

ΠΥΡΗΝΙΚΗ ΣΤΑΘΕΡΟΤΗΤΑ - ΠΡΟΤΥΠΟ ΤΗΣ ΥΓΡΗΣ ΣΤΑΓΟΝΑΣ

Η συνολική μάζα ενός σταθερού πυρήνα είναι πάντοτε μικρότερη από αυτή των συστατικών ή νουκλεονίων του (πρωτονίων και νετρονίων). Αυτό συμβαίνει διότι μέρος της μάζας ή αλλιώς της ενέργειας ξοδεύεται σε **ενέργεια σύνδεσης των νουκλεονίων** που δημιουργούν τη δέσμια κατάσταση. Αυτό το **έλλειμμα μάζας** αντιστοιχεί στην έννοια της πυρηνικής ενέργειας και ισούται με τη διαφορά της ατομικής μάζας μείον το μαζικό αριθμό σε μονάδες u . Δηλαδή:

$$\Delta = M(A, Z) - A \quad (\text{σε } u)$$

Συνεπώς η **ενέργεια σύνδεσης των νουκλεονίων του πυρήνα $B(A, Z)$** αποτελεί την ενέργεια που απαιτείται να δαπανηθεί ώστε να αποσυνδεθούν τα Z πρωτόνια και τα N νετρόνια που αποτελούν το δέσμιο σύστημα του πυρήνα. Δηλαδή η μάζα του πυρήνα θα είναι όσο η μάζα των Z πρωτονίων και N νετρονίων που τον αποτελούν αφαιρώντας την ενέργεια σύνδεσης $B(A, Z)$ λαμβάνοντας ότι $c = 1$:

$$M_{\text{πυρήνα}} = Zm_p + Nm_n - B(A, Z) \Rightarrow B(A, Z) = Zm_p + Nm_n - M_{\text{πυρήνα}}$$

Αλλά: $N = A - Z$ και $M_{\text{πυρήνα}} = M(A, Z) - Zm_e$ οπότε:

$$B(A, Z) = Zm_p + (A - Z)m_n - (M(A, Z) - Zm_e) =$$

$$= Z(m_p + m_e) + (A - Z)m_n - M(A, Z) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow B(A, Z) = ZM_H + (A - Z)m_n - M(A, Z) \quad (\text{σε MeV}) \quad (1)$$

όπου $M_H = m_p + m_e$ είναι η μάζα του ουδέτερου ατόμου του υδρογόνου, m_n η μάζα του νετρονίου και $M(A, Z)$ η μάζα του ουδέτερου ατόμου με μαζικό αριθμό A και ατομικό αριθμό Z .



Αν λάβουμε υπόψη ότι:

$$M_H = \Delta_H + A = \Delta_H + 1, m_n = \Delta_n + A = \Delta_n + 1 \text{ και } M(A, Z) = \Delta + A$$

τότε η **(1)** δίνει την ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα συναρτήσει των ελλειμμάτων μάζας ως:

$$\begin{aligned} B(A, Z) &= Z(\Delta_H + 1) + (A - Z)(\Delta_n + 1) - (\Delta + A) = \\ &= Z\Delta_H + Z + (A - Z)\Delta_n + A - Z - \Delta - A \Rightarrow \\ \Rightarrow B(A, Z) &= Z\Delta_H + (A - Z)\Delta_n - \Delta \quad (\text{σε MeV}) \quad (2) \end{aligned}$$

Αν $B(A, Z) > 0$ έχουμε σταθερά πυρηνικά συστήματα, ενώ αν $B(A, Z) < 0$ πρόκειται για ασταθή πυρηνικά συστήματα και παρατηρείται πλεόνασμα μάζας $\Delta > 0$.

Η σχέση **(2)** μας δίνει τη δυνατότητα να υπολογίσουμε την ενέργεια σύνδεσης με βάση τα πυρηνικά δεδομένα του Nuclear Data.

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι:

$$E_\Sigma = \frac{B}{A} \quad (\text{σε MeV}) \quad (3)$$

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο μετράει τη σταθερότητα του πυρήνα, δηλαδή όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας.

Ένα από τα βασικότερα μοντέλα που εξηγεί την πυρηνική ενέργεια σύνδεσης είναι το **πρότυπο της υγρής σταγόνας**, το οποίο διατυπώθηκε το 1936 από τον Bohr και ονομάζεται έτσι διότι σε μεγάλο βαθμό τα νουκλεόνια μεταχειρίζονται ως μόρια μιας σταγόνας νερού. Τα νουκλεόνια αλληλεπιδρούν ισχυρά και υφίστανται συχνές κρούσεις μεταξύ τους, καθώς στριφογυρίζουν μέσα στον πυρήνα, το οποίο είναι ανάλογο με τη θερμικά προκαλούμενη κίνηση των μορίων νερού μέσα σε υγρό.



Ο von Weizsäcker έκφρασε με αρκετά μεγάλη ακρίβεια μέσω του προτύπου της υγρής σταγόνας την τιμή της ενέργειας σύνδεσης λαμβάνοντας υπόψη τα γενικά ποιοτικά χαρακτηριστικά της, συναρτήσε του μαζικού αριθμού A . Σύμφωνα με αυτό η ολική ενέργεια σύνδεσης είναι το άθροισμα των όρων την ενέργειας όγκου $\alpha_v A$, της ενέργειας επιφάνειας $-\alpha_s A^{2/3}$, της ενέργειας Coulomb $-\alpha_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$, της ενέργειας ασυμμετρίας $-\alpha_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$ και της ενέργειας σύζευξης:

$$\delta(A, Z) = \begin{cases} +\delta & , \text{για άρτιους} - \text{άρτιους πυρήνες} \\ 0 & , \text{για άρτιους} - \text{περιττούς πυρήνες} \\ -\delta & , \text{για περιττούς} - \text{περιττούς πυρήνες} \end{cases}$$

Άρα ο ημ εμπειρικός τύπος της ενέργειας σύνδεσης του Weizsäcker είναι:

$$B(A, Z) = \alpha_v A - \alpha_s A^{2/3} - \alpha_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - \alpha_a \frac{(A-2Z)^2}{A} + \delta \quad (4)$$

όπου οι τιμές των παραμέτρων λαμβάνονται ως $\alpha_v = 15,6 \text{ MeV}$, $\alpha_s = 17,4 \text{ MeV}$, $\alpha_c = 0,7 \text{ MeV}$, $\alpha_a = 23,3 \text{ MeV}$ και $\delta = 0,6 - 1 \text{ MeV}$ μια εμπειρική σταθερά για την προσαρμογή προς τα πειραματικά δεδομένα, η οποία περιγράφει τη διαφορά στη σταθερότητα μεταξύ άρτιων-άρτιων και άρτιων-περιττών πυρήνων με ίδιο μαζικό αριθμό A .

Φυσική σημασία κάθε όρου:

- **Ενέργεια όγκου $\alpha_v A$:** έχει τη μεγαλύτερη συνεισφορά στην ενέργεια σύνδεσης και προέρχεται από την αλληλεπίδραση των γειτονικών νουκλεονίων μέσω των πυρηνικών δυνάμεων.
- **Ενέργεια επιφάνειας $-\alpha_s A^{2/3}$:** Τα νουκλεόνια που βρίσκονται στην επιφάνεια του πυρήνα αλληλεπιδρούν με μικρότερο αριθμό νουκλεονίων κι επομένως παρουσιάζουν μειωμένη ενέργεια



σύνδεσης. Άρα θα πρέπει να αφαιρέσουμε έναν όρο ανάλογο της επιφάνειας $S = 4\pi R^2 = 4\pi(R_0 A^{1/3})^2 = 4\pi R_0^2 A^{2/3}$.

- **Ενέργεια Coulomb** $-a_c \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}}$: είναι η ηλεκτροστατική ενέργεια λόγω απώσεων των θετικά φορτισμένων πρωτονίων του πυρήνα.
- **Ενέργεια ασυμμετρίας** $-a_a \frac{(A-2Z)^2}{A}$: περιγράφει τη μείωση της ενέργειας σύνδεσης λόγω της ασύμμετρης παρουσίας πρωτονίων και νετρονίων (Κατά τη συμμετρία $N = Z$ είναι $A - 2Z = N + Z - 2Z = N - Z = 0$ οπότε η ενέργεια ασυμμετρίας μηδενίζεται).
- **Ενέργεια σύζευξης** $\delta(A, Z)$: είναι μια εμπειρική σταθερά που εισάγεται για την προσαρμογή προς τα πειραματικά δεδομένα, η οποία περιγράφει τη διαφορά στη σταθερότητα μεταξύ άρτιων - άρτιων και άρτιων - περιττών πυρήνων με ίδιο μαζικό αριθμό A .

Συγγραφή – Επιμέλεια: Παναγιώτης Φ. Μοίρας

