



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

**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

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

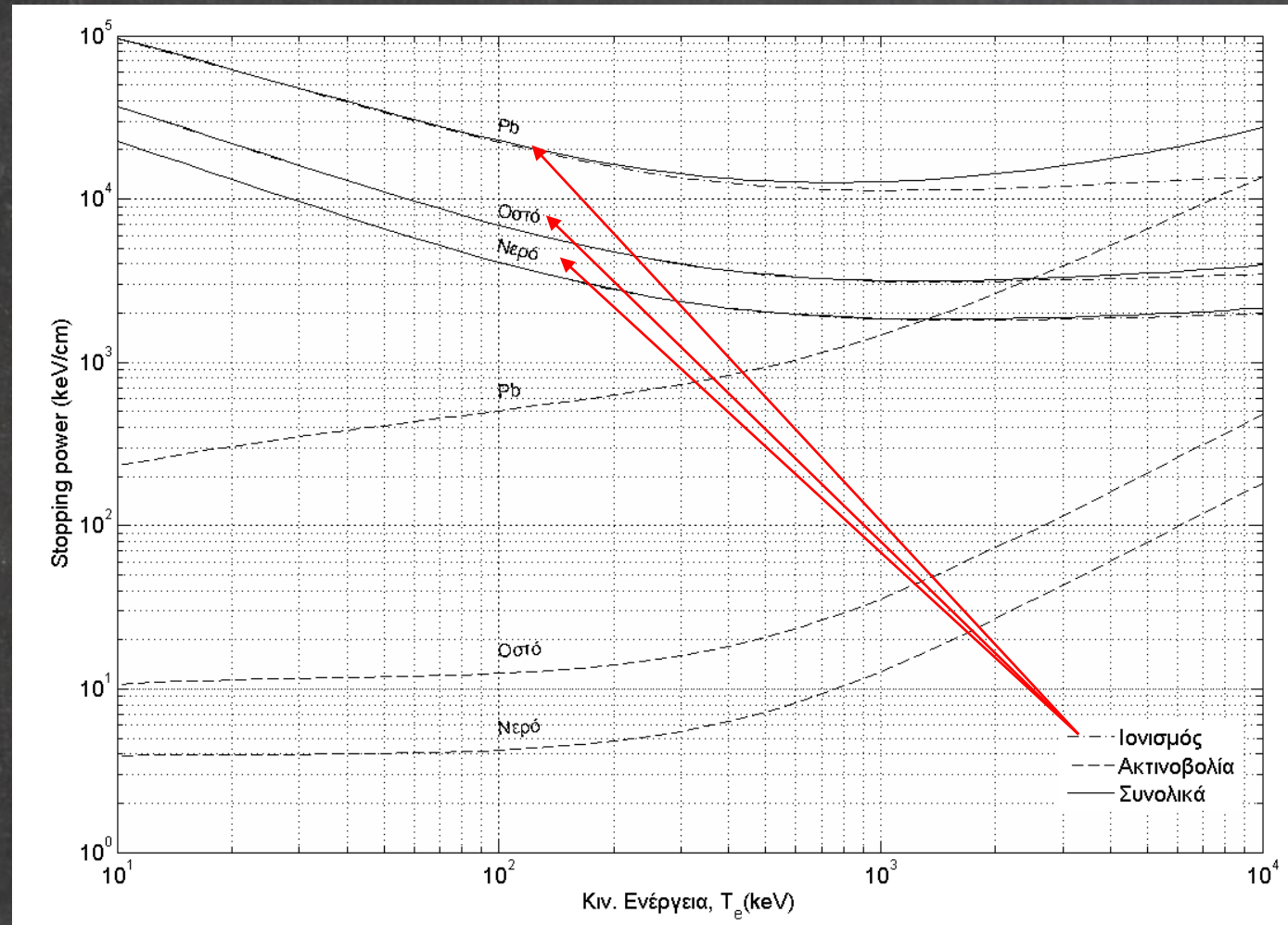
Απώλεια ενέργειας e⁻ λόγω διεγέρσεων & ιονισμών

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

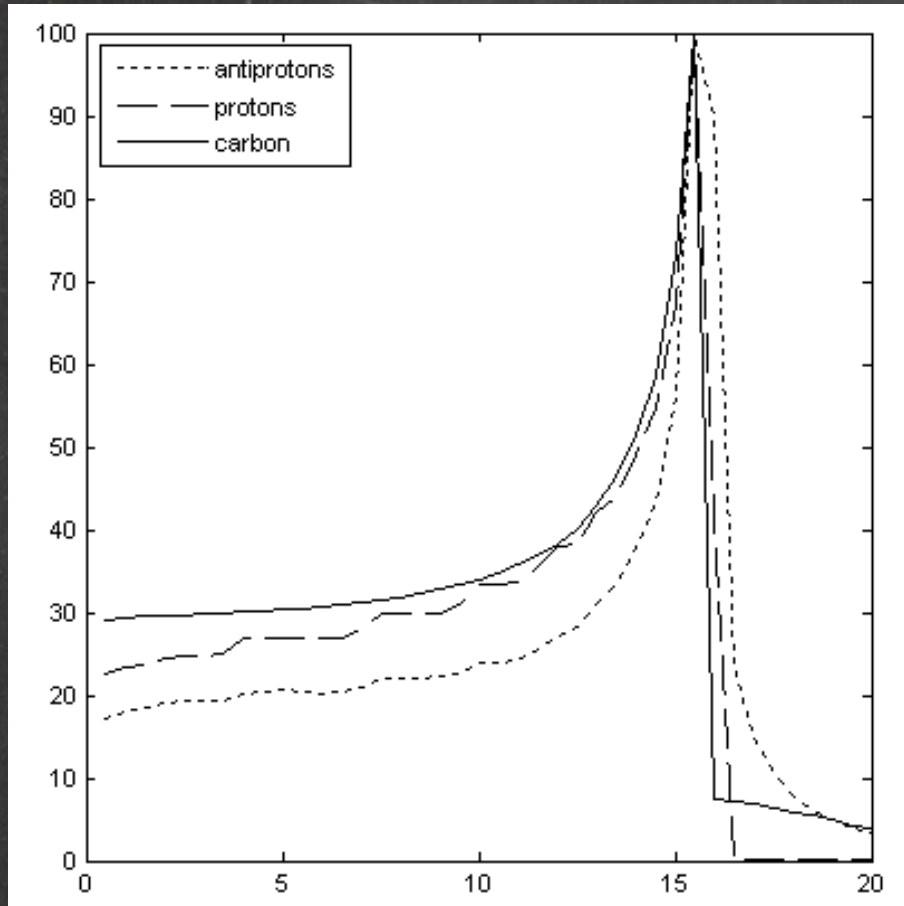
Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής ή ανασχετική ισχύς ενός υλικού ???

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

Απώλεια ενέργειας e⁻ λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



Καμπύλη Bragg...

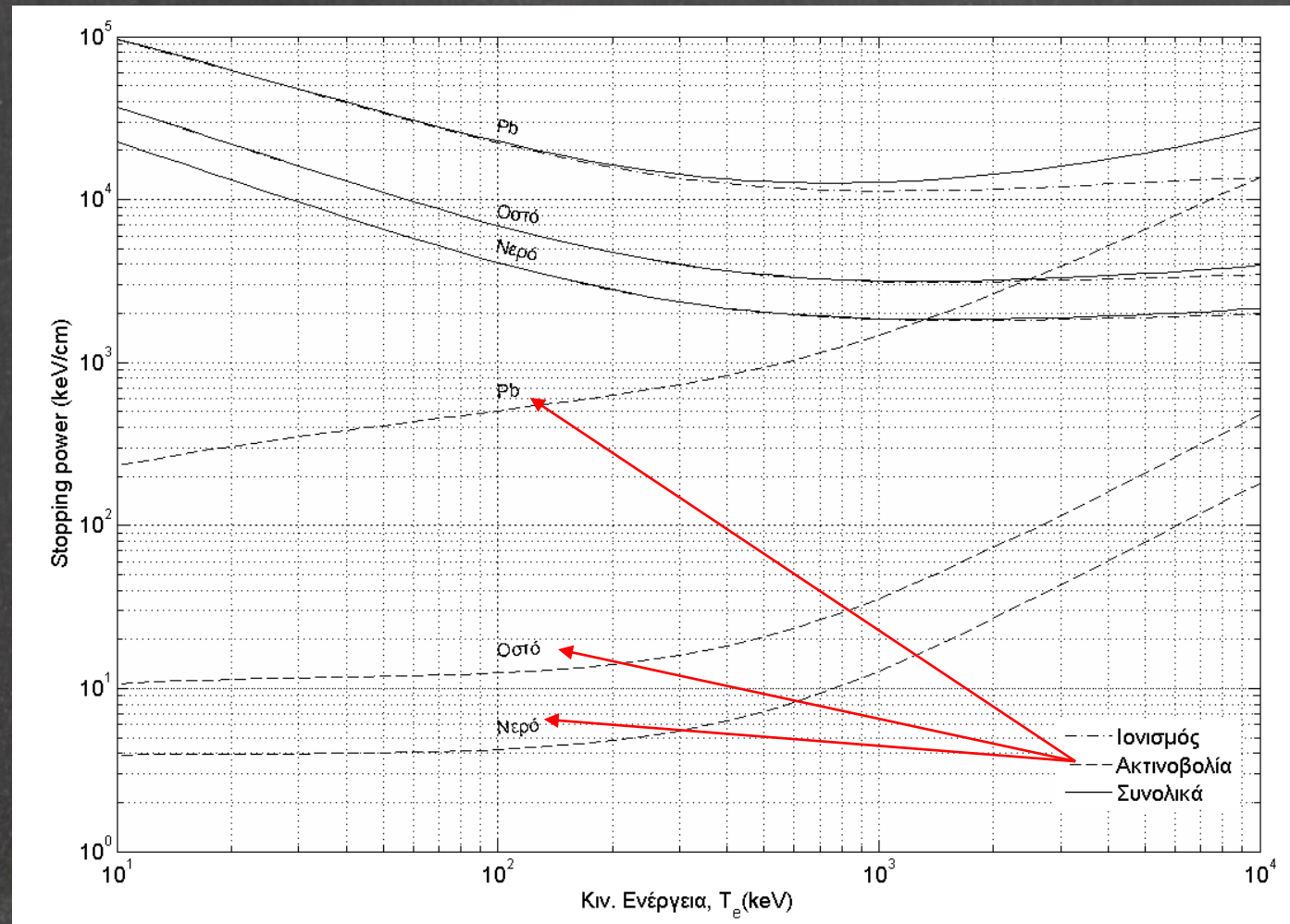


Το ποσοστό της ενέργειας που μεταφέρεται στο νερό κατά τη διέλευση διαφορετικών φορτισμένων σωματιδίων συναρτήσει του βάθους σε cm.

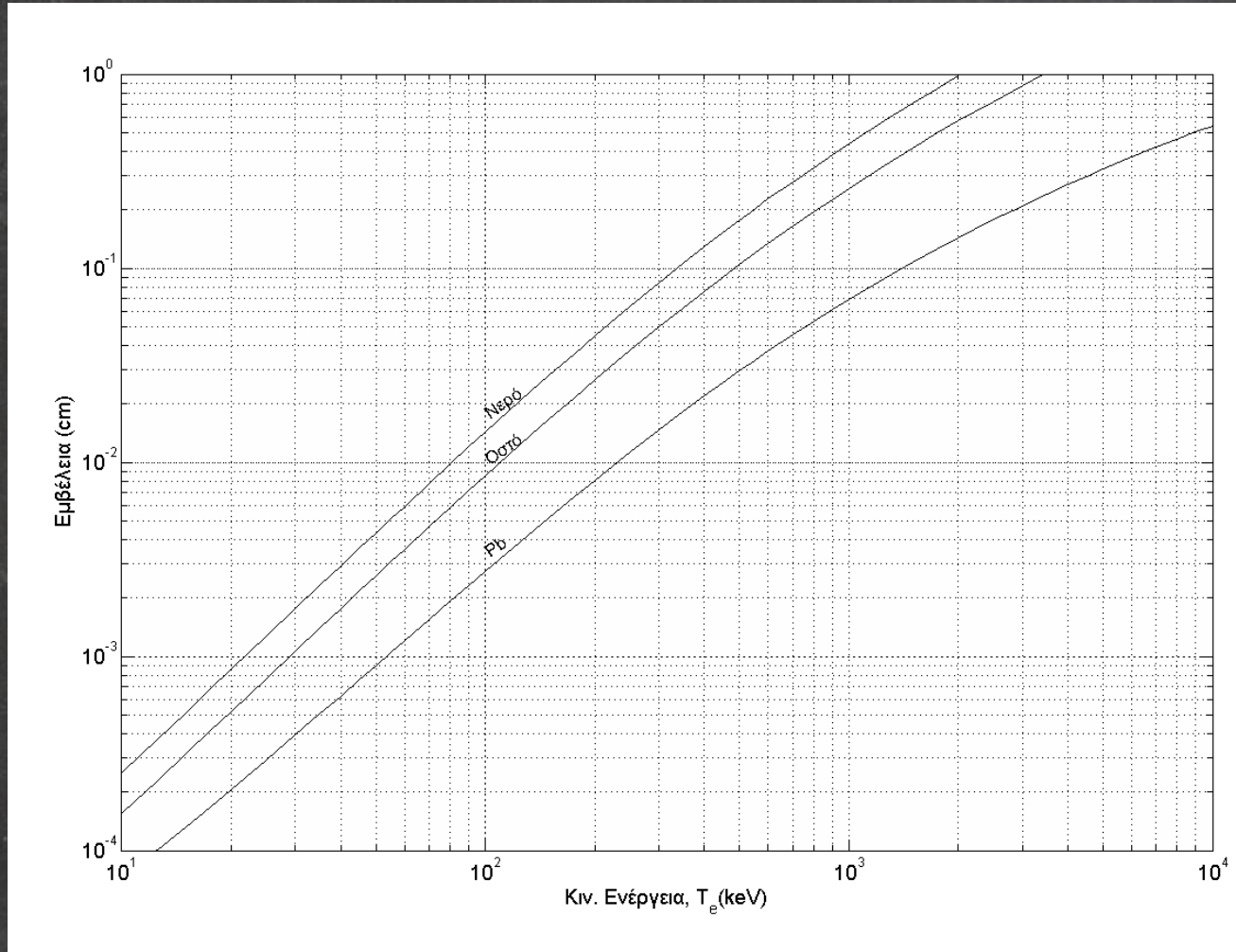
Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας

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

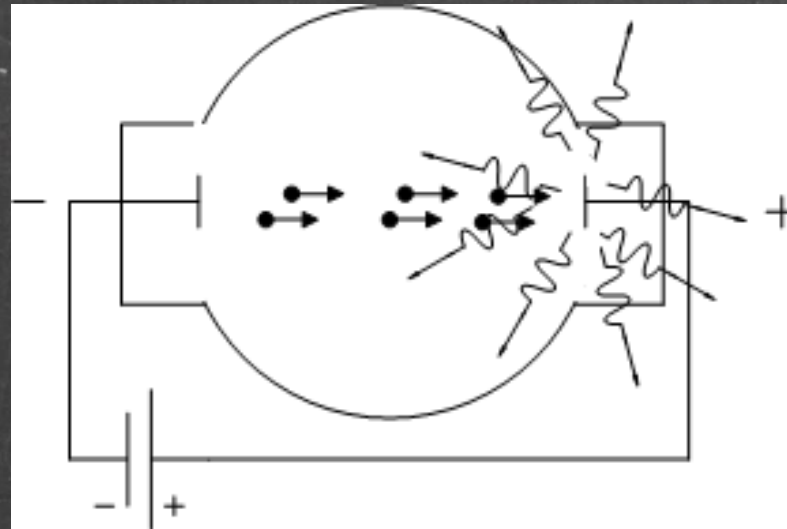
$$\frac{dE}{dx} \propto \rho \frac{N_A}{AB} \frac{Z^2}{m^2} E$$



Εμβέλεια ηλεκτρονίων σε διάφορα υλικά



Λυχνία ακτίνων χ...

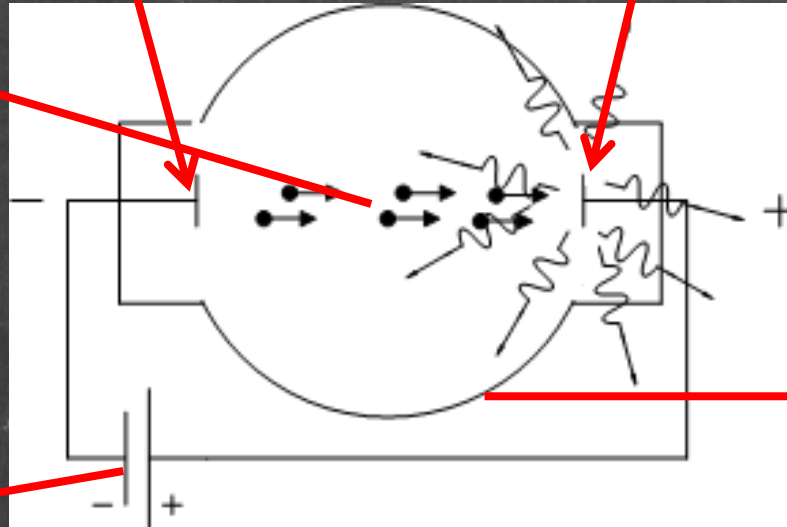


Λυχνία ακτίνων-χ

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

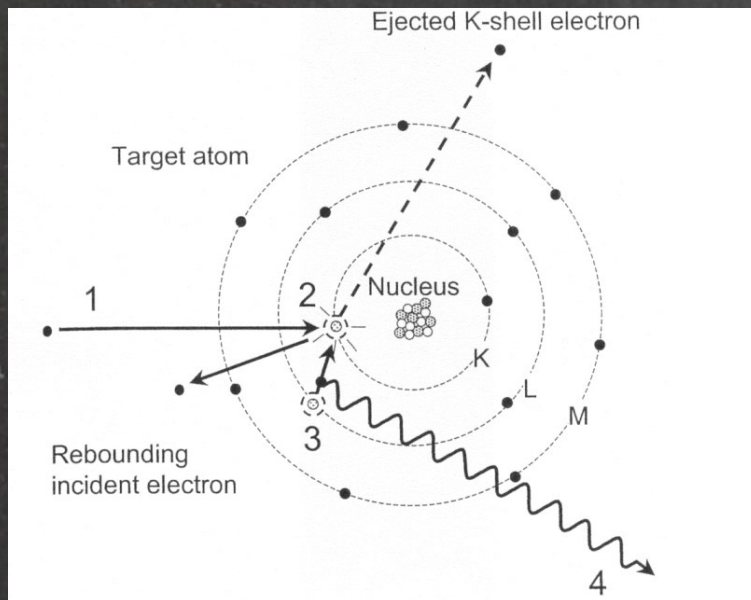
μέτρο της μέγιστης κινητικής ενέργειας
που θα αποκτήσουν τα e^- και επομένως
της μέγιστης ενέργειας της ακτινοβολίας
πέδησης

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

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

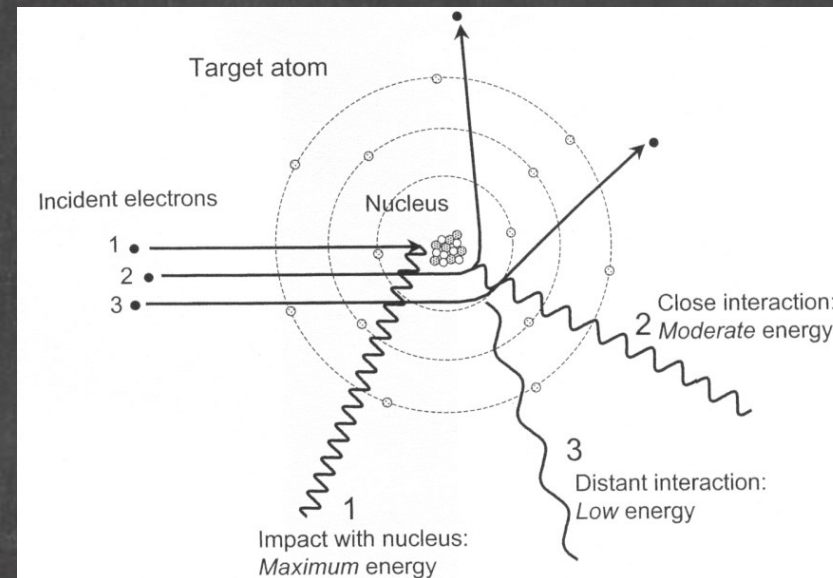
Τα e^- (ως φορτ. σωματίδια) θα απολέσουν ΟΛΗ την ενέργειά τους στο υλικό αλληλεπιδρώντας:

- 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**)

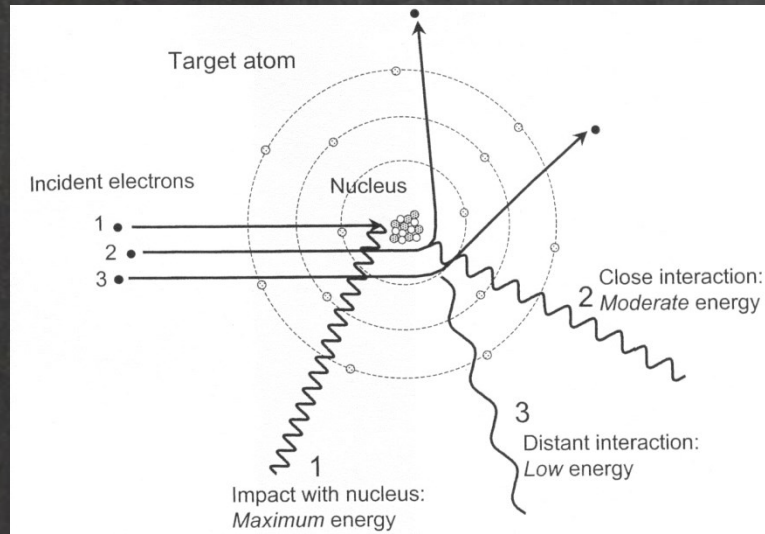
- λίγες αλληλεπιδράσεις απώλειας ενέργειας από 0 – 100%



Λυχνία ακτίνων x: φάσμα ακτίνων x

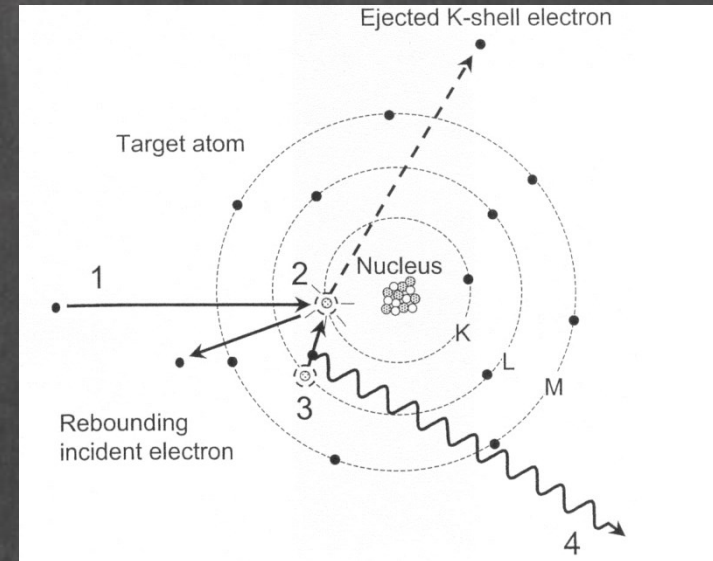
ακτινοβολία πέδησης

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



χαρακτηριστική ακτινοβολία

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



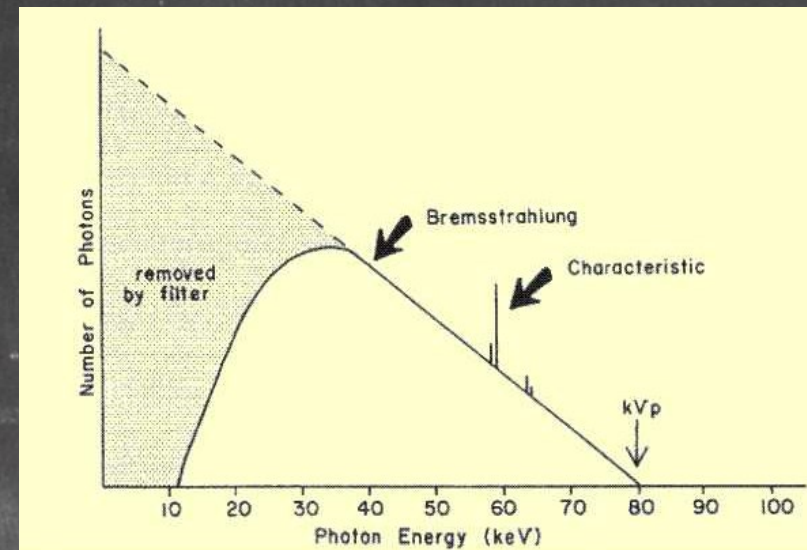
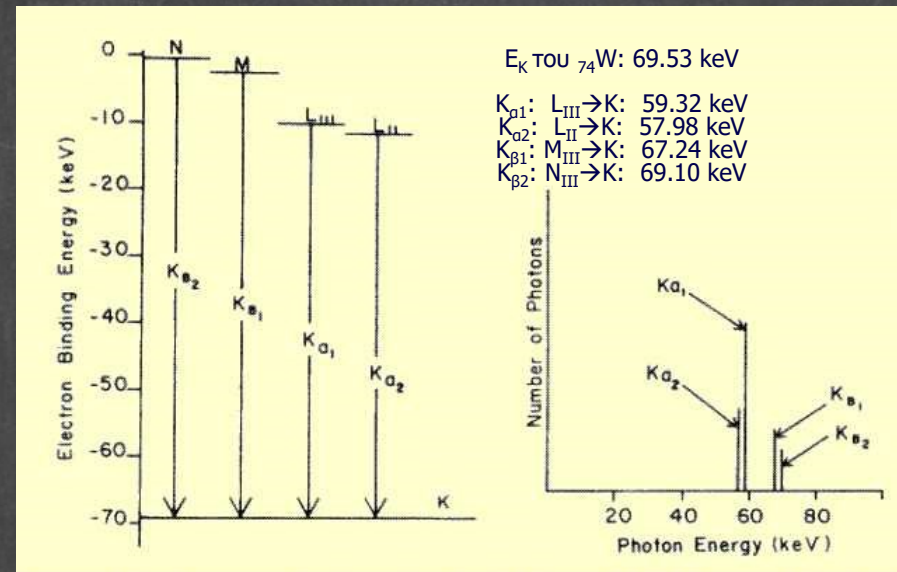
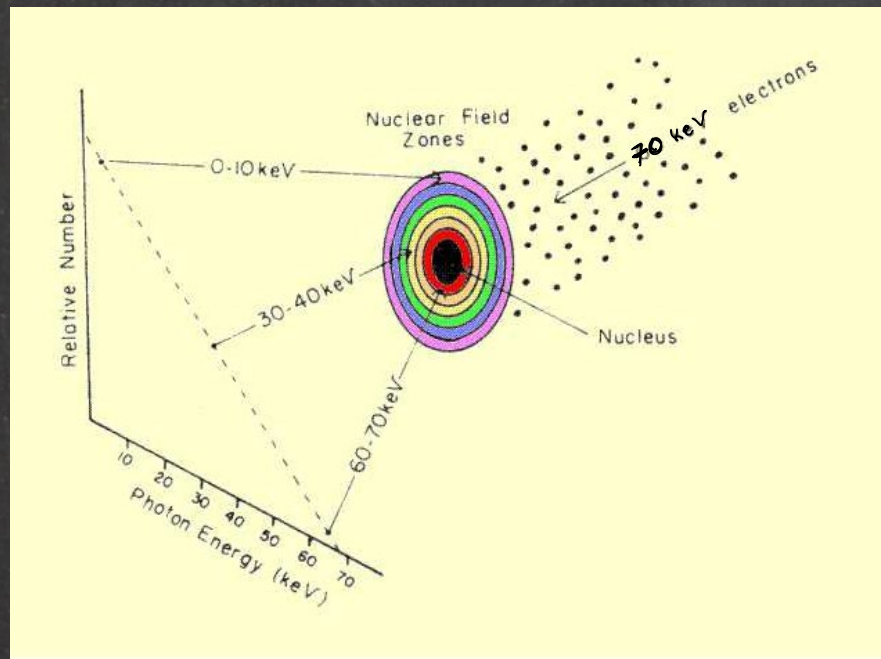
Λυχνία ακτίνων x: φάσμα ακτίνων x

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

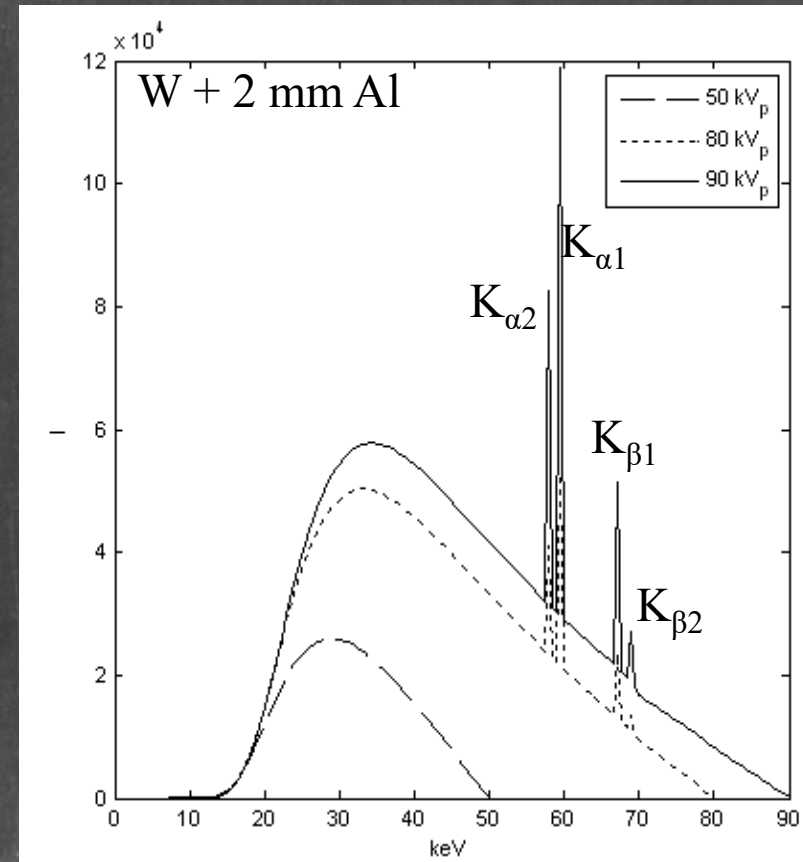
$K_{\alpha 1}$: $L_{III} \rightarrow K$: 59.32 keV

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

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

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

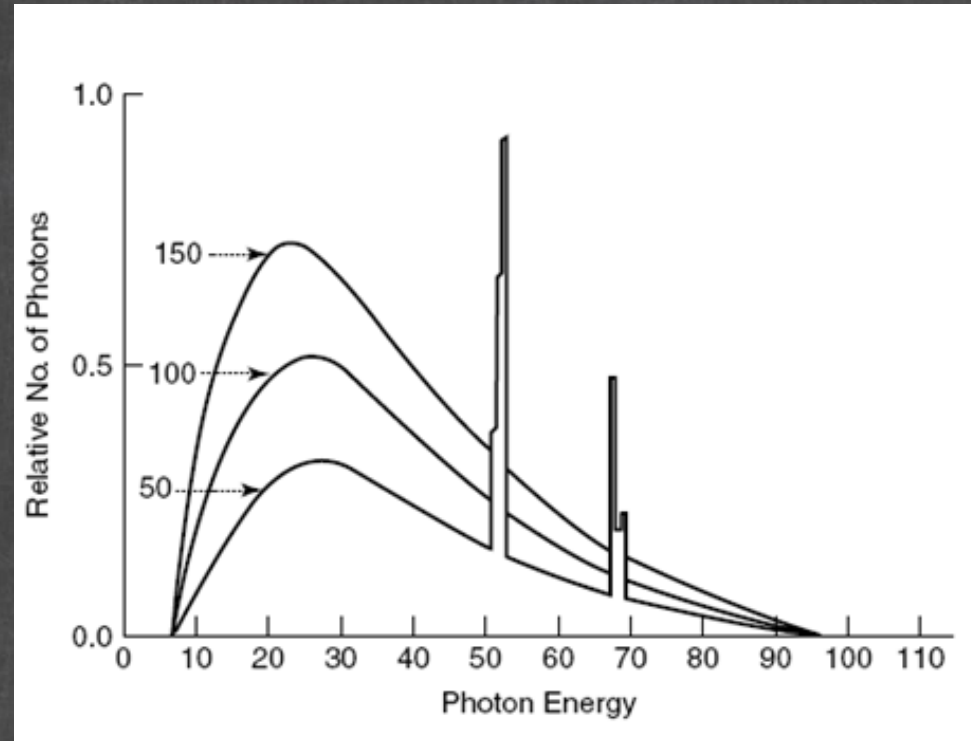
E_K του ${}_{13}\text{Al}$: 1.56 keV



φάσμα ακτίνων χ: 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

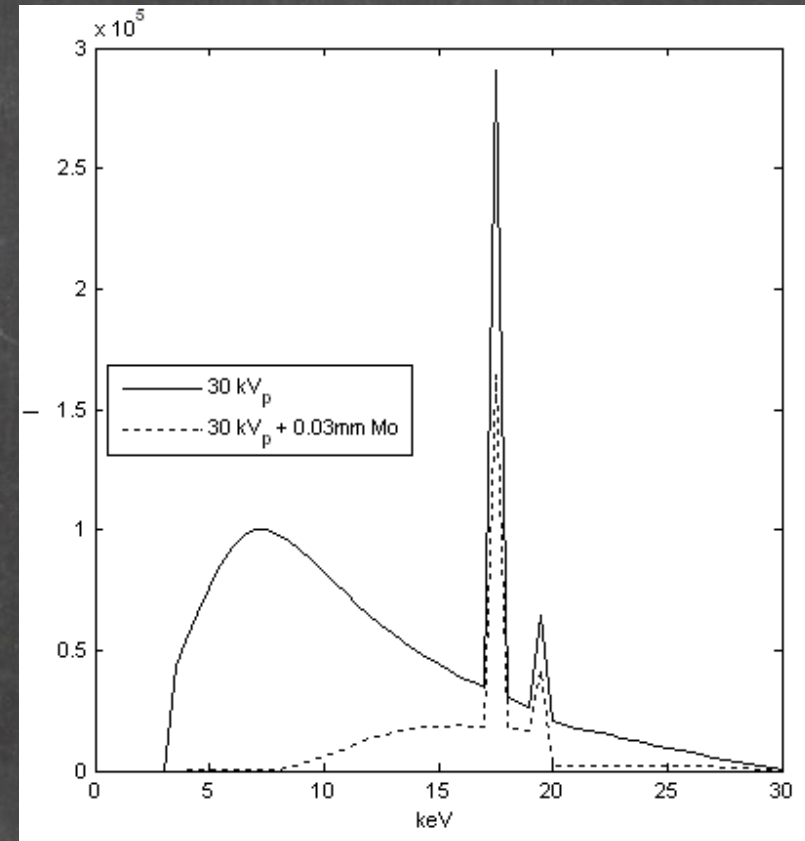
E_K του $_{74}\text{W}$: 69.53 keV

$K\alpha_1$: $L_{III} \rightarrow K$: 59.32 keV

$K\alpha_2$: $L_{II} \rightarrow K$: 57.98 keV

$K\beta_1$: $M_{III} \rightarrow K$: 67.24 keV

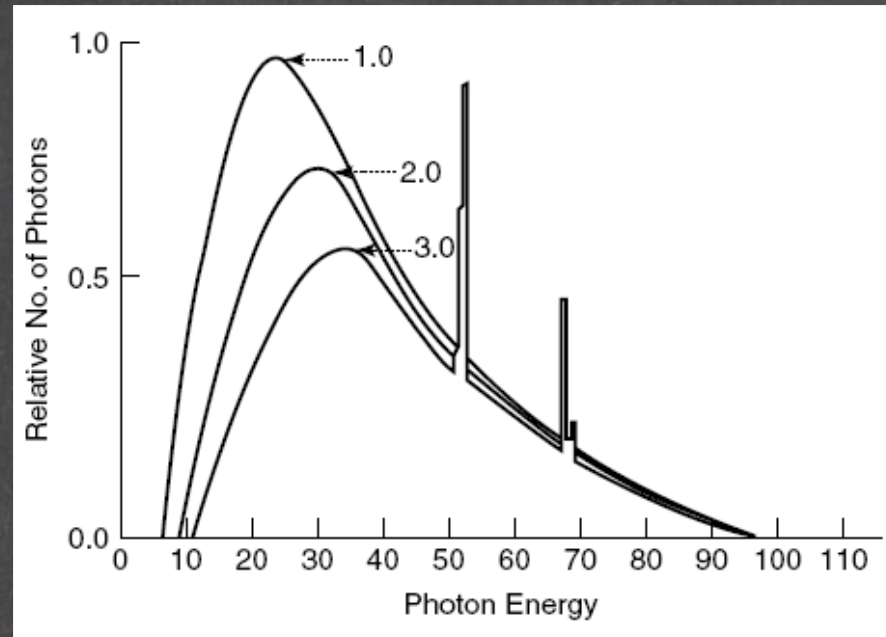
$K\beta_2$: $N_{III} \rightarrow K$: 69.10 keV



φάσμα ακτίνων x: πρόσθετο φίλτρο

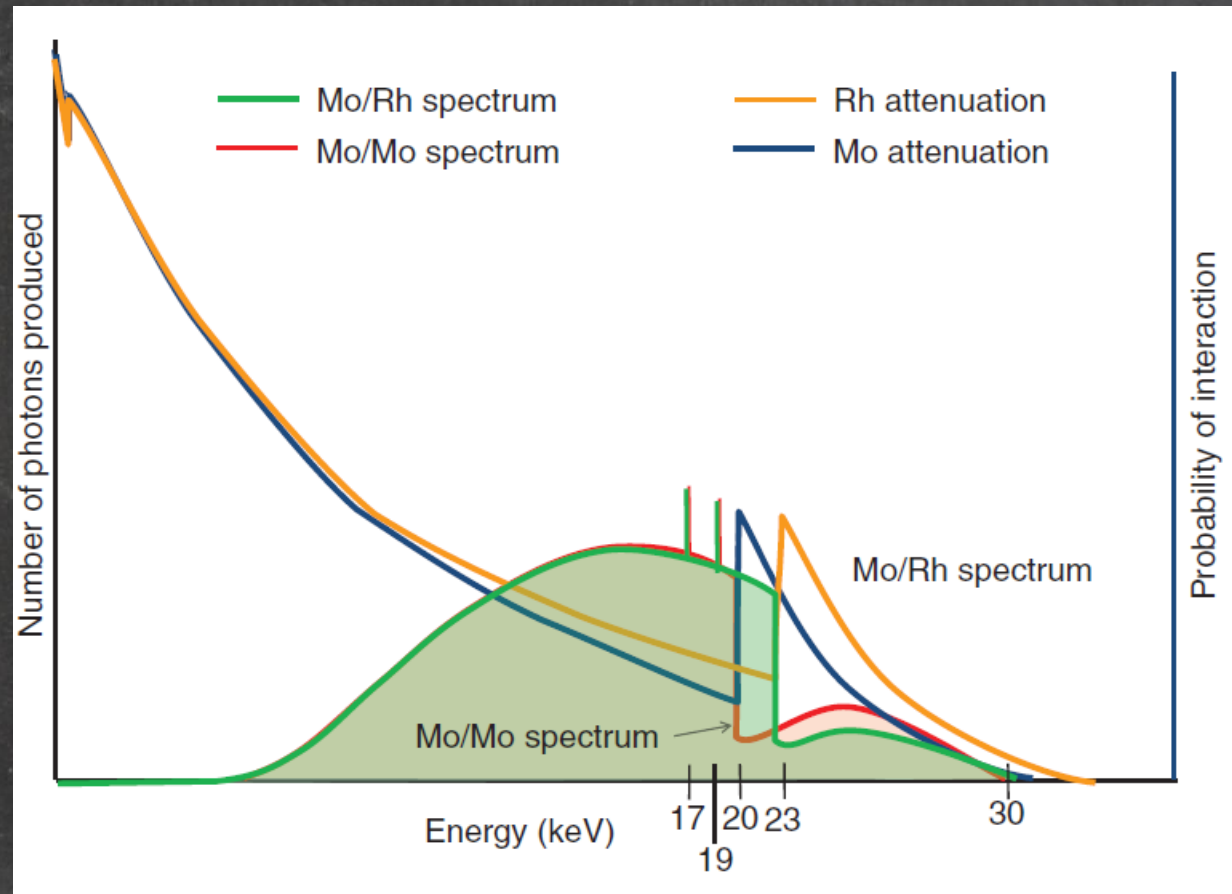
Επηρεάζει:

- τη μέση ενέργεια
- την ένταση



φάσμα ακτίνων x: πρόσθετο φίλτρο

Εφαρμογή στην επιλογή διαφορετικών φίλτρων K-αιχμής στη μαστογραφία



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>.

