

# Ιατρική Φυσική

Ε.Κ.Π.Α. 2021-2022

Ε. Στυλιάρης – Π. Παπαγιάννης

## Ακτινοπροστασία:

- Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

## Δοσιμετρία:

- Εξωτερική (υπολογιστική, πειραματική)
- Εσωτερική

Π. Ι. Παπαγιάννης  
Αν. Καθ.

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής  
Ιατρική Σχολή Αθηνών



210 7462442



ppapagi@med.uoa.gr



<http://mpl.med.uoa.gr/>

<http://www.rdl.gr/>



## Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

### Δοσιμετρία...?

- Η δόση είναι αυστηρά ορισμένο, φυσικό μέγεθος (βλ. και ICRU report στα βιβλιογραφικά συμπληρώματα στο eclass του μαθήματος: 10EK402)

#### 5.2.5 Absorbed Dose

The *absorbed dose*,  $D$ , is the quotient of  $d\bar{\epsilon}$  by  $dm$ , where  $d\bar{\epsilon}$  is the mean energy imparted by ionizing radiation to matter of mass  $dm$ , thus

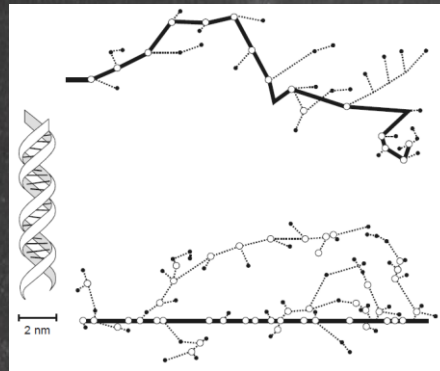
$$D = \frac{d\bar{\epsilon}}{dm}.$$

Unit:  $\text{J kg}^{-1}$

The special name for the unit of absorbed dose is gray (Gy).

## Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας γιατί χρήζει ιδιαίτερης συζήτησης...?

- τα στοχαστικά μεγέθη:
    - λαμβάνουν τυχαίες τιμές που δεν μπορούν να προβλεφθούν παρότι η σχετική κατανομή πιθανότητας μπορεί να είναι γνωστή
    - ορίζονται σε πεπερασμένες περιοχές, οι τιμές τους μεταβάλλονται ασυνεχώς χωρικά και χρονικά, και δεν ορίζεται ο ρυθμός μεταβολής τους
    - η αναμενόμενη τιμή τους είναι η μέση τιμή επαναλαμβανόμενων ανεξάρτητων μετρήσεών τους,  $n$ , καθώς  $n \rightarrow \infty$  (N. μεγάλων αριθμών)
- ! η αναμενόμενη τιμή στοχαστικού μεγέθους είναι μη-στοχαστικό μέγεθος !**



$e^-$  500 eV

Σωματίο  $\alpha$  4 MeV

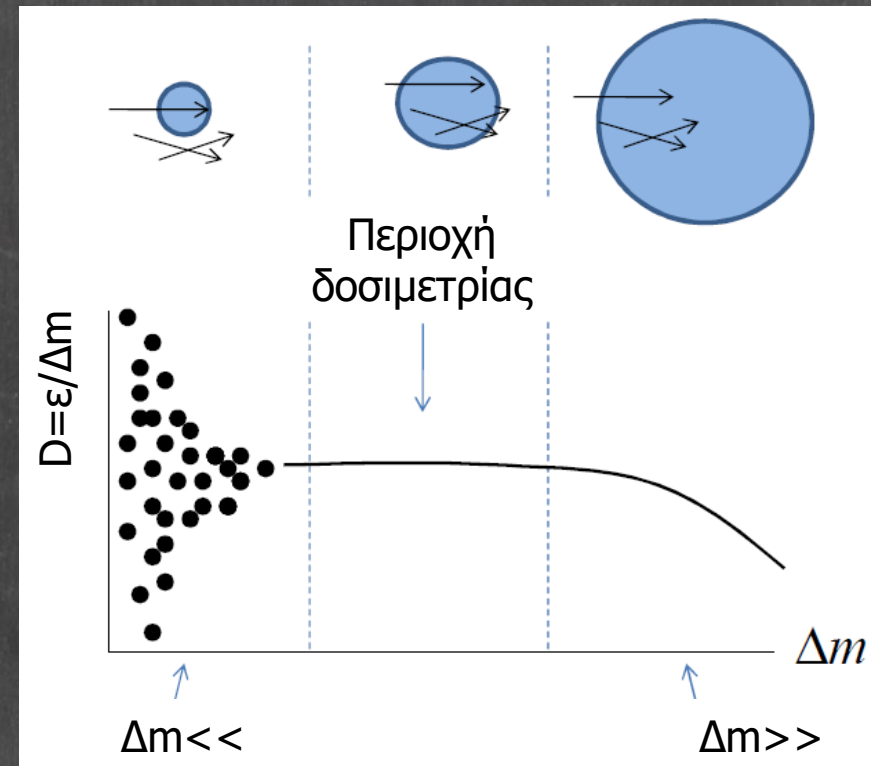


## Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας γιατί χρήζει ιδιαίτερης συζήτησης...?

- η μεταδιδόμενη ενέργεια ( $\epsilon$ ) είναι στοχαστικό μέγεθος τόσο για έμμεσα (μη φορτισμένα σωματίδια) όσο και για άμεσα ιοντίζουσα ακτινοβολία (φορτισμένα σωματίδια)

- ο αναλυτικός υπολογισμός της δόσης είναι αδύνατος (δεν υπάρχει επιλύσιμη εξίσωση που να συνδέει το πεδίο της ακτινοβολίας με τη  $D$ )

- η δόση πρέπει να μετρηθεί σε μια πεπερασμένη μάζα  $\Delta m$  (κεντρικό οριακό θεώρημα) χωρίς να διαταραχθεί το πεδίο της ακτινοβολίας (με ενδιαφέρει η δόση στο σημείο απουσία του μετρητή)



## Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας γιατί χρήζει ιδιαίτερης συζήτησης...?

- ποιά είναι η τάξη μεγέθους της ενέργειας που μεταδίδεται στην ύλη και απορροφάται από αυτή κατά την έκθεση σε ιοντίζουσα ακτινοβολία;
  - στην ακτινοθεραπεία χορηγούνται, τοπικά, δόσεις της τάξης των 60 Gy
  - $L.D._{50/60}=4Gy$  για ολοσωματική έκθεση  
( $1cal=4.18 J$  και  $1Cal=1000 cal$ )
    - !! Το βιολογικό αποτέλεσμα δεν οφείλεται στο ποσό της E που απορροφάται αλλά στον τρόπο με τον οποίο απορροφάται !!
- Η μέτρηση δόσης βάσει του ορισμού της (καλοριμετρία) είναι τεχνικά δύσκολη και πρέπει να καταφύγουμε σε άλλες πειραματικές τεχνικές (ή υπολογιστικές μεθόδους)



## Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- ορίζεται (βλ. και ICRU report στα βιβλιογραφικά συμπληρώματα στο eclass του μαθήματος) ο **αριθμός σωματιδίων**,  $N$ , και η **ακτινοβολούμενη ενέργεια**,  $R$

### 3.1.1 Particle Number, Radiant Energy

The *particle number*,  $N$ , is the number of particles that are emitted, transferred, or received.

Unit: 1

The *radiant energy*,  $R$ , is the energy (excluding rest energy) of the particles that are emitted, transferred or received.

Unit: J

## Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- Για λόγους που προαναφέρθηκαν, θέλουμε να περιγράψουμε το πεδίο της ακτινοβολίας με μη στοχαστικές ποσότητες
  - ορίζεται η Ροή και η Ενεργειακή ροή

### 3.1.3 Fluence, Energy Fluence

The *fluence*,  $\Phi$ , is the quotient of  $dN$  by  $da$ , where  $dN$  is the number of particles incident on a sphere of cross-sectional area  $da$ , thus

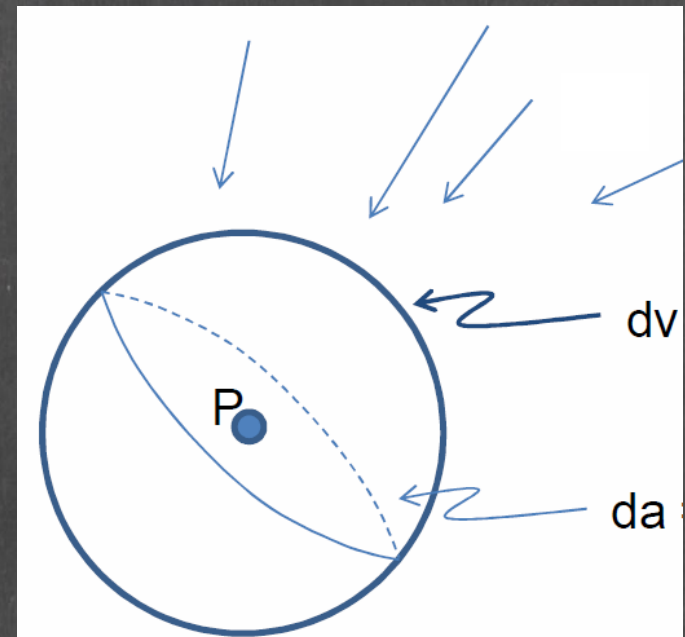
$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

Unit:  $m^{-2}$

The *energy fluence*,  $\Psi$ , the quotient of  $dR$  by  $da$ , where  $dR$  is the radiant energy incident on a sphere of cross-sectional area  $da$ , thus

$$\Psi = \frac{dR}{da}.$$

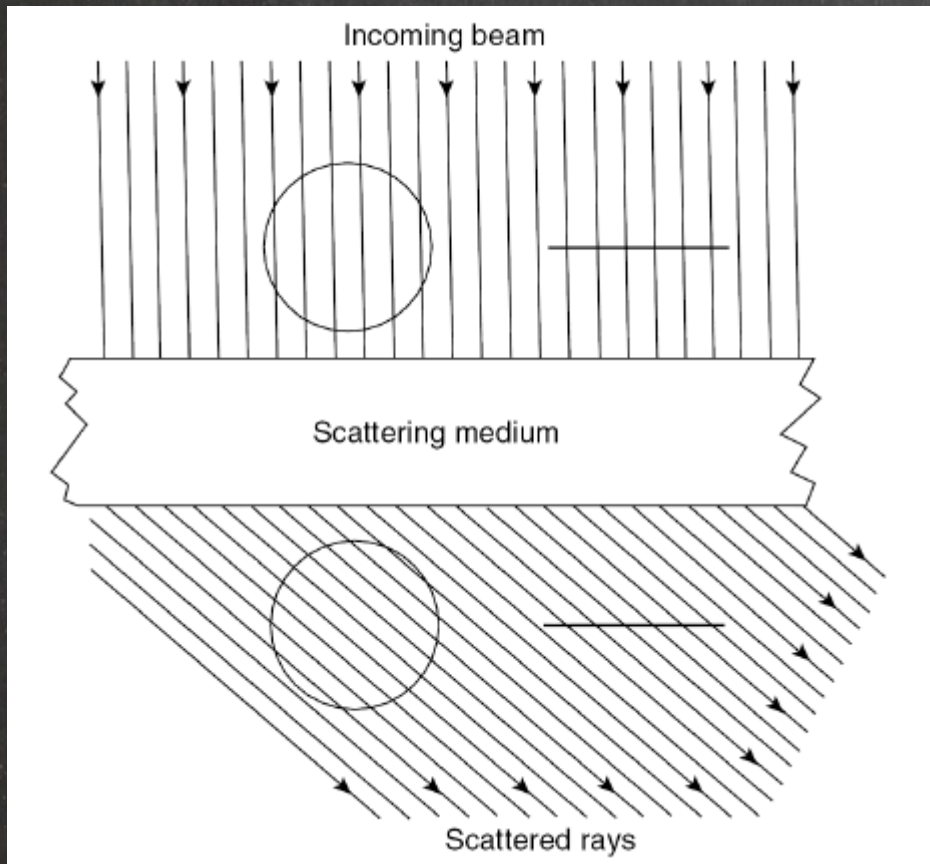
Unit:  $J m^{-2}$





# Γιατί η ροή ορίζεται σε στοιχειώδη σφαίρα;

Διαφορά ροής  $\Phi$  και ροής δια επιπέδου  $\Phi^p$



- $\Phi = \Phi^p$

- $\Phi^{p'} = \Phi^p$

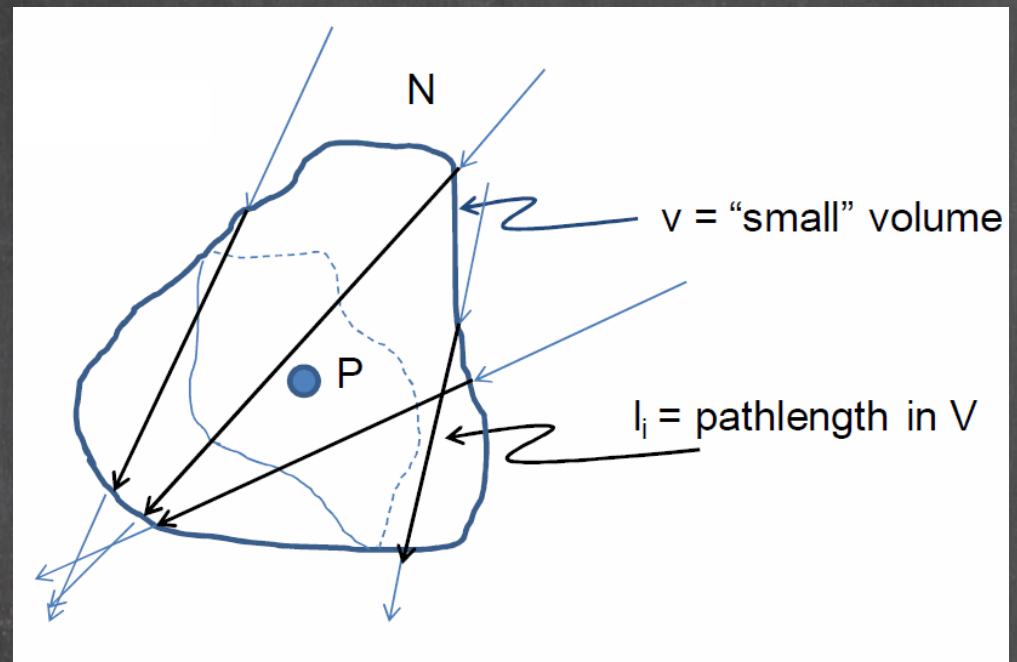
- $\Phi' > \Phi$

- $\Phi^p = \Phi |\cos\theta|$

## Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- η ροή μπορεί επίσης να οριστεί γενικότερα για οποιοδήποτε στοιχειώδη όγκο μέσω του «μήκους τροχιάς» των σωματιδίων

$$\Phi = \lim_{\substack{N \rightarrow \infty \\ V \rightarrow 0}} \left\{ \frac{1}{V} \sum_{i=1}^N l_i \right\}$$





## Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- σε δεδομένο  $t$ , τυχόν σωματίδιο προσδιορίζεται (πέρα από είδος, φορτίο, κτλ) από τη θέση, την κατεύθυνση και την ενέργειά του
- τα μεγέθη που περιγράφουν το πεδίο είναι συνεπώς συναρτήσεις τουλάχιστον 7 συνεχών ανεξάρτητων μεταβλητών (που καθορίζουν ένα πολυδιάστατο φασικό χώρο):
  - θέση  $(x, y, z)$
  - κατεύθυνση  $(\theta, \beta)$
  - ενέργεια  $(E)$
  - χρόνος,  $t$
- πλήρης γνώση του πεδίου σημαίνει γνώση της διαφορικής ροής ως προς κάθε μεταβλητή

$$\Phi'(x, y, z, \theta, \beta, E, t) = \frac{d^7 \Phi}{d(x, y, z, \theta, \beta, E, t)}$$

$$\Phi'(\mu\epsilon\tau.) \Leftrightarrow \frac{d\Phi}{d(\mu\epsilon\tau.)}$$

$$\Phi_{\mu\epsilon\tau.} \Leftrightarrow \frac{d\Phi}{d(\mu\epsilon\tau.)}$$

$$\bullet$$
$$\Phi \Leftrightarrow \frac{d\Phi}{dt}$$

# Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

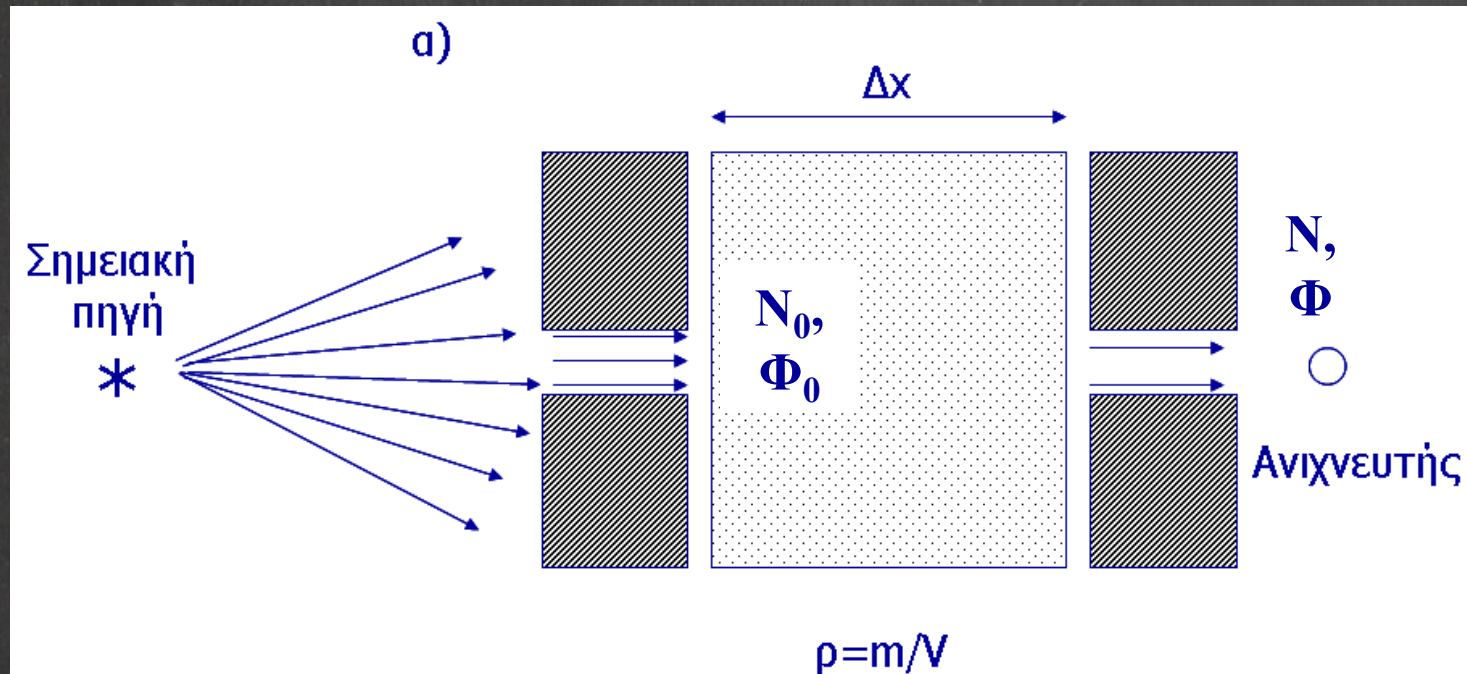
- τα περισσότερα μεγέθη περιγραφής του πεδίου που έχουν οριστεί δεν είναι παρά μερικές παράγωγοι ως προς κάποια(ες) από τις μεταβλητές με τις κατάλληλες μονάδες:

Table 3.1. Scalar radiometric quantities

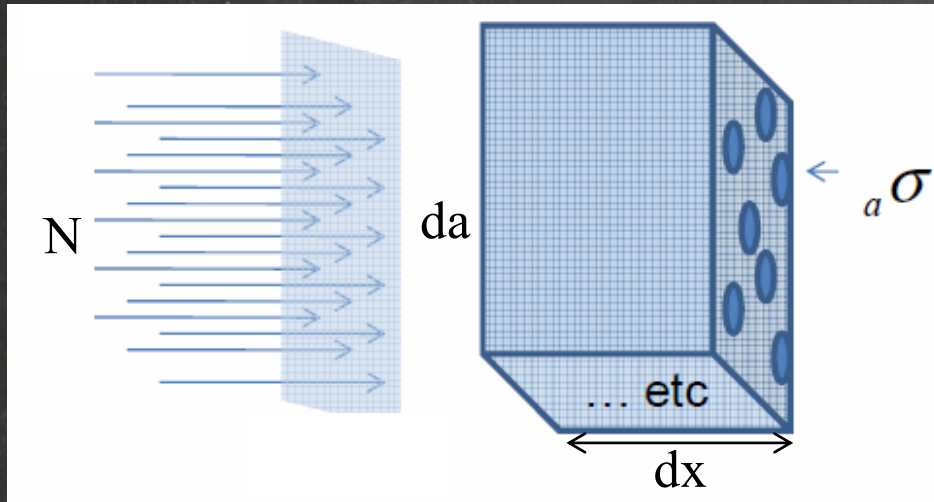
Name <sup>a</sup>	Symbol	Unit	Definition
particle number	$N$	1	–
radiant energy	$R$	J	–
energy distribution of particle number	$N_E$	$J^{-1}$	$dN/dE$
energy distribution of radiant energy	$R_E$	1	$dR/dE$
particle number density	$n$	$m^{-3}$	$dN/dV$
radiant energy density	$u$	$J m^{-3}$	$dR/dV$
energy distribution of particle number density	$n_E$	$m^{-3} J^{-1}$	$dn/dE$
energy distribution of radiant energy density	$u_E$	$m^{-3}$	$du/dE$
flux	$\dot{N}$	$s^{-1}$	$dn/dt$
energy flux	$\dot{R}$	W	$dR/dt$
energy distribution of flux	$\dot{N}_E$	$s^{-1} J^{-1}$	$dN/dE$
energy distribution of energy flux	$\dot{R}_E$	$s^{-1}$	$dR/dE$
fluence	$\Phi$	$m^{-2}$	$dN/da$
energy fluence	$\Psi$	$J m^{-2}$	$dR/da$
energy distribution of fluence	$\Phi_E$	$m^{-2} J^{-1}$	$d\Phi/dE$
energy distribution of energy fluence	$\Psi_E$	$m^{-2}$	$d\Psi/dE$
fluence rate	$\dot{\Phi}$	$m^{-2} s^{-1}$	$d\Phi/dt$
energy-fluence rate	$\dot{\Psi}$	$W m^{-2}$	$d\Psi/dt$
energy distribution of fluence rate	$\dot{\Phi}_E$	$m^{-2} s^{-1} J^{-1}$	$d\dot{\Phi}/dE$
energy distribution of energy-fluence rate	$\dot{\Psi}_E$	$m^{-2} s^{-1}$	$d\dot{\Psi}/dE$
particle radiance	$\dot{\Phi}_\Omega$	$m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$	$d\dot{\Phi}/d\Omega$
energy radiance	$\dot{\Psi}_\Omega$	$W m^{-2} sr^{-1}$	$d\dot{\Psi}/d\Omega$
energy distribution of particle radiance	$\dot{\Phi}_{\Omega,E}$	$m^{-2} s^{-1} sr^{-1} J^{-1}$	$d\dot{\Phi}_\Omega/dE$
energy distribution of energy radiance	$\dot{\Psi}_{\Omega,E}$	$m^{-2} s^{-1} sr^{-1}$	$d\dot{\Psi}_\Omega/dE$



# Εξασθένιση ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη



# Εξασθένιση ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη



- Έστω  ${}_a\sigma$  η ατομική ενεργός διατομή του υλικού
- η μείωση του αριθμού των φωτονίων στον όγκο του απορροφητή που ορίζεται από στοιχειώδες πάχος απορροφητή  $dx$  και διατομή δέσμης  $da$ , θα ισούται με τον αριθμό των αλληλεπιδράσεων, ή το γινόμενο της πιθανότητας να «πετύχω» ένα άτομο ( ${}_a\sigma N/da$ ) με τον αριθμό των ατόμων ανά μονάδα όγκου ( $\rho N_A/AB$ )

$$-\frac{dN}{dV} = \frac{{}_a\sigma N}{da} \frac{\rho N_A}{AB} \Leftrightarrow -\frac{dN}{dx da} = \frac{{}_a\sigma N}{da} \frac{\rho N_A}{AB}$$

$$\frac{dN}{dx} = -\left({}_a\sigma \frac{\rho N_A}{AB}\right)N$$

$$\frac{d\Phi}{dx} = -\left({}_a\sigma \frac{\rho N_A}{AB}\right)\Phi$$

## 4.1 Cross Section

The *cross section*,  $\sigma$ , of a target entity, for a particular interaction produced by incident charged or uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of  $N$  by  $\Phi$ , where  $N$  is the mean number of such interactions per target entity subjected to the particle fluence  $\Phi$ , thus

$$\sigma = \frac{N}{\Phi}$$

Unit:  $m^2$



# Ο νόμος εξασθένισης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη

$$\frac{dN}{dx} = -\left(\sigma \frac{\rho N_A}{AB}\right)N \rightarrow \frac{dN}{N} = -\mu dx \Rightarrow N = N_0 e^{-\mu x}$$
$$\frac{d\Phi}{dx} = -\left(\sigma \frac{\rho N_A}{AB}\right)\Phi \rightarrow \frac{d\Phi}{\Phi} = -\mu dx \Rightarrow \Phi = \Phi_0 e^{-\mu x}$$

• Όπου  $\mu$ :

$$\mu = \frac{dN}{N} \frac{1}{dx}, [\mu] = m^{-1}$$

ο αποκαλούμενος **γραμμικός συντελεστής εξασθένισης** ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, με μονάδες αντίστροφου μήκους

- Αποτελεί μέτρο της πιθανότητας αλληλεπίδρασης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας ανά μονάδα διαδρομής σε ένα υλικό

# Ο νόμος εξασθένισης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη

$$N = N_0 \exp(-\mu x)$$

ή

$$\Phi = \Phi_0 \exp(-\mu x)$$

- η πιθανότητα φωτόνιο να φτάσει σε βάθος  $x$  χωρίς να αλληλεπιδράσει (ή το ποσοστό των φωτονίων που φτάνουν σε βάθος  $x$  χωρίς να αλληλεπιδράσουν):  $\exp(-\mu x)$
- ορίζεται η μέση ελεύθερη διαδρομή φωτονίου (mean free path):

$$\lambda = 1/\mu$$

- η πιθανότητα φωτόνιο να αλληλεπιδράσει σε βάθος μεταξύ  $x$  και  $x+dx$  (ή το ποσοστό των φωτονίων που θα αλληλεπιδράσουν):  $\exp(-\mu x) \mu dx$



# Ο νόμος εξασθένισης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη

## ΠΡΟΣΟΧΗ ... !

Ο υπολογισμός του αριθμού αλληλεπιδράσεων σε πάχος απορροφητή  $x$  βάσει του ορισμού του  $\mu$ , ως:

$$dN = \mu N dx$$

ισοδυναμεί με την προσέγγιση:

$$e^{-\mu x} \approx 1 - \mu x$$

ώστε:

$$\Delta N = N_0 - N = N_0(1 - e^{-\mu x}) \approx N_0 \mu x$$

Η προσέγγιση αυτή είναι ακριβής εντός του 0,1% όταν  $\mu x < 0,05$   
(εξασθένιση < 5%)

# Ο νόμος εξασθένισης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη

- πάχος υποδιπλασιασμού & υποδεκαπλασιασμού του αριθμού φωτονίων ή της ροής δέσμης φωτονίων:

$$x_{1/2} \equiv HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$x_{1/10} \equiv TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

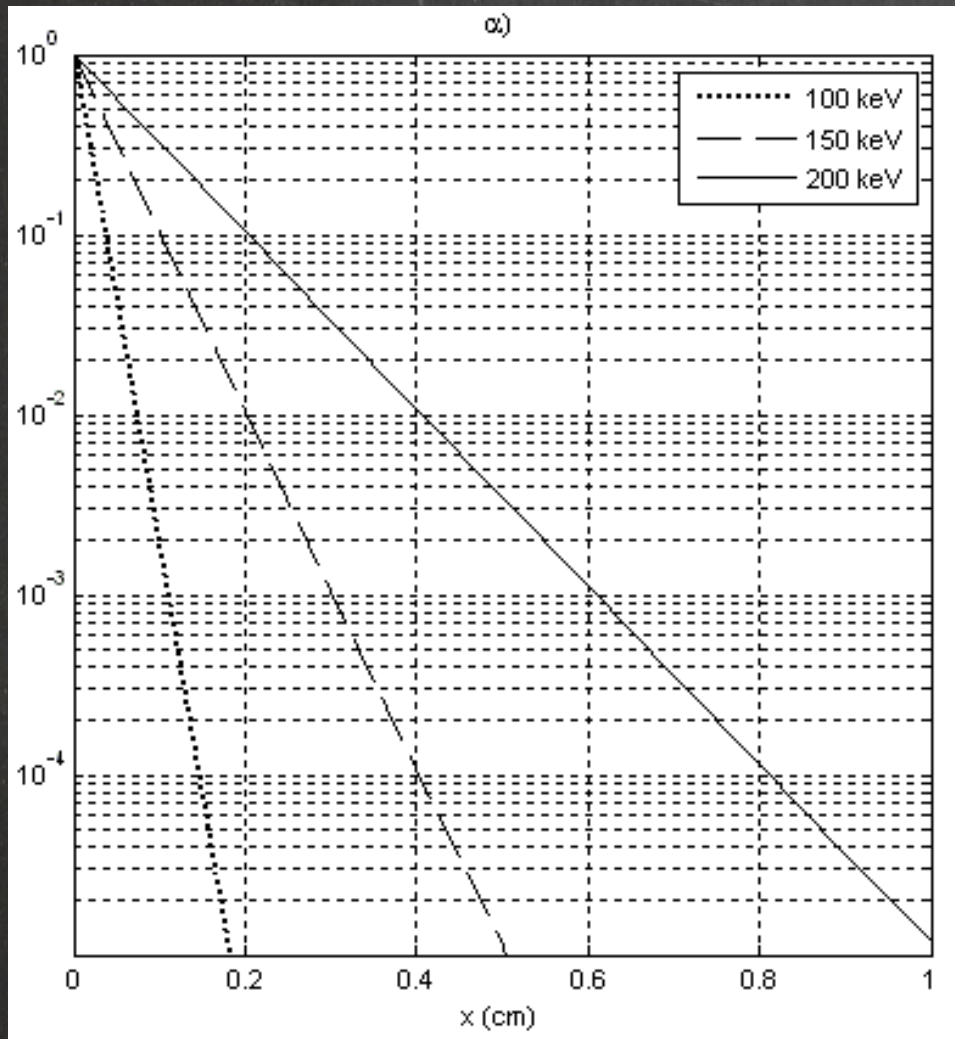
$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}}$$

$$N = N_0 \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{x}{TVL}}$$

- πρακτικοί δείκτες στην ακτινοπροστασία & τον χαρακτηρισμό δέσμης



Από ποιους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό της  
εξασθένισης ιοντιζουσας Η/Μ ακτινοβολίας  
κατά τη διαδρομή της στην ύλη  
(δηλαδή ο  $\mu$ );



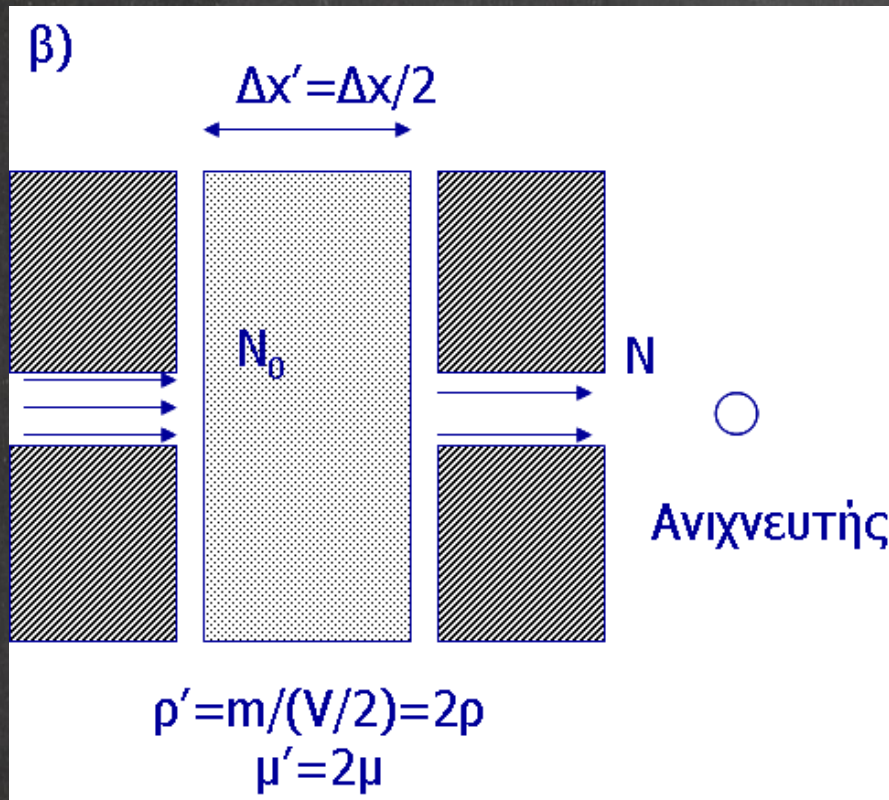
• Ενέργεια φωτονίων,  $E$

Υλικό,  $Z$

και πυκνότητα ...

$$\mu = (a \sigma \frac{\rho N_A}{AB})$$

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό της  
εξασθένισης ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας  
κατά τη διαδρομή της στην ύλη  
(δηλαδή ο  $\mu$ );



$$\mu = (a \sigma \frac{\rho N_A}{AB})$$

$$\mu = \mu(E, Z, \rho)$$

$$\mu / \rho = \mu(E, Z)$$

#### 4.2 Mass Attenuation Coefficient

The *mass attenuation coefficient*,  $\mu/\rho$ , of a material, for uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of  $dN/N$  by  $\rho dl$ , where  $dN/N$  is the mean fraction of the particles that experience interactions in traversing a distance  $dl$  in the material of density  $\rho$ , thus

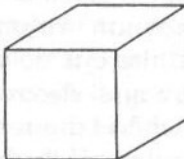
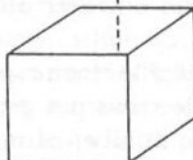
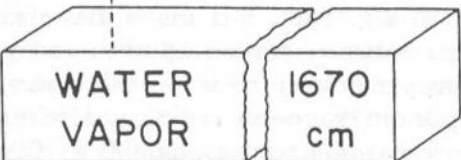
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dN}{dl N}$$

Unit:  $\text{m}^2 \text{kg}^{-1}$



# Διαφορετικές εκφράσεις του συντελεστή εξασθένισης

Γραμμικός,  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως  $x$  σε  $\text{cm}$   
 και Μαζικός,  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως  $\rho x$  σε  $\text{g}/\text{cm}^2$

50 keV		Density ( $\text{gm}/\text{cm}^3$ )	Thickness of $1 \text{ gm}/\text{cm}^2$
Linear Attenuation Coefficient ( $\text{cm}^{-1}$ )	Mass Attenuation Coefficient ( $\text{cm}^2/\text{gm}$ )		
0.214	0.214	1	 WATER 1 cm
0.196	0.214	0.917	 ICE 1.09 cm
0.000128	0.214	0.000598	 WATER VAPOR 1670 cm

## Υπολογισμός συντελεστών αλληπίδρασης για μόρια/μίγματα

$$\sigma_{A_X B_Y} = X \sigma_A + Y \sigma_B$$

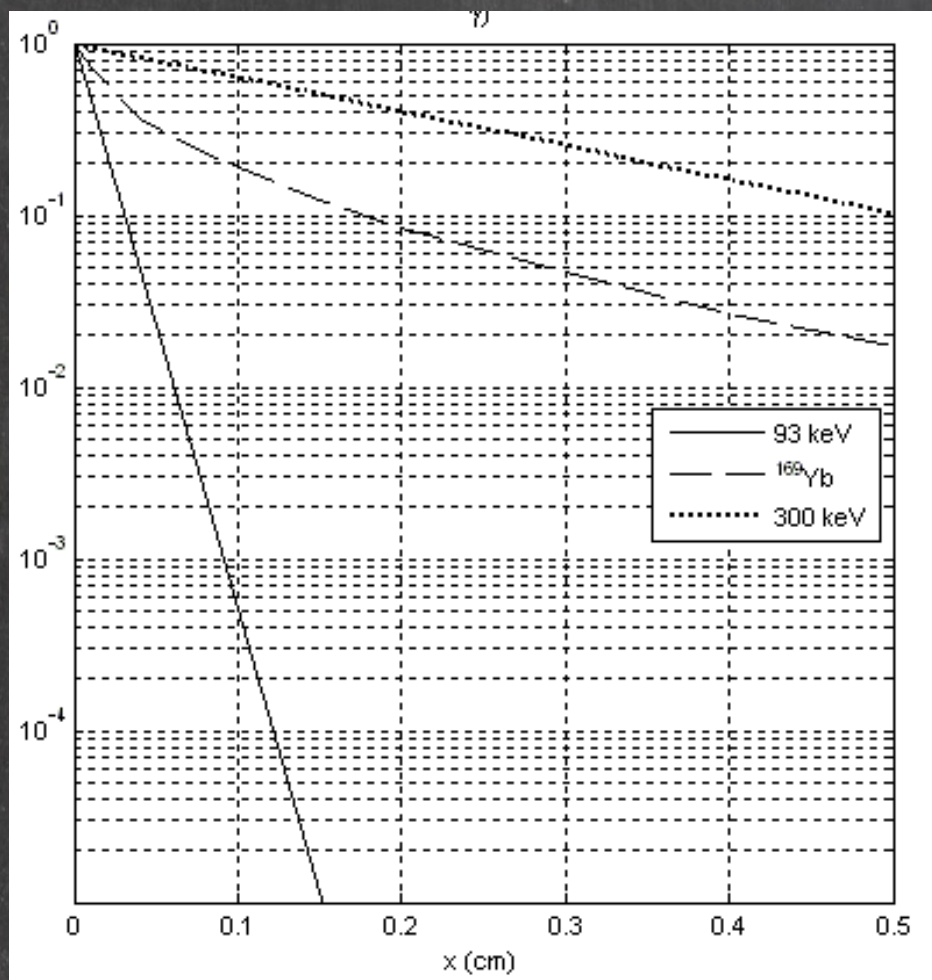
$$\left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{A_X B_Y} = \frac{X A B_A}{M B_{A_X B_Y}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_A + \frac{Y A B_B}{M B_{A_X B_Y}} \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_B$$

$$\left( \frac{\mu}{\rho} \right)_{A, B, \dots} = (\% \kappa. \beta.)_A \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_A + (\% \kappa. \beta.)_B \left( \frac{\mu}{\rho} \right)_B + \dots$$



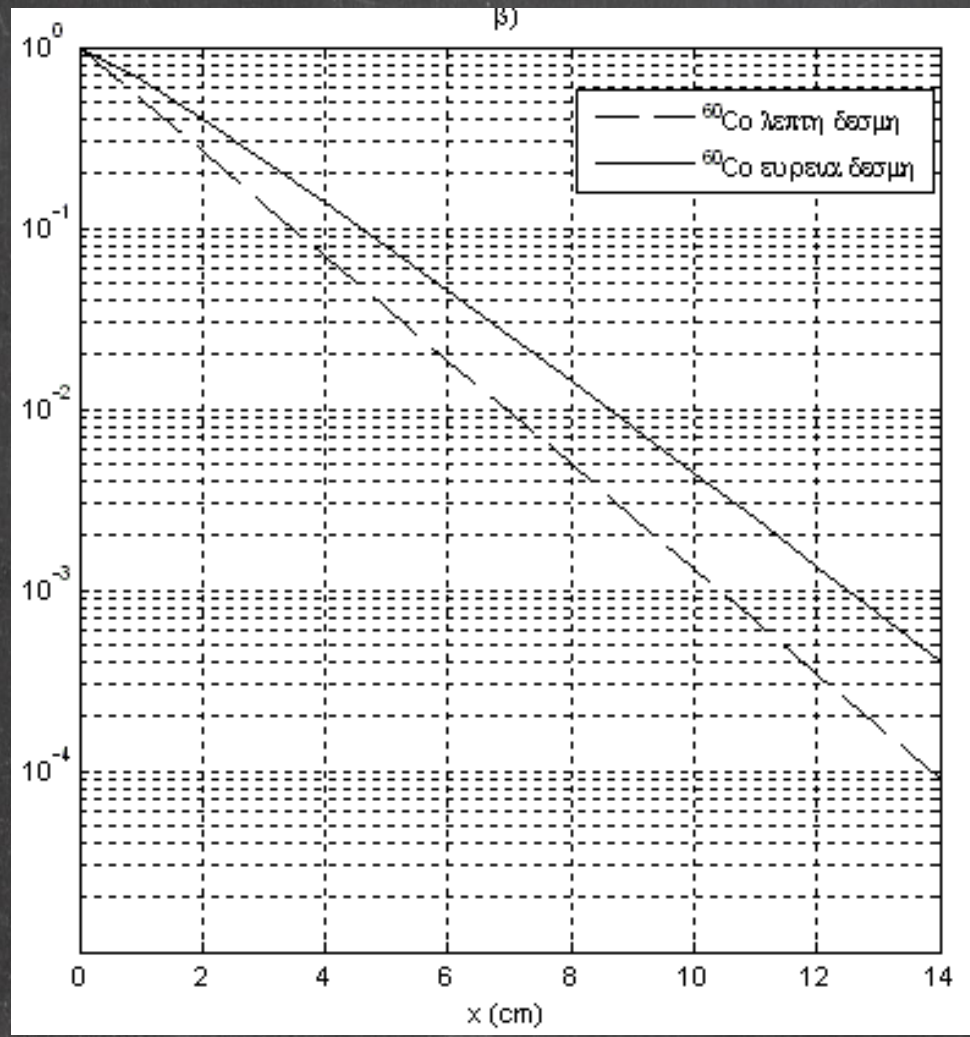
# Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

Μόνο για μονο-ενεργειακές δέσμες.  
Για πολυ-ενεργειακές δέσμες: ο  $\mu$  εξαρτάται από το φάσμα που μεταβάλλεται με το βάθος



# Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

Μόνο σε συνθήκες "λεπτής" δέσμης ή "καλής" γεωμετρίας.  
Εξασθένηση δεν σημαίνει απορρόφηση και σε συνθήκες "ευρείας" δέσμης  
ή "κακής" γεωμετρίας:

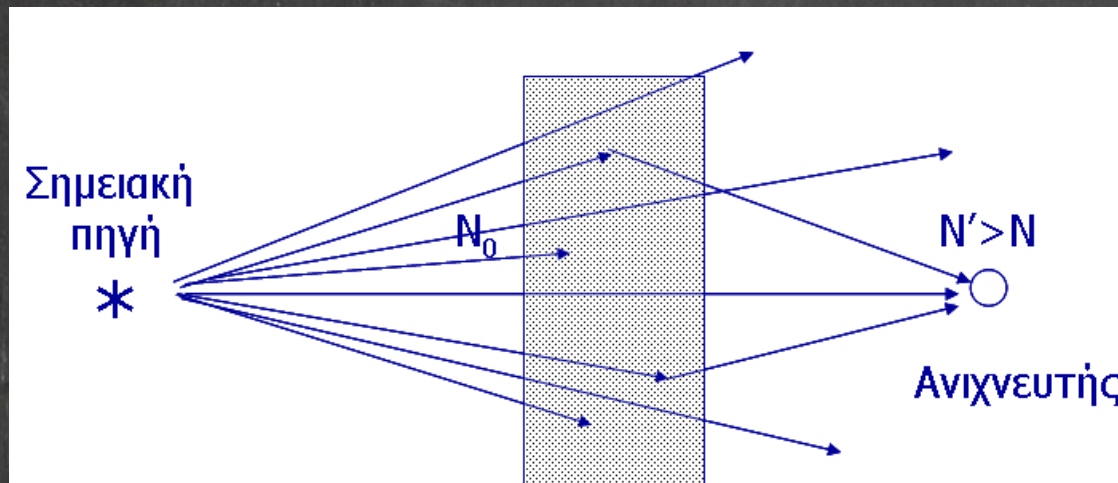




## “κακή” γεωμετρία της δέσμης...

$$N = N_0 \exp(-\mu x) B(x, E, S, I)$$

όπου ο παράγοντας  $B$  καλείται **παράγοντας επαύξησης** και εξαρτάται από την ενέργεια των φωτονίων, το πάχος του υλικού, τη διατομή της δέσμης και την απόσταση του ανιχνευτή από το υλικό.



## Ενέργεια που αφαιρείται από τη δέσμη

- Μπορώ να υπολογίσω σε κάθε σημείο τυχόν υλικού την ενέργεια που αφαιρείται από την πρωτογενή δέσμη των φωτονίων αν ξέρω την ενεργειακή ροή της
  - Η ποσότητα αυτή συχνά αναφέρεται ως **TERMA** (Total Energy Released per unit Mass):

$$TERMA \equiv T \equiv \frac{\mu}{\rho} \Psi$$

$$[T] = \frac{J}{kg}$$

- Έχει τις ίδιες μονάδες με τη δόση αλλά δεν ισούται με τη δόση καθώς η ενέργεια που αφαιρείται μπορεί να μην απορροφηθεί τοπικά (σε μάζα  $dm$  περί του υπό μελέτη σημείου)



## Πόση από την ενέργεια που αφαιρείται απορροφάται;

- Η ενέργεια που αφαιρείται από τη δέσμη μοιράζεται σε διαφορετικά σωματίδια και με διαφορετικό τρόπο σε κάθε είδος αλληλεπίδρασης φωτονίων – ύλης τα οποία συμβαίνουν με διαφορετική σχετική πιθανότητα συναρτήσει του υλικού και της ενέργειας φωτονίων

$$\mu = \mu_{\text{coh}} + \mu_{\text{ph}} + \mu_{\text{incoh}} + \mu_{\text{pp}}$$

$$\mu/\rho = \mu_{\text{coh}}/\rho + \mu_{\text{ph}}/\rho + \mu_{\text{incoh}}/\rho + \mu_{\text{pp}}/\rho$$

- Ενδιαφέρει η ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια μιας και λόγω της μικρής τους εμβέλειας σημαντικό μέρος της θα απορροφηθεί τοπικά

# Ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια

- Η ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια υπολογίζεται με τη βοήθεια του **μαζικού συντελεστή μεταφοράς ενέργειας**

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{\mu}{\rho} \frac{\langle T e^-, e^+ \rangle}{E} = \frac{\mu}{\rho} f$$

- $f \leq 1$  και άρα:  $\frac{\mu_{tr}}{\rho} \leq \frac{\mu}{\rho}$

- για μόρια και μίγματα υπολογίζεται όπως και ο  $\mu/\rho$

## 4.3 Mass Energy-Transfer Coefficient

The *mass energy-transfer coefficient*,  $\mu_{tr}/\rho$ , of a material, for uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of  $dR_{tr}/R$  by  $\rho dl$ , where  $dR_{tr}$  is the mean energy that is transferred to kinetic energy of charged particles by interactions of the uncharged particles of incident radiant energy  $R$  in traversing a distance  $dl$  in the material of density  $\rho$ , thus

$$\frac{\mu_{tr}}{\rho} = \frac{1}{\rho dl} \frac{dR_{tr}}{R}$$

Unit:  $m^2 kg^{-1}$



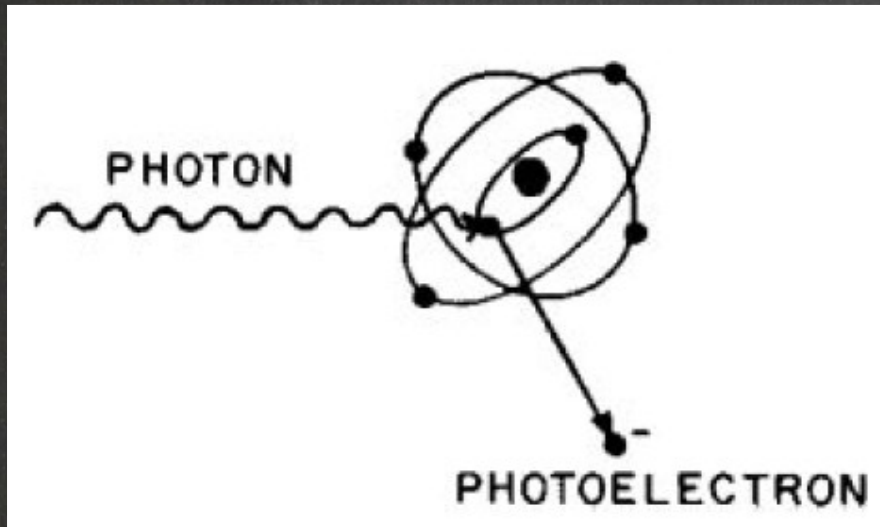
# ΣΥΜΦΩΝΗ ΣΚΕΔΑΣΗ

- Δεν συμβαίνει ιονισμός
- Δεν μεταφέρεται ενέργεια στην ύλη
- Σημειώνεται μόνο μικρή αλλαγή στη κατεύθυνση

**Ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα  
σωματίδια σε κάθε είδος αλληλεπίδρασης**



# ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ



- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το  $e^-$  εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια:

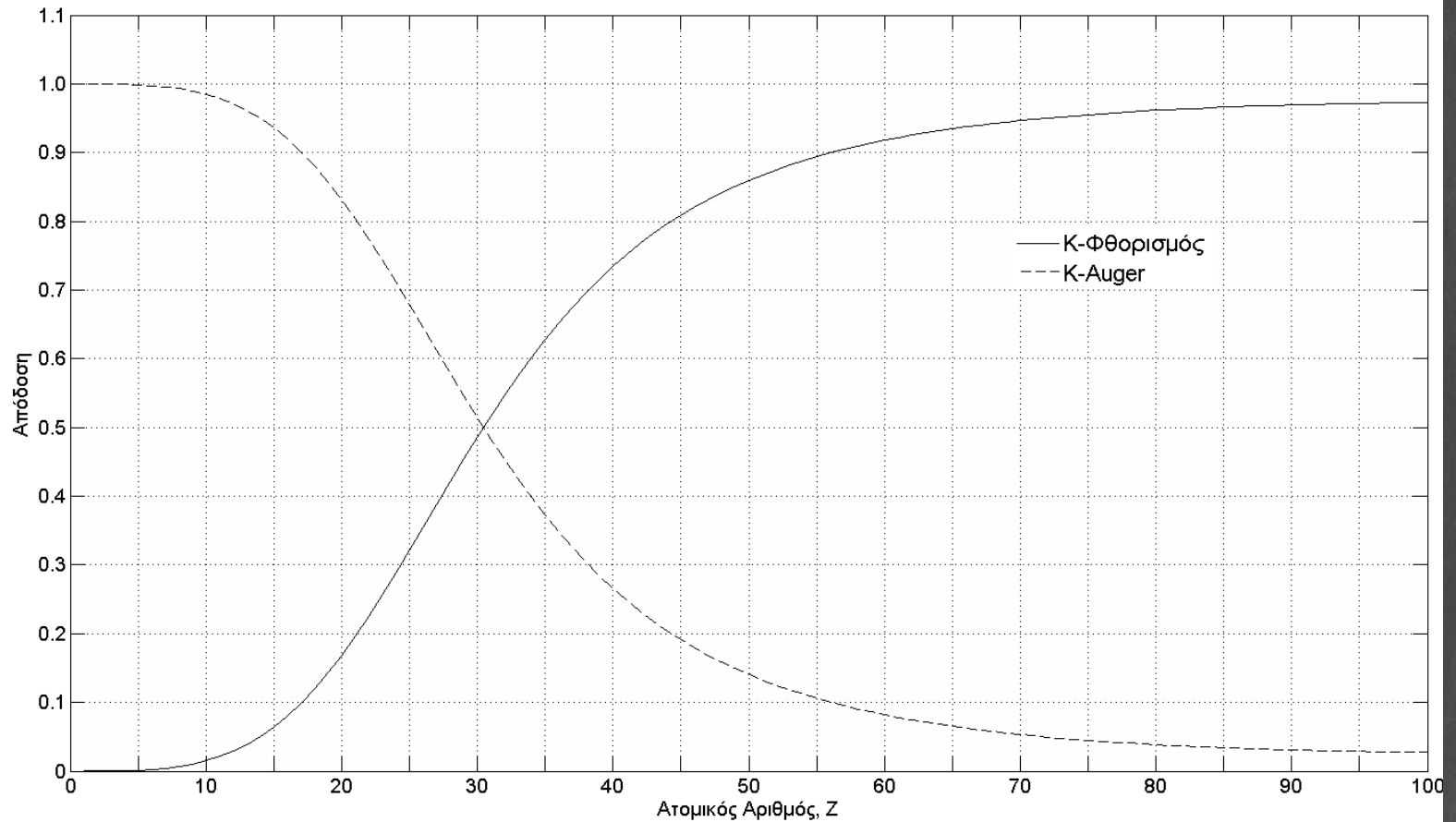
$$T_e = E - E_b$$

$$f^{ph} = 1 - \frac{E_b}{E}$$

- Για βιολογικούς ιστούς  $E_b \ll$
- Το κενό συμπληρώνεται με εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων Auger

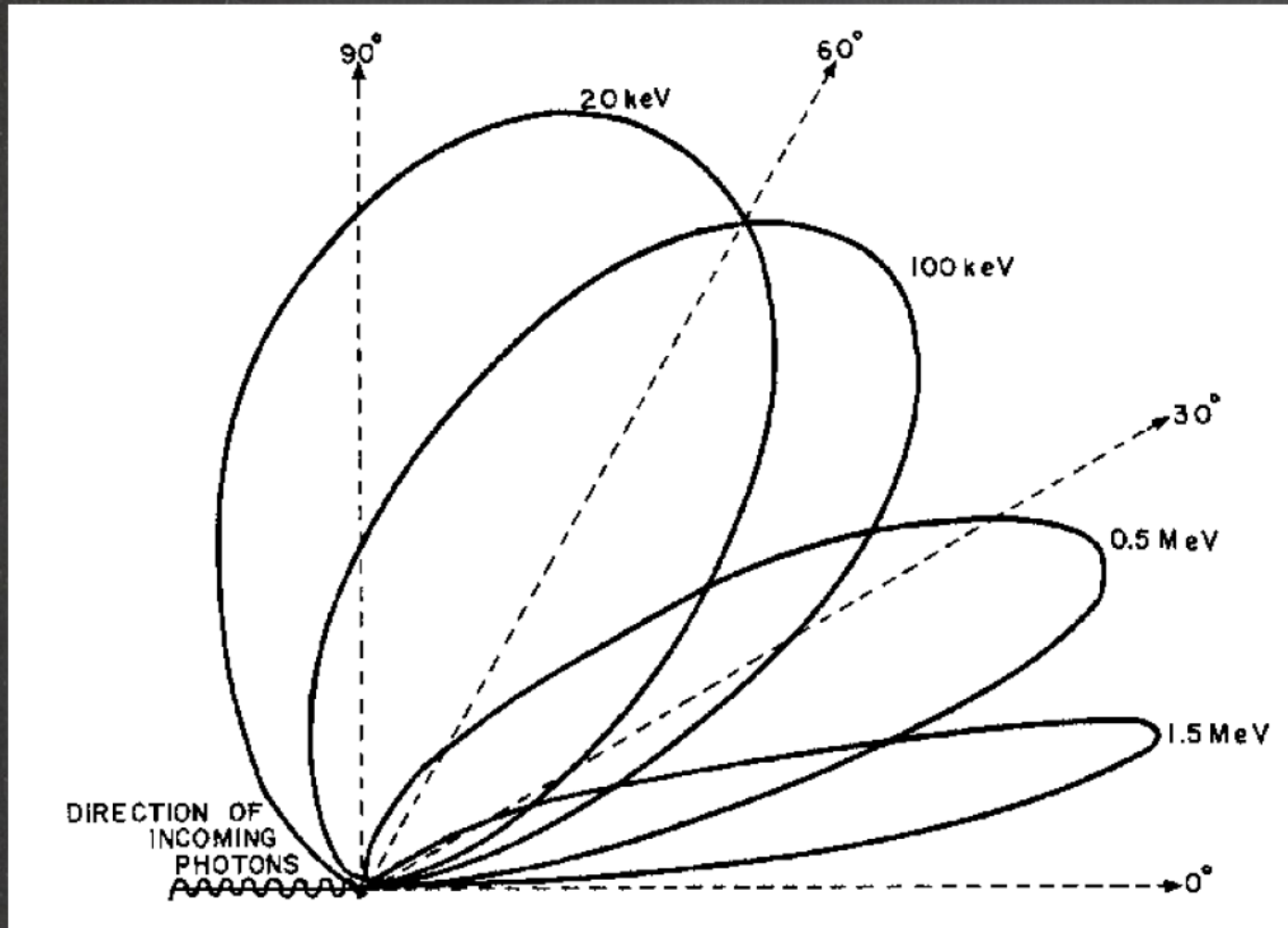
# Σχετική πιθανότητα εκπομπής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας και ηλεκτρονίων Auger συναρτήσει του ατομικού αριθμού

$$f^{ph} = 1 - \frac{E_X}{E}$$

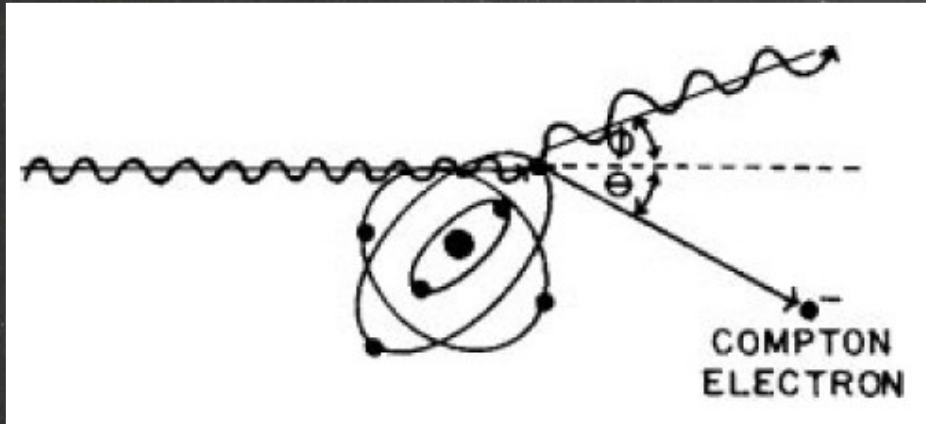




# Κατανομή της γωνίας εκπομπής των φωτοηλεκτρονίων ως προς τη διεύθυνση του αρχικού φωτονίου



# ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON



- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το φωτόνιο σκεδάζεται σε γωνία  $\phi$  με ενέργεια:

$$E_{sc} = E \frac{1}{1 + (E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}$$

- Το  $e^-$  εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια:

$$T_e = E - E_{sc} = E \frac{(E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}{1 + (E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}$$

$$\tan \theta = \frac{1}{(1 + E / m_e c^2) \tan(\phi / 2)}$$



$$T_e = E - E_{sc} = E \frac{(E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}{1 + (E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}$$

$$E_{sc} = E \frac{1}{1 + (E / m_e c^2)(1 - \cos \phi)}$$

**A. Κεντρική κρούση ( $\theta=0^\circ$ ,  $\phi=180^\circ$ )**

$$\cos \phi = \cos 180^\circ = -1$$

$$T_{eMAX} = E \frac{2(E / m_e c^2)}{1 + 2(E / m_e c^2)}$$

$$E_{scMIN} = E \frac{1}{1 + 2(E / m_e c^2)}$$

**B. Εφαπτομενική κρούση ( $\theta=90^\circ$ ,  $\phi=0^\circ$ )**

$$\cos \phi = \cos 0^\circ = 1$$

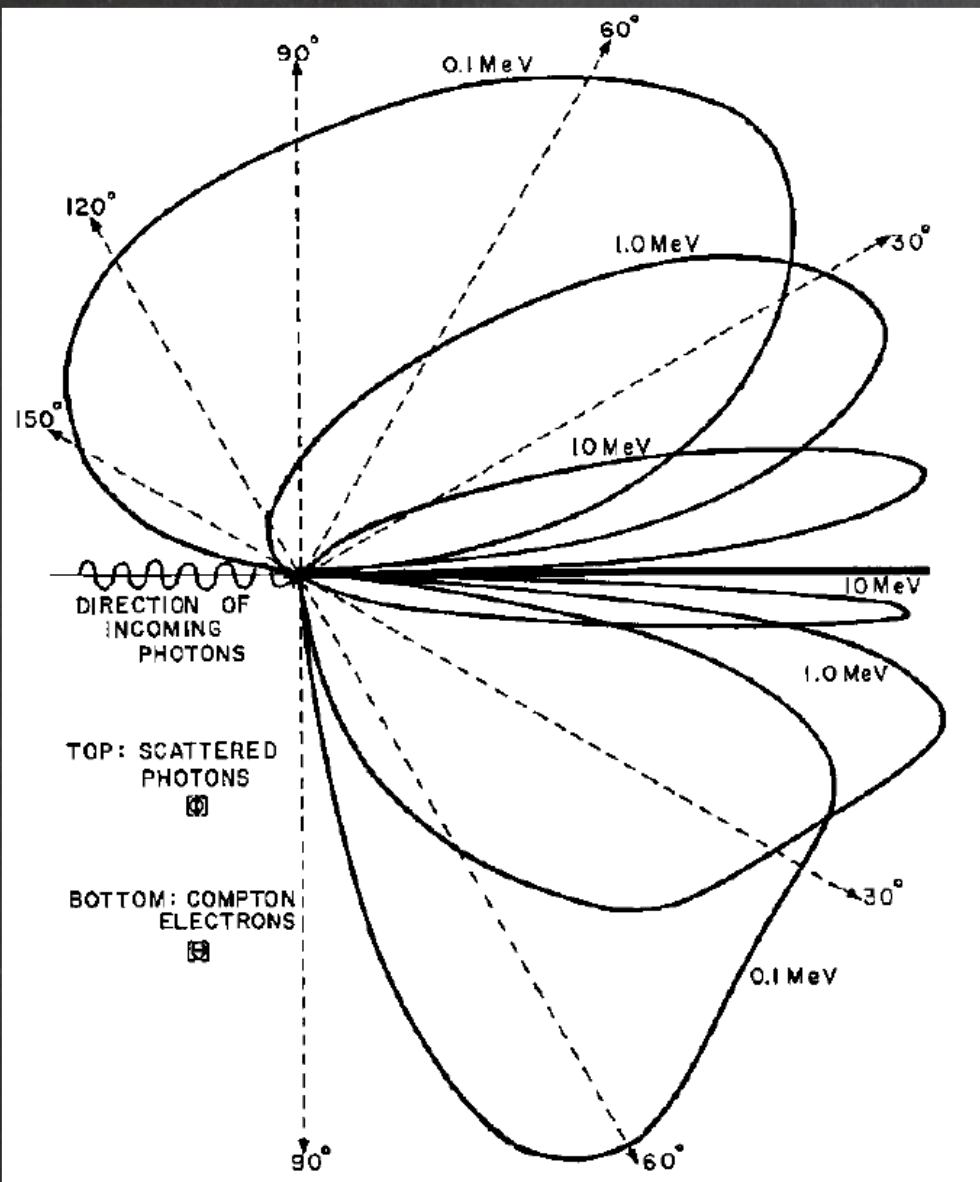
$$T_{eMIN} = 0$$

$$E_{scMAX} = E$$

**Γ.  $E \gg$**

$$\phi = 90^\circ \rightarrow E_{sc} = m_e c^2$$

$$\phi = 180^\circ \rightarrow E_{sc} = m_e c^2 / 2$$

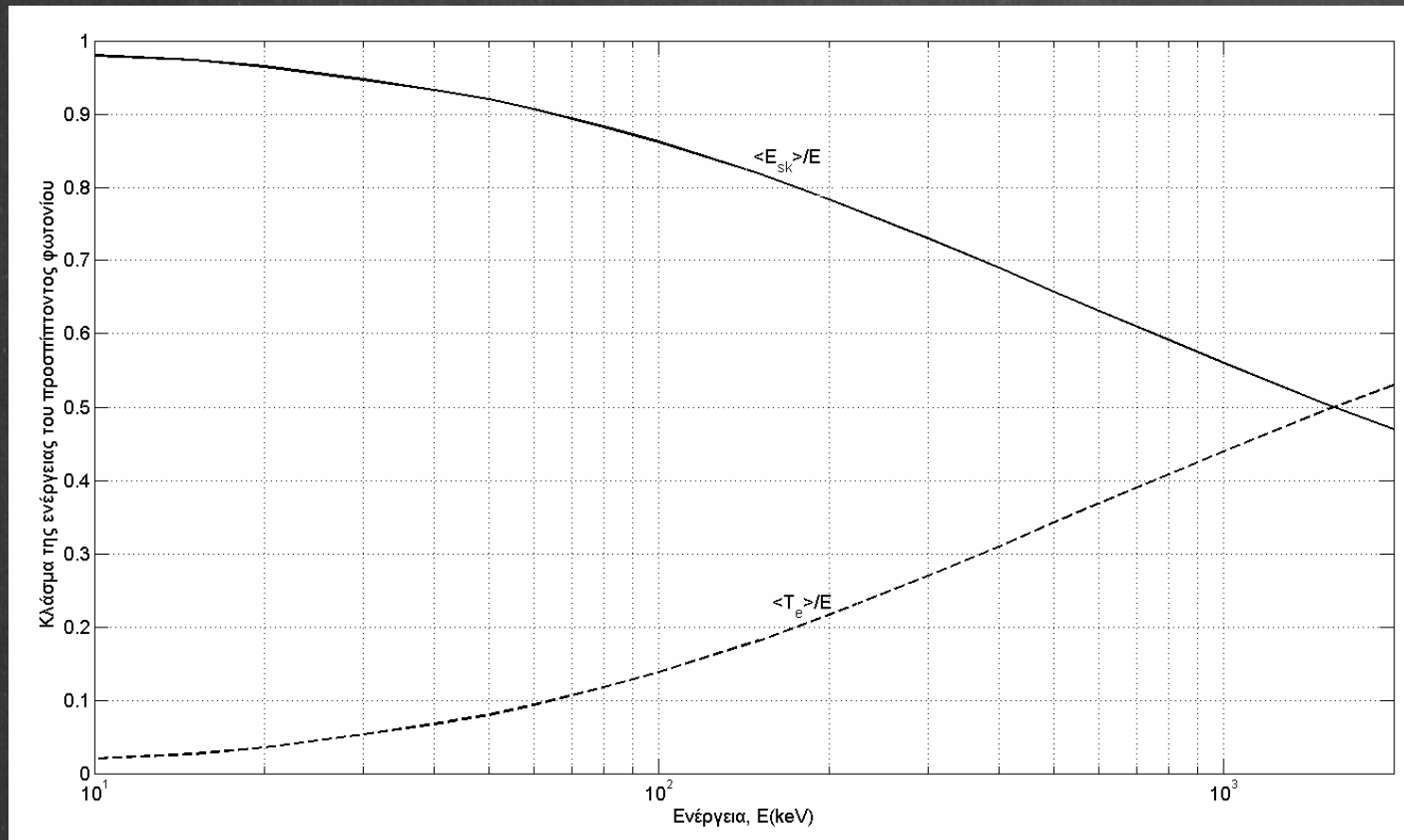


**Κατανομή της γωνίας εκπομπής του e- Compton και του φωτονίου που υπέστη σκέδαση ως προς τη διεύθυνση του αρχικού φωτονίου**

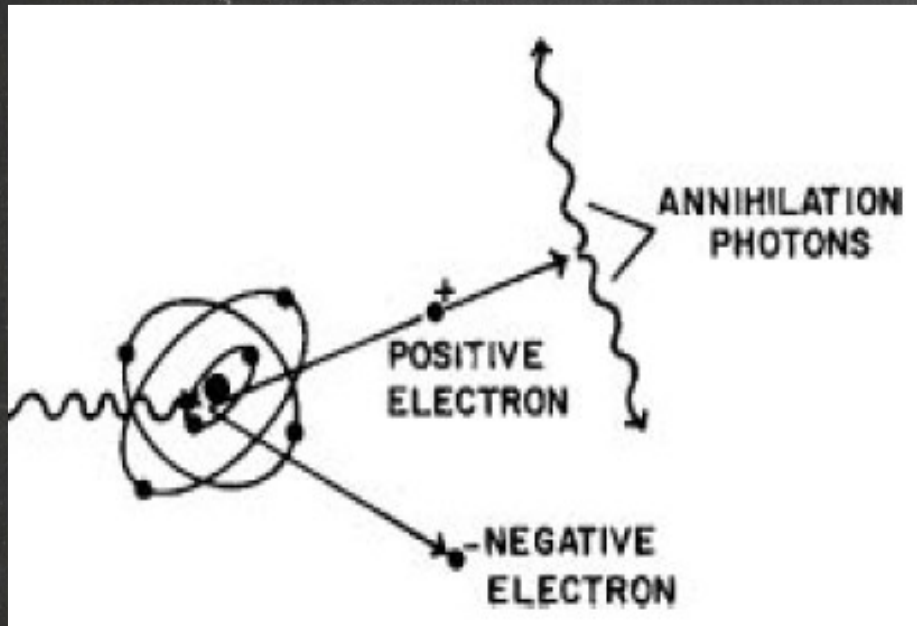


Η μέση τιμή του ποσοστού της ενέργειας του αρχικού φωτονίου που μετατρέπεται σε ενέργεια σκεδαζόμενου φωτονίου  $\langle E_{sc} \rangle / E$  και κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου,  $\langle T_e \rangle / E$ , στη σκέδαση Compton, συναρτήσει της ενέργειας του αρχικού φωτονίου.

$$f^{incoh} = \frac{T_e}{E} = 1 - \frac{\langle E_{sc} \rangle + E_X}{E} \approx 1 - \frac{\langle E_{sc} \rangle}{E}$$



# ΔΙΑΥΜΗ ΓΕΝΕΣΗ



- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το φωτόνιο απορροφάται και η ενέργειά του μετατρέπεται σε ζεύγος e<sup>-</sup>, e<sup>+</sup> και σε κινητική ενέργεια αυτών
- Υπάρχει κατώφλι ενέργειας:

$$E = 2m_e c^2 = 1.02 \text{ MeV}$$

$$f^{pp} = 1 - \frac{1.02}{E}$$

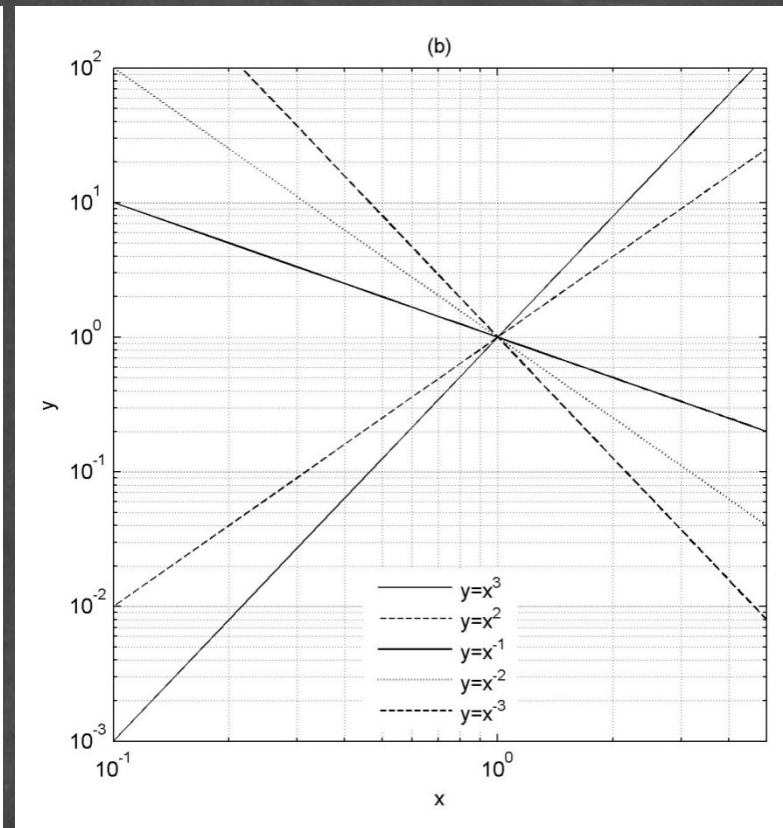
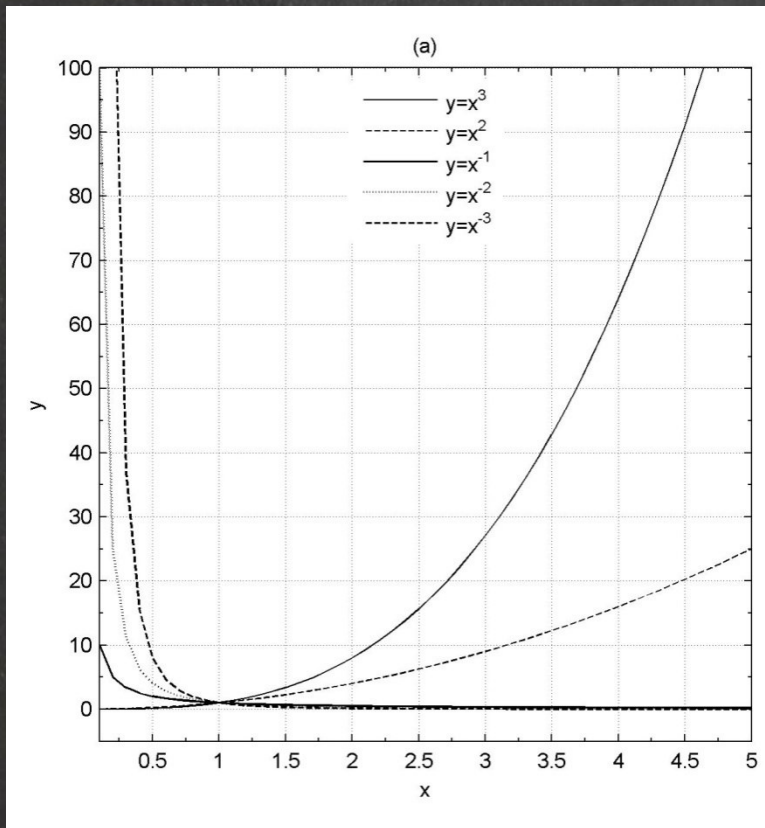


**Σχετική πιθανότητα κάθε είδους  
αλληλεπίδρασης**

# Συναρτήσεις δυνάμεων και λογαριθμικές κλίμακες ...

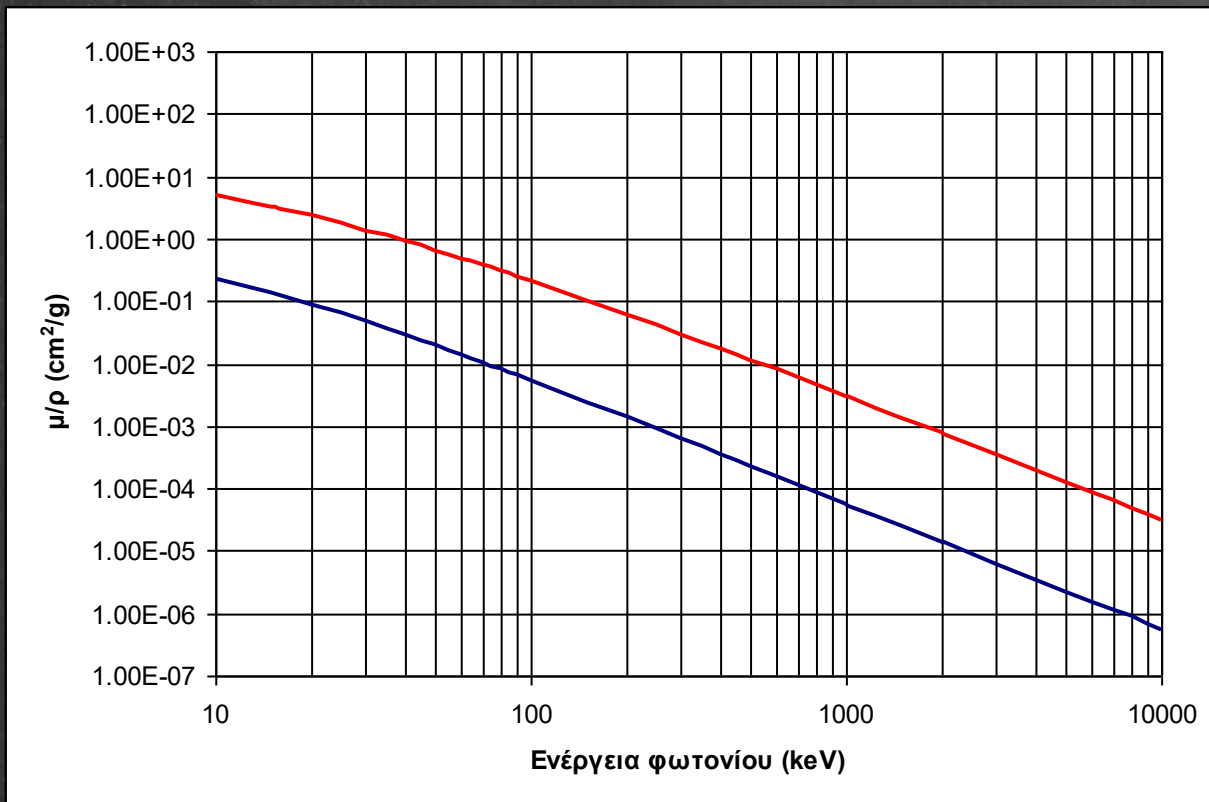
$$y = Ax^{\pm n} \Rightarrow$$

$$\log y = \log(Ax^{\pm n}) = \log A + \log(x^{\pm n}) \Leftrightarrow \log y = \log A \pm n \log x$$



# Σύμφωνη σκέδαση

H<sub>2</sub>O ( $Z_{\text{eff}}=7.5$ ) & Pb( $Z=82$ )

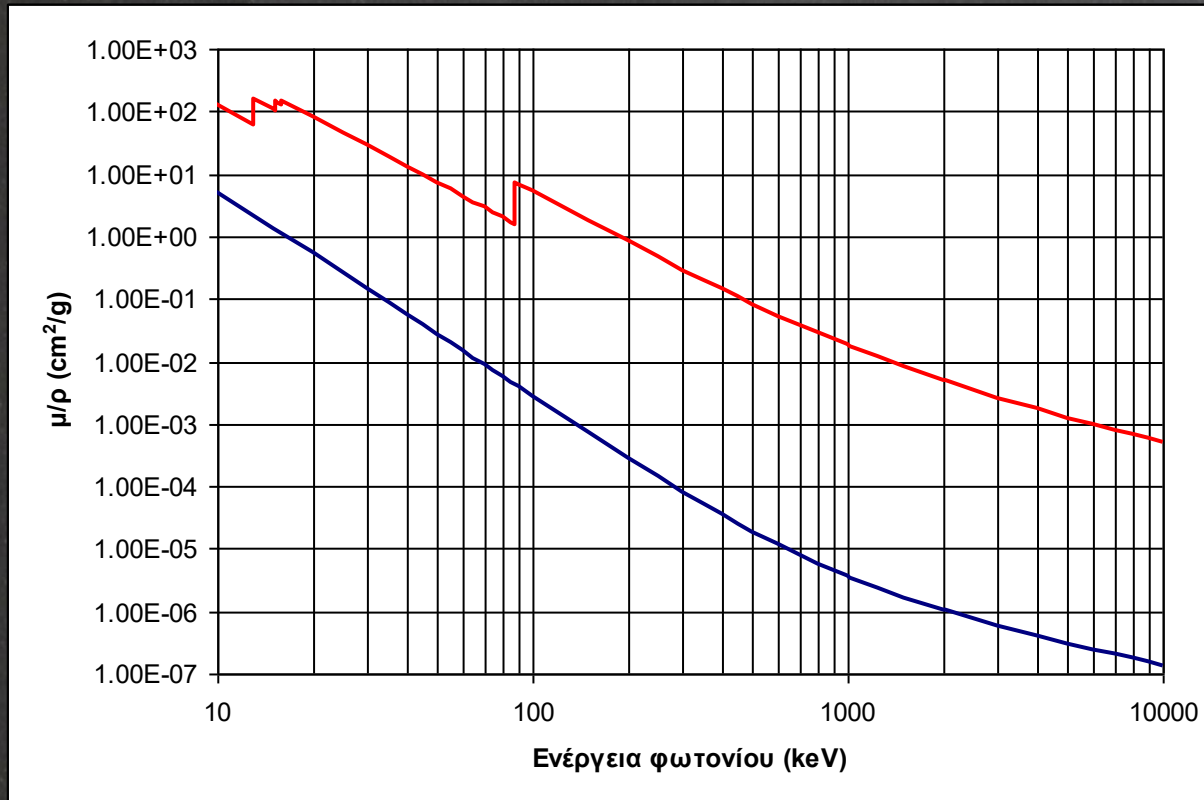


Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας:  
 $\sim Z/E^2$



# Φωτοηλεκτρικό

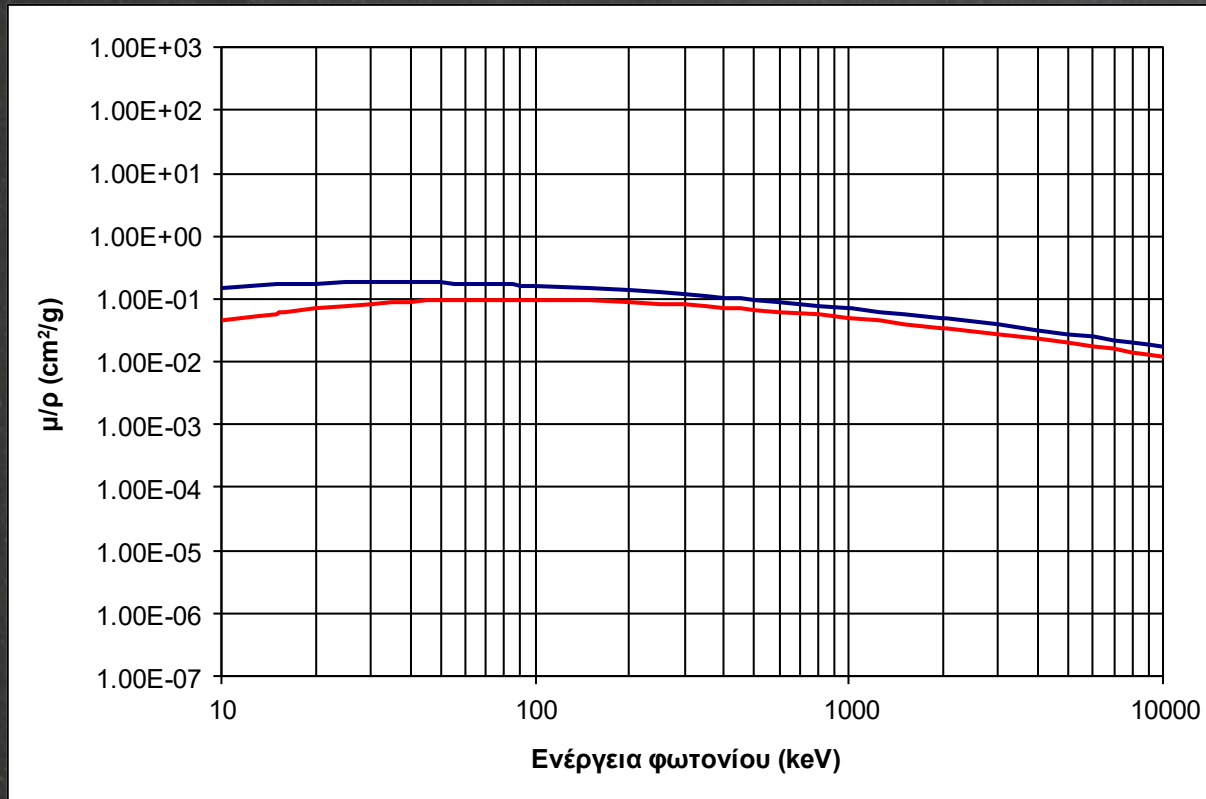
H<sub>2</sub>O ( $Z_{\text{eff}}=7.5$ ) & Pb( $Z=82$ )



Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας :  
 $\sim Z^3 \rightarrow 4 / E^2 \rightarrow 3$

# Σκέδαση Compton

H<sub>2</sub>O ( $Z_{\text{eff}}=7.5$ ) & Pb( $Z=82$ )

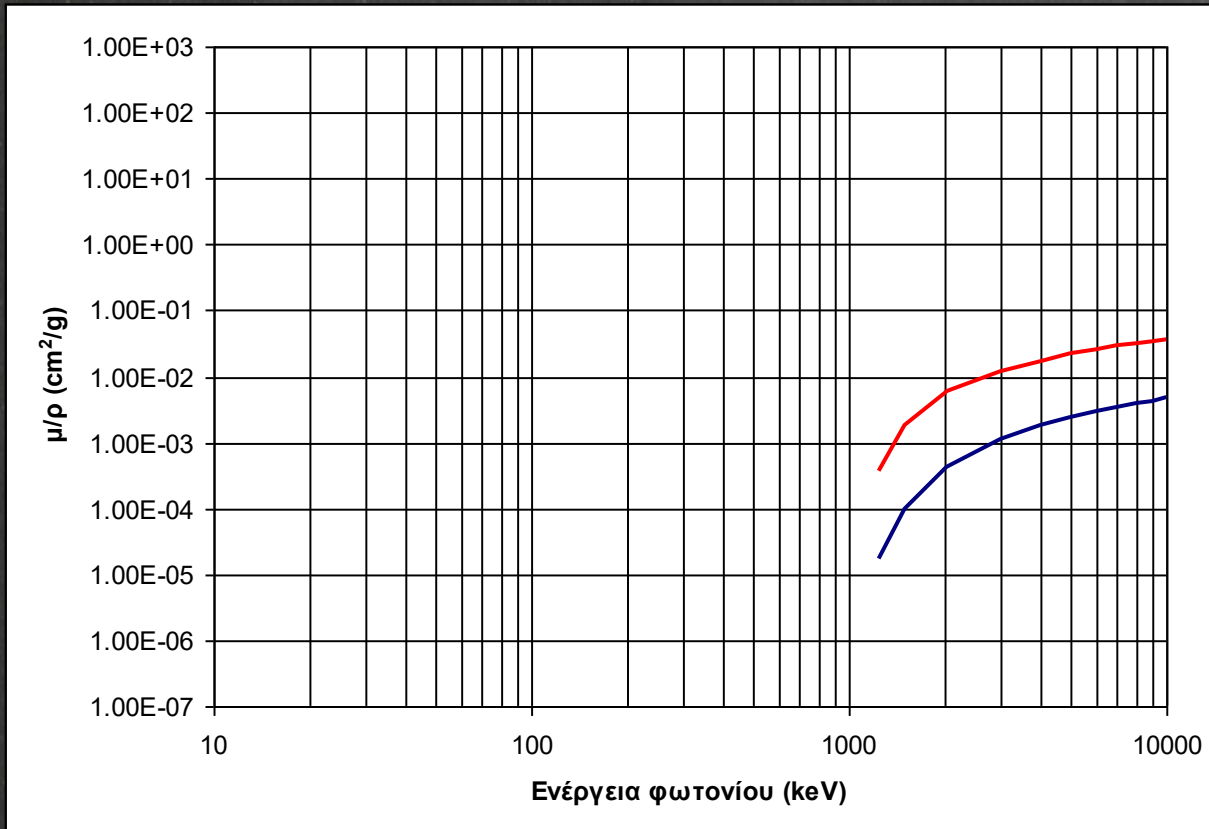


Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας :

- Μειώνεται με την E
- Ανεξάρτητη του Z!!!

# Δίδυμη γένεση

$\text{H}_2\text{O}$  ( $Z_{\text{eff}}=7.5$ ) &  $\text{Pb}$  ( $Z=82$ )

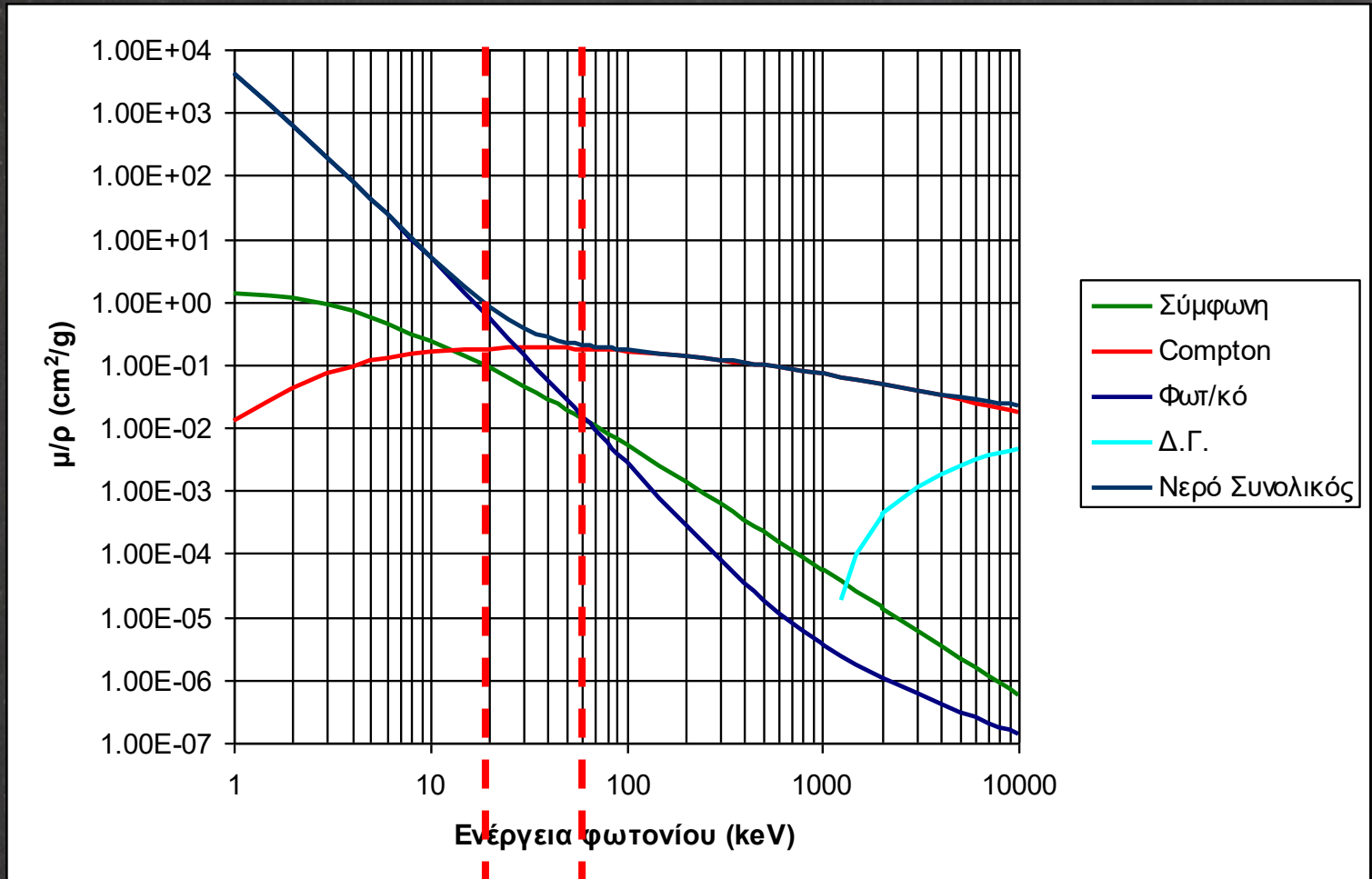


Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας :

- Αυξάνει με την  $E$  ( $>1,02$  MeV)
- Αυξάνει με τον  $Z$



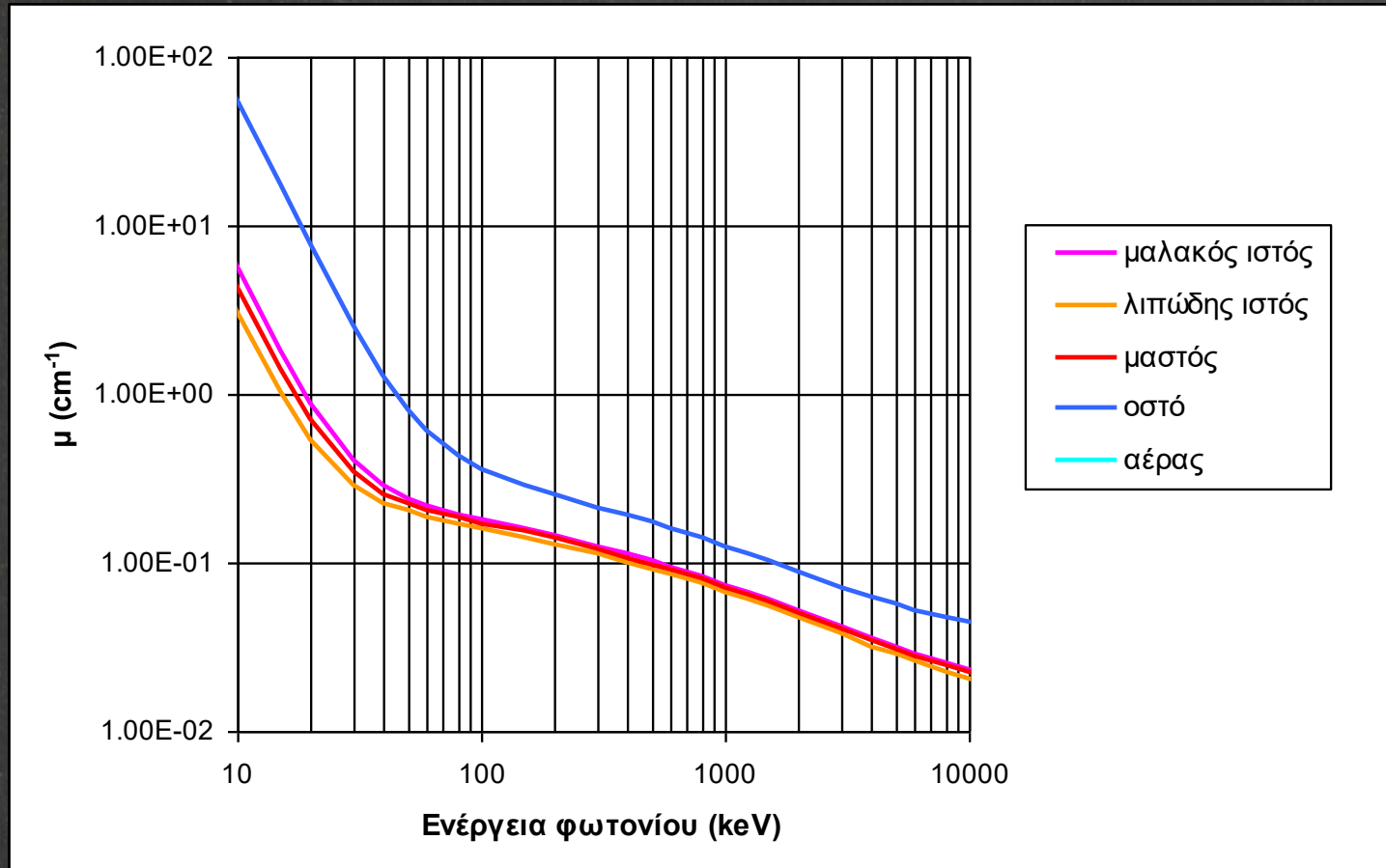
# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού



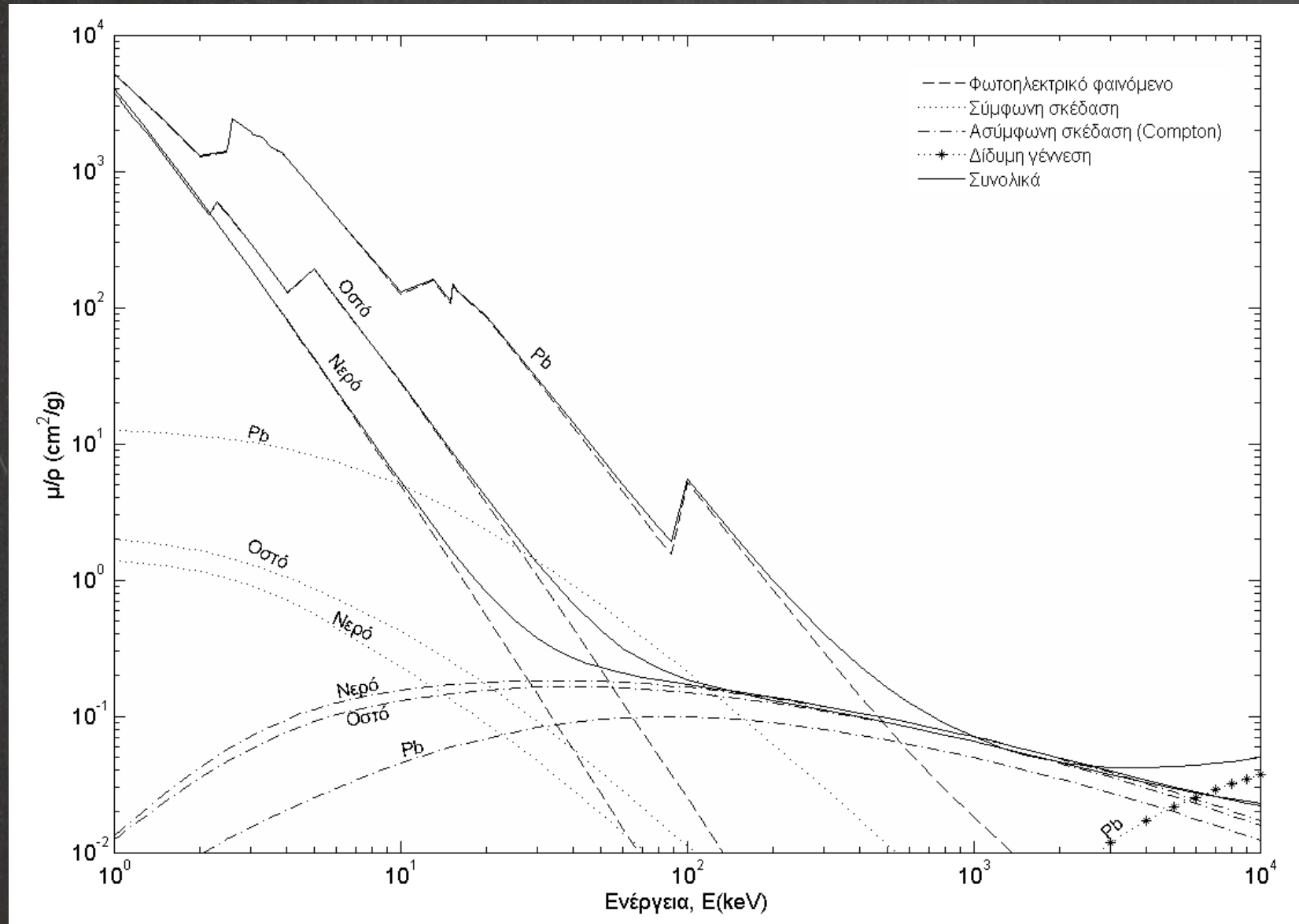
**Φωτοηλεκτρικό**

**Compton**

# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα πάχους υλικού



# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού





# Ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια

- Ενδιαφέρει η ενέργεια που μεταφέρεται σε φορτισμένα σωματίδια μιας και λόγω της μικρής τους εμβέλειας σημαντικό μέρος της θα απορροφηθεί τοπικά
- Η ποσότητα αυτή ορίζεται ως **KERMA (Kinetic Energy Released per unit Mass)**:

$$KERMA \equiv K \equiv \frac{\mu_{tr}}{\rho} \Psi$$

$$[K] = \frac{J}{kg}$$

- Έχει τις ίδιες μονάδες με τη δόση αλλά δεν ισούται με αυτή καθώς τα φορτισμένα σωματίδια μπορεί να απολέσουν ενέργεια με ακτινοβολία πέδησης

## 5.1.1 Kerma<sup>6</sup>

The *kerma*,  $K$ , for ionizing uncharged particles, is the quotient of  $dE_{tr}$  by  $dm$ , where  $dE_{tr}$  is the mean sum of the initial kinetic energies of all the charged particles liberated in a mass  $dm$  of a material by the uncharged particles incident on  $dm$ , thus

$$K = \frac{dE_{tr}}{dm}$$

Unit:  $J kg^{-1}$

The special name for the unit of kerma is gray (Gy).

# Ενέργεια που απορροφάται από το υλικό

- Έστω  $g$  το ποσοστό της κινητικής ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων που μετατρέπεται σε ακτινοβολία κατά την αλληλεπίδρασή τους με το υλικό (πέδηση, εξαΰλωση, αποδιεγέρσεις ατόμων)
- Το ποσοστό της κινητικής ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων που απορροφάται από το υλικό λόγω διεγέρσεων & ιονισμών θα είναι  $(1-g)$ 
  - $g \sim 0$  για  $E \ll \dots$  ή  $Z \ll \dots$
  - Μπορώ τότε να ορίσω το **μαζικό συντελεστή ενεργειακής απορρόφησης,  $\mu_{en}$**  :

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} \equiv \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g)$$

- $\frac{\mu_{en}}{\rho} \leq \frac{\mu_{tr}}{\rho}$

- για μόρια και μίγματα δεν υπολογίζεται όπως ο  $\mu_{tr}$  ή ο  $\mu$  λόγω διαφορών στις ενεργειακές στοιβάδες ελευθέρων ατόμων και ατόμων στο μόριο

product of  $\mu_{tr}/\rho$  for a material and  $(1 - g)$  is called the *mass energy-absorption coefficient*,  $\mu_{en}/\rho$ , of the material for uncharged particles,

$$\frac{\mu_{en}}{\rho} = \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g). \quad (4.3.4)$$



# Ενέργεια που απορροφάται από το υλικό

- Με τον μαζικό συντελεστή ενεργειακής απορρόφησης,  $\mu_{en}$  μπορώ να υπολογίσω το μέρος του KERMA που θα απορροφηθεί από το υλικό.
  - Συμβολίζεται  $K_{col}$  (collision KERMA):

$$collision\ KERMA \equiv K_{col} \equiv \frac{\mu_{en}}{\rho} \Psi$$

$$= \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) \Psi$$

$$[K] = \frac{J}{kg}$$

- Έχει τις ίδιες μονάδες με τη δόση.
- Μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο P
- Ισούται με τη δόση στο P υπό την προϋπόθεση ότι η ενέργεια που εκφράζει θα μεταδοθεί σε  $dm$  περί του P (θα απορροφηθεί από την  $dm$  υλικού περί του P) και δεν θα διαφύγει

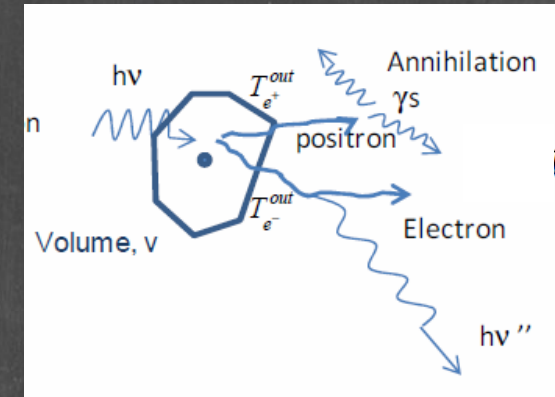
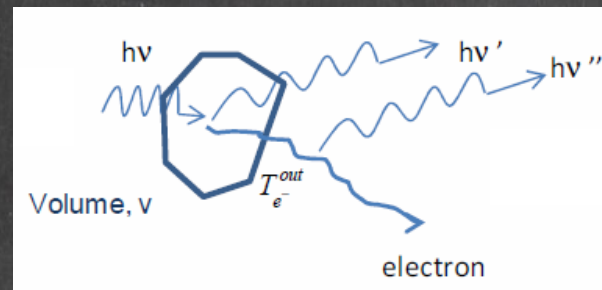
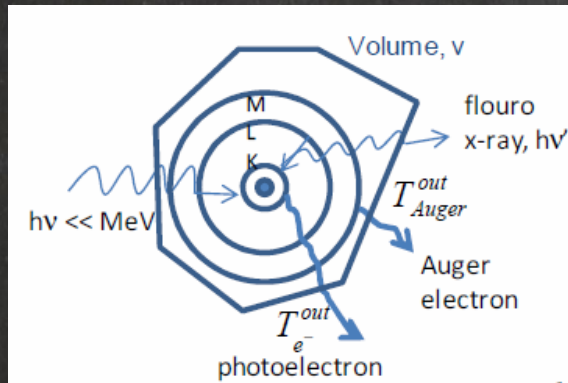
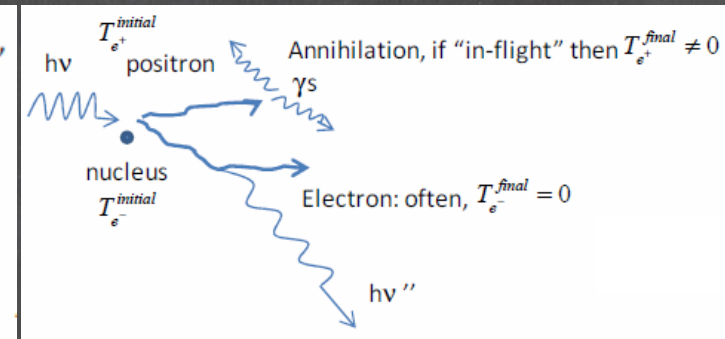
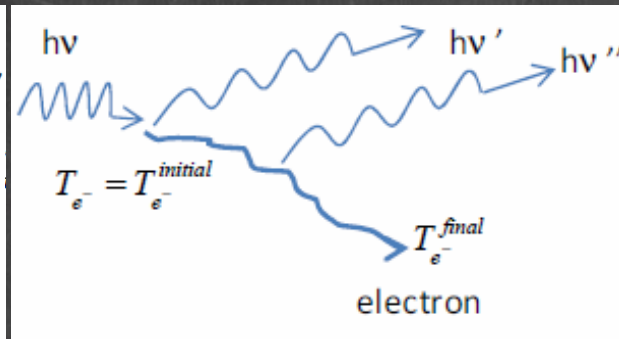
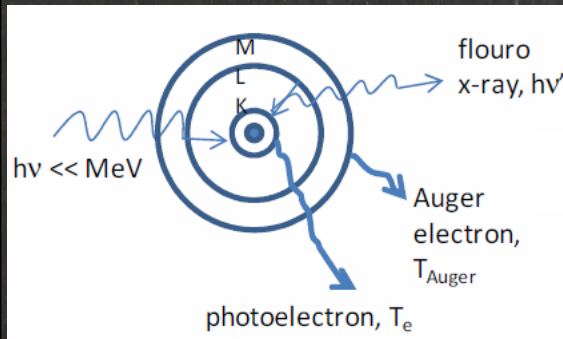


# Ενέργεια που απορροφάται από το υλικό

Photoelectric effect

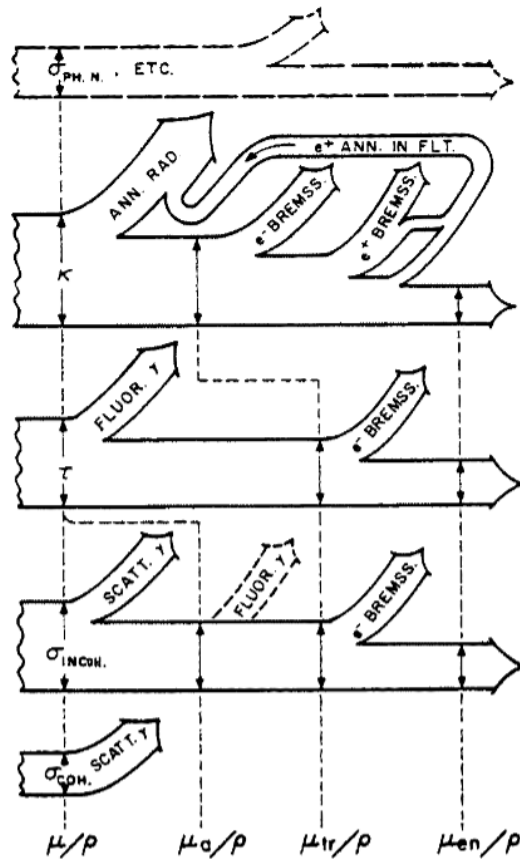
Compton

Pair Production



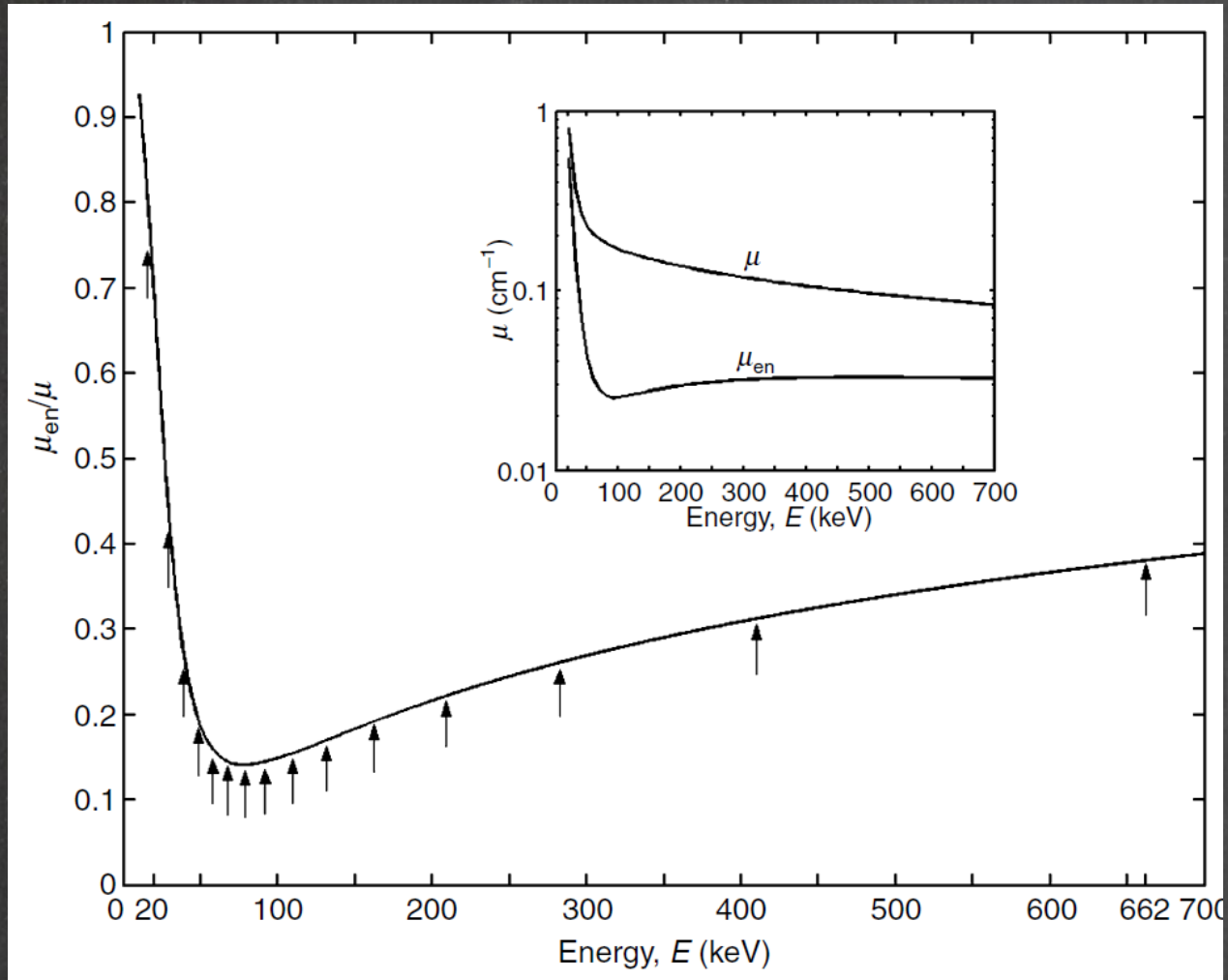
- Αν είναι γνωστή η  $\Psi$ , το  $K_{col}$  μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο P
  - Η δόση δεν μπορεί να υπολογιστεί από την  $\Psi$
- Η δόση είναι μετρούμενο μέγεθος (σε πεπερασμένη μάζα  $dm$ ) που μπορεί να θεωρηθεί κατά προσέγγιση ίση με το  $K_{col}$  υπό την προϋπόθεση ότι η ενέργεια  $K_{col}$  δεν θα διαφύγει της  $dm$

# Συνοπτικά (1):



**Figure 4.** Schematic representation of the mass attenuation coefficient  $\mu/\rho$ , the mass absorption coefficient  $\mu_a/\rho$ , the mass energy-transfer coefficient  $\mu_{tr}/\rho$ , and the mass energy-absorption coefficient  $\mu_{en}/\rho$  in terms of the cross sections for coherent ( $\sigma_{COH}$ ) and incoherent ( $\sigma_{INCOH}$ ) scattering, atomic photoeffect ( $\tau$ ), pair production ( $\kappa$ ), and photonuclear reactions ( $\sigma_{PH.N.}$ ). The upward-branching arrows represent the fraction, of the incident photon energy, lost to the volume of interest in the form of secondary photons such as positron annihilation radiation (ANN. RAD.), bremsstrahlung ( $e^-$ ,  $e^+$  BREMSS.), fluorescence x-rays (FLUOR.  $\gamma$ ) and scattered photons (SCATT.  $\gamma$ ). The enhancement of annihilation photon energies due to positron annihilation in flight ( $e^+$  ANN. IN FLT.) at the expense of positron bremsstrahlung and energy deposition is also indicated.

# Συνοπτικά (2):





## Βιβλιογραφία:

κεφ. 2-5 από το σύγγραμμά σας + σημειώσεις βιολ. επιδράσεων

### Προτεινόμενα ξενόγλωσσα συγγράμματα:

- ✓ E.B. Podgorsak (Editor), Radiation Oncology Physics: A Handbook for Teachers and Students  
(Διαθέσιμο δια-δικτυακά: [www.iaea.org](http://www.iaea.org))
- ✓ F. H. Attix, Introduction to radiological physics & radiation dosimetry
- ✓ P. Andreo, D.T. Burns, A.E. Nahum, J. Seuntjens, F. H. Attix, Fundamentals of Ionizing Radiation Dosimetry