



Χημεία 1^{ου} Εξαμήνου Σχολή Μεταλλειολόγων – Μεταλλουργών Μηχανικών

Ακαδημαϊκό Έτος 2025-26

Διάλεξη 3 – Κβαντική Θεωρία του Ατόμου (Μέρος 1^ο)

Η Ερώτηση:

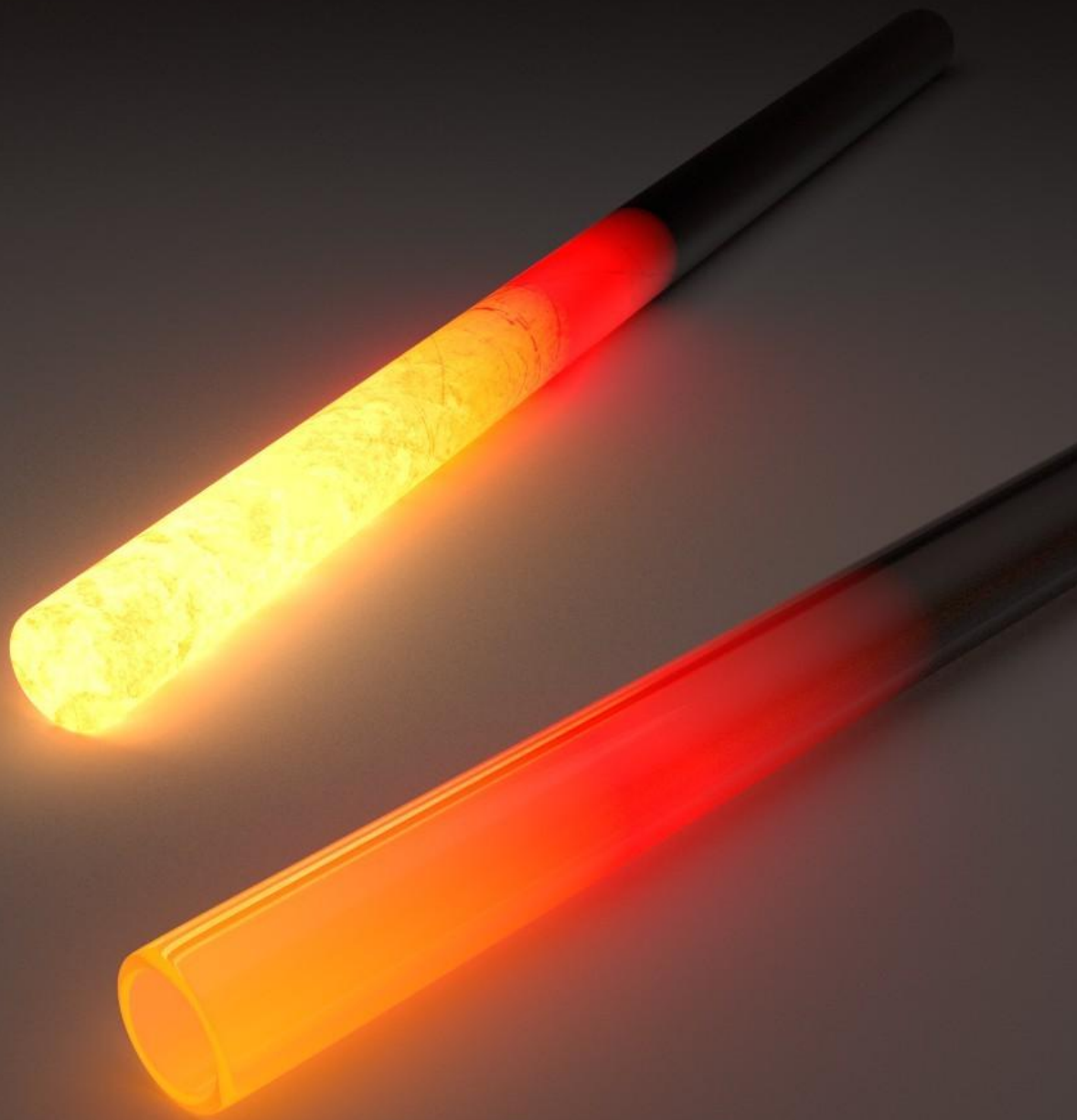
Αν το φως έχει συνεχές φάσμα, τότε πώς μπορούν να
εξηγηθούν οι διακριτές φασματικές γραμμές στα
ατομικά φάσματα;

- Πώς εξηγήθηκε το φαινόμενο της θερμικής ακτινοβολίας;
- Πώς εξηγήθηκε το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο;
- Πώς εξηγήθηκε το ατομικό φάσμα του Υδρογόνου;
- Πώς γεννήθηκε η ιδέα της κυματικής φύσης της ύλης;
- Πώς εξηγείται η αδυναμία μας να προσδιορίσουμε με ακρίβεια (αβεβαιότητα) τις ιδιότητες της ύλης στη μικροσκοπική κλίμακα;

Τι θα χρειαστούμε για να απαντήσουμε;

Κάθε μια από τις απαντήσεις που δώσαμε περιείχε ένα κομμάτι του παζλ που μας επέτρεψε να εξηγήσουμε τα ατομικά φάσματα μέσα από ένα επαναστατικό πλαίσιο ιδεών που άλλαξε τη άποψη μας για τον κόσμο.

Θερμική Ακτινοβολία και Κβάντα (Quanta)

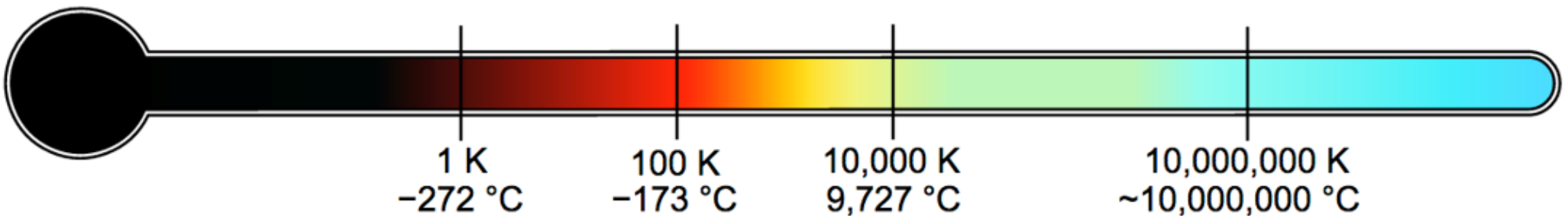


**Ποιο κομμάτι
μετάλλου
θεωρείτε ότι είναι
θερμότερο;**



- Η εκπομπή φωτός από ένα θερμό σώμα ονομάζεται θερμική ακτινοβολία σώματος (Thermal Radiation, Heat Radiation or Incandescence). Όλα τα στερεά σώματα σε θερμοκρασίες μεγαλύτερες από 0 K εκπέμπουν θερμική ακτινοβολία.
- Ο όρος «μέλαν σώμα» (black body) χρησιμοποιείται για να περιγράψει έναν ιδανικό πομπό θερμικής ακτινοβολίας. Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από ένα τέτοιο σώμα **εξαρτάται αποκλειστικά από τη θερμοκρασία του και όχι από τη χημική του σύσταση**.
- Ένα μέλαν σώμα όχι μόνο εκπέμπει θερμική ακτινοβολία αλλά απορρόφα κιόλας με ιδανικό τρόπο, όλη την ακτινοβολία που προσπίπτει σε αυτόν και, για τον λόγο αυτό, εμφανίζεται μαύρο.

Temperature of
objects at which
this radiation is the
most intense
wavelength emitted

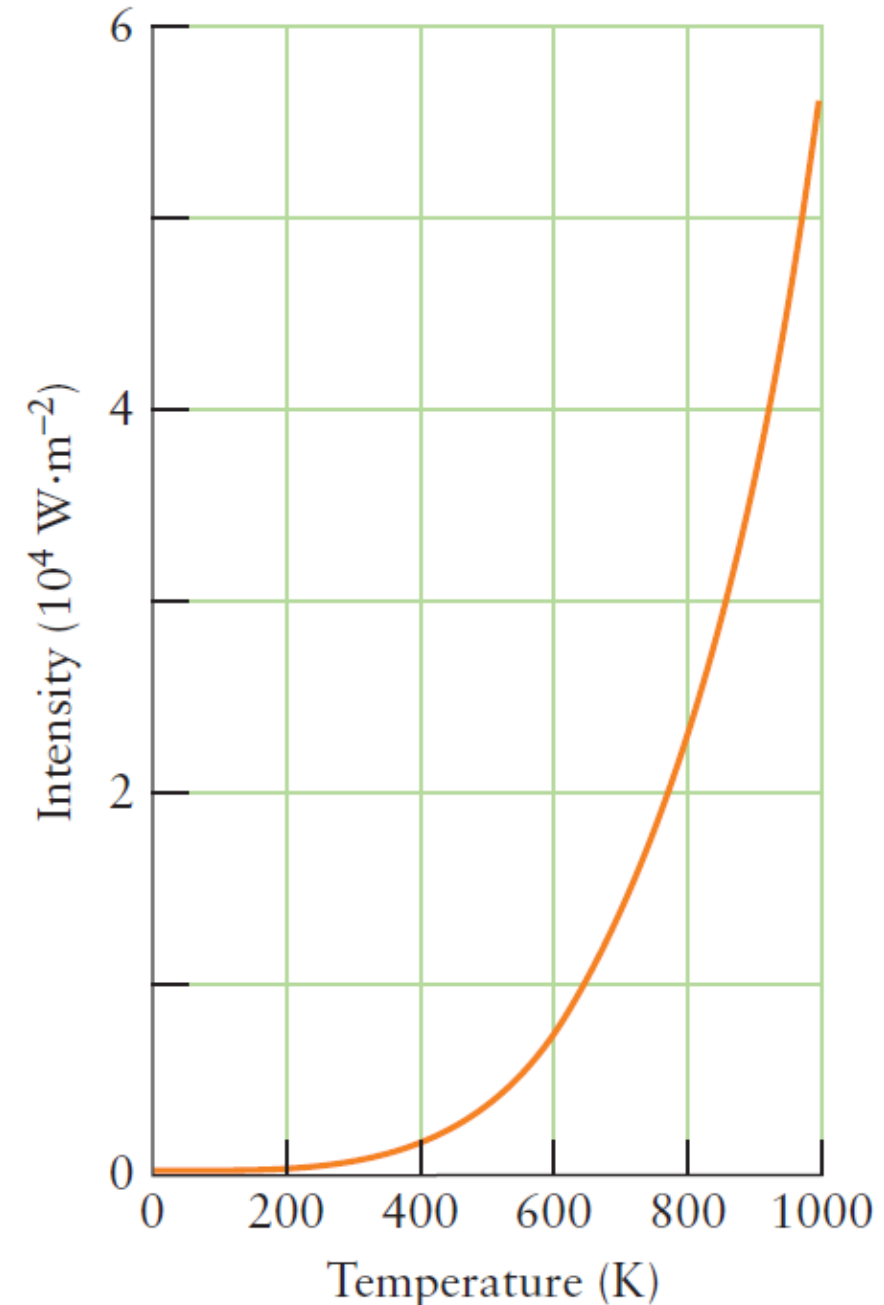


Το πρόβλημα της θερμικής ακτινοβολίας

- Το 1879, ο **Josef Stefan** μελέτησε την αύξηση της φωτεινότητας ενός μέλανος σώματος καθώς αυτό θερμαίνεται και ανακάλυψε ότι η ολική ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπεται σε όλα τα μήκη κύματος αυξάνεται με την τέταρτη δύναμη της απόλυτης θερμοκρασίας. Αυτή η ποσοτική σχέση είναι σήμερα γνωστή ως νόμος **Stefan-Boltzmann** και συνήθως γράφεται ως εξής:

$$\text{Όλική Ένταση Ακτινοβολίας} = \text{Σταθερά} \times T^4 \quad (3.1)$$

- Εφαρμόζοντας τις αρχές της κλασικής φυσικής πρόκυπτε ότι η ακτινοβολία από ένα μέλαν σώμα θα παραγόταν σε όλες τις συχνότητες, με την ένταση της να αυξάνεται, όσο η συχνότητα γίνεται μεγαλύτερη.
- Το πρόβλημα ονομάστηκε **υπεριώδης καταστροφή (ultraviolet catastrophe)**: κάθε θερμό σώμα θα εξέπεμπε έντονη υπεριώδη ακτινοβολία, ακόμη και ακτίνες X και γ. Ακόμη και το ανθρώπινο σώμα στους 37 °C θα έλαμπε στο σκοτάδι. Στην πραγματικότητα, δεν θα υπήρχε καθόλου σκοτάδι.



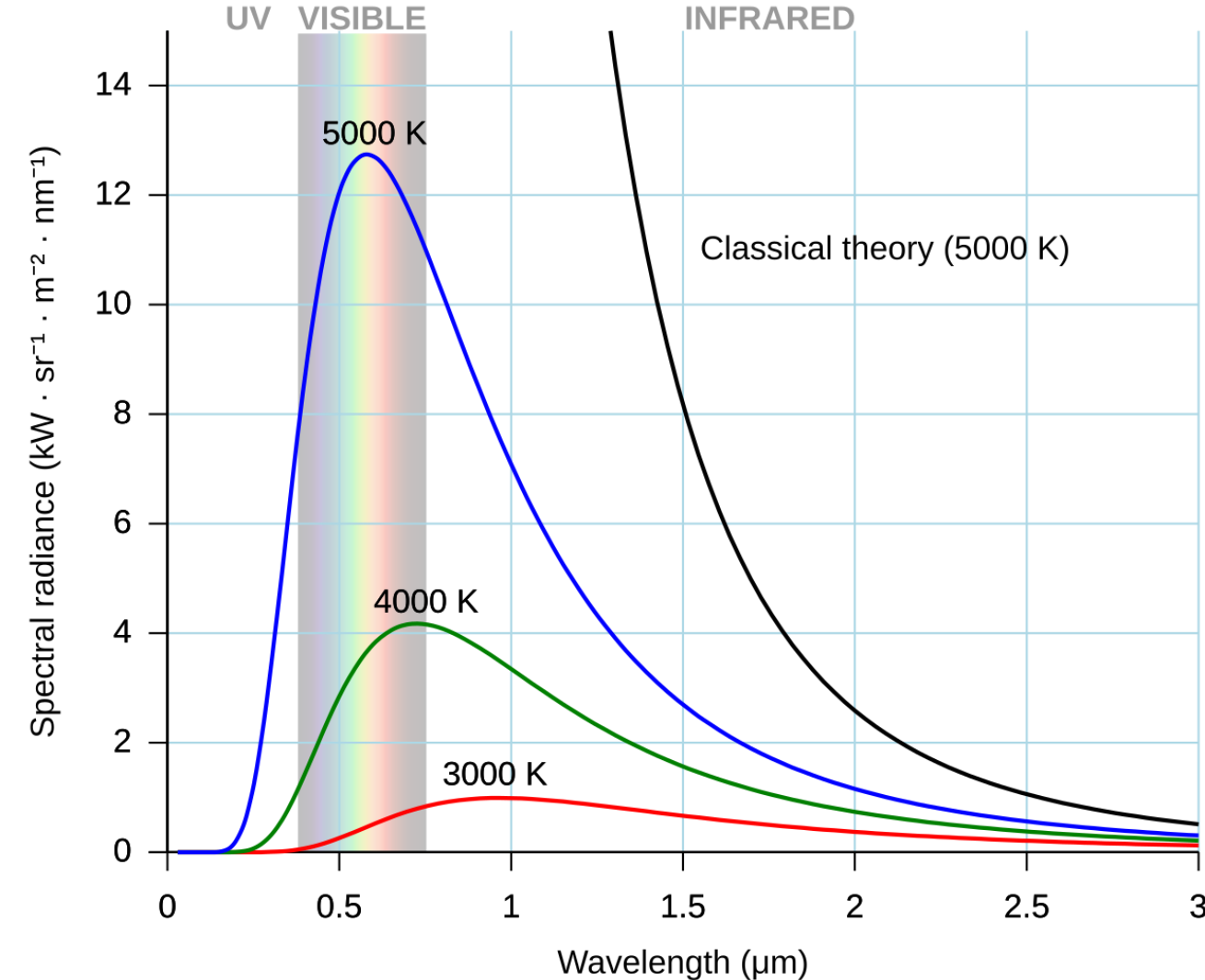
Η Λύση του Προβλήματος της Θερμικής Ακτινοβολίας

- Η πρόταση που έλυσε το πρόβλημα διατυπώθηκε το 1900 από τον Γερμανό φυσικό **Max Planck** που πρότεινε ότι η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ύλης και ακτινοβολίας πραγματοποιείται σε **κβάντα (quanta)**, δηλαδή σε «πακέτα» ενέργειας και όχι συνεχώς.
- Ο Planck σκέφτηκε ατομικά. Αναρωτήθηκε: **τι πιθανώς συμβαίνει στα θερμά, ταχέως ταλαντευόμενα ηλεκτρόνια και άτομα του μέλανος σώματος;** Η κεντρική του ιδέα ήταν ότι ένα φορτισμένο σωματίδιο, το οποίο ταλαντώνεται με συχνότητα ν , μπορεί να ανταλλάσσει ενέργεια με το περιβάλλον του παράγοντας ή απορροφώντας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μόνο σε διακριτά πακέτα ενέργειας συγκεκριμένου μεγέθους:

$$E = h\nu \quad (3.2)$$

- Η σταθερά h , που σήμερα ονομάζεται σταθερά του Planck, έχει τιμή $6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Αν το ταλαντούμενο άτομο απελευθερώσει ένα πακέτο ενέργειας μεγέθους E προς το περιβάλλον, τότε θα ανιχνευθεί ακτινοβολία με συχνότητα

$$\nu = \frac{E}{h}$$



- Το ερυθρό φως έχει τη χαμηλότερη συχνότητα από όλες τις συχνότητες της ορατής ακτινοβολίας. Επειδή η ενέργεια ενός κβάντου ακτινοβολίας είναι ανάλογη της συχνότητάς της, το κόκκινο φως μεταφέρει τη μικρότερη ποσότητα ενέργειας μέσα στο ορατό φάσμα. Έτσι, όταν ένα σώμα θερμανθεί τόσο ώστε να αρχίσει να εκπέμπει φως, μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας του αντιστοιχεί στη χαμηλότερη ενεργειακά μορφή ορατής ακτινοβολίας.
- Καθώς το σώμα θερμαίνεται περισσότερο, εκπέμπει περισσότερο φως σε υψηλότερες συχνότητες, ενώ εξακολουθεί να εκπέμπει και σε χαμηλότερες. Εφόσον πλέον εκπέμπονται όλα τα χρώματα του ορατού φάσματος, το πυρακτωμένο σώμα φαίνεται λευκό.
- Επιπλέον, η υπόθεση του Πλανκ προβλέπει μείωση της έντασης της ακτινοβολίας στις πολύ υψηλές συχνότητες, κάτι που συμφωνεί με τα πειραματικά αποτελέσματα.

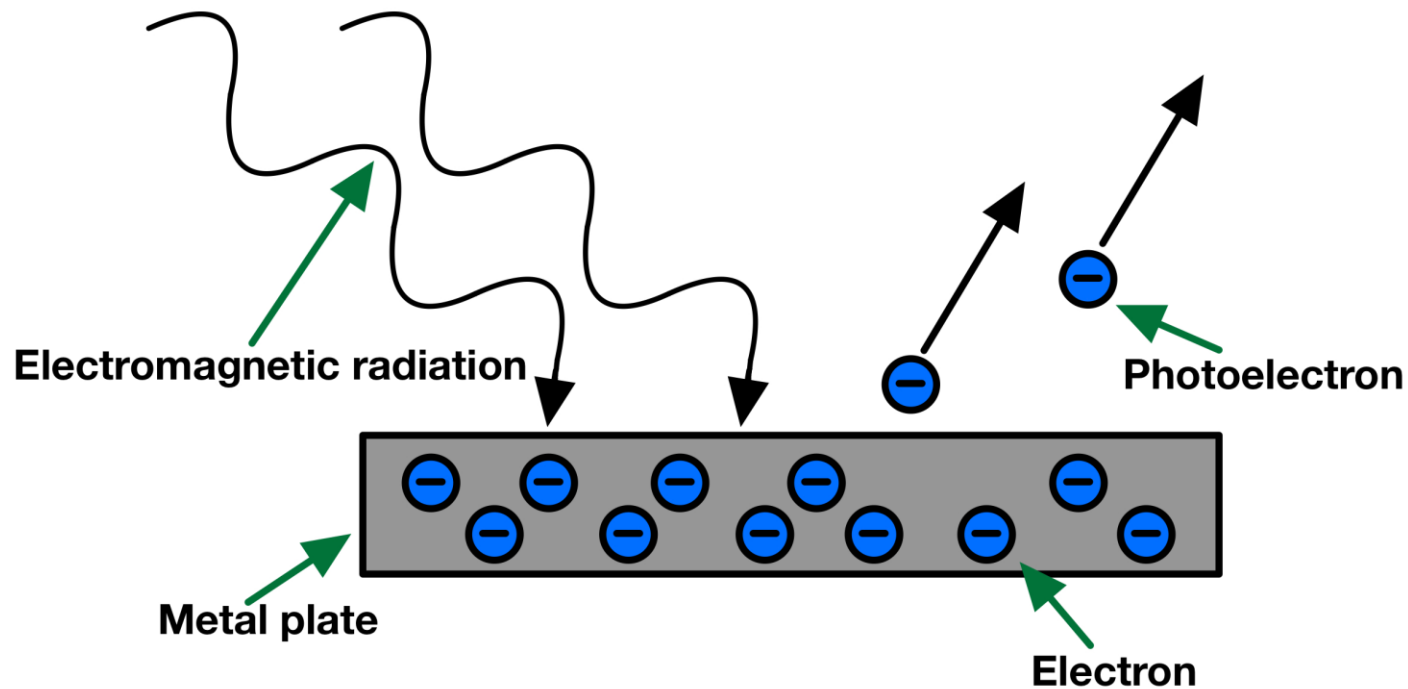
Κεντρική Ιδέα No.1

Η ανταλλαγή ενέργειας μεταξύ ύλης και ακτινοβολίας λαμβάνει χώρα σε κβάντα (Quanta) ή πακέτα ενέργειας που είναι ανάλογα της συχνότητας της ακτινοβολίας.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και Φωτόνια



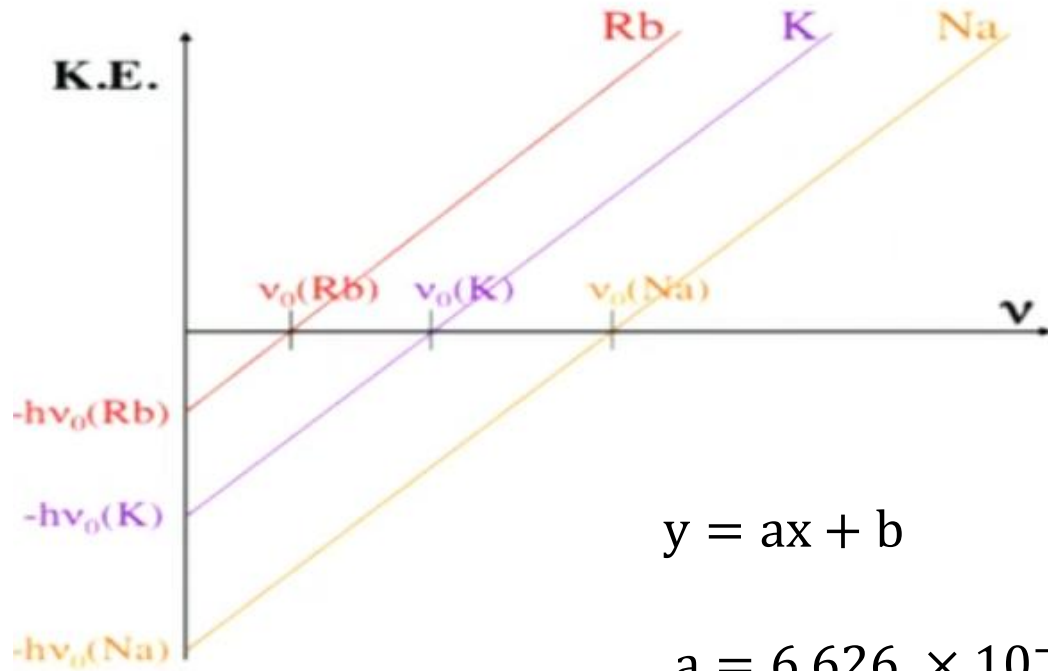
Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο



- Όταν ακτίνες φωτός (H/M ακτινοβολία) πέφτουν πάνω σε μια μεταλλική πλάκα, τότε η πλάκα μπορεί να εκπέμψει e^- .
- Η εκπομπή του ηλεκτρονίου γίνεται μόνο όταν η συχνότητα ν της ακτινοβολίας ξεπεράσει μια οριακή τιμή ν_0 .
- Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκτινάσσονται αυξάνεται γραμμικά με τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

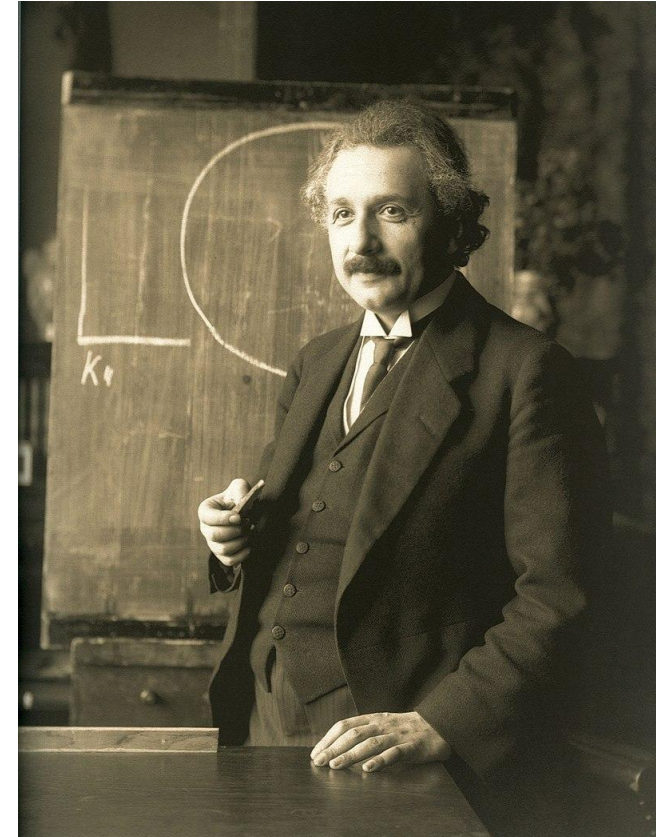
Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Κινητική Ενέργεια (Κ.Ε.) – Συχνότητα για διαφορετικά μέταλλα



$$y = ax + b$$

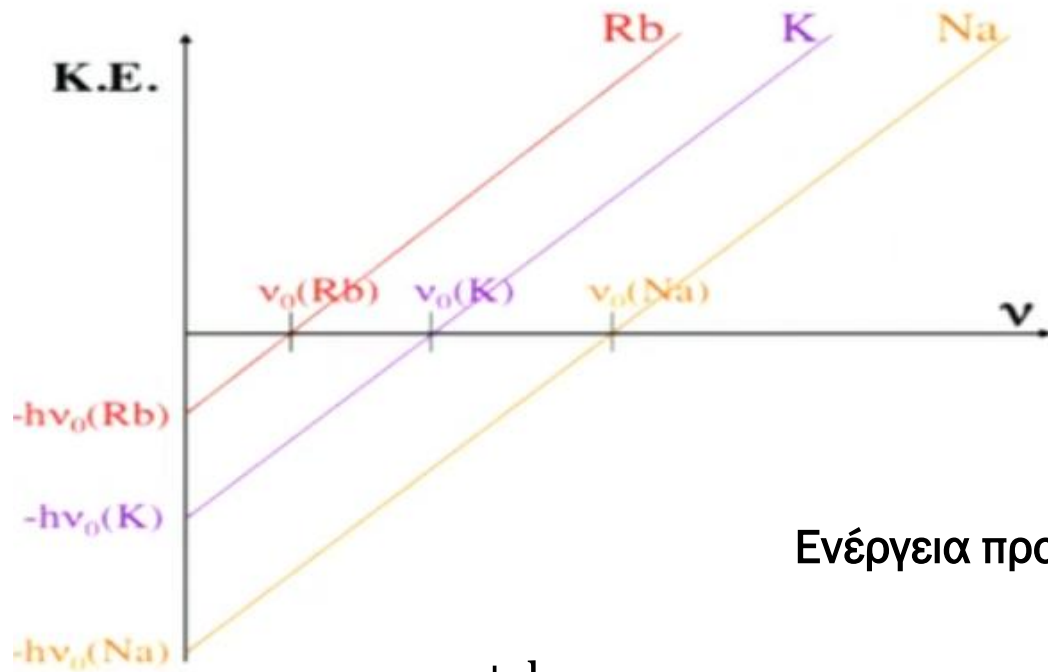
$$a = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$



Einstein: “Η τιμή της κλίσης είναι ίση με τη σταθερά του Planck!”

Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Κινητική Ενέργεια (Κ.Ε.) – Συχνότητα για διαφορετικά μέταλλα



$$y = mx + b$$

$$a = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

$$b = -h\nu_0$$

$$y = ax + b$$

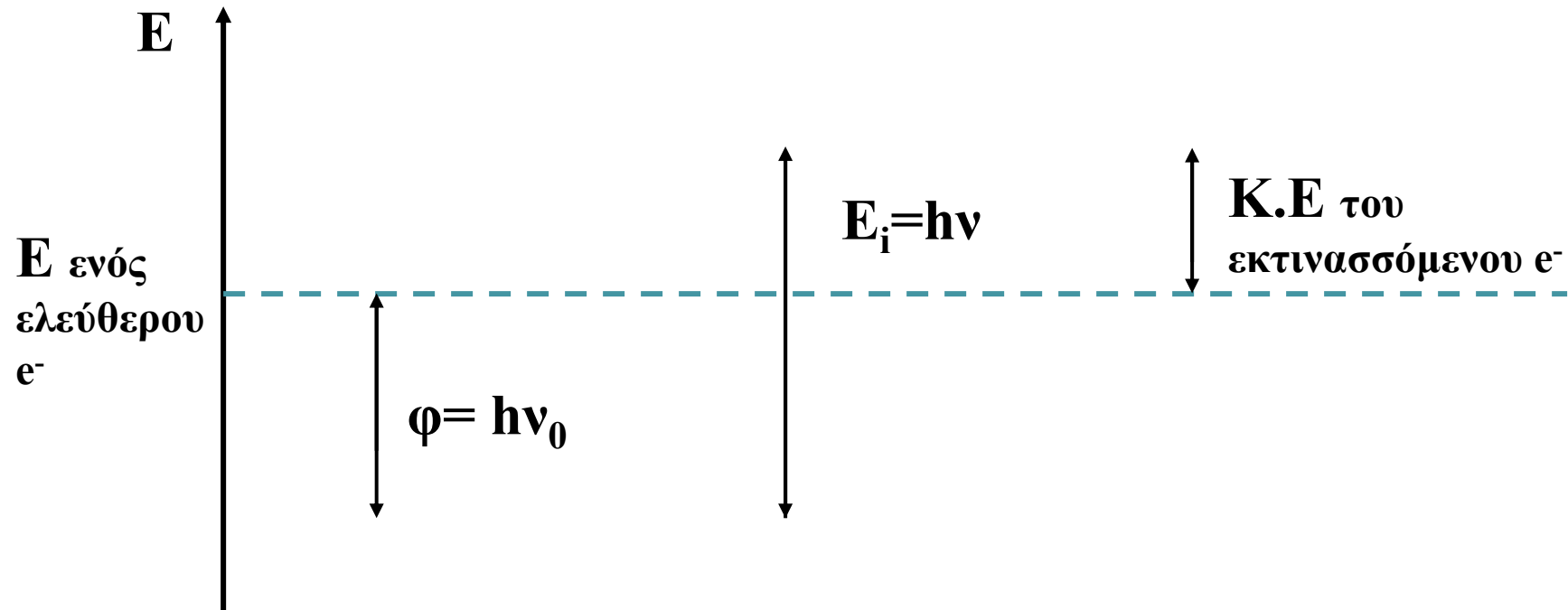
$$\text{K.E.} = h\nu - h\nu_0$$

Ενέργεια προσπίπτουσας ακτινοβολίας, E_i

Οριακή Ενέργεια ή
Συνάρτηση Έργου
(work function, ϕ)

Μια νέα επαναστατική ιδέα: Φωτόνια

Η ενέργεια ενός εισερχόμενου φωτονίου (E_i) πρέπει να είναι $\geq$ της συνάρτησης έργου ϕ , προκειμένου να εκτιναχθεί ένα e^- . Η επιπλέον ενέργεια θα είναι η κινητική ενέργεια του εκτινασσόμενου e^- .



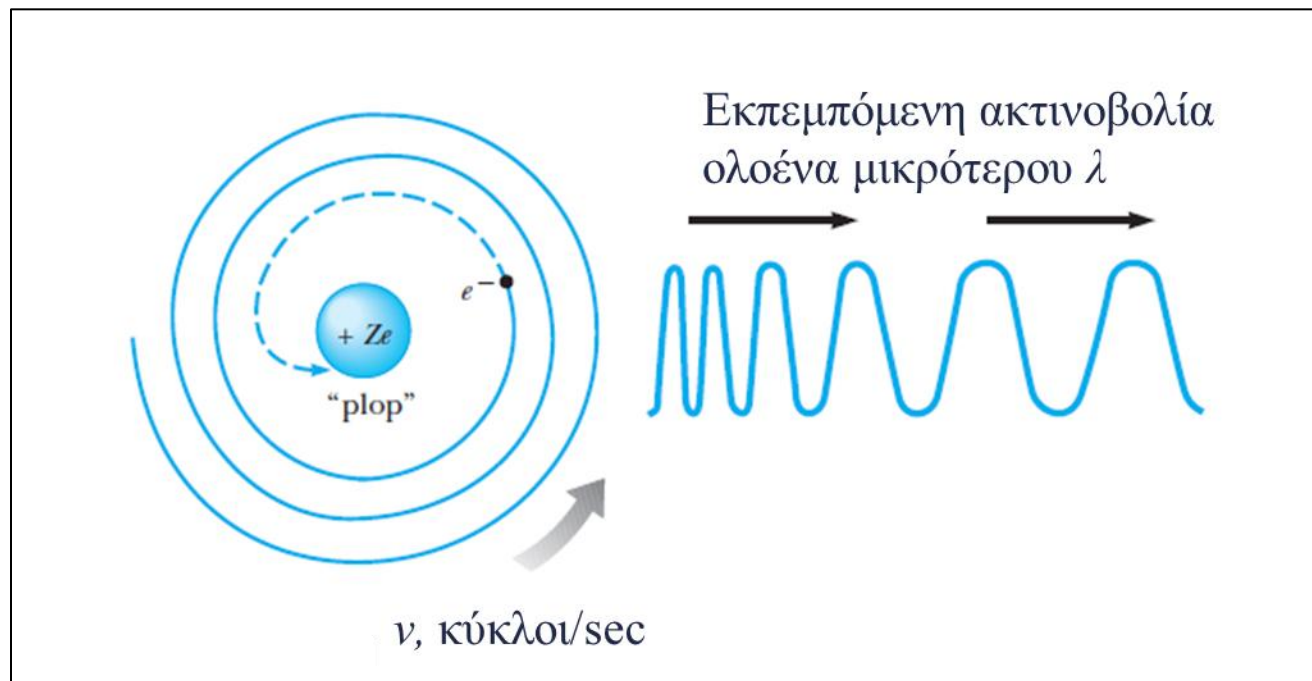
- Η ερμηνεία του Einstein είναι όμορφη και την ίδια στιγμή ριζοσπαστική. Φαντάστηκε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ως μια δέσμη από σωματίδια, τα οποία ονόμασε φωτόνια (photons). Κάθε φωτόνιο της δέσμης είναι ένα μικρό πακέτο ενέργειας με τιμή $E=h\nu$.
- Το φωτόνιο είναι ένα άυλο σωματίδιο, ένα κβάντο του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου και φορέας της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης.

Κεντρική Ιδέα No.2

Η Η/Μ ακτινοβολία στην αλληλεπίδραση της με την ύλη συμπεριφέρεται σαν σωματίδιο. Το στοιχειώδες σωματίδιο της Η/Μ ακτινοβολίας ονομάζεται φωτόνιο και είναι ένα μικρό πακέτο ενέργειας με τιμή $E=h\nu$.

Μοντέλο Bohr για το άτομο του H – Η πρώτη κβαντική απόπειρα

Μια νέα απρόβλεπτη συνέπεια από τη δομή των ατόμων



- Οι Thomson και Rutherford συνειδητοποίησαν ότι τα ηλεκτρόνια πρέπει κάπως να περιστρέφονται γύρω από τον πυρήνα για να μην πέσουν σε αυτόν.
- Σύμφωνα με τη κυματική θεωρία του Maxwell, επιταχυνόμενα φορτία που περιστρέφονται με την τροχιακή συχνότητα ν , θα πρέπει να ακτινοβολούν φως συχνότητας ν . Αν ωθήσουμε αυτό το συλλογισμό στο λογικό του συμπέρασμα, το κλασικό μοντέλο οδηγεί στην καταστροφή. Η ύλη δεν θα έπρεπε να υπάρχει!

Enter Niels Bohr



Niels Henrik David Bohr
(October 1885 - November 1962)

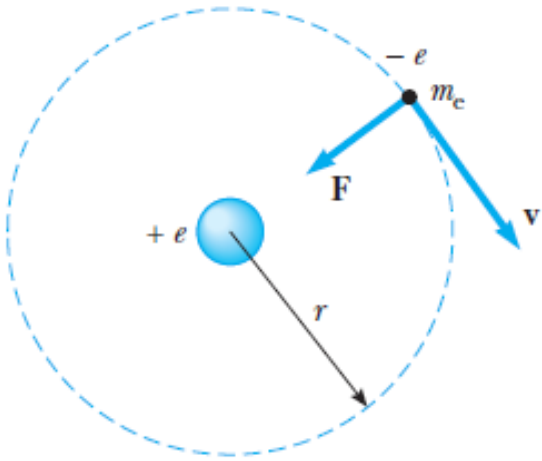
Ξεχάστε την κλασική κυματική θεωρία! Δεν ισχύει στην ατομική κλίμακα. Η θεωρία της ατομικής κλίμακας είναι αυτή των Planck και Einstein!

Η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα άτομα που περιέχουν ηλεκτρόνια φαίνεται να παίρνει διακριτές τιμές – γι' αυτό και έχουμε διακριτό φάσμα. Άρα η ενέργεια των ηλεκτρονίων πρέπει να μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές.

Σύμφωνα με τις παρατηρήσεις, αξιωματικά, ορίζουμε ότι τα e^- βρίσκονται σε στάσιμες κυκλικές τροχιές γύρω από τον πυρήνα. Οι στάσιμες τροχιές αυτές αντιστοιχούν σε συγκεκριμένες ενεργειακές καταστάσεις/στάθμες.

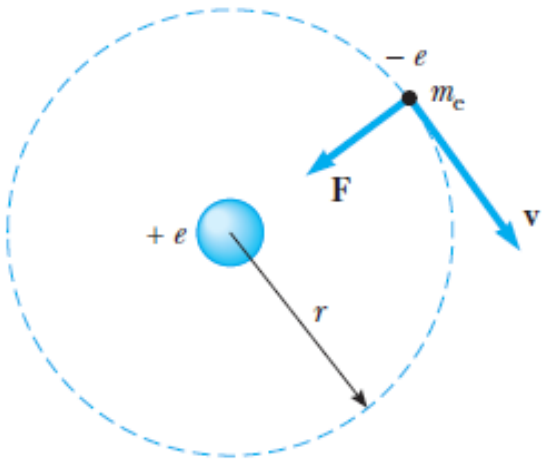
Εκπομπή φωτός έχουμε όταν ένα e^- μεταβαίνει από μια τροχιά υψηλής, σε μια τροχιά χαμηλής ενέργειας. Αν η διαφορά ενέργειας των δύο σταθμών είναι E , εκπέμπεται φωτόνιο ενέργειας $E=h\cdot\nu$.

Τα 4 Αξιώματα Bohr



1. Το e^- κινείται σε κυκλικές τροχιές γύρω από το πρωτόνιο υπό την επίδραση της ελκτικής δύναμης Coulomb.
2. Μόνο ορισμένες τροχιές είναι σταθερές. Αυτές οι σταθερές τροχιές είναι εκείνες στις οποίες το e^- δεν ακτινοβολεί. Ως εκ τούτου, η ενέργεια είναι σταθερή και η συνηθισμένη κλασική μηχανική μπορεί να περιγράψει την κίνηση του e^- σε αυτές τις σταθερές τροχιές.

Τα 4 Αξιώματα Bohr



3. Ακτινοβολία εκπέμπεται από το άτομο όταν το e^- «πηδά» από μια, αρχική σταθερή τροχιά υψηλότερης ενέργειας (E_i), σε μια χαμηλότερης ενέργειας (E_f). Αυτό το «άλμα» δεν μπορεί να αντιμετωπιστεί με τα εργαλεία της κλασικής μηχανικής. Η συχνότητα του εκπεμπόμενου φωτός δίνεται από την σχέση Planck-Einstein:

$$E_i - E_f = h\nu \quad (3.3)$$

3. Το μέγεθος των επιτρεπόμενων τροχιών του e^- καθορίζεται από μια πρόσθετη κβαντική συνθήκη που επιβάλλεται στη στροφορμή του e^- : Οι επιτρεπόμενες τροχιές είναι εκείνες για τις οποίες η στροφορμή του e^- στην κίνηση του γύρω από τον πυρήνα είναι ακέραια πολλαπλάσια του μεγέθους $\hbar = h/2\pi$:

$$m_e u r = \hbar n, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (3.4)$$

Ο κόσμος του ατόμου είναι κβαντισμένος

- Η τεράστια επιτυχία του μοντέλου Bohr ήταν **κατάφερε να προσδιορίσει τις ενεργειακές στάθμες (ή τροχιές) από το κέντρο του ατόμου του υδρογόνου, πάνω στις οποίες περιστρέφεται το μοναδικό του ηλεκτρόνιο**. Αυτές είναι οι τροχιές για τις οποίες ισχύει η συνθήκη:

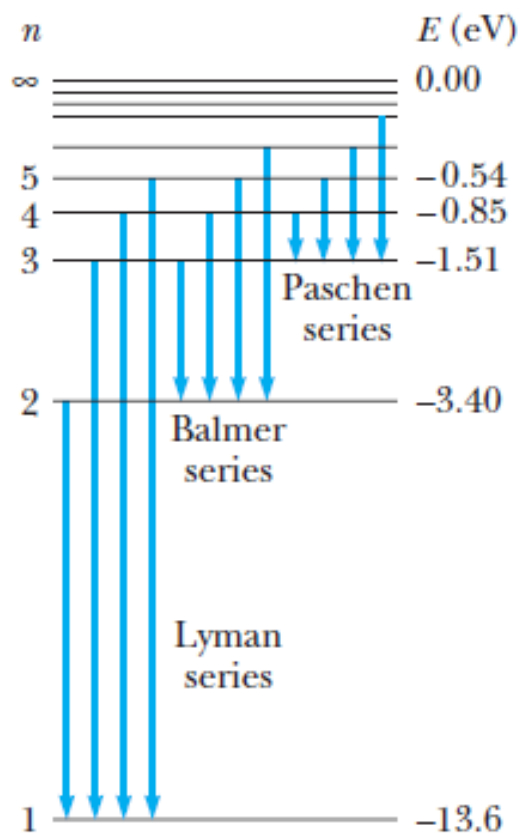
$$E_n = -\frac{ke^2}{2a_0} \left(\frac{1}{n^2} \right) \quad (3.5)$$

Όπου k η σταθερά Coulomb, e το φορτίο του ηλεκτρονίου, a_0 η ακτίνα Bohr και $n = 1, 2, 3, \dots$ θετικός ακέραιος.

- Η ακτίνα Bohr είναι η μικρότερη απόσταση του ηλεκτρονίου από τον πυρήνα για την οποία μπορεί να ισχύει η κβαντική συνθήκη (4^ο Αξίωμα) που απαιτεί $m_e v r = \hbar n$. Η τιμή της ακτίνας Bohr είναι ίση με:

$$a_0 = \frac{\hbar}{m_e k e^2} = 0.0529 \text{ nm} \quad (3.6)$$

Ο κόσμος του ατόμου είναι κβαντισμένος

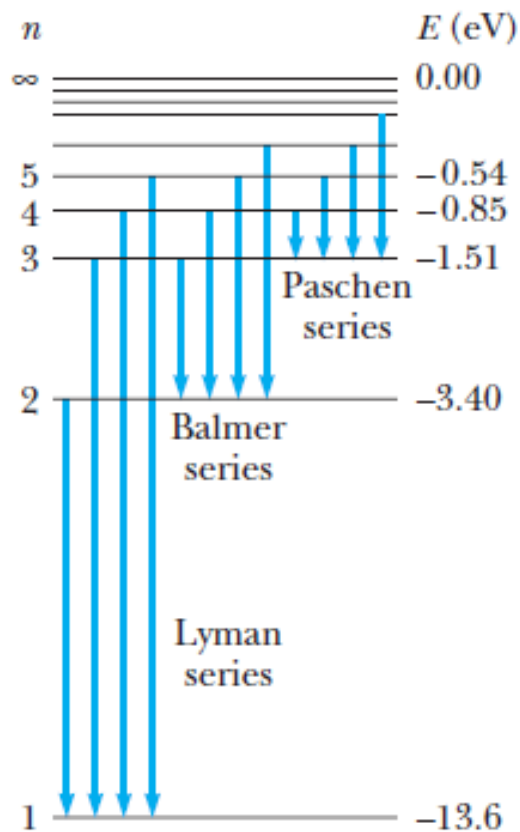


- Οι ακέραιοι n που αντιστοιχούν στις διακριτές ή κβαντισμένες τιμές της ενέργειας του ατόμου έχουν το ειδικό όνομα **κβαντικοί αριθμοί (quantum numbers)**. Οι κβαντικοί αριθμοί είναι κεντρικοί στην κβαντική θεωρία και γενικά αναφέρονται στο σύνολο των ακεραίων που επισημαίνουν τις διακριτές τιμές σημαντικών ατομικών μεγεθών, όπως η ενέργεια και η γωνιακή ορμή.
- Αν αντικαταστήσουμε με αριθμητικές τιμές στην (3.5), τότε θα έχουμε:

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

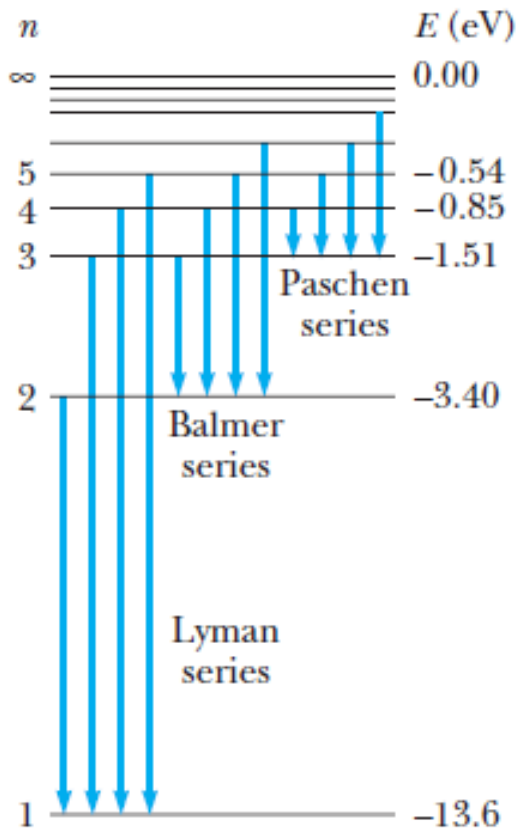
- Το αρνητικό πρόσημο έχει φυσική σημασία – περιγράφει ένα σύστημα δεσμευμένου e^- . Ενέργεια πρέπει να δοθεί για να **απομακρυνθεί** το e^- από την επίδραση του πυρήνα.
- Η χαμηλότερη στάσιμη τροχιά (ή αλλιώς η χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη) ονομάζεται **θεμελιώδης κατάσταση (ground state)**, έχει $n = 1$ και έχει ενέργεια $E_1 = -13.6 \text{ eV}$. Η επόμενη ενεργειακή στάθμη ή αλλιώς η πρώτη διεγερμένη κατάσταση (**excited state**), έχει $n = 2$ και ενέργεια $E_2 = -3.4 \text{ eV}$, κλπ.

Ο κόσμος του ατόμου είναι κβαντισμένος



- Η ανώτατη ενεργειακή στάθμη αντιστοιχεί σε $n = \infty$ (ή $r = \infty$) και $E = 0$ eV, αντιπροσωπεύει την κατάσταση κατά την οποία το e^- απομακρύνεται από το άτομο και φτάνει σε ακινησία. **Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται για τον ιονισμό του ατόμου (δηλαδή για την πλήρη απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου στη θεμελιώδη κατάσταση από την ελκτική επίδραση του πρωτονίου) ονομάζεται ενέργεια ιονισμού.**
- Η ενέργεια ιονισμού για το άτομο του υδρογόνου με βάση τον υπολογισμό του Bohr είναι 13.6 eV. Αυτό αποτέλεσε ένα άλλο σημαντικό επίτευγμα για τη θεωρία του Bohr, επειδή η ενέργεια ιοντισμού για το υδρογόνο είχε ήδη μετρηθεί πειραματικά με ακρίβεια και ήταν όντως 13.6 eV.

Η εξήγηση του ατομικού φάσματος του Η



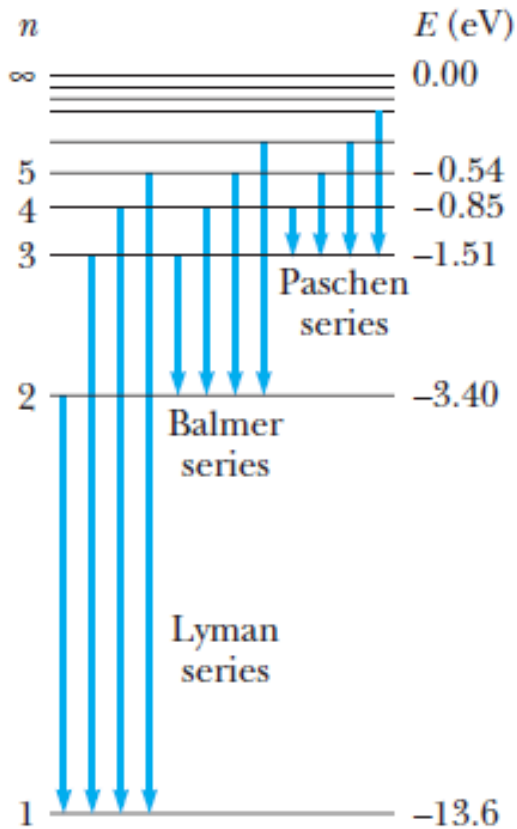
- Η εξίσωση (3.5) μαζί με την εξίσωση (3.3) (3^ο Αξίωμα του Bohr) μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον υπολογισμό της συχνότητας του φωτονίου που εκπέμπεται όταν το ηλεκτρόνιο μεταπηδά από μια εξωτερική σε μια εσωτερική τροχιά:

$$\nu = \frac{E_i - E_f}{h} = \frac{ke^2}{2a_0h} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (3.8)$$

- Αν μετατρέψουμε τη συχνότητα στην (3.8) σε μήκος κύματος χρησιμοποιώντας τη σχέση $c = \nu\lambda$ θα έχουμε:

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{ke^2}{2a_0hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (3.9)$$

Η εξήγηση του ατομικού φάσματος του Η



- Η (3.9) έχει μια εντυπωσιακή ομοιότητα με τη γενική μορφή της εμπειρικής σχέσης του Balmer (3.10):

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{ke^2}{2a_0hc} \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad (3.9)$$

$$\nu = \mathcal{R} \left\{ \frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_2^2} \right\}, n_1 = 1, 2, \dots, \quad n_2 = n_1 + 1, n_1 + 2, \dots \quad (3.10)$$

- Υπό τον όρο ότι ο συνδυασμός των σταθερών $ke^2/(2a_0hc)$ είναι ίσος με την πειραματικά προσδιορισμένη σταθερά Rydberg, $\mathcal{R}$.
- Ο Bohr έδειξε τη συμφωνία αυτών των δύο ποσοτήτων με ακρίβεια περίπου 1% στα τέλη του 1913. Αυτό αναγνωρίστηκε ως το κορυφαίο επίτευγμα της κβαντικής του θεωρίας για το υδρογόνο.
- Επιπλέον, έδειξε ότι όλες οι παρατηρούμενες φασματικές σειρές για το Η έχουν μια φυσική ερμηνεία στη θεωρία του.

Κεντρική Ιδέα No.3

Τα e^- γύρω από τον πυρήνα μπορούν να βρίσκονται μόνο σε συγκεκριμένες αποστάσεις (κβαντική συνθήκη) και δεν μπορούν να πάρουν οποιαδήποτε θέση. Οι αποστάσεις αυτές συνδέονται με συγκεκριμένες ενέργειες για τα ηλεκτρόνια, είναι δηλαδή ενεργειακές στάθμες. Σε αυτές τα e^- δεν εκπέμπουν ακτινοβολία. Η μετάβαση από μια στάθμη υψηλότερης σε μια χαμηλότερης ενέργειας οδηγεί σε εκπομπή ακτινοβολίας $E_i - E_f = h\nu$.

Σωματιδιακή φύση Φωτός – Κυματική φύση της Ύλης

Οι επιτυχίες και οι αποτυχίες του Bohr

Τι κατάφερε;

Εξήγησε πλήρως το ατομικό φάσμα του H και γιατί φαίνονται λιγότερες γραμμές στο φάσμα απορρόφησης του σε σχέση με το φάσμα εκπομπής.

Εξήγησε την εκπομπή ακτίνων X από τα άτομα και την πυρηνική προέλευση των σωματιδίων β.

Εξήγησε τις χημικές ιδιότητες των ατόμων με βάση το μοντέλο του ηλεκτρονιακού κελύφους.

Εξήγησε πώς τα άτομα συνδέονται για να σχηματίσουν μόρια.

Τι δεν κατάφερε;

Δεν προβλέπει τις παρατηρούμενες εντάσεις των φασματικών γραμμών για το H.

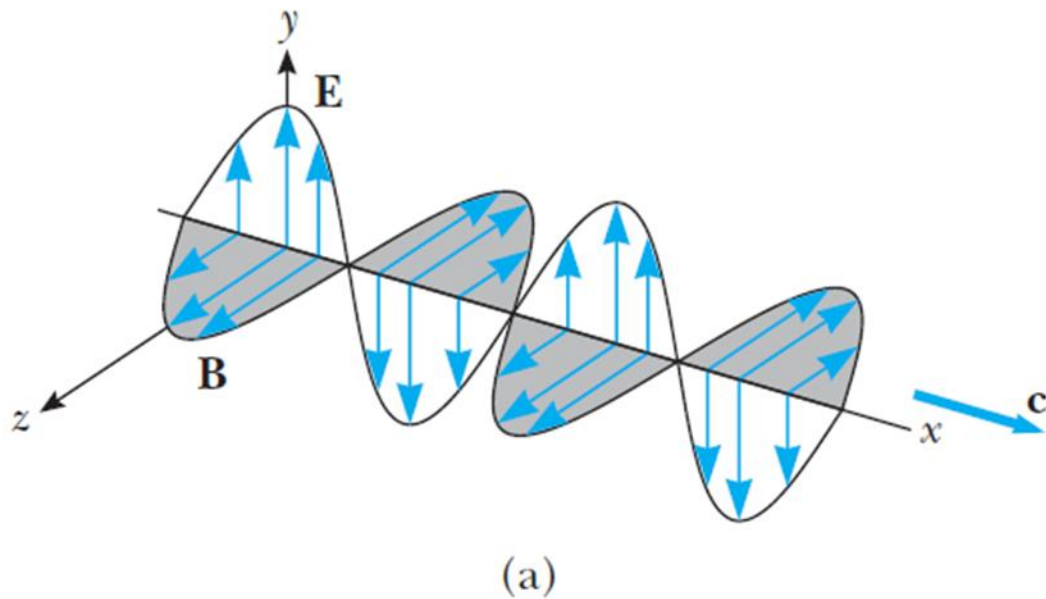
Είχε περιορισμένη μόνο επιτυχία στην πρόβλεψη των μηκών κύματος εκπομπής και απορρόφησης για άτομα πολλαπλών ηλεκτρονίων.

Δεν κατάφερε να δώσει μια εξίσωση κίνησης που να διέπει τη χρονική ανάπτυξη των ατομικών συστημάτων ξεκινώντας από μια αρχική κατάσταση.

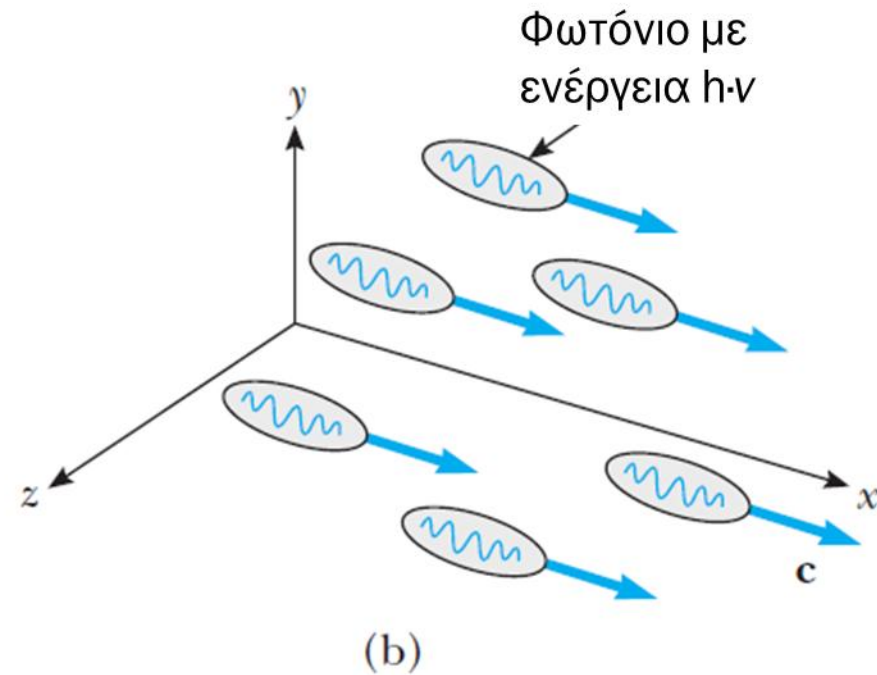
Αφήνει ακόμη αναπάντητο το ερώτημα πώς η σωματιδιακή ύλη μπορεί να εκπέμπει H/M ακτινοβολία.

Το Φως έχει ορμή – Πείραμα Compton

Κλασική Θεώρηση Η/Μ ακτινοβολίας



Απεικόνιση φωτονίου του Einstein



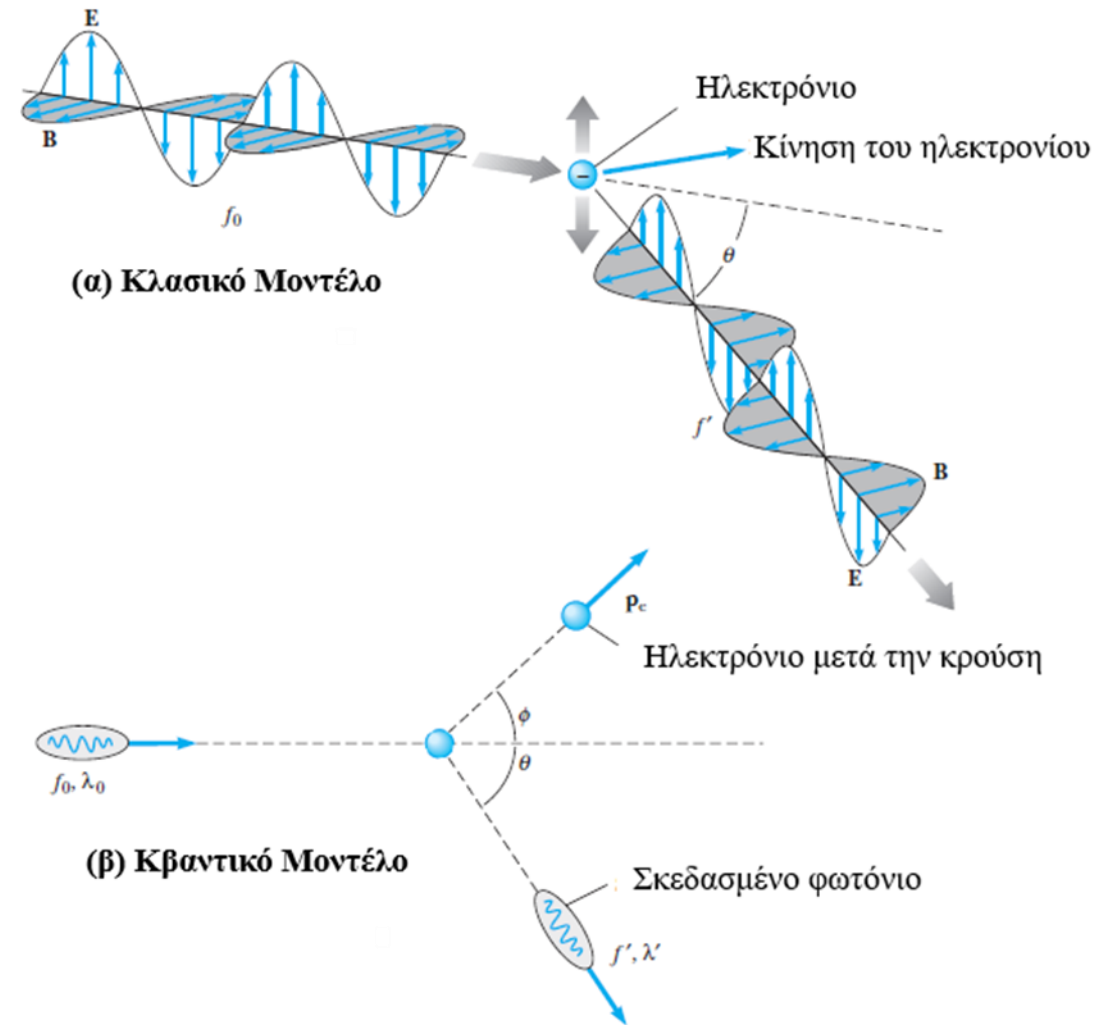
Αν το φως έχει πράγματι σωματιδιακές ιδιότητες, τότε θα πρέπει να έχει ορμή.

Το Φως έχει ορμή – Πείραμα Compton

- Ο Einstein έδειξε σε μια άλλη επιστημονική εργασία του ότι ένα φωτόνιο ενέργειας E κινείται προς μια μόνο κατεύθυνση και φέρει ορμή παράλληλη με τη κατεύθυνση διάδοσης του που δίνεται από τη σχέση:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} \xrightarrow{c=\lambda\nu} p = \frac{h}{\lambda} \quad (3.11)$$

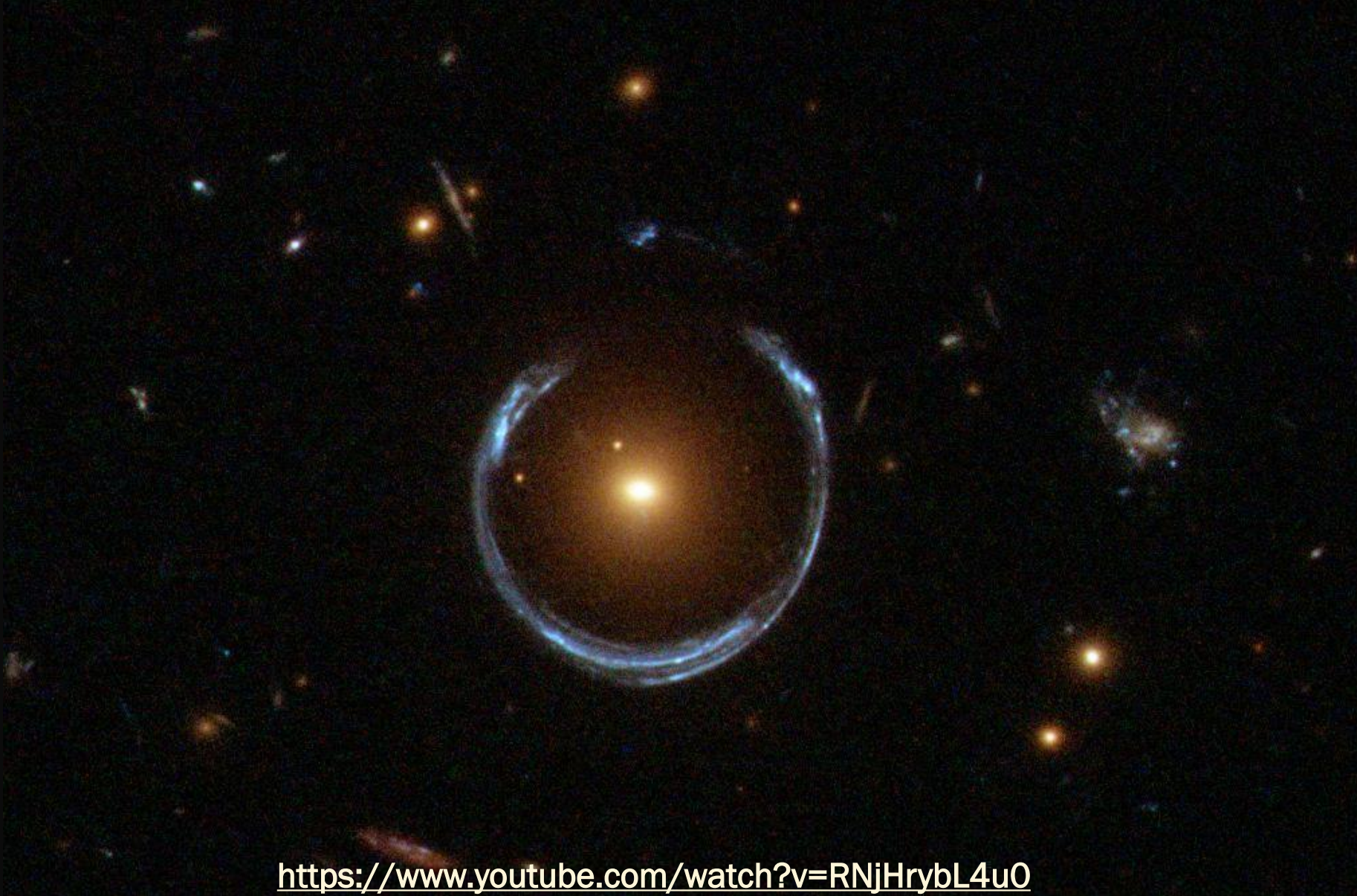
- Το 1923 οι **Peter Debye (1884–1966)** και **Arthur Holly Compton (1892–1962)** ανακαλύπτουν ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο ότι η σκέδαση φωτονίων Ακτινών Χ από ηλεκτρόνια μπορεί να ερμηνευτεί πειραματικά μόνο αν θεωρήσουμε τα φωτόνια ως σημειακά σωματίδια με ορμή $h\nu/c$.



Συνέπειες Πειράματος Compton

1. Το φαινόμενο Compton παρείχε αδιάσειστες αποδείξεις ότι όταν το φως αλληλοεπιδρά με την ύλη συμπεριφέρεται πράγματι σαν αποτελείται από σωματίδια με ενέργεια $h\nu$ και ορμή h/λ . **Εγκαταλείπουμε ΓΙΑ ΠΑΝΤΑ την ιδέα ότι μπορούμε να εξηγήσουμε τη συμπεριφορά του φωτός σύμφωνα με τις αισθητηριακές μας ικανότητες. Το φως συμπεριφέρεται ΚΑΙ σαν κύμα ΚΑΙ σαν σωματίδιο ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες και τι θέλουμε να υπολογίσουμε κάθε φορά.**
2. Ωστόσο, η ίδια η επιτυχία του πειράματος Compton εγείρει πολλά ερωτήματα.
 - Αν το φωτόνιο είναι σωματίδιο, ποια μπορεί να είναι η έννοια της «συχνότητας» και του «μήκους κύματος» του σωματιδίου, που καθορίζουν την ενέργεια και την ορμή του;
 - Αν και τα φωτόνια έχουν μηδενική μάζα, υπάρχει πιθανότητα ως σωματίδια να υφίστανται την έλξη της βαρύτητας;
 - Ποια είναι η χωρική έκταση ενός φωτονίου και πώς ένα ηλεκτρόνιο απορροφά ή σκεδάζει ένα φωτόνιο;

Βαρυτικοί φακοί – Gravitational Lensing (Einstein Rings)



<https://www.youtube.com/watch?v=RNjHrybL4u0>

Η υπόθεση De Broglie



Louis Victor Pierre
Raymond,
7th Duc de Broglie
(1892-1987)

- Πώς μπορεί να φανταστεί κανείς το γεγονός ότι επιτρέπονται μόνο ορισμένες ενέργειες κατά την περιφορά των ηλεκτρονίων γύρω από τον πυρήνα;
- Γιατί όλα τα άτομα του ίδιου στοιχείου να έχουν ακριβώς τις ίδιες φυσικές ιδιότητες, ανεξάρτητα από τις πρακτικά άπειρες συνθήκες αρχικής ταχύτητας και θέσης των ηλεκτρονίων σε κάθε άτομο;

Η Υπόθεση: Αν αντιμετωπίσουμε τα υλικά σωματίδια ως κύματα, τότε τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να ερμηνευτούν με κομψό τρόπο ως φαινόμενα συμβολής κυμάτων.

“... επειδή τα φωτόνια έχουν κυματικά και σωματιδιακά χαρακτηριστικά, ίσως όλες οι μορφές ύλης έχουν κυματικές αλλά και σωματιδιακές ιδιότητες.”

Η υπόθεση De Broglie

- Αποδείχτηκε πειραματικά από τον Compton ότι η ορμή ενός φωτονίου δίνεται από τη σχέση (3.11):

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad \text{ή} \quad \lambda = \frac{h}{p}$$

- Το φωτόνιο είναι ένα άυλο σωματίδιο. Τι θα γίνει όμως αν (πηγαίνοντας αντίθετα σε κάθε αισθητηριακή μου εμπειρία από τη στιγμή που γεννήθηκα) εφαρμόσω τη σχέση αυτή για ένα σωματίδιο με μάζα, για το οποίο η ορμή θα είναι $p = mu$;

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mu} \quad (3.12 - \text{Σχέση De Broglie})$$

- Η παραπάνω εξίσωση υποστηρίζει ότι:
 - Σε κάθε σώμα μάζας m που κινείται με ταχύτητα u αντιστοιχεί ένα μήκος κύματος λ . Δηλαδή, όλα τα υλικά σώματα είναι ταυτόχρονα και κύματα.
 - Αυτό το μήκος κύματος θα είναι ανάλογο της σταθεράς Planck και αντιστρόφως ανάλογο της μάζας του σώματος. Άρα πιο εύκολα παρατηρήσιμη για μικρά σωματίδια.

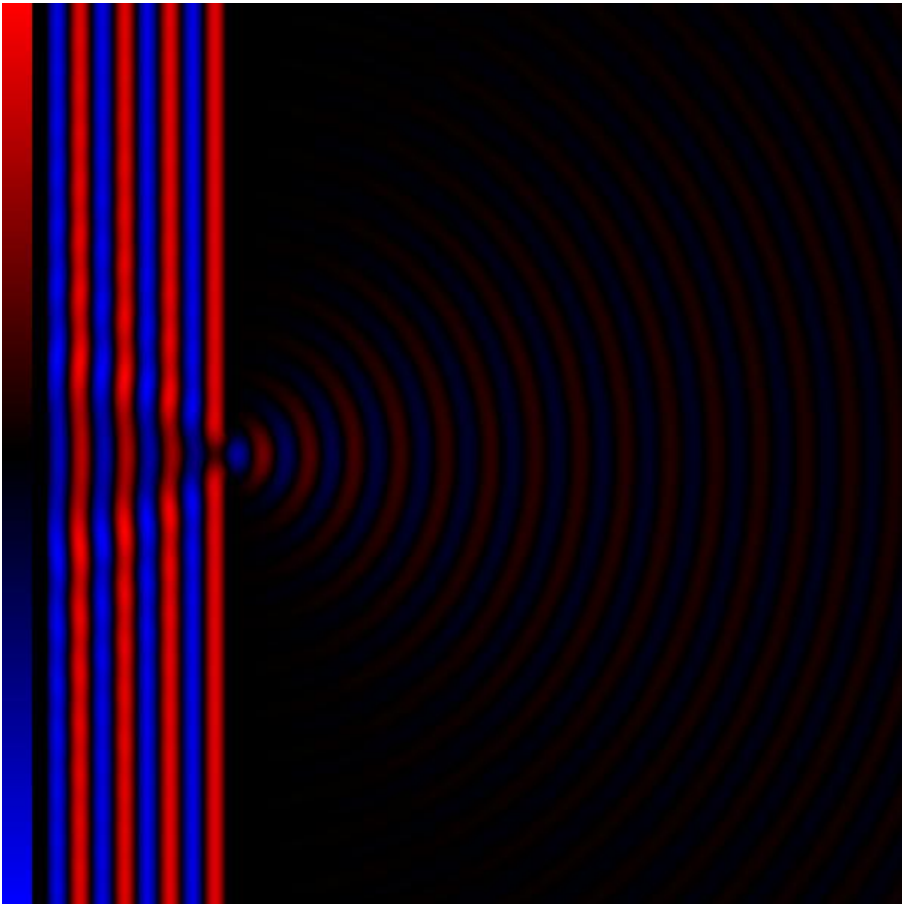
Η επιβεβαίωση της Υπόθεσης Περίθλαση Ηλεκτρονίων

- Ο Βρετανός G. P. Thomson και ο Αμερικανός C. Davisson, λίγο μετά τη δημοσίευση της διατριβής του de Broglie, ανακάλυψαν ανεξάρτητα την περίθλαση ηλεκτρονίων το 1926 και το 1927, αντίστοιχα.

Η Περίθλαση (Diffraction) είναι ένα φαινόμενο της διάδοσης των κυμάτων. Η περίθλαση είναι η απόκλιση των κυμάτων από την ευθύγραμμη διάδοσή τους, χωρίς καμία μεταβολή της ενέργειάς τους, λόγω της παρουσίας ενός εμποδίου ή μιας οπής. Το αντικείμενο ή η οπή που προκαλεί την περίθλαση λειτουργεί ουσιαστικά ως δευτερογενής πηγή του διαδιδόμενου κύματος.

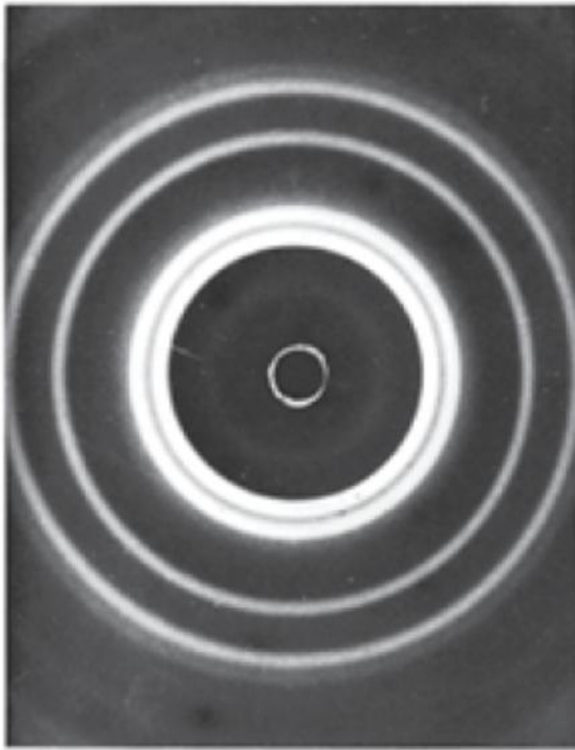


Η επιβεβαίωση της Υπόθεσης Περίθλαση Ηλεκτρονίων

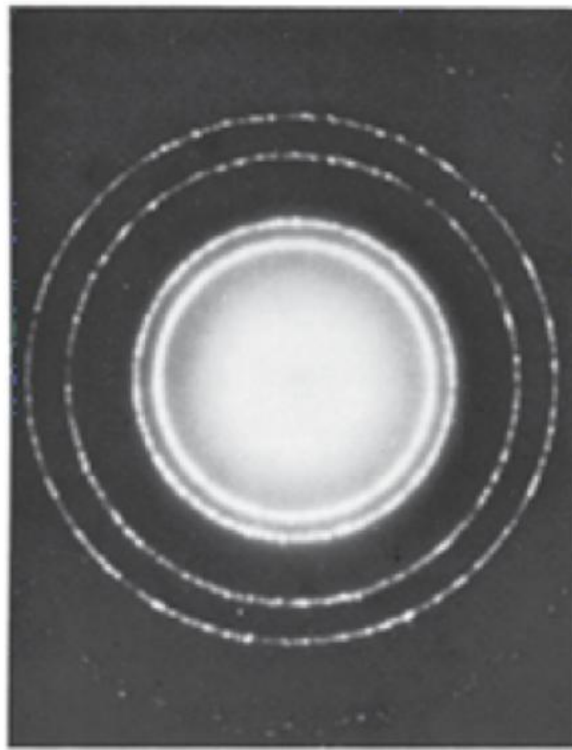


- Επειδή το φως έχει κυματικές ιδιότητες, η περίθλαση είναι ένα φαινόμενο που είναι γνωστό και έχει μελετηθεί διεξοδικά από την κλασική κυματική θεωρία. Το ερώτημα είναι: «Αν τα σωματίδια έχουν κυματικές ιδιότητες, μπορούν να υποστούν περίθλαση;»

Η επιβεβαίωση της Υπόθεσης Περίθλαση Ηλεκτρονίων



Περίθλαση ατόμων ΑΙ
με ακτινοβολία Χ



Περίθλαση ατόμων ΑΙ
με δέσμη ηλεκτρονίων

Το Πείραμα της Περίθλασης Ηλεκτρονίων είναι για τη φύση της ύλης ότι ήταν το Πείραμα Compton για τη φύση του Φωτός.

Εγκαταλείπουμε ΓΙΑ ΠΑΝΤΑ την ιδέα ότι μπορούμε να εξηγήσουμε και τη συμπεριφορά του ύλης στη μικροσκοπική κλίμακα σύμφωνα με τις αισθητηριακές μας ικανότητες. Η ύλη συμπεριφέρεται ΚΑΙ σαν σωματίδιο ΚΑΙ σαν κύμα ανάλογα με τις πειραματικές συνθήκες και τι θέλουμε να υπολογίσουμε κάθε φορά.

Συνέπειες για την Ατομική Θεωρία Bohr

Η Υπόθεση: Αν αντιμετωπίσουμε τα υλικά σωματίδια ως κύματα, τότε τα παραπάνω φαινόμενα μπορούν να ερμηνευτούν με κομψό τρόπο ως φαινόμενα συμβολής κυμάτων.

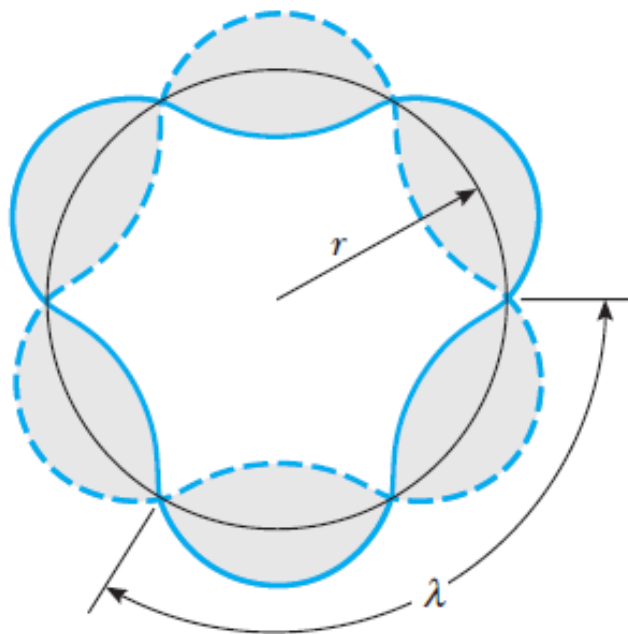
Τι είδους κύματα θα είναι αυτά;



<https://www.youtube.com/watch?v=XOCGb5ZGEV8>

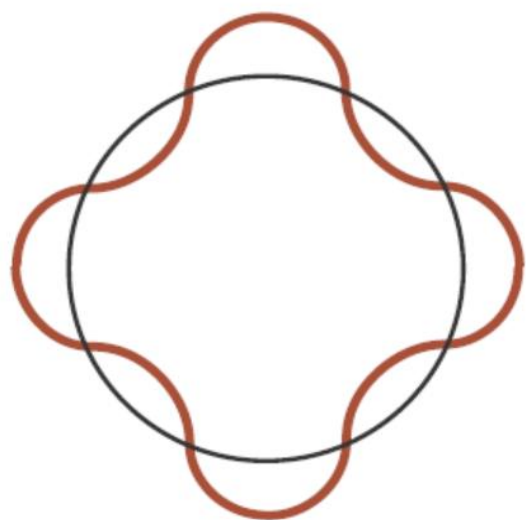
Συνέπειες για την Ατομική Θεωρία Bohr

- Σε μια παλλόμενη χορδή κιθάρας, ανεξάρτητα του τρόπου με τον οποίο αυτή έχει διεγερθεί, αναπτύσσονται πάντα μόνο εκείνες οι στάσιμες κυματομορφές που παρουσιάζουν δεσμούς σε κάθε άκρο της χορδής. Δηλαδή, μόνο ένα σύνολο από στάσιμα κύματα με διακριτά μήκη κύματος είναι δυνατό να εμφανιστούν στη χορδή. Τα μήκη κύματος που δεν ικανοποιούν τις συνθήκες που επιβάλλονται στα άκρα της χορδής, απλώς δεν αναπτύσσονται ποτέ.

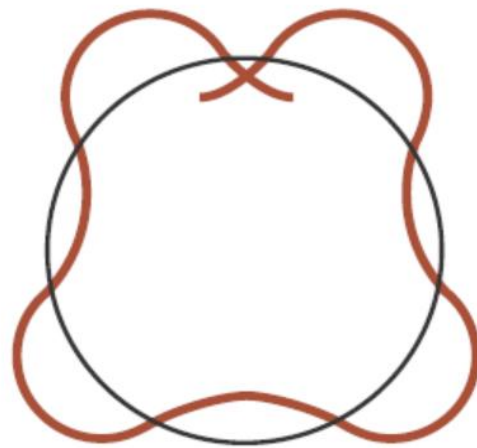


- Αυτό που υπολογίζουμε ως ακτίνα μιας επιτρεπόμενης τροχιάς Bohr δεν είναι τίποτα άλλο παρά το μέσο μιας κατανομής μηκών κύματος.
- Αν ακολουθήσουμε την (απολύτως αντισυμβατική θεώρηση) του De Broglie ότι τα ηλεκτρόνια είναι ΚΑΙ κύματα, τότε μπορούν να βρίσκονται σε αυτές τις τροχιές γιατί είναι οι μόνες για τις οποίες τα μήκη κύματος των ηλεκτρονίων ικανοποιούν τις κβαντικές συνθήκες που επιβάλλονται από το πεδίο του ατόμου.

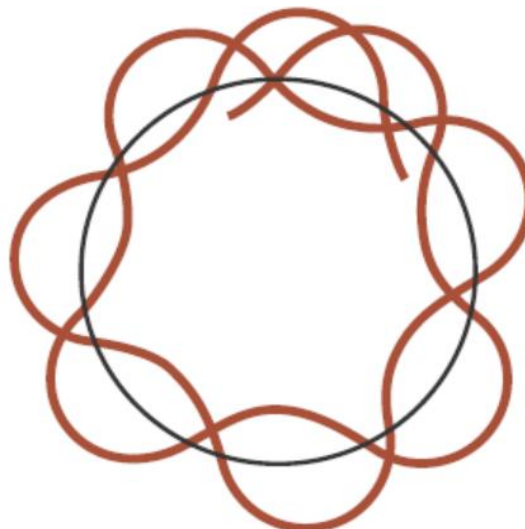
Αν τα κύματα de Broglie του ηλεκτρονίου δεν συμπίπτουν με τα επιτρεπόμενα κύματα για την τροχιά μετά από μία πλήρη περιστροφή, τότε τα κύματα αλληλοαναιρούνται και σταδιακά εξαφανίζονται (όπως τα κύματα της χορδής της κιθάρας).



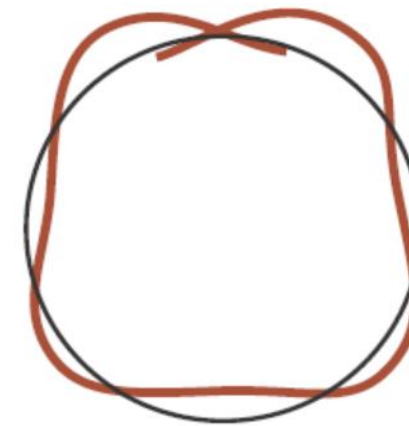
(a)



(b)



(c)



(d)

- Αν τα μήκη κύματος των κυμάτων de Broglie είναι τέτοια ώστε ένας ακέραιος αριθμός τους να χωρά στην περίμετρο της τροχιάς Bohr, τότε τα κύματα συμπίπτουν μετά από μία πλήρη περιστροφή, όπως φαίνεται στο (a), όπου $4\lambda = 2\pi r$.
- Αν τα κύματα δεν συμπίπτουν μετά από μία πλήρη περιστροφή, τότε επέρχεται αλληλοαναίρεση και τα κύματα σταδιακά εξαφανίζονται, όπως φαίνεται στα (b) έως (d). Επιτρέπονται μόνο οι τιμές ενέργειας του ηλεκτρονίου που αντιστοιχούν σε συμβατά κύματα de Broglie.

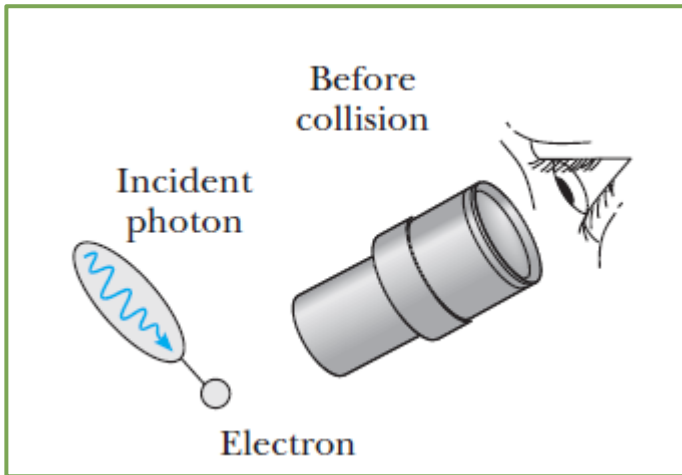
Κεντρική Ιδέα No.4

Επειδή τα e^- (και όλα τα υλικά σωματίδια) συμπεριφέρονται ΚΑΙ σαν κύματα, είναι η κυματική τους φύση που εξηγεί γιατί βρίσκονται σε συγκεκριμένες τροχιές γύρω από το άτομο του Η. Κάθε τροχιά είναι το μέσο μια κατανομής μηκών κύματος. Αν τα μήκη κύματος του e^- είναι τέτοια ώστε ένας ακέραιος αριθμός τους να χωρά στην περίμετρο της τροχιάς Bohr, τότε το e^- καταλαμβάνει την τροχιά. Αν όχι επέρχεται αλληλοαναίρεση και τα κύματα σταδιακά εξαφανίζονται.

Η Αρχή της Απροσδιοριστίας

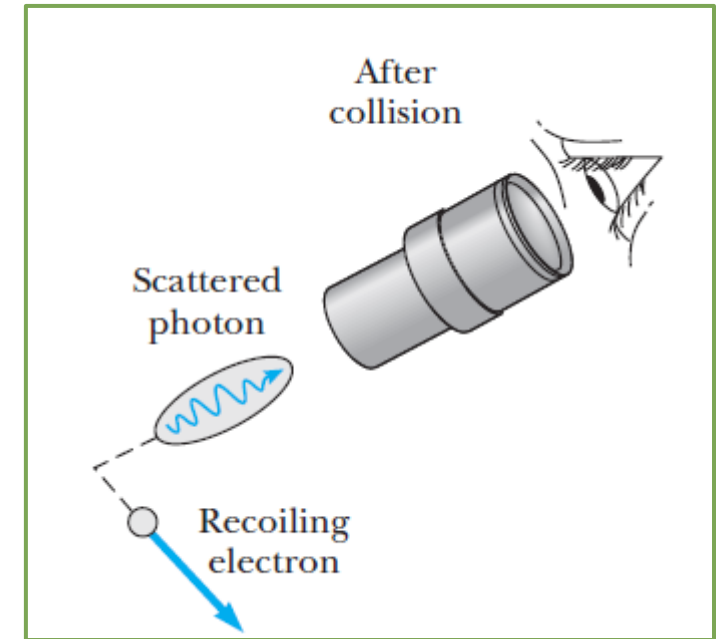
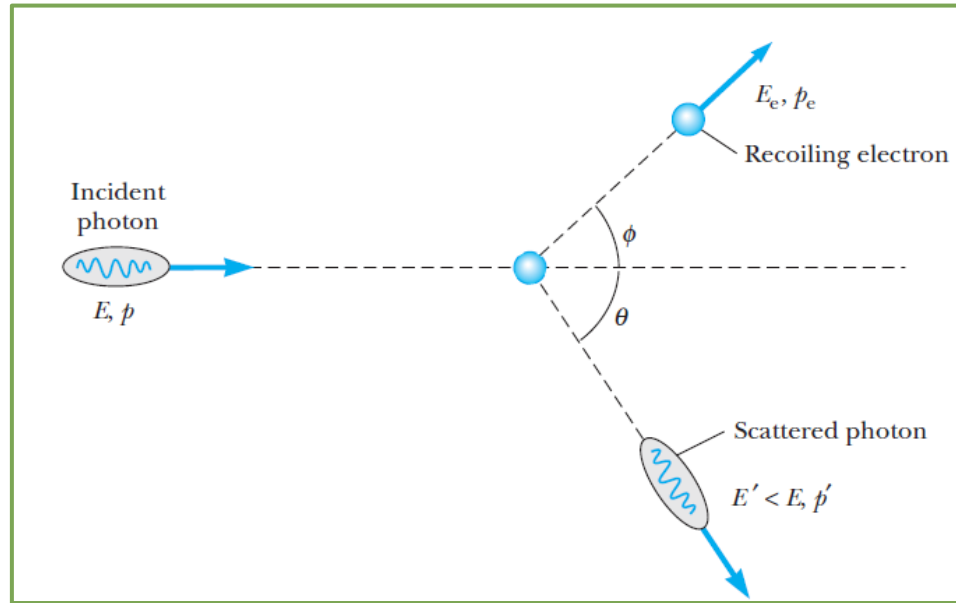
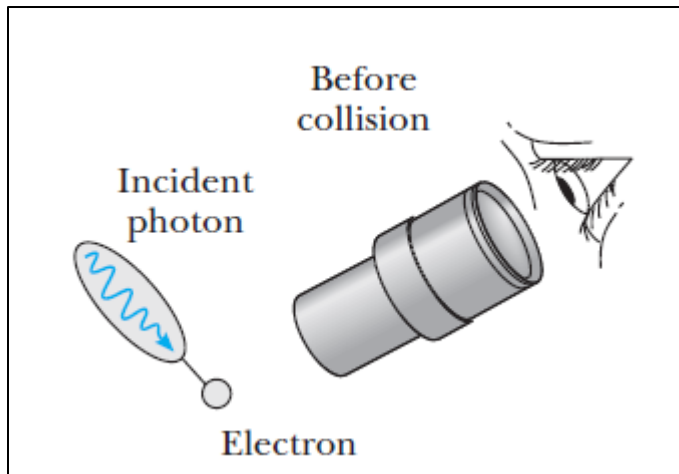


Μπορώ να υπολογίσω τη θέση ενός e^- ?



- Αν θέλουμε να εντοπίσουμε τη θέση του ηλεκτρονίου με ακρίβεια εντός μιας απόστασης Δx (όπου Δx δηλώνει την αβεβαιότητα στη θέση x) κατά τον άξονα x , τότε πρέπει να χρησιμοποιήσουμε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με μήκος κύματος τουλάχιστον τόσο μικρό όσο το Δx . Με άλλα λόγια, για να «δούμε» το ηλεκτρόνιο, ένα φωτόνιο πρέπει να αλληλεπιδράσει ή να συγκρουστεί με αυτό με κάποιον τρόπο. Διαφορετικά, το φωτόνιο θα περάσει απλώς δίπλα από το ηλεκτρόνιο και δε θα το δούμε.

Μπορώ να υπολογίσω τη θέση ενός e^- ?



- Το φωτόνιο έχει ορμή $p = h/\lambda$ και, κατά τη σύγκρουση, μέρος αυτής της ορμής μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο. Συνεπώς, η ίδια η πράξη εντοπισμού του ηλεκτρονίου προκαλεί μεταβολή στην ορμή του και το ηλεκτρόνιο θα μετακινηθεί σε μια νέα θέση διαφορετική από αυτήν που θα το βρίσκαμε αν δεν το ψάχναμε.

Αρχή της Απροσδιοριστίας

- Η ανάλυση του Heisenberg έδειξε ότι δεν είναι δυνατόν να προσδιοριστεί με ακρίβεια πόση από την ορμή του προσπίπτοντος φωτονίου μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο. Έτσι, η ίδια η προσπάθεια εντοπισμού της θέσης ενός ηλεκτρονίου με ακρίβεια εντός μιας απόστασης Δx προκαλεί αβεβαιότητα στην ορμή του, Δp .
- Ακολουθώντας το συλλογισμό στη λογική του κατάληξη, κατάφερε να δείξει ότι οι δύο αβεβαιότητες αυτές είναι συμπληρωματικές και συνδέονται από τη σχέση:

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar \quad (3.13 - \text{Αρχή της Απροσδιοριστίας})$$

Όπου $\hbar = h/2\pi$ και h η σταθερά του Planck.

Η αρχή της απροσδιοριστίας αντιπροσωπεύει μια απότομη ρήξη με τις ιδέες της κλασικής φυσικής, στην οποία θεωρείται ότι, με αρκετή επιδεξιότητα και εφευρετικότητα, είναι δυνατό να μετρηθεί ταυτόχρονα η θέση και η ορμή ενός σωματιδίου σε οποιονδήποτε επιθυμητό βαθμό ακρίβειας.

Συνέπειες για την Ατομική Θεωρία Bohr

Υποθέτοντας ότι το ηλεκτρόνιο στο άτομο του υδρογόνου περιορίζεται σε διακριτές, ακριβώς καθορισμένες τροχιές, η θεωρία του Bohr έρχεται σε αντίθεση με την αρχή της αβεβαιότητας του Heisenberg, καθώς επιχειρεί να δώσει μια υπερβολικά λεπτομερή περιγραφή της κίνησης του ηλεκτρονίου.

Το ατομικό μοντέλο του Bohr είναι λάθος και δεν μπορούμε να έχουμε μια εξίσωση που να προσδιορίζει με ακρίβεια τη θέση και την ενέργεια των ηλεκτρονίων οποιουδήποτε ατόμου.



To be Continued...