

Ο ΑΞΘΝΙΚΟΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΟΣ

ΚΟΡΙΤΣΙΔΗΣ ΚΩΝΣΤΑΝΤΙΝΟΣ

ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ

Εισαγωγή

“It seemed at first a new kind of invisible light. It was clearly something new, something unrecorded.”

(σχόλιο της “ατυχούς” ανακάλυψης των ακτίνων X)

- Wilhelm Röntgen

Στο πλαίσιο της σημερινής παρουσίασης συμπεριλαμβάνονται:

- Σύντομη ιστορική αναδρομή
- Αρχές λειτουργίας του αξονικού τομογράφου
- Τεχνικά/κατασκευαστικά χαρακτηριστικά (συνοπτικά)
- Φυσική της αξονικής τομογραφίας
- Αλληλεπίδραση με τον ασθενή
- Συγκριτικά με την μαγνητική τομογραφία (MRI)

Ιστορική αναδρομή

Οι άνθρωποι που εφηύραν και εφάρμοσαν πρώτοι τον αξονικό τομογράφο στο ευρύτερο φάσμα μεθόδων διάγνωσης της διαγνωστικής ιατρικής, ήταν ο βρετανός μηχανικός **Godfrey Hounsfield** και ο αμερικανός φυσικός **Dr. Allan Cormack**.

Αργότερα για αυτή τους την προσφορά στην επιστήμη, τους απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ Φυσιολογίας και Ιατρικής το έτος 1979.



Στην εικόνα φαίνεται ο Godfrey Hounsfield με τον πρώτο ολοκληρωμένο αξονικό τομογράφο εμπορικής χρήσης . Το μηχάνημα ολοκληρώθηκε το έτος 1972 ενώ μόλις από το 1973 η αμερικανική κυβέρνηση είχε εγκαταστήσει τα πρώτα μηχανήματα στα νοσοκομεία.

Μέχρι το έτος 1980 , είχαν πραγματοποιηθεί τρεις εκατομμύρια εξετάσεις που συμπεριλάμβαναν χρήση αξονικού τομογράφου.



Επιπλέον , άξιοι αναφοράς για την συνδρομή τους στην τελική διάταξη είναι ο αυστριακός μαθηματικός **Johann Radon** και ο πολωνός μαθηματικός **Stefan Kaczmarz**.

Ο πρώτος είναι ο εφευρέτης του ολοκληρωτικού μετασχηματισμού Radon (1917) , ο οποίος χρησιμοποιείται για την κατασκευή των εικόνων σε μια αξονική τομογραφία. Θεωρείται ως η μαθηματική ανακάλυψη που έδωσε ζωή σε αυτήν την νέα για εκείνους τους καιρούς τεχνολογία.

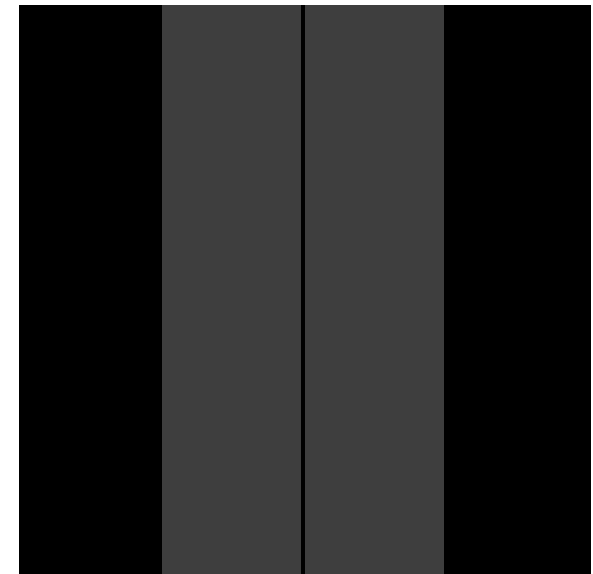
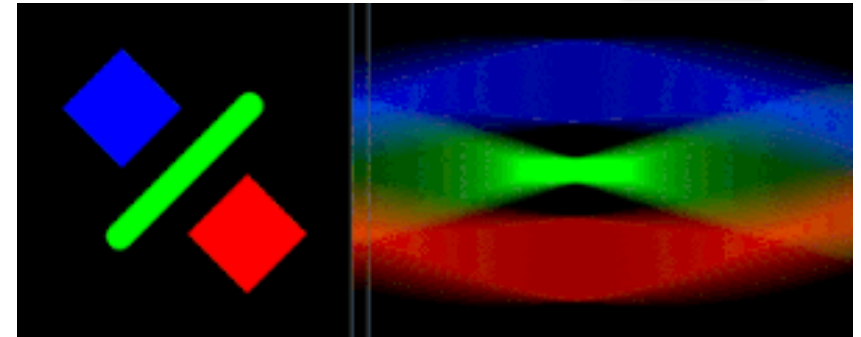
Ο δεύτερος ανακάλυψε την επονομαζόμενη τεχνική αλγεβρικής ανοικοδόμησης ή αλλιώς μέθοδος Kaczmarz (1937), μια τεχνική επαναλαμβανόμενης ανοικοδόμησης της εικόνας από μια σειρά διαδοχικών γωνιακών προβολών.

Και οι δύο από αυτές τις μεθόδους αξιοποιήθηκαν από τον Hounsfield , ο οποίος αργότερα ολοκλήρωσε την διαγνωστική συσκευή.



Ζωντανή απεικόνιση της μεθόδου Radon. Η εικόνα δίνει μια πρώτη ιδέα για την κατανόηση της μεθόδου αν παρατηρήσει κανείς το ίχνος που σχηματίζεται (sinogram) στα δεξιά , σε σχέση με τα περιστρεφόμενα σχήματα.

Ακολουθεί η απεικόνιση της μεθόδου Kaczmarz.

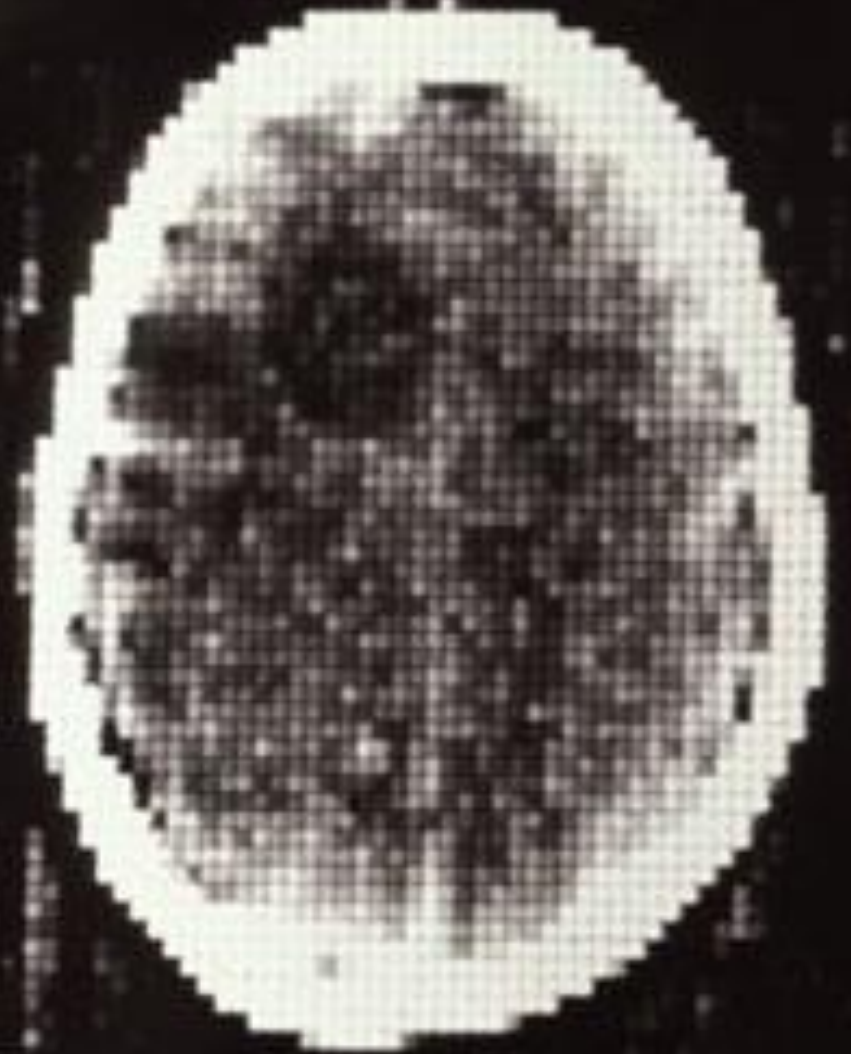


Η πρώτη εξέταση στην οποία χρησιμοποιήθηκε ο αξονικός τομογράφος έγινε σε μια γυναίκα, που οι γιατροί πίστευαν ότι υπέφερε από καρκίνο του εγκεφάλου.

Ωστόσο, η διαδικασία της εξέτασης ήταν χρονοβόρα, καθώς το μηχάνημα χρειαζόταν πολύ ώρα για να συγκεντρώσει έναν ικανό αριθμό δεδομένων.

Το ίδιο ίσχυε για την διαδικασία ανακατασκευής της εικόνας, η οποία διήρκησε από μόνη της μερικές μέρες.

Η εικόνα που προέκυψε έπειτα από την πολύωρη επεξεργασία φαίνεται δεξιά.



Η προηγούμενη εικόνα μπορεί άμεσα να συγκριθεί με την εικόνα που φαίνεται στα δεξιά. Πρόκειται για την πρώτη φωτογραφία που πάρθηκε με την χρήση ακτίνων X (ακτινογραφία), από τον ίδιο τον άνθρωπο που τις ανακάλυψε , τον φυσικό Wilhelm Roentgen.

Παρά ωστόσο τις πολλαπλές ομοιότητες , οι εικόνες αυτές διαφέρουν ως προς την τεχνογνωσία και την επιστήμη που χρειάστηκε για να δημιουργηθούν.

Ανεξαρτήτως και οι δύο αποτελούν αναπόσπαστα σημεία της ιστορίας της ενασχόλησης του ανθρώπου με τις ακτίνες X.

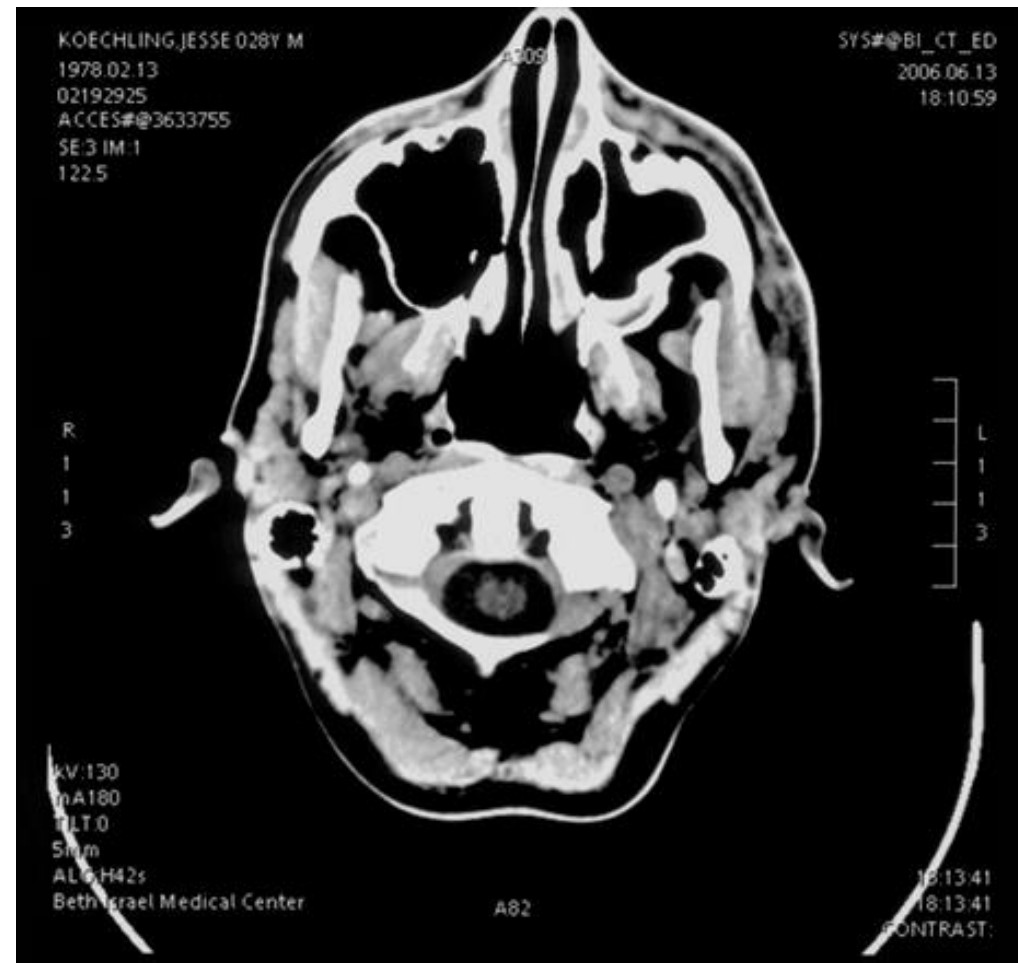



Αρχές λειτουργίας

- Η αρχή λειτουργίας ενός αξονικού τομογράφου είναι απλή. Περιλαμβάνει την λήψη εγκάρσιων διατομών (slices) μιας περιοχής του ανθρωπίνου σώματος με την χρήση διαπεραστικών ακτίνων Χ.
- Οι ακτίνες αυτές προβάλλονται στο ανθρώπινο σώμα από μια λυχνία ακτίνων Χ, η οποία μπορεί να εκτελέσει κυκλική κίνηση από μία συγκεκριμένη απόσταση γύρω από τον ασθενή.
- Οι δέσμες ακτινοβολίας των ακτίνων Χ, εξέρχονται από την έμβια ύλη ελαφρώς εξασθενημένες, πράγμα που οφείλεται στην μερική απορρόφηση των ακτίνων από τους διάφορους ιστούς του ανθρωπίνου σώματος.
- Η πορεία των ακτίνων λαμβάνει τέλος όταν αυτές φτάνουν στον ειδικό ανιχνευτή, ο οποίος βρίσκεται και κινείται πάντα σε σημείο αντιδιαμετρικό ως προς αυτό της λυχνίας.



- Ο ανιχνευτής είναι συνδεδεμένος με έναν ηλεκτρονικό υπολογιστή στον οποίο μεταφέρει την πληροφορία των ακτίνων X, υπό την μορφή ηλεκτρικών σημάτων.
- Ο ηλεκτρονικός υπολογιστής έπειτα “ράβει” τα κομμάτια της εικόνας μαζί και εμφανίζει το τελικό αποτέλεσμα.
- Δεξιά φαίνεται μια αξονική εγκεφάλου.





Ωστόσο, οι αρχές αυτές δεν χαρακτηρίζουν όλο το πλήθος των συσκευών που χρησιμοποιούνται στην αξονική τομογραφία. Με την συνεχή πρόοδο της τεχνολογίας έχουν υπάρξει αξονικοί τομογράφοι που υιοθετούν διαφορετική φιλοσοφία λειτουργίας.

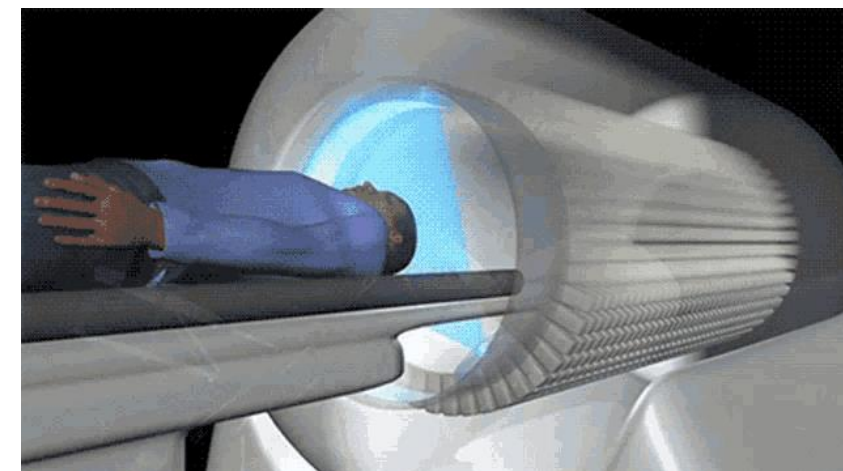
Θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά στους αξονικούς τομογράφους 3^{ης} και 4^{ης} γενιάς οι οποίοι φέρουν και τις μεγαλύτερες αλλαγές σχεδιαστικά.

Αξονικοί τομογράφοι 3^{ης} γενιάς

Οι αξονικοί τομογράφοι 3^{ης} γενιάς διαφοροποιούνται από την απλή διάταξη λυχνία – ανιχνευτή που είδαμε προηγουμένως. Σε αυτό το είδος αξονικού τομογράφου εντοπίζεται (έναντι του ενός ανιχνευτή) μια σειρά ανιχνευτών σε μορφή τόξου κύκλου. Το σύστημα ανιχνευτών – πηγής εκτελεί παρόμοια κίνηση με προηγουμένως. Το πλεονέκτημα αυτής της γενιάς αξονικών τομογράφων είναι ότι οι ανιχνευτές λόγω του τρόπου διάταξης τους, μπορεί να καλύψουν ένα ολόκληρο όργανο σε μια μόνο περιστροφή της λυχνίας. Σαν αποτέλεσμα η εξέταση διαρκεί πολύ λιγότερο από ότι σε άλλους αξονικούς τομογράφους.

Να σημειωθεί ότι αυτή είναι η διάταξη που είναι πιο διαδεδομένη στις μέρες μας (λόγω ταχύτητας, κατασκευαστικής απλότητας και άριστης ποιότητας εικόνας).

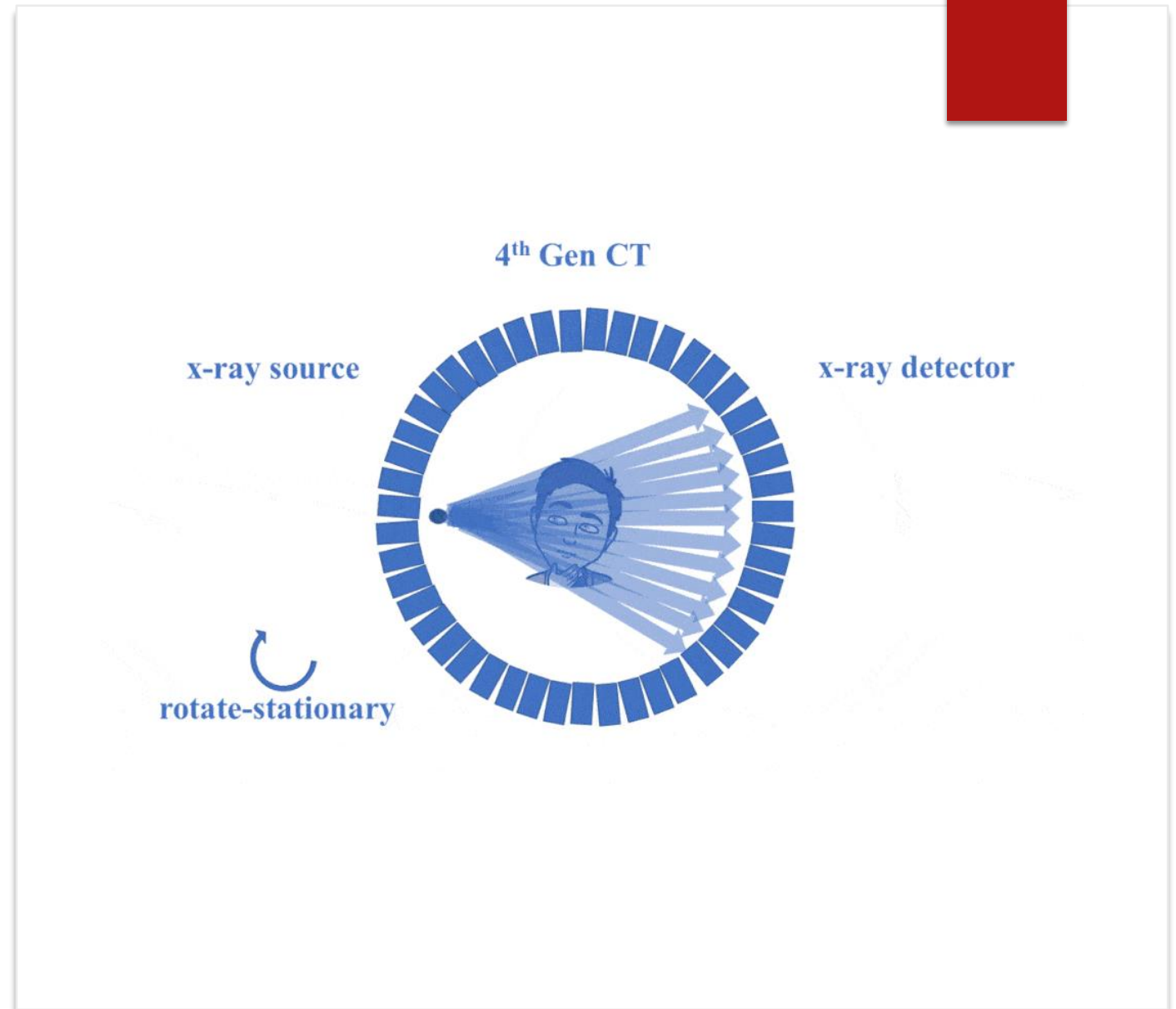
3rd Gen CT



Αξονικοί τομογράφοι 4^{ης} γενιάς

Η διάταξη αυτή διαφοροποιείται πλήρως από όλες τις προηγούμενες για τον εξής λόγο. Το σύστημα των ανιχνευτών τώρα είναι τοποθετημένο σε σταθερό σημείο, περιβάλλοντας εξ ολοκλήρου τον ασθενή (rotate – stationary geometry). Το μόνο κινούμενο μέρος στην συσκευή είναι η λυχνία των ακτίνων X, η οποία περιστρέφεται κυκλικά όπως και στις προηγούμενες περιπτώσεις.

Παρά τον αισιόδοξο σχεδιασμό του δεν κατάφερε να υπερνικήσει τον αξονικό 3^{ης} γενιάς, που χρησιμοποιείται μαζικά σε διαγνωστικές εξετάσεις.



Τεχνικά - Κατασκευαστικά χαρακτηριστικά

Θα κάνουμε μια σύντομη αναφορά ,σε μερικά από τα τεχνικά χαρακτηριστικά του αξονικού τομογράφου:

- Γεννήτρια: 20 -150 kVolts , αναλόγως την επιθυμητή ένταση ακτινοβολίας
- Μονάδα σάρωσης ,συμπεριλαμβάνει:
 - Σωλήνας ακτίνων X (εκεί γίνεται η μετατροπή των ηλεκτρονίων σε ακτίνες X) ή αλλιώς λυχνία ακτίνων X.
 - Ανιχνευτές
 - Κατευθυντήρες (collimators): Μειώνουν την έκθεση του ασθενή στην ακτινοβολία και βελτιώνουν την εικόνα
- Τραπέζι του ασθενή: Κινείται μέσα από την μονάδα σάρωσης

Φυσική της αξονικής τομογραφίας

Η μέθοδος της αξονικής τομογραφίας βασίζεται στην αποτελεσματικότητα της, στις ιδιότητες των ενεργειακών φωτονίων που συνιστούν τις ακτίνες X όταν αυτές αλληλοεπιδρούν με την έμβια ύλη.

Το πρώτο και σημαντικότερο κομμάτι αυτής της αλληλεπίδρασης που πρέπει να κατανοήσει ένας νέος ακτινικός φυσικός είναι το φαινόμενο της εξασθένησης της ακτινοβολίας κατά την διέλευση της μέσα από την ύλη.

Η γενική σχέση που εκφράζει τον ρυθμό εξασθένισης της δέσμης ακτινοβολίας είναι η παρακάτω:

$$I_x = I_0 e^{-\mu x}$$

Όπου I_x η ένταση σε σχέση με την απόσταση που έχει ταξιδέψει η δέσμη μέσα σε υλικό, I_0 η ένταση της ακτινοβολίας την στιγμή που εξέρχεται από την λυχνία και μ ο συντελεστής γραμμικής εξασθένισης.

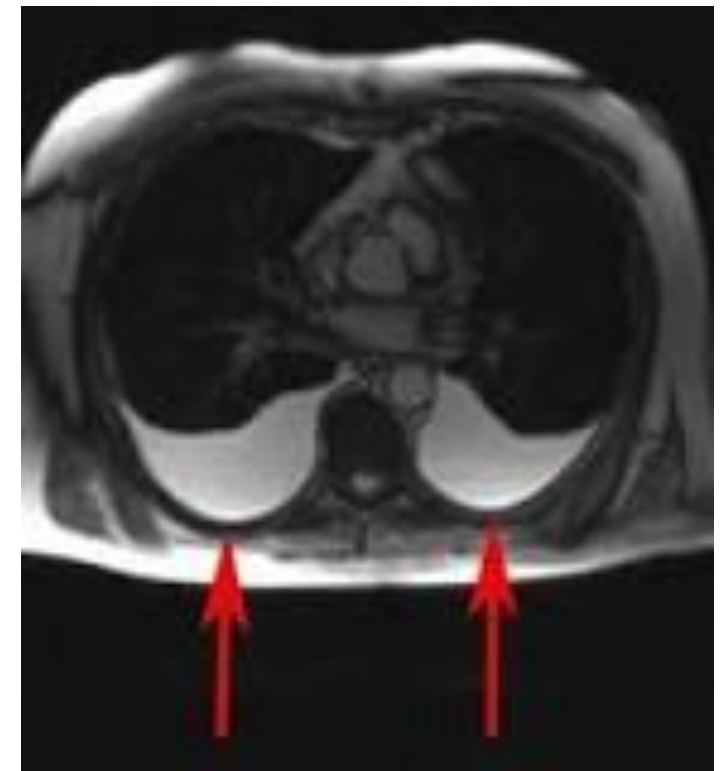
Ο παραπάνω φυσικός νόμος είναι γνωστός ως **νόμος Beer** και περιγράφει γενικότερα την εξασθένιση που δέχεται το φως αναλόγως με τις ιδιότητες του μέσου στο οποίο ταξιδεύει.

Φυσικά, η εξασθένιση δεν εξαρτάται μόνο από την απόσταση όπως φαίνεται παραπάνω. Ο γραμμικός συντελεστής "κρύβει" μέσα του έναν όρο πυκνότητας ο οποίος επηρεάζει δραστικά την τιμή της έντασης.

Ο ρυθμός εξασθένησης είναι ζωτικής σημασίας για την διαγνωστική διαδικασία γιατί είναι η πληροφορία η οποία μεταφράζεται για να αποδώσει την τελική εικόνα.

Για παράδειγμα , θεωρώντας ότι ένα όργανο αποτελείται από ένα συγκεκριμένο είδους ιστού ο οποίος διατάσσεται ομοιογενώς, οποιαδήποτε διαφοροποίηση στην εξασθένηση των δεσμών κατά τον όγκο του μπορεί να υποδηλώσει κάποια ανωμαλία στην εσωτερική δομή του (περιοχές διαφορετική πυκνότητας όπως μερική νέκρωση ή οίδημα).

Ζωντανό παράδειγμα αποτελεί η διάγνωση πνευμονίας με ακτινογραφία, λόγω της μεγάλης συσσώρευσης υγρού στους πνεύμονες (το υγρό φέρει μεγαλύτερη πυκνότητα από τον περιβάλλον αέριο μέσα στον πνεύμονα επομένως απορροφάει περισσότερη ακτινοβολία).

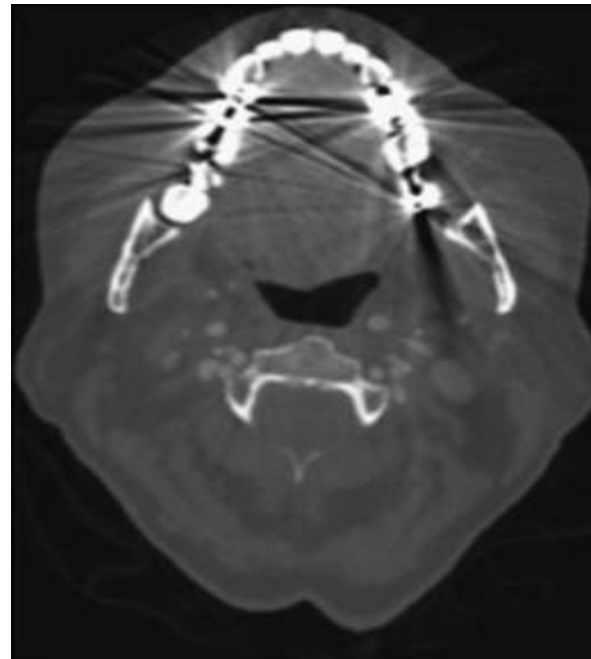


Κλίμακα του Hounsfield η οποία καθορίζεται από το μ του ιστού και το μ του νερού

$$CT\ number\ (HU) = 1000 \times (\mu_{material} - \mu_{water}) / (\mu_{water})$$

Η κλίμακα αυτή καθορίζει την αντίθεση της εικόνας στην αξονική τομογραφία. Υψηλότερες τιμές στην κλίμακα θα αυξήσουν την αντίθεση με την οποία προβάλλεται ο συγκεκριμένος ιστός.

Hounsfield Units (HU)	Material
>1000	Bone, calcium, metal
100 to 600	Iodinated CT contrast
30 to 500	Punctate calcifications
60 to 100	Intracranial haemorrhage
35	Grey matter
25	White matter
20 to 40	Muscle, soft tissue
0	Water
-30 to -70	Fat
	Air



Σε αυτό αποδίδεται και το χαρακτηριστικό άσπρο χρώμα των οστών σε μια ακτινογραφία.

Το ασβέστιο που βρίσκεται κατά μεγάλη συγκέντρωση στα οστά απορροφά τις ακτίνες Χ.

Ο ρυθμός απορρόφησης εξαρτάται από τον ατομικό αριθμό (αριθμός των πρωτονίων) του κάθε στοιχείου. Κατ' επέκταση τα οστά απορροφούν περισσότερο τις ακτίνες Χ και εμφανίζονται στην ακτινογραφία με μεγάλη αντίθεση σε σχέση με άλλους ιστούς.

Αυτό κάνει τις αξονικές εξαιρετική μέθοδο για λεπτεπίλεπτη μελέτη ενός σπασμένου ή ραγισμένου οστού.

Στην φωτογραφία , υπολογιστική τομογραφία της περιοχής της λεκάνης και της κοιλιάς.



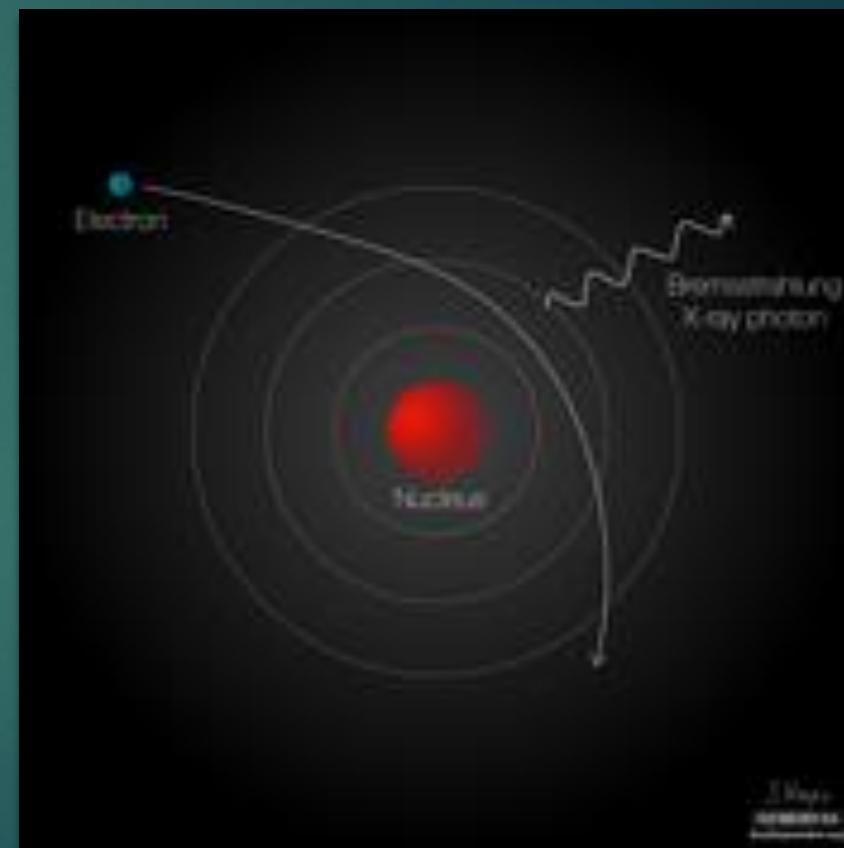
Φαινόμενα πέδησης – Παραγωγή ακτίνων X

Η διαδικασία παραγωγής ακτίνων X είναι και αυτή άξια αναφοράς.

Παράγονται από την αλληλεπίδραση ηλεκτρονίων με άτομα μετάλλων. Πιο συγκεκριμένα κατά την πρόσκρουση ταχύτατων δεσμών ηλεκτρονίων σε μια μεταλλική επιφάνεια.

Οι ίδιες οι ακτίνες X ωστόσο ,παράγονται από τα φαινόμενα πέδησης που προκαλούν τα ηλεκτρόνια τα οποία κινούνται στην περιοχή των ατόμων του μετάλλου. Οι ακτίνες X είναι με λίγα λόγια δευτερογενής ακτινοβολία πέδησης (**Bremsstrahlung -> Brems + Strahlung**)!

Παράγονται κατά την μερική ανάκλαση ή επιβράδυνση των ηλεκτρονίων κοντά στους πυρήνες των μετάλλων ,λόγω των πεδίων δυνάμεων που αυτοί δημιουργούν.



Ιονισμός ατόμων – Παραγωγή ακτίνων Χ

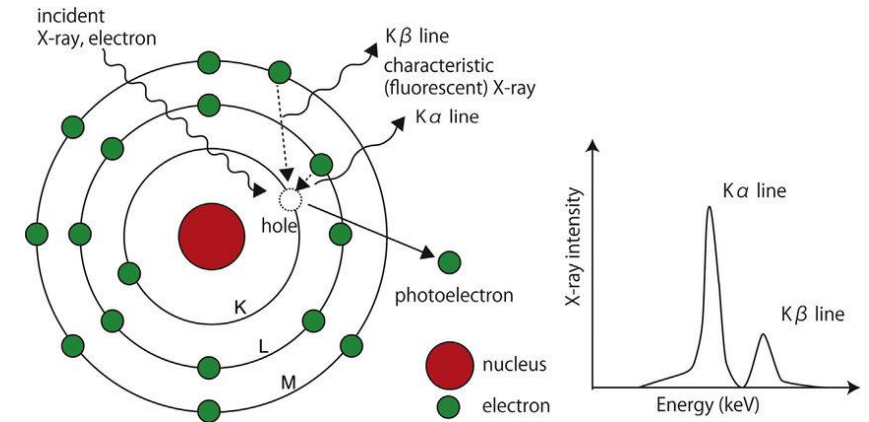
Τα φαινόμενα πέδησης προκαλούν μόνο κατά ένα μέρος την παραγωγή ακτίνων Χ.

Το υπόλοιπο παράγεται κατά την διαδικασία σύγκρουσης των ηλεκτρονίων της δέσμης με βασικά ηλεκτρόνια του ατόμου του μετάλλου.

Το ηλεκτρόνιο “συγκρούεται” με ένα ηλεκτρόνιο βασικής δέσμης διώχνοντας το από το άτομο και αφήνοντας πίσω μια οπή. Έπειτα, ηλεκτρόνια εξωτερικών στοιβάδων καλύπτουν την οπή εκπέμποντας την ενεργειακή διαφορά σε μορφή φωτονίου.

Τα φωτόνια αυτά φέρουν την απαραίτητη ενέργεια για να κατανεμηθούν στο φάσμα των ακτίνων Χ.

Οι συγκεκριμένες ακτίνες Χ ονομάζονται χαρακτηριστικές γιατί είναι μοναδικές για το κάθε μεταλλικό στοιχείο από την ενέργεια τους.



Αλληλεπίδραση με τον ασθενή

Οι ακτίνες Χ κατατάσσονται στις ιονίζουσες ακτινοβολίες και σαν αποτέλεσμα μπορούν να αλληλοεπιδράσουν με τον ασθενή, ιοντίζοντας τα άτομα του υδρογόνου στα μόρια του νερού και διασπώντας τα σε υδροξύλιο (OH^-) και ελεύθερο υδρογόνο (H^+) (**ρίζες**).

Αυτά τα ιόντα όντας εξαιρετικά αντιδραστικά, συνδέονται με τους ιστούς και τους διασπάνε , προκαλώντας μεταλλάξεις οι οποίες με την σειρά τους αυξάνουν την πιθανότητα εμφάνισης ασθενειών όπως του καρκίνου.

Βλάπτουν επομένως τον ανθρώπινο οργανισμό έμμεσα (μέσω χημικών διεργασιών) και όχι άμεσα σε αντίθεση με άλλα πιο ενεργειακά είδη ακτινοβολιών.



Οι ειδικοί χαρακτηρίζουν την δόση ακτινοβολίας που λαμβάνει ο ασθενής κατά την διάρκεια μιας ακτινολογικής εξέτασης ως **ενεργό δόση**.

Μετριέται κυρίως σε Sv (Sievert). Το μέτρο επικινδυνότητας της εξέτασης συγκρίνεται πάντα με το μέτρο της ακτινοβολίας περιβάλλοντος ($1.5\text{mSv} - 3.5\text{mSv} / \text{year}$) που ο ίδιος ιστός θα απορροφούσε υπό φυσιολογικές συνθήκες.

Φυσικά ,η δόση που λαμβάνει ο κάθε ιστός δεν είναι η ίδια γιατί διαφορετικοί ιστοί απορροφούν την ακτινοβολία με συγκεκριμένο τρόπο.

Αναφέρονται δόσολογίες από τις
συνηθέστερες αξονικές εξετάσεις :

Common types of CT scans and the amount of radiation you would absorb from them include:

- Belly and pelvis: 10 mSv, equal to about 3 years of background radiation
- Colonography: 6 mSv, equal to about 2 years of background radiation
- Head: 2 mSv, equal to about 8 months of background radiation
- Spine : 6 mSv, equal to about 2 years of background radiation
- Chest: 7 mSv, equal to about 2 years of background radiation
- Lung cancer screening: 1.5 mSv, equal to about 6 months of background radiation
- Coronary angiography (CTA): 12 mSv, equal to about 4 years of background radiation
- Cardiac (for calcium scoring): 3 mSv, equal to about 1 year of background radiation

Σε πολλές περιπτώσεις όμως, ο κίνδυνος που μπορεί να προκαλέσει μια αξονική τομογραφία , είναι αμελητέος με αυτό το οποίο θα προσφέρει αν διεξαχθεί.

Είναι γεγονός ότι μια προληπτική εξέταση η οποία περιλαμβάνει την χρήση αξονικού τομογράφου, μπορεί να είναι η διαφορά ανάμεσα στην ζωή και στον θάνατο.

Είναι αδιαμφισβήτητα μια από τις ισχυρότερες ιατρικές μεθόδους διάγνωσης , η οποία έχει σώσει αμέτρητες ζωές από την εφαρμογή της.

Συγκριτικά με μαγνητική τομογραφία (MRI)

Σε σχέση με την μαγνητική τομογραφία μια αξονική:

- Είναι καλύτερη στην εξέταση οστών και οργάνων
- Διαρκεί μερικά λεπτά
- Χρησιμοποιεί ιοντίζουσα ακτινοβολία

Ενώ η μαγνητική σε σχέση με την αξονική :

- Εξετάζει καλύτερα περιοχές μαλακού ιστού
- Δεν χρησιμοποιεί ιοντίζουσα ακτινοβολία αλλά ραδιοσυχνότητες
- Διαρκεί περίπου μισή ώρα



Ευχαριστώ για
την προσοχή
σας!



Πηγές

- <https://www.webmd.com/cancer/radiation-doses-ct-scans>
- <https://medlineplus.gov/xrays.html>
- <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK574548/>
- <https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/medical-x-ray-imaging/what-are-radiation-risks-ct>
- <https://case.edu/med/neurology/NR/CT%20Basics.htm>
- <https://www.progmedphys.org/journal/view.html?doi=10.14316/pmp.2021.32.1.1>
- <https://howradiologyworks.com/ctgenerations/>
- <https://eclass.duth.gr/modules/document/file.php/TMA489/Βιοϊατρική%20Μαθημα6-CT.pdf>
- <https://catalinaimaging.com/history-ct-scan/>
- <https://openmedscience.com/advancements-in-computed-tomography-scanners/>