

Σωματιδιακή φύση της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, ως αφετηρία της Κβαντικής Φυσικής

Ανδρέας Φ. Τερζής

Τμήμα Φυσικής, Πανεπιστήμιο Πατρών

Η ακτινοβολία του Μέλανος Σώματος

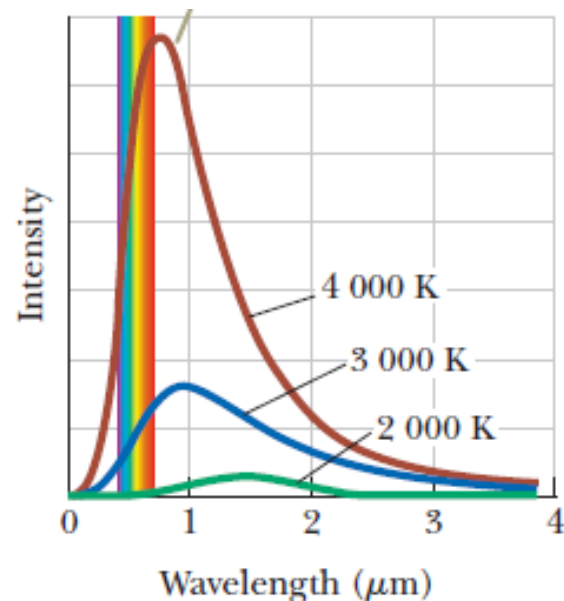
Η Ακτινοβολία του Μέλανος Σώματος (ΑΜΣ)

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

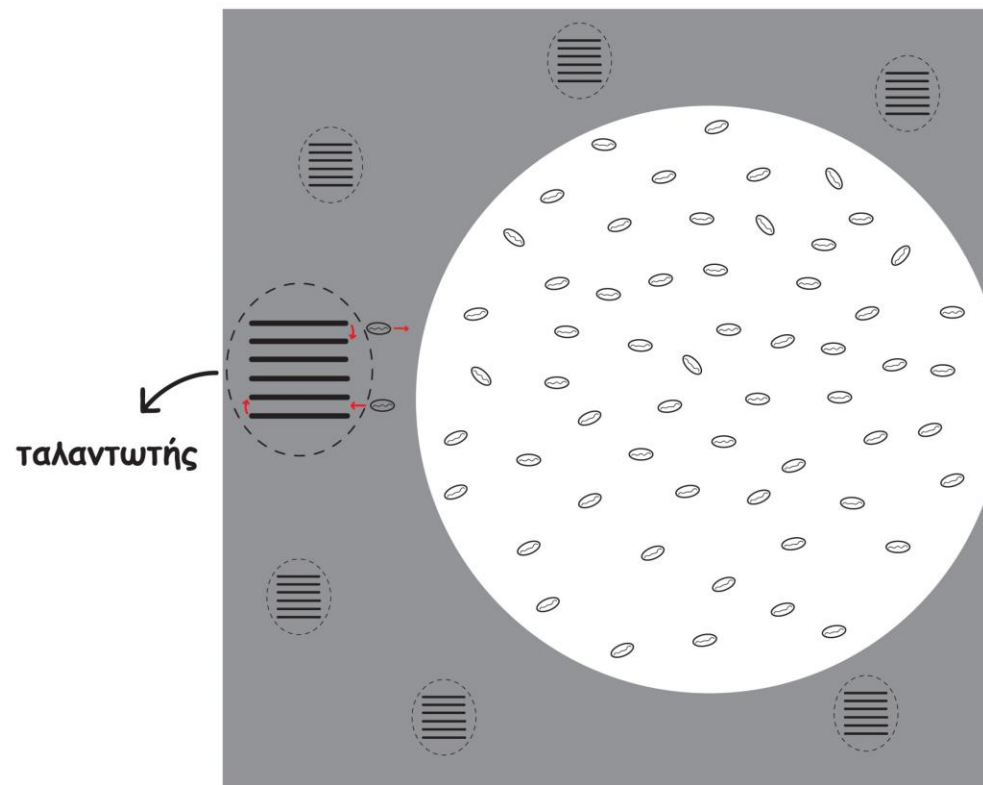
Κάθε σώμα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία κι αν βρίσκεται εκπέμπει ενέργεια με μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

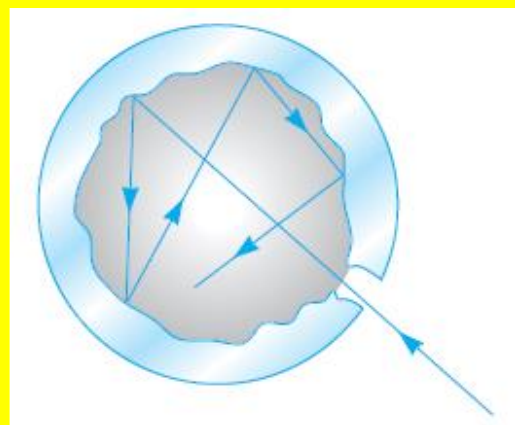
Η ακτινοβολία αυτή ονομάζεται **θερμική ακτινοβολία**. **ΕΙΝΑΙ ΔΗΛΑΔΗ Η ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΟΥ ΕΚΠΕΜΠΕΤΑΙ ΑΠΟ ΟΛΑ ΤΑ ΣΩΜΑΤΑ ΛΟΓΩ ΤΗΣ ΘΕΡΜΙΚΗΣ ΚΙΝΗΣΗΣ ΤΩΝ ΣΤΟΙΧΕΙΩΝ ΠΟΥ ΤΟ ΑΠΟΤΕΛΟΥΝ ΚΑΙ ΓΙΑΥΤΟ ΕΞΑΡΤΑΤΑΙ ΜΟΝΟ ΑΠΟ ΤΗΝ ΘΕΡΜΟΚΡΑΣΙΑΣ ΤΟΥΣ.**

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.**



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 ($\epsilon \approx 2 \text{ eV}$) 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 υπέρυθη) 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.





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,

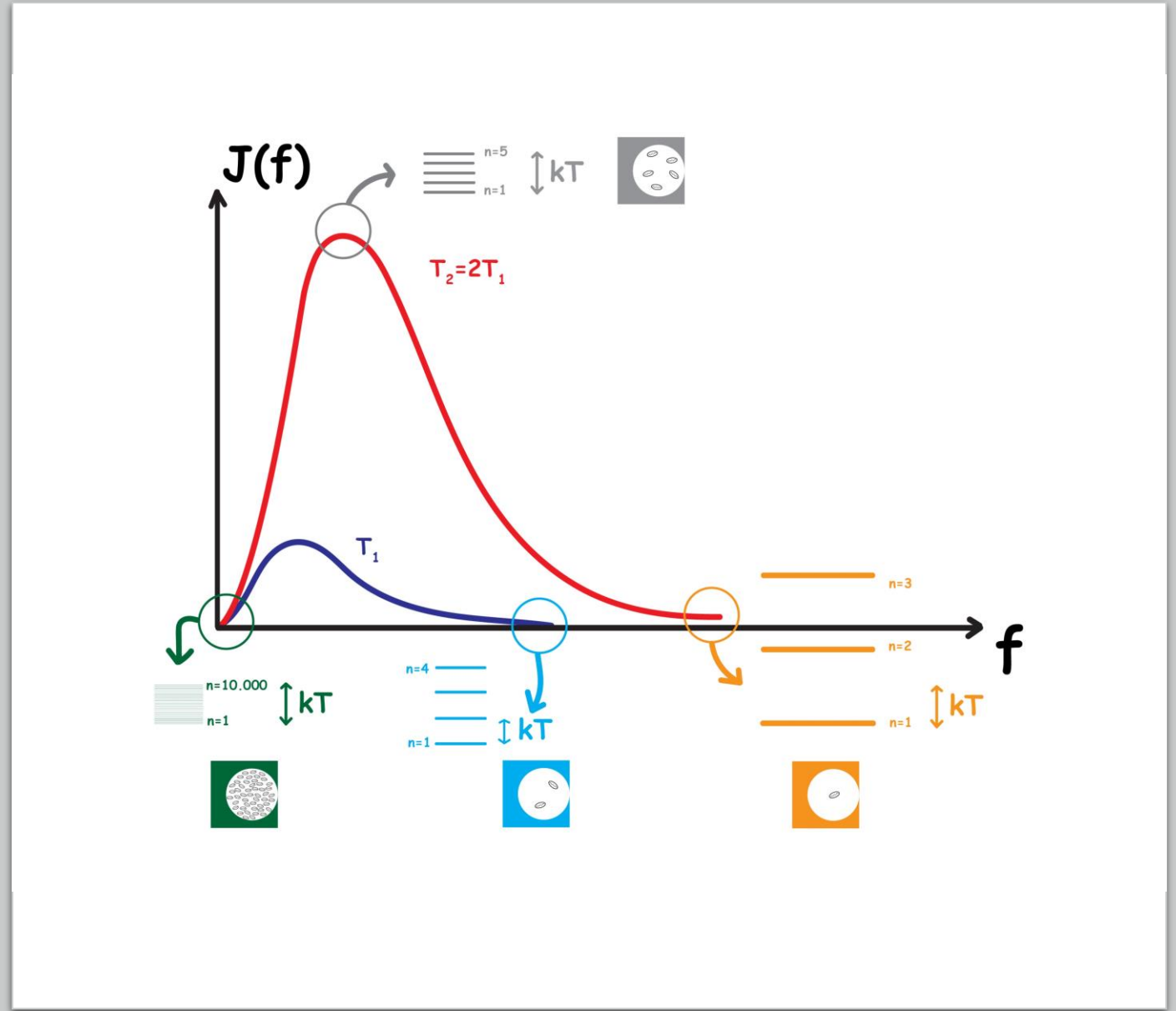
(β) κβαντικές καταστάσεις του η/μ πεδίου στην κοιλότητα, και

(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.
- **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 ιδρυτής της Κβαντικής θεωρίας, η ιστορική πραγματικότητα είναι πολύ διαφορετική. Η πραγματική ιστορία της ερμηνείας της ΑΜΣ, υπάρχει αποτυπωμένη στις **διάσημες διαλέξεις** του, που είναι καταγεγραμμένες 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.

Το Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

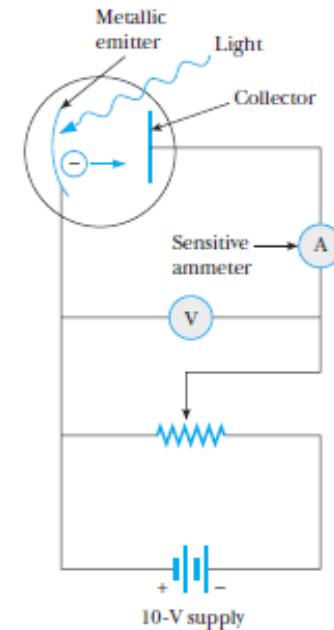
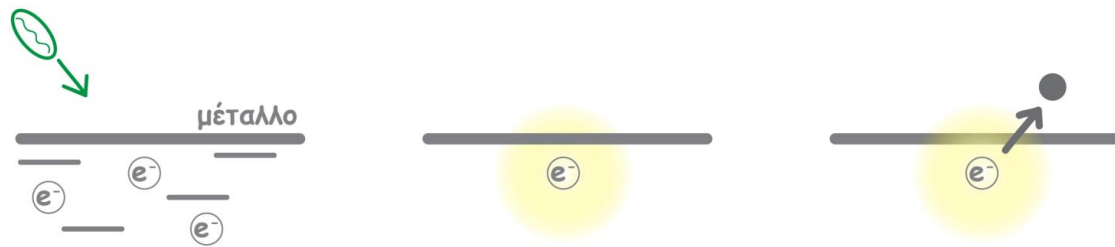


Figure 3.14 Photoelectric effect apparatus.

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

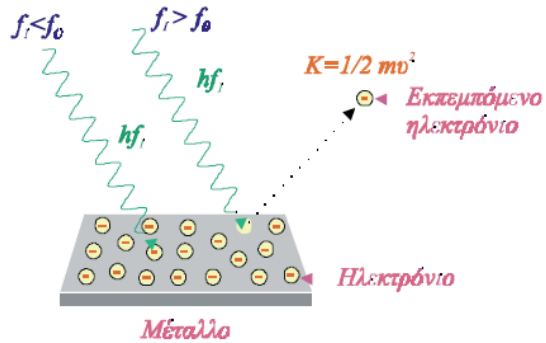
«το φως αποτελείται από μικρά πακέτα ενέργειας, που ονομάζονται κβάντα φωτός ή φωτόνια»

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»

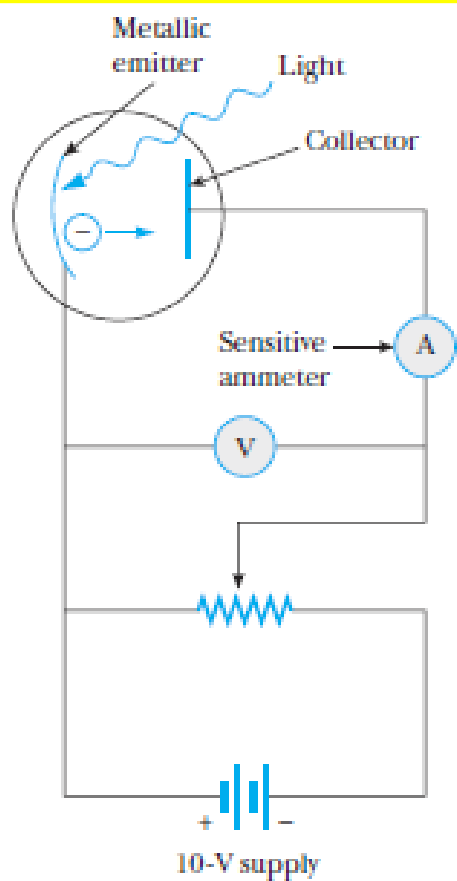


Figure 3.14 Photoelectric effect apparatus.

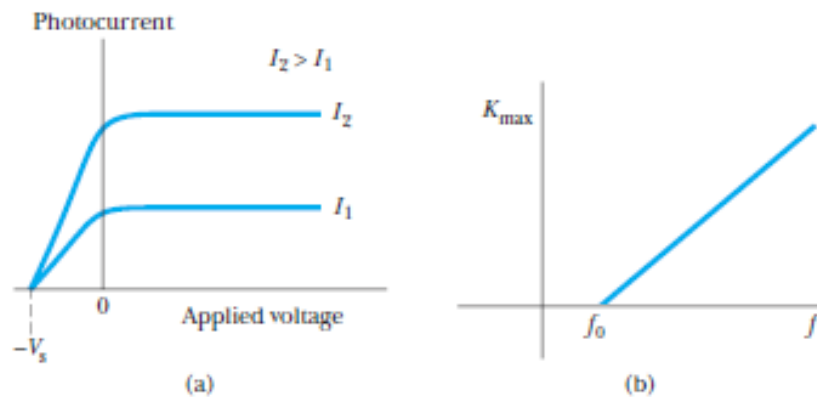


Figure 3.15 (a) A plot of photocurrent versus applied voltage. The graph shows that K_{\max} is independent of light intensity I for light of fixed frequency. (b) A graph showing the dependence of K_{\max} on light frequency.

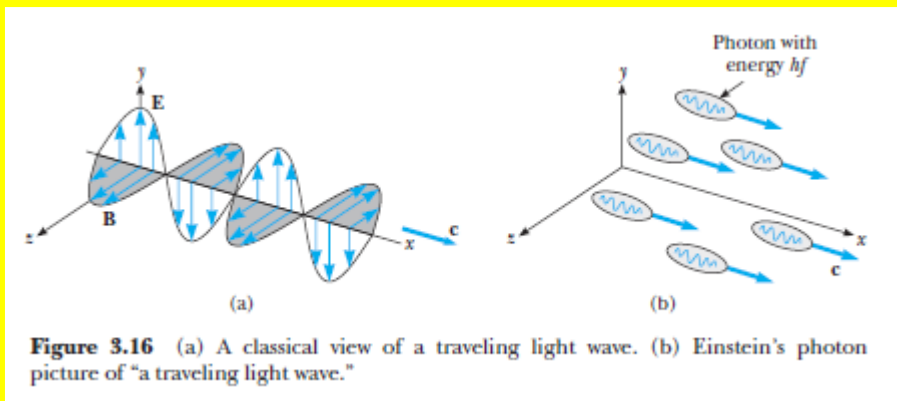


Figure 3.16 (a) A classical view of a traveling light wave. (b) Einstein's photon picture of "a traveling light wave."

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

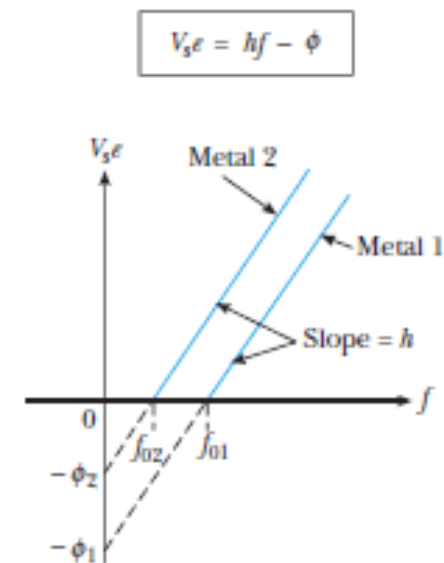



Figure 3.17 Universal characteristics of all metals undergoing the photoelectric effect.

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

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


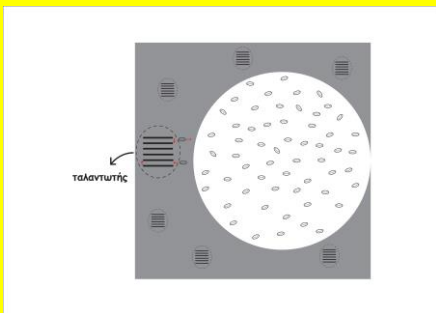
$$S - S_0 \propto \ln \left(\frac{V}{V_0} \right)^{E/\beta f}$$

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.

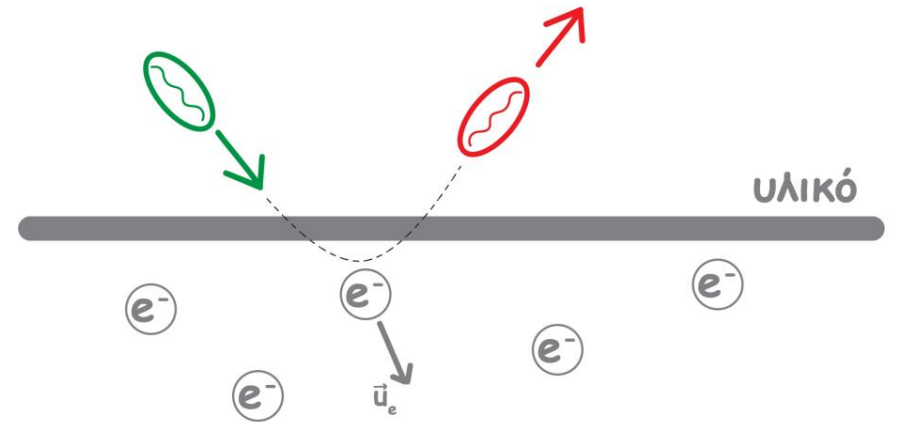
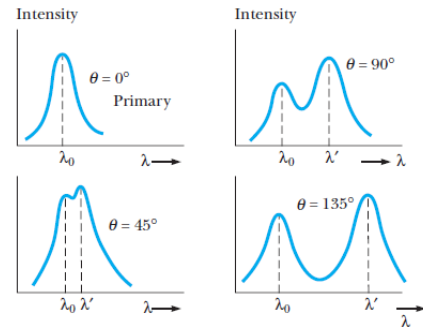
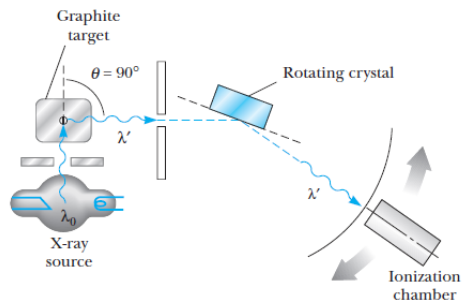
Το Νόμπελ φυσικής δόθηκε στον Einstein το 1921, (κυρίως) για την ερμηνεία του φωτοηλεκτρικού φαινομένου και για την γενική του προσφορά στην θεωρητική φυσική. Ενώ το 1923 πήρε Νόμπελ φυσικής ο Millikan για την δουλειά του σε σχέση με το ηλεκτρόνιο αλλά και για τα μεγάλης ακρίβειας πειράματά του το 1916,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

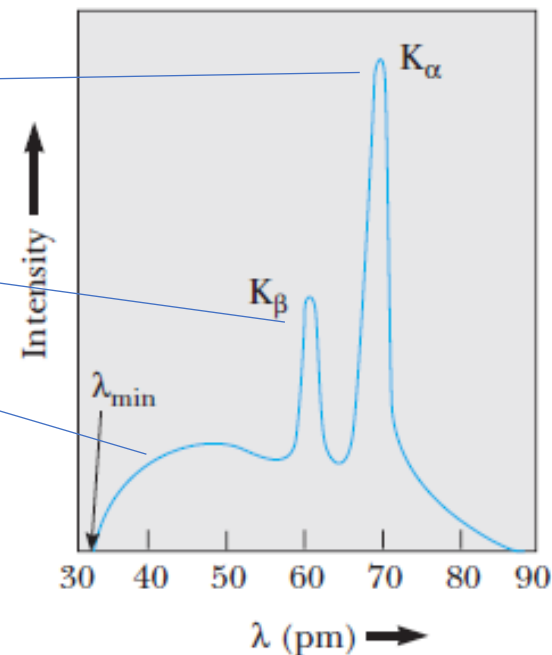
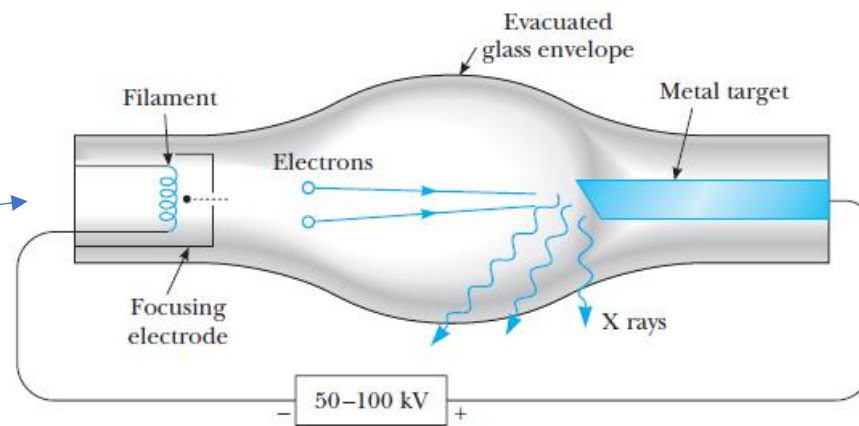
Όταν τα ηλεκτρόνια της δέσμης φτάνουν στην επιφάνεια του μετάλλου επιβραδύνονται απότομα. Η επιβράδυνση αυτή συνοδεύεται από εκπομπή ακτινοβολίας, το φωτόνιο της οποίας θα έχει ενέργεια μικρότερη ή ίση με την ενέργεια του ηλεκτρονίου στο οποίο οφείλεται η εκπομπή του.

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 ομώνυμων ακτίνων έφερε επανάσταση στην ιατρική. Νόμπελ Φυσικής το 1901.

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 εξαιρετικό 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

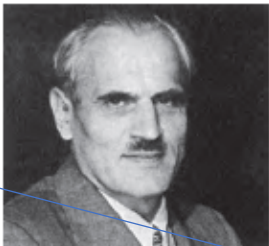
$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\phi)$$

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.

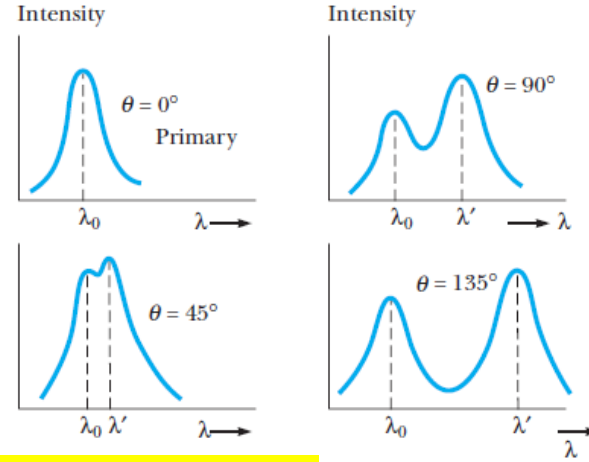
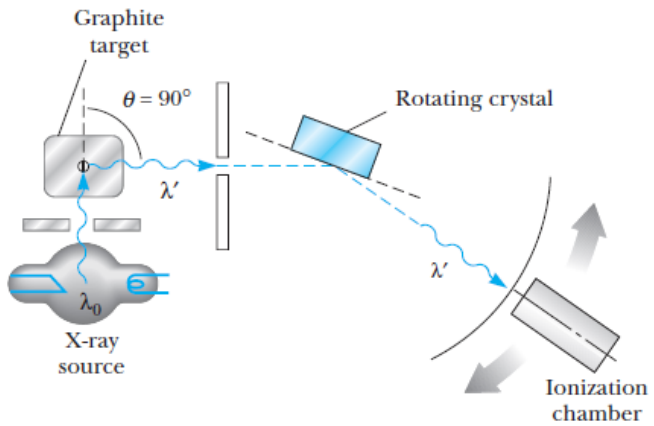
Σύμφωνα με την κλασική θεωρία ένα ηλεκτρομαγνητικό κύμα συχνότητας f που προσπίπτει σ' ένα υλικό αναγκάζει τα ηλεκτρόνια του υλικού να ταλαντώνονται με την ίδια συχνότητα και, επακόλουθα, να παράγουν με τη σειρά τους σαν μικρές κεραίες, ηλεκτρομαγνητικό κύμα της ίδιας συχνότητας f . Η κλασική θεωρία, 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.



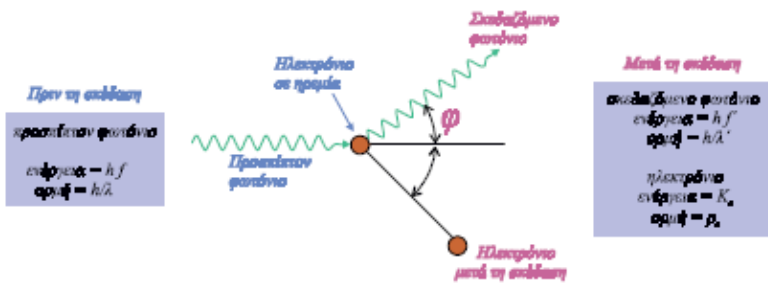
Arthur Holly Compton (1892-1962) Αμερική.
 Εικόνα 7.3



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.

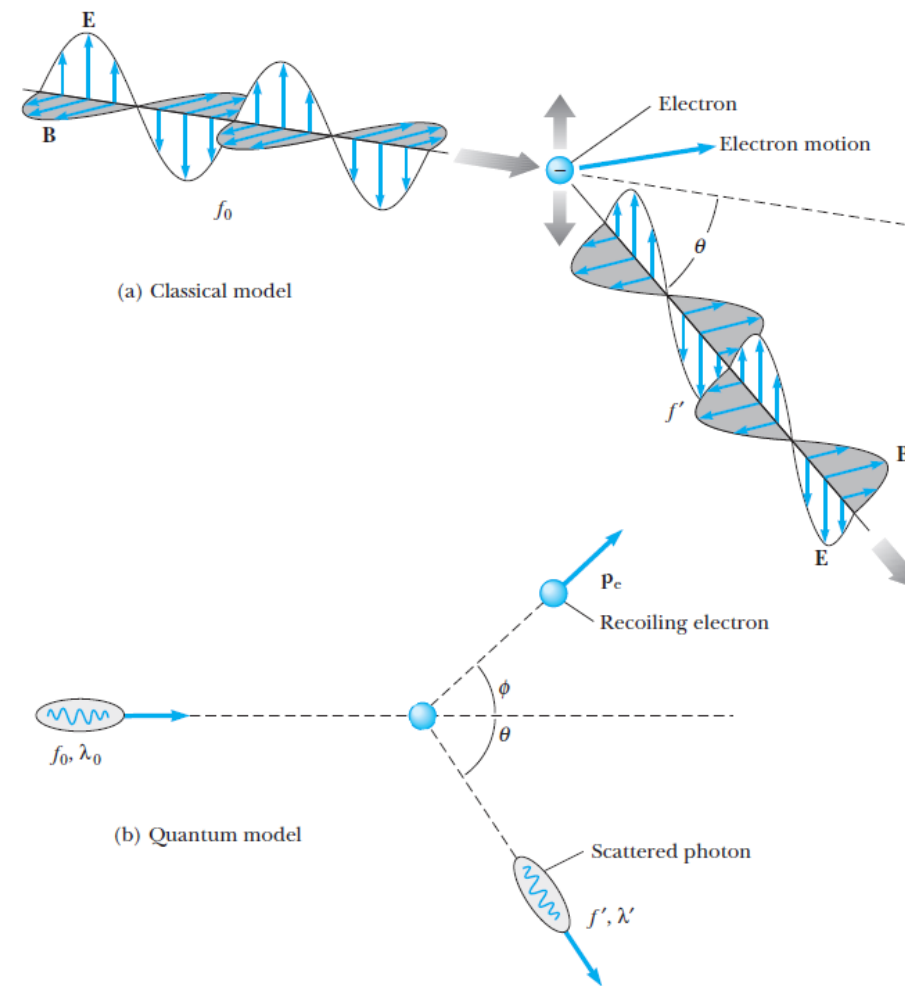


¹³P. Debye, *Phys. Zeitschr.*, 24:161, 1923. In this paper, Debye acknowledges Einstein's pioneering work on the quantum nature of light.
¹⁴A. H. Compton, *Phys. Rev.*, 21:484, 1923.

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.

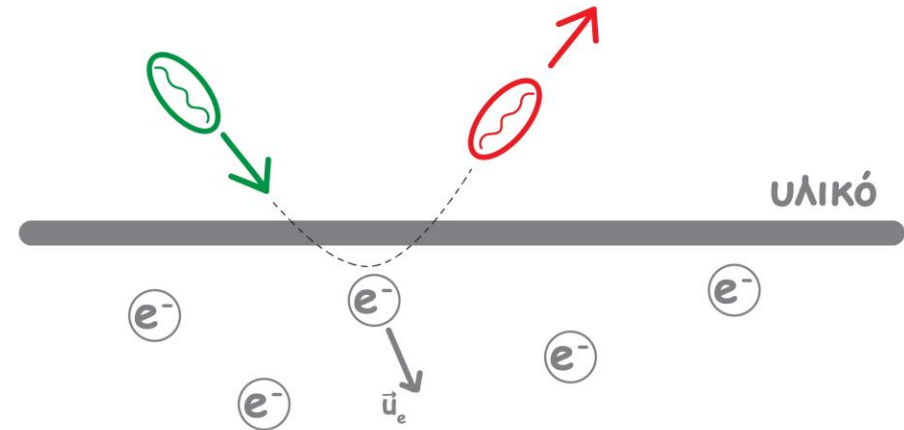
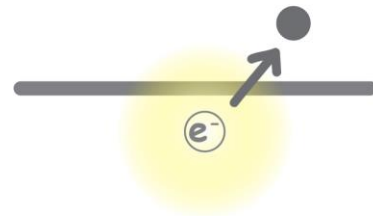
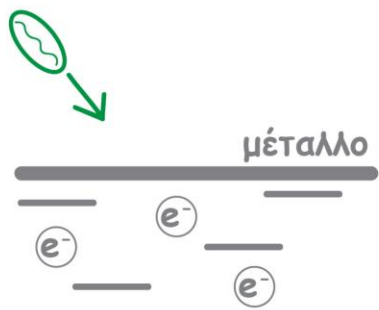
Αν και σε όλα σχεδόν τα βιβλία Μοντέρνας Φυσικής αναφέρεται ότι **κλασικά αναμένουμε** η συχνότητα της σκεδαζόμενης ακτινοβολίας είναι ίση με την προσπίπτουσα, αυτό δεν είναι σωστό. Την ορθή πρόβλεψη της κλασικής φυσικής την διαπραγματεύεται δεξιοτεχνικά ο David Bohm στο 'κλασικό' βιβλίο του «Quantum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

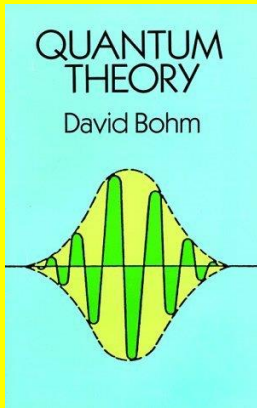


Σχήματα από το βιβλίο των Serway, Moses και Moyer, «Modern Physics» έκδοση 2004

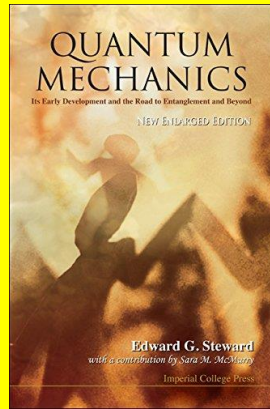
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (απορρόφηση φωτονίου) και φαινόμενο Compton (σκέδαση φωτονίου)



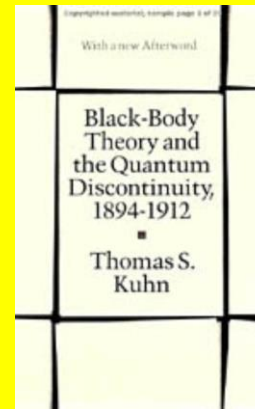
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΔΙΑΛΕΞΗΣ



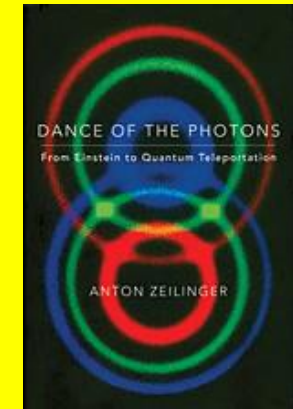
Εξαιρετικό βιβλίο, με ένα Bohm φανατικό υπερασπιστή της σχολής της Κοπεγχάγης. Αρχική έκδοση 1952, την ίδια χρονιά που ο συγγραφέας προτείνει μια άλλη διαδρομή για την κβαντομηχανική! Κυκλοφορεί ανατύπωση του 1989 από τις Dover Publications.



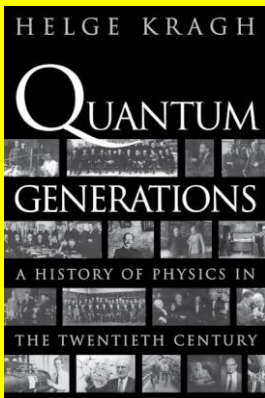
Εξαιρετικό βιβλίο, παρουσιάζεται η «πραγματική» ιστορία της κβαντομηχανικής, όπως αυτή δημιουργήθηκε από τους φυσικούς του 20^{ου} αιώνα. Από τις εκδόσεις Imperial College Press (2011).



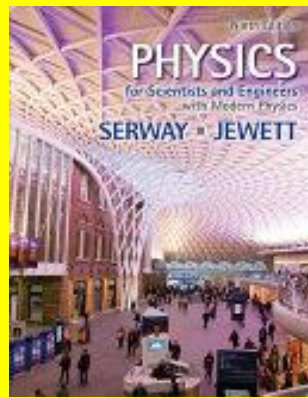
Από έναν από τους κορυφαίους επιστημολόγους του 20^{ου} αιώνα, η «πραγματική» ιστορία για τις μελέτες του Planck στην ΑΜΣ. Ερευνά κατά πόσο αυτές οδήγησαν στην αποδοχή της κβαντικής φύσης της ακτινοβολίας. Από τις εκδόσεις University of Chicago Press (1987).



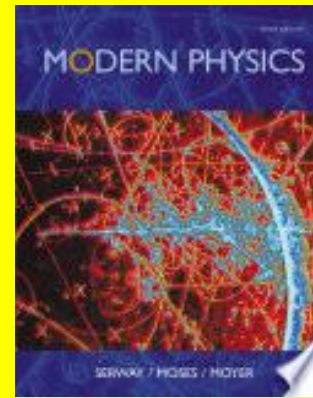
Ο αυστριακός καθηγητής Άντον Τσέιλινγκερ (φετινό –2022– Νόμπελ) παρουσιάζει, με ελάχιστα μαθηματικά, την φυσική των φωτονίων και της εφαρμογές της. Από τις (άγνωστες) εκδόσεις Farrar, Straus and Giroux (2010).



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).

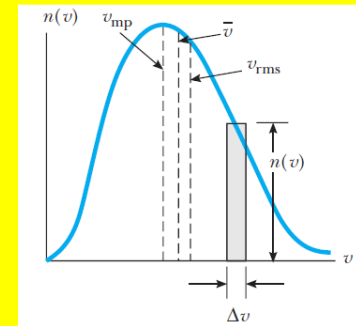
Συμπληρωματικό υλικό (πινελιές)

(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.**

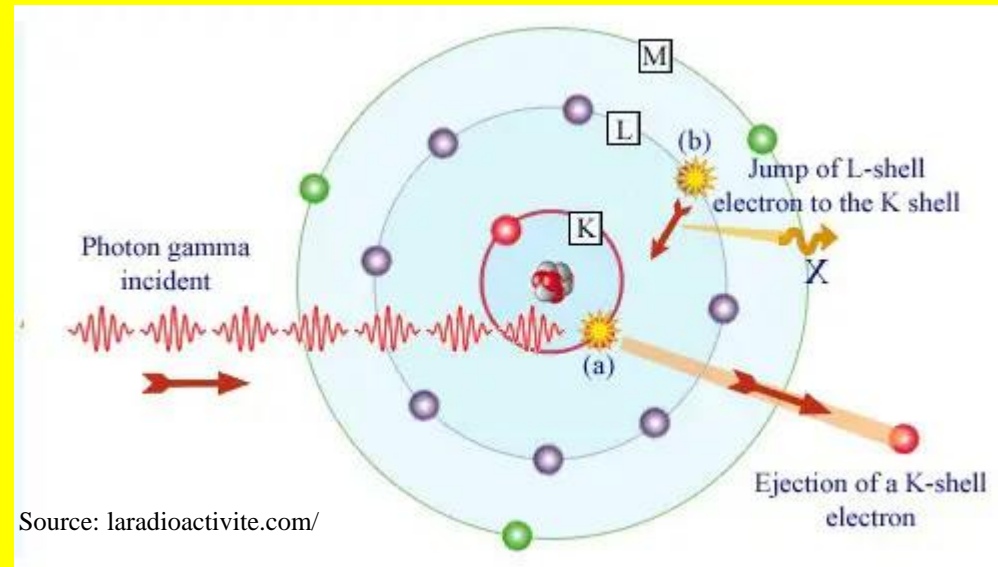
Ο Planck ήταν τόσο θεμελιακά ενάντιος στην στατιστική θερμοδυναμική, καθώς δεν μπορούσε να δεχθεί μια εξήγηση για τον φυσικό κόσμο να έχει την βάση της στην στατιστική. Μάλιστα, αγνόησε σημαντικές ενδείξεις για την αλήθεια και τις προβλεπτικές της ικανότητες, όπως για παράδειγμα την πολύ μεγάλη ομοιότητα 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.

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)