

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΦΥΣΙΚΗ - ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Η γέννηση της πυρηνικής φυσικής έγινε το 1896, με την ανακάλυψη της ραδιενέργειας από τον Becquerel και την προσπάθεια κατανόησης της ενέργειας αυτής.

Πυρηνική δομή

Σύσταση πυρήνων: Κάθε πυρήνας αποτελείται από πρωτόνια (p) και νετρόνια (n). Ο αριθμός των πρωτονίων, Z, λέγεται ατομικός αριθμός και ο αριθμός πρωτονίων και νετρονίων μαζί, A (=Z+N), λέγεται μαζικός αριθμός. Το κάθε στοιχείο συνήθως συμβολίζεται με το σύμβολο A_ZX , όπου X το σύμβολο του στοιχείου, π.χ. Fe.

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια κρατούνται δέσμια στον πυρήνα υπό την επίδραση της **ισχυρής πυρηνικής δύναμης**, η οποία δρα μεταξύ όλων των πυρηνικών σωματιδίων (p και n), υπερνικώντας την απωστική δύναμη Coulomb μεταξύ των πρωτονίων. Η δύναμη αυτή είναι πολύ ισχυρή αλλά με πολύ μικρή εμβέλεια (1-2 fm).

Ισότοπα λέμε τα στοιχεία με τον ίδιο ατομικό αριθμό αλλά διαφορετικό μαζικό (δηλ. διαφορετικό αριθμό νετρονίων). Έχουν ίδιες χημικές ιδιότητες άρα και ίδιο σύμβολο.

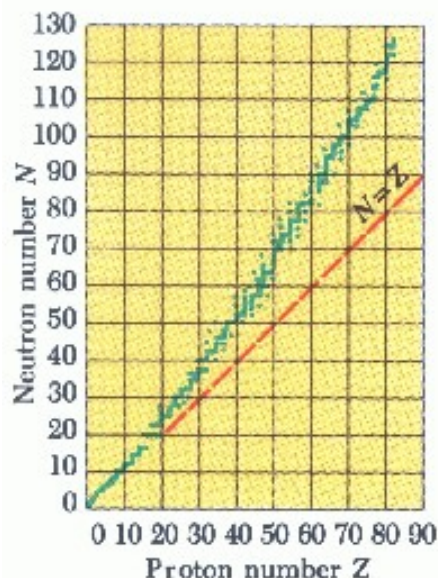
Ως μονάδα για τη μέτρηση της μάζας του πυρήνα χρησιμοποιούμε συνήθως την ατομική μονάδα μάζας, u, που είναι το 1/12 της μάζας του ατόμου του ${}^{12}\text{C}$. ($1\text{ u}=931,5\text{ MeV}/c^2=1,6606 \times 10^{-27}\text{ kg}$).

Μέγεθος πυρήνων: Το μέγεθος των πυρήνων μπορεί να προσδιοριστεί προσεγγιστικά μέσω κρούσεων ταχέων σωματιδίων με τους πυρήνες. Έχει βρεθεί ότι οι πυρήνες είναι συνήθως σφαιρικοί, με ακτίνα, r, της τάξης των μερικών φεμτομέτρων, ή φέρμι (fm). $1\text{ fm}=10^{-15}\text{ m}$. Συγκεκριμένα, $r=r_0A^{1/3}$, με $r_0=1,2\text{ fm}$ και A ο μαζικός αριθμός.

Σταθερότητα πυρήνων: Για μικρούς πυρήνες (μικρό Z) σταθερότεροι πυρήνες είναι εκείνοι με Z=N (ίσο αριθμό p και n). Πηγαίνοντας σε μεγαλύτερους πυρήνες, ευνοούνται από άποψη σταθερότητας οι πυρήνες με περισσότερα νετρόνια από πρωτόνια. Αυτό γιατί χρειάζεται η ισχυρή πυρηνική δύναμη (μικρής εμβέλειας, δρα μεταξύ όλων των σωματιδίων) να υπερνικήσει τη μεγάλης εμβέλειας δύναμη Coulomb μεταξύ των πρωτονίων.



Πηγαίνοντας σε $Z > 83$ δεν υπάρχουν πια σταθεροί πυρήνες. Στο σχήμα δείχνεται η σχέση αριθμού πρωτονίων και νετρονίων για τους σταθερούς πυρήνες. Αξιοσημείωτο είναι ότι οι περισσότεροι σταθεροί πυρήνες έχουν Z ή N άρτιο και ότι πυρήνες με Z ή N έναν από τους αριθμούς 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (μαγικοί αριθμοί) είναι εξαιρετικά σταθεροί.



Η σχέση αριθμού πρωτονίων και νετρονίων για τους σταθερούς πυρήνες (πράσινη στικτή γραμμή).

Ραδιενέργεια

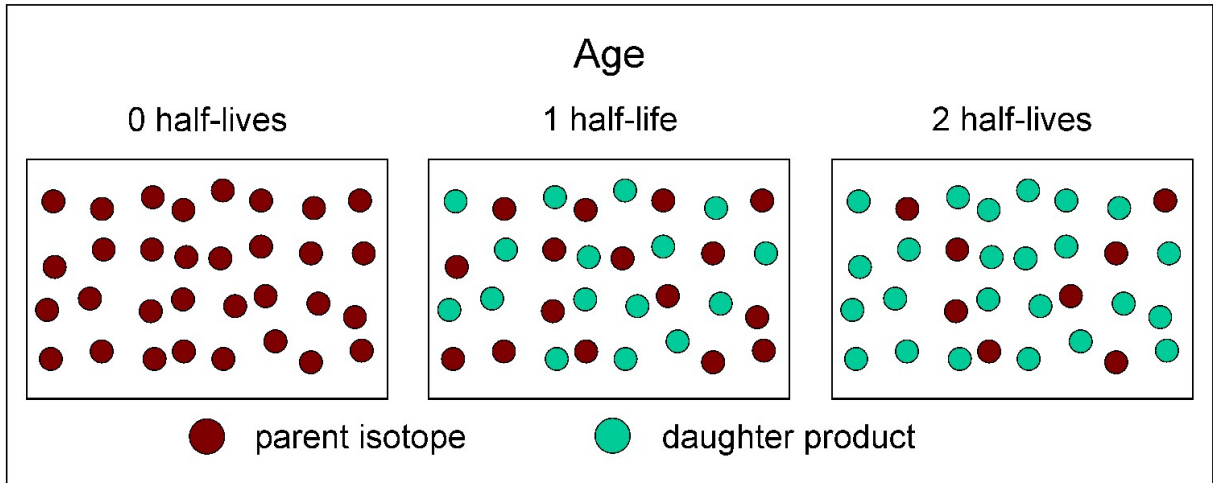
Με τον όρο ραδιενέργεια χαρακτηρίζουμε την ακτινοβολία που εκπέμπεται αυθόρμητα από τους πυρήνες. Η ραδιενέργεια ανακαλύφθηκε από τον Becquerel, το 1896, κατά τη μελέτη αλάτων ουρανίου. Μεταγενέστερα πειράματα από τους Pierre και Marie Curie και τον Rutherford έδειξαν ότι η ραδιενέργεια είναι **προϊόν διάσπασης των ασταθών πυρήνων**.

Αν και τα περισσότερα άτομα είναι σταθερά, πολλά στοιχεία έχουν ισότοπα τα οποία είναι ασταθή. Οι πυρήνες τους διασπώνται σε άλλα είδη πυρήνων, με ελευθέρωση ενέργειας, με μια διαδικασία που ονομάζεται **ραδιενέργεια**. Τα ραδιενεργά ισότοπα συχνά αναφέρονται ως **μητρικά** ενώ τα ισότοπα που προκύπτουν από τη διάσπαση τους ως **θυγατρικά**.



Παραδείγματα ασταθών πυρήνων, είναι το ^{40}K , ^{87}Rb , ^{232}Th , ^{238}U , ^{235}U , ^{226}Ra , ^{14}C και ^{12}N .

Νόμος ραδιενεργού διάσπασης



Έστω N_0 ο αριθμός των μητρικών ραδιενεργών πυρήνων που περιέχονται αρχικά ($t=0$) σε ένα ραδιενεργό δείγμα. Ο ρυθμός διάσπασης των ραδιενεργών πυρήνων υπακούει στην παρακάτω εξίσωση, η λύση της οποίας δίνει τον αριθμό των μητρικών πυρήνων $N(t)$ του δείγματος που έχουν παραμείνει αδιάσπαστοι μετά από χρόνο t .

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \quad \Rightarrow \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Αριθμός αδιάσπαστων πυρήνων → dN
Σταθερά διάσπασης → λ
Αρχικοί πυρήνες (για $t=0$) → N_0

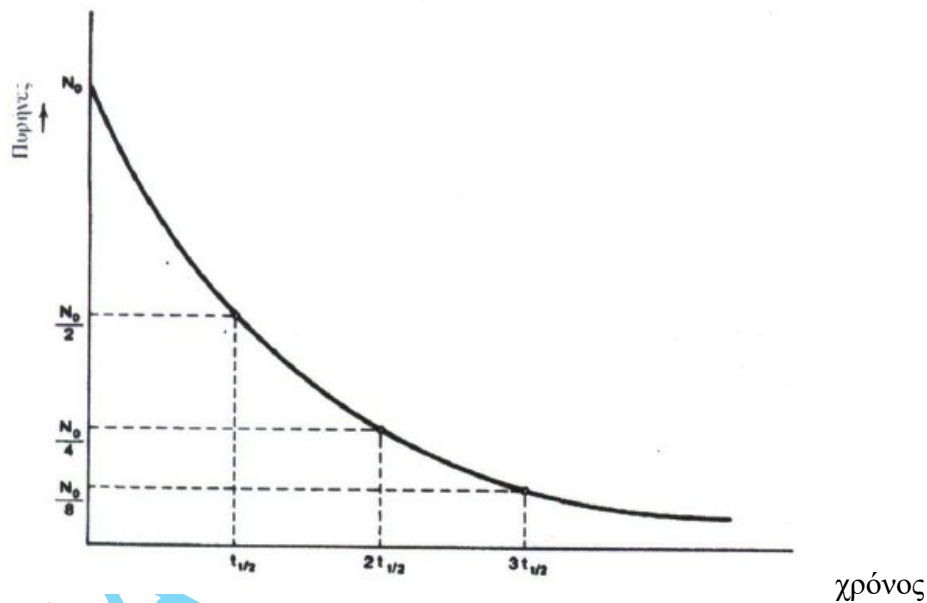
Αναλυτικά:



$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow \frac{dN}{N} = -\lambda t \Rightarrow \int_{N_0}^N \frac{dN}{N} = -\lambda \int_0^t dt \Rightarrow \ln\left(\frac{N}{N_0}\right) = -\lambda t \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{N}{N_0} = e^{-\lambda t} \Rightarrow \boxed{N = N_0 e^{-\lambda t}} \quad (1)$$

όπου N_0 οι αδιάσπαστοι πυρήνες τη χρονική στιγμή $t = 0$
 N οι αδιάσπαστοι πυρήνες τη χρονική στιγμή t
 λ η σταθερά διάσπασης



Ο χρόνος που χρειάζεται για να παμείνουν σε ένα δείγμα (αδιάσπαστοι) οι μισοί από τους αρχικούς πυρήνες λέγεται **χρόνος ημιζωής** του δείγματος, $T_{1/2}$. Αν θέσουμε $N = N_0/2$ και $t = T_{1/2}$ στην (1) προκύπτει:

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

Ο ρυθμός διάσπασης είναι γνωστός και ως **ενεργότητα δείγματος**, R , και υπολογίζεται ως:



$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = |-\lambda N| = |-\lambda N_0 e^{-\lambda t}| = R_0 e^{-\lambda t}$$

Μονάδες ενεργότητας είναι το 1 curie (Ci) = $3,7 \times 10^{10}$ διασπάσεις/sec, που είναι η ενεργότητα ενός γραμμαρίου ραδίου (Ra), και το 1 becquerel (Bq) = 1 διάσπαση/sec, στο SI.

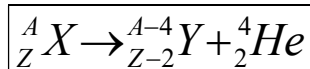
Ραδιενεργές διασπάσεις

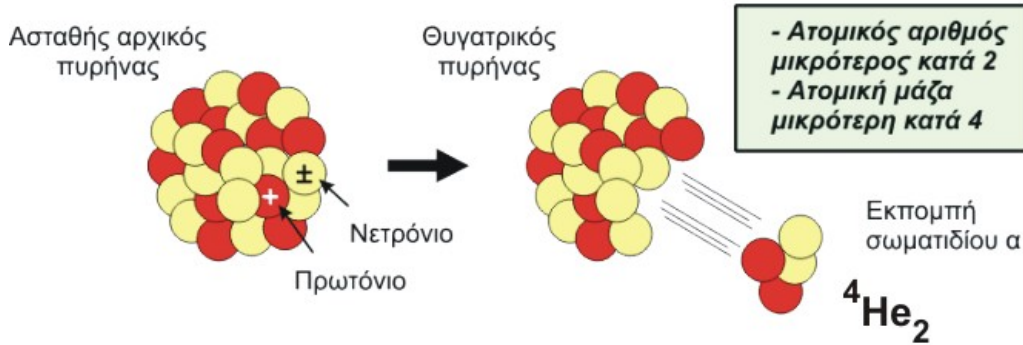
Υπάρχουν τρία είδη ραδιενέργειας, όπως τα κατηγοριοποίησε ο Rutherford με βάση το φορτίο τους και την ικανότητά τους να διεισδύουν στην ύλη:

1) Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων α

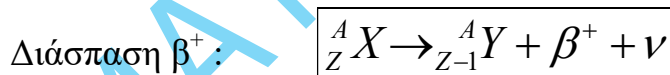
Ένα **σωματίδιο α** αποτελείται από **δύο νετρόνια** και **δύο πρωτόνια**, ισχυρά συνδεδεμένα μεταξύ τους. Τα α σωματίδια, τα οποία είναι όμοια με τον πυρήνα του ${}^4\text{He}$, εκπέμπονται από τους ασταθείς πυρήνες κατά την α-διάσπαση.

Σ' αυτό το είδος της διάσπασης ο **ατομικός αριθμός του ατόμου ελαττώνεται κατά δύο** εξαιτίας της απομάκρυνσης δύο πρωτονίων, ενώ ο **μαζικός αριθμός ελαττώνεται κατά τέσσερα**. Είναι η λιγότερο διεισδυτική - μόλις που διαπερνά ένα φύλλο χαρτί και μπορεί να ερμηνευθεί μέσω του φαινομένου σήραγγας. Η διάσπαση αυτή συμβολικά γράφεται ως εξής:

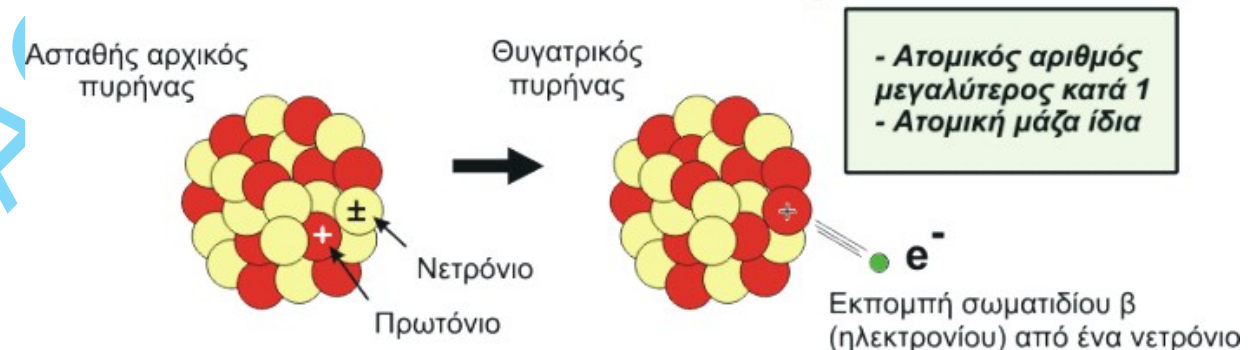


A. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ α**2) Διάσπαση με εκπομπή σωματιδίων β**

Ένα **σωματίδιο β** είναι ένα ηλεκτρόνιο ή ποζιτρόνιο το οποίο εκπέμπεται από τον ασταθή πυρήνα κατά τη β-διάσπαση. Επειδή το ηλεκτρόνιο και το ποζιτρόνιο θεωρείται ότι δεν έχουν μάζα, η εκπομπή τους δεν επηρεάζει το μαζικό αριθμό, ο ατομικός αριθμός όμως αυξάνεται ή ελαττώνεται κατά μία μονάδα, αφού ο αριθμός των νετρονίων αυξήθηκε ή ελαττώθηκε κατά ένα αντίστοιχα. Είναι μέτρια διεισδυτική καθώς διαπερνά λίγα mm ΑΙ. Οι διάσπασεις αυτές συμβολικά γράφονται ως εξής:

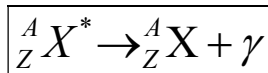


όπου $\bar{\nu}$ το αντινεutrino, ν το νεutrino αντίστοιχα.

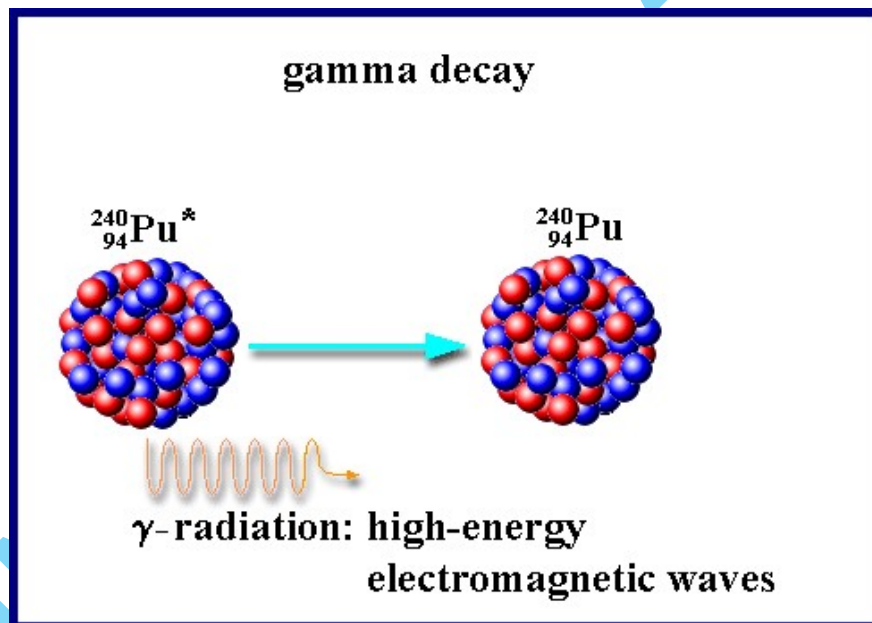
B. ΕΚΠΟΜΠΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ β

3) Διάσπαση με εκπομπή ακτίνων γ

Η **ακτινοβολία γάμμα** είναι φωτόνια υψηλής ενέργειας (1MeV-1GeV). Είναι η περισσότερο διεισδυτική καθώς διαπερνά, π.χ., μερικά cm Pb. Εκπέμπεται κυρίως από τους πυρήνες που αποτελούν προϊόντα διάσπασης άλφα ή βήτα, οι οποίοι στις περισσότερες περιπτώσεις είναι σε διεγερμένες καταστάσεις. Ένας διεγερμένος πυρήνας όταν αποδιεγείρεται και εκπέμπει μια ακτίνα γ δεν μεταβάλλεται αλλά απλώς μεταβαίνει σε χαμηλότερη ενεργειακή κατάσταση. Η διάσπαση αυτή συμβολικά γράφεται ως εξής:

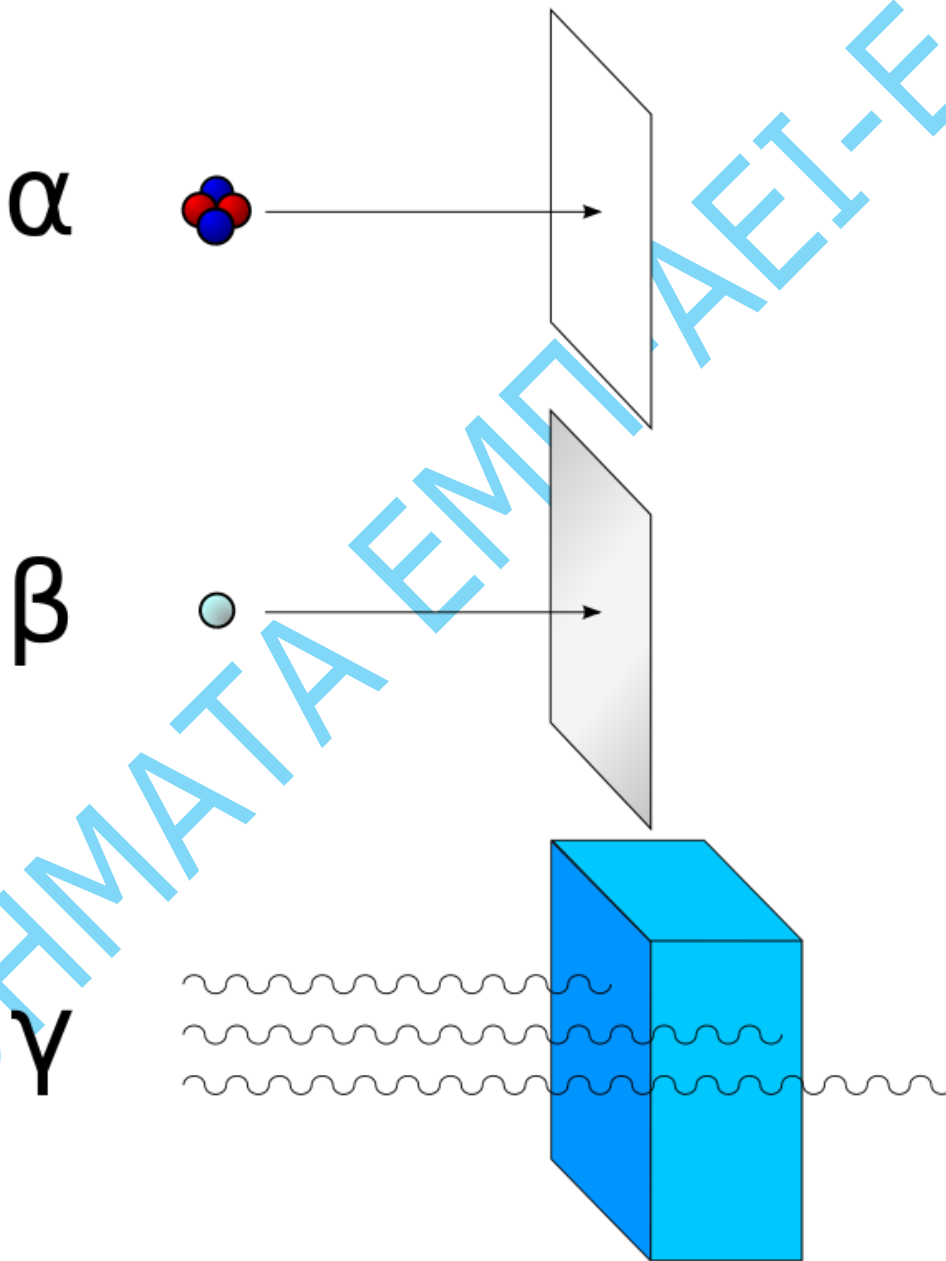


όπου X^* συμβολίζει τον πυρήνα σε διεγερμένη κατάσταση.



Στο ακόλουθο σχήμα φαίνεται η διαπερατότητα ραδιενεργών ακτίνων α , β , γ .:

- σωματίδια α : δεν διαπερνούν πέτασμα από χαρτί
- σωματίδια β : δεν διαπερνούν πέτασμα από αλουμίνιο
- σωματίδια γ : δεν διαπερνούν πέτασμα από μόλυβδο πάνω από ορισμένο πάχος



Ραδιοχρονολόγηση

Η ανακάλυψη της ραδιενέργειας υπήρξε ένα από τα μεγαλύτερα επιτεύγματα των φυσικών επιστημών. Μεταξύ των πλέον σημαντικών αποτελεσμάτων της ανακάλυψης της ραδιενέργειας είναι η **ραδιοχρονολόγηση**, μια μέθοδος μέτρησης της ηλικίας σχηματισμού ενός πετρώματος ή χρονολόγησης οργανικών δειγμάτων με τη βοήθεια ραδιενεργών στοιχείων, η οποία βασίζεται στο γεγονός ότι οι πυρήνες των ατόμων ενός ραδιενεργού στοιχείου μετατρέπονται σε άλλους πιο σταθερούς πυρήνες, εκπέμποντας ακτινοβολία (μεταστοιχείωση).

Εάν, λοιπόν, γνωρίζουμε τον χρόνο υποδιπλασιασμού ενός συγκεκριμένου ραδιενεργού στοιχείου που περιέχει το πέτρωμα ή το οργανικό δείγμα, δηλαδή τον χρόνο που χρειάζεται ένας αριθμός N πυρήνων αυτού του στοιχείου για να μειωθεί στο μισό (σε $N/2$), μπορούμε να υπολογίσουμε την ηλικία του πετρώματος. Είναι προφανές ότι το πρώτο (το ραδιενεργό) στοιχείο θα μειώνεται συνεχώς στη διάρκεια του χρόνου, ενώ το δεύτερο και πιο σταθερό στοιχείο θα αυξάνεται συνεχώς στο ίδιο διάστημα. Επομένως η αναλογία τους θα δίνει πληροφορίες για τον χρόνο που πέρασε από τη στιγμή που στερεοποιήθηκε το πέτρωμα μέχρι σήμερα, φυσικά με κάποια πιθανά όρια λάθους. Χαρακτηριστικά κατάλληλα ζεύγη στοιχείων γι' αυτό τον σκοπό είναι τα ζεύγη ουρανίου U-μολύβδου Pb και ρουβιδίου Rb-στροντίου Sr. Με τη βοήθεια της ραδιοχρονολόγησης υπολογίστηκε ότι τα παλαιότερα πετρώματα της Γης έχουν ηλικία περίπου 4 δισεκατομμυρίων ετών. Ο υπολογισμός αυτός, σε συσχετισμό με άλλα γεωλογικά στοιχεία, οδηγεί στο συμπέρασμα ότι η Γη έχει ηλικία περίπου 6 δισεκατομμυρίων ετών.

Ραδιοχρονολόγηση με ^{14}C

Αντίστοιχα, για τα οργανικά ευρήματα ηλικίας όχι μεγαλύτερης των 40.000 χρόνων χρησιμοποιείται η μέθοδος ραδιοχρονολόγησης του ραδιενεργού ισοτόπου του άνθρακα (^{14}C), την οποία επινόησε το 1949 ο χημικός Willard Frank Libby και για την τεχνική της ραδιοχρονολόγησης με τον ^{14}C το 1960 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Χημείας.

Η τεχνική αυτή βασίζεται στη ραδιενέργεια που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση β του ραδιενεργού ισοτόπου ^{14}C γνωστού ως ραδιοάνθρακα και χρησιμοποιείται ευρέως για τη χρονολόγηση οργανικών δειγμάτων. Επειδή ο χρόνος ημιζωής του είναι μόλις 5730 έτη, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη χρονολόγηση γεγονότων από τους ιστορικούς χρόνους αλλά και για γεγονότα της πρόσφατης γεωλογικής ιστορίας, μέχρι και 40.000 χρόνων.



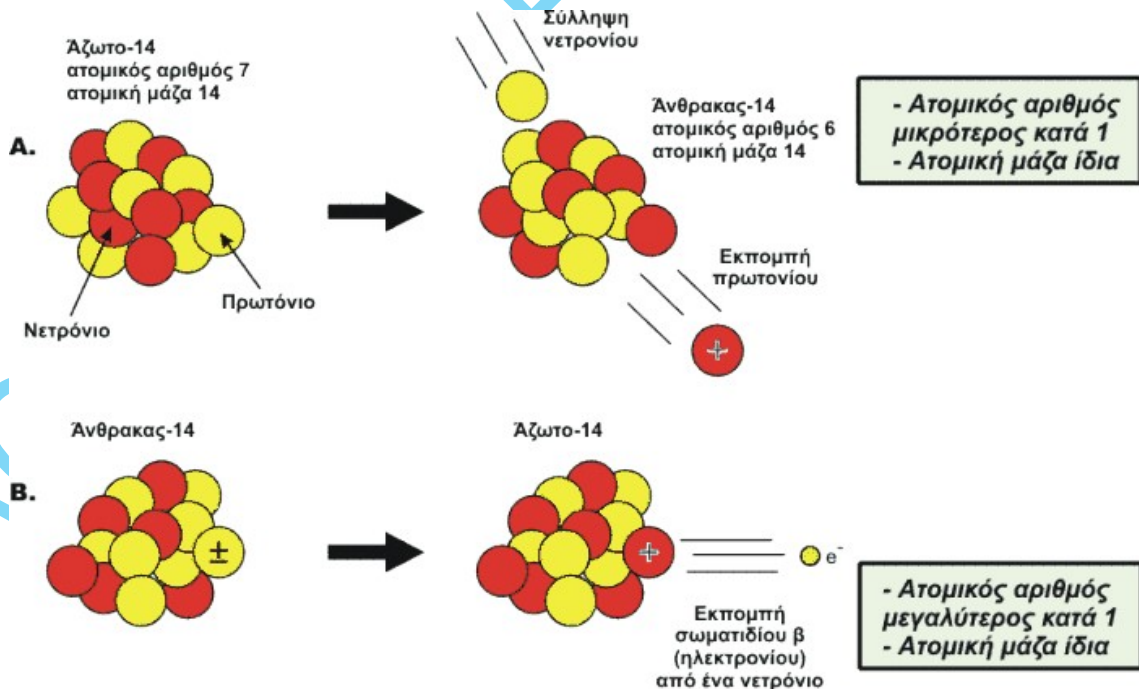
Το ισότοπο ^{14}C σχηματίζεται συνεχώς στην ανώτερη ατμόσφαιρα ως αποτέλεσμα βομβαρδισμού κοσμικής ακτινοβολίας, κατά τον οποίο κοσμική ακτινοβολία (πυρηνικά σωματίδια υψηλής ενέργειας προερχόμενα από το διάστημα) διασπά τους πυρήνες αερίων και απελευθερώνει νετρόνια. Τα νετρόνια στη συνέχεια απορροφούνται από άζωτο ^{14}N (N, ατομικός αριθμός 7, μαζικός αριθμός 14) αναγκάζοντας τον πυρήνα του να εκπέμπει ένα πρωτόνιο. Έτσι, ο ατομικός αριθμός του αζώτου μειώνεται κατά ένα - γίνεται 6 - με συνέπεια τη δημιουργία ενός νέου στοιχείου του ^{14}C .

Το ισότοπο αυτό του άνθρακα ενώνεται με οξυγόνο προς σχηματισμό διοξειδίου του άνθρακα, κυκλοφορεί στην ατμόσφαιρα και απορροφάται από τους ζώντες οργανισμούς.

Ο λόγος των ισοτόπων ^{14}C προς ^{12}C στα μόρια του CO_2 της ατμόσφαιρας είναι σταθερός και ισούται με $1,3 \times 10^{-12}$. Όλοι οι ζώντες οργανισμοί περιέχουν τον ίδιο λόγο των ισοτόπων αυτών, γιατί ανταλλάσσουν συνεχώς CO_2 με το περιβάλλον μέσω της αναπνοής ή της φωτοσύνθεσης.

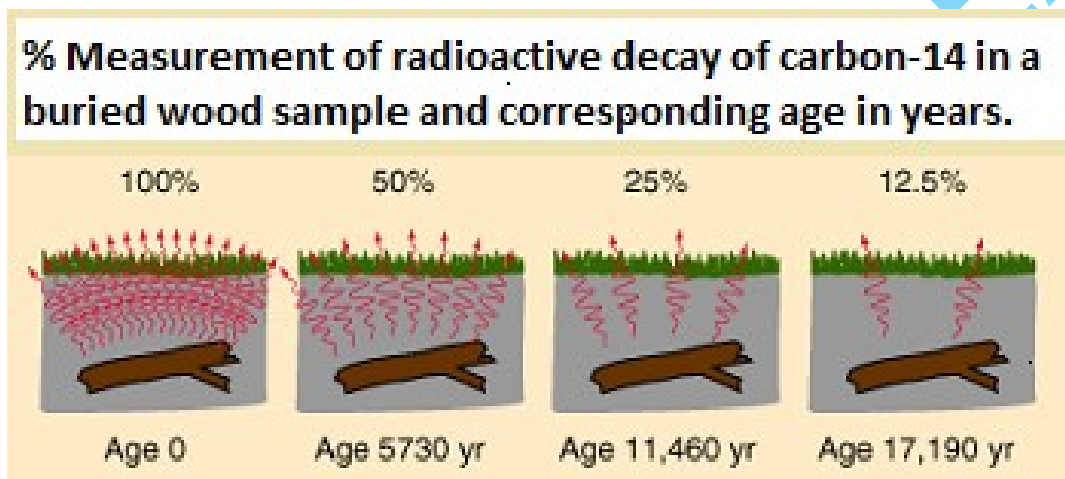
Όταν όμως ένας οργανισμός πεθάνει παύει να απορροφά CO_2 από την ατμόσφαιρα κι επομένως δεν προσλαμβάνει νέο ^{14}C , αλλά υφίσταται διάσπαση β, δηλαδή μειώνεται βαθμιαία καθώς αυτός διασπάται προς σχηματισμό ^{14}N με εκπομπή β σωματιδίων.

Οπότε ο λόγος των ισοτόπων ^{14}C προς ^{12}C δεν είναι πλέον σταθερός για τους νεκρούς οργανισμούς.



Συνεπώς προσδιορίζουμε τη χρονολογία που ένας οργανισμός έχει πεθάνει μετρώντας την ενεργότητα του ανά μονάδα μάζας. Δηλαδή συγκρίνοντας τις αναλογίες του ^{14}C και του ^{12}C σε ένα δείγμα, μπορούμε να προσδιορίσουμε την ηλικία του.

Επειδή ο χρόνος ημιζωής του ^{14}C είναι 5730 έτη, με τη μέθοδο αυτή μπορεί να προσδιοριστεί η ηλικία δειγμάτων οστών, όστρακων, ξύλου και άλλων παλαιών οργανικών δειγμάτων μέχρι 75000 έτη πριν από σήμερα.



Άσκηση

Σε μια ανασκαφή ανακαλύφθηκε ένα οστό μάζας 25gr. Το δείγμα αυτό έχει ενεργότητα του ^{14}C ίση με 250 διασπάσεις/min. Πόσα χρόνια έχουν περάσει από τότε που πέθανε ο οργανισμός αυτός; Δίνεται για τον ^{14}C : $T_{1/2}=5730$ έτη.

Λύση

Η σταθερά διάσπασης του ραδιοάνθρακα ^{14}C είναι:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \Rightarrow \lambda = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \Rightarrow \lambda = \frac{0,693}{5730 \text{έτη}} \Rightarrow \lambda = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{έτη}^{-1}$$

Για να υπολογίσουμε τον αριθμό των πυρήνων ^{14}C που υπήρχαν στο δείγμα αρχικά τη στιγμή που πέθανε ο οργανισμός ($t=0$) θα βρούμε το σταθερό αριθμό των πυρήνων του μη ραδιενεργού ^{12}C που περιέχει το δείγμα του οστού μάζας 25gr.

Το $1\text{mol}=12\text{gr}$ οστού περιέχει $N_A=6,023 \cdot 10^{23}$ πυρήνες ^{12}C

Τα 25gr οστού περιέχουν N πυρήνες ^{12}C

Άρα

$$N = \frac{25 \text{gr}}{12 \text{gr}} N_A = 2,083 \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{πυρήνες } ^{12}\text{C}$$

$$\Rightarrow N = 12,5 \cdot 10^{23} \text{πυρήνες } ^{12}\text{C}$$

Όταν πέθανε ο οργανισμός ($t=0$) τα 25 gr οστού περιείχαν N_0 αριθμό πυρήνων ^{14}C κι επειδή ο λόγος ^{14}C προς ^{12}C ήταν σταθερός και ίσος με $1,3 \cdot 10^{-12}$ είναι:

$$N_{o(^{14}\text{C})} = 1,3 \cdot 10^{-12} N_{^{12}\text{C}} = 1,3 \cdot 10^{-12} \cdot 12,5 \cdot 10^{23} \text{πυρήνες } ^{14}\text{C} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow N_{o(^{14}\text{C})} = 16,25 \cdot 10^{11} \text{πυρήνες } ^{14}\text{C}$$



Επομένως η αρχική ενεργότητα του δείγματος ήταν:

$$R_o = \lambda N_o = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ έτη}^{-1} \cdot 16,25 \cdot 10^{11} \text{ διασπάσεις} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_o = 19,66 \cdot 10^7 \text{ διασπάσεις / έτος}$$

Αλλά : 1 έτος = 365 μέρες = 365 x 24h = 8760h = 8760 x 60min = 525600min

Δηλαδή: 1 έτος = 5,256 x 10⁵ min

Άρα:

$$R_o = 19,66 \cdot 10^7 \frac{\text{διασπάσεις}}{5,256 \cdot 10^5 \text{ min}} = 3,74 \cdot 10^2 \text{ διασπάσεις / min} \Rightarrow \\ \Rightarrow R_o = 374 \text{ διασπάσεις / min}$$

Σύμφωνα με το νόμο της ραδιενέργειας είναι:

$$R_{(t)} = R_o e^{-\lambda t} \Rightarrow 250 \text{ διασπάσεις / min} = 374 \text{ διασπάσεις / min} e^{-1,21 \cdot 10^{-4} \text{ έτη}^{-1} t} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \frac{250}{374} = 0,668 = e^{-1,21 \cdot 10^{-4} \text{ έτη}^{-1} t} \Rightarrow \ln 0,668 = -1,21 \cdot 10^{-4} t \text{ έτη}^{-1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow -0,4 = -1,21 \cdot 10^{-4} t \text{ έτη}^{-1} \Rightarrow t = \frac{0,4}{1,21 \cdot 10^{-4}} \text{ έτη} = 0,33 \cdot 10^4 \text{ έτη} \Rightarrow$$

$$\boxed{\Rightarrow t = 3300 \text{ έτη}}$$

Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας

