

Σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ως αφετηρία της Κβαντικής Φυσικής

Ανδρέας Φ. Τερζής

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

«Σύντομη» τοποθέτηση/ομιλία στα πλαίσια του επιμορφωτικού διαδικτυακού σεμιναρίου **ΕΚΠΑΙΔΕΥΤΙΚΩΝ ΠΕ04** με θέμα:

«Κβαντομηχανική για το Λύκειο: Ακούμε & Ρωτάμε τους ειδικούς»,

«Μήνυμα» από τους εκπαιδευτικούς

Εκτός από την ανάπτυξη του επιστημονικού αντικειμένου θα επιθυμούσα από τους ομιλητές και την διδακτική τους πρόταση.

Η παρουσίασή μου έχει την εξής λογική,

(α) Να κινηθώ στην παρουσίαση των φυσικών φαινομένων, ακολουθώντας τον τρόπο παρουσίασή τους στο σχολικό βιβλίο.

(β) Να παρουσιάσω το επιστημονικό αντικείμενο, με όσο τον δυνατό πιο συνεπή και ολοκληρωμένο τρόπο, χρησιμοποιώντας όμως τον ελάχιστο μαθηματικό φορμαλισμό.

(γ) Να παρουσιάσω σε επαρκή ανάπτυξη την πραγματική εικόνα δημιουργίας του τελικού μοντέλου, που συνήθως στα πανεπιστημιακά βιβλία παρουσιάζεται σε μορφή εμπνευσμένων επινοήσεων ιδιοφυών επιστημόνων.

Καθώς θα είναι διαθέσιμο το περιεχόμενο της παρουσίασης μου σε μορφή pdf, παραθέτω και σύντομο σχόλιο για τον πιο αποτελεσματικό τρόπο ανάγνωσής της, όταν φύγουμε από εδώ.

(α) Οι **διαφάνειες σε άσπρο φόντο είναι αυτούσια κομμάτια από το σχολικό βιβλίο** ή από τις «οδηγίες διδασκαλίας της φυσικής του γενικού λυκείου για το σχολικό έτος 2022 -2023» που δίνονται στους εκπαιδευτικούς.

(β) **Στις άσπρου φόντου διαφάνειες, τα δικά μου σχόλια τα έχω βάλει σε κίτρινο φόντο.** Αυτές οι επισημάνσεις είτε έχουν χαρακτήρα εντοπισμού λαθών (όχι απλές αβλεψίες, σοβαρά επιστημονικά λάθη) ή υποδείξεις του πως θα πρέπει να παρουσιαστούν κάποια σημεία με περισσότερη σαφήνεια και επιστημονική επάρκεια.

(γ) **Οι διαφάνειες σε κίτρινο φόντο,** είναι αυτές που κάνω μια προσπάθεια να παρουσιάσω μια σχετικά ολοκληρωμένη εικόνα για τα φαινόμενα. Προφανώς, με αυτές οι διαφάνειες δεν θ' ασχοληθούμε σήμερα εκτενώς. **Ελπίζω,** όμως να έχουν κάποια σχετική επάρκεια για μια πρώτη πιο ουσιαστική επαφή με τον γνωστικό αντικείμενο και **να γίνουν οι αφορμή για περαιτέρω μελέτη ατομικά από τον κάθε εκπαιδευτικό.** Στο τέλος παραθέτω και εκτενή βιβλιογραφία.

Μπορούμε να πειστούμε για την **διττή φύση του φωτός με ένα «απλό» πείραμα**, δηλαδή ανοίγοντας μια τρύπα σε ένα σκοτεινό δωμάτιο μια ηλιόλουστη μέρα.

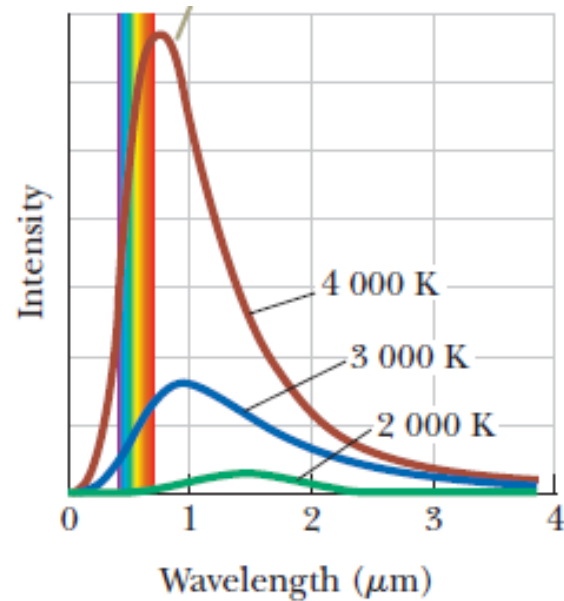
Όταν η τρύπα έχει διαστάσεις εκατοστού ή χιλιοστού για παράδειγμα έχουμε άμεση εποπτεία της ευθύγραμμης διάδοσης του φωτός κατά μήκος μια φωτεινής ακτίνας. Κάτι που προφανώς μας παραπέμπει σε μια σωματιδιακή περιγραφή μια και έχουμε ένα είδος τροχιάς (γεωμετρική οπτική).

Όταν όμως η διάσταση της οπής γίνει της τάξης του μήκους κύματος του φωτός (π.χ. 500nm, δηλαδή μισό χιλιοστό του χιλιοστού) τότε τα πράγματα αλλάζουν δραματικά και ο λεπτός σωλήνας φωτός (η ακτίνα) γίνεται ένας οπτικός κώνος, τώρα χρειαζόμαστε κυματική περιγραφή (κυματική οπτική).

Ιστορική διαδρομή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας (αντιγράψω από το βιβλίο Φυσικής γενικής παιδείας, της Β' λυκείου)

- **Αρχαιότητα μέχρι 17^{ος} αιώνας** Πρώτοι οι **αρχαίοι Έλληνες** είχαν αντιληφθεί και διατυπώσει αυτό που εμείς σήμερα ονομάζουμε «σωματιδιακή φύση» του φωτός. Πίστευαν δηλαδή ότι το φως που εκπέμπει ο Ήλιος, αλλά και κάθε φωτοβολούσα πηγή, αποτελείται από μικρά σωματίδια τα οποία κινούνται με πολύ μεγάλη ταχύτητα και, όταν πέφτουν στο μάτι του παρατηρητή, διεγείρουν το αισθητήριο όργανο της όρασης. Σ' αυτή ακριβώς τη σκέψη, δηλαδή τη σωματιδιακή φύση του φωτός, στηρίχτηκε, πολύ μεταγενέστερα, ο Newton (Νεύτωνας), για να διατυπώσει, με βάση τις αρχές της διατήρησης της ενέργειας και της ορμής, το νόμο της ανάκλασης του φωτός. **Μάλλον επηρεασμένος από την εικόνα της φωτεινής ακτίνας.**
- **κυματική φύση**, Δύο σημαντικά φαινόμενα, η περίθλαση και η συμβολή του φωτός, απασχόλησαν τους φυσικούς Christian Huygens (Κρίστιαν Χούχενς, 1629-1695) και Tomas Young (Τόμας Γιανγκ, 1773-1829) το 1670 (17^{ος} αιώνας) και 1803 (19^{ος} αιώνας) αντίστοιχα. Οι Huygens και Young, μέσα από πειραματικές διαδικασίες πάνω στα φαινόμενα αυτά, απέδειξαν ότι το φως έχει κυματική φύση και συγκεκριμένα ότι είναι εγκάρσια κύματα.
- **19^{ος} αιώνας, ξεκάθαρο προβάδισμα στην κυματική εικόνα** αποκορύφωμα της έρευνας για τη φύση του φωτός ήρθε το 1865, όταν ο Maxwell (Μάξγουελ), αναπτύσσοντας τη μεγαλειώδη θεωρία του, απέδειξε ότι το φως είναι εγκάρσια ηλεκτρομαγνητικά κύματα.
- **20^{ος} αιώνας, ανακάμπτει η σωματιδιακή εικόνα**, Συνεχίζοντας την ιστορική αναδρομή συναντάμε στις αρχές του 20ού αιώνα το Max Planck (Μαξ Πλανκ, 1858-1947), ο οποίος χρησιμοποίησε τη σωματιδιακή φύση του φωτός, για να ερμηνεύσει την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα θερμά σώματα.
- **21^{ος} αιώνας** Σήμερα πιστεύουμε στη διπλή φύση του φωτός, δηλαδή ότι το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο που ονομάζεται φωτόνιο. Σε φαινόμενα όπως η συμβολή, η περίθλαση και η πόλωση εκδηλώνεται η κυματική φύση του φωτός (ηλεκτρομαγνητικό κύμα), ενώ σε φαινόμενα που σχετίζονται με την αλληλεπίδραση του φωτός με την ύλη (απορρόφηση - εκπομπή), όπως το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, εκδηλώνεται η σωματιδιακή φύση του φωτός. Η ερώτηση λοιπόν «τι είναι το φως, σωματίδιο ή κύμα;» είναι εσφαλμένη, γιατί **το φως συμπεριφέρεται ως κύμα και ως σωματίδιο.**

Η ακτινοβολία του Μέλανος Σώματος



Εισαγωγή (σελίδα 226)

Ο Maxwell, με την ενοποιημένη θεωρία του για τον ηλεκτρομαγνητισμό (1864), είχε προβλέψει την ύπαρξη των ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων ως μηχανισμού διάδοσης της ενέργειας του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου στο χώρο. Αρκετά χρόνια αργότερα, το 1886, και ενώ ο Maxwell είχε πεθάνει, ο Γερμανός Heinrich Hertz παρήγαγε ηλεκτρομαγνητικά κύματα με ταλαντούμενα ηλεκτρικά δίπολα και απέδειξε ότι αυτά διαδίδονται στο χώρο με την ταχύτητα του φωτός. Είχε ανοίξει ο δρόμος για τη διερεύνηση της αλληλεπίδρασης ακτινοβολίας και ύλης. Ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα μπορούσε να μεταφέρει ενέργεια σ' ένα άτομο θέτοντάς το σε εξαναγκασμένη ταλάντωση και, αντίστροφα, ένα ταλαντούμενο άτομο, παρήγαγε ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα. **ΕΧΕΙ ΓΙΝΕΙ ΕΙΣΑΓΩΓΗ ΣΕ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ, ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΕΙΔΙΚΑ Η/Μ ΚΥΜΑΤΑ ΣΤΟ 2^ο ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ.**

Η κλασική θεωρία προβλέπει ότι η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία μπορεί να μεταφέρει οποιοδήποτε ποσό ενέργειας, ανάλογα με τη συχνότητά της. **(ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ, ΕΝΤΑΣΗ ΑΝΑΛΟΓΗ ΤΟΥ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟΥ ΤΟΥ ΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΠΕΔΙΟΥ. ΠΡΟΦΑΝΩΣ, ΟΥΤΕ ΣΤΟ ΒΙΒΛΙΟ ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΑΠΟΙΑ ΕΚΦΡΑΣΗ ΠΟΥ ΝΑ ΣΤΗΡΙΖΕΙ ΤΟΝ ΙΣΧΥΡΙΣΜΟ ΑΥΤΟ).** Εντούτοις μια σειρά από φαινόμενα, **όπως η ακτινοβολία του μέλανος σώματος, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, τα γραμμικά φάσματα εκπομπής και το φαινόμενο της σκέδασης των ακτίνων X (φαινόμενο Compton),** δεν μπορούσαν να ερμηνευτούν με την κλασική θεωρία.

Το 1900 ο Max Planck κάνει την πολύ *ριζοσπαστική υπόθεση ότι η ενέργεια εκπέμπεται ή απορροφάται από ένα αντικείμενο κατά διακριτές ποσότητες (κατά κβάντα)* ή, πιο απλά, κατά μικρά πακέτα. Η συνολική ενέργεια λοιπόν δεν μπορεί παρά να είναι ακέραιο πολλαπλάσιο του κβάντου ενέργειας. Η υπόθεση αυτή αποδείχθηκε επιτυχής στην αντιμετώπιση των αδιεξόδων στα οποία είχε οδηγηθεί η κλασική θεωρία.

Η κβάντωση ενός μεγέθους δεν μας είναι άγνωστη υπόθεση. Για παράδειγμα το ηλεκτρικό φορτίο είναι κβαντισμένο μέγεθος με κβάντο το φορτίο του ηλεκτρονίου. Οποιαδήποτε ποσότητα φορτίου είναι πάντα ακέραιο πολλαπλάσιο του φορτίου του ηλεκτρονίου. **ΕΝΑ ΠΟΛΥ ΠΕΤΥΧΗΜΕΝΟ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΚΒΑΝΤΩΣΗΣ ΕΙΝΑΙ ΤΑ ΣΤΑΣΙΜΑ ΚΥΜΑΤΑ, ΕΝΑ ΚΥΜΑΤΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΟΥ ΟΙ ΜΑΘΗΤΕΣ ΕΧΟΥΝ ΑΣΧΟΛΗΘΕΙ ΣΕ 'ΣΕΒΑΣΤΟ' ΒΑΘΟΣ (ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2, ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΣ {2.5}).** Η υπόθεση του Planck ήταν το θεμέλιο μιας νέας θεωρίας, της **κβαντικής θεωρίας**. Η κβαντική θεωρία προβλέπει κβάντωση κι άλλων μεγεθών όπως η ορμή και η στροφορμή.

Η κβαντική θεωρία ερμηνεύει φαινόμενα σε ατομικό επίπεδο τα οποία αδυνατεί να ερμηνεύσει η κλασική θεωρία. Όταν εξετάζουμε φαινόμενα του μακρόκοσμου η κβάντωση των μεγεθών γίνεται δυσδιάκριτη και τα συμπεράσματα της κβαντικής θεωρίας ταυτίζονται με αυτά της κλασικής.

ΤΑ ΒΑΣΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΕΙΝΑΙ Η ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ {ΚΑΙ Ο ΠΙΘΑΝΟΚΡΑΤΙΚΟΣ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑΣ}. ΕΞΑΙΤΙΑΣ ΤΗΣ ΠΟΛΥ ΜΙΚΡΗΣ ΤΙΜΗΣ ΤΗΣ ΠΙΟ ΒΑΣΙΚΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ, ΤΗΣ ΣΤΑΘΕΡΑΣ ΤΟΥ PLANCK, ΣΕ ΠΟΛΛΕΣ ΠΕΡΙΠΤΩΣΕΙΣ Η ΑΣΥΝΕΧΕΙΑ ΑΥΤΗ, «ΦΑΙΝΕΤΑΙ» ΩΣ ΣΥΝΕΧΕΙΑ. ΕΝΔΙΑΦΕΡΟΝ ΝΑ ΔΙΔΑΧΘΕΙ ΤΟ ΠΑΡΑΚΑΤΩ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ (7.1) ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΜΙΑ ΚΑΙ ΔΕΙΧΝΕΙ ΜΕ ΑΠΛΟ ΤΡΟΠΟ ΤΗΝ ΜΗ ΧΡΗΣΙΜΟΤΗΤΑ ΤΗΣ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΑΝΤΙΜΕΤΩΠΙΣΗΣ ΣΤΟ ΜΕΓΑΚΟΣΜΟ.

Παράδειγμα 7.1

Ένα σώμα μάζας $m = 50 \text{ g}$ είναι δεμένο σε ελατήριο σταθεράς $K = 5 \text{ N/m}$ και εκτελεί απλή γραμμική ταλάντωση πλάτους $A = 5 \text{ cm}$. Αν θεωρηθεί ότι το σύστημα αποτελεί κβαντικό ταλαντωτή (ταλαντωτή που η ενέργειά του μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές) να υπολογιστούν : α) το ενεργειακό διάστημα μεταξύ δύο ενεργειακών σταθμών, δηλαδή το κβάντο ενέργειας αυτού του ταλαντωτή και β) ο κβαντικός αριθμός n της ενεργειακής στάθμης στην οποία βρίσκεται ο ταλαντωτής.

Απάντηση :

α) Η συχνότητα της ταλάντωσης θα είναι

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{5 \text{ N/m}}{0,05 \text{ kg}}} = \frac{5}{\pi} \text{ s}^{-1}$$

Εάν ο ταλαντωτής χάνει ενέργεια λόγω τριβών, σύμφωνα με την υπόθεση του Planck θα πρέπει να χάνει την ενέργειά του κατά άλματα που το μέγεθός τους θα είναι

$$\Delta E = hf = (6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot \left(\frac{5}{\pi} \text{ s}^{-1} \right) = 10,551 \times 10^{-34} \text{ J}$$

Πρόκειται για ένα ποσό ενέργειας που πολύ δύσκολα να ανιχνεύεται.

β) Η ολική ενέργεια του ταλαντωτή είναι

Όμως επίσης $E = nhf$.

$$E = \frac{1}{2} KA^2 = \frac{1}{2} (5 \text{ N/m}) \cdot (0,05 \text{ m})^2 = 6,25 \times 10^{-3} \text{ J} \quad n = \frac{E}{hf} = \frac{6,25 \times 10^{-3} \text{ J}}{10,551 \times 10^{-34} \text{ J}} = 6 \times 10^{30}$$

Πρόκειται για ένα τεράστιο αριθμό.

Σε ανάλογα αποτελέσματα καταλήγουμε αν επιχειρήσουμε να ανιχνεύσουμε την κβάντωση της ενέργειας σε οποιοδήποτε σύστημα στο μακρόκοσμο.

Η Ακτινοβολία του Μέλανος Σώματος (ΑΜΣ), σελ. 230

Ένα οποιοδήποτε σώμα δε φαίνεται στο σκοτάδι ενώ αν το φωτίσουμε το βλέπουμε. Αυτό συμβαίνει γιατί όλο ή ένα μέρος από το φως που πέφτει στο σώμα επανεκπέμπεται (διαχέεται) στο περιβάλλον με αποτέλεσμα κάποιες από τις επανεκπεμπόμενες φωτεινές ακτίνες να φτάνουν στα μάτια μας. Με βάση αυτή τη διαδικασία καθορίζεται και το χρώμα που αποδίδουμε στο σώμα. Πιο συγκεκριμένα, αν φωτίσουμε ένα σώμα με λευκό φως εν γένει απορροφά κάποια μήκη κύματος ενώ άλλα τα επανεκπέμπει. Από τα επανεκπεμπόμενα μήκη κύματος καθορίζεται το χρώμα του σώματος που βλέπουμε. Στην ειδική περίπτωση που επανεκπέμπονται όλα τα μήκη κύματος του λευκού φωτός το σώμα φαίνεται λευκό. Στην αντίθετη περίπτωση, δηλαδή όταν το σώμα απορροφά όλα τα μήκη κύματος, φαίνεται μαύρο.

Μέλαν σώμα στη φυσική θεωρείται το σώμα που απορροφά την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσπίπτει σ' αυτό, σε όλο το φάσμα της (όλες τις συχνότητες).

Στην πράξη, μέλαν σώμα μπορεί να θεωρηθεί ένα οποιοδήποτε αντικείμενο με αιθαλωμένη την επιφάνειά του.

Κάθε σώμα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία κι αν βρίσκεται εκπέμπει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία**. **ΕΙΝΑΙ ΔΗΛΑΔΗ Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΤΑΙ ΑΠΟ ΟΛΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΚΑΙ ΓΙΑΥΤΟ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΜΟΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥΣ.**

Το μέγεθος που εκφράζει την ενέργεια που εκπέμπεται από τη μονάδα της επιφανείας ενός σώματος στη μονάδα του χρόνου ονομάζεται **ένταση της ακτινοβολίας**, συμβολίζεται με το I και στο S.I. μετριέται σε $J/(m^2).s$ ή $W/(m^2)$. **ΣΤΟ ΚΕΦΑΛΑΙΟ ΤΩΝ Η/Μ ΚΥΜΑΤΩΝ ΔΕΝ ΥΠΑΡΧΕΙ ΚΑΘΟΛΟΥ ΘΕΩΡΙΑ ΓΙΑ ΤΟ ΜΕΓΕΘΟΣ ΤΗΣ ΕΝΤΑΣΗΣ(ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΧΡΟΝΟΥ)...ΙΣΩΣ ΝΑ ΜΠΟΡΟΥΣΕ ΝΑ ΥΠΟΘΕΙ ΚΑΤΙ ΣΕ ΑΝΑΛΟΓΙΑ ΜΕ ΤΑ ΥΛΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΚΑΙ ΤΟΝ ΤΥΠΟ ΜΕ ΤΟ ΠΛΑΤΟΣ ΤΗΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΗΣ, ΠΟΥ ΥΠΑΡΧΕΙ ΣΤΟ ΒΙΒΛΙΟ ΚΑΙ ΦΑΙΝΕΤΑΙ Η ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΠΟ ΤΟ ΤΕΤΡΑΓΩΝΟ ΤΟΥ ΠΛΑΤΟΥΣ (ΒΛΕΠΕ ΚΑΙ ΑΣΚΗΣΗ 7.1).**

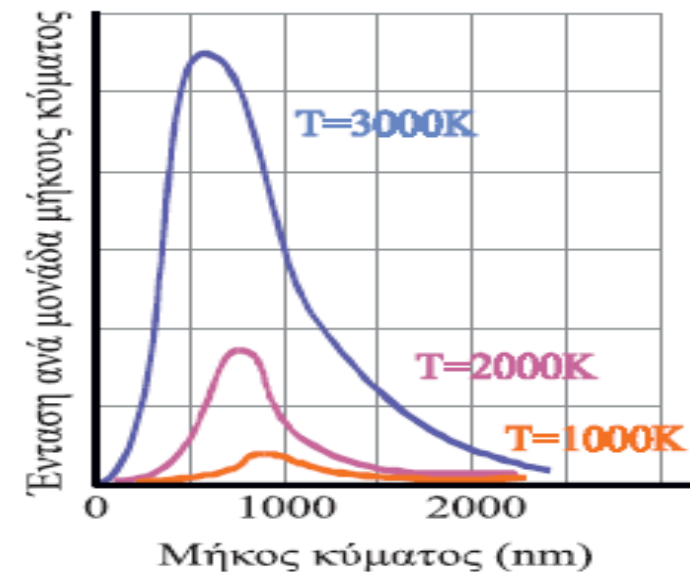
Η ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπει ένα σώμα εξαρτάται από τη θερμοκρασία του.

Ιδιαίτερο ενδιαφέρον, λόγω του ρόλου που έπαιξε στην εξέλιξη της φυσικής, έχει η μελέτη της θερμικής ακτινοβολίας του μέλανος σώματος, **που εξαρτάται ΜΟΝΟ από τη θερμοκρασία του και δεν εξαρτάται από το μέγεθος, το σχήμα και την χημική σύστασή του.**

Το μέλαν σώμα, σ' οποιαδήποτε θερμοκρασία κι αν βρίσκεται εκπέμπει ενέργεια με τη μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας σ'όλο το φάσμα της. Το μεγαλύτερο όμως τμήμα της ενέργειας που εκπέμπεται μ' αυτό τον τρόπο περιορίζεται σε μια στενή περιοχή, με «αιχμή» κάποιο μήκος κύματος (λ_{\max}), διαφορετικό για κάθε θερμοκρασία. Σε θερμοκρασίες γύρω στους 1000 K το μέλαν σώμα εκπέμπει κυρίως στην υπέρυθη περιοχή, ενώ σε ψηλότερες θερμοκρασίες το λ_{\max} μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος (μεγαλύτερες συχνότητες), στην περιοχή του ορατού (σχ. 7.1).

Η σχέση που συνδέει την απόλυτη θερμοκρασία (T) του μέλανος σώματος με το μήκος κύματος αιχμής (λ_{\max}) **είναι $\lambda_{\max} T = \text{σταθερό}$ (νόμος μετατόπισης Wien).**

Ο ΙΔΙΑΙΤΕΡΑ ΑΠΛΟΣ ΚΑΙ ΧΡΗΣΙΜΟΣ ΝΟΜΟΣ ΤΗΣ ΜΕΤΑΤΟΠΙΣΗΣ, ΑΠΟΔΕΙΧΘΗΚΕ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ ΤΟ 1893 ΑΠΟ ΤΟΝ WIEN ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΩΝΤΑΣ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΔΥΝΑΜΙΚΗ ΚΑΙ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ DOPPLER. ΜΠΟΡΕΙ ΝΑ ΧΡΗΣΙΜΟΠΟΙΗΘΕΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΠΙΛΥΣΗ ΑΠΛΩΝ ΑΣΚΗΣΕΩΝ ΕΠΙΠΕΔΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ, ΟΠΩΣ ΤΟ ΧΡΩΜΑ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΩΝ ΤΗΣ ΚΑΘΗΜΕΡΙΝΟΤΗΤΑΣ ΣΕ ΥΨΗΛΗ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ, ΤΟ ΧΡΩΜΑ ΤΟΥ ΗΛΙΟΥ ΚΑΙ ΤΩΝ ΜΑΚΡΙΝΩΝ ΑΣΤΡΩΝ ΚΑΙ ΤΑ ΜΗΚΗ ΚΥΜΑΤΟΣ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΙ Ο ΑΝΘΡΩΠΟΣ (ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑ ~ 300 T).



Διάγραμμα της έντασης ανά μονάδα μήκους κύματος σε συνάρτηση με το μήκος κύματος για το μέλαν σώμα, σε τρεις διαφορετικές θερμοκρασίες. Το μέγιστο της καμπύλης μετατοπίζεται σε μικρότερα μήκη κύματος όταν αυξάνεται η θερμοκρασία.

Σχήμα 7-1

Για την ερμηνεία των πειραματικών δεδομένων οι ερευνητές δέχτηκαν ότι τα άτομα των σωμάτων ταλαντώνονται. Το πλάτος της ταλάντωσής τους είναι συνάρτηση της θερμοκρασίας στην οποία βρίσκονται τα σώματα. Αποτέλεσμα αυτής της ταλάντωσης των ατόμων, που μπορούμε να τα δούμε ως στοιχειώδη ταλαντούμενα ηλεκτρικά δίπολα, είναι η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας. Η υπόθεση όμως αυτή δεν μπόρεσε να ερμηνεύσει ικανοποιητικά τα πειραματικά αποτελέσματα. **ΔΕΝ ΕΙΝΑΙ ΣΩΣΤΗ Η ΠΛΗΡΟΦΟΡΙΑ ΤΗΣ ΠΑΡΑΠΑΝΩ ΠΑΡΑΓΡΑΦΟΥ. ΑΛΛΩΣΤΕ, ΑΚΡΙΒΩΣ ΤΗΝ ΙΔΙΑ ΥΠΟΘΕΣΗ ΕΚΑΝΕ Ο PLANCK, ΑΠΛΩΣ ΜΙΑ ΚΑΙ ΔΕΝ ΥΠΗΡΧΕ ΑΠΟΔΕΚΤΗ ΑΤΟΜΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ, ΠΕΡΙΕΓΡΑΨΕ ΤΑ ΑΤΟΜΑ, ΩΣ ΣΥΝΤΟΝΙΣΤΕΣ.**

Το φαινόμενο ερμηνεύτηκε πλήρως το 1900, με τις δύο υποθέσεις που διατύπωσε ο Planck.

1. Η ενέργεια των ταλαντούμενων ατόμων δε μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή. Μπορεί να πάρει μόνο διακριτές (κβαντισμένες) τιμές. Οι τιμές της ενέργειας που μπορεί να έχει το ταλαντούμενο άτομο είναι

$$E_n = nhf$$

όπου n ένας θετικός ακέραιος αριθμός που ονομάζεται **κβαντικός αριθμός**, f η συχνότητα ταλάντωσης του ατόμου και h μια σταθερά που αργότερα έπαιξε μεγάλο ρόλο στη φυσική και ονομάστηκε **σταθερά δράσης του Planck**.

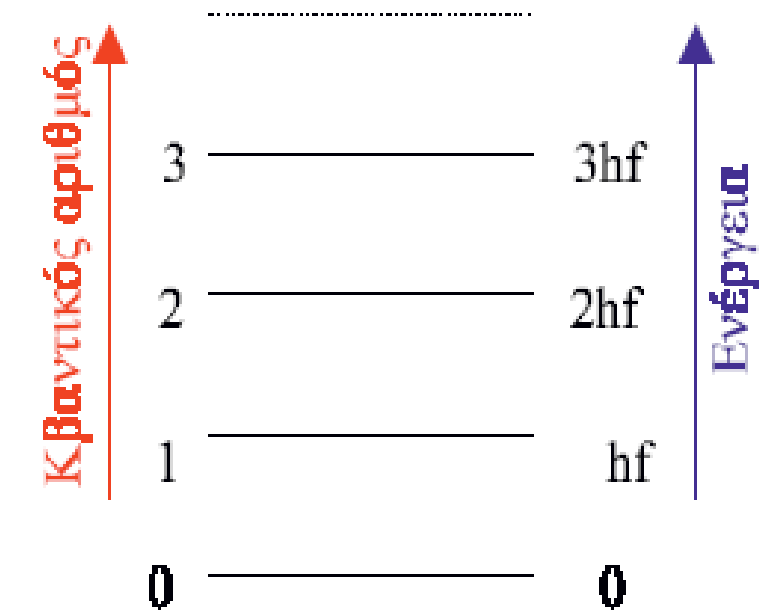
Η τιμή της βρέθηκε

$$h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

2. Το ποσό της ενέργειας, που μπορεί να απορροφήσει ή να εκπέμψει ένα άτομο, υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές.

Στο σχήμα 7.2 δίνουμε μία εικόνα των ενεργειακών σταθμών στις οποίες μπορεί να βρεθεί το άτομο. Αν το άτομο απορροφήσει ένα κβάντο ενέργειας δηλαδή ενέργεια $E = hf$, αυξάνει την ενέργειά του κατά ένα σκαλοπάτι στην κλίμακα των ενεργειακών σταθμών. Αν πάλι το άτομο εκπέμψει ένα κβάντο ενέργειας υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας τότε κατεβαίνει ένα σκαλοπάτι στην ίδια κλίμακα. Όσο ένα άτομο παραμένει στην ίδια ενεργειακή κατάσταση (στάθμη), ούτε εκπέμπει ούτε απορροφά ενέργεια. Τα άτομα, λοιπόν, απορροφούν ή εκπέμπουν ενέργεια όχι συνεχώς αλλά κάνοντας ενεργειακά άλματα.

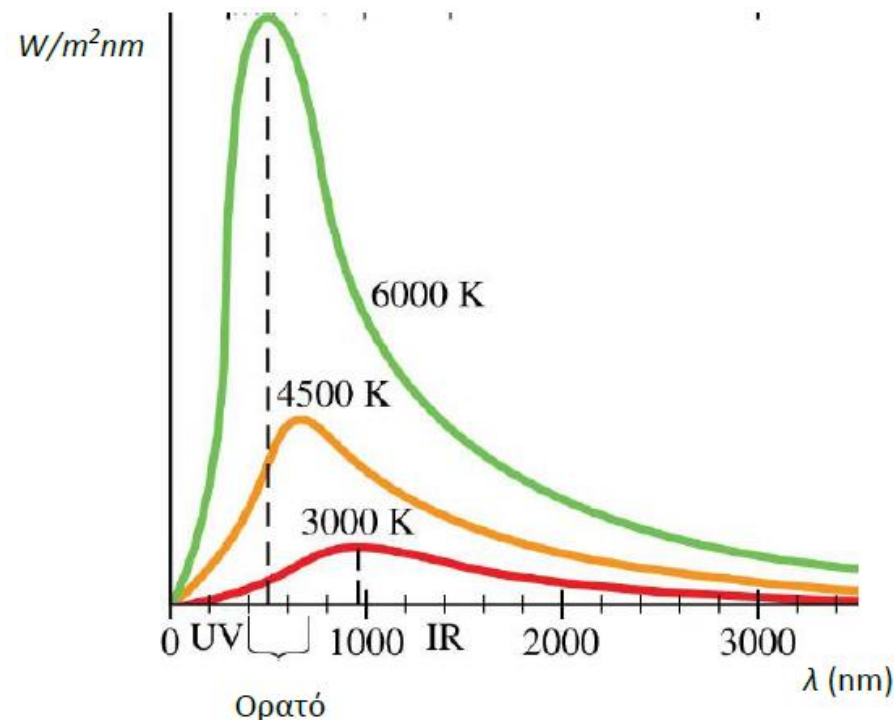
ΥΠΟΘΕΤΩ ΟΙ ΜΑΘΗΤΕΣ ΕΧΟΥΝ ΔΕΙ/ΔΙΔΑΧΘΕΙ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΚΑΤΑΣΤΑΣΕΙΣ ΜΕ ΚΒΑΝΤΩΣΗ ΣΤΗΝ Β' ΛΥΚΕΙΟΥ ΠΟΥ ΜΕΛΕΤΟΥΝ ΤΟ ΜΟΝΤΕΛΟ ΤΟΥ BOHR (ΑΝΑΠΤΥΧΘΗΚΕ ΤΟ 1913) ΓΙΑ ΤΟ ΑΤΟΜΟ ΤΟΥ ΥΔΡΟΓΟΝΟΥ. ΒΕΒΑΙΑ ΕΚΕΙ ΔΕΝ ΙΣΧΥΟΥΝ ΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΑ ΕΠΙΠΕΔΑ. ΚΑΠΟΙΟΣ ΜΑΘΗΤΗΣ ΘΑ ΜΠΟΡΟΥΣΕ ΝΑ ΥΠΟΘΕΣΕΙ ΟΤΙ Ο BOHR ΑΠΛΩΣ ΑΚΟΛΟΥΘΗΣΕ ΤΟΝ PLANCK, ΚΑΤΙ ΠΟΥ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ ΜΙΑ ΚΑΙ Ο PLANCK, ΔΕΝ ΜΙΛΟΥΣΕ ΓΙΑ ΑΤΟΜΑ, ΑΛΛΑ ΤΑΛΑΝΤΩΤΕΣ.



Σχήμα 7-2.

-Το διάγραμμα στο σχήμα 7-1 της σελίδας 227 δείχνει τη φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας μέλανος σώματος σε διάφορες θερμοκρασίες. Αυτή η ονομαζόμενη θερμική ακτινοβολία είναι ανεξάρτητη από τη φύση του εκπέμποντος υλικού. Το διάγραμμα υποδεικνύει ότι η ένταση της ακτινοβολίας δεν κατανέμεται ομοιόμορφα σε όλα τα μήκη κύματος. Με την αύξηση της θερμοκρασίας αυξάνει και η ένταση σε όλα τα μήκη κύματος και το μήκος κύματος αιχμής μετατοπίζεται προς μικρότερα μήκη κύματος. Το εμβαδόν κάτω από την καμπύλη δείχνει τη συνολική ένταση της ακτινοβολίας που εκπέμπει το σώμα σε ορισμένη θερμοκρασία.

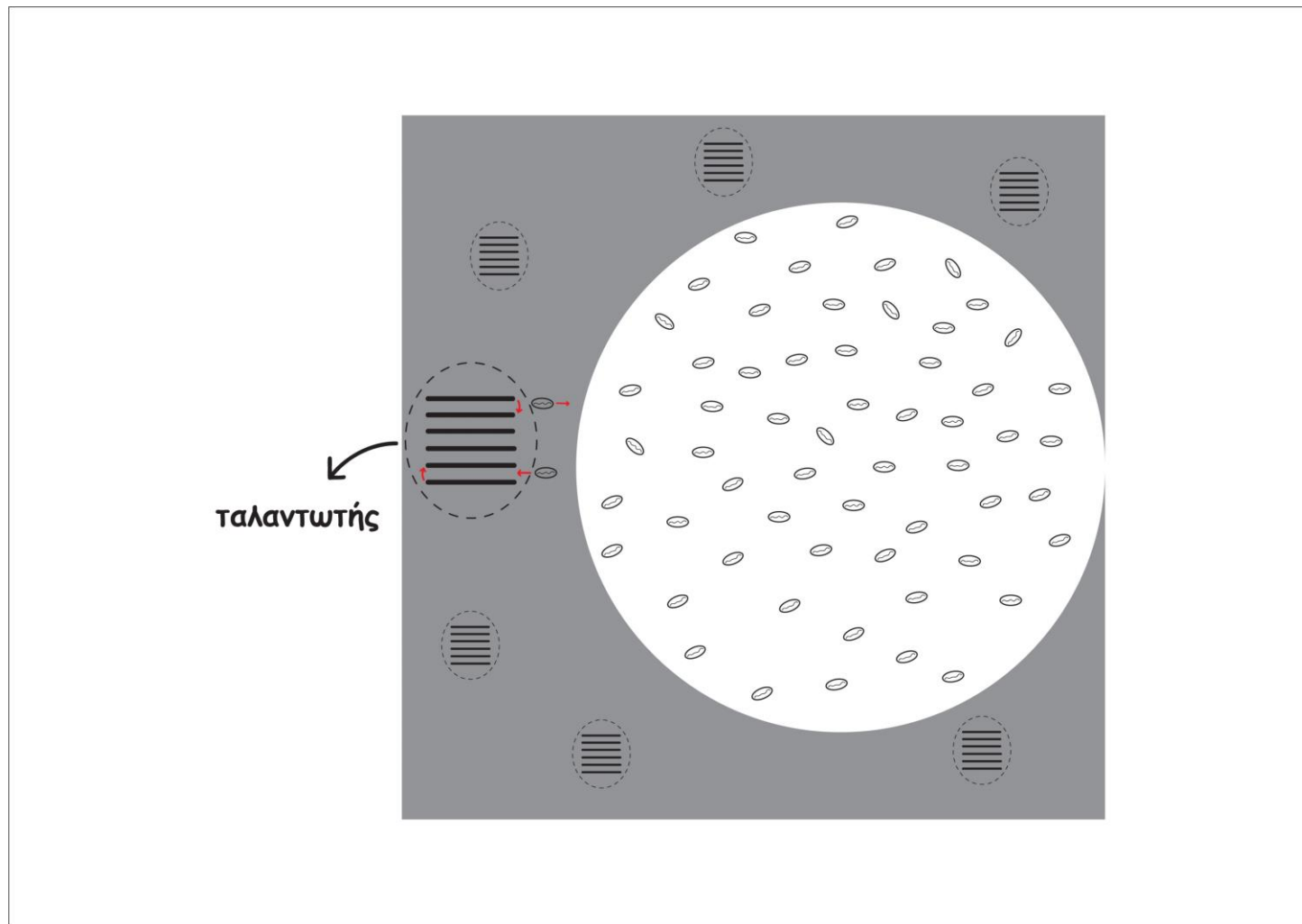
-Το διάγραμμα στο σχήμα 7-1 της σελίδας 227 προκύπτει από πειραματικά δεδομένα (για τα οποία αναφέρεται το βιβλίο στη σελίδα 227, 4^η γραμμή από το τέλος) και είναι το κύριο αποτέλεσμά τους το οποίο δεν μπόρεσε να ερμηνεύσει η κλασική φυσική. Στο βιβλίο όμως δεν φαίνεται γιατί η κλασική θεωρία δεν εξηγεί τα πειραματικά δεδομένα ούτε γιατί οι παραδοχές του Planck τα ερμηνεύουν. Στο πλαίσιο του μαθήματος αρκεί η παραπάνω δήλωση, αλλά θα μπορούσαμε προαιρετικά να αναφέρουμε ότι οι Rayleigh–Jeans εφαρμόζοντας την κλασική ηλεκτρομαγνητική θεωρία και την κλασική στατιστική μηχανική / θερμοδυναμική, κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι σε μεγάλες συχνότητες και μικρά μήκη κύματος η ένταση αυξάνεται ακατάσχετα πράγμα που έρχεται σε αντίθεση με τα πειραματικά δεδομένα, τα οποία όμως είναι σε πλήρη συμφωνία με την εκτός πλαισίου της κλασικής φυσικής υπόθεση του Planck για την κβάντωση της ενέργειας της Η.Μ ακτινοβολίας $E_n = nhf$.



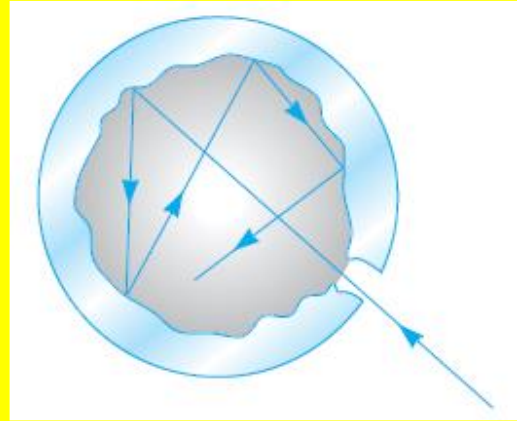
Στις οδηγίες αναφέρεται ότι το σχήμα 7.1 του βιβλίου είναι λάθος! Προτείνει την αντικατάστασή του με το παραπάνω. Στο παραπάνω σχήμα έχουμε και την θερμοκρασία 6000K, πολύ κοντινή στην θερμοκρασία του Ήλιου μας (ένα μέλαν σώμα σε θερμοκρασία ~ 5800K). Το μέγιστο είναι στο ορατό, για την ακρίβεια στο πράσινο, το χρώμα που η βιολογική μας εξέλιξη μας οδήγησε να είναι το πιο 'ευχάριστο' χρώμα.

ΟΔΗΓΙΕΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΟΛΙΚΟ ΕΤΟΣ 2022–2023 (συνέχεια..)

-Επίσης χρήσιμες είναι για τον/την εκπαιδευτικό και θα μπορούσε να γίνει αναφορά αν του ζητηθεί, οι παρατηρήσεις οι οποίες αναφέρονται από τον καθηγητή Στέφανο Τραχανά στο μάθημα του Mathesis: « [Εισαγωγή στην Κβαντική Φυσική 1: Οι βασικές αρχές](#)». Ο θερμικός χαρακτήρας της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος σε συνδυασμό με την υπόθεση του Planck μας δίνει μια φυσική ερμηνεία του διαγράμματος. Από την κινητική ενέργεια των αερίων γνωρίζουμε ότι η μέση κινητική ενέργεια ανά μόριο είναι $(3/2)kT$. Γενικά ο παράγοντας kT χαρακτηρίζει τη ζωηρότητα της θερμικής κίνησης των μορίων και είναι περίπου ίσος με $1/40$ του ηλεκτρονιοβόλτ σε θερμοκρασία δωματίου η οποία είναι περίπου εκατό φορές μικρότερη από την ενέργεια των κβάντων του ορατού φωτός ($\epsilon \approx 2$ eV) και επομένως η διέγερση αυτών των κβάντων είναι αδύνατη σε αυτή τη θερμοκρασία. **Η ΠΡΟΤΑΣΗ ΑΥΤΗ ΔΕΝ ΙΣΧΥΕΙ ΑΥΣΤΗΡΑ, ΜΙΑ ΚΑΙ ΥΠΑΡΧΟΥΝ ΚΑΙ ΟΙ ΔΙΑΚΥΜΑΝΣΕΙΣ ΓΥΡΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ, ΚΑΙ ΜΠΟΡΟΥΜΕ ΝΑ ΕΧΟΥΜΕ ΕΝΕΡΓΕΙΕΣ ΠΑΝΩ/ΚΑΤΩ ΑΠΟ ΤΗΝ ΜΕΣΗ ΤΙΜΗ (ΑΛΛΙΩΣ ΤΟ ΦΑΣΜΑ ΘΑ ΕΙΧΕ ΠΟΛΥ ΠΕΡΙΟΡΙΣΜΕΝΟ ΕΥΡΟΣ).** Για τον λόγο αυτό τα σώματα σε θερμοκρασία δωματίου εκπέμπουν θερμική (αόρατη υπέρυθρη) ακτινοβολία αλλά όχι φως (δηλαδή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία τέτοιας συχνότητας που να διεγείρει τον ανθρώπινο αμφιβληστροειδή χιτώνα του ματιού). Σε θερμοκρασία T θα μπορούν λοιπόν να δημιουργηθούν μόνο εκείνα τα φωτεινά κβάντα με ενέργεια μικρότερη του kT , δηλαδή τα μικρής συχνότητας. Τα κβάντα με υψηλή συχνότητα και μικρό μήκος κύματος δεν θα είναι δυνατόν να δημιουργηθούν και να είναι παρόντα στο εκπεμπόμενο φάσμα πράγμα που η κλασική φυσική δεν μπορούσε να ερμηνεύσει.



ΣΥΝΤΟΜΗ ΑΝΑΣΚΟΠΗΣΗ ΤΗΣ ΚΛΑΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΚΒΑΝΤΙΚΗΣ ΘΕΩΡΙΑΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΑΜΣ (στις επόμενες 5 διαφάνειες επιχειρώ να δώσω μια πλήρη εικόνα της μελέτης της ΑΜΣ, χωρίς καθόλου μαθηματικά, ελπίζω χρήσιμη για τους συναδέλφους εκπαιδευτικούς)



Από την εποχή του Planck, ο πιο συνήθης τρόπος αναπαράστασης ενός μέλανος σώματος, ήταν η **οπή σε μια κοιλότητα στο εσωτερικό ενός στερεού σώματος**, μια και μια τέτοια απεικόνιση ανταποκρίνεται στην βασική απαίτηση της πλήρους απορρόφησης ακτινοβολίας οποιασδήποτε συχνότητας (ασταμάτητες ανακλάσεις και τελικά απορροφήσεις από το υλικό των τοιχωμάτων).

Η **κλασική εξήγηση** που αναπτύχθηκε από τον λόρδο Rayleigh το 1900 (την ίδια χρονιά με τον Planck!) και τον Sir James Jeans το 1905, **επικεντρώνεται στα (στάσιμα) ηλεκτρομαγνητικά κύματα στην κοιλότητα χωρίς να ενδιαφέρεται στον τρόπο παραγωγή τους**. Εφαρμόζεται η ηλεκτρομαγνητική θεωρία του Maxwell και η στατιστική μηχανική του Boltzmann. Το τελικό αποτέλεσμα δίνει ικανοποιητική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, μόνο σε υψηλά μήκη κύματος ή χαμηλές συχνότητες, ενώ προβλέπει απεριόριστη αύξηση της έντασης της με την αύξηση της συχνότητας γνωστή στην βιβλιογραφία ως υπεριώδη καταστροφή.

Ο **Planck** επικεντρώθηκε στα υλικό των τοιχωμάτων θεωρώντας ότι από τους συντονιστές (αργότερα τα ονόμασε ταλαντωτές) παράγονται τα η/μ κύματα. Να θυμίσουμε ότι δεν υπήρχε κάποια εδραιωμένη ατομική θεωρία το 1900. Είχε ανακαλυφθεί μόνο το ηλεκτρόνιο (1897, J.J. Thomson), ενώ πολύ αργότερα ήρθαν τα πειράματα του Rutherford και το ατομικό του μοντέλο (1911) και το μοντέλο του Bohr (1913). Για την μελέτη της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος **ασχολείται αποκλειστικά με τα κυμάτων που παράγονται στα τοιχώματα**, καθώς θεωρεί θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ αυτών που παράγονται και αυτών που υπάρχουν στην κοιλότητα. Στην προσπάθειά του να υπολογίσει, για δεδομένη συχνότητα, τις χρήσιμες μέσες τιμές για τα φυσικά μεγέθη που χρειάζεται για τον υπολογισμό της έντασης της ακτινοβολίας, θεωρεί ότι οι δυνατές τιμές της ενέργειας παίρνουν ακέραιες τιμές της συχνότητας ($h\nu$, όπου h μία σταθερά).

Πρακτικά, αυτό ήταν ένα μαθηματικό τέχνασμα, σύνηθες εκείνη την εποχή στην μελέτη προβλημάτων στατιστικής μηχανικής, όπου στο τελικό στάδιο των υπολογισμών θα έπαιρνε την οριακή τιμή, $h \rightarrow 0$. Όταν γινόταν αυτό, η κατάληξη ήταν η κλασική θεωρία των Rayleigh-Jeans. **Ενώ, προς μεγάλη του έκπληξη βρήκε ότι το αποτέλεσμα με πεπερασμένο h , δηλαδή διακριτές ενέργειες, βρισκόταν σε εξαιρετική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα.**

$$\int e^{-E(h)/kT} dh \quad \xrightarrow{h \rightarrow 0} \quad \sum e^{-E(h)/kT}$$

Σχήμα 1. Μια σύντομη ανασκόπηση των θεωριών για την ΑΜΣ.

Οι ενεργειακές καταστάσεις για κάθε δεδομένη συχνότητα μπορούν να θεωρηθούν ως

(α) κβαντικές καταστάσεις των συντονιστών ή ταλαντωτών στα τοιχώματα,

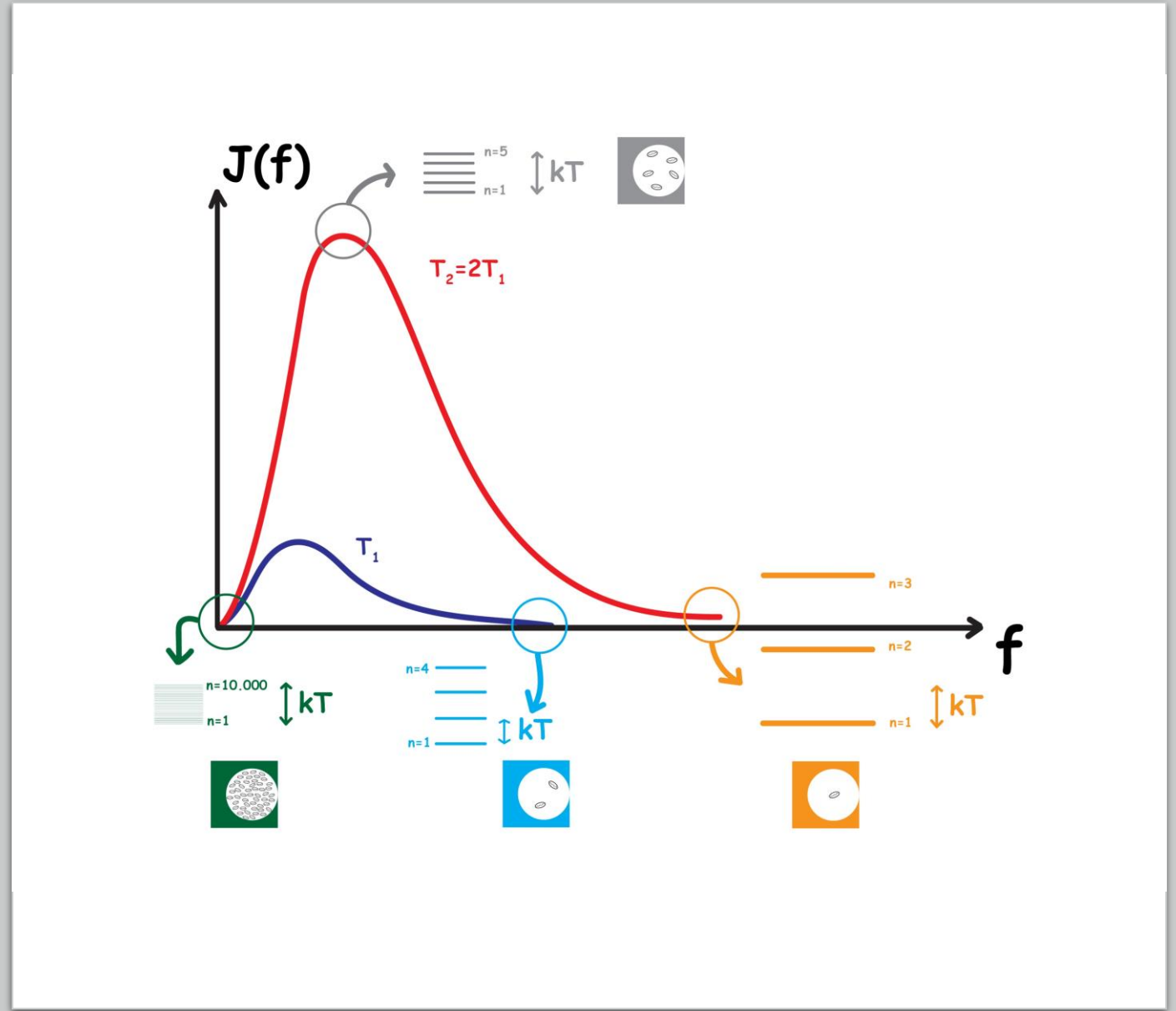
(β) κβαντικές καταστάσεις του η/μ πεδίου στην κοιλότητα, και

(γ) αριθμός φωτονίων στην κοιλότητα.

Για να είναι ισοδύναμες οι τρεις εικόνες, θα πρέπει να θεωρηθεί ότι υπάρχει θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ της ακτινοβολίας που παράγουν τα μόρια των τοιχωμάτων και του η/μ πεδίου στην κοιλότητα.

Η διπλανή εικόνα δίνει πολλές πληροφορίες, όπως για παράδειγμα το σωστό κλασικό όριο στις χαμηλές συχνότητες, όπου ο αριθμός των ενεργειακών καταστάσεων ή των φωτονίων είναι τεράστιος (αρχή της αντιστοιχίας για την ΑΜΣ).

Δίνει ακόμα και μια απλή ερμηνεία για την εξάρτηση του φάσματος από την θερμοκρασία. Συγκρίνετε για παράδειγμα την περιοχή των υψηλών συχνοτήτων για τις δυο διαφορετικές θερμοκρασίες.



Ιστορική διαδρομή μελέτης ΑΜΣ

- **Kirchhoff** (1859 - 1860), Ορίζει το μέλαν σώμα και πραγματοποιεί πολλά πειράματα που οδηγούν σε δυο πολύ σημαντικούς νόμους που περιγράφουν την απορρόφηση και εκπομπή της ακτινοβολίας και, τέλος, βρίσκει την κατανομής της έντασης στα διάφορα μήκη κύματος (επινόηση φασματοσκοπίου).
- **Stefan** (1879), προτείνει τον περίφημο νόμο για εξάρτηση της συνολικής ενέργειας του μέλανος σώματος από την τέταρτη δύναμη της θερμοκρασίας. Ο **Boltzmann** το 1884 τον αποδεικνύει με ηλεκτρομαγνητική θεωρία και 2^ο θερμοδυναμικό αξίωμα.
- **Wein** (1896), προτείνει κατανομή που βρίσκεται σε **αρκετά** ικανοποιητική συμφωνία με τα πειράματα (νόμο ακτινοβολίας), και κυρίως δείχνει ότι αν γνωρίζουμε την κατανομή σε μια θερμοκρασία μπορούμε να την βρούμε σε οποιαδήποτε άλλη. Από αυτή την κατανομή αποδεικνύεται και ο νόμος της μετατόπισης (**ο μοναδικός που αναφέρει το σχολικό βιβλίο στην θεωρία της ΑΜΣ**).
- **Planck** (1895 -1900), καθηγητής στο πανεπιστήμιο του Βερολίνου, στην θέση του Kirchhoff (ο 'κύκλος' κλείνει!)

.....η συνέχεια μια απρόθυμη επιστημονική επανάσταση (γένεση κβαντικής φυσικής)

- Να αναφέρουμε και δυο λόγια για τους πειραματικούς φυσικούς της εποχής. Αν και δεν έχουν ούτε κατ' ελάχιστο την φήμη του Planck η συνεισφορά τους είναι τεράστια. Οι πειραματικοί της εποχής δεν ασχολούνταν με την μελέτη της ΑΜΣ από καθαρά ακαδημαϊκό ενδιαφέρον αλλά και για 'πρακτικούς' λόγους μια και οποιαδήποτε νέα γνώση θα μπορούσε να φανεί πολύ χρήσιμη στις γερμανικές εταιρείες φωτισμού και θέρμανσης. Ο Planck το 1899 (στο πέμπτο από τα άρθρα του για την ΑΜΣ, στην περίοδο 1895-1899), βρίσκει μια έκφραση για την εντροπία ενός συστήματος ανεξάρτητων αρμονικών ταλαντωτών που του επιτρέπει να εξαγάγει το νόμο ακτινοβολίας του Wein. Αυτό ήταν το αποτέλεσμα στο οποίο ήλπιζε να φτάσει ο Planck και, αν δεν υπήρχαν τα πειράματα των Lummer, Pringsheim, Rubens και Kurlbaum (Εθνικό ίδρυμα προτύπων της Γερμανίας στο Βερολίνο) το 1899, **πιθανότατα θα είχε σταματήσει εκεί**. Οι πειραματιστές αυτοί έδειξαν ότι ο νόμος του Wien ήταν εσφαλμένος στην περιοχή των μεγάλων μηκών κύματος, και πρακτικά εξήγαγαν την σωστή έκφραση για την ΑΜΣ, στην οποία επικεντρώθηκε ο Planck στις ιστορικές εργασίες του την επόμενη χρονιά (1900).

Σύνοψη της πραγματικής θεωρητικής δουλειάς του Planck (1895-1900), και όχι αυτής που εμφανίζεται στα διδακτικά βιβλία

Μια σχετικά απλή, συνεκτική και ξεκάθαρη εικόνα εμφανίζεται και σε όλα τα βιβλία «Σύγχρονης Φυσικής». Η πραγματικότητα είναι τελείως διαφορετική. Το δυνατό σημείο του Planck ως θεωρητικού Φυσικού, ήταν η **κλασική θερμοδυναμική** όπως αυτή είχε διαμορφωθεί με την δουλειά του Clausius, στην οποία ο 2^{ος} θερμοδυναμικός νόμος είχε διατυπωθεί μέσω μιας νέας για την εποχή φυσικής ποσότητας, της εντροπίας (1865). Ήταν μάλιστα αντίθετος της στατιστικής Φυσικής των Boltzmann, Maxwell και Gibbs, καθώς δεν του άρεσε καθόλου ο πιθανοκρατικός χαρακτήρας της θεωρίας αυτής. **Βασισμένος στην θερμοδυναμική και μόνο σε αυτή, ο Planck ανέπτυξε την θεωρία του για την ΑΜΣ την περίοδο 1895 έως 1900 σε δύο στάδια.**

Στο **1^ο στάδιο**, παρήγαγε το πλέον σημαντικό θεώρημα που συνδέει την ζητούμενη ένταση της ΑΜΣ με την (χρονικά) μέση ενέργεια των ταλαντωτών της κοιλότητας. Στην συνέχεια έβγαλε μία σχέση μεταξύ ενέργειας και εντροπίας, αντί να βρει σχέση ενέργειας-θερμοκρασίας, που ήταν το σύνηθες στα πλαίσια της στατιστικής Φυσικής. **Την κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας, την βρήκε με την βοήθεια της εντροπικής του εξίσωσης, τις (άγνωστες) παραμέτρους της οποίας βρήκε προσαρμόζοντάς την, στην εμπειρική κατανομή του Wien για την ΑΜΣ.** Η κατανομή της έντασης της ΑΜΣ που βρήκε ήταν σε εξαιρετική συμφωνία με τα πειραματικά δεδομένα, και το 1^ο μέρος της θεωρητικής του δουλειάς έκλεισε με την παρουσίαση των αποτελεσμάτων του στις 19 Οκτώβρη 1900.

Στο **2^ο στάδιο** προσπάθησε να βρει μία θεωρητική βάση για την συνάρτηση κατανομής ενέργειας που παρήγαγε, κάτι που κατάφερε άμεσα (παρουσίαση αποτελεσμάτων στις 14 Δεκεμβρίου του 1900). Εφάρμοσε μια δική του εκδοχή της Στατιστικής Μηχανικής, όπου για τον υπολογισμό της εντροπίας των ταλαντωτών υπολόγισε όλους τους δυνατούς τρόπους που μη διακριτές τιμές της ενέργειας κατανέμονται σε διακριτούς ταλαντωτές. Φυσικά τα ίδια αποτελέσματα θα έβγαζε αν χρησιμοποιούσε την στατιστική φυσική. Να θυμίσω ότι το καταλυτικό στοιχείο σε αυτό το 2^ο στάδιο, είναι η διατήρηση μέχρι τέλους των διακριτών ενεργειακών καταστάσεων.

Ποτέ δεν ανέφερε την λέξη κβάντο ενέργειας ή κβαντισμένες ενεργειακές καταστάσεις, χρησιμοποιούσε την έκφραση **στοιχεία ενέργειας**, τα οποία για άγνωστους λόγους έδιναν το σωστό αποτέλεσμα μόνο όταν έπαιρναν **διακριτές τιμές.**

Κύρια πηγή στοιχείων, Edward G. Steward, «Quantum Mechanics», Imperial College Press, London, 2008 (σελίδες 26 -47), και David Bohm, «Quantum Theory», Dover, 1952 (σελίδες 6 -17).

Κβαντική Φυσική και Planck. Ένας απρόθυμος και συντηρητικός πατέρας της!

Αν και συχνά αποδίδεται στον Planck, ο χαρακτηρισμός του ιδρυτή της Κβαντικής θεωρίας, η ιστορική πραγματικότητα είναι πολύ διαφορετική. Η πραγματική ιστορία της ερμηνείας της ΑΜΣ, υπάρχει αποτυπωμένη στις **διάσημες διαλέξεις** του, που είναι καταγραμμένες στο βιβλίο «**Eight lectures on Theoretical Physics**» (1^η έκδοση 1906, 2^η 1912, ενώ σήμερα υπάρχει διαθέσιμη η βελτιωμένη ανατύπωση της 2^{ης} έκδοσης του 1915). Αν κάποιος δεν θέλει να διαβάσει τα πρωτότυπα, και για λόγους δυσκολίας κατανόησης του φορμαλισμού, ένα ιδανικό βιβλίο που αναλύει εκτενώς όλη την ιστορία αλλά και την φυσική, είναι το βιβλίο «**Black-Body theory and the quantum discontinuity, 1894-1912**», του μεγάλου ιστορικού και φιλόσοφου της επιστήμης Thomas Kuhn, του οποίου το βιβλίο «Η δομή των επιστημονικών επαναστάσεων» έχει αλλάξει την μοντέρνα επιστημολογία.

Εκεί βλέπουμε ότι στην 1^η έκδοση (1906) ο Planck είχε μια **ξεκάθαρα κλασική ματιά** και η ασυνέχεια των ενεργειών δεν ήταν τίποτα παραπάνω από ένα **μαθηματικό τέχνασμα**. Στην 2^η έκδοση (1912) αποδέχεται (για πρώτη φορά) τα κβαντικά άλματα ως φυσική πραγματικότητα, **αλλά μόνο για την περιγραφή του φαινομένου της εκπομπής** και όχι της απορρόφησης που εξακολουθούσε να πιστεύει ότι γινόταν με κλασικό τρόπο. Ο ίδιος ανέφερε ότι με αυτό τον τρόπο 'έκανε το λιγότερο κακό στο κλασικό οικοδόμημα'. Βέβαια την επόμενη χρονιά (1913) ήρθε το ατομικό μοντέλο του Bohr με προφανή αναγκαιότητα στην αντιμετώπιση της εκπομπής/απορρόφησης σε ίδια ασυνεχή λογική. Είναι εντυπωσιακό να πούμε ότι ο Planck, δέχθηκε την αναγκαιότητα της κβάντωσης στον μικρόκοσμο το 1918, την χρονιά που βραβεύτηκε με το Nobel φυσικής!

Να αναφέρω, ότι τις χρονιές που Planck προσπαθούσε να βρει κλασικές ερμηνείες, εμφανίστηκαν και άλλες ερμηνείες (στην πραγματικότητα ισοδύναμες) αποδείξεις της διάσημης σχέσης της κατανομής της έντασης στην ΑΜΣ. Η 1^η το 1909 από τον Einstein, απόδειξη που βασιζόταν στις έννοιες της αυθόρμητης απορρόφησης και της (αυθόρμητης και εξαναγκασμένης) εκπομπής. Η 2^η από τον Debye, το 1912, ουσιαστικά ως παράπλευρο αποτέλεσμα της μελέτης της ειδικής θερμότητας των στερεών. Εκεί χρησιμοποιήθηκε η κβάντωση των ταλαντωτικών κινήσεων των πλεγματικών σημείων, σήμερα γνωστά και ως φωνόνια. Για την ΑΜΣ, υλοποιούμε μια ανάλογη κβάντωση του η/μ πεδίου στο εσωτερικό της κοιλότητας του μέλανος σώματος (βλέπε σχήμα 1). Μια αντιμετώπιση του φαινομένου της ΑΜΣ, που υπερτερεί σε σχέση με αυτή του Planck, μια και εξηγεί με απλό φυσικό τρόπο την ανεξαρτησία της ακτινοβολίας από το υλικό του σώματος.

Ερωτήσεις εκπαιδευτικών σχετικά με ΑΜΣ

Ερώτηση: Γιατί η κλασική φυσική αδυνατεί να ερμηνεύσει πλήρως τα πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με την φασματική κατανομή της έντασης της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος και πως η κβαντική φυσική τα ερμηνεύει; Η απάντηση στο παραπάνω ερώτημα κατά την γνώμη μου δίνεται σχεδόν αξιωματικά στο σχολικό βιβλίο και συνεπώς γιατί να την πιστέψουμε;

Απόπειρα Απάντησης: η εκτίμησή μου είναι ότι στο βιβλίο γίνεται σχετικά επαρκής ανάπτυξη (πάντως με λάθη που παρουσίασα λεπτομερώς στις προηγούμενες διαφάνειές μου), στον ορισμό του μέλανος σώματος, στην έννοια και την μορφή του φάσματος και στον νόμο μετατόπισης του Wien. **Οπότε μόνο σε αυτά τα θέματα μπορεί ο εκπαιδευτικός να κάνει σχετικά επαρκή διδασκαλία και να λύσει ασκήσεις.**

Στο σχολικό βιβλίο δεν γίνεται καμία απόπειρα εξήγησης της ανεπάρκειας της κλασικής ερμηνείας, που οδηγεί στην «υπεριώδη καταστροφή» (τεράστια αύξηση της εκπεμπόμενης ενέργειας με την μείωση του μήκους κύματος). Ενώ και η ίδια η κλασική ερμηνεία σκιαγραφείται λάθος, όπως εξήγησα σε προηγούμενη διαφάνεια.

«Ο κλασικός τύπος των Rayleigh-Jeans, με $J(f) \sim \frac{f^2 kT}{c^2}$ προκύπτει από τον εμπειρικό νόμο της καθολικότητας της θερμικής ακτινοβολίας –δηλαδή την ανεξαρτησία της από τη φύση του εμπέμποντος υλικού– με καθαρά διαστατικές απαιτήσεις. Επομένως η κλασική φυσική δεν έχει κανένα περιθώριο να αποφύγει την υπεριώδη καταστροφή.» από το βιβλίο του Στέφανου Τραχανά, «Στοιχειώδης Κβαντική Φυσική», εκδόσεις ΠΕΚ (2012), σελίδα 7.

Προφανώς και το πως οι δύο υποθέσεις του Planck, (α) υπερνικούν τα προβλήματα της κλασικής προσέγγισης (που έτσι και αλλιώς δεν έχει παρουσιαστεί ορθά) και (β) με πιο τρόπο δίνουν τα σωστά αποτελέσματα, είναι σε πλήρη ανεπάρκεια. Βέβαια, αναμενόμενο, όπως έγινε φανερό από τις πέντε τελευταίες (σε κίτρινο φόντο) διαφάνειες, αφού η πλήρης ανάπτυξη της θεωρίας κράτησε πάνω από δέκα χρόνια. Το υλικό αυτό το θεωρώ, πρακτικά αδύνατο να παρουσιαστεί με απλή λογική συνέπεια σε ένα μάθημα λυκείου. Ακόμα και στα πανεπιστημιακά συγγράμματα, όπου η λύτρωση έρχεται συνήθως μέσω των μαθηματικών τύπων που συνδυάζουν διαφορετικές μεθοδολογίες, η πραγματική ιστορική ανάπτυξη των οποίων αγνοείται πλήρως.

Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

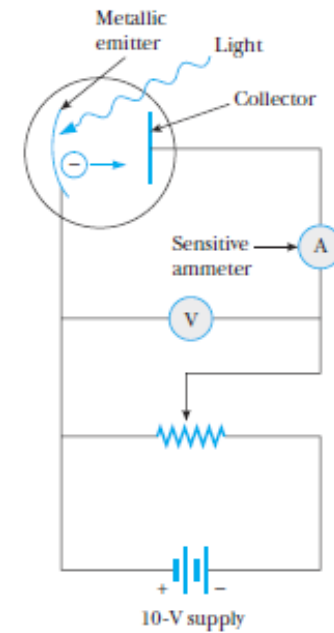
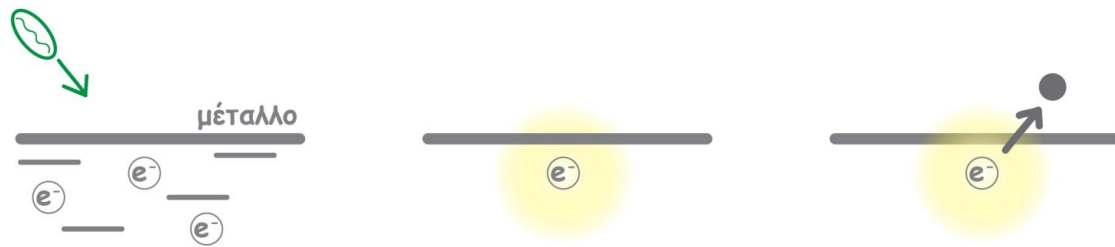


Figure 3.14 Photoelectric effect apparatus.

7.3. Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο (σελίδα 229)

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι το φαινόμενο κατά το οποίο μια μεταλλική επιφάνεια απελευθερώνει ηλεκτρόνια στο περιβάλλον όταν πάνω της προσπίπτει φως.

ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΑΡΑΤΗΡΗΘΗΚΕ ΤΟ 1887, ΑΠΟ ΤΟΝ HERTZ, ΣΤΑ ΠΕΡΙΦΗΜΑ ΙΔΙΟΦΥΗ ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΤΟΥ, ΠΟΥ ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΑΝ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΑ ΚΥΜΑΤΑ ΠΟΥ ΕΙΧΕ ΠΡΟΒΛΕΨΕΙ ΘΕΩΡΗΤΙΚΑ Ο MAXWELL. ΚΑΤΑ ΤΡΑΓΙΚΗ ΕΙΡΩΝΙΑ, ΑΥΤΟΣ ΠΟΥ ΕΠΑΛΗΘΕΥΣΕ ΤΗΝ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ ΦΥΣΗ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ, ΕΙΧΕ ΑΘΕΛΑ ΤΟΥ, ΑΝΑΚΑΛΥΨΕΙ ΤΑΥΤΟΧΡΟΝΑ ΤΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ ΠΟΥ ΘΑ ΑΜΦΙΣΒΗΤΟΥΣΕ ΕΝΤΟΝΑ ΤΗΝ ΚΛΑΣΙΚΗ ΚΥΜΑΤΙΚΗ ΘΕΩΡΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ! (ΕΚΤΕΝΗΣ ΑΝΑΦΟΡΑ ΣΤΟ ΒΙΒΛΙΟ «ΣΥΓΧΡΟΝΗ ΦΥΣΙΚΗ», ΤΩΝ SERWAY-MOSES-MOYER, ΕΚΔΟΣΕΙΣ ΠΕΚ, ΣΕΛ. 48-50).

Τα ηλεκτρόνια που υπάρχουν στο εσωτερικό ενός αγωγού περιορίζονται στο χώρο που καταλαμβάνει ο αγωγός, από δυνάμεις που εμποδίζουν τη διάχυσή τους στο περιβάλλον. ΣΤΑ ΜΕΤΑΛΛΑ ΕΝΑΣ ΜΕΓΑΛΟΣ ΑΡΙΘΜΟΣ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΩΝ ΕΧΕΙ ΑΠΟΣΠΑΣΤΕΙ ΑΠΟ ΤΑ ΑΤΟΜΑ ΣΤΑ ΟΠΟΙΑ ΑΝΗΚΕ ΚΑΙ ΚΥΚΛΟΦΟΡΟΥΝ 'ΕΛΕΥΘΕΡΑ' ΣΤΟ ΠΕΡΙΒΑΛΛΟΝ ΠΟΥ ΔΗΜΙΟΥΡΓΟΥΝ ΤΑ ΙΟΝΙΣΜΕΝΑ ΠΛΕΟΝ ΑΤΟΜΑ. ΤΟ ΘΕΤΙΚΟ ΑΥΤΟ ΦΟΡΤΙΟ ΤΩΝ ΙΟΝΤΩΝ ΕΙΝΑΙ ΑΥΤΟ ΠΟΥ ΣΥΓΚΡΑΤΕΙ ΜΕ ΗΛΕΚΤΡΟΣΤΑΤΙΚΕΣ ΔΥΝΑΜΕΙΣ ΤΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΑ. Η ΕΛΑΧΙΣΤΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΠΟΥ ΠΡΕΠΕΙ ΝΑ ΔΟΘΕΙ ΣΕ ΕΝΑ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ ΓΙΑ ΝΑ ΑΠΟΣΠΑΣΘΕΙ ΑΠΟ ΤΟ ΜΕΤΑΛΛΟ ΟΝΟΜΑΖΕΤΑΙ ΕΡΓΟ ΕΞΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΠΡΟΦΑΝΩΣ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΥΛΙΚΟ (ΠΙΝΑΚΑΣ ΔΙΠΛΑ, πάλι βιβλίο Serway). Όταν μια δέσμη φωτός προσπίπτει πάνω στην επιφάνεια του αγωγού κάποια ηλεκτρόνια απορροφούν ενέργεια αρκετή για να υπερνικήσουν αυτές τις δυνάμεις και βγαίνουν από το μέταλλο (**φωτοηλεκτρόνια**).

Για να υπερνικήσει τις δυνάμεις που το συγκρατούν στο μέταλλο ένα ηλεκτρόνιο πρέπει να προσλάβει ένα ελάχιστο ποσό ενέργειας. Η ενέργεια αυτή ονομάζεται **έργο εξαγωγής** και συμβολίζεται με ϕ . Το έργο εξαγωγής ποικίλει από μέταλλο σε μέταλλο. (σελίδα 230).

Table 3.1 Work Functions of Selected Metals

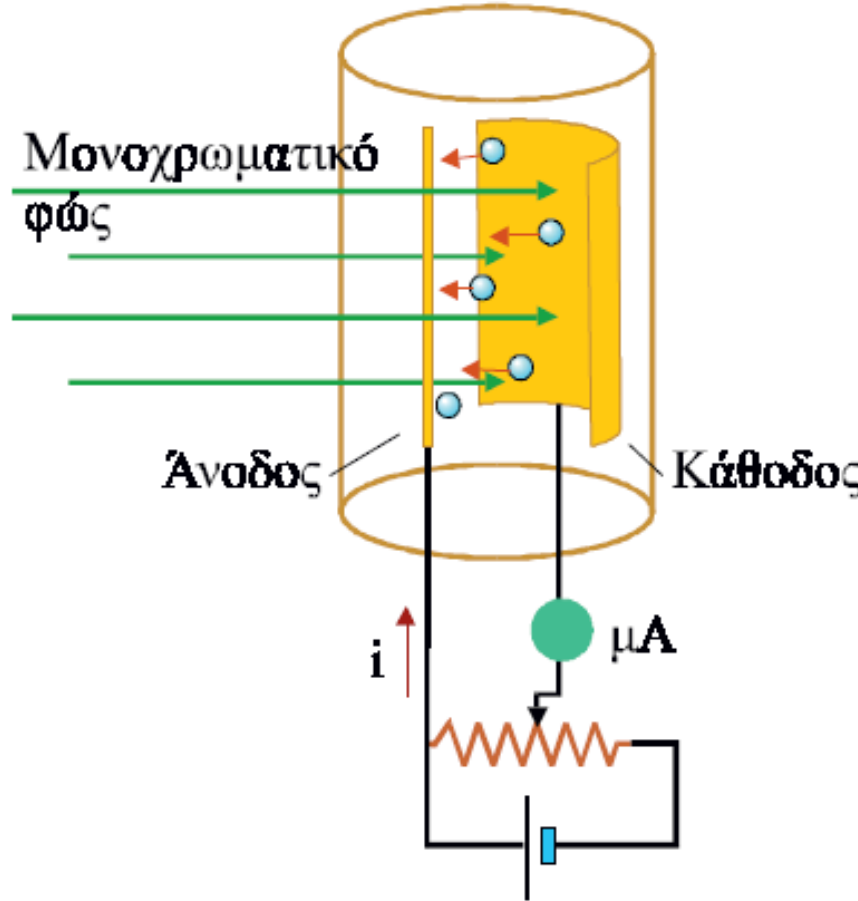
Metal	Work Function, ϕ , (in eV)
Na	2.28
Al	4.08
Cu	4.70
Zn	4.31
Ag	4.73
Pt	6.35
Pb	4.14
Fe	4.50

Για τη μελέτη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου θα χρησιμοποιήσουμε τη διάταξη του **σχήματος 7.3**.

Μέσα σε ένα σωλήνα υψηλού κενού ($\sim 0.0000001 \text{ atm}$) τοποθετούμε δύο ηλεκτρόδια. Το πρώτο, που χρησιμεύει ως **κάθοδος**, έχει μεγάλη επιφάνεια, φέρει επίστρωση από ένα αλκαλιμέταλλο (**K** ή **Cs**) και όταν φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια.

Η ΠΙΟ ΒΑΣΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΣΤΟ ΠΕΙΡΑΜΑ ΕΙΝΑΙ Η ΠΡΟΣΠΙΠΤΟΥΣΑ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΜΕ ΜΟΝΑΔΙΚΑ ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΑ (ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΥΣ ΔΗΛΑΔΗ ΤΟΥ ΠΕΙΡΑΜΑΤΟΣ) ΤΗΝ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ (ΥΠΕΡΙΩΔΕΣ Ή ΟΡΑΤΟ ΦΩΣ) ΚΑΙ ΤΗΝ ΕΝΤΑΣΗ ΤΗΣ (ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΣ ΚΑΙ ΑΝΑ ΜΟΝΑΔΑ ΧΡΟΝΟΥ).

Τα ηλεκτρόνια αυτά συλλέγονται από το δεύτερο ηλεκτρόδιο την **άνοδο**. Με τη βοήθεια μιας ποτενσιομετρικής διάταξης μπορούμε να μεταβάλλουμε την τάση που εφαρμόζεται στα ηλεκτρόδια. Τέλος, με ένα μικροαμπερόμετρο που παρεμβάλλεται στο κύκλωμα μπορούμε να μετρήσουμε την ένταση του ρεύματος που οφείλεται στα ηλεκτρόνια που εκπέμπει η φωτιζόμενη κάθοδος. Όταν η κάθοδος φωτίζεται εκπέμπει ηλεκτρόνια (φωτοηλεκτρόνια) τα οποία επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ των ηλεκτροδίων (**σχ. 7.3**) και καταλήγουν στην άνοδο.



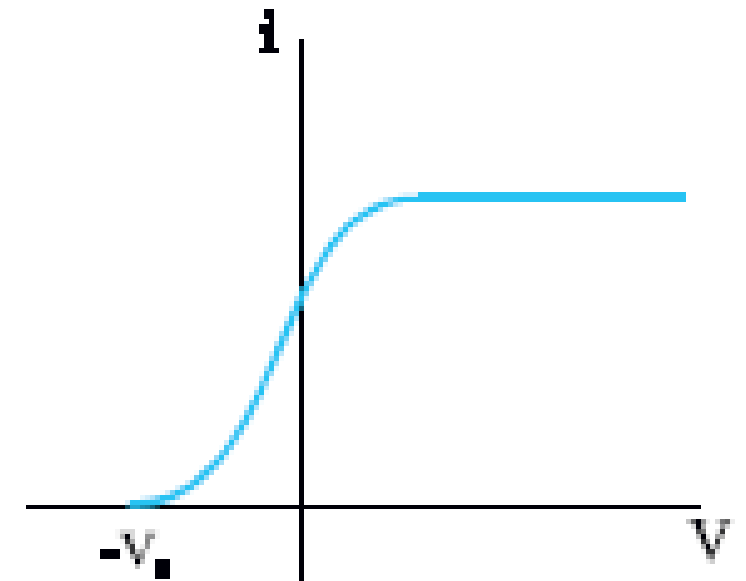
Σχηματική παράσταση ενός κυκλώματος φωτοκύτταρου.

Σχήμα 7-3.

Πειραματικά διαπιστώνεται ότι

1. Εκπομπή φωτοηλεκτρονίων έχουμε μόνο όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας ορισμένης συχνότητας, η οποία είναι χαρακτηριστική για το μέταλλο. Αυτή η οριακή συχνότητα ονομάζεται **συχνότητα κατωφλίου (f_0)**.
2. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από το μέταλλο ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογος της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο μέταλλο.
3. Η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας αλλά μόνο από τη συχνότητά της και αυξάνεται όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας μεγαλώνει.

Το **διάγραμμα 7.4** παριστάνει την ένταση του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση μεταξύ ανόδου καθόδου στο κύκλωμα του **σχήματος 7.3**. Παρατηρήστε ότι για τάση μηδέν έχουμε ρεύμα, που σημαίνει ότι τα φωτοηλεκτρόνια εξέρχονται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια που τους επιτρέπει να κινηθούν μέχρι την άνοδο. Ρεύμα έχουμε και για τάσεις λίγο μικρότερες από το μηδέν. Τάση αρνητική, εδώ, σημαίνει ότι η άνοδος έχει μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ανόδου - καθόδου παρεμποδίζει τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο να φτάσουν στην άνοδο. Εφόσον για κάποιες αρνητικές τιμές της τάσης έχουμε ρεύμα, η κινητική ενέργεια ορισμένων ηλεκτρονίων, όταν εξέρχονται από την κάθοδο, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικήσουν το αντιτιθέμενο ηλεκτρικό πεδίο και να φτάσουν στην άνοδο. Η τάση (V_0) στην οποία διακόπτεται το ρεύμα ονομάζεται **τάση αποκοπής**.



Διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση στο φωτοκύτταρο.

Σχήμα 7-4.

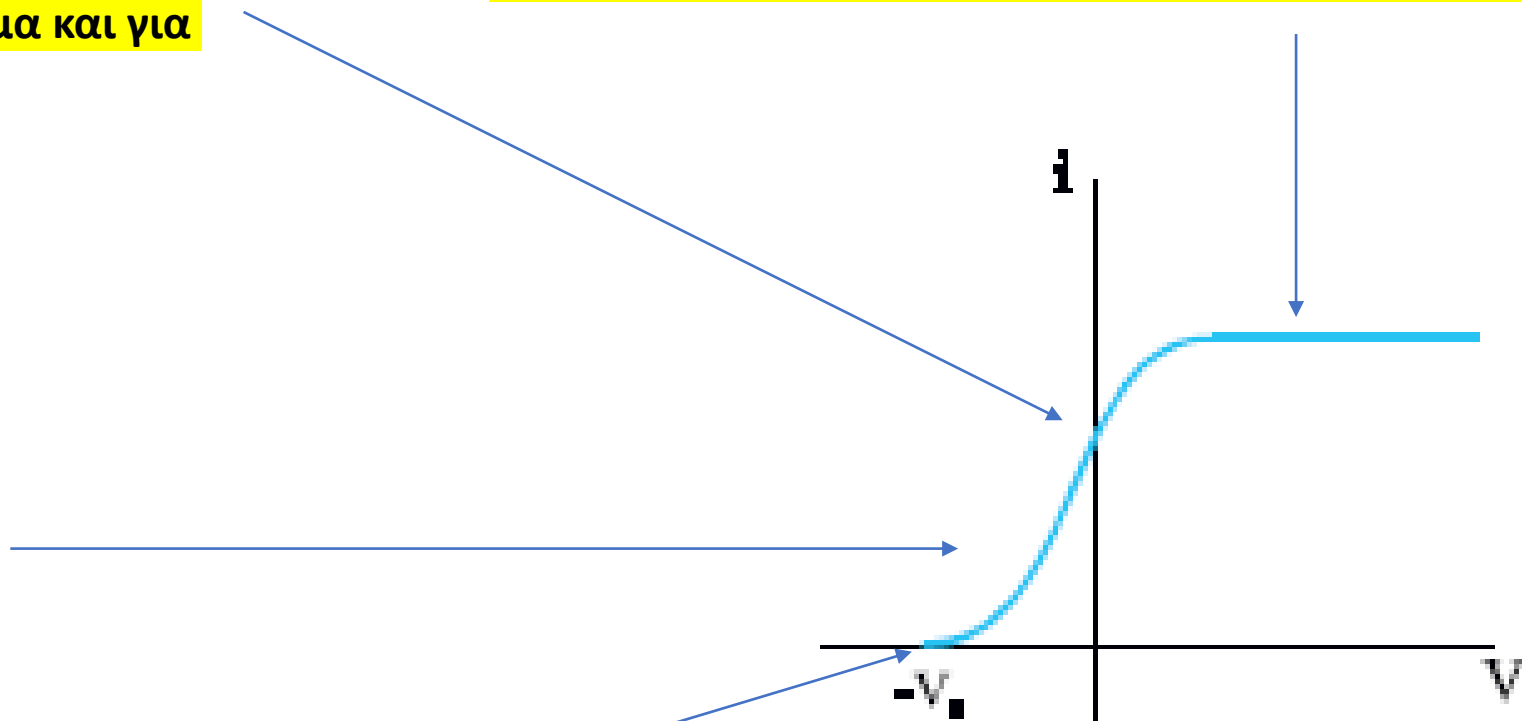
Πληροφορίες στο διάγραμμα του πειράματος (σχήμα 7-4) που μπορούν να ερμηνευτούν κλασικά

Η προσπίπτουσα ακτινοβολία μεταφέρει ενέργεια που αποσπών τα φωτοηλεκτρόνια και εξέρχονται από την κάθοδο με κινητική ενέργεια που τους επιτρέπει να κινηθούν μέχρι την άνοδο **ακόμα και για τάση μηδέν.**

Τάση αρνητική, εδώ, σημαίνει ότι η άνοδος έχει μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο. Στην περίπτωση αυτή το ηλεκτρικό πεδίο μεταξύ ανόδου - καθόδου παρεμποδίζει τα ηλεκτρόνια που εξέρχονται από την κάθοδο να φτάσουν στην άνοδο. Εφόσον για κάποιες αρνητικές τιμές της τάσης έχουμε ρεύμα, η κινητική ενέργεια ορισμένων ηλεκτρονίων, όταν εξέρχονται από την κάθοδο, είναι αρκετά μεγάλη ώστε να υπερνικήσουν το αντιτιθέμενο ηλεκτρικό πεδίο και να φτάσουν στην άνοδο. Η τάση (V_0) στην οποία διακόπτεται το ρεύμα ονομάζεται **τάση αποκοπής**.

Ερμηνεία πλατό (δεν αναφέρεται στο βιβλίο).

Για δεδομένη ένταση της ακτινοβολίας, υπάρχει ένας **μέγιστος αριθμός** φωτοηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου, που εξέρχονται από την κάθοδο και όσο και να αυξήσω την τάση δεν μπορεί να αλλάξει το ρεύμα.

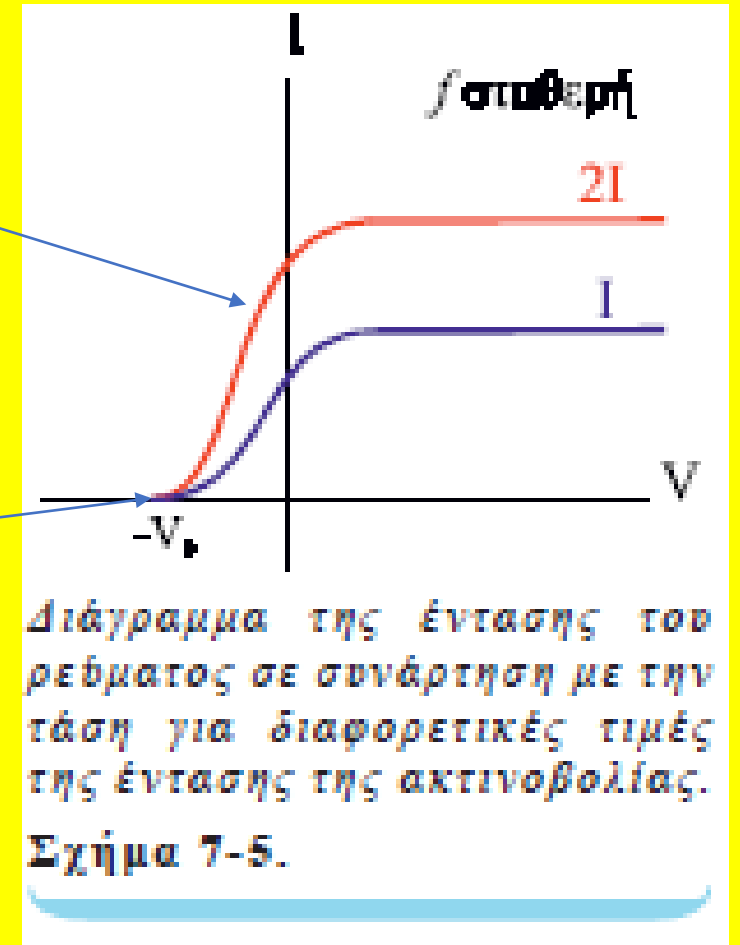


Διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση στο φωτοκύτταρο.

Σχήμα 7-4.

Υπάρχουν πληροφορίες στο διάγραμμα του πειράματος (σχήμα 7-5) που ΔΕΝ μπορούν να ερμηνευτούν κλασικά

Η αύξηση του ρεύματος (αριθμός φωτοηλεκτρονίων ανά μονάδα χρόνου) με την αύξηση της έντασης είναι **αναμενόμενη κλασικά**, μια και διατίθεται από την ακτινοβολία περισσότερη ενέργεια ανά μονάδα επιφάνειας, οπότε και περισσότερα φωτοηλεκτρόνια θα αποσπαστούν και θα συνεισφέρουν στο ρεύμα.



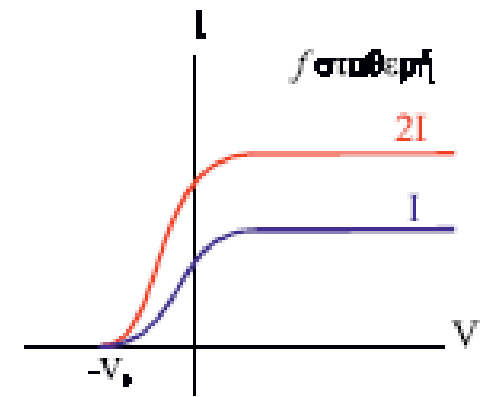
Η ανεξαρτησία της τάσης αποκοπής από την ένταση της ακτινοβολίας, είναι παντελώς απροσδόκητο, μη εξηγήσιμο κλασικά πειραματικό γεγονός.

Φανερώνει ότι κάθε φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφήσει μια συγκεκριμένη ποσότητα προσπίπτουσας ενέργειας απορρίπτοντας την απομένουσα ενέργεια της ακτινοβολίας μεγαλύτερης έντασης

(σελίδα 230) Πειραματικά διαπιστώνεται ότι

1. Εκπομπή φωτοηλεκτρονίων έχουμε μόνο όταν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη ή ίση μιας ορισμένης συχνότητας, η οποία είναι χαρακτηριστική για το μέταλλο. Αυτή η οριακή συχνότητα ονομάζεται **συχνότητα κατωφλίου (f_0)**.

ΔΗΛΑΔΗ, ΟΠΟΙΑΔΗΠΟΤΕ ΕΝΤΑΣΗ ΚΑΙ ΑΝ ΕΧΕΙ Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ, ΓΙΑ ΤΙΜΕΣ ΤΗΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑΣ ΜΙΚΡΟΤΕΡΕΣ ΤΗΣ ΤΙΜΗΣ ΚΑΤΩΦΛΙΟΥ, ΔΕΝ ΠΑΡΑΤΗΡΩ ΤΟ ΔΙΠΛΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ. ΕΝΩ, ΑΝ ΕΙΜΑΙ ΣΕ ΜΕΓΑΛΥΤΕΡΕΣ ΣΥΧΝΟΤΗΤΕΣ ΑΚΟΜΑ ΚΑΙ ΓΙΑ ΠΟΛΥ ΧΑΜΗΛΗ ΕΝΤΑΣΗ ΠΑΙΡΝΩ ΤΟ ΔΙΠΛΑΝΟ ΔΙΑΓΡΑΜΜΑ.



Διάγραμμα της έντασης του ρεύματος σε συνάρτηση με την τάση για διαφορετικές τιμές της έντασης της ακτινοβολίας.

Σχήμα 7-5.

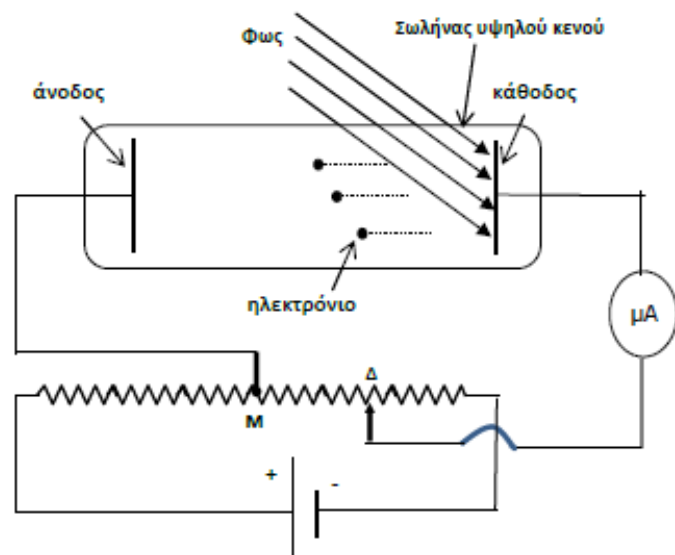
2. Ο αριθμός των ηλεκτρονίων που αποσπώνται από το μέταλλο ανά μονάδα χρόνου είναι ανάλογος της έντασης της φωτεινής ακτινοβολίας που προσπίπτει στο μέταλλο.

ΤΟ ΟΠΟΙΟ, ΟΠΩΣ ΗΔΗ ΕΧΟΥΜΕ ΑΝΑΦΕΡΕΙ, ΥΠΟΣΤΗΡΙΖΕΤΑΙ ΚΑΙ ΚΛΑΣΙΚΑ.

3. Η ταχύτητα με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια δεν εξαρτάται από την ένταση της φωτεινής ακτινοβολίας αλλά μόνο από τη συχνότητά της και αυξάνεται όταν η συχνότητα της ακτινοβολίας μεγαλώνει.

ΑΥΤΟ ΔΕΝ ΦΑΙΝΕΤΑΙ ΑΠΟ ΤΟ ΔΙΠΛΑΝΟ ΣΧΗΜΑ. ΜΟΝΟ ΑΝ ΕΙΧΑΜΕ ΕΝΑ ΑΝΑΛΟΓΟ ΣΧΗΜΑ ΓΙΑ ΔΙΑΦΟΡΕΤΙΚΗ ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ ΘΑ ΒΛΕΠΑΜΕ ΤΗΝ ΕΞΑΡΤΗΣΗ ΑΥΤΗ, ΠΟΥ ΘΑ ΑΠΟΤΥΠΩΝΟΤΑΝ ΣΤΗΝ ΤΑΣΗ ΑΠΟΚΟΠΗΣ ΠΟΥ ΘΑ ΜΕΤΑΤΟΠΙΖΟΤΑΝ, ΚΑΙ ΜΑΛΙΣΤΑ ΤΟΣΟ ΠΙΟ ΜΑΚΡΙΑ ΑΠΟ ΤΗΝ ΑΡΧΗ ΤΩΝ ΑΞΟΝΩΝ ΟΣΟ ΠΙΟ ΜΕΓΑΛΗ ΘΑ ΗΤΑΝ Η ΣΥΧΝΟΤΗΤΑ. ΣΥΖΗΤΗΣΗ ΓΙΑ ΑΥΤΟ ΓΙΝΕΤΑΙ ΣΤΙΣ ΟΔΗΓΙΕΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ (ΕΠΟΜΕΝΗ ΔΙΦΑΝΕΙΑ)

ΟΔΗΓΙΕΣ ΔΙΔΑΣΚΑΛΙΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ ΓΙΑ ΤΟ ΣΧΟΛΙΚΟ ΕΤΟΣ 2022–2023



Η πολύ σημαντική εξάρτηση της τάσης αποκοπής που ισοδύναμα αντιστοιχεί και στην ΜΕΓΙΣΤΗ κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων από την συχνότητα της ακτινοβολίας.

ΔΥΟ ΠΟΛΥ ΣΗΜΑΝΤΙΚΕΣ ΠΕΙΡΑΜΑΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΥΠΩΣΕΙΣ, ΜΕ ΕΝΤΟΝΟ ΜΗ ΚΛΑΣΙΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ.

ΕΙΔΙΚΑ ΓΙΑ ΤΟ Α), ΓΙΑ ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ ΓΙΑ ΑΣΘΕΝΕΙΣ ΠΗΓΕΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ (Π.Χ. ΜΙΑ ΛΑΜΠΑ), ΑΠΛΟΙ ΚΛΑΣΙΚΟΙ ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΙ ΕΚΤΙΜΟΥΝ ΧΡΟΝΟ ΑΝΑΜΟΝΗΣ ΓΙΑ ΤΟ ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ, ΜΕΧΡΙ ΝΑ ΜΑΖΕΥΣΕΙ ΤΗΝ ΠΟΣΟΤΗΤΑ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΟΥ ΧΡΕΙΑΖΕΤΑΙ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΞΑΓΩΓΗ ΤΟΥ, ΤΗΣ ΤΑΞΗΣ ΤΟΥ SEC.

ΕΠΙΠΛΕΟΝ, Η ΑΠΟΥΣΙΑ ΧΡΟΝΟ-ΚΑΘΥΣΤΕΡΗΣΗΣ ΕΝΙΣΧΥΕΙ ΤΟΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΟ ΧΑΡΑΚΤΗΡΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΣ, ΜΙΑ ΚΑΙ ΕΙΝΑΙ ΠΙΟ ΠΡΟΦΑΝΗΣ Η ΣΤΙΓΜΙΑΙΑ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗ ΑΠΟ ΕΝΑ ΣΗΜΕΙΑΚΟ ΕΝΕΡΓΟΦΟΡΟ ΑΝΤΙΚΕΙΜΕΝΟ.

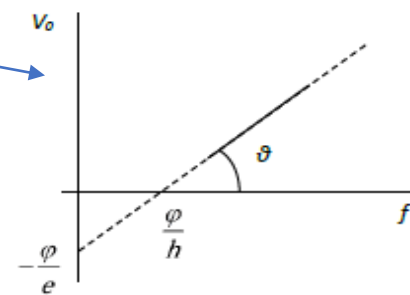
άλλο ηλεκτρόδιο –και επομένως για να μηδενιστεί το φωτορεύμα– θα πρέπει να εφαρμόσουμε αρνητική τάση μεταξύ ανόδου –καθόδου τέτοια ώστε

$$eV_0 = \frac{1}{2}mv^2$$

η τάση αυτή λέγεται «τάση αποκοπής» και από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση προκύπτει ότι

$$eV_0 = hf - \phi \quad \text{ή}$$

$$V_0 = \frac{h}{e}f - \frac{\phi}{e}$$



Η παραπάνω σχέση παριστάνεται γραφικά με

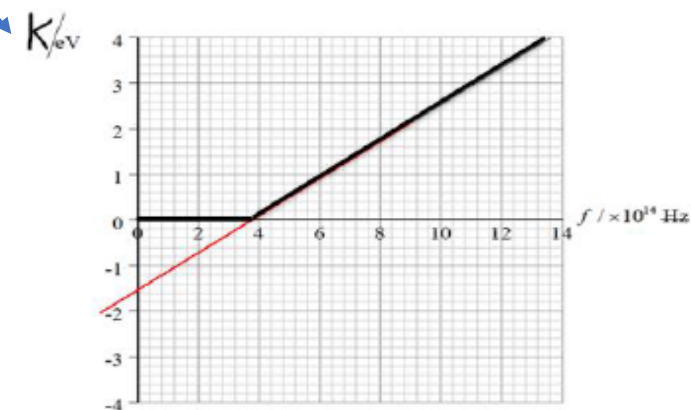
ευθεία που έχει κλίση $k = e\phi\theta = \frac{h}{e}$ και περνάει

από τα σημεία $(\frac{\phi}{h}, 0)$ και $(0, -\frac{\phi}{e})$.

Επομένως από το διάγραμμα $V_0(f)$ είναι δυνατό να υπολογιστούν η σταθερά h

(σταθερά του Planck) και το ϕ (έργο εξαγωγής για το υλικό της φωτοκαθόδου).

-Το παρακάτω γράφημα δείχνει την (μέγιστη) κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την επιφάνεια ενός μετάλλου σε σχέση με τη συχνότητα, του προσπίπτοντος φωτός.



Από το γράφημα αυτό μπορούμε να βρούμε τη συχνότητα κατωφλίου (τομή x), το έργο εξαγωγής (τομή y) και τη σταθερά του Planck (κλίση)

Στο παραπάνω σχήμα φαίνεται μια αναπαράσταση της συσκευής του Philipp Lenard ο οποίος το 1902 με τα πειράματά του διερεύνησε την επίδραση της έντασης του φωτός (δηλαδή της ενέργειας που προσπίπτει σε κάθε δευτερόλεπτο στη μονάδα επιφάνειας του μετάλλου της καθόδου) και της διαφοράς δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, στο ηλεκτρικό ρεύμα που δημιουργείται από το φως, θέτοντας τις βάσεις για την ανακάλυψη του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Όταν ο δρομέας Δ είναι δεξιά από την επαφή Μ στο μέσον της αντίστασης τότε η άνοδος έχει μεγαλύτερο δυναμικό από την κάθοδο (θετική τάση) και τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται προς την άνοδο. Όταν ο δρομέας Δ είναι στο μέσον Μ τότε η τάση μεταξύ ανόδου και καθόδου είναι μηδενική. Αν τέλος ο δρομέας Δ είναι αριστερά του Μ τότε η άνοδος έχει μικρότερο δυναμικό από την κάθοδο (Αρνητική τάση) και τα ηλεκτρόνια επιβραδύνονται καθώς κινούνται προς την άνοδο.

-Στις πειραματικές διαπιστώσεις θα μπορούσαν να προστεθούν και οι εξής:

Α) Το ρεύμα εμφανίζεται χωρίς καθυστέρηση όταν προσπίπτει το φως. Σε νεότερα πειράματα έχει υπολογιστεί ότι η όποια καθυστέρηση είναι μικρότερη από 1ns.

Β) Ακόμα και για πολύ μικρές τιμές της έντασης του φωτός ισχύει η αναλογία του ρεύματος κόρου με την ένταση του φωτός. Επίσης η τάση αποκοπής είναι η ίδια ανεξάρτητα από την ένταση του προσπίπτοντος φωτός όπως φαίνεται και στο σχήμα 7-5.

Το φως, ως ηλεκτρομαγνητικό κύμα, μεταφέρει ενέργεια, επομένως, είναι αναμενόμενο ότι τα ηλεκτρόνια κάποιου μετάλλου μπορούν να απορροφήσουν ενέργεια από το φως και να εξέλθουν από το μέταλλο. Η κλασική θεωρία όμως δε μπόρεσε 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 ενέργεια που μεταφέρει η φωτεινή δέσμη που προσπίπτει στο μέταλλο, δηλαδή από την ένταση της ακτινοβολίας.

Το φαινόμενο ερμηνεύτηκε το 1905 από τον Einstein ο οποίος, επεκτείνοντας τις απόψεις του Planck, υπέθεσε ότι

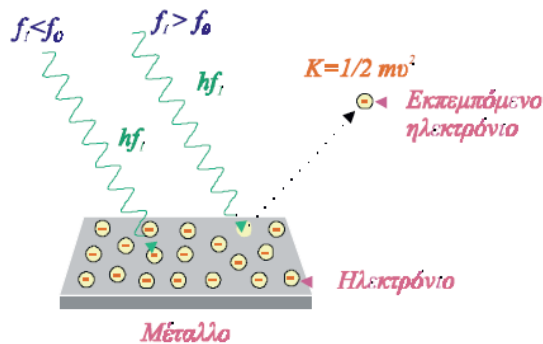
«το φως αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια»

Η ενέργεια κάθε φωτονίου είναι $E = hf$ (7.1), όπου f η συχνότητά του και h η σταθερά του Planck.

Κατά τον Einstein, κάθε φωτόνιο της δέσμης που φωτίζει την κάθοδο μεταδίδει όλη του την ενέργεια hf σε ένα μόνο από τα ηλεκτρόνια του μετάλλου. Αν η ενέργεια hf του φωτονίου είναι μικρότερη από το έργο εξαγωγής, το ηλεκτρόνιο δε μπορεί να εγκαταλείψει το μέταλλο. Εάν είναι μεγαλύτερη ή ίση με το έργο εξαγωγής ϕ το ηλεκτρόνιο εγκαταλείπει το μέταλλο με κινητική ενέργεια που υπολογίζεται από τη σχέση.

$$K = hf - \phi \quad \text{Φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein} \quad (7.2)$$

Κινητική ενέργεια ηλεκτρονίου	=	Ενέργεια προσπίπτοντος φωτονίου	-	Έργο εξαγωγής
$1/2 mv^2$	=	hf	-	Φ



Σχηματική παράσταση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου.

Σχήμα 7-6.

Η φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein ερμηνεύει όλα τα πειραματικά δεδομένα.

Για να εξέλθει ένα ηλεκτρόνιο από το μέταλλο πρέπει

$$hf - \phi \geq 0$$

δηλαδή η ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου να είναι μεγαλύτερη ή οριακά ίση με το έργο εξαγωγής $hf \geq \phi$

ή

$$f \geq \frac{\phi}{h}$$

Η συχνότητα $f_0 = \frac{\phi}{h}$ είναι η **συχνότητα κατωφλίου**.

Αν η συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας είναι μεγαλύτερη από τη συχνότητα κατωφλίου η αύξηση της έντασης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας συνεπάγεται αύξηση του αριθμού των φωτονίων που πέφτουν στην κάθοδο ανά μονάδα χρόνου και επομένως αύξηση του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εξέρχονται από το μέταλλο στον ίδιο χρόνο. Τέλος όπως φαίνεται από τη φωτοηλεκτρική εξίσωση, η κινητική ενέργεια με την οποία εξέρχονται τα ηλεκτρόνια από κάποιο μέταλλο εξαρτάται μόνο από τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας.

Η ορμή των φωτονίων

Στην παράγραφο 6-11 είδαμε ότι ένα σωματίο με μηδενική μάζα ηρεμίας - τέτοιο είναι το φωτόνιο - έχει ενέργεια $E = pc$. Όμως είδαμε επίσης ότι η ενέργεια ενός φωτονίου είναι $E = hf$. Εύκολα βρίσκει κανείς ότι $p = \frac{hf}{c}$. Αν λάβουμε υπόψη ότι $c = \lambda f$ καταλήγουμε στο συμπέρασμα ότι η ορμή του φωτονίου δίνεται από τη σχέση

$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (7.3)$$

Το φως στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συμπεριφέρεται σαν ένα ρεύμα σωματιδίων (φωτονίων). Σε άλλες περιπτώσεις όμως το φως συμπεριφέρεται σαν κύμα (π.χ. δίνει φαινόμενα συμβολής). Η **σχέση (7.3)** είναι ιδιαίτερα σημαντική γιατί φωτίζει τη δυαδική φύση του φωτός. Συνδέει μία καθαρά σωματιδιακή ιδιότητα, όπως η ορμή, με μια καθαρά κυματική ιδιότητα, όπως το μήκος κύματος. Ο σύνδεσμος μεταξύ τους είναι η σταθερά του Planck.

Είναι πραγματικά εντυπωσιακό ότι ο Einstein παρουσίασε την **σχέση (7.3)**, **έντεκα χρόνια** μετά την ερμηνεία του για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, αν και όπως σωστά αναφέρεται στο σχολικό βιβλίο **δεν ήταν παρά μια πολύ απλή εφαρμογή της δικής του ειδικής θεωρίας της σχετικότητας** (παράγραφο 6-11, εκτός διδακτέας ύλης στο σχολικό βιβλίο).

Η ιδέα ότι το φωτόνιο μεταφέρει εκτός από ενέργεια και ορμή, **αναφέρεται λογικά σε αυτή την παράγραφο για να χρησιμοποιηθεί στο επόμενο κεφάλαιο του βιβλίου που θα μελετηθεί η σκέδαση Compton**, στην εξήγηση της οποίας παίζει καθοριστικό ρόλο η ορμή. Η ιστορική πραγματικότητα όμως είναι τελείως διαφορετική. Ο Einstein δεν χρησιμοποίησε πουθενά στο άρθρο του την ορμή. Ασχολήθηκε για πρώτη φορά με το να σκεφτεί ότι θα μπορούσε να αποδοθεί και ορμή στα φωτεινά κβάντα του το 1909, όταν μελετούσε τις θερμοδυναμικές συνέπειες των διακυμάνσεων ενέργειας αλλά και ορμής. Τελικά, απέδωσε την ορμή της σχέσης (7.3) το 1916 σε μια εκ νέου προσέγγιση της κίνησης Brown.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο Bohr φανατικά ενάντιος στην θεωρία του κβάντου φωτός, χαρακτηριστικά το 1924 αναζητώντας εναλλακτική διέξοδο διατύπωσε με τους Krammers και Slater μια μη φωτονική θεωρία της ακτινοβολίας που **η ενέργεια δεν διατηρείται παρά μόνο στατιστικά** κατά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτινοβολίας και ατόμων. Η θεωρία αυτή ήταν πολύ βραχύβια, καθώς την επόμενη χρονιά πολλά πειραματικά δεδομένα ήρθαν σε αντίθεση με τις προβλέψεις της.

ΤΥΠΙΚΕΣ ΕΙΚΟΝΕΣ ΑΠΟ ΕΝΑ 'ΚΛΑΣΙΚΟ' ΒΙΒΛΙΟ «ΣΥΓΧΡΟΝΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ»

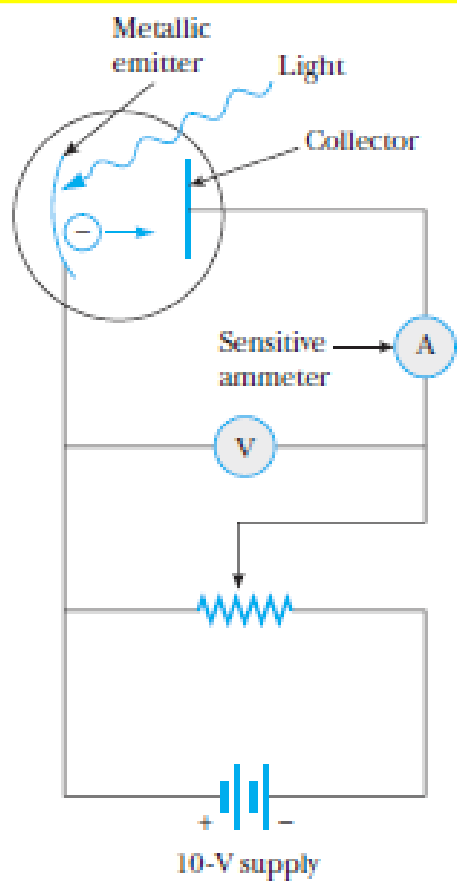


Figure 3.14 Photoelectric effect apparatus.

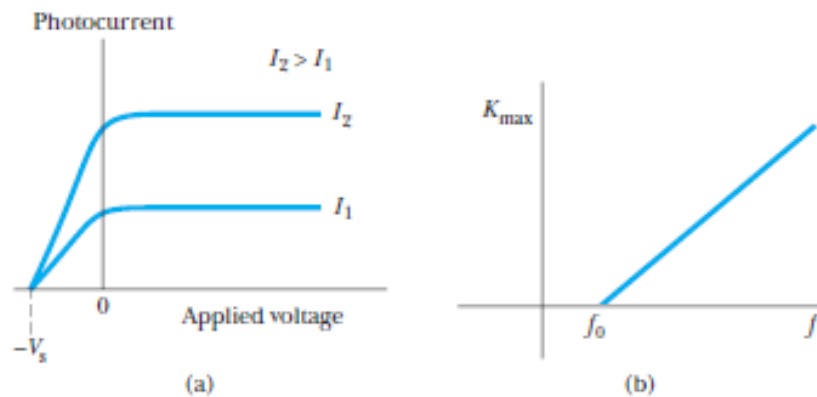


Figure 3.15 (a) A plot of photocurrent versus applied voltage. The graph shows that K_{\max} is independent of light intensity I for light of fixed frequency. (b) A graph showing the dependence of K_{\max} on light frequency.

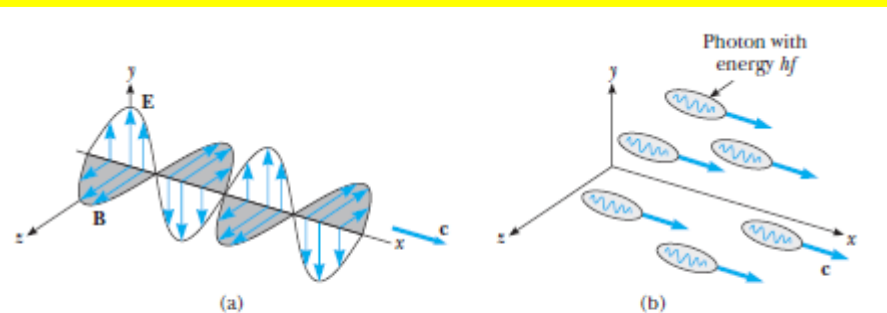


Figure 3.16 (a) A classical view of a traveling light wave. (b) Einstein's photon picture of "a traveling light wave."

Απλή σχηματική εικόνα που απεικονίζει την ιδέα του Einstein για τα κβάντα φωτός

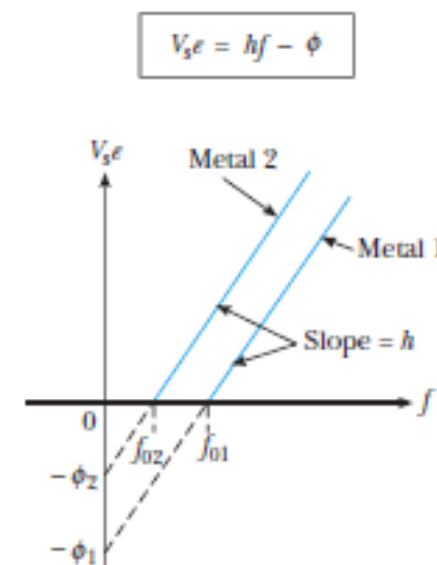


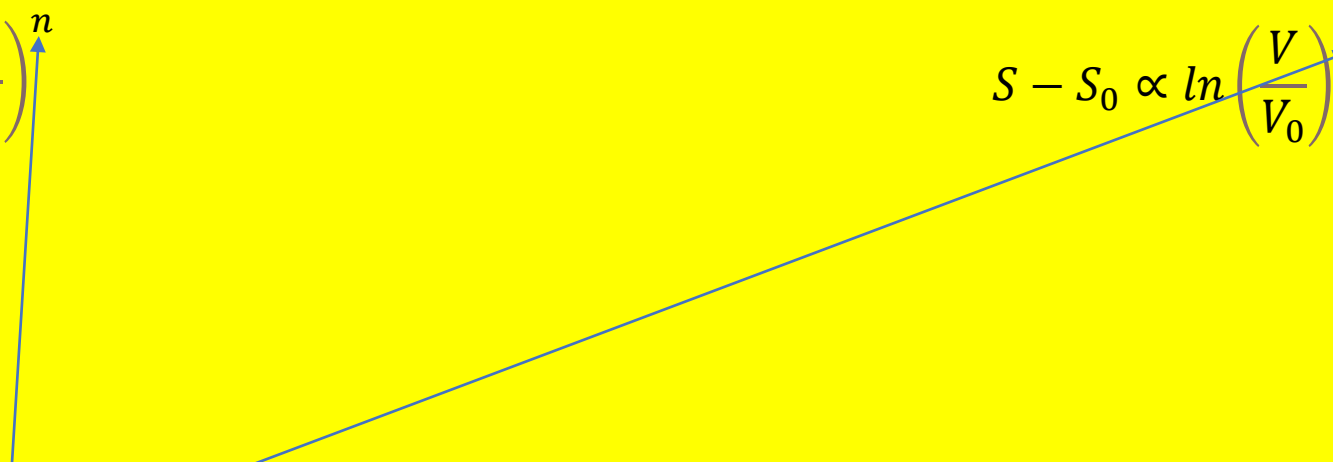
Figure 3.17 Universal characteristics of all metals undergoing the photoelectric effect.

Από αυτές τις καμπύλες μπορούμε να υπολογίσουμε το έργο εξαγωγής του μετάλλου (σημείο τομής ευθείας με κάθετο άξονα) και την σταθερά του Planck (κλίση ευθείας).

Η ΠΡΑΓΜΑΤΙΚΗ ΙΣΤΟΡΙΑ ΓΙΑ ΤΗΝ ΕΡΜΗΝΕΙΑ ΤΟΥ ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟΥ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟΥ.....ΚΑΙ ΤΟ ΑΕΡΙΟ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Η ερμηνεία του Einstein για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο παρουσιάστηκε στο περίφημο άρθρο του (Μάρτης του 1905) με τίτλο «Μια ευρετική άποψη για την παραγωγή και τους μετασχηματισμούς του φωτός» («On the heuristic point of view about the creation and conversion of light», αξίζει να διαβαστεί κυρίως για τα μη μαθηματικά κομμάτια του). Το θεωρητικό μέρος του άρθρου του, υπήρχε στην βιβλιογραφία και το πήρε έτοιμο. Ήταν η πολύ ενδιαφέρουσα σύμπτωση στην έκφραση για την μεταβολή της εντροπίας μιας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας εγκλωβισμένης σε ένα όγκο, με την μεταβολή του όγκου (αποτέλεσμα που είχε βρει ο Wien) με την αντίστοιχη μεταβολή ενός ιδανικού αερίου (αποτέλεσμα που είχε βρει ο Boltzmann).

(αριστερά), μεταβολή εντροπίας ιδανικού αερίου n ατόμων & (δεξιά), μεταβολή εντροπίας ακτινοβολίας συχνότητας f και ενέργειας E

$$S - S_0 \propto \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^n$$


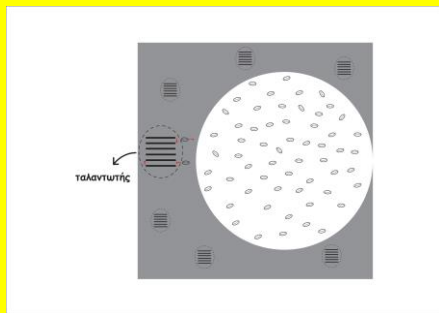
$$S - S_0 \propto \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^{E/\beta f}$$

Η αναλογία αυτή μεταξύ σωματιδίων και φωτός τον οδήγησε στο να ισχυριστεί ότι το φως έχει και αυτό συμπεριφορά σωματιδίου. Αποτελείτε από σημειακά αντικείμενα δηλαδή που κινούνται στον χώρο ως σωματάρια και στις αλληλεπιδράσεις τους μεταφέρουν στιγμιαία όλη την ενέργειά τους.

Βέβαια ο Einstein ήταν πολύ προσεκτικός και ονόμασε την ιδέα του ευρετική. Μια ιδέα χαρακτηρίζεται ως ευρετική όταν μας βοηθάει να αποκτήσουμε μια σχετικά ευρεία άποψη για το φαινόμενο που μελετάμε, να το κατανοήσουμε και να κάνουμε προβλέψεις, χωρίς όμως να μπορούμε να την αποδείξουμε αυστηρά από πρώτες αρχές. Μπορούμε να πούμε ότι είναι μια εμπνευσμένη «μαντεψιά», εύλογη και διαφωτιστική που βοηθάει στην ανίχνευση της αλήθειας, χωρίς όμως να είναι αυστηρά θεμελιωμένη. Ήταν και μετριόφρων, μια και έκλεινε το άρθρο του με την πρόταση, 'ελπίζω η μελέτη αυτή να δώσει κάποια βοήθεια στους πειραματικούς ερευνητικές'. Τα φωτεινά ή γενικότερα τα η/μ σωματίδια τα ονομάζει κβάντα φωτός. Το όνομα φωτόνια θα δοθεί από τον εξάίρετο φυσικοχημικό Gilbert Lewis (διάσημο για την θεωρία του περί ομοιοπολικού δεσμού, χωρίς Νόμπελ αλλά με 41 υποψηφιότητες!) πολλά χρόνια αργότερα, το 1926. Το δεύτερο, πολύ μικρότερο σε έκταση, μέρος του άρθρου του κλείνει με την εξήγηση όλων των πειραματικών αποτελεσμάτων του Lenard για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

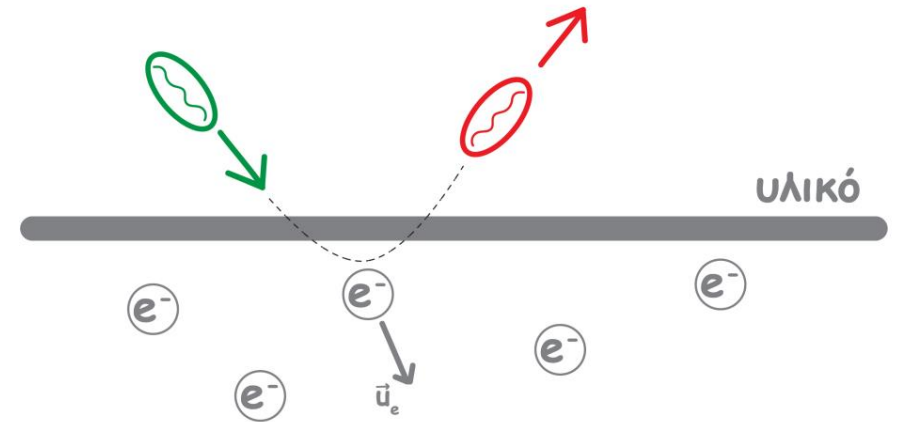
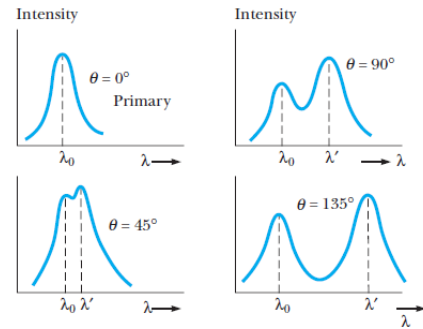
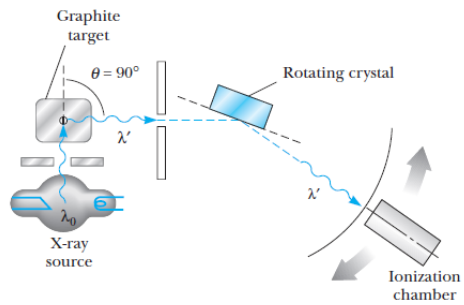
Το Νόμπελ φυσικής δόθηκε στον Einstein το 1921, (κυρίως) για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και για την γενική του προσφορά στην θεωρητική φυσική. Ενώ το 1923 πήρε Νόμπελ φυσικής ο Millikan για την δουλειά του σε σχέση με το ηλεκτρόνιο αλλά και για τα μεγάλης ακρίβειας πειράματά του το 1916, στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.

Αξίζει να αναφερθεί ότι ο Bohr ήταν φανατικά ενάντιος στην θεωρία του κβάντου φωτός, χαρακτηριστικά το 1924 αναζητώντας εναλλακτική διέξοδο διατύπωσε με τους Krammers και Slater μια μη φωτονική θεωρία της ακτινοβολίας που η **ενέργεια δεν διατηρείται παρά μόνο στατιστικά** κατά τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ ακτινοβολίας και ατόμων. Η θεωρία αυτή ήταν πολύ βραχύβια, καθώς την επόμενη χρονιά πολλά πειραματικά δεδομένα ήρθαν σε αντίθεση με τις προβλέψεις της. Είχε όμως μεγάλη χρησιμότητα γιατί επέδρασε καθοριστικά στον τρόπο σκέψης του Heisenberg!



Η ιδέα των κβάντων φωτός, επεκτάθηκε και με την συνεπικουρία του Ινδού φυσικού Bose στο διάστημα 1924-1925 όπου διαμόρφωσαν αυτό που ονομάζεται πλέον στην στατιστική φυσική, κβαντική στατιστική Bose-Einstein. Την εφαρμόζουν για να αποδείξουν με (ένα ακόμα) διαφορετικό τρόπο το αποτέλεσμα του Planck για την ΑΜΣ. Θεώρησαν δηλαδή την θερμική ακτινοβολία μέσα σε μια κοιλότητα, ως ένα «**αέριο φωτονίων**» (ουσιαστικά το σχήμα 1, που είχαμε ζωγραφίσει μια κοιλότητα γεμάτη με φωτόνια στην προσπάθεια κατανόησης της ΑΜΣ).

Φαινόμενο Compton



Σχήμα από το βιβλίο των Raymond A. Serway, Clement J. Moses, Curt A. Moyer, «Modern Physics» έκδοση 2004

(7.4.) Φαινόμενο Compton

Οι ακτίνες X

Το 1895 ο Wilhelm Röntgen (Ρέντγκεν) ανακάλυψε ότι όταν ένα μέταλλο «βομβαρδιστεί» με ηλεκτρόνια που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα εκπέμπει ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή ονομάστηκε ακτίνες X ή ακτίνες Röntgen. Ακτίνες X χρησιμοποιούνται καθημερινά σήμερα για την λήψη κοινών ακτινογραφιών. Οι ακτίνες X έχουν μήκη κύματος από $0,001 \text{ nm}$, έως 1 nm .

Ο μηχανισμός παραγωγής των ακτίνων X είναι ακριβώς ο αντίστροφος του φωτοηλεκτρικού φαινομένου. Στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μια μεταλλική επιφάνεια «βομβαρδίζεται» με ηλεκτρομαγνητικό κύμα και εκπέμπει ηλεκτρόνια. Στις ακτίνες X η μεταλλική επιφάνεια «βομβαρδίζεται» με ηλεκτρόνια και εκπέμπει ηλεκτρομαγνητικό κύμα.

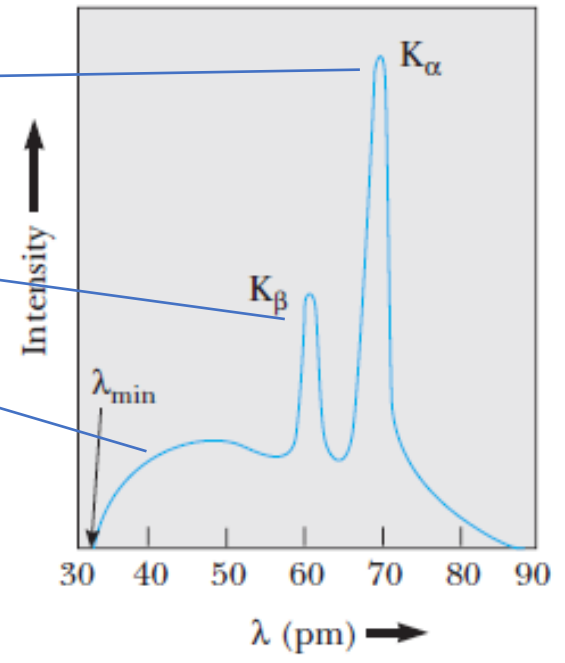
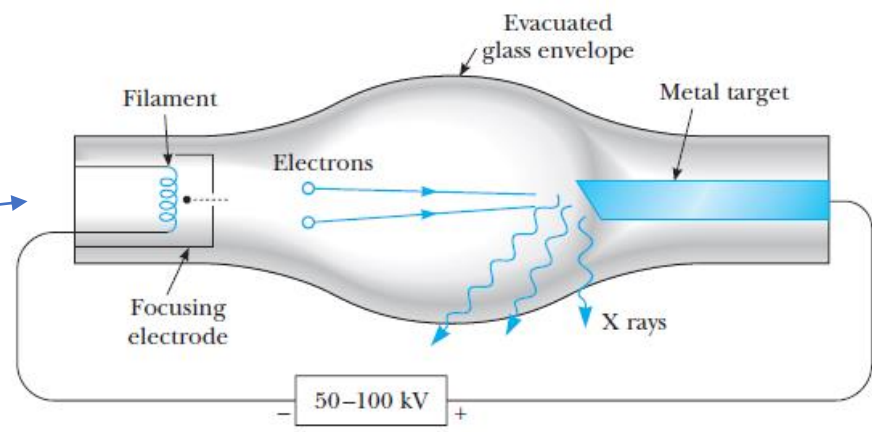
Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης φτάνουν στην επιφάνεια του μετάλλου επιβραδύνονται απότομα. Η επιβράδυνση αυτή συνοδεύεται από εκπομπή ακτινοβολίας, το φωτόνιο της οποίας θα έχει ενέργεια μικρότερη ή ίση με την ενέργεια του ηλεκτρονίου στο οποίο οφείλεται η εκπομπή του.

Υπάρχει και άλλη αιτία για την οποία εκπέμπεται ακτινοβολία από τη μεταλλική επιφάνεια. Καθώς τα ηλεκτρόνια συγκρούονται με τα άτομα της επιφάνειας του μετάλλου τούς μεταφέρουν ενέργεια. Τα άτομα διεγείρονται, τα ηλεκτρόνιά τους δηλαδή μεταφέρονται σε στιβάδες μεγαλύτερης ενέργειας. Όταν αποδιεγείρονται, όταν δηλαδή τα ηλεκτρόνια επανέλθουν στην αρχική τους στιβάδα, εκπέμπουν στο περιβάλλον ενέργεια υπό μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.



Wilhelm Röntgen (1845-1923). Ολλανδία, Ελβετία, Γερμανία. Η ανακάλυψη των ομόνομων ακτίνων έφερε επανάσταση στην ιατρική. Νόμπελ Φυσικής το 1902.

Εικόνα 7.2



Σχήματα από το βιβλίο των Serway, Moses και Moyer, «Modern Physics» έκδοση 2004

«Αν και οι ακτίνες X ανακαλύφθηκαν το 1895, για σχεδόν 20 χρόνια οι πειραματικοί κατέληγαν σε αμφίσημα αποτελέσματα για τον αν ήταν σωματίδια ή κύματα. Η άκρως συγκεχυμένη κατάσταση που επικρατούσε στον πειραματικό χώρο αντικατοπτρίζει τον **κυματοσωματιδιακό δυισμό**, ο οποίος δεν έμελλε να αποσαφηνισθεί παρά μόνο με την ανάπτυξη της κβαντομηχανικής.», το απόσπασμα αυτό από το εξαιρετο βιβλίο του Helge Kragh, «Οι γενιές των Κβάντων, η ιστορία της φυσικής του 20^{ου} αιώνα», που συνδυάζει την αυστηρή επιστημονική σκοπιά και την ιστορικο-κοινωνική και θεσμική πλευρά, μας προετοιμάζει για την επόμενη εισήγηση (ομιλία κ. Τραχανά).

Η σκέδαση Compton (Κόμπτον)

Η ύπαρξη φωτονίων επιβεβαιώθηκε πειραματικά το 1924 από τον Αμερικανό Arthur Holly Compton. Ο Compton παρατήρησε ότι όταν ακτίνες X προσπίπτουν πάνω σε μια υλική επιφάνεια ένα μέρος τους εκτρέπεται από τα σωματίδια της ύλης (σκεδαάζεται). Ο Compton διαπίστωσε ότι το σκεδαζόμενο τμήμα της ακτινοβολίας έχει μήκος κύματος μεγαλύτερο από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (μικρότερη συχνότητα). Οι μετρήσεις του Compton έδειξαν ότι η μεταβολή του μήκους κύματος ανάμεσα στην προσπίπτουσα και τη σκεδαζόμενη δέσμη εξαρτάται μόνο από τη γωνία ανάμεσα στις δύο δέσμες και μάλιστα υπακούει στη σχέση

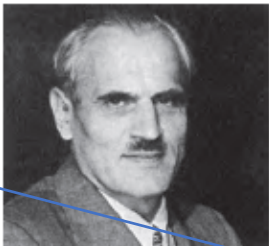
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$$

όπου λ' το μήκος κύματος της σκεδαζόμενης δέσμης, λ το μήκος κύματος της προσπίπτουσας δέσμης, m η μάζα του ηλεκτρονίου και ϕ η γωνία μεταξύ προσπίπτουσας και ανακλώμενης δέσμης.

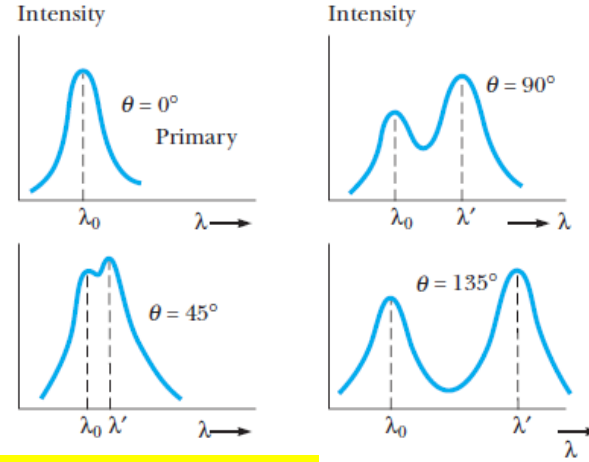
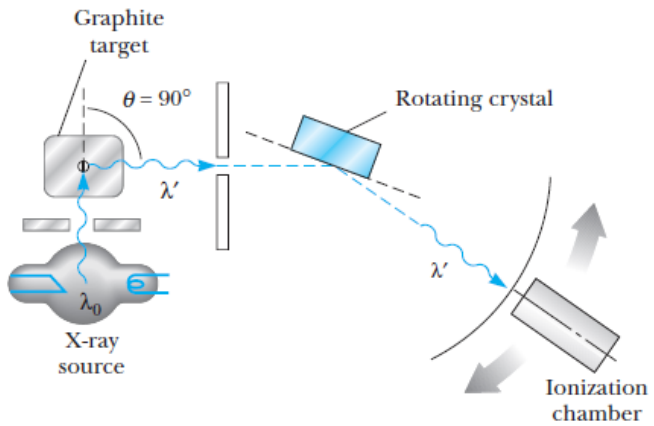
Σύμφωνα με την κλασική θεωρία ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f που προσπίπτει σ' ένα υλικό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια του υλικού να ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα και, επακόλουθα, να παράγουν με τη σειρά τους σαν μικρές κεραίες, ηλεκτρομαγνητικό κύμα της ίδιας συχνότητας f . Η κλασική θεωρία, λοιπόν, θα περίμενε η σκεδαζόμενη δέσμη να έχει την ίδια συχνότητα και, αντίστοιχα, ίδιο μήκος κύματος με την προσπίπτουσα δέσμη.

Τα πράγματα φαίνονται αν δούμε την ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία ως ρεύμα φωτονίων, δηλαδή σωματίων με μηδενική μάζα ηρεμίας που μεταφέρουν ενέργεια και ορμή. Τότε το πρόβλημα της σκέδασης της ακτινοβολίας μετατρέπεται σε πρόβλημα κρούσης ανάμεσα σ' ένα φωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο.

Ας υποθέσουμε ότι ένα φωτόνιο μήκους κύματος λ συγκρούεται μ' ένα πρακτικώς ακίνητο ηλεκτρόνιο (σχ. 7.7). Μετά τη σκέδαση το φωτόνιο κινείται σχηματίζοντας γωνία ϕ με την αρχική διεύθυνση κίνησης και έχοντας χάσει τμήμα της αρχικής του ενέργειας αφού ένα μέρος της αρχικής του ενέργειας θα μεταφερθεί στο ηλεκτρόνιο. Το σκεδαζόμενο φωτόνιο θα έχει μετατραπεί σε φωτόνιο μήκους κύματος λ' με $\lambda' > \lambda$. Κατά τη διάρκεια της σκέδασης πρέπει να διατηρούνται η ενέργεια και η ορμή του συστήματος.



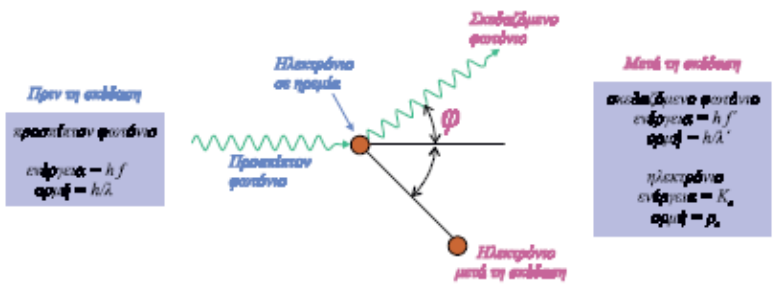
Arthur Holly Compton (1892-1962) Αμερική.
 Εικόνα 7.3



Σχήματα από το βιβλίο των Serway, Moses και Moyer, «Modern Physics» έκδοση 2004

(αριστερά) Σχηματικό διάγραμμα της πειραματικής διάταξης του Compton. Η προσπίπτουσα ακτίνα X ήταν μονοχρωματική με $\lambda_0=0.071\text{nm}$. Χρησιμοποιήθηκε στόχος άνθρακα, που έχει μικρό ατομικό αριθμό και άρα περισσότερα ασθενώς δέσμια (ελεύθερα) ηλεκτρόνια.

(δεξιά) Τα πειραματικά διαγράμματα της έντασης ως προς το μήκος κύματος για τέσσερις γωνίες σκέδασης. Η μια κορυφή είναι πάντα ίδια και αντιστοιχεί στο λ_0 και αντιστοιχεί σε σκέδαση των ακτίνων X από ισχυρώς δέσμια ηλεκτρόνια τα οποία έχουν ενεργό μάζα ίση με τη μάζα του ατόμου άνθρακα (φαίνεται από την σχέση $\lambda' - \lambda$, με τεράστια μάζα, $\lambda' \sim \lambda$). Η μετατοπισμένη κορυφή αντιστοιχεί στην σκέδαση Compton.



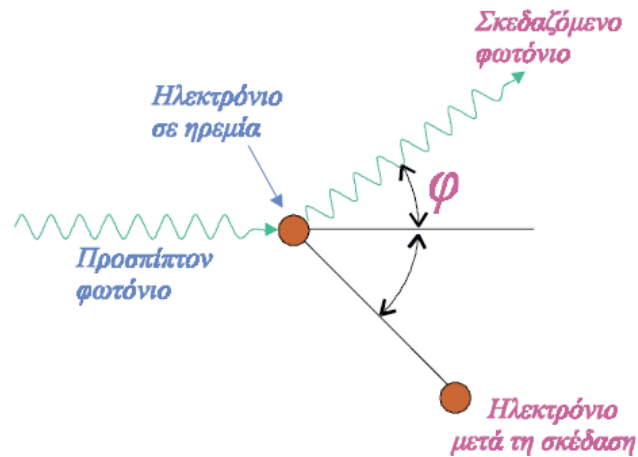
Σχήμα 7-7.

Να δοθεί μνεία και στον **Peter Debye** (δεξιά) που την ίδια χρονιά με τον Compton έδωσε την ίδια ερμηνεία.



¹³P. Debye, *Phys. Zeitschr.*, 24:161, 1923. In this paper, Debye acknowledges Einstein's pioneering work on the quantum nature of light.
¹⁴A. H. Compton, *Phys. Rev.*, 21:484, 1923.

Πριν τη σκέδαση
προσπίπτων φωτόνιο
ενέργεια = hf
ορμή = h/λ



Μετά τη σκέδαση
σκεδαζόμενο φωτόνιο
ενέργεια = hf'
ορμή = h/λ'
ηλεκτρόνιο
ενέργεια = K_e
ορμή = p_e

Το φωτόνιο έχει πριν τη σκέδαση ενέργεια $E = hf = hc/\lambda$ και μετά τη σκέδαση $E' = hc/\lambda'$. Θα πρέπει λοιπόν να ισχύει

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + K_e$$

όπου K_e η κινητική ενέργεια του ανακρουόμενου ηλεκτρονίου. Επειδή το ηλεκτρόνιο μετά την κρούση μπορεί να κινείται με ταχύτητα που πλησιάζει την ταχύτητα του φωτός καλό είναι να χρησιμοποιήσουμε τη σχέση 6.17 για την κινητική του ενέργεια οπότε

$$\frac{hc}{\lambda} = \frac{hc}{\lambda'} + \frac{mc^2}{\sqrt{1-v^2/c^2}} - mc^2 \quad (7.4)$$

Η ορμή του φωτονίου πριν είναι $p = E/c = h/\lambda$ και η ορμή του φωτονίου μετά είναι $p' = h/\lambda'$. Η ορμή του ηλεκτρονίου θα είναι σύμφωνα με τη σχέση (6.15) $p_e = \frac{mv}{\sqrt{1-v^2/c^2}}$.

Η διατήρηση της ορμής σε διανυσματική μορφή δίνει

οπότε
$$\mathbf{p} = \mathbf{p}' + \mathbf{p}_e$$

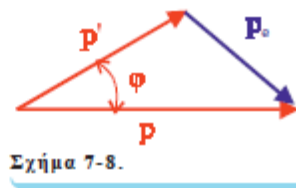
$$\mathbf{p}_e = \mathbf{p} - \mathbf{p}'$$

Χρησιμοποιώντας τον νόμο του συνήμιτονου στο διανυσματικό διάγραμμα του σχήματος 7.8 προκύπτει

Δηλαδή
$$\frac{m^2 v^2}{1-v^2/c^2} = \frac{h^2}{\lambda^2} + \frac{h^2}{\lambda'^2} - \frac{2h^2}{\lambda\lambda'} \cos\phi \quad (7.5)$$

Από τις (7.4) και (7.5), αν απαλείψουμε το v , προκύπτει η σχέση

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$$



Σχήμα 7-8.

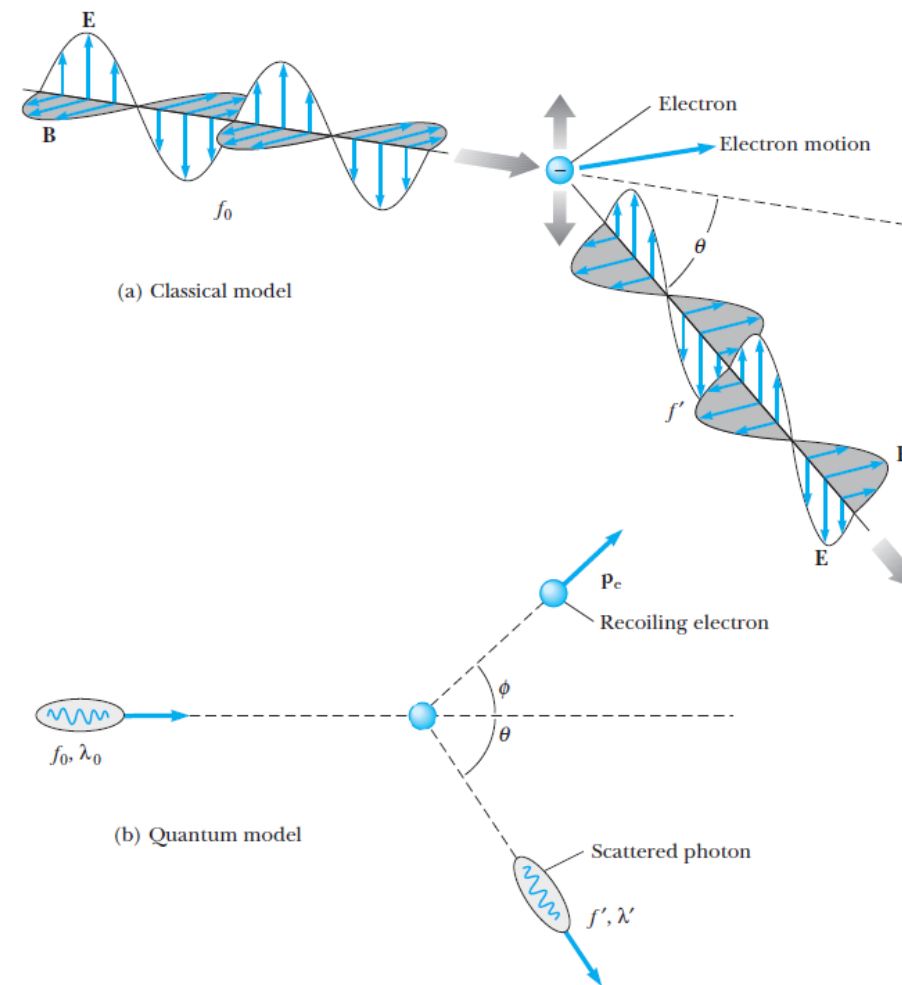
Για να διδαχθεί η θεωρία αυτή, που δεν είναι παρά μια εξίσωση διατήρησης της ενέργειας και δύο εξισώσεις από την αρχή διατήρησης της ορμής στο επίπεδο που ορίζουν η ορμή του φωτονίου πριν και μετά την σκέδαση, χρειάζονται οι σχετικιστικές εκφράσεις της ορμής και της ενέργειας.

Πιστεύω, ότι η εισαγωγή του μαθήματος της ειδικής θεωρίας της σχετικότητας, θα πρέπει να γίνει άμεσα, μια και τα μαθηματικά της σχετικότητας είναι πολύ απλά, ενώ τα εννοιολογικά θέματα που θα προκύψουν όσο νωρίτερα τα αντιμετωπίσει ο υποψήφιος φοιτητής τόσο το καλύτερο. Αλλά και για τους μαθητές που δεν ενδιαφέρονται για να σπουδάσουν, μια σύντομη γνωριμία με μια από της μεγαλύτερες κατακτήσεις του ανθρώπινου πνεύματος, με καθημερινή πειραματική επιβεβαίωση, μόνο να αποφεύγεται δεν είναι σωστό.

Σύμφωνα με την κλασική θεωρία ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f που προσπίπτει σ' ένα υλικό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια του υλικού να ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα και, επακόλουθα, να παράγουν με τη σειρά τους σαν μικρές κεραιές, ηλεκτρομαγνητικό κύμα της ίδιας συχνότητας f . Η κλασική θεωρία, λοιπόν, θα περίμενε η σκεδαζόμενη δέσμη να έχει την ίδια συχνότητα και, αντίστοιχα, ίδιο μήκος κύματος με την προσπίπτουσα δέσμη.

Αν και σε όλα σχεδόν τα βιβλία Μοντέρνας Φυσικής αναφέρεται ότι **κλασικά αναμένουμε** η συχνότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ίση με την προσπίπτουσα, αυτό δεν είναι σωστό. Την ορθή πρόβλεψη της κλασικής φυσικής την διαπραγματεύεται δεξιοτεχνικά ο David Bohm στο 'κλασικό' βιβλίο του «Quantum Physics».

Αναμένουμε η προσπίπτουσα ακτινοβολία θα επιταχύνει ένα ηλεκτρόνιο στην κατεύθυνση διάδοσης της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, να προκαλεί εξαναγκασμένες ταλαντώσεις στο ηλεκτρόνιο και επανεκπομπή ακτινοβολίας με συχνότητα ίση ή μικρότερη της προσπίπτουσας. Η μείωση οφείλεται σε μια διπλή μετατόπιση Doppler, πρώτα επειδή το ηλεκτρόνιο απομακρύνεται από την προσπίπτουσα ακτινοβολία, και δεύτερον, διότι το ηλεκτρόνιο είναι ένας κινούμενος πομπός σε σχέση με το ακλόνητο σύστημα του εργαστηρίου (**σχήμα πάνω δεξιά**, που είναι λάθος(!) μια και δείχνει το ηλεκτρόνιο να κινείται σε τυχαία διεύθυνση. Στις πιο παλιές του εκδόσεις ο Serway το είχε σωστά, δηλαδή να κινείται το ηλεκτρόνιο στην διεύθυνση της διάδοσης του προσπίπτοντος η/μ κύματος).



Σχήματα από το βιβλίο των Serway, Moses και Moyer, «Modern Physics» έκδοση 2004

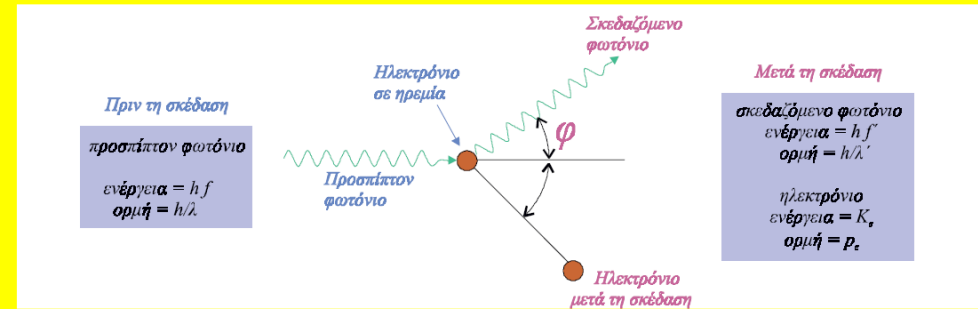
Ερωτήσεις εκπαιδευτικών σχετικά με το φαινόμενο Compton

Ερώτηση: Στο φαινόμενο Compton, σύμφωνα με το σχολικό βιβλίο, συμβαίνει μερική απορρόφηση της ενέργειας του προσπίπτοντος φωτονίου. Πως γίνεται να συμβαίνει αυτό; Δεν θα έπρεπε να απορροφάτε εξ' ολοκλήρου; Και αν ναι γιατί επανεκπέμπεται ακτινοβολία;

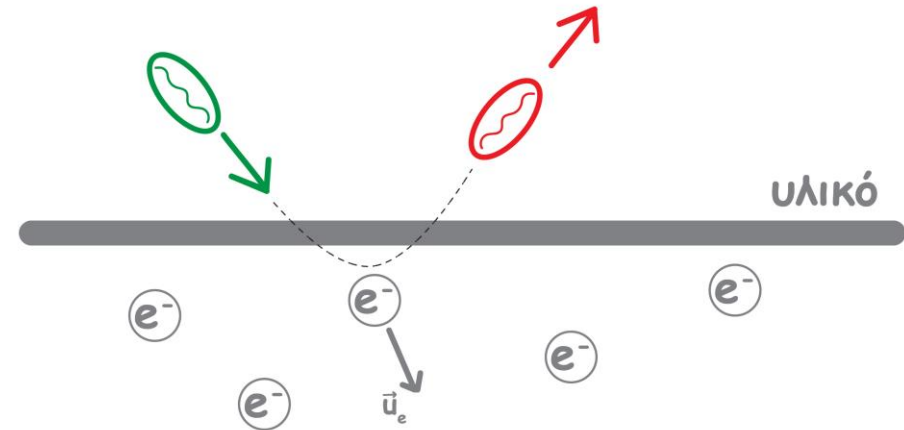
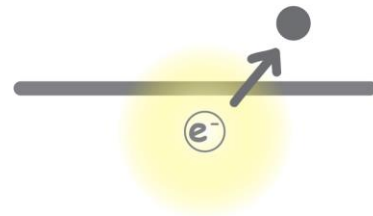
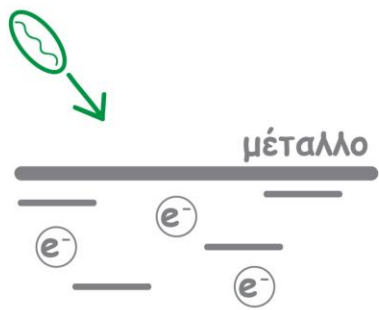
Απόπειρα Απάντησης: η εκτίμησή μου είναι ότι στο σχολικό βιβλίο δεν αναφέρεται πουθενά η έκφραση «μερική απορρόφηση», αλλά πάντα αναφέρεται ο ορθός όρος της σκέδασης.

Η σύγχυση προφανώς δημιουργείται από το λάθος σχήμα (7.7), όπου φαίνεται ένα προσπίπτων φωτόνιο με μάλλον μόνο κυματικό χαρακτήρα, που «μπαίνει» μέσα στο ηλεκτρόνιο (οπότε ίσως κάποιος μαθητής να υποθέσει ότι απορροφάτε ένα μέρος του από το ηλεκτρόνιο) και μετά βγαίνει σε άλλη κατεύθυνση.

Πρέπει να τονιστεί ότι το Compton είναι το φαινόμενο που η εξήγησή του, απαιτεί τον αποκλειστικό χειρισμό της η/μ ακτινοβολίας, ως σωματίο. Και τα σωματία όταν αλληλεπιδρούν σκεδάζονται. Αν τώρα έδινε το φωτόνιο όλη του την ενέργεια στο ηλεκτρόνιο (κάτι σαν «εξ' ολοκλήρου απορρόφηση» της ερώτησης), δεν θα είχαμε την διατήρηση της ορμής, διατήρηση απολύτως απαραίτητη στις σκεδάσεις.



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (απορρόφηση φωτονίου) και φαινόμενο Compton (σκέδαση φωτονίου)



Παράδειγμα 7.2

Δέσμη ακτίνων X με $\lambda = 0,1 \text{ nm}$ (10^{-10} m) σκεδάζεται από επιφάνεια άνθρακα. Η σκεδασθείσα δέσμη σχηματίζει γωνία 90° με την προσπίπτουσα. Να βρεθούν :

- α) Η ενέργεια και η ορμή των φωτονίων της προσπίπτουσας δέσμης.
- β) Το μήκος κύματος, η ενέργεια και η ορμή του φωτονίου της σκεδαζόμενης δέσμης.
- γ) Η κινητική ενέργεια που προσδίδεται σε ένα ανακρουόμενο ηλεκτρόνιο.

Απάντηση :

$$\alpha) E = hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{10^{-10} \text{ m}} = 19,878 \times 10^{-16} \text{ J} = 12424 \text{ eV}$$

$$p = \frac{h}{\lambda} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{10^{-10} \text{ m}} = 6,626 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

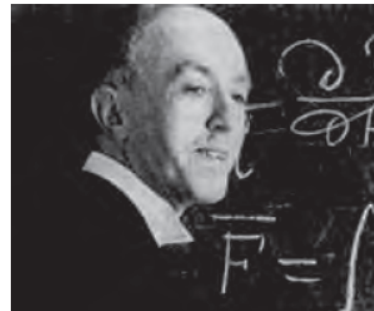
$$\beta) \lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \sigma \nu \varphi)$$

$$\text{άρα } \lambda' = \lambda + \frac{h}{mc}(1 - \sigma \nu \varphi) = 10^{-10} \text{ m} + \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})} = 1,024 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$E' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}) \cdot (3 \times 10^8 \text{ m/s})}{1,024 \times 10^{-10} \text{ m}} = 19,412 \times 10^{-16} \text{ J} = 12133 \text{ eV}$$

$$p' = \frac{h}{\lambda'} = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}}{1,024 \times 10^{-10} \text{ m}} = 6,471 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m/s}$$

$$\gamma) K_e = E - E' = 291 \text{ eV}$$



Επίλυση ασκήσεων, μακριά από τους υπολογιστές τσέπης (calculators)

Άσκηση 7.15 (σελ. 250) Δίνεται $\lambda=400\text{nm}$ και μέγιστη κινητική ενέργεια $0,8\text{eV}$. Χρειάζεται να βρεθεί το έργο εξαγωγής.....

Αυτό που βλέπω κάθε χρόνο από φοιτητές στο 3^ο έτος σπουδών, είναι να αντικαθιστούν τις σταθερές με τις δυνάμεις τους στους υπολογιστές τσέπης τους και να αφήνουν την τύχη τους στο μηχάνημα, η συνέπεια, κατά 80% λάθος αποτέλεσμα!!

Πάρα πολύ αναγκαίο να ζητάμε από τα παιδιά να κάνουν τις πράξεις στο χέρι σε τρία στάδια,

(α) ενιαίο σύστημα μονάδων (λογικά το διεθνές σύστημα, S.I.)

(β) ξεχωρίζω αριθμητικές τιμές από δυνάμεις

(γ) κάνω τις πράξεις ξεχωριστά

$$hf = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,6 \times 10^{-34} \cdot 3 \times 10^8}{400\text{m} \times 10^{-9}} = \frac{6,6 \times 3}{4} \times \frac{10^{-34} \times 10^8}{10^2 \times 10^{-9}} \sim \frac{20}{4} \times \frac{10^{-34+8}}{10^{2-9}} = 5 \times \frac{10^{-26}}{10^{-7}} = 5 \times 10^{-19} \text{ J}$$

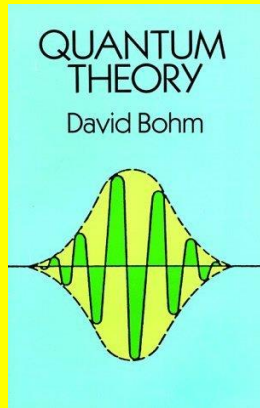
Σχόλιο εκπαιδευτικού, Η εκτέλεση πολύπλοκων πράξεων που απαιτούν οι ασκήσεις κβαντομηχανικής, χωρίς κομπιουτεράκι.

(α) Δεν είναι πολύπλοκες οι πράξεις στις ασκήσεις αυτές.

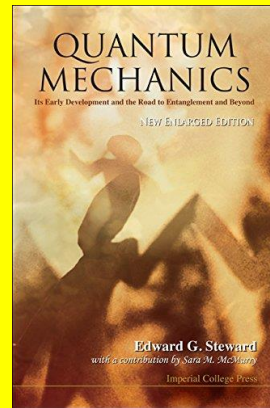
(β) Τα παιδιά 'καλομαθαίνουν' με την χρήση του και δεν μπορούν να κάνουν στοιχειώδεις πράξεις στο χέρι.

Η άποψή μου είναι ότι πρέπει να γίνονται **ΧΩΡΙΣ** κομπιουτεράκι.

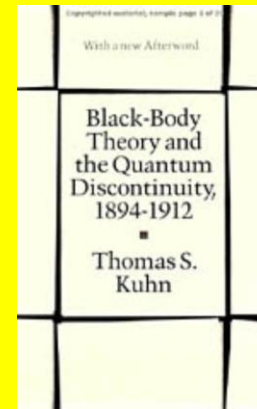
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΙΑΛΕΞΗΣ



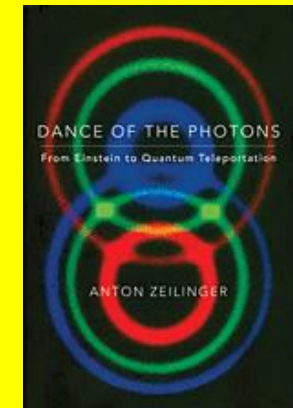
Εξαιρετικό βιβλίο, με ένα Bohm φανατικό υπερασπιστή της σχολής της Κοπεγχάγης. Αρχική έκδοση 1952, την ίδια χρονιά που ο συγγραφέας προτείνει μια άλλη διαδρομή για την κβαντομηχανική! Κυκλοφορεί ανατύπωση του 1989 από τις Dover Publications.



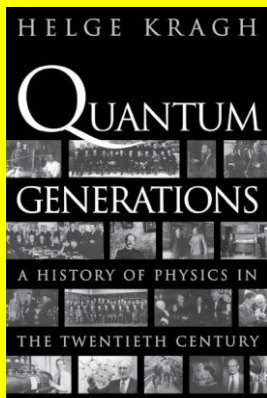
Εξαιρετικό βιβλίο, παρουσιάζεται η «πραγματική» ιστορία της κβαντομηχανικής, όπως αυτή δημιουργήθηκε από τους φυσικούς του 20^{ου} αιώνα. Από τις εκδόσεις Imperial College Press (2011).



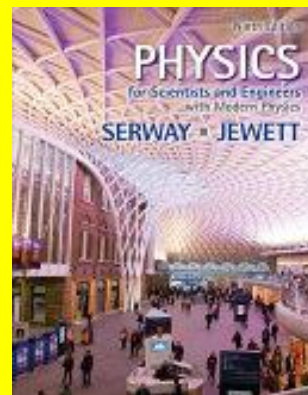
Από έναν από τους κορυφαίους επιστημολόγους του 20^{ου} αιώνα, η «πραγματική» ιστορία για τις μελέτες του Planck στην ΑΜΣ. Ερευνά κατά πόσο αυτές οδήγησαν στην αποδοχή της κβαντικής φύσης της ακτινοβολίας. Από τις εκδόσεις University of Chicago Press (1987).



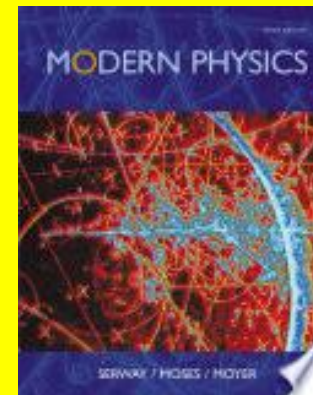
Ο αυστριακός καθηγητής Άντον Τσέιλινγκερ (φετινό –2022– Νόμπελ) παρουσιάζει, με ελάχιστα μαθηματικά, την φυσική των φωτονίων και της εφαρμογές της. Από τις (άγνωστες) εκδόσεις Farrar, Straus and Giroux (2010).



Εξαιρετικό βιβλίο, που συνδυάζει την αυστηρή επιστημονική σκοπιά και την ιστορικο-κοινωνική και θεσμική πλευρά. Κυκλοφορεί από τις εκδόσεις Princeton University Press(2002).



Πολύ χρησιμοποιημένο βιβλίο Γενικής Φυσικής, με αρκετά εκτενή στοιχεία σύγχρονης Φυσικής, από τους Serway και Jewett, μεταφρασμένο και στα ελληνικά.



Η πιο συνήθης αναφορά και διεθνώς το πιο χρησιμοποιημένο βιβλίο για την διδασκαλία της «Σύγχρονης Φυσικής». Από τους Raymond A. Serway, Clement J. Moses, Curt A. Moyer, «Modern Physics», μεταφρασμένο και στα ελληνικά.



Εξαιρετικό βιβλίο από τον κ. Τραχανά, που απευθύνεται επίσης στον **καθηγητή φυσικής της μέσης εκπαίδευσης** που θέλει να δώσει στον εαυτό του μια δεύτερη ευκαιρία να αποκτήσει τις βασικές γνώσεις κβαντικής φυσικής μέσα από ένα πολύ σύντομο βιβλίο γραμμένο στο απλούστερο δυνατό επίπεδο.

Max Planck, «**Eight lectures on Theoretical Physics**» (1^η έκδοση 1906, 2^η 1912, ενώ σήμερα υπάρχει διαθέσιμη η βελτιωμένη ανατύπωση της 2^{ης} έκδοσης του 1915).

J.J. Thomson, «**Conduction of Electricity through Gases**» (1906).

Arthur H. Compton, «**X-rays and electrons: An outline of recent X-ray theory**» (1926).

Arthur H. Compton, S.K. Allison, «**X-Rays in Theory and Experiment**» (1935).

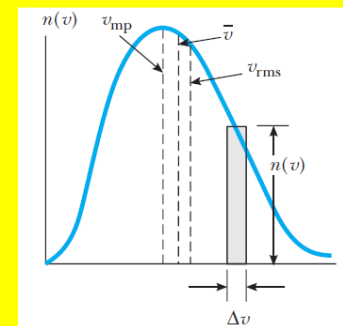
Συμπληρωματικό υλικό (πινελιές)

(προσεγγιστικός) νόμο ακτινοβολίας **Wien (1896)**, $\rho(f, T) = \alpha f^3 e^{-\beta f/kT}$, αποτυγχάνει για μικρές συχνότητες και υψηλές θερμοκρασίες.

ακριβής νόμο ακτινοβολίας **Planck (1900)**, $\rho(f, T) = \frac{8\pi f^3}{c^3} \frac{hf}{e^{\beta f/kT} - 1}$, για μεγάλες συχνότητες και χαμηλές θερμοκρασίες, συμφωνεί με τον ν. Wien.

Το 1899 ο Planck απέδειξε θεωρητικά τον νόμο του Wien και, αν δεν υπήρχαν τα πειράματα των Lummer, Pringsheim, Rubens και Kurlbaum (Εθνικό ίδρυμα προτύπων της Γερμανίας στο Βερολίνο) την ίδια χρονιά, **πιθανότατα θα είχε σταματήσει εκεί, και ο 'ιδρυτής' της κβαντικής φυσικής θα είχε άλλο όνομα.**

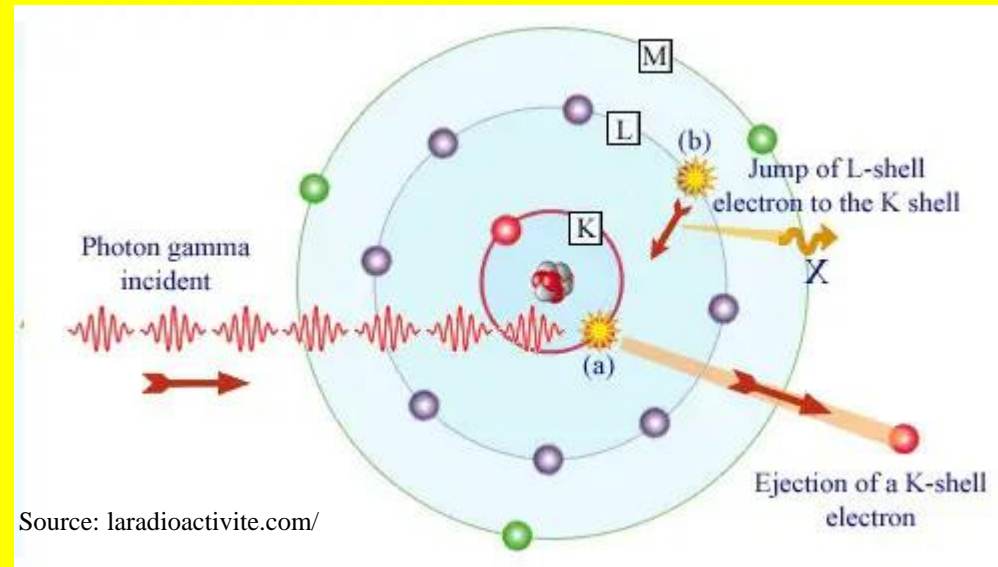
Ο Planck ήταν τόσο θεμελιακά ενάντιος στην στατιστική θερμοδυναμική, καθώς δεν μπορούσε να δεχθεί μια εξήγηση για τον φυσικό κόσμο να έχει την βάση της στην στατιστική. Μάλιστα, αγνόησε σημαντικές ενδείξεις για την αλήθεια και τις προβλεπτικές της ικανότητες, όπως για παράδειγμα την πολύ μεγάλη ομοιότητα του φάσματος της ακτινοβολίας του μέλανος σώματος με την κατανομή ταχυτήτων του Maxwell (διπλανό σχήμα). Τελικά ήταν ο απρόθυμος θεμελιωτής της θεωρίας που η πιθανότητες χρησιμοποιούνται ως θεμελιακά μεγέθη.



Αν και για μεγάλο χρονικό διάστημα ο Bohr ήταν φανατικά ενάντιος στην θεωρία του φωτονίου (κβάντου φως) και το 1924 δημιούργησε την λανθασμένη Bohr-Krammers-Slater μη φωτονική θεωρία της ακτινοβολίας, πλέον σε όλα τα βιβλία που ασχολούνται με το ατομικό μοντέλο του, βλέπουμε εικόνες διεγέρσεων και αποδιεγέρσεων ανάμεσα στις ενεργειακές τους στάθμες με αντίστοιχες απορροφήσεις και εκπομπές φωτονίων.

Από πολλούς φυσικούς της εποχής μας, οι πιο ολοκληρωμένες θεωρίες για την περιγραφή του φυσικού μας κόσμου λογίζονται οι **κβαντικές θεωρίες πεδίου**, όπου το βασικό τους συστατικό στοιχείο είναι ότι ο **φυσικός κόσμος είναι μια συλλογή από αρμονικούς ταλαντωτές**. Πίσω λοιπόν στα θεμέλια που έβαλε ο Planck.

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο με ακτίνες X και γ



Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο μπορούμε να έχουμε και με ακτίνες X και γ. Σε αυτή την περίπτωση το φωτόνιο αλληλοεπιδρά (πλήρη απορρόφηση) με ένα από τα ηλεκτρόνια που βρίσκονται στις εσωτερές στιβάδες του ατόμου. Η κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι ίση με την ενέργεια του φωτονίου μείον την ενέργεια σύνδεσης του ηλεκτρονίου στο άτομο (δηλαδή, τον ρόλο του έργου εξαγωγής που έχουμε στα μέταλλα εδώ τον έχει η δεσμική ενέργεια του ηλεκτρονίου).

Η ΣΗΜΕΡΙΝΗ ΕΙΚΟΝΑ ΓΙΑ ΤΑ ΦΩΤΟΝΙΑ

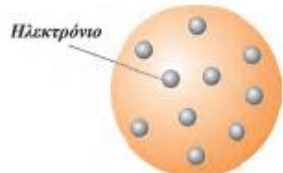
Η πρώτη απόπειρα κβαντομηχανική ερμηνείας της η/μ ακτινοβολίας ήρθε το 1928 από τον Dirac, όπου υλοποίησε την σύνθεση της θεωρίας που ανέπτυξαν οι Schrödinger και Heisenberg με την ειδική θεωρία της σχετικότητας.

Η ορθή θεωρία του φωτονίου ήρθε προς τα τέλη της δεκαετίας του 40, με την **Κβαντική Ηλεκτροδυναμική (QED)** που αναπτύχθηκε από τους Feynman, Tomonaga and Schwinger. Στην QED τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία που κλασικά περιγράφονται από τις εξισώσεις Maxwell τροποποιούνται σε κβαντική μορφή. Στην QED τα φωτόνια δεν είναι παρά οι φορείς των ηλεκτρικών και μαγνητικών δυνάμεων. Για παράδειγμα, η αλληλεπίδραση δύο φορτίων περιγράφεται με την ανταλλαγή φωτονίων. Η QED αποτελεί το σωστό πλαίσιο για την περιγραφή της μετατροπής ύλης σε φωτόνια και αντίστροφα. Αν και τα μαθηματικά της θεωρίας είναι αρκετά πολύπλοκα και πολλές φορές χρειάζονται ιδιαίτερους χειρισμούς, η θεωρία αυτή θεωρείται η πρότυπη Κβαντική θεωρία πεδίου, με εκτιμήσεις πειραματικών τιμών σε αξιοθαύμαστη ακρίβεια.

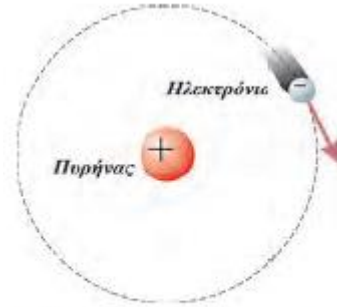
Η **κβαντική οπτική** που μελετά θεωρητικά και πειραματικά την αλληλεπίδραση ύλης με την η/μ ακτινοβολία, είναι τα τελευταία χρόνια ένας από τους πιο ενεργούς κλάδους της φυσικής. Ο κλάδος αυτός οφείλει ένα μεγάλο μέρος της άνθησής του στα τεράστια επιστημονικά και τεχνολογικά άλματα στις πηγές φωτός. Πραγματοποιούνται ιδιαίτερα πολύπλοκα πειράματα που ελέγχουν και τις θεμελιακές αρχές της κβαντομηχανικής (φετινά Νόμπελ Φυσικής), ενώ έχει συνεισφέρει στην ανάπτυξη του πρωτοπόρου κλάδου της κβαντικής πληροφορικής.

(2σέλιδο) ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ

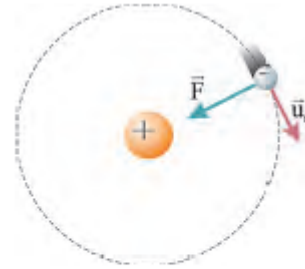
Μία συλλογή από εικόνες με άτομα και φωτόνια, από το βιβλίο Φυσικής γενικής παιδείας, της Β' λυκείου.



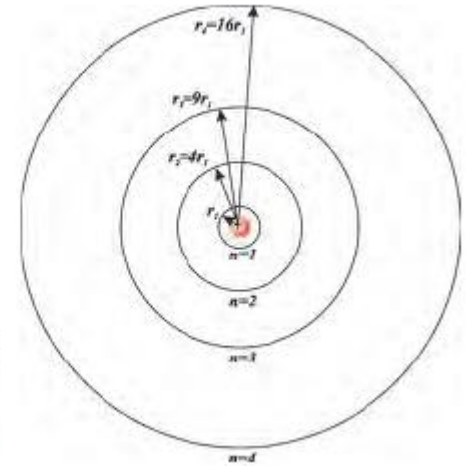
Το άτομο σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. Εικόνα 4.1-5



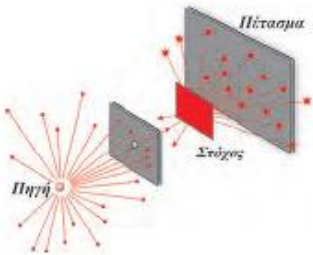
Μοντέλο του Rutherford για το άτομο (πλανητικό μοντέλο). Εικόνα 4.1-8



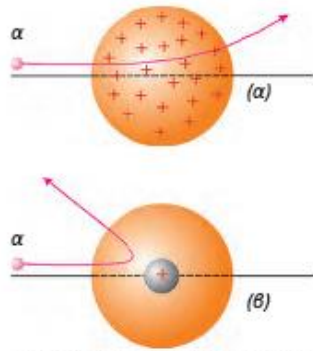
Άτομο του υδρογόνου. Το πρωτόνιο θεωρείται ακίνητο. Η δύναμη Coulomb F προκαλεί την απαιτούμενη κεντρομόλο επιτάχυνση. Το ηλεκτρόνιο λοιπόν περιφέρεται με ταχύτητα v_t σε επιτρεπόμενη τροχιά ακτίνας r_n , ώστε να ισχύει: $mv_t^2 = n\hbar$ Εικόνα 4.1-14



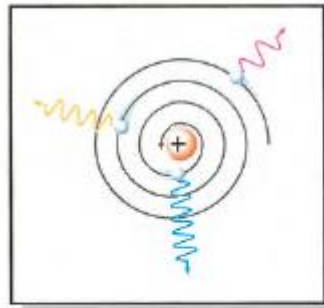
Επιτρεπόμενες τροχιές του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr για το άτομο του υδρογόνου. Εικόνα 4.1-15



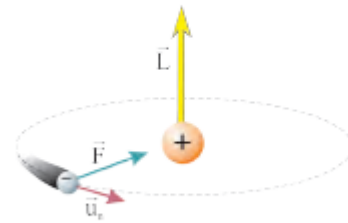
Πείραμα του Rutherford. Σκέδαση σωματιδίων α από ένα λεπτό φύλλο χρυσού. Περίπου ένα στα 8000 σωματίδια αποκλίνει κατά γωνία μεγαλύτερη των 90° . Τα σωματίδια α είναι πυρήνες ηλίου. Εικόνα 4.1-6



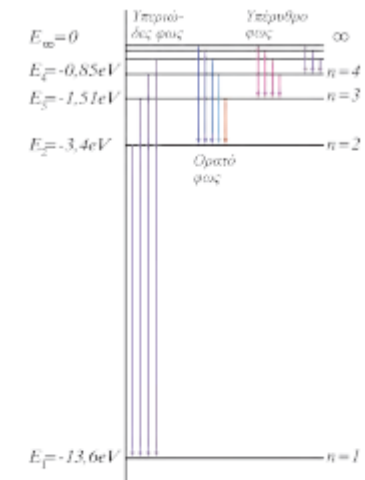
(α) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μικρή γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Thomson. (β) Τα σωματίδια α αποκλίνουν κατά μεγάλη γωνία σύμφωνα με το πρότυπο του Rutherford. Εικόνα 4.1-7



Ηλεκτρομαγνητικό μοντέλο του ατόμου. Σύμφωνα με την κλασική Φυσική, το επιταχυνόμενο ηλεκτρόνιο έπρεπε να εκπέμπει συνεχές φάσμα και ακολουθώντας σπειροειδή τροχιά να πέφτει στον πυρήνα. Εικόνα 4.1-12



Το διάνυσμα της στροφορμής L του ηλεκτρονίου στο πρότυπο του Bohr. Εικόνα 4.1-14α



Διάγραμμα ενεργειακών σταθμών του ατόμου του υδρογόνου. Οι μεταβάσεις των ηλεκτρονίων από μια τροχιά σε άλλη συμβολίζονται με κατακόρυφα βέλη. Εικόνα 4.2-16

4.3 ΜΗΧΑΝΙΣΜΟΣ ΠΑΡΑΓΩΓΗΣ ΚΑΙ ΑΠΟΡΡΟΦΗΣΗΣ ΦΩΤΟΝΙΩΝ

Διέγερση με κρούση

Όταν ένα σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο, ιόν ή άτομο) συγκρουστεί με ένα άτομο υδρογόνου, που βρίσκεται, λόγω χάρη, στη θεμελιώδη κατάσταση, τότε το ηλεκτρόνιο του ατόμου μπορεί να απορροφήσει ικανή ποσότητα ενέργειας και να μεταπηδήσει σε τροχιά μεγαλύτερης ενέργειας, με αποτέλεσμα το άτομο να διεγερθεί. Το διεγερμένο άτομο επανέρχεται μετά από ελάχιστο χρόνο στη θεμελιώδη κατάσταση. Η επάνοδος μπορεί να γίνει είτε με ένα άλμα κατευθείαν στη θεμελιώδη κατάσταση, με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου, είτε με περισσότερα ενδιάμεσα άλματα από τροχιά σε τροχιά, με ταυτόχρονη εκπομπή περισσότερων φωτονίων.

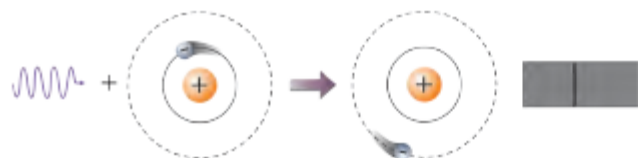


Για παράδειγμα, το ηλεκτρικό πεδίο σε σωλήνα που περιέχει αέριο χαμηλής πίεσης επιταχύνει τα ηλεκτρόνια και τα ιόντα που ήδη βρίσκονται μέσα στο σωλήνα. Όταν η ενέργειά τους γίνει αρκετά μεγάλη, τότε είναι δυνατό να προκαλέσουν διέγερση των ατόμων ή των ιόντων του αερίου με τα οποία συγκρούονται.

Διέγερση με απορρόφηση ακτινοβολίας

Ας θεωρήσουμε ότι ένα άτομο υδρογόνου βρίσκεται στη θεμελιώδη κατάσταση ($n=1$) και απορροφά ένα φωτόνιο, που έχει τόση ενέργεια όση ακριβώς απαιτείται, για να μεταπηδήσει το ηλεκτρόνιο από τη θεμελιώδη κατάσταση στην κατάσταση που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό $n=2$.

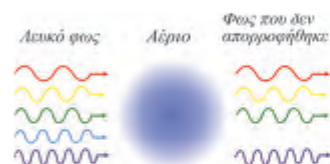
Μετά από ελάχιστο χρονικό διάστημα το διεγερμένο άτομο επανέρχεται στην κατάσταση $n=1$ εκπέμποντας ένα φωτόνιο, που έχει μήκος κύματος ίσο με το μήκος κύματος του φωτονίου που απορρόφησε (σχήμα 4.3-19). Επομένως και οι ενέργειες των δύο φωτονίων είναι ίσες. Αυτός είναι ο λόγος που το φάσμα εκπομπής παρουσιάζει μία φωτεινή γραμμή στη θέση της σκοτεινής γραμμής του φάσματος απορρόφησης.



(α) Το άτομο του υδρογόνου στη θεμελιώδη κατάσταση πριν από την κρούση με το ηλεκτρόνιο.
(β) Το άτομο σε διεγερμένη κατάσταση.
(γ) Το άτομο επανέρχεται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας ένα φωτόνιο.
Εικόνα 4.3-17

Ερμηνεία του φάσματος απορρόφησης. Το άτομο απορροφά ένα φωτόνιο και μεταβαίνει από τη θεμελιώδη κατάσταση στην πρώτη διεγερμένη κατάσταση. Η σκοτεινή γραμμή του φάσματος απορρόφησης αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που απορροφήθηκε.
Εικόνα 4.3-18

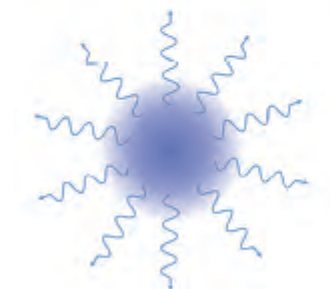
Ερμηνεία του φάσματος εκπομπής. Το άτομο εκπέμπει ένα φωτόνιο και μεταβαίνει στη θεμελιώδη κατάσταση. Η φωτεινή γραμμή αντιστοιχεί στο μήκος κύματος του φωτονίου που εκπέμπεται.
Εικόνα 4.3-19



Όταν λευκό φως, το οποίο, όπως γνωρίζουμε, περιέχει όλα τα μήκη κύματος, διέρχεται μέσα από αέριο υδρογόνο, τότε το αέριο απορροφά μόνο εκείνα τα φωτόνια τα οποία έχουν μήκη κύματος που αντιστοιχούν σε μεταβάσεις μεταξύ των επιτρεπόμενων τιμών ενέργειας του ατόμου του υδρογόνου. Τα διεγερμένα άτομα του υδρογόνου επανέρχονται στη θεμελιώδη κατάσταση εκπέμποντας φωτόνια προς όλες τις κατευθύνσεις.

Συμπέρασμα:

Το αέριο απορροφά και εκπέμπει φωτόνια που έχουν ορισμένα μήκη κύματος. Τα μήκη κύματος των φωτονίων που απορροφά το αέριο είναι ίσα με τα μήκη κύματος των φωτονίων που εκπέμπει. Το φάσμα απορρόφησης του αερίου παρουσιάζει σκοτεινές γραμμές στη θέση των φωτεινών γραμμών του φάσματος εκπομπής.



Το φως που απορροφήθηκε από το αέριο επανεκπέμπεται προς όλες τις κατευθύνσεις.
Εικόνα 4.3-20

Η επιτυχία και η αποτυχία του προτύπου του Bohr

Σύμφωνα με το πρότυπο του Bohr, όταν το ηλεκτρόνιο του ατόμου του υδρογόνου μεταβεί από αρχική τροχιά, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_i , σε τελική τροχιά μικρότερης ενέργειας, που αντιστοιχεί σε κβαντικό αριθμό n_f , τότε εκπέμπεται ένα φωτόνιο συχνότητας f , για την οποία ισχύει:

Σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ως αφετηρία της Κβαντικής Φυσικής

(1900) ΑΜΣ, Planck «στοιχεία ενέργειας» (energy elements)

(1905) Φωτοηλεκτρικό, Einstein « κβάντα ενέργειας» (energy quanta)

(1923) Σκέδαση Compton, Compton «κβάντα φωτός ή φωτόνια» (light quanta or photons)

ΕΥΧΑΡΙΣΤΩ ΠΟΛΥ, ΓΙΑ ΤΗΝ ΠΡΟΣΟΧΗ ΣΑΣ

&

ΝΑ ΕΥΧΗΘΩ ΓΙΑ ΕΣΑΣ ΚΑΙ ΤΟΥΣ ΜΑΘΗΤΕΣ ΣΑΣ

ΜΙΑ ΕΥΧΑΡΙΣΤΗ ΕΝΑΣΧΟΛΗΣΗ ΜΕ ΤΗΝ ΣΥΓΧΡΟΝΗ

ΦΥΣΙΚΗ