

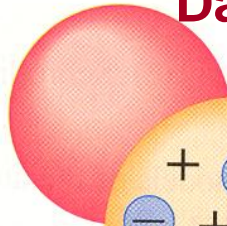
4. Η κβαντική θεωρία του ατόμου

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ:

- Η κυματική φύση του φωτός
- Κβαντικά φαινόμενα και φωτόνια
- Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου
- Κβαντομηχανική
- Κβαντικοί αριθμοί και ατομικά τροχιακά

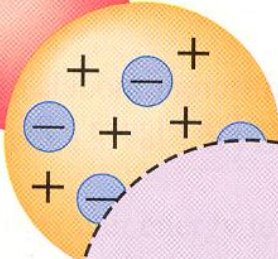
...Η πορεία του ατομικού προτύπου

Dalton (1803)



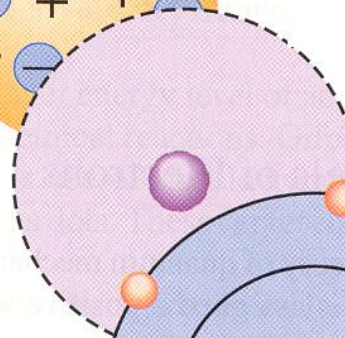
Thomson (1904)

(Θετικά και αρνητικά φορτία)



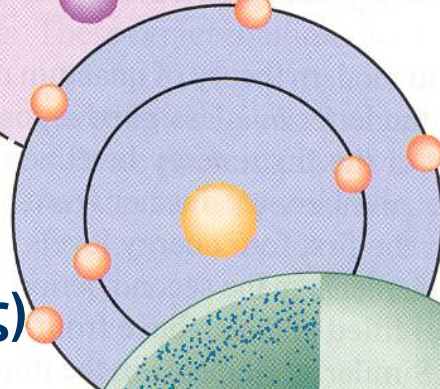
Rutherford (1911)

(Το πυρηνικό άτομο)



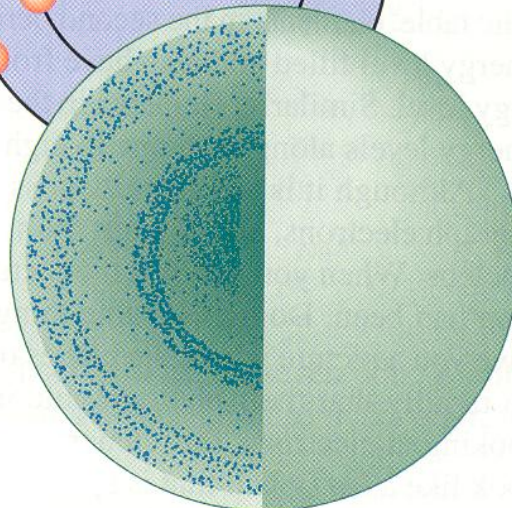
Bohr (1913)

(Επίπεδα ενέργειας)



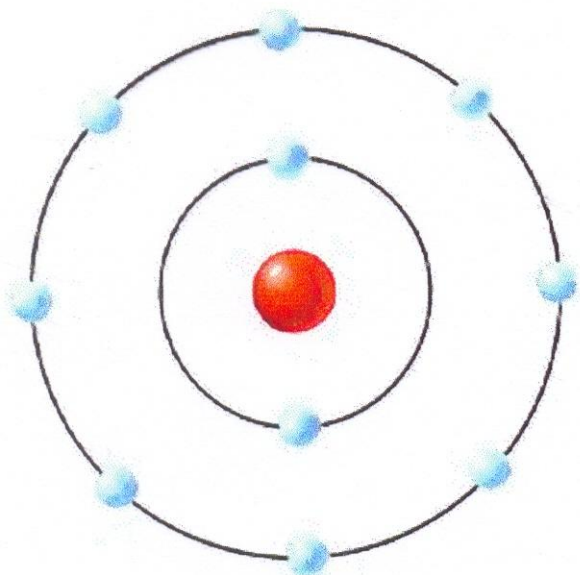
Schrödinger (1926)

(Ηλεκτρονικά νέφη)



Από την εποχή
του **Dalton** μέχρι
τον
Schrödinger,
το ατομικό μας
πρότυπο
τροποποιήθηκε
πολλές φορές.

Ατομικά Πρότυπα



Σύμφωνα με ΚΛΑΣΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ:
Ηλεκτρόνια Κινούμενα πάνω σε κυκλικές τροχιές θα έπρεπε να συμβαίνει:

Διαρκής και Συνεχής Εκπομπή Ακτινοβολίας:

1. Ατομικά **ΦΑΣΜΑΤΑ** Στοιχείων **ΣΥΝΕΧΗ** και όχι **ΓΡΑΜΜΙΚΑ**
2. Ελάττωση κινητικής ενέργειας ηλεκτρονίων και **ΠΤΩΣΗ** τους πάνω στον πυρήνα

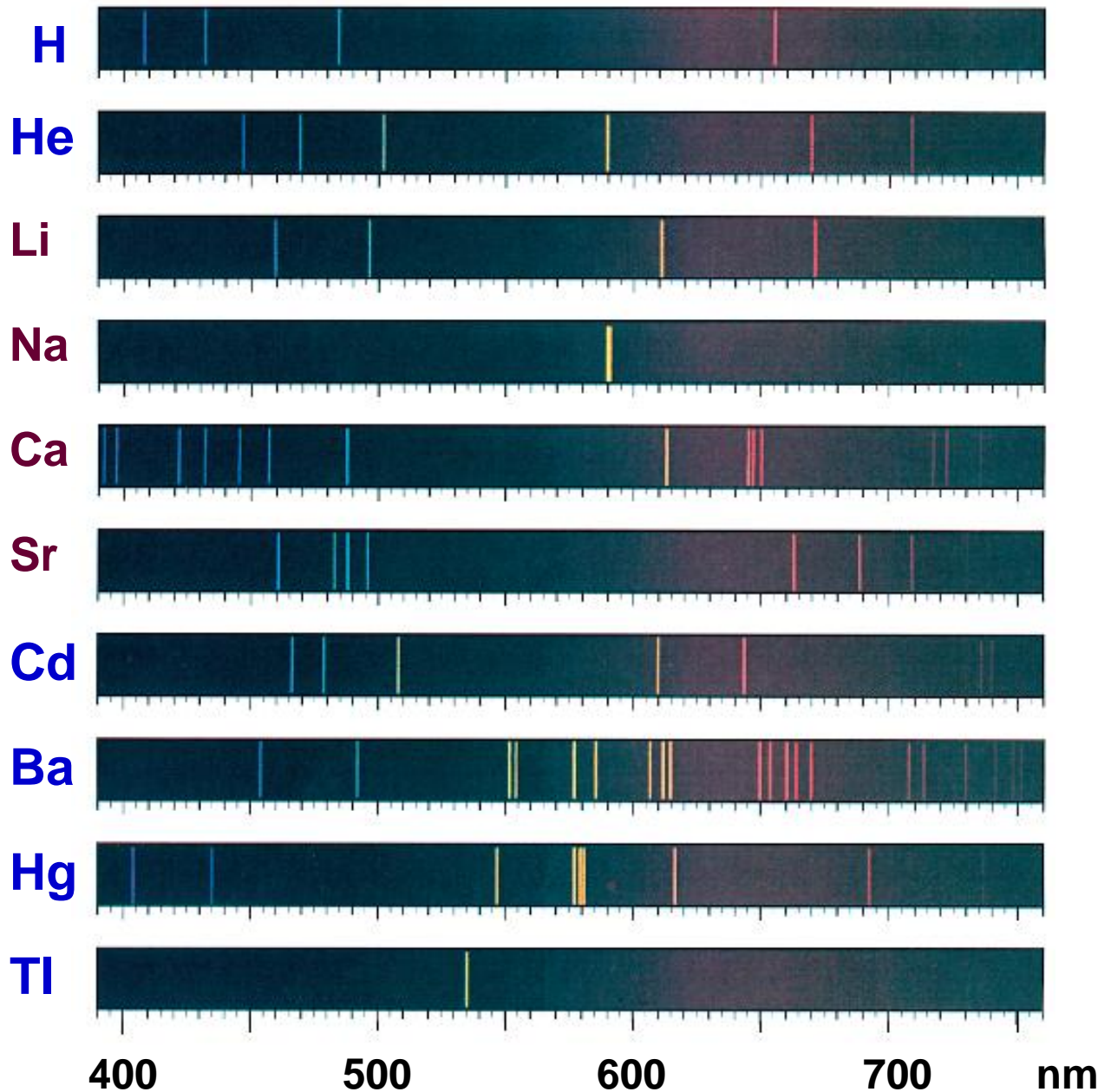
Ατομικό πρότυπο του Rutherford («planet system» model)



Δοκιμασίες φλόγας για στοιχεία των Ομάδων IA και IIA

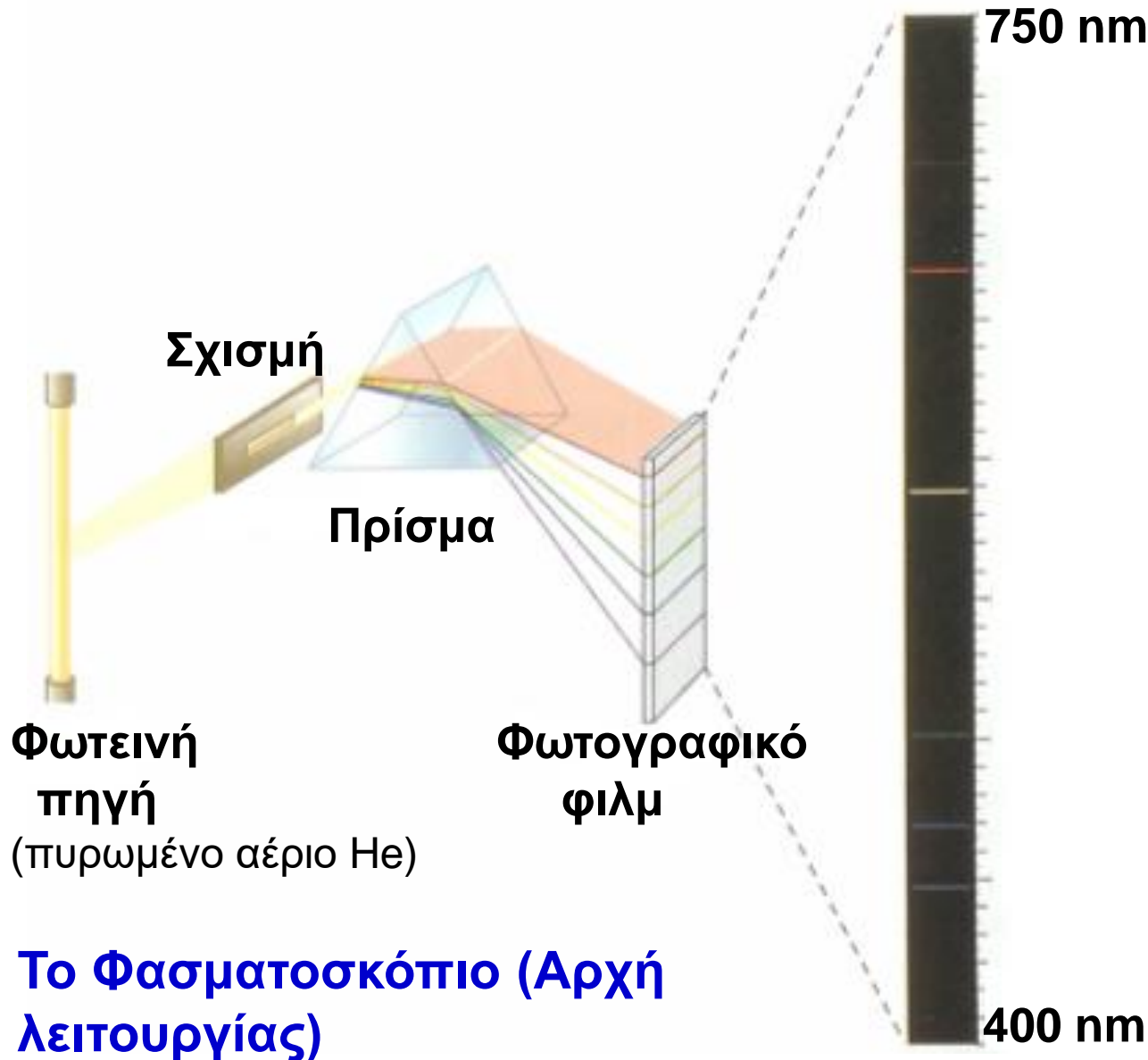
Ένας δακτύλιος από σύρμα που φέρει μικρή ποσότητα δείγματος μεταλλικής ένωσης, τοποθετείται μέσα σε μια φλόγα (χρώματα πυροτεχνημάτων)

Γραμμικά φάσματα εκπομπής



Οι γραμμές
αντιστοιχούν σε
ορατό φως που
εκπέμπεται από
διάφορα άτομα.

Ποιο φάσμα χαρακτηρίζεται ως γραμμικό;

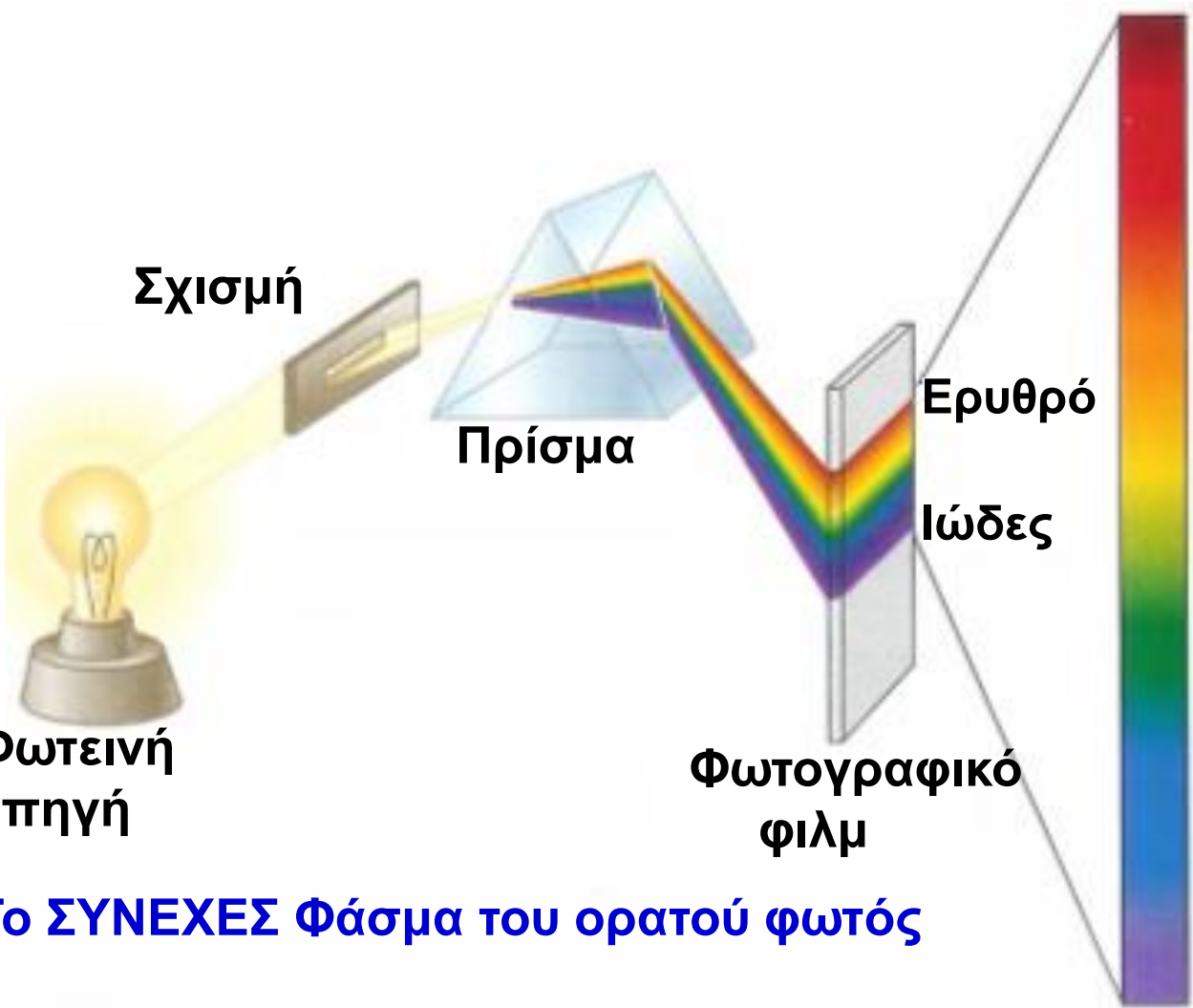


ΦΑΣΜΑΤΟΣΚΟΠΙΟ:
Δέσμη φωτός πάνω σε πρίσμα: Διάθλαση ακτίνων αντιστρόφως ανάλογη προς το μήκος κύματος της δέσμης

Το ΓΡΑΜΜΙΚΟ φάσμα εκπομπής του ηλίου
Έξι έγχρωμες γραμμές στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Καθεμιά αντιστοιχεί σε διαφορετικό μήκος κύματος

Το Φασματοσκόπιο (Αρχή λειτουργίας)

Ποιο φάσμα χαρακτηρίζεται ως συνεχές;



Τα όρια μεταξύ των χρωμάτων του φάσματος δεν είναι σαφή!

Π.χ. πού αρχίζει και πού τελειώνει το πράσινο;

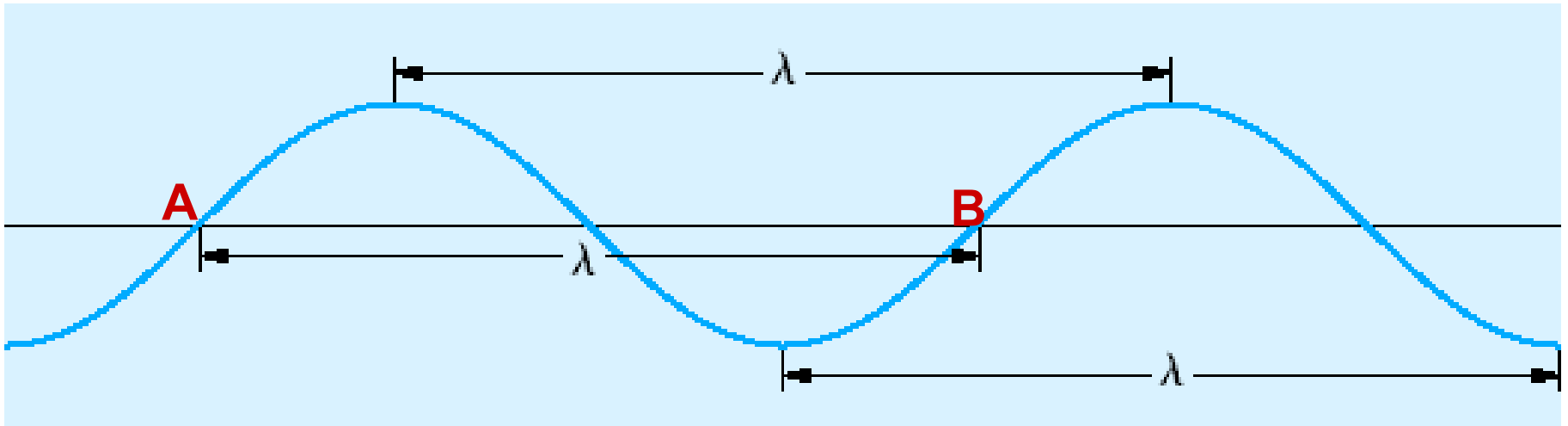
Το ΣΥΝΕΧΕΣ Φάσμα του ορατού φωτός

Δυο θεωρίες εξηγούν τη φύση του φωτός: 1. ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ
2. ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Η κυματική φύση του φωτός

Κύμα: μια συνεχώς επαναλαμβανόμενη μεταβολή ή ταλάντωση μέσα σε ύλη ή σε ένα φυσικό πεδίο.



Μήκος κύματος (λ): η απόσταση ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε διαδοχικά πανομοιότυπα σημεία ενός κύματος.

$$1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$$

Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

Συχνότητα (ν): αριθμός κυμάτων ανά δευτερόλεπτο
(σε $s^{-1} = \text{hertz, Hz}$)



**A = πλάτος
του κύματος**

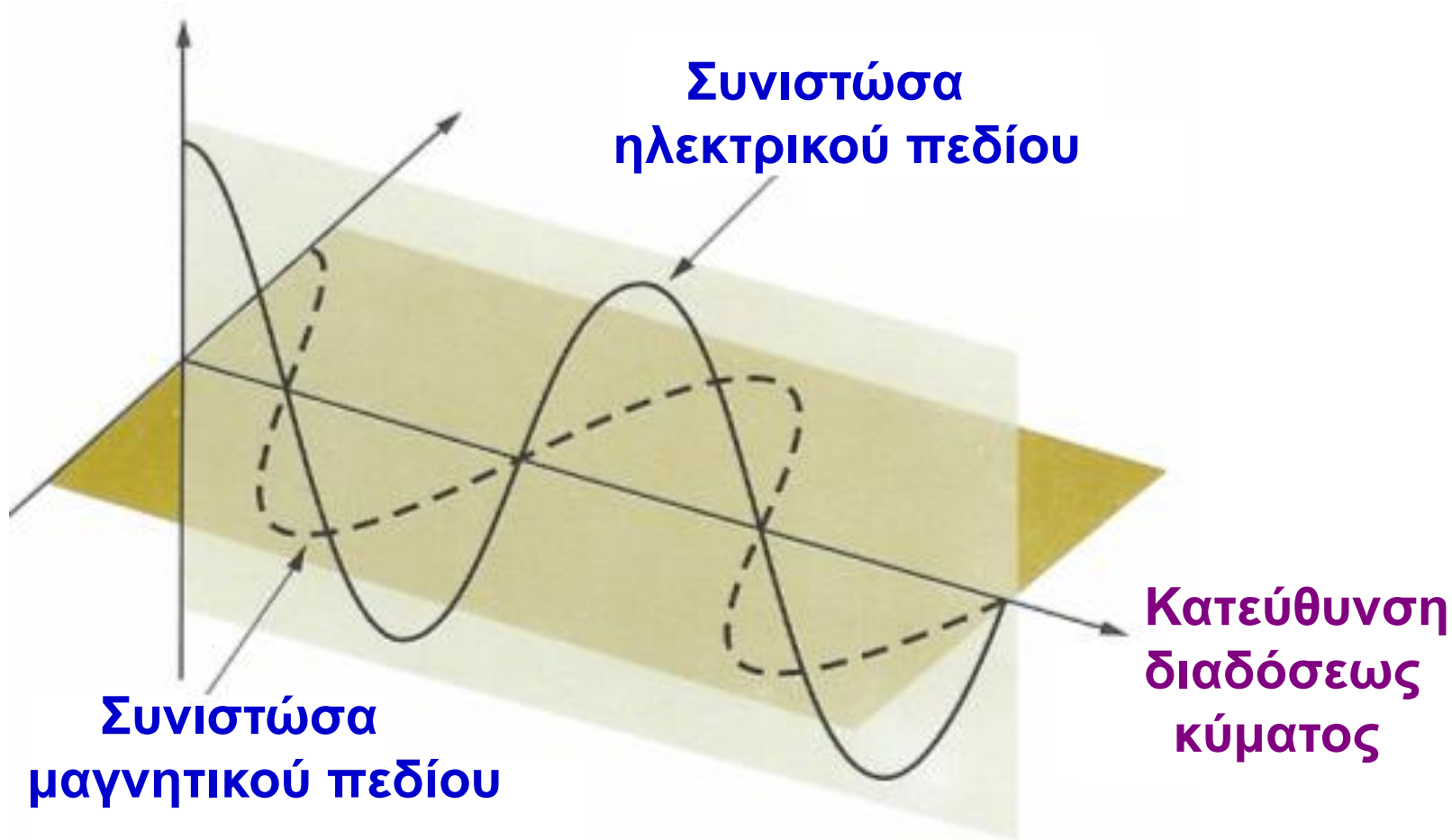
Σχέσεις

$$\begin{aligned}c_A &= c_B \\ \lambda_A &= 2\lambda_B \\ \nu_B &= 2\nu_A\end{aligned}$$

Ταχύτητα κύματος (c): $c = \nu \lambda$ (στο κενό $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)

Τι είναι το ηλεκτρομαγνητικό κύμα

Ταλαντώσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, οι οποίες μπορούν να διαδίδονται μέσα στο χώρο.



Άσκηση 7.1

Εύρεση του μήκους κύματος από τη συχνότητά του

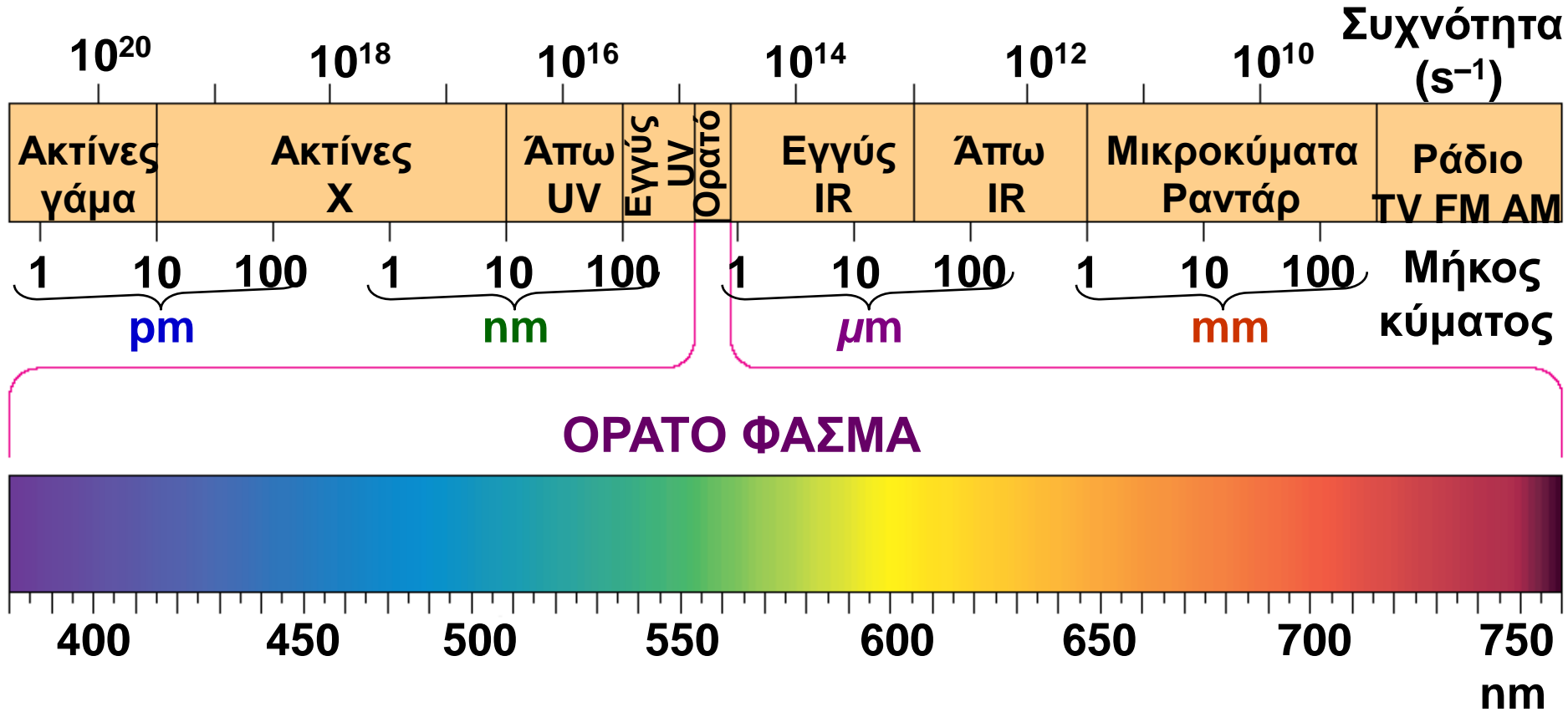
Η συχνότητα της έντονης κόκκινης γραμμής στο φάσμα του καλίου είναι $3,91 \times 10^{14}/\text{s}$. Πόσο είναι το μήκος κύματος αυτού του φωτός σε νανόμετρα;

Λύνουμε ως προς λ την εξίσωση $c = \nu\lambda$, η οποία συσχετίζει το μήκος κύματος με τη συχνότητα και την ταχύτητα του φωτός ($3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$):

$$\lambda = \frac{c}{\nu} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{3,91 \times 10^{14} / \text{s}} = 7,672 \times 10^{-7} \text{ m} = 7,67 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$\text{ή } \lambda = 767 \text{ nm}$$

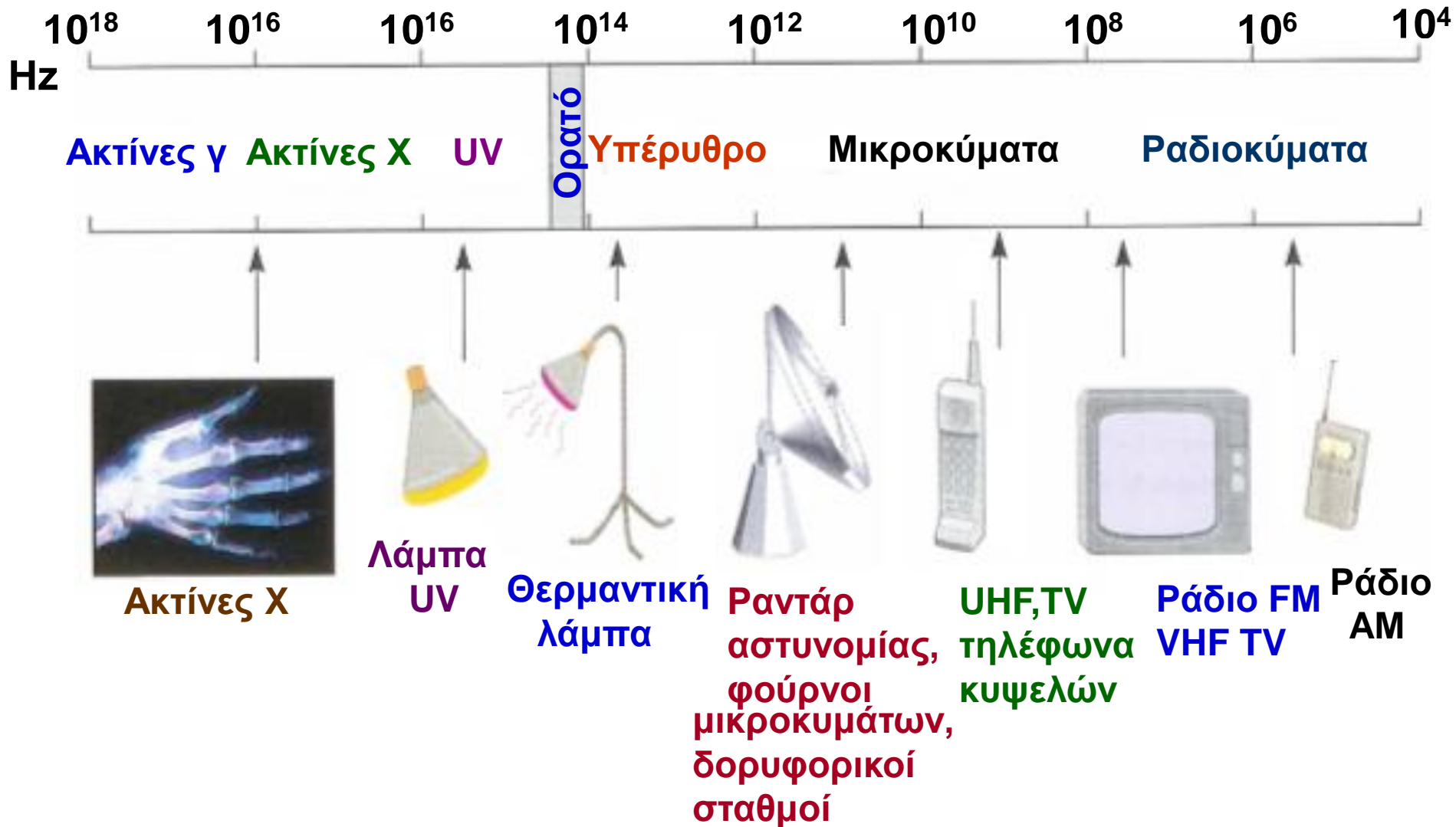
Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα



Το ορατό φως αποτελεί ένα ελάχιστο τμήμα του συνολικού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος!

Τα όρια των διαφόρων περιοχών δεν καθορίζονται επακριβώς.

Εφαρμογές των διαφόρων τύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Εφαρμογές των διαφόρων τύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Εισαγωγή στην κβαντική θεωρία

Κατά την κλασική Φυσική, η ύλη μπορεί να απορροφά ή να εκπέμπει **οποιαδήποτε** ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ποια η άποψη του Planck πάνω σ' αυτό;

Planck: η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται από την ύλη σε **καθορισμένες** στοιχειώδεις ποσότητες, τα **κβάντα**.

Πόση είναι η ενέργεια ενός κβάντου κατά τον Planck;

$$E = h \nu$$

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J s (σταθερά του Planck)}$$

Η ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται σε ακέραια πολλαπλάσια του $h \nu$ ($1h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$ κοκ) \Rightarrow η ενέργεια είναι **κβαντισμένη** (έχει καθορισμένες τιμές).

Τί θα σήμαινε κβάντωση της ενέργειας ενός αυτοκινήτου;

Άσκηση 7.3

Υπολογισμός της ενέργειας ενός φωτονίου

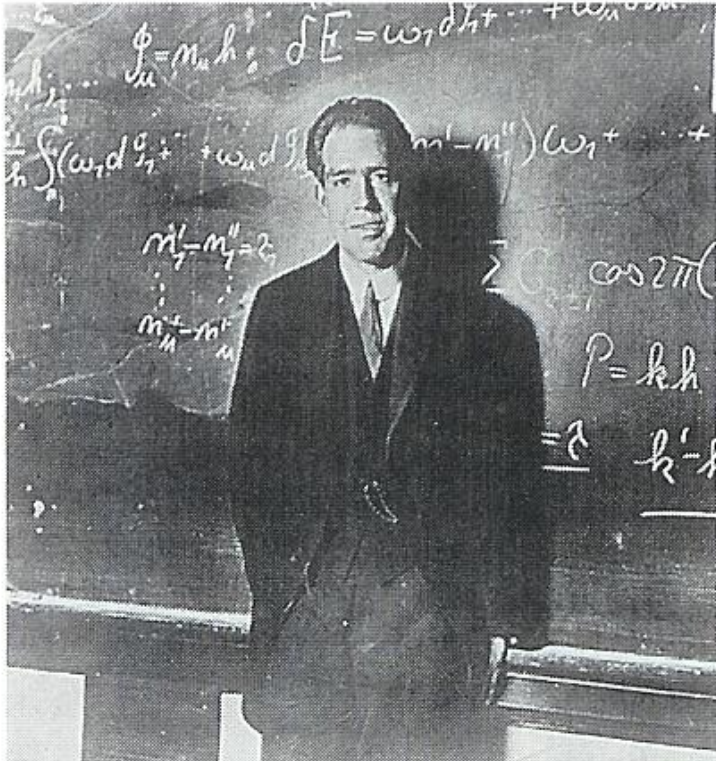
Τα ακόλουθα μήκη κύματος είναι αντιπροσωπευτικά για τις περιοχές **υπερύθρου**, **υπεριώδους** και **ακτίνων-Χ** του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αντίστοιχα:

$$1,0 \times 10^{-6} \text{ m}, 1,0 \times 10^{-8} \text{ m} \text{ και } 1,0 \times 10^{-10} \text{ m}.$$

Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου καθεμιάς ακτινοβολίας;
Ποια ακτινοβολία έχει το μεγαλύτερο ποσόν ενέργειας ανά φωτόνιο; Ποια το λιγότερο;



Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου



Ο δανός φυσικός
Niels Bohr (1885-1962)
Β. Νόμπελ 1922

Αφού το ατομικό πρότυπο του Rutherford δεν μπορούσε να εξηγήσει τη σταθερότητα του ατόμου:

Ο **Bohr** πρότεινε ένα καινούργιο ατομικό μοντέλο ενσωματώνοντας ιδέες της κβαντικής θεωρίας.

Η θεωρία του Bohr στηρίχθηκε στα ατομικά φάσματα και προκειμένου να ερμηνεύσει τις γραμμές του φάσματος του υδρογονατόμου, διατύπωσε δύο βασικές συνθήκες (εκτός από τις κυκλικές τροχιές του e).

Το συνολικό φάσμα του υδρογονατόμου

Πώς περιγράφεται το συνολικό φάσμα του υδρογονατόμου;



Οι δύο βασικές συνθήκες του Bohr

1. Συνθήκη για τα **επίπεδα ενέργειας** του ηλεκτρονίου στο άτομο H:

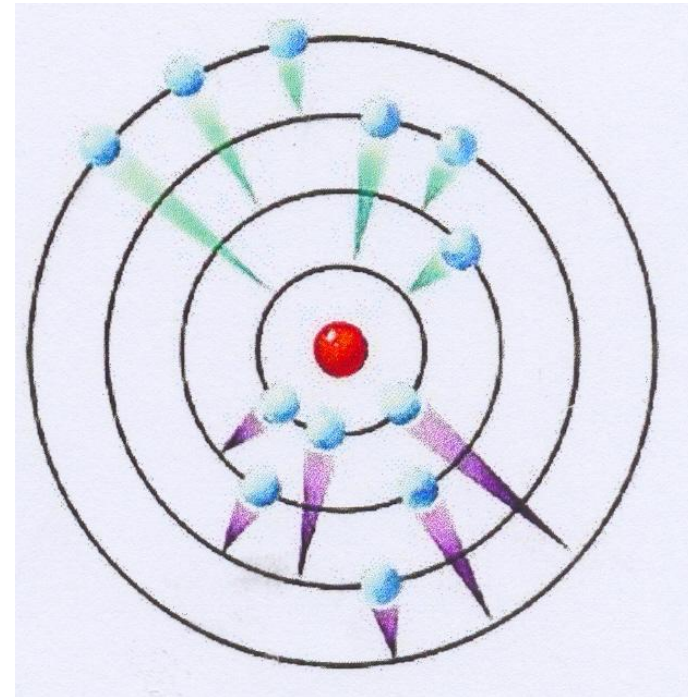
Το e επιτρέπεται να έχει **ορισμένες μόνο τιμές ενέργειας** :

$$E = -\frac{R_H}{n^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \infty$$

Όπου: R_H (σταθερά) = $2,179 \times 10^{-18} \text{ J}$
 n = κύριος κβαντικός αριθμός

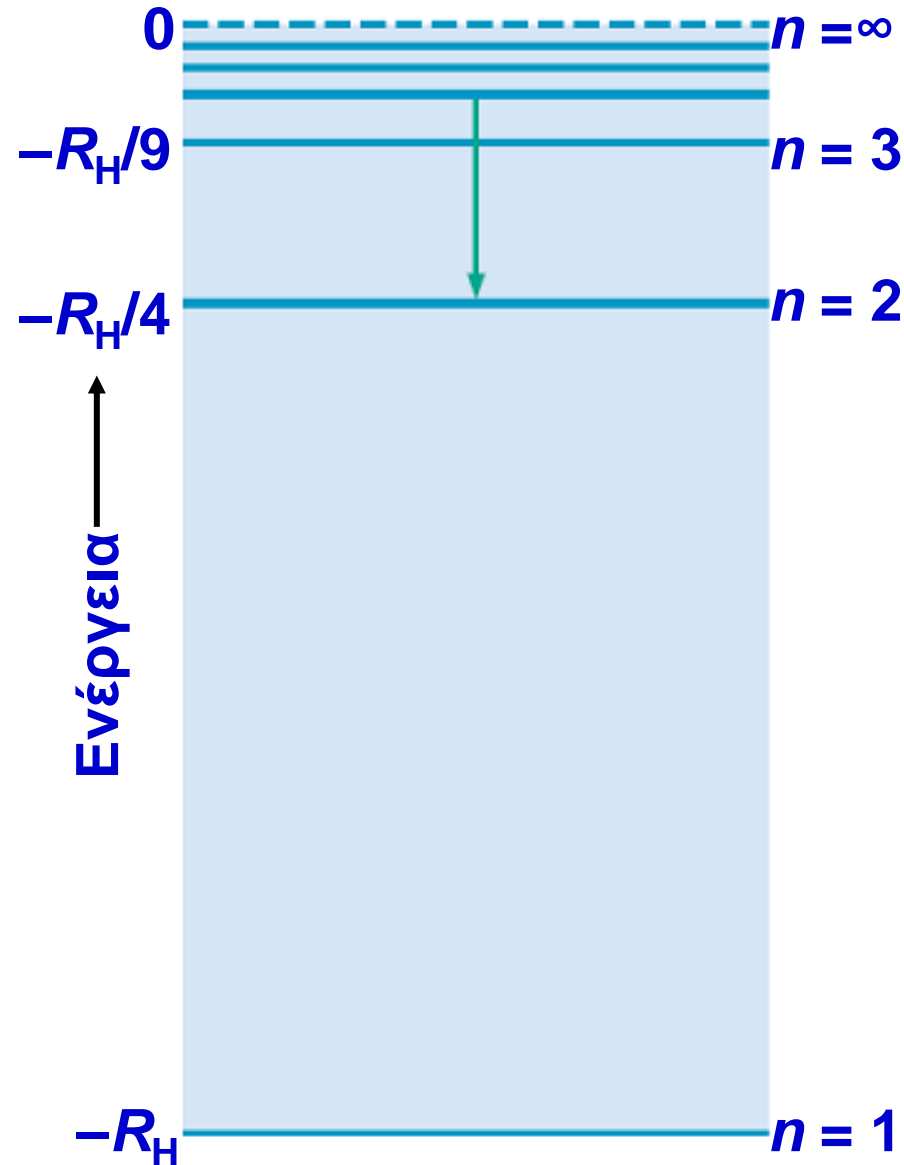
2. Συνθήκη για τις μεταπτώσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των επιπέδων ενέργειας στο άτομο H:

Το e επιτρέπεται να μεταβάλλει ενέργεια μόνο μεταπηδώντας από ένα επίπεδο ενέργειας σε άλλο (μετάπτωση)



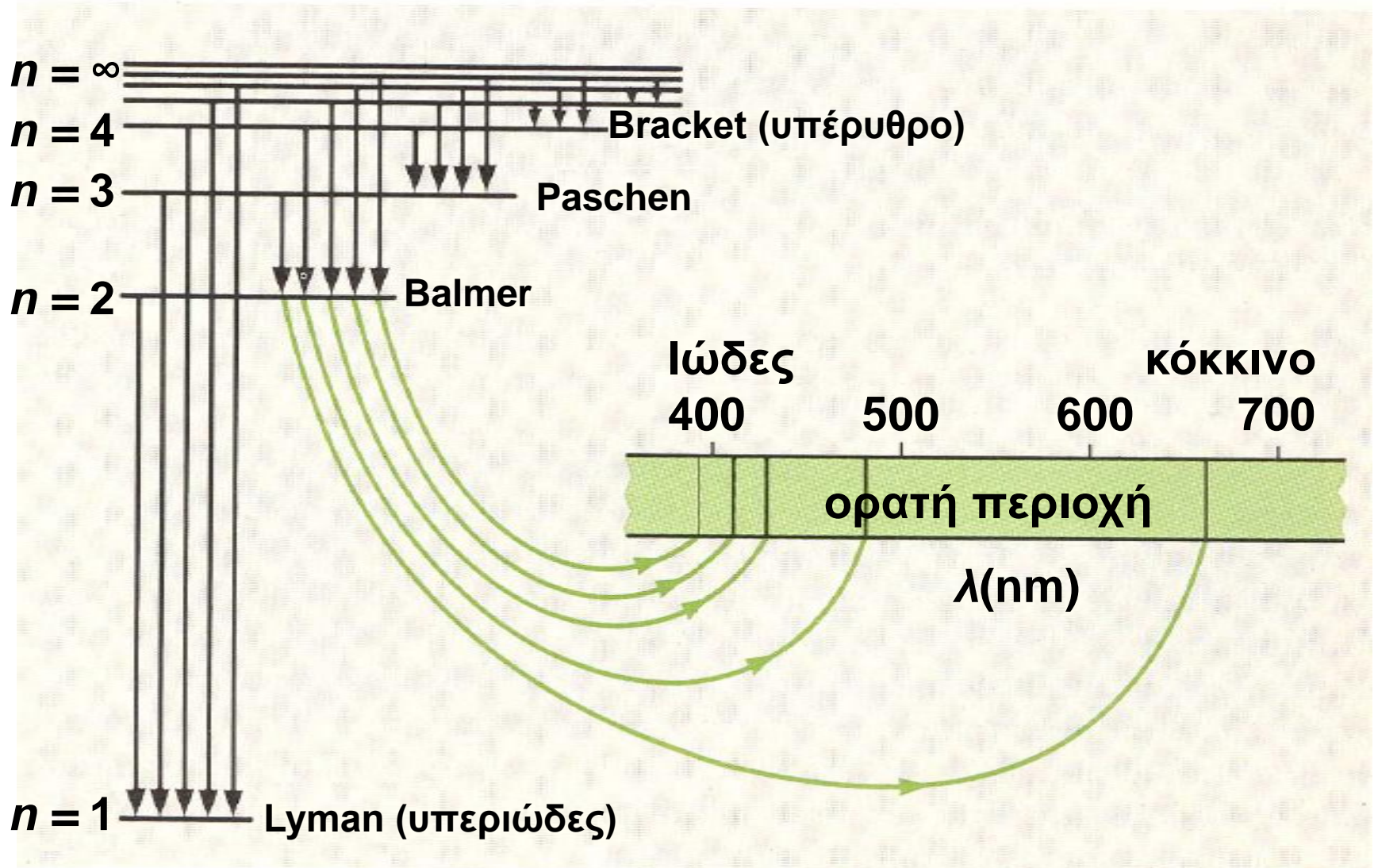
$$\text{Ενέργεια εκπεμπόμενου φωτονίου: } E = E_i - E_f = h\nu$$

Οι ενέργειες για το ηλεκτρόνιο στο άτομο H (Διάγραμμα επιπέδων ενέργειας)



Η ενέργεια παριστάνεται στον κάθετο άξονα (σε κλασματικά πολλαπλάσια του R_H). Το βέλος συμβολίζει μια μετάπτωση του ηλεκτρονίου από το επίπεδο $n = 4$ στο επίπεδο $n = 2$. Αυτή η μετάπτωση συνοδεύεται από εκπομπή φωτός μήκους κύματος 486 nm.

Ερμηνεία του φάσματος του ατόμου H



Για $n = \infty \Rightarrow$ πλήρης απομάκρυνση του e (ιοντισμός)

Ερμηνεία του φάσματος του υδρογονατόμου

Μήκος κύματος (nm)



Υπέρυθρο
Σειρές
Paschen,
Brackett,
Pfund

Ορατό
Σειρά
Balmer

Υπεριώδες
Σειρά Lyman

τα μήκη κύματος, λ , των γραμμών του ορατού φάσματος του ατόμου H υπακούουν σε Εξίσωση Balmer (1885) :

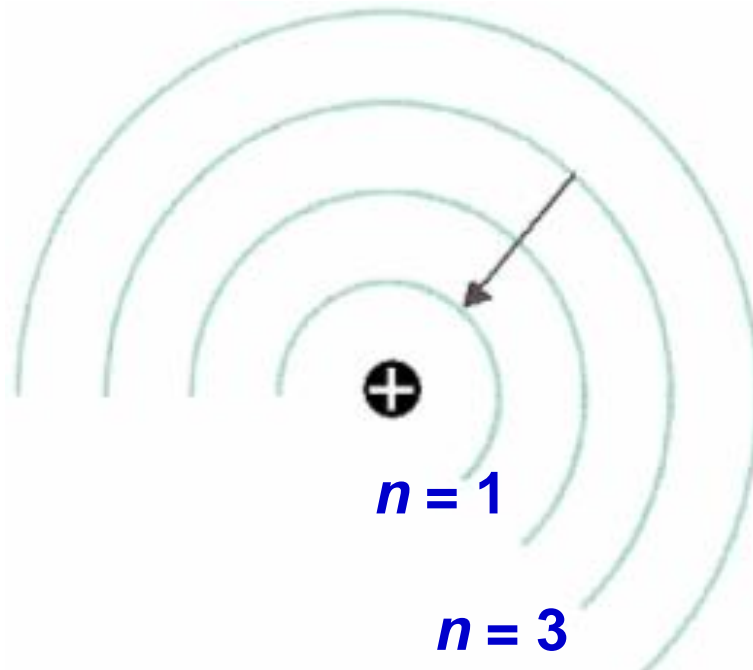
$$\frac{1}{\lambda} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{m}^{-1}$$

$n = \text{ακέραιος} > 2$

Άσκηση 7.4

Προσδιορισμός του μήκους κύματος ή της συχνότητας μιας μετάπτωσης του ηλεκτρονίου του ατόμου H

Υπολογίστε το μήκος κύματος του φωτός που εκπέμπεται από το υδρογόνατομο, όταν το ηλεκτρόνιο μεταπίπτει από το επίπεδο ενέργειας $n = 3$ στο επίπεδο $n = 1$.



Άσκηση 7.4

Συνθήκη 2 του Bohr \Rightarrow

$$h\nu = E_i - E_f = \left(-\frac{R_H}{n_i^2} \right) - \left(-\frac{R_H}{n_f^2} \right) = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$n_f = 1$ και $n_i = 3$ \Rightarrow

$$h\nu = R_H \left(\frac{1}{1^2} \right) - \left(\frac{1}{3^2} \right) = R_H \left(1 - \frac{1}{9} \right) = \frac{8R_H}{9}$$

Η συχνότητα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι:

$$\nu = \frac{8R_H}{9h} = \frac{8}{9} \times \frac{2,179 \times 10^{-18} \text{ J}}{6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} = 2,921 \times 10^{15} / \text{s} = 2,92 \times 10^{15} / \text{s}$$

$$\lambda = c/\nu \Rightarrow \lambda = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{2,92 \times 10^{15} / \text{s}} = 1,027 \times 10^{-7} \text{ m} \quad (103 \text{ nm})$$

Άσκηση

Εκπομπή και απορρόφηση φωτός από άτομα. Προσδιορισμός της διαφοράς ενέργειας μεταξύ επιπέδων ενέργειας ενός ατόμου

Πόση είναι η διαφορά των επιπέδων ενέργειας του ατόμου του νατρίου, αν φως που εκπέμπεται από νάτριο έχει μήκος κύματος 589 nm;

Κβαντομηχανική ή κυματομηχανική

Ποια ήταν τα αναπάντητα ερωτήματα της θεωρίας του Bohr;

1. Φάσματα πολυηλεκτρονικών ατόμων
2. Κυκλικές τροχιές
3. Γιατί η ενέργεια του e είναι κβαντισμένη;

Κβαντομηχανική ή κυματομηχανική: ο κλάδος της Φυσικής που περιγράφει μαθηματικά τις κυματικές ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων.

Η κβαντομηχανική, ένα από τα σημαντικότερα επιτεύγματα του 20ου αιώνα, στηρίχθηκε κυρίως στις ιδέες των:

- De Broglie (Εξίσωση του de Broglie)
- Heisenberg (Αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg) και
- Schrödinger (Κυματική εξίσωση του Schrödinger)

Κβαντομηχανική: Εξίσωση του de Broglie (Δυϊσμός κύματος-σωματιδίου)



Louis de Broglie:

Αν τα κύματα του φωτός μπορούν να συμπεριφέρονται ως υλικά σωματίδια, μήπως και υλικά σωματίδια, όπως τα ηλεκτρόνια, μπορούν να συμπεριφέρονται ως κύματα;

Εξίσωση de Broglie για το υλικό κύμα:

$$\lambda = \frac{h}{m\nu}$$

h = η σταθερά του Planck, m = η μάζα και ν = η ταχύτητα του σωματιδίου

Louis de Broglie (1892-1987)

Άσκηση 7.6

Εφαρμογή της εξίσωσης του de Broglie

Υπολογίστε το μήκος κύματος (σε πικόμετρα) που σχετίζεται με ηλεκτρόνιο κινούμενο με ταχύτητα $2,19 \times 10^6$ m/s.

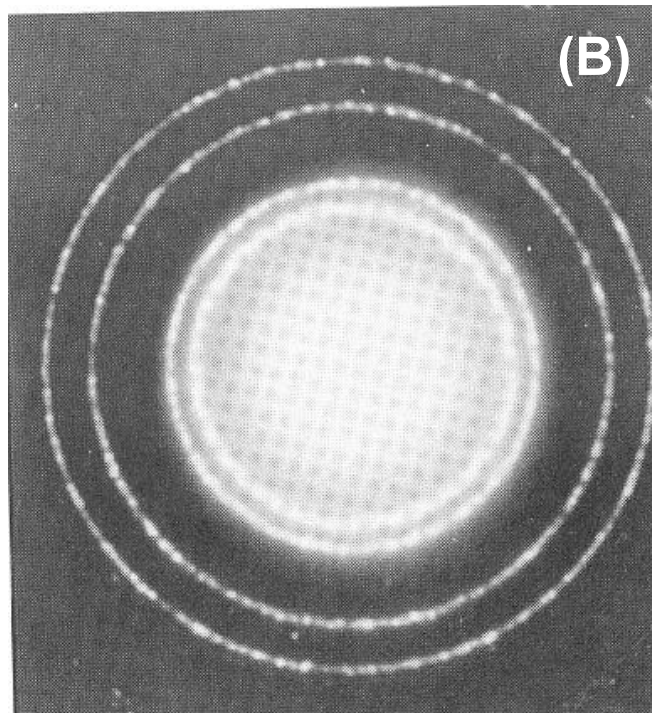
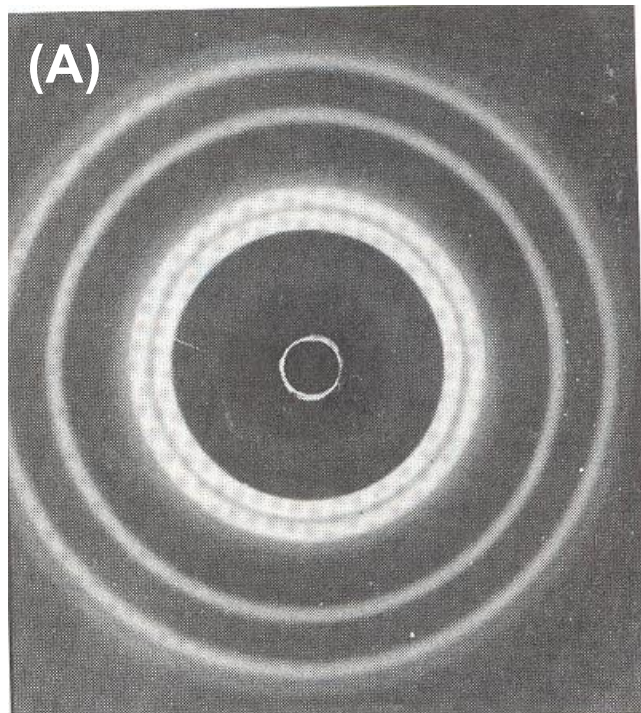
!!! Συγκρίνετε:

Για ένα μπαλάκι του μπέιζμπολ ($m = 0,145$ kg, $u = 27$ m/s) \Rightarrow
 $\lambda = ;$

Πώς αποδεικνύεται ότι το ηλεκτρόνιο έχει κυματικές ιδιότητες;

Πείραμα **Davisson-Germer** και (περίθλαση e σε κρυστάλλους, 1927)

Κατευθύνοντας μια δέσμη ηλεκτρονίων (που είναι σωματίδια) προς ένα κρύσταλλο νικελίου παρατήρησαν στην οθόνη ένα σύνολο ομοκεντρικών δακτυλίων, όμοιο με αυτό που έδιναν οι ακτίνες-Χ, **οι οποίες είναι κύματα**. Αυτοί θα αναμένονταν από **ηλεκτρόνια με λ** που δίνεται από την **εξίσωση de Broglie**



(A) Περίγραμμα
περίθλασης
ακτίνων-Χ σε
φύλλο Al

(B) Περίγραμμα
περίθλασης
ηλεκτρονίων
σε φύλλο Al

G. P. Thomson
Nobel P. 1937

Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο: Μια καταπληκτική εφαρμογή της κυματικής φύσης του ηλεκτρονίου

Ruska (1933), Νόμπελ Φυσικής 1986

Η «δέσμη» του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου (SEM, Scanning Electron Microscope) αποτελείται από υψηλής ταχύτητας ηλεκτρόνια και οι «φακοί» του είναι ηλεκτρομαγνητικά πεδία.
Μεγεθύνσεις > 200.000, Ανάλυση 0,5 nm



Απεικόνιση με ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης

Κεφάλι εξωγήινου τέρατος;
Όχι. Είναι το κεφάλι μιας σφήκας με όλες εκείνες τις λεπτομέρειες που μόνο το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης μπορεί να μας δώσει.

(Για δημιουργία αντίθεσης, έχει προστεθεί χρώμα.)