

7. Η ΚΒΑΝΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΑΤΟΜΟΥ

Φωτεινά κύματα, φωτόνια και η θεωρία του Bohr

ΣΚΟΠΟΣ

Σκοπός αυτής της ενότητας είναι να κατανοήσουμε τη φύση του φωτός και τις πληροφορίες που μάς δίνουν τα φωτεινά κύματα στην ερμηνεία της ηλεκτρονικής δομής των ατόμων. Αυτός ο σκοπός θα επιτευχθεί μελετώντας

1. Την κυματική φύση του φωτός
2. Κάποια κβαντικά φαινόμενα και
3. Τη θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

Προσδοκώμενα αποτελέσματα

Όταν θα έχετε μελετήσει αυτή την ενότητα, θα μπορείτε να:

- ❖ Ορίζετε το μήκος κύματος και τη συχνότητα ενός κύματος και να τα συσχετίζετε με την ταχύτητα του φωτός.
- ❖ Περιγράφετε τις διαφορετικές περιοχές του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.
- ❖ Περιγράφετε με αδρές γραμμές τον τρόπο παραγωγής και την εικόνα του ατομικού φάσματος του υδρογόνου.
- ❖ Εξηγείτε έννοιες όπως, κβάντο, φωτόνιο, κβάντωση ενέργειας, σταθερά του Planck και να δίνετε δύο παραδείγματα κβαντισμένων καταστάσεων.
- ❖ Περιγράφετε και να ερμηνεύετε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
- ❖ Διατυπώνετε τις παραδοχές του Bohr για το υδρογονάτομο.
- ❖ Συσχετίζετε την ενέργεια φωτονίου με τα διάφορα επίπεδα ενέργειας ενός ατόμου.
- ❖ Προσδιορίζετε το μήκος κύματος ή τη συχνότητα μιας μετάπτωσης στο υδρογονάτομο.
- ❖ Περιγράφετε τη διαφορά μεταξύ εκπομπής και απορρόφησης φωτός από ένα άτομο.

Έννοιες κλειδιά

- ❖ Γραμμικό φάσμα
- ❖ Επίπεδα ενέργειας
- ❖ Ηλεκτρομαγνητικό φάσμα
- ❖ Μήκος κύματος (λ)
- ❖ Σταθερά του Planck
- ❖ Συνεχές φάσμα
- ❖ Συχνότητα (ν)
- ❖ Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- ❖ Φωτόνια

Ebbing – Gammon (Ενότητες)

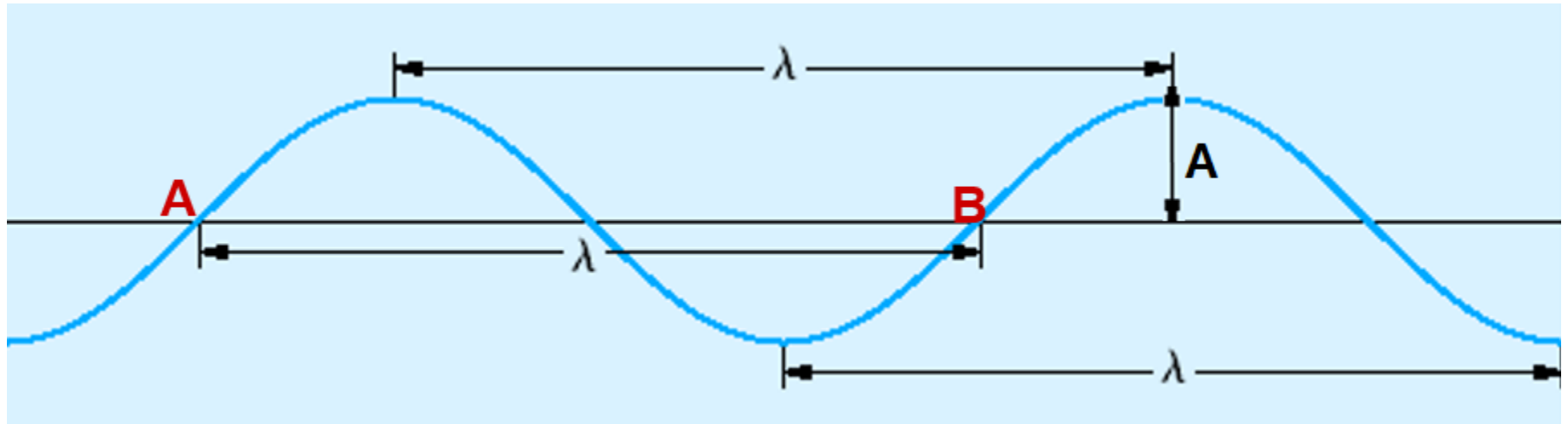
7.1 Η κυματική φύση του φωτός

7.2 Κβαντικά φαινόμενα και φωτόνια

7.3 Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

7.1 Η κυματική φύση του φωτός

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



Κάθετη διατομή ενός υδάτινου κύματος

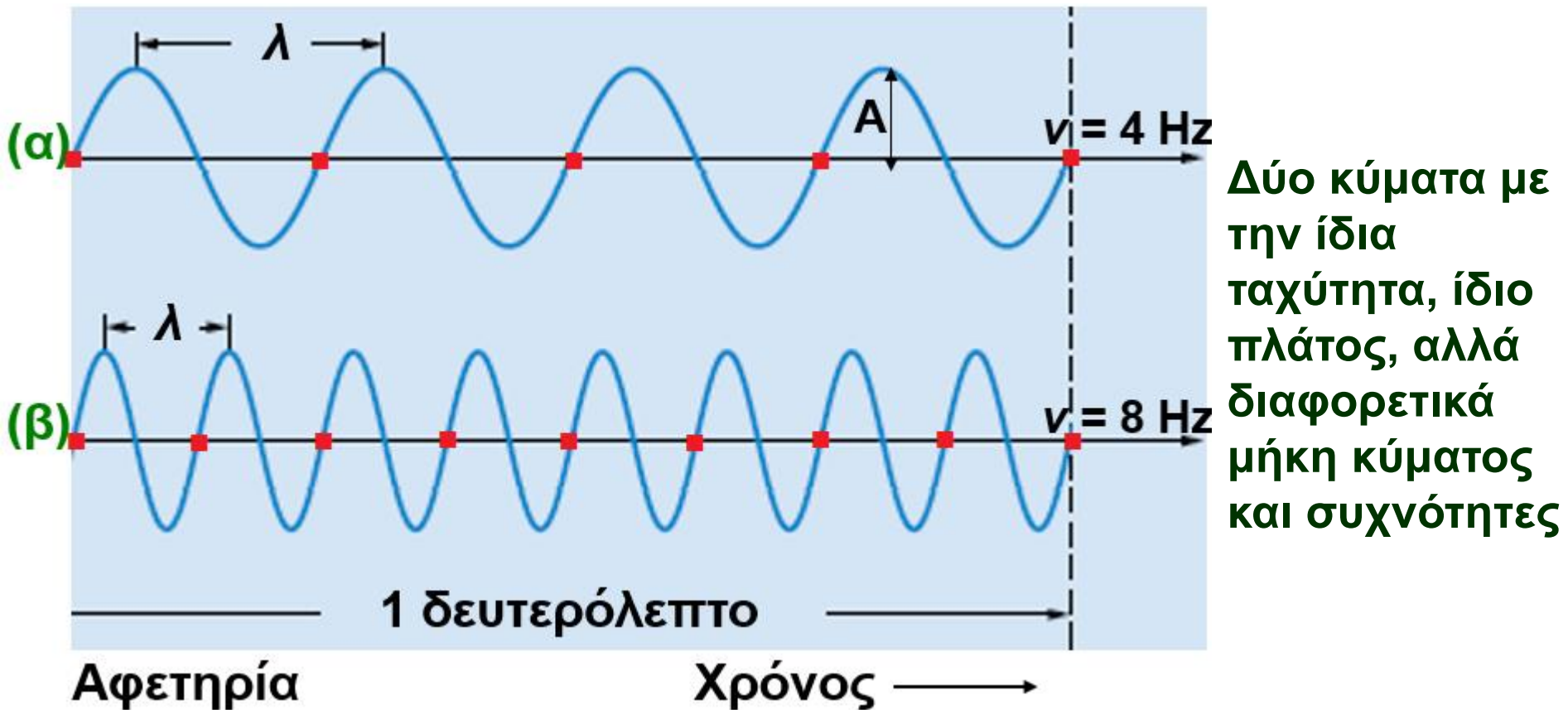
Μήκος κύματος (λ): η απόσταση ανάμεσα σε δύο οποιαδήποτε διαδοχικά πανομοιότυπα σημεία ενός κύματος (σε nm, $1 \text{ nm} = 1 \times 10^{-9} \text{ m}$)

Πλάτος κύματος (A): η κατακόρυφη απόσταση από τη νοητή ευθεία διάδοσης του κύματος μέχρι την κορυφή ενός κύματος (= πλάτος ταλάντωσης)

Συχνότητα (ν): ο αριθμός των μηκών κύματος που περνούν από ένα σταθερό σημείο σε ένα δευτερόλεπτο (σε $s^{-1} = \text{hertz, Hz}$)

Ταχύτητα κύματος (c): $c = \nu \lambda$

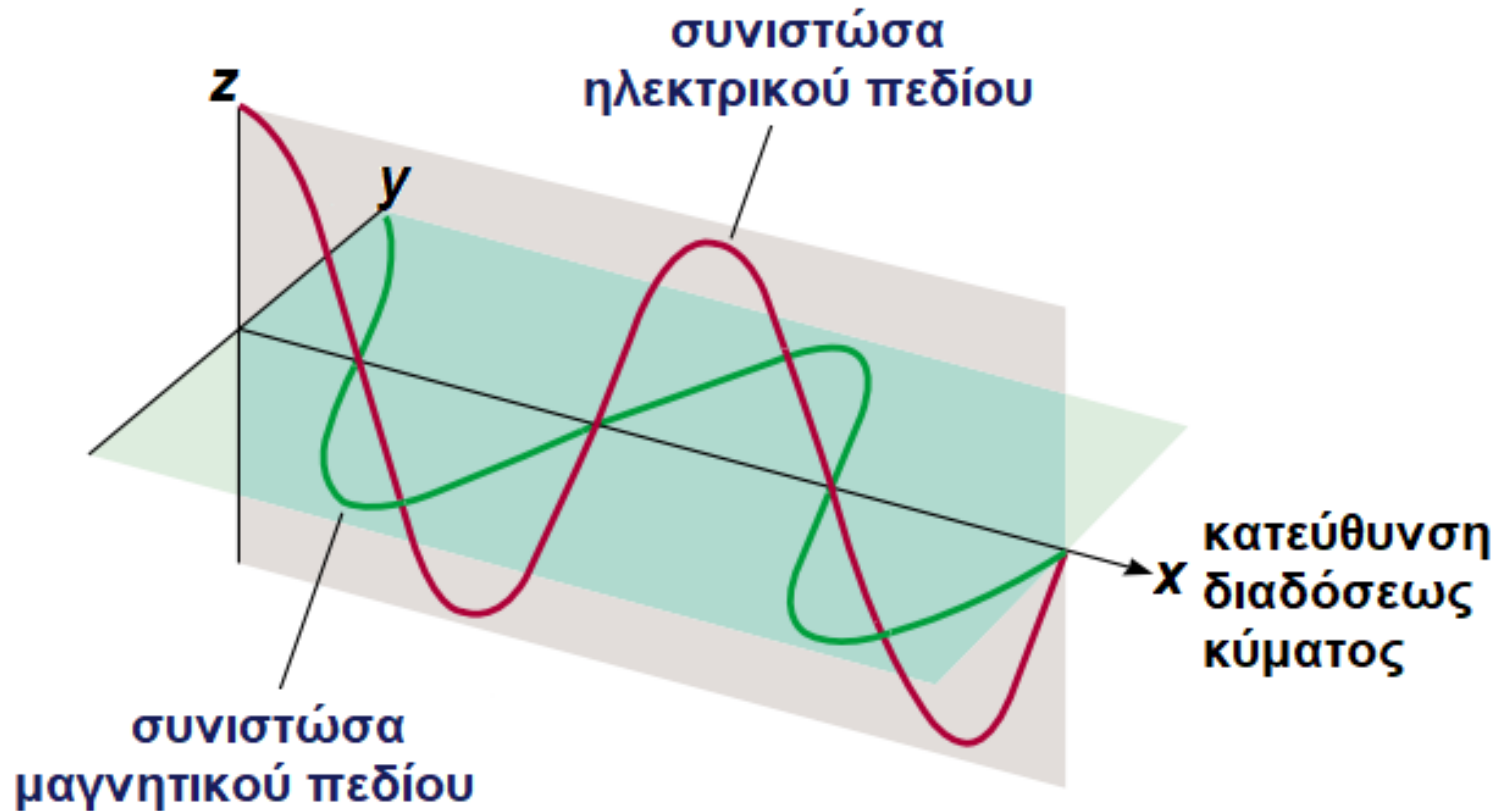
Και το φως είναι κύμα με ταχύτητα στο κενό $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$)



Σχέσεις μεταξύ των κυμάτων (α) και (β): $c_{\alpha} = c_{\beta}$ $\lambda_{\alpha} = 2\lambda_{\beta}$ $\nu_{\beta} = 2\nu_{\alpha}$

Ορατό φως, υπεριώδεις, ακτίνες Χ, ραδιοκύματα κ.λπ. είναι όλα μορφές **ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας**

Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα έχει δύο συνιστώσες:



Οι δύο συνιστώσες του ηλεκτρομαγνητικού κύματος έχουν το ίδιο μήκος κύματος, την ίδια συχνότητα και το ίδιο πλάτος, όμως ταλαντώνονται σε επίπεδα που είναι κάθετα τόσο μεταξύ τους, όσο και ως προς την κατεύθυνση διαδόσεως του κύματος.

Παράδειγμα 7.1

Υπολογισμός της συχνότητας φωτός από το μήκος κύματος

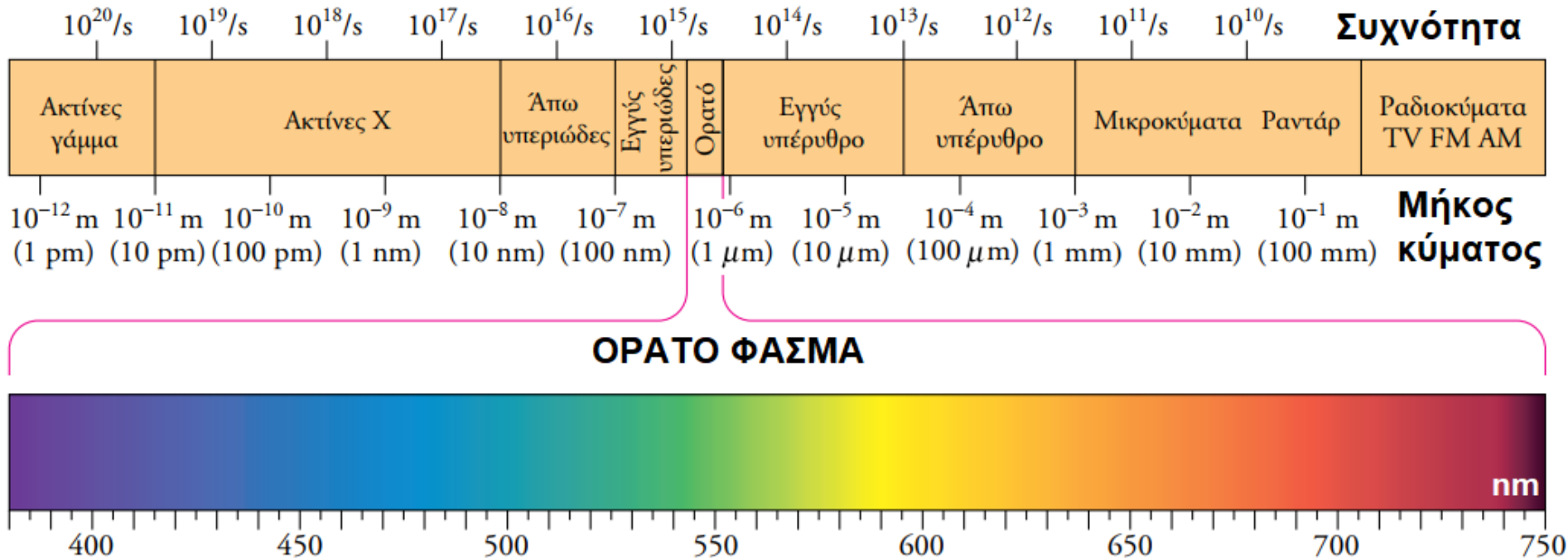
Το μήκος κύματος του πράσινου φωτός των φωτεινών σηματοδοτών της τροχαίας είναι 522 nm. Πόση είναι η συχνότητα αυτής της ακτινοβολίας;

Απάντηση

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{2,998 \times 10^8 \text{ m/s}}{522 \times 10^{-9} \text{ m}} = 5,74 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \quad \text{ή} \quad (5,74 \times 10^{14} \text{ Hz})$$

Τι είναι το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα;

είναι η περιοχή συχνοτήτων ή μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



ΟΡΑΤΟ ΦΑΣΜΑ

nm

400

450

500

550

600

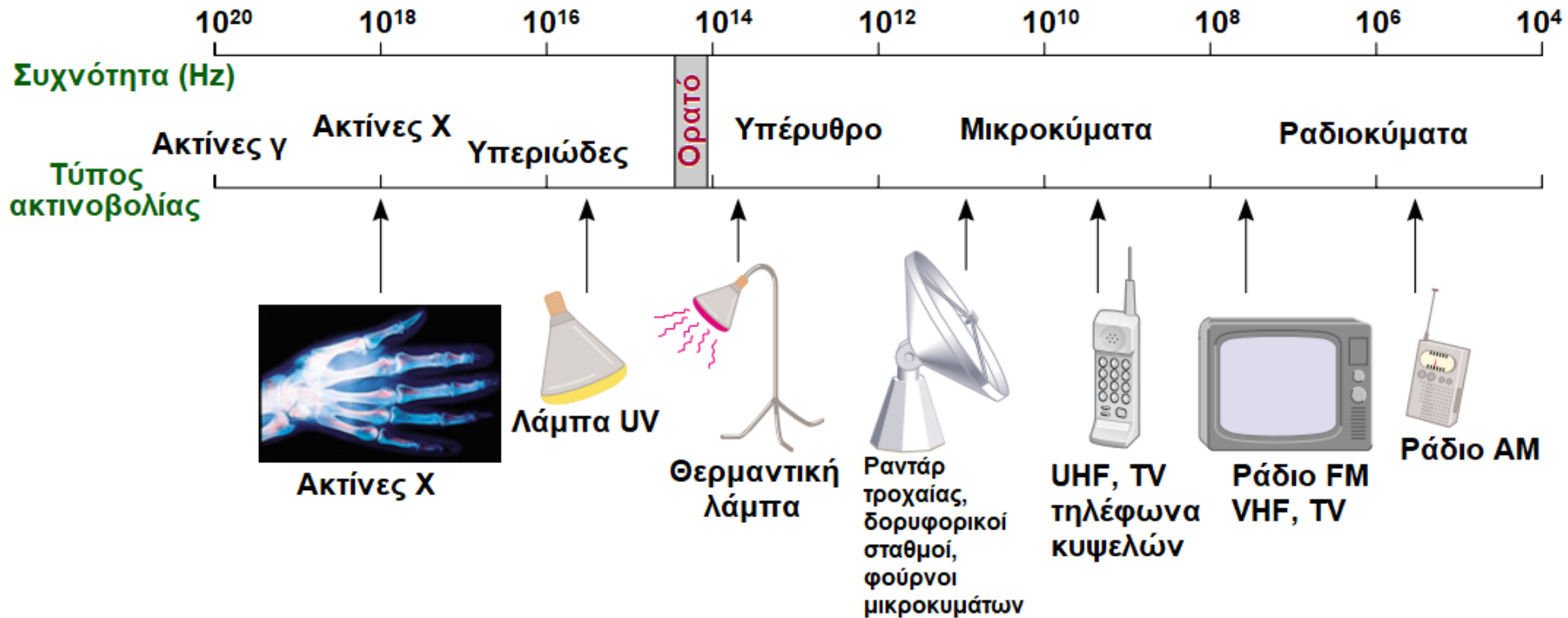
650

700

750

1. Το ορατό φως αποτελεί ένα ελάχιστο τμήμα του συνολικού ηλεκτρομαγνητικού φάσματος! Να θυμάσαι! όρια ~ 400 – 800 nm
2. Ηλεκτρομαγνητικά κύματα υψηλών συχνοτήτων έχουν μικρά μήκη κύματος, και αντιστρόφως.
3. Τα όρια των διαφόρων περιοχών δεν καθορίζονται επακριβώς.

Εφαρμογές των διαφόρων τύπων ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



7.2 Κβαντικά φαινόμενα και φωτόνια

(α) Κβάντωση ενέργειας του Planck

Κατά την κλασική Φυσική, η ύλη μπορεί να απορροφά ή να εκπέμπει **οποιαδήποτε** ποσότητα ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας. Ποια ήταν η άποψη του Planck πάνω σ' αυτό; Planck: η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια απορροφάται ή εκπέμπεται από την ύλη, όχι κατά τρόπο **συνεχή**, αλλά κατά **στοιχειώδεις ποσότητες ενέργειας, τα κβάντα**.

Πόση είναι η ενέργεια ενός κβάντου κατά τον Planck;

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

Κατά την Κβαντική Θεωρία:

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



Max Planck
(1858-1947)



ριπή κβαντισμένη
σφαίρες ~ κβάντα



τόνος βιολιού συνεχής
με αλλαγή της θέσης
των δακτύλων πάνω
στις χορδές



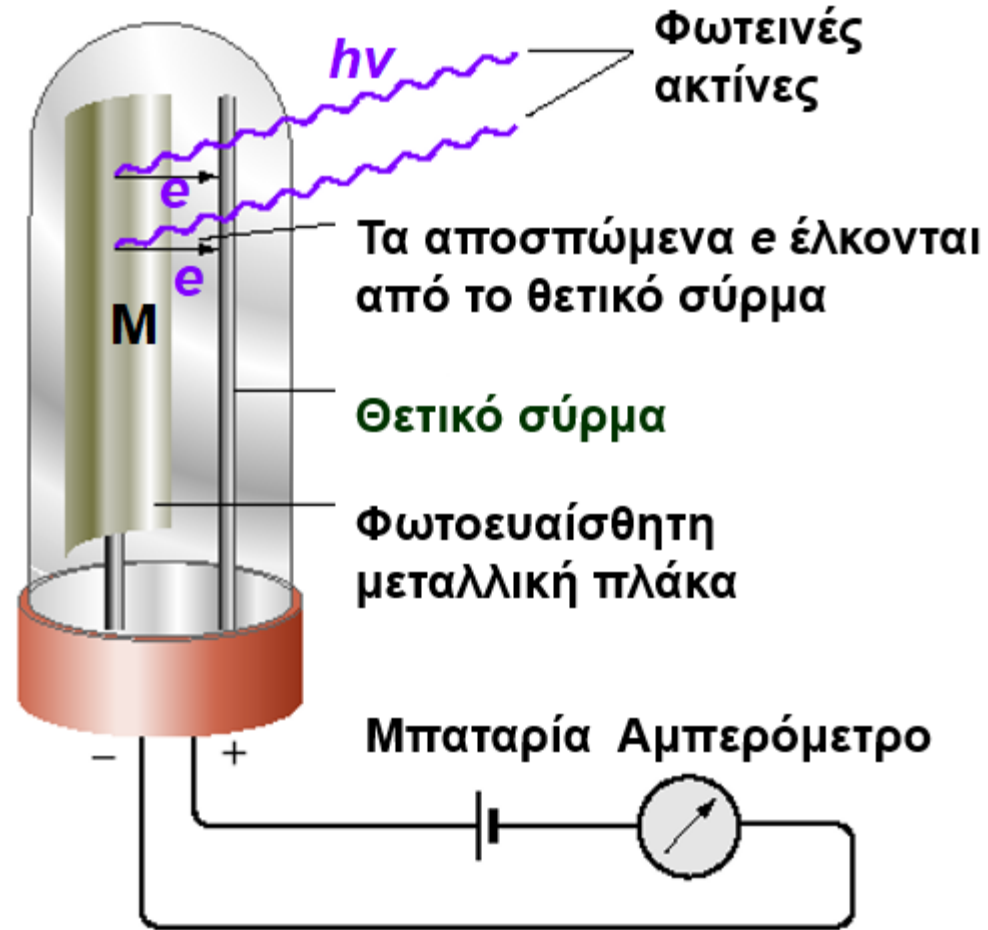
τόνος ενός πιάνου
μπορεί να μεταβάλ-
εται μόνο βαθμιαία
(Οι νότες είναι
κβαντισμένες)

Τι θα σήμαινε κβάντωση της ταχύτητας ενός αυτοκινήτου;

(β) Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο:

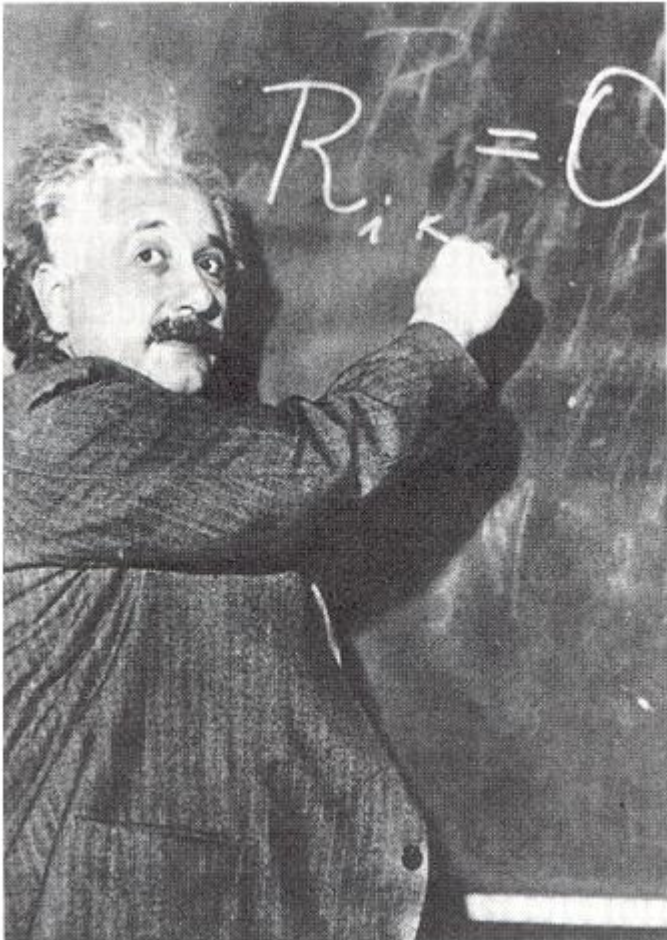
η εκτίναξη ηλεκτρονίων από την επιφάνεια ενός μετάλλου M ή από κάποιο άλλο υλικό, όταν πάνω σε αυτό προσπίπτει φως, το οποίο έχει συχνότητα ν μεγαλύτερη από μια οριακή τιμή ν_0 χαρακτηριστική του μετάλλου.



M = αλκαλιμέταλλο, κυρίως Cs
Εφαρμογή: Φωτοκύτταρα

Η επέκταση της θεωρίας του Planck από τον Einstein (1905)

Ερμηνεία φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Einstein



Albert Einstein (1879-1955)
Βραβείο Νομπέλ Φυσικής
1921

1. Ο Einstein ονόμασε τα κβάντα του φωτός φωτόνια. Κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια, ανάλογη προς τη συχνότητα του φωτός ($E = nh\nu$, $n = 1, 2, 3, \dots$), δηλαδή η φωτεινή ενέργεια είναι κβαντισμένη.
2. Ο Einstein δέχθηκε ότι ένα φωτόνιο που προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του μετάλλου μεταδίδει όλη του την ενέργεια σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο (e). Ένα e αποσπάται από το μέταλλο, όταν κτυπηθεί από ένα φωτόνιο.
3. Το φωτόνιο αυτό πρέπει να έχει μια ελάχιστη ενέργεια (έργο εξαγωγής $E_0 = h\nu_0$), προκειμένου να αποσπάσει το ηλεκτρόνιο από τις ελκτικές δυνάμεις που το κρατούν δέσμιο στο μέταλλο.

Η ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τον Einstein (συνέχεια)

4. Όταν το φωτόνιο κτυπά το μέταλλο, η ενέργειά του $E = h\nu$ απορροφάται από το ηλεκτρόνιο. Τότε το φωτόνιο παύει να υπάρχει ως σωματίδιο και λέμε ότι έχει απορροφηθεί.

5. Αν η $E < E_0$, το e διατηρεί τη θέση του στο μεταλλικό πλέγμα, ενώ αν είναι $E > E_0$, το e υπερνικά τις δυνάμεις που το συγκρατούν μέσα στο μέταλλο και αποσπάται.

Το πλεόνασμά της E μετατρέπεται σε $E_{κιν} = \frac{1}{2} m v^2$ του e :

$$\frac{1}{2} m v^2 = h\nu - h\nu_0$$

Ποιο ήταν το δίλημμα της θεωρίας του Einstein;

τελικά το φως είναι **κύμα** ή αποτελείται από **σωματίδια**;

Η απάντηση, όσο παράδοξη κι αν φαίνεται, είναι: το φως διαθέτει τόσο **κυματικές**, όσο και **σωματιδιακές ιδιότητες** (**δυϊσμός κύματος-σωματιδίου του φωτός**).

Η δυαδική αυτή φύση είναι χαρακτηριστικό **όλης της ύλης**.

!!! Πώς η εξίσωση $E = h\nu$ δείχνει αυτόν τον δυϊσμό;

Το E είναι η ενέργεια ενός σωματιδίου φωτός ή φωτονίου
το ν είναι η συχνότητα του συνδεδεμένου με αυτό κύματος

Παράδειγμα 7.2

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο: Εφαρμογές

Για να αποσπασθεί ένα ηλεκτρόνιο από μια γυαλιστερή επιφάνεια ψευδαργύρου, θα πρέπει το προσπίπτον φωτόνιο να έχει ελάχιστη ενέργεια $E_0 = 6,94 \times 10^{-19} \text{ J}$.

(α) Μπορεί ένα φωτόνιο με μήκος κύματος 210 nm να προκαλέσει απόσπαση ηλεκτρονίου από ψευδάργυρο;

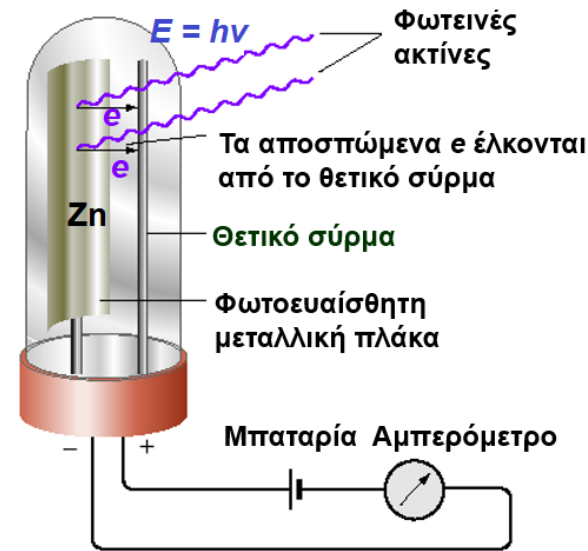
(β) Εάν ναι, πόση είναι η μέγιστη ενέργεια του αποσπασμένου e ;

Απάντηση

(α) Ενέργεια φωτονίου με $\lambda = 210 \text{ nm}$

$$E = h\nu, \quad \nu = \frac{c}{\lambda} \Rightarrow E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$= \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ J s})(3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1})}{210 \times 10^{-9} \text{ m}} = 9,47 \times 10^{-19} \text{ J} > E_0 \Rightarrow \text{ναι}$$



(β) $E_{\text{κιν}} = E - E_0 = 9,47 \times 10^{-19} \text{ J} - 6,94 \times 10^{-19} \text{ J} = 2,53 \times 10^{-19} \text{ J}$

Το ατομικό πρότυπο του Rutherford

(Γιατί δεν έγινε αποδεκτό;)

Ποιο ήταν το ατομικό πρότυπο του Rutherford;

Το άτομο αποτελείται από έναν πυρήνα ο οποίος συγκεντρώνει το μεγαλύτερο μέρος της μάζας και όλο το θετικό φορτίο.

Γύρω από τον πυρήνα κινούνται αρκετά ηλεκτρόνια, ώστε να κάνουν το άτομο ηλεκτρικά ουδέτερο.

Τι λέει η κλασική θεωρία για ένα ηλεκτρικά φορτισμένο σωματίδιο (όπως είναι το ηλεκτρόνιο) το οποίο περιφέρεται γύρω από ένα κέντρο;

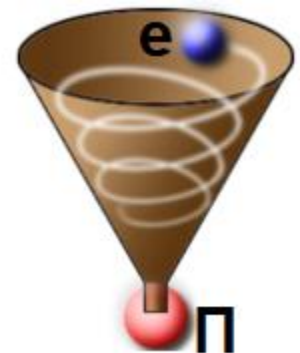
(α) Το e θα έχανε διαρκώς ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

(β) Κάτι τέτοιο θα ανάγκαζε το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου, να κινηθεί σπειροειδώς και να πέσει πάνω στον πυρήνα και μάλιστα σε χρόνο 10^{-10} s.

Συμπέρασμα: Ένα τέτοιο ατομικό πρότυπο δεν εξηγεί τη σταθερότητα του ατόμου!



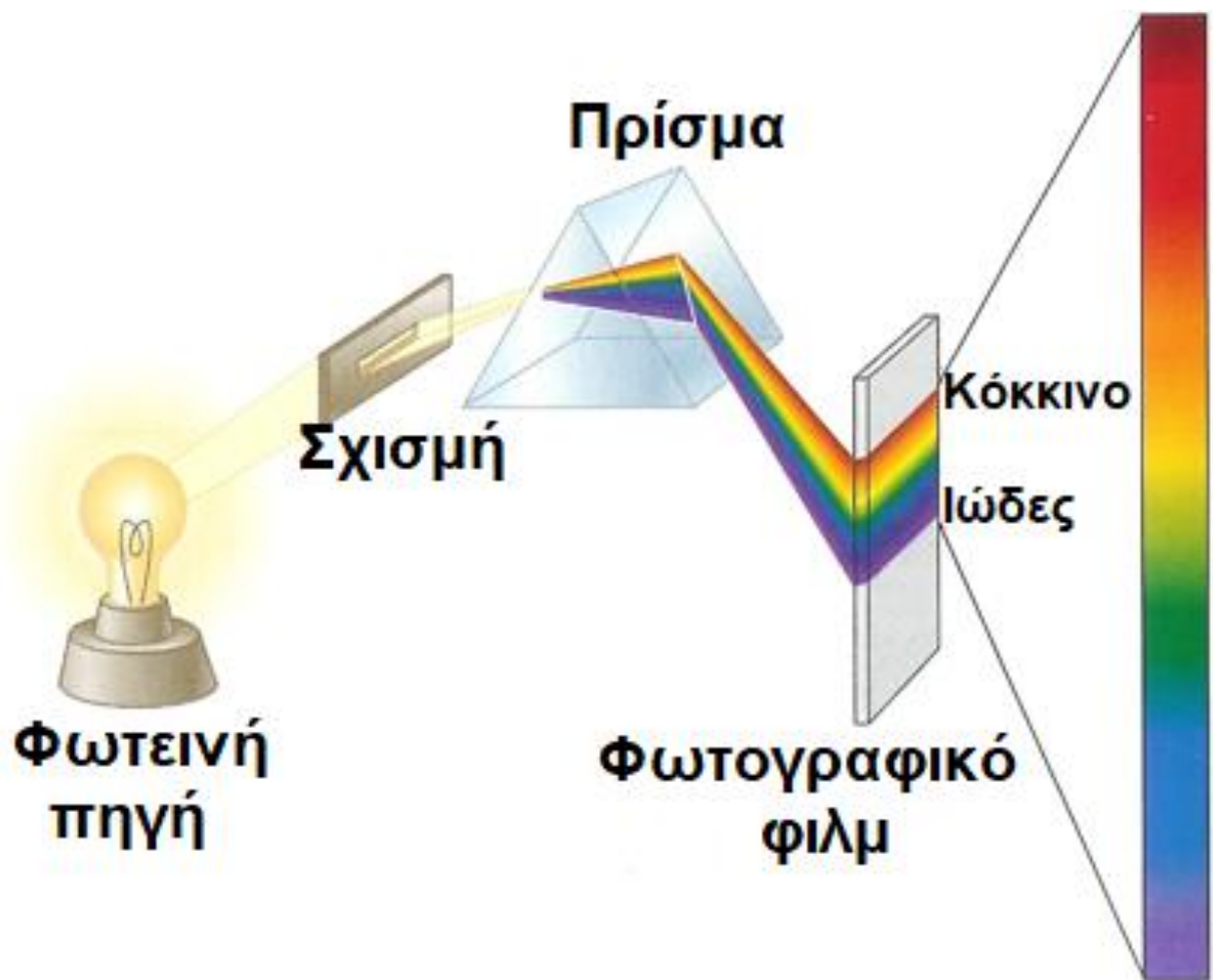
Ernest
Rutherford
1871-1937



7.3 Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου

(α) Ατομικά και γραμμικά φάσματα

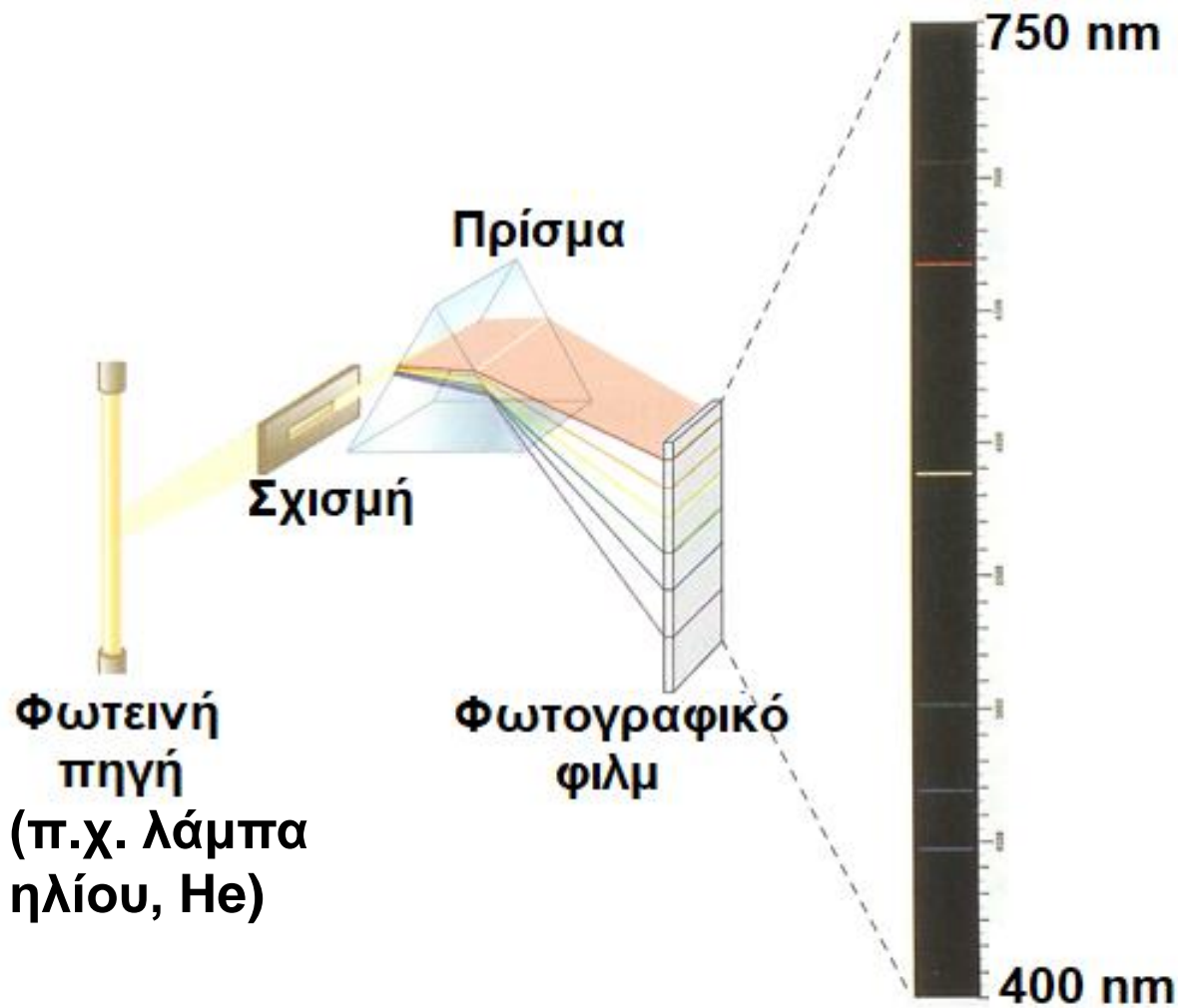
Ποιο φάσμα χαρακτηρίζουμε ως **συνεχές**;



Φάσμα ορατού
φωτός (συνεχές)
πού αρχίζει
και πού
τελειώνει π.χ.
το πράσινο;

Η θεωρία του Bohr για το άτομο του υδρογόνου (Ο ρόλος των ατομικών γραμμικών φασμάτων)

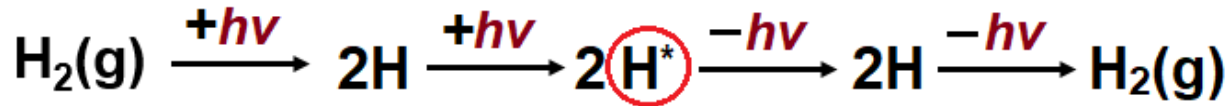
Ποιο φάσμα χαρακτηρίζεται ως **γραμμικό**;



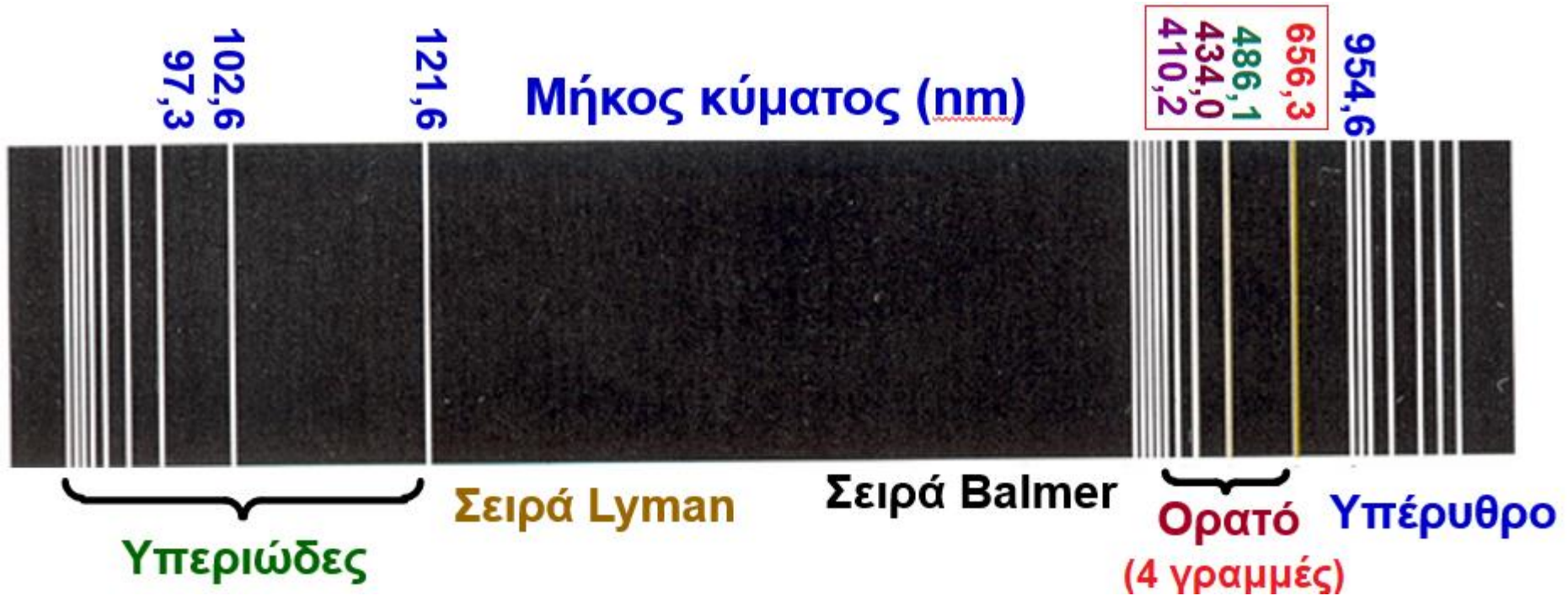
Το φάσμα εκπομπής του ηλίου (He)

Έξι έγχρωμες γραμμές στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος

Το συνολικό φάσμα του υδρογονατόμου



Πώς περιγράφεται το συνολικό φάσμα του υδρογονατόμου;



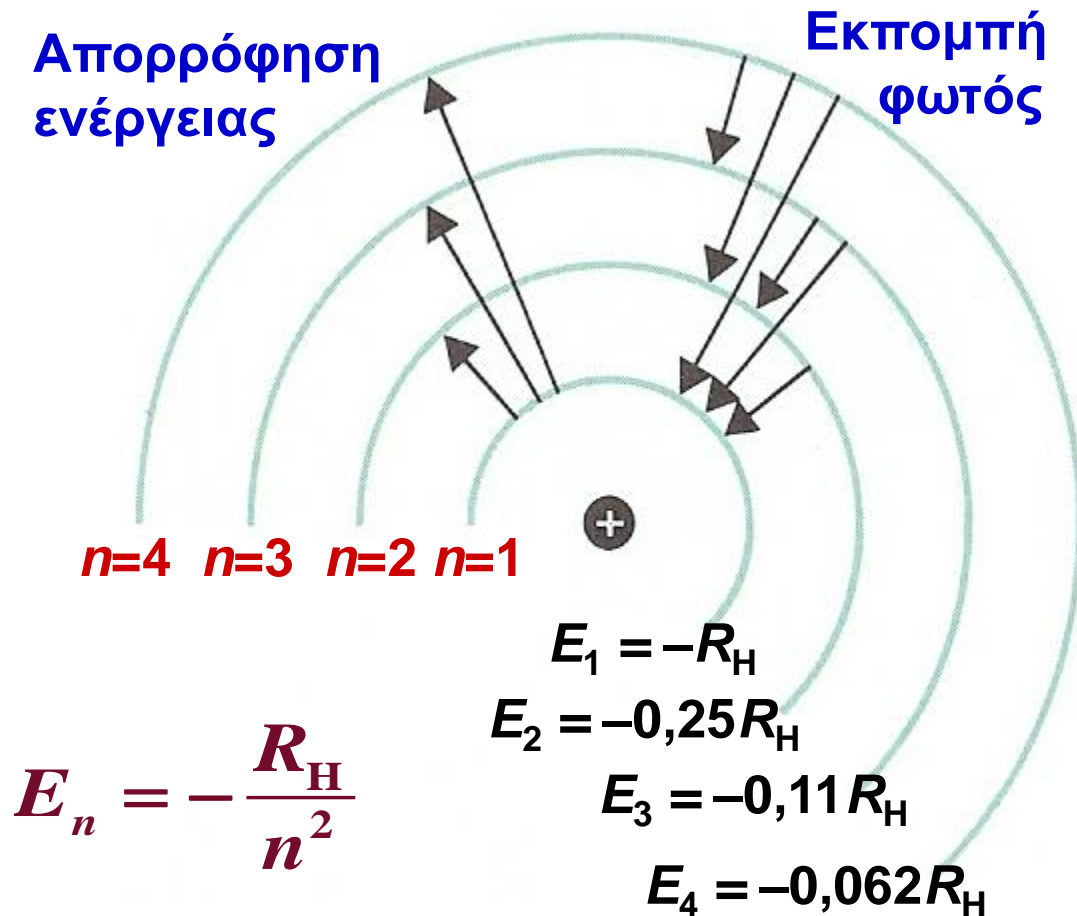
Σε ποια εξίσωση υπακούουν τα μήκη κύματος (λ) των γραμμών του ορατού φάσματος του υδρογονατόμου;

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

$n = \text{ακέραιος} > 2$

Εξίσωση Balmer (1885)

Απορρόφηση ενέργειας και εκπομπή φωτός από το άτομο Η



Πότε έχω απορρόφηση και πότε εκπομπή ενέργειας (φωτός) από το άτομο Η;

Στην τροχιά με $n = 1 \Rightarrow$ **θεμελιώδης κατάσταση**, ελάχιστη ενέργεια.

ακτίνα τροχιάς $a_0 = 53 \text{ pm}$ (ακτίνα του Bohr)

Σε τροχιά με $n = 2, 3, 4, \dots \Rightarrow$ **διεγερμένη κατάσταση**

Πώς προκύπτουν οι τιμές $E_1, E_2, E_3, E_4, \dots$;

Απόδειξη της εξίσωσης Balmer από τη θεωρία του Bohr

2η Παραδοχή του Bohr: Για επίπεδα ενέργειας E_i και E_f } Ισχύουν γενικά!
3η Παραδοχή του Bohr: $h\nu = (E_f - E_i)$ }

$$\left. \begin{aligned} E_i &= -\frac{R_H}{n_i^2} \\ E_f &= -\frac{R_H}{n_f^2} \end{aligned} \right\} \Delta E = \left(-\frac{R_H}{n_f^2} \right) - \left(-\frac{R_H}{n_i^2} \right) = -R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (1)$$

!!! Όταν απορροφάται ενέργεια (διέγερση e), τότε $\Delta E = h\nu$

Όταν εκπέμπεται ενέργεια (όπως π.χ. εδώ), τότε $\Delta E = -h\nu \Rightarrow$

$$h\nu = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{R_H}{hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (2)$$

Αντικατάσταση τιμών στην (2):

$R_H = 2,179 \times 10^{-18} \text{ J}$, $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$, $c = 2,998 \times 10^8 \text{ m/s}$, $n_f = 2$

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

Εξίσωση Balmer

Παράδειγμα 7.3

Ερμηνεία του συνολικού φάσματος του ατόμου H

Οι τέσσερις γραμμές στο ορατό φάσμα του ατόμου H αποτελούν τη λεγόμενη σειρά Balmer και προκύπτουν από την Εξίσωση (1) για $n_f = 2$ και $n_i = 3, 4, 5...$ Ποιες άλλες σειρές γραμμών υπάρχουν στο συνολικό φάσμα του ατόμου H και πώς προκύπτουν;

Απάντηση

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

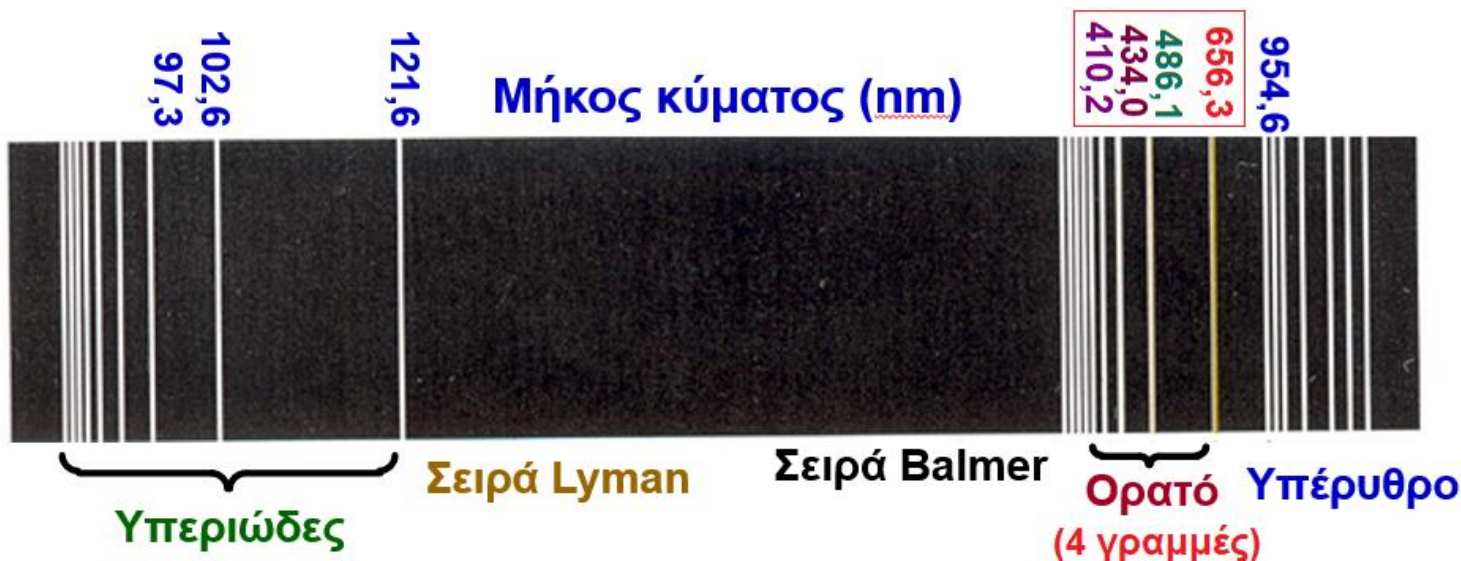
Για $n_f = 1$ και $n_i = 2, 3...$ \Rightarrow Σειρά Lyman (υπεριώδεις)

Για $n_f = 2$ και $n_i = 3, 4...$ \Rightarrow Σειρά Balmer (ορατό)

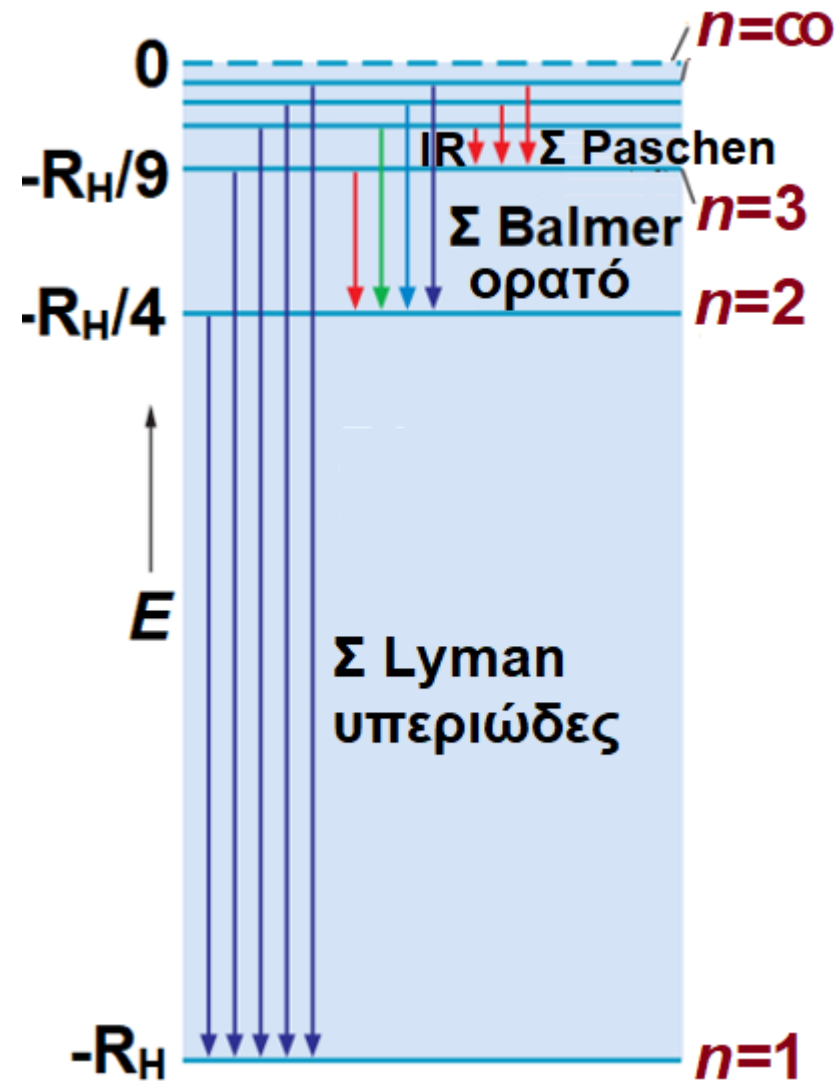
Για $n_f = 3$ και $n_i = 4, 5...$ \Rightarrow Σειρά Paschen (υπέρυθρο)

Για $n_f = 4$ και $n_i = 5, 6...$ \Rightarrow Σειρά Brackett (υπέρυθρο)

Για $n_f = 5$ και $n_i = 6, 7...$ \Rightarrow Σειρά Pfund (υπέρυθρο)



Σχηματικά, η δημιουργία των διαφόρων σειρών στο φάσμα του ατόμου H



Μεταπτώσεις του ηλεκτρονίου στο υδρογόνατομο

Το διάγραμμα δείχνει τις σειρές (Σ) Lyman, Balmer και Paschen που αντιστοιχούν σε ηλεκτρονικές μεταπτώσεις για $n_f = 1, 2$ και 3 , αντίστοιχα

$$E_n = -\frac{R_H}{n^2}$$

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

Παράδειγμα 7.4

Εφαρμογή της εξίσωσης Balmer

Πόσο είναι το μήκος κύματος της μιας οριακής γραμμής του ορατού φάσματος του ατόμου H;

Απάντηση

Οι γραμμές στο ορατό φάσμα του ατόμου H είναι τέσσερις για τις τιμές $n = 3, 4, 5, 6$. Στα όρια είναι οι γραμμές με $n = 3$ και $n = 6$, οπότε για $n = 3$, θα έχουμε:

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

$$\frac{1}{\lambda} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{m}^{-1} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) \text{m}^{-1}$$

$$\frac{1}{\lambda} = 0,15236 \times 10^7 \text{m}^{-1} \Rightarrow \lambda = 6,563 \times 10^{-7} \text{m} = 656,3 \text{ nm}$$

Σωστή είναι και η τιμή $\lambda = 410,2 \text{ nm}$ που προκύπτει για $n = 6$

Παράδειγμα 7.5

Υπολογισμός κύριου κβαντικού αριθμού για ηλεκτρονική μετάπτωση

Μια γραμμή της σειράς Lyman στο φάσμα του υδρογονατόμου έχει μήκος κύματος $9,50 \times 10^{-8} \text{ m}$ και οφείλεται σε μετάπτωση από ένα ανώτερο επίπεδο ενέργειας στο επίπεδο με $n = 1$.

Ποιος είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός του ανώτερου επιπέδου;



Απάντηση

$$\frac{1}{\lambda} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \text{m}^{-1} \quad \frac{1}{9,50 \times 10^{-8}} = 1,097 \times 10^7 \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$$\frac{1}{n_i^2} = 0,04 \Rightarrow n_i = 5 \quad \text{β' τρόπος} \quad \nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}}{9,50 \times 10^{-8} \text{ m}} = 3,16 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$$

$$\Delta E = h \nu = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J s})(3,16 \times 10^{15} \text{ s}) = 2,09 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$\Delta E = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = 2,09 \times 10^{-18} \text{ J}$$

$$1 - \frac{1}{n_i^2} = \frac{2,09 \times 10^{-18} \text{ J}}{2,179 \times 10^{-18} \text{ J}} = 0,959 \quad n_i = \left(\frac{1}{0,041} \right)^{1/2} = 4,94 \approx 5$$

Ερωτήσεις – Ασκήσεις – Προβλήματα

7.1 Το διαστημικό όχημα *Pioneer 11* εκτοξεύθηκε στις 5 Απριλίου 1973 και έφθασε στον Δία τον Δεκέμβριο του 1974, διανύοντας μια απόσταση 998 εκατομμυρίων km. Πόσο χρόνο θα χρειαζόταν ένα ηλεκτρομαγνητικό σήμα να φθάσει στη Γη από το *Pioneer 11*, όταν αυτό βρισκόταν κοντά στον Δία;

7.2 Μια συγκεκριμένη μετάπτωση του ατόμου του ρουβιδίου εκπέμπει φως που έχει συχνότητα $3,84 \times 10^{14}$ Hz. Είναι το φως αυτό στο ορατό φάσμα; Εάν ναι, ποιο χρώμα έχει το φως; Βλ. Σχήμα 7.5.

7.3 Όταν φως μήκους κύματος 470 nm προσπίπτει στην επιφάνεια μεταλλικού καλίου, προκαλείται απόσπαση ηλεκτρονίων ταχύτητας $6,4 \times 10^4$ m s⁻¹. Ποια ελάχιστη συχνότητα πρέπει να έχει το φως για την απλή απόσπαση ηλεκτρονίων από το κάλιο;

7.4 Πόση είναι η διαφορά ενέργειας μεταξύ των δύο επιπέδων, στην οποία οφείλεται η ιώδης γραμμή στα 422,7 nm του φάσματος εκπομπής του ατόμου Ca;

7.5 Το μεγαλύτερο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται από το άτομο H κατά τη μετάπτωση από το επίπεδο $n = 6$ είναι
(α) 938 nm (β) 7460 nm (γ) 781 nm (δ) 6840 nm