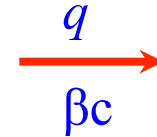
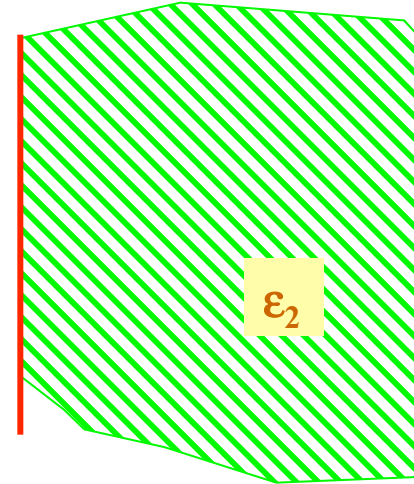


Ακτινοβολία μετάπτωσης (Transition Radiation)

Ακτινοβολίας μετάπτωσης (TR) εμφανίζεται όταν ένα σχετικιστικό φορτισμένο σωματίδιο διαπερνά από ένα υλικό σ' ένα άλλο με διαφορετικούς δείκτες διάθλασης.

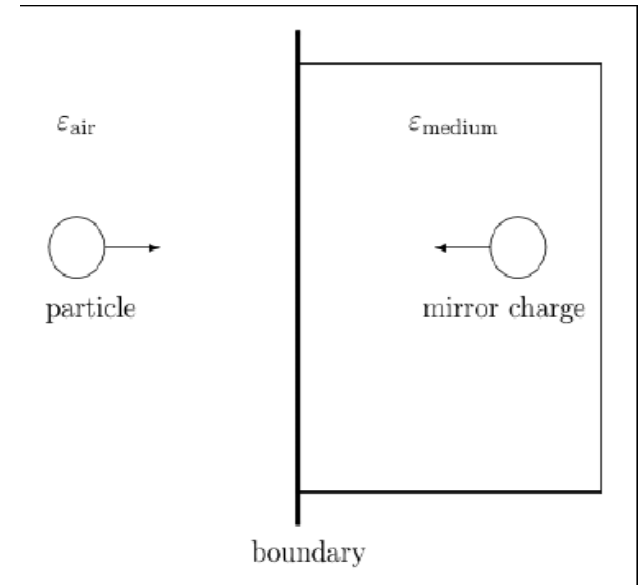
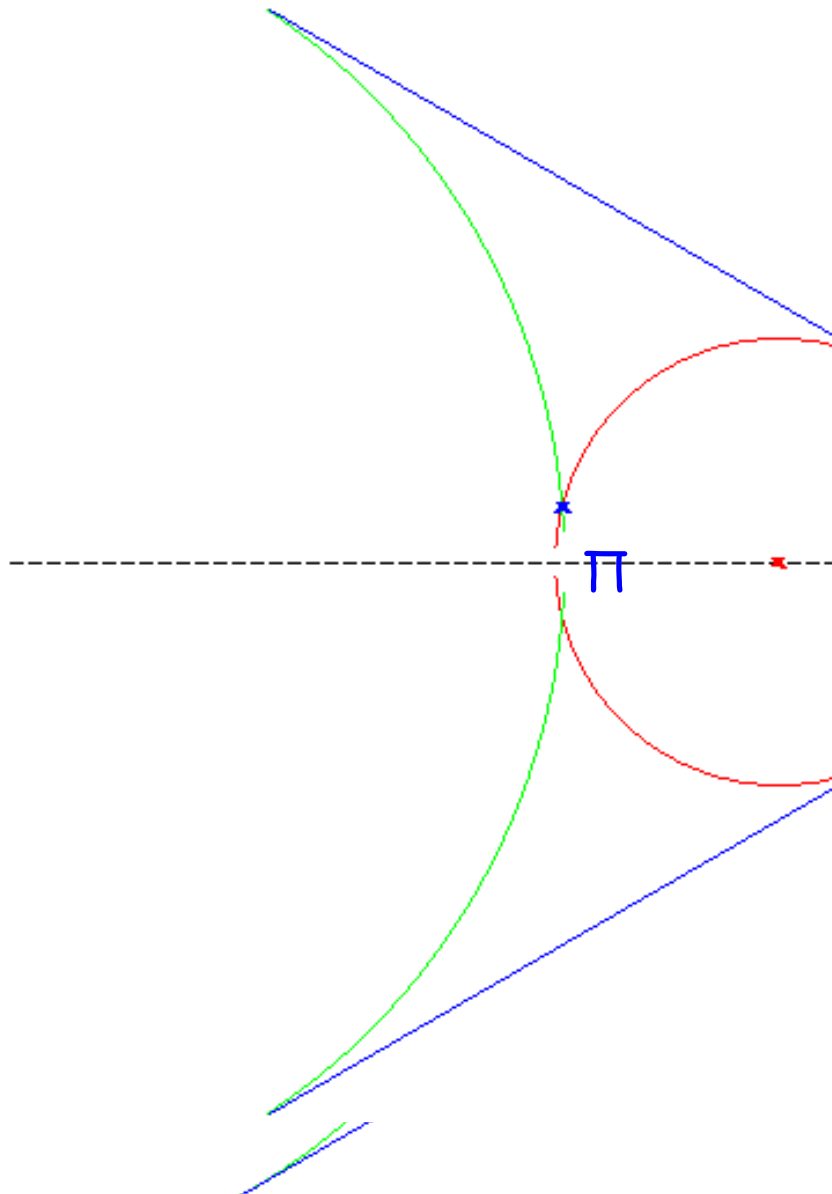


- Τα ΗΜ πεδία στο υλικό 1 & υλικό 2 δεν ικανοποιούν τις συνοριακές συνθήκες στην επιφάνεια διαχωρισμού. για να συμβεί η συνθήκη της συνέχειας στο σύνορο θα πρέπει να υπάρχει ένας άλλος όρος που εμφανίζεται ως ακτινοβολία TR από την επιφάνεια διαχωρισμού.



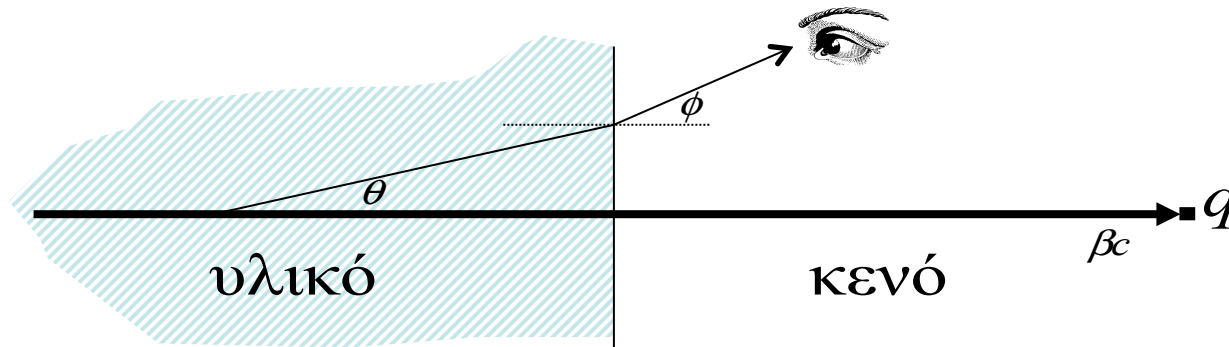
- Ένας παρατηρητής, είτε στο υλικό 1 είτε στο 2, όταν παρατηρεί το φορτίο q να περνά το σύνορο θα παρατηρήσει μια απότομη μεταβολή της στροφορμής του σωματιδίου. Η μεταβολή της στροφορμής (επιτάχυνση ή επιβράδυνση της στροφορμής) πάντοτε δημιουργεί εκπομπή ή απορρόφηση ακτινοβολίας.
- Αυτή είναι η ακτινοβολία TR.

Ακτινοβολία μετάπτωσης (Transition Radiation)



- Στην αρχή ο παρατηρητής (Π) δεν βλέπει τίποτα.
- Μετά βλέπει δυο φορτία που απομακρύνονται μεταξύ τους
→ δημιουργούν ηλεκτρικό δίπολο (electrical dipole).
- Επιταχυνόμενα φορτία δημιουργούν την ακτινοβολία.

Ακτινοβολία μετάπτωσης (Transition Radiation)



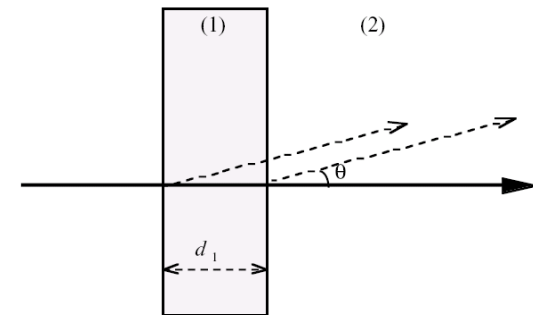
Γωνιακή κατανομή της ακτινοβολίας TR:

$$\frac{d^2 N}{d\omega d\Omega} = \frac{z^2 \alpha}{\pi^2 \omega} \varphi^2 \times \left(\frac{1}{\omega_p^2 / \omega^2 + \varphi^2 + 1/\gamma^2} - \frac{1}{\varphi^2 + 1/\gamma^2} \right)^2,$$

$$\theta \approx \frac{1}{\gamma} \quad \omega_p = \text{plasma frequency}$$

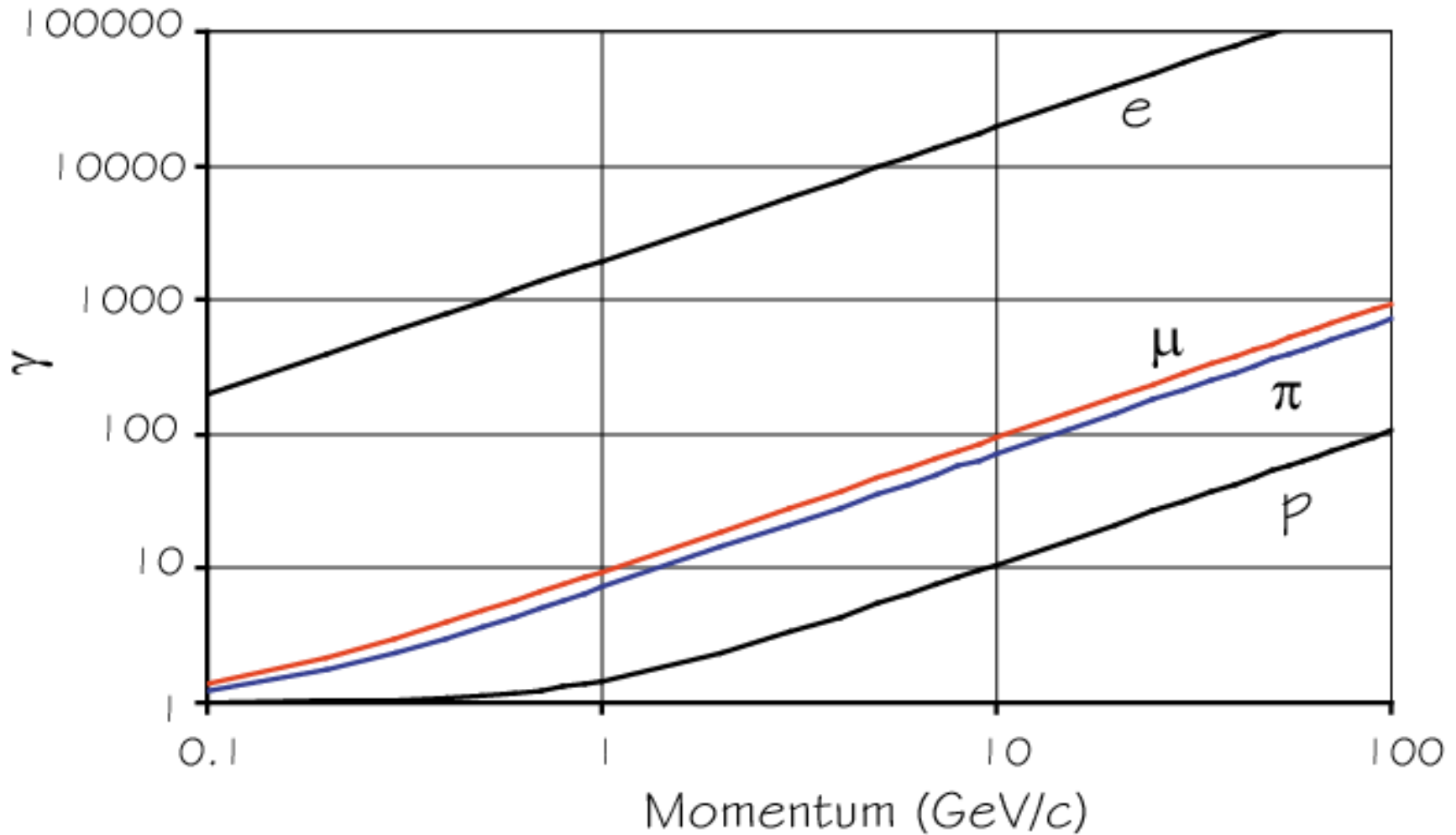
Ολική ενέργεια της ακτινοβολίας TR:

$$E_{TR} = \frac{2}{3} \alpha h \omega_p \gamma$$



Με την ακτινοβολία μετάπτωσης μετρούμε την ταχύτητα σωματιδίου

Ακτινοβολία μετάπτωσης (Transition Radiation)



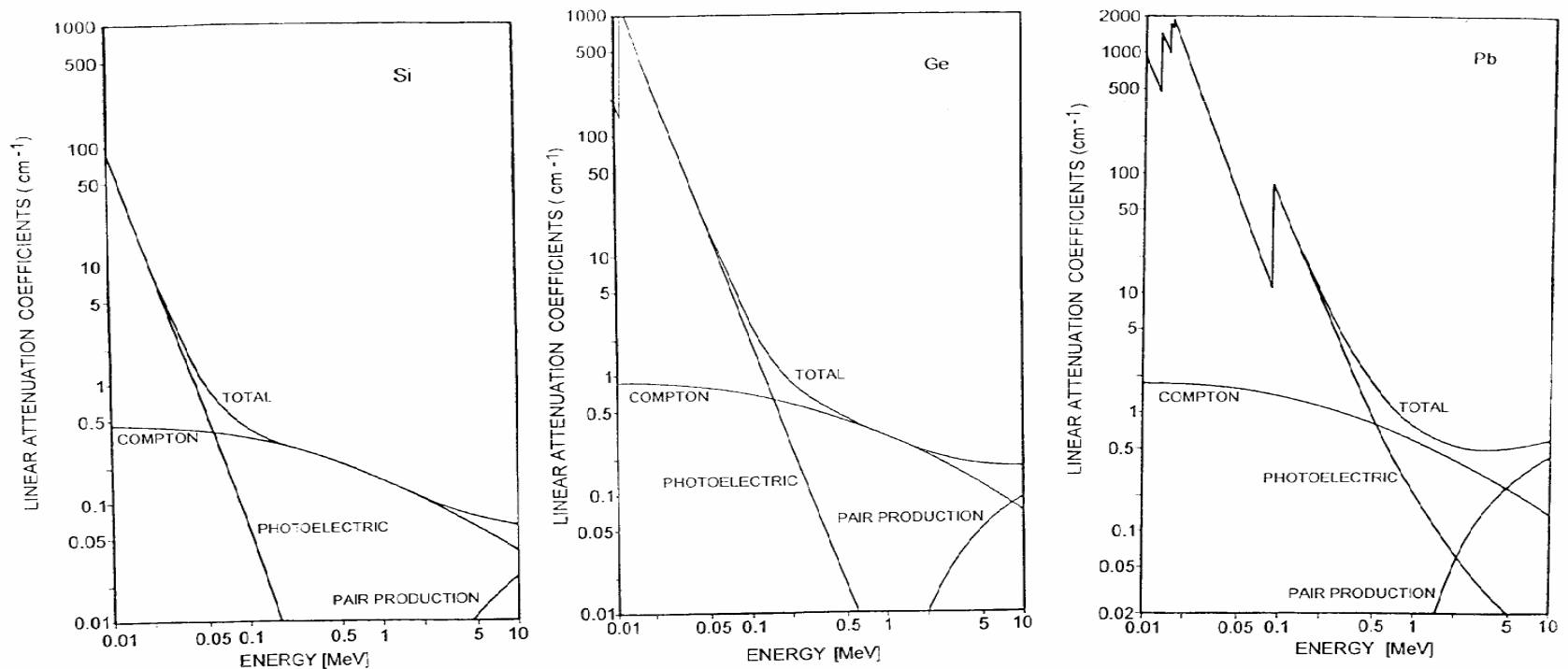
Συνήθως για να διακρίνουμε e από π

Αλληλεπίδραση Φωτονίων

- 3 κύριοι μηχανισμοί:

- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (Photoelectric effect)
- Σκέδαση Compton (+Thomson +Rayleigh) (Compton Scattering)
- Δίδυμη γένεση (pair production)

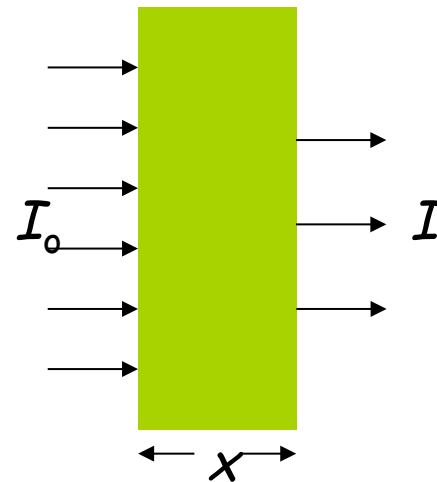
διαφορετική εξάρτηση από E_γ και Z του απορροφητή.



Αλληλεπίδραση Φωτονίων

- Δέσμη φωτονίων διαπερνούν υλικό πάχους $x \rightarrow$ εξασθένιση 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

Αλληλεπίδραση Φωτονίων

Lead

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

Φωτοηλεκτρικό

Compton

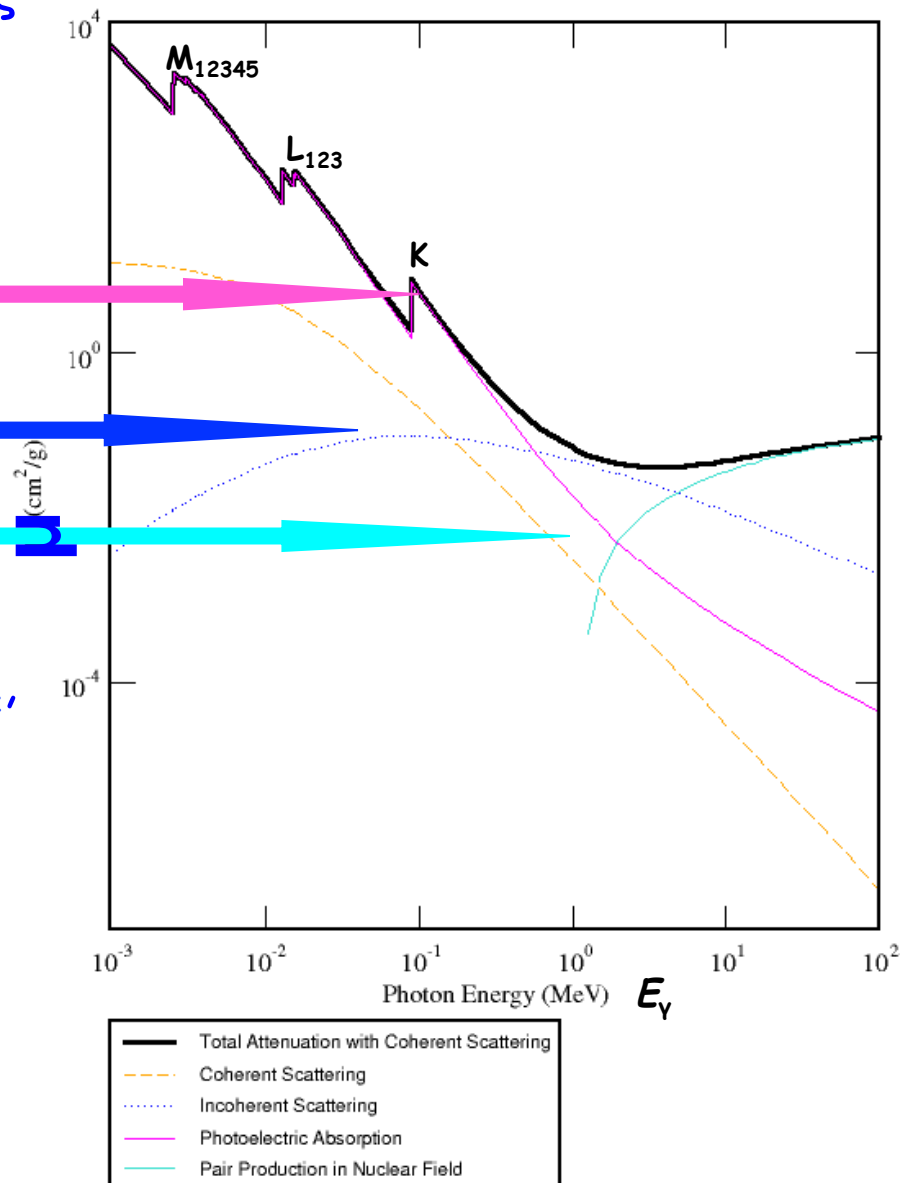
Δίδυμη γένεση

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

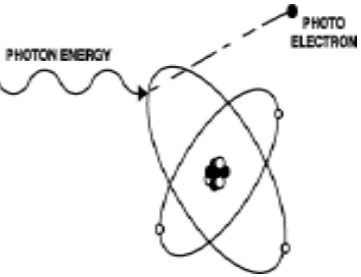
$$\mu_c = \sum_i w_i \mu_i$$

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

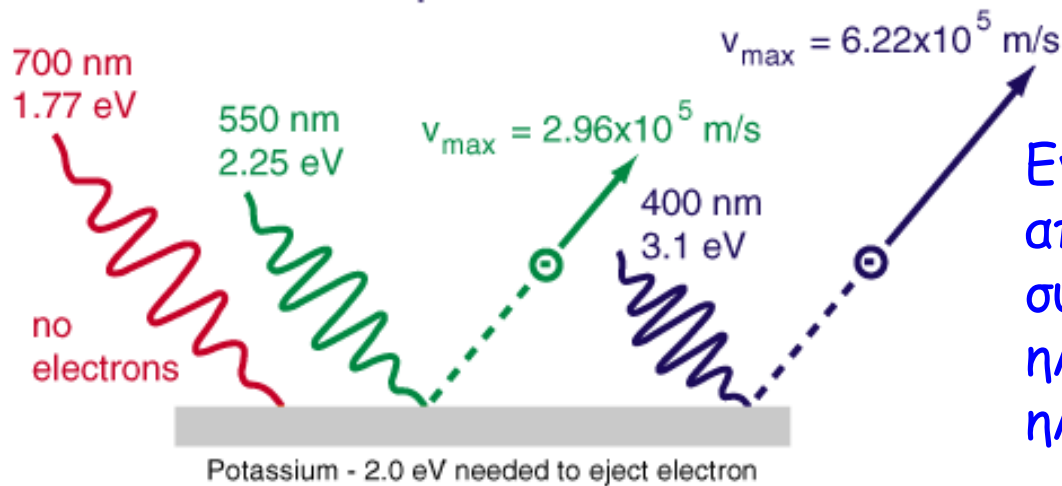
Γ. Τσιπολίτης



Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο



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



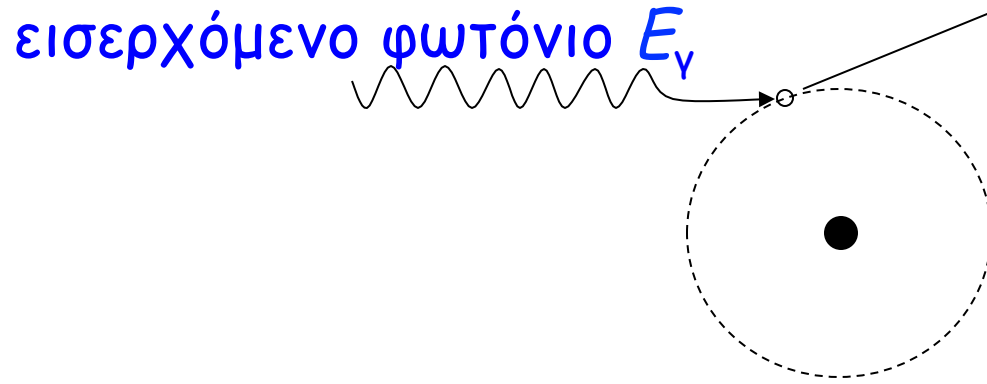
Ενέργεια φωτονίου μεγαλύτερη από την ενέργεια σύνδεσης ή τη συνάρτηση έργου (work function) ηλεκτρονίου, εκπέμπεται ένα ατομικό ηλεκτρόνιο με κινητική ενέργεια T

Photoelectric effect

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

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

φωτοηλεκτρόνιο $E_\gamma - \Phi$



Ολική μετατροπή της ενέργειας E_γ του φωτονίου αποδεσμεύοντας ένα ατομικό e



συνήθως από ένα εσωτερικό ατομικό φλοιό

• Το παραγόμενο φωτοηλεκτρόνιο έχει κινητική

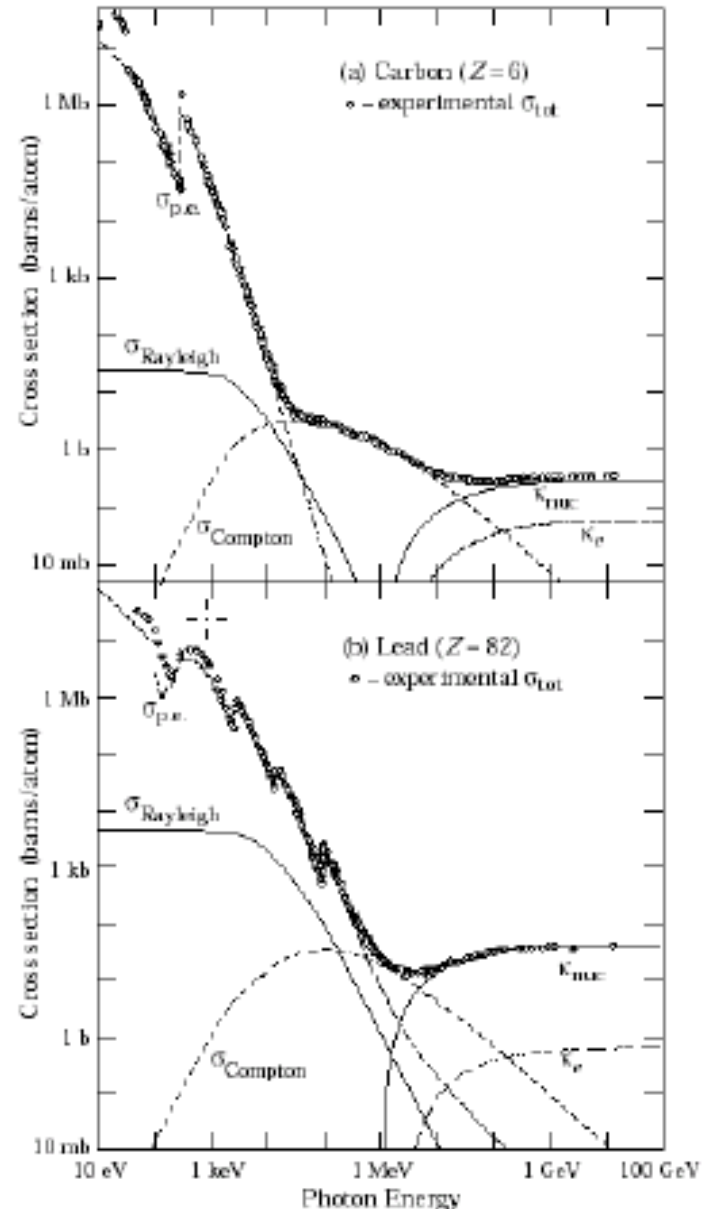
• ενέργεια $K = E_\gamma - \Phi$, όπου Φ είναι η ενέργεια σύνδεσης (διαφορετική για τις K, L, M, κλπ. ατομικές γραμμές)

Απαραίτητη προϋπόθεση

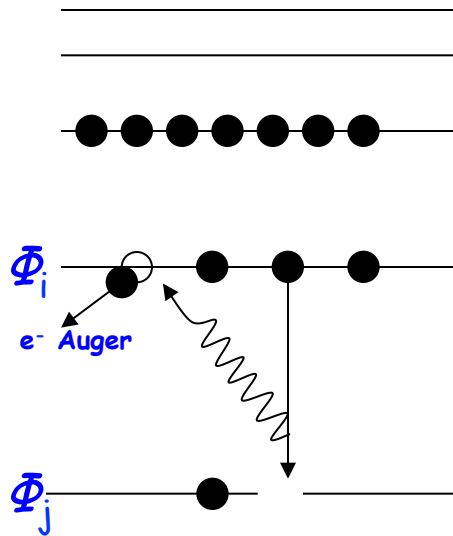
$$E_\gamma \geq \Phi$$

\rightarrow βυθίσματα απορρόφησης.

Ενεργός διατομή απορρόφησης φωτονίων για ${}_6\text{C}$ & ${}_{82}\text{Pb}$



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

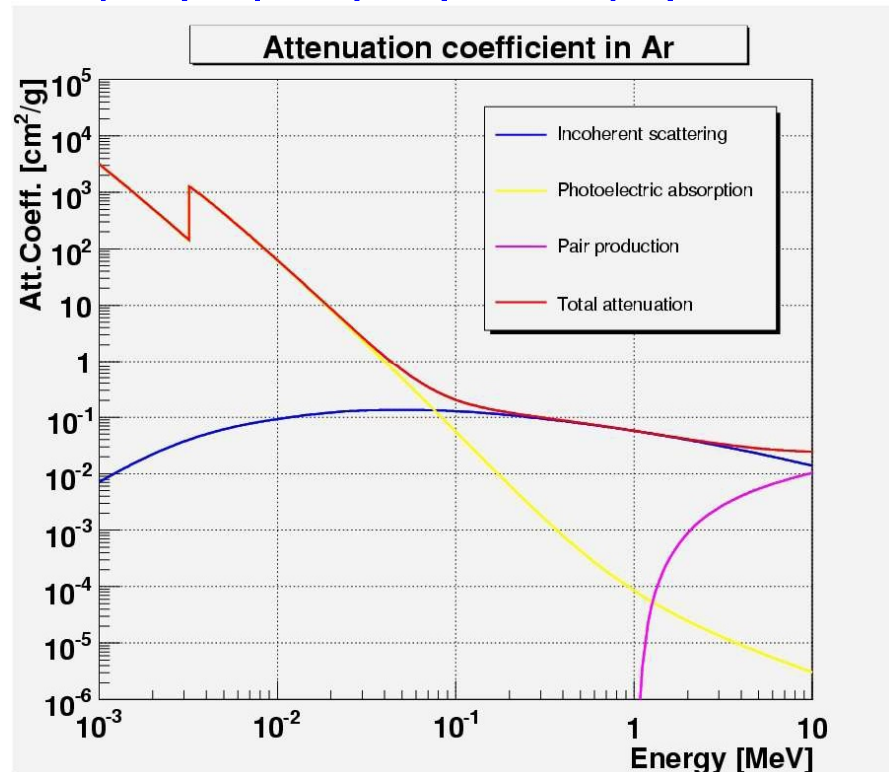
- **Φθορισμό ακτίνων-Χ**: παράγονται δευτερεύοντες ακτίνες-Χ ενέργειας $\Phi_j - \Phi_i$ και το φορτίο του εναπομείναντος ιόντος παραμένει αμετάβλητο.

- **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.

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

- Αλληλεπίδραση ακτινών γ ενέργειας $E=5.9 \text{ keV}$ σε αέριο $_{18}\text{Ar}$ που συνήθως το χρησιμοποιούμε σε ανιχνευτές αερίου. Για το $_{18}\text{Ar}$ έχουμε: $\rho = 1.66 \text{ g/cm}^3$, $Z=18$.
- $\mu(5.9 \text{ keV})=2.71 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\lambda=1/(\mu\rho)=2.2 \text{ cm}$
- $\mu(E_K-E_L=2.9 \text{ keV})=1.87 \times 10^2 \text{ cm}^2/\text{g}$, $\lambda=1/(\mu\rho)=3.2 \text{ cm}$, το φωτόνιο φθορισμού μπορεί διαφύγει και επομένως δεν μετρείται η ενέργεια του.



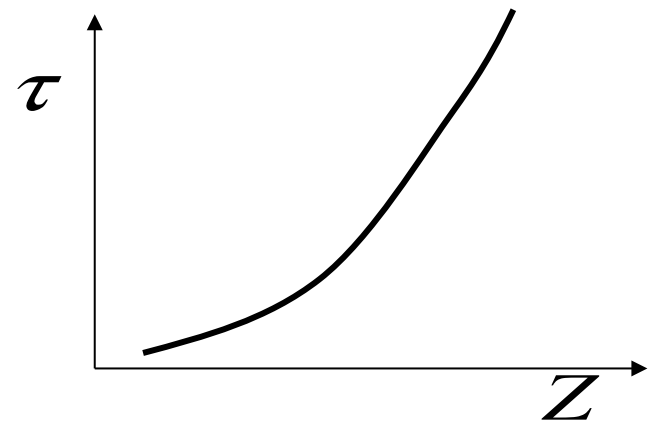
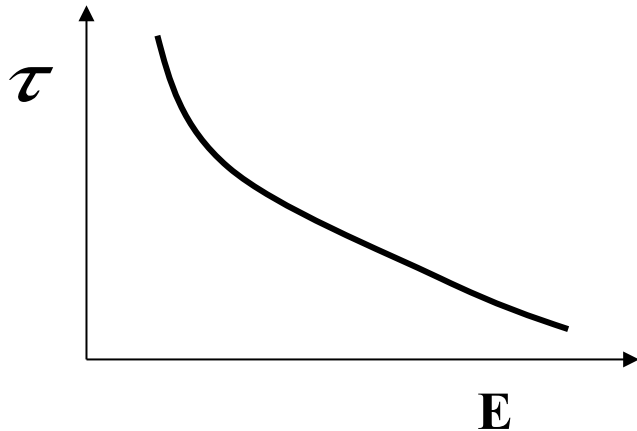
Φάσμα ενέργειας στο Ar με τη βοήθεια ανιχνευτή αερίου

Φωτοηλεκτρικό Φαινόμενο

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

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

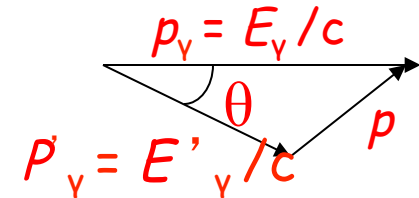
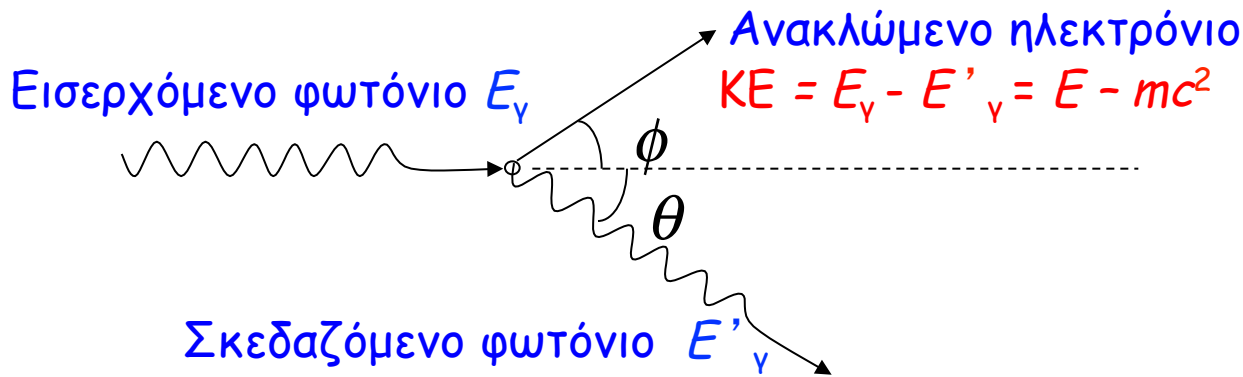
- έντονη εξάρτηση από το ατομικό αριθμό του υλικού, Z και αντίστροφη εξάρτηση της ενέργειας του φωτονίου.



- 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 ακτινών- γ**

Σκέδαση Compton

- Το φαινόμενο Compton περιγράφει τη σκέδαση ενός φωτονίου από ένα ελεύθερο ατομικό ηλεκτρόνιο: $\gamma + e \rightarrow \gamma' + e'$.
- Το φωτόνιο δεν εξαφανίζεται μετά τη σκέδαση αλλά αλλάζει κατεύθυνση και ενέργεια.
- Το φωτόνιο μεταφέρει μέρος της ενέργειας του στο ηλεκτρόνιο το οποίο μετά τη σκέδαση ονομάζεται «ανακλώμενο ηλεκτρόνιο» (recoil electron).



Διατήρηση ορμής και ενέργειας:

$$(p)^2 = (p_\gamma)^2 + (p'_\gamma)^2 - 2 p_\gamma p'_\gamma \cos\theta$$

$$(pc)^2 = (E_\gamma)^2 + (E'_\gamma)^2 - 2E_\gamma E'_\gamma \cos\theta = E^2 - m^2 c^4$$

Επίσης, $T = E_\gamma - E'_\gamma = E - mc^2$

Η ενέργεια του σκεδαζόμενου φωτονίου ως συνάρτηση της γωνίας σκέδασης είναι:

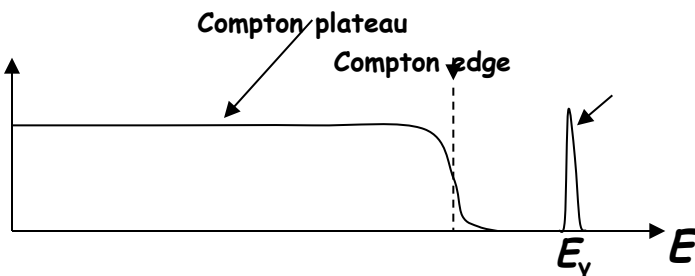
$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2} (1 - \cos\theta)}$$

Σκέδαση Compton

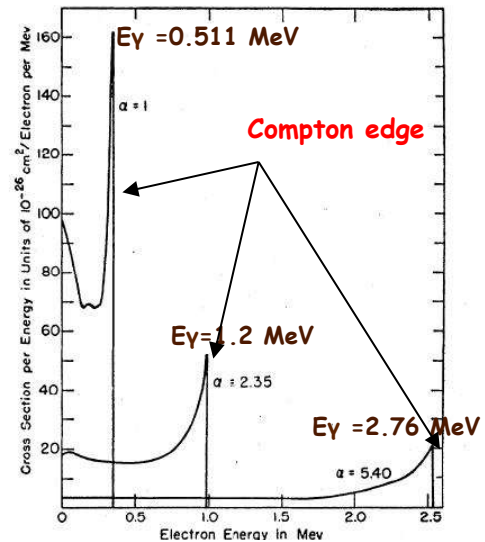
- κινητική ενέργεια, T , ανακλώμενου ηλεκτρονίου:

$$T = E_\gamma - E'_\gamma = E_\gamma \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{E_\gamma}{mc^2} (1 - \cos\theta)} \right)$$

- $T = E_\gamma - E'_\gamma$ πάντα μικρότερη της E_γ
- T Μέγιστη όταν $E'_\gamma = \text{ελάχιστη}$ ($\theta = 180^\circ$) \rightarrow "Compton Edge"
- T Ελάχιστη όταν $E'_\gamma = \text{μέγιστη}$ ($\theta = 0^\circ$)
- Αν το σκεδαζόμενο φωτόνιο διαφύγει χωρίς απώλεια ενέργειας \rightarrow συνεχές φάσμα ενέργειας (Compton plateau)
- οι ακτίνες- γ μπορούν να σκεδαστούν περισσότερες φορές \rightarrow εναποθέτουν ενέργεια
- Αν το σκεδαζόμενο φωτόνιο υποστεί φωτοηλεκτρικό φαινόμενο \rightarrow όλη η ενέργεια εναποτίθεται (full-energy peak).



$$T_{\max} = \frac{2E_\gamma^2}{1 + \frac{2E_\gamma^2}{mc^2}}$$



Σκέδαση Compton

- Η γωνιακή κατανομή των σκεδαζόμενων φωτονίων \rightarrow σχέση *Klein-Nishina*. Η διαφορική ενεργός διατομή έχει τη μορφή:

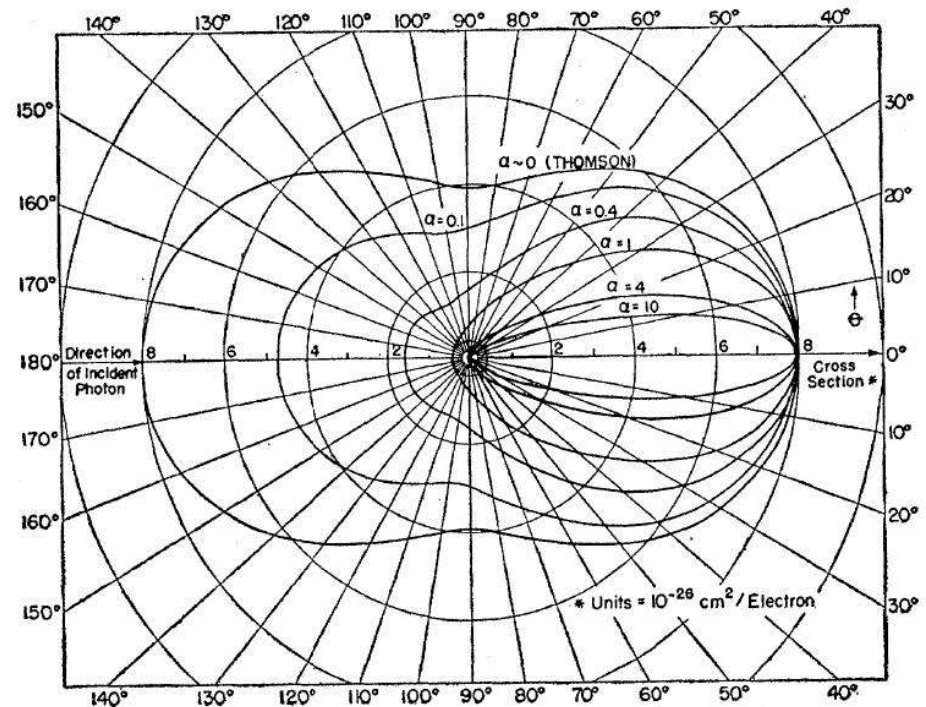
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = Zr_e^2 \left(\frac{1}{1 + a(1 - \cos\theta)} \right)^2 \left(\frac{1 + \cos^2\theta}{2} \right) \left(1 + \frac{a^2(1 - \cos\theta)^2}{(1 + \cos^2\theta)[1 + a(1 - \cos\theta)]} \right)$$

όπου $a = E_\gamma / mc^2$ & $r_e =$ κλασική ακτίνα ηλεκτρονίου

- Διάγραμμα σε πολικές συντεταγμένες του αριθμού των φωτονίων σκεδάζονται σε γωνία θ .

- Φαίνονται οι ισο-ενεργειακές γραμμές ως συνάρτηση της αρχικής ενέργειας των εισερχομένων φωτονίων.

- Για μεγάλες ενέργειες φωτονίου παρατηρούμε ότι σκεδάζονται προς τα μπρος.



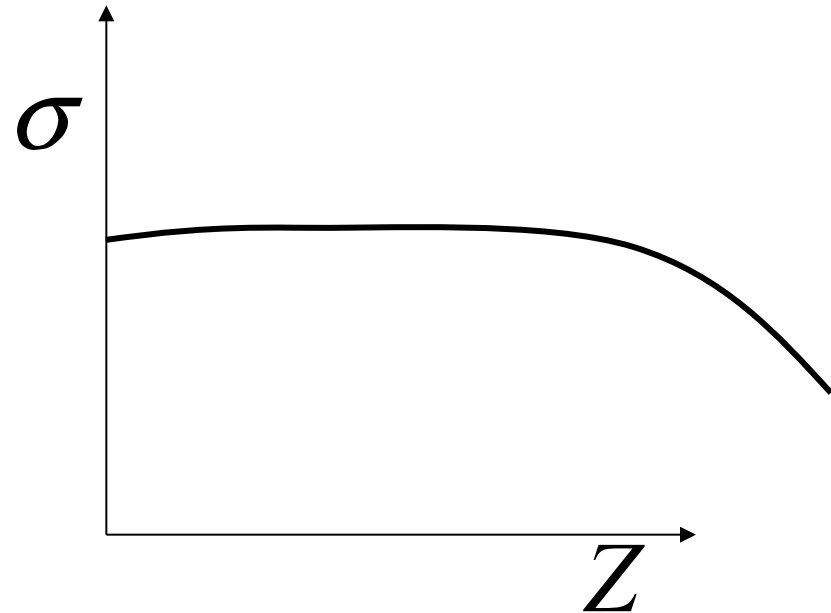
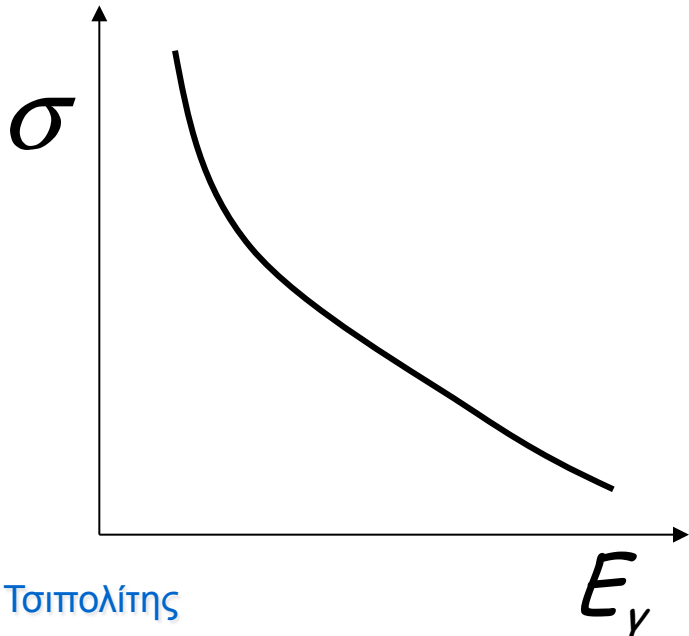
Σκέδαση Compton

- ολική ενεργός διατομή - συντελεστής απορρόφησης Compton

$$\sigma : \rho \frac{N_A}{A} Z f(E_\gamma) \rightarrow : \rho \frac{N_A}{A} \left(\frac{A}{2} \right) f(E_\gamma) \rightarrow : \rho \frac{N_A}{2} f(E_\gamma)$$

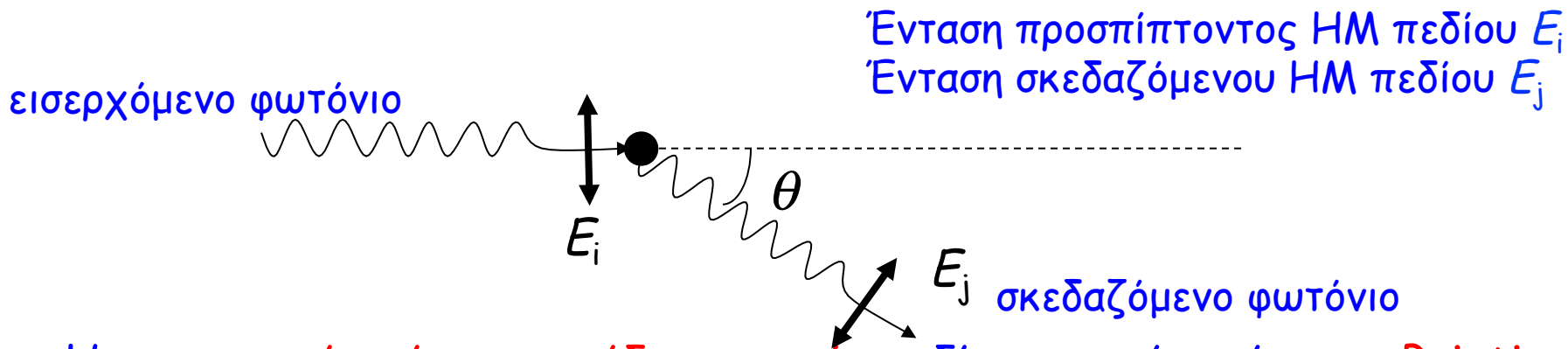
διότι $A \approx 2Z$ μέχρι $A \approx 2.6Z$ (εκτός του υδρογόνου)

η πιθανότητα να συμβεί το Compton είναι ανεξάρτητη του ατομικού αριθμού του υλικού.



Σκέδαση Thomson & Rayleigh

- Η επίδραση του ηλεκτρομαγνητικού πεδίου της ακτινοβολίας-γ επάνω στο ηλεκτρόνιο έχει ως αποτέλεσμα την ταλάντωση του ηλεκτρονίου για χαμηλές ενέργειες του φωτονίου.



- Η ενεργειακή ροή στη μονάδα του χρόνου δίνεται από το άνυσμα Poynting $W = E \times H \rightarrow \langle W \rangle = \langle E^2 \rangle \epsilon_0 c$. Η σκεδασθείσα ενέργεια σε χρόνο dt μέσα από επιφάνεια dS σε απόσταση r από το ηλεκτρόνιο δίνεται:

$$\langle E_j^2 \rangle \epsilon_0 c dS dt = \langle E_j^2 \rangle \epsilon_0 c r^2 d\Omega dt$$

- Θεωρώντας ένα ηλεκτρόνιο τότε η ίδια ενέργεια ισοδυναμεί με την εισερχόμενη επί την διαφορική ενεργό διατομή που σκεδάζεται στη γωνία $d\Omega$:

$$\langle E_i^2 \rangle \epsilon_0 c d\sigma dt \Rightarrow d\sigma = \frac{\langle E_j^2 \rangle}{\langle E_i^2 \rangle} r^2 d\Omega$$

Σκέδαση Thomson & Rayleigh

Σκέδαση Thomson $\xrightarrow[\text{με πολλά } e]{\text{άτομα}}$ σκέδαση Rayleigh

φωτόνια πάνω σε ελεύθερα ηλεκτρόνια χωρίς αλλαγή του μήκους κύματος.

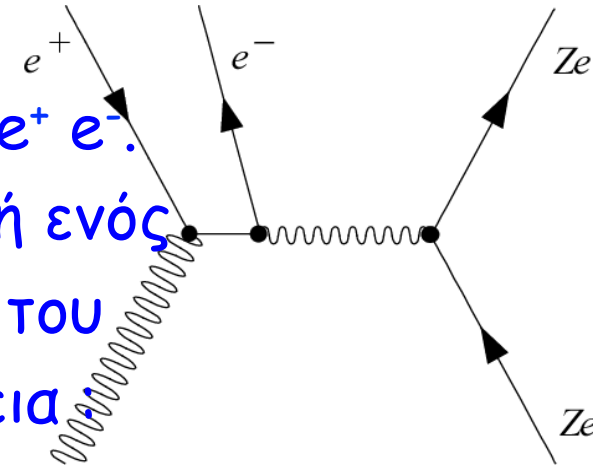
$$\sigma_T = \frac{8\pi}{3} r_e^2$$

Σκέδαση Rayleigh θεμελιώδης στην περίθλαση ακτινών-Χ από κρυστάλλους.

- Και στις δυο σκεδάσεις δεν μεταφέρεται ενέργεια στο υλικό.
- Τα άτομα του υλικού δεν διεγείρονται, δεν ιονίζονται. Αλλάζει μόνο η διεύθυνση του φωτονίου.
- Για πολύ μεγάλες ενέργειες Χ & ακτινών-γ οι Thomson, Rayleigh είναι αμελητέες.
- Η σκέδαση Compton θεωρείται ως ΑΣΥΜΦΩΝΗ διαδικασία σκέδασης, όπου όλα τα ατομικά ηλεκτρόνια δρουν ανεξάρτητα. → η ατομική ενεργός διατομή Compton είναι ίση με Z φορές την Klein-Nishina ενεργό διατομή.

Δίδυμη Γένεση

- Μετατροπή ενός φωτονίου σ' ένα ζεύγος $e^+ e^-$. Το φαινόμενο συμβαίνει μόνο στην περιοχή ενός πυρήνα ή e . Χρειάζεται το πεδίο Coulomb του πυρήνα και απαιτείται μια ελάχιστη ενέργεια



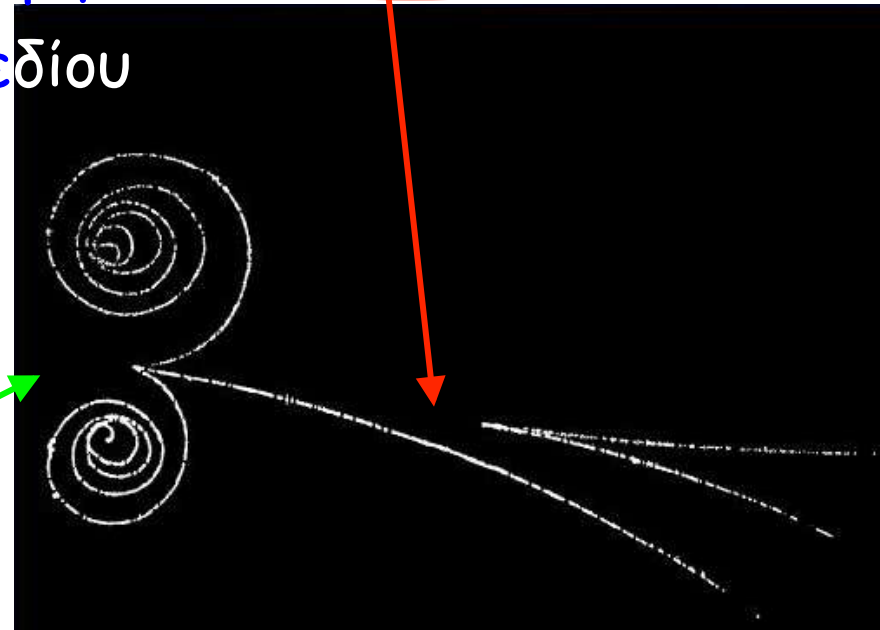
$$E_\gamma \geq 2m_e c^2 + \frac{2m_e^2 c^2}{m_{nucleus}} \quad \text{αλλά } m_{nucleus} \gg m_e \Rightarrow E_\gamma \geq 2m_e c^2$$

$$(\gamma + nucleus \rightarrow nucleus' + e^+ + e^-)$$

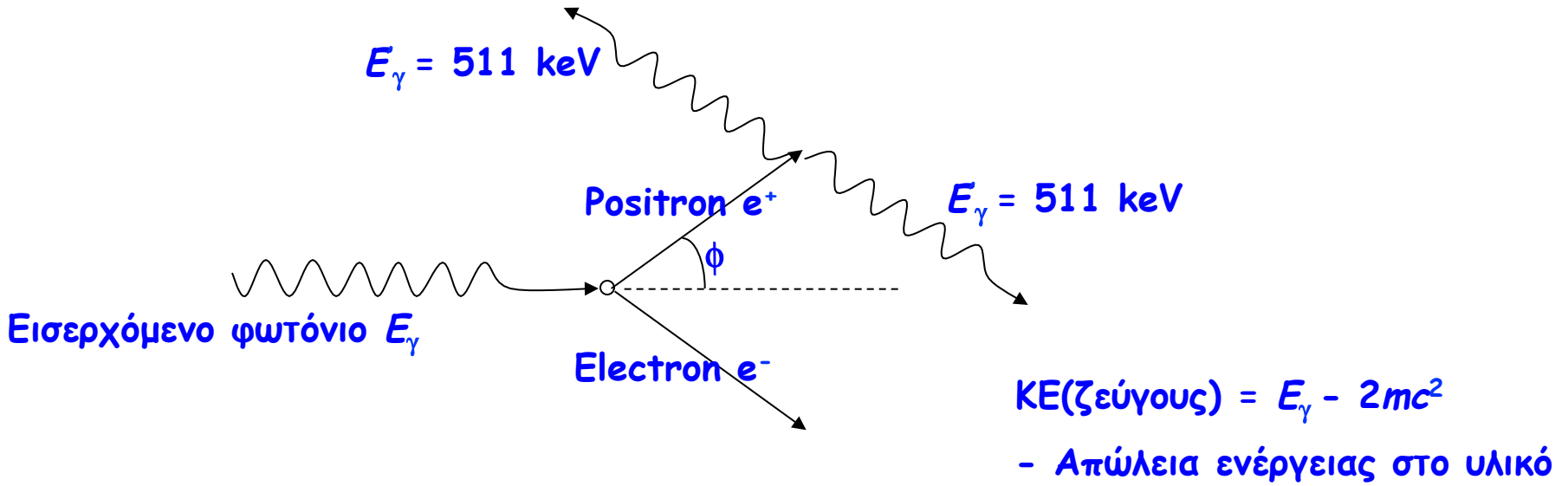
- Επίσης μπορούμε να έχουμε δίδυμη γένεση και στην περιοχή του πεδίου Coulomb ενός ηλεκτρονίου με ενέργεια κατωφλίου:

$$E_\gamma \geq 4m_e c^2$$

$$(\gamma + e^- \rightarrow e^- + e^+ + e^-)$$



Δίδυμη Γένεση



- Το ποζιτρόνιο χάνει την ενέργεια του και "έλκει" ένα ηλεκτρόνιο και **εξαυλώνεται** σε δυο φωτόνια που το καθένα έχει ενέργεια **0.511 MeV**
- Η μέση ελεύθερη διαδρομή (**mean free path**) ενός φωτονίου για τη δημιουργία ενός ζεύγους e^+e^- σχετίζεται με το «μήκος ακτινοβολίας» (**radiation length**) X_0 ηλεκτρονίων:

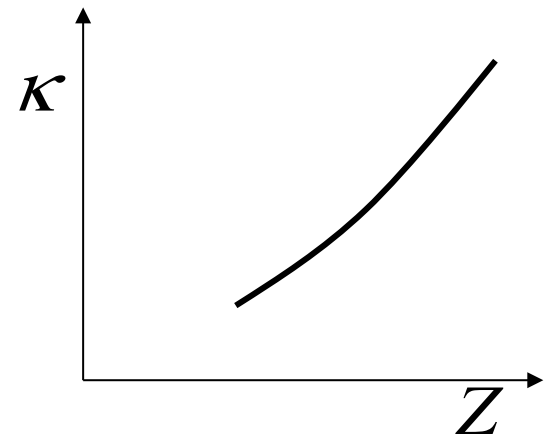
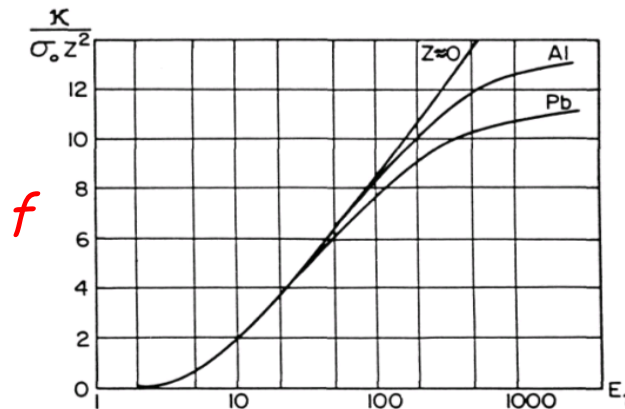
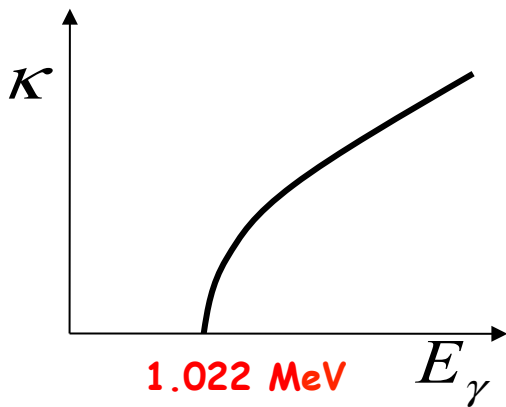
$$\lambda_{\text{ζεύγους}} = \frac{9}{7} X_0$$

Δίδυμη Γένεση

- Η πιθανότητα να συμβεί η δίδυμη γένεση, ονομάζεται συντελεστής παραγωγής ζεύγους (**pair production coefficient**) είναι μια πολύπλοκη συνάρτηση της ενέργειας E_γ , και του ατομικού αριθμού Z . Μπορεί να γραφτεί στη μορφή:

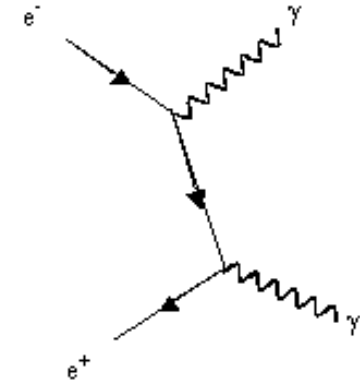
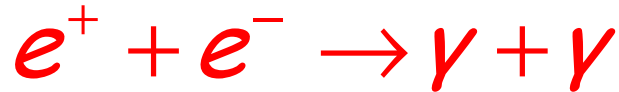
$$\kappa(m^{-1}) = NZ^2 f(E_\gamma, Z)$$

- κ είναι η πιθανότητα να συμβεί η παραγωγή ζεύγους ανά μονάδα μήκους και $f()$ μια συνάρτηση που μεταβάλλεται με την ενέργεια του φωτονίου και πολύ λίγο με τον ατομικό αριθμό.
- κ αυξάνει με (ατομικό αριθμό, ενέργεια) και έχει κατώφλι 1.022 MeV.
- Από τους 3 συντελεστές είναι ο μόνος που αυξάνει με την ενέργεια.



Εξαϋλωση Ποζιτρονίου

- τα ποζιτρόνια όταν διαπερνούν την ύλη εξαϋλώνονται με τα ηλεκτρόνια και δημιουργούν φωτόνια:



- Σε μεγάλες ενέργειες, το ποζιτρόνιο θα χάσει την ενέργεια του μέσω ιονισμού και ακτινοβολίας πέδησης μέχρι να αποκτήσει χαμηλή ενέργεια ώστε να εξαϋλωθεί.
- e^+ και e^- μπορούν να δημιουργήσουν μια προσωρινή δέσμια κατάσταση (**positronium**), παρόμοια αυτής του ατόμου του υδρογόνου.

Ενεργειακά επίπεδα positronium

$$E_{e^+e^-} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{2n^2}$$

Ενεργειακά επίπεδα ατόμου Η

$$E_{p-e^-} = -\frac{13.6 \text{ eV}}{n^2}$$

Αλληλεπίδραση φωτονίων

Ενεργός διατομή για την αλληλεπίδραση φωτονίων ως συνάρτηση της ενέργειας για C & Pb με τις επιμέρους συνεισφορές των διαφορετικών διαδικασιών.

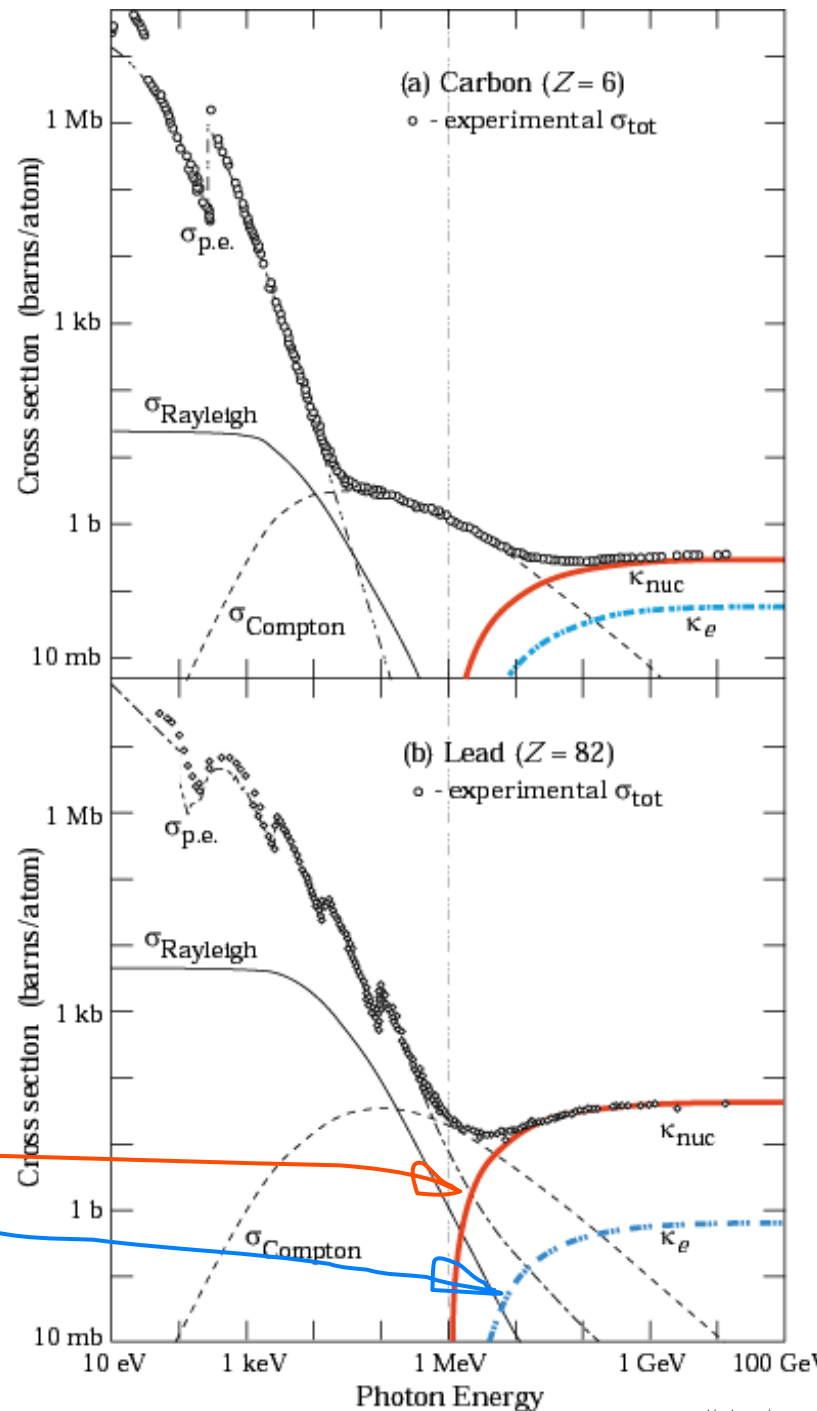
σ_{pe} = Atomic photo-effect
(electron ejection, photon absorption)

$\sigma_{Rayleigh}$ = Coherent scattering
(Rayleigh scattering-atom neither ionised nor excited)

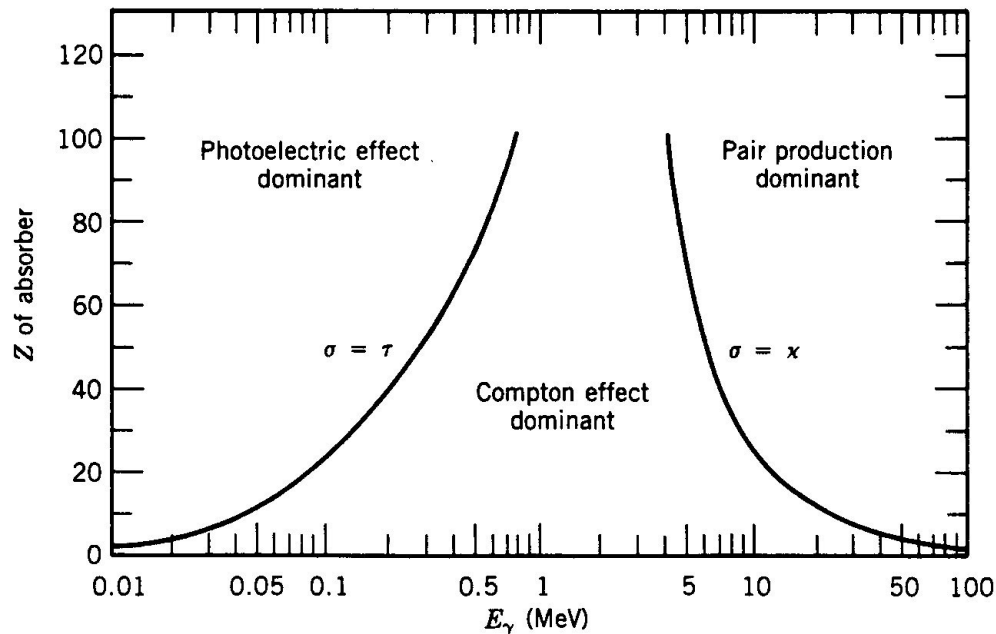
$\sigma_{Compton}$ = Incoherent scattering
(Compton scattering off an electron)

κ_n = Pair production, nuclear field

κ_e = Pair production, electron field



Αλληλεπίδραση φωτονίων



- Η ολική πιθανότητα αλλ/σης μ ανά μονάδα μήκους καλείται και γραμμικός συντελεστής απορρόφησης (**linear attenuation coefficient**) ισούται με το άθροισμα των τριών πιθανοτήτων ή ενεργών διατομών για τα αντίστοιχα 3 φαινόμενα:

$$\mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} = \tau + \sigma + \kappa$$

- Ο συντελεστής σε cm^2/g θα έχουμε τον μαζικό συντελεστή εξασθένησης:

$$\mu \text{ (cm}^2/\text{g)} = \mu \text{ (cm}^{-1}\text{)} / \rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$$

Παράδειγμα

- Να υπολογιστεί το πάχος ενός φύλλου μολύβδου (^{208}Pb) που εξασθενεί μια δέσμη φωτονίων ενέργειας 662 keV που προέρχεται από μια ραδιενεργό πηγή ^{137}Cs κατά ένα παράγοντα 10. Η πυκνότητα του Pb είναι $\rho=11.3 \text{ g/cm}^3$.

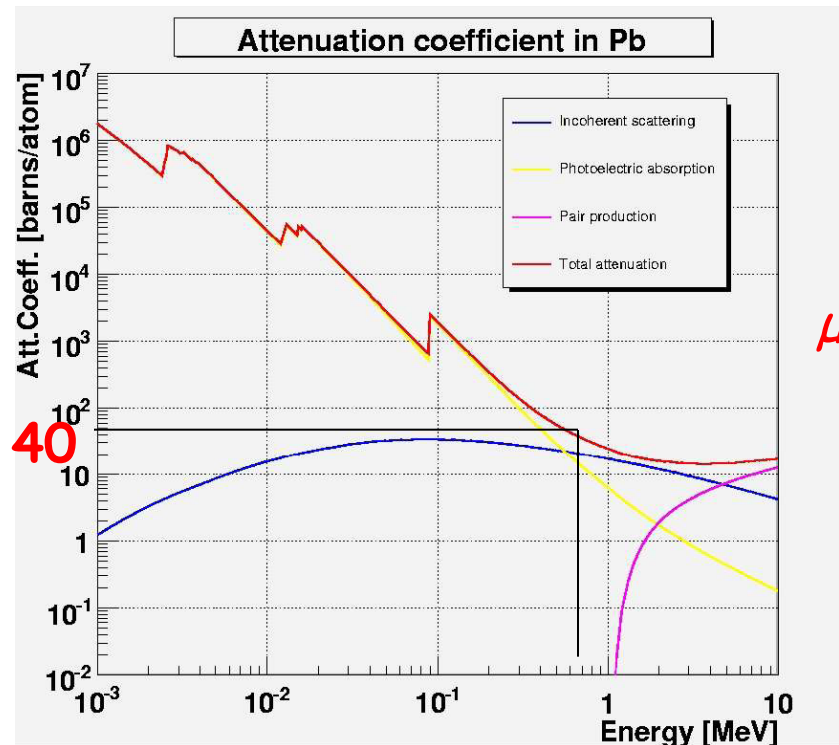
Από το διάγραμμα: η ολική ενεργός διατομή της αλλ/σης στο Pb $\sigma=40\text{b/atom} \rightarrow$ ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης θα είναι:

$$\mu = N\rho\sigma = \frac{N_A}{A} \rho\sigma = \frac{6 \times 10^{23}}{208} 11.3 \times 40 = 1.3 \text{ cm}^{-1}$$

Ο αριθμός των φωτονίων που επιβιώνουν σε απόσταση x :

$$I = I_0 e^{-\mu x} \Rightarrow x = \frac{1}{\mu} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

$$\Rightarrow x = \frac{1}{1.3} \ln(10) = \underline{\underline{1.77 \text{ cm}}}$$

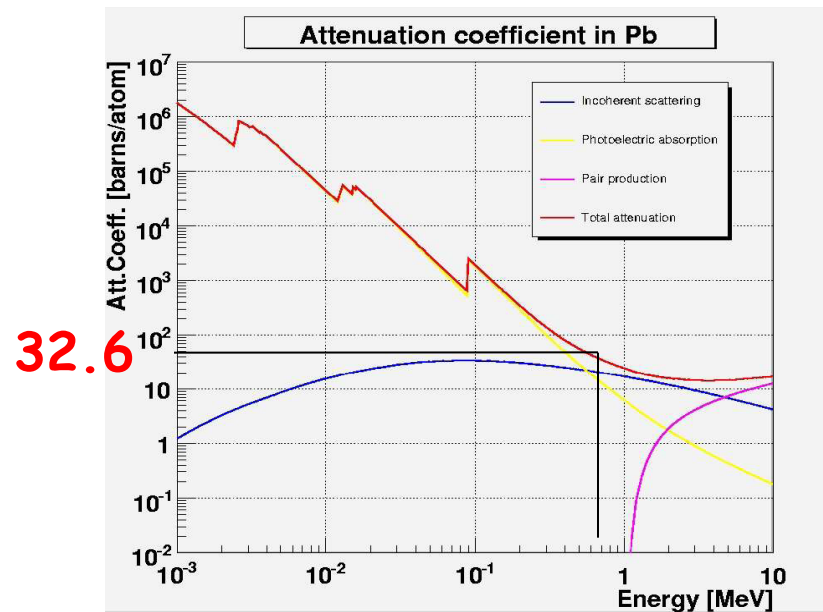


Παράδειγμα

- Ένα πάχος 2 mm ενός φύλλου μολύβδου (^{208}Pb) πυκνότητας $\rho=11.3 \text{ g/cm}^3$ εξασθενεί μια δέσμη φωτονίων κατά ένα παράγοντα 8.4. Να υπολογιστεί η ενέργεια των φωτονίων.

$$I = I_0 e^{-\mu x} \Rightarrow I = I_0 e^{-\frac{N_A}{A} \rho \sigma x} \Rightarrow \sigma = \frac{A}{x N_A \rho} \ln\left(\frac{I_0}{I}\right)$$

$$\Rightarrow \sigma = \frac{208}{0.2 \times 6.023 \times 10^{23} \times 11.3} \ln(8.4) = 32.6 \text{ b/atom}$$

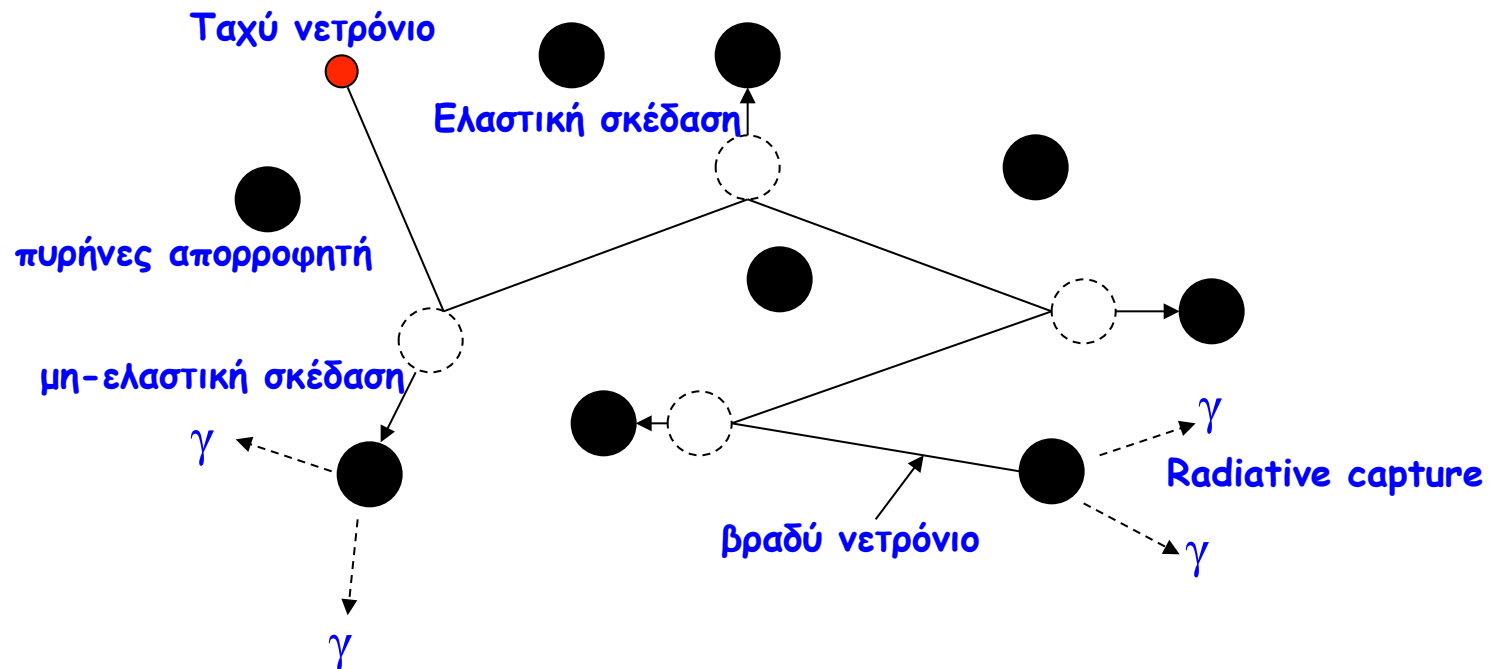


Νετρόνια

- Τα νετρόνια (n) είναι αφόρτιστα σωματίδια, απαιτείται πυρηνική αλλ/ση ώστε να μεταφερθεί ενέργεια στο υλικό (απορροφητή).
- Η πιθανότητα αλλ/σης (ενεργός διατομή, σ) εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από το τύπο των πυρήνων του υλικού και την ενέργεια των νετρονίων.
- Γενικώς, η ενεργός διατομή, σ , είναι πολύ μικρή και τα νετρόνια μπορούν να ταξιδεύουν μεγάλες αποστάσεις (αρκετά cm) χωρίς αλλ/ση μέσα στην ύλη.
- Πάντως τα νετρόνια μπορούν να:
 1. σκεδάζονται - μεταφέρουν ενέργεια στο σκεδαζόμενο (recoil nuclei) πυρήνα,
 2. να απορροφηθούν με τη βοήθεια διαφόρων πιθανών αντιδράσεων.

Νετρόνια

- Ταχέα (μεγάλης ενέργειας) νετρόνια (fast neutrons):
- Τα ταχέα νετρόνια μπορούν να προκαλέσουν ελαστικές σκεδάσεις, μη-ελαστικές σκεδάσεις και απορρόφηση, όπου η σύντηξη (fusion) είναι η κύρια μορφή απορρόφησης.



Σκέδαση Νετρονίων

- Ελαστική σκέδαση:

Ένα μεγάλο μέρος της ενέργειας των νετρονίων μεταφέρεται στον πυρήνα, ειδικά στην περίπτωση που έχουμε υλικό από ελαφρύς πυρήνες (μικρό A).

- Μη-ελαστική σκέδαση:

Ο σκεδαζόμενος πυρήνας διεγείρεται και μετέπειτα αποδιεγείρεται συνήθως με την ταυτόχρονη εκπομπή φωτονίων, γ .

Τα νετρόνια μετά από τη μη-ελαστική σκέδαση έχουν μικρότερη ενέργεια και συνήθως υπόκεινται μεγάλες αλλαγές στην κατεύθυνση τους.

Απορρόφηση Νετρονίων (Capture)

- Σύντηξη των νετρονίων με τους πυρήνες του στόχου (απορροφητή).
- Ο παραγόμενος σύνθετος πυρήνας διεγείρεται σε μια ενέργεια που είναι περίπου ίση:
~ **αρχική Κινητική Ενέργεια νετρονίου + Binding Energy (BE~8 MeV).**
- Αυτή η επιπρόσθετη ενέργεια του πυρήνα εμφανίζεται αργότερα ως προϊόντα αντίδρασης (ακτίνες γ, φορτισμένα σωματίδια και νετρόνια).
- Αν η πιθανότητα απορρόφησης = πιθανότητα σκέδασης, τότε τα νετρόνια υπόκεινται πολλαπλές σκεδάσεις με αποτέλεσμα σταδιακά να χάνουν την ενέργεια τους. Αυτή η διαδικασία «**καθυστέρησης**» (*moderation*) τα οδηγεί σε θερμική ισορροπία. Αυτά τα νετρόνια ονομάζονται **θερμικά νετρόνια**: Η ενέργεια των θερμικών νετρονίων σε κανονική θερμοκρασία (300 °K) είναι περίπου $E \sim kT = 0.025 \text{ eV}$.

Αλληλεπιδράσεις Νετρονίων

- **Ελαστική σκέδαση** με πυρήνες απορροφητή (στόχου) $A(n,n)A$: βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων τάξης 1 MeV .
- **Μη-ελαστική σκέδαση** πυρήνες απορροφητή (στόχου) $A(n,n')A^*$, $A(n,2n')$ B , κλπ: βασικός μηχανισμός απώλειας ενέργειας νετρονίων $> 1 \text{ MeV}$.

- **Radiative neutron capture** $X(n,\gamma)X$:

$$n + {}^A_Z X \rightarrow \gamma + {}^{A+1}_Z X, \quad \sigma_n^{\text{capt}} \propto \frac{1}{v}, \quad v = \text{ταχύτητα νετρονίου}$$

- **Πυρηνικές αντιδράσεις**: (n,p) , (n,n') , (n,α) , (n,d) , $(n,n'p)$, κλπ. όπου έχουμε σύλληψη νετρονίου και εκπομπή φορτισμένου σωματιδίου: $eV < E_n < keV$.
- **Πυρηνική σχάση (Fission)**: θερμικές ενέργειες.
 $n + (Z,A) \rightarrow (Z_1,A_1) + (Z_2,A_2) + n + n + \dots$
- **Παραγωγή αδρονικού πίδακα**: υψηλές ενέργειες $E_n > 100 \text{ MeV}$.

Κατηγορίες Νετρονίων

- Υψηλής ενέργειας: $E_n > 100 \text{ MeV}$.
- Ταχέα νετρόνια: $100 \text{ keV} < E_n < 100 \text{ MeV}$
- Επιθερμικά νετρόνια: $0.1 \text{ eV} < E_n < 100 \text{ keV}$
- Θερμικά νετρόνια: $E_n \sim kT \sim 1/40 \text{ eV}$
- Ψυχρά ή Υπερ-ψυχρα: $E_n \sim \text{meV}$ ή μeV

Η ολική πιθανότητα αλληλεπίδρασης νετρονίων είναι:

$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{el}} + \sigma_{\text{inel}} + \sigma_{\text{capt}} + K$$

πολλαπλασιάζουμε με την πυκνότητα των ατόμων \rightarrow μέσο μήκος ελεύθερης διαδρομής (mean free path length):

$$N = N_0 e^{-\frac{x}{\lambda}}$$

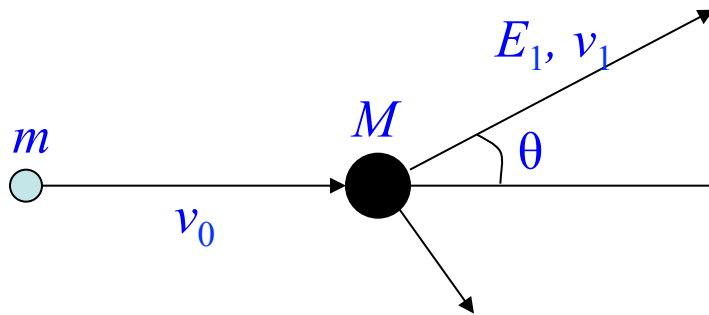
$$\frac{1}{\lambda} = N \sigma_{\text{tot}} = \frac{N_A \rho}{A} \sigma_{\text{tot}}$$

Εξασθένηση νετρονίων σε πάχος x

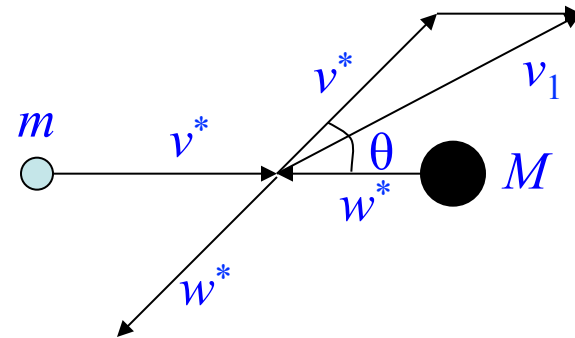
$$\lambda = \frac{\int_0^{\infty} x \exp(-x/\lambda) dx}{\int_0^{\infty} \exp(-x/\lambda) dx}$$

Νετρόνια

- Καθυστέρηση ταχέων νετρονίων \rightarrow **moderation**, πολύ σημαντική διαδικασία για την πυρηνική φυσική και τεχνολογία. Νετρόνιο εισέρχεται στην ύλη και σκεδάζεται όπισθεν (**μη-ελαστική**) πρόσθια (**ελαστική**) χάνοντας ενέργεια μέχρι την θερμική ισορροπία με τα γειτονικά άτομα, οπότε συλλαμβάνεται από κάποιο πυρήνα.



σύστημα εργαστηρίου



σύστημα κέντρου μάζας (CM)

$$m v_0 = (m + M) V_{cm} \quad \text{διατήρηση ορμής}$$

$$v^* = v_0 - V_{cm} = M v_0 / (m + M)$$

$$M/m = A \quad !!$$

Νετρόνια

- Θεώρημα των συνημίτονων των v^* , v_1 και V_{cm} θα έχουμε:

$$v_1^2 = (v^*)^2 + (V_{cm})^2 + 2 v^* V_{cm} \cos \theta$$

$$v_1^2(\max) = (v^* + V_{cm})^2 = v_0^2 \quad (\theta = 0)$$

$$v_1^2(\min) = (v^* - V_{cm})^2 = (M - m)^2 v_0^2 / (M + m)^2 = \alpha v_0^2 \quad (\theta = 180^\circ)$$

όπου $\alpha = (M - m)^2 / (M + m)^2$

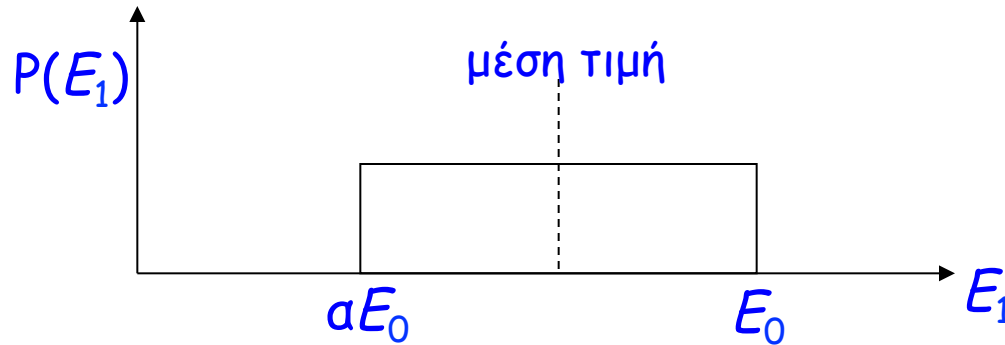
- Ενέργειες σκέδασης είναι:

$$E_1(\max) = \frac{1}{2} m v_0^2 = E_0$$

$$E_1(\min) = \alpha E_0 \quad [=0 \text{ for } M = m] \text{ (σκέδαση με πρωτόνιο, και επομένως}$$

έχουμε καθυστέρηση νετρονίων πιο αποδοτική με πρωτόνια ή ελαφρούς πυρήνες, για παράδειγμα: Νερό, παραφίνη, κ.λ.π.)

Νετρόνια



$$\text{Μέση τιμή: } \overline{E_1} = \frac{1}{2}(1+a)E_0 \Rightarrow \overline{E_1} = \frac{1}{2}E_0 \quad \text{for } M = m$$

- Επόμενες n σκεδάσεις: $\overline{E}_n = E_0 \times \left(\frac{\overline{E}_1}{E_0}\right)^n$
- Εκθετική μείωση της ενέργειας E_n vs $n \Rightarrow$ γραμμική σε λογαριθμική κλίμακα
- Κατανομή Condon-Breit για n σκεδάσεις: $\frac{dP(E_n)}{dE} = \frac{1}{E_0(n-1)!} \left(\ln \frac{E_0}{E}\right)^{n-1}$

Νετρόνια

- Καλύτερα να υπολογίσουμε τη μέση μείωση του λογαρίθμου (ενέργειας) σε μια σκέδαση \rightarrow *logarithmic energy decrement*

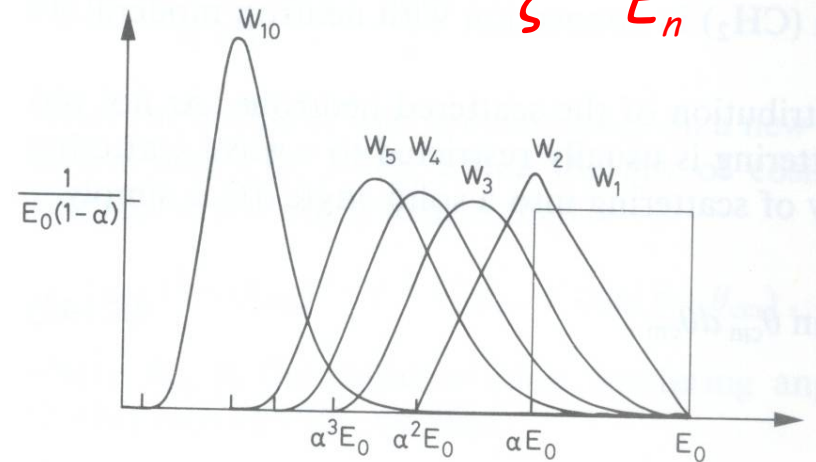
$$\xi = \overline{\ln(E_0 / E_1)} = 1 + \frac{(M - m)^2}{2Mm} \ln\left(\frac{M - m}{M + m}\right)$$

Για σκέδαση από πρωτόνια $M=m \rightarrow \xi=1$

Μετά από n σκεδάσεις

$$\overline{\ln E_n} = \ln E_0 - n\xi \Rightarrow n = \frac{1}{\xi} \ln \frac{E_0}{E_n}$$

για $M=A < 6 \rightarrow \xi = \frac{2}{A} - \frac{4}{3A^2}$



Για σκέδαση από πρωτόνια νετρόνια αρχικής ενέργειας $E=2 \text{ MeV}$ θερμοποιούνται ($E=0.025 \text{ MeV}$) μετά από 18 σκεδάσεις

Θωράκιση Νετρονίων

- **Θερμοποίηση νετρονίων:**
Υλικά πλούσια σε πρωτόνια H (Νερό, παραφίνη-polythene)
- **Θωράκιση θερμικών νετρονίων:**
Μπετόν (Concrete)
Φύλλα Καδμίου (Cadmium sheet) (μεγάλη απορρόφηση στις χαμηλές ενέργειες)

Νετρίνο

- Όπως τα φωτόνια τα νετρόνια έτσι και τα νετρίνο ανιχνεύονται έμμεσα - μόνο δια μέσου των αλληλεπιδράσεων τους.
- Εξαρτάται από τη γεύση του νετρίνο θεωρούμε τις παρακάτω διαδικασίες:

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$

$$\bar{\nu}_e + n \rightarrow n + e^+$$

$$\nu_\mu + n \rightarrow p + \mu^-$$

$$\bar{\nu}_\mu + n \rightarrow n + \mu^+$$

$$\nu_\tau + n \rightarrow p + \tau^-$$

$$\bar{\nu}_\tau + n \rightarrow n + \tau^+$$

- Η ενεργός διατομή της αλληλ/σης ν_e στη περιοχή ενέργειας MeV υπολογίζεται ως:

$$\sigma(\text{IN}) = \frac{4}{\pi} 10^{-10} \left(\frac{h\nu}{(m_p c)^2} \right)^2 = 1.6 \times 10^{-44} \text{ cm}^2 \quad \text{για } 0.5 \text{ MeV}$$