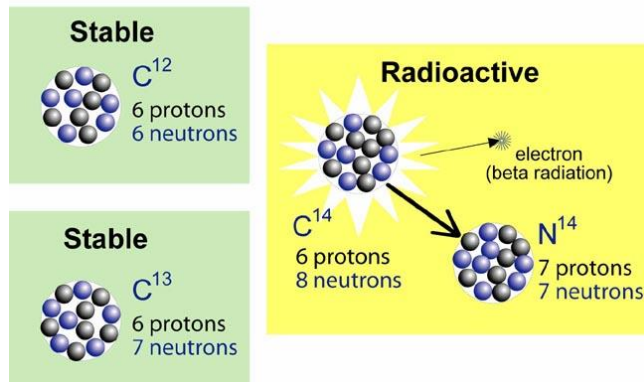


Γενικά χαρακτηριστικά των πυρήνων (Φορτίο, Μάζα, Σταθερότητα) Ισότοπα και Πυρηνικές αντιδράσεις Ραδιενέργεια

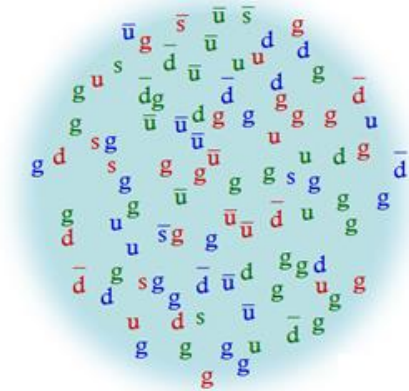
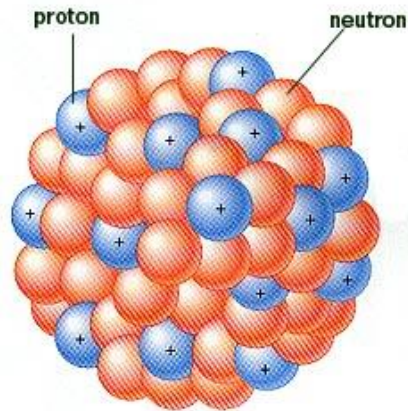
Three Isotopes of Carbon



Α. Λιόλιος
Μάθημα Πυρηνικής Φυσικής

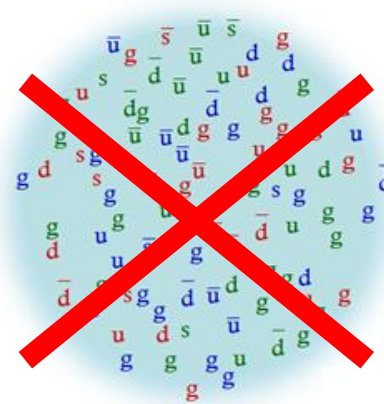
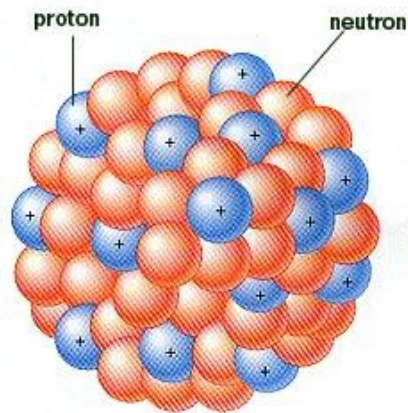
Σύσταση των πυρήνων

Οι πυρήνες αποτελούνται
από νουκλεόνια ; ή από κουάρκ;



Σύσταση των πυρήνων

Οι πυρήνες αποτελούνται
από νουκλεόνια ; ή από κουάρκ;



Απάντηση: από νουκλεόνια, διότι οι ενέργειες (δυναμική, κινητική) των νουκλεονίων στον πυρήνα είναι πολύ μικρότερες από τις ενέργειες διέγερσης των κουάρκ στα νουκλεόνια.

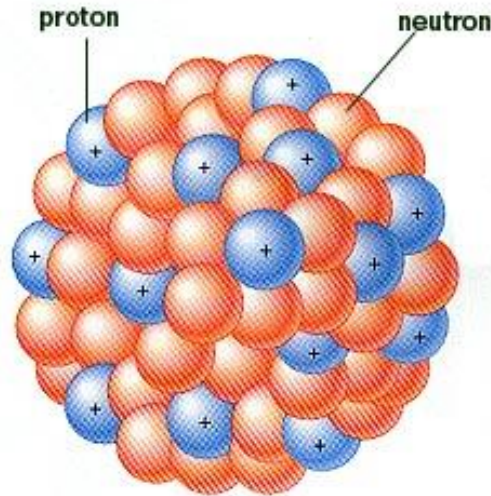
Άρα, στην μελέτη των πυρήνων θεωρούμε τις αλληλεπιδράσεις νουκλεονίου-νουκλεονίου (χαμηλές ενέργειες) και όχι των κουάρκ.

Επιλέγουμε ένα κατάλληλο δυναμικό και επιλύουμε την εξίσωση Schrodinger για δύο αλληλεπιδρώντα νουκλεόνια. Η απλούστερη περίπτωση **δέσμιας κατάστασης νουκλεονίων** είναι αυτή του **δευτερονίου** (πυρήνα του δευτερίου).



deuteron

Δομικοί λίθοι του πυρήνα



Ο πυρήνας αποτελείται από Z πρωτόνια και N νετρόνια.

Το **φορτίο** του χαρακτηρίζεται από τον αριθμό Z των πρωτονίων του
(ατομικός αριθμός)

Η **μάζα** του χαρακτηρίζεται από τον αριθμό $A = Z + N$ των
νουκλεονίων του (μαζικός αριθμός)

ΣΥΜΒΟΛΙΣΜΟΣ ΠΥΡΗΝΑ

Μαζικός αριθμός (Mass number)



Σύμβολο του
χημικού στοιχείου

Ατομικός αριθμός (Atomic number)

Z = αριθμός πρωτονίων (καθορίζει το χημ. στοιχείο)

$A - Z$ = αριθμός νετρονίων

Ορισμοί

Μαζικός αριθμός (Mass number)

A

X

Z

Σύμβολο του
χημικού στοιχείου

Ατομικός αριθμός (Atomic number)

Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό πρωτονίων Z λέγονται **ισοτοπικοί**.

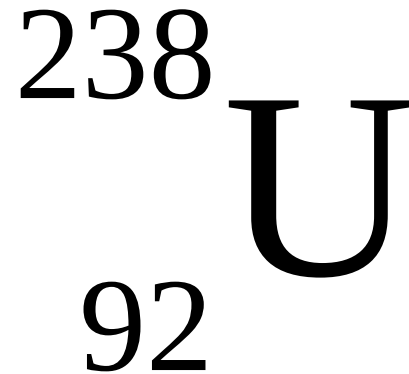
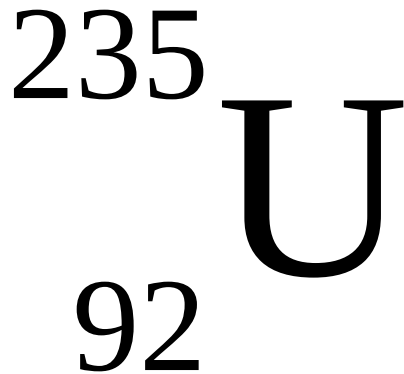
Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νουκλεονίων A λέγονται **ισοβαρείς**.

Πυρήνες με τον ίδιο αριθμό νετρονίων N λέγονται **ισότονι**.

ΙΣΟΤΟΠΙΚΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ ή ΙΣΟΤΟΠΑ

Τα **ισότοπα** (isotopes) είναι στοιχεία με το ίδιο Z , άρα έχουν την ίδια θέση στον περιοδικό πίνακα, δηλ. ανήκουν στο ίδιο χημικό στοιχείο. Οι πυρήνες τους περιλαμβάνουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Παράδειγμα, τα ισότοπα U-235 και U-238 του ουρανίου.

ΑΣΚΗΣΗ: Συμπληρώστε τους αριθμούς



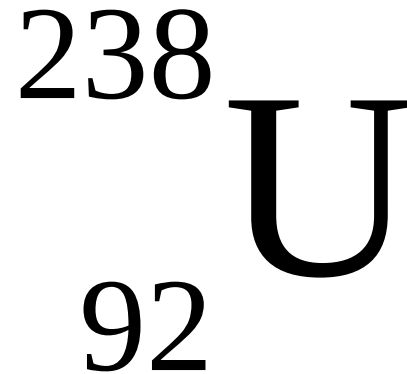
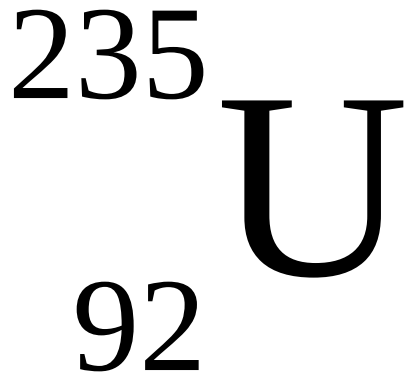
A	
Z	
Number of protons	
Number of neutrons	

A	
Z	
Number of protons	
Number of neutrons	

ΙΣΟΤΟΠΙΚΟΙ ΠΥΡΗΝΕΣ ή ΙΣΟΤΟΠΑ

Τα **ισότοπα** (isotopes) είναι στοιχεία με το ίδιο Z , άρα έχουν την ίδια θέση στον περιοδικό πίνακα, δηλ. ανήκουν στο ίδιο χημικό στοιχείο. Οι πυρήνες τους περιλαμβάνουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων, αλλά διαφορετικό αριθμό νετρονίων. Παράδειγμα, τα ισότοπα U-235 και U-238 του ουρανίου.

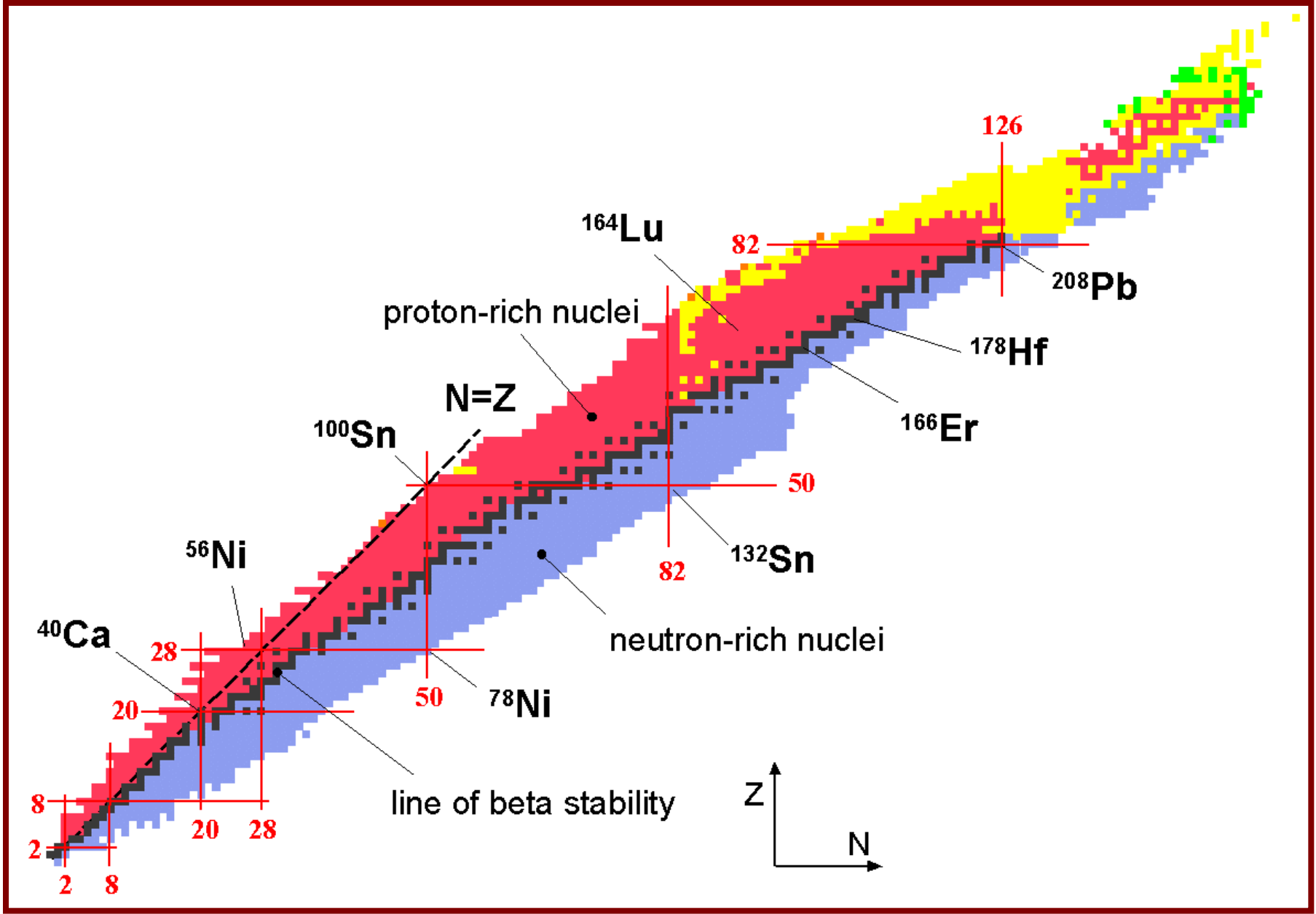
ΑΣΚΗΣΗ: Συμπληρώστε τους αριθμούς



A	235
Z	92
Number of protons	92
Number of neutrons	143

A	238
Z	92
Number of protons	92
Number of neutrons	146

Πίνακας των Ισοτόπων



Μπείτε και εξερευνείστε το εξής:

Exploring the Table of Isotopes

The Berkeley Laboratory Isotopes Project's

<http://ie.lbl.gov/education/isotopes.htm>

Παραδείγματα πυρηνικών αντιδράσεων

Πυρηνικές αντιδράσεις και δημιουργία τεχνητών νουκλιδίων

Οι πυρηνικές αντιδράσεις
γράφονται όπως περίπου
οι χημικές αντιδράσεις:



αλλά και πιο
συντομογραφικά:



<i>Bombarding particle</i>	<i>Examples</i>	<i>Type</i>
α -particle (${}^4_2\text{He}$)	${}^9_4\text{Be} + {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{12}_6\text{C} + {}^1_0n$	(α, n)
	${}^{19}_9\text{F} + {}^4_2\text{He} \longrightarrow {}^{22}_{10}\text{Ne} + {}^1_1\text{H}$	(α, p)
Proton (${}^1_1\text{H}$)	${}^{31}_{15}\text{P} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{31}_{16}\text{S} + {}^1_0n$	(p, n)
	${}^{12}_6\text{C} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^{13}_7\text{N} + \gamma$	(p, γ)
	${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^2_1\text{H}$	(p, α)
	${}^9_4\text{Be} + {}^1_1\text{H} \longrightarrow {}^6_3\text{Li} + {}^4_2\text{He}$	(p, α)
Neutron (1_0n)	${}^{27}_{13}\text{Al} + {}^1_0n \longrightarrow {}^{27}_{12}\text{Mg} + {}^1_1\text{H}$	(n, p)
	${}^{16}_8\text{O} + {}^1_0n \longrightarrow {}^{13}_6\text{C} + {}^4_2\text{He}$	(n, α)
Deuteron (${}^2_1\text{D}$ or ${}^2_1\text{H}$)	${}^6_3\text{Li} + {}^2_1\text{H} \longrightarrow {}^7_3\text{Li} + {}^1_1\text{H}$	(d, p)
	${}^{75}_{33}\text{As} + {}^2_1\text{H} \longrightarrow {}^{76}_{33}\text{As} + {}^1_1\text{H}$	(d, p)
γ -radiation	${}^9_4\text{Be} + \gamma \longrightarrow {}^8_4\text{Be} + {}^1_0n$	(γ, n)

Το Q της αντίδρασης

Η ενεργειακή πληροφορία για την αντίδραση δίδεται με την τιμή **Q της αντίδρασης**.

Αν το **Q** είναι θετικό, σημαίνει ότι ελευθερώνεται ενέργεια και η αντίδραση είναι εξώθερμη. Αυτό συμβαίνει όταν η ολική μάζα των προϊόντων είναι μικρότερη από την ολική μάζα του βλήματος και του στόχου.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑΤΑ

Reaction	Measured Q (MeV)	Reaction	Measured Q (MeV)
$^2\text{H}(\text{n},\gamma)^3\text{H}$	6.257 +/- 0.004	$^9\text{Be}(\text{p},\alpha)^6\text{Li}$	2.132 +/- 0.006
$^2\text{H}(\text{d},\text{p})^3\text{H}$	4.032 +/- 0.004	$^{10}\text{B}(\text{n},\alpha)^7\text{Li}$	2.793 +/- 0.003
$^6\text{Li}(\text{p},\alpha)^3\text{H}$	4.016 +/- 0.005	$^{10}\text{B}(\text{p},\alpha)^7\text{Be}$	1.148 +/- 0.003
$^6\text{Li}(\text{d},\text{p})^7\text{Li}$	5.020 +/- 0.006	$^{12}\text{C}(\text{n},\gamma)^{13}\text{C}$	4.948 +/- 0.004
$^7\text{Li}(\text{p},\text{n})^7\text{Be}$	-1.645 +/- 0.001	$^{13}\text{C}(\text{p},\text{n})^{13}\text{N}$	-3.003 +/- 0.002
$^7\text{Li}(\text{p},\alpha)^4\text{He}$	17.337 +/- 0.007	$^{14}\text{N}(\text{p},\text{n})^{14}\text{C}$	-0.627 +/- 0.001
$^9\text{Be}(\text{n},\gamma)^{10}\text{Be}$	6.810 +/- 0.006	$^{14}\text{N}(\text{n},\gamma)^{15}\text{N}$	10.833 +/- 0.007
$^9\text{Be}(\gamma,\text{n})^8\text{Be}$	-1.666 +/- 0.002	$^{18}\text{O}(\text{p},\text{n})^{18}\text{F}$	-2.453 +/- 0.002
$^9\text{Be}(\text{d},\text{p})^{10}\text{Be}$	4.585 +/- 0.005	$^{19}\text{F}(\text{p},\alpha)^{16}\text{O}$	8.124 +/- 0.007

Η **πιθανότητα** να λάβει μέρος η αντίδραση εκφράζεται μέσω της **ενεργού διατομής σ**.

ΓΙΑ ΤΙΣ ΑΣΚΗΣΕΙΣ

Αρχή διατήρησης της ενέργειας:

Ενέργεια πριν = Ενέργεια μετά

$$\Sigma M(\text{αρχικά}) = \Sigma M(\text{τελικά}) + Q$$

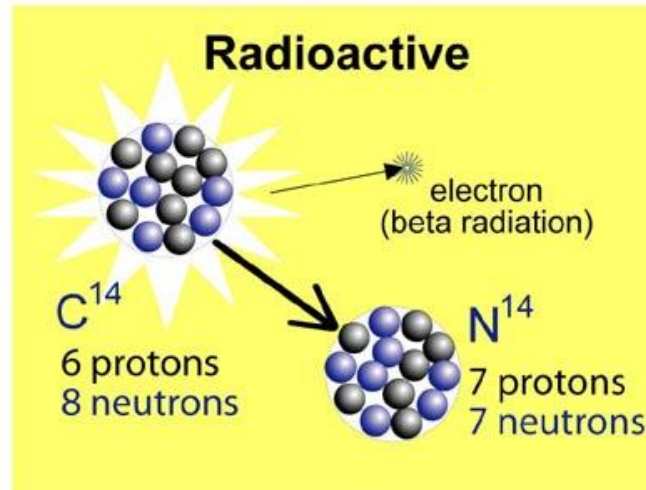
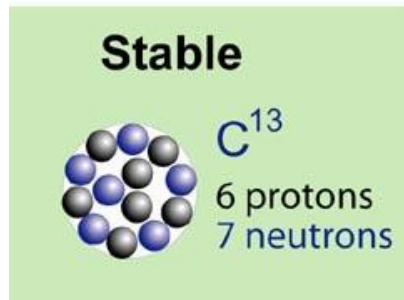
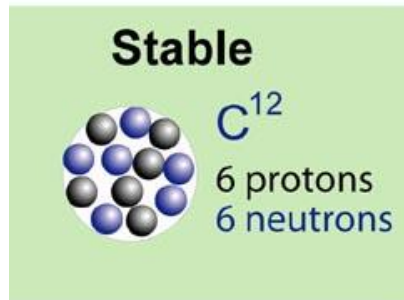
Η μάζα κάθε πυρήνα υπολογίζεται από τις μάζες των συστατικών του (πρωτόνια και νετρόνια) και την ενέργεια σύνδεσής τους.

Για να γίνεται η αντίδραση πρέπει $Q \geq 0$ (“εξώθερμη”).

$$1 \text{ amu} = 931.49 \text{ MeV}/c^2 \text{ και } 1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$M(n) = 939.57 \text{ MeV}, M(p) = 938.27 \text{ MeV}, M(e) = 0.511 \text{ MeV}, m(\nu) = 0$$

Σταθεροί και ασταθείς πυρήνες



Ραδιενέργεια

Ραδιο-ισότοπα και Ραδιενεργός Διάσπαση

Τα περισσότερα ισότοπα που υπάρχουν στη φύση είναι **σταθερά ισότοπα**.

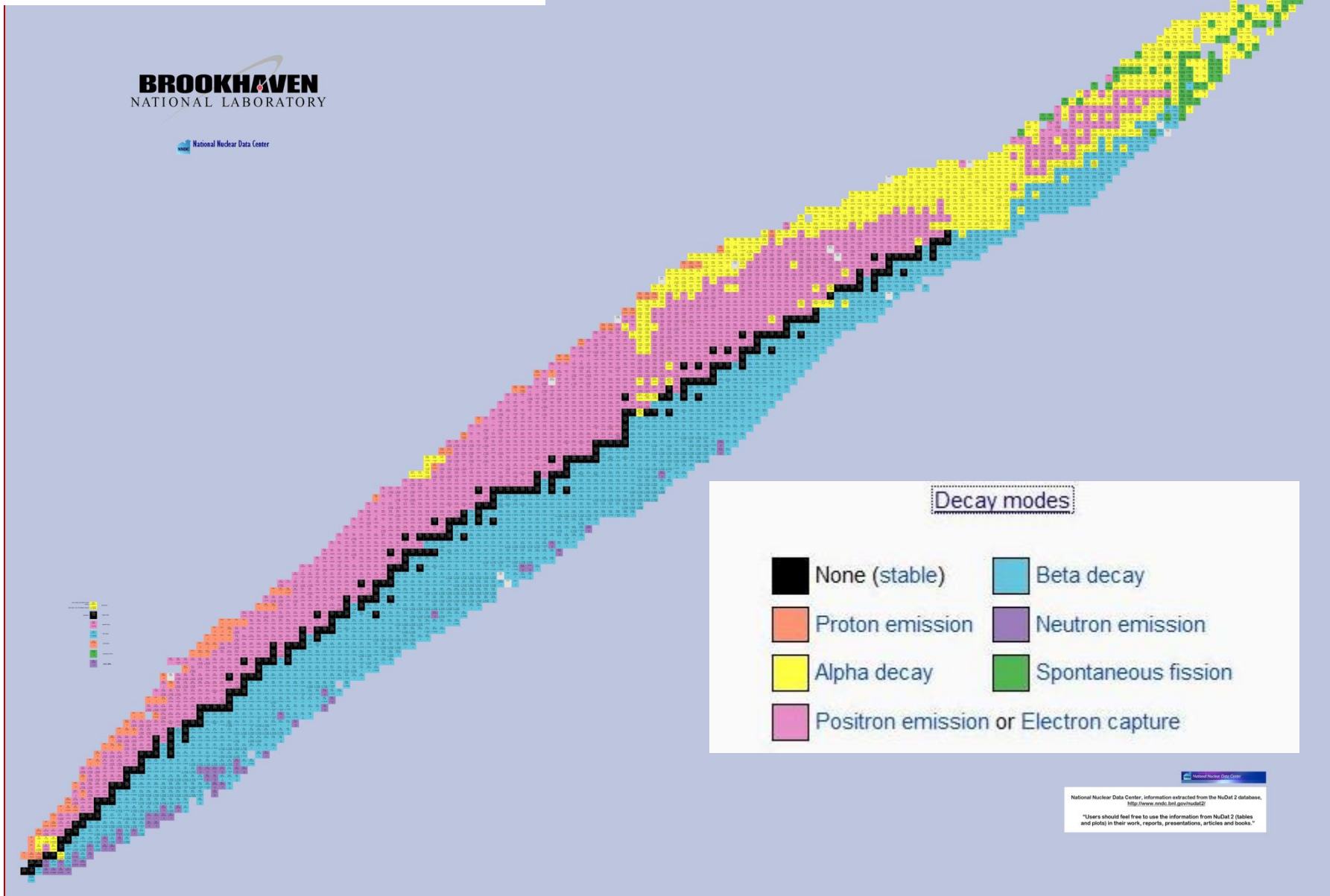
Λίγα μόνο ισότοπα που υπάρχουν στη φύση δεν είναι σταθερά, καθώς και όλα όσα είναι τεχνητά.

Τα ασταθή ισότοπα μπορεί να γίνουν σταθερά αν εκπέμψουν ένα ή περισσότερα σωματίδια ή ΗΜ ακτινοβολία. Η ακτινοβολία αυτή χαρακτηρίζεται ως ραδιενεργός ακτινοβολία και το φαινόμενο εκπομπής της **ραδιενέργεια**.

Η φυσική αυτή διαδικασία που συμβαίνει στους ασταθείς πυρήνες λέγεται **“ραδιενεργός διάσπαση”** (radioactive decay) και τα στοιχεία που την υφίστανται λέγονται **“ραδιο-ισότοπα”** ή **“ραδιο-νουκλίδια”** (radioisotopes / radionuclides).

Πίνακας των Ισοτόπων

Z ↑

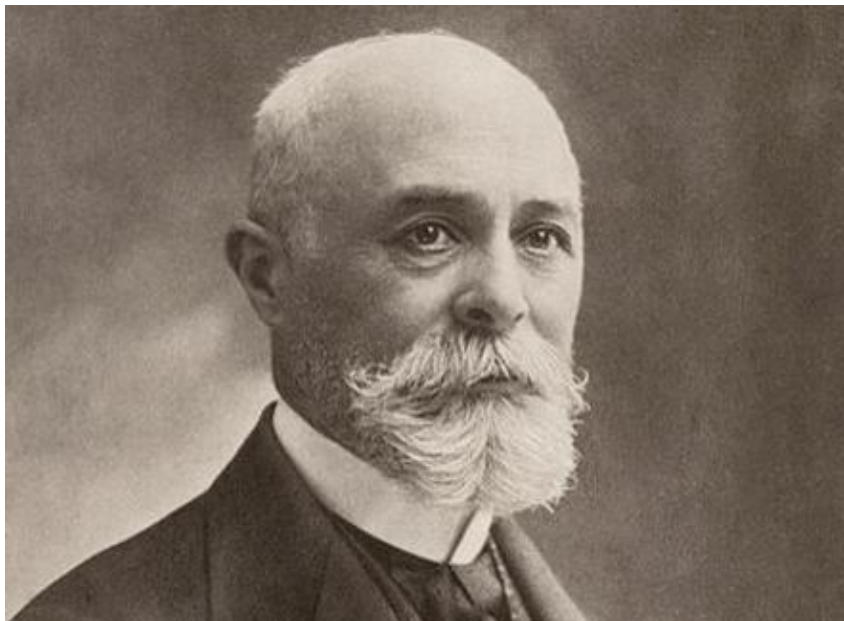


Για έναν interactive chart πάτε στο:
<http://www.nndc.bnl.gov/chart/>

→
Αριθμός νετρονίων $N = A - Z$

Ανακάλυψη της Ραδιενέργειας από τον Becquerel

Ο Ανρί Μπεκερέλ ήταν Γάλλος φυσικός.
Βραβεύθηκε με το Βραβείο Νόμπελ
Φυσικής το 1903 για την ανακάλυψη της
Ραδιενέργειας.



Antoine Henri **Becquerel**
(15 December 1852 – 25 August 1908)

Το **1896**, ενώ ο Μπεκερέλ ερευνούσε
τον φθορισμό σε άλατα ουρανίου, **ανακάλυψε**
τυχαία την ραδιενέργεια.

Ο Μπεκερέλ παρατήρησε πως μια φωτογραφική
πλάκα μαύριζε αν ήταν δίπλα σε ουρανιούχο
σκεύασμα (θεικό ουρανυλιοκάλιο) ακόμα και
αν αυτά βρισκόταν στο σκοτάδι. Έτσι
ανακάλυψε πως το υλικό αυτό εξέπεμπε
αυθόρμητα κάποια ακτινοβολία (radiation),
φαινόμενο που ονομάστηκε **ραδιενέργεια**
(radioactivity).

Τα πειράματα σχετικά με την αυθόρμητη αυτή
εκπομπή ακτινοβολίας συνεχίστηκαν από τον
ζεύγος **Πιερ και Μαρία Κιουρί**. Για την
ανακάλυψη της ραδιενέργειας βραβεύτηκαν και
οι τρεις με το βραβείο **Νόμπελ Φυσικής το**
1903.

Η **μονάδα μέτρησης ραδιενέργειας**
(1 **Bq** = 1 dps), πήρε το όνομά του.

Μαρία και Πιερ Κιουρί



Maria Curie

7 Νοεμβρίου, 1867 – 4 Ιουλίου 1934

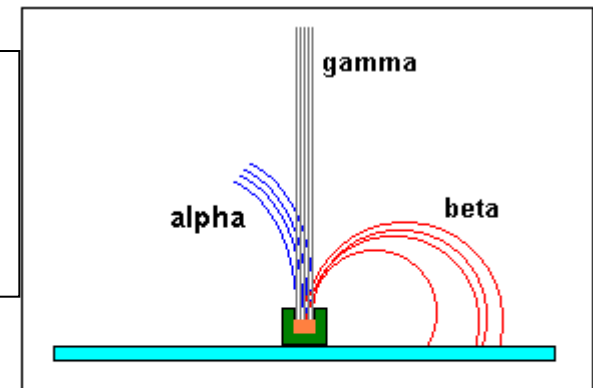
Pierre Curie

15 May 1859 – 19 April 1906

Νόμπελ Φυσικής (1903)

Η **Μαρία Κιουρί** ήταν πολωνικής καταγωγής. Σε συνεργασία με το σύζυγό της, **Πιερ Κιουρί**, ανακάλυψε το **ράδιο** και μελέτησε τα φαινόμενα της ραδιενέργειας. Ανακάλυψε επίσης το **πολόνιο** και υπήρξε η πρώτη γυναίκα που έγινε Καθηγήτρια στο πανεπιστήμιο της Σορβόνης, ενώ τιμήθηκε δυο φορές με το **Βραβείο Νόμπελ** για τη Φυσική (1903) και τη Χημεία (1911). Όντας η πιο φημισμένη γυναίκα επιστήμων της εποχής της, ήταν γνωστή επίσης και ως **Μαντάμ Κιουρί**.

Η “α, β, γ” για τους μελετητές της ραδιενέργειας και της Πυρηνικής Φυσικής!



Alpha, beta and gamma radiation can be deflected by using magnetic field. Alpha and beta particles have contrary charges - they undergo deflection in opposite directions. Gamma rays don't transfer any charge - they don't undergo deflection.

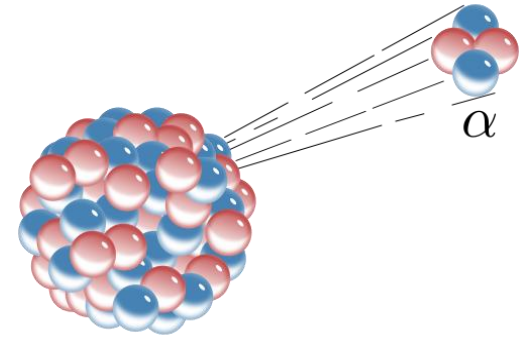
Το διεθνές σύμβολο για τη
Ραδιενέργεια



Είδη αυθόρμητης διάσπασης πυρήνων (ραδιενέργειας) και τα αντίστοιχα είδη ακτινοβολίας

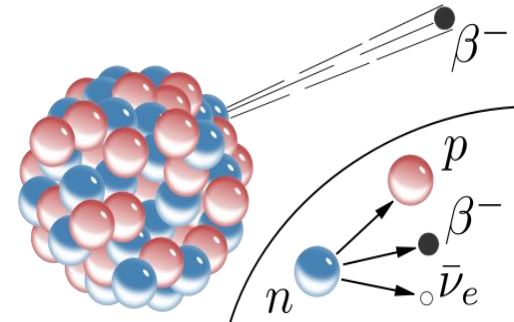
α-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα συσσωμάτωμα από
2 πρωτόνια και δύο νετρόνια
= διώχνει ένα σωματίδιο άλφα
(δηλαδή έναν πυρήνα ηλίου, ${}^4\text{He}$)



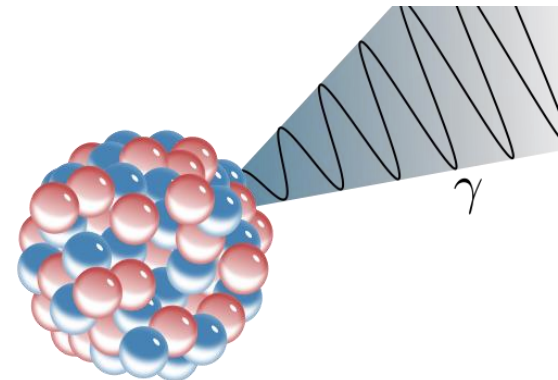
β-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα ηλεκτρόνιο (e^-)
ή ποζιτρόνιο (e^+)



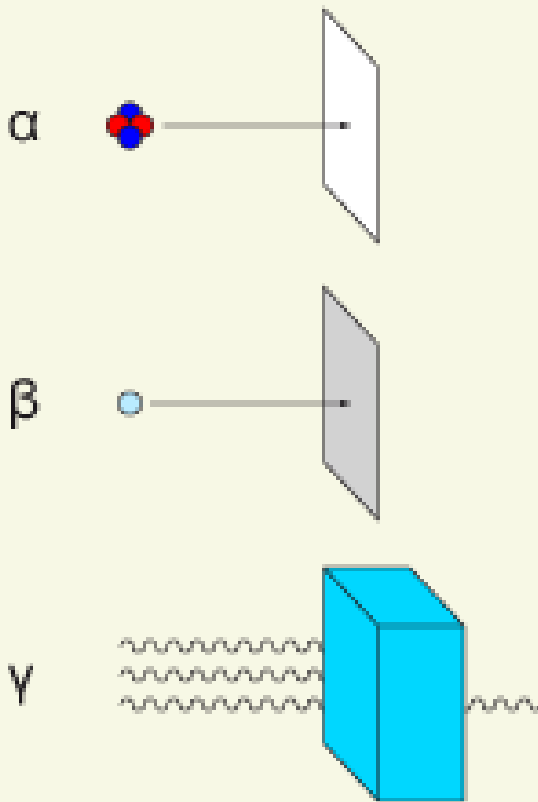
γ-διάσπαση:

ο πυρήνας διώχνει ένα φωτόνιο (γ)
→ η μόνη περίπτωση που μένει ο ίδιος, απλά με
χαμηλότερη ενέργεια



Η ραδιενεργός ακτινοβολία είναι ιονιστική ακτινοβολία, δηλαδή ιονίζει την ύλη.

Ionising Radiation



Η ακτινοβολία α , β , γ που εκπέμπεται από τους ραδιενεργούς πυρήνες, ιονίζει την ύλη χάνοντας ενέργεια.

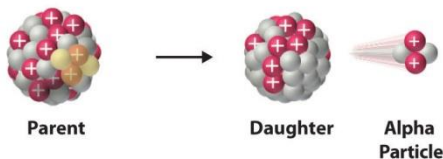
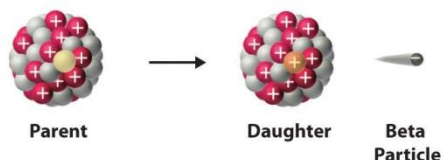
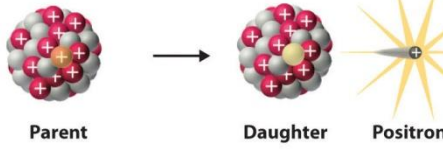
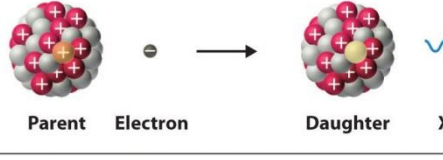
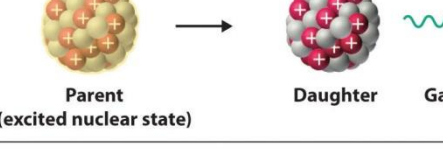
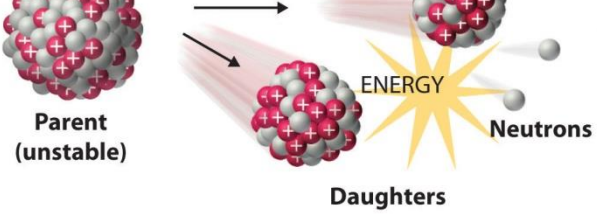
Οι ακτινοβολίες α και β είναι άμεσα ιονιστικές (ενώ η εμβέλειά τους διαφέρει).

Η ακτινοβολία γ είναι έμμεσα ιονιστική (μέσω $\Phi\Phi$, ΦC , $\Delta\Gamma$).

Ραδιενεργός Διάσπαση

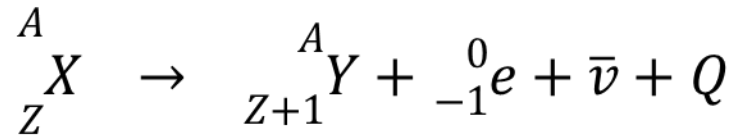
Φαινόμενο των ασταθών πυρήνων. Έχει ως αποτέλεσμα την εκπομπή σωματιδίων ή ΗΜ ακτινοβολίας.

Επίσης, υπάρχει και η πυρηνική σχάση.

Decay Type	Radiation Emitted	Generic Equation	Model
Alpha decay	${}^4_2\alpha$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-2}^{A-4}X' + {}^4_2\alpha$	 Parent → Daughter + Alpha Particle
Beta decay	${}^0_{-1}\beta$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z+1}^AX' + {}^0_{-1}\beta$	 Parent → Daughter + Beta Particle
Positron emission	${}^0_{+1}\beta$	${}_Z^AX \longrightarrow {}_{Z-1}^AX' + {}^0_{+1}\beta$	 Parent → Daughter + Positron
Electron capture	X rays	${}_Z^AX + {}^0_{-1}e \longrightarrow {}_{Z-1}^AX' + \text{X ray}$	 Parent + Electron → Daughter + X ray
Gamma emission	${}^0_0\gamma$	${}_Z^AX^* \xrightarrow{\text{Relaxation}} {}_Z^AX' + {}^0_0\gamma$	 Parent (excited nuclear state) → Daughter + Gamma ray
Spontaneous fission	Neutrons	${}_Z^{A+B+C}X \longrightarrow {}_Z^AX' + {}_Y^BX' + {}^1_0n$	 Parent (unstable) → Daughters + ENERGY + Neutrons

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΗΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Εκπομπή ηλεκτρονίου



Θεωρώντας, προσεγγιστικά, τη μάζα του αντινετρίνο (και την ενέργειά του) μηδενική, προκύπτει:

$$m_Z c^2 = m_{Z+1} c^2 + m_e c^2 + Q$$

όπου m_Z , m_{Z+1} , m_e , οι μάζες του πατρικού πυρήνα, του θυγατρικού πυρήνα και του ηλεκτρονίου, αντίστοιχα. Έτσι, για την ενέργεια Q της αντίδρασης προκύπτει:

$$\begin{aligned} Q &= (m_Z - m_{Z+1} - m_e) c^2 \\ &= (m_Z + Z m_e - m_{Z+1} - (Z + 1) m_e + m_e - m_e) c^2 \end{aligned}$$

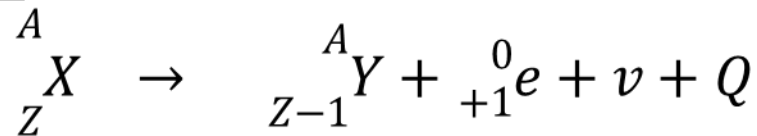
Δηλαδή, σε όρους ατομικών μαζών M_Z και M_{Z+1} :

$$Q = (M_Z - M_{Z+1}) c^2$$

Άρα, για να συμβεί η αντίδραση ($Q > 0$) θα πρέπει η μάζα του πατρικού ατόμου να είναι μεγαλύτερη της μάζας του θυγατρικού ατόμου.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΗΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Εκπομπή ποζιτρονίου



Θεωρώντας, προσεγγιστικά, τη μάζα του αντινετρίνο (και την ενέργειά του) μηδενική, προκύπτει:

$$m_Z c^2 = m_{Z-1} c^2 + m_e c^2 + Q$$

όπου m_Z , m_{Z-1} , m_e , οι μάζες του πατρικού πυρήνα, του θυγατρικού πυρήνα και του ηλεκτρονίου, αντίστοιχα. Έτσι, για την ενέργεια Q της αντίδρασης προκύπτει:

$$\begin{aligned} Q &= (m_Z - m_{Z-1} - m_e) c^2 \\ &= (m_Z + Zm_e - m_{Z-1} - (Z-1)m_e - m_e - m_e) c^2 \end{aligned}$$

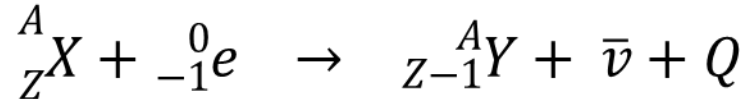
Δηλαδή, σε όρους ατομικών μαζών M_Z και M_{Z-1} :

$$Q = (M_Z - M_{Z-1} - 2m_e) c^2$$

Άρα, για να συμβεί η αντίδραση ($Q > 0$) θα πρέπει η μάζα του πατρικού ατόμου να είναι τουλάχιστον κατά $2m_e$ μεγαλύτερη της μάζας του θυγατρικού ατόμου.

ΕΝΕΡΓΕΙΑΚΕΣ ΣΥΝΘΗΚΕΣ ΓΙΑ ΤΗΝ ΒΗΤΑ ΔΙΑΣΠΑΣΗ

Αρπαγή ηλεκτρονίου (EC)



Λόγω διατήρησης της ενέργειας:

$$m_Z c^2 + m_e c^2 = m_{Z-1} c^2 + Q$$

όπου m_Z , m_{Z-1} , m_e , οι μάζες του πατρικού πυρήνα, του θυγατρικού πυρήνα και του ηλεκτρονίου, αντίστοιχα. Έτσι, για την ενέργεια Q της αντίδρασης προκύπτει:

$$\begin{aligned} Q &= (m_Z + m_e - m_{Z-1})c^2 \\ &= (m_Z + Zm_e + m_e - m_{Z-1} - (Z-1)m_e - m_e)c^2 \end{aligned}$$

Δηλαδή, σε όρους ατομικών μαζών M_Z και M_{Z-1} :

$$Q = (M_Z - M_{Z-1})c^2$$

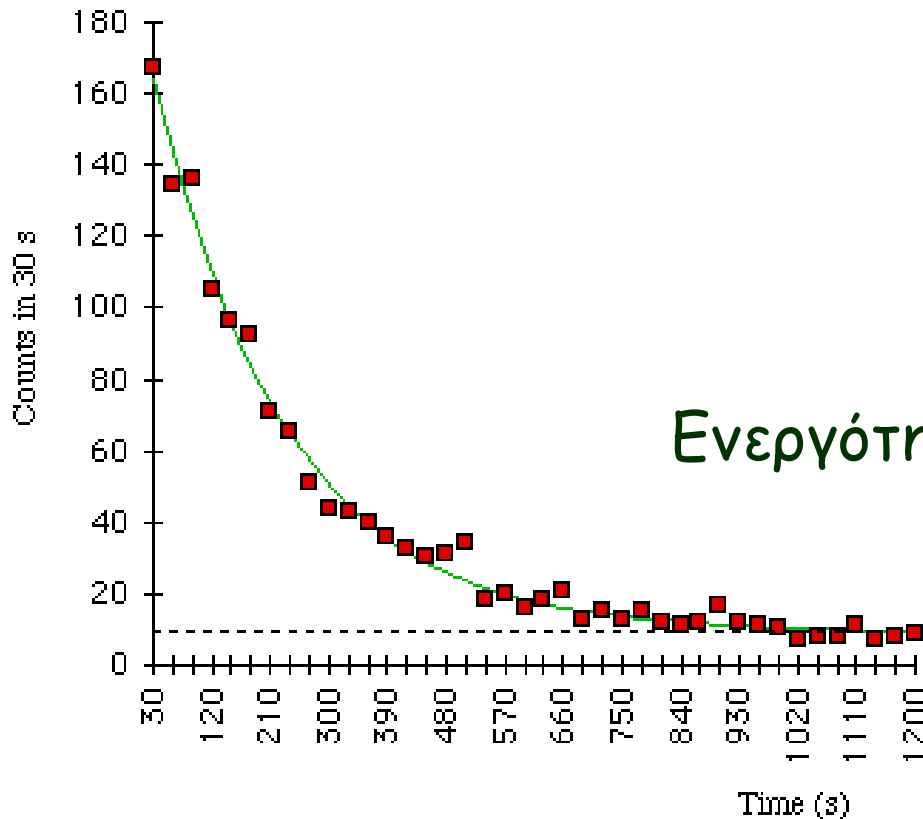
Άρα, για να συμβεί η αντίδραση ($Q > 0$) θα πρέπει η μάζα του πατρικού ατόμου να είναι μεγαλύτερη της μάζας του θυγατρικού ατόμου.

Σταθερά διάσπασης

- Μέσος χρόνος ζωής πυρήνα ή σωματιδίου = τ
= ο μέσος χρόνος που υπάρχει το σωματίδιο πριν διασπαστεί
 - Η πιθανότητα διάσπασης ανά μονάδα χρόνου ονομάζεται **σταθερά διάσπασης**, συμβολίζεται με λ και είναι σταθερή, δηλ. **η πιθανότητα διασπασης είναι ανεξάρτητη της ηλικίας του πυρήνα** (π.χ., $\lambda = 1\%$ ανά λεπτό = $0.01/\text{min}$).
 - Πιθανότητα διάσπασης μέσα σε χρονικό διάστημα $dt = \lambda * dt$
 - Αν σε $t=0$ έχουμε N_0 πυρήνες, σε χρόνο t θα έχουμε $N(t)$ πυρήνες
 - Στο διάστημα $\{t, t+dt\}$ έχουν **διασπαστεί: $N(t) * \lambda * dt$** πυρήνες και έχουν **απομείνει: $N(t+dt) = N(t) - N(t) * \lambda * dt \rightarrow$**
 $N(t+dt) - N(t) = - N(t) * \lambda * dt \rightarrow dN = -N * \lambda * dt \rightarrow \dots$
 $\dots \rightarrow N(t) = N_0 * e^{-\lambda t}$
- ΑΡΑ, συμβαίνει εκθετική μείωση του ραδιενεργού υλικού (και της ραδιενέργειας ή ενεργότητας) με την πάροδο του χρόνου.**

Ο νόμος της ραδιενέργειας

(η χρονική εξέλιξη του ρυθμού διασπάσεων)



Ενεργότητα:

$$R = \frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N$$

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t$$

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

ΣΥΜΒΟΛΑ - ΟΡΙΣΜΟΙ

R: Ρυθμός διάσπασης ή ενεργότητα (μονάδα το Bq = dps)

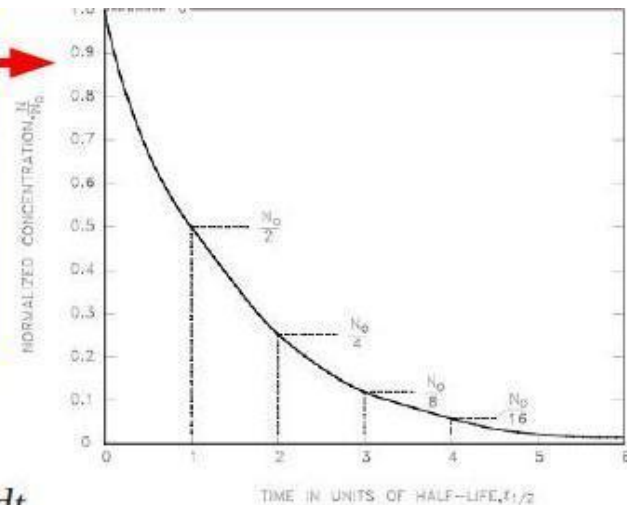
λ: σταθερά διάσπασης (χαρακτηριστικό του κάθε είδους πυρήνα)

τ: μέσος χρόνος ζωής των πυρήνων (=1/λ), $T_{1/2}$: χρόνος ημιζωής

Χρόνος ζωής ραδιενεργών πυρήνων: τ και $T_{1/2}$

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

Εκθετική μείωση του αδιάσπαστου (και άρα ραδιενεργού) πληθυσμού με το πέρασμα του χρόνου



- **Μέσος χρόνος ζωής**

$$\tau = \frac{t_1 N_1 + t_2 N_2 + \dots}{N_1 + N_2 + \dots} = \frac{\int_0^{\infty} t N(t) dt}{\int_0^{\infty} N(t) dt} = \frac{N_0 \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{N_0 \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\lambda^{-2}}{\lambda^{-1}} = \frac{1}{\lambda} \rightarrow \boxed{\lambda = \frac{1}{\tau}}$$

- **Χρόνος ημίσειας ζωής: $T_{1/2}$**

$$N(t=T_{1/2}) = N_0/2 \rightarrow \dots$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \approx \frac{0.693}{\lambda} \approx 0.693\tau$$

Radioactive
half-life

Radioactive
decay constant

Mean
lifetime

Πιο αναλυτικά ο
υπολογισμός για τον
μέσο χρόνο ζωής...

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt} = \frac{\int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt}{\frac{1}{\lambda} [-e^{-\lambda t}]_0^{\infty}} = \lambda \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dt$$

Το ολοκλήρωμα αυτό μπορεί να βρεθεί με
ολοκλήρωση κατά μέρη.

Βολική είναι η αντικατάσταση $x = \lambda t$, οπότε:

$$\langle t \rangle = \tau = \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} x e^{-x} dx$$

Για την ολοκλήρωση κατά μέρη ισχύει: $u dv = d(uv) - v du$

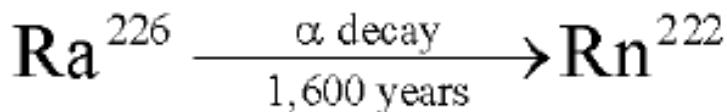
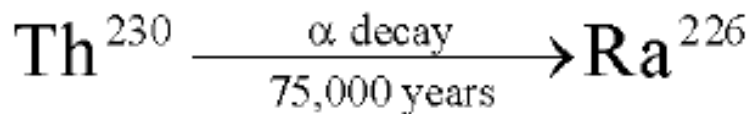
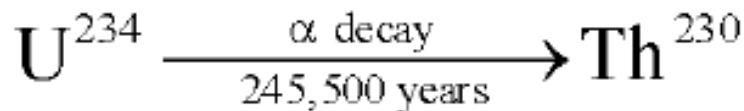
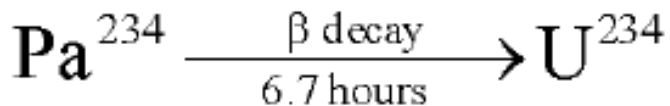
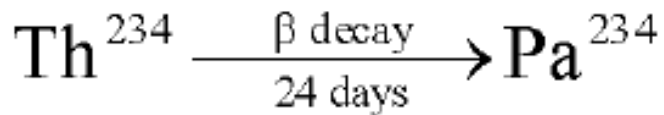
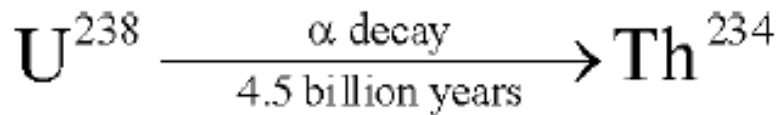
όπου στην περίπτωση μας: $u = x \quad du = dx$

$$dv = e^{-x} dx \quad v = -e^{-x}$$

Οπότε για το ολοκλήρωμα προκύπτει:

$$\begin{aligned} \langle t \rangle = \tau &= -x e^{-x} \Big|_0^{\infty} - \frac{1}{\lambda} \int_0^{\infty} -e^{-x} dx \\ &= 0 + \frac{1}{\lambda} [-e^{-x}]_0^{\infty} = \frac{1}{\lambda} \end{aligned}$$

Ο χρόνος ημιζωής (half-life) μερικών φυσικών ραδιενεργών πυρήνων



• Πολλά ραδιενεργά υλικά διασπώνται διαδοχικά σε μια **σειρά πυρηνικών αντιδράσεων**.

• Έτσι, το αέριο Ραδόνιο (Radon) προέρχεται από το Ουράνιο του εδάφους.

• Μεσολαβούν 6 διαδοχικές αντιδράσεις για να διασπασθεί το U-238 σε Rn-222.

Άσκηση

Ποια η ενεργότητα (δηλαδή ο ρυθμός ραδιενεργών διασπάσεων) που δίνει 1g ^{226}Ra ; (ο χρόνος ημισείας ζωής του είναι: $T_{1/2}=1670 \text{ y} \approx 1.6 \times 10^3 \times 3.1 \times 10^7 \text{ s} \approx 5 \times 10^{10} \text{ s}$)

Λύση

$$\lambda = \ln 2 / T_{1/2} = 0.693 / (5 \times 10^{10} \text{ s}) \approx 1.4 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

$$1\text{g περιέχει } N_0 \approx 6 \times 10^{23} / 226 \approx 2.7 \times 10^{21} \text{ πυρήνες}$$

Η ενεργότητα (στην αρχή δημιουργίας του δείγματος, $t=0$) θα είναι:

$$I(t=0) = I_0 = \lambda N_0 \approx 1.4 \times 10^{-11} \times 2.7 \times 10^{21} / \text{s} \approx \mathbf{3.7 \times 10^{10} \text{ διασπάσεις/sec}}$$

$$\text{ή } \mathbf{3.7 \times 10^{10} \text{ Bq} = 1 \text{ Ci}}$$

Μονάδες ενεργότητας

Curie

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ διασπ./s}$$

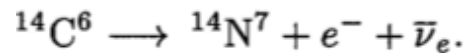
Becquerel

$$1\text{Bq} = 1 \text{ διασπ./s}$$

ΕΦΑΡΜΟΓΗ: Ραδιοχρονολόγηση με ^{14}C

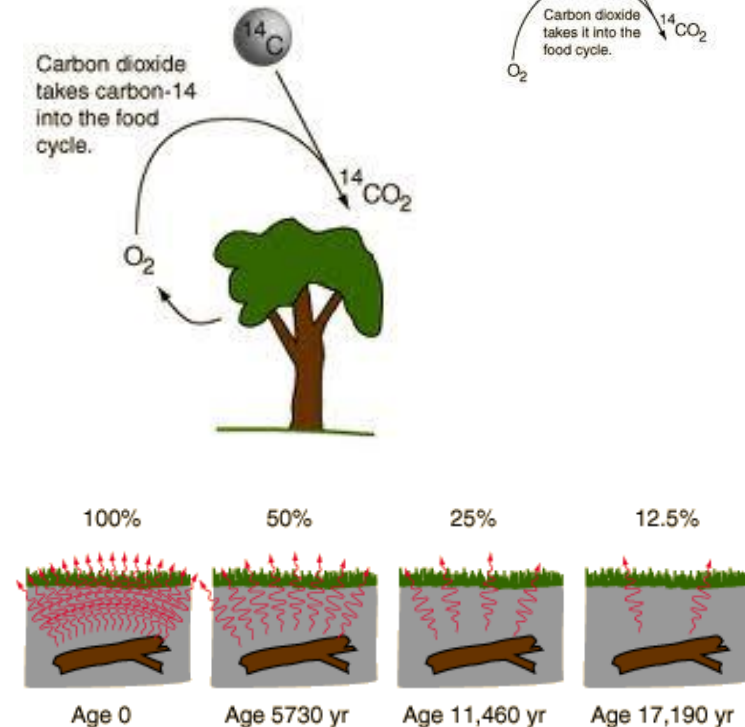
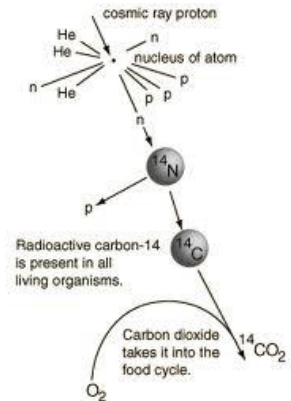
Το ισότοπο ^{14}C παράγεται από την αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινοβολίας με το άζωτο ^{14}N της ατμόσφαιρας. $^{14}\text{N}^7 + n \rightarrow ^{14}\text{C}^6 + p$.

Ο ^{14}C είναι β^- ραδιενεργός, με $T_{1/2} = 5730$ έτη.



Οι ζωντανοί οργανισμοί καταναλώνουν CO_2 το οποίο περιέχει τα ισότοπα ^{12}C και ^{14}C . Η αναλογία πυρήνων $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ στους ζώντες οργανισμούς είναι σταθερή και γνωστή (1.3×10^{-12}).

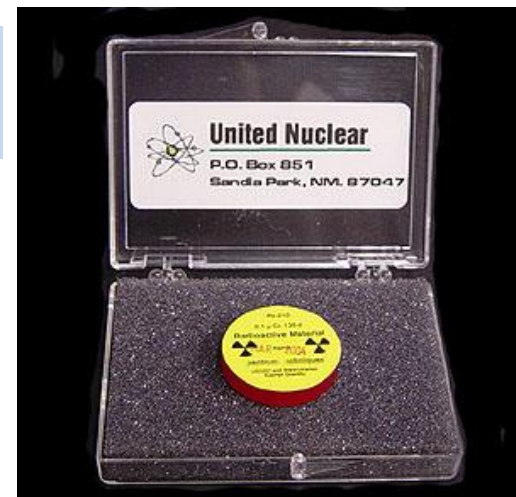
Με το τέλος της ζωής του οργανισμού, παύει η πρόσληψη του ραδιενεργού ^{14}C , και συνεχίζεται μόνο η διάσπασή του. Επομένως, η αναλογία πυρήνων $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ στο νεκρό υλικό, αρχίζει να μικραίνει συνεχώς, αφού το ^{14}C διασπάται και δεν αναπληρώνεται



Η χρονολόγηση στηρίζεται στη σύγκριση της ενεργότητας του ^{14}C στο δείγμα τώρα, σε σχέση με την ενεργότητα του ^{14}C στους ζωντανούς οργανισμούς.

ΕΡΓΑΣΙΑ - ΑΣΚΗΣΗ

Οι ραδιενεργές πηγές που χρησιμοποιούνται στις φοιτητικές ασκήσεις του εργαστηρίου Πυρηνικής Φυσικής του ΑΠΘ περιλαμβάνουν τα ισότοπα:
 ^{137}Cs , ^{22}Na και ^{54}Mn .



- 1) Ποιο είναι το φορτίο των πυρήνων τους και ποιος ο αριθμός των πρωτονίων και νετρονίων που τους αποτελούν;
- 2) Ερευνείτε την βιβλιογραφία για να βρείτε τις ατομικές τους μάζες (σε amu) και την ισοδύναμη ενέργειά τους (σε GeV).
- 3) Ερευνείτε την βιβλιογραφία για να βρείτε το είδος της ραδιενεργού ακτινοβολίας που εκπέμπουν και τη μέγιστη ενέργεια των σωματιδίων της για το κάθε ραδιο-ισότοπο. Κατόπιν υπολογίστε την ταχύτητα των σωματιδίων αυτών και το μήκος κύματος στο οποίο αντιστοιχούν.
- 4) Ερευνείτε την βιβλιογραφία για να βρείτε τους χρόνους ημιζωής τους. Γνωρίζοντας τους χρόνους ημιζωής τους, υπολογίστε πόση μάζα από το κάθε ισότοπο πρέπει να περιλαμβάνει κάθε μία από τις πηγές αν θέλουμε η ενεργότητά της να είναι 50 kBq.