

Ραδιενέργεια



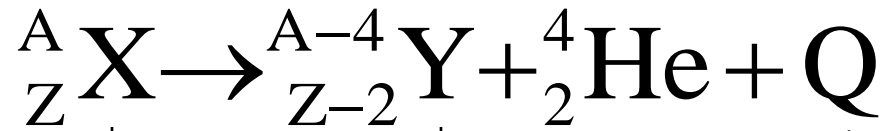
ΜΕΤΑΣΤΟΙΧΕΙΩΣΗ ΠΥΡΗΝΩΝ

Πυρήνες με μεγάλο ατομικό αριθμό διασπώνται (αυθόρμητα ή εξαιτίας εξωτερικής διέγερσης) σε άλλους με διαφορετικό, υπό ταυτόχρονη έκλυση ακτινοβολίας

- Το φαινόμενο ονομάζεται *ραδιενεργός διάσπαση*
- Η μετάπτωση των αρχικών πυρήνων σε πυρήνες άλλων στοιχείων λέγεται *μεταστοιχείωση*
- Οι αρχικοί πυρήνες ονομάζονται *μητρικοί*
- Οι παραγόμενοι πυρήνες ονομάζονται *θυγατρικοί*

Η ενέργεια που απελευθερώνεται κατά τη ραδιενεργό διάσπαση, είτε με τη μορφή κινητικής ενέργειας των σωματίων είτε με τη μορφή Η/Μ ακτινοβολίας, προέρχεται από *μετατροπή μέρους της μάζας του αρχικού πυρήνα σε ενέργεια*

Η ακτινοβολία α



Μητρικός
πυρήνας

Θυγατρικός
πυρήνας

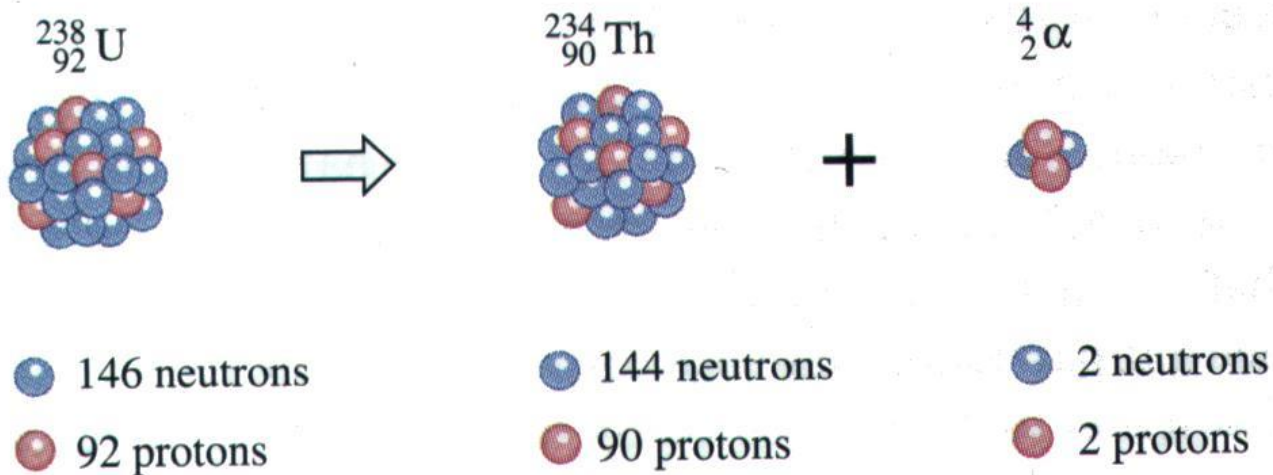
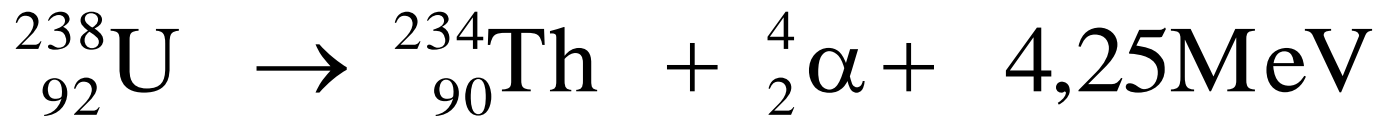
Ενέργεια
αποσύνθεσης

$Q > 0$

Αυθόρμητη διάσπαση

$Q < 0$

Μη Αυθόρμητη διάσπαση

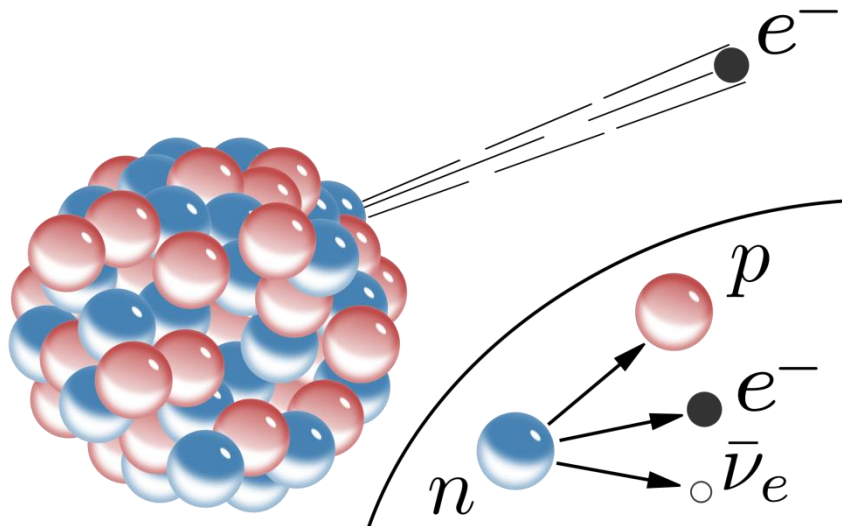


Η ακτινοβολία-α απορροφάται εύκολα από την ύλη. Ανακόπτεται με απλό φύλλο χαρτιού. Το σωματίο α, κατά τη διαδρομή του στον αέρα, συγκρούεται με τα μόρια του αέρα και η ενέργεια του μειώνεται διαδοχικά μέχρι μηδενισμού μέσα σε λίγα cm (**εμβέλεια**)

Η ακτινοβολία β

β^- διάσπαση: Εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο (${}^0_{-1}e$) από τον πυρήνα καθώς ένα νετρόνιο μετασχηματίζεται σε πρωτόνιο

β^+ διάσπαση: Εκπέμπεται ένα ποζιτρόνιο (${}^0_{+1}e$) από τον πυρήνα καθώς ένα πρωτόνιο μετασχηματίζεται σε νετρόνιο



Νεutrίνο ν_e

(Διάνυσμα στροφορμής παράλληλο με διάνυσμα γραμμικής ορμής)

Αντινεutrίνο $\bar{\nu}_e$

(Διάνυσμα στροφορμής αντιπαράλληλο με διάνυσμα γραμμικής ορμής)

β^- διάσπαση:

$$n \rightarrow p + {}_{-1}^0e + \bar{\nu}_e$$



β^+ διάσπαση:

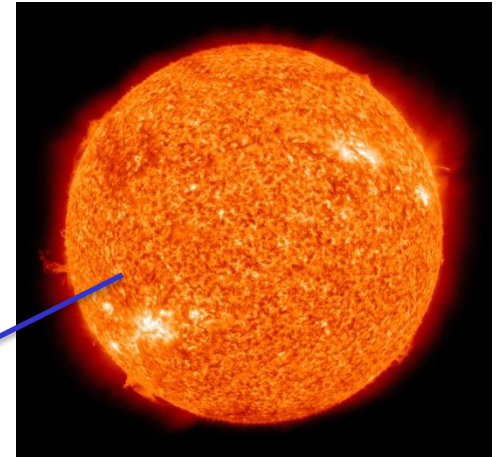
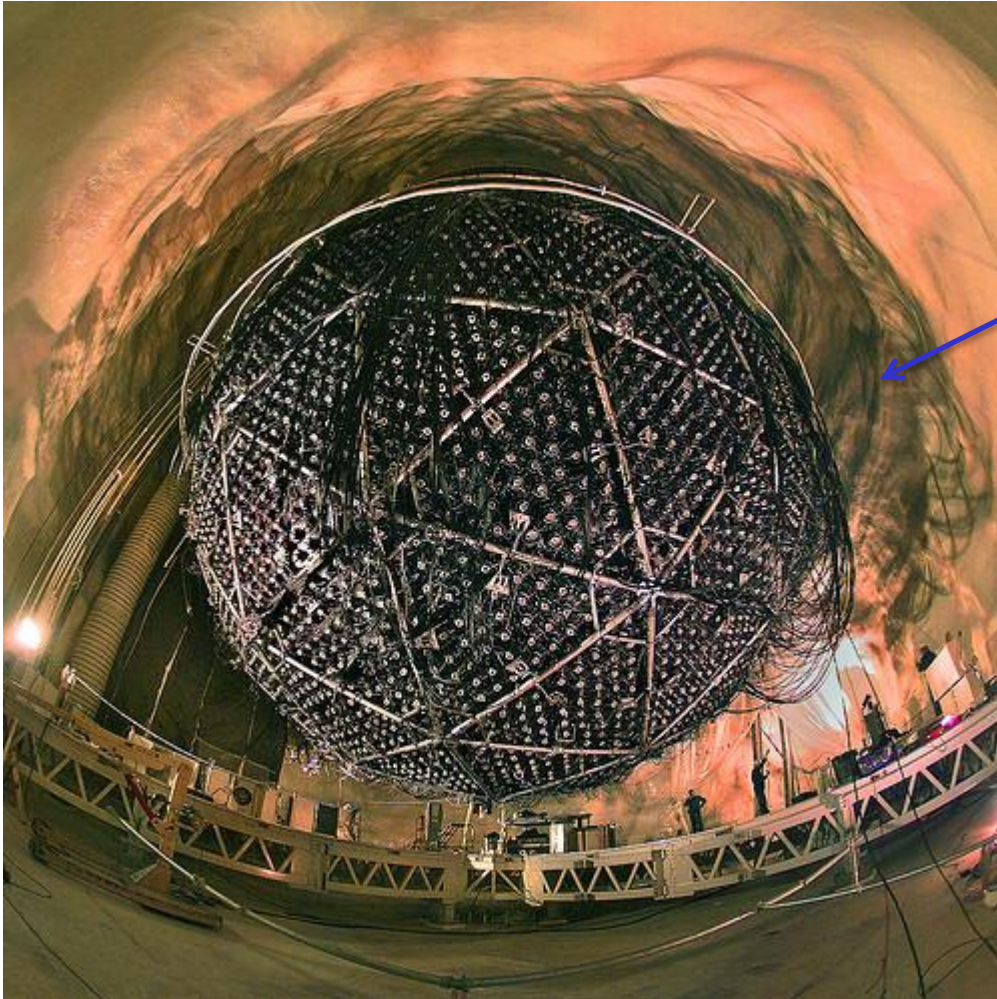
$$p \rightarrow n + {}_{+1}^0e + \nu_e$$



ΕΜΒΕΛΕΙΑ

Η εμβέλεια των σωματίων β είναι πολύ μεγαλύτερη από εκείνη των σωματίων α και μπορεί να έχει μήκος αρκετά μέτρα. Ανακόπτεται εύκολα με λεπτό φύλλο αλουμινίου

Τα νεutrίνο είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν επειδή σπάνια αλληλεπιδρούν με την ύλη.

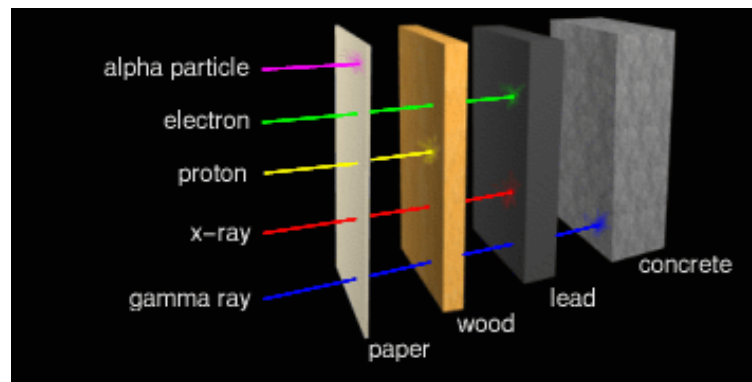


ν_e

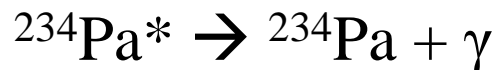
Ανιχνευτής σωματιδίων νεutrίνο
κάτω από τη γη στον Καναδά.

Μελετά **νεutrίνο** που
εκπέμπονται από τον Ήλιο

Η ακτινοβολία γ



Εκπέμπεται ένα φωτόνιο γ (με $\lambda = 10^{-12} - 10^{-15}$ m)
από ένα διεγερμένο πυρήνα καθώς αυτός αποδιεγείρεται.
Είναι πολύ διεισδυτική επειδή δεν έχει φορτίο.



Σήμα ραδιενέργειας



Ο Νόμος της ραδιενεργού διασπάσεως

Ενεργότητα:

Ο αριθμός των πυρήνων ραδιενεργού πηγής dN που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου dt :

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

Μονάδες:

1 Curie: διασπάσεις που παρατηρούνται σε 1 gr Ra μέσα σε χρονικό διάστημα 1s

$$1 \text{ Curie (Ci)} = 3,7 \times 10^{10} \text{ διασπάσεις / s}$$

1 Becquerel (Bq) [S.I.] = 1 διάσπαση / s

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

Μέτρηση της ισχύος της πηγής που εκπέμπει την ακτινοβολία

Δεν αναφέρεται στο είδος των διασπάσεων. Χρησιμοποιείται ως εξής: Η ραδιενέργεια της χρησιμοποιημένης στον αντιδραστήρα ράβδου-καυσίμου #5658 στις 15 Ιαν. 1987 ήταν $9,5 \times 10^4 \text{ Ci}$.

Ο Νόμος της ραδιενεργού διασπάσεως

Οι νόμοι που περιγράφουν τη ραδιενεργό διάσπαση είναι νόμοι στατιστικής, δηλ:

π.χ. 1 mg μέταλλου Ουρανίου περιέχει $2,5 \times 10^{18}$ άτομα ^{238}U το οποίο έχει πολύ μεγάλο χρόνο ζωής (συγκεκριμένα, οι πυρήνες αυτών των ατόμων δεν έχουν διασπασθεί από τότε που δημιουργήθηκαν – πριν τη δημιουργία του ηλιακού μας συστήματος – κατά την έκρηξη του υπερκαινοφανούς).

Κατά τη διάρκεια οποιουδήποτε δευτερολέπτου που ακολουθεί 12 από αυτούς τους πυρήνες θα διασπασθούν εκπέμποντας ένα α-σωματίδιο και θα μεταστοιχειωθούν σε ^{234}Th .

Δεν υπάρχει κανένας τρόπος να προβλέψουμε ποιος πυρήνας θα ανήκει σε αυτή τη μικρή ομάδα των 12 που θα διασπασθούν το επόμενο δευτερόλεπτο. Όλοι έχουν την ίδια πιθανότητα ίση με $12/(2,5 \times 10^{18})$ ή αλλιώς $1/2 \times 10^{17}$ ανά δευτερόλεπτο.

Ο Νόμος της ραδιενεργού διασπάσεως

Παρόλα αυτά μπορούμε να εκφράσουμε τον στατιστικό χαρακτήρα του νόμου της ραδιενεργού διασπάσεως ως εξής:

Στο προηγούμενο παράδειγμα:

Η πιθανότητα να διασπασθεί ένας πυρήνας είναι ίση με $12/(2,5 \times 10^{18})$ ανά δευτερόλεπτο

Εάν γενικότερα σε δείγμα ραδιενεργού στοιχείου υπάρχουν:

N ραδιενεργοί πυρήνες

και σε dt διασπώνται dN από αυτούς (πειραματικά δεδομένα)

Σύμφωνα με τον παραπάνω ορισμό πιθανότητας διασπάσεως: dN/Ndt

$$\text{Ορίζουμε } dN/dt = -\lambda N$$

(το « \rightarrow » υπεισέρχεται γιατί ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων μειώνεται όταν αυξάνει ο χρόνος)

όπου λ η σταθερά διασπάσεως (το ποσοστό των πυρήνων που διασπώνται στη μονάδα του χρόνου – θα έχει μονάδες = sec^{-1})

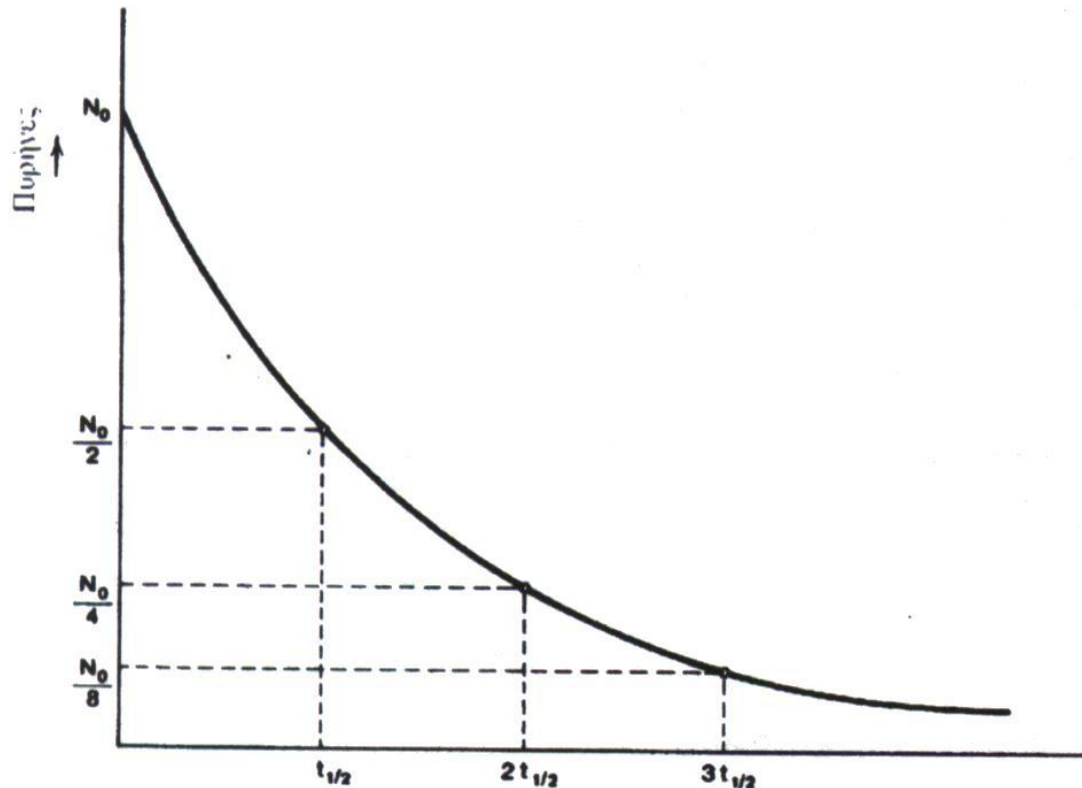
χαρακτηριστική του θεωρούμενου πυρήνα και μόνο

Ο Νόμος της ραδιενεργού διασπάσεως

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \Leftrightarrow dN = -\lambda N dt \xrightarrow{\int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\int_0^t \lambda dt} N = N_0 \exp(-\lambda t)$$

όπου N_0 οι αδιάσπαστοι πυρήνες τη χρονική στιγμή $t = 0$

N οι αδιάσπαστοι πυρήνες τη χρονική στιγμή t



Χρόνος υποδιπλασιασμού ($t_{1/2}$):

$$N \rightarrow N_0/2$$

(χρόνος μέσα στον οποίο έχουν μείνει αδιάσπαστοι οι μισοί αρχικοί ραδιενεργοί πυρήνες)

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \xrightarrow{N=\frac{N_0}{2}} \frac{N_0}{2} = N_0 \exp(-\lambda t_{1/2}) \Rightarrow t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$

Μέσος Χρόνος ζωής (τ):

$$N \rightarrow N_0/e$$

(χρόνος μέσα στον οποίο έχει μείνει αδιάσπαστο το 1/e των αρχικών ραδιενεργών πυρήνων)

$$N = N_0 \exp(-\lambda t) \xrightarrow{N=\frac{N_0}{e}} \frac{N_0}{e} = N_0 \exp(-\lambda \tau) \Rightarrow \tau = \frac{1}{\lambda}$$

$$t_{1/2} = 0,693 \tau$$

↑ λ

↓ $t_{1/2}$ και ↓ τ

Ο ραδιενεργός πυρήνας έχει πεθάνει μετά από $t = 10 \times t_{1/2}$

Πυρήνας	$t_{1/2}$	
^{238}U	$4,51 \times 10^9$ χρόνια	Έκλυση μικρής ποσότητας ραδιενέργειας σε δεδομένο χρόνο
^{226}Ra	1620 χρόνια	Εκλύει σημαντικά ποσά ραδιενέργειας και για μεγάλο χρονικό διάστημα
^{131}Th	8,0 ημέρες	Ισχυρά ραδιενεργός αλλά η ραδιενέργεια σύντομα φτάνει να γίνεται αμελητέα

ραδιοχρονολόγηση

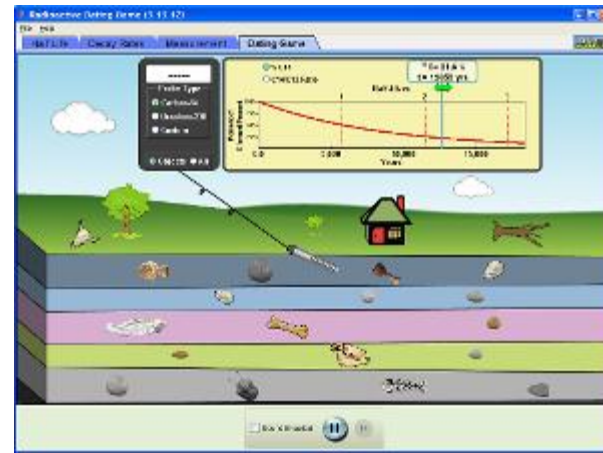
Γεωλογία:

Μέτρηση του λόγου ^{40}K προς ^{40}Ar ($t_{1/2} = 1,25 \times 10^9$ έτη) ή ^{235}U προς ^{207}Pb για τον υπολογισμό της ηλικίας πετρωμάτων από τη γη, το φεγγάρι και μετεωριτών.

Αρχαιολογία:

Μέτρηση επιπέδου ^{14}C ($t_{1/2} = 5730$ έτη) και σύγκριση του με εκείνο που θα έπρεπε να υπάρχει αν δεν είχαν σταματήσει οι φυσιολογικές λειτουργίες του φυτικού ή ζωικού οργανισμού για τον υπολογισμό της ηλικίας του ευρήματος

Phet : Παιχνίδι ραδιοχρονολόγησης



Παλαιό θέμα εξετάσεων

α) Η αναλογία ατομών $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C}$ στο περιβάλλον είναι περίπου 1×10^{-12} . Εξηγείστε πώς παραγεται στην φύση ο ^{14}C , πώς καταλήγει στο σώμα μας και πώς η διάσπαση του χρησιμοποιείται για την ραδιοχρονολόγηση νεκρών οργανισμών.

β) Στο ανθρώπινο σώμα, 18,5 % της μάζας του είναι άνθρακας. Υπολογίστε ποσα άτομα ^{14}C υπάρχουν αυτή την στιγμή στο σώμα σας.

γ) Ποσα απο αυτα τα άτομα ^{14}C του σώματος σας, διασπώνται καθε δευτερολεπτο; (δίνεται $t_{1/2} = 5730$ χρόνια για τον ^{14}C).

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΩΝ ΣΤΗΝ ΥΛΗ

Φορτισμένα σωματία: Σωματία α , β και πρωτόνια

Προκαλούν ιοντισμό των ατόμων και διέγερση, ιοντισμό ή και διάσπαση των μορίων.

Ενέργεια σωματίου α ή $\beta \approx 1\text{MeV}$ – Ενέργεια ιοντισμού 10eV

1 τέτοιο σωματίο μπορεί να προκαλέσει χιλιάδες ιοντισμούς

Ουδέτερα σωματία: Νετρόνια και νετρίνα

Νετρόνια – μεταστοιχείωση πυρήνων, καταστροφή μορίου, μετακινήσεις ατόμων στα μέταλλα και αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων τους

Νετρίνα – ελάχιστη αλληλεπίδραση με την ύλη

H/M ακτινοβολία: Ακτινοβολία X και γ

Προκαλούν διέγερση και ιοντισμό ατόμων ή μορίων. Μέσω φωτοηλεκτρικού φαινομένου, φαινομένου Compton ή δίδυμης γένεσης παράγουν ελεύθερα ηλεκτρόνια τα οποία προκαλούν παρόμοια αποτελέσματα με αυτά των φορτισμένων σωματιδίων.

ΕΠΙΔΡΑΣΗ ΣΤΟΥΣ ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΥΣ

Ιοντισμός μορίων → παράγονται ιόντα και ελεύθερες ρίζες (π.χ H^+ , OH^- κ.α.) εξαιρετικά δραστικές που οδηγούν σε χημικές αντιδράσεις διαφορετικές από τις φυσιολογικές.
Απελευθέρωση e^- μοριακών δεσμών – μεταβολή της δομής του μορίου

Καταστροφή-μεταβολή πρωτεϊνικού μορίου: Αντικαθιστάται με άλλο που παράγεται από το γονίδιο. Καταστροφή πολλών – μη αντιστρέψιμο φαινόμενο.

Καταστροφή-μεταβολή μορίου DNA: Μεταβολή γονιδίων – μεταβολή δομής παραγομένων πρωτεϊνών – μετάλλαξη ή θάνατος κυττάρου.

Ο οργανισμός μπορεί εύκολα να αντικαταστήσει ένα κατεστραμμένο κύτταρο ενώ η αντικατάσταση μεγάλου αριθμού κυττάρων είναι προβληματική. Ένα πάλι μεταλλαγμένο κύτταρο μπορεί να παράγει και άλλα ελαττωματικά κύτταρα – δημιουργία αποικίας κυττάρων ξένων προς τη λειτουργία του οργανισμού – κακοήθης όγκος (ταχύς πολλαπλασιασμός των κυττάρων του χωρίς σεβασμό του περιβάλλοντός του)

Σωματικές καταστροφές

- Δημιουργία καρκινώματος
- Οξεία ακτινοπληξία

Γενετικές καταστροφές

- Καταστροφή ή μετάλλαξη των κυττάρων αναπαραγωγής
- Στείρωση

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Έκθεση:

Μέτρηση της απελευθέρωσης ενέργειας σε ένα υλικό μέσα από το οποίο διέρχονται, συνήθως ακτίνες X ή γ, ή και άλλες ακτινοβολίες.

Ορίζεται ως το άθροισμα θετικών και αρνητικών ιόντων dq που παράγονται στη μονάδα μάζας dm κατά τη διέλευση της ακτινοβολίας μέσα από αυτήν:

$$X = dq / dm$$

Μονάδες: 1 Röntgen = Απελευθέρωση ενέργειας 8,78 mJ σε 1Kgr ξηρού αέρα σε κανονικές συνθήκες.

$$\begin{aligned} 1 \text{ Röntgen (1 r)} &= 2,08 \times 10^8 \text{ ζεύγη ιόντων / cm}^3 \text{ αέρα} \\ &= 2,58 \times 10^{-4} \text{ Cb / Kgr αέρα} \end{aligned}$$

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Ρυθμός Έκθεσης:

Ορίζεται ως την έκθεση dX εντός χρονικού διαστήματος dt , δια του χρονικού αυτού διαστήματος:

$$dX / dt$$

Μονάδες:

$$r/s \quad \text{ή} \quad r/h$$

Παράδειγμα:

«Ο ρυθμός έκθεσης κάποιων οδοντιατρικών ακτίνων X είναι 300 mR/s»

Η παραπάνω δήλωση δεν αναφέρεται καθόλου στο αν η ενέργεια που απελευθερώνεται φθάνει στον ασθενή ή αν υπάρχει ασθενής στην οδοντιατρική καρέκλα.

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Δόση: Μέτρηση της ακτινοβολίας που απορροφάται από ένα οργανισμό

Απορροφούμενη Δόση:

Ορίζεται ως η ενέργεια dW που αποθέτει η προσπίπτουσα ακτινοβολία κατά τη διέλευση της στη μονάδα μάζας dm των ιστών.

$$D = dW / dm$$

Μονάδες:

1 rad (**r**adiation **a**bsorbed **d**ose): ορίζεται ως η ποσότητα ακτινοβολίας που αποθέτει 0,01J ενέργειας ανά χιλιόγραμμο μάζας ιστού

$$1\text{rad} = 0,01 \text{ J/Kg}$$

$$\text{S.I.} \quad 1\text{Gray (1 Gy)} = 1 \text{ Joule/Kgr} = 10^2 \text{ rad}$$

Η απορροφούμενη δόση αναφέρεται σε όλες τις ακτινοβολίες και αποτελεί μέτρηση της ολικής ενέργειας που απορροφά δεδομένο τεμάχιο ύλης ή οργανισμός. Δεν αποτελεί μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας.

Π.χ. Δεδομένη δόση ακτινοβολίας a προκαλεί 10 φορές περισσότερες βιολογικές βλάβες από ίση δόση ακτίνων X

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Ισοδύναμη Δόση: Μέτρηση της ακτινοβολίας που δέχεται ένας οργανισμός λαμβανομένων υπόψη των βιολογικών επιδράσεων αυτής

Ισούται με το γινόμενο της απορροφούμενης δόσης επί ένα συντελεστή ποιότητας, (RBE) ο οποίος εξαρτάται από το είδος της ακτινοβολίας:

Μονάδες:

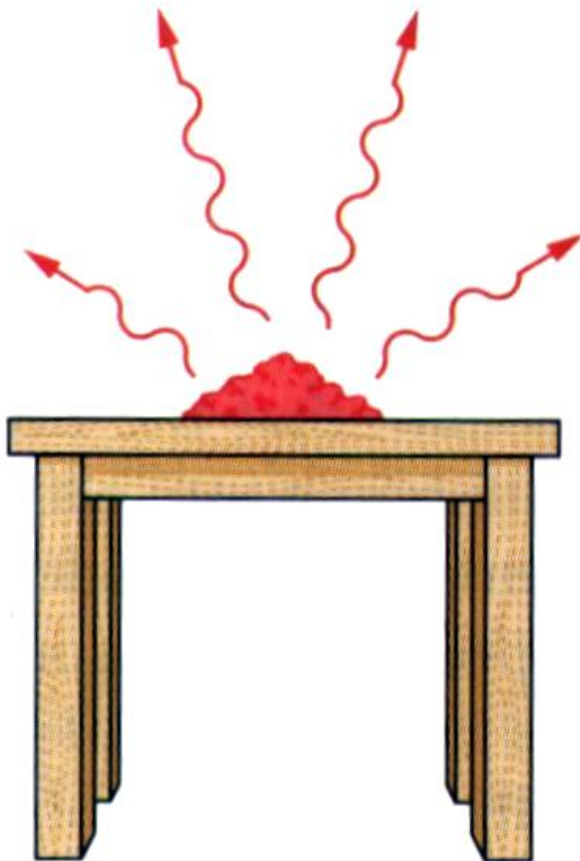
$$1 \text{ rem (röntgen equivalent in man)} = 1 \text{ rad} \times \Sigma.Π.$$

$$\text{S.I.} \quad 1 \text{ sievert (1 Sv)} = 1 \text{ Gy} \times \Sigma.Π. \quad 1 \text{ Sv} = 10^2 \text{ rem}$$

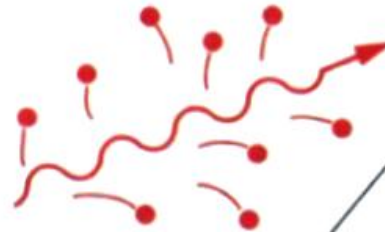
Ακτινοβολία	Συντελεστής Ποιότητας (Σ.Π.)
H/M ακτινοβολία (X ή γ)	1
Σωματία β με ενέργεια > 30 keV	1
Βραδέα νετρόνια	5
Ταχέα νετρόνια	10
Σωματία α	10 – 20
Βαρέα ιόντα	20

Απορροφηθείσα Δόση
(rad)

Ενεργότητα
(curie)



Έκθεση
(roentgen)



Ισοδύναμη Δόση
(rem)



ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Επιτρεπτά όρια

Αποτελέσματα απορρόφησης ακτινοβολίας

ισοδύναμο δόσεως rem	αποτελέσματα
0-25	δεν υπάρχουν άμεσα κλινικά αποτελέσματα
25-50	μικρή παροδική αλλοίωση του αίματος
50-100	σοβαρές αλλοιώσεις του αίματος πιθανή μικρή ελάττωση του χρόνου ζωής
100-200	κλινικά αποτελέσματα, πιθανός ο θάνατος, δυνατή η θεραπεία
200-400	κλινικά αποτελέσματα, μικρό ποσοστό θανάτων σε 2-6 εβδομάδες
400	50 % θάνατοι σε κάποιο χρονικό διάστημα
600	θάνατοι μέχρι και 100 % από τη δεύτερη εβδομάδα μετά την ακτινοβολήση .

Αβλαβείς δόσεις σημαίνει ότι δεν παρατηρούνται ανιχνεύσιμες βλάβες.

Κλινικά αποτελέσματα:

Μεταξύ άλλων, καρκίνος, λευχαιμία, στείρωση, καταρράκτης και γενετικές ανωμαλίες.

Οι προκαλούμενες βλάβες εξαρτώνται *από την ηλικία του ατόμου και από το όργανο που πλήττεται.*

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

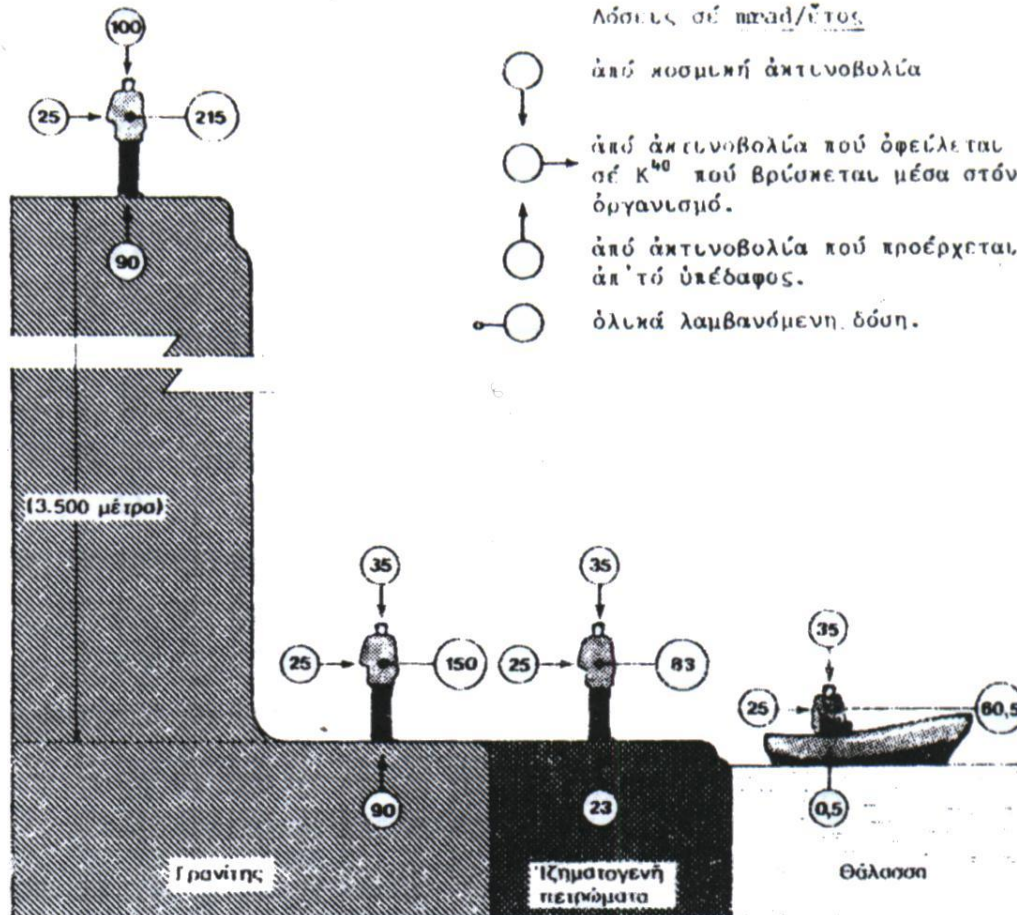
Επιτρεπτά όρια

Μέγιστες επιτρεπτές δόσεις (rem)

όργανο	μέγιστες επιτρεπτές δόσεις		
	επαγγελματίες		μη επαγγελματίες
	3 συνεχείς μήνες	1 χρόνο	1 χρόνο
ολόκληρο το σώμα αιμοποιητικά όργανα φακοί οφθαλμών γεννητικοί αδένες	3	5	0.5
δέρμα θυρεοειδής οστά	8	30	3
άκρα	25	75	7.5
διάφορα μεμονωμένα όργανα	4	15	1.5

ΔΟΣΙΜΕΤΡΙΑ

Απορρόφηση ακτινοβολίας από το περιβάλλον



Κοσμική ακτινοβολία:

Ελάχιστη τιμή στον Ισημερινό και την επιφάνεια της θάλασσας, αυξάνεται κατά 7 μrem για κάθε αύξηση του ύψους κατά 25 m. Βομβαρδίζει τα ανώτερα ατμοσφαιρικά στρώματα – παραγωγή ραδιενεργών ισοτόπων (σημαντικότερο ^{14}C)

ΑΣΚΗΣΗ

Το ραδιοϊσότοπο ^{198}Au , με χρόνο υποδιπλασιασμού 2,7 ημέρες, χρησιμοποιείται για τη θεραπεία του καρκίνου. Υπολογίστε τη μάζα αυτού του ισοτόπου που απαιτείται για να έχουμε πηγή ενεργότητας 250Ci.

$$\text{Δίνονται: } 1 \text{ u} = 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad 1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

$$2,7 \text{ d} = 233280 \text{ s}$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / 233280 \text{ s}^{-1} = 2,97 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$C = \lambda N \Rightarrow N = 250 \times 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq} / 2,97 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1} \Rightarrow N = 3,114 \times 10^{18}$$

$$m \approx 3,114 \times 10^{18} \times 198 \times 1,66 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,02 \text{ mg}$$

ΑΣΚΗΣΗ

Δεδομένου ότι οι Curie είχαν απομονώσει το 1898 περίπου 200g ^{226}Ra , με χρόνο υποδιπλασιασμού $1,62 \times 10^3$ χρόνια, πόσο από αυτό έχει απομείνει σήμερα;

$$1 \text{ χρόνος} = 3,15 \times 10^7 \text{ s}$$

$$\lambda = \ln 2 / t_{1/2} = 0,693 / 1,62 \times 3,15 \times 10^{10} \text{ s}^{-1} = 1,36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$m = m_0 e^{-\lambda t} = 200 \text{ g} \exp - [(1,36 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1})(1,05 \times 3,15 \times 10^7 \text{ s})] \\ \approx 200 \text{ g} 0,958 = 192 \text{ g}$$

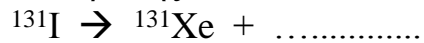
Θέμα εξετασεων

Μετά την ξαφνική απελευθέρωση ραδιενέργειας από το ατύχημα στον πυρηνικό αντιδραστήρα στο Chernobyl το 1986 , η ραδιενέργεια του γάλακτος στην Πολωνία αυξήθηκε κατά 2000 Bq / λίτρο λόγω της παρουσίας ιωδίου 131 στο γρασίδι που καταναλωνόταν από βοοειδή γαλακτοπαραγωγής. Το ^{131}I (με χρόνο ημιζωής 8 ημέρες) είναι ιδιαίτερα επικίνδυνο επειδή συγκεντρώνεται στον θυρεοειδή αδένα.

α) Συμπληρώστε τα κενά:

Το ^{131}I είναι του ιωδίου με $Z = 53$, $A = \dots\dots\dots$ και $N = \dots\dots\dots$

β) Συμπληρώστε την πυρηνική αντίδραση διάσπασης του ^{131}I . Τι είδους διάσπαση είναι αυτή; Ποια από τα προϊόντα της αντίδρασης είναι επικίνδυνα για τον άνθρωπο και ποια όχι;



γ) Πόση ήταν η περιεκτικότητα ^{131}I (σε gr / λίτρο) στο γάλα την ημέρα του ατυχήματος και πόση μετά από 8 ημέρες;