

Πηγές Ταχέων Ηλεκτρονίων - internal conversion

- Ένας πυρήνας σε διεγερμένη κατάσταση (πχ μετα από β-διάσπαση) που για διάφορους λόγους δεν μπορεί να διασπασθεί μέσω εκπομπής γ ακτινοβολίας. Η ενέργεια διέγερσης του πυρήνα μεταφέρεται σε ένα από τα ατομικά ηλεκτρόνια που ελευθερώνεται. Η ενέργεια του ηλεκτρονίου είναι:

$$E_{e^-} = E_{ex} - E_b$$

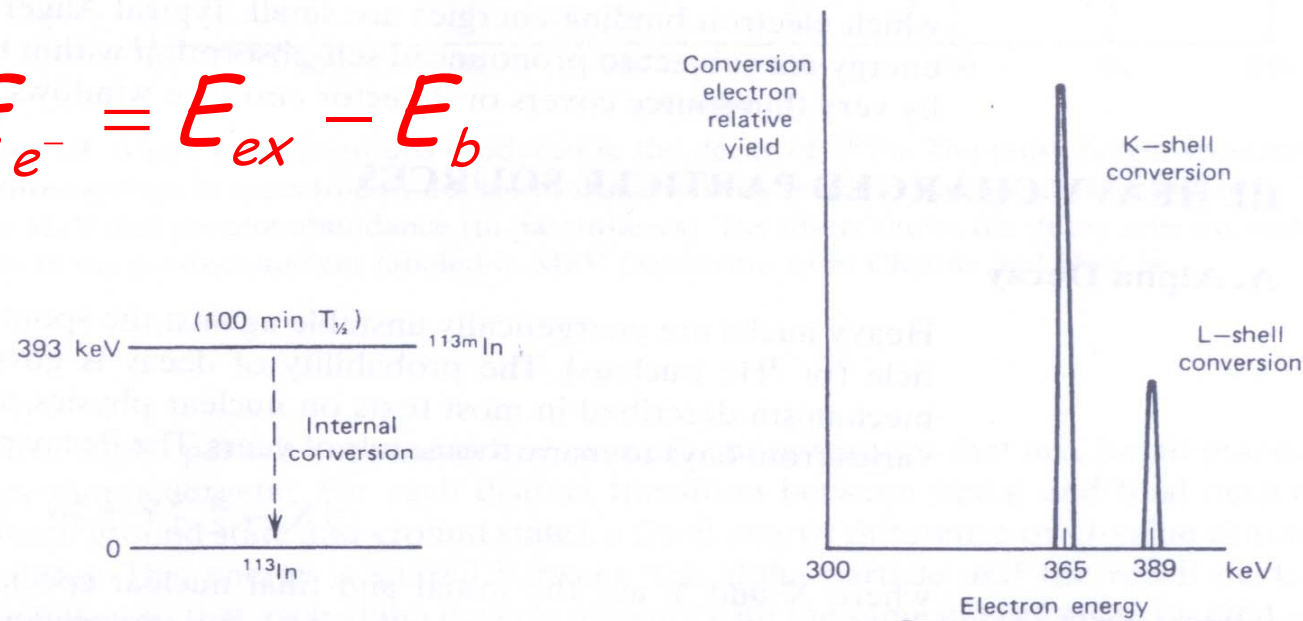


Figure 1.2 The conversion electron spectrum expected from internal conversion of the isomeric level at 393 keV in ^{113m}In .

Πηγές Ταχέων Ηλεκτρονίων - internal conversion

Table 1.2 Some Common Conversion Electron Sources

Parent Nuclide	Parent Half-Life	Decay Mode	Decay Product	Transition Energy of Decay Product (keV)	Conversion Electron Energy (keV)
^{109}Cd	453 d	EC	$^{109\text{m}}\text{Ag}$	88	62
					84
^{113}Sn	115 d	EC	$^{113\text{m}}\text{In}$	393	365
					389
^{137}Cs	30.2 y	β^-	$^{137\text{m}}\text{Ba}$	662	624
					656
^{139}Ce	137 d	* EC	$^{139\text{m}}\text{La}$	166	126
					159
^{207}Bi	38 y	EC	$^{207\text{m}}\text{Pb}$	570	482
					554
					976
					1048

Data from Lederer and Shirley.¹

Πηγές Ταχέων Ηλεκτρονίων - ηλεκτρόνια Auger

- Το φαινόμενο Auger είναι αναλογο με την «internal conversion» με τη διαφορά ότι η ενέργεια διέγερσης προέρχεται από το άτομο αντί από τον πυρήνα. Αν για παράδειγμα είχαμε σύλληψη ηλεκτρονίου (electron capture) τότε το άτομο έχει ένα κενό σε μια στοιβάδα που συνήθως είναι πλήρης. Αυτό το κενό συμπληρώνεται από ένα ηλεκτρόνιο που βρίσκεται στις εξωτερικές στοιβάδες με σύγχρονη εκπομπή μιας χαρακτηριστικής ακτίνας X .
- Τα ηλεκτρόνια Auger έχουν διακριτό φάσμα και η ενέργεια τους εξαρτάται από τη διαφορά μεταξύ της αρχικής διέγερσης και της ενέργειας δέσμευσης της στοιβάδας από την οποία προέρχεται το ηλεκτρόνιο.
- Η ενέργεια των ηλεκτρονίων Auger είναι σχετικά μικρή σε σχέση με την ενέργεια των β και είναι της τάξης του keV.
- Το φαινόμενο Auger είναι πιο συχνό στα υλικά με μικρό Z .

Γ. Τσιπολίτης

Παράδειγμα

Ποιο είναι το μικρότερο μήκος κύματος ακτίνων-Χ που εκπέμπονται από «tube» που δουλεύει σε διαφορά δυναμικού 195 KV;

Απάντηση:

$$E = h\nu = h \frac{c}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{hc}{E}$$

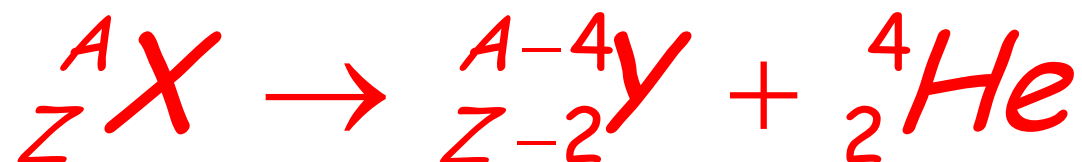
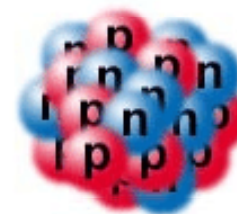
$$\Rightarrow \lambda = \frac{(4.135 \times 10^{-15} \text{ eV} \cdot \text{s}) \left(3 \times 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)}{195 \times 10^3 \text{ eV}} = 6.36 \text{ pm}$$

Πηγές βαρέων φορτισμένων σωματιδίων

- **α - διάσπαση**

- Βαρείς πυρήνες είναι ενεργητικά ασταθής και μπορούν να διασπασθούν με την εκπομπή ενός πυρήνα ${}^4\text{He}$.

- Ο χρόνος ημιζωής μπορεί να είναι από μερικές ημέρες μέχρι πολλές χιλιάδες χρόνια.



α - διάσπαση

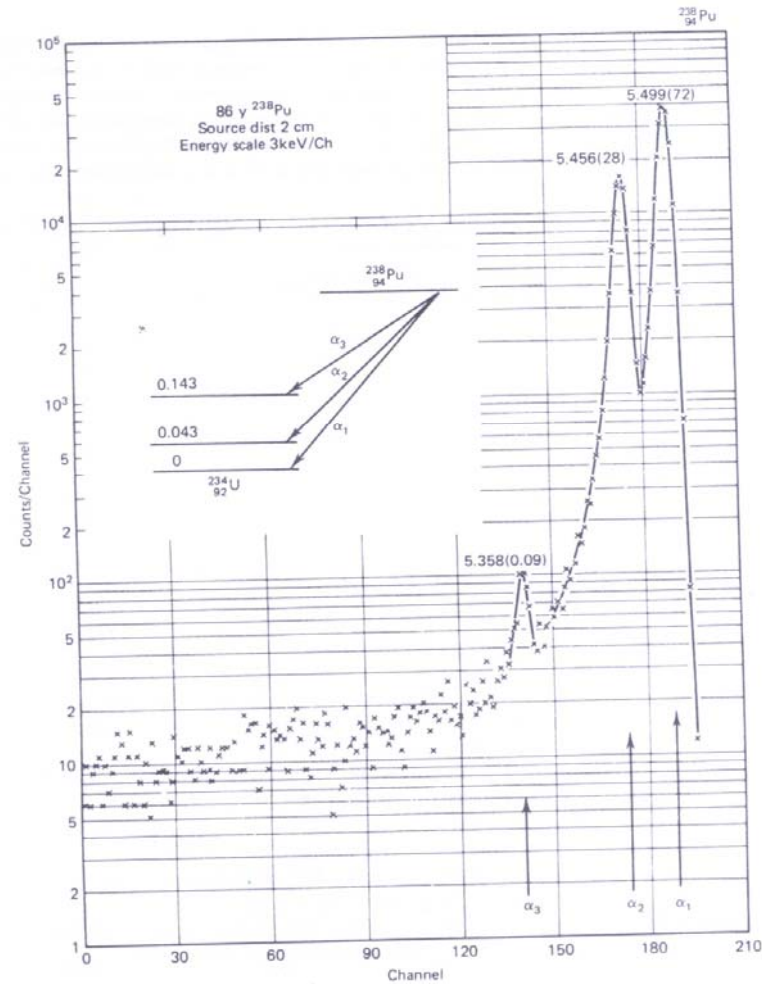


Figure 1.3 Alpha particle groups produced in the decay of ^{238}Pu . The pulse height spectrum shows the three groups as measured by a silicon surface barrier detector. Each peak is identified by its energy in MeV and percent abundance (in parentheses). The insert shows the decay scheme, with energy levels in the product nucleus labeled in MeV. (Spectrum from Chanda and Deal.²)

Γ. Τσιπολίτης

α - διάσπαση

Ενέργειες μεταξύ

4 - 6 MeV

Συσχετισμός μεταξύ
ενέργειας του α και
χρόνου ημιζωής →
μεγαλύτερες ενέργειες →
μικρότερος χρόνος
ημιζωής.

Πάνω από ~6,5 MeV
χρόνος ημιζωής
αναμένεται να είναι
μερικές μέρες ενώ αν η
ενέργεια είναι κάτω από
4 MeV ο χρόνος ημιζωής
είναι παρα πολύ μεγάλος.

Table I.3 Common Alpha-Emitting Radioisotope Sources

Source	Half-Life	Alpha Particle Kinetic Energy (with Uncertainty) in MeV		Percent Branching
¹⁴⁸ Gd	~93 y	3.182787	±0.000024	100
²³² Th	1.4 × 10 ¹⁰ y	4.012	±0.005	77
		3.953	±0.008	23
²³⁸ U	4.5 × 10 ⁹ y	4.196	±0.004	77
		4.149	±0.005	23
²³⁵ U	7.1 × 10 ⁸ y	4.598	±0.002	4.6
		4.401	±0.002	56
		4.374	±0.002	6
		4.365	±0.002	12
		4.219	±0.002	6
²³⁶ U	2.4 × 10 ⁷ y	4.494	±0.003	74
		4.445	±0.005	26
²³⁰ Th	7.7 × 10 ⁴ y	4.6875	±0.0015	76.3
		4.6210	±0.0015	23.4
²³⁴ U	2.5 × 10 ⁵ y	4.7739	±0.0009	72
		4.7220	±0.0009	28
²³¹ Pa	3.2 × 10 ⁴ y	5.0590	±0.0008	11
		5.0297	±0.0008	20
		5.0141	±0.0008	25.4
		4.9517	±0.0008	22.8
²³⁹ Pu	2.4 × 10 ⁴ y	5.1554	±0.0007	73.3
		5.1429	±0.0008	15.1
		5.1046	±0.0008	11.5
²⁴⁰ Pu	6.5 × 10 ³ y	5.16830	±0.00015	76
		5.12382	±0.00023	24
²⁴³ Am	7.4 × 10 ³ y	5.2754	±0.0010	87.4
		5.2335	±0.0010	11
²¹⁰ Po	138 d	5.30451	±0.00007	99+
²⁴¹ Am	433 y	5.48574	±0.00012	85.2
		5.44298	±0.00013	12.8
²³⁸ Pu	88 y	5.49921	±0.00020	71.1
		5.4565	±0.0004	28.7
²⁴⁴ Cm	18 y	5.80496	±0.00005	76.4
		5.762835	±0.000030	23.6
²⁴³ Cm	30 y	6.067	±0.003	1.5
		5.992	±0.002	5.7
		5.7847	±0.0009	73.2
		5.7415	±0.0009	11.5
²⁴² Cm	163 d	6.11292	±0.00008	74
		6.06963	±0.00012	26
^{254m} Es	276 d	6.4288	±0.0015	93
²⁵³ Es	20.5 d	6.63273	±0.00005	90
		6.5916	±0.0002	6.6

Data from Rytz.³

Τυχαία Σχάση

- Η σχάση είναι η μόνη πηγή από βαριά φορτισμένα σωματίδια άλλα από το α.
- Όλοι οι βαρείς πυρήνες είναι, κατά κανόνα, ασταθείς στην τυχαία σχάση σε 2 ελαφρύτερους πυρήνες.
- Η πιο διαδεδομένη πηγή τυχαίας σχάσης είναι το ^{252}Cf το οποίο έχει χρόνο ημιζωής για τυχαία σχάση 85 γ.
- Το ^{252}Cf έχει και α-διάσπαση με χρόνο ημιζωής 2,65 γ.
- πχ. 1 μgr ^{252}Cf δίνει $1,92 \times 10^7$ σωματίδια α το δευτερόλεπτο ενώ θα έχει $6,14 \times 10^5$ τυχαίες σχάσεις το δευτερόλεπτο.

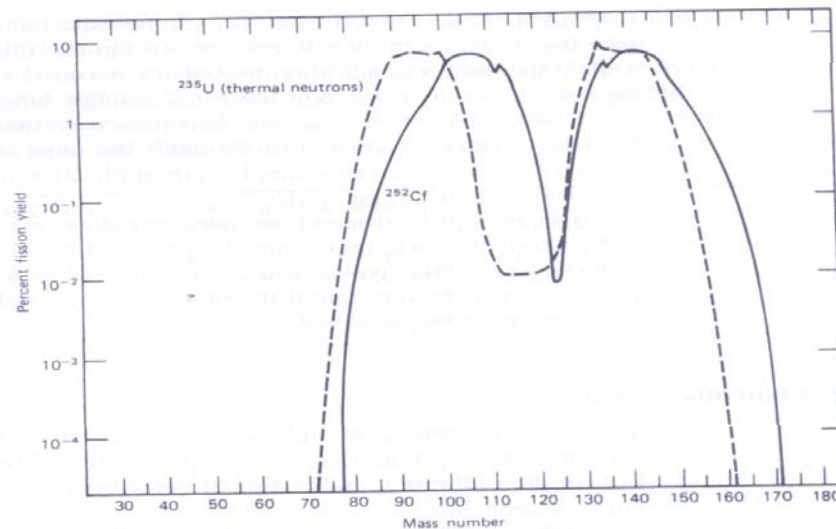


Figure 1.4a The mass distribution of ^{252}Cf spontaneous fission fragments. Also shown is the corresponding distribution from fission of ^{235}U induced by thermal neutrons. (From Nervik.⁴)

Τυχαία Σχάση

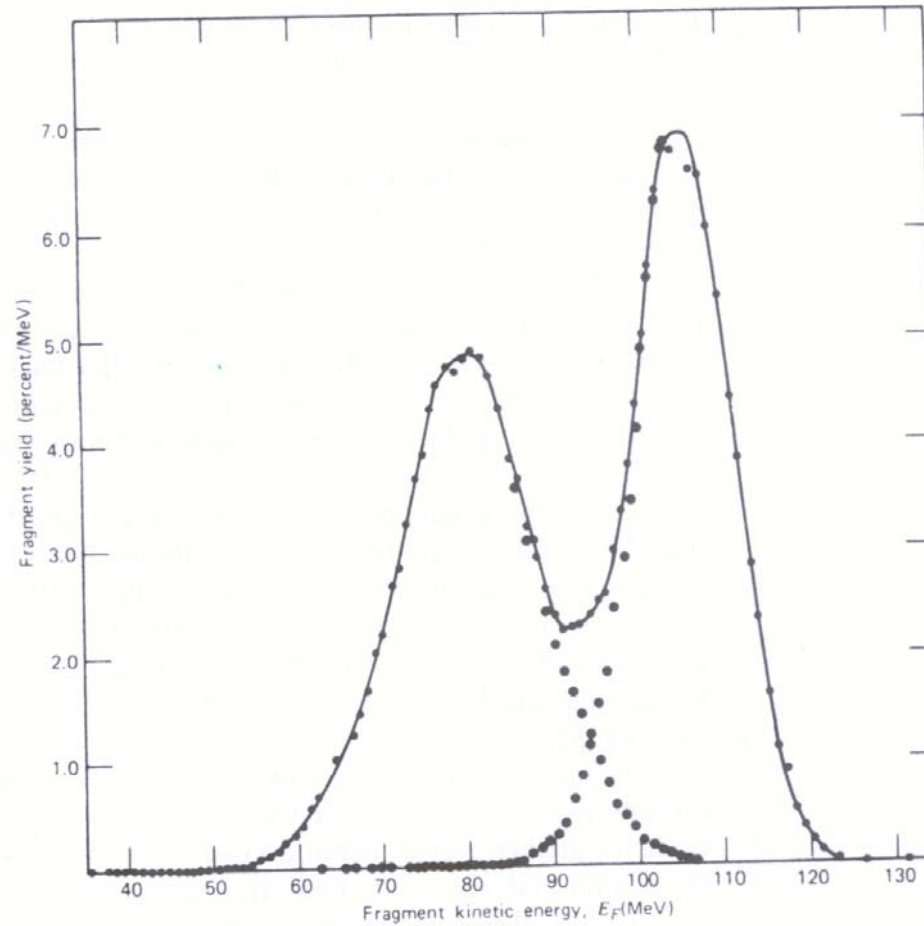


Figure 1.4b The distribution in kinetic energy of the ^{252}Cf spontaneous fission fragments. The peak on the left corresponds to the heavy fragments, and that on the right to the light fragments. (From Whetstone.⁵)

Γ. Τσιπολίτης

Παράδειγμα

Να βρείτε την ενέργεια που απελευθερώνεται από τη σχάση του ^{235}U σε δυο όμοιους πυρήνες:



Απάντηση:

Γνωρίζουμε από πίνακες ότι:

$$M(^{117}\text{Sn}) = 116.9029\text{amu}, M(^{118}\text{Sn}) = 117.9016\text{amu}, M(^{235}\text{U}) = 235.0439\text{amu}$$



$$Q = M(^{235}\text{U})c^2 - M(^{117}\text{Sn})c^2 - M(^{118}\text{Sn})c^2$$

$$\Rightarrow Q = 223\text{MeV}$$

$$\text{όπου } 1\text{amu} = \frac{1}{12} (\text{μάζας του ατόμου } ^{12}\text{C}) = 931.5\text{MeV} / c^2$$

Γ. Τσιπολίτης

Η/Μ ακτινοβολία - ακτίνες γ

- Η ακτινοβολία γ παράγεται από διεγερμένους πυρήνες κατά τη μετάπτωσή τους σε χαμηλότερα ενεργειακά επίπεδα.

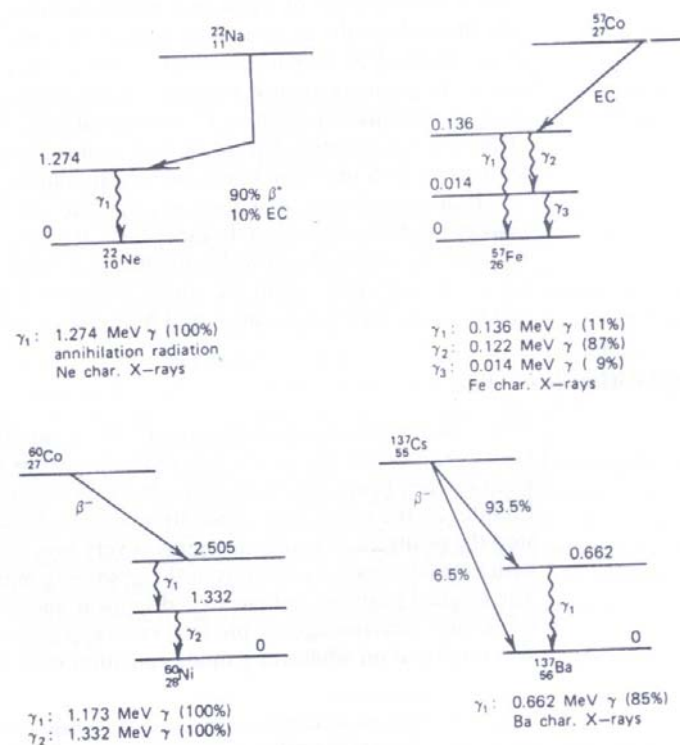


Figure 1.5 Decay schemes for some common gamma reference sources. Only major transitions are shown. The energies and yields per disintegration of X- and gamma rays emitted in each decay are listed below the diagram. (Data from Lederer and Shirley.¹)

Η/Μ ακτινοβολία - ακτίνες γ

- Οι β διάσπαση είναι αργή διαδικασία με χρόνο ημιζωής μερικές εκατοντάδες ημέρες ή και περισσότερο ενώ οι διεγερμένες πυρηνικές καταστάσεις έχουν χρόνο ημιζωής \ll ps. Άρα οι ακτίνες γ παρουσιάζονται με χρόνο ημιζωής που είναι της β-διάσπασης.
- Λόγω του ότι οι πυρηνικές στάθμες έχουν πολύ καλά καθορισμένες ενέργειες
- Οι συνήθεις πηγές έχουν ενέργειες $< 2,8$ MeV.

Ακτινοβολία από εξαΰλωση

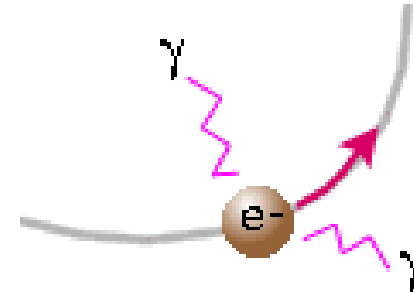
- Όταν ένας πυρήνας διασπάται μέσω β^+ διάσπασης τότε το β^+ μπορεί να κάνει ένα positronium με κάποιο ηλεκτρόνιο από το υλικό που περιβάλλει την πηγή. Το positronium διασπάται κατά κανόνα σε 2 φωτόνια ενέργειας 511 keV που κατευθύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις.
- Τα φωτόνια των 511 keV εμφανίζονται μαζί με ότι άλλες ακτίνες γ προέρχονται από την πηγή.
- πχ. το ^{22}Na δίνει φωτόνια 511 keV και 1274 keV

Bremsstrahlung

- Όταν γρήγορα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη τότε μέρος της ενέργειας τους μετατρέπεται σε Η/Μ ακτινοβολία με την μορφή της ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung).
- Το ποσοστό της ακτινοβολίας πέδησης αυξάνει με την ενέργεια του ηλεκτρονίου και είναι μέγιστη σε υλικά με μεγάλο ατομικό αριθμό.
- Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική στην παραγωγή ακτίνων - Χ.

Synchrotron Radiation

- Όταν μια δέσμη ηλεκτρονίων μεγάλης ενέργειας κάμπυλώνεται τότε ακτινοβολείται η ακτινοβολία σύγχροτρον.
- Τα φωτόνια βγαίνουν κυρίως κατά την εφαπτομένη της δέσμης και μπορούν να έχουν ενέργειες από μερικά eV (οπτικό φάσμα) μέχρι MeV.
- Σε πολλούς επιταχυντές παράγονται φωτόνια από ακτινοβολία σύγχροτρον.



Παράδειγμα

Τα ενεργειακά φάσματα των ιορτιζουσών ακτινοβολιών μπορούν να διαχωριστούν σε δυο βασικές κατηγορίες, αυτά με διακριτές ενεργειακές καταστάσεις (γραμμικά φάσματα) και αυτά με συνεχή κατανομή ενεργειών (συνεχή φάσματα). Για τις κάτωθι πηγές ακτινοβολιών να καταγράψετε σε ποια κατηγορία φασμάτων ανήκουν

Ακτινοβολία	Γραμμικά	Συνεχή
Σωματίδια α	X	
Σωματίδια β		X
Σωματίδια γ	X	
Ακτίνες Χ	X	
Θραύσματα σχάσης		X
Ακτινοβολία πέδησης		X
Ακτινοβολία εξαΰλωσης	X	
Ηλεκτρόνια Auger	X	

Μονάδες - δοσιμετρίας

Η αλληλεπίδραση της ακτινοβολίας με την ύλη επιφέρει ιονισμό ή διέγερση των ατόμων και μορίων.

Οι μονάδες Δοσιμετρίας αποτελούν μέτρηση της ποσότητας ιονισμού που προκαλείται ή του ποσού της ενέργειας που έχει εναποτεθεί στην ύλη.

- **1 Roentgen** = ποσότητα ακτίνων-Χ που προκαλούν ιονισμό 1 esu/cm³ στον αέρα Υ.Κ.Σ.)

$$1 \text{ esu} = 3,34 \times 10^{-10} \text{ C}$$

Το Roentgen έχει να κάνει με ακτίνες-Χ στον αέρα. Δεν είναι βολικό για βιολογικούς οργανισμούς!

- Ιονισμός ανά μονάδα χρόνου ή ρυθμός έκθεσης που οφείλεται σε μια πηγή

$$= \frac{\Gamma \cdot A}{d^2}, \quad \Gamma = \text{σταθερά ρυθμού έκθεσης}$$

A = ενεργότητα της πηγής

d = απόσταση

^{137}Cs	3.3
^{57}Co	13.2
^{22}Na	12.0

πηγή	$(R \cdot \text{cm}^2) / (\text{hr} \cdot \text{mCi})$

Απορροφούμενη Δόση: Ολική ενέργεια που απορροφάται ανά μονάδα μάζας:

$$1 \text{ rad} = 100 \text{ erg/g}$$

$$1 \text{ Gray (Gy)} = 1 \text{ J/kg} = 100 \text{ rad}$$

Η απορροφούμενη Δόση δεν γνωρίζει τίποτε για το ρυθμό της ακτινοβολίας και τον τύπο της ακτινοβολίας.

Γ. Τσιπολίτης

Παράδειγμα

Ποιος είναι ο ρυθμός έκθεσης σε απόσταση 5 m από μια πηγή Co ενεργότητας 1 Ci;

$$\text{Ρύθμος έκθεσης} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} = \left(13.2 \frac{\text{R} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr} \cdot \text{mCi}} \right) \times \frac{(10^3 \text{ mCi})}{500^2 \text{ cm}^2} = 52.8 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}$$

Παράδειγμα

Έστω ένας βιολογικός οργανισμός απορροφά $\sim 93 \text{ erg/g}$ για 1 R ακτίνων γ από ^{22}Na . Ποιος είναι ο ρυθμός δόσης αν δουλεύει σε απόσταση 50 cm από μια πηγή $100 \mu\text{Ci}$;

$$\text{Ρύθμος έκθεσης} = \frac{\Gamma \cdot A}{d^2} = \left(12 \frac{\text{R} \cdot \text{cm}^2}{\text{hr} \cdot \text{mCi}} \right) \times \frac{(0.1 \text{ mCi})}{50^2 \text{ cm}^2} = 0.48 \frac{\text{mR}}{\text{hr}}$$

$$\begin{aligned} \text{Ρύθμος δόσης} &= 93 \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{R}} \times 0.48 \times 10^{-3} \frac{\text{R}}{\text{hr}} \\ &= 0.447 \frac{\text{erg}}{\text{hr} \cdot \text{g}} = 4.47 \frac{\text{mrad}}{\text{hr}} \end{aligned}$$

rad

Παράδειγμα

Να υπολογιστεί ο ρυθμός αύξησης της θερμοκρασίας ενός δείγματος νερού το οποίο εκτίθεται σε ακτινοβολία με ρυθμό δόσης 10 mrad/h;

$$E = mC_p \Delta T \Rightarrow \Delta T = \frac{E}{mC_p}, \quad C_p = 4.187 \frac{\text{J}}{\text{g} \cdot ^\circ\text{C}}$$

$$\frac{E}{m} = \left(10 \times 10^{-3} \frac{\text{rad}}{\text{hr}} \right) \left(100 \frac{\text{erg}}{\text{g} \cdot \text{rad}} \right) \left(10^{-7} \frac{\text{J}}{\text{erg}} \right)$$

$$\Rightarrow \Delta T = 2.39 \times 10^{-8} \frac{^\circ\text{C}}{\text{hr}}$$

1 rad = 100 erg/g

Ισοδύναμη Δόση

- Ισοδύναμη δόση D_q είναι το μέτρο της επίδρασης των ιοντιζουσών ακτινοβολιών επάνω στο ανθρώπινο σώμα.

- $1 \text{ rem (Roentgen equivalent mass)} = Q \cdot 1 \text{ rad}$

Q: ποιοτικός παράγοντας επίδρασης των διαφόρων τύπων ιοντιζουσών ακτινοβολιών πάνω στο βιολογικό ιστό

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{για } \gamma \text{ \& } \beta \\ 10 & \text{για } p \\ 20 & \text{για } {}^4_2\text{He} \\ 10 & \text{για ταχεία } n \\ 3 & \text{για θερμικά } n \end{cases}$$

- Στο S.I.: $1\text{Sv (Sievert)} = Q \cdot 1\text{Gy} = Q \cdot 100 \text{ rad}$

Γ. Τσιπολίτης

Παράδειγμα

Γραμμικός επιταχυντής παράγει φωτόνια ισοδύναμα μονοενεργειακής δέσμης 2 MeV . Να βρεθεί το πάχος Pb το οποίο απαιτείται για την ελάττωση του ρυθμού δόσης από 2 Gy/min σε 10^{-5} Gy/hr.

Απάντηση:

Γνωρίζουμε ότι ο ρυθμός δόσης είναι ανάλογος του ρυθμού έκθεσης που είναι ανάλογος της έντασης της ακτινοβολίας. Άρα ο εκθετικός νόμος μείωσης της έντασης εφαρμόζεται ανάλογα και στο ρυθμό δόσης. Επίσης γνωρίζουμε ότι ο γραμμικός συντελεστής εξασθένησης του Pb στα 2 MeV είναι $\mu=1/\lambda=0.5182 \text{ cm}^{-1}$ και επομένως θα έχουμε:

$$D = D_0 e^{-x/\lambda} \Rightarrow x = -\lambda \ln \left(\frac{D}{D_0} \right)$$

$$\Rightarrow x = -\frac{1}{0.5182} \ln \left(\frac{10^{-5} \text{ Gy} / 60 \text{ min}}{2 \text{ Gy} / \text{min}} \right) = 31.46 \text{ cm}$$

Νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων

- Βρέθηκε πειραματικά από τους Rutherford & Soddy ότι η ενεργότητα μιας πηγής πέφτει εκθετικά.

- Για N πυρήνες, ο μέσος αριθμός διασπάσεων σε χρόνο dt θα είναι:

$$dN = -\lambda N dt \quad (\text{διαφορικός νόμος των ραδιενεργών διασπάσεων})$$

\uparrow
 σταθερά
 διάσπασης

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

$$\boxed{\lambda N}$$

\uparrow
 ενεργότητα

$$T_m = \text{μέσος χρόνος ζωής} = \frac{\int_0^{\infty} t \cdot N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

$$N(t) = N_0 e^{-t/T_m} \quad N(T_m) = \frac{N_0}{e}$$

$$T_{1/2} \text{ (χρόνος ημιζωής)} : \frac{N_0}{2} = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \Rightarrow \frac{\ln 2}{\lambda} = T_{1/2} = T_m \cdot \ln 2$$

Μεταβλητότητα Ραδιενεργών Διασπάσεων

- Διασπάσεις - Στατιστική διαδικασία
- Η πιθανότητα παρατήρησης n διασπάσεων σε χρόνο Δt ακολουθεί κατανομή Poisson:

$$P(n, \Delta t) = \frac{m^n}{n!} e^{-m} \quad \begin{array}{l} m: \text{ μέσος αριθμός διασπάσεων σε χρόνο } \Delta t \\ \sigma = \sqrt{m}: \text{ τυπική απόκλιση} \end{array}$$

- **Παράδειγμα 1:** Από μια πηγή μετρούνται $m=900$ cnts σε $\Delta t=5$ s
Η τυπική απόκλιση θα είναι: $\sigma = \sqrt{m} = 30$
Ο ρυθμός καταγραφής/s θα είναι: $(900 \pm 30) / 5s = (180 \pm 6) Hz$
- **Παράδειγμα 2:** Μια πηγή έχει μέσο ρυθμό εκπομπής 1 cnt/s.
Ποια η πιθανότητα να ΜΗΝ παρατηρηθούν διασπάσεις σε χρόνο 4 s;
Ποια η πιθανότητα να παρατηρηθεί 1 διάσπαση σε χρόνο 4 s;

$$\text{Για } 4s \Rightarrow m=4 \text{ cnt} \Rightarrow P(0, 4) = \frac{4^0}{0!} \cdot e^{-4} \approx 1.8\%$$

$$P(1, 4) = \frac{4^1}{1!} \cdot e^{-4} \approx 7.3\%$$