος 2025-2026:

<https://www.minedu.gov.gr/lykeio-2/didaktea-exet-yli-lyk/62824-19-09-25-odigies-didaskalias-fysikis-genikou-lykeiou-gia-to-sxoliko-etos-2025-2026>

ΙΕΠ(Ινστιτούτο Εκπαιδευτικής Πολιτικής) Τράπεζα θεμάτων διαβαθμισμένης δυσκολίας:

<https://trapeza.iep.edu.gr/grades/1/classes/3/subjects/18>

Σχολικό βιβλίο:

Ιωάννου Αλέκος, Ντάνος Γιάννης, Πήττας Άγγελος και Ράπτης Σταύρος, 1999, *Φυσική Ομάδας Προσανατολισμού Θετικών Σπουδών & Σπουδών Υγείας, Τεύχος Γ*, Αθήνα, ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ ΥΠΟΛΟΓΙΣΤΩΝ ΚΑΙ ΕΚΔΟΣΕΩΝ «ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ»

και σε ηλεκτρονική μορφή:

https://ebooks.edu.gr/ebooks/v/html/8547/2728/Fysiki-G-Lykeiou-ThSp_html-apli/

Υπεύθυνη Δήλωση Συγγραφέα:

Δηλώνω ρητά ότι, σύμφωνα με το άρθρο 8 του Ν.1599/1986, η παρούσα εργασία αποτελεί αποκλειστικά προϊόν προσωπικής μου εργασίας, δεν προσβάλλει κάθε μορφής δικαιώματα διανοητικής ιδιοκτησίας, προσωπικότητας και προσωπικών δεδομένων τρίτων, δεν περιέχει έργα/εισφορές τρίτων για τα οποία απαιτείται άδεια των δημιουργών/δικαιούχων και δεν είναι προϊόν μερικής ή ολικής αντιγραφής, οι πηγές δε που χρησιμοποιήθηκαν περιορίζονται στις βιβλιογραφικές αναφορές και μόνον και πληρούν τους κανόνες της επιστημονικής παράθεσης.