

Γενική Χημεία

Νίκος Ξεκουκουλωτάκης
Επίκουρος Καθηγητής

Πολυτεχνείο Κρήτης
Τμήμα Μηχανικών Περιβάλλοντος
Γραφείο Κ2.125, τηλ.: 28210-37772
e-mail: nikosxek@gmail.com

Βασικές έννοιες της κβαντικής και μοντέλο του Bohr



- Ηλεκτρονική δομή των ατόμων
- Κυματική φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας
- Σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:
 - ✓ η θερμική ακτινοβολία μέλανος σώματος
 - ✓ το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 - ✓ τα φάσματα εκπομπής των ατόμων
- Μοντέλο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- Αφού μελετήσετε αυτό το κεφάλαιο, θα πρέπει να είστε σε θέση:
- ✓ Να αναγνωρίζετε τα βασικά κυματικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως το μήκος κύματός της και η συχνότητά της και να κατανοείτε τη σημασία τους.
- ✓ Να υπολογίζετε το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αν γνωρίζετε της συχνότητας ή τη συχνότητάς της αν γνωρίζετε το μήκος κύματος της.
- ✓ Να διακρίνετε μεταξύ των διαφόρων ειδών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και να τα ταξινομείτε με βάση το μήκος κύματος τους, τη συχνότητα τους και την ενέργειά τους.



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να εξηγείτε τι είναι το κβάντο (quantum) ενέργειας και τι είναι το φωτόνιο και να υπολογίζετε την ενέργεια ενός φωτονίου αν γνωρίσετε τη συχνότητα ή το μήκος κύματός του.
- ✓ Να περιγράφετε τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και να εξηγείτε πως υποστηρίζει τη θεωρία περί της σωματιδιακής φύσης των ακτινοβολιών.
- ✓ Να υπολογίζετε τη συχνότητα ή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας η οποία απαιτείται για να προκληθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αν γνωρίζετε το έργο εξαγωγής του μετάλλου.



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να περιγράψετε τη διαφορά μεταξύ ενός συνεχούς φάσματος και ενός γραμμικού φάσματος.
- ✓ Να εξηγείτε πώς τα γραμμικά φάσματα εκπομπής σχετίζονται με την ιδέα των κβαντισμένων ενεργειακών καταστάσεων των ηλεκτρονίων στα άτομα.
- ✓ Να περιγράφετε εν συντομία τις βασικές παραδοχές ή αξιώματα του μοντέλου του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.
- ✓ Να υπολογίζετε την ενέργεια των διαφόρων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων στο άτομο του υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο του Bohr.



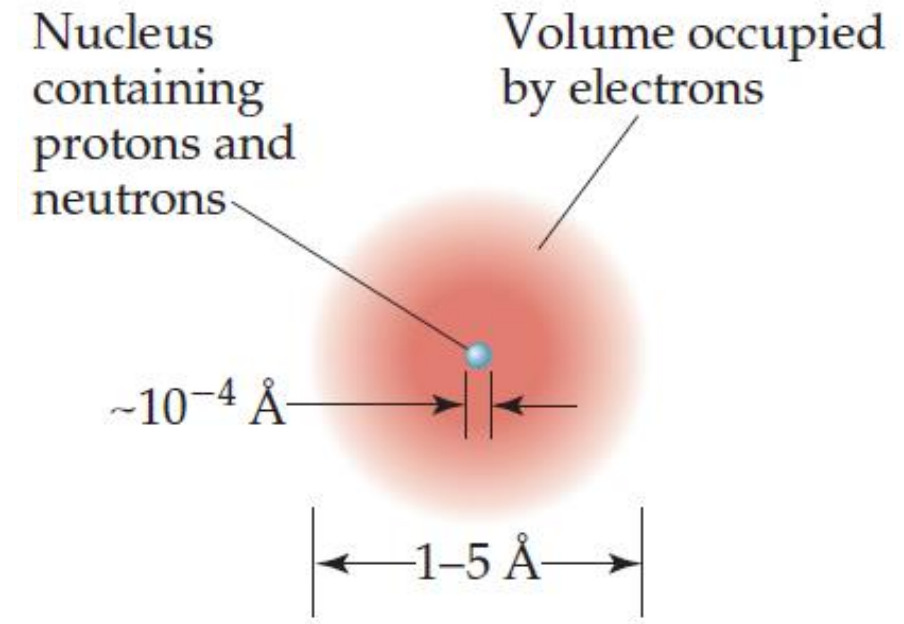
Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να υπολογίζετε μήκος κύματος και τη συχνότητα των φωτονίων που εκπέμπονται ή απορροφώνται κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου μεταξύ των διαφόρων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων στο άτομο του υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο του Bohr.

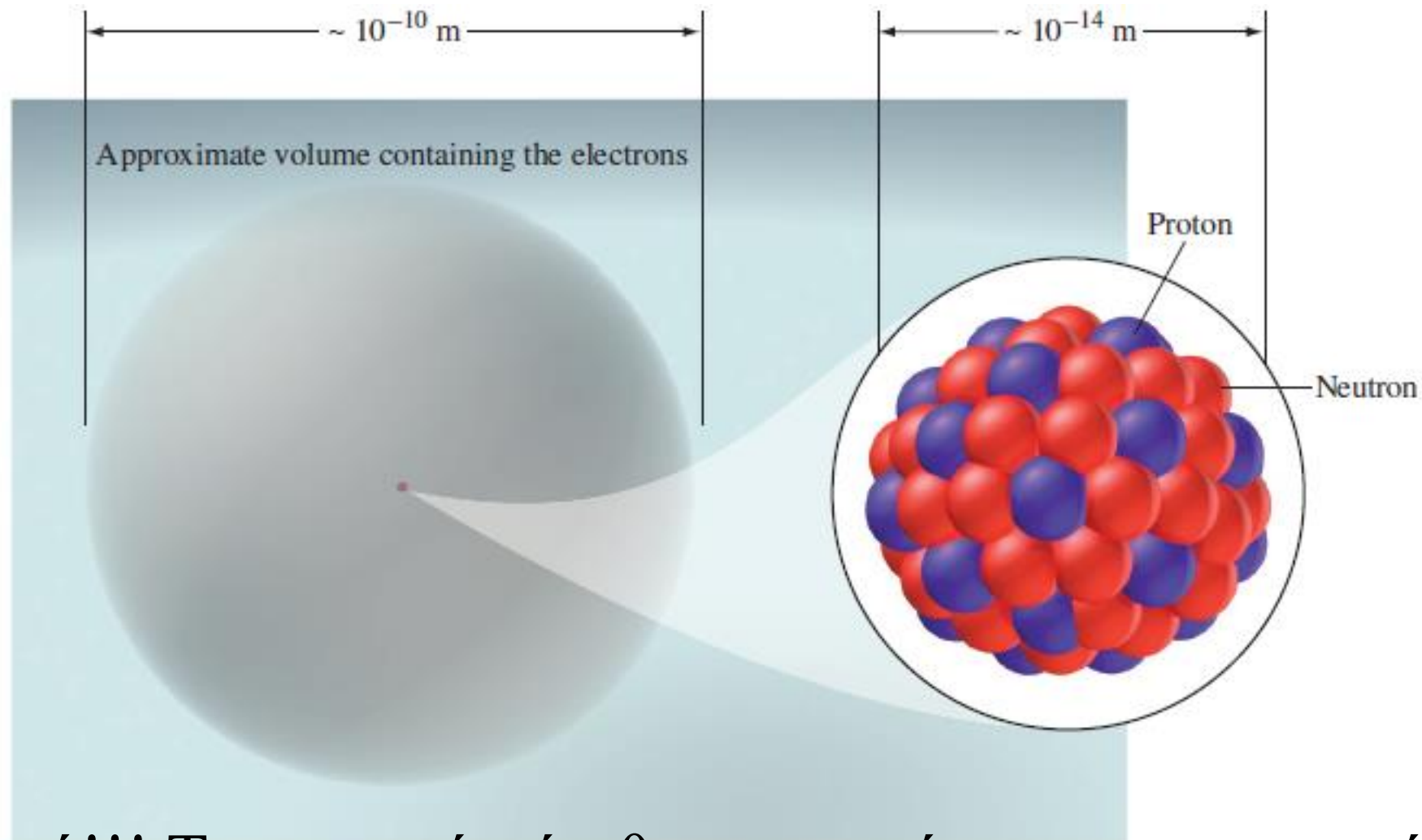


Ηλεκτρονική δομή των ατόμων

- Η ύλη αποτελείται από άτομα.
- Τα άτομα αποτελούνται από πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια.
- Τα πρωτόνια και τα νετρόνια βρίσκονται στον πυρήνα, ενώ τα ηλεκτρόνια κινούνται γύρω από τον πυρήνα.
- Η χημική συμπεριφορά των ατόμων καθορίζεται από τα ηλεκτρόνια τους.
- Η κίνηση των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα και όλα όσα την αφορούν ονομάζεται **ηλεκτρονική δομή (electronic structure)**.



Διαστάσεις των ατόμων

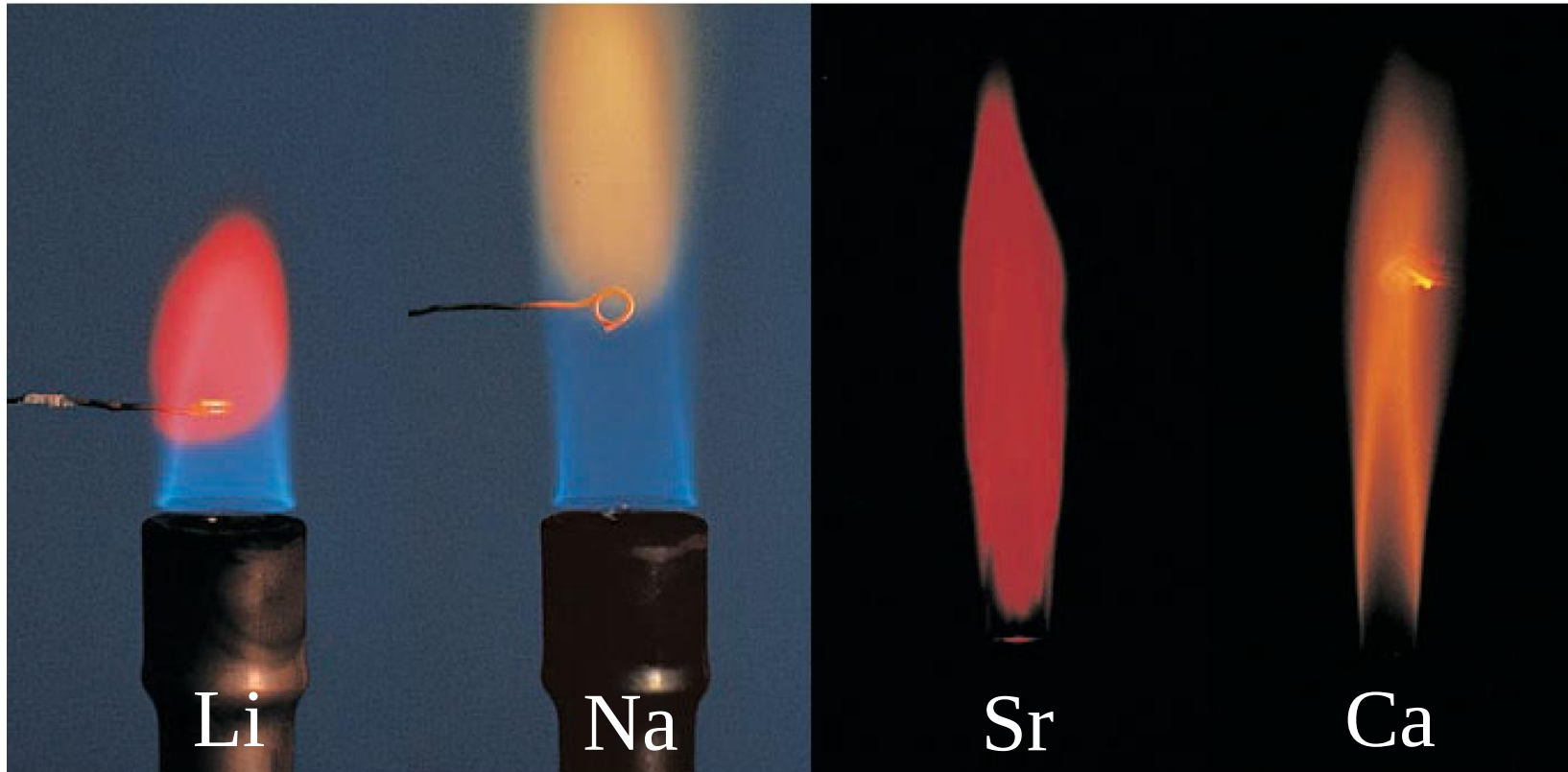


- Προσοχή!!! Το σχετικό μέγεθος του ατόμου και του πυρήνα δεν είναι στη σωστή κλίμακα.

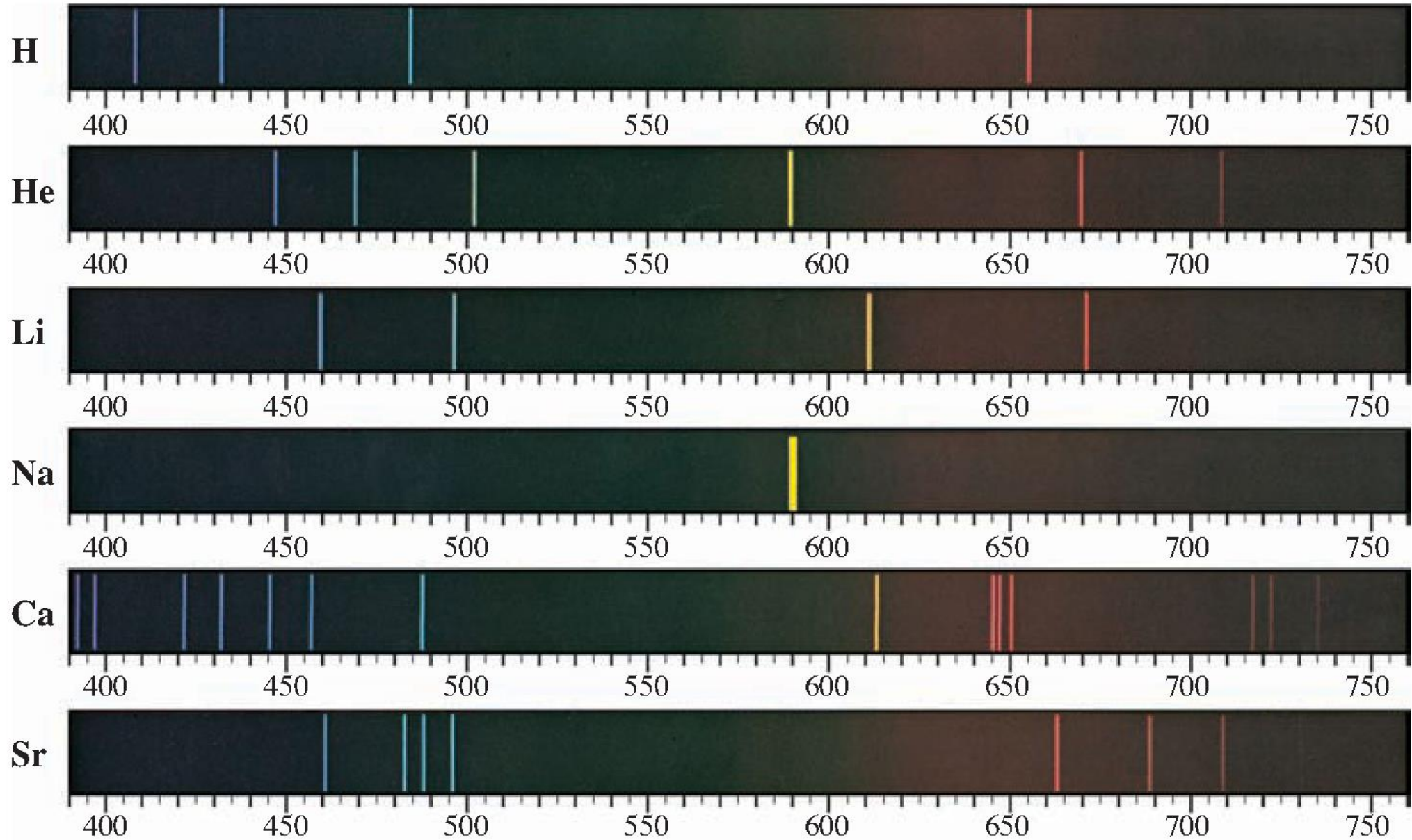


Ηλεκτρονική δομή των ατόμων

- Η μελέτη και η κατανόηση διαφόρων φαινομένων αλληλεπίδρασης του φωτός (ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) με τα υλικά σώματα συνεισέφερε σημαντικά στην ερμηνεία της ηλεκτρονικής δομής των ατόμων.



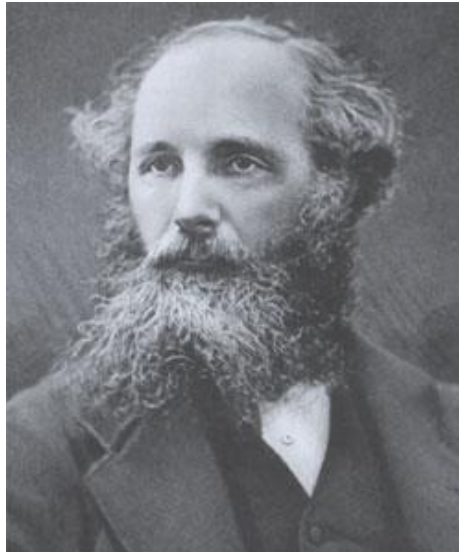
Γραμμικά φάσματα εκπομπής διαφόρων στοιχείων





Η κυματική φύση του φωτός

- Σύμφωνα με τη θεωρία του Maxwell, η οποία επιβεβαιώθηκε πειραματικά από τον Herz, το φως (γενικότερα, οι ακτινοβολίες) διαδίδεται με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων.
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αποτελείται από ταλαντώσεις ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, οι οποίες διαδίδονται στο χώρο.



James Clerk Maxwell
(1831 – 1879)

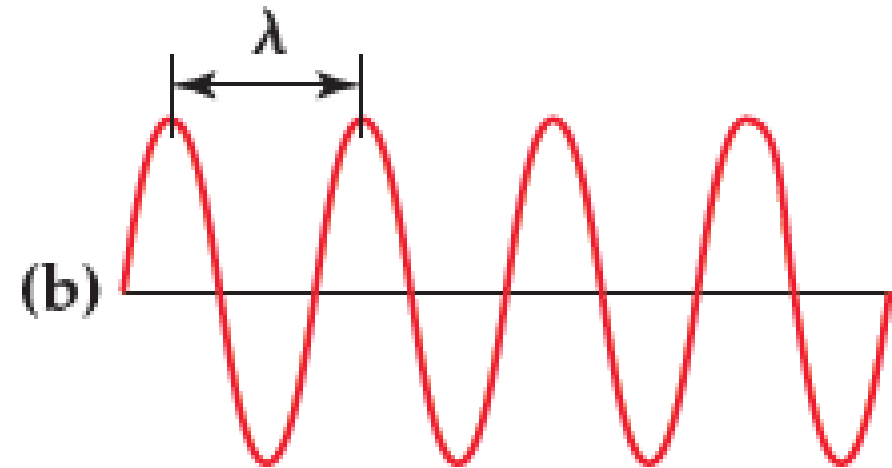
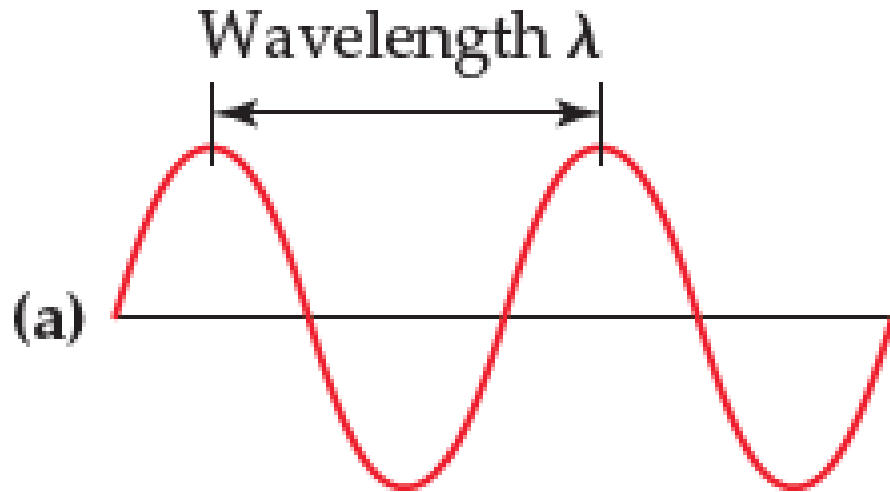


Heinrich Rudolf Hertz
(1857 – 1894)



Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία

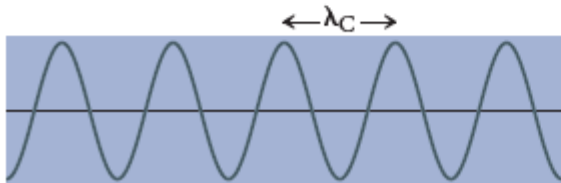
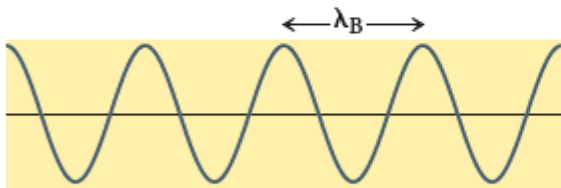
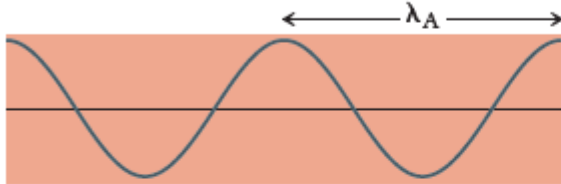
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία διαδίδεται με τη μορφή κυμάτων.
- Τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα μεταφέρουν ενέργεια και ορμή.
- Χαρακτηρίζονται από το μήκος κύματός τους, λ (σε m) και τη συχνότητά τους, ν ή f (σε s^{-1} ή Hz).



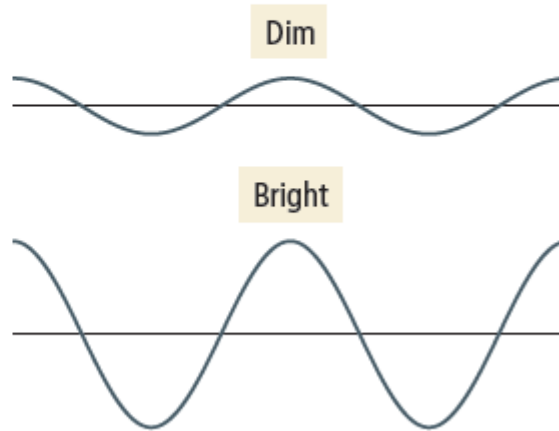
Ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία



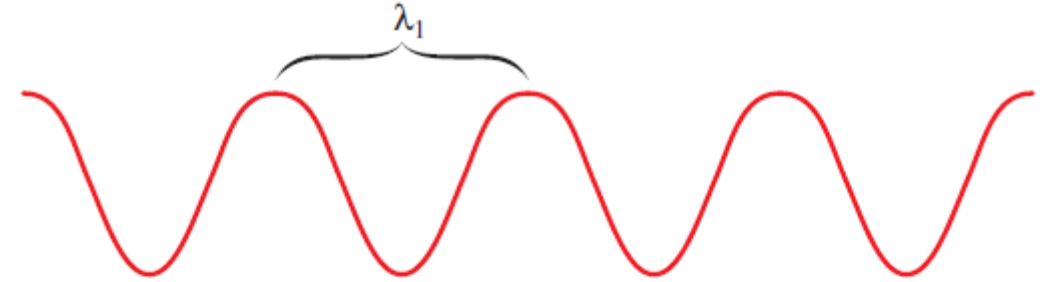
Different wavelengths,
different colors



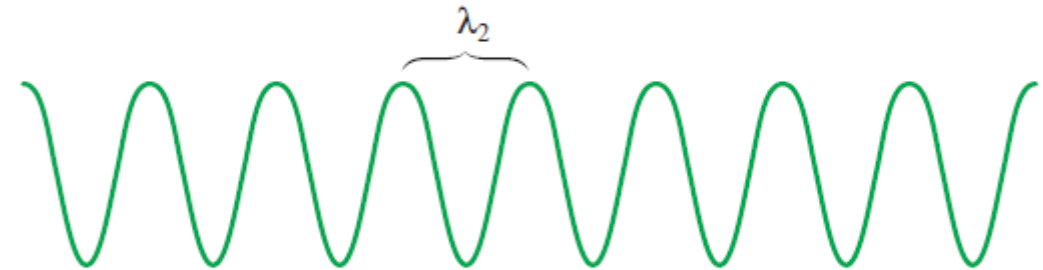
Different amplitudes,
different brightness



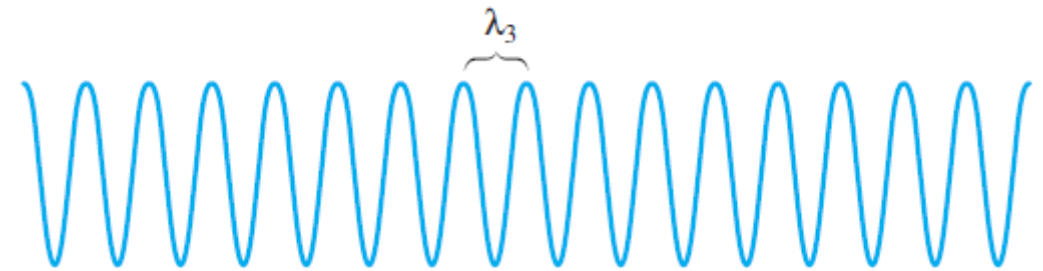
1 second



$$\nu_1 = 4 \text{ cycles/second} = 4 \text{ hertz}$$

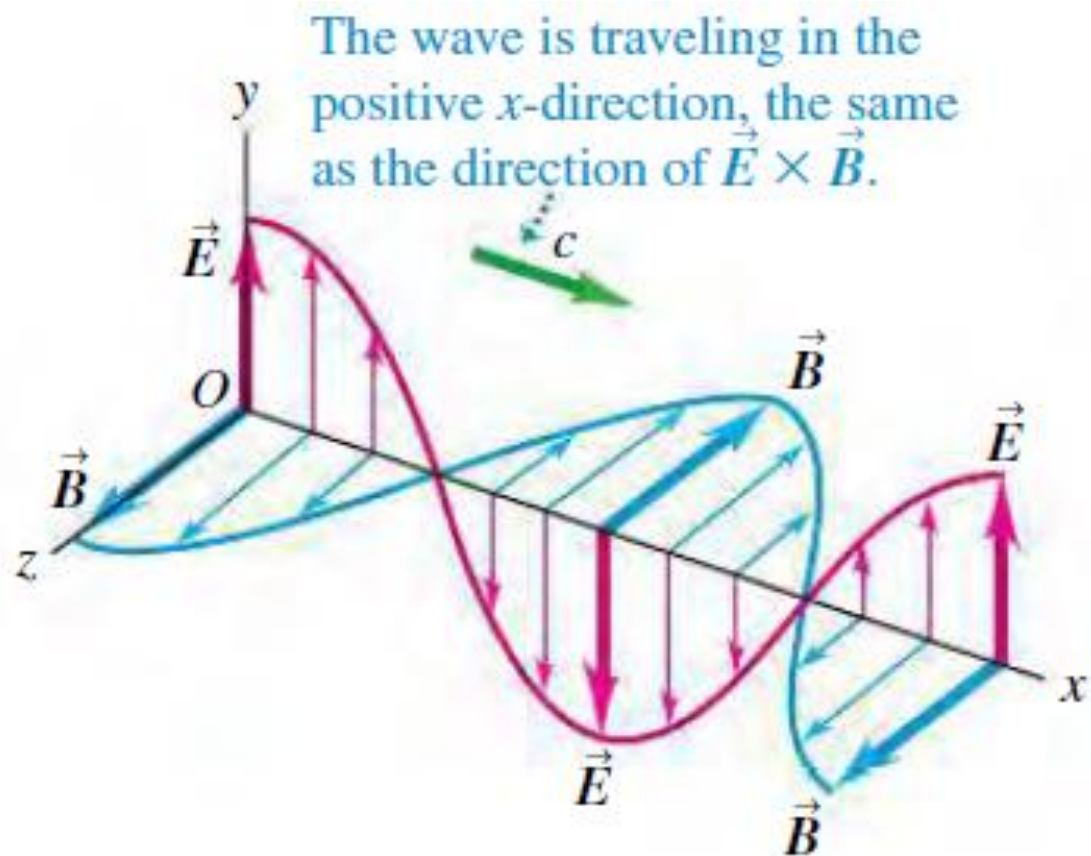


$$\nu_2 = 8 \text{ cycles/second} = 8 \text{ hertz}$$



$$\nu_3 = 16 \text{ cycles/second} = 16 \text{ hertz}$$

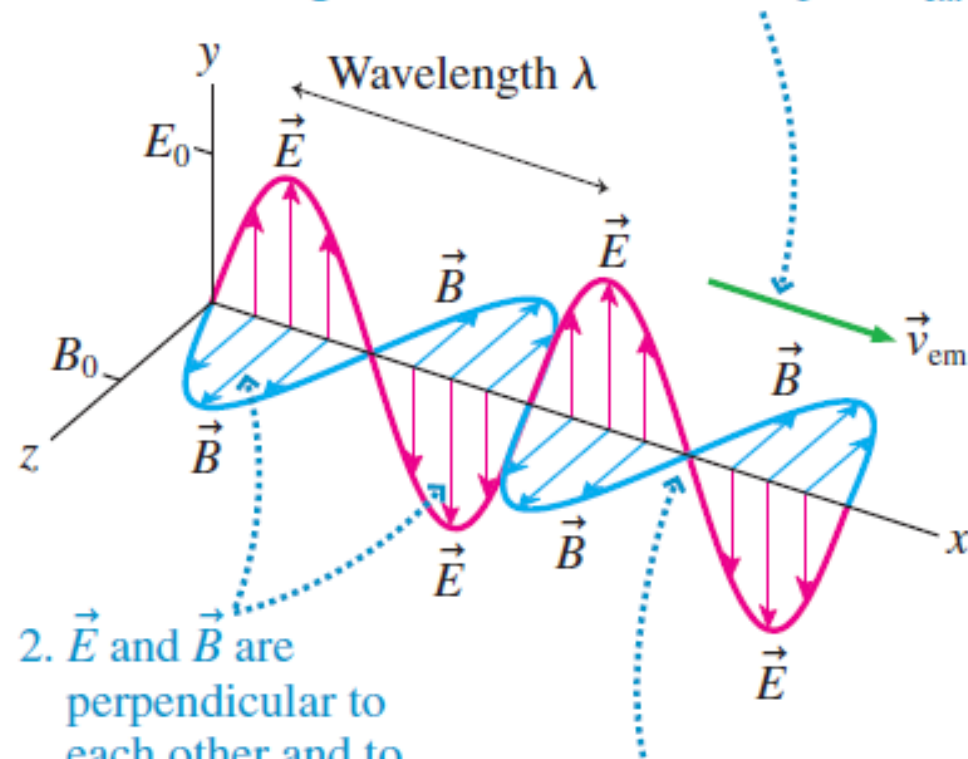
Ηλεκτρομαγνητικά κύματα



The wave is traveling in the positive x -direction, the same as the direction of $\vec{E} \times \vec{B}$.

$\vec{E}$: y -component only
 $\vec{B}$: z -component only

1. A sinusoidal wave with frequency f and wavelength λ travels with wave speed v_{em} .



2. $\vec{E}$ and $\vec{B}$ are perpendicular to each other and to the direction of travel. The fields have amplitudes E_0 and B_0 .

3. $\vec{E}$ and $\vec{B}$ are in phase. That is, they have matching crests, troughs, and zeros.

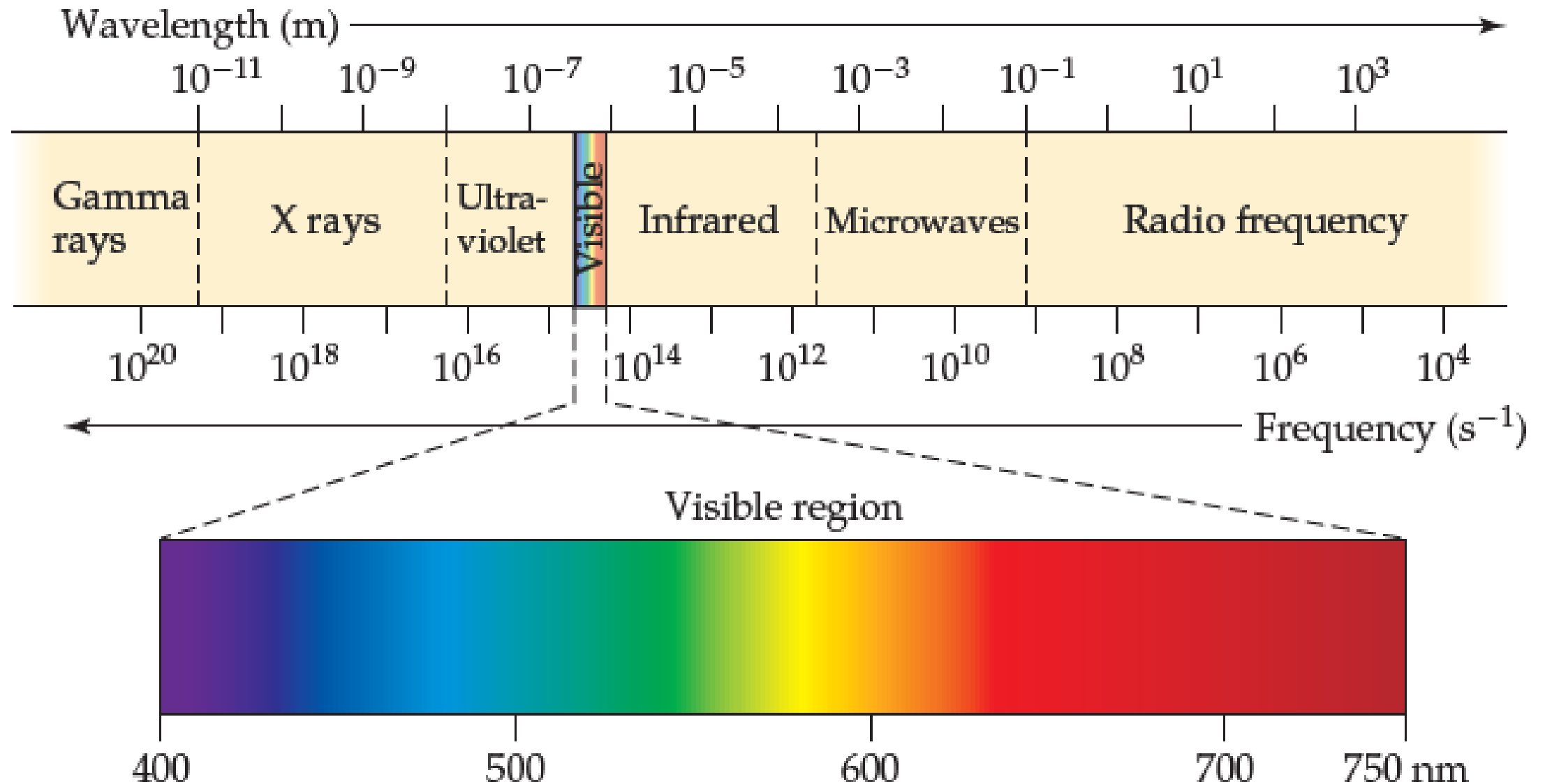


Βασική εξίσωση της κυματικής

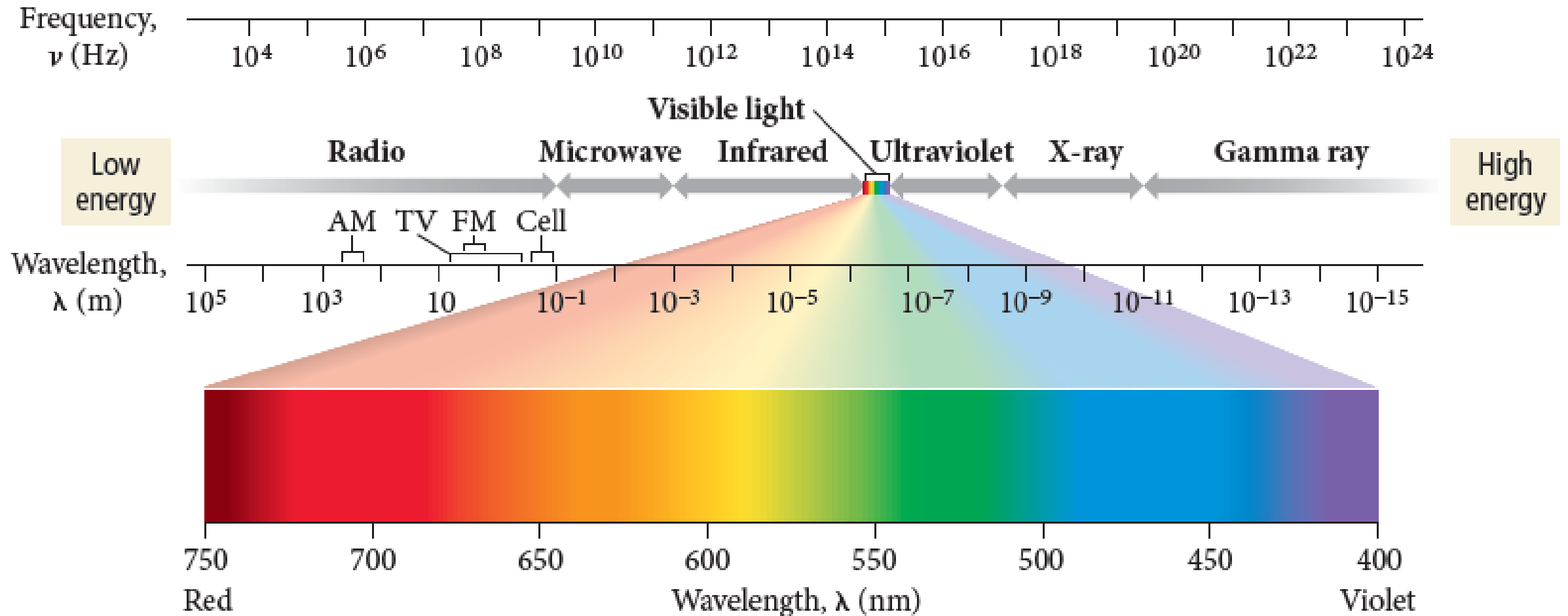
$$c = \lambda \times f$$

- ✓ όπου c : ταχύτητα του φωτός στο κενό, $c = 299792458 \text{ m/s}$
($3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$)
- ✓ λ : μήκος κύματος, σε m
- ✓ f : συχνότητα, σε Hz (s^{-1})
- Η περιοχή συχνοτήτων ή μηκών κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας ονομάζεται **ηλεκτρομαγνητικό φάσμα**.
- Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα εκτείνεται από τις ακτίνες Γ έως τα ραδιοκύματα (κατά σειρά αυξανόμενου μήκους κύματος).

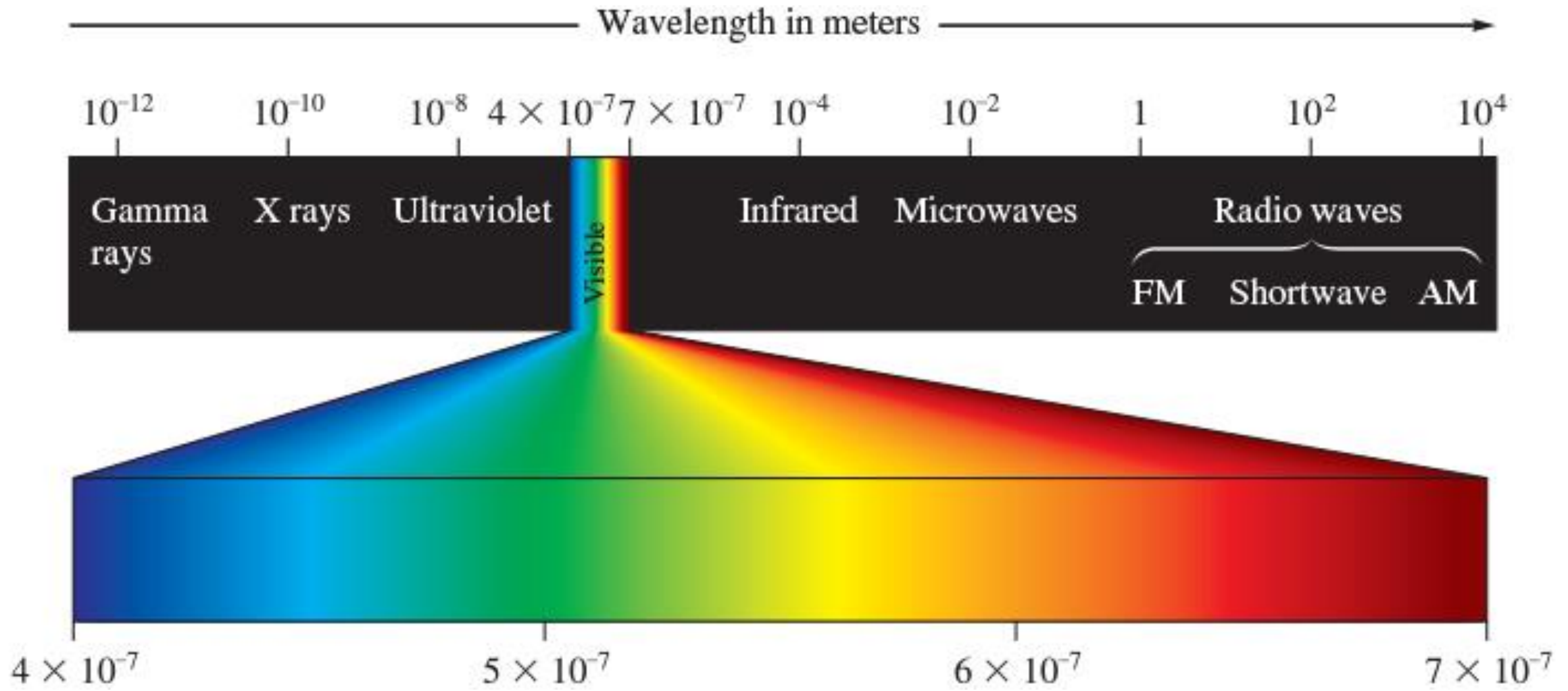
Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



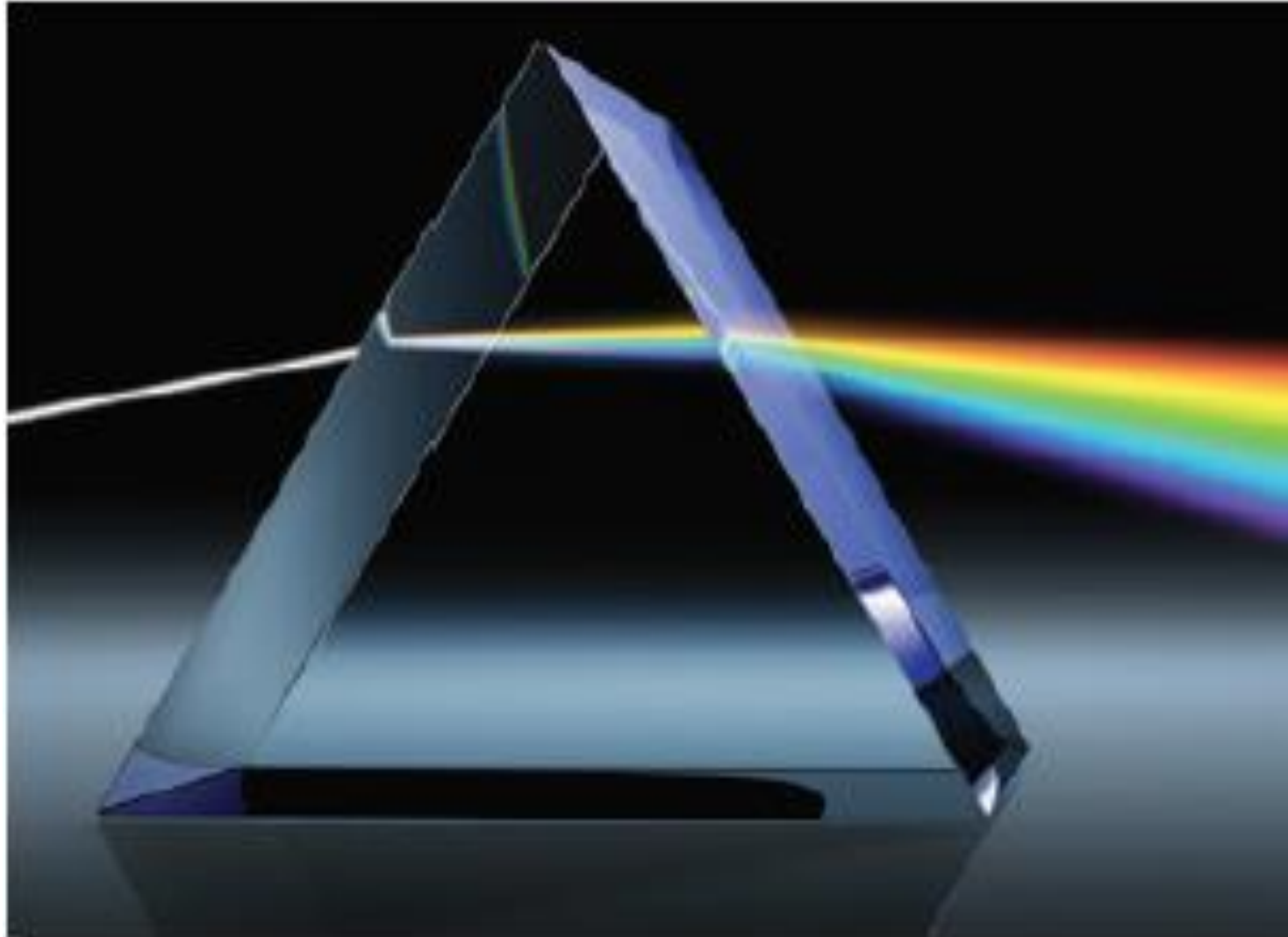
Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Φάσμα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας



Ορατή ακτινοβολία





Μονάδες μέτρησης μήκους κύματος

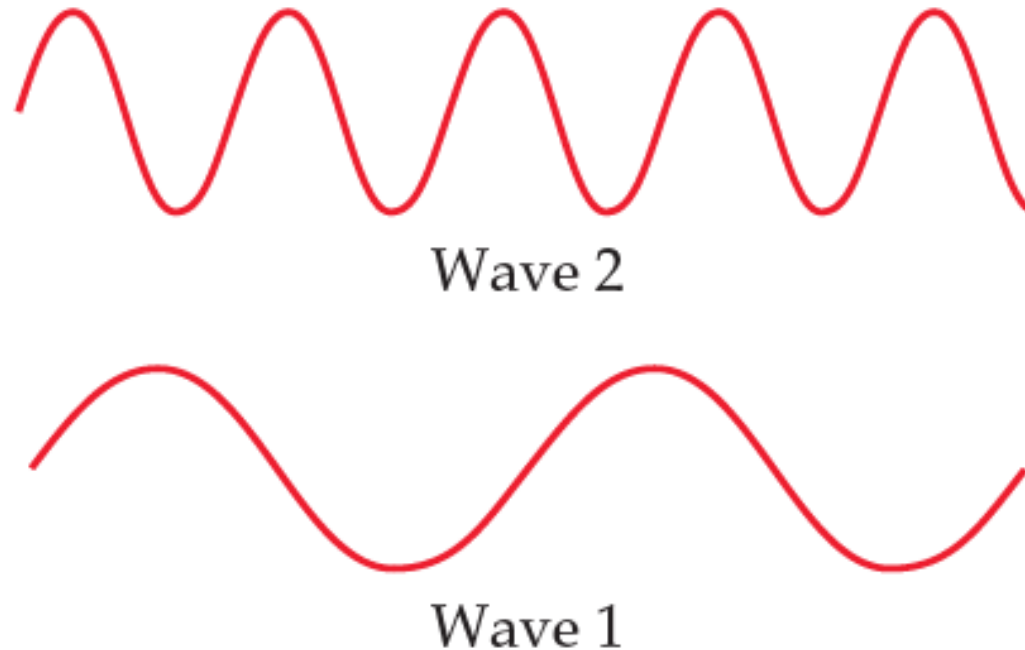
TABLE 6.1 Common Wavelength Units for Electromagnetic Radiation

Unit	Symbol	Length (m)	Type of Radiation
Angstrom	Å	10^{-10}	X ray
Nanometer	nm	10^{-9}	Ultraviolet, visible
Micrometer	μm	10^{-6}	Infrared
Millimeter	mm	10^{-3}	Microwave
Centimeter	cm	10^{-2}	Microwave
Meter	m	1	Television, radio
Kilometer	km	1000	Radio

Παράδειγμα 3.1



- Στο παρακάτω σχήμα φαίνονται δύο ηλεκτρομαγνητικά κύματα.



- Ποιο κύμα έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα;
- Αν το ένα κύμα αντιστοιχεί σε ορατή ακτινοβολία ενώ το άλλο σε υπέρυθρη, ποιο κύμα αντιστοιχεί σε ποια ακτινοβολία;



Παράδειγμα 3.1: Απάντηση

- Το κύμα 2 έχει μεγαλύτερη συχνότητα από το κύμα 1.
- Η ορατή ακτινοβολία έχει μεγαλύτερη συχνότητα από την υπέρυθρη.
- Άρα, το κύμα 2 αντιστοιχεί σε ορατή ακτινοβολία, ενώ το κύμα 1 σε υπέρυθρη.

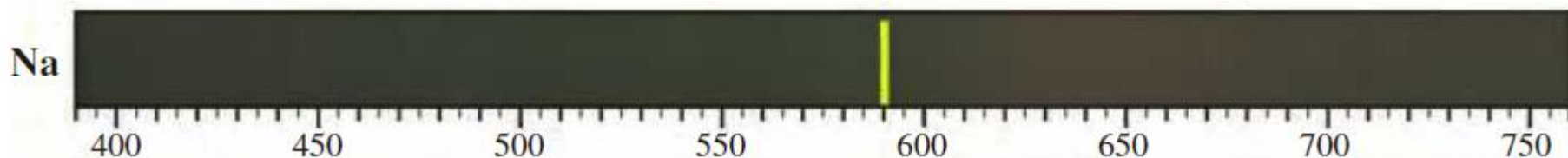


Παράδειγμα 3.2

- Πόσο είναι το μήκος κύματος του κίτρινου φωτός το οποίο εκπέμπουν οι ατμοί νατρίου και το οποίο έχει συχνότητα $5,09 \cdot 10^{14}$ Hz.
- Απάντηση:

$$c = \lambda \cdot f \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{5,09 \cdot 10^{14} \text{ s}^{-1}} \Leftrightarrow$$

$$\lambda = 5,89 \cdot 10^{-7} \text{ m} \text{ ή } 589 \text{ nm}$$





Κβαντισμένη ενέργεια και φωτόνια

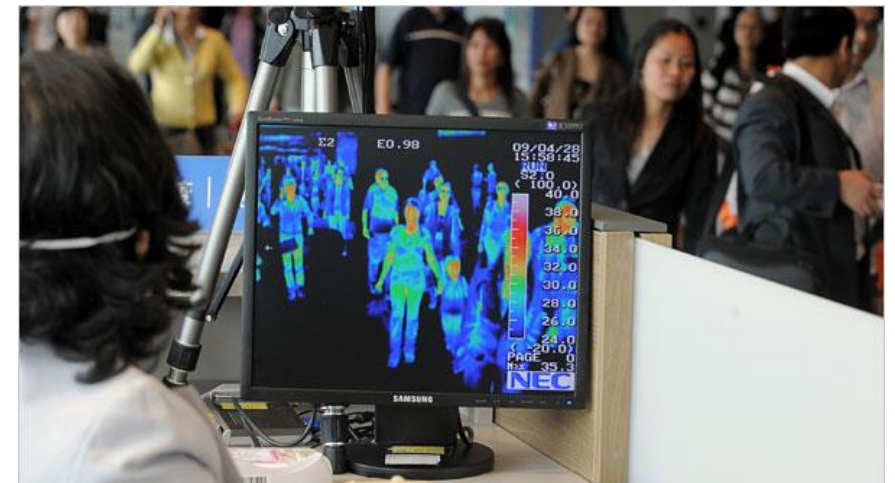
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία έχει **ταυτόχρονα κυματικές** αλλά και **σωματιδιακές ιδιότητες**, δηλαδή συμπεριφέρεται και ως **κύμα** αλλά και ως **σωματίδιο**.
- Τρία φαινόμενα οδήγησαν στην ανακάλυψη της σωματιδιακής φύσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας:
 - ✓ η θερμική ακτινοβολία μέλανος σώματος
 - ✓ το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
 - ✓ τα φάσματα εκπομπής των ηλεκτρονικά διεγερμένων ατόμων στην αέρια φάση

Θερμική ακτινοβολία

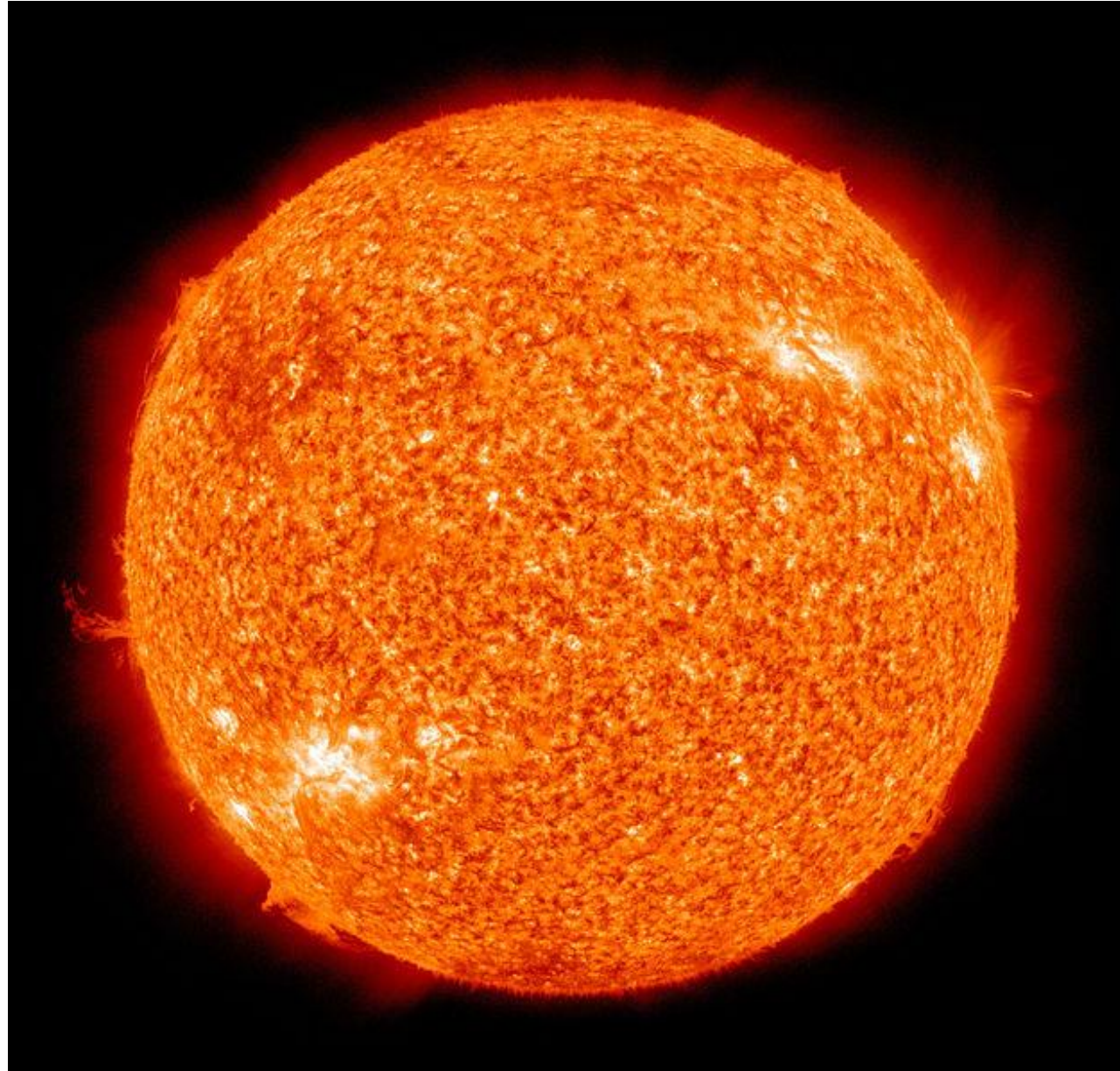


- Όλα τα σώματα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.
- Η ισχύς της ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία.
- Σε χαμηλές θερμοκρασίες το μήκος κύματος της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας βρίσκεται συνήθως στην υπέρυθρη περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος και κατά συνέπεια δεν είναι ορατό με γυμνό μάτι.
- Σε υψηλότερες θερμοκρασίες το φάσμα εκπομπής μετατοπίζεται προς το ορατό.

Θερμική ακτινοβολία



Θερμική ακτινοβολία





Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- **Ακτινοβολία μέλανος σώματος (black body radiation)** είναι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία την οποία εκπέμπουν όλα τα σώματα όταν θερμανθούν ($T > 0$).
- Συχνά ονομάζεται και **θερμική ακτινοβολία (thermal radiation)**.
- Το **μέλαν σώμα (black body)** είναι ένα εξιδανικευμένο μοντέλο το οποίο επινοήθηκε για να διευκολυνθεί η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας των πραγματικών σωμάτων.
- Το μέλαν σώμα συμπεριφέρεται ιδανικά ως προς την απορρόφηση και την εκπομπή θερμικής ακτινοβολίας.



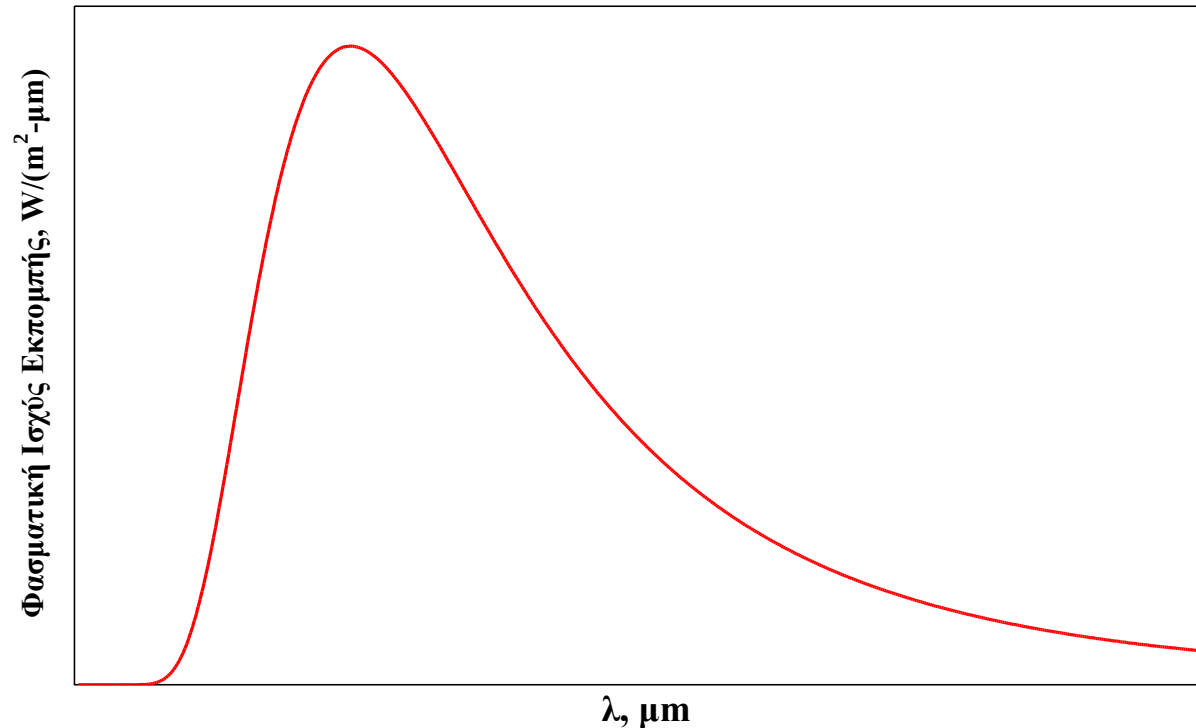
Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Το μέλαν σώμα απορροφάει όλες τις ακτινοβολίες οι οποίες προσπίπτουν σε αυτό (δηλαδή οι ακτινοβολίες ούτε ανακλώνται ούτε διαπερνούν το σώμα, αλλά απορροφούνται στο σύνολό τους).
- Αυτό ισχύει για όλα τα μήκη κύματος και για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης.
- Δηλαδή το μέλαν σώμα είναι ένα ιδανικός απορροφητής όλων των ακτινοβολιών οι οποίες προσπίπτουν σε αυτό.
- Αφού απορροφάει όλες τις ακτινοβολίες θα έχει μαύρο χρώμα (εξ' ου και η ονομασία του).



Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Στην πράξη όλα τα στερεά σώματα όταν θερμανθούν σε σχετικά υψηλές θερμοκρασίες εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία.
- Η κατανομή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στις διάφορες συχνότητες έχει την ακόλουθη χαρακτηριστική μορφή:





Ακτινοβολία μέλανος σώματος

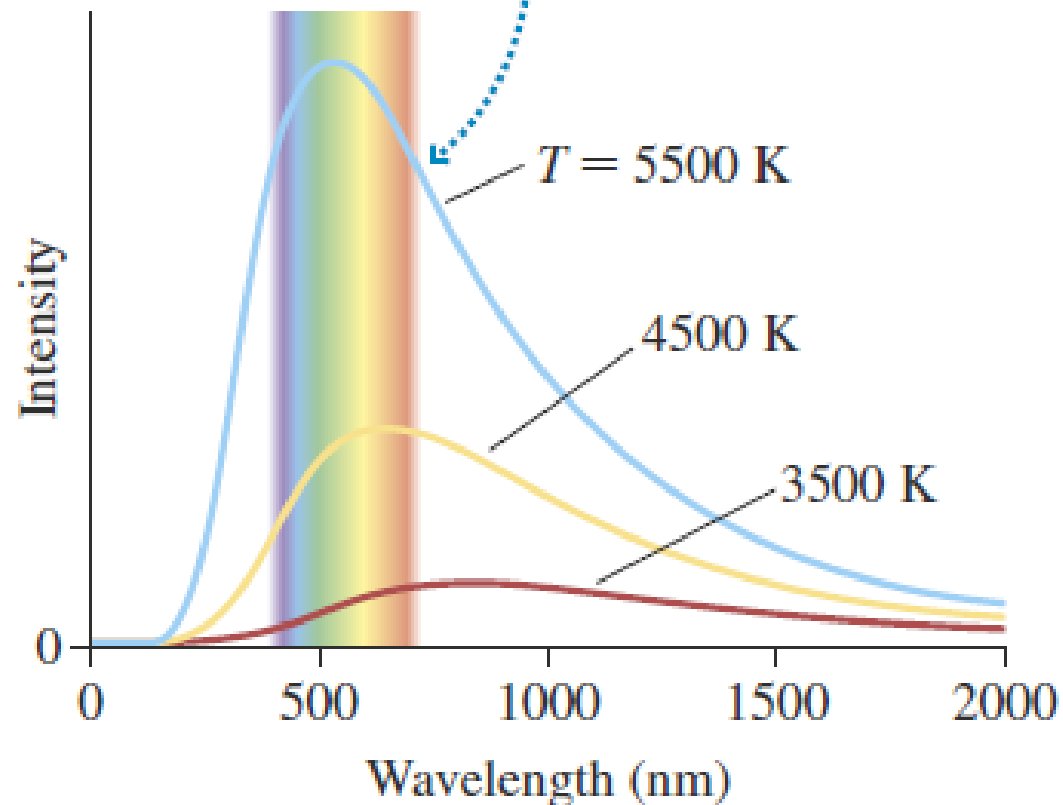
- Η ισχύς της εκπεμπόμενης θερμικής ακτινοβολίας εξαρτάται από τη θερμοκρασία του σώματος.
- Όλα τα μέλανα σώματα που βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία εκπέμπουν ακριβώς το ίδιο φάσμα.
- Το φάσμα εκπομπής εξαρτάται μόνο από τη θερμοκρασία και όχι από το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί αύξηση της ισχύος της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας σε όλα τα μήκη κύματος.
- Η αύξηση της θερμοκρασίας προκαλεί μετατόπιση του φάσματος εκπομπής προς την ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.



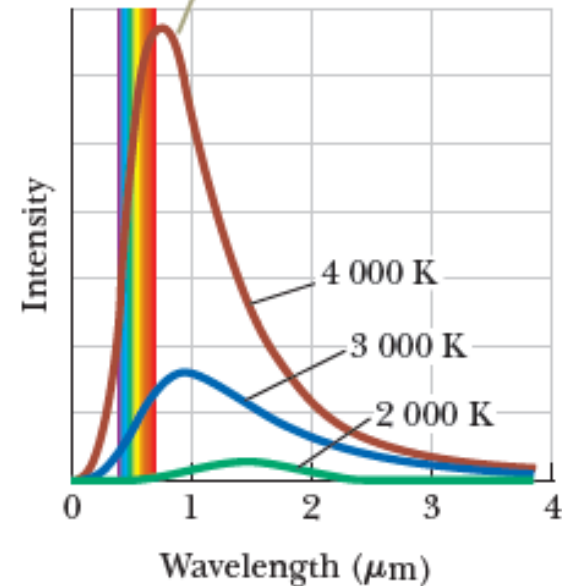
Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Όσο υψηλότερη είναι η θερμοκρασία τόσο μικρότερο είναι το μήκος κύματος που αντιστοιχεί στο μέγιστο της εκπομπής.

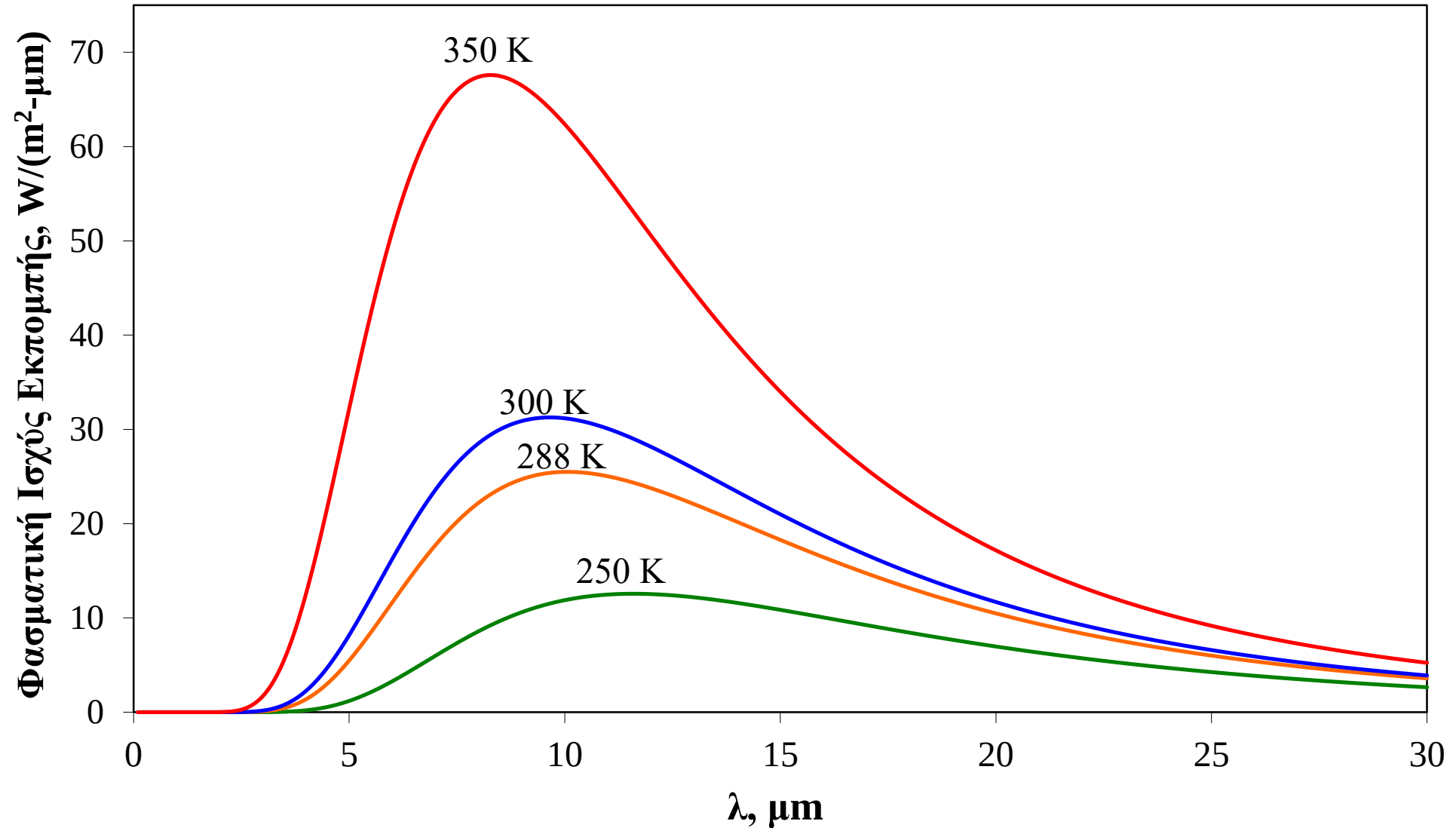
A hotter object has a much greater intensity, peaked at shorter wavelengths.



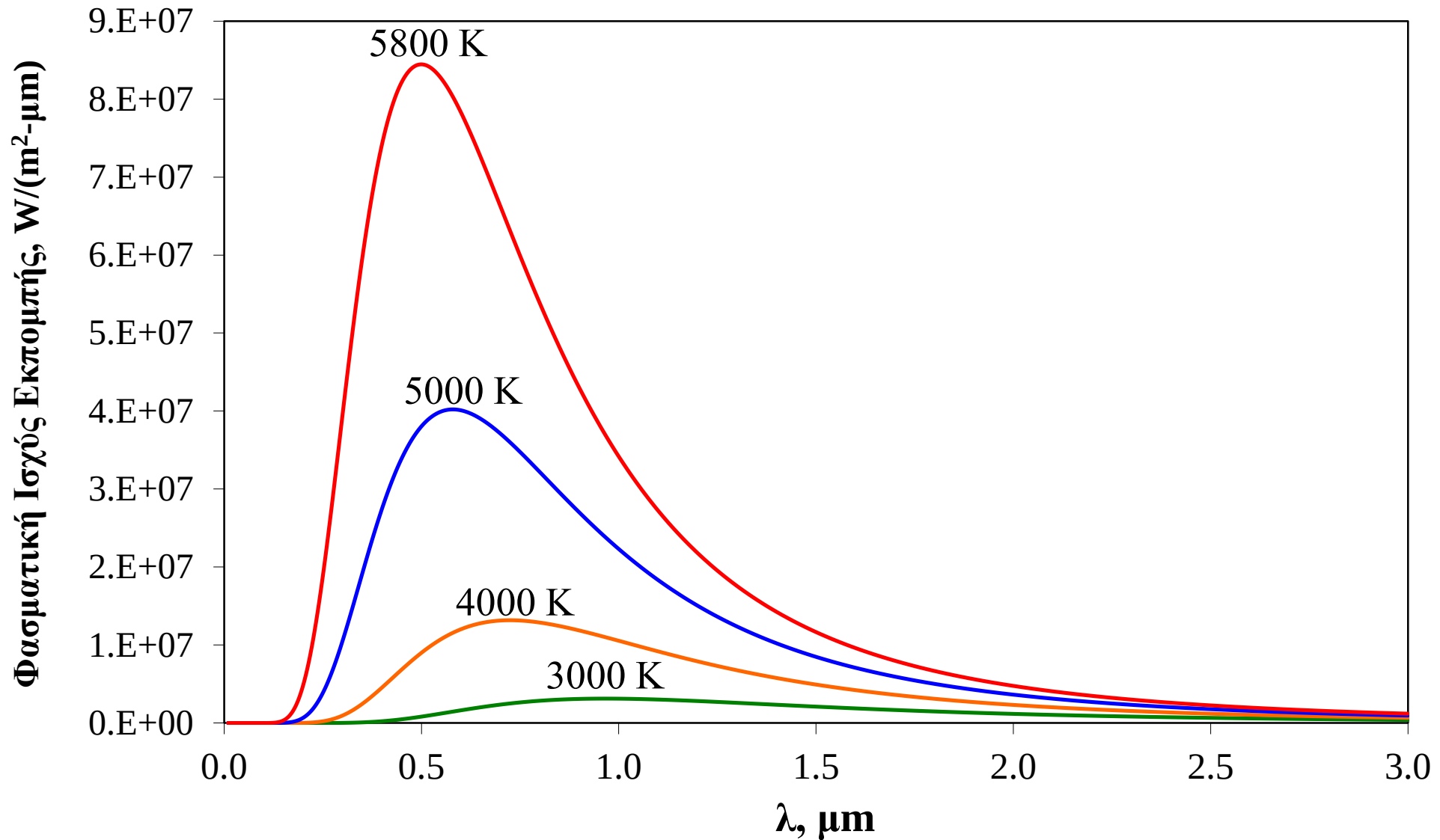
The 4 000-K curve has a peak near the visible range. This curve represents an object that would glow with a yellowish-white appearance.



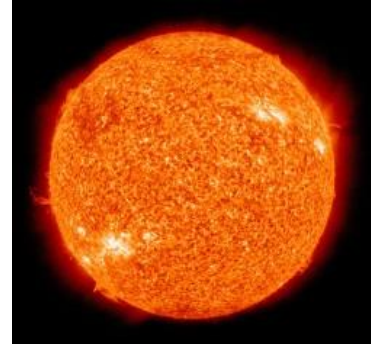
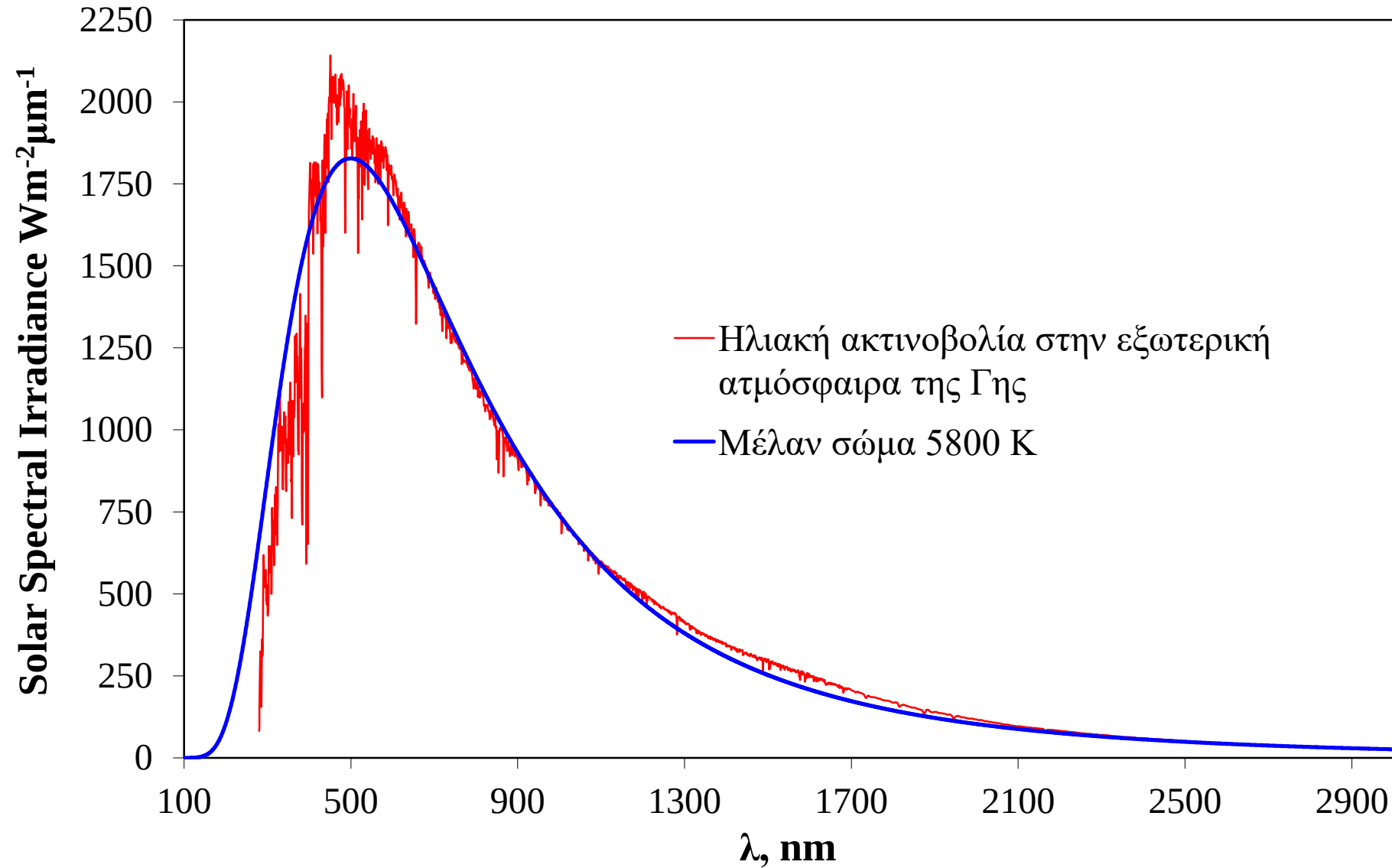
Ακτινοβολία μέλανος σώματος



Ακτινοβολία μέλανος σώματος



Ηλιακή ακτινοβολία





Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Το μέλαν σώμα εκπέμπει το μεγαλύτερο δυνατό ποσό θερμικής ακτινοβολίας από όλα τα πραγματικά σώματα τα οποία βρίσκονται στην ίδια θερμοκρασία.
- Τα πραγματικά σώματα δεν εκπέμπουν τόση θερμική ακτινοβολία όση το μελανό σώμα, αλλά τα πιο πολλά σώματα βρίσκονται κοντά σε αυτό το θεωρητικό όριο.



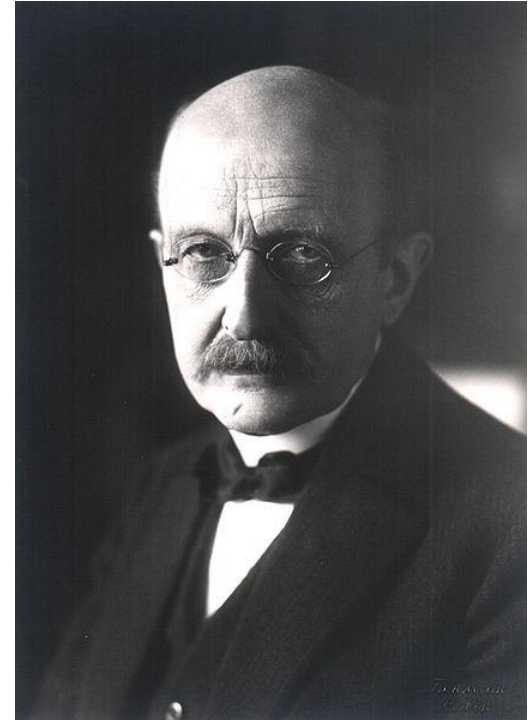
Ακτινοβολία μέλανος σώματος

- Το μέγεθος το οποίο δίνει την ισχύ της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας στα διάφορα μήκη κύματος, ονομάζεται **φασματική ισχύς εκπομπής (spectral emissive power)**, $M(\lambda, T)$.
- Συχνά, η ισχύς της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας ανά μονάδα επιφάνειας ονομάζεται **ένταση (intensity)** της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας.



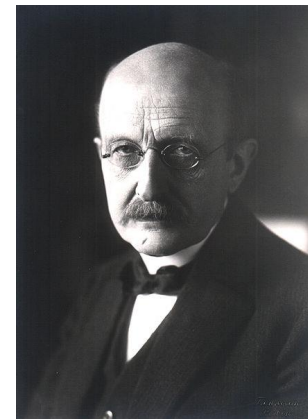
Κβάντα ενέργειας

- Το 1900 ο Γερμανός Φυσικός Max Planck (1858-1947, Βραβείο Nobel στη Φυσική το 1918) για να ερμηνεύσει την εκπομπή της θερμικής ακτινοβολίας των σωμάτων (ακτινοβολία μέλανος σώματος) εισήγαγε την έννοια του **κβάντου (quantum)** ενέργειας.
- Διατύπωσε την αρχή ότι η **ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται από τα άτομα σε διακριτά πακέτα ενέργειας** που ονομάζονται **κβάντα ενέργειας**.
- Σε ατομικό επίπεδο, η ενέργεια εκπέμπεται με ασυνεχή και όχι με συνεχή τρόπο.





$$M(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1 \right)}$$



- Όπου $M(\lambda, T)$ είναι η φασματική ισχύς εκπομπής (spectral emissive power) της ακτινοβολίας, σε $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$
- h είναι η σταθερά του Planck, ισούται με $6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
- k είναι η σταθερά του Boltzmann, ισούται με $1,380649 \times 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$
- T είναι η απόλυτη θερμοκρασία, σε K.



Κβάντα ενέργειας

- Η λέξη **quantum** (πληθυντικός **quanta**) είναι το ουδέτερο γένος της Λατινικής λέξης **quantus** = πόσο (μεγάλο ή μικρό) σε ποσότητα.
- Έχει την ίδια ρίζα με τη Λατινική λέξη **quantitas** (ποσότητα) από την οποία προέρχεται η Αγγλική λέξη **quantity**.
- Στην προκείμενη περίπτωση, δηλώνει την **ελάχιστη ποσότητα** (ελάχιστο δείγμα, ψήγμα, ίχνος) μιας φυσικής οντότητας.





Κβάντα ενέργειας

- Η ενέργεια, με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, η οποία **εκπέμπεται** ή **απορροφάται** από τα **άτομα** μπορεί να πάρει μόνο διακριτές (μη συνεχείς) τιμές οι οποίες είναι ακέραια πολλαπλάσια μίας στοιχειώδους ποσότητας ενέργειας (κβάντο ενέργειας):

$$E = nhf$$

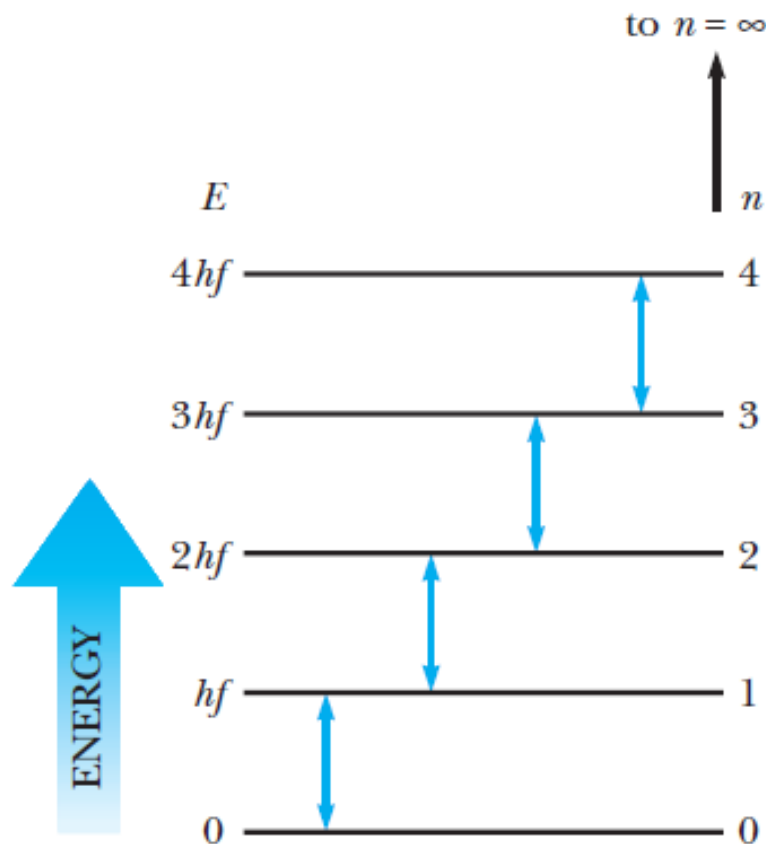
- Όπου E είναι η ενέργεια της ακτινοβολίας, σε J
- n είναι ο κύριος κβαντικός αριθμός, 1, 2, 3, ...
- h είναι η σταθερά του Planck, ισούται με $6,62607015 \times 10^{-34}$ J·s
- f είναι η συχνότητα της ακτινοβολίας, σε Hz (s^{-1})

Κβάντα ενέργειας



- Η μεταβολή ενέργειας από τη μία ενεργειακή κατάσταση στην άλλη δίνεται από την εξίσωση:

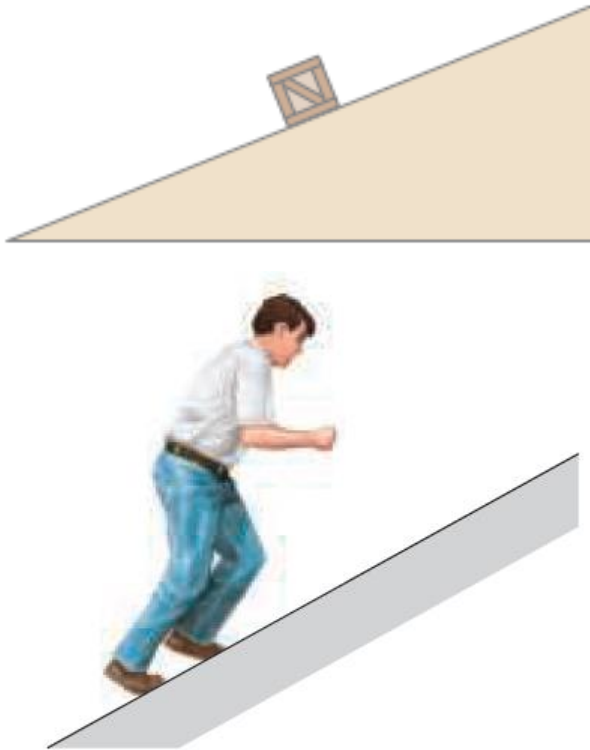
$$\Delta E = hf$$



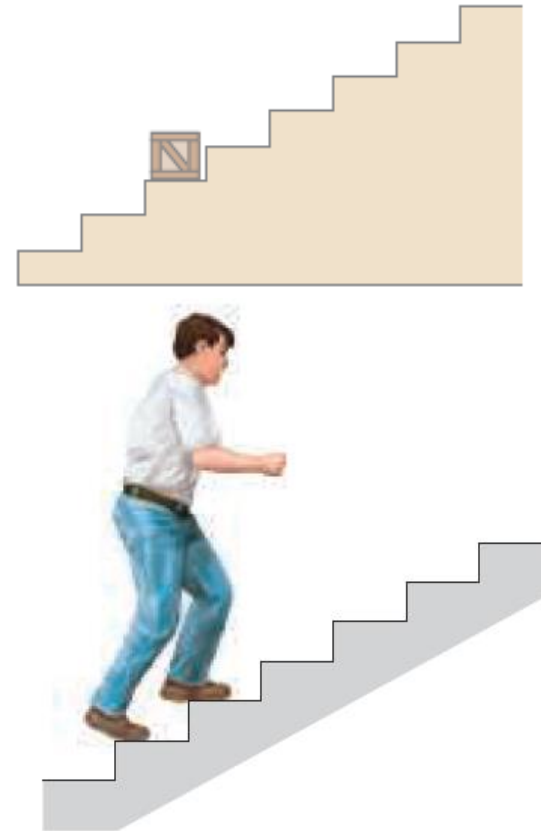
Κβάντα ενέργειας



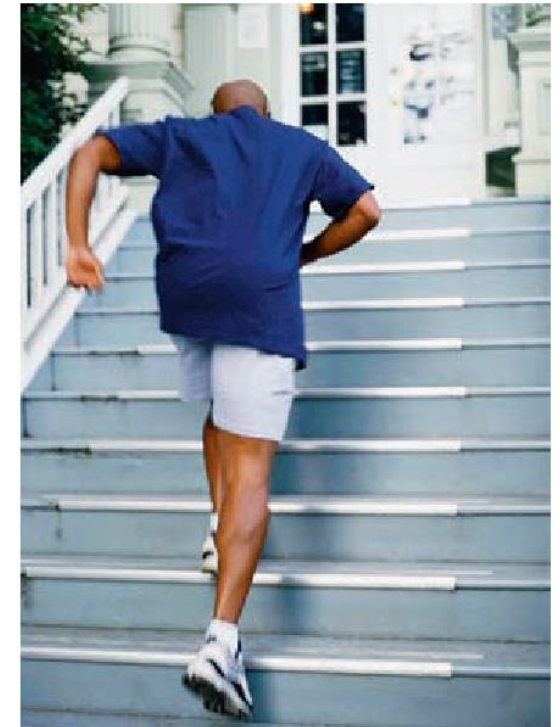
- Η ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται από τα άτομα σε ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας hf (είναι δηλαδή κβαντισμένη).



συνεχής μεταβολή της
δυναμικής ενέργειας



ασυνεχής ή κβαντισμένη
μεταβολή της δυναμικής ενέργειας





Κβαντισμένη ενέργεια

- Στο μακρόκοσμο της ύλης η ενέργεια φαίνεται να παίρνει συνεχείς τιμές γιατί η σταθερά του Planck έχει πάρα πολύ μικρή τιμή (τάξη μεγέθους 10^{-34}).
- Σε ένα σύστημα που εκτελεί ταλάντωση στο μακρόκοσμο της ύλης (π.χ. εκκρεμές), η συχνότητα ταλάντωσης είναι σχετικά μικρή (π.χ. μερικά Hz) σε σύγκριση με την συχνότητα ταλάντωσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (π.χ. μεταξύ 10^{14} και 10^{15} Hz για την ορατή ακτινοβολία).
- Κατά συνέπεια, στο μακρόκοσμο της ύλης, οι μεταβολές ενέργειας είναι πάρα πολύ μικρές (π.χ. της τάξης μεγέθους 10^{-34} J) για να γίνουν αντιληπτές.

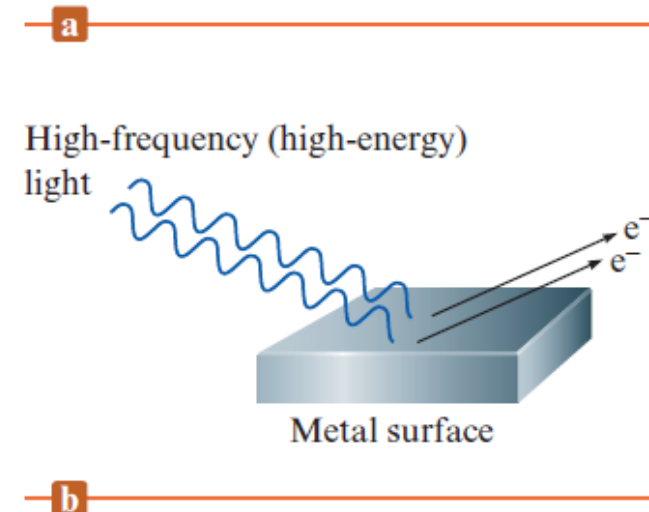
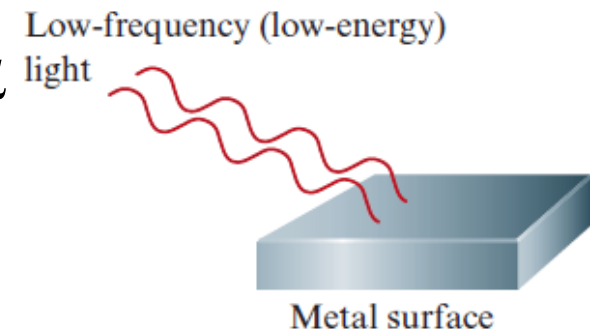


Κβαντισμένη ενέργεια

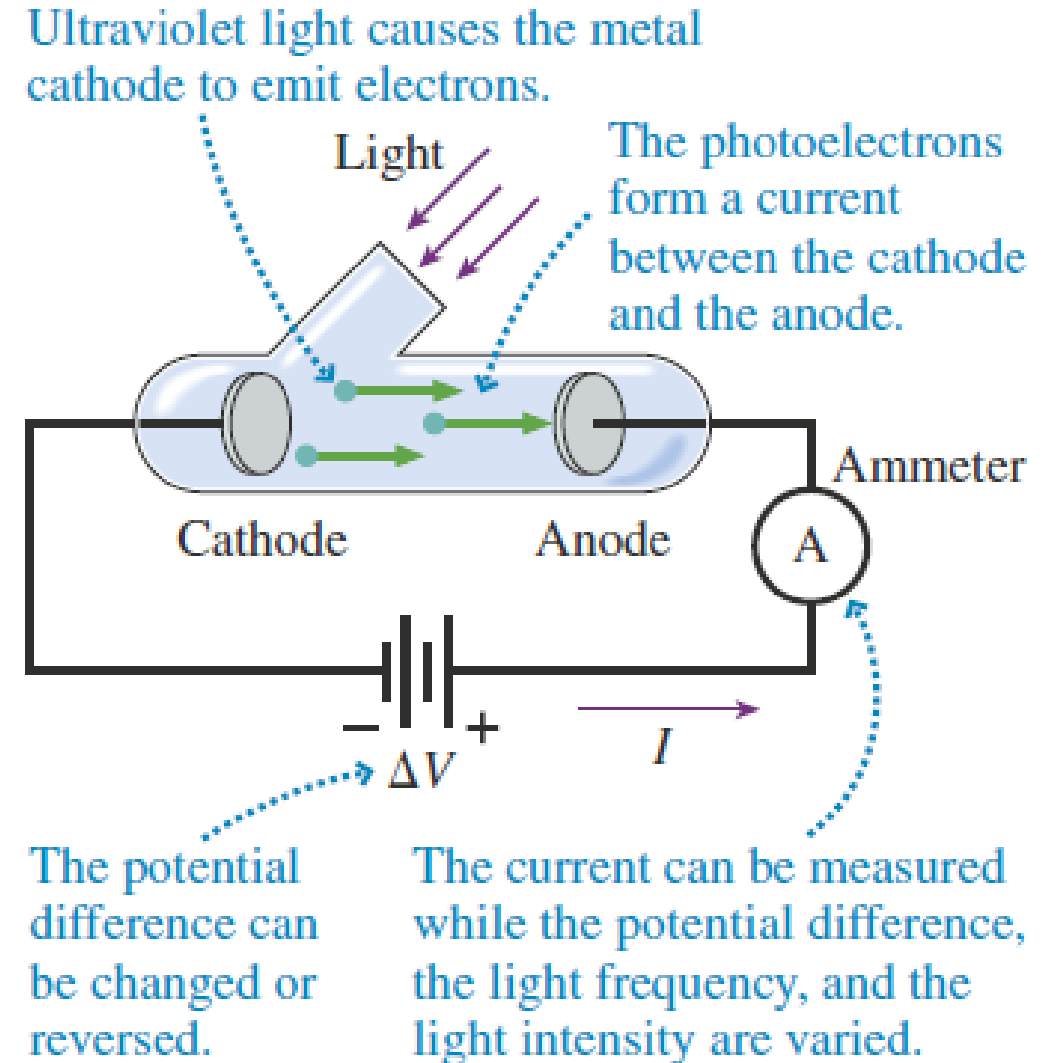
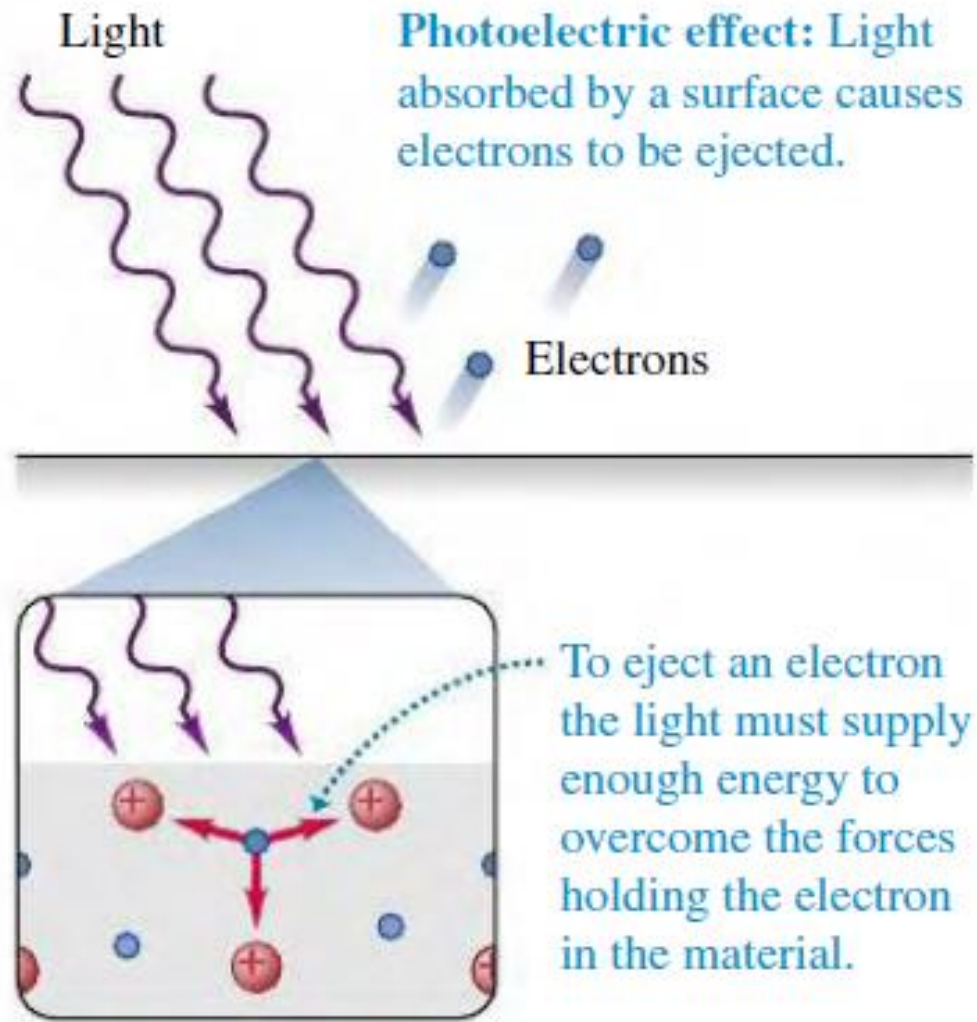
- Στο μικρόκοσμο της ύλης, όπου η συχνότητα ταλάντωσης είναι αρκετά υψηλή, αποκτά σημασία η έννοια της κβάντωσης της ενέργειας.
- Η σταθερά του Planck είναι μία από τις θεμελιώδεις σταθερές της φύσης.
- Πλέον, χρησιμοποιείται στο Διεθνές Σύστημα Μονάδων Μέτρησης (SI) για τον ορισμό της μονάδας μέτρησης της μάζας, δηλ. του κιλού (kilogram).
- Για περισσότερες πληροφορίες δείτε το εξής:
- <https://www.bipm.org/en/measurement-units/>

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Όταν προσπίπτει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία κατάλληλης συχνότητας (ή μήκους κύματος) πάνω σε ορισμένες μεταλλικές επιφάνειες (αγωγούς) τότε απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από την επιφάνεια του αγωγού.
- Λόγω της απορρόφησης ακτινοβολίας, τα ηλεκτρόνια υπερπηδούν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια του μετάλλου και παράγουν ηλεκτρικό ρεύμα.
- Η ακτινοβολία που μπορεί να προκαλέσει το φαινόμενο έχει συχνότητες συνήθως από την ορατή ή την υπεριώδη περιοχή και πάνω.



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο





Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

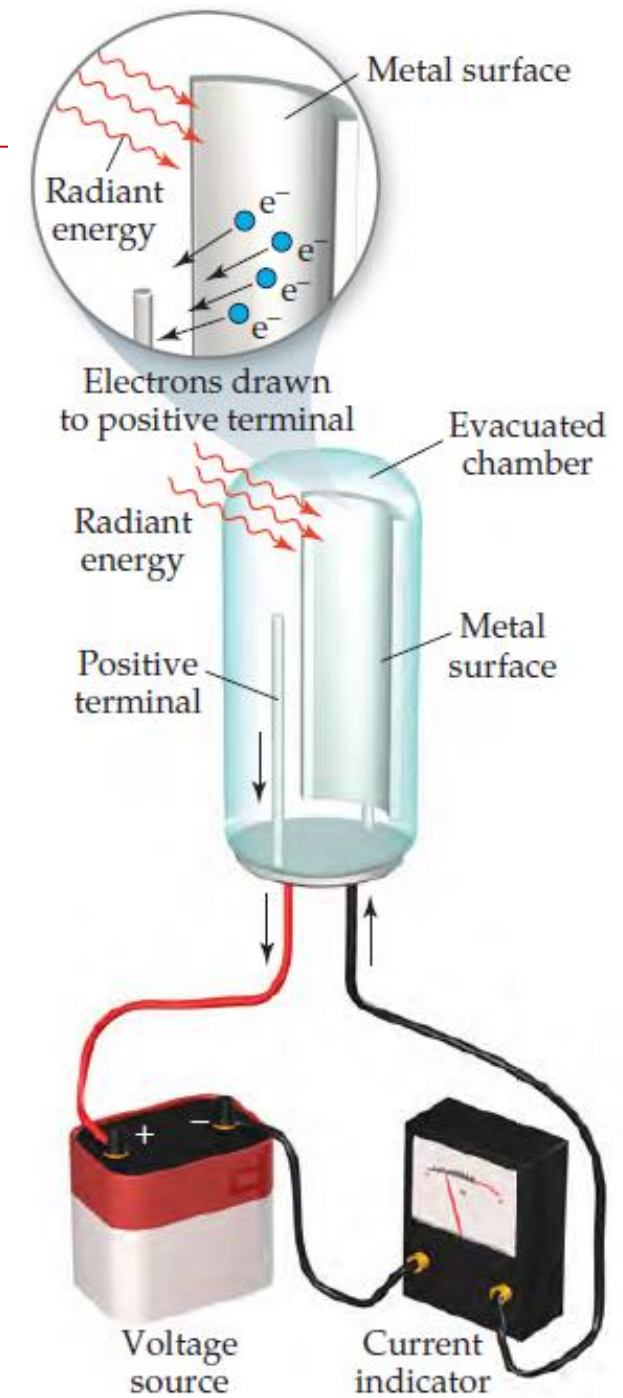
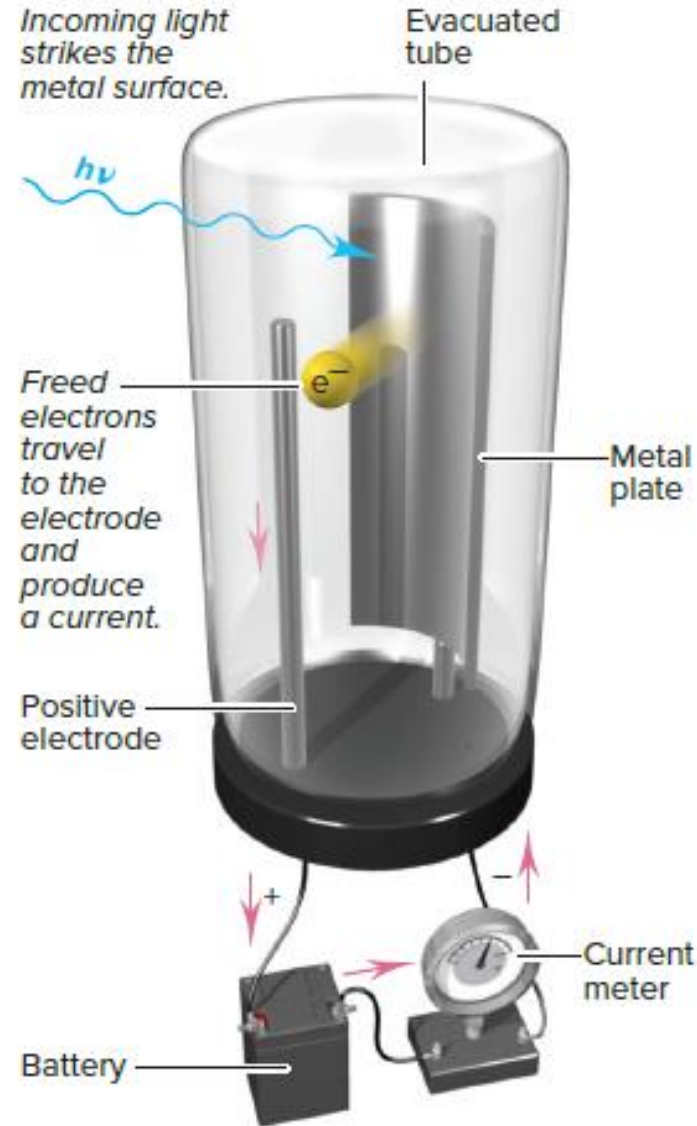
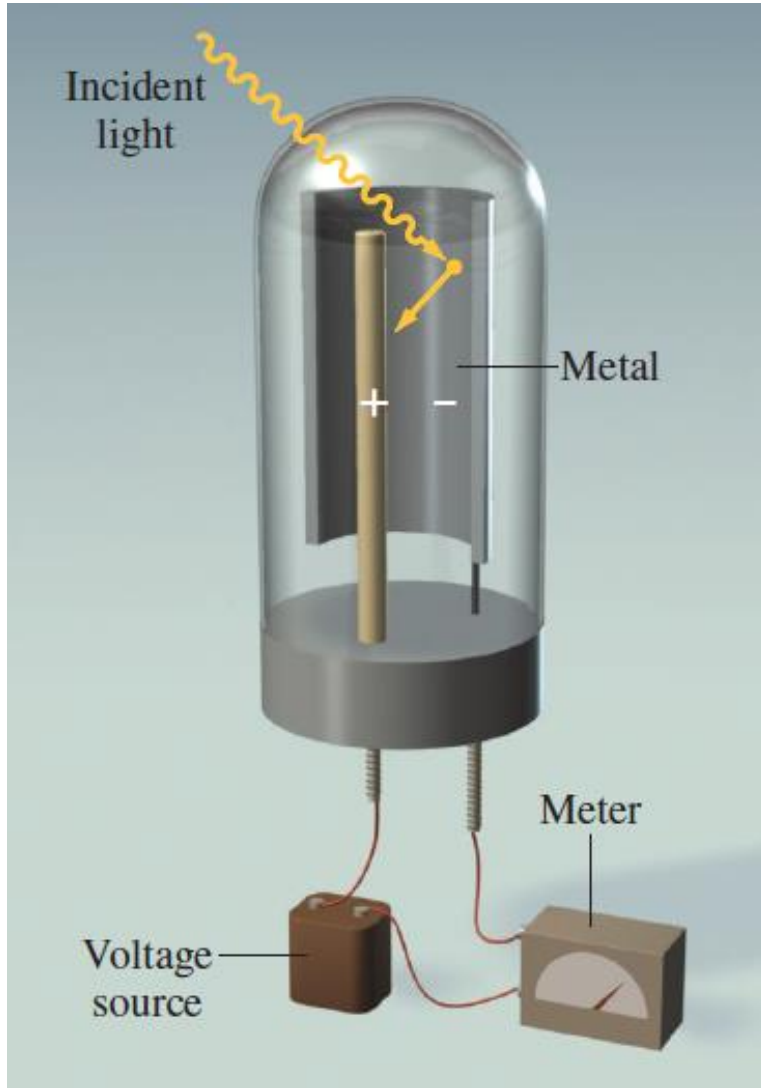
- Μέσα σε ένα σωλήνα υψηλού κενού ($\approx 10^{-7}\text{atm}$) είναι τοποθετημένα δύο ηλεκτρόδια.
- Το αρνητικό ηλεκτρόδιο είναι η **κάθοδος** (–).
- Η κάθοδος έχει μεγάλη επιφάνεια και φέρει επίστρωση από ένα μέταλλο.
- Κατά την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατάλληλης συχνότητας (ή μήκους κύματος) η κάθοδος εκπέμπει ηλεκτρόνια τα οποία ονομάζονται φωτοηλεκτρόνια.
- Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται και κινούνται προς το θετικό ηλεκτρόδιο της **ανόδου** (+).



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Με τη βοήθεια κατάλληλης διάταξης μεταβάλλεται η τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια.
- Με το αμπερόμετρο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα μπορεί να μετρηθεί η ένταση του ρεύματος που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η κάθοδος.
- Κατά την πρόσπτωση στην κάθοδο ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατάλληλης συχνότητας (ή μήκους κύματος) εκπέμπονται ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων και καταλήγουν στην άνοδο.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο





Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Τα ηλεκτρόνια συγκρατούνται λόγω των ελκτικών δυνάμεων από τα θετικά φορτισμένα ιόντα του μετάλλου.
- Για να ξεφύγει ένα ηλεκτρόνιο από την επιφάνεια του μετάλλου πρέπει να απορροφήσει αρκετή ενέργεια ώστε να υπερνικήσει την έλξη από τα θετικά ιόντα του μετάλλου.
- Η προσπίπτουσα ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία προσφέρει στα ηλεκτρόνια την απαιτούμενη ενέργεια για να υπερνικήσουν τις ελκτικές δυνάμεις που ασκούνται από τα θετικά ιόντα του μετάλλου.



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Απαιτείται μία ελάχιστη ποσότητα ενέργειας για να ξεφύγει ένα ηλεκτρόνιο από την επιφάνεια του μετάλλου.
- Η ελάχιστη αυτή ενέργεια ονομάζεται **έργο εξαγωγής (work function) φ** .
- Τα φωτοηλεκτρόνια εγκαταλείπουν την κάθοδο έχοντας αποκτήσει κινητική ενέργεια.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια, $K_{\max}$, την οποία αποκτούν τα ηλεκτρόνια ισούται με την ενέργεια που έχουν τα ηλεκτρόνια μέσα στο μέταλλο μετά την απορρόφηση ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, E_{elec} , μείον το έργο εξαγωγής, φ :

$$K_{\max} = E_{\text{elec}} - \varphi$$

Έργο εξαγωγής διαφόρων μετάλλων

$$1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

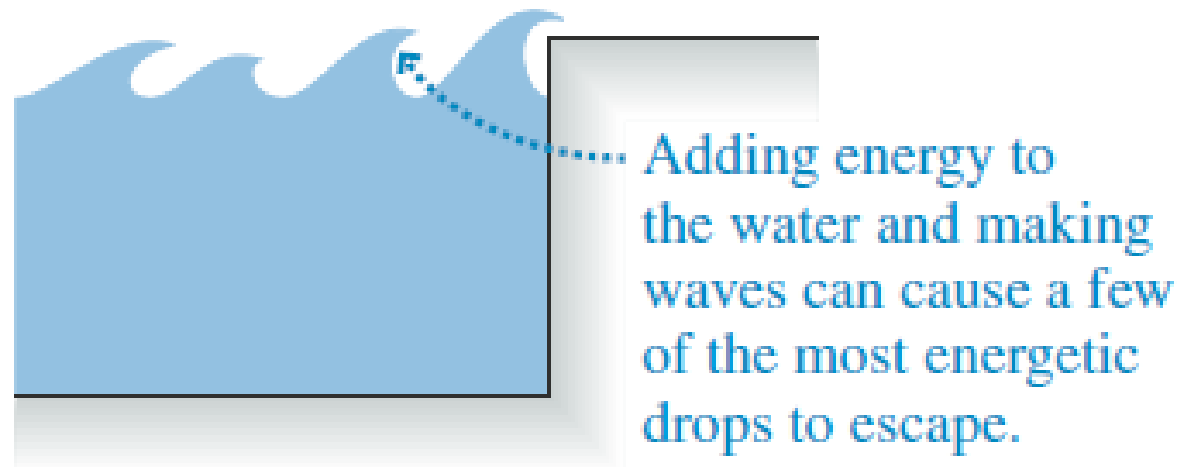
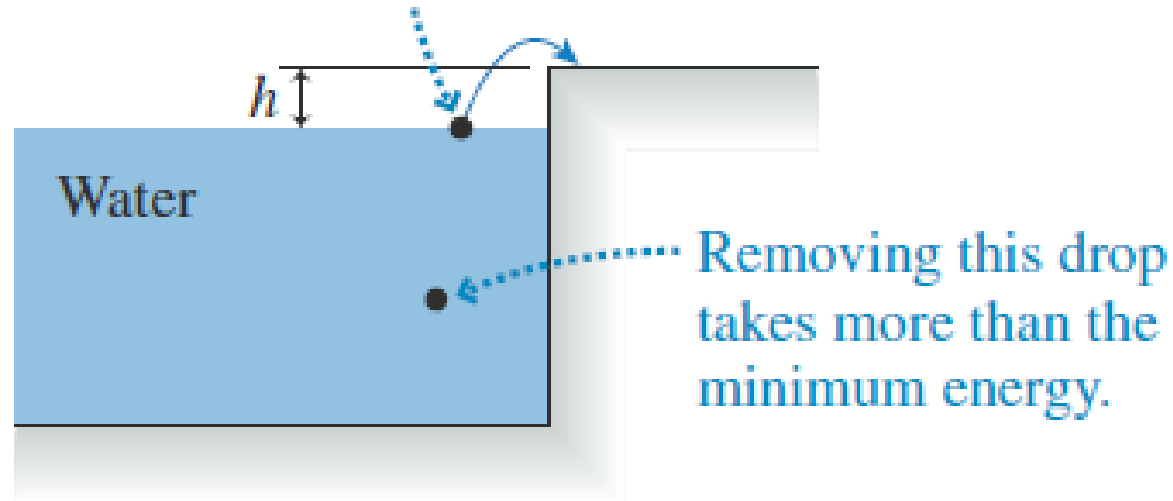


Στοιχείο	ϕ (eV)	ϕ (J)	λ (nm)
Κάλιο	2,30	$3,69 \times 10^{-19}$	539
Νάτριο	2,75	$4,41 \times 10^{-19}$	451
Αργίλιο	4,28	$6,86 \times 10^{-19}$	290
Βολφράμιο	4,55	$7,29 \times 10^{-19}$	272
Χαλκός	4,65	$7,45 \times 10^{-19}$	267
Σίδηρος	4,70	$7,53 \times 10^{-19}$	264
Χρυσός	5,10	$8,17 \times 10^{-19}$	243

Μηχανικό ανάλογο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



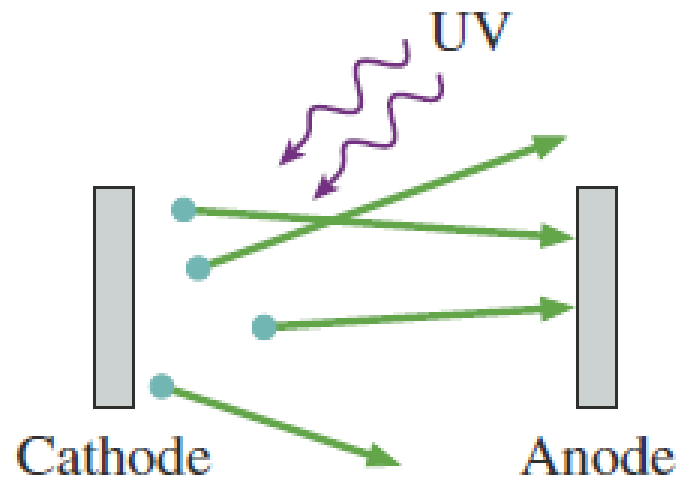
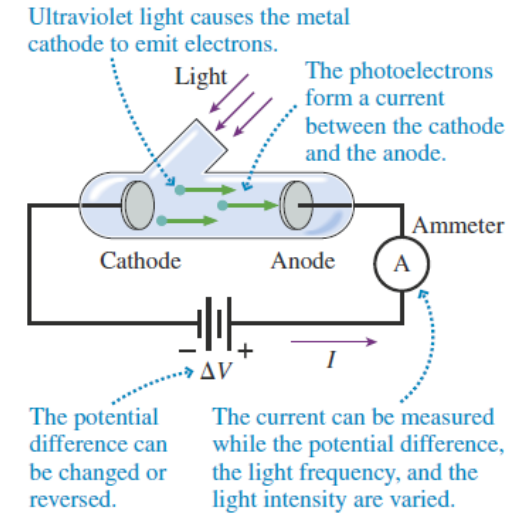
The *minimum* energy to remove a drop of water from the pool is mgh .



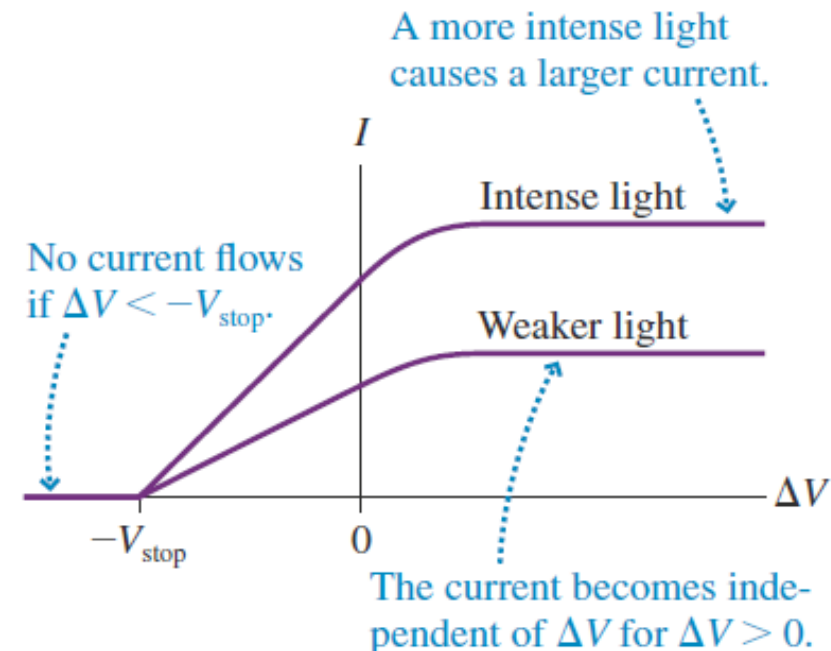
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



- Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων είναι μηδέν, $\Delta V = 0$, κάποια φωτοηλεκτρόνια καταφθάνουν στην άνοδο προκαλώντας την εμφάνιση ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ πολλά άλλα ηλεκτρόνια δεν καταφθάνουν.



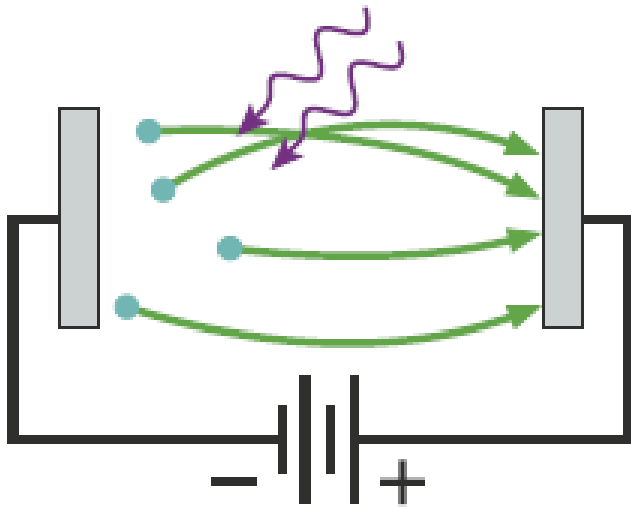
$\Delta V = 0$: The photoelectrons leave the cathode in all directions. Only a few reach the anode.



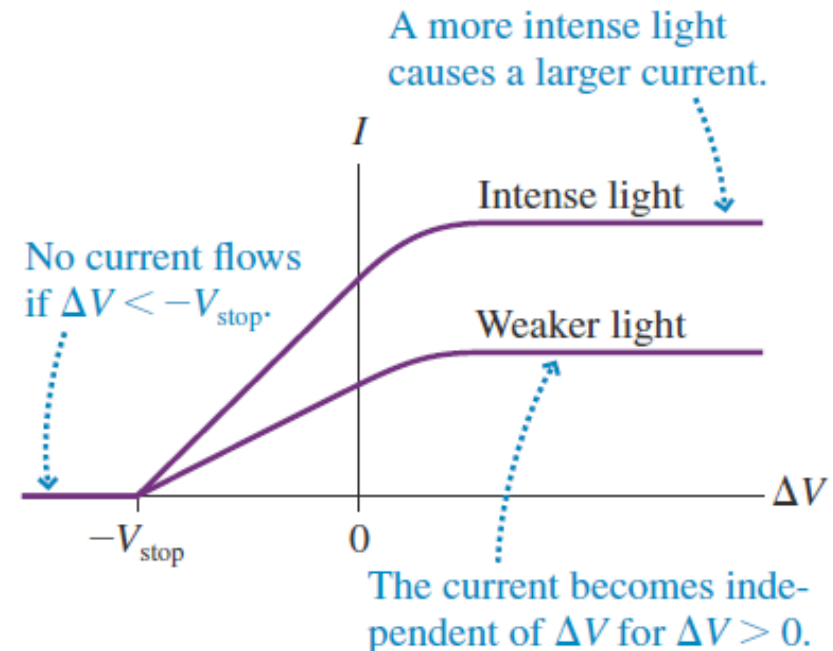


Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Κατά την εφαρμογή θετικής διαφοράς δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων, $\Delta V > 0$, τα ηλεκτρόνια έλκονται προς την άνοδο.
- Όταν όλα τα ηλεκτρόνια φτάσουν στην άνοδο, περαιτέρω αύξηση της διαφοράς δυναμικού δεν προκαλεί περαιτέρω αύξηση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος.



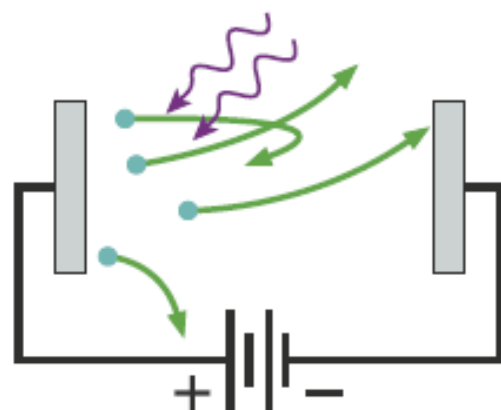
$\Delta V > 0$: A positive anode attracts the photoelectrons to the anode.



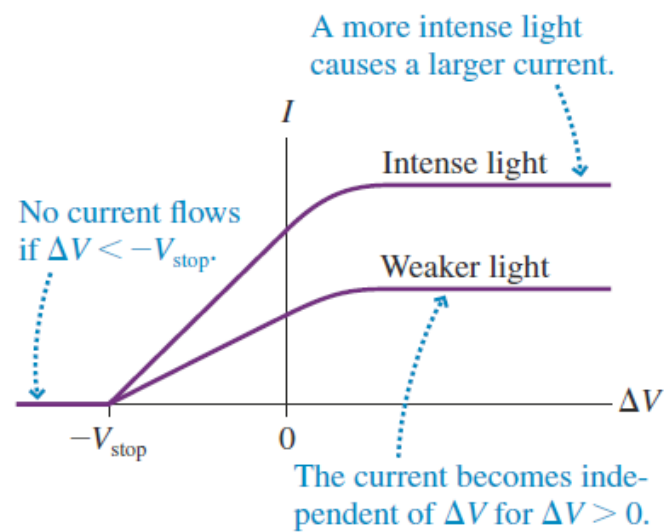
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



- Όταν η διαφορά δυναμικού μεταξύ των ηλεκτροδίων γίνει αρνητική, $\Delta V < 0$, τότε η άνοδος φορτίζεται αρνητικά και απωθεί τα ηλεκτρόνια.
- Ωστόσο, τα φωτοηλεκτρόνια τα οποία εγκαταλείπουν την άνοδο με αρκετή κινητική ενέργεια μπορούν να φτάσουν μέχρι τη άνοδο.
- Η ένταση του ρεύματος μειώνεται σταδιακά μέχρι που μηδενίζεται.



$\Delta V < 0$: A negative anode repels the electrons.
Only the very fastest make it to the anode.





Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Η τιμή του δυναμικού όπου η ένταση του ρεύματος μηδενίζεται ονομάζεται **τάση αποκοπής** (stopping potential, $-V_{\text{stop}}$).
- Στην τάση αποκοπής, **όλα** τα ηλεκτρόνια επιστρέφουν πίσω στην κάθοδο και πλέον το κύκλωμα δεν διαρρέεται από ρεύμα.
- Σύμφωνα με την αρχή διατήρησης της ενέργειας, στην περίπτωση αυτή ισχύει ότι η ενέργεια του ηλεκτρικού πεδίου ισούται με τη μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων:

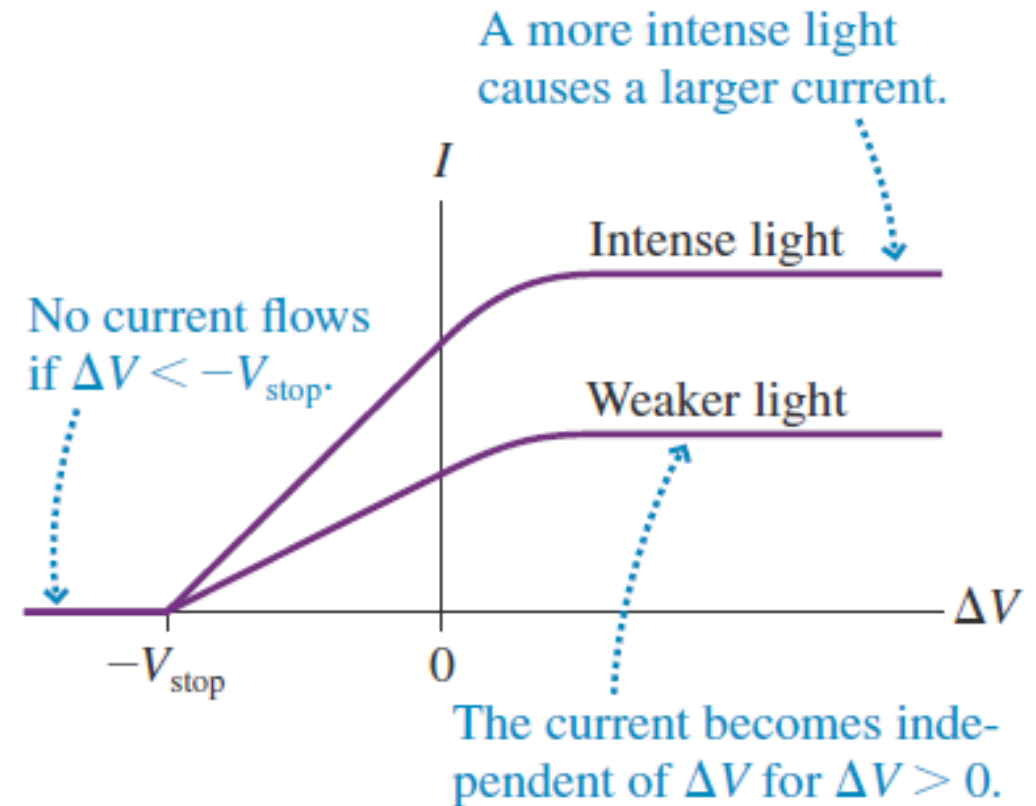
$$K_{\text{max}} = eV_{\text{stop}}$$

- Κατά συνέπεια, από την τιμή της τάσης αποκοπής προσδιορίζεται η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων.



Χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Το ηλεκτρικό ρεύμα (άρα και η ροή ηλεκτρονίων) είναι ευθέως ανάλογο με την ένταση της ακτινοβολίας. Εάν η ένταση της ακτινοβολίας διπλασιαστεί το ρεύμα επίσης διπλασιάζεται.
- Η μέγιστη κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων δεν εξαρτάται από την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.
- Η $K_{\max}$ εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας αυξάνεται όταν αυξάνεται η συχνότητα.





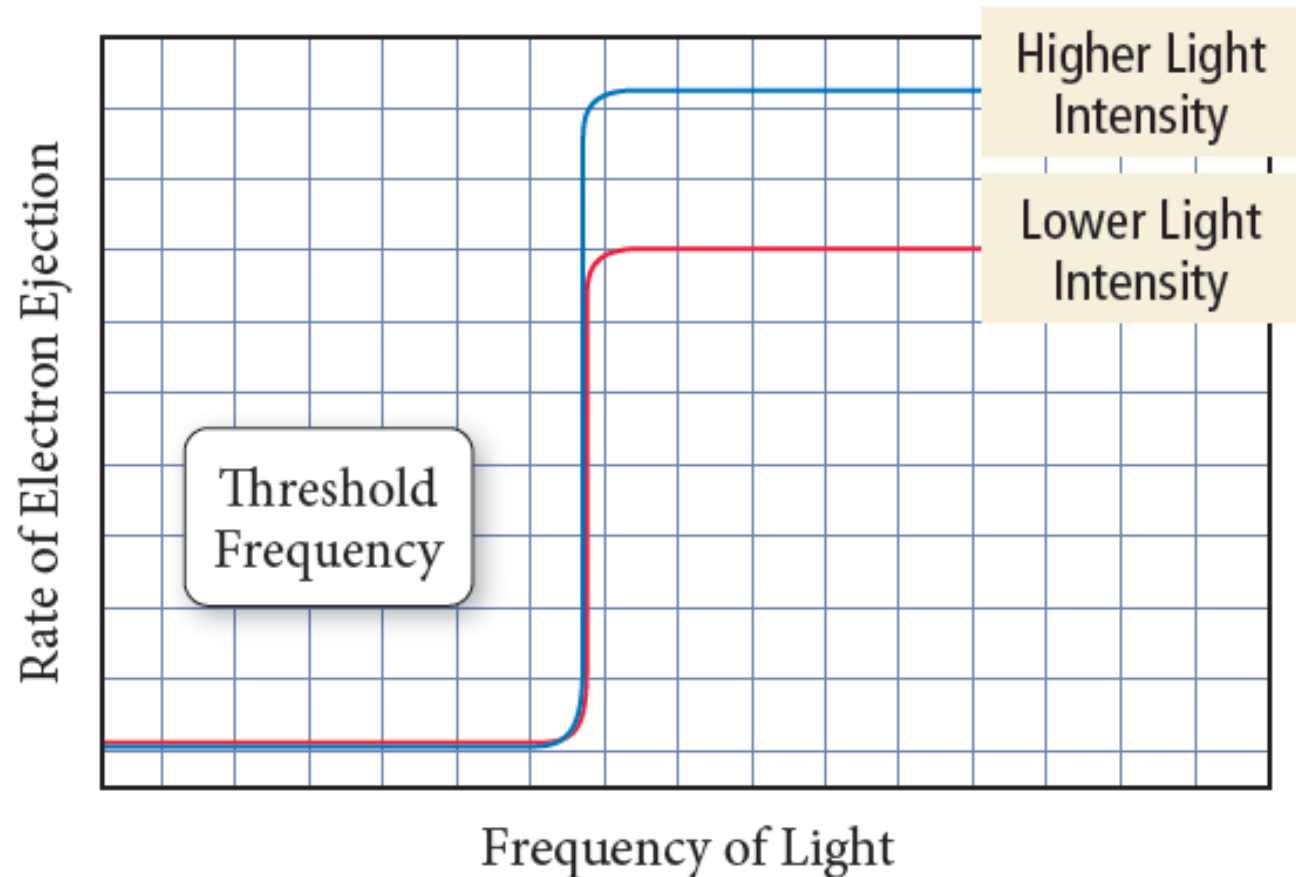
Χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Το ηλεκτρικό ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ακαριαία (σε λιγότερο από 1 ns!) κατά την ακτινοβολή της επιφάνειας.
- Αν η συχνότητα της προσπίπτουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι μικρότερη από μια οριακή τιμή (η οποία εξαρτάται από τη φύση του μετάλλου) τότε σταματάει η εκπομπή ηλεκτρονίων.
- Η οριακή αυτή τιμή ονομάζεται οριακή συχνότητα ή **συχνότητα κατωφλίου (threshold frequency)**, f_0 ή ν_0 .



Χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Για παράδειγμα, ακτινοβολία χρώματος μπλε ($f \approx 6,5 \times 10^{14}$ Hz) μπορεί να προκαλέσει εκπομπή ηλεκτρονίων από το νάτριο, ενώ ακτινοβολία κόκκινου χρώματος ($f \approx 4,5 \times 10^{14}$ Hz) δεν έχει καμία επίδραση στο νάτριο.





Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Η κλασική θεωρία της κυματικής φύσης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να ερμηνεύσει κάποια από τα χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μεταφέρει ενέργεια.
- Κατά συνέπεια, είναι αναμενόμενο ότι τα ηλεκτρόνια κάποιου μετάλλου μπορούν να απορροφήσουν την ενέργεια της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και να εξέλθουν από το μέταλλο.



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Ωστόσο, η κλασική θεωρία δε μπορούσε να εξηγήσει κάποια από τα επιμέρους χαρακτηριστικά του φαινομένου.
- Ιδιαίτερη δυσκολία παρουσίαζε η ερμηνεία της ύπαρξης της συχνότητας κατωφλίου.
- Η κλασική θεωρία δε μπορούσε να ερμηνεύσει το γεγονός, ότι η εξαγωγή ηλεκτρονίων από το μέταλλο και η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται εξαρτάται από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι από την ένταση της ακτινοβολίας.
- Επίσης, δεν μπορεί να εξηγήσει γιατί το ρεύμα εμφανίζεται σχεδόν ακαριαία.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



- Ο Albert Einstein (1879 – 1955, βραβείο Nobel Φυσικής 1921) το 1905 χρησιμοποίησε την κβαντική θεωρία του Planck για να εξηγήσει το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο**.
- Μία Ευρετική Θεώρηση Περί της Δημιουργίας και του Μετασχηματισμού του Φωτός (Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt). *Annalen der Physik* **17** (6): 132–148, 1905.
- Η Γερμανική λέξη heuristisch (στα Αγγλικά heuristic) προέρχεται από την Ελληνική λέξη «εὕρισκιν», δηλαδή το απαρέμφατο του ρήματος «εὕρισκω», από το οποίο προέρχεται η λέξη «εὕρηκα».



... καὶ ἐγένετο φῶς



- ... νομίζω ὅτι οἱ παρατηρήσεις σχετικά με την ακτινοβολία μέλανος σώματος ... την παραγωγή καθοδικῶν ακτίνων ἀπὸ το υπεριώδες φως [δηλ. το φωτοηλεκτρικὸ φαινόμενο], καθὼς και ἄλλα φαινόμενα τα οποία αφοροῦν την εκπομπή ἢ τη μετατροπή του φωτός μπορούν να γίνουν καλύτερα κατανοητά με την υπόθεση ὅτι **ἡ ἐνέργεια του φωτός κατανέμεται ασυνεχῶς στο χώρο** (.. die Energie des Lichtes diskontinuierlich im Raume verteilt sei).



... καὶ ἐγένετο φῶς



- ... η ενέργεια μίας ακτίνας φωτός αποτελείται από ένα πεπερασμένο αριθμό **κβάντων ενέργειας** (... die Energie des Lichtstrahles es besteht dieselbe aus einer endlichen Zahl von **Energiequanten**).



- Πηγές:

- ✓ <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/andp.19053220607>
- ✓ http://users.physik.fu-berlin.de/~kleinert/files/eins_lq.pdf

Φωτόνια



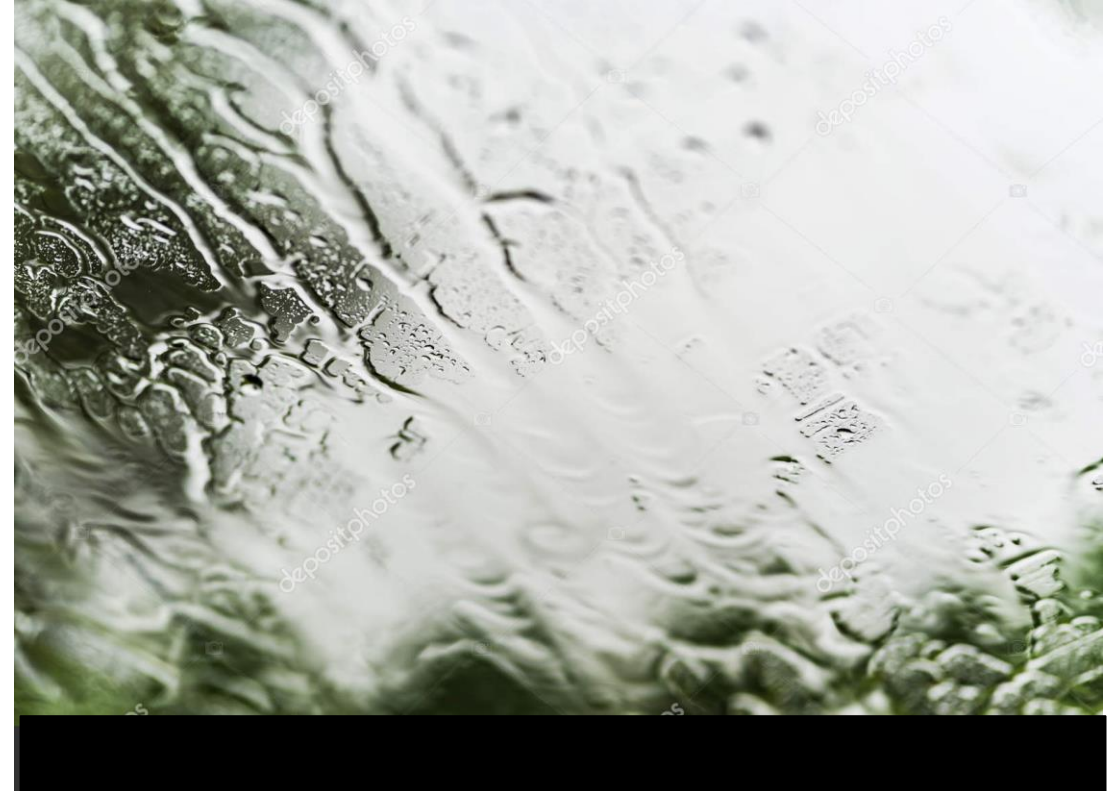
- Για να ερμηνεύσει το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, καθώς και άλλα φαινόμενα που σχετίζονται με την δημιουργία και το μετασχηματισμό του φωτός, ο Einstein πρότεινε ότι **η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αυτή καθαυτή είναι κβαντισμένη**, δηλαδή παίρνει ασυνεχείς (κβαντισμένες) τιμές.
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία δεν είναι ένα συνεχές κύμα, αλλά αποτελείται από **διακριτά και αδιαίρετα κβάντα** («πακέτα») **ενέργειας**, τα οποία ονομάστηκαν **φωτόνια (photons)**:

$$E = hf$$

Μηχανικό ανάλογο των φωτονίων



➤ «βροχή» φωτονίων





Αξιώματα της θεωρίας του Einstein

1. Η ακτινοβολία με συχνότητα f αποτελείται από διακριτά και αδιαίρετα κβάντα («πακέτα») ενέργειας (φωτόνια), $E = hf$. Τα φωτόνια ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός c .
2. Τα φωτόνια της ακτινοβολίας εκπέμπονται ή απορροφώνται σε ακέραια πολλαπλάσια της ποσότητας hf . Μια ουσία μπορεί να εκπέμψει ή να απορροφήσει 1 ή 2 ή 3 φωτόνια, αλλά όχι 1,5. Ομοίως, ένα ηλεκτρόνιο σε ένα μέταλλο πρέπει να απορροφήσει ένα ολόκληρο φωτόνιο (δηλαδή, δεν μπορεί να απορροφήσει για παράδειγμα μισό φωτόνιο).
3. Κάθε φωτόνιο, όταν απορροφάται από ένα μέταλλο, μεταδίδει όλη του την ενέργεια hf σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο του μετάλλου.



Αξιώματα της θεωρίας του Einstein

- Αυτά τα τρία αξιώματα, δηλαδή ότι η ακτινοβολία διαδίδεται σε κβάντα («πακέτα») ενέργειας, τα κβάντα δεν μπορούν να διαιρεθούν και ότι η ενέργεια ενός κβάντου μεταδίδεται ολόκληρη σε ένα ηλεκτρόνιο, είναι κρίσιμα για την κατανόηση των νέων ιδεών που οδήγησαν στην ανάπτυξη της κβαντικής θεωρίας.
- Είναι εντελώς αντίθετα με τις έννοιες της κλασσικής φυσικής, όπου η ενέργεια μπορεί να διαδοθεί και να διαιρεθεί συνεχώς.
- Κατά μία έννοια, η ακτινοβολία, όπως και η ύλη, αποτελείται από στοιχειώδεις, διακριτές «οντότητες».
- Στη ύλη ονομάζονται **άτομα**, στην ακτινοβολία ονομάζονται **φωτόνια**.

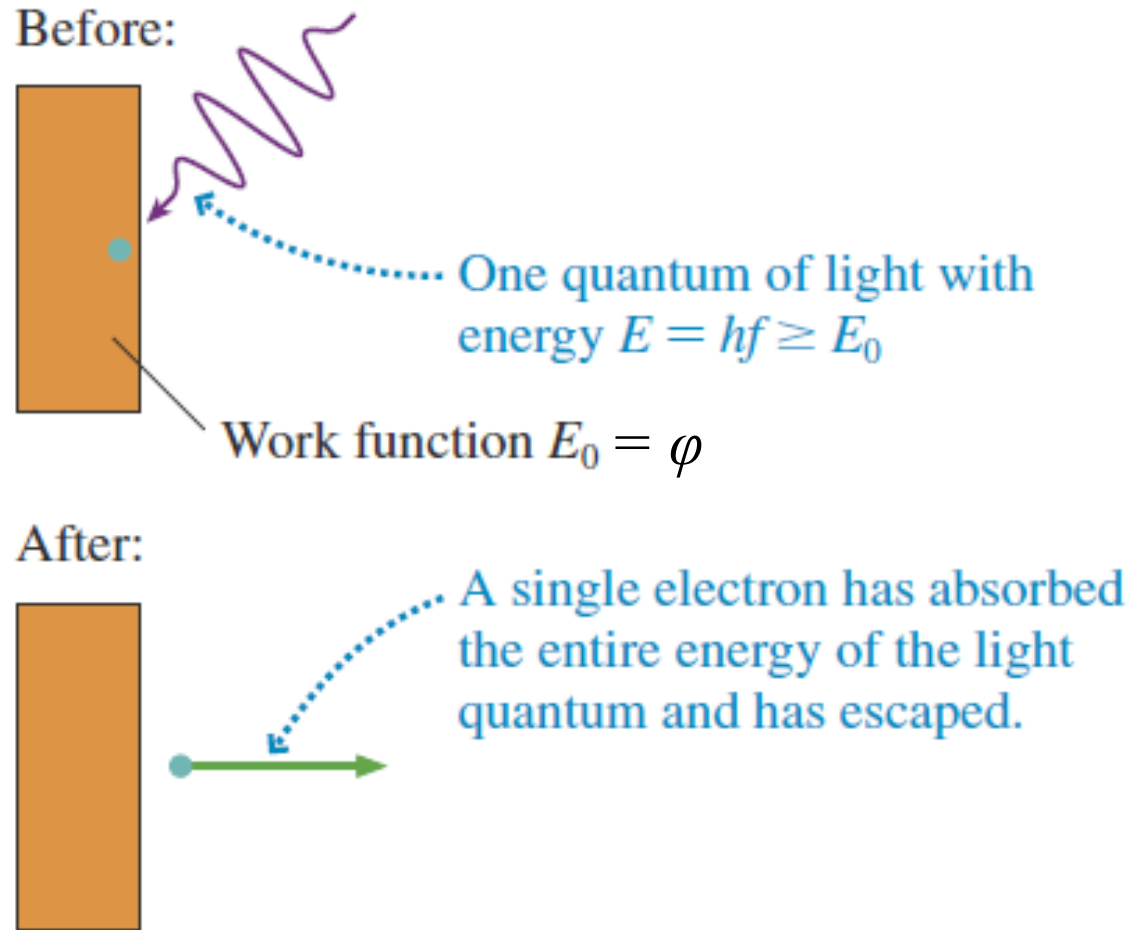


Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Σύμφωνα με τον Einstein, ένα ηλεκτρόνιο που έχει απορροφήσει ένα φωτόνιο, έχει ενέργεια $E_{\text{elec}} = hf$.
- Αν η ενέργεια hf του φωτονίου είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής, φ , τότε το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο.
- Εάν η ενέργεια του φωτονίου είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής, $E_{\text{elec}} = hf \geq \varphi$, το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το μέταλλο με μέγιστη κινητική ενέργεια που υπολογίζεται από τη σχέση:

$$K_{\text{max}} = hf - \varphi$$

Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



- Ως αποτέλεσμα, υπάρχει μια συχνότητα κατωφλίου για την εξαγωγή των ηλεκτρονίων από την επιφάνεια του μετάλλου:

$$f_0 = \frac{\phi}{h} \Leftrightarrow \phi = hf_0$$

Μηχανικό ανάλογο της συχνότητας κατωφλίου





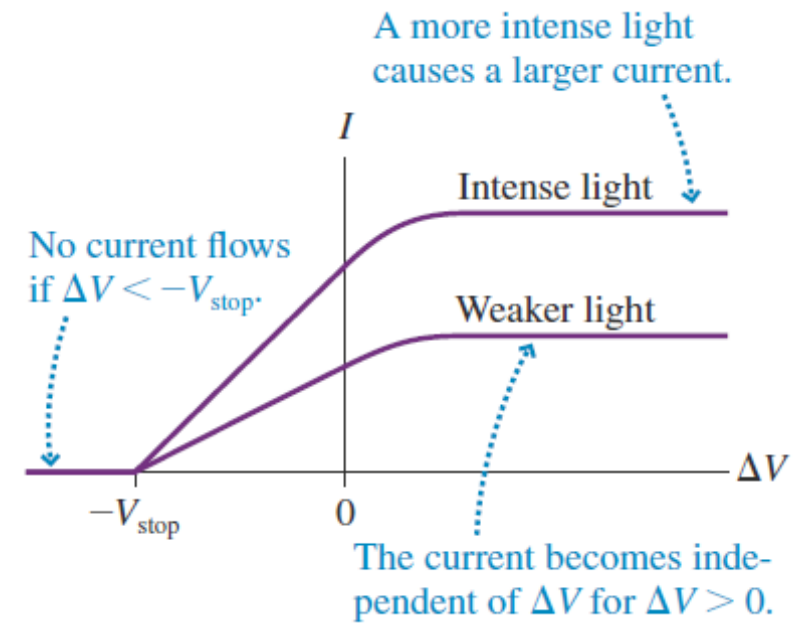
Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Αν η συχνότητα είναι έστω και λίγο μικρότερη από την f_0 , κανένα από τα ηλεκτρόνια δεν θα έχει αρκετή ενέργεια για να φύγει από την επιφάνεια του μετάλλου, ανεξάρτητα από το πόσο έντονη είναι η ακτινοβολία.
- Ακτινοβολία μεγαλύτερης έντασης σημαίνει περισσότερα φωτόνια της ίδιας ενέργειας και όχι φωτόνια μεγαλύτερης ενέργειας.



Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Αν τα φωτόνια έχουν συχνότητα από μία οριακή τιμή και πάνω, τότε κατά την πρόσπτωσή τους στην επιφάνεια του μετάλλου προκαλούν την εξαγωγή ηλεκτρονίων.
- Αν αυξηθεί η ένταση της ακτινοβολίας, αυξάνεται ο αριθμός των φωτονίων.
- Αυτά τα επιπλέον φωτόνια εκπέμπουν μεγαλύτερο αριθμό φωτοηλεκτρονίων και προκαλούν μεγαλύτερο ρεύμα.



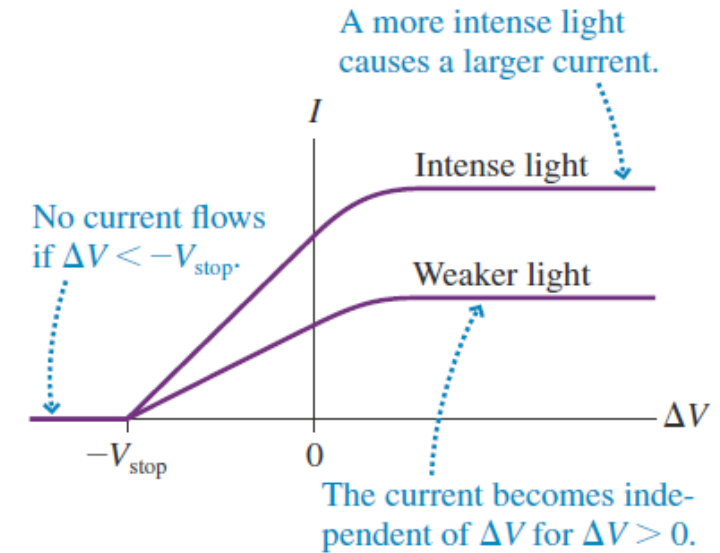


Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Η τάση αποκοπής, V_{stop} , εξαρτάται από τη συχνότητα της ακτινοβολίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{\text{stop}} = \frac{K_{\text{max}}}{e} = \frac{hf - \phi}{e}$$

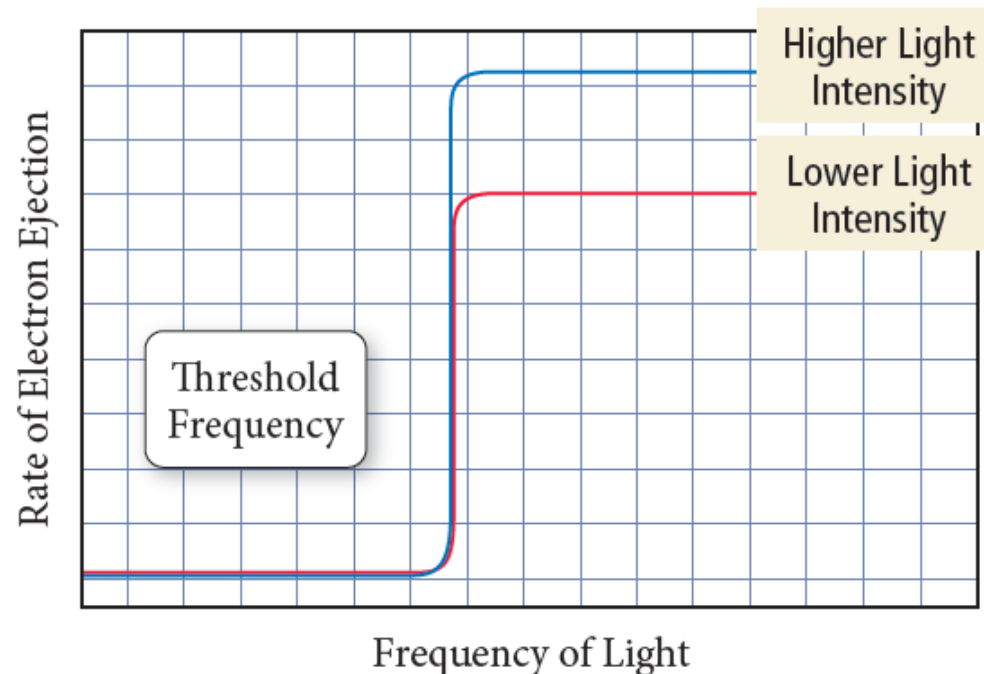
- Η τάση αποκοπής δεν εξαρτάται από την ένταση της ακτινοβολίας.
- Ακτινοβολία ορισμένης συχνότητας, είτε ισχυρής είτε ασθενούς έντασης, έχει την ίδια τάση αποκοπής.



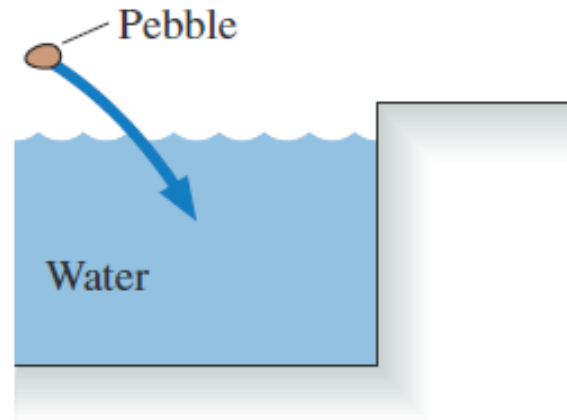


Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

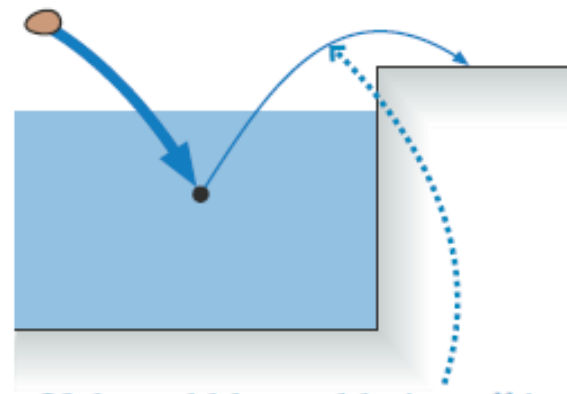
- Αν κάθε φωτόνιο μεταφέρει την ενέργεια του hf σε ένα μόνο ηλεκτρόνιο, τότε αυτό το ηλεκτρόνιο έχει αμέσως αρκετή ενέργεια για να διαφύγει από την επιφάνεια του μετάλλου.
- Κατά συνέπεια, το κύκλωμα θα διαρρέεται άμεσα από ηλεκτρικό ρεύμα, χωρίς καθυστέρηση.



Μηχανικό ανάλογο του φωτοηλεκτρικού φαινομένου



Classically, the energy of the pebble is shared by all the water molecules. One pebble causes only very small waves.



If the pebble could give *all* its energy to one drop, that drop could easily splash out of the pool.

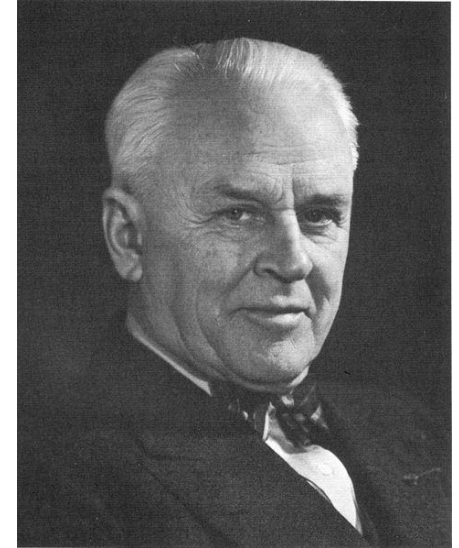


Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Η τάση αποκοπής αυξάνεται γραμμικά συναρτήσει της συχνότητας της ακτινοβολίας σύμφωνα με τη σχέση:

$$V_{\text{stop}} = \frac{h}{e} (f - f_0)$$

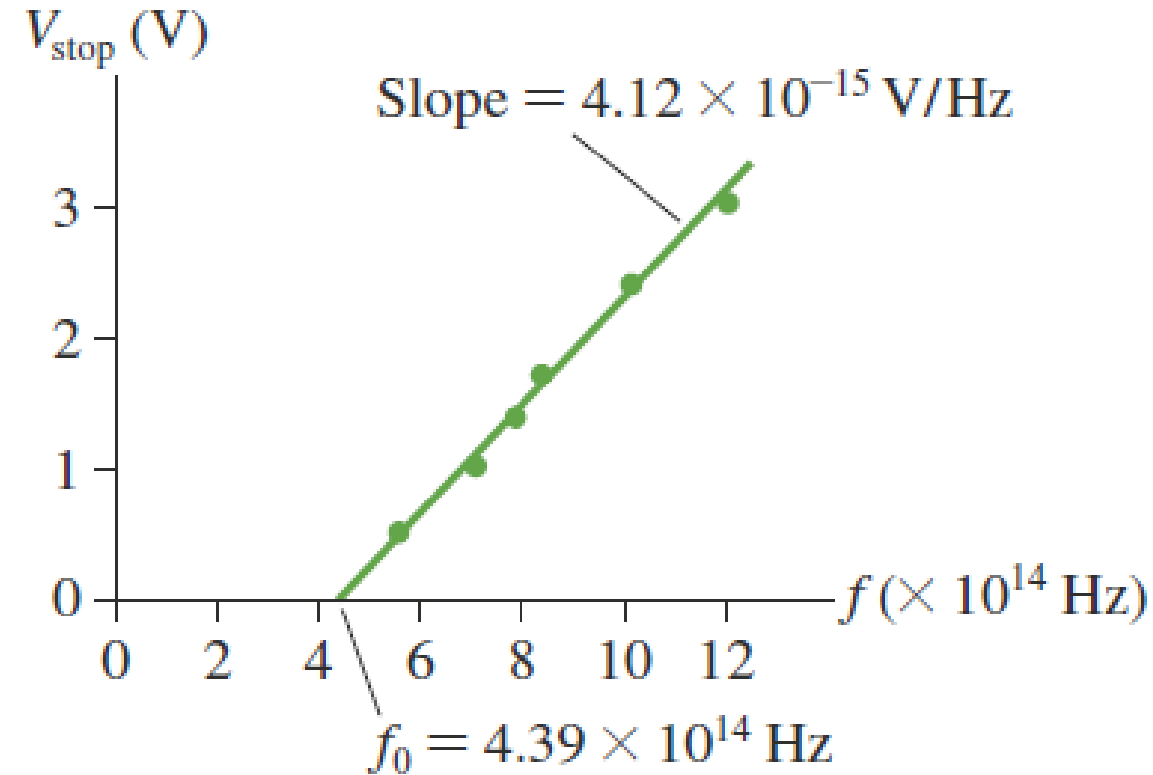
- Το 1916, ο Robert Millikan (1868-1953, βραβείο Nobel Φυσικής το 1923) μέτρησε την τάση αποκοπής συναρτήσει της συχνότητας της ακτινοβολίας.
- Από την κλίση της ευθείας, και έχοντας ήδη υπολογίσει το φορτίο του ηλεκτρονίου, υπολόγισε εκ νέου την σταθερά του Planck.





Ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Η γραφική παράσταση του V_{stop} συναρτήσει της συχνότητας ξεκινάει από το μηδέν για $f = f_0$ και μετά αυξάνεται γραμμικά με κλίση h/e .
- Από την κλίση της ευθείας, ο Millikan μέτρησε εκ νέου τη σταθερά h του Planck.
- Η τιμή που υπολόγισε συμφωνούσε με πολύ μεγάλη ακρίβεια με την τιμή που είχε υπολογίσει ο Planck το 1900 μελετώντας την ακτινοβολία του μέλανος σώματος.

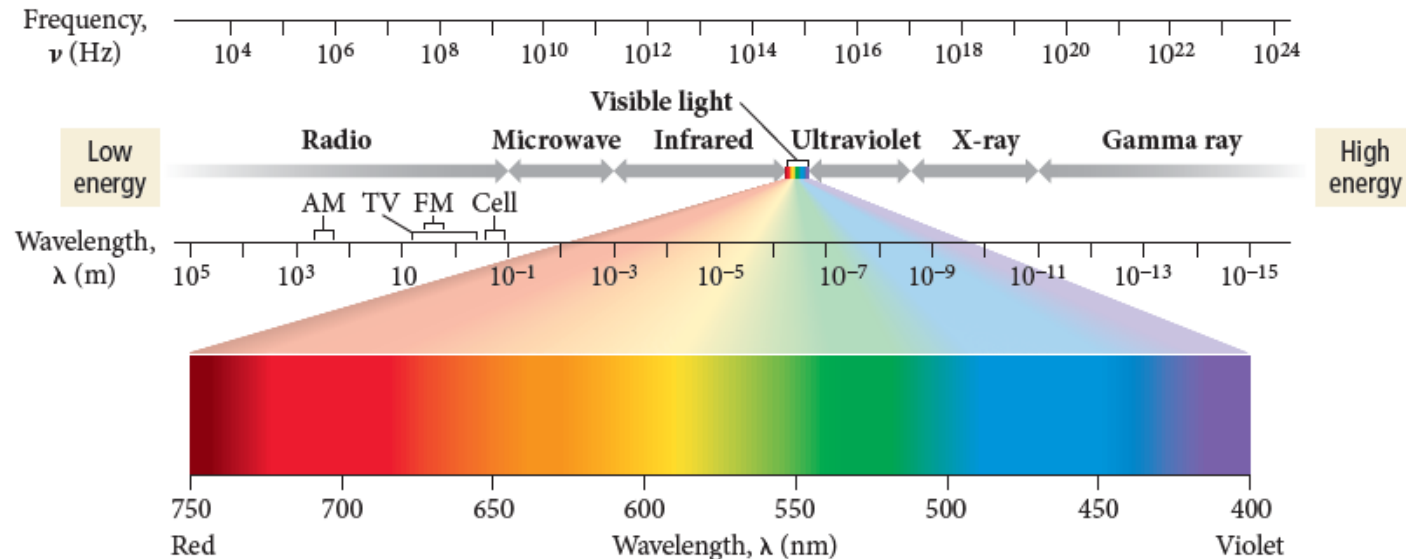




Ενέργεια ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας

- Συνδυάζοντας τη βασική εξίσωση της κυματικής και την εξίσωση της ενέργειας των φωτονίων του Einstein, τότε προκύπτει ότι:

$$\left. \begin{aligned} c &= \lambda f \Leftrightarrow f = \frac{c}{\lambda} \\ E &= hf \end{aligned} \right\} E = \frac{hc}{\lambda}$$





Ορμή των φωτονίων

- Τα φωτόνια έχουν μηδενική μάζα ηρεμίας.
- Μάζα ηρεμίας (**rest mass**) ονομάζεται η μάζα των σωμάτων όταν η ταχύτητα τους είναι μηδέν.
- Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας, τα **φωτόνια έχουν ορμή**, η οποία δίνεται από τη σχέση:

$$p = \frac{E}{c}$$

- Ως εκ τούτου, προκύπτει ότι:

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{hc/\lambda}{c} \Leftrightarrow p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}$$



Αποτελεσματική αδρανειακή μάζα των φωτονίων

- Επειδή τα φωτόνια έχουν ορμή, μπορεί να θεωρηθεί ότι έχουν μία φαινόμενη (apparent) ή **αποτελεσματική** (effective) **αδρανειακή μάζα (inertial mass)**, η οποία δίνεται από την εξίσωση:

$$m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{hf}{c^2}$$

- Η αδρανειακή μάζα ορίζεται σύμφωνα με το 2^ο Νόμο του Newton ($F = ma$) και συνδέεται με την αντίσταση στη μεταβολή της κινητικής κατάστασης ενός σώματος όταν ασκούνται πάνω του δυνάμεις.



Ερώτηση

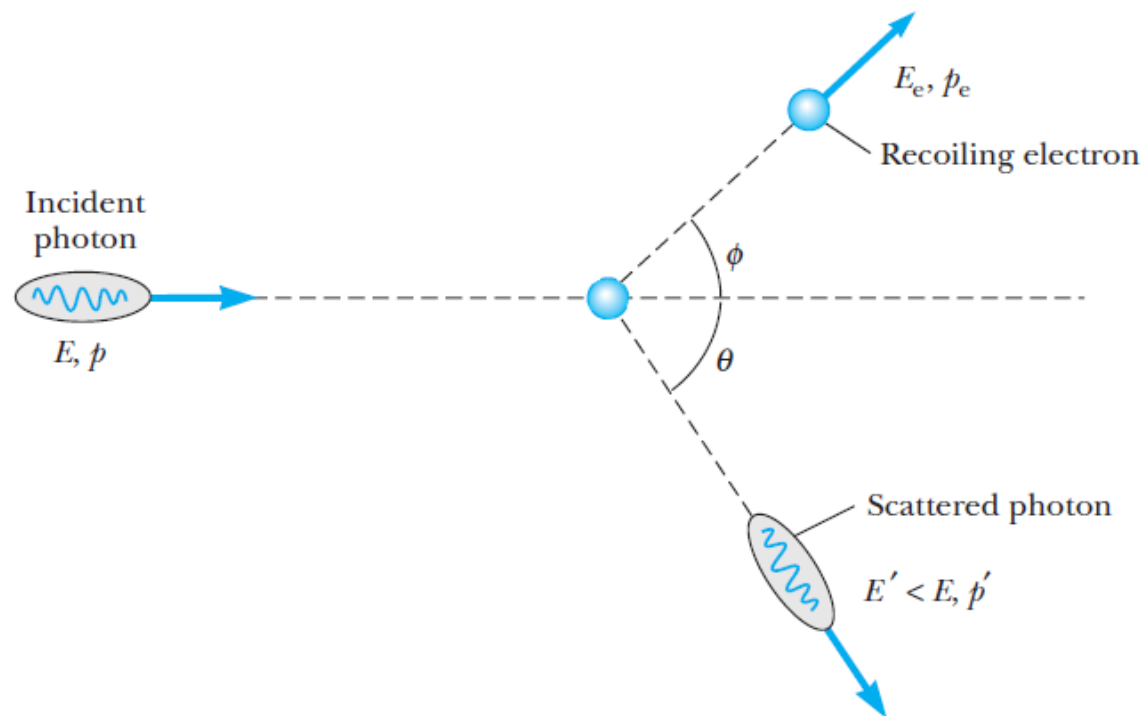
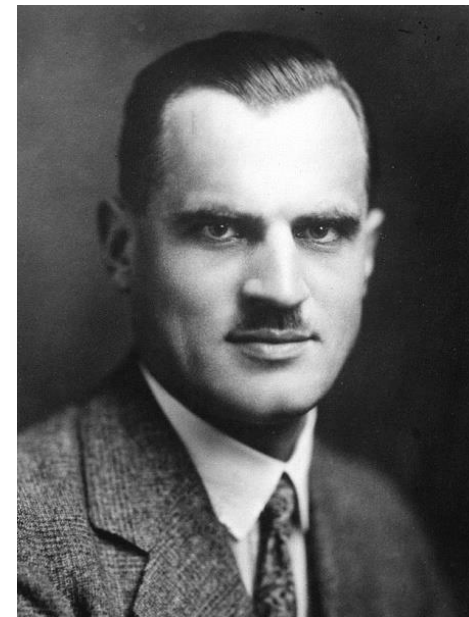
- Ποια είναι η τάξη μεγέθους της αποτελεσματικής αδρανειακής μάζας ενός φωτονίου;
- **Απάντηση**: Η αποτελεσματική αδρανειακή μάζα του φωτονίου εξαρτάται από το μήκος κύματός του (ή τη συχνότητά του).
- Έστω ένα φωτόνιο μήκους κύματος 650 nm (κόκκινο).
- Η αποτελεσματική αδρανειακή του μάζα ισούται με:

$$m = \frac{h}{\lambda c} = \frac{6,626 \times 10^{-34} (\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}) \cdot \text{s}}{(650 \times 10^{-9} \text{ m}) \cdot (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})} = 3,40 \times 10^{-36} \text{ kg}$$

Φωτόνια και φαινόμενο Compton



- Το 1922, ο Αμερικάνος Φυσικός Arthur Compton (1892 – 1962, Βραβείο Nobel στη Φυσική το 1927) **απέδειξε πειραματικά ότι πράγματι τα φωτόνια έχουν ορμή**, πραγματοποιώντας πειράματα σκέδασης ακτίνων X.





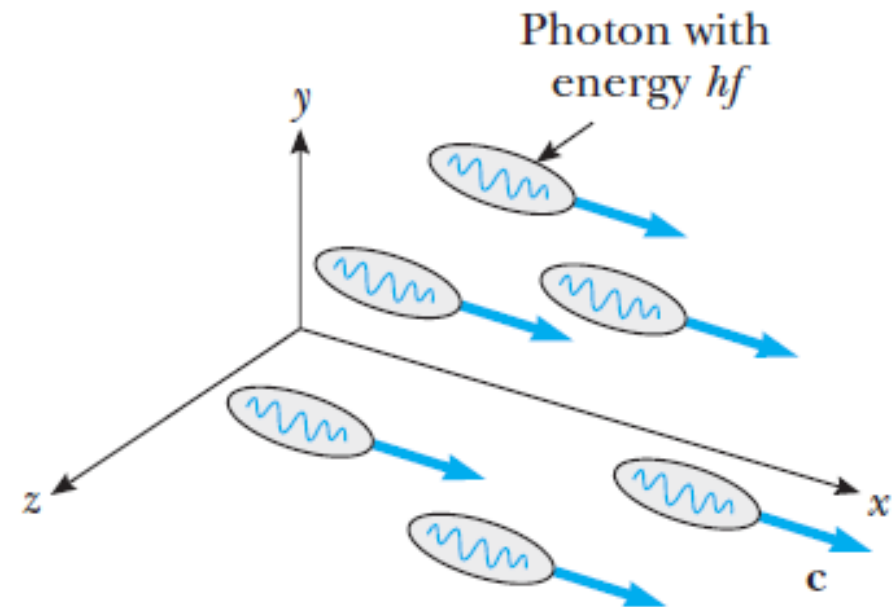
Τι είναι τα φωτόνια;

- Οι ιδιότητες των φωτονίων συνοψίζονται ως εξής:
- ✓ κινούνται με την ταχύτητα του φωτός στο κενό, c .
- ✓ έχουν μηδενική μάζα ηρεμίας
- ✓ μεταφέρουν ενέργεια και ορμή, οι οποίες συνδέονται με τη συχνότητα και το μήκος κύματος των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων με τις εξισώσεις $E = hf$ και $p = h/\lambda$
- ✓ Μπορούν να δημιουργηθούν ή να καταστραφούν κατά την εκπομπή ή την απορρόφηση ακτινοβολίας
- ✓ Μπορούν να έχουν σωματιδιακού τύπου συγκρούσεις με άλλα σωματίδια όπως τα ηλεκτρόνια



Τι είναι τα φωτόνια;

- Το φως (ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία) έχει **διττή φύση**: συμπεριφέρεται και ως κύμα αλλά και ως σωματίδιο (φωτόνιο).
- Μέρος των ιδιοτήτων των ακτινοβολιών μπορεί να εξηγηθεί αν ληφθεί υπόψη η κυματική τους φύση, ενώ άλλες ιδιότητες εξηγούνται με βάση τη σωματιδιακή τους φύση (φωτόνια).
- **Η κυματική και η σωματιδιακή φύση των ακτινοβολιών δρουν συμπληρωματικά.**
- Είναι απαραίτητες και οι δύο για την πλήρη κατανόηση των ιδιοτήτων των ακτινοβολιών.





Παράδειγμα 3.3

- Ο αμφιβληστροειδής χιτώνας των ματιών μας έχει τρεις τύπους φωτοϋποδοχέων, οι οποίοι ονομάζονται κωνία.
- Τα κωνία έχουν μέγιστη ευαισθησία στα 437 nm, 533 nm και 575 nm.
- Για κάθε κωνίο, ποια είναι η ενέργεια ενός κβάντος φωτός που έχει αυτό το μήκος κύματος;
- **Απάντηση:**

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})}{437 \times 10^{-9} \text{ m}} = 4,55 \times 10^{-19} \text{ J}$$



Παράδειγμα 3.4

- Ποιες είναι οι συχνότητες κατωφλίου και τα μήκη κύματος για την εκπομπή φωτοηλεκτρονίων από το νάτριο και το αργίλιο;
- Δίνεται ότι το έργο εξαγωγής του νατρίου είναι $\phi_0 = 2,75 \text{ eV}$, ενώ του αργιλίου είναι $\phi_0 = 4,28 \text{ eV}$.
- **Απάντηση:**
- Ισχύει ότι: $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ C} \times 1 \text{ J/C} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- Για το νάτριο έχουμε:

$$f_0 = \frac{\phi_0}{h} = \frac{2,75 \text{ eV}}{6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}} \cdot \frac{1,602 \times 10^{-19} \text{ J}}{1 \text{ eV}} = 6,65 \times 10^{14} \text{ s}^{-1} \text{ (ή Hz)}$$

$$c = \lambda f \Leftrightarrow \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}{6,65 \times 10^{14} \text{ s}^{-1}} = 4,51 \times 10^{-7} \text{ m} \text{ ή } 451 \text{ nm}$$



Παράδειγμα 3.5

- Ένας δείκτης λέιζερ (laser pointer) εκπέμπει ακτινοβολία με μήκος κύματος $\lambda = 650 \text{ nm}$ (κόκκινο) και έχει ισχύ $1,0 \text{ mW}$.
- Να υπολογίσετε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπει στη μονάδα του χρόνου.



- **Απάντηση:**
- Αρχικά υπολογίζουμε την ενέργεια το ενός φωτονίου:

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})}{650 \times 10^{-9} \text{ m}} = 3,06 \times 10^{-19} \text{ J/φωτόνιο}$$



Παράδειγμα 3.5

- Στη συνέχεια, διαιρούμε την ισχύ του laser προς την ενέργεια του κάθε ενός φωτονίου:

$$\frac{P}{E} = \frac{1,0 \times 10^{-3} \text{ J/s}}{3,06 \times 10^{-19} \text{ J/φωτόνιο}} = 3,3 \times 10^{15} \text{ φωτόνια/s}$$

- Συμπέρασμα: ο ρυθμός εκπομπής φωτονίων (εκφρασμένος σε αριθμό φωτονίων ανά δευτερόλεπτο) μίας πηγής ακτινοβολίας τόσο μικρής ισχύος είναι κολοσσιαίος!!!



Γραμμικά φάσματα εκπομπής

- Όταν τα άτομα θερμαίνονται ή γενικότερα διεγείρονται ενεργειακά, τα ηλεκτρόνιά τους αποκτούν επιπλέον ενέργεια.
- Τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από τη βασική ενεργειακή τους κατάσταση σε διαφόρων ειδών διεγερμένες ενεργειακές καταστάσεις.
- Ο χρόνος ζωής των διεγερμένων καταστάσεων είναι κατά κανόνα πάρα πολύ μικρός (της τάξεως των 10^{-8} με 10^{-9} s ή και μικρότερος).
- Τα ηλεκτρόνια μεταβαίνουν από τις διεγερμένες καταστάσεις στη βασική ενεργειακή κατάσταση εκπέμποντας ακτινοβολίες με συγκεκριμένα μήκη κύματος.



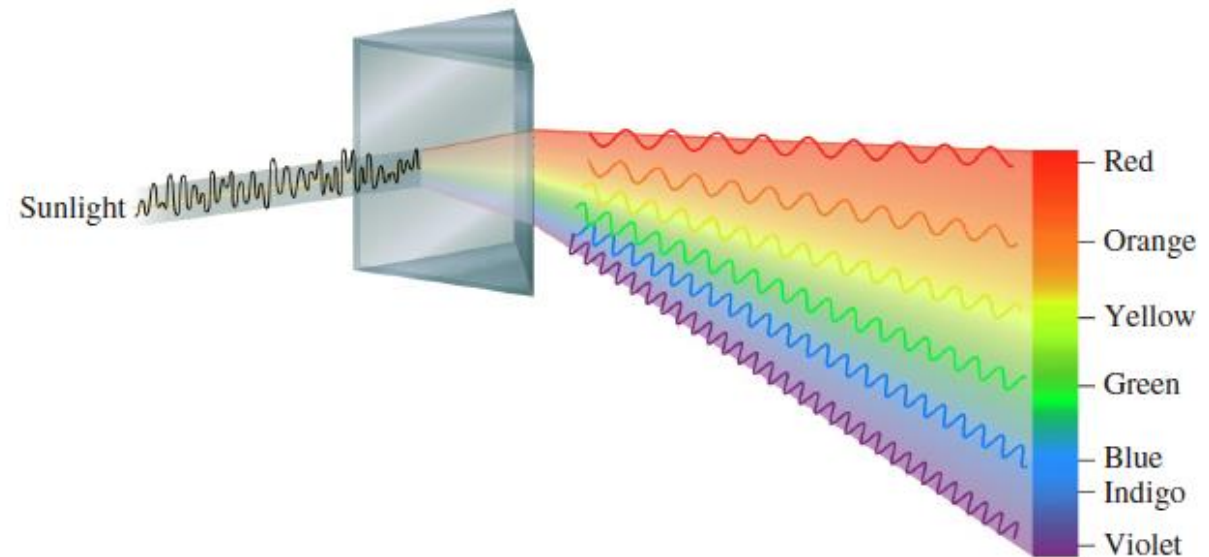
Γραμμικά φάσματα εκπομπής

- Οι ακτινοβολίες αυτές αποτελούνται από συγκεκριμένες κάθε φορά φασματικές γραμμές για το κάθε στοιχείο, σε αντίθεση με την ηλιακή ακτινοβολία η οποία αποτελείται από μία συνεχή κατανομή μηκών κύματος.
- Οι ακτινοβολίες αυτές ονομάζονται **γραμμικά φάσματα εκπομπής (emission line spectra)**.
- Τα γραμμικά φάσματα εκπομπής προσφέρουν πολύτιμες πληροφορίες για τις ενεργειακές καταστάσεις στις οποίες μπορούν να βρεθούν τα ηλεκτρόνια των ατόμων.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής



- Οι πηγές φωτός (ή γενικότερα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) εκπέμπουν:
- μονοχρωματική ακτινοβολία: ενός μόνο μήκους κύματος, π.χ. laser
- πολυχρωματική ακτινοβολία: συνεχές φάσμα ακτινοβολιών, π.χ. λαμπτήρες φωτισμού, άστρα (π.χ. ήλιος).





Γραμμικά φάσματα εκπομπής

- Για να ληφθούν τα γραμμικά φάσματα εκπομπής, το υπό μελέτη αέριο τοποθετείται σε ένα σωλήνα υπό χαμηλή πίεση ο οποίος περιέχει δύο ηλεκτρόδια και εφαρμόζεται υψηλή διαφορά δυναμικού (σωλήνας εκκένωσης).
- Η ηλεκτρική εκκένωση προκαλεί ροή ηλεκτρονίων και εμφανίζεται όταν το αέριο υπόκειται σε διαφορά δυναμικού η οποία δημιουργεί ένα ηλεκτρικό πεδίο μεγαλύτερο από τη διηλεκτρική ισχύ του αερίου.
- Καθώς τα ηλεκτρόνια ρέουν από την κάθοδο (αρνητικό ηλεκτρόδιο) στην άνοδο (θετικό ηλεκτρόδιο), συγκρούονται με τα άτομα του αερίου.



Γραμμικά φάσματα εκπομπής

- Οι συγκρούσεις προκαλούν διέγερση των ηλεκτρονίων των ατόμων.
- Δηλαδή, τα ηλεκτρόνια των ατόμων αποκτούν επιπλέον ενέργεια και μεταβαίνουν από τη βασική ενεργειακή κατάσταση στις διεγερμένες ενεργειακά καταστάσεις.
- Κατά την αποδιέγερση των ηλεκτρονίων απελευθερώνουν την επιπλέον ενέργεια που έχουν αποκτήσει εκπέμποντας ακτινοβολία με συγκεκριμένα κάθε φορά μήκη κύματος που εξαρτώνται από το κάθε άτομο.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής



H_2

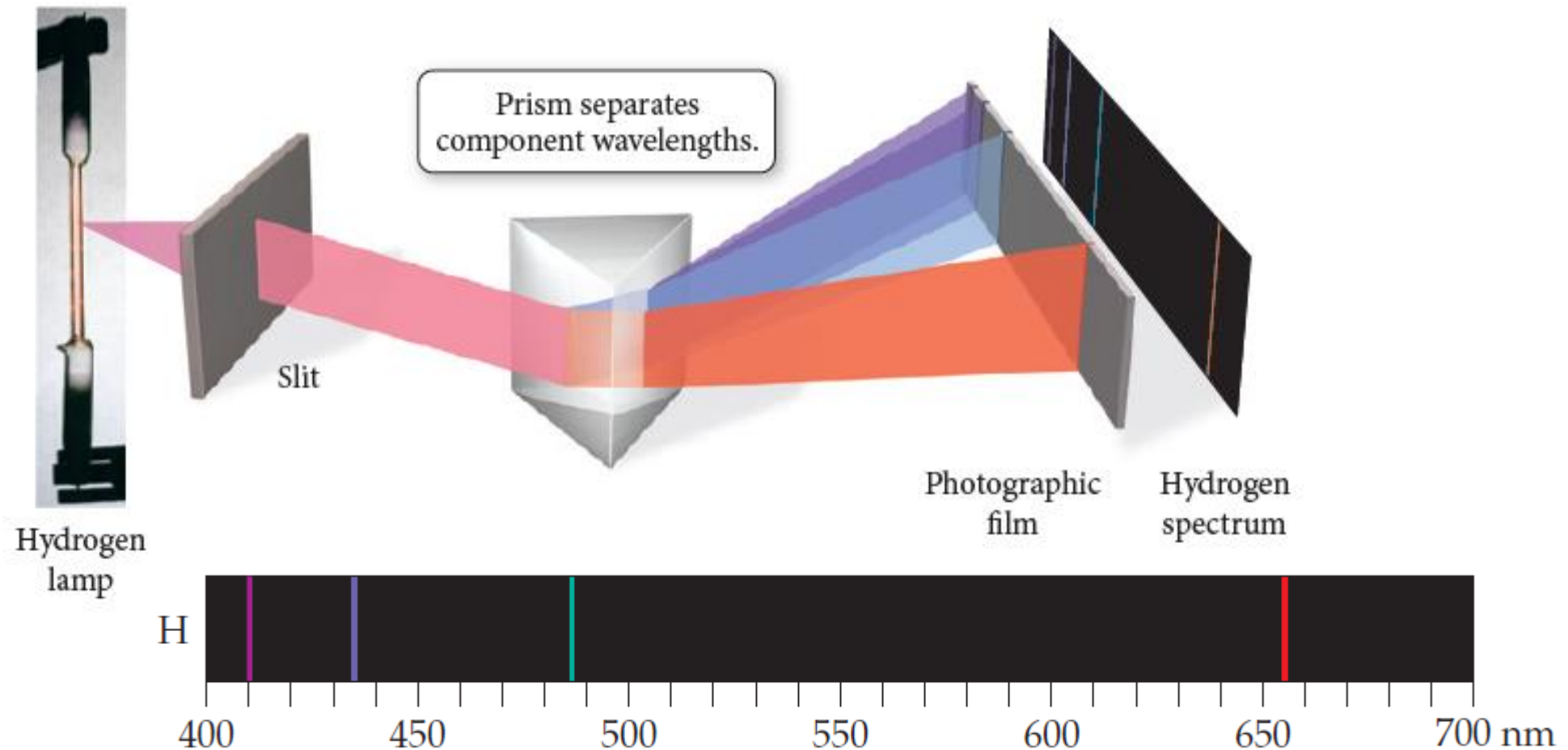


Ne

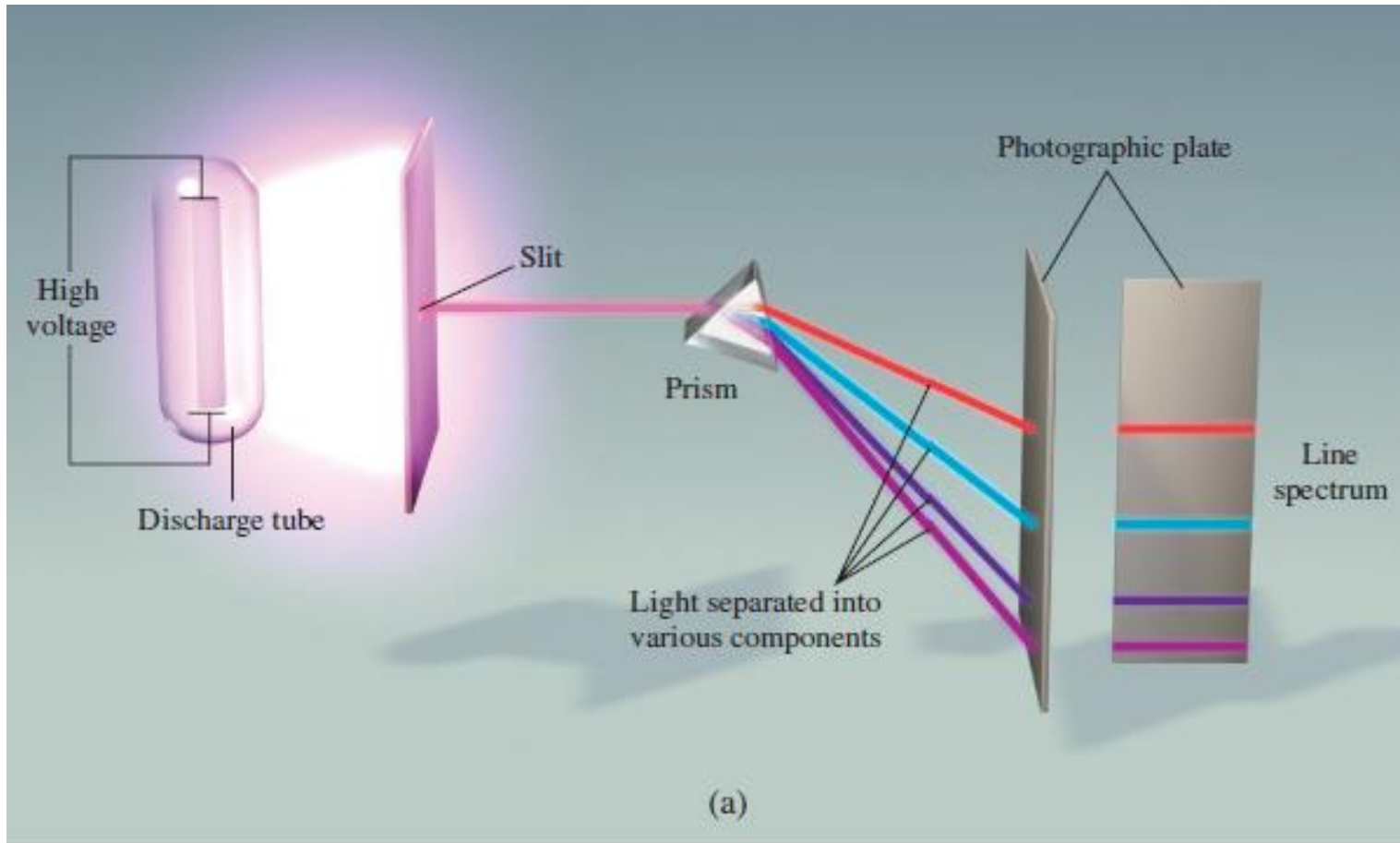
Γραμμικά φάσματα εκπομπής



- Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία των αερίων αναλύεται και καταγράφεται όποτε προκύπτουν τα λεγόμενα γραμμικά φάσματα εκπομπής.

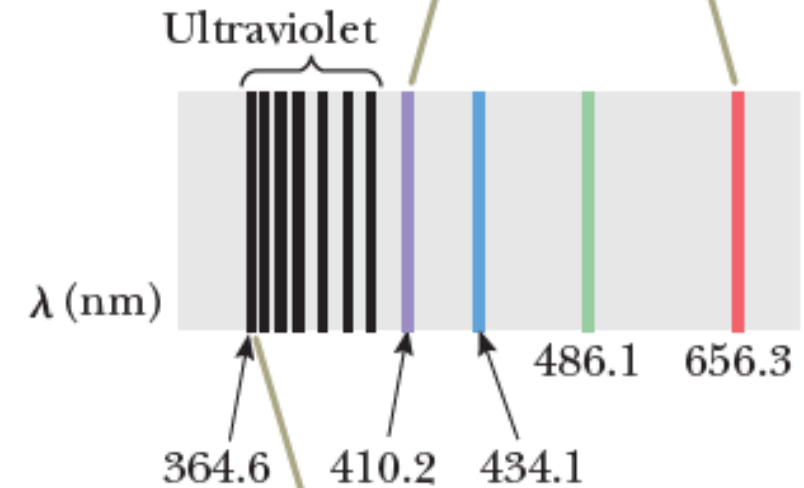


Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου



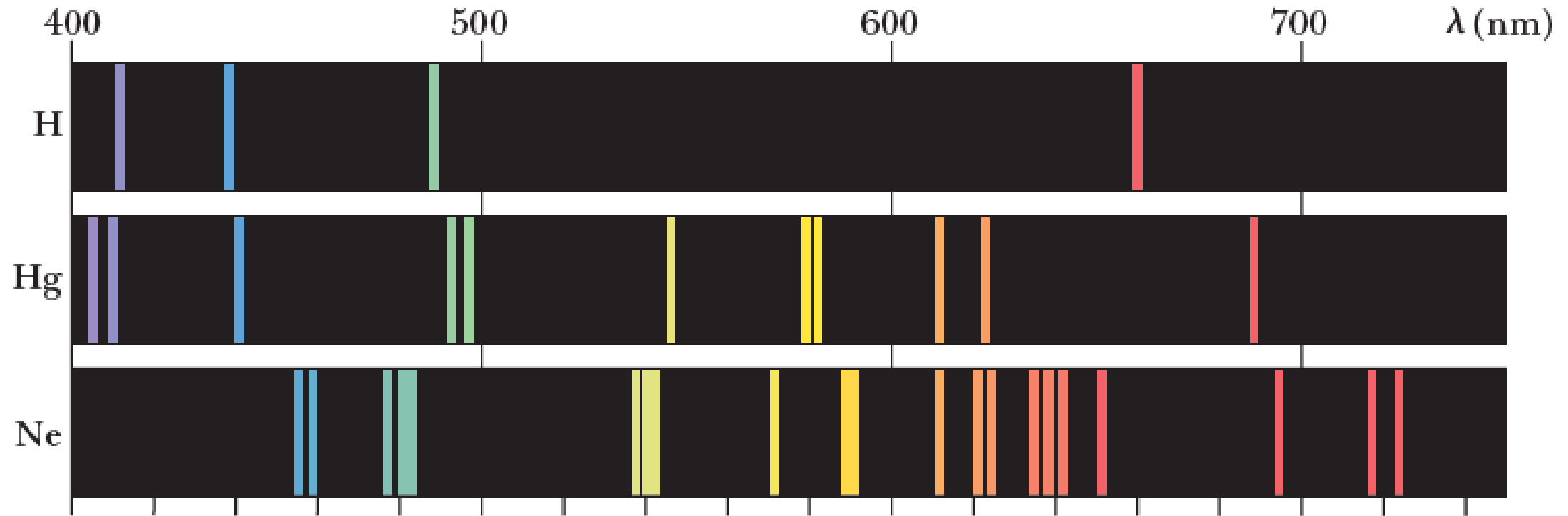
(b)

The lines shown in color are in the visible range of wavelengths.



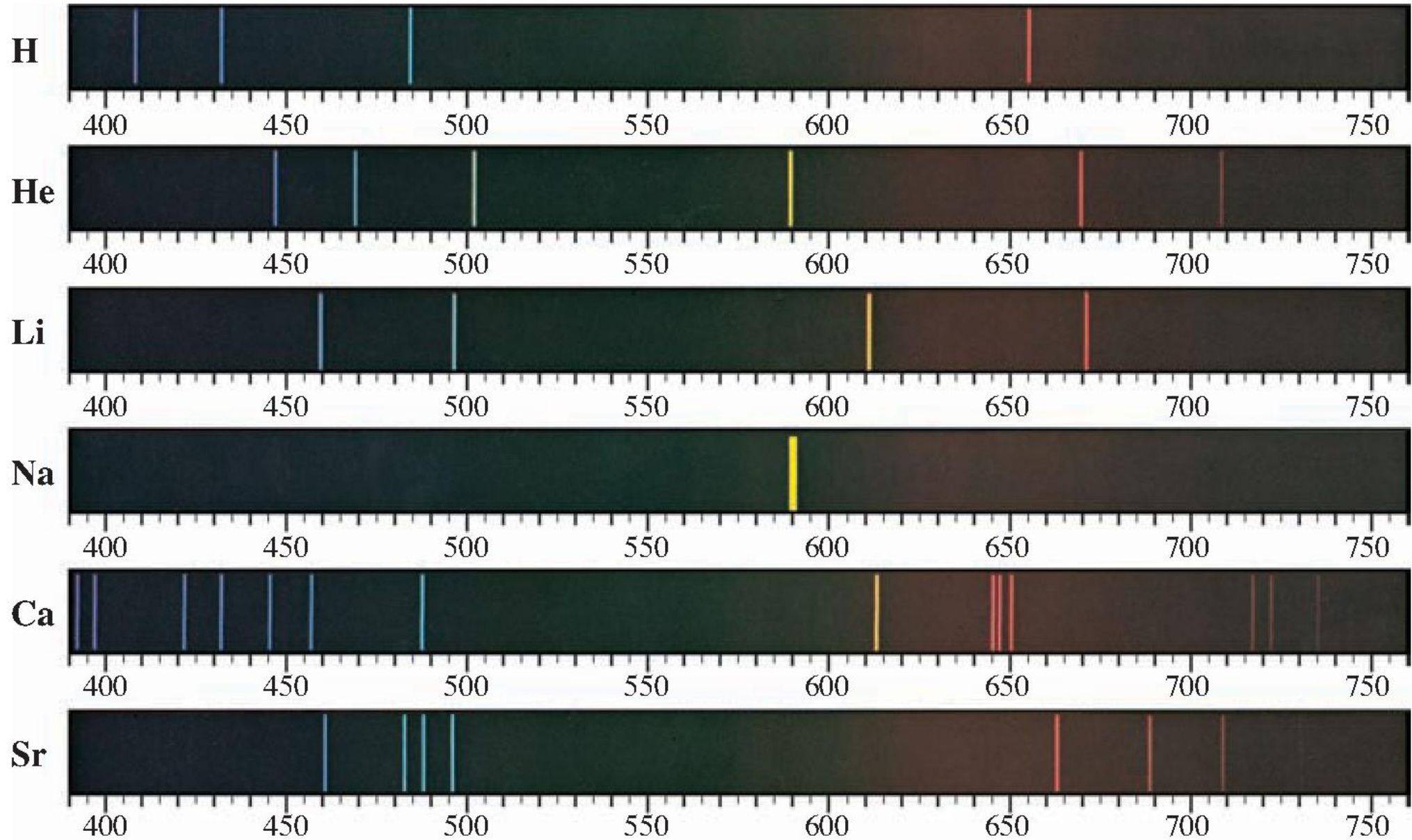
This line is the shortest wavelength line and is in the ultraviolet region of the electromagnetic spectrum.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής

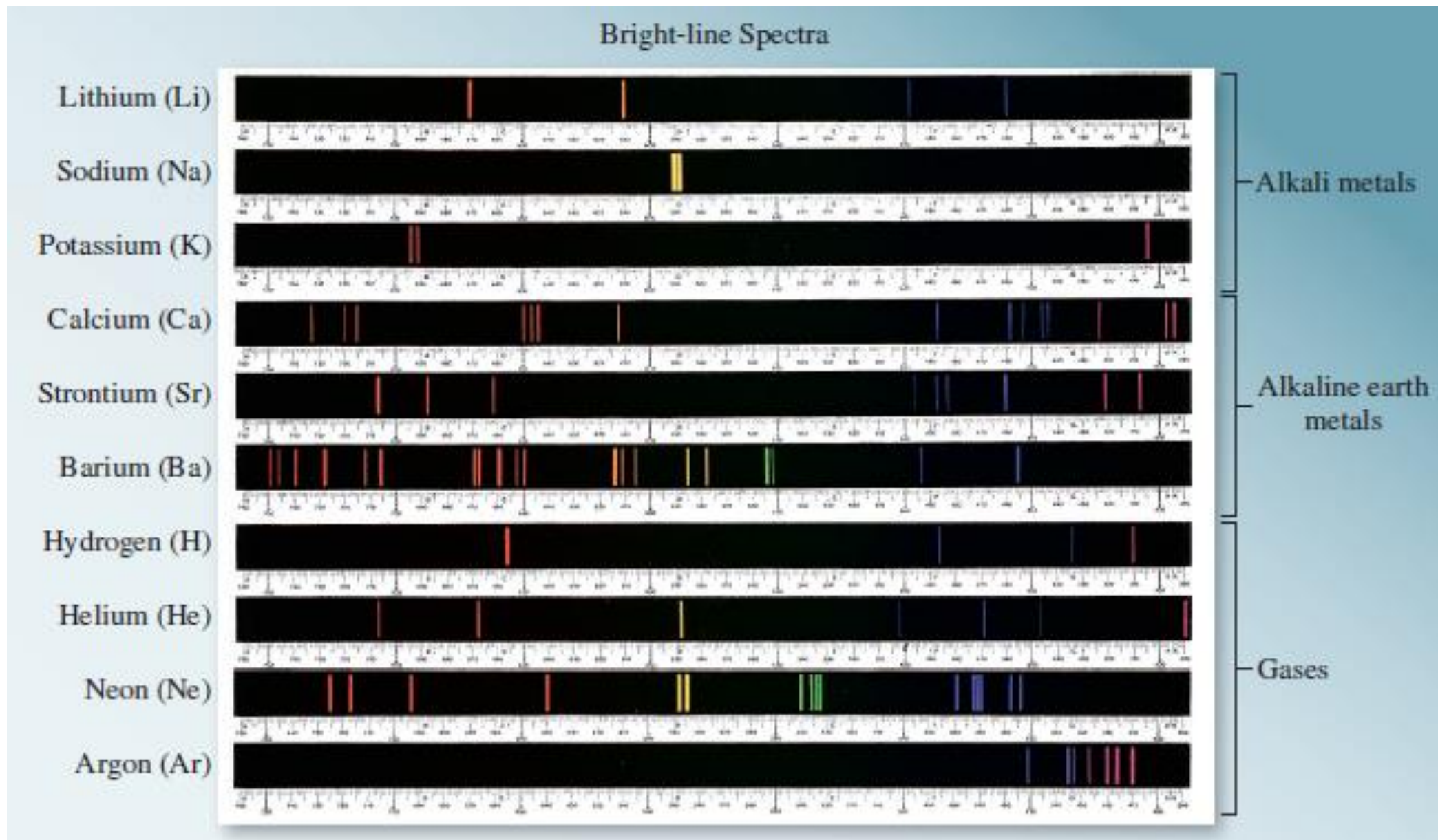


- Τα μήκη κύματος των εκπεμπόμενων φασματικών γραμμών είναι χαρακτηριστικά του στοιχείου που τα εκπέμπει.
- Με βάση τα φάσματα εκπομπής μπορεί να γίνει αναγνώριση και ταυτοποίηση του εκάστοτε στοιχείου.

Γραμμικά φάσματα εκπομπής



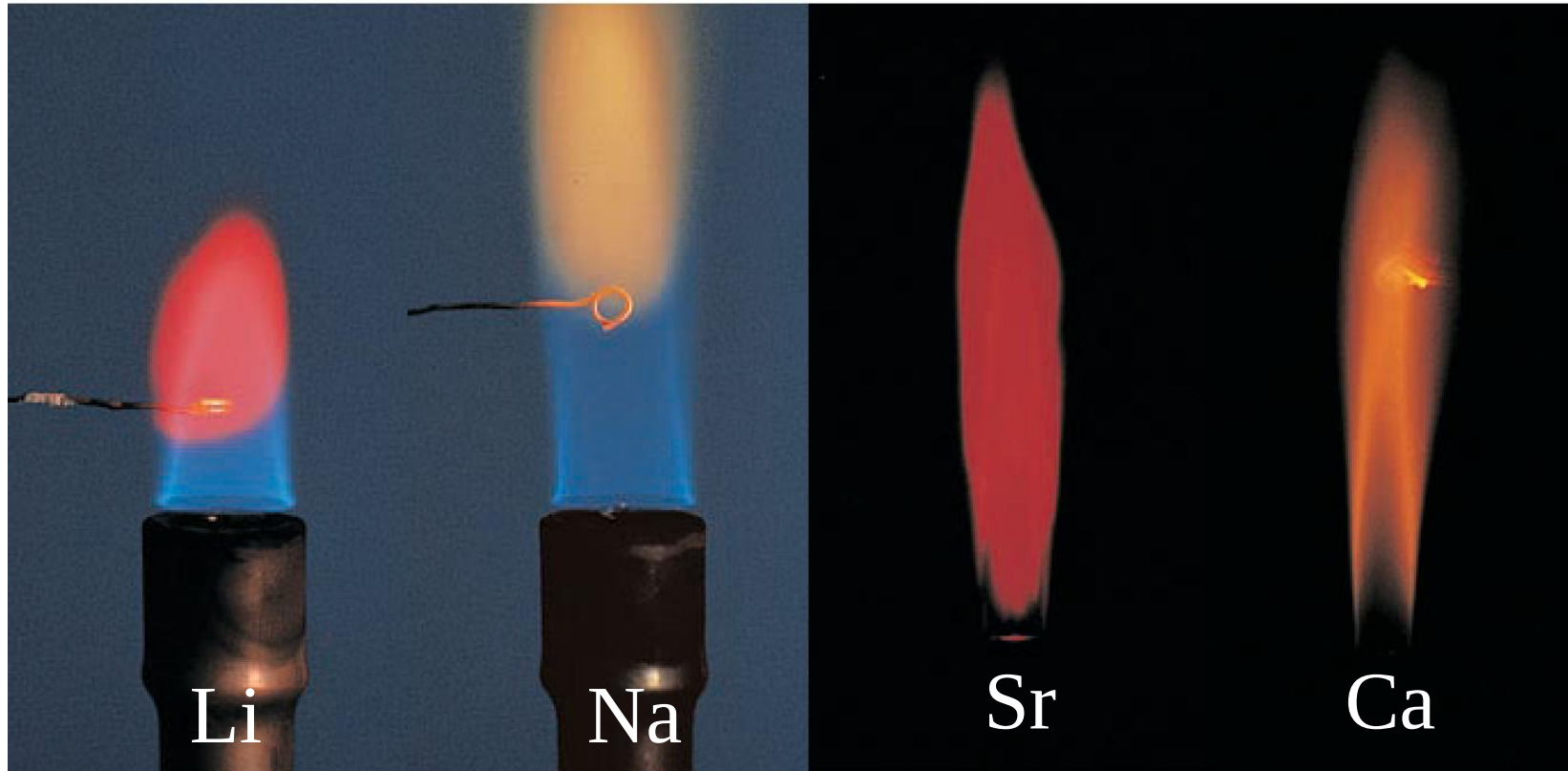
Γραμμικά φάσματα εκπομπής





Γραμμικά φάσματα εκπομπής

- Όταν τα άτομα διαφόρων στοιχείων τοποθετούνται σε φλόγα, τα ηλεκτρόνιά τους αποκτούν επιπλέον ενέργεια (διεγείρονται) και στη συνέχεια απελευθερώνουν την επιπλέον ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολιών χαρακτηριστικού χρώματος.



Σειρά Balmer



- Το 1885, ο Ελβετός μαθηματικός Johann Balmer (1825 – 1898) βρήκε εμπειρικά έναν τύπο ο οποίος περιγράφει σωστά τα μήκη κύματος των τεσσάρων γραμμών του φάσματος εκπομπής του υδρογόνου στην περιοχή του ορατού:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$



- ✓ όπου R_{∞} (ή R_H) είναι μία σταθερά η οποία αργότερα ονομάστηκε σταθερά του Rydberg και έχει τιμή $1,0973731568160 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$.
- ✓ n είναι ένας ακέραιος αριθμός που παίρνει τιμές 3, 4, 5, ...

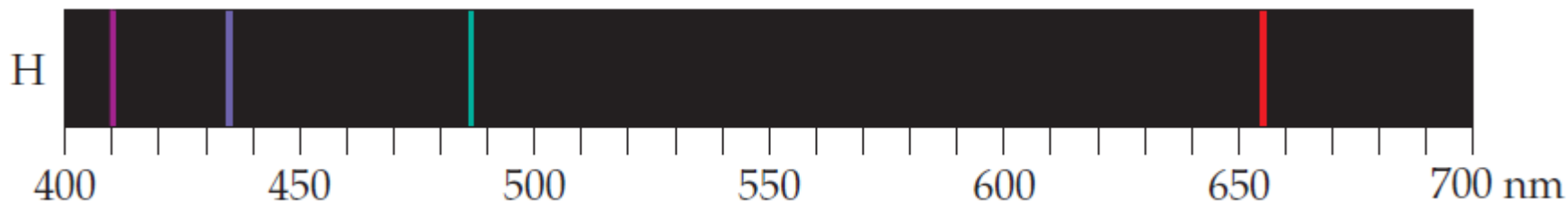
Ερώτηση



- Ποια φασματική γραμμή αντιστοιχεί στην τιμή $n = 5$ της σειράς Balmer;
- Απάντηση. Αντικαθιστώντας προκύπτει ότι:

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) = R_{\infty} \left(\frac{n^2 - 2^2}{2^2 n^2} \right) = 1,09737 \times 10^7 \left(\frac{5^2 - 2^2}{2^2 5^2} \right) = 1,09737 \times 10^7 \frac{21}{100}$$

$$\frac{1}{\lambda} = 2,304477 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \Leftrightarrow \lambda = 4,34 \times 10^{-7} \text{ m} \text{ ή } 434 \text{ nm}$$





Σειρές Lyman, Paschen και Brackett

➤ Αργότερα ανακαλύφθηκαν και άλλες φασματικές γραμμές του φάσματος εκπομπής του υδρογόνου στο:

➤ υπεριώδεις: $\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 2, 3, 4, \dots$ Σειρά Lyman

➤ υπέρυθρο: $\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 4, 5, 6, \dots$ Σειρά Paschen

➤ υπέρυθρο: $\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{4^2} - \frac{1}{n^2} \right)$ $n = 5, 6, 7, \dots$ Σειρά Brackett

Εξίσωση Rydberg



- Αργότερα, όλες οι προηγούμενες εξισώσεις ενοποιήθηκαν σε μία πιο γενική εξίσωση από το Σουηδό Φυσικό Johannes Rydberg (1854 –1919), στην επονομαζόμενη **εξίσωση Rydberg**, η οποία μας επιτρέπει να υπολογίσουμε τα μήκη κύματος όλων των φασματικών γραμμών του υδρογόνου:



$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$

- ✓ όπου n_1 και n_2 είναι θετικοί ακέραιοι αριθμοί με $n_2 > n_1$



Εξίσωση Rydberg

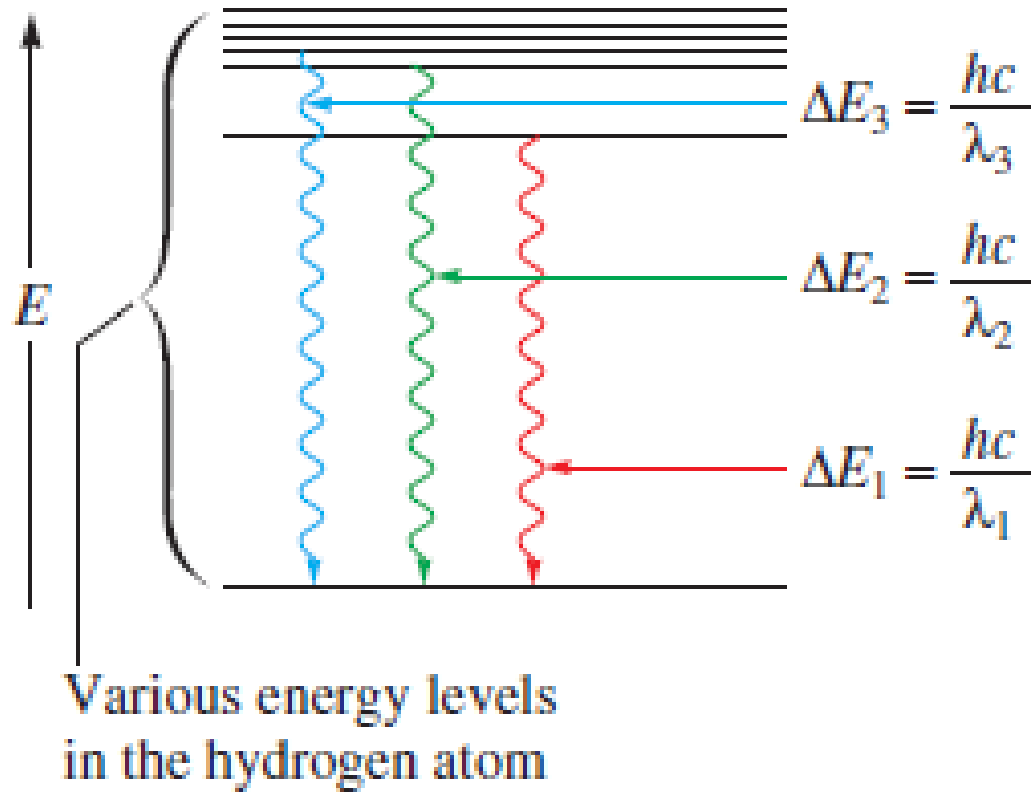
- Η εξίσωση του Rydberg παρά το ότι προβλέπει με ακρίβεια τις φασματικές γραμμές του ατόμου του υδρογόνου είναι μία εμπειρική εξίσωση, δηλαδή δεν έχει προκύψει από κάποιες θεμελιώσεις αρχές.
- Δεν εξηγεί γιατί εμφανίζονται τα γραμμικά φάσματα εκπομπής και γιατί η εξίσωση είναι αληθής.



Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου

- Το γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου υποδηλώνει ότι μόνο ορισμένες ενεργειακές στάθμες είναι επιτρεπτές για το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου.
- Υποδηλώνει ότι η **ενέργεια του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου είναι κβαντισμένη.**
- Οι μεταβάσεις του ηλεκτρονίου μεταξύ των διαφόρων διακριτών επιπέδων ενέργειας στο υδρογόνο παράγουν ορισμένα μόνο μήκη κύματος εκπεμπόμενου φωτός.

Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου



- Αν ισχύει αυτή η υπόθεση, τότε η μετάβαση από τη μία ενεργειακή στάθμη στην άλλη θα δίνεται από την εξίσωση:

$$\Delta E = hf = \frac{hc}{\lambda}$$

Μοντέλο δομής του ατόμου κατά Rutherford



➤ Την περίοδο 1909-1911 ο Rutherford ερμηνεύοντας τα αποτελέσματα των πειραμάτων βομβαρδισμού λεπτών φύλλων χρυσού με ακτίνες α (πυρήνες ηλίου He^{2+}), διατύπωσε το λεγόμενο **πυρηνικό μοντέλο** δομής του ατόμου:



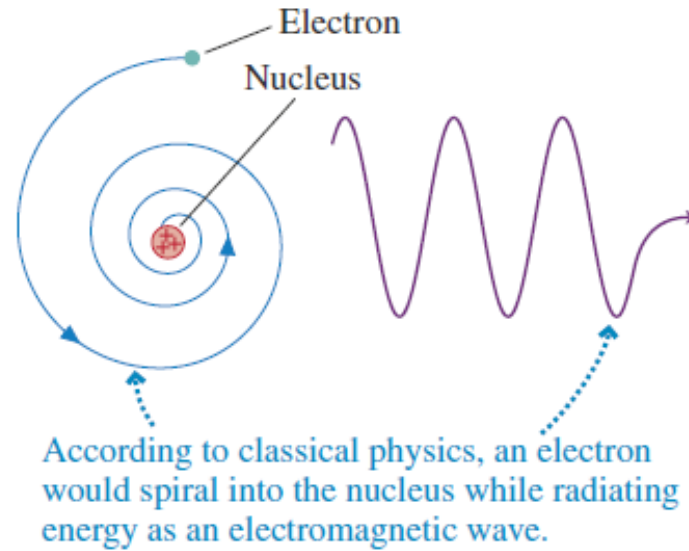
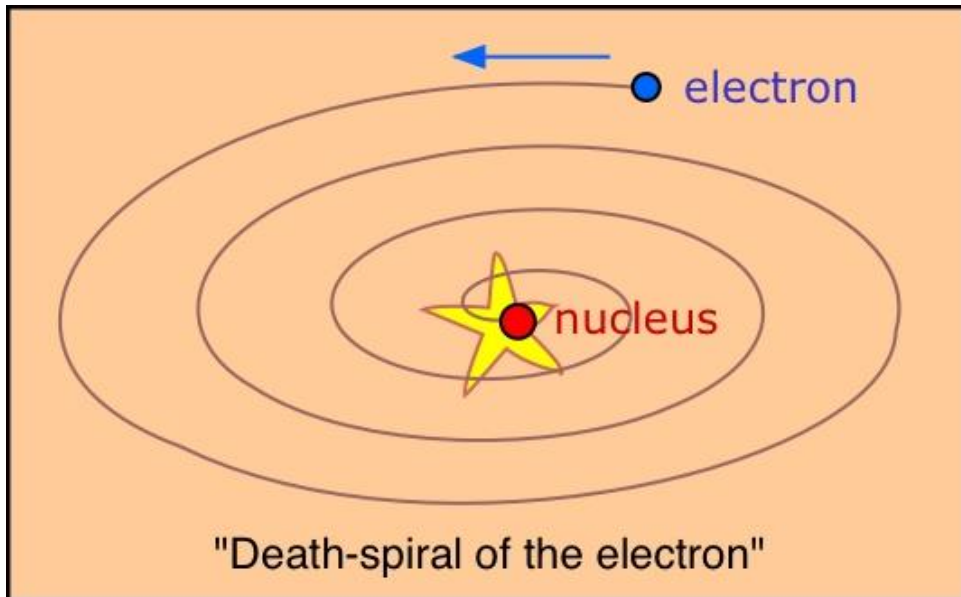
- ✓ σχεδόν όλη η μάζα του ατόμου και το θετικό φορτίο βρίσκονται συγκεντρωμένα σε ένα μικρό χώρο του ατόμου που ονομάζεται **πυρήνας (nucleus)**
- ✓ το μεγαλύτερο μέρος του όγκου του ατόμου είναι κενός χώρος μέσα στον οποίο κινούνται τα αρνητικά φορτισμένα ηλεκτρόνια γύρω από τον πυρήνα.



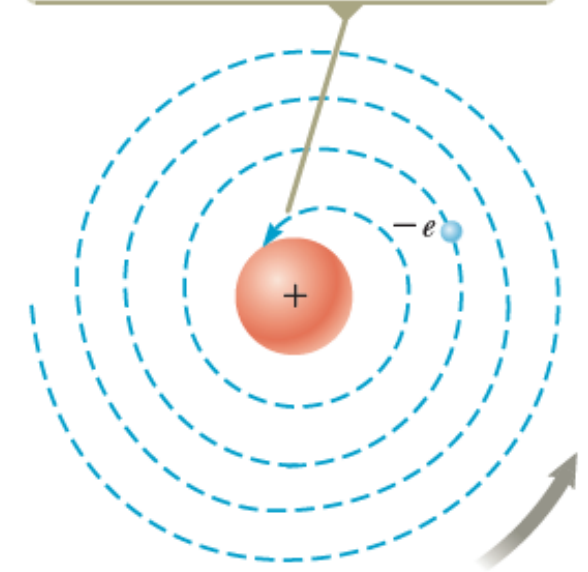
Αδυναμίες του μοντέλου του Rutherford

- Το άτομο του υδρογόνου αποτελείται από ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο.
- Καθώς το ηλεκτρόνιο κινείται γύρω από το πρωτόνιο τότε θα έπρεπε να εκπέμπει συνεχώς ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με συχνότητα ίση με τη συχνότητα περιστροφής του.
- Η εκπομπή ακτινοβολίας θα είχε ως αποτέλεσμα την συνεχή απώλεια ενέργειας του ηλεκτρονίου.
- Κατά συνέπεια, η τροχιά του ηλεκτρονίου θα ήταν σπειροειδής και θα κατέληγε να συγκρουστεί με το πρωτόνιο σε χρόνο 10^{-10} s.

Κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία



Because the accelerating electron radiates energy, the size of the orbit decreases until the electron falls into the nucleus.



σπειροειδής κίνηση του ηλεκτρονίου

- Όλα τα παραπάνω δεν ισχύουν, άρα η κλασική θεωρία δεν μπορεί να ερμηνεύσει την κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από το πρωτόνιο.

Ατομικό μοντέλο του Bohr

- Το 1913 ο Δανός Φυσικός Niels Bohr (1885–1962, βραβείο Nobel Φυσικής 1922) ερμήνευσε το γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου και διατύπωσε ένα μοντέλο για τη δομή του ατόμου του υδρογόνου στηριζόμενος:
 - ✓ στο ατομικό πρότυπο του Rutherford
 - ✓ στην κβαντική θεωρία του Planck
 - ✓ στη θεωρία των φωτονίων του Einstein
 - ✓ στη Νευτώνεια (κλασική) μηχανική
- <https://www.nbi.ku.dk/english/www/niels/bohr/bohratomet/>

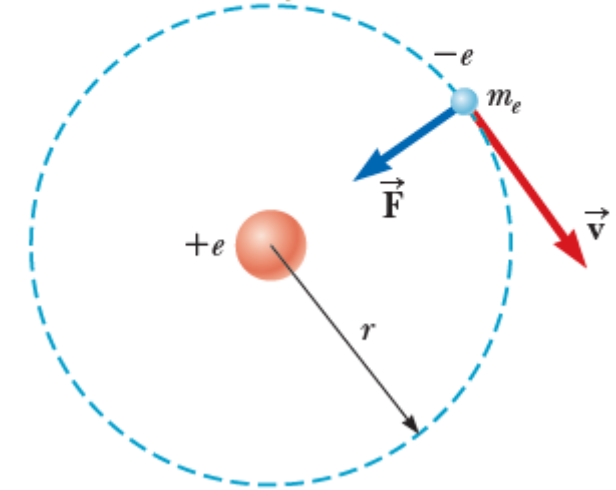




Αξιώματα ή συνθήκες του Bohr

- Το ηλεκτρόνιο περιφέρεται σε κυκλικές τροχιές γύρω από το πρωτόνιο υπό την επίδραση της δύναμης Coulomb, F_C .
- Όμως, ένα ηλεκτρόνιο επιτρέπεται να έχει ορισμένες μόνο τιμές ενέργειας, οι οποίες ονομάζονται **επίπεδα ενέργειας (energy levels)**. Ο Bohr τις ονόμασε **στάσιμες καταστάσεις (stationary states)**.
- Δηλαδή, μόνο μερικές τροχιές επιτρέπονται, οι οποίες αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ακτίνες και τιμές ενέργειας (**κβαντισμένες**).

The orbiting electron is allowed to be only in specific orbits of discrete radii.





Αξιώματα ή συνθήκες του Bohr

- Κατά την κίνηση του αυτή το ηλεκτρόνιο δεν εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ακτινοβολιών, παρά το ότι επιταχύνεται.
- Ως εκ τούτου, η συνολική ενέργεια του ατόμου παραμένει σταθερή.
- Στην περίπτωση αυτή, μπορεί να χρησιμοποιηθεί η κλασσική μηχανική για να περιγράψει την κίνηση του ηλεκτρονίου.
- Το μοντέλο του Bohr υποθέτει ότι το κυκλικά επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο δεν εκπέμπει συνεχώς ακτινοβολία.
- Κατά συνέπεια, δεν χάνει ενέργεια και δεν διαγράφει σπειροειδή τροχιά στην οποία καταλήγει να συγκρουστεί με τον πυρήνα.



Αξιώματα ή συνθήκες του Bohr

- Το ηλεκτρόνιο εκπέμπει ακτινοβολία μόνο όταν μεταβαίνει από μια επιτρεπτή τροχιά σε μια άλλη επιτρεπτή τροχιά χαμηλότερης ενέργειας.
- Αντίθετα, το ηλεκτρόνιο απορροφά ακτινοβολία όταν μεταβαίνει από μια επιτρεπτή τροχιά σε μια άλλη επιτρεπτή τροχιά υψηλότερης ενέργειας.
- Οι μεταβάσεις αυτές δεν μπορούν να ερμηνευτούν και να αντιμετωπιστούν με βάση την κλασσική μηχανική.
- Η συχνότητα f του φωτονίου που εκπέμπεται ή απορροφάται σχετίζεται με την αλλαγή στην ενέργεια του ατόμου και δεν είναι ίση με τη συχνότητα της τροχιακής κίνησης του ηλεκτρονίου.



Απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας

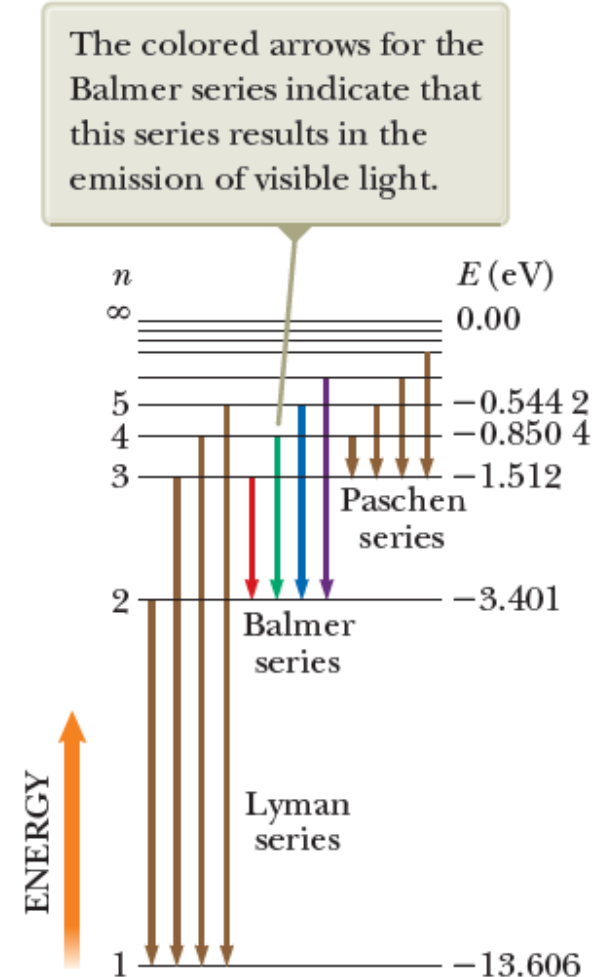
- Η συχνότητα της ακτινοβολίας η οποία εκπέμπεται ή απορροφάται δίνεται από τη σχέση:

$$|\Delta E| = |E_f - E_i| = hf$$

- όπου

- ✓ E_i και E_f είναι η αρχική και τελική ενέργεια, αντίστοιχα
- ✓ h : η σταθερά του Planck
- ✓ f : η συχνότητα της ακτινοβολίας

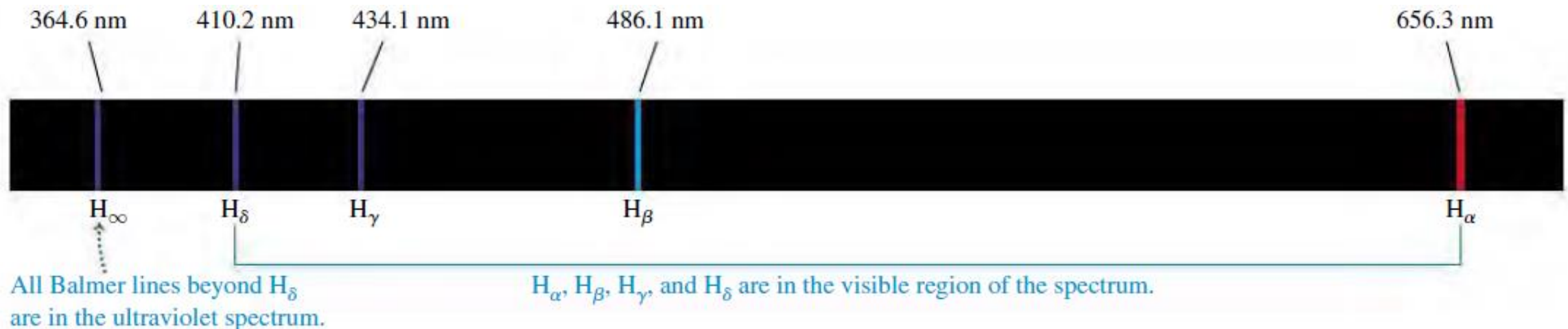
- Σημείωση: η ενέργεια του ηλεκτρονίου έχει αρνητικές τιμές.





Απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας

- Το μοντέλο του Bohr οδηγεί στο συμπέρασμα ότι το άτομο του υδρογόνου μπορεί να απορροφήσει ή να εκπέμψει μόνο τις συγκεκριμένες εκείνες ακτινοβολίες των οποίων οι συχνότητες ικανοποιούν την εξίσωση $E = hf$.
- Δηλαδή, εξηγεί το γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου!!!





Απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας

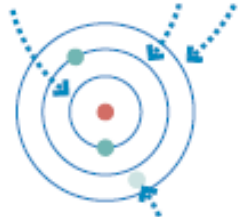
- Η ενέργεια ενός προσπίπτοντος φωτονίου μπορεί να απορροφηθεί από το άτομο μόνο αν το φωτόνιο έχει ενέργεια που να ταιριάζει επακριβώς με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ δύο επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων.
- Με την απορρόφηση, το φωτόνιο εξαφανίζεται και το ηλεκτρόνιο του ατόμου κάνει μία μετάβαση από τη χαμηλότερη στην υψηλότερη ενεργειακή κατάσταση.

Το μοντέλο του Bohr



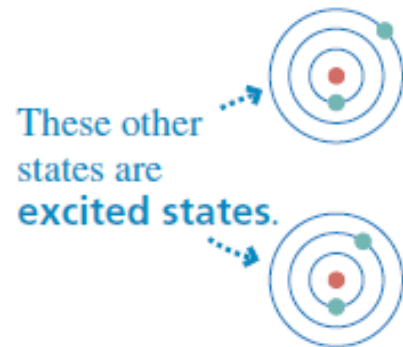
The Bohr model of the atom

Electrons can exist in only certain allowed orbits.



An electron cannot exist here, where there is no allowed orbit.

Stationary states



These other states are **excited states**.

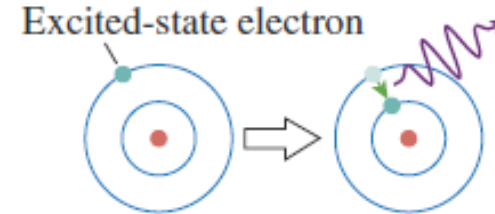


This is one stationary state.

This is another stationary state.

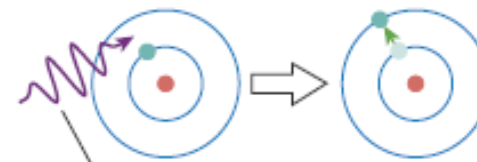
This state, with the lowest energy E_1 , is the **ground state**. It is stable and can persist indefinitely.

Photon emission



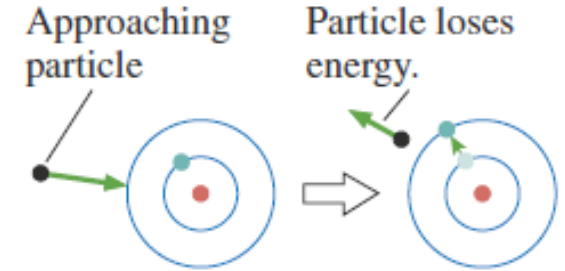
The electron jumps to a lower energy stationary state and emits a photon.

Photon absorption

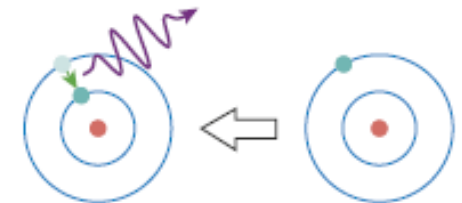


The electron absorbs the photon and jumps to a higher energy stationary state.

Collisional excitation



The particle transfers energy to the atom in the collision and excites the atom.



An atom in an excited state jumps to lower states, emitting a photon at each jump.



Επιτρεπτές τροχιές

- Επιτρεπτές είναι μόνο οι τροχιές εκείνες στις οποίες η στροφορμή του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα του ατόμου είναι **κβαντισμένη** και είναι ακέραιο πολλαπλάσιο της ποσότητας $h/2\pi$:

$$mvr = n \frac{h}{2\pi}$$

- ✓ όπου m είναι η μάζα του ηλεκτρονίου
- ✓ v είναι η ταχύτητα του ηλεκτρονίου
- ✓ r είναι η ακτίνα της κυκλικής τροχιάς του ηλεκτρονίου
- ✓ h είναι η σταθερά του Planck
- ✓ n : θετικός ακέραιος αριθμός, $n = 1, 2, 3, \dots$



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Με βάση τις παραπάνω υποθέσεις, ο Bohr υπολόγισε την ενέργεια του ηλεκτρονίου ως εξής.
- Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του ηλεκτρονίου γύρω από το πρωτόνιο του πυρήνα του ατόμου του υδρογόνου ισούται με:

$$U = k \frac{q_1 q_2}{r} = -k \frac{e^2}{r}$$

- Η ολική ενέργεια του ατόμου, E , ισούται με:

$$E = K + U = \frac{1}{2} m v^2 - k \frac{e^2}{r}$$



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Η ηλεκτρική δύναμη Coulomb F_C , ισούται με την κεντρομόλο δύναμη στην οποία υπόκειται το ηλεκτρόνιο κατά την κυκλική κίνηση του γύρω από τον πυρήνα, F_K . Άρα:

$$F_C = F_K \Leftrightarrow k \frac{e^2}{r^2} = \frac{mv^2}{r} \Leftrightarrow v^2 = \frac{ke^2}{mr}$$

- Κατά συνέπεια, η κινητική ενέργεια ισούται με:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{ke^2}{2r} = \frac{|U|}{2}$$



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Άρα, η συνολική ενέργεια του ατόμου ισούται με:

$$E = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - k\frac{e^2}{r} = k\frac{e^2}{2r} - k\frac{e^2}{r} \Leftrightarrow E = -\frac{ke^2}{2r} = \frac{U}{2}$$

- Η συνολική ενέργεια του ατόμου είναι **αρνητική**. Άρα, το ηλεκτρόνιο συγκρατείται σταθερά γύρω από το πρωτόνιο.
- Αν θέλουμε να απομακρύνουμε το ηλεκτρόνιο σε άπειρη απόσταση από το πρωτόνιο (ιοντισμός) πρέπει να προσφέρουμε στο ηλεκτρόνιο ενέργεια ίση με $ke^2/2r$ έτσι ώστε να μηδενιστεί η ολική ενέργεια του συστήματος.



Επιτρεπτές τροχιές

- Για να βρούμε τη σχέση που δίνει την ακτίνα της κυκλικής κίνησης εργαζόμαστε ως εξής:

$$\left. \begin{aligned} mvr &= n \frac{h}{2\pi} \Leftrightarrow v^2 = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r^2} \\ v^2 &= \frac{ke^2}{mr} \end{aligned} \right\} \Leftrightarrow v^2 = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m^2 r^2} = \frac{ke^2}{mr}$$

- Λύνοντας ως προς r προκύπτει ότι:

$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} n^2$$



Επιτρεπτές τροχιές

- Η ακτίνα r_n των επιτρεπτών τροχιών είναι **κβαντισμένη**:

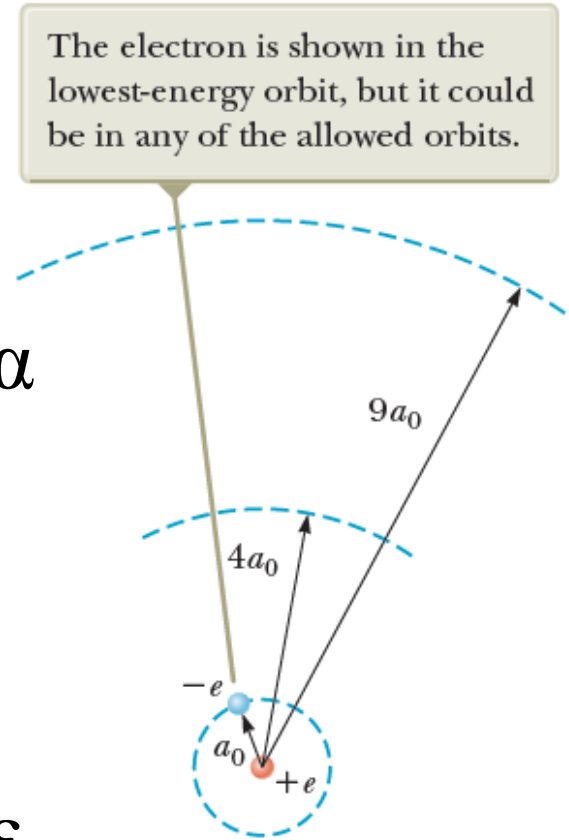
$$r_n = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} n^2$$

- Για $n = 1$ έχουμε την τροχιά με τη μικρότερη ακτίνα η οποία ονομάζεται **ακτίνα Bohr**, a_0 , και έχει τιμή:

$$a_0 = \frac{h^2}{4\pi^2 m k e^2} = 0,0529 \text{ nm} = 0,529 \text{ \AA}$$

- Κατά συνέπεια, η γενική έκφραση της ακτίνας κάθε τροχιάς στο άτομο του υδρογόνου ισούται με:

$$r_n = n^2 a_0$$





Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Κατά συνέπεια, η ολική ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου ισούται με:

$$E = -\frac{ke^2}{2a_0} \cdot \frac{1}{n^2} \Leftrightarrow E = -\frac{2\pi^2 mk^2 e^4}{h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$$

- ✓ όπου μάζα ηλεκτρονίου: $m = 9,1093837015 \times 10^{-31} \text{ kg}$
- ✓ σταθερά Coulomb: $k = 8,9875517923 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 = \text{kg} \cdot \text{m}^3/(\text{s}^2 \cdot \text{C}^2)$
- ✓ φορτίο ηλεκτρονίου: $e = 1,602176634 \times 10^{-19} \text{ C}$
- ✓ σταθερά του Planck: $h = 6,62607015 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s} = \text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
- ✓ **n: κύριος κβαντικός αριθμός, $n = 1, 2, 3, \dots$**
- ✓ Τιμές σταθερών: <https://physics.nist.gov/cuu/Constants/index.html>



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Αντικαθιστώντας προκύπτει ότι:

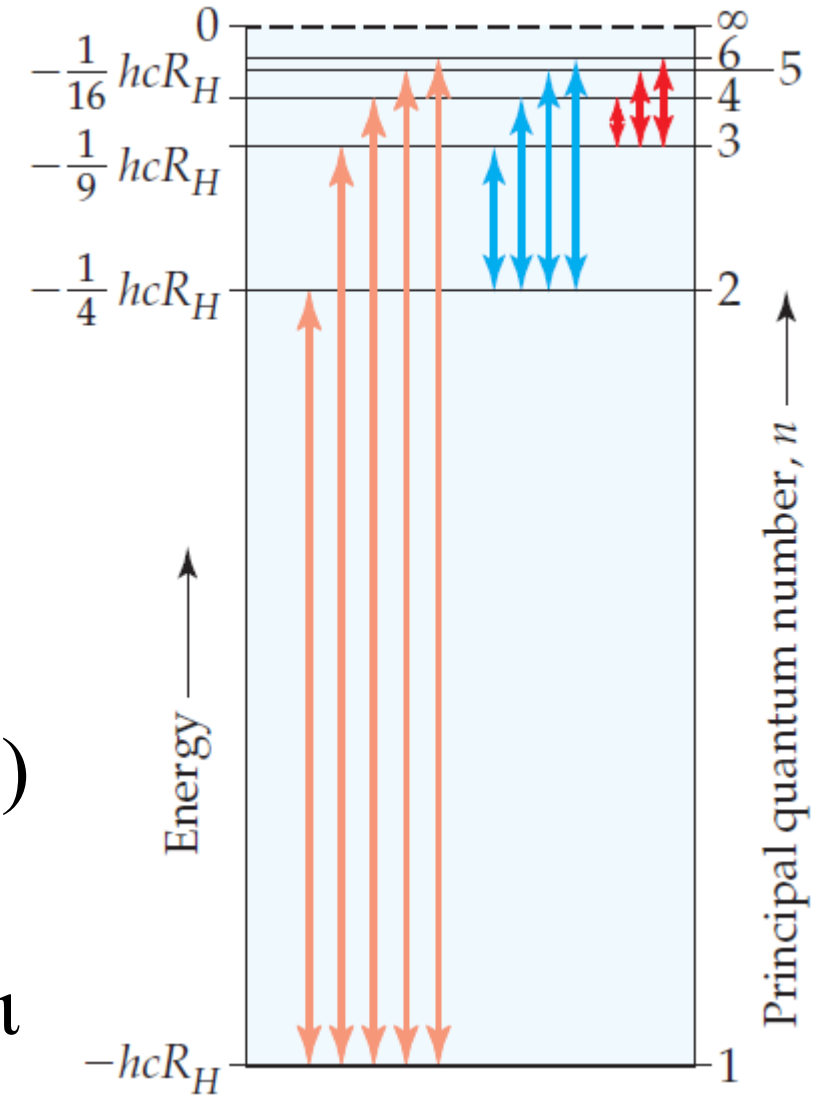
$$E = -\frac{2,180 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ J}$$

- Το n συμβολίζει τις επιτρεπτές ενεργειακές καταστάσεις (ή στάθμες ενέργειας). Κάθε επιτρεπτή τροχιά αντιστοιχεί σε μία διαφορετική του n .
- Για $n = 1$ προκύπτει η πρώτη στάθμη ενέργειας, η οποία ισούται με $E_1 = -2,180 \times 10^{-18} \text{ J}$.
- Επειδή πρόκειται για τη χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση, ονομάζεται **βασική ή θεμελιώδης κατάσταση (ground state)**.

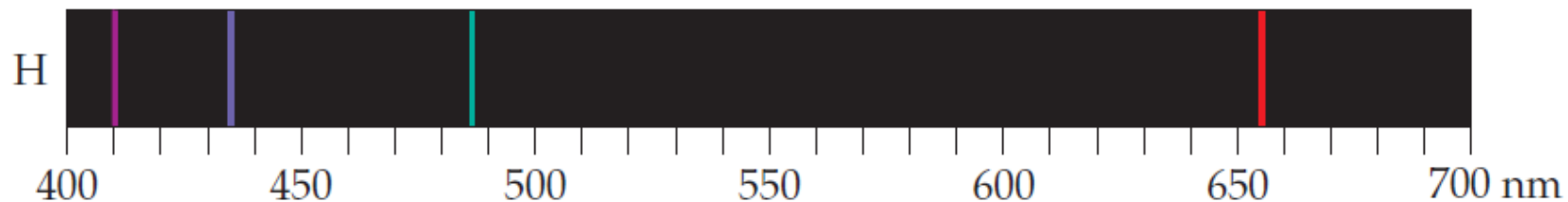
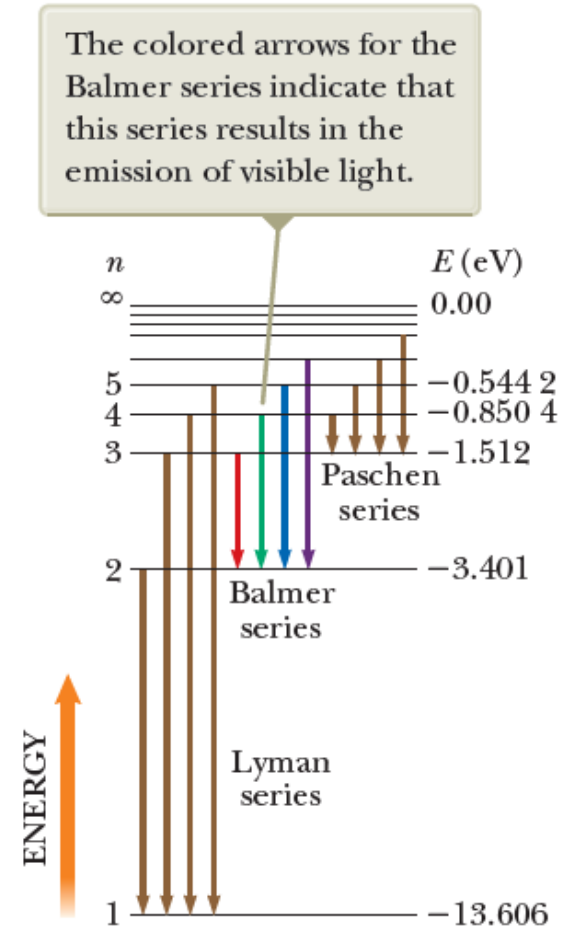
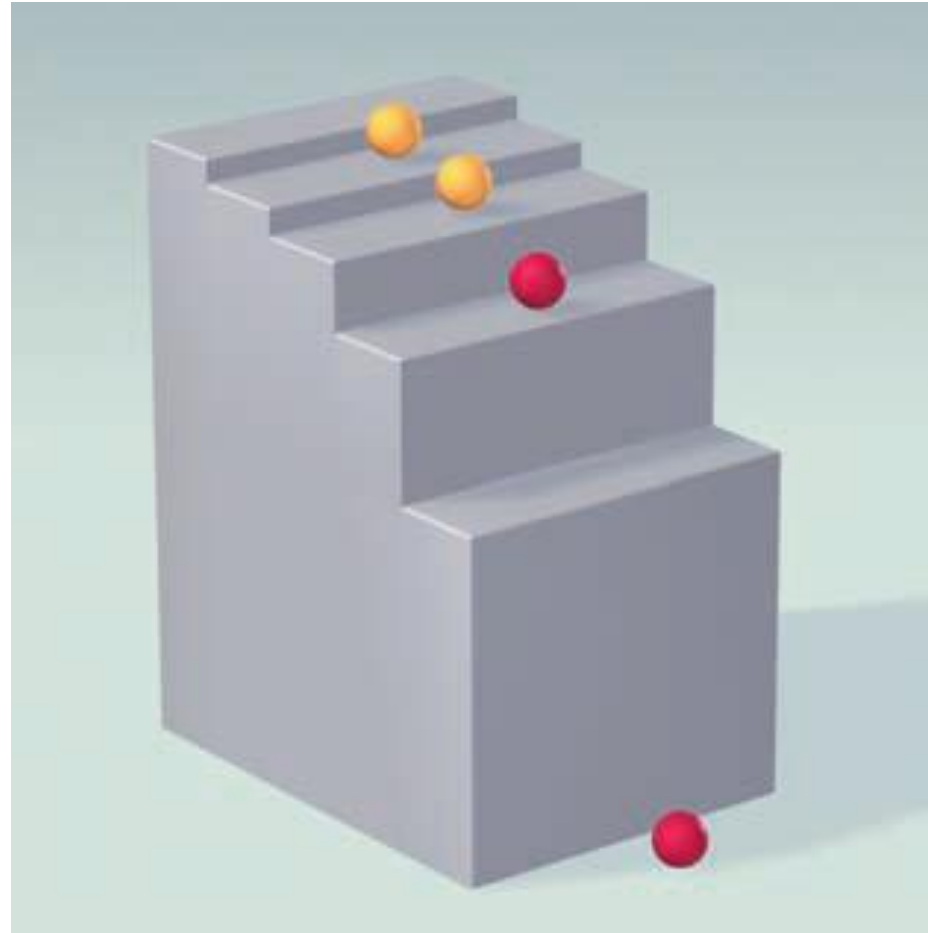
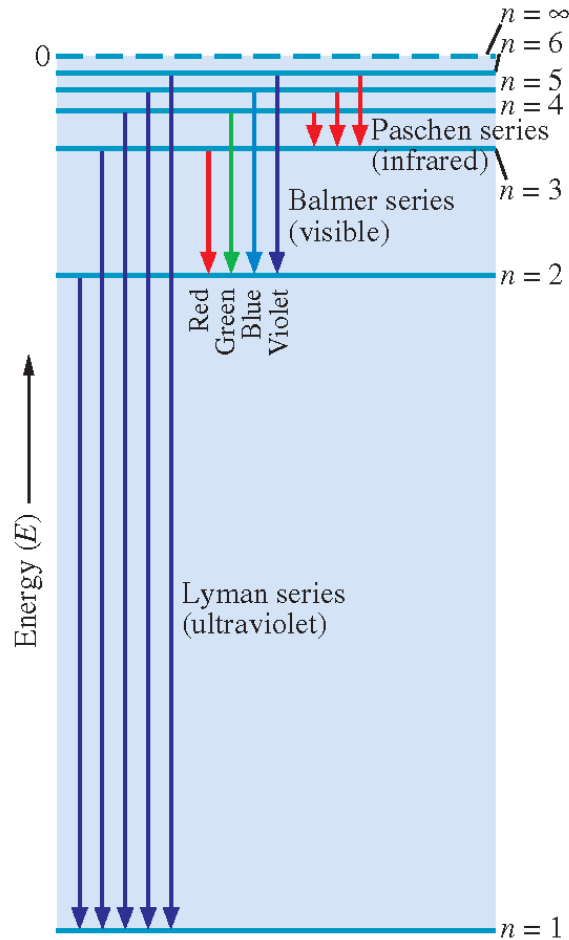


Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Για $n \geq 2$ οι ενεργειακές καταστάσεις ονομάζονται **διεγερμένες (excited states)**.
- Για $n = 2$ προκύπτει η δεύτερη ενεργειακή κατάσταση $E_2 = E_1/4$ (συχνά ονομάζεται πρώτη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση)
- Για $n = 3$ προκύπτει η τρίτη ενεργειακή κατάσταση, $E_3 = E_1/9$ (συχνά ονομάζεται δεύτερη διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση)
- κ.ο.κ. ...
- Σε άπειρη απόσταση από τον πυρήνα ισχύει ότι $E_\infty = 0$.



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες



Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

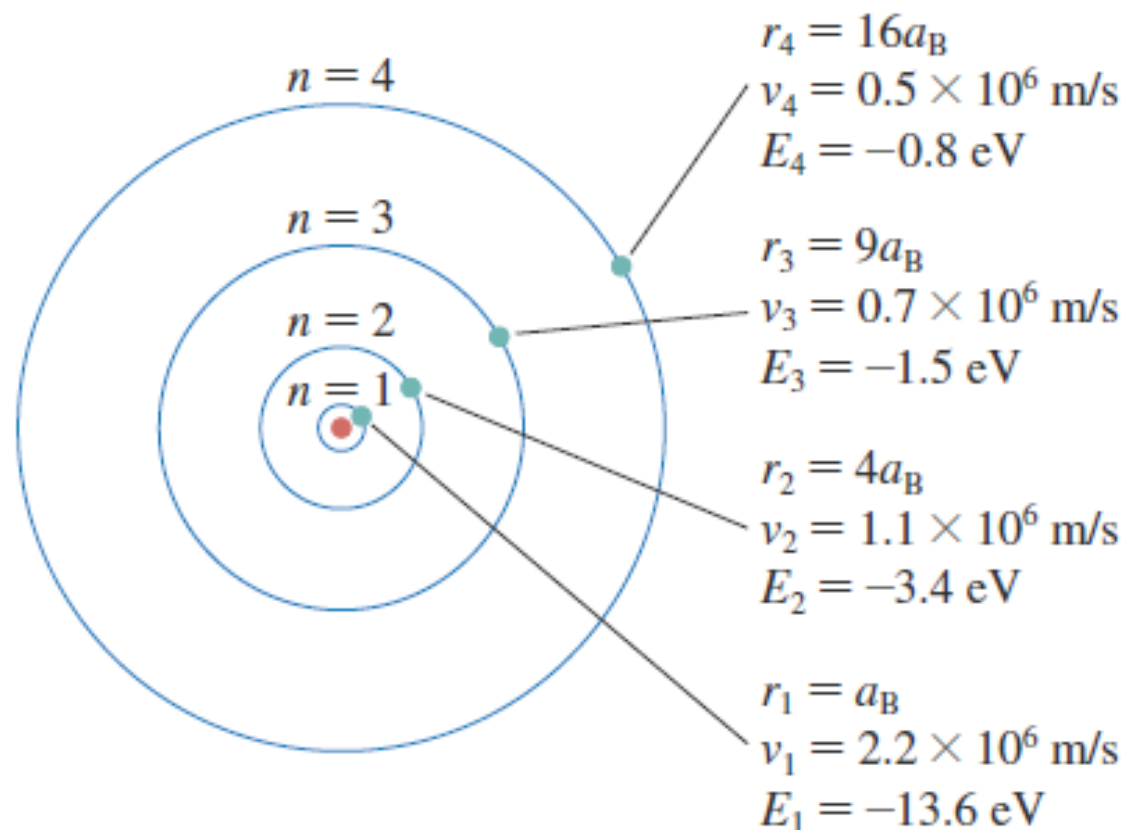


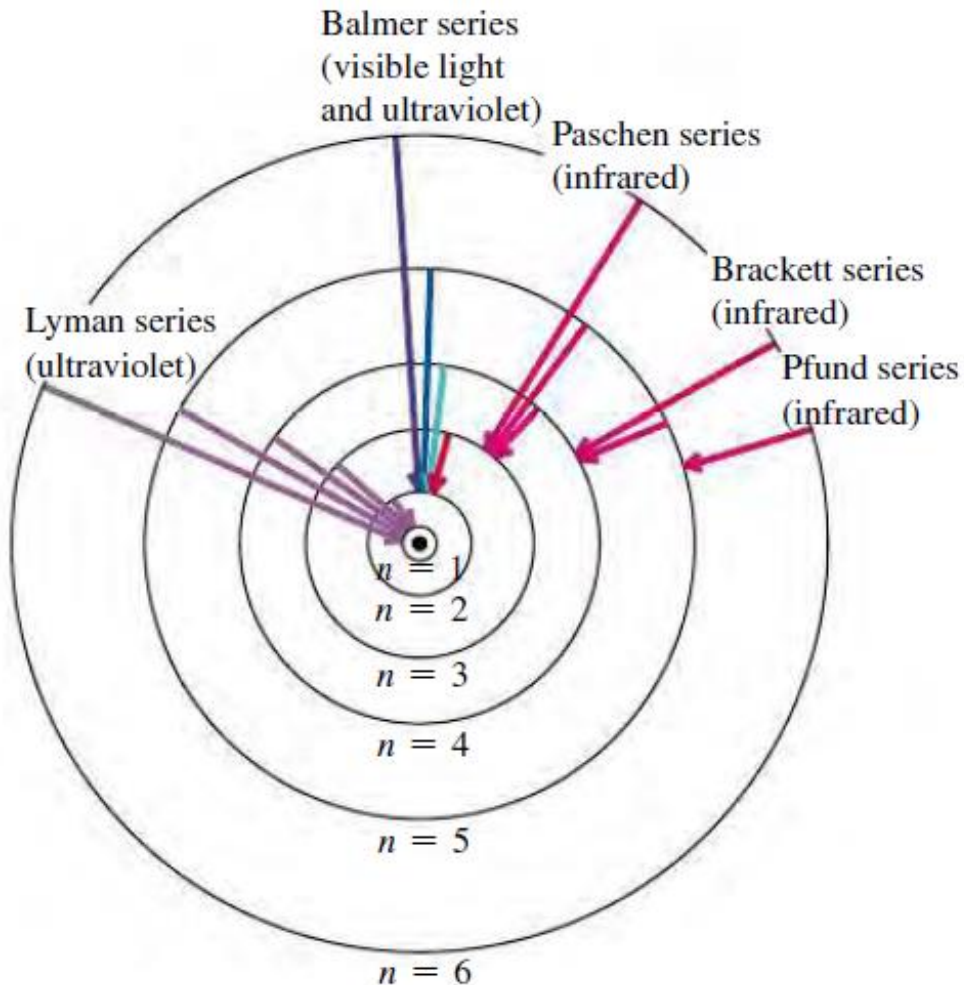
TABLE 38.2 Radii, speeds, and energies for the first five states of the Bohr hydrogen atom

n	$r_n(\text{nm})$	$v_n(\text{m/s})$	$E_n(\text{eV})$
1	0.053	2.19×10^6	-13.60
2	0.212	1.09×10^6	-3.40
3	0.476	0.73×10^6	-1.51
4	0.846	0.55×10^6	-0.85
5	1.322	0.44×10^6	-0.54

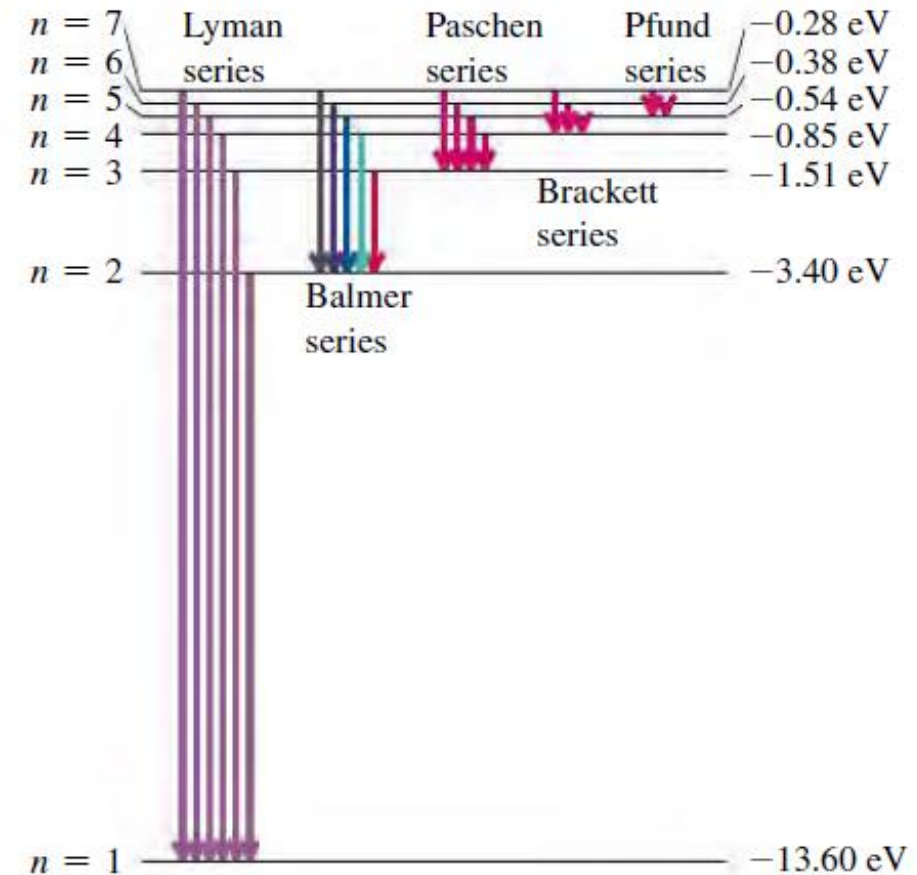
Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες



(a) Permitted orbits of an electron in the Bohr model of a hydrogen atom (not to scale). Arrows indicate the transitions responsible for some of the lines of various series.



(b) Energy-level diagram for hydrogen, showing some transitions corresponding to the various series





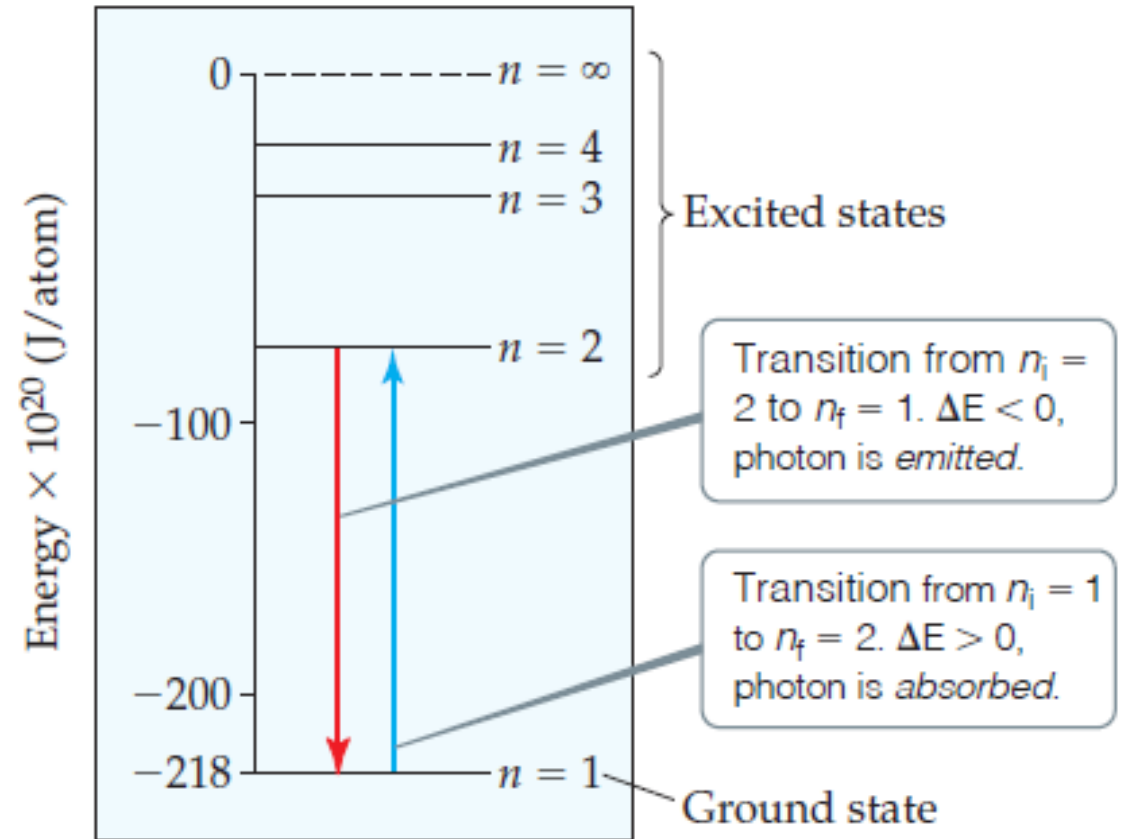
Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Οι ενέργειες του ηλεκτρονίου είναι αρνητικές για όλες τις τιμές του n .
- Όσο μικρότερη είναι η ενέργεια (δηλαδή, όσο πιο αρνητική), τόσο πιο σταθερό είναι το άτομο.
- Η μικρότερη τιμή ενέργειας προκύπτει για $n = 1$.
- Όσο το n αυξάνεται, η ενέργεια γίνεται λιγότερο αρνητική και επομένως αυξάνεται, ενώ σε άπειρη απόσταση η ενέργεια μηδενίζεται.
- Σε άπειρη απόσταση το ηλεκτρόνιο έχει απομακρυνθεί πλήρως από την έλξη του πυρήνα και το άτομο έχει **ιοντιστεί**.

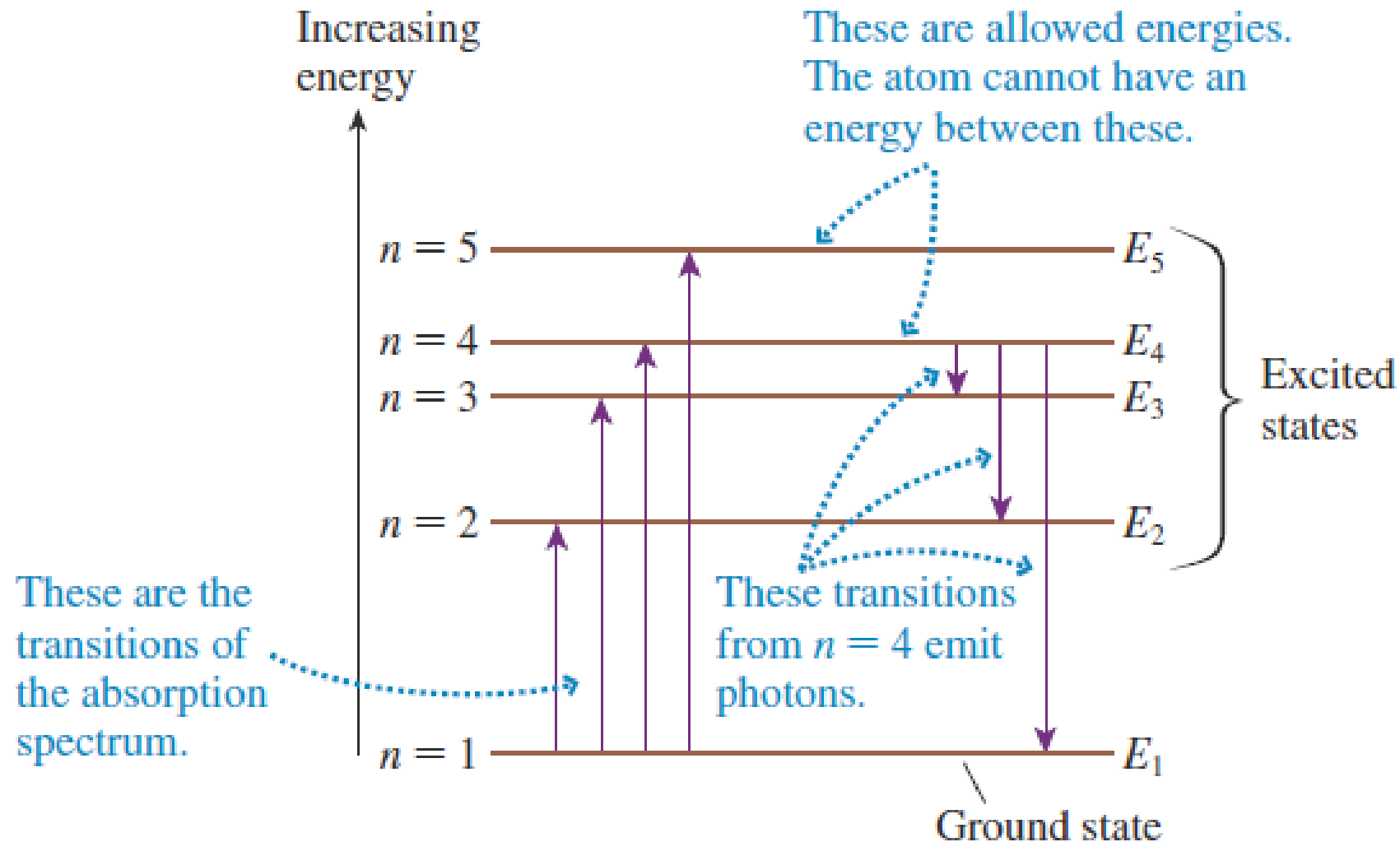


Απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας

- Κατά την απορρόφηση ακτινοβολίας ισχύει ότι $n_f > n_i$. Κατά συνέπεια $E_f > E_i$ οπότε $\Delta E > 0$.
- Κατά την εκπομπή ακτινοβολίας ισχύει ότι $n_f < n_i$. Κατά συνέπεια $E_f < E_i$ οπότε $\Delta E < 0$.



Απορρόφηση ή εκπομπή ακτινοβολίας





Ενέργεια ιοντισμού

- Η ελάχιστη ενέργεια η οποία απαιτείται για τον ιοντισμό ενός ατόμου ονομάζεται **ενέργεια ιοντισμού (ionization energy)**.
- Σύμφωνα με τους υπολογισμούς τους Bohr, η ενέργεια ιοντισμού του ατόμου του υδρογόνου είναι $2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ (13,6 eV).
- Πράγματι, η ενέργεια ιοντισμού του ατόμου του υδρογόνου έτσι όπως έχει μετρηθεί πειραματικά ισούται με 1312 kJ/mol ή $2,18 \times 10^{-18} \text{ J}$ (13,6 eV) ανά άτομο υδρογόνου, σε απόλυτη συμφωνία με τη θεωρία του Bohr!!!



Εκπομπή ή απορρόφηση ακτινοβολίας

- Η συχνότητα του φωτονίου που εκπέμπεται ή απορροφάται κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου από τη μία επιτρεπτή ενεργειακή στάθμη στην άλλη δίνεται από την εξίσωση:

$$|\Delta E| = |E_f - E_i| = hf \Leftrightarrow |\Delta E| = \left| -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^2} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \right| = hf$$

- Λύνοντας ως προς f έχουμε:

$$f = \frac{|\Delta E|}{h} = \left| -\frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \right|$$



Εκπομπή ή απορρόφηση ακτινοβολίας

- Διαιρώντας με το c προκύπτει ότι:

$$\frac{f}{c} = \frac{|\Delta E|}{hc} = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3 c} \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

- Αντικαθιστώντας $f/c = 1/\lambda$ έχουμε:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3 c} \left| \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right|$$

- Δηλαδή, προέκυψε η εμπειρική εξίσωση του Rydberg για την εκπομπή ακτινοβολίας από το άτομο του υδρογόνου!!!

$$\frac{1}{\lambda} = R_{\infty} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right)$$



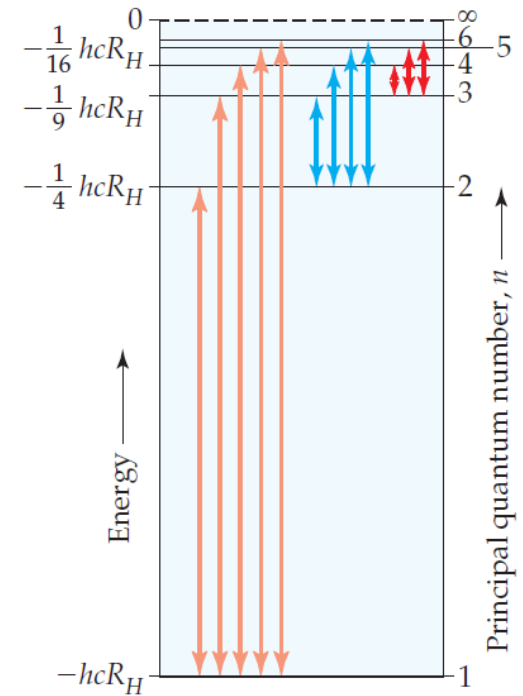
Επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες

- Κατά συνέπεια, η σταθερά του Rydberg ισούται με:

$$R_{\infty} = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{h^3 c}$$

- Κατά συνέπεια ισχύει ότι:

$$E = -hcR_{\infty} \cdot \frac{1}{n^2}$$

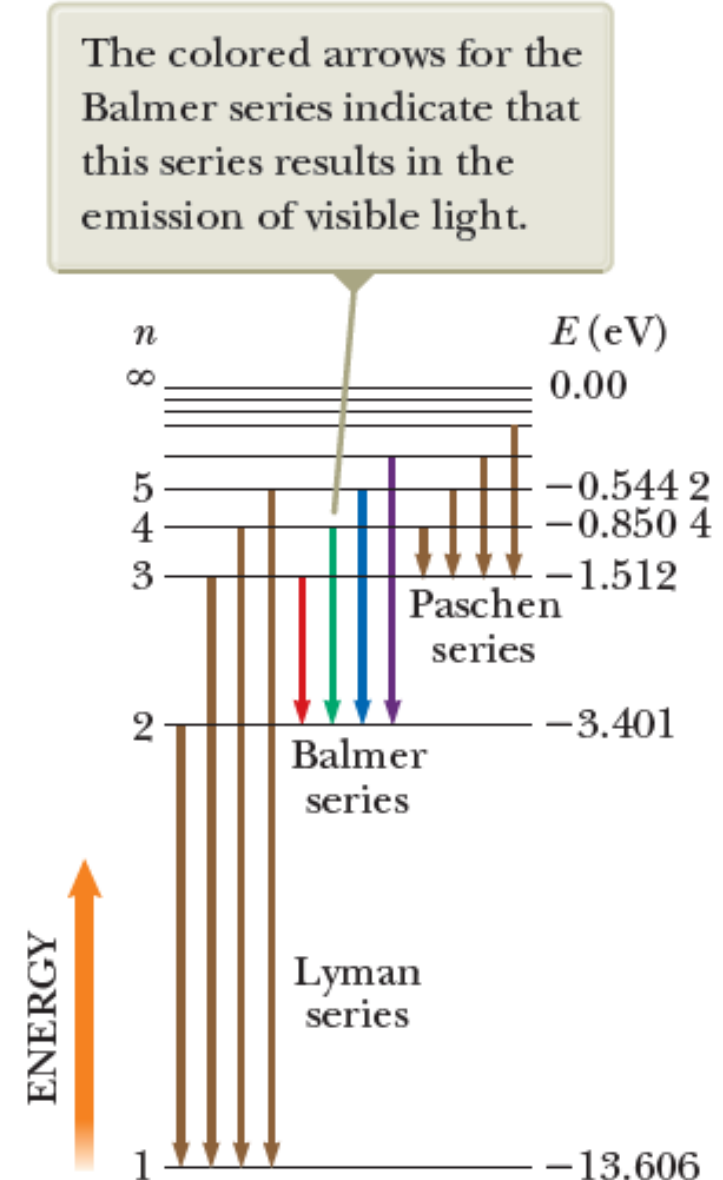


- Δηλαδή, ο Bohr υπολόγισε θεωρητικά τη σταθερά του Rydberg!!!
- Η θεωρητική τιμή συμφωνεί πάρα πολύ καλά με την τιμή που έχει μετρηθεί πειραματικά.



Γραμμικό φάσμα εκπομπής του υδρογόνου

- Ο Bohr ερμήνευσε όλες τις φασματικές γραμμές στο φάσμα εκπομπής του υδρογόνου.
- Οι διαφορετικές φασματικές γραμμές αντιστοιχούν σε μεταβάσεις του ηλεκτρονίου από διάφορες αρχικές σε διάφορες τελικές επιτρεπτές ενεργειακές στάθμες.





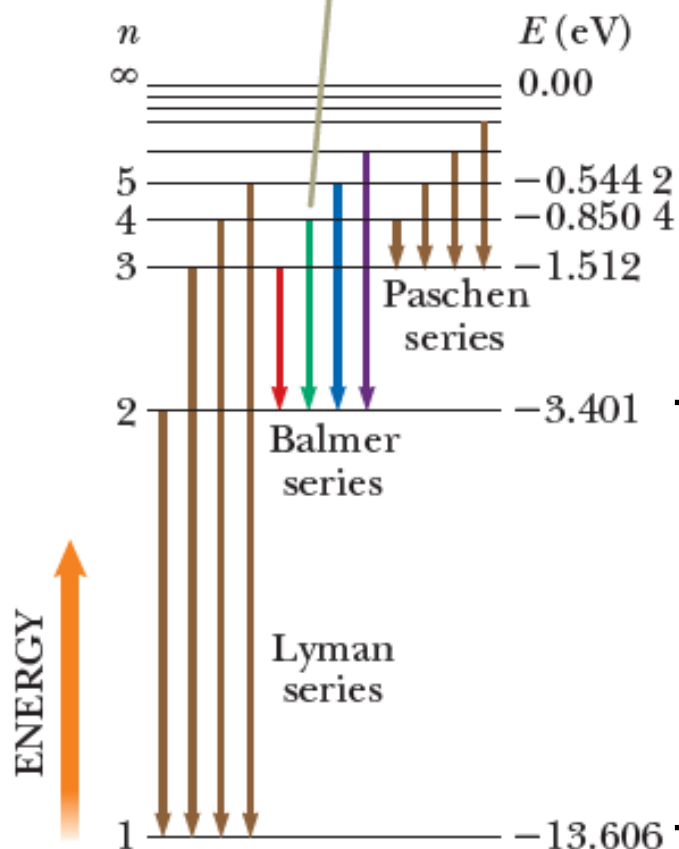
Παράδειγμα 3.6

- Ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη βασική ενεργειακή του κατάσταση. Στο άτομο προσπίπτει ένα φωτόνιο με ενέργεια 10,5 eV. Τι από τα παρακάτω θα συμβεί;
- a. Το ηλεκτρόνιο διεγείρεται και μεταβαίνει σε μία επιτρεπτή ενεργειακή κατάσταση υψηλότερης ενέργειας.
 - b. Το άτομο ιοντίζεται.
 - c. Το φωτόνιο περνά από το άτομο χωρίς να αλληλεπιδράσει μαζί του.

Παράδειγμα 3.6. Απάντηση



The colored arrows for the Balmer series indicate that this series results in the emission of visible light.



- Η ενέργεια του φωτονίου (10,5 eV) δεν αντιστοιχεί σε καμία ενεργειακή μεταβολή του ηλεκτρονίου.
- Η ενέργεια του φωτονίου δεν είναι αρκετή για να προκαλέσει ιοντισμό του ατόμου.
- Άρα, το φωτόνιο δεν θα αλληλεπιδράσει με το άτομο (σωστή απάντηση είναι η c).

$$\Delta E = 10,2 \text{ eV}$$

- Τι θα συμβεί αν η ενέργεια του φωτονίου είναι 15 eV;



Παράδειγμα 3.7

- Το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου υδρογόνου μεταβαίνει από το επίπεδο ενέργειας με $n = 3$ στο επίπεδο με $n = 2$.
- Στη συνέχεια, πραγματοποιείται μία επιπλέον μετάβαση από το επίπεδο με $n = 2$ στο επίπεδο με $n = 1$.
- Ποια μετάβαση έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή ενός φωτονίου με μεγαλύτερο μήκος κύματος;
 - a. η πρώτη μετάβαση
 - b. η δεύτερη μετάβαση
 - c. καμία από τις δύο, επειδή τα μήκη κύματος είναι τα ίδια και για τις δύο μεταβάσεις



Παράδειγμα 3.7. Απάντηση

➤ Για την πρώτη μετάβαση ($n_i = 3 \rightarrow n_f = 2$) ισχύει ότι:

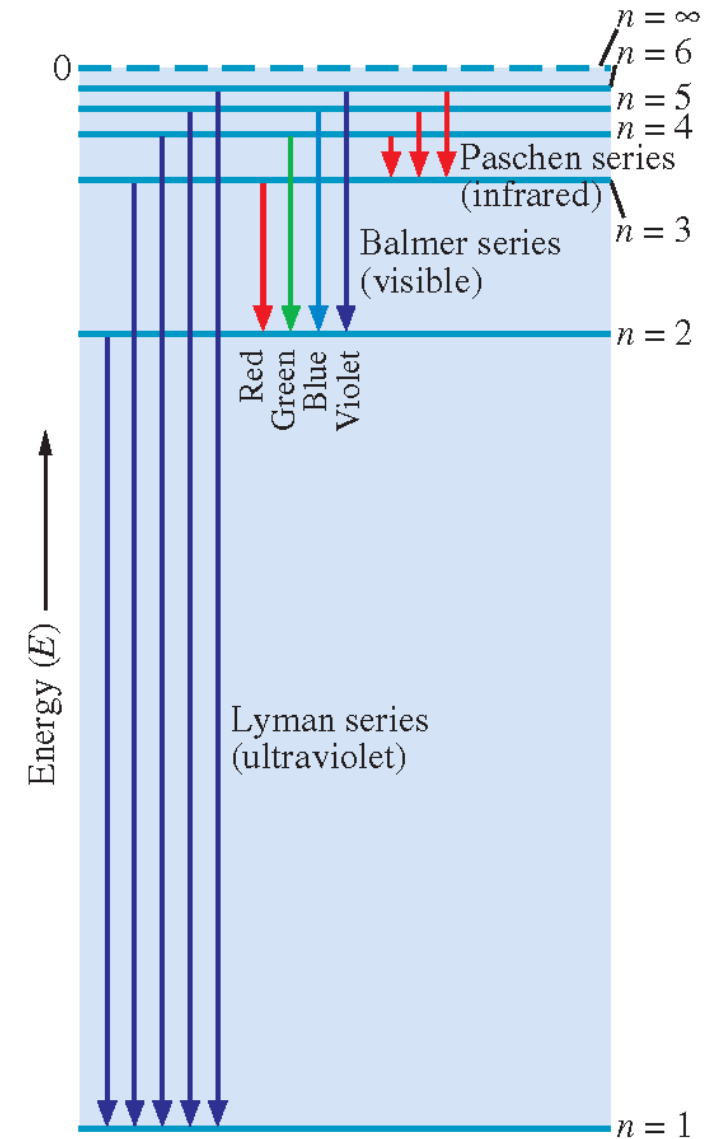
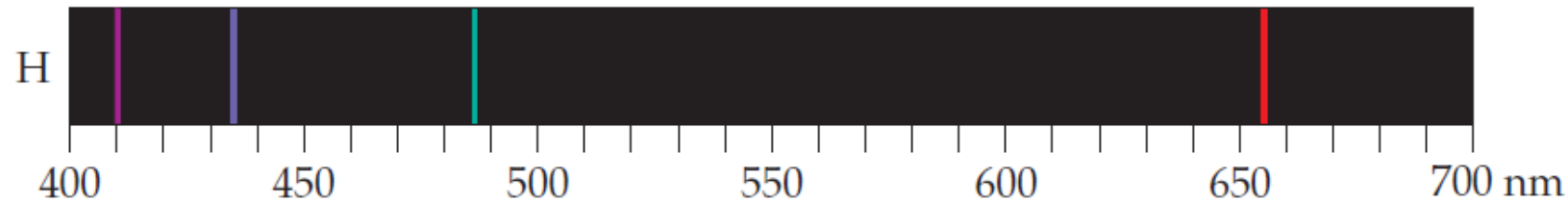
$$\begin{aligned} |\Delta E_1| = |E_f - E_i| &= \frac{hc}{\lambda_1} \Leftrightarrow |\Delta E_1| = |E_2 - E_3| = \frac{hc}{\lambda_1} \Leftrightarrow |\Delta E_1| = \left| \frac{E_1}{4} - \frac{E_1}{9} \right| = \frac{hc}{\lambda_1} \\ \Leftrightarrow |\Delta E_1| &= \left| \frac{5E_1}{36} \right| = \frac{hc}{\lambda_1} \Leftrightarrow \lambda_1 = \frac{36}{5} \frac{hc}{|E_1|} \Leftrightarrow \lambda_1 = 7,2 \frac{hc}{|E_1|} \end{aligned}$$

➤ Ομοίως, για τη δεύτερη μετάβαση ($n_i = 2 \rightarrow n_f = 1$) ισχύει ότι:

$$\begin{aligned} |\Delta E_2| = |E_f - E_i| &= \frac{hc}{\lambda_2} \Leftrightarrow |\Delta E_2| = |E_1 - E_2| = \frac{hc}{\lambda_2} \Leftrightarrow |\Delta E_2| = \left| E_1 - \frac{E_1}{4} \right| = \frac{hc}{\lambda_2} \\ \Leftrightarrow |\Delta E_2| &= \left| \frac{3E_1}{4} \right| = \frac{hc}{\lambda_2} \Leftrightarrow \lambda_2 = \frac{4}{3} \frac{hc}{|E_1|} \Leftrightarrow \lambda_2 = 1,33 \frac{hc}{|E_1|} \end{aligned}$$

Παράδειγμα 3.7. Απάντηση

- Άρα, $\lambda_1 > \lambda_2$ (σωστό είναι το α).
- Τι ισχύει για τις αντίστοιχες συχνότητες των ακτινοβολιών;





Παράδειγμα 3.8

➤ Ποιο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται όταν το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου υδρογόνου μεταπίπτει από το επίπεδο ενέργειας με $n = 4$ στο επίπεδο με $n = 2$;

➤ Δίνεται ότι: $E = -\frac{2,180 \times 10^{-18}}{n^2} \text{ J}$

➤ **Απάντηση:**

➤ Για τη μετάβαση από $n_i = 4 \rightarrow n_f = 2$ ισχύει ότι:

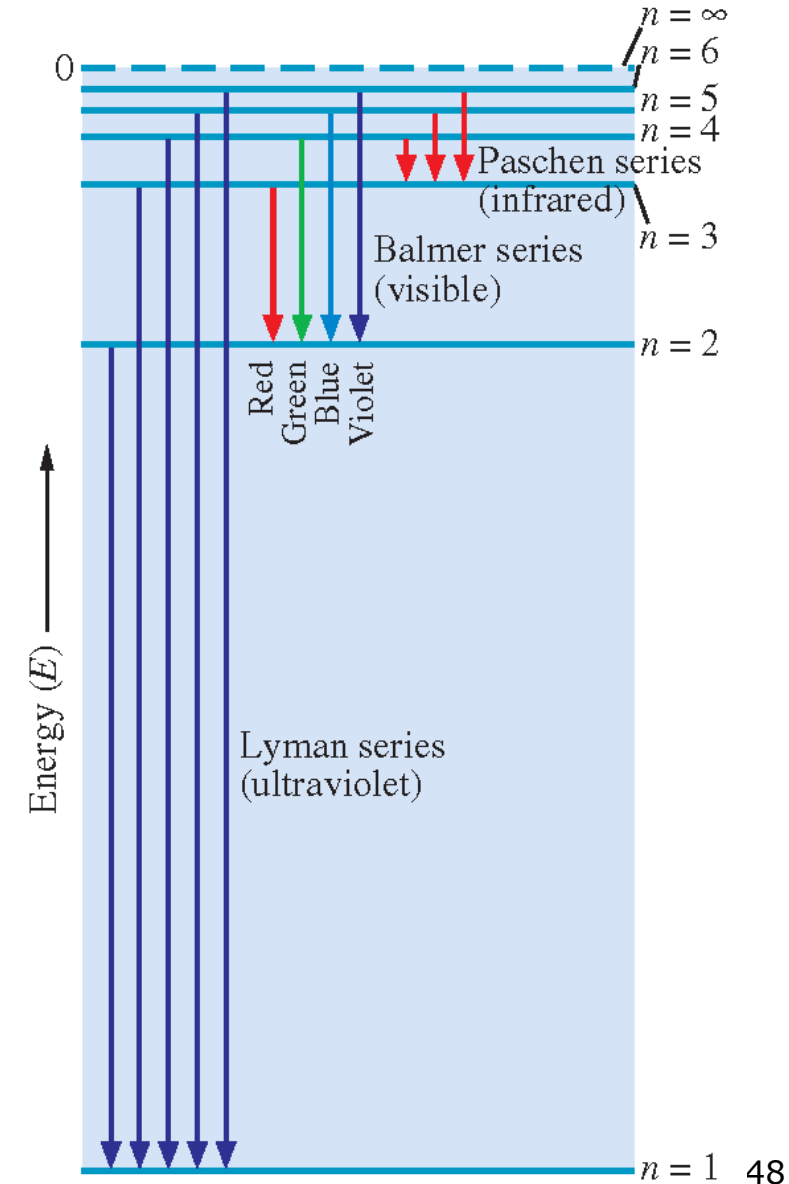
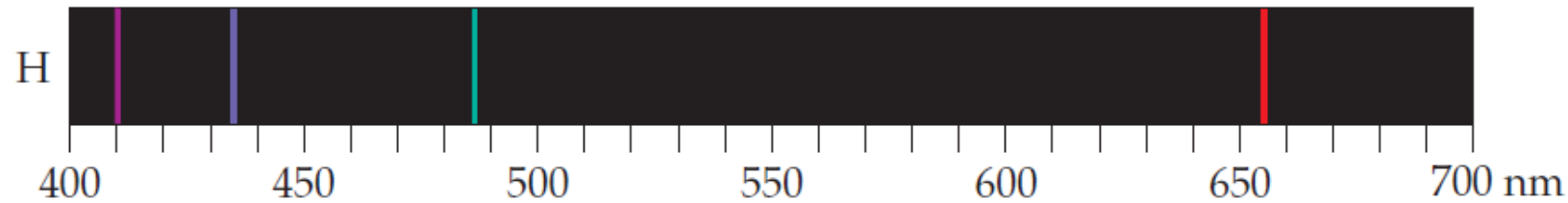
$$|\Delta E| = |E_f - E_i| = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow |E_2 - E_4| = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \left| \frac{E_1}{4} - \frac{E_1}{16} \right| = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow \left| \frac{3E_1}{16} \right| = \frac{hc}{\lambda} \Leftrightarrow$$

$$\lambda = \frac{16}{3} \frac{hc}{|E_1|} = \frac{16}{3} \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3,00 \times 10^8 \text{ m/s})}{|-2,180 \times 10^{-18} \text{ J}|} = 4,86 \times 10^{-7} \text{ m ή } 486 \text{ nm}$$

Παράδειγμα 3.8



➤ $\lambda = 486 \text{ nm}$. Το χρώμα είναι κυανοπράσινο.





Περιορισμοί του μοντέλου του Bohr

- Το ατομικό μοντέλο του Bohr εξηγεί ικανοποιητικά το φάσμα εκπομπής του υδρογόνου αλλά δεν μπορεί να εξηγήσει τα φάσματα εκπομπής των υπολοίπων ατόμων.
- Το μοντέλο του ηλεκτρονίου το οποίο περιφέρεται σε τροχιά γύρω από τον πυρήνα σε μια σταθερή απόσταση δεν είναι ρεαλιστικό.
- Το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου δεν κινείται σε ένα επίπεδο κύκλο γύρω από τον πυρήνα. Το άτομο είναι σφαιρικό.
- Δεν λαμβάνει υπόψη την κυματική φύση του ηλεκτρονίου.



Πλεονεκτήματα του μοντέλου του Bohr

- Το μοντέλο του Bohr ήταν ένα πολύ σημαντικό βήμα στην πορεία προς την ανάπτυξη ενός πιο ολοκληρωμένου μοντέλου.
- Το μοντέλο του Bohr εισάγει δύο πολύ σημαντικές ιδέες που ενσωματώνονται στο τρέχον μοντέλο δομής του ατόμου:
 1. Τα ηλεκτρόνια υπάρχουν μόνο σε ορισμένα διακριτά επίπεδα ενέργειας, τα οποία περιγράφονται με τους κβαντικούς αριθμούς (κβάντωση της ενέργειας).
 2. Κατά τη μετάβαση ενός ηλεκτρονίου από το ένα επίπεδο ενέργειας στο άλλο εκπέμπεται ή απορροφάται ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- Αφού μελετήσετε αυτό το κεφάλαιο, θα πρέπει να είστε σε θέση:
- ✓ Να αναγνωρίζετε τα βασικά κυματικά χαρακτηριστικά της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, όπως το μήκος κύματός της και η συχνότητά της και να κατανοείτε τη σημασία τους.
- ✓ Να υπολογίζετε το μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας αν γνωρίζετε της συχνότητας ή τη συχνότητάς της αν γνωρίζετε το μήκος κύματος της.
- ✓ Να διακρίνετε μεταξύ των διαφόρων ειδών ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας και να τα ταξινομείτε με βάση το μήκος κύματος τους, τη συχνότητα τους και την ενέργειά τους.



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να εξηγείτε τι είναι το κβάντο (quantum) ενέργειας και τι είναι το φωτόνιο και να υπολογίζετε την ενέργεια ενός φωτονίου αν γνωρίσετε τη συχνότητα ή το μήκος κύματός του.
- ✓ Να περιγράφετε τα βασικά χαρακτηριστικά του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και να εξηγείτε πως υποστηρίζει τη θεωρία περί της σωματιδιακής φύσης των ακτινοβολιών.
- ✓ Να υπολογίζετε τη συχνότητα ή το μήκος κύματος της ακτινοβολίας η οποία απαιτείται για να προκληθεί το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αν γνωρίζετε το έργο εξαγωγής του μετάλλου.



Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να περιγράψετε τη διαφορά μεταξύ ενός συνεχούς φάσματος και ενός γραμμικού φάσματος.
- ✓ Να εξηγείτε πώς τα γραμμικά φάσματα εκπομπής σχετίζονται με την ιδέα των κβαντισμένων ενεργειακών καταστάσεων των ηλεκτρονίων στα άτομα.
- ✓ Να περιγράφετε εν συντομία τις βασικές παραδοχές ή αξιώματα του μοντέλου του Bohr για το άτομο του υδρογόνου.
- ✓ Να υπολογίζετε την ενέργεια των διαφόρων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων στο άτομο του υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο του Bohr.



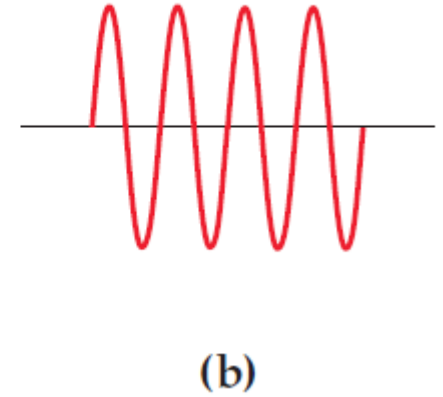
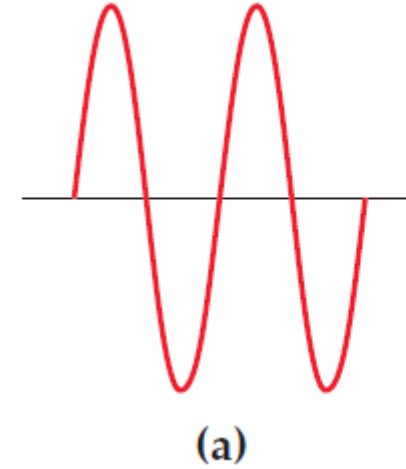
Μαθησιακά Αποτελέσματα

- ✓ Να υπολογίζετε μήκος κύματος και τη συχνότητα των φωτονίων που εκπέμπονται ή απορροφώνται κατά τη μετάβαση του ηλεκτρονίου μεταξύ των διαφόρων επιτρεπτών ενεργειακών καταστάσεων στο άτομο του υδρογόνου σύμφωνα με το μοντέλο του Bohr.



Άσκηση 3.1

- Το διπλανό σχήμα δείχνει δύο ηλεκτρομαγνητικά κύματα τα οποία έχουν σχεδιαστεί στην ίδια κλίμακα.
- Ποιο κύμα έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος;
 - Ποιο κύμα έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα;
 - Ποιο κύμα έχει τη μεγαλύτερη ενέργεια;



Άσκηση 3.2



- Το γνωστό μας φαινόμενο του ουρανίου τόξου προκύπτει από τη διάθλαση της ηλιακής ακτινοβολίας από τις σταγόνες της βροχής.

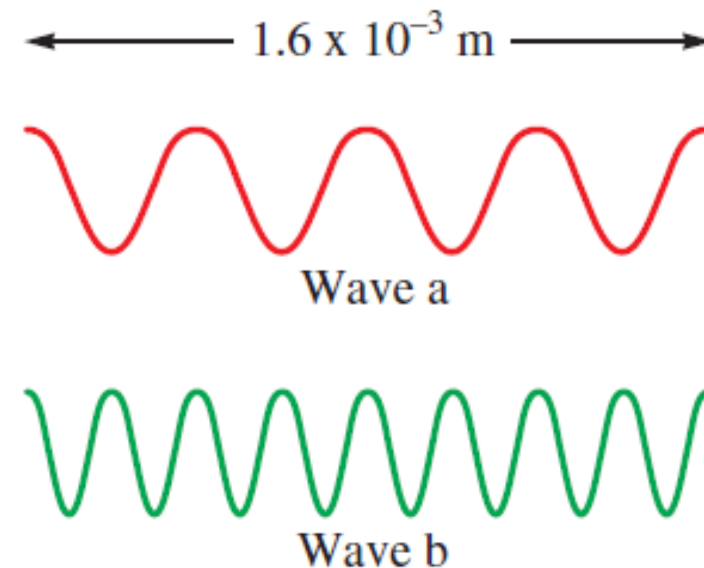


- Το μήκος κύματος του φωτός αυξάνεται ή μειώνεται καθώς προχωράμε προς τα έξω ξεκινώντας από το εσωτερικό προς το εξωτερικό μέρος του ουρανίου τόξου;
- Η συχνότητα του φωτός αυξάνεται ή μειώνεται καθώς προχωράμε προς τα έξω;

Άσκηση 3.3



- Δείτε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα που φαίνονται στο διπλανό σχήμα.
- a. Ποιο κύμα έχει το μεγαλύτερο μήκος κύματος; Υπολογίστε αυτό το μήκος κύματος.
- b. Ποιο κύμα έχει τη μεγαλύτερη συχνότητα και τη μεγαλύτερη ενέργεια; Υπολογίστε αυτές τις τιμές.
- c. Ποιο κύμα έχει τη μεγαλύτερη ταχύτητα;
- d. Σε τι είδους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία αντιστοιχεί το κάθε κύμα;





Άσκηση 3.4

- Η μέση απόσταση της Γης από τον Ήλιο είναι $1,496 \times 10^8$ km.
- Να υπολογίσετε πόσο χρόνο χρειάζεται το φως για να ταξιδέψει από τον Ήλιο στη Γη.

Άσκηση 3.5



- Ταξινομήστε τα παρακάτω είδη ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας κατά σειρά (i) αυξανόμενου μήκους κύματος και (ii) αυξανόμενης ενέργειας ανά φωτόνιο.
- a. ραδιοκύματα
 - b. μικροκύματα
 - c. υπέρυθρη ακτινοβολία
 - d. υπεριώδης ακτινοβολία
 - e. ορατή ακτινοβολία

Άσκηση 3.6



- Μία πηγή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εκπέμπει υπέρυθρη ακτινοβολία.
- Ποιο από τα ακόλουθα μήκη κύματος μπορεί να αντιστοιχεί στην ακτινοβολία αυτή;

(i) 3,0 nm

(ii) 4,7 cm

(iii) 66,8 m

(iv) 34,5 μm

(v) 16,5 $\text{\AA}$

Άσκηση 3.7



- a. Η συχνότητα της έντονης κόκκινης γραμμής στο φάσμα εκπομπής του καλίου είναι $3,91 \cdot 10^{14}$ Hz. Ποιο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας αυτής μετρημένο σε νανόμετρα (nm); Υπολογίστε την ενέργεια της ακτινοβολίας αυτής.
- b. Υπολογίστε τη συχνότητα και την ενέργεια ενός φωτονίου με μήκος κύματος 413 nm.
- c. Ποιο είναι το μήκος κύματος και η συχνότητα ενός φωτονίου που έχει ενέργεια $6,06 \times 10^{-19}$ J;

Άσκηση 3.8



- Να υπολογίσετε και να συγκρίνετε την ενέργεια ενός φωτονίου με μήκος κύματος $3,3 \mu\text{m}$ με την αντίστοιχη ενέργεια ενός άλλου φωτονίου μήκους κύματος $0,154 \text{ nm}$.
- Σε ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος ανήκουν τα φωτόνια αυτά;

Άσκηση 3.9



- Να υπολογίσετε τη συχνότητα και την ενέργεια των ακτινοβολιών με τα ακόλουθα μήκη κύματος:
- a. 632,8 nm (κόκκινο φως ακτίνων λέιζερ)
 - b. 503 nm (μήκος κύματος που αντιστοιχεί στη μέγιστη ένταση της ηλιακής ακτινοβολίας)
 - c. 0,052 nm (μήκος κύματος ακτίνων X)

Άσκηση 3.10



- Να υπολογίσετε το μήκος κύματος και την ενέργεια των ακτινοβολιών με τις ακόλουθες συχνότητες:
 - a. 103,7 MHz (συχνότητα εκπομπής του Δευτέρου Προγράμματος της Ελληνικής Ραδιοφωνίας στα FM)
 - b. 1070 kHz (συχνότητα εκπομπής ραδιοφωνικού σταθμού στα AM)
 - c. 835,6 MHz (συχνότητα μετάδοσης σήματος κινητής τηλεφωνίας)



Άσκηση 3.11

- Τα ακόλουθα μήκη κύματος είναι αντιπροσωπευτικά για τις περιοχές του υπερύθρου, του υπεριώδους και των ακτίνων X του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αντίστοιχα: $1,0 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, $1,0 \cdot 10^{-8} \text{ m}$ και $1,0 \cdot 10^{-10} \text{ m}$.
- Πόση είναι η ενέργεια ενός φωτονίου καθεμιάς ακτινοβολίας;
- Ποια ακτινοβολία έχει το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας ανά φωτόνιο;
- Ποια το λιγότερο;

Άσκηση 3.12



- Ένα λέιζερ (laser) εκπέμπει ακτινοβολία μήκους κύματος 337 nm και ενέργειας $3,83 \text{ mJ}$.
- Πόσα φωτόνια περιέχει;

Άσκηση 3.13



- Ένας λαμπτήρας εκπομπής ορατής ακτινοβολίας έχει ισχύ 100 W .
- Αν θεωρήσετε ότι το φως που εκπέμπει έχει μήκος κύματος 525 nm , να υπολογίσετε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπει ο λαμπτήρας στη μονάδα του χρόνου.



Άσκηση 3.14

- Ένας λαμπτήρας εκπομπής θερμότητας έχει ισχύ $32,8 \text{ W}$ και εκπέμπει σε μήκος κύματος $6,5 \text{ nm}$.
- Να υπολογίσετε τον αριθμό των φωτονίων που εκπέμπει ο λαμπτήρας στη μονάδα του χρόνου.



Άσκηση 3.15

- Ένα λέιζερ εκπέμπει σε μήκος κύματος 987 nm .
- Σε ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται αυτή η ακτινοβολία;
- Όλη η ενέργεια της ακτινοβολίας απορροφάται από έναν ανιχνευτή που μετρά συνολική ενέργεια $0,52 \text{ J}$ σε μία χρονική περίοδο 32 δευτερολέπτων.
- Πόσα φωτόνια ανά δευτερόλεπτο εκπέμπονται από το λέιζερ;



Άσκηση 3.16

- Ο άνθρακας εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος 150 nm.
- Η ολική ποσότητα ενέργειας η οποία εκπέμπεται από ένα δείγμα άνθρακα ισούται με $1,98 \times 10^5$ J.
- Υπολογίστε τον αριθμό των ατόμων άνθρακα που περιέχει το δείγμα, αν κάθε άτομο άνθρακα εκπέμπει ένα φωτόνιο.



Άσκηση 3.17

- Κατά την έκθεση του δέρματος μας σε υπεριώδη ακτινοβολία (UV) με μήκος κύματος 325 nm προκαλούνται εγκαύματα.
- Ποια είναι η ενέργεια ενός φωτονίου αυτής της ακτινοβολίας;
- Ποια είναι η ενέργεια ενός mole φωτονίων αυτής της ακτινοβολίας (1 mole φωτονίων ισούται με $6,022 \times 10^{23}$ φωτόνια);
- Πόσα φωτόνια υπάρχουν σε μία δέσμη ακτινοβολίας ενέργειας 1,00 mJ;



Άσκηση 3.17

- Αυτά τα φωτόνια της υπεριώδους ακτινοβολίας μπορούν να προκαλέσουν διάσπαση των χημικών δεσμών στο δέρμα μας, προκαλώντας έτσι εγκαύματα.
- Εάν η ακτινοβολία των 325 nm παρέχει ακριβώς την ενέργεια η οποία απαιτείται για τη διάσπαση των χημικών δεσμών στο δέρμα μας, να υπολογίσετε την ενέργεια αυτών των δεσμών, εκφρασμένη σε kJ/mol.



Άσκηση 3.18

- Η ενέργεια της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας μπορεί να προκαλέσει διάσπαση των χημικών δεσμών μίας ένωσης.
- Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τη διάσπαση του δεσμού μεταξύ των ατόμων χλωρίου στο μόριο του χλωρίου (Cl_2) ισούται με 242 kJ/mol (1 mole μορίων ισούται με $6,022 \times 10^{23}$ μόρια).
- Ποιο είναι το μέγιστο μήκος κύματος της ακτινοβολίας που έχει την απαραίτητη ενέργεια για τη διάσπαση του δεσμού;
- Σε τι είδους ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ανήκει;



Άσκηση 3.19

- Το μολυβδαίνιο πρέπει να απορροφήσει ακτινοβολία με συχνότητα κατωφλίου $1,09 \times 10^{15} \text{ s}^{-1}$ πριν εκπέμψει ηλεκτρόνια από την επιφάνειά του μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.
- Ποια είναι η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για την εξαγωγή ενός ηλεκτρονίου (έργο εξαγωγής) μετρημένο σε J και σε eV;
- Ποιο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που αντιστοιχεί στη συχνότητα αυτή;
- Εάν το μολυβδαίνιο ακτινοβοληθεί με ακτινοβολία μήκους κύματος 120 nm, ποια είναι η μέγιστη δυνατή κινητική ενέργεια των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων;



Άσκηση 3.20

- Το έργο εξαγωγής του λιθίου ισούται με $279,7 \text{ kJ/mol}$ (δηλαδή, απαιτούνται $279,7 \text{ kJ}$ ενέργειας για την απομάκρυνση 1 mole ηλεκτρονίων από 1 mole ατόμων Li από την επιφάνεια του μεταλλικού λιθίου).
- Ποιο είναι το μέγιστο μήκος κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας το οποίο μπορεί να απομακρύνει ένα ηλεκτρόνιο από ένα άτομο από την επιφάνεια του μεταλλικού λιθίου;
- Δίνεται ότι 1 mole περιέχει $6,022 \times 10^{23}$ άτομα.

Άσκηση 3.21



- Κατά τη μετάβαση ενός ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου από τη στάθμη ενέργειας με $n = 1$ στη στάθμη με $n = 3$, το μέγεθος του ατόμου αυξάνεται ή μειώνεται (δηλαδή το άτομο επεκτείνεται ή συρρικνώνεται);

Άσκηση 3.22



- Χαρακτηρίστε κάθε μία από τις ακόλουθες προτάσεις ως σωστή ή λανθασμένη:
- a. Ένα άτομο υδρογόνου στην κατάσταση $n = 3$ μπορεί να εκπέμψει ακτινοβολία μόνο σε δύο συγκεκριμένα μήκη κύματος
 - b. ένα άτομο υδρογόνου στην κατάσταση $n = 2$ είναι σε χαμηλότερη ενέργεια από μία στην κατάσταση $n = 1$
 - c. η ενέργεια ενός εκπεμπόμενου φωτονίου ισούται με τη διαφορά ενέργειας των δύο καταστάσεων που εμπλέκονται στην εκπομπή

Άσκηση 3.23



- Εκπέμπεται ή απορροφάται ενέργεια όταν λαμβάνουν χώρα οι ακόλουθες ηλεκτρονιακές μεταβάσεις στο υδρογόνο;
- a. από το επίπεδο ενέργειας με $n = 4$ στο $n = 2$
 - b. από μία τροχιά ακτίνας $2,12 \text{ \AA}$ σε μία τροχιά ακτίνας $8,46 \text{ \AA}$
 - c. ένα ηλεκτρόνιο προστίθεται στο ιόν H^+ και καταλήγει στο επίπεδο ενέργειας με $n = 3$

Άσκηση 3.24



- a. Να υπολογίσετε την ενέργεια ενός ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου όταν βρίσκεται στο επίπεδο ενέργειας με $n = 2$ και με $n = 6$.
- b. Να υπολογίσετε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται όταν ένα ηλεκτρόνιο μεταβαίνει από το επίπεδο με $n = 6$ στο $n = 2$.
- c. Βρίσκεται η γραμμή αυτή στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος; Εάν ναι, ποιο είναι το χρώμα της;

Άσκηση 3.25



- Έστω η μετάβαση του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου από $n = 4$ σε $n = 9$.
- a. Η ΔE για αυτή τη μετάβαση είναι θετική ή αρνητική;
 - b. Προσδιορίστε το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που σχετίζεται με αυτή τη μετάβαση.
 - c. Η ακτινοβολία απορροφάται ή εκπέμπεται;
 - d. Σε ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται;



Άσκηση 3.26

- Ποιο είναι το μήκος κύματος της ακτινοβολίας που εκπέμπεται όταν το ηλεκτρόνιο ενός ατόμου υδρογόνου μεταπίπτει από το επίπεδο ενέργειας με $n = 3$ στο επίπεδο με $n = 1$;
- Σε ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται η ακτινοβολία αυτή;

Άσκηση 3.27



➤ Να βρείτε ποια από τις παρακάτω μετακινήσεις του ηλεκτρονίου στο άτομο του υδρογόνου παράγει τη φασματική γραμμή με το μεγαλύτερο μήκος κύματος:

✓ από $n = 2$ σε $n = 1$

✓ από $n = 3$ σε $n = 2$

✓ από $n = 4$ σε $n = 3$

Άσκηση 3.28

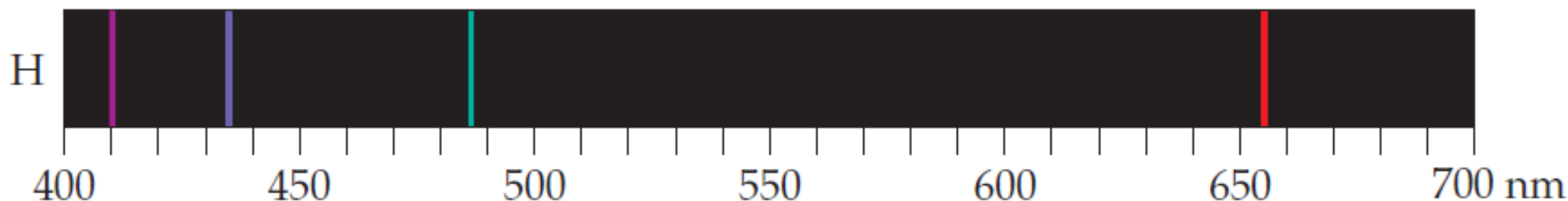


- Σε όλες τις γραμμές εκπομπής που παρατηρήθηκαν στην περιοχή του ορατού από τον Balmer ισχύει ότι $n_f = 2$. Ποια από τις ακόλουθες προτάσεις εξηγεί καλύτερα γιατί οι φασματικές γραμμές με $n_f = 3$ (σειρά Paschen) δεν παρατηρούνται στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος:
- a. οι μεταβάσεις σε $n_f = 3$ δεν είναι επιτρεπτές
 - b. οι μεταβάσεις σε $n_f = 3$ εκπέμπουν φωτόνια στο υπέρυθρο
 - c. οι μεταβάσεις σε $n_f = 3$ εκπέμπουν φωτόνια στην υπεριώδες
 - d. οι μεταβάσεις σε $n_f = 3$ εκπέμπουν φωτόνια που έχουν ακριβώς το ίδιο μήκος κύματος με τις μεταβάσεις σε $n_f = 2$.

Άσκηση 3.28



- Να υπολογίσετε τα μήκη κύματος των πρώτων τριών γραμμών στη σειρά Balmer, εκείνες δηλαδή για τις οποίες ισχύει ότι $n_i = 3, 4$ και 5 .
- Να ταυτοποιήσετε αυτές τις γραμμές στο παρακάτω φάσμα εκπομπής του ατόμου του υδρογόνου:





Άσκηση 3.29

- Μία από τις γραμμές εκπομπής του ατόμου του υδρογόνου έχει μήκος κύματος 93,07 nm.
- a. Σε ποια περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος βρίσκεται αυτή η φασματική γραμμή;
- b. Να προσδιορίσετε την αρχική και την τελική τιμή του n που σχετίζονται με αυτή την εκπομπή.

Άσκηση 3.30

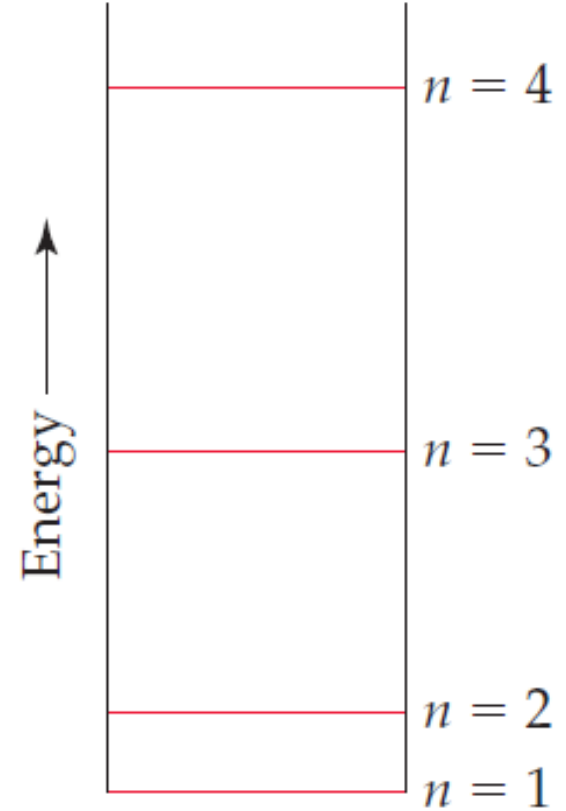


- Ταξινομήστε τις ακόλουθες μεταβάσεις στο άτομο του υδρογόνου από τη μικρότερη προς τη μεγαλύτερη με βάση τη συχνότητα της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας που απορροφάται:
- a. από $n = 3$ σε $n = 6$
 - b. από $n = 4$ σε $n = 9$
 - c. από $n = 2$ σε $n = 3$
 - d. από $n = 1$ σε $n = 2$



Άσκηση 3.31

- Ένα συγκεκριμένο κβαντομηχανικό σύστημα έχει τα επίπεδα ενέργειας που φαίνονται στο διπλανό διάγραμμα, μαζί με τους αντίστοιχους κβαντικούς αριθμούς.
- Ποιοι κβαντικοί αριθμοί εμπλέκονται στη μετάβαση που απαιτεί την περισσότερη ενέργεια;
- Ποιοι κβαντικοί αριθμοί εμπλέκονται στη μετάβαση που απαιτεί τη λιγότερη ενέργεια;

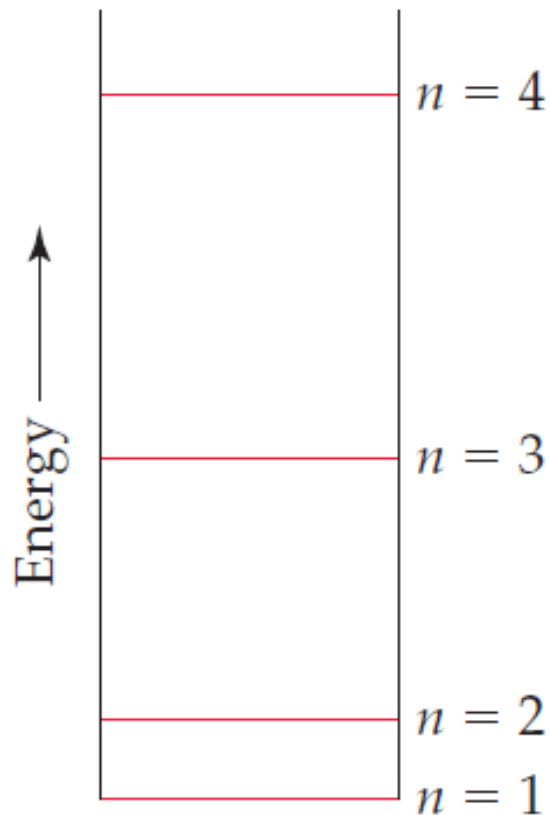


Άσκηση 3.31



➤ Με βάση το διάγραμμα, τοποθετήστε τις παρακάτω μεταβάσεις κατά σειρά αυξανόμενου μήκους κύματος της ακτινοβολίας που απορροφήθηκε κατά τη διάρκεια της μετάβασης:

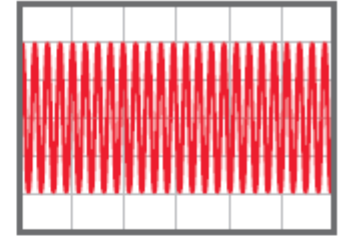
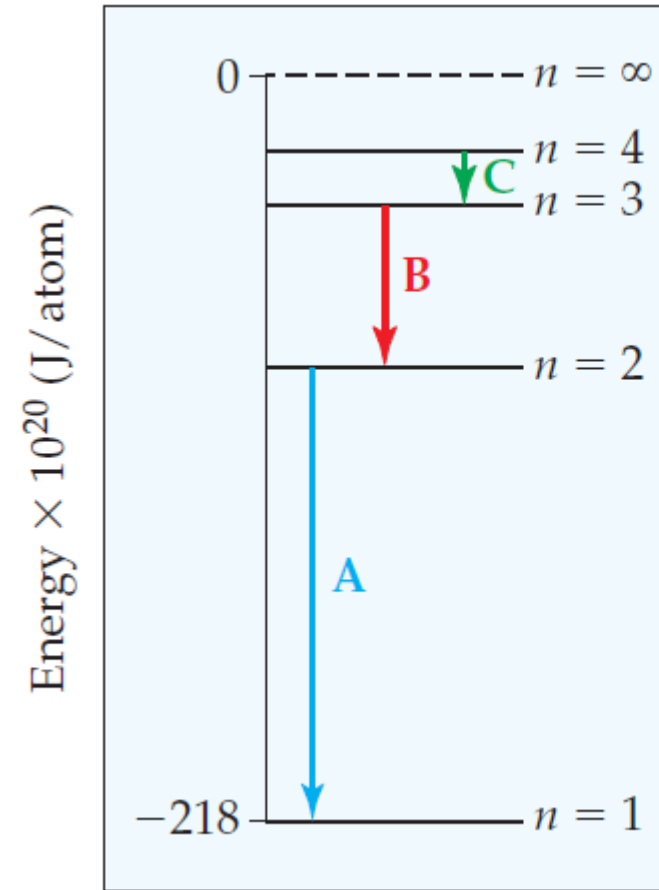
- a. από $n = 1$ σε $n = 2$
- b. από $n = 2$ σε $n = 3$
- c. από $n = 2$ σε $n = 4$
- d. από $n = 1$ σε $n = 3$.



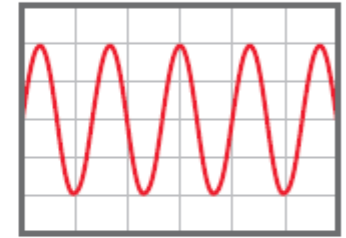


Άσκηση 3.32

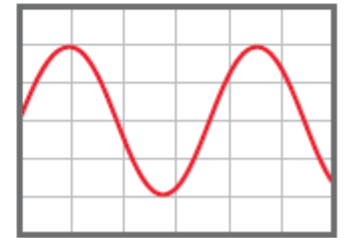
- Σε ένα άτομο υδρογόνου, έστω οι ηλεκτρονιακές μεταβάσεις A, B και C που φαίνονται στο διπλανό σχήμα.
- Στο σχήμα επίσης φαίνονται τρία ηλεκτρομαγνητικά κύματα, τα οποία έχουν όλα σχεδιαστεί στην ίδια κλίμακα.
- Κάθε κύμα αντιστοιχεί σε μία μετάβαση.



(i)



(ii)



(iii)



Άσκηση 3.32

- Ποιο ηλεκτρομαγνητικό κύμα αντιστοιχεί στη μετάβαση C;
- Με βάση το σχήμα, να υπολογίσετε την ενέργεια και το μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται σε κάθε μετάβαση.
- Ανήκει κάποια από αυτές τις μεταβάσεις στην ορατή περιοχή του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Αν ναι, ποια (ή ποιες);