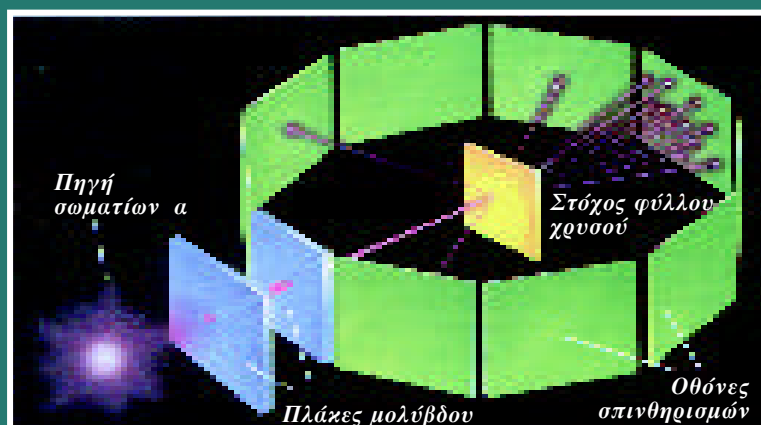


## ΑΤΟΜΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

- Ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου
- Διακριτές ενεργειακές στάθμες
- Μηχανισμός παραγωγής και απορρόφησης φωτονίων
- Ακτίνες X



## Πείραμα του Rutherford

Σκέδαση σωματίων  $\alpha$  από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Το πείραμα αυτό έδειξε ότι το θετικό φορτίο και το μεγαλύτερο μέρος της μάζας ενός ατόμου είναι συγκεντρωμένα σε μια μικρή περιοχή του ατόμου, που ονομάστηκε πυρήνας.

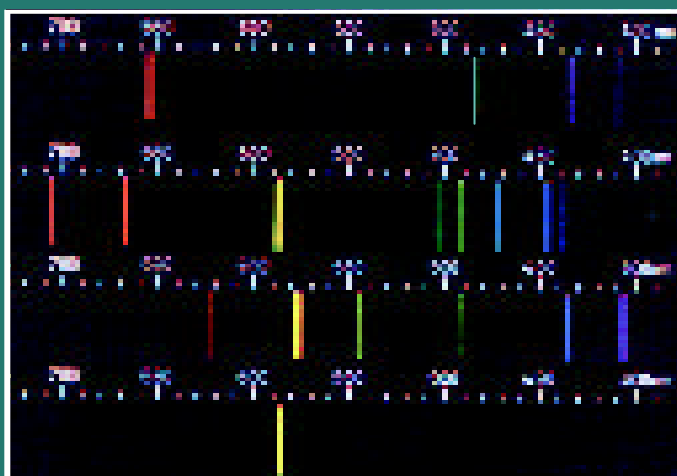
## Φάσματα εκπομπής ατόμων

Υδρογόνου H

Ηλίου He

Υδραργύρου Hg

Νατρίου Na

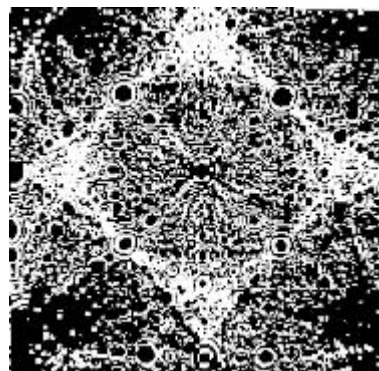




Στο πυρηνικό εργαστήριο Sandia στο Νέο Μεξικό ένας επιταχυντής φορτισμένων σωματιδίων (μηχανή Z) παράγει μέσα σε ελάχιστο χρόνο δέκα φορές περισσότερη ενέργεια από όλους μαζί τους σταθμούς ηλεκτροπαραγωγής στον κόσμο. Η ενέργεια παράγεται υπό μορφή ακτίνων X. Ηλεκτρικές εκκενώσεις φωτίζουν την επιφάνεια της μηχανής Z. Η παραγόμενη ισχύς είναι 210 τρισεκατομμύρια Watt.



2-1 Ένας φύλακας του ατομικού ρολογιού και-  
σίον στο Γραφείο Μέτρων και Σταθμών της  
Ουάσιγκτον.



2-2 Άτομα στην επιφάνεια μιας μύτης  
βελόνας όπως φαίνονται με ηλεκτρονι-  
κό μικροσκόπιο πεδίου.

## 2.1 ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ ΣΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ

**Π**ρώτοι οι αρχαίοι Έλληνες φιλόσοφοι ασχολήθηκαν με το πρόβλημα των συστατικών της ύλης. Ο Λεύκιππος και ο Δημόκριτος υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από πολύ μικρά σωματίδια, τα οποία δεν μπορούν να διαρουνται απεριόριστα και γι' αυτό ονομάστηκαν ά-τομα (δηλαδή άτομητα). Διατύπωσαν λοιπόν μια φιλοσοφική θεωρία, για να ερμηνεύσουν τις ιδιότητες των υλικών σωμάτων. Υποστήριζαν ότι η ύλη αποτελείται από άτομα που διαφέρουν μεταξύ τους κατά το σχήμα και κατά το μέγεθος. Τα άτομα δε δημιουργούνται ούτε καταστρέφονται και επομένως είναι άφθαρτα και αιώνια. Τα άτομα είναι πάρα πολλά και βρίσκονται σε διαρκή κίνηση μέσα στο κενό. Τα διάφορα φυσικά φαινόμενα οφείλονται στην κίνηση των ατόμων. Ο σχηματισμός των υλικών σωμάτων οφείλεται στις ενώσεις των ατόμων με άλλα άτομα, ενώ αντίθετα η καταστροφή των σωμάτων οφείλεται στο διαχωρισμό των ατόμων.

Ο Επίκουρος επηρεάστηκε από τη θεωρία του Δημόκριτου. Ένα μέρος της θεωρίας αυτής βρίσκεται σε ένα ποίημα του Ρωμαίου ποιητή Λουκρήτιου, όπου περιγράφεται, με βάση τις ατομικές αντιλήψεις του Δημόκριτου, η πίεση που ασκούν τα αέρια, η διάχυση των οσμών και το σχήμα των κρυστάλλων.

Η ατομική θεωρία του Δημόκριτου ήταν μία από τις φιλοσοφικές θεωρίες των αρχαίων Ελλήνων. Δεν υπήρχε καμία πειραματική παρατήρηση για την υποστήριξή της. Η θεωρία του Δημόκριτου καταπολεμήθηκε από τον Πλάτωνα, τον Αριστοτέλη και τους μαθητές τους και έπεσε σε αφάνεια μέχρι το 19ο αιώνα.

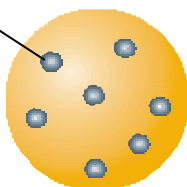


2-3 Δημόκριτος ο Αβδηρίτης (470-360 π.Χ.).  
Αρχαίος Έλληνας φιλόσοφος, ιδρυτής της ατο-  
μικής θεωρίας.

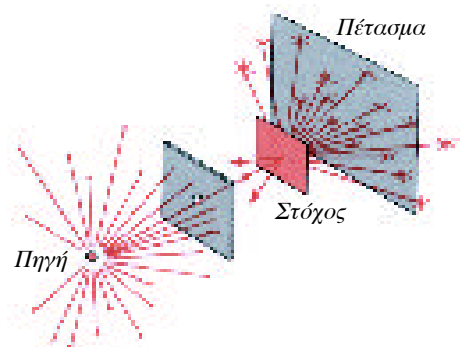


2-4 Αριστερά ο Άγγλος φυσικός J. J. Thomson (1856-1940) και δεξιά ο Ernest Rutherford (1871-1937).

Ηλεκτρόνιο



2-5 Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson.



2-6 Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωματιδίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωματίδια αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των  $90^\circ$ . Τα σωματίδια α είναι πυρήνες ηλίου.

Στις αρχές του 19ου αιώνα ο Dalton (Ντάλτον) επανέφερε την ατομική θεωρία, για να εξηγήσει τους νόμους της Χημείας που ανακάλυψε πειραματικά.

Σημαντικό σταθμό στην εξέλιξη των επιστημονικών ιδεών για το άτομο αποτέλεσε η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου από τον Thomson (Τόμσον) κατά το τέλος του 19ου αιώνα.

Η ανακάλυψη του ηλεκτρονίου ως συστατικό του ατόμου έδειξε ότι το άτομο έχει εσωτερική δομή και επομένως δεν είναι άτμητο. Επειδή η ύλη είναι ηλεκτρικά ουδέτερη, κατέληξε στο συμπέρασμα ότι και τα άτομα της ύλης είναι ηλεκτρικά ουδέτερα και επομένως το άτομο θα έχει ίσες ποσότητες θετικού και αρνητικού φορτίου.

Επίσης τα πειράματα έδειξαν ότι η μάζα του τμήματος που είναι θετικά φορτισμένο είναι μεγαλύτερη από τη μάζα των ηλεκτρονίων του ατόμου.

Το ερώτημα που τέθηκε στη συνέχεια ήταν: **«πώς η μάζα και το φορτίο κατανέμονται στο εσωτερικό του ατόμου;»**

### Πρότυπο του Thomson

Ο Thomson (Τόμσον) πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο το άτομο αποτελείται από μια σφαίρα θετικού φορτίου, ομοιόμορφα κατανεμημένου, μέσα στο οποίο είναι ενσωματωμένα τα ηλεκτρόνια, όπως οι σταφίδες μέσα σε ένα σφαιρικό σταφιδόψωμο.

### Πρότυπο του Rutherford

Ο Rutherford (Ράδερφορντ) και οι μαθητές του πραγματοποίησαν τα πρώτα πειράματα, για να διερευνήσουν την εσωτερική δομή του ατόμου, τα αποτελέσματα των οποίων ήλθαν σε αντίθεση με το πρότυπο του Thomson. Στα πειράματα αυτά μια δέσμη θετικά φορτισμένων σωματιδίων α κατευθύνεται σε λεπτό μεταλλικό φύλλο χρυσού (στόχος). Σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson, η δέσμη των σωματιδίων α δε θα πρέπει να αποκλίνει σημαντικά για τους εξής λόγους:

- Το ολικό ηλεκτρικό φορτίο του ατόμου είναι μηδέν και επομένως δεν ασκείται ηλεκτρική δύναμη στα σωματίδια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εξωτερικό του ατόμου.
- Επειδή το θετικό ηλεκτρικό φορτίο είναι ομοιόμορφα κατανεμημένο, δεν μπορεί να ασκεί σημαντική απωστική δύναμη στα σωματίδια α, όσο αυτά βρίσκονται στο εσωτερικό του ατόμου.
- Η σύγκρουση των σωματιδίων α με τα ηλεκτρόνια δεν επηρεάζει σημαντικά την κίνησή τους, γιατί τα ηλεκτρόνια έχουν πολύ μικρότερη μάζα. Με τον ίδιο τρόπο δεν επηρεάζεται σημαντικά η κίνηση μιας βαριάς πέτρας μέσα στη βροχή.

Ο Rutherford παρατήρησε ότι τα περισσότερα από τα σωματίδια α διέρχονται μέσα από το στόχο σχεδόν ανεπηρέαστα, σαν να κινούνται μέσα σε σχεδόν κενό χώρο. **Αρκετά αποκλίνουν σε διάφορες γωνίες. Λίγα όμως αποκλίνουν κατά  $180^\circ$ .** Αυτό μπορεί να συμβεί μόνο, αν το θετικό φορτίο είναι συγκεντρωμένο σε μικρό

χώρο, ώστε να ασκεί στα σωματίδια α μεγάλες απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις.

Για να εξηγήσει ο Rutherford τις πειραματικές παρατηρήσεις του, πρότεινε ένα πρότυπο σύμφωνα με το οποίο:

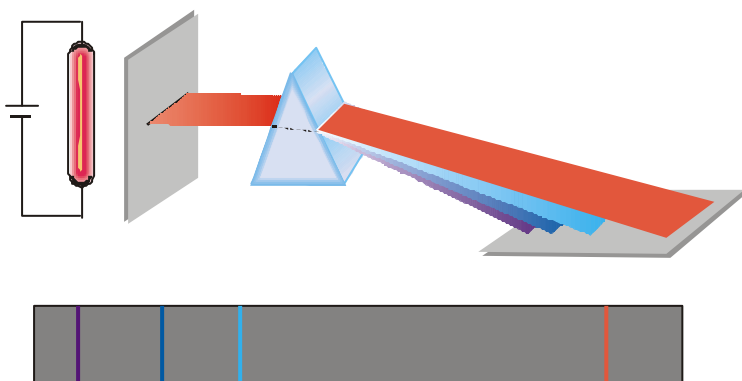
Το άτομο αποτελείται από μία πολύ μικρή περιοχή στην οποία είναι συγκεντρωμένο όλο το θετικό φορτίο και σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου. Η περιοχή αυτή ονομάζεται πυρήνας. Ο πυρήνας περιβάλλεται από ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια πρέπει να κινούνται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλικές τροχιές, όπως οι πλανήτες γύρω από τον Ήλιο, γιατί, αν ήταν ακίνητα, θα έπεφταν πάνω στον πυρήνα εξαιτίας της ηλεκτρικής έλξης που δέχονται από αυτόν.

Το πρότυπο του Rutherford ονομάζεται και **πλανητικό μοντέλο** του ατόμου, γιατί αποτελεί μικρογραφία του ηλιακού πλανητικού συστήματος. Αποτελεί ένα μεγάλο βήμα, που πλησιάζει στην εικόνα του ατόμου όπως τη γνωρίζουμε σήμερα. Όμως το μοντέλο αυτό, όπως θα δούμε παρακάτω, παρουσιάζει ορισμένες σημαντικές αδυναμίες.

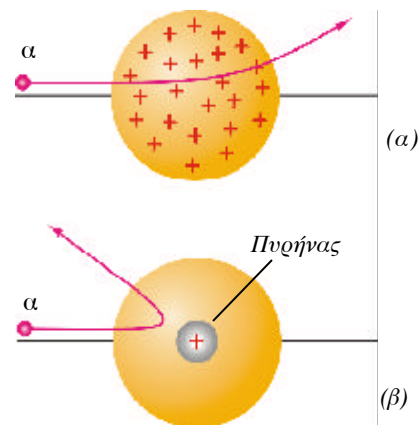
### Ατομικά φάσματα

Όταν εφαρμόσουμε ορισμένη τάση σε γυάλινο σωλήνα που περιέχει αέριο σε χαμηλή πίεση (όπως στις διαφημιστικές λυχνίες νέου), τότε θα παρατηρήσουμε ότι το αέριο εκπέμπει φως. Αν το φως αυτό αναλυθεί, όταν, για παράδειγμα, περάσει μέσα από ένα πρίσμα, τότε θα παρατηρήσουμε μια σειρά από φωτεινές γραμμές. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό μήκος κύματος ή χρώμα. Όπως γνωρίζουμε, η σειρά των γραμμών που παρατηρούνται ονομάζεται **γραμμικό φάσμα εκπομπής** του αερίου.

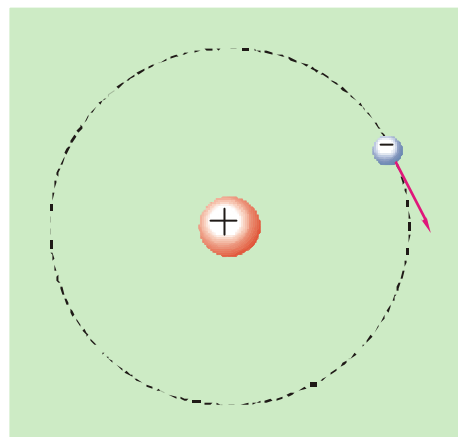
Τα μήκη κύματος που περιέχει το γραμμικό φάσμα εκπομπής είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που εκπέμπει το φως. Δεν υπάρχουν δύο διαφορετικά στοιχεία που να έχουν το ίδιο φάσμα εκπομπής. Το δεδομένο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον προσδιορισμό των στοιχείων που περιέχονται σε μια ουσία. Δηλαδή το γραμμικό φάσμα παίζει το ρόλο των δακτυλικών αποτυπωμάτων. Όπως από τα



δακτυλικά αποτυπώματα μπορούμε να βρούμε τον άνθρωπο στον οποίο ανήκουν, έτσι και από το γραμμικό φάσμα μπορούμε να βρούμε το στοιχείο στο οποίο ανήκει.



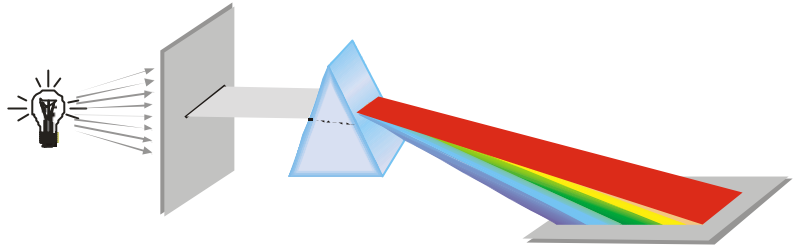
2-7 (α) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. (β) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford.



2-8 Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο).

2-9 Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου. Το φως που εκπέμπει το αέριο περνάει μέσα από ένα πρίσμα και το φάσμα αποτυπώνεται σε ευαίσθητο φιλμ.

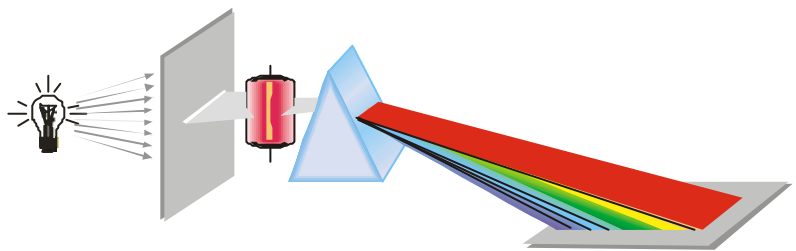
Ένα αέριο μπορεί όχι μόνο να εκπέμπει φως, αλλά μπορεί και να απορροφά φως. Αν φωτίσουμε με πηγή που εκπέμπει λευκό φως ένα πρίσμα, πίσω από το οποίο έχει τοποθετηθεί πέτασμα, τότε θα παρατηρήσουμε πάνω στο πέτασμα μια συνεχή χρωματιστή ταινία. Η ταινία αυτή των χρωμάτων, όπως γνωρίζουμε, ονομάζεται **συνεχές φάσμα** του λευκού φωτός.



2-10 Συνεχές φάσμα του λευκού φωτός.



Αν τώρα ανάμεσα στην πηγή του λευκού φωτός και στο πρίσμα τοποθετηθεί γυάλινο δοχείο που περιέχει κάποιο αέριο, τότε θα παρατηρήσουμε ότι η χρωματιστή ταινία διακόπτεται από σκοτεινές γραμμές. Η ταινία αυτή των χρωμάτων ονομάζεται **γραμμικό φάσμα** απορρόφησης του αερίου. Οι σκοτεινές γραμμές εμφανίζονται σε εκείνες ακριβώς τις συχνότητες στις οποίες εμφανίζονται οι φωτεινές γραμμές του φάσματος εκπομπής του ίδιου αερίου.



2-11 Γραμμικό φάσμα απορρόφησης του υδρογόνου.



Επομένως το πείραμα δείχνει ότι:

- α. Το φάσμα εκπομπής ή απορρόφησης ενός αερίου αποτελείται από ορισμένες φασματικές γραμμές που είναι χαρακτηριστικές του αερίου. Κάθε γραμμή αντιστοιχεί σε ορισμένη συχνότητα (ή μήκος κύματος).
- β. Κάθε γραμμή του φάσματος απορρόφησης του αερίου συμπίπτει με μία γραμμή του φάσματος εκπομπής του. Δηλαδή κάθε αέριο απορροφά μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες τις οποίες μπορεί να εκπέμπει.



Τα γραμμικά φάσματα των αερίων αποτέλεσαν **το κλειδί** για την έρευνα της δομής του ατόμου. Κάθε θεωρία για τη δομή του ατόμου πρέπει να εξηγήσει γιατί τα άτομα εκπέμπουν ή απορροφούν μόνο ορισμένες ακτινοβολίες και γιατί απορροφούν μόνο εκείνες τις ακτινοβολίες που μπορούν να εκπέμπουν.

Το μοντέλο του Rutherford αδυνατούσε να εξηγήσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων για τους παρακάτω λόγους:

Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο, το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον πυρήνα σε κυκλική τροχιά. Το μέτρο της ταχύτητάς του είναι σταθερό, αλλά η κατεύθυνσή της συνεχώς μεταβάλλεται και επομένως το ηλεκτρόνιο έχει επιτάχυνση. Σύμφωνα με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία, το ηλεκτρόνιο, όπως και κάθε επιταχυνόμενο φορτίο, εκπέμπει ακτινοβολία, δηλαδή ακτινοβολεί ενέργεια. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου θα πρέπει να μειώνεται συνεχώς. Επομένως θα πρέπει να κινείται σε σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και με διαρκώς μεταβαλλόμενη συχνότητα, μέχρις ότου πέσει στον πυρήνα.

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας θα πρέπει να είναι ίση με τη συχνότητα περιφοράς του ηλεκτρονίου, η οποία μεταβάλλεται συνεχώς.

Άρα, σύμφωνα με το μοντέλο του Rutherford, τα άτομα θα έπρεπε να εκπέμπουν συνεχές φάσμα και όχι γραμμικό, όπως παρατηρείται στην πράξη.

Για να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα του υδρογόνου, ο Bohr πρότεινε ένα νέο πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου.

### Το πρότυπο του Bohr για το υδρογόνο

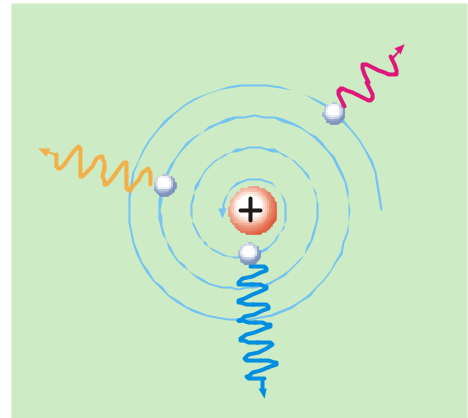
Στις αρχές του 20ού αιώνα οι επιστήμονες διαπίστωσαν ότι η κλασική Φυσική αδυνατούσε να ερμηνεύσει τα γραμμικά φάσματα των αερίων. Δεν μπορούσε να εξηγήσει:

- Γιατί το υδρογόνο εκπέμπει μόνο ορισμένα μήκη κύματος ακτινοβολίας;
- Γιατί απορροφά μόνο τα μήκη κύματος που εκπέμπει;

Για να απαντήσει στα παραπάνω ερωτήματα, ο Δανός φυσικός Bohr (Μπορ) πρότεινε ένα πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου, που στηρίζεται στις παρακάτω παραδοχές:

- Το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου περιφέρεται γύρω από το θετικά φορτισμένο πυρήνα με την επίδραση της δύναμης Coulomb που δέχεται από αυτόν (σχήμα 2-14).
- Το ηλεκτρόνιο μπορεί να κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές, οι οποίες ονομάζονται **επιτρεπόμενες τροχιές**. Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες ισχύει ότι η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη και ίση με ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας  $\hbar = h/2\pi$ , όπου  $h$  είναι η σταθερά του Planck. Το μέτρο της στροφορμής του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

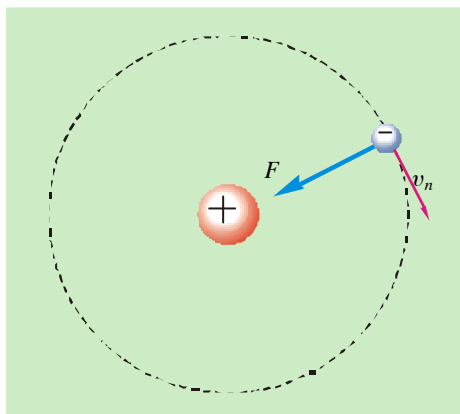
$$L = mvr$$



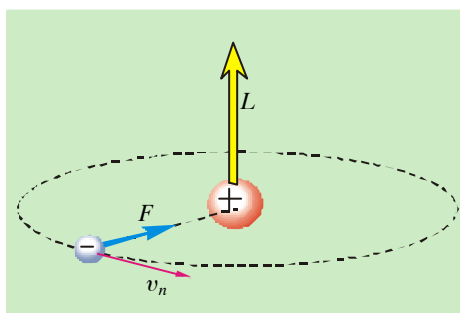
**2-12** Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα.



**2-13** Ο Δανός φυσικός Niels Bohr (1885-1962). Τιμήθηκε με το βραβείο Nobel Φυσικής το 1922 για την έρευνά του στη δομή των ατόμων.



**2-14** Άτομο του υδρογόνου. Το πρωτόνιο θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη Coulomb  $F$  προκαλεί την απαιτούμενη κεντρομόλο επιτάχυνση. Το ηλεκτρόνιο λοιπόν περιφέρεται με ταχύτητα  $v_n$  σε επιτρεπόμενη τροχιά ακτίνας  $r_n$  ώστε να ισχύει:  $m \delta r = n \hbar$



**2-14a** Το διάνυσμα της στροφορμής  $L$  του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr.

όπου  $m$  είναι η μάζα του ηλεκτρονίου,  $v$  είναι το μέτρο της ταχύτητάς του και  $r$  η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του. Εφαρμόζοντας τη συνθήκη σύμφωνα με την οποία η στροφορμή του ηλεκτρονίου είναι κβαντωμένη, έχουμε :

$$m v r = n \frac{h}{2\pi} = n \hbar, \quad n=1, 2, 3, \dots, - \quad (2.1)$$

- γ. Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται σε ορισμένη επιτρεπόμενη τροχιά, δεν εκπέμπει ακτινοβολία. Η παραδοχή αυτή έρχεται σε αντίθεση με την ηλεκτρομαγνητική θεωρία σύμφωνα με την οποία το ηλεκτρόνιο θα έπρεπε να ακτινοβολεί συνεχώς ενέργεια, να διαγράφει σπειροειδή τροχιά με διαρκώς μειούμενη ακτίνα και τελικά να πέφτει στον πυρήνα.
- δ. Όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδήσει από μία επιτρεπόμενη τροχιά σε άλλη μικρότερης ενέργειας, τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της αρχικής και της τελικής του ενέργειας. Αν  $E_i$  είναι η ενέργεια του ατόμου πριν από τη μετάβαση,  $E_f$  η ενέργεια μετά τη μετάβαση και  $hf$  η ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, τότε ισχύει:

$$E_i - E_f = hf \quad (2.2)$$

### Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου

Θα υπολογίσουμε την κινητική, τη δυναμική και την ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Θεωρούμε ότι το ηλεκτρόνιο περιφέρεται γύρω από τον ακίνητο πυρήνα, ο οποίος αποτελείται από ένα πρωτόνιο. Σύμφωνα με το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα, η ηλεκτρική ελκτική δύναμη  $F = ke^2/r^2$ , που ασκεί ο πυρήνας στο ηλεκτρόνιο, πρέπει να είναι ίση με  $F = m a_\kappa$ , όπου  $a_\kappa = v^2/r$  είναι η κεντρομόλος επιτάχυνση του ηλεκτρονίου:

$$F = m a_\kappa \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{v^2}{r} \quad \text{ή} \quad v = e \sqrt{\frac{k}{m r}} \quad (1)$$

Αντικαθιστώντας την παραπάνω σχέση στην εξίσωση  $K = \frac{1}{2} m \delta^2$  βρίσκουμε:

$$K = k \frac{e^2}{2r} \quad (2)$$

Η δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου δίνεται από την εξίσωση:

$$U = -k \frac{e^2}{r} \quad (3)$$

Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι το άθροισμα της κινητικής και της δυναμικής του ενέργειας:

$$E = K + U = k \frac{e^2}{2r} + (-k \frac{e^2}{r}) \quad \text{ή}$$



$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{Ολική ενέργεια ηλεκτρονίου} \quad (2.3)$$

Όταν αναφερόμαστε στην ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου, εννοούμε την ενέργεια του συστήματος που αποτελείται από το ηλεκτρόνιο και τον ακίνητο πυρήνα του ατόμου. Η ενέργεια αυτή οφείλεται στην αλληλεπίδραση μεταξύ του ηλεκτρονίου και του πυρήνα.

### Επιτρεπόμενες τροχιές και τιμές ενέργειας

Η μικρότερη ακτίνα επιτρεπόμενης τροχιάς του ηλεκτρονίου ονομάζεται **ακτίνα του Bohr** και είναι ίση με  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Οι ακτίνες των άλλων επιτρεπόμενων τροχιών του ηλεκτρονίου δίνονται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 r_1 \quad \text{Επιτρεπόμενες τροχιές} \quad (2.4)$$

όπου  $n$  είναι ακέραιος θετικός αριθμός, ο οποίος ονομάζεται **κύριος κβαντικός αριθμός**, και μπορεί να πάρει τιμές από ένα μέχρι άπειρο:

$$n = 1, 2, 3, \dots, \infty$$

Όταν το ηλεκτρόνιο κινείται στην τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα ( $n=1$ ), τότε έχει την ελάχιστη ενέργεια, που είναι ίση με  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ . Όταν κινείται στις άλλες επιτρεπόμενες τροχιές, τότε έχει ολική ενέργεια που δίνεται από την εξίσωση:

$$E_n = \frac{E_1}{n^2} \quad \text{Επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας} \quad (2.5)$$

Γνωρίζοντας τις τιμές των  $r_1$  και  $E_1$  και αντικαθιστώντας  $n=1, 2, 3, \dots$  στις εξισώσεις 2.4 και 2.5, υπολογίζουμε τις επιτρεπόμενες τιμές της ακτίνας και της ενέργειας. Οι τιμές αυτές φαίνονται στον παρακάτω πίνακα:

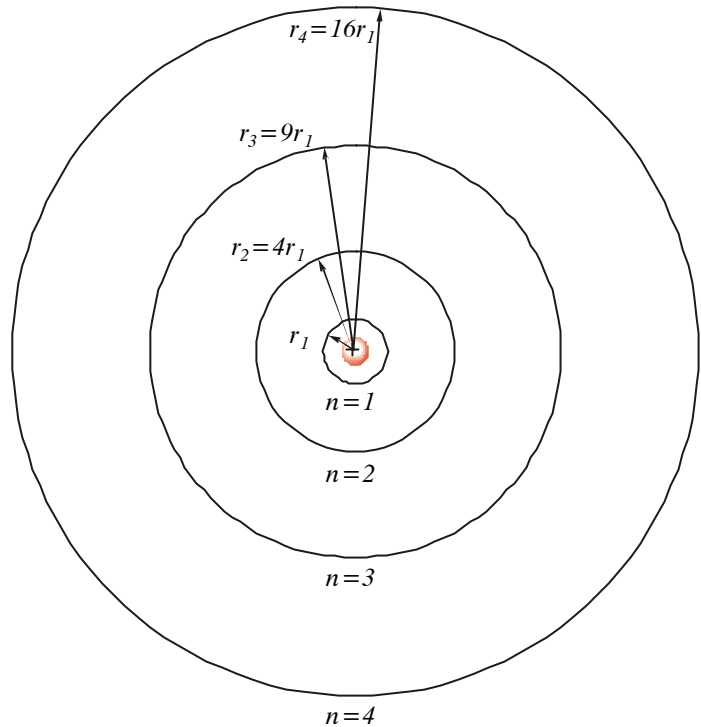
| Κύριος κβαντικός αριθμός | $n = 1$ | $n = 2$ | $n = 3$ | ... | $n \rightarrow \infty$ |
|--------------------------|---------|---------|---------|-----|------------------------|
| Ακτίνα                   | $r_1$   | $4r_1$  | $9r_1$  | ... | $\infty$               |
| Ολική ενέργεια           | $E_1$   | $E_1/4$ | $E_1/9$ | ... | 0                      |

Οι τιμές της ενέργειας είναι αρνητικές. Η μεγαλύτερη τιμή της ενέργειας είναι  $E=0$ . Αντιστοιχεί σε  $n \rightarrow \infty$  και  $r \rightarrow \infty$  και περιγράφει την κατάσταση κατά την οποία το ηλεκτρόνιο έχει απομακρυνθεί από το άτομο (ιονισμός). Η φυσική σημασία του αρνητικού προσήμου της ολικής ενέργειας είναι ότι απαιτείται προσφορά ενέργειας, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα.

#### Το ηλεκτρονιοβόλτ (eV)

Το ηλεκτρονιοβόλτ είναι η ενέργεια που μεταβιβάζεται σε ένα ηλεκτρόνιο, όταν αυτό επιταχύνεται μέσω διαφοράς δυναμικού 1 Volt.

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$



**2-15** Επιτρεπόμενες τροχιές του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.

### ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 2 - 1

Ένα άτομο υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση έχει ολική ενέργεια  $E_1 = -13,6 \text{ eV}$ . Η ακτίνα της τροχιάς του ηλεκτρονίου είναι  $r_1 = 0,53 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Να υπολογιστούν οι ακτίνες της τροχιάς και οι ενέργειες του ηλεκτρονίου στις δύο πρώτες διεγερμένες καταστάσεις, που αντιστοιχούν σε κβαντικούς αριθμούς  $n=2$  και  $n=3$ .

**ΛΥΣΗ** Η ακτίνα της τροχιάς δίνεται από την εξίσωση:

$$r_n = n^2 \cdot r_1$$

Αντικαθιστώντας  $n=2$  και  $n=3$ , βρίσκουμε:

$$r_2 = 2^2 r_1 = 4 r_1 = 2,12 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

$$r_3 = 3^2 r_1 = 9 r_1 = 4,77 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

Η ολική ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου δίνεται από την εξίσωση:

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

Αντικαθιστώντας  $n=2$  και  $n=3$ , βρίσκουμε :

$$E_2 = \frac{E_1}{2^2} = \frac{E_1}{4} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{4} = -3,4 \text{ eV}$$

$$E_3 = \frac{E_1}{3^2} = \frac{E_1}{9} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{9} = -1,51 \text{ eV}$$

### Απόδειξη των τύπων 2.4 και 2.5

Χρησιμοποιούμε την εξίσωση που περιγράφει την κβάντωση της στροφορμής:  $m v r = n \hbar$  (1) και το δεύτερο νόμο του Νεύτωνα για το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου:

$$F = m a_{\kappa} \quad \text{ή} \quad k \frac{e^2}{r^2} = m \frac{\delta^2 r}{\delta t^2} \quad \text{ή} \quad m \delta^2 r = k e^2 \quad (2)$$

Λύνουμε την (1) ως προς  $v$  και αντικαθιστούμε το αποτέλεσμα στη (2):

$$m \frac{n^2 \hbar^2}{m^2 r^2} r = k e^2 \quad \text{ή} \quad r = n^2 \frac{\hbar^2}{m k e^2}$$

Αντικαθιστώντας το  $r$  με  $r_n$ , έχουμε:

|  |                                     |
|--|-------------------------------------|
| $r_n = n^2 \frac{\hbar^2}{m k e^2}, n=1, 2, 3, \dots, -$ | Ακτίνες επιτρεπόμενων τροχιών (2.6) |
|--|-------------------------------------|

Αντικαθιστώντας  $n=1$ , βρίσκουμε την τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα  $r_1$ :

$$r_1 = \frac{\hbar^2}{m k e^2}$$

Αντικαθιστώντας την τελευταία εξίσωση στη 2.6, παίρνουμε:

$$r_n = n^2 r_1$$

Αν αντικαταστήσουμε στην εξίσωση 2.3 το  $E$  με  $E_n$  και το  $r$  με  $r_n$ , παίρνουμε την ακόλουθη έκφραση για την ενέργεια του ατόμου:

$$E = -k \frac{e^2}{2r} \quad \text{ή} \quad E_n = -k \frac{e^2}{2r_n} \quad \text{ή λόγω της 2.6}$$

|  |   |
|--|---|
| $E_n = -\left(\frac{1}{n^2}\right) \frac{m k^2 e^4}{2 \hbar^2}$<br>$n=1, 2, 3, \dots, -$ | Επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας (2.7) |
|--|---|

Η μικρότερη τιμή της ενέργειας αντιστοιχεί σε  $n=1$ . Αντικαθιστώντας  $n=1$  στην εξίσωση 2.7, βρίσκουμε:

$$E_1 = -\frac{m k^2 e^4}{2 \hbar^2} \quad \text{και} \quad E_n = \frac{E_1}{n^2}$$

Αντικαθιστώντας τις τιμές των σταθερών  $m, k, e$  και  $\hbar = h / 2\pi$ , υπολογίζουμε τη μικρότερη επιτρεπόμενη ακτίνα  $r_1$  και τη μικρότερη επιτρεπόμενη ενέργεια  $E_1$ . Είναι:

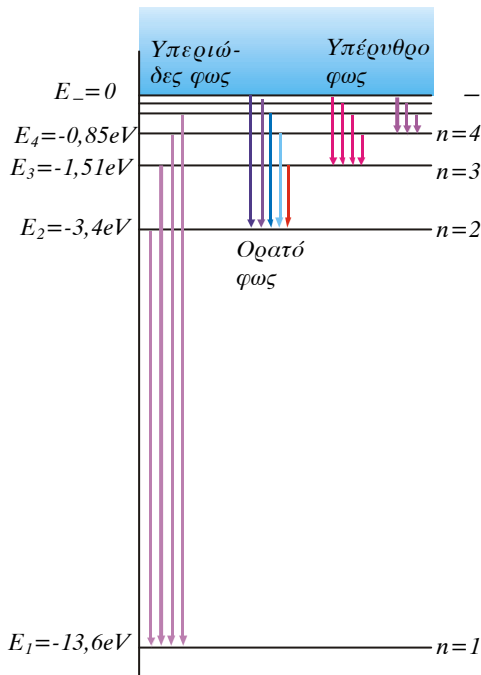
$$r_1 = 0,53 \cdot 10^{-10} \text{ m} \quad \text{και} \quad E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

Η έννοια της κβάντωσης της ενέργειας είναι σημαντική, γιατί εξηγεί ότι το ηλεκτρόνιο κινείται μόνο σε ορισμένες τροχιές καθορισμένης ενέργειας και δεν κινείται σπειροειδώς πλησιάζοντας συνεχώς προς τον πυρήνα. Επίσης η κβάντωση της ενέργειας έδωσε ώθηση στην ανάπτυξη της κβαντομηχανικής. Όμως η κβάντωση της στροφορμής, σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, έχει ιστορική μόνο σημασία.

## 2.2 ΔΙΑΚΡΙΤΕΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΤΑΘΜΕΣ

### Ενεργειακές στάθμες

Οι επιτρεπόμενες τιμές της ενέργειας του υδρογόνου και κάθε ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές στάθμες**. Οι αντίστοιχες καταστάσεις του ατόμου ονομάζονται **ενεργειακές καταστάσεις**. Η κατάσταση με τη χαμηλότερη ενέργεια  $E_1$  ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση**. Όλες οι άλλες ενεργειακές καταστάσεις  $E_2, E_3, \dots$  ονομάζονται **διεγερμένες καταστάσεις**.



**2-16** Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη.

### Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών

Παίρνουμε κατακόρυφο άξονα βαθμολογημένο σε τιμές ενέργειας και σχεδιάζουμε οριζόντιες ευθείες γραμμές στις θέσεις που αντιστοιχούν στις επιτρεπόμενες τιμές ενέργειας  $E_1, E_2, E_3, \dots$  του ηλεκτρονίου. Το σχήμα που προκύπτει είναι το **διάγραμμα των ενεργειακών σταθμών**.

Η απόσταση μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών αντιστοιχεί στη διαφορά των αντίστοιχων ολικών ενεργειών του ηλεκτρονίου. Η μετάβαση του ηλεκτρονίου από μία τροχιά σε άλλη συμβολίζεται με κατακόρυφο βέλος, που έχει αρχή την αρχική στάθμη και τέλος την τελική στάθμη.

### Διέγερση του ατόμου

Αν το άτομο του υδρογόνου που βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση απορροφήσει ενέργεια, τότε το ηλεκτρόνιο μπορεί να μεταπηδήσει σε άλλη επιτρεπόμενη τροχιά υψηλότερης ενέργειας.

**Η μετάβαση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου από μία τροχιά χαμηλής ενέργειας σε άλλη υψηλότερης ενέργειας ονομάζεται διέγερση του ατόμου.** Η ενέργεια που απαιτείται για τη διέγερση του ατόμου ονομάζεται **ενέργεια διέγερσης**.

Το διεγερμένο άτομο παραμένει στην κατάσταση διέγερσης για ελάχιστο χρονικό διάστημα (της τάξης του  $10^{-8}$  s) και επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος του ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση μπορεί να γίνει είτε απευθείας με ένα άλμα, οπότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο, είτε με περισσότερα διαδοχικά άλματα, οπότε εκπέμπονται τόσα φωτόνια όσα και τα άλματα που πραγματοποιεί.

### Ιονισμός του ατόμου

Μερικές φορές το άτομο μπορεί να απορροφήσει τόσο μεγάλη ενέργεια, ώστε είναι δυνατό το ηλεκτρόνιο του να απομακρυνθεί από τον πυρήνα, σε περιοχή που ο πυρήνας δεν ασκεί ηλεκτρική δύναμη στο ηλεκτρόνιο. Το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται οριστικά από τον πυρήνα και το άτομο μετατρέπεται σε θετικό ιόν. **Η απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου του ατόμου σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα ονομάζεται ιονισμός του ατόμου.** Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται, για να απομακρυνθεί το ηλεκτρόνιο του ατόμου από τη θεμελιώδη τροχιά σε περιοχή εκτός του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, ονομάζεται **ενέργεια ιονισμού**.

Η ενέργεια ιονισμού είναι ίση με:

$$E_{\text{iov.}} = E_{\infty} - E_1$$

όπου  $E_{\infty} = 0$  είναι η ενέργεια του ατόμου που αντιστοιχεί σε κατάσταση με  $n = \infty$  — και  $E_1$  η ενέργειά του στη θεμελιώδη κατάσταση. Επομένως:

$$E_{\text{iov.}} = - E_1$$

Για το άτομο του υδρογόνου είναι  $E_1 = -13.6 \text{ eV}$ , οπότε η ενέργεια ιονισμού είναι  $E_{\text{iov.}} = 13.6 \text{ eV}$ .