



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

## ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

**Π. Παπαγιάννης**

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,  
Ιατρική Σχολή Αθηνών  
Κτίριο 5, Γραφείο 21



210 746 2442



ppapagi@med.uoa.gr



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

**MED1114**

**Αλληλεπίδραση Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας  
φορτισμένων σωματιδίων - Ύλης**

# Αλ/δραση Ιοντιζουσας Ακτινοβολιας φορτισμενων σωματιδιων-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

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

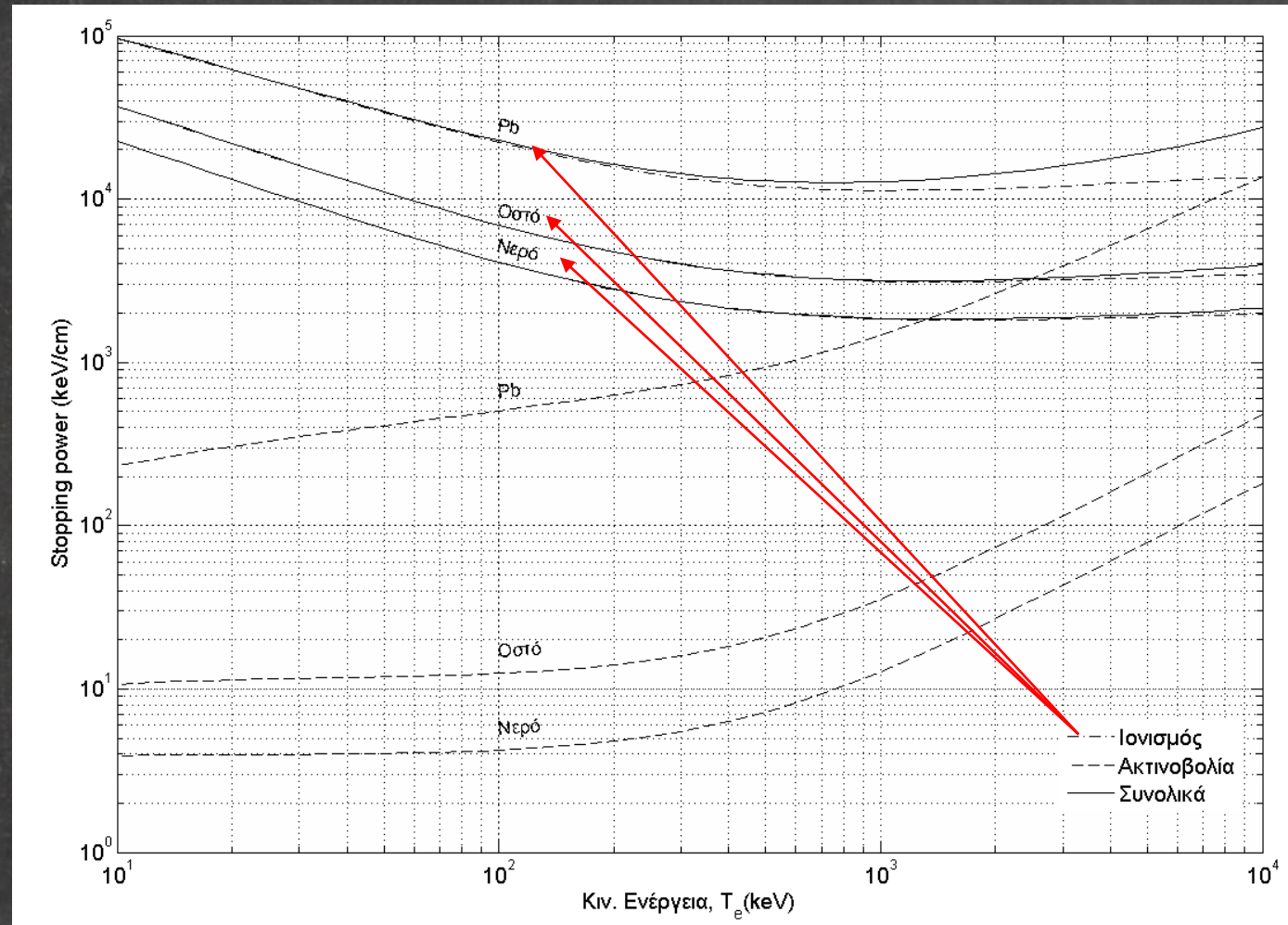
## Απώλεια ενέργειας e<sup>-</sup> λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

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

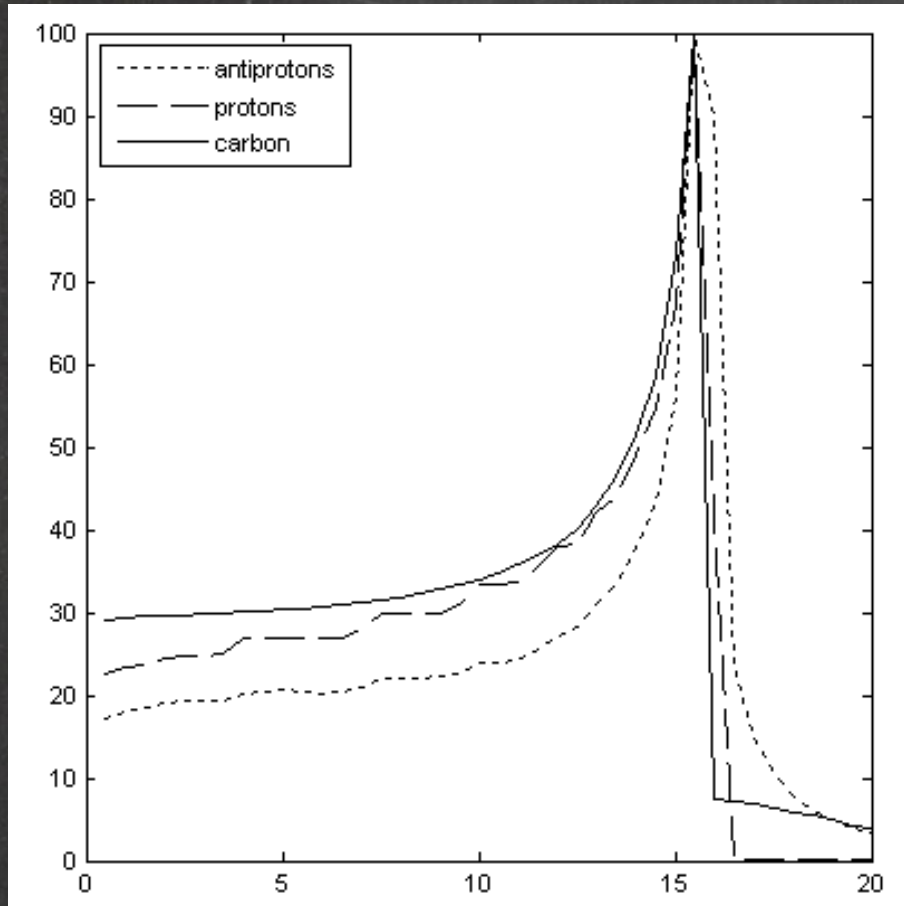
Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

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

## Απώλεια ενέργειας e<sup>-</sup> λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



## Καμπύλη Bragg...

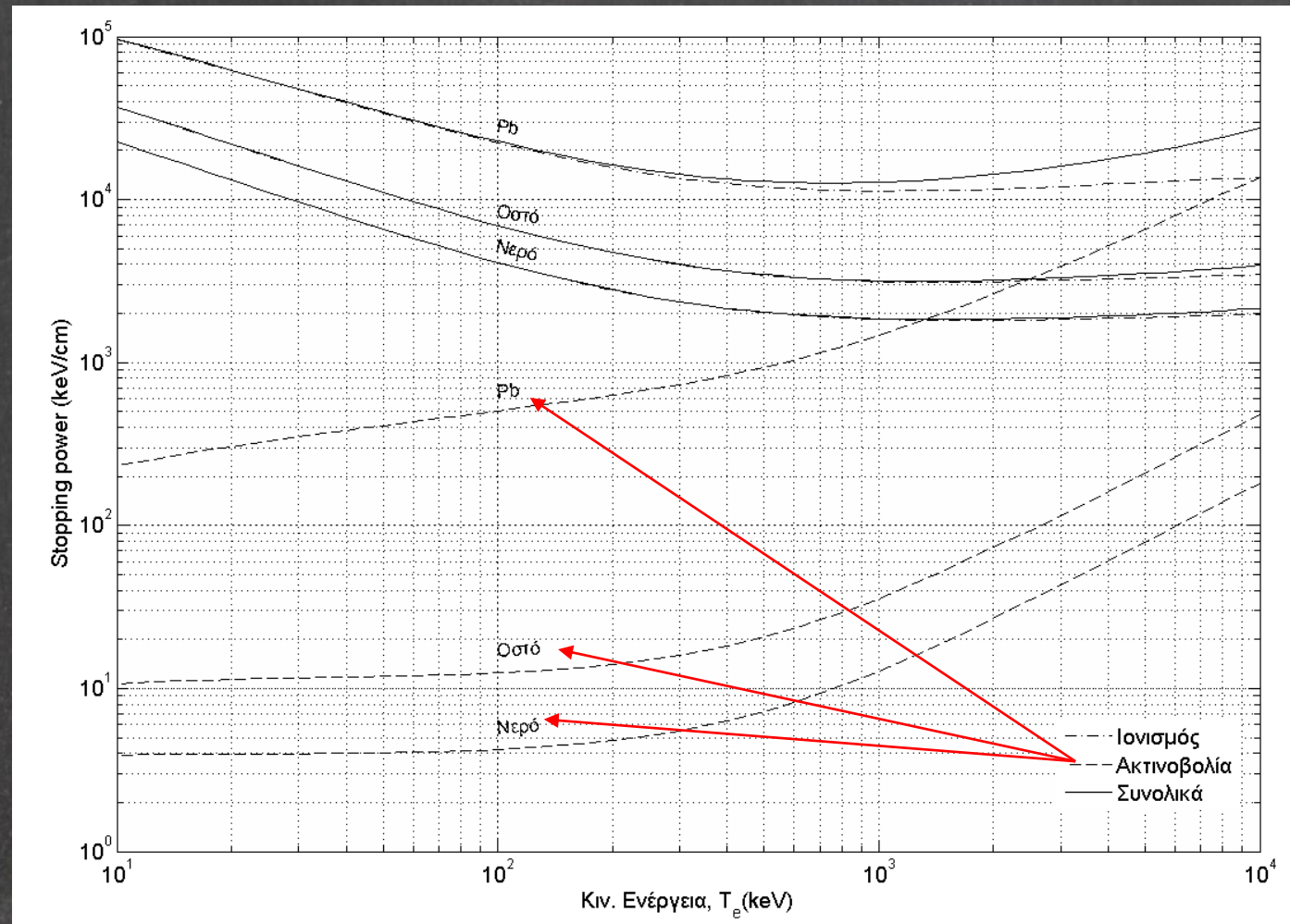


Το ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται στο νερό κατά τη διέλευση διαφορετικών φορτισμένων σωματιδίων συναρτήσει του βάθους σε cm.

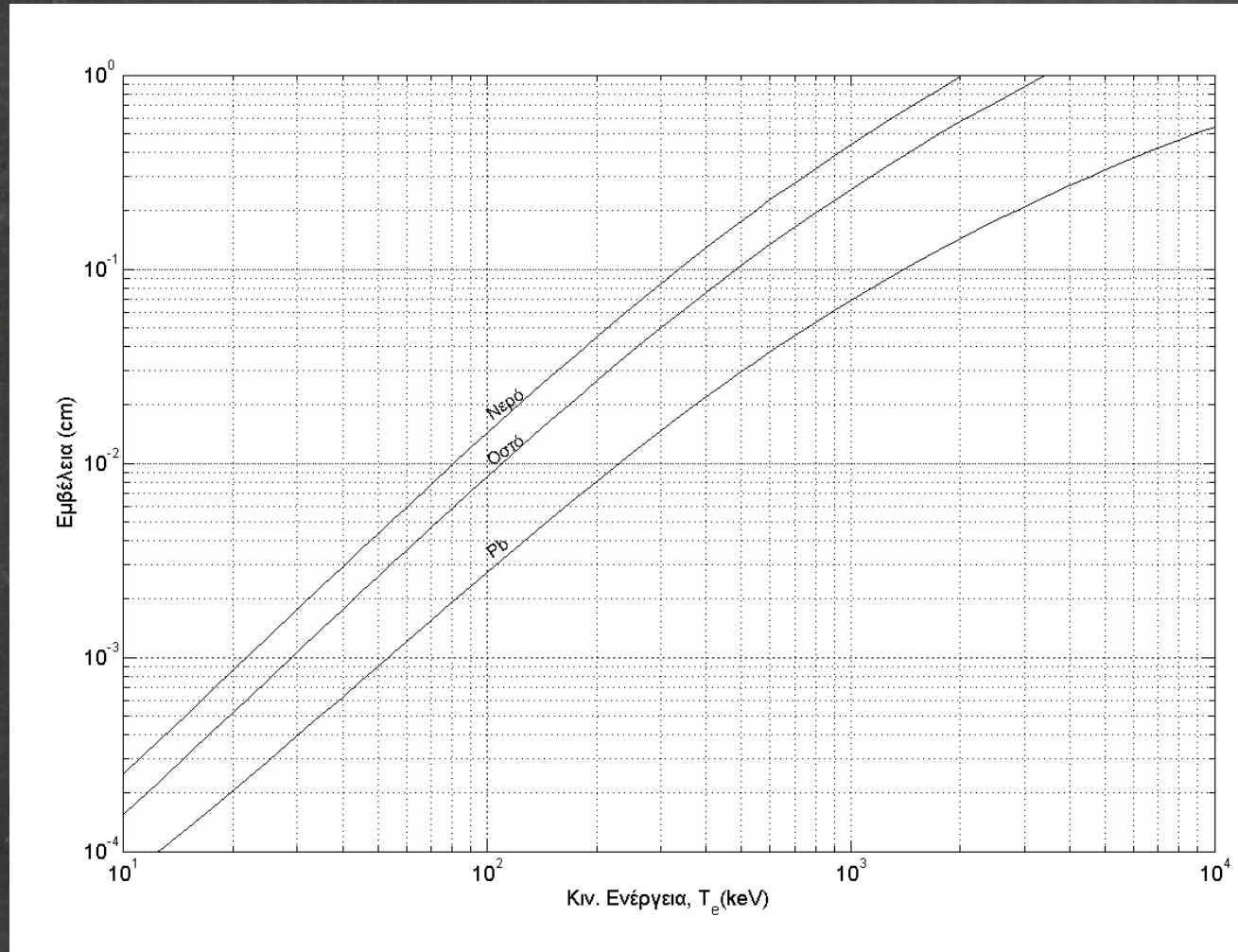
# Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας

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

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

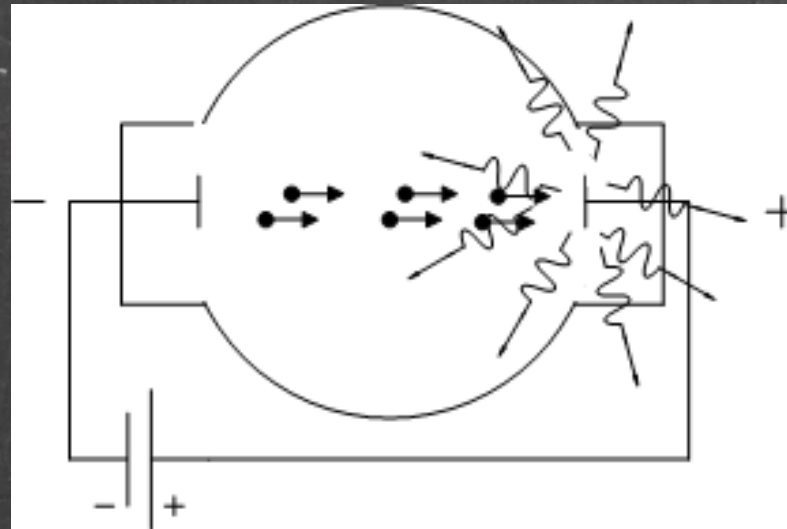


# Εμβέλεια ηλεκτρονίων σε διάφορα υλικά





# Λυχνία ακτίνων χ...

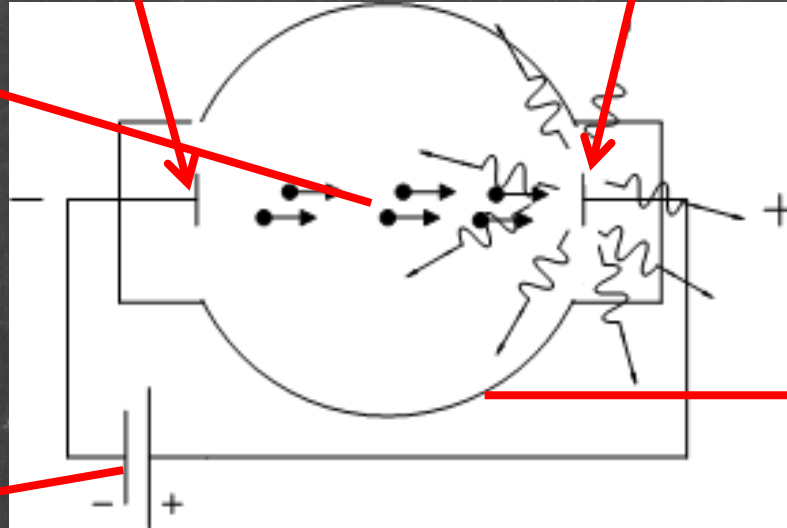


# Λυχνία ακτίνων-χ

Ρεύμα λυχνίας  
 $I$  (A ή mA)  
μέτρο του αριθμού  $e^-$  που  
κινούνται από την κάθοδο  
στην άνοδο ανά μονάδα  
χρόνου

Κάθοδος (-)

Άνοδος (+)



Υψηλή τάση λυχνίας  
 $V$  (V ή kV)

Κέλυφος λυχνίας  
υπό χαμηλή  
πίεση

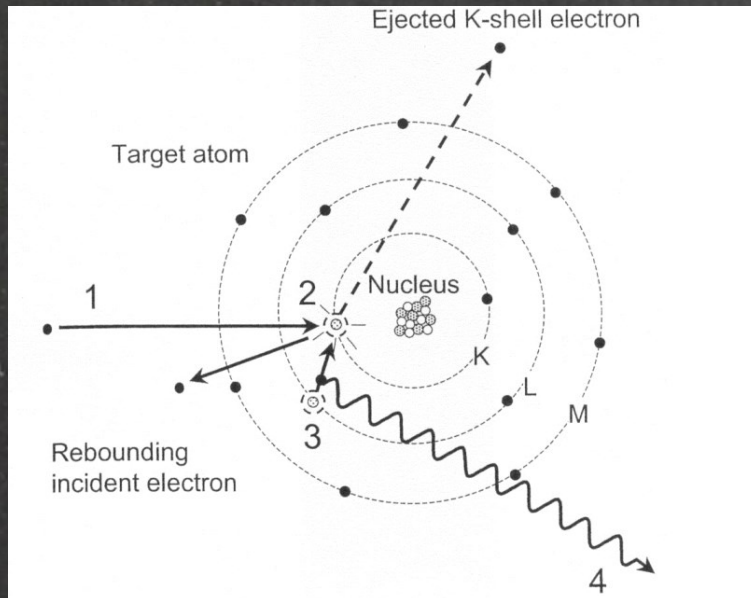
μέτρο της μέγιστης κινητικής ενέργειας  
που θα αποκτήσουν τα  $e^-$  και επομένως  
της μέγιστης ενέργειας της ακτινοβολίας  
πέδησης

Ισχύς ακτινοβολίας:  $P_{\text{ακτ.}} \sim 10^{-9} I V^2 Z$   
Ηλεκτρική ισχύς:  $P_{\text{ηλ.}} = V I$   
Απόδοση:  $a \sim 10^{-9} V Z$

- > 99% της ενέργειας μετατρέπεται σε θερμότητα για  $V < 200$  kV
- Άνοδος:  $Z \gg$  με μεγάλη θερμική αντοχή (π.χ. Βολφράμιο,  $_{74}W$ )

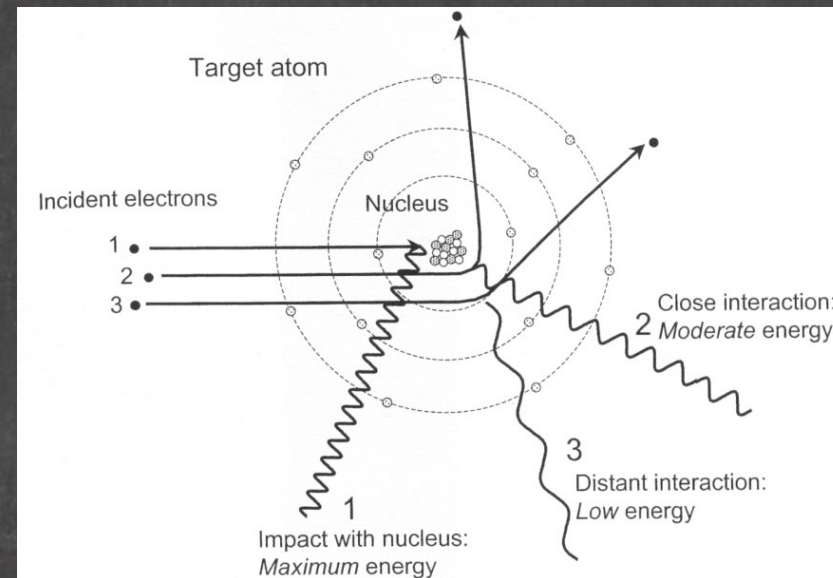
# Τα $e^-$ (ως φορτ. σωματίδια) θα απολέσουν ΟΛΗ την ενέργειά τους στο υλικό αλληλεπιδρώντας:

- 1) με τα **ηλεκτρόνια** του υλικού προκαλώντας διεγέρσεις και ιονισμούς και συνεπώς και εκπομπή **χαρακτηριστικής ακτινοβολίας**
  - πολλές αλλ/σεις μικρής κατά μέσο όρο απώλειας ενέργειας



- 2) με τους **πυρήνες** του υλικού εκπέμποντας Η/Μ ακτινοβολία (**ακτινοβολία πέδησης**)

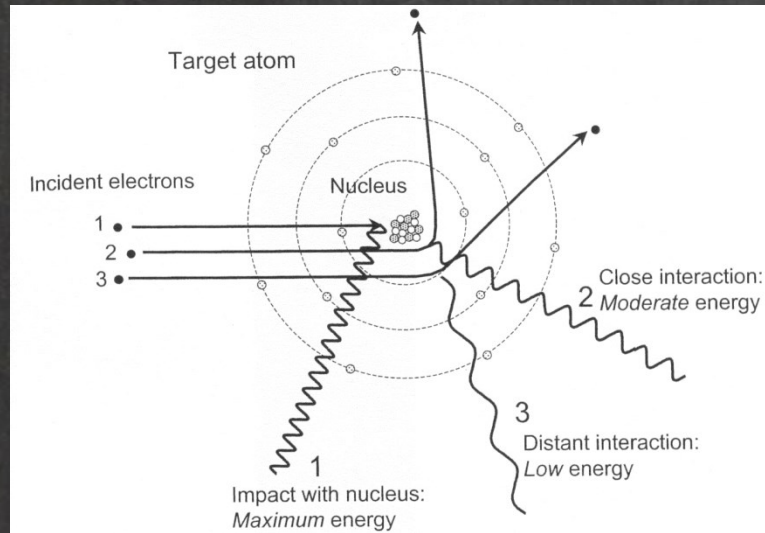
- λίγες αλληλεπιδράσεις απώλειας ενέργειας από 0 – 100%



# Λυχνία ακτίνων x: φάσμα ακτίνων x

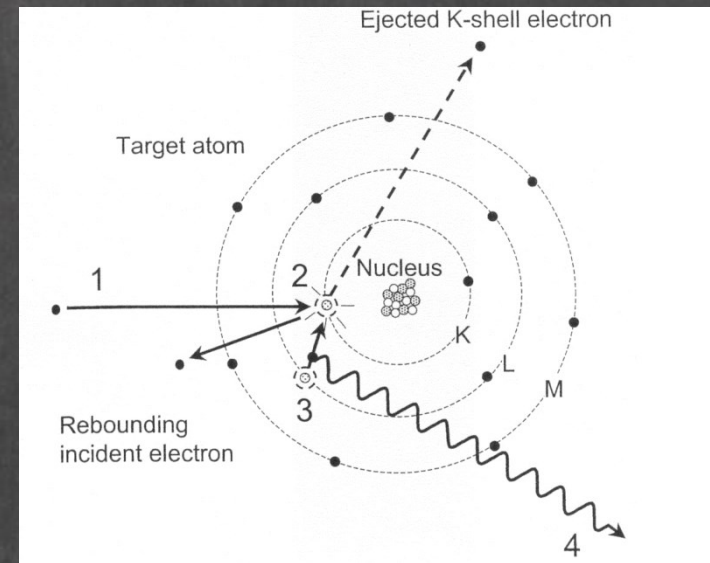
ακτινοβολία πέδησης

$$E \text{ από } 0 \text{ έως } E_{\phi \text{ max}} = hf_{\text{max}} = hc/\lambda_{\text{min}} = K_{e^-} = qV,$$



χαρακτηριστική ακτινοβολία

$$E = E_n - E_1 = 13.6 (Z-1)^2 (1 - 1/n^2)$$



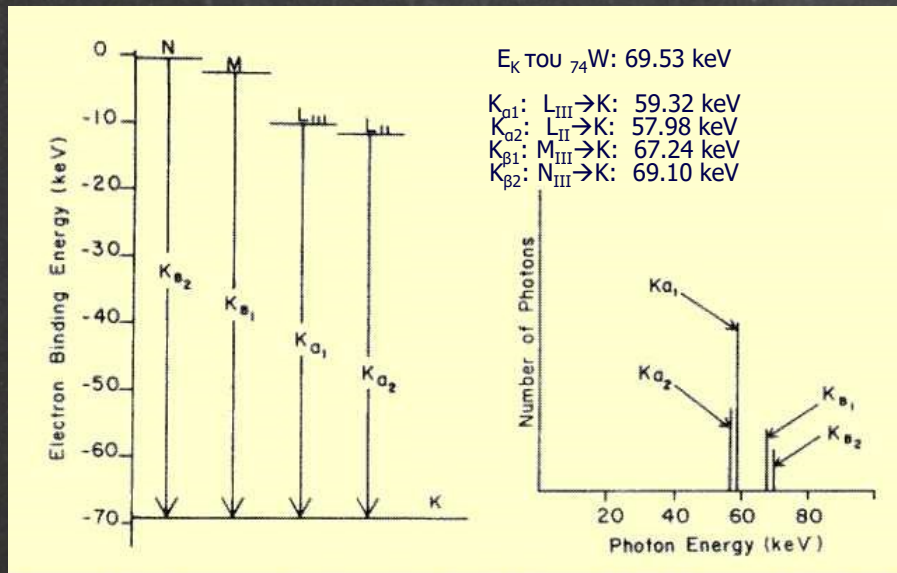
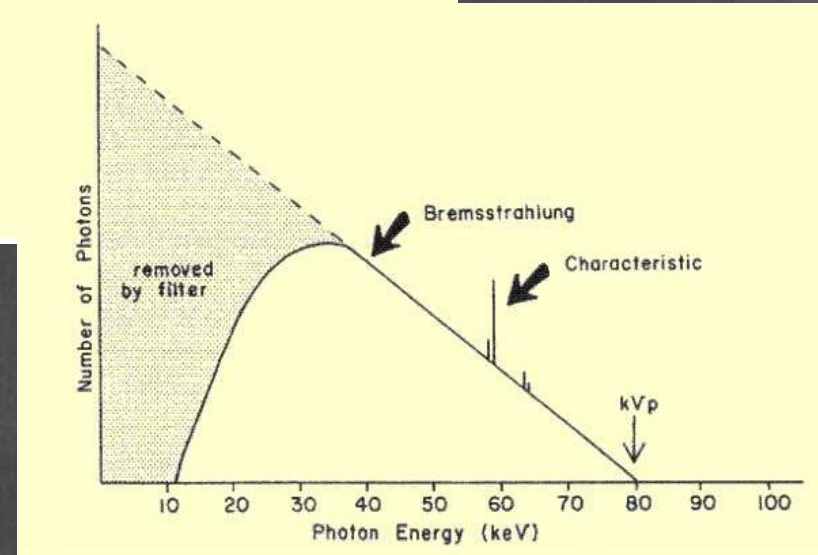
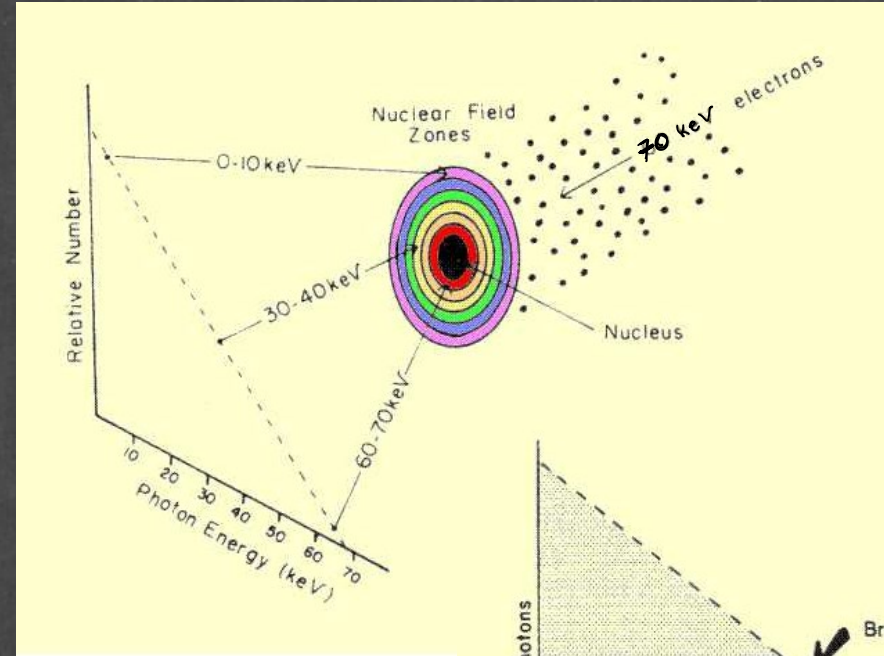
# Λυχνία ακτίνων x: φάσμα ακτίνων x

Θεωρητική φασματική κατανομή ακτινοβολίας πέδησης :

# φωτ. ανά μονάδα ενέργειας E  
 $\sim I Z (E_{e-max} - E)$

Στην πράξη όμως:

- χαρακτηριστική ακτινοβολία
- εκθετική εξασθένιση



# Παράγοντες που επηρεάζουν το φάσμα ακτίνων x: υψηλή τάση

Επηρεάζει:

- τη μέγιστη ενέργεια
- τη μέση ενέργεια
- την ένταση ( $I \sim kV_p^2$ )
- την εμφάνιση ή μη χαρακτηριστικής ακτινοβολίας

$E_K$  του  ${}_{74}\text{W}$ : 69.53 keV

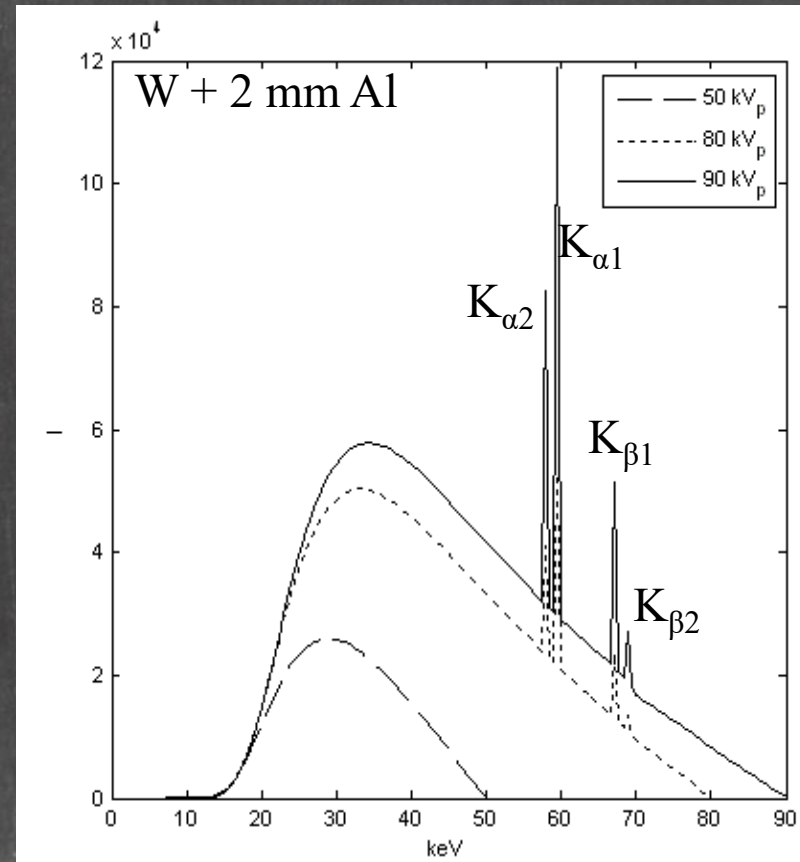
$K_{\alpha 1}$ :  $L_{III} \rightarrow K$ : 59.32 keV

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

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

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

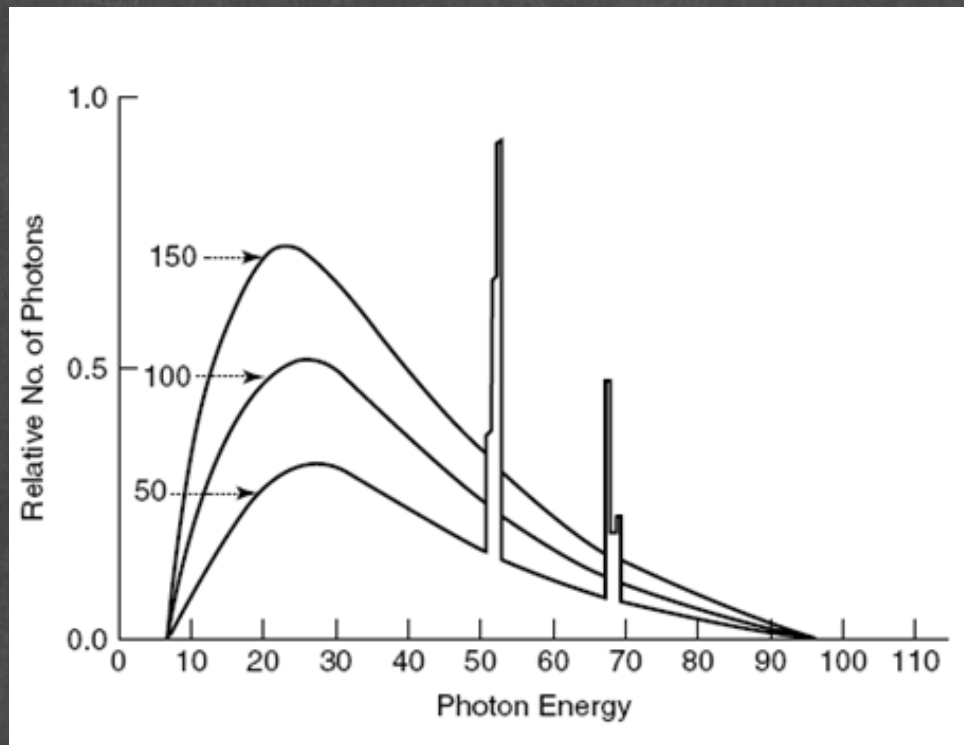
$E_K$  του  ${}_{13}\text{Al}$ : 1.56 keV



# φάσμα ακτίνων x: ρεύμα λυχνίας / χρόνος έκθεσης

Επηρεάζουν:

- την ένταση ( $N \sim \text{mAs}$ ,  $I \sim \text{mA}$ )



# φάσμα ακτίνων χ: υλικό ανόδου

Επηρεάζει:

- την ένταση ( $I \sim Z$ )
- την ενέργεια χαρακτηριστικής ακτινοβολίας

$E_K$  του  $_{42}\text{Mo}$ : 20.00 keV

$K_{\alpha 1}$ :  $L_{III} \rightarrow K$ : 17.48 keV

$K_{\alpha 2}$ :  $L_{II} \rightarrow K$ : 17.37 keV

$K_{\beta 1}$ :  $M_{III} \rightarrow K$ : 19.61 keV

$K_{\beta 2}$ :  $N_{III} \rightarrow K$ : 19.96 keV

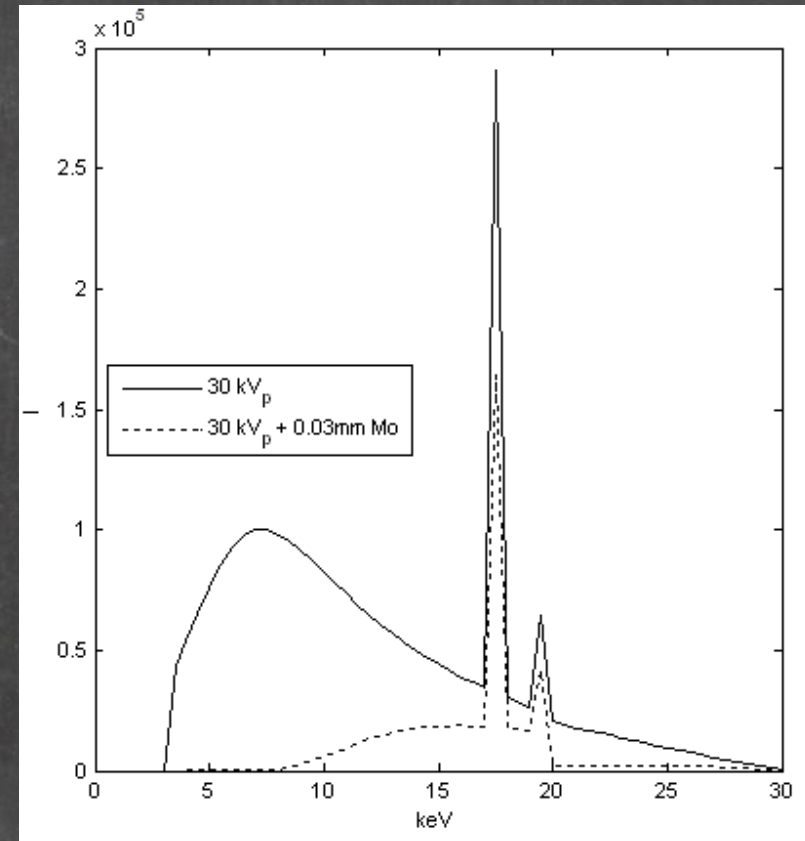
$E_K$  του  $_{74}\text{W}$ : 69.53 keV

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

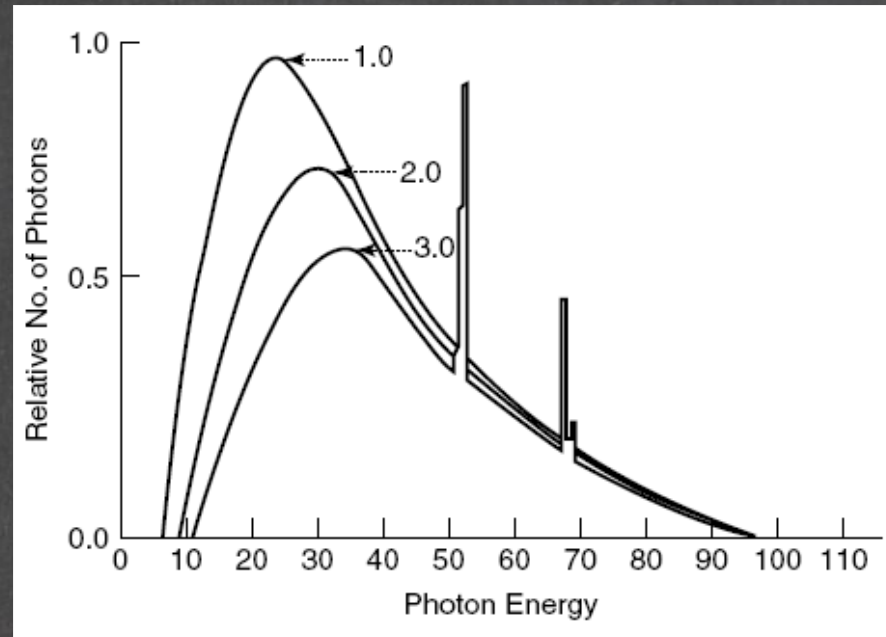




# φάσμα ακτίνων x: πρόσθετο φίλτρο

Επηρεάζει:

- τη μέση ενέργεια
- την ένταση



# Υλικό περαιτέρω μελέτης

- § 3.3 και 4.1 Κεφαλαίου 2 Συγγράμματος
- Ερωτήσεις κατανόησης
- Μπορείτε επίσης να αναζητήσετε τους όρους “x-ray tube” και “bremsstrahlung” στο HyperPhysics (<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/index.html>) ή να δείτε την ανασκόπηση: Rolf Behling, X-ray sources: 125 years of developments of this intriguing technology, *Physica Medica*, 79, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.ejmp.2020.07.021.125>.

