Θεμελιώδεις Νόμοι της Χημείας

Richter: Ο Νόμος ισοδύναμων Μαζών (1792)

(1762-1807)

- Όταν 2 στοιχεία ενώνονται με την ίδια μάζα τρίτου στοιχείου, τότε η αναλογία μαζών τους είναι ίδια ή απλό πολλαπλάσιο της αναλογίας με την οποία ενώνονται μεταξύ τους.

1 g Na ενώνεται με → 1,54 g Cl προς NaCl

1 g Na ενώνεται με → 5,52 g I προς NaI

5,52/1,54=3,58

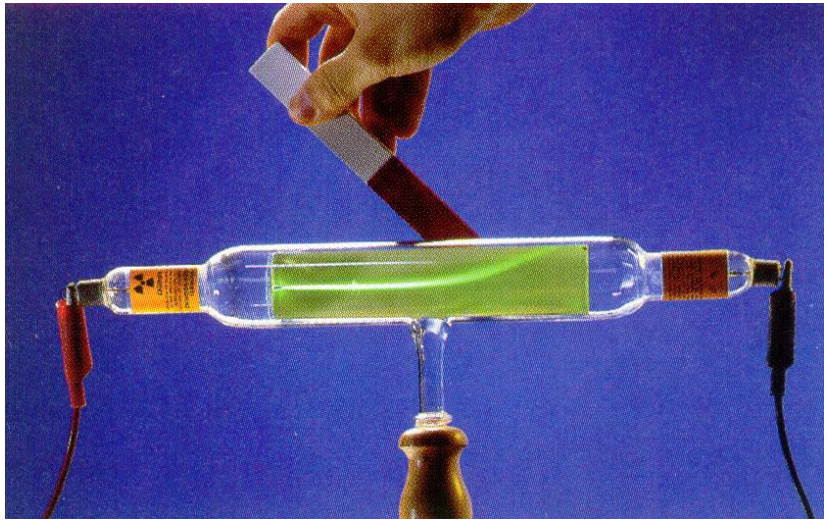
3,58/3,58 = 1

1 g I ενώνεται με → 0,28 g Cl προς ICl

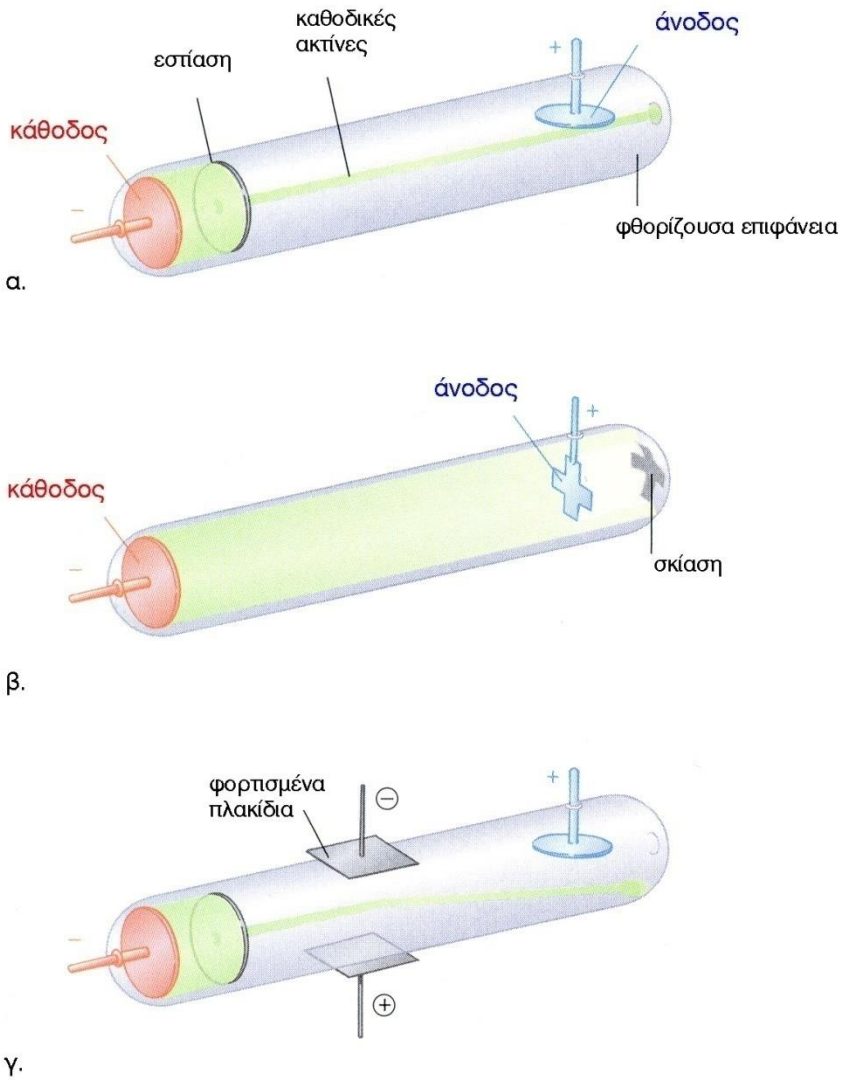
1/0,28= 3,58

Το ηλεκτρόνιο

Το 1897 ο Άγγλος φυσικός **Thomson** ανακάλυψε ότι η εφαρμογή υψηλού δυναμικού σε σωλήνα υψηλού κενού που περιέχει δύο ηλεκτρόδια προκαλεί ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ των δύο ηλεκτροδίων και εκπέμπεται ένα πράσινο φως (**καθοδικές ακτίνες**) από την κάθοδο. Αυτές οι καθοδικές ακτίνες, αποτελούμενες από στοιχειώδη σωματίδια, τα οποία ο Thomson ονόμασε **ηλεκτρόνια**, κινούνται προς την άνοδο.

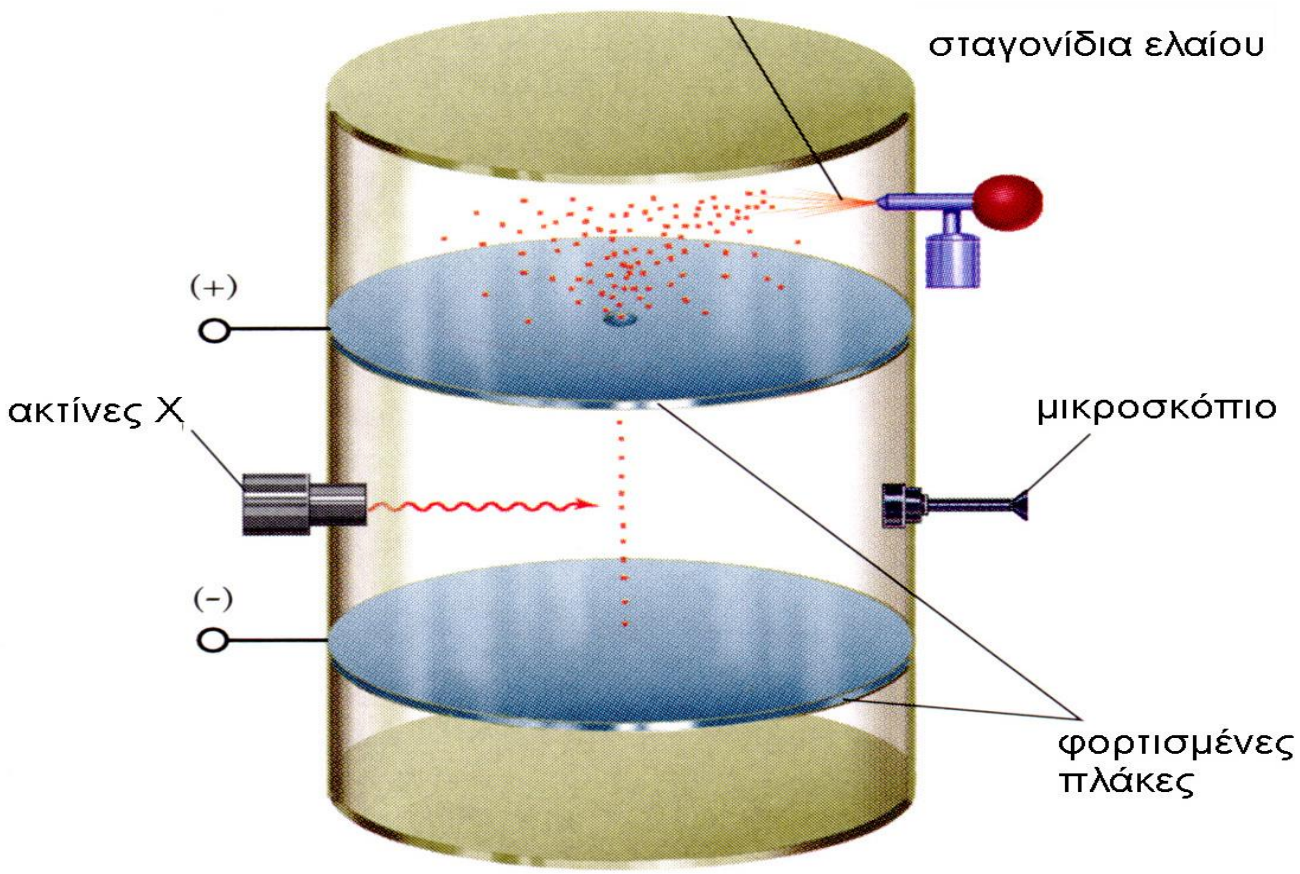


Το ηλεκτρόνιο



Ο Thomson κάνοντας μία σειρά τέτοιων πειραμάτων διερεύνησε τη φύση των ηλεκτρονίων και προσδιόρισε το λόγο φορτίου προς μάζα του ηλεκτρονίου e/m ($1{,}75882\ 10^{8}$ C g^{-1}).

Πείραμα Millikan



- Το ηλεκτρικό φορτίο του ηλεκτρονίου είναι ίσο με τη μονάδα του στοιχειώδες αρνητικού φορτίου, $1{,}60218\ 10^{-19}$ C,
- και η μάζα του με $9{,}10940\ 10^{-28}$ g.

Το πρωτόνιο

- Το 1886 ο Γερμανός Goldstein ανακάλυψε στους σωλήνες των καθοδικών ακτίνων την ύπαρξη δέσμης θετικά φορτισμένων σωματιδίων που ονόμασε θετικές ακτίνες.

- Η θετική αυτή δέσμη σωματιδίων κινείται ευθύγραμμα από την άνοδο προς την κάθοδο (αντίθετα δηλαδή προς τις καθοδικές ακτίνες) και εκτρέπεται επίσης αντίθετα από τις καθοδικές ακτίνες από ένα ηλεκτρικό πεδίο.

Το πρωτόνιο

- Όταν στους σωλήνες των καθοδικών ακτίνων υπήρχε μερική πίεση αέριου υδρογόνου τότε οι θετικές ακτίνες που δημιουργούνταν αποτελούνταν από πρωτόνια (H^+). Το πρωτόνιο δηλαδή είναι αυτό που απομένει από το άτομο του υδρογόνου αφού απομακρυνθεί το μοναδικό του ηλεκτρόνιο.

- Με ανάλογα πειράματα που έγιναν για το ηλεκτρόνιο προσδιορίστηκε ο λόγος φορτίου προς μάζα του πρωτονίου e/m ($9{,}7591\ 10^4$ C g^{-1}). Το ηλεκτρικό φορτίο του πρωτονίου είναι ίσο με τη μονάδα του στοιχειώδες θετικού φορτίου, $1{,}60218\ 10^{-19}$ C, και η μάζα του με $1{,}6726\ 10^{-24}$ g.

- Η μάζα του πρωτονίου είναι σχεδόν 1837 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

Το νετρόνιο

- Η ανακάλυψη του νετρονίου έγινε πολύ αργότερα, το 1932 από τον Άγγλο Chadwick λόγω της ηλεκτρικής ουδετερότητας του σωματιδίου αυτού, πράγμα που καθιστούσε δύσκολη την ταυτοποίησή του.

- Κατά το βομβαρδισμό ορισμένων ελαφριών στοιχείων, όπως του βυρηλλίου (Be), με ακτίνες α (πυρήνες Ηλίου), εκπέμπεται μία πολύ ισχυρή και διεισδυτική ακτινοβολία, η οποία αποτελείται από ουδέτερα σωματίδια, τα νετρόνια, με μάζα ίση περίπου αυτής των πρωτονίων, τα οποία αποτελούν προϊόντα της ακόλουθης πυρηνικής αντίδρασης.

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n$$

- Η μάζα του νετρονίου, που προσδιορίστηκε με βάση την παραπάνω αντίδραση των σωματιδίων της αντίδρασης, είναι ίση με $1{,}6750\ 10^{-24}$ g. Μάζα n = 1,0067 x μάζα p.

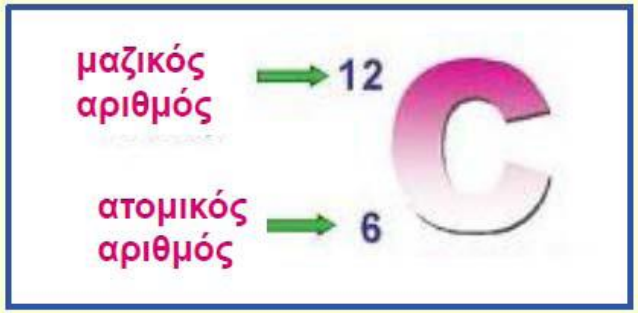
Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Ατομικός αριθμός (Z)

αριθμός πρωτονίων του πυρήνα

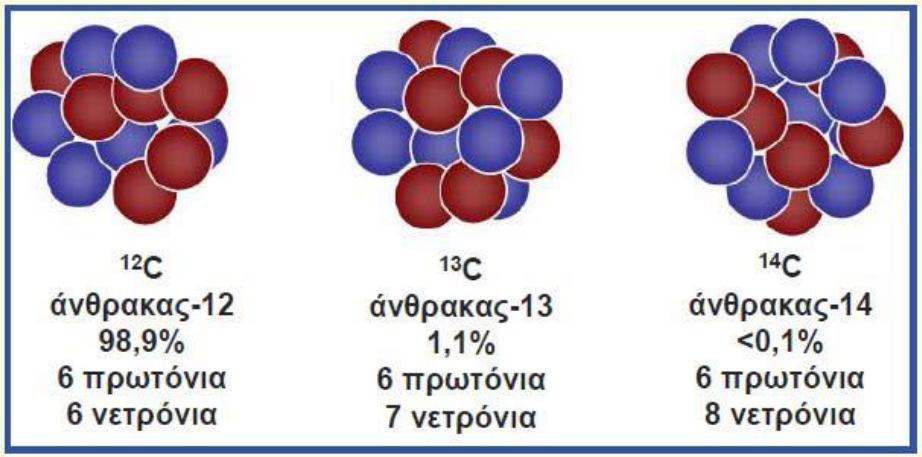
Μαζικός αριθμός (A)

αριθμός πρωτονίων και νετρονίων του πυρήνα



Ισότοπα

Άτομα των οποίων οι πυρήνες έχουν τον ίδιο ατομικό, αλλά διαφορετικό μαζικό αριθμό



Ασκήσεις

1) Ποιο είναι το νουκλιδικό σύμβολο για τον πυρήνα που περιέχει 34 πρωτόνια και 45 νετρόνια;

2) Έχετε τα δεδομένα του διπλανού πίνακα.

i) Ποιο άτομο είναι ισότοπο του Α;

ii) Ποιο άτομο έχει τον ίδιο μαζικό αριθμό με το Α;

Στοιχείο	p	n
Α	18	19
Β	16	19
Γ	18	18
Δ	17	20

3) Να κατατάξετε τα παρακάτω ισότοπα κατά σειρά (i) αυξανόμενου αριθμού ηλεκτρονίων, (b) αυξανόμενου αριθμού νετρονίων και (c) αυξανόμενης μάζας.

$^{112}_{50}Sn$, $^{22}_{10}Ne$, $^{122}_{52}Te$, $^{59}_{29}Cu$, $^{120}_{48}Cd$, $^{58}_{27}Co$

4) Δίνονται τα νουκλίδια:

$^{136}_{54}Xe$, $^{133}_{55}Cs$, $^{136}_{56}Ba^{2+}$, $^{138}_{56}Ba$, $^{139}_{56}Ba$, $^{138}_{57}La$, $^{139}_{57}La$, $^{136}_{58}Ce^{3+}$, $^{138}_{58}Ce^{4+}$

Ποια από αυτά είναι ισότοπα; Ποια ισοβαρή; Από ποια στοιχειώδη σωματίδια αποτελείται το νουκλίδιο $^{136}_{56}Ba^{2+}$;

Ασκήσεις

5) Ένα μονοατομικό ιόν έχει φορτίο +3.Το αντίστοιχο άτομο έχει μαζικό αριθμό 45. Ο αριθμός νετρονίων του πυρήνα είναι 1,142 φορές μεγαλύτερος από τον αριθμό των πρωτονίων. Πόσα ηλεκτρόνια έχει το ιόν; Για ποιο στοιχείο πρόκειται;

Θεωρίες περί ατομικών προτύπων

- Από την στιγμή που ταυτοποιήθηκε η ύπαρξη αυτών των υποατομικών σωματιδίων άρχισαν να διατυπώνονται διάφορες θεωρίες σχετικά με το πως αυτά τα σωματίδια συμμετέχουν στη δημιουργία του ατόμου.

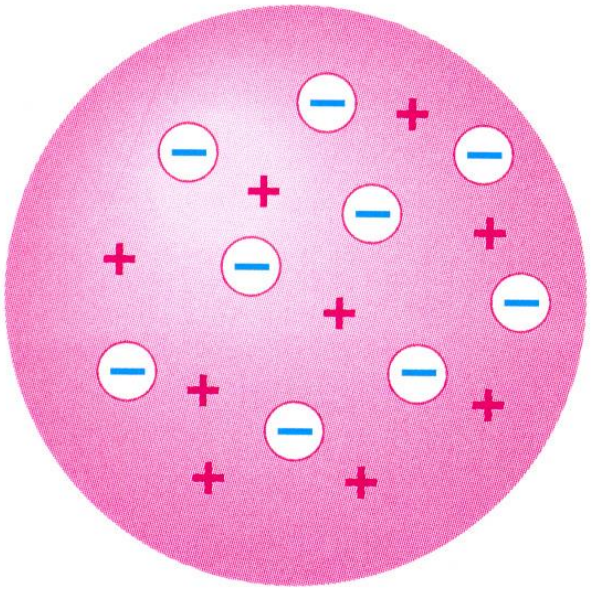
- Thomson (1898)
- Rutherford (1911)

Ατομικό μοντέλο του Thomson (1898)

- Το άτομο αποτελείται από θετικά και αρνητικά σωματίδια.

- Το θετικό φορτίο είναι ομοιόμορφα συγκεντρωμένο πάνω στην επιφάνεια μίας σφαίρας, μέσα στην οποία κινούνται τα ηλεκτρόνια

ατομικό μοντέλο σταφιδόψωμου

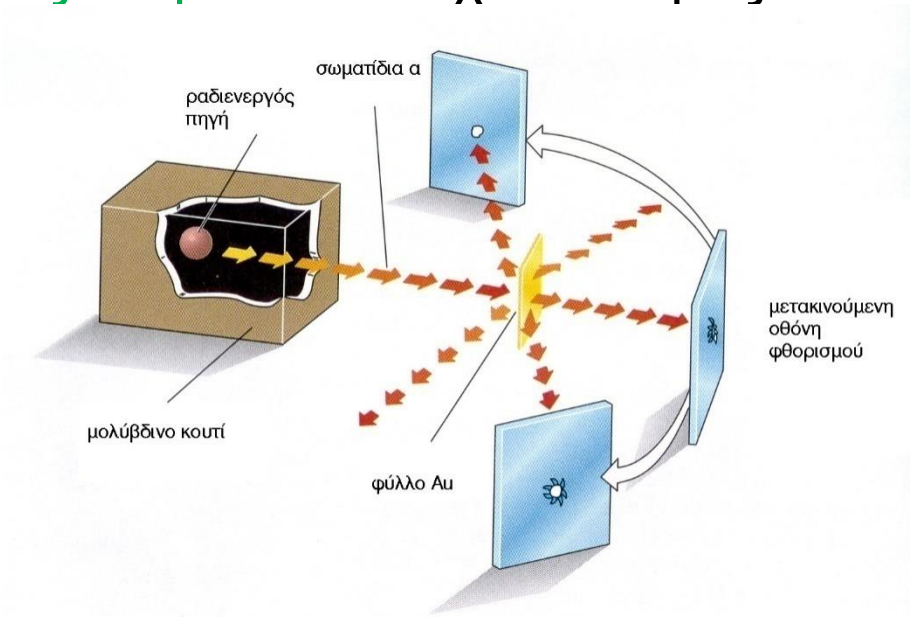


Ατομική Θεωρία του Rutherford (1911)

Ο Νέοζηλανδός φυσικός **Rutherford** διεξήγαγε πειράματα βομβαρδισμού χρυσού με ακτίνες α και παρατήρησε την σκέδαση των σωματίων α πάνω σε μία φθορίζουσα οθόνη.

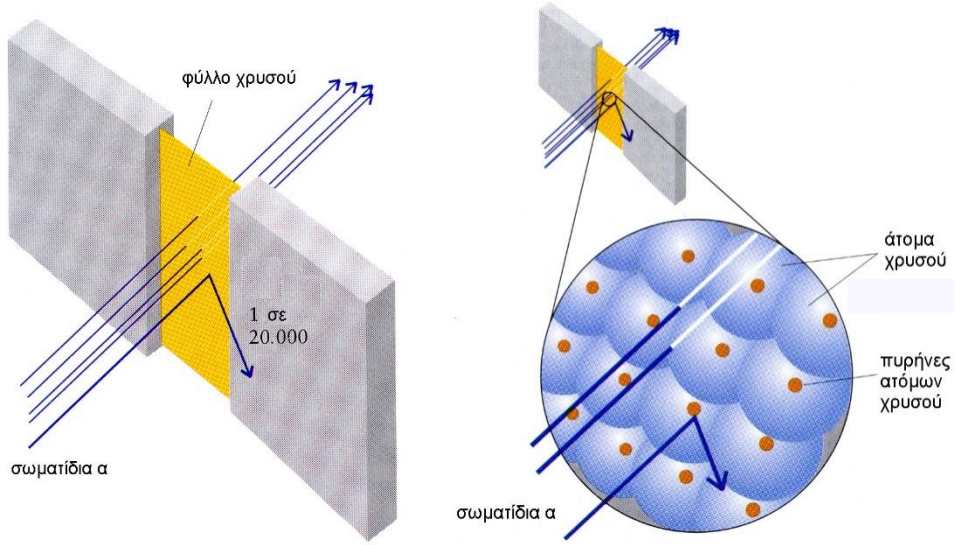
- Τα πιο πολλά από τα σωμάτια α περνούσαν μέσα από το φύλλο του χρυσού ανεπηρέαστα (περίπου 99.9%)
- 1 στα 1000 απέκλινε σημαντικά της ευθύγραμμης πορείας.
- Ένας πολύ μικρότερος αριθμός εκτρεπόταν σχεδόν προς τα πίσω.

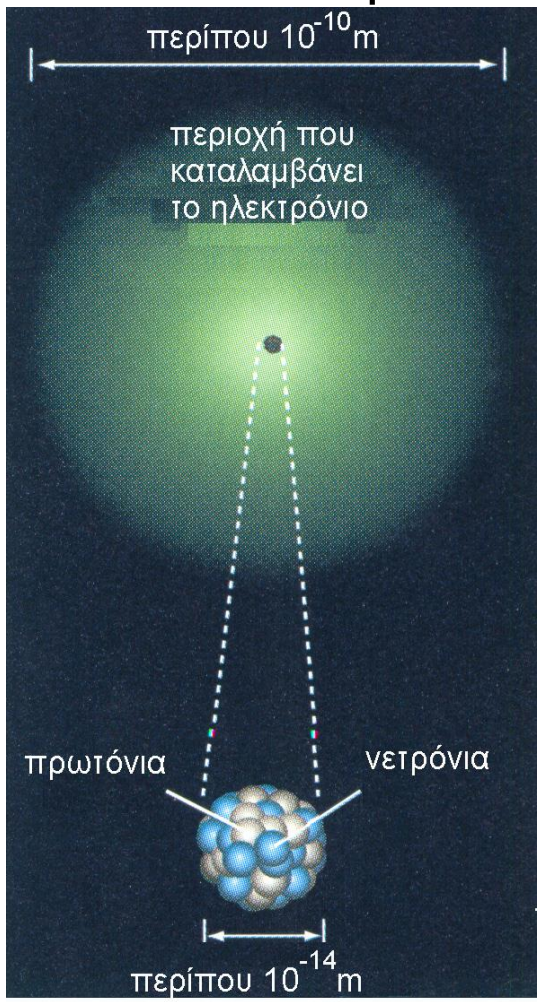
Πείραμα των Geiger-Marsden



Ατομική Θεωρία του Rutherford (1911)

- Η σκέδαση των σωματίων α οφείλεται στον θετικά φορτισμένο πυρήνα του ατόμου του χρυσού, που είναι στο κέντρο του ατόμου

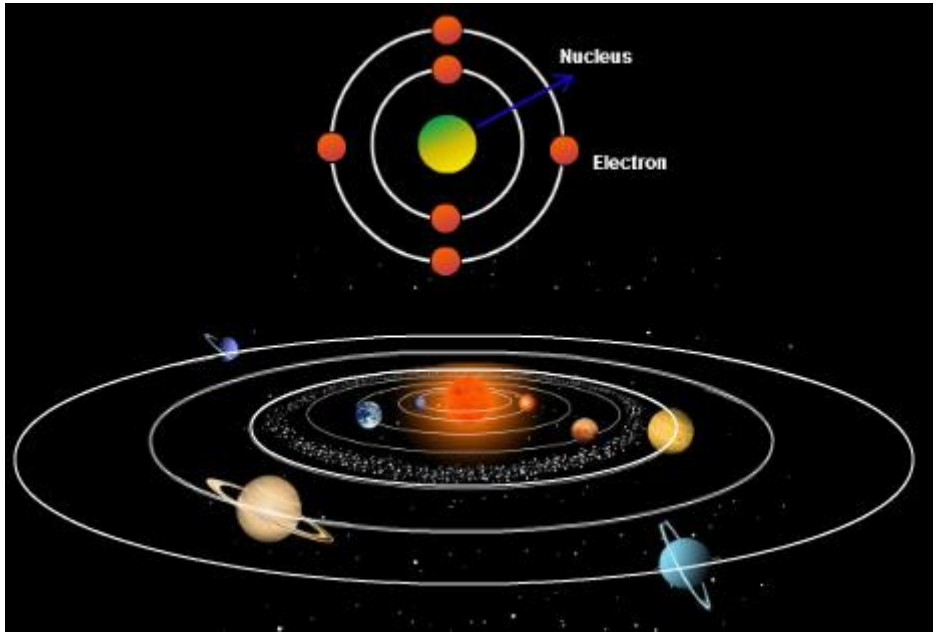




Ατομικό πρότυπο Rutherford – Πλανητικό Σύστημα

Ο πυρήνας, στον οποίο είναι συγκεντρωμένη όλη σχεδόν η μάζα και το θετικό φορτίο του ατόμου, καταλαμβάνει τη θέση του ήλιου

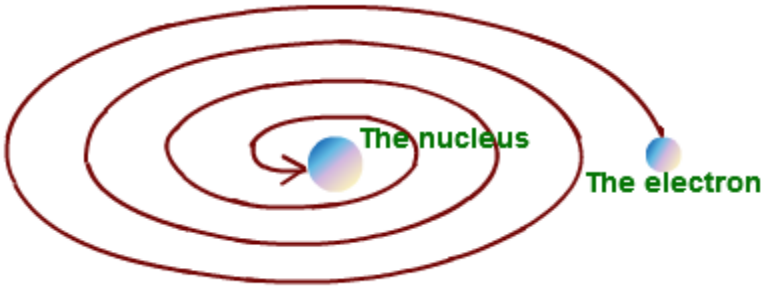
Τα ηλεκτρόνια κατέχουν τη θέση των πλανητών και κινούνται σε τυχαίες κυκλικές τροχιές.



Ατομικό πρότυπο Rutherford – Πλανητικό Σύστημα

- Μειονεκτήματα

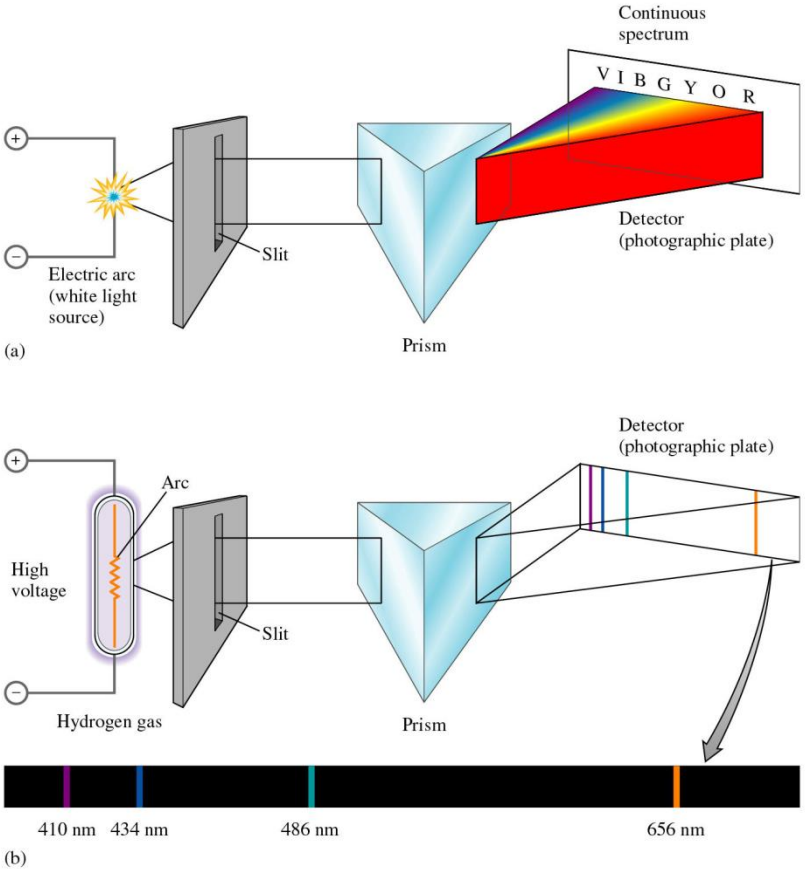
- Τα ηλεκτρόνια κινούμενα με επιταχυνόμενη κίνηση θα έπρεπε (Maxwell) να εκπέμπουν συνέχεια ενέργεια με μορφή ακτινοβολίας και έτσι διαγράφοντας ελικοειδή τροχιά τελικά να προσπίπτουν στον πυρήνα.



Ατομικό πρότυπο Rutherford – Πλανητικό Σύστημα

Μειονεκτήματα

- Η συνεχόμενη μείωση της ενέργειας των ηλεκτρονίων θα είχε ως συνέπεια τη συνεχή μείωση της συχνότητας της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας με συνέπεια τα φάσματα εκπομπής των ατόμων να είναι συνεχή κάτι το οποίο δεν παρατηρείται. Τα φάσματα εκπομπής των ατόμων είναι γραμμικά.



Ατομικό πρότυπο του Bohr (1913)

πρώτη συνθήκη του Bohr (μηχανική συνθήκη)

- τα ηλεκτρόνια κινούνται σε ορισμένες μόνο κυκλικές τροχιές, οι οποίες έχουν καθορισμένες ενέργειες δηλαδή είναι κβαντισμένες ενεργειακά. Η στροφορμή των ηλεκτρονίων είναι ακέραια πολλαπλάσια του h/2π σύμφωνα με τη συνθήκη:

$$m\,u\,r = n\,h/2\pi$$

- Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου (άθροισμα κινητικής και δυναμικής ενέργειας) στο άτομο του υδρογόνου δίνεται από τη σχέση:

$$E_n = (-\,2{,}18\ 10^{-18}/n^2)\ J$$

Ατομικό πρότυπο του Bohr (1913)

Δεύτερη συνθήκη του Bohr (οπτική συνθήκη)

- τα ηλεκτρόνια (σε κάθε καθορισμένη τροχιά) έχουν καθορισμένη ενέργεια και κατά τη κίνησή τους δεν εκπέμπουν ακτινοβολία. Ακτινοβολία εκπέμπεται από το άτομο μόνο όταν ένα ηλεκτρόνιο του μεταπηδήσει από μία τροχιά ορισμένης ενέργειας ($E_{αρχ}$) σε μία άλλη τροχιά μικρότερης ενέργειας ($E_{τελ}$).

- Η συχνότητα της ακτινοβολίας που εκπέμπεται κατά την διάρκεια αυτής της μεταπήδησης του ηλεκτρονίου δίνεται από τη ακόλουθη σχέση:

$$\Delta E = |E_f - E_i| = h\nu$$

$$\Delta E = \left| 2{,}18 \quad 10^{18} \left(\frac{1}{n_f^2} \quad \frac{1}{n_i^2}\right) \right|$$

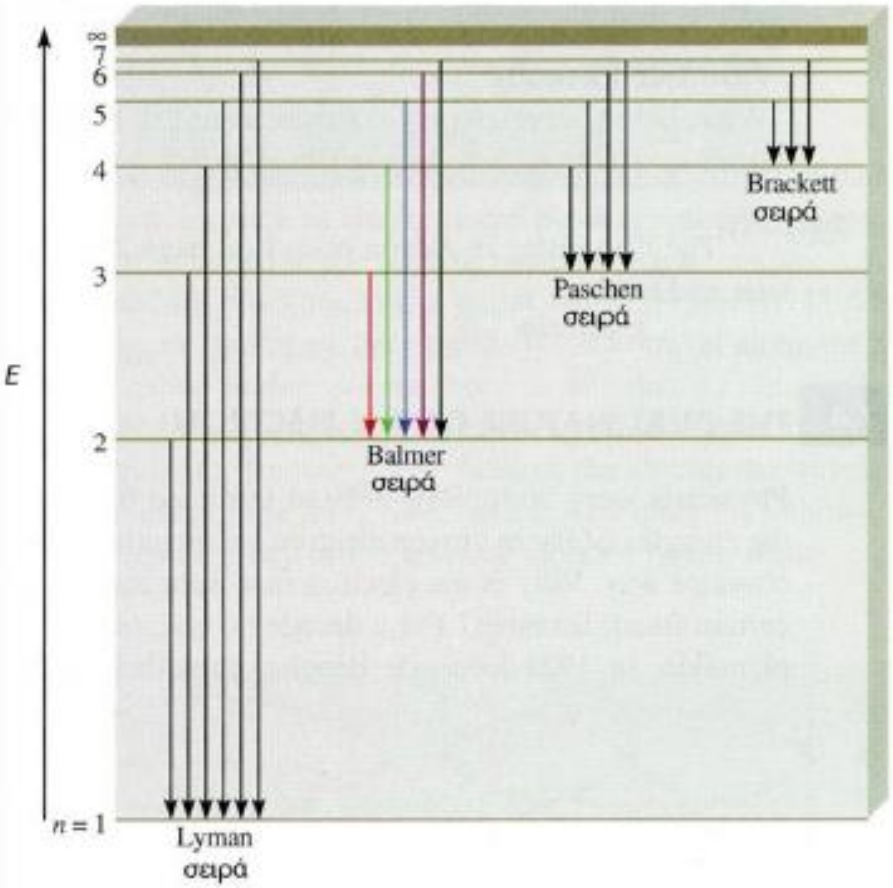
$$\nu = \left| \frac{-2{,}18 \cdot 10^{-18}}{h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right) \right|$$

Ατομικό πρότυπο του Bohr (1913)

Μειονεκτήματα

- Μπορεί να εξήγησε πλήρως το φάσμα του μονοηλεκτρονιακού ατόμου Η και των υδρογονοειδών ιόντων (He^{+} και Li^{2+}), παραταύτα δεν μπόρεσε να εμφαρμοστεί με επιτυχία σε πολυηλεκτρονικά άτομα.

Ατομικό πρότυπο του Bohr (1913)



Τύπος Balmer

$$\frac{1}{\lambda} = R_H\left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2}\right)$$

Σταθερά Rydberg

$R_H = 1.09678\ 10^{-7}\ m^{-1}$

Ασκήσεις

1. Κατά τη διέγερση ενός ατόμου υδρογόνου, ηλεκτρόνιο μεταπηδά από την ενεργειακή στάθμη με n= 1 στην ενεργειακή στάθμη με n = 4. Ποια από τα παρακάτω δεδομένα είναι εσφαλμένο;

i. Η ενεργειακή στάθμη με n = 4 αποτελεί την πρώτη διεγερμένη κατάσταση του ατόμου του υδρογόνου.

ii. Χρειάζεται λιγότερη ενέργεια για να ιονιστεί ένα διεγερμένο άτομο υδρογόνου από ότι όταν το άτομο είναι στη θεμελιώδη του κατάσταση.

iii. Το ηλεκτρόνιο όταν βρίσκεται σε κατάσταση διέγερσης είναι κατά μέσο όρο πιο μακριά από τον πυρήνα.

iv. Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά την μετάπτωση ηλεκτρονίου από n= 4 σε n =3 είναι μικρότερη αυτής που προκύπτει κατά την μετάπτωση ηλεκτρονίου από n = 3 σε n = 2.

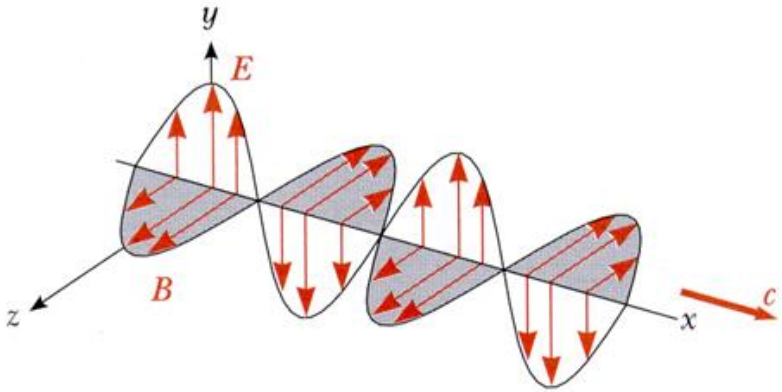
Ασκήσεις

2) Το άτομο του υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση. Πόση ενέργεια πρέπει να απορροφήσει ώστε να μεταβεί στην τροχιά που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n = 3;
3) Να υπολογιστεί το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας κατά τη μετάπτωση του ηλεκτρονίου από την τροχιά με n = 4 στην τροχιά με n = 2 στο άτομο του υδρογόνου. Δίνονται: $h = 6{,}63\ 10^{-34}$ J s, $c = 3\ 10^{8}$ m/s.
4) Πόση είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ιοντισμό: α) του ατόμου του υδρογόνου, β) 1 mol ατόμων υδρογόνου.
5) Ποια ηλεκτρονιακή μετάπτωση στο άτομο Η, που καταλήγει στην τροχιά n=5, θα δώσει φωτόνια μήκους κύματος 3740nm;
6) Για το ηλεκρόνιο του ατόμου του υδρογόνου δίνονται οι μεταπτώσεις: (α) από την στοιβάδα με n=4 στην στοιβάδα με n=2 και (β) από την στοιβάδα με n= 5 στην στοιβάδα με n=3. Σε ποια περίπτωση εκπέμπεται περισσότερη ενέργεια;

Από τι αποτελείται το Φως (1873)

- Ο James Maxwell έδειξε θεωρητικά ότι το ορατό φως αποτελείται από ηλεκτρομαγνητικά κύματα.

- Ηλεκτρομαγνητικό κύμα είναι η ταυτόχρονη διάδοση, μέσω της ταχύτητας του φωτός (c), ενός ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου. Τα διανύσματα του ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου είναι κάθετα μεταξύ τους και κάθετα στη διεύθυνση διάδοσης του κύματος.



Φως

- ✓ Φως είναι ένα είδος ακτινοβολίας.

- ✓ Ακτινοβολία είναι η εκπομπή και διάδοση ενέργειας μέσα στο χώρο υπό τη μορφή κυμάτων.

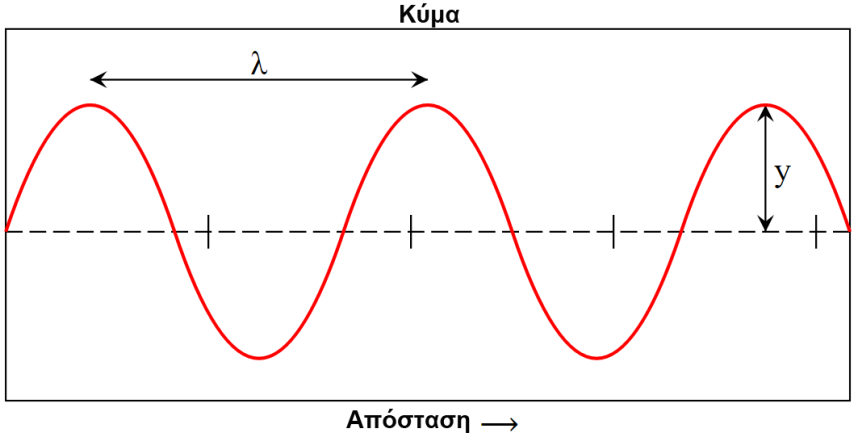
- ➢ Το φως μπορεί να θεωρηθεί είτε σαν κύμα ή σαν σωματίδιο (διττή φύση του φωτός).

- ➢ Τα σωματίδια του φωτός ονομάζονται φωτόνια και αποτελούν μικροσκοπικά ενεργειακά πακέτα (κβάντα)

Κύμα - Μήκος Κύματος (λ)

- Κύμα ονομάζεται κάθε μηχανισμός διάδοσης μιας διαταραχής που μεταφέρει ενέργεια και ορμή με ορισμένη ταχύτητα

- Το μήκος κύματος (λ) είναι: η απόσταση που διανύει το κύμα για χρόνο ίσο με την περίοδο



ταχύτητα διάδοσης

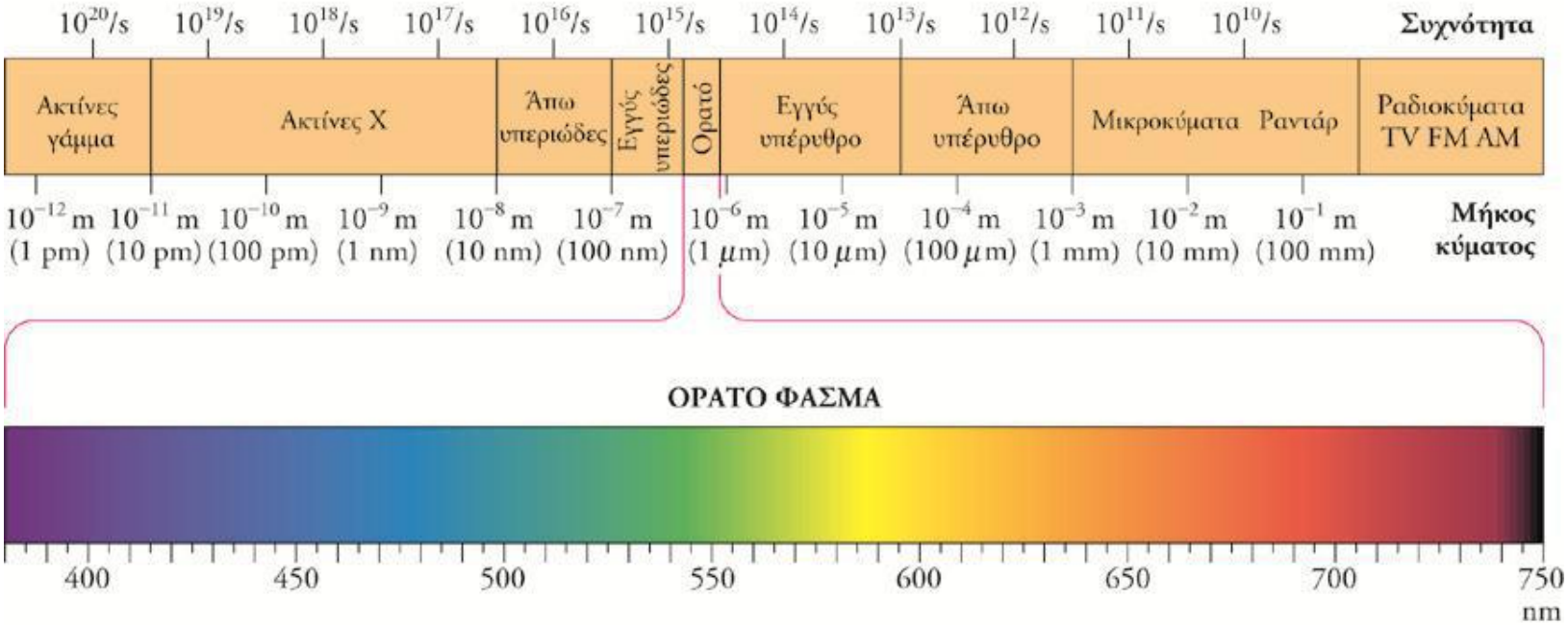
$c = 2{,}997925 \times 10^{10}$ cm/s

- Συνδέεται με τη συχνότητα (ν) μέσω της ταχύτητας του φωτός

$$\nu = c/\lambda$$

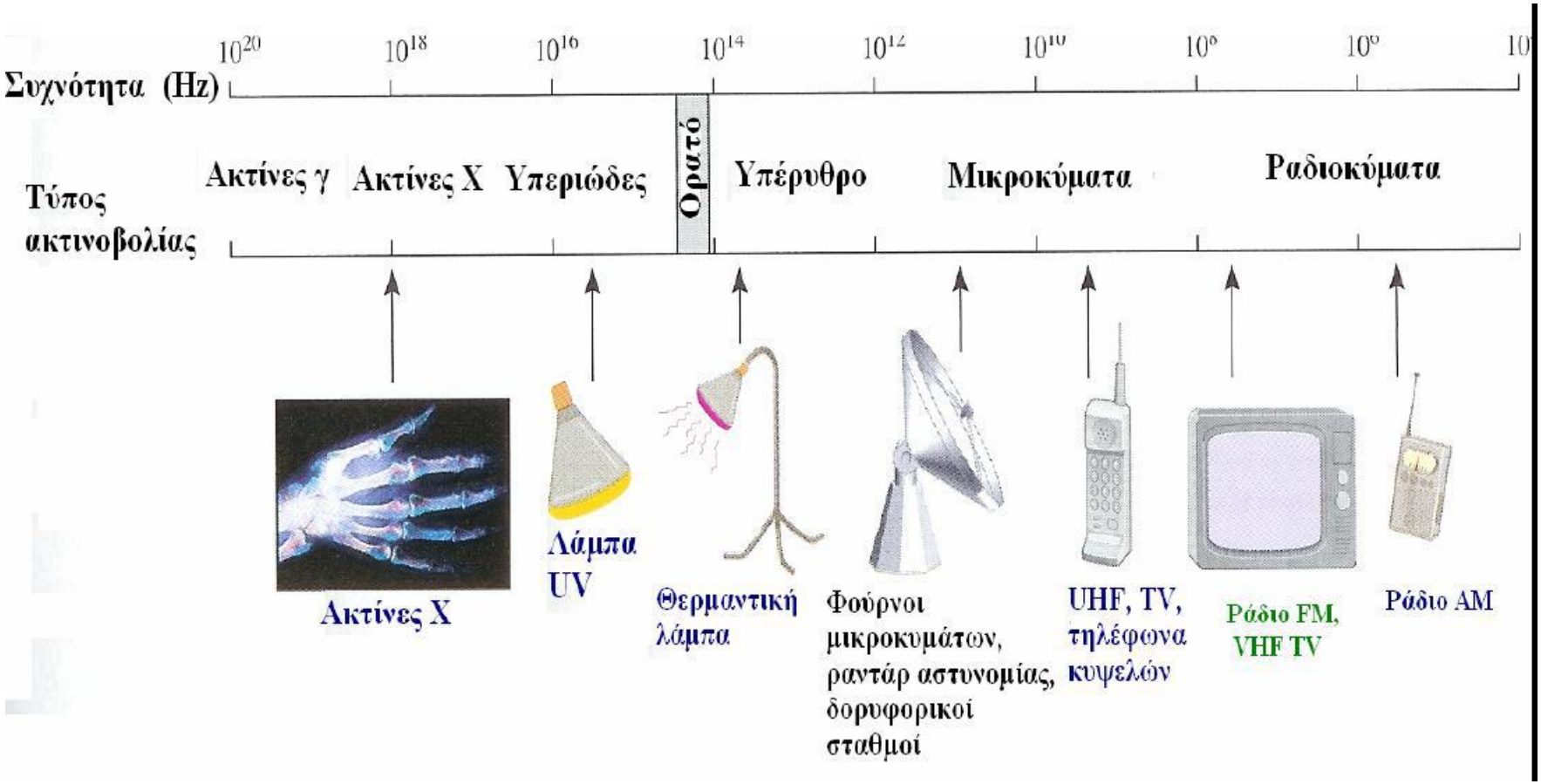
- Συχνότητα (ν) είναι ο αριθμός των εναλλαγών της ταλάντωσης ανά s, μονάδες: s^{-1} ή Hz
- Περίοδος (T), το χρονικό διάστημα στο οποίο η κυματική εικόνα επαναλαμβάνεται, $T = 1/\nu$

Ηλεκτρομαγνητική Ακτινοβολία

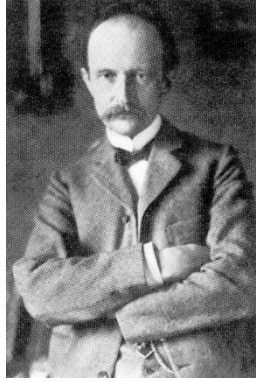


- ✓ Το ορατό φάσμα (Vis) αποτελεί ένα ελάχιστο τμήμα του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- ✓ Ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλών συχνοτήτων (μεγάλες ενέργειες) έχουν μικρά μήκη κύματος και αντίστροφα
- ✓ Τα όρια των διαφόρων περιοχών δεν καθορίζονται επακριβώς

Εφαρμογές


Συχνότητα (Hz)
10^{20}
10^{18}
10^{16}
10^{14}
10^{12}
10^{10}
10^{8}
10^{6}
Τύπος ακτινοβολίας
Ακτίνες γ
Ακτίνες Χ
Υπεριώδες
Ορατό
Υπέρυθρο
Μικροκύματα
Ραδιοκύματα
Ακτίνες Χ
Λάμπα UV
Θερμαντική λάμπα
Φούρνοι μικροκυμάτων, ραντάρ αστυνομίας, δορυφορικοί σταθμοί
UHF, TV, τηλέφωνα κυψελών
Ράδιο FM, VHF TV
Ράδιο AM

Η κβάντωση της ενέργειας του Planck (1900)

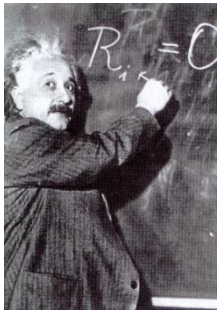


- Παρατηρώντας την ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα θερμό σώμα, το οποίο βρίσκεται σε διαφορετικές θερμοκρασίες, κατέληξε στον τύπο για την ενέργεια της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα υλικό:

$$\mathbf{E = n}\boldsymbol{hv}\mathbf{,\ n = 1,2,3,4,\ldots}$$

• Όπου $\boldsymbol{h}$ = 6,63 x 10^{-34} J s και $\boldsymbol{v}$ η συχνότητα της ακτινοβολίας.

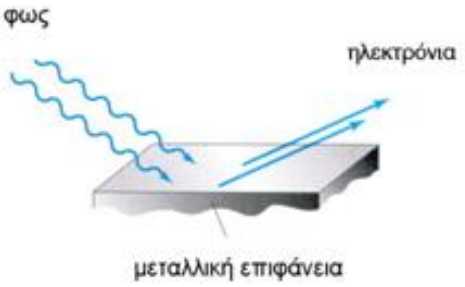
• Η ακτινοβολία από ένα υλικό εκπέμπεται όχι με συνεχή τρόπο, αλλά σε «πακέτα» ενέργειας *hv* (κβάντα), η τιμή των οποίων εξαρτάται από την v της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.

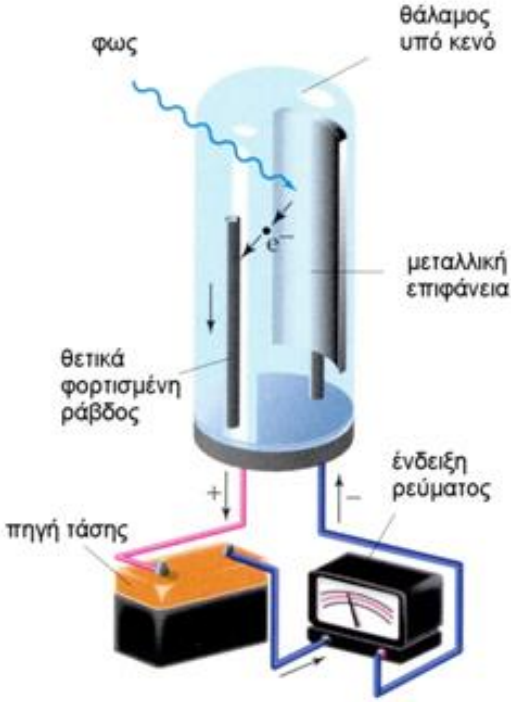


Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο του Einstein (1921)

Ο Einstein επέκτεινε τη θεωρία του Planck.

- Όταν πάνω σε μία επιφάνεια ενός μετάλλου προσπίπτει φως (φωτόνια) συγκεκριμένης συχνότητας τότε εκπέμπονται ηλεκτρόνια.





Διττή φύση του φωτός: σωματιδιακή και κυματική

- Υπέθεσε ότι εάν για οποιοδήποτε λόγο μεταβληθεί η ενέργεια ενός ατόμου κατά *hν*, τότε αυτή η μεταβολή της ενέργειας θα εκπεμφθεί υπό τη μορφή φωτεινής ενέργειας.
- Το φως αποτελείται από κβάντα ενέργειας (φωτόνια), δηλαδή από σωματίδια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας με ενέργεια ίση με: $E = h\nu$.

✓ Για να γίνει πλήρης περιγραφή του φωτός απαιτείται να λάβουμε υπόψη μας τόσο την σωματιδιακή όσο και την κυματική του φύση.

➢ Ενέργεια του σωματιδίου φωτός (φωτόνιο), $E = mc^2$

➢ Συχνότητα του κύματος αυτής της ενέργειας, $E = h\nu$

Κυματική θεωρία της ύλης του de Broglie (1924)

- Κάθε κινούμενο μικρό σωματίδιο, π.χ. ηλεκτρόνιο, παρουσιάζει διττή φύση, σωματιδίου και κύματος.

$$\lambda = \frac{h}{m\,u} = \frac{h}{p}$$

εξίσωση de Broglie

- όπου *m*: ιδιότητα σωματιδίου
  λ: ιδιότητα κύματος
  u: κοινή ιδιότητα σωματιδίου και κύματος (ταχύτητα σωματιδίου, ταχύτητα διάδοσης κύματος).

Απόδειξη της εξίσωσης de Broglie

$E = h\,v$ ή $E = h\,c/\lambda$ (1)

η εξίσωση του Einstein: $E = m\,c^2$ (2)

Από τις σχέσεις (1) ^ (2) προκύπτει:

$$h\,c/\lambda = m\,c^2$$

οπότε, $\lambda = h/(mc)$

ή $\lambda = h/(mu) = h/p$, *για το ηλεκτρόνιο*

Τι είναι το ηλεκτρόνιο; Σωματίδιο ή κύμα;

- Η απάντηση είναι: ούτε σωματίδιο, ούτε κύμα, αλλά μια σύνθεση που εμπεριέχει ταυτόχρονα και τις σωματιδιακές και τις κυματικές ιδιότητες.

Αρχή της αβεβαιότητας (απροσδιοριστίας) του Heisenberg (1927)

- **Είναι αδύνατο να προσδιορισθεί με ακρίβεια συγχρόνως η θέση και η ορμή ενός μικρού σωματιδίου, π.χ. ηλεκτρονίου.**

➢ Όσο μεγαλύτερη ακρίβεια υπάρχει στον προσδιορισμό της θέσης ενός σωματιδίου τόσο μεγαλύτερο είναι το σφάλμα (μεγαλύτερη η αβεβαιότητα) στον προσδιορισμό της ορμής του.

$$\Delta x \,.\, \Delta p \;\geq\; h \,/\, 4\pi$$

- ***Αν υποθέσουμε ότι γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια τη θέση ενός μικρού σωματιδίου, δηλαδή Δx=0, τότε έχουμε απόλυτη άγνοια για την ορμή αυτού, δηλαδή Δp=∞.***
- ***Επίσης, αν γνωρίζουμε με απόλυτη ακρίβεια την ορμή ενός μικρού σωματιδίου, δηλαδή Δp=0, τότε έχουμε απόλυτη άγνοια για τη θέση που βρίσκεται το σωματίδιο, δηλαδή Δx=∞.***

Άσκηση

- Να υπολογισθεί η αβεβαιότητα στη θέση του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Δίνονται: η μέση ταχύτητα κίνησης του ηλεκτρονίου, $5x10^{6}$ m/s, με μία αβεβαιότητα 1% και η μάζα του ηλεκτρονίου $9,11x10^{-31}$ Kg. Σταθερά Planck, $6,63x10^{-34}$ J s.
- Να υπολογισθεί η αβεβαιότητα στον προσδιορισμό της ταχύτητας ενός σώματος μάζας 1g και ενός ηλεκτρονίου, όταν η αβεβαιότητα της θέσεως είναι 10^{-8} cm. Ποιο συμπέρασμα εξάγεται από το αποτέλεσμα; θέση του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου. Δίνονται: η μάζα του ηλεκτρονίου $9,11x10^{-31}$ Kg. Σταθερά Planck, $6,63x10^{-34}$ J s.

Κυματική εξίσωση του Schrödinger (1926)

- *Για την περιγραφή του ηλεκτρονίου χρησιμοποίησε μια* **κυματοσυνάρτηση** *σε αναλογία με την εξίσωση κύματος που χρησιμοποιείται για την περιγραφή ενός μηχανικού ή ηλεκτρομαγνητικού κύματος.*

$$H\,\Psi = E\,\Psi$$

- *Η κυματοσυνάρτηση αυτή συμβολίζεται με Ψ και είναι μια συνάρτηση της θέσης, του χρόνου και του μήκους κύματος*

$$\Psi = f(x, y, z, t, \lambda).$$

Κυματική εξίσωση του Schrödinger για το άτομο του υδρογόνου (1926)

$$\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}+\frac{8\pi^2 m\,E\kappa}{h^2}\Psi=0$$

- Η πιο πάνω εξίσωση προκύπτει από την

$$\frac{-h^2}{8\pi^2 m}\left(\frac{\partial^2\Psi}{\partial x^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial y^2}+\frac{\partial^2\Psi}{\partial z^2}\right)+V\Psi=E\Psi$$