



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

## ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

**Π. Παπαγιάννης**  
Αν. Καθηγητής,  
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,  
Ιατρική Σχολή Αθηνών  
Κτίριο 5, Γραφείο 21



210 746 2442



ppapagi@med.uoa.gr



<https://eclass.uoa.gr/>

**MED1114**

Αλ/δραση Ιοντιζουσας **H/M** Ακτινοβολιας -Υλης

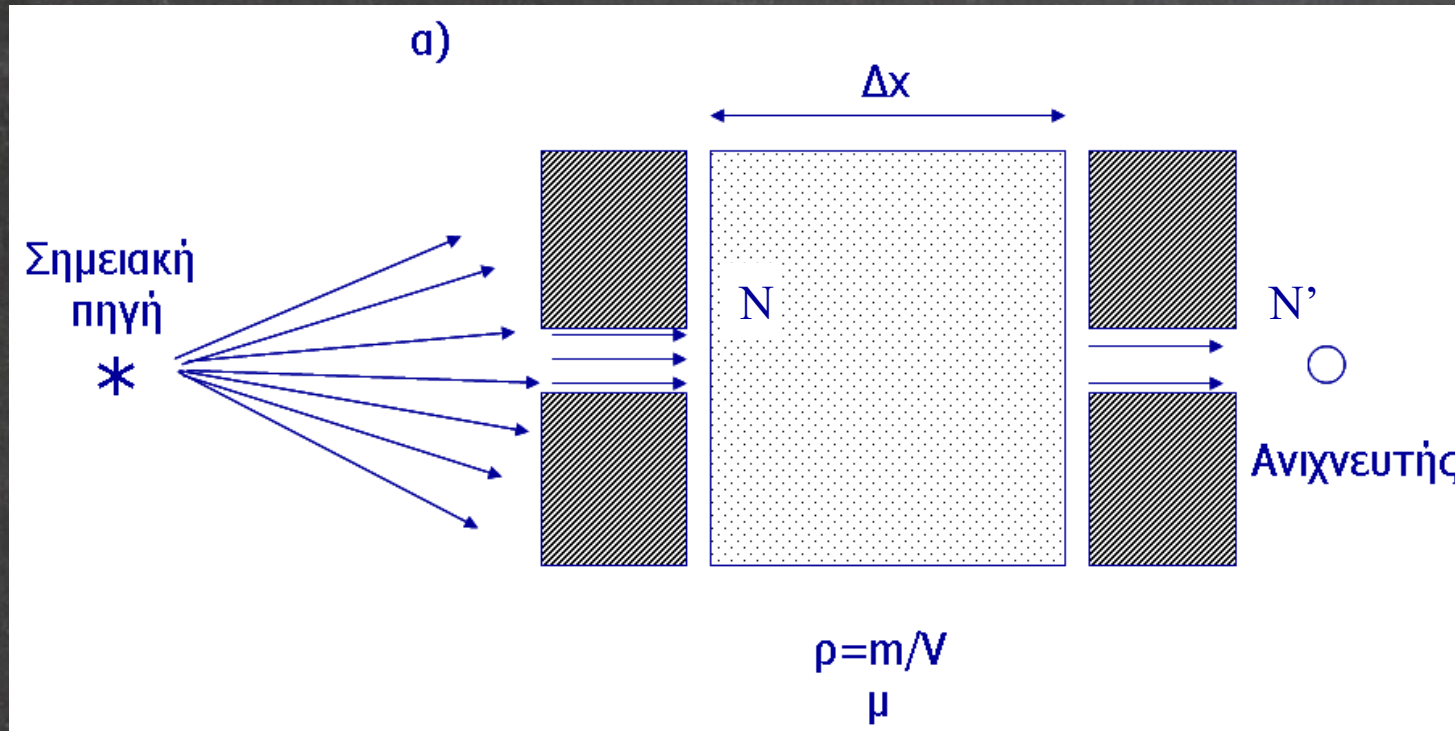


Συχνότητα, f (s <sup>-1</sup> )	Μήκος κύματος, λ	Ενέργεια	Περιοχή	Ιδιότητες σε σχέση με βιολογικά υλικά
10 <sup>5</sup> 3 10 <sup>10</sup>	3 km 0.01 m	413 peV 124 μεV	Ραδιοκύματα	Παράγονται από την ταλάντωση ηλεκτρικών φορτίων και χρησιμοποιούνται κυρίως για τη μετάδοση πληροφορίας (ραδιοφωνία, τηλεόραση, ασύρματη δικτύωση, κινητή τηλεφωνία) καθώς ανακλώνται ή απορροφώνται ανάλογα με την ενέργεια μόνο από μεταλλικούς αγωγούς. Τα βιολογικά υλικά σε μεγάλα μήκη κύματος είναι σχεδόν <b>διαφανή</b> σε αυτά ενώ τα μικρά μήκη κύματος (μικροκύματα) έχουν ενέργεια που αντιστοιχεί σε ενέργεια περιστροφής απλών μορίων και σημειώνεται <b>περιορισμένη</b> απορρόφηση.
3 10 <sup>10</sup> 3 10 <sup>14</sup>	100 μm 1 μm	12.4 meV 1.24 eV	Υπέρυθρο	Παράγονται κυρίως από μοριακές ταλαντώσεις και διεγέρσεις εξωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων. Το μεγαλύτερο μέρος της ακτινοβολίας θερμών σωμάτων εμπίπτει σε αυτή την περιοχή για συνήθεις θερμοκρασίες. Απορροφάται <b>σημαντικά</b> από την ύλη καθώς αντιστοιχεί σε ενέργειες μοριακών ταλαντώσεων απλών μορίων.
4.3 10 <sup>14</sup> 7.5 10 <sup>14</sup>	700 nm 400 nm	1.77 eV 3.1 eV	Ορατό	Παράγεται από διεγέρσεις εξωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων και αποτελεί μεγάλο μέρος της ακτινοβολίας πολύ θερμών σωμάτων όπως ο Ήλιος. Απορροφάται <b>έντονα</b> από την ύλη.

Συχνότητα, $f \text{ (s}^{-1}\text{)}$	Μήκος κύματος, $\lambda$	Ενέργεια	Περιοχή	Ιδιότητες σε σχέση με βιολογικά υλικά
$7.5 \cdot 10^{14}$ $3 \cdot 10^{16}$	400 nm 10 nm	3.1 eV 124 eV	Υπεριώδες	Παράγεται από διεγέρσεις εξωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων και αποτελεί σημαντικό μέρος της ακτινοβολίας πολύ θερμών σωμάτων όπως ο Ήλιος. Απορροφάται <b>εξαιρετικά έντονα</b> από την ύλη και δεν διαπερνά την επιφάνειά της.
$3 \cdot 10^{16}$ $3 \cdot 10^{18}$	10 nm 100 pm	124 eV 12.4 keV	«μαλακές» ακτίνες x	Παράγεται από διεγέρσεις εσωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων. Απορροφάται <b>έντονα</b> από την ύλη και μπορεί να προκαλέσει <b>ιονισμό</b> .
$3 \cdot 10^{18}$ $3 \cdot 10^{19}$	100 pm 10 pm	12.4 keV 124 keV	Διαγνωστικές ακτίνες x	Παράγεται από διεγέρσεις εσωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων και λυχνίες x. Απορροφάται <b>σημαντικά</b> από την ύλη και μπορεί να προκαλέσει <b>ιονισμό</b> .
$3 \cdot 10^{19}$ $3 \cdot 10^{19}$	10 pm 1pm	124 keV 1.24 MeV	Ακτίνες γ και θεραπευτικές ακτίνες x	Παράγονται από διάσπαση γ και γραμμικούς επιταχυντές. Απορροφώνται <b>περιορισμένα</b> από την ύλη και προκαλούν <b>ιονισμό</b> .
$3 \cdot 10^{21}$	100 fm	12.4 MeV	Θεραπευτικές ακτίνες x	Παράγονται από διάσπαση γ και γραμμικούς επιταχυντές. Απορροφώνται <b>περιορισμένα</b> από την ύλη και προκαλούν <b>ιονισμό</b> .



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



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

$$-\Delta N = N - N' = \mu N \Delta x$$

$$\Rightarrow \Delta N = -\mu N \Delta x$$

$$\Rightarrow \mu = -\left(\frac{\Delta N}{N}\right)\left(\frac{1}{\Delta x}\right)$$

Όπου  $\mu$  ο αποκαλούμενος  
γραμμικός συντελεστής εξασθένισης  
ιοντίζουσας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.

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

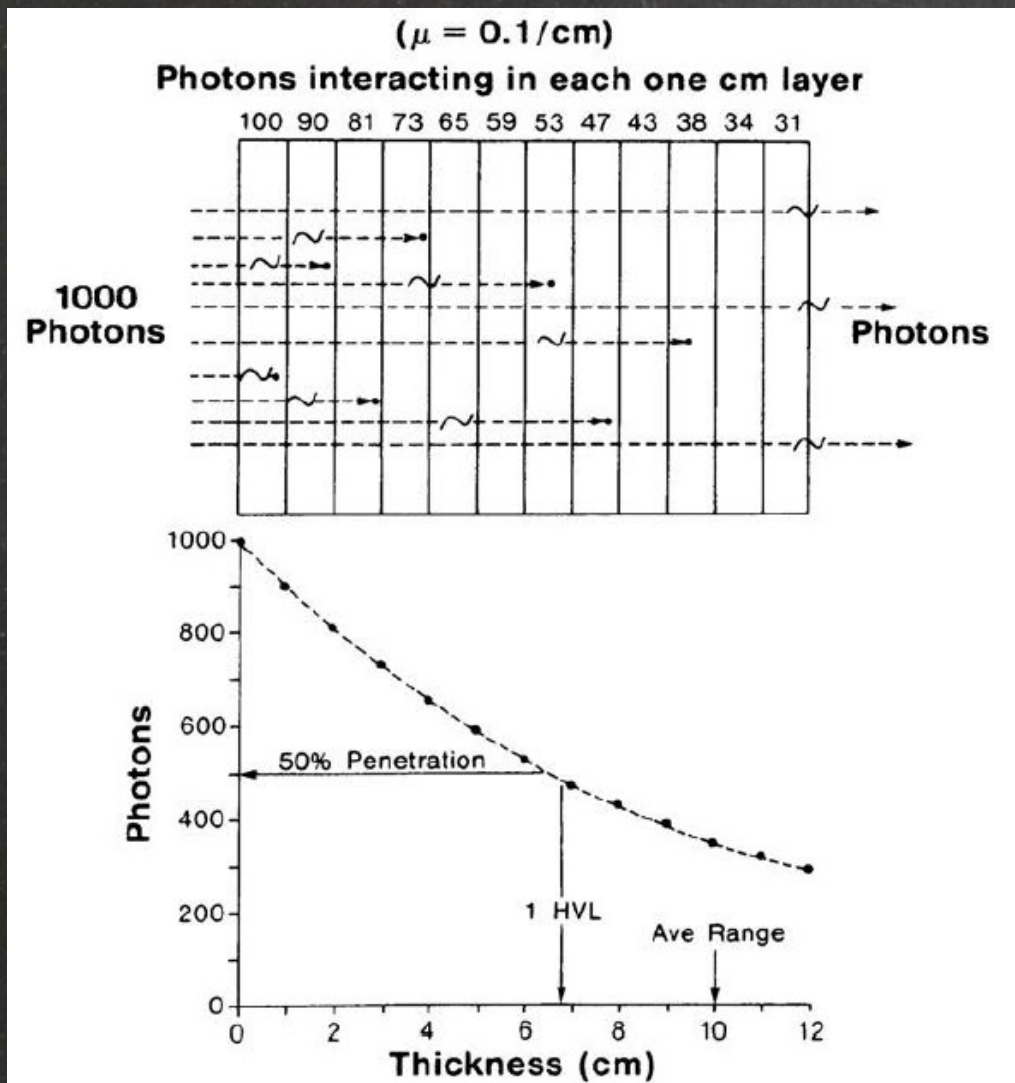


Εκθετική συμπεριφορά εμφανίζει οποιοδήποτε μέγεθος,  $y$ , για το οποίο ο ρυθμός μεταβολής του ως προς μια μεταβλητή,  $x$ , από την οποία συναρτάται είναι ανάλογος της τιμής του μεγέθους.

Αν:  $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \pm \beta y$   
 $\rightarrow \frac{dy}{dx} = \pm \beta y$  Τότε:  $y = y_0 e^{\pm \beta x}$

Αφού:  $\frac{\Delta N}{\Delta x} = -\mu N$  Τότε:  $N = N_0 \exp(-\mu x)$

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



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

ή

$$I = I_0 \exp(-\mu x)$$

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

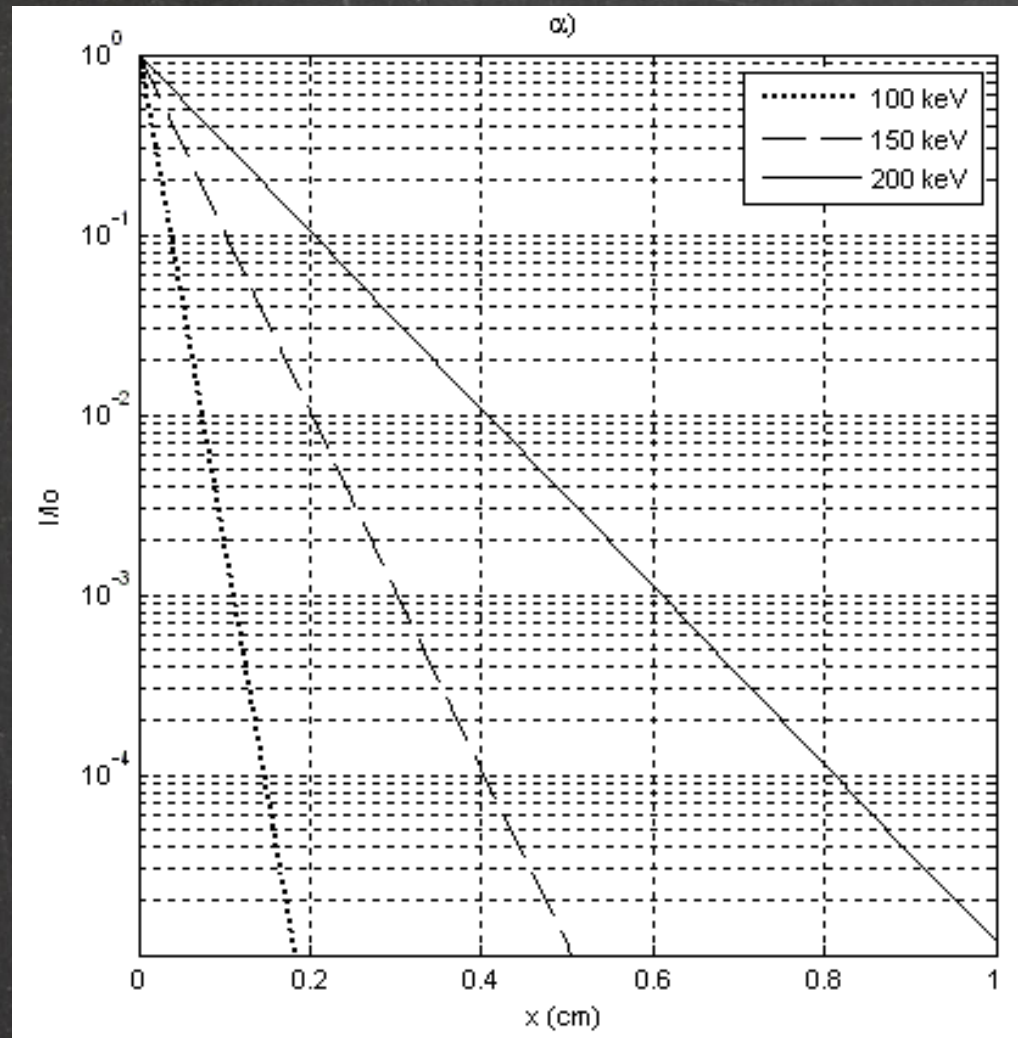
$$x_{1/10} \equiv TVL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

$$I = I_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}}$$

$$I = I_0 \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{x}{TVL}}$$



Από ποιους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό της εξασθένησης ιοντίζουσας  
H/M ακτινοβολίας  
κατά τη διαδρομή της στην ύλη  
(δηλαδή ο μ);

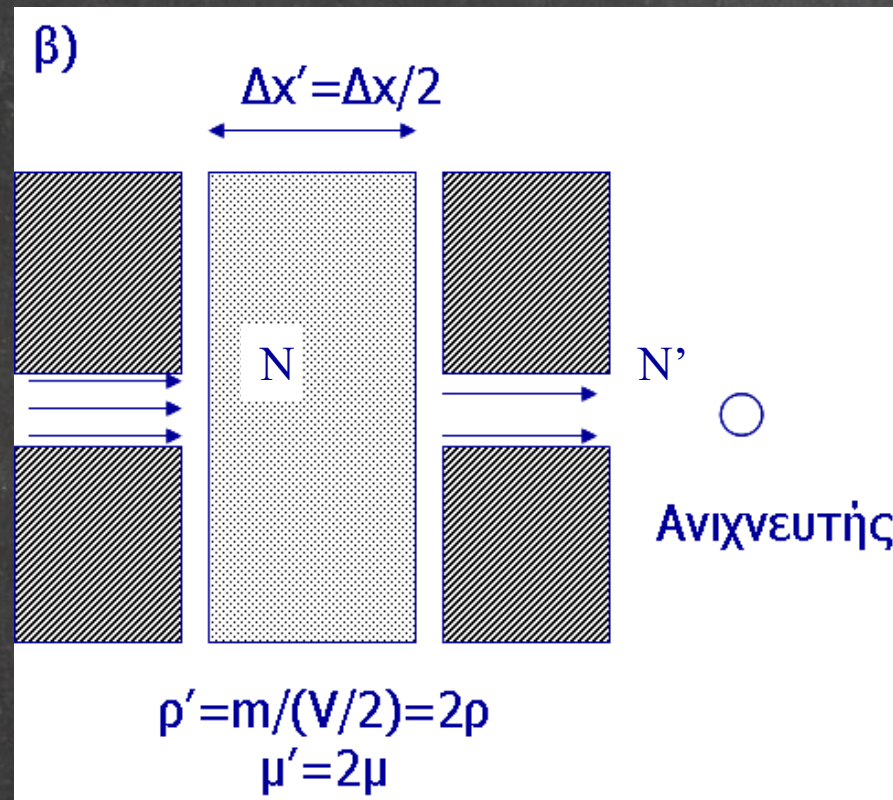


• Ενέργεια φωτονίων,  $E$

Υλικό,  $Z$

και ...

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται το ποσοστό της εξασθένησης ιοντίζουσας  
H/M ακτινοβολίας  
κατά τη διαδρομή της στην ύλη  
(δηλαδή ο  $\mu$ );



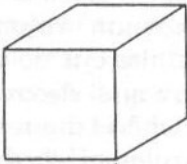
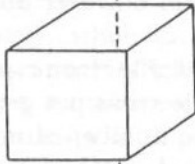
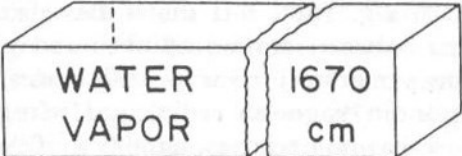
$$\mu = \mu(E, Z, \rho)$$

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



# Διαφορετικές εκφράσεις του συντελεστή εξασθένισης

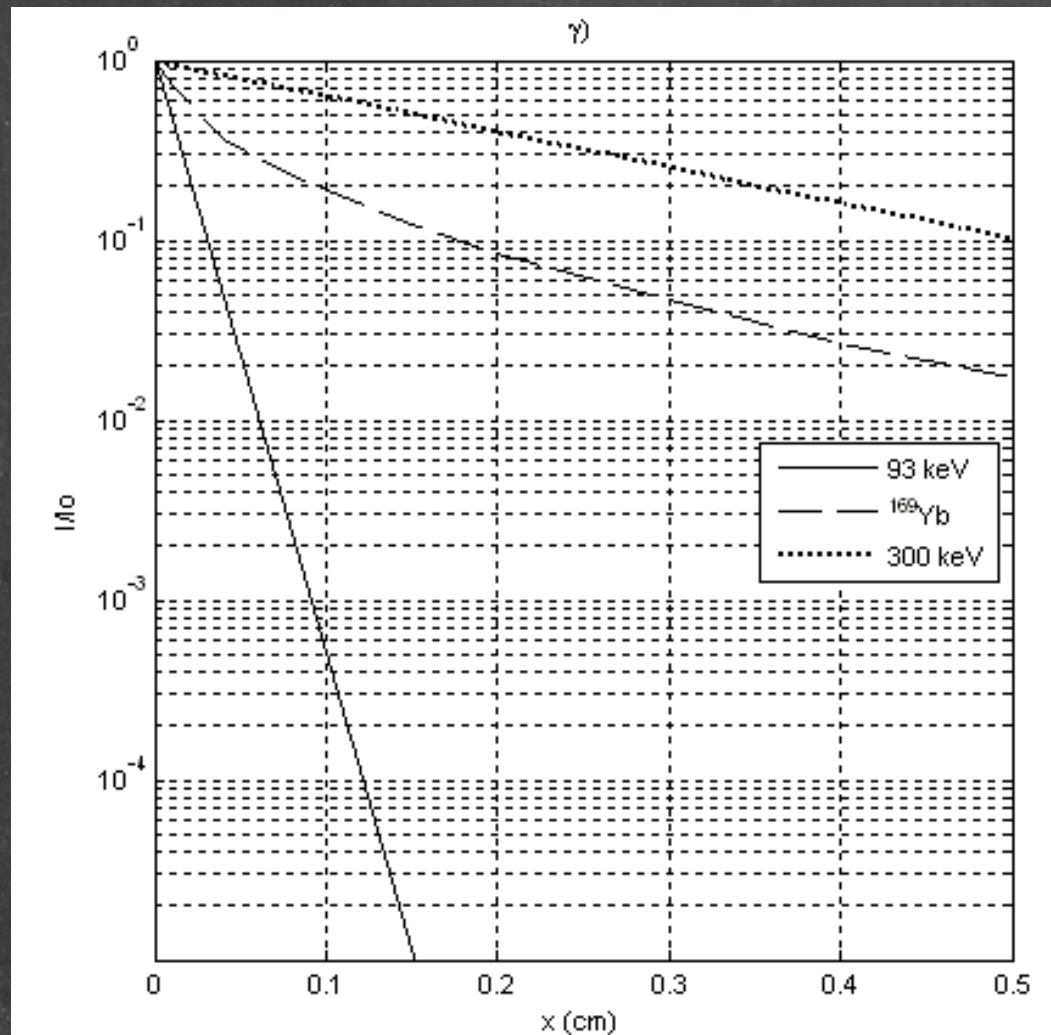
Γραμμικός,  $\mu$  ( $\text{cm}^{-1}$ ), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως  $x$  σε  $\text{cm}$   
και Μαζικός,  $\mu/\rho$  ( $\text{cm}^2/\text{g}$ ), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως  $\rho x$  σε  $\text{g}/\text{cm}^2$

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

Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

Μόνο για μονο-ενεργειακές δέσμες.

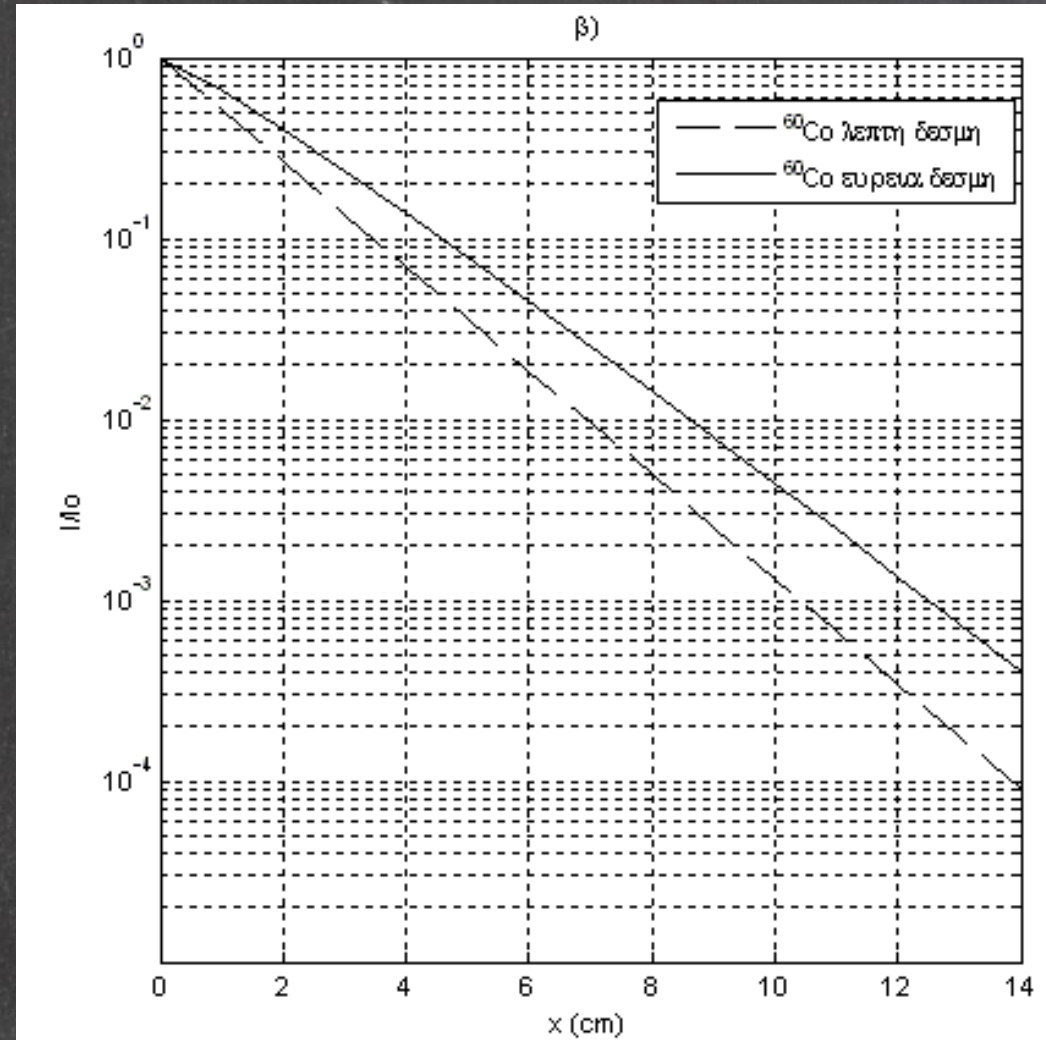
Για πολυ-ενεργειακές δέσμες:





Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

Μόνο σε συνθήκες "λεπτής" δέσμης ή "καλής" γεωμετρίας.  
Σε συνθήκες "ευρείας" δέσμης ή "κακής" γεωμετρίας:



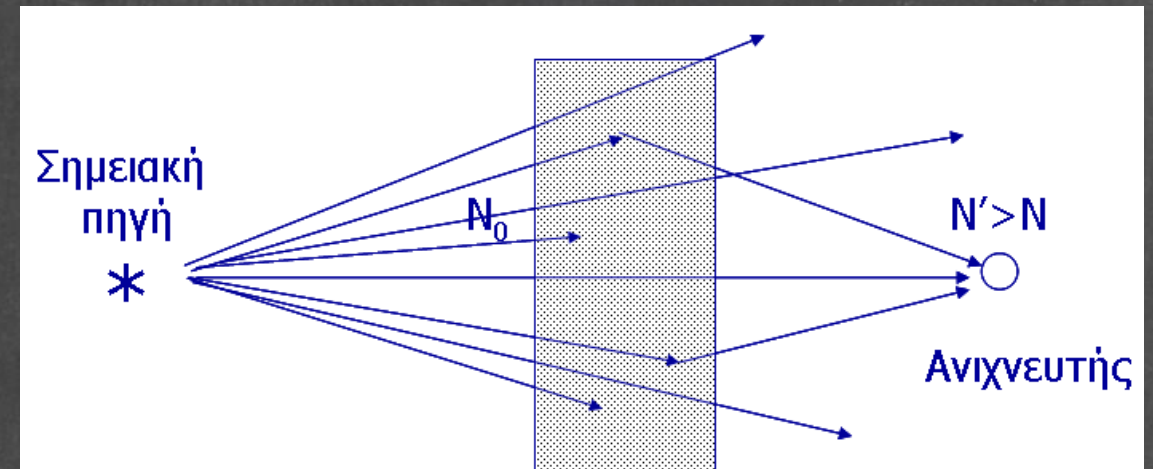
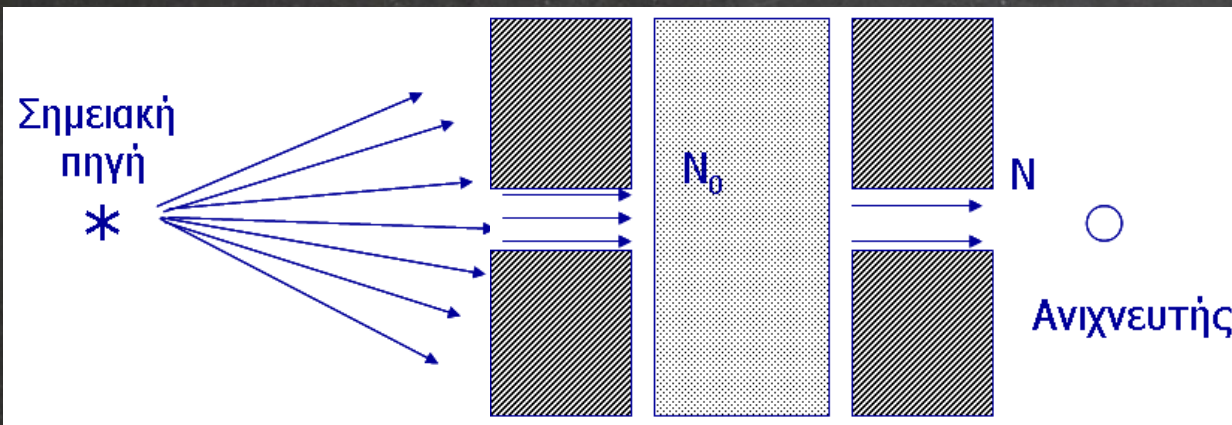
«Καλή» γεωμετρία δέσμης

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

«Κακή» γεωμετρία δέσμης

$$N' = N \cdot B(x, E, S, l) = N_0 \cdot \exp(-\mu x) \cdot B(x, E, S, l)$$

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



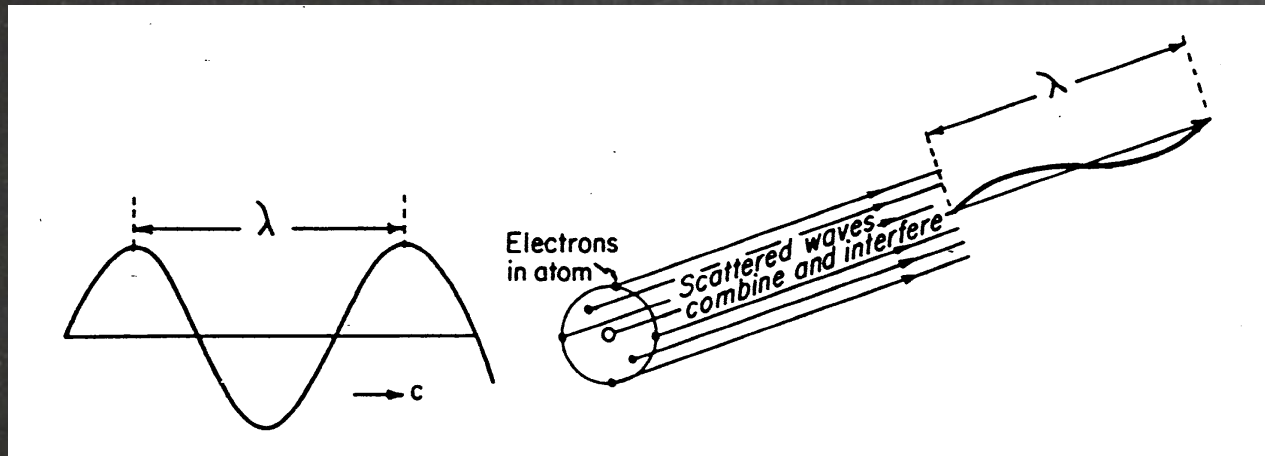


## Αλ/δραση Ιοντίζουσας Η/Μ Ακτινοβολίας-Ύλης: πιθανοί στόχοι

1. Άτομο
2.  $e^-$  εσωτερικής στοιβάδας
3.  $e^-$  εξωτερικής στοιβάδας
4. Πυρήνας

1. Αν η ενέργεια του φωτονίου  
δεν αντιστοιχεί σε διαφορά  
ενεργειακών σταθμών στο άτομο  
και δεν επαρκεί για ιονισμό:

## ΣΥΜΦΩΝΗ ΣΚΕΔΑΣΗ

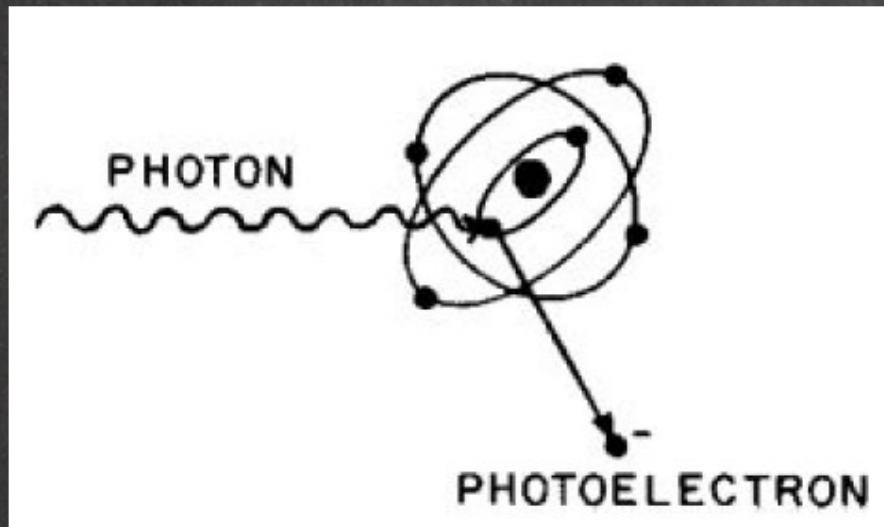


- Δεν συμβαίνει ιονισμός
- Δεν μεταφέρεται ενέργεια στην ύλη
- Σημειώνεται μόνο μικρή αλλαγή στη διεύθυνση του φωτονίου



## 2. Αλληλεπίδραση φωτονίου με ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας:

### ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ

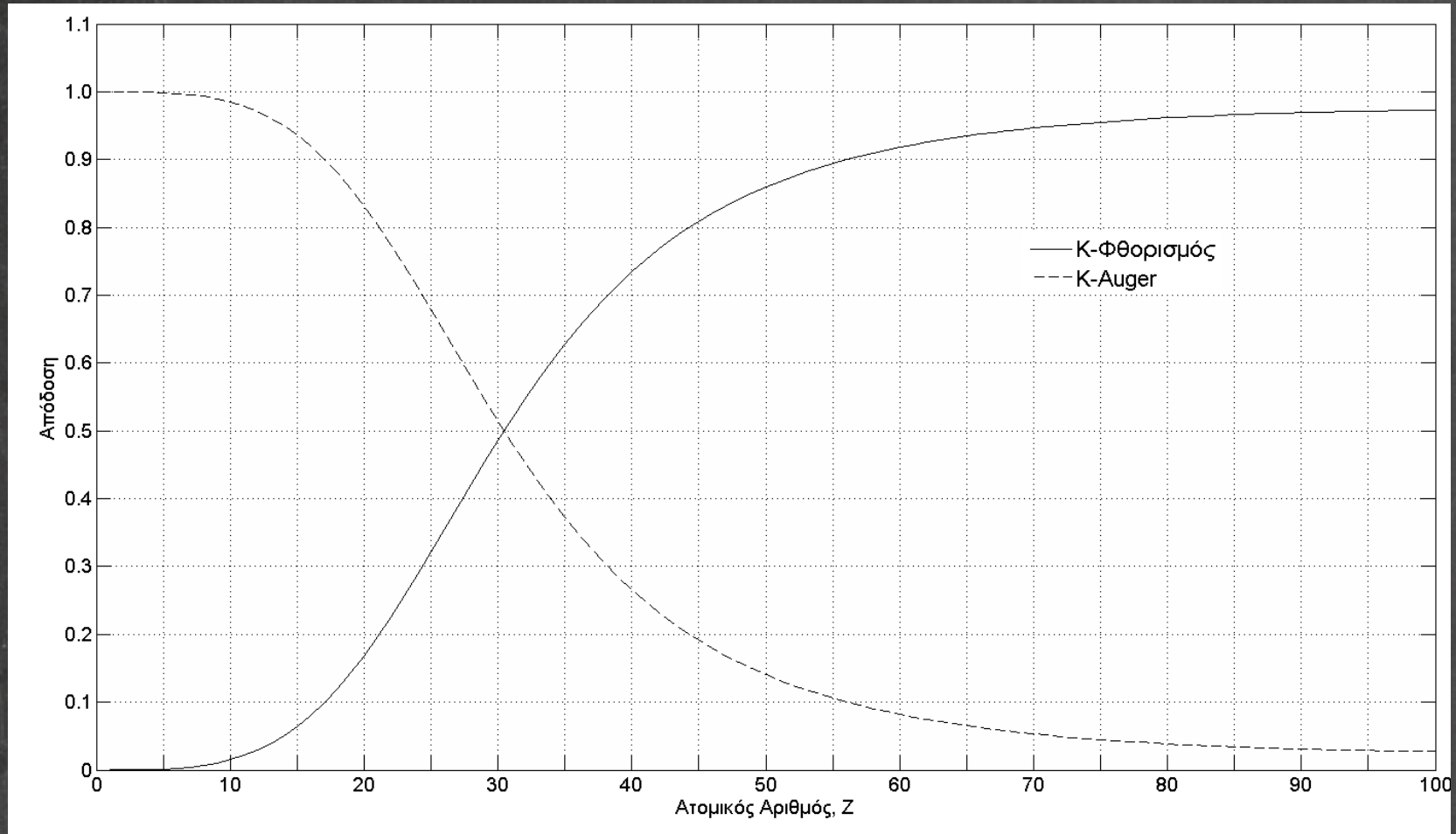


- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το  $e^-$  εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια:

$$T_e = E - E_b$$

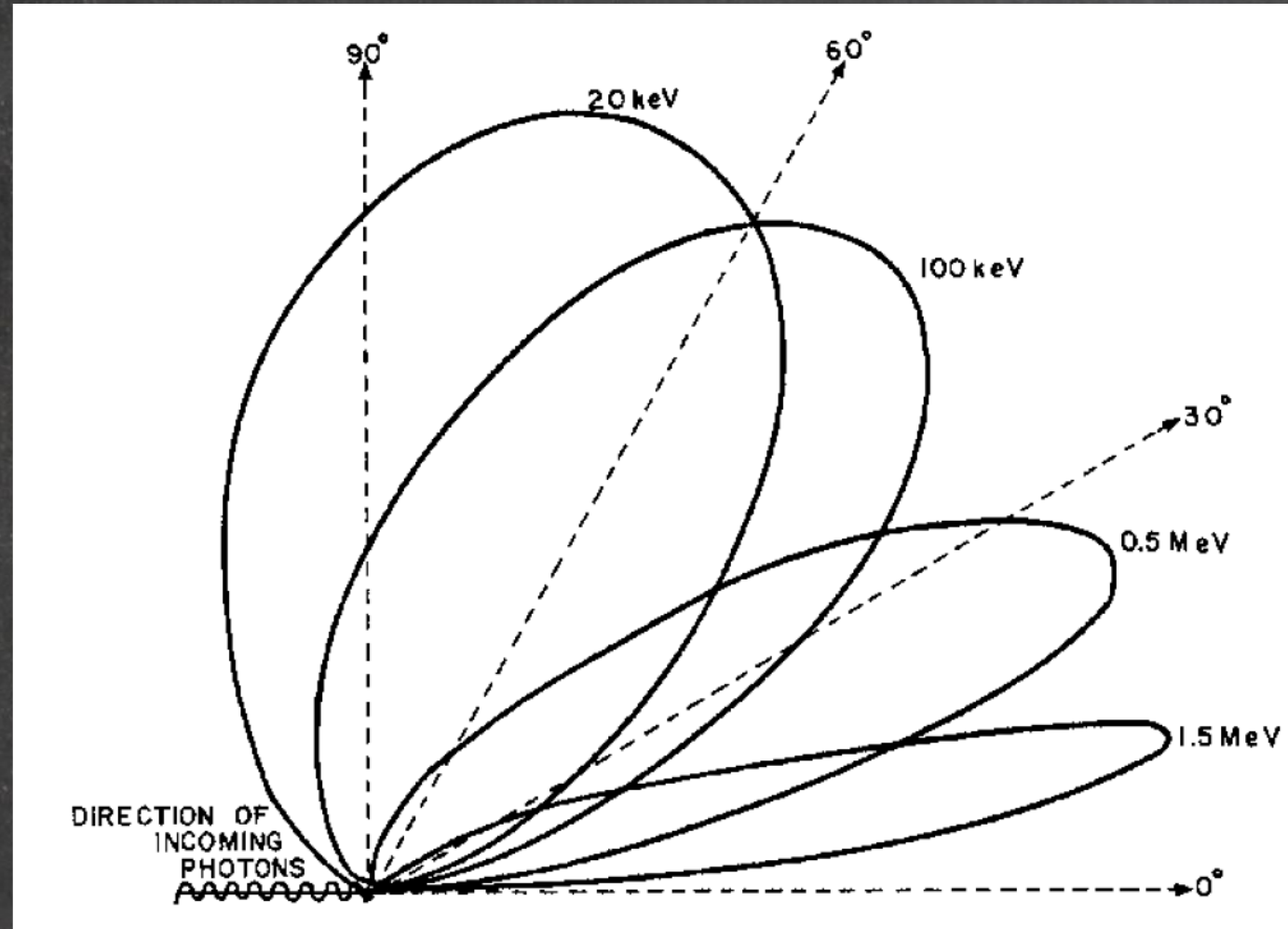
- Για βιολογικούς ιστούς  $E_b \ll$
- Το κενό συμπληρώνεται με εκπομπή χαρακτηριστικής ακτινοβολίας ή ηλεκτρονίων Auger

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



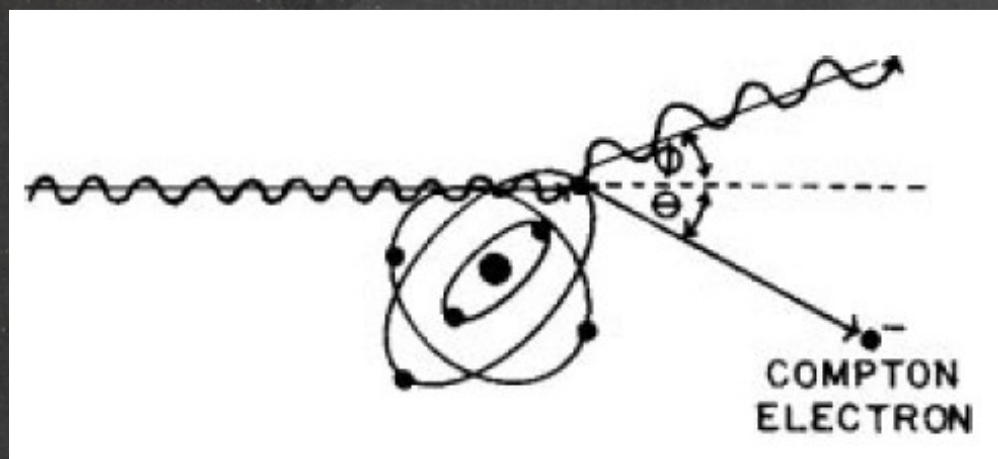


Κατανομή της γωνίας εκπομπής των φωτοηλεκτρονίων  
ως προς τη διεύθυνση του αρχικού φωτονίου



### 3. Αλληλεπίδραση φωτονίου με “ελεύθερο” ηλεκτρόνιο (εξωτερικής στοιβάδας):

## ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON



$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \phi)$$

- 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:

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



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

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

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

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

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

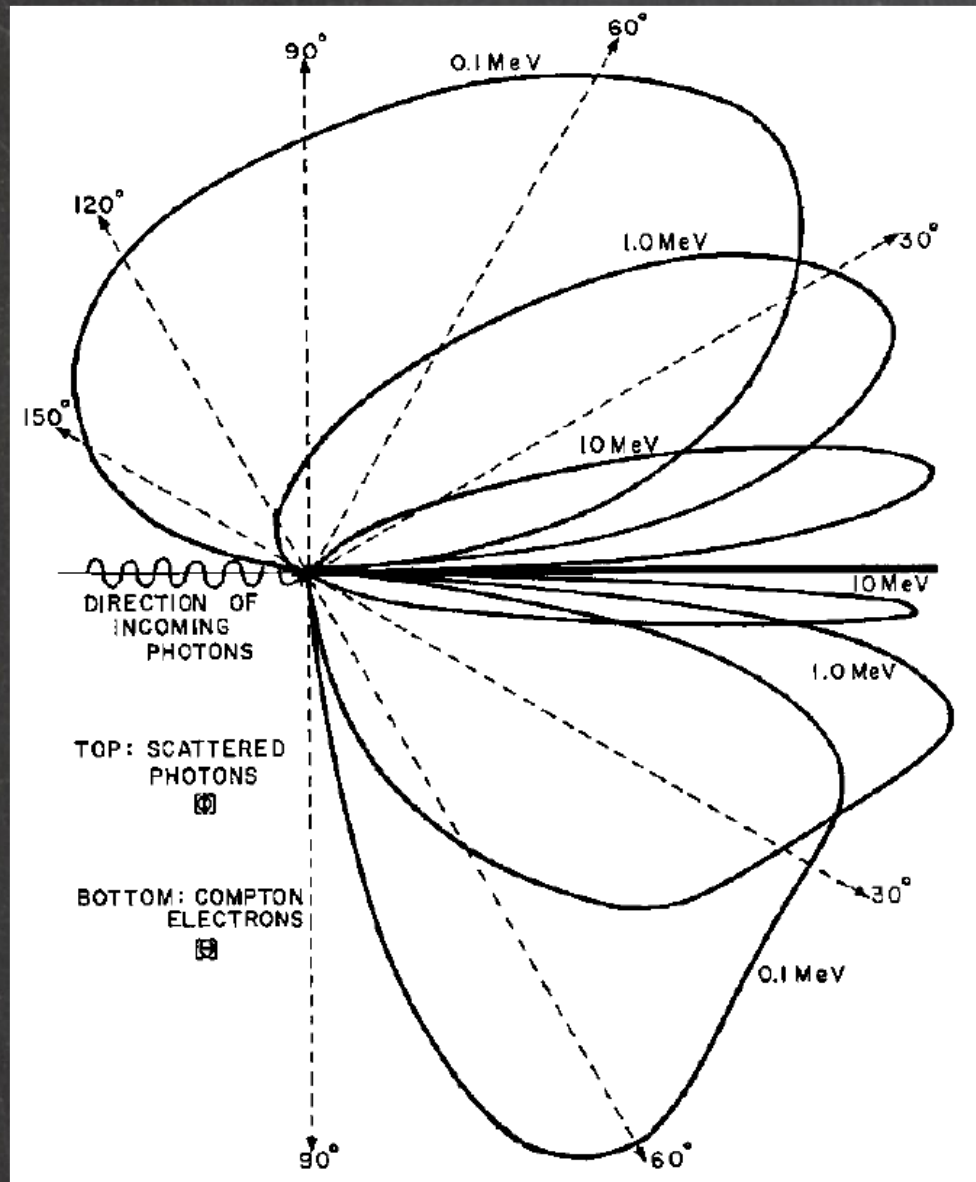
$$E_{scMIN} = E \frac{1}{1 + 2(E / m_e c^2)}$$

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

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

$$T_{eMIN} = 0$$

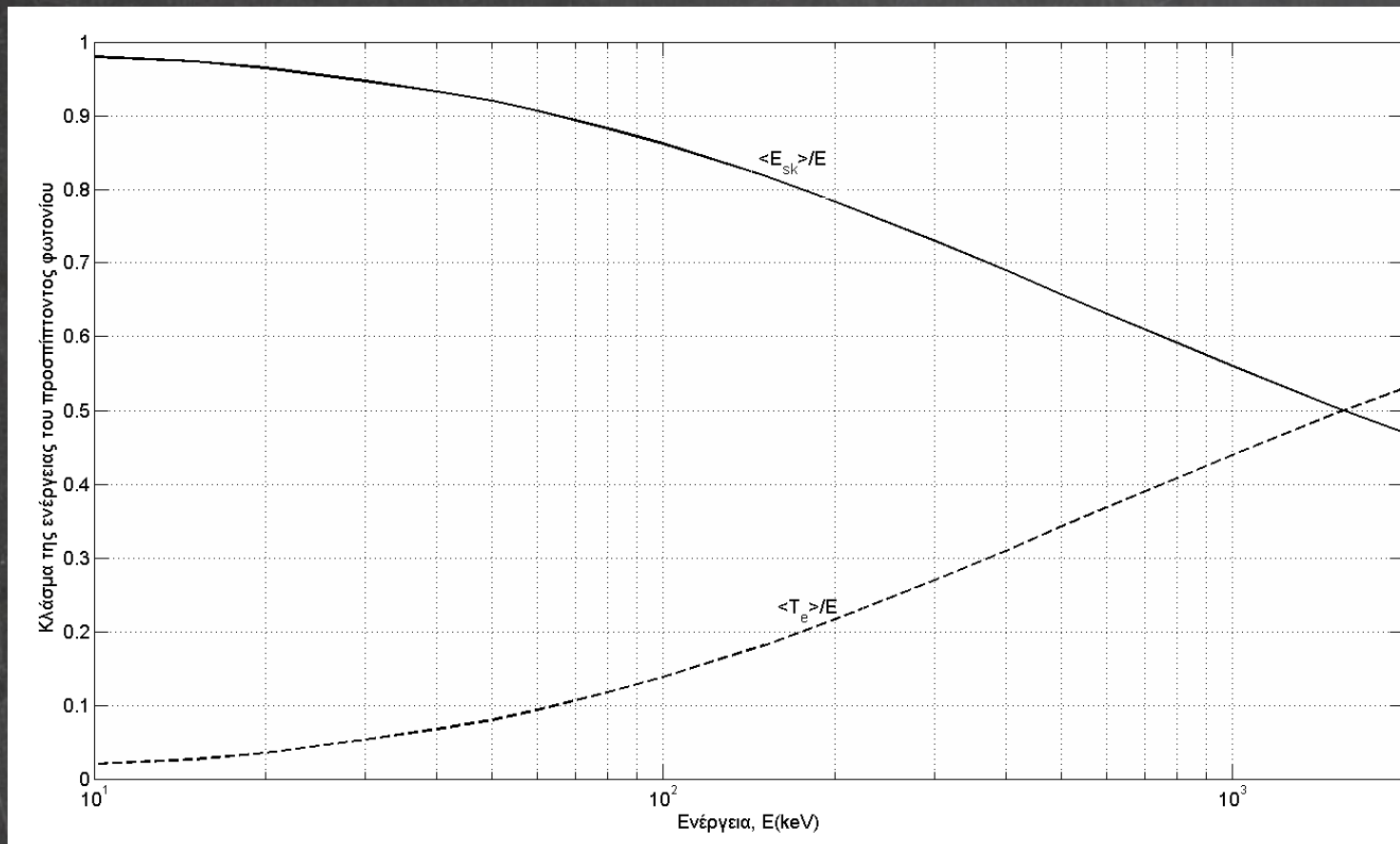
$$E_{scMAX} = E$$



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

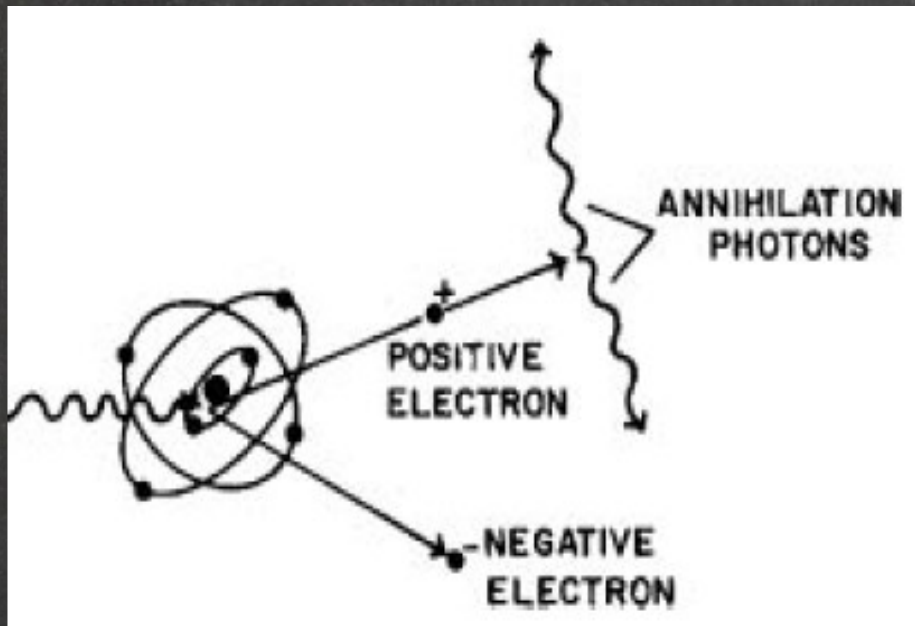


Η μέση τιμή του ποσοστού της ενέργειας του αρχικού φωτονίου που μετατρέπεται σε ενέργεια σκεδαζόμενου φωτονίου  $\langle E_{sk} \rangle / E$  και κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου,  $\langle T_e \rangle / E$ , στη σκέδαση Compton, συναρτήσει της ενέργειας του αρχικού φωτονίου.



## 4. Αλληλεπίδραση φωτονίου με πυρήνα:

### ΔΙΔΥΜΗ ΓΕΝΕΣΗ



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

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



# Συνοπτικά λοιπόν:

Αλλ/ση:	σύμφ. σκέδαση	Φωτ/κτρικό φαιν.	Σκ. Compton	Διδ. Γένεση
Με:	Άτομο (ατομικά $e^-$ )	δέσμιο $e^-$ (άτομο)	ελεύθερο $e^-$	πυρήνα
Αποτέλεσμα:	Αλλαγή κατ/νσης	Απορρόφηση φωτ., Ιονισμός της ύλης	Αλλαγή κατ/νσης & E φωτ., Ιονισμός της ύλης	Απορρόφηση φωτ., Ιονισμός της ύλης
E που μεταφέρεται & απορ/φάται από βιολογικό ιστό:	0	$\sim E_\phi$	$\sim E_{e^-} = E_\phi - E'_\phi$	$\sim E_{e^-} + E'_{e^+} = E_\phi - 1.02$

Ποια η πιθανότητα να συμβεί  
κάθε είδος αλ/σης και από ποιους  
παράγοντες εξαρτάται;

$$\mu = \mu_{\text{συμφ}} + \mu_{\text{φωτ}} + \mu_{\text{Compton}} + \mu_{\Delta.\Gamma.}$$

ή

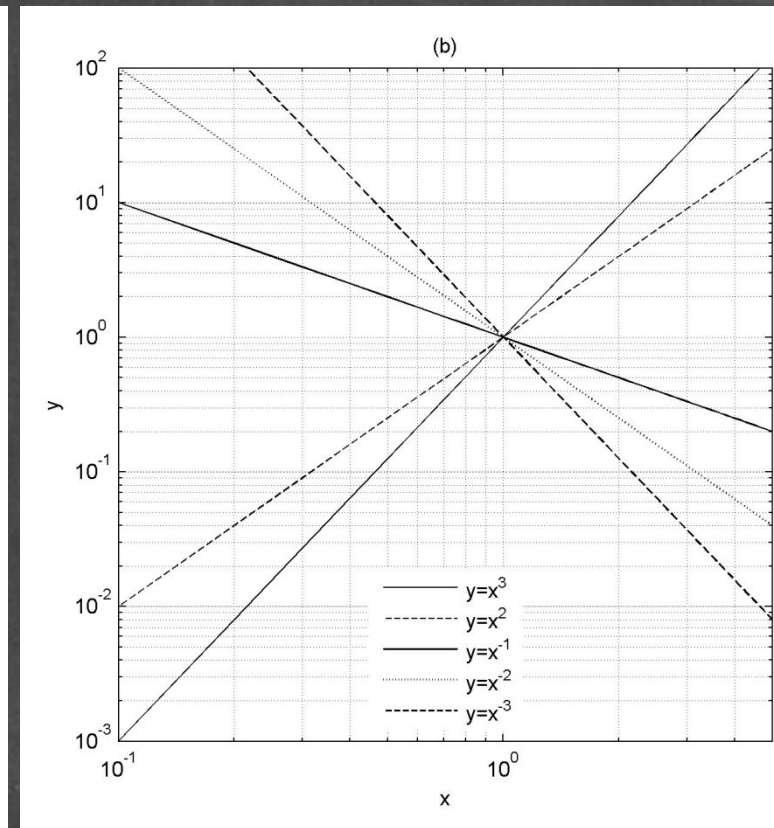
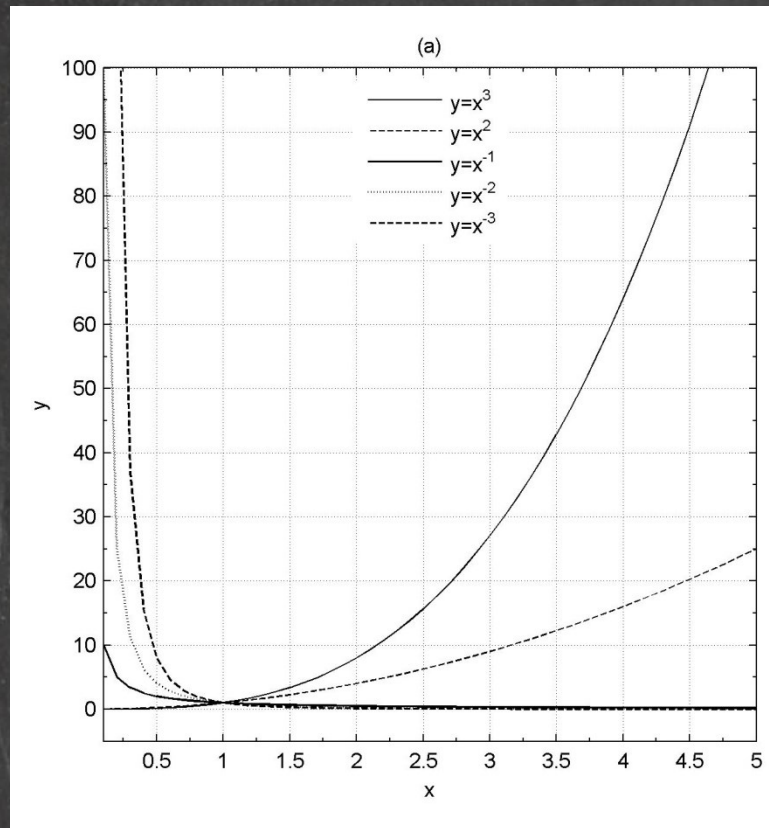
$$\mu/\rho = \mu_{\text{συμφ}}/\rho + \mu_{\text{φωτ}}/\rho + \mu_{\text{Compton}}/\rho + \mu_{\Delta.\Gamma.}/\rho$$



# Συναρτήσεις δυνάμεων και λογαριθμικές κλίμακες ...

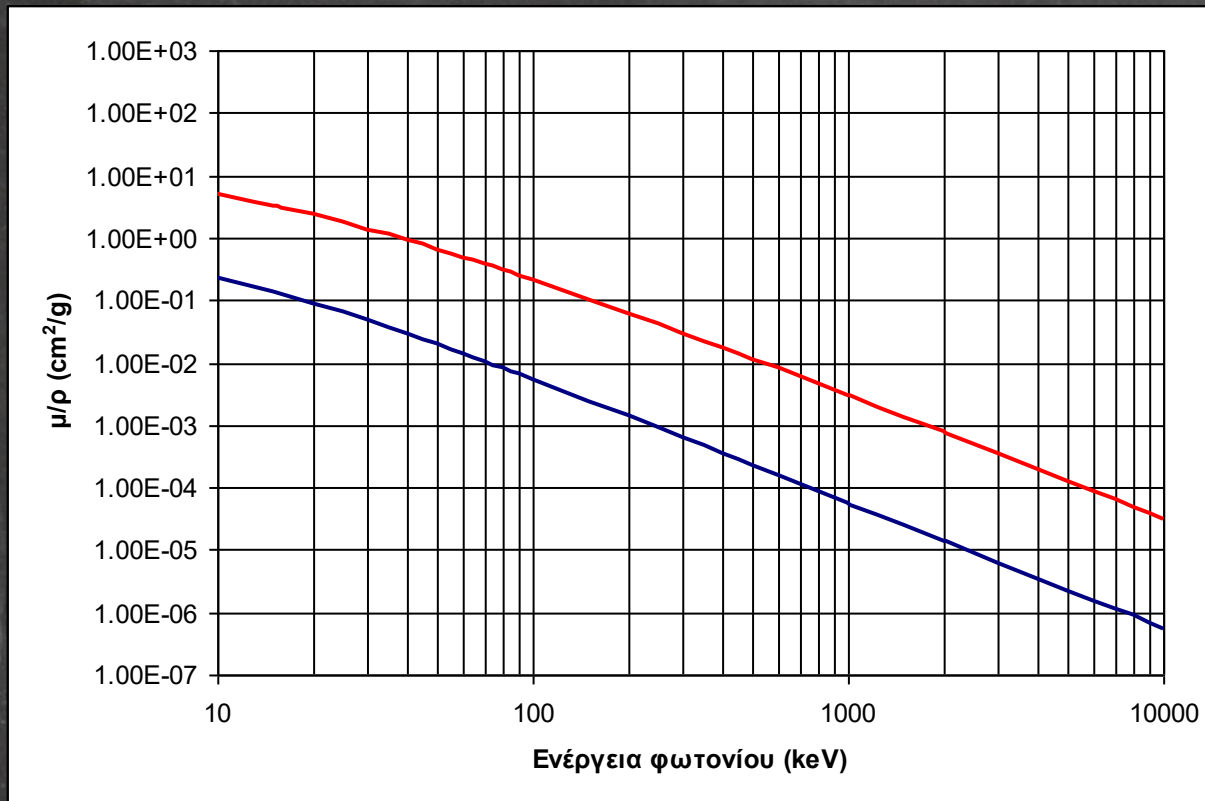
$$y = Ax^{\pm n} \Rightarrow$$

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



# Σύμφωνη σκέδαση

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

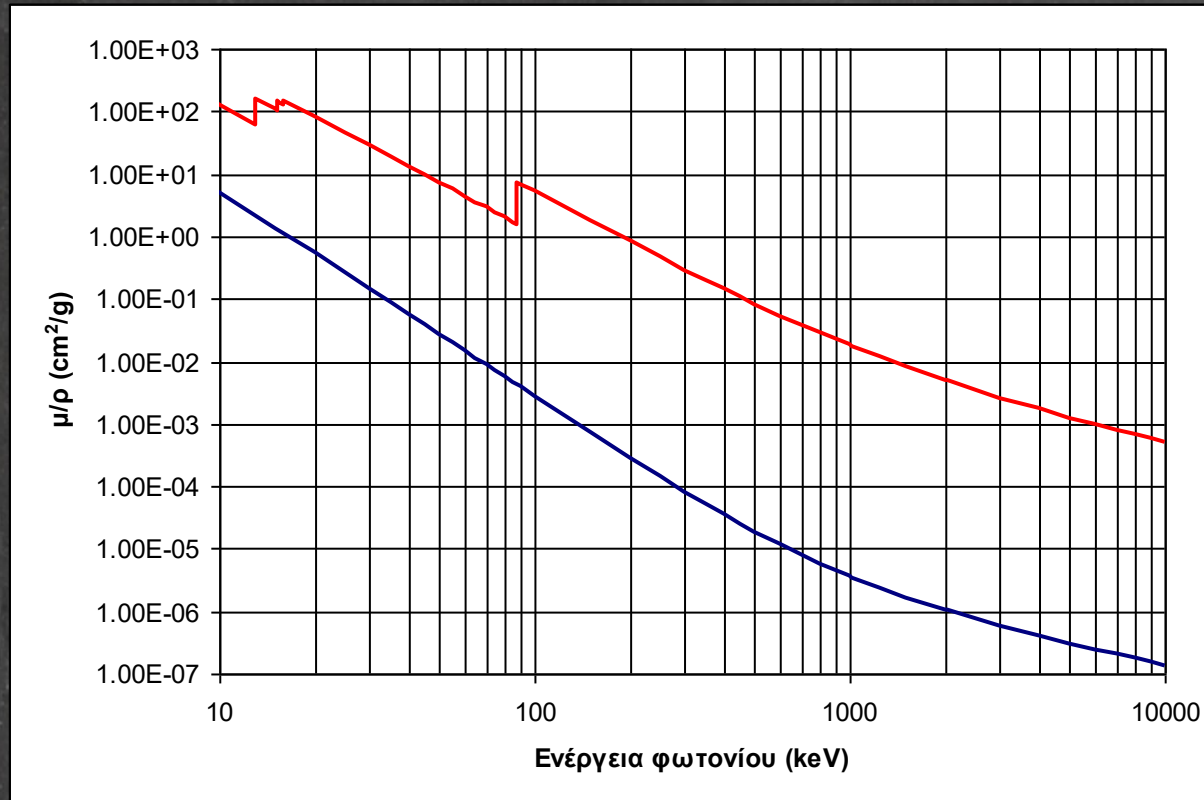


Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας:  
 $\sim Z/E^2$



# Φωτοηλεκτρικό

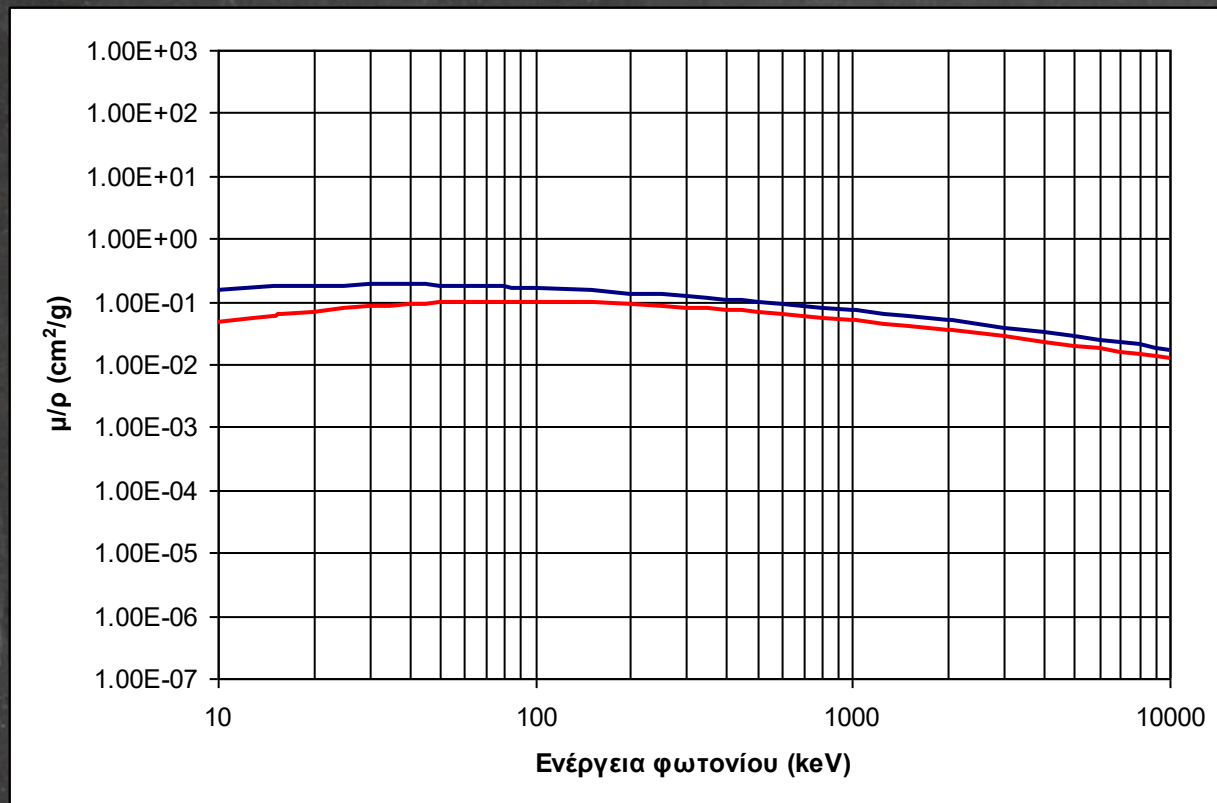
H<sub>2</sub>O ( $Z_{\text{eff}}=7.5$ ) & Pb( $Z=82$ )



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

# Σκέδαση Compton

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

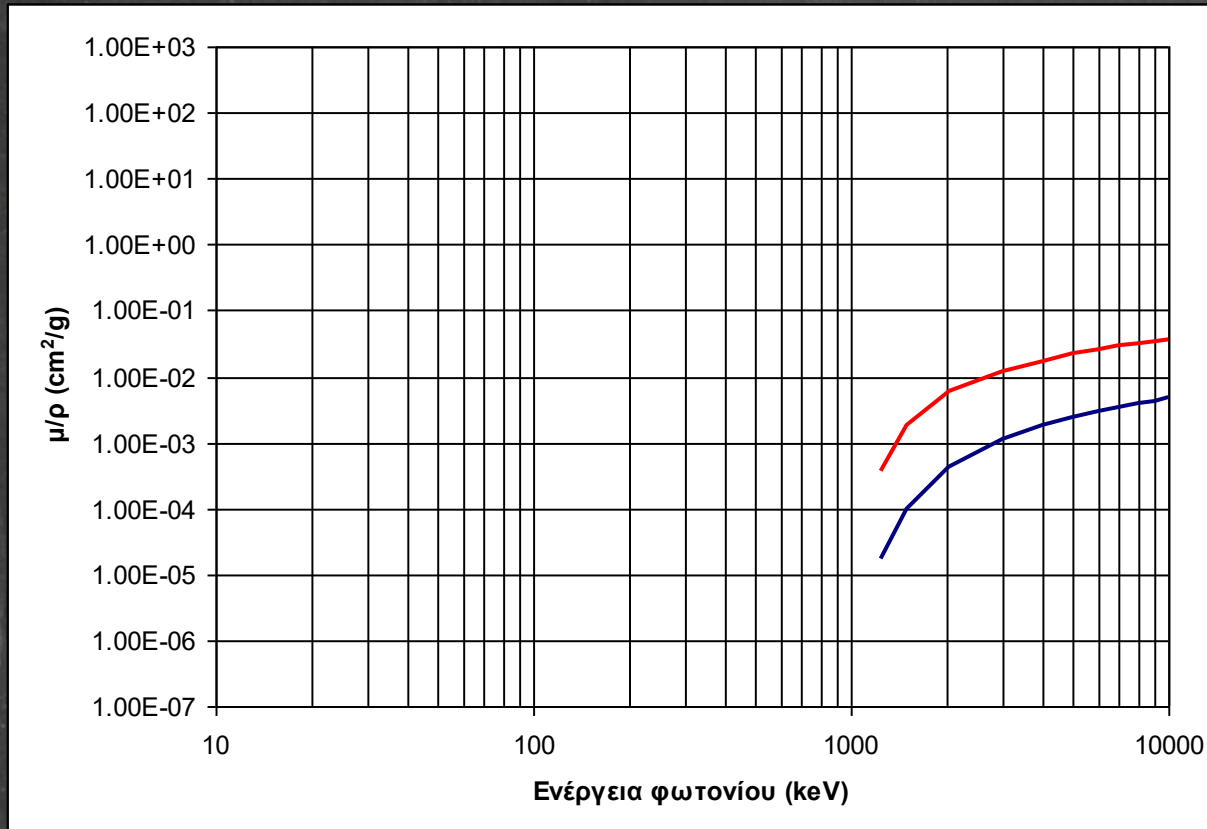


- Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας :
- Μειώνεται με την E
  - Ανεξάρτητη του Z!!!



# Δίδυμη γένεση

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



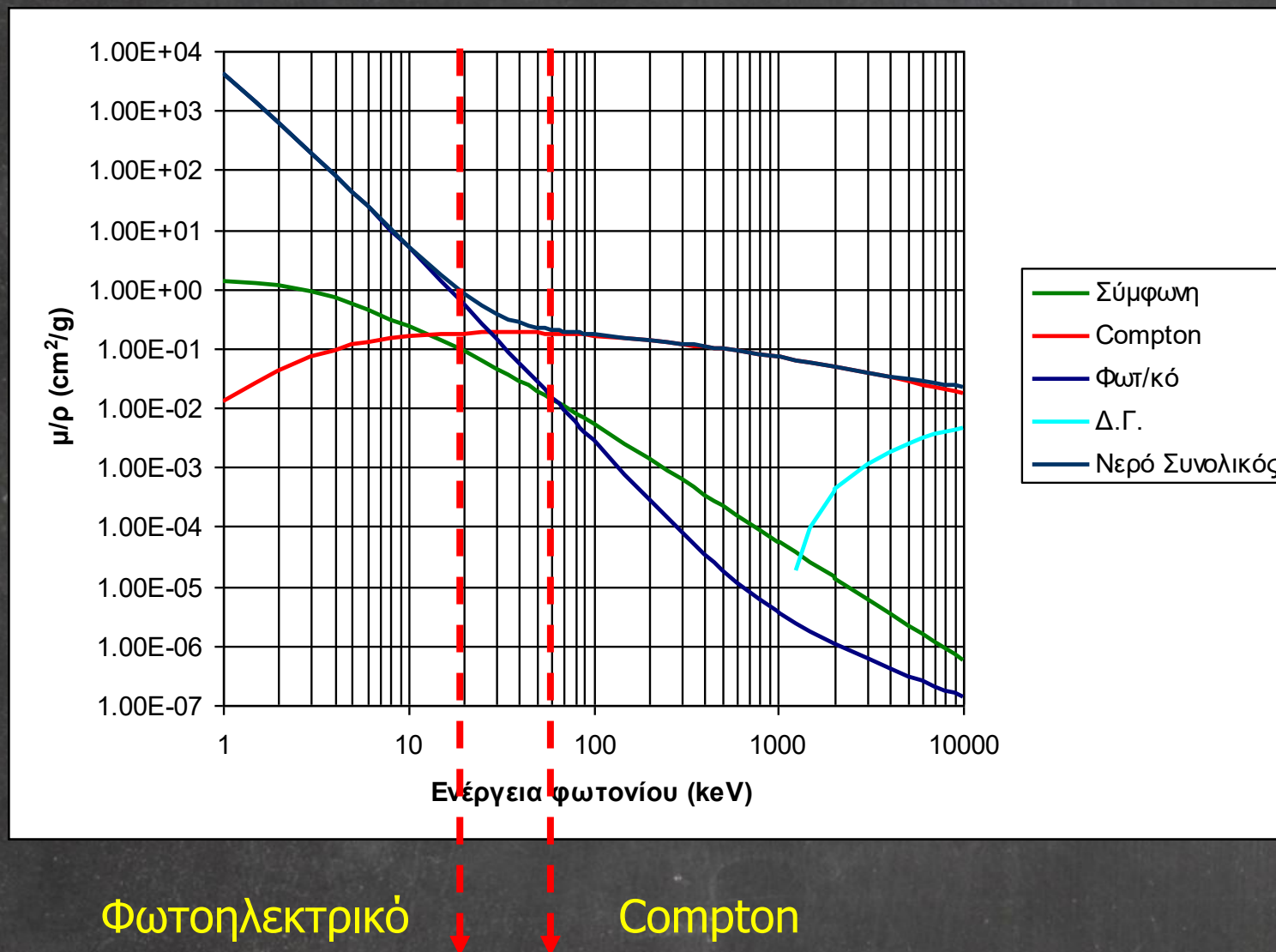
- Πιθανότητα  
ανά μονάδα  
μάζας :
- Αυξάνει με την  $E (>1,02 \text{ MeV})$
  - $\sim Z$

## Συνοπτικά λοιπόν:

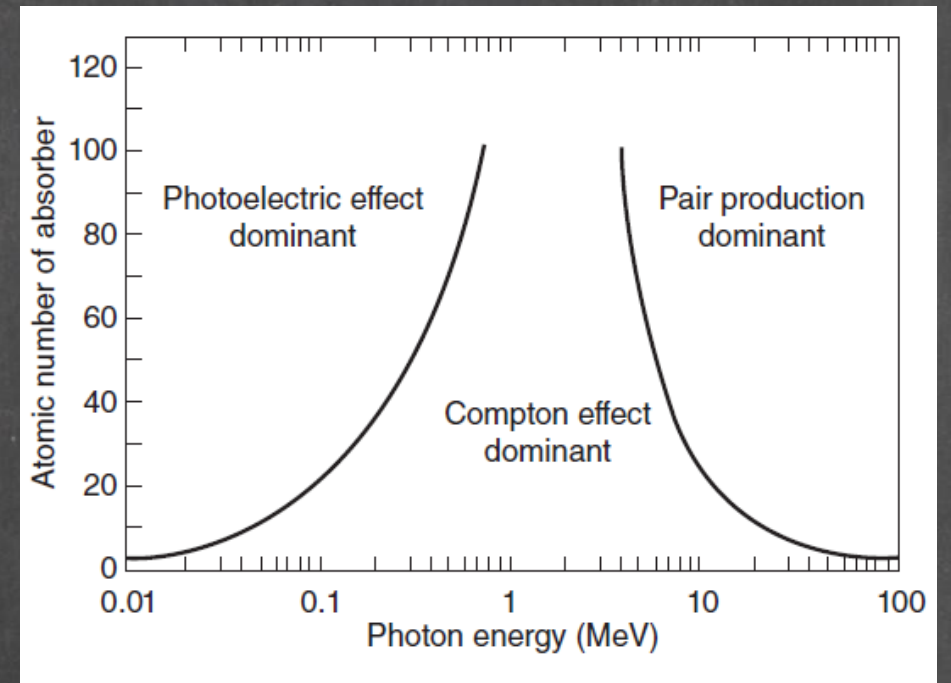
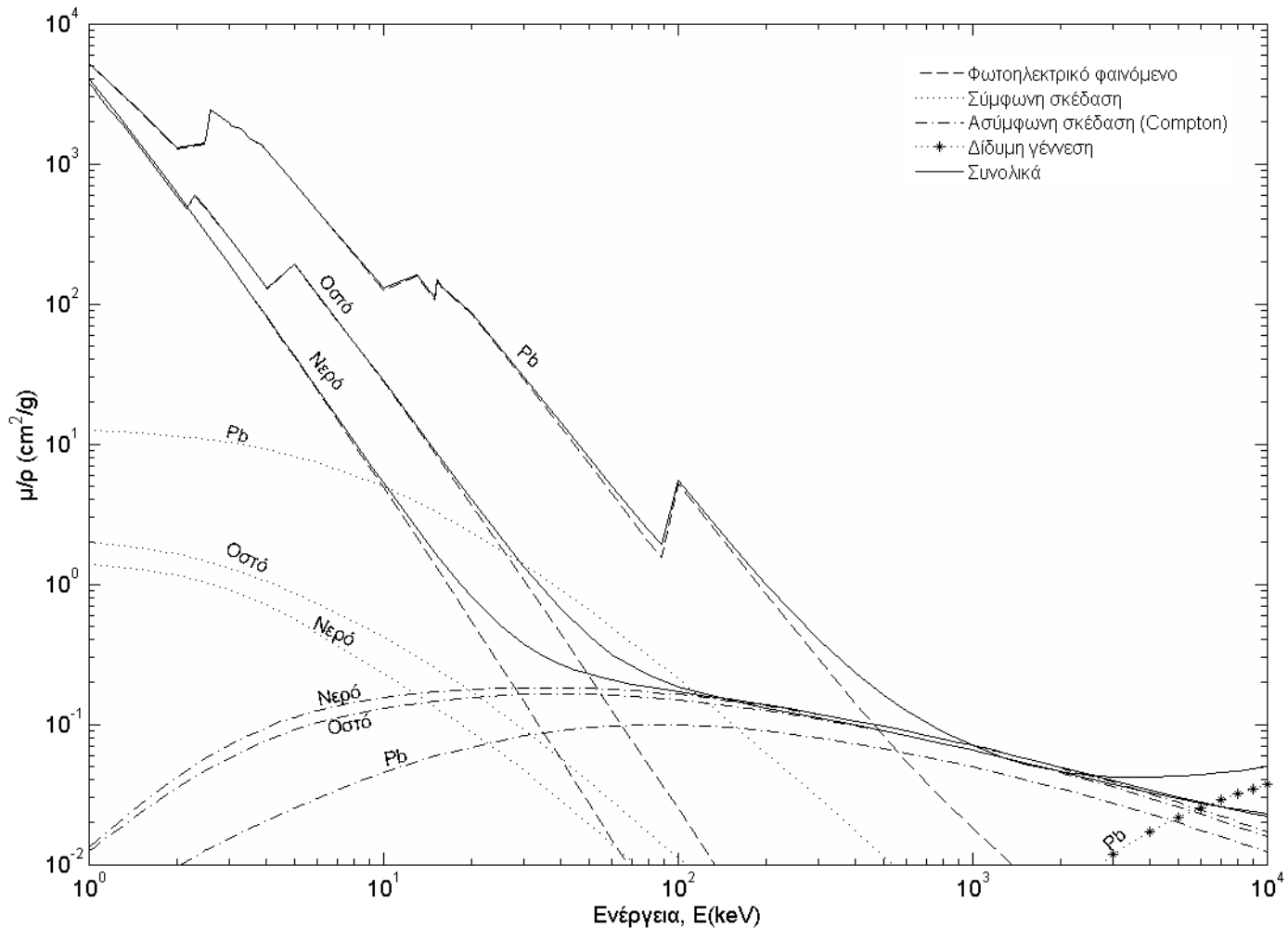
Αλλ/ση:	σύμφ. σκέδαση	Φωτ/κτρικό φαιν.	Σκ. Compton	Δίδ. Γένεση
Με:	ατομικά $e^-$	δέσμιο $e^-$ (άτομο)	ελεύθερο $e^-$	πυρήνα
Αποτέλεσμα:	Αλλαγή κατ/νσης	Απορρόφηση	Αλλαγή κατ/νσης & E	Απορρόφηση
E που μεταφέρεται & απορ/φάται από βιολογικό ιστό:	0	$\sim E_\phi$	$\sim E_{e^-} = E_\phi - E'_\phi$	$\sim E_{e^-} = E_\phi - 1.02 - E'_{e^+}$
$\mu/\rho$ :	$\sim Z/E^2$	$\sim Z^3/E^3$	$\downarrow E$	$\uparrow E, \sim Z$



# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα μάζας υλικού

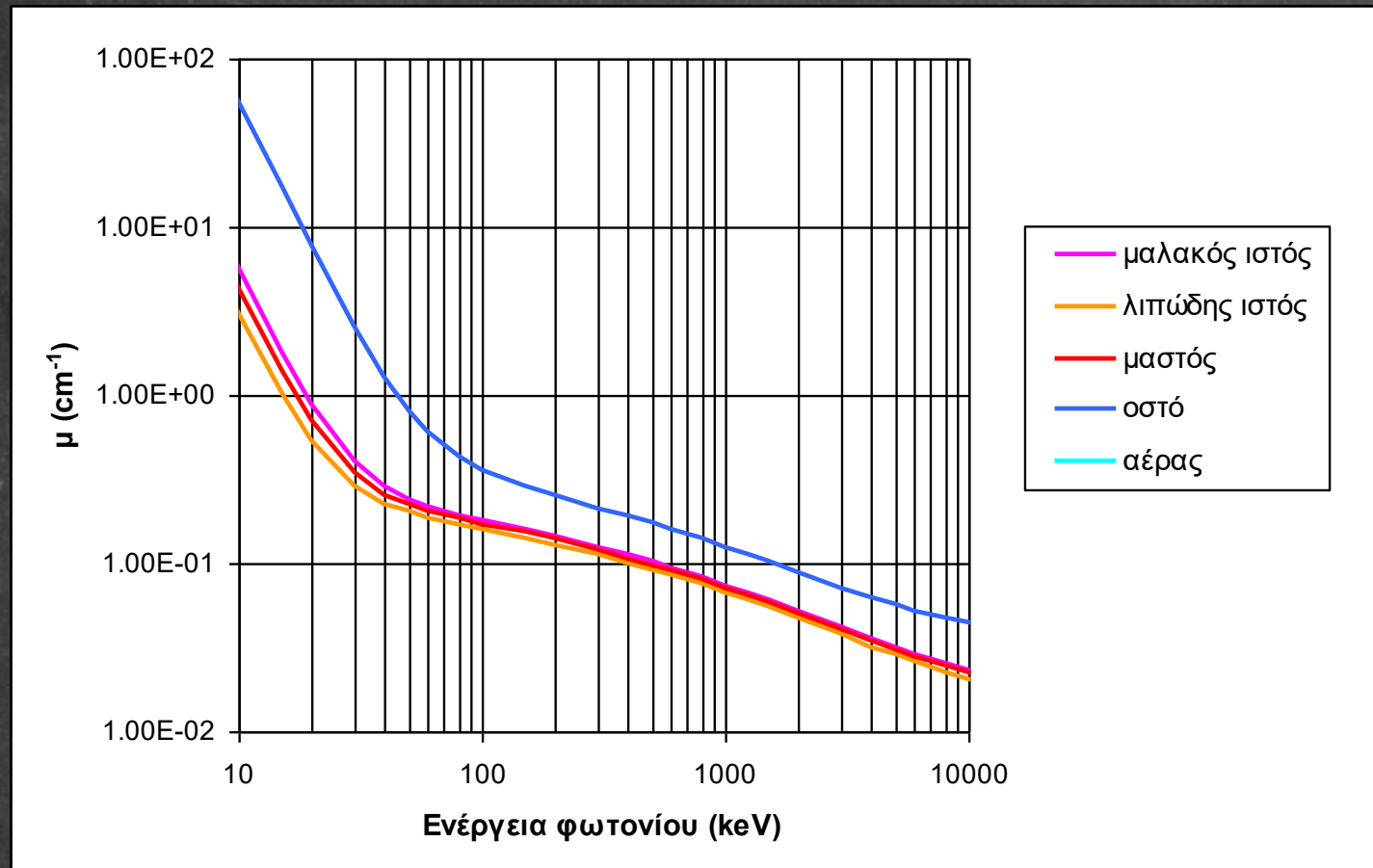


# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού

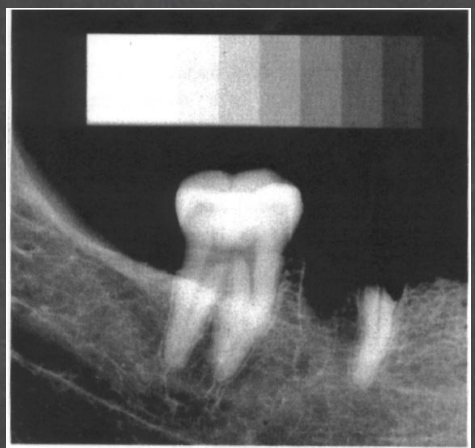
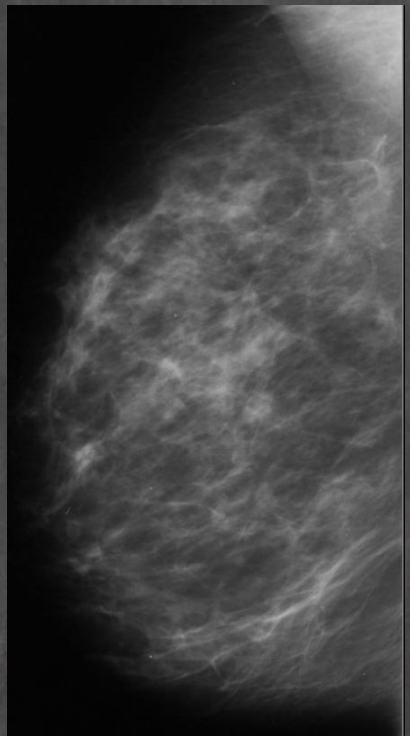
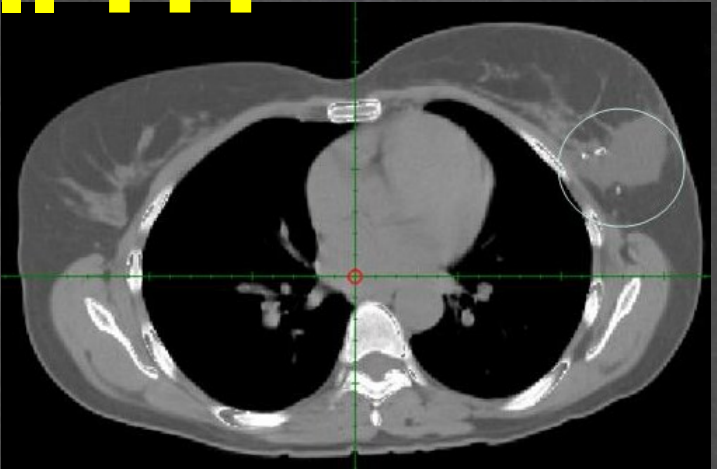
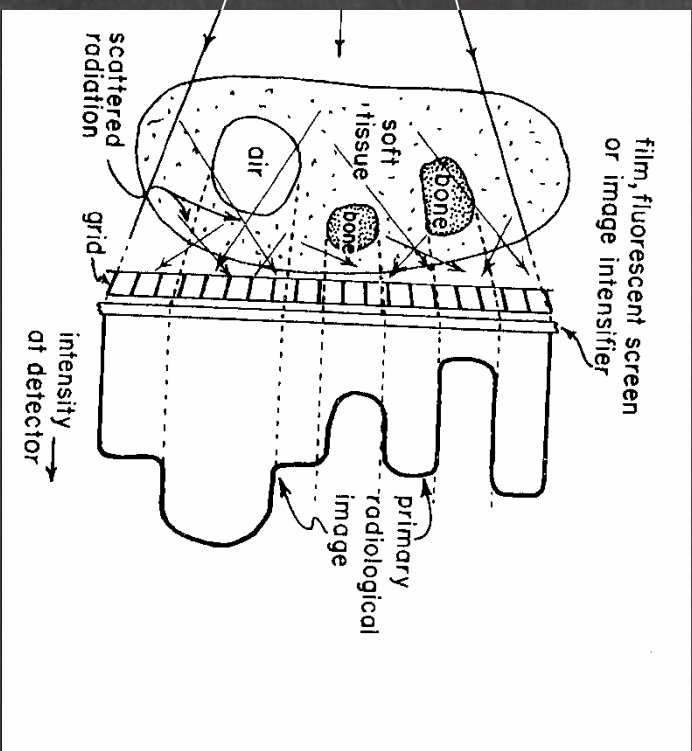




# Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα πάχους υλικού

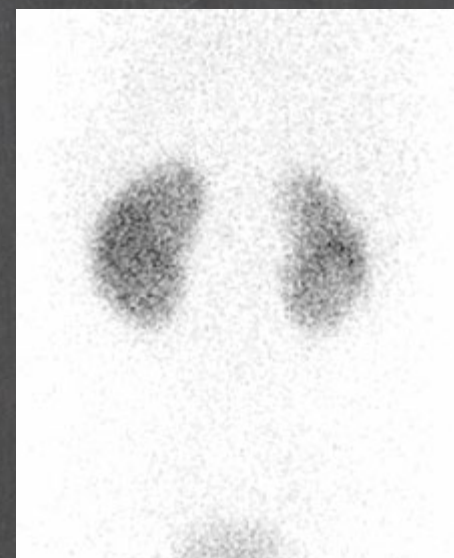
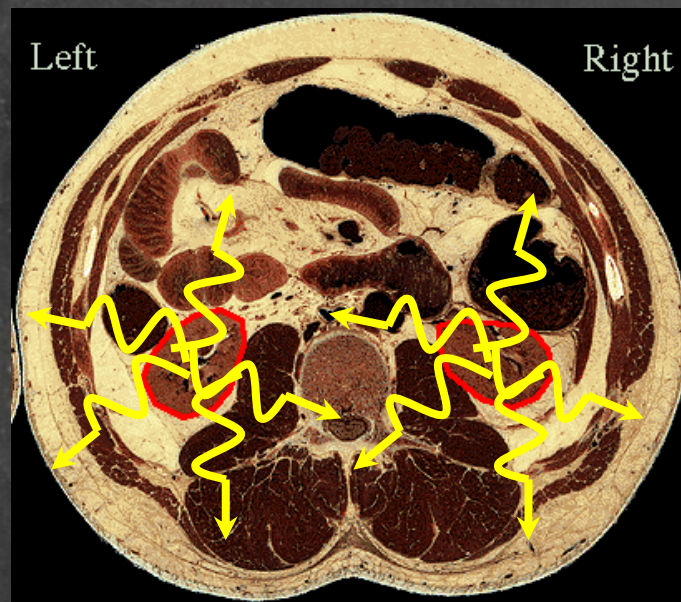


$E_{\phi} \dots \dots ???$



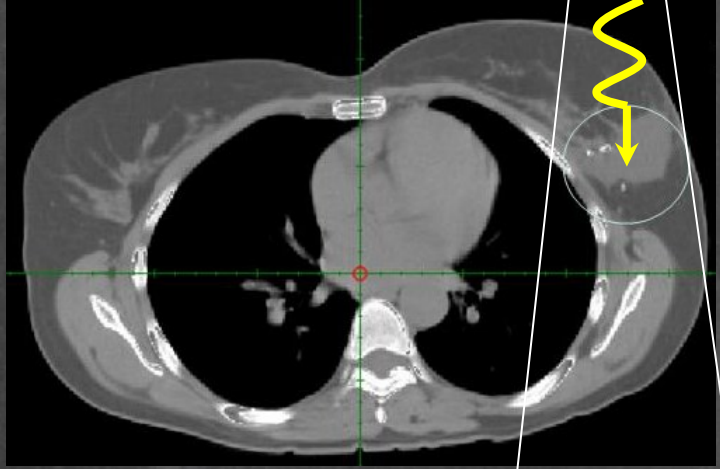


$E_{\phi} \dots \text{???}$



Ανιχνευτής ακτινοβολίας

$E_{\phi}$  ..... ???





# Υλικό περαιτέρω μελέτης

- § 1-3.1.4, Κεφάλαιο 2 Συγγράμματος
- Ερωτήσεις κατανόησης
- Μπορείτε επίσης να αναζητήσετε τους όρους “Radiation Interaction with matter” and “Compton scattering” στο HyperPhysics (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>).

