

Πυρηνική Φυσική και Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων (5ου εξαμήνου)

Τμήμα Τ2: Κ. Κορδάς & Δ. Σαμψωνίδης

Μάθημα 24

**Αλληλεπίδραση ακτινοβολίας με την ύλη
και μονάδες μέτρησης δόσης ακτινοβολίας**

Κώστας Κορδάς

Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης

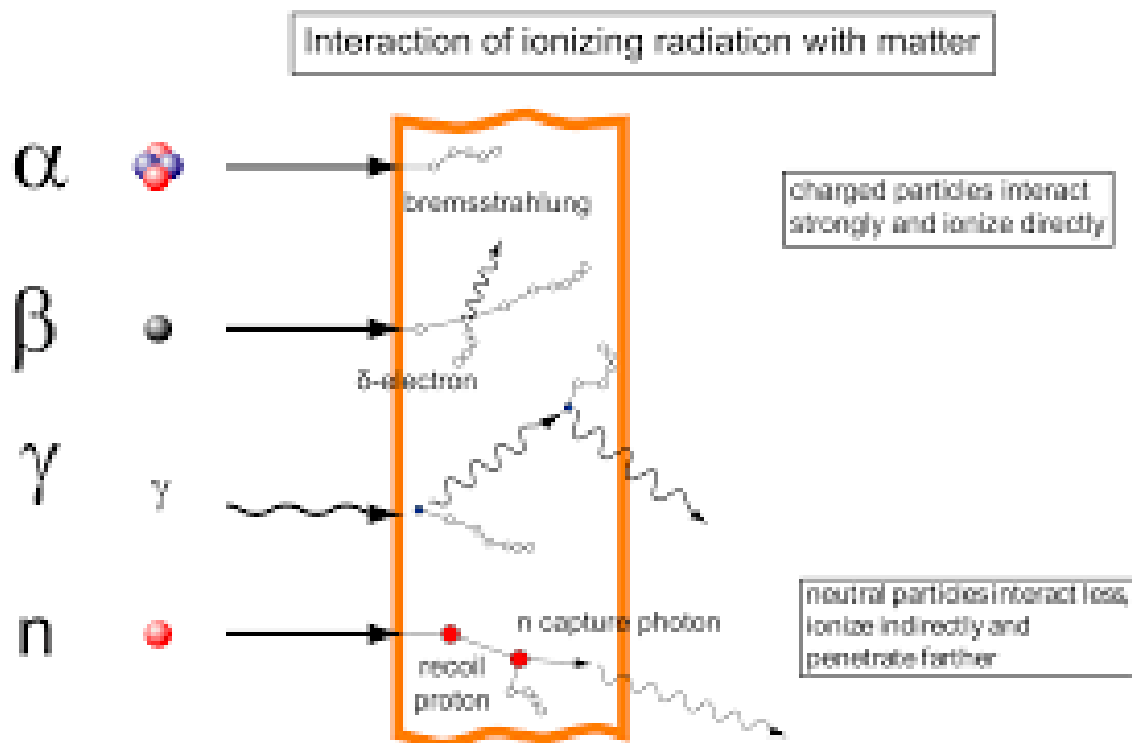
Πυρηνική & Στοιχειώδη

Τι θα συζητήσουμε

- Κεφ. 13 βιβλίο C&G :
 - Διέλευση σωματιδίων από την ύλη
- Παράρτημα Ε βιβλίο C&G:
 - ενεργότητα και μονάδες ραδιενέργειας

1. Αλληλεπίδραση σωματιδίων με την ύλη:

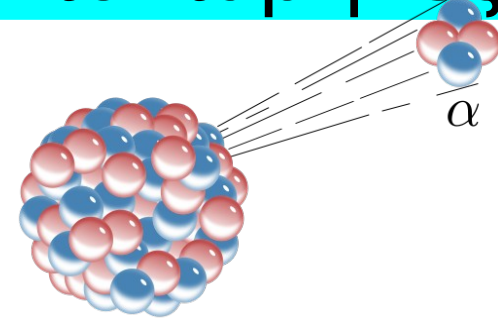
Κεφάλαιο 13 C&G (dE/dx , φωτόνια)



Αυθόρμητη διάσπαση πυρήνων (ραδιενέργεια) και είδη ακτινοβολίας από πυρήνες

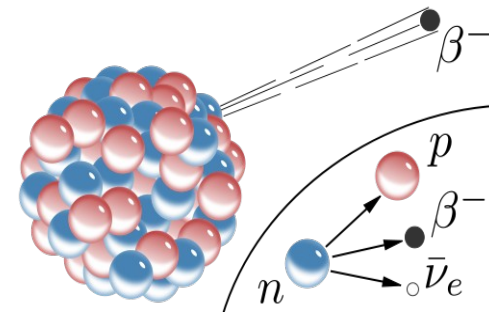
α-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα συσμάτωμα
από {2 πρωτόνια και δύο νετρόνια}
= διώχνει ένα σωματίδιο άλφα
(δηλαδή έναν πυρήνα ηλίου, He)



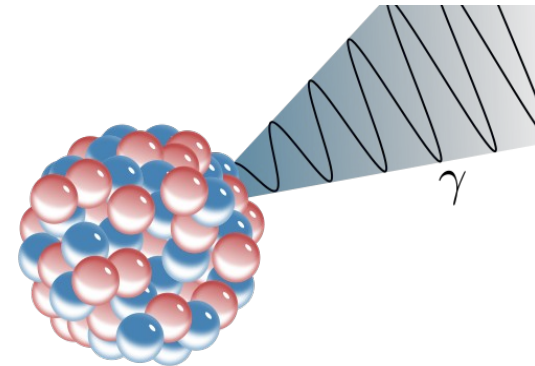
β-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα ηλεκτρόνιο
(e^-) ή ποζιτρόνιο (e^+)



γ-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα φωτόνιο (γ)
→ η μόνη περίπτωση που μένει ο ίδιος, απλά
με χαμηλότερη ενέργεια



ακτινοβολία νετρονίων:

- Κατά τη σχάση πυρήνων σε μικρότερους
“περισσεύουν νετρόνια

Αυθόρμητη διάσπαση και είδη ακτινοβολίας από πυρήνες

ακτινοβολία α:

- Θετικά φορτισμένα σωματίδια, ~ 4 φορές βαρύτερα των πρωτονίων, δηλ. με μάζα ~ 4 GeV. (Προσέξате ότι γράψαμε μάζα=4 GeV αντί για $4 \text{ GeV}/c^2$: εσείς ξέρετε όμως ότι μιλάμε για μάζα, οπότε δεν πειράζει, γιατί έτσι κι αλλιώς, όπου το χρησιμοποιήσουμε με $c=1$, θα βάλουμε μάζα=4 GeV)
- Αλληλεπιδράει με την ύλη μέσω της ισχυρής δύναμης: σταματάει εύκολα (~ 0.02 mm σε Pb)

ακτινοβολία β (β^- ή β^+):

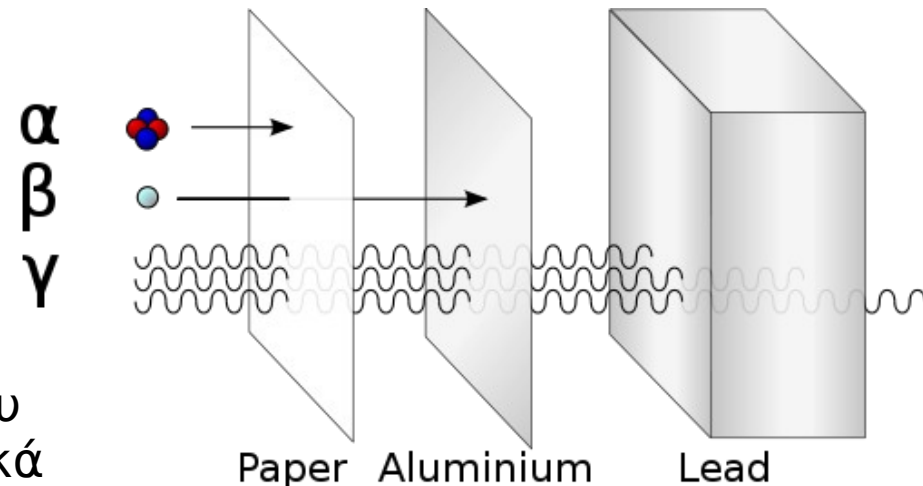
- Φορτισμένα σωματίδια (ηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια) και ελαφριά (~ 2000 φορές ελαφρύτερα από τα πρωτόνια)
- Αλληλεπιδράει με την ύλη με την ηλεκτρομαγνητική δύναμη και διασχίζει περισσότερη ύλη μέχρι να απορροφηθεί (~ 1 mm σε Pb)

ακτινοβολία γ:

- Αφόρτιστα “σωματίδια”, χωρίς μάζα
- Πιο διεισδυτική στην ύλη από α και β, απορροφάται σταδιακά

ακτινοβολία νετρονίων:

- Αφόρτιστα “σωματίδια”, με μάζα $\sim$ πρωτονίου
- Πιο διεισδυτική από α, απορροφάται σταδιακά

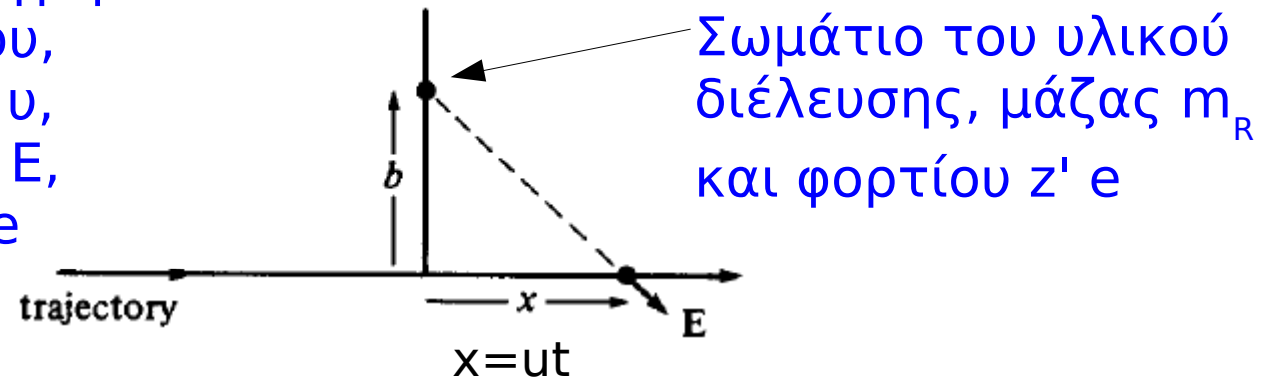


1α. Αλληλεπίδραση φορτισμένων σωματιδίων με την ύλη - “ιονίζουσα ακτινοβολία”

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη (1): μεταβολή της ορμής του

Τροχιά γρήγορου
σωματιδίου,
ταχτητας v ,
ενέργειας E ,
φορτίου ze

b = impact parameter = παράμετρος κρούσης



$$E_x = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(z'e)x}{(b^2 + x^2)^{3/2}}, \quad E_y = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{(z'e)b}{(b^2 + x^2)^{3/2}}$$

Εξίσωση κίνησης: Δύναμη = $\frac{dp}{dt} = zeE$

**Μεταβολή
ορμής:**

$$\Delta p_x = ze \int_{-\infty}^{\infty} E_x dt \approx \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{vt dt}{(b^2 + v^2 t^2)^{3/2}} = 0$$

Δεν έχουμε
συνολική
μεταβολή
ορμής κατά τον
άξονα κίνησης

$$\Delta p_y = p_T \quad p_T = ze \int_{-\infty}^{\infty} E_y dt = -\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \int_{-\infty}^{\infty} \frac{b dt}{(b^2 + v^2 t^2)^{3/2}} = -\left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{2}{bv} \rightarrow p_T \sim 1/v$$

Μεταβολή ορμής κάθετα στην κίνηση

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη (2): απώλεια ενέργειας σε ένα άτομο υλικού

Θεωρώντας το “ακίνητο” σωματίο: αποκτά ορμή $-p_T$.

Και κερδίζει κινητική ενέργεια: $(p_T^2/2m_R)$

(θεωρώντας ότι δεν είναι αρκετή για να το κάνει σχετικιστικό)

Η οποία είναι όση ενέργεια έχασε το κινούμενο.

Άρα **απώλεια ενέργειας κινούμενου**:

$$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2 \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{b^2 v^2 m_R}$$

← Δεν εξαρτάται από τη μάζα του γρήγορου σωματιδίου.

ισχύει και για σχετικιστικό σωματίδιο

Για “ακίνητα” σωματίδια του υλικού = πυρήνες ατόμων του υλικού, καθώς και τα ατομικά του ηλεκτρόνια (θυμηθείτε: η ταχύτητα των ατομικών ηλεκτρονίων είναι της τάξης $\beta = \alpha = 1/137$)

Μεγάλη μάζα $m_R \rightarrow$ μικρή απώλεια ενέργειας. Ποσοτικά:

Απώλεια λόγω αλληλεπίδρασης με τα Z ατομικά ηλεκτρόνια (μάζας Zm_e)

Απώλεια λόγω αλληλεπίδρασης με τον πυρήνα (μάζας $\sim Am_p \sim 2Z \cdot m_p$)

$\sim 2 m_p / m_e \sim 4 \cdot 10^3$ **~ΌΛΗ η απώλεια ενέργειας στα ατομικά ηλεκτρόνια!**

Φορτισμένο σωματίδιο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη(3): απώλεια ενέργειας στην ύλη

Το σωματίδιο κατά την διέλευσή του από κάποιο υλικό, θα αλληλεπιδράσει με πολλά ηλεκτρόνια σε διάφορες αποστάσεις, b . Αν τα ηλεκτρόνια του υλικού είναι τυχαία κατανεμημένα στο χώρο γύρω από την τροχιά του σωματιδίου, ο αριθμός ηλεκτρονίων που περιέχονται σε κυλινδρικό όγκο ακτίνας b , πάχους db και μήκους dx θα είναι:
 $= Z * \text{αριθμός ατόμων στον όγκο αυτό} = Z * (\rho * b * 2\pi * db * dx) / m_a$

Όπου m_a είναι η μάζα του κάθε ατόμου (προσέγγιστικά: $m_a = A \text{ amu}$).

Οπότε:

$$\Delta E = \text{διπλό διαφορικό} \quad d^2 E = -4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{\rho Z}{m_a} \frac{1}{v^2 m_e} \frac{db}{b} dx$$

(ως προς b και ως προς x):

Ολοκληρώνοντας ως προς όλα τα πιθανά b , προσέχουμε ότι το b δεν μπορεί να γίνει μηδέν (τότε απέλεια ενέργειας άπειρη), ούτε άπειρο:

Το b ξεκινάει από κάποιο $b_{\min}$ ($\sim$ απόσταση ελάχιστης προσέγγισης), μέχρι κάποιο μέγιστο $b_{\max}$, πέρα από το οποίο η μεταφορά ενέργειας δεν είναι αρκετή για να κάνει ούτε καν διέγερση του ατόμου, οπότε και δεν γίνεται! (θυμηθείτε το πείραμα Frank-Hertz)

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη(4): απώλεια ενέργειας

Ολοκλήρωση για όλα τα πιθανά b :

$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{\rho Z}{m_a m_e} \frac{1}{v^2} L,$$

where $L = \ln(b_{\max}/b_{\min})$.

Since $m_a \approx A$ atomic mass units, where A is the mass number of the atoms, we write this as

$$-\frac{dE}{dx} = D \left(\frac{Z}{A} \right) \rho \left(\frac{zc}{v} \right)^2 L,$$

where

$$D = 4\pi \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{m_e (931.5 \text{ MeV})} = 0.307 \text{ MeV cm}^2 \text{ g}^{-1}.$$

and the mass density ρ of the material is expressed in g cm^{-3} . (Note the units.)

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη: απώλεια ενέργειας και όρια ολοκλήρωσης (1)

$$\text{Ολοκλήρωση για } -\frac{dE}{dx} = 4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{\rho Z}{m_a m_e v^2} L,$$

where $L = \ln(b_{\max}/b_{\min})$.

1. Πόσο είναι το **bmin**;

Θυμηθείτε τη μεταφορά ενέργειας σε ένα άτομο:

$$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2 \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{b^2 v^2 m_R}$$

Για $b_{\min}=0$ το ΔE απειρίζεται!

Αφύσικο, αφού δεν μπορεί ποτέ το σωματίδιο να χάσει ενέργεια πίο πολύ από αυτή με την οποία μπήκε στο υλικό από το οποίο διέρχεται.

Άρα:

.... **bmin** = όσο το μήκος του κυματοπακέτου που χαρακτηρίζει το σωματίο = $h / p = h / (\gamma m v)$

Δεν έχει νόημα να πούμε ότι το σωματίδιο πλησίασε πίο κοντά, γιατί δεν ξέρουμε τη θέση του σωματιδίου με καλύτερη ακρίβεια.

Οπότε θα μπορούσαμε να χρησιμοποιήσουμε την απροσδιοριστία για να πούμε κάτι για το $b_{\min}$, ως εξής:

$$\Delta p * \Delta x > \hbar \rightarrow \Delta x > \hbar / \Delta p = \hbar / \langle p \rangle = \hbar / (\gamma m v)$$

$$\rightarrow \mathbf{bmin = \hbar / (\gamma m v)}$$

Φορτισμένο σωματιδίο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη: απώλεια ενέργειας και όρια ολοκλήρωσης (2)

Ολοκλήρωση για όλα τα πιθανά b :
$$-\frac{dE}{dx} = 4\pi \left(\frac{ze^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{\rho Z}{m_a m_e v^2} L,$$

where $L = \ln(b_{\max}/b_{\min})$.

2. Πόσο είναι το $b_{\max}$;

Θυμηθείτε τη μεταφορά ενέργειας σε ένα άτομο:

Για $b_{\max} = \infty$ το ΔE μηδενίζεται!

Αφύσικο, αφού δεν μπορεί ποτέ το άτομο (που είναι κβαντισμένο σύστημα) να πάρει ενέργεια λιγότερη από την ενέργεια διέγερσης από μία στάθμη σε μία άλλη (θυμηθείτε το πείραμα Frank-Hertz)
~ τάξη μεγέθους όσο η ενέργεια ιονισμού, I .

$$\Delta E = -\frac{p_T^2}{2m_R} = -2 \left(\frac{zz'e^2}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{1}{b^2 v^2 m_R}$$

Άρα:

.... $b_{\max}$ = περατωμένο.

$$\Delta E \cdot \Delta t = \hbar \rightarrow \Delta t = \hbar / \Delta E, \text{ αλλά } \Delta E > I \rightarrow \Delta t < \hbar / I$$

Αλλά το Δt είναι ο χρόνος αλληλεπίδρασης: $\Delta t \sim b / (\gamma v)$

$$\text{Οπότε: } b / (\gamma v) < \hbar / I \rightarrow b < \hbar \gamma v / I \rightarrow \mathbf{b_{\max} = \hbar \gamma v / (I \gamma)}$$

Οπότε:
$$L = \ln \left(\frac{b_{\max}}{b_{\min}} \right) \approx \ln \left(\frac{\gamma^2 m_e v^2}{\langle I \rangle} \right)$$

Απώλεια ενέργειας με ιονισμό και διέγερση του υλικού (Bethe-Bloch)

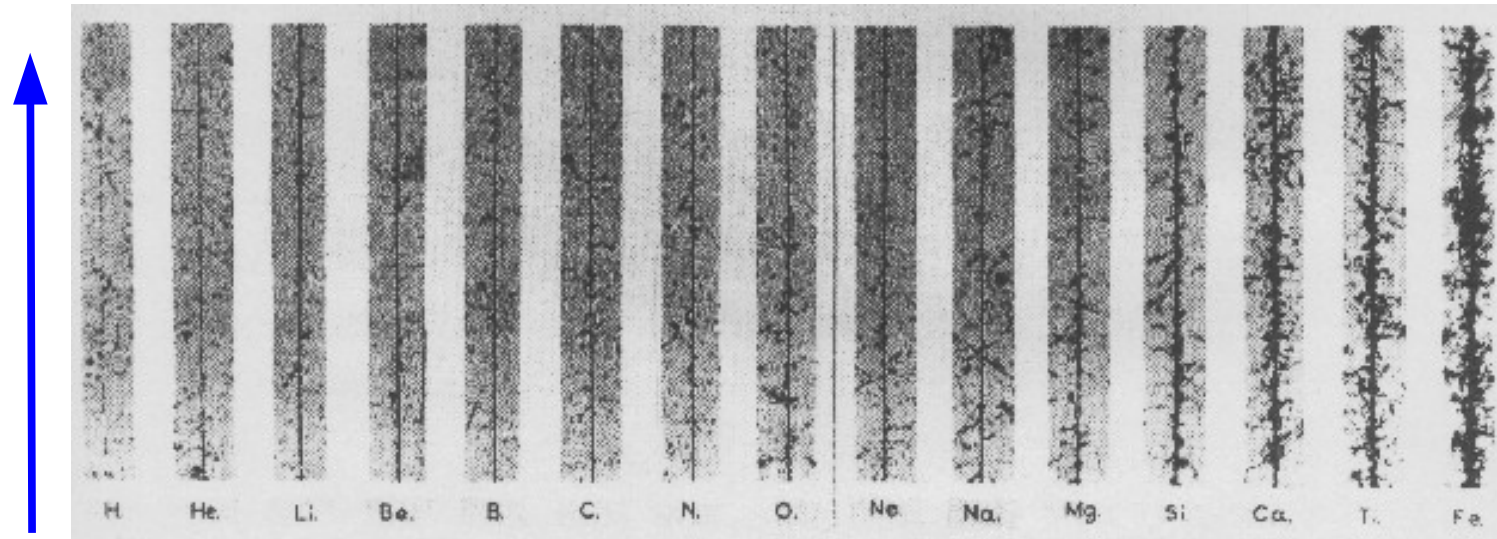
$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = -4\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 F}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Bethe Bloch Formula

$Z_1 e$ = φορτίο προσπίπτοντος σωματιδίου

$\beta = v/c$ ταχύτητά του

ρ, Z, A = πυκνότητα κλπ του ανιχνευτή



Π.χ., Φορτισμένα σωματίδια (από κοσμική ακτινοβολία) διαπερνούν υλικό πυκνότητας ρ .

→ Η απώλεια ενέργειάς του είναι μεγαλύτερη, όσο περισσότερο φορτίο έχει το σωματίδιο: $dE/dx \sim Z_1^2$

Απώλεια ενέργειας με ιονισμό και διέγερση του υλικού (Bethe-Bloch)

$$\frac{1}{\rho} \frac{dE}{dx} = -4\pi r_e^2 m_e c^2 \frac{Z_1^2}{\beta^2} N_A \frac{Z}{A} \left[\ln \frac{2m_e c^2 \beta^2 \gamma^2 F}{I} - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

$Z_1 e$ = φορτίο προσπίπτοντος

σωματιδίου

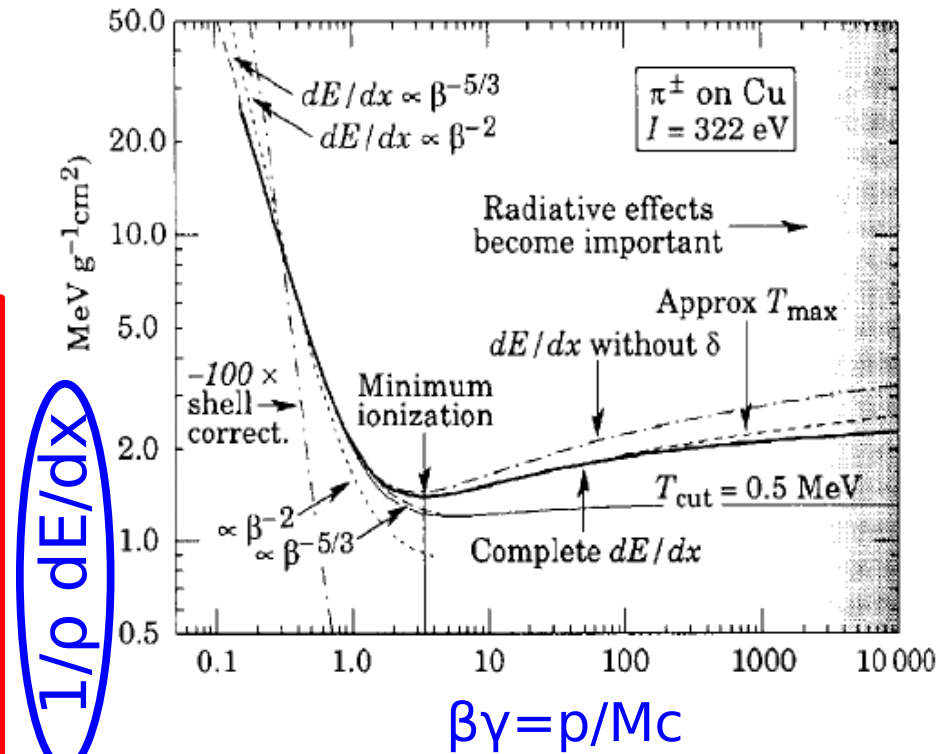
β = η ταχύτητά του

ρ, Z, A = πυκνότητα κλπ. του ανιχνευτή

Bethe Bloch Formula

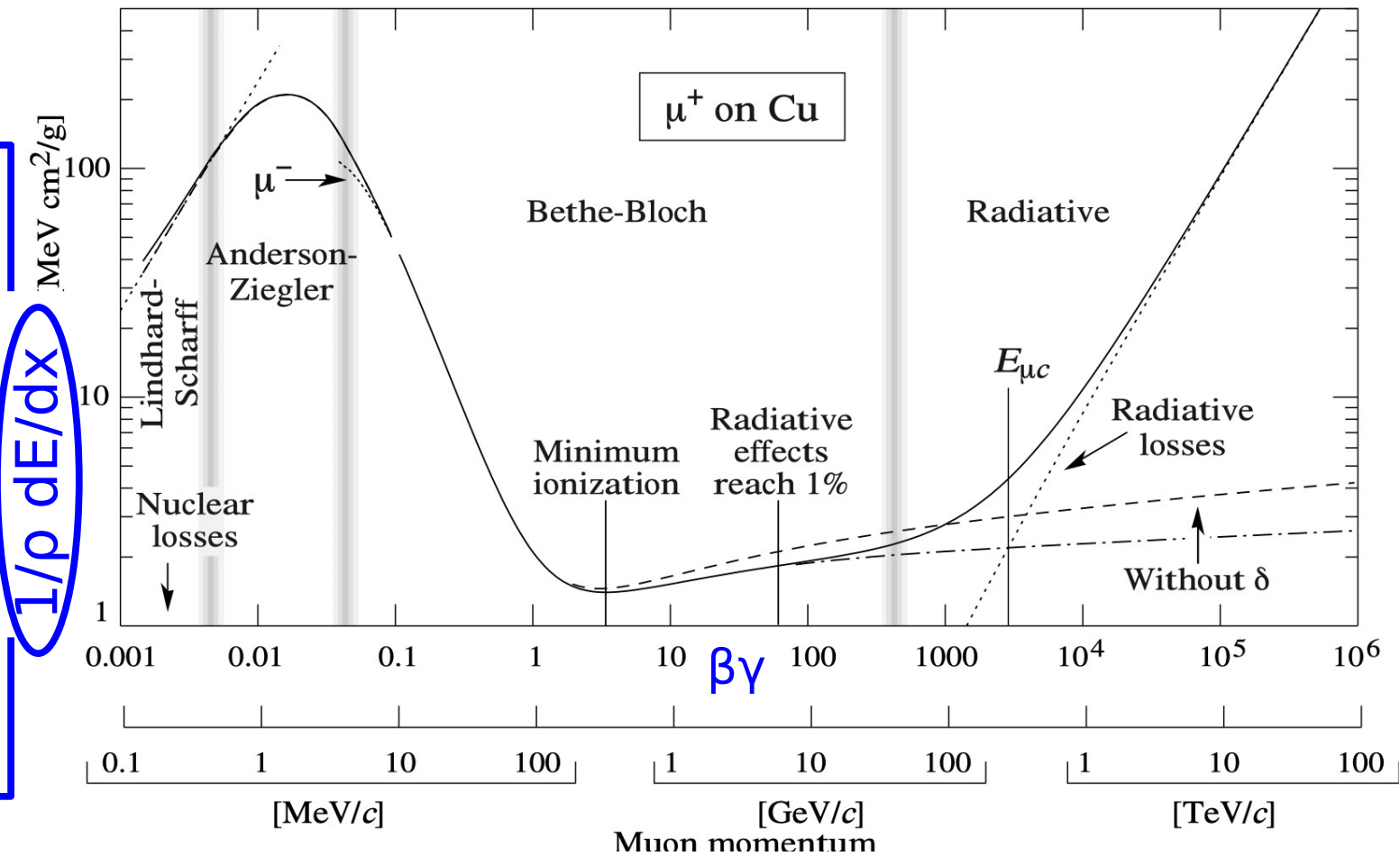
Απώλεια Ενέργειας: $1/\rho \, dE/dx$

- αρχικά πέφτει με $1/\beta^2$
- για $\beta\gamma > 3$ αυξάνεται με $\ln\gamma$ και δείχνει πλατώ για μεγάλα $\beta\gamma$ (>1000)
- είναι ~ανεξάρτητο της μάζας M του εισερχόμενου ($M \gg m_e$)
- είναι ανάλογο του Z_1^2 του εισερχόμενου σωματιδίου.
- είναι ~ανεξάρτητη του υλικού (αφού $Z/A \sim \text{σταθ.}$)
- $dE/dx \approx 1-2 * \rho \text{ [g/cm}^3\text{]} \text{ MeV/cm}$



Φορτισμένο σωματίδιο χάνει ενέργεια διαπερνώντας την ύλη: specific Energy Loss ($1/\rho \, dE/dx$)

Για να υπολογίσουμε την απώλεια ενέργειας ανά μονάδα απόστασης (dE/dx , σε MeV/cm), πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το $1/\rho \, dE/dx$ (σε $\text{MeV cm}^2/\text{g}$) με την πυκνότητα ρ του υλικού.



Ένα σωματίδιο διασχίζει ένα υλικό με πυκνότητα ρ . **Ανάλογα με την ορμή του, το σωματίδιο χάνει ενέργεια και με διαφορετικό μηχανισμό.** Π.χ., στην περιοχή $\beta\gamma = [0.1 - 1000]$ (περιοχή Bethe-Bloch) έχουμε απώλειες με ιονισμό του υλικού. Από εκεί και πάνω, η απώλεια ενέργειας είναι κυρίως λόγω εκπομπής φωτονίων (δηλ., με radiation = Bremsstrahlung)

π.χ. Μιόνιο διαπερνά σίδηρο - απώλεια ενέργειας (Energy Loss)

Bethe Bloch Formula, a few Numbers:

Σημειώστε ότι για $Z \approx 0.5$ A:
 $1/\rho \, dE/dx \approx 1.4 \text{ MeV cm}^2/\text{g}$,
όταν $\beta\gamma \approx 3$ (minimum ionizing)

Παράδειγμα :

Σίδηρο: πάχος = 100 cm;

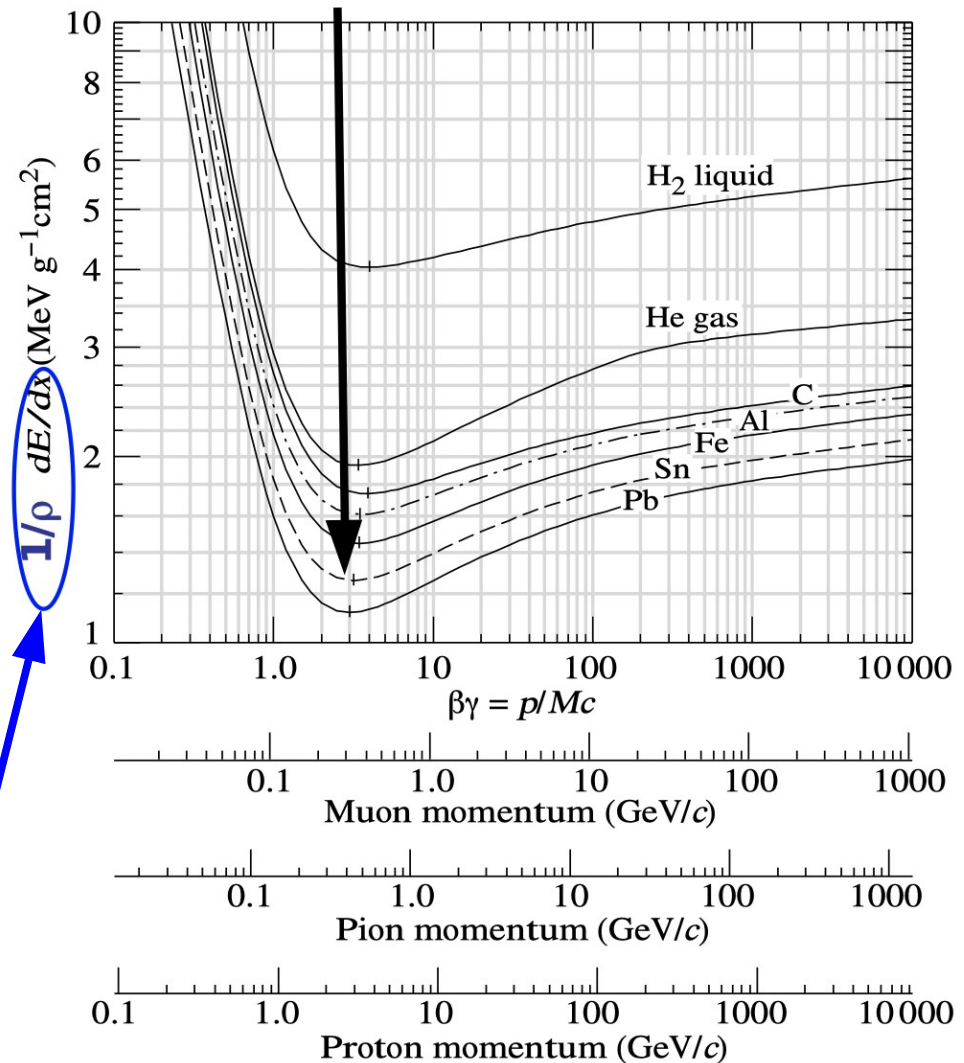
$\rho = 7.87 \text{ g/cm}^3$

$dE \approx 1.4 * 100 * 7.87$
 $= 1102 \text{ MeV}$

**→ Μιόνιο 1.15 GeV μπορεί
να διασχίσει 1m σίδηρο!**

Για να υπολογίσουμε την απώλεια
ενέργειας ανά μονάδα απόστασης (dE/dx ,
σε MeV/cm),
πρέπει να πολλαπλασιάσουμε το $1/\rho \, dE/dx$
(σε MeV cm²/g) με την πυκνότητα ρ του
υλικού.

“a minimum ionizing particle (MIP)”



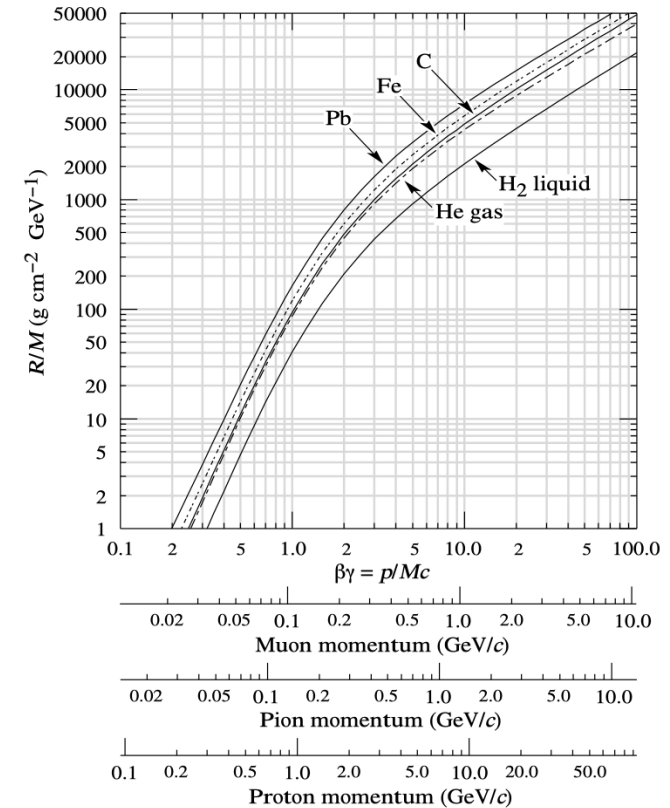
ΣωματΙΑ που σταματούν – εμβέλεια (range)

Σωματίδιο μάζας M και κινητικής ενέργειας E_0 εισέρχεται στην ύλη και χάνει ενέργεια έως ότου σταματήσει, σε απόσταση R (=range=εμβέλεια).

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \frac{-1}{dE/dx} dE$$

$$R(\beta_0 \gamma_0) = \frac{Mc^2}{\rho} \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0 \gamma_0)$$

$$\frac{\rho}{Mc^2} R(\beta_0 \gamma_0) = \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0 \gamma_0)$$



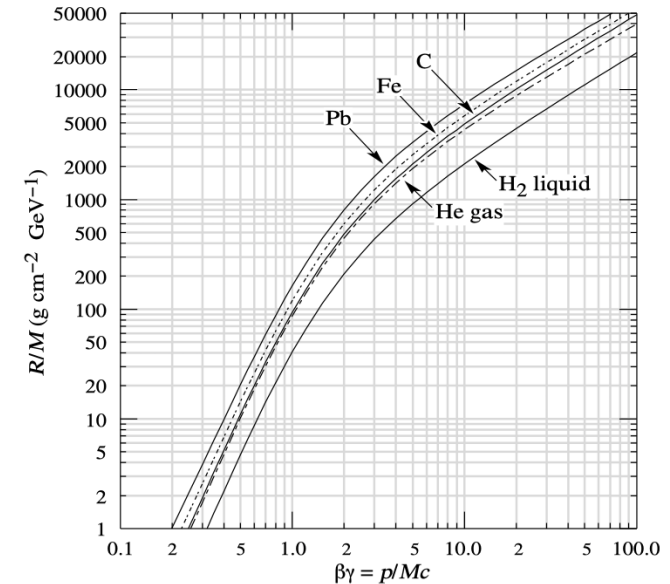
Σωματρία που σταματούν - εμβέλεια (range)

Σωματίδιο μάζας M και κινητικής ενέργειας E_0 εισέρχεται στην ύλη και χάνει ενέργεια έως ότου σταματήσει, σε απόσταση R (=range=εμβέλεια).

$$R(E_0) = \int_{E_0}^0 \frac{-1}{dE/dx} dE$$

$$R(\beta_0 \gamma_0) = \frac{Mc^2}{\rho} \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0 \gamma_0)$$

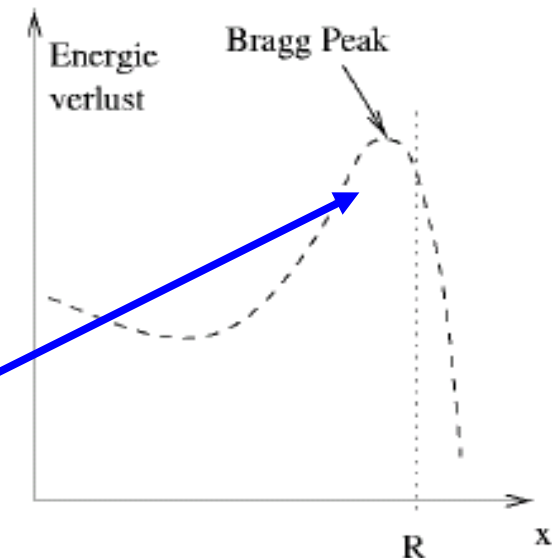
$$\frac{\rho}{Mc^2} R(\beta_0 \gamma_0) = \frac{1}{Z_1^2} \frac{A}{Z} f(\beta_0 \gamma_0)$$



Bragg Peak:

- Για $\beta\gamma > 3$ η απώλεια ενέργειας είναι ~σταθερή (Fermi Plateau)
- Όταν μικραίνει η ενέργεια ενός σωματιδίου, κάτω από $\beta\gamma = 3$, η απώλεια ενέργειας αυξάνεται με $1/\beta^2$

→ Προς το τέλος της διαδρομής ενός βλήματος, η απώλεια ενέργειας είναι μέγιστη
→ εφαρμογές σε θεραπεία καρκίνου

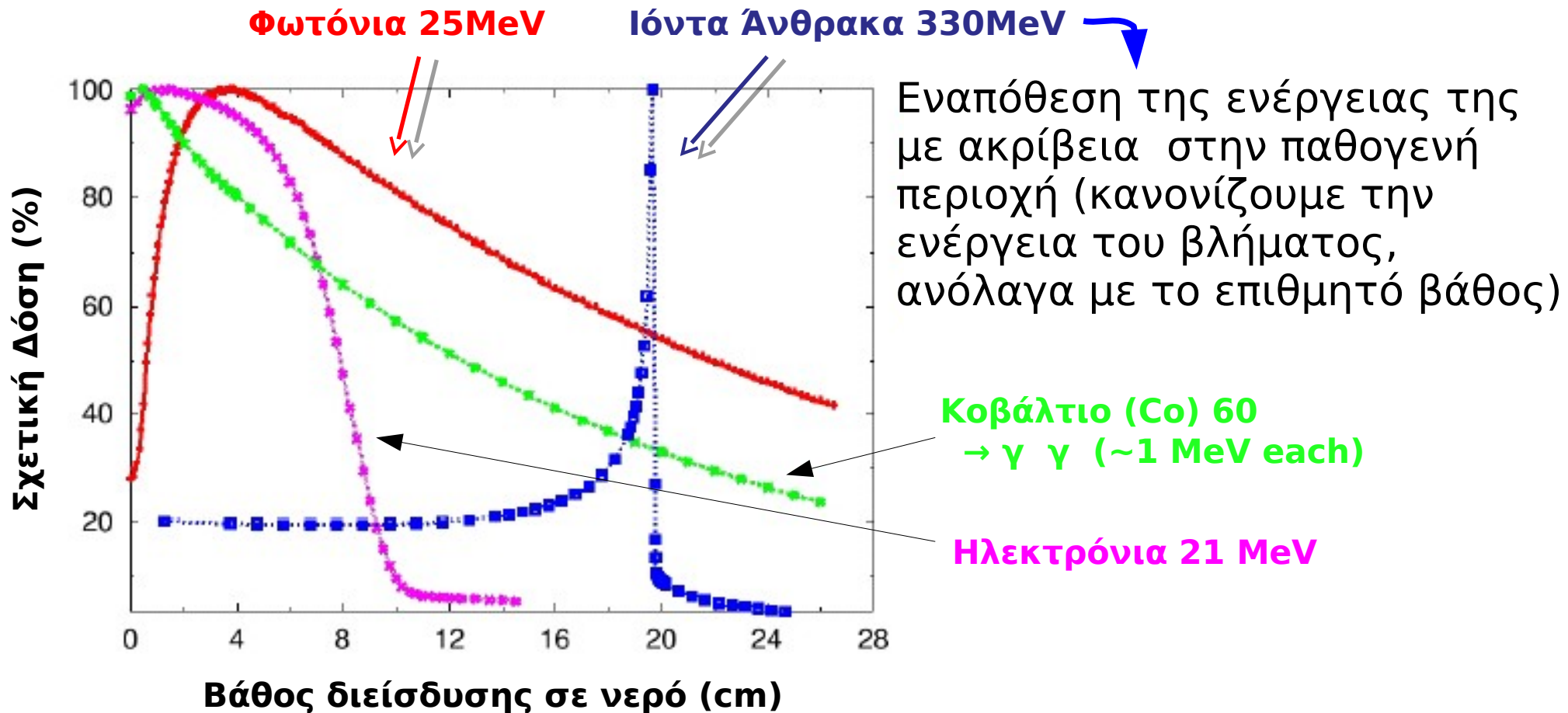


Χωρική κατανομή εναπόθεσης της ενέργειας

Μέση εμβέλεια:

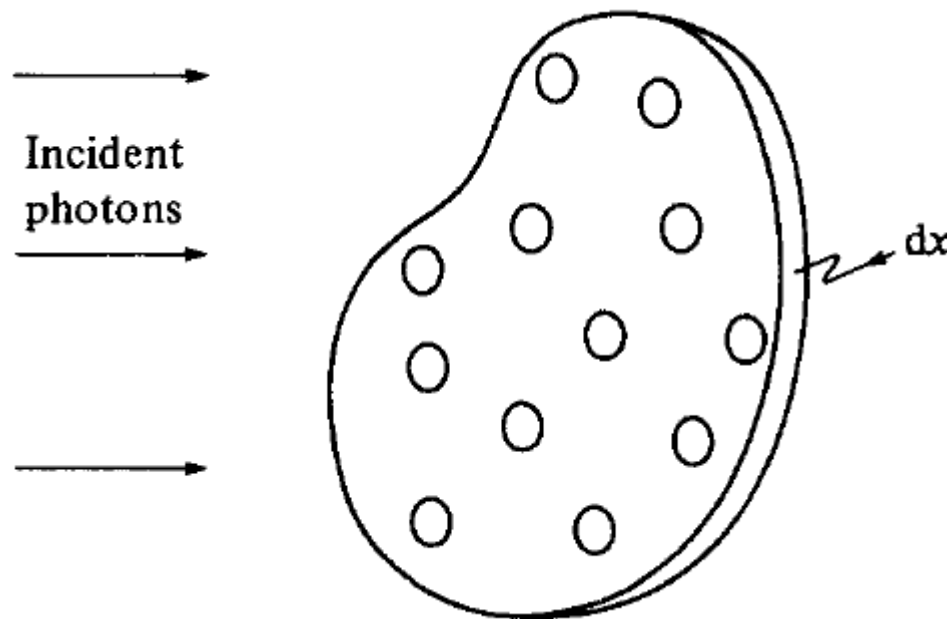
Ένα σωματίδιο-βλήμα χάνει το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του προς το τέλος της διαδρομής του

→ Bragg Peak → **Θεραπεία Καρκίνου**



1β. Αλληλεπίδραση φωτονίων και νετρονίων με την ύλη

Φωτόνια περνώντας μέσα από υλικό



Τι μπορεί να πάθουν:

- Compton
- Φωτοηλεκτρικό
- Δίδυμη γέννηση
- απλά περνάν ή κάνουν ελαστική σκέδαση

$$\frac{dn}{n} = - \frac{\text{area covered by cross-sections}}{\text{total area}}$$

$$= - \frac{(\rho/m_a) S dx \sigma_{\text{tot}}}{S} = - (\rho/m_a) \sigma_{\text{tot}} dx$$

σ_{tot} : ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης
 πιθανότητα αλληλεπίδρασης ανά μονάδα μήκους
 $= \mu$ = "γραμμικός συντελεστής απορρόφησης"

$$n(x) = n(0)e^{-\mu x}$$

$$\mu = \rho \sigma_{\text{tot}} / m_a$$

$$\mu / \rho = \sigma_{\text{tot}} / m_a$$

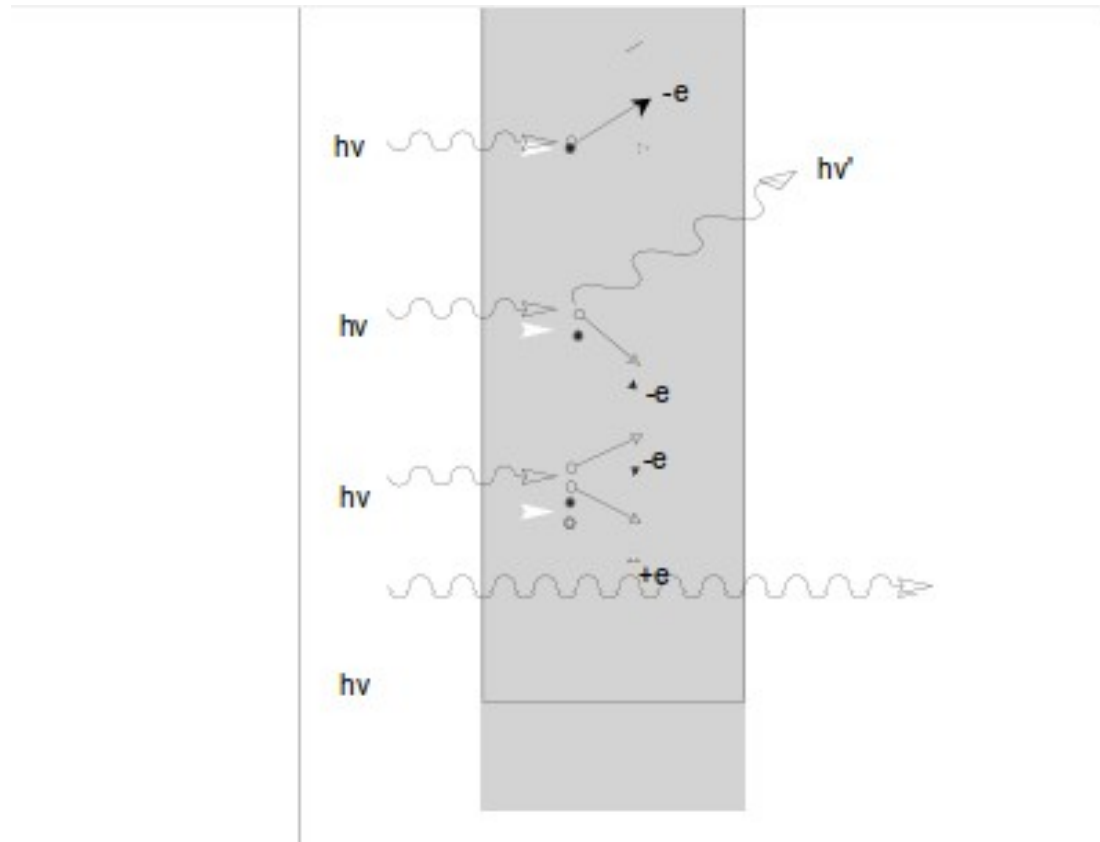
Εκθετική μείωση του αριθμού φωτονίων που περνούν

Γραμμικός συντελεστής εξασθένησης (ή απορρόφησης)

Μαζικός συντελεστής εξασθένησης (ή απορρόφησης)

Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

- Από το βιβλίο
Εργαστηρίου
Πυρηνικής Ι



Σχήμα 2.3.5 Οι 4 πιθανότερες περιπτώσεις έκβασης της πρόσπτωσης φωτονίων γ σε κάποιο υλικό, σχηματικά. Από πάνω προς τα κάτω:

- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με $\Phi\Phi$.
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ΦC .
- Το φωτόνιο αλληλεπιδρά με $\Delta\Gamma$ (αυτό μόνο αν $h\nu \geq 2m_0c^2$).
- Το φωτόνιο δεν αλληλεπιδρά καθόλου με το υλικό.

Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

- Ποσοστό φωτονίων που διέρχονται χωρίς να αλληλεπιδράσουν $= I/I_0$

$$I = I_0 e^{-\mu x} \quad [8.1]$$

όπου I η ένταση της διερχόμενης δέσμης, I_0 η αρχική ένταση, μ ο συντελεστής απορρόφησης και x το πάχος του απορροφητή. Ο συντελεστής απορρόφησης εκφράζεται με δύο τρόπους:

- 1) γραμμικός συντελεστής απορρόφησης, σε μονάδες αντιστρόφου μήκους, πχ. cm^{-1}
- 2) μαζικός συντελεστής απορρόφησης, σε μονάδες επιφάνειας δια μάζα, πχ. cm^2/gr . Ο συντελεστής αυτός προκύπτει από διαίρεση του γραμμικού συντελεστού απορρόφησης με την πυκνότητα του απορροφητή.

Έτσι, ο συντελεστής απορρόφησης είναι ένα μέτρο της αλληλεπίδρασης των φωτονίων με την ύλη:

Μεγάλος συντελεστής απορρόφησης $\mu \rightarrow$ μεγάλη πιθανότητα αλληλεπίδρασης

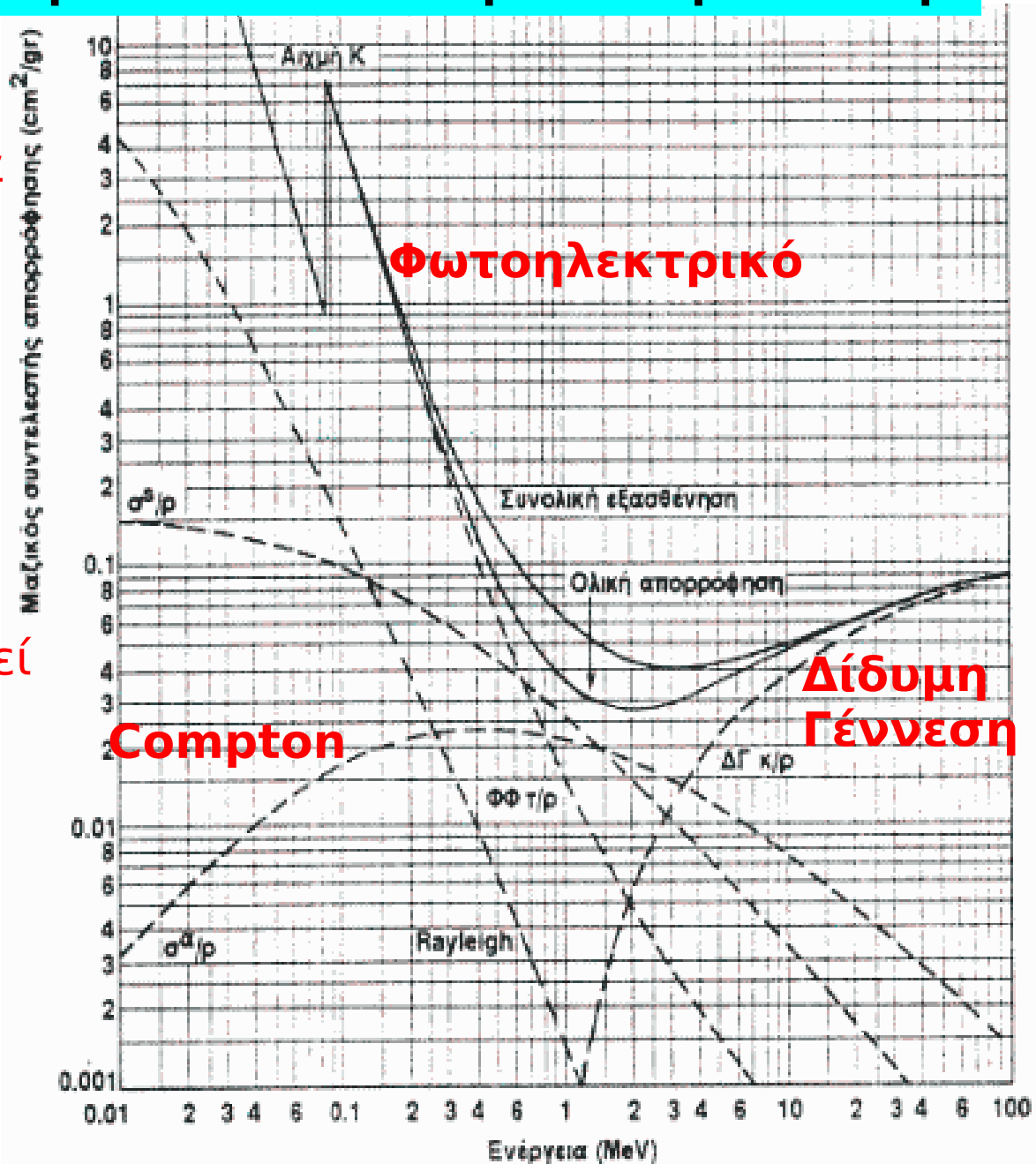
Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

Συντελεστής απορρόφησης μ :
Μεγάλο $\mu \rightarrow$ μεγάλη πιθανότητα αλληλεπίδρασης

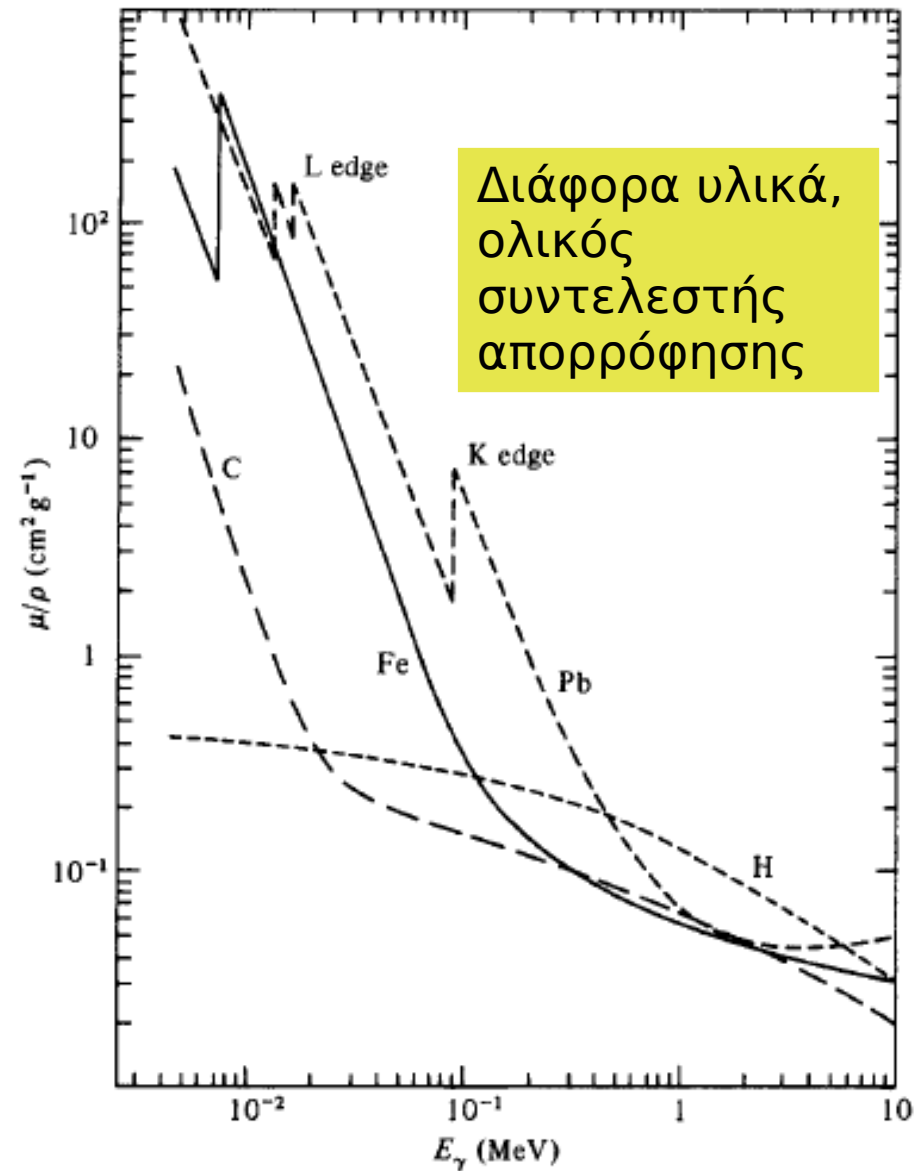
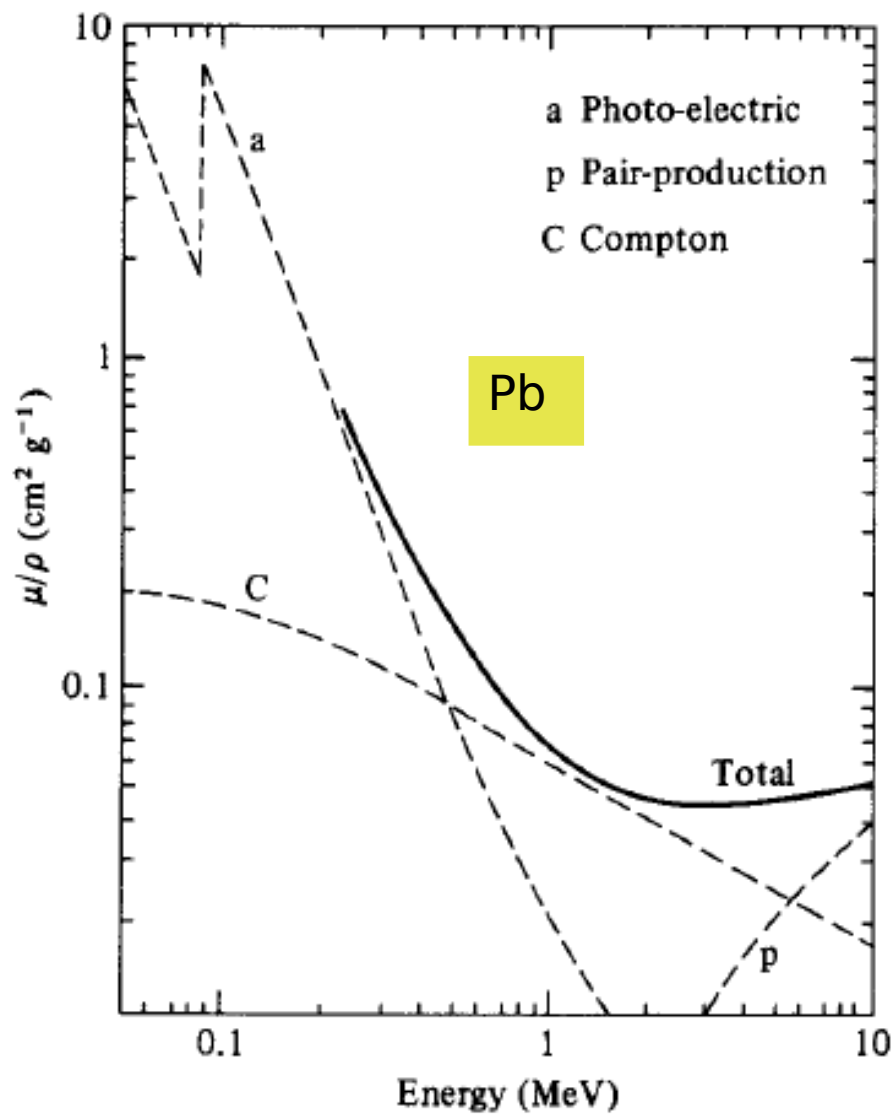
Το κάθε είδος αλληλεπίδρασης έχει διαφορετική πιθανότητα να συμβεί, ανάλογα με την ενέργεια του προσπίπτοντος φωτονίου.

Ανάλογα την ενέργεια, κυριαρχεί ο ένας ή ο άλλος τρόπος:

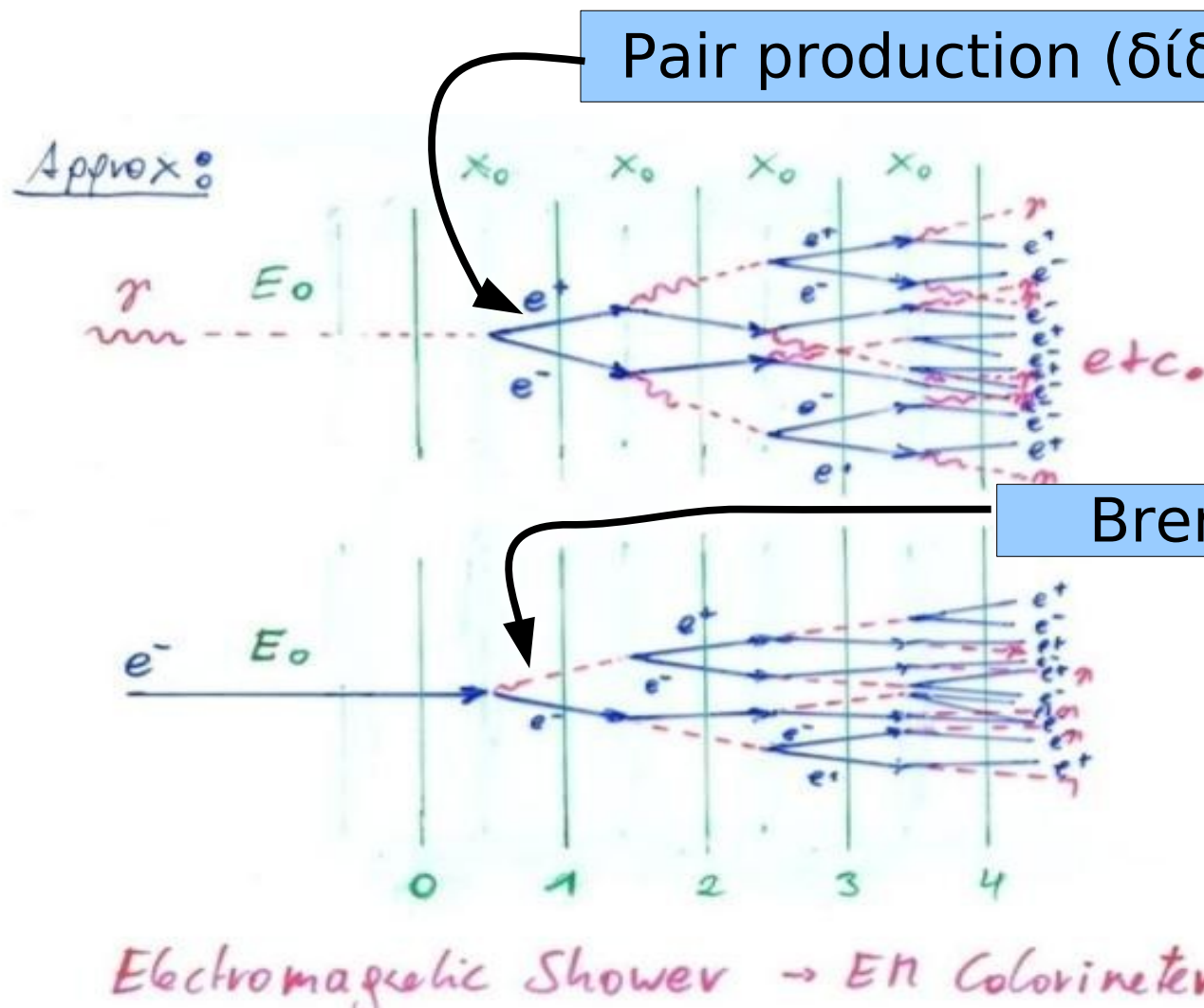
- $E < 0.8 \text{ MeV}$:
κυριαρχεί το φωτοηλεκτρικό
- $E: 0.8 - 3.5 \text{ MeV}$:
 - το Compton
- $E > 3.5 \text{ MeV}$:
η δίδυμη γέννηση



Φωτόνια περνώντας μέσα από υλικό



Υψηλής ενέργειας φωτόνια σε “πυκνή ύλη” - ένας καταιγισμός ΗλεκτροΜαγνητικής ακτινοβολίας (EM shower)



$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{X_0} \quad E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

$$X_0(\gamma) = \frac{9}{7} X_0(e), \text{ όπου } X_0 \equiv X_0(e)$$

Παράδειγμα της διεισδυτικότητας των φωτονίων

Table 14.1. *Ionising path lengths for 1 MeV electrons and 1 MeV α -particles, and 1 MeV photon attenuation lengths, in air and in soft tissue*

	Air (cm)	Soft tissue (cm)
Electron	380	0.43
Alpha particle	0.52	7×10^{-4}
Photon	1.1×10^4	14

(Data from *American Institute of Physics Handbook*, 3rd ed. 1972, New York: McGraw-Hill.)

Μέση ελεύθερη διαδρομή για ιονισμό από ηλεκτρόνια και άλφα σωματίδια ενέργειας 1 MeV,
καθώς και το “μήκος απόσβεσης” για φωτόνια ενέργειας 1 MeV επίσης,
Στον αέρα και στα μη οστεϊκό μέρη του ανθρωπίνου σώματος

Μείωση πληθυσμού δέσμης νετρονίων κατά τη διέλευσή τους από ένα υλικό

Τα νετρόνια μπορούν να κάνουν:

- να μην αλληλεπιδράσουν
- να κάνουν ελαστική σκέδαση: το νετρόνιο δεν χάνει ενέργεια $\rightarrow (n,n)$
- να κάνουν μη-ελαστική σκέδαση:
 - να γίνει **σύλληψη νετρονίου** από πυρήνα που πάει σε διεγερμένη κατάσταση και με επακόλουθη **αποδιέγερση γ** $\rightarrow (n,\gamma)$
 - να γίνει **σύλληψη νετρονίου** από πυρήνα που πάει σε διεγερμένη κατάσταση και με επακόλουθη **αποδιέγερση με εκπομπή α ή πρωτονίου** $\rightarrow (n,\alpha)$ ή (n,p)
 - να γίνει **σύλληψη νετρονίου** από πυρήνα που πάει σε διεγερμένη κατάσταση και με επακόλουθη **αποδιέγερση με εκπομπή νετρονίων** $\rightarrow (n, 2n)$ ή $(n, 3n)$ κλπ.
 - να γίνει **σύλληψη νετρονίου** από πυρήνα που πάει σε διεγερμένη κατάσταση και με επακόλουθη **επαγόμενη σχάση (“fission”)** $\rightarrow (n,f)$

Η ολική ενεργός διατομή αλληλεπίδρασης είναι το άθροισμα των επιμέρους ενεργών διατομών: $\sigma = \sigma(n,n) + \sigma(n,\gamma) + \sigma(n,\alpha) + \sigma(n,p) + \dots$

Η ροή νετρονίων που επιζεί ανεπηρέαστη μετά από διέλευση από πάχος x υλικού (το οποίο υλικό έχει αριθμητική πυκνότητα πυρήνων $= \rho$, και πλήθος πυρήνων $= N$) είναι: $I(x) = I(0) e^{-x/\lambda} = I(0) e^{-N \cdot \sigma \cdot \rho \cdot x} = I(0) e^{-\Sigma \cdot x}$

όπου: $\lambda = \eta$ μέση ελεύθερη διαδρομή των νετρονίων, $\Sigma = N \cdot \sigma$, και $x = \rho \cdot x$

Σ : ονομάζεται “μακροσκοπική ενεργός διατομή”, σε αντίθεση με την “μικροσκοπική ενεργό διατομή” σ που περιγράφει την αλληλεπίδραση 1 νετρονίου με 1 πυρήνα.

Το Σ εκφράζει, όπως και το μ στα φωτόνια, την πιθανότητα αλληλεπίδρασης ανά μονάδα x .

2. Ενεργότητα και μονάδες ραδιενέργειας

Παράρτημα Ε

(Bq, Gr, Sv = Gr*RBE, κλπ)

Μονάδες

- Πόσες διασπάσεις ανα μονάδα χρόνου:
 - **1 Bq = 1 διάσπαση / sec** (Becquerel)
 - $1 \text{ Ci} = 3.7 * 10^{10} \text{ Bq}$ (Curie)
- Δεν δίνουν όμως όλες την ίδια ενέργεια. Οπότε, πόση ενέργεια δίνουν ανά μονάδα όγκου και ανά μονάδα πθκνότητας;
 - **1 Gy = 1 J** απορροφηθείσα ενέργεια **ανά kg** υλικού (Gray)
 - $1 \text{ rad} = 0.01 \text{ Gy}$
- Επίσης, δεν έχει το κάθε Joule ενέργειας το ίδιο βιολογικό αποτέλεσμα. Ανάλογα με το ποιός είναι ο τύπος της ακτινοβολίας, και με πόση ενέργεια πέφτει πάνω μας έχουμε κι άλλον “παράγοντα βιολογικής δράσης” (BRE factors):

- **1 Sv = 1 Gy * BRE**

BRE factors:

1 for X-rays, γ -rays, β -particles and muons,
5 for protons $> 2 \text{ MeV}$,
20 for α -particles.

BRE factors για νετρόνια:

5 for $< 10 \text{ keV}$,
10 for $10\text{--}100 \text{ keV}$,
20 for 100 keV to 2 MeV ,
10 for $2\text{--}20 \text{ MeV}$,
5 for $> 20 \text{ MeV}$.

Δόσεις: από το φυσικό περιβάλλον και από ανθρώπινες δραστηριότητες

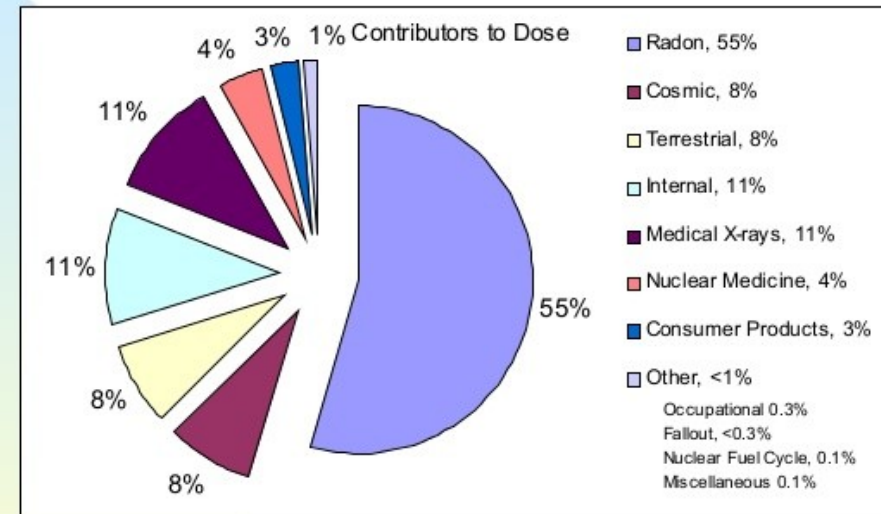
Κάθε χρόνο:

Από ακτινοβολία υποβάθρου:

- Κοσμική ακτινοβολία:
 - 0.25mSv (επιφάνεια θάλασσας)
 - 2mSv (σε ύψος 4km)
- ^{40}K στο σώμα μας: 0.17 mSv (^{40}K = 0.2% του βάρους μας!)
- Ραδιενεργά στοιχεία εδάφους: 0.2-0.4 mSv
- Ραδιενεργό αέριο ραδόνιο (^{222}Rn και ^{220}Rn): ~1 mSv

ΣΥΝΟΛΟ φυσικής ακτινοβολίας:
~ 2 mSv

Where Your Dose Comes From



Contribution of various sources to the total U.S. average effective dose equivalent

[Jump to first page](#)



Από ανθρωπογενείς παράγοντες:

- Διαγνωστικές εξετάσεις, εργασία σε περιβάλλον με ραδιενέργεια κλπ. ΣΥΝΟΛΟ από τέτοιες γενικές δραστηριότητες, εκτός εργασίας, είναι αρκετά μικρότερο από τη συνεισφορά του φυσικού περιβάλλοντος
- - ειδικά όρια για την ανώτατη επαγγελματική δόση (πχ., <50 mSv)
- Η βλάβη στον οργανισμό μας εξαρτάται από πολλούς παράγοντες. Όχι απλά ανάλογη της δόσης, αλλά και ποιό όργανο, διάρκεια ακτινοβολήσης, κλπ