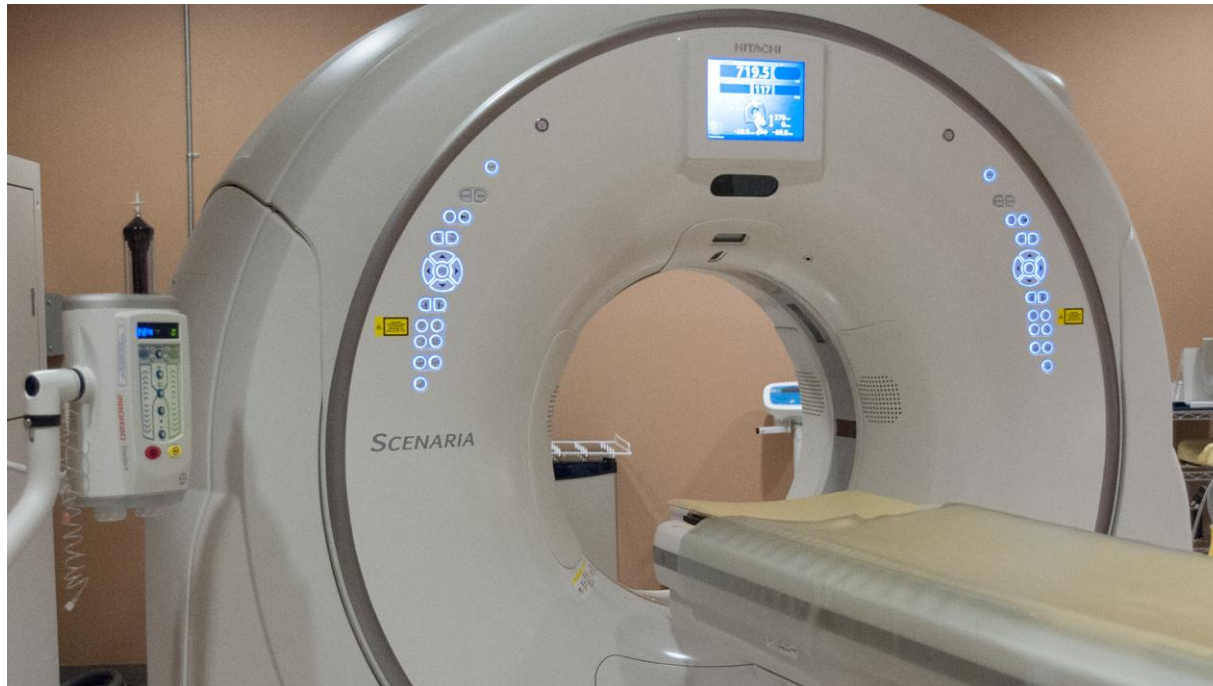


# Υπολογιστική Τομογραφία ακτίνων Χ



# Εισαγωγή



Οι ακτίνες X είναι μια μορφή ιοντίζουσας ακτινοβολίας εφόσον μπορούν να ιονίσουν άτομα και μόρια

$$\lambda_1 = 400 \text{ nm}$$

$$\lambda_2 = 700 \text{ nm}$$

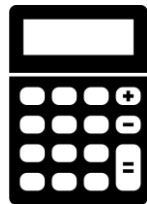


Η ενέργεια φωτονίου στο ορατό φάσμα κυμαίνεται από ~1.8 – 3.1 eV

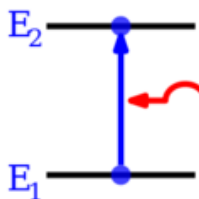
## X-RAYS

$$\lambda_1 = 10 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

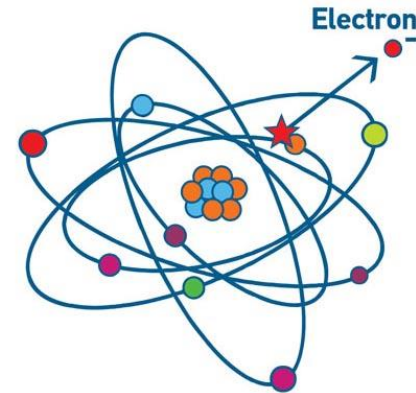
$$\lambda_2 = 100 \times 10^{-3} \text{ nm}$$



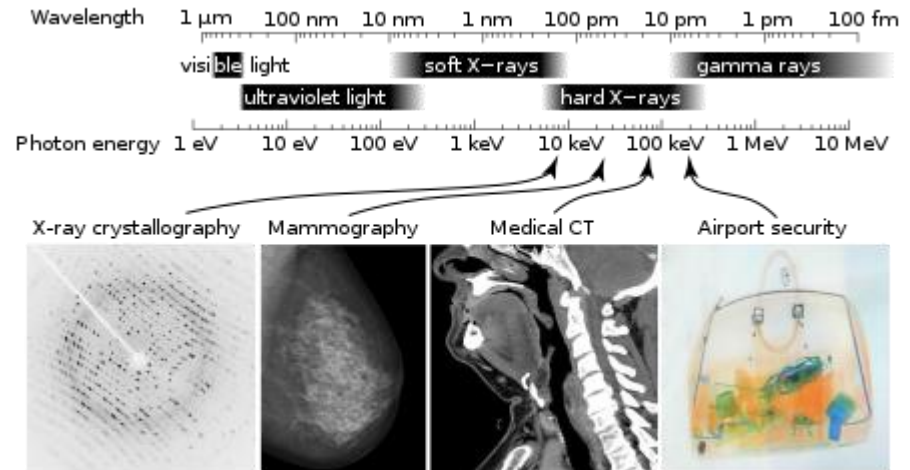
12400 έως 124000 eV



Ενεργειακά επίπεδα σε άτομα ~eV



~10<sup>4</sup> μεγαλύτερη ενέργεια φωτονίων σε σχέση με το ορατό φως



<https://en.wikipedia.org/wiki/X-ray>

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ Joules}$$

$$\text{Ενέργεια(eV)} = 1240 / \text{Μηκος κύματος (nm)}$$

# Εισαγωγή



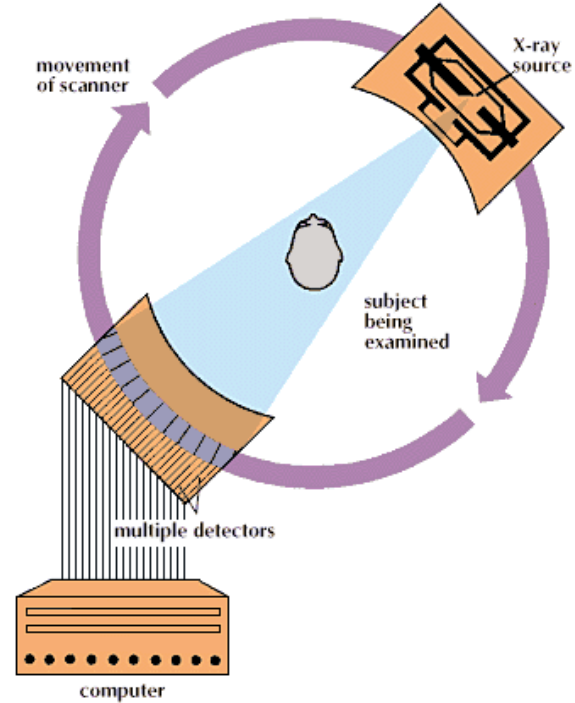
**Wilhelm Conrad Röntgen (1845-1923)**  
Nobel in Physics 1901



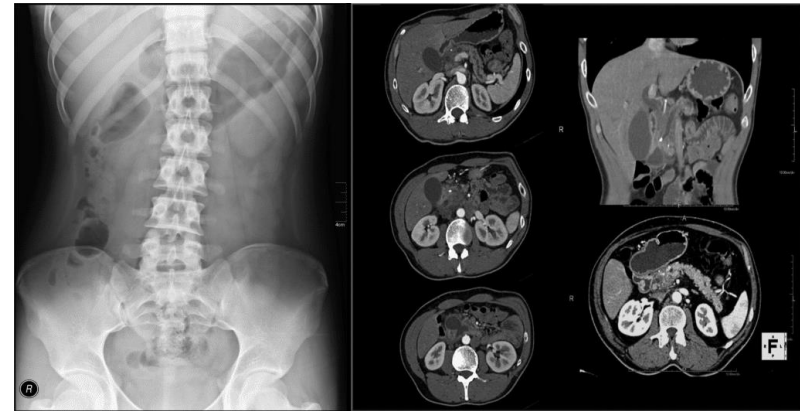
**Η πρώτη ακτινογραφία (1895)**



## COMPUTED X-RAY TOMOGRAPHY (CT) SCANNER



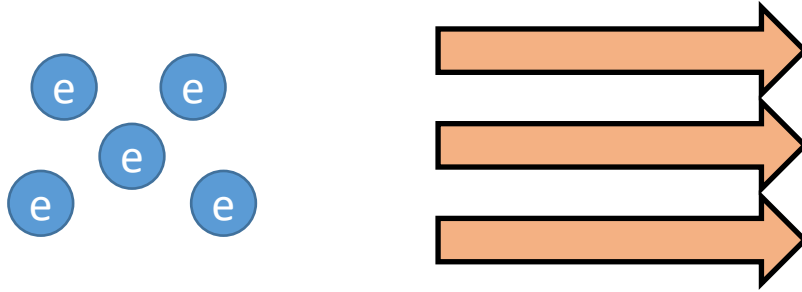
- Από την ανακάλυψή τους, οι ακτίνες X αποτέλεσαν μία από τις πιο κοινές διαγνωστικές διαδικασίες στην ιατρική
- Αρχές δεκαετίας 70: Η ανάπτυξη της υπολογιστικής αξονικής τομογραφίας φέρνει επανάσταση στην ιατρική διαγνωστική
- 85.3 εκατομμύρια αξονικές τομογραφίες έγιναν το 2011 στις ΗΠΑ



<https://emergencymdsc.com/ct-scans/>

# Παραγωγή ακτίνων X

Για να παραγάγουμε ακτίνες X χρειαζόμαστε τα εξής:



Ηλεκτρόνια

Επιτάχυνση

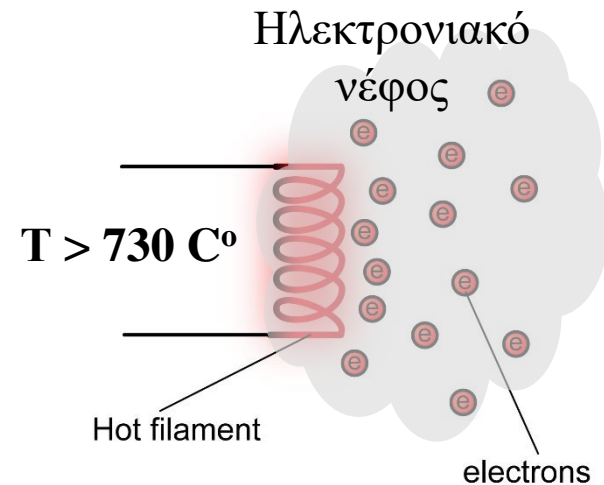


Επιβράδυνση

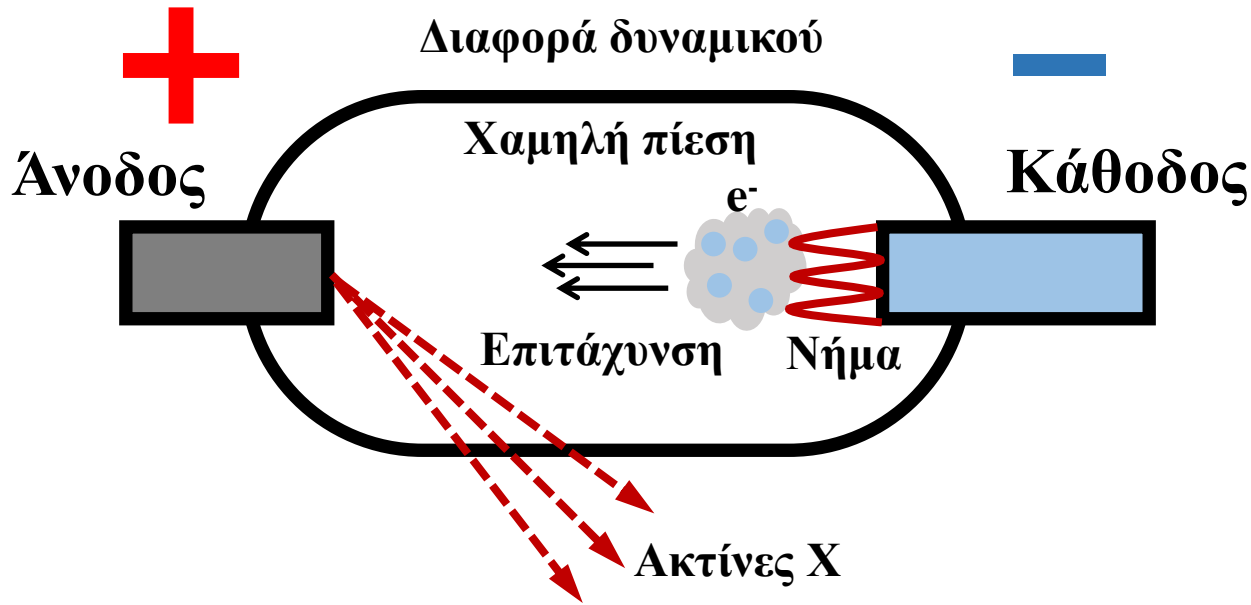


Πώς μπορώ να δημιουργήσω μια πηγή ηλεκτρονίων;

**Θερμιονική εκπομπή:** Η διαδικασία εκπομπής φορτισμένων σωματιδίων από την επιφάνεια θερμαινόμενου μετάλλου  
**Εξαρτάται από:** α) θερμοκρασία, β) ενεργό επιφάνεια, γ) είδος μετάλλου



# Παραγωγή ακτίνων X



Τυπικές παράμετροι:

- Ρεύμα λυχνίας  
~200-500 mA
- Διαφορά δυναμικού  
~20-150 kV
- Υλικά ανόδου  
Tungsten,  
Molybdenum,  
Rhodium



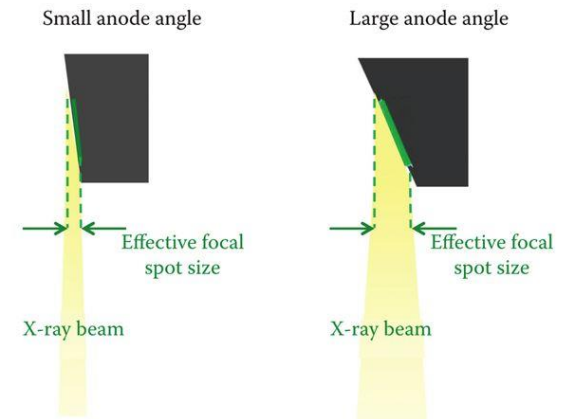
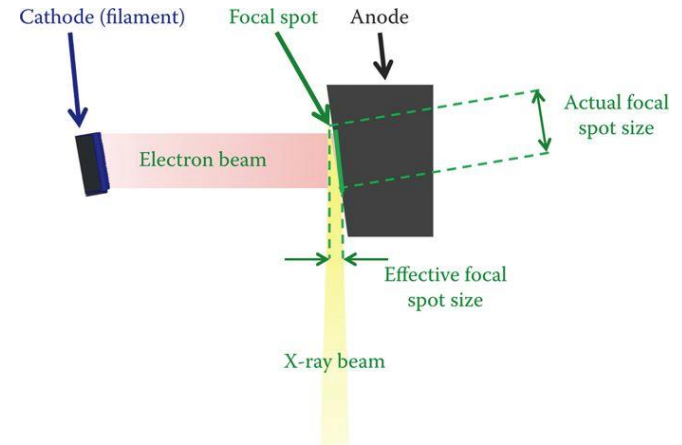
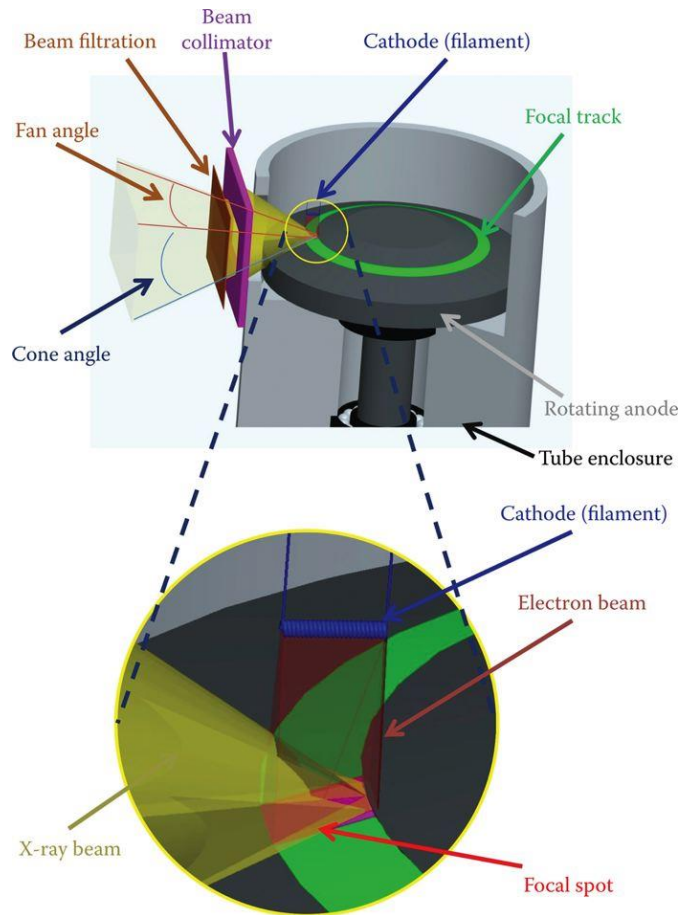
Αυξάνοντας το ρεύμα στη λυχνία, αυξάνεται η θερμοκρασία του και άρα ο αριθμός των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων στη μονάδα χρόνου, συνεπώς και η ένταση της δέσμης ακτίνων X με γραμμικό τρόπο



Αυξάνοντας τη διαφορά δυναμικού μεταξύ ανόδου και καθόδου, αυξάνεται η επιτάχυνση των ηλεκτρονίων και συνεπώς η κινητική τους ενέργεια, άρα και η αντίστοιχη ενέργεια των φωτονίων των ακτίνων X. Επίσης αυξάνεται μη γραμμικά ( $3^{\text{η}}$  δύναμη) και ο αριθμός των εκπεμπόμενων φωτονίων



# Σωλήνας ακτίνων X με περιστρεφόμενη άνοδο



Essentials of in-vivo biomedical imaging, CRC Press,2015

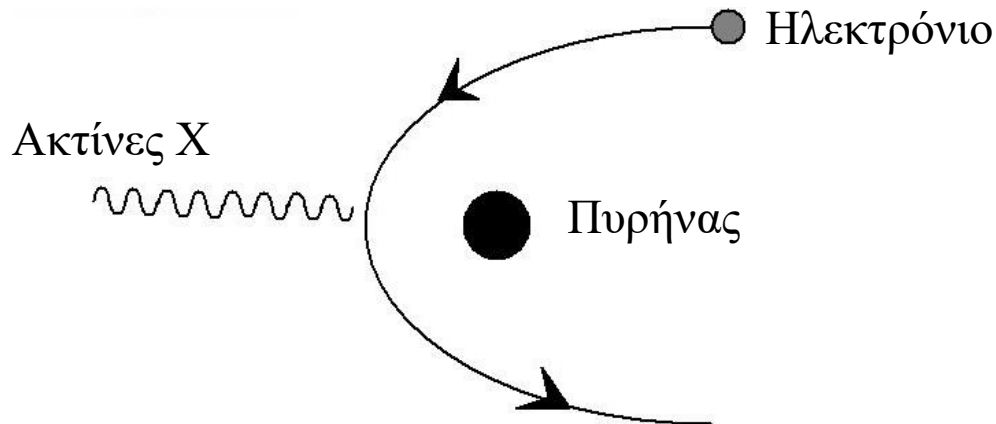
- 10000 στροφές/sec
- Καλύτερη απαγωγή θερμότητας
- Πιο αποδοτική παραγωγή ακτίνων X
- Τυπικές γωνίες: 7-20 μοίρες
- Ενεργό μέγεθος εστίας: 0.1 – 1.2 mm
- Εστία σε micro-CT: 10 μm
- Μικρότερη εστία, καλύτερη ανάλυση

# Φάσμα των ακτινών X



Πρόκειται για **σύνθετο φάσμα** που αποτελείται από ένα συνεχές φάσμα πάνω στο οποίο εμφανίζονται μερικές γραμμές (γραμμικό φάσμα). Διαμορφώνεται από δύο φυσικούς μηχανισμούς:

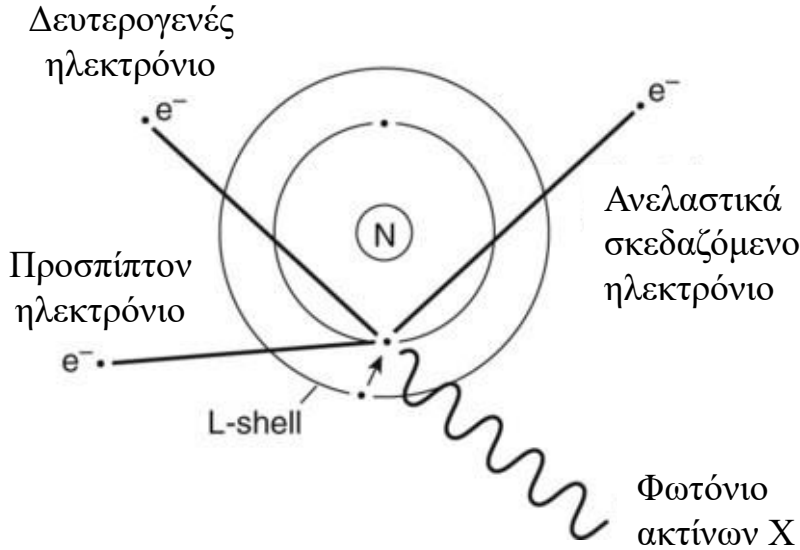
## 1. Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung)



- Ένα ταχέως κινούμενο ηλεκτρόνιο πλησιάζει τον πυρήνα
- Η ισχυρή έλξη Coulomb από τον πυρήνα αναγκάζει το ηλεκτρόνιο να επιβραδύνει
- Εκπομπή ακτινοβολίας λόγω πέδησης του ηλεκτρονίου
- Η ακτινοβολία «φιλτράρεται» λόγω της επαναπορρόφησής της από το υλικό της ανόδου ή του περιβλήματος του σωλήνα
- Μικρότερο ποσοστό φωτονίων χαμηλών ενεργειών

# Φάσμα των ακτίνων X

## 2. Χαρακτηριστική ακτινοβολία



- Ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας από την κάθοδο συγκρούονται με τα τροχιακά ηλεκτρόνια στην άνοδο με αποτέλεσμα την απομάκρυνσή τους
- Το άτομο ionίζεται λόγω ελλείμματος ηλεκτρονίου στην εσωτερική στιβάδα του
- Ένα ηλεκτρόνιο της εξώτερης στιβάδας καλύπτει την κενή θέση με ταυτόχρονη εκπομπή ενός φωτονίου ακτίνων X ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά ανάμεσα στις δύο στιβάδες
- Η ενεργειακή διαφορά είναι χαρακτηριστική για κάθε στοιχείο και συνεπώς εξαρτάται από το υλικό της ανόδου

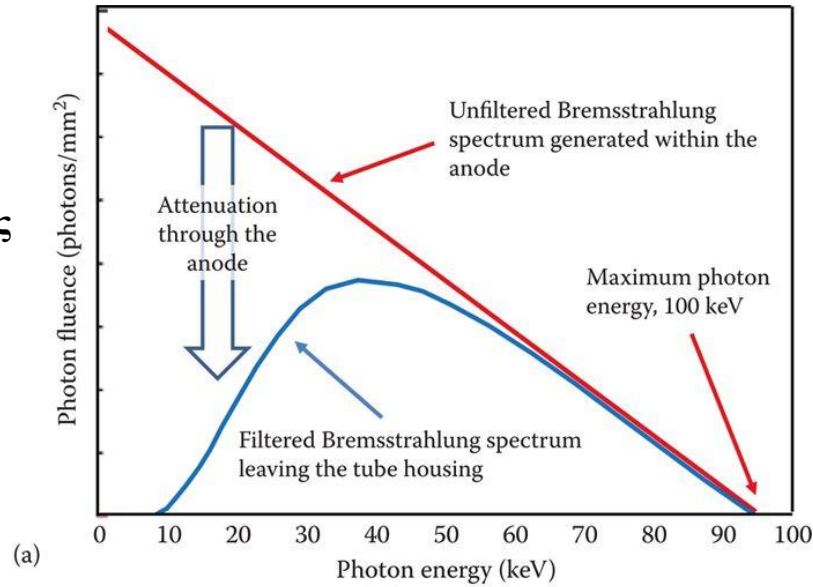


Τυπικά, 10% των ακτίνων X προέρχεται από χαρακτηριστική ακτινοβολία ενώ 90% είναι αποτέλεσμα της ακτινοβολίας πέδησης

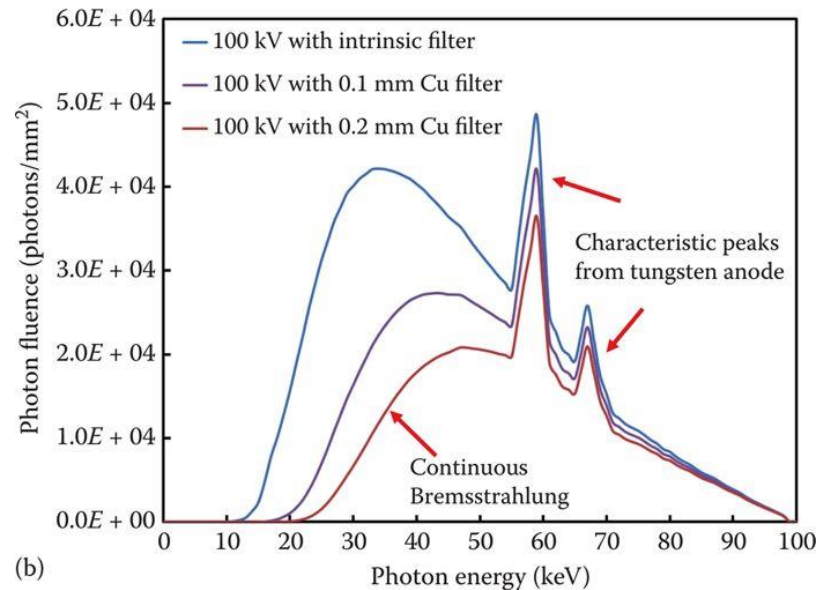


# Φάσμα των ακτίνων X

Ακτινοβολία πέδησης  
στα 100 keV



Παρατηρούμενο  
φάσμα ακτίνων X  
στα 100 keV από  
άνοδο tungsten



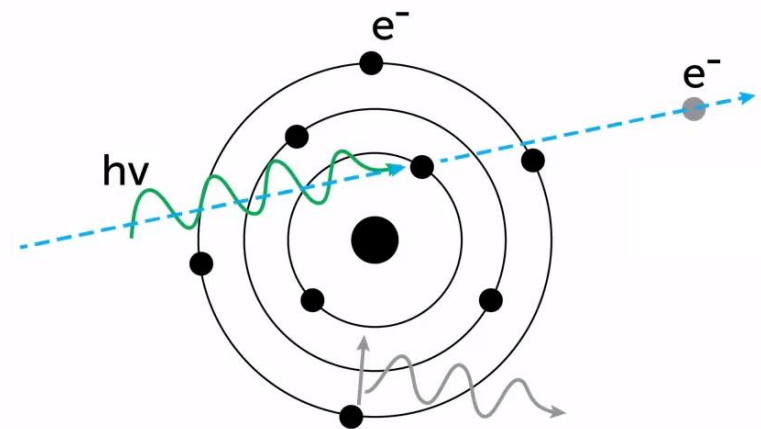
# Αλληλεπίδραση ακτίνων X με την ύλη



Οι κύριοι μηχανισμοί απορρόφησης (εξασθένησης) των ακτίνων X από την ύλη είναι:

α) Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο, β) Σκέδαση Compton

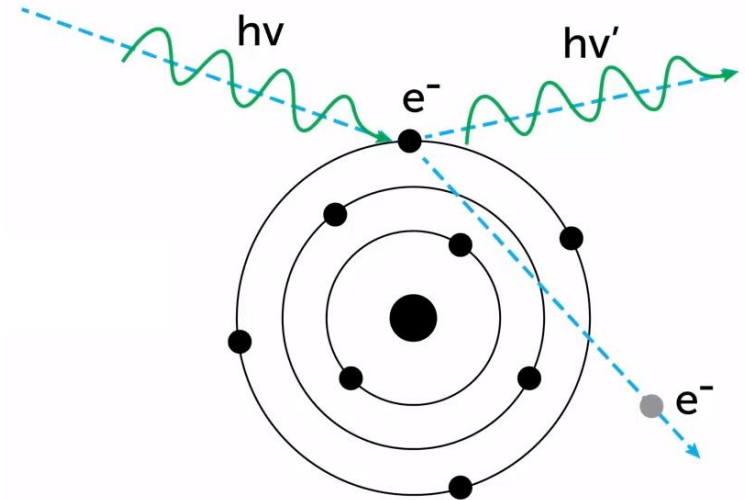
- Το προσπίπτον φωτόνιο απορροφάται από ένα ηλεκτρόνιο εσωτερικής στιβάδας (K) με αποτέλεσμα να εξαχθεί από το άτομο
- Το προκύπτον «φωτοηλεκτρόνιο» έχει ενέργεια ίση με τη διαφορά μεταξύ της ενέργειας φωτονίου και του έργου εξαγωγής από το άτομο
- Πιθανότητα να συμβεί ανά μονάδα μάζας  $\sim (Z^3/E^3)$  όπου  $Z$  ο ατομικός αριθμός του μέσου και  $E$  η ενέργεια του φωτονίου
- Αύξηση της πιθανότητας όταν η ενέργεια του φωτονίου είναι λίγο μεγαλύτερη από το έργο εξαγωγής



photoelectric effect

# Αλληλεπίδραση ακτίνων X με την ύλη

- Το προσπίπτον φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ηλεκτρόνιο σθένους μεταφέροντάς του κινητική ενέργεια
- Το φωτόνιο σκεδάζεται στο σημείο της αλληλεπίδρασης χάνοντας παράλληλα ποσοστό της ενέργειάς του
- Η πιθανότητα του φαινομένου εξαρτάται από την τοπική πυκνότητα ηλεκτρονίων και είναι σχετικά ανεξάρτητη από τον ατομικό αριθμό  $Z$  του μέσου



Compton scattering

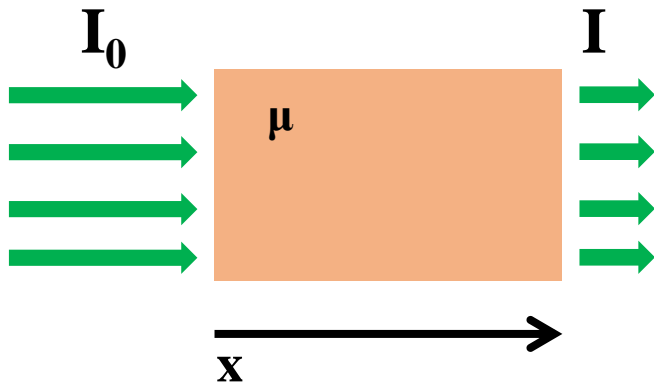


Σε μια πρώτη προσέγγιση, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο συνεισφέρει στην απόκτηση χρήσιμης αντίθεσης, ενώ το φαινόμενο Compton στην αύξηση του θορύβου



ΑΡΑ: Για να αυξήσω την ποιότητα της εικόνας πρέπει να χαμηλώσω την ενέργεια των φωτονίων  
→ Αύξηση απορρόφησης → Αύξηση έντασης

# Αλληλεπίδραση ακτίνων X με την ύλη



*Beer's law*

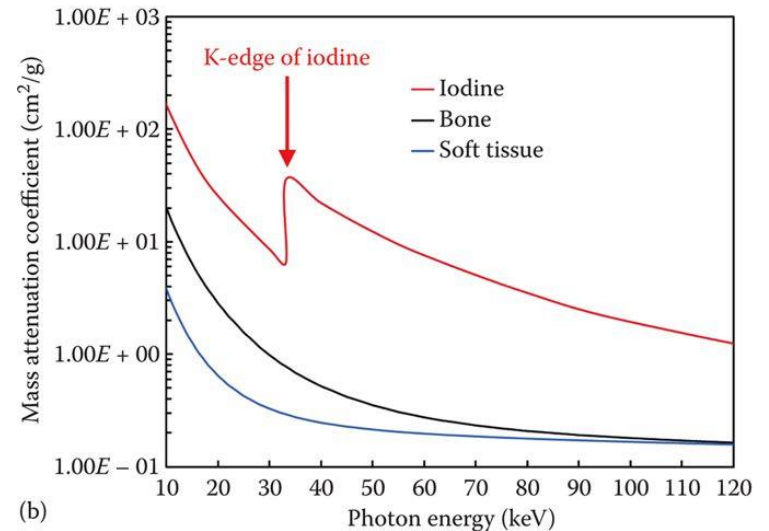
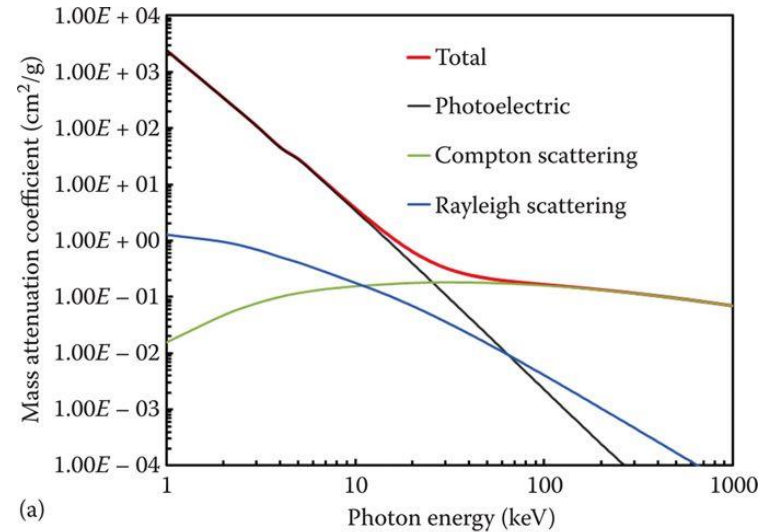
$$I = I_0 e^{-\mu \cdot x}$$

Συνολικός συντελεστής απορρόφησης  $\mu$

$$\mu \approx \mu(\text{Photoelectric}) + \mu(\text{Compton})$$



Ο συντελεστής απορρόφησης έχει μονάδες αντιστρόφου μήκους (π.χ.  $\text{cm}^{-1}$ )

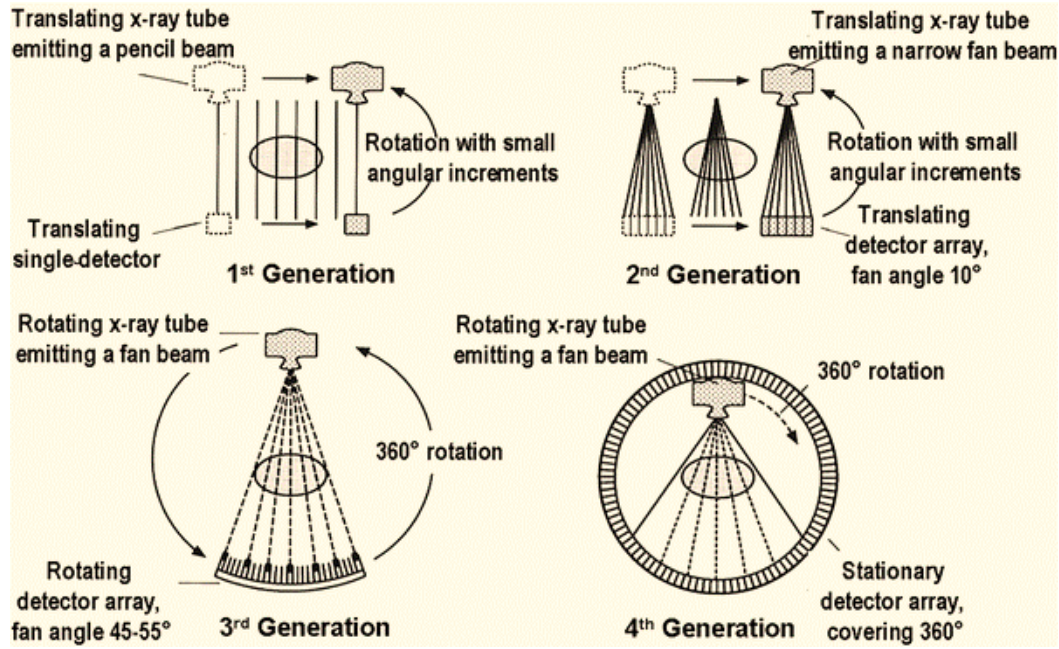


Mass attenuation coefficient:  $\mu/\rho$

# Εξέλιξη αξονικών τομογράφων

- Γεωμετρία παράλληλης δέσμης
- 5 λεπτά ανά τομή
- Χαμηλή ποιότητα λόγω κινούμενων μερών

- Αποκλίνουσα δέσμη, περιστρεφόμενοι ανιχνευτές
- 1 sec ανά τομή
- 800 ανεξάρτητοι ανιχνευτές



Thomas Flohr, Current Radiology Reports, 2013

- Αποκλίνουσα δέσμη, πολλαπλοί ανιχνευτές
- 30 sec ανά τομή
- Βελτίωση ποιότητας
- Αποκλίνουσα δέσμη, ακίνητοι ανιχνευτές
- 1 sec ανά τομή
- 600-4800 ανεξάρτητοι ανιχνευτές

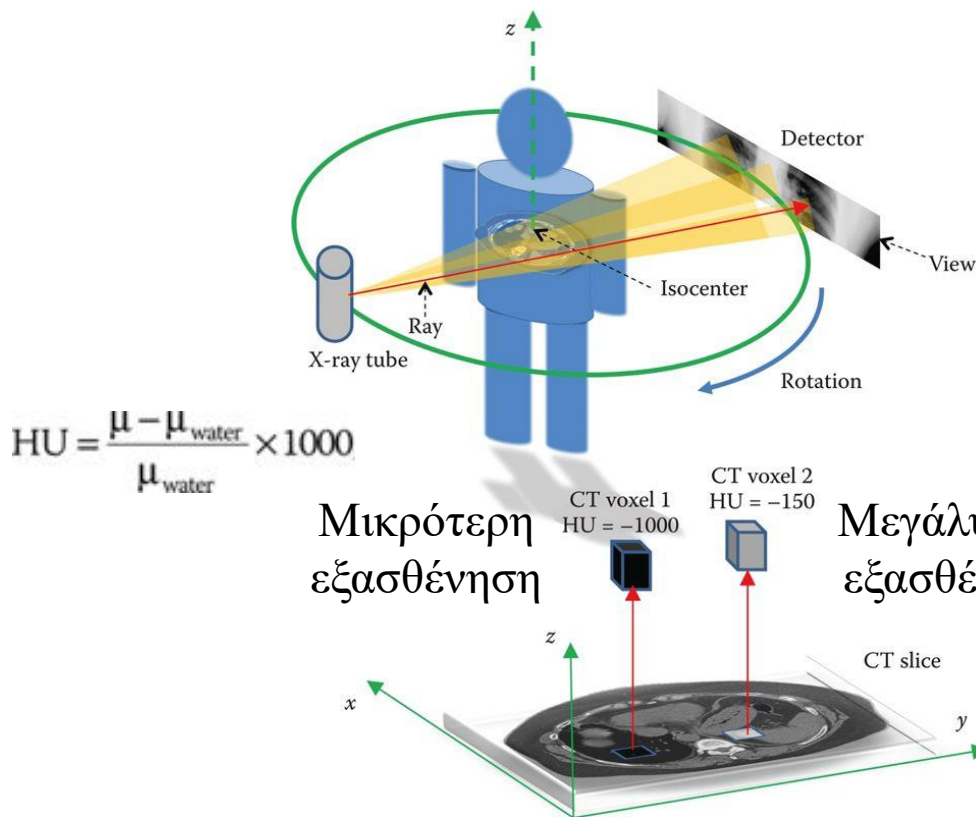
**Οι ανιχνευτές ακτίνων X πρέπει να:**

- α) έχουν υψηλή συνολική απόδοση ώστε να ελαχιστοποιείται η δόση ακτινοβολίας
- β) είναι σταθεροί στο χρόνο
- γ) μην είναι ευαίσθητοι σε αλλαγές θερμοκρασίας



- Στερεάς κατάστασης (π.χ. κεραμικά υλικά)
- Ιονισμού αερίου (π.χ. Ξένο)

# Ερμηνεία εικόνων αξονικού τομογράφου

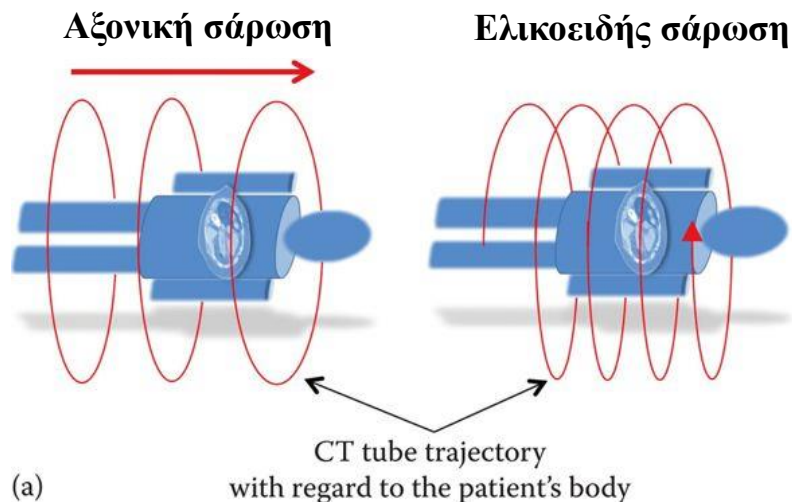


- Μια ανακατασκευασμένη εικόνα του αξονικού τομογράφου αποτελεί την κατανομή των γραμμικών συντελεστών εξασθένησης ( $\mu$ ) από μια λεπτή «φέτα»
- Κάθε pixel αναπαριστά τον ενεργό συντελεστή εξασθένησης από ένα πολύ μικρό στοιχείο όγκου (voxel)

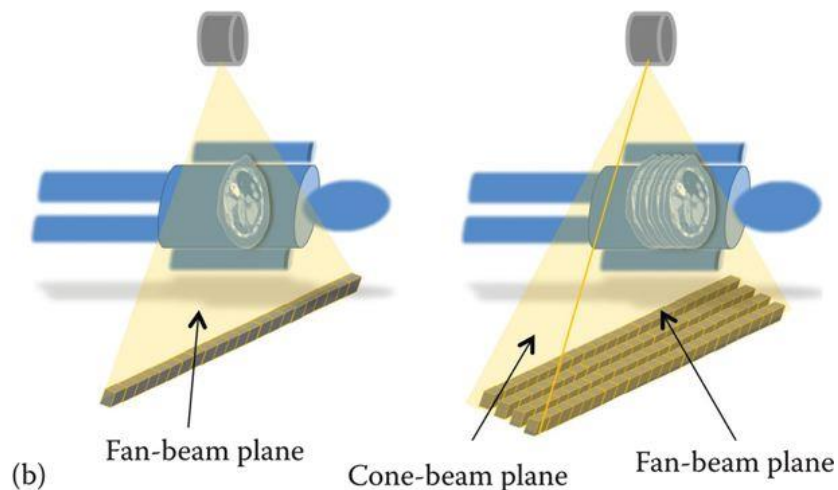


# Τρόποι καταγραφής τομογραφικών εικόνων

- Το εξεταζόμενο άτομο παραμένει σταθερό κατά τη διάρκεια μιας πλήρους περιστροφής
- Ο σωλήνας ακτίνων X κλείνει και ανοίγει ξανά πριν την επόμενη καταγραφή
- Πιο αργός τρόπος που επηρεάζεται από την πιθανή κίνηση (π.χ. αναπνοή)



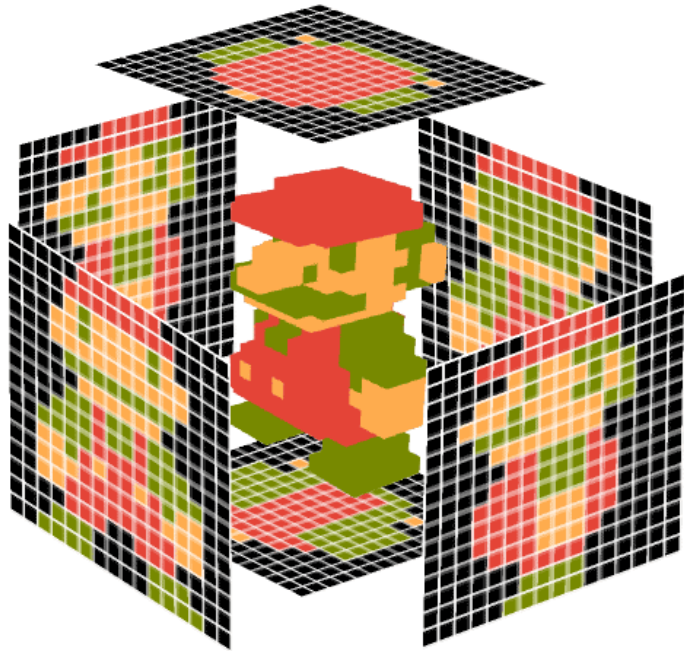
- Συνεχής κίνηση του ατόμου κατά τη διάρκεια της περιστροφής
- Η πηγή ακτίνων X κινείται κατά μήκος μιας έλικοειδούς τροχιάς
- Πιο γρήγορος τρόπος σάρωσης



Μονή συστοιχία  
ανίχνευσης

Πολλαπλές  
συστοιχίες ανίχνευσης

# Η έννοια της προβολής

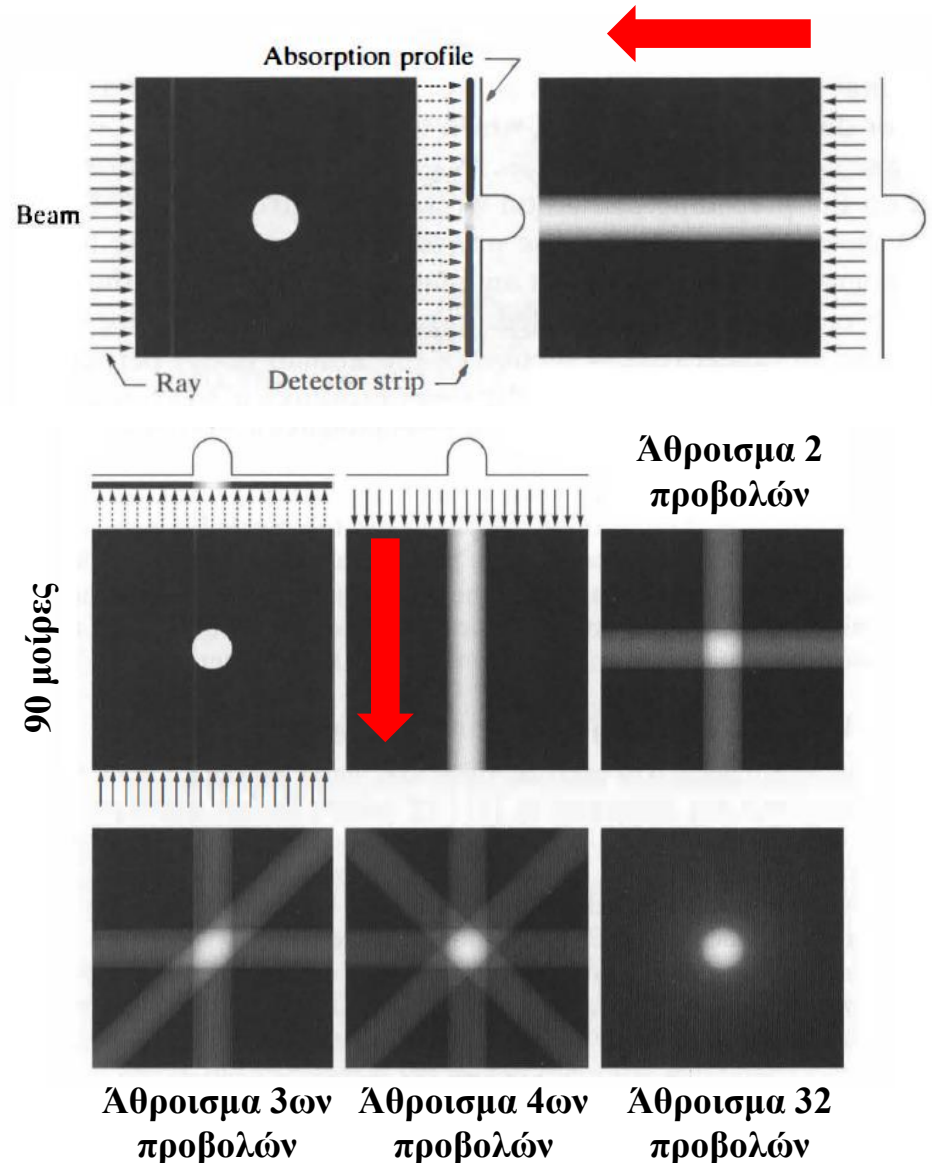


<https://www.blogsolute.com/create-3d-characters-from-2d-image/24571/>



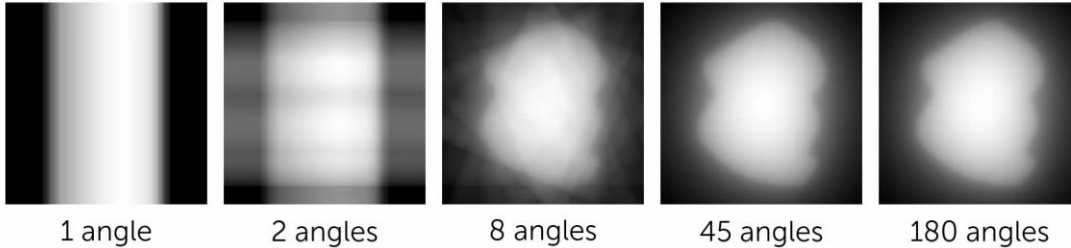
Μπορώ να ανακατασκευάσω ένα τρισδιάστατο αντικείμενο αν συνδυάσω πολλές προβολές που έχουν ληφθεί υπό διαφορετικές γωνίες;

## Αλγόριθμος Back-Projection



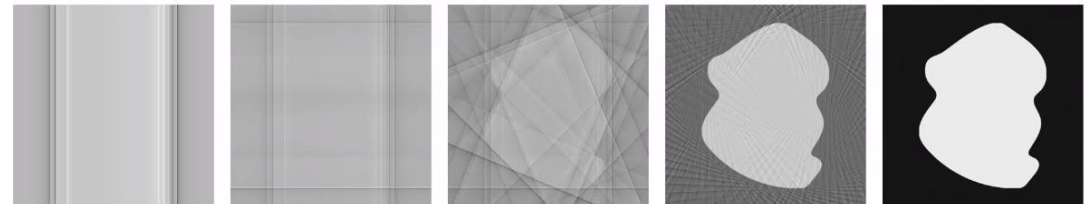
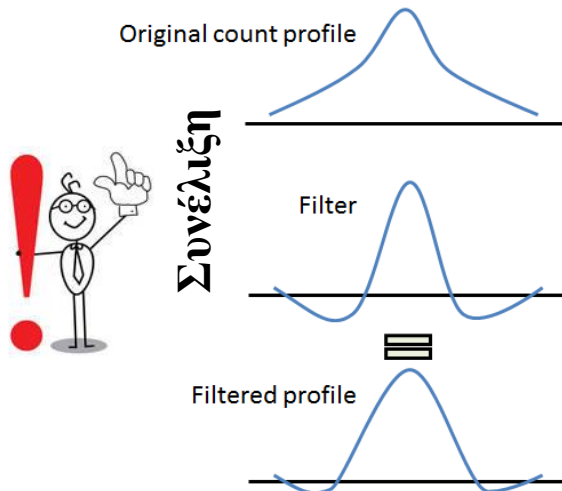
# Filtered Back-Projection

backprojection



Πώς μπορώ να βελτιώσω τη θολή εικόνα που προκύπτει από τον απλό αλγόριθμο Back-Projection;

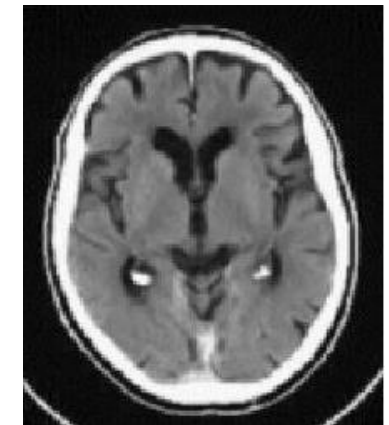
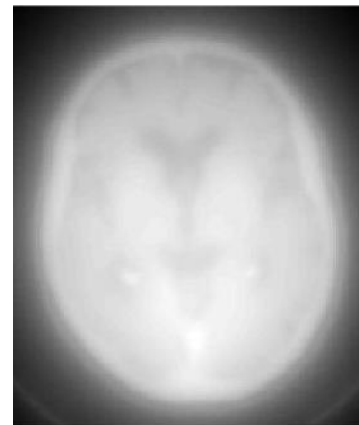
**Χρησιμοποιώντας ένα φίλτρο!**



filtered backprojection

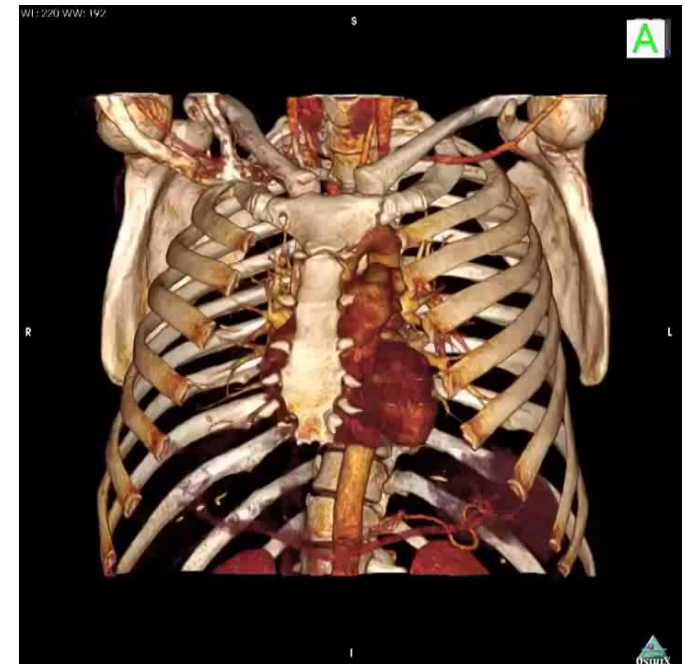
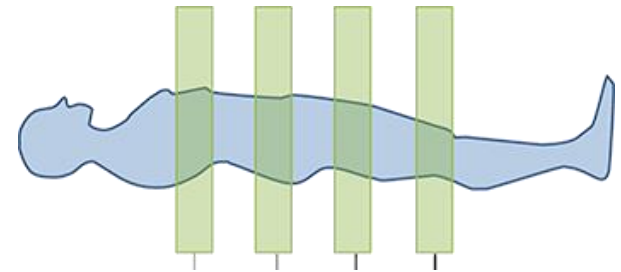
Computed Tomography and the ASTRA Toolbox training course

Οπισθοπροβάλλουμε το φιλτραρισμένο προφίλ και όχι αυτό που έχει αρχικά καταγραφεί!

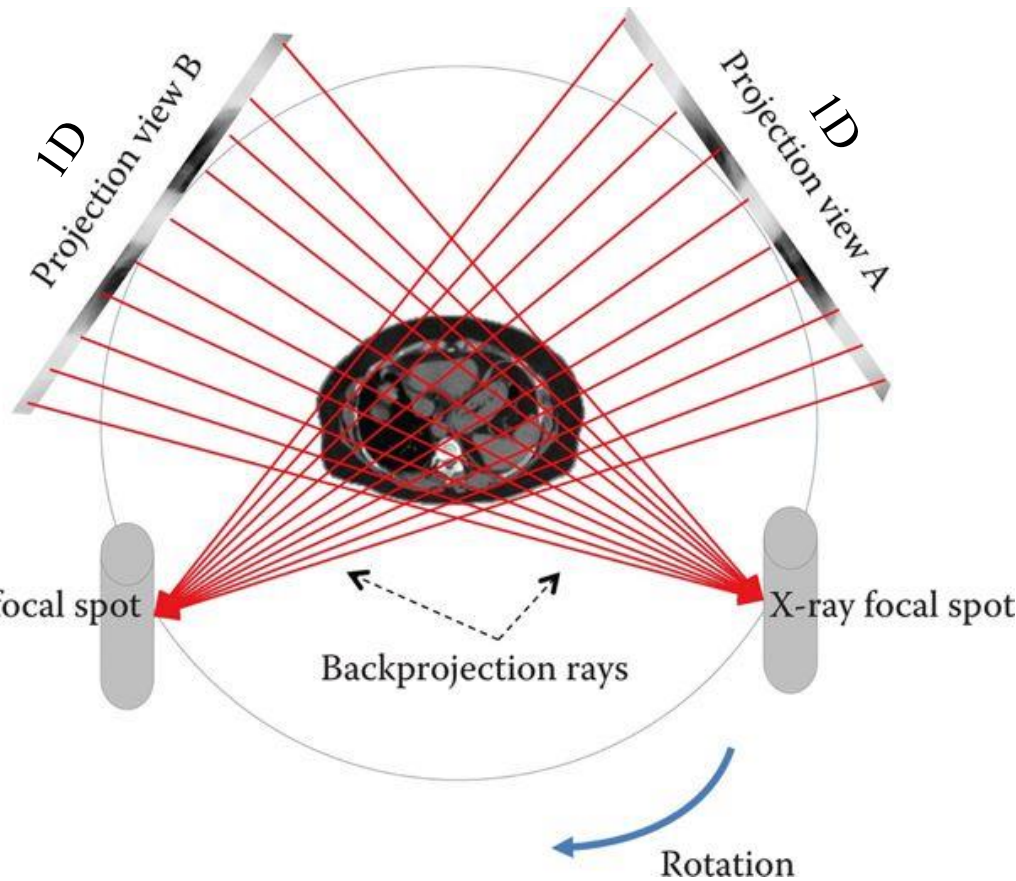


# Ανακατασκευή εικόνας στον αξονικό τομογράφο

Συνδυασμός πολλών τομών



<https://www.youtube.com/watch?v=hO5HRzPrKV4>





# Εφαρμογές αξονικής τομογραφίας (κλινικές)

3D ανακατασκευή ολόκληρου του σώματος



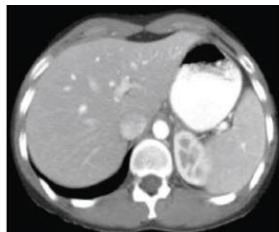
Coronal άποψη κοιλιάς /λεκάνης



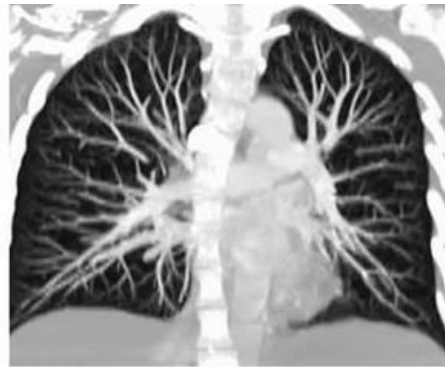
Sagittal άποψη κοιλιάς /λεκάνης



Axial άποψη κοιλιάς /λεκάνης



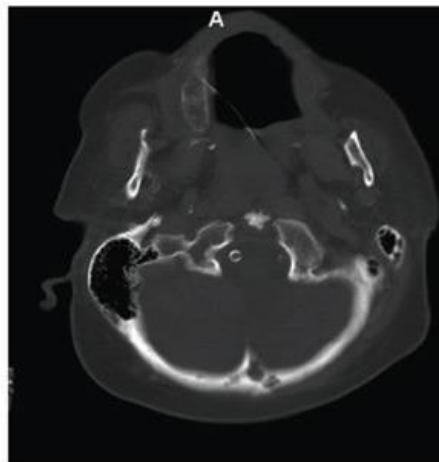
Απεικόνιση πνευμόνων με χρήση παράγοντα αντίθεσης



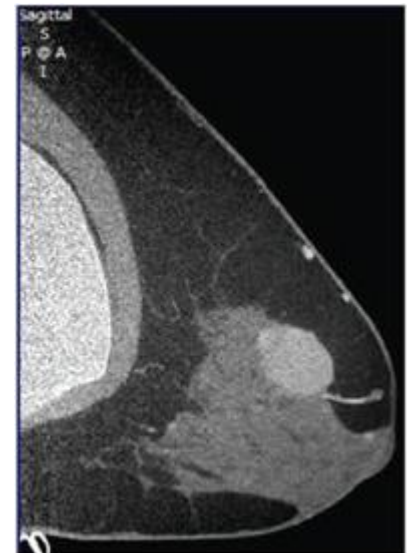
Απεικόνιση κάτω άκρου



Απεικόνιση κεφαλιού

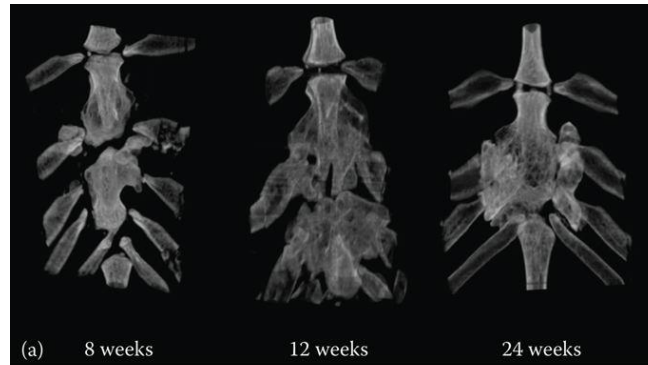


Απεικόνιση μαστού με χρήση παράγοντα αντίθεσης

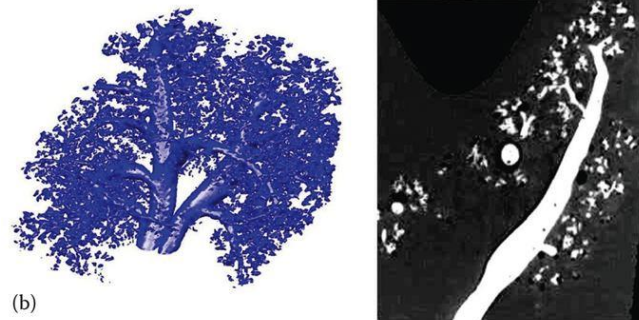


# Εφαρμογές αξονικής τομογραφίας (προκλινικές)

Διαδικασία επούλωσης  
στέρνου κουνελιού  
έπειτα από ράγισμα

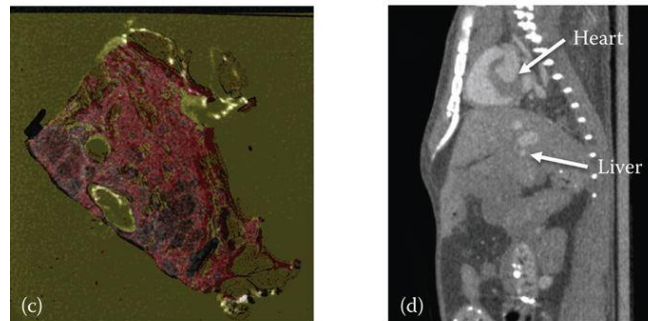


3D ανακατασκευή  
αεραγωγών στους  
πνεύμονες ποντικού

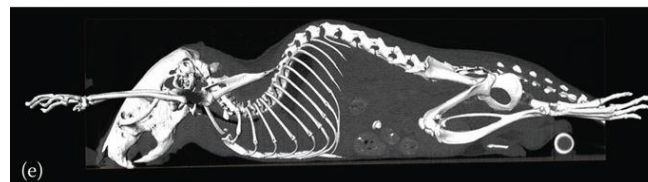


Δείγμα καρκινικού  
ιστού

Απεικόνιση κοιλιάς  
ποντικού με χρήση  
παράγοντα αντίθεσης



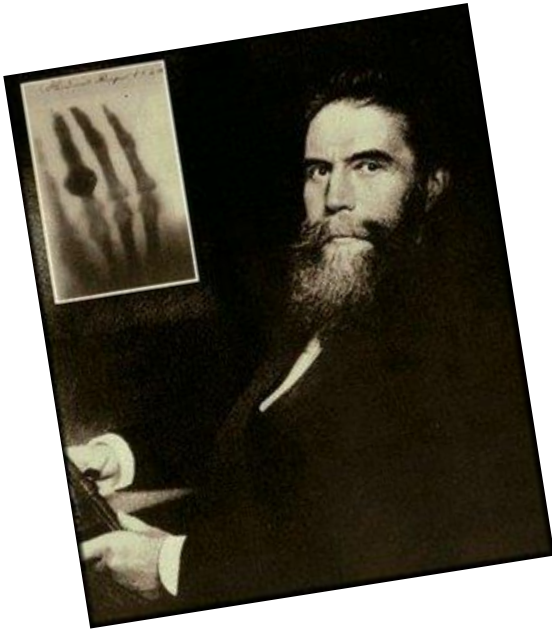
In vivo απεικόνιση  
σώματος ποντικού



3D ανακατασκευή  
σώματος ποντικού



# Ποια ερωτήματα πρέπει να μπορούμε να απαντάμε;



- Τί είναι οι ακτίνες X και πώς παράγονται;
- Πώς αλληλεπιδρούν με τον ιστό;
- Πώς λειτουργεί ένας σύγχρονος αξονικός τομογράφος;
- Πώς γίνεται η ανακατασκευή των εικόνων;
- Τί είδους βιολογική πληροφορία μπορούν να μας παρέχουν;