



ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ
ΠΑΤΡΩΝ
UNIVERSITY OF PATRAS

ΑΝΟΙΚΤΑ ακαδημαϊκά
μαθήματα ΠΠ

Κβαντική Φυσική Ι

Ενότητα 1: Ανασκόπηση Σύγχρονης Φυσικής

Ανδρέας Τερζής
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής

Σκοποί ενότητας

- Σκοπός της ενότητας είναι να επαναληφθούν βασικές έννοιες της Σύγχρονης Φυσικής, για να κατονοηθεί πώς προέκυψε ως λογική συνέχεια η Κβαντική θεωρία.

Περιεχόμενα ενότητας

- Μέλαν σώμα
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο
- Φαινόμενο Compton
- Το άτομο του υδρογόνου – Το πρότυπο του Bohr

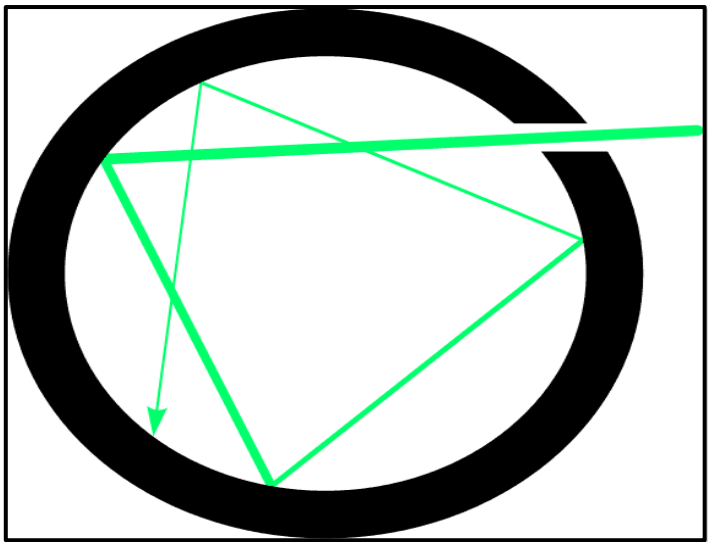
Προβλήματα της κλασικής φυσικής

- Ακτινοβολία μέλανος σώματος
(Kirchhoff 1859)
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Hertz 1887)
- Γραμμικά φάσματα



Μέλαν σώμα

Εικόνα 1: Προσομοίωση μέλανος σώματος



- Μέλαν σώμα είναι το υποθετικό σώμα που απορροφά το 100% της ακτινοβολίας που προσπίπτει σε αυτό.
- Στην διπλανή εικόνα φαίνεται μια **προσομοίωση** μέλανος σώματος. Η ακτινοβολία που προσπίπτει στην οπή της κοιλότητας θα περάσει στο εσωτερικό της, με μικρή πιθανότητα να υπάρξει επαναεκπομπή. Άρα είμαστε σε συμφωνία με τον παραπάνω ορισμό.



Μέλαν σώμα (συνέχεια..)

- Το γεγονός ότι το μέλαν σώμα δεν επανεκπέμπει ακτινοβολία που σχετίζεται με την προσπίπτουσα, δεν σημαίνει ότι δεν εκπέμπει καθόλου ακτινοβολία.
- Εκπέμπει ακτινοβολία, διαφορετικής φύσης από την προσπίπτουσα. Το είδος της ακτινοβολίας, ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία**. Εξαρτάται ΜΟΝΟ από την θερμοκρασία του μέλανος σώματος.
- Οι πειραματικοί νόμοι που περιγράφουν το μέλαν σώμα είναι:

- ❖ Νόμος Stefan-Boltzmann:

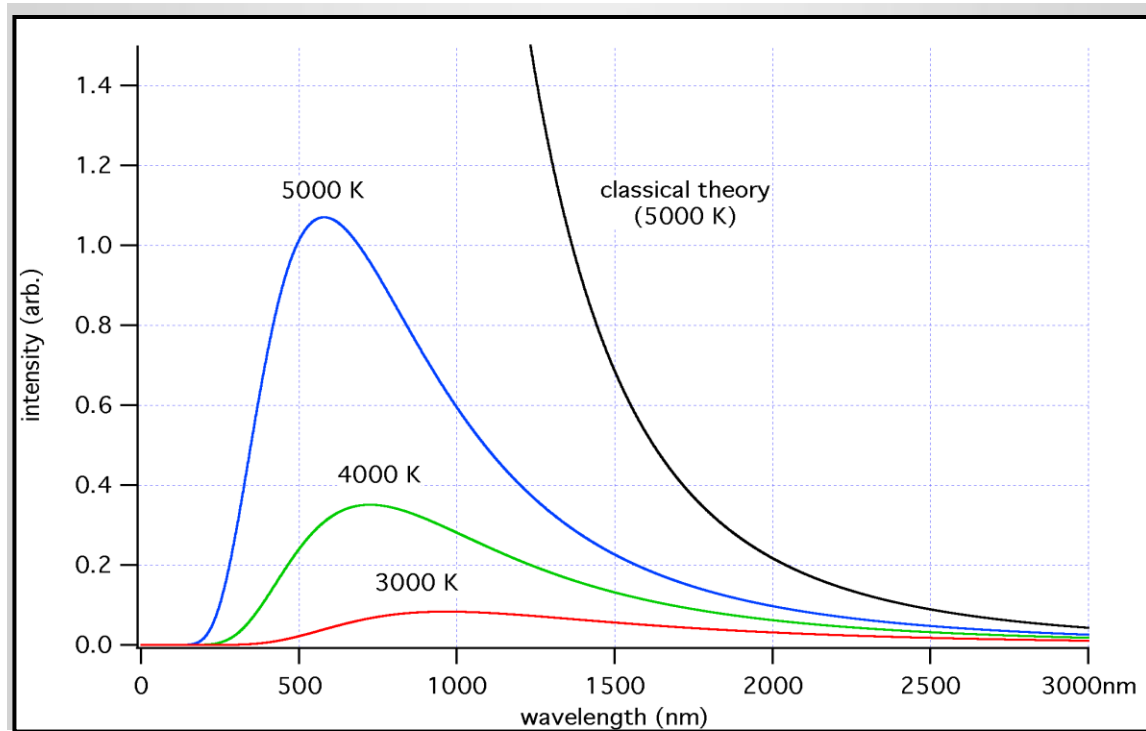
$$I \propto T^4$$

- ❖ Νόμος Wien:

$$T\lambda_{max} = const.$$

Η κλασική περιγραφή του μέλανος σώματος είναι η θεωρία Rayleigh-Jeans.





Εικόνα 2: Νόμος Rayleigh- Jeans(κλασική θεώρηση) και τα πειραματικά δεδομένα(μπλε, πράσινη, κόκκινη καμπύλη). Υπάρχει πλήρης ασυμφωνία στα μικρότερα μήκη κύματος, όπως παρατηρούμε.



Συμβολή του Planck

- Ο Planck το 1900 έδωσε την ερμηνεία στο φάσμα του μέλανος σώματος. Χρησιμοποίησε:
 1. Το θεώρημα Clausius.
 2. Την θεωρία Hertz για τα ηλεκτρικά δίπολα.
 3. Την υπόθεση ότι οι τιμές της ενέργειας ταλάντωσης των ηλεκτρονίων της επιφάνειας του μέλανος σώματος ήταν διακριτές. Χρησιμοποίησε τον όρο «**πακέτα ενέργειας**».
- Τον όρο «φωτόνιο» τον εισήγαγε για πρώτη φορά ο Lewis (γνωστός για την έρευνα στον ομοιοπολικό δεσμό) το 1926.
- Εξηγήθηκαν δύο φαινόμενα:
 1. Φωτοηλεκτρικό.
 2. Compton.



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο αποτελεί ουσιαστικά μια αλληλεπίδραση ύλης-φωτός, που δεν μπορεί να εξηγηθεί από την κλασική θεωρία, η οποία περιγράφει το φως σαν ηλεκτρομαγνητικό κύμα.
- Αφορά την απελευθέρωση ηλεκτρονίων από μεταλλική επιφάνεια, όταν φως προσπίπτει σε αυτήν.
- Οι «ανεξήγητες» τότε ενδείξεις που οδήγησαν τον Einstein στην ερμηνεία του φαινομένου ήταν :
 1. Η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που ελευθερώνονταν μεταβαλλόταν με την συχνότητα του φωτός (και όχι με την ένταση, όπως επιβάλλει η κυματική θεωρία)
 2. Δεν υπήρχε χρονική διαφορά μεταξύ της πρόσπτωσης της ακτινοβολίας και της εκπομπής των ηλεκτρονίων.



Εξήγηση φωτοηλεκτρικού φαινομένου

- Η απάντηση στα ερωτήματα ήρθε από τον Einstein το 1905, ο οποίος θεώρησε ότι κάθε σωματίδιο φωτός (φωτόνιο) περιέχει μια συγκεκριμένη ποσότητα ενέργειας, ένα **κβάντο ενέργειας**, που εξαρτάται μόνο από την συχνότητα του φωτός.
- Πιο συγκεκριμένα ,κάθε φωτόνιο έχει ενέργεια $E = hf$, όπου h η σταθερά Planck και f η συχνότητα του φωτός.
- Έτσι, σύμφωνα με τον Einstein, το φωτόνιο διαπερνά το υλικό και μεταφέρει την ενέργειά του σ' ένα ηλεκτρόνιο. Καθώς το ηλεκτρόνιο απελευθερώνεται από το υλικό, η κινητική του ενέργεια μειώνεται κατά φ , ποσότητα που ονομάζεται **έργο εξόδου**. Το έργο εξόδου είναι η ποσότητα ενέργειας που απαιτείται, προκειμένου το ηλεκτρόνιο να απελευθερωθεί από το μέταλλο. Η εξίσωση που περιγράφει το φαινόμενο είναι

$$E_k = hf - \varphi$$

όπου E_k η κινητική ενέργεια του εκπεμπόμενου ηλεκτρονίου. Η εξίσωση αυτή αποτελεί ουσιαστικά την αρχή διατήρησης της ενέργειας.



Φαινόμενο Compton

- Ο Compton παρατήρησε την σκέδαση ακτίνων Χ από ηλεκτρόνια και ανακάλυψε ότι οι σκεδαζόμενες ακτίνες είχαν μεγαλύτερο μήκος κύματος από τις προσπίπτουσες. Η μεταβολή στο μήκος κύματος δίνεται από την σχέση:

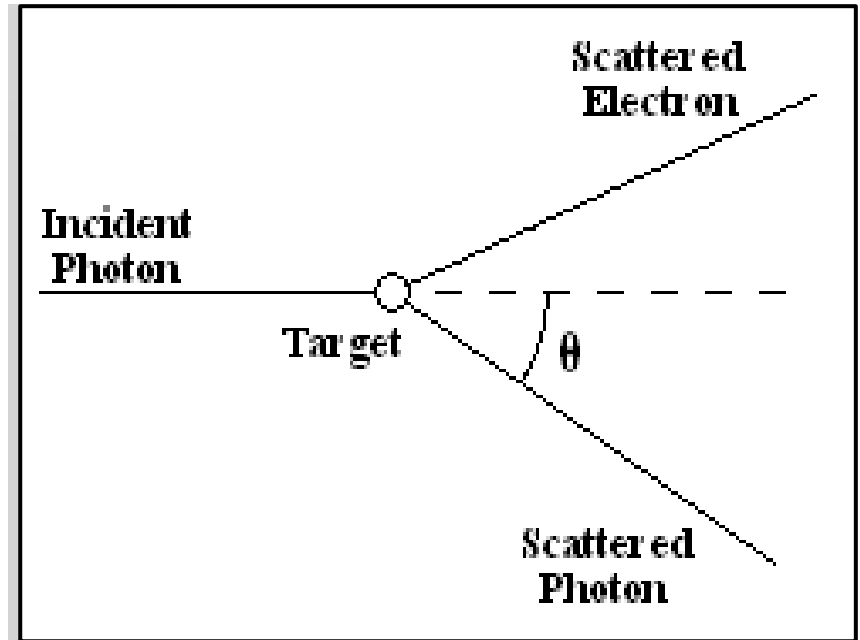
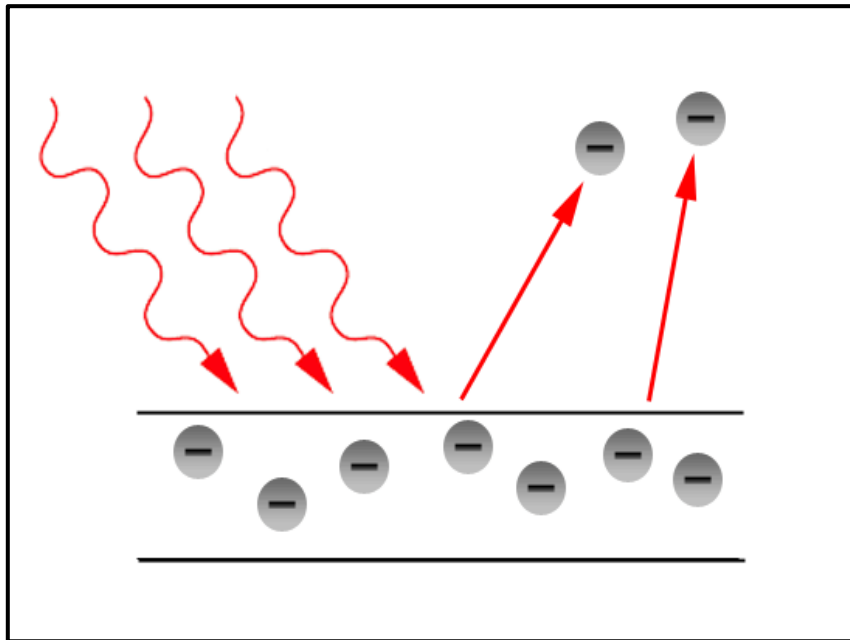
- $$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta)$$

με θ την γωνία σκέδασης.

- ❖ Στην επόμενη εικόνα φαίνονται τα δύο φαινόμενα σχηματικά (φωτοηλεκτρικό αριστερά και Compton δεξιά).

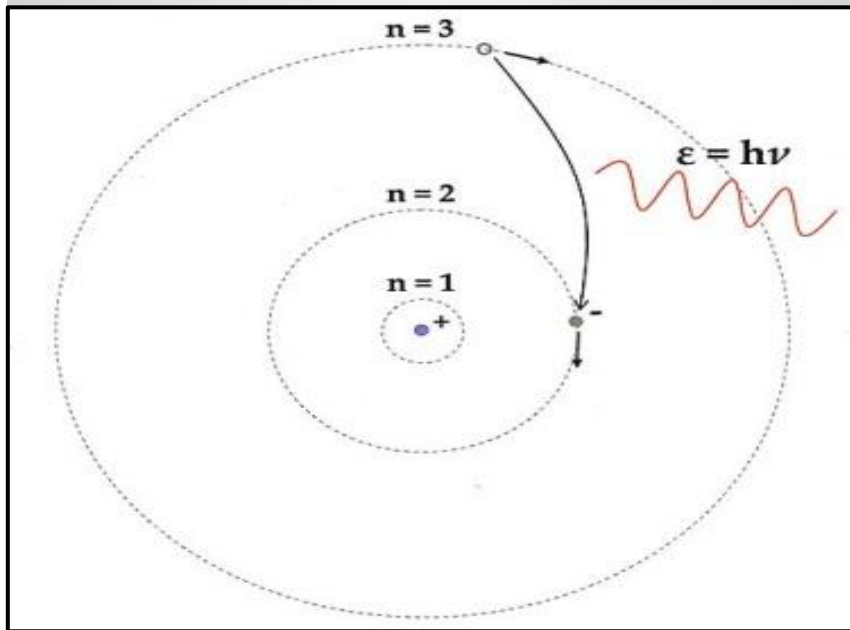


Φωτοηλεκτρικό και Compton



Μοντέλο Bohr(1913)

Εικόνα 5: Το άτομο του υδρογόνου



Περιγραφή του μοντέλου

- Ισχύει κατά τον Bohr η κλασική φυσική όσον αφορά την κίνηση του ηλεκτρονίου γύρω από τον πυρήνα, αλλά εισάγει την κβάντωση στην στροφορμή:
- $L = rp = rmv = n\hbar, n = 1, 2, \dots$ (1)
- Η κεντρομόλος είναι ίση με την δύναμη Coulomb:
- $\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2} \Rightarrow mrv^2 = e^2$ (2).
- Δουλεύουμε στο C.G.S όπου $k_{ηλ} = 1$.



Μοντέλο Bohr(συνέχεια..)

- Από τις σχέσεις (1) και (2) με διαίρεση κατά μέλη προκύπτει η σχέση

$$\frac{v_n}{c} = \frac{e^2}{\hbar c} \frac{1}{n}, n = 1, 2, 3, \dots (3)$$

- Η ποσότητα $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c}$ ονομάζεται σταθερά της λεπτής υφής. Είναι ίση με $1/137$.
- Αντικαθιστώντας την (3) στην (2) παίρνουμε την σχέση (4) για την ατομική ακτίνα:

$$r_n = \frac{\hbar^2}{m e^2} n^2, n = 1, 2, 3, \dots (4)$$

- Η ποσότητα $r_0 = \frac{\hbar^2}{m e^2}$ ονομάζεται ακτίνα Bohr. Είναι ίση με 0.529 \AA .
- Η ταχύτητα και η ακτίνα του ηλεκτρονίου επομένως παίρνουν διακριτές – συγκεκριμένες τιμές. Θα λέμε ότι είναι **κβαντισμένες**.



Μοντέλο Bohr(συνέχεια..)

- Η ολική ενέργεια του ηλεκτρονίου(δυναμική και κινητική) είναι $E = -\frac{e^2}{2r}$. Εφ' όσον η ακτίνα είναι κβαντισμένη, το ίδιο θα είναι και η ενέργεια.
- Αντικαθιστώντας την σχέση (4) στον τύπο της ενέργειας παίρνουμε την σχέση

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}, n = 1,2,3,\dots$$

- Η ποσότητα $E_0 = -\frac{me^4}{2\hbar^2}$, ονομάζεται σταθερά Rydberg και είναι ίση με 13.6 eV. Είναι η ενέργεια ιονισμού.



Σχετικιστική προσέγγιση

- Κβάντωση της στροφορμής:

$$\frac{mrv}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = n\hbar$$

- Ισότητα δυνάμεων:

$$\frac{mv^2}{\left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}\right) r} = \frac{e^2}{r^2}$$

- Το σχετικιστικό μοντέλο Bohr δίνει την ίδια λύση με το μη σχετικιστικό, όσον αφορά την ταχύτητα.
- Οι εκφράσεις για τις ενέργειες και τις ακτίνες προκύπτουν διαφορετικές, όμως επειδή οι ταχύτητες είναι μικρές, τ' αποτελέσματα είναι παρόμοια στις δύο προσεγγίσεις.



Υδρογονοειδή

- Οι σχέσεις στα υδρογονοειδή (δηλαδή άτομα με φορτίο πυρήνα Ze^- , όπου Z ο ατομικός αριθμός) μετασχηματίζονται ως εξής:

$$1. \quad \frac{v_n}{c} = \frac{e^2 Z}{\hbar c n}$$

$$2. \quad r_n = \frac{\hbar^2}{Zme^2} n^2$$

$$3. \quad E_n = -\frac{Z^2 me^4}{2\hbar^2} \frac{1}{n^2}$$



Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Πανεπιστήμιο Πατρών, **Ανδρέας Τερζής**. Ανδρέας Τερζής
«**Κβαντική Φυσική Ι. Ανασκόπηση Σύγχρονης Φυσικής**». Έκδοση: **1.0**. Πάτρα
2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:
<https://eclass.upatras.gr/courses/PHY1957/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά Δημιουργού, Μη Εμπορική Χρήση, Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.

Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων(1/2)

Το Έργο αυτό κάνει χρήση των ακόλουθων έργων:

Εικόνα 1:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hole_in_Cavity_as_Blackbody.png

Εικόνα 2:

<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Blackbody-lg.png>

Εικόνα 3:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Photoelectric_effect.png

Εικόνα 4:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Compton_scattering_diagram.png



Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (2/2)

Εικόνα 5:

http://en.wikipedia.org/wiki/File:Bohr_model_3.jpg

