

Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική και τη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων
Θεόδωρος Μερτζιμέκης

τελευταία ανανέωση: 8 Ιουνίου 2026, 14:05

Λυμένες ασκήσεις

Τα προβλήματα και οι συνοδευτικές λύσεις που ακολουθούν έχουν διδαχθεί στο μάθημα κορμού “Εισαγωγή στην Πυρηνική Φυσική και τη Φυσική Στοιχειωδών Σωματιδίων” (10ΕΚΑ04) και αποτελούν συμπληρωματικό υλικό στην ύλη του μαθήματος.

Πρόβλημα [01]

Να αποδείξετε ότι:

$$|\alpha\rangle \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} = 1.44 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$$

$$|\beta\rangle \hbar c = 197 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$$

$|\gamma\rangle$ Ποιο είναι το πηλίκο του $[\alpha.] / [\beta.]$;

Λύση

$|\alpha\rangle$ Γνωρίζουμε τις παρακάτω τιμές των σταθερών και τις αντιστοιχίες μονάδων

- ▶ $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$
- ▶ $\epsilon_0 = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1} = 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}$
- ▶ $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ J}$
- ▶ $1 \text{ MeV} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ J} = 1.602 \cdot 10^{-13} \text{ N m}$
- ▶ $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- ▶ $1 \text{ MeV}\cdot\text{fm} = 1.602 \cdot 10^{-28} \text{ N m}^2 = 1.602 \cdot 10^{-28} \text{ J m}$

οπότε με αντικατάσταση βρίσκουμε:

$$\begin{aligned} \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} &= \frac{(1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(4\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2})} \\ &= \frac{1.602 \cdot 1.602 \cdot 10^{-38} \text{ C}^2}{(4\pi \cdot 8.854 \cdot 10^{-12}) \text{ C}^2 \text{ N}^{-1} \text{ m}^{-2}} \\ &\approx 1.44 \cdot 10^{-28} \cdot 1.602 \text{ N m}^2 \\ &= 1.44 \text{ MeV fm} \end{aligned}$$

$|\beta\rangle$ Ομοίως, $\hbar = h/2\pi$, όπου $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J s}$ και η ταχύτητα του φωτός: $c = 2.998 \times 10^8 \text{ m/s}$.
Με αντικατάσταση:

$$\hbar c = \frac{h}{2\pi} c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s} \frac{6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}}{2\pi} \approx 197.3 \text{ MeV fm}$$

|γ> Το κλάσμα του [α] ως προς [β] είναι ίσο:

$$\frac{\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0}}{\hbar c} \approx \frac{1}{137}$$

Η τιμή αυτή είναι η σταθερά λεπτή υφής, α



Πρόβλημα [02] Δείγμα ^{212}Pb παρουσιάζει ενεργότητα η οποία μετريέται σε 10^6 διασπάσεις/min.

Αν γνωρίζετε ότι $t_{1/2}(^{212}\text{Pb})=10.64 \text{ h}$:

|α> Ποια η ενεργότητά του μετά από δύο ώρες σε Bq;

|β> Πόσα άτομα μολύβδου έχουν απομείνει τη στιγμή εκείνη στο δείγμα;

Λύση

Από τα δεδομένα, υπολογίζουμε τη σταθερά διάσπασης λ:

$$\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{10.64 \text{ h}} = 11.33 \text{ h}^{-1} = \frac{\ln 2}{10.64 \cdot 3600 \text{ s}} = 0.18 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

|α> Με αρχική ενεργότητα $A_0 = \frac{10^6}{60 \text{ s}} = \frac{1}{6} \cdot 10^5 \text{ Bq}$, η ενεργότητα μετά από 2 ώρες θα είναι:

$$\begin{aligned} A(2\text{h}) &= A_0 \cdot e^{-\lambda t} = \frac{1}{6} \cdot 10^5 e^{-\frac{\ln 2}{10.64 \text{ h}} \cdot 2\text{h}} \\ &= \frac{1}{6} \cdot 10^5 e^{-0.1303} \approx \frac{1}{6} \cdot 10^5 \cdot 0.877 \\ &= 0.146 \cdot 10^5 \text{ Bq} \end{aligned}$$

|β> Επομένως, οι εναπομείναντες πυρήνες ^{212}Pb μπορούν να βρεθούν από τον ορισμό της ενεργότητας:

$$A = \lambda N \Rightarrow N = A/\lambda = \frac{0.146 \cdot 10^5}{0.18 \cdot 10^{-4}} \approx 0.89 \cdot 10^9$$



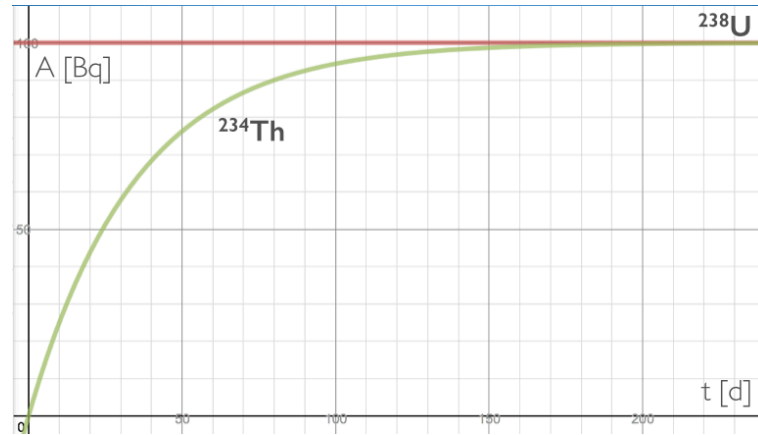
Πρόβλημα [03]

Να σχεδιαστούν στο ίδιο διάγραμμα οι καμπύλες εξέλιξης της ενεργότητας του μητρικού και θυγατρικού πυρήνα στη διάσπαση $^{238}\text{U} \longrightarrow ^{234}\text{Th}$ για χρονικό διάστημα 10 χρόνων ημιζωής του ^{234}Th .

Δίνονται: $t_{1/2}(^{238}\text{U}) = 1.632 \cdot 10^{12} \text{ d}$, $t_{1/2}(^{234}\text{Th}) = 24.10 \text{ d}$, $A(^{238}\text{U}) = 100 \text{ kBq}$

Λύση

Οι ενεργότητες μπορούν να βρεθούν μέσω των εξισώσεων Bateman. Ο μητρικός πυρήνας ακολουθεί τον απλό νόμο εκθετικής διάσπασης, αλλά καθότι πολύ μακροβιότερος του θυγατρικού, η ενεργότητά του παραμένει προσεγγιστικά σταθερή στο χρονικό διάστημα που ζητείται. Παράλληλα, ο θυγατρικός αυξάνεται και λόγω της συνθήκης ισορροπίας που ισχύει, θα προσεγγίσει την ενεργότητα του μητρικού σε μεγάλους χρόνους $t \geq 10t_{1/2}({}^{234}\text{Th})$. Δείτε τις καμπύλες στο Σχ. 1.

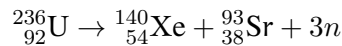


Σχήμα 1: Η χρονική εξέλιξη της ενεργότητας μητρικού–θυγατρικού πυρήνα



Πρόβλημα [04]

Στην παρακάτω αντίδραση που περιγράφει τη σχάση του ισότοπου ${}^{236}\text{U}$ να υπολογιστεί η συνολική εκλυόμενη ενέργεια.



Δίνονται: $BE({}^{236}\text{U})/A = 7.6 \text{ MeV}$, $BE({}^{140}\text{Xe})/A = 8.4 \text{ MeV}$, $BE({}^{93}\text{Sr})/A = 8.7 \text{ MeV}$

Λύση

Η ζητούμενη ενέργεια προκύπτει από τη διαφορά ανάμεσα στις ενέργειες σύνδεσης, πριν και μετά την αντίδραση. Δηλαδή:

$$Q = BE_f - BE_i$$

Η παραπάνω γίνεται:

$$Q = 140 \cdot 8.4 + 93 \cdot 8.7 - 236 \cdot 7.6$$

$$Q = 1176 + 809.1 - 1793.6$$

$$Q = 191.5 \text{ MeV}$$

Σημειώνεται ότι τα νετρόνια που εκλύονται δεν έχουν ενέργεια σύνδεσης (είναι μεμονωμένα σωματίδια) και επομένως δε συμπεριλαμβάνονται στην παραπάνω εξίσωση.



Πρόβλημα [05]

Να υπολογιστεί η ενέργεια σύνδεσης του τελευταίου νετρονίου στο ισότοπο ^{13}C .
Δίνονται: $m[^{13}\text{C}] = 13.00335u$, $m[^{12}\text{C}] = 12.00000u$, $m[n] = 1.00866u$

Λύση

Η απάντηση προκύπτει από τη διερεύνηση του ενεργειακού ισοζυγίου, πριν και μετά την αφαίρεση του νετρονίου. Η διαφορά στην ενέργεια είναι:

$$\begin{aligned}\Delta E &= c^2 \cdot (m[^{12}\text{C}] + m[n] - m[^{13}\text{C}]) \\ &= c^2 \cdot (12.00000u + 1.00866u - 13.00335u) \\ &= c^2 \cdot 0.00531u = c^2 \cdot 0.00531 \cdot 931.49 \text{ MeV}/c^2 \\ &= 4.946 \text{ MeV}\end{aligned}$$



Πρόβλημα [06]

Στην απαρχή του ηλιακού συστήματος, μπορεί να υποτεθεί ότι δημιουργήθηκαν ποσότητες των ισωτόπων ^{238}U και ^{235}U με αναλογία των ενεργοτήτων τους ίση με 1:1. Δεδομένου ότι σήμερα η αναλογία έχει διαμορφωθεί αντίστοιχα σε 138:1, πόσα χρόνια πριν δημιουργήθηκε το ηλιακό σύστημα; Δίνονται:

$$t_{1/2}(^{238}\text{U}) = 4.468 \text{ Ga}$$

$$t_{1/2}(^{235}\text{U}) = 0.704 \text{ Ga}$$

Λύση

Αν το χρονικό διάστημα από την αρχή του ηλιακού συστήματος είναι t_s , τότε οι σημερινές ενεργότητες είναι:

$$\begin{aligned}A(^{238}\text{U}) &= A_o^{238} e^{-\lambda_{238} t_s} \\ A(^{235}\text{U}) &= A_o^{235} e^{-\lambda_{235} t_s}\end{aligned}$$

Με διαίρεση κατά μέλη και με δεδομένο $A_o^{238} = A_o^{235}$, έχουμε:

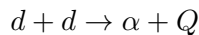
$$\begin{aligned}138 &= e^{-(\lambda_{238} - \lambda_{235}) t_s} \\ \ln 138 &= (\lambda_{235} - \lambda_{238}) t_s \\ 4.927 &= \left(\frac{\ln 2}{t_{1/2}^{235}} - \frac{\ln 2}{t_{1/2}^{238}} \right) t_s \\ 4.927 &= \left(\frac{\ln 2}{0.704 \cdot 10^9} - \frac{\ln 2}{4.468 \cdot 10^9} \right) t_s \\ 4.927 \cdot 10^9 &= 1.1966 (\ln 2) t_s \\ t_s &= 5.94 \cdot 10^9 \text{ a}\end{aligned}$$



Πρόβλημα [07] Ποια είναι η ενέργεια που απελευθερώνεται όταν δύο πυρήνες δευτερίου σχηματίζουν έναν πυρήνα ηλίου-4 (σωματίο α); Δίνονται: $BE(D)/A = 1.112 \text{ MeV}$ και $BE(\alpha)/A = 7.074 \text{ MeV}$

Λύση

Η αντίδραση σύντηξης των δευτερίων για το σχηματισμό ηλίου είναι:



Εξυπακούεται ότι $B = A \cdot \frac{BE}{A}$. Επομένως, με απλή αντικατάσταση:

$$B(d) = 2 \cdot 1.112 \text{ MeV} = 2.224 \text{ MeV} \text{ και}$$

$$B(\alpha) = 4 \cdot 7.074 \text{ MeV} = 28.296 \text{ MeV}$$

$$\text{Από το ενεργειακό ισοζύγιο, προκύπτει: } Q = (28.296 - 2 \cdot 2.224) \text{ MeV} = 23.85 \text{ MeV}$$



Πρόβλημα [08]

Να υπολογιστεί η ενέργεια διαχωρισμού S_n για τα ισότοπα ^{236}U και ^{239}U . (Χρησιμοποιήστε τον ημ εμπειρικό τύπο της μάζας για την εύρεση της ενέργειας σύνδεσης.)

Λύση

Η ενέργεια διαχωρισμού του νετρονίου είναι η ενέργεια αφαίρεσης του τελευταίου νετρονίου από τον πυρήνα. Επομένως, τα τελικά προϊόντα είναι το εκπεμπόμενο νετρόνιο (με ενέργεια σύνδεσης ίση με το μηδέν) και το ισότοπο του αρχικού πυρήνα με ένα νετρόνιο λιγότερο σε σχέση με το αρχικό. Έτσι:

$$S_n = BE(Z, A) - BE(Z, A - 1)$$

Με χρήση του ημ εμπειρικού τύπου (απαιτείται αναλυτικός υπολογισμός) και εφαρμογή στην παραπάνω σχέση, έχουμε:

$$S_n(^{236}\text{U}) = BE(^{236}\text{U}) - BE(^{235}\text{U}) = 1789.462 - 1782.691 = 6.771 \text{ MeV}$$

και

$$S_n(^{239}\text{U}) = BE(^{239}\text{U}) - BE(^{238}\text{U}) = 1805.905 - 1801.064 = 4.841 \text{ MeV}$$

Οι αντίστοιχες πειραματικές τιμές είναι 6.546 MeV και 4.806 MeV .

Χρήσιμα εργαλεία:

<https://nuclearbindingenergy.info/>

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3>



Πρόβλημα [09]

Χρησιμοποιώντας τον τύπο για το ελάχιστο της παραβολής σταθερότητας, να υπολογίσετε τον ατομικό αριθμό που αντιστοιχεί σε $A=10, 27, 59, 236$. Πώς συγκρίνετε τα αποτελέσματά σας με τα στοιχεία στη βιβλιογραφία;

Λύση

Ο τύπος για το ελάχιστο της παραβολής σταθερότητας είναι:

$$Z = \frac{2A}{4 + \left(\frac{a_C}{a_{sym}}\right) A^{2/3}}$$

Οι τιμές των παραμέτρων είναι $a_C = 0.70877 \text{ MeV}$ και $a_{sym} = 23.19 \text{ MeV}$.

Με αντικατάσταση των δεδομένων τιμών του A , έχουμε αντίστοιχα τις τιμές:

Στοιχείο B ($Z=5$): $A = 10 \rightarrow Z = 4.83$

Στοιχείο Al ($Z=13$): $A = 27 \rightarrow Z = 12.63$

Στοιχείο Co ($Z=27$): $A = 59 \rightarrow Z = 26.44$

Στοιχείο U ($Z=92$): $A = 236 \rightarrow Z = 92.33$



Πρόβλημα [10]

Με βάση τον ημειμπειρικό τύπο της μάζας να υπολογίσετε την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για τα ισότοπα ^{10}B , ^{27}Al , ^{59}Co , και ^{236}U . Πώς συγκρίνονται τα αποτελέσματα με τον πίνακα;

Λύση

Με χρήση της ενέργειας συνδέσεως ανά νουκλεόνιο (δείτε και Σχ. 2), τα ζητούμενα ισότοπα αντιστοιχούν σε:

^{10}B ($Z=5, A=10$): $BE/A = 6.75$

^{27}Al ($Z=13, A=27$): $BE/A = 8.22$

^{59}Co ($Z=27, A=59$): $BE/A = 8.73$

^{236}U ($Z=92, A=236$): $BE/A = 7.6$

Οι παραπάνω τιμές έχουν υπολογιστεί σε MeV/A . Σημειώνεται ότι είναι πιθανόν να υπάρχουν διαφορές με την εξίσωση AME2012 που έχει δοθεί στο μάθημα λόγω στρογγυλοποίησης.



Πρόβλημα [11] Για το δυναμικό Yukawa με $V_0 = 40 \text{ MeV}$ και $R = 1.5 \text{ fm}$ να υπολογιστεί ο λόγος ανάμεσα στο πυρηνικό δυναμικό και το δυναμικό Coulomb για αποστάσεις $r=1,2,4,8$ και 16 fm

Λύση Το δυναμικό Yukawa δίνεται από τον τύπο:

Element	Z	N	A	Atomic mass M_A (u)	Mass excess $M_A - A$ (μu)	Mass defect ΔM_A (μu)	Binding energy E_B (MeV)	E_B/A (MeV/A)
n	0	1	1	1.008 665	8 665	0	-	-
H	1	0	1	1.007 825	7 825	0	-	-
D	1	1	2	2.014 102	14 102	-2 388	2.22	1.11
T	1	2	3	3.016 049	16 049	-9 106	8.48	2.83
He	2	1	3	3.016 029	16 029	-8 286	7.72	2.57
He	2	2	4	4.002 603	2 603	-30 377	28.30	7.07
He	2	4	6	6.018 886	18 886	-31 424	29.27	4.88
Li	3	3	6	6.015 121	15 121	-34 348	32.00	5.33
Li	3	4	7	7.016 003	16 003	-42 132	39.25	5.61
Be	4	3	7	7.016 928	16 928	-40 367	37.60	5.37
Be	4	5	9	9.012 182	12 182	-62 442	58.16	6.46
Be	4	6	10	10.013 534	13 534	-69 755	64.98	6.50
B	5	5	10	10.012 937	12 937	-69 513	64.75	6.48
B	5	6	11	11.009 305	9 305	-81 809	76.20	6.93
C	6	6	12	12.000 000	0	-98 940	92.16	7.68
N	7	7	14	14.003 074	3 074	-112 356	104.7	7.48
O	8	8	16	15.994 915	-5 085	-137 005	127.6	7.98
F	9	10	19	18.998 403	-1 597	-158 671	147.8	7.78
Ne	10	10	20	19.992 436	-7 564	-172 464	160.6	8.03
Na	11	12	23	22.989 768	-10 232	-200 287	186.6	8.11
Mg	12	12	24	23.985 042	-14 958	-212 837	198.3	8.26
Al	13	14	27	26.981 539	-18 461	-241 495	225.0	8.33
Si	14	14	28	27.976 927	-23 073	-253 932	236.5	8.45
P	15	16	31	30.973 762	-26 238	-282 252	262.9	8.48
K	19	20	39	38.963 707	-36 293	-358 266	333.7	8.56
Co	27	32	59	58.933 198	-66 802	-555 355	517.3	8.77
Zr	40	54	94	93.906 315	-93 685	-874 591	814.7	8.67
Ce	58	82	140	139.905 433	-94 567	-1 258 941	1 172.7	8.38
Ta	73	108	181	180.947 993	-52 007	-1 559 045	1 452.2	8.02
Hg	80	119	199	198.968 254	-31 746	-1 688 872	1 573.2	7.91
Th	90	142	232	232.038 051	38 051	-1 896 619	1 766.7	7.62
U	92	143	235	235.043 924	43 924	-1 915 060	1 783.9	7.59
U	92	144	236	236.045 563	45 563	-1 922 087	1 790.4	7.59
U	92	146	238	238.050 785	50 785	-1 934 195	1 801.7	7.57
Pu	94	146	240	240.053 808	53 808	-1 946 821	1 813.5	7.56

Σχήμα 2: Ενέργειες σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για διάφορα ισότοπα

$$V(r) = -V_o \frac{e^{-r/R}}{r/R}$$

ενώ το δυναμικό Coulomb από τη γνωστή σχέση:

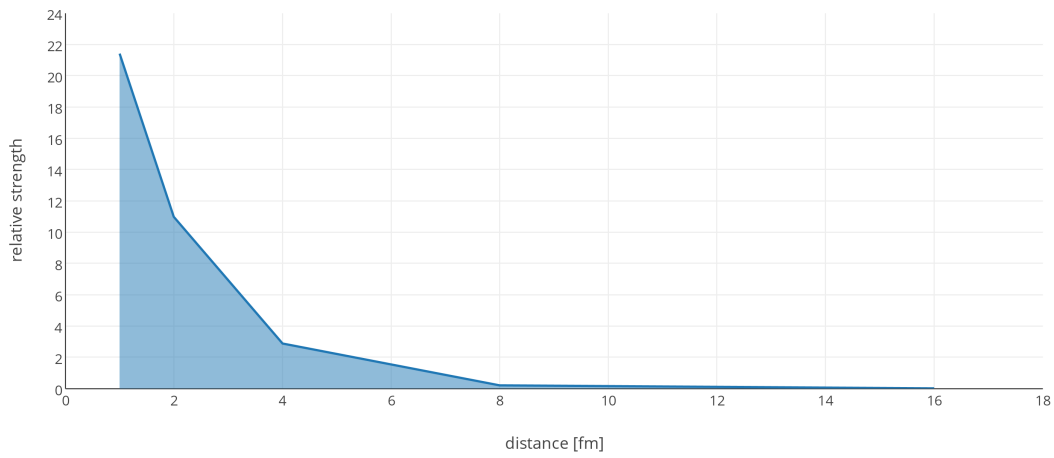
$$V(r) = -\frac{1}{4\pi\epsilon_o} \frac{Ze^2}{r}$$

Επομένως για πρωτόνιο ($Z=1$) και επειδή $\frac{e^2}{4\pi\epsilon_o} = 1.44 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$ έχουμε τον Πιν. 1 και το Σχ. 3.

r [fm]	V_{nuc} [MeV]	V_C [MeV]	ratio
1	-30.805	-1.44	21.4
2	-7.908	-0.72	10.98
4	-1.042	-0.36	2.89
8	-0.036	-0.18	0.20
16	≈ 0	-0.09	≈ 0

Πίνακας 1: Αναλογία δυναμικού Yukawa ως προς Coulomb

Παρατήρηση: είναι εμφανής η σχετική ισχύς των δύο δυναμικών (αλληλεπιδράσεων) εντός του πυρήνα, η οποία κυμαίνεται στις 10-100 φορές υψηλότερη για το πυρηνικό δυναμικό.



Σχήμα 3: Σχετική ισχύς δυναμικών Yukawa και Coulomb ως συνάρτηση της απόστασης από τον πυρήνα.



Πρόβλημα [12]

Να βρεθεί η μέση ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για το ισότοπο ^{58}Fe με χρήση του ημειμπειρικού τύπου της μάζας. Να υπολογιστούν ξεχωριστά οι όροι που συνεισφέρουν.

Λύση

Σύμφωνα με την εξίσωση της ενέργειας σύνδεσης (AME2012):

$$BE(Z, A) = a_v A - a_s A^{2/3} - a_c \frac{Z^2}{A^{1/3}} - a_{sym} \frac{(A - 2Z)^2}{A} - \delta \cdot a_p A^{-1/2}$$

όπου:

$$a_v = 15.6372 \text{ MeV}$$

$$a_s = 17.2819 \text{ MeV}$$

$$a_c = 0.70877 \text{ MeV}$$

$$a_{sym} = 23.19 \text{ MeV}$$

$$a_p = 12.839 \text{ MeV}$$

Με αντικατάσταση προκύπτει αντίστοιχα ότι:

$$\text{όρος όγκου} = +906.9576 \text{ MeV}$$

$$\text{όρος επιφάνειας} = - 258.9466 \text{ MeV}$$

$$\text{όρος Coulomb} = - 123.7778 \text{ MeV}$$

$$\text{όρος ασυμμετρίας} = - 14.39 \text{ MeV}$$

$$\text{όρος ζεύγους} (\delta = -1 \text{ γιατί είναι άρτιος άρτιος}) = +1.686 \text{ MeV}$$

και συνολική ενέργεια σύνδεσης

$$B(26, 58) = 511.529 \text{ MeV}$$

ή ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο:

$$B(26, 58)/58 = 8.819 \text{ MeV/A}$$



Πρόβλημα [13] Να συμπληρωθούν / γραφούν πλήρως οι παρακάτω διεργασίες:

$$p + {}^{112}_{48}\text{Cd} \rightarrow \gamma + \dots$$

$$\alpha + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \dots$$

$${}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{93}_{38}\text{Sr} + \dots$$

$$\text{διάσπαση } \alpha \text{ του } {}^{230}_{90}\text{Th}$$

$$\text{διάσπαση } \beta^- \text{ του } {}^{95}_{41}\text{Zr}$$

$$\text{διάσπαση } \beta^+ \text{ του } {}^{17}_9\text{F}$$

Λύση

Με εφαρμογή των βασικών αρχών διατήρησης (Q, B κοκ) έχουμε:

$${}_1^1\text{p} + {}^{112}_{48}\text{Cd} \rightarrow \gamma + {}^{113}_{49}\text{In}$$

$${}_2^4\text{He} + {}^{12}_6\text{C} \rightarrow {}^{16}_8\text{O} + \gamma$$

$${}^{236}_{92}\text{U} \rightarrow {}^{140}_{54}\text{Xe} + {}^{93}_{38}\text{Sr} + 3n$$

$${}^{230}_{90}\text{Th} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^{226}_{88}\text{Ra}$$

$${}^{95}_{40}\text{Zr} \rightarrow {}^{95}_{41}\text{Nb} + e^- + \bar{\nu}_e$$

$${}^{17}_9\text{F} \rightarrow {}^{17}_{10}\text{Ne} + e^- + \bar{\nu}_e$$



Πρόβλημα [14]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία των ^{38}Cl , ^{26}Al , ^{56}Co

Λύση

$|\alpha\rangle \ ^{38}_{17}\text{Cl}$ ($Z=17$, $A=38$, επομένως $N=A-Z=21$)

Η διαμόρφωση της θεμελιώδους στάθμης για τα πρωτόνια (π) και τα νετρόνια (ν), αντίστοιχα, είναι:

$$\begin{aligned}\pi & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^1 \\ \nu & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^1\end{aligned}$$

δηλ. δύο ασυζευκτα (περιττά) σωμάτια, το μεν πρωτόνιο σε στάθμη με $j = l - 1/2$, το δε νετρόνιο σε στάθμη με $j = l + 1/2$. Το ολικό σπιν της συγκεκριμένης διαμόρφωσης εμπίπτει στον **κανόνα 1** των Brennan-Bernstein, δηλ. $J = |j_\pi - j_\nu| = |3/2 - 7/2| = 2$

Οι αντίστοιχες ομοτιμίες είναι $P = P^\pi \cdot P^\nu = (-1)^2 \cdot (-1)^3 = (-1)^5 = (-1)$, κάνοντας χρήση του ότι $d \rightarrow l = 2$ και $f \rightarrow l = 3$.

Επομένως $J^\pi(^{38}\text{Cl}) = 2^-$

$|\beta\rangle \ ^{26}_{13}\text{Al}$ ($Z=13$, $A=26$, επομένως $N=A-Z=13$)

Η τελική διαμόρφωση για τα πρωτόνια (π) και τα νετρόνια (ν), αντίστοιχα, είναι:

$$\begin{aligned}\pi & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5 \\ \nu & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^5\end{aligned}$$

δηλ. δύο ασυζευκτες οπές, σε στάθμες με $j = l + 1/2$. Το ολικό σπιν της συγκεκριμένης διαμόρφωσης εμπίπτει στον **κανόνα 2** των Brennan-Bernstein, δηλ. $J = j_\pi + j_\nu = 5/2 + 5/2 = 5$. Αντίστοιχα, η ομοτιμία είναι:

$$P = P^\pi \cdot P^\nu = (-1)^2 \cdot (-1)^2 = (-1)^4 = (+1)$$

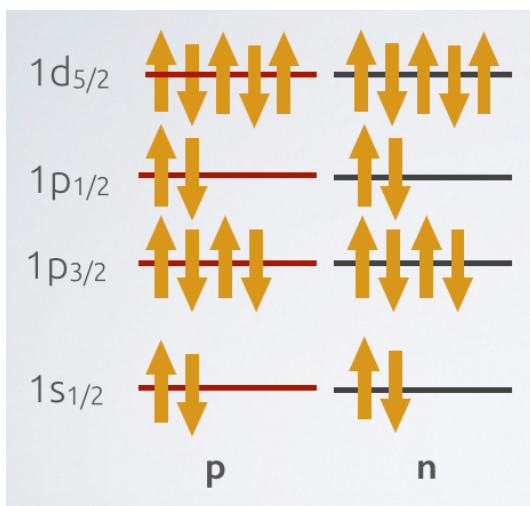
Άρα $J^\pi(^{26}\text{Al}) = 5^+$

$|\gamma\rangle \ ^{56}_{27}\text{Co}$ ($Z=27$, $A=56$, επομένως $N=A-Z=29$)

Η τελική διαμόρφωση για τα πρωτόνια (π) και τα νετρόνια (ν), αντίστοιχα (βλ. Σχ. 4), είναι:

$$\begin{aligned}\pi & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^7 \\ \nu & : (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8(1p_{3/2})^1\end{aligned}$$

Η κατάσταση αυτή αντιστοιχεί σε οπή $j = l + 1/2$ σε με σωματίο $j = l + 1/2$, δηλ. εφαρμόζεται ο 3ος κανόνας Brennan-Bernstein: $J = j_1 + j_2 - 1 = 7/2 + 3/2 - 1 = 4$. Και αντίστοιχα η ομοτιμία είναι:



Σχήμα 4: Διάταξη πρωτονίων και νετρονίων σε μονοσωματιδιακές στάθμες του ^{26}Al

$$P = P^\pi \cdot P^\nu = (-1)^3 \cdot (-1)^1 = (-1)^4 = (+1)$$

δηλ. η βασική στάθμη είναι: $J^\pi(^{56}\text{Co}) = 4^+$



Πρόβλημα [15]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία του ^{198}Au

Λύση

$^{198}_{79}\text{Au}$ ($Z=79$, $A=198$, επομένως $N=A-Z=119$)

Για τα πρωτόνια, απαιτούνται τρία ακόμη για να συμπληρωθεί ο φλοιός $Z=82$, ο οποίος αντιστοιχεί στη συμπληρωμένη στάθμη ($1h_{11/2}$) ($h \rightarrow l = 5$, δηλ. στάθμη με $j = l + 1/2$). Αντίστοιχα, τα νετρόνια έχουν 7 νετρόνια στη στάθμη ($1i_{13/2}$) ($i \rightarrow l = 6$, δηλ. ξανά στάθμη με $j = l + 1/2$).

$$\pi : [\dots](1h_{11/2})^9$$

$$\nu : [\dots](1i_{13/2})^7$$

Στην απλούστερη θεώρηση, τα ζεύγη π-π και ν-ν ακυρώνονται και τα ασύζευκτα σωματίδια καθορίζουν τη συμπεριφορά της στάθμης, δηλ. η τελική διαμόρφωση μπορεί να γραφεί ως:

$$\pi(1h_{11/2}) \oplus \nu(1i_{13/2})$$

Η περίπτωση αντιστοιχεί στον **κανόνα 2** των Brennan-Bernstein (δύο σωματίδια ή δύο σπές, $j_\pi = l_\pi \pm 1/2$, $j_\nu = l_\nu \pm 1/2$, οπότε $J = |j_\pi \pm j_\nu|$), δηλ.

$$J = |j_\pi + j_\nu| = |13/2 + 11/2| = 12$$

με ομοτιμία $(-1)^{5+6} = (-1)$.

Η αντίστοιχη ισομερής στάθμη θα είναι $J = |j_\pi - j_\nu| = |13/2 - 11/2| = 1$ με αρνητική ομοτιμία.

Σημειώνεται ότι με τα ίδια επιχειρήματα, μπορεί κάποιος να βρει το ίδιο ακριβώς αποτέλεσμα για τις βασικές στάθμες των ^{196}Au και ^{200}Au , τα οποία διαφέρουν μόνο κατά ένα ζεύγος νετρονίων στην ίδια στάθμη κι επομένως δε συνεισφέρει στην τελική διαμόρφωση της στάθμης.



Πρόβλημα [16]

Να βρείτε το ολικό σπιν και την ομοτιμία του ^{64}Cu

Λύση

$^{64}_{29}\text{Cu}$ ($Z=29$, $A=64$, επομένως $N=A-Z=35$)

Η διαμόρφωση της θεμελιώδους στάθμης για τα πρωτόνια (π) και τα νετρόνια (ν), αντίστοιχα, είναι:

$$\begin{aligned}\pi &: (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8(2p_{3/2})^1 \\ \nu &: (1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^4(1f_{7/2})^8(2p_{3/2})^4(1f_{5/2})^3\end{aligned}$$

δηλ. δύο ασύζευκτα (περιττά) σωμάτια, το μεν πρωτόνιο σε στάθμη με $j = l + 1/2$, το δε νετρόνιο σε στάθμη με $j = l - 1/2$. Το ολικό σπιν της συγκεκριμένης διαμόρφωσης εμπίπτει στον **κανόνα 1** των Brennan-Bernstein, δηλ. $J = |j_\pi - j_\nu| = |3/2 - 5/2| = 1$

Οι αντίστοιχες ομοτιμίες είναι $P = P^\pi \cdot P^\nu = (-1)^1 \cdot (-1)^3 = (-1)^4 = (+1)$, κάνοντας χρήση του ότι $p \rightarrow l = 1$ και $f \rightarrow l = 3$.

Επομένως $J^\pi(^{64}\text{Cu}) = 1^+$



Πρόβλημα [17]

Να βρείτε η μαγνητική διπολική ροπή του ^{17}O

Λύση

Το ^{17}O διαθέτει ένα παραπάνω νετρόνιο από το διπλά μαγικό ισότοπο ^{16}O . Το ασύζευκτο αυτό νετρόνιο βρίσκεται στο φλοιό νετρονίων $1d_{5/2}$, δηλ. σε φλοιό με $j = l + 1/2$.

Με απευθείας εφαρμογή του τύπου $\mu = \frac{1}{2}g_\nu\mu_N$ που αντιστοιχεί σε τέτοιο φλοιό, βρίσκει κανείς ότι:

$$\mu = \frac{1}{2} \cdot (-3.826)\mu_N = -1.913\mu_N$$

Η αντίστοιχη πειραματική τιμή του ^{17}O έχει μετρηθεί $-1.89379(9)\mu_N$.



Πρόβλημα [18]

Για το ^{177}Hf $Q=+3.0$ e-barns. Να υπολογιστεί ο λόγος των ημιαξόνων του πυρήνα

Λύση

$$Q/e = \frac{2}{5}Z(\alpha^2 - c^2)$$

Επομένως

$$\alpha^2 - c^2 = \frac{5Q/e}{2Z} = \frac{5 \cdot 3e \cdot 10^{-24} \text{cm}^2/e}{2 \cdot 72} = 1.042 \cdot 10^{-25} \text{cm}^2$$

Από την εξίσωση του ελλειψοειδούς:

$$R^2 = \frac{1}{2}(\alpha^2 + c^2)$$

όπου $R = R_o A^{1/3} = 1.2 \cdot 10^{-13} \cdot 177^{1/3} \text{ cm}$. Με αντικατάσταση:

$$\alpha^2 + c^2 = 2(1.2 \cdot 10^{-13} \text{cm} \cdot 177^{1/3})^2 = 9.079 \cdot 10^{-25} \text{cm}^2$$

Και τελικά, $\alpha = 7.11 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$, $c = 6.34 \cdot 10^{-13} \text{ cm}$, άρα:

$$a/c = 1.12$$



Πρόβλημα [19]

Να υπολογιστεί η ενέργεια ανάκρουσης του πυρήνα ^{69}Zn για την εσωτερική μετάβαση (IT) $\frac{9}{2}^+ \rightarrow \frac{1}{2}^+$. (Δίνεται η μάζα $M=68.297u$)

Λύση

Η ενέργεια ανάκρουσης του πυρήνα δίνεται από τη σχέση:

$$T_R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2}$$

Επομένως με αντικατάσταση (βρείτε την ενέργεια σε πίνακες ή στη βάση δεδομένων NUDAT):

$$T_R = \frac{0.439 \text{ keV}}{2 \times 68.297 \times 931.5 \text{ MeV}/c^2 \times c^2} = 1.5 \times 10^{-6} \text{ MeV}$$

Η τιμή της ενέργειας είναι αρκετές τάξεις μεγέθους μικρότερη από την ενέργεια του εκπεμπόμενου φωτονίου, επομένως θεωρείται αμελητέα σε υπολογισμούς.



Πρόβλημα [20]

Να υπολογιστεί η ενέργεια ανάκρουσης του πυρήνα ^{12}C ο οποίος εκπέμπει φωτόνιο ενέργειας 15.1 MeV.

Λύση

Η αποδιέγερση είναι: $^{12}\text{C}^* \rightarrow ^{12}\text{C} + \gamma$ με ενέργεια φωτονίου $E_\gamma = 15.1 \text{ MeV}$.

Παρόμοια με πριν:

$$T_R = \frac{E_\gamma^2}{2Mc^2} = \frac{15.1^2}{2 \times 12 \times 931.5} = 1.02 \times 10^{-2} \text{ MeV}$$

μιας και η μάζα του ^{12}C είναι εξ ορισμού ίση με 12 amu.



Πρόβλημα [21]

Με χρήση των κανόνων επιλογής να βρεθούν οι δυνατοί τρόποι ακτινοβολίας της αποδιέγερσης γ του ^{23}Na ($E_\gamma = 2080 \text{ keV}$) από την αρχική στάθμη $\frac{7}{2}^+$ στην τελική $\frac{3}{2}^+$.

Λύση

Για την αποδιέγερση $\frac{7}{2}^+ \rightarrow \frac{3}{2}^+$ του ^{23}Na , ισχύει ότι

$$|7/2 - 3/2| \leq L \leq 7/2 + 3/2 \Rightarrow 2 \leq L \leq 5$$

Επομένως, οι δυνατές τιμές του L είναι 2, 3, 4 και 5. Επειδή η ομοτιμία δεν αλλάζει κατά τη μετάβαση στάθμης, ο κανόνας επιλογής δίνει ως δυνατά πολύπολα τα:

$$E2, M3, E4, M5$$

Από αυτά, το υπερισχύον πολύπολο είναι το E2.



Πρόβλημα [22]

Η αποδιέγερση της ισομερούς στάθμης στο ισότοπο ^{69}Zn πραγματοποιείται με εκπομπή φωτονίου με $E_\gamma = 0.439 \text{ MeV}$. Να βρεθεί ο λόγος του μήκος κύματος του φωτονίου ως προς τη διάμετρο του πυρήνα.

Λύση

Για φωτόνιο ενέργειας E_γ , ισχύει $E_\gamma = h\nu$. Και άρα ισοδύναμα: $\nu = \frac{E_\gamma}{h}$.

Όμως ισχύει επίσης ότι:

$$\lambda\nu = c \Rightarrow \lambda \frac{E_\gamma}{h} = c$$

$$\lambda = \frac{hc}{E_\gamma} = \frac{\hbar c}{2\pi E_\gamma}$$

Με αντικατάσταση τιμών στο κλάσμα, $\hbar c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$, καταλήγουμε στο $\lambda = 2820 \text{ fm}$

Αντίστοιχα, η διάμετρος του πυρήνα είναι $D = 2R$ με $R = 1.2 \times A^{1/3} \text{ fm}$.

$$D = 2.4 \times 69^{1/3} = 9.84 \text{ fm}$$

Ο ζητούμενος λόγος είναι $\lambda_\gamma/D \approx 286$.



Πρόβλημα [23]

Με χρήση των κανόνων επιλογής να χαρακτηρίσετε τη μετάβαση από την ισομερή στάθμη στα $0.439 \text{ MeV} \left(\frac{9}{2}^+\right)$ του ^{69}Zn στη βασική στάθμη $\left(\frac{1}{2}^-\right)$. Κατόπιν, να υπολογιστούν οι εκτιμήσεις Weisskopf για τις επιτρεπόμενες μεταβάσεις και να συγκριθούν με τα πειραματικά δεδομένα.

Λύση

Με χρήση των κανόνων επιλογής:

$$\left| \frac{9}{2} - \frac{1}{2} \right| \leq L \leq \frac{9}{2} + \frac{1}{2}$$

δηλ. $L=4$ ή 5 . Ταυτόχρονα, η ομοτιμία μεταβάλλεται μεταξύ αρχικής και τελικής στάθμης, επομένως οι κανόνες επιλογής δίνουν ως δυνατά πολύπολα τα $M4$, $E5$. Από άποψη ισχύος, τα δύο αυτά πολύπολα είναι ανταγωνίστρια μεταξύ τους.

Σε ό,τι αφορά τις εκτιμήσεις Weisskopf, με απλή εφαρμογή των τύπων για $M4/E5$, έχουμε:

$$M4 : \lambda_{sp}(M4) = 3.27 \times 10^{-6} A^2 E_\gamma^9 = 7.66 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

$$E5 : \lambda_{sp}(E5) = 2.40 \times 10^{-12} A^{10/3} E_\gamma^{11} = 3.77 \times 10^{-10} \text{ s}^{-1}$$

Από τη βάση δεδομένων [NUDAT](#), βρίσκει κανείς ότι

$$\lambda_{exp}(M4) = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} = \frac{\ln 2}{14 \text{ h}} = 13.7 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

δηλ. $\lambda_{exp} \approx 2 \times \lambda_{sp}(M4)$

Η διαφορά ερμηνεύεται από την ύπαρξη περισσότερων του ενός ρευμάτων (σωματίων) εντός του πυρήνα, τα οποία συνεισφέρουν στη μετάβαση μεταξύ των σταθμών. Παρ'όλα αυτά, η συνεισφορά συλλογικών βαθμών ελευθερίας (συμμετοχή πολλών νουκλεονίων, μαζικά) είναι σχετική μικρή.



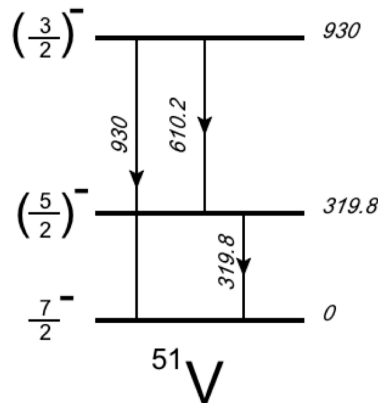
Πρόβλημα [24]

Το ισότοπο ^{51}V έχει βασική στάθμη με $J^\pi = \frac{7}{2}^-$, ενώ διαθέτει δύο διεγερμένες στάθμες, μία σε ενέργεια 319.8 keV και $J^\pi = \left(\frac{5}{2}^-\right)$ και μια σε ενέργεια 930 keV και $J^\pi = \left(\frac{3}{2}^-\right)$

- να σχεδιαστεί το ακριβές ενεργειακό διάγραμμα
- να βρεθούν όλες οι δυνατές αποδιεγέρσεις μεταξύ των σταθμών
- να καθοριστούν ποια πολύπολα ευθύνονται για αυτές

Λύση

Το ενεργειακό διάγραμμα εικονίζεται στο Σχ. 5 Με χρήση των κανόνων επιλογής, οι μεταβάσεις



Σχήμα 5: Το ενεργειακό διάγραμμα του ισότοπου ^{51}V σε χαμηλές ενέργειες

που εικονίζονται έχουν ως εξής:

$$\left(\frac{3}{2}\right)^- \rightarrow \left(\frac{7}{2}\right)^- / 930 \text{ keV:}$$

$$\Delta\pi = +, L = 2, 3, 4, 5$$

Επομένως: E2, M3, E4, M5. Κυρίαρχο είναι το E2

$$\left(\frac{3}{2}\right)^- \rightarrow \left(\frac{5}{2}\right)^- / 610.2 \text{ keV:}$$

$$\Delta\pi = +, L = 1, 2, 3, 4$$

Επομένως: M1, E2, M3, E4. Κυρίαρχα είναι τα M1, E2

$$\left(\frac{5}{2}\right)^- \rightarrow \frac{7}{2}^- / 319.8 \text{ keV:}$$

$$\Delta\pi = +, L = 1, 2, 3, 4, 5, 6$$

Επομένως: M1, E2, M3, E4, M5, E6. Κυρίαρχα είναι τα M1, E2



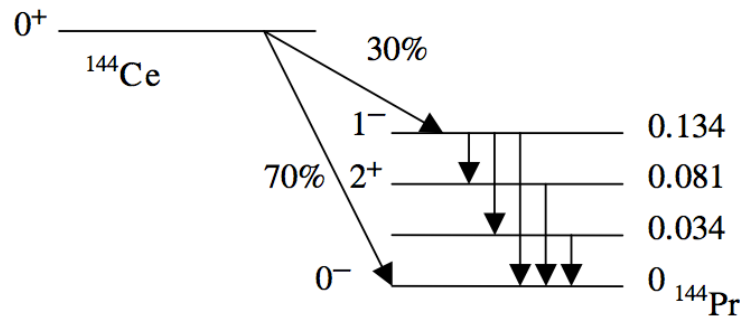
Πρόβλημα [25] Η αποδιέγερση β του ισοτόπου ^{144}Ce δίνεται στο Σχ. 6.

Ια> Τι είδους είναι η διάσπαση προς το επίπεδο με $I^\pi = 1^-$

Ιβ> Τι τιμή $\log ft$ περιμένει κανείς για αυτή τη διάσπαση;

Ιγ> Γιατί δεν καταγράφεται διάσπαση β προς το ενεργειακό επίπεδο με $I^\pi = 2^+$;

Λύση



Σχήμα 6: Αποδιέγερση β του ^{144}Ce

Ια> Υπάρχει αλλαγή σπιν κατά 1 μονάδα ($\Delta I=1$) και αλλαγή ομοτιμίας. Επομένως, είναι πρώτη απαγορευμένη.

Ιβ> Στην περίπτωση της πρώτης απαγορευμένης διάσπασης β , υπάρχει ένα εύρος τιμών του $\log ft \approx 6 - 10$.

Ιγ> Η περίπτωση της διάσπασης β για $0^+ \rightarrow 2^+$ δεν μπορεί να υπάρξει μιας και είναι μόνο επιτρεπτή ως δεύτερη απαγορευμένη. (Είναι $\Delta I=2$, χωρίς αλλαγή ομοτιμίας)



Πρόβλημα [26] Η εκπομπή ακτινοβολίας γ σε ένα πυρήνα που αποδιεγείρεται μέσω E2 παρουσιάζει γωνιακή κατανομή σύμφωνα με τη σχέση:

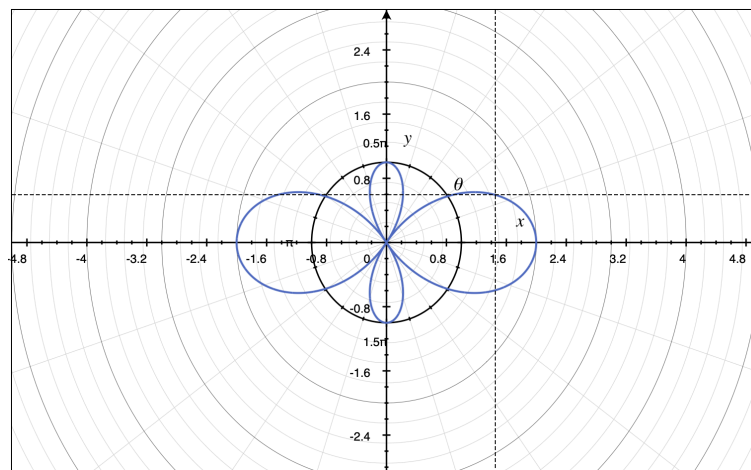
$$W(\theta) = 3 \cos^2 \theta - 1$$

όπου θ η πολική γωνία. (α) Να σχεδιάσετε σε πολικό χαρτί τη γωνιακή κατανομή (β) Σε ποια γωνία θα καταγράψει τη μέγιστη αλλαγή στις καταγραφόμενες ακτίνες γ ένας κινούμενος ανιχνευτής ο οποίος βρίσκεται σε σταθερή ακτίνα από το κέντρο;

Λύση

Ια> Η γωνιακή κατανομή εμφανίζεται στην Εικ. 7

Ιβ> Η μέγιστη αλλαγή συμπίπτει με το μέγιστο της παραγώγου $dW(\theta)/d\theta$. Επομένως, στο ακρότατο, $dW(\theta)/d\theta = 0$ ή ισοδύναμα $6 \sin \theta \cos \theta = 0$ που σημαίνει γωνίες $\theta=0$ ή 90 .



Σχήμα 7: Γωνιακή κατανομή E2



Πρόβλημα [27] Στο μέσο ανθρώπινο σώμα βάρους 67 kg, υπάρχει 18% άνθρακα. Δεδομένου ότι η συγκέντρωση ^{14}C ως προς το σύνολο του άνθρακα είναι ίση με $1.3 \cdot 10^{-12}$ και ο μέσος χρόνος ζωής του, $\tau = 8627$ a, να βρεθούν:

α> Η ενεργότητα του ^{14}C στο μέσο ανθρώπινο σώμα

β> Αν η ενεργότητα αυτή αντιστοιχεί στην αρχική ενεργότητα ενός αρχαιολογικού ευρήματος σε προϊστορικό τάφο, ενώ η σημερινή ενεργότητα μετριέται ίση με 440 Bq, πόσο παλιό είναι το εύρημα;

Λύση

α> Με τα δεδομένα του προβλήματος, το 18% είναι περίπου 12.06 kg άνθρακα. Η ποσότητα αυτή αντιστοιχεί σε:

$$12.06 \text{ kg} = 12060 \text{ g} \approx 10^3 \text{ mol} = 10^3 \cdot N_A$$

όπου $N_A = 6.022 \cdot 10^{23}$, ο αριθμός Avogadro

Με αναγωγή στη συγκέντρωση του ^{14}C , η ποσότητά του είναι ίση με:

$$N(^{14}\text{C}) = 10^3 \cdot 1.3 \cdot 10^{-12} N_A = 7.82 \cdot 10^{14}$$

άτομα ^{14}C . Μέσω του ορισμού της ενεργότητας:

$$A(^{14}\text{C}) = \frac{N(^{14}\text{C})}{\tau}$$

και με μετατροπή του μέσου χρόνου ζωής, $\tau = 8627 \text{ a} = 2.721 \cdot 10^{11} \text{ s}$ η ενεργότητα υπολογίζεται σε:

$$A(^{14}\text{C}) = \frac{7.82 \cdot 10^{14}}{2.721 \cdot 10^{11} \text{ s}} = 2.87 \cdot 10^3 \text{ Bq} = 2.87 \text{ kBq}$$

|β> Με χρήση του εκθετικού νόμου διάσπασης:

$$A(t) = A(0) \exp(-t/\tau) \Rightarrow 440 = 2870 \exp(-t/8627) \Rightarrow \exp(-t/8627) = 0.1533$$

επομένως με λογαρίθμηση των δύο πλευρών της εξίσωσης:

$$-t/8627 = -1.8753 \Rightarrow t = 16178 \text{ a}$$

δηλ. η ηλικία του ευρήματος είναι 16178 έτη.



Πρόβλημα [28] Τι μέρος της αρχικής ποσότητας πυρήνων ^{37}Ar θα έχει διασπαστεί μετά από ένα έτος; Τι θα έχει απομείνει μετά από 180 h; Δίνεται $t_{1/2} = 35 \text{ d}$.

Λύση

Είναι γνωστό ότι $N(t) = N(0)e^{-\lambda t}$, όπου $\lambda = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}$.

Σε 1 έτος = 365 d έχουν απομείνει:

$$N(365 \text{ d}) = N(0) \exp\left(-\lambda \frac{365 \text{ d}}{35 \text{ d}}\right)$$

και επομένως θα έχουν διασπασθεί

$$N(0) - N(365) = N(0) - N(0) \exp\left(-\lambda \frac{365 \text{ d}}{35 \text{ d}}\right) = N(0) \left(1 - \exp\left(-\lambda \frac{365 \text{ d}}{35 \text{ d}}\right)\right)$$

ή αντικαθιστώντας

$$N(0) - N(365) = N(0) \times 0.999$$

Ομοίως, θα έχουν απομείνει $N(180 \text{ h}) = N(0) \exp\left(-\lambda \frac{180 \text{ h}}{35 \cdot 24 \text{ h}}\right) = 0.862N(0)$ ή 86.2% του αρχικού.



Πρόβλημα [29] Η ενεργότητα ενός ασταθούς ισοτόπου έχει μειωθεί 1.5 φορές σε 51.1 d. Να βρείτε τις ποσότητες $t_{1/2}$, λ και τ .

Λύση

Με εφαρμογή του εκθετικού νόμου διάσπασης, μετά από χρόνο t έχουν παραμείνει ενεργότητα ίση με $A(t) = A(0)e^{-\lambda t}$, ενώ αντίστοιχα έχει χαθεί ενεργότητα ίση με $A(0) - A(t) = A(0) - A(0)e^{-\lambda t} = A(0)(1 - e^{-\lambda t})$.

Με γνωστό ότι έχει μειωθεί 1.5 φορές σε σχέση με την αρχική, βρίσκουμε ότι:

$$A(0) - A(0)e^{-\lambda t} = \frac{2}{3}A(0)$$

δηλ. με απλοποίηση

$$1 - e^{-\lambda t} = \frac{2}{3} \Rightarrow e^{-\lambda t} = \frac{1}{3} \Rightarrow -\lambda t = -\ln 3 \Rightarrow \lambda \cdot (51.1 \text{ d}) = \ln 3$$

Το τελικό αποτέλεσμα δίνει $\lambda = 2.488 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$, ενώ αντίστοιχα από τους γνωστούς τύπους, $\tau = 1/\lambda \approx 4 \cdot 10^6 \text{ s}$ και $t_{1/2} = \tau \ln 2 \approx 2.785 \cdot 10^{-6} \text{ s}$.



Πρόβλημα [30] Η μάζα ενός φρέσκου δείγματος ραδιενεργού σιδήρου ^{59}Fe ($t_{1/2} = 44.5 \text{ d}$) είναι ίση με 2 g. α) πόση είναι η αρχική ενεργότητα του δείγματος και β) πόση είναι η ενεργότητα μετά από χρόνο 70 d;

Λύση

Προτού υπολογίσουμε την ενεργότητα είναι χρήσιμο να υπολογίσουμε την υπάρχουσα ποσότητα πυρήνων ^{59}Fe που υπάρχουν στο δείγμα την αρχική χρονική στιγμή. Αυτοί αντιστοιχούν σε 2 g και αντίστοιχα σε ποσότητα:

$$\frac{2 \text{ g}}{M.B.} \cdot 6.022 \cdot 10^{23} \text{ atoms/mol} = 0.204 \cdot 10^{22} \text{ atoms}$$

όπου έχει χρησιμοποιηθεί το μοριακό βάρος (M.B.) του σιδήρου (εδώ ίσο με 59 g).

α) Επομένως η αρχική ενεργότητα είναι

$$A(0) = \lambda N(0) = \frac{\ln 2}{\lambda} \cdot 0.204 \cdot 10^{23} = \frac{\ln 2 \cdot 0.204 \cdot 10^{23}}{44.5 \cdot 24 \cdot 3600 \text{ s}} = 3.678 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

β) Μετά την πάροδο 70 d, η ενεργότητα είναι ίση με $A(70 \text{ d}) = A(0)e^{-\lambda(70 \text{ d})} \approx 1.24 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$



Πρόβλημα [31] Οι μετρήσεις ενεργότητας μιας ραδιενεργής ουσίας καταγράφονται στον παρακάτω πίνακα:

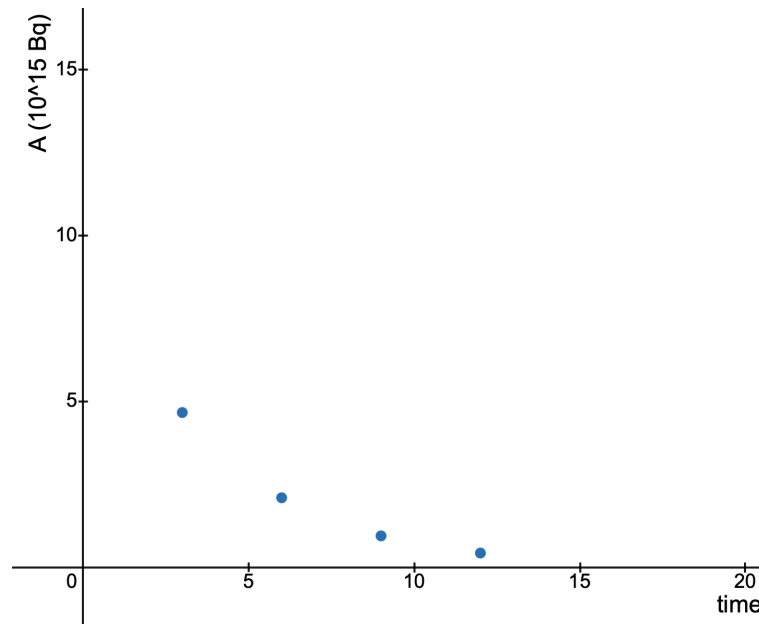
t (h)	3	6	9	12
A (10^{15} Bq)	4.66	2.09	0.941	0.423

|α> να βρείτε το χρόνο ημιζωής της ουσίας

|β> να βρείτε τον αρχικό αριθμό ατόμων της ουσίας

Λύση

|α> Ο απλούστερος τρόπος είναι να σχεδιάσουμε τη γραφική παράσταση της εξέλιξης της ενεργότητας ως προς το χρόνο με χρήση των τιμών του πίνακα. Αυτό φαίνεται στο διάγραμμα 9.



Σχήμα 8: Χρονική εξέλιξη της ενεργότητας

Από αυτό και τις τιμές του πίνακα:

$$A(6h) = A(0) \exp(-\lambda(6h))$$

$$A(3h) = A(0) \exp(-\lambda(3h))$$

και με διαίρεση κατά μέλη προκύπτει

$$\frac{A(6h)}{A(3h)} = \frac{A(0) \exp(-\lambda(6h))}{A(0) \exp(-\lambda(3h))} = \exp(-\lambda(6h - 3h)) = \exp(-(3h)\lambda)$$

από την οποία προκύπτει με λογαρίθμηση και στα δύο μέλη ότι

$$-3\lambda = \ln \frac{2.09}{4.66} \Rightarrow \lambda = \frac{1}{3} \ln \frac{4.66}{2.09} \approx 0.74 \text{ h}^{-1}$$

|β> Με ανάλογη διαδικασία εξαγάγουμε και τους άλλους λόγους, $\frac{A(9h)}{A(6h)}$, $\frac{A(12h)}{A(9h)}$ κτλ, επομένως με γνωστό πλέον το λ:

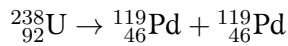
$$A(3h) = A(0) \exp(-(3h)\lambda) \Rightarrow A(0) \approx 43 \cdot 10^{15} \text{ Bq}$$

και από δω: $N(0) = \frac{A(0)}{\lambda} \Rightarrow N(0) = \frac{43 \cdot 10^{15}}{0.74/3600} = 209 \cdot 10^{15}$ πυρήνες. Στην τελευταία έχει γίνει μετατροπή των ωρών σε δευτερόλεπτα.



Πρόβλημα [32] Με χρήση του ημιεμπειρικού τύπου της μάζας υπολογίστε την εκλυόμενη ενέργεια κατά τη σχάση του πυρήνα ${}^{238}_{92}\text{U}$ σε δύο ίσα μέρη.

Λύση Η σχάση του $^{238}_{92}\text{U}$ σε δύο ίσα μέρη είναι της μορφής:



Η εκλυόμενη ενέργεια υπολογίζεται από τη διαφορά των ενεργειών σύνδεσης $BE(238,92)$ και $BE(119,46)$ με χρήση του ημιεμπειρικού τύπου (δείτε τυπολόγιο).

$$\Delta E = BE(238, 92) - 2BE(119, 46) = \dots \approx 194 \text{ MeV}$$



Πρόβλημα [33] Πυρήνες $^{192}_{84}\text{Po}$ σε ηρεμία διασπώνται από τη βασική στάθμη προς θυγατρικό πυρήνα εκπέμποντας σωμάτια α με κινητικές ενέργειες & σχετικές πιθανότητες (%):

i. $T^1_\alpha = 6416 \text{ keV}$ (0.7%)

ii. $T^2_\alpha = 6611 \text{ keV}$ (1.4%)

iii. $T^3_\alpha = 7167 \text{ keV}$ (97.3%)

Να απαντήσετε στα παρακάτω ερωτήματα:

|α> Ποιος είναι ο θυγατρικός πυρήνας

|β> Να σχεδιαστεί το ενεργειακό διάγραμμα της διάσπασης α

|γ> Να βρεθούν οι ενέργειες Q για καθεμία από τις διασπάσεις

|δ> Ποιες οι ενέργειες των φωτονίων γ που ακολουθούν τις διασπάσεις α ;

Λύση

|α> Η διάσπαση α μπορεί να γραφεί ως: $^{192}_{84}\text{Po} \rightarrow ^{188}_{82}\text{Pb} + \alpha$. Με βάση αυτή, ο θυγατρικός πυρήνας είναι ο μόλυβδος-182

|β> Το διάγραμμα μπορεί να σχεδιαστεί ως εξής:

|γ> Στη διάσπαση α , ισχύει ότι $Q = T_\alpha \left(1 + \frac{4}{A_D}\right)$, όπου A_D είναι ο μαζικός αριθμός του θυγατρικού πυρήνα. Μέσω των δεδομένων ενεργειών, για καθένα από τα σωμάτια α , έχουμε:

$$Q^1_\alpha = 6416 \left(1 + \frac{4}{188}\right) \approx 6552 \text{ keV}$$

$$Q^2_\alpha \approx 6786 \text{ keV}$$

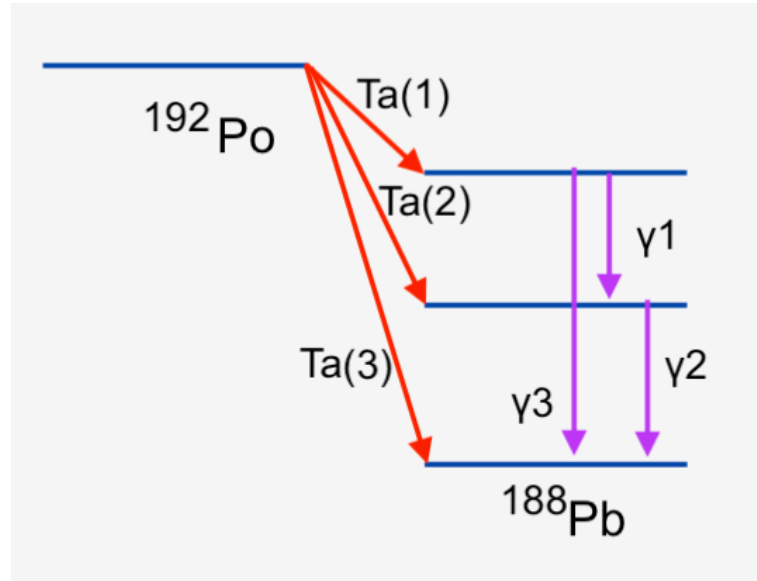
$$Q^3_\alpha \approx 7358 \text{ keV}$$

|δ> Οι ακτίνες γ που εκπέμπονται απεικονίζονται στο διάγραμμα και οι ενέργειές τους μπορούν να υπολογιστούν μέσω των διαφορών των ενεργειών που έχουν οι στάθμες του θυγατρικού πυρήνα, δηλ.

$$E^1_\gamma = 7358 - 6786 = 572 \text{ keV}$$

$$E^2_\gamma = 6780 - 6552 = 234 \text{ keV}$$

$$E^3_\gamma = 7358 - 6552 = 806 \text{ keV}$$



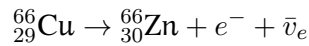
Σχήμα 9: Απλοποιημένο διάγραμμα διάσπασης α του $^{192}_{84}\text{Po}$



Πρόβλημα [34] Πυρήνας $^{66}_{29}\text{Cu}$ είναι $\beta(-)$ ασταθής στη θεμελιώδη στάθμη του και καταλήγει στη βασική σταθμή του θυγατρικού. Να βρεθεί η κινητική ενέργεια του σωματιδίου β και του αντίστοιχου νετρίνου αν αγνοήσετε την ανάκρουση του θυγατρικού πυρήνα.

Λύση

Η διάσπαση $\beta-$ του μητρικού μπορεί να γραφεί ως εξής:



Με εφαρμογή Α.Δ.Ε. $E(\text{Cu-66}) = E(\text{Zn-66}) + E_e + E_v$ οπότε με αντικατάσταση:

$$0 + m_1c^2 = T_2 + m_2c^2 + T_e + m_ec^2 + T_v + m_vc^2$$

Με την υπόθεση ότι ο θυγατρικός πυρήνας έχει $T_2 \approx 0$

$$m_1c^2 = m_2c^2 + T_e + m_ec^2 + T_v + m_vc^2$$

$$(m_1 - m_e - m_v)c^2 = T_e + T_v \Rightarrow Q = T_e + T_v$$

Αν επιπλέον εφαρμόσουμε την ΑΔΟ και αγνοήσουμε τη μάζα του νετρίνου, τότε αντίστοιχα:

$$p_e + p_v = 0 \Rightarrow T_e - m_ec^2 = T_v$$

Από τις δυο τελευταίες εξισώσεις, μπορεί να βρεθούν οι ενέργειες T_e και T_v :

$$T_e = \frac{1}{2}(Q + m_ec^2)$$

$$T_v = \frac{1}{2}(Q - m_ec^2)$$



Πρόβλημα [35] Να βρεθεί η σχέση ανάμεσα στα A και Z για β-σταθερούς πυρήνες.

Λύση

Παραγωγίζοντας τη σχέση που δίνει την ενέργεια σύνδεσης (βλ. διαλέξεις) εξάγεται ότι:

$$Z \approx \frac{A}{(0.015A^{2/3} + 1.973)}$$



Πρόβλημα [36] Να βρεθεί η συνολική στροφορμή και η ομοτιμία της κυματοσυνάρτησης της θεμελιώδους στάθμης, καθώς και η αντίστοιχη μαγνητική ροπή στο ${}^3\text{H}$

Λύση

Το ισότοπο του τριτίου περιέχει 1 πρωτόνιο στην $\pi 1s_{1/2}$ και αντίστοιχα δύο νετρόνια στη $\nu 1s_{1/2}$. Τα δύο νετρόνια σχηματίζουν ζεύγος και δε συνεισφέρουν στην κυματοσυνάρτηση, επομένως μόνο το περιττό πρωτόνιο είναι αυτό που καθορίζει το τελικό σπιν και την ομοτιμία. Κατά συνέπεια, $J^\pi({}^3\text{H}) = J^\pi(\pi) = \frac{1}{2}^+$, καθώς ο φασματοσκοπικός συμβολισμός δηλώνει ότι $s \rightarrow l = 0 \rightarrow \pi = (-)^l = (-)^0 = +$.

Αντίστοιχα, η μαγνητική ροπή του πυρήνα καθορίζεται από το ασύζευκτο πρωτόνιο. Η τιμή Schmidt για αυτήν την περίπτωση δίνεται από τη σχέση $\mu = gJ$, όπου

$$g = g_l \pm \frac{g_s - g_l}{2l + 1}, \quad \pm : j = l \pm s$$

Για το ασύζευκτο πρωτόνιο στο τρίτιο:

$$g = g_l^\pi + \frac{g_s^\pi - g_l^\pi}{2 \cdot 0 + 1} = g_s^\pi = 2 \cdot 2.793\mu_N \Rightarrow \mu = \frac{1}{2}g_s^\pi = 2.793\mu_N$$



Πρόβλημα [37] Ομοίως με το πρόβλημα 36, αλλά για το ισότοπο ${}^{29}_{14}\text{Si}$

Λύση

Στην περίπτωση αυτή, έχουμε άρτιο αριθμό πρωτονίων (14) και περιττό αριθμό νετρονίων. Το τελευταίο ασύζευκτο νετρόνιο βρίσκεται στο φλοιό $\nu 1d_{5/2}$, και επομένως:

$$J^\pi({}^{29}_{14}\text{Si}) = J^\pi(\nu 1d_{5/2}) = \frac{5}{2}^+$$

καθώς ο φασματοσκοπικός συμβολισμός υποδηλώνει πώς $l = 2$ (φλοιός d).

Ομοίως με πριν, η μαγνητική ροπή είναι:

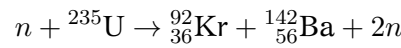
$$\mu = gJ = J \cdot \left(g_l^\nu + \frac{g_s^\nu - g_l^\nu}{2l + 1} \right) \quad (1)$$

$$= \left(\frac{5}{2} \right) \cdot \left(0 + \frac{g_s^\nu - 0}{5} \right) \quad (2)$$

$$= \left(\frac{5}{2} \right) \cdot \left(\frac{2}{5} (-1.913) \mu_N \right) = -1.913 \mu_N \quad (3)$$



Πρόβλημα [38] Δίνεται η παρακάτω διεργασία (επαγόμενη σχάση):



Ια> Να υπολογίσετε την ενέργεια που εκλύεται στην παρακάτω διεργασία: όταν $m({}^{235}_{92}\text{U}) = 235.043928u$, $m({}^{92}_{36}\text{Kr}) = 91.926269u$ και $m({}^{142}_{56}\text{Ba}) = 141.916361u$.

Ιβ> Το αποτέλεσμα που θα βρείτε είναι κατά 6 MeV μεγαλύτερο από όταν συμβαίνει αυθόρμητη σχάση. Εξηγήστε.

Ιγ> Επιβεβαιώστε ότι ο αριθμός των νουκλεονίων και το συνολικό φορτίο διατηρούνται

Λύση

Ια> Από την τιμή Q της διεργασίας:

$$Q = m_n + m({}^{235}_{92}\text{U}) - m({}^{92}_{36}\text{Kr}) - m({}^{142}_{56}\text{Ba}) - 2m_n \quad (4)$$

$$= m({}^{235}_{92}\text{U}) - m({}^{92}_{36}\text{Kr}) - m({}^{142}_{56}\text{Ba}) - m_n \quad (5)$$

$$= 235.043928u - 91.926269u - 141.916361u - 1.0086649u \quad (6)$$

$$= 0.1926331u \quad (7)$$

$$= 0.1926331u \cdot 931.5 \text{ MeV}/u \quad (8)$$

$$= 179.44 \text{ MeV} \quad (9)$$

Ιβ> Η πλεονάζουσα ενέργεια προέρχεται από τη διαφορετική συνολική ενέργεια της αντίδρασης. Στην αυθόρμητη σχάση, η Q -value δεν περιλαμβάνει την κινητική ενέργεια των νετρονίων που βομβαρδίζουν τον πυρήνα U-235 .

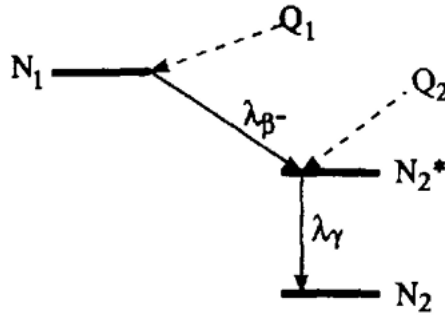
Ιγ> ΠPIN / νουκλεόνια: $1 + 235 = 236$, $Z=0+92 = 92$

META / νουκλεόνια: $92+142+2 = 236$, $Z=36+56+0=92$



Πρόβλημα [39] Μητρικός πυρήνας αποδιεγείρεται μέσω διάσπασης β^- προς διεγερμένη στάθμη

θυγατρικού, η οποία με τη σειρά της αποδιεγείρεται με εκπομπή φωτονίου γ προς τη βασική. το σχήμα 10 απεικονίζει τη συνολική διεργασία.



Σχήμα 10: Διάγραμμα διάσπασης

Αν ο μητρικός με πληθυσμό $N_1(t)$ έχει επιπλέον πιθανότητα διακλάδωσης Q_1 για να επιτελέσει διάσπαση β , ενώ αντίστοιχα η διεγερμένη στάθμη με $N_2^*(t)$ έχει πιθανότητα διακλάδωσης Q_2 για αποδιέγερση προς τη βασική του σταθερού ισότοπου, να βρεθούν οι εξισώσεις που περιγράφουν τους πληθυσμούς $N_1(t)$, $N_2^*(t)$ και $N_2(t)$, με την προϋπόθεση ότι υπάρχουν αρχικές συνθήκες $N_1(0) = N_0$ και $N_2^*(0) = N_2(0) = 0$. Μπορεί η στάθμη $N_2^*(t)$ να περιγράφεται αποκλειστικά από ένα εκθετικό νόμο διάσπασης ανάλογο του όρου $\exp(-t\lambda_{\beta-})$;

Λύση Η διεργασία είναι ταυτόσημη με τη γραμμική αλυσίδα διάσπασης $N_1 \rightarrow N_2^* \rightarrow N_2$, όπου N_1 , N_2 ασταθείς, ενώ N_2^* σταθερή. Οι πληθυσμοί ή ισοδύναμα οι ενεργότητες περιγράφονται από τις εξισώσεις Bateman. Στη συγκεκριμένη περίπτωση, για μια αλυσίδα $N_A \rightarrow N_B \rightarrow N_C$, οι λύσεις είναι:

$$\begin{aligned} N_A(t) &= N_A(0) \cdot e^{-\lambda_A t} \\ N_B(t) &= N_A(0) \cdot \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \left(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \right) \\ N_C(t) &= N_A(0) \cdot \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_A t}}{\lambda_A} - \frac{1 - e^{-\lambda_B t}}{\lambda_B} \right) \end{aligned}$$

Στο συγκεκριμένο πρόβλημα, υπάρχουν οι εξής αντιστοιχίες:

$$\begin{aligned} N_A(t) &\rightarrow N_1(t) \\ N_B(t) &\rightarrow N_2^*(t) \\ N_C(t) &\rightarrow N_2(t) \\ N_A(0) &\rightarrow N_0 \\ \lambda_A &\rightarrow Q_1 \lambda_{\beta-} \\ \lambda_B &\rightarrow Q_2 \lambda_{\gamma} \end{aligned}$$

οι οποίες με αντικατάσταση θα δώσουν τις τελικές μορφές των εξισώσεων.

Σε σχέση με το δεύτερο ερώτημα, ο πληθυσμός $N_2^*(t) = N_A(0) \cdot \frac{Q_1 \lambda_{\beta-}}{Q_2 \lambda_{\gamma} - Q_1 \lambda_{\beta-}} (e^{-Q_1 \lambda_{\beta-} t} - e^{-Q_2 \lambda_{\gamma} t})$, μπορεί να είναι ανάλογος του παράγοντα $\exp(-t\lambda_{\beta-})$ μόνο αν ο όρος $\exp(-Q_2 \lambda_{\gamma} t)$ μηδενιστεί,

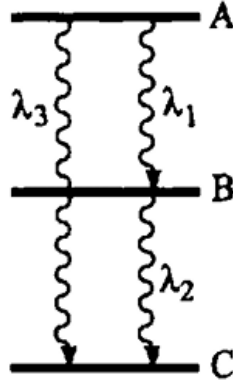
δηλ. θα πρέπει να ισχύει ότι:

$$Q_2 \lambda_\gamma t \rightarrow \infty$$

για κάθε χρονική στιγμή t . Δεδομένου ότι $0 \leq Q_2 \leq 1$, πρέπει $\lambda_\gamma \rightarrow \infty$ ή $\tau_\gamma \rightarrow 0$ δηλ. η διεγερμένη στάθμη N_2^* να είναι σταθερή, άρα καταλήγουμε σε άτοπο.



Πρόβλημα [40] Δίνεται το διάγραμμα διάσπασης του σχήματος 11:



Σχήμα 11: Διάγραμμα αποδιέγερσης

Αν τη χρονική στιγμή $t = 0$ όλοι οι πυρήνες βρίσκονται στη στάθμη A, να βρεθούν οι πληθυσμοί των σταθμών B και C ως συνάρτηση του χρόνου t . Να διερευνηθούν επιπλέον οι παρακάτω περιπτώσεις:

$$|\alpha\rangle \lambda_3 = 0$$

$$|\beta\rangle \lambda_1 = \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda$$

$$|\gamma\rangle \lambda_1 = \lambda_3 = \lambda/2 \text{ και } \lambda_2 = \lambda$$

Λύση

Παρόμοια με το προηγούμενο πρόβλημα, έχουμε γενική λύση για το διάγραμμα διάσπασης, μέσω των εξισώσεων Bateman. Στις περιπτώσεις διακλάδωσης πρέπει να ληφθούν υπόψη οι συντελεστές διακλάδωσης, που μπορούν να γραφούν μέσω των σταθερών διάσπασης.

$$\begin{aligned} N_A(t) &= N_A(0) \cdot e^{-\lambda_A t} \\ N_B(t) &= N_A(0) \cdot \frac{\lambda_A}{\lambda_B - \lambda_A} \left(e^{-\lambda_A t} - e^{-\lambda_B t} \right) \\ N_C(t) &= N_A(0) \cdot \frac{\lambda_A \lambda_B}{\lambda_B - \lambda_A} \left(\frac{1 - e^{-\lambda_A t}}{\lambda_A} - \frac{1 - e^{-\lambda_B t}}{\lambda_B} \right) \end{aligned}$$



Πρόβλημα [41] Έστω ο πυρήνας $^{35}_{19}\text{K}$. Να απαντήσετε στα παρακάτω:

- ια> Ποιος είναι ο κατοπτρικός πυρήνας του; Ποιο το σπιν και η ομοτιμία της βασικής στάθμης του κατοπτρικού;
- ιβ> Να εκτιμήσετε τη διαφορά στην ενέργεια σύνδεσης για το ζεύγος των κατοπτρικών
- ιγ> Ποιες οι τιμές της τρίτης προβολής ισοσπίν των δύο κατοπτρικών πυρήνων; Αν ο πυρήνας $^{35}_{19}\text{K}$ βρίσκεται στην ακραία τιμή, πόσοι άλλοι ισοβαρείς πυρήνες (και ποιοι;) συμπληρώνουν την ομάδα;
- ιδ> Να σχεδιασθεί η παραβολική καμπύλη ισοβαρών της ομάδας και να σημειώσετε τις διαδρομές διάσπασης μεταξύ τους.

Λύση

Ο πυρήνας $^{35}_{19}\text{K}$ έχει $Z = 19$ και $N = 16$ ($A = Z + N = 35$). Επομένως:

- ια> Ο κατοπτρικός πυρήνας προκύπτει από εναλλαγή Z, N , δηλ. προκύπτει ο πυρήνας με $Z = 16$ και $N = 19$, $^{35}_{16}\text{S}$. Πρόκειται για άρτιο-περιττό πυρήνα με δομή:
 π: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2$
 ν: $(1s_{1/2})^2(1p_{3/2})^4(1p_{1/2})^2(1d_{5/2})^6(2s_{1/2})^2(1d_{3/2})^3$
 προκύπτει ότι το ασύζευκτο νετρόνιο στην $(1d_{3/2})$ καθορίζει και τον πυρήνα συνολικά, καθώς στη βασική του στάθμη θα έχει $I^\pi = \frac{3}{2}^+$.
- ιβ> Με χρήση του ημιεμπειρικού τύπου για την ενέργεια σύνδεσης των κατοπτρικών $^{35}_{19}\text{K}$ - $^{35}_{16}\text{S}$, έχουμε:

$$\delta B = |B(A, Z_1) - B(A, Z_2)| = |B(34, 19) - B(35, 16)|$$

Καθώς και οι δύο πυρήνες είναι α-π, οι μόνοι όροι που επιζούν στην απόλυτη τιμή της διαφοράς παραπάνω είναι οι όροι που εξαρτώνται από τον ατομικό αριθμό, δηλ. ο όρος ασυμμετρίας και ο όρος Coulomb:

$$\delta B = \left| -\frac{\alpha_C}{A^{1/3}} (19(19-1) - 16(16-1)) - \frac{\alpha_{asym}}{A^{2/3}} ((35-2 \cdot 19)^2 - (35-2 \cdot 16)^2) \right|$$

ο όρος ασυμμετρίας είναι ίσος με 0, ενώ τελικά με αντικατάσταση του συντελεστή α_C προκύπτει $\delta B \approx 22 \text{ MeV}$.

- ιγ> $\tau_z = \frac{N-Z}{2}$. Έτσι
 $\tau_z(^{35}_{19}\text{K}) = -3/2$
 $\tau_z(^{35}_{16}\text{S}) = +3/2$.

Επομένως το ισοσπίν, T , είναι $3/2$ και αντίστοιχα υπάρχουν $2 + 1 = 2\frac{3}{2} + 1 = 4$ προβολές του, που αντιστοιχούν σε διαφορετικά ισότοπα. Αυτά είναι τα:

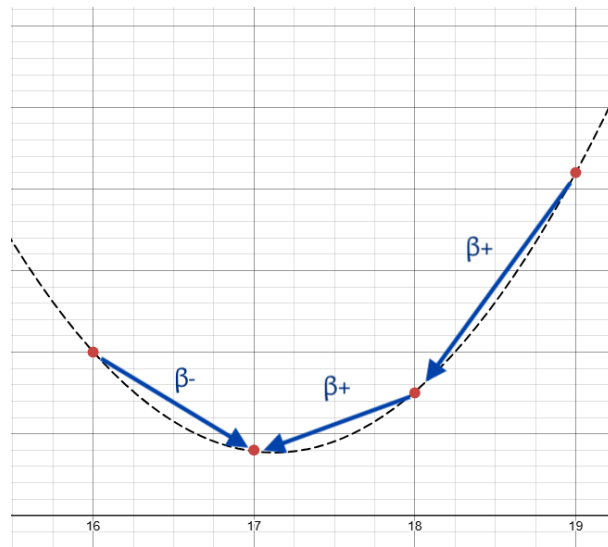
$$\tau_z = -3/2 \rightarrow ^{35}_{19}\text{K}$$

$$\tau_z = -1/2 \rightarrow ^{35}_{18}\text{Ar}$$

$$\tau_z = +1/2 \rightarrow ^{35}_{17}\text{Cl}$$

$$\tau_z = +3/2 \rightarrow ^{35}_{16}\text{S}$$

Ιδ> Καθώς η ενέργεια σύνδεσης του $^{35}_{19}\text{K}$ είναι 22 MeV μεγαλύτερη από του $^{35}_{16}\text{S}$, η καμπύλη ισοβαρών για τα 4 ισότοπα της ομάδας με ολικό ισοσπίν 3/2 είναι προσεγγιστικά όπως απεικονίζεται στην Εικ. 12.



Σχήμα 12: Προσεγγιστική καμπύλη ισοβαρών (οι μονάδες στον άξονα y είναι αυθαίρετες) και διασπάσεις β+,β- μεταξύ τους

