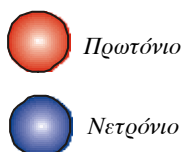
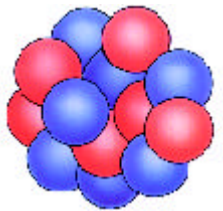




3-4 Οι σημερινές ενδείξεις μάς λένε ότι το Σύμπαν γεννήθηκε σε μια γιγαντιαία έκρηξη, το Bing-Bang, πριν από 15 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν το μέγεθος όλου του Σύμπαντος ήταν μικρότερο από αυτό ενός ατόμου. Σήμερα παρόμοιες συνθήκες αναπαράγονται στο εργαστήριο με συγκρούσεις στοιχειωδών σωματιδίων στους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

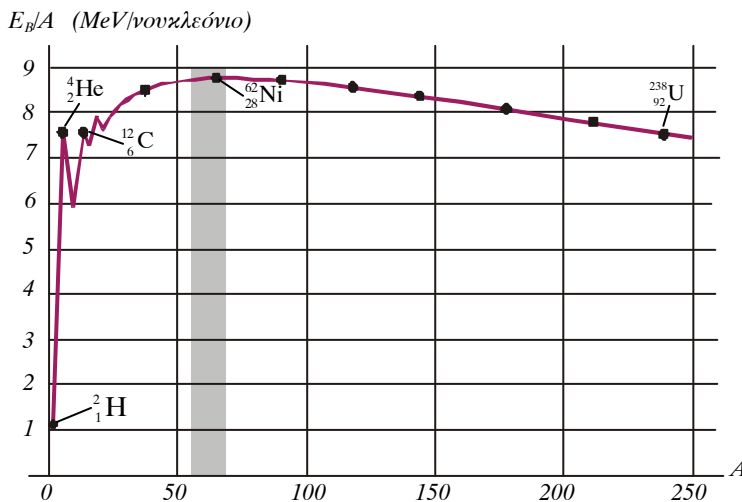
Μερικές τυπικές τιμές ενεργειών σύνδεσης για μερικούς πυρήνες αναφέρονται στον πίνακα 3.2.

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 διααιρώντας 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

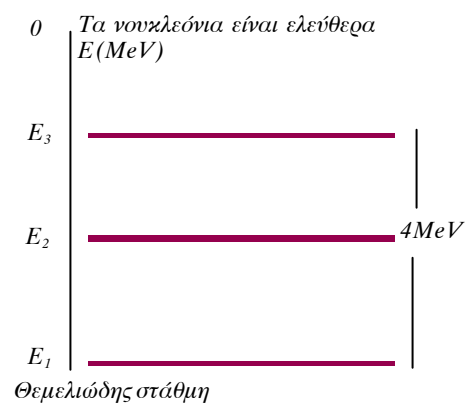
Η ενέργεια των νουκλεονίων του πυρήνα δεν μπορεί να πάρει οποιαδήποτε τιμή, αλλά, όπως συμβαίνει και με την ενέργεια του ατόμου του υδρογόνου, είναι κβαντωμένο μέγεθος και μπορεί να πάρει μόνο διακριτές τιμές.

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.

3.2 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

Μέχρι το 1932 οι φυσικοί πίστευαν ότι όλη η ύλη αποτελείται από τέσσερα βασικά σωματίδια: ηλεκτρόνια, πρωτόνια, νετρόνια και φωτόνια. Τα σωματίδια αυτά πίστευαν ότι δε διασπώνται σε μικρότερα μέρη. Τα πρώτα νέα σωματίδια βρέθηκαν στην κοσμική ακτινοβολία που φτάνει στη Γη από το διάστημα. Μετά τη δεκαετία του '50 οι φυσικοί κατασκεύαζαν όλο και μεγαλύτερους επιταχυντές, με τους οποίους επιτάχυναν σωματίδια σε όλο και μεγαλύτερες ενέργειες και πραγματοποιούσαν κρούσεις με άλλα σωματίδια - στόχους.

Κατά τις κρούσεις αυτές κινητική ενέργεια των αρχικών σωματιδίων μετατρέπεται σε μάζα των νέων σωματιδίων, σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας - ενέργειας. Έτσι είδαν να γεννιούνται όλο και νέα σωματίδια, τα περισσότερα από τα οποία ήταν εξαιρετικά ασταθή και βραχύβια. Μερικά από αυτά έχουν μέσο χρόνο ζωής της τάξης των 10^{-20} s. Σήμερα, που γνωρίζουμε περισσότερα από 200 «στοιχειώδη σωματίδια», ξέρουμε ότι τα περισσότερα από αυτά, συμπεριλαμβανομένων των νετρονίων και των πρωτονίων, δε θεωρούνται στοιχειώδη, αλλά αποτελούνται από μικρότερα σωματίδια. Έτσι επικράτησε τις πραγματικά στοιχειώδεις οντότητες της ύλης να τις ονομάζουμε **σωματίδια** και τις πιο σύνθετες **σωμάτια**.

Τα αντισωματίδια

Το 1932 ο Anderson (Άντερσον) παρατήρησε για πρώτη φορά ένα σωματίδιο που ήταν σε όλα όμοιο με το ηλεκτρόνιο, αλλά έφερε το στοιχειώδες θετικό φορτίο. Το σωματίδιο αυτό ονομάστηκε **ποζιτρόνιο** (e^+) και αποτελεί το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου.

Στη συνέχεια ανακαλύφθηκε το **αντιπρωτόνιο** ($\bar{p}$), που είναι όμοιο με το πρωτόνιο, αλλά φέρει το στοιχειώδες αρνητικό φορτίο. Ακολούθησε η ανακάλυψη του **αντινετρονίου** ($\bar{n}$), που όμως δεν έχει φορτίο, όπως και το νετρόνιο. Το αντινετρόνιο έχει όμως άλλα χαρακτηριστικά, που είναι αντίθετα από αυτά του νετρονίου (κβαντικούς αριθμούς). Όταν το αντινετρόνιο διασπάται, παράγονται σωματίδια που είναι αντισωματίδια εκείνων που παράγονται κατά τη διάσπαση του νετρονίου.

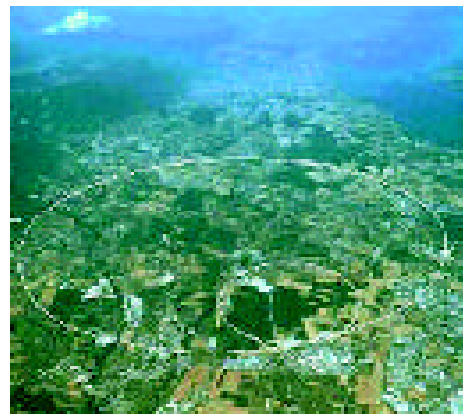
Σε κάθε **σωμάτιο** αντιστοιχεί και ένα **αντισωματίο**.

Τα αντισωματίδια του φωτονίου και μερικών άλλων σωματιδίων ταυτίζονται με τα ίδια τα σωματίδια. Συνήθως τα αντισωματίδια συμβολίζονται με μια παύλα πάνω από το σύμβολο του σωματιδίου.

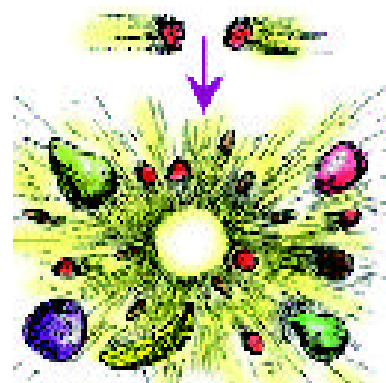
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος δημιουργίας του ποζιτρονίου είναι το **φαινόμενο της παραγωγής ζεύγους ποζιτρονίου - ηλεκτρονίου**.

Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας, καθώς αλληλεπιδρά με κάποιο πυρήνα, εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζεται ένα ζεύγος (e^- , e^+). Σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας, τα δύο σωματίδια που δημιουργούνται έχουν ενέργεια τουλάχιστον ίση με:

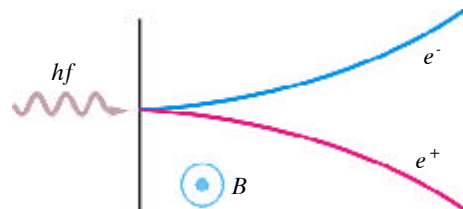
$$E = 2m_e c^2 = 2(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 = 1,64 \times 10^{-13} \text{ J} = 1,02 \text{ MeV}.$$



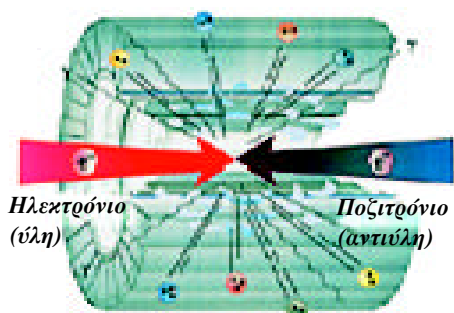
3-9 Ο μεγάλος επιταχυντής στο CERN στη Γενεύη. Έχει περιφέρεια 27km και βρίσκεται 100m κάτω από το έδαφος. Τα σωματίδια μέσα σ' αυτόν ταξιδεύουν σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και διαγράφουν αυτή την περιφέρεια 11000 φορές το δευτερόλεπτο.



3-10 Από τη σύγκρουση δύο αρχικών σωματιδίων γεννιούνται τελείως διαφορετικά νέα σωματίδια.



3-11 Διάγραμμα που δείχνει τη διαδικασία παραγωγής ζεύγους. Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με πυρήνες σε φύλλα μολύβδου και δημιουργούνται ζεύγη (e^- , e^+). Στη συνέχεια τα σωματίδια του ζεύγους καμπυλώνονται αντίθετα μέσα σε μαγνητικό πεδίο.



3-12 Όταν ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο πλησιάζουν, εξαφανίζονται και τα δύο και ελευθερώνεται ένα αντίστοιχο ποσό ενέργειας. Σχεδόν αμέσως η ενέργεια αυτή μετατρέπεται σε σωματίδια, περίπου όπως σχηματίστηκε και η ύλη στα πρώτα στάδια του Σύμπαντος. Η διάταξη γύρω από την περιοχή της σύγκρουσης είναι ανιχνευτές που ανιχνεύουν τα παραγόμενα σωματίδια.



3-13 Murray Gell-Mann (1929) αριστερά και Richard Feynman (1918-1988) δεξιά. Η θεωρητική εργασία τους στα στοιχειώδη σωματίδια τιμήθηκε με Nobel το 1969 και 1965 αντίστοιχα.

Την αντίστοιχη τουλάχιστον ενέργεια πρέπει να διαθέτει και το φωτόνιο που εξαφανίζεται (σχήμα 3-11).

Η αντίστροφη διαδικασία λέγεται **εξαύλωση** και συμβαίνει όταν συγκρούεται ένα ηλεκτρόνιο με ένα ποζιτρόνιο. Τα δύο σωματίδια εξαφανίζονται και εμφανίζονται δύο ή περισσότερα φωτόνια με ολική ενέργεια τουλάχιστον $2m_e c^2$ (*). Αν η ενέργεια των αρχικών σωματιδίων είναι αρκετά μεγάλη, τότε στην τελική κατάσταση θα εμφανιστεί πλειάδα άλλων σωματιδίων, αλλά πάντα η συνολική ενέργεια και η ορμή πρέπει να διατηρούνται (σχήμα 3-12).

Η ταξινόμηση των σωματίων

α. Αδρόνια και quarks (κουάρκς)

Η αφθονία των σωματίων κάνει την ταξινόμησή τους μια μάλλον περίπλοκη υπόθεση. Συνήθως η ταξινόμηση των σωματιδίων βασίζεται στις αλληλεπιδράσεις. Τα σωματίδια που εκδηλώνουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις λέγονται **αδρόνια**. Στα αδρόνια ανήκουν τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Όλα τα αδρόνια έχουν δομή και αποτελούνται από πιο μικροσκοπικά συστατικά, που λέγονται **quarks**. Τα quarks έχουν ως φορτίο κλάσμα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Σήμερα πιστεύουμε ότι τα quarks δεν έχουν εσωτερική δομή. Υπάρχουν έξι quarks, στα οποία έχουμε δώσει περίεργα ονόματα και τα οποία χωρίζουμε σε τρία ζεύγη.

Τα 6 quarks εικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



up (πάνω) - down (κάτω),
charm (γοητευτικό) - strange (παράδοξο),
top (κορυφή) - bottom (πυθμένας).

Ας σημειώσουμε ότι όλα τα αδρόνια που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν είναι φτιαγμένα από το ζεύγος των quarks **up** και **down**.

Το ηλεκτρικό φορτίο του up είναι $\frac{2}{3}e$ και του down $-\frac{1}{3}e$.

Τα quarks δεν εμφανίζονται ποτέ ελεύθερα αλλά πάντα σε ομάδες με άλλα quarks. Η ομαδοποίησή τους γίνεται κατά τέτοιο τρόπο, ώστε τα αδρόνια που σχηματίζουν να έχουν πάντα ακέραιο ηλεκτρικό φορτίο (0, $\pm 1e$, $\pm 2e$ κτλ.).

Έτσι, για παράδειγμα, το πρωτόνιο αποτελείται από 2 up και 1 down (uud), ενώ το νετρόνιο από 1 up και 2 down (udd).

(*) Δημιουργία ενός μόνο φωτονίου μ' αυτή την ενέργεια είναι αδύνατη, γιατί θα παραβιαζόταν η αρχή διατήρησης της ορμής.

β. Λεπτόνια

Τα **λεπτόνια** είναι μια δεύτερη ανεξάρτητη κατηγορία σωματιδίων. Το χαρακτηριστικό των λεπτονίων είναι ότι δε συμμετέχουν σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Τα λεπτόνια δεν αποτελούν συστατικό άλλων σωματιδίων και δε δομούνται από άλλα.

Υπάρχουν συνολικά μόνο έξι λεπτόνια. Τα τρία από αυτά, που έχουν φορτίο $-1e$, είναι τα: **ηλεκτρόνιο** (e^-), **μύονιο** (μ^-) και **ταυ** (τ^-). Τα άλλα τρία είναι τα αντίστοιχα **νετρίνα**: ν_e , ν_μ , ν_τ .

Κάθε φορτισμένο λεπτόνιο από τα e , μ , τ έχει το δικό του νεutrino ν_e, ν_μ, ν_τ , που το συνοδεύει στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις του.

Το μ και το τ συμπεριφέρονται σε όλες τις αλληλεπιδράσεις τους ακριβώς όπως το ηλεκτρόνιο. Η μόνη τους διαφορά από το ηλεκτρόνιο είναι η πολύ μεγαλύτερη μάζα τους. Μάλιστα το τ είναι βαρύτερο ακόμα και από τα νουκλεόνια. Το μύονιο και το ταυ ζουν για λίγο και μετατρέπονται σε άλλα σωματίδια. Το ηλεκτρόνιο είναι το μόνο φορτισμένο σταθερό λεπτόνιο που γνωρίζουμε.

Τα νετρίνα δε διασπώνται, δεν έχουν φορτίο και η μάζα τους είναι πολύ μικρή ή ίσως και μηδενική.

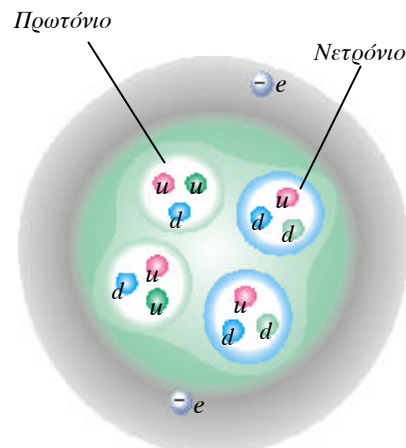
Φυσικά υπάρχουν και τα αντισωματίδια όλων των παραπάνω σωματιδίων.

Βέβαια ας μην ξεχάμε ότι τα λεπτόνια είναι σωματίδια που υπάρχουν μόνα τους έστω και για λίγο χρόνο, ενώ τα quarks δεν εμφανίζονται ποτέ μόνα τους.

γ. Τα σωματίδια φορείς δυνάμεων

Οι διάφορες αλληλεπιδράσεις (συνήα ονομάζονται και δυνάμεις) που γνωρίζουμε σήμερα, με σειρά μειούμενης ισχύος, είναι:

1. η ισχυρή αλληλεπίδραση,
 2. η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση,
 3. η ασθενής αλληλεπίδραση,
 4. η βαρυτική αλληλεπίδραση.
- Οι ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα και γενικότερα μεταξύ των αδρονίων είναι αποτέλεσμα της ισχυρής αλληλεπίδρασης.
 - Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των φορτίων στα φαινόμενα του ηλεκτρισμού και του μαγνητισμού είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης.
 - Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τις διασπάσεις πολλών ασταθών σωματιδίων, για παράδειγμα των λεπτονίων. Είναι υπεύθυνη επίσης για την εκπομπή ηλεκτρονίων από τους

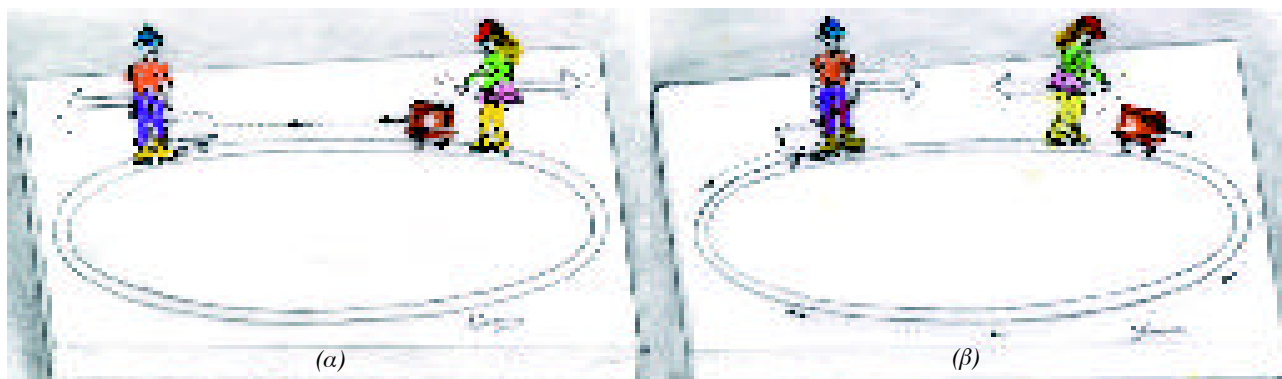


3-14 Τα πρωτόνια και τα νετρίνα του πυρήνα αποτελούνται από τρία quarks το καθένα.

e^- ηλεκτρόνιο	ν_e νεutrino-e
μ^- μύονιο	ν_μ νεutrino-μ
τ^- ταυ	ν_τ νεutrino-τ

3-15 Τα αντίστοιχα ζεύγη των λεπτονίων. Καθένα από τα e^- , μ^- και τ^- έχει το δικό του νεutrino.

3-16 Μια παραστατική αναλογία του φορέα της δύναμης φαίνεται στο σχήμα. Δύο παιδιά ανταλλάσσουν ένα βαγονάκι με δύο διαφορετικούς τρόπους. Στην εικόνα (α) η ανταλλαγή οδηγεί σε άπωση, ενώ στην εικόνα (β) σε έλξη.



πυρήνες, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα 3.3. Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι μικρής εμβέλειας, όπως και η ισχυρή, αλλά είναι πολύ ασθενέστερη.

- Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ μαζών που κυριαρχούν στο μακρόκοσμο είναι αποτέλεσμα της βαρυτικής αλληλεπίδρασης.

Η σύγχρονη Φυσική εξηγεί όλες τις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των σωματιδίων ως ανταλλαγή κάποιων άλλων σωματιδίων που τα θεωρεί φορείς των συγκεκριμένων αλληλεπιδράσεων.

- Τα σωματίδια φορείς της ισχυρής αλληλεπίδρασης λέγονται **γκλουόνια** (gluons).
- Τα σωματίδια φορείς της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης είναι τα **φωτόνια**. Έτσι, για παράδειγμα, οι φυσικοί εξηγούν την αλληλεπίδραση μεταξύ δύο ηλεκτρονίων ως ανταλλαγή ενός φωτονίου που εκπέμπεται από το ένα και απορροφάται από το άλλο.
- Τα σωματίδια φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι τα W^+ , W^- και Z^0 .
- Κατ' αναλογία πιστεύουμε σήμερα ότι το σωματίδιο φορέας της βαρυτικής αλληλεπίδρασης είναι το **βαρυτόνιο**, χωρίς ακόμη να υπάρχουν θεωρητικές και πειραματικές ενδείξεις.

Τα 6 quarks, τα 6 λεπτόνια, τα αντισωματίδιά τους και τα σωματίδια φορείς των αλληλεπιδράσεων αποτελούν σήμερα τις θεμελιώδεις οντότητες με τις οποίες η σύγχρονη Φυσική αντιλαμβάνεται και περιγράφει τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις και την εξέλιξη του κόσμου από τις αρχέγονες στιγμές της γέννησής του μέχρι σήμερα.

Σήμερα, ύστερα από 15 δισεκατομμύρια χρόνια από τη γέννηση του Σύμπαντος, **στην ύλη που παρατηρούμε υπάρχουν μόνο τα πιο σταθερά των στοιχειωδών σωματιδίων, δηλαδή τα up και down quarks, που συγκροτούν τα νουκλεόνια, τα ηλεκτρόνια, τα νετρίνα, και οι φορείς των αλληλεπιδράσεων.**

Πίνακας 3.3 ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΦΟΡΕΙΣ ΤΩΝ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ

			Στοιχεία σωματιδίου φορέα της δύναμης		
Αλληλεπίδραση	Ισχύς	Εμβέλεια	Όνομα	Μάζα ηρεμίας	Φορτίο
Ισχυρή	60	περίπου (10^{-15}m)	Γκλουόνιο	0	0
Ηλεκτρομαγνητική	1	άπειρη	Φωτόνιο	0	0
Ασθενής	10^{-4}	περίπου (10^{-18}m)	W^+ , W^- Z^0	$80,41\text{GeV}/c^2$ $91,187\text{GeV}/c^2$	$\pm e$ 0
Βαρυτική	10^{-41}	άπειρη	Βαρυτόνιο	0	0

Οι αλληλεπιδράσεις αναφέρονται σε δύο quarks μέσα σε ένα νουκλεόνιο. Ο όρος «ισχύς» αναφέρεται στο πόσο ισχυρότερες είναι οι διάφορες αλληλεπιδράσεις σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση που ελήφθη ως μονάδα σύγκρισης. Η «εμβέλεια» παριστάνει τη μέγιστη απόσταση στην οποία εκδηλώνεται κάθε αλληλεπίδραση.