ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

https://eclass.uoa.gr/
ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ - ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΗ (MED684)

Παρουσίαση:
Ελευθέριος Παππάς
Επίκουρος Καθηγητής
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,
Ιατρική Σχολή Αθηνών
elepappas@med.uoa.gr

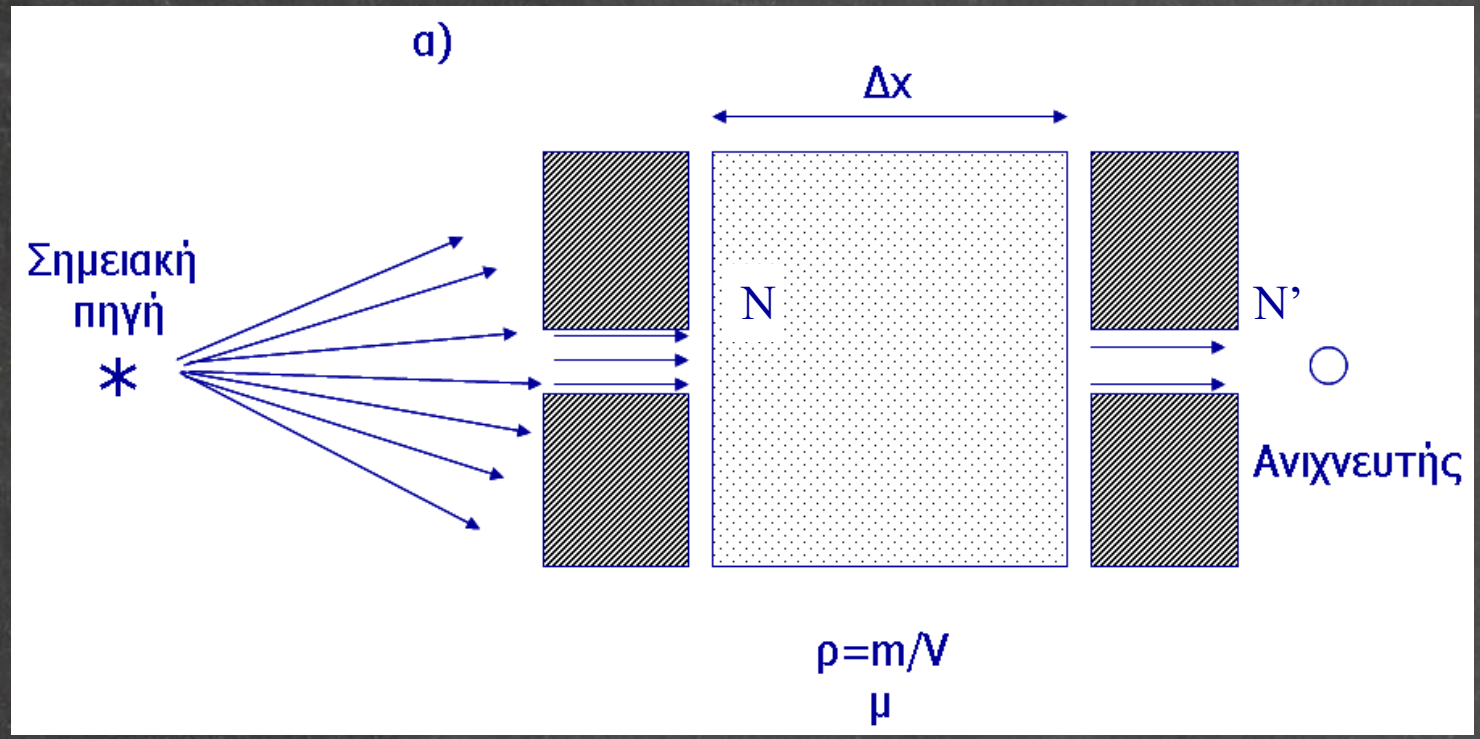
Επιμέλεια διαφανειών και υλικού μελέτης:
Καθ. Π. Παπαγιάννης
Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,
Ιατρική Σχολή Αθηνών
Κτίριο 5, Γραφείο 21

Αλ/δραση Ιοντίζουσας Η/Μ Ακτινοβολίας (φωτονίων) -Ύλης

Συχνότητα, f (s^{-1})	Μήκος κύματος, λ	Ενέργεια	Περιοχή	Ιδιότητες σε σχέση με βιολογικά υλικά
10^5 $3\ 10^{10}$	3 km 0.01 m	413 peV 124 μeV	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 **διαφανή** σε αυτά ενώ τα μικρά μήκη κύματος (μικροκύματα) έχουν ενέργεια που αντιστοιχεί σε ενέργεια περιστροφής απλών μορίων και σημειώνεται **περιορισμένη** απορρόφηση.
$3\ 10^{10}$ $3\ 10^{14}$	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 **σημαντικά** από την ύλη καθώς αντιστοιχεί σε ενέργειες μοριακών ταλαντώσεων απλών μορίων.
$4.3\ 10^{14}$ $7.5\ 10^{14}$	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 **έντονα** από την ύλη.

Συχνότητα, f (s^{-1})	Μήκος κύματος, λ	Ενέργεια	Περιοχή	Ιδιότητες σε σχέση με βιολογικά υλικά
$7.5\ 10^{14}$ $3\ 10^{16}$	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 **εξαιρετικά έντονα** από την ύλη και δεν διαπερνά την επιφάνειά της.
$3\ 10^{16}$ $3\ 10^{18}$	10 nm 100 pm	124 eV 12.4 keV	«μαλακές» ακτίνες x	Παράγεται από διεγέρσεις εσωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων. Απορροφάται **έντονα** από την ύλη και μπορεί να προκαλέσει ιονισμό.
$3\ 10^{18}$ $3\ 10^{19}$	100 pm 10 pm	12.4 keV 124 keV	Διαγνωστικές ακτίνες x	Παράγεται από διεγέρσεις εσωτερικών ηλεκτρονίων ατόμων και λυχνίες x. Απορροφάται **σημαντικά** από την ύλη και μπορεί να προκαλέσει ιονισμό.
$3\ 10^{19}$ $3\ 10^{19}$	10 pm 1pm	124 keV 1.24 MeV	Ακτίνες γ και θεραπευτικές ακτίνες x	Παράγονται από διάσπαση γ και γραμμικούς επιταχυντές. Απορροφώνται **περιορισμένα** από την ύλη και προκαλούν ιονισμό.
$3\ 10^{21}$	100 fm	12.4 MeV	Θεραπευτικές ακτίνες x	Παράγονται από διάσπαση γ και γραμμικούς επιταχυντές. Απορροφώνται **περιορισμένα** από την ύλη και προκαλούν ιονισμό.

Εξασθένηση ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας κατά τη διαδρομή της στην ύλη



Ο νόμος εξασθένησης 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 μ ο αποκαλούμενος
γραμμικός συντελεστής εξασθένησης
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: $\frac{\Delta y}{\Delta x} = \pm \beta y$

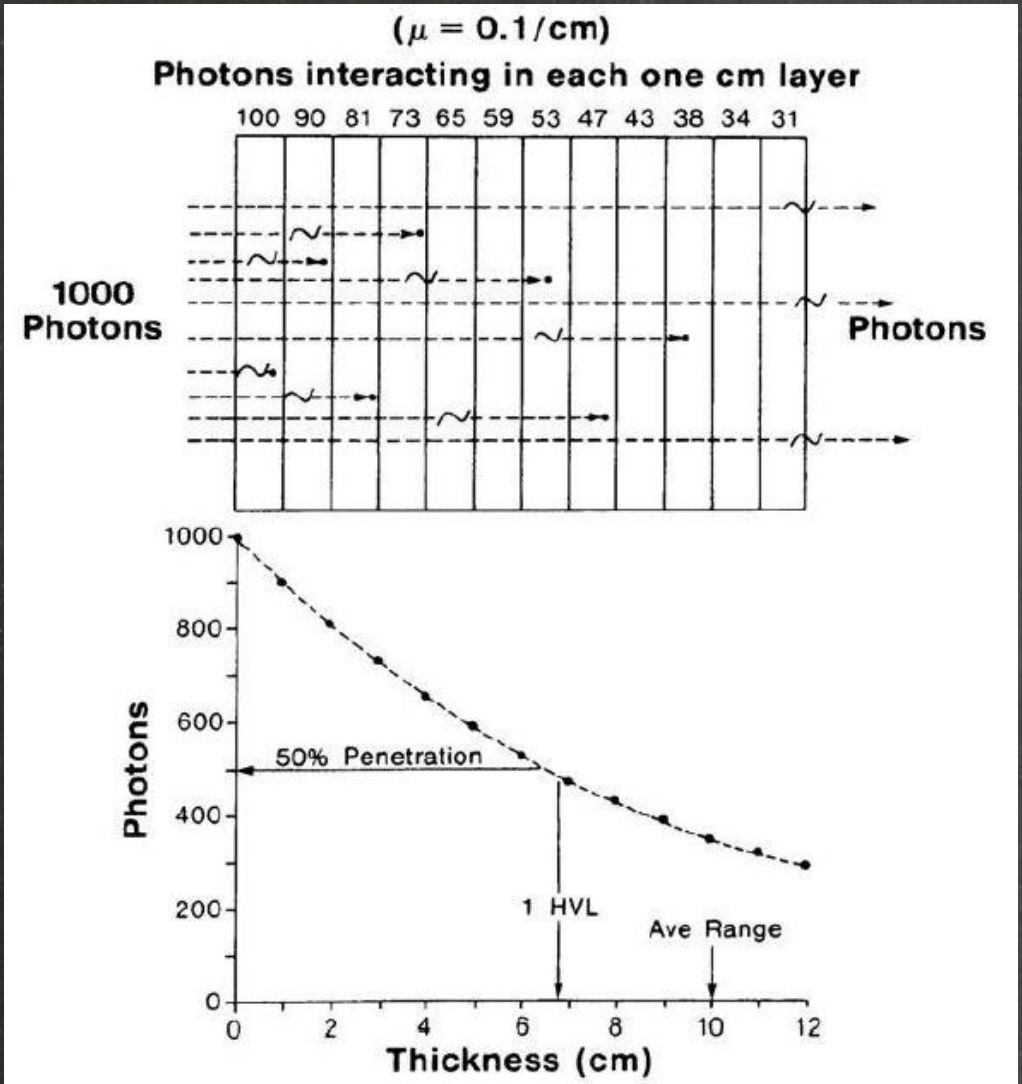
$\rightarrow \frac{dy}{dx} = \pm \beta y$

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



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

$$\acute{\eta}$$

$$\mathrm{I} = \mathrm{I}_0 \exp(-\mu x)$$

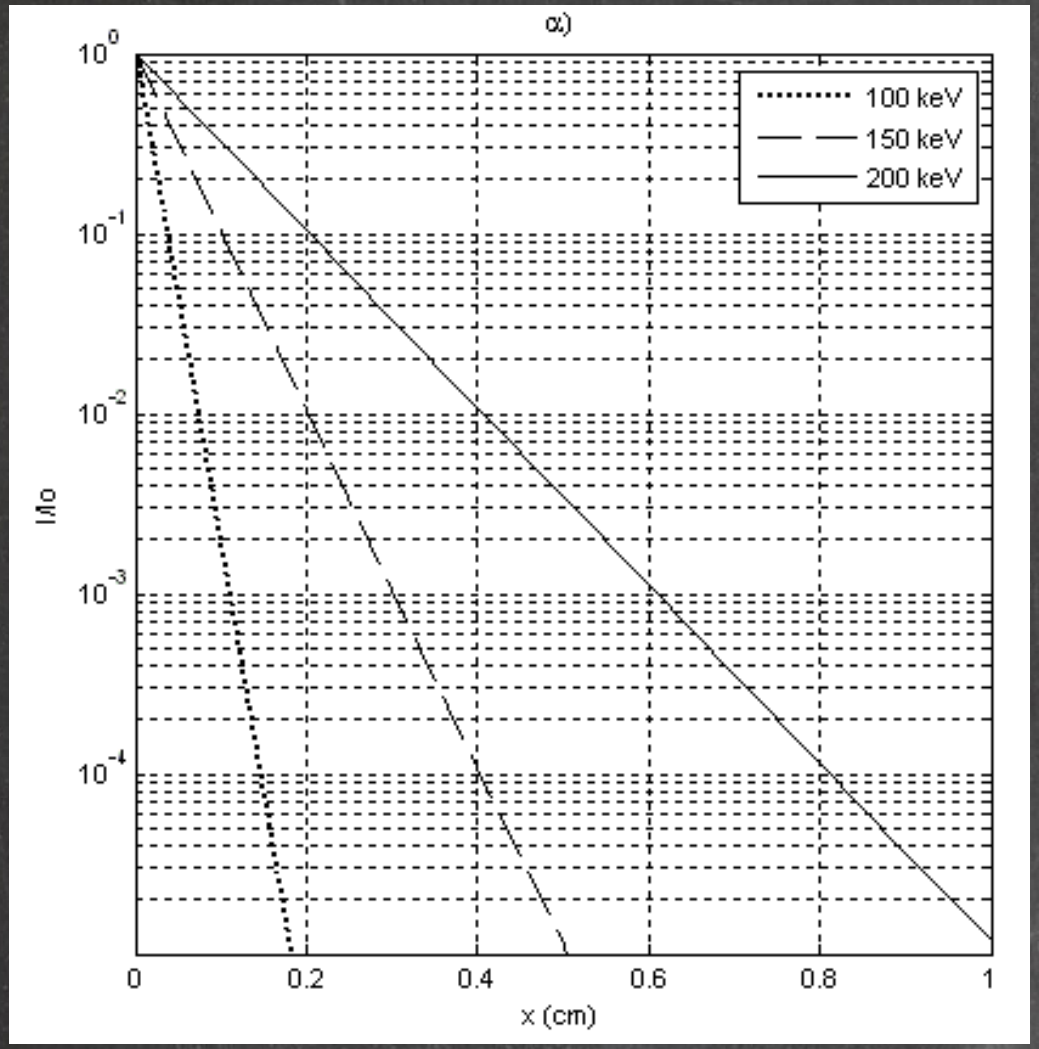
$$x_{1/2} \equiv HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

$$x_{1/10} \equiv \mathrm{T}VL = \frac{\ln 10}{\mu}$$

$$\mathrm{I} = \mathrm{I}_0 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{x}{HVL}}$$

$$\mathrm{I} = \mathrm{I}_0 \left(\frac{1}{10}\right)^{\frac{x}{TVL}}$$

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

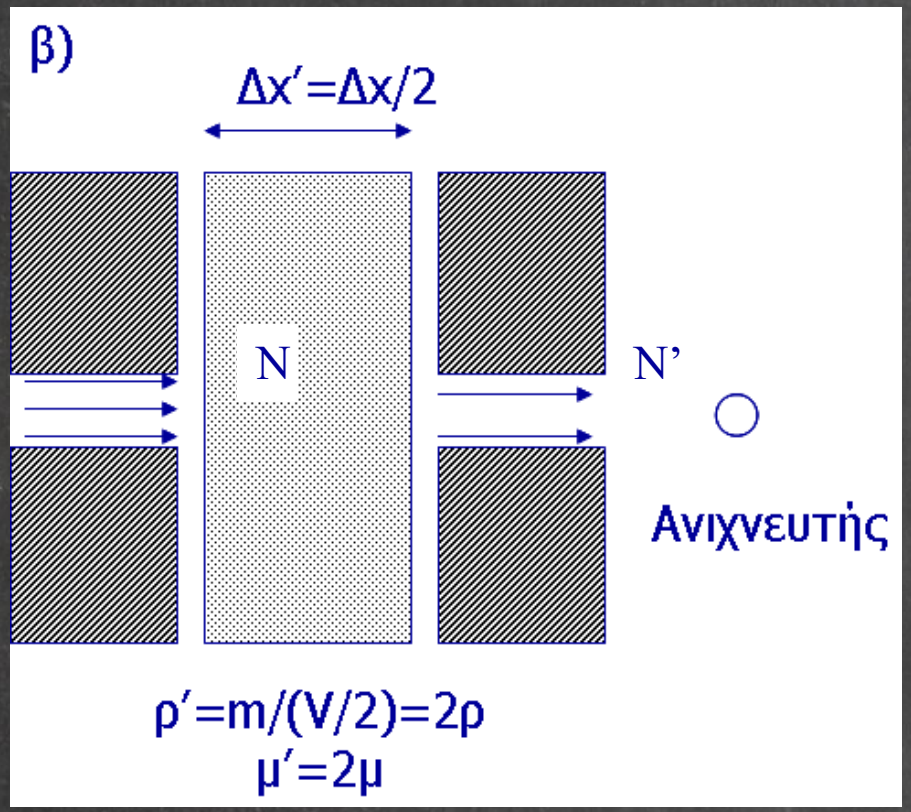


- **Ενέργεια φωτονίων, Ε**

Υλικό, Z

και ...

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



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

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

Διαφορετικές εκφράσεις του συντελεστή εξασθένησης

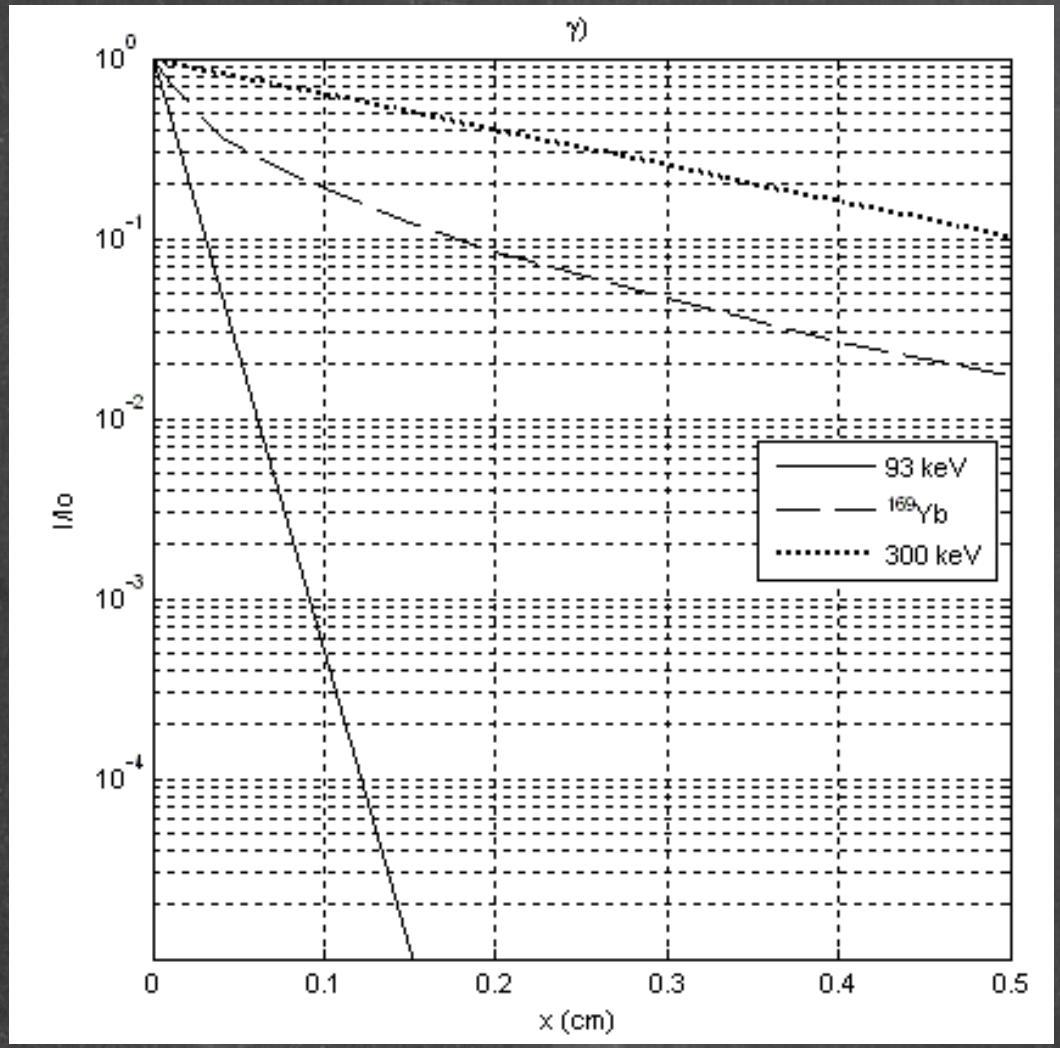
Γραμμικός, μ (cm^{-1}), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως x σε cm
και Μαζικός, μ/ρ (cm^2/g), οπότε θα εκφράζω το πάχος του υλικού ως ρx σε g/cm^2

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

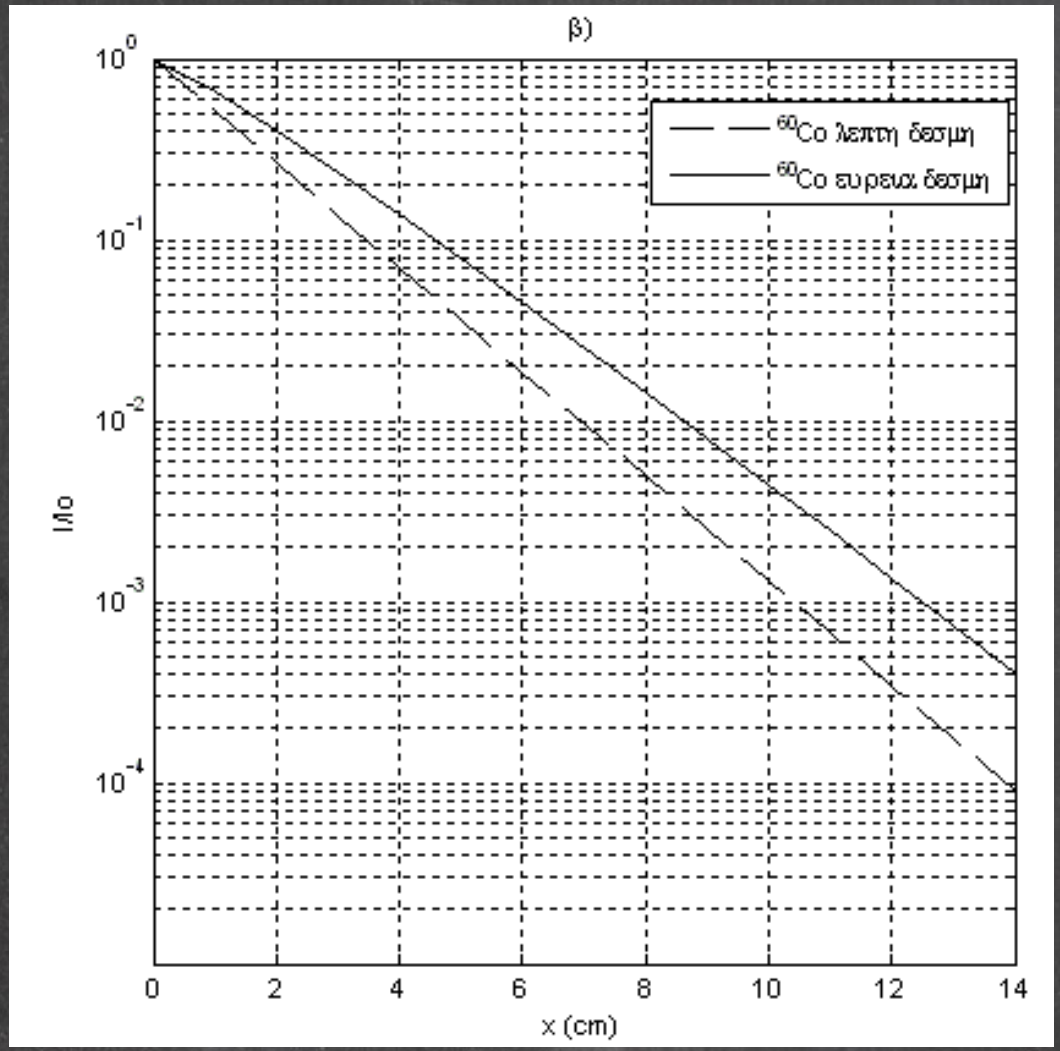
Για πολυ-ενεργειακές δέσμες:



Ισχύει πάντα ο Νόμος της εκθετικής εξασθένησης;

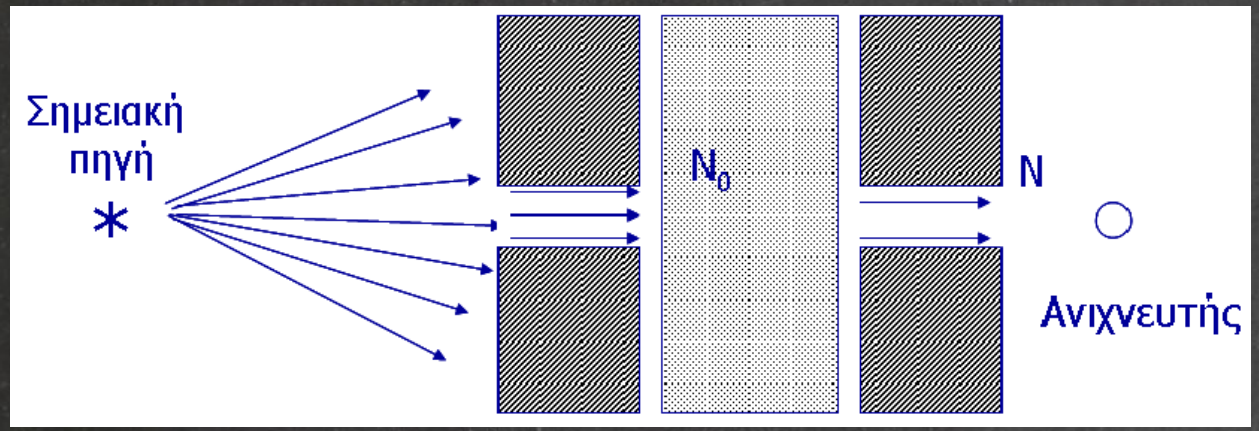
Μόνο σε συνθήκες "λεπτής" δέσμης ή "καλής" γεωμετρίας.

Σε συνθήκες "ευρείας" δέσμης ή "κακής" γεωμετρίας:



«Καλή» γεωμετρία δέσμης

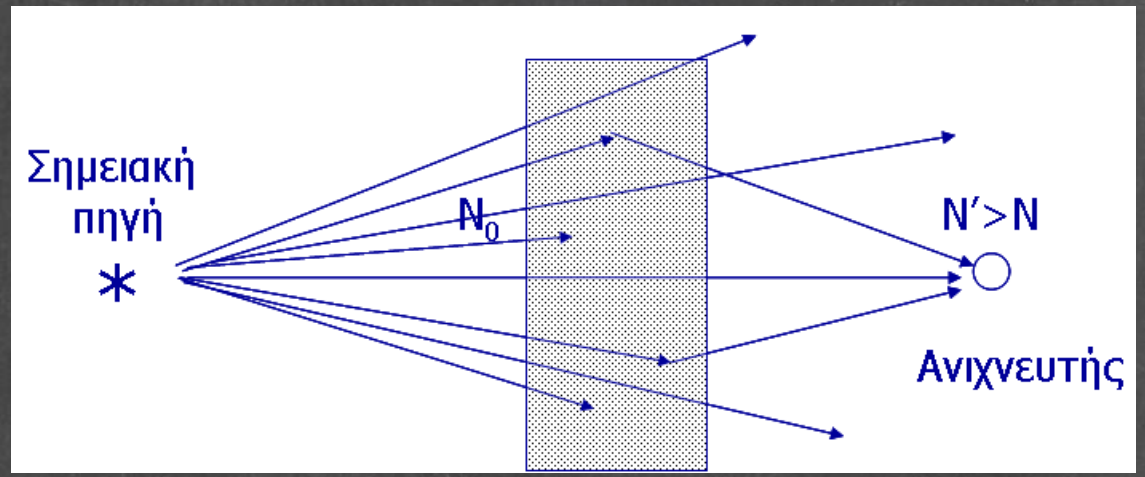
$N = N_0 * \exp(-\mu x)$



«Κακή» γεωμετρία δέσμης

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

όπου Β 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).

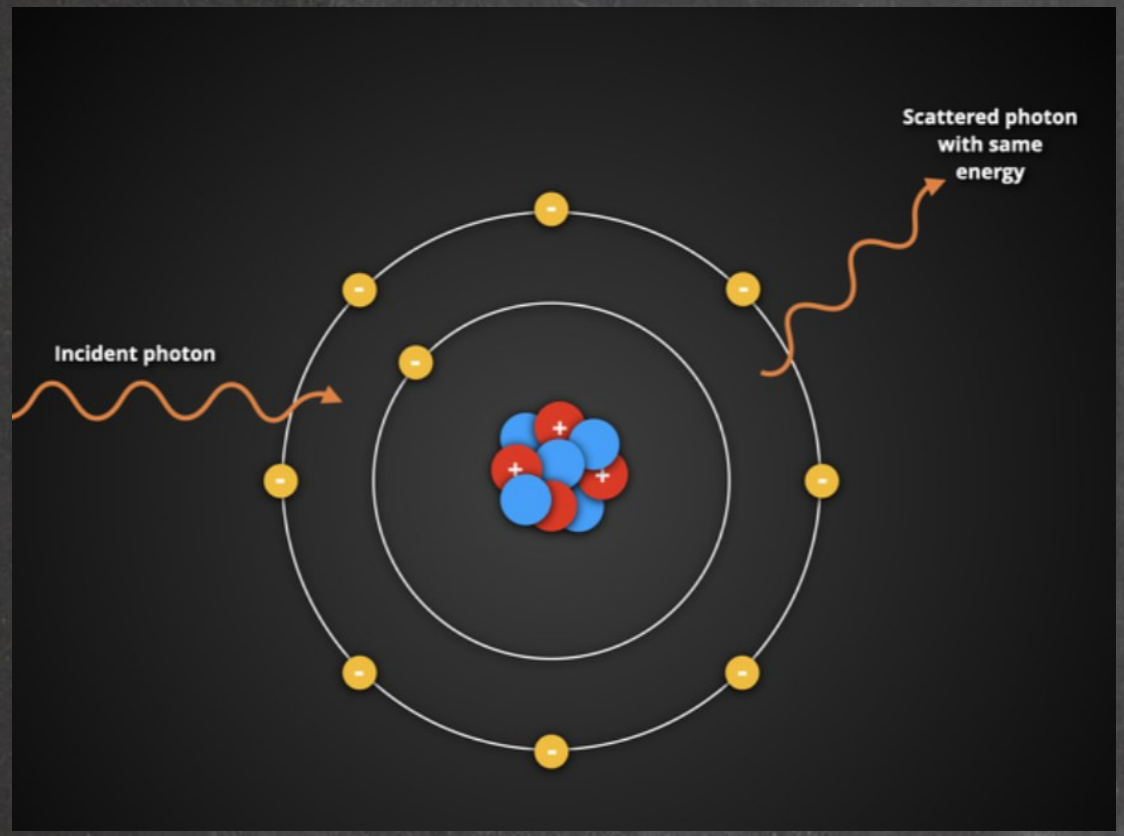


Αλ/δραση Ιοντίζουσας Η/Μ Ακτινοβολίας-Ύλης: πιθανοί στόχοι

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:

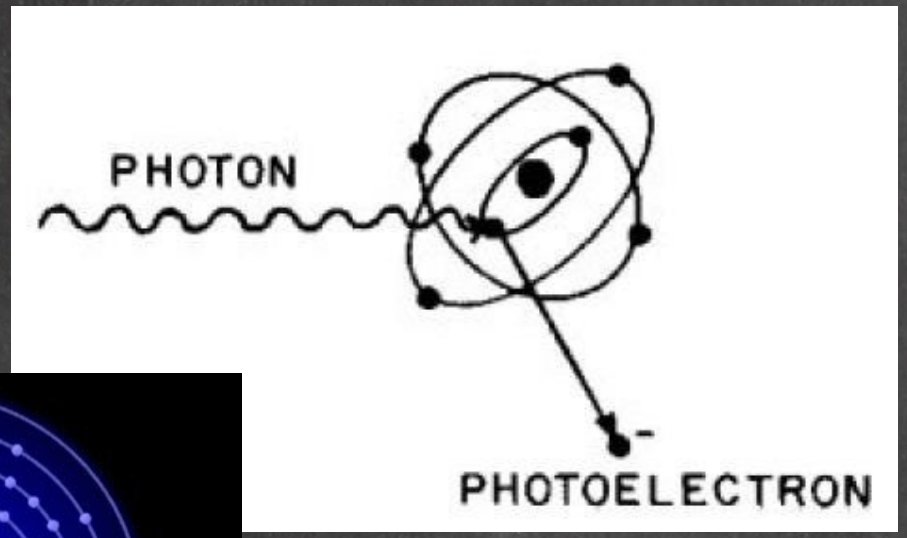
ΣΥΜΦΩΝΗ ΣΚΕΔΑΣΗ

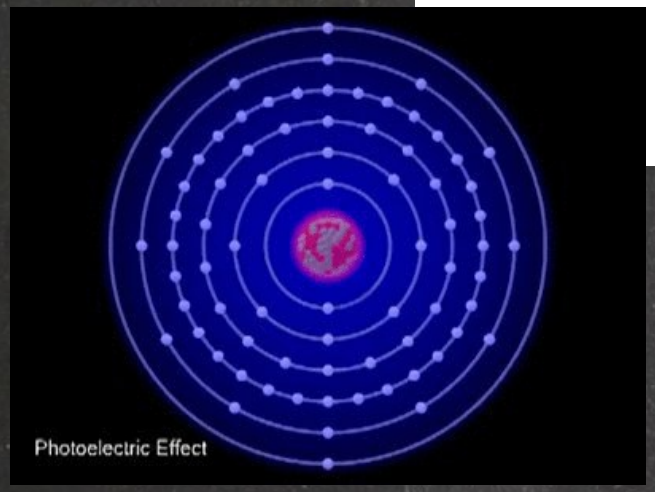


- Δεν συμβαίνει ιονισμός
- Δεν μεταφέρεται ενέργεια στην ύλη
- Σημειώνεται μόνο μικρή αλλαγή στη διεύθυνση του φωτονίου χωρίς να μεταβάλλεται η ενέργειά του

2. Αλληλεπίδραση φωτονίου με ηλεκτρόνιο εσωτερικής στοιβάδας:

ΦΩΤΟΗΛΕΚΤΡΙΚΟ ΦΑΙΝΟΜΕΝΟ



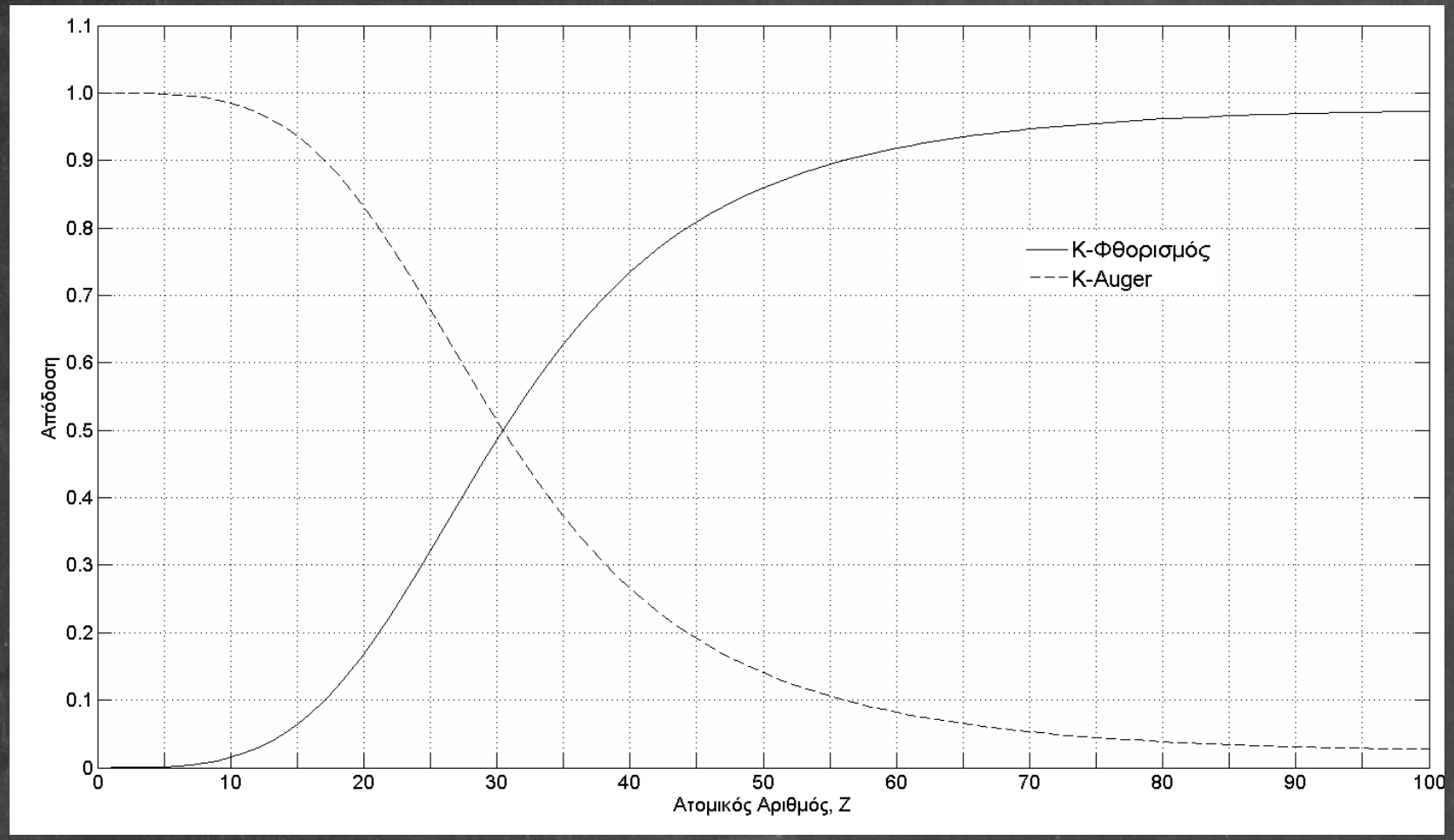


- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το e^- εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια:

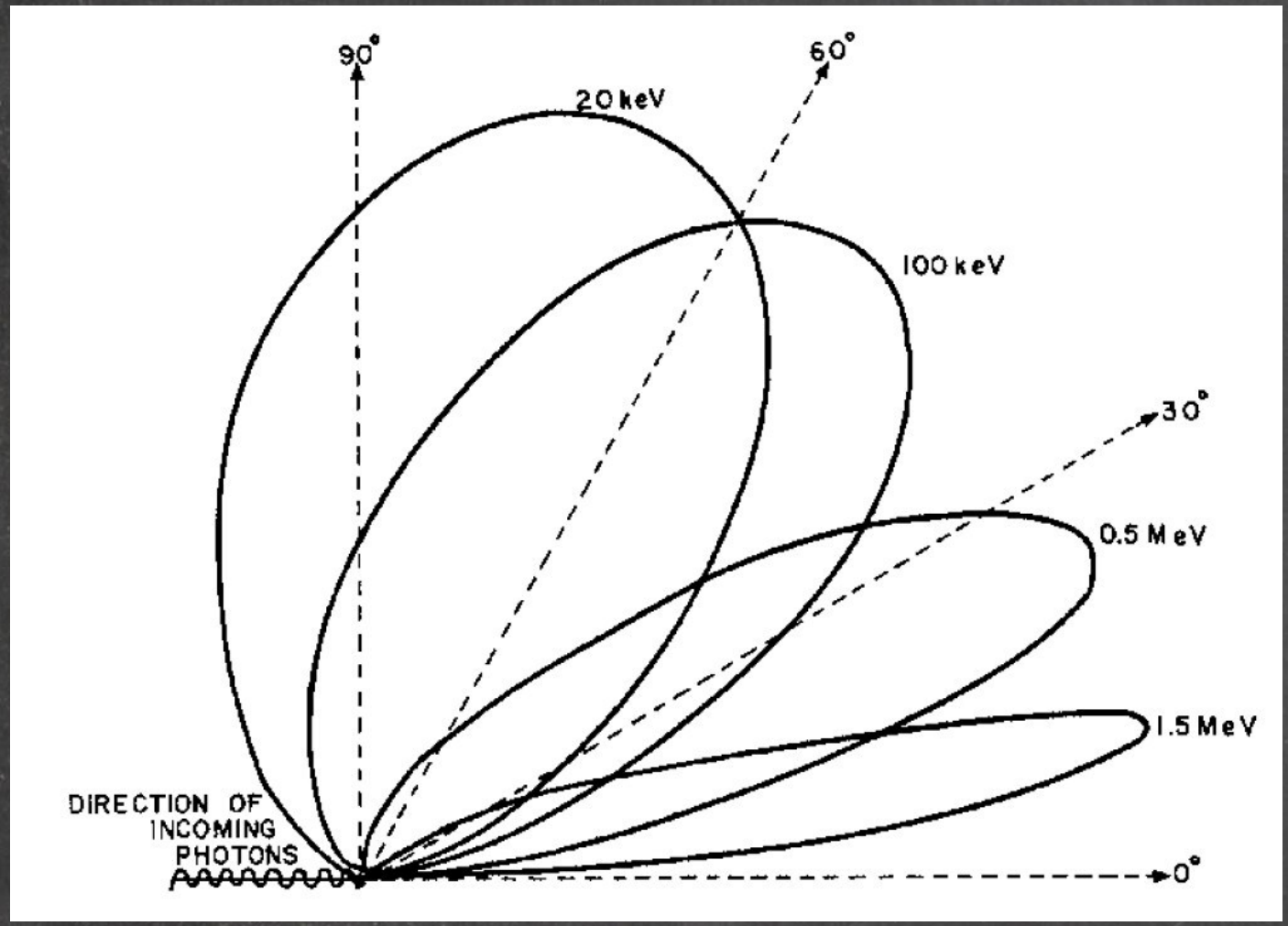
$$T_e = E - E_b$$

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

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

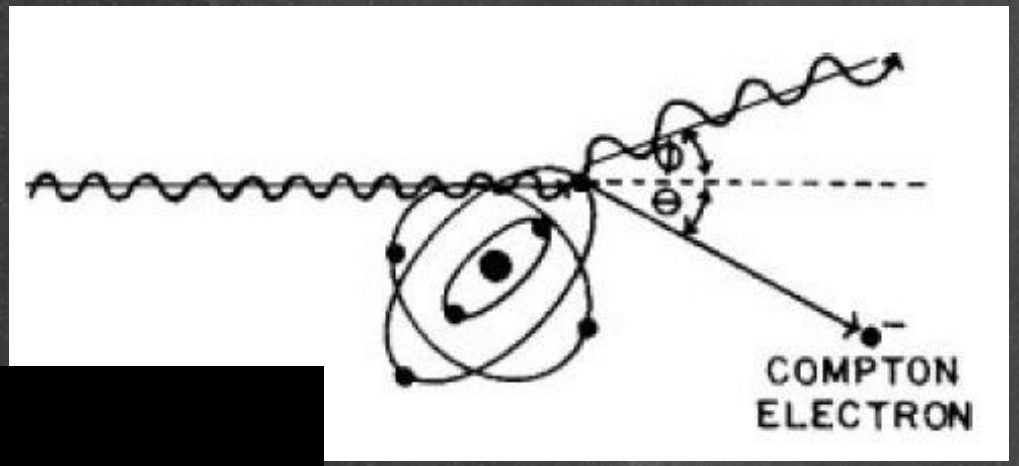


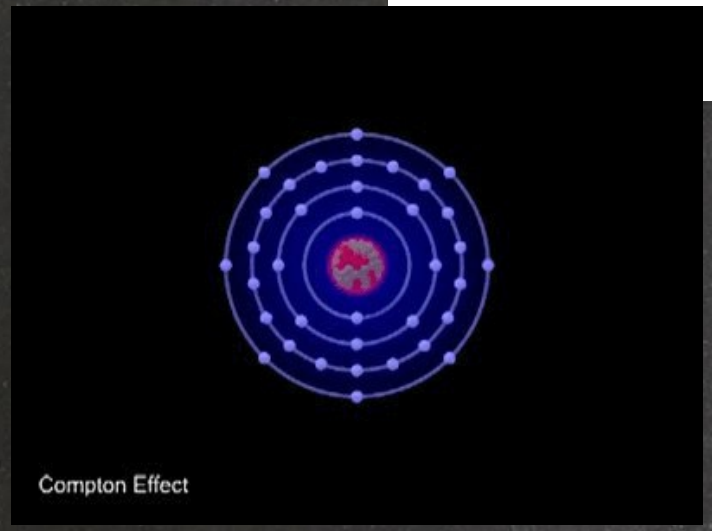
Κατανομή της γωνίας εκπομπής των φωτοηλεκτρονίων ως προς τη διεύθυνση του αρχικού φωτονίου



3. Αλληλεπίδραση φωτονίου με "ελεύθερο" ηλεκτρόνιο (εξωτερικής στοιβάδας):

ΣΚΕΔΑΣΗ COMPTON
(ασύμφωνη σκέδαση)





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

- 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:

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

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

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

Α. Κεντρική κρούση (θ=0ο, **φ=180ο**)

cosφ=cos180ο= -1

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

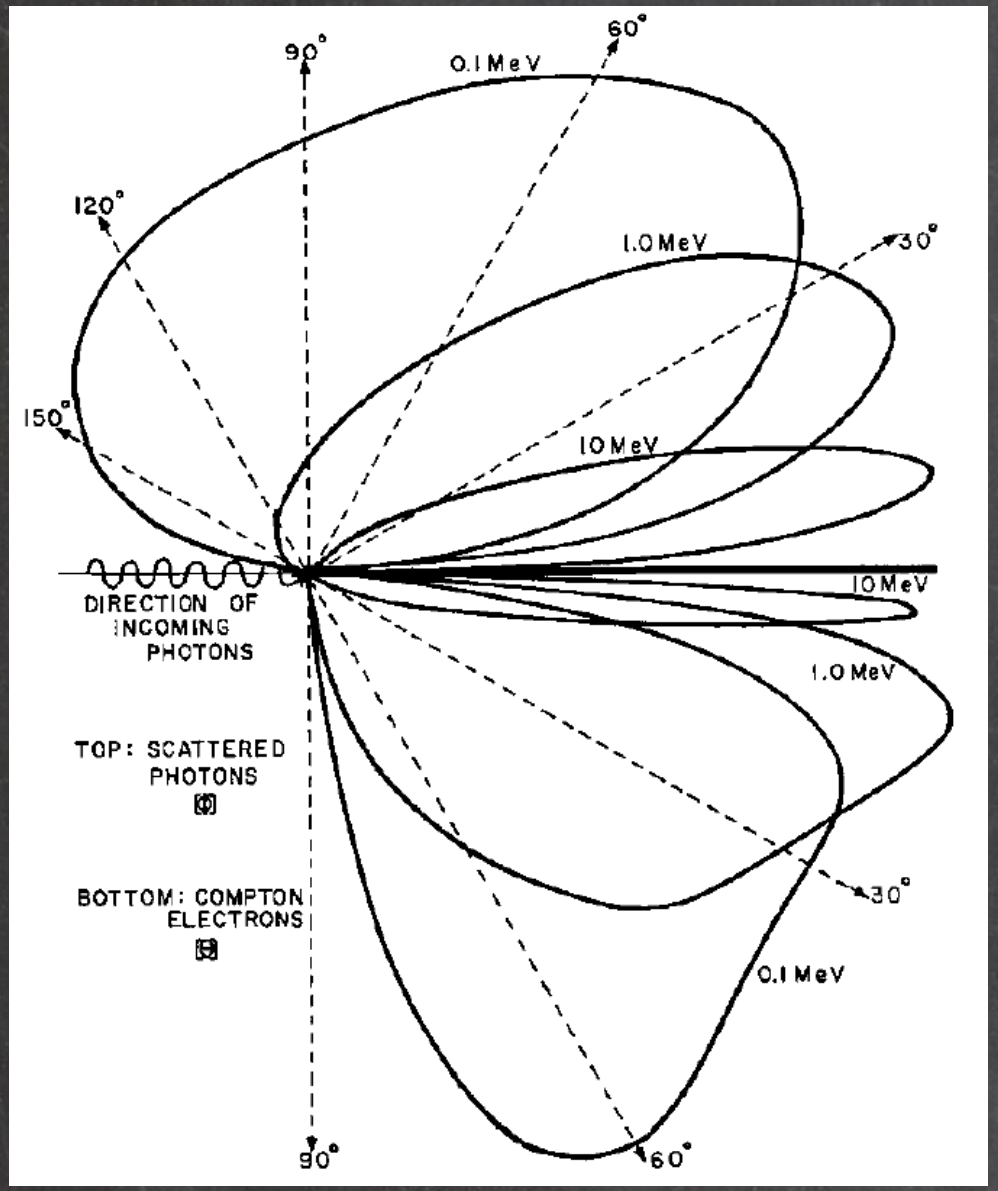
$$E_{sc\,MIN} = E\frac{1}{1+2(E/m_ec^2)}$$

Β. Εφαπτομενική κρούση (θ=90ο, **φ=0ο**)

cosφ=cos0ο= 1

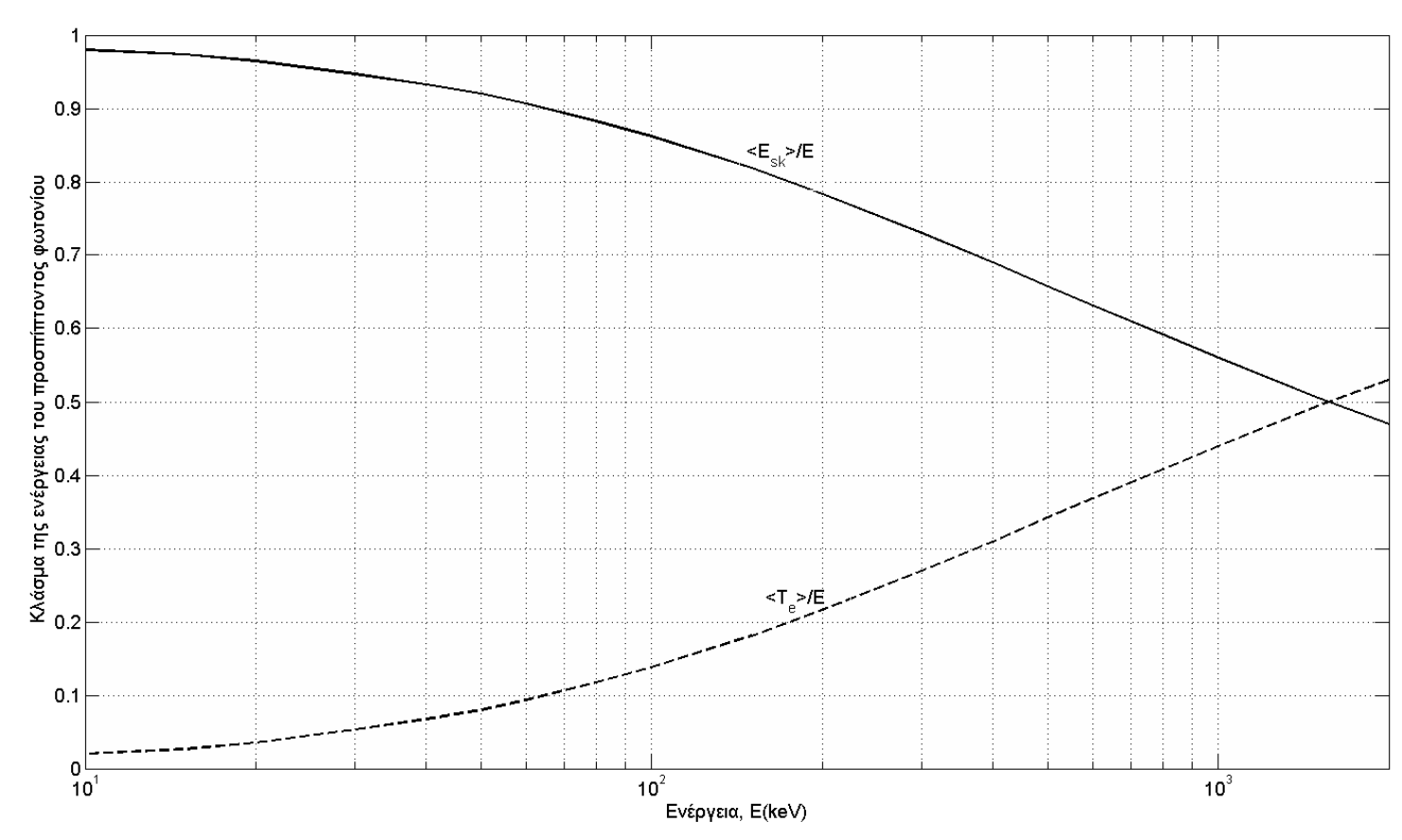
$$T_{eMIN} = 0$$

$$E_{sc\,MAX} = E$$



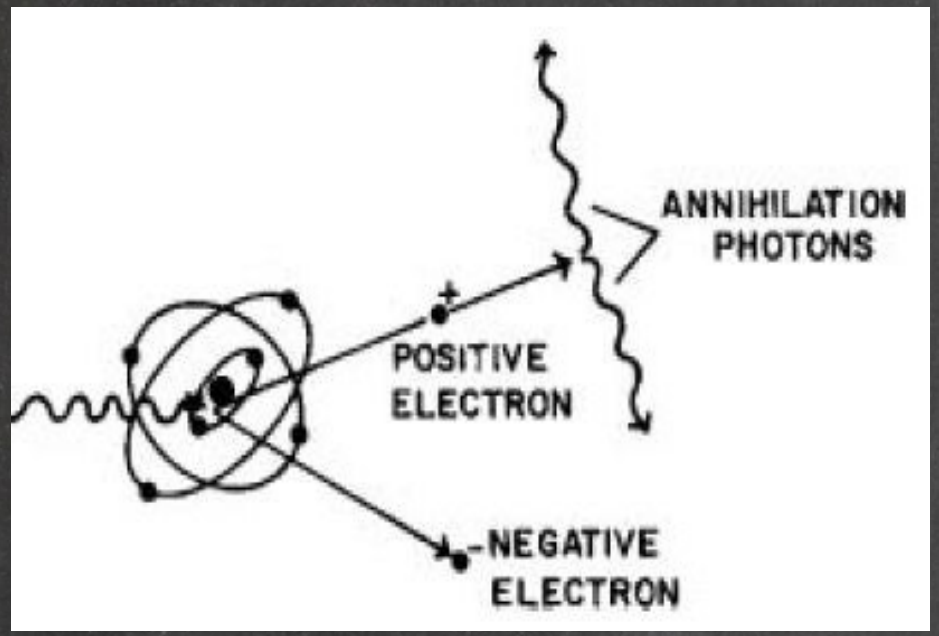
Κατανομή της γωνίας εκπομπής του e^- Compton και του φωτονίου που υπέστη σκέδαση ως προς τη διεύθυνση του αρχικού φωτονίου

Η μέση τιμή του ποσοστού της ενέργειας του αρχικού φωτονίου που μετατρέπεται σε ενέργεια σκεδαζόμενου φωτονίου <Esc>/E και κινητική ενέργεια του ηλεκτρονίου, <Te>/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:

$$E = 2m_e c^2 = 1.02 MeV$$

Συνοπτικά λοιπόν:

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

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

$$\mu = \mu_{συμφ} + \mu_{φωτ} + \mu_{Compton} + \mu_{Δ.Γ.}$$

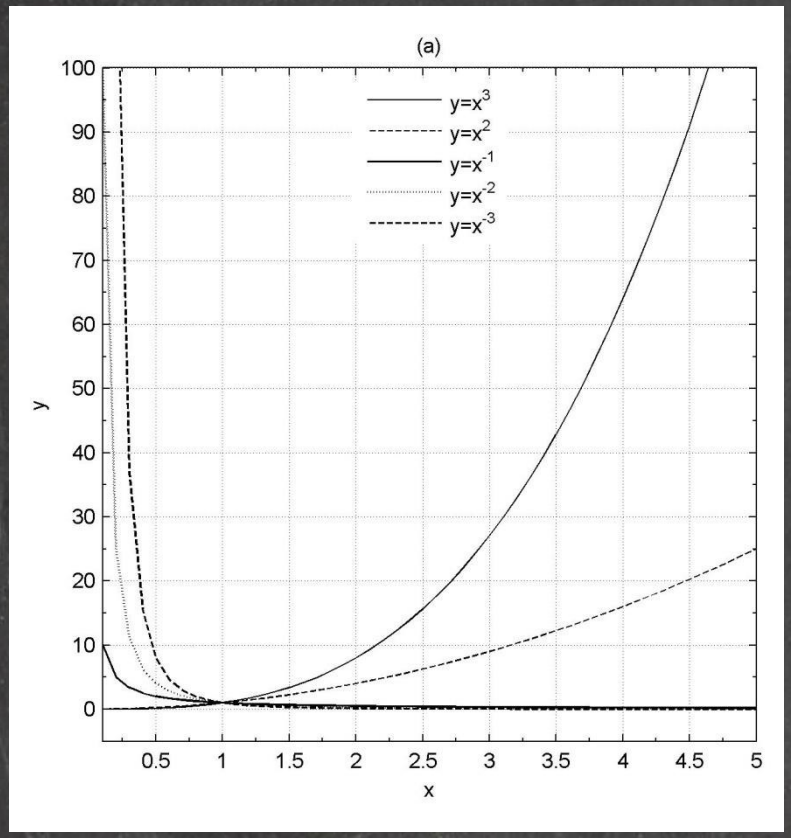
ή

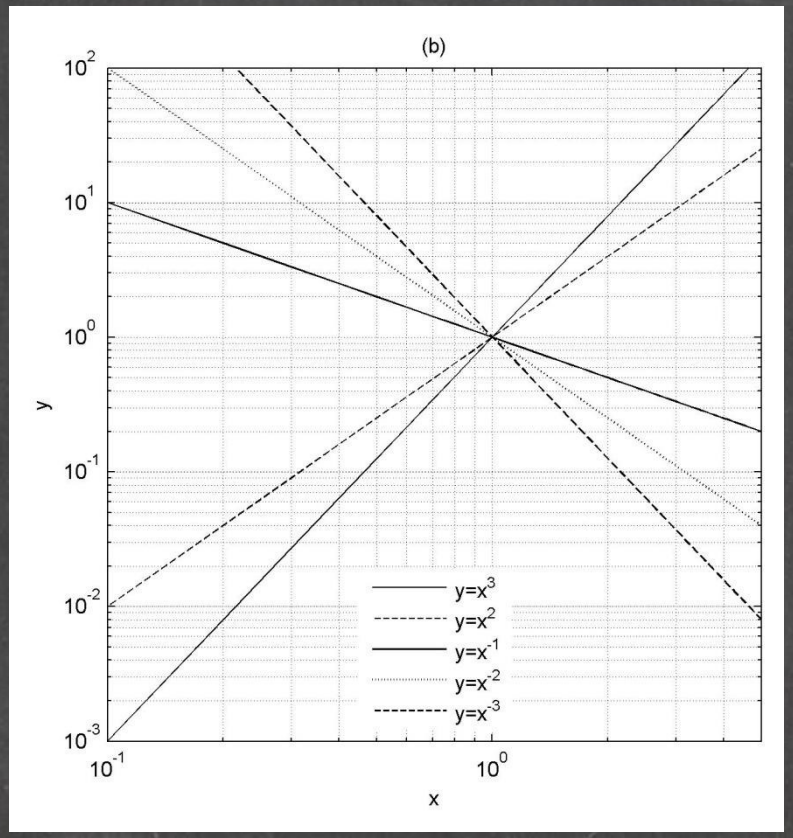
$$\mu/\rho = \mu_{συμφ}/\rho + \mu_{φωτ}/\rho + \mu_{Compton}/\rho + \mu_{Δ.Γ.}/\rho$$

Συναρτήσεις δυνάμεων και λογαριθμικές κλίμακες ...

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

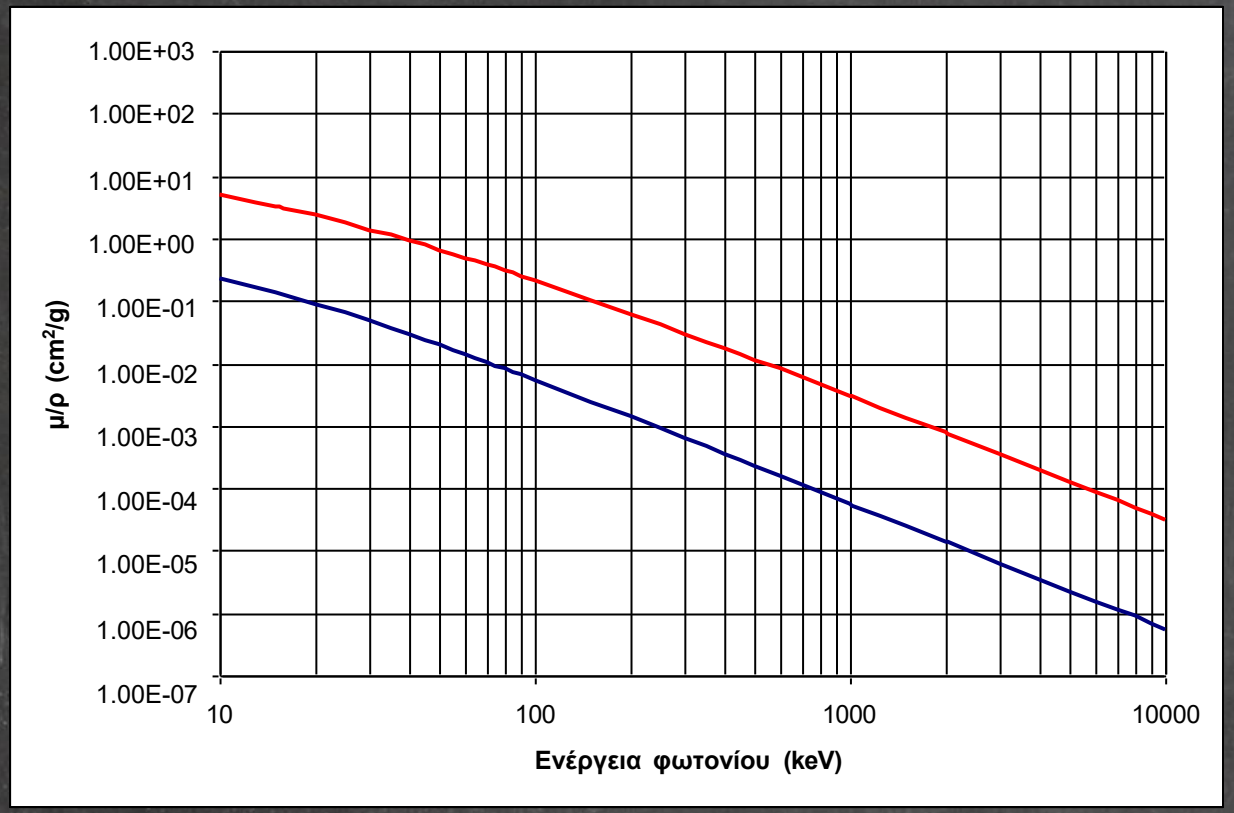
$\log y=\log(Ax^{\pm n})=\log A+\log(x^{\pm n}) \Leftrightarrow \log y = \log A \pm n \log x$





Σύμφωνη σκέδαση

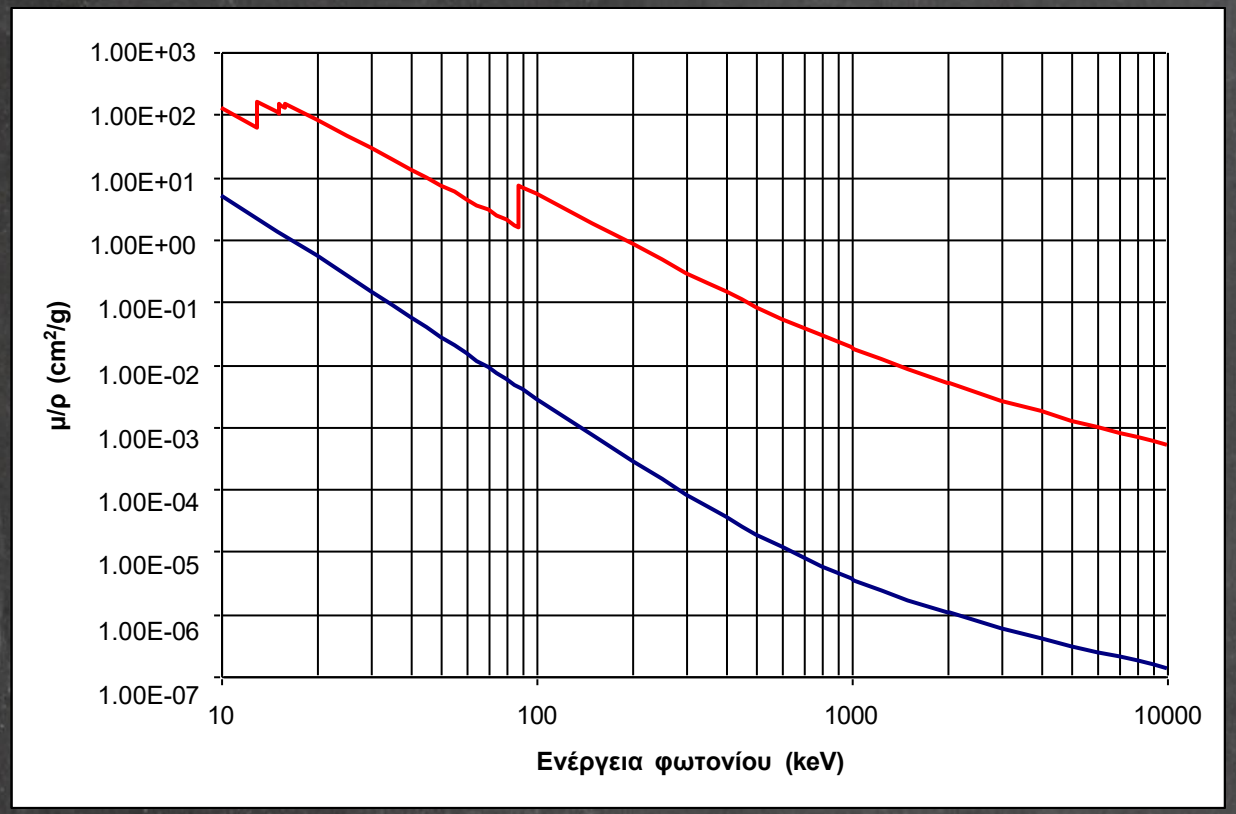
H_2O (Z_{eff}=7.5) & Pb(Z=82)



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

Φωτοηλεκτρικό

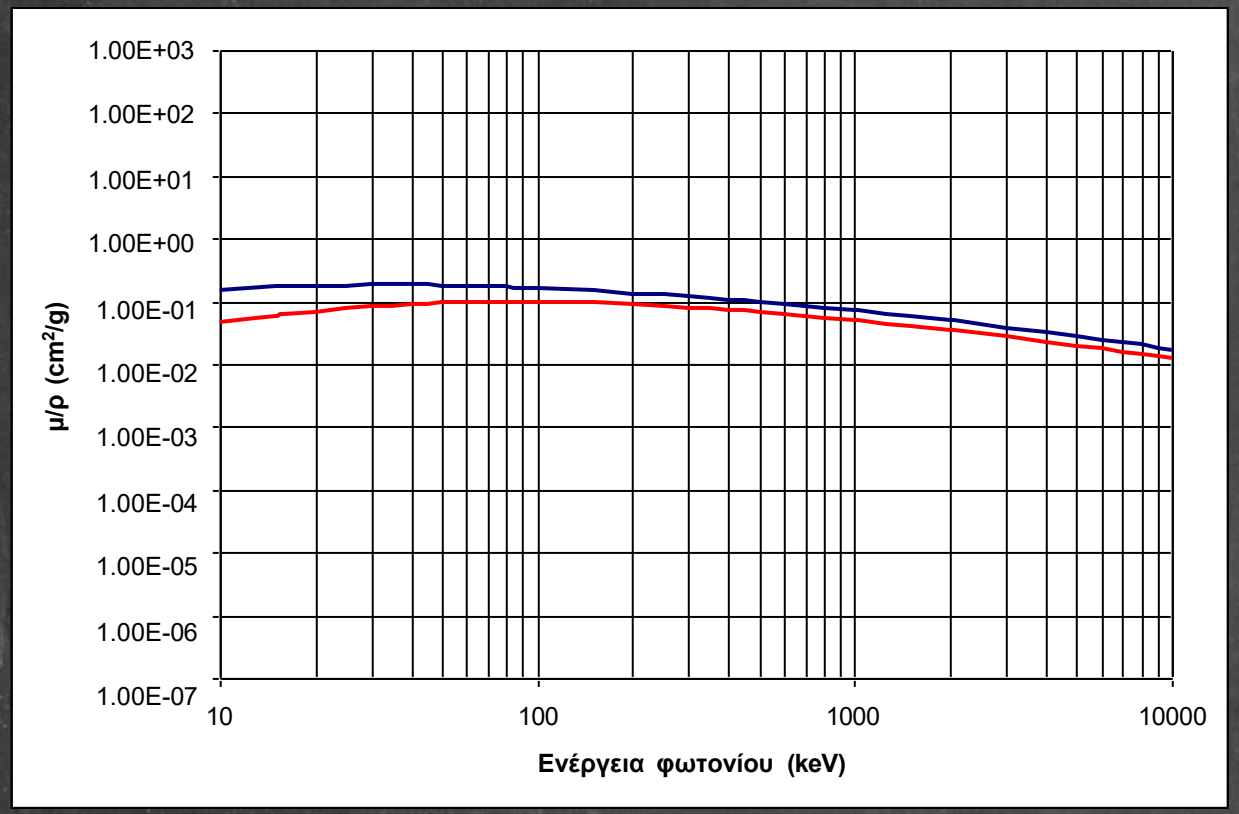
H_2O (Z_{eff}=7.5) & Pb(Z=82)



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

Σκέδαση Compton

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

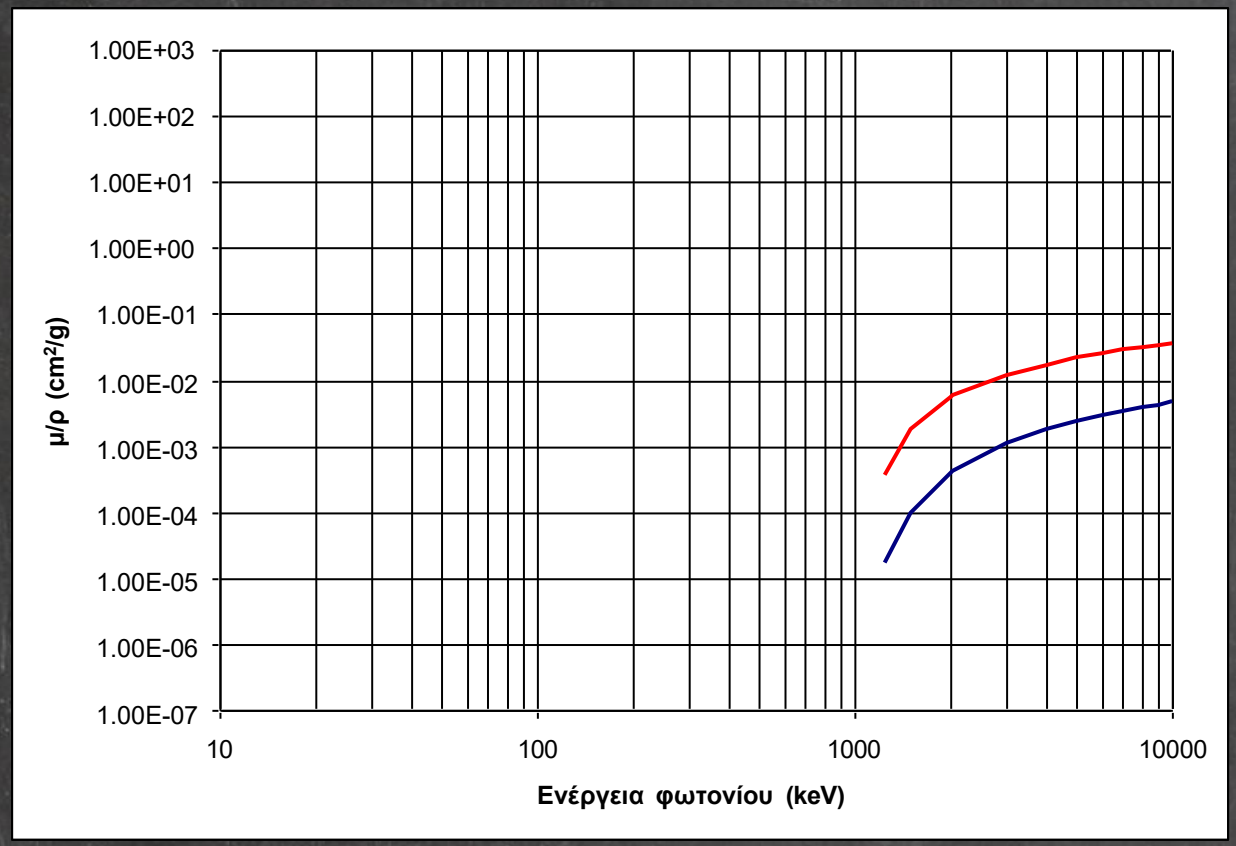


Πιθανότητα ανά μονάδα μάζας :

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

Δίδυμη γένεση

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



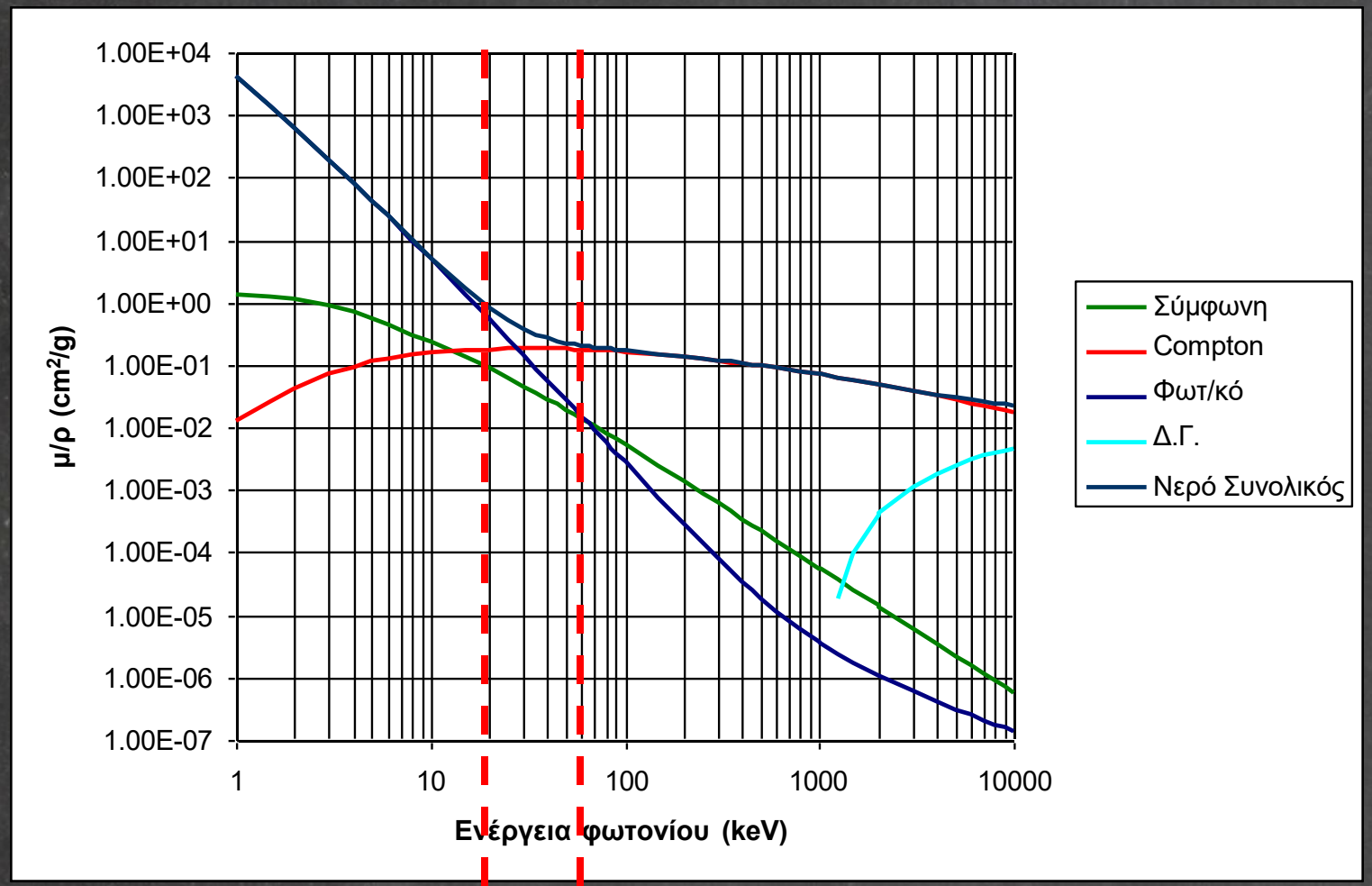
Πιθανότητα ανά μονάδα μάζας :

- Αυξάνει με την E (>1,02 MeV)
- ~Z

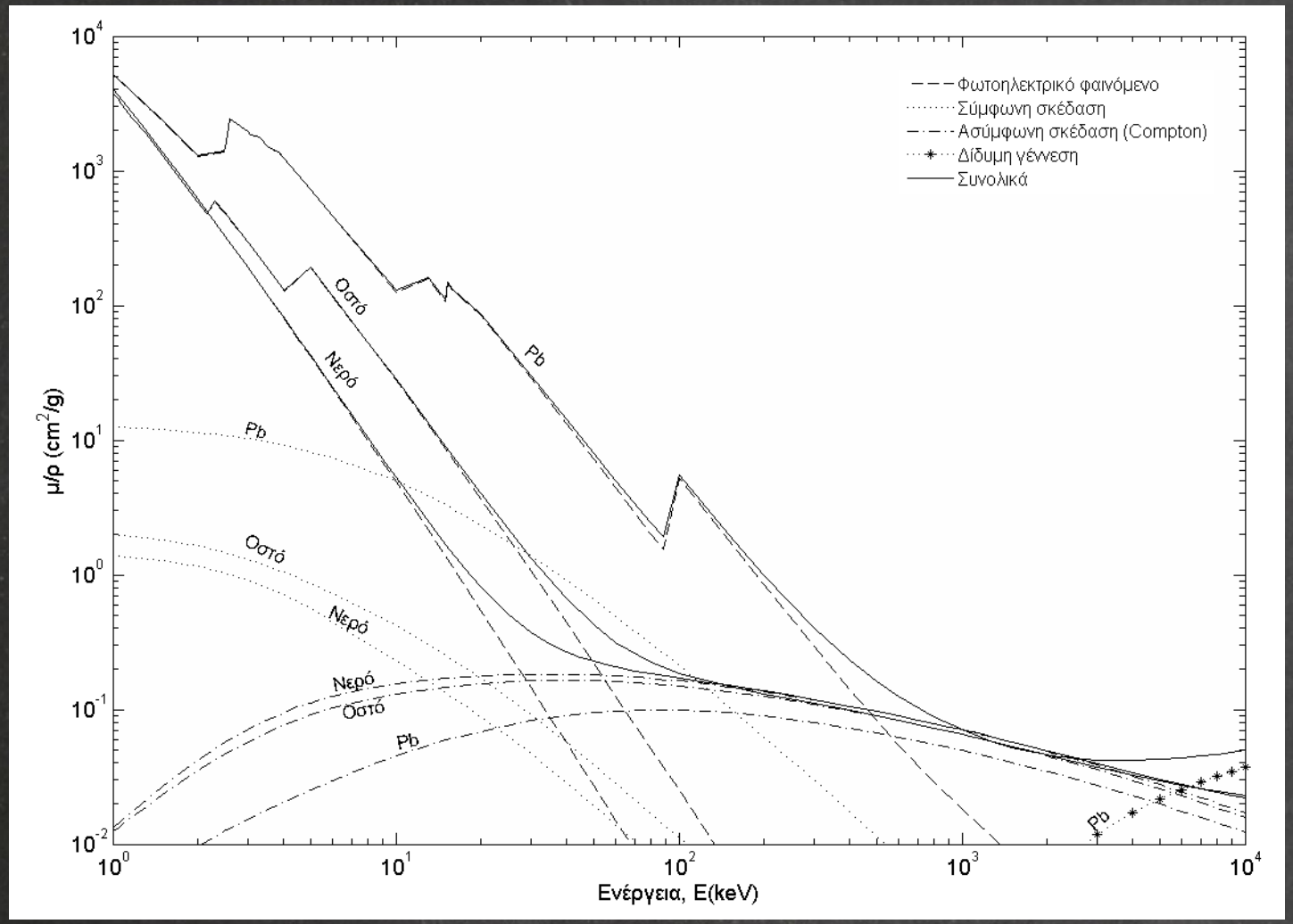
Συνοπτικά λοιπόν:

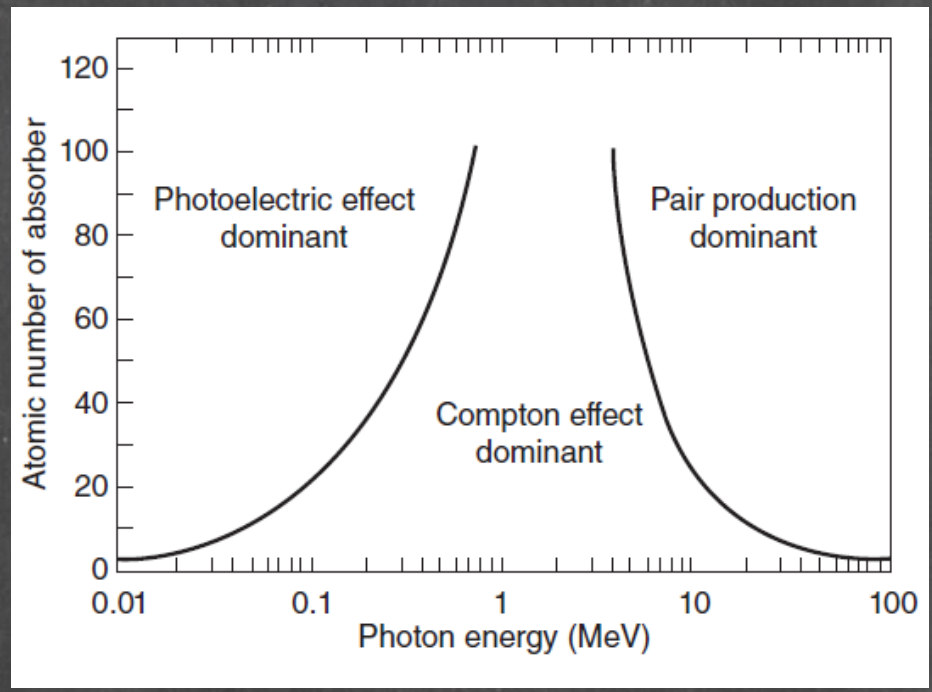
Αλλ/ση:	**σύμφ. σκέδαση**	**Φωτ/κτρικό φαιν.**	**Σκ. Compton**	**Δίδ. Γένεση**
Με:	ατομικά e^-	δέσμιο e^- (άτομο)	ελεύθερο e^-	πυρήνα
Αποτέλεσμα:	Αλλαγή κατ/νσης	Απορρόφηση	Αλλαγή κατ/νσης & Ε	Απορρόφηση
Ε που μεταφέρεται & απορ/φάται από βιολογικό ιστό:	0	$\sim E_{\varphi}$	$\sim E_{e^-} = E_{\varphi} - E'_{\varphi}$	$\sim E_{e^-} = E_{\varphi} - 1.02 - E'_{e+}$
μ/ρ:	$\sim Z/E^2$	$\sim Z^3/E^3$	↓ Ε	↑ Ε, ~Ζ

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

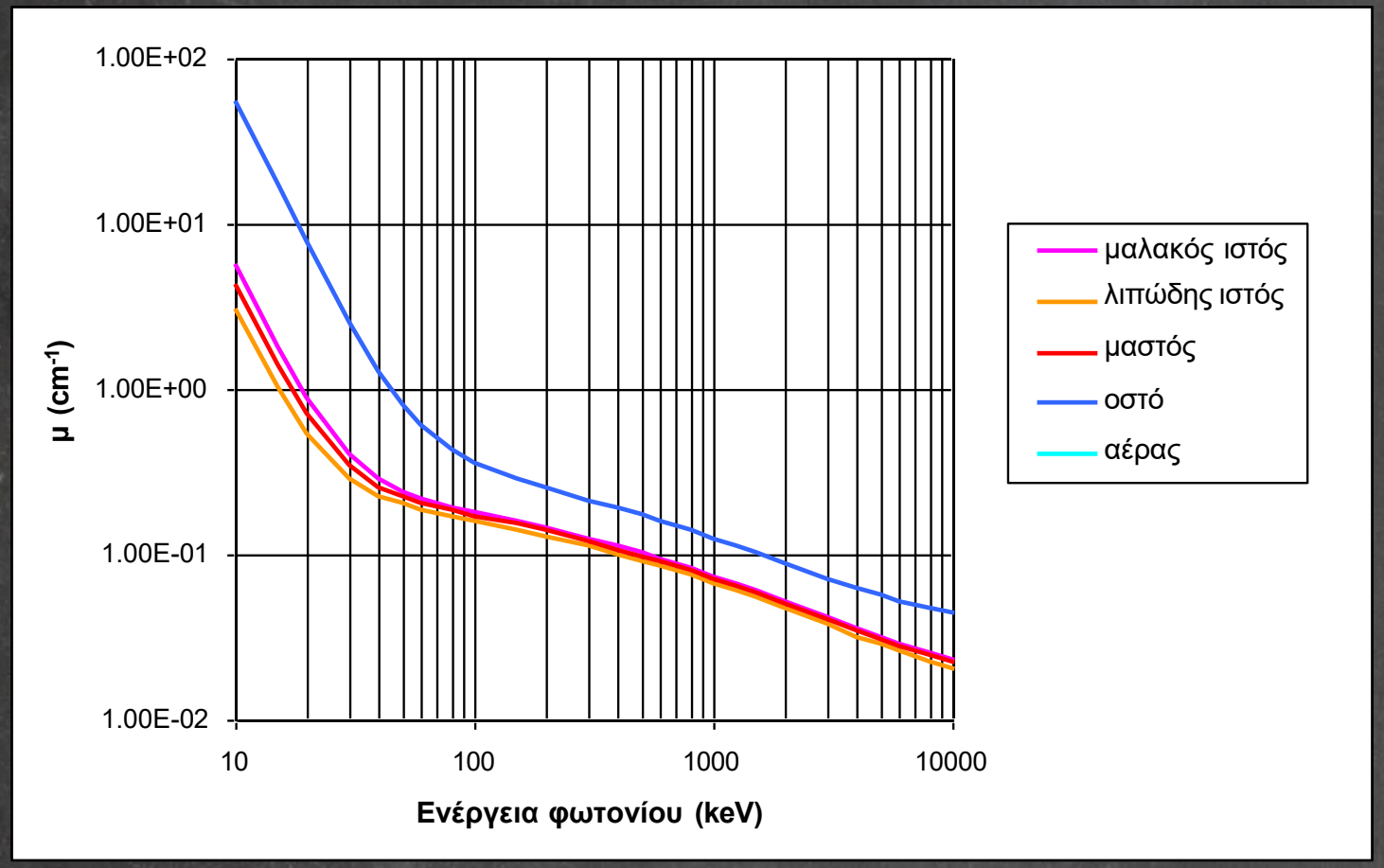


Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **μάζας** υλικού

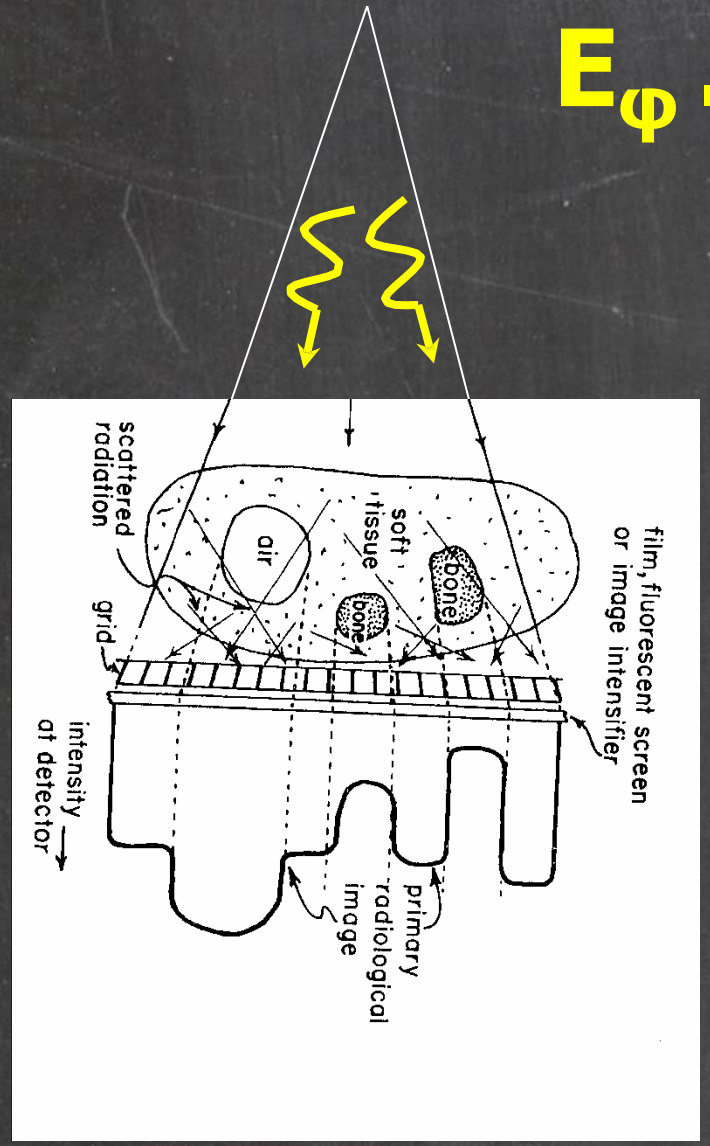


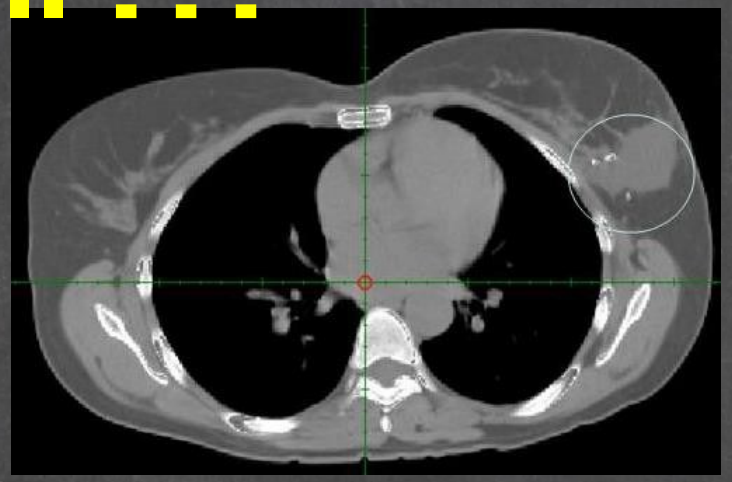


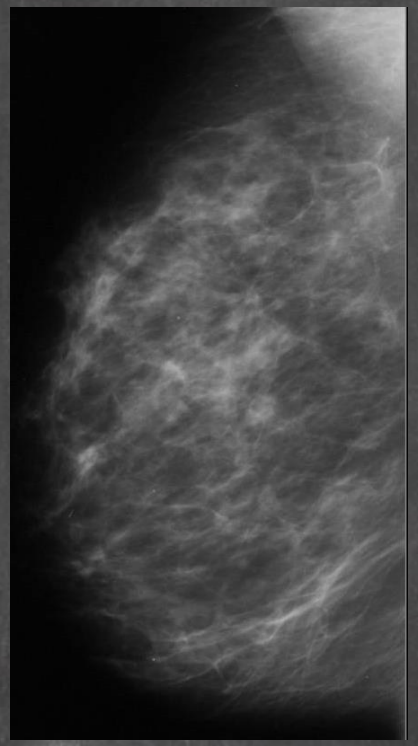
Πιθανότητα αλλ/σης ανά μονάδα **πάχους** υλικού

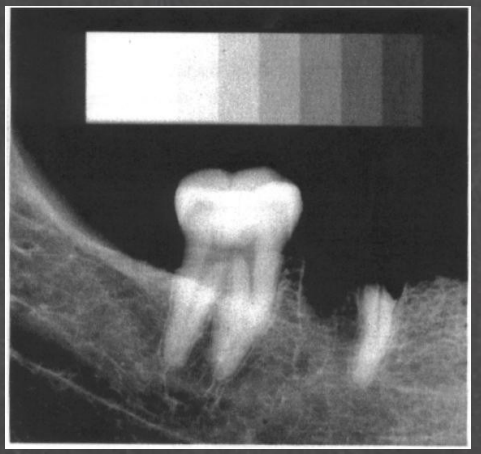


E_φ ..... ???

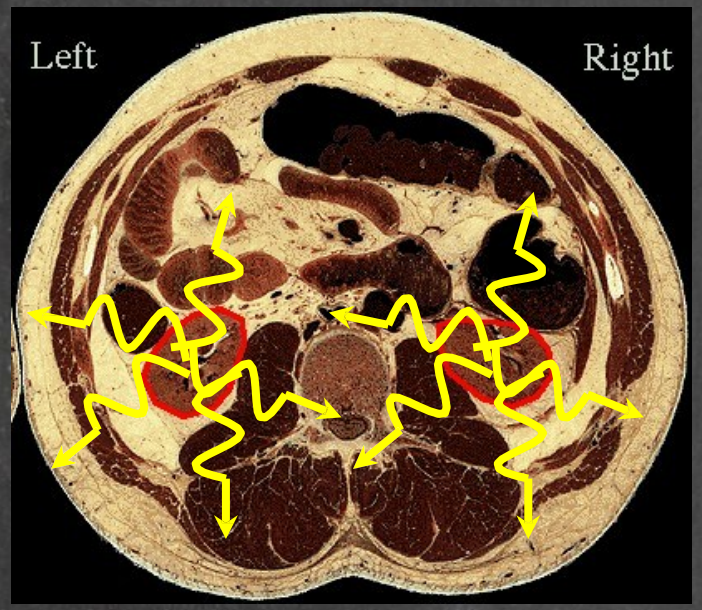

scattered radiation
air
soft tissue
bone
bone
grid
film, fluorescent screen or image intensifier
intensity at detector
primary radiological image



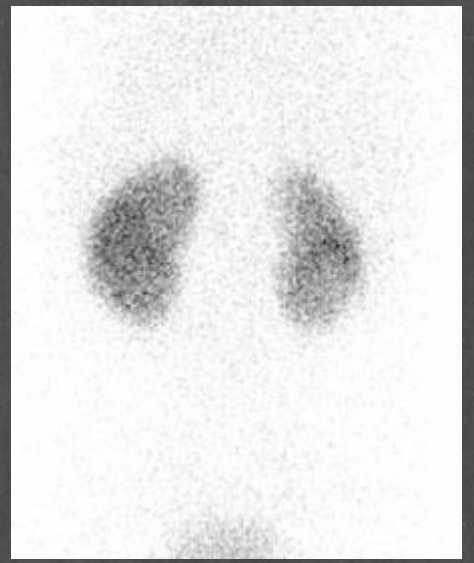




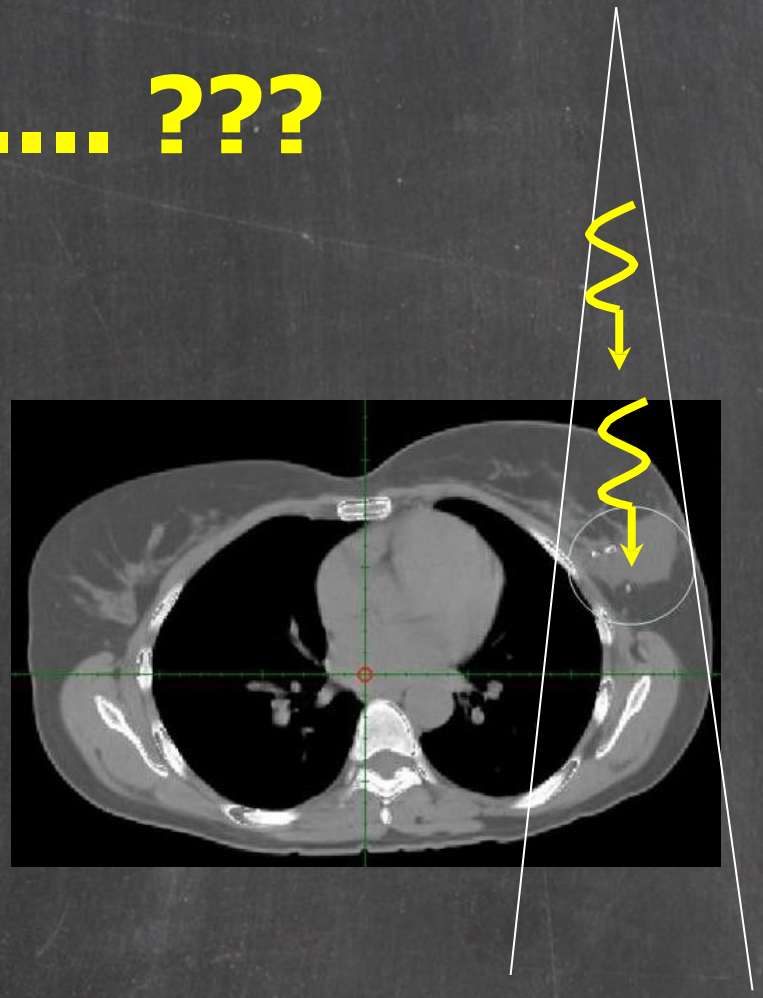
E_φ ..... ???

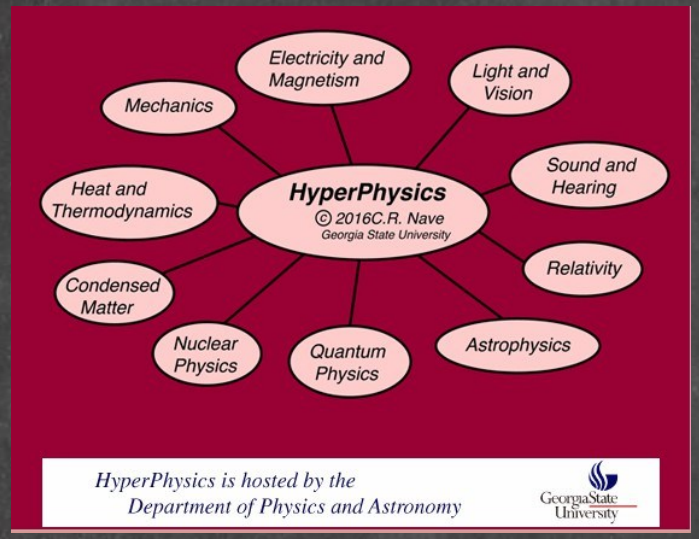


Ανιχνευτής ακτινοβολίας



E_{φ} ..... ???



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).