

Εισαγωγή στην Βιοϊατρική Τεχνολογία

Βασικές έννοιες σύγχρονης φυσικής

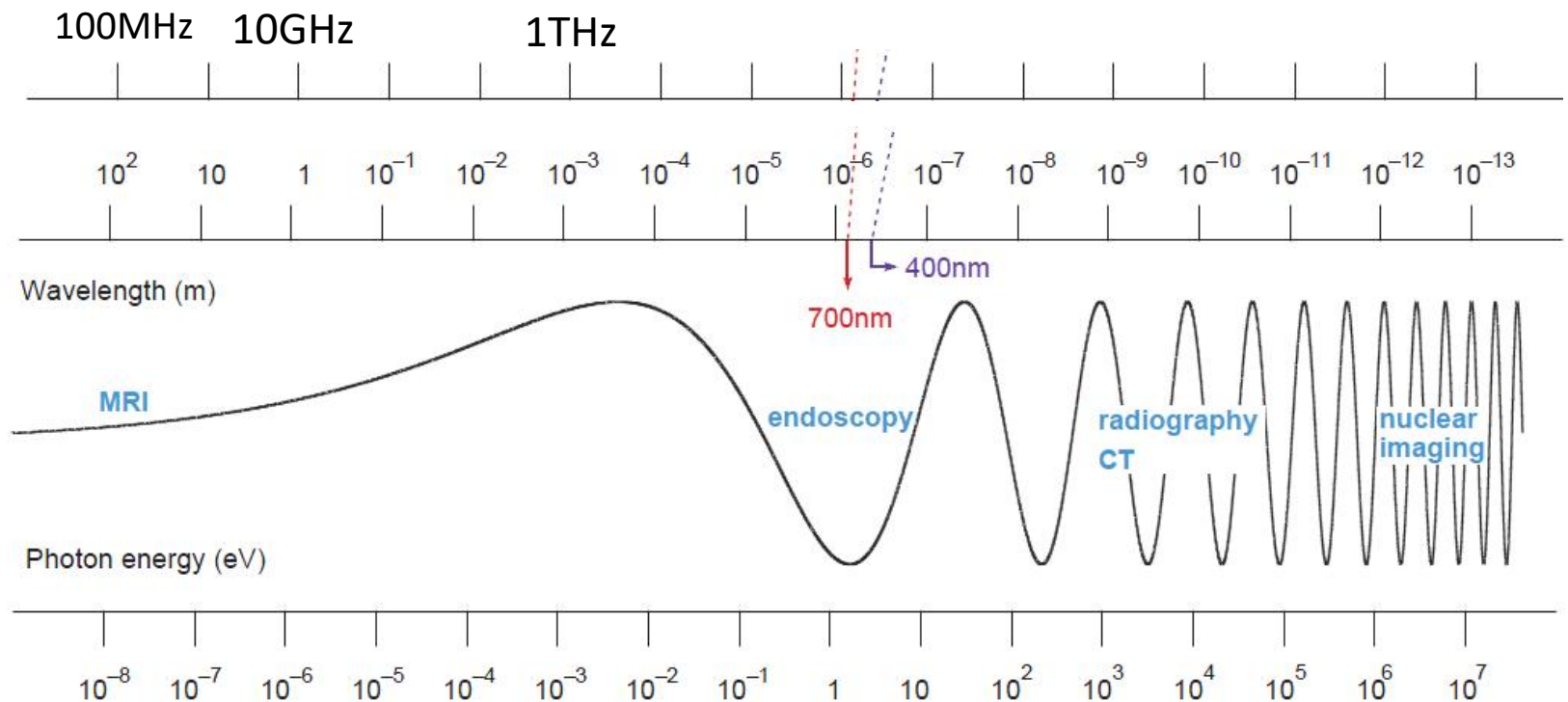
- Ατομικός αριθμός Z : ο αριθμός των πρωτονίων ενός πυρήνα
- Μαζικός αριθμός A : ο αριθμός των πρωτονίων και νετρονίων ενός πυρήνα
- Προφανώς $A=Z+N$
- Σε A gr όποιουδήποτε στοιχείου, περιέχονται $N_A=6.022 \times 10^{23}$ άτομα του στοιχείου
- Σταθεροί πυρήνες
- Ατομική μάζα $M=(1/12)$ μάζας του ^{12}C , $=931.5\text{MeV}/c^2$. Το $M <$ της μάζας ηρεμίας όλων των νουκλεονίων ενός πυρήνα, λόγω της ενέργειας σύνδεσης

Ισότοπα

- Πυρήνες με ίδιο A (αριθμό πρωτονίων) και διαφορετικό συνολικό αριθμό νουκλεονίων (Z) καλούνται ισότοπα.
- Σταθεροί πυρήνες (μη ραδιενεργοί): $A/Z \sim 0.5$, για μικρά A , ενώ για μεγαλύτερα A , $A/Z \sim 0.4$. Αν A και Z είναι άρτιοι αριθμοί αυξάνει η πιθανότητα ένα ισότοπο να είναι σταθερός πυρήνας.
- Ατομική μάζα:
- Mass excess:

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης

- jkdlij



Παράδειγμα

- Φωτόνιο ραδιοφωνικού σταθμού με συχνότητα $\nu=1020\text{kHz}$.

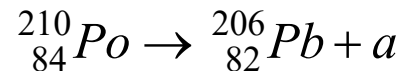
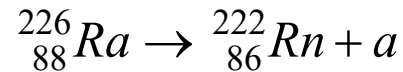
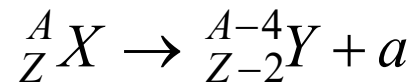
$$\text{Μήκος κύματος: } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}}{1.02 \times 10^6 \text{ Hz}} = 294 \text{ m}$$

$$\text{Ενέργεια: } E = hf = 6.614 \times 10^{-34} \text{ J sec} \cdot 1.02 \times 10^6 \text{ Hz} = 6.25 \times 10^{-28} \text{ J} =$$

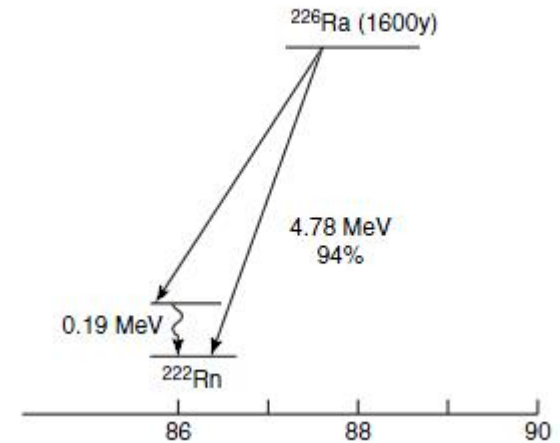
$$\frac{6.25 \times 10^{-28} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 4.14 \times 10^{-9} \text{ eV}$$

Πυρηνικές διασπάσεις: α διάσπαση

- Διάσπαση α ενός στοιχείου X:



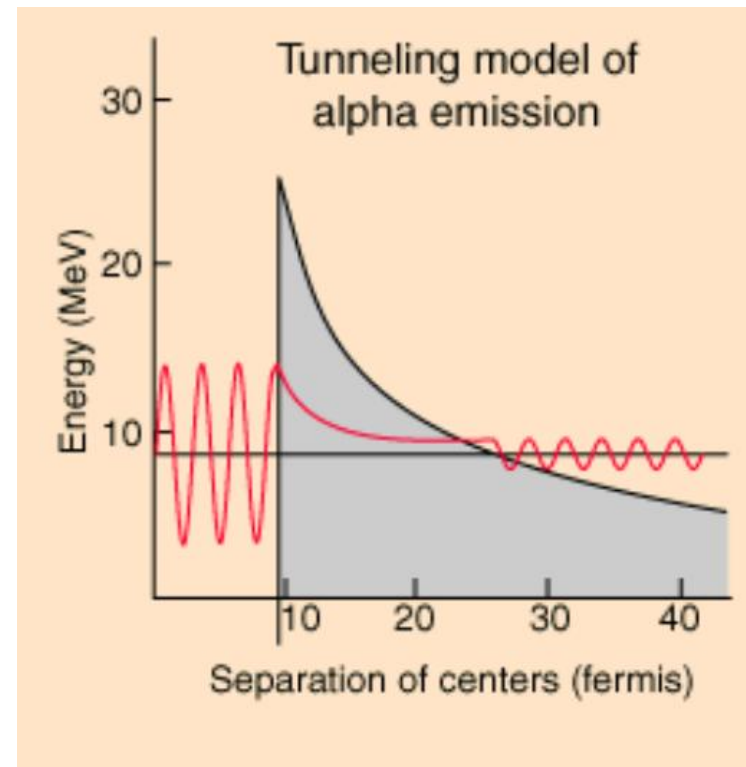
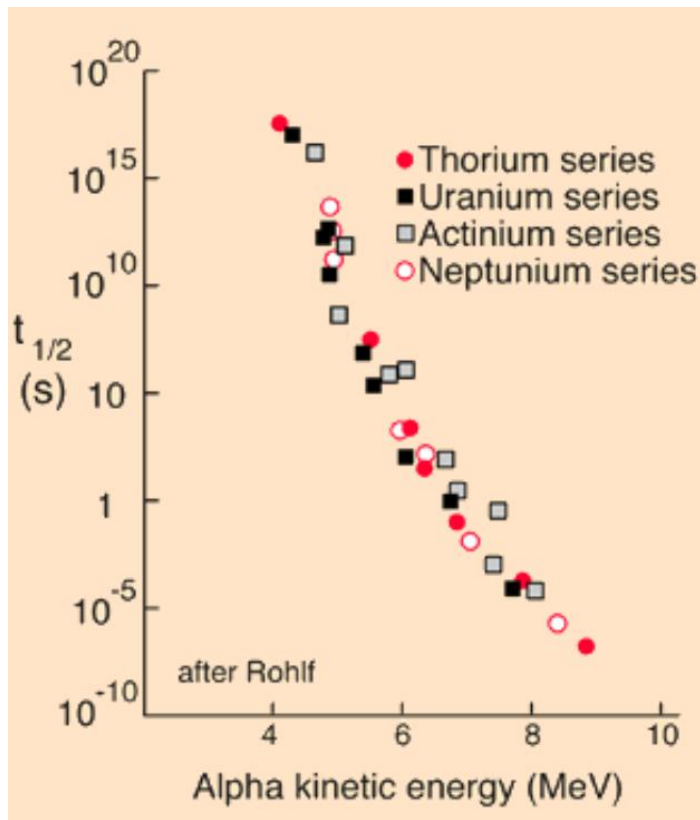
- Προυπόθεση για να πραγματοποιηθεί η α διάσπαση: $M_X > M_Y + m_\alpha + 2m_e$ (2 τροχιακά ηλεκτρόνια χάνονται με την αλλαγή του ατομικού αριθμού).
- Η διαφορά της ενέργειας αποδίδεται ως κινητική ενέργεια στο α και τον θυγατρικό πυρήνα.



- Εστω M, m, V, v οι μάζες και ταχύτητες του θυγατρικού πυρήνα και του α αντίστοιχα. Τότε:

$$\left. \begin{array}{l} \text{Διατήρηση Ενέργειας: } Q = \frac{1}{2}MV^2 + mv^2 \\ \text{Διατήρηση Ορμής: } MV = mv \end{array} \right\} \Rightarrow Q = E_\alpha \left(1 + \frac{m}{M} \right)$$

- Αρα, δεδομένου ότι $m \ll M$, η το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας αποδίδεται στο α .
- Τα α είναι μονοενεργειακά. Ανάλογα με την ενεργειακή κατάσταση του θυγατρικού πυρήνα, μεταβάλλεται η E_α .



- <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/Nuclear/alptun.html>

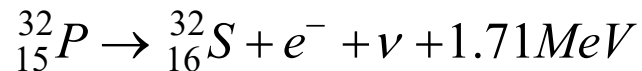
Διάσπαση β

- Διάσπαση β^+ , β^- .
 - Αν ο αριθμός $p \gg$ αριθμού n ($A \gg Z-A$) τότε συμβαίνει Positron decay (ποζιτρονική διάσπαση):
 - Αν ο αριθμός $n \gg$ αριθμού p ($Z-A \gg A$) τότε συμβαίνει Electron decay (διάσπαση β^- , εκπομπή ηλεκτρονίου):

διάσπαση β^- , εκπομπή ηλεκτρονίου

- Παράδειγμα:

$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$

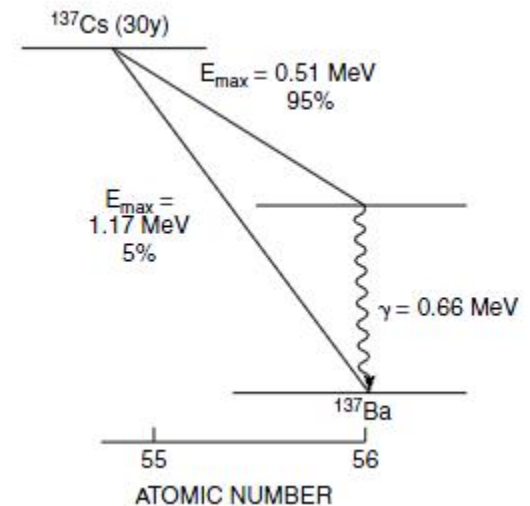


- Η διατήρηση της ορμής και της ενέργειας δείχνει ότι η διαφορά μάζας ηρεμίας μεταξύ p, n μετατρέπεται σε κινητική ενέργεια του e^- και πολύ μικρό ποσοστό σε κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα Si.
- Πειραματικά βρέθηκε τα β^- δεν είναι μονοενεργειακά, αλλά έχουν συνεχές φάσμα με μέση ενέργεια $\sim 1/3$ της μέγιστης ενέργειας τους. Έτσι θεωρήθηκε η ύπαρξη ενός 3^{ου} σωματιδίου (Pauli 1933) το οποίο ονομάστηκε νεutrίνο (από τον Fermi) .

- Υπολογισμός της κατανομής της παραγόμενης ενέργειας σε κινητική του β , ν και ανάκρουση του θυγατρικού πυρήνα. Υσχύει η ανάλυση της α -διάσπασης: Στην περίπτωση του ^{32}P , η διαφορά μάζας ηρεμίας μεταξύ του P , του θυγατρικού S και του εκπεμπόμενου β (το ν δεν έχει μάζα) είναι:
 - $31.98404 - 31.98224 = 0.00179 \text{amu} = 0.00179 \text{amu} \times 931 \text{MeV/amu} = 1.71 \text{MeV}$
 - Αφού $m/M = 0.000017 \rightarrow 0$, σχεδόν μηδενική ενέργεια αποδίδεται στον θυγατρικό πυρήνα S .

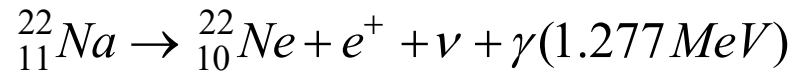
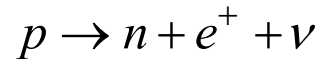
- ^{32}P , ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{90}Y διασπώνται με β^- διάσπαση, χωρίς παραγωγή φωτονίων.
- β^- διάσπαση: πιθανή εκπομπή φωτονίου (γ). Αν ο θυγατρικός πυρήνας παραχθεί σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, μεταπίπτει στιγμιαία στην βασική (χαμηλότερη) ενεργειακή κατάσταση με εκπομπή ενός γ με E ίση με τη διαφορά των δύο ενεργειακών καταστάσεων.
 - $\pi\chi \ ^{203}\text{Hg} \rightarrow \ ^{203}\text{Tl} + e^- + \nu + 0.21\text{MeV} + \gamma(0.279\text{MeV})$

- Πολλαπλή εκπομπή β^- : είναι δυνατό ένας πυρήνας να διασπάται με περισσότερους από ένα τρόπους, όπως το παράδειγμα του ^{137}Cs .

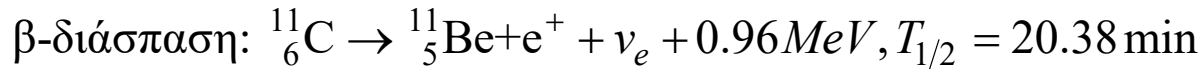
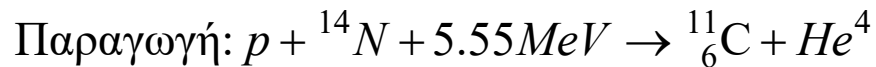


διάσπαση β^+ , εκπομπή ποζιτρονίου

- Παράδειγμα: διάσπαση β^+ του ^{22}Na σε ^{22}Ne (διεγερμένη κατάσταση με επακόλουθη εκπομπή φωτονίου):

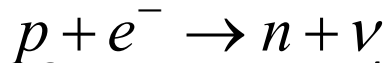


- Η β^+ διάσπαση και η EC αποτελούν ανταγωνιστικές διεργασίες. Πχ το ^{22}Na σε ^{22}Ne διασπάται κατά 10% με β^+ διάσπαση και κατά 90% με EC.

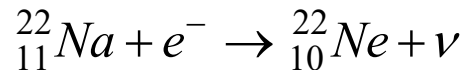


Σύλληψη ηλεκτρονίου (Electron capture –EC)

- Εναλλακτικά, ο πυρήνας μπορεί να συλλάβει ένα από τα τροχιακά ηλεκτρόνια του ατόμου (κυρίως της K στοιβάδας)



- Επακολουθεί αναδιάταξη των τροχιακών ηλεκτρονίων με αντίστοιχη εκπομπή ακτίνων X
- Παράδειγμα EC



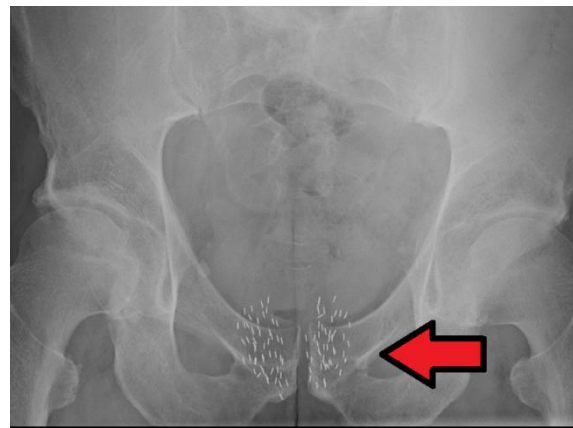
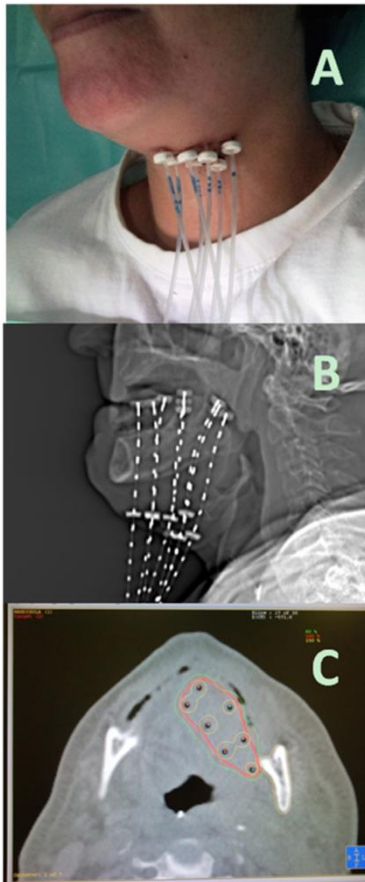
- Σε αντίθεση με την $\beta+$, $\beta-$ διάσπαση, τη EC παράγει μονοενεργειακά νετρίνα.
- Η κινητική ενέργεια Q που αποδίδεται στον θυγατρικό πυρήνα και το νεutrίνο, προκύπτει ως εξής:
 - $Q = \text{Μάζα πατρικού πυρήνα} + m_e - (\text{Μάζα θυγατρικού πυρήνα} + \text{ενέργεια σύνδεσης συλληφθέντος ηλεκτρονίου}) - E_{\text{εκπεμπόμενου γωτονίου } \gamma}$ λόγω διεγερμένης στάθμης του θυγατρικού πυρήνα.

Εσωτερική μετατροπή (Internal Conversion –IC)

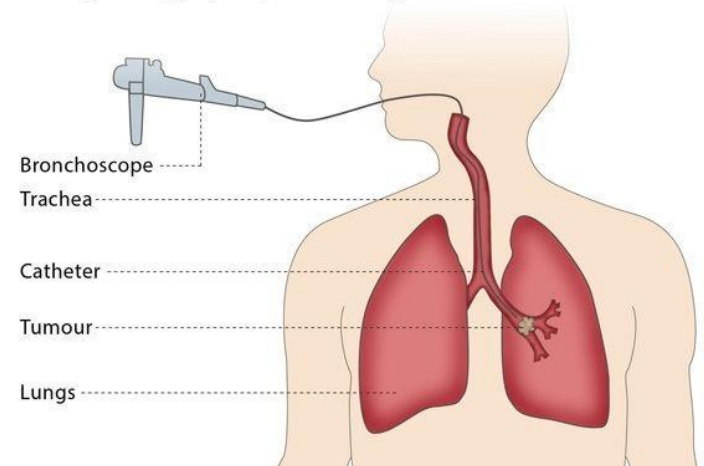
- Όπως είδαμε, πυρήνες που προκύπτουν από την α , β^+ , β^- διάσπαση ή EC μπορεί να βρίσκονται σε διεγερμένη κατάσταση, οπότε και μεταπίπτουν στην θεμελιώδη ενεργειακή κατάσταση με εκπομπή ενός φωτονίου γ .
- Το γ έχει πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με τροχιακό ηλεκτρόνιο της K, ή L στοιβάδας («εσωτερικό» φωτοηλεκτρικό φαινόμενο), το οποίο αποβάλλεται από το άτομο με ενέργεια «μονοχρωματική»
$$E_e = E_\gamma - E_{\text{σύνδεσης του ηλεκτρονίου.}}$$
- Έτσι, τα μονοχρωματικά ηλεκτρόνια προσθέτουν κορυφές στο γραμμικό ενεργειακό φάσμα των β^+ , β^- .
- Το κενό που δημιουργείται στην K, ή L στοιβάδα συμπληρώνεται με μεταπτώσεις ηλεκτρονίων από τις ανώτερες στοιβάδες, με συνεπακόλουθη εκπομπή φωτονίων X χαρακτηριστικών ενεργειών.
- Τα φωτόνια X είναι δυνατό να αλληλεπιδράσουν με εσωτερική μετατροπή με e άλλων στοιβάδων του ατόμου, αποβάλλοντας τα. Τα αποβληθέντα e λόγω IC φωτονίου X καλούνται ηλεκτρόνια Auger.
- Τα ηλεκτρόνια Auger έχουν πολύ μικρή κινητική ενέργεια.

Βραχυθεραπεία

- Ακτινοθεραπεία με τοπική τοποθέτηση ραδιοισοτόπων.



Brachytherapy (example in the lung)



Ισότοπα που χρησιμοποιούνται για Βραχυθεραπεία

Radionuclide	Type	Half-life	Energy
Cesium-131 (^{131}Cs)	Electron Capture, ϵ	9.7 days	30.4 keV (mean)
Cesium-137 (^{137}Cs)	β^- - particles, γ -rays	30.17 years	0.512, 0.662 MeV γ -rays
Cobalt-60 (^{60}Co)	β^- - particles, γ -rays	5.26 years	1.17, 1.33 MeV γ -rays
Iridium-192 (^{192}Ir)	γ -rays	73.8 days	0.38 MeV (mean)
Iodine-125 (^{125}I)	Electron Capture, ϵ	59.6 days	27.4, 31.4 and 35.5 keV
Palladium-103 (^{103}Pd)	Electron Capture, ϵ	17.0 days	21 keV (mean)
Ruthenium-106 (^{106}Ru)	β^- - particles	1.02 years	3.54 MeV
Radium-226 (^{226}Ra)	α - particles	1599 years	

- <https://en.wikipedia.org/wiki/Brachytherapy>

Ποια η διαφορά μεταξύ φωτονίων γ και X ?

- Αμφότερα είναι φωτόνια του ίδιου ενεργειακού φάσματος.
- Τα γ προκύπτουν από ενεργειακές μεταπτώσεις του πυρήνα, ή αλληλεπιδρούν με αυτόν.
- Τα X προκύπτουν από ενεργειακές μεταπτώσεις του ατόμου, ή αλληλεπιδρούν με αυτό.

Ραδιενέργεια

- Εστω N_0 πυρήνες ενός ραδιενεργού ισότοπου οι οποίοι διασπώνται με οποιοδήποτε τρόπο. Τότε μετά από χρόνο t θα έχουν απομείνει:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

- Η παραπάνω εξίσωση προκύπτει από το γεγονός ότι ο ρυθμός μεταβολής του αριθμού N είναι ανάλογος των εναπομείναντων πυρήνων:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

- Η σταθερά λ καλείται σταθερά διάσπασης και είναι χαρακτηριστική του ραδιοισοτόπου.
- Ο χρόνος ημίσειας ζωής (ημιζωής) $T_{1/2}$ ορίζεται ως ο χρόνος που απαιτείται για να διασπατούν οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \Rightarrow T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda}$$

Παράδειγμα

- Ένα μgr ^{226}Ra εκπέμπει $3.7 \times 10^4 / \text{sec}$ σωμάτια α . Να βρεθεί ο χρόνος ημιζωής του ^{226}Ra .

Υπολογισμός αριθμού πυρήνων:

$$N = N_A \frac{w}{A} = 6.023 \times 10^{23} \text{ atoms / mole} \frac{1 \times 10^{-6} \text{ gr}}{226 \text{ gr / mole}} = 2.66 \times 10^{15} \text{ atoms}$$

$$\lambda = \frac{1}{N} \text{ ρυθμό διάσπασης} = 3.7 \times 10^4 \text{ διασπάσεις sec}^{-1} \frac{1}{2.66 \times 10^{15} \text{ atoms}} = 1.39 \times 10^{-11} \text{ sec}^{-1}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln(2)}{\lambda} = 4.987 \times 10^{10} \text{ sec} = 1581 \text{ years}$$

- Σημείωση: για να είναι ακριβής ο υπολογισμός αυτός, πρέπει ο χρόνος υπολογισμού του ρυθμού διάσπασης να είναι $\ll T_{1/2}$.

Ενεργότητα - Activity

- Αναφορικά με ραδιοϊσότοπα, η μάζα δεν αποτελεί το κρίσιμο μέγεθος. Αντίθετα μας ενδιαφέρει ο αριθμός των διασπάσεων / μονάδα χρόνου. Το μέγεθος αυτό καλείται ενεργότητα.
- Διαστάσεις της ενεργότητας: κρούσεις/sec = διασπάσεις /sec.
- Προσοχή: διασπάσεις /sec διαφορετικό από σωματίδια /sec.
- Μονάδα ενεργότητας:
 - 1 Bequerel= 1Bq=1 διασπάση /sec (Πολύ μικρή μονάδα, συνήθως χρησιμοποιούμε πολλαπλάσια kBq, MBq).
 - 1 Curie = 1Ci= 3.7×10^{10} Bq = η ενεργότητα ενός γραμμαρίου ^{226}Ra . (πολύ μεγάλη μονάδα, συνήθως χρησιμοποιούμε υποπολλαπλάσια mCi, μCi).

- Εστω ότι την $t=0$ εισάγεται ενδοφλέβια $m_0=10\text{mg}$ μίας ραδιενεργού ουσίας με ενεργότητα 10MBq .
- Μετά από λίγα λεπτά γίνεται αιμοληψία 10 ml και διαπιστώνεται ότι περιέχουν ενεργότητα 2kBq . Ποιος ο όγκος του αίματος του ασθενούς ?

- Εστω ότι την $t=0$ εισάγεται ενδοφλέβια $m_0=1\text{mg}$ μίας δραστικής ουσίας, η οποία απομακρύνεται με άγνωστο ρυθμό k_{01} από το αίμα.
- Κατασκευάστε τον πίνακα K .
- Εστω ότι για διάφορες χρονικές στιγμές (αριστερή στήλη) έγιναν οι παρακάτω μετρήσεις μάζας της δραστικής ουσίας (δεξιά στήλη).
- Βρείτε τις τιμές των στοιχείων του K .
- Σας δίνεται ο τύπος για την ευθεία ελαχίστων τετραγώνων

	0	1.0486
	10.0000	0.9534
	20.0000	0.8673
	30.0000	0.7894
	40.0000	0.7189
	50.0000	0.6551
	60.0000	0.5974
	70.0000	0.5452
	80.0000	0.4979
	90.0000	0.4552
	100.0000	0.4165

$$a = \frac{n \sum xy - \sum x \sum y}{n \sum x^2 - (\sum x)^2}, b = \frac{\sum y - a \sum x}{n}$$

Μονάδες Δόσης ραδιενέργειας

- Δόση = ενέργεια που αποτίθεται από ιοντίζουσα ακτινοβολία / μάζα. Μονάδα δόσης 1 Gray= 1 Gy = 1J/kg.
- 1 Gy= 100 rad.
- Ισοδύναμη δόση (Dose equivalent): μέγεθος ίσο με τη δόση πολλαπλασιασμένο με μία αδιάστατη σταθερά, ώστε να αντανakλά στο βιολογικό αποτέλεσμα της δόσης.
- Μονάδα Ισοδύναμης δόσης (SI): 1Sievert=1 Gy \times *const*
- Εναλλακτική μονάδα ισοδύναμης δόσης: 1 rem=0.01 Sievert
- Η σταθερά *const* εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας:

Σωματίο	Ένέργεια	<i>const</i>
γ , X, e ⁻ , e ⁺		1
Νετρόνια	<10keV	5
	10keV – 100keV	10
	2MeV – 20MeV	20
Πρωτόνια	>2MeV	2
α , βαρύτερα ιόντα		20

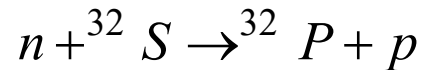
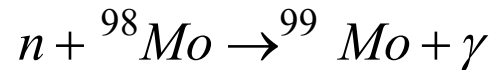
- Ένας αισθητήρας 10×10 cm τοποθετείται σε απόσταση 1m από $1 \mu\text{g}$ $^{99\text{m}}\text{Tc}$.
Να βρεθεί πόσα φωτόνια διέρχονται από τον αισθητήρα.
- Ποση μάζα ^{222}Ra (1580 έτη) απαιτείται ώστε να έχουμε την ίδια ενεργότητα με $1 \mu\text{g}$ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (6 ώρες)

Μέθοδοι Παραγωγή ραδιοϊσοτόπων

- Ενεργοποίηση νετρονίων (Neutron activation)
- Πυρηνική σχάση (Nuclear fission)
- Βομβαρδισμό με ιόντα
- Γεννήτρια ραδιονουκλιδίων (radionuclide generator)

Ενεργοποίηση νετρονίων (Neutron activation)

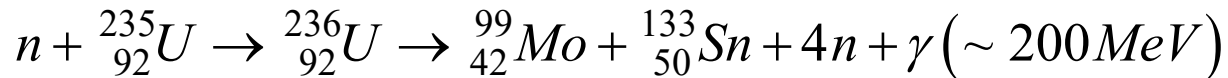
- Κρούση πυρήνων με «θερμικά νετρόνια (n)» (μέση $E < 100\text{eV}$). Θερμικά νετρόνια παράγονται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Παραδείγματα αντιδράσεων:



- Οι αντιδράσεις του 1^{ου} τύπου παράγουν μείγμα των 2 ισοτόπων, από το οποίο πρέπει να διαχωριστεί το ραδιενεργό ισότοπο με φυσικές/χημικές διεργασίες.
- Στην ιατρική χρησιμοποιείται η ανάλυση χημικής σύστασης μέσω ενεργοποίησης νετρονίων. Η ακρίβεια της ανίχνευσης κυμαίνεται $10^{-3} - 10^{-10}$ gr.
- Ισότοπα που παράγονται: ${}^{131}\text{I}$ (γ 364 keV, 8 days), ${}^{99}\text{Mo}$ (740keV, 66h), ${}^{59}\text{Fe}$ (1099 keV, 44.5 d).

Πυρηνική σχάση (Nuclear fission)

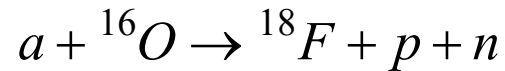
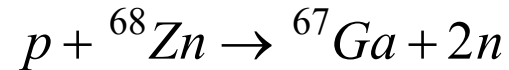
- Σχάση: ένας πυρήνας απορροφά ένα νετρόνιο, καθίσταται ασταθής (ραδιενεργός) και διασπάται σε δυο θυγατρικούς, με παραγωγή νέων νετρονίων και ενέργειας σε μορφή φωτονίων γ .



- Η παραπάνω αντίδραση:
 1. Παράγει 4 νετρόνια \rightarrow εκθετικός αριθμός $n \rightarrow$ αλυσιδωτή αντίδραση
 2. Είναι ισχυρά εξώθερμη (συγκρίνετε τα 200 MeV που παράγονται ανά σχάση πυρήνα με τα ~ 2 eV / πυρήνα που παράγονται από την απλή καύση του άνθρακα).
 3. Κάθε ένας από τους θυγατρικούς πυρήνες διασπάται, παράγοντας πλήθος ισοτόπων: πχ ${}^{131}\text{I}$ (γ 364 keV, 8 days), ${}^{99}\text{Mo}$ (740keV, 66h), ${}^{133}\text{Xe}$ (81 keV, 5.27 d)

Βομβαρδισμό με ιόντα

- Παράδειγμα:



- Απαιτείται επιταχυντής (γραμμικός ή κύκλοτρο) για να αποδώσει 100 MeV /νουκλεόνιο για να υπερνικηθεί η ηλεκτροστατική απώθηση του πυρήνα-στόχου.
- Παράγονται ισότοπα:

Παραγόμενο Ισότοπο	Ενέργεια	T1/2	Στόχος (κρούση με p)
^{11}C	e^+ 511keV	20.4 min	^{14}N
^{13}N	e^+ 511keV	10 min	^{13}C
^{15}O	e^+ 511keV	2 min	^{15}N
^{18}F	e^+ 511keV	110 min	^{18}O
^{67}Ga	γ 93, 184, 300	78 h	^{68}Zn
^{111}In	γ 171,245	68 h	^{112}Cd
^{123}I	γ 159	13 h	^{124}Te , ^{127}I
^{201}Tl	γ 80	73 h	^{203}Tl

Γεννήτρια ραδιονουκλιδίων (radionuclide generator)

- Εστω ισότοπο X1 (σταθερά λ_1 , χρόνος ημιζωής T_1) που διασπάται και παράγει το ισότοπο X2 (σταθερά λ_2 , χρόνος ημιζωής T_2).
- Η συγκέντρωση των πυρήνων του X1 σε συνάρτηση του χρόνου θα είναι:

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

- Θεωρώντας ότι σε κλειστό δοχείο υπάρχουν την $t=0$ N_0 πυρήνες του X1 και 0 πυρήνες του X2, η συγκέντρωση των πυρήνων του X2 καθορίζεται από την ακόλουθη διαφορική εξίσωση:

$$\frac{dN_2(t)}{dt} = \lambda_1 N_1(t) - \lambda_2 N_2(t) = \lambda_1 N_0 e^{-\lambda_1 t} - \lambda_2 N_2(t)$$

- Επιλύοντας την παραπάνω:

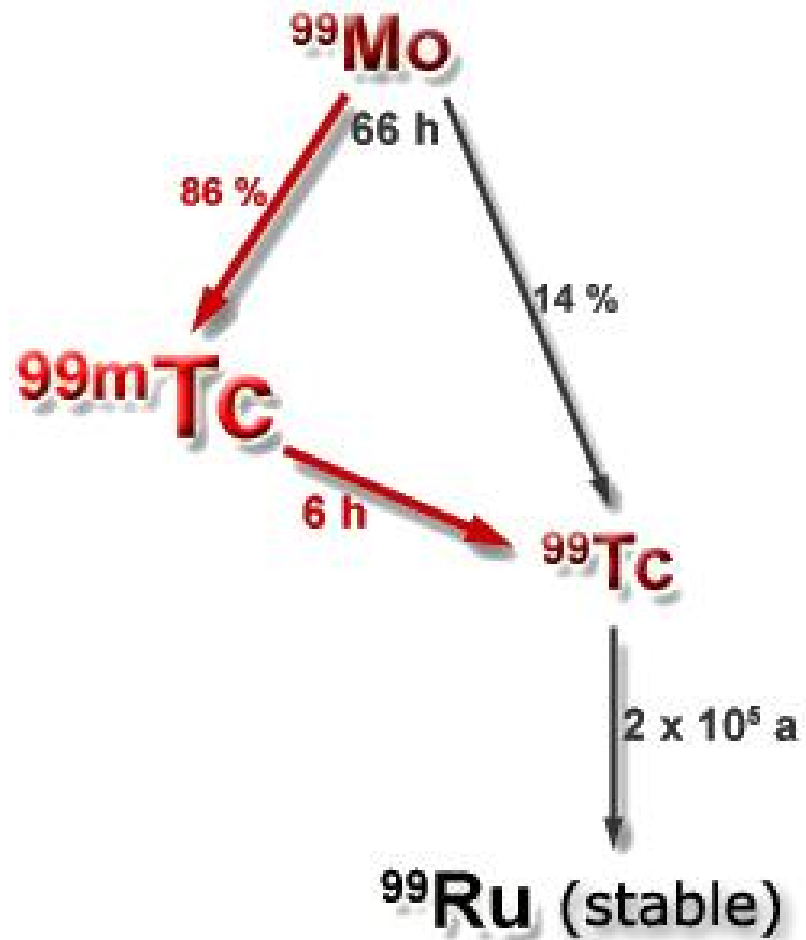
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

- Αν $T_1 > 10^4 T_2 \rightarrow$ Secular ισοροπία

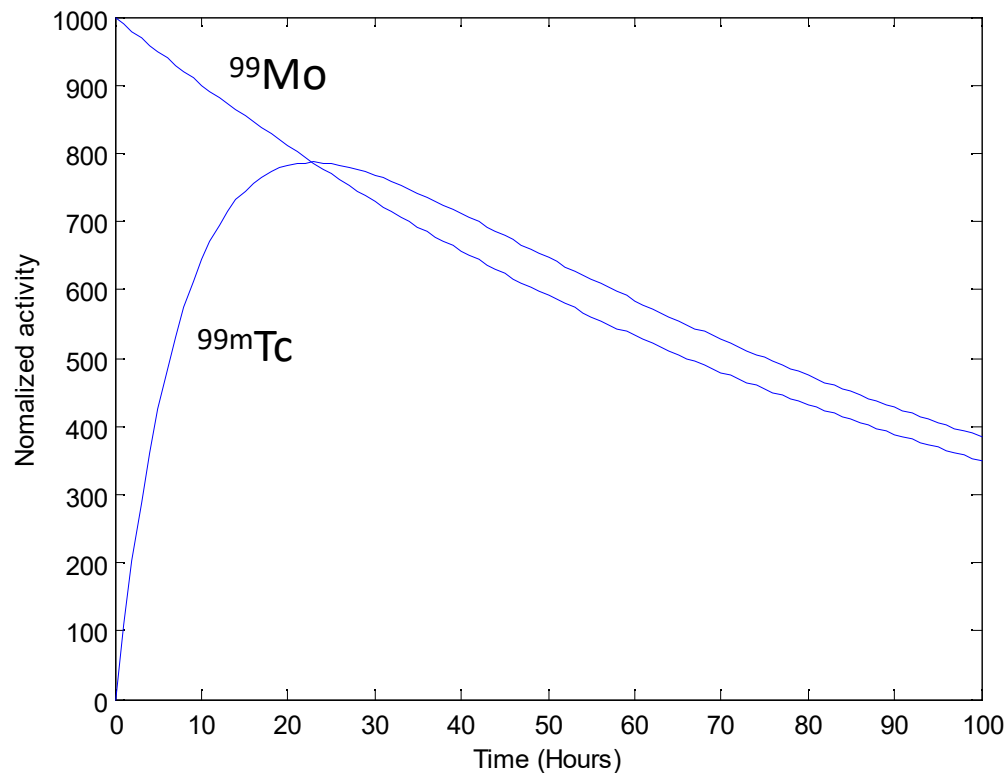
$$t > 5T_2 \Rightarrow N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} N_1(0)(1 - 0)$$

- Αν $T_1 \gg T_2 \rightarrow$ Μεταβατική (Transient) ισοροπία: Το N_2 αποκτά μέγιστη τιμή όταν γίνει ίσο με το N_1 και στη συνέχεια μειώνεται με τη σταθερά διάσπασης λ_1 του X_1 .
- Τη στιγμή της μεταβατικής ισοροπίας μπορεί να γίνει η απορόφηση του X_2 από τη γεννήτρια με την μέγιστη αποτελεσματικότητα.

Το παράδειγμα του Τεχνητίου



- Γεννήτρια $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$
 - Χ1: ^{99}Mo ολυβδένιο ($T_1=66,7$ ώρες)
 - Χ2: $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Τεχνητικό Μετασταθές ($^{99\text{m}}\text{Tc}$) ($T_1=6,07$ ώρες)
- Το ^{99}Mo απορροφάται σε αλουμίνα (Al_2O_3), ενώ το παραγόμενο $^{99\text{m}}\text{Tc}$ διαχωρίζεται εύκολα. Άντληση του $^{99\text{m}}\text{Tc}$ γίνεται κάθε μέρα, ενώ μετά 3-4 μέρες το Νοσοκομείο προμηθεύεται νέα γεμάτη γεννήτρια με ^{99}Mo .



Ακτίνες Χ

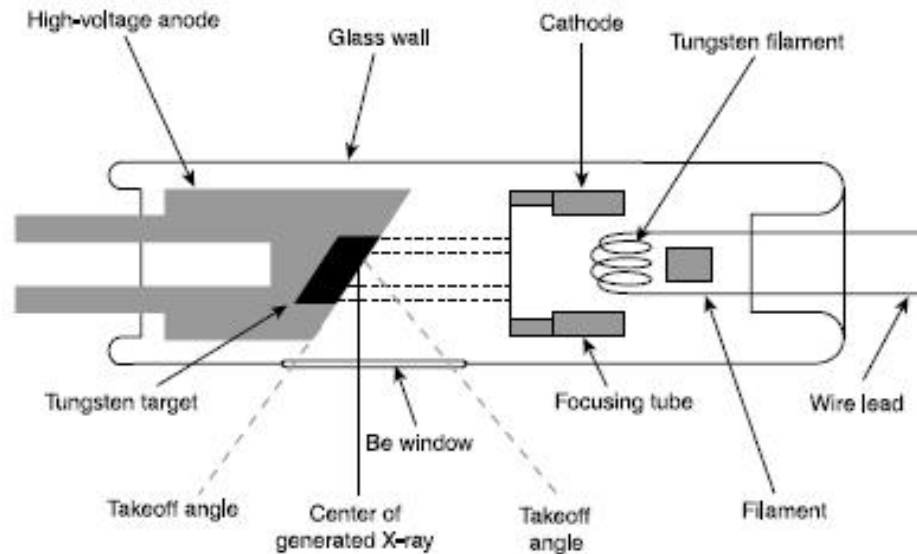
- Οι ακτίνες Χ είναι μορφή ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας.
- Έχουν τόσο υψηλή ενέργεια ώστε όταν αλληλεπιδράσουν με άτομα μπορούν να απελευθερώσουν δέσμια ηλεκτρόνια.
- Γι αυτή την ιδιότητά τους κατατάσσονται στις ionίζουσες ακτινοβολίες.
- Σχέση ενέργειας (E) και συχνότητας (f): $E=hf$ όπου h η σταθερά του Planck.
- Οι ακτίνες Χ προκύπτουν από ενεργειακές μεταπτώσεις του ατόμου, ή αλληλεπιδρούν με αυτό.
- Στην ακτινοδιαγνωστική, το εύρος των ενεργειών των ακτινών Χ που προσπίπτουν στους ασθενείς είναι από 10-15keV έως περίπου 150keV.
- Χαρακτηριστικά μήκη κύματος: 0.01nm – 0.1nm.

Ανακάλυψη ακτινών X



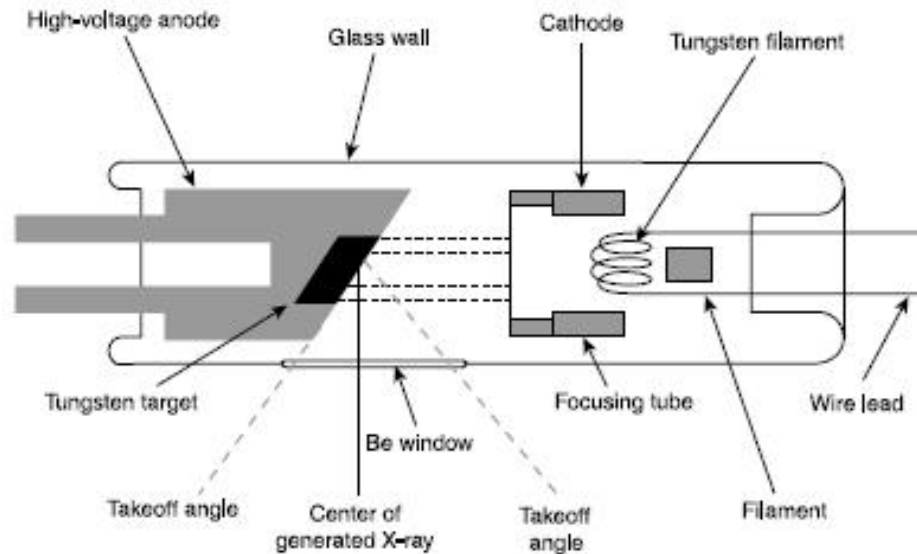
- Το 1895 ο W. K. Röntgen ανακάλυψε τις ακτίνες X όταν πειραματιζόταν με έναν σωλήνα καθοδικών ακτινών.
- Παρατήρησε ότι οι αόρατες καθοδικές ακτίνες προκαλούν ένα φθορίζον φαινόμενο πάνω στην πλάκα με πλατινοκυανιούχο βάριο που είχε ως στόχο.
- 1901 πήρε το βραβείο Nobel στον τομέα της φυσικής.

Διάταξη παραγωγής ακτίνων Χ



- Στην κάθοδο, το νήμα (filament) βολφραμίου θερμαίνεται από την διέλευση ηλεκτρικού ρεύματος. Ως αποτέλεσμα, παράγεται μια στενή δέσμη e^- (θερμιονική εκπομπή).
- Υπό την επίδραση υψηλής διαφοράς δυναμικού (25–150keV) τα e^- επιταχύνονται προς την άνοδο.
- Τα e^- αλληλεπιδρούν με το υλικό της ανόδου και επιβραδύνονται.
- Το μεγαλύτερο ποσοστό της ενέργειας των e^- μετατρέπεται σε θερμότητα. Ένα μικρό μέρος τους (~1%) μετατρέπεται σε ακτίνες Χ.

Διάταξη παραγωγής ακτίνων Χ (συνέχεια...)



- Η σχεδίαση του νήματος και του συστήματος εστίασης της δέσμης των ηλεκτρονίων είναι πολύ σημαντική για την ευκρίνεια της τελικής εικόνας.
- Η λυχνία είναι κατάλληλα θωρακισμένη ώστε οι ακτίνες Χ να εξέρχονται μόνο από το ειδικό παράθυρο και εξοπλισμένη με συστήματα ψύξης.
- Η άνοδος είναι κατασκευασμένη συνήθως από βολφράμιο ($Z=74$).
- Οι ακτίνες Χ παράγονται με μία από τις δύο ακόλουθες διεργασίες:
 - Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung)
 - Χαρακτηριστική ακτινοβολία

Ακτινοβολία πέδησης

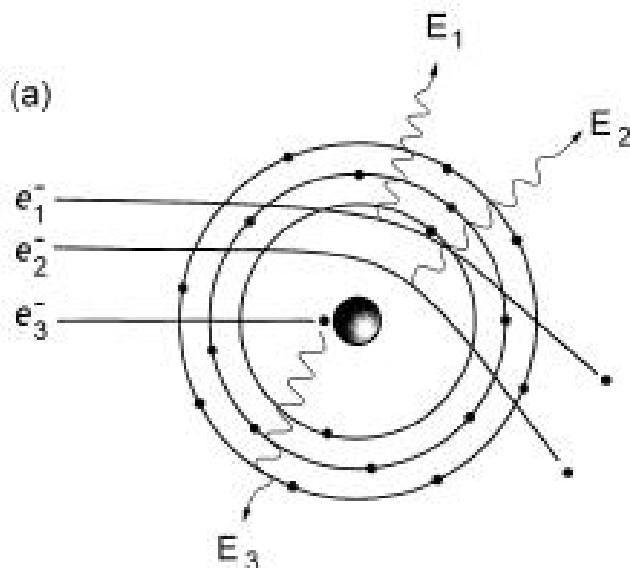
- Τα e^- που προσπίπτουν στην άνοδο, αλληλεπιδρούν με το πεδίο Coulomb των πυρήνων των ατόμων του στόχου και επιβραδύνονται.
- Η κινητική ενέργεια που χάνει κάθε e^- μετατρέπεται σε φωτόνιο X ίσης ενέργειας.
- Η ένταση της ακτινοβολίας πέδησης που προέρχεται από ένα φορτισμένο σωματίδιο μάζας m και φορτίου $(z \cdot e)$ το οποίο προσπίπτει σε ένα πυρήνα – στόχο με φορτίο $(Z \cdot e)$ είναι ανάλογη:

$$I_{\text{πέδησης}} \propto \frac{Z^2 z^4 e^6}{m^2}$$

Ακτινοβολία πέδησης (συνέχεια...)

- Ένα e^- μπορεί να χάσει οποιοσδήποτε ποσοστό της $E_{\text{κιν}}$ στην αλληλεπίδραση του με τον πυρήνα του ατόμου \rightarrow η ακτινοβολία πέδησης μπορεί να πάρει ένα μεγάλο πεδίο τιμών \rightarrow συνεχές φάσμα ενεργειών.
- Το ελάχιστο μήκος κύματος (μέγιστη συχνότητα και ενέργεια φωτονίου) καθορίζεται από το δυναμικό επιτάχυνσης στη λυχνία:

$$\lambda_{\text{min}} = hc/eV$$



- Στο σχήμα φαίνονται 3 e^- που διέρχονται κοντά από τον πυρήνα του ατόμου. Ως αποτέλεσμα παράγονται 3 ακτινοβολίες πέδησης διαφορετικών ενεργειών.

Χαρακτηριστική ακτινοβολία

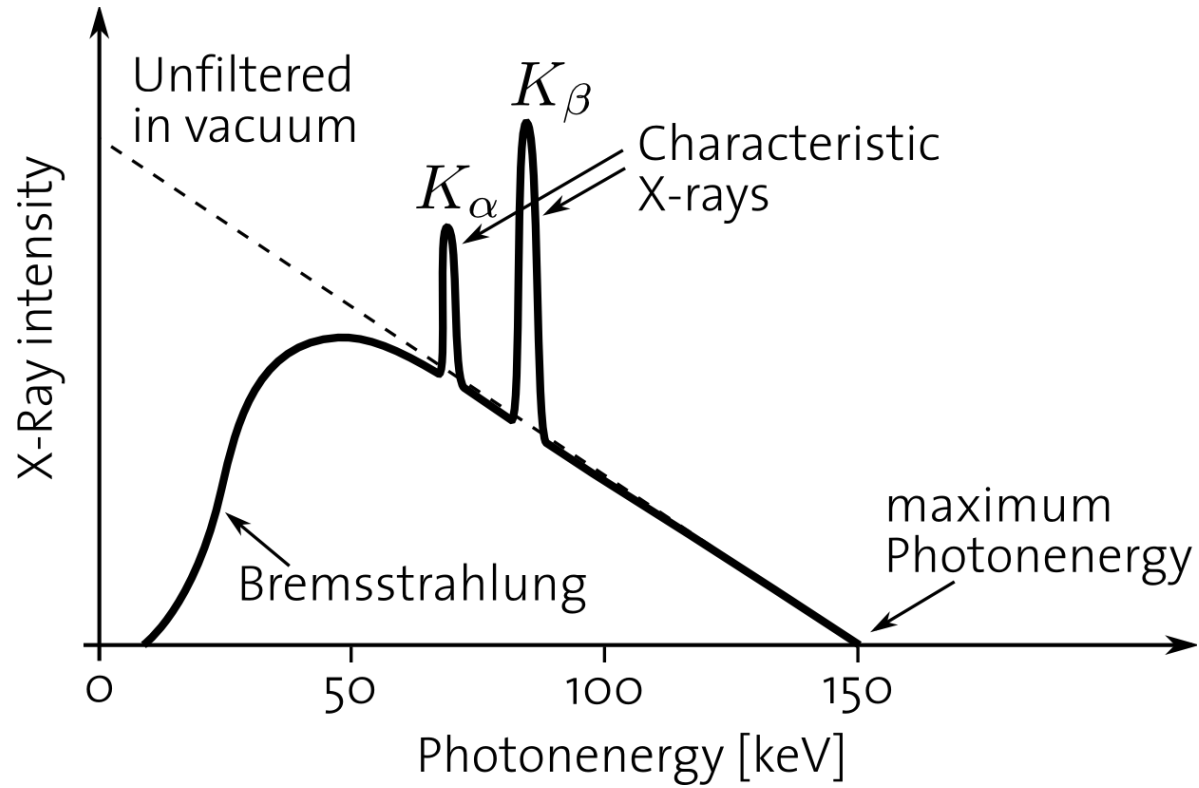
- Ενέργεια Δέσμησης (binding energy ή BE): η απαιτούμενη ενέργεια για να απομακρυνθεί τελείως ένα e^- από το άτομο. Η BE ενός e^- που περιφέρεται, σε απόλυτη τιμή, είναι τόσο μεγαλύτερη όσο εσωτερικότερη είναι η τροχιά του και όσο περισσότερα πρωτόνια περιέχονται στον πυρήνα του ατόμου (μεγαλύτερος Z).
- Αν η ενέργεια του e^- που προσπίπτει στην άνοδο είναι μεγαλύτερη της BE ενός e^- που περιστρέφεται στην στοιβάδα K. Τότε, είναι πιθανόν το προσπίπτον e^- να εκδιώξει το περιφερόμενο και να ιονίσει το άτομο.
- Η στοιβάδα K θα παρουσιάσει ένα κενό και ένα e^- από τη πιο εξωτερική στοιβάδα L (μικρότερη BE) θα έρθει να συμπληρώσει το κενό. Οι αποδιεγέρσεις θα συνεχιστούν μέχρι την εξωτερική στοιβάδα.
- Κατά τις αποδιεγέρσεις εκπέμπεται χαρακτηριστική ακτινοβολία X, με ενέργεια ίση με τη διαφορά ενέργειας μεταξύ των 2 στοιβάδων

Χαρακτηριστική ακτινοβολία (συνέχεια...)

- Η ακτινοβολία αυτή είναι χαρακτηριστική του συγκεκριμένου ατόμου του υλικού του στόχου (στην άνοδο της λυχνίας). Παρουσιάζεται μια ομάδα διακριτών ενεργειακών κορυφών που επικάθονται στο συνεχές φάσμα των ακτινών Χ
- Το e^- της Κ στοιβάδας στο βολφράμιο ($Z=74$) έχει ΒΕ -69.5keV , ενώ το e^- της Κ στοιβάδας στο υδρογόνο ($Z=1$) μόνο $-13,5\text{ eV}$. Για την L στοιβάδα οι αντίστοιχες τιμές είναι -11keV και $-3,4\text{ eV}$.

	H	Cs	Thallium Tl	
K	13.5981	35984.6		
L		5714.3		
M		1218.3		
N		232.15		

Φάσμα ακτίνων Χ



Αλληλεπίδραση φωτονίων με την ύλη

- Σκέδαση Rayleigh.
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.
- Σκέδαση Compton.
- Δίδυμη γένεση.

Αλληλεπίδραση ιονίζουσας ακτινοβολίας με την ύλη: φωτόνια (X και γ)

- Σε αντίθεση με τα φορτισμένα σωματία α και β,
- Εστω δέσμη μονο-ενεργειακών φωτονίων, έντασης N φωτόνια /sec η οποία προσπίπτει σε ομογενές υλικό. Τότε, ο αριθμός των φωτονίων dN που αλληλεπιδρούν με το υλικό, ανά μονάδα μήκους της διαδρομής της δέσμης στο υλικό dx δίνεται:

$$\frac{dN}{dx} = -\mu x \Rightarrow N = N_0 e^{-\mu x}$$

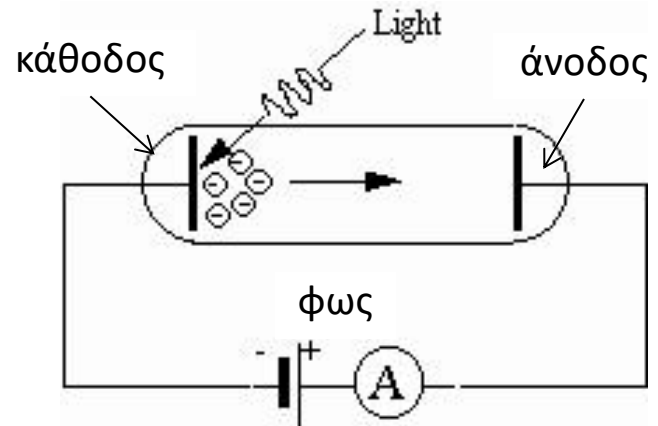
- μ είναι η πιθανότητα αλληλεπίδρασης των φωτονίων με το υλικό και καλείται **συντελεστής γραμμικής απορρόφησης** (linear attenuation coefficient). Οι μονάδες του (όπως προκύπτει βάσει διαστατικής ανάλυσης) είναι (μήκος)⁻¹.
- Συχνά χρησιμοποιείται ο ατομικός συντελεστής απορρόφησης μ_a , που ορίζεται ως το πλήθος των προσπίπτοντων φωτονίων που απορροφώνται από ένα άτομο του υλικού:

Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο

- Η προσπίπτουσα ακτίνα X αλληλεπιδρά με ένα e^- της επιφάνειας ενός μέσου. Η ακτινοβολία απορροφάται πλήρως και η ενέργειά της μεταφέρεται στο e^- .
- Ένα μέρος της δαπανάται για την εξουδετέρωση του ϕ και ένα μέρος μετατρέπεται στην κινητική ενέργεια του εξερχόμενου e^- :

$$hf = \phi + \frac{1}{2}mv^2$$

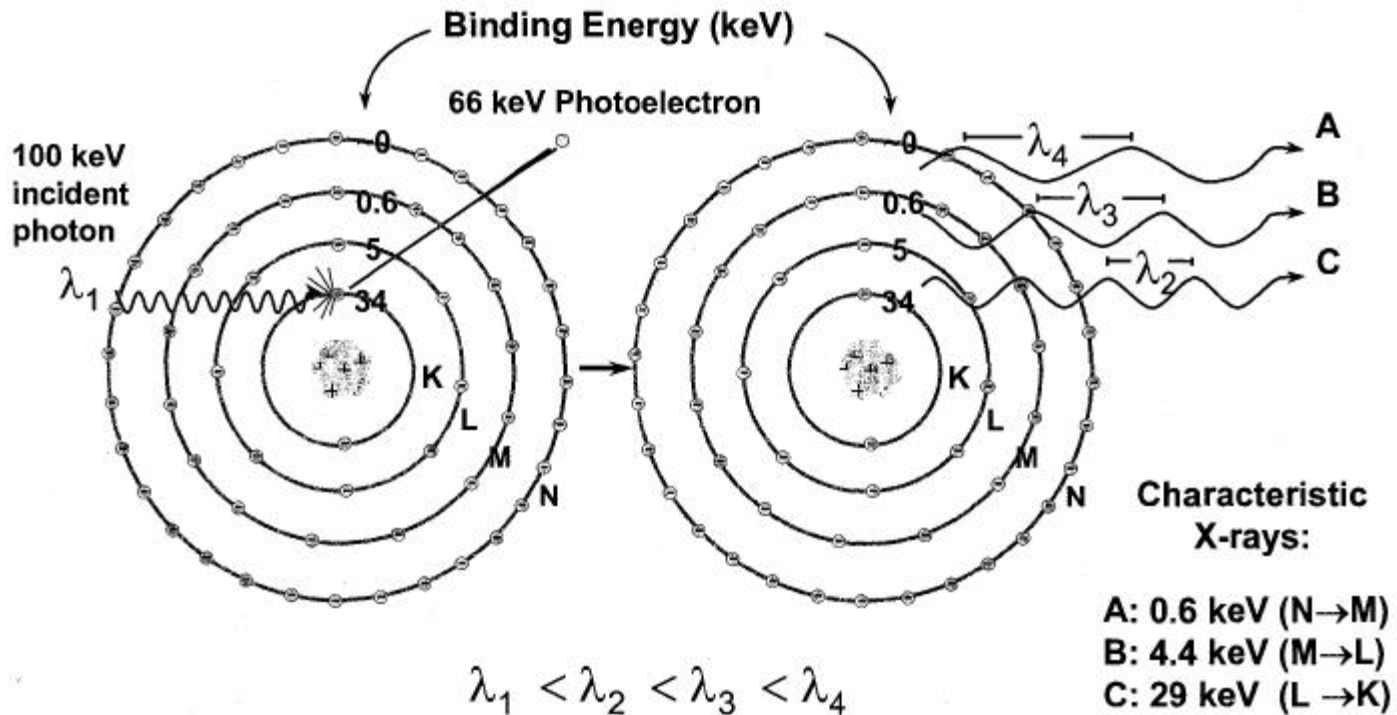
- Έργο εξαγωγής (ϕ): ελάχιστη ενέργεια που χρειάζεται ένα e^- για να διαφύγει από μια ορισμένη επιφάνεια.
- Με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο έχουμε ιονισμό.
- Για να έχουμε φωτοηλεκτρικό φαινόμενο πρέπει:
 $hf_{\min} \geq \phi$
- Προφανώς η οριακή συχνότητα f_{\min} εξαρτάται από το υλικό.
- Το e^- που παράγεται μπορεί να προκαλέσει και άλλους ιονισμούς.



Στοιχείο	Έργο εξαγωγής (eV)
Αλουμίνιο	4,3
Άνθρακας	5,0
Άργυρος	4,3
Νάτριο	2,7
Νικέλιο	5,1
Πυρίτιο	4,8
Χαλκός	4,7
Χρυσός	5,1

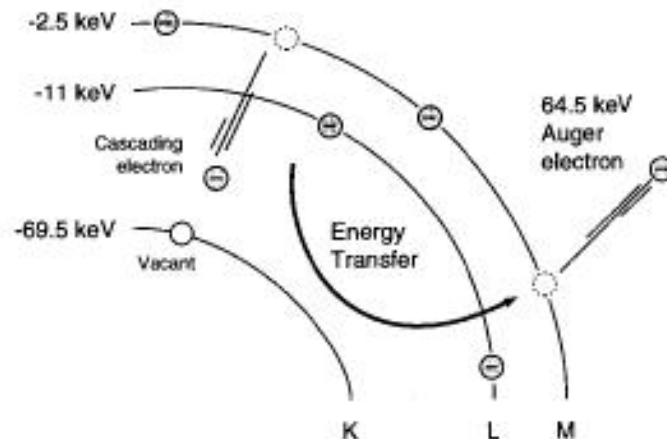
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (συνέχεια...)

- Όταν ένα e^- εκδιώκεται από τη στοιβάδα του δημιουργεί μια κενή θέση, η οποία συμπληρώνεται με ένα e^- εξωτερικότερης στοιβάδας.
- Κάθε μεταπήδηση e^- προς εσωτερικότερη τροχιά συνοδεύεται από:
 - έκλυση χαρακτηριστικής ενέργειας (η οποία είναι ίση με τη διαφορά της BE της στοιβάδας εκκίνησης του e^- και της BE της στοιβάδας άφιξης του e^- ή
 - έκλυση e^- Auger.



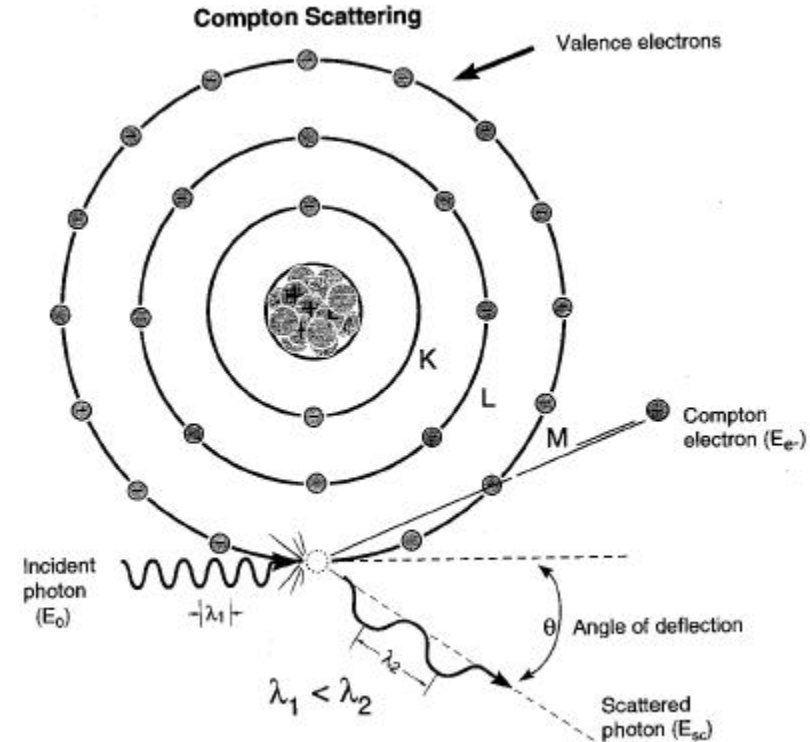
Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο (συνέχεια...)

- Η πιθανότητα εκπομπής χαρακτηριστικής ακτινοβολίας για στοιχεία με $Z < 10$ είναι περίπου 1%, για $Z = 20$ (ασβέστιο) είναι 15% για $Z = 53$ (ιώδιο) είναι 65% και για $Z > 60$ είναι περίπου 80%.
- Με την εκπομπή e^- Auger καμία ακτίνα X δεν φτάνει στον ανιχνευτή.
- Η πιθανότητα φωτοηλεκτρικής απορρόφησης ανά μονάδα μάζας είναι: $P_{ph} \sim \frac{Z^3}{E^3}$
- Το πλεονέκτημα της φωτοηλεκτρικής απορρόφησης στην απεικόνιση με ακτίνες X είναι η απουσία δευτερογενών φωτονίων που υποβαθμίζουν την ποιότητα της εικόνας.



Σκέδαση Compton

- Σκέδαση ακτίνων X από e^- .
- Κυριαρχεί σε ενέργειες 26keV - 30MeV για τους μαλακούς ιστούς.
- Η αλληλεπίδραση αυτή συμβαίνει μεταξύ ακτίνων X και e^- εξωτερικών στοιβάδων.
- Η σκέδαση μεταφέρει μέρος της E των γ /X στο ηλεκτρόνιο, το οποίο σκεδάζεται με γωνία $\geq 90^\circ$ σε σχέση με την ορμή του γ / X
- Το φωτόνιο μπορεί να σκεδαστεί σε οποιαδήποτε γωνία. Όσο μεγαλύτερη η γωνία σκέδασης του γ , τόσο μεγαλύτερη η απώλεια ενέργειας του.



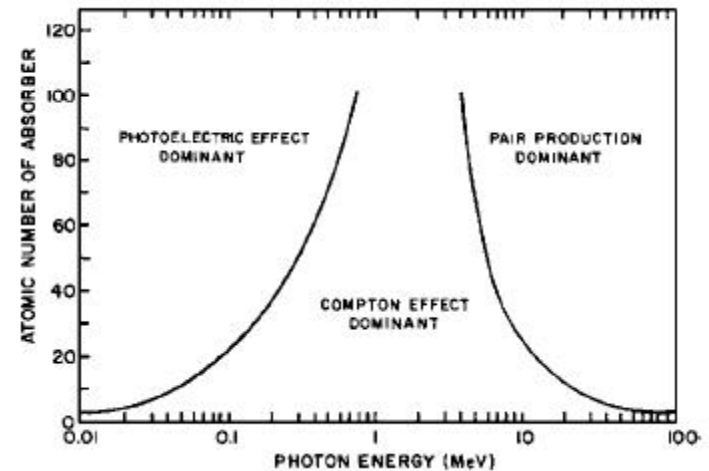
Δίδυμη γέννεση (pair production)

- Ένα φωτόνιο γ με επαρκή ενέργεια που διέρχεται κοντά από πυρήνα, έχει πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με αυτόν και να εξαυλωθεί δημιουργώντας ένα σωματίο β^- και ένα β^+ .
- Ενεργειακά, αυτό είναι δυνατόν μόνο αν
$$E_\gamma > 2 * (\text{μάζα ηρεμίας του } \beta) * c^2 = 2 * (511 \text{keV} / c^2) c^2 = 1.01 \text{ MeV}$$
- Η διαφορά της ενέργειας $E_\gamma - 1.01 \text{ MeV}$ αποδίδεται στον πυρήνα (πρακτικά θεωρείται ίση με 0 λόγω της πολύ μεγαλύτερης μάζας του πυρήνα από τα β^+ , β^-), και στα β^+ , β^- .
- Τα β^+ , β^- αποθέτουν την ενέργεια τους τοπικά ionίζοντας τα άτομα κοντά στο σημείο της δίδυμης γέννεσης.
- Μόλις το β^+ απωλέσει την κινητική του ενέργεια αλληλεπιδρά με ένα β^- , και εξαυλώνεται παράγοντας 2 φωτόνια γ τα οποία έχουν ίση ενέργεια και αντίθετη ορμή (λόγω της διατήρησης των δύο μεγεθών).

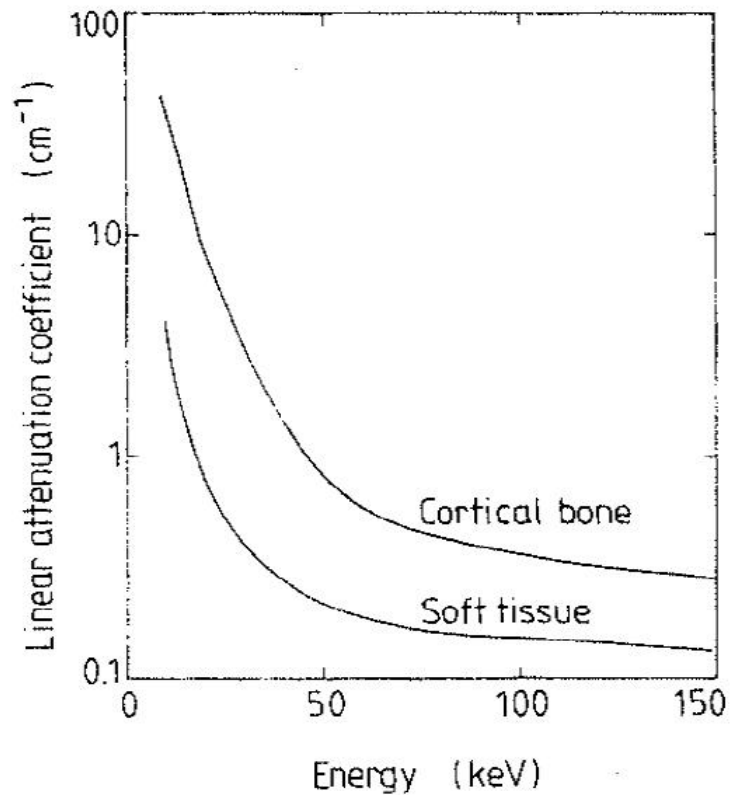
- Η παραπάνω διαδικασία μπορεί να λάβει χώρα στην περιοχή ενός ηλεκτρονίου (β^-). Διαφορές
 - Το β^- ανακρούει σημαντική ενέργεια, σε σχέση με την περίπτωση του πυρήνα. Έτσι δημιουργούνται 3 σωμάτια (το προϋπάρχον β^- , και τα εμφανιζόμενα β^- και β^+). Συχνά το φαινόμενο ονομάζεται τριπλή γέννηση.
 - Η ενέργεια του φωτονίου E_γ για τριπλή γέννηση έχει κάτω κατόφλι 4 μάζες ηρεμίας του ηλεκτρονίου.
 - Σε χαμηλές ενέργειες φωτονίου η πιθανότητα για δίδυμη γέννηση είναι \gg πιθανότητα για τριπλή γέννηση. Όσο η E φωτονίου αυξάνει, τόσο η πιθανότητα για δίδυμη γέννηση νειώνεται σε σχέση με την τριπλή γέννηση.

Εξάρτηση φαινομένων από τη ενέργεια του φωτονίου και το υλικό

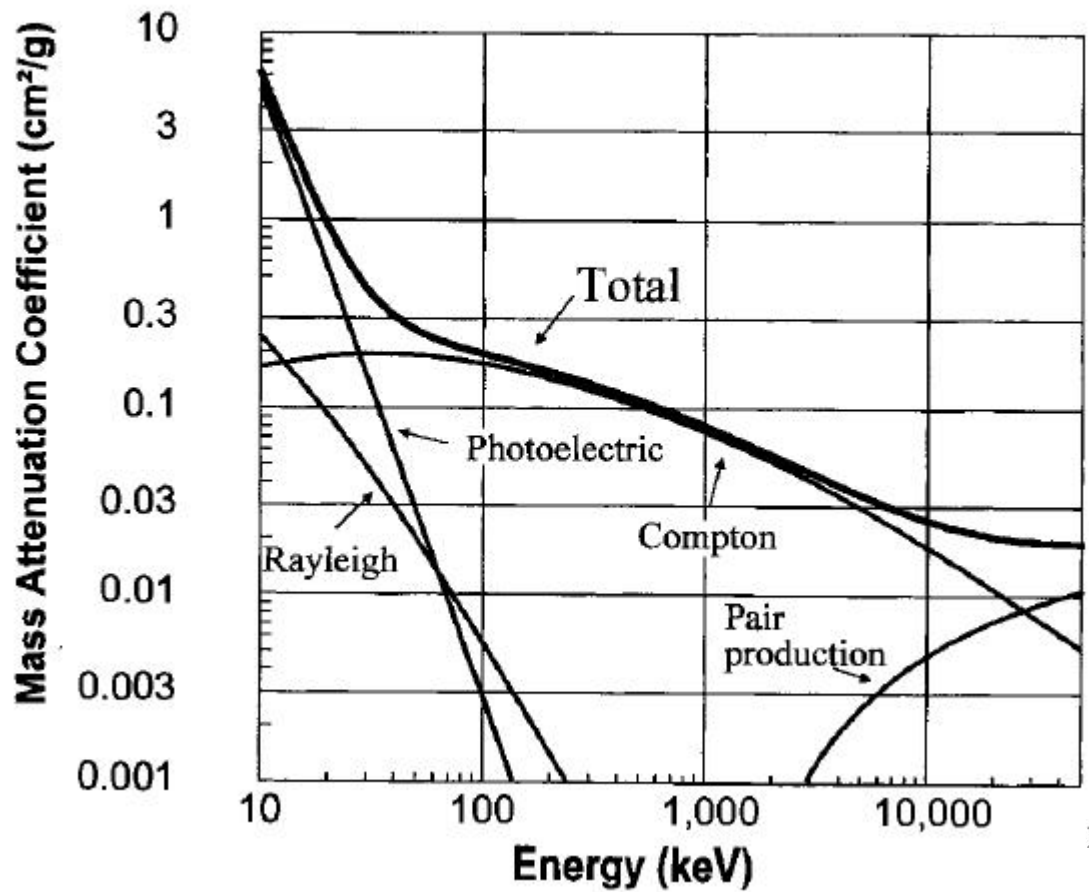
- Φωτοηλεκτρικό φαινόμενο $\sim E^{-3}, Z^3$.
- Σκέδαση Compton: ανεξάρτητο από το Z
- Δίδυμη γέννηση



<i>Dependence of Linear Attenuation Coefficient on</i>				
<i>Mode of Interaction</i>	<i>Photon Energy $h\nu$</i>	<i>Atomic Number Z</i>	<i>Electron Density ρ_e</i>	<i>Physical Density ρ</i>
Photoelectric	$\frac{1}{(h\nu)^3}$	Z^3	—	ρ
Compton	$\frac{1}{h\nu}$	—	ρ_e	ρ
Pair production	$h\nu$ (>1.02 MeV)	Z	—	ρ



Mass Attenuation Coefficients for Soft Tissue



$$\text{Mass Attenuation Coefficient } (\mu/\rho) [\text{cm}^2/\text{g}] = \frac{\text{Linear Attenuation Coefficient } (\mu) [\text{cm}^{-1}]}{\text{Density of Material } (\rho) [\text{g}/\text{cm}^3]}$$

$$\mu = \mu_{\text{Rayleigh}} + \mu_{\text{photoelectric effect}} + \mu_{\text{Compton scatter}} + \mu_{\text{pair production}}$$

TABLE 3-1. MATERIAL DENSITY, ELECTRONS PER MASS, ELECTRON DENSITY, AND THE LINEAR ATTENUATION COEFFICIENT (AT 50 keV) FOR SEVERAL MATERIALS

Material	Density (g/cm ³)	Electrons per Mass (e/g) × 10 ²³	Electron Density (e/cm ³) × 10 ²³	μ @ 50 keV (cm ⁻¹)
Hydrogen	0.000084	5.97	0.0005	0.000028
Water vapor	0.000598	3.34	0.002	0.000128
Air	0.00129	3.006	0.0038	0.000290
Fat	0.91	3.34	3.04	0.193
Ice	0.917	3.34	3.06	0.196
Water	1	3.34	3.34	0.214
Compact bone	1.85	3.192	5.91	0.573

Ανίχνευση ακτίνων Χ

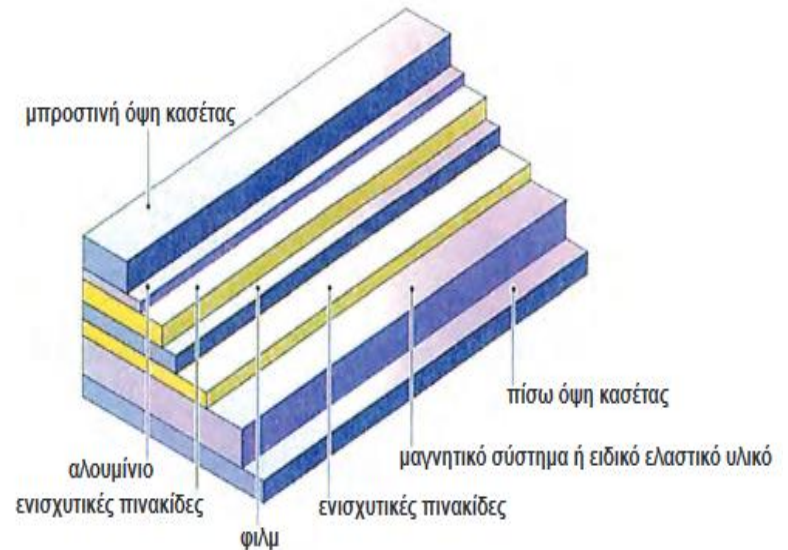
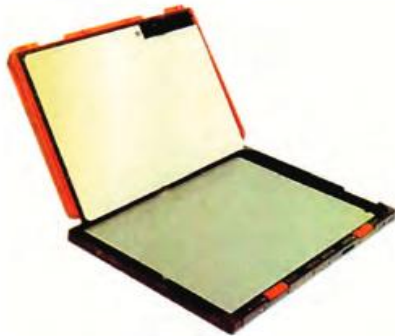
- *flat-panel detector* fields (commercially available since the late 1990s)
- charge-coupled devices (CCDs) developed at Bell Laboratories in 1969
- a-Si active matrix thin-film transistor (TFT) array

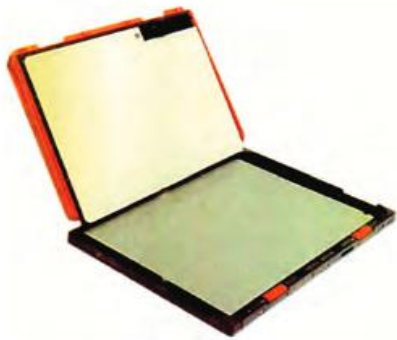
Αναλογική Ραδιογραφία

- Ο Φώσφορος (Gd_2O_2S) εκπέμπει ορατό φως τη στιγμή που προσπίπτει σε αυτόν φωτόνιο ακτίνων Χ.
- Ένα λεπτό στρώμα φωσφόρου τοποθετημένο σε επαφή με φωτογραφικό φιλμ χρησιμοποιείται επί δεκαετίες για την καταγραφή των ακτινογραφιών.

Ακτινογραφική Κασέτα

- Είναι ειδική θήκη μέσα στην οποία τοποθετείται το φιλμ.
- Οι δύο εσωτερικές επιφάνειές της καλύπτονται από αντίστοιχες ενισχυτικές πινακίδες.





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

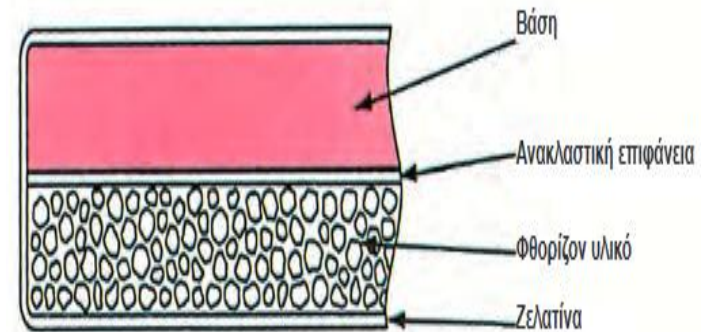
Ενισχυτικές Πινακίδες

Αρχή λειτουργίας-Φυσικά χαρακτηριστικά

- Η βασική αρχή χρησιμοποίησης των ενισχυτικών πινακίδων βασίζεται στο φαινόμενο της φωταύγειας και πιο συγκεκριμένα στο φαινόμενο του **φθορισμού**.
 - ✓ Φωταύγεια είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό εκπέμπει φως, όταν διεγείρεται από ακτινοβολία Χ. Μορφές αυτού του φαινομένου είναι ο φθορισμός και ο φωσφορισμός.
 - ✓ Φθορισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό εκπέμπει φως κατά τη διάρκεια της διέγερσής του, από κάποια ιοντίζουσα ακτινοβολία. Το φως αυτό σταματά να εκπέμπεται ταυτόχρονα με τη διακοπή της διέγερσης του υλικού από την ακτινοβολία.
 - ✓ Φωσφορισμός είναι το φαινόμενο κατά το οποίο ένα υλικό συνεχίζει να εκπέμπει φως και μετά τη διακοπή της διέγερσης από την ακτινοβολία.

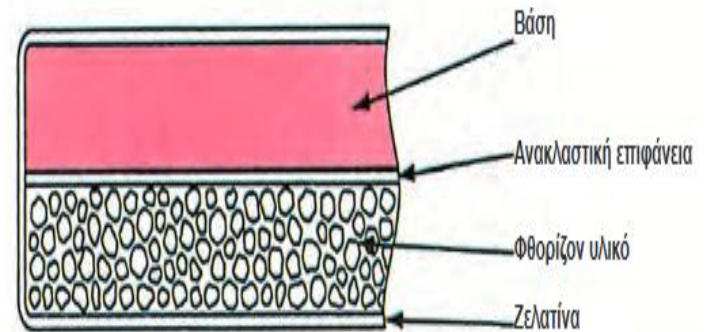
Δομή της Ενισχυτικής Πινακίδας

- Μια ενισχυτική πινακίδα αποτελείται από 4 στρώματα τα οποία από κάτω προς τα πάνω είναι:
1. Η βάση
 2. Η ανακλαστική επιφάνεια
 3. Το στρώμα του φθορίζοντος υλικού (φώσφοροι κρύσταλλοι)
 4. Το προστατευτικό επίστρωμα



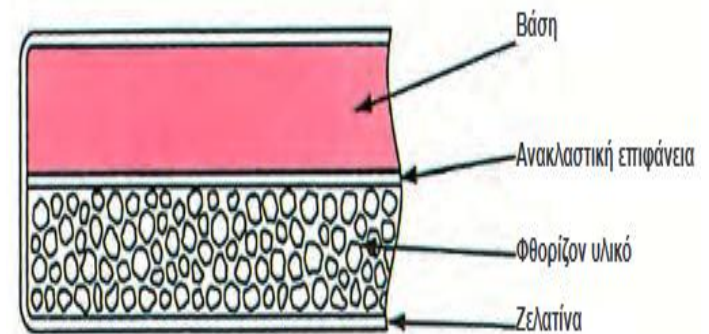
Δομή της Ενισχυτικής Πινακίδας

1. Η **βάση** που είναι συνήθως κατασκευασμένη από πολυεστέρα και χρησιμεύει στη δημιουργία ενός σταθερού στρώματος πάνω στο οποίο θα επιστρωθεί το φθορίζον υλικό.
2. Η **ανακλαστική επιφάνεια** που χρησιμεύει στην ανάκλαση των φωτεινών ακτίνων (που πορεύονται προς τη βάση) από τη βάση προς το φιλμ. Η ύπαρξη του στρώματος αυτού είναι προαιρετική και οδηγεί σε αύξηση της αποδοτικότητας των ενισχυτικών πινακίδων, σε βάρος όμως της σαφήνειας της ακτινολογικής εικόνας.



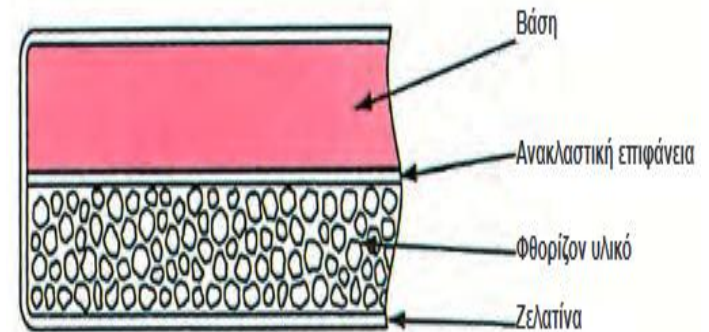
Δομή της Ενισχυτικής Πινακίδας

3. Το στρώμα του φθορίζοντος υλικού (φώσφοροι κρύσταλλοι) που είναι το κατεξοχήν λειτουργικό στρώμα των ενισχυτικών πινακίδων. Αποτελείται από κόκκους βολφραμικού ασβεστίου ή θειούχων οξειδίων σπανίων γαιών, που μετατρέπουν τις ακτίνες X σε ορατό φως.



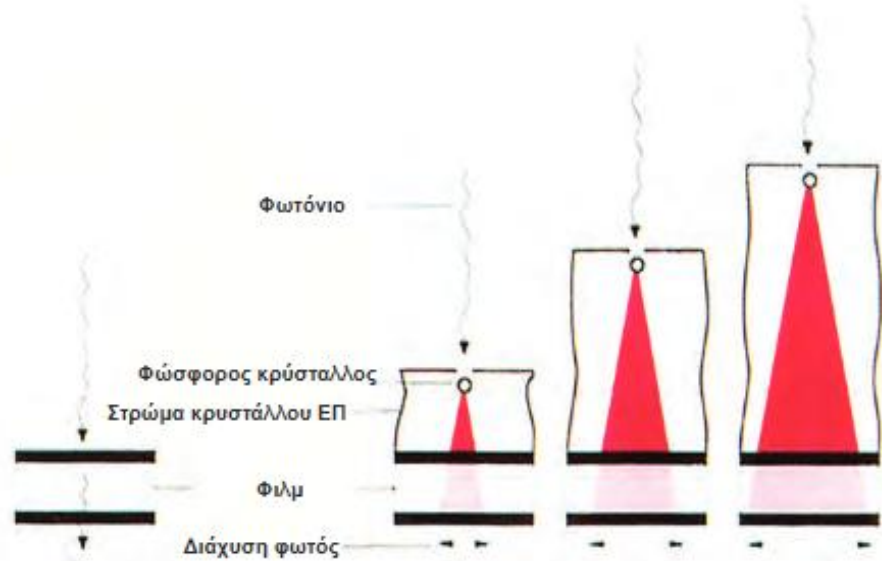
Δομή της Ενισχυτικής Πινακίδας

4. Το προστατευτικό επίστρωμα που είναι λεπτότατη διαφανής επίστρωση από πλαστικό υλικό (ζελατίνα) και τοποθετείται πάνω από το στρώμα των φωσφόρων. Χρησιμεύει στο ότι:
- ✓ παραθέτει λεία επιφάνεια που βρίσκεται σε επαφή με το φιλμ
 - ✓ συγκρατεί και προστατεύει τους φωσφόρους από μηχανικές κακώσεις και υγρασία
 - ✓ επιτρέπει τον ασφαλή καθαρισμό των πινακίδων από ξένες ύλες
 - ✓ συμβάλλει στη μείωση του στατικού ηλεκτρισμού



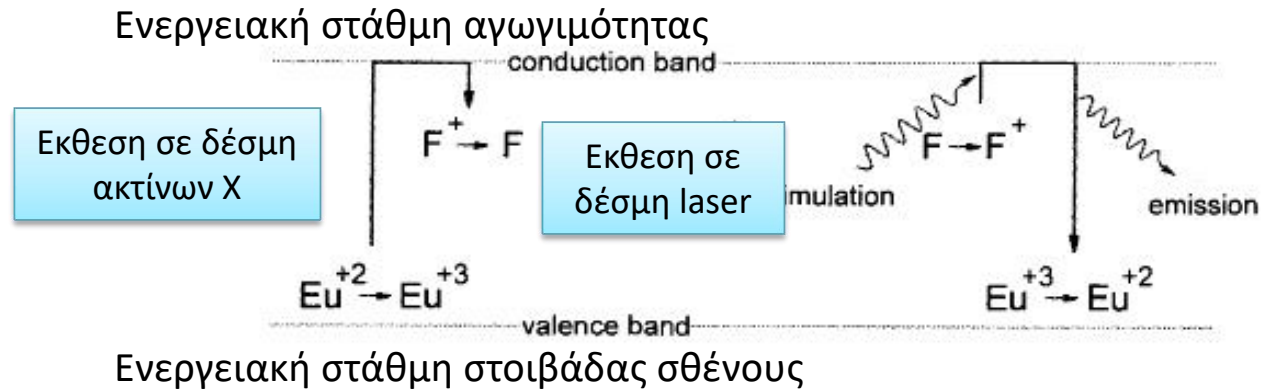
Κατηγορίες Ενισχυτικών Πινακίδων

- Όσο αυξάνεται το πάχος του φθορίζοντος υλικού → προκαλείται μεγαλύτερη διάχυση του φωτός,
- → μεγαλύτερη απώλεια της απεικονιζόμενης λεπτομέρειας



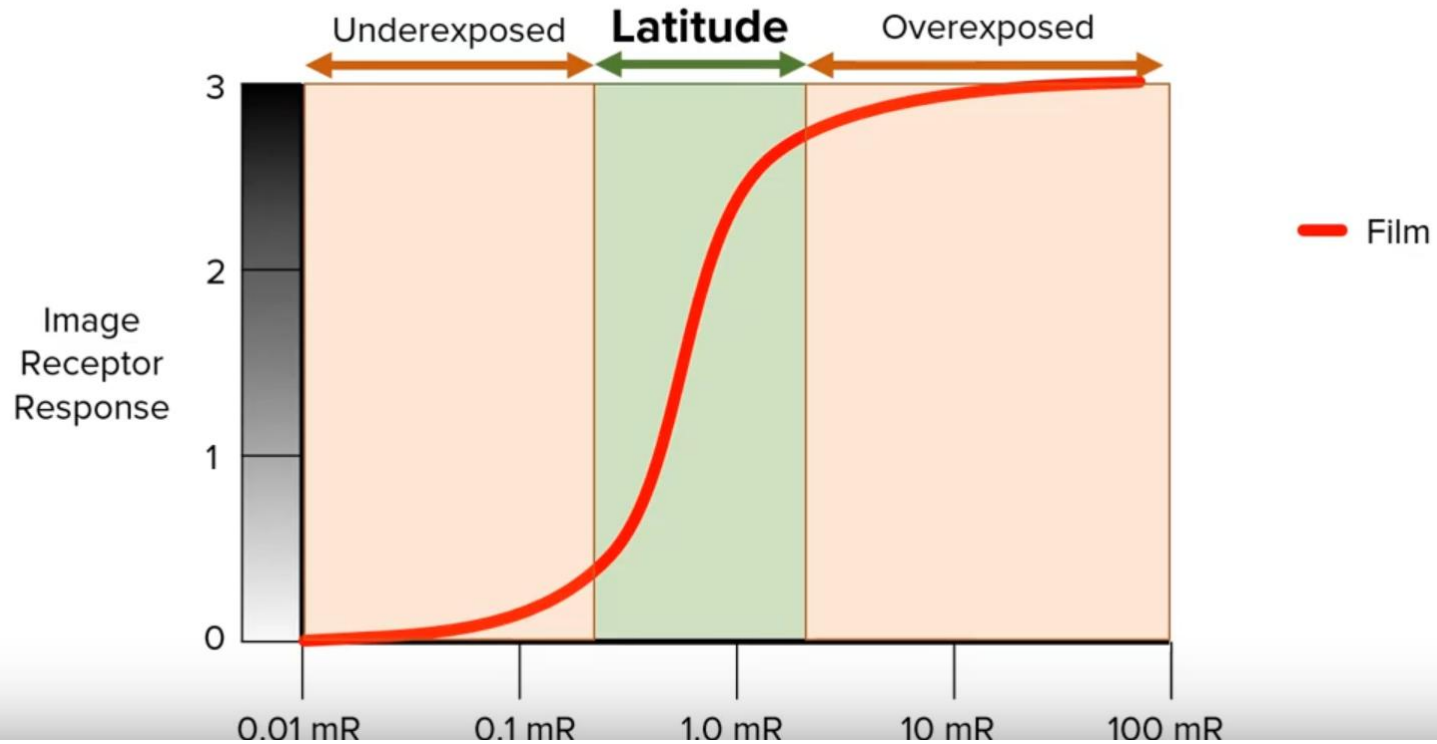
Ψηφιακή Ραδιογραφία με κασέτα (Computer Radiography)

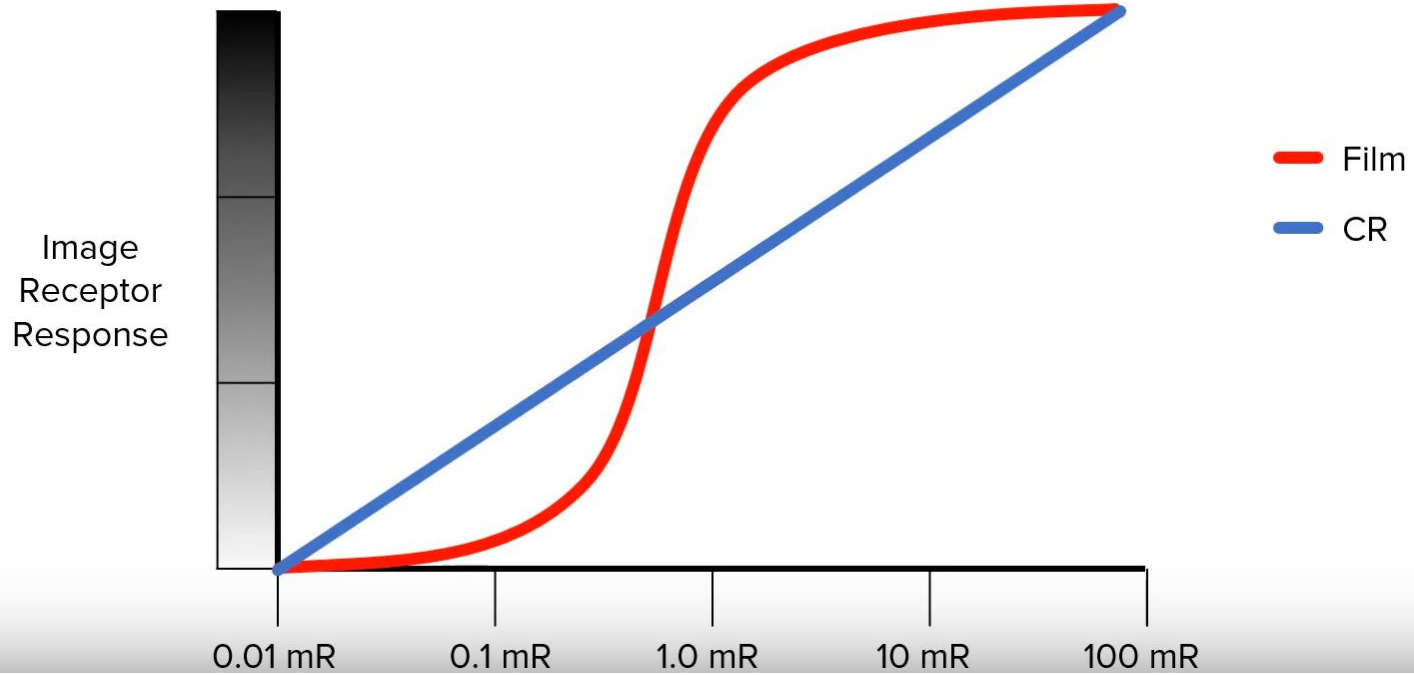
- Χρησιμοποιείται ανιχνευτής από Φωτοδιεγέρσιμο Φώσφορο photostimulable phosphor detector (PSP) 85% BaFBr και 15% BaFI με προσμίξεις Ευρωπίου (Eu), κλεισμένος σε θήκη από αδιαφανές πλαστικό μικρής πυκνότητας.
- Ο ανιχνευτής PSP εκτείνεται σε ακτίνες Χ και τα ιονιζόμενα ηλεκτρόνια των στοιβάδων σθένους των ατόμων του Eu εγκλωβίζονται σε μία ενεργειακή στάθμη μεταξύ αυτής της στοιβάδας σθένους και των ελεύθερων ηλεκτρονίων.
- Ο αριθμός των εγκλωβισμένων ηλεκτρονίων είναι ανάλογος της έντασης της δέσμης ακτίνων Χ.
- Οποιαδήποτε στιγμή (εντός ημερών) μετά την έκθεση του PSP, το PSP σαρώνεται από δέσμη laser 700nm. Τα φωτόνια του laser δίνουν επαρκή ενέργεια στα εγκλωβισμένα ηλεκτρόνια, ώστε να ανέλθουν σε κατάσταση αγωγιμότητας και στη συνέχεια να μεταπέσουν άμεσα σε στοιβάδα σθένους.
- Για κάθε ηλεκτρόνια η ενεργειακή διαφορά μεταξύ στοιβάδας σθένους και αγωγιμότητας αποβάλλεται με εκπομπή φωτονίου (πράσινου ή μπλε).



- Η ίδια εικόνα που έχει αποθηκευθεί στον ανιχνευτή PSP μπορεί να «διαβαστεί» πολλές φορές.
- Η εικόνα διαγράφεται με έκθεση του PSP σε πολύ έντονο φώς, οπότε και μπορεί να επαναεκτεθεί σε ακτίνες Χ.
- Γενικά η διαδικασία είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί φωτογραφικό φιλμ.
- Πλεονεκτήματα PSP : μεγαλύτερη δυναμική ακτίνα τιμών και γραμμικότητα. Πολλαπλή επαναχρησιμοποίηση.

Image Receptor Response

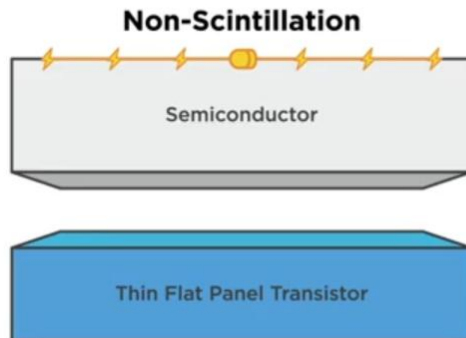




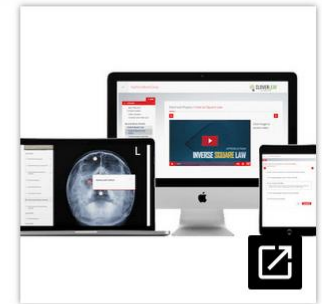
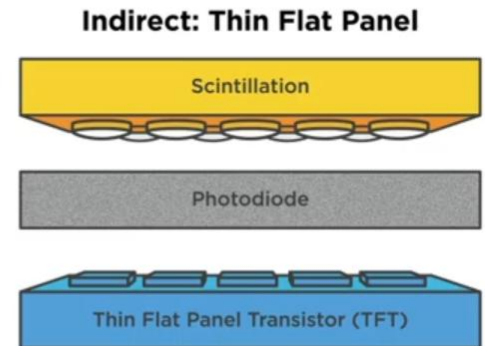
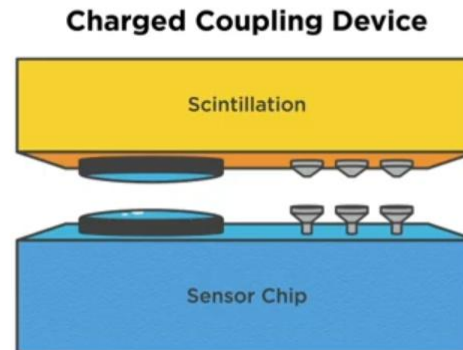
Ψηφιακή Ραδιογραφία χωρίς κασέτα

Cassette-less Digital Radiography Systems

Direct Conversion



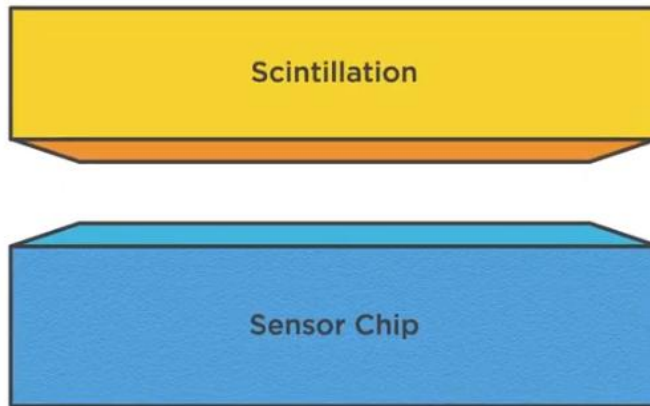
Indirect Conversion



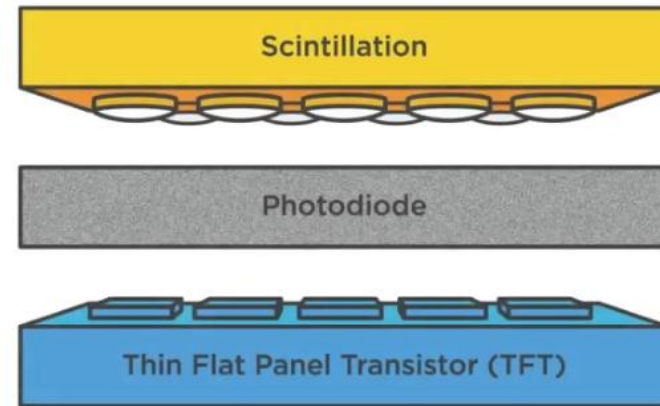
- <https://www.youtube.com/watch?v=YzV1kovMjkl>

Indirect detection: TFTs Thin Film Transistor, Charged-coupled devices (CCDs)

Charged Coupled Device



Indirect: Thin Flat Panel

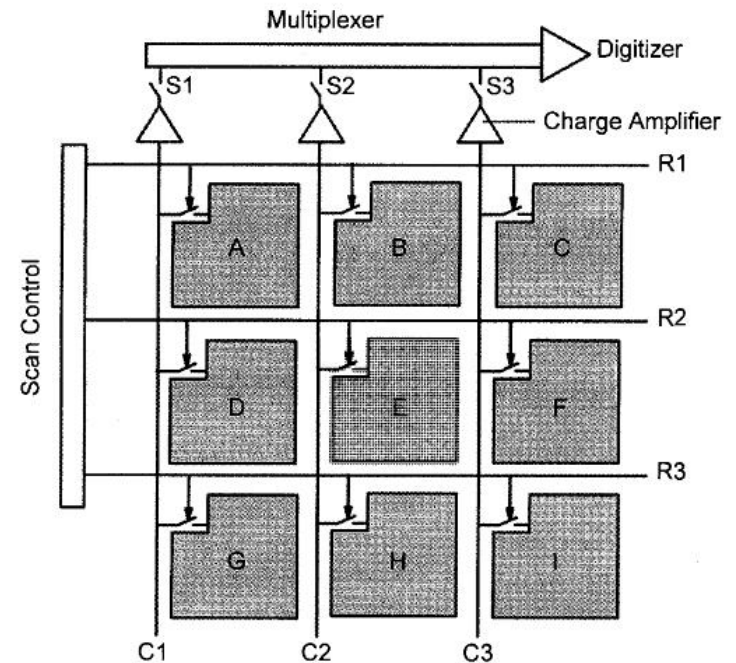


TFT FLAT PANEL Ανιχνευτές: έμμεση ανίχνευση (indirect detection)

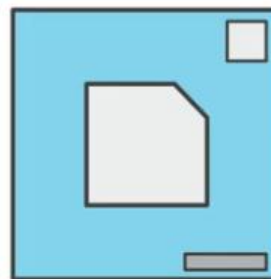
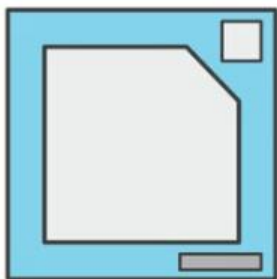
- Τεχνολογία παρόμοια με τις οθόνες των laptop. Το TFT (Thin Film Transistor) Flat Panel αποτελείται από πολύ μεγάλο αριθμό μικροσκοπικών ανιχνευτών φωτός οι οποίοι δέχονται ορατά φωτόνια και παράγουν ηλεκτρόνια.
- Ο όρος έμμεση ανίχνευση σημαίνει ότι τα φωτόνια X παράγουν ορατό φώς, το οποίο παράγει ηλεκτρικό φορτίο που τελικά καταγράφεται.
- Χρησιμοποιείται ο Φώσφορος (Gd_2O_2S) που εκπέμπει ορατό φως τη στιγμή που προσπίπτει σε αυτόν φωτόνιο ακτίνων X . Το φωτογραφικό φιλμ αντικαθίσταται από Flat Panel. Συχνά ο Φώσφορος αντικαθίσταται από κύσταλλο σπινθηρισμού NaI ή CsI με προσμίξεις Tl .
- Κάθε ανιχνευτής του TFT περιέχει:
 - ένα πυκνωτή που συλλέγει το παραγόμενο φορτίο
 - Ένα τρανζιστορ που είναι συνδεδεμένο με τον πυκνωτή και το κανάλι readout

- Τα ηλεκτρονικά κάθε στοιχειώδους ανιχνευτή καταλαμβάνουν ποσοστό του εμβαδού του.
- Κάθε στοιχειώδης ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα pixel της παραγόμενης εικόνας. Το μέγεθος στοιχειώδους ανιχνευτή καθορίζει και την μέγιστη χωρική συχνότητα που μπορεί να απεικονίσει η παραγόμενη εικόνα.

- Οι πύλες των στοιχειωδών ανιχνευτών συνδέονται κατά γραμμές για εφαρμογή τάσης και κατά στήλες με πολυπλέκτη.
- Κατά την έκθεση σε ακτίνες Χ, όλες οι πύλες κάθε γραμμής έχουν αρνητική τάση, οπότε το TFT συσσωρεύει ηλεκτρόνια.
- Κατά τη φάση readout, οι πύλες του TFT τίθενται σε θετική τάση, οπότε και ο πολυπλέκτης επιλέγει ποιος στοιχειώδης ανιχνευτής θα εκφορτίσει το φορτίο του.
- Η ψηφιακή εικόνα παράγεται βάσει του φορτίου που έχει κάθε στοιχ. ανιχν.



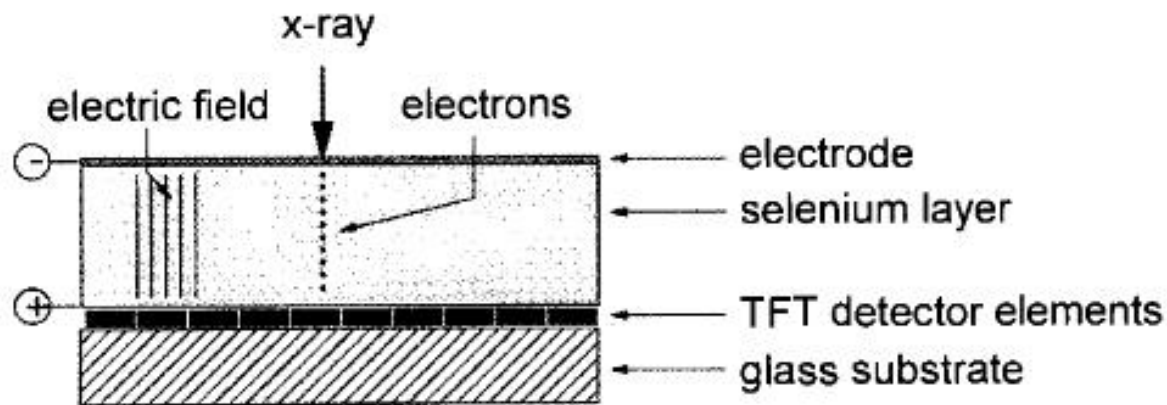
Fill Factor



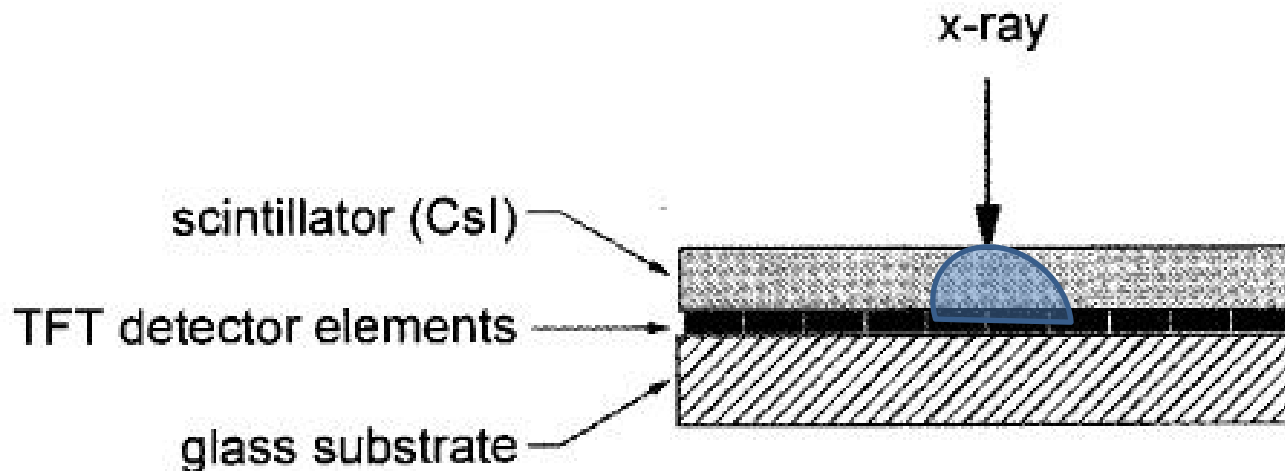
TFT FLAT PANEL Ανιχνευτές: άμεση ανίχνευση (direct detection)

- Οι ανιχνευτές άμεσης ανίχνευσης αποτελούνται από ένα στρώμα TFT επί του οποίου έχει τοποθετηθεί ένα φωτοαγώγιμο υλικό (photoconductor).
- Ο photoconductor είναι ημιαγωγός που έχει την ιδιότητα να αυξάνει την αγωγιμότητα του όταν προπέσουν σε αυτόν φωτόνια με συχνότητα μεγαλύτερη ενός κατοφλίου. Το κατόφλι είναι ίσο:
 - Με το πλάτος του band gap (διαφορά ενέργειας στοιβάδας σθένους (valence) και κατάστασης αγωγιμότητας)
 - Με τη διαφορά ενέργειας μίας ενδιάμεσης ενεργειακής κατάστασης που δημιουργείται από προσμίξεις (inpurities) στο κρυσταλλικό πλέγμα του ημιαγωγού και της κατάστασης αγωγιμότητας
- Παραδείγματα:
 - Θειούχο Κάδμιο (CdS), ημιαγωγός (band gap: 2.4 eV)
 - Αντιμονιούχο Ινδίο (InSb), ημιαγωγός (band gap: 0.7 eV)
 - Αμορφο Σελήνιο (a-Se): ημιαγωγός όπως το Si, Ge, αλλά με υψηλότερο Z, ώστε να αλληλεπιδρούν τα φωτόνια X με αυτόν.

- Κατά την έκθεση σε ακτίνες X, στο a-Se δημιουργούνται ζεύγη οπών/ηλεκτρονίων. Το ηλεκτρόδιο που βρίσκεται στην εμπρόσθια επιφάνεια του a-Se τίθεται σε αρνητική τάση ($10\text{V}/\mu\text{m}$) και τα ηλεκτρόνια μετακινούνται προς το TFT όπου και συλλέγονται.
- Το readout γίνεται όπως περιγράφηκε προηγουμένως.



- Παρόλα αυτά το Se έχει $Z=34$ το οποίο είναι ιδιαίτερα μικρό για να καταγράφει την πλειοψηφία των φωτονίων X. Κατά συνέπεια, το πάχος του πρέπει να είναι πολύ αυξημένο σε σχέση με το αντίστοιχο των έμμεσων συστημάτων ανίχνευσης.
- Επισημαίνεται ότι το αυξημένο πάχος του a-Se δεν προκαλεί θόλωση της παραγόμενης ραδιογραφίας, σε αντίθεση με τον σπινθηριστή των έμμεσων συστημάτων ανίχνευσης (CsI, Gd₂O₂, NaI). Γιατί ??



	Radiography	Mammography	Fluoroscopy
Imager size (cm)	35 × 43	18 × 24	25 × 25
Pixel size (μm)	100–150	50	150–200
Readout time (s)	<5	<5	0.033/frame
X-ray energy (kVp)	80–130	25–50	80
Exposure (mR)	0.03–3	0.6–240	0.0001–0.01
Patient thickness (cm)	20	5	20
Object size	0.5 mm (bone detail)	50–100 μm (μ calcifications)	2 mm