

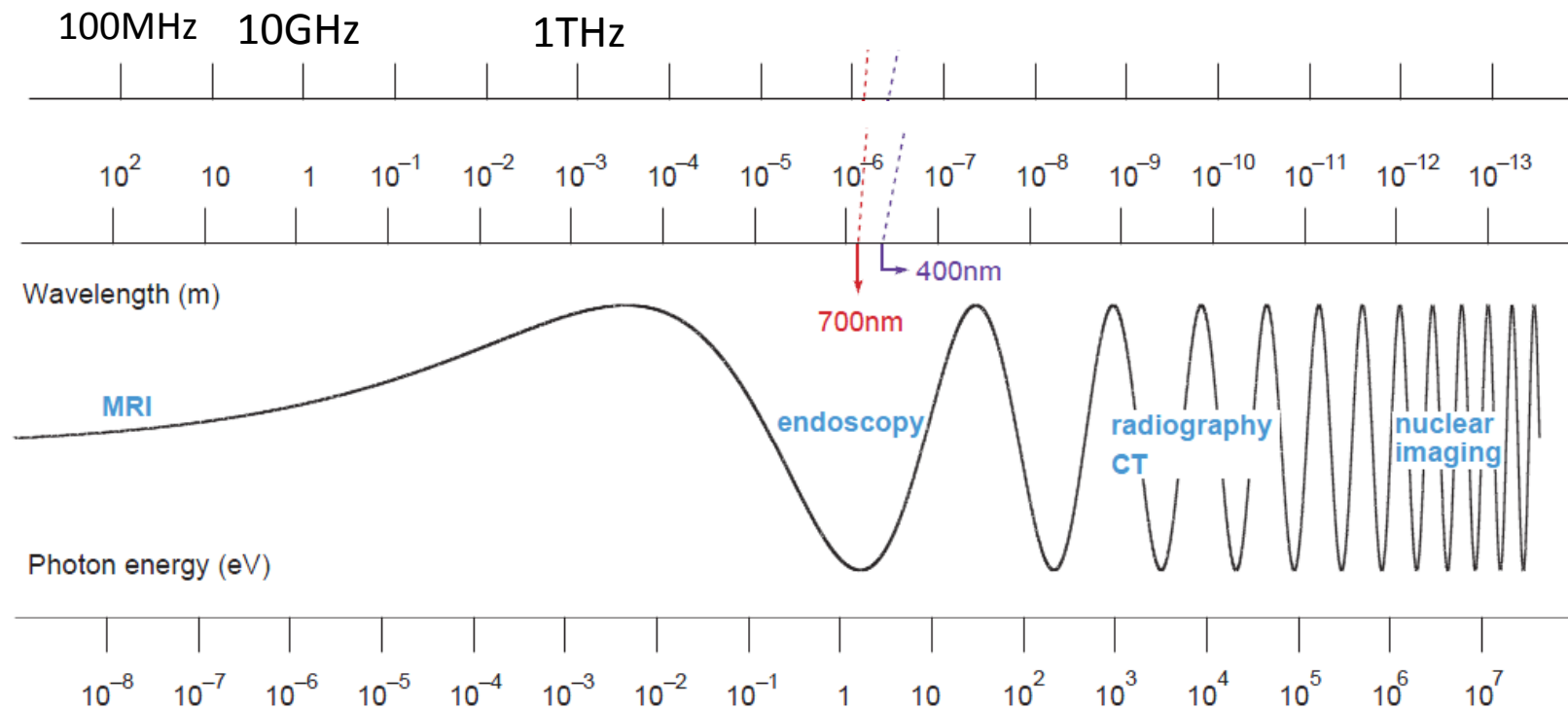
- Ατομικός αριθμός Z : ο αριθμός των πρωτονίων ενός πυρήνα
- Μαζικός αριθμός A : ο αριθμός των πρωτονίων και νετρονίων ενός πυρήνα
- Προφανώς $A=Z+N$
- Σε A gr όποιουδήποτε στοιχείου, περιέχονται $N_A=6.022 \times 10^{23}$ άτομα του στοιχείου
- Σταθεροί πυρήνες
- Ατομική μάζα $M=(1/12)$ μάζας του ^{12}C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

Το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα και εφαρμογές ιατρικής απεικόνισης

- jkdlij



Παράδειγμα

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

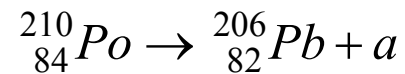
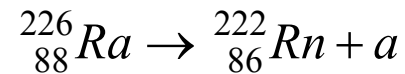
$$\text{Μήκος κύματος: } \lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{sec}^{-1}}{1.02 \times 10^6 \text{ Hz}} = 294 \text{ m}$$

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

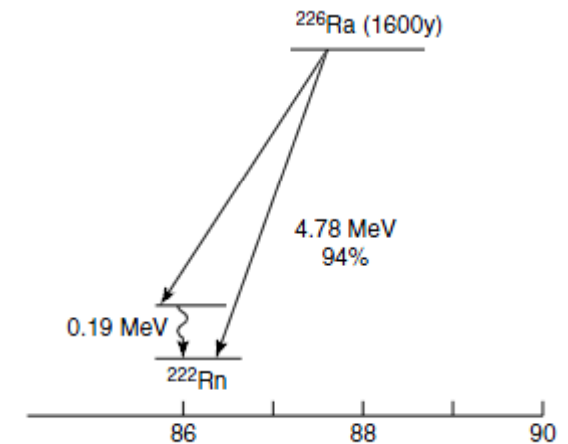
$$\frac{6.25 \times 10^{-28} \text{ J}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} = 4.14 \times 10^{-9} \text{ eV}$$

Πυρηνικές διασπάσεις: α διάσπαση

- Διάσπαση α: ${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} Y + a$



- Προυπόθεση για να πραγματοποιηθεί η α διάσπαση: $M_X > M_Y + M_a + 2m_e$ (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 .

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:

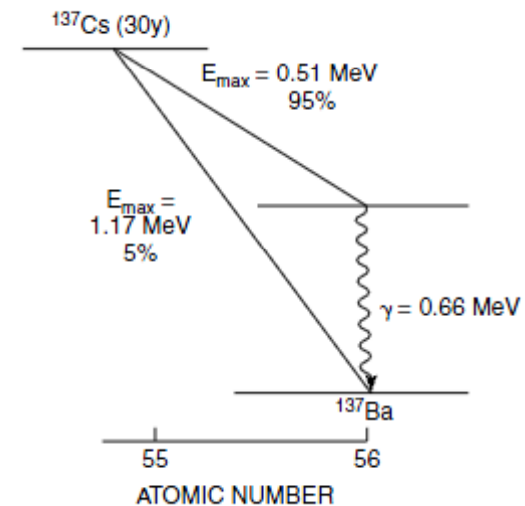
$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$

$${}_{15}^{32}P \rightarrow {}_{16}^{32}S + e^- + \nu + 1.71MeV$$

- 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 .

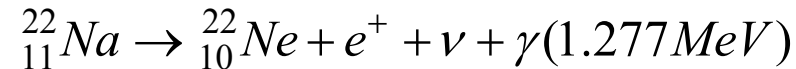
- ^{32}P , ^3H , ^{14}C , ^{90}Sr , ^{90}Y διασπώνται με β^- διάσπαση, χωρίς παραγωγή γωτονίων.
- β^- διάσπαση: πιθανή εκπομπή φωτονίου (γ). Αν ο θυγατρικός πυρήνας παραχθεί σε διεγερμένη ενεργειακή κατάσταση, μεταπίπτει στιγμιαία στην βασική (χαμηλότερη) ενεργειακή κατάσταση με εκπομπή ενός γ με E ίση 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 .



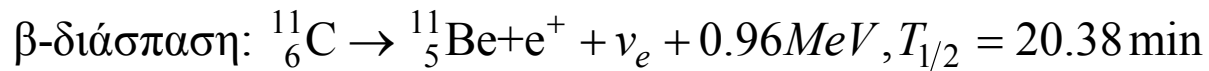
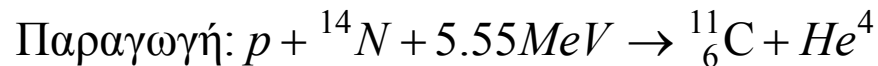
διάσπαση β^+ , εκπομπή ποζιτρονίου

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

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

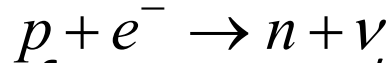


- Η β^+ διάσπαση και η EC αποτελούν ανταγωνιστικές διεργασίες. Πχ το ^{22}Na σε ^{22}Ne διασπάται κατά 10% με β^+ διάσπαση και κατά 90% με EC.

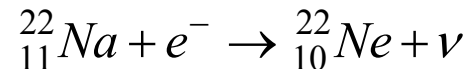


Σύλληψη ηλεκτρονίου (Electron capture –EC)

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

Εσωτερική μετατροπή (Internal Conversion –IC)

- Οπως 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.

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 $\mu\text{gr } ^{226}\text{Ra}$ 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

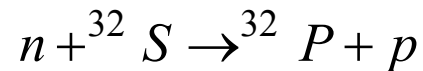
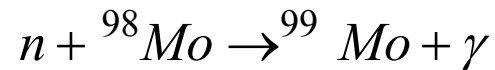
- Αναφορικά με ραδιοϊσότοπα, η μάζα δεν αποτελεί το κρίσιμο μέγεθος. Αντίθετα μας ενδιαφέρει ο αριθμός των διασπάσεων / μονάδα χρόνου. Το μέγεθος αυτό καλείται ενεργότητα.
- Διαστάσεις της ενεργότητας: κρούσεις/sec = διασπάσεις /sec.
- Προσοχή: διασπάσεις /sec διαφορετικό από σωματίδια /sec.
- Μονάδα 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).

Παραγωγή ραδιοϊσοτόπων

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

Ενεργοποίηση νετρονίων (Neutron activation)

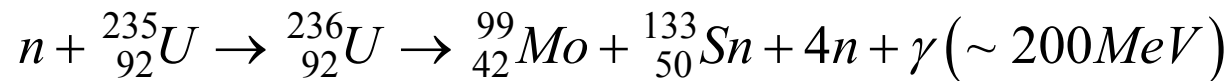
- Κρούση πυρήνων με «θερμικά νετρόνια (n)» (μέση $E < 100\text{eV}$). Θερμικά νετρόνια παράγονται σε πυρηνικούς αντιδραστήρες. Παραδείγματα αντιδράσεων:



- 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)

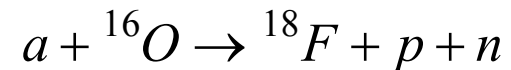
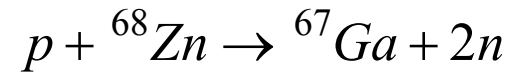
- Σχάση: ένας πυρήνας απορροφά ένα νετρόνιο, καθίσταται ασταθής (ραδιενεργός) και διασπάται σε δυο θυγατρικούς, με παραγωγή νέων νετρονίων και ενέργειας σε μορφή φωτονίων γ .



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

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:

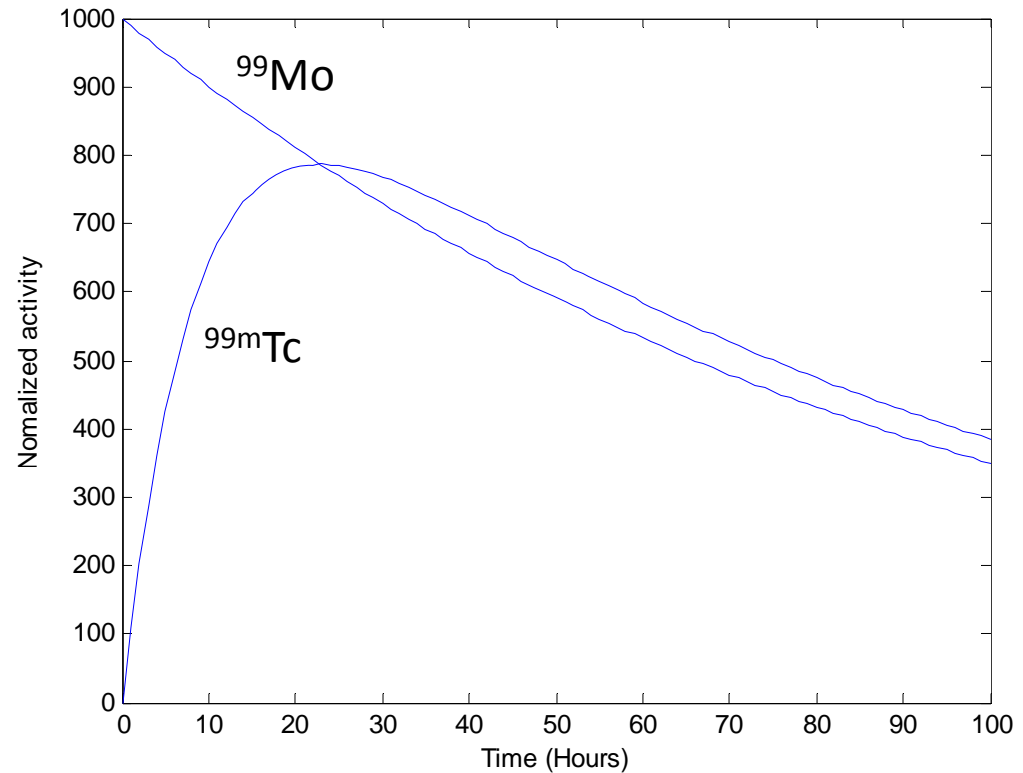
$$N_2(t) = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_1(0) (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

- Αν $T_1 \gg T_2 \rightarrow$ 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.

- Γεννήτρια $^{99}\text{Mo} \rightarrow ^{99\text{m}}\text{Tc}$
 - Χ1: ^{99}Mo μολυβδένιο ($T_1=66,7$ ώρες)
 - Χ2: $^{99\text{m}}\text{Tc}$ Τεχνητίο 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 .



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

- Σε αντίθεση με τα φορτισμένα σωμάτια α και β,
- Εστω δέσμη μονοενεργειακών 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 $(\text{μήκος})^{-1}$.
- Συχνά χρησιμοποιείται ο ατομικός συντελεστής απορρόφησης μ_a , που ορίζεται ως το πλήθος των προσπίπτοντων φωτονίων που απορροφώνται από ένα άτομο του υλικού:

- 'λκξλ

$$\mu_a (cm^2) = \frac{\mu_L (cm^{-1})}{N \text{ atoms} / cm^3}$$

Δίδυμη γέννεση (pair production)

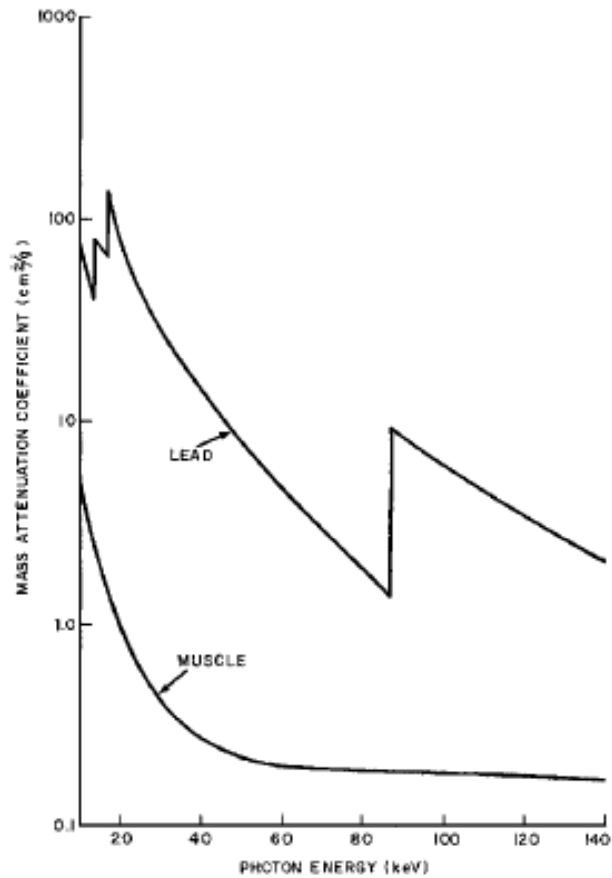
- Ένα φωτόνιο γ με επαρκή ενέργεια που διέρχεται κοντά από πυρήνα, έχει πιθανότητα να αλληλεπιδράσει με αυτόν και να εξαυλωθεί δημιουργώντας ένα σωματίο β^- και ένα β^+ .
- Ενεργειακά, αυτό είναι δυνατόν μόνο αν
$$E_{\gamma} > 2 * (\text{μάζα ηρεμίας του } \beta) * c^2 = 2 * (511 \text{keV} / c^2) c^2 = 1.01 \text{ MeV}$$
- 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 προυπάρχον 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 μειώνεται σε σχέση με την τριπλή γέννηση.

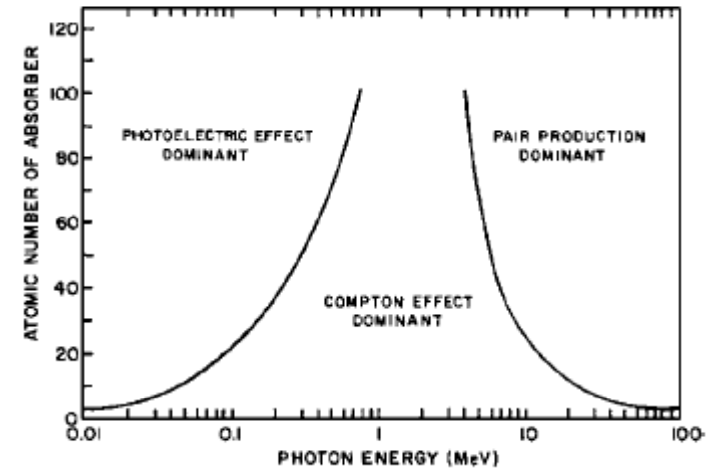
Σκέδαση Compton

- Τα φωτόνια γ και X με ενέργεια από 30 keV έως MeV σκεδάζονται ανελαστικά από ελεύθερα ηλεκτρόνια.
- 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.

Εξάρτηση του φωτοηλεκτρικού φαινομένου από τη ενέργεια του φωτονίου



- 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

Ανίχνευση ακτίνων Χ

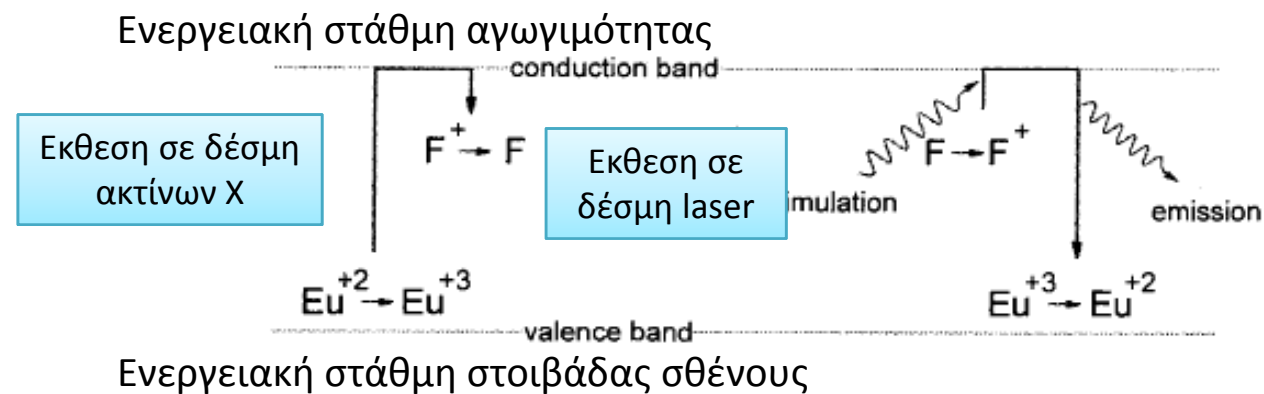
- *flat-panel detector* fields (commercially available since the late 1990s)
- charge-coupled devices (CCDs) developed at Bell Laboratories in 1969
- a-Si active matrix thin-film transistor (TFT) array

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.

Ψηφιακή Ραδιογραφία (Computer Radiography)

- Χρησιμοποιείται ανιχνευτής από Φωτοδιεγέρισμο Φώσφορο photostimulable phosphor detector (PSP) 85% BaFBr και 15% BaFI με προσμίξεις Ευρωπαϊού (Eu), κλεισμένος σε θήκη από αδιαφανές πλαστικό μικρής πυκνότητας.
- Ο ανιχνευτής PSP εκτείθεται σε ακτίνες X 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 X.
- 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).

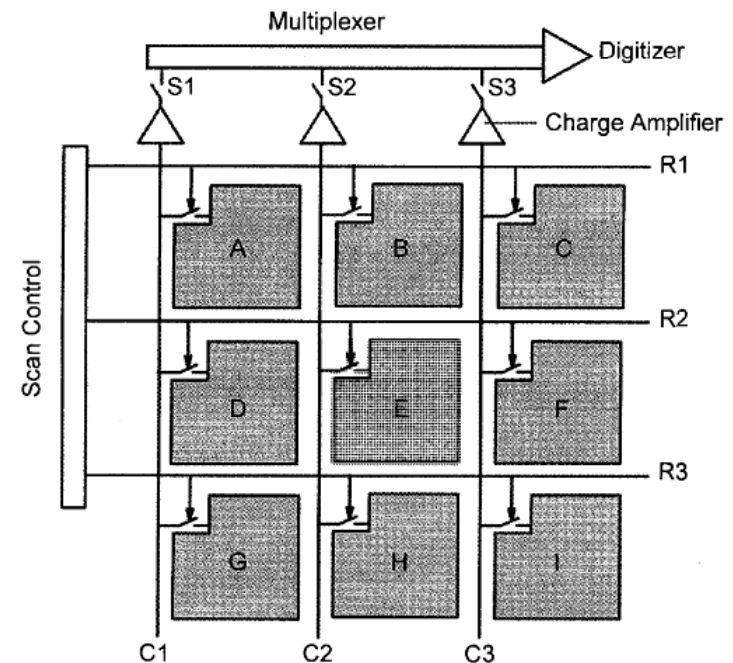


- Η ίδια εικόνα που έχει αποθηκευθεί στον ανιχνευτή PSP μπορεί να «διαβαστεί» πολλές φορές.
- Η εικόνα διαγράφεται με έκθεση του PSP σε πολύ έντονο φως, οπότε και μπορεί να επαναεκτεθεί σε ακτίνες Χ.
- Γενικά η διαδικασία είναι ίδια με αυτή που χρησιμοποιεί φωτογραφικό φιλμ.
- Πλεονεκτήματα PSP : μεγαλύτερη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

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 φως, 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

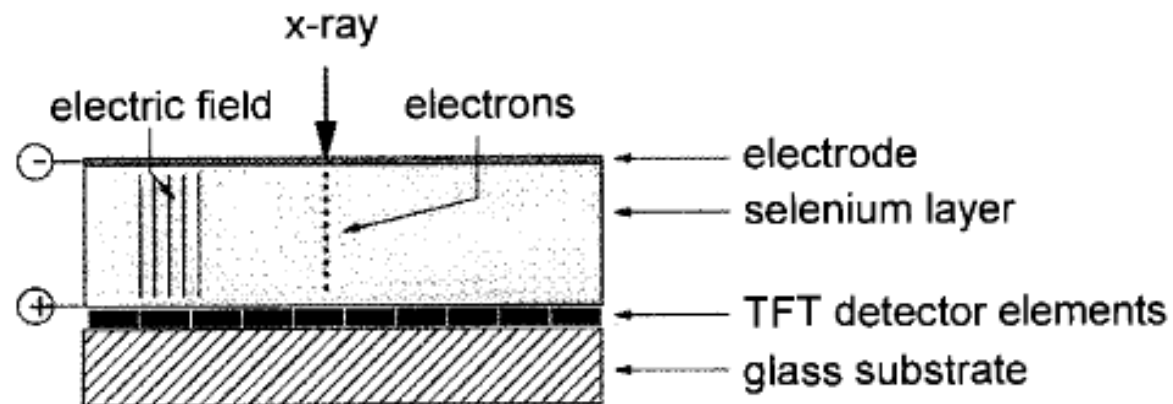
- Τα ηλεκτρονικά κάθε στοιχειώδους ανιχνευτή καταλαμβάνουν ποσοστό του εμβαδού του.
- Κάθε στοιχειώδης ανιχνευτής αντιστοιχεί σε ένα pixel της παραγόμενης εικόνας. Το μέγεθος στοιχειώδους ανιχνευτή καθορίζει και την μέγιστη χωρική συχνότητα που μπορεί να απεικονίσει η παραγόμενη εικόνα.
- Οι πύλες των στοιχειωδών ανιχνευτών συνδέονται κατά γραμμές για εφαρμογή τάσης και κατά στήλες με πολυπλέκτη.
- Κατά την έκθεση σε ακτίνες X, 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.



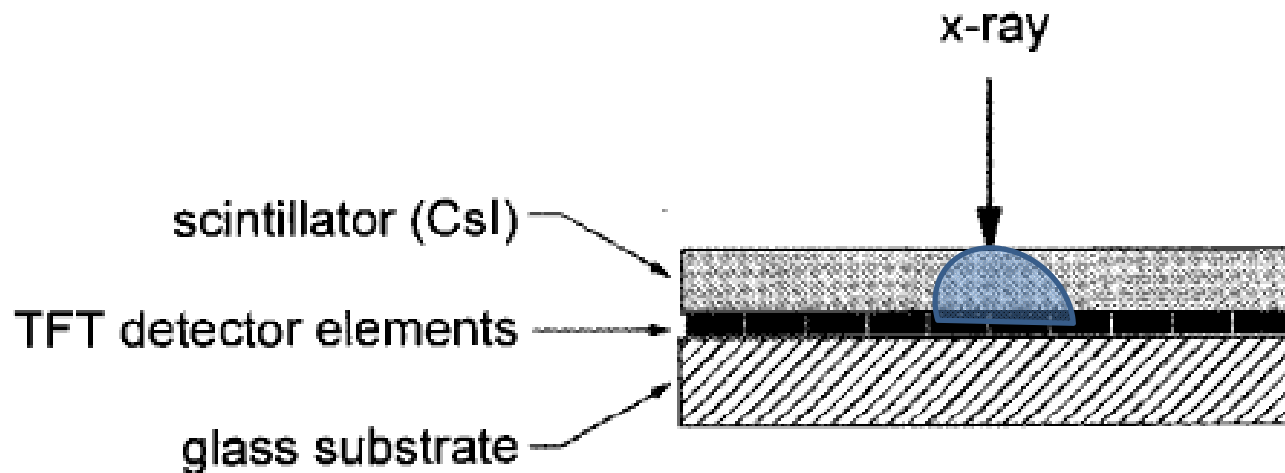
TFT FLAT PANEL Ανιχνευτές: άμεση ανίχνευση (direct detection)

- 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 (impurities) 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 (10V/μm) 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