



ΒΙΟΦΥΣΙΚΗ

Αλληλεπίδραση ιοντίζουσας ακτινοβολίας και ύλης

Ε. Παντελής

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

Εργαστήριο προσομοίωσης
210-746 2454

vpantelis@phys.uoa.gr

<http://eclass.uoa.gr/courses/MED732/>

Αλληλεπίδραση Ιοντιζουσας Ακτινοβολίας-Ύλης:

στόχοι του μαθήματος

- Να γνωρίζετε τη διαφορά μεταξύ ιοντιζουσών και μη ακτινοβολιών καθώς και μεταξύ άμεσα και έμμεσα ιοντιζουσών ακτινοβολιών
- Να έχετε κατανοήσει την εκθετική εξασθένιση της ακτινοβολίας και να γνωρίζετε σε ποια είδη ακτινοβολίας και υπό ποιες συνθήκες ισχύει
- Να γνωρίζετε τα κύρια χαρακτηριστικά των μηχανισμών αλληλεπίδρασης κάθε είδους ακτινοβολίας με την ύλη, και την εξάρτησή τους από την ενέργεια της ακτινοβολίας και των παραμέτρων που αφορούν την ύλη
- Να γνωρίζετε από ποιες παραμέτρους εξαρτάται η μεταφορά ενέργειας από την ακτινοβολία στην ύλη

Αλ/δραση Ιοντιζουσας Ακτινοβολιας φορτισμένων σωματιδίων-Υλης

Απώλεια ενέργειας λόγω
διεγέρσεων & ιονισμών

Μεγάλος αριθμός αλλ/σεων
με την κατανομή e^- του
υλικού, μικρής κατά μέσο
όρο απώλειας ενέργειας

Απώλεια ενέργειας λόγω
εκπομπής Η/Μ ακτινοβολίας

Μικρός αριθμός αλλ/σεων με
τους πυρήνες του υλικού
σημαντικής απώλειας
ενέργειας

Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

$$\frac{dE}{dx} = 4\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{z^2 mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{2mc^2 \beta^2}{I(1-\beta^2)} - \dots \right]$$

Απώλεια ενέργειας e^- λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

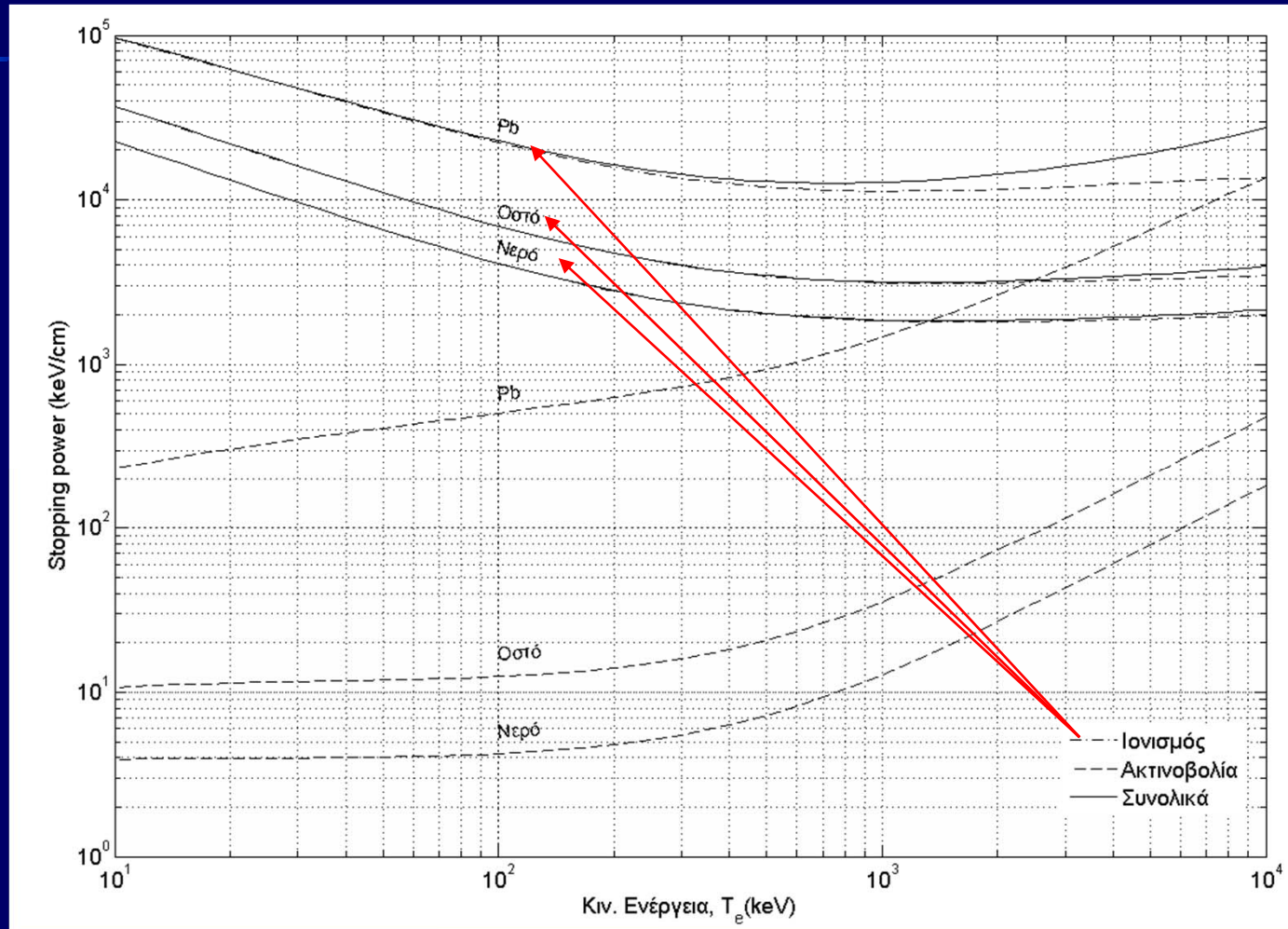
$$\frac{dE}{dx} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{ZN_A}{AB} \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{E^2 (E + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} - \dots \right]$$

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

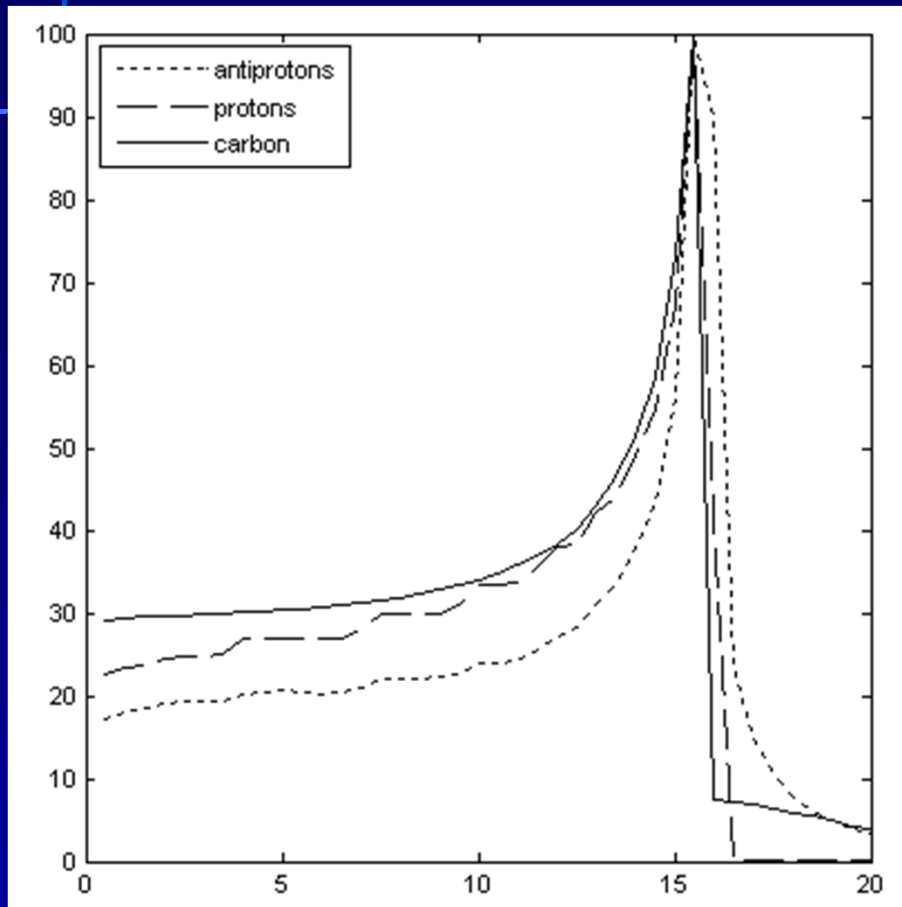
$$\frac{dE}{dx} = 2\pi r_0^2 \rho \frac{Z}{AB} N_A \frac{mc^2}{\beta^2} \left[\ln \frac{E^2 (E + 2mc^2)}{2mc^2 I^2} - \dots \right]$$

$$\frac{dE}{dx} \propto \rho \frac{ZN_A}{AB}, z^2, \frac{1}{E^2}, \ln \frac{E}{I}$$

Απώλεια ενέργειας e⁻ λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



Καμπύλη Bragg...

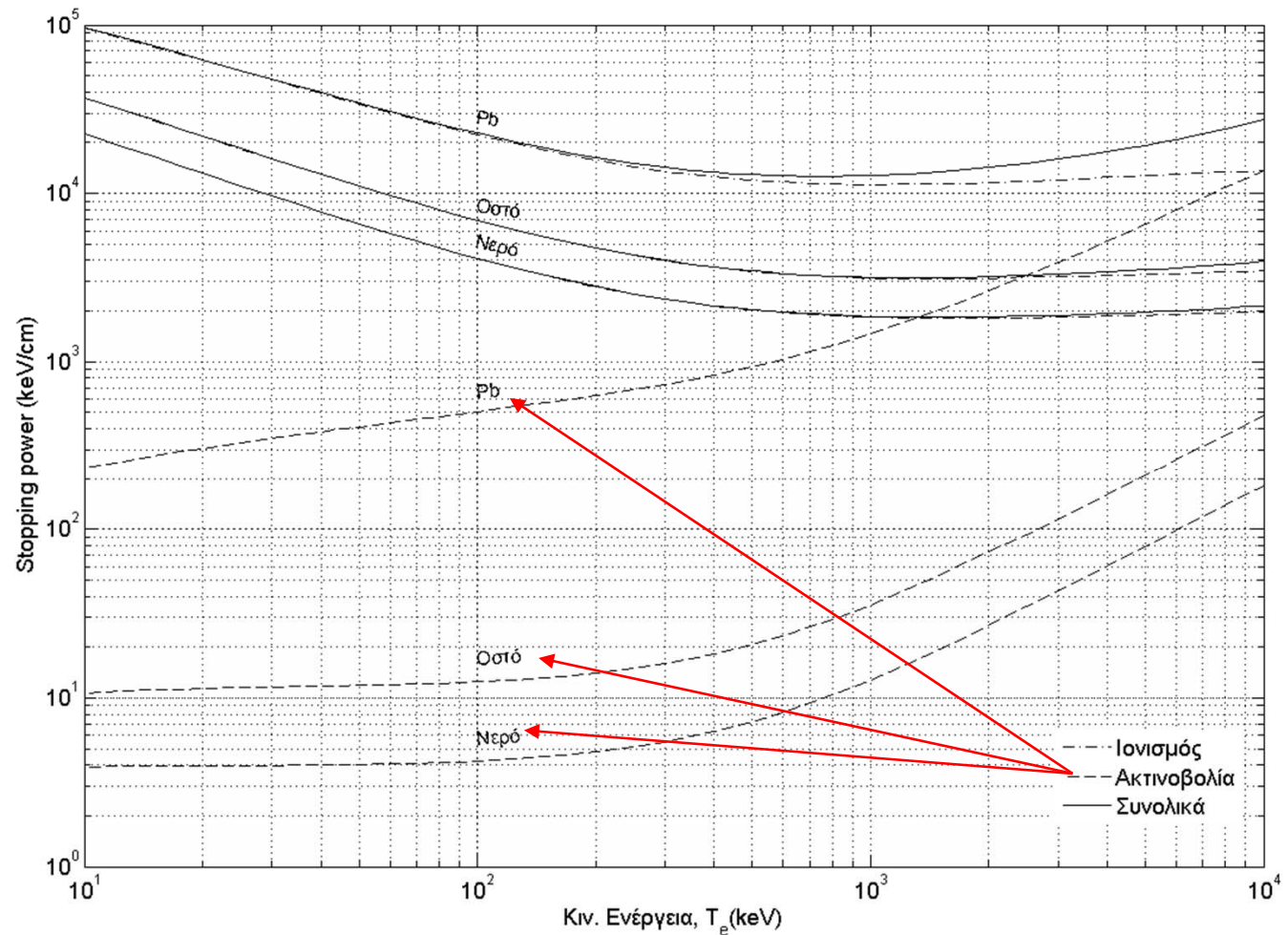


Το ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται στο νερό κατά τη διέλευση διαφορετικών φορτισμένων σωματιδίων συναρτήσει του βάθους σε cm.

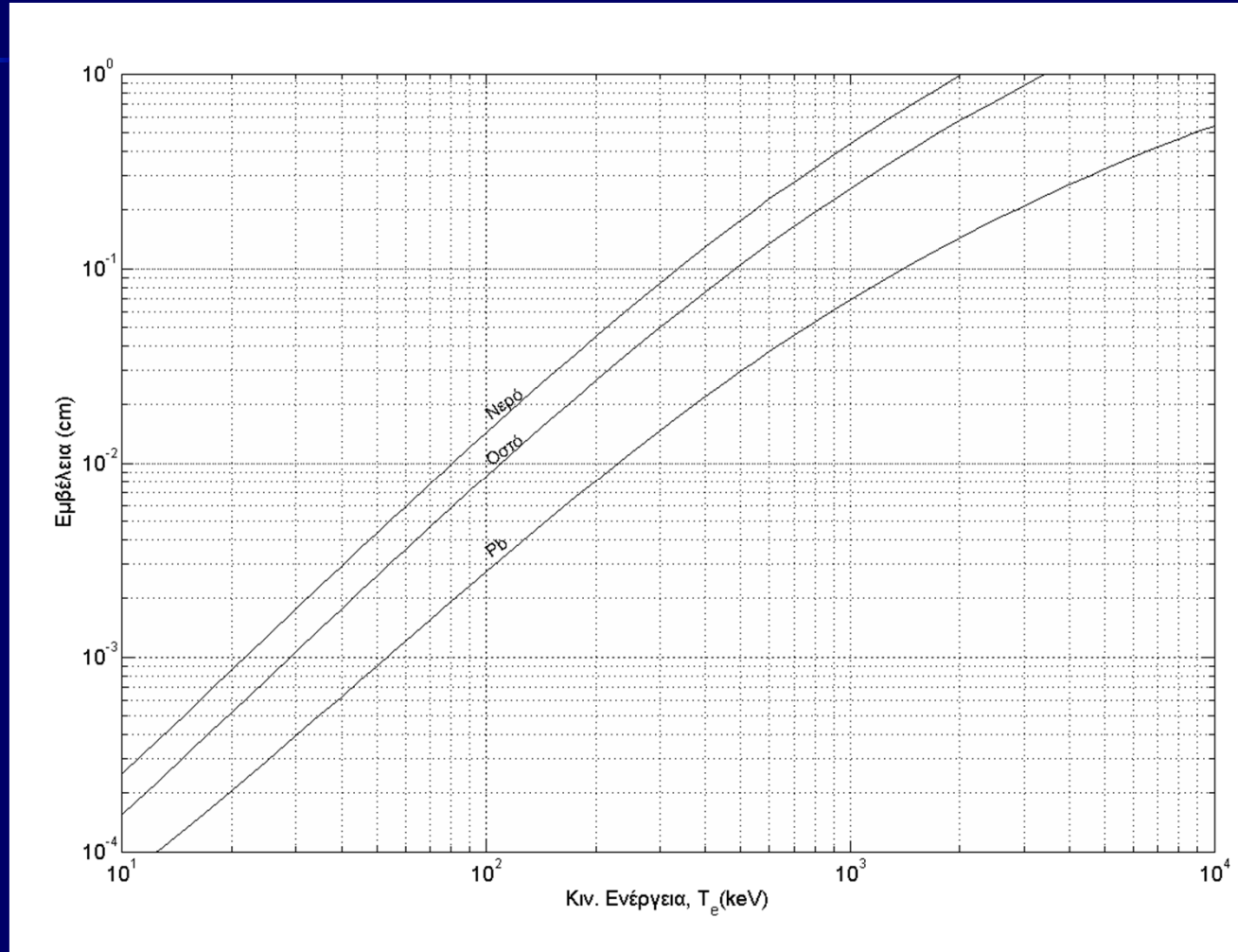
Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

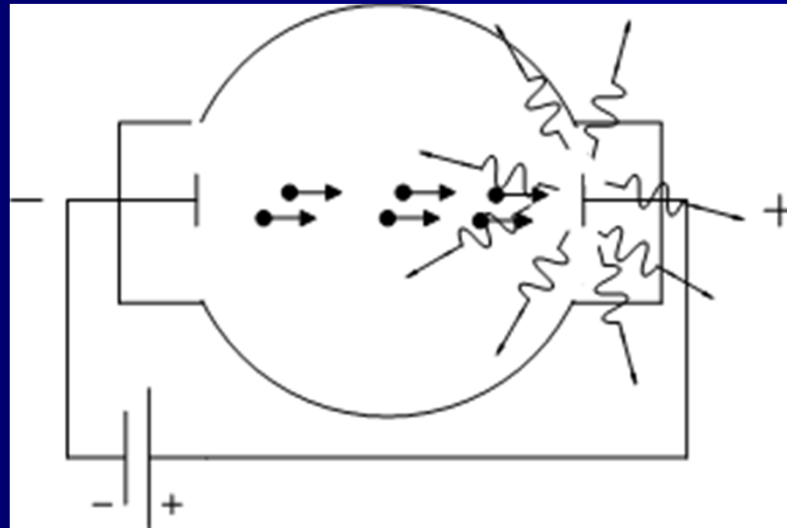
$$\frac{dE}{dx} \propto \rho \frac{N_A}{AB}, \frac{Z^2}{M^2}, E$$



Εμβέλεια ηλεκτρονίων σε διάφορα υλικά

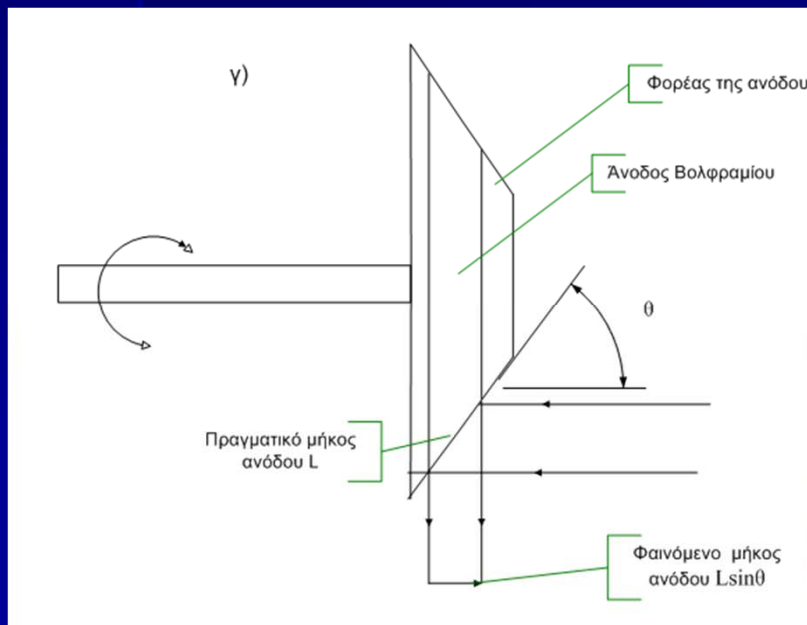
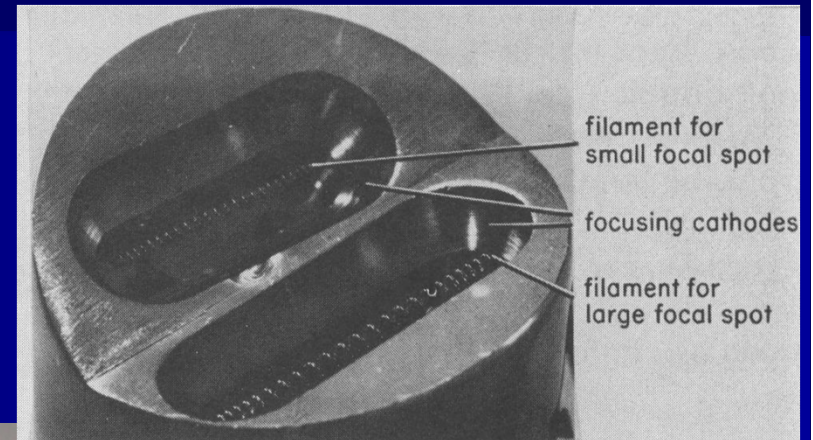


Λυχνία ακτίνων χ...



Λυχνία ακτίνων χ... κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

- Υλικό και γεωμετρία καθόδου?
- Υλικό και γεωμετρία ανόδου?
- Υλικό κελύφους?



Λυχνία ακτίνων χ... φάσμα ακτίνων χ

Από τι εξαρτάται:

- η εμφάνιση χαρακτηριστικής ακτινοβολίας?
- η ενέργεια της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας?
- η ένταση της χαρακτηριστικής ακτινοβολίας?
- η μέγιστη ενέργεια του συνεχούς φάσματος?
- η ένταση του συνεχούς φάσματος?

E_K του ${}_{74}\text{W}$: 69.53 keV

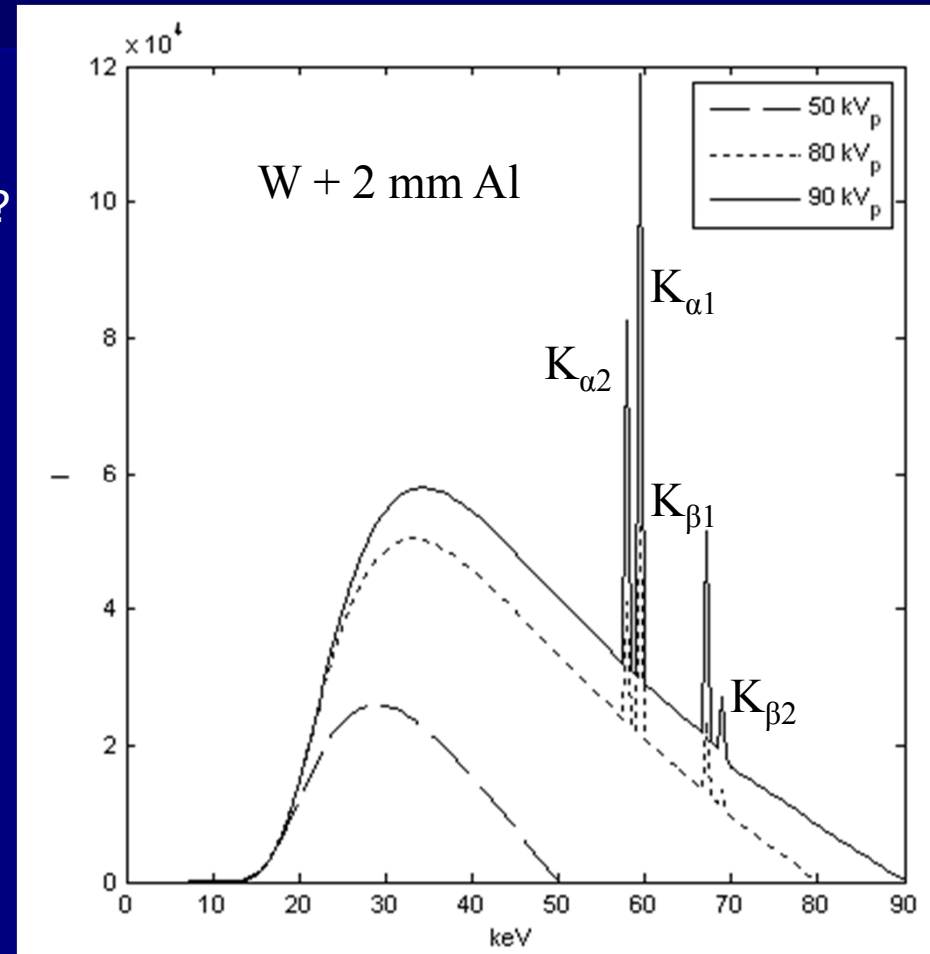
$K_{\alpha 1}$: $L_{III} \rightarrow K$: 59.32 keV

$K_{\alpha 2}$: $L_{II} \rightarrow K$: 57.98 keV

$K_{\beta 1}$: $M_{III} \rightarrow K$: 67.24 keV

$K_{\beta 2}$: $N_{III} \rightarrow K$: 69.10 keV

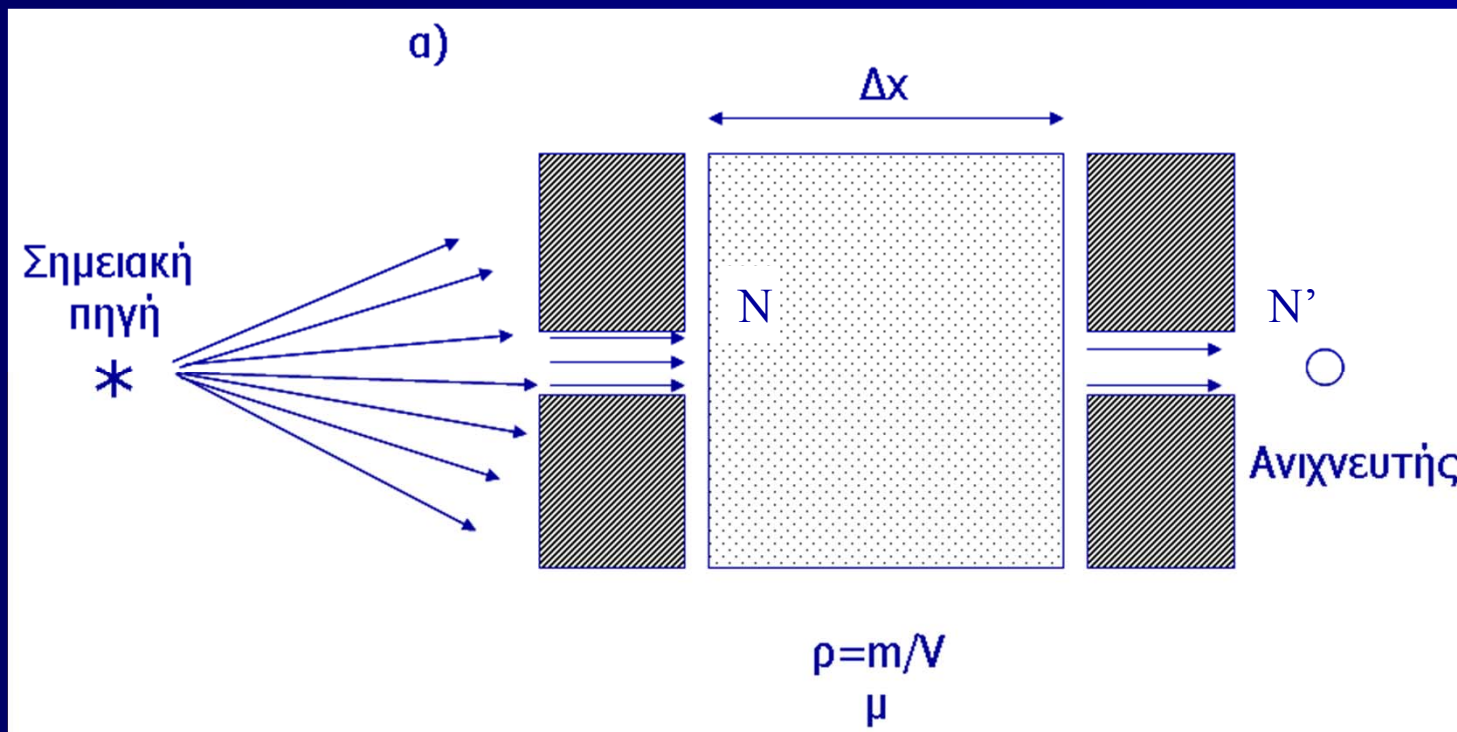
E_K του ${}_{13}\text{Al}$: 1.56 keV



Αλ/δραση Ιοντίζουσας **H/M** Ακτινοβολίας - Ύλης

Συχνότητα, f (s^{-1})	Μήκος κύματος, λ	Ενέργεια	Περιοχή	Ιδιότητες σε σχέση με βιολογικά υλικά
				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.
10^5 $3 \cdot 10^{10}$	3 km 0.01 m	413 peV 124 meV	Ραδιοκύματα	
$3 \cdot 10^{10}$ $3 \cdot 10^{14}$	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.
$4.3 \cdot 10^{14}$ $7.5 \cdot 10^{14}$	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 .



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

$$\begin{aligned} -\Delta N &= N - N' = \mu N \Delta x \\ \Rightarrow \Delta N &= -\mu N \Delta x \\ \Rightarrow \mu &= -\left(\frac{\Delta N}{N}\right)\left(\frac{1}{\Delta x}\right) \end{aligned}$$

Όπου μ 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:

$$y = y_0 e^{\pm \beta x}$$

Ο νόμος της **εκθετικής** εξασθένησης
ιοντίζουσας Η/Μ ακτινοβολίας
κατά τη διαδρομή της στην ύλη

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

ή

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

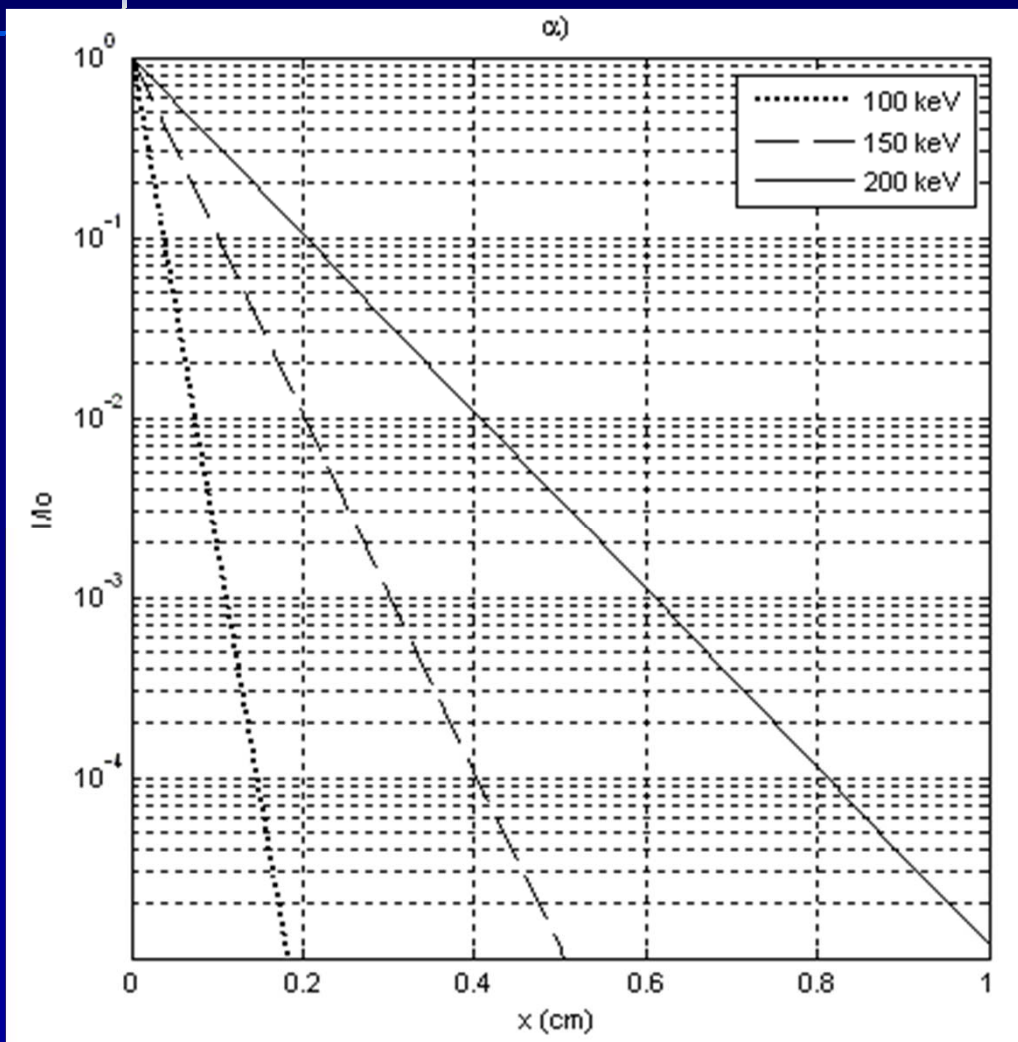
$$x_{1/2} \equiv HVL = \frac{\ln 2}{\mu}$$

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

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

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

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

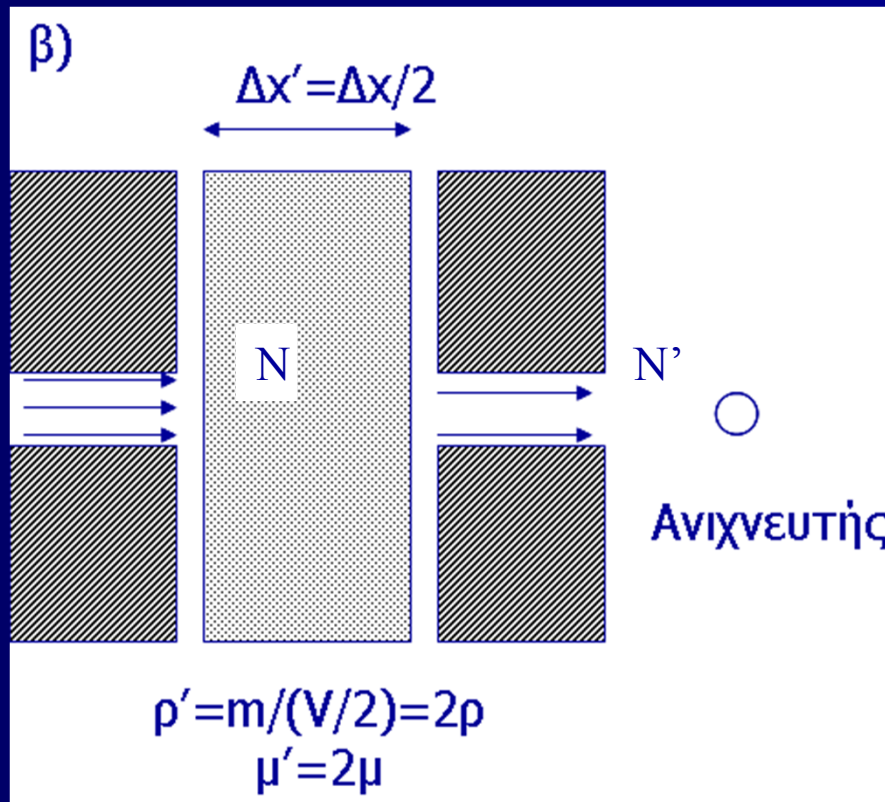


• Ενέργεια φωτονίων, E

Υλικό, Z

και ...

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



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

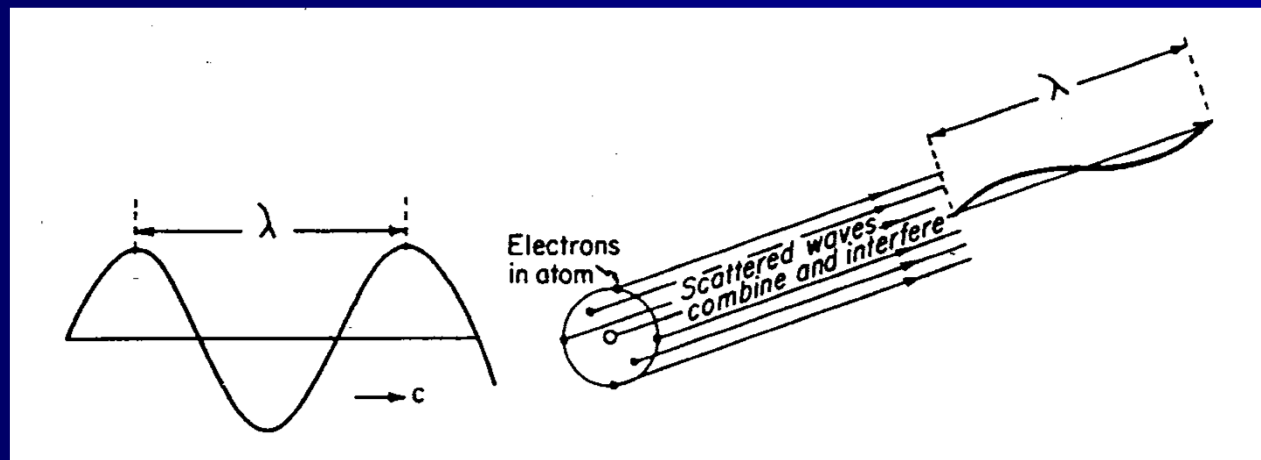
$$\mu / \rho = \mu(E, Z)$$

Αλ/δραση Ιοντίζουσας Η/Μ Ακτινοβολίας-Υλης: 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

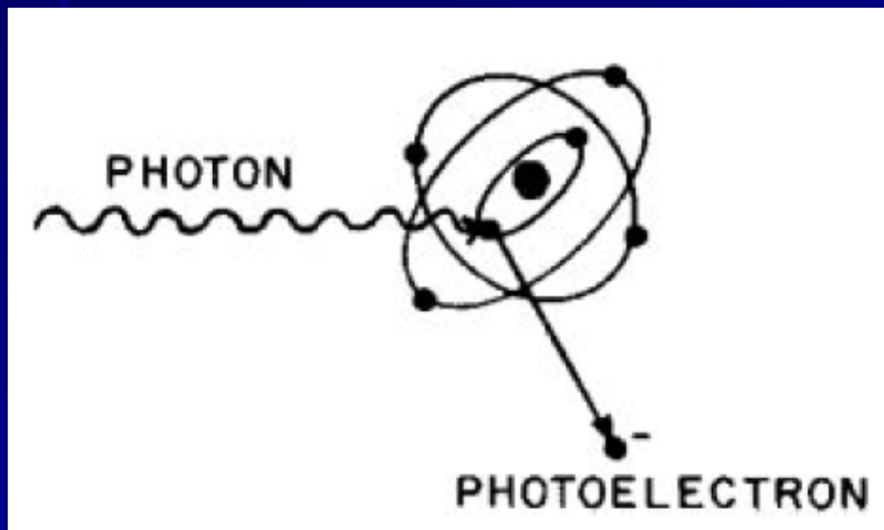


ΣΥΜΦΩΝΗ ΣΚΕΔΑΣΗ

- 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



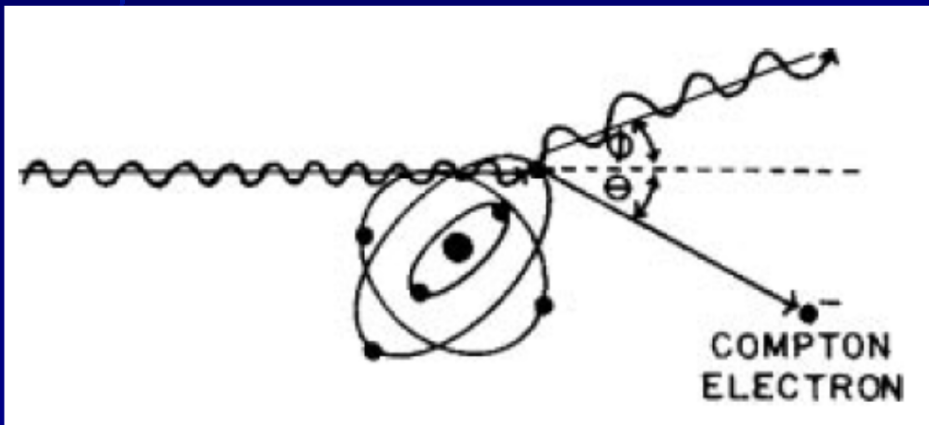
- Λαμβάνει χώρα ιονισμός
- Το e^- εγκαταλείπει το άτομο με κινητική ενέργεια:

$$T_e = E - E_b$$

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

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

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:

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

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

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

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

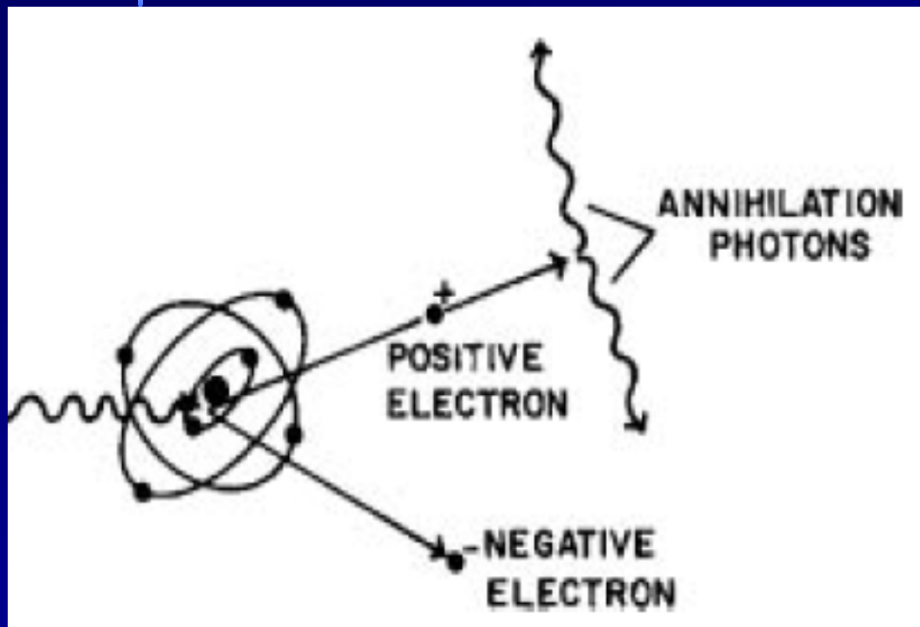
$$\cos\phi = \cos 0^\circ = 1$$

$$T_{eMIN} = 0$$

$$E_{scMAX} = E$$

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 & Ε φωτ., Ιονισμός της ύλης	Απορρόφηση φωτ., Ιονισμός της ύλης
Ε που μεταφέρεται & απορ/φάται από βιολογικό ιστό:	0	$\sim E_\phi$	$\sim E_{e^-} = E_\phi - E'_\phi$	$\sim E_{e^-} = E_\phi - 1.02 - E'_{e^+}$