

# ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΚΤΙΝΟΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ Ι

## ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΕΝΟΤΗΤΑ

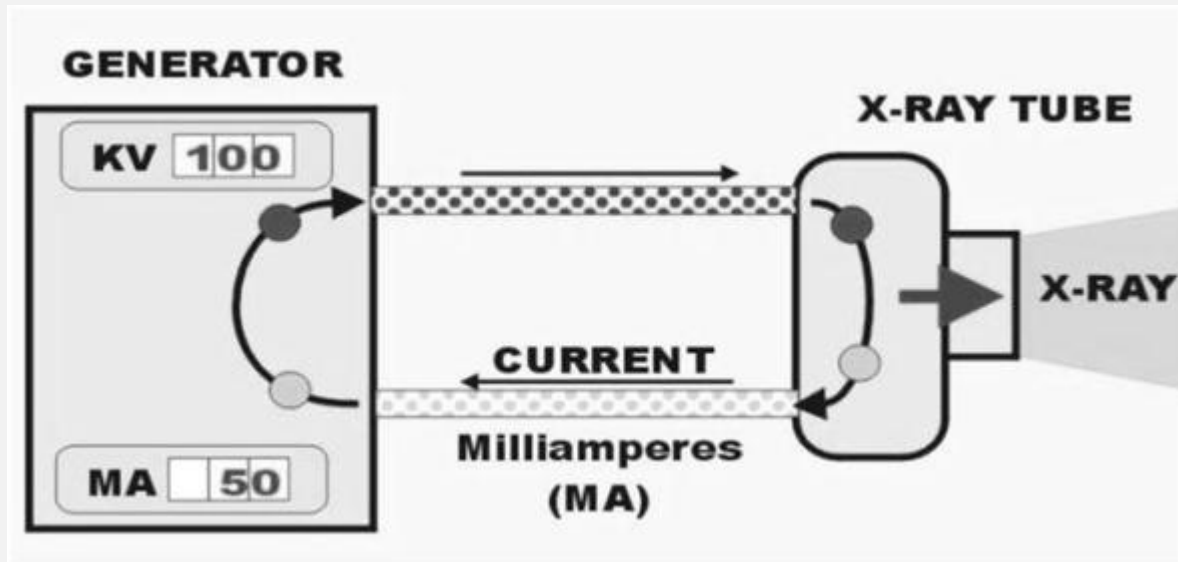
- λυχνία
- παραγωγή ακτίνων Χ
- χαρακτηριστικά χρήσιμης δέσμης
- αλληλεπίδραση ακτίνων Χ - ύλης

ΓΑΛΑΝΟΠΟΥΛΟΥ Α. – ΟΙΚΟΝΟΜΟΥ Γ.

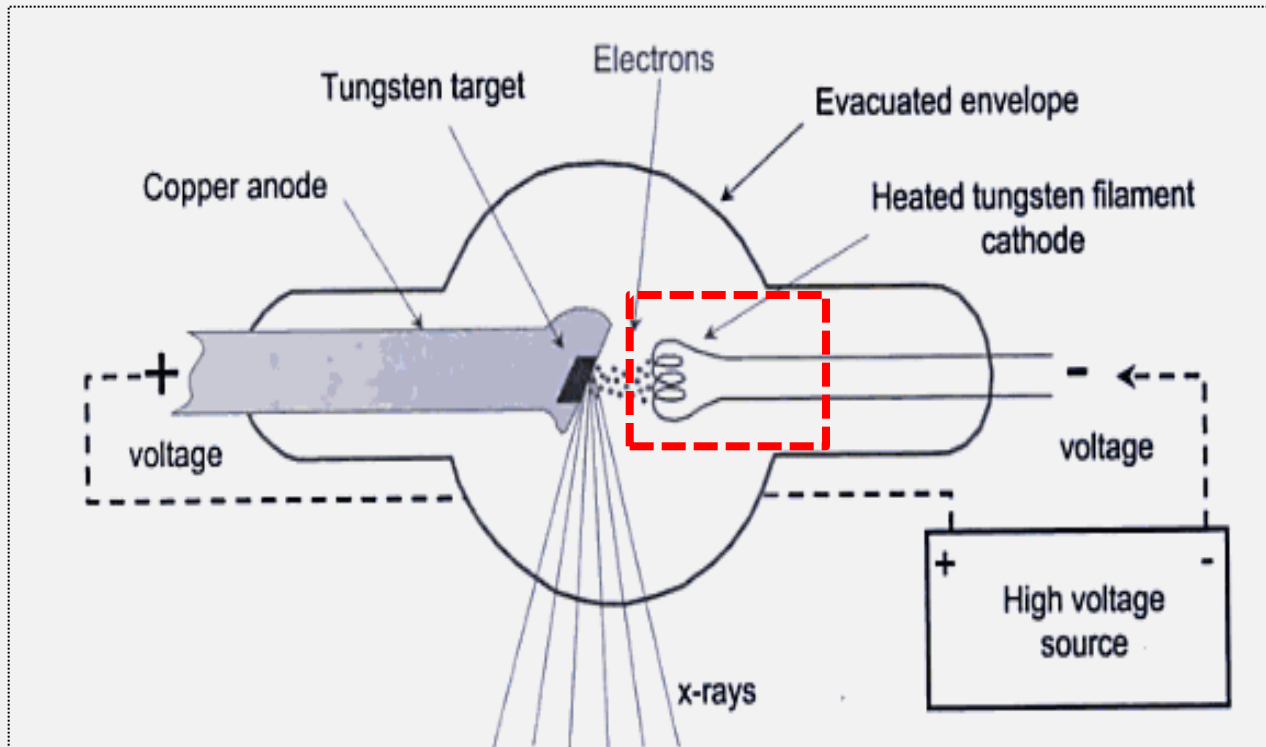
# βιβλιογραφικές αναφορές

- Bushong C.S: Radiologic science for Technologists
- Dowd, et. al: Principles og Imaging Science and Protection
- Fauber L.T: Radiographic Imaging and Exposure
- Μπούτσικου Κ, Οικονόμου Γ: Σημειώσεις Εργαστηρίου Ακτινοτεχνολογίας Ι

# λυχνία



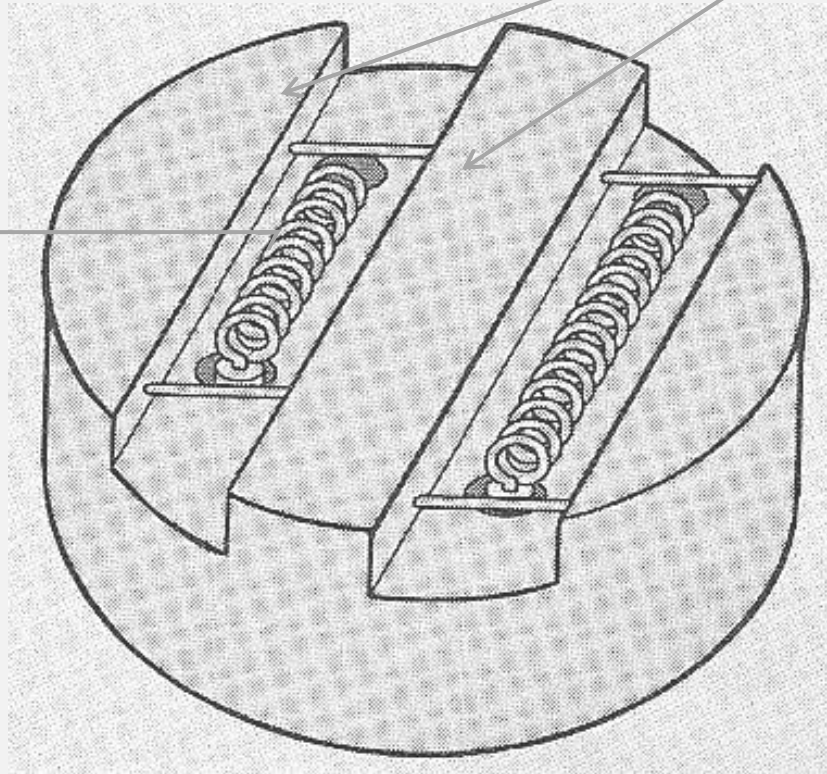
# κάθοδος



κάθοδος

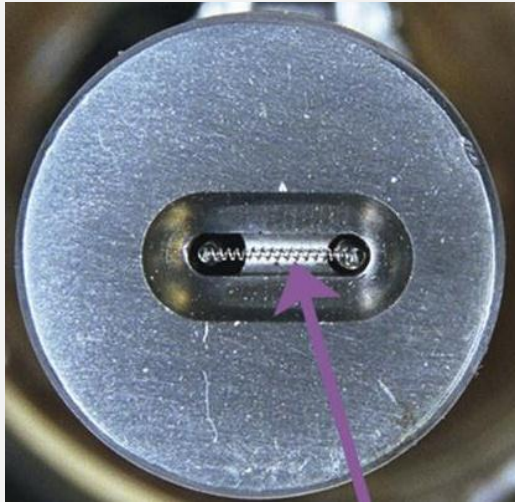
σπείραμα

κύπελλο εστίασης



# κάθοδος

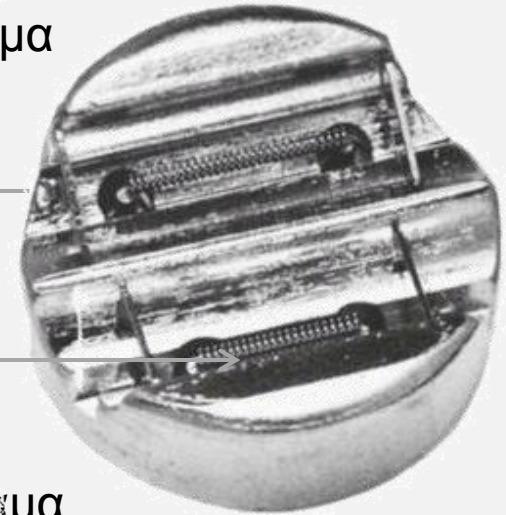
μονοεστιακή



σπείραμα

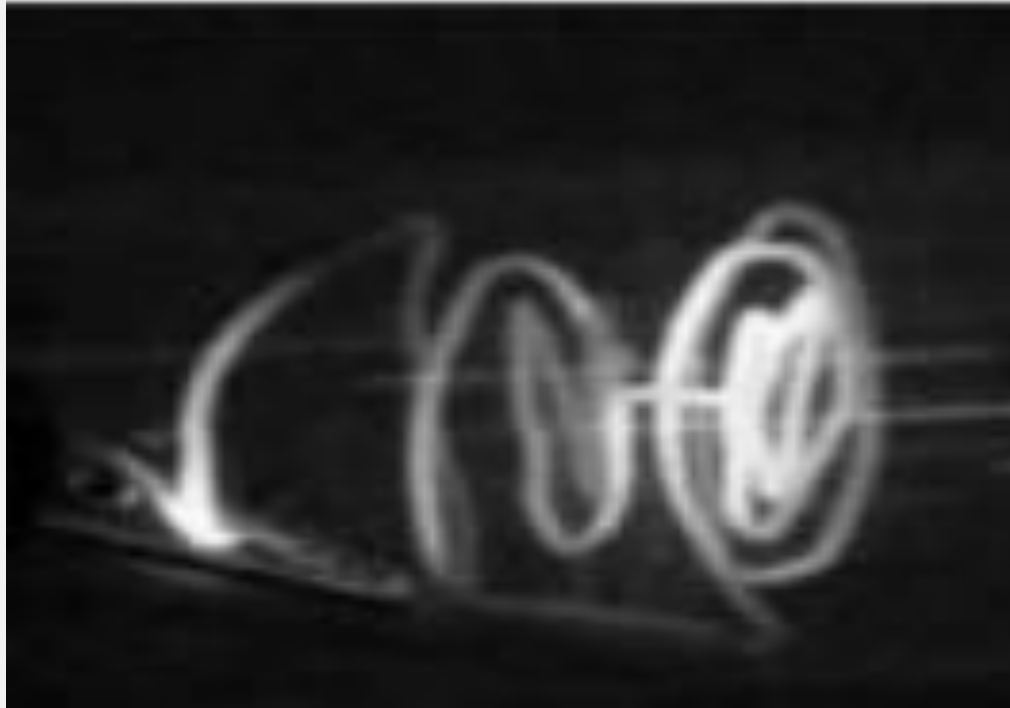
διπλοεστιακή

μεγάλο σπείραμα



μικρό σπείραμα

# σπείραμα



θερμιονική εκπομπή

ρεύμα χαμηλής έντασης  $\rightarrow$  θερμική ενέργεια σε  $e$   $\rightarrow$  εξαγωγή

# σπείραμα

σύρμα από Βολφράμιο με προσθήκη Θορίου

Πλεονεκτήματα Βολφραμίου

- υψηλό σημείο τήξης
- δυνατότητα δημιουργίας σύρματος μικρής διαμέτρου

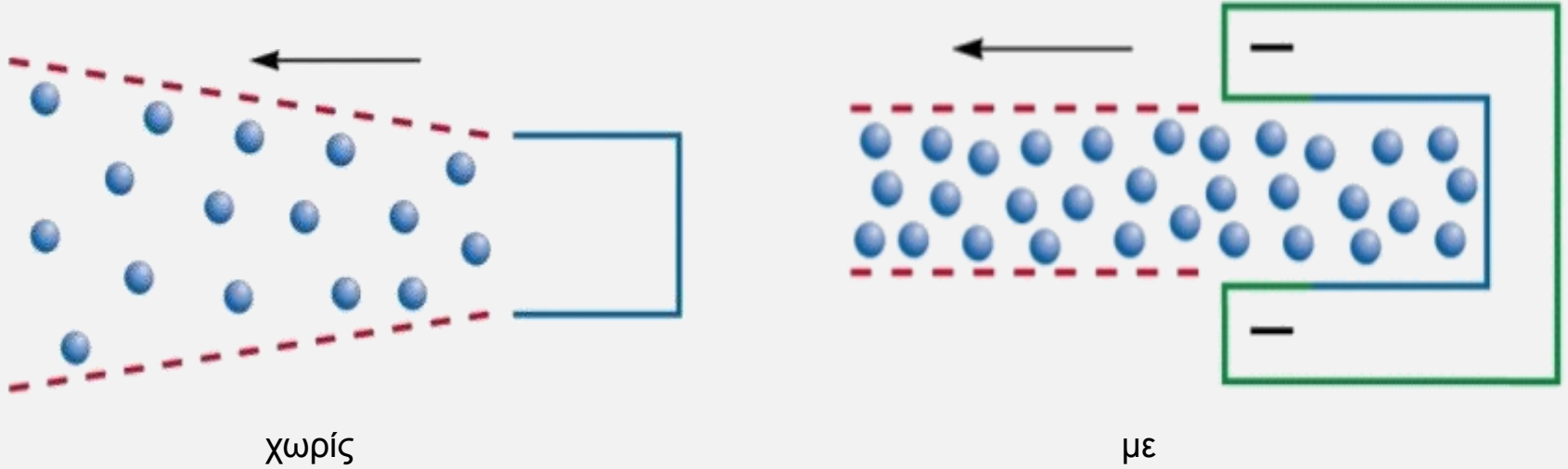
Πλεονεκτήματα Θορίου

- μείωση του ποσοστού εξάχνωσης του βολφραμίου κατά τη θερμονική εκπομπή συμβάλλοντας στην αύξηση της διάρκειας ζωής της λυχνίας

Εξάχνωση

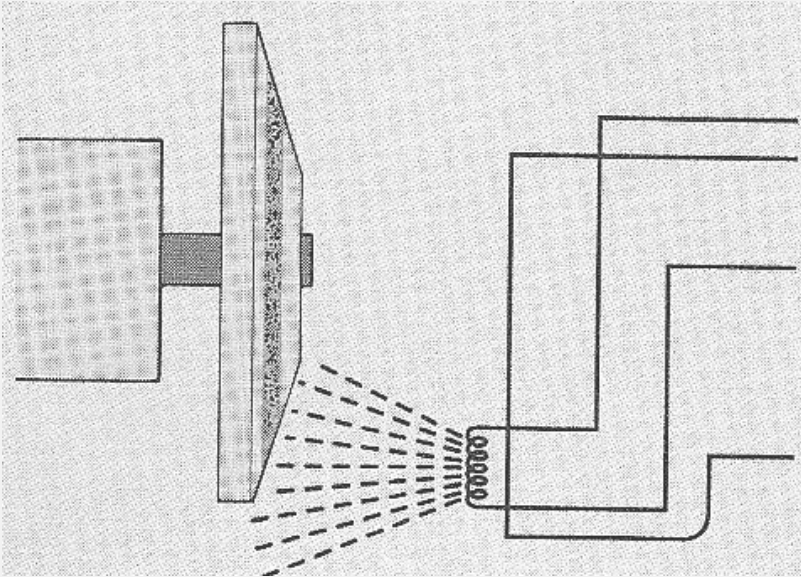
τα μόρια επικάθονται στα τμήματα της λυχνίας μεταβάλλοντας τα χαρακτηριστικά τους (κίτρινο χρώμα στο γυάλινο περίβλημα)

# κύπελλο εστίασης

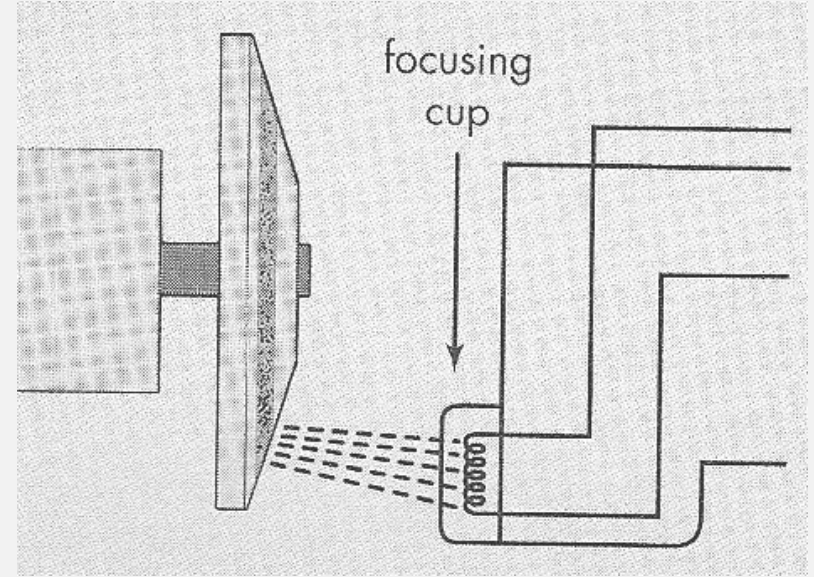


καθορίζει το εύρος της δέσμης των ηλεκτρονίων

# κύπελλο εστίασης



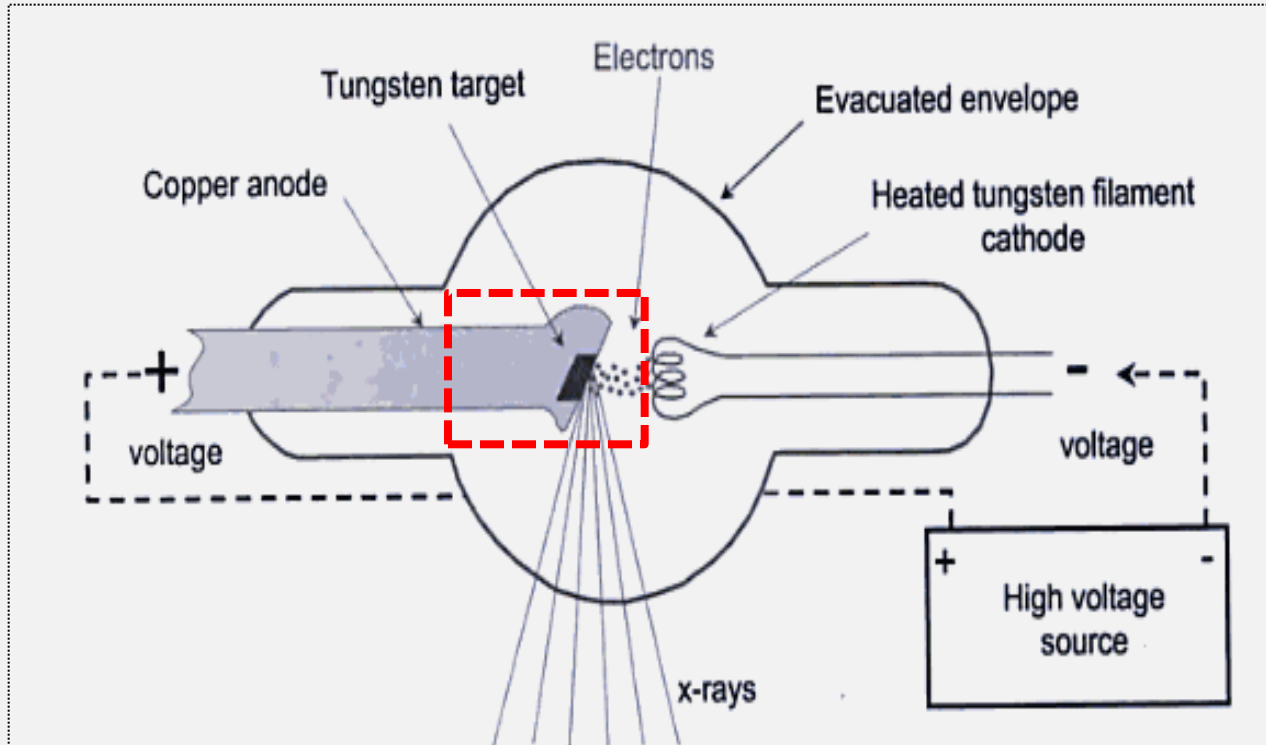
χωρίς



με

απόκλιση α) κάποια δεν προσπίπτουν στην → μειωμένος αριθμός ακτίνων  
β) αυξημένο μέγεθος της εστίας που επιδρά αρνητικά στην ποιότητα της εικόνας

# άνοδος



# άνοδος

Πλεονεκτήματα Βολφραμίου

- υψηλός ατομικός αριθμός ( $Z = 74$ ) → υψηλό ποσοστό παραγωγής ακτίνων Χ
- υψηλό σημείο τήξης

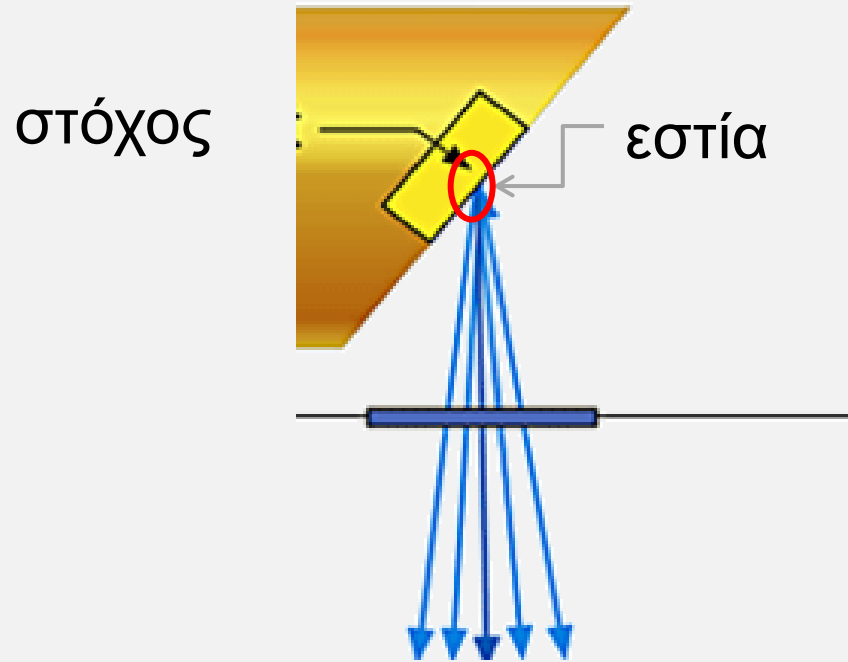
**\* το μεγαλύτερο πρόβλημα είναι η ανάπτυξη υψηλών ποσοστών θερμότητας**

Πλεονεκτήματα υπόλοιπων υλικών

- αντοχή
- μείωση βάρους
- απαγωγή θερμότητας στο περιβάλλον
- περιορισμός επαγωγής θερμότητας σε άλλα τμήματα

**\* στο σύστημα μαστογραφίας χρησιμοποιείται Μολυβδένιο ή Ρόδιο (παρέχουν κατάλληλης ενέργειας δέσμη φωτονίων)**

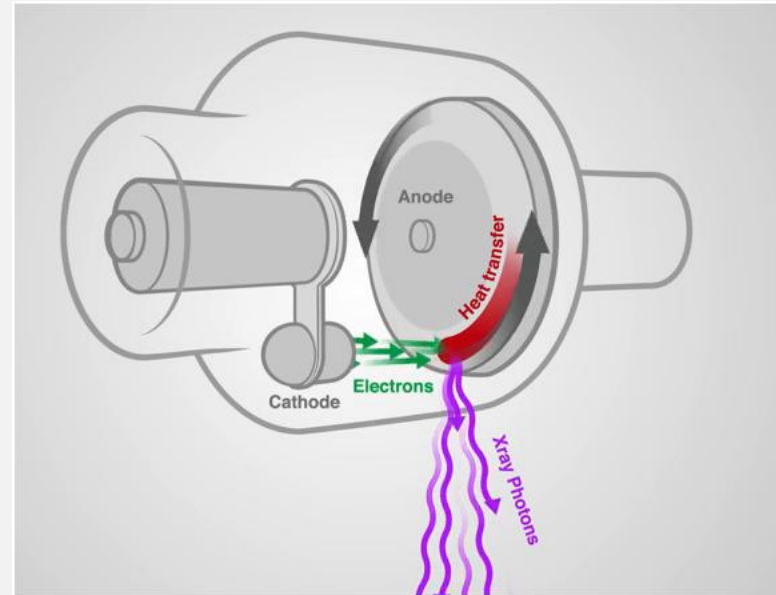
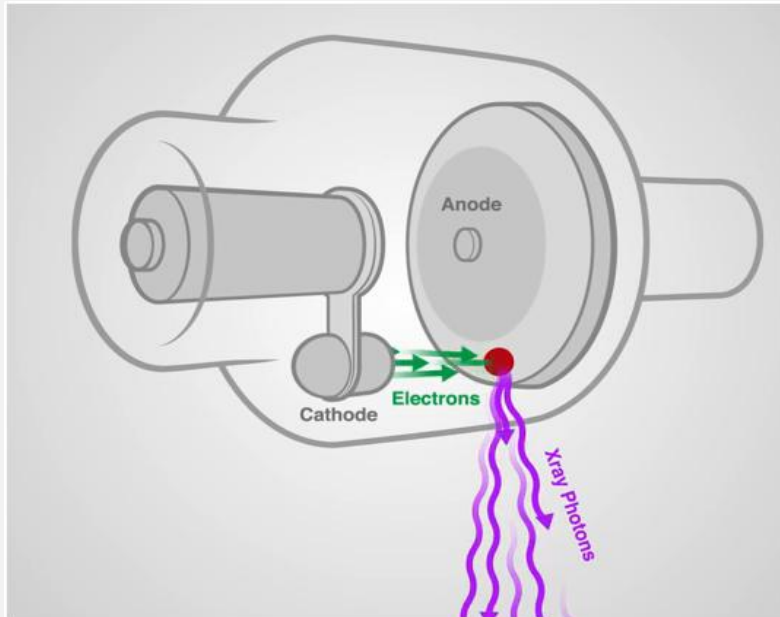
# στόχος - εστία



στόχος: περιοχή ανόδου που δέχεται καθοδικά ηλεκτρόνια

εστία: το «σημείο» του στόχου που γίνεται η παραγωγή των ακτίνων

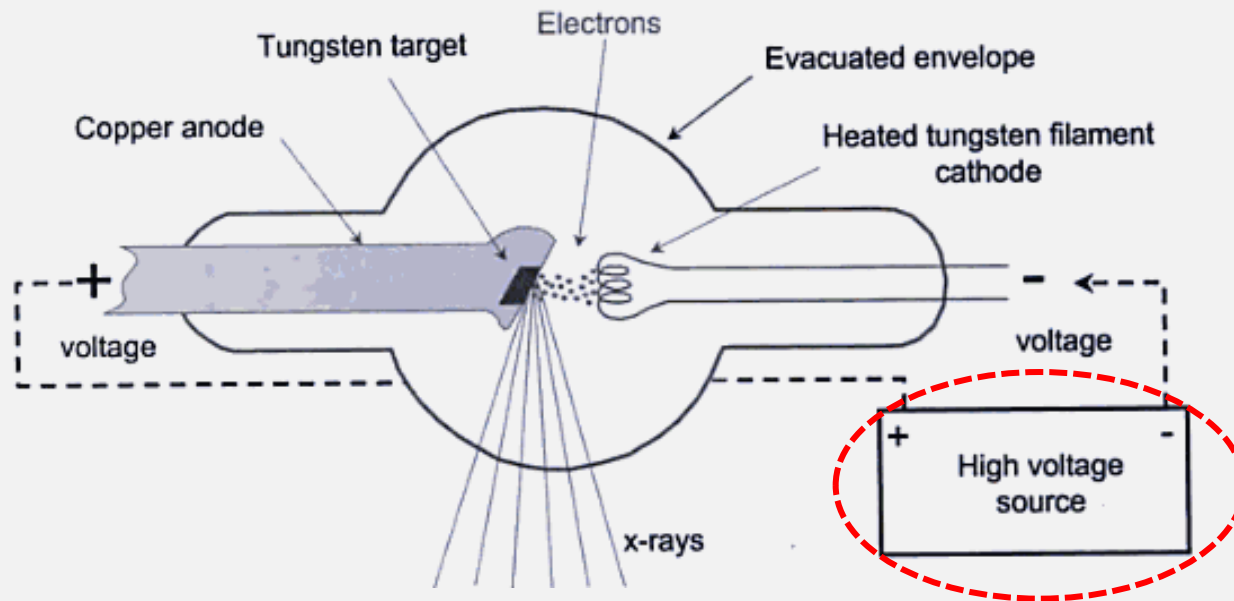
# πλεονέκτημα περιστρεφόμενης ανόδου



ακίνητη: το ίδιο σημείο βομβαρδίζεται πάντα → ανάπτυξη ποσού θερμότητας στατικά

περιστρεφόμενη: διαφορετικό σημείο βομβαρδίζεται κάθε στιγμή → ανάπτυξη ίδιου ποσού θερμότητας σε μεγαλύτερη επιφάνεια → αντοχή + εύκολη απαγωγή

# γεννήτρια υψηλής τάσης



- μετατρέπει την χαμηλή τάση δικτύου (V) σε υψηλή τάση (kV) για κατάλληλη επιτάχυνση των καθοδικών  $e$
- όχι συνεχής  $\rightarrow$  όχι όλα τα  $e$  την ίδια κινητική ενέργεια

# Θερμότητα

Θερμότητα:

$$HU = a \times kVp \times mA \times sec$$

a = συντελεστής γεννήτριας

εξαρτάται από γεννήτρια, παράγοντες έκθεσης

$$mAs = mA \times sec$$

• για **mAs = const**: ρεύμα – χρόνος αντιστρόφως ανάλογα

- $6mAs = 6mA \times 1s$

- $6mAs = 1mA \times 6s$

- $6mAs = 3mA \times 2s$

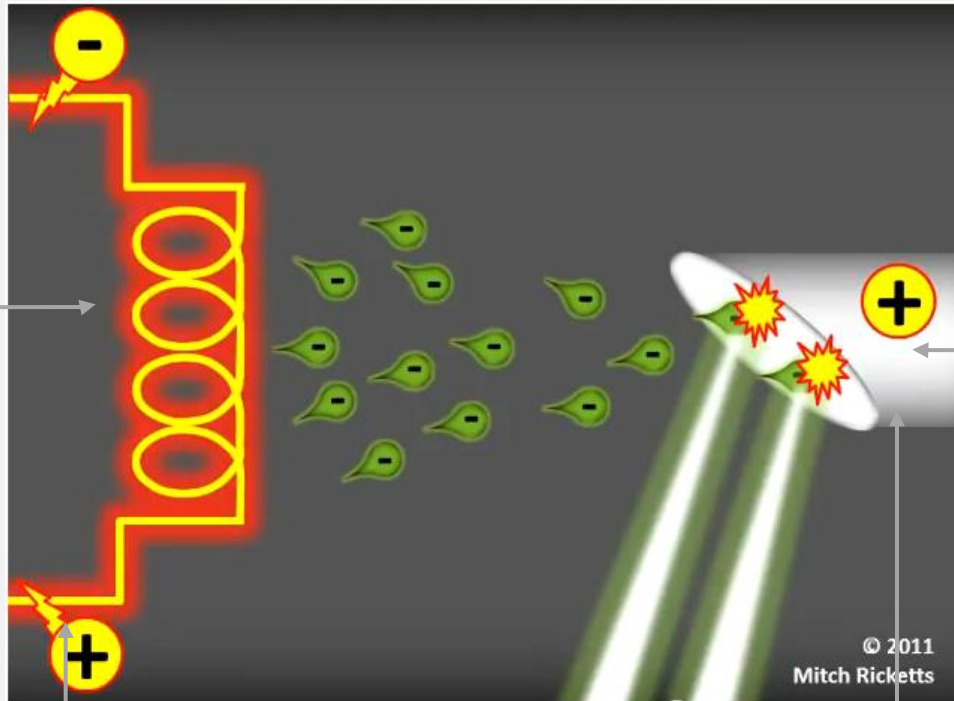
- $6mAs = 2mA \times 3s$

Κ.λ.π.

# Ακτίνες Χ

παραγωγή – χαρακτηριστικά χρήσιμης δέσμης

# παραγωγή

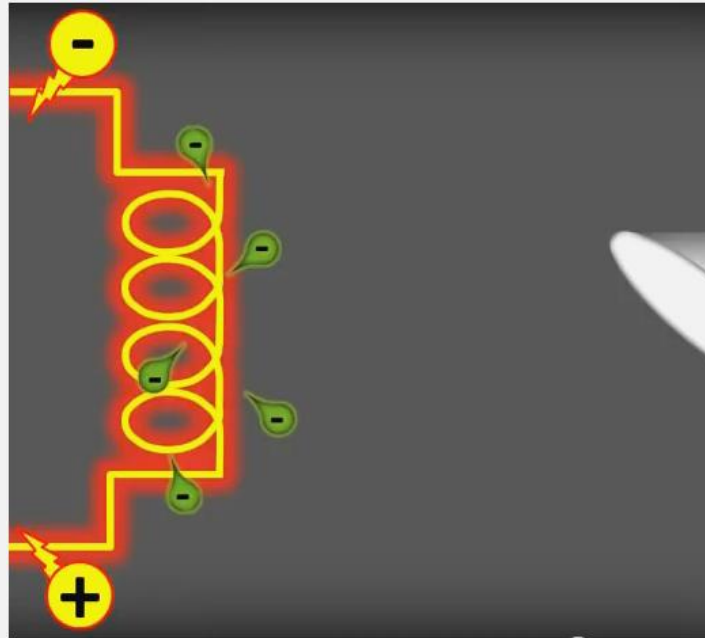


1. εφαρμογή χαμηλής τάσης στο σπείραμα – παραγωγή ηλεκτρονίων (θερμιονική εκπομπή)

2. εφαρμογή υψηλής τάσης μεταξύ καθόδου – ανόδου για επιτάχυνση των ηλεκτρονίων

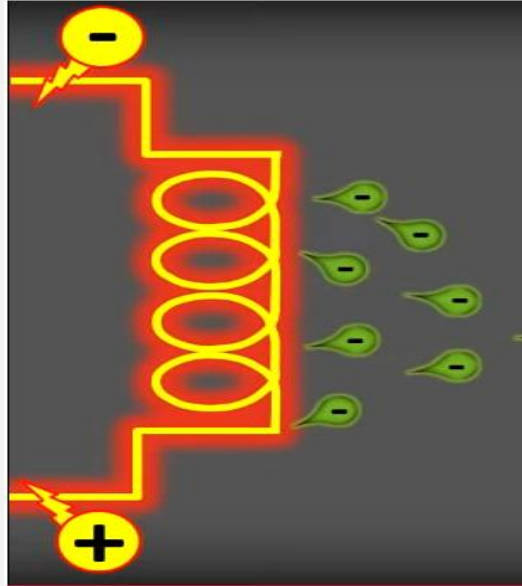
3. αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων με υλικό ανόδου – παραγωγή φωτονίων

# 1. Θερμιονική εκπομπή



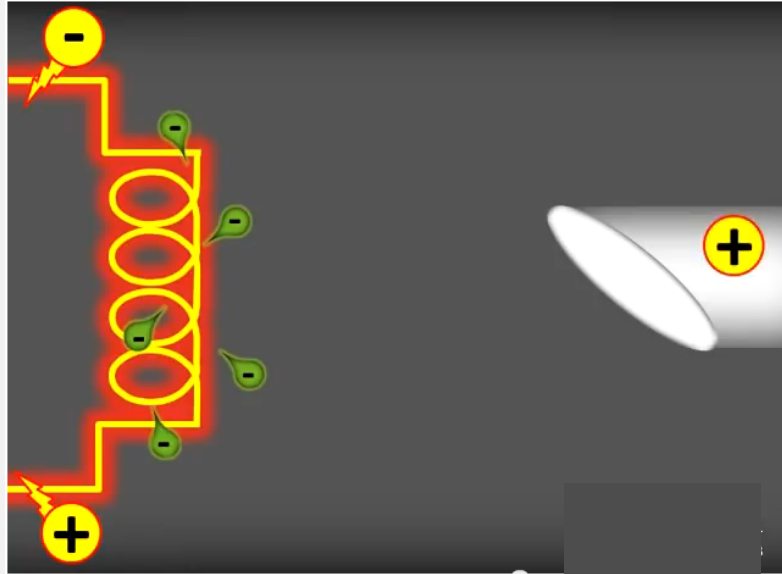
- παραγωγή **καθοδικών ηλεκτρονίων**
- εφαρμογή χαμηλής τάσης στο σπείραμα → ρεύμα → θέρμανση → ηλεκτρόνια εξωτερικής τροχιάς (χαμηλής ενέργειας σύνδεσης) αποκτούν ικανή κινητική ενέργεια για εξαγωγή

# φορτίο χώρου



- τα εξερχόμενα ηλεκτρόνια παραμένουν ως νέφος στην περιοχή του σπειράματος  
→ παρεμπόδιση εξαγωγής νέων ακόμα και αν αυξηθεί η θερμοκρασία του σπειράματος

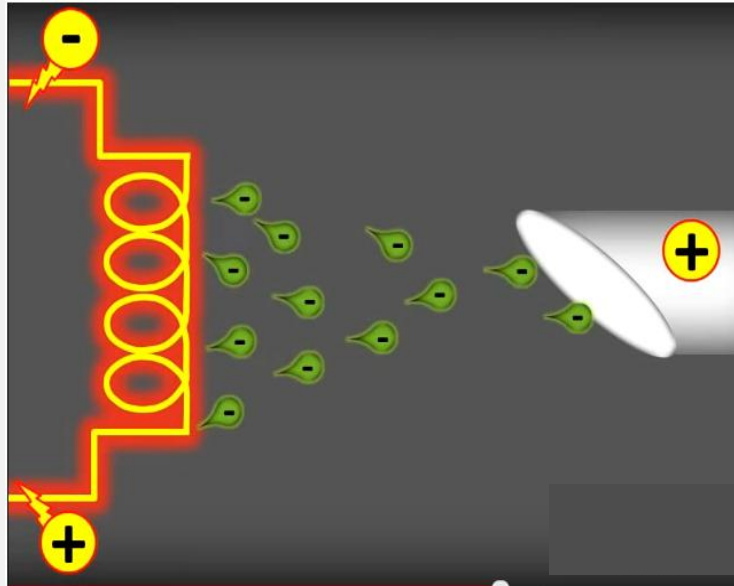
## 2. υψηλή τάση



$$K_e = q V$$

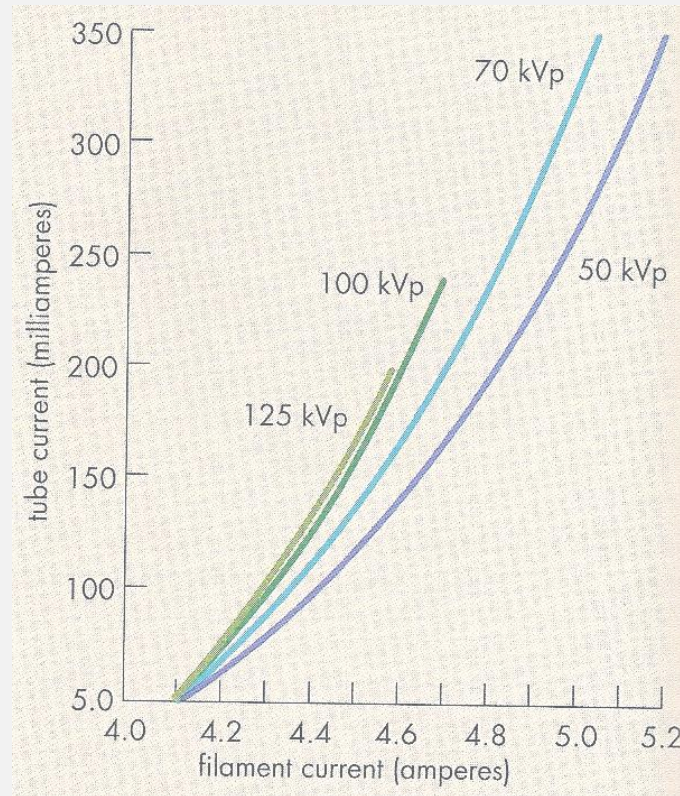
- εφαρμογή υψηλής τάσης μεταξύ καθόδου – ανόδου → επιτάχυνση ηλεκτρονίων (κινητική ενέργεια) → μετακίνησή τους προσανατολισμένα προς άνοδο
- **τάση λυχνίας (kV)**
- **η κινητική ενέργεια θα καθορίσει την ποσότητα αλλά και τη μέγιστη ενέργεια των φωτονίων**

# ρεύμα λυχνίας



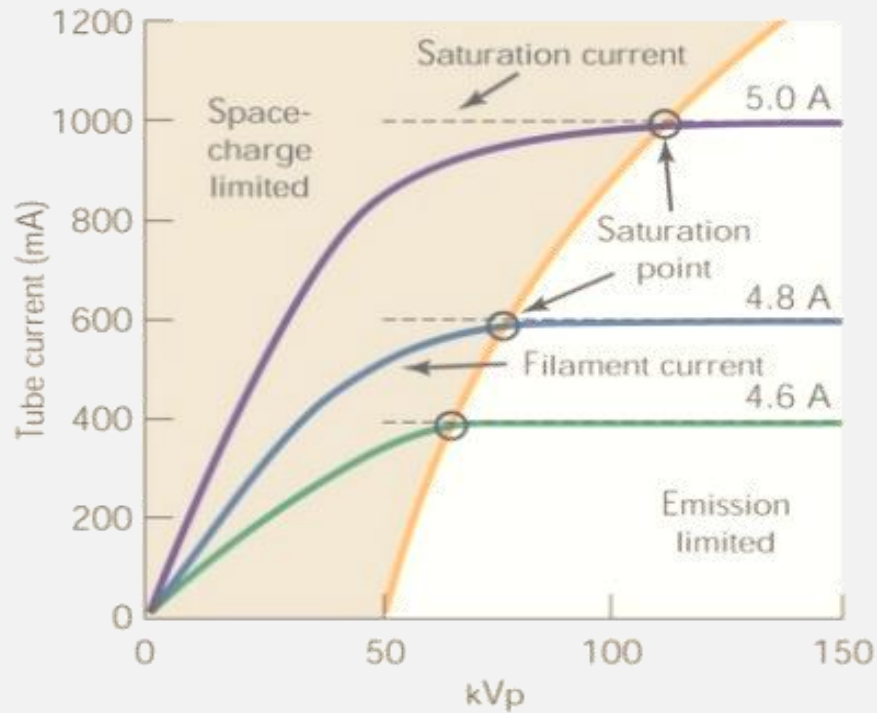
- ρεύμα = προσανατολισμένη κίνηση φορτίων
- τα κινούμενα ηλεκτρόνια αποτελούν το **ρεύμα της λυχνίας (mA)**
- εξαρτάται από τον αριθμό ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από σπείραμα μέσω θερμιονικής εκπομπής

# ρεύμα λυχνίας



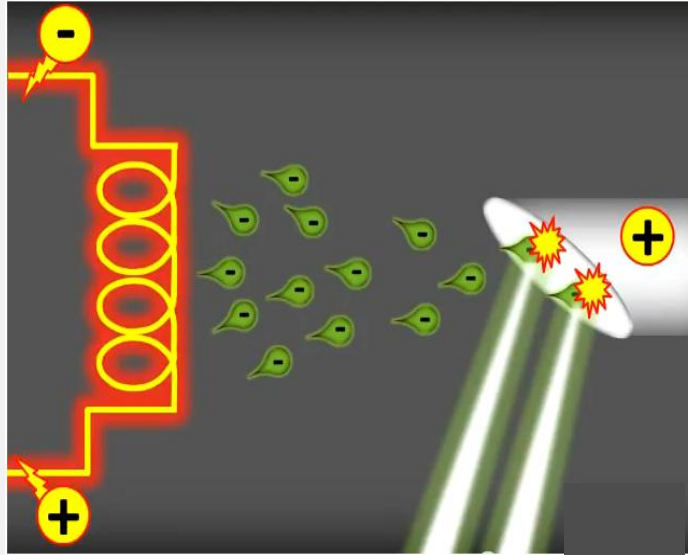
- συσχετίζεται με αριθμό των ηλεκτρονίων που παράγει το σπείραμα και άρα με το ρεύμα που διαρρέει το σπείραμα
- για συγκεκριμένη τάση λυχνίας αυξάνεται με την αύξηση του ρεύματος του σπειράματος

# ρεύμα λυχνίας



- συσχετίζεται με την τάση λυχνίας αφού διασπά το νέφος
- για συγκεκριμένο ρεύμα σπειράματος αυξάνεται με την αύξηση της τάση λυχνίας μέχρι **την τάση κορεσμού**, ενώ παραμένει σταθερό για οποιαδήποτε περαιτέρω αύξηση αφού έχουν χρησιμοποιηθεί όλα τα ηλεκτρόνια

### 3. αλληλεπίδραση με υλικό ανόδου



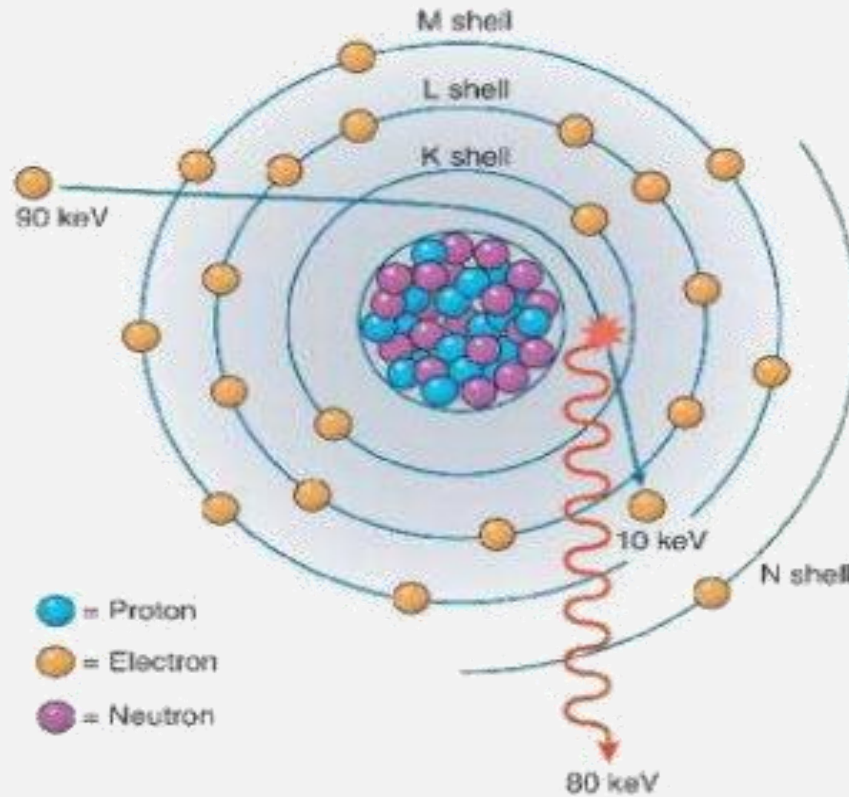
μετατροπή κινητικής ενέργειας ηλεκτρονίων σε ενέργεια φωτονίων

**\* μόνο το 1% μετατρέπεται σε ακτίνες X το υπόλοιπο 99% μετατρέπεται σε θερμότητα**

# αλληλεπίδραση καθοδικών $e^-$ – υλικό ανόδου

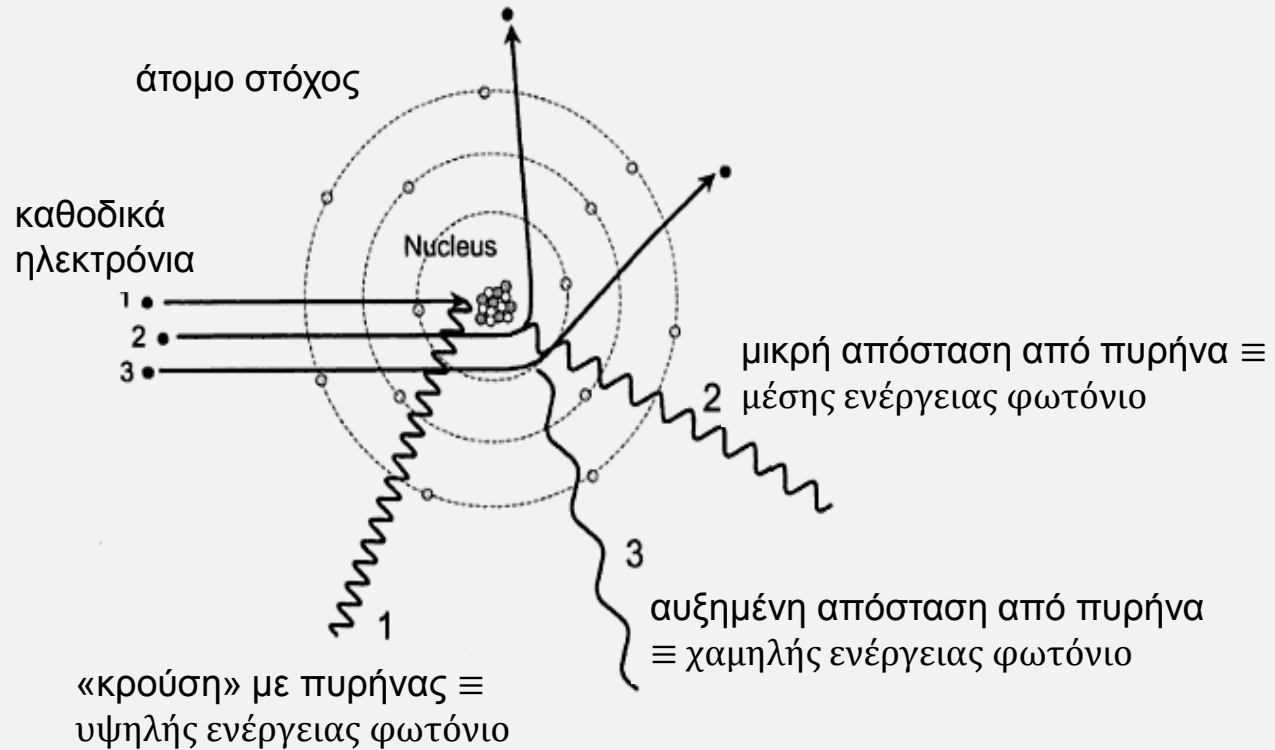
ΕΙΔΗ	
με πυρήνα ατόμου	με τροχιακά ηλεκτρόνια εσωτερικών τροχιών
<b>ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ ΠΕΔΗΣΗΣ</b> (αποτελεί το μεγαλύτερο ποσοστό φωτονίων της δέσμης)	<b>ΧΑΡΑΚΤΗΡΙΣΤΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ</b>

# ακτινοβολία πέδησης



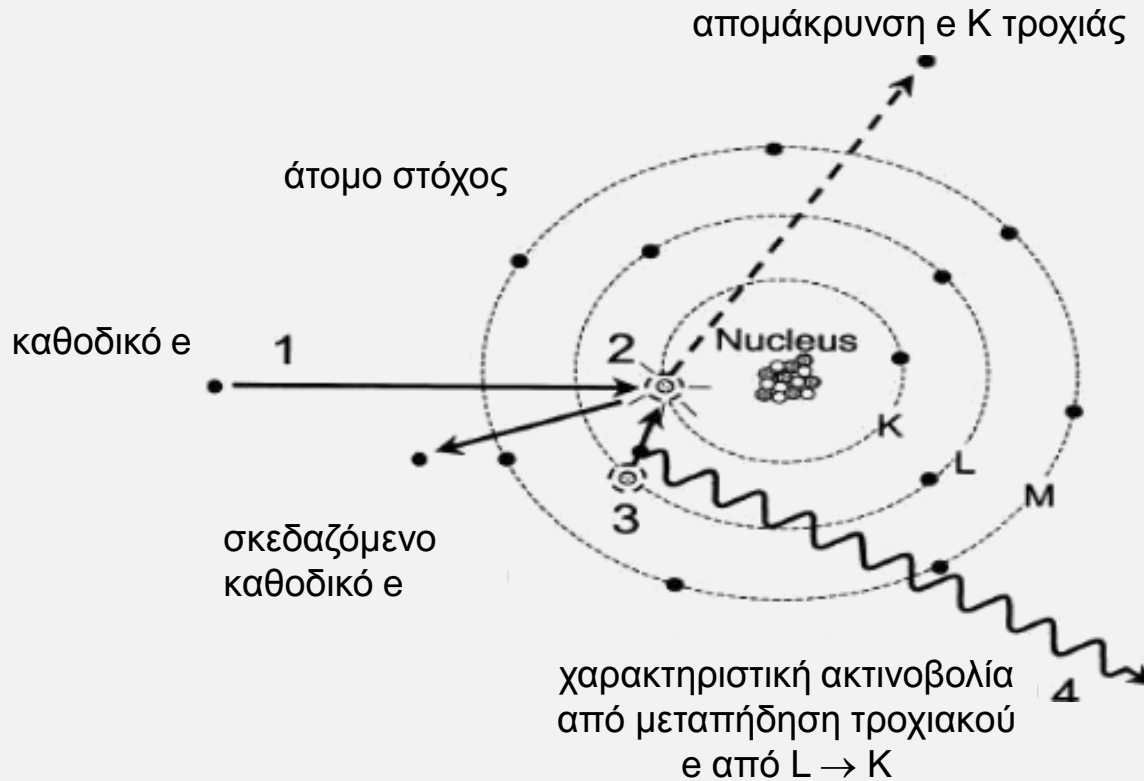
- καθοδικό εδιερχόμενο από το κενό χώρο έλκεται από πυρήνα → αποκλίνει από αρχική πορεία → επιβραδύνεται
- η απώλεια ενέργειας μεταφέρεται στο περιβάλλον με τη μορφή φωτονίου (φωτόνιο πέδησης)

# ακτινοβολία πέδησης



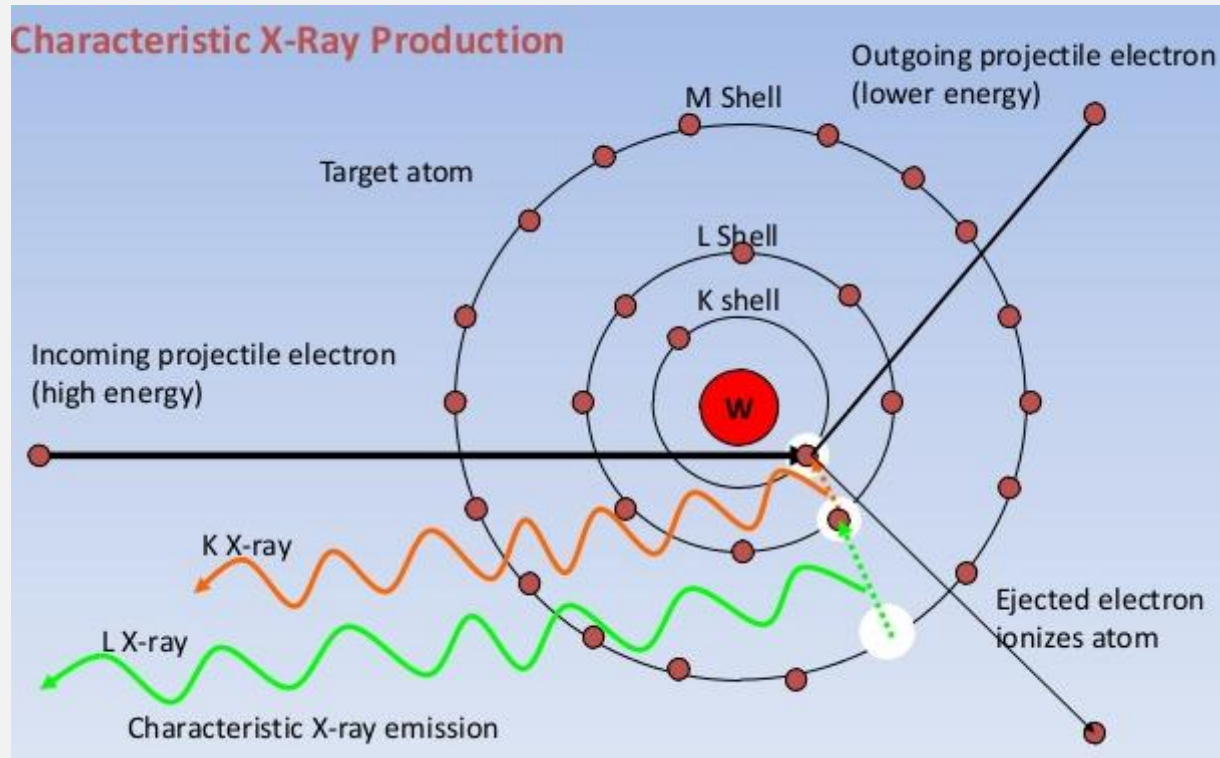
τα φωτόνια πέδησης εμφανίζουν ενέργεια που κυμαίνεται από  $0 \rightarrow K_{e,max} \cong kV_p$   
(συνεχές φάσμα)

# χαρακτηριστική ακτινοβολία



- καθοδικό e αλληλεπιδρά με τροχιακό e εσωτερικής τροχιάς → απόδοση ενέργειάς του ή τμήμα αυτής στο τροχιακό ηλεκτρόνιο
- πρέπει  $K_{\text{καθ.}e} \geq E_{\text{συν. τρ}}$
- το τροχιακό e εγκαταλείπει την τροχιά, δημιουργώντας οπή (ασταθής κατάσταση)
- e εξωτερικής τροχιάς μεταπηδά για κάλυψη του κενού → εκπομπή ενέργειας ίση με  $\Delta E_{\text{στάθμεων}}$ , μεταφέρεται στο περιβάλλον με τη μορφή φωτονίου

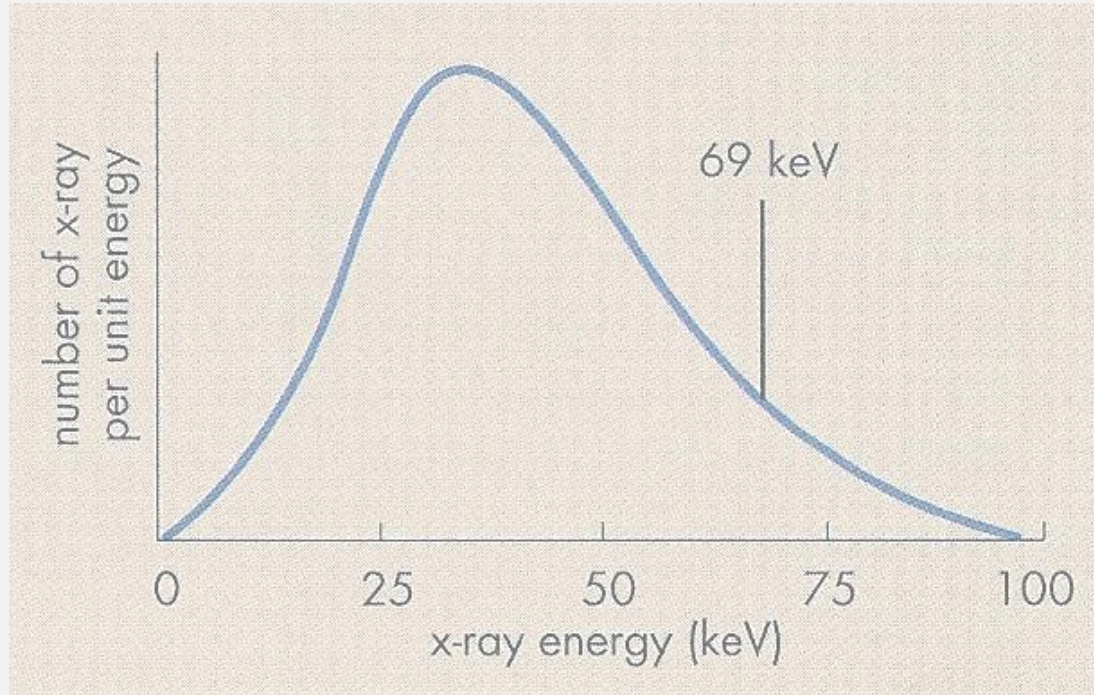
# χαρακτηριστική ακτινοβολία



- το νέο κενό συμπληρώνεται από εξώτερα ηλεκτρόνια → νέα φωτόνια χαμηλής ενέργειας
- Εφωτονίου =  $\Delta E$  στάθμεων → φωτόνια εμφανίζουν συγκεκριμένη ενέργεια (φωτόνια χαρακτηριστικής ακτινοβολίας) χαρακτηριστική του υλικού της ανόδου
- αλληλεπίδραση με τροχιακά ηλεκτρόνια K τροχιάς → υψηλής ενέργειας φωτόνια (σημαντική διαφορά ενεργειακών τροχιών)

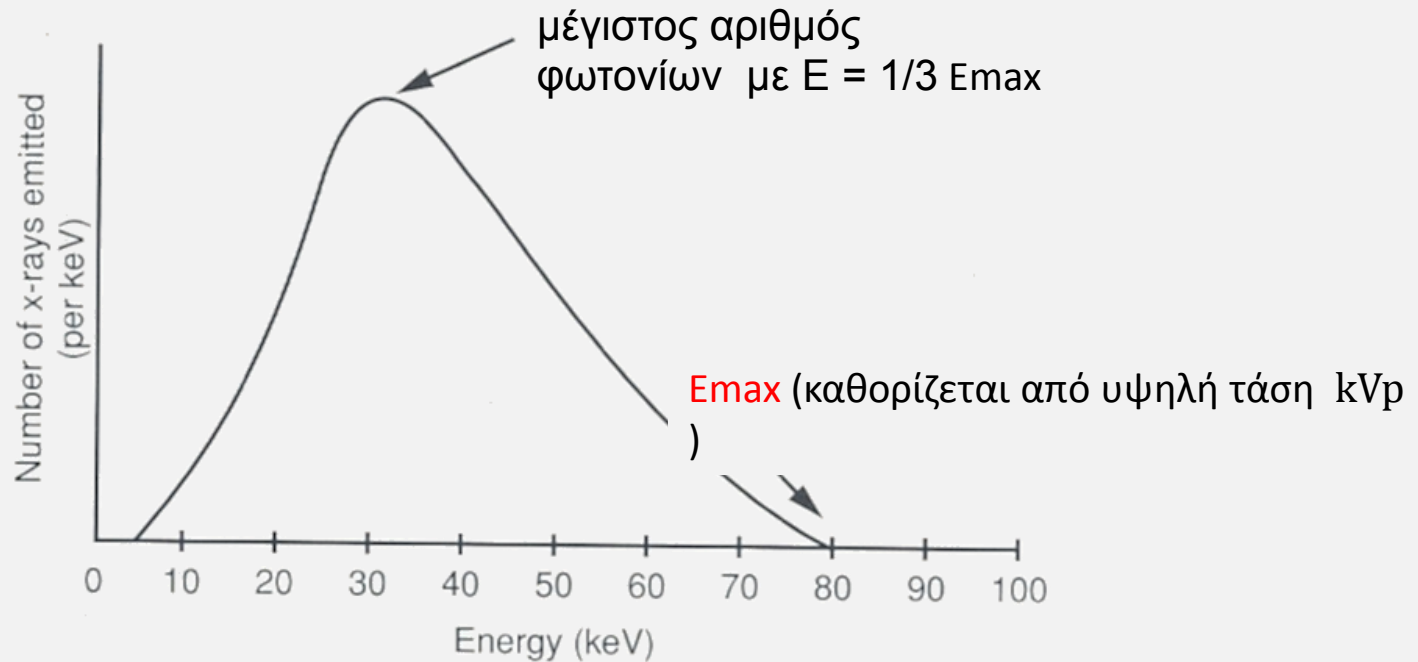
# φάσμα ακτίνων Χ

κατανομή αριθμού φωτονίων Χ συναρτήσει της ενέργειάς τους



- σύνθετο: συνεχές – ακτινοβολία πέδησης,  
γραμμικό – χαρακτηριστική ακτινοβολία

# συνεχές φάσμα



$$K_e = q V$$

→

$$E_{max} \text{ (keV)} \sim V_{max} \text{ (kVp)}$$

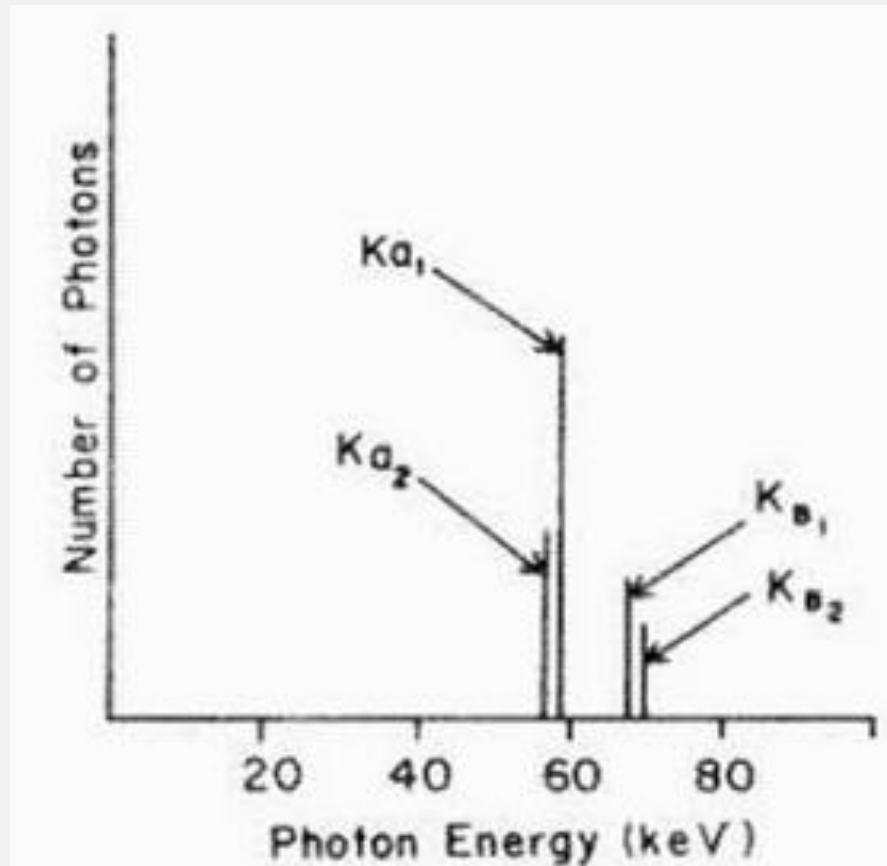
$$E = h c / \lambda$$

→

$$E_{max} \rightarrow \lambda_{min}$$

Θεωρητικά η ελάχιστη ενέργεια είναι 0 αλλά πρακτικά κυμαίνεται από 15 – 20keV λόγω διήθησης δέσμης

# γραμμικό φάσμα



$$E = \Delta E_{\text{τροχιών}}$$

επειδή απαιτείται  $K_{\text{καθ.ε}} \geq E_{\text{συν. τρ}}$  για το βολφράμιο παρατηρείται για τάσεις  $> 69\text{kVp}$

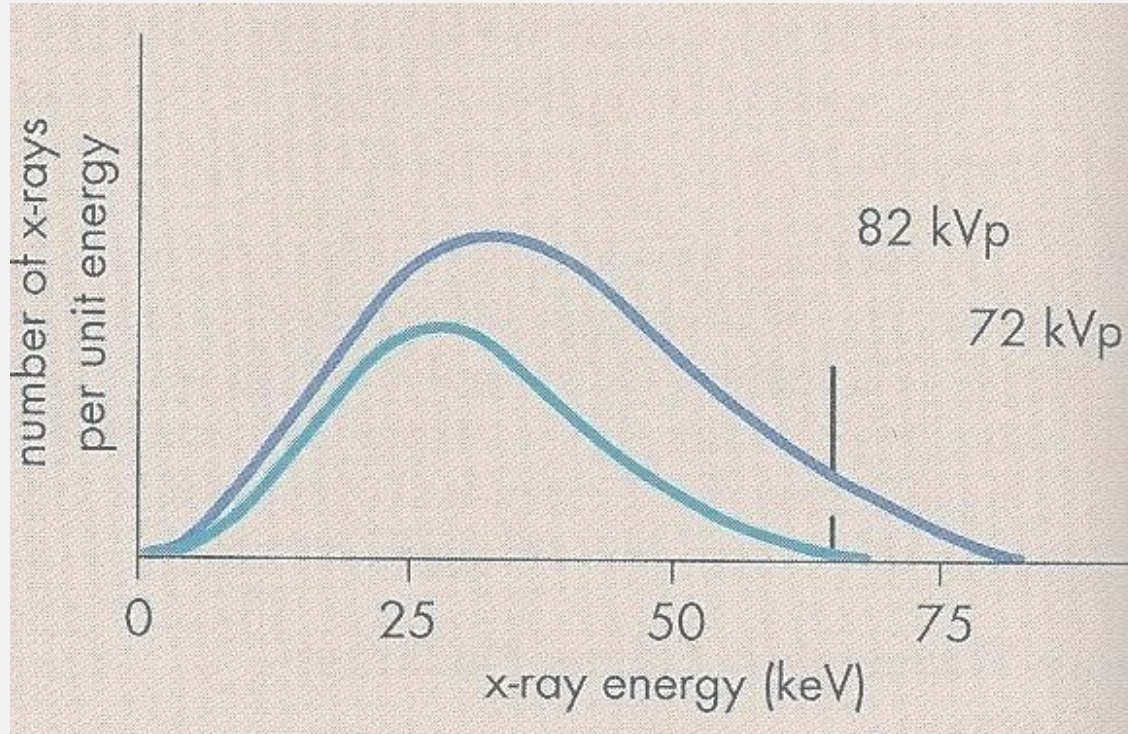
## χαρακτηριστικά χρήσιμης δέσμης

παράγοντες που τα επηρεάζουν	Ποιοτικά διεισδυτικότητα φωτονίων (ενέργεια)	Ποσοτικά αριθμός φωτονίων
πρωταρχικοί (παράγοντες έκθεσης)	kVp – τάση λυχνίας	kVp – τάση λυχνίας mA – ρεύμα λυχνίας sec – χρόνος έκθεσης mAs – φορτίο
δευτερογενείς	διήθηση	είδος γεννήτριας διήθηση περιορισμός πεδίου απόσταση από πηγή

\* η απόσταση επηρεάζει τον αριθμό των φωτονίων που εκμεταλλευόμαστε όχι τον αριθμό των φωτονίων που περιέχει η δέσμη

# kVp

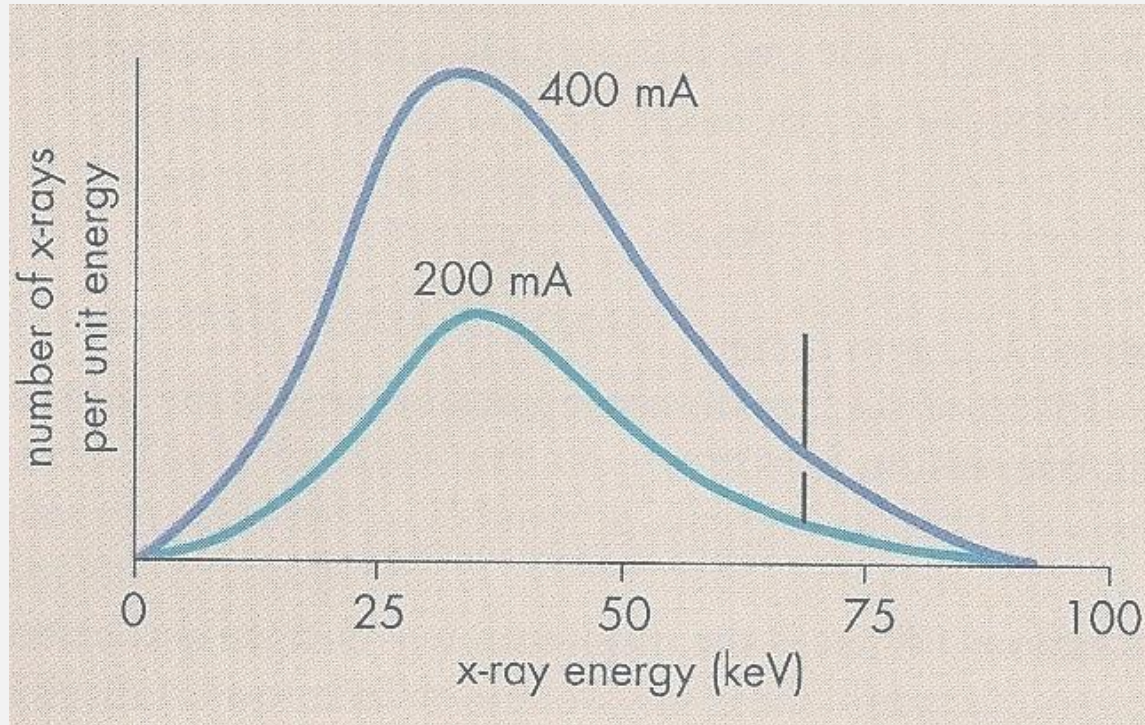
επιδρά σε ποσότητα αλλά και σε ποιότητα



αύξηση kVp → αύξηση ποιότητας – ενέργειας (όχι χαρακτηριστικής) αλλά και αύξηση της ποσότητας – αριθμού φωτονίων

# mAs

επιδρά σε ποσότητα



**αύξηση mAs → αύξηση της ποσότητας – αριθμού φωτονίων**

# αρχή γραμμικής εστίας

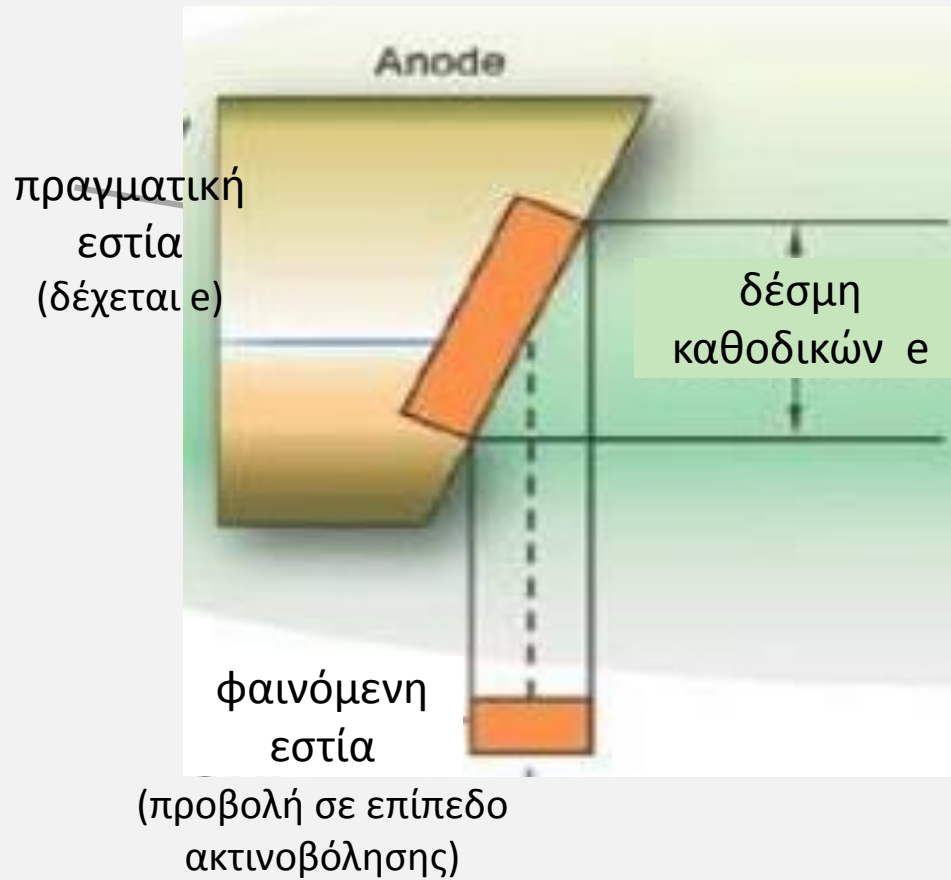
εστία:

πρέπει να ικανοποιεί δυο αντίθετες προϋποθέσεις

α) να είναι η μεγαλύτερη δυνατή → ανάπτυξη θερμότητας σε μεγάλη επιφάνεια → ευκολότερη απαγωγή κ' μειωμένη αρνητική επίδραση

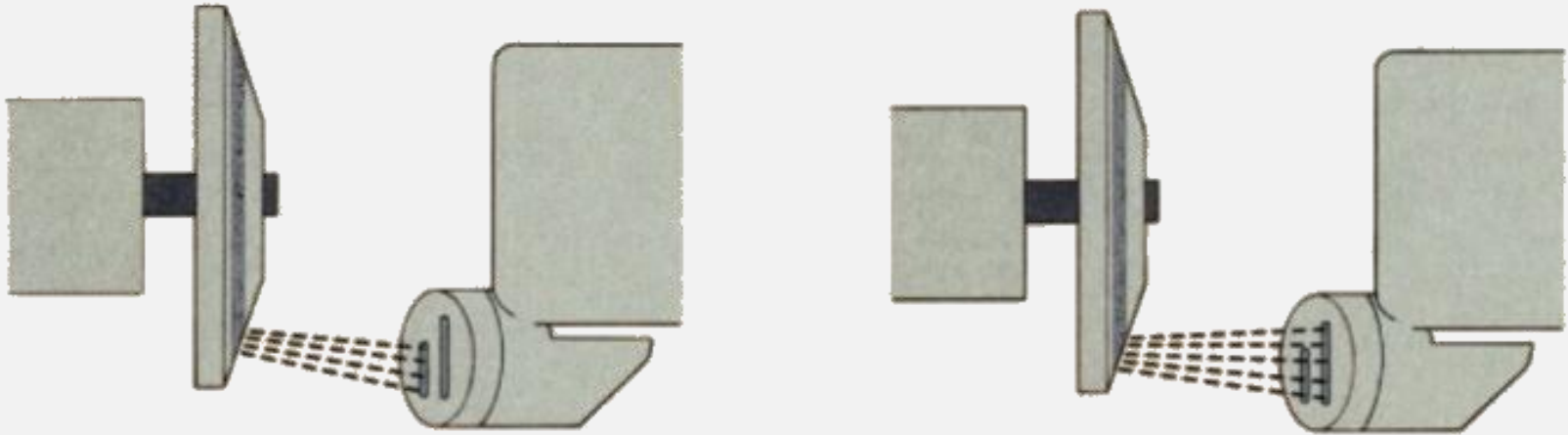
β) να είναι η μικρότερη δυνατή - σημειακή → αυξημένη σαφήνεια εικόνας (χωρική διακριτική ικανότητα – spatial resolution)

# κλίση ανόδου



- τα περισσότερα φωτόνια να κινούνται προς το παράθυρο εξόδου
- **πραγματική εστία: μεγάλη**
- **φαινόμενη εστία: μικρή**

# μέγεθος πραγματικής εστίας



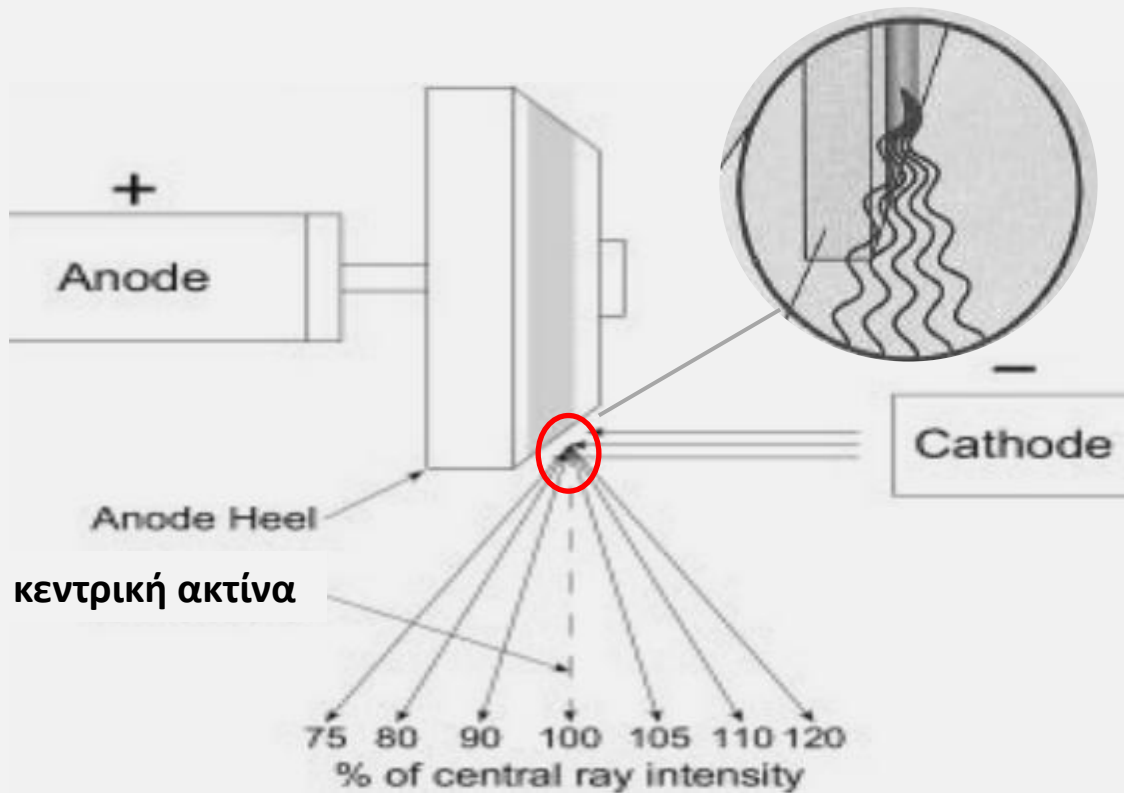
το μέγεθος της εστίας καθορίζεται κατά την επιλογή του σπειράματος

μικρό σπείραμα  $\rightarrow$  μικρό εύρος δέσμης  $e \rightarrow$  μικρή εστία (σαφήνεια)

μεγάλο σπείραμα  $\rightarrow$  μεγάλο εύρος δέσμης  $e \rightarrow$  μεγάλη εστία

# φαινόμενο πτέρνας

οφείλεται στην κλίση της ανόδου



κεντρική ακτίνα

ανομοιομορφία έντασης δέσμης (45%)

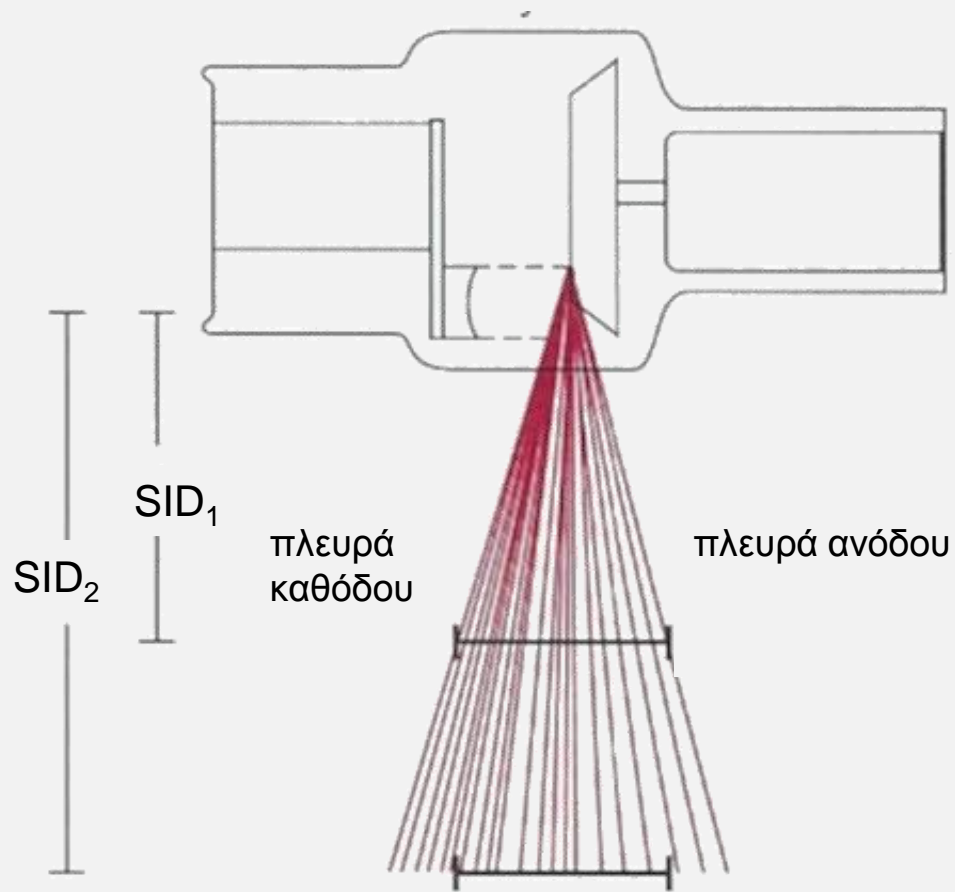
μεγαλύτερη ένταση προς την πλευρά της καθόδου - κενό ,μικρότερη προς την πλευρά της ανόδου – αλληλεπίδραση με υλικό

# χρήση φαινομένου πτέρνας



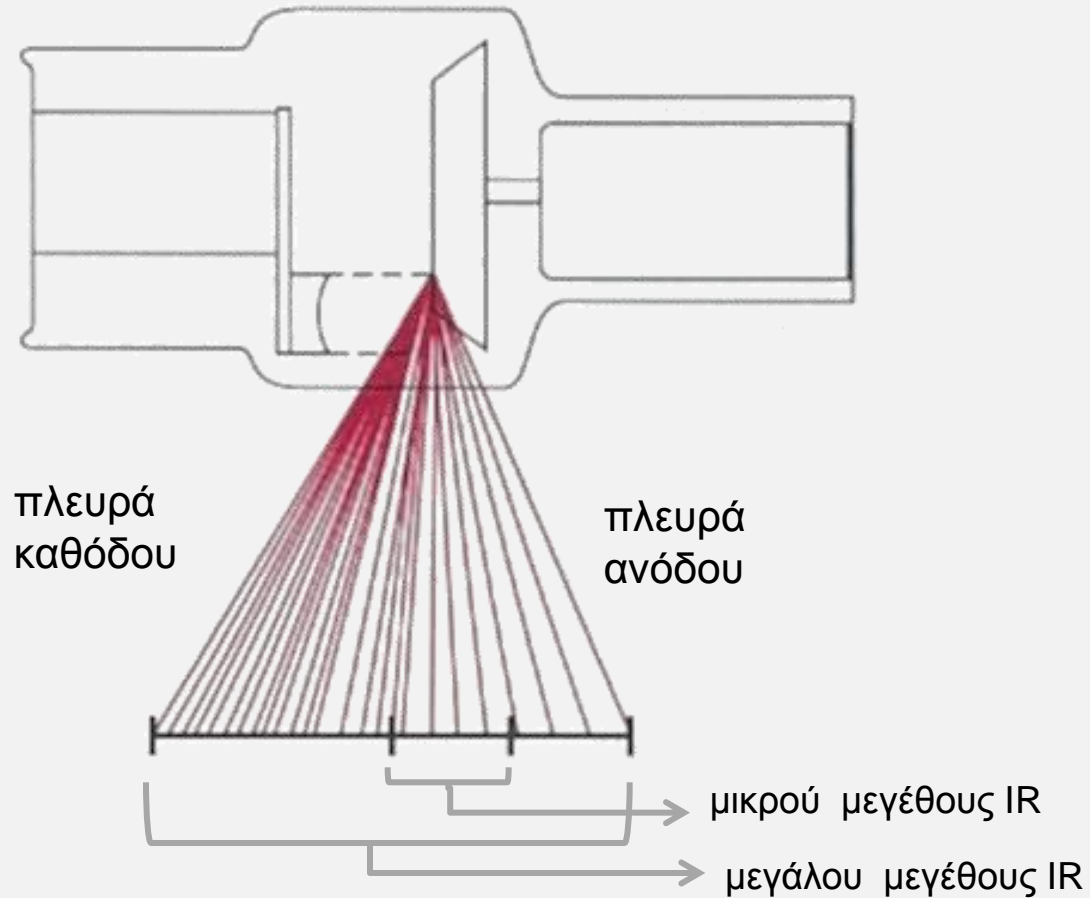
απεικόνιση θεμάτων με διαφορά πάχους κατά μήκους τους, τοποθετώντας το παχύτερο προς την πλευρά της καθόδου

# Ε.Α. (SID) - φαινόμενο πτέρνας



λόγω αποκλίνουσας δέσμης : αύξηση απόστασης → μείωση επίδρασης φαινομένου στην εικόνα

# μέγεθος IR - φαινόμενο πτέρνας



λόγω αποκλίνουσας δέσμης : αύξηση μεγέθους ανιχνευτή εικόνας (IR) → αύξηση επίδρασης φαινομένου στην εικόνα

# ένταση ακτινοβολίας (I)

ενέργεια φωτονίων που διέρχονται ανά μονάδα επιφάνειας - χρόνου

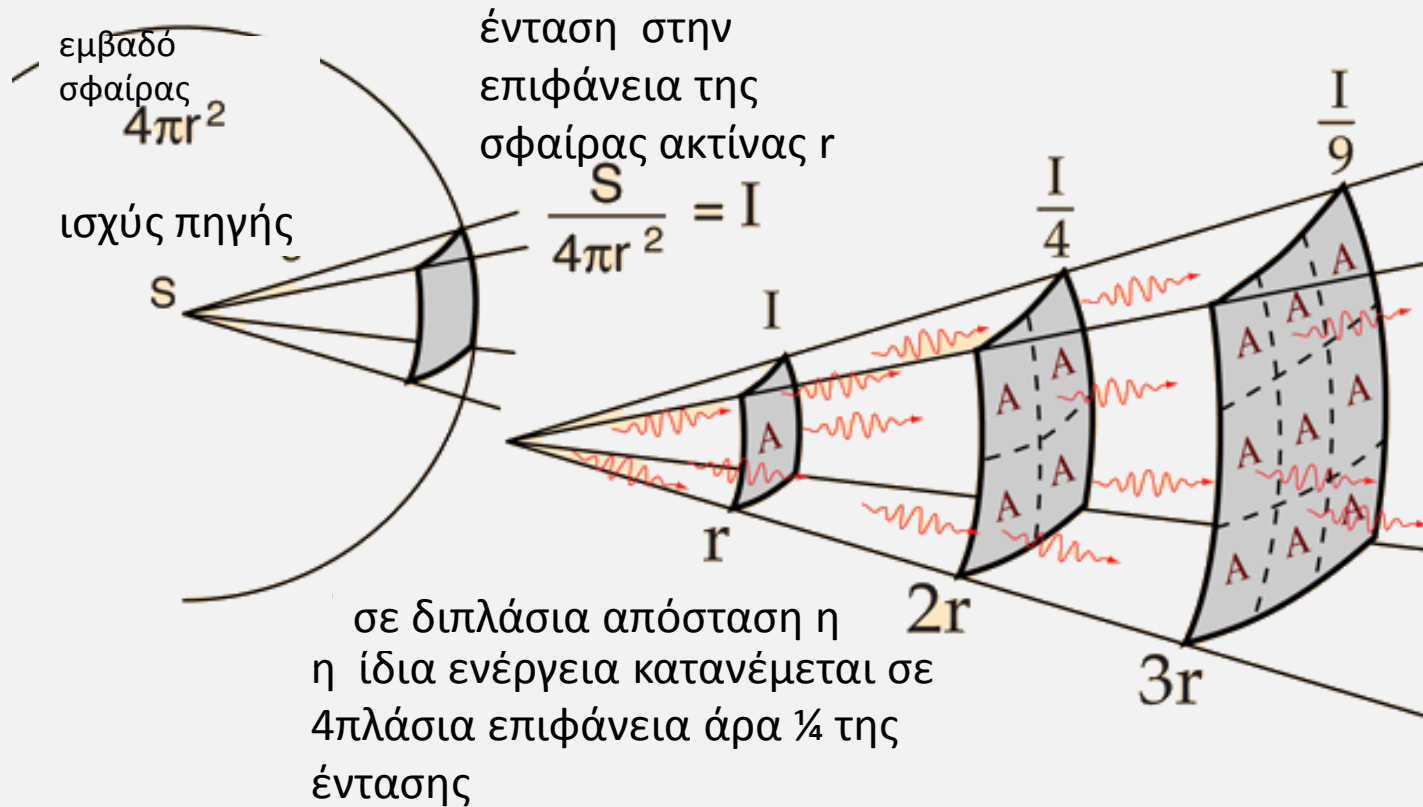
$$I = \frac{E_{o\lambda}}{S t} \quad P = \frac{E_{o\lambda}}{t} \quad \rightarrow \quad I = \frac{P}{S} \quad \begin{matrix} S = 4\pi d^2 \\ \rightarrow \\ P = \text{const} \end{matrix} \quad I \sim \frac{1}{d^2}$$

$$E_{o\lambda} = N E_1 \quad E_1 = \text{const} \quad \rightarrow \quad I \sim N$$

$$I \sim \frac{(\text{kVp})^2 \text{ mAs}}{d^2}$$

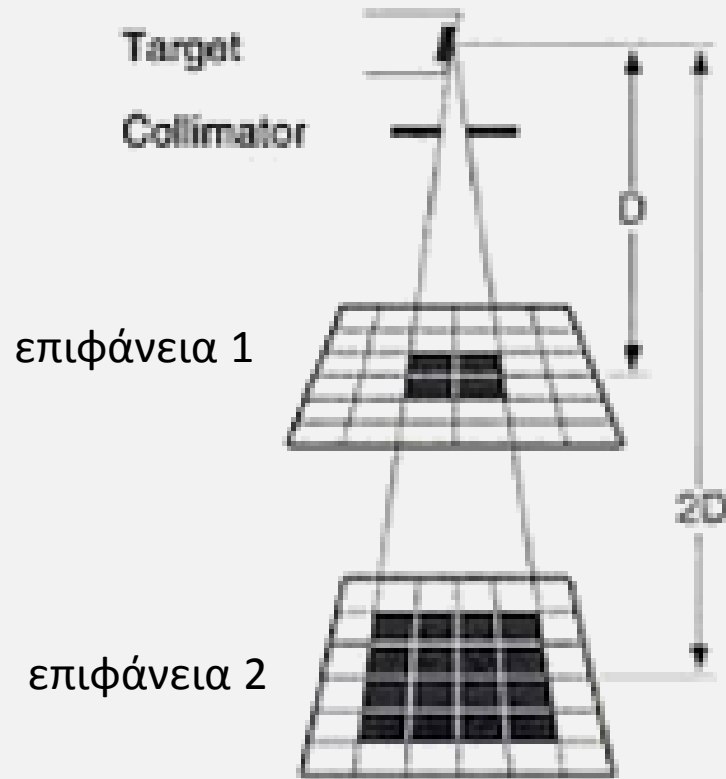
- ένταση αντιστρόφως ανάλογη του τετραγώνου της απόστασης από την πηγή
- ένταση ανάλογη του αριθμού των φωτονίων
- οφείλεται στην αποκλίνουσα πορεία της δέσμης

# νόμος αντιστρόφου τετραγώνου



$$\frac{I_1}{I_2} = \left(\frac{d_2}{d_1}\right)^2$$

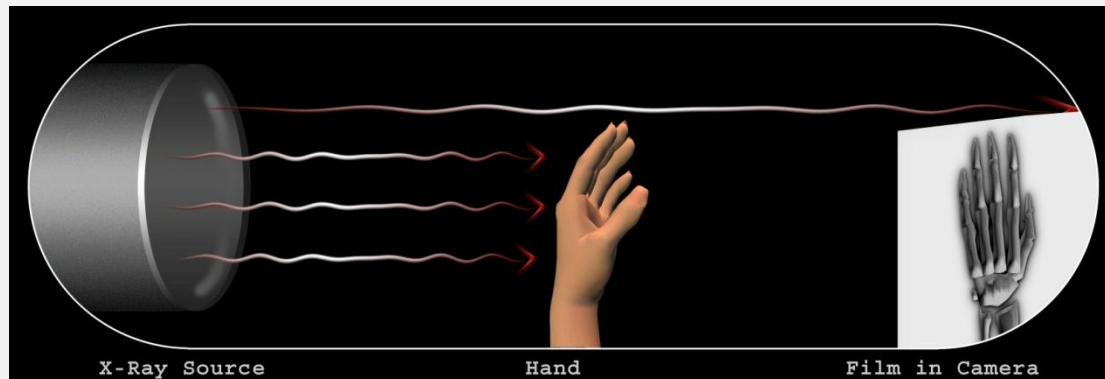
# νόμος αντιστρόφου τετραγώνου



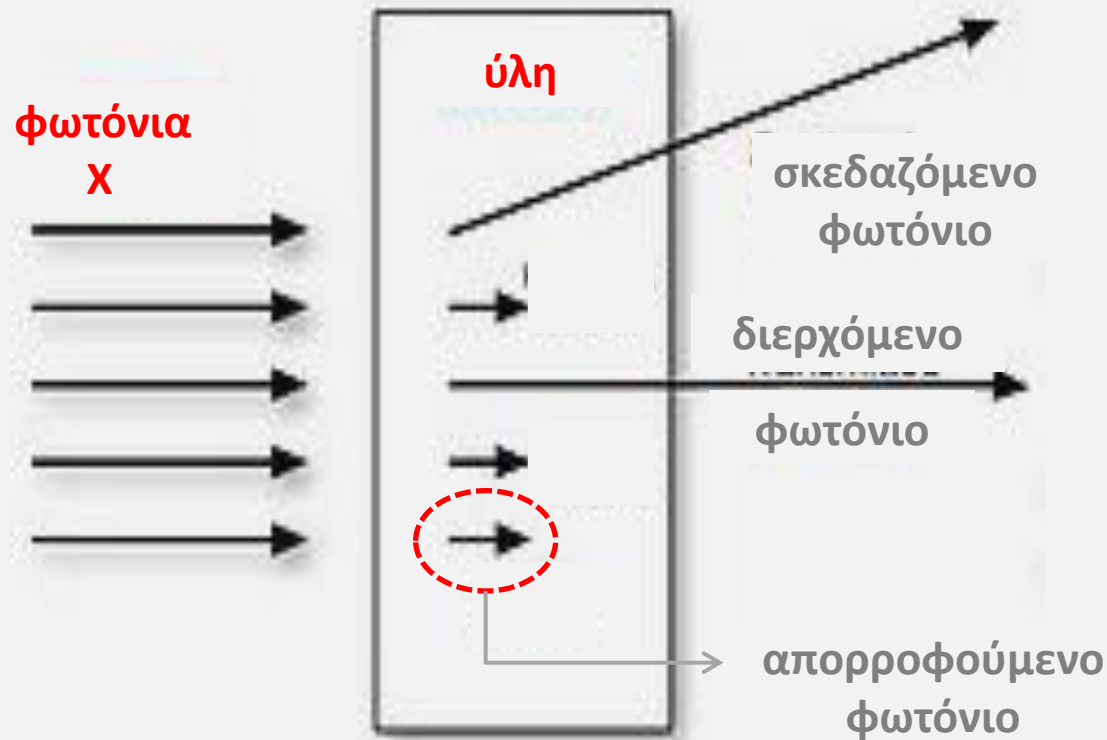
λόγω αποκλίνουσας πορεία της δέσμης

- ο ίδιος αριθμός φωτονίων καλύπτει μεγαλύτερη επιφάνεια
- για να διατηρηθεί ο αριθμός τους ανά μονάδα επιφάνειας πρέπει να αυξηθεί ο αριθμός τους

# Αλληλεπίδραση X - ύλης



# αλληλεπίδραση $\chi$ – ύλης



εξαρτάται

- χαρακτηριστικά χρήσιμης δέσμης
- χαρακτηριστικά ύλης (πάχος, ατομικός αριθμός  $Z$ , πυκνότητα ιστού)

# αλληλεπίδραση Χ – ύλης

διέλευση  
(όχι αλληλεπίδραση)

εξασθένηση  
(μείωση ενέργειας)

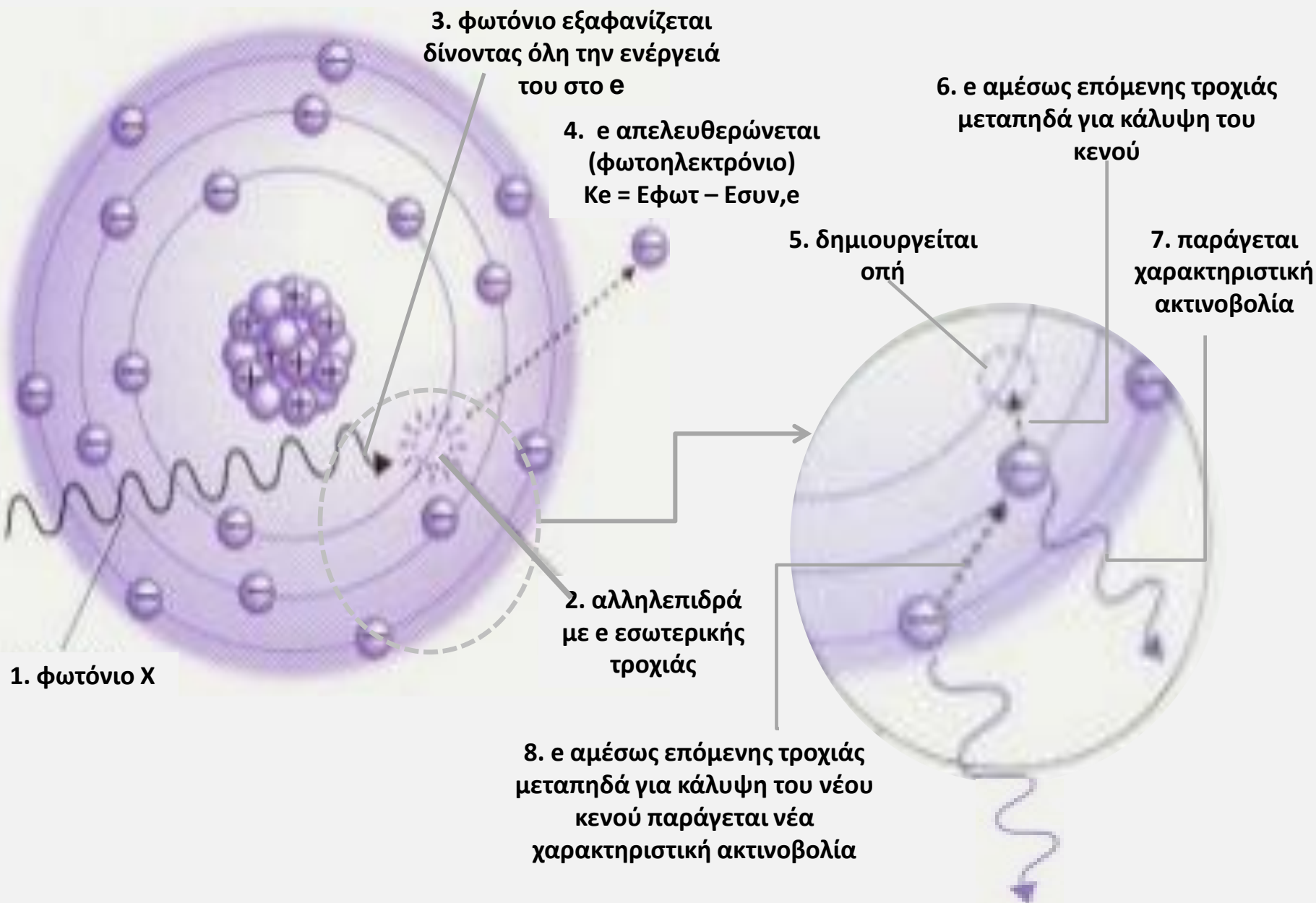
απορρόφηση  
(πλήρης απόδοση  
ενέργειας σε ύλη)

σκέδαση  
(μερική απόδοση  
ενέργειας σε ύλη)

φωτοηλεκτρικό φαινόμενο  
(αλληλεπίδραση με ηλεκτρόνιο  
εσωτερικής τροχιάς)

φαινόμενο Compton  
(αλληλεπίδραση με ηλεκτρόνιο  
περιφερικής τροχιάς)

# φωτοηλεκτρικό φαινόμενο



## αποτελέσματα

- απορρόφηση φωτονίου
- απελευθέρωση ηλεκτρονίου (φωτοηλεκτρονίου)
- παραγωγή δευτερογενών φωτονίων (χαρακτηριστική ακτινοβολία) χαμηλής ενέργειας

## πιθανότητα πραγματοποίησης P

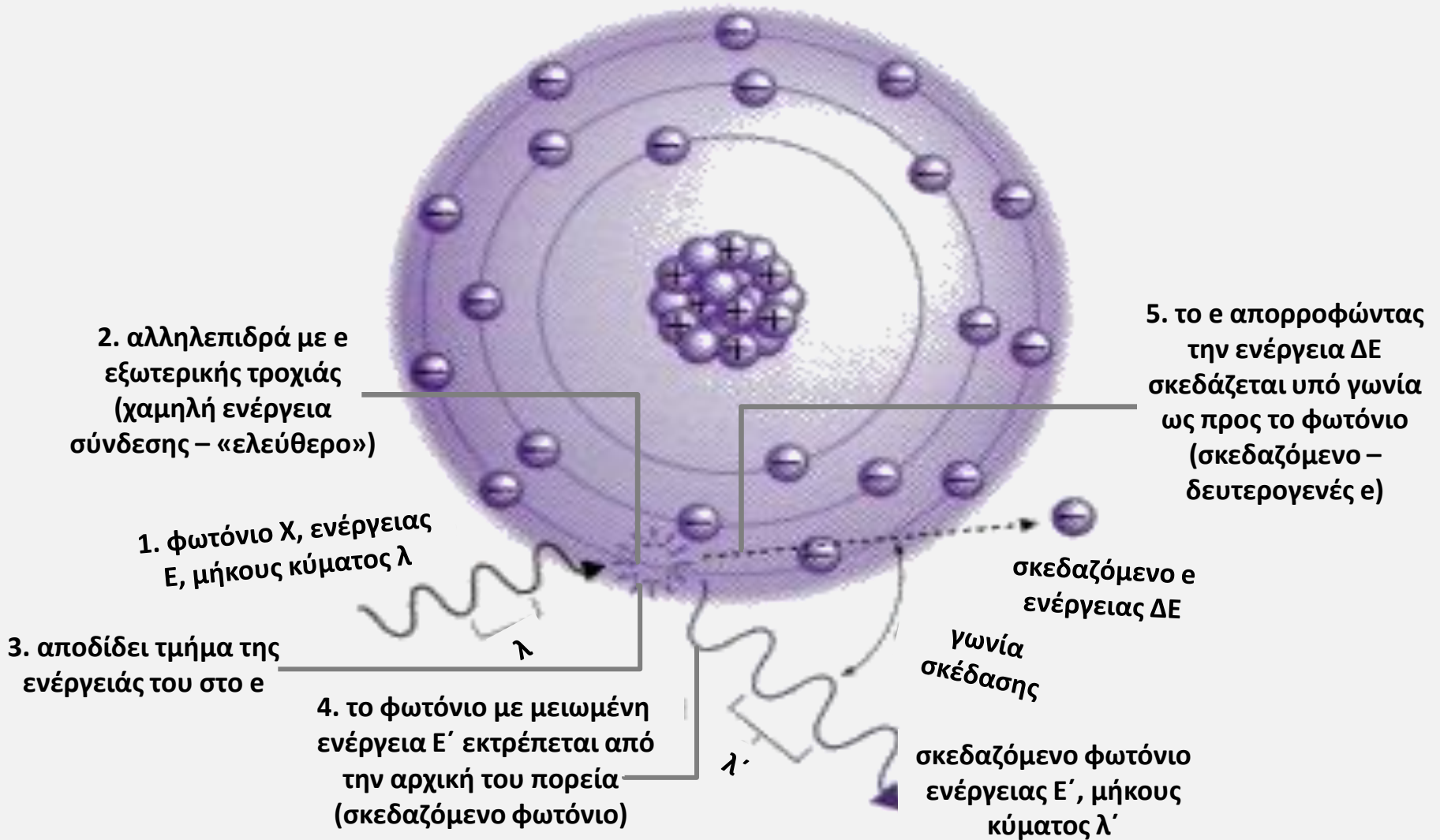
- μειώνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια του φωτονίου ( $\sim 1/E^3$ )
- αυξάνεται όσο αυξάνεται ο ατομικός αριθμός του στοιχείου ( $Z^3$ )

$$P \sim \frac{Z^3}{E^3}$$

## προϋπόθεση

$E_{\text{φωτονίου}} \geq E_{\text{συνδεσης}}, e$

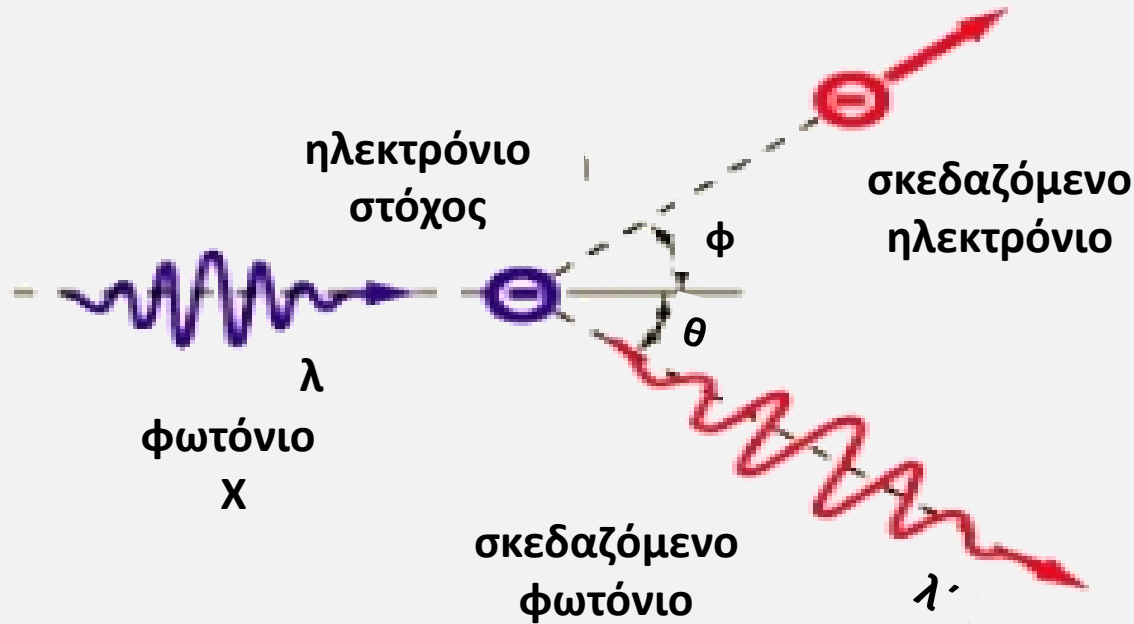
# φαινόμενο Compton



$$E > E' \quad \rightarrow \quad \lambda' > \lambda$$

$E \sim 1/\lambda$

# φαινόμενο Compton



- γωνία σκέδασης: φωτονίων  $0^\circ \rightarrow 180^\circ$  , ηλεκτρονίων  $0^\circ \rightarrow 90^\circ$
- $\uparrow E$  αρχικού φωτονίου  $\rightarrow \downarrow$  γωνίας σκέδασης φωτονίου και ηλεκτρονίου (πρόσθια κίνηση)
- $\uparrow$  γωνίας σκέδασης  $\rightarrow \uparrow$  απώλειας ενέργειας  $\rightarrow \downarrow E$  σκεδαζόμενου
- $\theta = 180^\circ$  (οπισθοσκέδαση)  $\rightarrow$  ελάχιστη ενέργεια σκεδαζόμενου φωτονίου (απορρόφηση)

## αποτελέσματα

- σκεδαζόμενο φωτόνιο μειωμένης ενέργειας και διαφορετικής πορείας από το αρχικό
- απελευθέρωση ηλεκτρονίου (σκεδαζόμενο – δευτερογενές ηλεκτρόνιο) που κινείται υπό γωνία σε σχέση με το σκεδαζόμενο φωτόνιο με ενέργεια ίση με τη  $\Delta E$  του φωτονίου

## πιθανότητα πραγματοποίησης $P$

- μειώνεται όσο αυξάνεται η ενέργεια του φωτονίου ( $\sim 1/E$ )
- είναι ανεξάρτητη του ατομικού αριθμού ( $Z$ )

$$P \sim \frac{1}{E}$$

επιδρά αρνητικά στην ποιότητα της εικόνας (δε φέρει διαγνωστική πληροφορία)

# συμπέρασμα

$$P \sim \frac{Z^3}{E^3}$$

$$P \sim \frac{1}{E}$$

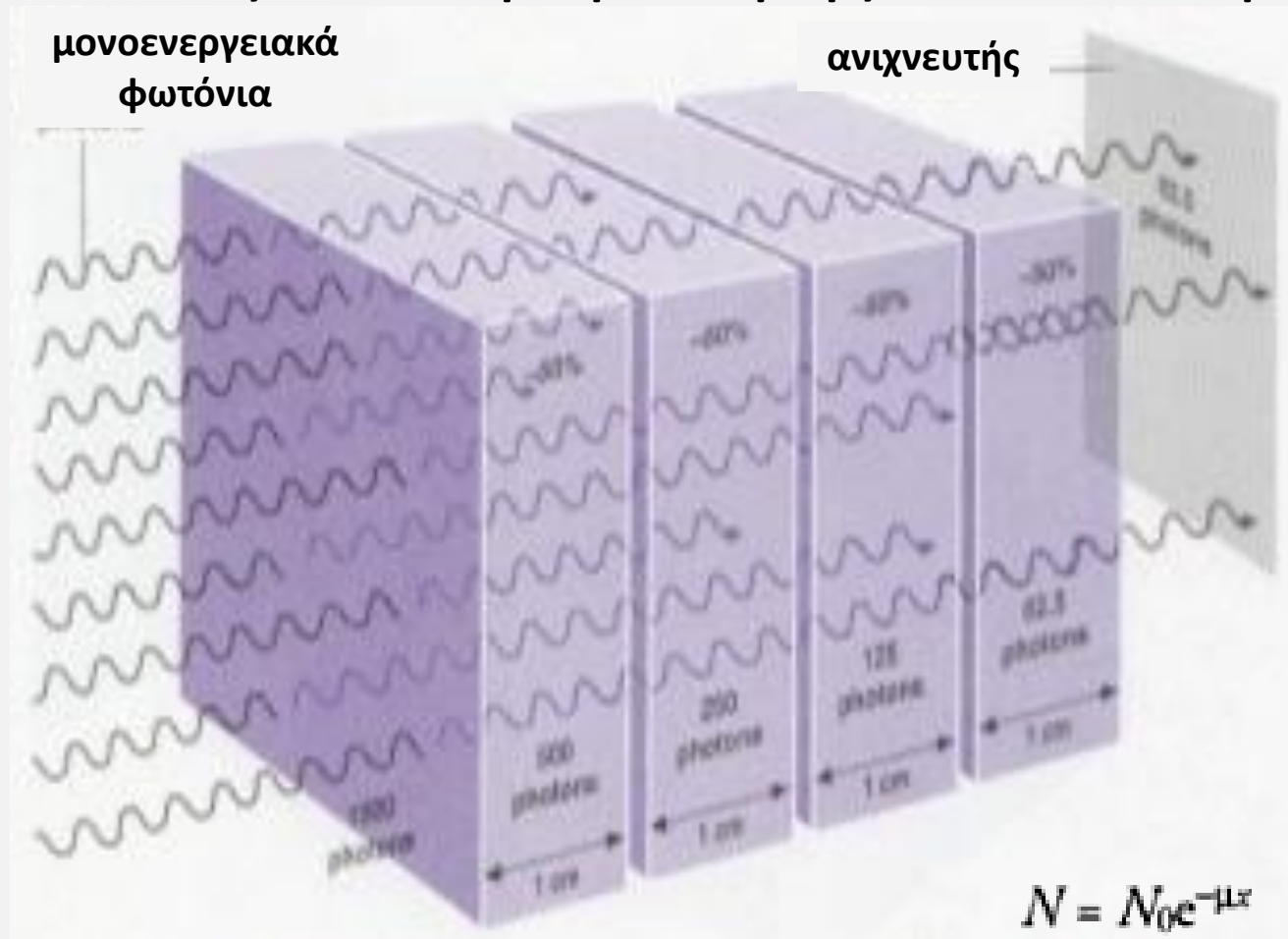
↑ ενέργειας των φωτονίων → ↓ και των δυο φαινομένων

- αφού  $P_{\text{φωτοηλεκτρικού}}$  αντιστρόφως ανάλογη του  $E^3$  ενώ  $P_{\text{Compton}}$  του  $E \rightarrow P_{\text{φωτοηλεκτρικού}}$  μειώνεται περισσότερο με την αύξηση της ενέργειας σε σχέση με  $P_{\text{Compton}}$



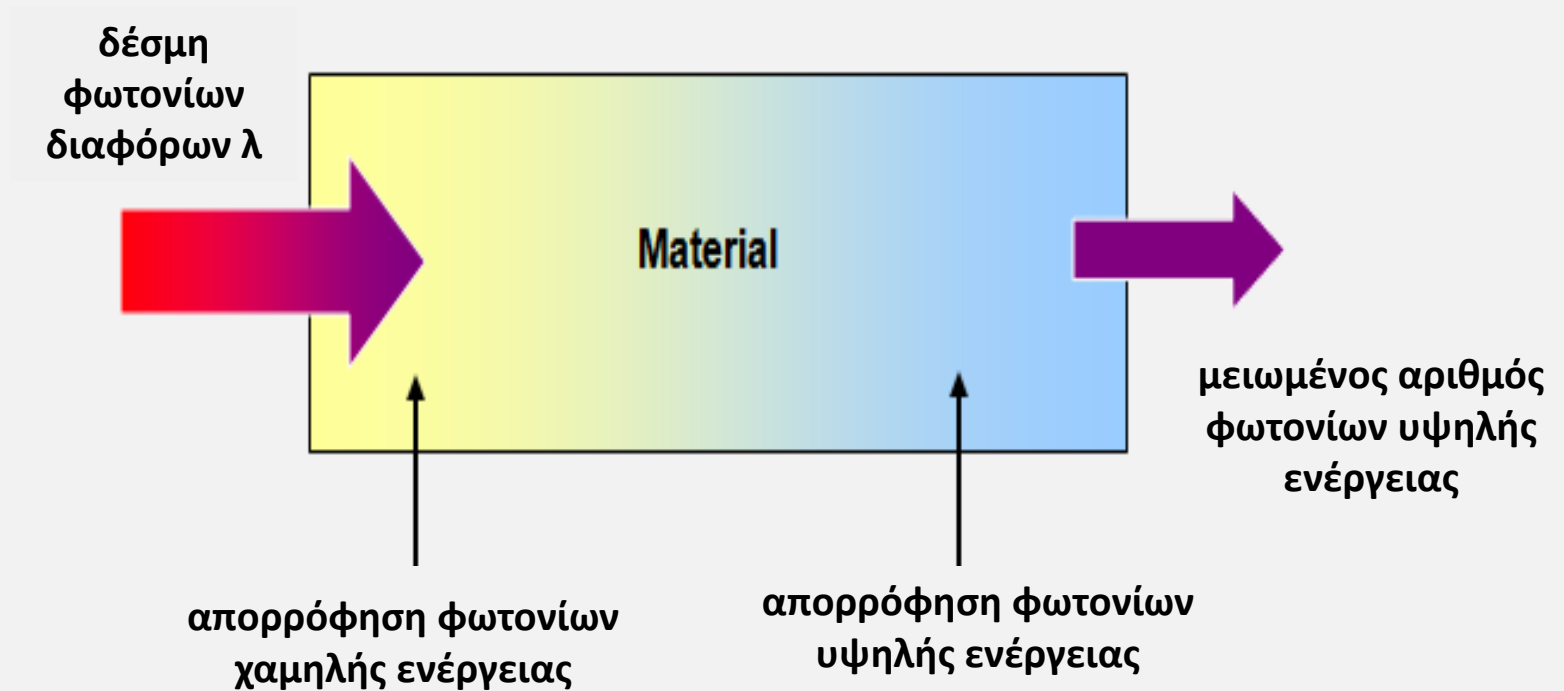
η ενέργεια των φωτονίων – διεισδυτικότητα αποτελεί ποιοτικό χαρακτηριστικό της δέσμης και καθορίζεται από τα  $kVp$

# εξασθένηση δέσμης - διέλευση



- μονοενεργειακή δέσμη → σταθερός ρυθμός εξασθένησης / μονάδα πάχος

# εξασθένηση δέσμης - διέλευση

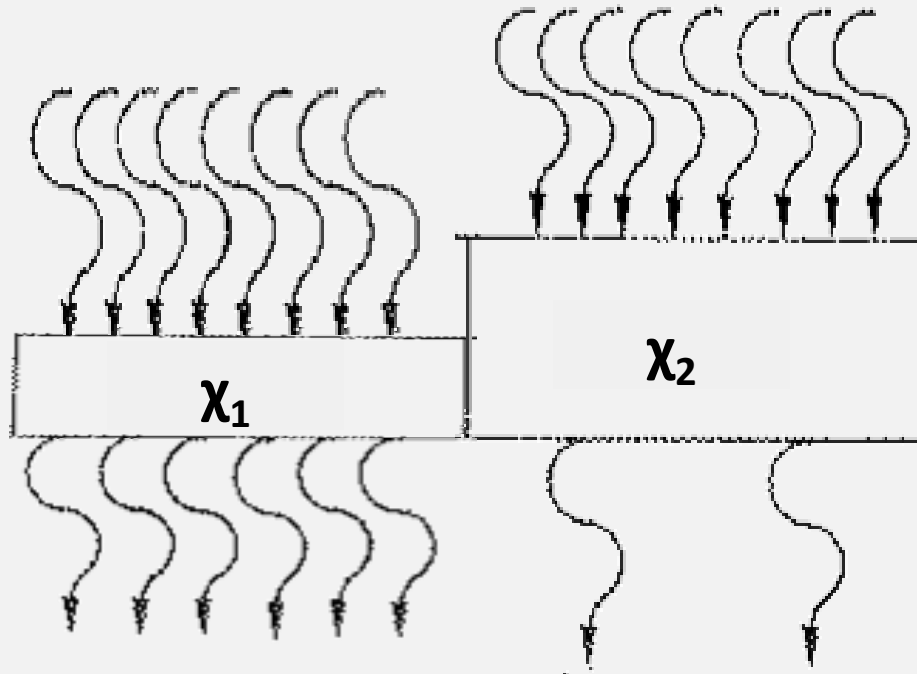


- πολυενεργειακή δέσμη → ανομοιόμορφη εξασθένηση

# παράγοντες εξασθένησης - διέλευσης

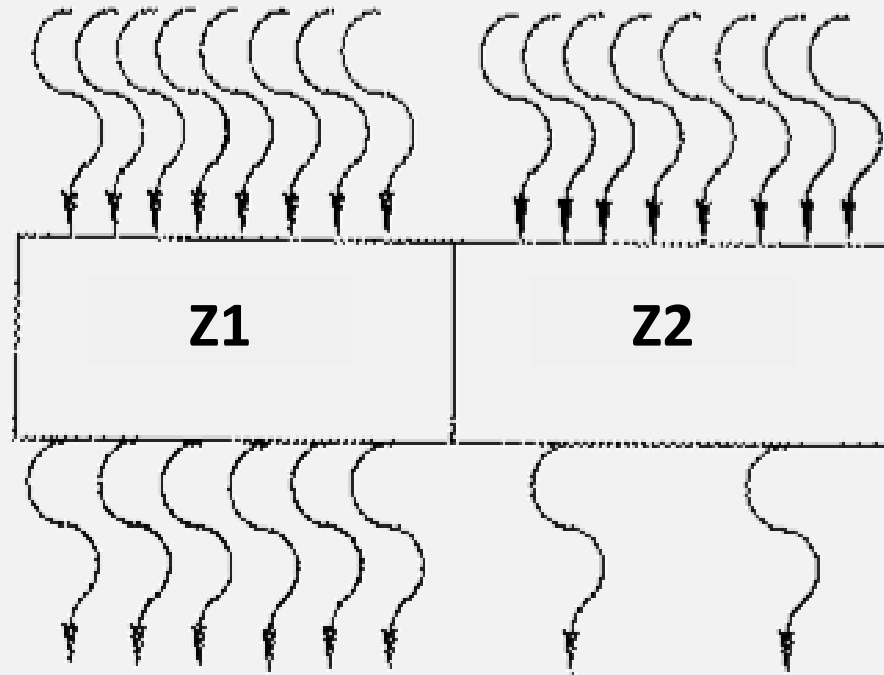


# εξασθένηση - πάχος



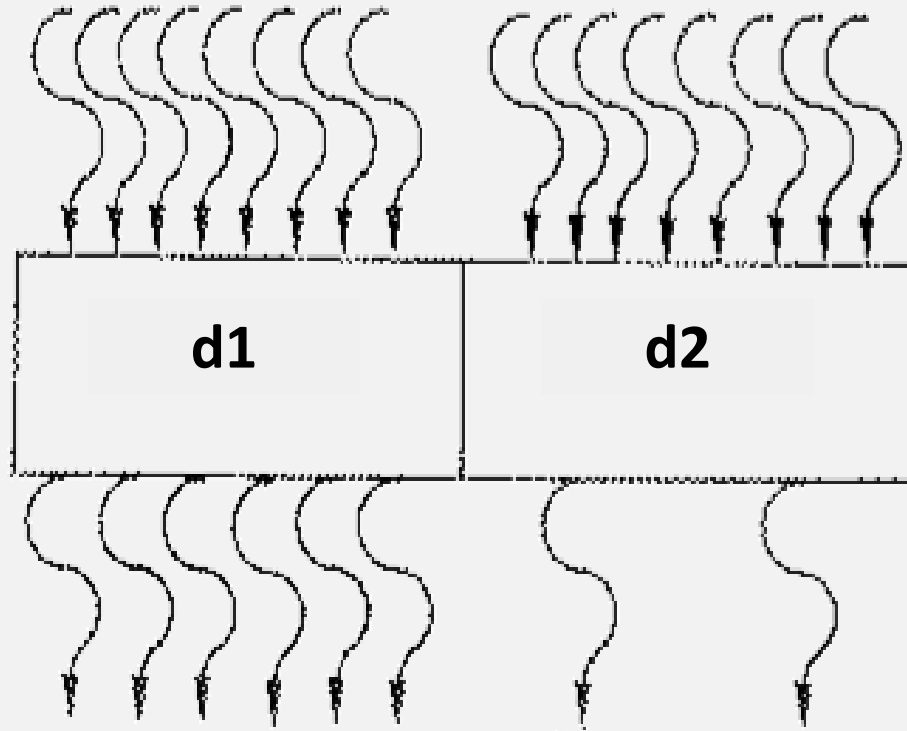
$$\chi_1 < \chi_2,$$

# εξασθένηση - Z



$$Z_1 < Z_2$$

# ελασθένηση - πυκνότητα



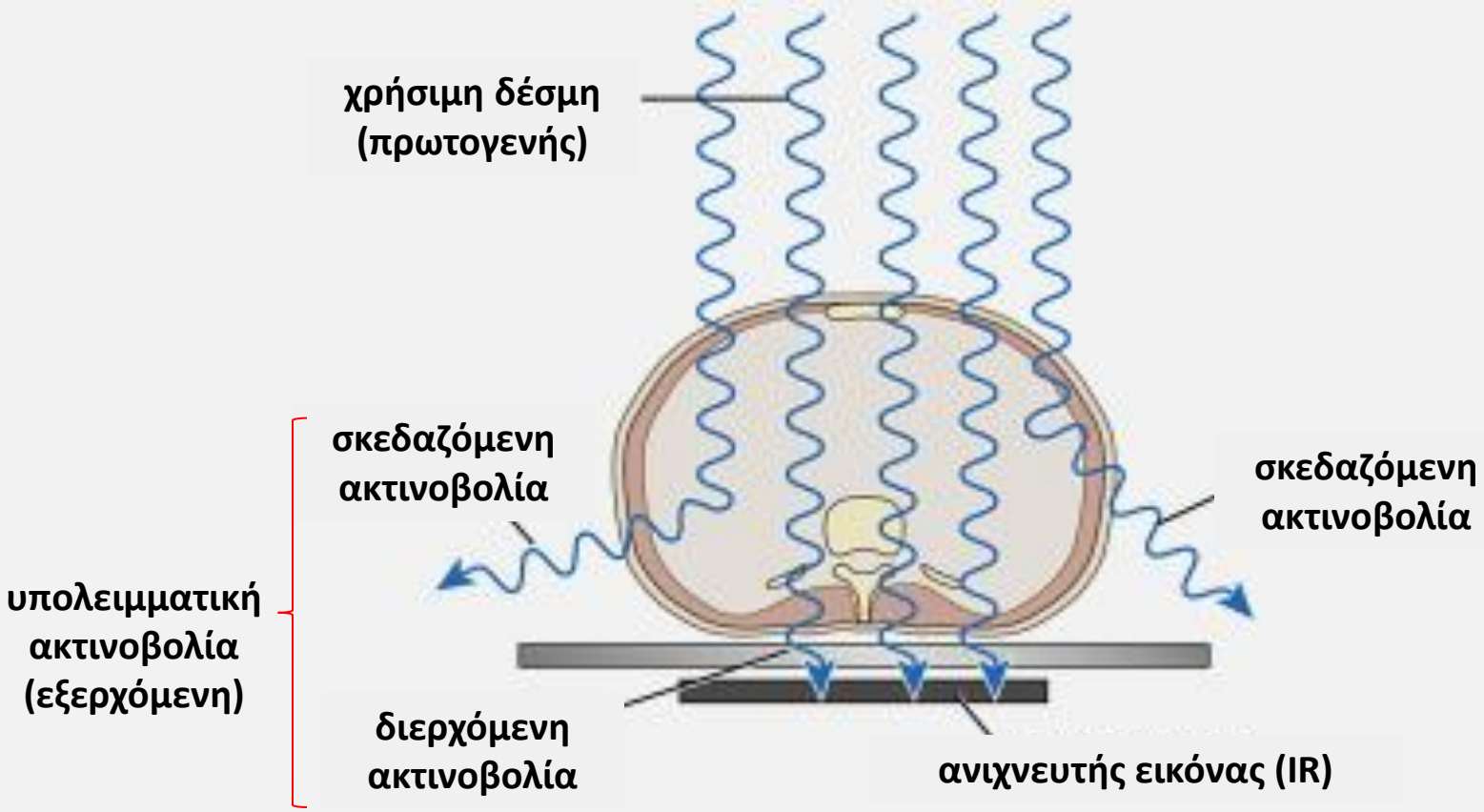
$$d_1 < d_2$$

# εξασθένηση - ενέργεια

kVp	Percent Interaction			Percent Transmission
	Photo-electric	Compton	Total	
50	79	21	>99	<1
60	70	30	>99	<1
70	60	40	>99	<1
80	46	52	98	2
90	38	59	97	3
100	31	63	94	6
110	23	70	93	7
120	18	83	91	9

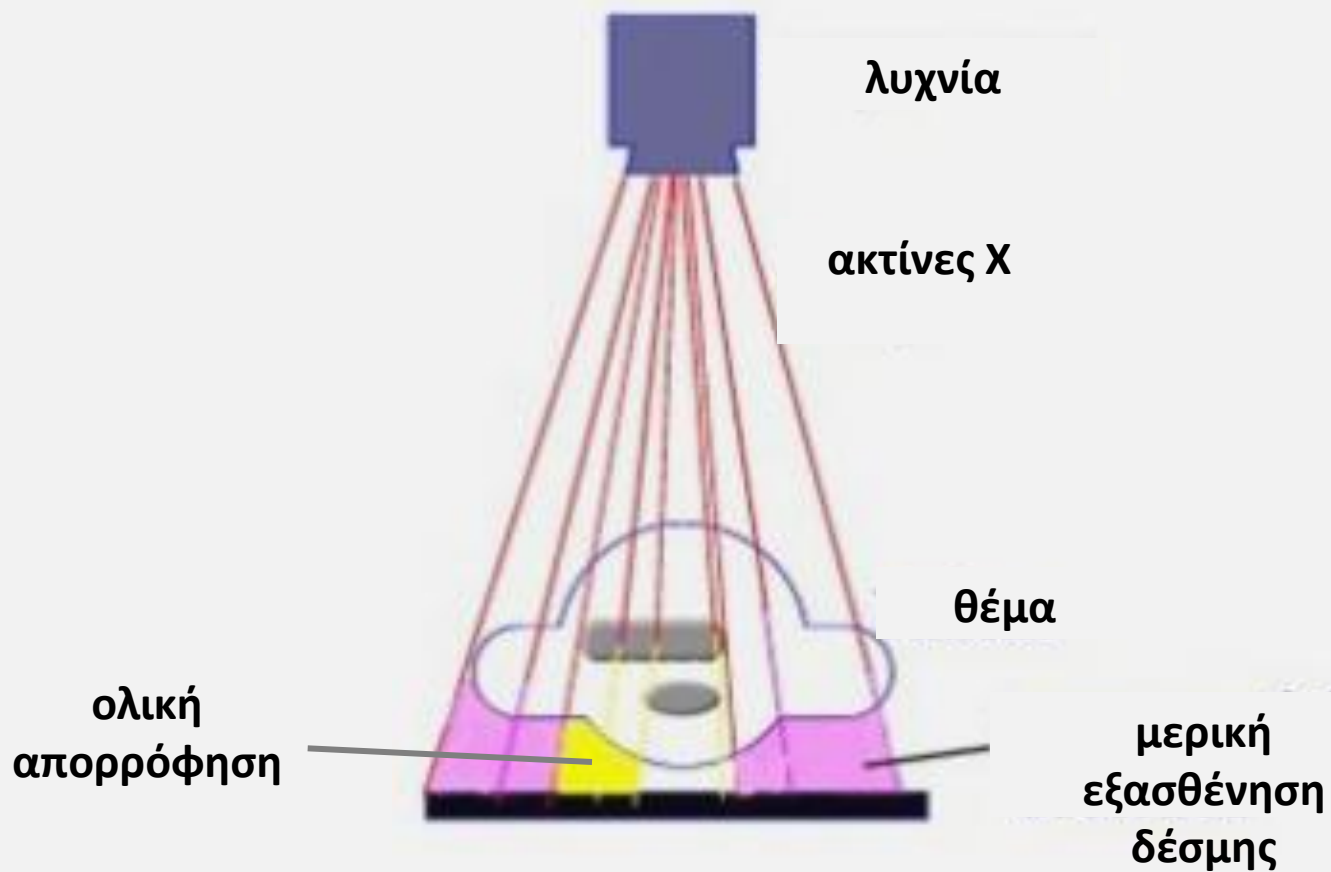
↑ E (kVp) → ↑ διεισδυτικότητας (διέλευση) + ↓ εξασθένησης

# σχηματισμός εικόνας



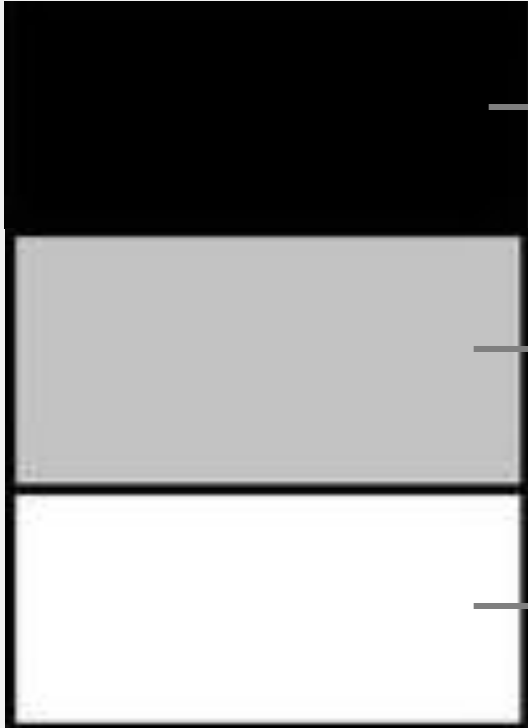
εικόνα: καταγραφή της εξερχόμενης ακτινοβολίας

# σχηματισμός εικόνας



εικόνα: περιοχές IR που δεν δέχονται φωτόνια κ' περιοχές που δέχονται φωτόνια  
(επιθυμητά φαινόμενα διέλευσης – φωτοηλεκτρικό)  
η καταγραφή σκεδαζόμενων αλλοιώνει την '1-1' σχέση

# σχηματισμός εικόνας



μαύρη περιοχή που δέχεται αυξημένο αριθμό φωτονίων

γκρι περιοχή που δέχεται μικρότερο αριθμό φωτονίων

άσπρη περιοχή που δεν δέχεται φωτόνια