

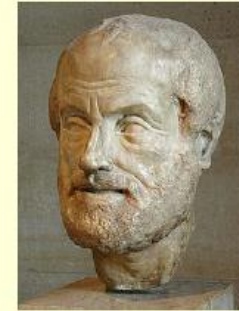
Η ΑΤΟΜΙΚΗ ΥΠΟΘΕΣΗ ΤΟΥ ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΥ (400 π.χ.)

- ✓ Η ύλη αποτελείται από μικροσκοπικά, αόρατα σωματίδια, τα οποία δεν μπορούν να διασπασθούν σε μικρότερα σωματίδια.
- ✓ Τα σωματίδια διαφέρουν ως προς το μέγεθος, το σχήμα και το βάρος.
- ✓ Υπάρχει κενός χώρος μεταξύ των σωματιδίων.
- ✓ Τα σωματίδια βρίσκονται σε συνεχή κίνηση μέσα στον κενό χώρο και συγκρούονται μεταξύ τους.
- ✓ Μετά τη σύγκρουση τα άτομα μπορούν να αποχωριστούν ή να ενωθούν.

ΙΣΤΟΡΙΚΗ ΑΝΑΔΡΟΜΗ

Αριστοτέλης

- Απέριψε την ατομική υπόθεση

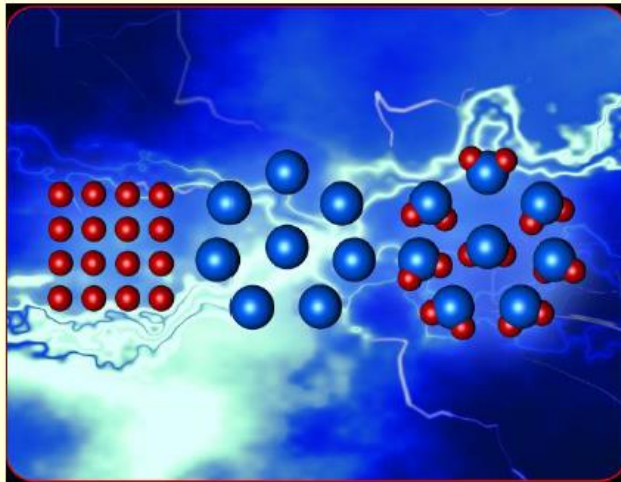
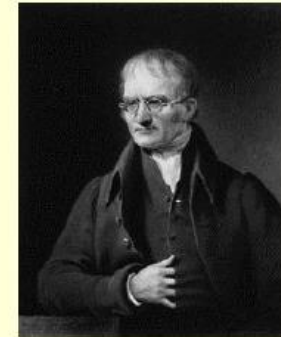


.....

..... ~ 2000 χρόνια

.....

John DALTON (1766-1844)



ΧΗΜΕΙΑ

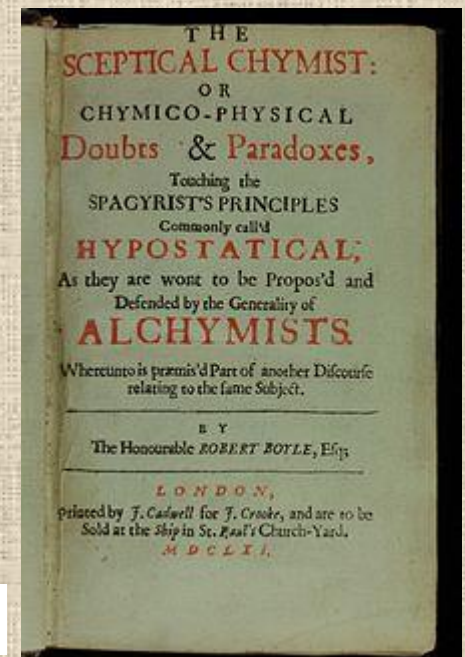
Ιστορική αναδρομή

Νόμος του Boyle: $PV=k$

Η ύλη αποτελείται από άτομα ή συσσωματώματα ατόμων που βρίσκονται σε συνεχή κίνηση. Οποιοδήποτε φαινόμενο είναι αποτέλεσμα της σύγκρουσης των κινουμένων ατόμων



Robert W. Boyle
(1627–1691)



ΘΕΜΕΛΙΩΔΕΙΣ ΝΟΜΟΙ ΤΗΣ ΧΗΜΕΙΑΣ

Lavoisier: Αρχή διατήρησης της μάζας (1774)



(1743-1794)

(1754-1826)



Proust: Νόμος ορισμένων αναλογιών (1799)

Μια χημική ένωση πάντα περιέχει την ίδια αναλογία μάζας από τα στοιχεία που την αποτελούν.

Dalton: Νόμος των απλών πολλαπλασίων (1803)

Όταν δύο στοιχεία A και B αντιδρούν προς σχηματισμό χημικών ενώσεων, τα βάρη του στοιχείου A που αντιδρούν κάθε φορά με το ίδιο βάρος του στοιχείου B, βρίσκονται σε σχέση απλής αναλογίας μεταξύ τους



(1766-1844)

(1762-1807)



Richter: Νόμος ισοδυνάμων βαρών (1792)

Όταν 2 στοιχεία ενώνονται με το ίδιο βάρος τρίτου στοιχείου, τότε η αναλογία μαζών τους είναι η ίδια ή απλό πολλαπλάσιο της αναλογίας με την οποία ενώνονται μεταξύ τους

Proust: Νόμος ορισμένων αναλογιών (1799)

Μια χημική ένωση πάντα περιέχει την ίδια αναλογία μάζας από τα στοιχεία που την αποτελούν.

EXAMPLE 1.1: REDUCTION OF CUPRIC OXIDE

When 1.375 g of cupric oxide is reduced on heating in a current of hydrogen, the weight of copper remaining 1.098 g. In another experiment, 1.179 g of copper is dissolved in nitric acid and resulting copper nitrate converted into cupric oxide by ignition. The weight of cupric oxide formed is 1.476 g. Show that these results illustrate the law of constant proportion.

SOLUTION

First experiment

- Copper oxide = 1.375 g
- Copper left = 1.098 g
- Oxygen present = 1.375 - 1.098 = 0.277 g

$$\text{Percentage of oxygen in CuO} = \frac{(0.277)(100\%)}{1.375} = 20.15\% \quad (1.1)$$

Second Experiment

- Copper taken = 1.179 g
- Copper oxide formed = 1.476 g
- Oxygen present = 1.476 - 1.179 = 0.297 g

$$\text{Percentage of oxygen in CuO} = \frac{(0.297)(100\%)}{1.476} = 20.12\% \quad (1.2)$$

Percentage of oxygen is approximately (within significant figures limite) the same in both the above cases. So the law of constant composition is illustrated.

Dalton: Νόμος των απλών πολλαπλασίων (1803)

Όταν δύο στοιχεία A και B αντιδρούν προς σχηματισμό χημικών ενώσεων, τα βάρη του στοιχείου A που αντιδρούν κάθε φορά με το ίδιο βάρος του στοιχείου B, βρίσκονται σε σχέση απλής αναλογίας μεταξύ τους

EXAMPLE

- Carbon monoxide (CO): 12 parts by mass of carbon combines with 16 parts by mass of oxygen.
- Carbon dioxide (CO_2): 12 parts by mass of carbon combines with 32 parts by mass of oxygen.

Ratio of the masses of oxygen that combines with a fixed mass of carbon (12 parts): 16:32 or 1:2

Hydrogen and oxygen are known to form 2 compounds. The hydrogen content in one is 5.93%, and that of the other is 11.2%. Show that this data illustrates the law of multiple proportions.

SOLUTION

In the first compound: hydrogen = 5.93%

Oxygen = $(100 - 5.93) = 94.07\%$

In the first compound the number of parts of oxygen that combine with one part by mass of hydrogen $\frac{94.07}{5.93} = 15.86$ parts

In the second compound: hydrogen = 11.2%

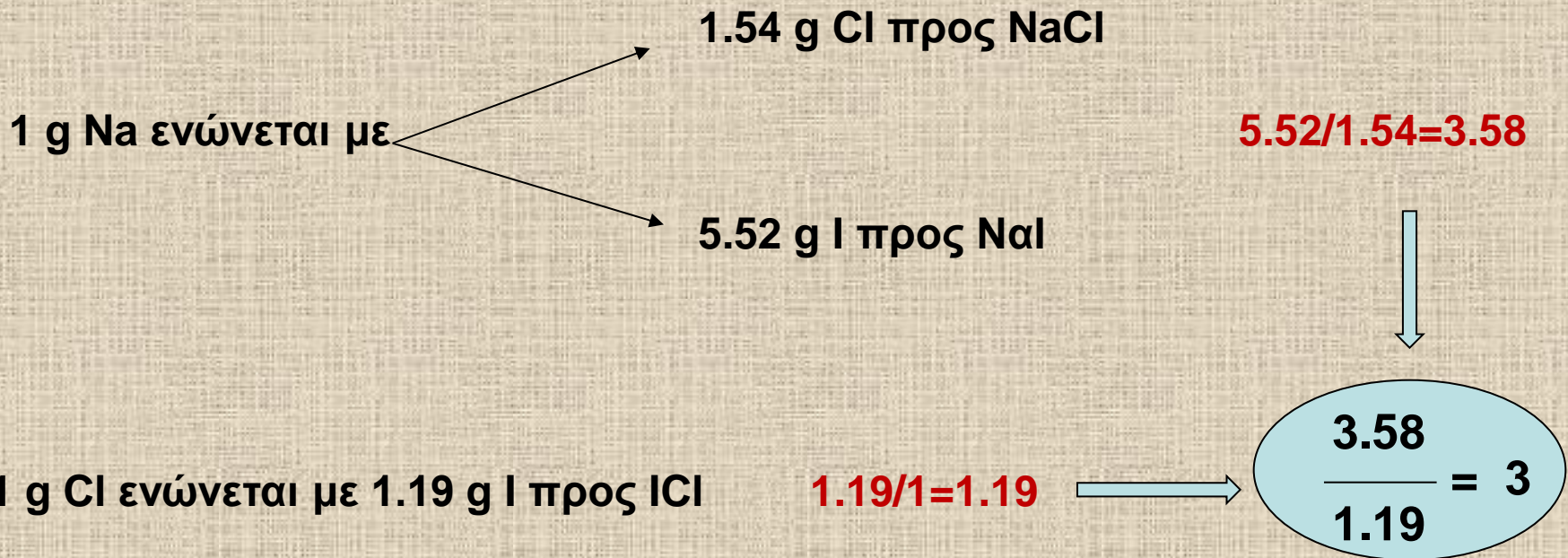
Oxygen = $(100 - 11.2) = 88.88\%$

In the second compound the number of parts by mass of oxygen that combine with one part by mass of hydrogen $\frac{88.8}{11.2} = 7.9$ parts

Ratio of the masses of oxygen that combine with fixed mass of hydrogen: 15.86:7.9 or 2:1. This is consistent with the law of multiple proportions.

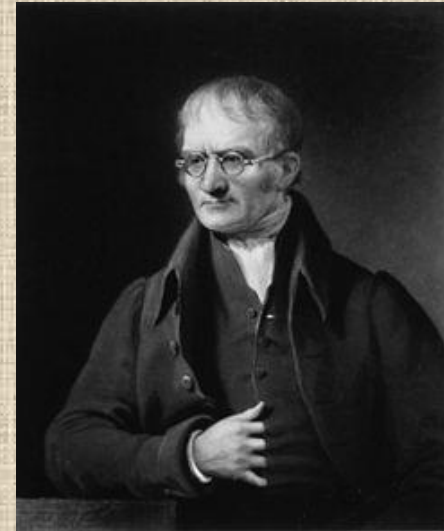
Richter: Νόμος ισοδυνάμων βαρών (1792)

Όταν 2 στοιχεία ενώνονται με το ίδιο βάρος τρίτου στοιχείου, τότε η αναλογία μαζών τους είναι η ίδια ή απλό πολλαπλάσιο της αναλογίας με την οποία ενώνονται μεταξύ τους



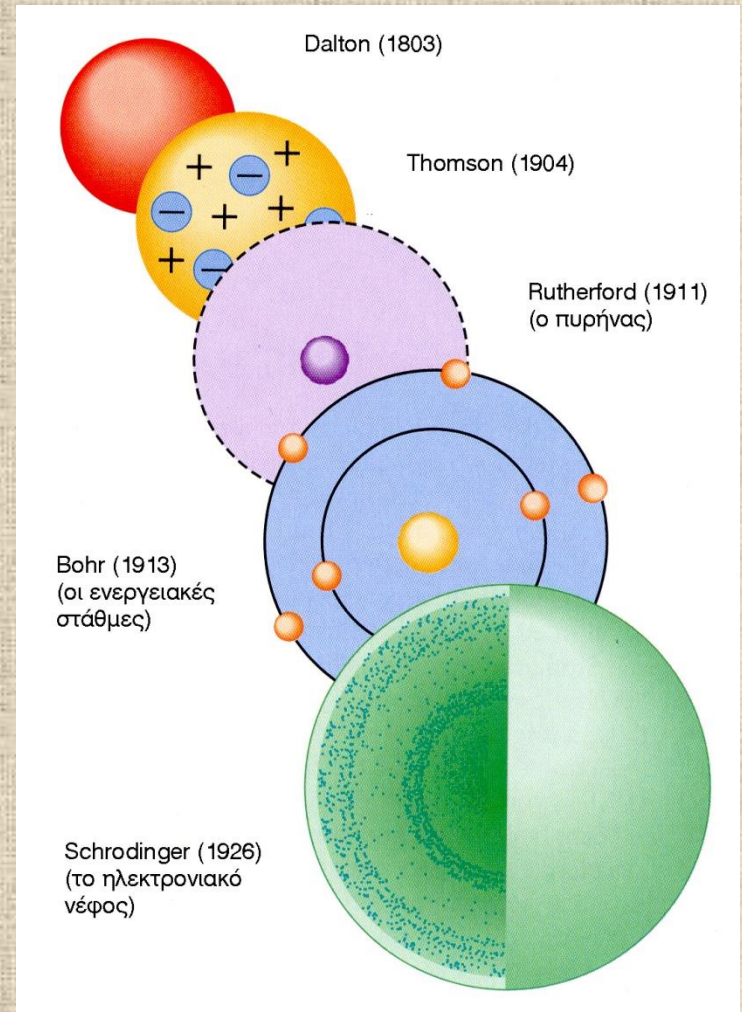
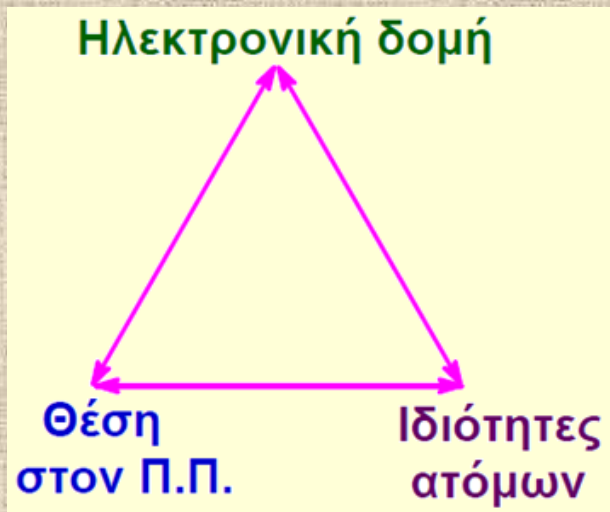
Η ΑΤΟΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ DALTON (1803)

- Η ύλη αποτελείται από **άτομα**
- Τα άτομα κάθε στοιχείου είναι απολύτως όμοια και διαφορετικά από τα άτομα των άλλων στοιχείων
- Οι **χημικές ενώσεις** αποτελούνται από άτομα που ενώνονται με σταθερή αναλογία
- Τα άτομα δεν τεμαχίζονται, δεν δημιουργούνται και δεν καταστρέφονται
- **Χημική αντίδραση** είναι η αναδιάταξη των ατόμων που οδηγεί στο σχηματισμό νέων ενώσεων

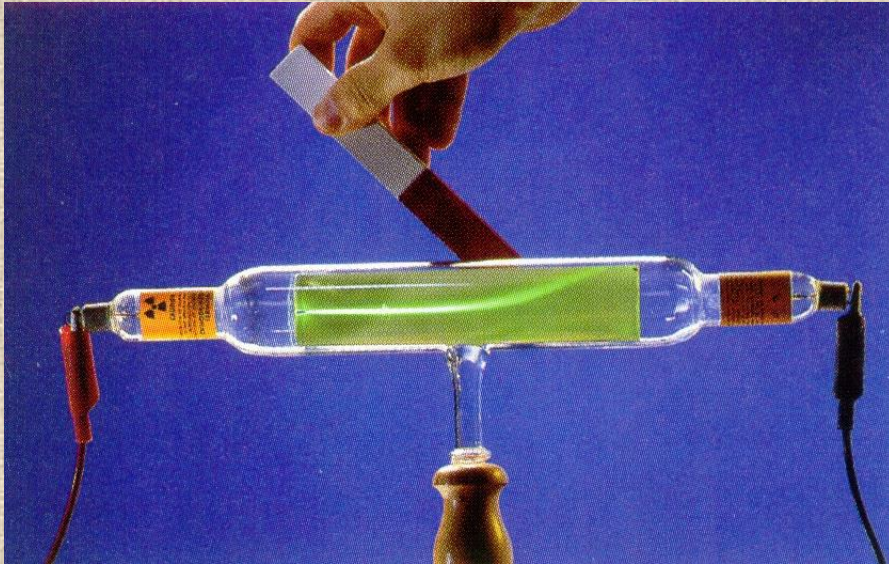


John Dalton
(1766-1844)

ΑΤΟΜΙΚΗ ΔΟΜΗΣΗ



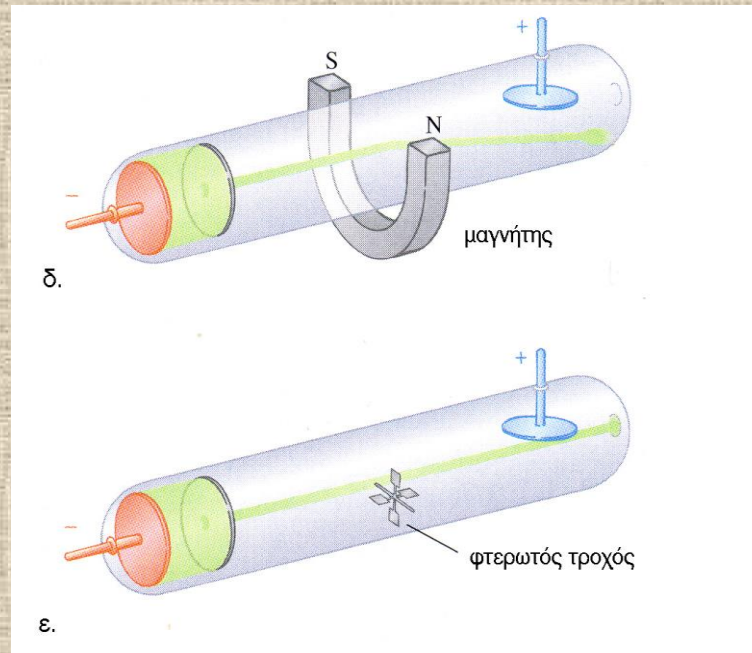
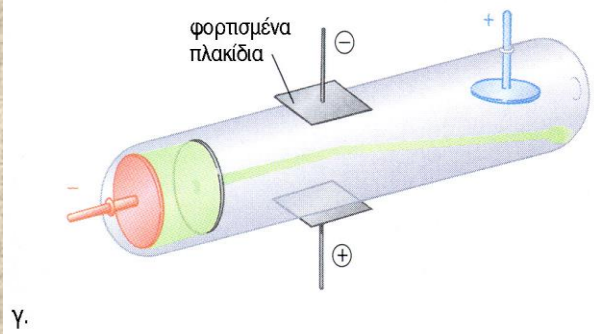
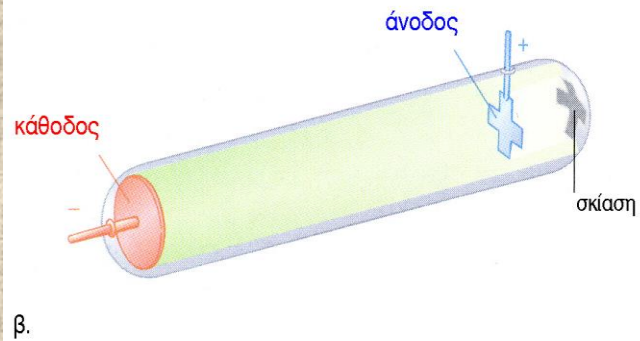
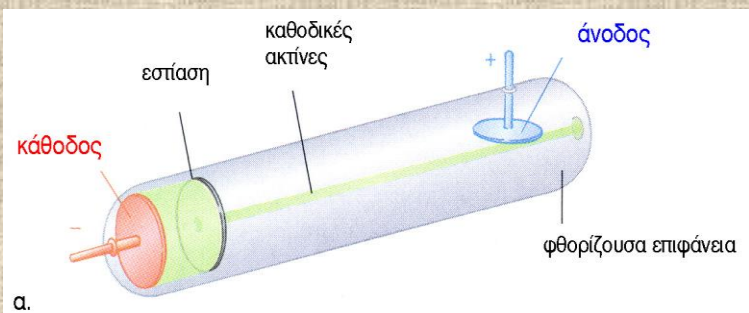
Joseph John Thomson (1856-1940)



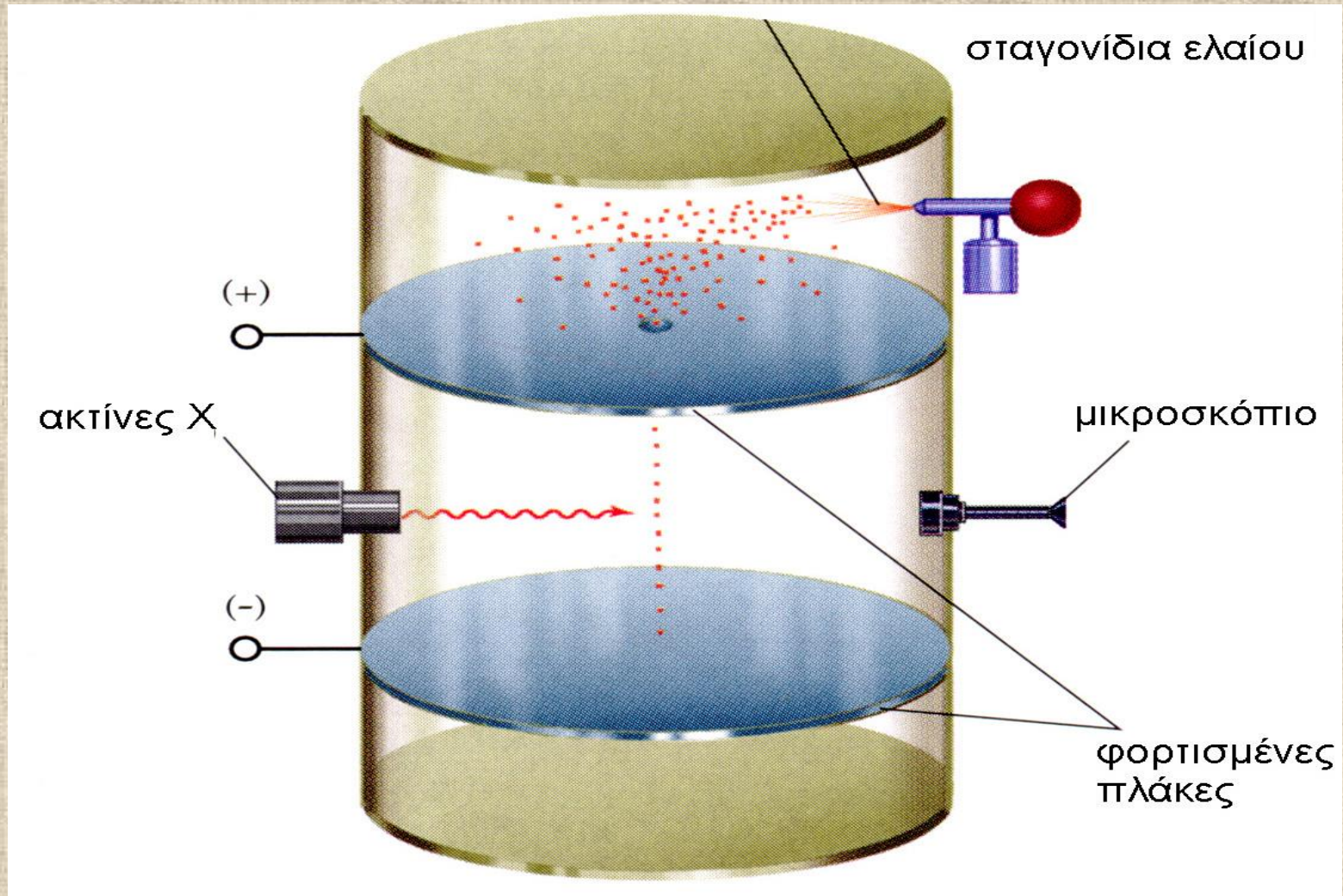
ανακάλυψη ηλεκτρονίου
(1897)

Καθοδικές ακτίνες:

Δημιουργούνται σε σωλήνες υψηλού κενού όταν προκληθούν ηλεκτρικές εκκενώσεις μεταξύ δύο μεταλλικών ηλεκτροδίων



Πείραμα Millikan



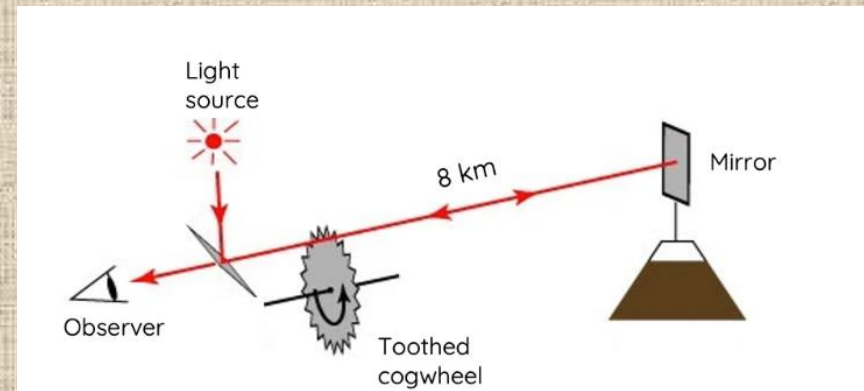
$$|e| = 1.60218 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$m = 9.10940 \times 10^{-28} \text{ g}$$

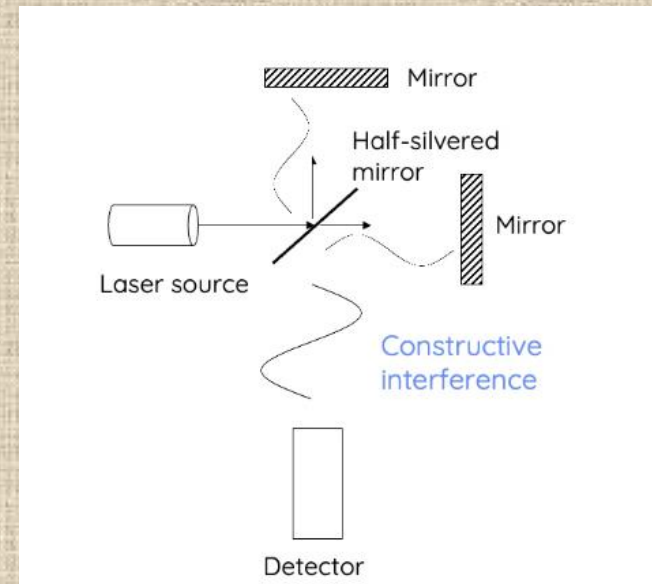
Μέτρηση της ταχύτητας του φωτός

1675 – Ole Rømer 200,000 km/sec

1849 – Hippolyte Louis Fizeau
313,300 km/sec

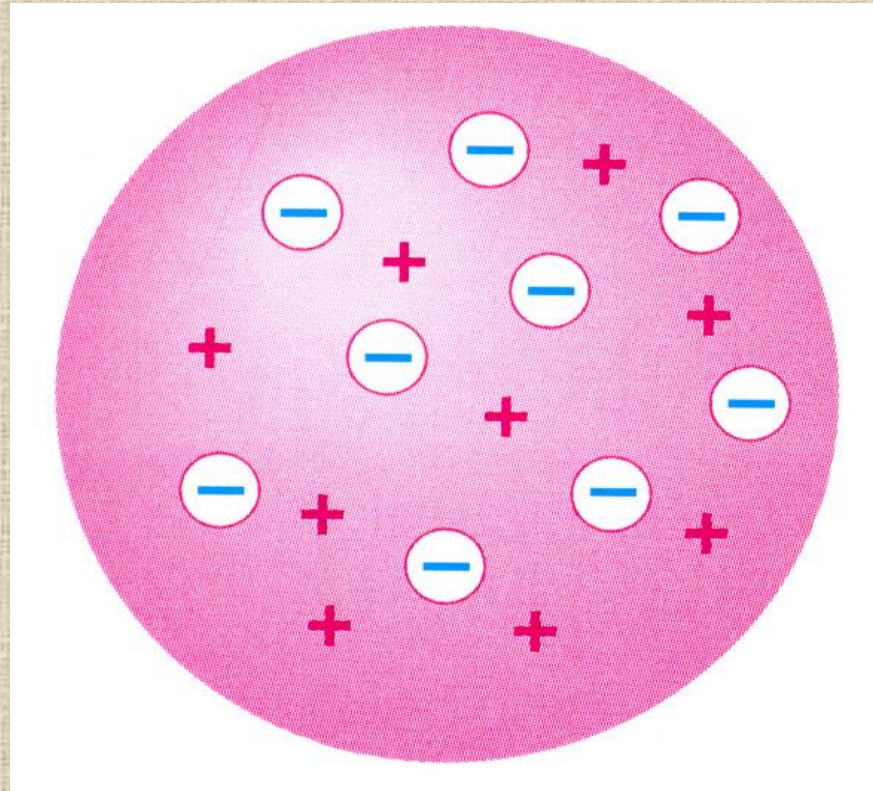


1973 – Evenson et al
299,972,457 m/s

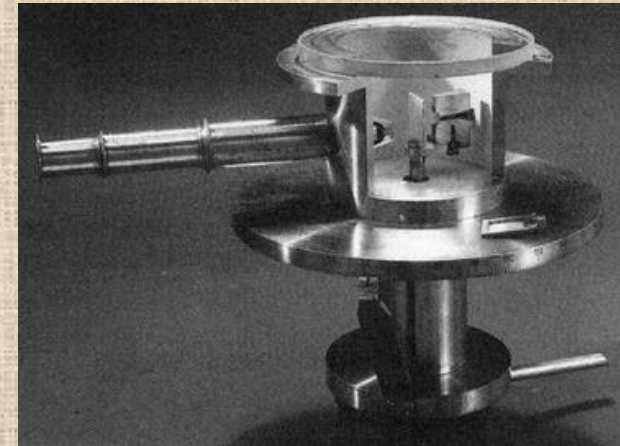
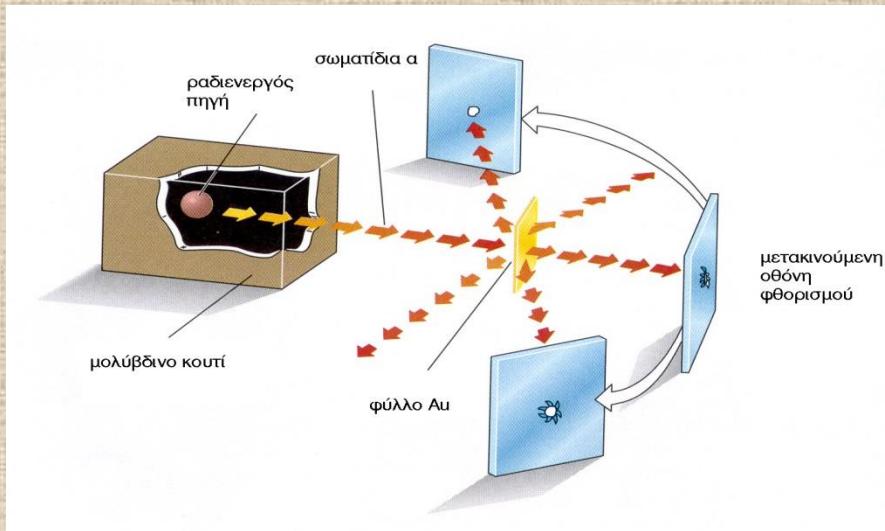
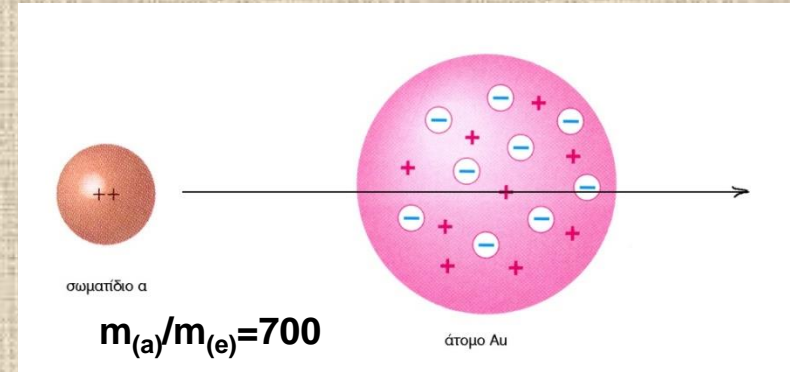


Joseph John Thomson (1904)

ατομικό μοντέλο: σταφιδόψωμο



Πείραμα Geiger-Marsden ανακάλυψη πυρήνα - 1911



Ακτίνες α: Πυρήνες He, αποτελούνται από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια

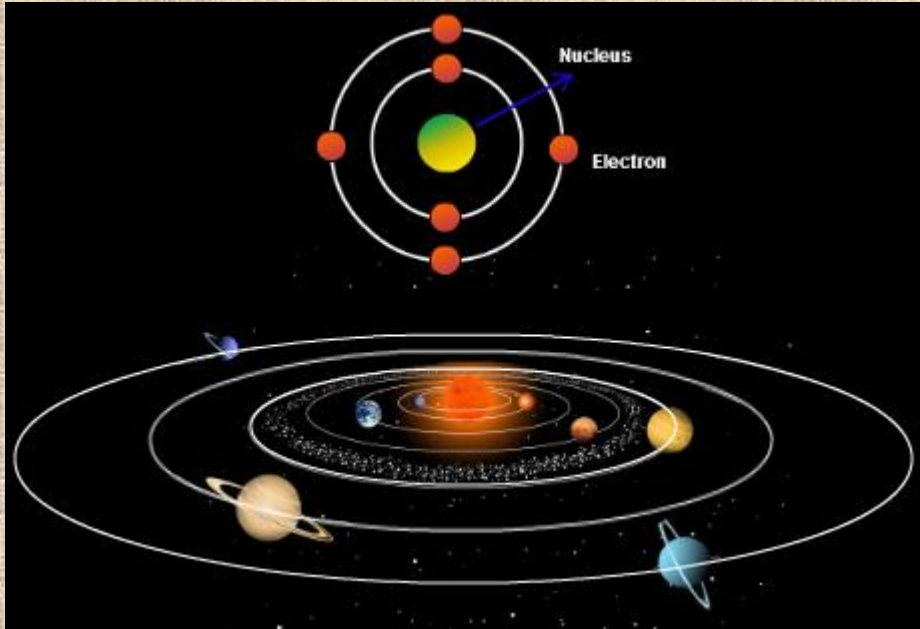
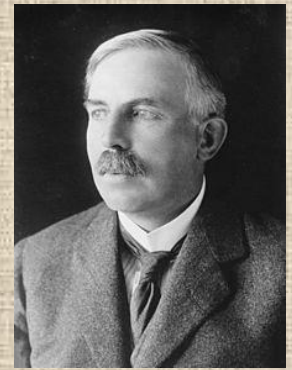
Ακτίνες β: Ηλεκτρόνια που κινούνται με ταχύτητα 130.000 km/s

Ακτίνες γ: Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ($\lambda <$ ακτίνων X)

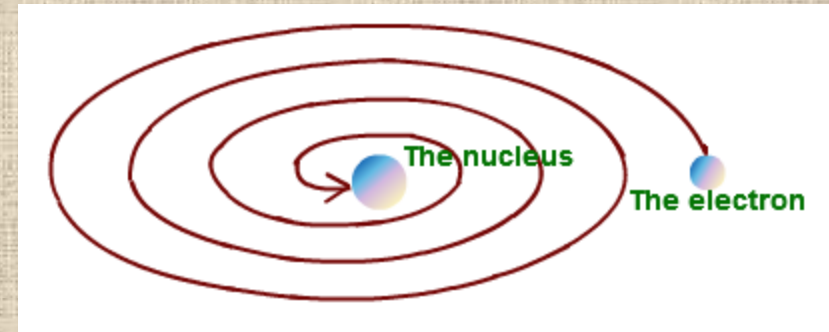
Ικανότητα να προκαλούν ιονισμό ατόμων: $\alpha > \beta > \gamma$. Διεισδυτική ικανότητα: $\gamma > \beta > \alpha$

Αν ο Rutherford και οι συνεργάτες του Geiger και Marsden χρησιμοποιούσαν ηλεκτρόνια αντί για σωματίδια α στα πειράματά τους, τι θα μπορούσαν να είχαν ανακαλύψει;

Πλανητικό μοντέλο Rutherford (1911)



Θεωρία Maxwell

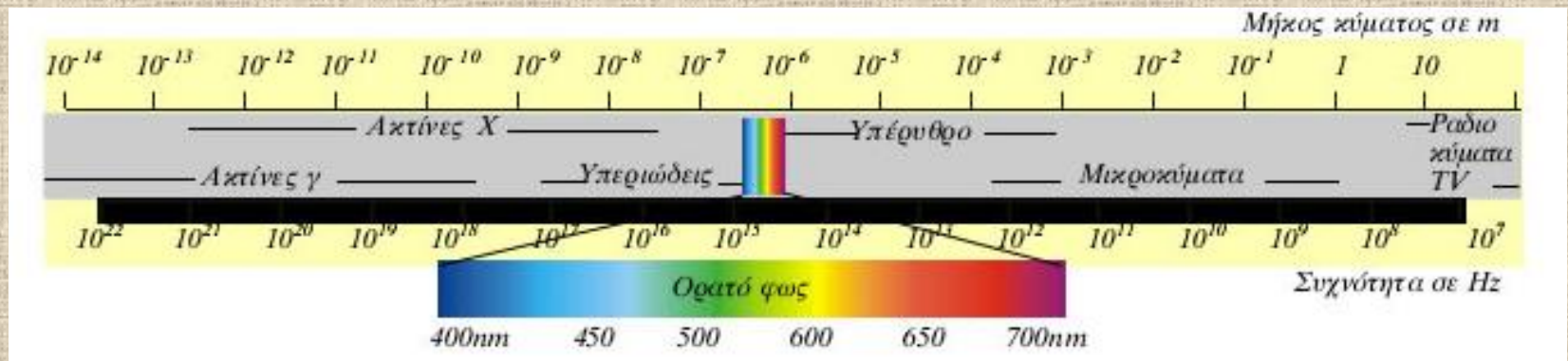
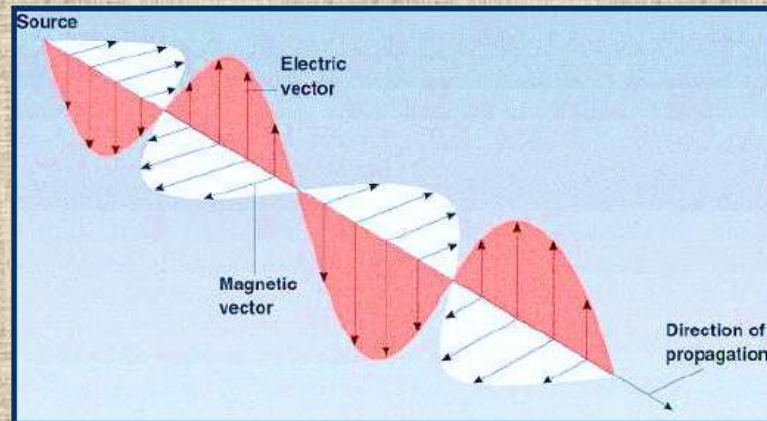


Αποτυχία μοντέλου Rutherford:

- Δεν εξηγεί την σταθερότητα των ατόμων
- Δεν εξηγεί γιατί τα ατομικά φάσματα εκπομπής των στοιχείων είναι γραμμικά

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία:

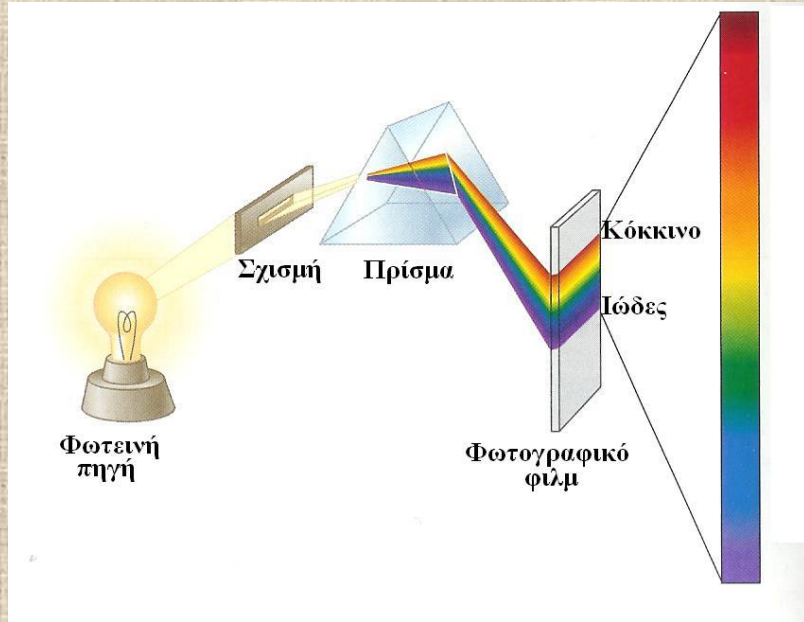
ένα ηλεκτρικό και ένα μαγνητικό πεδίο, κάθετα μεταξύ τους



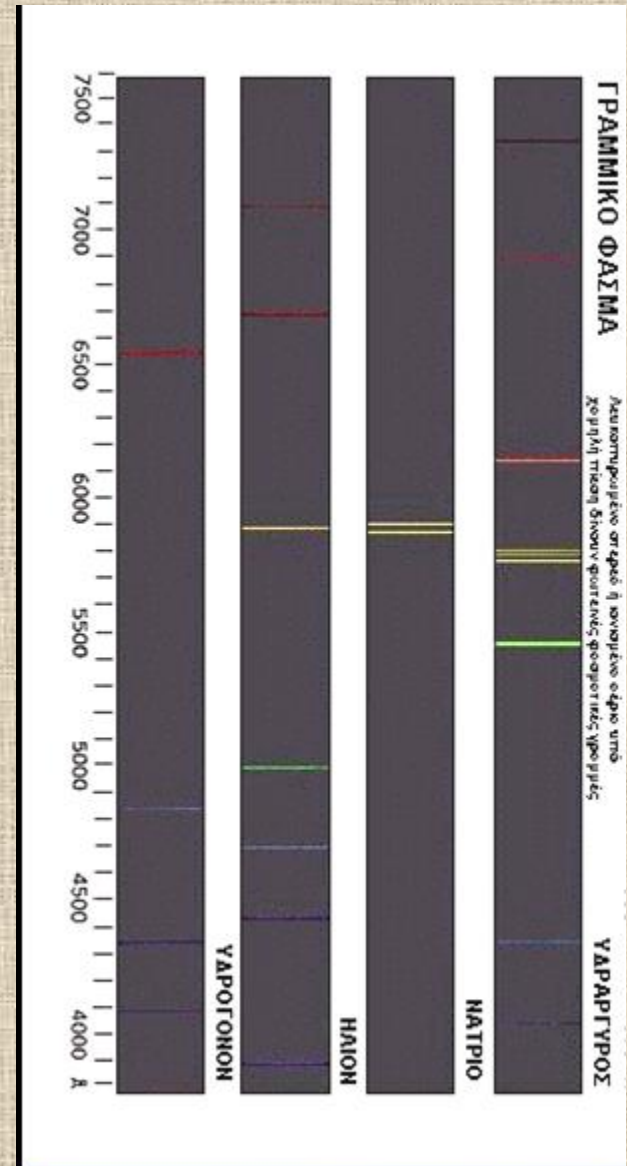
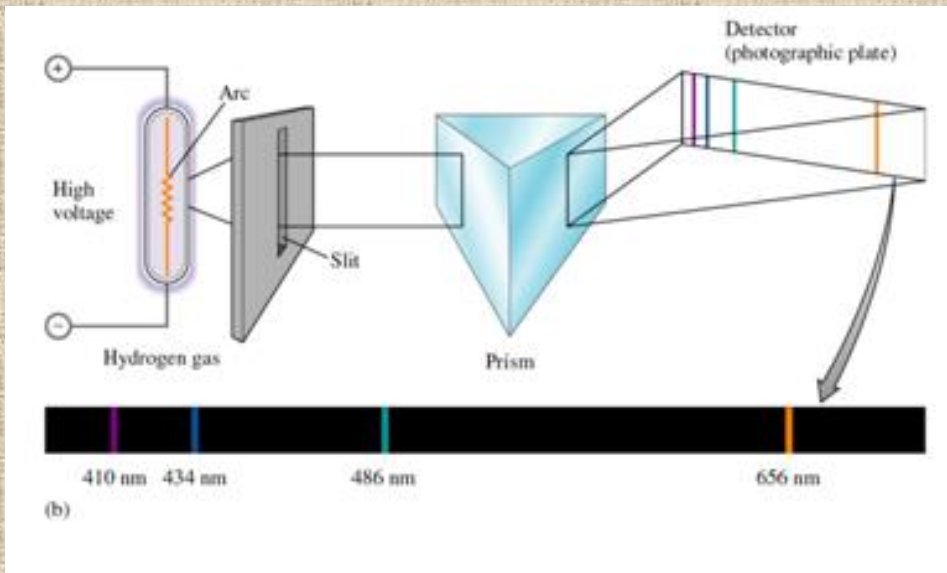
Αλληλεπίδραση ύλης – ακτινοβολίας:

Επίδραση ηλεκτρικού και μαγνητικού πεδίου στην ύλη

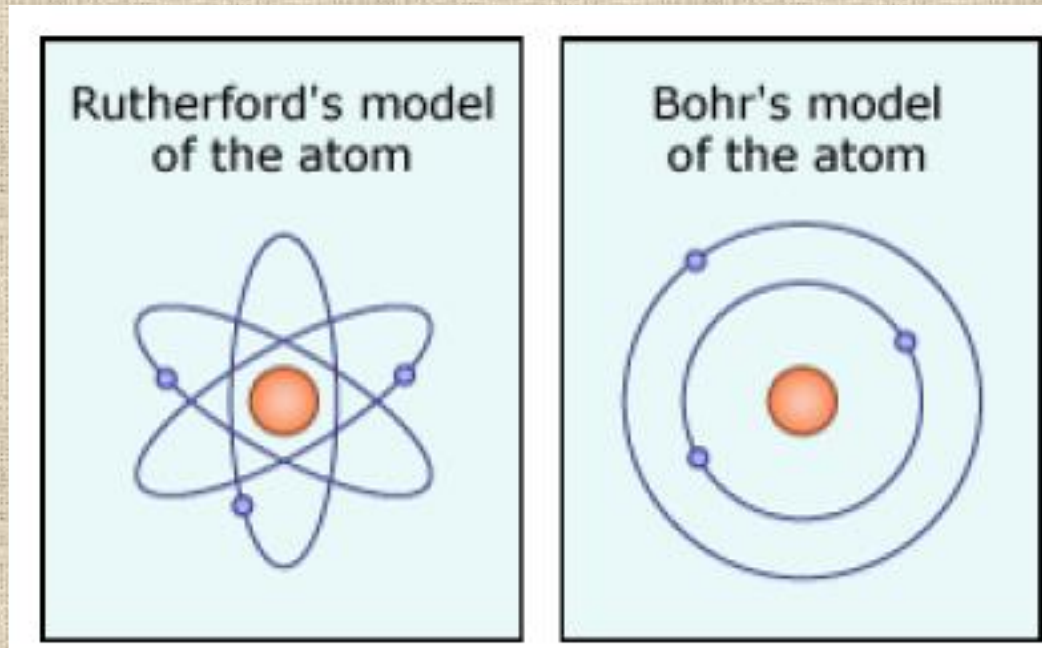
Ανάλυση φάσματος ορατού φωτός



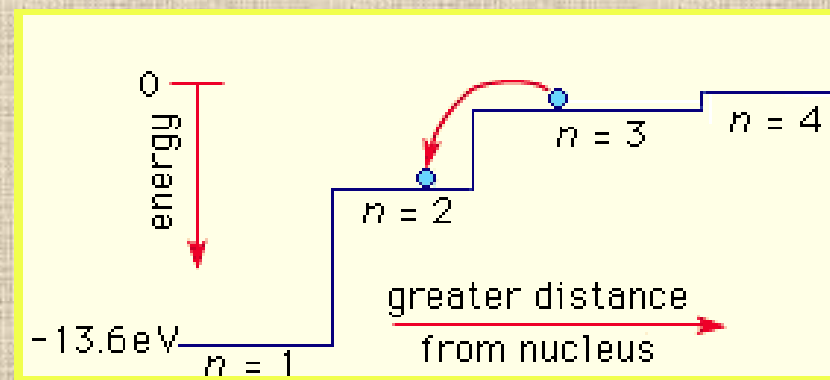
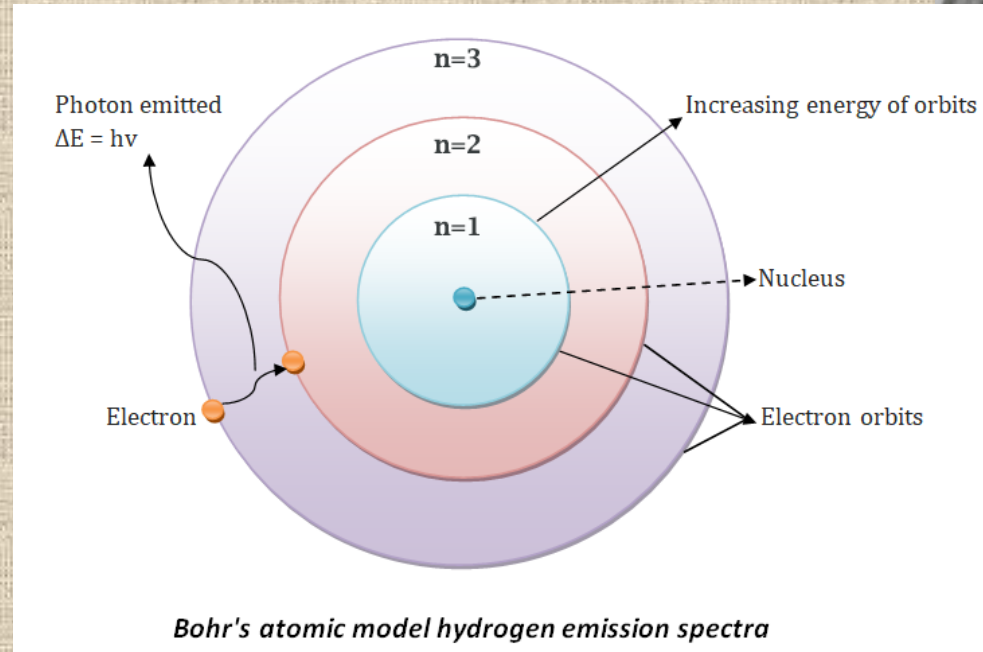
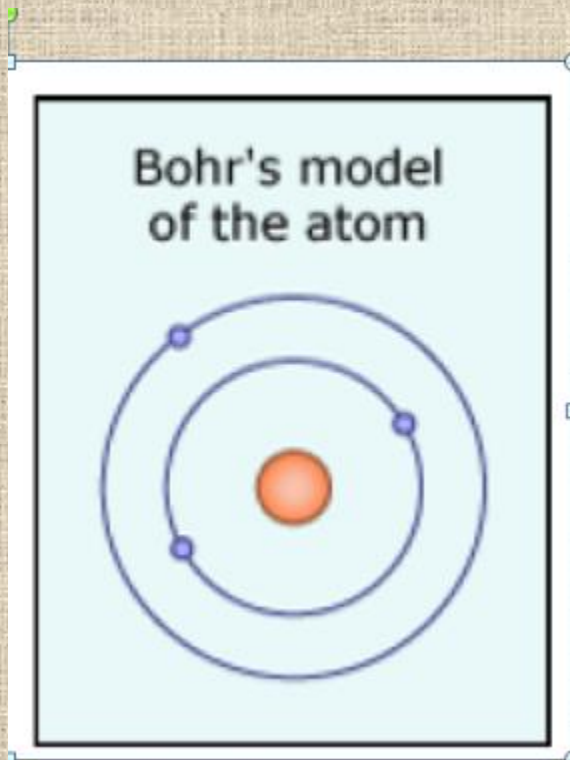
Φάσμα εκπομπής H_2



Σταθερό πλανητικό μοντέλο Bohr (1913)



Σταθερό πλανητικό μοντέλο Bohr (1913)



1. Μηχανική συνθήκη Bohr

- ❖ Τα ηλεκτρόνια περιστρέφονται σε καθορισμένες κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα.
- ❖ Οι τροχιές πρέπει να ικανοποιούν την σχέση:

στροφορμή e → $m \cdot u \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$

κβάντωση

$$E_n = \frac{-2,18 \cdot 10^{-18}}{n^2} \text{ J}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_n = \frac{-13.6}{n^2} \text{ eV}$$

2. Οπτική συνθήκη Bohr

Τα ηλεκτρόνια εκπέμπουν ή απορροφούν ενέργεια (με την μορφή ακτινοβολίας) μόνο όταν αλλάζουν ενεργειακή στάθμη

$$E = h \nu$$

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

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

$$r = a_0 \cdot n^2$$

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

$$n_f > n_i \longrightarrow ?$$

$$n_f < n_i \longrightarrow ?$$

Μηχανική συνθήκη Bohr →

$$m \cdot u \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

Ενέργεια e στην n στιβάδα →

$$E_n = \frac{-2,18 \cdot 10^{-18}}{n^2} \text{ J}$$

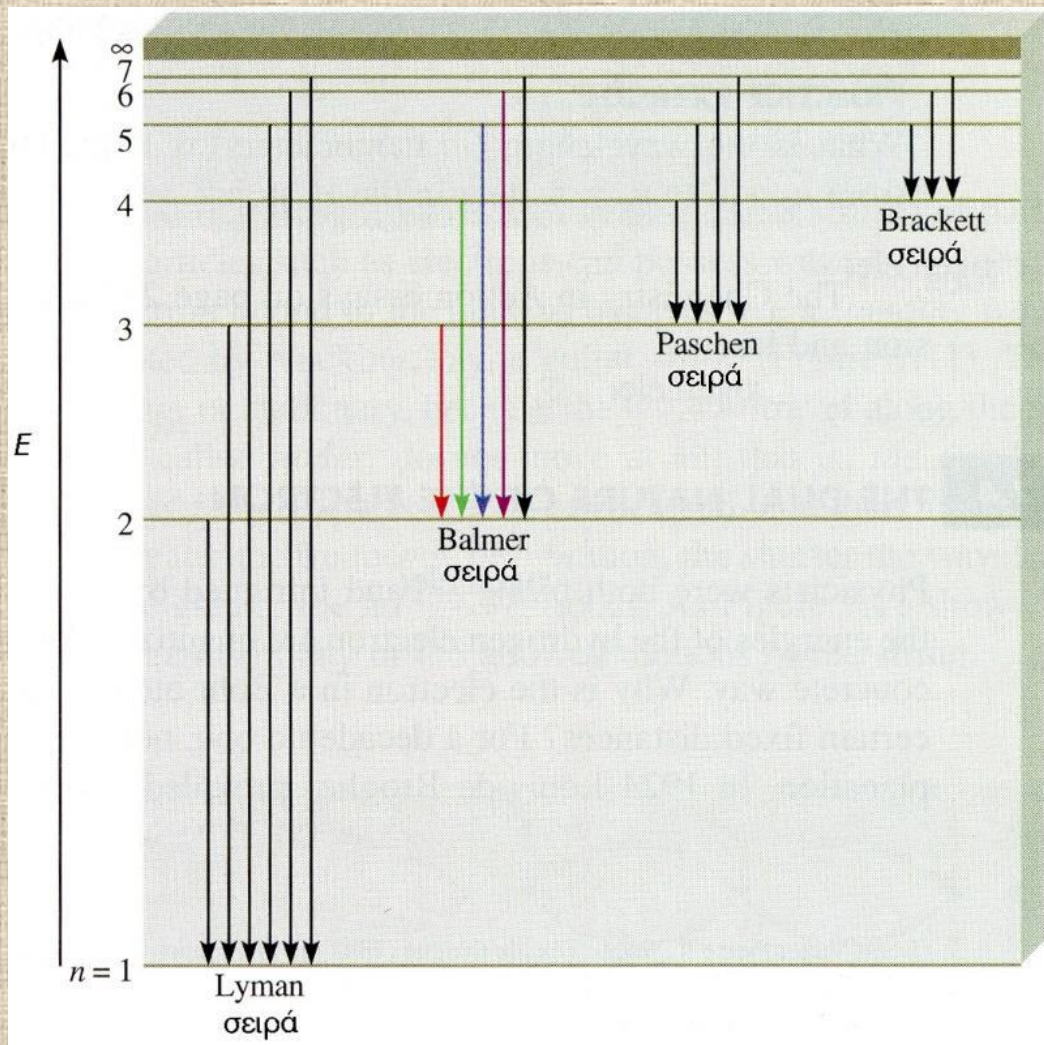
Ενέργεια που εκπέμπεται ή απορροφάται κατά την μετακίνηση ηλεκτρονίου από την n_i στην n_f τροχιά (άτομο H)

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

Ακτίνα τροχιάς e στην στιβάδα n

→

$$r = a_0 \cdot n^2$$
$$a_0 = 0.0529 \text{ nm}$$



Τύπος *Balmer*

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

Σταθερά *Rydberg*

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

1. Να υπολογιστεί η ενέργεια ιοντισμού 1 mol του υδρογόνου με βάση τη θεωρία του Bohr.
2. Να υπολογισθεί το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από ένα άτομο H όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από την ενεργειακή στάθμη $n=5$ στην $n=4$. (Δίνεται η σταθερά Rydberg $R_H=1.09678 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$)
3. Ποια ηλεκτρονική μετάπτωση στο άτομο H, που καταλήγει στην τροχιά $n = 5$, θα δώσει φωτόνιο μήκους κύματος 3740 nm;
4. Στο ατομικό πρότυπο για το άτομο του υδρογόνου ποια από τις παρακάτω μεταπτώσεις οδηγεί στην εκπομπή φωτονίου με την μεγαλύτερη ενέργεια;
A: $n = 1 \rightarrow n = 6$, B: $n = 2 \rightarrow n = 1$ Γ: $n = 6 \rightarrow n = 3$
Δ: $n = 3 \rightarrow n = 6$ E: $n = 5 \rightarrow n = 3$
5. Κατά τη μετάπτωση του ηλεκτρονίου του υδρογόνου από μια διεγερμένη κατάσταση στη θεμελιώδη εκπέμπεται φως μήκους κύματος 121 nm. Ποιόν κύριο κβαντικό αριθμό έχει η διεγερμένη κατάσταση. Ποια είναι η ενεργειακή διαφορά των δύο καταστάσεων
 $h = 6.63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ $c = 2,997925 \cdot 10^{10} \text{ cm/s}$

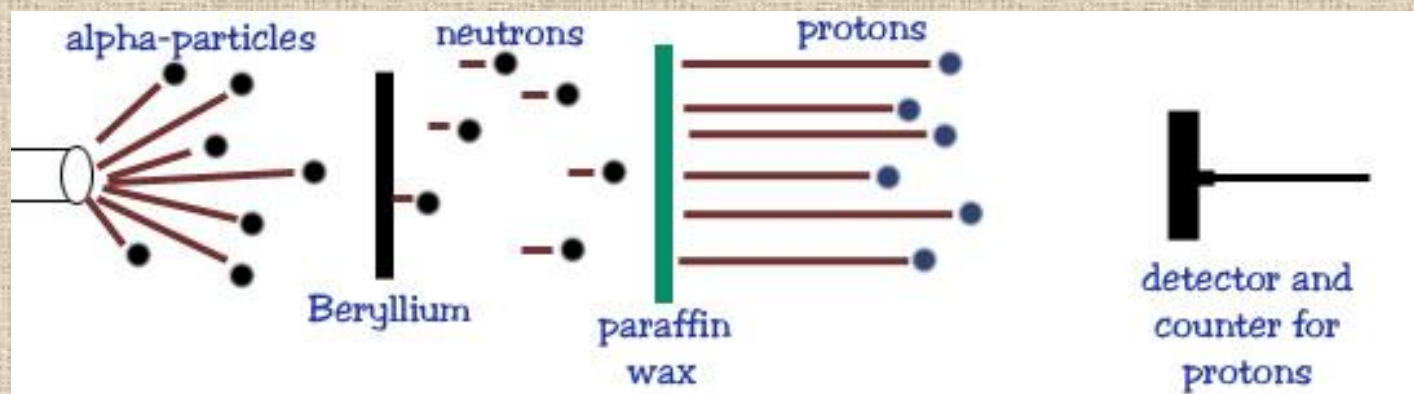
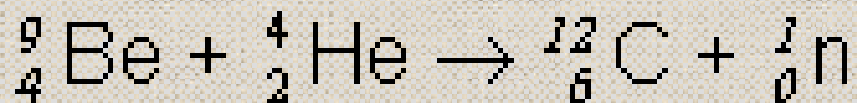
6. Θεωρούμε 2 άτομα υδρογόνου. Στο πρώτο το ηλεκτρόνιο βρίσκεται στην τροχιά Bohr με $n=4$, ενώ στο δεύτερο στη θεμελιώδη κατάσταση. Ποιο από τα 2 ηλεκτρόνια περιστρέφεται με τη μεγαλύτερη ταχύτητα.

$$m \cdot u \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

$$r = a_0 \cdot n^2$$

Πείραμα Chadwick

ανακάλυψη νετρονίων (1932)



φορτίο νετρονίων = 0 C

μάζα νετρονίου = 1.0067 x μάζα πρωτονίου

Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Πρωτόνιο

θετικά φορτισμένο σωματίδιο

$$m = 1,67252 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$q = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Νετρόνιο

ηλεκτρικά ουδέτερο σωματίδιο

$$m = 1,6749 \times 10^{-24} \text{ g}$$

$$q = 0 \text{ C}$$

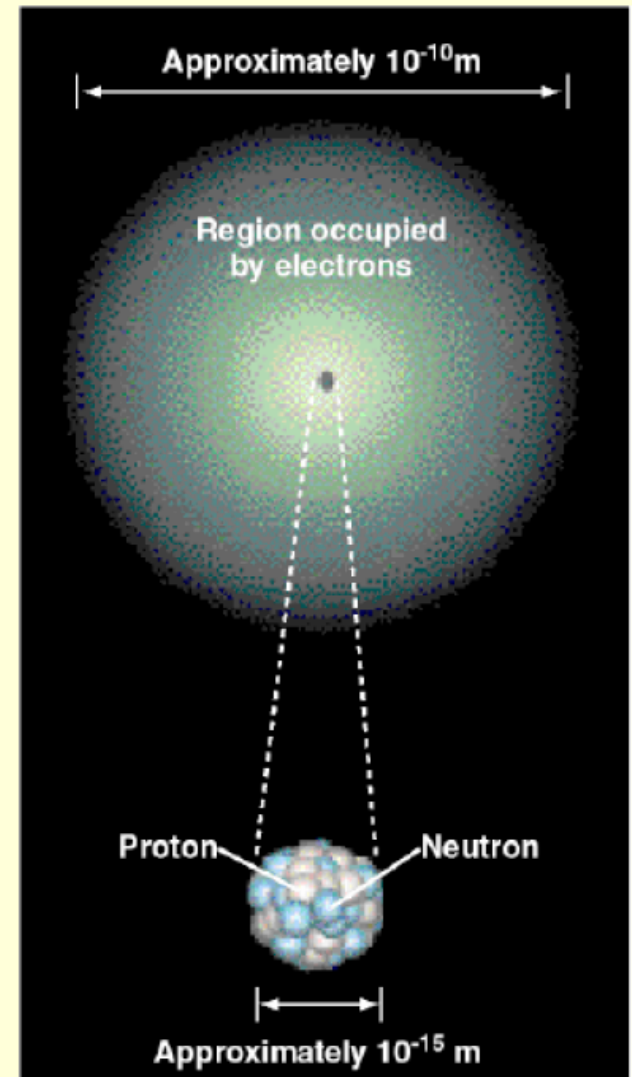
Ηλεκτρόνιο

αρνητικά φορτισμένο σωματίδιο

$$m = 9,1093897 \times 10^{-28} \text{ g}$$

$$q = 1,6022 \times 10^{-19} \text{ C}$$

Πυρήνας



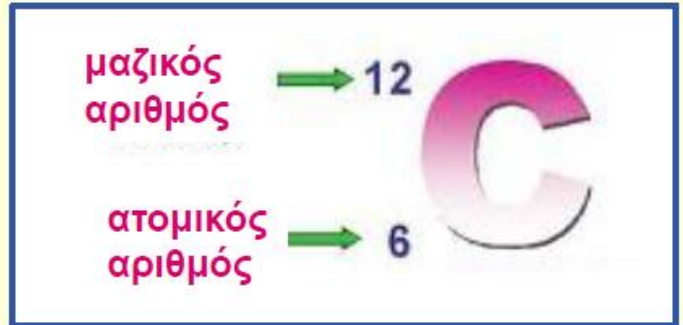
Η ΔΟΜΗ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Ατομικός αριθμός (Z)

αριθμός πρωτονίων του πυρήνα

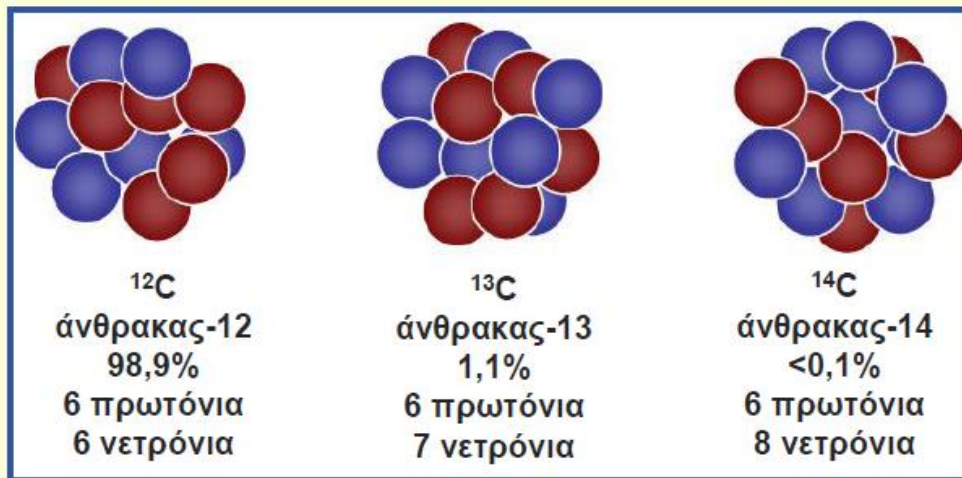
Μαζικός αριθμός (A)

αριθμός πρωτονίων και νετρονίων του πυρήνα



Ισότοπα

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



Ποιο άτομο είναι ισότοπο του A;

Ποιο άτομο έχει τον ίδιο μαζικό αριθμό με το A;

	πρωτόνια	νετρόνια
A	18	19
B	16	19
C	18	18
D	17	20

Στοιχείο	Ατομ. αριθ.	Μαζ. αριθ.	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ηλεκτρόνια
Co	27	59			
Cu ⁺				34	28
Br		81		46	
Nb		93	41		
S ²⁻	11	23			
		32			18
	17			18	18
Si	14			15	

Κλασική Φυσική

ύλη (σωματίδια)

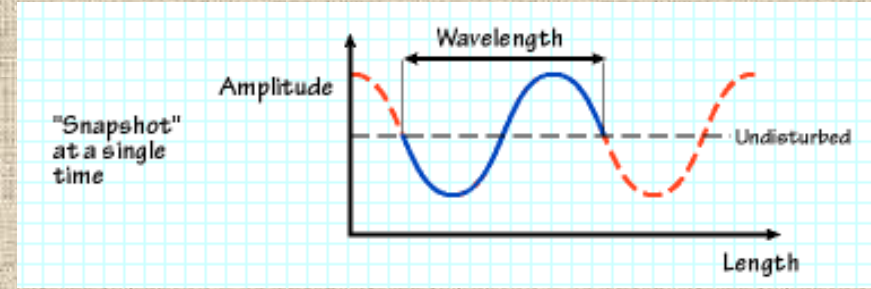
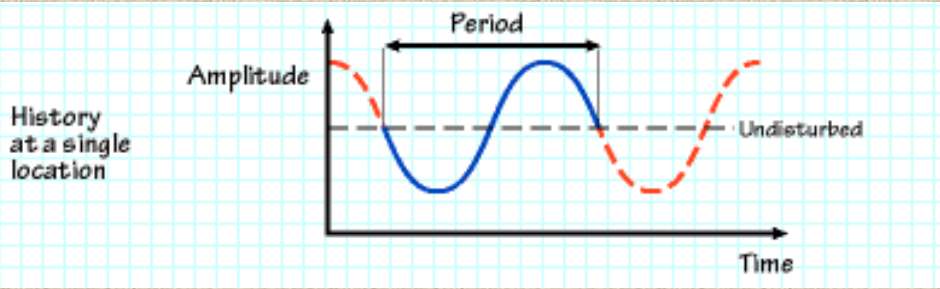
ακτινοβολία (κύμα)

“η φύση δεν κάνει άλματα”

δομή ατόμων – μορίων
αλληλεπίδραση ύλης – ακτινοβολίας

??

Η ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ



Περίοδος (T): το χρονικό διάστημα στο οποίο η κυματική εικόνα επαναλαμβάνεται

Μήκος κύματος (λ): η απόσταση που διανύει το κύμα σε χρόνο T

Συχνότητα (ν): ο αριθμός των εναλλαγών της ταλάντωσης ανά s ,
μονάδες: s^{-1} ή Hz

$$c = \lambda \cdot \nu$$

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

Max Planck (1858-1947)

$$E = h \nu$$

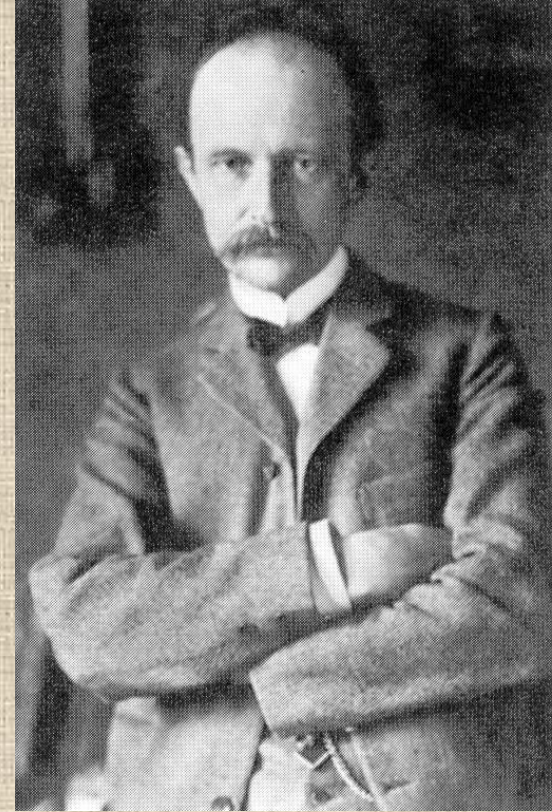
$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Γιατί η σταθερά h έχει τόσο μικρή τιμή?

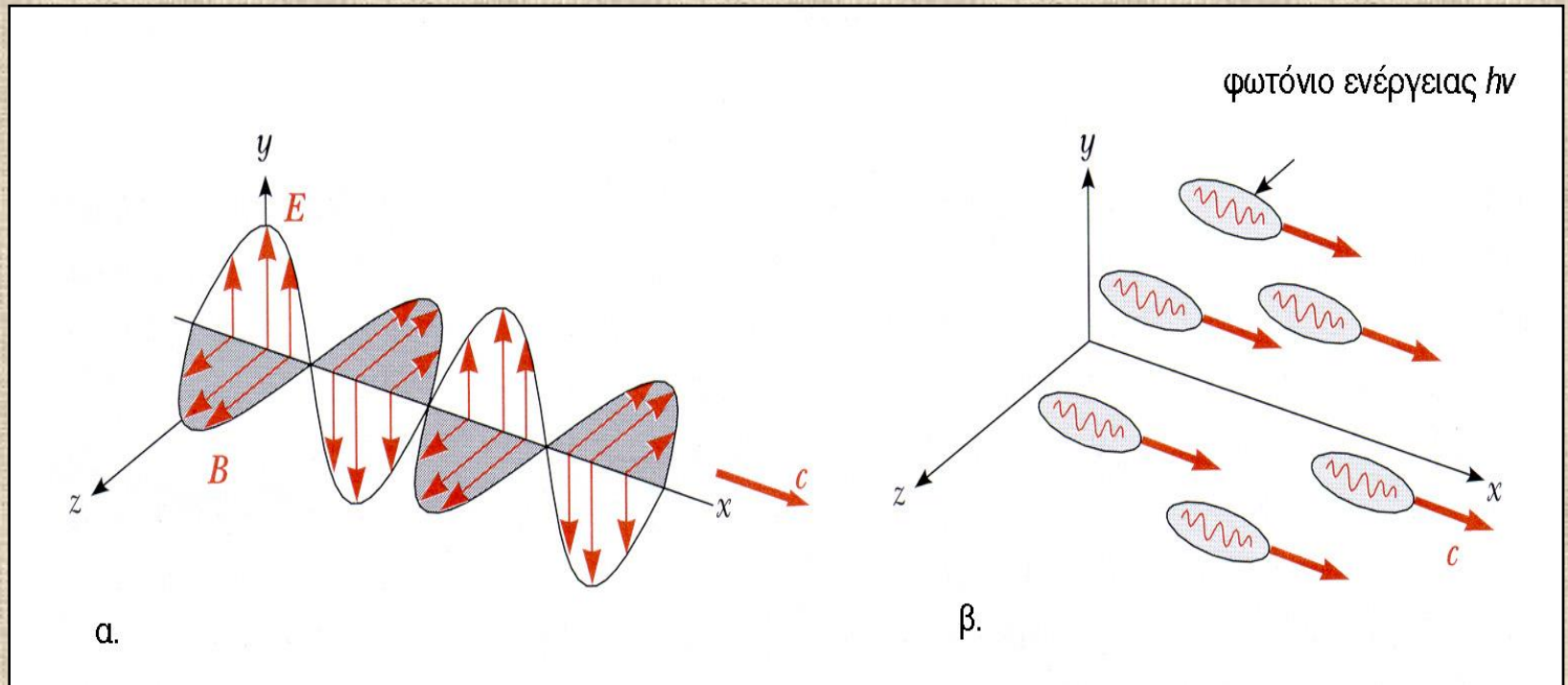
ενέργεια που εκπέμπεται ή απορροφάται από ένα σώμα:

$1h\nu, 2h\nu, 3h\nu$ *κ.ο.κ*

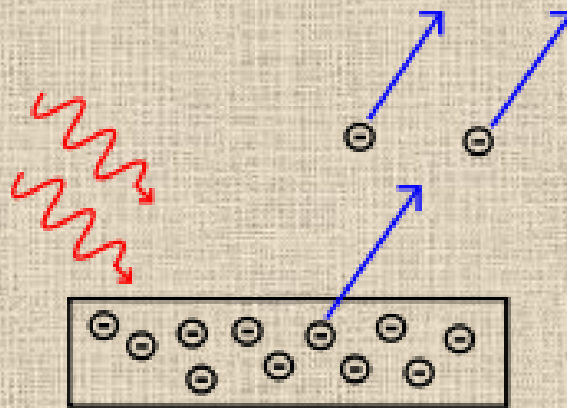
φωτόνιο



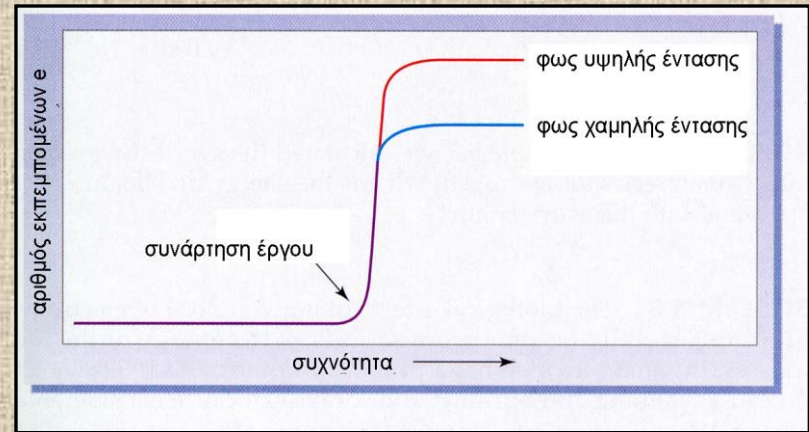
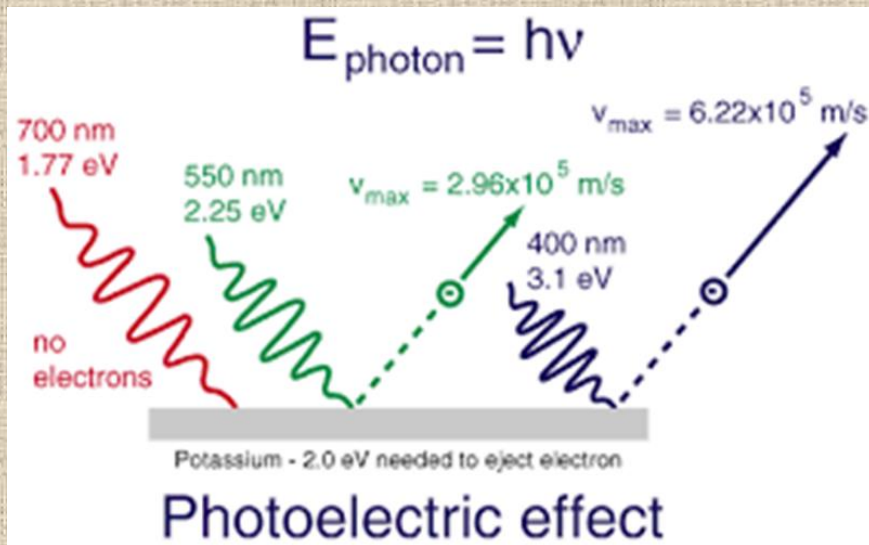
Κυματική vs σωματιδιακή φύση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



- Δεν υπάρχει εκπομπή για $\nu < \nu_0$
- Δεν υπάρχει χρονική καθυστέρηση
- Ο αριθμός e αυξάνεται με την ένταση του φωτός
- Η κινητική ενέργεια των e είναι ανάλογη της συχνότητας και ανεξάρτητη της έντασης του φωτός



$$h\nu = h\nu_0 + E_{\text{KIV}}$$

$$E = h\nu - h\nu_0$$

$$E_{\text{max}} = \frac{1}{2} m u^2 = h\nu - \Phi$$

$$\Phi = h\nu_0$$

7. Όταν φως που έχει συχνότητα 2.00×10^{16} Hz προσπέσει σε επιφάνεια μετάλλου, αποσπώνται ηλεκτρόνια με κινητική ενέργεια $7,50 \times 10^{-18}$ J.

Να υπολογίσετε

(α) Τη συχνότητα ν_0 που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια E_0 για απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από το μέταλλο.

8. Θέλουμε να κατασκευάσουμε ανιχνευτή ακτινοβολίας για χρήση σε διαστημικό όχημα και επιλέγουμε να χρησιμοποιήσουμε λεπτό έλασμα Κ. Ποιο είναι το μέγιστο μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που θα μπορούσε να ανιχνευτεί? Το έργο εξόδου για το Κ είναι 2.29 eV.

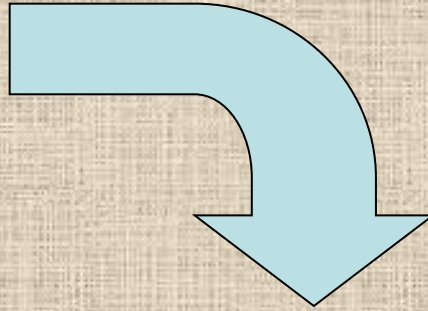
$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

$$c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$



Αν τα κύματα του φωτός έχουν και σωματιδιακή φύση, μήπως κάποια σωματίδια έχουν και κυματική φύση?

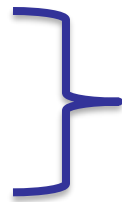


Κυματική θεωρία της ύλης (1924) Κάθε κινούμενο μικρό σωματίδιο, π.χ. ηλεκτρόνιο, παρουσιάζει διττή φύση, σωματιδίου και κύματος.



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

εξίσωση de Broglie



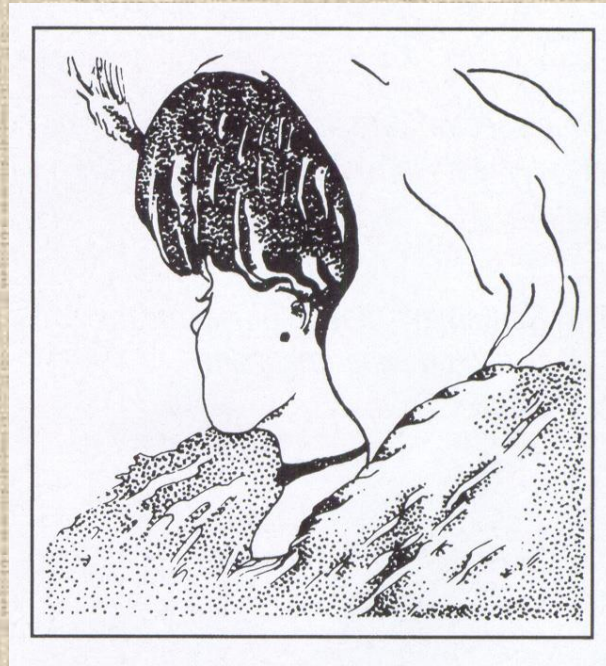
m: ιδιότητα σωματιδίου

λ: ιδιότητα κύματος.

u: κοινή ιδιότητα σωματιδίου και κύματος

Ένα ηλεκτρόνιο και ένα πρωτόνιο έχουν το ίδιο μήκος κύματος. Ποιό από τα δύο κινείται με την μεγαλύτερη ταχύτητα?

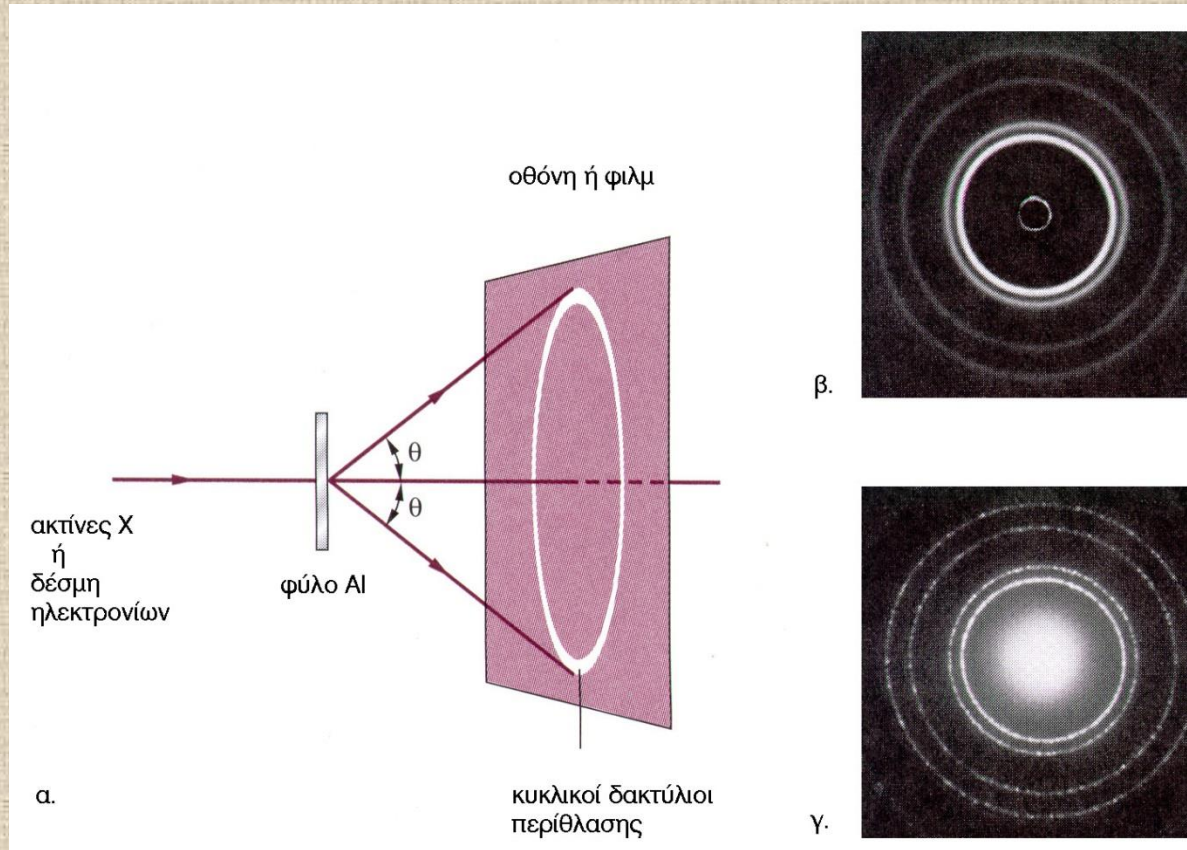
**Τι είναι το ηλεκτρόνιο?
Κύμα ή σωματίδιο?**





Sir G. P. Thomson (1937) πειραματική απόδειξη της κυματικής φύσης των e

Διαγράμματα
περίθλασης δέσμης
ακτίνων X (πάνω) και
ηλεκτρονίων (κάτω)
μέσω λεπτού φύλλου
αλουμινίου.



Joseph John Thomson (1856-1940)



ανακάλυψη ηλεκτρονίου
(1897)

Να υπολογίσετε το μήκος κύματος ενός πρωτονίου που κινείται με ταχύτητα 7,30 km/s.

Δίνονται: $h = 6.63 \times 10^{-34}$ J.s, $m = 1.67252 \times 10^{-24}$ g

2. Χρησιμοποιούμε την εξίσωση του de Broglie ($\lambda = h/mv$), όπου m η μάζα του πρωτονίου ($1,67262 \times 10^{-27}$ kg), v η ταχύτητα του πρωτονίου ($7,30$ km/s = $7,30 \times 10^3$ m/s) και h η σταθερά του Planck ($h = 6,626 \times 10^{-34}$ kg · m²/s):

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}}{(1,67262 \times 10^{-27} \text{ kg}) \times (7,30 \times 10^3 \text{ m/s})} = 5,427 \times 10^{-11} \text{ m} = 5,43 \times 10^{-11} \text{ m} (54,3 \text{ pm})$$

Το μήκος κύματος των 54 pm εμπίπτει στην περιοχή των ακτίνων X του φάσματος.

3. Όταν φως που έχει συχνότητα $2,00 \times 10^{16}$ Hz προσπέσει σε επιφάνεια μετάλλου, αποσπώνται ηλεκτρόνια με κινητική ενέργεια $7,50 \times 10^{-18}$ J.

Υπολογίστε:

(α) Τη συχνότητα ν_0 που αντιστοιχεί στην ελάχιστη ενέργεια E_0 για απόσπαση ενός ηλεκτρονίου από το μέταλλο.

(β) Το μήκος κύματος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων.

Υπόδειξη: Για τον υπολογισμό του μήκους κύματος των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων, εφαρμόστε την εξίσωση του de Broglie.

$$\nu_0 = \underline{8,668 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}}$$

$$\lambda = \frac{h}{m_e v}$$

$$v = \sqrt{\frac{2E_{\text{κιν}}}{m_e}} = \sqrt{\frac{2 \times 7,50 \times 10^{-18} \text{ J}}{9,109 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \Rightarrow v = \underline{4,06 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}}$$

$$\lambda = \frac{h}{m_e v} \Rightarrow \lambda = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J s}}{9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} \times 4,06 \times 10^6 \text{ m s}^{-1}} \Rightarrow \lambda = \underline{1,79 \times 10^{-10} \text{ m}} = 179 \text{ pm}$$

Σωστό ή Λάθος?

Στα ραδιοκύματα, που έχουν μεγάλο μήκος κύματος, είναι δύσκολο να αποδείξουμε το σωματιδιακό τους χαρακτήρα, ενώ στις ακτίνες Χ, που έχουν πολύ μικρό μήκος κύματος, είναι δύσκολο να αποδείξουμε τις κυματικές τους ιδιότητες;