

ΑΠΟ ΤΑ ΠΡΩΤΟΝΙΑ & ΤΑ ΝΕΤΡΟΝΙΑ ΣΤΟΥΣ ΠΥΡΗΝΕΣ

Στο βιβλίο «Από τα κουάρκ μέχρι το Σύμπαν» το παραπάνω θέμα είναι το αντικείμενο του 8^{ου} κεφαλαίου, σελ. 113-126. Σε ό,τι ακολουθεί η ύλη του 8^{ου} κεφαλαίου και των βιντεοσκοπημένων σχετικών διαλέξεων χωρίζεται σε μικρότερες ενότητες

1^η ΕΝΟΤΗΤΑ (8.1): ΕΙΣΑΓΩΓΗ

11ο VIDEO, 8/11/2013 Από 1ω,12λ έως το τέλος

Η ολική ενέργεια $E_{ολ}$ του όποιου πυρήνα ισούται με

$$E_{ολ} = Zm_p c^2 + Nm_n c^2 - B,$$

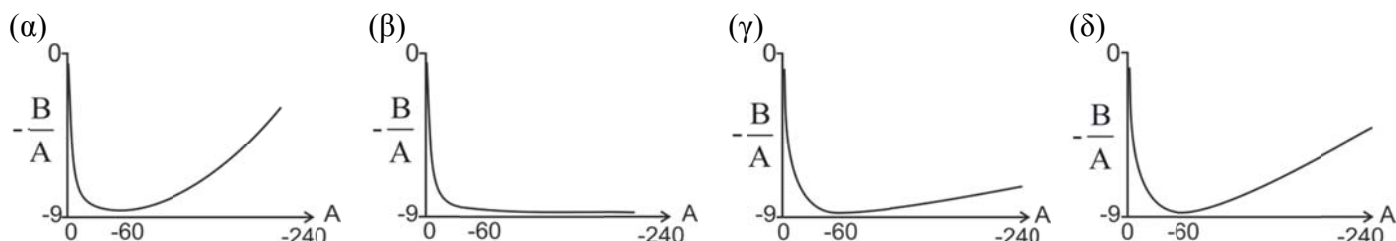
όπου Z είναι ο αριθμός των πρωτονίων του, N είναι ο αριθμός των νετρονίων του, m_p , m_n είναι οι μάζες ηρεμίας του πρωτονίου και του νετρονίου αντίστοιχα και B είναι η απόλυτη τιμή της μείωσης της ολικής ενέργειας λόγω σχηματισμού του πυρήνα. Στο B συμβάλουν κατά σειρά σπουδαιότητας η ελκτική πυρηνική δυναμική ενέργεια (θετική συμβολή), η 'απωστική' κβαντική κινητική ενέργεια (αρνητική συμβολή) και η δυναμική ενέργεια Coulomb λόγω απώσεων μεταξύ των πρωτονίων (αρνητική συμβολή).

Σχολιάζονται οι χαρακτηριστικές ιδιότητες των δύο δυναμικών ενεργειών και ο ρόλος τους στην πολύ σημαντική καμπύλη που δίνει την εξάρτηση της ποσότητας $-B/A$ από το A (βλ. Σχ. 8. 3, σελ. 119), όπου $A = Z + N$ είναι ο συνολικός αριθμός νουκλεονίων στον πυρήνα. Από την καμπύλη αυτή προκύπτει αμέσως η δυνατότητα άντλησης τεράστιας ενέργειας είτε από τη **σχάση** ενός μεγάλου πυρήνα (π.χ. U-235) είτε από την **σύντηξη** δύο μικρών πυρήνων. Γιατί όμως η καμπύλη αυτή ξεκινάει για πολύ μικρές τιμές του A ($A=2$) σχεδόν από το -1 MeV, φτάνει σε ένα μίνιμουμ γύρω στο $-8,8$ MeV για $A=56$, και στη συνέχεια αυξάνει σχεδόν γραμμικά για να φτάσει την τιμή $-7,59$ MeV για $A=235$;

Παρακολουθήστε [εδώ](#) το 11^ο VIDEO , 8/11/2013 Από 1ω,12λ έως το τέλος .
Διάρκεια 13λ

Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Ο σχηματισμός του πυρήνα συνεπάγεται τη μείωση της ολικής ενέργειας του συστήματος. Η ποσότητα αυτή ανά νουκλεόνιο δίνεται προσεγγιστικά από το εξής γράφημα:



2. Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για το σίδηρο 56 είναι περίπου:
(α) 7,1eV (β) 8,2keV (γ) 8,9MeV (δ) 10,5MeV
3. Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για το ουράνιο 235 είναι περίπου:
(α) 6,1eV (β) 7,6MeV (γ) 7,2keV (δ) 9,9MeV
4. Γιατί οι πυρήνες με μικρό αριθμό νουκλεονίων έχουν μικρότερη ενέργεια σύνδεσης $|B/A|$ ανά νουκλεόνιο;
(α) επειδή η κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι μικρότερη
(β) επειδή η κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη
(γ) επειδή η άπωση Coulomb ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη
(δ) επειδή ο μέσος όρος γειτονικών νουκλεονίων για κάθε νουκλεόνιο είναι μικρότερος
5. Γιατί οι πυρήνες με πολύ μεγάλο αριθμό νουκλεονίων έχουν μικρότερη ενέργεια σύνδεσης $|B/A|$ ανά νουκλεόνιο;
(α) επειδή ο μέσος όρος γειτονικών νουκλεονίων για κάθε νουκλεόνιο είναι μικρότερος
(β) επειδή η άπωση Coulomb ανά νουκλεόνιο είναι σχετικά μεγαλύτερη
(γ) επειδή η κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι σχετικά μεγαλύτερη
(δ) επειδή η κινητική ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι σχετικά μικρότερη

2^H ΕΝΟΤΗΤΑ, ΚΕΦ. 8.2, Σελ. του βιβλίου ΚΣ 113-116: ΥΠΟΛΟΓΙΣΜΟΣ ΤΗΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

12^ο VIDEO, 14/11/2013, Από 0 έως 46:30λ

Ο όγκος του πυρήνα $V_\pi = (4\pi/3)R^3$ είναι ανάλογος του όγκου $V_0 = (4\pi/3)r_0^3$ κάθε νουκλεονίου επί τον αριθμό A των νουκλεονίων. Ο συντελεστής αναλογίας a είναι μεγαλύτερος της μονάδας, $a=3,22$, γιατί υπάρχει αρκετός κενός χώρος στο εσωτερικό του πυρήνα (Η μέση απόσταση δύο γειτονικών νουκλεονίων είναι 2,1 fm, ενώ η ακτίνα του καθενός είναι 0.84 fm. Επομένως ο διαθέσιμος χώρος για την αέναη κίνηση των νουκλεονίων είναι $V' = [(3,22-1)/3,22]V_\pi = 0,69V_\pi$). Έπεται από τα παραπάνω ότι

$$R = a^{1/3} A^{1/3} r_0 = 1.24 A^{1/3} \text{ fm} \quad (1)$$

Η βασική ποσότητα $-B$, που ορίστηκε στην 1^η ενότητα, ισούται με $E_{\Delta I} + E_{\Delta C} + E_K$, δηλαδή με το άθροισμα της δυναμικής ενέργειας λόγω ισχυρής αλληλεπίδρασης (I), της δυναμικής ενέργειας λόγω άπωσης Coulomb (C) και της κινητικής ενέργειας.

Λαμβάνοντας υπόψη ότι η ισχυρή αλληλεπίδραση, λόγω της βραχείας εμβέλειάς της, δρα μόνο μεταξύ άμεσων γειτονικών νουκλεονίων, έχουμε ότι

$$E_{\Delta I} = -A_\zeta \varepsilon, \quad A_\zeta = \frac{1}{2} A_{\varepsilon\sigma} K + \frac{1}{2} A_{\varepsilon\pi} K' \quad (2)$$

όπου A_ζ είναι ο αριθμός γειτονικών ζευγών νουκλεονίων και $\varepsilon = 11,4 \text{ MeV}$ είναι η μέση απόλυτη τιμή της ενέργειας τους λόγω ισχυρής αλληλεπίδρασης, $A_{\varepsilon\sigma} \equiv A - A_{\varepsilon\pi}$ είναι ο αριθμός νουκλεονίων που είναι στο εσωτερικό του πυρήνα, $A_{\varepsilon\pi} \propto 4\pi R^2 \Rightarrow A_{\varepsilon\pi} \approx A^{2/3}$ είναι ο αριθμός νουκλεονίων που βρίσκονται στην επιφάνεια του πυρήνα, $K \approx 8$ είναι ο αριθμός των άμεσων γειτόνων ενός νουκλεονίου που είναι στο εσωτερικό του πυρήνα και $K' \approx 5$ είναι ο αριθμός των άμεσων γειτόνων ενός νουκλεονίου που βρίσκεται στην επιφάνεια του πυρήνα. Αντικαθιστώντας τις παραπάνω τιμές στην (2) έχουμε σε MeV την ακόλουθη σχέση (3)

$$E_{\Delta I} = -\frac{1}{2}(A - A_{\varepsilon\pi})K\varepsilon - \frac{1}{2}A_{\varepsilon\pi}K'\varepsilon = -\frac{1}{2}AK\varepsilon + \frac{1}{2}A_{\varepsilon\pi}(K - K')\varepsilon = -45,6A + 17,1A^{2/3}$$

$$E_{\Delta C} = \frac{1}{2} \frac{Z(Z-1)e^2}{r}, \quad r \approx \frac{5}{6}R \Rightarrow E_{\Delta C} = \frac{3}{5} \frac{Z(Z-1)e^2}{R} = 0,71 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} \text{ MeV} \quad (4)$$

$$E_K = 1,105 \frac{\hbar^2}{m R'^2} (N^{5/3} + Z^{5/3}), \quad V' = (4\pi/3)R'^3 \quad (5)$$

Όπου $R'^2 = 0.69^{2/3} R^2 \propto A^{2/3}$, $\frac{N^{5/3} + Z^{5/3}}{A^{2/3}} \approx \frac{1}{2^{2/3}} \left[A + \frac{5(N-Z)^2}{9A} \right]$. ‘Αρα

$$E_K = \alpha_{K0}A + \alpha_K \left[(N-Z)^2 / A \right] = 29,74A + 16,52 \left[(N-Z)^2 / A \right] \text{ MeV} \text{ και τελικά}$$

$$-B = -(\alpha_{\Delta I} - \alpha_{K0})A + \beta_{\Delta I} A^{2/3} + \gamma_{\Delta C} \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} + \alpha_K \frac{(N-Z)^2}{A} - \delta \text{ MeV} \quad (6)$$

- 15,86	17,1	0,71	16,52
- 15,75	17,8	0,71	23,69

Στην πρώτη γραμμή είναι οι αριθμητικές τιμές των συντελεστών του τύπου (6) βάσει των εκτιμήσεων μας και στη δεύτερη βάσει της προσαρμογής τους στα εμπειρικά δεδομένα. Η σύμπτωση (εκτός του a_K) είναι εντυπωσιακή.

Η ποσότητα δ είναι μια πολύ σημαντική διόρθωση που λαμβάνει υπόψη ότι οι ενεργειακές στάθμες είναι διακριτές και ότι καταλαμβάνονται πιο αποδοτικά όταν ο πυρήνας είναι ζ/ζ , δηλαδή ζυγός αριθμός πρωτονίων/ζυγός αριθμός νετρονίων, παρά στις άλλες περιπτώσεις:

$$\delta = 34 / A^{3/4} \zeta / \zeta, \quad \delta = 0 \zeta / \mu, \quad \delta = -34 / A^{3/4} \mu / \mu$$

Μελετήστε τις σελ. 113-116 του 8^{ου} κεφαλαίου του βιβλίου ΚΣ και παρακολουθήστε το 12^ο VIDEO από 0 έως 46λ, 30δ πατώντας [εδώ](#).

Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

Εκτιμήστε το μέγεθος της πυρηνικής ενέργειας ανά νουκλεόνιο από το μέγεθος της κινητικής ενέργειάς του, δεδομένου ότι ο διαθέσιμος όγκος ανά νουκλεόνιο είναι $(4\pi/3)r^3$ με $r=1,1$ fm

- (α) 1 GeV (β) 191MeV (γ) 17 MeV (δ) 1 MeV

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

- Υπολογίστε το $-B/A$ για το He-4, για τον Fe-56, για το U-235 και για το U-238 λαμβάνοντας υπόψη τη διόρθωση δ .
- Για κάθε όρο στον τύπο 6 αναφέρετε το πού οφείλεται
- Πρόβλημα 1 στη σελ. 125 του βιβλίου ΚΣ
- Πρόβλημα 3 στη σελ. 125 του βιβλίου ΚΣ
- Πρόβλημα 5 στη σελ. 126 του βιβλίου ΚΣ
- Πρόβλημα 9 στη σελ. 125 του βιβλίου ΚΣ

3^H ΕΝΟΤΗΤΑ, Σελ. 117-119 ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΚΣ: ΣΥΝΕΠΕΙΕΣ ΤΟΥ ΤΥΠΟΥ ΓΙΑ ΤΟ –B

12⁰ VIDEO, 14/11/2013, Από 46λ,30δ έως 1ω, 22λ (τέλος)

Αν ελαχιστοποιήσουμε την έκφραση για την ολική ενέργεια του πυρήνα υπό A σταθερό (που σημαίνει ότι πρέπει πρώτα να θέσουμε N=A-Z και μετά να παραγωγίσουμε ως προς Z) βρίσκουμε τον σημαντικό τύπο (8.8) ή (8.8') σελ. 117 του βιβλίου ΚΣ και την αντίστοιχη γραφική παράσταση του Σχ. 8.2 της σελ. 118 του ως άνω βιβλίου.

Αντικαθιστούμε την τιμή του Z που ελαχιστοποιεί την ολική ενέργεια του πυρήνα για κάθε A και βρίσκουμε έτσι το –B ή το –B/A για κάθε τιμή του A. Προκύπτει έτσι το καίριας σημασίας γράφημα του Σχ. 8.3, σελ. 119 του βιβλίου ΚΣ (στο οποίο όμως δεν έχει συμπεριληφθεί η διόρθωση δ). Σημειώστε ότι για A μεγαλύτερο του 100 ισχύει ο εξής απλός τύπος για το –B/A

$$-B/A = -9,45 + 0,008A \text{ MeV}, \quad A > 100 \quad (\text{Έχει παραληφθεί η διόρθωση } \delta) \quad (1)$$

Μελετήστε τις σελίδες 117 έως 119 και στη συνέχεια παρακολουθήστε το 12⁰ VIDEO από 46λ,30δ έως το τέλος πατώντας **εδώ**. Στο VIDEO υπάρχουν σχόλια σχετικά με το ποσοστό κάθε στοιχείου στο Σύμπαν, στη Γη και για το πώς δημιουργήθηκε το κάθε στοιχείο κατά την ιστορική διαδρομή του Σύμπαντος, των άστρων, των πλανητών κλ.

Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

Το ποσοστό των πρωτονίων σε ένα σταθερό (ή σχεδόν σταθερό) πυρήνα ως συνάρτηση του αριθμού των νουκλεονίων δίνεται από τον εξής τύπο:

$$(\alpha) \frac{Z}{A} \approx \frac{1,01}{2+0,015A}$$

$$(\beta) \frac{Z}{A} \approx \frac{1,01}{2+0,015A^{2/3}}$$

$$(\gamma) \frac{Z}{A} \approx \frac{1,01}{2+0,015A^{1/3}}$$

$$(\delta) \frac{Z}{A} \approx \frac{1,01}{2+0,015A^{1/2}}$$

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

1. Θεωρήστε ένα πυρήνα με 100 νουκλεόνια. Πόσα νετρόνια και πόσα πρωτόνια έχει; Ποιο (ή ποια) στοιχείο(α) αντιστοιχούν;
2. Θεωρήστε ένα πυρήνα με Z=N=40. Είναι ο πυρήνας αυτός σταθερός; Αν όχι τι θα συμβεί;

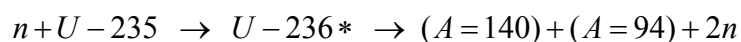
4^H ΕΝΟΤΗΤΑ, Σελ. 120-125 ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΚΣ : ΣΧΑΣΗ ΚΑΙ ΑΛΛΑ ΘΕΜΑΤΑ

13^O VIDEO, 15/11/2013

α) 0 έως 16λ: Επανάληψη (Για να το παρακολουθήσετε πατήστε [εδώ](#))

β) 16λ έως 51:30λ: Σχάση U-235 και δυνατότητα σχάσης U-238 με την ενσωμάτωση ενός νετρονίου

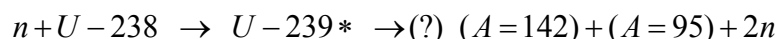
Εστω ένα νετρόνιο που προσκρούει και ενσωματώνεται στον πυρήνα U-235, ο οποίος στη συνέχεια διασπάται σε δύο θυγατρικούς πυρήνες, έναν μικρό με A π.χ. ίσον με 94 και ένα μεγάλο με A π.χ. 140 και σε δύο νετρόνια, που ενδεχομένως θα ενσωματωθούν σε κάποιους άλλους πυρήνες U-235 οδηγώντας έτσι σε αλυσωτή αντίδραση:



Το U-236* μετά την ενσωμάτωση του νετρονίου βρίσκεται σε διεγερμένη κατάσταση πάνω από τη βασική κατάσταση κατά ένα ποσό ίσο με δE . Για να βρούμε το δE χρησιμοποιούμε τον τύπο $-B = -9,45A + 0,008A^2 - \delta$ που δίνει $-1778,95 + \varepsilon_K$ MeV για την αρχική κατάσταση του U-235 συν την κινητική ενέργεια ε_K του νετρονίου. Λόγω της διατήρησης της ενέργειας, η ενέργεια του U-236* είναι $-1778,95 + \varepsilon_K$ MeV. Για το $-B$ της βασικής κατάστασης του U-236 βρίσκουμε

$$-1784,63 - \delta = -1785,19 \text{ MeV. Άρα } \delta E = -1778,95 + \varepsilon_K - (-1784,63 - \delta) = 5,67 + \delta + \varepsilon_K \text{ MeV} = 6,23 \text{ MeV} + \varepsilon_K.$$

Ας επαναλάβουμε τώρα τον ίδιο απλό υπολογισμό για την αντίδραση



Η ενέργεια $-B$ του $n + U - 238$, και επομένως και του U-239* είναι $1795,95 \text{ MeV} - \delta + \varepsilon_K$, ενώ το $-B$ για τη βασική κατάσταση του U-239 είναι $-1801,58 \text{ MeV}$. Άρα για την ενδεχόμενη σχάση του U-238, το δE ισούται με $5,63 \text{ MeV} - \delta + \varepsilon_K = 5,07 \text{ MeV} + \varepsilon_K$.

Δεδομένου ότι το φράγμα δυναμικού που εμποδίζει την αυθόρμητη σχάση του U-235 ή του U-238 είναι περίπου $6,2 \text{ MeV}$ (βλ. Σχ. 8.4(β), σελ.121 του βιβλίου ΚΣ), συμπεραίνουμε ότι η ενσωμάτωση ενός νετρονίου ακόμη και μηδενικής κινητικής ενέργειας στο U-235 παρέχει αρκετή ενέργεια για την υπερπήδηση του φράγματος και επομένως για την άμεση σχάση, ενώ η ενσωμάτωση ενός νετρονίου μηδενικής κινητικής ενέργειας στο U-238 δεν παρέχει αρκετή ενέργεια για την υπερπήδηση του φράγματος και επομένως δεν οδηγεί σε σχάση. Χρειάζεται το νετρόνιο που θα

ενσωματωθεί να έχει κινητική ενέργεια τουλάχιστον ίση με $6,2 \cdot 5,1 = 1,1 \text{ MeV}$ για να γίνει η σχάση του U-238. Δεδομένου ότι όσο πιο μεγάλη η κινητική ενέργεια του νετρονίου τόσο μικρότερη είναι η πιθανότητα ενσωμάτωσης, το μεν U-238 χαρακτηρίζεται ως μη σχάσιμο, ενώ το U-235 είναι σχάσιμο. Όπως είδαμε, η θεμελιώδης αυτή διαφορά από την άποψη του περιορισμού των πυρηνικών όπλων οφείλεται στον όρο δ που στην περίπτωση του U-235 προστίθεται κατά τον υπολογισμό του δE (λόγω του ότι η ενσωμάτωση του νετρονίου οδηγεί από ζ/μ πυρήνα σε ζ/ζ πυρήνα), ενώ στην περίπτωση του U-238 αφαιρείται κατά τον υπολογισμό του δE (λόγω του ότι η ενσωμάτωση του νετρονίου οδηγεί από ζ/ζ πυρήνα σε ζ/μ πυρήνα). Για τον ίδιο λόγο και οι τεχνητοί πυρήνες U-233 και Pu-239 είναι σχάσιμοι.

Για να παρακολουθήσετε το σχετικό VIDEO διάρκειας 35:30 λ πατήστε [εδώ](#).

γ) 51:30λ έως 55λ: Γιατί δεν υπάρχουν πυρήνες με A μεγαλύτερο από περίπου 240;

Από ενεργειακή άποψη συμφέρει να σπάσουν αυθόρμητα σε δύο θραύσματα όλοι οι πυρήνες με A μεγαλύτερο από περίπου 100. Αυτό που εμποδίζει την αυθόρμητη σχάση των πυρήνων με $100 < A < 240$ και διατηρεί 'εν ζωή' το μισό του περιοδικού πίνακα των στοιχείων είναι το φράγμα δυναμικού (βλ. το Σχ.8.4(β), σελ 121 του βιβλίου ΚΣ), το οποίο όμως γίνεται όλο και μικρότερο όσο το A αυξάνει μέχρι που για κάποιο A αρκετά μεγάλο (γύρω στα 300) μηδενίζεται και οι αντίστοιχοι πυρήνες διασπώνται ακαριαία (βλ. σελ. 120-122 του βιβλίου ΚΣ). Για να παρακολουθήσετε το σχετικό VIDEO διάρκειας 3:30 λ πατήστε [εδώ](#).

Στο βιβλίο ΚΣ θα βρείτε τις απαντήσεις και σε κάποια άλλα εύλογα ερωτήματα:

Γιατί τα θραύσματα της σχάσης μεγάλων πυρήνων είναι ραδιενεργά; Ποια η ραδιενέργεια τους; (Σελ. 124 του βιβλίου ΚΣ)

Πόση ενέργεια εκλύεται από τη σχάση του U-235; (Σελ. 123 του βιβλίου ΚΣ)

Πόσοι σταθεροί πυρήνες υπάρχουν με διαφορετικό A ; (Σελ. 124-125 του βιβλίου ΚΣ)

Από ποιο A και πάνω είναι δυνατή η ραδιενέργεια α ; (Σελ. 120 του βιβλίου ΚΣ)

Ερωτήσεις πολλαπλής επιλογής

1. Γιατί δεν υπάρχουν πυρήνες με $A \geq 240$;
 - (α) Γιατί συμφέρει ενεργειακά και είναι και εφικτό να σπάσουν σε δυο κομμάτια
 - (β) Γιατί σε όλη την ιστορία του Σύμπαντος δεν έτυχε ποτέ να δημιουργηθούν
 - (γ) Γιατί η κινητική ενέργεια επιβάλλει τη σχάση τους σε δύο κομμάτια
 - (δ) Γιατί ο σχηματισμός τους θα αύξανε την ολική τους ενέργεια

2. Γιατί τα θραύσματα της σχάσης πολύ μεγάλων πυρήνων είναι ραδιενεργά;
 - (α) Γιατί έχουν πολύ μεγάλη κινητική ενέργεια γύρω στα 90 MeV το καθένα τους
 - (β) Γιατί το ποσοστό νετρονίων τους αμέσως μετά τη σχάση είναι αυτό του μητρικού πυρήνα, ενώ το ποσοστό ισορροπίας είναι σαφώς μικρότερο
 - (γ) Γιατί λόγω του άνισου εν γένει μεγέθους τους έχουν και άνισο ποσοστό νετρονίων που τείνει να εξισωθεί
 - (δ) Γιατί προσκρούουν σε άλλους πυρήνες ή άτομα και τείνουν να διασπασθούν

3. Για ποιο λόγο το ουράνιο 235 είναι σχάσιμο και το ουράνιο 238 δεν είναι;
 - (α) Επειδή το 235 έχει λιγότερα νουκλεόνια, η ενσωμάτωση ενός εξωτερικού νετρονίου επιτρέπει την υπέρβαση του φράγματος δυναμικού σε αντίθεση με το 238
 - (β) Επειδή το 235 έχει λιγότερα νετρόνια η ενσωμάτωση ενός εξωτερικού νετρονίου επιτρέπει την υπέρβαση του φράγματος δυναμικού σε αντίθεση με το 238
 - (γ) Επειδή η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μικρότερη σε απόλυτη τιμή στο 235 από ότι στο 238, η ενσωμάτωση ενός εξωτερικού νετρονίου επιτρέπει την υπέρβαση του φράγματος δυναμικού στο 235 σε αντίθεση με το 238
 - (δ) Επειδή η ενέργεια διέγερσης $\varepsilon_{\text{νετρονίου}} + E_{235} - E_{236}$ του προκύπτοντος 236 είναι μεγαλύτερη κατά 2δ από την ενέργεια διέγερσης $\varepsilon_{\text{νετρονίου}} + E_{238} - E_{239}$, του προκύπτοντος 239. Η διαφορά αυτή επιτρέπει την υπέρβαση του φράγματος δυναμικού στο προκύπτον 236 σε αντίθεση με το προκύπτον 239

ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Το υπ' αρ. 7, σελ. 126 του βιβλίου ΚΣ