

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

eclass: PHYS215

Π. Παπαγιάννης

Αν. Καθηγητής,
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,
Ιατρική Σχολή Αθηνών.

Γραφείο 21

210-746 2442

ppapagi@phys.uoa.gr

Ιατρική Φυσική:

- Δοσιμετρία Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας
- Βιολογικές επιδράσεις
- Ακτινοπροστασία

Βιβλιογραφία:
κεφ. 2-5 από το σύγγραμμά σας

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

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, n , καθώς $n \rightarrow \infty$ (N. μεγάλων αριθμών)

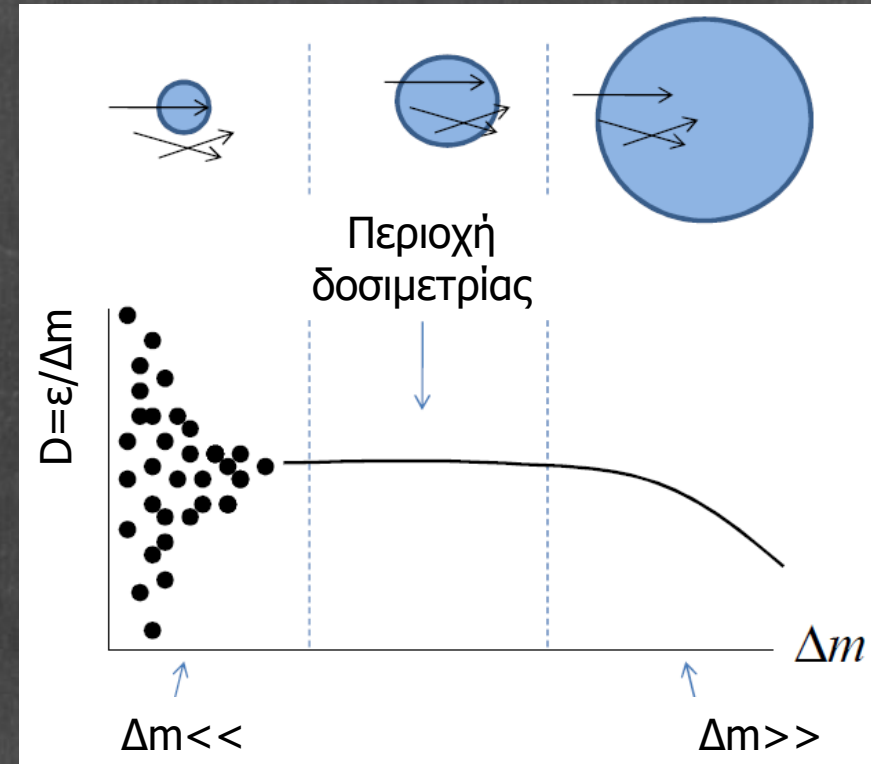
! η αναμενόμενη τιμή στοχαστικού μεγέθους είναι μη-στοχαστικό μέγεθος !

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 τη 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, 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

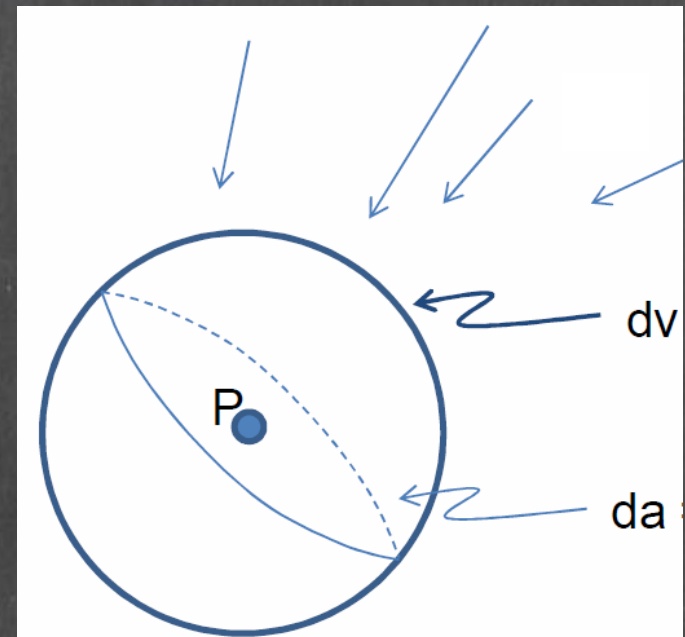
$$\Phi = \frac{dN}{da}.$$

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

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

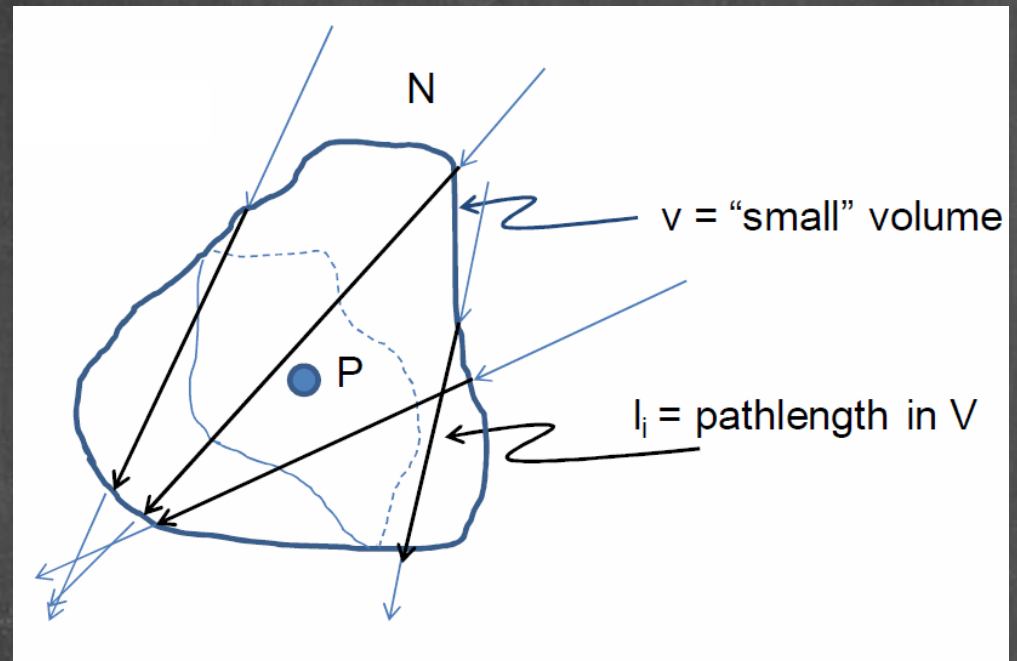
Unit: $J m^{-2}$



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

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

$$\Phi'(\text{μετ.}) \Leftrightarrow \Phi(\text{μετ.}) \Leftrightarrow \frac{d\Phi}{d(\text{μετ.})}$$

$$\Phi_{\text{μετ.}} \Leftrightarrow \frac{d\Phi}{d(\text{μετ.})}$$

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

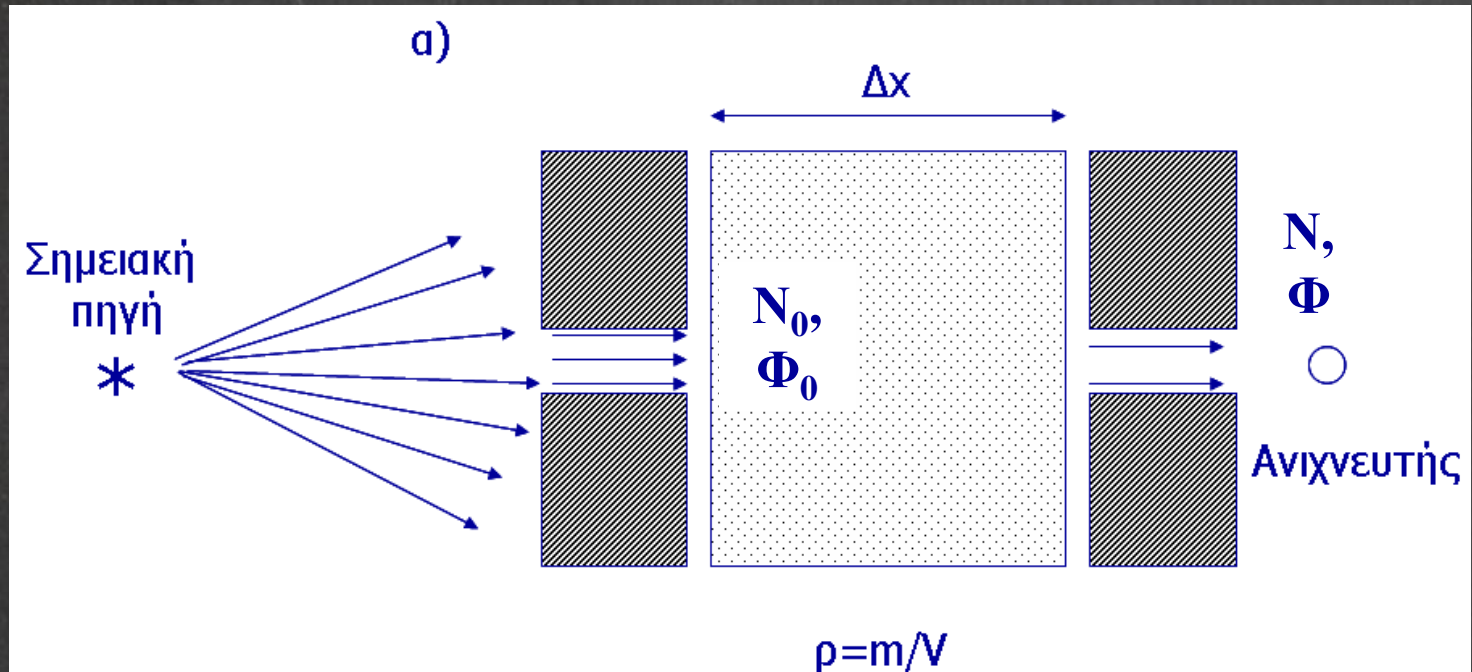
Περιγραφή πεδίου ακτινοβολίας

- 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:

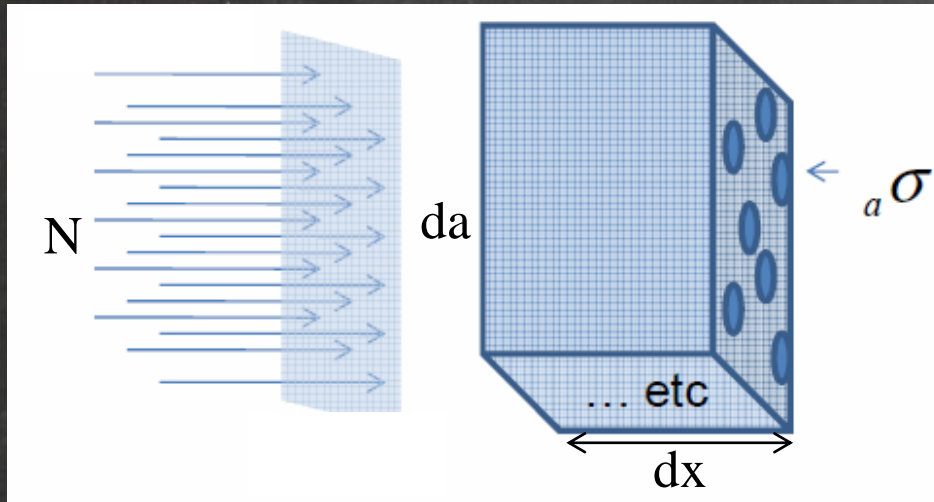
Table 3.1. Scalar radiometric quantities

Name ^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 ($\rho N_A/AB$)

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

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

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

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

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

• Όπου 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): $\exp(-\mu x)$
- η πιθανότητα φωτόνιο να αλληλεπιδράσει σε βάθος μεταξύ x και $x+dx$ (ή το ποσοστό των φωτονίων που θα αλληλεπιδράσουν): $\exp(-\mu x) \mu dx$
- ορίζεται η **μέση ελεύθερη διαδρομή** φωτονίου (mean free path):

$$\lambda = \int_0^{\infty} l(e^{-\mu l} \cdot \mu dl) = \mu \int_0^{\infty} l e^{-\mu l} dl = 1 / \mu$$

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

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

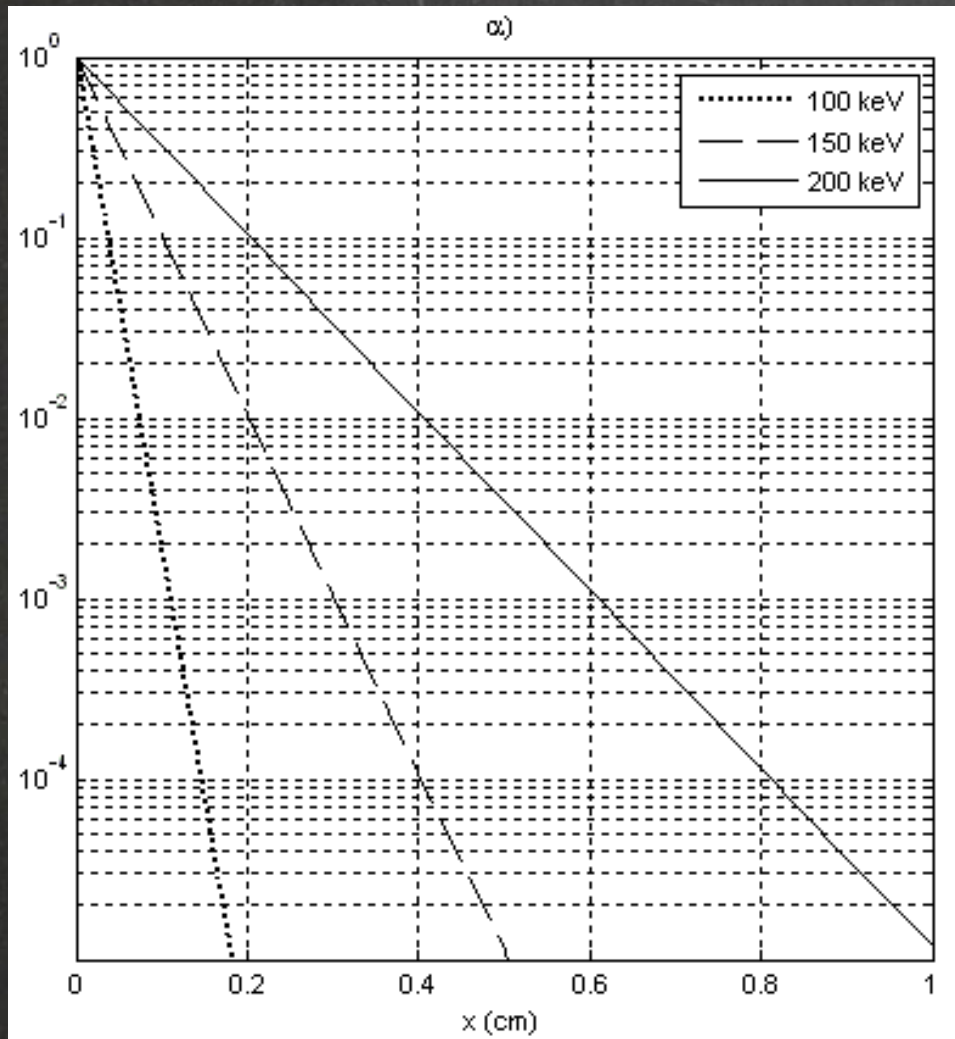
$$x_{1/2} \equiv HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

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

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

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

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



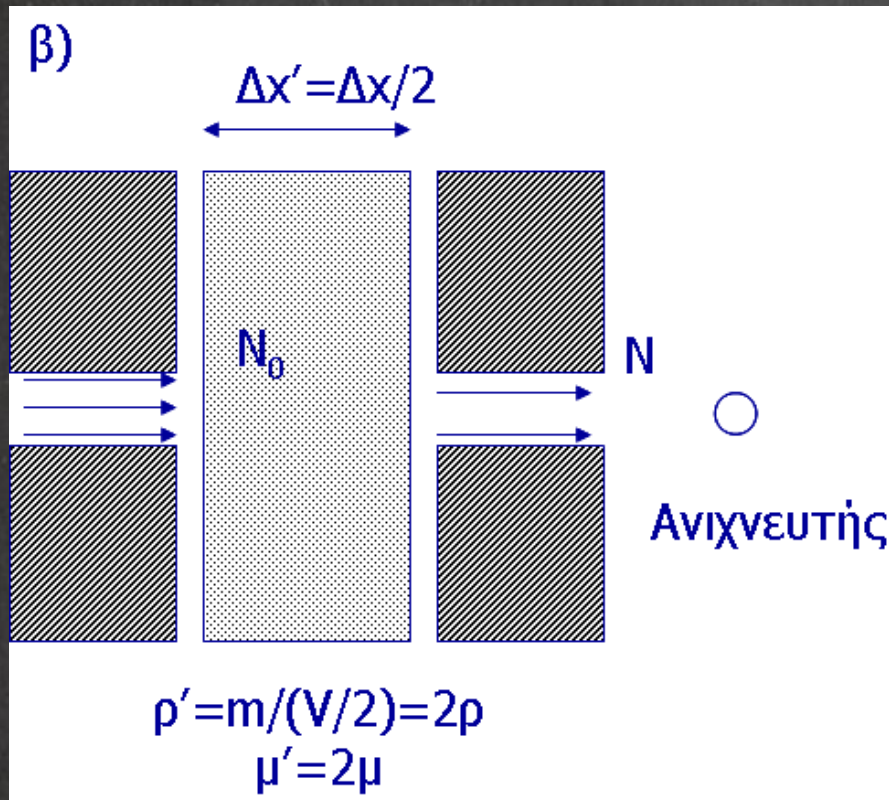
• Ενέργεια φωτονίων, E

Υλικό, Z

και πυκνότητα ...

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

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



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

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

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

4.2 Mass Attenuation Coefficient

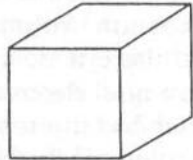
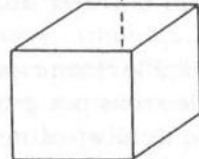
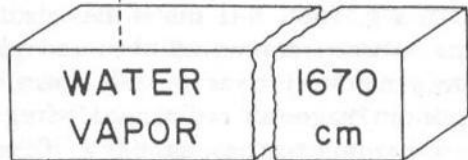
The *mass attenuation coefficient*, μ/ρ , of a material, for uncharged particles of a given type and energy, is the quotient of dN/N by ρdl , where dN/N is the mean fraction of the particles that experience interactions in traversing a distance dl in the material of density ρ , thus

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

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

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 $1 \text{ gm}/\text{cm}^2$
Linear Attenuation Coefficient (cm^{-1})	Mass Attenuation Coefficient (cm^2/gm)		
0.214	0.214	1	 <p>WATER 1 cm</p>
0.196	0.214	0.917	 <p>ICE 1.09 cm</p>
0.000128	0.214	0.000598	 <p>WATER VAPOR 1670 cm</p>

Υπολογισμός συντελεστών αλληπίδρασης για μόρια/μίγματα

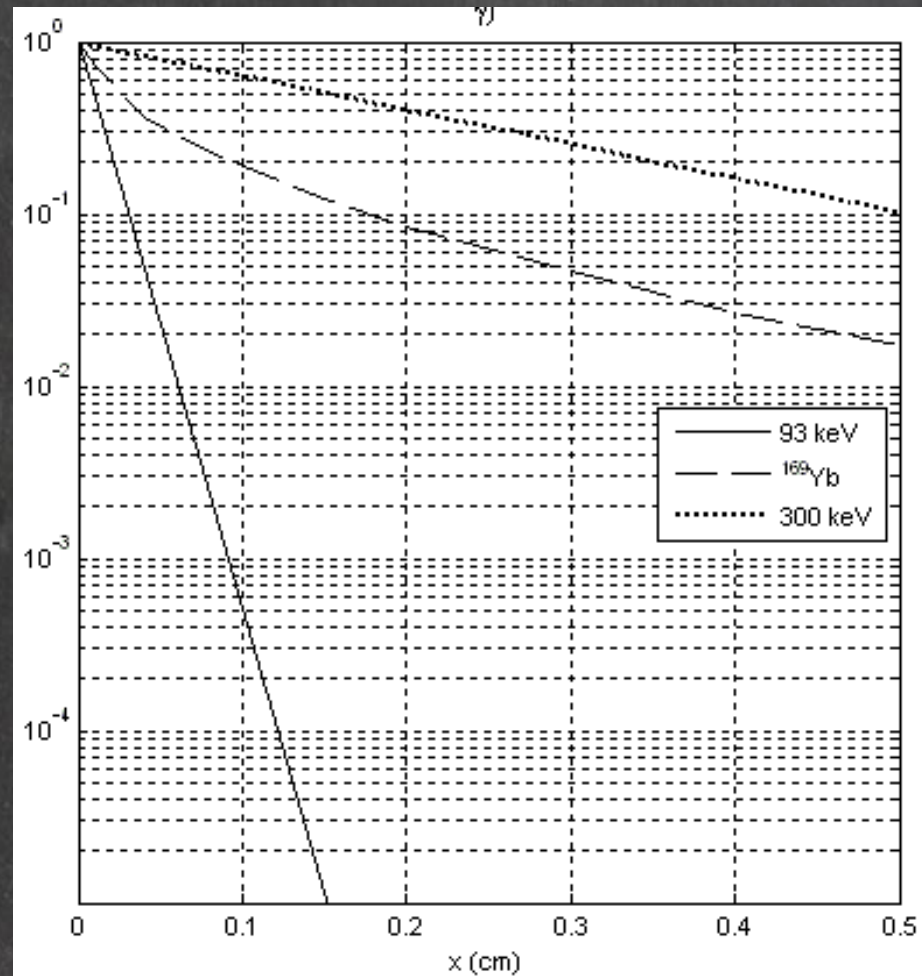
$$\sigma_{A_X B_Y} = X \sigma_A + Y \sigma_B$$

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

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

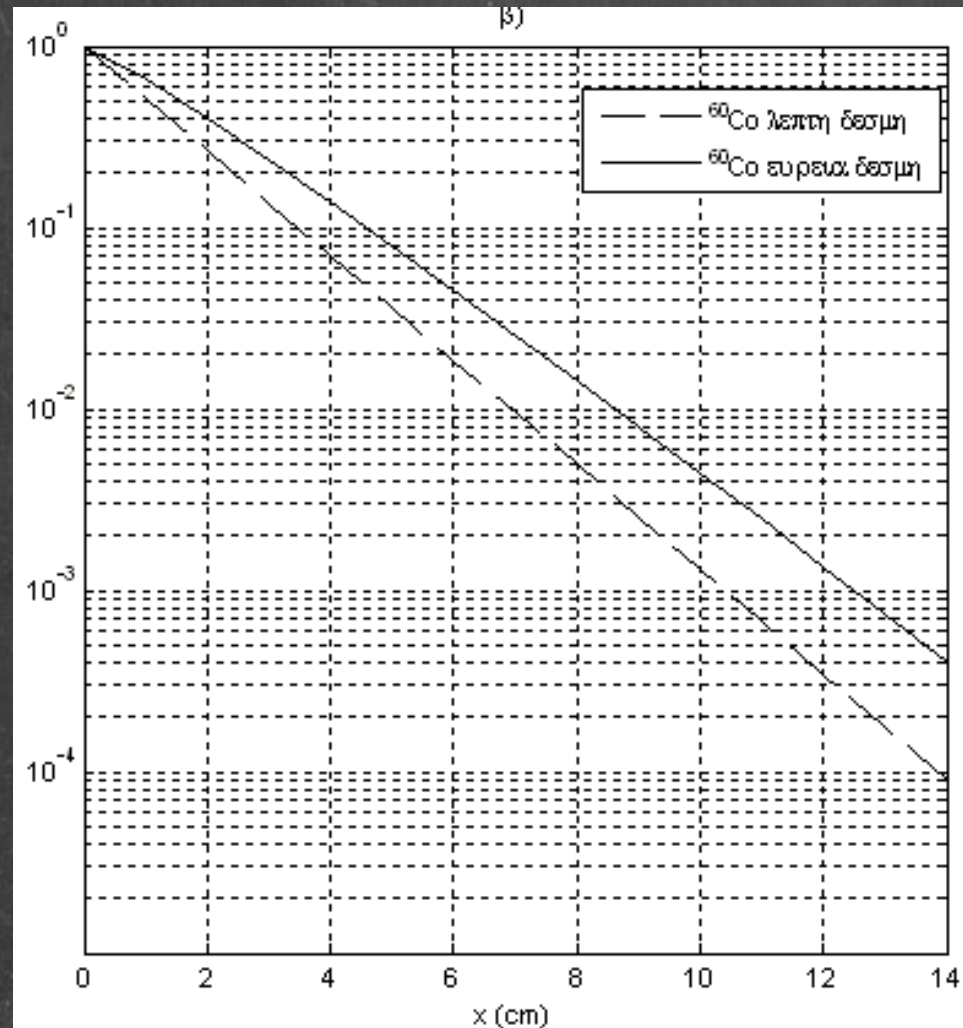
Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

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



Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

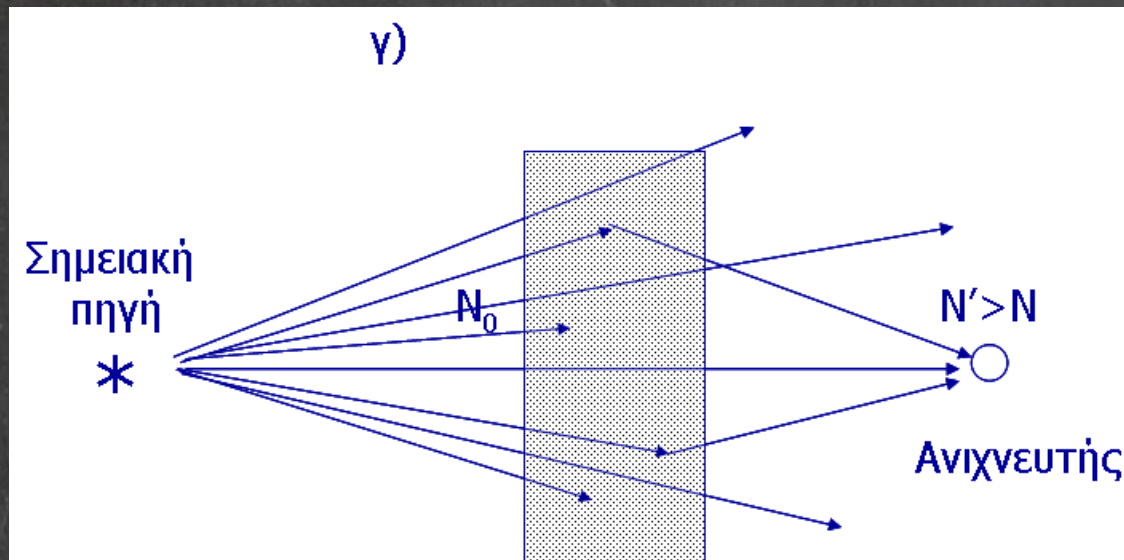
Μόνο σε συνθήκες "λεπτής" δέσμης ή "καλής" γεωμετρίας.
Εξασθένηση δεν σημαίνει απορρόφηση και σε συνθήκες "ευρείας" δέσμης
ή "κακής" γεωμετρίας:



“κακή” γεωμετρία της δέσμης...

$$I = I_0 \exp(-\mu x) B(x, E, S, I)$$

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 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

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

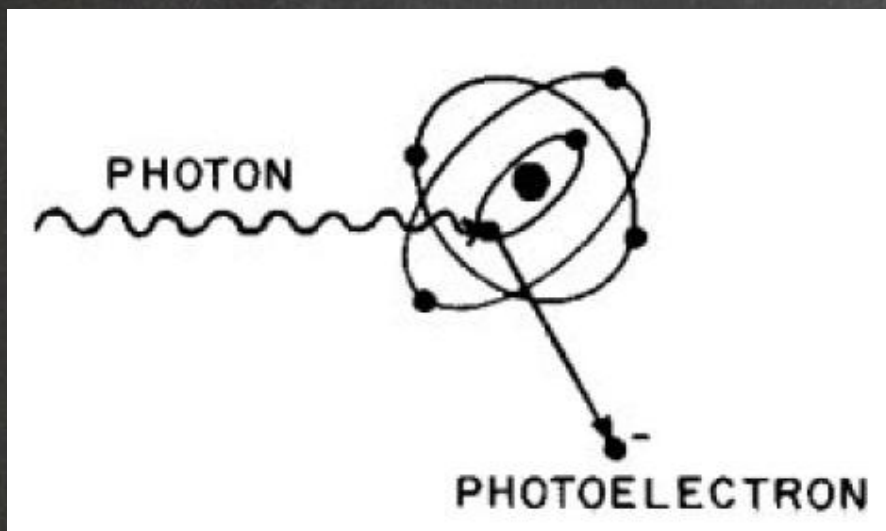
Unit: $m^2 kg^{-1}$

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:

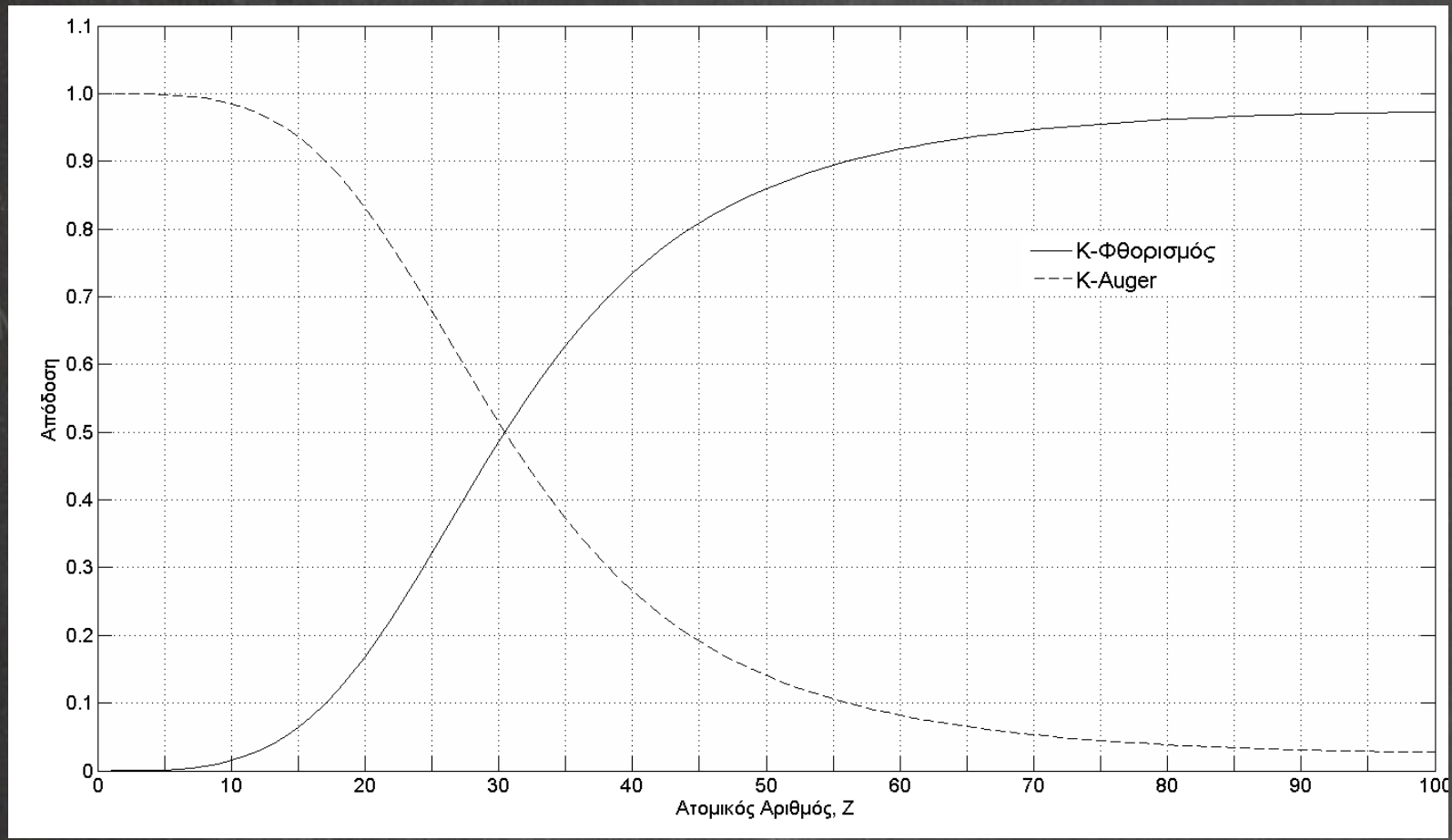
$$T_e = E - E_b$$

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

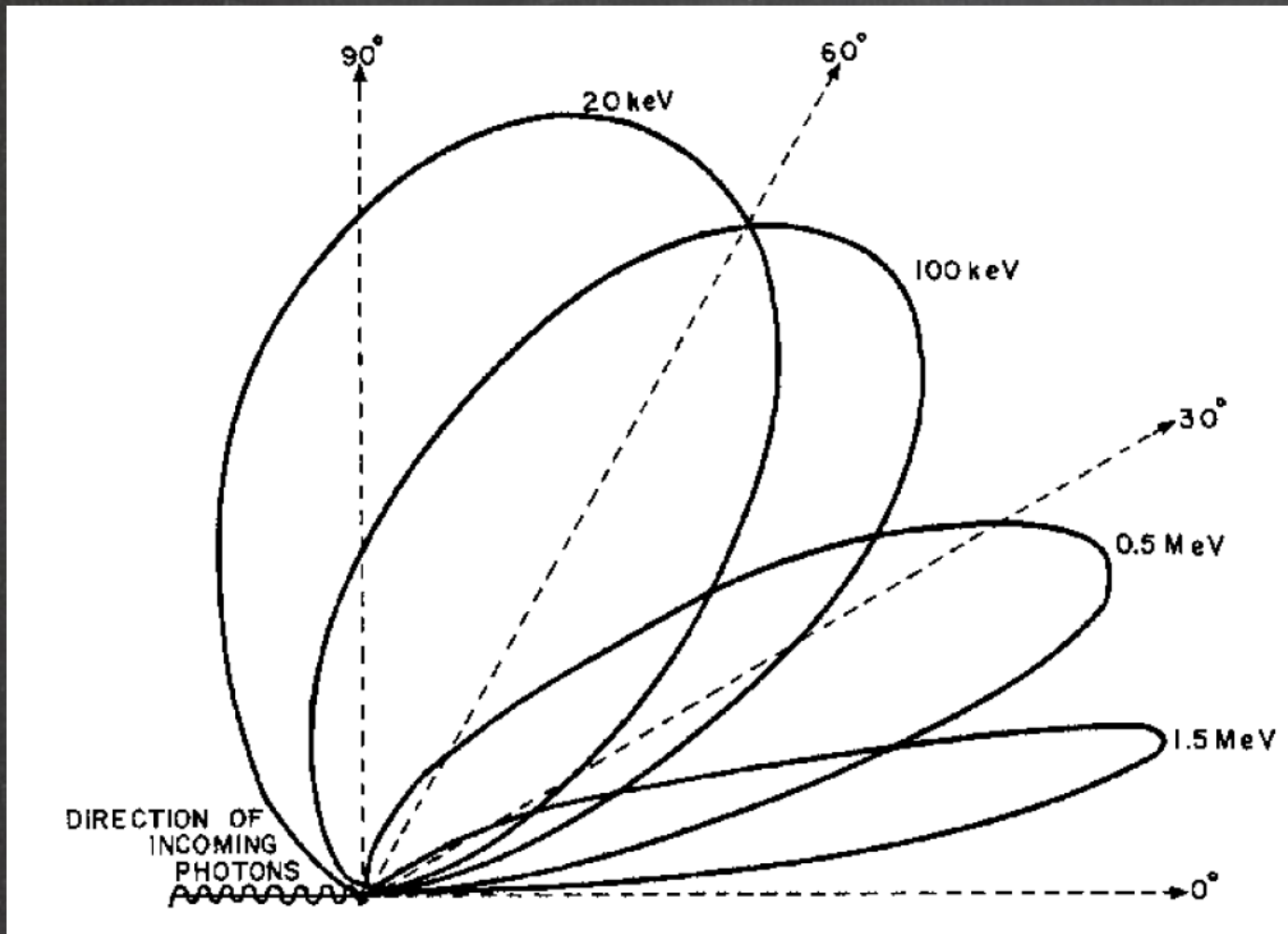
- Για βιολογικούς ιστούς $E_b \ll$
- Το κενό συμπληρώνεται με εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων Auger

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

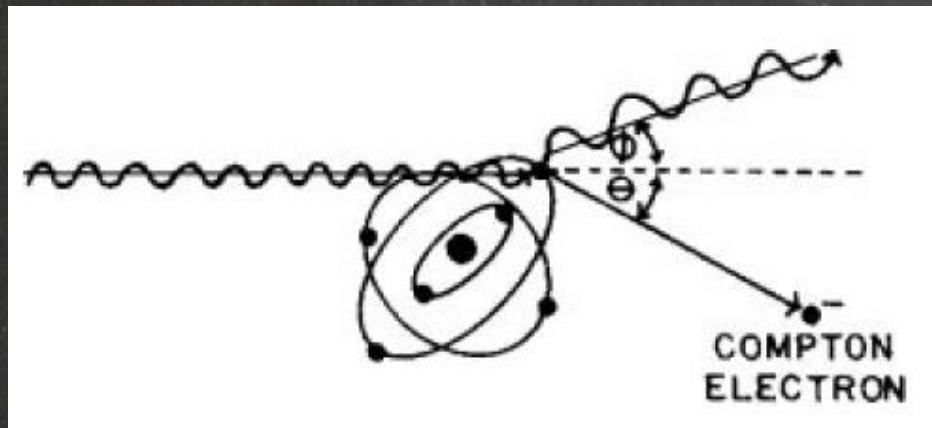
$$f^{ph} = 1 - \frac{E_X}{E}$$



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 ($\theta=90^\circ$, $\phi=0^\circ$)

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

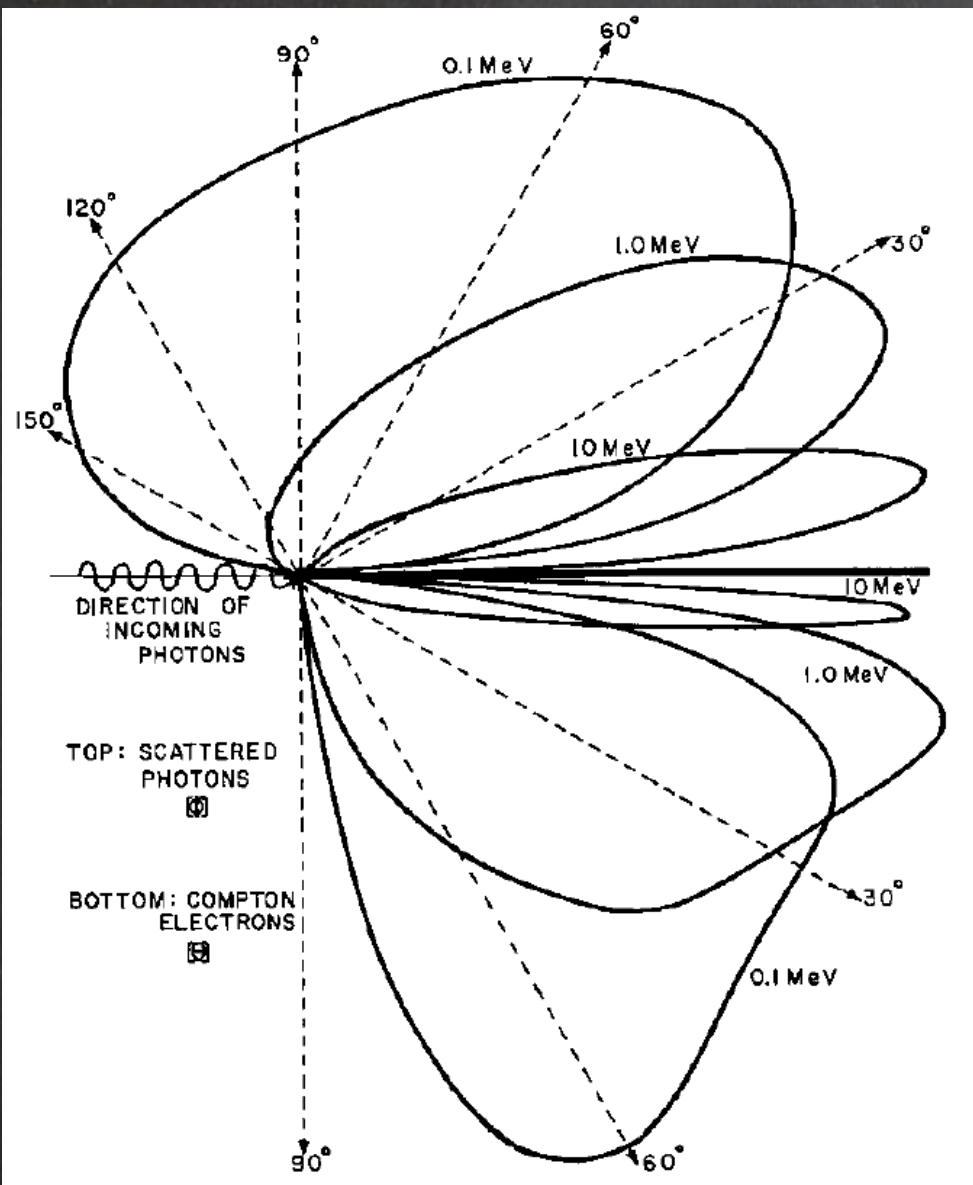
$$T_{eMIN} = 0$$

$$E_{scMAX} = E$$

Γ. $E \gg$

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

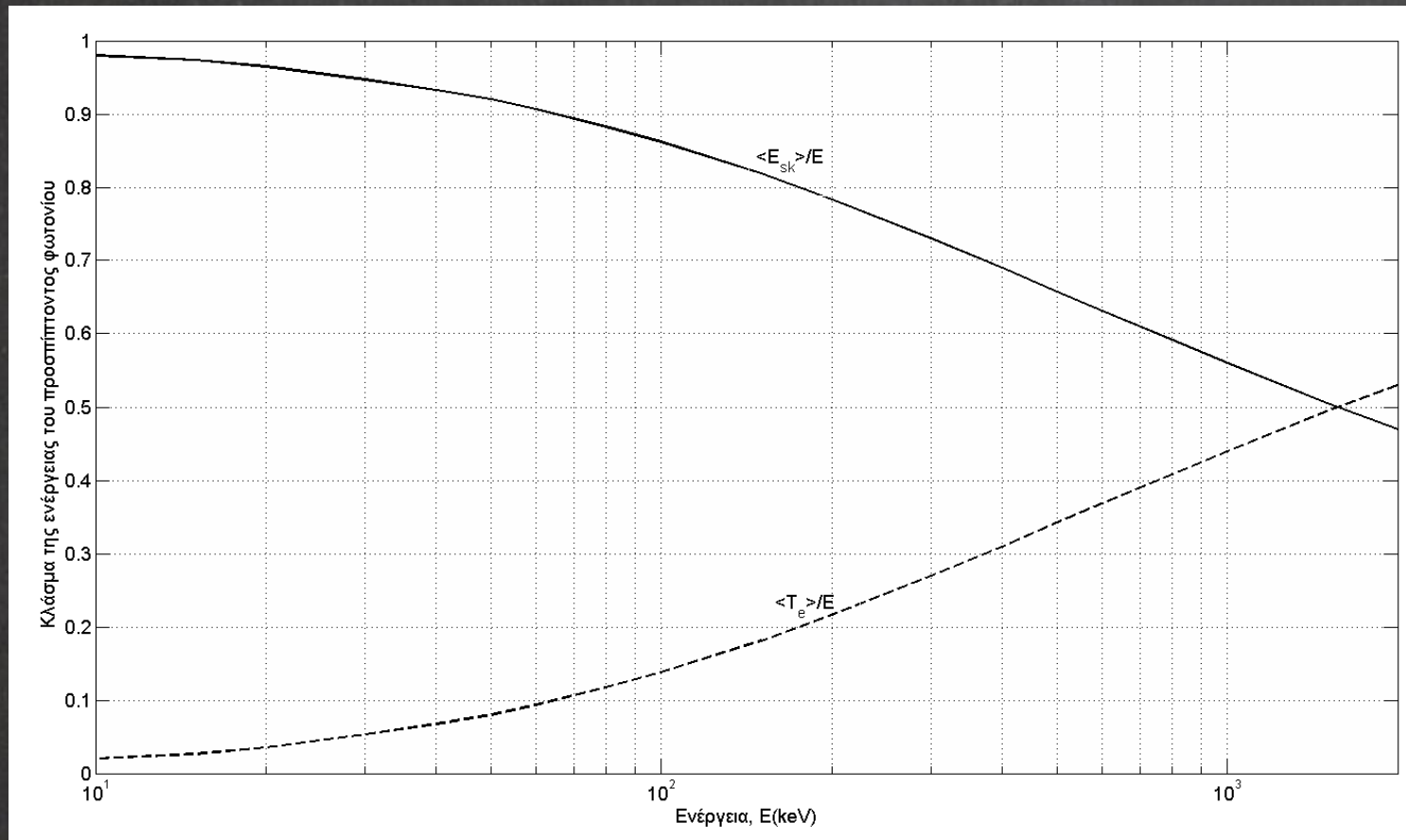
$$\phi=180^\circ \rightarrow E_{sc} = m_e c^2 / 2$$



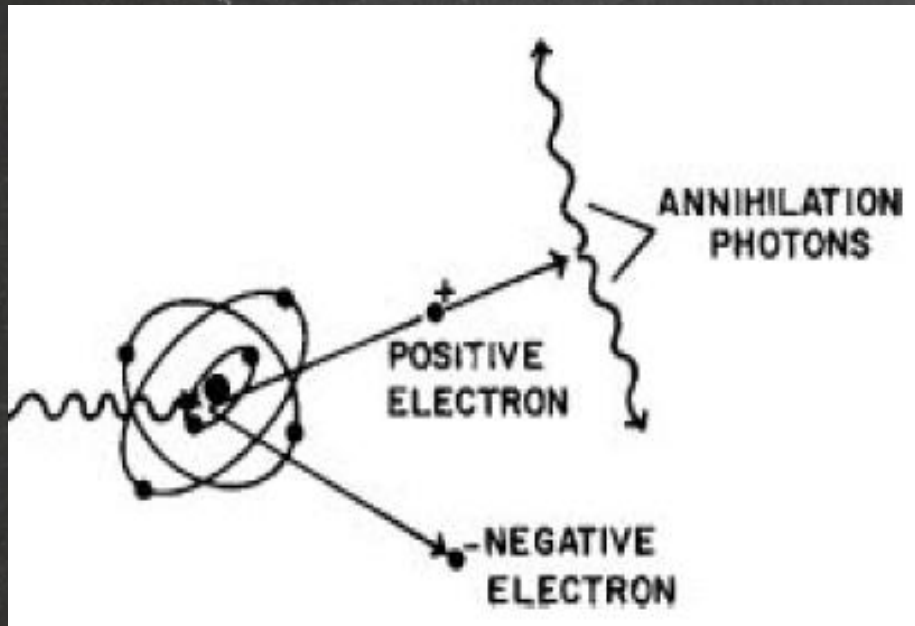
**Κατανομή της γωνίας
εκπομπής του e- Compton και
του φωτονίου που υπέστη
σκέδαση
ως προς τη διεύθυνση του
αρχικού φωτονίου**

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.

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



ΔΙΑΔΥΜΗ ΓΕΝΕΣΗ



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

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

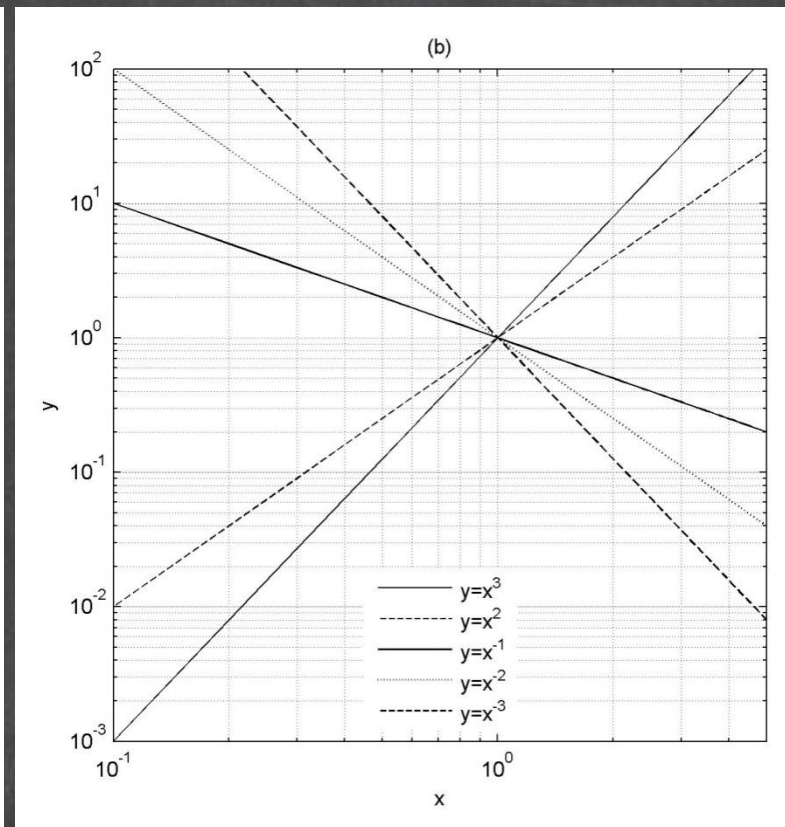
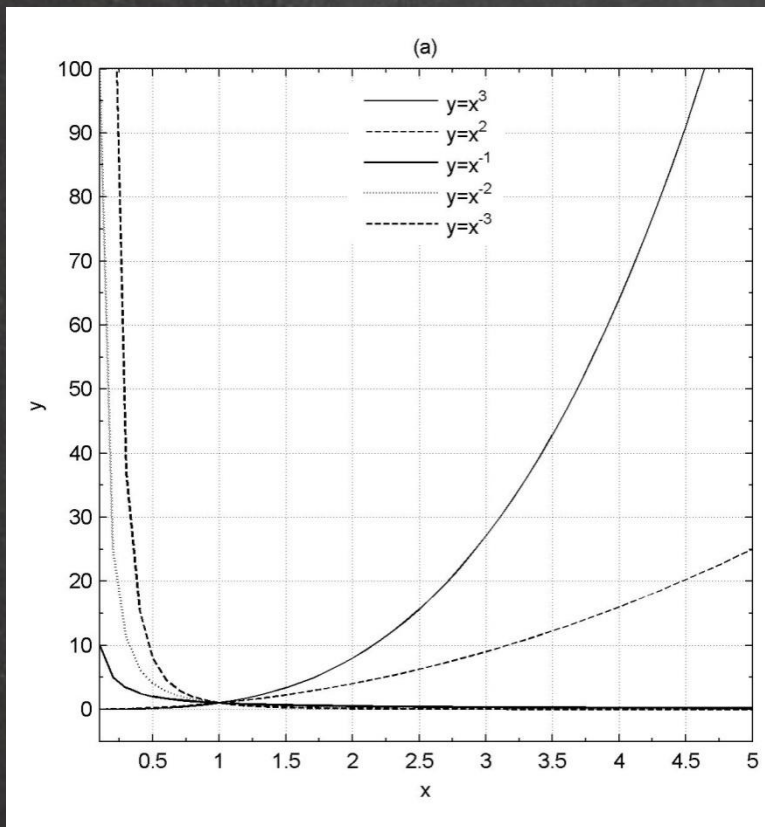
$$f^{pp} = 1 - \frac{1.02}{E}$$

**Σχετική πιθανότητα κάθε είδους
αλληλεπίδρασης**

Συναρτήσεις δυνάμεων και λογαριθμικές κλίμακες ...

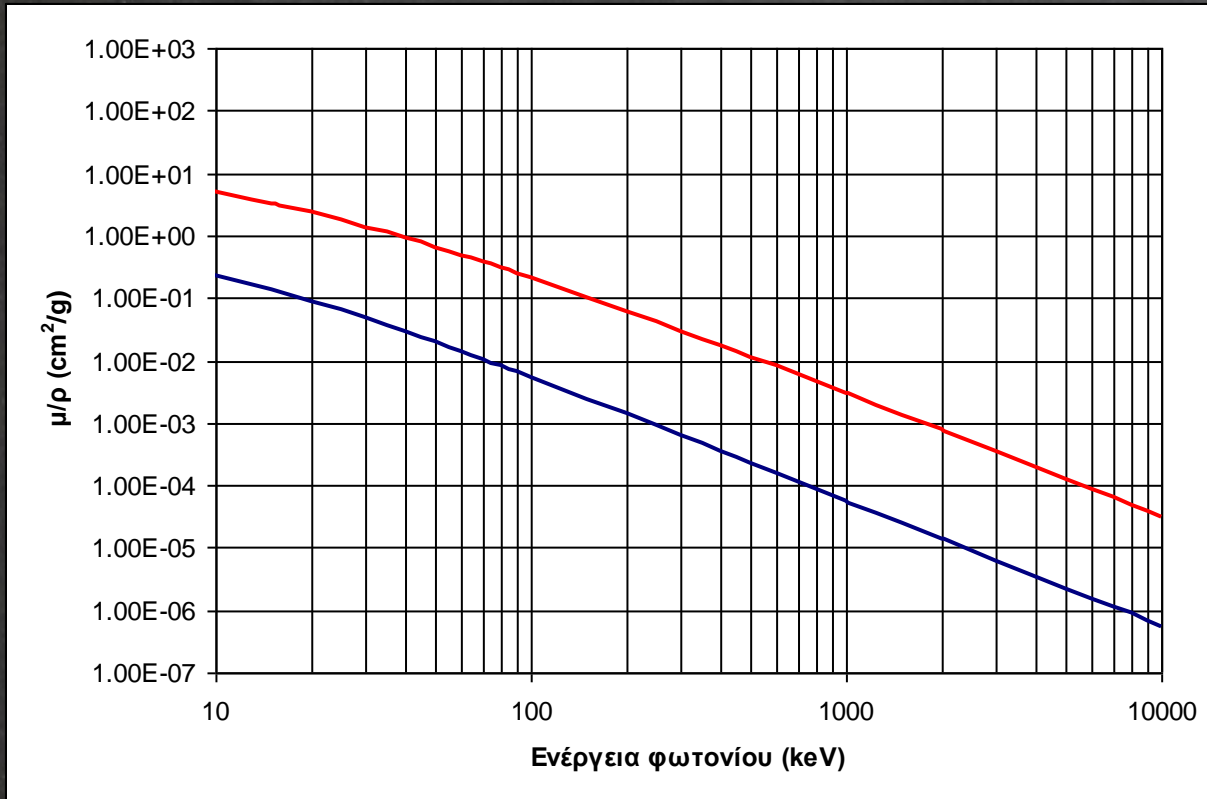
$$y = Ax^{\pm n} \Rightarrow$$

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



Σύμφωνη σκέδαση

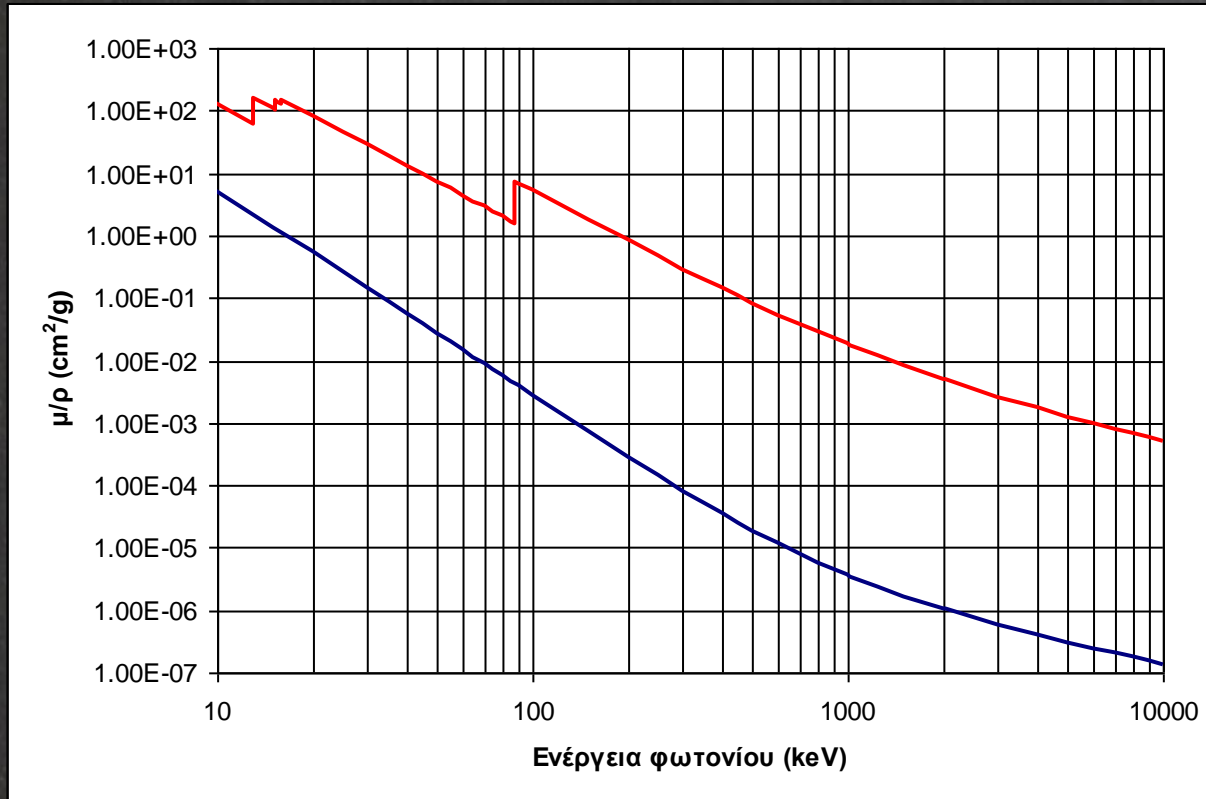
H₂O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & Pb($Z=82$)



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

Φωτοηλεκτρικό

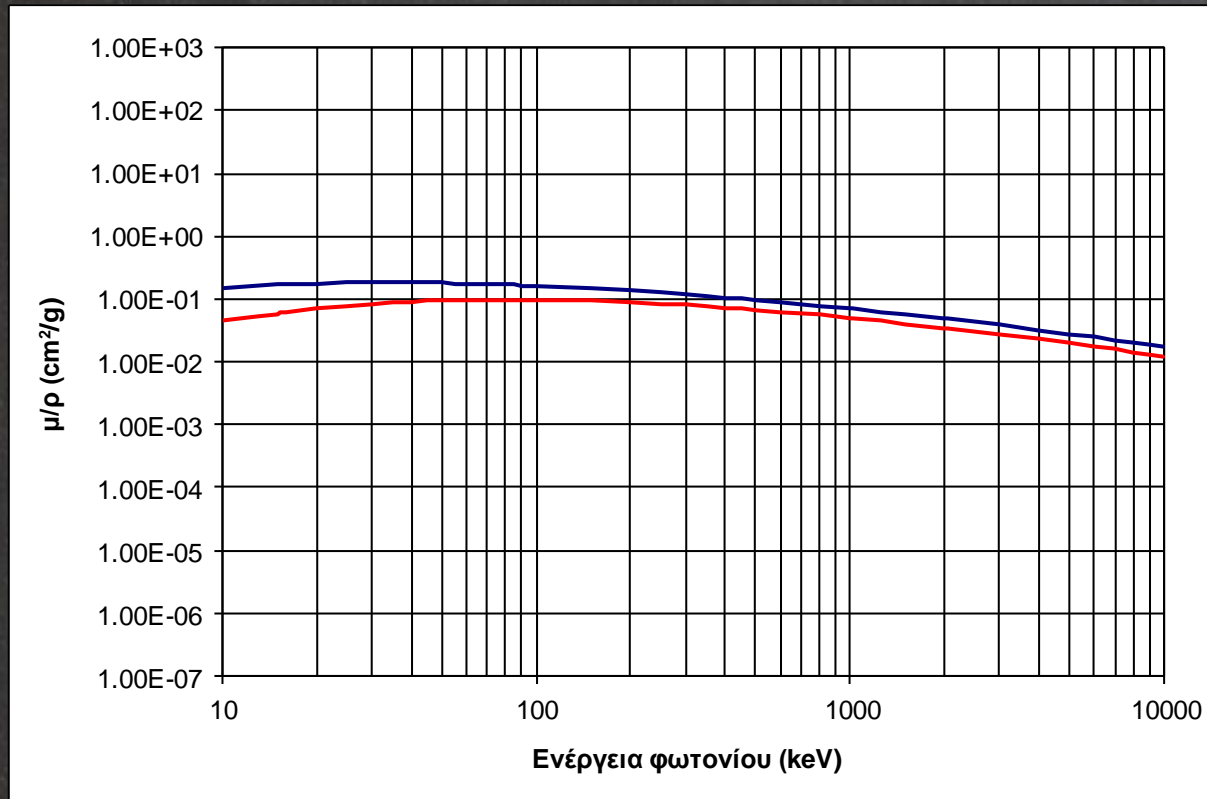
H₂O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & Pb($Z=82$)



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

Σκέδαση Compton

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

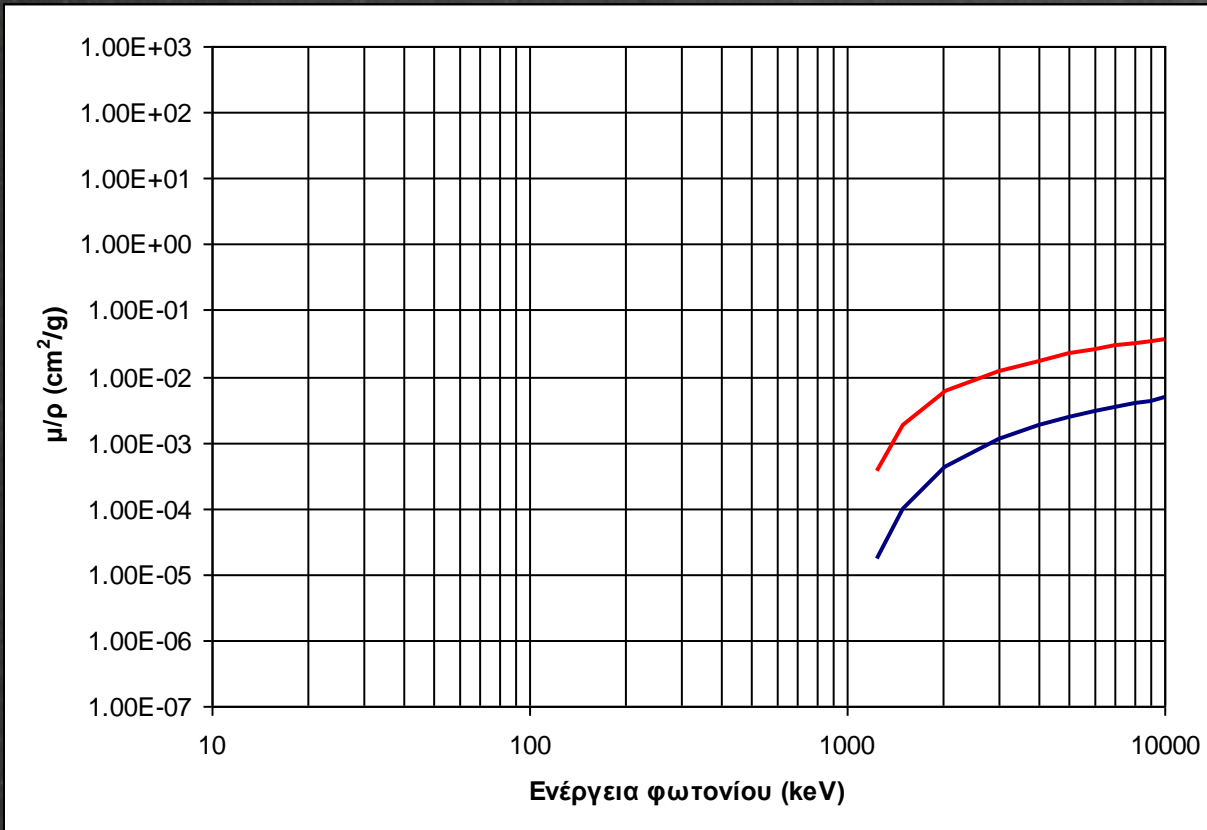


Πιθανότητα
ανά μονάδα
μάζας :

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

Δίδυμη γένεση

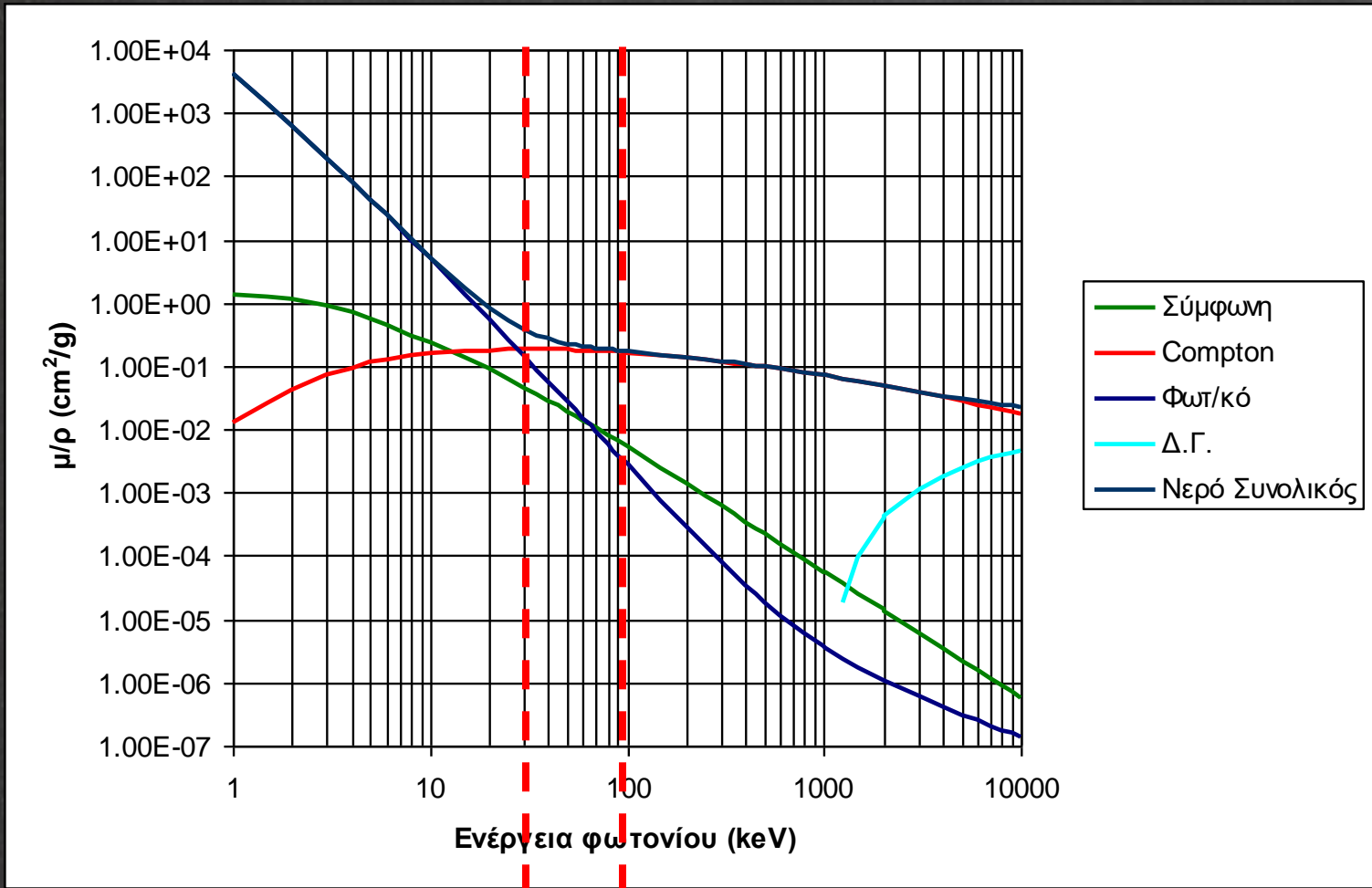
H_2O ($Z_{\text{eff}}=7.5$) & $\text{Pb}(Z=82)$



**Πιθανότητα
ανά μονάδα
μάζας :**

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

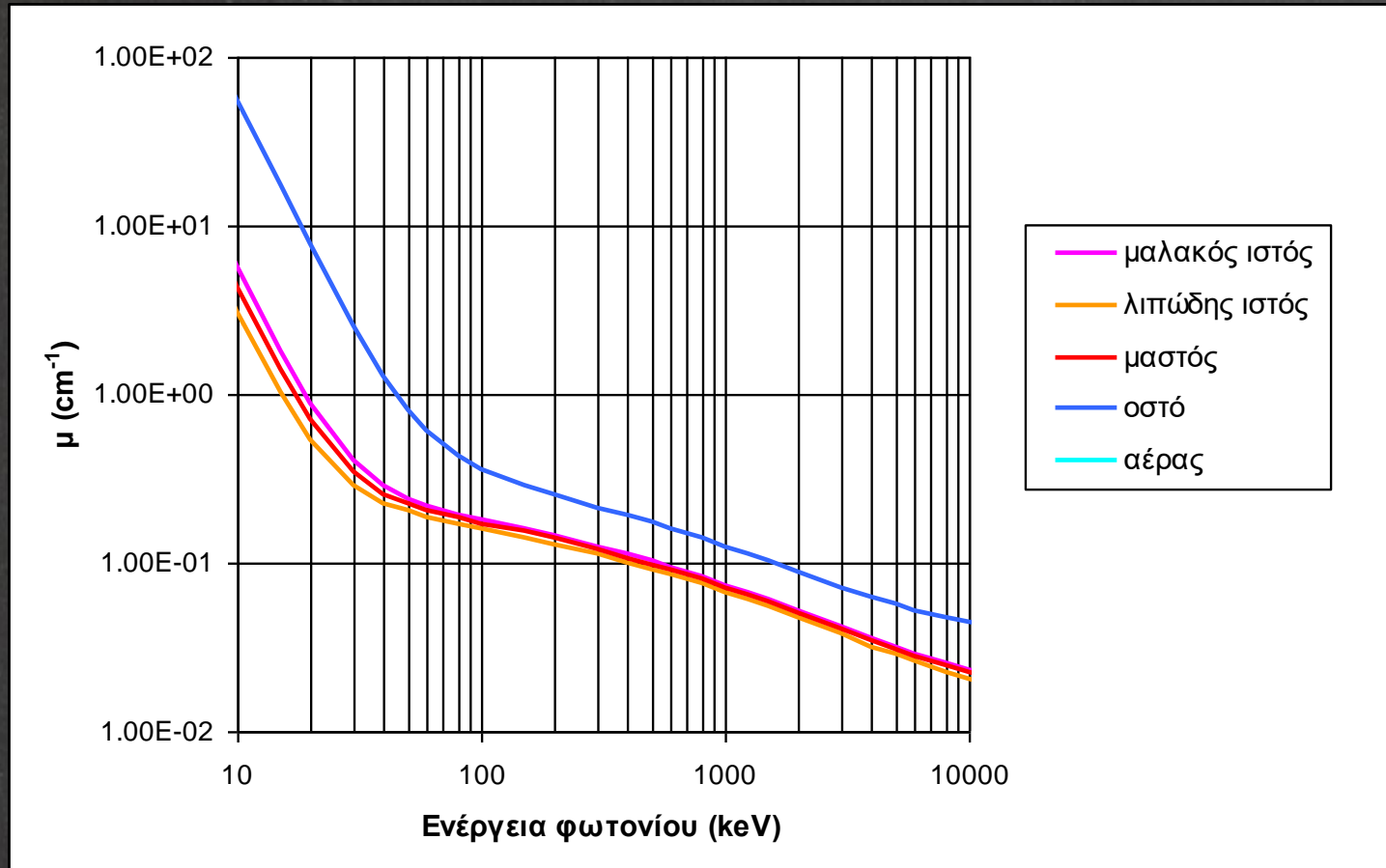
Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού



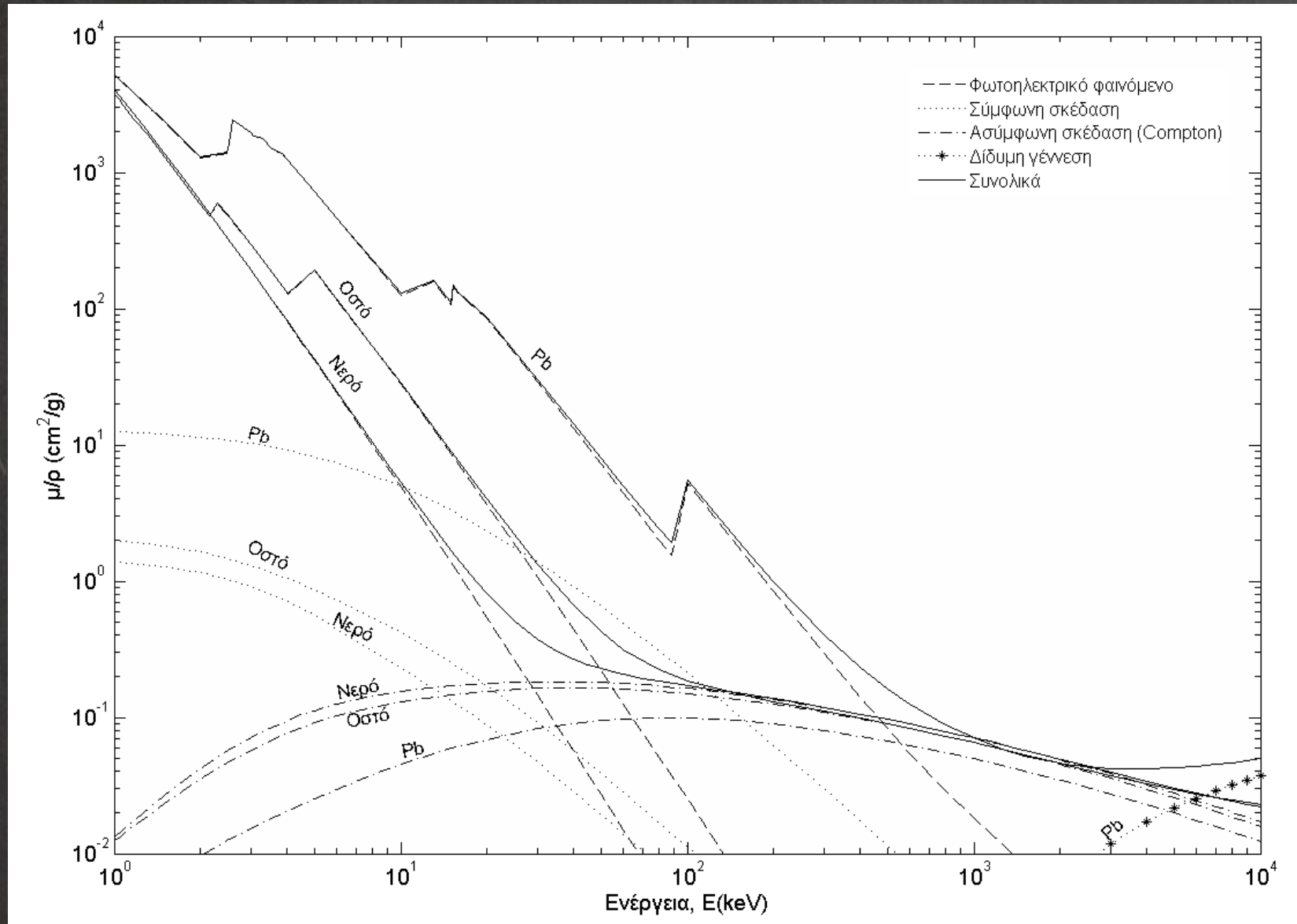
Φωτοηλεκτρικό

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, εξαΰλωση, απόδιεγέρσεις 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, 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**):

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

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

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

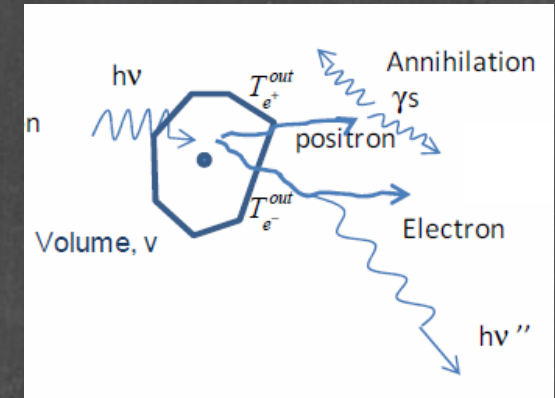
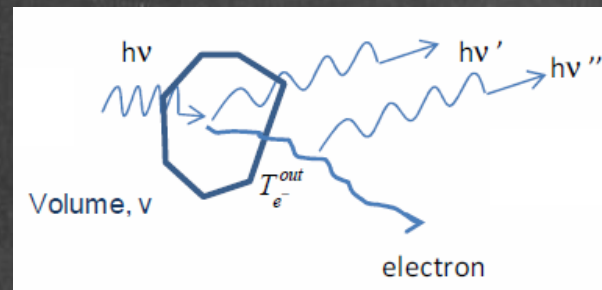
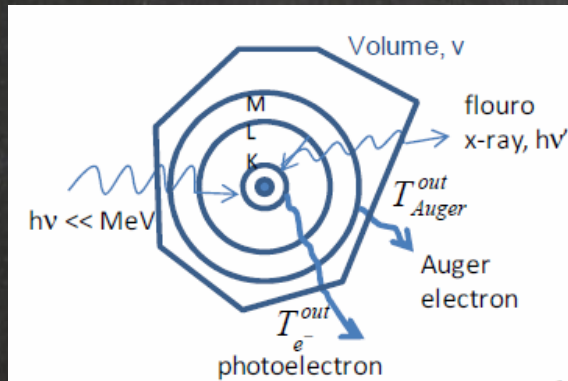
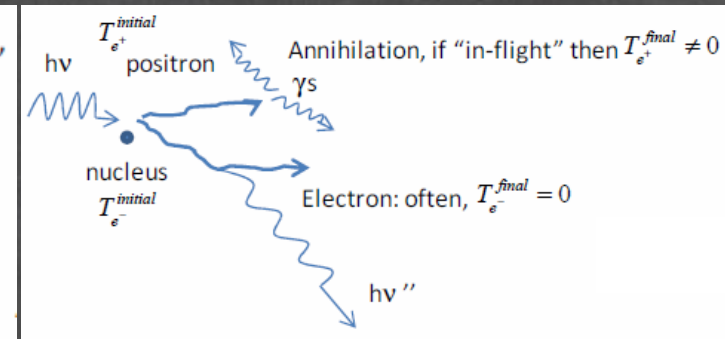
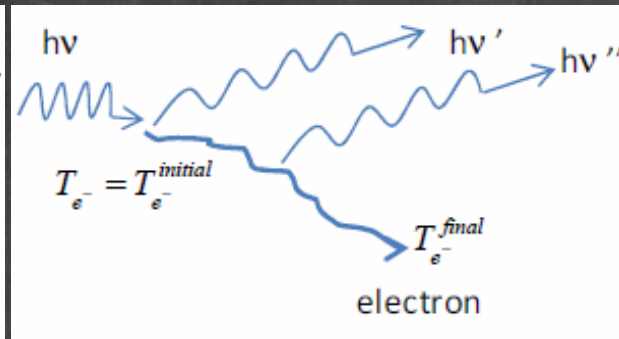
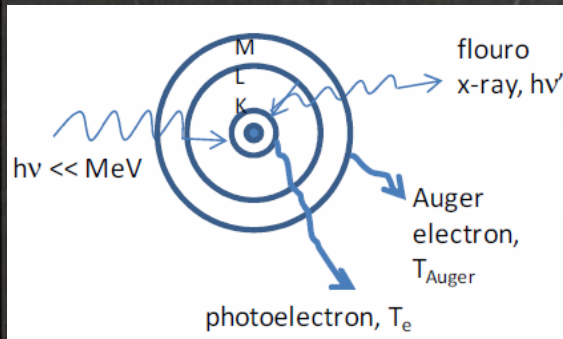
- Έχει τις ίδιες μονάδες με τη δόση.
- Μπορεί να υπολογιστεί σε κάθε σημείο P
- Ισούται με τη δόση στο P υπό την προϋπόθεση ότι η ενέργεια που εκφράζει θα μεταδοθεί σε dm περί του P (θα απορροφηθεί από την dm υλικού περί του P) και δεν θα διαφύγει

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

Συνοπτικά (1):

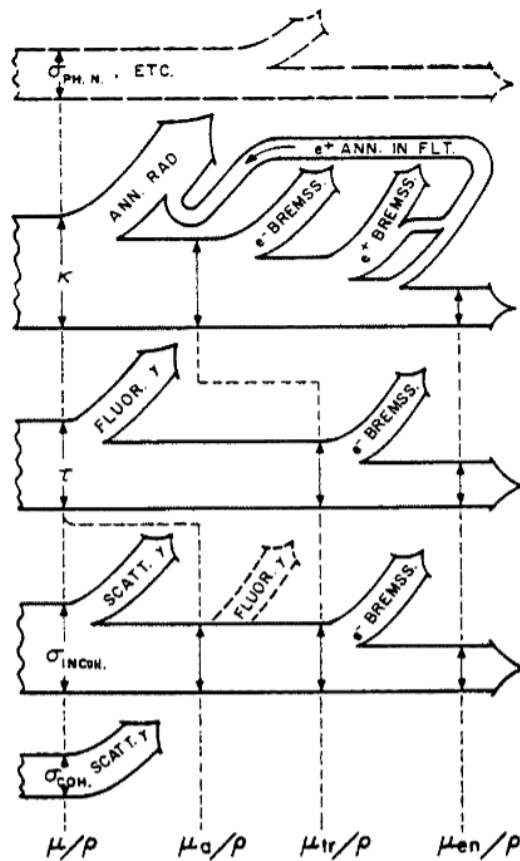


Figure 4. Schematic representation of the mass attenuation coefficient μ/ρ , the mass absorption coefficient μ_a/ρ , the mass energy-transfer coefficient μ_{tr}/ρ , and the mass energy-absorption coefficient μ_{en}/ρ in terms of the cross sections for coherent (σ_{COH}) and incoherent (σ_{INCOH}) scattering, atomic photoeffect (τ), pair production (κ), 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. γ) and scattered photons (SCATT. γ). 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):

