

Ιατρική Φυσική

Ε.Κ.Π.Α. 2024-2025

Ε. Στυλιάρης – Π. Παπαγιάννης

Ακτινοπροστασία:

- Βιολογικές επιδράσεις ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Διεθνές σύστημα ακτινοπροστασίας

Δοσιμετρία:

- Εξωτερική (υπολογιστική, πειραματική)

Π. Ι. Παπαγιάννης

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής
Ιατρική Σχολή Αθηνών



210 7462442



ppapagi@med.uoa.gr



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

Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας

Δοσιμετρία...?

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

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: J kg^{-1}

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

Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας γιατί χρήζει ιδιαίτερης συζήτησης...?

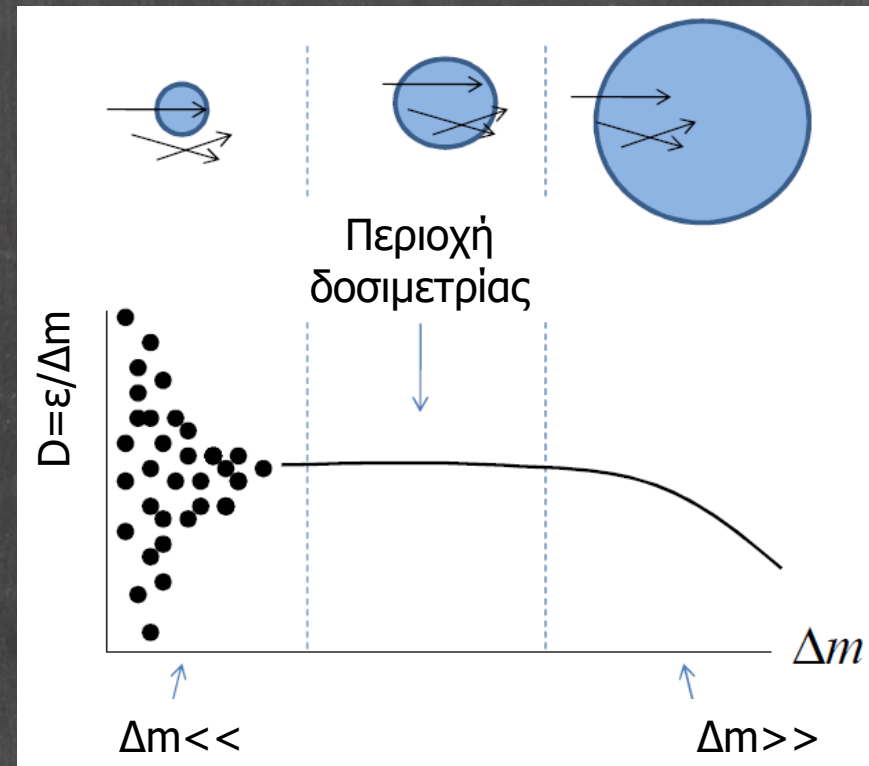
- τα στοχαστικά μεγέθη:
 - λαμβάνουν τυχαίες τιμές που δεν μπορούν να προβλεφθούν παρότι η σχετική κατανομή πιθανότητας μπορεί να είναι γνωστή
 - ορίζονται σε πεπερασμένες περιοχές, οι τιμές τους μεταβάλλονται ασυνεχώς χωρικά και χρονικά, και δεν ορίζεται ο ρυθμός μεταβολής τους
 - η αναμενόμενη τιμή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

Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας γιατί χρήζει ιδιαίτερης συζήτησης...?

- η μεταδιδόμενη ενέργεια (ϵ) 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 την D)

- η δόση πρέπει να μετρηθεί σε μια πεπερασμένη μάζα Δm (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 και κλασματοποιημένα, δόσεις της τάξης των 60 Gy
 - $L.D._{50/60}=4\text{Gy}$ για ολοσωματική έκθεση
($1\text{cal}=4.18\text{ J}$ και $1\text{Cal}=1000\text{ cal}$)
 - !! 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*, Φ , is the quotient of dN by da , where dN is the number of particles incident on a sphere of cross-sectional area da , thus

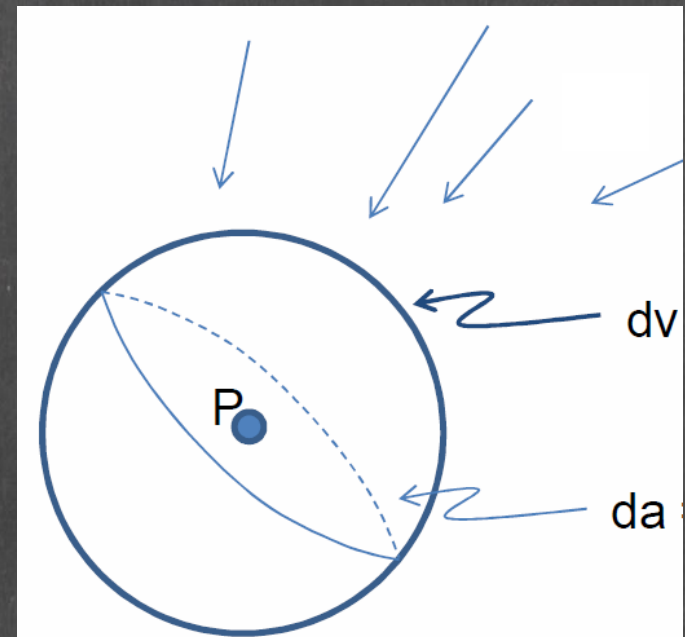
$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

Unit: m^{-2}

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

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

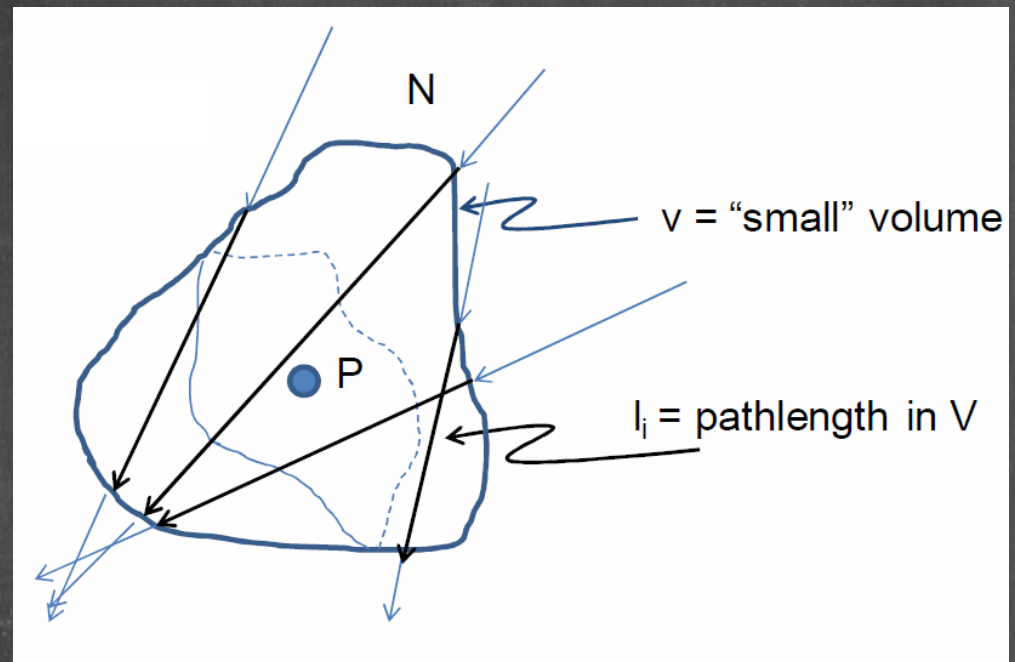
Unit: J m^{-2}



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 (2 συνημίτονα κατεύθυνσης, έστω θ, β)
 - ενέργεια (E)
 - χρόνος, t
- πλήρης γνώση του πεδίου σημαίνει γνώση της διαφορικής ροής ως προς κάθε μεταβλητή

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

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

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

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

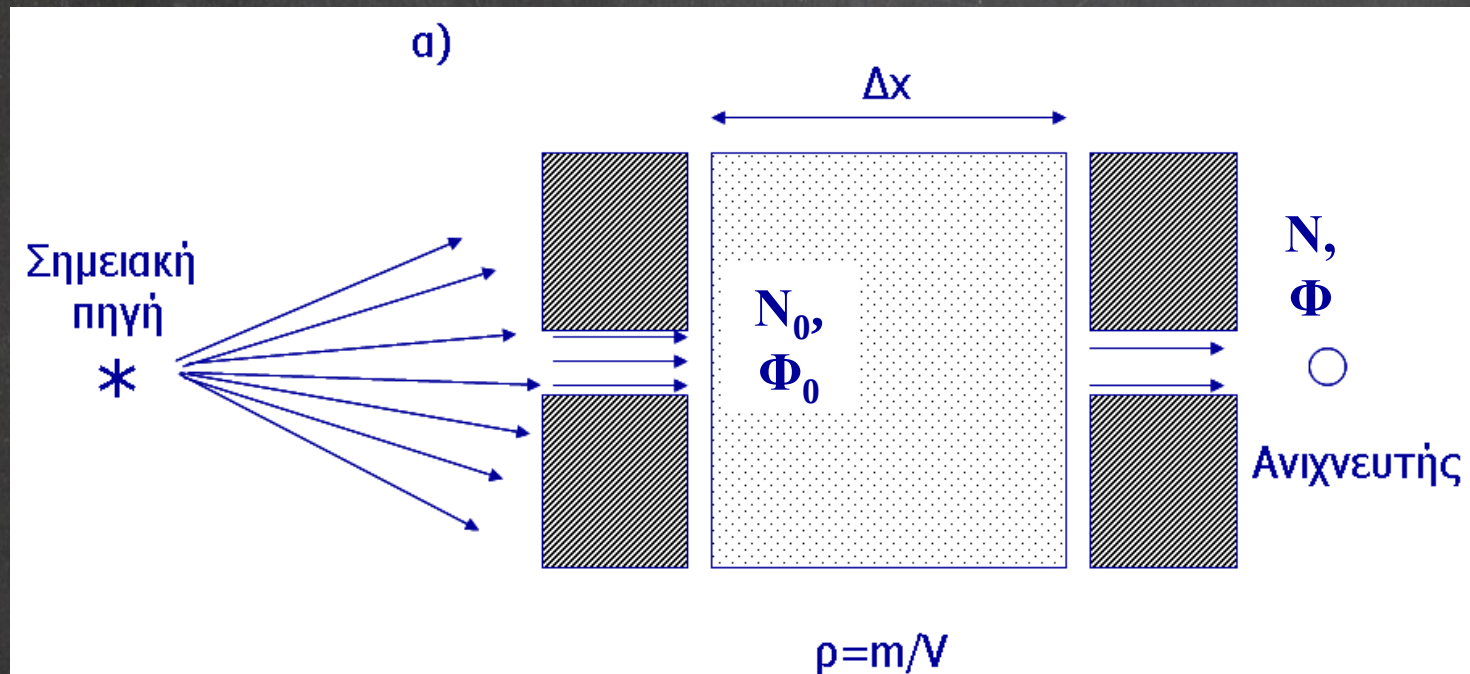
Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- 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:

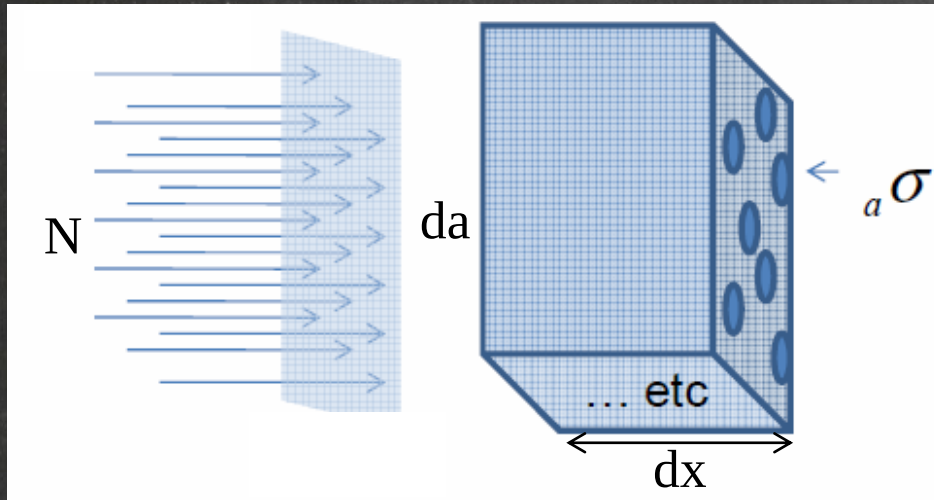
Table 3.1. Scalar radiometric quantities

Name ^a	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	Φ	m^{-2}	dN/da
energy fluence	Ψ	$J m^{-2}$	dR/da
energy distribution of fluence	Φ_E	$m^{-2} J^{-1}$	$d\Phi/dE$
energy distribution of energy fluence	Ψ_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 ($\rho N_A/AB$)

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

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dx} &= -({}_a\sigma \frac{\rho N_A}{AB})N \\ \frac{d\Phi}{dx} &= -({}_a\sigma \frac{\rho N_A}{AB})\Phi \end{aligned}$$

4.1 Cross Section

The *cross section*, σ , 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 Φ , where N is the mean number of such interactions per target entity subjected to the particle fluence Φ , thus

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

Unit: m^2

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

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

• Όπου μ :

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

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 μ , ως:

$$dN = \mu N dx$$

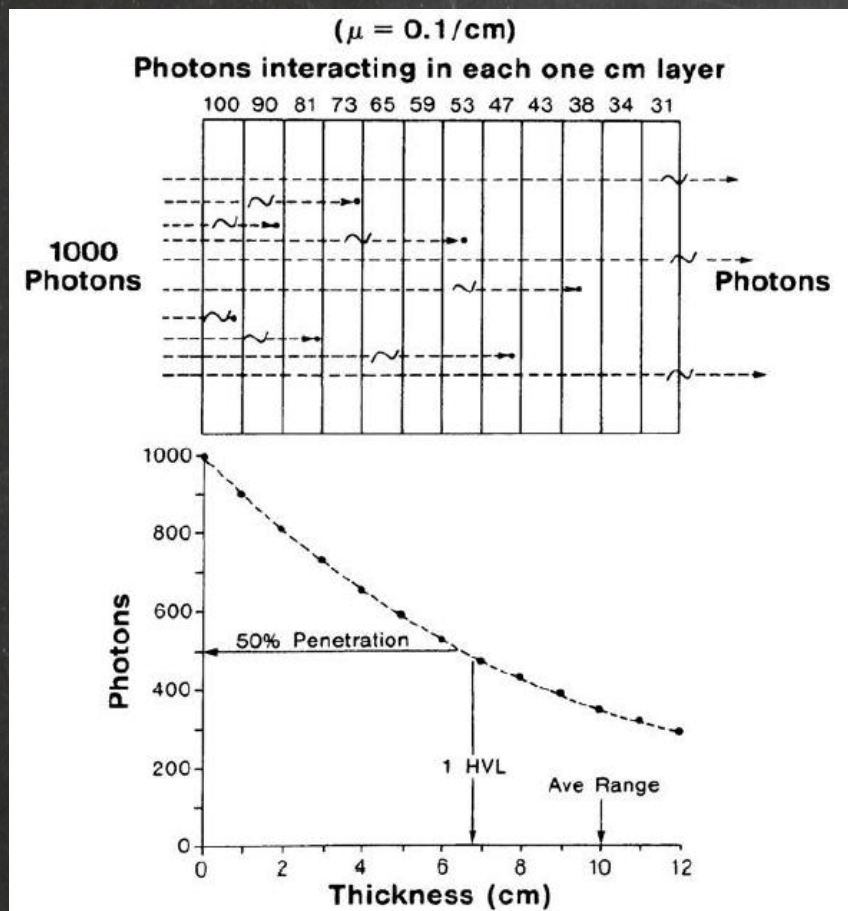
ισοδυναμεί με την προσέγγιση:

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

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 $\mu x < 0,05$ (εξασθένηση $< 5\%$)



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

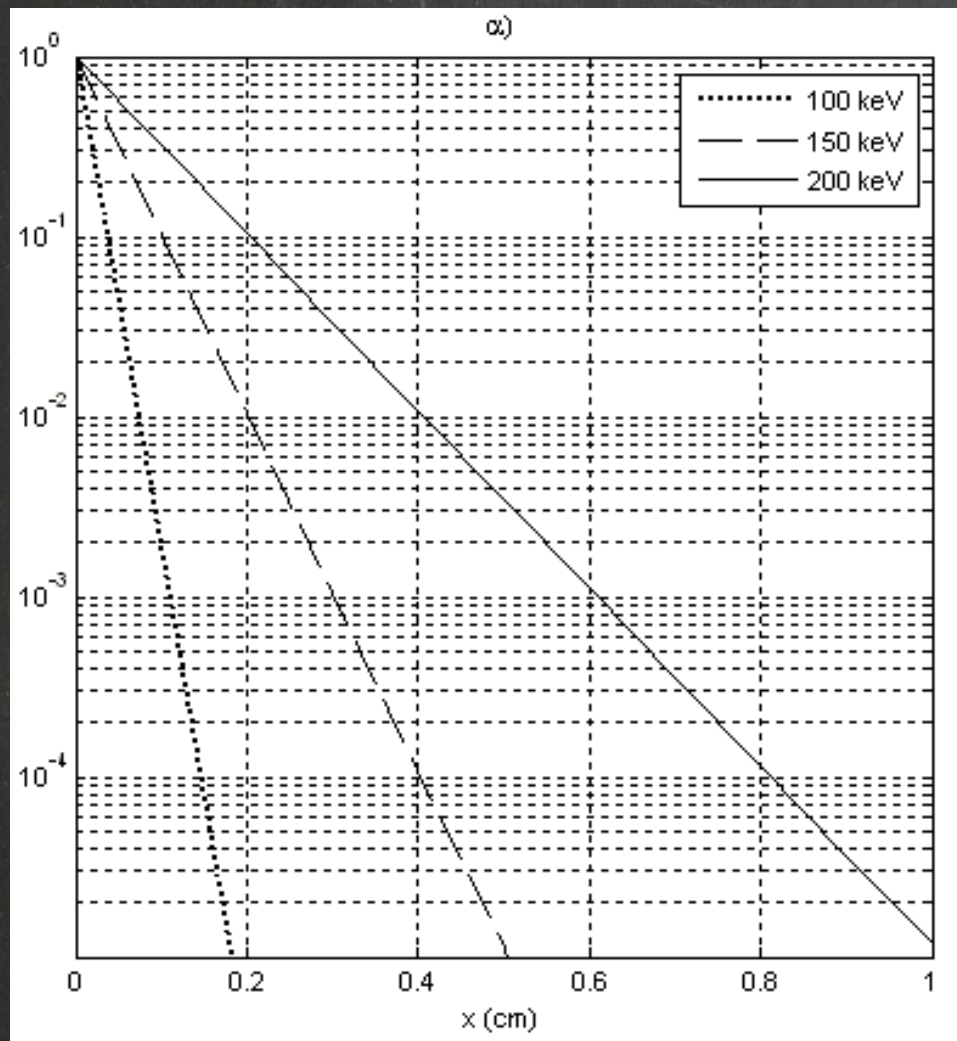
- πάχος υποδιπλασιασμού & υποδεκαπλασιασμού του αριθμού φωτονίων ή της ροής δέσμης φωτονίων:

$$x_{1/2} \equiv HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$
$$x_{1/10} \equiv TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

$$N = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}}$$
$$N = N_0 \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{x}{TVL}}$$

- πρακτικοί δείκτες στην ακτινοπροστασία & τον χαρακτηρισμό δέσμης

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



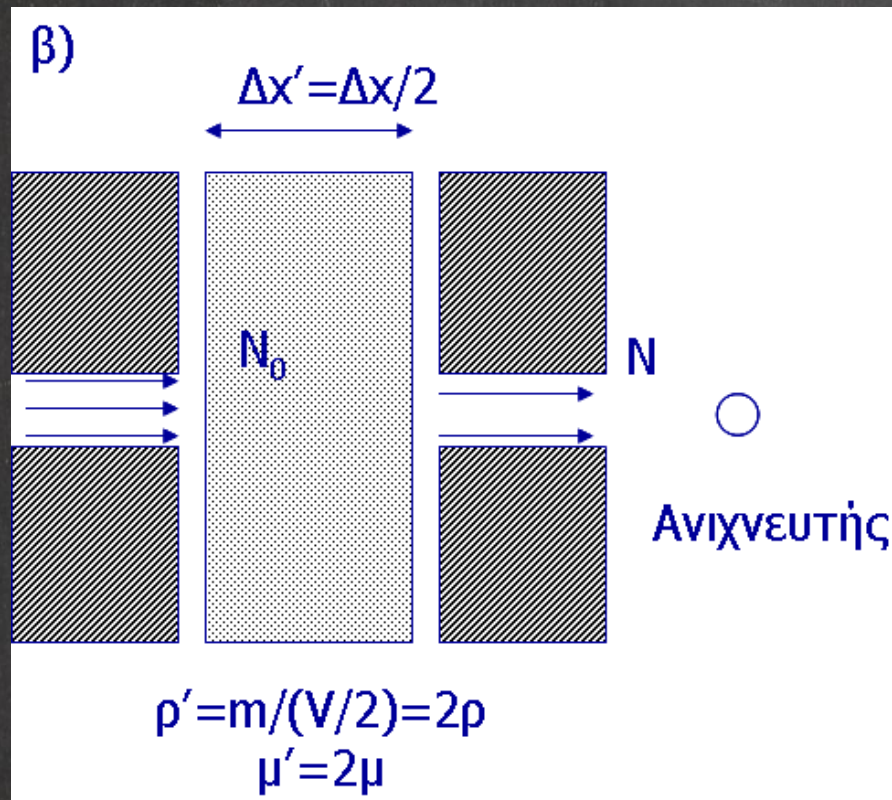
•Ενέργεια φωτονίων, E

Υλικό, Z

και πυκνότητα ...

$$\mu = (\sigma_a \frac{\rho N_A}{A})$$

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



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

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

4.2 Mass Attenuation Coefficient

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

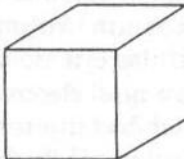
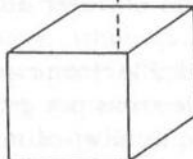
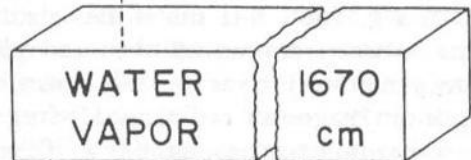
$$\frac{\mu}{\rho} = \frac{1}{\rho} \frac{dN}{dl N}$$

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

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

Διαφορετικές εκφράσεις του συντελεστή εξασθένισης

Γραμμικός, μ (cm^{-1}), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως x σε cm
και Μαζικός, μ/ρ (cm^2/g), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως ρx σε g/cm^2

50 keV		Density (gm/cm^3)	Thickness of 1 gm/cm^2
Linear Attenuation Coefficient (cm^{-1})	Mass Attenuation Coefficient (cm^2/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

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

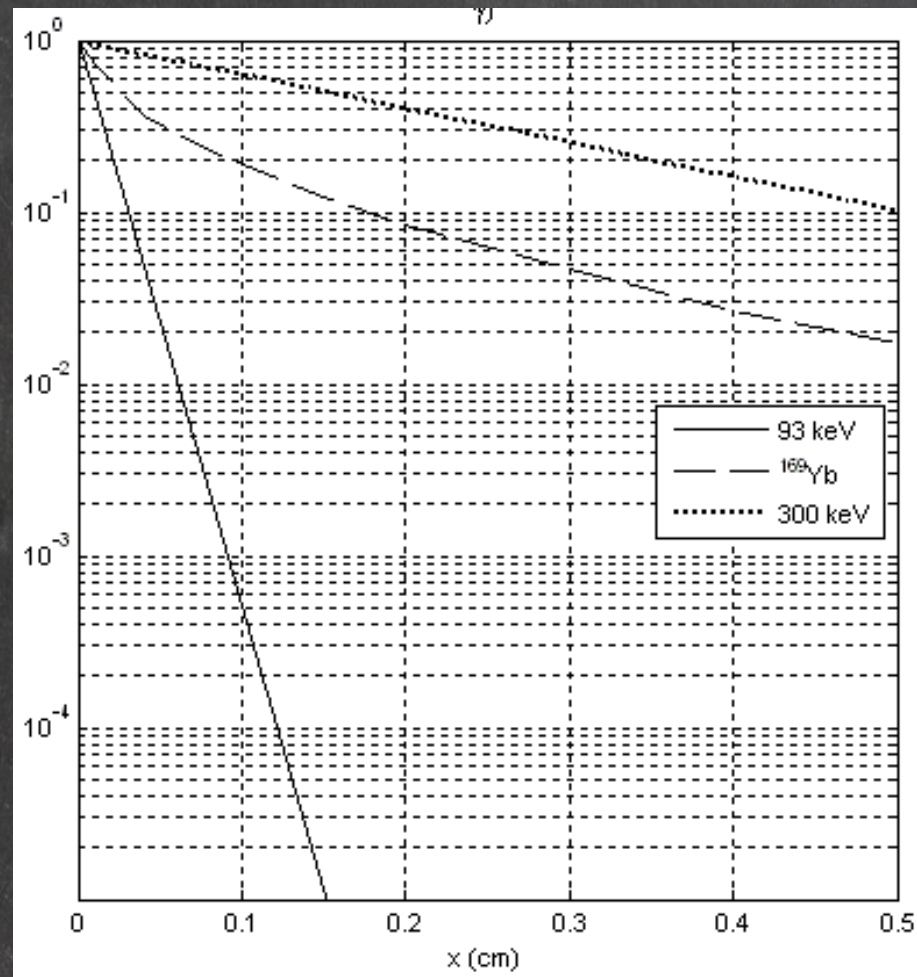
$$\left(\frac{\mu}{\rho} \right)_{A_X B_Y} = \frac{X A B_A}{M B_{A_X B_Y}} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_A + \frac{Y A B_B}{M B_{A_X B_Y}} \left(\frac{\mu}{\rho} \right)_B$$

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

Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

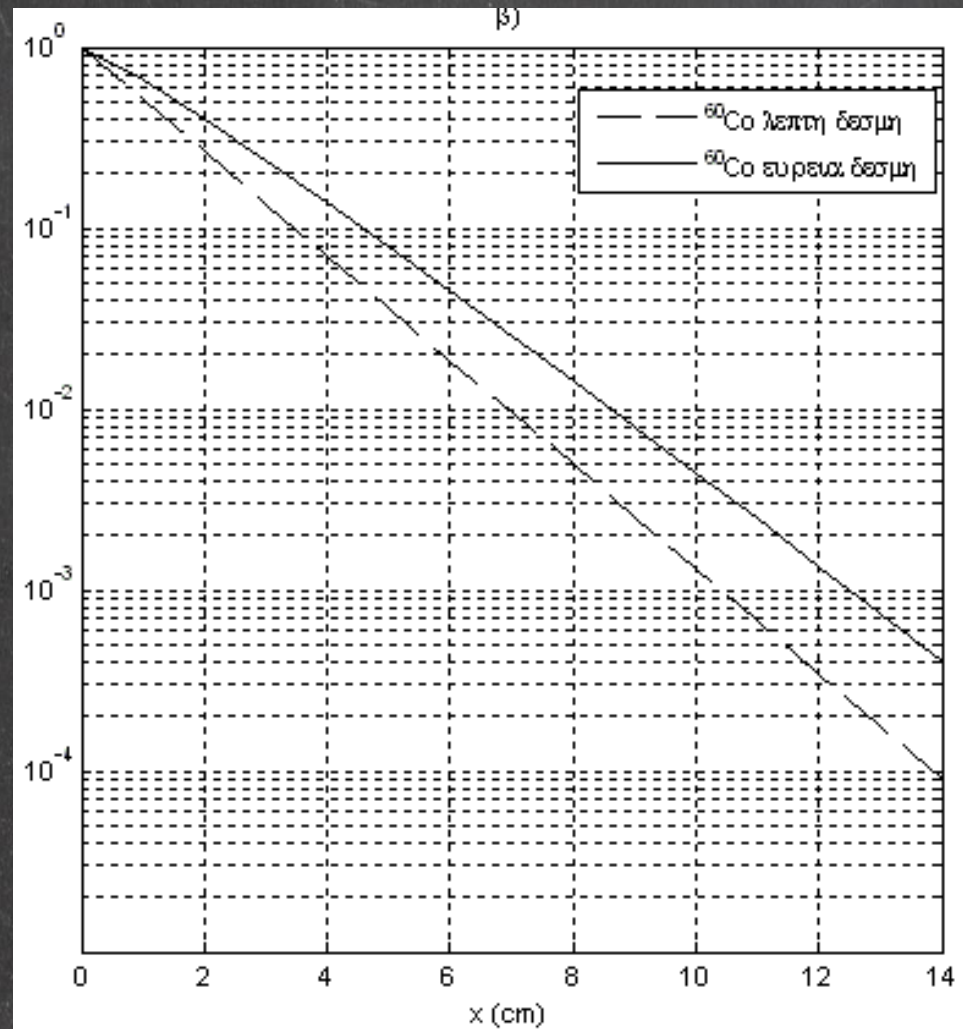
Μόνο για μονο-ενεργειακές δέσμες.

Για πολυ-ενεργειακές δέσμες: ο μ εξαρτάται από το φάσμα που μεταβάλλεται με το βάθος



Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

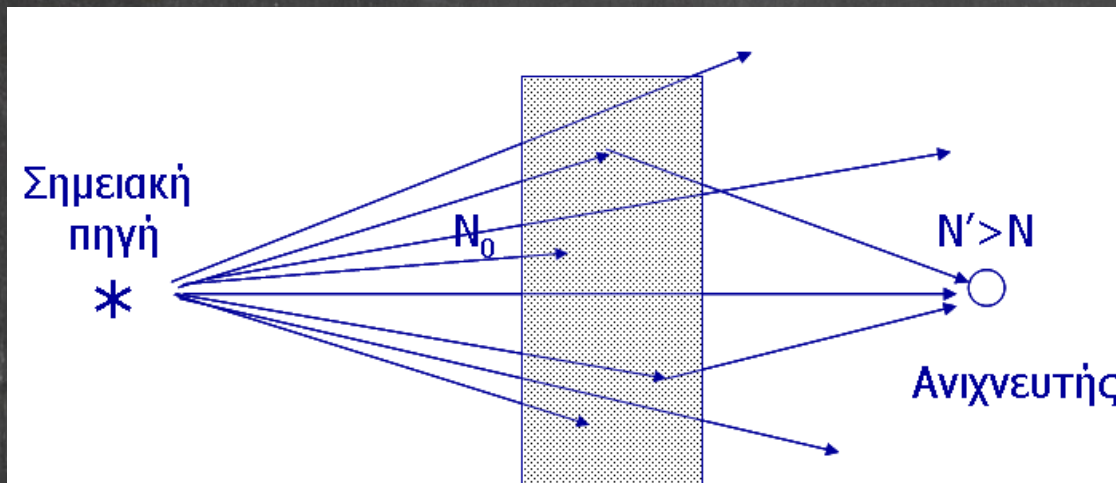
Μόνο σε συνθήκες “λεπτής” δέσμης ή “καλής” γεωμετρίας.
Εξασθένηση δεν σημαίνει απορρόφηση και σε συνθήκες “ευρείας” δέσμης
ή “κακής” γεωμετρίας:



“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 ισούνται 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 μ/ρ

4.3 Mass Energy-Transfer Coefficient

The *mass energy-transfer coefficient*, μ_{tr}/ρ , of a material, for uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of dR_{tr}/R by ρdl , 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 ρ , thus

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

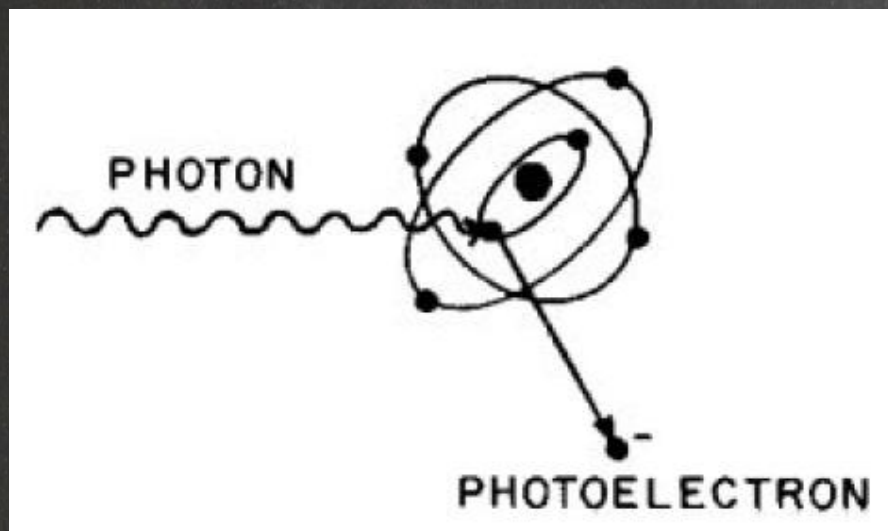
Unit: $m^2 kg^{-1}$

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:

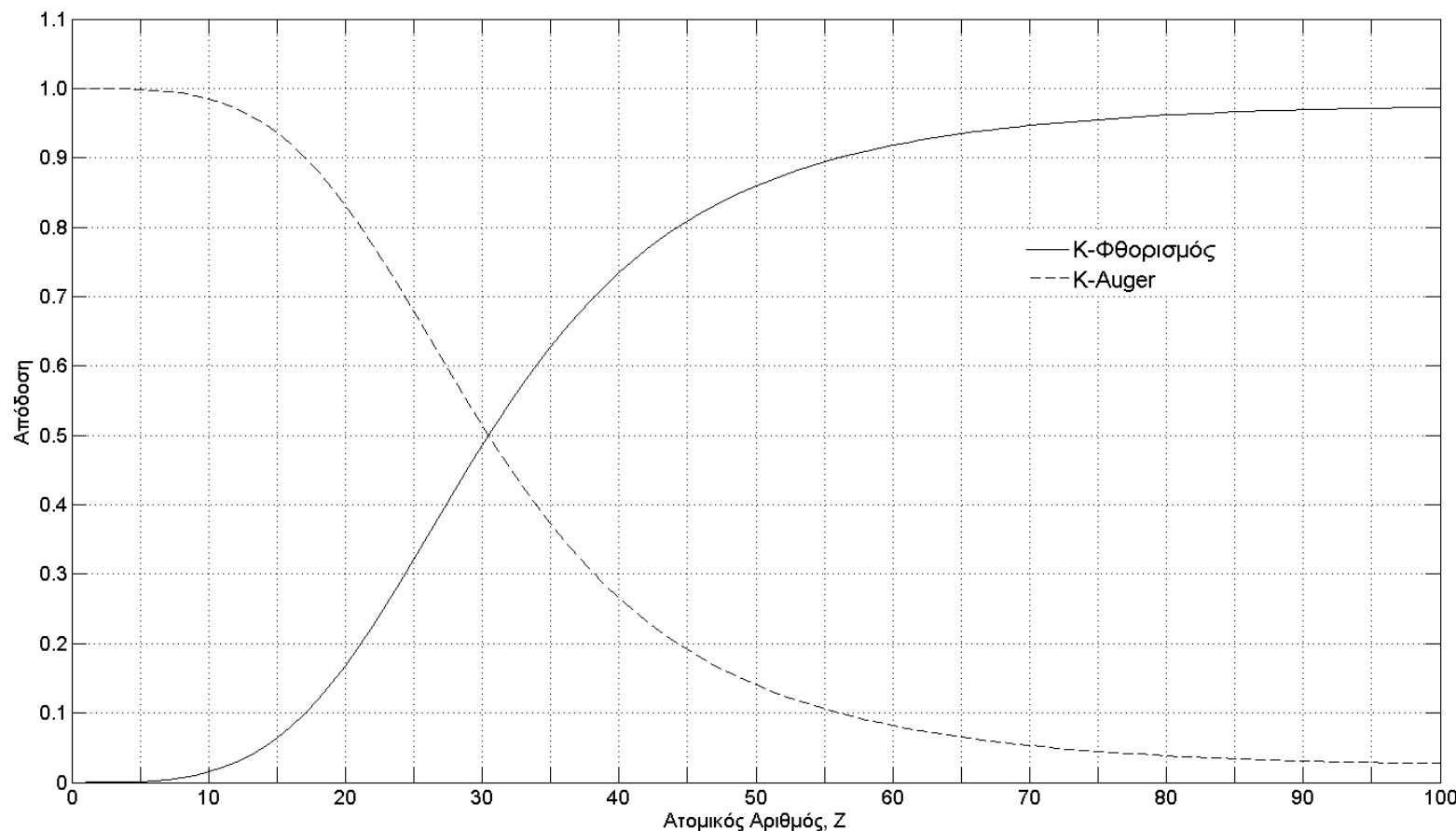
$$T_e = E - E_b$$

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

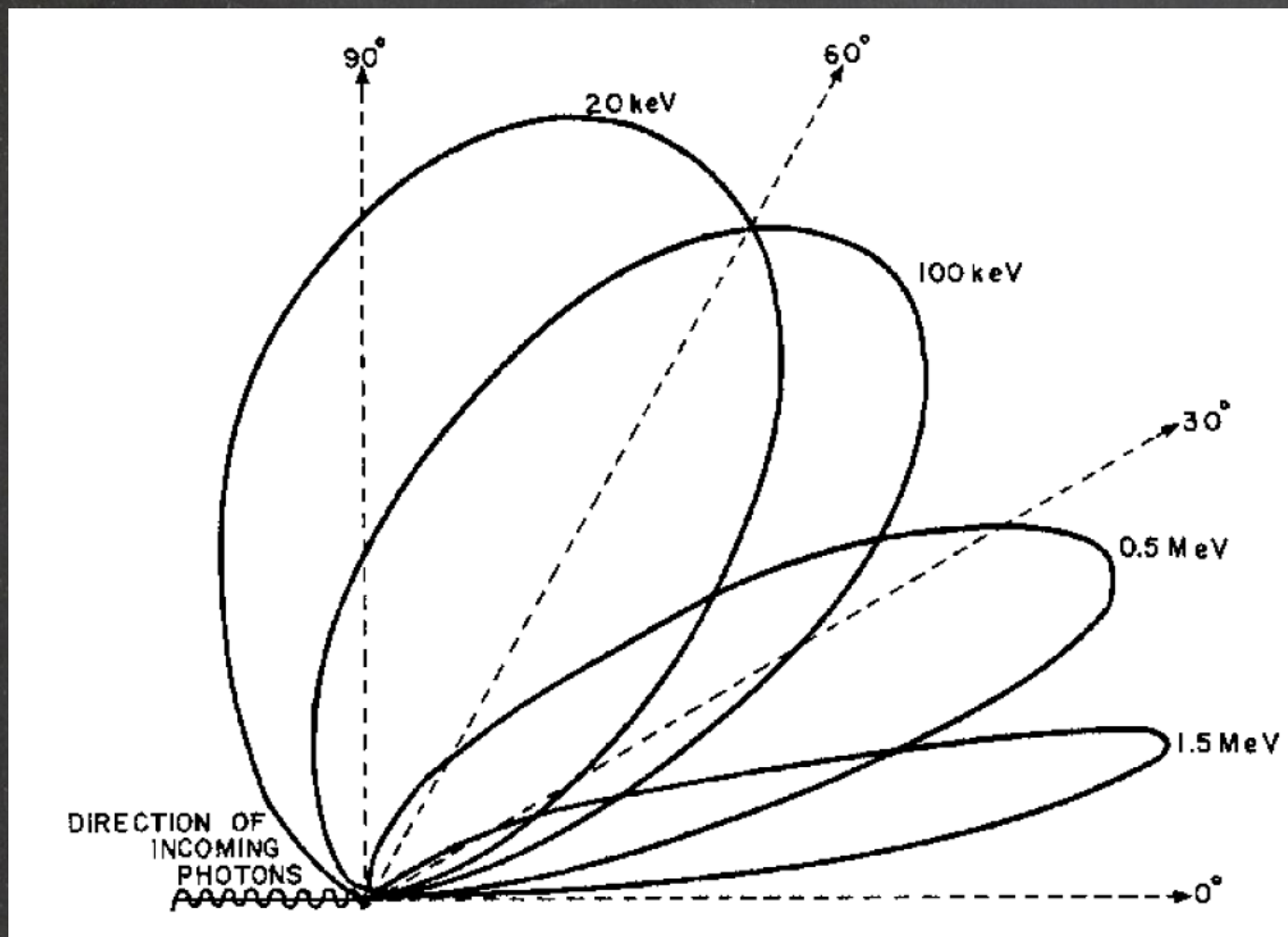
- Για βιολογικούς ιστούς $E_b \ll$
- Το κενό συμπληρώνεται με εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων Auger

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

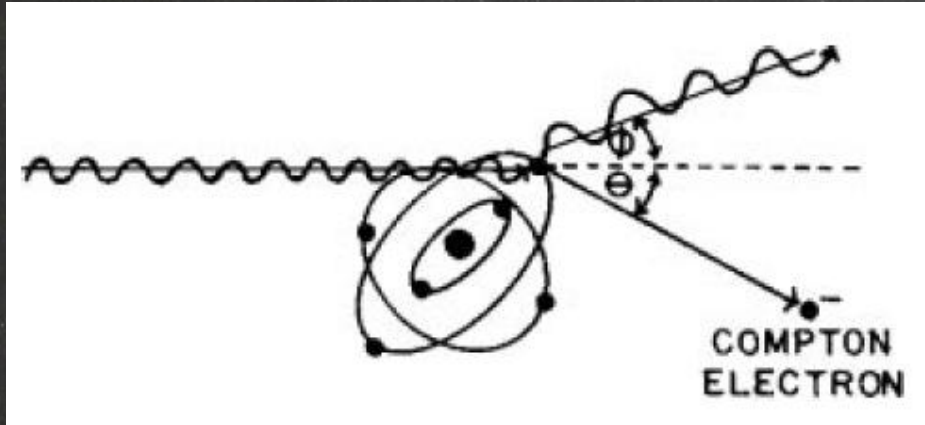
$$f^{ph} = 1 - \frac{E_X}{E}$$



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



ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON



- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το φωτόνιο σκεδάζεται σε γωνία ϕ 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 ($\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$)

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

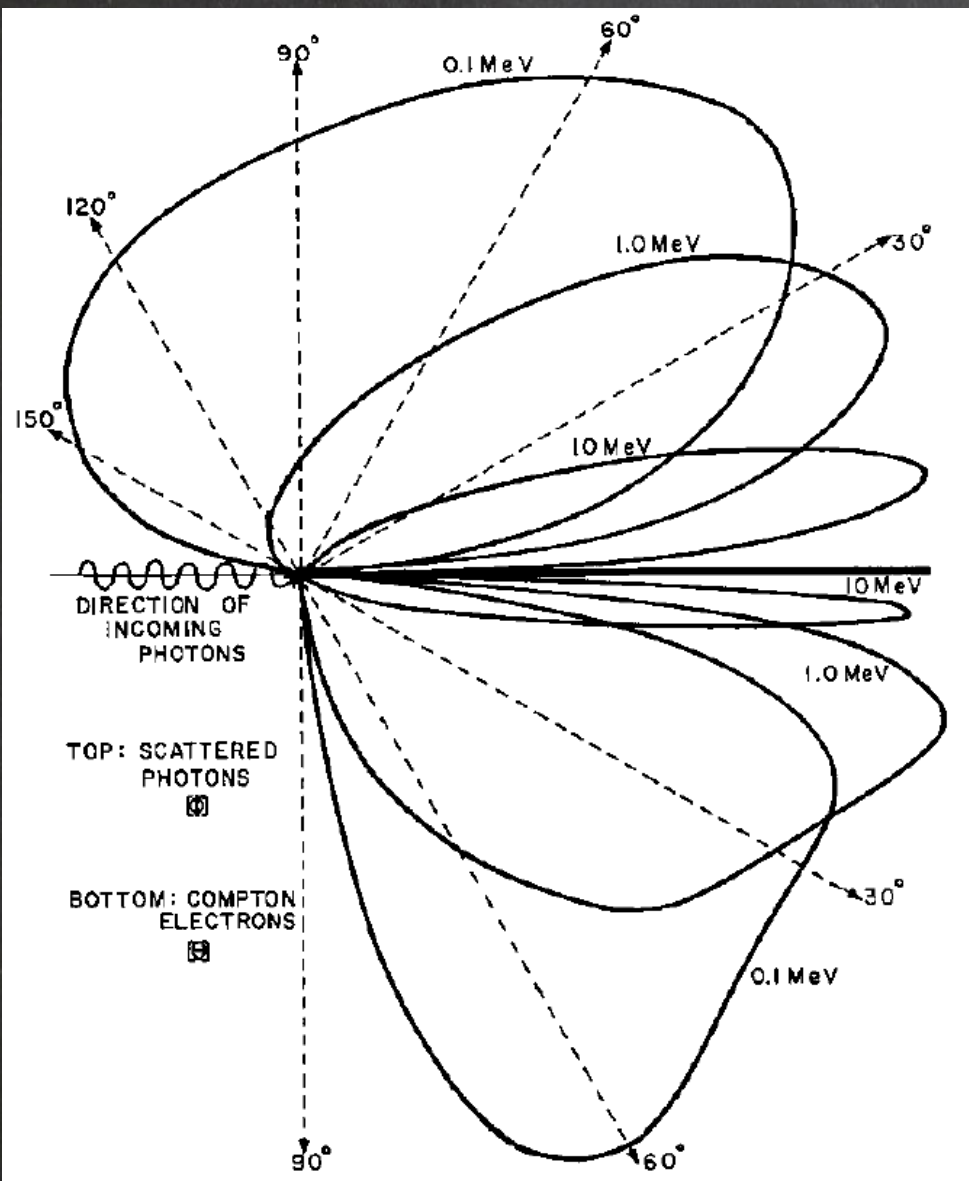
$$T_{eMIN} = 0$$

$$E_{scMAX} = E$$

Γ. $E \gg$

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

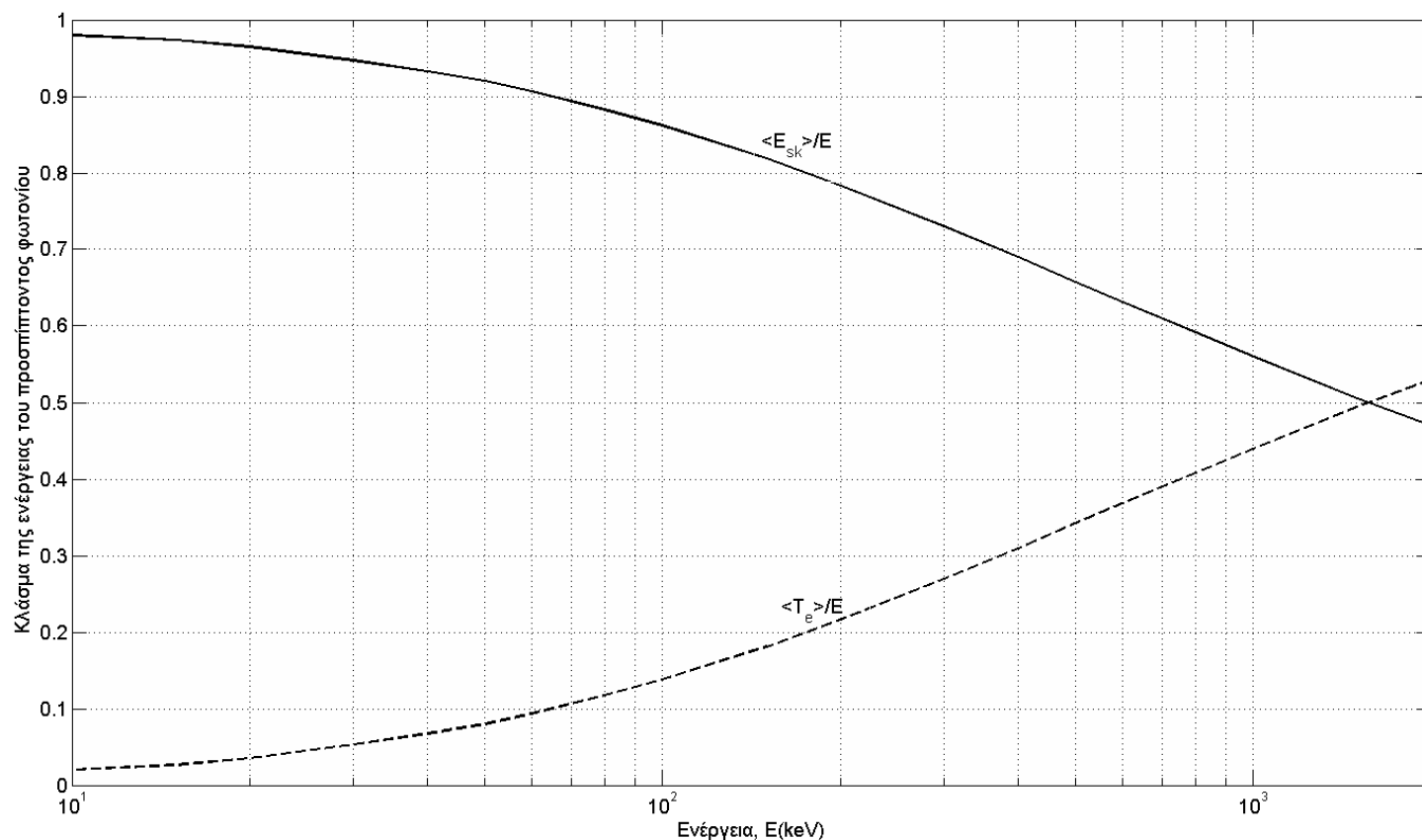
$$\phi=180^\circ \rightarrow E_{sc} = m_e c^2 / 2$$



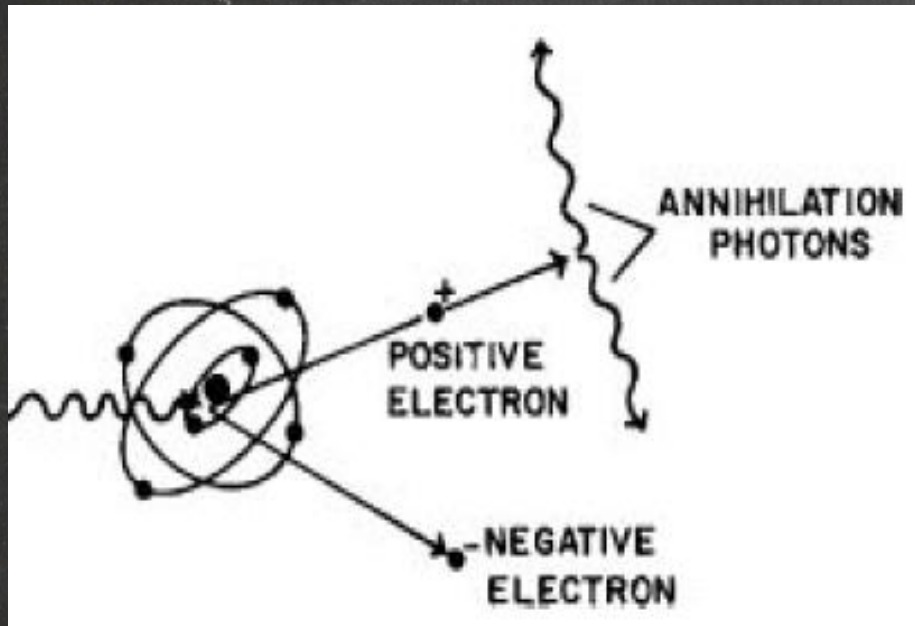
**Κατανομή της γωνίας
εκπομπής του e- Compton και
του φωτονίου που υπέστη
σκέδαση
ως προς τη διεύθυνση του
αρχικού φωτονίου**

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^- , e^+ και σε κινητική ενέργεια αυτών
- Υπάρχει κατώφλι ενέργειας:

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

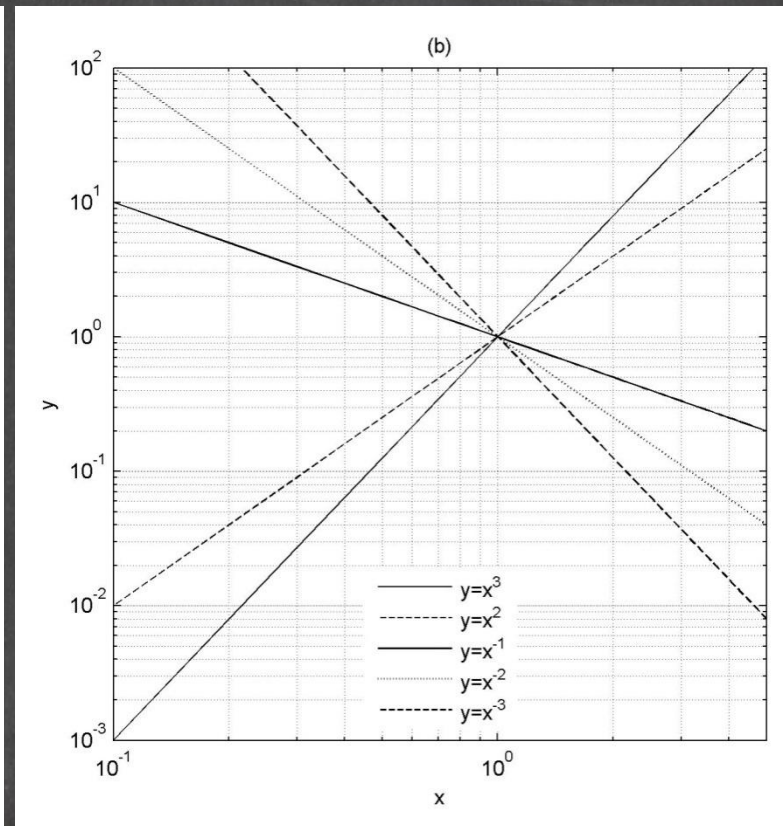
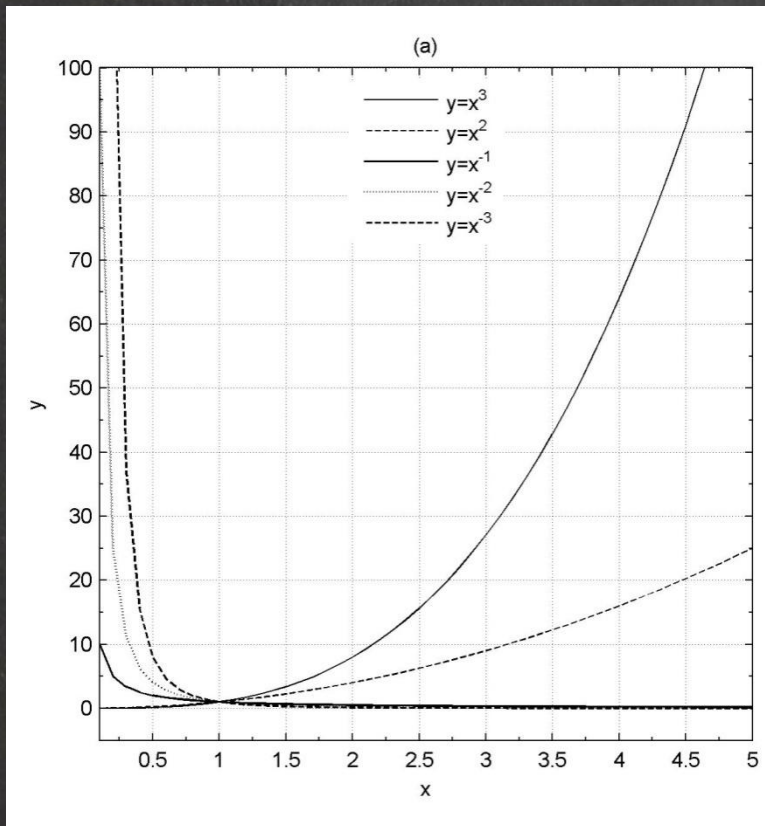
$$f^{pp} = 1 - \frac{1.02}{E}$$

**Σχετική πιθανότητα κάθε είδους
αλληλεπίδρασης**

Συναρτήσεις δυνάμεων και λογαριθμικές κλίμακες ...

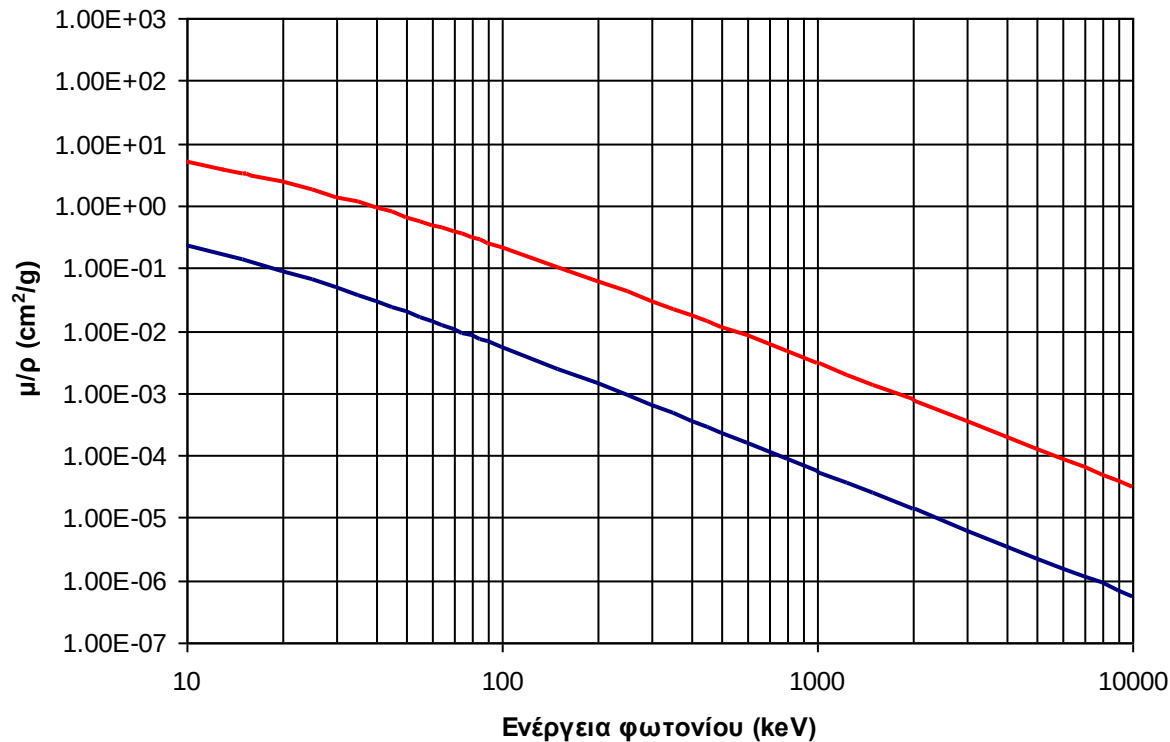
$$y = Ax^{\pm n} \Rightarrow$$

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



Σύμφωνη σκέδαση

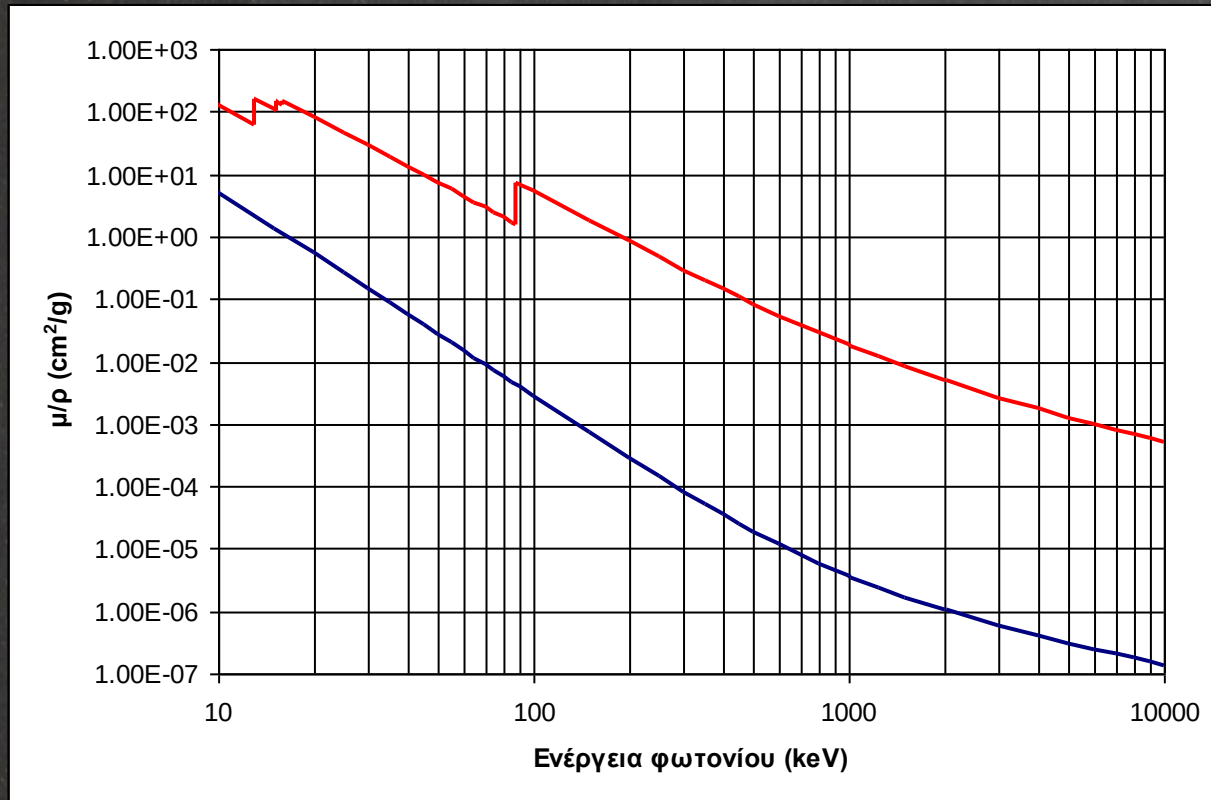
H₂O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & Pb($Z=82$)



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

Φωτοηλεκτρικό

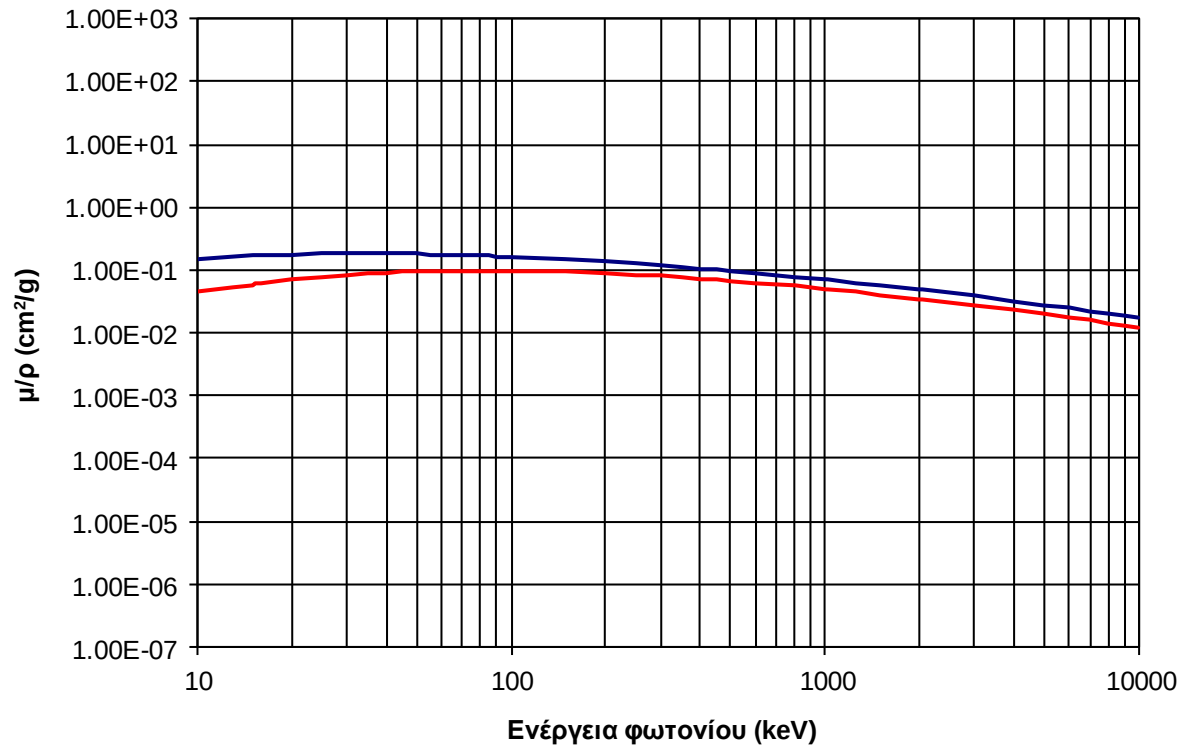
H₂O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & Pb($Z=82$)



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

Σκέδαση Compton

H₂O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & Pb($Z=82$)

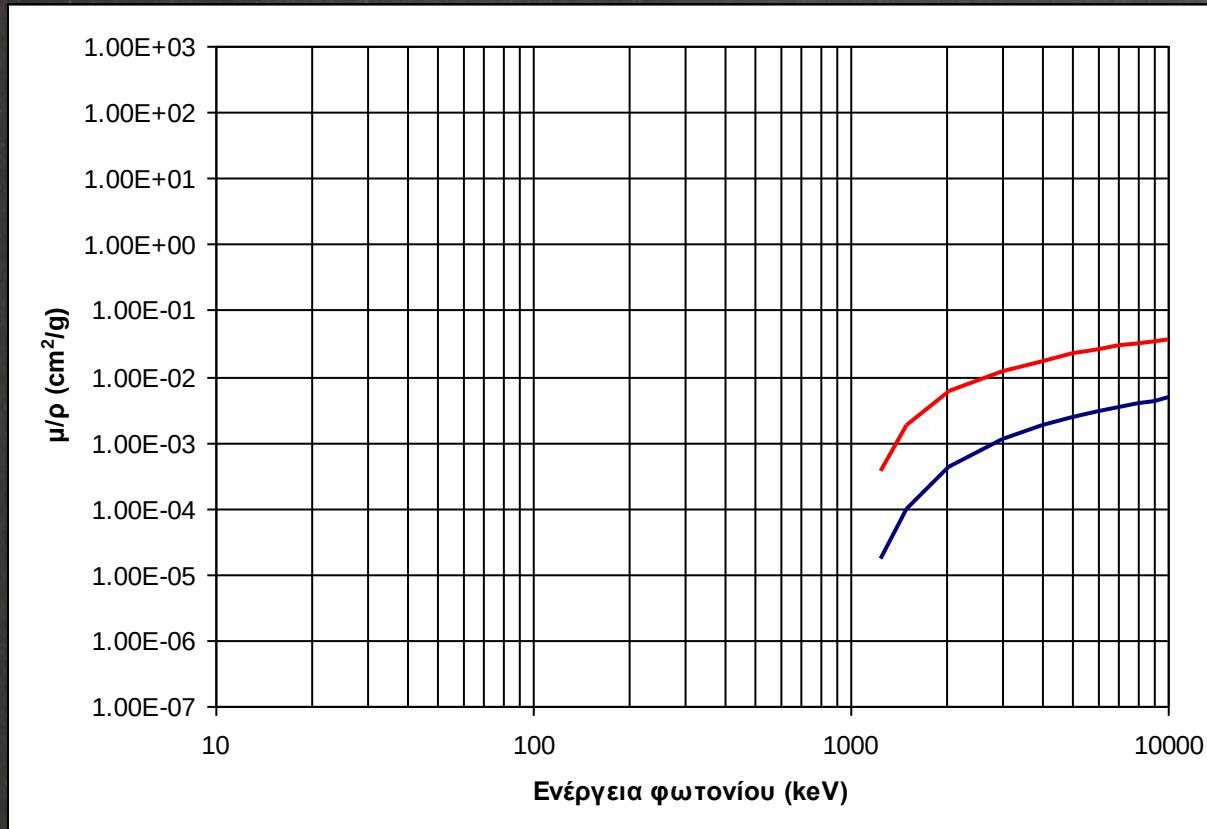


Πιθανότητα
ανά μονάδα
μάζας :

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

Δίδυμη γένεση

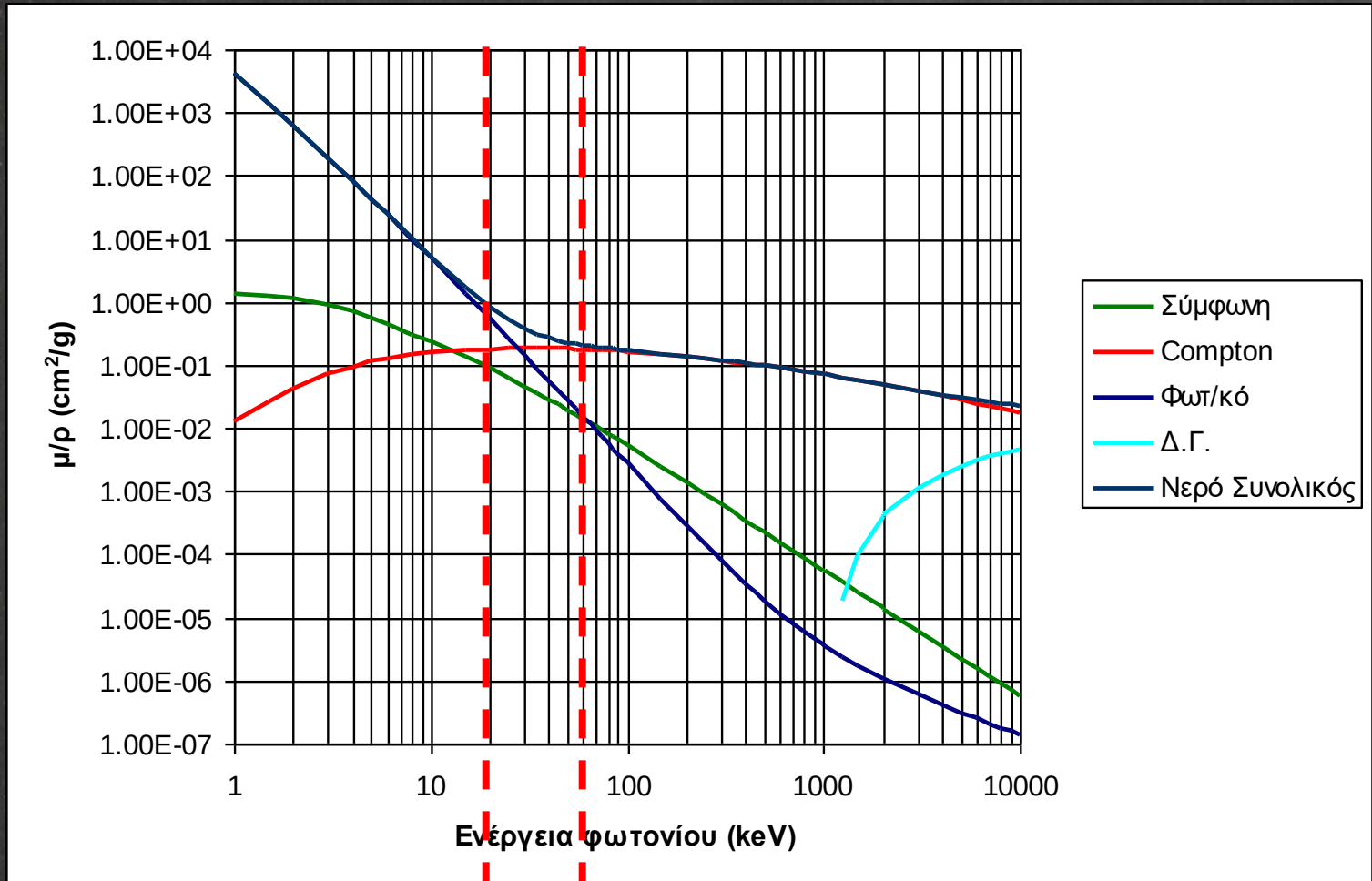
H_2O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & $\text{Pb}(Z=82)$



Πιθανότητα
ανά μονάδα
μάζας :

- Αυξάνει με την E ($>1,02 \text{ MeV}$)
- Αυξάνει με τον Z

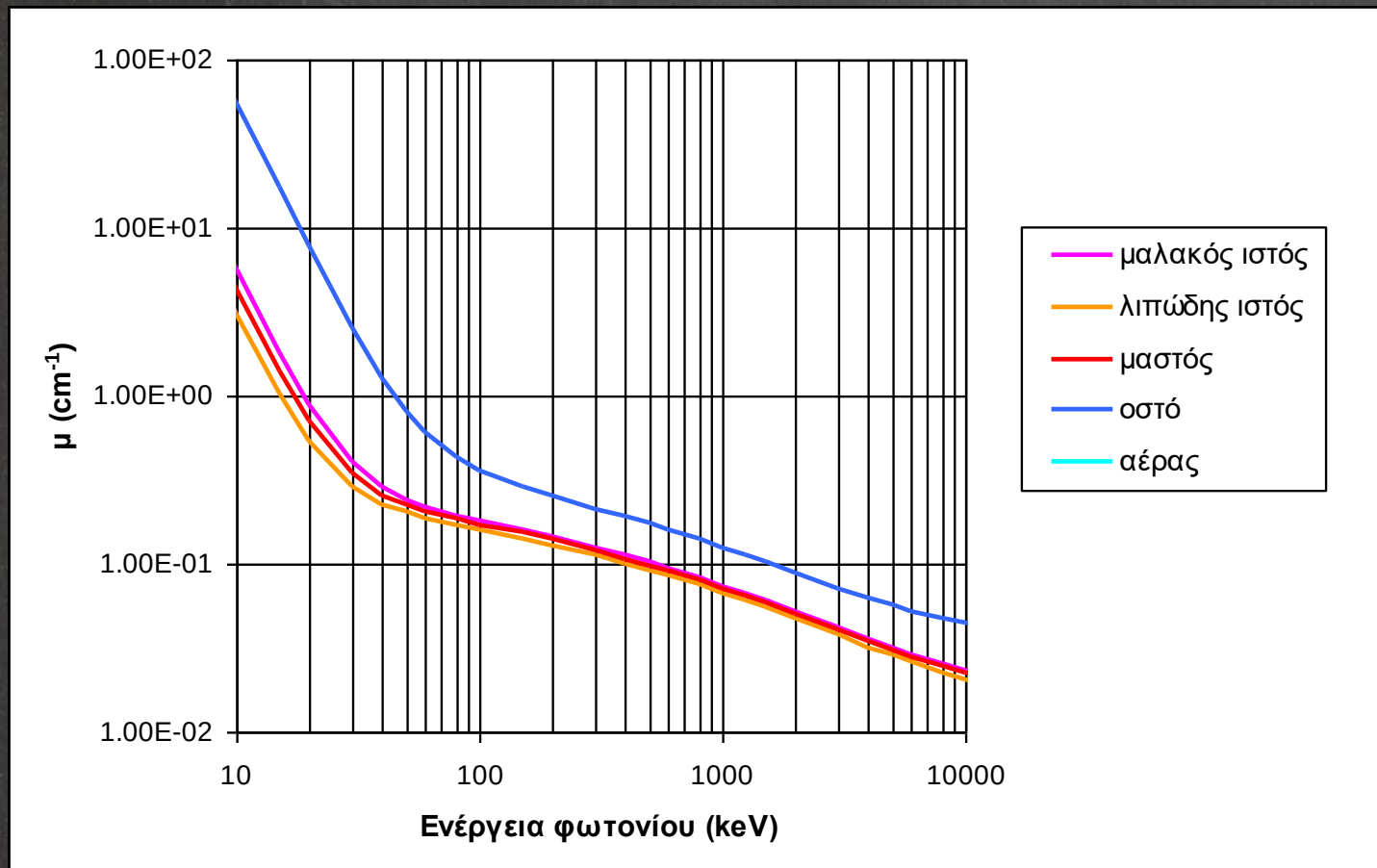
Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού



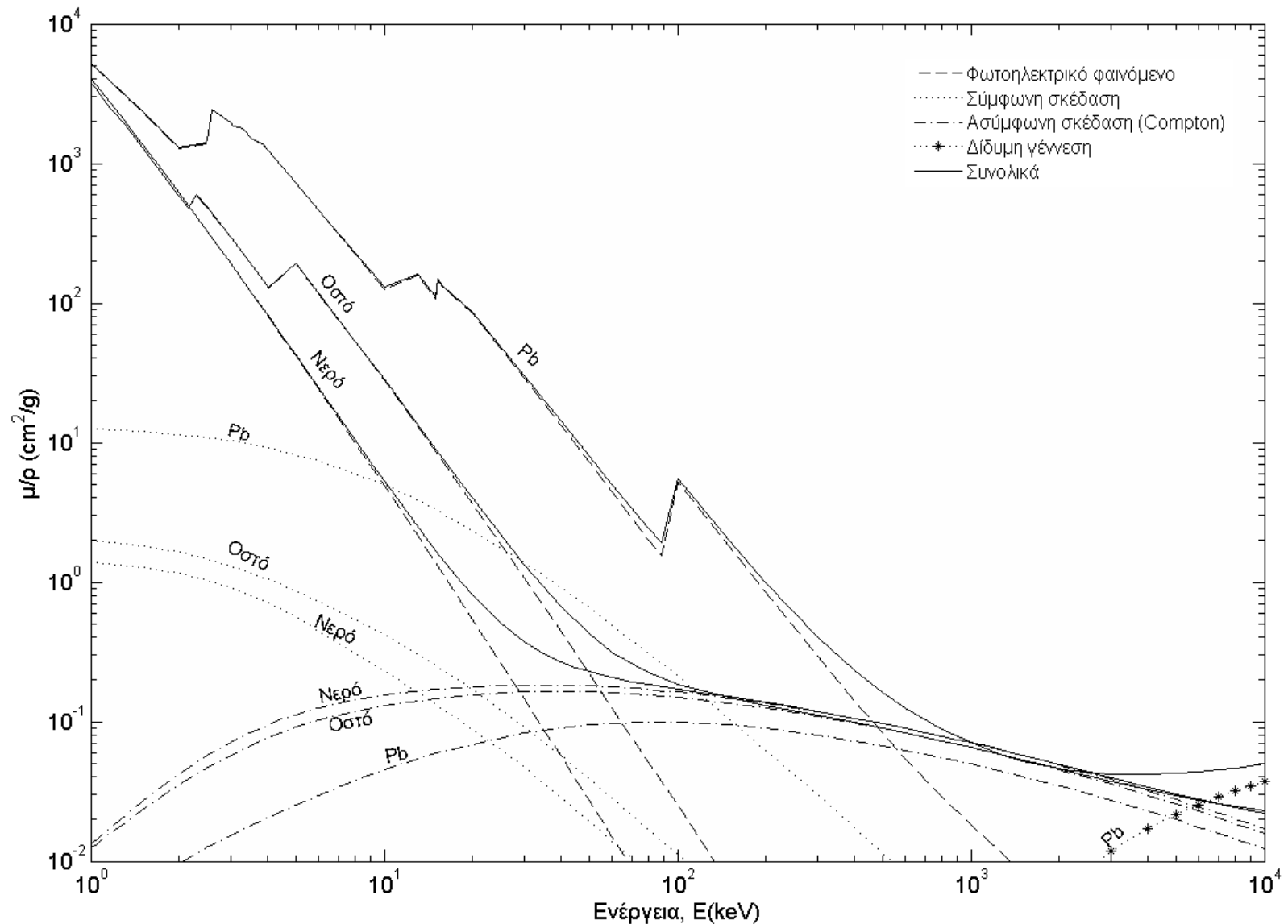
Φωτοηλεκτρικό

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 Kerma⁶

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, εξαϋλωση)
- Το ποσοστό της κινητικής ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων που απορροφάται από το υλικό λόγω διεγέρσεων & ιονισμών θα είναι $(1-g)$
 - $g \sim 0$ για $E \ll$ ή $Z \ll$
 - Μπορώ τότε να ορίσω το **μαζικό συντελεστή ενεργειακής απορρόφησης, μ_{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 μ_{tr} ή ο μ λόγω διαφορών στις ενεργειακές στοιβάδες ελευθέρων ατόμων και ατόμων στο μόριο

product of μ_{tr}/ρ for a material and $(1 - g)$ is called the *mass energy-absorption coefficient*, μ_{en}/ρ , 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, μ_{en} μπορώ να υπολογίσω το μέρος του KERMA που θα απορροφηθεί από το υλικό.
 - Συμβολίζεται K_{col} (collision KERMA):

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

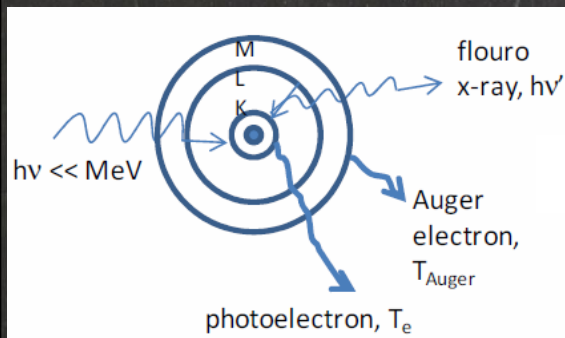
$$= \frac{\mu_{tr}}{\rho} (1 - g) \Psi$$

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

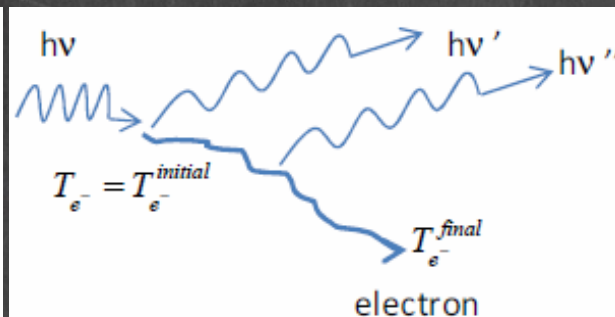
- Έχει τις ίδιες μονάδες με τη δόση.
 - Μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο P
 - Ισούται με τη δόση στο P υπό την προϋπόθεση ότι η ενέργεια που εκφράζει θα μεταδοθεί σε dm περί του P (θα απορροφηθεί από την dm υλικού περί του P) και δεν θα διαφύγει

Ενέργεια που απορροφάται από το υλικό

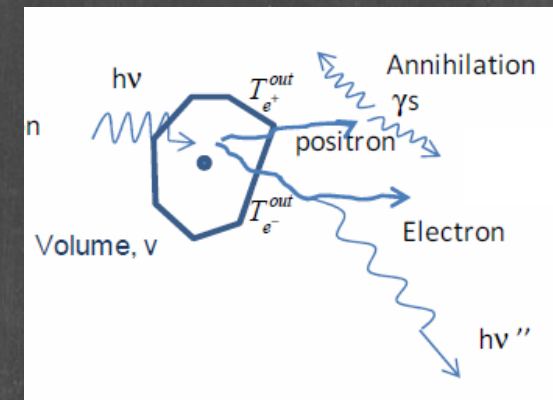
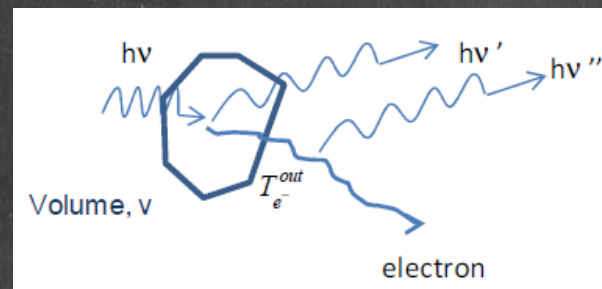
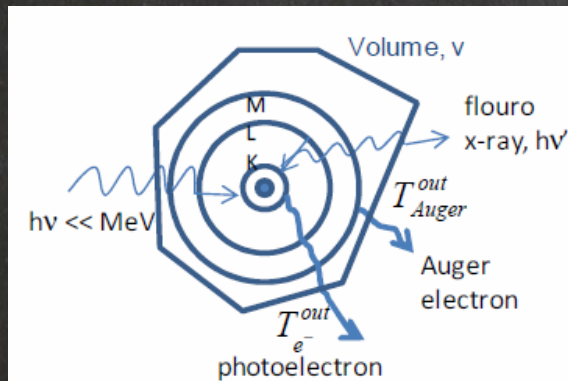
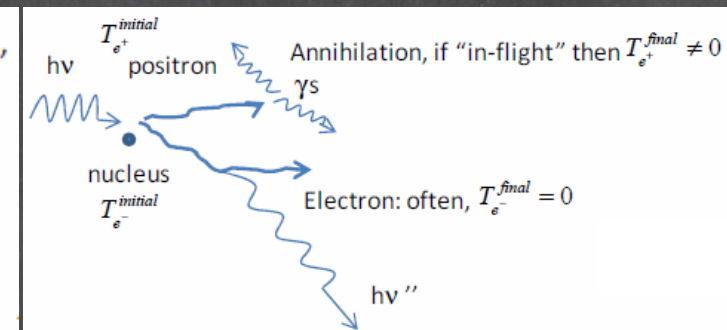
Photoelectric effect



Compton



Pair Production



- Αν είναι γνωστή η Ψ , το K_{col} μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο P
 - Η δόση δεν μπορεί να υπολογιστεί από την Ψ
- 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

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)
- ✓ 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