



N. Bohr

Η ζωή και το έργο του

$$\text{Central force} = \frac{e^2}{r^2} \cdot 1$$

$$\left(\frac{e^2}{4\pi a^2} \cdot 2 \cdot \frac{e^2 a}{(a^2 + b^2)^2} \right) \quad h = a\sqrt{3}$$

$$\text{Central force} = 2 \cdot \frac{e^2 h}{(a^2 + b^2)^2} = \frac{e^2}{a^2} \cdot \frac{e^2}{h^2} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - \frac{1}{\sqrt{3}} \right) = \frac{e^2}{h^2} \cdot 1.049$$

$$\text{Central force} = \frac{2e^2}{h^2} \cdot \frac{e^2}{a^2} = \frac{e^2}{h^2} \cdot 1.75$$

$$\left(\frac{4e^2}{4\pi a^2} \cdot 4 \cdot \frac{2e^2 a}{(a^2 + b^2)^2} \right) \quad h = a\sqrt{3}$$

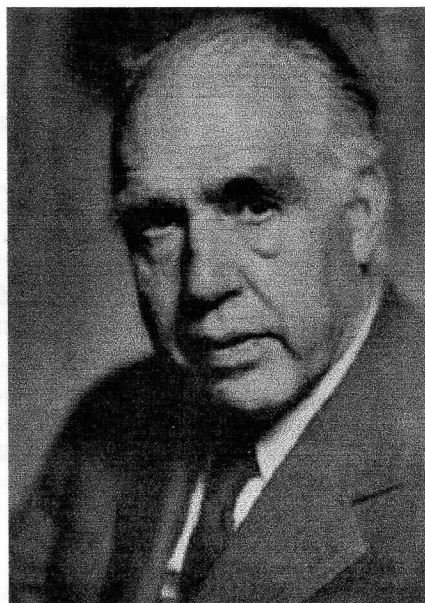
$$\text{Central force} = 2 \cdot \frac{2e^2 h}{(a^2 + b^2)^2} = \frac{e^2 h}{a^2} \cdot \frac{e^2}{h^2} \left(\frac{3\sqrt{3}}{2} - \frac{3.828}{\sqrt{3}} \right) = \frac{e^2}{h^2} \cdot 1.641$$

all to $\frac{e^2 X}{h^2}$ we get

[X]	H_1	H_2	[H_3]
1	1.049	1.75	1.641

Niels Henrik David Bohr (1885-1957)

*"Never express yourself
more clearly than you can think"*



Η ζωή και το έργο των μεγάλων επιστημόνων δεν γίνονται πάντα γνωστά στο πλατύ κοινό. Η δημοτικότητα του Einstein, του οποίου το όνομα και η φυσιογνωμία είναι πια σύμβολα μιας εποχής, αποτελούν την εξέρση μάλλον παρά τον κανόνα. Σ' αυτό τον κανόνα των άγνωστων αλλά επιφανών προσωπικοτήτων της επιστήμης, ανήκει και ο Niels Bohr, δημιουργός του ατομικού μοντέλου, πρωτεργάτης της κβαντικής θεωρίας και ερευνητής των πυρηνικών αντιδράσεων και της σχάσης του πυρήνα.

Γεννήθηκε στις 7 Οκτωβρίου του 1885 στην Κοπενχάγη της Δανίας. Ο πατέρας του, Christian, ήταν καθηγητής φυσιολογίας στο Παν/μιο της Κοπενχάγης.

Ο ίδιος αρχίζει το 1903 τις σπουδές του στη Φυσική στο ίδιο Πανεπιστήμιο. Αποδείχτηκε προικισμένος φοιτητής, κερδίζοντας το 1907 το χρυσό μετάλλιο της Βασιλικής Ακαδημίας Επιστημών της Δανίας για την εργασία του στην "Επιφανειακή τάση του νερού" (αξίζει να σημειωθεί ότι αυτή ήταν η πρώτη αλλά και η τελευταία πειραματική δουλειά του Bohr). Το 1911 κάνει την διδακτορική του διατριβή πάνω στην "Θεωρία των ηλεκτρονίων των μετάλλων". Για την εργασία του αυτή κερδίζει μια υποτροφία από την ζυθοβιομηχανία Calsberg. Την ίδια χρονιά (με χρήση της υποτροφίας) πηγαίνει στο Παν/μιο του Cambridge (εργαστήριο Cavendish) στην Αγγλία, για να συνεχίσει την έρευνά του υπό την εποπτεία του καθηγητή J.J. Thomson. Ωστόσο ο Thomson δεν έδειξε μεγάλο ενδιαφέρον* για τις ιδέες του Bohr για τα ηλεκτρόνια των μετάλλων και έτσι σύντομα μετακόμισε στο Παν/μιο του Manchester, για να συνεχίσει υπό τον καθηγητή E. Rutherford, ο οποίος μελετούσε την δομή του ατόμου.

Το 1912 παντρεύεται την Margrethe Norlund με την οποία αποκτά έξι γιούς, ένας εκ των οποίων, ο Aage, έγινε Φυσικός ακολουθώντας τα βήματα του πατέρα του.



Bohr-Rutherford

Το 1913 δημοσιεύει την εργασία του "Περί σχηματισμού των Ατόμων και των Μορίων" ("On the constitution of Atoms and Molecules" Philosophical Magazine, Series 6, Volume 26, July 1913, p.1-25), στην οποία επικέντρωσε το ενδιαφέρον του στη (κβαντική) δομή του ατόμου του Υδρογόνου. Στέλνει την εργασία του αυτή στον Rutherford, ο οποίος αρχικά δυσκολεύεται να την αποδεχτεί. Μετά από συνεχή αλληλογραφία, πηγαίνει ο ίδιος στο Manchester για να την υπερασπιστεί καλύτερα. Τελικά ο Rutherford πίθεται λέγοντας:

«Αυτός ο νέος είναι ο πιο ευφυής άνθρωπος που έχω γνωρίσει στη ζωή μου».

Γι' αυτή του την εργασία, τελικά ο Bohr, κερδίζει το 1922 το βραβείο Nobel Φυσικής (ήταν μόνο 37 ετών).

Το 1916 επιστρέφει στη Δανία όπου γίνεται (μόλις 31 ετών) καθηγητής στο Πανεπιστήμιο που σπούδασε. Πέντε χρόνια αργότερα (3/3/21) διορίζεται διευθυντής ενός νεοσύστατου Ινστιτούτου Θεωρητικής Φυσικής (αργότερα μετονομάστηκε σε Ινστιτούτο Niels Bohr, NBI) στην Κοπενχάγη, θέση την οποία διατήρησε μέχρι το τέλος της ζωής του. Πολλά σημαντικά ονόματα της σύγχρονης Φυσικής πέρασαν απ' το Ινστιτούτο. Μερικά απ' αυτά: Pauli, Heisenberg, Schrodinger, Landau, Dirac, Kramers, Rutherford, Gamow, Oppenheimer, Slater, Klein, Nashima, Casimir κ.ά. Σύντομα έγινε το παγκόσμιο κέντρο μελέτης της

* Ο λόγος ήταν μάλλον προφανής: στη πρώτη κιόλας γνωριμία του με τον διάσημο Thomson ο νεαρός Δανός Φυσικός κατά την διάρκεια ενός δείπνου, είχε το θάρρος ή το θράσος, όπως αργότερα ο ίδιος ομολογεί, να εντοπίσει λάθη στο ατομικό μοντέλο Thomson (σταφιδόσωμο), το οποίο χαρακτήρησε ανεπαρκές.

κβαντικής θεωρίας και μέχρι σήμερα εξακολουθεί να παράγει σημαντικό πνευματικό έργο. Ας δούμε πως αναφέρεται ο Gamow στο Ινστιτούτο Bohr, στο οποίο και ο ίδιος εργάστηκε για πολλά χρόνια:

«Το Ινστιτούτο Bohr έγινε γρήγορα το παγκόσμιο κέντρο της κβαντικής Φυσικής και, για να παραφράσουμε του αρχαίου Ρωμαίου "όλοι οι δρόμοι οδηγούσαν στη Blegdamsvej 17". Το Ινστιτούτο βούιζε από νέους θεωρητικούς Φυσικούς και από νέες ιδέες για τα άτομα, τους πυρήνες των ατόμων και τη θεωρία των κβάντων γενικά. Η δημοτικότητα του Ινστιτούτου οφείλονταν στην ιδιοφυΐα του διευθυντή του μα και στη καλή, πατρική θα έλεγε κανείς, καρδιά του... Ο Bohr ήταν πατέρας πολλών επιστημονικών 'τέκνων'. Όλες οι χώρες του κόσμου έχουν Φυσικούς που λένε περίφανοι: "Εχω εργαστεί με τον Bohr"».



Τα κριτήρια με τα οποία επιλέγονταν οι υπότροφοι του Ινστιτούτου δεν ήταν κάποιες εξετάσεις ακαδημαϊκού χαρακτήρα. Μια συνάντηση με τον Bohr, αρκούσε για να διαπιστωθούν οι ικανότητες του υποψηφίου. Αν κρίνουμε απ' τα αποτελέσματα μπορούμε να πούμε ότι ο Bohr δεν έπεφτε έξω στις επιλογές του. Οι συνθήκες εργασίας στο Ινστιτούτο ήταν πολύ ελεύθερες. Σύμφωνα με τον Gamow:

«καθώς μπορούσε να κάνει όπι ήθελε, να έρχεται στη δουλειά και να φεύγει στο σπίτι όποτε του άρεσε».

Στα χρόνια του ψυχρού πολέμου το πρώτο άρθρο που γράφεται από κοινού από έναν Αμερικανό και έναν Σοβιετικό Φυσικό, γράφεται και δημοσιεύεται στο Ινστιτούτο Niels Bohr.

Το 1918 ο Bohr διατυπώνει την αρχή της αντιστοιχίας. Σύμφωνα με την αρχή αυτή η εφαρμογή των κβαντομηχανικών εξισώσεων σε μακροσκοπικά συστήματα αναπαράγει οριακά τις κλασικές εξισώσεις κίνησης. Μια σειρά από τυπικές κβαντικές εκδηλώσεις (κβάντωση, αρχή αβεβαιότητας,...) εξαλείφονται βαθμιαία όσο προχωρούμε στο κλασικό όριο (μεγάλοι κβαντικοί αριθμοί, μεγάλη μάζα,...).

Το 1927 διατυπώνει την (περισσότερο φιλοσοφική, παρά επιστημονική) αρχή της συμπληρωματικότητας. Σύμφωνα με την αρχή αυτή στον μικρόκοσμο οι έννοιες 'κύμα' και 'σωματίδιο' δεν υπάρχουν αυτόνομες, ούτε έρχονται σε αντίφαση. Αντίθετα συνυπάρχουν και αλληλοσυμπληρώνονται.



Στα τέλη της δεκαετίας του '30 το ενδιαφέρον του μεταφέρθηκε από την ατομική στην πυρηνική Φυσική και συγκεκριμένα στην πυρηνική διάσπαση. Διατυπώνει την έννοια του σύνθετου πυρήνα (ότι δηλαδή ένα σωματίδιο βλήμα μπορεί να 'μπει και να κάτσει' για λίγο μέσα σ' ένα πυρήνα). Την ίδια εποχή διατυπώνει το μοντέλο της σταγόνας υγρού (ο πυρήνας του τόμου παρομοιάζεται με μια ασυμπίεστη και μεγάλης πυκνότητας, σταγόνα υγρού. Τα νουκλεόνια που βρίσκονται κοντά στην επιφάνεια του πυρήνα, είναι λιγότερο συνδεδεμένα από αυτά που βρίσκονται στο εσωτερικό του. Συνάγεται έτσι το συμπέρασμα ότι η ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα είναι ανάλογη με την επιφάνειά του, όπως η επιφανειακή τάση ενός υγρού. Το μοντέλο αυτό, αν και προσεγγιστικό, αποδείχτηκε πολύ γόνιμο). Το 1939 συμπεραίνει ότι η διάσπαση του σπάνιου ^{235}U είναι ευκολότερη απ' ότι του κοινού ^{238}U , ανακάλυψη που θα ανοίξει στη συνέχεια τον δρόμο για την κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας.

Αλλά η ιστορία στον... έξω κόσμο εξελισσόταν. Το 1940 οι Ναζί εισβάλουν στην Δανία. Προσπάθησε να συνεχίσει τη δουλειά του στο Ινστιτούτο αλλά στις 29 Σεπτεμβρίου του 1943 αναγκάζεται να εγκαταλείψει οικογενειακώς (η οικογένειά του είχε -από τη γυναίκα του- Εβραϊκές ρίζες) τη Δανία. Καταφεύγει, με ένα ψαροκάικο στη Σουηδία. Σ' αυτή την 'απόδραση' τον βοηθά η Δανική Αντίσταση, της οποίας, μέχρι εκείνη τη στιγμή, ήταν ενεργό μέλος. Πηγαίνει στην Αγγλία όπου δουλεύει για μερικούς μήνες στο British Atomic

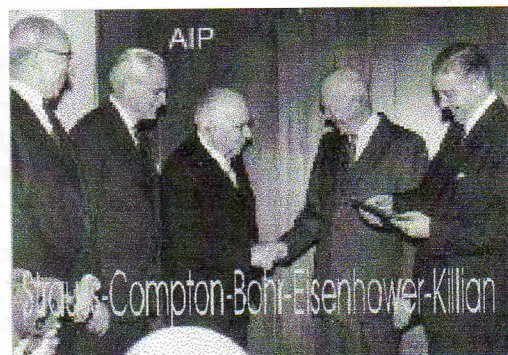
Energy Project. Στη συνέχεια μετακομίζει στις ΗΠΑ και συγκεκριμένα στο Los Alamos του New Mexico όπου και ενώνεται, μαζί με τον γιό του Aage, με την υπόλοιπη διεθνή ομάδα επιστημόνων, οι οποίοι (υπό την καθοδήγηση του R. Oppenheimer) εργάζονται για την κατασκευή της πρώτης ατομικής βόμβας. Ήταν το περίφημο πρόγραμμα Manhattan, στο οποίο έμεινε μέχρι την πρώτη δοκιμή (νήσοι Bikini, 1945). Οι κανονισμοί στο Los Alamos ήταν πολύ αυστηροί, για λόγους ασφαλείας. Όλοι οι επιστήμονες είχαν ψευδώνυμα και αυτό του Bohr ήταν Nicolas Beker. Όλοι όμως τον φώναζαν Μπάρμπα Νic...



Σύντομα άρχισε να συνειδητοποιεί τις αρνητικές επιπτώσεις της πυρηνικής ενέργειας. Χρησιμοποιώντας το κύρος του πλησίασε τον Αμερικανό Πρόεδρο F. Roosevelt και τον Βρετανό Πρωθυπουργό W. Churchill για να τους εκφράσει τους φόβους του. Προσπάθησε να τους πείσει να μοιραστούν οι πληροφορίες πάνω στην πυρηνική ενέργεια (σε όλα τα κράτη). Πίστευε πως ήταν ο μοναδικός τρόπος αποφυγής της επέκτασης των πυρηνικών.

«Πως μπορούσα, ένας άνθρωπος σαν εμένα, να μιλήσω σ' έναν ηγέτη μιας τέτοιας χώρας, για τέτοια θέματα, στη μέση ενός τέτοιου πολέμου; Αλλά του τα έθεσα απλά, σαν άντρας προς άντρα. Άλλωστε τι άλλος τρόπος υπήρχε;»

(λόγια του Bohr για τη συζήτησή του με τον F. Roosevelt, για την αποτροπή της εξάπλωσης των πυρηνικών).



Συνέχισε την προσπάθειά του αυτή και μετά τον πόλεμο. Στις 9 Ιουνίου του 1950 σε ανοικτή επιστολή του προς τα Ηνωμένα Εθνή προτίνει την αναγκαιότητα του ελεύθερου διαλόγου των επιστημόνων και των πολιτικών όλων των χωρών. Το 1955 οργανώνει την πρώτη Διεθνή Συνδιάσκεψη για τις ειρηνικές χρήσεις της ατομικής ενέργειας, στη Γενεύη της Ελβετίας. Βοήθησε να δημιουργηθεί το Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικής Ενέργειας (CERN) που αυτή τη στιγμή είναι το μεγαλύτερο (από άποψης ετήσιου προϋπολογισμού) ερευνητικό κέντρο στον κόσμο. Για όλες αυτές του τις προσπάθειες τιμήθηκε με το πρώτο Αμερικανικό βραβείο Ειρήνης (US Atoms for Peace) το 1957.

Περίφημες, τέλος, έμειναν οι συζητήσεις-κόντρες του με τον A. Einstein. Χαρακτηριστικά αναφέρουμε πως υπήρχε μια περίοδος (σχεδόν 30 ετών) κατά την οποία συνεχώς ο Einstein εφήβρε νοητικά πειράματα, που σκοπό είχαν να αποκαλύψουν τα λάθη της αρχής της συμπληρωματικότητας, τα οποία ο Bohr απεδείκνυε λάθος. Ένας χαρακτηριστικός διάλογος ήταν ο εξής:

**E: «Ο Θεός δεν παίζει ζάρια»
B: «Einstein, σταμάτα να λες στον Θεό τι να κάνει!»**



Πέθανε αιφνίδια, στις 18 Νοεμβρίου του 1962 στην Κοπεγχάγη, από θρόμβωση αορτής. Ένα χρόνο αργότερα ο γιός του, Aage, διορίστηκε διευθυντής στο Ινστιτούτο Θεωρητικής Φυσικής (το οποίο μετονομάστηκε σε Ινστιτούτο Niels Bohr, NBI) και το 1977 τιμήθηκε με το Nobel Φυσικής για την εργασία του πάνω στη "δομή του ατομικού πυρήνα".

Οι γνώμες για τις διανοητικές ικανότητες του Bohr είχαν τεράστιες διακυμάνσεις: ο Rutherford τον περιέγραψε ως **«τον ευφυέστερο τύπο που έχω συναντήσει»**, ενώ ο Gamow διατεινόταν ότι η πιο χαρακτηριστική ιδιότητα του Bohr ήταν **«η βραδύτητα της σκέψης και της κατανόησής του»**. Την παρατήρησή του την επανέλαβε ο Churchill, που πίστευε ότι ο Bohr ήταν **«φοβερά πληκτικός»**. Και όμως,



έμελλε να εμπνεύσει και να δεσπόσει στον νέο τρόπο σκέψης, για τον κόσμο που δημιουργήθηκε από την κβαντική θεωρία. Το επιστημονικό έργο του Bohr υπήρξε τεράστιο. Υπήρξε πρόδρομος και πρωτεργάτης της κβαντικής θεωρίας. Η αξιαγάπητη προσωπικότητά του, το ενδιαφέρον για τον άνθρωπο, το χιούμορ και η σεμνότητά του έμειναν αξέχαστα στους πολυάριθμους φυσικούς, που προερχόμενοι από κάθε γωνιά της Γης, πέρασαν κάποιο διάστημα της καριέρας τους από το Ινστιτούτο Niels Bohr. Για τον πολύ κόσμο όμως παρέμεινε ο άγνωστος Bohr...

Το ατομικό μοντέλο για το άτομο του Υδρογόνου

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε στο βασικό έργο της πρώτης επιστημονικής του περιόδου, δηλαδή στο ατομικό μοντέλο για του άτομο του Υδρογόνου. Θα δούμε τι προϋπήρχε, πως η σκέψη του Bohr οδηγήθηκε στην ιδέα της κβάντωσης και τι τελικά έγινε στη συνέχεια... Ας δούμε όμως πρώτα μερικές σκέψεις-κρίσεις* πάνω στη δουλειά αυτή:

Η ερφνία ορισμένων μεγάλων Φυσικών, μεταξύ των οποίων και ο Bohr, δοκιμάζεται πολλές φορές και καλείται να απαντήσει στο εξής δίλημμα: αν μια ήδη υπάρχουσα θεωρία η οποία αποτυγχάνει για κάποιο μοντέλο θα πρέπει να τροποποιηθεί ώστε να ταιριάζει και στα καινούρια δεδομένα ή θα πρέπει να καταρριφθεί τελείως.

Ένα παράδειγμα ενός τέτοιου διλήμματος μας το προσφέρει η πρόσφατη αστρονομία: οι παρατηρήσεις των ανωμαλιών στην κίνηση του πλανήτη Ουρανού οδήγησαν τον J.C. Adams στην διατύπωση της ύπαρξης ενός άλλου πλανήτη, η βαρυντική επίδραση του οποίου διατάρασε την κίνηση του Ουρανού. Πράγματι ο πλανήτης αυτός ανακαλύφθηκε λίγο αργότερα απ' τον J.J. Leverrier και ονομάστηκε Ποσειδώνας. Όμως παρόμοια υπόθεση για την διαταραχή της τροχιάς του Ερμή δεν απέδωσε καρπούς (ποτέ δεν βρέθηκε ο «Ηφαιστος»). Εδώ έπρεπε να αλλάξει τελείως η βαρυντική θεωρία, ένα τόλμημα αρκετά επικίνδυνο αν σκεφτεί κανείς ότι από την διατύπωσή της, τον 17^ο αι. από τον I. Newton, δεν είχε αμφισβητηθεί. Όμως τελικά η αμφισβήτησή της, μας έδωσε την γενική θεωρία της σχετικότητας από τον A. Einstein, την πιο ολοκληρωμένη και πλήρη (...μέχρι στιγμής) βαρυντική θεωρία. Μια θεωρία καταρρίφθηκε και μια άλλη ήρθε στο προσκήνιο.

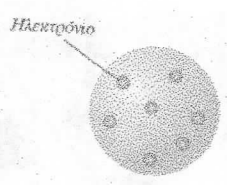
Κάπως έτσι έγινε και το 1913 από τον Bohr, όταν σχεδόν δογματικά "αναγκάστηκε" να καταρρίψει το πλανητικό μοντέλο του Rutherford και να εισάγει ένα νέο (κβαντικό αυτή τη φορά) μοντέλο. Και με ανάλογο τρόπο οι συνεχιστές του, De Broglie, Schrodinger, Heisenberg, κατέρριψαν με τη σειρά τους το μοντέλο του Bohr και οριστικοποίησαν (μόλλον...) το ατομικό μοντέλο.

Οι πρόδρομοι...

Η αρχή έγινε από τον J.J. Thomson ο οποίος ανακάλυψε το ηλεκτρόνιο. Ένα πολύ μικρό (σε μάζα) και αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο, συστατικό του ατόμου. Ο Thomson είχε ανακαλύψει δομή στο άτομο, είχε αποδείξει δηλαδή την λάθος χρήση του αρχαίου όρου «άτομο» (ά-τομο, atom) για ότι μέχρι εκείνη τη στιγμή πίστευαν (φυσικά ο όρος «άτομο» χρησιμοποιήθηκε από τον Δημόκριτο ως το μικρότερο υλικό σωματίδιο και όχι για αυτό που η σύγχρονη Φυσικοχημεία θεωρεί ως άτομο. Ο όρος δηλαδή «άτομο» ως έννοια πλέον μπορεί να αποδοθεί στα ηλεκτρόνια και στα quarks, χωρίς να μειώνεται σε τίποτα η αρχική ιδέα του Δημόκριτου).

* Από το άρθρο του J.L. Heilbron: "Bohr's first theories of the atom", Physics Today, Oct.1985, p.28

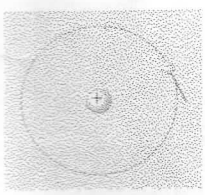
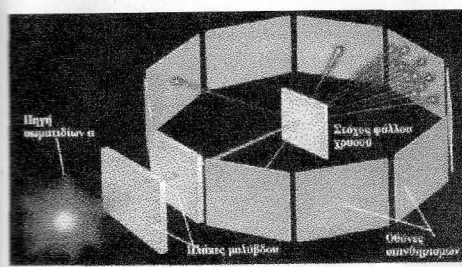
Ο Thomson λοιπόν, κλήθηκε να κατασκευάσει ένα μοντέλο για το άτομο, χρησιμοποιώντας τα εξής δεδομένα: α) την ύπαρξη του ηλεκτρονίου ως, μικρής μάζας και αρνητικού φορτίου, σωματίδιο, β) τη ηλεκτρική ουδετερότητα του ατόμου και γ) την μεγάλη μάζα του ατόμου. Έτσι κατέληξε στο μοντέλο του σταφιδόψωμου όπου το κυρίως μέρος του ατόμου, σαν το ψωμί, είχε ισοκατανεμημένο το θετικό του φορτίο και τα ηλεκτρόνια σαν σταφίδες ήταν εντοπισμένα και διασκορπισμένα σε όλο το άτομο. Τα ηλεκτρόνια μπορούν να εκτελούν ταλαντώσεις γύρω από μια θέση ισορροπίας και έλκονται προς το κέντρο του θετικού φορτίου ενώ ταυτόχρονα αποθούνται μεταξύ τους.



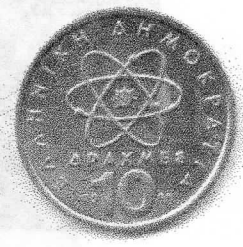
Στην προσπάθειά του να επιβεβαιώσει αυτό το μοντέλο, ο E. Rutherford και η επιστημονική του ομάδα, οργάνωσαν και διεξήγαγαν το εξής πείραμα: σε λεπτό φύλλο χρυσού έβαλαν ταχιάως κινούμενους πυρήνες Ηλίου (σωμάτια α). Λόγω της μεγάλης μάζας (A=4) και παρόλο του θετικού τους φορτίου, ο Rutherford περίμενε ότι τα σωματίδια α θα περνούσαν το φύλλο παθαίνοντας μικρές μόνο σκεδάσεις και αυτό επειδή έριχνε συμπαγή και μεγάλης ταχύτητας βλήματα σε μεγάλες κατανομές θετικού φορτίου (ψωμί) με πολύ μικρές αρνητικές αλληλεπιδράσεις (σταφίδες). Όμως προς μεγάλη του έκπληξη είδε σκεδάσεις των σωματιδίων α σε μεγάλες γωνίες, μέχρι και οπισθοσκεδάσεις (180°).

Ο ίδιος γράφει:

«Ήταν το πιο απίστευτο γεγονός που μου τύχε στη ζωή μου. Ήταν σχεδόν τόσο απίστευτο, όσο και το να βάλεις με μια οβίδα των 15 ιντσών σ' ένα φύλλο χαρτιού και να γυρίζει να σε χτυπήσει. Καθώς άρχισα να το σκέφτομαι, κατάλαβα ότι αυτή η οπισθοσκάδαση θάπρεπε να οφείλεται σε μια μοναδική κρούση και, κάνοντας τους υπολογισμούς, είδα ότι ο μόνος τρόπος για να πάρει κανείς μια τέτοια τάξη μεγέθους, ήταν να θεωρήσει ότι το μεγαλύτερο μέρος της μάζας του ατόμου ήταν συγκεντρωμένο σ' ένα μικροσκοπικό πυρήνα».

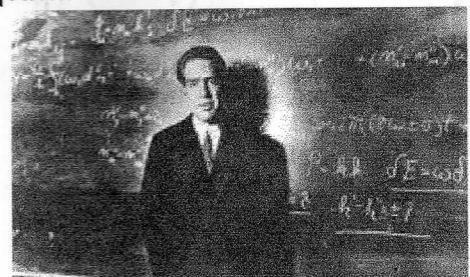
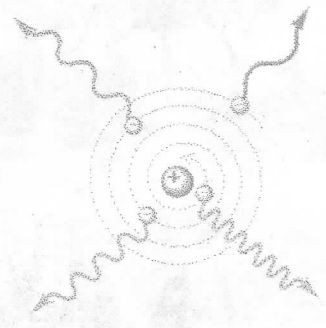


Έτσι το νέο μοντέλο (το οποίο είχε προταθεί για πρώτη φορά, θεωρητικά, από τον Nagoaka το 1905) ήταν το εξής: θετικός πυρήνας όπου συγκεντρώνεται και η μεγαλύτερη μάζα του ατόμου και τα αρνητικά ηλεκτρόνια, υπό την επίδραση της έλξης Coulomb (κεντρομόλος) σε τροχιές γύρω του. Λόγω της προφανούς ομοιότητάς του, το μοντέλο αυτό ονομάστηκε πλανητικό.



Όμως και αυτό το μοντέλο είχε ορισμένες πολύ σημαντικές ατέλειες, τόσο σημαντικές που οδήγησαν στην κατάρριψή του πολύ σύντομα. Μία απ' αυτές ήταν η ασταθής δομή ως πλανητικό μοντέλο που παρουσιάζεται σε συγκρούσεις. Γνώριζαν ότι τα μόρια των αερίων βρίσκονται σε διαρκή κίνηση. Φανταστείτε λοιπόν, δύο άτομα να συγκρούονται, με την επέκταση δύο πλανητικών συστημάτων να συγκρούονται... Δεν θα έμενε τίποτα!

Μια άλλη είχε να κάνει με την μέχρι τότε ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell. Κατά την θεωρία αυτή ένα φορτίο όταν επιταχύνεται ακτινοβολεί και τα ηλεκτρόνια εκτελώντας καμπυλόγραμμες τροχιές (ελλείψεις) επιταχύνονται (έχουν κεντρομόλο επιτάχυνση) άρα ακτινοβολούν. Ακτινοβολώντας όμως χάνουν ενέργεια και μια απλή εκτίμηση της τάξης μεγέθους του χρόνου πτώσης του ηλεκτρονίου στον πυρήνα δείχνει ότι αυτό πέφτει σπειροειδώς σε 10^{-10} sec. Άρα το άτομο, σύμφωνα με την κλασσική Η/Μ θεωρία ήταν αρκετά βραχύβιο. Όμως δεν ήταν...



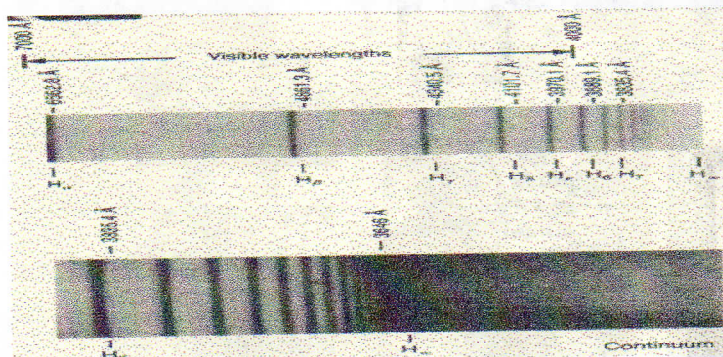
Ακόμα και αν το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είχε καθαρά ηλεκτροστατικό χαρακτήρα, αν δηλαδή δεν ακτινοβολούσε, το πλανητικό άτομο παρ' όλο που θα ήταν σταθερό απ' αυτή την άποψη, θα ήταν πάλι βραχύβιο, λόγω κρούσεων του με τα άλλα άτομα όπως εξηγήσαμε παραπάνω. Όμως μέσα απ' τα δισεκατομμύρια κρούσεων ανά δευτερόλεπτο τα άτομα βγαίνουν τελείως αμετάβλητα...

Η Θεωρία...

Bohr:

«Αφιετηρία μου δεν ήταν καθόλου η ιδέα ότι, το άτομο είναι ένα πλανητικό σύστημα σε μικρή κλίμακα και σαν τέτοιο ότι διέπεται από τους νόμους της αστρονομίας. Ποτέ δεν πήρα αυτή την αναλογία κατά γράμμα. Αφιετηρία μου ήταν μάλλον η σταθερότητα της ύλης. Ένα καθαρό θαύμα αν το δει κανείς από τη σκοπιά της Κλασσικής Φυσικής».

Η πρώτη ιδέα για τη διατύπωση της θεωρίας του, ήρθε από μια πολύ απλή ερώτηση: “αφού το ηλεκτρόνιο στο άτομο του Υδρογόνου θα μπορούσε να περιφέρεται σε οποιαδήποτε τροχιά, η οποία μάλιστα θα άλλαζε από κρούση σε κρούση, γιατί το άτομο είχε πάντα την ίδια συγκεκριμένη ακτίνα, 0.53 \AA ; Τι καθόριζε αυτή τη συγκεκριμένη τιμή και τι την διατηρούσε πάντα σταθερή;”. Μια κλασσική θεωρία θα έλεγε ότι η ακτίνα θα εξαρτώταν σίγουρα απ’ τη μάζα (m) και το φορτίο (e) του ηλεκτρονίου και από την μόνη σίγουρη κλασσική σταθερά, την ταχύτητα του φωτός (c). Έτσι μια διαστατική ανάλυση θα μας έδινε έναν τύπο της μορφής $r \sim e^2/mc^2$, όπου με μια σταθερά αναλογίας θα γινόταν ισότητα. Αλλά η τιμή αυτής της έκφρασης δίνει περίπου 10^{-15} m , δηλαδή 50.000 φορές μικρότερη από την πραγματική τιμή. Αν όμως αντί της ταχύτητας του φωτός, βάλουμε την σταθερά του Planck (h) τότε η αντίστοιχη διαστατική ανάλυση έδεινε $r \sim h^2/me^2$, η τιμή της οποίας είναι 0.5 \AA δηλαδή ακριβώς η τιμή της ακτίνας του ατόμου του Υδρογόνου. Η αρχή είχε γίνει και η κβαντική θεώρηση του ατόμου ήταν ήδη γεγονός.



Η μελέτη των φασμάτων των αερίων είχε δώσει πολλά σημαντικά αποτελέσματα την εποχή εκείνη. Η μελέτη κυρίως του ατομικού φάσματος του Υδρογόνου (ως το απλούστερο στοιχείο, $Z=1$) από τον Balmer είχε δώσει δύο πολύ σημαντικά συμπεράσματα. Το πρώτο ήταν η *συνδιαστική αρχή*:

$$f = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = f_m - f_n ,$$

$$R = 3.27 \times 10^{15} \text{ Hz} \quad (\text{σταθερά Rydberg})$$

“το φάσμα κάθε στοιχείου χαρακτηρίζεται πλήρως από μια ακολουθία f_1, f_2, \dots, f_n φασματικών όρων, τέτοιων ώστε κάθε φασματική γραμμή μπορεί να γραφεί σαν διαφορά δύο φασματικών όρων” ή αλλιώς “το άθροισμα ή η διαφορά δύο παρατηρούμενων συχνοτήτων, είναι πάλι μια παρατηρούμενη συχνότητα”. Το δεύτερο ήταν η *ακολουθία των φασματικών όρων για το άτομο του Υδρογόνου*:

$$f_n = \frac{R}{n^2} , \quad n = 1, 2, \dots$$

Αυτά τα δύο συμπεράσματα (πειραματικά συμπεράσματα του Balmer) οδήγησαν σιγά-σιγά τη σκέψη του Bohr. Ας δούμε πως: γνωρίζοντας την συνδιαστική αρχή και τον τύπο $E=hf$ του Planck έκανε το εξής:

$$f = f_m - f_n \xrightarrow{\times h} hf = hf_m - hf_n \Rightarrow hf = E_{\text{αρχ.}} - E_{\text{τελ.}}$$

όπου $E_{\text{αρχ.}}$ και $E_{\text{τελ.}}$ η αρχική και τελική ενέργεια του ατόμου (πριν και μετά την αποχώρηση ενός φωτονίου ενέργειας hf). Και επειδή χρειάζεται να δώσουμε ενέργεια για να αποσπάσουμε το ηλεκτρόνιο απ’ το άτομο, αυτές οι ενέργειες πρέπει να είναι αρνητικές, δηλαδή: $E_n = -hf_n$, $E_m = -hf_m$. Δεδομένου ότι οι φασματικοί όροι αποτελούν μια διακριτή ακολουθία, οι προηγούμενοι τύποι μας λένε ότι ισχύει το ίδιο και για τις ενέργειες του ατόμου, δηλαδή αφού $E_n = -hf_n$ και οι f_n είναι διακριτές, διακριτές θα είναι και οι E_n . Καταλήγουμε επομένως στην *πρώτη συνθήκη του Bohr*:



Οι ενεργειακές καταστάσεις των ατόμων είναι κβαντωμένες. Οι επιτρεπόμενες ενέργειες συνδέονται με την ακολουθία των φασματικών όρων του κάθε ατόμου με τη σχέση: $E_n = -hf_n$. 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 της ενέργειας: $hf = E_n - E_m$.

$$W_{r_2} - W_{r_1} = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right)$$

$$W_{r_2} - W_{r_1} = h\nu$$

$$\nu = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^3} \left(\frac{1}{r_2^2} - \frac{1}{r_1^2} \right) \dots \dots \dots (4)$$

$$W_r = \frac{2\pi^2 m e^4}{h^2 r^2}$$

Συνεχίζοντας τώρα με το δεύτερο συμπέρασμα του Bohr, για την ακολουθία των φασματικών γραμμών, ο Bohr υπολόγισε την συνθήκη κβάντωσης των ενεργειών του ατόμου:

$$\left. \begin{aligned} f_n &= R/n^2 \quad (R = 3.27 \times 10^{15} \text{ Hz}) \\ E_n &= -hf_n \end{aligned} \right\} E_n = -h \frac{R}{n^2} = -\frac{E_1}{n^2} \quad n=1,2,\dots \quad E_1 = hR = 13.6 \text{ eV}$$

Στη συνέχεια υπέθεσε κάτι πολύ λογικό: ότι για κάποιον λόγο το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε ορισμένες διακριτές τροχιές (στοιβάδες) αφού διακριτές είναι και οι ενέργειες του ατόμου. Ας δούμε γιατί: η ολική ενέργεια του ατόμου είναι:

$$\left. \begin{aligned} E &= E_K + E_\Delta = \frac{1}{2} m v^2 - k \frac{e^2}{r} \\ \dots \text{αλλά } F_c &= F_k \Rightarrow k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \Rightarrow k \frac{e^2}{r} = m v^2 \quad (*) \end{aligned} \right\} \Rightarrow E = \frac{1}{2} k \frac{e^2}{r} - k \frac{e^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r} \Rightarrow r = -\frac{ke^2}{2E} \quad (E < 0)$$

$$\text{ή } r = \frac{ke^2}{2|E|} \quad \dots \text{και } (*) : m v^2 = \frac{ke^2}{\frac{ke^2}{2|E|}} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2|E|}{m}}$$



Pauli-Bohr

Επομένως η στροφορμή του ηλεκτρονίου, $L = p \cdot r = m \cdot v \cdot r$, γίνεται:

$$L = m \sqrt{\frac{2|E|}{m}} \cdot \frac{ke^2}{2|E|} = \sqrt{m^2 \frac{2|E|}{m}} \cdot \frac{1}{4|E|^2} \cdot ke^2 = ke^2 \sqrt{\frac{m}{2|E|}}$$

Ο λόγος για τον οποίο ο Bohr ασχολήθηκε με την στροφορμή ήταν ότι απ' όλα τα χαρακτηριστικά μιας κυκλικής κίνησης, η στροφορμή ήταν η μόνη που είχε τις ίδιες διαστάσεις με την σταθερά του Plank ($\text{Joule} \cdot \text{sec} = \text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{sec}$, στο S.I.), για τη οποία είχε πειστεί ότι θα έπαιζε τον πρώτο ρόλο από 'δώ και τέρα. Έτσι υπέθεσε ότι η ζητούμενη συνθήκη κβάντωσης θα εκφράζεται σαν μια συνθήκη πάνω στις επιτρεπόμενες τιμές της στροφορμής. Έτσι:

$$\left. \begin{aligned} L &= ke^2 \sqrt{\frac{m}{2|E|}} \\ E_n &= -\frac{E_1}{n^2} \end{aligned} \right\} L = ke^2 \sqrt{\frac{m}{2 \frac{E_1}{n^2}}} = ke^2 \sqrt{\frac{m}{2E_1}} \cdot n \quad \dots \text{άρα: } L_n = n \cdot L_1 \quad , L_1 = ke^2 \sqrt{\frac{m}{2E_1}}$$

με την εμπειρική τιμή: $E_I = 13.6 \text{ eV}$, βγάζουμε ότι: $L_1 = 10^{-27} \text{ erg} \cdot \text{sec}$, δηλαδή: $L_1 = \hbar$. Καταλήγουμε λοιπόν, στην δεύτερη συνθήκη του Bohr:

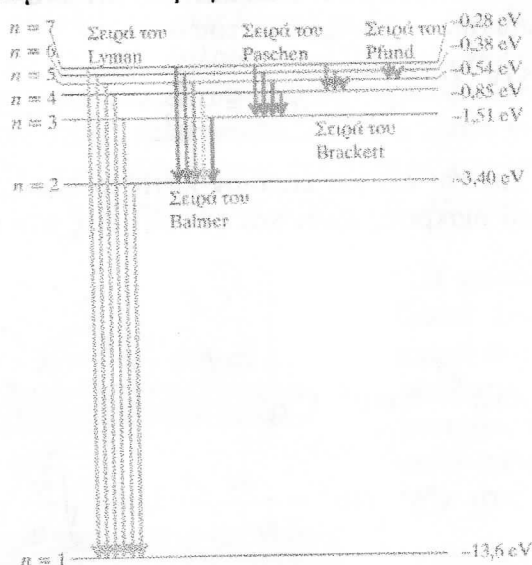
Επιτρέπονται μόνο εκείνες οι κυκλικές τροχιές, για τις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της σταθεράς του Planck: $L_n = n \cdot \hbar$.

Ξεκινώντας τώρα από τη σχέση: $L_n = n \cdot \hbar$ και αντιστρέφοντας τη σειρά των προηγούμενων υπολογισμών (που βασίστηκαν στα πειραματικά δεδομένα του Balmer) βγάζουμε θεωρητικά τους τύπους κβάντωσης του Bohr:

$$E_n = -\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad r_n = \frac{\hbar^2}{mke^2} \cdot n^2 \quad v_n = \frac{ke^2}{\hbar} \cdot \frac{1}{n}$$

και αν το άτομο δεν είναι το Υδρογόνο, αλλά ένα άλλο με σθένος $+1$ (υδρογονοειδές) και ατομικό αριθμό Z , τότε απλά κάνουμε την αλλαγή: $e^2 \rightarrow Ze^2$.

Η πρώτη ακτίνα: $r_1 = 0.53 \text{ \AA}$ ονομάζεται ακτίνα Bohr (με σύμβολο a_0), ενώ η πρώτη ενέργεια: $E_I = -13.6 \text{ eV}$ ονομάζεται έργο ιονισμού του ατόμου του Υδρογόνου.



Ας δούμε τώρα γιατί η θεωρία αυτή δεν είχε καμία σχετικιστική προσέγγιση αν και διατυπώθηκε 8 χρόνια μετά την διατύπωση της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας από τον Α. Einstein. Η πρώτη ταχύτητα του ηλεκτρονίου στο άτομο του Υδρογόνου είναι: $v = ke^2 / \hbar$, η οποία μπορεί να γραφεί: $v = (ke^2 / \hbar c) \cdot c$, όπου η ποσότητα: $a = ke^2 / \hbar c$ γραμμένη στο c.g.s. (cm,gr,sec), όπου $k=1$, είναι: $a = e^2 / \hbar c = 1/137$ και είναι αδιάστατη. Δηλαδή $v_1 = c/137$ δηλαδή η ταχύτητα του ηλεκτρονίου είναι το 1/137 της ταχύτητας του φωτός, εξού και η μη σχετικιστική προσέγγιση. Η σταθερά a



ονομάζεται σταθερά της λεπτής υφής και έχει να κάνει με τον διαχωρισμό, σε περισσότερες από μια, φασματικών γραμμών που “από μακριά” φαίνονται σαν μία. Έχει δε, εξέχουσα σημασία στη κβαντική Φυσική.

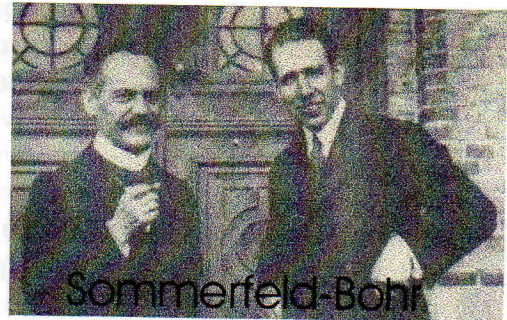
Η κβάντωση του ατόμου έδωσε και τη λύση στο βασανιστικό ερώτημα της σταθερότητας των ατόμων κατά τις θερμικές τους κρούσεις. Σε θερμοκρασία δωματίου ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) οι θερμικές κρούσεις ανταλλάσσουν ενέργειες της τάξης του $1/40 \text{ eV}$ (από τον τύπο $E_{\text{θερ.}} = kT$, k : σταθερά του Boltzmann, T : θερμοκρασία σε $^\circ\text{K}$). Αντίστοιχα η ενέργεια που χρειάζεται το ηλεκτρόνιο για να “ανέβει” από την θεμελιώδη στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση είναι: $\Delta E = E_2 - E_1 = (E_1/2^2) - E_1 = -3E_1/4 = -3(-13.6)/4 = 10.2 \text{ eV}$. Άρα τα

άτομα (γενικά) είναι ευσταθή (από θερμικής απόψεως) για μεγάλη περιοχή θερμοκρασιών. Παρόλο την "πλανητική τους μορφή" συμπεριφέρονται περισσότερο σαν... ατσάλινες σφαίρες. Τα λόγια του ίδιου του Bohr για αυτό το συμπέρασμα:

«Με τον όρο σταθερότητα εννοώ ότι οι ίδιες ουσίες έχουν πάντα τις ίδιες ιδιότητες, σχηματίζονται οι ίδιοι κρύσταλλοι, οι ίδιες χημικές ουσίες κ.ο.κ. Με άλλα λόγια, ακόμα και μετά από μια πληθώρα μεταβολών λόγω εξωτερικών επιδράσεων, ένα άτομο σιδήρου παραμένει πάντα το ίδιο άτομο σιδήρου, με τις ίδιες ακριβώς, όπως και πριν, ιδιότητες. Αυτό δεν μπορεί να εξηγηθεί με τις αρχές της κλασσικής μηχανικής. Σίγουρα δεν μπορεί, αν το άτομο ήταν παρόμοιο με ένα πλανητικό σύστημα. Η φύση έχει την τάση να παράγει ορισμένες "μορφές" -χρησιμοποιώ τη λέξη "μορφές" στην πιο γενική της έννοια- και αναδημιουργεί αυτές τις μορφές ακόμα και όταν παραμορφώνονται ή καταστρέφονται.»

Αν ισχύει η κλασσική θεωρία, όπου το ενεργειακό συνεχές είναι επιτρεπτό, τότε μέσα από τις συνεχείς κρούσεις κανένα άτομο δεν θα ήταν το ίδιο με το άλλο, αλλά ούτε και τον εαυτό του μετά από κάθε κρούση. Βλέπουμε λοιπόν, αντιστρέφοντας τους συλλογισμούς μας, ότι η κβάντωση είναι η μόνη δυνατή λύση για το πρόβλημα που ακούει στο όνομα 'ατομική θεωρία'.

Η συνέχεια ήταν η γενικευμένη συνθήκη κβάντωσης ή συνθήκη Wilson-Sommerfeld και αφορά τροχιές που δεν είναι απαραίτητα κυκλικές (πάντα όμως κλειστές, π.χ. ελλειπτικές). Η συνθήκη δίνεται από τον τύπο: $\oint p \cdot dq = n \cdot h$, όπου p η ορμή και q η συντεταγμένη της κίνησης του ηλεκτρονίου. Δυστυχώς(;) και η ζωή αυτής της συνθήκης ήταν μικρή...



Οι αντιρήσεις...

Οι επιτυχίες της θεωρίας αυτής ήταν αρχικά πολλές: τα φάσματα εκπομπής του Υδρογόνου και των αλκαλίων και τα φάσματα ταλάντωσης και περιστροφής των διατομικών μορίων. Όμως γρήγορα φάνηκαν οι αδυναμίες της: α) ασυνέπια στα φάσματα εκπομπής των υπολοίπων (μη αλκαλικών) ατόμων, β) αδυναμία στην πρόβλεψη της σχετικής έντασης των φασματικών γραμμών, γ) αδυναμία στη μελέτη μη περιοδικών φαινομένων όπως η σκέδαση ενός ηλεκτρονίου πάνω σ' ένα άτομο.

Η θεωρία όμως, πέρα από τις πειραματικές της δυσκολίες μπορεί να κριθεί δυσμενώς και σε καθαρά επιστημολογικό επίπεδο: έχουμε λοιπόν, ένα μίγμα από μη κλασσικές παραδοχές (όπως η κβάντωση) διατυπωμένες σ' ένα καθαρά κλασσικό εννοιολογικό πλαίσιο. Για παράδειγμα ενώ υπάρχει η κλασσική έννοια της τροχιάς, διατυπώνεται αυθαίρετα ότι 'στις επιτρεπόμενες τροχιές το άτομο δεν ακτινοβολεί'. Μετά έχουμε και τα μυστήρια κβαντικά άλματα από τη μια τροχιά στην άλλη. Σε μια συνομιλία του με τον Bohr ο Schrodinger λέει:

«Αν αυτά τα καταραμένα κβαντικά άλματα πρόκειται στ' αλήθεια να παραμείνουν στη Φυσική, τότε εγώ το μετανοιώω που ανακατεύτηκα ποτέ μου με την Κβαντική Θεωρία.»

Το ηλεκτρόνιο δεν ακτινοβολεί ούτε στην αρχική τροχιά, ούτε στην τελική. Άρα ακτινοβολεί καθ' οδόν. Αλλά η κίνηση από την μια τροχιά στην άλλη, όπως και να είναι, θα είναι σίγουρα αperiοδική και επομένως η εκπεμπόμενη ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία θα αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα συχνοτήτων πράγμα όμως που δεν συμβαίνει.



Ίσως εδώ θα χρειαστεί να τονίσουμε την υπέρβαση του Bohr: στην προκειμένη περίπτωση και μη έχοντας άλλη εκλογή (ας μην ξεχνάμε ότι διατύπωνε την πρώτη κβαντική ατομική θεωρία, άρα ήταν πρωτοπόρος) αναγκάστηκε να δεχθεί δογματικά την μη εκπομπή ηλ/κης ακτινοβολίας κατά την περιστροφή του ηλεκτρονίου ώστε αυτό να μην πέφτει στον πυρήνα. Μελανό μεν, αναγκαίο δε σημείο της θεωρίας του...



Τελικά οι σκόπελοι της θεωρίας αυτής, είχαν μια κοινή πηγή: την έννοια της τροχιάς. Πως θα μπορούσε δηλαδή, ένα τελείως καινούριο για την επιστήμη μοντέλο, το κβαντικό, να περιέχει μέσα του έναν καθαρά κλασικό όρο, την τροχιά. Ο αδύναμος κρίκος στη θεωρία του Bohr βρισκόταν λοιπόν, στη δεύτερη συνθήκη κβάντωσης και ειδικότερα στη εισαγωγή της έννοιας των κβαντισμένων τροχιών για την περιγραφή των επιτρεπόμενων ενεργειακών καταστάσεων. Από την άλλη μεριά η έννοια της ενεργειακής κβάντωσης καθ' αυτή είχε ακλόνητο πειραματικό υπόβαθρο (Balmer).

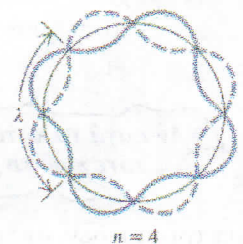
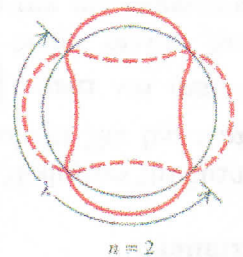


Τα θεμέλια λοιπόν, άρχισαν πάλι να τρίζουν, όπως πριν λίγα χρόνια είχε γίνει το ίδιο στα θεμέλια του πλανητικού μοντέλου του Rutherford και ακόμα νορρίτερα στα θεμέλια του προτύπου του Thomson.

Η συνέχεια...

Στο σημείο αυτό θα αναφέρουμε σύντομα την εξέλιξη της θεωρίας, ώστε χωρίς να ξεφύγουμε πολύ από τα όρια της εργασίας μας, να δώσουμε στον αναγνώστη μια ιδέα για το τι ακολούθησε...

Στην κλασική Φυσική και συγκεκριμένα στα στάσιμα κύματα (π.χ. χορδή) παρατηρούμε φαινόμενα κβαντισμού των συχνοτήτων. Δηλαδή ένα κύμα μπορεί να συμπεριφερθεί κβαντισμένα. Επίσης με την εξήγηση του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, είδαμε πως τα φωτόνια (που μέχρι τότε θεωρούνταν αποκλιστικά κύματα) συμπεριφέρονταν και σαν σωματίδια (πακέτα εντοπισμένης ενέργειας). Γιατί λοιπόν, αφού ένα κύμα (φωτόνιο) συμπεριφέρονταν σαν σωματίδιο και ένα σωματίδιο να μην συμπεριφέρονταν σαν κύμα; Αυτό το ερώτημα απάντησε "παράτολμα" αρχικά, ο De Broglie. Είπε λοιπόν, ότι το ηλεκτρόνιο συμπεριφέρονταν σαν κύμα και μάλιστα με συγκεκριμένες μόνο τιμές συχνοτήτων (όπως η χορδή) άρα συγκεκριμένες μόνο τιμές ενεργειών (ένα στάσιμο κύμα γύρω απ' τον πυρήνα). Αυτή ονομάστηκε αρχή του *κυματοσωματιδιακού δυισμού* και διατυπώθηκε από τον De Broglie το 1923 (και μάλιστα στην διδακτορική του διατριβή). Σήμερα η αρχή του κυματοσωματιδιακού δυισμού έχει επιβεβαιωθεί κατ' ευθείαν σε πειράματα σκέδασης από κρυστάλλους και είναι καθολικά αποδεκτή.



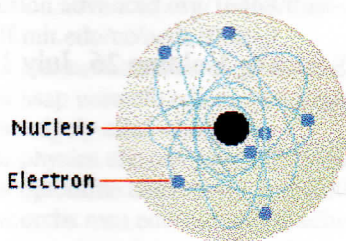
Στη συνέχεια η θεωρία εξελίχθηκε και από στάσιμο κύμα γύρω απ' τον πυρήνα (που αντικατέστησε την κλασική –και γεμάτη προβλήματα– έννοια της τροχιάς), πήγαμε στο κύμα πιθανότητας (μια τελείως κβαντική έννοια). Η Κβαντομηχανική είχε γίνει πλέον ολοκληρωμένη θεωρία. Η *εξίσωση του Schrodinger*, η *αρχή της απροδιοριστίας του Heisenberg*, η *απαγορευτική αρχή του Pauli*, η *εξίσωση του Dirac* είναι μερικές από τις πιο λαμπρές σελίδες της ιστορίας που γράφτηκε στη συνέχεια. Μιας ιστορίας που πολύ εύγλωττα ο ίδιος ο Bohr πολύ αργότερα περιέγραφε ως:



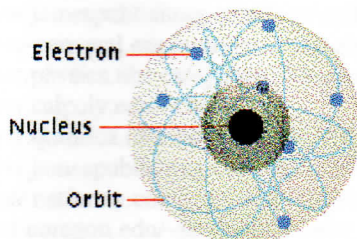
Bohr-Heisenberg(& wife)
Ακρόπολη Αθηνών

«Δεν υπάρχει κβαντικός κόσμος. Υπάρχει μόνο μια αφηρημένη κβαντική περιγραφή».

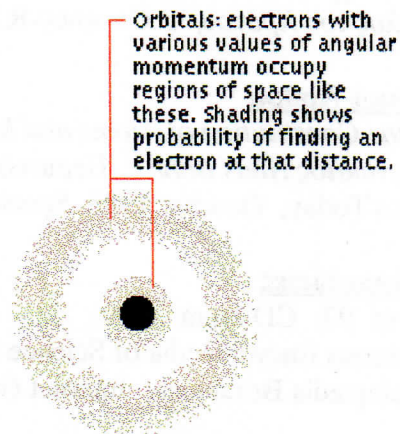
Η Κβαντική Θεωρία του Bohr δεν αποτελεί κατά κανένα τρόπο ένα εννοιολογικό προαπαιτούμενο της σημερινής Κβαντομηχανικής. Η ιστορική της αποστολή ήταν ν' ανοίξει τον δρόμο για την ανακάλυψη της θεμελιώδους αρχής του κυματοσωματιδιακού δυισμού. Από τη στιγμή που την εκπλήρωσε, το σκηνικό ήταν έτοιμο για την οικοδόμηση μιας νέας θεμελιώδους θεωρίας...



The Rutherford Model
pictured the atom as a miniature solar system with the electrons moving like planets around the nucleus.



The Bohr Model
'quantized' the orbits in order to explain the stability of the atom.



The Schrödinger Model
abandoned the idea of precise orbits, replacing them with a description of the regions of space (called orbitals) where the electrons were most likely to be found.

Microsoft Illustration

Βιβλιογραφία:

Βιβλία

1. *Κβαντομηχανική I*, Σ.Α.Τραχανάς, ΠΕΚ
2. *Οι έννοιες της Φυσικής -τόμος II*, P.G.Hewitt, ΠΕΚ
3. *Ο Χημικός Δεσμός*, J.N.Murell-S.F.A.Kettle-J.N.Tedder, ΠΕΚ
4. *Η Φυσική Σήμερα I. Τα Θεμέλια*, Ε.Ν.Οικονόμου, ΠΕΚ
5. *Κλασσική και Σύγχρονη Φυσική -3^{ος} τόμος*, Κ.Υ.Υ.Υ., Εκδ. Πνευματικός
6. *Πανεπιστημιακή Φυσική -τόμος Β'*, Η.Δ.Υ.Υ., Εκδ. Παπαζήση
7. *Το Βέλος του Χρόνου*, Ρ.Υ.Υ.-Υ.Υ., Εκδ. Κάτοπτρο

Περιοδικά-Άρθρα

1. "On the Constitution of Atoms and Molecules", Philosophical Magazine, Series 6, Volume 26, July 1913
2. "Ο Άγνωστος Niels Bohr", Περισκόπιο της Επιστήμης, Φεβρουάριος 1989
3. Physics Today, October 1985, Special Issue: Niels Bohr Centennial

Εγκυκλοπαίδειες

1. Encarta '97, CD-Rom
2. Eyewitness Encyclopedia of Science 2.0, CD-Rom
3. Encyclopædia Britannica, Internet (www.britannica.com)

Web Sites

1. <http://britannica.com/bcom/eb/article/printable/8/0,5722,106088,00.html>
2. <http://www.nobel.se/laureates/physics-1922-press.html>
3. <http://www.nobel.se/laureates/physics-1922-1-bio.html>
4. <http://www.lucidcafe.com/library/95oct/nbohr.html>
5. http://www-groups.dcs.st-and.ac.uk/~history/Mathematicians/Bohr_Niels.html
6. <http://www.pbs.org/wgbh/aso/databank/entries/bpbohr.html>
7. http://orac.sunderland.ac.uk/~hs0bd/h_nb.html
8. <http://home.mira.net/~graffcam/phil/bohr.html>
9. <http://home.mira.net/~graffcam/phil/physic2.htm#Bohr>
10. <http://theory.uwinnipeg.ca/physics/bohr/nobe3.html>
11. <http://www.aip.org>
12. <http://www.neutron.anl.gov/bohr.html>
13. <http://www.autodynamics.org/Atomic/Bohr/BohrHydr.html>
14. <http://www.amazon.com/exec/obidos/subject-combination/002-2401194-6353048>
15. http://www.vma.bme.hu/mathhist/References/Bohr_Niels.html