



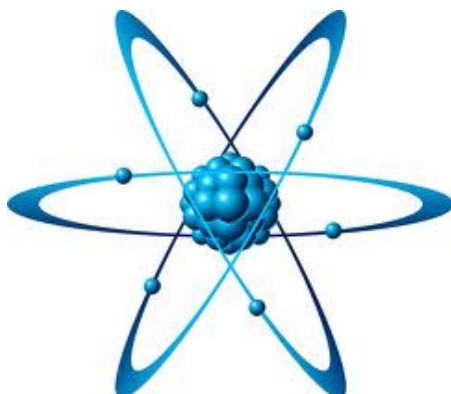
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

ΤΜΗΜΑ ΧΗΜΕΙΑΣ

**ΔΙΑΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΑΚΟ ΔΙΑΤΜΗΜΑΤΙΚΟ ΠΡΟΓΡΑΜΜΑ
ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΩΝ ΣΠΟΥΔΩΝ
ΔΙΔΑΚΤΙΚΗ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ ΚΑΙ ΝΕΕΣ ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΕΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΕΣ
(ΔιΧηNET)**

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Η ιστορία της Χημείας ως εκπαιδευτικό εργαλείο.
Το κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου.**



**ΜΠΟΥΝΤΟΥΡΗ Κ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ
ΧΗΜΙΚΟΣ**

ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗ

ΔΕΚΕΜΒΡΙΟΣ 2011

ΕΡΕΥΝΗΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ ΔΙΠΛΩΜΑΤΟΣ ΕΙΔΙΚΕΥΣΗΣ

**Η ιστορία της Χημείας ως εκπαιδευτικό εργαλείο.
Το κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου.**

ΜΠΟΥΝΤΟΥΡΗ Κ. ΑΙΚΑΤΕΡΙΝΗ

A.M: 291216

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ:

Σιγάλας Μ., Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

ΓΙΑΝΝΑΚΟΥΔΑΚΗΣ Α. Αναπλ. Καθηγητής

ΓΙΑΝΝΑΚΟΥΔΑΚΗΣ Π. Αναπλ. Καθηγητής

ΣΙΓΑΛΑΣ Μ. Καθηγητής

ΗΜΕΡΟΜΗΝΙΑ ΕΞΕΤΑΣΗΣ

8/12/2011

ΠΡΟΛΟΓΟΣ

Η διπλωματική μου εργασία με θέμα «Η ιστορία της Χημείας ως εκπαιδευτικό εργαλείο. Το κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου», είναι αποτέλεσμα της Φοίτησης μου στο Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών «Διδακτική της Χημείας και Νέες Εκπαιδευτικές Τεχνολογίες (ΔιΧηNET)», στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης κατά τα ακαδημαϊκά έτη 2009-2011.

Η παρούσα εργασία αποτελεί σύνοψη ενός εκτενούς άρθρου επισκόπησης, όπου γίνεται αναφορά σε μια διεξοδική ιστορική και επιστημολογική ανάλυση της ερευνητικής στρατηγικής των επιστημόνων κατά την περίοδο γέννησης της κβαντικής θεωρίας.

Σκοπός της Χημείας στην Υποχρεωτική Εκπαίδευση είναι να κρατήσει όλους τους μαθητές – αυριανούς πολίτες – ικανούς να κατανοούν τον κόσμο γύρω τους και να αποκωδικοποιούν τον τρόπο με τον οποίο λειτουργεί. Η Χημεία δεν είναι κάτι αόριστο και αφηρημένο, αλλά είναι μέσα στη ζωή, είναι η ίδια η ζωή. Επομένως, είναι χρήσιμο, κατά τη διδασκαλία, να επισημαίνονται συνεχώς τομείς της καθημερινής ζωής που άμεσα συνδέονται με τη Χημεία, όπως τα τρόφιμα, τα χρώματα τα απορρυπαντικά, τα φάρμακα, τα πλαστικά, τα οικοδομικά υλικά, τα καύσιμα και άλλα.

Στόχος της εργασίας είναι να παρουσιαστεί το κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου υπό το πρίσμα της Ιστορίας της Χημείας. Πολλές έρευνες έχουν δείξει ότι οι ιστορικές επιστημονικές – ερευνητικές διαδικασίες προσφέρουν ένα μοντέλο της ίδιας της μαθησιακής δραστηριότητας. Η αναφορά και ανάλυση των ιστορικών διαδικασιών βοηθά τους διδασκόμενους να συγκροτήσουν, ν' αλλάξουν και να επικοινωνήσουν με επιστημονικές αναπαραστάσεις.

Ως ερευνητικό αλλά και διδακτικό αντικείμενο η Κβαντική Θεωρία όταν περιγράφει και ερμηνεύει τον μικρόκοσμο αποτελεί σημείο συνάντησης της Φυσικής και της Χημείας. Η μελέτη των βασικών νόμων της είναι απαραίτητη για να διερευνηθούν οι ιδιότητες της ύλης και ιδιαιτέρως η δομή και η μορφή των ατόμων των χημικών στοιχείων εφ' όσον αποτελούν δομικές της μονάδες. Η κατανόηση της ατομικής δομής έχει αξία για τους φυσικούς, τους μηχανικούς, τους χημικούς και τους βιολόγους και επομένως πρέπει να έχει μια μεγάλη επίδραση στην κοινωνία. Αν ληφθεί υπόψη ότι οι σημερινοί μαθητές και φοιτητές θα είναι οι αυριανοί επιστήμονες αλλά και πολίτες σε μια κοινωνία, όπου η ανάπτυξη της τεχνολογίας

βασισμένης στην σύγχρονη φυσική θεωρία θα κυριαρχεί στη ζωή τους, θεωρούμε ότι είναι απαραίτητο να είναι ενημερωμένοι για τις βασικές αρχές της αλλά και τις φιλοσοφικές της προεκτάσεις. Η αφετηρία για την ενεργητική οικοδόμηση αυτής της γνώσης μπορεί να είναι η μελέτη του ατόμου και κατ' επέκταση του ατομικού μοντέλου, που δομείται σύμφωνα με τις αρχές της Κβαντομηχανικής

Θέλω να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα καθηγητή μου, κ. Σιγάλα Μιχαήλ που με τις γνώσεις του και την αγάπη του για την επιστήμη της Χημείας, με βοήθησε να ολοκληρώσω την εργασία μου αλλά και να αγαπήσω περισσότερο τη Χημεία, την κ. Χατζηαντωνίου – Μαρούλη Κωνσταντίνα και τον υποψήφιο διδάκτωρ Παπαδόπουλο Αναστάσιο για τις πολύτιμες συμβουλές τους και την υποστήριξή τους, καθώς και τα άλλα δύο μέλη της τριμελούς επιτροπής κ. Γιαννακουδάκη Α., και κ. Γιαννακουδάκη Π. για τις εύστοχες παρατηρήσεις τους.

Θέλω επίσης, να ευχαριστήσω τους γονείς μου Κωνσταντίνο και Ελένη για την αμέριστη υποστήριξή τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Θεσσαλονίκη
Δεκέμβριος 2011

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Πρόσφατες έρευνες έχουν δείξει ότι οι ιστορικές επιστημονικές – ερευνητικές διαδικασίες προσφέρουν ένα μοντέλο της ίδιας της μαθησιακής δραστηριότητας. Η αναφορά και ανάλυση των ιστορικών διαδικασιών βοηθά τους διδασκόμενους να συγκροτήσουν, ν' αλλάξουν και να επικοινωνήσουν με επιστημονικές αναπαραστάσεις.

Η παρούσα εργασία αποτελεί σύνοψη ενός εκτενούς άρθρου επισκόπησης, όπου γίνεται αναφορά σε μια διεξοδική ιστορική και επιστημολογική ανάλυση της ερευνητικής στρατηγικής των επιστημόνων κατά την περίοδο γέννησης της κβαντικής θεωρίας.

Η κβαντική θεωρία διατυπώθηκε και θεμελιώθηκε στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Οι επιστήμονες την εποχή εκείνη με την τεχνολογία που είχαν στην διάθεσή τους άρχισαν να παίρνουν τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα από έναν μέχρι τότε άγνωστο κόσμο, τον κόσμο των στοιχειωδών σωματιδίων (μόρια, άτομα, πυρήνες, νετρόνια, ηλεκτρόνια, κ.α.) από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κόσμος που βλέπουμε και καταλαβαίνουμε. Ο κόσμος των σωματιδίων αυτών λέγεται μικρόκοσμος. Τα σωματίδια αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους δημιουργούν τα λεγόμενα φαινόμενα του μικρόκοσμου, τα οποία ήταν αδύνατον να ερμηνευτούν με τις θεωρίες της κλασικής μηχανικής, της θερμοδυναμικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, με τις οποίες οι επιστήμονες εξηγούσαν τις θεωρίες του μακρόκοσμου, δηλαδή του κόσμου που μπορεί να δει, να αισθανθεί και να καταλάβει κανείς.

Συγκεκριμένα, στην παρούσα εργασία με θέμα «Η ιστορία της Χημείας ως εκπαιδευτικό εργαλείο. Το κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου», παρουσιάζονται οι σπουδαιότεροι επιστήμονες που ασχολήθηκαν πειραματικά με το μακρόκοσμο. Αυτοί είναι ο Thomas Young με το πείραμα των δυο σχισμών, ο Max Planck με την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, ο J.J Thomson με το πρότυπό του, ο Ernest Rutherford με τη δομή του ατόμου, ο Niels Bohr με το πρότυπο Bohr, ο Louis de Broglie με τα υλικά κύματα, ο Werner Heisenberg με την αρχή της απροσδιοριστίας, αλλά και ο Erwin Schrödinger με την υλοκυματική εξίσωση.

Στόχος της παρούσης εργασίας είναι η κατανόηση της συμβολής των μοντέλων που πρότειναν στις διαδικασίες εννοιολογικής αλλαγής από την κλασική στην κβαντική κοσμοθεώρηση, καθώς και η ανάπτυξη εκπαιδευτικού υλικού για τη διδακτική αξιοποίηση των παραπάνω.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Βιβλιογραφική εργασία

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Ιστορία των φυσικών επιστημών, παρανοήσεις στη μάθηση, κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου.

ABSTRACT

Recent research in Science education has recognized the importance of history and philosophy of science and the research procedures offer a model of learning activity. The reporting and analysis of historical processes helps learners to set, change and communicate with scientific representations. The history and philosophy of science can be introduced in the classroom not necessarily through formal courses in the history of chemistry or comments and anecdotes, but rather by incorporating the heuristic principles that guided the scientists to elaborate their theories.

This paper is a summary of an extensive overview article, citing a thorough historical and epistemological analysis of the research strategy of scientists during the birth of quantum theory.

The quantum theory formulated and founded the first decades of the twentieth century. At the time, the technology was available to scientists began to take the first experimental results from a unknown world, the world of elementary particles (molecules, atoms, nuclei, neutrons, electrons, etc.) from a world which is made to see and understand. The world of particles called microcosm, which could not be explained by theories of classical mechanics, of thermodynamics and electromagnetism, which scientists explain the theories of macrocosm, the world can see, feel and understand.

Specifically, in this paper titled “the history of chemistry as an educational tool. The quantum mechanical model of atom” presents the grader experimental scientists involved in macrocosm. These are the Thomas Young with experiment with two slits, Max Planck with radiation of black body, J.J. Thomson with his model, Ernest Rutherford with atomic structure, Niels Bohr with Bohr’s model, Louis de Broglie with waves materials, and Erwin Schrödinger with Schrödinger’s equation.

The aim of this paper is to understand the contribution of the models proposed in the processes of conceptual change from classical to quantum worldview, and to develop educational materials for teaching use of the above.

SUBJECT AREA: Bibliographic word

KEY WORDS: History of science, Microconceptions in learning, Quantum – mechanical model of atom.

Περιεχόμενα

Εισαγωγή	13
----------------	----

Κεφάλαιο 1

Η χρήση της Ιστορίας της Επιστήμης στη διδασκαλία	15
---	----

1. Η χρήση της Ιστορίας της Επιστήμης στη διδασκαλία	15
1.1 Η Ιστορία των Φυσικών Επιστημών ως μέσον διδασκαλίας	15
1.2 Η αξιοποίηση της Ιστορίας των Επιστημών στη διδακτική πράξη	20
1.3 Η χρήση της ιστορίας στα μαθήματα των φυσικών επιστημών.....	22
1.4 Η αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας της χημείας μέσα από την ιστορία της επιστήμης.....	24
Βιβλιογραφία.....	29

Κεφάλαιο 2

Παρανοήσεις στη μάθηση της Κβαντομηχανικής Θεωρίας	30
--	----

2. Παρανοήσεις στη μάθηση	30
2.1 Τι είναι οι παρανοήσεις των μαθητών;	31
2.2 Πώς επηρεάζεται η μάθηση από τις παρανοήσεις;.....	31
2.3 Τι και πως μαθαίνουν οι μαθητές;.....	31
2.4 Στάσεις των μαθητών απέναντι στη θεωρία πριν ακόμα τη διδαχτούν.....	32
2.5 Η ανάγκη διδασκαλίας της Κβαντομηχανικής	33
2.6 Δυσκολίες κατανόησης στη Κβαντομηχανική	34
2.7 Προβλήματα διδασκαλίας στη Κβαντική Χημεία	35
2.8 Πρέπει τελικά να διδαχτεί η Κβαντική Θεώρηση του ατόμου στη σχολική τάξη;.....	45
2.9 Τρόποι διδασκαλίας της Κβαντικής Χημείας.....	47
2.9.1 Προτάσεις ερευνητών.....	47
2.9.2 Σχεδιασμός μαθήματος.....	48
2.9.2.1 Διδάσκοντας το Κβαντομηχανικό Πρότυπο του ατόμου.....	48
2.9.2.2 Διδάσκοντας τα άτομα: δομικά στοιχεία της ύλης.....	51
2.9.2.3 Διδάσκοντας το δυϊσμό σωματιδίων και την αβεβαιότητα	53
Βιβλιογραφία.....	63

Κεφάλαιο 3

Εκπαιδευτικό υλικό από την εξέλιξη της Κβαντικής Θεωρίας	64
--	----

3.1 Το πείραμα των δυο σχισμών – Thomas Young.....	67
--	----

3.1.1. Το πείραμα της «διπλής σχισμής».....	68
Βιβλιογραφία.....	73
3.2 Η Γένεση της Κβαντικής Μηχανικής.....	75
3.2.1 Θερμική Ακτινοβολία και Ακτινοβολία του Μέλανος σώματος.....	77
3.2.1.1 Οι πειραματικοί νόμοι	80
3.2.1.2 Κλασική ερμηνεία	82
3.2.1.3 Κβαντική ερμηνεία. Η θεωρία Planck	83
3.2.2 Δυσμός της ακτινοβολίας	91
3.2.2.1 Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο	91
3.2.2.2 Οι πειραματικοί νόμοι	93
3.2.2.3 Κλασική ερμηνεία.....	93
3.2.2.4 Κβαντική ερμηνεία	94
3.2.3 Σκέδαση Ακτινοβολία. Το φαινόμενο Compton.....	98
3.2.3.1 Περιγραφή του φαινομένου. Κλασική πρόβλεψη και πειραματικά αποτελέσματα	98
3.2.3.2 Κλασική ερμηνεία του φαινομένου Compton.....	103
Βιβλιογραφία.....	110
3.3 Άτομα και Πυρήνες.....	112
3.3.1 Το πρότυπο του Thomson	112
3.3.2 Το πρότυπο του Rutherford.....	114
3.3.3 Στάσιμες Στάθμες Ενέργειας.....	121
3.3.4 Το πρότυπο του Bohr.....	125
3.3.4.1 Αξιώματα Bohr	126
3.3.4.2 Ατομικό πρότυπο – Μοντέλο του Υδρογόνου (υπολογισμός ακτίνας)...	129
3.3.4.3 Κριτική της Θεωρίας του Bohr	132
3.3.4.4 Ανακεφαλαίωση του Προτύπου του Bohr	134
Βιβλιογραφία.....	137
3.4 Τα υλικά κύματα του de Broglie.....	139
3.4.1 Πειραματική επιβεβαίωση της υπόθεσης de Broglie. Το πείραμα Davisson – Germer	142
Βιβλιογραφία.....	146
3.5 Heisenberg και απροσδιοριστία.....	148
3.5.1 Η αρχή αβεβαιότητας του Heisenberg	149
3.5.2 Η αρχή αβεβαιότητας ενέργειας και χρόνου	150

Βιβλιογραφία.....	154
3.6 Η Υλοκυματική εξίσωση του Schrödinger	156
3.6.1 Η Υλοκυματική εξίσωση του Schrödinger.....	156
3.6.2 Το παράδοξο της γάτας του Schrödinger.....	159
3.6.3 Εφαρμογές των εξισώσεων de Broglie και Schrödinger.	161
Βιβλιογραφία.....	163
Συμπεράσματα	165

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

Η εργασία αυτή έχει ως στόχο της, τη διδασκαλία του κβαντομηχανικού προτύπου του ατόμου υπό το πρίσμα της ιστορίας των φυσικών επιστημών, και την πλήρη ενημέρωση των εκπαιδευτικών και των μαθητών.

Η Ιστορία των Επιστημών μπορεί να δείξει τον τρόπο που οι επιστημονικές εξελίξεις επηρεάζουν τον πολιτισμό και πώς η επιστημονική και κοινωνική ηθική διαμορφώνονται μέσα στο χρόνο. Μέρος του πολιτισμού του κάθε λαού, θα πρέπει να αποτελέσει η συζήτηση εκπαιδευτικών θεμάτων, η ενθάρρυνση των μαθητών να δώσουν έμφαση αλλά και να μάθουν τα θέματα που τους δυσκολεύουν, η αλλαγή αντίληψης των επιστημών καθώς και η χρήση της τεχνολογίας στα εκπαιδευτικά θέματα. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων γίνεται χρήση της ιστορίας της επιστήμης από τους εκπαιδευτικούς.

Η κβαντική θεωρία διατυπώθηκε και θεμελιώθηκε στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Οι επιστήμονες την εποχή εκείνη με την τεχνολογία που είχαν στην διάθεσή τους άρχισαν να παίρνουν τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα από έναν μέχρι τότε άγνωστο κόσμο, τον κόσμο των στοιχειωδών σωματιδίων (μόρια, άτομα, πυρήνες, νετρόνια, ηλεκτρόνια, κ.α.) από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κόσμος που βλέπουμε και καταλαβαίνουμε. Ο κόσμος των σωματιδίων αυτών λέγεται μικρόκοσμος. Τα σωματίδια αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους δημιουργούν τα λεγόμενα φαινόμενα του μικρόκοσμου, τα οποία ήταν αδύνατον να ερμηνευτούν με τις θεωρίες της κλασικής μηχανικής, της θερμοδυναμικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, με τις οποίες οι επιστήμονες εξηγούσαν τις θεωρίες του μακρόκοσμου, δηλαδή του κόσμου που μπορεί να δει, να αισθανθεί και να καταλάβει κανείς.

Είναι αυτονόητο ότι πρωτίστως κρίνεται απαραίτητη η βαθιά και λεπτομερής ενημέρωση του διδάσκοντα. Η μονογραφία αυτή εμπεριέχει όλες τις σημαντικές πληροφορίες που απαιτούνται για τη σφαιρική γνώση του θέματος. Στο κυρίως μέρος της εργασίας μελετάται διεξοδικά η ιστορική και επιστημολογική ανάλυση της ερευνητικής στρατηγικής των επιστημόνων κατά την περίοδο γέννησης της κβαντικής θεωρίας.

Η δομή της εργασίας είναι τέτοια ώστε να μπορεί ο αναγνώστης να ενημερωθεί σφαιρικά. Παρακάτω δίνονται τα κεφάλαια που περιλαμβάνει η εργασία και το περιεχόμενο του καθενός από αυτά:

Πρώτο κεφάλαιο: μελετάται η χρήση της Ιστορίας της Επιστήμης στη διδασκαλία.

Δεύτερο κεφάλαιο: μελετώνται οι παρανοήσεις στη μάθηση της Κβαντομηχανικής Θεωρίας.

Τρίτο κεφάλαιο: γίνεται ανάπτυξη εκπαιδευτικού υλικού από την εξέλιξη της Κβαντικής Θεωρίας, όπου παρουσιάζονται οι σπουδαιότεροι επιστήμονες που ασχολήθηκαν πειραματικά με το μακρόκοσμο. Αυτοί είναι ο Thomas Young με το πείραμα των δυο σχισμών, ο Max Planck με την ακτινοβολία του μέλανος σώματος, ο J.J Thomson με το πρότυπό του, ο Ernest Rutherford με τη δομή του ατόμου, ο Niels Bohr με το πρότυπο Bohr, ο Louis de Broglie με τα υλικά κύματα, ο Werner Heisenberg με την αρχή της απροσδιοριστίας, αλλά και ο Erwin Schrödinger με την υλοκυματική εξίσωση.

Ακόμη, η αναχείρας μονογραφία αποτελεί μια βάση δεδομένων για την ιστορία των φυσικών επιστημών ως μέσον διδασκαλίας καθώς και για ο κβαντομηχανικό πρότυπο του ατόμου, με άφθονο πληροφοριακό υλικό τόσο για τον καθηγητή αλλά και για κάθε ενδιαφερόμενο μαθητή και φοιτητή.

1. Η χρήση της Ιστορίας της Επιστήμης στη διδασκαλία

1.1 Η Ιστορία των Φυσικών Επιστημών ως μέσον διδασκαλίας

Έχει επαρκώς τεκμηριωθεί μέσα από τη διεθνή αρθρογραφία ότι η Ιστορία των Επιστημών μπορεί να συμβάλει καθοριστικά στην Διδασκαλία και Μάθηση των Φυσικών Επιστημών. Το ερώτημα που τίθεται όμως, είναι πως μέσω της ιστορίας των επιστημών μπορεί να βελτιωθεί η γενική κατανόηση της επιστήμης από τους μαθητές;

Η Ιστορία των Επιστημών μπορεί να δείξει τον τρόπο που οι επιστημονικές εξελίξεις επηρεάζουν τον πολιτισμό και πώς η επιστημονική και κοινωνική ηθική διαμορφώνονται μέσα στο χρόνο. Μέρος του πολιτισμού του κάθε λαού, θα πρέπει να αποτελέσει η συζήτηση εκπαιδευτικών θεμάτων, η ενθάρρυνση των μαθητών να δώσουν έμφαση αλλά και να μάθουν τα θέματα που τους δυσκολεύουν, η αλλαγή αντίληψης των επιστημών καθώς και η χρήση της τεχνολογίας στα εκπαιδευτικά θέματα. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων γίνεται χρήση της ιστορίας της επιστήμης από τους εκπαιδευτικούς.

Πάνω από 50 χρόνια η ιστορία της επιστήμης χρησιμοποιείται ως μέσο διδασκαλίας. Στο σημείο αυτό, θα πρέπει να γίνει σαφές το γεγονός ότι η «Ιστορία της Επιστήμης» δεν είναι συλλογή βιβλίων και άρθρων που θα αποτελέσουν ένα μέρος των σχολικών εγχειριδίων, αλλά είναι μια γλώσσα με την οποία ο κάθε άνθρωπος μπορεί να τη χρησιμοποιήσει για την καλύτερη κατανόηση της φύσης. Τοποθετώντας μια ή δυο παραγράφους με στοιχεία ιστορίας στα σχολικά εγχειρίδια δεν βοηθάει τα παιδιά να κατανοήσουν την επιστήμη. Οι συγγραφείς πρέπει να ενστερνιστούν ότι η επιστήμη πρέπει να είναι μια συλλογική ανθρώπινη δραστηριότητα η οποία επιδιώκει μια λογική και αποδεικτική μέθοδο κατανόησης της φύσης, διαφορετικά «η επίλυση προβλημάτων και οι αφηγήσεις θα συνεχίσουν να αντιμετωπίζονται σαν δύο ξεχωριστά θέματα αντί για ένα.

Οι πρώτες αναφορές για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών μέσα από την ιστορία της επιστήμης εμφανίζονται στα μέσα του 19ου αιώνα στην Αγγλία όταν ο Δούκας του Argyll, στην ομιλία του το 1856 στα μέλη της British Association for the Advancement of Science υποστηρίζει: “Αυτό που αναζητούμε στη διδασκαλία των νέων, δεν είναι τόσο η γνώση των αποτελεσμάτων όσο η κατανόηση της μεθόδου και

πάνω απ' όλα, η Ιστορία της Επιστήμης ... αυτό είναι που πρέπει να διδάξουμε εάν επιθυμούμε μια εκπαίδευση αντάξια των μεγάλων προσδοκιών μας”. Αργότερα ο Ernst Mach, Αυστριακός φυσικός και φιλόσοφος στο ερευνητικό του έργο *The Science of Mechanics* επισημαίνει: “Η ιστορική έρευνα της εξέλιξης της Επιστήμης είναι αναγκαία αν δε θέλουμε οι αρχές και οι έννοιες που πηγάζουν απ’ αυτήν να παραμείνουν κενές επιταγές ή, ακόμη χειρότερα, κοινές προκαταλήψεις”.

Μετά τον 1^ο παγκόσμιο πόλεμο επανέρχεται η British Association και προτρέπει τη χρήση της ιστορίας της επιστήμης στη εκπαίδευση. Ο Langevin σε παιδαγωγικό επίπεδο, πιστεύει ότι η επιστροφή στις αυθεντικές πηγές της γνώσης είναι η καταλληλότερη μέθοδος για την υλοποίηση του μοντέλου του τονίζοντας ότι “...μέσα από την Ιστορία της Επιστήμης θα καταδειχθούν ο δυναμικός, εξελικτικός και διαλεκτικός χαρακτήρας του περιεχομένου και της μεθοδολογίας της Φυσικής, οι κοινωνικές και ανθρώπινες ρίζες της καθώς και η αλληλεπίδρασή της με τις άλλες ανθρώπινες δραστηριότητες”. Οι ιδέες αυτές ανεκμετάλλευτες για αρκετά χρόνια αποτέλεσαν το θεωρητικό υπόβαθρο για την ανάπτυξη της έρευνας και εφαρμογής ιδεών, προς την κατεύθυνση της αξιοποίησης της ιστορίας της επιστήμης ως μέσου διδασκαλίας και μάθησης των φυσικών επιστημών.

Η συσχέτιση μεταξύ της Ιστορίας των Επιστημών και της διδασκαλίας των φυσικών επιστημών διαμορφώνεται μετά το τέλος του Β' Παγκοσμίου Πολέμου, στο πλαίσιο της γενικότερης ιδέας ότι οι επιστημονικές ανακαλύψεις αποτελούν κοινωνικές δραστηριότητες με ανάλογες επιπτώσεις και επομένως θα πρέπει να αναδειχθεί η ανθρωπιστική και πολιτισμική διάσταση της Επιστήμης.

Το 1948 ο J. Conant, υπεύθυνος της Προπτυχιακής Γενικής Εκπαίδευσης του Harvard, δημοσιεύει στις Η.Π.Α. το *Harvard Case Histories in Experimental Science*, μια σειρά από 8 μελέτες ιστορικών περιπτώσεων στους τομείς της Φυσικής, της Χημείας και της Βιολογίας, απευθυνόμενος σε σπουδαστές κοινωνικών επιστημών, με σκοπό να τους φέρει πιο κοντά στην εξέλιξη και την μεθοδολογία της επιστήμης. Στη συνέχεια ο L. Klopfer το 1956 ξεκινάει τη δική του προσπάθεια παρουσίασης ιστορικών περιπτώσεων, απευθυνόμενος σε μαθητές της Δευτεροβάθμιας Εκπαίδευσης.

Πάνω σε αυτή την έρευνα εφαρμόστηκε μια τεχνική διδασκαλίας με τίτλο «Historical case studies». Με την τεχνική αυτή οι μαθητές έχουν τη δυνατότητα να γνωρίσουν τον τρόπο με τον οποίο μεγάλοι επιστήμονες του παρελθόντος αντιμετώπισαν διάφορα εννοιολογικά και μεθοδολογικά προβλήματα και κατόπιν να

τα συζητήσουν και να τα διερευνήσουν μέσα στο εργαστήριο. Μετά από μια δεκαετία περίπου εφαρμογής το εγχείρημα εγκαταλείπεται. Οι ανασταλτικοί παράγοντες που επέδρασαν φαίνεται να ήταν οι εξής:

1. Ιδεολογικού χαρακτήρα (αδιαφορία για τις ιστορικές μεθόδους).
2. Επιστημολογικού χαρακτήρα (οι καθηγητές και οι μαθητές θα εμπλέκονταν στο χώρο των επιστημολογικών διαμαχών).
3. Οι δυσκολίες που συνάντησαν οι εκπαιδευτικοί στην εφαρμογή της μεθόδου ως αποτέλεσμα της πλήρους απουσίας «ιστορικής παιδείας» από μέρους τους.

Μετά το 1957 και ενώ από το MIT είχε ήδη εφαρμοστεί το πρόγραμμα PSSC (Physical Science Study Committee), το οποίο απευθυνόταν σε μαθητές θετικής κατεύθυνσης που θα ακολουθούσαν αργότερα σπουδές στις φυσικές επιστήμες αναπτύσσεται από το Harvard το HPPC (Harvard Project Physics Course), ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα διδασκαλίας, το οποίο προωθούσε την ιδέα της φυσικής για όλους, με έμφαση στην ιστορική και πολιτισμική προσέγγιση της Επιστήμης. Στόχος αυτού του προγράμματος αποτέλεσε η αντιμετώπιση της ιστορίας της επιστήμης με τη χρήση αυθεντικού ιστορικού υλικού και τη δομή των σχολικών βιβλίων βασισμένη στην ιστορική ένταξη και ανάπτυξη των ιδεών και εννοιών των φυσικών επιστημών. Το πρόγραμμα παρακολούθησε το 15% του μαθητικού πληθυσμού των Λυκείων στο πλαίσιο ενός εκπαιδευτικού σχεδιασμού, ενώ η εφαρμογή του συνοδεύτηκε και από ένα ολοκληρωμένο πρόγραμμα αξιολόγησης. Κατά τη διάρκεια αυτού του προγράμματος έγινε χρήση ιστορικών πειραμάτων, προσομοιώσεων, ταινιών και διαφανειών ώστε να προσελκύσουν το ενδιαφέρον των μαθητών. Οι ερευνητές είχαν ως στόχο να βοηθήσουν τους μαθητές να αυξήσουν τις γνώσεις τους στον κόσμο της φυσικής αλλά και να τους δείξουν πως μέσω της ιστορίας αντικατοπτρίζεται ο θαυμάσιος κόσμος της φυσικής. Τα αποτελέσματα της έρευνας αυτής έδειξαν πως αυτή η προσέγγιση ιστορικού χαρακτήρα των φυσικών επιστημών προκάλεσε μεγάλο ενδιαφέρον κάνοντας ο μάθημα εύκολο και ευχάριστο, και διαμόρφωσε θετικές στάσεις των μαθητών προς τις φυσικές επιστήμες. Παρόλα αυτά αποδείχτηκε αργότερα πως δεν παρουσιάστηκε ιδιαίτερη βελτίωση στην κατανόηση του περιεχομένου και των μεθοδολογικών διαδικασιών των φυσικών επιστημών. Η αδυναμία αυτή σε συνδυασμό με την αποτυχία μιας επαρκούς κατάρτισης των διδασκόντων σε ζητήματα της Ιστορίας και της Φιλοσοφίας των φυσικών επιστημών., οδήγησε και αυτό το πρόγραμμα, μετά από 5 χρόνια εφαρμογής, σε συρρίκνωση. Η εγκατάλειψη των προγραμμάτων τα οποία στόχευαν

στην ενσωμάτωση της ιστορίας της επιστήμης στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών, δημιουργεί ένα κλίμα έντονου προβληματισμού για τη διδακτική αξία της ιστορίας της εκπαίδευσης.

Μετά το 1970 ξεκινούν τα προγράμματα STS (Science - Technology and Society), τα οποία στοχεύουν στην ανάδειξη των αλληλεπιδράσεων Επιστήμης και Κοινωνίας και αναγνωρίζουν την πρακτική, επαγγελματική, κοινωνική, και ανθρωπιστική πλευρά των φυσικών επιστημών με την ενσωμάτωση αυτών των αντιλήψεων στα Αναλυτικά Προγράμματα. Πιο συγκεκριμένα, επιδιώκεται μέσα από τη διδασκαλία να αναδειχθεί η φύση της επιστημονικής γνώσης, καθώς και θέματα σχετικά με τον τρόπο διαχείρισής της, όπως αυτός εκδηλώνεται μέσα από πολιτισμικές και ηθικές αλληλεπιδράσεις, ανάμεσα στην Επιστήμη και την Κοινωνία. Η φύση της επιστημονικής γνώσης εκφράζεται με τη “Φύση των Φυσικών Επιστημών” όπου πρόκειται για ένα γόνιμο χώρο σύγκλισης διαφόρων επιστημονικών πεδίων (όπως είναι η Ιστορία, η Φιλοσοφία, η Κοινωνιολογία, η Ανθρωπολογία), με τις φυσικές επιστήμες και αποτελεί συγχρόνως την έκφραση των νέων τάσεων διαχείρισης του επιστημονικού φαινομένου. Μερικές από αυτές τις τάσεις είναι: Επιστημονικός Αλφαριθμητισμός (Scientific Literacy), Δημόσια Κατανόηση της Επιστήμης (Public Understanding of Science), Φυσικές Επιστήμες για Όλους (Science for All) και Φυσικές Επιστήμες ως Κουλτούρα (Science as Culture). Στόχος όλων των παραπάνω αποτελεί η ανάδειξη της φύσης της επιστημονικής γνώσης, ο διάλογος σχετικά με τον τρόπο που τη διαχειριζόμαστε και η καλλιέργεια στάσεων που φέρεται να διαμορφώνει η γνώση αυτή. Η Ιστορία των Επιστημών συμβάλλει στην ανάδειξη αυτών των επιδιώξεων, προβάλλεται ως κατάλληλο πεδίο υλοποίησής τους και συναντά τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών. Αποτέλεσμα της προοπτικής αυτής υπήρξε ο σχεδιασμός και η υλοποίηση αντίστοιχων Αναλυτικών Προγραμμάτων. Στη δομή των Προγραμμάτων αυτών, η Ιστορία των Επιστημών και η διδασκαλία της έχει σημαντικό ρόλο για τη βελτίωση της κατανόησης των σχετικών μαθημάτων. Το ρεύμα αυτό μεταφέρεται και στην Ελλάδα και εκφράζεται με τη συγκρότηση ενός νέου αναλυτικού προγράμματος Φυσικής στα Ενιαία Πολυκλαδικά Λύκεια την περίοδο 1984-85, θέτοντας ως έναν από τους κεντρικούς διδακτικούς του στόχους “...την κατανόηση της αλληλεπίδρασης της επιστήμης με τα κοινωνικά συμβαίνοντα”. Η προσπάθεια υποστηρίζεται από τη συγγραφή σχολικών εγχειριδίων, στα οποία επιχειρείται να αξιοποιηθεί η ιστορία της φυσικής με την παρουσίαση των φυσικών εννοιών μέσα

στα πλαίσια της καταγωγής και της ιστορικής εξέλιξής τους. Το πρόγραμμα αφού εφαρμόζεται στα Λύκεια όλης της χώρας το 1997, εγκαταλείπεται μετά από αρκετά χρόνια εφαρμογής χωρίς ποτέ να αξιολογηθεί ερευνητικά η αποτελεσματικότητά του σε σχέση με τους στόχους που τέθηκαν.

Κατά τη δεκαετία του '80 οι επιστήμονες εστιάζουν τις έρευνές τους σε έναν άμεσο ρόλο της ιστορίας της επιστήμης στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών όπου η ιστορία των επιστημών κατέχει σημαντική θέση. Αντιπροσωπευτικά Προγράμματα της εποχής είναι τα: Φυσικές Επιστήμες και Κοινωνία (Science and Society) και Οι Φυσικές Επιστήμες στο Κοινωνικό τους Πλαίσιο (Science in its Social Context).

Το 1985 στις ΗΠΑ γίνεται η εφαρμογή του Project, το οποίο δίνει έμφαση στη βελτίωση της διδασκαλίας των φυσικών επιστημών και παρουσιάζει το επιστημονικό εγχείρημα ως μία κοινωνική προσπάθεια η οποία επηρεάζει, αλλά και επηρεάζεται από την ανθρώπινη σκέψη.

Τη δεκαετία του '90, έως τις μέρες μας, η Ιστορία των Επιστημών αξιοποιείται στη διδακτική πράξη με τους όρους του Harvard Project (ανάδειξη δηλ. της πολιτισμικής και ανθρωπιστικής διάστασης της Επιστήμης, ώστε ακόμα και ο μαθητής που δεν θα ακολουθήσει τη φυσικομαθηματική κατεύθυνση να μπορεί να προσεγγίσει τη βασική γνώση, σε όλη της τη διάσταση, ώστε να μην μείνει επιστημονικά αναλφάβητος) και αντίστοιχα θέματα υπάρχουν στα Αναλυτικά Προγράμματα των περισσότερων χωρών. Τα θέματα αυτά δεν προτείνονται ως κύρια θέματα διδακτικών ενοτήτων, αλλά ως περιφερειακά θέματα, που εξυπηρετούν την ανάπτυξη και τον εμπλουτισμό επιστημονικών ζητημάτων.

Σε παγκόσμιο επίπεδο, παρατηρείται ταυτόχρονα, μια αύξηση του ερευνητικού ενδιαφέροντος για τα σχετικά ζητήματα, η οποία αποτυπώνεται με την ίδρυση του International History Philosophy and Science Teaching Group, τη διοργάνωση διεθνών θεματικών συνεδρίων (Florida 1989, Kingston 1992, Szombathely 1994, Minneapolis 1995, Bratislava 1996, Pavia 1999, Denver 2001, Winnipeg 2003) και την κυκλοφορία ειδικευμένων περιοδικών (*Science & Education*). Στα πλαίσια αυτά δημοσιεύονται θεωρητικές μελέτες αλλά και εμπειρικές έρευνες, οι οποίες διερευνούν τα μαθησιακά αποτελέσματα και ελέγχουν τα όρια εφαρμογής της λειτουργικής ένταξης της ιστορίας της επιστήμης στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών ενώ παράλληλα κατατίθενται προτάσεις για την αντιμετώπιση των προβλημάτων που δημιουργεί η νέα προσέγγιση. Βέβαια για να

γίνει σωστή χρήση όλων των παραπάνω θα πρέπει να υπάρξει ιστορική κατάρτιση των διδασκόντων.

1.2 Η αξιοποίηση της Ιστορίας των Επιστημών στη διδακτική πράξη

Όσον αφορά την αξιοποίηση της ιστορίας της επιστήμης στη διδακτική πράξη έχουν αναφερθεί οι εξής προτάσεις:

- i. Η ιστορία των επιστημών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο από τη Διδακτική για να επιτευχθούν μαθησιακοί και διδακτικοί στόχοι και ως διδακτική παρέμβαση για τη βελτίωση της ποιότητας της
- ii. Η άποψη της ιστορικής προσέγγισης με στόχο την ανάδειξη του μεγαλείου των επιστημονικών επιτευγμάτων και την επιβεβαίωση ότι η επιστημονική γνώση είναι μια έγκυρη γνώση, σαφώς ανώτερη από τις άλλες υπάρχουσες μορφές γνώσης. Οι Ιστορικές αναφορές μπορεί να περιέχουν μία ελάχιστη γεύση ιστορίας είτε σε εισαγωγικά κεφάλαια είτε σε διάσπαρτες αναφορές στους μεγάλους ήρωες παλιότερων εποχών, ωστόσο συμβάλλουν στο να καλλιεργήσουν στους μαθητές την αίσθηση συμμετοχής σε μία μακρόχρονη επιστημονική παράδοση και
- iii. Η πρόταση ότι η Ιστορία των Επιστημών βοηθάει στο να γίνει κατανοητό ότι δεν υπάρχουν σταθερές για το πώς αναπτύσσεται η Επιστήμη, η οποία συνεχίζει την πορεία της.

Η χρήση όμως στοιχείων της ιστορίας των επιστημών στη διδασκαλία δεν θα πρέπει να συνδέεται μόνο με την προσπάθεια διαμόρφωσης θετικών στάσεων, αλλά και με την αλλαγή φιλοσοφίας προς την αναβάθμιση της πολιτισμικής παράδοσης και κουλτούρας, καθώς και της επιστημονικής γνώσης.

Βασική διδακτική πρόταση για το πώς η Ιστορία των Επιστημών μπορεί να ενσωματωθεί στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών, θα πρέπει να αποτελέσει η ένταξή της στα διδακτικά εγχειρίδια κεφαλαίων ή ενοτήτων με τη μορφή εισαγωγικού προβληματισμού ή ένθετης πληροφορίας ή κάποιας δραστηριότητας. Αυτά τα θέματα Ιστορίας των Επιστημών καταλαμβάνουν κατά μέσο όρο το 2-4% της έκτασης των σχολικών εγχειριδίων και μόνο το 1/3 των εκπαιδευτικών τα εντάσσει στην εξέλιξη του μαθήματος, αφιερώνοντας περίπου το 2-3% του χρόνου που προορίζεται για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών. Όλα τα παραπάνω έχουν ως αποτέλεσμα να μην συμβάλλουν ουσιαστικά στην επιστημονική εκπαίδευση και να μην στοχεύουν στην

καλλιέργεια μιας γενικής παιδείας των μαθητών, προσφέροντάς τους κάποια γνωστικά ερεθίσματα.

Οι λόγοι εντοπίζονται στο γεγονός ότι οι ιστορικές αναφορές είναι πολύ λίγες και απαιτούν κατάλληλους διδακτικούς μετασχηματισμούς και αλλαγή νοοτροπίας και στάσης. Για να πετύχει όμως αυτό, προέχει η ανάγκη να καταρτιστούν οι εκπαιδευτικοί επαρκώς, ώστε να είναι σε θέση να αναδείξουν και να τονίσουν τη θέση της Επιστήμης στην ιστορία του ανθρώπινου πολιτισμού. Αυτό θα μπορούσε να γίνει με την άμεση παροχή απαραίτητων γνώσεων και με συναφείς προτάσεις καινοτόμων διδακτικών προσεγγίσεων προκειμένου να διαμορφωθεί μία κουλτούρα και πρακτική, έτσι όπως περιγράφεται και υποστηρίζεται από την Ιστορία των Επιστημών.

Από την άλλη μεριά, επιφυλάξεις διατυπώνονται για την αποτελεσματικότητα της ενσωμάτωσης στοιχείων της Ιστορίας των Επιστημών ακόμα και από εκπαιδευτικούς που επιλέγουν μία τέτοια προοπτική διδασκαλίας. Και αυτό, διότι συχνά οι εκπαιδευτικοί χρησιμοποιούν υλικό από την Ιστορία με γνώμονα την διεύρυνση των παιδαγωγικών τους επιδιώξεων, εις βάρος της ιστορίας και πολλές φορές σε μία αντί-ιστορική βάση.

Βέβαια, οι ιστορικές αναφορές στα διδακτικά εγχειρίδια και η αξιοποίησή τους στην διδακτική πράξη, επιδρούν αρνητικά στους μαθητές. Έτσι λοιπόν στο σημείο αυτό ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να στοχεύει με κατάλληλες στρατηγικές στην καλλιέργεια δεξιοτήτων κριτικής σκέψης χρησιμοποιώντας ερωτήσεις όπως: «Ποιες είναι οι κεντρικές έννοιες και οι μεταξύ τους σχέσεις; Ποια είναι τα βασικά επιχειρήματα που προβάλλονται; Ποια στοιχεία έχουμε ή μπορούμε να βρούμε που αμφισβητούν τα επιχειρήματα που προβάλλονται; Τι θα γινόταν αν; Πώς...; Γιατί...; κ.λπ.» προκειμένου να κατευθύνει και να καθοδηγήσει τη σκέψη και τη δράση των μαθητών. Επιπλέον, ο εκπαιδευτικός θα πρέπει να ενσωματώσει στη διδασκαλία του διδακτικά εργαλεία με τη χρήση των οποίων θα μπορούσε να βελτιωθεί η διδασκαλία των φυσικών επιστημών στη σχολική τάξη (διατύπωση ερωτήσεων, αναζήτηση απαντήσεων μεταξύ των μαθητών, ερμηνεία δεδομένων, επίλυση προβλημάτων, λήψη απόφασης, ανάπτυξη και υποστήριξη επιχειρημάτων).

Επομένως, οι εκπαιδευτικοί στόχοι θα πρέπει να επιδιώκουν μία εκπαίδευση στις φυσικές επιστήμες που θα ξεπερνά τη συντηρητική προσέγγιση του επιστημονισμού, που αποδίδει στην επιστήμη ένα υπερβολικό κύρος, και θα αναδεικνύει την Επιστήμη ως κουλτούρα για όλους τους πολίτες.

Η διδασκαλία των φυσικών επιστημών με τη συμβολή της Ιστορίας των Επιστημών είναι η πρόταση για μία ανθρωπιστική, αντιαυταρχική και δημοκρατική εκπαίδευση που θα βοηθούσε τους μαθητές να εμπλουτίσουν τις γνώσεις και τη γενική τους παιδεία και να καλλιεργήσουν μία ώριμη στάση απέναντι στην Επιστήμη.

1.3 Η χρήση της ιστορίας στα μαθήματα των φυσικών επιστημών

Είναι ευρέως αποδεκτό ότι η Ιστορία και η Φιλοσοφία των Φυσικών Επιστημών παρέχει πλούσιο υλικό που μπορεί να αξιοποιηθεί στη διδασκαλία τους. Πολλοί καθηγητές φυσικών επιστημών αναγνωρίζουν ότι η διδασκαλία στοιχείων της ιστορίας της επιστήμης βοηθά τους μαθητές να μάθουν το περιεχόμενο της επιστήμης και τη φύση της επιστήμης.

Η χρήση της ιστορίας μπορεί να βοηθήσει τους μαθητές να βελτιώσουν τις κριτικές τους ικανότητες, που είναι απαραίτητες για την ανάλυση των ιδεών και τη σύγκρισή τους και να παρατηρήσουν τη λειτουργία της φύσης και της αναγνώρισης των νόμων που τη διέπουν με σκοπό την εξαγωγή συμπερασμάτων και τη διατύπωση υποθέσεων, να προωθήσει μια βαθύτερη κατανόηση των επιστημονικών εννοιών, και να αντιμετωπίσει τις συνήθεις παρανοήσεις των μαθητών που συχνά μοιάζουν με εκείνες των επιστημόνων παλαιότερων εποχών.

Ειδικότερα, η αναφορά σε ιστορικά επεισόδια μπορεί να συμβάλλει σε μια βαθύτερη κατανόηση ενός πλήθους ζητημάτων που συνδέονται με τη φύση της επιστήμης ως διαδικασία (π.χ. η προσωρινή φύση των επιστημονικών συμπερασμάτων). Ενώ γενικά κυριαρχεί η άποψη ότι η ιστορία της επιστήμης πρέπει να ενσωματωθεί στη διδασκαλία του επιστημονικού περιεχομένου διότι τα διαθέσιμα μοντέλα είναι συχνά ατελή σε ότι αφορά τις λεπτομέρειες.

Για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών μπορεί να χρησιμοποιηθούν ποικίλες στρατηγικές διδασκαλίας όπως αντιπαράθεση επιχειρημάτων, παιχνίδι ρόλων, σχεδιασμός αφίσας, συζήτηση πάνω σε κείμενα (που προέρχονται από τη λογοτεχνία, την ποίηση, τη φιλοσοφία, την ιστορία), συζήτηση πάνω σε άρθρα εφημερίδων και υλικό άλλων μέσων μαζικής ενημέρωσης, σχεδιασμός δικτυακού τόπου κ.λπ. Αυτές οι στρατηγικές διδασκαλίας ενθαρρύνουν τους μαθητές να συμμετέχουν σε συζητήσεις, να ανταλλάσσουν ιδέες που αφορούν στη Φύση των Φυσικών Επιστημών και στις συσχετίσεις ανάμεσα στις Φυσικές Επιστήμες και την κοινωνία.

Η πρόκληση για τους εκπαιδευτικούς είναι πώς να ενσωματώσουν αποτελεσματικά την ιστορία στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών, έχοντας συγχρόνως επίγνωση των πολλαπλών περιορισμών που διέπουν την διδακτική πράξη.

Μέθοδος ενσωμάτωσης της ιστορίας στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών

1. Προσδιορισμός των εκπαιδευτικών στόχων.

Για να ενσωματωθεί η ιστορία της επιστήμης στη τάξη θα πρέπει να προσδιοριστούν αρχικά οι εκπαιδευτικοί στόχοι από τον εκπαιδευτικό για τον ίδιο, αλλά και για τους μαθητές του. Οι περιορισμοί που τίθενται στην περίπτωση αυτή, είναι ο αριθμός των μαθητών, ο διαθέσιμος χρόνος, αλλά και οι προηγούμενες γνώσεις των μαθητών. Στους μαθητές δεν χρειάζεται να δοθεί μια πλήρης ιστορική ερμηνεία του επεισοδίου, κυρίως εάν οι λεπτομέρειες μπορεί να τους αποσπάσουν από τους διδακτικούς στόχους.

2. Επιλογή ενός ιστορικού γεγονότος.

Το επόμενο βήμα είναι να καθοριστεί ποιο γεγονός από την ιστορία της επιστήμης θα χρησιμοποιηθεί στην τάξη. Αφού επιλεγθεί, το επόμενο βήμα του εκπαιδευτικού είναι να διαμορφώσει τους στόχους του μαθήματος.

3. Καλή ενημέρωση και γνώση του ιστορικού γεγονότος.

Έχοντας το επεισόδιο κατά νου, το επόμενο βήμα του εκπαιδευτικού είναι να μάθει αρκετά για αυτό προκειμένου να δημιουργήσει έναν τρόπο με τον οποίο οι μαθητές θα επιχειρηματολογήσουν με τρόπο παρόμοιο, αλλά όχι πανομοιότυπο, με τους παλαιότερους επιστήμονες. Καλό θα ήταν ο εκπαιδευτικός να συμβουλευτεί πρωτογενείς πηγές, όπως τις πρωτότυπες ερευνητικές εργασίες, περιγραφές σε διδακτικά βιβλία και τις σύντομες περιλήψεις που παρέχονται σε κείμενα ιστορίας της επιστήμης, ώστε να βοηθηθεί στη δημιουργία μιας διδακτικής ενότητας για την τάξη του. Η διδακτική πρόταση θα πρέπει περιλαμβάνει παρουσίαση ενός φαινομένου για μελέτη στους μαθητές, συζήτηση των πρότερων αντιλήψεων των μαθητών για το φαινόμενο αυτό καθώς και τη χρήση αυτών των σχολίων ως εφαλτήριο για τη δραστηριότητα της ημέρας (π.χ., μια έρευνα ή μια συζήτηση που θα τους επιτρέψει να ερευνήσουν και να αξιολογήσουν τις ιδέες τους). Το κλείσιμο της

συζήτησης μπορεί να στοχεύει όχι μόνο στην κατανόηση της έννοιας αλλά και σε συμπεράσματα σχετικά με αυτά που το συγκεκριμένο παράδειγμα αποκαλύπτει για την επιστήμη ως διαδικασία. Κάνοντας χρήση των διδακτικών στόχων του μαθήματος, γίνεται ευκολότερο να απλοποιηθούν ή και να παραλειφθούν ιστορικές λεπτομέρειες άσχετες με τους γενικούς στόχους.

4. Εφαρμογή.

Η αποτελεσματική διδασκαλία μέσω διερεύνησης απαιτεί συχνά πολύ καλή προετοιμασία για τον εκπαιδευτικό. Αρχικά πρέπει να αναπτυχθεί ένα σενάριο προβληματισμού που να παρέχει στους μαθητές επαρκείς, αλλά όχι υπερβολικές, λεπτομέρειες. Πρέπει επίσης, ο εκπαιδευτικός να σκεφτεί πώς θα παρουσιάσει καλύτερα το πρόβλημα για κάθε περίπτωση και έπειτα να Υποστηρίξει τη μάθηση χρησιμοποιώντας ένα σύνολο έτοιμων ερωτήσεων. Πρέπει να σκεφτεί πώς θα ανταποκριθούν οι μαθητές και πώς θα τροποποιήσει τις οδηγίες ανά πάσα στιγμή, ανάλογα με τις απαντήσεις τους στο μαθησιακό περιβάλλον που θα διαμορφωθεί. Όλα αυτά πρέπει να γίνουν λαμβάνοντας υπόψη τους στόχους της ημέρας, της διδακτικής ενότητας και των εθνικών προτύπων διδασκαλίας (standards).

Το κύριο πλεονέκτημα του σχεδιασμού μαθημάτων που χρησιμοποιούν την ιστορία της επιστήμης κατ' αυτόν τον τρόπο είναι ότι οι μαθητές χρησιμοποιούν την ιστορία της επιστήμης για να διαμορφώσουν τη δική τους κατανόηση των σημαντικών εννοιών αλλά και εκείνων των ζητημάτων που σχετίζονται με τη φύση της επιστήμης. Όταν οι μαθητές προκαλούνται να υιοθετήσουν ένα ρόλο λύτη προβλήματος παρόμοιο με αυτόν των επιστημόνων της ιστορίας, η εμπειρία αυτή διευκολύνει την εξαγωγή των συμπερασμάτων που οι ίδιοι οι μαθητές αναπτύσσουν.

1.4 Η αποτελεσματικότητα της διδασκαλίας της χημείας μέσα από την ιστορία της επιστήμης.

Κατά γενική ομολογία, η Χημεία αποτελεί σημαντικό μέρος της καθημερινής μας ζωής. Ωστόσο η αντίληψη της κοινής γνώμης στο άκουσμα και μόνο της λέξης "χημεία" εκφράζεται με αρνητισμό. Οι πολίτες συσχετίζουν τη χημεία με τις περιβαλλοντικές και οικολογικές καταστροφές καθώς και με τις καταστροφές του περιβάλλοντος από την βιομηχανική ρύπανση. Αυτοί και άλλοι παράγοντες προκαλούν αρνητικές επιπτώσεις στην κοινή γνώμη και κυρίως στους μαθητές. Οι

μαθητές αντιμετωπίζουν εσφαλμένα τον όρο χημεία, καθώς δεν αναγνωρίζουν το αντίκτυπο των εξελίξεων αυτής σε διάφορους τομείς όπως στην τεχνολογία, στην υγεία, την γεωργία, την ενέργεια, κ.ά. και παραβλέπουν τα οφέλη αυτής στην κοινωνία.

Οι μαθητές αρχίζουν να μαθαίνουν από τις πρώτες τάξεις του γυμνασίου μια ποικιλία θεμάτων όπως: η δομή του ατόμου, τα χαρακτηριστικά της ύλης, τη ραδιενέργεια, το νόμο Lavoisier, τα στοιχεία του περιοδικού πίνακα τις οργανικές ενώσεις κ.ά., χωρίς όμως να γνωρίζουν ποιος, πώς και πότε ανακαλύφθηκε η κάθε έννοια και ο κάθε νόμος. Οι ερευνητές υποστηρίζουν όμως πως αυτή η απουσία της ιστορίας της επιστήμης εμποδίζει την καλή κατανόηση της χημείας.

Σε μια ερευνητική μελέτη που πραγματοποίησαν οι Zaragoza et al(2003) σε Ισπανούς μαθητές δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης ηλικίας 14 – 16 ετών και τριτοβάθμιας εκπαίδευσης άνω των 17 ετών, ζητήθηκε από τους μαθητές να συμπληρώσουν ερωτηματολόγια σχετικά με τη χημεία και τα ενδιαφέροντα τους όσον αφορά τις φυσικές επιστήμες.

Έως το 2003 συμπληρώθηκαν 321 ερωτηματολόγια εκ των οποίων το 52% αντιστοιχούσε σε κορίτσια και το 48% σε αγόρια.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι τα τελευταία 5 χρόνια το ενδιαφέρον των μαθητών για το μάθημα της χημείας παρατηρείται μειωμένο. Το 30% των μαθητών δήλωσε ότι θα συνεχίσει τις σπουδές του στις άλλες φυσικές επιστήμες, φυσική, βιολογία, μαθηματικά, και μόλις το 5% θα ακολουθήσει την επιστήμη της χημείας. Επίσης 4 στους 10 μαθητές πιστεύουν πως η χημεία είναι άσχημο μάθημα και 9 στους 10 πιστεύουν ότι είναι δύσκολο. Από την έρευνα φάνηκε ότι οι μαθητές παρουσιάζουν χαμηλότερο ενδιαφέρον για το μάθημα της χημείας από ότι για τις άλλες επιστήμες, και αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι δεν υπάρχει ένας έξυπνος και ενδιαφέρον τρόπος να προσελκύσει τους μαθητές στη μάθηση της χημείας.

Η έρευνα συνεχίστηκε με μια ομάδα μαθητών και είχε ως στόχο τη διδασκαλία της χημείας μέσω της ιστορίας στη σχολική τάξη. Οι ερευνητές ζήτησαν από τους μαθητές να μελετήσουν βιογραφίες αλχημιστών και χημικών όπως οι Lavoisier, Meyer, Medeleev, Rutherford, Plank, Bohr κ.ά. έχοντας ως στόχο να γεφυρώσουν το χάσμα ανάμεσα στην Χημεία και στην Ιστορία της Επιστήμης.

Στη συνέχεια ακολούθησαν 15λεπτες παρουσιάσεις, όπου ο κάθε μαθητής παρουσίασε το θέμα που του δόθηκε για μελέτη και έπειτα τέθηκαν ερωτήσεις από τους συμμαθητές τους, δημιουργώντας ένα κλίμα συζήτησης. Με τον τρόπο αυτό, οι

μαθητές είχαν την ευκαιρία να μάθουν για τη ζωή του κάθε χημικού είτε μέσω της άμεσης έρευνας είτε μέσω των παρουσιάσεων που διατίθενται από τους συμμαθητές τους. Με τον τρόπο αυτό μπόρεσαν να κατανοήσουν κάποιες χημικές έννοιες και μεθόδους που χρησιμοποιήθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους μέσα από τη ιστορία.

Οι μαθητές αυτοί μελετώντας τις βιογραφίες του Mendeleev και του Meyer μπόρεσαν να κατανοήσουν την σημαντική συμβολή των δυο επιστημών στην ανάπτυξη και το σχεδιασμό του περιοδικού πίνακα και των στοιχείων. Επιπλέον έχοντας διαβάσει οι μαθητές τη βιογραφία του Seaborg αντιλήφθηκαν ότι ανά πάσα στιγμή μπορούν να ανακαλυφθούν νέα στοιχεία.

Ο περιοδικός πίνακας ανακαλύφθηκε από τον Mendeleev το 1869 και αποτελεί έναν τρόπο παρουσίασης χημικών στοιχείων. Ο περιοδικός πίνακας είναι ένας κατάλογος, σε μορφή πίνακα όλων των απλών χημικών ουσιών ταξινομημένων σύμφωνα με τις ομοιότητες και τις διαφορές τους. Κάθε στοιχείο έχει τη δική του ατομική μάζα και το δικό του ατομικό αριθμό. Σήμερα ο περιοδικός πίνακας αποτελείται από 111 αναγνωρισμένα στοιχεία.

Οι μαθητές του σχολείου χωρίστηκαν σε 4 ομάδες για να μελετήσουν καλύτερα την ιστορική εξέλιξη των χημικών στοιχείων και την τοποθέτησή τους στον περιοδικό πίνακα. Η κάθε ομάδα μελέτησε τα στοιχεία που ανακαλύφθηκαν σε διαφορετικές χρονικές περιόδους: κατά την Αρχαιότητα, το Mendeleev, το 1850-1940 και το 1940 μέχρι και σήμερα.

Κάνοντας την έρευνα αυτή οι μαθητές έμαθαν πως ο Mendeleev το 1870 μπόρεσε να προβλέψει την ύπαρξη αλλά και τις ιδιότητες του κάθε χημικού στοιχείου όπως το γερμάνιο (Ge), το γάλλιο (Ga) και το σκάνδιο (Sc). Το γάλλιο ανακαλύφθηκε το 1875, το σκάνδιο το 1879 και το γερμάνιο το 1886. Τα τρία αυτά στοιχεία είχαν περίπου τις ίδιες ιδιότητες. Δυστυχώς όμως, αυτές οι πληροφορίες οι οποίες μπορούν να κινήσουν το ενδιαφέρον των μαθητών λείπουν από τα σχολικά βιβλία.

Η διαδικασία ολοκληρώθηκε με ερωτηματολόγια που απαντήθηκαν από τους μαθητές.

Τα αποτελέσματα της έρευνας φανερώνουν ότι οι ιστορικές παρεμβάσεις στο μάθημα της χημείας είναι χρήσιμες διότι αυξάνουν το ενδιαφέρον και την κριτική σκέψη των μαθητών. Οι μαθητές στο τέλος της παραπάνω διαδικασίας κατανόησαν καλύτερα τις ιδιότητες και τη δραστικότητα των χημικών στοιχείων. Ενώ πριν την

έρευνα ισχυριζόταν πως το μάθημα τις χημείας είναι δύσκολο και απρόσιτο, μετά την έρευνα δήλωσαν πως το μάθημα χημείας είναι ενδιαφέρον.

Συμπερασματικά η ιστορία της επιστήμης θα πρέπει να χρησιμοποιείται στα μαθήματα των φυσικών επιστημών ως διδακτικό εργαλείο με μεγάλη αποτελεσματικότητα ελκύνοντας περισσότερο τους μαθητές.

Στην έρευνα των De Berg et al (1998) κατά τη μελέτη 14 σχολικών εγχειριδίων χημείας οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι μόνο το 6,3% περιείχε ποιοτικές ασκήσεις και πως η υπερβολική έμφαση των αλγοριθμικών προβλημάτων δε βρίσκεται μόνο στα σχολικά εγχειρίδια αλλά και στις εξετάσεις. Το γεγονός αυτό δεν θα πρέπει να εκπλήσσει, διότι οι χημικοί εκπαιδευτικοί, υποστηρίζουν ότι η επιτυχία στη επίλυση μαθηματικών προβλημάτων αντικατοπτρίζει τη γνώση επιστημονικών εννοιών, με αποτέλεσμα τα σχολικά εγχειρίδια να μην περιλαμβάνουν εννοιολογικές ερωτήσεις και προβλήματα, τα οποία παρέχουν αξιόπιστη αξιολόγηση της κριτικής σκέψης, πάρα μόνο αλγοριθμικές ασκήσεις.

Οι επιστήμονες κατέληξαν στο συμπέρασμα πως ο μόνος τρόπος να βοηθήσουν τους μαθητές να ξεπεραστεί αυτή η κατάσταση, είναι να γίνουν κατανοητές πρώτα οι χημικές έννοιες και έπειτα να προβούν στην επίλυση των ασκήσεων μέσω των αλγοριθμικών εξισώσεων. Εναλλακτική λύση του προβλήματος αποτελεί η ενσωμάτωση της ιστορίας της επιστήμης στα προγράμματα σπουδών και στη συνέχεια να δοθεί η σημασία της μαθηματικής εξίσωσης στην επιστήμη. Η ιστορία της επιστήμης είναι ευεργετική τόσο στο επιστημονικό συγγραφικό έργο όσο και στους φοιτητές – μαθητές διότι προωθεί την εννοιολογική κατανόηση.

Οι παρακάτω πειραματική μελέτη επιβεβαιώνει τη χρήση αυτή.

Οι De Berg et al (1998) στην έρευνα που πραγματοποίησαν σε μαθητές της 8^{ης} τάξης στη δευτεροβάθμια εκπαίδευση, ζήτησαν από τους μαθητές να μελετήσουν δυο ιστορικές περιπτώσεις: την ατμοσφαιρική πίεση και τα άτομα.

Οι ερευνητές βιντεοσκόπησαν τις διδασκαλίες και τις ενέργειες των μαθητών, έδωσαν ερωτηματολόγια πριν και μετά τη διδασκαλία. Στη προσπάθεια αυτή συμμετείχαν τρεις καθηγητές χημείας και πέντε τάξεις μαθητών (220 μαθητές).

Τα αποτελέσματα έδειξαν ότι οι μαθητές που διδάχτηκαν την ιστορία της επιστήμης για την ατμοσφαιρική πίεση και τα άτομα, κατανόησαν τις έννοιες και απάντησαν σωστά στις περισσότερες ερωτήσεις, εν αντιθέσει με τους μαθητές που διδάχτηκαν τις έννοιες με βάση τις πληροφορίες του σχολικού βιβλίου.

Έτσι απορρέει το συμπέρασμα ότι τα αποτελέσματα αυτά έχουν άμεσες συνέπειες στη παιδαγωγική διαδικασία κάτι που δείχνει την αναγκαιότητα του επαναπροσδιορισμού της εν λόγω διδασκαλίας.

Σκοπός της έρευνας

Στη μελέτη αυτή οι ερευνητές προσπάθησαν να διαπιστώσουν αν και κατά πόσο μπορεί να φανεί χρήσιμη η ιστορία της επιστήμης στη διδασκαλία των φυσικών επιστημών.

Μέθοδος

Α΄ Φάση: Καινοτόμος διδασκαλία: κατά την έναρξη της μελέτης, στη διάρκεια της διδασκαλίας των εννοιών οι μαθητές χωρίστηκαν σε πέντε ομάδες, δυο ομάδες αποτελούμενες από 88 μαθητές οι οποίες διδάχτηκαν τις έννοιες με βάση το ιστορικό υλικό, δυο ομάδες αποτελούμενες από 89 μαθητές στις οποίες η διδασκαλία έγινε χωρίς το ιστορικό υλικό, και μία ομάδα αποτελούμενη από 43 μαθητές η οποία διδάχτηκε τις έννοιες με βάση το σχολικό εγχειρίδιο και το ιστορικό υλικό που δόθηκε στις δυο πρώτες ομάδες. Ο χρόνος διδασκαλίας ήταν ίδιος σε όλες τις τάξεις και διήρκησε 2 μήνες.

Τα θέματα που αναπτύχθηκαν ήταν:

- 1^{ov}: Πως προσδιορίστηκε η ατμοσφαιρική πίεση το 17^o αιώνα, και
- 2^{ov}: Η ανάπτυξη: α) της ατομικής θεωρίας, β) το ατομικό βάρος, γ) ο τύπος του νερού, και δ) ο αριθμός Avogadro, καθώς επίσης συμπεριλήφθηκε και ένα πείραμα για κάθε έννοια χωριστά. Με αυτό τον τρόπο θεωρήθηκε ότι θα ήταν πιο εύκολο από τους μαθητές να κατανοήσουν τις θεωρητικές έννοιες του ατόμου και του μορίου, δεδομένου ότι είναι σημαντικές έννοιες οι οποίες βρίσκονται σε σύγχυση στο μυαλό των μαθητών.

Β΄ φάση: Ερωτηματολόγια: δόθηκαν τέσσερα διαφορετικά ερωτηματολόγια σε όλους τους μαθητές που πήραν μέρος στην έρευνα, των οποίων η εξέταση εστιάζεται κυρίως στην ικανότητα των μαθητών να συνθέσουν πληροφορίες και να εφαρμόσουν έννοιες. Οι έννοιες που ζητήθηκαν ήταν το άτομο, το ατομικό βάρος, το μόριο, το μοριακό βάρος, η μάζα, ο όγκος και τα ατομικά σύμβολα.

Συμπεράσματα: στην παρούσα έρευνα για να γίνει πιο απτή και κατανοητή η ιστορία της επιστήμης στα θέματα της ατμοσφαιρικής πίεσης και των ατόμων, έγινε χρήση πειραμάτων. Στην ιστορία της επιστήμης, οι επιστήμονες χρειάστηκαν 50 χρόνια για να διακρίνουν τις έννοιες του μορίου και του ατόμου. Ωστόσο, οι σημερινοί εκπαιδευτικοί (χημικοί) δαπανούν περίπου 50 λεπτά για την εισαγωγή

αυτών των βασικών θεωρητικών εννοιών με αποτέλεσμα οι μαθητές να δυσκολεύονται στην κατανόηση τους. Για να ξεπεραστεί όμως αυτή η δυσκολία, οι επιστήμονες δίδαν τις έννοιες του μορίου και του ατόμου μέσα από την ιστορική εξέλιξή τους, κάνοντας χρήση θεωρητικών μοντέλων. Προσεγγίζοντας λοιπόν, καταυτόν τον τρόπο τις παραπάνω έννοιες, διαπιστώθηκε ότι η χρήση της ιστορίας μπορεί να βοηθήσει τους μαθητές να βελτιώσουν τις κριτικές τους ικανότητες, που είναι απαραίτητες για την ανάλυση των ιδεών, καθώς επίσης και την αναγνώριση των νόμων που τη διέπουν.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση.

1. Allchin D.(1992).*History as a Tool in Science Education*, Second International History and Philosophy of Science and Science Teaching Conference, Kingston, Ontario
2. Bent A.H, Uses of History in Teaching Chemistry, Journal of Chemical Education, Vol.54, No8, 462-466
3. Brush G.S.(1989). *History of science and science education*, Science & Education, Vol.20, No.2:60-70
4. Dedes C., Ravanis K.(1997) *History of Science and Conceptual Change: The Formation of Shadows by Extended Light Sources*, Vol.18, No 9, 1135-1151.
5. Huann – shyang Lin (1998). *The effectiveness of Teaching Chemistry through the History of Science*. Journal of Chemical Education, 75:1326-1330
6. Matthews,M.R.,(1994), *Science Teaching: The Role of History and Philosophy of Science*, New York, Routledge
7. Matthews R.M.(1989). *History, philosophy, and science teaching: The present rapprochement*. Vol 20, No 2, 3-15
8. Rudge DW, Howe EM (2004). *Incorporating history into the science classroom*. Sci Teach 71:52–57

9. Rudge, D.W. & Howe, E.M. (2008). *An explicit and reflective approach to the use of history to promote understanding of the nature of science*. Science & Education, online first article.
10. Russell L.T.(1981), *What History of Science, How Much, and Why?*, Science Education 65(1):51-64
11. Seroglou,F. & Koumaras,K.,(2001), *The Contribution of the History of Physics in Physics Education: A Review*, Science & Education, 10(1-2), pp153-172
12. Wang, A., H. (1999), *A content analysis of the history of science in the national science educational standards documents and four secondary science textbooks*, American Educational Research Association.
13. Zaragoza C. Fernández-Novell M. J., *Teaching Chemistry Through History: The Importance of The Periodic Table*, 6th INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE HISTORY OF CHEMISTRY, 685-693
14. http://ppp.unipv.it/MAP/pagine/INTRO_00.HTM

Ελληνόγλωσση.

1. Κασσέτας, Α. (1992). *Η Διδακτική της Φυσικής: Απ' το Νηπιαγωγείο μέχρι το Πανεπιστήμιο*. Εκπαιδευτική Κοινότητα, 15, 30-31.
2. Μανιάτη,Ε.,(2009), «Ο ρόλος της Ιστορίας των Επιστημών στη διδακτική πράξη: Η αποτίμηση μιας καταγραφής σε σχολικά εγχειρίδια», ΙΓ' Διεθνές Συνέδριο Παιδαγωγικής Εταιρείας Ελλάδος, Ιωάννινα, 20-22 Νοεμβρίου 2009

2. Παρανοήσεις στη μάθηση της Κβαντομηχανικής Θεωρίας

2.1 Τι είναι οι παρανοήσεις των μαθητών

Οι παρανοήσεις είναι νοητικά μοντέλα που διαφέρουν σημαντικά από το μοντέλο που περιμένουμε να αναπτύξουν οι μαθητές. Συχνά λέγονται και πρότερες αντιλήψεις (*preconceptions*), γιατί προέρχονται από την καθημερινή μας εμπειρία και την παρατήρηση ή από τις γενικεύσεις που γίνονται στην παιδική ηλικία.

Με τον όρο «εναλλακτικές» εννοούνται οι ιδέες που αφορούν φυσικά και κοινωνικά φαινόμενα, τις έννοιες, τις ιδιότητες και τις μεθόδους των εννοιών πριν έλθουν σε επαφή με την επιστημονική άποψη για αυτές. Είναι οι αρχικές εννοιολογικές δομές των μαθητών, οι οποίες συνήθως γίνονται επιστημολογικά εμπόδια που προβάλλουν αντίσταση σε οποιαδήποτε επιχειρούμενη εννοιολογική αλλαγή. Ορισμένες από αυτές παραμένουν και μετά την διδασκαλία των επιστημονικών απόψεων ενώ άλλες φορές παρατηρείται σημαντική διαφοροποίηση από την αρχική αντίληψη των παιδιών ως συνέπεια της διδασκαλίας.

Τα παιδιά όπως και οι επιστήμονες κάνουν υποθέσεις και δημιουργούν μοντέλα για να ερμηνεύσουν τις παρατηρήσεις τους και τις εμπειρίες τους. Οι απόψεις των παιδιών προέρχονται από την εμπειρία τους μέσω των αισθήσεων και την αλληλεπίδραση με το κοινωνικό περιβάλλον αλλά εξαιτίας του περιορισμού της γλωσσικής έκφρασης συνήθως δεν μπορούν να εκφραστούν με κατηγορηματικό τρόπο από τα παιδιά. Οι μαθητές πριν εισέλθουν στο σχολικό περιβάλλον, έχουν ήδη διαμορφώσει γνωστικά σχήματα για έννοιες και καταστάσεις του φυσικού περιβάλλοντος και καταστάσεων της καθημερινότητας που έχουν συνοχή και είναι εναρμονισμένες με τους χώρους της εμπειρίας τους αλλά μπορεί να διαφέρουν ουσιωδώς από την επιστημονική άποψη. Σε ειδικές περιπτώσεις οι παρανοήσεις των μαθητών οφείλονται εν μέρει στον τρόπο που μαθαίνουν φυσική και χημεία. Τέτοια είναι η περίπτωση μετάβασης από την κλασσική στην κβαντική μηχανική. Συμπερασματικά, οι εναλλακτικές ιδέες – αντιλήψεις των μαθητών (*alternate conceptions* ή *misconceptions*) είναι οι ιδέες, τα νοητικά μοντέλα και οι γνωστικές δομές των μαθητών που συνήθως αντιστέκονται στη δυνατότητα μάθησης των επιστημονικών ιδεών και την ερμηνεία φαινομένων. Κάθε ιδέα έχει διαφορετική

βάση και είναι αποτέλεσμα μιας περίπλοκης πνευματικής διαδικασίας, που διαφέρει σε κάθε υποκείμενο.

2.2 Πως επηρεάζεται η μάθηση από τις παρανοήσεις

Καθώς οι παρανοήσεις ενισχύονται και εδραιώνονται στους μαθητές, δημιουργούνται δυσκολίες στη μάθηση. Ειδικά στις φυσικές επιστήμες οι παρανοήσεις δημιουργούν εννοιολογική σύγχυση, αδυναμία εφαρμογής της γνώσης (μέσα και έξω από την τάξη) και επηρεάζουν την ικανότητα επίλυσης προβλημάτων. Όσο πιο περίπλοκη και «περίεργη» φαίνεται μια θεωρία στο μαθητή τόσο λιγότερο γίνεται κτήμα του και επηρεάζεται η εννοιολογική κατανόηση του. Με τον όρο εννοιολογική κατανόηση (*conceptual understanding*) εννοείται η μάθηση που έχει συνοχή και αποτελεί ένα αλληλοσυσχετιζόμενο σύνολο, παρά μια συγκέντρωση απομονωμένων εννοιών.

Απέναντι στη μάθηση και την απόκτηση καινούργιας γνώσης ο διδασκόμενος αντιστέκεται όταν αυτή έρχεται σε ρήξη με το λάθος που έχει ήδη αφομοιώσει. Αρχικά μαθαίνει το «λάθος» και στη συνέχεια δυσκολεύεται να το αναθεωρήσει, όταν αργότερα γνωρίσει το «σωστό». Μάλιστα η προϋπάρχουσα γνώση μπορεί να «παλινорθωθεί» όταν οι μαθητές δεν μένουν ικανοποιημένοι από την καινούργια. Αυτό σημαίνει ότι οποιαδήποτε παρανόηση δημιουργείται στο παρόν μπορεί να συμβάλει στη δημιουργία μιας άλλης παρανόησης στο μέλλον.

Η διδασκαλία επομένως γίνεται αποτελεσματικότερη όταν αποβλέπει μεν στη διόρθωση των παρανοήσεων αλλά φέρνει τους μαθητές σε σύγκρουση με την προηγούμενη γνώση. Για να βοηθηθούν οι μαθητές να διορθώσουν τις παρανοήσεις τους θα πρέπει να τους δοθεί η δυνατότητα να δοκιμάσουν το μοντέλο τους και να διαπιστώσουν από μόνοι τους ότι το μοντέλο τους αποτυγχάνει να δώσει σωστά αποτελέσματα.

2.3 Τι και πως μαθαίνουν οι μαθητές

Το «πως» έχει μεγάλη σχέση με το «τι» μαθαίνουν οι μαθητές. Συγκεκριμένα το «τι» προηγείται του «πως». Δεν μπορεί για παράδειγμα να διδαχτεί η κβαντομηχανική στο Γυμνάσιο. Τουλάχιστον όχι στο βάθος που χρειάζεται η

κβαντική θεωρία χωρίς προαπαιτούμενες γνώσεις γύρω από την ηλεκτρομαγνητική θεωρία και τα ατομικά πρότυπα.

Σύμφωνα με έρευνες γύρω από τη γνωστική ανάπτυξη, υποστηρίζεται ότι η διαδικασία της απόκτησης γνώσεων αρχίζει κατά τη γέννηση, και τα νήπια προχωρούν ραγδαία στην οικοδόμηση μιας θεμελιώδους κατανόησης του φυσικού και κοινωνικού κόσμου. Αυτή η θεμελιώδης κατανόηση του φυσικού και κοινωνικού κόσμου φαίνεται ότι αναπτύσσεται στις φυσικές επιστήμες και την ψυχολογία.

Όπως ειπώθηκε η αντίληψη που σχηματίζουν τα παιδιά για τον κόσμο βασίζεται σε μια ερμηνεία της καθημερινής τους εμπειρίας. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την απόκτηση μιας διαισθητικής - αρχικής γνώσης που είναι, συνήθως, πολύ διαφορετική από την επιστημονική γνώση. Η συζήτηση γύρω από τη φύση της διαισθητικής - αρχικής γνώσης, εκτός του θεωρητικού ενδιαφέροντος που παρουσιάζει, έχει και μεγάλη σημασία στον τομέα της διδακτικής των επιστημών, διότι έχει διαπιστωθεί ότι οι ιδέες αυτές είναι πολύ ισχυρές και, συχνά, αποτελούν εμπόδιο στην οικοδόμηση της γνώσης.

Κατά τη διαδικασία της απόκτησης των επιστημονικών γνώσεων, τα παιδιά, συνήθως, πρέπει να αλλάζουν τη διαισθητική τους γνώση για να μπορέσουν να αφομοιώσουν και να προσαρμοστούν στην κοινή αποδεκτή επιστημονική γνώση της εποχής τους. Η διαδικασία αυτή είναι συνήθως μακρόχρονη, διότι οι διαισθητικές ιδέες φαίνεται ότι έχουν ιδιαίτερη δύναμη και είναι δύσκολο να εξαλειφθούν. Οι μαθητές συνήθως δυσκολεύονται να εγκαταλείψουν τις διαισθητικές τους ιδέες και έτσι προσπαθώντας να ερμηνεύσουν τις πληροφορίες των ενήλικων, κατά τέτοιο τρόπο ώστε να μην έρχονται σε αντιπαράθεση με τις δικές τους πεποιθήσεις, σχηματίζουν εναλλακτικές έννοιες. Μέσα σε κάθε εναλλακτική έννοια οι μαθητές προσπαθούν να διατηρήσουν όσο το δυνατόν περισσότερες από τις δικές τους πεποιθήσεις τους, χωρίς να έρθουν σε σύγκρουση με αυτά που διδάσκουν οι ενήλικες. Δηλαδή, δημιουργούν τα λεγόμενα συνθετικά μοντέλα.

2.4 Στάσεις των μαθητών απέναντι στη θεωρία πριν ακόμα τη διδαχτούν

Εκτός από τις εναλλακτικές τους ιδέες οι μαθητές διαθέτουν συχνά προκαταλήψεις για πολλά μαθήματα. Η ίδια η λέξη «μηχανική» δημιουργεί ανησυχίες στους μαθητές ότι πρόκειται για άλλο ένα μάθημα φυσικής με κρούσεις, ορμές, βολές, όπως μαθαίνουν στην κλασική θεωρία. Εξάλλου πολλοί μαθητές

έχουν συνδέσει αυτά τα κεφάλαια της φυσικής με την επίπονη επίλυση δύσκολων ασκήσεων, στις οποίες έχουν εκπαιδευτεί να εξάγουν απλώς κάποιο αριθμητικό αποτέλεσμα, χωρίς συχνά να καταλαβαίνουν τη σημασία τους. Με λίγα λόγια η λέξη «μηχανική» φέρνει στο νου των μαθητών δύσκολους υπολογισμούς χωρίς νόημα.

Ένας ιδιαίτερα σημαντικός παράγοντας που δημιουργεί προκαταλήψεις στους μαθητές που δεν έχουν έρθει σε επαφή με την κβαντική θεωρία, είναι οι απόψεις άλλων που την έχουν διδαχτεί στο παρελθόν. Οι μαθητές επηρεάζονται ή τρομοκρατούνται από τις απόψεις όσων έχουν ακούσει ή διαβάσει κβαντομηχανική και για κάποιο λόγο έχουν μια αρνητική στάση απέναντί της, που συχνά αγγίζει και τα όρια της υπερβολής. Αυτές τις απόψεις είναι δυνατόν να τις εκφράζουν οι ίδιοι οι καθηγητές του μαθήματος. Κάποιοι που αδυνατούν να συνδέσουν την κβαντική με την καθημερινότητα, πιστεύουν ότι η θεωρία αυτή δεν συνδέεται με την πραγματικότητα. Όπως για παράδειγμα η άποψη ότι *«πρόκειται για ένα μάθημα με παράξενες εξισώσεις και Γερμανούς με umlaut στα ονόματά τους, που έχουν πεθάνει εδώ και χρόνια»*. Άλλες απόψεις που τρομοκρατούν τους μαθητές είναι ότι *«η διδασκαλία της κβαντομηχανικής απαιτεί τη χρήση ανώτερων μαθηματικών και για αυτό θα πρέπει να διδάσκεται μόνο στο πανεπιστήμιο»* και ότι *«η κβαντομηχανική περιέχει δύσκολες έννοιες, τις οποίες πρέπει να θέλει κανείς να μάθει, άρα είναι μόνο για εκείνους που θέλουν να σπουδάσουν φυσική και χημεία»*.

2.5 Η ανάγκη διδασκαλίας της κβαντομηχανικής

Δημιουργείται λοιπόν το ερώτημα «γιατί να διδαχτούν οι μαθητές του Λυκείου κβαντομηχανική, εφόσον θα "χρειαστεί" μόνο σε όσους σπουδάσουν φυσική και χημεία». Φυσικά δεν μπορεί κάποιος να πειστεί για τη σημασία της κβαντομηχανικής αν δεν τονιστούν κατ' αρχάς οι εφαρμογές στην καθημερινότητα και ο ρόλος της στη σύγχρονη σκέψη των φυσικών. Οι προβλέψεις της κβαντομηχανικής επιβεβαιώνονται κατά καιρούς και οι εφαρμογές της αφορούν αντικείμενα στο μοριακό και ατομικό επίπεδο (βιομόρια, νανοσωλήνες, τρανζίστορ, ημιαγωγοί), στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα (υπέρηχοι, μικροκύματα, ακτίνες X) στην καθημερινότητα (υπολογιστές, κρυπτογραφία, laser, κβαντικοί συντονιστές, SQUID, ιδιότητες υλικών) και σε αστρονομικά αντικείμενα (αν και συχνά δεν είναι απαραίτητο). Οι εφαρμογές της κβαντομηχανικής στην τεχνολογία έδωσαν

εντυπωσιακά βιομηχανικά προϊόντα, που κεντρίζουν το ενδιαφέρον των εφήβων και πρέπει να γίνονται από την αρχή γνωστά στους μαθητές

Η κβαντική είναι η βάση για την κατανόηση της φασματοσκοπίας, της ηλεκτρονικής δομής και των περιοδικών ιδιοτήτων των ατόμων. Είναι απαραίτητη για το μέλλον της τεχνολογίας όπως τονίστηκε (κβαντικοί υπολογιστές, νανοσωλήνες). Χωρίς την κβαντική θεωρία είναι αδύνατον να εξηγηθεί πλήρως ο χημικός δεσμός και να ερμηνευθούν οι μικροσκοπικές ιδιότητες των χημικών ενώσεων.

2.6 Δυσκολίες κατανόησης της Κβαντομηχανικής

Η κβαντομηχανική είναι μια αντιδιαισθητική θεωρία και όταν κάποιος τη διδάσκεται πρώτη φορά συναντά αρκετές δυσκολίες κατανόησης και είναι δυνατόν να διαμορφώσει εναλλακτικές ιδέες και παρανοήσεις. Ο Feynmann αναφέρει *«όποιος νομίζει ότι καταλαβαίνει την κβαντομηχανική, δεν έχει καταλάβει την κβαντομηχανική»*. Αυτά σε συνδυασμό με τον τρόπο απομνημόνευσης και εξέτασης οδηγούν τους μαθητές σε επιφανειακή γνώση. Οι παρανοήσεις που δημιουργούνται οφείλονται στη κλασσική φυσική, που έχουν εκπαιδευτεί οι μαθητές από τα προηγούμενα χρόνια στο σχολείο, στις αφηρημένες έννοιες της κβαντομηχανικής, σε προσπάθειες για απλοποίησή τους αλλά και στη χρήση πολλαπλών μοντέλων και ορισμών.

Η ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας χρειάστηκε 30 χρόνια και τη χρήση ανώτερων μαθηματικών. Τα μαθηματικά είναι πανταχού παρόντα στη φυσική και σπάνια συναντάει κανείς παραδείγματα στη φυσική ή τη χημεία που μπορούν να αποδειχτούν χωρίς τη χρήση των μαθηματικών. Παρά τη μεγάλη ακρίβεια των αποτελεσμάτων της η κβαντομηχανική στερείται κάποιου ικανοποιητικού φυσικού μοντέλου. Για τις έννοιες που δημιούργησε, όπως η κβαντική επαλληλία, το κβαντικό άλμα, οι εικονικές μεταπτώσεις, δεν έχει βρεθεί κάποιο ικανοποιητικό οντολογικό σχήμα.

Για πολλούς επιστήμονες, μεταξύ των οποίων ο Plank και ο Einstein είναι σημαντικό οι καινούριες ιδέες και θεωρίες της φυσικής να διατυπώνονται με τέτοιο τρόπο, ώστε να είναι προσιτές στο ευρύ κοινό. Όμως μια περισσότερο εκλαϊκευμένη διατύπωση δεν είναι ακριβώς δυνατή γιατί οι έννοιες που χρησιμοποιεί η κβαντική έχουν ξεπεράσει τη χρησιμοποιούμενη γλώσσα, η οποία είναι απαραίτητη για να σχηματιστούν οι νοητικές εικόνες. Ακόμα και το κοινό που θα μπορούσε να

παρακολουθήσει προηγούμενες επιστημονικές ανακαλύψεις και να τις εκτιμήσει με κάποιο τρόπο, όταν βρίσκεται αντιμέτωπο με τις θεωρίες σχετικότητας και της κβαντομηχανικής, δυσκολεύεται να τις κατανοήσει. Την εποχή που πρωτοδιατυπώθηκε η κβαντική η δυσκολία ήταν πιο έκδηλη. Η προσπάθεια προσέγγισης της φύσης και της πραγματικότητας είχε κάνει ένα τεράστιο άλμα, όμως ένας πολύ μικρός αριθμός ειδικών που κατείχαν τη γνώση μπορούσε να το παρακολουθήσει. Ο Einstein δεν είχε πολύ άδικο. Η γλώσσα της επιστήμης χρησιμοποιεί ένα πολύ εξειδικευμένο λεξιλόγιο και ένα μαθηματικό φορμαλισμό που δεν αφήνει περιθώρια για μια άμεση σύνδεσή της με την καθημερινή γλώσσα. Οι εικόνες της καθημερινότητας αντιπαραβάλλονται με ισότητες αριθμών και οι αισθητικές αξίες με αυστηρά καθορισμένες μαθηματικές σχέσεις.

Αρκετοί επιστήμονες όπως ο Weiskopf, υποστηρίζουν ότι η «εκλαΐκευση» της επιστήμης κρύβει κινδύνους και είναι πρακτικά αδύνατη στην περίπτωση της κβαντικής θεωρίας. Εκτός από το φορμαλισμό της και τις έννοιες που δύσκολα αφομοιώνονται, τα πειράματα που επιβεβαιώνουν τις κεντρικές ιδέες της απαιτούν περίπλοκο και ακριβό εξοπλισμό και είναι απίθανο να διεξαχθούν στο σχολείο από μαθητές. Παρόλα αυτά αρκετά από αυτά τα πειράματα (πείραμα Young, φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, σκέδαση Compton) μπορούν να γίνουν ιδεατά ή με προσομοίωση στον υπολογιστή.

Η έλλειψη ικανοποιητικού φυσικού μοντέλου και ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της θεωρίας είναι επίσης σημαντικοί παράγοντες δυσκολίας κατανόησης. Εξάλλου καθ' όλη τη διάρκεια των σχολικών χρόνων οι μαθητές μαθαίνουν να οπτικοποιούν και να σχεδιάζουν και κυρίως να σκέφτονται αιτιοκρατικά.

2.7 Προβλήματα διδασκαλίας στη Κβαντική Χημεία

Τα σημαντικότερα προβλήματα αλλά και παρανοήσεις των μαθητών στη διδασκαλία της κβαντικής χημείας, σύμφωνα με τη βιβλιογραφία, εντοπίζονται στα παρακάτω κεφάλαια:

1. Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός – Αβεβαιότητα
2. Ατομικό μοντέλο – Τροχιακά - Ενεργειακές καταστάσεις

1. Κυματοσωματιδιακός δυϊσμός – Αβεβαιότητα

Ανάμεσα στις βασικές έννοιες της κβαντικής θεωρίας, κυματοσωματιδιακός δυϊσμός και η αρχή αβεβαιότητας είναι από τις πιο παράξενες και δυσνόητες. Η φυσική ερμηνεία του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού προέρχεται από τις αναλογίες ενέργειας-μάζας και ενέργειας-μήκους κύματος. Εύκολα αποδεικνύεται σύμφωνα με τον κανόνα συχνότητων του Planck (εξίσωση 1), την εξίσωση συχνότητας-μήκους κύματος (εξίσωση 2) και την ενέργεια ηρεμίας του Einstein (εξίσωση 3), ότι όσο μικρότερη μάζα άρα και μικρότερη ενέργεια ενός σώματος, τόσο μεγαλύτερο μήκος κύματος έχει αυτό, οπότε εμφανίζεται ο κυματικός χαρακτήρας.

$$E = hf \quad (1)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} \quad (2)$$

$$E = mc^2 \quad (3)$$

Κάτι τέτοιο παρατηρείται στα σωματίδια πολύ μικρών διαστάσεων (ηλεκτρόνιο, φωτόνιο, πρωτόνιο, νετρόνιο). Αντίθετα όσο μεγαλύτερη ενέργεια (πχ. αντικείμενα μακρόκοσμου) δεν εμφανίζεται κυματικός χαρακτήρας και κυριαρχεί ο σωματιδιακός. Στην κβαντική θεωρία ο κυματοσωματιδιακός δυϊσμός εισάγεται με την υπόθεση de Broglie και τα πειράματα Davison - Germer, Thomson καθώς και το φαινόμενο Compton και την ερμηνεία του Einstein στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Αν η ύλη έχει κατάλληλα σωματίδια που αλληλεπιδρούν με κύματα τότε αυτά θα έχουν κυματική συμπεριφορά, ενώ αν τα κύματα αλληλεπιδρούν με την ύλη τότε θα πρέπει να αποτελούνται από σωματίδια.

Μερικές από τις παρανοήσεις που δημιουργούνται στους μαθητές σε αυτήν την ενότητα είναι οι εξής:

1. *Το φως είναι ή σωματίδιο ή κύμα μόνο*
2. *Το φως μπορεί να είναι ένα σωματίδιο σε ένα μέρος κάποια χρονική στιγμή και κύμα σε κάποια άλλη χρονική στιγμή*
3. *Τα σωματίδια δεν μπορούν να έχουν κυματικές ιδιότητες*
4. *Τα κύματα δεν μπορούν να έχουν σωματιδιακές ιδιότητες*

5. *Η θέση ενός σωματιδίου μπορεί να είναι πάντα απολύτως γνωστή*
6. *Ένα φωτόνιο είναι ένα σωματίδιο με ένα κύμα μέσα του*
7. *Τα φωτόνια με μεγαλύτερη συχνότητα είναι μεγαλύτερα από εκείνα με μικρότερη συχνότητα*
8. *Το ηλεκτρόνιο «κινείται» σαν κύμα*
9. *Τα ηλεκτρόνια είναι κλασικά σωματίδια και κινούνται σε συγκεκριμένη τροχιά κυκλικής ή τυχαίας μορφής*
10. *Η αρχή της αβεβαιότητας είναι αποτέλεσμα των ορίων των μετρητικών συσκευών*
11. *Η μέτρηση διαταράσσει το σύστημα*

2. Ατομικό μοντέλο – Τροχιακά - Ενεργειακές καταστάσεις

Αν και το ατομικό μοντέλο έχει μελετηθεί πολύ από τους επιστήμονες δεν υπάρχει ένα πλήρες ακόμα που να αντικατοπτρίζει πλήρως την εικόνα του ατόμου. Υπάρχουν ακόμα αρκετά ανοιχτά ζητήματα κυρίως στην εικόνα που έχουμε για τον πυρήνα και για τις αλληλεπιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων. Όσον αφορά τα τροχιακά, οι ιδέες και τα νοητικά μοντέλα των μαθητών φαίνεται ότι απέχουν πολύ από την επιστημονική άποψη. Στο θέμα αυτό επικρατεί σύγχυση που οφείλεται κυρίως στους εξής παράγοντες:

1. Κατανομή περιεχομένου σχολικού βιβλίου
2. Χρήση της εικόνας στην αναπαράσταση του ατόμου
3. Αποστήθιση – έλλειψη κριτικής ικανότητας και εν γένει δυσκολίες κατανόησης που έχουν τα τροχιακά.

Τα ατομικά τροχιακά, τα μοριακά τροχιακά όπως και άλλες σχετικές έννοιες προέρχονται από τη κβαντομηχανική θεωρία για την ατομική και μοριακή δομή. Λόγω της νοηματικής δυσκολίας τους, αυτές οι έννοιες δε διδάσκονται σε εισαγωγικά μαθήματα σχολικής χημείας, αποτελούν όμως τώρα μέρος των περισσότερων αναλυτικών προγραμμάτων για τις μεγάλες τάξεις του λυκείου. Διδάσκονται επίσης σε μαθήματα Γενικής Χημείας ή εισαγωγικά μαθήματα Ανόργανης Χημείας στα χημικά ή και σε άλλα πανεπιστημιακά τμήματα φυσικών επιστημών. Ένας αριθμός ερευνητών έχει συνδέσει τις δυσκολίες και παρανοήσεις των φοιτητών με τα πολύπλοκα ατομικά και μοριακά μοντέλα που χρησιμοποιούνται. Ακόμη και φοιτητές πανεπιστημίου που έχουν περάσει το μάθημα της βασικής κβαντικής χημείας

αντιμετωπίζουν δυσκολίες μάθησης και παρουσιάζουν αρκετές παρανοήσεις σε σχέση με τις βασικές κβαντικές έννοιες.

Από έρευνες που έγιναν στην Ιταλία, τη Γαλλία και την Αγγλία διαπιστώθηκε ότι: στην Ιταλία διαπιστώθηκε σύγχυση όσον αφορά τα τροχιακά και αυτό αποδόθηκε από τους εκπαιδευτικούς από τη μια στα κακώς κείμενα των βιβλίων και από πρωτοετής φοιτητές από την άλλη, οι οποίοι προσδιορίζουν τα τροχιακά σαν τροχιές ενέργειας και από την άλλη σαν τροχιές ηλεκτρονίων. Στην Γαλλία διαπιστώθηκε ότι οι μαθητές διδάσκονταν για το πρότυπο του ατόμου στο πρώτο έτος. Στην Αγγλία από την άλλη, οι μαθητές κατά τη δευτεροβάθμια εκπαίδευσή τους, δεν διδάσκονται το ατομικό πρότυπο του Bohr. Ο ερευνητής Taber διδάσκοντας τη μοριακή δομή, διαπίστωσε ότι υπήρχε σύγχυση ανάμεσα στο μαθηματικό μοντέλο (LCAO) των μοριακών τροχιακών σχηματισμού, με τα ατομικά τροχιακά. Οι Coll και Treagust βρήκαν ότι ακόμη και μεταπτυχιακοί φοιτητές προτιμούν απλά πραγματικά μοντέλα και αναφέρονται σε πιο πολύπλοκα μοντέλα μόνο κατά τη διάρκεια των εξετάσεων. Οι κυριότερες παρανοήσεις βέβαια οφείλονται στην ανάμειξη των εννοιολογικών δομών της κλασικής και κβαντικής φυσικής και από επιστημολογικά εμπόδια για την απόκτηση της κατάλληλης γνώσης.

Σε μια ερευνητική μελέτη που πραγματοποίησαν οι Τσαπαρλής και Παπαφώτης σε εκατόν είκοσι πέντε (125) πρωτοετής φοιτητές των τμημάτων Χημείας, Βιολογικών Εφαρμογών και Τεχνολογιών και Επιστήμης και Τεχνολογίας των Υλικών του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων τον Οκτώβριο του 2001, ζητήθηκε από τους φοιτητές να απαντήσουν σε ένα γραπτό ερωτηματολόγιο 14 ερωτήσεων με όσα είχαν διδαχτεί στη γ' λυκείου την προηγούμενη σχολική χρονιά, στα πλαίσια της χημείας θετικής κατεύθυνσης. Από τις 14 ερωτήσεις, οι 5 απαιτούσαν απλή εφαρμογή γνωστών αλγορίθμων στους οποίους οι φοιτητές είχαν ασκηθεί ή ανάκληση γνώσεων, ενώ οι υπόλοιπες 9 ήταν πιο απαιτητικές και απαιτούσαν νοηματική κατανόηση. Ακολούθησε μια ποιοτική μελέτη στην οποία έλαβαν μέρος 23 επιλεγμένοι φοιτητές και από τα τρία τμήματα. Οι φοιτητές αυτοί έλαβαν μέρος σε ημιδομημένες συνεντεύξεις, κατά τις οποίες συζητήθηκαν οι εννέα πιο απαιτητικές ερωτήσεις. Οι φοιτητές επελέγησαν με βάση την επίδοσή τους στο γραπτό ερωτηματολόγιο, έτσι ώστε να λάβουν μέρος φοιτητές με διαφορετικές επιδόσεις στο γραπτό ερωτηματολόγιο: φοιτητές με καλή επίδοση γενικά, φοιτητές με καλή επίδοση στις ερωτήσεις ανάκλησης γνώσεων και τις αλγοριθμικές άλλα όχι τόσο καλή επίδοση στις πιο απαιτητικές ερωτήσεις και το αντίθετο.

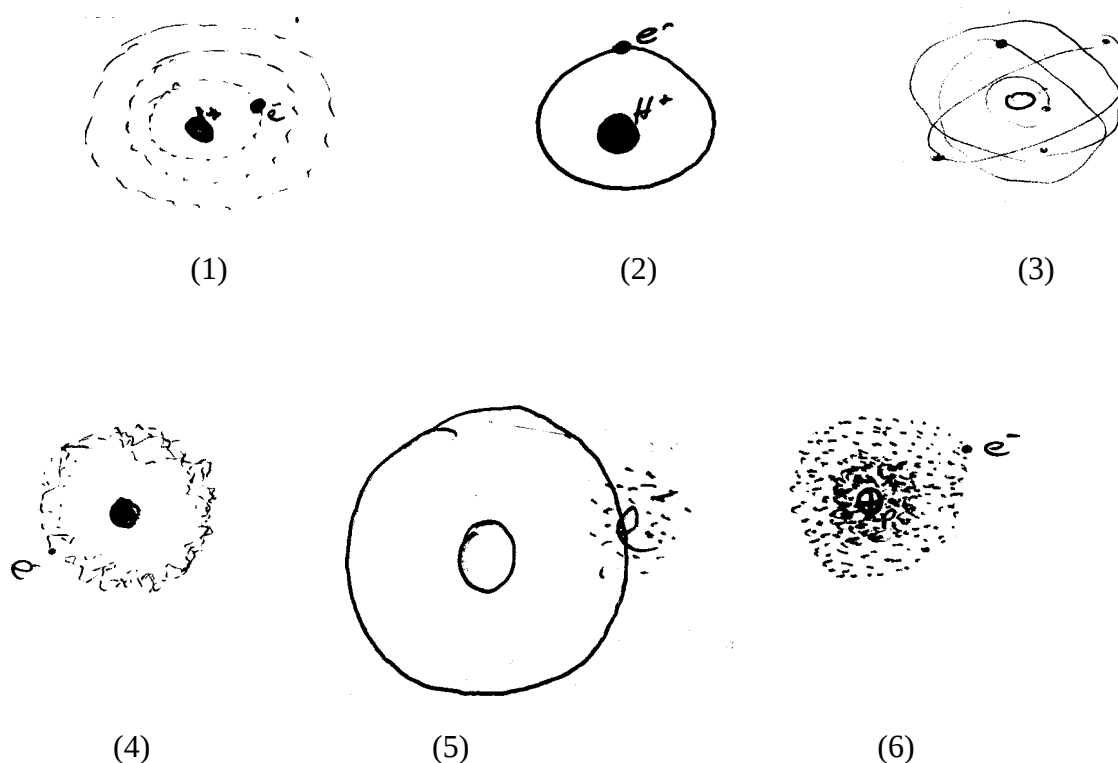
Το ερωτηματολόγιο δόθηκε επίσης το Φεβρουάριο του 2002 σε 43 φοιτητές του δεύτερου έτους του Τμήματος Χημείας (ΤΧ2) του Πανεπιστημίου Ιωαννίνων, οι φοιτητές αυτοί δεν είχαν ακόμη διδαχθεί το μάθημα της Κβαντικής Χημείας, είχαν όμως διδαχθεί και εξετασθεί επιτυχώς τις σχετικές έννοιες σε μαθήματα γενικής χημείας (ανόργανης και οργανικής).

Στόχος της έρευνας όσον αφορά τις ομαδικές συνεντεύξεις ήταν να έρθουν αντιμέτωποι οι φοιτητές που είχαν δώσει αντίθετες απαντήσεις στο γραπτό ερωτηματολόγιο, έτσι ώστε να μπλεχτούν σε μια συζήτηση και να καταγραφούν οι αντιδράσεις τους. Στις συνεντεύξεις πήραν μέρος και οι δυο ερευνητές. Οι ερωτήσεις που τέθηκαν ήταν οι εξής:

1. Να σχεδιάσετε το άτομο του υδρογόνου όπως φαντάζεστε ότι περίπου είναι στην πραγματικότητα,
2. Να διατάξετε τις υποστιβάδες $3d$, $2p$, $5s$, $4p$, $5f$, $3p$, $4d$, $4s$ και $2s$ κατά σειρά αυξανόμενης ενέργειας για ένα οποιοδήποτε άτομο εκτός του υδρογόνου,
3. Η διάταξη που έγραψες στην προηγούμενη ερώτηση είναι διαφορετική στην περίπτωση του ατόμου του υδρογόνου. Ποια είναι η διάταξη τώρα; Ξέρεις για ποιο λόγο διαφοροποιείται το υδρογόνο;
4. Είναι δυνατό να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάστασή του έξω από τον χώρο που ορίζεται ως τροχιακό $1s$; Να δικαιολογήσετε την απάντησή σας.

Τα αποτελέσματα της έρευνας έδειξαν ότι:

Ένα μεγάλο ποσοστό των πρωτοετών φοιτητών (72%), όπως και ένα σημαντικό ποσοστό δευτεροετών φοιτητών (30%), εμμένει στο πλανητικό ατομικό πρότυπο του Bohr έναντι του πρότυπου του Schrodinger. Ακόμη και όταν η απάντηση στην ερώτηση 1 γίνεται με βάση το κβαντομηχανικό μοντέλο, μέσα από τη συζήτηση στην ίδια ή και σε άλλες ερωτήσεις φαίνεται ότι οι φοιτητές εμμένουν σε έννοιες από το πλανητικό μοντέλο όπως π.χ. οι τροχιές. Ενδεικτικά παρατίθενται τα πιο κάτω σχήματα.



Σχήμα 1: Σχέδια του ατόμου του υδρογόνου

Είναι φανερό ότι στα σχήματα (1) έως (3) γίνεται αναφορά μόνο στο πλανητικό μοντέλο ενώ στα σχήματα (4) έως (6) τα δύο μοντέλα συνδυάζονται. Στο σχήμα (4) έχουμε πεπλατυσμένη τροχιά, στο σχήμα (5) το ηλεκτρονικό νέφος κινείται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα και στο σχήμα (6) παρουσιάζεται το ηλεκτρόνιο εντοπισμένο στο ηλεκτρονικό νέφος.

Σύμφωνα με τις απαντήσεις που δόθηκαν στη δεύτερη ερώτηση οι φοιτητές σε μεγάλο ποσοστό φαίνεται να γνωρίζουν και να εφαρμόζουν σωστά τον αλγόριθμο για την κατάταξη των υποστιβάδων σύμφωνα με την ενέργειά τους (75% - 90%). Όμως δε γνωρίζουν ή δεν κατανοούν τη θεωρία από την οποία προέρχεται η σειρά που προβλέπει ο αλγόριθμος αυτός. Έτσι δυσκολεύονται να κατατάξουν σύμφωνα με την ενέργεια τις υποστιβάδες του υδρογόνου (10% - 3%). Το 46% - 81% των φοιτητών που ξαφνιάζεται από την ερώτηση 3 απέφυγε να την απαντήσει. Η απόδοση στις δύο αυτές ερωτήσεις δείχνει τον αλγοριθμικό τρόπο προσέγγισης στην ύλη του κεφαλαίου αυτού.

Είναι χαρακτηριστικό ότι και τα συνολικά αποτελέσματα της έρευνας δείχνουν μια σαφώς καλύτερη επίδοση στις απλές ερωτήσεις γνώσεως από τις ερωτήσεις κρίσεως.

Αξίζει να επισημανθεί ότι ανάμεσα στις ερωτήσεις γνώσεως υπήρχε καλύτερη επίδοση στις ερωτήσεις εφαρμογής αλγορίθμων, αντικείμενο στο οποίο εξασκούνται συστηματικά οι μαθητές κατά τη διδασκαλία του σχετικού κεφαλαίου. Ενώ η χειρότερη, πάντως όμως καλύτερη από την επίδοση στις ερωτήσεις κρίσεως, σχετιζόταν με τους κβαντικούς αριθμούς οι οποίοι μαθαίνονται από τους φοιτητές εντελώς μηχανικά, με αποτέλεσμα μετά από κάποιο διάστημα να μη θυμούνται τι σημαίνει ο καθένας. Υπήρχε γενικά η τάση να αποδίδονται σε ένα κβαντικό αριθμό χαρακτηριστικά άλλου.

Από την ερώτηση 4 διαπιστώνεται ότι το 63% - 67% των φοιτητών ταυτίζουν τα σχήματα των τροχιακών και το χώρο που αυτά περικλείουν με τα ίδια τα τροχιακά. Ακόμη και αν φραστικά ορίζουν τα σχήματα αυτά ως το χώρο που υπάρχει πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο, φαίνεται να μη συνειδητοποιούν την έννοια της πιθανότητας και ουσιαστικά να αποκλείουν την εύρεση του ηλεκτρονίου έξω από το χώρο αυτό. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί έξω από το χώρο που ορίζεται ως 1s τροχιακό μόνο αν είναι διεγερμένο.

i) Τα τροχιακά έχουν κάποιο καθορισμένο σχήμα στο χώρο και το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να βρεθεί έξω από αυτό.

ii) Αφαίρεση τροχιακών σημαίνει αφαίρεση χώρων και είναι ένα φαινόμενο.

Στη συνέχεια παρατίθενται ενδεικτικές απαντήσεις

- *«Ναι, όταν βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση.»*
- *«Όχι, για να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου έξω από το χώρο που ορίζεται ως τροχιακό 1s, θα πρέπει να είναι σε διεγερμένη κατάσταση, αφού το 1s τροχιακό είναι ο μικρότερης ενέργειας “χώρος”»*
- *«Η θεμελιώδης κατάσταση είναι η κατάσταση με τη μικρότερη ενέργεια. Για το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου η ελάχιστη ενέργεια είναι στο 1s τροχιακό. Αν βρεθεί έξω από αυτό το χώρο, θα έχει μεγαλύτερη ενέργεια άρα δε θα είναι στη θεμελιώδη του κατάσταση.»*
- *«Η αφαίρεση δύο ατομικών τροχιακών θα ήταν αδύνατη γιατί τα ατομικά τροχιακά είναι χώροι όπου μπορεί να βρεθεί το ηλεκτρόνιο και όχι απλά αριθμοί που μπορούν να αφαιρεθούν.»*

- «Είναι δυνατό. Το τροχιακό είναι ο χώρος μέσα στον οποίο υπάρχει μεγάλη πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο. Άρα σε κάποια ειδική περίπτωση είναι δυνατό να μη βρίσκεται στο χώρο το τροχιακό αυτό.»
- «Εγώ απάντησα σύμφωνα με αυτά που είχαμε μάθει στο λύκειο. Δεν είμαι σίγουρη αν είναι σωστός ο αριθμός που έχω βάλει αλλά είπα ότι η πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο στο χώρο που ορίζεται ως τροχιακό $1s$ στη θεμελιώδη κατάσταση είναι 95%. Άρα υπάρχει ένα 5% πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο και έξω από το χώρο του τροχιακού $1s$ στη θεμελιώδη κατάσταση πάντα έστω και αν η πιθανότητα αυτή είναι μικρή, πάντως υπάρχει.»
- «Και βέβαια γιατί το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί οπουδήποτε. Πουθενά η πιθανότητα δεν είναι μηδενική. Απλά κοντά στο πυρήνα έχει τις περισσότερες πιθανότητες γύρω στα 90 με 97%.»

Συμπερασματικά, διαπιστώθηκε ότι πολλοί σπουδαστές δυσκολεύονται να καταλάβουν την πιθανολογική φύση της έννοιας του τροχιακού. Επιπλέον προσδιορίζουν το τροχιακό μόνο ως το χώρο που περικλείεται από ο χρησιμοποιούμενο σχήμα για το τροχιακό, δηλαδή τη μορφή του τροχιακού που αναφέρεται σε μια ορισμένη πιθανότητα. Μια αποτελεσματική προσέγγιση για εννοιολογική αλλαγή ήταν μέσω της αλλαγής του μεγέθους του τροχιακού, σε σχέση με τη τιμή της πιθανότητας να βρεθεί εκεί το ηλεκτρόνιο. Και πάλι όμως τα προβλήματα κατανόησης συνεχίστηκαν.

Σημαντικός στη δημιουργία παρανοήσεων είναι και ο ρόλος των σχολικών βιβλίων. Ενδεικτικά αναφέρονται:

A) Υδρογονοειδή άτομα είναι εκείνα που στην εξωτερική τους στοιβάδα έχουν ένα ηλεκτρόνιο, παρανόηση που προέρχεται από το βιβλίο της Φυσικής Γενικής Παιδείας της Γ' λυκείου, όπου λανθασμένα εκφράζεται αυτή η άποψη.

B) Το ηλεκτρονιακό νέφος στο $1s$ δεν είναι και τόσο καθορισμένο, ενώ στο $2p$ είναι. Στο $1s$, το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί και μακριά από τον πυρήνα, όχι όμως στο $2p$. Στην παρανόηση αυτή συνέβαλε προφανώς η λανθασμένη απεικόνιση του σχολικού βιβλίου του ηλεκτρονιακού νέφους για το τροχιακό $2p$ στην οποία υπάρχουν σαφή όρια, σε συνδυασμό με την αυθεντία του βιβλίου που «δεν κάνει ποτέ λάθος».

Δεν έχει κατανοηθεί η θεμελιώδης φύση της αβεβαιότητας για την οποία μιλά η αρχή της αβεβαιότητας. Τόσο οι πρωτοετείς φοιτητές όσο και οι δευτεροετείς κατανοούν την αβεβαιότητα με όρους του μακρόκοσμου, ανεξάρτητα από πια απάντηση επιλέγουν. Η χρησιμοποίηση αναλογιών από το μακρόκοσμο (π.χ. αναλογία αεροπλάνου) επιτείνει μάλλον αυτήν τη σύγχυση παρά βοηθά στην κατανόηση της αρχής της αβεβαιότητας.

Οι έννοιες και οι διαδικασίες της κβαντικής χημείας είναι αφηρημένες και σύνθετες, έτσι η μάθηση είναι δύσκολη χωρίς μια λεπτομερή κατανόηση του θέματος. Διαφορετικά οι φοιτητές πρέπει να προσφύγουν στην αποστήθιση των ορισμών, των τύπων και των διαδικασιών. Η παραδοσιακή μεθοδολογία διδασκαλίας είναι δύσκολο να τα ξεπεράσει, αντίθετα η εποικοδομητική παιδαγωγική η οποία παρέχει ενεργές και συνεργατικές μορφές μάθησης, και στοχεύει στην εννοιολογική σύγκρουση και την εννοιολογική αλλαγή, φαίνεται να είναι πιο αποτελεσματική στη μείωση ή στο ξεπέρασμά τους.

Ένα ακόμα πρόβλημα όσον αφορά τις παρανοήσεις των μαθητών είναι η έλλειψη κριτικής ικανότητας και η αποστήθιση. Η διδασκαλία της κβαντικής χημείας αναδεικνύει τα προβλήματα που δημιουργεί στην κριτική ικανότητα και τη μακροπρόθεσμη μνήμη των μαθητών. Ο τρόπος εξέτασης του μαθήματος (όπως και όλων των υπόλοιπων μαθημάτων) κατά τις Πανελλήνιες εξετάσεις μπορεί να θεωρηθούν επίσης ως παράγοντες παρανοήσεων. Οι απλές ερωτήσεις αναπαραγωγής και εφαρμογής μνημονικών κανόνων εγκλωβίζουν δασκάλους και μαθητές σε μια επιφανειακή προσέγγιση της κβαντικής θεωρίας.

Μερικές από τις παρανοήσεις που δημιουργούνται στους μαθητές σε αυτήν την ενότητα είναι οι εξής:

1. *Τα τροχιακά είναι οι περιοχές που κινούνται τα ηλεκτρόνια.*
2. *Τα ηλεκτρόνια «γυρίζουν γύρω» από το άτομο σε μια κβαντική κατάσταση*
3. *Τα ηλεκτρόνια μπορούν να κινούνται σε όποια τροχιά αυτά "θέλουν"*
4. *Τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου περιφέρονται γύρω από τον πυρήνα, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο*
5. *Το ηλεκτρόνιο είναι όπως ένας τεχνητός δορυφόρος. Μπορεί να βρίσκεται σε οποιαδήποτε τροχιά.*
6. *Το ηλεκτρονιακά νέφη είναι εικόνες των τροχιών*
7. *Η Κυματοσυνάρτηση περιγράφει την τροχιά ενός ηλεκτρονίου.*

8. Η κυματοσυνάρτηση είναι αδιάστατη.
9. Οι κυματοσυναρτήσεις είναι μαθηματικές αναπαραστάσεις του ηλεκτρονίου.
10. Υπάρχει μόνο ένα σωστό μοντέλο για τα άτομα.
11. Οι φυσικοί τώρα γνωρίζουν το σωστό μοντέλο του ατόμου.
12. Τα τροχιακά έχουν καθορισμένο σχήμα και μέγεθος και το ηλεκτρόνιο δεν μπορεί να βρεθεί εκτός.
13. Οι ενεργειακές ιδιοτιμές είναι οι μόνες επιτρεπόμενες καταστάσεις.
14. Το ηλεκτρόνιο μπορεί να βρεθεί εκτός του τροχιακού $1s$ μόνο αν είναι διεγερμένο.
15. Το νέφος στο $1s$ τροχιακό δεν είναι καθορισμένο, αλλά στο $2p$ είναι.
16. Τα ηλεκτρόνια «μεταπηδούν» από την μια κατάσταση στην άλλη (με απορρόφηση ή εκπομπή).
17. Οι φασματικές γραμμές παριστάνουν «ενεργειακά επίπεδα» του ηλεκτρονίου.
18. Όταν απορροφάται ένα φωτόνιο χάνεται το φως. Όταν εκπέμπεται το φωτόνιο, το φως επανεμφανίζεται.
19. Μετάπτωση σημαίνει ότι τα ηλεκτρόνια κινούνται και δονούνται περισσότερο.

Συμπερασματικά, από την παραπάνω βιβλιογραφική έρευνα, διαπιστώνεται ότι:

- Οι μαθητές φαίνεται να προτιμούν τα συγκεκριμένα έναντι των αφηρημένων μοντέλων, όπως για παράδειγμα τα μοντέλα των συμπαγών σφαιρών για τα άτομα και τα μόρια, το μοντέλο του Bohr, τον κανόνα της οκτάδας και απλά μοντέλα για τον χημικό δεσμό. Όταν τα μοντέλα βρίσκονται σε σύγκρουση μεταξύ τους, τότε οι μαθητές επιλέγουν αυτό που φαίνεται να είναι πιο κοντά σε αυτούς.
- Δεν διαθέτουν νοητική εικόνα για το άτομο.
- Αν και μαθητές και φοιτητές, καθώς μετακινούνται στα επίπεδα της εκπαίδευσης, διδάσκονται αφηρημένα μοντέλα ανώτερου επιπέδου και μεγαλύτερης εξηγητικής ισχύος, όπως το κβαντομηχανικό μοντέλο ή τα μοριακά τροχιακά, εξακολουθούν να καταφεύγουν συχνά σε πρωταρχικά μοντέλα τα οποία φαίνεται να είναι πολύ σταθερά.
- Υπάρχουν όμως και παρανοήσεις που αναφέρονται στα σχολικά εγχειρίδια.

2.8 Πρέπει τελικά να διδαχθεί η Κβαντική Θεώρηση του Ατόμου στη σχολική τάξη;

Αρκετοί συγγραφείς, κυρίως στις προηγούμενες δεκαετίες, αλλά και σήμερα ακόμη υποστηρίζουν ότι η Κβαντική Θεώρηση του Ατόμου, δεν θα πρέπει να διδαχθεί στο Λύκειο, διότι:

- Πολλοί μαθητές βρίσκονται ακόμη στο στάδιο των συγκεκριμένων συλλογισμών κατά Piaget και αυτό σημαίνει ότι κατανοούν μόνο τις συγκεκριμένες διαδικασίες μοντελοποίησης, ενώ αδυνατούν να κατανοήσουν τον μαθηματικό φορμαλισμό και τις εμπλεκόμενες έννοιες της Κβαντικής Θεωρίας που Το Κβαντικό Ατομικό Μοντέλο απαιτούν αφαιρετική ικανότητα.
- Οι μαθητές δεν έχουν τις απαραίτητες μαθηματικές γνώσεις και έτσι δεν μπορούν να κατανοήσουν τις μαθηματικές λύσεις της εξίσωσης Schrödinger και την φυσική σημασία των κβαντικών αριθμών. Αλλά όταν η παρουσίαση παραμένει ποιοτική πολλές έννοιες εμφανίζονται αυθαίρετα.
- Τα τροχιακά είναι μαθηματικές συναρτήσεις, ανθρώπινες επινοήσεις και βεβαίως δεν είναι υπαρκτές οντότητες, επομένως δεν σχετίζονται άμεσα με την επιστήμη των υλικών, των χρωμάτων και των οσμών που προκαλούν το ενδιαφέρον των μαθητών.
- Οι καθηγητές δεν έχουν την απαιτούμενη γνώση, πολλές φορές και λόγω των βασικών τους σπουδών να την διδάξουν, με αποτέλεσμα να επιτείνουν την δημιουργία αυθόρμητων νοητικών παραστάσεων εκ μέρους των διδασκομένων.
- Τα διδακτικά εγχειρίδια παρουσιάζουν πολλές ασάφειες στους ορισμούς των βασικών εννοιών και ανακολουθίες στην συλλογιστική πορεία που παρουσιάζουν. Ένα παράδειγμα είναι ότι το μεθάνιο έχει τετραεδρική δομή λόγω του sp^3 υβριδισμού. Είναι όμως γενικά αποδεκτό ότι η ΚΘΑ είναι αυτή, που σήμερα ερμηνεύει πλήρως τις ιδιότητες των χημικών ουσιών και πολλών φυσικών φαινομένων που αφορούν την συμπεριφορά των υλικών και όποιος μπορεί να το χρησιμοποιεί 'είναι επικεφαλής του παιχνιδιού'. Εξάλλου, τα τροχιακά και οι ηλεκτρονικές δομές είναι εξαιρετικά χρήσιμα διότι παρέχουν μια θεωρητική βάση για την ενοποίηση όλων των χημικών γεγονότων. Ο Hobson (2001), επίσης υπογραμμίζει το γεγονός ότι κεφάλαια της Σύγχρονης

Φυσικής, όπως η Κβαντική Θεωρία, είναι απαραίτητο να διδαχθούν σήμερα με την χρήση ελάχιστων ή καθόλου μαθηματικών, δεδομένου ότι αποτελούν θέματα που κεντρίζουν το ενδιαφέρον όλων των φοιτητών. Παρόμοια άποψη εκφράζεται και από τον Lawrence (2001), που θεωρεί ότι η εισαγωγή των μαθητών στην Κβαντική Φυσική πρέπει να αρχίσει από νωρίς (μετά την ηλικία των 16 ετών), για να μπορούν να αφομοιώσουν τις έννοιες σε συνδυασμό και με τα άλλα κεφάλαια της Φυσικής. Όσον αφορά τις ελλείψεις των μαθητών και φοιτητών στα μαθηματικά αντιπαραθέτουμε την άποψη του Styer: ‘Μαθαίνω πολλά τόσο μέσω της έρευνας όσο και διδάσκοντας τεχνικής φύσεως μαθήματα σε προχωρημένους σπουδαστές που ακολουθούν την κατεύθυνση της Φυσικής. Όμως μαθαίνω περισσότερα αποστάζοντας την ουσία των ιδεών της Φυσικής στην προσπάθειά μου να προετοιμάσω μια αυστηρά ειλικρινή αλλά μη τεχνική παρουσίαση για κάποιο γενικό ακροατήριο. Προκειμένου να επικοινωνήσω με ένα τέτοιο κοινό, δεν μπορώ να αποκρύψω την άγνοιά μου πίσω από ένα προπέτασμα μαθηματικών τύπων και τεχνικής ορολογίας’ (2000). Επιπλέον οι φοιτητές στο πανεπιστήμιο θα διευκολυνθούν στο να συνεχίσουν να εμβαθύνουν στην κβαντική θεώρηση του ατόμου, εάν φτάσουν χωρίς λανθασμένες ιδέες και απλοϊκές αντιλήψεις για το πώς είναι στην πραγματικότητα το άτομο. Οι μαθητές μπορεί να θεωρήσουν ενδιαφέρον ότι η επιστήμη δεν μπορεί να εντοπίσει το ηλεκτρόνιο Αρχίζουν να διαμορφώνουν την άποψη ότι η επιστήμη δεν είναι ένα παιχνίδι όπου όλα περιγράφονται με ακρίβεια. Από την έρευνα των Petri και Niedderer φαίνεται να διαμορφώνεται αυτή η επιστημολογική στάση. Ο Pospiech προτείνει τρόπους ώστε να συμπεριληφθούν τα αποτελέσματα των νέων ερευνών για την Κβαντική Θεωρία στα τμήματα επιμόρφωσης των διδασκόντων και αυτά να φθάσουν τελικά στους μαθητές ή τους φοιτητές. Έχει διαπιστωθεί ότι γενικά η παρουσίαση των θεωριών και των μοντέλων που προκύπτουν από αυτές, συνδέεται με την βελτίωση της κατανόησης των εννοιών από τους μαθητές και τους φοιτητές, όμως μεγάλο μέρος των αυθόρμητων νοητικών τους παραστάσεων παραμένει και οφείλεται στην παιδαγωγική τους χρησιμοποίηση ή στην έλλειψη αυτής. Είναι έργο της έρευνας στον χώρο της Διδακτικής των Φυσικών Επιστημών να εντοπίσει τις δυσκολίες και να προτείνει τις μεθόδους παρουσίασης των αφηρημένων

εννοιών στους μαθητές, αλλά πρωτίστως είναι έργο της διασαφήνισης των εννοιών από τους φυσικούς.

2.9 Τρόποι διδασκαλίας της Κβαντικής Χημείας

2.9.1 Οι προτάσεις των ερευνητών

Από τις έρευνες που έχουν γίνει μέχρι τώρα, διαπιστώνεται ότι το σημαντικότερο εμπόδιο για την κατανόηση των αρχών που διέπουν τον κβαντικό κόσμο είναι η κλασική προσέγγισή του από τους μαθητές, αλλά πολλές φορές και από τα σχολικά βιβλία και τους διδάσκοντες. Ένα άλλο σημαντικό πρόβλημα είναι η ορολογία που χρησιμοποιείται και έχει μια διαφορετική ερμηνεία για την Κβαντική Θεωρία από ότι στον κόσμο της κλασικής σκέψης. Για παράδειγμα ‘η αβεβαιότητα’, για την κλασική μέτρηση φανερώνει απλά την έλλειψη απόλυτης ακρίβειας της μετρητικής μας συσκευής, το σφάλμα στη μέτρηση, ενώ είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό γνώρισμα του κβαντικού κόσμου, που φανερώνει ότι οι μετρήσεις δεν αναπαράγονται. Πιο συγκεκριμένα από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση προκύπτει ότι φοιτητές και μαθητές:

1. Συγχέουν το άτομο με άλλα δομικά στοιχεία της ύλης,
2. Δεν διαθέτουν νοητική εικόνα για το άτομο,
3. Διαθέτουν νοητική εικόνα επηρεασμένη από το μοντέλο του Bohr,
4. Διαθέτουν νοητική εικόνα που δεν συμφωνεί με καμία επιστημονική θεωρία.

Σύμφωνα με τον Scott Aronson υπάρχουν δύο τρόποι διδασκαλίας της κβαντικής θεωρίας. Ο πρώτος ακολουθεί την ιστορική σειρά με την οποία εξελίχτηκαν οι ιδέες της θεωρίας. Η διδασκαλία ξεκινάει από την κλασική μηχανική και την ηλεκτροδυναμική και την επίλυση διαφορικών εξισώσεων. Έπειτα περνάει στο μέλαν σώμα και διάφορα άλλα «παράξενα» πειραματικά επιτεύγματα. Στη συνέχεια ακολουθούν οι ερμηνείες των επιστημόνων μεταξύ του 1900 και του 1926, οπότε και πραγματοποιήθηκε το συνέδριο του Solvay καθιερώνοντας τα αξιώματα και τις βασικές αρχές της κβαντομηχανικής. Έπειτα διδάσκεται η κεντρική ιδέα της θεωρίας: η φύση περιγράφεται από εύρη και διασπορές (και όχι πιθανότητες).

Ο δεύτερος τρόπος διδασκαλίας της κβαντομηχανικής ξεκινάει απ’ ευθείας με τον εννοιολογικό πυρήνα της θεωρίας. Το εγχείρημα αυτό στηρίζεται σε μια απλή ιδέα: «Εφόσον διδαχτούμε τι ακριβώς διαπραγματεύεται η θεωρία, τότε μπορούμε να

κάνουμε τους υπολογισμούς ή να αναλύουμε φάσματα οποιουδήποτε ατόμου επιθυμούμε».

Οι προτάσεις των ερευνητών για την επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούνται από τις παρανοήσεις των μαθητών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Ποιοτική προσέγγιση της Κβαντικής Θεώρησης του Ατόμου (ΚΘΑ). Οι διδάσκοντες και οι ερευνητές της Διδακτικής προσανατολίζονται συχνά προς μια διδακτική πρόταση με έμφαση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ΚΘΑ.

2. Ενιαία παρουσίαση της ΚΘΑ στα μαθήματα Φυσικής και Χημείας. Προτείνεται να δημιουργηθεί μια ουσιαστική σύνδεση μεταξύ της διδασκαλίας της Φυσικής και της Χημείας και να υπογραμμισθεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι η ΚΘΑ δίνει τη δυνατότητα ερμηνείας φυσικών και χημικών φαινομένων.

3. Αξιοποίηση των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και των Επικοινωνιών (ΤΠΕ) για την οπτική αναπαράσταση εννοιών που συνδέονται με την ΚΘΑ. Η χρήση των οπτικοποιήσεων με την αξιοποίηση των ΤΠΕ βελτιώνει την κατανόηση των εννοιών που συνδέονται με την ΚΘΑ. Άλλωστε δεν είναι δυνατό να δημιουργηθούν τρισδιάστατες οπτικές αναπαραστάσεις του ατόμου σύμφωνα με την κβαντική του θεώρηση με διαφορετικό τρόπο.

2.9.2 Σχεδιασμός μαθήματος

2.9.2.1 Διδάσκοντας το Κβαντομηχανικό Πρότυπο του Ατόμου

Στόχοι

Πίνακας 1. Στόχοι ενότητας «το Κβαντομηχανικό Πρότυπο του Ατόμου»

ΣΤΟΧΟΙ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ
Γνωστικοί	Να περιγράφουν το συγκεκριμένο πείραμα το οποίο ενθάρρυνε την πρόταση για το πλανητικό μοντέλο του ατόμου Να αναγνωρίζουν ότι το προτεινόμενο μοντέλο δεν εναρμονίζεται με κάποια στοιχεία της αποδεκτής θεωρίας ούτε και με τα εμπειρικά δεδομένα, αλλά κι να	Να είναι σε θέση οι μαθητές να εξηγούν • Το ατομικό μοντέλο το οποίο είχε προτείνει ο J.J Thomson. • Την ύπαρξη και τις

γνωρίζουν ποια είναι τα στοιχεία και τα δεδομένα αυτά.

Να εξοικειωθούν με τη μέθοδο που χρησιμοποιεί η επιστήμη, όπως η πειραματική έρευνα, η επινóηση μοντέλων και η διαμόρφωση θεωριών. Για παράδειγμα, στη περίπτωση του Rutherford για το πλανητικό μοντέλο, θα πρέπει οι μαθητές να κατανοήσουν μέσω της θεωρητικής σκέψης τη λειτουργία του πλανητικού μοντέλου.

ιδιότητες των σωματιδίων, πρωτόνιο, ηλεκτρόνιο και άλφα.

- Ότι κατά την ομαλή κυκλική κίνηση υπάρχει επιτάχυνση.
- Ότι σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, κάθε σωματίδιο με φορτίο και επιτάχυνση εκπέμπει ακτινοβολία.
- Το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα της κίνησης.

Συναισθη-
ματικοί

Να γνωρίσουν διαφορετικές ερμηνείες που προκύπτουν από την κβαντική θεωρία (επινóηση μοντέλων, πλανητικό μοντέλο Rutherford)

Να χρησιμοποιούν επιχειρήματα και αποδείξεις για τη κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα.

Μέθοδος

- Αξιοποίηση στοιχείων της ιστορίας της επιστήμης,
- Διδασκαλία με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού.

Υλικά

Υπολογιστής, προτζέκτορας, βίντεο, laser-pointer

Εννοιολογικά εμπόδια

Τα ηλεκτρόνια ενός ατόμου περιφέρονται γύρω από το πυρήνα, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο.

Περιεχόμενο μαθήματος

Ο καθηγητής καθορίζει το βασικό πρόβλημα υπό μορφή ερωτημάτων:

1. Ποιο ήταν το μοντέλο του Rutherford για τη δομή του ατόμου;

2. Σε ποια εμπειρικά δεδομένα βασίστηκε;
3. Σε τι πλεονεκτούσε σε σχέση με το ατομικό μοντέλο του «πατέρα του ηλεκτρονίου» J.J Thomson;
4. Ποιες ήταν οι αδυναμίες του;

Προσέγγιση

1. Ο εκπαιδευτικός καλεί τους μαθητές να παρακολουθήσουν μια προσομοίωση πειράματος βομβαρδισμού φύλλων χρυσού με σωμάτια άλφα και στη συνέχεια να συζητήσουν την αδυναμία ερμηνείας βάσει του μοντέλου του Thomson.

Για παράδειγμα: <http://micro.magnet.fsu.edu/electromag/java/rutherford/>

2. Στη συνέχεια τους αναφέρει την ιδέα του Rutherford, το έτος 1911, για ένα μοντέλο ανάλογο με εκείνο του ηλιακού συστήματος.
3. Τέλος χρησιμοποιεί μερικά βίντεο για να τους αποσαφηνίσει τις διαφορές των δύο μοντέλων.

Για παράδειγμα:

http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/rutherford/rutherford2.html

http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Applets/rutherford/rutherford.html

4. Στη συνέχεια ο εκπαιδευτικός ζητάει από κάθε μαθητή να σχεδιάσει στο τετράδιο του έναν πλανήτη περιφερόμενο γύρω από τον ήλιο μαζί με τη τροχιά του καθώς και ένα ηλεκτρόνιο περιφερόμενο γύρω από τον ατομικό πυρήνα, μαζί και τη τροχιά του, και να απαντήσει στις ερωτήσεις: *«ποια είναι η δύναμη που ασκείται στο Πλανήτη και τον κάνει συνεχώς να στρίβει;», «ποια δύναμη ασκείται στο περιφερόμενο ηλεκτρόνιο;»*
5. Έπειτα καθοδηγεί τη συζήτηση, έτσι ώστε οι μαθητές να διακρίνουν την αδυναμία του πλανητικού μοντέλου.
6. Αξιοποιεί διδακτικά ένα βίντεο με γραμμικά φάσματα αερίων και στη συνέχεια τους επισημαίνει ότι το προτεινόμενο μοντέλο αδυνατεί να ερμηνεύσει το εμπειρικό δεδομένο, ότι τα αέρια εκπέμπουν ακτινοβολίες με συγκεκριμένες συχνότητες.

7. Εξηγεί τη διαφορά ανάμεσα στο πλανητικό μοντέλο του ατόμου και στο αντίστοιχο μοντέλο για το ηλιακό σύστημα, για να φωτίσει τη σοβαρή αδυναμία του πλανητικού μοντέλου, στο να δώσει λύση όσον αφορά τη σταθερότητα των ατόμων.

Αξιολόγηση

Τέλος ο εκπαιδευτικός δίνει στους μαθητές ένα φυλλάδιο αξιολόγησης με ερωτήσεις.

2.9.2.2 Διδάσκοντας τα άτομα: δομικά στοιχεία της ύλης

Στόχοι

Πίνακας 2. Στόχοι ενότητας «τα άτομα, δομικά στοιχεία της ύλης»

ΣΤΟΧΟΙ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ
Γνωστικοί	Να κατανοήσει ο μαθητής πώς αναπτύχθηκαν σημαντικές επιστημονικές θεωρίες, Να αναγνωρίζει το έργο των επιστημόνων που συνεισέφεραν με τις ιδέες τους στον τομέα της κβαντικής μηχανικής, Να δημιουργήσει ένα χρονοδιάγραμμα με βάση την εξέλιξη της έννοιας του ατόμου από επιστήμονα σε επιστήμονα.	Να συνειδητοποιήσει την εξέλιξη της έννοιας του ατόμου
Συναισθηματικοί	Να αναγνωρίζει το πλήθος εφαρμογών στην τεχνολογία (μικροσκόπιο TEM, κρυσταλλογραφία, κτλ)	

Υλικά

- Υπολογιστής, προτζέκτορας, βίντεο, laser-pointer.

Μέθοδος

- Αξιοποίηση στοιχείων της ιστορίας της επιστήμης,
- Διδασκαλία με τη βοήθεια ειδικού λογισμικού.

Περιεχόμενο μαθήματος

Ο καθηγητής καθορίζει το βασικό πρόβλημα υπό μορφή ερωτημάτων:

1. Πως αναπτύχθηκαν οι επιστημονικές ιδέες;
2. Πιστεύετε ότι η ιδέα μιας έννοιας προέρχεται μόνο από ένα επιστήμονα, ή από συλλογική προσπάθεια επιστημόνων;

Προσέγγιση

1. Ο εκπαιδευτικός αναφέρει στους μαθητές το θέμα του μαθήματος, δηλαδή πως οι ερευνητές ανακάλυψαν τη δομή του ατόμου.
2. Στη συνέχεια τους εξηγεί ότι οι ιδέες των ερευνητών τους οδήγησαν σε αυτό που σήμερα καλείται κβαντομηχανική, η επιστήμη δηλαδή που μέσω αυτής ανακαλύφθηκαν τα σημαντικότερα επιτεύγματα του 20^{ου} αιώνα.
3. Έπειτα ο εκπαιδευτικός ζητάει από τους μαθητές να σχεδιάσουν στο τετράδιο τους ένα χρονοδιάγραμμα από το 1900 έως 1930, και τους χωρίζει σε μικρές ομάδες τριών τεσσάρων ατόμων, όπου η καθεμία θα ερευνήσει από έναν επιστήμονα που συνέβαλε στη κατανόηση της κβαντικής μηχανικής. Ο εκπαιδευτικός δίνει και κάποιες ιστοσελίδες που θα φανούν χρήσιμες στην μικρή ερευνά των μαθητών, αλλά και κάποιες πληροφορίες για τους επιστήμονες, αλλά όπως:

Max Planck: Το 1900 ανακάλυψε ότι η ακτινοβολία εκπέμπεται σε διακριτές ποσότητες που τις αποκάλεσε κβάντα.

Άλμπερτ Αϊνστάιν: Με βάση τις ιδέες του Planck, το 1905 ο Αϊνστάιν δημοσίευσε ότι το «κβάντα» ήταν μια δέσμη φωτός που συμπεριφέρεται σαν σωματίδιο.

Ernest Rutherford: Το 1911, ήταν ο πρώτος που όρισε το κέντρο του ατόμου ως θετικά φορτισμένο πυρήνα.

Niels Bohr: Το 1913, πρότεινε ένα μοντέλο του ατόμου με τα ηλεκτρόνια να κινούνται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα παρόμοια με τους πλανήτες που περιστρέφονται γύρω από τον ήλιο.

Louis de Broglie: Πρότεινε το 1924 ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται ως κύματα κάτω από ορισμένες συνθήκες.

Erwin Schrodinger: Με βάση την ιδέα του de Broglie τα ηλεκτρόνια δρουν σαν κύματα. Το 1926 ανέπτυξε τη βασική εξίσωση της κβαντικής μηχανικής.

Werner Heisenberg: Το 1927 πρότεινε ότι είναι αδύνατο να γνωρίζει κανείς τη θέση και την ταχύτητα των ηλεκτρονίων την ίδια στιγμή. Η έννοια αυτή ονομάζεται αρχή της αβεβαιότητας.

4. Αφού οι μαθητές ολοκληρώσουν την έρευνα τους, ακολουθεί παρουσίαση των εργασιών τους και συζήτηση.

Αξιολόγηση

Τέλος ο εκπαιδευτικός δίνει στους μαθητές ένα φυλλάδιο αξιολόγησης με ερωτήσεις για να διαπιστώσει αν το θέμα έγινε κατανοητό και αν υπάρχουν παρανοήσεις.

2.9.2.3 Διδάσκοντας το δυϊσμό σωματιδίων και την αβεβαιότητα

Προαπαιτούμενες γνώσεις

Ο δυϊσμός των σωματιδίων και η αβεβαιότητα είναι ενταγμένα στο πλαίσιο της διδασκαλίας της κβαντικής θεωρίας όπως διατυπώθηκε στις αρχές του προηγούμενου αιώνα. Ένα μάθημα στο δυϊσμό και την αβεβαιότητα έπεται μιας μικρής εισαγωγής στην οπτική, την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, την παρουσίαση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, την εξίσωση Plank και την ιστορία του ατομικού προτύπου μέχρι τον Bohr, με τρόπο ώστε να γίνονται εύληπτα στους μαθητές:

1. η κβάντωση της ενέργειας
2. πως το ατομικό πρότυπο επηρέασε τις ιδέες μας για το χημικό δεσμό και ποιά πειράματα μας οδήγησαν στην κβαντομηχανική

Περιεχόμενο μαθήματος

Υπάρχουν σήμερα διάφορες διδακτικές προτάσεις για το κεφάλαιο δυϊσμού-αβεβαιότητας στο Λύκειο, αν και αρκετοί διαφωνούν με ένα τέτοιο επιχείρημα. Για παράδειγμα ο Pauling στην κριτική του πάνω στα βιβλία της δευτεροβάθμιας εκπαίδευσης περιγράφει το υλικό «προχωρημένο» και «βαρύ» και προτείνει να διδάσκονται απλούστερες έννοιες όπως η θεωρία δεσμού σθένους. Το μάθημα μπορεί να χωριστεί σε δυο διδακτικές ενότητες/ώρες. Την πρώτη ώρα οι μαθητές θα διδαχτούν:

- το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο Einstein
- την κυματική θεωρία της ύλης και την εξίσωση de Broglie
- πειράματα Davisson-Germer, περίθλαση ηλεκτρονίων G. Thomson και πείραμα Young

Τη δεύτερη ώρα μπορούν να διδαχτούν:

- την αρχή αβεβαιότητας Heisenberg

- την εξίσωση Schrödinger
- ποιές είναι οι συνέπειες της αβεβαιότητας
- τις διαφορετικές ερμηνείες και τη διαμάχη που προκάλεσε η αβεβαιότητα.

«Ο Δυϊσμός των σωματιδίων της ύλης»

1^η Διδακτική ώρα

Στόχοι

Πίνακας 3. Στόχοι ενότητας «Ο Δυϊσμός των σωματιδίων της ύλης»

ΣΤΟΧΟΙ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ
Γνωστικοί	Να περιγράφει παραδείγματα που αφορούν την κυματική συμπεριφορά του ηλεκτρονίου Να αναφέρει παραδείγματα που αποδεικνύουν τη σωματιδιακή συμπεριφορά του φωτονίου	Να προβλέπει το μήκος κύματος διαφόρων σωματιδίων με βάση την εξίσωση de Broglie Να συνειδητοποιήσει ότι η διττή συμπεριφορά οφείλεται εν μέρει και στις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος
Συναισθηματικοί	Να αναγνωρίζει το πλήθος εφαρμογών στην τεχνολογία (μικροσκόπιο TEM, κρυσταλλογραφία, κτλ)	

Υλικά

Υπολογιστής, προτζέκτορας, βίντεο, laser-pointer, πολωτικοί φακοί

Λεξιλόγιο

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, Σκέδαση Compton, Πείραμα Young, Υπόθεση de Broglie, Δυϊσμός, Πειράματα Davisson – Germer και Thomson, Κρυσταλλογραφία, Φύση ηλεκτρονίου και φωτονίου, Κβαντική Γόμα

Προσέγγιση

Ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει το βίντεο

<http://www.youtube.com/watch?v=N7BywkIretM>

και εξηγεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: «όταν στην επιφάνεια ενός μετάλλου πέσει φως κατάλληλης συχνότητας τότε εκπέμπονται ηλεκτρόνια από αυτήν».

Παρουσιάζει διαδοχικά διαφάνειες με τα πειράματα χωρίς να αναφερθεί σε τεχνικές λεπτομέρειες και εξηγεί τι συμβαίνει. Εξηγεί ότι το φαινόμενο αυτό οδήγησε τον Einstein το 1905 στην παραδοχή της σωματιδιακής φύσης του φωτός και στα φωτόνια, χωρίς να αναφερθεί σε τεχνικές λεπτομέρειες. Κάθε φωτόνιο έχει συχνότητα και μεταφέρει πακέτο ενέργειας (κβάντο) σύμφωνα με τον κανόνα συχνοτήτων του Plank. Κάτι που επιβεβαίωσε ο Compton το 1923, ο οποίος εξήγησε ότι η σκέδαση των ακτίνων X από ηλεκτρόνια οφείλεται στη σωματιδιακή φύση των κυμάτων (ακτίνων X). Το πείραμα παρουσιάζεται σε απλοποιημένη μορφή ώστε να αποφεύγεται η σύγχυση των μαθητών με τεχνικές λεπτομέρειες των πειραμάτων. Οι μαθητές θα πρέπει να καταλάβουν την αρχή λειτουργίας του πειράματος και που οφείλεται το φαινόμενο Compton.

Στη συνέχεια ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει το νοητικό πείραμα Young, δείχνοντας το σε μια διαφάνεια και εξηγώντας ότι το φαινόμενο συμβολής δηλώνει συμπεριφορά κύματος. Στη συνέχεια διατυπώνεται η υπόθεση de Broglie: *«Αν το φως (που είναι κύμα) παρουσιάζει σωματιδιακές ιδιότητες, τότε μπορεί ένα σωματίδιο να έχει κυματικές ιδιότητες;»*. και δίνεται η εξίσωση de Broglie. Ο εκπαιδευτικός στο σημείο αυτό δίνει το λόγο στους μαθητές να απαντήσουν στο παραπάνω ερώτημα και στη συνέχεια τους καθοδηγεί συμπεράσμα ότι η εξίσωση συνδυάζει μια κυματική ιδιότητα (μήκος κύματος) με μια σωματιδιακή (μάζα) και μια κοινή ιδιότητα σωματιδίου και κύματος (ταχύτητα σωματιδίου, ταχύτητα διάδοσης κύματος). Έπειτα γενικεύοντας καταλήγει στην κυματική θεωρία της ύλης: *«Κάθε κινούμενο μικρό σωματίδιο, π.χ. ηλεκτρόνιο, παρουσιάζει διττή φύση, σωματιδίου και κύματος»*. Στη συνέχεια ο εκπαιδευτικός παρουσιάζει διαφάνειες με τα πειράματα Davison-Germer και Thomson και εξηγεί ότι με τα πειράματα αυτά διαπιστώθηκε η κυματική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων.

Δίνεται ο πίνακας:

Πίνακας 4. Μάζες, ταχύτητες και μήκη κύματος σωμάτων

Σωματίδιο	m / kg	u / m s ⁻¹	λ / Å
Ηλεκτρόνιο	9,1 10 ⁻³¹	1,2 10 ⁵	61
Πρωτόνιο	1,67 10 ⁻²⁷	1,4 10 ⁵	0,03
Άτομο He	7,0 10 ⁻³⁰	1,0 10 ³	0,90
Κόκκος άμμου	1,0 10 ⁻⁸	10,0 10 ⁻²	6,6 10 ⁻¹⁵

Το σημείο αυτό ο εκπαιδευτικός ρωτάει τους μαθητές να δώσουν ορισμένες εξηγήσεις για τις τιμές αυτές. Οι μαθητές θα πρέπει να καταλήξουν στο συμπέρασμα ότι τα μικροσκοπικά αντικείμενα με μεγάλες ταχύτητες, όπως το ηλεκτρόνιο έχουν μεγάλα μήκη κύματος δηλαδή εμφανίζουν κυματικές ιδιότητες. Όσο μεγαλώνει η μάζα και τα αντικείμενα γίνονται ορατά, όπως ο κόκκος άμμου το μήκος κύματος μικραίνει κατά 15 τάξεις μεγέθους και δεν εμφανίζεται πλέον η κυματική συμπεριφορά. Συμπερασματικά, τα αντικείμενα που μπορεί να δει κάποιος λόγω μεγέθους δεν παρουσιάζουν δυϊσμό.

Ο εκπαιδευτικός στη συνέχεια αναφέρεται στη σπουδαιότητα αυτών των πειραμάτων και τις περαιτέρω εφαρμογές τους στην ηλεκτρονική μικροσκοπία και την κρυσταλλογραφία, με την οποία λαμβάνεται η «ακτινογραφία» του DNA. Ρωτάει τώρα τους μαθητές: «Τι είναι τελικά το ηλεκτρόνιο; Σώμα ή κύμα;» Παίρνει τις απαντήσεις από τους μαθητές και τους παρουσιάζει τις επιστημονικές απόψεις που αναπτύχθηκαν στα τέλη του 19^{ου} αιώνα και στον 20^ο γύρω από το θέμα. Στόχος είναι μέσω της γνωσιακής σύγκρουσης να προσεγγίσουν τις νέες επιστημονικές θεωρίες, να τις επεξεργαστούν κριτικά και να τις υιοθετήσουν.

Έπειτα εκτελεί το πείραμα της «κβαντικής γόμας» με σκοπό να δείξει στους μαθητές ότι τα φαινόμενα συμβολής στο πείραμα της διπλής οπής αποδόθηκαν αρχικά στο δυϊσμό, όμως είναι δυνατόν να αποδειχτεί ότι αυτή η συμπεριφορά οφείλεται κατά πάσα πιθανότητα στις συνθήκες διεξαγωγής του πειράματος και όχι σε μια εν γέννη ιδιότητα των σωματιδίων.

Το πείραμα είναι αρκετά απλό και ασφαλές για τα παιδιά. Χρειάζεται ένα laser-pointer και δύο φακούς πολωτικού γυαλιού. Ο εκπαιδευτικός υπενθυμίζει στους μαθητές ότι δεν πρέπει να κοιτάνε την ακτίνα ή να σημαδεύουν κάποιον στα μάτια με το laser. Καρφώνουν μια καρφίτσα (ή ένα κομμάτι σύρμα) σε ένα κομμάτι ξύλο που χρησιμοποιούν για βάση, μεταξύ του laser και του τοίχου και σημαδεύουν με το laser τον τοίχο. Με τον τρόπο αυτό οι μαθητές παρατηρούν φαινόμενα συμβολής. Ο εκπαιδευτικός Εξηγεί πάλι ότι το φαινόμενο συμβολής δηλώνει συμπεριφορά κύματος.

Στη δεύτερη φάση στερεώνεται στην καρφίτσα με μονωτική ταινία δύο πλάκες από πολωτικό γυαλί, προσεχτικά ώστε να μην υπάρξουν κενά μεταξύ τους. Το πολωτικό γυαλί είναι ένα ειδικό πολυμερές που δημιουργεί μικροσκοπικά αυλάκια στην επιφάνεια του γυαλιού. Το υλικό αυτό χρησιμοποιείται στις οθόνες υγρών κρυστάλλων (LCD) Η επικόλληση γίνεται με τη μονωτική στο πάνω και το κάτω

μέρος των πλακών, ώστε να μπορεί να διέρχεται το φως από αυτές. (Αναφορά και μετάβαση στη διεύθυνση: <http://www.scientificamerican.com/slideshow.cfm?id=a-do-it-yourself-quantum-eraser>). Οι μαθητές γυρνάνε τη δεξιά πλάκα ώστε ο άξονάς της να είναι κάθετος στον άξονα της αριστερής. Παρατηρούν ότι τα φαινόμενα συμβολής εξαφανίζονται. Στο σημείο αυτό ο εκπαιδευτικός εξηγεί ότι το φως που περνάει από τη δεξιά πλευρά είναι αντίθετα πολωμένο από το φως που περνάει από την αριστερή πλευρά. Τα φωτόνια που κινούνται δεξιά μπορούν να περάσουν μέσα από το φακό, ενώ αυτά που κινούνται αριστερά δεν μπορούν να περάσουν από το φακό που βρίσκεται αριστερά.

Το φως που εκπέμπεται από μια πηγή φωτός, όπως το laser, ταλαντεύεται προς όλες τις κάθετες προς τη διάδοσή του διευθύνσεις. Όταν το φως περάσει από ένα πολωμένο γυαλί, η ταλάντωσή του αποκτά διεύθυνση παράλληλη προς τον προσανατολισμό της πόλωσης του φακού και έτσι το φως αυτό καλείται πολωμένο. Όταν το πολωμένο φως συναντήσει ένα πολωμένο φακό, του οποίου η πόλωση είναι κάθετα προσανατολισμένη σε σχέση με αυτή του πολωμένου φωτός, τότε το φως δε μπορεί να διέλθει μέσα από τον φακό αυτό. Δηλαδή τα φωτόνια να κινούνται προς συγκεκριμένη κατεύθυνση και έτσι αποτρέπεται η συμβολή. Μοιάζει δηλαδή σαν να «σβήστηκε» η διττή συμπεριφορά του φωτονίου (για αυτό και ονομάζεται κβαντική γόμα).

«Αρχή της αβεβαιότητας»

2^η Διδακτική ώρα

Στόχοι

Πίνακας 5. Στόχοι ενότητας: «Αρχή της αβεβαιότητας»

ΣΤΟΧΟΙ	ΠΑΡΑΓΩΓΗ	ΑΝΑΠΑΡΑΓΩΓΗ
Γνωστικοί	Να αναφέρουν ότι στον κόσμο των υποατομικών σωματιδίων, δεν μπορούν να προσδιοριστούν η διασπορά στην ταχύτητα και τη θέση ταυτόχρονα (αρχή αβεβαιότητας) Να γνωρίζουν ότι η κυματοσυνάρτηση Schrödinger δίνει τη θέση του σωματιδίου σε ορισμένο χρόνο	Να εξηγούν τη σταθερότητα των ατόμων με βάση την αρχή αβεβαιότητας

Συναισθη-ματικοί	Να γνωρίσουν διαφορετικές ερμηνείες που προκύπτουν από την κβαντική θεωρία (Κοπεγχάγη, πείραμα EPR, ανισότητες Bell)	Να χρησιμοποιούν επιχειρήματα και αποδείξεις για τη συμπεριφορά της ύλης σε μικροσκοπικό επίπεδο.
------------------	--	---

Υλικά

Προτζέκτορας, Διαφάνειες

Λεξιλόγιο

Αβεβαιότητα, Απροσδιοριστία, Άτομο Υδρογόνου, QED, Κυματοσυνάρτηση, Πιθανότητα, Γάτα Schrodinger, Σχίσμα στη Φυσική, Σχολές Κοπεγχάγη – Ρεαλιστική, EPR, Κρυμμένες μεταβλητές, Υπέρθεση, Κατάρευση Κυματοσυνάρτησης, Ανισότητες Bell

Προσέγγιση

Σύνδεση με τα προηγούμενα:

Ο εκπαιδευτικός ξεκινάει με την ερώτηση: «εφόσον έχουμε τόσες πολλές ερμηνείες για το ηλεκτρόνιο, γιατί δεν μπορούμε να το κοιτάξουμε με ένα μικροσκόπιο και να σιγουρευτούμε;». Δίνεται η απάντηση, πως για να δει κανείς κάτι πρέπει το μάτι του να συλλάβει το φως από αυτό. Όμως για σωματίδια του μεγέθους του ηλεκτρονίου η αλληλεπίδραση με το φως και κατ' επέκταση το σωματίδιο του φωτός, το φωτόνιο, σημαίνει αλλαγή στις ιδιότητες του ηλεκτρονίου.

Στη συνέχεια δίνεται η εξίσωση της αβεβαιότητας και διατυπώνεται η αρχή της. Ο εκπαιδευτικός εξηγεί ότι η αρχή αυτή απορρέει άμεσα από τον κυματικό χαρακτήρα των σωματιδίων. Για να κατασκευαστεί ένα κύμα περιορισμένο χωρικά, όπως είναι ένα σωματίδιο θα πρέπει να προστεθούν (να γίνει υπέρθεση) πολλών επίπεδων κυμάτων με παραπλήσια μήκη κύματος, άρα και διαφορετικές παραπλήσιες ορμές ($p=h/\lambda$), και όσο πιο εντοπισμένο χωρικά είναι ένα κύμα τόσο πιο μεγάλο είναι το εύρος μηκών κύματος (άρα και των ορμών) που περιέχει (δηλ. που θα πρέπει να χρησιμοποιήσει κανείς για να το κατασκευάσει). Αν θεωρηθεί ότι ένα σωματίδιο περιγράφεται από ένα τέτοιο κύμα, η ταχύτητά του, u , θα είναι ίση με την ταχύτητα ομάδας u_g του κύματος ($u_g=\Delta E/\Delta p=p/m=u$).

Με την αβεβαιότητα εξηγείται η σταθερότητα των ατόμων: Βάσει της αρχής αυτής απαγορεύεται σ' ένα ηλεκτρόνιο να πέσει στον πυρήνα αν και έλκεται απ' αυτόν. Αν συνέβαινε αυτό το ηλεκτρόνιο θα βρισκόταν περιορισμένο σε πάρα πολύ

μικρό χώρο, άρα πολύ μικρό Δx , με αποτέλεσμα το Δp να πάρει πολύ μεγάλες τιμές. Επειδή το ηλεκτρόνιο έχει πολύ μικρή μάζα (περίπου 2.000 φορές μικρότερη του πρωτονίου και του νετρονίου), αυτό θα είχε ως συνέπεια, το ηλεκτρόνιο, να αποκτήσει μια τεράστια ταχύτητα η οποία θα το πέταγε έξω από τον πυρήνα.

Συγκρίνοντας τα δύο σωματίδια (φωτόνιο και ηλεκτρόνιο), φτάνει κανείς στην υπόθεση του Schrödinger ότι *«αν το ηλεκτρόνιο είναι κύμα θα περιγράφεται από μια συνάρτηση (στάσιμου) κύματος, την κυματοσυνάρτηση»*. Στη συνέχεια παρουσιάζεται μια διαφάνεια με την απλουστευμένη μορφή της κυματοσυνάρτησης, προκειμένου να καταλάβουν οι μαθητές την συμπεριφορά του ηλεκτρονίου χωρίς τη χρήση ανώτερων μαθηματικών. Στη συνέχεια εξηγούνται οι ιδιότητες και η φυσική σημασία της κυματοσυνάρτησης. Τονίζεται ότι ο Born πρότεινε τοκυματοπακέτο και εισήγαγε το στατιστικό χαρακτήρα της ψ και γίνεται αναφορά στη κυματοσυνάρτηση.

Στην επόμενη φάση γίνονται ερωτήσεις στους μαθητές «Ποιός είχε τελικά δίκιο; Ο Heisenberg που έλεγε ότι δεν μπορούμε να εντοπίσουμε το ηλεκτρόνιο ή ο Schrödinger με τα στάσιμα κύματα». Από τις απαντήσεις γίνεται συζήτηση για τις διαφορετικές ερμηνείες που υπάρχουν γύρω από την κβαντική. Οι κυριότερες είναι της Σχολής της Κοπεγχάγης και της Ρεαλιστικής Σχολής :

Κατά την ερμηνεία της Κοπεγχάγης, κάθε φυσικό σύστημα εκφράζεται μέσω της κυματοσυνάρτησής του και πριν το μετρήσουμε βρίσκεται σε μία κατάσταση υπέρθεσης. Δηλαδή δεν είναι προσδιορισμένο σε τι κατάσταση βρίσκεται το σύστημα αν δεν το μετρήσουμε. Τη στιγμή της μέτρησης συμβαίνει η «κατάρρευση» της κυματοσυνάρτησης, το σύστημα δηλαδή 'αιχμαλωτίζεται' από τη μέτρησή μας κι εκείνη τη στιγμή μας αποκαλύπτει τη φύση και την ταυτότητά του. Κάποιοι μάλιστα έφτασαν στο σημείο να πουν ότι η κατάρρευση προϋποθέτει την παρουσίας ενός παρατηρητή με συνείδηση.

Αυτή η απροσδιοριστία ενός φυσικού συστήματος πριν την παρατήρηση ξένιζε στους Einstein και Schrödinger, ο οποίοι θεωρούσαν πως τα πράγματα έχουν ιδιότητες πριν ακόμη τα μετρήσουμε. Το νοητικό πείραμα E.P.R. αποδείκνυε ότι αν η Κοπεγχάγεια κβαντική ερμηνεία είναι σωστή, τότε μπορούμε να παράγουμε δύο σωματίδια που να είναι συσχετισμένα μεταξύ τους ώστε να συμβαίνει το εξής: Κάνοντας μια μέτρηση στο ένα από τα δύο συζευγμένα σωματίδια (δηλαδή δύο σωματίδια που έχουν την ίδια κυματοσυνάρτηση – κβαντική συσχέτιση), τότε κατά τη μέτρηση του ενός (κατά την οποία μια ιδιότητά του παίρνει συγκεκριμένη τιμή), η ιδιότητα αυτή αναγκάζεται να πάρει συγκεκριμένη τιμή και στο δεύτερο σωματίδιο.

Μάλιστα ο εξαναγκασμός αυτός γίνεται ακαριαία, όσο μεγάλη και να είναι η απόσταση που χωρίζει τα δύο σωματίδια. Αν μπορεί να συμβεί αυτό, τότε μπορούμε στο πρώτο μεν σωματίδιο να μετρήσουμε την ορμή του και στο δεύτερο τη θέση του. Έτσι είναι δυνατόν να ξέρουμε και την θέση και την ορμή και των δύο σωματιδίων ταυτόχρονα, κάτι το οποίο δεν επιτρέπεται από την απροσδιοριστία. Δηλαδή η Κοπεγχάγεια κβαντική ερμηνεία είναι λανθασμένη.

Αξιολόγηση

Φύλλα αξιολόγησης

Τα φύλλα αξιολόγησης χρησιμοποιούνται στο τέλος του μαθήματος και διαρκούν περίπου 10-15 λεπτά. Με το φύλλο αξιολογείται ο βαθμός κατανόησης από τους μαθητές και ο βαθμός επίτευξης των αρχικών μας στόχων. Γι' αυτό κάθε στόχος συνδέεται με τα ερωτήματα του φύλλου αξιολόγησης.

Δυϊσμός σωματιδίων της ύλης

1. Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

I. Το πείραμα που «ακυρώνει» το δυϊσμό των φωτονίων είναι:

- | | |
|---------------------------------|-------------------------------|
| α. το πείραμα Davisson - Germer | γ. η κβαντική γόμα |
| β. το πείραμα διπλής οπής | δ. το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο |

II. Γιατί είναι τόσο σημαντική η κρυσταλλογραφία;

- α. γιατί με αυτήν μπορούμε να αποδείξουμε το δυϊσμό σώματος-κύματος
- β. γιατί με αυτήν μπορούμε να κατασκευάσουμε μακρομόρια
- γ. γιατί με αυτήν μπορούμε να δούμε μακρομόρια
- δ. τίποτα από όλα αυτά

2. Αντιστοιχίστε τα φαινόμενα, πειράματα και τις υποθέσεις της στήλης I με τα ονόματα των επιστημόνων της στήλης II.

(I)	(II)	(III)
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο	Compton	Κυματικές
Σκέδαση φωτονίων	Einstein	ιδιότητες σωματιδίων
Υπόθεση υλοκυμάτων	Davisson – Germer	Σωματιδιακές
Περίθλαση ηλεκτρονίων	de Broglie	ιδιότητες κυμάτων

3. Υπολογίστε το μήκος κύματος de Broglie ηλεκτρονίων ενέργειας 54eV. Δίνονται η μάζα του ηλεκτρονίου $m=9,11 \cdot 10^{-31} \text{Kg}$ το $e=1,6 \cdot 10^{-19} \text{C}$ και η σταθερά του Plank $h=6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ (στόχος 3).

4. Ποιό είναι το μήκος κύματός σας όταν περπατάτε ($u \sim 1 \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) ; Θα μπορούσε να παρατηρηθεί η κυματική σας φύση περνώντας το κατώφλι 1m μιας πόρτας; (στόχος 6

Αρχή της αβεβαιότητας

1. Βρισκόμαστε σε ένα σκοτεινό δωμάτιο και κάποιος ελευθερώνει μέσα ένα μπαλόνι. Πως μπορούμε να βρούμε που βρίσκεται; Αν το αγγίζουμε τι θα συμβεί στο μπαλόνι;

2. Συμπληρώστε τα κενά:

Αν το ηλεκτρόνιο είναι κύμα τότε πρέπει να περιγράφεται από μια με την οποία προσδιορίζεται η του σε καθορισμένο Αυτήν την πρόταση έκανε ο

3. Με βάση τα όσα ακούσατε στο σημερινό μάθημα εξηγήστε τη σταθερότητα των ατόμων.

4. Κατατάξτε σε κάθε στήλη τις κατάλληλες έννοιες που βρίσκονται παρακάτω

Σχολή της Κοπεγχάγης	Ρεαλιστική Σχολή
----------------------	------------------

Αβεβαιότητα, πείραμα EPR, βεβαιότητα, πιθανοκρατία, ανισότητες Bell, κρυμμένες μεταβλητές, κατάρευση κυματοσυνάρτησης, η ΚΜ δεν είναι πλήρης

5. Δώστε από ένα επιχείρημα που να δικαιολογεί τα παρακάτω:

- αβεβαιότητα στον ταυτόχρονο προσδιορισμό της διασποράς της ορμής και της θέσης
- η κυματοσυνάρτηση περιγράφει την πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο στο χώρο και σε συγκεκριμένο χρόνο
- αν τα ηλεκτρόνια είναι συζευγμένα τότε παραβιάζεται η αβεβαιότητα (στόχος

Δείτε και Διαβάστε στο ίντερνετ

- Ενδιαφέροντα άρθρα στο ίντερνετ

[http://users.sch.gr/apouliassis/Quantum Mechanics/uncertainty.htm](http://users.sch.gr/apouliassis/Quantum_Mechanics/uncertainty.htm)

http://www.chemistry.upatras.gr/~klouras/edu/chem_gen_files/Chemotherapy_files/Measurements_And_Uncertainty_Principle.pdf

<http://users.sch.gr/kassetas/zzzzzzphHEISENBERG.htm>

<http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/30/2/30-2-carson.pdf> (στα αγγλικά)

- Εκπαιδευτικά φίλμ και βίντεο

A. Δυϊσμός σωματιδίου-κύματος

- Κύμα ή σώμα;

<http://www.youtube.com/watch?v=HvEcgKypd3c> (στα αγγλικά)

B. Πείραμα διπλής σχισμής

- Κινούμενα σχέδια με το πείραμα διπλής οπής

<http://www.youtube.com/watch?v=cxRKcxRlBNQ>

- Διάλεξη

<http://www.youtube.com/watch?v=AMBcgVlamoU> (στα αγγλικά)

Γ. Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Ιστορία της αβεβαιότητας του Heisenberg

<http://www.youtube.com/watch?v=7GTCus7KTb0> (στα αγγλικά)

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση.

1. Bent, H. (1984), *Uses and abuses of models in teaching Chemistry*, Journal of Chemical Education, 61, 774 – 777
2. Chang H., (2011), *How Historical Experiments Can Improve Scientific Knowledge and Science Education: The Cases of Boiling Water and Electrochemistry*, Science & Education, 20: 317-341
3. Fletcher, P., R., (1997), “*How Students Learn Quantum Mechanics*”, Sydney: School of Physics, University of Sydney.
4. Johnston, D., Crawford, K. & Fletcher, P. (1998). *Students’ difficulties in learning quantum mechanics*. International Journal of Science Education, 20, 427 – 446.
5. Michael, J., “Misconceptions—what students think they know”, Adv Physiol Educ, 26 (1), 5-6, (2002)
6. MacKinnon, G. (1999), *Students’ understanding of Orbitals: A Survey, Research Report* (Service No ED 433 248 ERIC Document reproduction), Wolfville, Nova Scotia, Canada
7. Petri, J. and Niedderer, H. (1998), *A learning pathway in High – school level quantum atomic physics*, International Journal of Science Education, 20, 1075 – 1088
8. Pospiech G, (2003), *Philosophy and Quantum Mechanics in Science Teaching*, Science & Education, 12: 559-571 Rodriguez A.M., Niaz M., (2002). *How in Spite of the Rhetoric, History of Chemistry has Been Ignored in Presenting Atomic Structure in Textbooks*, Science & Education, 11: 423 - 441
9. Styer, D., F., (1996), “*Common misconceptions regarding quantum mechanics*”, Am. J. Phys., 64 (1), 31-34.
10. Tuvi, I., Nachmias, R., (2001) “*Current state of web sites in science education – Focus on atomic structure*”, Journal of Science Education and Technology, **10**, 293 – 303,
11. Tsaparlis G., Papaphotis G, (2009), *High-School Students’ Conceptual Difficulties and Attempts at Conceptual Change: The Case of Basic Quantum Chemical Concepts*, Science Education, 31, 07, 895-930

12. Tsaparlis G., Papaphotis G, (2002), *Quantum – Chemical Concepts: are they suitable for Secondary students?*, Science Education, 3, 02, 129-144.
13. Tsaparlis G., Stefani C, (2009), *Students' Levels of Explanations, Models, and Misconceptions in Basic Quantum Chemistry: A Phenomenographic Study*, Science & Education, 46, 05, 520-536
14. Wandersee H.J., (1985), *Can the History of Science Help Science Educators Anticipate Students' Misconceptions?*, Journal of Research in Science and Teaching, 23, 07, 581-597
15. <http://phys.udallas.edu/C3P/Preconceptions.pdf>
16. http://school.discoveryeducation.com/teachersguides/pdf/physicalscience/ds/ec_atoms.pdf
17. <http://www.slac.stanford.edu/pubs/beamline/30/2/30-2-carson.pdf>
18. http://www.chemistry.upatras.gr/~klouras/edu/chem_gen_files/Chemotherapy_files/Measurements_And_Uncertainty_Principle.pdf
19. <http://www.aare.edu.au/02pap/har02049.htm>

Ελληνόγλωσση.

1. Κόκκοτας, Π., “Σύγχρονες Προσεγγίσεις στη Διδασκαλία των Φυσικών Επιστημών”, 122-132, Αθήνα, (1998)
2. Κοντογεωργίου – Παπανικολάου Ασημίνα Μ. *Το Κβαντικό Ατομικό Μοντέλο Γιατί δεν το κατανοούν οι μαθητές του Λυκείου και όχι μόνο;*, ISBN: 978-960-92999-2-3
3. Κοντογεωργίου, Α. & Μικρόπουλος, Τ. (2003). *Η διδασκαλία του ατομικού μοντέλου της ύλης*. Από την κλασική στην κβαντομηχανική θεώρηση, Θέματα στην Εκπαίδευση, 4, 25-45.
4. Στεφανή, Χ., Τσαπαρλής, Γ., “Επίπεδα εξηγήσεων και επίπεδα μοντέλων στις βασικές έννοιες της κβαντικής χημείας”, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Διδακτικής των Φ.Ε. και Ν.Τ. στην Εκπαίδευση, 807-818, Φλώρινα, (2009)
5. Τσαπαρλής Γ., Παπαφώτης Γ., *Προβλήματα και παρανοήσεις κατά τη διδασκαλία κβαντομηχανικών εννοιών στη χημεία γ' Λυκείου*, 20^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Χημείας
6. Τσαπαρλής Γ., Παπαφώτης Γ., *Είναι δυνατό να βρεθεί το ηλεκτρόνιο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση του έξω από τον χώρο που ορίζεται ως*

τροχιακό $1s$; Νοηματικές δυσκολίες μαθητών λυκείου για βασικές κβαντομηχανικές έννοιες και προσπάθειες εννοιολογικής αλλαγής, 6^ο Πανελλήνιο Συνέδριο διδακτικής των Φ.Ε και Ν.Τ στην Εκπαίδευση.

Κεφάλαιο 3

3. Εκπαιδευτικό υλικό από την εξέλιξη της Κβαντικής Θεωρίας

Η κβαντική θεωρία διατυπώθηκε και θεμελιώθηκε στις πρώτες δεκαετίες του 20^{ου} αιώνα. Οι επιστήμονες την εποχή εκείνη με την τεχνολογία που είχαν στην διάθεσή τους άρχισαν να παίρνουν τα πρώτα πειραματικά αποτελέσματα από έναν μέχρι τότε άγνωστο κόσμο, τον κόσμο των στοιχειωδών σωματιδίων (μόρια, άτομα, πυρήνες, νετρόνια, ηλεκτρόνια, κ.α.) από τα οποία είναι φτιαγμένος ο κόσμος που βλέπουμε και καταλαβαίνουμε. Ο κόσμος των σωματιδίων αυτών λέγεται μικρόκοσμος.

Τα χαρακτηριστικά του μικρόκοσμου είναι δυο: α) το πάρα πολύ μικρό μέγεθος των σωματιδίων και β) οι μεταξύ τους πάρα πολύ μικρές αποστάσεις. Τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρώντας μεταξύ τους δημιουργούν τα λεγόμενα φαινόμενα του μικρόκοσμου, τα οποία ήταν αδύνατον να ερμηνευτούν με τις θεωρίες της κλασικής μηχανικής, της θερμοδυναμικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, με τις οποίες οι επιστήμονες εξηγούσαν τις θεωρίες του μακρόκοσμου, δηλαδή του κόσμου που μπορεί να δει, να αισθανθεί και να καταλάβει κανείς.

Μερικοί από τους σπουδαιότερους επιστήμονες που ασχολήθηκαν πειραματικά με το μακρόκοσμο είναι ο Thomas Young, ο Max Planck, ο Albert Einstein, ο J.J Thomson, ο Ernest Rutherford, ο Niels Bohr, ο Louis de Broglie, ο Werner Heisenberg, αλλά και ο Erwin Schrödinger.

Μέχρι το 1801 που ο Thomas Young πραγματοποίησε το πολύ γνωστό και ιστορικό πείραμά του, η φύση του φωτός (αν δηλαδή το φώς ήταν κυματικό ή σωματιδιακό φαινόμενο) δεν είχε αποσαφηνιστεί. Η απεικόνιση συμβολής δυο κυμάτων που παρουσιάστηκε από το Young το 1801, είναι μια καθαρή απόδειξη ότι το φώς είναι κυματικό φαινόμενο. Όμως η φυσική του εικοστού αιώνα ανέτρεψε την αντίληψη που δημιουργήθηκε για τη κυματική φύση του φωτός, αποδεικνύοντας ο Max Planck ότι το φώς αποτελείται από πακέτα κβαντισμένης ενέργειας, δηλαδή τα φωτόνια, τα οποία παρουσιάζουν σωματιδιακή συμπεριφορά.

Τα πειράματα αλλά και οι ερμηνείες της κβαντικής φυσικής άρχισαν από τη μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος. Το μέλαν σώμα, σε οποιαδήποτε θερμοκρασία και αν βρίσκεται εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σε όλο το φάσμα της. Το μεγαλύτερο όμως τμήμα

της εκπεμπόμενης ενέργειας περιορίζεται σε μια στενή περιοχή, με “αιχμή” κάποιο μήκος κύματος ($\lambda_{\max}$) διαφορετικό για κάθε θερμοκρασία.

Η αιτιολόγηση του φαινομένου δόθηκε από τον Max Planck, το 1900, θεωρώντας ότι η ακτινοβολούμενη ενέργεια αποτελείται από στοιχειώδεις μονάδες ενέργειας, τα “κβάντα” ενέργειας. Η θεώρηση αυτή ήρθε σε σύγκρουση με την κλασική φυσική, η οποία στηριζόταν στην αρχή συνέχειας της ενέργειας. Η προσέγγιση αυτή του Planck άνοιγε το δρόμο για μια νέα φυσική.

Στη συνέχεια, το 1950, ο Einstein εργαζόμενος στα θέματα αυτά, δεν άργησε να αντιληφθεί την μεγάλη αξία της εργασίας του Planck και επεκτείνοντας τη θεωρία αυτή, διατύπωσε ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν εκπέμπεται μόνο κατά κβάντα ενέργειας, τα οποία ονόμασε φωτόνια, αλλά και διαδίδεται στο χώρο με ασυνεχή τρόπο. Έτσι με τις ιδέες αυτές μπόρεσε να ερμηνεύσει το φαινόμενο Compton.

Στη συνέχεια, το 1987 ο J.J. Thomson μέτρησε το λόγο του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου και αναγνώρισε το ηλεκτρόνιο ως νέο στοιχειώδες σωματίδιο της φύσης.

Ο Νεοζηλανδός πυρηνικός φυσικός Ernest Rutherford, το 1911 αναλύοντας τα πειράματα της σκεδάσεως σωματιδίων α , που έπεφταν πάνω σε λεπτό μεταλλικό φύλλο, διαπίστωσε ότι όλη σχεδόν η μάζα και ολόκληρο το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή κεντρική περιοχή που ο Rutherford αποκάλεσε “πυρήνα” του ατόμου. Παρόλη την προσπάθεια του ο Rutherford να ερμηνεύσει την σκέδαση των άλφα σωματιδίων παρουσιάστηκε πρόβλημα ως προς την σταθερότητα του ατόμου

Το 1913 όμως ο Δανός φυσικός Niels Bohr προσπαθεί να βρει λύση για το πρόβλημα της σταθερότητας του ατόμου και να εξηγήσει τα φάσματα εκπομπής και απορροφήσεως.

Λίγο αργότερα, το 1924, ο Γάλλος φυσικός Louis de Broglie, διατύπωσε ένα αξίωμα το οποίο επαληθεύτηκε και πειραματικά, σύμφωνα με το οποίο κάθε κινούμενο σωματίδιο μπορεί να συμπεριφερθεί σαν κύμα ορισμένου μήκους κύματος που κινείται προς τη διεύθυνση της κινήσεως του σωματιδίου. Έτσι με το δυικό χαρακτήρα της ύλης, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και σωματίδιο ταυτόχρονα, που δόθηκε από τους Planck, Einstein και Louis de Broglie, ερμηνεύτηκαν πολλά κλασικά φαινόμενα.

Το 1927 ο Heisenberg διατυπώνει την αρχή της αβεβαιότητας. Η κλασική φυσική δέχεται ότι είναι δυνατό να μετρηθεί η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου με όση ακρίβεια ορίσει ένας ερευνητής. Οι πιθανές αποκλίσεις, είναι αποτέλεσμα των οργάνων μέτρησης.

Σχεδόν ταυτόχρονα ο Schrödinger εισήγαγε με τις θεωρίες του την Κβαντομηχανική ή Κβαντική θεωρία. Οι θεωρίες των δυο επιστημόνων Schrödinger και Heisenberg είναι ισοδύναμες και διαφέρουν μόνο ως προς το μαθηματικό τρόπο αντιμετώπισης των προβλημάτων.

Συμπερασματικά, η Κβαντική θεωρία είναι ένας κλάδος της Φυσικής που ασχολείται με τη συμπεριφορά και τις αλληλεπιδράσεις του μικρόκοσμου, με σκοπό τη καλύτερη κατανόηση των νόμων που τους διέπουν.

3.1 Το πείραμα των δυο σχισμών – Thomas Young.

Μέχρι το 1801 που ο Thomas Young πραγματοποίησε το πολύ γνωστό και ιστορικό πείραμά του, η φύση του φωτός, αν δηλαδή το φώς ήταν κυματικό η



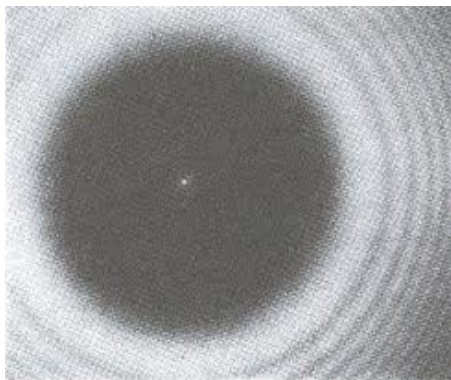
Εικόνα 1: Ο Thomas Young (1773 – 1829) ήταν ένα παιδί θαύμα που διάβαζε από δυο χρονών. Στα νεανικά του χρόνια έμαθε να μιλά δώδεκα γλώσσες, μεταξύ των οποίων ελληνικά, λατινικά, γαλλικά, εβραϊκά, γερμανικά, αραβικά και τούρκικα. Όταν τελείωσε το σχολείο σπούδασε ιατρική στο Κέμπριτζ, άνοιξε ιατρείο στο Λονδίνο και άρχισε να ασκεί το επάγγελμα του γιατρού. Το μεγάλο όμως μέρος της δραστηριότητάς του το απορροφούσε η πραγματοποίηση πειραμάτων, κυρίως στην Οπτική. Το πιο σημαντικό από αυτά έχει μείνει στην ιστορία της Φυσικής ως το πείραμα των δύο σχισμών. Ήταν επίσης και ο πρώτος που σημείωσε πρόοδο στην αποκρυπτογράφηση της ιερογλυφικής γραφής των αρχαίων Αιγυπτίων.

σωματιδιακό φαινόμενο, δεν είχε αποσαφηνιστεί. Το 17^ο αιώνα, ο Ισαάκ Νεύτων για παράδειγμα, διατύπωσε την άποψη ότι το φώς μπορούσε να θεωρηθεί ως ρεύμα σωματιδίων, σαν σφαίρες δηλαδή που εκτοξεύονται από ένα πολυβόλο, ενώ ο Ολλανδός φυσικός Huygens θεωρούσε τη φύση του φωτός κυματική.

Η θεωρία του Νεύτωνα μπορούσε να εξηγήσει τα φαινόμενα της ανάκλασης και διάθλασης, δεν μπορούσε όμως να ερμηνεύσει το φαινόμενο της συμβολής, κατά το οποίο εμφανίζονται χρωματιστές λωρίδες στην επιφάνεια λεπτών υμενίων, όπως π.χ. στις

σαπουνόφουσκες ή στο πετρέλαιο που καλύπτει μια υδάτινη επιφάνεια. Από την άλλη πλευρά, η θεωρία του Christiaan Huygens, μπορούσε να ερμηνεύσει τόσο την ανάκλαση και τη διάθλαση όσο και τη συμβολή. Δεν μπορούσε όμως να ερμηνεύσει το φαινόμενο της πόλωσης αλλά ούτε μπορούσε να καθορίσει ποιο είναι το μέσο στο οποίο διαδίδονται τα φωτεινά κύματα.

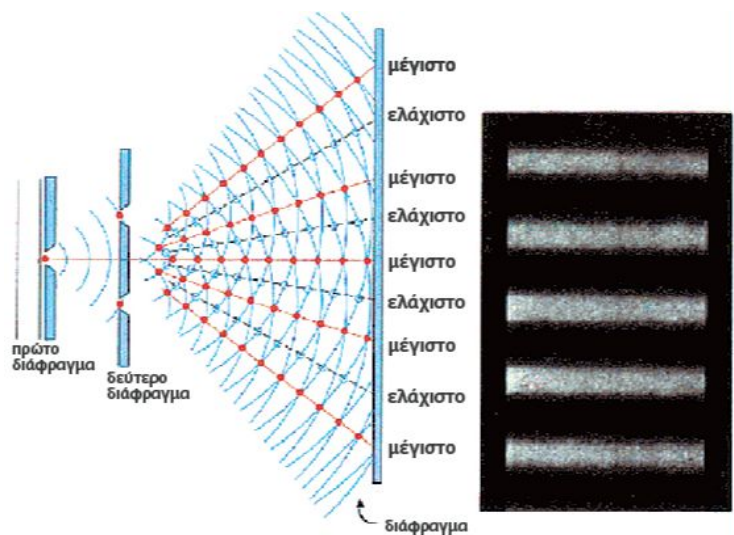
Τη λύση λοιπόν σε όλα τα παραπάνω ζητήματα την έδωσε ο ερασιτέχνης φυσικός Thomas Young με το πείραμα της “διπλής σχισμής”. Στο πείραμα αυτό ο Young χρησιμοποίησε ένα διάφραγμα με δυο σχισμές για να έχει κύματα φωτός από δυο πηγές που θα μπορούσαν να συμβάλουν και να παραγάγουν τους περίφημους «», μια εναλλαγή φωτεινών και σκοτεινών γραμμών.



Εικόνα 2: Περίθλασης που δημιουργεί ένα μικρό κέρμα. Στο κέντρο υπάρχει μια φωτεινή κηλίδα, κατόπιν η σκιά ακολουθούμενη από κυκλικούς κροσσούς στα όρια της και μετά, έξω από την σκιά, υπάρχει άλλη μια σειρά κυκλικών κροσσών.

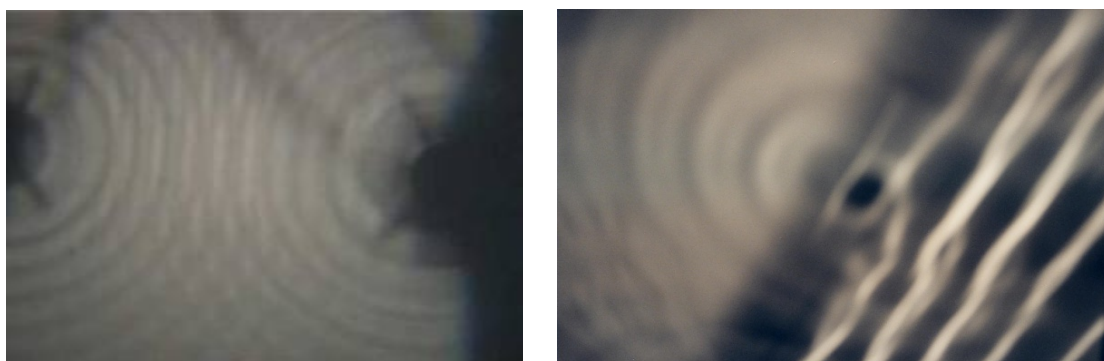
3.1.1 Το πείραμα της «διπλής σχισμής».

Στο πείραμα αυτό, της διπλής σχισμής ο Young χρησιμοποίησε δύο διαφράγματα, ένα με χαραγμένη μία σχισμή και ένα άλλο με χαραγμένες δύο σχισμές. Τοποθέτησε τα δύο διαφράγματα παράλληλα μεταξύ τους και προσανατόλισε το δεύτερο έτσι ώστε οι δύο σχισμές του να είναι παράλληλες με τη σχισμή του πρώτου. Τοποθέτησε μια πηγή φωτός πίσω από το διάφραγμα με τη μία σχισμή και παρατήρησε ότι στον τοίχο απέναντι από το δεύτερο διάφραγμα εμφανίστηκε μία ταινία από χρωματιστές και σκοτεινές γραμμές, που συνήθως ονομάζονται συνολικά κροσσοί συμβολής. Όταν αφαιρούσε το διάφραγμα με τις δύο σχισμές, εξαφανίζονταν και οι κροσσοί αφήνοντας στη θέση τους λευκό φως και όταν το τοποθετούσε ξανά, εμφανίζονταν και πάλι οι κροσσοί. Η ερμηνεία που έδωσε ήταν ότι αυτό που παρατηρούσε ήταν το φαινόμενο συμβολής δύο πηγών κυμάτων, η καθεμιά από τις οποίες συνέπιπτε με μία από τις σχισμές του δεύτερου διαφράγματος.



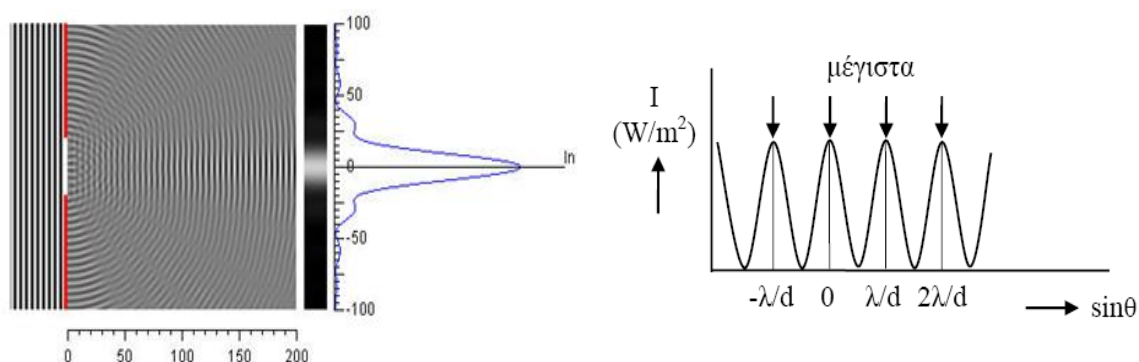
Σχήμα 1: Το πείραμα των δύο σχισμών. Αριστερά η διάταξη, δεξιά η εικόνα συμβολής.

Το φαινόμενο της συμβολής είναι εύκολο να παρατηρηθεί με δύο κύματα που διαδίδονται στην επιφάνεια ενός υγρού (πχ όταν πέσει ένα βότσαλο στο νερό της θάλασσας δημιουργούνται κύματα). Κάθε στιγμή τα δύο κύματα προστίθενται, έτσι ώστε το ύψος σε ένα σημείο να είναι ίσο με το άθροισμα των υψών του κάθε κύματος. Όταν σε ένα σημείο φθάσουν δύο κορυφές ή δύο κοιλάδες ταυτόχρονα, τότε το κύμα που παρατηρείται έχει διπλάσιο ύψος ή βάθος. Όταν όμως φθάσει η κορυφή του ενός κύματος και η κοιλάδα του άλλου, τότε η επιφάνεια μένει ήρεμη, σαν να μην υπάρχει καθόλου κυματισμός. Αυτή η κατάσταση αντιστοιχεί στις σκοτεινές γραμμές που παρατηρούσε ο Young, όπου δεν υπάρχει φως. Από τη διαφορετική θέση των χρωματιστών γραμμών ο Young κατέληξε στο συμπέρασμα ότι το κάθε χρώμα αντιστοιχεί σε κύματα διαφορετικού μήκους κύματος.



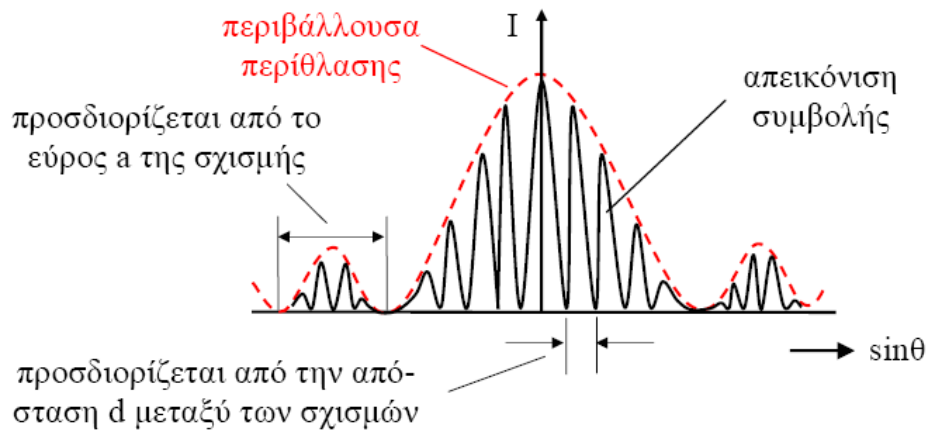
Εικόνα 3: Χαρακτηριστικές εικόνες κυματικών φαινομένων με υδάτινα κύματα. Η αριστερή εικόνα δείχνει τη συμβολή κύματος που περνά από τις δυο σχισμές και η δεξιά εικόνα δείχνει τη διάδοση ενός κύματος από μια μόνο σχισμή.

Κατά τη δημιουργία του κάθε κύματος, η διεύθυνση στην οποία σχηματίζονται τα μέγιστα και τα ελάχιστα, εξαρτάται από το μήκος κύματος λ της ακτινοβολία που προσπίπτει στο επίπεδο των σχισμών. Στην κατανομή της οπτικής έντασης του παρακάτω σχήματος το εύρος a των δυο σχισμών είναι πάρα πολύ μικρό σε σχέση με το μήκος κύματος λ της ακτινοβολίας που προσπίπτει στις σχισμές (δηλαδή $a \ll \lambda$). Το γεγονός αυτό διαμορφώνει τις σχισμές ως δυο σημειακές πηγές. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την ισότροπη κατανομή ακτινοβολίας από κάθε σχισμή (Σχήμα 3).



Σχήμα 3: Αριστερή εικόνα: Ένα διάγραμμα του πειράματος της διπλής σχισμής με υδάτινα κύματα. Δεξιά εικόνα: Ιδανική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας κατά μήκος των κροσσών συμβολής, ως συνάρτηση της γωνίας θ . Η εικόνα αυτή λαμβάνεται όταν το εύρος των δυο σχισμών είναι πολύ μικρό.

Στην περίπτωση αυτή η ακτινοβολία δεν είναι αρκετά ισχυρή, με αποτέλεσμα να απαιτούνται σχισμές με μεγαλύτερου εύρους a . Τέτοιου είδους σχισμές δίνουν ανισότροπη γωνιακή κατανομή, δηλαδή η κάθε σχισμή θα δημιουργεί μια απεικόνιση της έντασης της ακτινοβολίας η οποία θα αντιστοιχεί σε περίθλαση απλής σχισμής. Αυτό διαμορφώνει κατά πλάτος την απεικόνιση της συμβολής των κυμάτων που προέρχονται από τις δυο σχισμές.



Σχήμα 4: Η διαμόρφωση πλάτους της συμβολής δημιουργείται από την περίθλαση (κόκκινη καμπύλη).

Για να παρατηρηθούν όμως φαινόμενα συμβολής, οι δυο πηγές θα πρέπει να είναι σύμφωνες, δηλαδή να έχουν την ίδια φάση ή σταθερή διαφορά φάσης και να έχουν την ίδια συχνότητα.

Στην περίπτωση που η μονοχρωματική ακτινοβολία δεν είναι μονοχρωματική αλλά παρουσιάζει ένα διευρυμένο φάσμα συχνοτήτων οι κροσσοί συμβολής, μετά το κεντρικό παρουσιάζονται ασαφείς, ως μια ταινία χρωμάτων, όπου τα μέγιστα και τα ελάχιστα δεν είναι διακριτά (εικόνα 5). Αυτό συμβαίνει γιατί κάθε συχνότητα (μήκος κύματος), σχηματίζει τα μέγιστα και τα ελάχιστα, σε διαφορετικές διευθύνσεις, ανεξάρτητα από τις υπόλοιπες συχνότητες, με αποτέλεσμα να υπάρχει μια αλληλοεπικάλυψη όπου μέγιστα μιας συχνότητας, συμπίπτουν με τα μέγιστα μιας άλλης συχνότητας.

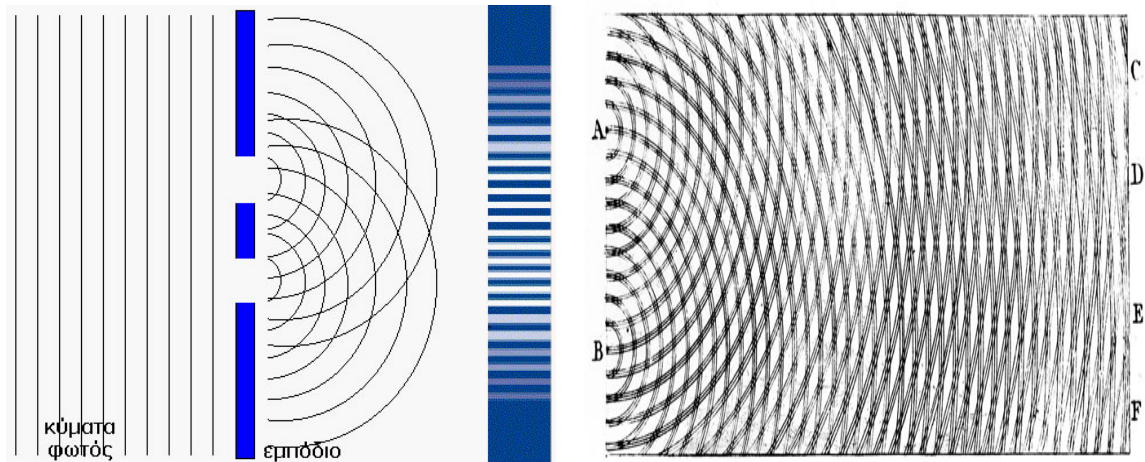


Εικόνα 5: Στο επάνω μέρος της εικόνας παρατηρούμε κροσσούς συμβολής μονοχρωματικής ακτινοβολίας (πράσινο), όπου τα όρια μεγίστων – ελαχίστων, σχηματίζονται καθαρά. Στο κάτω μέρος παρατηρούμε τους κροσσούς συμβολής από πηγή λευκού φωτός. Παρατηρείστε ότι μόνο ο κεντρικός κροσσός διαφαίνεται καθαρά, ενώ οι υπόλοιποι είναι τελείως ασαφείς.

Η συνολική ένταση I στο σημείο παρατήρησης P είναι συνάρτηση του $\cos^2(\delta/2)$. Ειδικότερα, για την περίπτωση διπλής σχισμής αποδεικνύεται ότι:

$$I_{ολ} = 4I_0 \cos^2\left(\frac{\delta}{2}\right)$$

όπου I_0 η ένταση κάθε κύματος χωριστά.



Σχήμα 5: Πείραμα συμβολής με κύματα. Τα κύματα που φεύγουν από τις δύο σχισμές κάποτε συναντιούνται. Μερικές φορές συμβαίνει να είναι συγχρονισμένα και άλλες φορές είναι λίγο ή τελείως ασυντόνιστα. Τα συγχρονισμένα κύματα θα προστεθούν, ενώ τα εντελώς ασυντόνιστα θα αλληλοεξουδετερωθούν. Πέφτοντας στην οθόνη, το φως θα δημιουργήσει εναλλασσόμενους σκοτεινούς και φωτεινούς "κροσσούς", που αντιστοιχούν σε καταστρεπτική και ενισχυτική συμβολή.

Στην τελική μορφή του πειράματος ο Young τοποθέτησε χρωματιστά φίλτρα πριν από το διάφραγμα με την απλή σχισμή και πέτυχε να υπολογίσει το μήκος κύματος του κάθε χρώματος. Μετρώντας την απόσταση των δύο σχισμών, την απόσταση του δεύτερου διαφράγματος από τον τοίχο και την απόσταση μεταξύ δύο διαδοχικών σκοτεινών κροσσών, βρήκε ότι το κόκκινο χρώμα έχει μήκος κύματος 0,7 χιλιοστά του χιλιοστομέτρου και το ιώδες 0,4. Επεκτείνοντας μάλιστα την αναλογία των φωτεινών κυμάτων με τα κύματα επιφάνειας μπόρεσε να ερμηνεύσει και το φαινόμενο της πόλωσης. Υπέθεσε ότι η κύμανση του μέσου στο οποίο διαδίδεται το φως είναι κάθετη προς τη διεύθυνση διάδοσης, οπότε υπάρχουν δύο διευθύνσεις κύμανσης κάθετες μεταξύ τους, η καθεμιά από τις οποίες αντιστοιχεί σε μια ακτίνα με ξεχωριστές ιδιότητες.

Η απεικόνιση συμβολής δυο συμφώνων κυμάτων που παρουσιάστηκε από το Young το 1801, είναι μια καθαρή απόδειξη ότι το φώς είναι κυματικό φαινόμενο. Όμως η φυσική του εικοστού αιώνα ανέτρεψε την αντίληψη που δημιουργήθηκε για τη κυματική φύση του φωτός, αποδεικνύοντας ο Max Plank ότι το φώς αποτελείται από πακέτα κβαντισμένης ενέργειας, δηλαδή τα φωτόνια, τα οποία παρουσιάζουν σωματιδιακή συμπεριφορά.

Βιβλιογραφία.

Ξενόγλωσση.

1. Andrew Robinson, The Last Man Who Knew Everything: Thomas Young, the Anonymous Polymath Who Proved Newton Wrong, Explained How We See, Cured the Sick and Deciphered the Rosetta Stone, Oneworld Publications
2. Francis A Jenkins, Harvey E White, Francis Jenkins, Harvey White, Fundamentals of Optics, McGraw-Hill Science/Engineering/Math, 2001.

Ηλεκτρονική.

1. <http://physics.teiath.gr/physics/pdf/O14.pdf>
2. [http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%85%CE%BC%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AE_\(%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE\)](http://el.wikipedia.org/wiki/%CE%A3%CF%85%CE%BC%CE%B2%CE%BF%CE%BB%CE%AE_(%CF%86%CF%85%CF%83%CE%B9%CE%BA%CE%AE))
3. [http://www.chemistry.uoc.gr/frudakis/Courses/Physics_II/04-Introduction to Quantum Mechanics.pdf](http://www.chemistry.uoc.gr/frudakis/Courses/Physics_II/04-Introduction_to_Quantum_Mechanics.pdf)
4. <http://users.sch.gr/avelentz/CD%20METRSH%20h/theor%20symbol.htm>
5. http://www.studyphysics.ca/newnotes/20/unit04_light/chp1719_light/lesson58.htm
6. <http://www.tmth.gr/sciencerelated/49-fysiki/277-o-young-kai-oi-duo-sxismes>
7. http://scienceblogs.com/builtonfacts/2010/03/a_brief_history_of_light.php
8. <http://users.sch.gr/apouliassis/ondas/redes/redes.htm>

Ελληνόγλωσση.

1. Ε.Ν Οικονόμου, Η Φυσική Σήμερα, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 1986.
2. Roger Penrose, Ο Νέος Αυτοκράτορας (;), Εκδόσεις Γκοβόστη, Αθήνα
3. Tony Hey & Patrick Walters, Το κβαντικό σύμπαν, Εκδόσεις Κάτοπτρο, Αθήνα 1992.

3.2. Η Γένεση της Κβαντικής Μηχανικής.

Από τη σκοπιά του Planck και των συγχρόνων του, ήταν φυσικό να αναζητείται μια εξήγηση του νόμου της εντροπίας στην ηλεκτροδυναμική του Maxwell. Η θεωρία του Maxwell ήταν θεμελιώδης και υποτίθετο ότι ερμήνευε τη



Εικόνα 6: Ο Max Planck (1858-1947) γύρω στο 1900. Με τη ριζοσπαστική λύση που έδωσε στο πρόβλημα της ακτινοβολίας από θερμά σώματα, εισήγαγε για πρώτη φορά κβαντικές ιδέες. Η σημασία του έργου του αναγνωρίστηκε όταν απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ, το 1918, αλλά ο Planck δεν ήταν ευχαριστημένος με την Κβαντική Επανάσταση που εγκαινίασε το έργο του.

Ο Ζόμερφελντ αναφερόμενος στο ότι το κβάντο είναι ιδέα του Πλανκ έγραφε σ' ένα γράμμα του προς αυτόν:

‘Παρθένο χώμα εσείς οργανώνετε, που εγώ εκεί δεν έκανα άλλο από το να ανθολογώ’.

Και ο Πλανκ του απαντούσε:

‘Ανθ και εγώ μαζεύω όπως και εσείς. Λοιπόν τώρα ας συνταιριαστούν, ανταλλαγή ας γίνει, ωραία, των λουλουδιών και ένα στεφάνι υπέρλαμπρο μ’ αυτά ας πλεχτεί’.

συμπεριφορά των μικροσκοπικών ταλαντωτών που παράγουν την ακτινοβολούμενη θερμότητα από ένα μαύρο σώμα. Ο Planck αρχικά πίστευε ότι είχε δικαιολογήσει την μη αντιστρεψιμότητα της διαδικασίας ακτινοβολίας μέσω της έλλειψης συμμετρίας ως προς το χρόνο στις εξισώσεις του Maxwell. Δηλαδή ότι οι νόμοι της ηλεκτροδυναμικής διακρίνουν μεταξύ παρόντος και παρελθόντος, μεταξύ χρόνου που κυλάει προς τα εμπρός και χρόνου που κυλάει προς τα πίσω. Όμως το 1897 ο Boltzmann κατέρριψε αυτό το επιχείρημα. Ο Boltzmann έδειξε ότι η ηλεκτροδυναμική δεν εξασφαλίζει “βέλος του χρόνου” περισσότερο από ότι η μηχανική. Ο Planck έπρεπε να βρει άλλο δρόμο για να δικαιολογήσει την μη αντιστρεπτότητα.

Η μελέτη της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είχε ξεκινήσει το 1859, όταν ο Robert Kirchhoff, ο προκάτοχος της έδρας του Planck στο Βερολίνο σχολίαζε ότι αυτή η ακτινοβολία ήταν θεμελιώδους φύσης. Την δεκαετία του 1890 αρκετοί πειραματικοί και θεωρητικοί φυσικοί ερευνούσαν την φασματική κατανομή της ακτινοβολίας. Σημαντική πρόοδος είχε επιτελεσθεί το 1896 όταν ο Wien βρήκε ένα μαθηματικό νόμο που ήταν σε συμφωνία με τις ακριβείς μετρήσεις που εκτελούνταν στο Physikalisch-Technische Reichsanstalt στο Βερολίνο.

Σύμφωνα με τον Wien, η ένταση κάθε περιοχής του φάσματος, u , δηλαδή η πυκνότητα ενέργειας ανά μονάδα συχνότητας εξαρτάται από τη συχνότητα, f , και την θερμοκρασία, T , σύμφωνα με τη σχέση $u(f,T) = af^5 \exp(bf/T) - 1$, όπου a και b

είναι σταθερές που προσδιορίζονται εμπειρικά. Ο νόμος του Wien εστερείτο όμως μιας ικανοποιητικής θεωρητικής βάσης και γι αυτόν τον λόγο δεν έγινε αποδεκτός από τον Planck. Βέβαια η μη ικανοποίηση του Planck δεν οφειλόταν στον ίδιο τον τύπο του Wien τον οποίο αποδεχόταν πλήρως αλλά στον τρόπο παραγωγής του από τον Wien. Ο Planck δεν ενδιαφερόταν να παράγει έναν σωστό μεν αλλά εμπειρικό νόμο, αλλά να θεμελιώσει μια ισχυρή αποδείξη του. Κατ' αυτόν τον τρόπο πίστευε, ότι θα μπορούσε να δικαιολογήσει το νόμο της εντροπίας.

Οδηγημένος από την κινητική θεωρία των αερίων του Boltzmann, ο Planck διατύπωσε ότι αποκαλούσε «αρχή στοιχειωδών διαταραχών» η οποία δεν στηριζόταν ούτε στην μηχανική ούτε στην ηλεκτροδυναμική. Την χρησιμοποίησε για να ορίσει



Εικόνα 7: Wilhelm Wien (1864-1928). Γερμανός Φυσικός ο οποίος εισήγαγε τον νόμο Wien χρησιμοποιώντας τις θεωρίες που σχετίζονταν με τη θερμότητα και τον ηλεκτρομαγνητισμό.



Εικόνα 8: Η ιστορική φωτογραφία αναπαριστά μερικούς από τους συμμετέχοντες στο 1st Solvay Conference, Brussels, 1911: Καθιστοί (Α-Δ) W. Nernst, M. Brillouin, E. Solvay, H. Lorentz, E. Warburg, J. Perrin, W. Wien, M. Curie, και H. Poincaré. Όρθιοι (Α-Δ): R. Goldschmidt, M. Planck, H. Rubens, A. Sommerfeld, F. Lindemann, M. de Broglie, M. Knudsen, F. Hasenöhl, G. Hostelet, E. Herzen, J.H. Jeans, E. Rutherford, H. Kamerlingh Onnes, A. Einstein και P. Langevin.

την εντροπία ενός ιδανικού ταλαντωτή (διπόλου) αλλά ήταν προσεκτικός να μην ταυτίσει τέτοιους ταλαντωτές με συγκεκριμένα άτομα ή μόρια. Το 1899 ο Planck βρήκε μια έκφραση για την εντροπία των ταλαντωτών από την οποία προκύπτει ο νόμος του Wien. Ο νόμος αυτός που μερικές φορές αναφέρεται σαν νόμος των Wien-Planck είχε πια αποκτήσει μια θεμελιώδη υπόσταση. Ο Planck ήταν ικανοποιημένος. Τελικά, ο νόμος είχε το πρόσθετο πιστοποιητικό ότι συμφωνούσε θαυμάσια με τις μετρήσεις. Ή τουλάχιστον έτσι φαινόταν.

Η αρμονία μεταξύ θεωρίας και πειράματος δεν διάρκεσε πολύ. Προς κατάπληξη του Planck, τα πειράματα που έγιναν στο Βερολίνο έδειξαν ότι ο νόμος των Wien-Planck δεν περιγράφει σωστά το φάσμα στις πολύ χαμηλές συχνότητες. Κάτι πήγαινε λάθος, και ο Planck έπρεπε να επιστρέψει στο γραφείο του για να ψάξει

γιατί η φαινομενικά σωστή απόδειξη παρήγαγε ένα λανθασμένο αποτέλεσμα. Το πρόβλημα του φαινόταν ότι βρισκόταν στον ορισμό της εντροπίας του ταλαντωτή.

Με μια αναθεωρημένη έκφραση για την εντροπία ενός απλού ταλαντωτή, ο Planck πέτυχε ένα νέο νόμο της φασματικής κατανομής την οποία παρουσίασε σε μια συνάντηση της Ένωσης Γερμανών Φυσικών στις 19 Οκτωβρίου του 1900.

3.2.1 Θερμική Ακτινοβολία και Ακτινοβολία του Μέλανος σώματος.

Οι ρίζες του επαναστατικού ισχυρισμού του Max Planck, ότι το φως εκπέμπεται και απορροφάται μόνο με τη μορφή μικρών χωριστών ποσοτήτων ενέργειας, προχωρούν πίσω στις πολύ προγενέστερες έρευνες του Boltzmann, του Maxwell, του Gibbs και άλλων για τη στατιστική περιγραφή των θερμικών ιδιοτήτων των υλικών σωμάτων.

Ένα από τα πρώτα φαινόμενα με τα οποία διαπιστώθηκε η αδυναμία της κλασικής φυσικής, ήταν το φαινόμενο της «**ακτινοβολίας του μέλανος σώματος**». Το φαινόμενο αυτό σχετίζεται με τη θερμοδυναμική ανταλλαγή ενέργειας ανάμεσα στο ηλεκτρομαγνητικό πεδίο και στην ύλη. Κάθε σώμα δηλαδή, με θερμοκρασία ελάχιστα μεγαλύτερη του απόλυτου μηδενός εκπέμπει θερμική ακτινοβολία, η οποία δεν γίνεται αισθητή, λόγω της χαμηλής έντασης και των χαμηλών μήκων κύματος τα οποία πέφτουν στην περιοχή των ραδιοφωνικών κυμάτων. Αντιθέτως όμως, η θερμική ακτινοβολία των πυρακτωμένων σωμάτων γίνεται αισθητή όχι μόνο ως θερμότητα αλλά και ως ορατό φως με χαρακτηριστικό κοκκινωπό ή κιτρινωπό χρώμα.

Η θερμική ακτινοβολία με την πάροδο του χρόνου χαρακτηρίστηκε ενδιαφέρουσα για τους εξής λόγους: όλα τα πυρακτωμένα σώματα σε μια ισχυρή εστία φωτιάς έχουν το ίδιο χαρακτηριστικό χρώμα. Είναι όλα «κοκκινωπά» ή όλα «κιτρινωπά», ανάλογα με την ένταση φωτιάς. Για παράδειγμα, στην εστία του σιδερά, τα κάρβουνα είναι αδύνατον να διακριθούν οπτικά από το πυρακτωμένο σίδηρο ή από οποιοδήποτε άλλο αντικείμενο που βρίσκεται στην ίδια εστία. Στο φούρνο ενός υαλουργείου η εικόνα είναι πιο εντυπωσιακή. Από τα πυρίμαχα τοιχώματα του φούρνου έως τα γυάλινα αντικείμενα που εισάγονται εκεί είναι όλα λουσμένα με το κίτρινο φως που εκπέμπουν. Η οπτική τους διάκριση είναι αδύνατη. Σύμφωνα με τα παραπάνω, *όλα τα πυρακτωμένα αντικείμενα με την ίδια θερμοκρασία, εκπέμπουν την ίδια ακριβώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, ανεξάρτητα από τη χημική τους σύσταση ή άλλες διαφορές στις φυσικές τους ιδιότητες*. Τόσο η ένταση, όσο και η χρωματική σύνθεση, δηλαδή η φασματική κατανομή, αυτής της ακτινοβολίας φαίνεται να είναι

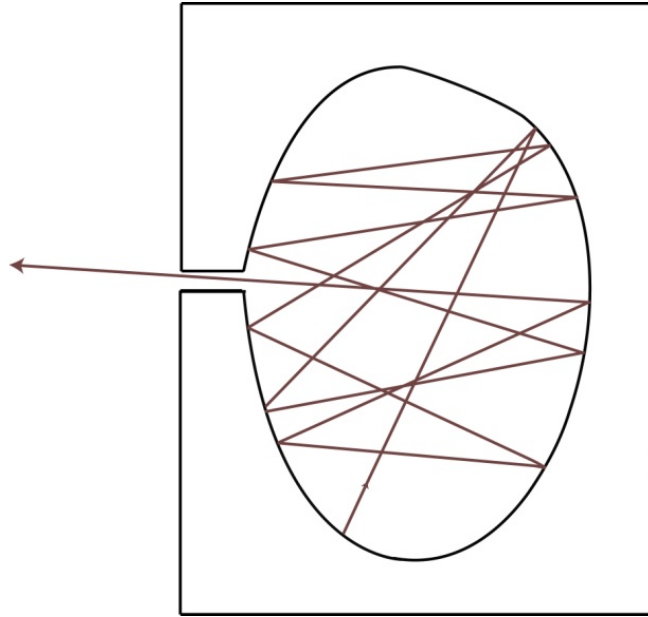
ανεξάρτητη από το υλικό του σώματος και να εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία του.

Η «ακτινοβολία του μέλανος σώματος» πήρε το όνομά της για τους εξής λόγους: στα περισσότερα πυκνά υλικά η διαδικασία θερμοποίησης είναι αυτονόητη, διότι το φως που εκπέμπεται στο εσωτερικό του σώματος από τα άτομά του, πριν φτάσει στην επιφάνειά του και εκπεμφθεί, έχει αλληλεπιδράσει με άλλα άτομα, αλλάζοντας κατεύθυνση ή συχνότητα κάθε φορά, οπότε η πλήρης θερμοποίησή του είναι εξασφαλισμένη. Σε ορισμένες περιοχές συχνότητων όμως, π.χ. στα ραδιοκύματα ή σε συγκεκριμένες συχνότητες του ορατού φάσματος, ένα σώμα μπορεί να είναι διαφανές, οπότε η θερμοποίηση της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα είναι αδύνατη.

Ένα μαύρο σώμα έχει την ιδιότητα να απορροφά έντονα όλες τις ορατές ακτινοβολίες που πέφτουν στην επιφάνειά του, άρα αλληλεπιδρά ισχυρά μαζί τους και όταν τις εκπέμπει εξασφαλίζει την πλήρη θερμοποίηση. Το μέλαν σώμα όμως, πρέπει να έχει την ιδιότητα αυτή όχι μόνο στην περιοχή του ορατού φωτός, αλλά και σε όλη την έκταση του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Εμπειρικά όμως διαπιστώνεται ότι με την ομοιοχρωμία όλων των πυρακτωμένων αντικειμένων, τα περισσότερα πυκνά υλικά συμπεριφέρονται ως μέλανα σώματα στο ορατό, υπεριώδες και υπέρυθρο μέρος του φάσματος για συνήθεις θερμοκρασίες των σωμάτων.

Η θερμική ακτινοβολία λοιπόν εκπέμπεται από τα περισσότερα σώματα σε λογικές θερμοκρασίες και είναι θερμοποιημένη ώστε να ανταποκρίνεται στις θεωρητικές προδιαγραφές του ιδανικού πρότυπου, που καλείται μέλαν σώμα. Το ιδανικό πρότυπο μπορεί να προσεγγιστεί με το τέχνασμα της κοιλότητας. Δηλαδή τη δημιουργία ενός κενού στο εσωτερικό του σώματος με ένα μικρό άνοιγμα στη μία πλευρά του για την έξοδο της ακτινοβολίας που εγκλωβίζεται εκεί. Το πρότυπο αυτό, δίνει στη ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα εσωτερικά τοιχώματα αυτού του μικρού «φούρνου» να σκεδαστεί πολλές φορές πάνω τους, ώστε όταν φτάσει να εξέλθει από το άνοιγμά του, η θερμοποίηση να είναι απόλυτη (Σχ.7).



Σχήμα 7: Μια κοιλότητα μέλανος σώματος. Πριν εξέλθει από το άνοιγμα της κοιλότητας, μια «φωτεινή ακτίνα» που εκπέμπεται από ένα σημείο των τοιχωμάτων της, υφίσταται επανειλημμένες «ανακλάσεις» πάνω σε αυτά, απορροφήσεις και επαναεκπομπές, οπότε η ακτινοβολία που εξέρχεται από το άνοιγμα αυτού του μικρού «φούρνου» είναι πλήρως θερμοποιημένη. Θα έχει την ιδεατή κατανομή που προβλέπεται για το μέλαν σώμα.

Για την ποσοτική περιγραφή της θερμικής ακτινοβολίας χρησιμοποιείται ο τύπος της φασματικής έντασης J και ορίζεται ως:

$$J = \frac{\Delta E}{\Delta t \cdot \Delta s \cdot \Delta f} \equiv \frac{\Delta P}{\Delta s \cdot \Delta f}, \quad (1.1)$$

δηλαδή ως εκπεμπόμενη ισχύς, ΔP , ανά μονάδα επιφάνειας του σώματος ανά μονάδα διαστήματος συχνότητας. Η φασματική ένταση θα είναι μια συνάρτηση της μορφής $J=J(f,T)$ που οι τιμές της για διάφορα f θα μας δίνουν την ένταση της ακτινοβολίας κοντά στις αντίστοιχες συχνότητες. Η συνάρτηση δηλαδή, $J=J(f,T)$ θα μας δίνει τη ζητούμενη κατανομή για την εκάστοτε θερμοκρασία T . Ο όρος ένταση, I , αναφέρεται στην ολική ακτινοβολούμενη ισχύ ανά μονάδα επιφάνειας σώματος, δηλαδή $I=\Delta P/\Delta S$, όπως προκύπτει από τη φασματική ένταση J :

$$I = \int_0^\infty J(f,T)df, \quad (1.2)$$

δηλαδή, ολοκληρώνοντάς την σε όλο το φάσμα συχνοτήτων. Οι μονάδες μέτρησης θα είναι:

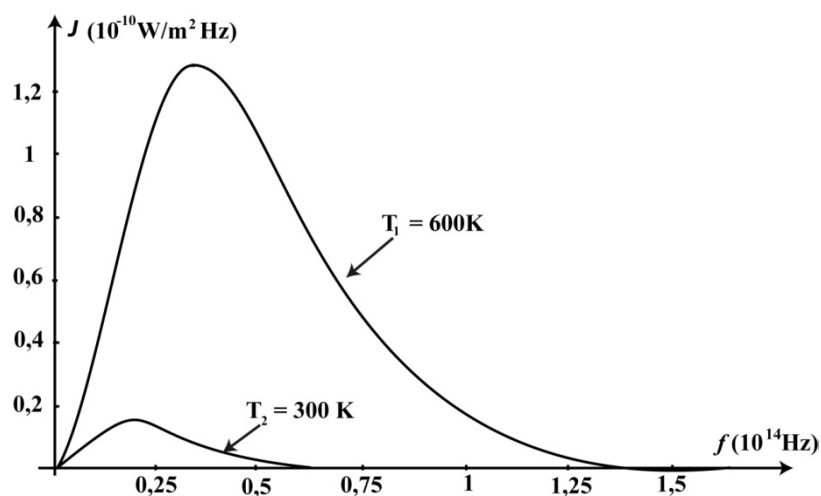
$$[J] = \frac{Watt}{m^2 \cdot Hz}, \quad [I] = \frac{Watt}{m^2}$$

3.2.1.1 Οι πειραματικοί νόμοι.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής μελέτης της θερμικής ακτινοβολίας των σωμάτων που ήταν πλήρης τα τέλη του 19^{ου} αιώνα, συνοψίζονται ως εξής:

1. Ο νόμος της παγκοσμιότητας του φάσματος.

Όταν ισχύουν οι προϋποθέσεις της πλήρους θερμοποίησης, όλα τα σώματα με την ίδια θερμοκρασία εκπέμπουν την ίδια θερμική ακτινοβολία, ανεξάρτητα από την υλική τους σύσταση. Για κάθε θερμοκρασία, η φασματική κατανομή έχει τη χαρακτηριστική μορφή των καμπύλων του σχήματος 2, και είναι ίδια για όλα τα σώματα.



Σχήμα 8: Οι καμπύλες της φασματικής κατανομής της θερμικής ακτινοβολίας για δυο δεδομένες θερμοκρασίες ($T_1=600\text{K}$ και $T_2=300\text{K}$).

2. Ο νόμος των Stefan – Boltzmann.

Η ολική ένταση της θερμικής ακτινοβολίας ενός σώματος είναι ανάλογη με τη τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας του. Δηλαδή,

$$I = \sigma T^4 \quad (1.3)$$

όπου σ μια παγκόσμια σταθερά, η σταθερά των Stefan – Boltzmann, ανεξάρτητη από την υλική σύσταση του σώματος και με αριθμητική τιμή:

$$\sigma = 5,67 \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4} \quad (mks)$$

όπου, $W \equiv \text{Watt}$ και $K \equiv \text{Kelvin}$.

3. Ο νόμος της μετατόπισης του Wien.

Το μήκος κύματος μέγιστης εκπομπής, δηλαδή το μήκος κύματος στο οποίο η ακτινοβολία γίνεται μέγιστη, μετατοπίζεται αντιστρόφως ανάλογα με τη θερμοκρασία. Δηλαδή,

$$\lambda_{max}(cm) = \frac{0,29}{T(K)} \approx \frac{0,3}{T}, \quad (1.4)$$

Στην περιοχή όμως υψηλών συχνοτήτων τα πειραματικά δεδομένα περιγράφονται από τον εμπειρικό τύπο:

$$J_{wien} \sim f^3 e^{-af/t} \quad (f \rightarrow \infty) \quad (1.5)$$

που είναι γνωστός ως *ασυμπτωτικός νόμος του Wien*.

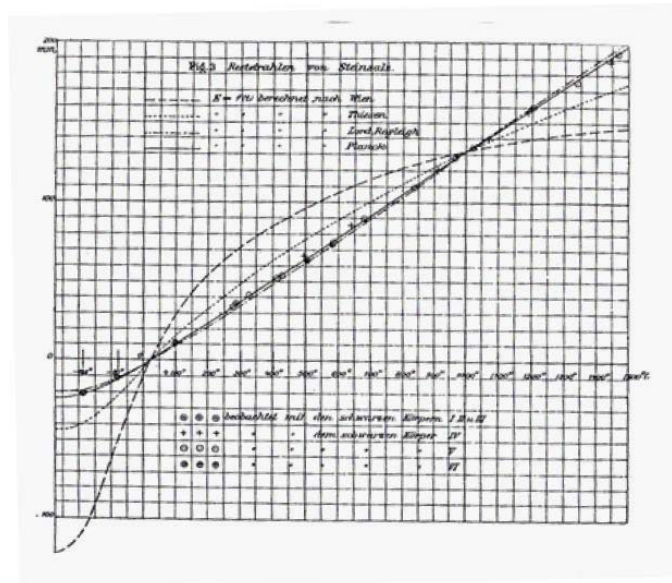
4. Ο γενικός εμπειρικός τύπος του Planck.

Ο γενικός εμπειρικός τύπος του Planck παρουσιάστηκε το Δεκέμβριο του 1899, στην Ακαδημία του Βερολίνου.

$$J(f, T) = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}, \quad (1.6)$$

όπου c είναι η ταχύτητα του φωτός, k η σταθερά του Boltzmann και h μια νέα παγκόσμια σταθερά, η *σταθερά Planck*. Η μεταβλητή hf/kT στον εκθετικό τύπο (1.6), πρέπει να είναι αδιάστατη, ο παρονομαστής kT να έχει διαστάσεις ενέργειας και το h έχει διαστάσεις ενέργεια επί χρόνο, δηλαδή διαστάσεις δράσης (εικόνες). Όπου :

$$\begin{aligned} h &= 6,62 \times 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{dec} & (cgs) \\ &= 6,62 \times 10^{-34} \text{J} \cdot \text{sec} & (mks) \end{aligned}$$



Σχήμα 9: Οι καμπύλες εκπομπής του μέλανος σώματος σε σταθερή συχνότητα και μεταβλητή θερμοκρασία, συγκρινόμενες προς τα πειραματικά δεδομένα. [Από τους H. Rubens και F. Kurlbaum, στο *Annalen der Physik*, 4, 649, (1901)].

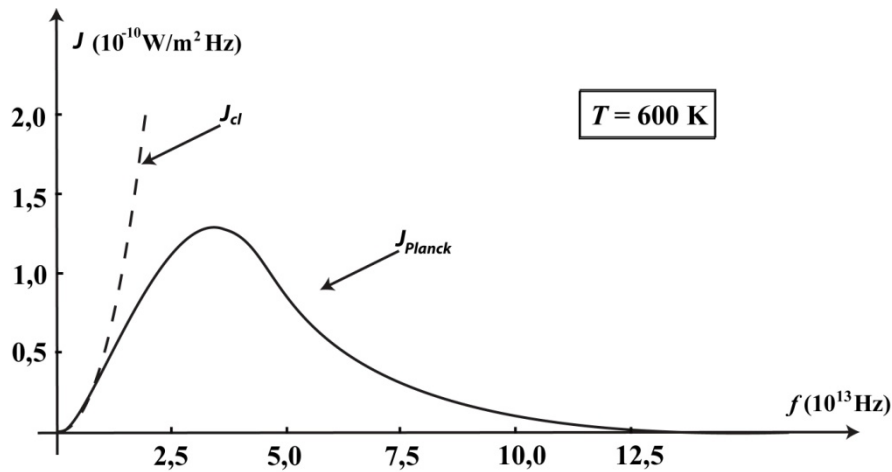
3.2.1.2 Κλασική ερμηνεία.

Οι Rayleigh-Jeans προσπάθησαν να εξηγήσουν κλασικά τα πειραματικά δεδομένα της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος στα τέλη του 19^{ου} αιώνα. Οι Rayleigh-Jeans κατέληξαν στον τύπο:

$$J_{cl}(f, T) = \frac{2\pi}{c^2} f^2 kT$$

ο οποίος βρίσκεται σε πλήρη συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα όπως φαίνεται και στο σχήμα 10.

Σύμφωνα με το παρακάτω σχήμα για μικρές συχνότητες υπάρχει συμφωνία ανάμεσα στο νόμο Rayleigh-Jeans και τα πειραματικά δεδομένα, για μεγάλες όμως συχνότητες υπάρχει πλήρη ασυμφωνία, γιατί ενώ το σχήμα εμφανίζει ένα μέγιστο και εκθετική πτώση της συχνότητας, ο νόμος Rayleigh-Jeans προβλέπει συνεχή αύξηση και για $f \rightarrow \infty$ ή $J_{cl} \rightarrow \infty$, αποτέλεσμα που είναι άτοπο (δηλαδή η ολική ενέργεια που εκπέμπεται ανά δευτερόλεπτο από ένα θερμό σώμα είναι άπειρη). Αυτό είναι ως γνωστό «καταστροφή του υπεριώδους».



Σχήμα 10: Σύγκριση της κλασικής πρόβλεψης για τη φασματική κατανομή της θερμικής ακτινοβολίας, με τον εμπειρικό τύπο του Planck για $T=600\text{K}$. Ο κλασικός τύπος Rayleigh – Jeans συμφωνεί με τον τύπο του Planck μόνο στην περιοχή των χαμηλών συχνοτήτων, ενώ στις μεγάλες συχνότητες οδηγεί στο απαράδεκτο συμπέρασμα ότι η ακτινοβολία αυξάνεται απεριόριστα. Η συμπεριφορά αυτή για μεγάλα f , γνωστή ως υπεριώδης καταστροφή, συμπυκνώνει όχι απλώς την αδυναμία της κλασικής φυσικής να ερμηνεύσει τη θερμική ακτινοβολία των σωμάτων αλλά τη πλήρη χρεωκοπία της σε αυτό το θέμα.

3.2.1.3 Κβαντική ερμηνεία. Η θεωρία του Planck.

Στις 14 Δεκεμβρίου 1900 ο Γερμανός φυσικός Max Planck (1858-1947) παρουσίασε μια εργασία στο συνέδριο της Γερμανικής Φυσικής εταιρίας στο Βερολίνο, σχετικά με την εκπομπή και την απορρόφηση ακτινοβολίας. Η ημερομηνία αυτή αποτελεί την ημερομηνία γεννήσεως της Κβαντικής Μηχανικής.

Στην εργασία αυτή ο Planck εγκαταλείπει την Κλασική Φυσική και περνάει στη Κβαντική ερμηνεία και δέχεται ότι:

‘Κάθε φυσική οντότητα που περιγράφεται από μια μεταβλητή η οποία μεταβάλλεται ημιτονοειδώς με το χρόνο (δηλ. εκτελεί απλή αρμονική ταλάντωση, οπότε και η φυσική οντότητα μπορεί ισοδύναμα να θεωρηθεί σαν αρμονικός ταλαντωτής) δεν μπορεί να κατέχει οποιαδήποτε τιμή ολικής ενέργειας, αλλά μόνο διακεκριμένες τιμές $0, 1\varepsilon, 2\varepsilon, \dots n\varepsilon$ ’

Η ποσότητα ε είναι μια σταθερά ποσότητα ενέργειας που εξαρτάται από τη συχνότητα f σύμφωνα με τη σχέση:

$$\varepsilon = hf,$$

όπου h είναι μια παγκόσμια σταθερά, η σταθερά του Planck η οποία παίρνει τιμή $h=6,63 \times 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$ ή $6,63 \times 10^{-27} \text{ Joule} \cdot \text{sec}$ και f η συχνότητα της ακτινοβολίας.

Από την παραπάνω εξίσωση προκύπτει η εξής παραδοχή:

‘Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα «μέλαν σώμα» είναι κβαντωμένη. Οι μόνες επιτρεπόμενες τιμές είναι τα ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας $\epsilon=hf$, όπου h η σταθερά του Planck και f η συχνότητα της ακτινοβολίας’.

Σύμφωνα με τις ιδέες του Planck τα ηλεκτρόνια του υλικού από το οποίο είναι κατασκευασμένη η επιφάνεια μιας κοιλότητας βρισκόμενα σε θερμοκρασία T εκτελούν δονήσεις γύρω από μια θέση ισορροπίας, δηλαδή, μια αρμονική ταλάντωση. Το ίδιο συμβαίνει και με τα ηλεκτρομαγνητικά στάσιμα κύματα της κοιλότητας, των οποίων το ηλεκτρικό και

Είκοσι χρόνια αργότερα αφ’ ότου απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ στον Πλάνκ είπε το εξής:

«Όμως ακόμη και αν η σχέση που διέπει την ακτινοβολία αποδεικνύονταν ότι ήταν τελικά σωστή, δεν ήταν παρά μια εμβόλιμη σχέση, η οποία είχε προκύψει από κάποια τυχερή εικασία κι έτσι μάλλον δεν έπρεπε να ήμασταν ικανοποιημένοι. Γ’ αυτό από την μέρα που ανακαλύφθηκε αγωνιζόμουν για να της δώσω μια φυσική ερμηνεία κι αυτό με οδήγησε στην αναζήτηση της σχέσης της εντροπίας και της πιθανότητας, σύμφωνα με τις ιδέες του Μπόλτσμαν. Μετά από μερικές εβδομάδες εντονότατης εργασίας, της πιο έντονης της ζωής μου, άρχισε να εμφανίζεται φως και μου αποκαλύφθηκαν απρόσμενες απόψεις».

Το 1931 ο Αμερικανός Φυσικός Γουντ ρώτησε τον Πλάνκ πως κατόρθωσε να επινοήσει κάτι τόσο απίστευτο όσο η κβαντική θεωρία, κι εκείνος απάντησε:

«Ήταν μια πράξη απελπισίας. Επί έξι χρόνια πάλευα με τη θεωρία του μέλανος σώματος. Γνώριζα ότι ήταν ένα θεμελιώδες πρόβλημα, γνώριζα και την απάντηση και έπρεπε να ανακαλύψω μια θεωρητική ερμηνεία οποιοδήποτε και αν ήταν το κόστος, με εξαίρεση βέβαια την παραβίαση των δυο θερμοδυναμικών αξιωμάτων».

Προς τα τέλη της ζωής του ο Πλάνκ προχώρησε παραπέρα:

«Οι μάταιες προσπάθειές μου να συμβιβάσω οπωσδήποτε το στοιχειώδες κβάντο με τη κλασική θεωρία συνεχίστηκαν για πολλά χρόνια και μου κόστισαν πολύ σε μόγθο. Πολλοί συνεργάτες μου είδαν σ’ αυτό κάτι σαν τραγωδία, ενώ όμως το έβλεπα διαφορετικά γιατί η εργασία αυτή με οδήγησε σε ένα βαθύ ξεκαθάρισμα των απόψεων μου και αυτό είχε μεγάλη αξία για μένα. Τώρα γνωρίζω με βεβαιότητα ότι το κβάντο δράσης έχει πολλαπλάσια σπουδαιότητα απ’ ότι αρχικά νόμιζα».

μαγνητικό πεδίο μεταβάλλεται ημιτονοειδώς.

Για την παραδοχή του Planck χρησιμοποιήθηκε ο εμπειρικός τύπος για τη φασματική ένταση J .

$$J = \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{e^{hf/kT} - 1}$$

Ο παράγοντας $\frac{f^3}{e^{hf/kT} - 1}$ θυμίζει τον εκθετικό τύπο του Boltzmann, $\exp(-E/kT)$, με αντίθετο πρόσημο. Πολλαπλασιάζοντας αριθμητή και παρονομαστή με το εκθετικό $\exp(-hf/kT)$, προκύπτει

$$\frac{e^{-hf/kT}}{1 - e^{-hf/kT}}$$

και δεδομένου ότι

$$\frac{1}{1 - z} = 1 + z + z^2 + \dots \quad (|z| < 1)$$

η παραπάνω έκφραση γράφεται ως εξής:

$$e^{-\frac{hf}{kT}} \left(1 + e^{-\frac{hf}{kT}} + e^{-\frac{2hf}{kT}} + \dots \right) =$$

$$e^{-hf/kT} + e^{-2hf/kT} + e^{-3hf/kT} + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} e^{-nhf/kT},$$

Δηλαδή ως ένα άθροισμα εκθετικών τύπου Boltzmann $-\exp(-E_n/kT)$, με ενέργειες

$$E_n = nhf$$

που είναι τα ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας

$$\varepsilon = hf.$$

Ο Planck λοιπόν χρησιμοποιώντας την Κλασική στατιστική Boltzmann και εισάγοντας την έννοια της κβαντισμένης ενέργειας μπόρεσε να εξηγήσει την ακτινοβολία του μέλανος σώματος.

**9. Ueber das Gesetz
der Energieverteilung im Normalspectrum;
von Max Planck.**

(In anderer Form mitgeteilt in der Deutschen Physikalischen Gesellschaft,
Sitzung vom 19. October und vom 14. December 1900, Verhandlungen
2. p. 202 und p. 237. 1900.)

Einleitung.

Die neueren Spectralmessungen von O. Lummer und E. Pringsheim¹⁾ und noch auffälliger diejenigen von H. Rubens und F. Kurlbaum²⁾, welche zugleich ein früher von H. Beckmann³⁾ erhaltenes Resultat bestätigten, haben gezeigt, dass das zuerst von W. Wien aus molecularkinetischen Betrachtungen und später von mir aus der Theorie der elektromagnetischen Strahlung abgeleitete Gesetz der Energieverteilung im Normalspectrum keine allgemeine Gültigkeit besitzt.

Die Theorie bedarf also in jedem Falle einer Verbesserung, und ich will im Folgenden den Versuch machen, eine solche auf der Grundlage der von mir entwickelten Theorie der elektromagnetischen Strahlung durchzuführen. Dazu wird es vor allem nötig sein, in der Reihe der Schlussfolgerungen, welche zum Wien'schen Energieverteilungsgesetz führten, dasjenige Glied ausfindig zu machen, welches einer Abänderung fähig ist; sodann aber wird es sich darum handeln, dieses Glied aus der Reihe zu entfernen und einen geeigneten Ersatz dafür zu schaffen.

Dass die physikalischen Grundlagen der elektromagnetischen Strahlungstheorie, einschliesslich der Hypothese der „natürlichen Strahlung“, auch einer geschärften Kritik gegenüber Stand halten, habe ich in meinem letzten Aufsatz⁴⁾ über diesen

1) O. Lummer u. E. Pringsheim, Verhandl. der Deutsch. Physikal. Gesellsch. 2. p. 168. 1900.

2) H. Rubens und F. Kurlbaum, Sitzungsber. d. k. Akad. d. Wissensch. zu Berlin vom 25. October 1900, p. 929.

3) H. Beckmann, Inaug.-Dissertation, Tübingen, 1898. Vgl. auch H. Rubens, Wied. Ann. 69, p. 582. 1899.

4) M. Planck, Ann. d. Phys. 1. p. 719. 1900.

Annalen der Physik. IV. Folge. 4.

Εικόνα 10: Η πρώτη σελίδα του άρθρου του Μάξ Πλάνκ, που δημοσιεύτηκε στο Annalen der Physik [4, 533(1901)], στο οποίο εμφανίστηκε για πρώτη φορά η σταθερά h , που σηματοδότησε τη γένεση της Κβαντικής Φυσικής.

Hierbei sind A und k universelle Constante.

Durch Substitution in (9) erhält man:

$$\frac{1}{\nu} = \frac{k}{h\nu} \log \left(1 + \frac{h\nu}{U} \right), \quad (11)$$

$$U = \frac{h\nu}{e^{\frac{h\nu}{k\theta}} - 1}$$

und aus (8) folgt dann das gesuchte Energieverteilungsgesetz:

$$u = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k\theta}} - 1} \quad (12)$$

oder auch, wenn man mit den in § 7 angegebenen Substitutionen statt der Schwingungszahl ν wieder die Wellenlänge λ einführt:

$$E = \frac{8\pi c h}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda k\theta}} - 1} \quad (13)$$

Εικόνα 11: Άλλα αποσπάσματα από την ίδια εργασία του Πλάνκ. Η εξίσωση (12) αποτελεί τη μαθηματική διατύπωση της κατανομής της ενέργειας της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος συναρτήσει της συχνότητας ν και της θερμοκρασίας θ . Σ' αυτήν εμφανίζεται η σταθερά h , καθώς και η ταχύτητα του φωτός c και η σταθερά k .



Λυμένες Ασκήσεις

1. Απόδειξη του νόμου των Stefan – Boltzmann σε συνδυασμό με την αριθμητική τιμή της σχετικής σταθεράς σ ότι αποτελούν αναγκαστική συνέπεια του γενικού εμπειρικού νόμου του Planck και της εκλεγείσας τιμής για το h .

Λύση

Θα είναι

$$I = \int_0^{\infty} J(f, T) df = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{f^3}{e^{hf/kT} - 1} df$$

Οπότε με την αλλαγή μεταβλητής

$$x = \frac{hf}{kT} \Rightarrow f = \frac{kT}{h} x \Rightarrow df = \frac{kT}{h} dx$$

Διαδοχικά θα ισχύει:

$$I = \frac{2\pi h}{c^2} \int_0^{\infty} \frac{\left(\frac{kT}{h}\right)^3 x^3}{e^x} \left(\frac{kT}{h}\right) dx \Rightarrow$$

$$I = \frac{2\pi h}{c^2} \left(\frac{kT}{h}\right)^4 \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx = \frac{2\pi k^4 T^4}{c^2 h^3} a \quad (1)$$

Όπου α η τιμή του ολοκληρώματος $\int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$ η οποία μπορεί να υπολογιστεί αφού το ολοκλήρωμα υπάρχει.

Όποια όμως και να είναι η τιμή του α, ο νόμος της τέταρτης δύναμης είναι ήδη φανερός από την παραπάνω εξίσωση, ενώ θα έχουμε ταυτόχρονα για την τιμή του σ την έκφραση $\sigma = 2\pi k^4 / c^2 h^3$, που παίρνει τελικά τη μορφή

$$\sigma = \frac{2\pi^5}{15} \frac{k^4}{c^2 h^3} \alpha \quad (2)$$

Με $k=1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$, $c=3 \times 10^8 \text{ m/s}$ και $h=6,62 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ η (2) δίνει την εμπειρική τιμή του σ ($\sigma=5,67 \times 10^{-8} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-4}$).

2. Εξαγωγή του ορίου χαμηλών συχνοτήτων της κατανομής του Planck ώστε να συμπίπτει με την αντίστοιχη κλασική.

Λύση

Από τον τύπο $\varepsilon=hf$ είναι φανερό ότι στην περίπτωση των χαμηλών συχνοτήτων ($f \rightarrow 0$) η ενέργεια του «φωτεινού κβάντου» θα γίνει αμελητέα κι συνεπώς η κβαντική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας δεν είναι πειραματικά ανιχνεύσιμη. Στη περιοχή αυτή πρέπει να ισχύει η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία οπότε ο τύπος του Planck θα πρέπει να αναπαράγει το κλασικό αποτέλεσμα (τύπος Rayleigh – Jeans). Επομένως για πολύ μικρό f , $f \ll kT$, θα είναι $hf/kT \ll 1$, το ανάπτυγμα του εκθετικού:

$$e^{hf/kT} = 1 + \frac{hf}{kT} + \frac{1}{2!} \left(\frac{hf}{kT}\right)^2 + \dots$$

θα μπορεί να προσεγγιστεί μόνο από τους δυο πρώτους όρους, δηλαδή $\exp\left(\frac{hf}{kT}\right) \approx 1 + \left(\frac{hf}{kT}\right)$, οπότε η σχετική αντικατάσταση στον τύπο του Planck θα δώσει:

$$J \approx \frac{2\pi h}{c^2} \frac{f^3}{\left(\frac{hf}{kT}\right)} = \frac{2\pi}{c^2} kT f^2,$$

Που είναι ο κλασικός τύπος Rayleigh – Jeans.

3. Απόδειξη ότι σε χαμηλή συχνότητα και υψηλή θερμοκρασία ισχύει: $u_\nu \sim T$ όπως ακριβώς προκύπτει από το νόμο του Rayleigh-Jeans γνωρίζοντας ότι ισχύει ο νόμος του Planck για την ακτινοβολία του μέλανος σώματος

$$u_\nu = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$$

Λύση

Από τη σχέση $u_\nu = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1}$, προκύπτει ότι όταν το ν είναι πολύ μικρό

και η θερμοκρασία T πολύ μεγάλη τότε $\frac{hf}{kT} \ll 1$ και συνεπώς προκύπτει:

$$u_\nu = \frac{8\pi h f^3}{c^3} \cdot \frac{1}{\left(1 + \frac{hf}{kT} + \dots\right) - 1} = \frac{8\pi f^2}{c^3} kT$$

4. α) Απόδειξη ότι η ολική ενεργειακή πυκνότητα u της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της απολύτου θερμοκρασίας και β) Υπολογισμός σταθεράς αναλογίας, στηριζόμενοι στο νόμο του Planck.

Λύση

α) Η ολική ενεργειακή πυκνότητα u , είναι:

$$u = \int_0^\infty u_\nu d\nu = \int_0^\infty \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \cdot \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{kT}} - 1} d\nu$$

Θέτοντας $\frac{h\nu}{kT} = x$, η παραπάνω εξίσωση παίρνει τη μορφή:

$$u = \frac{8\pi k^4 T^4}{c^3 h^3} \cdot \int_0^\infty \frac{x^3}{e^x - 1} dx$$

Αναπτύσσοντας τα παραπάνω ολοκληρώματα και κάνοντας τις πράξεις προκύπτει ότι:

$$u = \frac{8\pi\kappa^4 T^4}{c^3 h^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{6}{n^4} = \frac{4\pi\kappa^4 T^4}{c^3 h^3} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4}$$

Επειδή $\sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^4} = \frac{\pi}{90}$ η παραπάνω εξίσωση γίνεται:

$$u = \frac{8}{15} \frac{\pi^5 \kappa^4}{c^3 h^3} T^4 = \sigma' T^4$$

β) Η ζητούμενη σταθερά αναλογίας είναι:

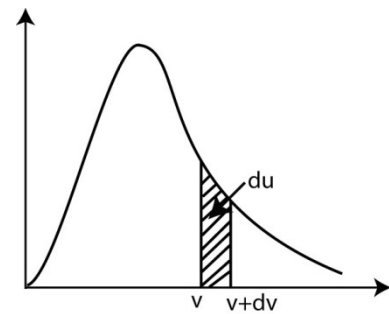
$$\sigma' = \frac{8}{15} \frac{\pi^5 \kappa^4}{c^3 h^3}$$

5. Με τη βοήθεια της φασματικής κατανομής της ενεργειακής πυκνότητας, u_ν , του μέλανος σώματος εκφράστε το μέγεθος της ενεργειακής πυκνότητας συναρτήσει του μήκους κύματος u_λ .

Λύση

Η ενεργειακή πυκνότητα της ακτινοβολίας σε μία περιοχή του φάσματος δεν εξαρτάται από το εάν η φασματική κατανομή της ενέργειας περιγράφεται συναρτήσει της ν ή της λ . Έτσι ισχύει:

$$u_\nu |d\nu| = u_\lambda |d\lambda|$$



Εφαρμόζοντας τη σχέση $c = \lambda \cdot \nu$ παραπάνω ισχύει:

$$|d\nu| = \frac{c}{\lambda^2} |d\lambda|$$

Οπότε:

$$u_\lambda = u_\nu \left| \frac{d\nu}{d\lambda} \right| = \frac{c}{\lambda^2} \frac{8\pi \left(\frac{c}{\lambda}\right)^2}{c^3} \frac{h \left(\frac{c}{\lambda}\right)}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

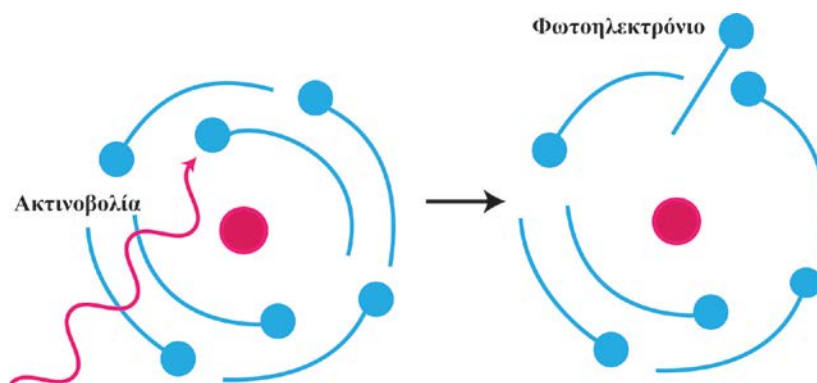
Άρα,

$$u_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1}$$

3.2.2 Διυσμός της Ακτινοβολίας.

3.2.2.1 Το φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο.

Ο Hertz μετά από μια σειρά πειραμάτων το 1887 παρατήρησε εκπομπή ηλεκτρονίων, όταν η επιφάνεια ορισμένων μετάλλων, όπως ο ψευδάργυρος, το ρουβίδιο, το ασβέστιο, το νάτριο κ.α. ακτινοβολούνταν με υπεριώδη ακτινοβολία.



Σχήμα 11: Διέγερση ηλεκτρονίου

Το φαινόμενο αυτό κατά το οποίο παρατηρείται εκπομπή ηλεκτρονίων από ένα μέταλλο, η οποία προκαλείται από την πρόσπτωση ορατής ή υπεριώδους ακτινοβολίας στην επιφάνειά του, ονομάζεται «**φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**». Στην πραγματικότητα ελευθερώνονται ηλεκτρόνια από ένα οποιοδήποτε φυσικό σύστημα, άτομο, μόριο ή στερεό, με την ακτινοβολία.

Η πειραματική διάταξη αποτελείται από ένα σωλήνα κενού (σχ.), ο οποίος φέρει δυο μεταλλικά ηλεκτρόδια. Το ένα αποτελεί την φωτοηλεκτρική κάθοδο, δηλαδή την μεταλλική επιφάνεια πάνω στην οποία προσπίπτει το φως και εκπέμπει ηλεκτρόνια, και το άλλο ηλεκτρόδιο αποτελεί το συλλέκτη ηλεκτρονίων.

Εάν τα ηλεκτρόδια συνδεθούν με την ηλεκτρική πηγή μεταβλητής τάσης V και η κάθοδος φωτοβοληθεί με μονοχρωματική δέσμη, θα παρατηρηθεί ηλεκτρικό ρεύμα που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που ελευθερώνονται υπό την επίδραση του φωτός.

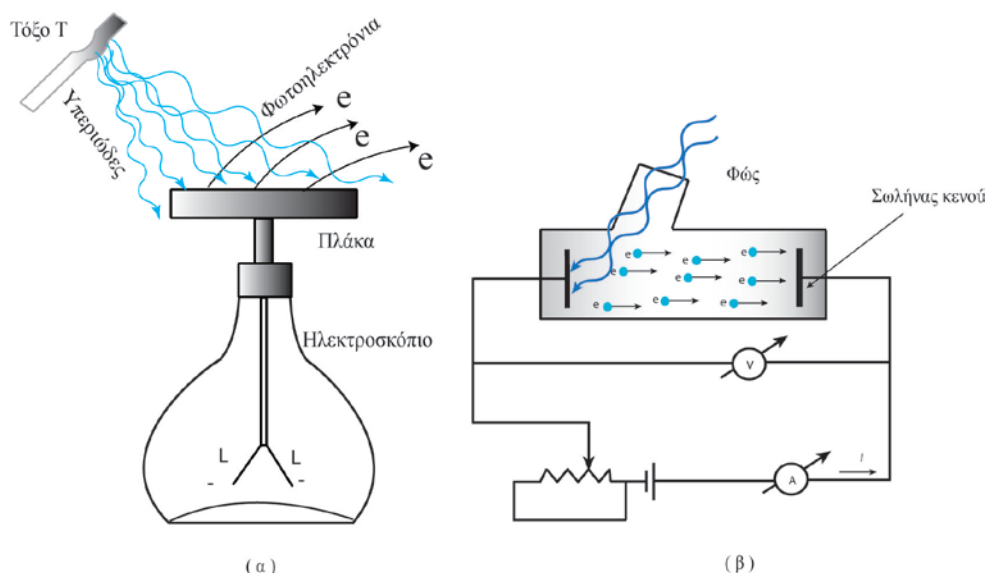
Οι παράμετροι που μεταβάλλονται στο πείραμα είναι η συχνότητα, η ένταση της φωτεινής δέσμης και η τάση της πηγής. Το μέγεθος που μετράτε είναι η ένταση I του φωτοηλεκτρικού ρεύματος.

Χρησιμοποιώντας επίσης αυτή τη διάταξη είναι δυνατό να μετρηθεί η κινητική ενέργεια των αποσπώμενων από την κάθοδο ηλεκτρονίων που προσπίπτουν

στην πλάκα, ορισμένης έντασης και μήκους κύματος. Στην περίπτωση αυτή θα ισχύει η σχέση,

$$K = eV_0,$$

αφού το έργο eV_0 που παράγεται από το ηλεκτρικό πεδίο της καθόδου ως την άνοδο, θα πρέπει να ισούται με την κινητική ενέργεια K του ηλεκτρονίου που καταναλώθηκε κατά τη διαδρομή (όπου V_0 είναι το δυναμικό αποκοπής).



Σχήμα 12: Πειραματική μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στο (α) εικονίζεται η αρχική μέθοδος επίδειξης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η υπεριώδης ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα ηλεκτρικό τόξο προκαλεί την απόσπαση των ηλεκτρονίων από μια μεταλλική πλάκα που συνδέεται με ένα ηλεκτροσκόπιο. Τα αρνητικώς φορτισμένα φύλλα L του ηλεκτροσκοπίου, που απωθούνται μεταξύ τους, χάνουν το φορτίο τους και πέφτουν. Στο (β) φαίνεται η σύγχρονη πειραματική διάταξη της μελέτης του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Η φωτεινή δέσμη πέφτει σε μια φωτοευαίσθητη κάθοδο και τα αποσπώμενα ηλεκτρόνια συλλέγονται στην άνοδο και παράγουν το φωτοηλεκτρικό ρεύμα που διαρρέει το κύκλωμα.

3.2.2.2 Οι πειραματικοί νόμοι.

Μετά από συνεχείς μελέτες που έγιναν από τους Hertz, Millikan και Lenard διατυπώθηκαν οι ακόλουθοι πειραματικοί νόμοι:

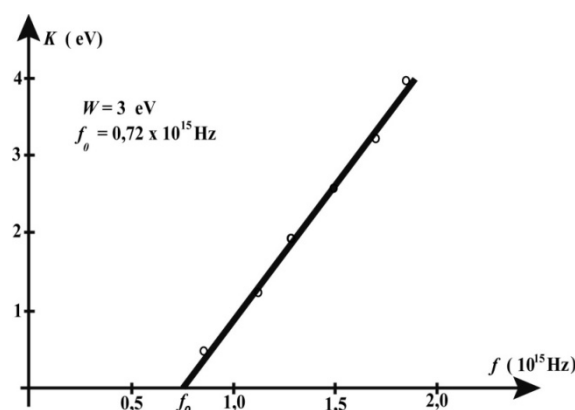
A. Η ένταση του ρεύματος, δηλαδή ο αριθμός των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται, ανά μονάδα χρόνου, είναι ανάλογη με την φωτεινή ροή.

B. Φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται μόνο όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή $f_0 > f_{min}$, χαρακτηριστική του

υλικού της φωτοκαθόδου. Αν είναι $f < f_0$ δεν θα υπάρξει φωτοηλεκτρικό ρεύμα, οποιαδήποτε και να είναι η ένταση της φωτεινής δέσμης.

Γ. Η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων (για $f > f_0$) δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής δέσμης αλλά μόνο από τη συχνότητά της. Επιπλέον η εξάρτηση του K από το f έχει τη γραμμική μορφή του σχήματος 13.

Δ. Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ταυτόχρονα με την πρόσπτωση της φωτεινής δέσμης στην φωτοκάθοδο. Αν υπάρχει χρονική υστέρηση, αυτή θα είναι μικρότερη από ένα νανοδευτερόλεπτο.



Σχήμα 13: Πέραν της οριακής συχνότητας f_0 η κινητική ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα της ακτινοβολίας. (Πειραματικός νόμος)

3.2.2.3 Κλασική ερμηνεία.

Σε όλες τις εκδοχές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου απαιτείται να δοθεί στο ηλεκτρόνιο μια ελάχιστη χαρακτηριστική ενέργεια, ώστε να επιτευχθεί η απομάκρυνσή του. Στα μέταλλα, αυτή η ενέργεια είναι γνωστή ως έργο εξαγωγής και συμβολίζεται με W , στα άτομα, αποκαλείται έργο ιοντισμού και συμβολίζεται με W_I ή E_I .

Το ερώτημα που τίθεται όμως είναι το εξής: πώς προσλαμβάνει το ηλεκτρόνιο την αναγκαία για την εξαγωγή του ενέργεια; Στην κλασική φυσική η απάντηση στο ερώτημα είναι απλή. Η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα του οποίου το ηλεκτρικό πεδίο θα ασκεί στα ηλεκτρόνια του μετάλλου μια δύναμη $F = -eV$, που τα επιταχύνει αυξάνοντας την κινητική τους ενέργεια. Όταν η ενέργεια αυτή ξεπεράσει το έργο εξαγωγής του μετάλλου, τα ηλεκτρόνια αποσπώνται από αυτό. Πως όμως αυτός ο κλασικός μηχανισμός μπορεί να εξηγήσει τους νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου;

Σχετικά με το πρώτο συμπέρασμα, όπου η ένταση του ρεύματος είναι ανάλογη με την φωτεινή ροή η κλασική μηχανική δίνει λογική εξήγηση. Το ηλεκτρικό πεδίο του ηλεκτρομαγνητικού κύματος αναμένεται να ασκεί μια δύναμη πάνω στο ηλεκτρόνιο της ακτινοβολούμενης επιφάνειας και να προκαλεί την εκπομπή του, αρκεί η ένταση της ακτινοβολίας να είναι μεγάλη.

Εκεί όμως που η κλασική φυσική αδυνατεί να δώσει εξηγήσεις, είναι στους επόμενους τρεις πειραματικούς νόμους (B, Γ, Δ). Σύμφωνα με τη κλασική μηχανική η εκπομπή φωτοηλεκτρονίων θα έπρεπε να πραγματοποιείται με ακτινοβολία οποιουδήποτε μήκους κύματος, οπότε δεν θα έπρεπε να υπάρχει οριακό μήκος, αρκεί η ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας να ήταν αρκετά μεγάλη. Επίσης με την ένταση της ακτινοβολίας θα αναμένονταν να αυξάνει και η κινητική ενέργεια ηλεκτρονίων. Τα πειραματικά όμως αποτελέσματα δεν συμφωνούν με την κλασική ερμηνεία.

Έτσι χρησιμοποιώντας την ιδέα του Plank για τα φωτοκβάντα και διαπιστώνοντας ότι υπάρχουν μικρές και ανεξάρτητες ποσότητες ενέργειας στο χώρο, ο Einstein μπόρεσε να δώσει εξήγηση στους παραπάνω νόμους του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

3.2.2.4 Κβαντική ερμηνεία.

Ο Einstein το 1905 στην προσπάθεια του να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο διατύπωσε ότι :

" η ενέργεια μιας φωτεινής ακτίνας που εκπέμπεται από μια σημειακή πηγή δεν είναι συνεχώς κατανεμημένη στο χώρο, αλλά αποτελείται από έναν πεπερασμένο αριθμό ενεργειακών κβάντων, που είναι τελείως εντοπισμένα στο χώρο χωρίς να διαιρούνται και τα οποία μπορούν να παραχθούν ή να απορροφηθούν μόνο ως ολόκληρες μονάδες."

Δηλαδή η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία όχι μόνο απορροφάται και εκπέμπεται κατά κβάντα, αλλά και διαδίδεται στο χώρο κατά κβάντα. Ο Einstein θεώρησε ότι τα κβάντα ενέργειας που εκπέμπονται από ένα σύστημα δεν διαδίδονται στο χώρο σαν κύματα αλλά σαν «σωματίδια» που μπορούν να απομονωθούν σε ένα στοιχειώδη όγκο του χώρου. Τα σωματίδια αυτά που ονομάστηκαν φωτόνια, και έχουν ενέργεια:

$$E = hf$$

διαδίδονται με την ταχύτητα του φωτός c , έχουν ορμή hf/c και μάζα ηρεμίας μηδέν, όπου h η σταθερά Plank και f η συχνότητα.

Σύμφωνα με τα παραπάνω το χαρακτηριστικό μέγεθος του κύματος και αυτό που παίζει κεντρικό ρόλο κατά τη φωτοεκπομπή δεν είναι η ένταση αλλά συχνότητα. Αντίθετα στη κλασική θεωρία του φωτός η συχνότητα είναι κυματικό χαρακτηριστικό με δευτερεύοντα ρόλο. Ενώ σύμφωνα με τα πειραματικά δεδομένα η ενεργειακή δραστηριότητα του φωτός εξαρτάται κυρίως από τη συχνότητα και δευτερεύοντος από την ένταση.

Επίσης η απορρόφηση της ενέργειας γίνεται ακαριαία. Το ηλεκτρόνιο παίρνει από το φως την ενέργεια εξαγωγής του σε μια μοναδική δόση και όχι βαθμιαία, όπως προβλέπει η κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

Με βάση όλα τα παραπάνω ο Einstein εξήγησε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ως εξής:

Για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο, απαιτείται να καταναλωθεί ενέργεια W για να υπερνικηθούν οι δυνάμεις που το συγκρατούν. Η ενέργεια αυτή λέγεται έργο εξόδου του ηλεκτρονίου, είναι ανεξάρτητη από την προσπίπτουσα ακτινοβολία και είναι χαρακτηριστική του μετάλλου. Το φωτόνιο προσπίπτοντας πάνω στο ηλεκτρόνιο του προσδίδει ενέργεια, η οποία σύμφωνα με την πρόταση του Einstein, θα είναι ίση με hf . Εάν η ενέργεια είναι μεγαλύτερη από το έργο εξόδου, τότε το ηλεκτρόνιο εξέρχεται από την φωτοκάθοδο και κινείται με κινητική ενέργεια E , η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$E = hf - w \quad (1.7)$$

Η σχέση αυτή είναι γνωστή ως φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein. Η οριακή συχνότητα f_0 προσδιορίζεται από τη σχέση :

$$hf_0 = W$$

και η τιμή της εξαρτάται από το συγκεκριμένο μέταλλο, όπως δείχνει το πείραμα.

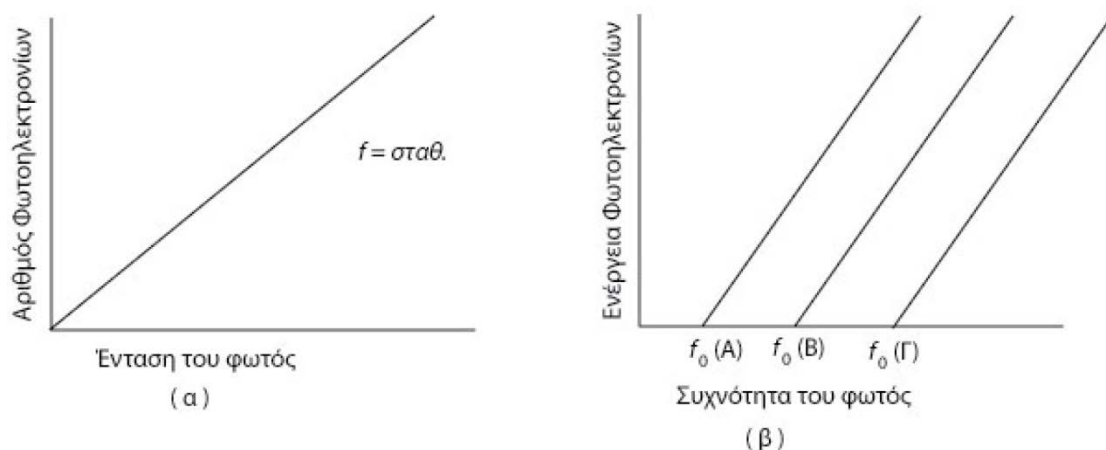
Με τον τρόπο αυτό, η κβαντική μηχανική μέσω της εξίσωσης του Einstein εξηγεί τα πειραματικά δεδομένα του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, δηλαδή:

- 1) Ο αριθμός των παραγόμενων φωτοηλεκτρονίων, δηλαδή η ένταση του ρεύματος, είναι ανάλογος με τον αριθμό φωτονίων, που προσπίπτουν στην επιφάνεια του μετάλλου και παράγουν φωτοηλεκτρόνια.
- 2) Η κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων $K = \frac{1}{2}mv^2$, όπως φαίνεται και από τη σχέση 1.7, συνδέεται με την συχνότητα f της προσπίπτουσας δέσμης μέσω της σχέσης,

$$K = hf - W = h(f - f_0)$$

της οποίας η γραφική παράσταση για $f \geq f_0$ είναι μια ευθεία γραμμή όπως δείχνει το παραπάνω σχήμα 7.

- 3) Η κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων, είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό φωτονίων.
- 4) Για να λάβει χώρα το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο η ενέργεια θα πρέπει να είναι στην περιοχή του υπεριώδους (σχήμα 14).



Σχήμα 14: Οι νόμοι του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Το (α) παριστάνει γραφικώς τον αριθμό των ηλεκτρονίων σε συνάρτηση με την ένταση του μονοχρωματικού προσπίπτοντος φωτός. Το (β) παριστάνει την ενέργεια των φωτοηλεκτρονίων σε συνάρτηση με τη συχνότητα του μονοχρωματικού φωτός που προσπίπτει σε τρία διαφορετικά μέταλλα Α, Β, Γ.

Το αποτέλεσμα της παραπάνω ερμηνείας του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμφωνεί με το πείραμα και δεν αφήνει αμφιβολίες για την πραγματική ύπαρξη των φωτοκβάντων.

Σήμερα η έννοια του φωτονίου χρησιμοποιείται για όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και όχι μόνο για την περιοχή του ορατού. Για παράδειγμα οι πομποί της τηλεοράσεως εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υπό τη μορφή φωτονίων που το καθένα έχει ενέργεια της τάξεως των 10^{-6}eV και αντιστοιχεί σε ένα μήκος κύματος της τάξεως του ενός 1m ($\lambda = 1\text{m}$) ή συχνότητας της τάξης των 100MHz .

Εφαρμογή.

6. Ακτινοβολία μήκους κύματος $\lambda = 2.000\text{\AA}$ πέφτει πάνω σε ένα μέταλλο με έργο εξαγωγής $W = 2\text{eV}$. Υπολογίστε: α) Την κινητική ενέργεια K και την ταχύτητα u των φωτοηλεκτρονίων. β) το δυναμικό αποκοπής V_0 (δίνεται ότι $E(\text{eV})=12.000/\lambda(\text{\AA})$).

Λύση

α) Με $\lambda = 2.0\text{\AA}$ η σχέση $E(\text{eV})=12.0/\lambda(\text{\AA})$ δίνει $E= 6\text{eV}$ οπότε αφαιρώντας τα 2eV του έργου εξαγωγής, απομένουν άλλα 4eV ως κινητική ενέργεια των εξερχόμενων ηλεκτρονίων. Με γνωστό το K η ταχύτητα των φωτοηλεκτρονίων θα υπολογιστεί από τη σχέση:

$$K = \frac{1}{2} m u^2 \equiv \frac{1}{2} m c^2 \left(\frac{u^2}{c^2} \right) \Rightarrow \frac{u}{c} = \sqrt{\frac{2K}{m c^2}}$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 4\text{eV}}{\frac{1}{2} \times 10^6 \text{eV}}} = 4 \times 10^{-3} \Rightarrow \frac{u}{c} = 4 \times 10^{-3} \Rightarrow u = 1,2 \times 10^8 \frac{\text{cm}}{\text{sec}}$$

β) Το δυναμικό αποκοπής V_0 θα είναι ίσο με $V_0 = 4\text{Volt}$, αφού είναι $K = 4\text{eV}$ και ισχύει ότι $K = eV_0$.

3.2.3 Σκέδαση της Ακτινοβολίας. Το Φαινόμενο Compton.

3.2.3.1 Περιγραφή του φαινομένου. Κλασική πρόβλεψη και πειραματικά αποτελέσματα.

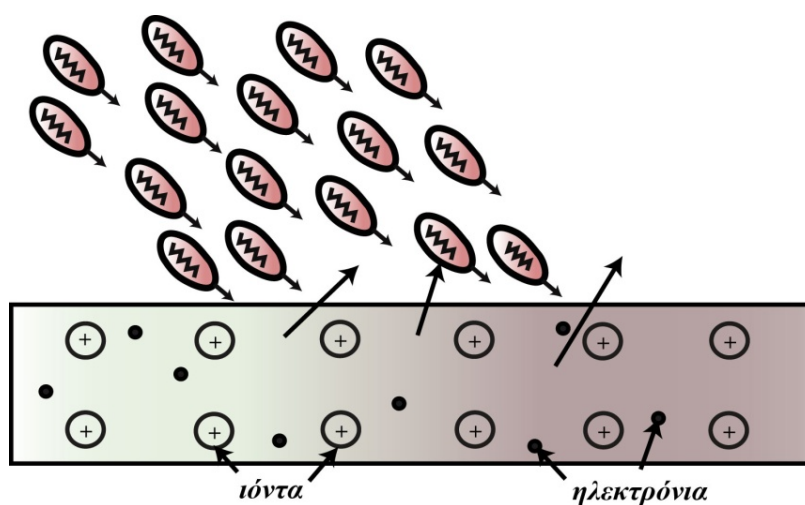
Η ακτινοβολία του μέλανος σώματος, και το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αποδεικνύουν το σωματιδιακό χαρακτήρα της ακτινοβολίας, μέσω της εκπομπής φωτονίων, δηλαδή μέσω των κβάντων ενέργειας $h\nu$. Το σωματιδιακό χαρακτήρα της ακτινοβολίας, τον απέδωσε ο Α. Einstein το 1909:

"είναι ένα αναντίρρητο γεγονός ότι υπάρχει μια εκτεταμένη συλλογή δεδομένων για την ακτινοβολία που δείχνουν ότι το φως έχει ορισμένες θεμελιώδης ιδιότητες που μπορούν να κατανοηθούν πολύ πιο εύκολα από τη σκοπιά της σωματιδιακής θεωρίας του Νεύτωνα παρά από τη σκοπιά της κυματικής θεωρίας.

Επομένως, κατά τη γνώμη μου, η επόμενη φάση ανάπτυξης της θεωρητικής φυσικής θα μας οδηγήσει σε μια θεωρία για το φως, που μπορεί να ερμηνευτεί σαν ένα είδος συγκερασμού της κυματικής και σωματιδιακής εικόνας."

Η θεωρία της σχετικότητας λοιπόν υποχρεώνει τα φωτεινά κβάντα, τα φωτόνια, να είναι σωματίδια και εκτός από ενέργεια, $E=hf$, να έχουν ορμή $p=h/\lambda$. Σύμφωνα με τα παραπάνω η σκέδαση της ακτινοβολίας με την ύλη μπορεί να περιγραφεί σαν μια αλληλεπίδραση δυο σωματιδίων, δηλαδή του ηλεκτρονίου και του ατόμου του φωτονίου, με τις αντίστοιχες μάζες ηρεμίας $m_0=m$ και $m_0=0$. Συνεπώς το πρόβλημα της σκεδάσεως ακτινοβολίας στη ύλη ανάγεται σε πρόβλημα σκεδάσεως υλικών σωματιδίων, έτσι ώστε να μπορούν να εφαρμοστούν οι αρχές διατήρησης της ενέργειας και της ορμής.

Μια παραστατική εικόνα για την κβάντωση του φωτός είναι αυτή του σχήματος 15, όπου τα φωτόνια, τα σωματίδια που προσπίπτουν σ' ένα μέταλλο και πραγματοποιούν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, παριστάνονται ως επιμηκυμένες "σταγόνες" με κυματοειδή γραμμή στο κεντρικό τους ως υπόδειξη της κυματικής τους φύσης την οποία και διατηρούν.



Σχήμα 15:Μια σύγχρονη εικόνα για το φως. Η φωτεινή δέσμη που πέφτει στην επιφάνεια ενός μετάλλου και αποσπά τα ηλεκτρόνια του μπορεί να παρασταθεί ως ένα είδος "φωτεινής βροχής" αλλά με απόλυτα "συμπαγείς" σταγόνες που μπορούν να απορροφηθούν μόνο ως αδιαίρετες μονάδες.



Εικόνα13: Ο Arthur Compton και ο Heisenberg Wermer το 1929 στο Σικάγο. Ο Arthur Compton ήταν Αμερικανός φυσικός και νομπελίστας Φυσικής για την ανακάλυψη του φαινομένου Compton.

Ένα σπουδαίο πείραμα που αποδείκνυε την πραγματική ύπαρξη σωματιδίων, έγινε το 1923 από τον Αμερικανό Φυσικό A.H. Compton, που μελέτησε τη κρούση ενός σωματιδίου με ένα κινούμενο ηλεκτρόνιο, ελεύθερο στο χώρο. Ο ιδανικός τρόπος για να παρατηρήσει τέτοιες κρούσεις θα ήταν να κατευθύνει μια δέσμη φωτός πάνω σε μια δέσμη ηλεκτρονίων. Αλλά δυστυχώς και στις ισχυρότερες δέσμες ηλεκτρονίων, ο αριθμός των ηλεκτρονίων είναι τόσο μικρός, ώστε θα έπρεπε να περιμένει αιώνες κανείς για να

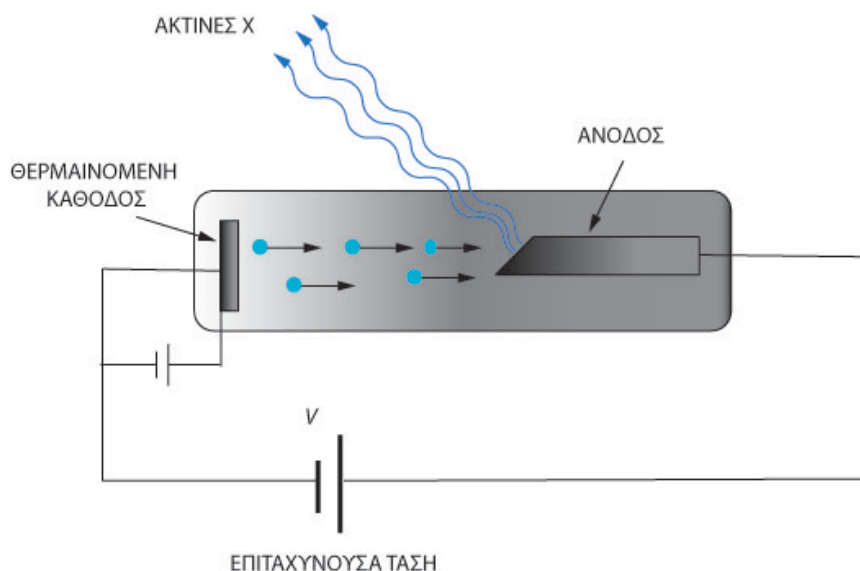
παρατηρήσει μια και μόνη κρούση. Ο Compton αντιμετώπισε τη δυσκολία αυτή με τη χρήση ακτίνων X που τα κβάντα τους φέρουν μεγάλα ποσά ενέργειας εξ αιτίας της πολύ μεγάλης συχνότητας που έχουν.

Οι ακτίνες X παράγονται από μια συσκευή, όπως αυτή του παρακάτω σχήματος (σχήμα 16). Μια θερμαινόμενη κάθοδος εκπέμπει ηλεκτρόνια τα οποία επιταχύνονται από μια διαφορά δυναμικού της τάξεως δεκάδων kV και προσπίπτουν πάνω στο υλικό της ανόδου όπου και “φρενάζονται” απότομα, εκπέμποντας ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Στη πραγματικότητα, λόγω της κβαντικής φύσης του φωτός, η εκπομπή αυτή γίνεται με τη μορφή φωτονίων σε ένα ευρύ φάσμα συχνοτήτων, αφού η κίνηση των ηλεκτρονίων δεν είναι μια αρμονική ταλάντωση, που θα φτάνει μέχρι μια μέγιστη τιμή f_{max} που προσδιορίζεται από τη σχέση,

$$hf_{max} = K = e \cdot V$$

όπου K η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων όταν φτάνουν στην άνοδο και η οποία ισούται επίσης με το έργο $e \cdot V$ της επιταχύνουσας τάσης πάνω στα συγκεκριμένα ηλεκτρόνια. Η παραπάνω σχέση προκύπτει αν θεωρήσουμε ότι όλη η κινητική ενέργεια ενός ηλεκτρονίου εκπέμπεται υπό τη μορφή ενός φωτεινού κβάντου, το οποίο όμως δεν είναι αναγκαστικό να συμβεί γι’ αυτό και η συχνότητα f_{max} που υπολογίζεται με αυτόν τον τρόπο, αποτελεί απλώς το άνω όριο του φάσματος ακτίνων X που εκπέμπεται από τον αντίστοιχο σωλήνα για μια δεδομένη επιταχύνουσα τάση V. Η παραπάνω σχέση δίνει μια καλή εκτίμηση της ενέργειας που έχουν τα περισσότερα από τα φωτόνια ακτίνων X, τα οποία παράγονται από το σωλήνα.

Παραδείγματος χάριν, για μια επιταχύνουσα τάση ίση με πενήντα χιλιάδες Volt (50 kV) τα παραγόμενα φωτόνια θα έχουν ενέργειες της τάξεως των τριάντα έως πενήντα χιλιάδων ηλεκτρονιοβόλτ (30 – 50 keV).



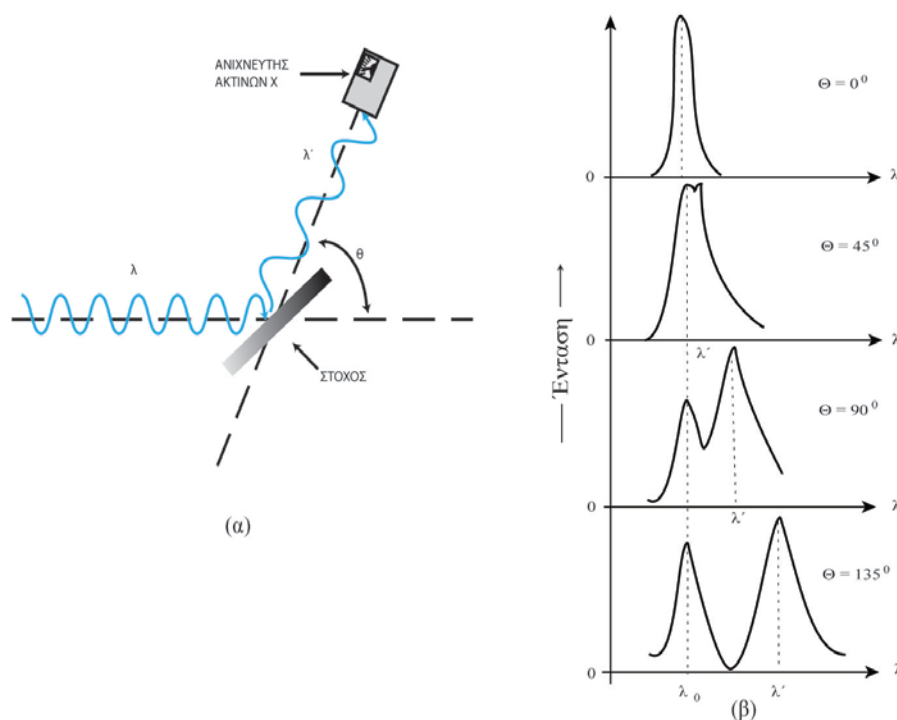
Σχήμα 16: Ένας σωλήνας ακτίνων Χ. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από τη θερμαινόμενη κάθοδο επιταχύνονται από μια μεγάλη διαφορά δυναμικού (δεκάδες kV) και “φρενάρονται” πάνω στην άνοδο μετατρέποντας – ολόκληρη ή εν μέρει- την κινητική τους ενέργεια σε αντίστοιχα κβάντα. Η μέγιστη δυνατή ενέργεια hf_{max} των εκπεμπόμενων φωτονίων θα είναι ίση με $e \cdot V$, όπου V η επιταχύνουσα τάση.

Το 1923 ο Compton δημοσίευσε τα αποτελέσματα πειραμάτων με ακτίνες Χ τα οποία επαληθεύουν, την υπόθεση του σωματιδιακού χαρακτήρα της ακτινοβολίας.

Στο παρακάτω σχήμα (α) δίνεται η πειραματική διάταξη του πειράματος Compton. Μονοχρωματική δέσμη ακτίνων Χ μήκους κύματος λ πέφτει πάνω σε γραφίτη, τα άτομα του οποίου δρουν ως κέντρα σκεδάσεως των ακτίνων Χ. Στη συνέχεια η σκεδασμένη ακτινοβολία αφού περάσει από μια σειρά κατευθυντήρων, αναλύεται με τη βοήθεια ενός κρυστάλλου και προσδιορίζεται η ένταση της σκεδασμένης ακτινοβολίας σε συνάρτηση του μήκος κύματος για διάφορες γωνίες σκεδάσεως με έναν μετρητή (π.χ. θάλαμο ιονισμού).

Τα αποτελέσματα του πειράματος δίνονται στο σχήμα (β) και παρατηρείται ότι, αν η προσπίπτουσα ακτινοβολία είναι βασικά μονοχρωματική μήκους κύματος λ , μετά τη σκέδαση στο γραφίτη σε κάποια γωνία εμφανίζονται δυο μέγιστα της εντάσεως της ακτινοβολίας. Το ένα μέγιστο αντιστοιχεί στο μήκος κύματος της ακτινοβολίας λ , το άλλο αντιστοιχεί σε ένα μεγαλύτερο μήκος κύματος λ' . Η διαφορά

$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ ονομάζεται μετατόπιση Compton και μεταβάλλεται με τη γωνία σκεδάσεως θ . συγχρόνως με την εμφάνιση των δυο μέγιστων παρατηρείται και εκπομπή ηλεκτρονίων τα οποία ονομάζονται ηλεκτρόνια Compton. Η μετατόπιση Compton με τη σύγχρονη εμφάνιση των ηλεκτρονίων Compton αποτελούν το γνωστό φαινόμενο Compton.



Σχήμα 17: α) Το πείραμα Compton. Μια δέσμη ακτίνων X στέλνεται πάνω σε έναν υλικό στόχο (γραφίτης στο αρχικό πείραμα) και, αφού σκεδαστεί στα ηλεκτρόνια του, ανιχνεύεται σε διάφορες γωνίες θ ως προς τη κατεύθυνση της αρχικής δέσμης. Το βασικό αποτέλεσμα του πειράματος είναι ότι η σκεδαζόμενη ακτινοβολία έχει μεγαλύτερο μήκος κύματος από την αρχική και μάλιστα τόσο μεγαλύτερο όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία σκέδασης θ . β) Πειραματικά αποτελέσματα του πειράματος Compton.

Το βασικό αποτέλεσμα του πειράματος Compton συνοψίζεται ως εξής:

Το φαινόμενο Compton: Η σκέδαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μικρού μήκους κύματος (π.χ. ακτίνες X) πάνω σε ελεύθερα ή ασθενώς δέσμευμένα ηλεκτρόνια συνοδεύεται από αύξηση μήκους κύματος της. Η αύξηση είναι τόσο μεγαλύτερη όσο μεγαλύτερη είναι η γωνία σκέδασης θ .

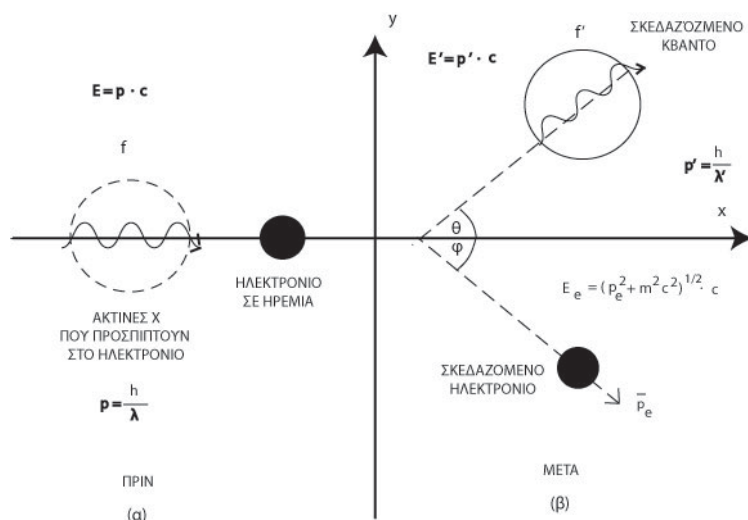
Ως προς τη δυνατότητα κλασικής ερμηνείας του φαινομένου Compton γίνεται γρήγορα αντιληπτό ότι η παρατηρούμενη μεταβολή συχνότητας και μήκους κύματος είναι ακατανόητη μέσα στο πλαίσιο του κλασικού ηλεκτρομαγνητισμού, όπου ο μηχανισμός του φαινομένου είναι πολύ απλός. Το ηλεκτρικό πεδίο του

προσπίπτοντος ηλεκτρομαγνητικού κύματος θέτει τα ηλεκτρόνια του στόχου σε αρμονική ταλάντωση με συχνότητα ίση με τη συχνότητα του κύματος. Τα ταλαντευόμενα ηλεκτρόνια με τη σειρά τους, εκπέμπουν ένα δευτερογενές ηλεκτρομαγνητικό κύμα με τη συχνότητα της ταλάντωσής τους, δηλαδή τη συχνότητα του αρχικού κύματος. Σύμφωνα λοιπόν με τη κλασική θεωρία, η μεταβολή συχνότητας κατά τη σκέδαση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας πάνω σε ελεύθερα ηλεκτρόνια είναι αδύνατη. Δηλαδή, το φαινόμενο Compton δεν υπάρχει.

3.2.3.2 Κβαντική ερμηνεία του φαινομένου Compton

Ο Compton ερμήνευσε τα πειραματικά αποτελέσματα σύμφωνα με τις αντιλήψεις του Einstein και του Plank ως εξής:

Σύμφωνα με τη Κβαντική Θεωρία η σκέδαση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας από ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο μπορεί να θεωρηθεί ως το αποτέλεσμα κρούσης του ηλεκτρονίου με το φωτόνιο, το οποίο έχει μάζα ηρεμίας μηδέν και ορμή $h\nu/c$. Σύμφωνα με τον μηχανισμό του φαινομένου το φωτόνιο απορροφάται προς στιγμήν από το ηλεκτρόνιο και αμέσως μετά επανεκπέμπεται προς μια κατεύθυνση διαφορετική της αρχικής. Η αρχική και η τελική φάση αυτής της διαδικασίας απεικονίζεται στο παρακάτω (σχήμα 18).



Σχήμα 18 : Η σκέδαση Compton ως σύγκρουση ενός φωτονίου με ένα ηλεκτρόνιο. Ως αποτέλεσμα της σύγκρουσης το ηλεκτρόνιο θα πάρει ένα μέρος από την ενέργεια του φωτονίου, το οποίο επομένως θα σκεδαστεί με μειωμένη ενέργεια, άρα και μειωμένη συχνότητα ή αυξημένο μήκος κύματος.

Ο βασικός πειραματικός νόμος του φαινομένου εξηγείται πάρα πολύ απλά. Καθώς το δευτερογενές φωτόνιο εκπέμπεται σε μια διαφορετική κατεύθυνση από την αρχική, η αρχή διατήρησης της ορμής επιβάλλει στο αρχικά ακίνητο ηλεκτρόνιο να κινηθεί αποκτώντας έτσι μια κινητική ενέργεια. Αλλά αυτό σημαίνει ότι η ενέργεια του δευτερογενούς φωτονίου θα είναι μειωμένη, σε σχέση με την αρχική, κατά ποσό ίσο με την κινητική ενέργεια που απέκτησε το ηλεκτρόνιο. Έτσι, αν, ε , ε' και f , f' είναι οι αρχικές και οι τελικές τιμές ενέργειας και συχνότητας του φωτονίου, αντίστοιχα, θα έχουμε:

$$\varepsilon' < \varepsilon \rightarrow hf' < hf \rightarrow f' < f$$

όπως ακριβώς δείχνει το πείραμα. Για τα μήκη κύματος $\lambda = c/f$ και $\lambda' = c/f'$ θα είναι αντίστοιχα $\lambda' > \lambda$.

Η αλλαγή $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda$ του μήκους κύματος θα εξαρτάται από τη γωνία εκπομπής θ του δευτερογενούς φωτονίου. Αυτή η εξάρτηση μπορεί να βρεθεί πολύ εύκολα από τις εξισώσεις διατήρησης της ορμής και της ενέργειας για την ελαστική κρούση του προηγούμενου σχήματος. Και η μόνη αλλαγή σε σχέση με μια κοινή σωματιδιακή σύγκρουση είναι ότι τώρα θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί η σχετικιστική σχέση ενέργειας – ορμής για το ηλεκτρόνιο

$$E = \sqrt{c^2 p^2 + m^2 c^4} \quad (m \equiv m_0)$$

διότι τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν πολύ μεγάλη ενέργεια και θα συμπαρασύρουν σε αντίστοιχα βίαιη κίνηση τα ηλεκτρόνια. Για τα φωτόνια θα ισχύουν οι σχέσεις του κυματοσωματιδικού δυϊσμού

$$\varepsilon = hf, \quad p_\gamma = \frac{h}{\lambda} = \frac{hf}{c},$$

οπότε οι εξισώσεις διατήρησης ορμής και ενέργειας θα γράφονται ως:

$$\text{Διατήρηση της ενέργειας} : hf + mc^2 = hf' + E \quad (1.8)$$

Διατήρηση της ορμής

$$\text{κατά τον άξονα } \chi : \frac{hf}{c} + 0 = \frac{hf'}{c} \cos \theta + p \cos \varphi \quad (1.9)$$

Διατήρηση της ορμής

$$\text{κατά τον άξονα } y \quad : \quad 0 + 0 = \frac{hf'}{c} \sin \theta - p \sin \varphi \quad (1.10)$$

όπου E και p η ενέργεια και η ορμή του σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου και φ η γωνία σκέδασης του. Για να υπολογιστεί η συχνότητα f' του δευτερογενούς φωτονίου συναρτήσει της γωνίας εκπομπής του, θ , θεωρείται σκόπιμο να απαλειφθούν οι παράμετροι E , p και φ που αφορούν το ηλεκτρόνιο.

Η απαλοιφή της γωνίας φ γίνεται κρατώντας τους όρους $p \cos \varphi$ και $p \sin \varphi$ στη μια μεριά των παραπάνω εξισώσεων, υψώνοντας στο τετράγωνο και προσθέτοντας κατά μέλη προκύπτει, πολλαπλασιάζοντας και με c^2 ,

$$c^2 p^2 = h^2(f^2 + f'^2 - 2ff' \cos \theta) \quad (1.11)$$

Η απαλοιφή των E και p γίνεται με βάση τη σχετικιστική σχέση ενέργειας – ορμής του ηλεκτρονίου

$$E^2 - c^2 p^2 = m^2 c^4$$

στην οποία το E αντικαθίσταται από τη σχέση 1.8 με:

$$E = h(f - f') + mc^2$$

και το $c^2 p^2$ από τη 1.11, έτσι θα προκύψει:

$$[h(f - f') + mc^2]^2 - h^2(f^2 + 2ff' \cos \theta) = m^2 c^4,$$

από όπου εκτελώντας τις πράξεις το αποτέλεσμα θα είναι,

$$\frac{1}{f'} - \frac{1}{f} = \frac{h}{mc^2} (1 - \cos \theta)$$

ή, ισοδύναμα, για την αλλαγή μήκους κύματος

$$\Delta \lambda = \lambda' - \lambda = c \left(\frac{1}{f'} - \frac{1}{f} \right)$$

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

Η ποσότητα h/mc συμβολίζεται με λ_c και είναι γνωστή ως μήκος κύματος Compton του ηλεκτρονίου, παρότι, δεν αντιπροσωπεύει κανένα μήκος κύματος, αλλά είναι απλώς μια ποσότητα με διαστάσεις μήκους που υπεισέρχεται στο τύπο του Compton για το $\Delta\lambda$.

Για τις γνωστές τιμές των σταθερών h , m ($\equiv m_e$) και c θα είναι

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = 2,4 \times 10^{-2} \text{Å}$$

το οποίο σημαίνει ότι η αλλαγή $\Delta\lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta) \rightarrow (\Delta\lambda)_{\max} = 2\lambda_c$ είναι αμελητέα για το ορατό φως όπου $\lambda \approx 6.000 \text{ Å}$ αλλά γίνεται σημαντική στις ακτίνες X, των οποίων το μήκος κύματος είναι της τάξεως του Angström και μικρότερο. Στη περίπτωση του φαινομένου Compton δεν έχει σημασία το απόλυτο μέγεθος της αλλαγής $\Delta\lambda$ αλλά η *ποσοστιαία* αλλαγή.

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_c}{\lambda} (1 - \cos \theta)$$

η οποία είναι σημαντική μόνο όταν το μήκος κύματος λ του προσπίπτοντος φωτονίου είναι συγκρίσιμο με το μήκος κύματος Compton του ηλεκτρονίου,

Όταν $\lambda = \lambda_c$, τότε η ενέργεια $\varepsilon = hf = hc/\lambda$ του φωτονίου είναι ίση με την ενέργεια ηρεμίας mc^2 του ηλεκτρονίου. Πράγματι, για $\lambda = \lambda_c = h/mc$ θα προκύψει:

$$\varepsilon = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_c} = \frac{hc}{h/mc} = mc^2$$

Διαπιστώνεται, ότι το φαινόμενο Compton αρχίζει να γίνεται σημαντικό όταν η ενέργεια του πρωτογενούς φωτονίου γίνει συγκρίσιμη με την ενέργεια ηρεμίας του ηλεκτρονίου ή μεγαλύτερη από αυτήν.

Αυτό είναι προφανές, όταν ένα μικρό ατσάλινο σφαιρίδιο συγκρούεται με μια βαριά ακίνητη σφαίρα απλώς αναπηδά χωρίς απώλεια ταχύτητας ή ενέργειας. Αντίθετα, όταν πέφτει πάνω σε μια ακίνητη σφαίρα συγκρίσιμης μάζας τότε τη μεταβιβάζει ένα μεγάλο μέρος από την κινητή του ενέργεια. Το ίδιο ακριβώς

συμβαίνει και με την ελαστική κρούση ενός φωτονίου με ένα ακίνητο ηλεκτρόνιο. Ένα φωτόνιο ενέργειας $\varepsilon = hf$ έχει μάζα κίνησης $\mu = \varepsilon/c^2 = hf/c^2$. Έτσι, όταν το φωτόνιο είναι πολύ ελαφρύτερο από το ακίνητο ηλεκτρόνιο ($\mu \ll m$), τότε απλώς θα αναπηδήσει πάνω του χωρίς καμία ενεργειακή απώλεια και επομένως χωρίς αλλαγή συχνότητας. Μια τέτοια αλλαγή θα συμβεί μόνο όταν το φωτόνιο αρχίσει να γίνεται εξίσου «βαρύ» ή «βαρύτερο» από το ηλεκτρόνιο. Όταν δηλαδή $\mu \geq m$. Αυτή η συνθήκη είναι ισοδύναμη με την $\lambda \leq \lambda_c$.

Με την παρατήρηση του φαινομένου Compton το 1922 και οι τελευταίες αντιρρήσεις για τον δυαδικό χαρακτήρα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας καταρρέουν. Η υπόθεση του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού του φωτός αποκτά πια ακλόνητη πειραματική βάση.

Εφαρμογές.

7. Πάνω σε μεταλλική επιφάνεια προσπίπτουν φωτόνια μήκους κύματος λ_1 και λ_2 , των οποίων οι απαιτούμενες ελάχιστες τάσεις κατά την επιβράδυνση των εξερχόμενων φωτοηλεκτρονίων μέχρι μηδενισμού της ταχύτητας τους είναι V_1 και V_2 , αντιστοίχως. Να βρεθούν: α) η σταθερά h του Planck, β) το έργο εξαγωγής των φωτοηλεκτρονίων και γ) η συχνότητα των φωτονίων για την οποία πρέπει να προσπέσουν στη μεταλλική επιφάνεια ώστε τα εξερχόμενα φωτοηλεκτρόνια να εξέρχονται με μηδενική ταχύτητα (Δίνονται: $\lambda_1=4358\text{\AA}$, $\lambda_2=5461\text{\AA}$, $V_1=0,95\text{ Volt}$, $V_2=0,38\text{ Volt}$).

Λύση

α) Η εξίσωση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι:

$$hf = \frac{1}{2}mu_0^2 + W \quad (1)$$

Για τα φωτόνια μήκους κύματος λ_1 και λ_2 , αντιστοίχως η (1) γράφεται:

$$\frac{ch}{\lambda_1} = \frac{1}{2}mu_1^2 \quad (2)$$

$$\frac{ch}{\lambda_2} = \frac{1}{2}mu_2^2 + W \quad (3)$$

Αλλά

$$\frac{1}{2}mu_1^2 + W = eV_1 \quad \text{και} \quad \frac{1}{2}mu_2^2 + W = eV_2$$

Επομένως οι εξισώσεις (2) και (3) γίνονται:

$$\frac{ch}{\lambda_1} = eV_1 + W \quad (4)$$

$$\frac{ch}{\lambda_2} = eV_2 + W \quad (5)$$

Λύνοντας το σύστημα των εξισώσεων (4) και (5) ως προς h και W , ισχύει:

$$h = \frac{(V_1 - V_2)}{c} \cdot \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2}{\lambda_1 - \lambda_2} \quad (6)$$

Αρα

$$h = \frac{0,912 \cdot 10^{-12} \text{erg}}{3 \cdot 10^{10} \text{cm/sec}} \frac{4358 \cdot 5461}{1103} \cdot 10^{-8} \text{cm} \Rightarrow$$

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{erg} \cdot \text{cm}$$

β) Το έργο εξαγωγής των φωτοηλεκτρονίων είναι:

$$W = \frac{\lambda_1 eV_1 - \lambda_2 eV_2}{\lambda_2 - \lambda_1}$$

Αρα

$$W = \frac{4358 \cdot 0,95 - 5461 \cdot 0,38}{1103} \text{eV} \Rightarrow$$

$$W = 1,9 \text{eV}$$

γ) Όταν τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια της επιφάνειας του μετάλλου έχουν μηδενική ταχύτητα, τότε η ενέργεια των φωτονίων ισούται με το έργο εξαγωγής των φωτοηλεκτρονίων,

$$hf = W$$

Ισχύει,

$$f = \frac{W}{h}$$

Οπότε

$$f = \frac{1,9 \cdot 1,6 \cdot 10^{-12} \text{ erg}}{6,62 \cdot 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}} \Rightarrow$$

$$f = 4,6 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$$

8. Σε ένα πείραμα Compton τα προσπίπτοντα φωτόνια έχουν μήκος κύματος $\lambda = 1,2 \times 10^{-2} \text{ \AA} = \lambda_c/2$ και κάποια από αυτά ανιχνεύονται από έναν μετρητή που έχει τοποθετηθεί σε μια γωνία 60° από την κατεύθυνση της προσπίπτουσας δέσμης. Υπολογίστε: α) Το μήκος κύματος του σκεδαζόμενου φωτονίου καθώς επίσης την ορμή και την ενέργειά του. β) Την ορμή και την ενέργεια του σκεδαζόμενου ηλεκτρονίου καθώς και τη γωνία σκέδασής του. Εκφράστε τα αποτελέσματά σας συναρτήσει της μάζας του ηλεκτρονίου και θεμελιωδών φυσικών σταθερών.

Λύση

Για $\lambda = \lambda_c/2$ και $\theta = 60^\circ$ ($\rightarrow \cos \theta = 1/2$) ο τύπος $\Delta\lambda = \lambda' - \lambda = \lambda_c (1 - \cos \theta)$ δίνει αμέσως $\lambda' = \lambda_c$, δηλαδή το διπλάσιο μήκος κύματος από το αρχικό. Ως προς την ορμή και την ενέργεια του φωτονίου πριν και μετά τη σκέδαση, θα είναι:

$$p_\gamma = \frac{h}{\lambda} = \frac{h}{\lambda/2} = \frac{h}{\frac{\lambda_c}{2}} = 2mc, \quad p_{\gamma'} = \frac{h}{\lambda'} = \frac{h}{\lambda_c} = mc$$

και

$$\varepsilon = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda_c/2} = 2mc^2, \quad \varepsilon' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{hc}{\lambda_c} = mc^2,$$

όπου ο δείκτης «γ» στο σύμβολο p της ορμής αντιστοιχεί, στο καθιερωμένο σωματιδιακό σύμβολο του φωτονίου και προστίθενται για διάκριση από το σύμβολο p της ορμής του ηλεκτρονίου. Με τα παραπάνω δεδομένα οι αρχές διατήρησης και ενέργειας γράφονται ως:

α) Διατήρηση της ενέργειας

$$\begin{aligned} \varepsilon + mc^2 &= \varepsilon' + E & \Rightarrow & \quad 2mc^2 + mc^2 = mc^2 + E \\ & & \Rightarrow & \quad E = 2mc^2 \end{aligned}$$

β) Διατήρηση της ορμής κατά άξονα (Σχήμα 11 με $\theta = 60^\circ$)

$$p_y + 0 = p_y' \cos \varphi \Rightarrow 2mc + 0 = mc \frac{1}{2} + p \cos \varphi$$

$$\Rightarrow p \cos \varphi = \frac{3}{2} mc \quad (1)$$

γ) Διατήρηση ορμής κατά άξονα y

$$0 + 0 = p_y' \sin \theta - p \sin \varphi \Rightarrow 0 = mc \frac{\sqrt{3}}{2} - p \sin \varphi$$

$$\Rightarrow p \sin \varphi = mc \frac{\sqrt{3}}{2} \quad (2)$$

Υψώνοντας στο τετράγωνο και προσθέτοντας κατά μέλη τις εξισώσεις (1) και (2) προκύπτει:

$$p^2 = 3m^2 c^2 \Rightarrow p = \sqrt{3} mc$$

οπότε βάσει της (1), θα είναι $\sqrt{3} mc \cos \varphi = \left(\frac{3}{2}\right) mc \Rightarrow \cos \varphi = \frac{\sqrt{3}}{2} \Rightarrow \varphi = 30^\circ$.

Με υπολογισμένα τα p και τα E για το ηλεκτρόνιο ($p = \sqrt{3} mc$, $E = 2mc^2$) θα πρέπει να ισχύει ότι: $E^2 = c^2 p^2 + m^2 c^4$, πράγμα που ισχύει.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

1. D. Amarath, M. Diehl, J.P. Lansberg, *Deeply virtual Compton scattering on a virtual pion target*, Eur. Rhys. J.C.58: 179-192 (2008)
2. F.A. Beck, I. Piqueras, E. Pachoud, G. Duchene, O.Dorvaux, P. Medina and C. Ring, *An alternative gamma tracking method using the Compton scattering probability*, Eur. Rhys. J. A. 20, 203-204 (2004)
3. A.H Compton, Phys. Rev. 21, 438 (1923)
4. A.H Compton, Phys. Rev. 22, 409 (1923)
5. B. Gross, *The Compton Current*, Zeitschrift für Physik, 155, 479-487 (1959)
6. S. Klassen, *The Reconstructing the story for the Physics Classroom*, Sci & Educ, (2009)
7. J.P.Lowe, Kirk A. Peterson, *Quantum Chemistry*, Elsevier Academic Press, 2006
8. B. R. Wheaton, *Photoelectric Effect*, Journal of Sol-Gel Science and technology, (1998) 472-475

9. L.Xin, XU Wei-jun, LIU Chun-liang, and Liang Zhi-hu, *Experiment study of forming and activation of conductive film of the surface conductive film of the surface conduction electron emitter display*, Optoelectronics Letter, Vol.3, No.1, 15 Jan. 2007
10. R. R. Zope, M. K. Harbola and R. K. Pathak, *Atomic Compton profiles within different exchange – only theories*. Eur. Rhys. J. D. 151-155 (1999)
11. http://www.genproenergy.com/photoelectric_effect.html
12. http://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/Einstein_and_photoelectric_effect.html
13. http://galileo.phys.virginia.edu/classes/252/photoelectric_effect.html
14. http://en.wikipedia.org/wiki/Arthur_Compton
15. <http://www.physics4u.gr/articles/quantum100.html>
16. http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Wien

Ελληνόγλωσση

1. Γ. Ι. Ανδριτσόπουλος, *Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική*, Ιωάννινα 1984
2. Τζώρτζ Γκάμοφ, *Τρίαντα χρόνια που συγκλόνισαν τη φυσική*, Επιστημονικές εκδόσεις Β. Σελούντος, Αθήνα 1971
3. Αθαν. Σ. Γκιτζένης, *Θεωρία και Ασκήσεις Κβαντομηχανικής*, 1972
4. Emilio Segrè, *Ιστορία της φυσικής, Από τις Ακτίνες Χ έως τα Κουάρκ*, Εκδόσεις Δίαυλος, Αθήνα 1997
5. Στ. Μάσεν, Β.Κάργα, Κ.Δασκαλογιάννη, Μ.Γρυπαίου, *Ασκήσεις κβαντομηχανικής*, Θεσσαλονίκη 1980.
6. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική Ι* , Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2005

3.3. Άτομα και Πυρήνες.

3.3.1 Το πρότυπο του Thomson.

Από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής, τα φωτόνια και τα ηλεκτρόνια είναι δυο διαφορετικά είδη αντικειμένων. Αντίθετα, στη κβαντική φυσική τα φωτόνια και τα

ηλεκτρόνια είναι κβαντικά αντικείμενα και συμπεριφέρονται με κβαντομηχανικό τρόπο. Το 1987 ο J.J. Thomson μέτρησε το λόγο του ηλεκτρικού φορτίου προς τη μάζα του ηλεκτρονίου και αναγνώρισε το ηλεκτρόνιο ως νέο στοιχειώδες σωματίδιο της φύσης. Τριάντα χρόνια αργότερα, ο γιος του G.P Thomson καθώς και οι Davisson και Germer στις Η.Π.Α. ανακάλυψαν μετά από σειρά μετρήσεων ότι τα ηλεκτρόνια συμπεριφέρονται επίσης σαν κύματα.

Ο J.J. Thomson πρότεινε το εξής πρότυπο του ατόμου, θεωρώντας ότι το θετικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο μέσα σε μια ιδεατή σφαίρα ακτίνας 10^{-8}cm , και τα ηλεκτρόνια είναι διασπαρμένα μέσα στο

θετικό ηλεκτρονικό νέφος και βρίσκονται σε θέσεις ευσταθούς ισορροπίας. Δηλαδή το σύστημα έχει ελάχιστη ολική ενέργεια. Όταν τα άτομα διεγερθούν, δηλαδή όταν το υλικό στο οποίο ανήκει το άτομο, βρεθεί σε υψηλότερες θερμοκρασίες, τα ηλεκτρόνια εκτελούν αρμονικές ταλαντώσεις γύρω από τις θέσεις ισορροπίας. Οι δυνάμεις που ασκούνται ανάμεσα στα ηλεκτρόνια και στο νέφος του θετικού φορτίου είναι ηλεκτροστατικής φύσης και το όλο σύστημα είναι ηλεκτρικά ουδέτερο.

Οι δονήσεις των ηλεκτρονίων έχουν σαν συνέπεια, τη εκπομπή ακτινοβολίας σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία.

Πιο απλά η βασική ιδέα του J.J. Thomson είναι ότι τα θετικά φορτία κατανέμονται σε μια διάχυτη μάζα, ένα είδος “ζελέ”, που καταλαμβάνει όλο τον όγκο του ατόμου (όπως απεικονίζεται και στο σχήμα 19). Επάνω σε αυτό το “ζελέ” είναι

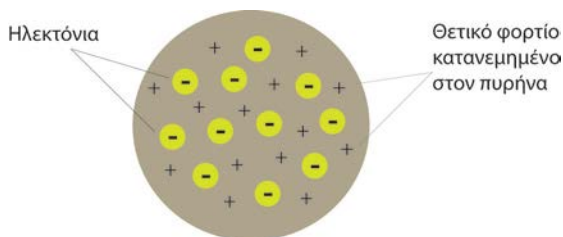


Εικόνα 14: Ο Άγγλος J.J Thomson (1856- 1940). Σπούδασε στο πανεπιστήμιο του Owen's College, όπου μελέτησε μαθηματικά. Το 1884 σε ηλικία 27 ετών γίνεται καθηγητής Φυσικής και διευθυντής του Cavendish Laboratory. Το 1906 πήρε βραβείο Nobel στη φυσική. Η τελετή απονομής έγινε στις 11 Δεκεμβρίου του 1906 με τίτλο ομιλίας “Φορέας αρνητικού ηλεκτρισμού”.

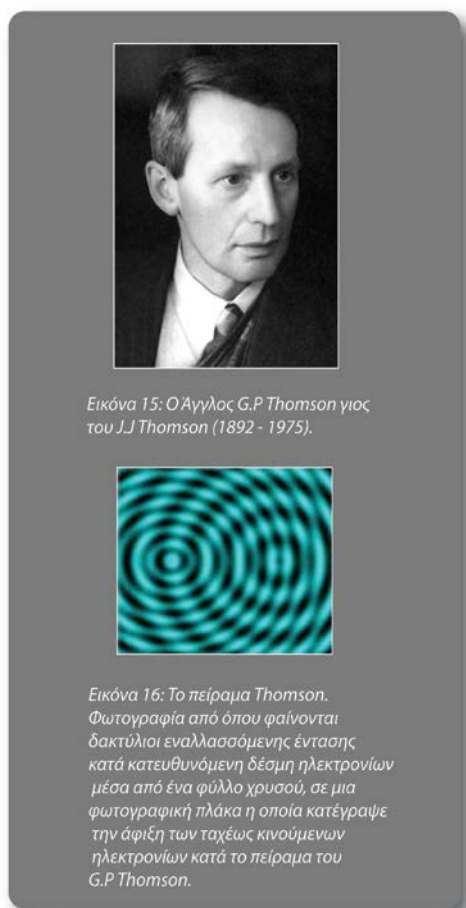
«Θα μπορούσαμε να πούμε πως ο Thomson πατέρας πήρε το βραβείο Νόμπελ επειδή απέδειξε ότι το ηλεκτρόνιο είναι σωματίδιο και ο Thomson γιος επειδή απέδειξε ότι το ηλεκτρόνιο είναι κύμα»

Ιστορικός Max Jammer

“προσκολλημένα” τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες στο σταφιδόψωμο, εκτελώντας μικρές ταλαντώσεις γύρω από τη θέση ισορροπίας τους.



Σχήμα 19: Το πρότυπο πείραμα του Thomson. Τα θετικά φορτία κατανέμονται σε μια διάχυτη μάζα, ένα είδος “ζελέ”, που καταλαμβάνει όλο τον όγκο του ατόμου. Επάνω σε αυτό το “ζελέ” είναι “κολλημένα” τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια όπως οι σταφίδες στο σταφιδόψωμο.

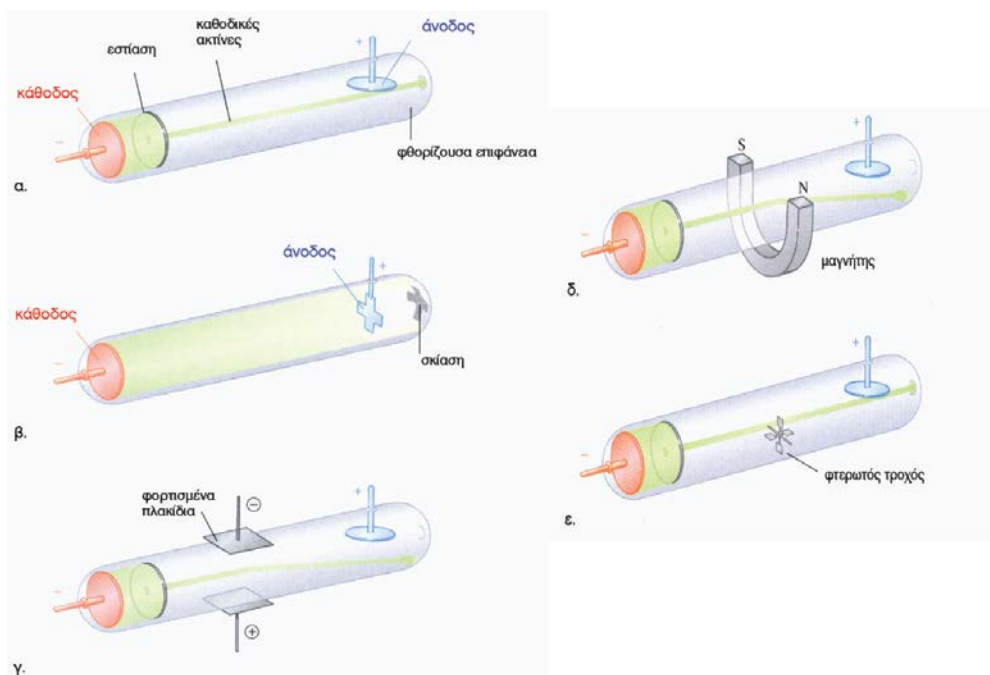


Ο J.J. Thomson κάνοντας τρία πειράματα διατύπωσε τρεις υποθέσεις:

- α) Οι καθοδικές ακτίνες είναι φορτισμένα σωματίδια (τα οποία τα ονόμασε corpuscles).
- β) Τα σωματίδια αυτά είναι συστατικά του ατόμου.
- γ) Τα σωματίδια αυτά είναι τα μόνο συστατικά του ατόμου.

Οι ποσοτικές προβλέψεις φασμάτων εκπομπής του παραπάνω πρότυπου διαφωνούν με τα πειραματικά δεδομένα, πράγμα που αποδεικνύεται με το πρότυπο Rutherford.

Την εποχή που ο Thomson ανακάλυψε τα ηλεκτρόνια κανείς δε φαντάζονταν ότι τα φορτισμένα αυτά σωματίδια που δε μπορεί κανείς να δει με γυμνό μάτι, θα βοηθούσαν μερικές δεκαετίες αργότερα να γίνει εμφανής η ύλη μέσα από τα οπτικά μικροσκόπια.



Σχήμα 20: α. Διάταξη παραγωγής καθοδικών ακτίνων. β. Πειραματική απόδειξη ότι η δέσμη ηλεκτρονίων οδεύει ευθύγραμμα. γ. Οι καθοδικές ακτίνες εκτρέπονται από ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο αποδεικνύει ότι τα ηλεκτρόνια είναι φορτισμένα. δ. Οι καθοδικές ακτίνες εκτρέπονται από μαγνητικό πεδίο. ε. Απόδειξη της σωματιδιακής φύσης των ηλεκτρονίων, η δέσμη ηλεκτρονίων κινεί τον τροχό.



Σχήμα 21: Πειραματική διάταξη που χρησιμοποίησε ο Thomson για την ανακάλυψη του ηλεκτρονίου.

3.3.2 Το πρότυπο του Rutherford.

Ο Rutherford το 1911 σε μια δημοσίευση του ανέλυσε τα πειραματικά αποτελέσματα των Geiger και Marsden της σκεδάσεως άλφα σωματιδίων που έπεφταν πάνω σε λεπτό μεταλλικό φύλλο. Από τα πειράματα αυτά διαπίστωσε ότι όλη σχεδόν η μάζα και ολόκληρο το θετικό φορτίο του ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή κεντρική περιοχή που ο Rutherford αποκάλεσε “πυρήνα” του ατόμου. Το μεγαλύτερο μέρος του ατόμου είναι κενός χώρος.



Εικόνα 17: Ο Νεοζηλανδός πυρηνικός φυσικός Ernest Rutherford (1871 - 1937) είναι γνωστός ως ο πατέρας της Πυρηνικής Φυσικής. Έκανε καριέρα στην Αγγλία, δίδαξε στο Cambridge και πήρε το Νόμπελ Χημείας το 1908.



Εικόνα 18: Το εργαστήριο του Ernest Rutherford. Ο Rutherford εκτός από τις επιτυχημένες έρευνες πάνω στην ραδιενέργεια και στην πυρηνική φυσική, επηρέασε και μια ολόκληρη γενιά Βρετανών πειραματικών φυσικών. Ο Rutherford είχε μια βροντερή φωνή που μπορούσε να απορροθίσει τα ευαίσθητα πειραματικά όργανα και η επιγραφή "ΠΑΡΑΚΑΛΩ ΜΗΛΑΤΕ ΣΙΓΑ" που υπήρχε στο εργαστήριο του απευθύνονταν με χιούμορ σε αυτόν.



Εικόνα 19: Χαρτονόμισμα με τον E. Rutherford.

Τα άτομα είναι τελείως αδύνατο να υπάρχουν από την άποψη της κλασικής φυσικής.

Richard Feynman

Ήταν το πιο απίστευτο γεγονός που μου έτυχε στη ζωή μου. Ήταν σχεδόν τόσο απίστευτο, όσο και να βάλεις μια οβίδα 15 ιντσών σε ένα φύλλο χαρτιού και να γυρίσει να σε χτυπήσει. Καθώς άρχισα να σκέφτομαι, κατάλαβα ότι αυτή η οπισθοσκέδαση θα έπρεπε να οφείλεται σε μια μοναδική κρούση και κάνοντας τους υπολογισμούς, είδα ότι ο μόνος τρόπος για να πάρει κανείς μια τέξη μεγέθους ήταν να θεωρήσει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του ατόμου ήταν συγκεντρωμένο σε έναν μικροσκοπικό πυρήνα.

E. Rutherford

Ο Rutherford το 1908 είχε πάρει βραβείο Νόμπελ για τις εργασίες του πάνω στην ραδιενέργεια. Η ραδιενέργεια οφείλεται στη “διάσπαση” του ασταθούς πυρήνα των ατόμων ορισμένων χημικών στοιχείων, κατά την οποία εκπέμπεται ακτινοβολία με τη μορφή ακτίνων α , β ή γ , και προκύπτει ένας πυρήνας ατόμου ενός άλλου χημικού στοιχείου.

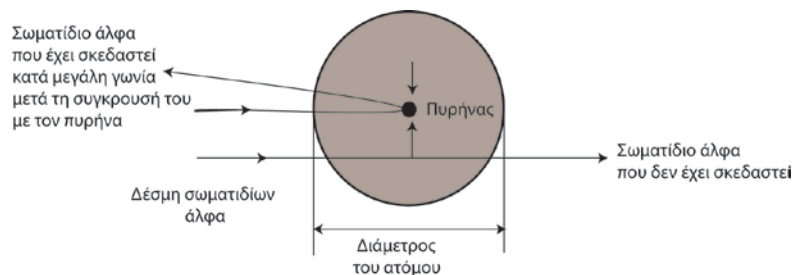
Ο Rutherford ήταν εκείνος που έδειξε ότι οι θετικά φορτισμένες βαριές διεισδυτικές ακτίνες α ήταν στη πραγματικότητα άτομα ηλίου που είχαν χάσει δυο ηλεκτρόνια. Διαπιστώθηκε επίσης ότι οι ακτίνες β ήταν ηλεκτρόνια και οι ακτίνες γ , φωτόνια μεγάλης ενέργειας.

Η ανακάλυψη του πυρήνα των ατόμων από τον Rutherford έγινε με τη χρήση της παραδοσιακής μεθόδου των φυσικών όπου χτυπάνε ένα πράγμα με ένα άλλο και παρατηρούν τι συμβαίνει.

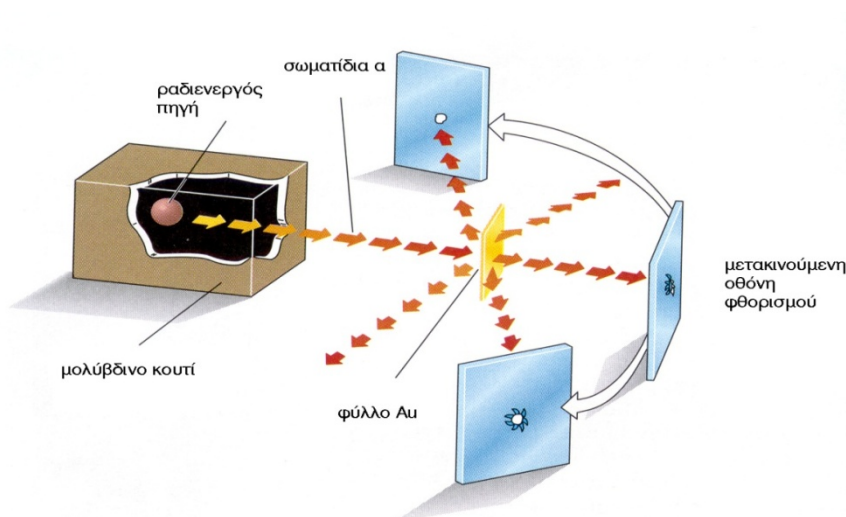
Το πείραμα έγινε το 1894 από τους Geiger και Marsden στο εργαστήριο που διεύθυνε ο Rutherford και η βασική του ιδέα είναι η εξής: από μία ραδιενεργό πηγή γίνεται χρήση μιας μονοενεργειακής δέσμης σωματιδίων α , ενέργειας μερικών MeV, η οποία στέλνεται προς σκέδαση πάνω σε λεπτό φύλλο χρυσού. Ένας μετρητής, ο οποίος μπορεί να τοποθετηθεί σε διάφορες γωνίες δίνει τη

δυνατότητα μέτρησης της γωνιακής κατανομής των σκεδαζόμενων σωματιδίων. Κατά το πείραμα ένα μικρό ποσοστό α - σωματιδίων κατά τη δίοδο τους από φύλλο χρυσού πάθαιναν σκέδαση σε γωνίες μεγαλύτερες και από 90° . Η παρατήρηση αυτή οδήγησε στο Rutherford στην υπόθεση ότι η σκέδαση αυτή προέρχεται από κάποιον ισχυρό κεντρικό πυρήνα φορτίων, ο οποίος σκεδάζει το α - σωματίο και το αναγκάζει να

διαγράφει υπερβολική τροχιά. Ο κεντρικός αυτός πυρήνας αποτελεί μια από τις εστίες της υπερβολής.

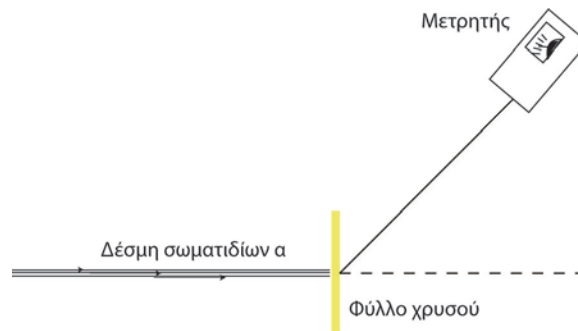


Σχήμα 22: Εξήγηση του πειράματος Rutherford για την σκέδαση των σωματιδίων άλφα. Ο πυρήνας είναι περίπου εκατό χιλιάδες φορές μικρότερος από το άτομο. Μόνο αν ένα σωματίδιο άλφα τύχει να συγκρουστεί με τον πολύ μικρό πυρήνα θα σκεδαστεί κατά μια μεγάλη γωνία, πράγμα που συμβαίνει σπάνια.



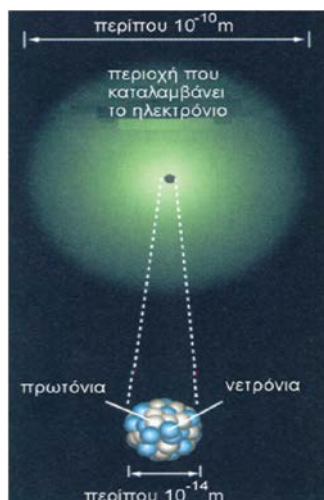
Σχήμα 23: Η πειραματική διάταξη των Geiger-Marsd.

Με βάση τα παραπάνω ο Rutherford διατύπωσε ένα ατομικό μοντέλο, κατά το οποίο δέχεται ότι, ένα άτομο αποτελείται από έναν ισχυρό πυρήνα που είναι θετικά φορτισμένος και έχει μάζα. Τόσο η μάζα όσο και το ποσό του φορτίου εξαρτώνται από το είδος του ατόμου.



Σχήμα 24: Το πείραμα του Rutherford. Η σκέδαση σωματιδίων α μεγάλης ενέργειας από τα άτομα του “στόχου” μπορεί να αποκαλύψει τη δομή του ατόμου.

Ο πυρήνας του ατόμου περιέχει σωματίδια που ονομάζονται πρωτόνια (εφ’ όσον ένα άτομο σε κανονικές συνθήκες εμφανίζεται ηλεκτρικά ουδέτερο, θα πρέπει ο αριθμός των ηλεκτρονίων να είναι ίσος με τον αριθμό των θετικά φορτισμένων σωματιδίων που απαρτίζουν τον πυρήνα) και σωματίδια που ονομάζονται νετρόνια (που είναι ηλεκτρικά ουδέτερα). Το ολικό φορτίο του πυρήνα είναι $+Ze$, όπου e είναι το στοιχειώδες ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου και Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων ή των ηλεκτρονίων. Ο αριθμός αυτός λέγεται ατομικός αριθμός. Η μάζα του ατόμου ισούται με το άθροισμα της μάζας του πυρήνα και της μάζας των ηλεκτρονίων. Και αφού η μάζα του πρωτονίου είναι περίπου 1840 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου, πρακτικά η μάζα του ατόμου θεωρείται ίση με τη μάζα του πυρήνα. Οι διαφορετικοί αριθμοί πρωτονίων και νετρονίων στον πυρήνα εξηγούν τα διαφορετικά χημικά στοιχεία. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια συγκρατούνται μέσα στον μικρό όγκο του πυρήνα από δυνάμεις που είναι πολύ μεγαλύτερες από την ηλεκτρική άπωση μεταξύ των πρωτονίων.



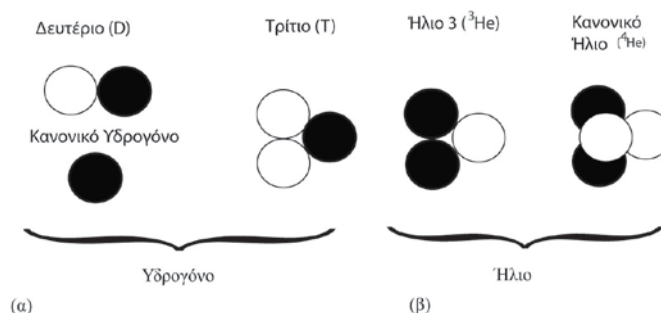
Σχήμα 25: Ο πυρήνας του ατόμου.

Ο πιο απλός πυρήνας είναι του υδρογόνου, αφού αποτελείται από ένα μόνο πρωτόνιο. Οι επόμενοι πιο απλοί πυρήνες αποτελούνται από σωματίδια α , που

είναι πυρήνες ηλίου με δυο πρωτόνια και δυο νετρόνια. Σε ένα ουδέτερο άτομο το θετικό φορτίο του πυρήνα εξισορροπείται από το αρνητικό ηλεκτρικό φορτίο ηλεκτρονίων. Το άτομο του υδρογόνου έχει ένα ηλεκτρόνιο ενώ του ηλίου δυο. Το χημικό χαρακτήρα των διάφορων ατόμων τον προσδιορίζει ο αριθμός των ηλεκτρονίων που είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων του πυρήνα τους. Έτσι, αν και οι ισχυρές πυρηνικές

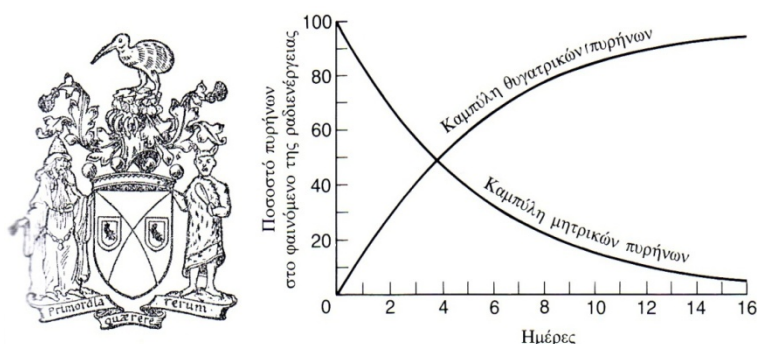
δυνάμεις συχνά επιτρέπουν στον πυρήνα του ατόμου ενός χημικού στοιχείου να υπάρχει με διαφορετικές μορφές που αντιστοιχούν σε διαφορετικούς αριθμούς νετρονίων, όλα αυτά τα ισότοπα έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες.

Όσον αφορά το υδρογόνο, υπάρχουν σπάνια ισότοπα υδρογόνου που ο πυρήνας τους αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ή δυο νετρόνια. αυτά τα ισότοπα του υδρογόνου ονομάζονται “δευτέριο” και “τρίτιο”.



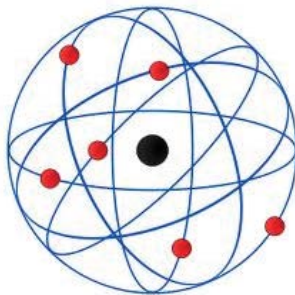
Σχήμα 26: Ισότοπα του υδρογόνου και του ηλίου. Οι μαύροι κύκλοι παριστάνουν πρωτόνια και οι λευκοί νετρόνια. α) Δευτέριο και Τρίτιο, β) Ήλιο 3 (^3He) και κανονικό ήλιο (^4He).

Μερικά ισότοπα, ιδιαίτερα των βαριών στοιχείων, είναι ασταθή και υφίσταται ραδιενεργό “διάσπαση” μεταπίπτοντας σε πιο σταθερά άτομα.



Σχήμα 27: Το οικοδόμημα του Λόρδου Rutherford του Nelson. Ο Rutherford έγινε βαρόνος το 1931 και αποφάσισε να συνδέσει το όνομα του με τη πόλη Nelson της Νέας Ζηλανδίας, τη γενέτειρά του. Στην εικόνα αριστερά το πουλί Κίβι στο πάνω μέρος και ο ιθαγενής Μαορί δεξιά, με το ρόπαλο στο χέρι μαρτυρούν την αγάπη του για τη Νέα Ζηλανδία. Οι δυο καμπύλες πάνω στην ασπίδα είναι από το γράφημα του διάσημου άρθρου του για τη ραδιενέργεια. Αριστερά της ασπίδας είναι ο Ερμής ο Τρισμέγιστος, όπως ονομάζονταν ο θεός Θωτ των αρχαίων Αιγυπτίων που θεωρούνταν υπεύθυνος για μυστηριώδη πράγματα, όπως η αλχημεία. Έτσι με μια έννοια ο Rutherford πήρε το Νόμπελ για κάποιο μοντέρνο είδος αλχημείας. Το ρητό κάτω σημαίνει: «να αναζητάμε τις απαρχές των πραγμάτων».

Ο Rutherford απεικόνισε το άτομο ως μια μικρογραφία του ηλιακού συστήματος με τα ηλεκτρόνια να περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο. Οι μεγάλες τροχιές των ηλεκτρονίων θα μπορούσαν να ερμηνεύσουν το μεγάλο μέγεθος του ατόμου σε σύγκριση με το μέγεθος του πυρήνα. Το άτομο ως σύνολο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο και τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται σε τροχιές από την ηλεκτρική έλξη ανάμεσα σε αυτά και τον θετικά φορτισμένο πυρήνα.

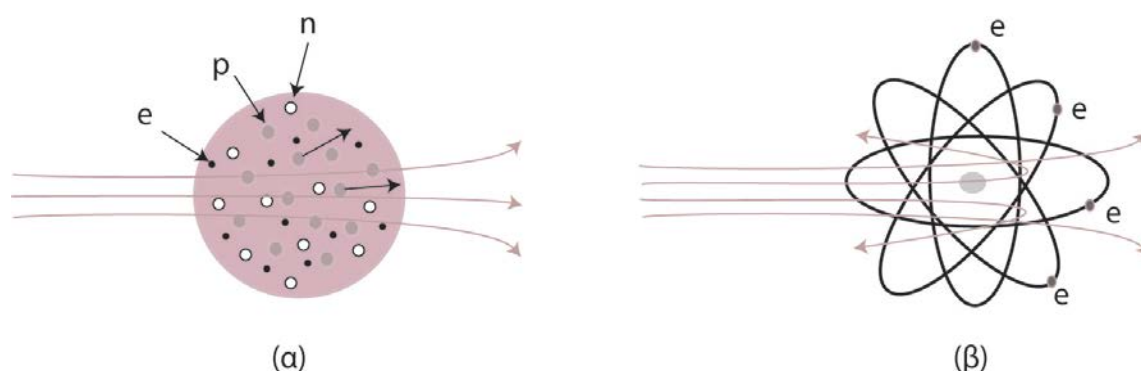


Σχήμα 28: Σχηματική εικόνα του μοντέλου του ατόμου του Rutherford – Bohr. Το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο στο κέντρο του ατόμου ενώ τα ηλεκτρόνια διαγράφουν τροχιές γύρω από έναν πυρήνα, όμοιες με τις τροχιές των πλανητών στο ηλιακό σύστημα.

Τα δυο πρότυπα μοντέλα του Thomson (τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια είναι ομοιόμορφα αναμεμειγμένα με τα ηλεκτρόνια σε όλη την έκταση του ατόμου) και του Rutherford (πρωτόνια και νετρόνια είναι συγκεντρωμένα σε έναν μικροσκοπικό μαζικό πυρήνα στο κέντρο του ατόμου, ενώ τα ηλεκτρόνια περιφέρονται σε μεγάλες αποστάσεις από αυτόν) διαφέρουν ως προς τη σκέδαση σε μεγάλες γωνίες. Επειδή το σωματίδιο α είναι αρκετά βαρύ (τέσσερις φορές βαρύτερο από το πρωτόνιο) και διασχίζει τα άτομα του χρυσού με πολλή μεγάλη ταχύτητα, ο μόνος τρόπος για να εκτραπεί σημαντικά από την ευθύγραμμη τροχιά του είναι να δεχτεί μια πολύ μεγάλη δύναμη, το οποίο όμως μπορεί να συμβεί μόνο αν πλησιάσει πάρα πολύ κοντά σε ένα από τα φορτισμένα σωματίδια του ατόμου. Αυτό όμως μπορεί να συμβεί μόνο αν υπάρχουν βαριά φορτισμένα σωματίδια, τα οποία θα παραμείνουν πρακτικώς ακίνητα καθώς πλησιάζει το σωματίδιο α , οπότε μπορεί να ασκήσουν πάνω του μια ισχυρή ηλεκτρική δύναμη ικανή να το εκτρέψει αισθητά από την ευθύγραμμη τροχιά του.

Στο πρότυπο Thomson αντιθέτως η δυνατότητα αυτή είναι ανύπαρκτη. Το πιο βαρύ φορτισμένο σωματίδιο του ατόμου είναι το πρωτόνιο και αυτό είναι τέσσερις φορές ελαφρύτερο από το σωματίδιο α . Έτσι το τελευταίο περνά σα βολίδα μέσα από το άτομο, σκορπίζοντας τα πρωτόνια δεξιά και αριστερά. Στο πρότυπο αυτό η σκέδαση περιορίζεται σε μια έως δυο μοίρες γύρω από την αρχική κατεύθυνση των σωματιδίων α (σχήμα 26α).

Στο πλανητικό μοντέλο όμως τα πράγματα διαφέρουν. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια είναι συγκεντρωμένα σε έναν μικροσκοπικό μαζικό πυρήνα. Στο άτομο του χρυσού για παράδειγμα ($Z=79$, $A=197$), ο πυρήνας είναι γύρω στις πενήντα φορές βαρύτερος από το σωματίδιο α . Εξαιτίας του πολύ μικρού πυρηνικού μεγέθους, τα περισσότερα σωματίδια της δέσμης θα περάσουν μακριά από τον πυρήνα και θα υποστούν ασήμαντη απόκλιση. Το μικρό και μετρήσιμο ποσοστό όμως που θα περάσει δίπλα του, θα υποστεί μια πανίσχυρη ασήμαντη άπωση ικανή να το εκτρέψει ακόμα και κατά εκατόν ογδόντα μοίρες από την ευθύγραμμη τροχιά του (σχήμα 29β).



Σχήμα 29: Δυο πιθανά σενάρια για το πείραμα του Rutherford. α) Η σκέδαση περιορίζεται λίγες μοίρες γύρω από την αρχική κατεύθυνση της δέσμης. β) Το πλανητικό μοντέλο: λόγω της μεγάλης μάζας του, ο πυρήνας του ατόμου παραμένει πρακτικά ακίνητος καθώς πλησιάζουν τα σωματίδια άλφα και, επομένως, μπορεί να τους ασκήσει μια ισχυρότατη ηλεκτρική άπωση ικανή να τα εκτρέψει ακόμα και 180° από την ευθύγραμμη τροχιά τους.

Ο Bohr επεσήμανε τις δυσκολίες που παρουσιάζει η δομή του ατόμου στο πλαίσιο της "πυρηνικής" θεωρίας και απέδειξε ότι με την κλασική μηχανική δεν είναι δυνατόν να εξηγηθούν συμπεράσματα για την σταθερή κατάσταση των εξωτερικών ηλεκτρονίων. Εισάγοντας όμως τα κβάντα του Planck κατόρθωσε να δείξει ότι, υπο ορισμένες συνθήκες, είναι δυνατόν να δομηθούν απλά άτομα και μόρια, π.χ. το άτομο και το μόριο του υδρογόνου και το άτομο του ηλίου τα οποία συμπεριφέρονται όπως τα πραγματικά άτομα ή μόρια. Κι ενώ είναι πιθανόν να υπάρχουν αντιρρήσεις ως προς την ισχύ των υποθέσεων του Bohr, δεν υπάρχει καμία αμφιβολία ως προς το ενδιαφέρον ή τη σπουδαιότητα που έχουν για όλους τους φυσικούς οι εργασίες αυτές, μια και αποτελούν την πρώτη ολοκληρωμένη απόπειρα να δομηθούν απλά άτομα και μόρια και να ερμηνευτούν τα φάσματά τους.

Απόσπασμα από τη δημοσιευμένη εργασία του Rutherford το 1914 με τίτλο "Η δομή του Ατόμου" από το *Philosophical Magazine* VI, 26,937

Παρόλο που Rutherford προσπάθησε να ερμηνεύσει την σκέδαση των σωματιδίων α παρουσιάστηκε πρόβλημα ως προς την σταθερότητα του ατόμου. Κατά το πρότυπο του Rutherford τα ηλεκτρόνια κινούνται σε κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα του ατόμου. Όταν όμως, ένα ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα, η κίνησή του είναι μεταβαλλόμενη και σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία πρέπει το ηλεκτρόνιο να εκπέμπει συνεχώς ακτινοβολία, με αποτέλεσμα να χάνει ενέργεια και να κινείται σε τροχιά μικρότερης ακτίνας, πράγμα που αν

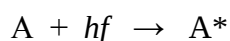
συμβεί το ηλεκτρόνιο θα πέσει πάνω στον θετικά φορτισμένο πυρήνα. Κάτι τέτοιο όμως, είναι αδύνατον να συμβεί.

Το 1913 όμως ο Δανός φυσικός Niels Bohr προσπαθεί να βρει λύση για το πρόβλημα της σταθερότητας του ατόμου και να εξηγήσει τα φάσματα εκπομπής και απορροφήσεως.

3.3.3 Στάσιμες Στάθμες Ενέργειας.

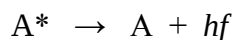
Όταν ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντιδρά με ένα σύστημα φορτισμένων σωματίων, όπως το άτομο, το μόριο ή ο πυρήνας, το ηλεκτρικό και το μαγνητικό πεδίο προκαλούν κάποια διαταραχή στην κίνηση των φορτίων. Με μια κλασσική διατύπωση, μπορούμε να πούμε ότι προκαλεί μια εξαναγκασμένη ταλάντωση στο σύστημα των φορτίων, με συνέπεια την απορρόφηση ενέργειας από το σύστημα. Ένας κλασσικός ταλαντωτής υφίσταται ευκολότερα εξαναγκασμένη ταλάντωση, όταν η ιδιοσυχνότητά του συμπίπτει με τη συχνότητα της εξαναγκασμένης ταλάντωσης. Η κατάσταση αυτή λέγεται συντονισμός. Κατά το συντονισμό παρατηρείται και ο μεγαλύτερος ρυθμός απορροφήσεως ενέργειας. Τα άτομα, οι πυρήνες και γενικά κάθε σύνολο φορτισμένων σωματίων, παρουσιάζουν έντονη απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας για σειρά συχνοτήτων $f_1, f_2, f_3, \dots$ ενώ σε άλλες συχνότητες η απορρόφηση είναι σχεδόν μηδενική. Οι συχνότητες συντονισμού $f_1, f_2, f_3, \dots$ αποτελούν το φάσμα απορροφήσεως του συστήματος των φορτίων.

Εάν το σύστημα βρίσκεται στην ευσταθέστερη ενεργειακή κατάσταση της ελάχιστης ενέργειας τότε η κατάσταση αυτή λέγεται βασική στάθμη ενέργειας ή βασική κατάσταση. Εάν το σύστημα βρίσκεται στην βασική κατάσταση και διεγερθεί με απορρόφηση ακτινοβολίας, τότε ανέρχεται σε κατάσταση υψηλότερης ενέργειας και το σύστημα βρίσκεται σε διεγερμένη στάθμη ενέργειας ή διεγερμένη κατάσταση. Οι καταστάσεις αυτές λέγονται στάσιμες καταστάσεις. Το παραπάνω φαινόμενο μπορεί να παρασταθεί ως εξής:

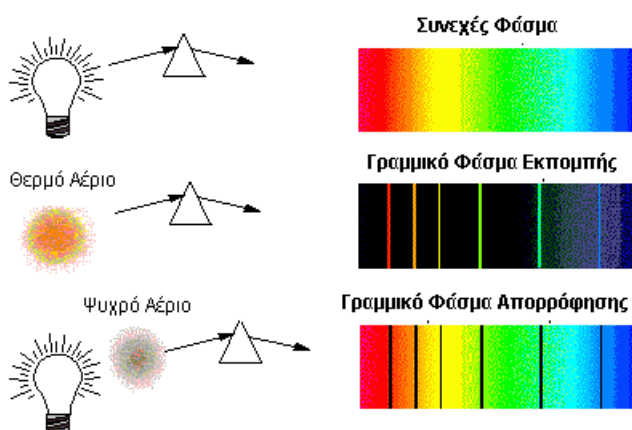


όπου A είναι το σύστημα των φορτίων (άτομο, μόριο, πυρήνας) στη βασική κατάσταση και A^* το ίδιο σύστημα σε διεγερμένη κατάσταση, hf είναι το ποσό της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε από το A για να μεταβεί στην A^* κατάσταση. Ένα σύστημα φορτίων σε διεγερμένη κατάσταση αποβάλλει το πλεόνασμα της ενέργειας

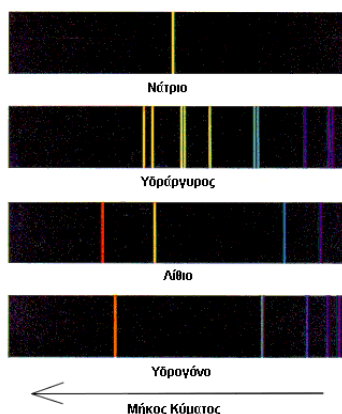
με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, οπότε το σύστημα αποδεδειγείται. Ο μηχανισμός αυτός μπορεί να παρασταθεί με την αντίστοιχη πορεία.



δηλαδή το διεγερμένο σύστημα φορτίων A^* μεταπίπτει στη βασική κατάσταση με σύγχρονη εκπομπή ακτινοβολίας hf . Οι παρατηρούμενες συχνότητες κατά την παραπάνω εκπομπή αποτελούν το φάσμα εκπομπής του συστήματος των φορτίων. Πειραματικά έχει αποδειχθεί το φάσμα απορρόφησης συμπίπτει με το φάσμα εκπομπής, δηλαδή οι παρατηρούμενες συχνότητες του φάσματος απορρόφησης ενός συστήματος φορτισμένων σωματίων παρατηρούνται επίσης στο φάσμα εκπομπής του συστήματος.



Σχήμα 30: α) Συνεχές φάσμα, γραμμικό φάσμα εκπομπής, γραμμικό φάσμα απορρόφησης. Στο σχήμα παρουσιάζονται τρεις τύποι φασμάτων. Ένα γραμμικό φάσμα εκπομπής δημιουργείται από την ακτινοβολία που προέρχεται από τα άτομα θερμού αερίου όταν περάσει μέσα από πρίσμα. Ένα συνεχές φάσμα δημιουργείται όταν η ακτινοβολία που προέρχεται από ένα λαμπτήρα περάσει μέσα από πρίσμα. Ένα γραμμικό φάσμα απορρόφησης δημιουργείται όταν η ακτινοβολία που προέρχεται από ένα θερμό σώμα περάσει μέσα από ψυχρό αέριο και κατόπιν μέσα από πρίσμα. β) Γραμμικά φάσματα εκπομπής των στοιχείων Na, Hg, Li, και H. Παρατηρείται η μοναδικότητα του κάθε φάσματος.



Σχήμα 31: Γραμμικά φάσματα εκπομπής των στοιχείων Na, Hg, Li, και H. Παρατηρείται η μοναδικότητα του κάθε φάσματος.



Εικόνα 20: Οι Niels Bohr (1885 - 1962) ήταν Δανός φυσικός. Σπούδασε στο Πανεπιστήμιο της Κοπεγχάγης και είχε θεμελιώδεις συνεισφορές στην κατανόηση της ατομικής δομής και της κβαντικής μηχανικής. Επηρέαστηκε πάρα πολύ από τον Rutherford και εργάστηκε μαζί του όταν οικοδομούσε το δικό του μοντέλο για το άτομο. Ο Bohr ενδιαφερόταν πάντα να είναι πολύ σαφής όταν αναφερόταν στην κβαντική θεωρία. Κατά παράδοξο τρόπο αυτό τον έκανε να φαίνεται σε κάποιον που τον πρωτόκουγε πολύ σκοτεινός! Παρ' όλα αυτά ήταν χωρίς αμφιβολία ένας από τους πιο σημαντικούς επιστήμονες του αιώνα μας. Θεωρούνταν αυθεντία σε ζητήματα ερμηνείας της κβαντικής μηχανικής. Είναι διάσημη η πολύχρονη διαμάχη του με τον Einstein πάνω στη φιλοσοφική βάση της κβαντικής μηχανικής. Τα επιχειρήματα του Einstein αντικρούστηκαν επανειλημμένα από τον Bohr. Ο Einstein έμεινε αμετάπειστος ως το τέλος της ζωής τους, αλλά οι πιο πολλοί φυσικοί σήμερα είναι πρόθυμοι να δεχτούν την ερμηνεία του Bohr.



Εικόνα 21: Ο Niels Bohr και ο Albert Einstein, 1925.

"Αφετηρία μου δεν ήταν καθόλου η ιδέα ότι το άτομο είναι ένα πλανητικό σύστημα σε μικρή κλίμακα και σαν τέτοιό ότι διέπεται από τους νόμους της αστρονομίας. Ποτέ δεν πήρα αυτή την αναλογία κατά γράμμα. Αφετηρία μου ήταν μάλλον η σταθερότητα της ύλης. Ένα καθαρό θάυμα αν το δει κανείς από τη σκοπιά της κλασικής φυσικής".

Niels Bohr

3.3.4 Το πρότυπο του Bohr.

Ο νεαρός Δανός φυσικός Niels Bohr που βρισκόταν στο Μαντσεστερ μαζί με τον Rutherford, αναγνώρισε με τόλμη ότι, παρ' όλες τις δυσκολίες, θα πρέπει να υπήρχε κάποια δόση αλήθειας στο "πλανητικό μοντέλο" του ατόμου. Επινόησε λοιπόν κανόνες για τον υπολογισμό ορισμένων σταθερών τροχιών ηλεκτρονίων, για τις οποίες οι νόμοι της κλασικής φυσικής ήταν αναποτελεσματικοί. Στο σημείο αυτό κρίνεται σκόπιμο να γίνει αναφορά στον ελβετό δάσκαλο των μαθηματικών Johann Jakob Balmer.

Οι φυσικοί συνήθιζαν να διασκεδάζουν δημιουργώντας ηλεκτρικούς σπινθήρες σε σωλίνες που περιείχαν διάφορα αέρια. Βρήκαν λοιπόν ότι κάθε αέριο εκπέμπει φως με ένα χαρακτηριστικό "φάσμα" (το φως αυτό έχει μόνο ορισμένα μήκη κύματος, που προκαλούν χαρακτηριστικές γραμμές σε αυτό το φάσμα). Τα φάσματα αυτά ονομάζονται γραμμικά φάσματα και μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να διαπιστωθεί η ταυτότητα των διαφόρων χημικών στοιχείων που περιέχονται στα αέρια. Για παράδειγμα, το στοιχείο

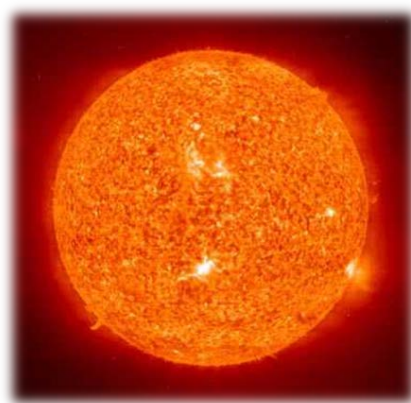
ήλιο ανακαλύφθηκε αρχικά στο ηλιακό φως (εικόνα 22, όπου δείχνει μια άποψη του Ήλιου κάνοντας χρήση του φωτός από το στοιχείο ήλιο).

Η κλασική φύση δεν μπορεί καν να ερμηνεύσει την σταθερότητα των ατόμων, πόσο μάλλον να εξηγήσει τις λεπτομέρειες των φασμάτων τους.

Ο Ελβετός Balmer ήταν δάσκαλος των μαθηματικών και περίεργος άνθρωπος, και τις ελεύθερες του ώρες ασχολιόταν μανιωδώς με σχέσεις μεταξύ διάφορων αριθμών. Καυχιόταν αν του δώσουν τέσσερις οποιουσδήποτε αριθμούς, μπορούσε να βρει μια σχέση που να τις συνδέει. Κάποιος του έδωσε τους αριθμούς που αντιστοιχούν στα μήκη κύματος λ των πρώτων τεσσάρων γραμμών που παρατηρούνται στο φάσμα του υδρογόνου. Η σχέση που ανακάλυψε ο Balmer ήταν αυτή:

$$\lambda = \frac{(364,5)n^2}{(n^2 - 4)}$$

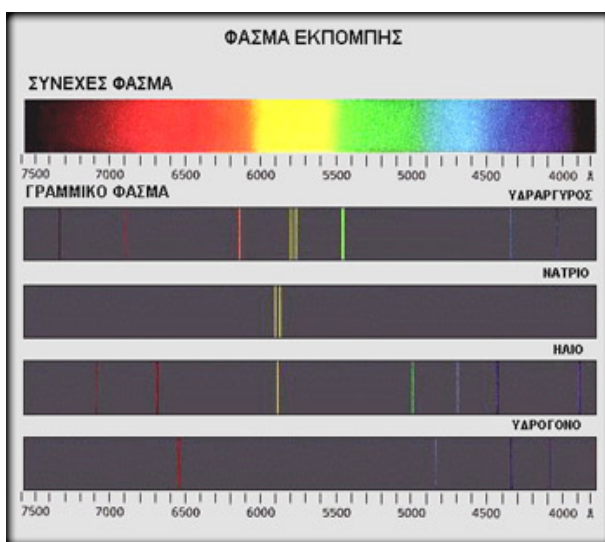
όπου το n παίρνει τιμές 3,4,5 και 6! Η σχέση αυτή έδωσε απίστευτη ακρίβεια, αλλά παρέμεινε μυστηριώδης, ώσπου την εξήγησε ο Niels Bohr.



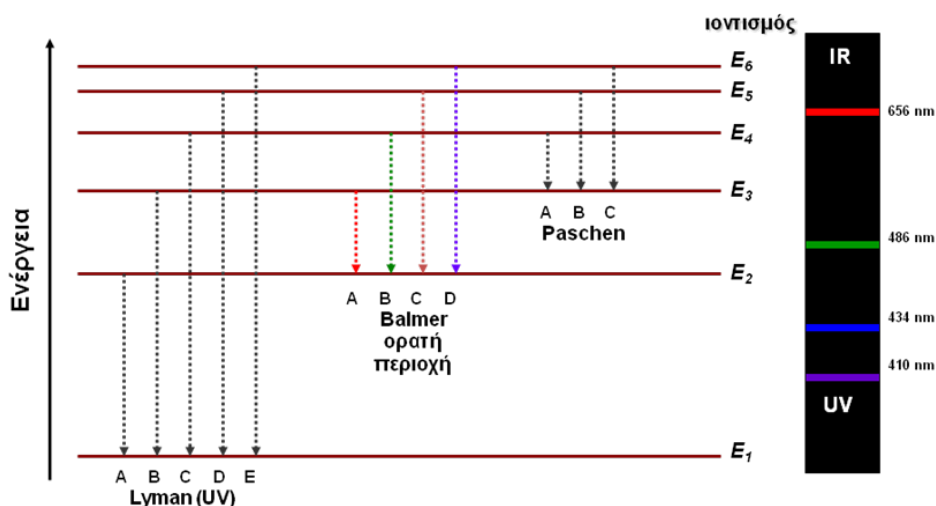
Εικόνα 22: Ο Ήλιος εκπέμπει φως σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα. Διαφορετικά μέρη του φάσματος μας πληροφορούν για διαφορετικά χαρακτηριστικά των διαδικασιών που επιτελούνται στον Ήλιο. Είναι ιδιαίτερα αποκαλυπτικό το να χρησιμοποιηθεί ένα φίλτρο, που αφήνει να περνά φως με μήκος κύματος που αντιστοιχεί σε μια φασματική γραμμή ενός συγκεκριμένου στοιχείου. Στην φωτογραφία αυτή παριστάνεται η εικόνα του Ήλιου με φως ενός συγκεκριμένου μήκους κύματος που αντιστοιχεί σε μια υπεριώδη γραμμή από το φάσμα του χημικού στοιχείου του ηλίου. Η εικόνα έχει χρωματιστεί με υπολογιστή και οι κίτρινες περιοχές παριστάνουν τα μέρη όπου υπάρχει η πιο ισχυρή εκπομπή. Η φωτογραφία πάρθηκε από τον διαστημικό σταθμό Skylab και παρουσιάζει μια περιοχή στην κατώτερη ατμόσφαιρα του Ήλιου με θερμοκρασία 10.000 ως 20.000 βαθμούς Κελσίου. Δείχνει τον Ήλιο με κοκκινίλες αλλά και μια εντυπωσιακή ασίδα από υλικό που ωθείται μακριά από τον Ήλιο από μαγνητικές δυνάμεις.

Όπως είπε και ο ίδιος αργότερα, “καθετί έγινε σαφές”, και οι επιτρεπόμενες τροχιές των ηλεκτρονίων του Bohr όχι μόνο εξήγησαν την σχέση Balmer, αλλά

πρόβλεψαν επίσης κάποιες καινούργιες φασματικές γραμμές σε διάφορα μήκη κύματος για το γραμμικό φάσμα του υδρογόνου. Τα μήκη κύματος των γραμμών αυτών δίνονται από τη σχέση όμοιας μορφής με τη σχέση του Balmer, αν εξαιρέσουμε τον παρονομαστή, που έγινε τώρα ($n^2 - m^2$), με m ίσο με οποιοδήποτε ακέραιο και όχι μόνον το 2, όπως στην αρχική θέση του Balmer. Αφού παρατηρήθηκαν όλες αυτές οι καινούργιες γραμμές οι φυσικοί αναγκάστηκαν να πάρουν σοβαρά υπόψη τους το μοντέλο του Bohr, παρόλο που σε αυτό οι νόμοι της φυσικής “αναστέλλονταν” με φανερά αυθαίρετο τρόπο. Ο Bohr ανέπτυξε το μοντέλο του 1913. Αλλά μόνο το 1926 ο Schrödinger μπόρεσε να εξηγήσει τους νόμους του Bohr χρησιμοποιώντας την νέα θεωρία την κβαντική μηχανική.



Σχήμα 32: Από κάθε χημικό στοιχείο σε αέρια μορφή παίρνουμε ένα χαρακτηριστικό φάσμα φωτός, όταν συμβεί μια ηλεκτρική εκκένωση στο εσωτερικό του. αυτό το φως μπορεί να διαχωριστεί σε διαφορετικά μήκη κύματος περνώντας μέσα από το πρίσμα κάθε φασματογράφου. Κάθε χημικό στοιχείο έχει τη δική του μοναδική σειρά φασματικών γραμμών, που μπορεί να χρησιμεύσει ως ένα είδος «δαχτυλικών αποτυπωμάτων» για την παρουσία του.



Σχήμα 33: Διάγραμμα ενεργειακών επιπέδων για το άτομο του υδρογόνου που δείχνει πως εμφανίζονται οι διάφορες “σειρές” φασματικών γραμμών. Μόνο η σειρά Balmer βρίσκεται στην περιοχή μηκών κύματος που είναι ορατή.

3.3.4.1 Αξιώματα Bohr.

Το πρότυπο του Bohr, αναφέρεται κυρίως στο άτομο του υδρογόνου. Ισχύει για κάθε μονοηλεκτρονικό άτομο και ερμηνεύει τα φάσματα εκπομπής και απορρόφησης, τα πειραματικά δεδομένα της σκεδάσεως των σωμάτων α, τη σταθερότητα των ατόμων αλλά και πολλά άλλα φαινόμενα ατομικής φυσικής. Το πρότυπο αυτό στηρίζεται στις κλασικές ιδέες της νευτώνιου μηχανικής και του ηλεκτρομαγνητισμού, αλλά και στις νέες ιδέες περί φωτονίων και κβαντώσεως της ακτινοβολίας σε συνδυασμό με ορισμένες παραδοχές που διατύπωσε αυθαίρετα ο Bohr. Τα αξιώματα του Bohr είναι τα εξής:

Αξίωμα I (Κβάντωση ενέργειας)

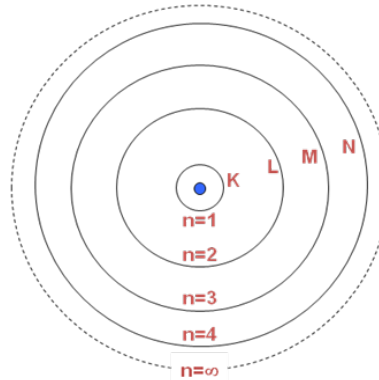
Ένα ηλεκτρόνιο σε ένα άτομο κινείται σε ορισμένες επιτρεπτές κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα με ορισμένη επιτρεπτή τιμή ολικής ενέργειας, υπό την επίδραση ελκτικών δυνάμεων Coulomb και υπακούοντας στους νόμους της κλασικής μηχανικής χωρίς εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, παρ’ όλο που εκτελεί μεταβαλλόμενη κίνηση (σταθερότητα του ατόμου). Οι επιτρεπόμενες τροχιές δίνονται από την σχέση:

$$E_n = -hf_n$$

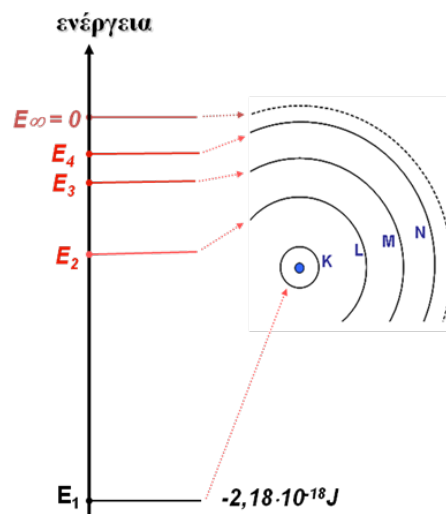
όπου f_n η ακολουθία των φασματικών όρων του κάθε ατόμου. Κάθε επιτρεπόμενη ενέργεια ορίζει μια «στάσιμη κατάσταση» στην οποία το άτομο δεν

ακτινοβολεί. Ακτινοβολία εκπέμπεται μόνο κατά την μετάβαση του ατόμου από μια ανώτερη σε μια κατώτερη ενεργειακή στάθμη. Η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτονίου προσδιορίζεται από την αρχή διατήρησης ενέργειας:

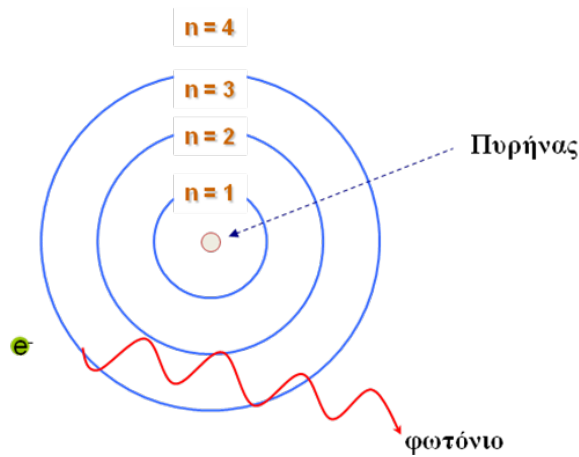
$$hf = E_n - E_m .$$



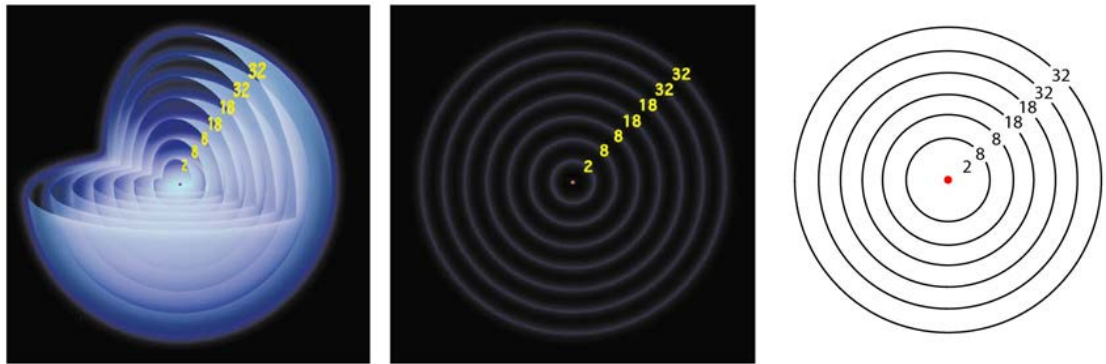
Σχήμα 34: Καθορισμένες κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα με καθορισμένη (κβαντισμένη) ενέργεια. Κάθε επιτρεπόμενη τροχιά που ονομάζεται **στιβάδα** ή **φλοιός**, συμβολίζεται με τα κεφαλαία γράμματα K, L, M, N, ... και αντιστοιχεί στην τιμή ενός ακέραιου αριθμού **n** (**n=1,2,3...**) που ονομάζεται **πρώτος** ή **κύριος κβαντικός** αριθμός.



Σχήμα 35: Οι στάθμες ενέργειας ατόμου υδρογόνου στο πρότυπο Bohr.



Σχήμα 36: Για κάθε ένα “άλμα” ηλεκτρονίου από στιβάδα n_a μεγάλης ενέργειας E_a , σε στιβάδα n_t χαμηλότερης ενέργειας E_t , εκπέμπεται ένα φωτόνιο.



Σχήμα 37: Σχηματική παράσταση στιβάδων ενός ατόμου.

Αξίωμα II (Κβάντωση στροφορμής)

Οι επιτρεπτές τροχιές του ηλεκτρονίου για τις οποίες η κάθε ενέργειά του παραμένει σταθερή, είναι εκείνες για τις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο τις σταθεράς του Planck και ονομάζονται στάσιμες τροχιές.

Η συνθήκη $l = mur = n\hbar$ σε συνδυασμό με τον νόμο του Νεύτωνα $m(u^2/r) = e^2/r^2$ σχηματίζουν το σύστημα δυο εξισώσεων με δυο αγνώστους:

$$mur = n\hbar, \quad m \frac{u^2}{r} = \frac{e^2}{r^2}$$

το οποίο δίνει για τις ακτίνες των επιτρεπόμενων τροχιών r_n και τις αντίστοιχες ταχύτητες περιφοράς u_n , τις εκφράσεις:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2} n^2, \quad u_n = \frac{e^2}{\hbar} \frac{1}{n}$$

ενώ για τις επιτρεπόμενες ενέργειες του ηλεκτρονίου η αντικατάσταση των u και r δίνει:

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$

Αξίωμα III (Κβάντωση της απορροφούμενης και εκπεμπόμενης ακτινοβολίας)

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται ή απορροφάται μόνο όταν η κινητική κατάσταση του ηλεκτρονίου μεταβάλλεται κατά τέτοιο τρόπο ώστε αυτό να μεταβαίνει από μια επιτρεπτή στάσιμη τροχιά σε άλλη. Η συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας f ισούται με τη διαφορά των ολικών ενεργειών που αντιστοιχούν στην αρχική και τελική τροχιά, διαιρεμένη δια της σταθεράς του Planck σύμφωνα με την εξίσωση του Einstein.

3.3.5 Ατομικό πρότυπο – Μοντέλο Υδρογόνου (Υπολογισμός ακτίνας)

Το άτομο του υδρογόνου συνίσταται από ένα θετικό πυρήνα (πρωτόνιο) και ένα ηλεκτρόνιο περιφερόμενο γύρω από τον πυρήνα υπό την αλληλεπίδραση ηλεκτροστατικών δυνάμεων Coulomb, σε τροχιές για τις οποίες σύμφωνα με την πρώτη παραδοχή, το ηλεκτρόνιο διατηρεί σταθερή ολική ενέργεια.

Εάν m και u η μάζα και η ταχύτητα του ηλεκτρονίου και r είναι η ακτίνα της τροχιάς, τότε η κεντρομόλος δύναμη F , η οποία διατηρεί το ηλεκτρόνιο στη στάσιμη τροχιά, δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{mu^2}{r}$$

Καθώς η δύναμη αυτή είναι ηλεκτροστατική δύναμη Coulomb, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$F = \frac{eZe}{4\pi\epsilon_0 r^2}$$

όπου e είναι το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου και Ze το φορτίο του πυρήνα (για το υδρογόνο $Z=1$). Η σταθερή ποσότητα $1/4\pi\epsilon_0$ υπερσχύεται λόγω μονάδων, και στο C.G.S., ισούται με τη μονάδα. Εξισώνοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\frac{Ze^2}{r^2} = \frac{mu^2}{r} \quad \text{ή} \quad mu^2 = \frac{Ze^2}{r}$$

Σύμφωνα με τη δεύτερη παραδοχή το άτομο μπορεί να παραμένει στην ίδια ενεργειακή στάθμη ή κατάσταση χωρίς εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας,

ασκεί η περιστροφή του περιστρεφόμενου ηλεκτρονίου να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς Planck. Σύμφωνα με το δεύτερο αξίωμα:

$$mur = n\hbar$$

όπου n παίρνει τιμές 1, 2, 3, ... και λέγεται κύριος **κβαντικός αριθμός**.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$r = \frac{\hbar^2 n^2}{e^2 m Z} = a_0 \frac{1}{Z} n^2 \quad n = 1, 2, \dots$$

όπου

$$a_0 = \frac{\hbar^2}{e^2 m} = 5.2917 \times 10^{-9} \text{ cm} \approx 0,5 \text{ \AA}$$

Το a_0 λέγεται ακτίνα του Bohr και το r δίνει τις ακτίνες των επιτρεπόμενων τροχιών. Για $n=1$ και $Z=1$ λαμβάνεται η ακτίνα του Bohr a_0 , δηλαδή η ακτίνα της τροχιάς που αντιστοιχεί στη βασική κατάσταση του υδρογόνου. η ολική ενέργεια E ενός ηλεκτρονίου περιφερόμενου γύρω από τον πυρήνα ισούται με το άθροισμα της κινητικής ενέργειας E_K και της δυναμικής ενέργειας V του συστήματος ηλεκτρόνιο – πυρήνας. Έτσι, η ενέργεια ενός ηλεκτρονίου που κινείται σε επιτρεπτή τροχιά είναι:

$$E = E_K + V = \frac{1}{2} m u^2 - \frac{Z e^2}{r^2}$$

Το αρνητικό σημείο της δυναμικής ενέργειας τέθηκε επειδή οι δυνάμεις είναι ελκτικές. Με αντικατάσταση του $m u^2$ η εξίσωση γίνεται:

$$E = \frac{Z e^2}{2r} - \frac{Z e^2}{r} = -\frac{Z e^2}{2r}$$

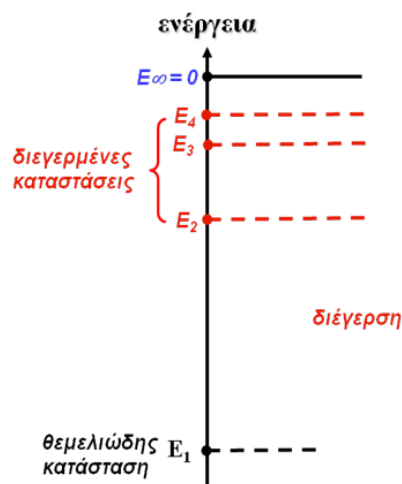
και

$$E = -\frac{Z^2 m e^4}{2 \hbar^2} \frac{1}{n^2} = -13,6 \frac{Z^2}{n^2} \text{ eV}$$

Η σχέση αυτή εκφράζει τη συνάρτηση της ενέργειας από τον κβαντικό αριθμό n και είναι αντιστρόφως ανάλογη του n^2 . Αυτό σημαίνει ότι στη μικρότερη τροχιά ($n=1$) αντιστοιχεί η ελάχιστη (λόγω αρνητικού σημείου) ολική ενέργεια. Το ποσό αυτό της ενέργειας πρέπει να καταναλωθεί για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο από τη βασική κατάσταση $n=1$ στη $n=\infty$, όπου η ενέργεια του συστήματος είναι μηδέν.

Η ενέργεια της βασικής στάθμης του υδρογόνου βρίσκεται ότι είναι από την παραπάνω σχέση:

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}$$



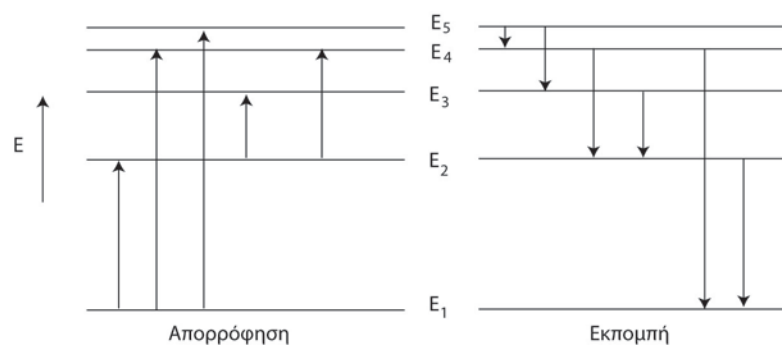
Σχήμα 38: Η διέγερση του ατόμου του υδρογόνου στο πρότυπο του Bohr.

Συνεπώς ένα ηλεκτρόνιο επιτρέπεται να κινείται σε ορισμένες επιτρεπτές τροχιές, και η ενέργειά του παίρνει ορισμένες μόνο επιτρεπτές τροχιές. Έτσι, η ενέργεια ενός συστήματος φορτίων μπορεί να έχει ορισμένες μόνο τιμές $E_1, E_2, E_3, \dots$ δηλαδή η ενέργεια του συστήματος είναι κβαντισμένη. Οι ενεργειακές καταστάσεις που αντιστοιχούν στις ενέργειες αυτές είναι οι στάσιμες καταστάσεις. Οι τιμές της ενέργειας ονομάζονται ενεργειακές στάθμες.

Από το τρίτο αξίωμα του Bohr προκύπτει ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία εκπέμπεται κάθε φορά που το άτομο μεταβαίνει από μια αρχική κατάσταση επιτρεπτής ενέργειας E_i σε μια άλλη τελική επιτρεπτή ενέργειας E_f . Λόγω της αρχής της διατήρησης της ενέργειας, της ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίση με τη διαφορά $E_i - E_f$, δηλαδή:

$$hf = E_i - E_f$$

Αντίστροφα, εάν σε ένα άτομο που βρίσκεται σε μια αρχική στάσιμη ενεργειακή κατάσταση E_i προσπέσει ακτινοβολία. Τότε αυτό θα απορροφήσει μόνο εκείνο το ποσό ενέργειας, το οποίο θα ισούται με την ενεργειακή διαφορά δυο στάσιμων σταθμών ενέργειας ($E_i - E_f$) και θα μεταβεί στη στάσιμη ενεργειακή κατάσταση E_f . συνεπώς η απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ή οποιασδήποτε άλλης μορφής ενέργειας έχει ως αποτέλεσμα τη μετάβαση ενός ατόμου, μορίου ή πυρήνα, από μια κατάσταση σε μια άλλη μεγαλύτερης ενέργειας.



Σχήμα 39: Ενεργειακές μεταβάσεις ανάμεσα σε στάσιμες καταστάσεις. Η ενεργειακή κατάσταση E_1 είναι η βασική κατάσταση γιατί έχει μικρότερη ενέργεια.

Για παράδειγμα, στο άτομο του υδρογόνου, οι ενέργειες της θεμελιώδους και της πρώτης διεγερμένης στάθμης, είναι:

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}, \quad E_2 = -3,4 \text{ eV}$$

και η διαφορά τους:

$$\Delta E = E_2 - E_1 = 10,2 \text{ eV},$$

το οποίο σημαίνει ότι για να διεγερθεί ένα άτομο υδρογόνου απαιτείται ενέργεια τουλάχιστον 10,2 eV.

Οι ενεργειακές μεταβάσεις ανάμεσα σε στάσιμες καταστάσεις παριστάνονται σχηματικά όπως στο σχήμα 39. Οι σχετικές θέσεις ανάμεσα στις ενεργειακές καταστάσεις και η πιθανότητα να συμβεί μια μετάβαση εξαρτώνται από το σύστημα (μόριο, άτομο, πυρήνα, κ.α.). Η μετάβαση του ηλεκτρονίου από μια τροχιά σε μια άλλη έχει ως συνέπεια την μετάβαση του ατόμου από την ενεργειακή κατάσταση E_i στη E_f . Έτσι,

$$f = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{Z^2 m e^4}{2\pi \hbar^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

όπου $n_i = (n_f+1), (n_f+2), \dots$ και $n_f=1,2,3,\dots$

3.3.4.3 Κριτική της θεωρίας του Bohr.

Η θεωρία του Bohr αρχικά σημείωσε σημαντικές επιτυχίες, λόγω της σωστής πρόβλεψης των φασμάτων εκπομπής των υδρογονοειδών ιόντων, όπως το He^+ , καθώς και των αλκαλικών ατόμων, που μοιάζουν με το υδρογόνο και έχουν ένα μόνο ηλεκτρόνιο στην εξωτερική τους στιβάδα. Πολύ γρήγορα όμως φάνηκαν οι αδυναμίες, και κυρίως μετά τη μελέτη των μη αλκαλικών ατόμων. Που το φάσμα τους διαφέρει αρκετά από το υδρογονικό. Επίσης η θεωρία του Bohr δε μπόρεσε να

ΚΡΙΤΙΚΗ ΤΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΤΟΥ NIELS BOHR

W. PAULI: Η όλη υπόθεση είναι σαν παραμύθι. Αν πραγματικά υπάρχει τέτοιο πράγμα όπως η τροχιά του ηλεκτρονίου, τότε το ηλεκτρόνιο θα πρέπει προφανώς να περιφέρεται περιοδικά με μια ορισμένη συχνότητα. Όμως, όπως ξέρουμε από την ηλεκτροδυναμική, ένα ηλεκτρικό φορτίο σε περιοδική κίνηση πρέπει να ακτινοβολεί φως με την ίδια συχνότητα. Μα αυτό υποτίθεται πως δεν συμβαίνει με το ηλεκτρόνιο. Αντίθετα ισχυριζόμαστε ότι η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός βρίσκεται κάπου μεταξύ της τροχιακής συχνότητας μετά το άλμα. Όλα αυτά είναι καθαρή τρέλα.

W. HEISENBERG: Όμως παρ' όλο που είναι τρέλα, έχει μια μέθοδο μέσα της.

Αν τα καταραμένα κβαντικά άλματα πρόκειται στ' αλήθεια να παραμείνουν στη φυσική, τότε εγώ το μετανιώνω που ανακατέυτηκα ποτέ μου με την κβαντική θεωρία.

E. SCHRÖDINGER (συνομιλία με τον Bohr)

Η κβαντική θεωρία μου προκαλεί αισθήματα τελείως παρόμοια με τα δικά σου. Θα έπρεπε κανείς στ' αλήθεια να ντρέπεται για τέτοιες επιτυχίες, αποκτημένες με τη βοήθεια του Ιησούϊτικού κανόνα: "Μη γνωτώ η αριστερά σου τι ποιεί η δεξιά σου"

A. EINSTEIN (Επιστολή του στον M. Born, 1919)

ερμηνεύσει τη σχετική ένταση των φασματικών γραμμών, αλλά και τη μελέτη των μη περιοδικών κινήσεων, όπως, π.χ. η σκέδαση του ηλεκτρονίου πάνω σε ένα άτομο.

Στη θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου, ενώ από τη μια μεριά διατηρείται η κλασική έννοια της τροχιάς για την περιγραφή της κίνησης του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα, από την άλλη διατυπώνεται η αυθαίρετη παραδοχή, ότι «στις επιτρεπόμενες τροχιές το άτομο δεν ακτινοβολεί», χωρίς να εξηγείται ο λόγος για τον οποίο η κλασική θερμοδυναμική παύει να ισχύει σε αυτή την περίπτωση.

Κατά τον Pauli, «όλα αυτά είναι μια καθαρή τρέλα». Όμως μια πολύ έξυπνη τρέλα που «έχει μια μέθοδο μέσα της», όπως αντιλέγει ο Heisenberg.

Ο αδύνατος όμως κρίκος στη θεωρία του Bohr βρίσκεται στο δεύτερο αξίωμα και ειδικότερα στην εισαγωγή της έννοιας των κβαντωμένων τροχιών για την περιγραφή των επιτρεπόμενων ενεργειακών καταστάσεων. Έτσι το αξίωμα αυτό, μπορεί να θεωρηθεί ως ένας σχετικά επιτυχής «ευρετικός κανόνας» για τον υπολογισμό των επιτρεπόμενων ενεργειών.

3.3.4.4. Ανακεφαλαίωση του πρότυπου του Bohr.

Ανακεφαλαιώνοντας τη θεωρία του πρότυπου Bohr εξάγονται τα εξής συμπεράσματα: Τα άτομα συνίστανται από βαρείς θετικά φορτισμένους πυρήνες πολύ μικρού μεγέθους, γύρω από τους οποίους περιφέρονται σε ελλειπτικές και κυκλικές τροχιές ηλεκτρόνια αρνητικά φορτισμένα. Αν το θετικό φορτίο των πυρήνων είναι ίσο με το αρνητικό φορτίο των ηλεκτρονίων, το άτομο εμφανίζεται ουδέτερο.



Εικόνα 23: Οι Niels Bohr, Ernest Rutherford, Albert Einstein and William Lawrence πριν από το συνέδριο του Solway in Belgium, Εικόνα 21ο 1954.

"Δεν χρειάζεται να τονιστεί προκαταρκτικός και υποθετικός χαρακτήρας των παραπάνω θεωρήσεων. Ωστόσο, ο σκοπός είναι να δείχθει ότι η γενίκευση της θεωρίας των στάσιμων καταστάσεων πιθανώς να προσφέρει μια απλή βάση ερμηνείας ενός αριθμού πειραματικών δεδομένων, τα οποία δεν μπορούν να ερμηνευτούν με την κοινή Ηλεκτροδυναμική, και ότι οι προϋποθέσεις που χρησιμοποιήθηκαν δεν φαίνεται να βρίσκονται σε ασυνέχεια με τα πειραματικά δεδομένα φαινομένων για τα οποία μπορεί να δοθεί ικανοποιητική ερμηνεία με την Κλασική Δυναμική και την κυματική θεωρία του φωτός."

Απόσπασμα της πρώτης εργασίας του Bohr στην οποία παρατίθενται τα συμπεράσματα που απαντούν στην κριτική του Rutherford.



Εικόνα 24: Η υπογραφή του Niels Bohr.



Εικόνα 25: Στο ινστιτούτο του Niels Bohr το 1933. Bohr, Niels Henrik David, Dirac, Paul Adrien Maurice, Heisenberg Werner, Ehrenfest, Paul, Delbruck, Max Meitner, Lise; Weizsacker, Carl Friedrich von Teller, Edward Jensen, Homer Heitler, Walter; Frisch, Otto Robert Plesset, Milton S. Peierls, Rudolf Ernst, Sir Rabinowitch, Eugene I. Nordheim, Lothar Wolfgang Casimir, Hendrik Brugt Gerhard Moller, Christian Bloch, Felix Kopfermann, Hans Bohr, Harald August; Kalckar, Fritz Rosenblum, Arnold Manneback, Charles Lambert Placzek, George Weisskopf, Victor Frederick Arley, Niels; Majumdar, Chanchal Kumar Klein, Oskar Benjamin Bhabha, Homi Jehangir; Rosenfeld, Leon Jacobsen, Jacob Christian Hylleraas, Ejil Andersen.

Η κίνηση των ηλεκτρονίων μπορεί να περιγραφεί με την κλασική θεωρία, αλλά κατά τις νέες θεωρίες ορισμένες μόνο τροχιές είναι επιτρεπτές, ενώ κλασικά δεν βρίσκει εφαρμογή κάτι τέτοιο.

Οι επιτρεπτές τροχιές καθορίζονται με βάση τους κβαντικούς κανόνες των οποίων η μορφή δεν είναι γνωστή.

Οι επιτρεπτές τροχιές καθορίζουν ορισμένες κβαντικές καταστάσεις που αντιστοιχούν σε ορισμένες τιμές ενέργειας τις οποίες μπορεί να έχει το άτομο.

Το άτομο μπορεί να παραμένει σε κβαντικώς επιτρεπόμενη κατάσταση (στάσιμη) επί αρκετό χρόνο, χωρίς να ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία λόγω περιστροφής των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα.

Το άτομο μπορεί να μεταβαίνει από μια επιτρεπόμενη κατάσταση σε άλλη κατά τέτοιο τρόπο, ώστε αν μεν μεταβαίνει από ενεργειακά υψηλότερη στάθμη σε μια άλλη χαμηλότερης ενέργειας, να ακτινοβολεί ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, της οποίας η συχνότητα καθορίζεται από τη σχέση του Einstein, εάν δεν μεταβαίνει από μια στάθμη ενέργειας σε μια άλλη υψηλότερης ενέργειας, να απορροφά ακτινοβολία, η συχνότητα της οποίας δίνεται πάλι από την ίδια σχέση.

Εφαρμογές

1. Υπολογισμός της ακτίνας r περιφοράς του ηλεκτρονίου του ατόμου του υδρογόνου, χρησιμοποιώντας τη συνθήκη του Bohr.

Λύση

Το ηλεκτρόνιο εκτελεί εντός του ατόμου του υδρογόνου κυκλική τροχιά ακτίνας r , και ασκείται κεντρομόλος δύναμη $F = \frac{mu^2}{r}$, όπου m η μάζα και u η ταχύτητα του ηλεκτρονίου. Η δύναμη αυτή θα ισούται με τη δύναμη Coulomb:

$$\frac{e^2}{r^2} = \frac{mu^2}{r}$$

Από την πρώτη συνθήκη του Bohr ισχύει:

$$mur = \hbar$$

Συνδυάζοντας τις παραπάνω εξισώσεις προκύπτει:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{me^2}$$

$$u_n = \frac{e^2}{\hbar}$$

Θέτοντας όπου $m=9,1 \cdot 10^{-28} gr$, και $e=4,8 \cdot 10^{-10}$, προκύπτει $r=0,53 \cdot 10^{-8} cm$.

2. Α) Υπολογισμός των τεσσάρων πρώτων ενεργειακών καταστάσεων του ατόμου του υδρογόνου.

Β) Υπολογισμός του αριθμού των δυνατών μεταπηδήσεων και των μηκών των αντίστοιχων φασματικών γραμμών.

Λύση

Α) Για τις ενεργειακές στάθμες του ατόμου του υδρογόνου, ισχύει ο τύπος:

$$E_n = E_1 \frac{1}{n^2}$$

για $n=1, 2, 3, 4$ προκύπτει:

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

$$E_2 = -3,4 \text{ eV}$$

$$E_3 = -1,51 \text{ eV}$$

$$E_4 = -0,85 \text{ eV}$$

B) Εάν είναι f η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την μεταπήδηση ενός ηλεκτρονίου από την τροχιά ή στην τροχιά m θα ισχύει:

$$hf = E_m - E_n$$

ή αλλιώς:

$$hf = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

και επειδή:

$$c = \lambda \cdot f$$

Θα ισχύει:

$$\lambda = \frac{4\pi c \hbar^3}{me^4 \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)}$$

Για $n=1$ και $m=2,3,4$ προκύπτουν τα εξής μήκη κύματος (γραμμές *Lyman*):

$$\lambda_{12}=1216\text{\AA}, \lambda_{13}=1026\text{\AA}, \lambda_{14}=973\text{\AA}$$

Ομοίως για $n=2$ και $m=3,4$ λαμβάνονται δυο γραμμές *Balmer* μήκους κύματος:

$$\lambda_{23}=6563\text{\AA}, \lambda_{24}=4861\text{\AA}$$

Τέλος για $n=3$ και $m=4$ προκύπτει μια γραμμή *Paschen* μήκους κύματος $\lambda_{34}=18750\text{\AA}$.

3. Να υπολογιστεί το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπει το άτομο του υδρογόνου, όταν μεταπηδά από την κατάσταση $n=6$ στην κατάσταση με $n=2$. Η ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση είναι $E_1=-13,6\text{eV}$.

Λύση

Το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπει το άτομο, προσδιορίζεται από την εξίσωση:

$$E_6 - E_2 = hf. \text{ Αντικαθιστώντας } f=c/\lambda, \text{ βρίσκουμε:}$$

$$E_6 - E_2 = hc/\lambda \text{ ή } \lambda = \frac{hc}{E_6 - E_2} \quad (1)$$

Οι ενέργειες E_2 και E_6 υπολογίζονται από τις εξισώσεις:

$$E_2 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{2^2} = -3,4\text{eV} = -3,4 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

$$E_6 = \frac{E_1}{n^2} = \frac{E_1}{6^2} = -\frac{13,6}{36}\text{eV} = -0,378 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

Αντικαθιστώντας στην (1) τις παραπάνω τιμές, προκύπτει:

$$\lambda = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{(-0,378 + 3,4) \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} m = 4,1 \cdot 10^{-7} m$$

Βιβλιογραφία.

Ξενόγλωσση.

1. A. I. Arbab, A phenomenological model for the precession of planets and bending of light, *Astrophys Space Sci* (2010) 325:41-45.
2. N. Bohr. In: U. Hoyer (Ed.), *Niels Bohr. Collected Works*, Vol. 2. North-Holland, Amsterdam, 1981.
3. E.A. Davis and I.J. Falconer. *J. J. Thomson and the Discovery of the Electron*. Taylor & Francis, London, 1997.
4. A. Hessenbruch, Rutherford's 1901 experiment on Radiation Energy and His Creation of a stable Detector, *Arch. Hist. Exact Sci.* 54(2000) 403-420.
5. H. Kragh, THE FIRST SUBATOMIC EXPLANATIONS OF THE PERIODIC SYSTEM, *Foundations of Chemistry* 3: 129–143, 2001.
6. MacKinnon, G. (1999). "Students' Understanding of Orbitals: A Survey" U. S. Department of Education, Educational resources information center, document number: ED 433248.
7. M.J. Martin, M.L. Calzada, J. Mediola, Study by Rutherford Backscattering Spectroscopy of the Heterostructure of Lead Titane Thin Films, *Journal of Sol – Gel Science and Technology*, 13,843-847 (1998).
8. P. A. Cox, *Introduction to Quantum Theory and Atomic Structure*, Oxford, Univarsity Press, 1996.
9. D. D. Fitts, *Principles of Quantum Mechanics: as Applied to Chemistry and Chemical Physics*, Published by Cambridge University Press, 2002.
10. A. A. Svidzinsky Marlan O. Scully and Dudley R. Herschbach, Bohr's 1913 molecular model revisited, *J. Chem. Educ.*, 1977, 54 (4), p 208
11. <http://tokohbersejarah.blogspot.com/2010/07/joseph-john-thomson.html>
12. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1906/thomson-bio.html
13. <http://www.chemistryexplained.com/Te-Va/Thomson-Joseph-John.html>
14. <http://www.jstor.org/pss/4026358>

15. <http://selectcopypaste.com/beautiful%20experimemts.htm>
16. http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/thomson.html?print=1
17. <http://kalamatianos.wordpress.com>
18. http://creationwiki.org/Niels_Bohr
19. <http://photos.aip.org/quickSearch.jsp?qsearch=dirac&group=80>
20. <http://historicalwallpapers.blogspot.com/2011/04/niels-bohr-1885-1962.html>
21. <http://www.fourakis-kea.com/forum/viewtopic.php?f=29&t=1739>
22. <http://dimitris.webgalaxy.gr/science-quantum-mechanics-ennoies.php>

Ελληνόγλωσση.

1. Γ. Ι. Ανδριτσόπουλος, *Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική*, Ιωάννινα 1984
2. P.W.Atkins, *Φυσικοχημεία*, Τόμος II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2009.
3. Αθαν. Σ. Γκιτζένης, *Θεωρία και Ασκήσεις Κβαντομηχανικής*, 1972.
4. Ένωση Ελλήνων Φυσικών, *Μεγάλες στιγμές της Φυσικής*, 1^ο Επιστημονικό συνέδριο, Καστοριά 29-31 Μαρτίου 2002, Εκδόσεις Πατάκη.
5. Στ. Μάσεν, Β.Κάργα, Κ.Δασκαλογιάννη, Μ.Γρυπαίου, *Ασκήσεις κβαντομηχανικής*, Θεσσαλονίκη 1980.
6. Τζώρτζ Γκάμοφ, *Τριάντα χρόνια που συγκλόνισαν τη φυσική*, Επιστημονικές εκδόσεις Β. Σελούντος, Αθήνα 1971
7. Tony Hey & Patrick Walters, *Το κβαντικό σύμπαν*, Εκδόσεις Κάτοπτρο, Αθήνα 1992.
8. Emilio Segre, *Ιστορία της φυσικής, Από τις ακτίνες Χ έως τα Κουάρκ*, Εκδόσεις Δίαυλος, Αθήνα 1997.
9. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2005

3.4 Τα υλικά κύματα του de Broglie.

Ο πρώτος που έκανε κάποιο επαναστατικό βήμα ήταν ένας Γάλλος αριστοκράτης, ο πρίγκιπας Louis de Broglie (1892-1987), ο οποίος ήταν άγνωστος στους φυσικούς της εποχής εκείνης. Σύμφωνα με τα φαινόμενα συμβολής και



Εικόνα 26: Ο πρίγκιπας Louis de Broglie (1892 – 1987) γεννήθηκε το 1892 από οικογένεια γάλλων ευγενών: Αρχικά πήρε πτυχίο στην ιστορία, αλλά ενώ υπηρετούσε στο γαλλικό στρατό κατά τον Πρώτο Παγκόσμιο πόλεμο στις ραδιοεπικοινωνίες από τον σταθμό στην κορυφή του πύργου Άιφελ, άρχισε να ενδιαφέρεται για τη φυσική. Με την απλή μαθηματική σχέση που συνδέει τις κυματικές και τις σωματιδιακές ιδιότητες της ύλης, κέρδισε το βραβείο Νομπέλ το 1929.

«Είχα τελείως πεισθεί ότι ο κυματοσωματιδιακός δυισμός που ανακλύφθηκε από τον Einstein στη θεωρία του για τα φωτεινά κβάντα είναι απόλυτα γενικός και εκτείνεται σε όλη τη φυσική πραγματικότητα. Έτσι, μου φαινόταν σίγουρο ότι η κίνηση ενός σωματιδίου οποιουδήποτε είδους (φωτόνιο, ηλεκτρόνιο, πρωτόνιο, κ.λπ.) συνοδεύεται πάντα και από τη διάδοση ενός κύματος»

L. DE BROGLIE

περίθλασης, το φως αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα. Ο de Broglie άρχισε να ασχολείται με το δίλλημα της διπλής φύσης του φωτός και οδηγήθηκε στη διατύπωση της κυματικής υφής ως εξής: εφόσον στη φύση παρατηρείται συμμετρία και απλότητα, πρέπει η ύλη κάτω από ειδικές συνθήκες να συμπεριφέρεται σαν κύμα ακριβώς όπως η κυματικής φύσης ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συμπεριφέρεται κάτω από ειδικές συνθήκες σαν σωματίο (φωτόνιο).

Οι ιδέες του de Broglie για τον κυματικό χαρακτήρα της ύλης, απορρίφθηκε αρχικά λόγω έλλειψης πειραματικών δεδομένων. Την μεγάλη φυσική σημασία όμως των παραπάνω ιδεών αναγνώρισε ο Einstein. Πέντε χρόνια αργότερα, το 1927 ο de Broglie έλαβε το βραβείο Νομπέλ Φυσικής για την εργασία της διατριβής του, αφού αποδείχθηκε και πειραματικά η ορθότητα

των ιδεών του από τους Gavisson και Germer.

Στην απονομή του βραβείου Nobel το 1929 εξήγησε το υπόβαθρο των ιδεών του που περιέχονταν στο διδακτορικό του.

“Τριάντα χρόνια πριν, η φυσική διαιρέθηκε σε δυο στρατόπεδα: Τη φυσική της ύλης, βασισμένη στις ιδέες των σωματιδίων και ατόμων που υπάκουε ισχυρίζονταν ότι υπάκουε στους νόμους της Κλασικής Νευτώνειας Μηχανικής, τη φυσική της ακτινοβολίας, βασισμένη στην ιδέα της κυματικής διάδοσης σε ένα υποθετικό συνεχές μέσο, τον αιθέρα. Αλλά αυτά τα δύο συστήματα της φυσικής δεν μπορούν να

παραμείνουν χωρισμένα το ένα από το άλλο: Αυτά πρέπει να ενοποιηθούν μέσω της διατύπωσης μιας θεωρίας ανταλλαγών της ενέργειας μεταξύ ύλης και ακτινοβολίας”.



Και σε ένα άλλο σημείο είπε:

“Από τη μια μεριά μας ενοχλεί το γεγονός ότι στην κβαντική θεωρία του φωτός ορίζουμε την ενέργεια του σωματίου ως συνάρτηση της συχνότητας $E = hf$. Αλλά μια αμιγής σωματιδιακή θεωρία δεν θα μας έδινε την δυνατότητα να ορίσουμε συχνότητα. Για τον λόγο αυτό στην περίπτωση του φωτός αναγκαζόμαστε να εισάγουμε ταυτόχρονα την ιδέα του σωματιδίου και του κύματος. Από το άλλο μέρος γνωρίζουμε ότι, η σταθερότητα των τροχιών των ηλεκτρονίων στα άτομα, μας υποχρεώνει να εισάγουμε

ακεραίους αριθμούς. Αλλά μέχρι τώρα τα μόνα φαινόμενα στη φυσική που περιέχουν ακεραίους είναι αυτό της συμβολής και των θεμελιωδών μορφών ταλάντωσης. Αυτό μου έδωσε την ιδέα ότι τα ηλεκτρόνια δεν είναι μόνο σωματίδια, αλλά πρέπει να τα συνδέσουμε με κάποια περιοδικότητα...”.

“... όσο για την ακτινοβολία, ειδικότερα για το φως, πρέπει να εισάγουμε άμεσα και ταυτόχρονα τη σωματιδιακή ιδέα και τη κυματική ιδέα. Με άλλα λόγια, και στις δύο περιπτώσεις πρέπει να υποθέσουμε την ύπαρξη της ύλης που συνοδεύεται από κύματα. Αλλά η ύλη και τα κύματα δεν μπορούν να είναι ανεξάρτητα επειδή, σύμφωνα με τον Bohr, αυτά είναι συμπληρωματικά το ένα του άλλου. Συμπερασματικά πρέπει να είναι δυνατόν να ιδρύσουμε ένα ορισμένο παραλληλισμό ανάμεσα στη κίνηση ενός σώματος και τη διάδοση του κύματος το οποίο το συνοδεύει”.

Στην διατριβή του ο Louis de Broglie αναφέρει τα εξής:

“Αφού τα φωτόνια δείχνουν συγχρόνως χαρακτηριστικές ιδιότητες σωματίων και κυμάτων, γιατί να μην συμβαίνει και το ίδιο με όλες τις μορφές της ύλης, γιατί δηλαδή τα σωματίδια να μη συμπεριφέρονται και ως κύματα”.

Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία συχνότητας f και μήκους λ συμπεριφέρεται και σαν σωματίο ενέργειας $E=hf$ και ορμής $p=h/\lambda$. σύμφωνα όμως με τον de Broglie,

ένα υλικό σωματίο μάζας m , ενέργειας E και ορμής p συμπεριφέρεται και σαν κύμα μήκους κύματος λ και συχνότητας f σύμφωνα με τις σχέσεις:

$$f = \frac{E}{h} \quad \text{και} \quad \lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$

Σύμφωνα λοιπόν με την υπόθεση de Broglie ένα σωματίο μάζας m κινούμενο με ταχύτητα u μπορεί να θεωρηθεί σαν ένα «υλικό» κύμα κινούμενο κατά τη διεύθυνση της κινήσεως του σωματίου με μήκος κύματος λ , που ονομάζεται, μήκος κύματος de Broglie.

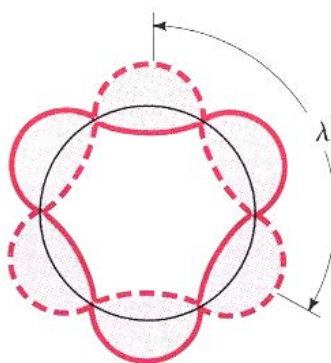
Για να ελεγχθεί αν ισχύει η υπόθεση de Broglie θα πρέπει να μπορεί να συναχθεί από αυτήν η συνθήκη κβάντωσης του Bohr. Η συνθήκη $l = n\hbar$ είναι ισοδύναμη με τη συνθήκη δημιουργίας στάσιμων ηλεκτρονιακών κυμάτων γύρω από τον πυρήνα. Όπως φαίνεται και στο σχήμα 40, για να είναι δυνατός ο σχηματισμός τέτοιων κυμάτων πρέπει το μήκος της νοητής περιφέρειας, κατά μήκος της οποίας σχηματίζεται το στάσιμο κύμα να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος, δηλαδή:

$$2\pi r = n\lambda = \frac{nh}{p}, \quad n = 1, 2, \dots$$

$$\Rightarrow \quad rp = n \frac{h}{2\pi} \equiv n\hbar$$

και δεδομένου ότι $l = rp$ (κυκλικές τροχιές), θα ισχύει η συνθήκη κβάντωσης του Bohr:

$$l = l_n = n\hbar, \quad n = 1, 2, \dots$$



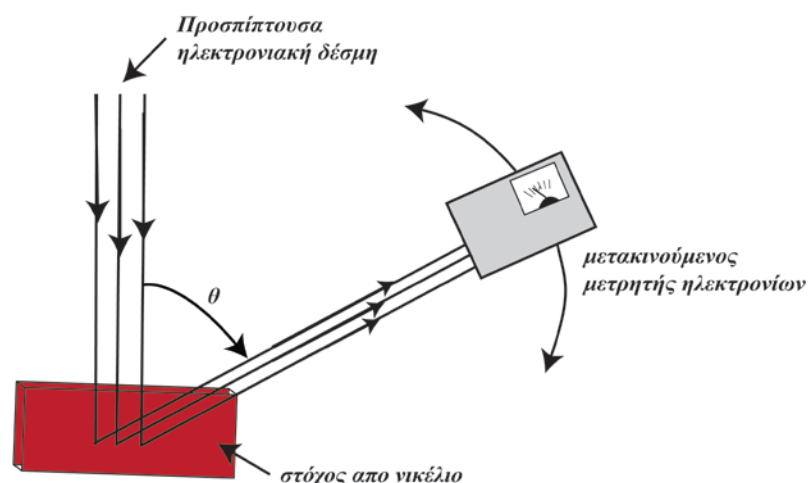
Σχήμα 40: Η συνθήκη κβάντωσης του Bohr ως συνέπεια της κυματικής φύσης των ηλεκτρονίων. Η (νοητή) περιφέρεια κατά μήκος της οποίας σχηματίζεται το ηλεκτρονικό στάσιμο κύμα πρέπει να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος de Broglie.

Η κβάντωση των ενεργειακών καταστάσεων των ατομικών ηλεκτρονίων, η οποία είναι αναγκαία για την εξήγηση της ατομικής σταθερότητας, εξηγείται με την υπόθεση του κυματοσωματιδιακού δυϊσμού της ύλης.

Η μέθοδος κβάντωσης του de Broglie οδήγησε τον Schröndiger στην ανακάλυψη της πραγματικής εξίσωσης του ηλεκτρονίου, μια πολλή σημαντική ανακάλυψη, που οδηγεί στον υπολογισμό της κίνησης των κβαντικών κυμάτων κάνοντας ακριβής προβλέψεις, συγκρινόμενες με πειραματικά δεδομένα.

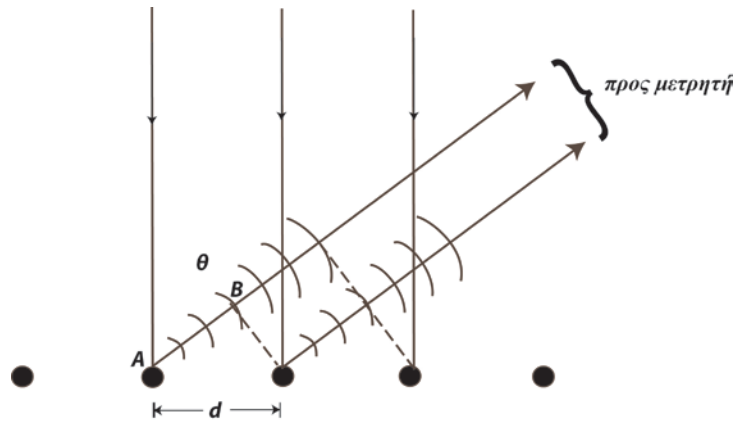
3.4.1 Πειραματική επιβεβαίωση της υπόθεσης de Broglie. Το πείραμα Davisson – Germer.

Το 1927, η κυματική συμπεριφορά των ηλεκτρονίων αποδείχτηκε πειραματικά από τον Davisson και τον Germer στις Η.Π.Α. Τα πειράματα βασίστηκαν στην μέτρηση των ηλεκτρονίων που σκεδάζονται από ένα κρύσταλλο σε διάφορες γωνίες θ . Τα ηλεκτρόνια παράγονται και επιταχύνονται σε διάφορες ενέργειες με τη βοήθεια μιας πηγής ηλεκτρονίων.



Σχήμα 41: Σχηματική παράσταση του πειράματος Davisson – Germer. Μια δέσμη ηλεκτρονίων χαμηλής ενέργειας πέφτει κάθετα πάνω στην επιφάνεια του δείγματος και ένας μετρητής τοποθετημένος διαδοχικά σε διάφορες γωνίες μετρά τη γωνιακή κατανομή σκεδαζόμενων ηλεκτρονίων. Η διάταξη είναι εγκλεισμένη μέσα σε έναν σωλήνα υψηλού κενού, ώστε αφενός να μην υπάρχει σκέδαση ηλεκτρονίων πάνω στα μόρια του αέρα και αφετέρου για να αποφεύγεται η αλλοίωση της επιφάνειας του δείγματος από τις αναπόφευκτες οξειδωτικές αντιδράσεις.

Πέφτοντας κάθετα πάνω στην επιφάνεια του δείγματος, τα ηλεκτρόνια θα συναντηθούν σε έναν εκτεταμένο μονοκρύσταλλο του οποίου τα άτομα θα είναι τοποθετημένα σε μια περιοδική διάταξη, η οποία επαναλαμβάνεται (σχήμα 42).



Σχήμα 42: Θεωρητική ανάλυση του πειράματος Davisson – Germer. Τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται προνομιακά προς τις κατευθύνσεις θ που ικανοποιούν την συνθήκη ενισχυτικής συμβολής $d \sin \theta = n\lambda$ ($n=0,1,2,\dots$). Στο συγκεκριμένο πείραμα ($E = 54\text{eV} \Rightarrow \lambda = 1,68\text{\AA}$ και $d = 2,15\text{\AA}$) η συνθήκη συμβολής ικανοποιείται μόνο για $n=1$ και δίνει γωνία σκέδασης $\theta=51^\circ$ σε πλήρη συμφωνία με το πειραματικό αποτέλεσμα.

Σύμφωνα με την υπόθεση de Broglie, η ανάλυση του πειράματος είναι πολύ απλή. Το προσπίπτον ηλεκτρονικό κύμα ανακλάται στις θέσεις των ατόμων Ni υπό μορφή σφαιρικών κυματιδίων του ίδιου μήκους κύματος όπως και το αρχικό. Τα κυματίδια αυτά συμβάλλουν ενισχυτικά μόνο προς εκείνες τις κατευθύνσεις θ για τις οποίες η διαφορά δρόμου AB ($=d \sin \theta$) μεταξύ δυο γειτονικών ανακλώμενων “ακτινών” είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του μήκους κύματος λ των ηλεκτρονίων. Δηλαδή όταν ισχύει η σχέση

$$d \sin \theta = n\lambda$$

Στην περίπτωση αυτή είναι $d=2,15\text{\AA}$ και επίσης αν $E=54\text{eV}$, τότε θα ισχύει:

$$\lambda(\text{\AA}) = \frac{12,4}{\sqrt{54}} = 1,68\text{\AA}$$

Έτσι από την παραπάνω συνθήκη προκύπτει:

$$\sin \theta_n = n \frac{\lambda}{d} = n \frac{1,68}{2,15} = 0,78n ,$$

και για $n = 0 \Rightarrow \theta_0 = 0$ προκύπτει:

$$\sin \theta_1 = 0,78 \Rightarrow \theta_1 = 51^\circ.$$

Σύμφωνα με τα παραπάνω τα υλικά κύματα de Broglie, αποτελούν πλέον και πειραματικό γεγονός. Η κυματική φύση των κινούμενων σωματιδίων βεβαιώθηκε πειραματικά και για άλλα σωματίδια εκτός των ηλεκτρονίων, όπως π.χ. για νετρόνια. Η σκέδαση νετρονίων χρησιμοποιείται στη μελέτη της κρυσταλλικής δομής, γιατί

αποτελεί μια από τις πιο ενδεδειγμένες μεθόδους για τη μελέτη τέτοιων προβλημάτων.

Εφαρμογές.

1. Υπολογισμός του μήκους κύματος (de Broglie) ηλεκτρονίων που έχουν επιταχυνθεί από την κατάσταση ηρεμίας μέσω μιας διαφοράς δυναμικού 1,00 kV.

Λύση

Η ενέργεια που αποκτά ένα ηλεκτρόνιο μέσω διαφοράς δυναμικού $\Delta\varphi$ είναι $e \times \Delta\varphi$, όπου e η απόλυτη τιμή του φορτίου του. Τη στιγμή που το ηλεκτρόνιο παύει να επιταχύνεται, όλη η ενέργεια που έχει αποκτήσει είναι υπό μορφή κινητική ενέργειας $E_k = \frac{1}{2}m_e u^2$. Εκφράζοντας την κινητική ενέργεια συναρτήσει της ορμής $p = m_e u$, παίρνουμε $E_k = \frac{p^2}{2m_e}$. Στη συνέχεια εξισώνεται η κινητική ενέργεια με την ενέργεια που απέκτησε το ηλεκτρόνιο λόγω επιτάχυνσης, από όπου εξάγεται το μήκος κύματος.

$$\frac{p^2}{2m_e} = e\Delta\varphi \Rightarrow p = (2m_e e\Delta\varphi)^{1/2}$$

Άρα το μήκος κύματος de Broglie θα είναι:

$$\lambda = \frac{h}{(2m_e e\Delta\varphi)^{1/2}}$$

Κάνοντας αντικατάσταση των δεδομένων της άσκησης στην παραπάνω σχέση προκύπτει:

$$\lambda = \frac{6,626 \times 10^{-34} Js}{\{2 \times (9,109 \times 10^{-31} Kg) \times (1,602 \times 10^{-19} C) \times (1,00 \times 10^3 V)\}^{\frac{1}{2}}} \Rightarrow$$

$$\lambda = 3,88 \times 10^{-11} m$$

2. Υπολογισμός του μήκους κύματος (de Broglie) των κυμάτων των συσχετιζόμενων προς μια δέσμη νετρονίων ενέργειας 0,025eV.

Λύση

Το μήκος κύματος de Broglie ενός σωματιδίου μάζας m κινούμενο με ταχύτητα u είναι:

$$\lambda = \frac{h}{mu} \quad (1)$$

Εάν η ενέργεια E του σωματιδίου είναι:

$$E = \frac{1}{2}mu^2 \Rightarrow mu = \sqrt{2mE} \quad (2)$$

Οπότε σε συνδυασμό των εξισώσεων (1) και (2) προκύπτει:

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE}}$$

Επειδή $E = 0,025\text{eV} = 0,025 \times 1,6 \times 10^{-12} \text{erg} = 0,4 \times 10^{-13} \text{erg}$ και $m = 1,67 \times 10^{-24} \text{gr}$ προκύπτει:

$$\lambda = 1,81 \text{ \AA}$$

3. Εύρεση μηκών κύματος κατά de Broglie υπάρχουν σε κάθε ευσταθή τροχιά του ατόμου Bohr καθώς και εξαγωγή σχέσης μεταξύ του μήκους κύματος και του κβαντικού αριθμού της τροχιάς του ατόμου του υδρογόνου.

Λύση

Σύμφωνα με την υπόθεση του Bohr ισχύει:

$$P_\phi = mu\alpha = n \frac{h}{2\pi}, \quad \text{όπου } n = 1, 2, 3, \dots \Rightarrow$$

$$2\pi\alpha = n \frac{h}{mu},$$

Και επειδή $\frac{h}{mu} = \lambda = \text{μήκος κύματος de Broglie}$, θα ισχύει:

$$2\pi\alpha = n\lambda \quad (2)$$

Δηλαδή θα υπάρχουν τόσα μήκη κύματος σε κάθε ευσταθή τροχιά όσα παριστά ο κβαντικός αριθμός n .

Από τη θεωρία του Bohr είναι γνωστό ότι η ακτίνα της ευσταθούς τροχιάς του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα είναι:

$$\alpha = \frac{\hbar^2 \cdot n}{me^2 Z} \quad (3)$$

Συνδυάζοντας τις σχέσεις (2) και (3), προκύπτει:

$$\lambda = \frac{h^2 \cdot n}{2\pi me^2 Z}$$

Οπότε για την πρώτη και τη δεύτερη τροχιά θα ισχύει:

$$\lambda_1 = 3,32\text{\AA} \quad \text{και} \quad \lambda_2 = 6,64\text{\AA}$$

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

1. P. A. Cox, Introduction to Quantum Theory and Atomic Structure, Oxford, Univercity Press, 1996.
2. G. Lochak, De Broglie's initial conception of de Broglie's waves, in 'The wave particle dualism', Proceedings of an international symposium held in Perugia, Apr. 22-10, 1982, D. Reidel Publ. Co., Dortdrecht, Holland, 1984.
3. Louis de Broglie, C. R. Acad. Sc. Paris, 277, B71, 1973.
4. Louis de Broglie, The wave nature of the electron, Nobel Lecture, December 12, 1929.
5. <http://www.spaceandmotion.com/quantum-theory-de-broglie-quotes.htm>
6. http://www.mines-paristech.fr/aflb/LDB-oeuvres/De_Broglie_Kracklauer.htm
7. <http://users.sch.gr/apouliassis/Quantum%20Mechanics/broglie.htm>
8. http://courses.chem.indiana.edu/c362/documents/DeBroglie2011_000.pdf
9. <http://www.physchem.co.za/OB12-wav/debroglie.htm>
10. <http://focus.aps.org/story/v17/st17>

Ελληνόγλωσση

10. Γ. Ι. Ανδριτσόπουλος, *Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική*, Ιωάννινα 1984
11. P.W.Atkins, *Φυσικοχημεία*, Τόμος II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2009.
12. Αθαν. Σ. Γκιτζένης, *Θεωρία και Ασκήσεις Κβαντομηχανικής*, 1972.
13. Ένωση Ελλήνων Φυσικών, *Μεγάλες στιγμές της Φυσικής*, 1^ο Επιστημονικό συνέδριο, Καστοριά 29-31 Μαρτίου 2002, Εκδόσεις Πατάκη.
14. Στ. Μάσεν, Β.Κάργα, Κ.Δασκαλογιάννη, Μ.Γρυπαίου, *Ασκήσεις κβαντομηχανικής*, Θεσσαλονίκη 1980.
15. Τζώρτζ Γκάμοφ, *Τριάντα χρόνια που συγκλόνισαν τη φυσική*, Επιστημονικές εκδόσεις Β. Σελούντος, Αθήνα 1971

16. Tony Hey & Patrick Walters, *Το κβαντικό σύμπαν*, Εκδόσεις Κάτοπτρο, Αθήνα 1992.
17. Emilio Segre, *Ιστορία της φυσικής, Από τις ακτίνες X έως τα Κουάρκ*, Εκδόσεις Διάυλος, Αθήνα 1997.
18. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2005

3.5. Heisenberg και Απροσδιοριστία.

Στην Κβαντική μηχανική δεν είναι εύκολη η παραστατική απεικόνιση της κίνησης των κβαντικών σωματιδίων. Το μόνο που μπορεί να προσδιοριστεί με

ακρίβεια είναι π.χ. η θέση, η ταχύτητα, η ορμή, η ενέργεια κ.λπ. ενός σωματιδίου. Αυτό μπορεί να γίνει μόνο εφόσον το υπό μελέτη σωματίδιο είναι μεγάλο, οπότε η μελέτη που γίνεται για τον προσδιορισμό της τιμής ενός μεγέθους, π.χ. θέση, δεν επηρεάζει την κατάσταση στην οποία βρίσκεται το σωματίδιο, ως προς π.χ. την ορμή.

Σαν παράδειγμα μπορεί να θεωρηθεί ο προσδιορισμός της θέσης ενός αεροπλάνου με τη βοήθεια του ραντάρ. Το ραντάρ εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία στην περιοχή των μικροκυμάτων. Τα μικροκύματα ανακλώμενα από το αεροπλάνο δίνουν στο δέκτη του ραντάρ τη θέση και τη ταχύτητα του αεροπλάνου. Προφανώς λόγω του όγκου και της μάζας του αεροπλάνου τα μικροκύματα ούτε το μετατόπισαν ούτε το άλλαξαν ταχύτητα.

Όταν όμως η παρατήρηση γίνεται σε σωματίδιο του μικρόκοσμου, όπου η Κλασική Φυσική δεν επαρκεί και η μελέτη του

σωματιδίου είναι δυνατό να ερμηνευτεί μόνο με τους κανόνες της Κβαντικής θεωρίας, τότε δεν μπορεί να επιτευχθεί ο ακριβής προσδιορισμός των διαφόρων μεγεθών.

Στο πείραμα της διπλής σχισμής για παράδειγμα, μόλις προσδιοριστεί από ποιά σχισμή πέρασε το ηλεκτρόνιο, η χαρακτηριστική εικόνα της συμβολής καταστρέφεται. Αυτό το αποτέλεσμα είναι ενδεικτικό μιας γενικής αρχής της κβαντικής φυσικής που φέρει το όνομα του ανθρώπου που την ανακάλυψε, του Werner Heisenberg.



Εικόνα 28: Ο Werner Heisenberg (1901 – 1976) ήταν Γερμανός Φυσικός. Ήταν λίγο παραπάνω από είκοσι χρονών όταν ολοκλήρωσε τη βασική του εργασία πάνω στη Κβαντική θεωρία. Το 1932 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ για την ανακάλυψη της αρχής της απροσδιοριστίας.



Εικόνα 29: 1932, Αριστερά ο Heisenberg και δεξιά ο Bohr.

«Το αληθινό νόημα της σταθεράς του Planck είναι τούτο: Αποτελεί ένα παγκόσμιο μέτρο της απροσδιοριστίας που, λόγω της αρχής του κυματοσωματιδιακού δυισμού, είναι ένα εγγενές χαρακτηριστικό των φυσικών νόμων»

M.Bohr – W. Heisenberg
(Κοινή εισήγηση στο συνέδριο του Solvay)

3.5.1 Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg.

Η αρχή της αβεβαιότητας ή της απροσδιοριστίας του Heisenberg μελετά αντικείμενα μικροσκοπικών διαστάσεων. Οι φυσικοί παριστάνουν τη μέτρηση της θέσης ενός σωματιδίου με x , και αντί για τη ταχύτητα του σωματιδίου χρησιμοποιούν την ορμή. Η ορμή είναι το γινόμενο της μάζας του σωματιδίου επί την ταχύτητά του και παριστάνεται με το σύμβολο p , δηλαδή,

$$p = mu$$

Σε ένα κβαντικό σύστημα οι ποσότητες x και p δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστούν με μεγάλη ακρίβεια. Υπάρχει ένα ελάχιστο σφάλμα ή απροσδιοριστία Δx και Δp , που έχει σχέση με τη μέτρησή τους. Σύμφωνα με τη θεωρία του Heisenberg οι απροσδιοριστίες Δx και Δp , είναι άμεσα συνδεδεμένες.

Για να εντοπιστεί σωματίδιο με μεγάλη ακρίβεια θα πρέπει να χρησιμοποιηθεί φως με μεγάλη συχνότητα. Φως με μεγάλη συχνότητα σημαίνει ότι σημαίνει φωτόνια με πολύ μεγάλη ενέργεια που προκαλούν μεγάλη διαταραχή στο κβαντικό σύστημα, δηλαδή μεγάλη απροσδιοριστία στη μέτρηση της ορμής.

Η αρχή της απροσδιοριστίας του Heisenberg έχει μια ακριβή μαθηματική σχέση, η οποία συνδέει την απροσδιοριστία στις μετρήσεις της θέσης και της ορμής με τον εξής τρόπο:

$$\Delta x \Delta p \approx h$$

(απροσδιοριστία στη θέση) επί (απροσδιοριστία στην ορμή) $\approx$ (σταθερά του Plank)

Όπου $h = \hbar/2$, επομένως η παραπάνω εξίσωση γράφεται ως εξής:

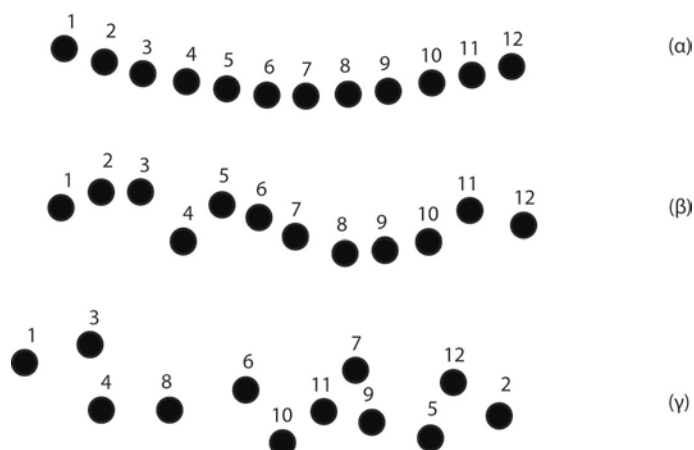
$$\Delta x \Delta p \approx \hbar/2$$

Ο παραπάνω τύπος ερμηνεύεται ως εξής:

Όσο μεγαλύτερη είναι η ακρίβεια που μετριέται στη θέση x , τόσο μειώνεται η δυνατότητα να προσδιοριστεί με ακρίβεια η θέση p , και αντιστρόφως. Αν γινόταν να μετρηθεί η θέση με άπειρη ακρίβεια, η ορμή θα γινόταν εντελώς απροσδιόριστη και αντιθέτως, αν μετρηθεί με απόλυτη ακρίβεια η ορμή του σωματιδίου γίνεται εντελώς απροσδιόριστη η θέση του.

Επομένως η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg μπορεί να διατυπωθεί και ως εξής:

“είναι αδύνατη η ταυτόχρονη ακριβής μέτρηση της θέσης και της ορμής ενός σωματιδίου, ανεξάρτητα από τον τρόπο και μέσα μέτρησης αυτών”.



Σχήμα 43: Προσδιορισμός των διαδοχικών θέσεων ενός κυματοσωματιδίου κατά τις χρονικές στιγμές $t, 2t, 3t, \dots, 12t$. Το μέγεθος κάθε κυκλίσκου δηλώνει την απροσδιοριστία στο πειραματικό καθορισμό της θέσης. α) η απροσδιοριστία είναι πολύ μεγάλη, οι διαδοχικοί κυκλίσκοι ακολουθούν ο ένας τον άλλο δημιουργώντας προσεγγιστικά την εικόνα της τροχιάς. Καθώς αυξάνεται η ακρίβεια καθορισμού θέσης, οι διαδοχικοί κυκλίσκοι ακολουθούν όλο και λιγότερο μια ομαλή καμπύλη (περίπτωση β) μέχρι που στη περίπτωση (γ) τα σημεία είναι τόσο τυχαία κατανομημένα ώστε η έννοια της τροχιάς χάνει ακόμη και την προσεγγιστική της σημασία.

Η αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg δεν περιορίζεται μόνο στην θέση και στην ορμή, αλλά γενικεύεται σε κάθε ζεύγος συζυγών μεγεθών. Η παραπάνω σχέση μπορεί να γραφεί γενικά:

$$\Delta q \Delta p \approx \hbar/2$$

όπου q και p είναι συζυγή μεγέθη.

Η αρχή της αβεβαιότητας έχει έννοια μόνο για τις περιπτώσεις εκείνες, όπου τα Δq και Δp είναι συγκρίσιμα με το $\hbar$. έτσι η σχέση αυτή έχει σημασία μόνο στο μικρόκοσμο (δεδομένου ότι το $\hbar$ είναι πολύ μικρό) και όχι στο μακρόκοσμο.

3.5.2 Η Αρχή της Αβεβαιότητας Ενέργειας και Χρόνου.

Για τον προσδιορισμό της χρονικής στιγμής κατά την οποία ένα σωματίδιο διέρχεται από δεδομένο σημείο x και έχει ενέργεια E , πρέπει η κυματική μορφή του σωματιδίου, να θεωρηθεί ως ένα κυματόδεμα ή ένας παλμός χρονικής διάρκειας Δt . Για τη δημιουργία ενός κυματοδέματος απαιτείται η συμβολή πολλών άλλων κυμάτων, των οποίων οι γωνιακές συχνότητες θα κυμαίνονται μέσα στη περιοχή $\Delta \omega$.

Με βάση τη θεωρία αναλύσεως κατά Fourier αποδεικνύεται ότι το γινόμενο

$$\Delta t \Delta \omega \geq 1/2 \quad \text{ή} \quad \Delta t \Delta \nu \geq 1/4\pi$$

και εφόσον $E = h\nu$, συνεπάγεται ότι,

$$\Delta t \Delta E \geq \hbar/2$$

όπου ΔE είναι η αβεβαιότητα στην τιμή ενέργειας, λόγω ύπαρξης πεπερασμένης χρονικής διάρκειας Δt , που το σωματίδιο έχει αυτή την ενέργεια. Στην παραπάνω σχέση η ενέργεια είναι μια δυναμική μεταβλητή, ενώ ο χρόνος είναι μια παράμετρος. Έτσι η σχέση αυτή συνδέει την αβεβαιότητα ΔE στην τιμή της δυναμικής μεταβλητής με το χρονικό διάστημα Δt που χαρακτηρίζει το ρυθμό της μεταβολής της ενέργειας του συστήματος, ή γενικότερα το χρόνο εξέλιξης του φυσικού συστήματος. Εάν $\Delta t \rightarrow \infty$, δηλαδή ο χρόνος εξέλιξης είναι τόσο μικρός ώστε το σύστημα να θεωρείται ενεργειακά αμετάβλητο, τότε $\Delta t \rightarrow 0$, με αποτέλεσμα η αντίστοιχη τιμή της ενέργειας να είναι με ακρίβεια προσδιορίσιμη. Από όλα τα παραπάνω προκύπτει ότι:

“Η αβεβαιότητα στη μέτρηση της ενέργειας ΔE ενός συστήματος, που γίνεται μέσα στο χρόνο Δt , είναι τόση ώστε το γινόμενο $\Delta E \Delta t$ να είναι μεγαλύτερο ή το πολύ ίσο με τη σταθερά $\hbar/2$ ”.

Άλλη μια εφαρμογή της παραπάνω σχέσης αποτελεί η συσχέτιση του χρόνου ζωής και του ενεργειακού εύρους διαφόρων ενεργειακών καταστάσεων συστημάτων, όπως ραδιενεργοί πυρήνες, διεγερμένα άτομα, ασταθή στοιχειώδη σωματίδια, κ.α.

Έστω ένα ηλεκτρόνιο περιστρεφόμενο γύρω από τον πυρήνα ενός ατόμου σε διεγερμένη κατάσταση. Το ηλεκτρόνιο μετά από ορισμένο χρόνο με εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας θα μεταπέσει σε άλλη κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Ο χρόνος παραμονής του ηλεκτρονίου στην αρχική διεγερμένη κατάσταση ονομάζεται χρόνος ζωής και είναι πεπερασμένος.

Για τη μέτρηση της ενέργειας E της διεγερμένης κατάστασης η διάρκεια της μετρήσεως Δt εξαρτάται από το χρόνο ζωής τ . Εάν ο χρόνος ζωής είναι βραχύς, δηλαδή ο ρυθμός μεταβολής είναι μεγάλος, ο διαθέσιμος χρόνος μέτρησης είναι μικρός, και το σφάλμα ΔE στην τιμή της ενέργειας E είναι μεγάλο. Για μια ευσταθή κατάσταση, όπως η βασική στάθμη του ατόμου, ο χρόνος ζωής είναι άπειρος, δηλαδή εξέλιξη μηδέν, ο χρόνος μέτρησης Δt μπορεί να είναι αρκετά μεγάλος, οπότε το αντίστοιχο ΔE να είναι σχεδόν μηδέν και επομένως μπορεί να προσδιοριστεί με ακρίβεια η τιμή της ενέργειας της βασικής στάθμης.

Η αβεβαιότητα στην ενέργεια ΔE λέγεται Εύρος Ενέργειας ή Εύρος Ενεργειακής στάθμης, συμβολίζεται με το γράμμα Γ και ισχύει

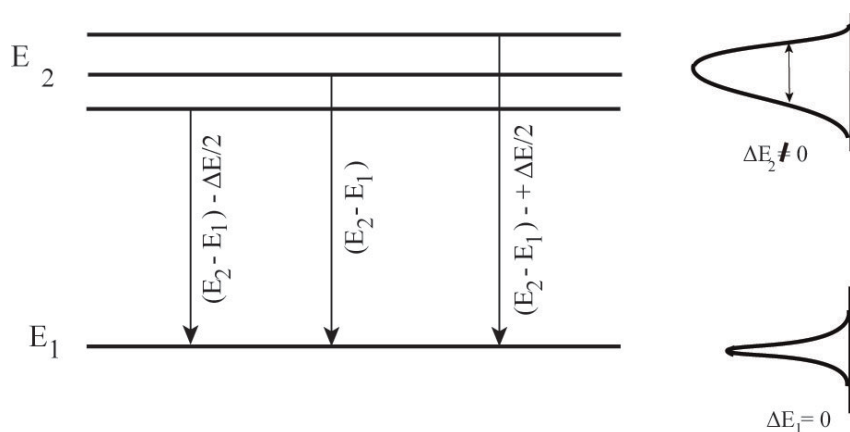
$$\tau\Gamma \geq \hbar$$

Το νόημα αυτής της σχέσης είναι το εξής:

“Όσο πιο αργά μεταβάλλεται ένα φυσικό σύστημα (τ μεγάλο) τόσο ακριβέστερα προσδιορίζεται η ενέργεια του (ΔE μικρό). Και αντιστρόφως, όσο πιο γρήγορος είναι ο ρυθμός μεταβολής του (τ μικρό), τόσο πιο μεγάλη είναι η αβεβαιότητα στην ενέργεια (ΔE μεγάλο)”.

Η σχέση αυτή είναι από τις σπουδαιότερες της φυσικής του μικρόκοσμου και συνδέει το χρόνο ζωής μιας κατάστασης με την ακρίβεια μέτρησης της αντίστοιχης ενέργειας.

Η αβεβαιότητα στην ενέργεια ΔE ορίζεται για μια περιοχή ενέργειας από $E - \Delta E/2$ έως $E + \Delta E/2$, και όχι για μια ορισμένη τιμή ενέργειας μιας κατάστασης. Η ενέργεια όμως μιας διεγερμένης στάθμης δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, καθώς επίσης και η ενέργεια της μετρούμενης ακτινοβολίας που ελευθερώνεται κατά την μετάπτωση $E_2 \rightarrow E_1$, δεν είναι γνωστή με ακρίβεια, ωστόσο περιορίζεται μέσα στη περιοχή $E_2 \rightarrow E_1 \pm \Delta E/2$.



Σχήμα 44: Εύρος ενεργειακής κατάστασης.

Έτσι σύμφωνα με τη σχέση το εύρος μιας πειραματικής λαμβανόμενης φασματοσκοπικής γραμμής που προέρχεται από μετάπτωση από μια διεγερμένη κατάσταση στη βασική, είναι το μέτρο του χρόνου ζωής της διεγερμένης κατάστασης από την οποία προήλθε η φασματική γραμμή.\\

Εφαρμογές.

1. Εύρεση της βασικής στάθμης αρμονικού ταλαντωτή με τη χρήση της σχέσης αβεβαιότητας του Heisenberg.

Λύση

Η ενέργεια του αρμονικού ταλαντωτή είναι:

$$E = \frac{p^2}{2m} + \frac{1}{2}kx^2 \quad (1)$$

Η ελάχιστη δυνατή ορμή Δp καθώς και η ελάχιστη απομάκρυνση συνδέονται με τη σχέση της αβεβαιότητας:

$$\Delta p \cdot \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad (2)$$

Οπότε η (1) γίνεται:

$$E \geq \frac{\hbar^2}{8m(\Delta x)^2} + \frac{\kappa(\Delta x)^2}{2} \quad (3)$$

Η (3) παρουσιάζει ελάχιστο όταν:

$$(\Delta x)^2 = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{1}{mk} \right)^{1/2}$$

Επομένως:

$$E_{min} = \frac{\hbar}{2} \left(\frac{1}{mk} \right)^{1/2} = \frac{\hbar\omega}{2}$$

2. Εύρεση ενέργειας της βασικής στάθμης ενός ηλεκτρονίου κινούμενου εντός ατόμου, με ατομικό αριθμό z .

Λύση

Η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι:

$$E = \frac{p^2}{2m} - \frac{ze^2}{r} \quad (1)$$

Επειδή $p \sim \hbar/r$, όπου r οι διαστάσεις εντός των οποίων εντοπίζεται το σωματίδιο, θα ισχύει:

$$E = \frac{\hbar^2}{2mr^2} - \frac{ze^2}{r} \quad (2)$$

Η (2) παρουσιάζει ελάχιστο όταν,

$$r = \frac{\hbar^2}{ze^2m} = \frac{a}{z} \quad (3)$$

Όπου a η ακτίνα Bohr ($a=0,529 \text{ \AA}$).

Συνδυάζοντας τις εξισώσεις (2) και (3) ισχύει:

$$E = -\frac{Z^2 me^4}{2\hbar^2} = -Z^2 \cdot 13.5eV$$

3. Υπολογισμός της ελάχιστης αβεβαιότητας της θέσης ενός βλήματος, ταχύτητας $1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$ και μάζας $1,0 \text{ g}$.

Λύση

Η ελάχιστη αβεβαιότητα θέσης υπολογίζεται από την εξίσωση

$$\Delta p \Delta q \geq 1/2\hbar$$

Και όπου $\Delta p = m\Delta u$.

Συνδυάζοντας τις παραπάνω σχέσεις προκύπτει:

$$\Delta q = \frac{\hbar}{2m\Delta u} \Rightarrow$$

$$\Delta q = \frac{1,055 \times 10^{-34} \text{ Js}}{2 \times (1,0 \times 10^{-13} \text{ kg}) \times (1 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1})} = 5 \times 10^{-26} \text{ m}.$$

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση

1. Werner Heisenberg, *Physics and Philosophy*, Published by Penguin Books.
2. Werner Heisenberg, *The Physical Principles of quantum theory*, Published by University of Chicago Press, 1950.
3. D. D. Fitts, *Principles of Quantum Mechanics: as Applied to Chemistry and Chemical Physics*, Published by Cambridge University Press, 2002.
4. <http://plato.stanford.edu/entries/qt-uncertainty/>
5. <http://www.aip.org/history/heisenberg/>

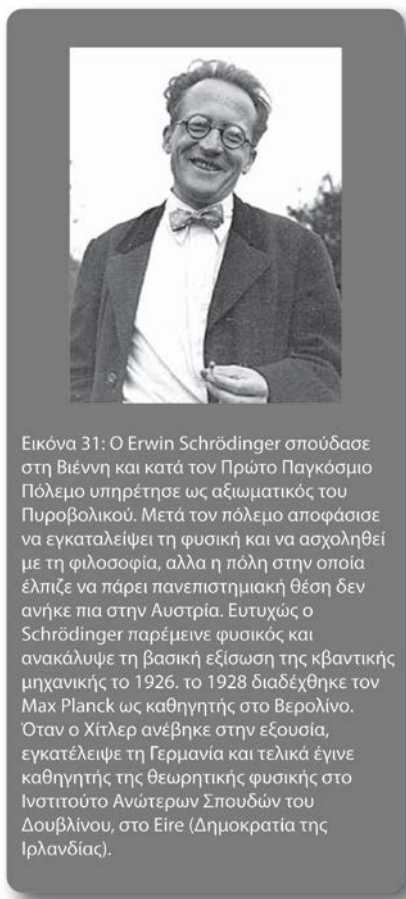
6. <http://www.spaceandmotion.com/quantum-theory-werner-heisenberg-quotes.htm>
7. <http://hubpages.com/hub/Quantum-Physics---Werner-Heisenberg>
8. <http://www.aps.org/publications/apsnews/200802/physicshistory.cfm>
9. http://physicwanderings.blogspot.com/2008/09/blog-post_6791.html
10. http://aventuresdelhistoire.blogspot.com/2008_02_01_archive.html
11. <http://staff.science.uva.nl/~awatts/page3/files/aug-2009.html>

Ελληνόγλωσση

19. Γ. Ι. Ανδριτσόπουλος, *Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική*, Ιωάννινα 1984
20. P.W.Atkins, *Φυσικοχημεία*, Τόμος II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2009.
21. Αθαν. Σ. Γκιτζένης, *Θεωρία και Ασκήσεις Κβαντομηχανικής*, 1972
22. Ε.Ν. Οικονόμου, *Η Φυσική Σήμερα*, Πανεπιστημιακές Εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 1986.
23. Roger Penrose, *Ο Νέος Αυτοκράτορας (;)*, Εκδόσεις Γκοβόστη, Αθήνα
24. Τζώρτζ Γκάμοφ, *Τρίαντα χρόνια που συγκλόνισαν τη φυσική*, Επιστημονικές εκδόσεις Β. Σελούντος, Αθήνα 1971
25. Tony Hey & Patrick Walters, *Το κβαντικό σύμπαν*, Εκδόσεις Κάτοπτρο, Αθήνα 1992.
26. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2005

3.6 Η Υλοκυματική εξίσωση του Schrödinger

Ο Schrödinger άρχισε να σκέφτεται την εξήγηση της κίνησης ενός ηλεκτρονίου σε ένα άτομο με τη βοήθεια ενός κύματος, με αφορμή την ιδέα του Γάλλου φυσικού Louis de Broglie, ότι ο κυματο-σωματιδιακός δυϊσμός του φωτός



(που την ανέπτυξε ο Einstein για να εξηγήσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο) επιβαλλόταν να επεκταθεί και στα υλικά σωματίδια. Σύμφωνα με τον de Broglie, κάθε σωματίδιο που διαθέτει ενέργεια και ορμή μπορεί να χαρακτηριστεί μέσω μιας συχνότητας ταλάντωσης και ενός μήκους κύματος. Ο Schrödinger άντλησε λοιπόν αυτή την ιδέα του κύματος και το 1926 δημοσίευσε μια σειρά εργασιών με τον γενικό τίτλο "Η κβάντωση ως πρόβλημα ιδιοτιμών", στις οποίες έθετε σε γερά θεμέλια τη μυστηριώδη μέχρι τότε θεωρία της κυματομηχανικής. Η κυματομηχανική του και ειδικά η περίφημη εξίσωση Schrödinger, καθιερώθηκε από τότε ως ένα από τα κλασικά έργα της Κβαντικής Φυσικής, που διδάσκεται σε όλα τα πανεπιστήμια αλλά και στα σχολεία. Η θεωρητική αυτή εξήγηση των ηλεκτρονίων σε

ένα άτομο του Schrödinger, ήταν η δεύτερη που δόθηκε. Είχε προηγηθεί η θεωρία πινάκων του Werner Heisenberg το 1925. Ο Schrödinger αργότερα βρήκε πως μπορεί να εκφράζονται διαφορετικά. Όμως υπάρχει ισοδυναμία των δύο θεωριών για την ερμηνεία των φυσικών ιδιοτήτων των ατόμων. Πολλοί επιστήμονες προτιμούν να δουλεύουν με την εξίσωση του παρά με αυτή του Heisenberg λόγω της μαθηματικής στρυφνότητας που αυτή έχει.

3.6.1 Η Υλοκυματική εξίσωση του Schrödinger

Τον Ιανουάριο του 1926 ο Schrödinger δημοσίευσε την εργασία του στο περιοδικό Annalen der Physik, 79, 361 (1926), στην οποία διατύπωσε την περίφημη εξίσωση:

$$E_\psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + \Delta\psi$$

Η εξίσωση αυτή εκφράζει την κίνηση ενός σωματιδίου με ολική ενέργεια E που κινείται σε μια διάσταση x , σε μια περιοχή στην οποία υπάρχει δυναμικό Δ . Η παράσταση των πλατών πιθανότητας με το ελληνικό γράμμα ψ είναι μια απλή σύμβαση. Το m είναι η μάζα του σωματιδίου και το $\hbar$ είναι η σταθερά του Planck διαιρούμενη με 2π .

Η συνάρτηση ψ στην εξίσωση αυτή αντιστοιχεί στην πιθανότητα του ηλεκτρικού φορτίου. Η ερμηνεία αυτή ωστόσο, δημιούργησε πολλές αμφιβολίες επειδή το ηλεκτρόνιο θεωρούνταν εντοπισμένο, σε μια πολύ μικρή περιοχή του χώρου, τόσο μικρή όσο ένα σημείο.

Με βάση την παραπάνω εξίσωση, υπολογίζεται η ενέργεια του ηλεκτρονίου, η οποία βρίσκεται σε πλήρη ταύτιση με αυτή που προσδιόρισε ο Bohr (κβάντωση ενέργειας). Επιπλέον, η εξίσωση αυτή προσδιορίζει την πιθανότητα εύρεσης του ηλεκτρονίου σε ορισμένο χώρο, πράγμα που βρίσκεται σε πλήρη αντίθεση με τις αντιλήψεις του Bohr (καθορισμένες τροχιές). Πιο αναλυτικά, η επίλυση αυτής της εξίσωσης οδηγεί στις κυματοσυναρτήσεις ψ , οι οποίες περιγράφουν την κατάσταση του ηλεκτρονίου με ορισμένη ενέργεια και ονομάζονται ατομικά τροχιακά.

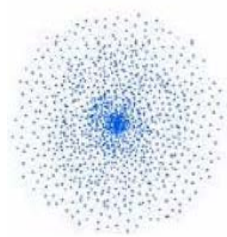
Τα ατομικά τροχιακά αποτελούν συναρτήσεις θέσης του ηλεκτρονίου στο άτομο π.χ. είναι της μορφής $\psi(x, y, z)$, όπου x, y, z είναι οι συντεταγμένες που καθορίζουν τη θέση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα. Το ψ αυτό καθαυτό δεν έχει φυσική σημασία. Αποτελεί όμως κατά κάποιο τρόπο, μια ένδειξη παρουσίας, ή μη, του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα ($\psi=0$ υποδηλώνει την απουσία και $\psi \neq 0$ την παρουσία του ηλεκτρονίου). Αντίθετα το ψ^2 έχει φυσική σημασία, καθώς εκφράζει την πιθανότητα να βρεθεί το ηλεκτρόνιο σε ένα ορισμένο σημείο του χώρου γύρω από τον πυρήνα, ή αλλιώς εκφράζει την κατανομή ή την πυκνότητα του ηλεκτρονιακού νέφους στο χώρο γύρω από τον πυρήνα. Για παράδειγμα:

Στη θέση A: $\psi=0,1$ ή $\psi^2=0,01$

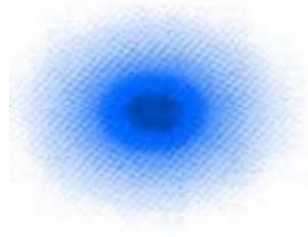
Στη θέση B: $\psi=-0,3$ ή $\psi^2=0,09$

Δηλαδή η πιθανότητα να βρίσκεται το ηλεκτρόνιο στη θέση B είναι εννιά φορές μεγαλύτερη από όσο στη θέση A.

Παρακάτω, δίνεται υπό μορφή παραδείγματος, η σχηματική απεικόνιση του ηλεκτρονιακού νέφους του ατόμου του υδρογόνου, στη θεμελιώδη κατάσταση.



α.

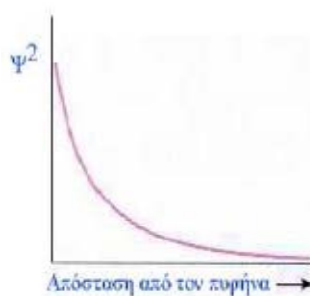


β.



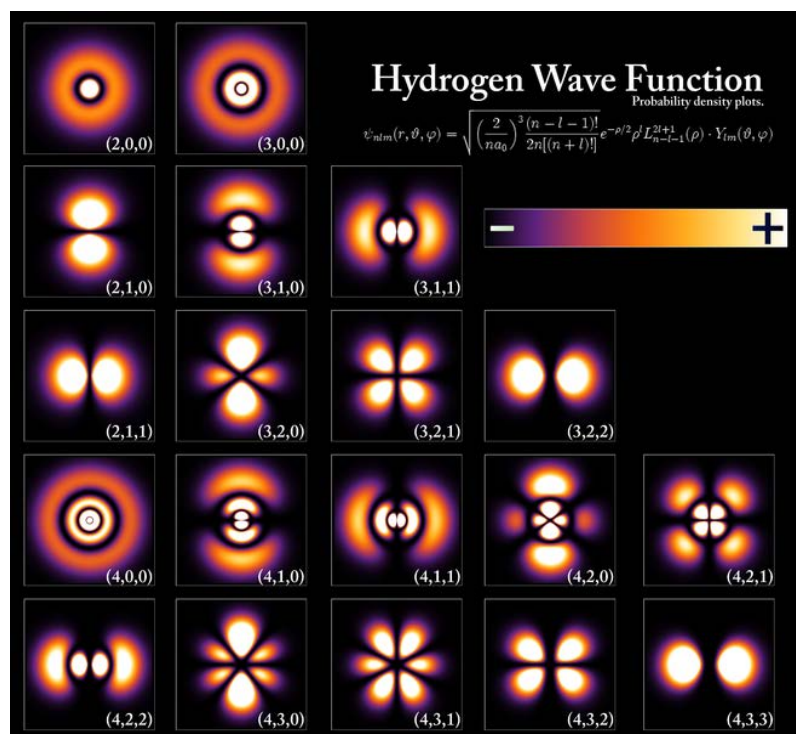
γ.

Σχήμα 44: Σχηματική απεικόνιση της πυκνότητας του ηλεκτρονιακού νέφους του ατόμου του υδρογόνου σε μη διεγερμένη κατάσταση: α) με “στιγμές” β) με πυκνότητα χρώματος γ) με οριακές καμπύλες.



Σχήμα 45: Γραφική παράσταση της πυκνότητας του ηλεκτρονιακού νέφους σε συνάρτηση με την απόσταση από τον πυρήνα.

Στο σχήμα 44α, η πυκνότητα του ηλεκτρονιακού νέφους, που είναι και ανάλογη της πιθανότητας παρουσίας ηλεκτρονίου, καθορίζεται από τον αριθμό των κουκκίδων ανά μονάδα όγκου. Στο σχήμα 44β, η πυκνότητα του ηλεκτρονιακού νέφους, είναι ανάλογη της πυκνότητας του χρώματος, ενώ στο σχήμα 44γ, οι οριακές καμπύλες, είναι η πιο συνηθισμένη απεικόνιση του ηλεκτρονιακού νέφους.



Σχήμα 46: Τα ηλεκτρονιακά νέφη του Schrödinger, τα οποία αντιστοιχούν σε στάσιμες καταστάσεις του ατόμου του υδρογόνου. Τα σχήματα αυτά δείχνουν την ηλεκτρονιακή πυκνότητα, δηλαδή την πιθανότητα $|\psi^2|$ να βρεθεί το ηλεκτρόνιο σε ένα ορισμένο σημείο, όταν το άτομο βρίσκεται στην κατάσταση που περιγράφεται από τους συγκεκριμένους κβαντικούς αριθμούς. Ο πρώτος αριθμός το n , είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός, τα γράμματα s,p,d,f, για ιστορικούς λόγους, δείχνουν την τιμή της στροφορμής σε μονάδες $\hbar/2\pi$, το s αντιστοιχεί σε τιμή $l=0$, το p σε $l=1$, το d σε $l=2$, και το f σε $l=3$. Το m είναι ο μαγνητικός αριθμός και καθορίζει τον προσανατολισμό του ατόμου. [Από το άρθρο του H. White, Physical Review, 37, 1416, (1937)].

Το σχήμα 46, δείχνει τα νέφη κατά Schrödinger του ηλεκτρικού φορτίου για το άτομο του υδρογόνου, χωρίς όμως αυτά να είναι υπαρκτά.

3.6.2 Το παράδοξο της γάτας του Schrödinger

Ο Erwin Schrödinger το 1935 πρότεινε το πείραμα: το παράδοξο της γάτας του Schrödinger.

Το πείραμα είχε ως εξής: έστω πως υπάρχει ένας σφραγισμένος χώρος, κατασκευασμένος τόσο τέλεια, ώστε καμία φυσική επίδραση να μην μπορεί να περάσει από τα τοιχώματά του, είτε προς τα μέσα, είτε προς τα έξω. Έστω επίσης ότι στο εσωτερικό του κλειστού χώρου βρίσκεται μια γάτα, καθώς και μια συσκευή, που μπορεί να ενεργοποιηθεί από κάποιο κβαντικό γεγονός. Αν συμβεί αυτό το γεγονός, η

συσκευή σπάει ένα φιαλίδιο που περιέχει υδροκυάνιο και η γάτα σκοτώνεται. Αν το γεγονός δεν συμβεί, τότε η γάτα επιβιώνει. Στην κβαντική εκδοχή του Schrödinger το κβαντικό γεγονός ήταν η διάσπαση ενός ραδιενεργού ατόμου.

Εάν μπορούσε να θεωρηθεί ως κβαντικό γεγονός η διέγερση ενός φωτοκύτταρου από ένα φωτόνιο, που εκπέμφθηκε από κάποια κατάλληλα προετοιμασμένη πηγή, στην συνέχεια αυτό θα είχε ως αποτέλεσμα την ανάκλασή του από έναν ημιεπαργυρωμένο καθρέφτη. Ο καθρέφτης διασπά την κυματοσυνάρτηση του φωτονίου σε δυο ξεχωριστά κομμάτια, από τα οποία το ένα ανακλάται, και το άλλο μεταδίδεται μέσω του καθρέφτη. Το τμήμα της κυματοσυνάρτησης του φωτονίου που ανακλάστηκε εστιάζεται στο φωτοκύτταρο, οπότε αν το φωτόνιο καταγραφεί από το φωτοκύτταρο, αυτό σημαίνει ότι έχει υποστεί ανάκλαση. Αν το φωτοκύτταρο δεν καταγράψει τίποτα, αυτό σημαίνει ότι το φωτόνιο διαδόθηκε μέσα από τον καθρέφτη προς τον τοίχο που βρίσκεται από πίσω, αφήνοντας τη γάτα ζωντανή.

Επειδή ο παρατηρητής δεν γνωρίζει τι γίνεται μέσα στο κουτί, η γάτα είναι ζωντανή και νεκρή ταυτόχρονα. Έτσι τουλάχιστον προκύπτει από την αρχή της επαλληλίας. Μόνο αφού ανοίξει κανείς το κουτί και δει με τα μάτια του τη κατάσταση της γάτας, μόνο τότε λοιπόν η γάτα γίνεται ζωντανή ή νεκρή! Αυτή είναι η κβαντική απροσδιοριστία με τα παράδοξά της. Η παρατήρηση λοιπόν, είναι αυτή που καθορίζει το αποτέλεσμα, το οποίο δεν υπάρχει μέχρι να γίνει η παρατήρηση. Επεκτείνοντας κανείς τη συλλογιστική αυτή λίγο παραπέρα, όλη η ύλη που υπάρχει στο σύμπαν αποτελείται από υποατομικά σωματίδια που συμπεριφέρονται όπως περιγράφηκε παραπάνω.

Με αυτό το πείραμα ο Schrödinger για πρώτη φορά στην ιστορία της κβαντομηχανικής συνέδεσε δεδομένα του μικρόκοσμου με δεδομένα του μακρόκοσμου. Αυτό που έλεγε το πείραμα στην ουσία ήταν: Αφού σύμφωνα με την κβαντομηχανική θεωρία ο πυρήνας βρίσκεται σε υπέρθεση, σε απροσδιοριστία, τότε και η γάτα που ανήκει στον ορατό μας μακρόκοσμο και στη συγκεκριμένη περίπτωση εξαρτάται άμεσα από το μικρόκοσμο και τις σχέσεις που τον διέπουν, βρίσκεται και αυτή σε απροσδιοριστία.

Πώς είναι δυνατόν να κατανοήσει κανείς την υπέρθεση στην περίπτωση της γάτας; Το μόνο εφικτό θα ήταν να χαρακτηριστεί η γάτα ως ένα ενδιάμεσο στάδιο μεταξύ νεκρού και ζωντανού οργανισμού, ως κάτι το νεκρό-ζωντανό, πράγμα που έρχεται σε ευθεία αντίθεση με τον εμπειρικό μας κόσμο.

Το πείραμα αυτό δείχνει κατά βάθος την πάλη μεταξύ της μέχρι τότε αιτιοκρατικής άποψης που διακατείχε τον κόσμο της εμπειρίας και της νέας εποχής που εισήγαγε η κβαντική απροσδιοριστία.



Σχήμα 45: Το παράδοξο της γάτας του Schrödinger.

3.6.3 Εφαρμογές των εξισώσεων de Broglie και Schrödinger.

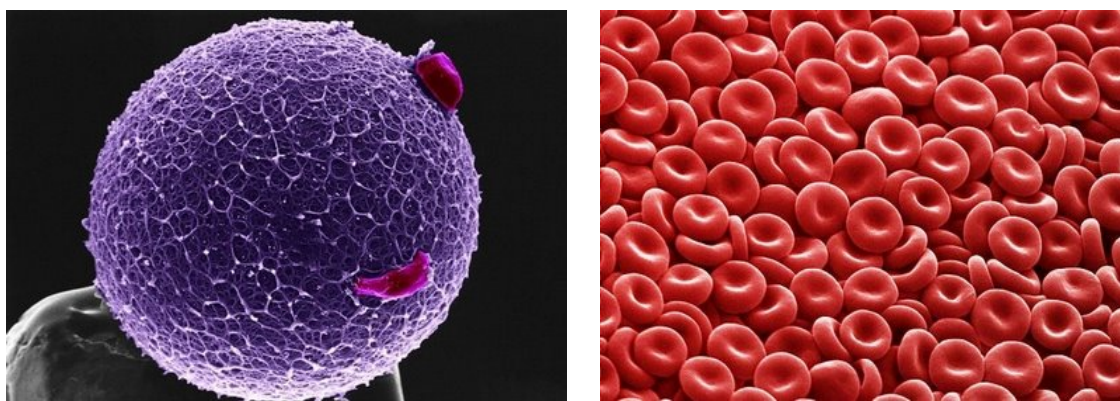
Όταν το 1926, δημοσιεύτηκε το διάσημο άρθρο του Schrödinger, η ύπαρξη των υλικών κυμάτων δεν είχε επιβεβαιωθεί πειραματικά. Σήμερα, η παρατήρηση της κυματικής συμπεριφοράς των “σωματιδίων” είναι κοινός τόπος και αποτελεί τη βάση για νέους τρόπους αποκάλυψης των φαινομένων του κβαντικού κόσμου. Η πιο γνωστή διάταξη που αποκαλύπτει την δυαδική φύση της ύλης είναι το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο. Στο όργανο αυτό, αντί για γυάλινους φακούς, όπως στα κοινά “οπτικά” μικροσκόπια, μπορεί να τοποθετηθεί μια διάταξη ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, που λειτουργεί για τα ηλεκτρόνια των ηλεκτρονικών μικροσκοπίων όπως οι γυάλινοι φακοί για το φως των “οπτικών” μικροσκοπίων.

Η χρησιμότητα όλων των ανωτέρω, έγκειται στο γεγονός ότι οι λεπτομέρειες είναι ορατές σε ένα αντικείμενο που εξετάζεται και η ορατότητα εξαρτάται από το μήκος κύματος που χρησιμοποιείται για τη παρατήρηση. Το μήκος κύματος πρέπει να είναι μικρότερο από το μέγεθος της κάθε λεπτομέρειας που πρέπει να παρατηρηθεί. Όσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος, τόσο πιο μικρή είναι και η λεπτομέρεια που διακρίνεται. Τα οπτικά μικροσκόπια δεν μπορούν να διακρίνουν λεπτομέρειες μικρότερες από το μήκος του ορατού φωτός. Έτσι, χαρακτηριστικά που είναι μικρότερα από ένα εκατομμυριοστό του μέτρου δεν μπορούν να διακριθούν με ορατό φως. Για τα ηλεκτρόνια από την άλλη το μήκος κύματος του αντίστοιχου κύματος εξαρτάται από την ορμή του ηλεκτρονίου, σύμφωνα με τη σχέση de Broglie.

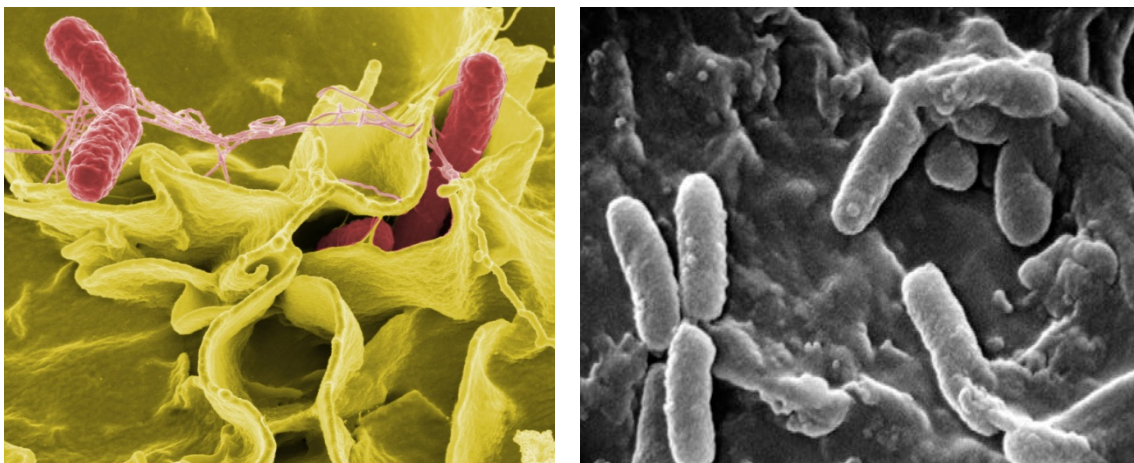
Επιπλέον το μήκος κύματος ελαττώνεται καθώς αυξάνεται η ορμή. Έτσι μπορεί να μεταβληθεί η διακριτική ικανότητα του μικροσκοπίου, μεταβάλλοντας την ταχύτητα με την οποία επιταχύνονται τα ηλεκτρόνια. Ένα κοινό ηλεκτρονικό μικροσκόπιο μπορεί να λειτουργήσει σε μήκη κύματος ένα εκατομμύριο φορές μικρότερα από τα μήκη κύματος.

Τέτοια μήκη κύματος είναι μικρότερα από τα οπτικά μήκη κύματος και με τη χρήση ειδικών τεχνικών μπορούν να γίνουν ευδιάκριτα τα άτομα. Η διακριτική ικανότητα του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου περιορίζεται από τεχνικά προβλήματα, όπως ατέλειες στα συστήματα των ηλεκτρομαγνητικών “φακών” και κραδασμούς της συσκευής και των ίδιων των ατόμων. Παρόλα αυτά, το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο δίνει μια εντυπωσιακή εικόνα ενός κόσμου τελείως αόρατου με οπτικά μικροσκόπια.

Τα ηλεκτρονικά μικροσκόπια δίνουν ένα είδωλο του αντικειμένου, με αποτέλεσμα κάποιες απεικονίσεις βακτηρίων να γίνονται με μεγάλη δυσκολία. Δέσμες ηλεκτρονίων μπορούν όμως να χρησιμοποιηθούν για να εξεταστεί σε βάθος η εσωτερική δομή της ύλης χωρίς την απ’ ευθείας λήψη ειδώλου – αντικειμένου.



Εικόνα 32: Χρήση ηλεκτρονικού μικροσκοπίου σάρωσης (SEM), έναν τύπο που χρησιμοποιεί την δέσμη ηλεκτρονίων υψηλής ενέργειας για να σαρώνει επιφάνειες των εικόνων. Η δέσμη ηλεκτρονίων του SEM αλληλεπιδρά με άτομα κοντά στην επιφάνεια του δείγματος που θα πρέπει να θεωρηθούν, με αποτέλεσμα μια πολύ υψηλής ευκρίνειας, 3D-εικόνα. Η μοβ περιοχή, σχετικά με την πρώτη εικόνα που βλέπετε ένα ανθρώπινο ωάριο. Η επικάλυψη που παρατηρείται και είναι σαν μαλλιά εξυπηρετεί ως προς την προστασία του αφού μπει το πρώτο σπερματοζώαριο. Στη δεύτερη εικόνα τα ερυθρά αιμοσφαίρια μοιάζουν με καραμέλες, αλλά είναι το πιο κοινό είδος στο αίμα στο ανθρώπινο σώμα.



Εικόνες 33: Φωτογραφίες από την ενοχλητική παρουσία βακτηρίων στα τρόφιμα.



Εικόνα 34: Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης.

Βιβλιογραφία

Ξενόγλωσση.

1. Carbo R. Quantum Chemistry: Basic Aspects, Actual Trends. Elsevier Science publs, Amsterdam, 1989.
2. David J. Griffiths "Introduction to Quantum Mechanics (2nd ed.) " , Prentice Hall, 2004 , ISBN 013805326X
3. E. Schrödinger, *Ann. Phys. (Leipzig)* **489** (1926) p.79
4. D. D. Fitts, Principles of Quantum Mechanics: as Applied to Chemistry and Chemical Physics, Published by Cambridge University Press, 2002.

5. http://www.easypedia.gr/el/articles/e/r/w/%CE%95%CE%B9%CE%BA%CF%8C%CE%BD%CE%B1~Erwin_Schr%C3%B6dinger.jpg_77df.html
6. http://dimitris.webgalaxy.gr/ppt-pps-pdf/E_Schrodinger-D_Mouroulis.pdf
7. http://www.chem.uoa.gr/courses/organiki_1/fasm_org/Chapter_1_2.pdf
8. <http://dimitris.webgalaxy.gr/science-schrodinger-2-1.php>
9. http://paratolmo.blogspot.com/2009/03/blog-post_3090.html
10. http://paidio.blogspot.com/2010/09/blog-post_24.html
11. http://dimimed.blogspot.com/2010_09_01_archive.html
12. <http://www.aua.gr/fasseas/fotoepist.htm>
13. <http://physicsgg.wordpress.com/page/26/>

Ελληνόγλωσση.

27. Γ. Ι. Ανδριτσόπουλος, *Εισαγωγή στη Κβαντομηχανική*, Ιωάννινα 1984
28. P.W.Atkins, *Φυσικοχημεία*, Τόμος II, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2009.
29. Τζώρτζ Γκάμοφ, *Τριάντα χρόνια που συγκλόνισαν τη φυσική*, Επιστημονικές εκδόσεις Β. Σελούντος, Αθήνα 1971
30. Tony Hey & Patrick Walters, *Το κβαντικό σύμπαν*, Εκδόσεις Κάτοπτρο, Αθήνα 1992.
31. Roger Penrose, *Ο Νέος Αυτοκράτορας (;)*, Εκδόσεις Γκοβόστη, Αθήνα
32. Emilio Segre, *Ιστορία της φυσικής, Από τις ακτίνες Χ έως τα Κουάρκ*, Εκδόσεις Διάυλος, Αθήνα 1997.
33. Σ. Τραχανάς, *Κβαντομηχανική I*, Πανεπιστημιακές εκδόσεις Κρήτης, Ηράκλειο 2005.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Η Ιστορία των Επιστημών μπορεί να δείξει τον τρόπο που οι επιστημονικές εξελίξεις επηρεάζουν τον πολιτισμό και πώς η επιστημονική και κοινωνική ηθική διαμορφώνονται μέσα στο χρόνο. Μέρος του πολιτισμού του κάθε λαού, θα πρέπει να αποτελέσει η συζήτηση εκπαιδευτικών θεμάτων, η ενθάρρυνση των μαθητών να δώσουν έμφαση αλλά και να μάθουν τα θέματα που τους δυσκολεύουν, η αλλαγή αντίληψης των επιστημών καθώς και η χρήση της τεχνολογίας στα εκπαιδευτικά θέματα. Για την επίτευξη των παραπάνω στόχων γίνεται χρήση της ιστορίας της επιστήμης από τους εκπαιδευτικούς (η «Ιστορία της Επιστήμης» δεν είναι συλλογή βιβλίων και άρθρων που θα αποτελέσουν ένα μέρος των σχολικών εγχειριδίων, αλλά είναι μια γλώσσα με την οποία ο κάθε άνθρωπος μπορεί να τη χρησιμοποιήσει για την καλύτερη κατανόηση της φύσης)

Όσον αφορά την αξιοποίηση της ιστορίας της επιστήμης στη διδακτική πράξη είναι απαραίτητη διότι:

1. Η ιστορία των επιστημών μπορεί να χρησιμοποιηθεί ως εργαλείο από τη Διδακτική για να επιτευχθούν μαθησιακοί και διδακτικοί στόχοι και ως διδακτική παρέμβαση για τη βελτίωση της ποιότητας της
2. Η άποψη της ιστορικής προσέγγισης με στόχο την ανάδειξη του μεγαλείου των επιστημονικών επιτευγμάτων και την επιβεβαίωση ότι η επιστημονική γνώση είναι μια έγκυρη γνώση, σαφώς ανώτερη από τις άλλες υπάρχουσες μορφές γνώσης. Οι Ιστορικές αναφορές μπορεί να περιέχουν μία ελάχιστη γεύση ιστορίας είτε σε εισαγωγικά κεφάλαια είτε σε διάσπαρτες αναφορές στους μεγάλους ήρωες παλιότερων εποχών, ωστόσο συμβάλλουν στο να καλλιεργήσουν στους μαθητές την αίσθηση συμμετοχής σε μία μακρόχρονη επιστημονική παράδοση και
3. Η πρόταση ότι η Ιστορία των Επιστημών βοηθάει στο να γίνει κατανοητό ότι δεν υπάρχουν σταθερές για το πώς αναπτύσσεται η Επιστήμη, η οποία συνεχίζει την πορεία της.

Ειδικότερα, η αναφορά σε ιστορικά επεισόδια μπορεί να συμβάλλει σε μια βαθύτερη κατανόηση ενός πλήθους ζητημάτων που συνδέονται με τη φύση της επιστήμης ως διαδικασία (π.χ. η προσωρινή φύση των επιστημονικών συμπερασμάτων).

Για τη διδασκαλία των φυσικών επιστημών μπορεί να χρησιμοποιηθούν ποικίλες στρατηγικές διδασκαλίας όπως αντιπαράθεση επιχειρημάτων, παιχνίδι ρόλων, σχεδιασμός αφίσας, συζήτηση πάνω σε κείμενα (που προέρχονται από τη λογοτεχνία, την ποίηση, τη φιλοσοφία, την ιστορία), συζήτηση πάνω σε άρθρα εφημερίδων και υλικό άλλων μέσων μαζικής ενημέρωσης, σχεδιασμός δικτυακού τόπου κ.λπ. Αυτές οι στρατηγικές διδασκαλίας ενθαρρύνουν τους μαθητές να συμμετέχουν σε συζητήσεις, να ανταλλάσσουν ιδέες που αφορούν στη Φύση των Φυσικών Επιστημών και στις συσχετίσεις ανάμεσα στις Φυσικές Επιστήμες και την κοινωνία.

Όσον αφορά τη διδασκαλία του κβαντομηχανικού πρότυπου του ατόμου, δημιουργείται το ερώτημα «γιατί να διδαχτούν οι μαθητές του Λυκείου κβαντομηχανική, εφόσον θα "χρειαστεί" μόνο σε όσους σπουδάσουν φυσική και χημεία».

Η κβαντική είναι η βάση για την κατανόηση της φασματοσκοπίας, της ηλεκτρονικής δομής και των περιοδικών ιδιοτήτων των ατόμων. Είναι απαραίτητη για το μέλλον της τεχνολογίας όπως τονίστηκε (κβαντικοί υπολογιστές, νανοσωλήνες). Χωρίς την κβαντική θεωρία είναι αδύνατον να εξηγηθεί πλήρως ο χημικός δεσμός και να ερμηνευθούν οι μικροσκοπικές ιδιότητες των χημικών ενώσεων.

Από τη βιβλιογραφική ανασκόπηση που προηγήθηκε στα προηγούμενα κεφάλαια διαπιστώθηκε ότι τα ατομικά μοντέλα και ιδιαίτερα η κβαντική θεώρηση του ατόμου δυσκολεύουν τους διδασκόμενους σε όλες τις εκπαιδευτικές βαθμίδες. Τα μαθησιακά προβλήματα που εμφανίζονται κατά την διδασκαλία ταξινομούνται κυρίως σε τρεις κατηγορίες:

1. *Ο ρόλος των μοντέλων.* Οι διδασκόμενοι δεν έχουν κατανοήσει ότι για να περιγράψουν το άτομο ενός συγκεκριμένου χημικού στοιχείου χρησιμοποιούν ένα ατομικό μοντέλο ή μια επιστημονική θεωρία που μπορεί να αναθεωρηθεί στο μέλλον.
2. *Οι έννοιες, οι αρχές και τα σύμβολα.* Οι διδασκόμενοι δημιουργούν λανθασμένες νοητικές παραστάσεις για τις θεμελιώδεις έννοιες και αρχές που θεωρούνται απαραίτητες στην κβαντική θεώρηση του ατόμου. Οι διάφοροι συμβολισμοί που χρησιμοποιούν οι επιστήμονες και συνδέονται με την κβαντική θεώρηση του ατόμου, όπως ο μαθηματικός φορμαλισμός, η ηλεκτρονική δομή ή οι γραφικές παραστάσεις δεν ερμηνεύονται με τον ίδιο τρόπο από τους διδασκόμενους.

3. *Η ερμηνεία των οπτικών αναπαραστάσεων.* Οι διαθέσιμες αναπαραστάσεις της κυματοσυνάρτησης, της πυκνότητας πιθανότητας και του ηλεκτρονικού νέφους

πιθανότητας είναι τις περισσότερες φορές δισδιάστατες, αλλά και όταν είναι τρισδιάστατες δεν παρουσιάζονται με τον κατάλληλο τρόπο, ώστε να δημιουργείται σύγχυση στους μαθητές. Επιπλέον η δυσκολία οπτικής αναπαράστασης συνολικά του ατόμου σύμφωνα με την Κβαντική Θεωρία είναι αναμενόμενο ότι δεν τους βοηθούν να κατανοήσουν τη μορφή του προτεινόμενου προτύπου στο χώρο.

Συνεπώς για να περιγράψουν το άτομο ενός στοιχείου και να ερμηνεύσουν τον σχηματισμό μορίων στοιχείων ή χημικών ενώσεων ανακαλούν συχνότερα ένα πλανητικού τύπου μηχανιστικό μοντέλο.

Οι προτάσεις των ερευνητών για την επίλυση των προβλημάτων που δημιουργούνται από τις παρανοήσεις των μαθητών μπορούν να ταξινομηθούν σε τρεις κατηγορίες:

1. Ποιοτική προσέγγιση της Κβαντικής Θεώρησης του Ατόμου (ΚΘΑ). Οι διδάσκοντες και οι ερευνητές της Διδακτικής προσανατολίζονται συχνά προς μια διδακτική πρόταση με έμφαση στα ποιοτικά χαρακτηριστικά της ΚΘΑ.

2. Ενιαία παρουσίαση της ΚΘΑ στα μαθήματα Φυσικής και Χημείας. Προτείνεται να δημιουργηθεί μια ουσιαστική σύνδεση μεταξύ της διδασκαλίας της Φυσικής και της Χημείας και να υπογραμμισθεί ιδιαίτερα το γεγονός ότι η ΚΘΑ δίνει τη δυνατότητα ερμηνείας φυσικών και χημικών φαινομένων.

3. Αξιοποίηση των Τεχνολογιών της Πληροφορίας και των Επικοινωνιών (ΤΠΕ) για την οπτική αναπαράσταση εννοιών που συνδέονται με την ΚΘΑ. Η χρήση των οπτικοποιήσεων με την αξιοποίηση των ΤΠΕ βελτιώνει την κατανόηση των εννοιών που συνδέονται με την ΚΘΑ. Άλλωστε δεν είναι δυνατό να δημιουργηθούν τρισδιάστατες οπτικές αναπαραστάσεις του ατόμου σύμφωνα με την κβαντική του θεώρηση με διαφορετικό τρόπο.