



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ

Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ

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

**ΙΑΤΡΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ - ΟΔΟΝΤΙΑΤΡΙΚΗ
(MED684)**

Διδάσκων:

Ελευθέριος Παππάς

Επίκουρος Καθηγητής

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,

Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

elepappas@med.uoa.gr

Επιμέλεια διαφανειών και υλικού μελέτης:

Καθ. Π. Παπαγιάννης

Εργαστήριο Ιατρικής Φυσικής,

Ιατρική Σχολή, ΕΚΠΑ

Κτίριο 5, Γραφείο 21

Αλληλεπίδραση Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας φορτισμένων σωματιδίων – Ύλης

Παραδείγματα ιοντ. ακτινοβολίας φορτισμένων
σωματιδίων:

Ηλεκτρόνια (e^- δηλ, β^-), ποζιτρόνια (e^+ , δηλ, β^+),
πρωτόνια (p), σωματία α (δηλ πυρήνες $He-4$), κ.α.

Αλ/δραση Ιοντίζουσας Ακτινοβολίας φορτισμένων σωματιδίων-Ύλης

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
(ακτινοβολία πέδησης)

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

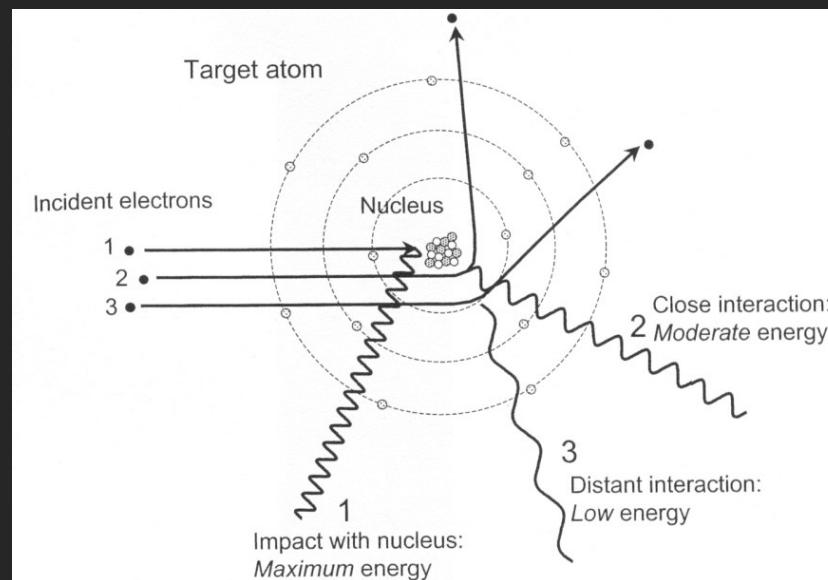
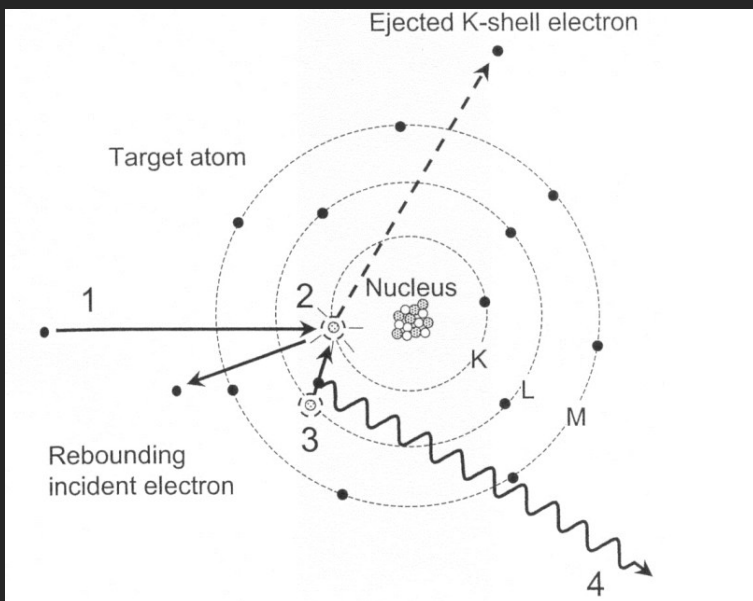
Σημείωση: γίνονται και ελαστικές σκεδάσεις με τον πυρήνα, αλλά για
ακτινοβολία e^- δεν προκαλεί απώλεια ενέργειας

Συγκεκριμένα για 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 H/M ακτινοβολία (**ακτινοβολία πέδησης**)

λίγες αλληλεπιδράσεις απώλειας ενέργειας από 0 – 100%



**Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων
λόγω διεγέρσεων & ιονισμών
(ανασχετική ισχύς)**

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

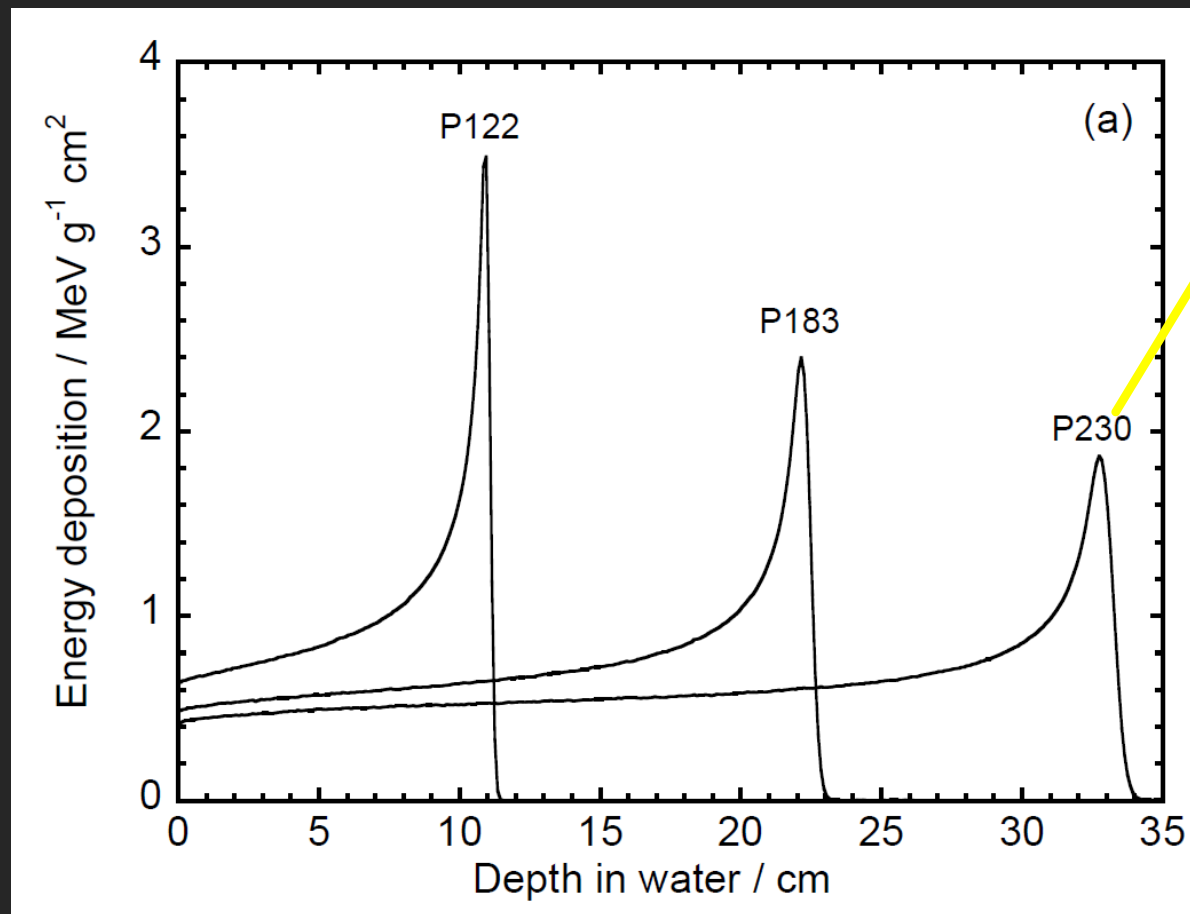
**Απώλεια ενέργειας e^-
λόγω διεγέρσεων & ιονισμών (ανασχετική ισχύς)**

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

όπου $\beta = u/c$ δηλ η ταχύτητα του σωματιδίου ως προς την ταχύτητα του φωτός

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

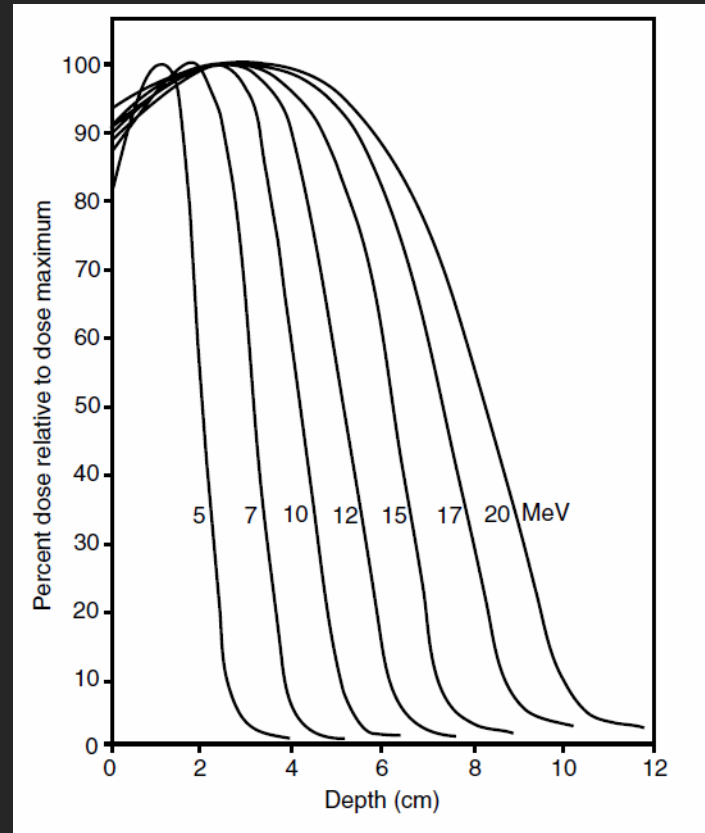
Καμπύλες εναπόθεσης ενέργειας-βάθους πρωτονίων (μονοενεργειακή δέσμη) –
Καμπύλη Bragg (για βαριά φορτισμένα σωματίδια, όχι e^-)



Bragg peak στο τέλος της διαδρομής και οφείλεται στο ότι η απώλεια ενέργειας ανά μήκος διαδρομής είναι αντιστρόφως ανάλογη του β^2

Για δοσμένο ομοιογενές υλικό, η εμβέλεια των βαριών φορτισμένων σωματιδίων εξαρτάται από την αρχική κινητική τους ενέργεια. Το βάθος στο οποίο παρατηρείται το Bragg peak επίσης εξαρτάται από την αρχική κινητική ενέργεια

Σχετικές Καμπύλες εναπόθεσης ενέργειας-βάθους e^- (ελαφριά φορτισμένα σωματίδια) ή δόσης-βάθους

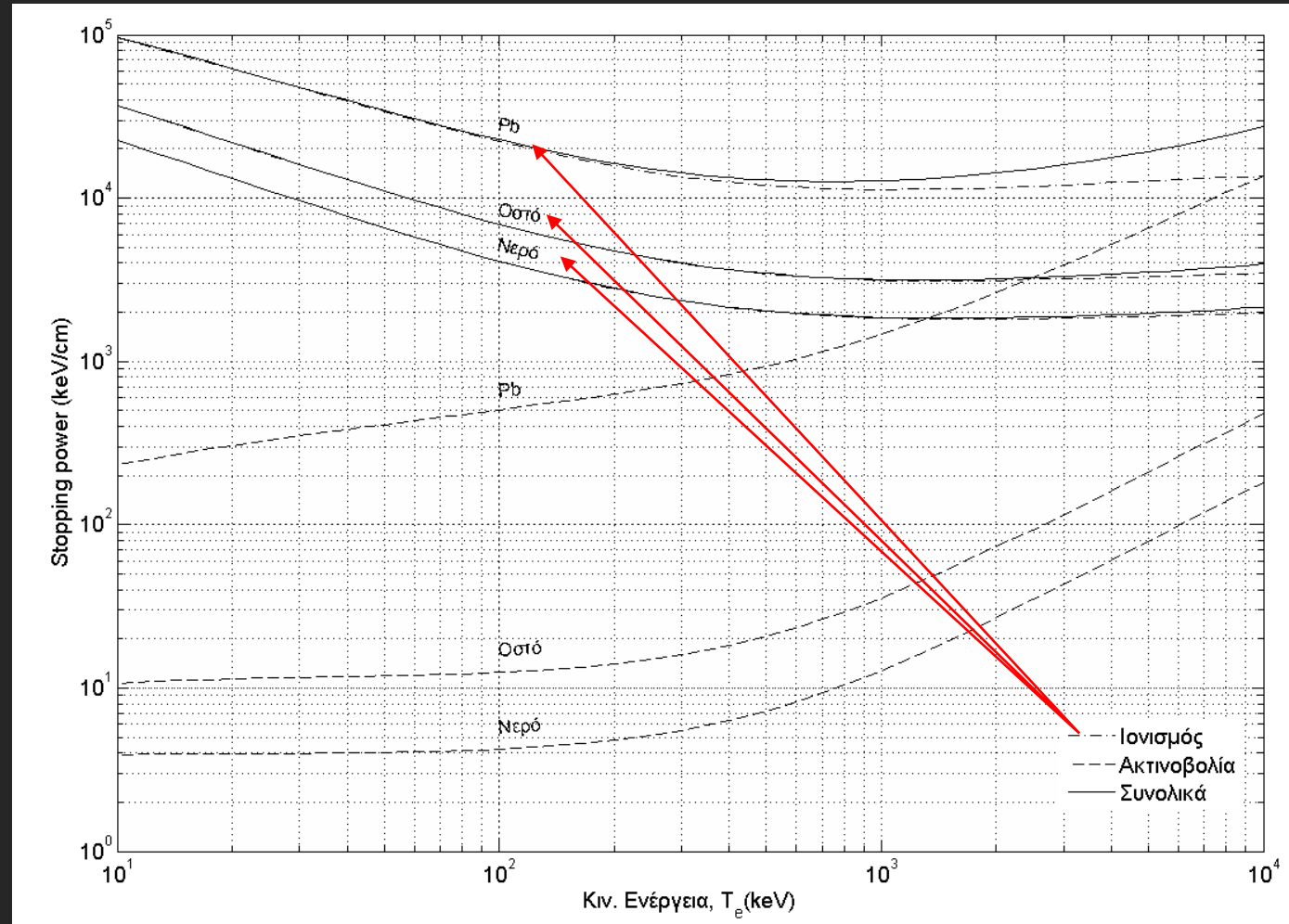


Δεν σχηματίζεται Bragg peak γιατί λόγω της μικρής μάζας των e^- έχουμε και ελαστικές κρούσεις

Για δοσμένο ομοιογενές υλικό, η εμβέλεια των e^- εξαρτάται από την αρχική κινητική τους ενέργεια

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

Απώλεια ενέργειας e^- λόγω διεγέρσεων & ιονισμών



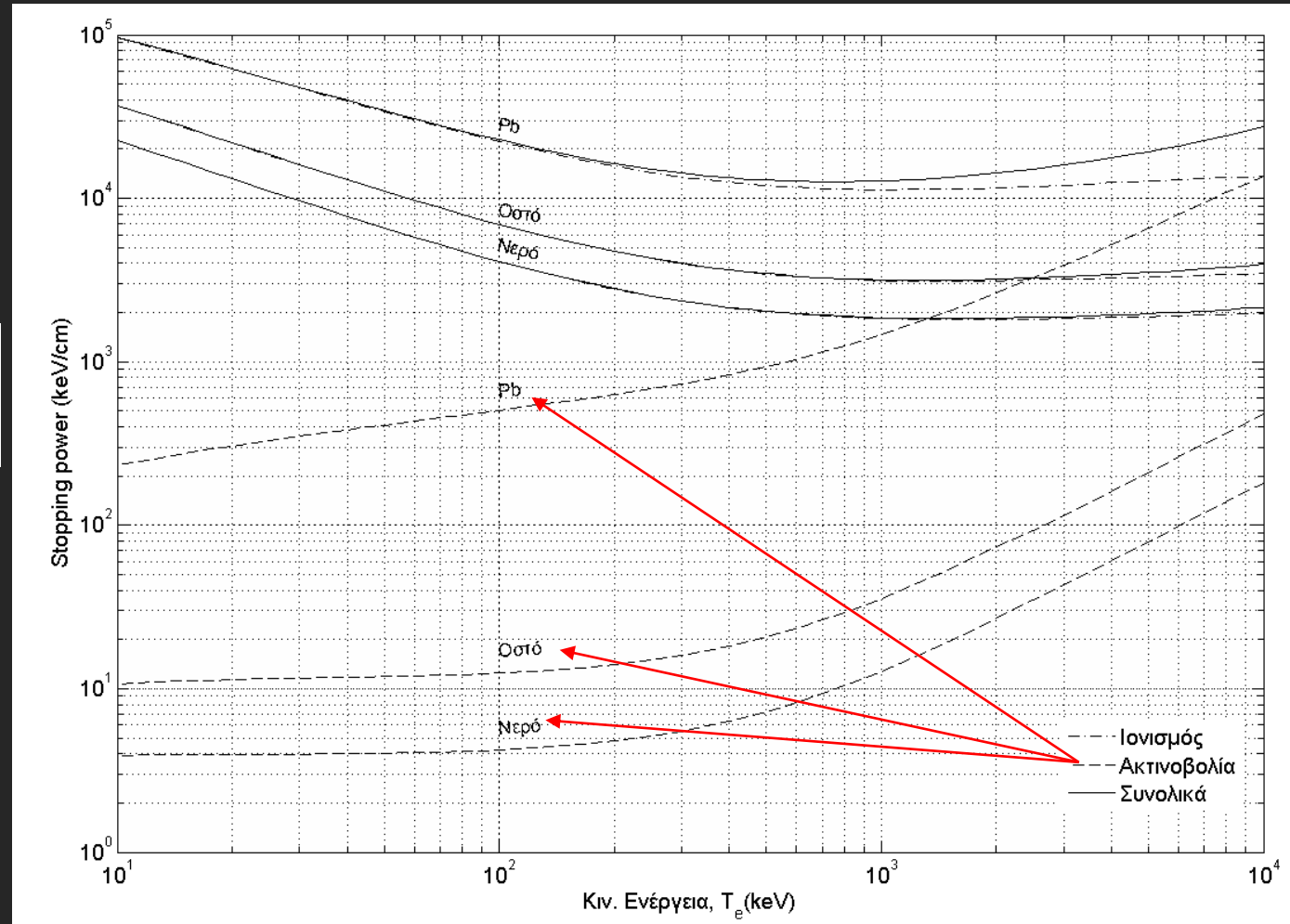
Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας πέδησης (ανασχετική ισχύς ακτινοβολίας Bremsstrahlung)

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής λόγω εκπομπής ακτ. πέδησης ???

$$\frac{dE}{dx_{rad}} \propto \rho \frac{N_A}{AB}, \frac{Z^2}{m^2}, E$$

Ατομικός
αριθμός
υλικού

Μάζα
σωματιδίου



Απώλεια ενέργειας φορτισμένων σωματιδίων λόγω εκπομπής ακτινοβολίας πέδησης (ανασχετική ισχύς ακτινοβολίας Bremsstrahlung)

Από ποιους παράγοντες εξαρτάται η απώλεια ενέργειας ανά μονάδα διαδρομής λόγω εμπομπής ακτ. πέδησης (ή αλλιώς ανασχετική ισχύς λόγω πέδησης) ???

Ατομικός
αριθμός
υλικού

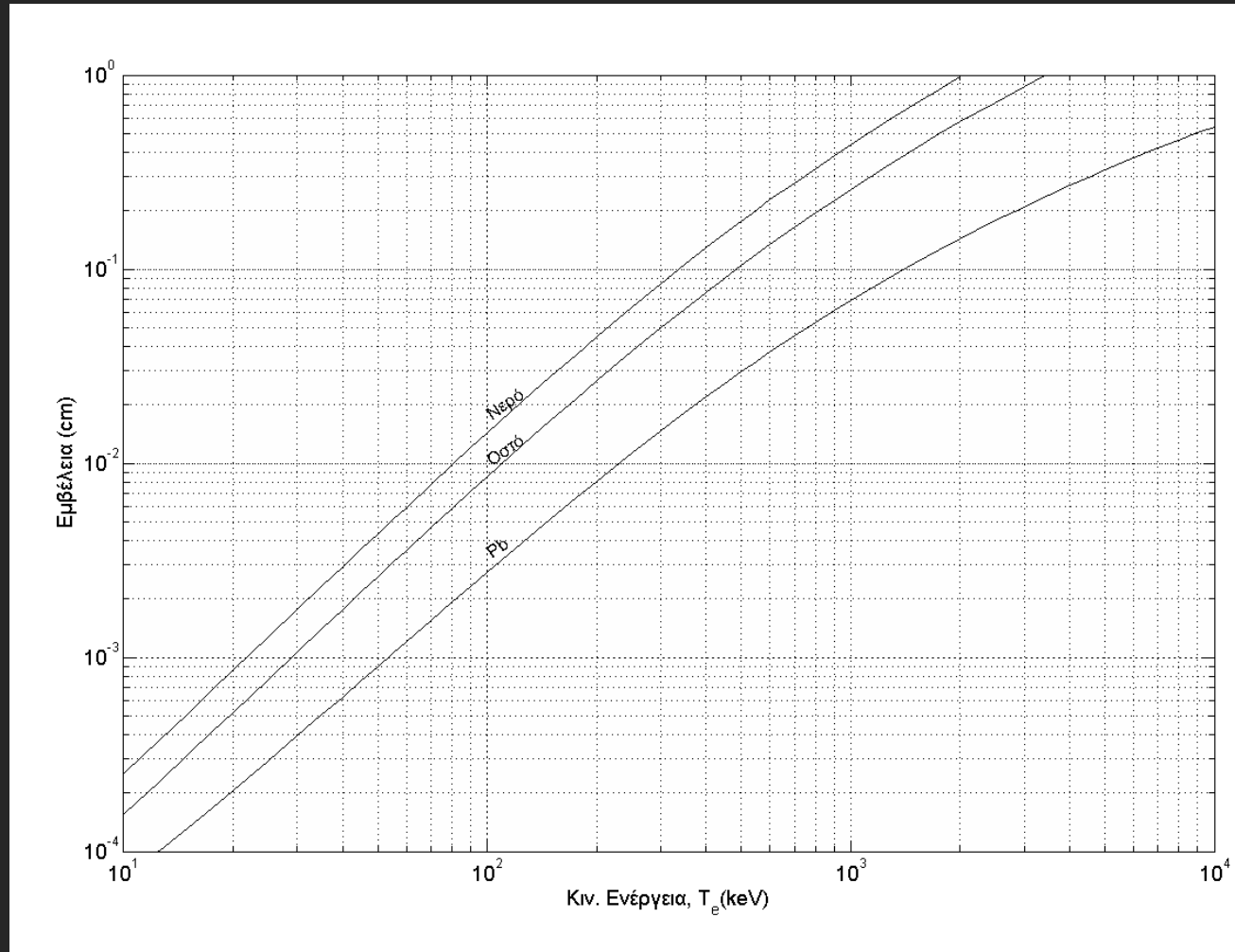
$$\frac{dE}{dx_{rad}} \propto \rho \frac{N_A}{A_B}, \frac{Z^2}{m^2}, E$$

Μάζα
σωματιδίου

Λόγω του m^2 στον παρονομαστή, η εκπομπή ακτινοβολίας πέδησης από βαριά φορτισμένα είναι αμελητέα σε σχέση με την ακτινοβολία πέδησης από δέσμη ηλεκτρονίων (~ 1800 φορές μικρότερη μάζα για τα e^- σε σχέση με p). Ομοίως και για υλικά μικρού Z

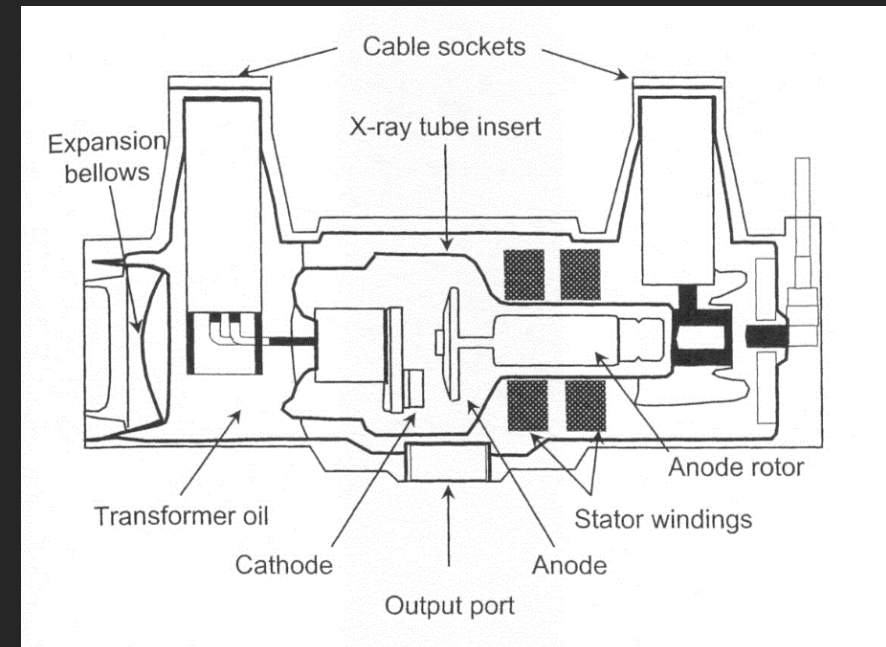
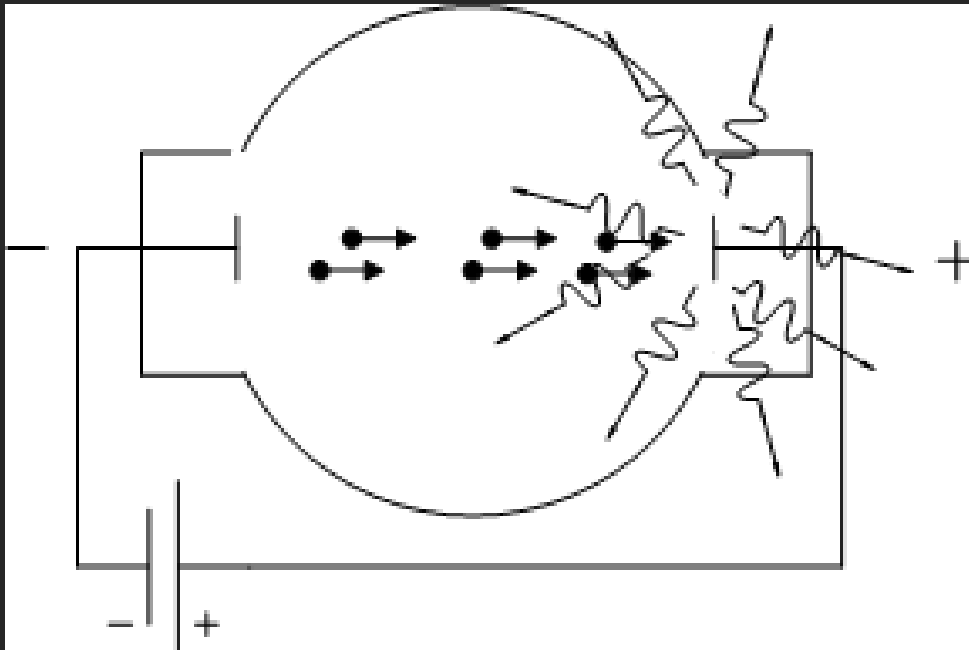
Αν όμως θέλω να εκπέμπεται ακτινοβολία πέδησης χρειαζομαι υλικό υψηλού Z , ελαφριά σωματίδια (ηλεκτρόνια) και μεγάλη πυκνότητα υλικού...
Π.χ.,: Λυχνίες ακτίνων X (δηλ, σε ακτινολογικά, ακτινοσκοπικά, μαστογράφοι, κ.α.) και γραμμικοί επιταχυντές...

Εμβέλεια ηλεκτρονίων σε διάφορα υλικά



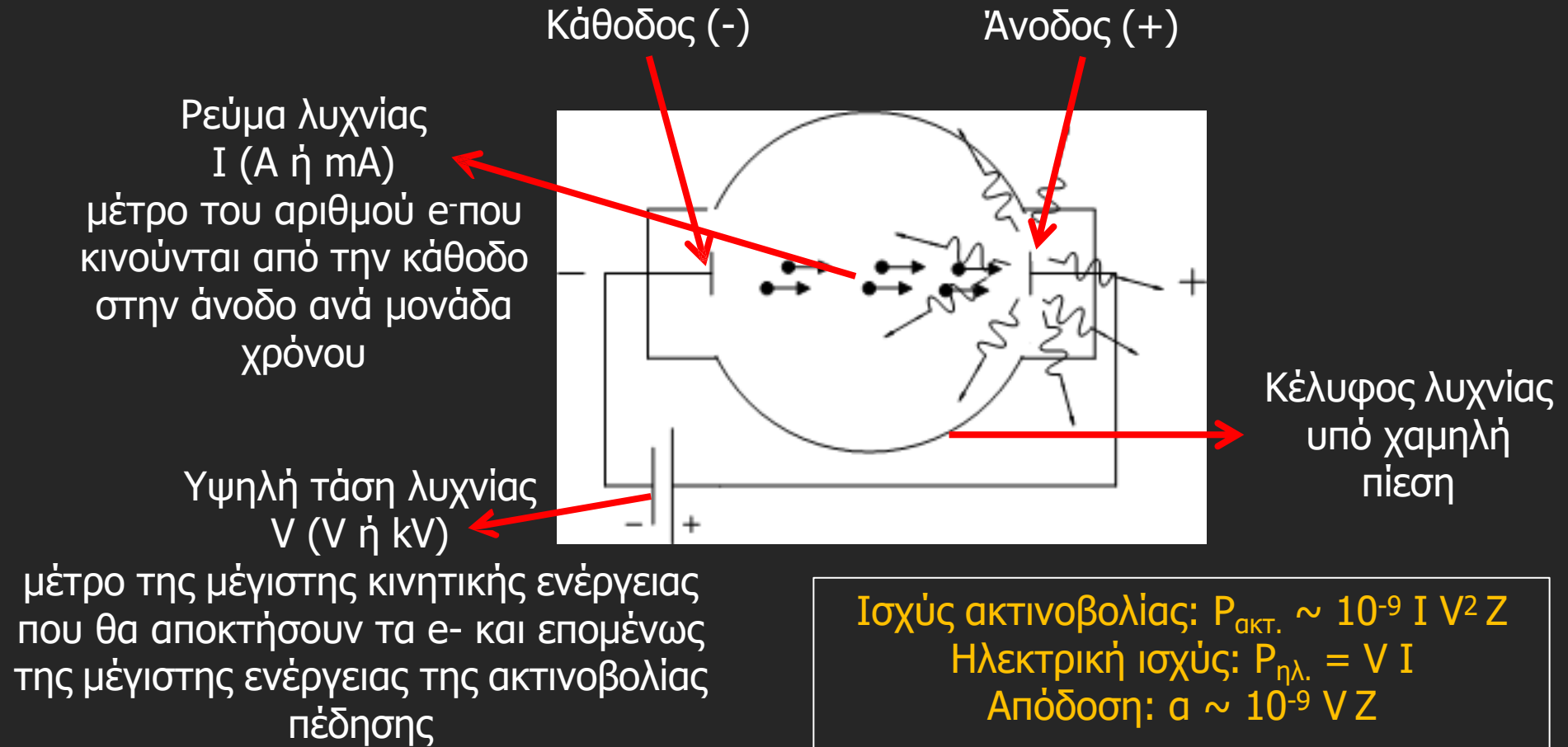
Λυχνία ακτίνων Χ...

**Αρχή λειτουργίας για παραγωγή ακτίνων Χ:
Επιτάχυνση e^- , πρόσπτωση στην άνοδο, εκπομπή Χ
κατά την αλλ/ση με το υλικό της ανόδου**





Λυχνία ακτίνων-X: από e^- σε ακτίνες X (φωτόνια)

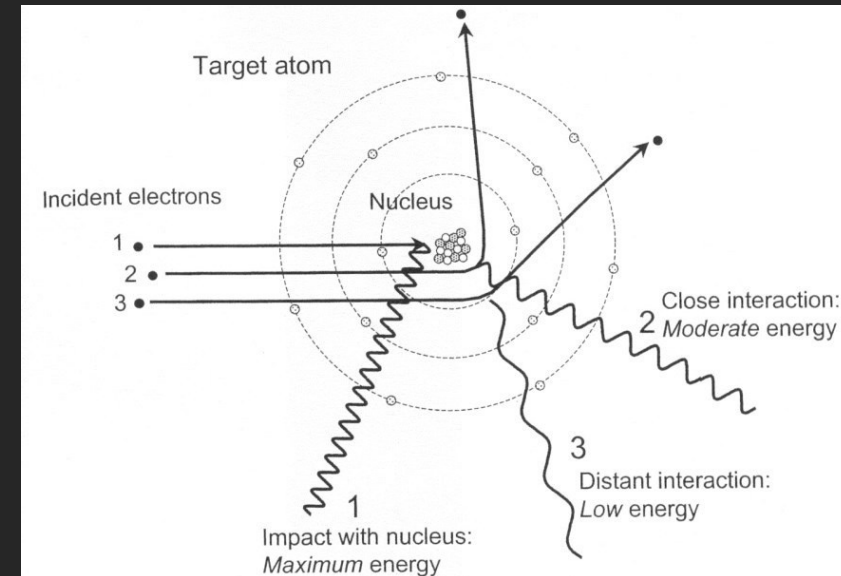
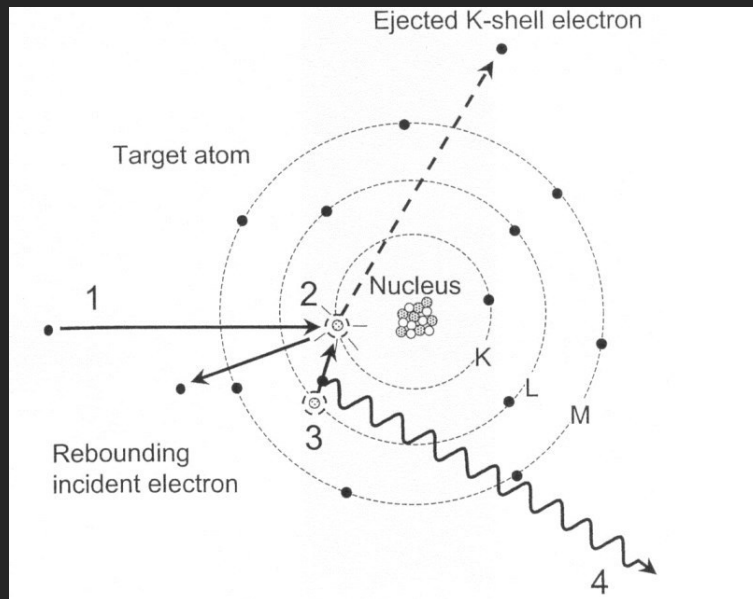


$$\begin{aligned}\text{Ισχύς ακτινοβολίας: } P_{\text{ακτ.}} &\sim 10^{-9} I V^2 Z \\ \text{Ηλεκτρική ισχύς: } P_{\text{ηλ.}} &= V I \\ \text{Απόδοση: } a &\sim 10^{-9} V Z\end{aligned}$$

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

Υπενθύμιση: 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 ενδεχομένως 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%

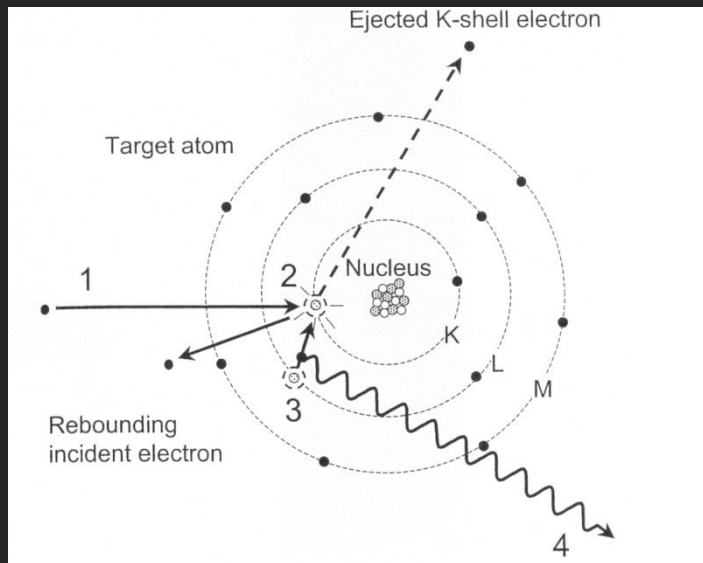


Λυχνία ακτίνων x: φάσμα εκπομπής Σύνθετο φάσμα που αποτελείται από:

χαρακτηριστική ακτινοβολία

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

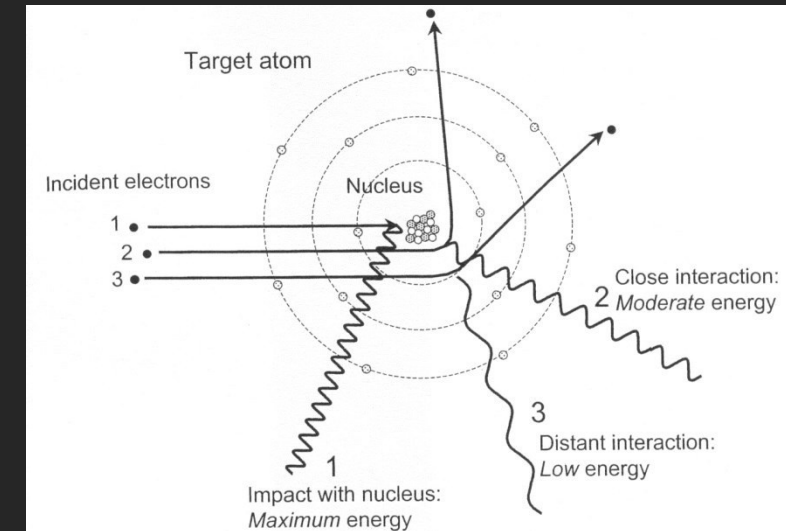
Γραμμικό φάσμα εκπομπής



ακτινοβολία πέδησης

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

Συνεχές φάσμα εκπομπής



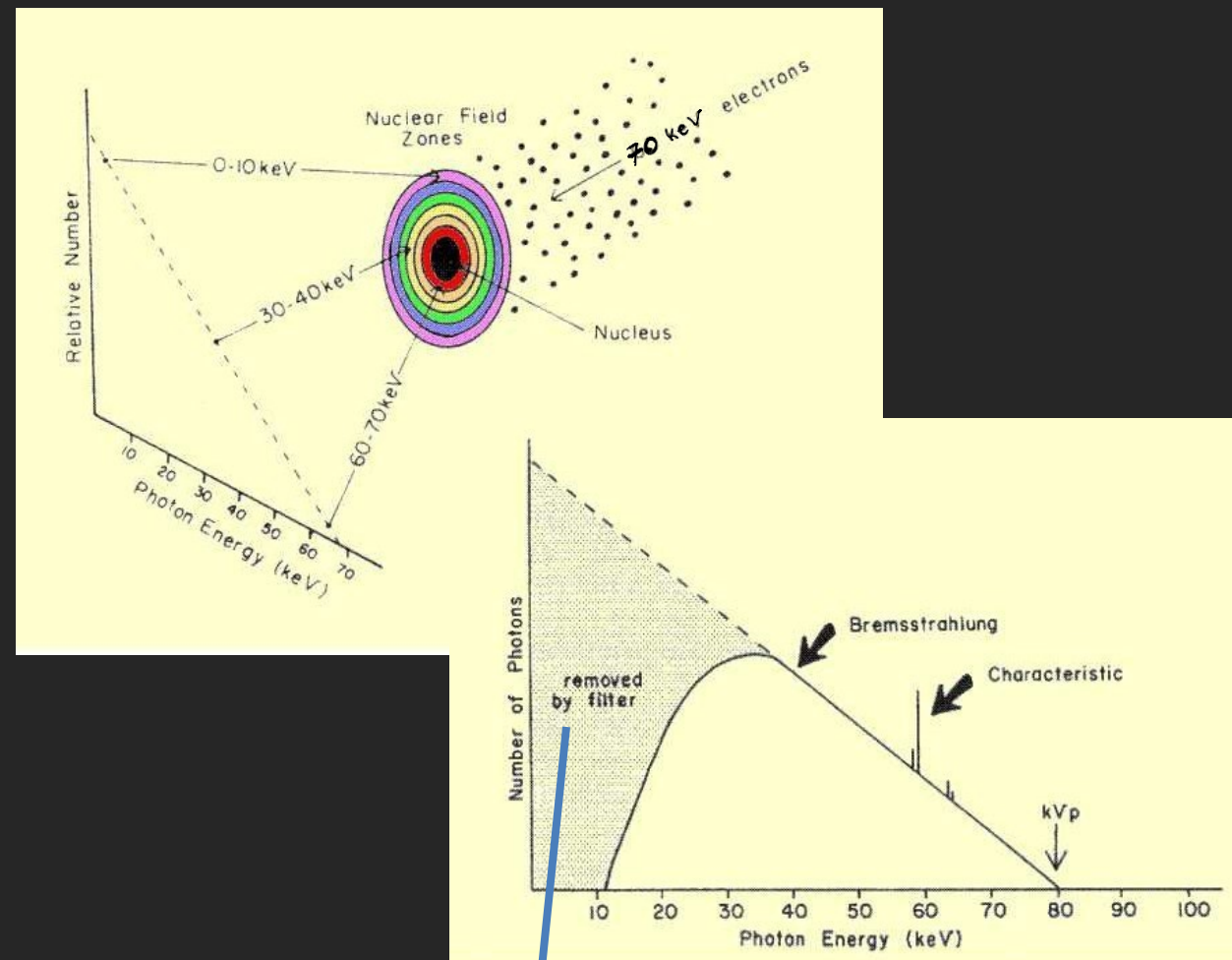
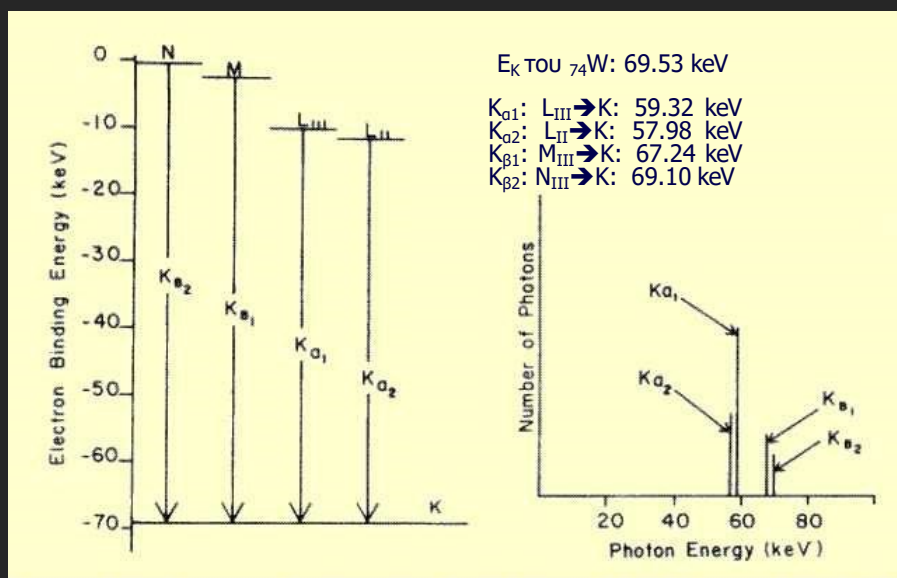
Λυχνία ακτίνων x: φάσμα ακτίνων x

Θεωρητική φασματική κατανομή
ακτινοβολίας πέδησης :

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

Στην πράξη όμως:

- χαρακτηριστική ακτινοβολία
- εκθετική εξασθένιση



Φίλτρο στην έξοδο των
ακτίνων X από τη λυχνία
απορροφά («κόβει») τα
φωτόνια πολύ χαμηλής
ενέργειας

Παράγοντες που επηρεάζουν το φάσμα ακτίνων x: υψηλή τάση (kVp δηλ kilovolt potential)

Επηρεάζει:

- τη μέγιστη ενέργεια
- τη μέση ενέργεια (keV όσα και τα kV)
- την ένταση ($I \propto kV_p^2$)
- την εμφάνιση ή μη χαρακτηριστικής ακτινοβολίας

E_K του $_{74}W$: 69.53 keV

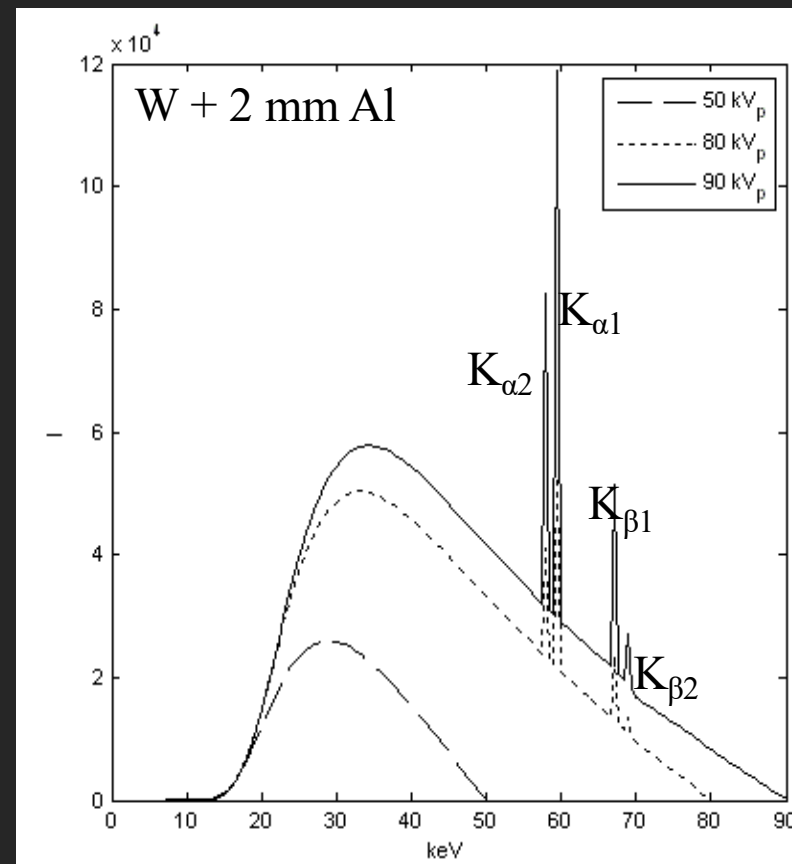
$K_{\alpha 1}$: $L_{III} \rightarrow K$: 59.32 keV

$K_{\alpha 2}$: $L_{II} \rightarrow K$: 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 $_{13}Al$: 1.56 keV



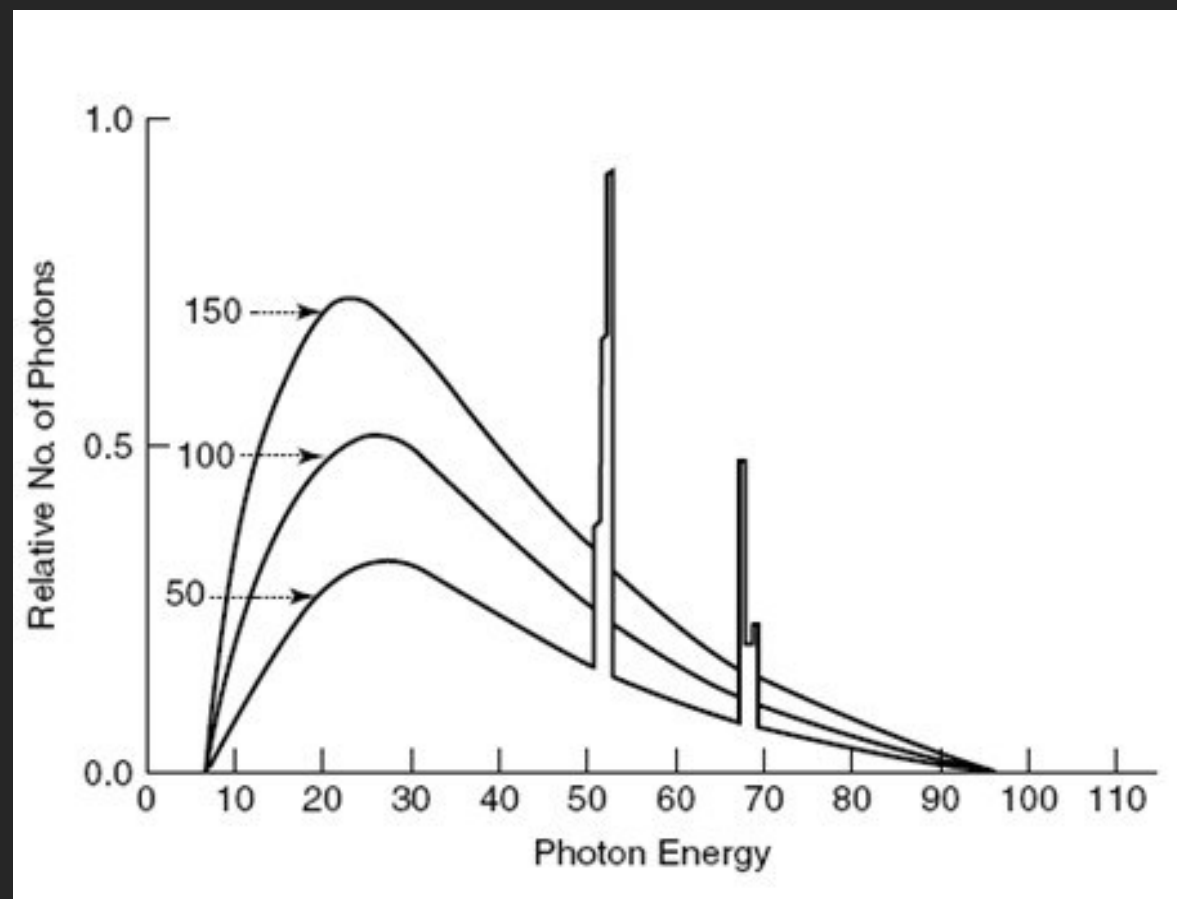
Μέγιστη ενέργεια των φωτονίων στο φάσμα σε keV θα είναι όση και η τάση λειτουργίας της λυχνίας σε kVp

φάσμα ακτίνων x: ρεύμα λυχνίας (mA) / χρόνος έκθεσης (s)

Σημαντικό είναι το γινόμενο
του ρεύματος (mA) επί το
χρόνο (s) δηλ, mAs

Επηρεάζουν:

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



Ουσιαστικά καθορίζει το πλήθος των φωτονίων στο φάσμα εκπομπής αλλά όχι το σχήμα της καμπύλης

φάσμα ακτίνων x: υλικό ανόδου

Επηρεάζει:

- την ένταση ($I \propto Z$)
- 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

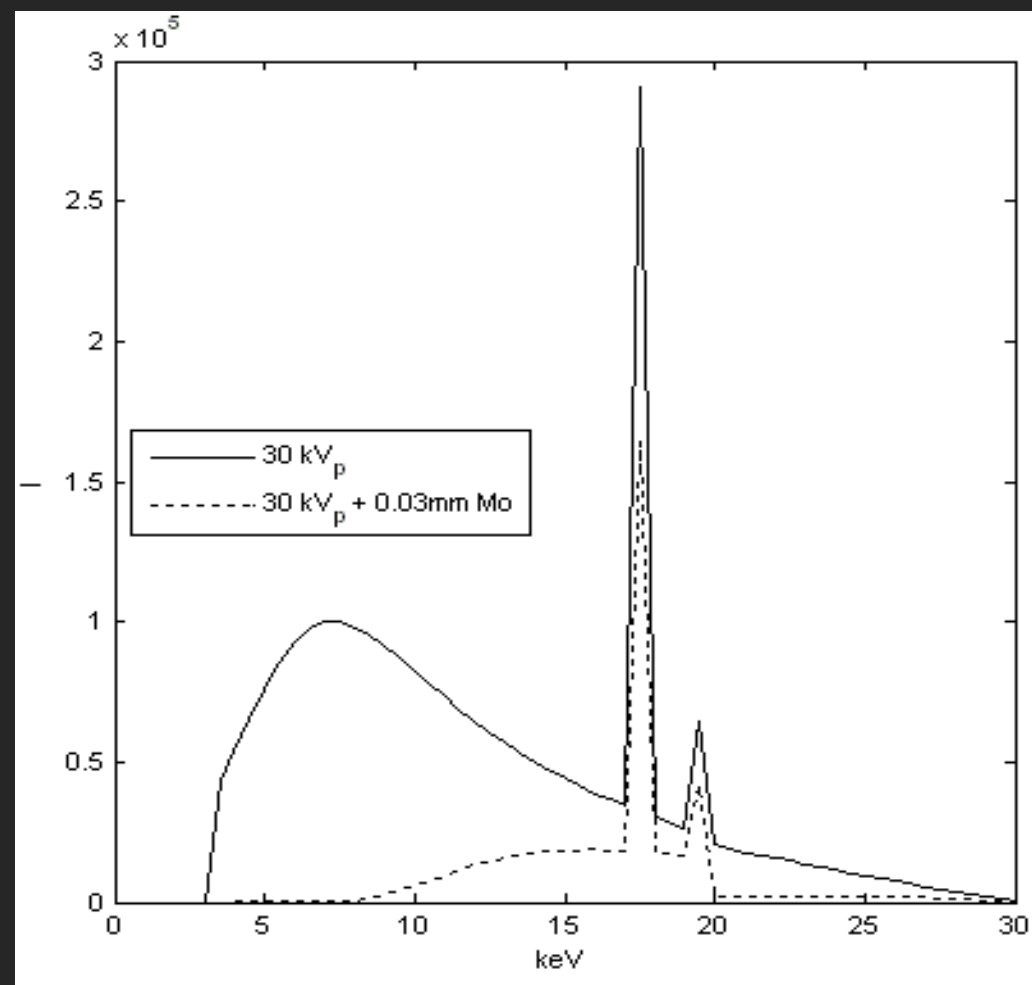
E_K του $_{74}\text{W}$: 69.53 keV

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

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

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

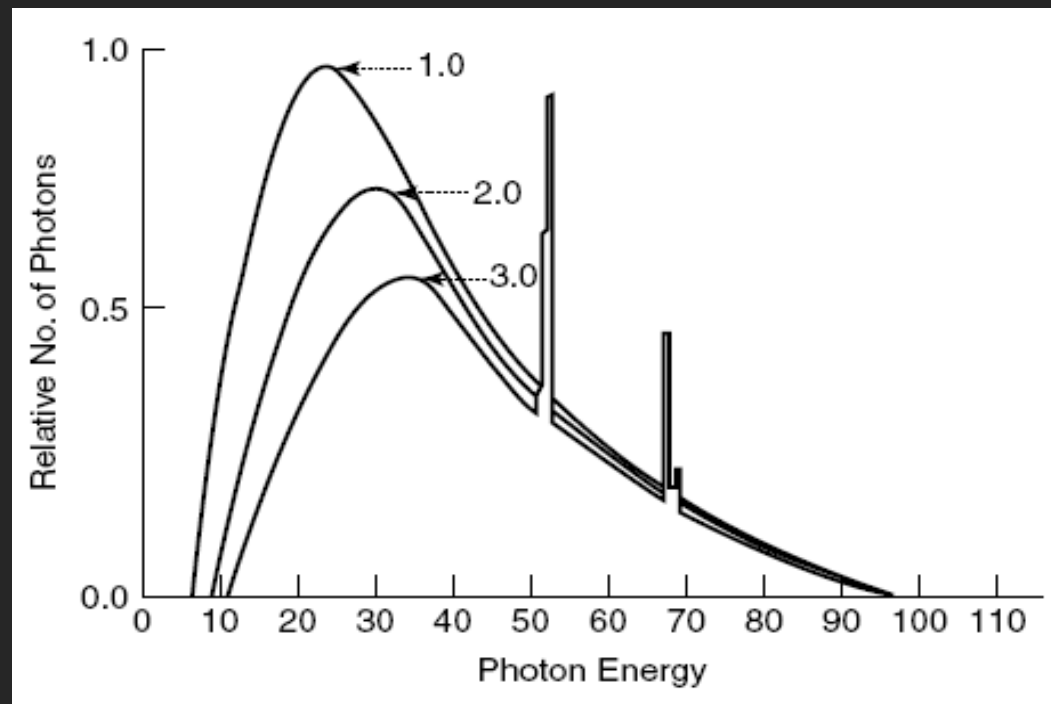
$K\beta_2$: $N_{III} \rightarrow K$: 69.10 keV



φάσμα ακτίνων x: πρόσθετο φίλτρο στην έξοδο της λυχνίας

Επηρεάζει:

- τη μέση ενέργεια
- την ένταση



Απορροφά έντονα («κόβει») φωτόνια πολύ χαμηλής ενέργειας πριν φτάσουν στον ασθενή. Το πάχος του φίλτρου μπορεί να επιλέγεται ανάλογα με την εφαρμογή

Υλικό περαιτέρω μελέτης

➤ § 3.3 και 4.1 Κεφαλαίου 2 Συγγράμματος

➤ 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>.

