

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΤΟ ΦΩΣ ;;;

- Σωματιδιακή εικόνα
(I.Newton)

Ροή τέλειων ελαστικών
σωματιδίων που κινούνται
ελεύθερα στο κενό χώρο.

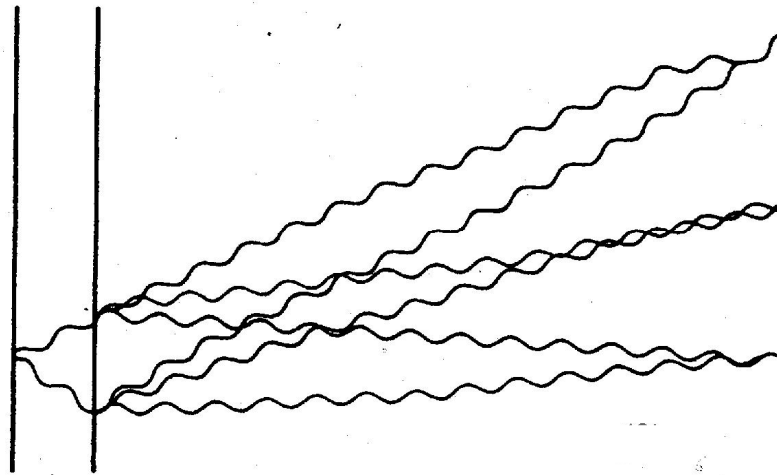
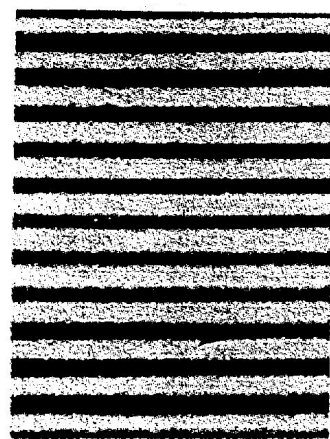
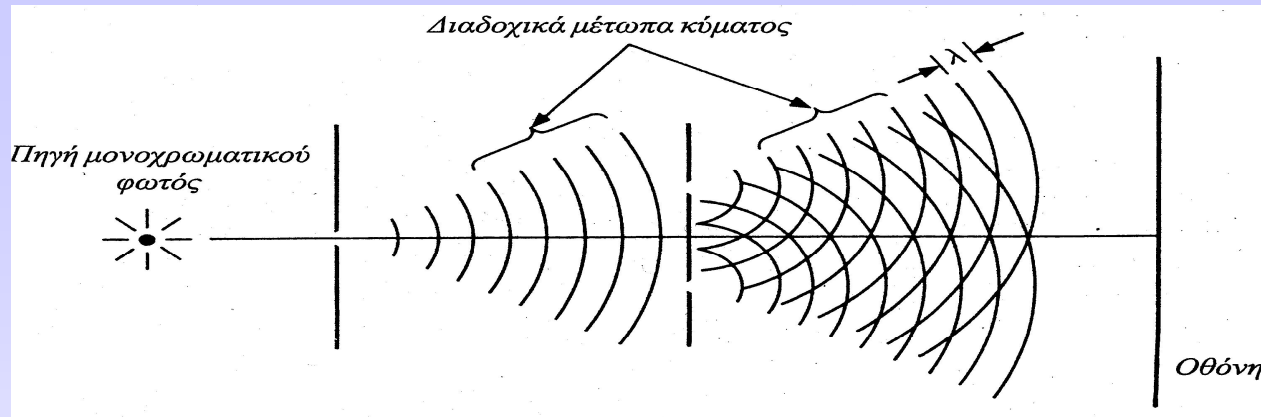
Πληρεί τους κανόνες της
γεωμετρικής οπτικής
Ευθύγραμμη διάδοση
Ανάκλαση – Διάθλαση.

- Κυματική εικόνα
(C.Huygens – T. Young)

Κυμάνσεις ενός τέλειου
ελαστικού μέσου διάδοσης που
πληρεί όλο το χώρο.

Πληρεί τους κανόνες της
γεωμετρικής οπτικής αλλά και
εξηγεί τα φαινόμενα Συμβολής
και Περίθλασης.

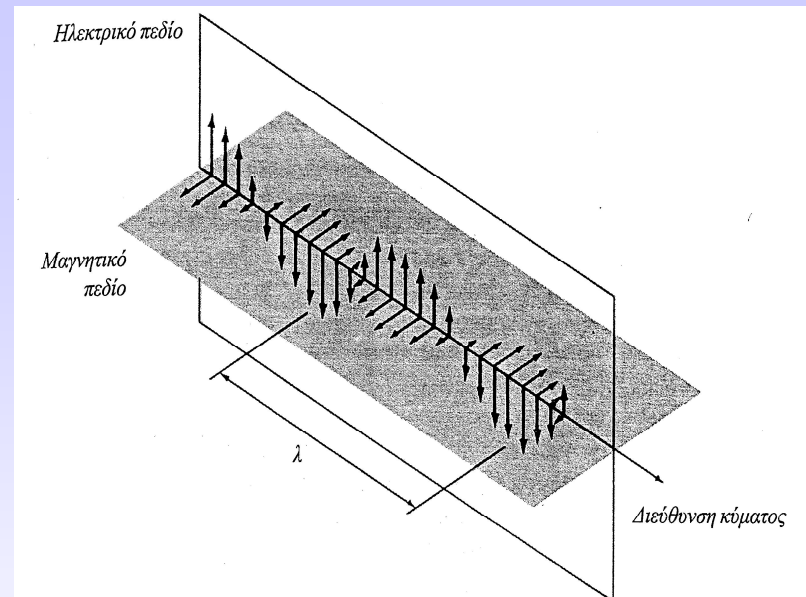
Πείραμα των δύο σχισμών [T.Young, 1801]



- ⊕ *Εποικοδομητική συμβολή*
- ⊖ *Καταστρεπτική συμβολή*
- ⊕ *Εποικοδομητική συμβολή*

Ηλεκτρομαγνητική Θεωρία του Maxwell [1864]

- Μεταβαλλόμενο Μαγνητικό πεδίο δημιουργεί Ηλεκτρικό πεδίο (Faraday)
- Μεταβαλλόμενο Ηλεκτρικό πεδίο συνοδεύεται από Μαγνητικό πεδίο (Maxwell)
- Υπάρχουν Η/Μ κύματα αποτελούμενα από σταθερά μεταβαλλόμενα Η/Μ πεδία ($E=c \cdot B$) που διαδίδονται στο κενό με ταχύτητα :
$$c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$$
- Η θεωρία αυτή επιβεβαιώθηκε από τον H.Hertz



Το ΦΩΣ είναι ηλεκτρομαγνητικά κύματα

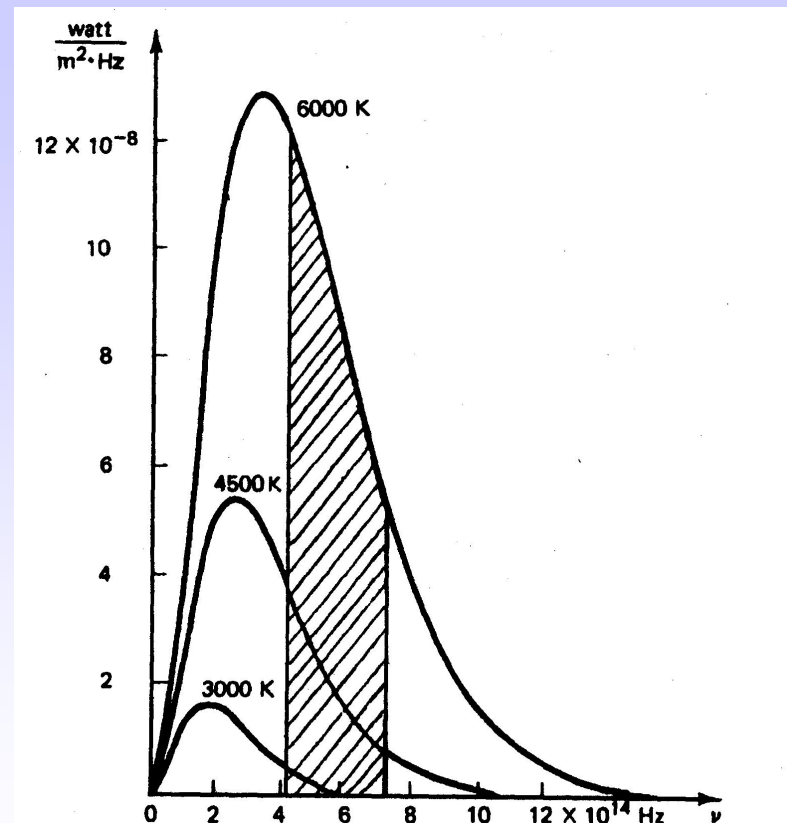
(κλασική θεώρηση)

Ακτινοβολία Μέλανος Σώματος [Kirchhoff, 1859]

- Όλα τα σώματα σε οποιαδήποτε θερμοκρασία εκπέμπουν Η/Μ ακτινοβολία σε ένα ευρύ και συνεχές φάσμα συχνοτήτων.

Θερμική Ακτινοβολία

- «Μέλαν σώμα» χαρακτηρίζεται ένα σώμα που είναι τέλειος απορροφητής-εκπομπός της Η/Μ ακτινοβολίας σε όλο της το φάσμα. (Κλειστή Κοιλότητα τέλεια θερμομονωμένη)



Ερμηνεία της Ακτινοβολίας από Μέλαν Σώμα βάσει της Κλασικής Θερμοδυναμικής [1879-1900]

- Η ολική ροή της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι ανάλογη της τέταρτης δύναμης της θερμοκρασίας του

[Νόμος των Stefan-Boltzmann]

- Το φάσμα της εκπεμπόμενης ακτινοβολίας μετατοπίζεται σε υψηλότερες συχνότητες με την αύξηση της θερμοκρασίας έτσι ώστε να ισχύει: $\lambda \cdot T = \text{σταθερά}$

[Νόμος μετατόπισης του Wien]

- **Μορφή του φάσματος (?????)**
Θεωρώντας ότι η ακτινοβολία εντός του σώματος έχει την μορφή στάσιμων κυμάτων σε θερμοδυναμική ισορροπία τότε η ολική ροή της ακτινοβολίας δίνεται από την σχέση:

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi ckT}{\lambda^4}$$

[Νόμος Rayleigh-Jeans]

Δεν ισχύει για μικρά μήκη κύματος (καταστροφή στο υπεριώδες)

Ερμηνεία της Ακτινοβολίας από Μέλαν Σώμα βάσει της Κβαντικής Θεωρίας του Plank [1900]

Ο Plank διατήρησε τη κλασσική θεώρηση των Rayleigh-Jeans με την προσθήκη δύο νέων υποθέσεων:

- Η ενέργεια των ταλαντούμενων μορίων των τοιχωμάτων της κοιλότητας παίρνει μόνο κάποιες διακριτές τιμές (κβαντισμένες):

$$E_n = n \cdot h \cdot \nu$$

- Η ενέργεια της H/M ακτινοβολίας που εκπέμπεται-απορροφάται από την κοιλότητα έχει μόνο διακριτές τιμές (κβάντα):

$$E = h \cdot \nu$$

- Τελικά η ολική ροή της εκπεμπόμενης H/M ακτινοβολίας από μέλαν σώμα δίνεται ως :

$$I(\lambda, T) = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{(e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

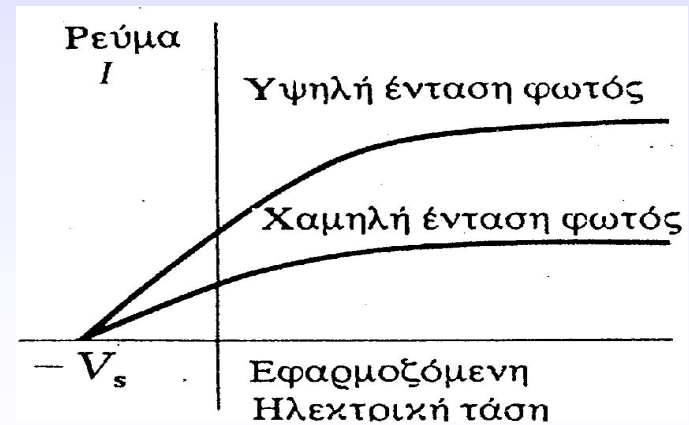
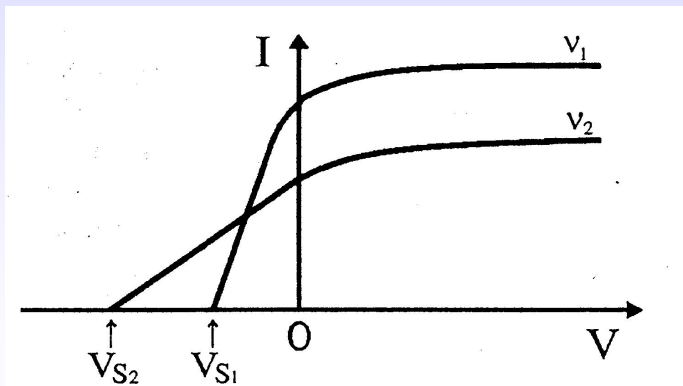
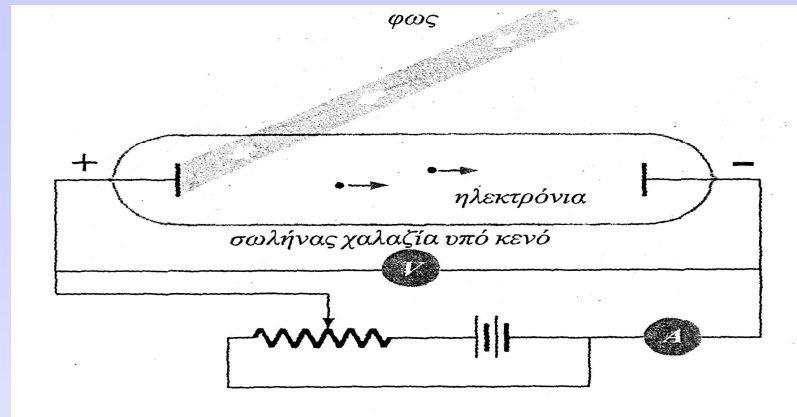
$$I(\nu, T) = \frac{2\pi \nu^2}{c^2} \cdot \frac{h\nu}{(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

[Νόμος ακτινοβολίας του Plank]

Όπου $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ (J.sec) είναι η σταθερά του Plank (κβάντο της δράσης)

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο [Hertz, 1888]

[Εξαγωγή e^- από μέταλλα λόγω πρόσπτωσης H/M ακτινοβολίας]



Αντιφάσεις με την κυματική θεώρηση

- Τα φωτοηλεκτρόνια εκπέμπονται ακαριαία

Στον μέγιστο δυνατό χρόνο των 10^{-9} sec (ακαριαία εκπομπή) βάσει της κυματικής θεώρησης ένα μέσο άτομο Na μπορεί να απορροφήσει ενέργεια 10^{-15} eV.

Ένα e^- του ατόμου για να αποκτήσει ενέργεια μερικών eV απαιτείται χρόνος μερικών μηνών (!!!!????)

- Η ενέργεια των e^- , που ελευθερώνονται με απορρόφηση ακτινοβολίας από άτομα, αυξάνει με τη συχνότητα της προσπίπτουσας ακτινοβολίας και όχι με την ένταση αυτής.
- Για συχνότητες μικρότερες μιάς κρίσιμης τιμής (συχνότητα κατωφλιού), χαρακτηριστικής κάθε μετάλλου, ΔΕΝ εκπέμπονται φωτοηλεκτρόνια.

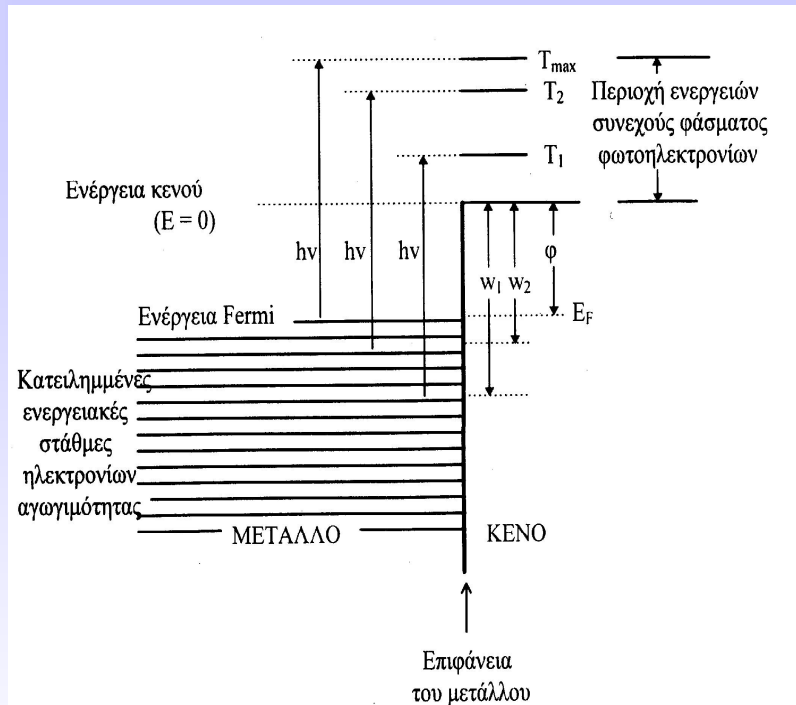
Εξήγηση του ΦΦ από τον Einstein [1905] βάσει της κβαντικής θεωρίας του Plank

- Υπέθεσε ότι το φως (αλλά και κάθε Η/Μ ακτινοβολία) συχνότητας ν αποτελείται από δέσμη κβαντισμένων ποσοτήτων ενέργειας E .
- Το κάθε κβάντο φωτός είναι μια αυτόνομη οντότητα, ένα είδος σωματιδίου, που ονομάστηκε **ΦΩΤΟΝΙΟ** και του οποίου η ενέργεια είναι
$$E = h \cdot \nu$$
- Το κάθε **ΦΩΤΟΝΙΟ**, δρώντας ανεξάρτητα από τα υπόλοιπα της φωτεινής δέσμης, μπορεί να δώσει όλη την ενέργειά του σε ένα δέσμιο e^- του υλικού της καθόδου και να προκαλέσει την εξαγωγή του ατομικού e^- .
- Η ενέργεια του **ΦΩΤΟΝΙΟΥ** πρέπει να είναι μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης (w) του ατομικού e^- . Τα φωτοηλεκτρόνια, μετά την έξοδό τους από το μέταλλο, κινούνται με ενέργεια T ίση με το περίσσειμα ενέργειας των φωτονίων.

Η μέγιστη ενέργεια T_{\max} των φωτοηλεκτρονίων αντιστοιχεί σ' αυτά με την μικρότερη ενέργεια σύνδεσης $w = \phi$ (έργο εξόδου):

$$T_{\max} = h \cdot \nu - \phi$$

[φωτοηλεκτρική εξίσωση του Einstein]



- Η χαρακτηριστική **συχνότητα κατωφλιού ν_0** για το εκάστοτε μέταλλο προκύπτει όταν $T_{\max} = 0$ και ισούται με

$$\nu_0 = \phi / h$$

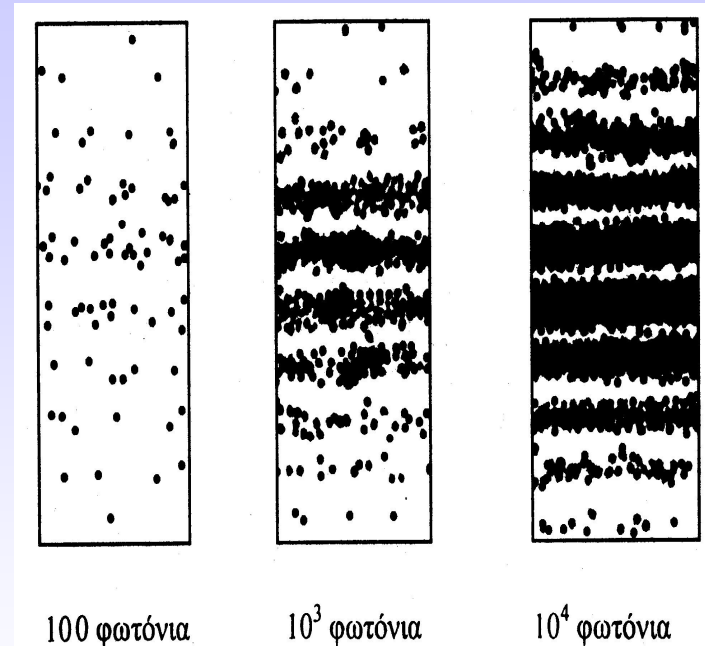
Βάσει της σχέσης αυτής προσδιορίστηκε πειραματικά για πρώτη φορά η σταθερά του Plank από τον Millican (1916)

- Από την αρχή διατήρησης της ορμής στο σύστημα φωτονίου- e^- προκύπτει ότι ΔEN συμβαίνει $\Phi\Phi$ για ελεύθερο ηλεκτρόνιο

ΤΙ ΕΙΝΑΙ ΦΩΣ.

Η Μορφολογία της Η/Μ ακτινοβολίας.

- Τα κβάντα της Η/Μ ακτινοβολίας έχουν και σωματιδιακές ιδιότητες (Ενέργεια – Ορμή – Στροφορμή)
- Τα κβάντα της Η/Μ ακτινοβολίας έχουν και κυματικές ιδιότητες (Συχνότητα – μήκος κύματος - Φάση)
- Το ΦΩΣ ταξιδεύει ως ξεχωριστά σωματίδια-φωτόνια το καθένα εκ των οποίων εμφανίζει κυματική συμπεριφορά
- Η κυματική και η σωματιδιακή φύση είναι ΣΥΜΠΛΗΡΩΜΑΤΙΚΕΣ



ΦΩΤΟΝΙΑ – Κβάντα Η/Μ ακτινοβολίας



- Σωματίδιο μάζας m που κινείται με ταχύτητα $v = c$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

Τα φωτόνια έχουν μηδενική μάζα ηρεμείας $m_0=0$

- Η ενέργεια και η ορμή σωματιδίου βάσει της ειδικής θεωρίας της Σχετικότητας :

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad p = \frac{m_0 u}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}}$$

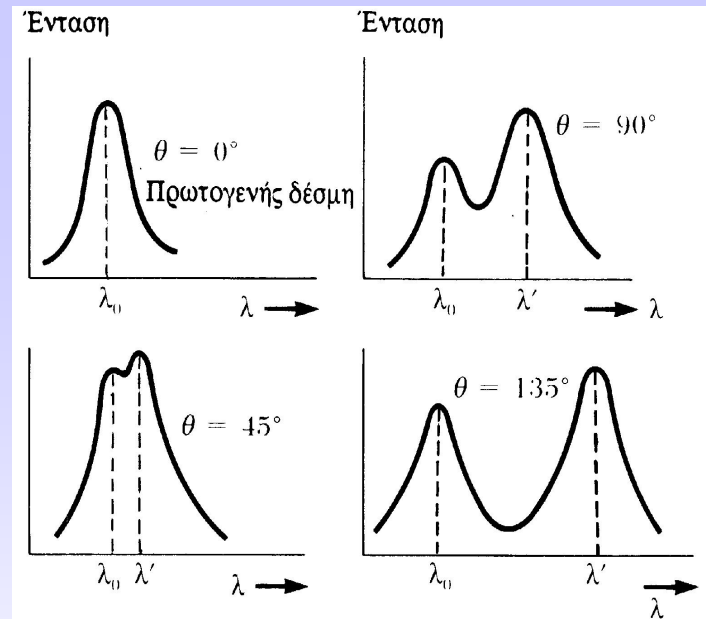
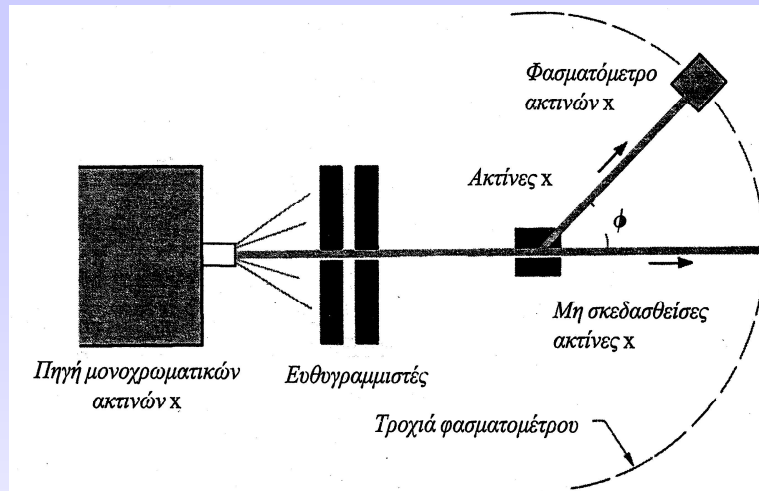
$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

Επομένως η ορμή των φωτονίων είναι $p = E / c = h \cdot \nu / c = h / \lambda$

Τα φωτόνια έχουν επίσης και στροφορμή $i = E / 2\pi\nu = h/2\pi = \hbar$

Φαινόμενο Compton [1923]

[Μη ελαστική σκέδαση φωτονίου από ελεύθερο e^-]



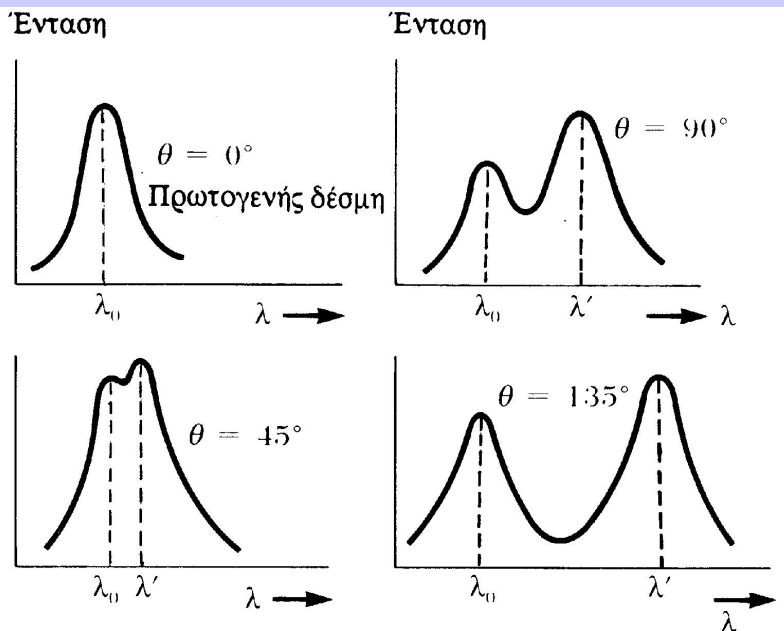
Η πρώτη συνιστώσα έχει μήκος κύματος ίδιο με την προσπίπτουσα λ_0

Η δεύτερη συνιστώσα έχει πάντα μεγαλύτερο μήκος κύματος λ'

Η διαφορά μήκους κύματος μεταξύ τους εξαρτάται από τη γωνία σκέδασης θ

• ΕΠΙΒΕΒΑΙΩΣΗ ΤΗΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑΚΗΣ ΘΕΩΡΗΣΗΣ

Βάσει της κυματικής θεώρησης κατά την σκέδαση Η/Μ ακτινοβολίας (λ_0) προκαλείται ταλάντωση των φορτίων του υλικού με μήκος κύματος ίσο με της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Επομένως θα ανιχνευτόταν μόνο μία συνιστώσα με λ_0 .



Βάσει της σωματιδιακής θεώρησης

- (1) όταν το φωτόνιο σκεδαστεί από ισχυρώς δέσμιο e^- δεν χάνει ενέργεια κατά την σκέδαση και συνεχίζει με την αρχική του. Η σκέδαση αυτή καλείται ελαστική ή σύμφωνη σκέδαση και είναι υπεύθυνη για την συνιστώσα λ_0 .
- (2) όταν το φωτόνιο σκεδαστεί από ελεύθερο ή χαλαρά συδεδεμένο e^- τότε χάνει ένα μέρος ενέργειας κατά την σκέδαση και συνεχίζει με μικρότερη ενέργεια. Η σκέδαση αυτή καλείται μη ελαστική ή ασύμφωνη σκέδαση ή σκέδαση Compton και είναι υπεύθυνη για την συνιστώσα λ' .

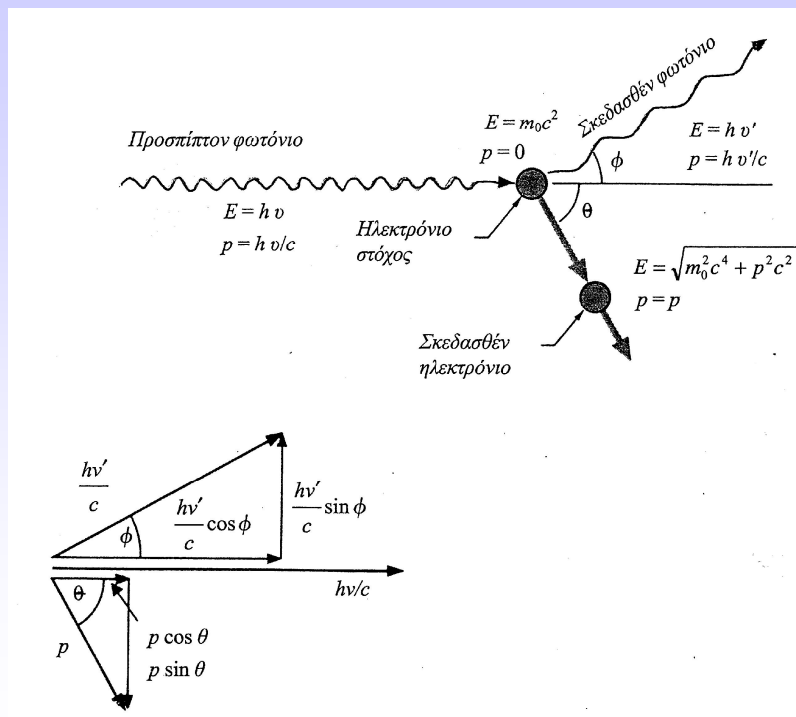
Αρχή διατήρησης της ενέργειας :

$$h\nu_0 = h\nu' + (m_e - m_0)c^2$$

Η ενέργεια του σκεδαζόμενου e^-

$$E_e = m_e c^2 = h(\nu_0 - \nu') + m_0 c^2$$

$$E_e = \sqrt{m_0^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$



Αρχή διατήρησης της ορμής :

$$(x) \rightarrow \frac{h\nu_0}{c} + 0 = \frac{h\nu'}{c} \cos \phi + p_e \cos \theta$$

$$(y) \rightarrow 0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \phi - p_e \sin \theta$$

Τελικά προκύπτει ότι:

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_0 = \lambda_C (1 - \cos \theta)$$

όπου $\lambda_C = h / m_0 c = 0.00243 \text{ nm}$ και καλείται **μήκος κύματος Compton**

$$\lambda_C = \frac{h}{m_0 c} = \frac{hc}{m_0 c^2} = \frac{h\nu_0}{m_0 c^2} \lambda_0$$

Το μήκος κύματος Compton του e^- αντιστοιχεί στο μήκος κύματος φωτονίου με ενέργεια ίση με την ενέργεια ηρεμείας του e^-

ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΗ ΦΩΤΟΝΙΟΥ ΜΕ ΥΛΗ

Με τα e^- του ατόμου

- **Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ΦΦ**
[τέλεια πλαστική κρούση] συμβαίνει για φωτόνια ενέργειας $eV < E_\Phi < 1MeV$
- **Φαινόμενο-Σκέδαση Compton ΦC**
[μη ελαστική κρούση] συμβαίνει για φωτόνια ενέργειας $100keV < E_\Phi < 10MeV$
- **Σκέδαση Thomson** [ελαστική κρούση] συμβαίνει για φωτόνια ενέργειας $eV < E_\Phi < 10keV$
- **Σκέδαση Rayleigh** [ελαστική κρούση] συμβαίνει για φωτόνια ενέργειας $eV < E_\Phi$

Με τον πυρήνα του ατόμου

- Αλληλεπίδραση με το πεδίο του πυρήνα (γενικότερα με ένα ισχυρό πεδίο Coulomb) όπου η ενέργεια του φωτονίου μετατρέπεται σε ύλη-αντιύλη [**Φαινόμενο Δίδυμης Γένεσης**] συμβαίνει όταν τα φωτόνια έχουν ενέργεια $E_\Phi > 1MeV$
- Απορρόφηση φωτονίου από τον πυρήνα του ατόμου με εκπομπή σωματιδίου [**Πυρηνική αντίδραση (γ, x)**] συμβαίνει για φωτόνια ενέργειας $E_\Phi > 10MeV$

Φαινόμενο Δίδυμης Γένεσης (ΦΔΓ)

[Μεταροπή φωτονίου σε ύλη-αντιύλη παρουσία πεδίου Coulomb]

- Η αντιύλη προέκυψε από την σχετικιστική-κβαντομηχανική θεωρία του P. Dirac [1930] όπου η ενέργεια του e^- δίνεται από την σχέση:

$$E_e = \pm \sqrt{m_0^2 c^4 + p_e^2 c^2}$$

- Οι θετικές καταστάσεις ενέργειας αντιστοιχούν στα e^-
- Οι αρνητικές καταστάσεις ενέργειας αντιστοιχούν σε ένα νέο είδος σωματιδίου e^+ [ποζιτρόνιο]. Η ύπαρξή τους επιβεβαιώθηκε στην κοσμική ακτινοβολία. [Anderson, 1933]

- Η δίδυμη γένεση [e^-, e^+] συμβαίνει όταν φωτόνιο ενέργειας E βρεθεί εντός ισχυρού πεδίου Coulomb.
- Η ενεργειακή εξίσωση που διέπει την ΔΓ είναι η ακόλουθη:

$$E_\gamma = T_{e^-} + T_{e^+} + 2m_0 c^2$$

- Η ελάχιστη ενέργεια φωτονίου που απαιτείται για τη δημιουργία ζεύγους [e^-, e^+] είναι 1.02 MeV διπλάσια της μάζας ηρεμίας του ηλεκτρονίου (511keV)

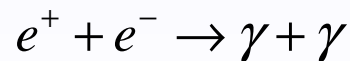
Εξαύλωση ποζιτρονίου - Positronium

Ποζιτρόνιο που βρίσκεται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον του όταν συναντηθεί με ένα e^- έχει δύο δυνατότητες:

- Αμοιβαία αρπαγή των e^- και e^+ με ακαριαία εξαφάνιση των δύο σωματιδίων που συνοδεύεται από ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων.
- Αρπαγή του e^- και σχηματισμό μίας βραχύβιας «ατομικής» μονάδας υδρογονοειδούς μορφής όπου το ποζιτρόνιο αντικαθιστά το πρωτόνιο.

[Φαινόμενο Εξαύλωσης]

- Όταν τα e^- και e^+ βρίσκονται σε θερμική ισορροπία με το περιβάλλον τους τότε εκπέμπονται δύο φωτόνια κάθετα μεταξύ τους ενέργειας 511 keV το καθένα.



[Positronium]

- Όταν τα e^- και e^+ έχουν αντίθετο spin τότε το Positronium εξαυλώνεται με εκπομπή δύο φωτονίων κάθετων μεταξύ τους με ενέργεια 511 keV το καθένα.
- Όταν τα e^- και e^+ έχουν παράλληλα spin τότε το Positronium εξαυλώνεται με εκπομπή τριών φωτονίων με άθροισμα ενεργειών ~ 1.02 MeV.