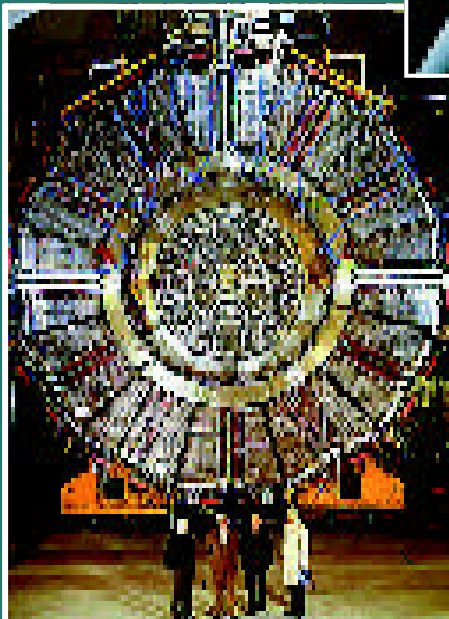
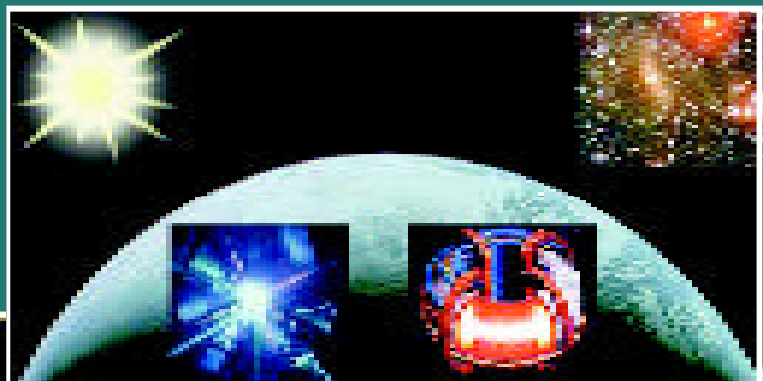


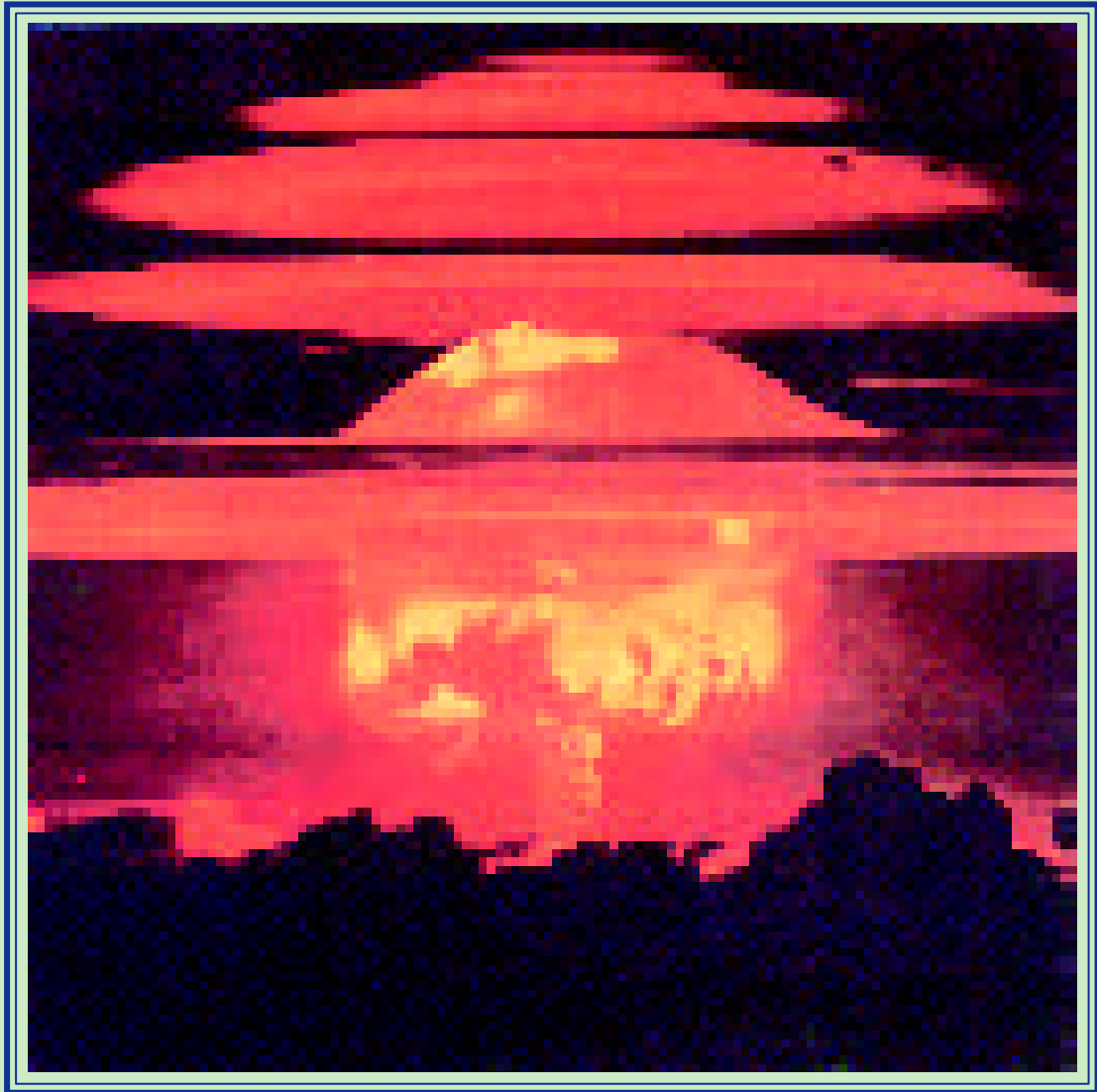
ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

- ☐ Ιδιότητες των πυρήνων
- ☐ Τα στοιχειώδη σωματίδια
- ☐ Η ραδιενέργεια
- ☐ Πυρηνικές αντιδράσεις
- ☐ Εφαρμογές και κίνδυνοι της ραδιενέργειας



Ο ενεργειακός γίγαντας- πυρήνας εκδηλώνει την παρουσία του τόσο στο μικρόκοσμο όσο και σε φαινόμενα συμπαντικής κλίμακας.

Οι διατάξεις των ανιχνευτών σωματιδίων είναι τα ηλεκτρονικά μάτια των φυσικών για να παρατηρούν τα υποατομικά σωματίδια.



Η τρομακτική φωτογραφία του «μανιταριού» μιας πυρηνικής έκρηξης

Το πιθανό αποτέλεσμα μιας πυρηνικής έκρηξης ενός μεγατόνου θα ήταν η καταστροφή μιας πόλης σαν την Αθήνα. Η έκρηξη θα προκαλούσε τεράστια πυρκαγιά, που θα κατάπινε το μεγαλύτερο μέρος της πόλης. Ο καπνός και η σκόνη, που θα διασκορπίζονταν στην ατμόσφαιρα από παρόμοιες εκρήξεις, θα προκαλούσαν έναν πυρηνικό χειμώνα με πολύ χαμηλές θερμοκρασίες.



3-1 Albert Einstein (1879-1955) και Robert Oppenheimer (1904-1967). Ο πρώτος, με μια επιστολή του το 1939 στον πρόεδρο Ρούζβελτ, υπέδειξε τη δυνατότητα κατασκευής ατομικής βόμβας. Μετά τον πόλεμο έπαιξε ενεργό ρόλο στην προσπάθεια αφοπλισμού. Ο δεύτερος ήταν ο πρωτεργάτης της κατασκευής της πρώτης βόμβας ουρανίου που ρίχτηκε στη Χιροσίμα.



3-2 Ένα κορίτσι - θύμα της ρίψης της πυρηνικής βόμβας πλουτωνίου στο Ναγκασάκι.

3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ

Λίγες ανακαλύψεις έμελλαν να έχουν τόσο σημαντική επίδραση στην ανθρώπινη ιστορία όσο η ανακάλυψη της πυρηνικής ενέργειας.

Από το 1896 ο Henri Becquerel (Ανρί Μπεκερέλ) είχε διαπιστώσει ότι ένα ορυκτό που περιείχε ουράνιο εξέπεμπε μια αόρατη ακτινοβολία, η οποία διαπερνούσε το μαύρο χαρτί που κάλυπτε το ορυκτό και προσέβαλλε τη φωτογραφική πλάκα. Η μεγάλη ενέργεια αυτής της ακτινοβολίας, που εκπεμπούν αυθόρμητα, δεν αντιστοιχούσε σε καμιά από τις γνωστές πηγές εκπομπής ακτινοβολιών και, για να εξηγηθεί, άρχισε η μελέτη του εσωτερικού του ατόμου.

Στις αρχές του 20ού αιώνα, συγκεκριμένα το 1911, τα πειράματα του Rutherford (Ράδερχορντ) και των μαθητών του Geiger (Γκάιγκερ) και Marsden (Μάρσντεν) έδειξαν ότι ο πυρήνας ενός ατόμου μπορούσε να θεωρηθεί ως μία σχεδόν σημειακή μάζα με θετικό φορτίο και ότι η μάζα όλου του ατόμου είναι κυρίως συγκεντρωμένη στον πυρήνα.

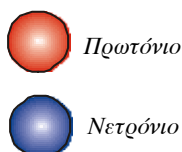
Το γεγονός όμως που τράβηξε την προσοχή όχι μόνο των επιστημόνων αλλά και ολόκληρης της ανθρωπότητας πάνω στον πυρήνα ήταν η ανακάλυψη ότι στην «καρδιά» του ατόμου βρισκόταν ένας **ενεργειακός γίγαντας**.



3-3 Ο Ernest Rutherford (1871-1937) ήταν ένας από τους ανθρώπους που έθεσαν τα θεμέλια για την εξερεύνηση του πυρήνα.



3-4 Οι σημερινές ενδείξεις μάς λένε ότι το Σύμπαν γεννήθηκε σε μια γιγαντιαία έκρηξη, το Bing-Bang, πριν από 15 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν το μέγεθος όλου του Σύμπαντος ήταν μικρότερο από αυτό ενός ατόμου. Σήμερα παρόμοιες συνθήκες αναπαράγονται στο εργαστήριο με συγκρούσεις στοιχειωδών σωματιδίων στους επιταχυντές.



3-5 Ένας πυρήνας μοιάζει με ένα τσαμπί, του οποίου οι ρώγες είναι τα πρωτόνια και τα νετρόνια.

Όταν ο άνθρωπος βρήκε τρόπους να αποδεσμεύσει την πυρηνική ενέργεια, αναβίωσαν πάνω στη Γη δυνάμεις κοσμικής κλίμακας. Πρόκειται για τις ίδιες δυνάμεις που κάποτε, στο αρχέγονο παρελθόν, σχημάτισαν στα διάφορα άστρα την ύλη από την οποία είμαστε και εμείς οι ίδιοι φτιαγμένοι.

Είναι οι ίδιες δυνάμεις που προκαλούν τις πυρηνικές αντιδράσεις στον Ήλιο και στα άλλα άστρα και ελευθερώνουν την τόσο απαραίτητη για τη συνέχιση της ζωής ηλιακή ενέργεια.

Δυστυχώς όμως η αποδέσμευση της πυρηνικής ενέργειας γέννησε και τον πιο μαζικό τρόπο αφανισμού των ανθρώπων. Το 1945 η ενέργεια που αποδεσμεύθηκε μόνο από 1kg ουρανίου ισοπέδωσε μια ολόκληρη πόλη, τη Χιροσίμα.

Σήμερα στον πλανήτη μας «συγκατοικούν» σε μια εύθραυστη ισορροπία η έμβια ύλη, που απαιτεί μικρά και ελέγξιμα ποσά ενέργειας, και ύλη έτοιμη στα οπλοστάσια να υποστεί πυρηνικές διεργασίες και να αποδεσμεύσει τεράστια και ανεξέλεγκτα ποσά ενέργειας, ικανά να εξαφανίσουν όλο τον ανθρώπινο πολιτισμό. Η αναζήτηση τρόπων τιθάσευσης και χρησιμοποίησης της πυρηνικής ενέργειας, ώστε να τεθεί στην υπηρεσία του ανθρώπου και όχι να οδηγήσει στον αφανισμό του, πρέπει να αποτελέσει μέλημα των σύγχρονων κοινωνιών.

Το μέγεθος και η δομή των πυρήνων

Το πρότυπο του Rutherford για το άτομο είναι όμοιο με αυτό του ηλιακού μας συστήματος. Μετά από επίμονα πειράματα μετρήθηκαν οι ακτίνες του ατόμου και του πυρήνα και βρέθηκε ότι: η ακτίνα του ατόμου είναι της τάξης των 10^{-10}m και η ακτίνα του πυρήνα της τάξης μεγέθους μεταξύ των 10^{-15}m και 10^{-14}m .

Ο πυρήνας λοιπόν έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου. Για να γίνει αυτό αντιληπτό, μπορούμε να κάνουμε την εξής παρομοίωση: το άτομο σαν ένα μεγάλο στάδιο και τον πυρήνα σαν ένα κεράσι στο κέντρο του. Άρα το άτομο είναι σχεδόν άδειο στο εσωτερικό του.

Όλοι οι πυρήνες των ατόμων αποτελούνται από πιο μικροσκοπικά σωματίδια, τα **νουκλεόνια**, που τα διακρίνουμε σε **πρωτόνια** και **νετρόνια**. Ο πυρήνας του υδρογόνου είναι μόνο ένα πρωτόνιο.

Τα πρωτόνια και τα νετρόνια του πυρήνα μπορούμε να τα φανταστούμε σαν ένα τσαμπί από σταφύλια, σφαιρικού περίπου σχήματος, του οποίου οι ρώγες, δηλαδή τα πρωτόνια και τα νετρόνια, έχουν το ίδιο μέγεθος και την ίδια περίπου μάζα, αλλά διαφέρουν ως προς το ηλεκτρικό φορτίο (σχήμα 3-5). Το νετρόνιο είναι ηλεκτρικά ουδέτερο, δηλαδή έχει μηδενικό φορτίο, ενώ το πρωτόνιο φέρει το στοιχειώδες θετικό ηλεκτρικό φορτίο. Το συνολικό φορτίο του πυρήνα είναι ίσο με το άθροισμα των φορτίων των πρωτονίων του.

Στο σημείο αυτό πάντως θα πρέπει να τονιστεί ότι, ενώ στον κόσμο το δικό μας, το μακρόκοσμο, η ακινησία είναι συνηθισμένο φαινόμενο, στο μικρόκοσμο οι στοιχειώδεις δομικές μονάδες της ύλης δεν είναι δυνατό να ακινητοποιηθούν. Εκδηλώνουν μια αέναη κίνηση, δηλαδή κινούνται συνεχώς και έχουν κινητική ενέργεια.

Τη συγκρότηση κάθε πυρήνα περιγράφουμε χρησιμοποιώντας τους παρακάτω αριθμούς:

Τον **ατομικό αριθμό Z**, που είναι ο αριθμός των πρωτονίων του πυρήνα.

Τον **αριθμό νετρονίων N**.

Το **μαζικό αριθμό A**, που είναι ο αριθμός των νουκλεονίων (νετρονίων και πρωτονίων) του πυρήνα. Ισχύει δηλαδή: $A=Z+N$

Συμβολικά ένας πυρήνας θα παριστάνεται ως A_ZX , όπου το X παριστάνει το χημικό σύμβολο του στοιχείου. Έτσι, για παράδειγμα, ο ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ έχει μαζικό αριθμό 56 και ατομικό αριθμό 26, δηλαδή περιέχει 26 πρωτόνια και 30 νετρόνια.

Πυρήνες που ανήκουν στο ίδιο χημικό στοιχείο και έχουν τον ίδιο αριθμό πρωτονίων Z αλλά όχι και τον ίδιο αριθμό νετρονίων N ονομάζονται ισότοποι.

Γίνεται φανερό ότι οι ισότοποι πυρήνες έχουν διαφορετικό μαζικό αριθμό A. Τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων, αφού αυτός, στα ουδέτερα άτομα, είναι ίσος με τον αριθμό των πρωτονίων. Συνεπώς τα ισότοπα ενός στοιχείου έχουν τις ίδιες χημικές ιδιότητες, επειδή αυτές καθορίζονται από το πλήθος των ατομικών ηλεκτρονίων. Γι' αυτό το λόγο στη Χημεία το όνομα κάθε στοιχείου συνοδεύεται μόνο από τον ατομικό του αριθμό Z.

Τα ισότοπα ενός στοιχείου δε βρίσκονται με την ίδια αφθονία στη φύση. Έτσι το ισότοπο ${}^{12}_6\text{C}$ του άνθρακα βρίσκεται σε ποσοστό περίπου 99% στη φύση, ενώ τα ισότοπα ${}^{13}_6\text{C}$ και ${}^{14}_6\text{C}$ βρίσκονται σε πολύ μικρότερα ποσοστά.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων χρησιμοποιούμε την **ατομική μονάδα μάζας u**, η οποία ορίζεται ως το 1/12 της μάζας του ατόμου του ${}^{12}_6\text{C}$. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα ενός ατόμου ${}^{12}_6\text{C}$ μαζί με τα 6 ηλεκτρόνια του είναι 12u.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων προτιμάμε να χρησιμοποιούμε τις ατομικές μονάδες μάζας αντί για kg, γιατί η ατομική μονάδα μάζας είναι πολύ μικρότερη από το kg και έτσι η σύγκριση μεταξύ των μαζών των πυρήνων γίνεται με πολύ μεγαλύτερη ακρίβεια.

Σύμφωνα με τη θεωρία της σχετικότητας, η μάζα οποιουδήποτε σώματος είναι ισοδύναμη με κάποια ποσότητα ενέργειας, όπως καθορίζεται από τη σχέση:

$$E = m c^2 \quad (3.1)$$

Σύμφωνα με τη σχέση αυτή, μπορούμε να μετράμε τη μάζα ενός σωματιδίου και σε μονάδες ενέργειας. Συνήθως στην Πυρηνική χρησιμοποιούμε τη μονάδα 1MeV.

Σχέσεις των διάφορων μονάδων μάζας και ενέργειας:

$$\begin{aligned} 1u &= 1,66055 \times 10^{-27} \text{ kg} \\ 1\text{eV} &= 1,602 \times 10^{-19} \text{ Joule} \\ 1\text{MeV} &= 1,602 \times 10^{-13} \text{ Joule} \\ 1u &= 931,48 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Πίνακας 3.1 Μάζες ηρεμίας και φορτίο του πρωτονίου, του νετρονίου και του ηλεκτρονίου σε διάφορες μονάδες.

	MAZA			ΦΟΡΤΙΟ
Σωματίδιο	kg	u	MeV/c ²	C
Πρωτόνιο	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28	$1,602177 \times 10^{-19}$
Νετρόνιο	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57	0,000000
Ηλεκτρόνιο	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	0,511	$-1,602177 \times 10^{-19}$

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 1

Να υπολογιστεί η μάζα ενός πρωτονίου σε kg, Joule και MeV.

ΛΥΣΗ Η μάζα ενός πρωτονίου είναι:

$$\begin{aligned}
 m_p &= 1,007276 \text{ u ή} \\
 m_p &= 1,007276 \times 1,66055 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg ή} \\
 m_p &= (1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,5 \times 10^{-10} \text{ J ή} \\
 m_p &= (1,5 \times 10^{-10} \text{ J}) / (1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = 938 \text{ MeV.}
 \end{aligned}$$

Έλλειμμα μάζας - Ενέργεια σύνδεσης

Ας θεωρήσουμε τον απλό πυρήνα δευτέριο ${}^2_1\text{H}$ που περιέχει ένα πρωτόνιο και ένα νετρόνιο και ας αναρωτηθούμε πόση είναι η μάζα του. Μια πρώτη απάντηση ίσως να ήταν ότι είναι ίση με το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων του, δηλαδή $1m_p + 1m_n$. Πειραματικά όμως έχει βρεθεί ότι η μάζα του πυρήνα ${}^2_1\text{H}$ είναι μικρότερη από το άθροισμα αυτό. Η ιδιότητα αυτή των πυρήνων να έχουν μικρότερη μάζα από το άθροισμα των μαζών των νουκλεονίων τους είναι γενική για κάθε πυρήνα.

Η διαφορά της μάζας M_Π ενός πυρήνα από το άθροισμα των μαζών των ελεύθερων νουκλεονίων του ονομάζεται **έλλειμμα μάζας** και παριστάνεται ως ΔM . Για έναν πυρήνα με Z πρωτόνια και N νετρόνια ορίζουμε ως έλλειμμα μάζας ΔM τη διαφορά:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_\Pi \quad (3.2\alpha)$$

Η ισοδύναμη ενέργεια που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας ονομάζεται **ενέργεια σύνδεσης**, παριστάνεται ως E_B και υπολογίζεται από τη σχέση:

$$E_B = (\Delta M)c^2 \quad (3.2\beta)$$

Αυτή ακριβώς η ενέργεια σύνδεσης εκφράζει την ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια που πρέπει να δώσουμε, για να απομακρύνουμε μεταξύ τους τα πρωτόνια και τα νετρόνια, που αποτελούν τον πυρήνα, ώστε να μην υπάρχει καμία αλληλεπίδραση μεταξύ τους.

Αν διατρέσουμε την ενέργεια σύνδεσης με το πλήθος των νουκλεονίων, παίρνουμε την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο.

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

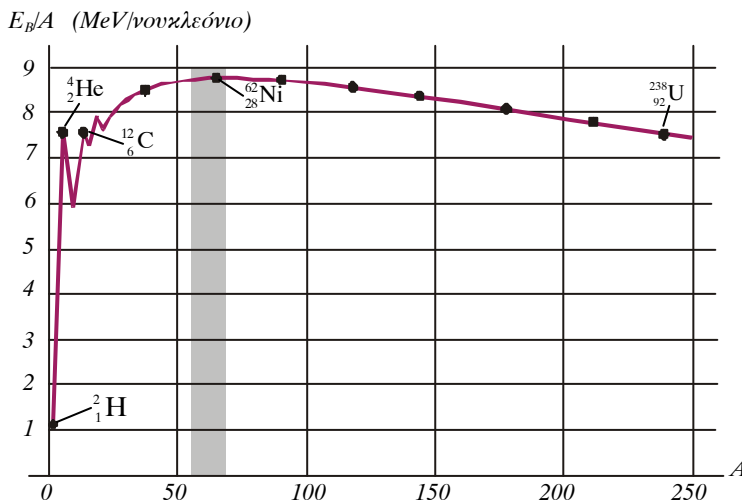
Μερικές τυπικές τιμές ενεργειών σύνδεσης για μερικούς πυρήνες αναφέρονται στον πίνακα 3.2.

ΠΥΡΗΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ/νουκλεόνιο
	MeV	MeV/νουκλεόνιο
$^{12}_6\text{C}$	92,17	7,68
$^{16}_8\text{O}$	127,61	7,97
$^{28}_{14}\text{Si}$	236,93	8,46
$^{56}_{26}\text{Fe}$	492,25	8,79
$^{238}_{92}\text{U}$	1801,72	7,57

Πίνακας 3.2

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των περισσότερων πυρήνων κυμαίνεται μεταξύ των τιμών 7MeV/νουκλεόνιο και 9MeV/νουκλεόνιο, όπως δείχνεται και στο σχήμα 3-6. Σ' αυτό το σχήμα παρατηρούμε ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυξάνεται γρήγορα στα ελαφριά στοιχεία, έχει ένα πλατύ μέγιστο στην περιοχή περίπου με $A=56$ έως $A=60$, και μειώνεται αργά στα μεσαίου βάρους και βαριά στοιχεία. Όμως οι διαφορές, αν και φαίνονται μικρές, είναι σημαντικές.

Πυρήνες με μαζικούς αριθμούς αρκετά μεγάλους ή αρκετά μικρούς δεν έχουν τόση σταθερότητα όσο οι πυρήνες της μεσαίας περιοχής και προτιμούν να μεταπίπτουν σε πυρήνες μεσαίου μαζικού



3-6 Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο στον πυρήνα, ως συνάρτηση του μαζικού αριθμού. Το μηδέν της ενέργειας αντιστοιχεί στην κατάσταση των ελεύθερων νουκλεονίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο τόσο σταθερότερος ενεργειακά είναι ο πυρήνας. Η γκριζα περιοχή είναι αυτή των σταθερών πυρήνων.

αριθμού, οι πρώτοι με θραύση τους σε μικρότερους πυρήνες (**σχάση**), ενώ οι δεύτεροι με συνένωσή τους προς μεγαλύτερους (**σύντηξη**), αποδεσμεύοντας αντίστοιχα ποσά ενέργειας.

Σε οποιαδήποτε σχάση ή σύντηξη η μάζα των πυρήνων που παράγονται και συνεπώς η ισοδύναμη ενέργειά τους είναι πάντα μικρότερη από τη μάζα των αρχικών πυρήνων και την ισοδύναμη ενέργειά τους. Έτσι στις αντιδράσεις αυτές αποδεσμεύονται αντίστοιχα ποσά ενέργειας, όπως θα δούμε σε επόμενη ενότητα.

Για να αντιλήσουμε λοιπόν ενέργεια μέσω πυρηνικών αντιδράσεων, θα πρέπει να μεταβούμε ή από την περιοχή των πολύ μικρών πυρήνων ή από την περιοχή των πολύ μεγάλων πυρήνων προς την περιοχή των μεσαίων πυρήνων.

Παρατηρούμε επίσης ότι η αιχμή της καμπύλης στο $A=4$ δείχνει την ιδιαίτερη σταθερότητα της δομής του σωματίου α .

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 - 2

Ποιο είναι το έλλειμμα μάζας του πυρήνα $^{12}_6\text{C}$;
 Ποια είναι η ενέργεια σύνδεσης;
 Αν η ακτίνα του πυρήνα είναι της τάξης των $2,7 \times 10^{-15} \text{m}$ πόση είναι η πυκνότητά του;

ΛΥΣΗ Με τις μάζες εκφρασμένες σε ατομικές μονάδες μάζας η σχέση 3.2α δίνει:

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_{\text{Π}} \quad \text{ή}$$

$$\Delta M = 6(1,007276)u + 6(1,008665)u - [12,000u - 6(0,000549)u] \quad \text{ή} \quad \Delta M = 0,098946u$$

Ο όρος $6 \times 0,000549u$ παριστάνει τη συνεισφορά σε μάζα των έξι ηλεκτρονίων του ατόμου, εφόσον το $12u$ είναι η μάζα ηρεμίας του ουδέτερου ατόμου του άνθρακα. Η ενέργεια

για σύνδεσης για τον ίδιο πυρήνα είναι:

$$E_B = 0,098946 \times 931,48 \text{MeV} = 92,17 \text{MeV}$$

ή διαχωρίζοντας με το πλήθος των νουκλεονίων

$E_B / 12 = 7,68 \text{MeV}$ ανά νουκλεόνιο. Η πυκνότητά του είναι τότε:

$$\tilde{n} = \frac{m}{V} = \frac{m}{\frac{4}{3} \cdot 3,14 r^3} = \frac{12 \cdot 1,66 \cdot 10^{-27} \text{kg}}{4,19 \cdot 2,17^3 \cdot 10^{-45} \text{m}^3} = 4,6 \cdot 10^{17} \text{kg} / \text{m}^3$$

(Συγκρίνοντας με την πυκνότητα του νερού, που είναι μόλις 10^3kg/m^3 , βλέπουμε πόσο τρομακτικά πυκνή είναι η ύλη του πυρήνα!)

Σημείωση: Όταν κάνουμε υπολογισμούς με έλλειμμα μάζας, ενέργεια σύνδεσης κτλ., η μάζα του πυρήνα που υπεισέρχεται αναφέρεται στο γυμνό πυρήνα, χωρίς τα ηλεκτρόνια. Οι πίνακες των μαζών όμως δίνουν τη μάζα των ουδέτερων ατόμων, που περιλαμβάνει και όλα τα ηλεκτρόνά τους. Για να βρούμε λοιπόν τη μάζα ενός γυμνού πυρήνα, όταν ενδιαφερόμαστε για ακρίβεια αρκετών δεκαδικών ψηφίων, πρέπει να αφαιρούμε τη μάζα αυτών των ηλεκτρονίων, έστω και αν είναι πολύ μικρή.

Οι πυρηνικές δυνάμεις

Είδαμε ότι τα νουκλεόνια βρίσκονται σε μια αέναη και αδιάκοπη κίνηση μέσα στον πυρήνα. Εξαιτίας της κίνησης αυτής τα νουκλεόνια έχουν μια τεράστια κινητική ενέργεια, η οποία τείνει να τα διασκορπίσει προς τα έξω και επομένως να διαλύσει τον πυρήνα. Επιπλέον τα πρωτόνια στον πυρήνα υφίστανται την αμοιβαία ηλεκτρική άπωση, η οποία τείνει επίσης να τα εκδιώξει από τον πυρήνα.

Τότε τι είναι εκείνο που συγκρατεί το πυρηνικό «τσαμπί» ενιαίο;

Καταλήγουμε λοιπόν ότι μια και υπάρχουν πυρήνες, θα πρέπει να υπάρχει και μία άλλη δύναμη, **ισχυρότατα ελκτική**, που θα υπερνικά την ηλεκτρική άπωση και την τάση που έχουν τα νουκλεόνια να διασκορπιστούν λόγω της έντονης κίνησής τους. Μία τέτοια δύναμη πράγματι υπάρχει και είναι γνωστή με το όνομα **ισχυρή πυρηνική δύναμη**. Η δύναμη αυτή έχει τα εξής χαρακτηριστικά:

- Δεν κάνει διάκριση μεταξύ πρωτονίων και νετρονίων. Είναι δηλαδή η ίδια για τα ζεύγη πρωτόνιο - πρωτόνιο, πρωτόνιο - νετρόνιο και νετρόνιο - νετρόνιο.
- Δρα μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων και μόνο στις πολύ κοντινές αποστάσεις.

Πράγματι, όταν η απόσταση μεταξύ των κέντρων δύο νουκλεονίων είναι μεγαλύτερη από $4 \times 10^{-15} \text{ m}$, η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι σχεδόν μηδέν.

Στο γήινο περιβάλλον και στον κόσμο γύρω μας, που γίνεται άμεσα αντιληπτός, οι πυρήνες σχεδόν ποτέ δεν πλησιάζουν ο ένας τον άλλο, γιατί οι ηλεκτρικές απώσεις δεν τους αφήνουν. Έτσι η ισχυρή πυρηνική δύναμη, που δρα μόνο «εξ επαφής», δε γίνεται εύκολα αισθητή ούτε και επηρεάζει άμεσα τα μακροσκοπικά φαινόμενα.

Υποψιαστήκαμε για πρώτη φορά την ύπαρξή της, μόνο όταν μπορέσαμε με κατάλληλους επιταχυντές να δώσουμε υψηλές κινητικές ενέργειες σε πυρήνες, ώστε να μπορέσουν να υπερνικήσουν το φράγμα των ηλεκτρικών απώσεων και να πλησιάσουν σε απόσταση λιγότερη από $2 \times 10^{-15} \text{ m}$ άλλους πυρήνες. Έτσι καταφέραμε να αλληλεπιδράσουν οι δύο πυρήνες και να σχηματιστούν νέοι πυρήνες.

Ο πυρήνας έχει ενεργειακές στάθμες

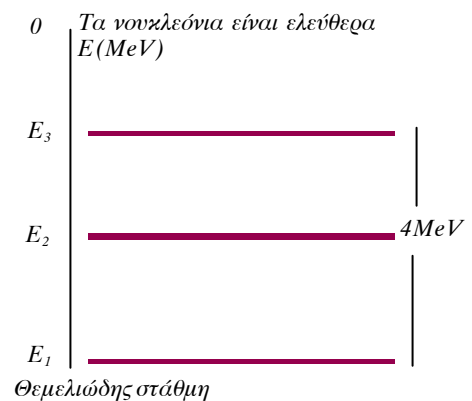
Η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αλλά, όπως συμβαίνει και με την ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, είναι κβαντωμένο μέγεθος και μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές.

Τη στάθμη που αντιστοιχεί στη μικρότερη δυνατή ενέργεια τη λέμε και εδώ θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη. Οι υπόλοιπες ενεργειακές στάθμες του πυρήνα παριστάνονται σχηματικά με μικρές οριζόντιες γραμμές πάνω από τη θεμελιώδη ενεργειακή στάθμη και ονομάζονται διεγερμένες στάθμες (σχήμα 3-8).

Οι αποστάσεις των ενεργειακών σταθμών στο άτομο του υδρογόνου είναι μερικά eV, ενώ στον πυρήνα οι αποστάσεις των ενεργειακών σταθμών είναι μερικά MeV, δηλαδή ένα εκατομμύριο φορές περισσότερες.



3-7 Η κινητική ενέργεια των νουκλεονίων και η απωστική δύναμη μεταξύ των πρωτονίων τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα, ενώ η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι αυτή που τον κρατάει ενιαίο.



3-8 Οι πρώτες λίγες ενεργειακές στάθμες του πυρήνα ${}^{14}_7\text{N}$. Η θεμελιώδης ενεργειακή στάθμη αντιστοιχεί στην πιο ευσταθή κατάσταση του πυρήνα. Όλες οι στάθμες έχουν αρνητική ενέργεια. Οι διεγερμένες στάθμες έχουν απλώς μεγαλύτερη ενέργεια από τη θεμελιώδη. Κάθε φορά που ο πυρήνας, ενώ βρίσκεται σε μια διεγερμένη στάθμη, μεταπίπτει σε μια πιο χαμηλή, αποβάλλει στο περιβάλλον του ενέργεια με τη μορφή φωτονίων.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-3

Για δύο πρωτόνια που βρίσκονται σε μια απόσταση $2 \times 10^{-15} \text{m}$ να συγκρίνετε τη βαρυτική, την ηλεκτρική και την πυρηνική δύναμη. Δίνεται ότι η πυρηνική δύναμη σ' αυτή την απόσταση είναι της τάξης των 10^3N .

ΛΥΣΗ Η βαρυτική και η ηλεκτρική δύναμη υπολογίζονται αντίστοιχα από τις σχέσεις:

$$F_{\text{βαρ}} = G \frac{m_p^2}{r^2} \quad \Xi$$

$$F_{\text{αα}} = 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(2 \cdot 10^{-15})^2} \text{N} = 4,65 \cdot 10^{-35} \text{N}$$

$$F_{\text{εε}} = k \frac{q_p^2}{r^2} \quad \Xi$$

$$F_{\text{εε}} = 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(2 \cdot 10^{-15})^2} \text{N} = 57,6 \text{N}$$

Παρατηρούμε ότι η βαρυτική δύναμη είναι περίπου 10^{36} φορές ασθενέστερη της ηλεκτρικής.

Η πυρηνική δύναμη, σε αντίθεση, είναι της τάξης των 10^3N , δηλαδή περίπου 20 φορές ισχυρότερη της ηλεκτρικής. Επιβεβαιώνουμε έτσι ότι η βαρυτική δύναμη θεωρείται αμελητέα για μια τυπική απόσταση νουκλεονίων στον πυρήνα.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3-4

Ένα σωματίο α κατευθύνεται από πολύ μακριά, με ταχύτητα v , μετωπικά προς πυρήνα ατομικού αριθμού Z , ο οποίος θεωρούμε ότι παραμένει ακίνητος στη θέση του.

Βρείτε την ελάχιστη απόσταση στην οποία μπορεί να πλησιάσει το σωματίο α ως συνάρτηση της ταχύτητάς του. Η δυναμική ενέργεια μεταξύ δύο φορτίων q_1, q_2 σε απόσταση r δίνεται από τη σχέση: $U = Kq_1q_2/r$

ΛΥΣΗ Η κινητική ενέργεια του σωματίου, στο σημείο που αυτό σταματάει στιγμιαία λόγω της απωστικής ηλεκτρικής δύναμης, για να γυρίσει στη συνέχεια πίσω, έχει μετατραπεί σε δυναμική ενέργεια αλληλεπίδρασης. Η ηλεκτρική δυναμική ενέργεια του συστήματος πυρήνας - σωματίο α δίνεται από τη σχέση:

$$U = k \frac{q_1 q_2}{r} = k \frac{(2e)(Ze)}{d}$$

όπου d η ελάχιστη απόσταση μεταξύ τους, $2e$ το φορτίο του σωματίου α και Ze το φορτίο του πυρήνα.

Η διατήρηση της ενέργειας δίνει για το σύστημα:

$$\frac{1}{2} m \tilde{v}^2 = k \frac{(2e)(Ze)}{d}$$

$$\text{Λύνοντας ως προς } d \text{ βρίσκουμε: } d = \frac{4kZe^2}{mv^2}$$

Από τη σχέση αυτή μπορούμε να δούμε ότι για πυρήνες χρυσού, για παράδειγμα, ακόμη και αν το σωματίο α έχει κινητική ενέργεια περίπου 10MeV , δεν μπορεί να πλησιάσει σε απόσταση μικρότερη από $23 \times 10^{-15} \text{m}$ τον πυρήνα και επομένως να γίνει αισθητή η ισχυρή πυρηνική δύναμη.