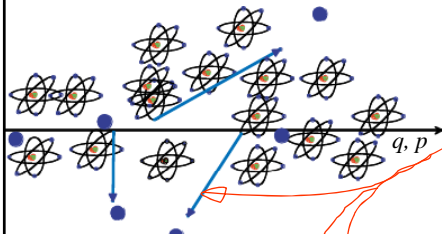


δ - rays

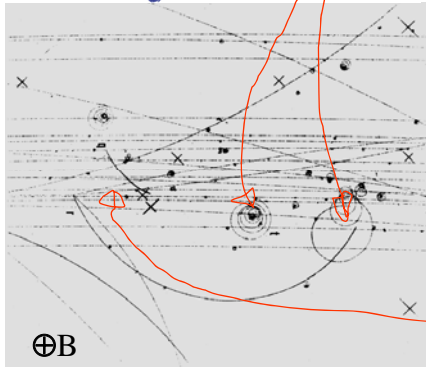


Κατά τον ιονισμό το εκπεμπόμενο e θα έχει κινητική ενέργεια : $0 \leq T \leq T_{max}$

δ-ray με κινητική ενέργεια T_e και ορμή p_e παράγεται σε μια γωνία Θ

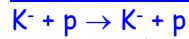
$$\cos \Theta = \frac{T_e p_{max}}{p_e T_{max}}$$

όπου p_{max} η ορμή ενός e με τη μέγιστη μεταφερόμενη κινητική ενέργεια T_{max} . Αυτό το "knock-on" e μπορεί να έχει αρκετή ενέργεια για να ιονίσει μακριά από το αρχικό σωματίδιο.



Γ. Τσιπολίτης

Knock on:

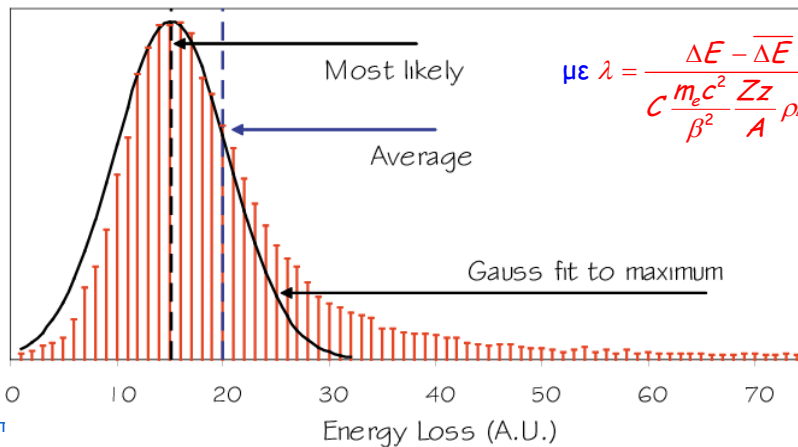


p slow
high ionisation

Κατανομή Landau / Vavilov

- Οι ακτίνες δ δημιουργούν διακυμάνσεις στη μέτρηση της εναποτιθέμενης ενέργειας που περιγράφεται από την κατανομή Landau / Vavilov

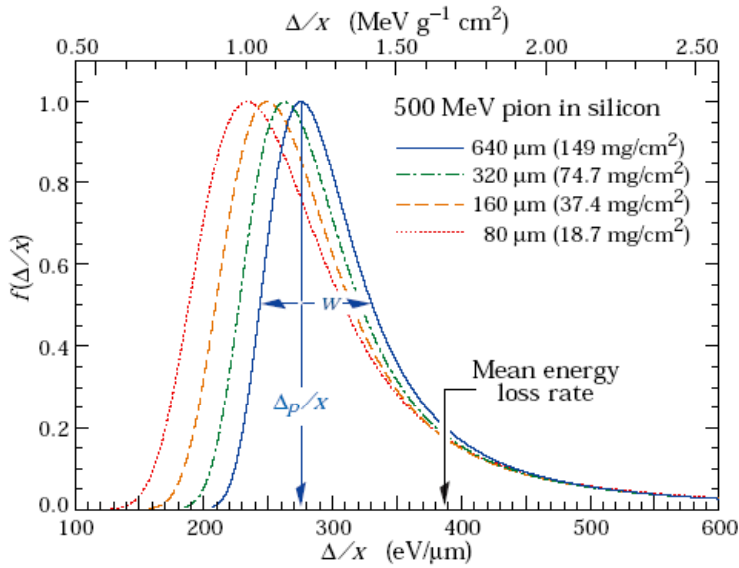
$$f(\lambda) = \sqrt{\frac{e^{-(\lambda+e^{-\lambda})}}{2\pi}}$$



$$\mu \epsilon \lambda = \frac{\Delta E - \overline{\Delta E}}{C \frac{m_e c^2}{\beta^2} \frac{Zz}{A} \rho \Delta x}$$

Γ. Τσιπ

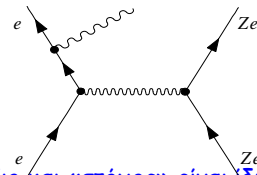
Στραγγαλισμός (Straggling)



Γ. Τσιπολίτης

Απώλεια Ενέργειας Ηλεκτρονίων

- Δυο κύριοι μηχανισμοί απώλειας ενέργειας για e^\pm μέσα στην ύλη
- **Ιονισμός** (dE/dx)_i
όπως και στην περίπτωση των βαριών φορτισμένων σωματιδίων → αλληλ/ση μέσω των δυνάμεων Coulomb
- **Ακτινοβολία** (dE/dx)_r
εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης (Bremsstrahlung) όταν τα ηλεκτρόνια υπόκεινται σε μεγάλη επιτάχυνση κατά τη διάρκεια της κρούσης.
- Η σχέση Bethe-Bloch για $z=1$ → το προσπίπτον σωματίδιο και «στόχος» είναι ίδια σωματίδια



$$E_{κιν}^{max} = \frac{\gamma m_e c^2}{2}$$

$$-\frac{dE}{dx} = k \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{\gamma \beta^2 m_e c^2 \sqrt{\gamma-1}}{\sqrt{2I}} + \frac{1}{2}(1-\beta^2) - \frac{2\gamma-1}{2\gamma^2} \ln 2 + \frac{1}{16} \left(\frac{\gamma-1}{\gamma} \right)^2 \right] \quad \text{για } e^-$$

$$-\frac{dE}{dx} = k \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{\gamma \beta^2 m_e c^2 \sqrt{\gamma-1}}{\sqrt{2I}} - \frac{\beta^2}{24} \left(23 + \frac{14}{\gamma+1} + \frac{10}{(\gamma+1)^2} + \frac{4}{(\gamma+1)^3} \right) \right] \quad \text{για } e^+$$

Γ. Τσιπολίτης

Απώλεια Ενέργειας Ηλεκτρονίων

- Παρατηρήσεις:
- Για την ίδια ταχύτητα v , $(dE/dx)_e$ είναι η ίδια για ηλεκτρόνια και πρωτόνια.
- Για τυπικές ενέργειες (μερικά MeV), $v_e \gg v_p$ και αφού $(dE/dx)_e$ είναι ανάλογη του $1/v^2$, τότε η απώλεια ενέργειας είναι **πολύ μικρότερη** για ηλεκτρόνια από ότι για βαριά ιόντα.
- Αυτός είναι ο λόγος τα ηλεκτρόνια είναι δύσκολο να τα σταματούμε στην ύλη σε σύγκριση με τα σωματίδια α
- Σε μια κρούση ηλεκτρονίου-ηλεκτρονίου, ένα ηλεκτρόνιο μπορεί να απολέσει μεγάλο μέρος της ενέργειάς του (ακόμη και 100%) και να σκεδαστεί σε μεγάλες γωνίες. Επομένως, η τροχιά ενός ηλεκτρονίου μέσα στην ύλη αποκλίνει από την ευθύγραμμη τροχιά και καμιά φορά αλλάζει κατεύθυνση.

Γ. Τσιπολίτης



Τροχιές σωματίδια- α σ' ένα ανιχνευτή (Cloud chamber)



Τροχιές ηλεκτρονίων σ' ένα ανιχνευτή (Cloud chamber)

Γ. Τσιπολίτης

Απώλεια Ενέργειας Ηλεκτρονίων (ακτινοβολία)

Κλασική
Ηλεκτροδυναμική:



Φορτίο που επιταχύνεται ακτινοβολεί
ανάλογα με το μέγεθος του φορτίου και
της επιτάχυνσης

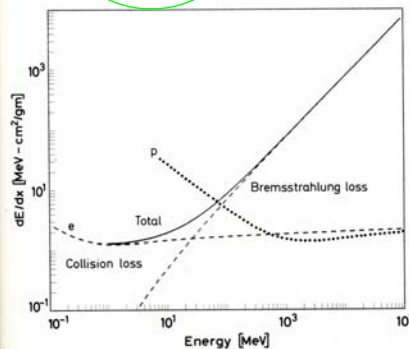
Η επιτάχυνση που υφίσταται ένα ηλεκτρόνιο σε απόσταση r από τον πυρήνα είναι:

$$a = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{mr^2} \quad \text{οπότε} \quad \frac{E_r}{E} \propto a^2 \Rightarrow \frac{E_r}{E} \propto Z^2 \quad \text{ενώ} \quad \frac{E_e}{E} \propto Z$$

$$\frac{E_r}{E} \propto \frac{1}{m^2}$$

E_r κύρια διαδικασία για e

Γ. Τσιπολίτης



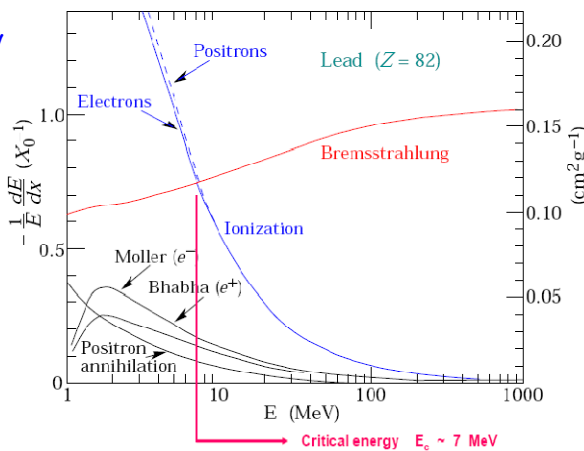
Κρίσιμη Ενέργεια (Critical Energy)

- Η ενέργεια στην οποία απώλεια ενέργειας λόγω ιονισμού = απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβολίας πέδησης.
- Εξαρτάται κυρίως από τον τύπο του υλικού $\text{pχ Pb} \sim 7 \text{ MeV}$, $\text{Al} \sim 51 \text{ MeV}$, $\text{Cu} \sim 19.63 \text{ MeV}$, $\text{Polystyrene} \sim 109 \text{ MeV}$.

- Προσεγγιστικά σε στερεά ή αέρια οι σχέσεις

$$E_c \cong \frac{610 \text{ MeV}}{Z + 1.24} \quad (\text{στερεά})$$

$$E_c \cong \frac{710 \text{ MeV}}{Z + 0.92} \quad (\text{αέρια})$$



Γ. Τσιπολίτης

Απώλεια Ενέργειας Ηλεκτρονίων

- Η ολική απώλεια ενέργειας ηλεκτρονίων είναι το άθροισμα της ενέργειας ιονισμού και της ακτινοβολίας:

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_r = \left(\frac{dE}{dx}\right)_e + \left(\frac{dE}{dx}\right)_r \quad \text{Σε χαμηλές ενέργειες,} \\ (dE/dx)_r < (dE/dx)_e$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{exc} = \frac{2\pi e^4 N \cdot Z}{m_0 \cdot v^2} \left(\ln \frac{m_0 \cdot v^2}{2I^2(1-\beta^2)} - \ln 2(2\sqrt{1-\beta^2} - 1 + \beta^2) + \frac{(1-\sqrt{1-\beta^2})^2}{8} \right)$$

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{rad} = \frac{e^4 N}{137 m_0^2 c^4} (Z(Z+1) \cdot E) \left(4 \cdot \ln \frac{2E}{m_0 c^2} - 4/3 \right)$$

$$\frac{(dE/dx)_{rad}}{(dE/dx)_{exc}} \approx \frac{E \cdot Z}{700}$$

Γ. Τσιπολίτης

Μήκος Ακτινοβολίας (Radiation Length)

- Ισοδύναμο μήκος διαδρομής για το οποίο η ενέργεια του ηλεκτρονίου μειώνεται κατά παράγοντα 1/e λόγω εκπομπής ακτινοβολίας (Bremsstrahlung). Μετριέται σε g cm⁻².

$$E = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}, \quad x \text{ είναι η διανυθείσα απόσταση} \\ X_0 = \text{μήκος ακτινοβολίας}$$

$$\frac{1}{X_0} = 4\alpha r_e^2 \frac{N_A}{A} \left\{ Z^2 [L_{rad} - f(Z)] + Z L'_{rad} \right\},$$

Table 27.2: Tsai's L_{rad} and L'_{rad} , for use in calculating the radiation length in an element using Eq. (27.20).

Element	Z	L_{rad}	L'_{rad}
H	1	5.31	6.144
He	2	4.79	5.621
Li	3	4.74	5.805
Be	4	4.71	5.924
Others	> 4	$\ln(184.15 Z^{-1/3})$	$\ln(1194 Z^{-2/3})$

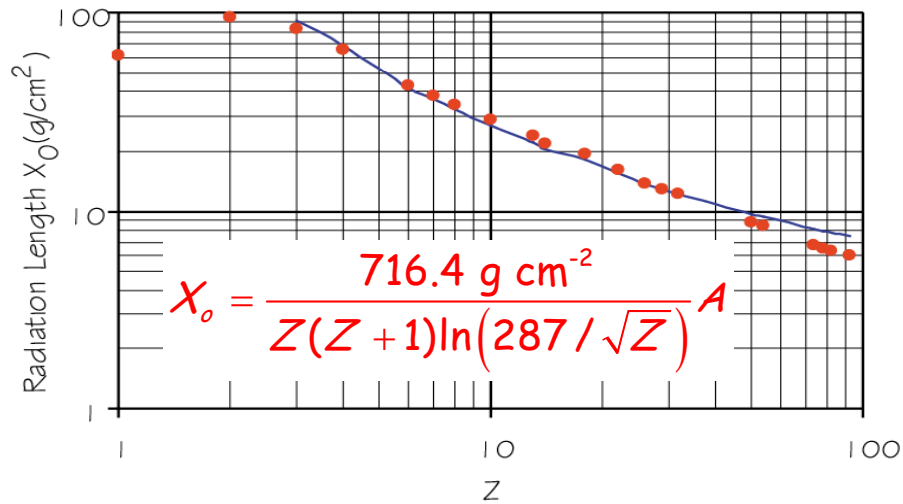
$$a = \alpha Z, \quad 4\alpha r_e^2 N_A = 716.408 \text{ g cm}^{-2}$$

$$f(Z) = a^2 \left[(1 + a^2)^{-1} + 0.20206 - 0.0369a^2 + 0.0083a^4 - 0.002a^6 \right]$$

Γ. Τσιπολίτης

Μήκος Ακτινοβολίας (Radiation Length)

Μια προσαρμογή των δεδομένων → εξάρτηση του μήκους ακτινοβολίας από το Z:



Μήκος Ακτινοβολίας (Radiation Length)

Υλικό	gr cm ⁻²	cm
Air	36.20	30050
H ₂ O	36.08	36.1
NaI	9.49	2.59
Pb	6.37	0.56
Fe	13.84	1.76
BGO	7.98	1.12
Scintillator	43.8	42.4

Για σύνθετα υλικά και Μίγματα, τα μήκη ακτινοβολίας υπολογίζονται με εφαρμογή του Νόμου Bragg:

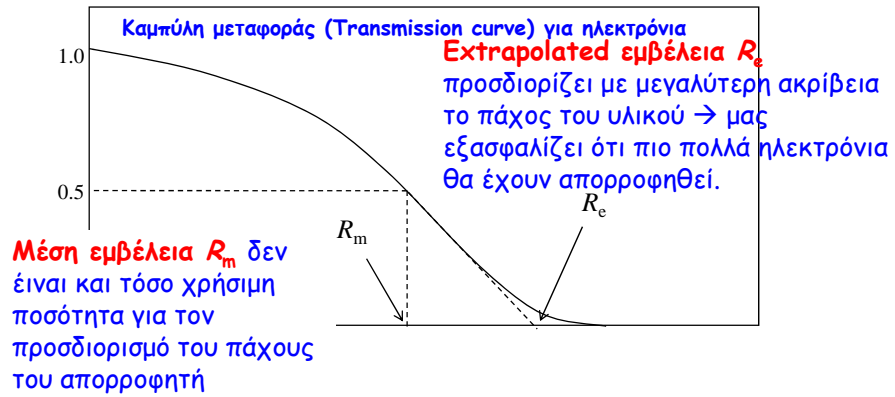
$$\frac{1}{X_0} = \sum_j \frac{w_j}{(X_0)_j}$$

Γ. Τσιπολίτης

w_j = μέρη «βάρους» κάθε στοιχείου j με αντίστοιχα μήκη ακτινοβολίας (X₀)_j

Ηλεκτρόνια

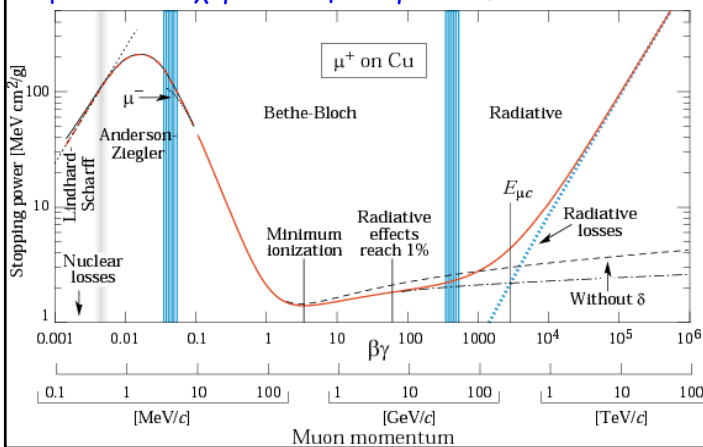
- τα ηλεκτρόνια σκεδάζονται πολύ πιο εύκολα ακόμα και λεπτοί απορροφη-τές σκεδάζουν τα ηλεκτρόνια με αποτέλεσμα τα χάνονται από την κύρια δέσμη.
- η I/I_0 θα αρχίσει να μειώνεται από πολύ μικρές αποστάσεις μέσα στον απορροφητή.



Γ. Τσιπολίτης

Απώλεια Ενέργειας μιονίων

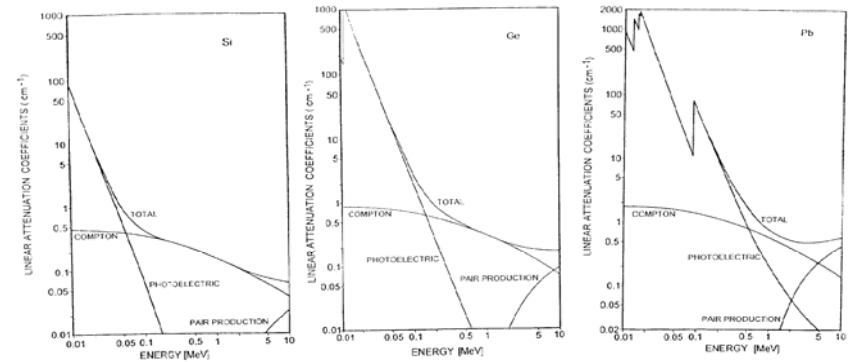
- Μιόνια 200 φορές πιο βαριά "ηλεκτρόνια"
- Η μεγάλη μάζα των μιονίων κάνει τη διαφορά: η απώλεια ενέργειας οφείλεται κυρίως στον ιονισμό αντί της ακτινοβολίας πέδησης → παρουσιάζουν μεγαλύτερη εμβέλεια στην ύλη σε σύγκριση με τα ηλεκτρόνια τα οποία ακτινοβολούν φωτόνια ή με τα αδρόνια (π, p, n) τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω των ισχυρών αλληλεπιδράσεων.



• Τοποθετώντας ανιχνευτές πίσω από μεγάλους απορροφητές τότε ανιχνεύουμε κυρίως μιόνια

Αλληλεπίδραση Φωτονίων

- 3 κύριοι μηχανισμοί:
 - Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect)
 - Σκέδαση Compton (+Thomson +Rayleigh) (Compton Scattering)
 - Δίδυμη γένεση (pair production)
- } διαφορετική εξάρτηση από E_γ και Z του απορροφητή.



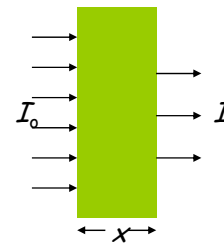
Γ. Τσιπολίτης

Και στις 3 διαδικασίες έχουμε εκπομπή ηλεκτρονίων

Αλληλεπίδραση Φωτονίων

- Δέσμη φωτονίων διαπερνούν υλικό πάχους x → εξασθένηση με αποτέλεσμα η ροή των εξερχόμενων φωτονίων να δίνεται από τη σχέση:

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$



όπου μ (cm^2/g) είναι ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης:

$$\mu = \frac{N_A}{A} \sum_{i=1}^3 \sigma_i \quad \sigma_i = \begin{cases} i=1: & \text{φωτοηλεκτρικό} \\ i=2: & \text{Compton} \\ i=3: & \text{Δίδυμη γένεση} \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{\int_0^\infty x e^{-\mu x} dx}{\int_0^\infty e^{-\mu x} dx} = \frac{1}{\mu}$$

Η μέση απόσταση λ , («μέση ελεύθερη διαδρομή»), μέσα στον απορροφητή προτού εμφανιστεί κάποια αλληλεπίδραση

Γ. Τσιπολίτης

Αλληλεπίδραση Φωτονίων

- Μαζικός συντελεστής, μ , εξασθένησης Pb ως συνάρτηση της ενέργειας του φωτονίου E_γ

Φωτοηλεκτρικό

Compton

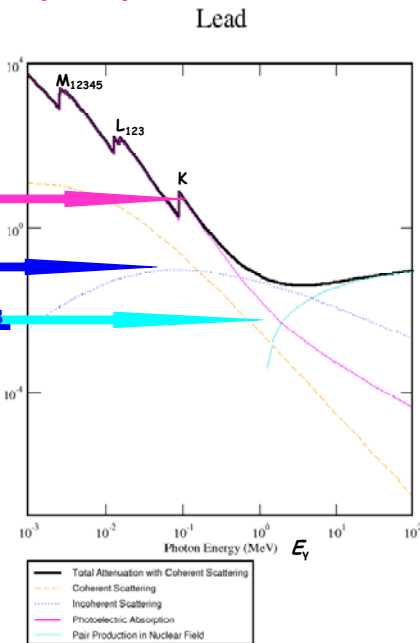
Δίδυμη γένεση

- μαζικός συντελεστής εξασθένησης, μ_c , σύνθετου υλικού ή μίγματος υλικών

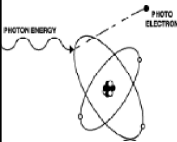
$$\mu_c = \sum_i w_i \mu_i$$

w_i το ποσοστό του i στοιχείου στο σύνθετο υλικό, μ_i είναι ο μαζικός συντελεστής εξασθένησης του i στοιχείου.

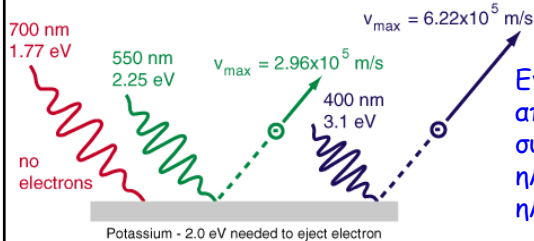
Γ. Τσιπολίτης



Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο



$$E_{\text{photon}} = h\nu$$



Ενέργεια φωτονίου μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης ή τη συνάρτηση έργου (work function) ηλεκτρονίου, εκπέμπεται ένα ατομικό ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργεια T

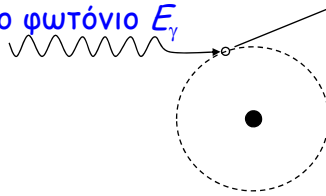
Photoelectric effect

$$T = h\nu - \Phi$$

Γ. Τσιπολίτης

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

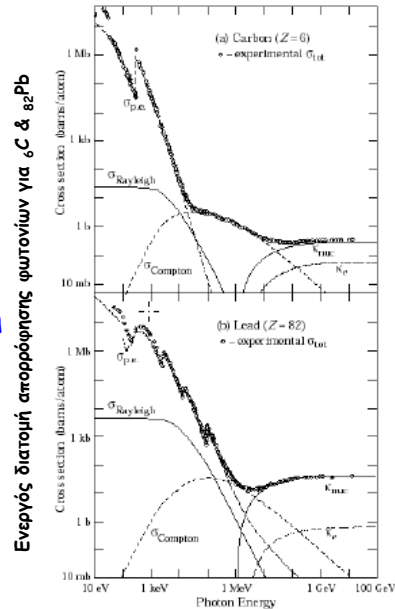
εισερχόμενο φωτόνιο E_γ φωτοηλεκτρόνιο $E_\gamma - \Phi$



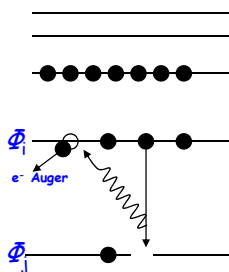
Ολική μετατροπή της ενέργειας E_γ του φωτονίου αποδεδμεύοντας ένα ατομικό e^-
 $\gamma + \text{άτομο} \rightarrow \text{άτομο}^* + e^-$
 συνήθως από ένα εσωτερικό ατομικό φλοιό
 • Το παραγόμενο φωτοηλεκτρόνιο έχει κινητική
 • ενέργεια $K = E_\gamma - \Phi$, όπου Φ είναι η ενέργεια σύνδεσης (διαφορετική για τις K,L,M, κλπ. ατομικές γραμμές)
 Απαραίτητη προϋπόθεση

$$E_\gamma \geq \Phi \rightarrow \text{βυθίσματα απορρόφησης.}$$

Γ. Τσιπολίτης



Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο



• Το κενό που δημιουργείται μετά την εκπομπή του φωτοηλεκτρονίου καλύπτεται από ένα άλλο ηλεκτρόνιο που προέρχεται από κάποιο ανώτερο ατομικό φλοιό ενέργειας σύνδεσης $\Phi_i < \Phi_j$ οδηγώντας σε δυο εναλλασσόμενους μηχανισμούς

• **Φθορισμό ακτίνων-X**: παράγονται δευτερεύοντες ακτίνες-X ενέργειας $\Phi_i - \Phi_j$ και το φορτίο του αναπομείναντος ιόντος παραμένει αμετάβλητο.

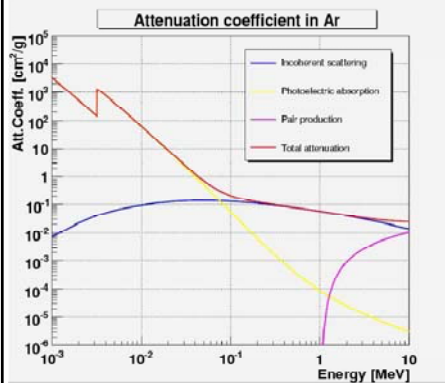
• **Φαινόμενο Auger**: το φωτόνιο που εκπέμπεται από την αντικατάσταση του κενού που είχε δημιουργηθεί από το φωτοηλεκτρόνιο μπορεί να απορροφηθεί από κάποιο άλλο ηλεκτρόνιο του ίδιου ατόμου με αποτέλεσμα να δημιουργείται ένα νέο φωτοηλεκτρόνιο αφήνοντας ένα νέο κενό. Αυτό το νέο φωτοηλεκτρόνιο \rightarrow **ηλεκτρόνιο Auger**. Το αρχικό κενό αντικαθίσταται από δυο κενά.

Τα νέα κενά καλύπτονται από μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από μεγαλύτερους φλοιούς μέχρι το ιονισμένο άτομο βρεθεί στην κατάσταση όπου δεν μπορούν να συμβούν άλλες μεταπτώσεις.

Γ. Τσιπολίτης

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

- Αλληλεπίδραση ακτίνων γ ενέργειας $E=5.9$ keV σε αέριο ${}_{18}\text{Ar}$ που συνήθως το χρησιμοποιούμε σε ανιχνευτές αερίου. Για το ${}_{18}\text{Ar}$ έχουμε: $\rho = 1.66$ g/cm³, $Z=18$.
- $\mu(5.9 \text{ keV})=2.71 \times 10^2$ cm²/g, $\lambda=1/(\mu\rho)=2.2$ cm
- $\mu(E_K-E_L=2.9 \text{ keV})=1.87 \times 10^2$ cm²/g, $\lambda=1/(\mu\rho)=3.2$ cm, το φωτόνιο φθορισμού μπορεί διαφύγει και επομένως δεν μετρείται η ενέργεια του.



Γ. Τσιπολίτης

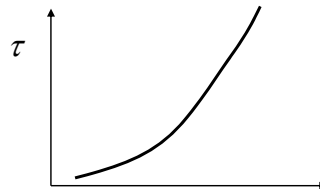
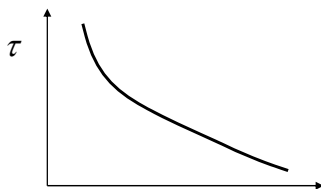


Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

Ο συντελεστής απορρόφησης, τ , για το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι:

$$\tau \propto a^4 Z^5 E_\gamma^{-3}$$

- έντονη εξάρτηση από το ατομικό αριθμό του υλικού, Z και αντίστροφη εξάρτηση της ενέργειας του φωτονίου.



- Λόγω αυτής της ισχυρής εξάρτησης του τ από τον ατομικό αριθμό Z του απορροφητή είναι πολύ σημαντικό να χρησιμοποιούμε υλικά με μεγάλο- Z στη σχεδίαση των υλικών θωράκισης ακτίνων-γ

Γ. Τσιπολίτης