

ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΕΘΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ ΚΑΙ ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟ

ΦΥΣΙΚΗ

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ' ΤΑΞΗΣ ΓΕΝΙΚΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ



ΟΡΓΑΝΙΣΜΟΣ ΕΚΔΟΣΕΩΣ ΔΙΔΑΚΤΙΚΩΝ ΒΙΒΛΙΩΝ

ΑΘΗΝΑ

Φ Υ Σ Ι Κ Η

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ ΤΑΞΗΣ ΕΝΙΑΙΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

Τόμος 3ος

ΟΜΑΔΑ ΣΥΓΓΡΑΦΗΣ

**Πέτρος Γεωργακάκος, φυσικός,
καθηγητής 3ου Λυκείου
Ηλιούπολης**

**Αθανάσιος Σκαλωμένος, φυσικός,
καθηγητής 1ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Νικόλαος Σφαρνάς, φυσικός,
καθηγητής 56ου Λυκείου Αθηνών**

**Ιωάννης Χριστακόπουλος,
φυσικός, καθηγητής του Ε.Π.Λ.**

**Νέας Φιλαδέλφειας «Μίλτος
Κουντουράς»**

ΟΜΑΔΑ ΚΡΙΣΗΣ

**Ευάγγελος Κούκλης, φυσικός,
καθηγητής 6ου Λυκείου Ζωγράφου**

**Σπύρος Τζαμαρίας, φυσικός
στοιχειωδών σωματιδίων. Κύριος
ερευνητής Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. «Δημόκριτος»**

**Χρήστος Χρονόπουλος, φυσικός,
καθηγητής 4ου Λυκείου
Αμαρουσίου**

**ΥΠΕΥΘΥΝΟΣ ΣΤΟ ΠΛΑΙΣΙΟ ΤΟΥ
ΠΑΙΔΑΓΩΓΙΚΟΥ ΙΝΣΤΙΤΟΥΤΟΥ**

**Χρήστος Δούκας, πάρεδρος
Παιδαγωγικού Ινστιτούτου, τομέας
Φυσικών Επιστημών**

ΓΛΩΣΣΙΚΗ ΕΠΙΜΕΛΕΙΑ

**Μαρίτα Κλειδωνάρη, φιλόλογος,
καθηγήτρια Λυκείου Αγίου
Στεφάνου**

**ΠΡΟΣΑΡΜΟΓΗ ΤΟΥ ΒΙΒΛΙΟΥ ΓΙΑ
ΜΑΘΗΤΕΣ ΜΕ ΜΕΙΩΜΕΝΗ ΟΡΑΣΗ**

**Ομάδα Εργασίας Ινστιτούτο
Εκπαιδευτικής Πολιτικής (Ι.Ε.Π.) –
(Ιουστίνα Φλεμοτόμου) (επιμέλεια:
Γεωργία Παπασταυρινίδου)**

ΠΕΤΡΟΣ ΓΕΩΡΓΑΚΑΚΟΣ

ΑΘΑΝΑΣΙΟΣ ΣΚΑΛΩΜΕΝΟΣ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΦΑΡΝΑΣ

ΙΩΑΝΝΗΣ ΧΡΙΣΤΑΚΟΠΟΥΛΟΣ

Φ Υ Σ Ι Κ Η

ΓΕΝΙΚΗΣ ΠΑΙΔΕΙΑΣ

Γ ΤΑΞΗΣ ΕΝΙΑΙΟΥ ΛΥΚΕΙΟΥ

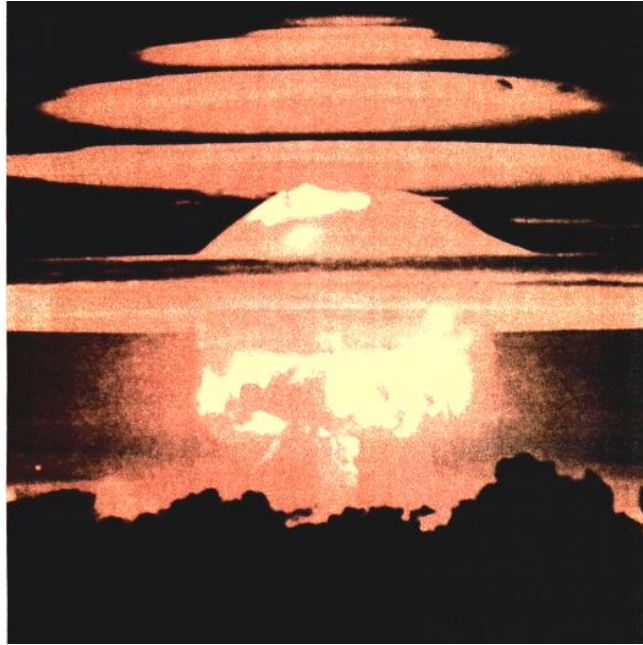
Τόμος 3ος

- Ιδιότητες των πυρήνων**
- Τα στοιχειώδη σωμάτια**
- Η ραδιενέργεια**
- Πυρηνικές αντιδράσεις**
- Εφαρμογές και κίνδυνοι της ραδιενέργειας**

Ο ενεργειακός γίγαντας – πυρήνας εκδηλώνει την παρουσία τους 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 προκάλλυσε τεράστια πυρκαγιά, που θα κατάπινε το μεγαλύτερο μέρος της πόλης. Ο καπνός και η σκόνη, που θα διασκορπίζονταν στην ατμόσφαιρα από παρόμοιες εκρήξεις, θα προκάλλυσαν 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 ουράνιου 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 εκπεμπόταν 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 (Ράδερφορντ) 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.



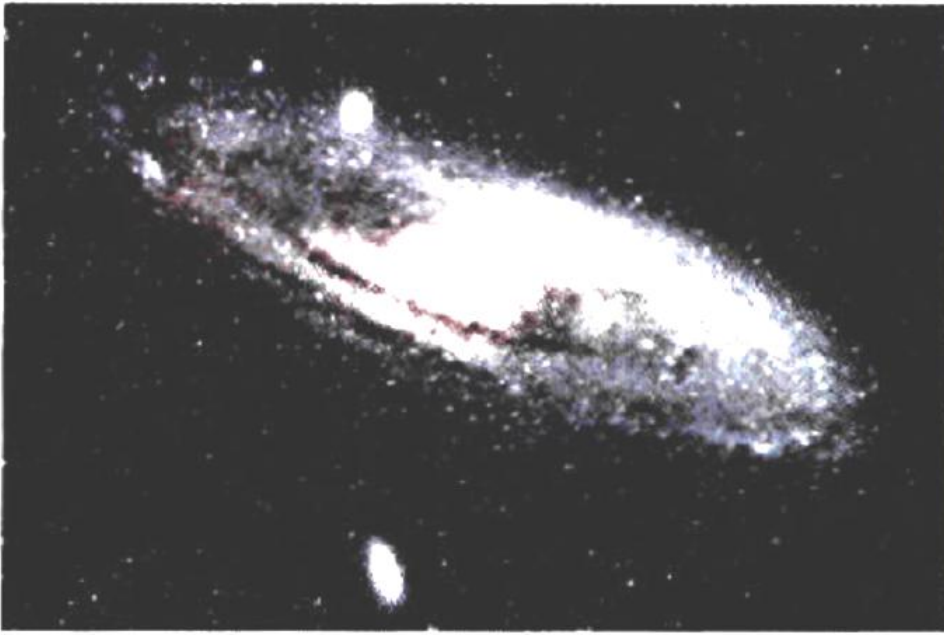
3-3 Ο Ernest Rutherford (1871-1937) ήταν ένας (από τους ανθρώπους που έθεσαν τα θεμέλια για την εξερεύνηση του πυρήνα.

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 αφανι-

σμού 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.



3-4 Οι σημερινές ενδείξεις μάς λένε ότι το Σύμπαν γεννήθηκε σε μια γιγαντιαία έκρηξη, το Big-Bang, πριν (από περίπου 15 δισεκατομμύρια χρόνια, όταν το μέγεθος όλου του Σύμπαντος ήταν μικρότερο από αυτό ενός ατόμου.

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

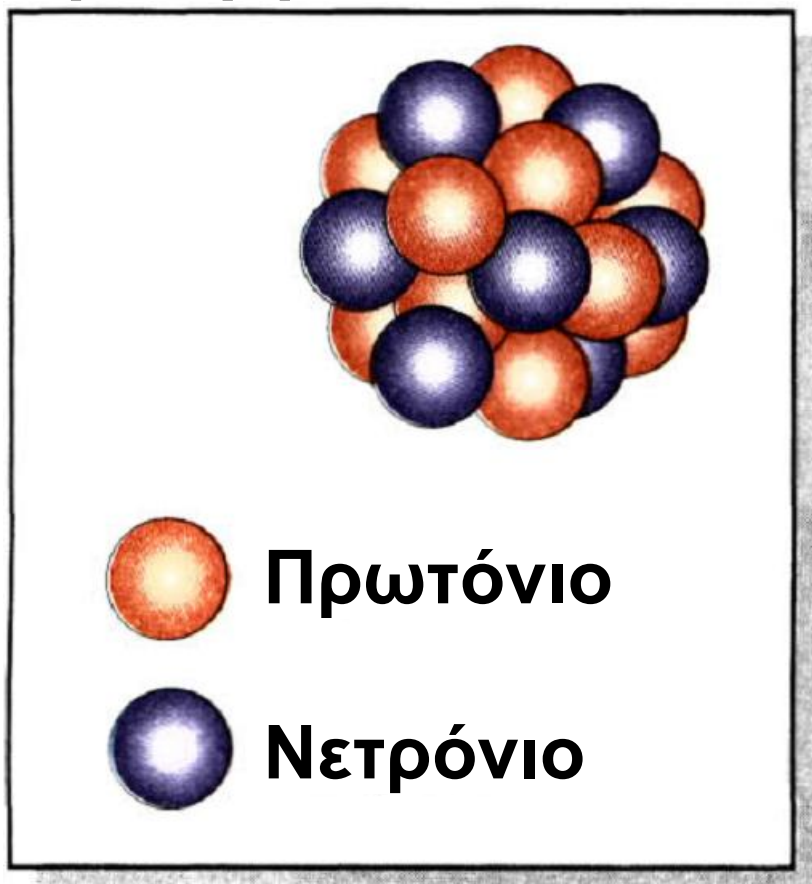
και βρέθηκε ότι: η ακτίνα του ατόμου είναι της τάξης των 10^{-10} m και η ακτίνα του πυρήνα της τάξης μεγέθους μεταξύ των 10^{-15} m και 10^{-14} m. Ο πυρήνας λοιπόν έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου. Για να γίνει αυτό αντιληπτό, μπορούμε να κάνουμε την εξής 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 κοινού 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.



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

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 και τις ενεργειακές καταστάσεις 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% του C 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 μονάδα ατομικής μάζας u , η οποία ορίζεται ως το $1/12$ της μάζας του ατόμου του $^{12}_6C$. Αυτό σημαίνει ότι η μάζα ενός ατόμου $^{12}_6C$ μαζί με τα 6 ηλεκτρόνιά του είναι $12u$.

Για τη μέτρηση των μαζών των πυρήνων προτιμάμε να χρησιμοποιούμε τις ατομικές μονάδες μάζας αντί για kg :

1ο γιατί οι μάζες εκφράζονται σε μικρούς αριθμούς, εύκολα συγκρίσιμες μεταξύ τους και

2ο γιατί η μάζα ενός ατόμου σε u είναι περίπου ίση με το μαζικό του αριθμό, A .

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

$$E = mc^2 \quad (3.1)$$

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

Σχέσεις των διάφορων μονάδων μάζας και ενέργειας:

$$1u = 1,66055 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$1\text{eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1\text{MeV} = 1,602 \times 10^{-13} \text{ J}$$

$$1u = 931,48\text{MeV}$$

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

ΣΩΜΑ- ΤΙΔΙΟ	ΜΑΖΑ			ΦΟΡΤΙΟ
	kg	u	MeV/c ²	C
Πρωτό- νιο	$1,6726 \times 10^{-27}$	1,007276	938,28	$1,602177 \times 10^{-19}$
Νετρό- νιο	$1,6750 \times 10^{-27}$	1,008665	939,57	0,000000
Ηλεκ- τρόνιο	$9,109 \times 10^{-31}$	$5,486 \times 10^{-4}$	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:

$$m_p = 1,007276u \quad \text{ή}$$

$$m_p = 1,007276 \times 1,66055 \times 10^{-27} \text{ kg} =$$

$$1,67 \times 10^{-27} \text{ kg} \quad \text{ή}$$

$$m_p = (1,67 \times 10^{-27} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/s})^2 =$$

$$1,5 \times 10^{-10} \text{ J} \quad \text{ή}$$

$$m_p = (1,5 \times 10^{-10} \text{ J}) / (1,6 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}) = 938 \text{ MeV}.$$

Έλλειμμα μάζας - Ενέργεια σύνδεσης

Ας θεωρήσουμε τον απλό πυρήνα

δευτέριο ${}^2_1\text{H}$ που περιέχει ένα πρω-

τόνιο και ένα νετρόνιο και ας ανα-

ρωτηθούμε πόση είναι η μάζα του.

Μια πρώτη απάντηση ίσως να ήταν

ότι είναι ίση με το άθροισμα των μα-

ζών 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**, παριστά-

νεται 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 διαιρέσουμε 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 νου-

κλεόνιο τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας.

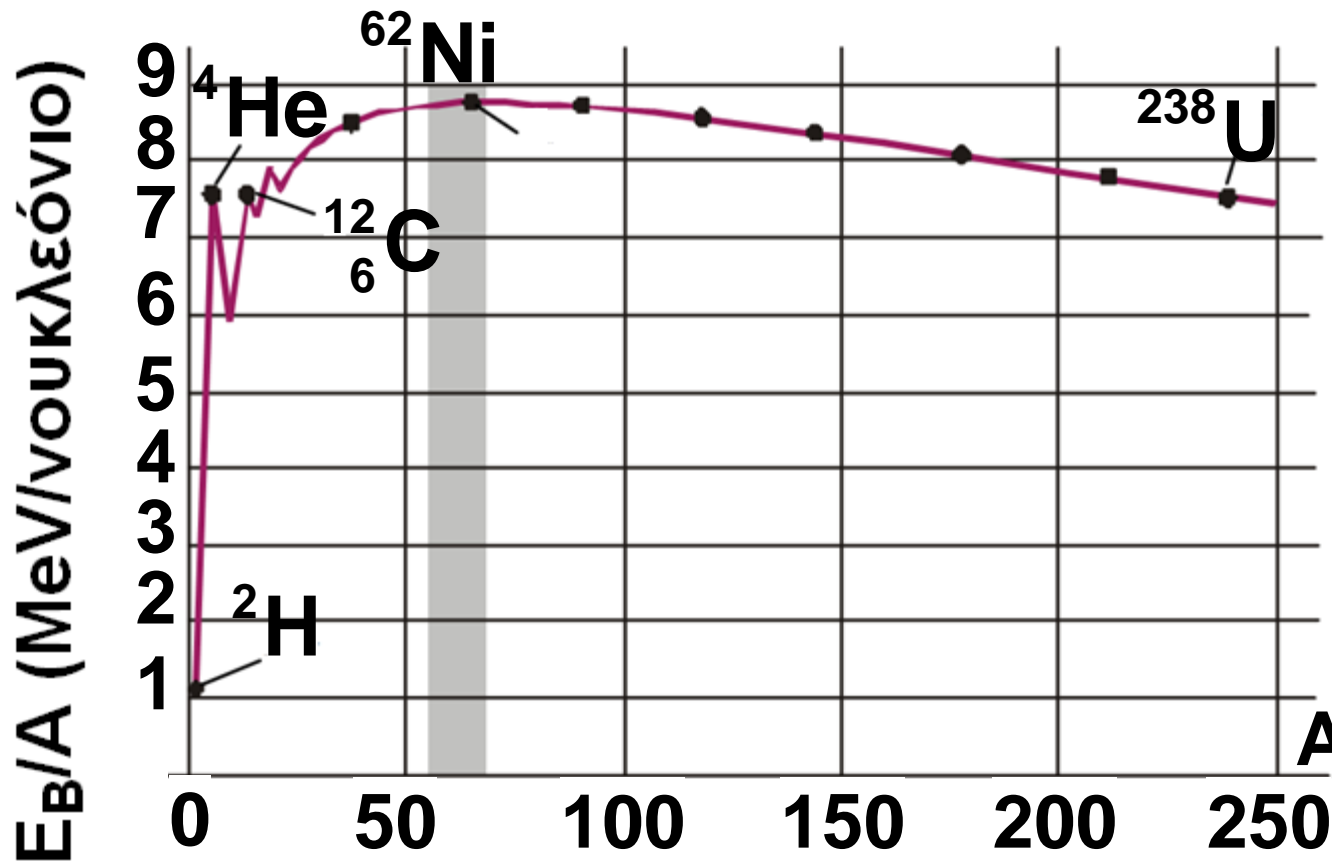
Μερικές τυπικές τιμές ενεργειών σύνδεσης για μερικούς πυρήνες αναφέρονται στον πίνακα 3.2.

Πίνακας 3.2

ΠΥΡΗ- ΝΑΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ	ΕΝΕΡΓΕΙΑ ΣΥΝΔΕΣΗΣ/νου- κλεόνιο
	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
$^{238}_{92}\text{Fe}$	1801,72	7,57

**Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεό-
νιο 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. Παρατηρούμε επίσης ότι η αιχμή της καμπύλης στο $A = 4$ δείχνει την ιδιαίτερη σταθερότητα της δομής του σωματίου α .



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 έγχρωμη περιοχή είναι αυτή των πιο ευσταθών πυρήνων.

Όταν κάποιος πυρήνας πολύ μεγάλου μαζικού αριθμού διασπάται είτε αυθόρμητα είτε τεχνητά σε δύο άλλους πυρήνες μεσαίων μαζικών αριθμών (φαινόμενο σχάσης), η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη στους νέους πυρήνες που προκύπτουν. Ομοίως όταν δύο ή περισσότεροι πολύ ελαφροί πυρήνες στο αριστερό μέρος της καμπύλης, συνενώνονται προς σχηματισμό ενός μεγαλύτερου με $A \leq 60$ (φαινόμενο σύντηξης), πάλι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο είναι μεγαλύτερη στο νέο πυρήνα που προκύπτει. Συνεπώς στις διαδικασίες αυτές, οι πυρήνες που παράγονται είναι ενεργειακά σταθερότεροι και αποδεσμεύεται συνολικά ενέργεια, την οποία εκμεταλλευόμαστε.

Ας θεωρήσουμε για παράδειγμα ότι ένας πυρήνας με $A = 240$ και ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο $7,5\text{MeV}$ σχάζεται σε δύο μεσαίους πυρήνες με μαζικούς αριθμούς 120 οι οποίοι έχουν ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο $8,5\text{MeV}$. Η διάλυση του αρχικού πυρήνα στα νουκλεόνια που τον αποτελούν απαιτεί δαπάνη ενέργειας $240 \times 7,5\text{MeV} = 1800\text{MeV}$.

Ο σχηματισμός των δύο νέων πυρήνων από τα ίδια νουκλεόνια εκλύει ενέργεια $240 \times 8,5\text{MeV} = 2040\text{MeV}$. Από όλη τη διαδικασία της σχάσης αποδεσμεύεται συνεπώς ενέργεια ίση με τη διαφορά $(2040 - 1800)\text{MeV} = 240\text{MeV}$ την οποία ωφελούμαστε.

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 $2,7 \times 10^{-15}$ m πόση είναι η πυκνότητα του;

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

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

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

$$\Delta M = 0,098946u$$

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 σύνδεσης για τον ίδιο πυρήνα είναι:

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

ή διαιρώντας με το πλήθος των νουκλεονίων $E_B/12 = 7,68 \text{ MeV}$ ανά νουκλεόνιο. Η πυκνότητά του είναι τότε:

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

(Συγκρίνοντας με την πυκνότητα του νερού, που είναι μόλις 10^3 kg/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 ηλεκτρόνια 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 4×10^{-15} 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», δεν 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 κυρίως ελαφρούς, ώστε να μπορέσουν να υπερνικήσουν το φράγμα των ηλεκτρικών

απόσεων 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.

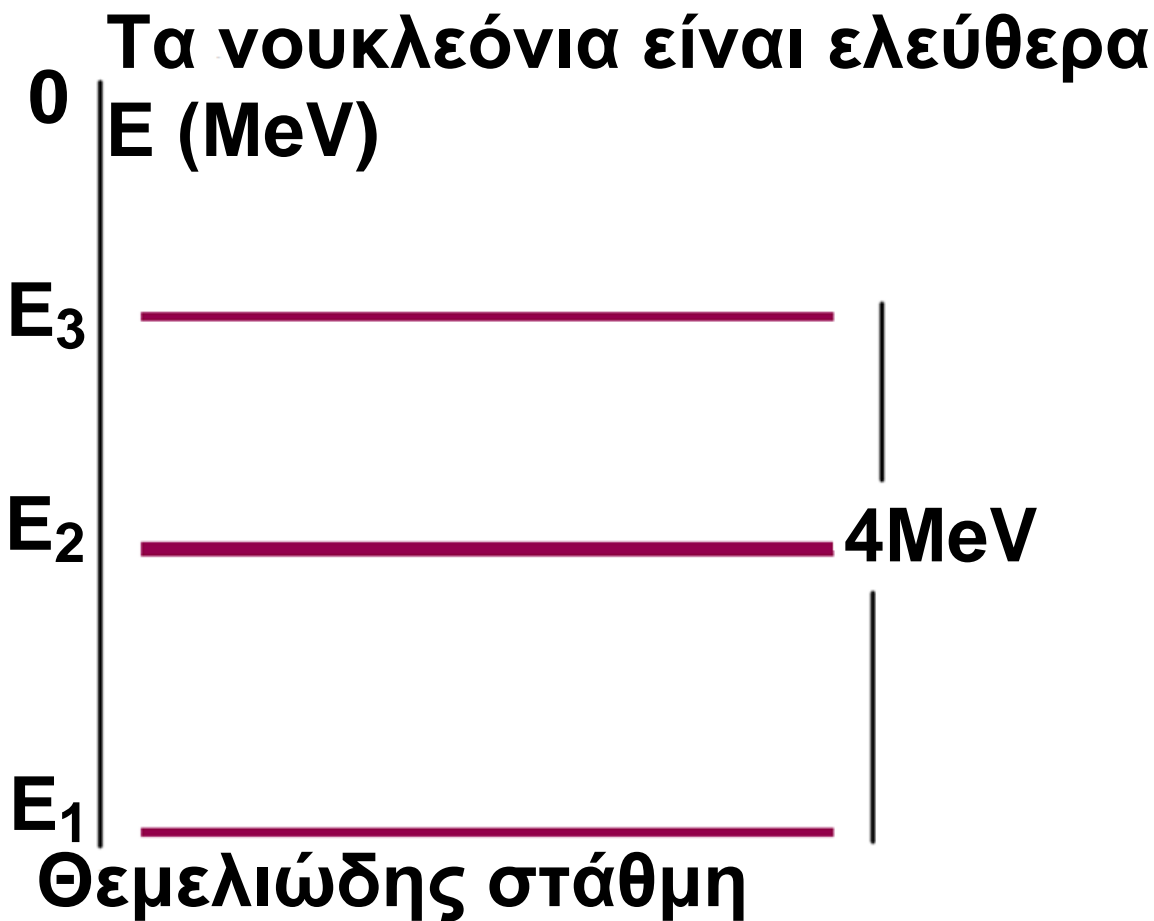


3-7 Η κινητική ενέργεια των νουκλεονίων και η απωστική δύναμη μεταξύ των πρωτονίων τείνουν να αποσυνθέσουν τον πυρήνα, ενώ η ισχυρή πυρηνική δύναμη είναι αυτή που τον κρατάει ενιαίο.

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).



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, μεταπί-

πτει σε μια πιο χαμηλή, αποβάλλει στο περιβάλλον του ενέργεια με τη μορφή φωτονίων.

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 περισσότερο.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 3

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

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

$$\begin{aligned}
 F_{\beta\alpha\rho} &= G \frac{m_p^2}{r^2} \Rightarrow \\
 \Rightarrow F_{\beta\alpha\rho} &= 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{(1,67 \cdot 10^{-27})^2}{(2 \cdot 10^{-15})^2} \text{ N} = \\
 &= 4,65 \cdot 10^{-35} \text{ N} \\
 F_{\eta\lambda} &= 9 \cdot 10^9 \frac{(1,6 \cdot 10^{-19})^2}{(2 \cdot 10^{-15})^2} \text{ N} = 57,6 \text{ N}
 \end{aligned}$$

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

Η πυρηνική δύναμη, σε αντίθεση, είναι της τάξης των 10^3 N , 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 σωμάτιο α κατευθύνεται από πολύ μακριά, με ταχύτητα u , 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 σωμάτιο α ως συνάρτηση της ταχύτητάς του. Η δυναμική ενέργεια μεταξύ δύο φορτίων q_1, q_2 σε απόσταση r δίνεται από την 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 - σωμάτιο 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:

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

Λύνοντας ως προς d βρίσκουμε:

$$d = \frac{4kZe^2}{m u^2}$$

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 την απόσταση μικρότερη σ' αυτό από $23 \times 10^{-15}\text{m}$ τον πυρήνα και επομένως να γίνει αισθητή η ισχυρή πυρηνική δύναμη.

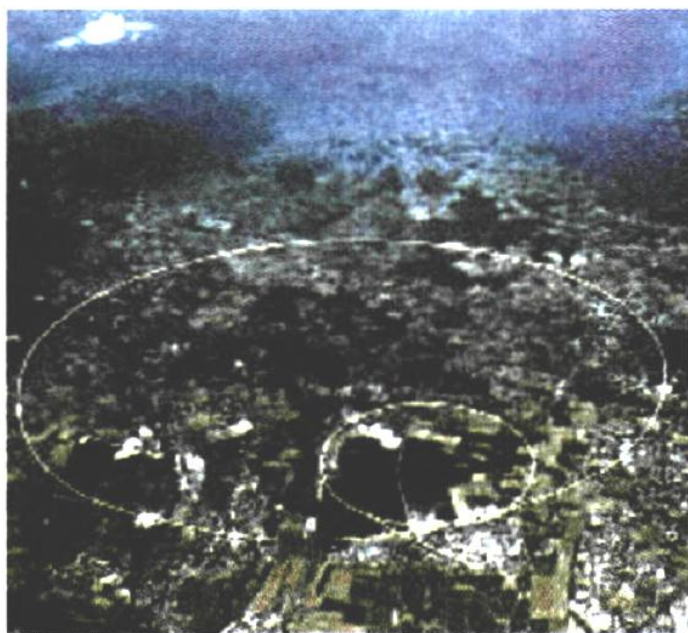
3.2 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ

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 σωματίων μετατρέπóταν σε μάζα των νέων σωματίων, σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας – ενέργειας. Έτσι είδαν

να γεννιούνται όλο και νέα περισσότερα σωμάτια, 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 σωμάτια», ξέρουμε ότι τα περισσότερα από αυτά, συμπεριλαμβανομένων των νετρονίων και των πρωτονίων, δε θεωρούνται πια στοιχειώδη, αλλά αποτελούνται από μικρότερα σωματίδια. Έτσι επικράτησε τις πραγματικά στοιχειώδεις οντότητες της ύλης να τις ονομάζουμε σωματίδια και τις πιο σύνθετες σωμάτια.



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.

Τα αντισωματία

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 σω-

ματίδιο 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 σωματίια που είναι αντισωματίια εκείνων που παράγονται κατά τη διάσπαση του νετρονίου.

Σε κάθε σωματίιο αντιστοιχεί και ένα αντισωματίιο.

Τα αντισωματίδια του φωτονίου και μερικών άλλων σωματιδίων ταυτίζονται με τα ίδια τα σωματίδια.

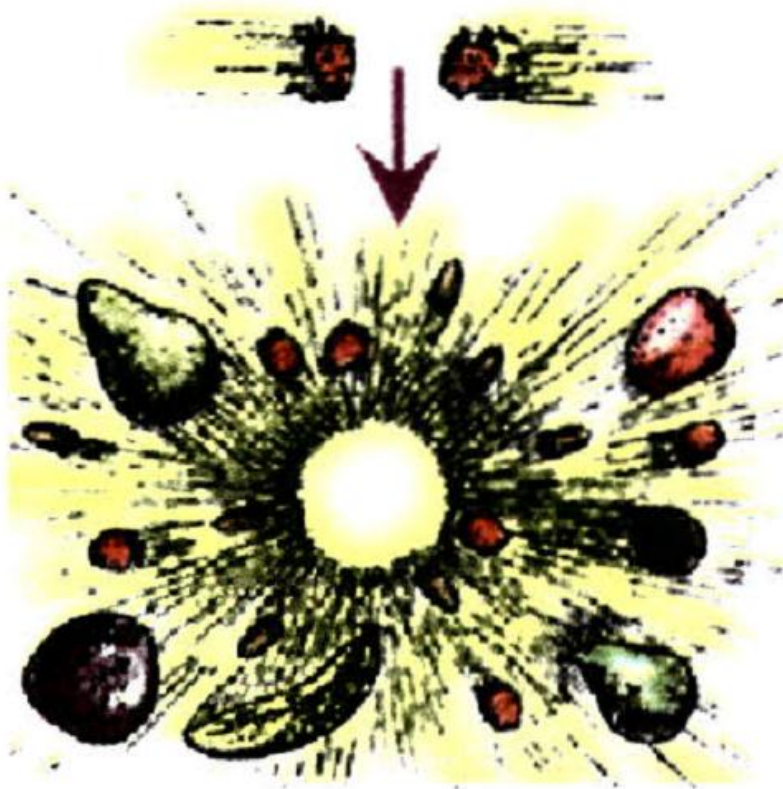
Συνήθως τα αντισωματίδια συμβολίζονται με μια παύλα πάνω από το σύμβολο του σωματιδίου.

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

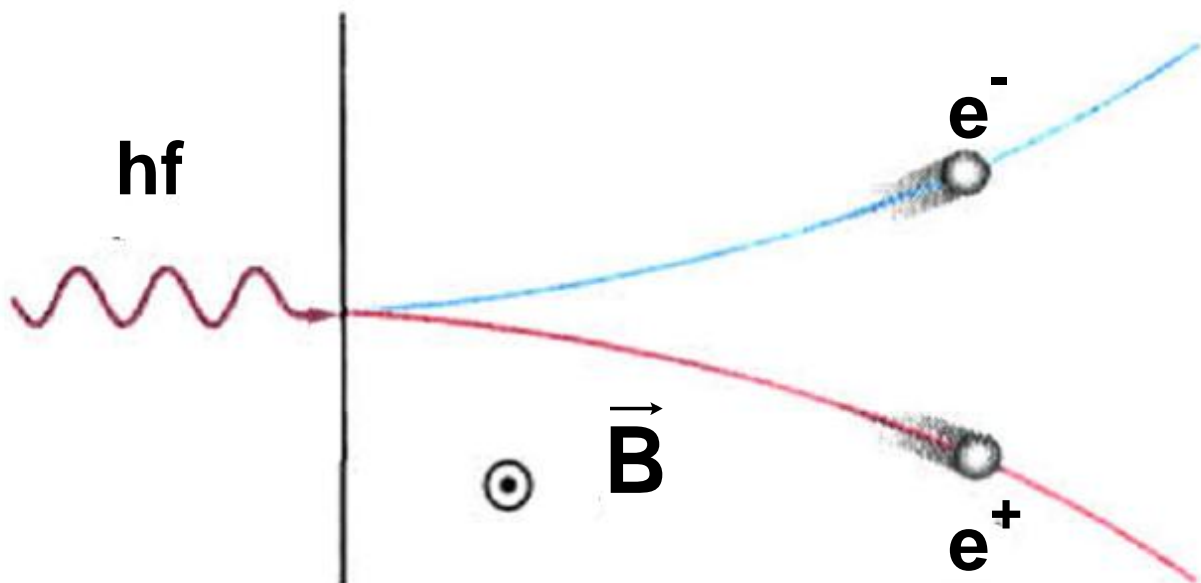
Ένα φωτόνιο υψηλής ενέργειας, καθώς αλληλεπιδρά με κάποιο πυρήνα, εξαφανίζεται και στη θέση του εμφανίζεται ένα ζεύγος (e^- , e^+).

Σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας, τα δύο σωματίδια που δημιουργούνται έχουν ενέργεια τουλάχιστον ίση με:

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



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



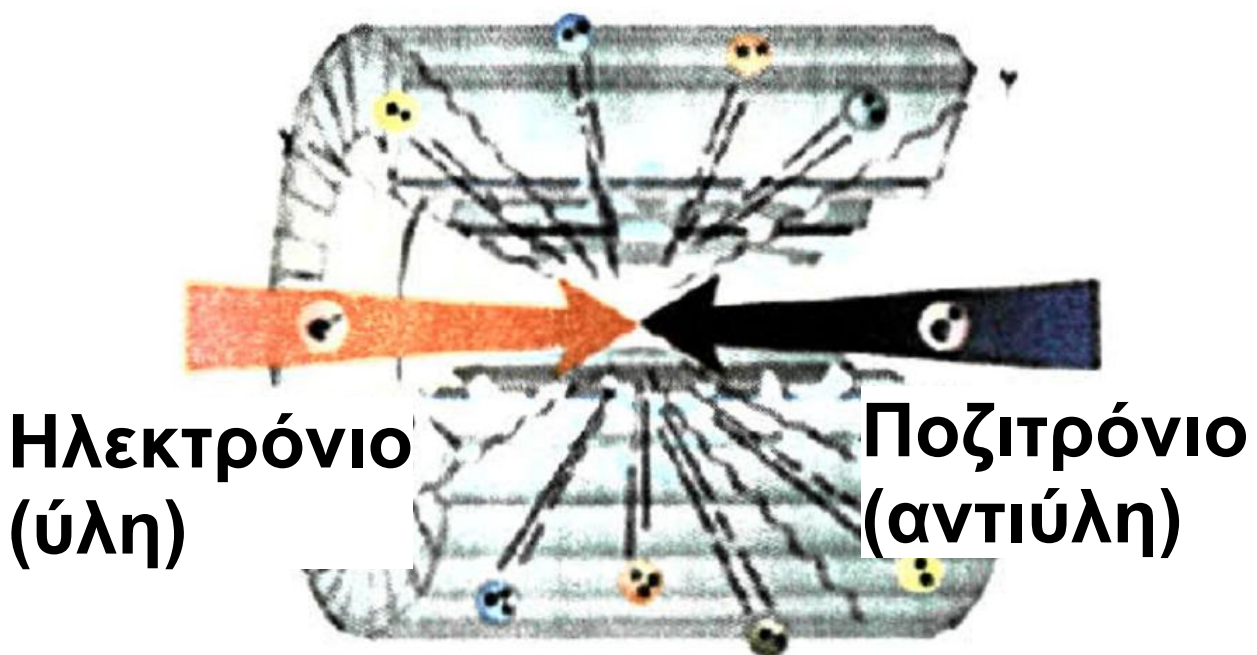
3-11 Διάγραμμα που δείχνει τη διαδικασία παραγωγής ζεύγους. Ένα φωτόνιο αλληλεπιδρά με πυρήνες σε φύλλα μολύβδου και δημιουργούνται ζεύγη (e^- , e^+). Στη συνέχεια τα σωματίδια του ζεύγους καμπυλώνονται αντίθετα μέσα σε μαγνητικό πεδίο.

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

Η αντίστροφη διαδικασία λέγεται **εξαϋλωση** 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 σωματίων, αλλά πάντα η συνολική ενέργεια και η ορμή πρέπει να διατηρούνται (σχήμα 3-12).

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



3-12 Όταν ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο πλησιάζουν, εξαφανίζονται και τα δύο και ελευθερώνεται ένα αντίστοιχο ποσό ενέργειας. Σχεδόν αμέσως η ενέργεια αυτή μετα-

τρέπεται 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.

Η ταξινόμηση των σωματίων

α. Αδρόνια και quarks (κουάρκ)

Η αφθονία των σωματίων κάνει την ταξινόμηση τους μια μάλλον περίπλοκη υπόθεση. Συνήθως η ταξινόμηση των σωματίων 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 απεικονίζονται στο παρακάτω σχήμα:



up (πάνω) - down (κάτω),
charm (γοητεία) - 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 ομαδοποίηση 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). Επίσης ένα αντιπρωτόνιο αποτελείται από ($\bar{u} \bar{u} \bar{d}$).

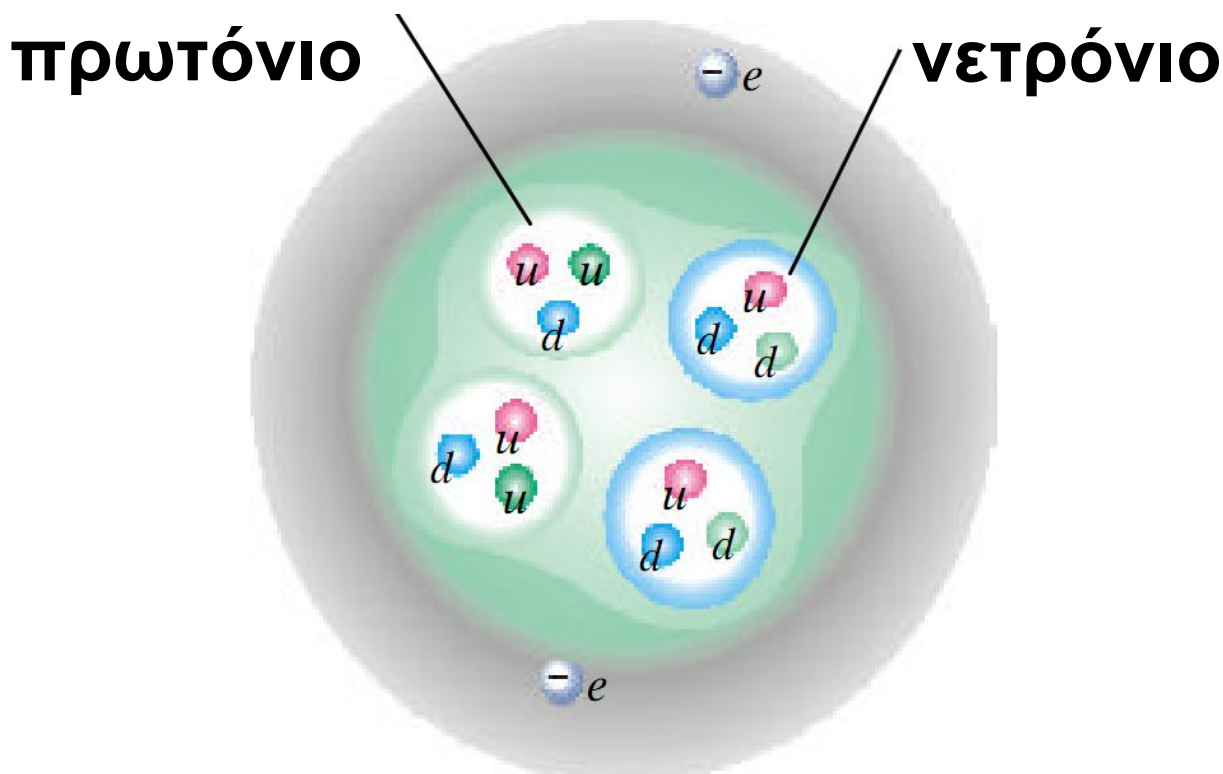


3-13 Murray Gell-Mann (1929) αριστερά και Richard Feynman (1918-1988) δεξιά. Η θεωρητική εργασία τους στα στοιχειώδη σωμάτια τιμήθηκε με Nobel το 1969 και 1965 αντίστοιχα.

β. Λεπτόνια

Τα λεπτόνια είναι μια δεύτερη ανεξάρτητη κατηγορία σωματιδίων. Το χαρακτηριστικό των λεπτονίων είναι ότι δε συμμετέχουν σε ισχυρές αλληλεπιδράσεις, 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^-), μιονίο (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 νετρίνο ν_e, ν_μ, ν_τ , που το συνοδεύει στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις του.



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

γ. Τα σωματίδια φορείς δυνάμεων

Οι διάφορες αλληλεπιδράσεις (συνήθως 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 μαγνητι-

σμού είναι αποτέλεσμα της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης.

- Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για πολλές από τις άλλες λεπιδράσεις των λεπτονίων. Είναι υπεύθυνη για την εκπομπή ηλεκτρονίων από τους πυρήνες, όπως θα δούμε στην επόμενη ενότητα

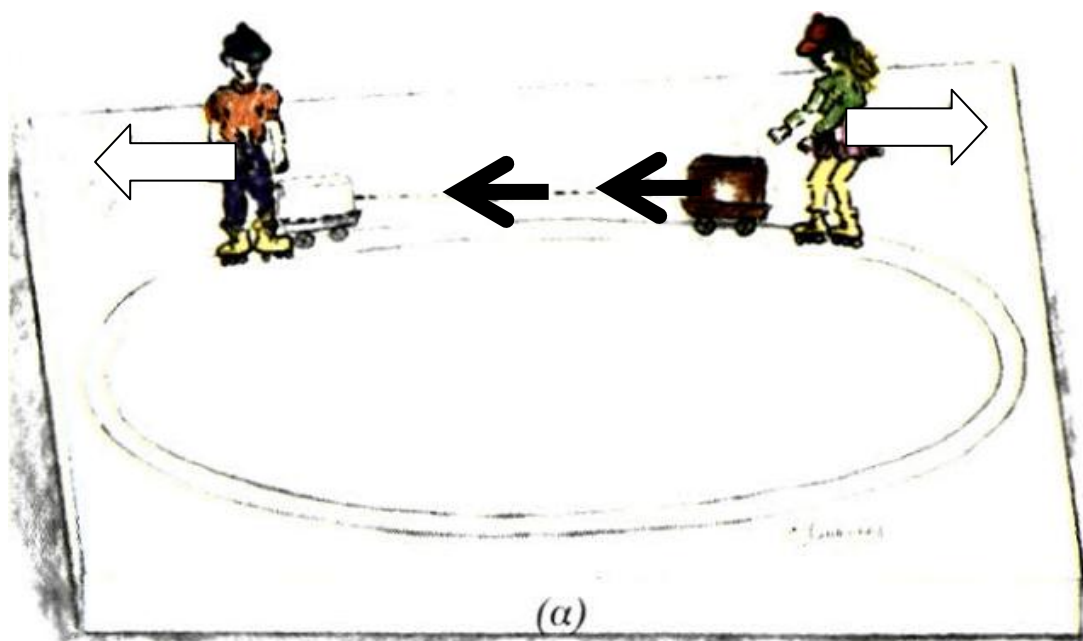
3.3. Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι μικρής εμβέλειας, όπως και η ισχυρή, αλλά είναι πολύ ασθενέστερη.

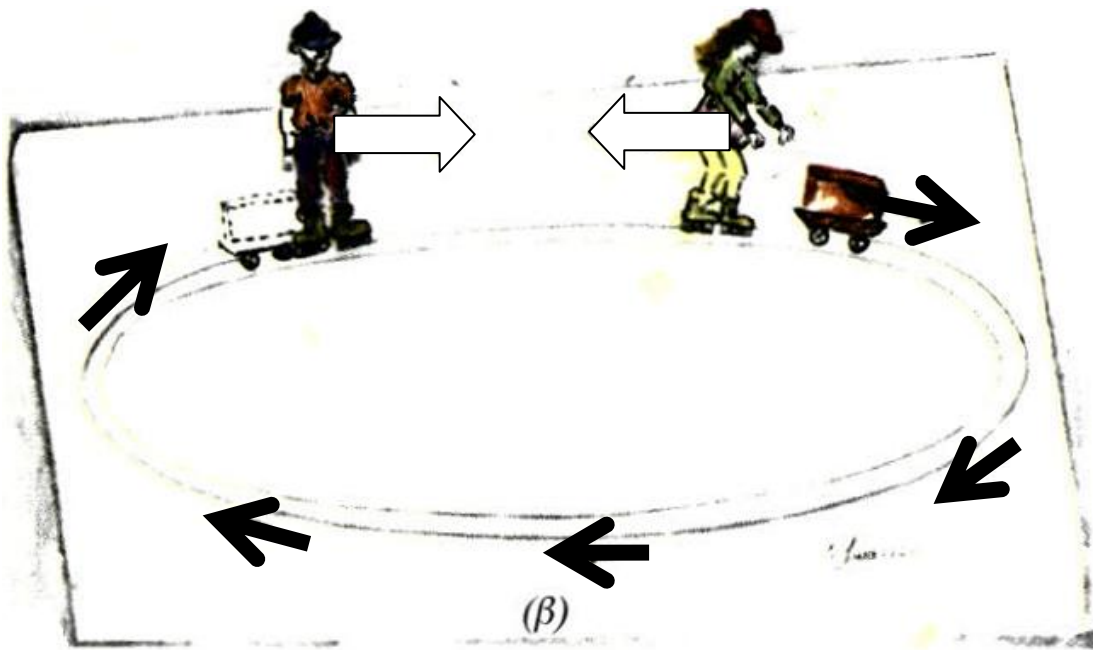
- Οι ελκτικές δυνάμεις μεταξύ μαζών που κυριαρχούν στο μακρόκοσμο είναι αποτέλεσμα της βαρυτικής αλληλεπίδρασης.

e^- ηλεκτρόνιο	ν_e νεutrίνο-e
μ^- μιονίο	ν_μ νεutrίνο-μ
τ^- ταυ	ν_τ νεutrίνο-τ

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

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





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
Ηλεκτρομαγ/κή	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


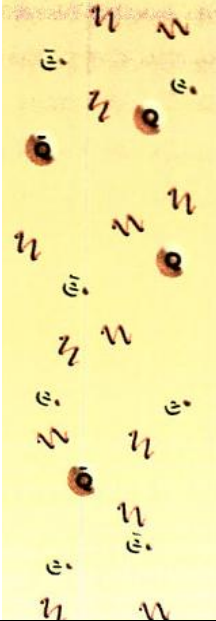
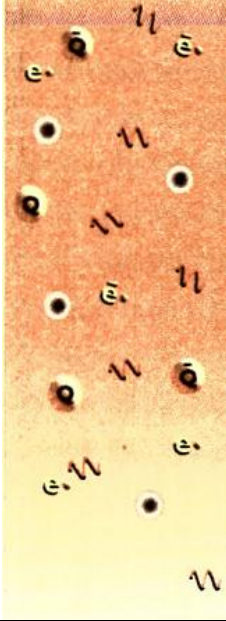
Οι αλληλεπιδράσεις αναφέρονται σε δύο quarks μέσα σε ένα νουκλεόνιο. Ο όρος «ισχύς» αναφέρεται στο πόσο ισχυρότερες είναι οι διάφορες αλληλεπιδράσεις σε σχέση με την ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση που ελήφθη ως μονάδα σύγκρισης. Η «εμβέλεια» παριστάνει τη μέγιστη απόσταση στην οποία εκδηλώνεται κάθε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

Εικόνα από το βιβλίο του STEPHEN HAWKING «Το χρονικό του χρόνου».

Η ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ

Το χρονικό του Σύμπαντος σύμφωνα με το μοντέλο της θερμής μεγάλης έκρηξης.

(εικόνα στις επόμενες σελίδες) →

<p>Μεγάλη Έκρηξη</p>		<p>10^{32} βαθμοί</p>	<p>10^{27} βαθμοί</p>
	<p>Κβαντικά φαινόμενα – άγνωστοι φυσικοί νόμοι</p>		
		<p>10^{-43} δευτ.</p>	<p>10^{-34} δευτ.</p>

10^{15} βαθμοί	10^{10} βαθμοί	10^9 βαθμοί
		
<p>Σχηματισμός πρωτονίων, νετρονίων και μεσονίων – περιορισμός των κουάρκ και εξαφάνιση των αντικουάρκ.</p>	<p>Πρωτόνια και νετρόνια συνδέονται σχηματίζοντας πυρήνες υδρογόνου, ηλίου, λιθίου και δευτερίου</p>	<p>Σύζευξη ύλης και ακτινοβολίας</p>
<p>10^{-10} δευτ.</p>	<p>1 δευτ.</p>	<p>3 λεπτά</p>

3000 βαθμοί	18 βαθμοί	3 βαθμοί Kelvin
		
<p>Καθώς ηλεκτρόνια συνδέονται με πυρήνες συντελείται αποσύζευξη ύλης και ακτινοβολίας.</p>	<p>Συσσωρεύσεις ύλης από κβάζαρ, άστρα και πρωτογαλαξίες.</p>	<p>Γύρω από τα άστρα σχηματίζονται ηλιακά συστήματα.</p>

<p>Το Σύμπαν γίνεται διαπερατό από την ακτινοβολία κοσμικού υποβάθρου</p>	<p>Τα άστρα καίνε αρχέγονο υδρογόνο και ήλιο, και συνθέτουν βαρύτερα στοιχεία</p>	<p>Τα άτομα συνδέονται σχηματίζοντας πολύπλοκα μόρα και έμβια ύλη</p>
<p>300000 έτη</p>	<p>1 δισεκατομμ. έτη</p>	<p>15 δισεκατομμ. έτη</p>

3.3 Η ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ

Οι περισσότεροι από τους πυρήνες, που υπάρχουν στη φύση ή έχουν παραχθεί τεχνητά στο εργαστήριο, είναι ασταθείς. Διασπώνται δηλαδή σε άλλους πυρήνες οι οποίοι είναι σταθερότεροι.

Γιατί όμως μερικοί πυρήνες είναι σταθεροί και άλλοι όχι;

Γενικά το θέμα αυτό είναι πολύπλοκο. Ωστόσο μερικά γενικά χαρακτηριστικά μπορούν να γίνουν κατανοητά από το ακόλουθο παράδειγμα:

Ας θεωρήσουμε έναν πυρήνα με μεγάλο ατομικό αριθμό Z , στον οποίο οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων μόλις που αντισταθμίζονται από τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις, που όμως δρουν μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων. Αν συνεχίσουμε να προ-

σθέτουμε πρωτόνια, ο πυρήνας γίνεται αρκετά μεγάλος και οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις υπερσχύουν των πυρηνικών με αποτέλεσμα τη διάσπαση του πυρήνα. Αυτός είναι και ο λόγος που οι μεγάλοι πυρήνες έχουν πιο πολλά νετρόνια από ό,τι πρωτόνια. Το πλεόνασμα των νετρονίων συμβάλλει στην ισχυρή πυρηνική σύνδεση, χωρίς να συνοδεύεται από παράλληλη αύξηση της άπωσης Coulomb.

Η διαδικασία κατά την οποία ένας πυρήνας μετατρέπεται σε έναν άλλο διαφορετικού στοιχείου ονομάζεται μεταστοιχείωση.

Όταν ένας πυρήνας μετατρέπεται αυθόρμητα σε άλλο πυρήνα, εκλύεται ενέργεια με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Το φαινό-

μενο αυτό ονομάζεται ραδιενέργεια.

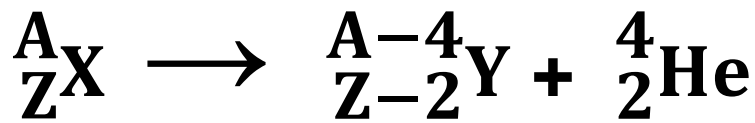
Η έκλυση της ενέργειας γίνεται συνήθως με έναν από τους τρεις τρόπους που περιγράφονται παρακάτω. Οι έννοιες της εκπομπής σωματίων α, σωματιδίων β και φωτονίων γ, που περιγράφονται παρακάτω, αποδίδονται και ως ακτινοβολίες α, β και γ αντίστοιχα.

Διάσπαση α

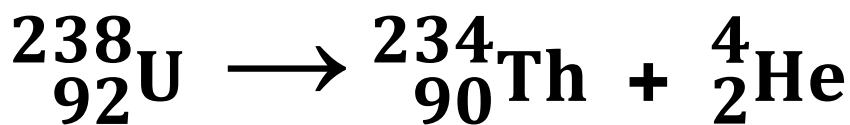
Το σωματίο α είναι ένας πυρήνας ηλίου (${}^4_2\text{He}$). Αποτελείται δηλαδή από δύο πρωτόνια και δύο νετρόνια.

Όταν συμβαίνει εκπομπή σωματίων α από ένα βαρύ πυρήνα, που λέγεται μητρικός, ο μαζικός αριθμός μειώνεται κατά 4 και ο νέος πυρήνας, που λέγεται θυγατρικός, είναι σταθερότερος.

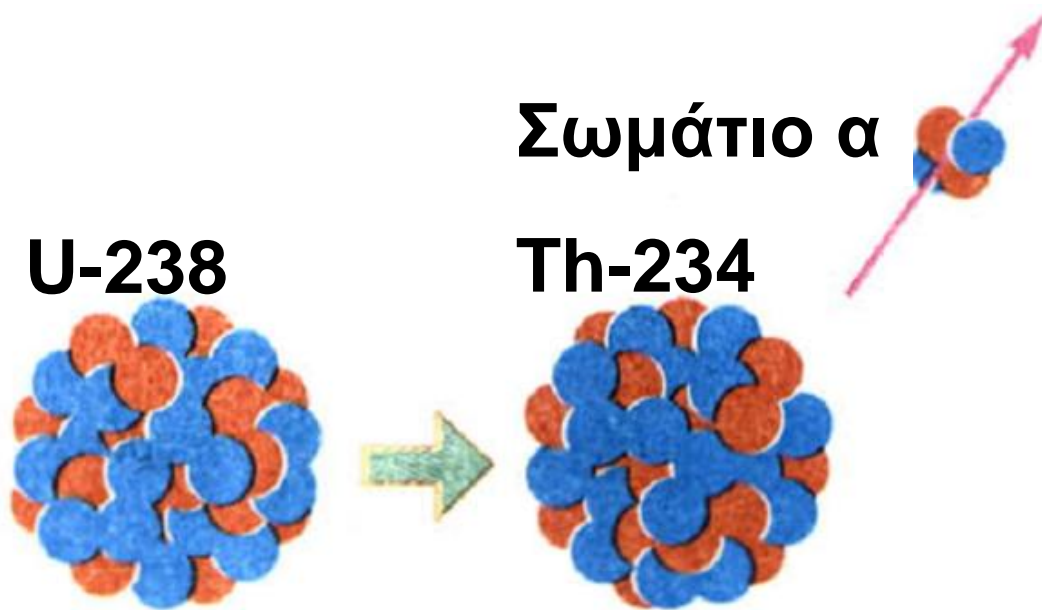
Δηλαδή ισχύει:



Ας θεωρήσουμε, για παράδειγμα, τη ραδιενεργό διάσπαση α του ουρανίου (${}^{238}_{92}\text{U}$).



Παρατηρούμε ότι ο αριθμός των πρωτονίων στο αριστερό μέλος είναι ίσος με τον αντίστοιχο στο δεξιό μέλος (δηλαδή $92 = 90 + 2$), επειδή αυτό επιβάλλει η διατήρηση του φορτίου.



3-17 Διάσπαση α τον U-238 σε Th-234 με ταυτόχρονη εκπομπή σωματίου α.

Επίσης ο συνολικός μαζικός αριθμός στο αριστερό μέλος είναι ίσος με τον αντίστοιχο στο δεξιό μέλος (δηλαδή $238 = 234 + 4$), επειδή αυτό επιβάλλει η διατήρηση του συνολικού αριθμού των νουκλεονίων. Θα δούμε και σε άλλες παραγράφους ότι οι διατηρήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε πυρηνική αντίδραση.

Όταν συμβαίνει μία διάσπαση α, η μάζα του μητρικού πυρήνα είναι μεγαλύτερη από το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α. Κατά τη διάσπαση η διαφορά των μαζών εκδηλώνεται ως κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 5

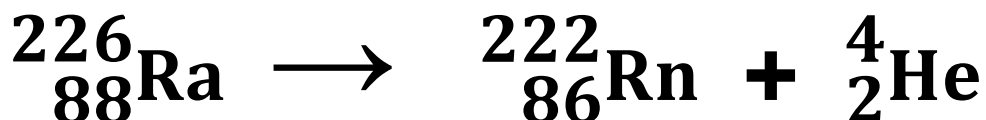
Ο πυρήνας ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ διασπάται με εκπομπή σωματίου α. Ποιος θυγατρικός πυρήνας σχηματίζεται;

ΛΥΣΗ Η διάσπαση μπορεί να γραφεί ως εξής:



Η σύγκριση των ατομικών και μαζικών αριθμών δεξιά και αριστερά του βέλους μάς δείχνει ότι ο θυγατρικός πυρήνας έχει $Z = 86$ και $A = 222$.

Ο πυρήνας που αντιστοιχεί στα στοιχεία αυτά είναι του ραδονίου ${}^{222}_{86}\text{Rn}$. Έτσι η διάσπαση είναι:



ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 6

Στην παραπάνω διάσπαση, αν γνωρίζουμε ότι η μάζα του

${}^{226}_{88}\text{Ra}$ είναι 226,025406u, η μάζα του ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ είναι 222,017574u και

αυτή του ${}^4_2\text{He}$ είναι 4,002603u, βρείτε την ενέργεια που ελευθερώνεται κατά τη διάσπαση.

ΛΥΣΗ Μετά τη διάσπαση το άθροισμα των μαζών του θυγατρικού πυρήνα και του σωματίου α είναι:

$$m_{\theta} + m_{\alpha} = 222,017574\text{u} + 4,002603\text{u} \\ = 226,020177\text{u}$$

Έτσι η μάζα που χάθηκε κατά τη διάσπαση είναι:

$$m_{\text{Ra}} - (m_{\theta} + m_{\alpha}) = 226,025406\text{u} - 226,020177\text{u} = 0,005229\text{u}$$

Χρησιμοποιώντας τη σχέση $1\text{u} = 931,5\text{MeV}$ βρίσκουμε ότι η ενέργεια που ελευθερώνεται είναι:

$$E = (0,005229\text{u}) \times (931,5\text{MeV/u}) = 4,87\text{MeV}$$

Ας σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας αποτελεί κινητική ενέργεια του σωματιδίου α .

Διάσπαση β

Είναι το φαινόμενο κατά το οποίο εκπέμπεται από τον πυρήνα ένα ηλεκτρόνιο (διάσπαση β^-) ή ένα ποζιτρόνιο (διάσπαση β^+).

Έτσι, για παράδειγμα, ο πυρήνας ${}^{14}_6\text{C}$ διασπάται σε πυρήνα ${}^{14}_7\text{N}$,

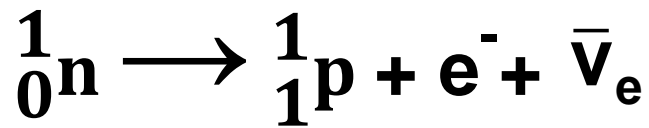
ενώ συγχρόνως εκπέμπεται και ένα ηλεκτρόνιο.



3-18 Τα νεutrίνα αλληλεπιδρούν τόσο ασθενικά με την ύλη, ώστε πολύ δύσκολα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε. Ένα νεutrίνο μπορεί να περάσει μέσα από τη Γη σαν να μην υπήρχε καθόλου αυτή.

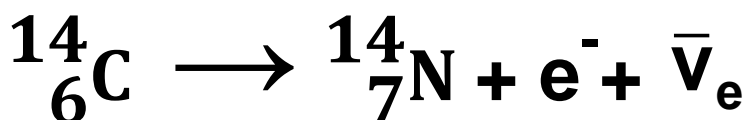
Το γεγονός ότι κατά τη διάσπαση ενός πυρήνα μπορεί να εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο δε σημαίνει ότι το ηλεκτρόνιο αυτό προϋπήρχε μέσα στο μητρικό πυρήνα. Αυτό που συμβαίνει είναι ότι η εκπομπή ενός ηλεκτρονίου οφείλεται στη διάσπαση ενός νετρονίου του πυρήνα σε

ένα πρωτόνιο, ένα ηλεκτρόνιο και ένα αντineutrino:



Έτσι ο αριθμός των πρωτονίων Z στο θυγατρικό πυρήνα αυξάνεται κατά 1, ενώ ο αριθμός των νετρονίων μειώνεται κατά 1, οπότε ο συνολικός αριθμός των νουκλεονίων A δε μεταβάλλεται.

Η αντίδραση που παριστάνει την παραπάνω ραδιενεργό διάσπασή του ${}^{14}_6\text{C}$ είναι η ακόλουθη:



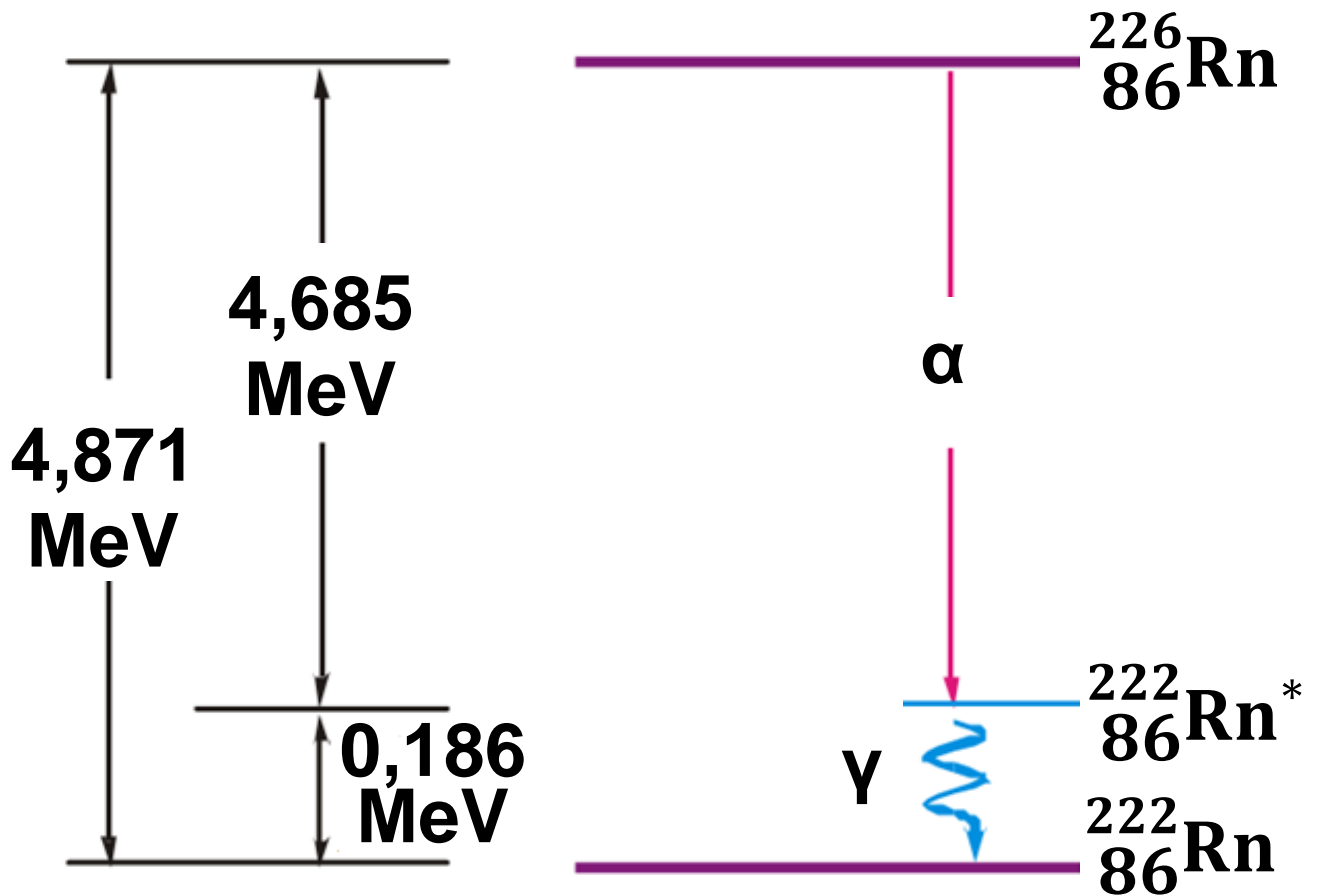
Η αλληλεπίδραση που είναι υπεύθυνη για τη μεταλλαγή αυτή είναι η ασθενής αλληλεπίδραση μεταξύ των quarks του νετρονίου. Τα σωματίδια β , επειδή φέρουν φορτίο, μπορούν να ανιχνευτούν. Οι ταχύ-

τητές τους φτάνουν ακόμη και το 99,9% της ταχύτητας του φωτός. Επειδή το αντινετρίνο αλληλεπιδρά πολύ ασθενικά με την ύλη, η παρατήρησή του είναι εξαιρετικά δύσκολη. Παρουσιάζει μάλιστα ιστορικό ενδιαφέρον ότι, όταν παρατηρήθηκε η παραπάνω διάσπαση β, το νετρίνο δεν ήταν γνωστό και με τα πειραματικά μέσα της εποχής δεν μπορούσε να ανιχνευτεί. Την ύπαρξή του ως άγνωστο σωματίδιο πρότεινε ο Pauli (Πάουλι) το 1930, για να μπορεί να ισχύει η διατήρηση της ενέργειας και της ορμής στη διάσπαση του $^{14}_6\text{C}$. Η παρατήρηση του νετρίνου έγινε πολύ αργότερα, το 1950.

Διάσπαση γ

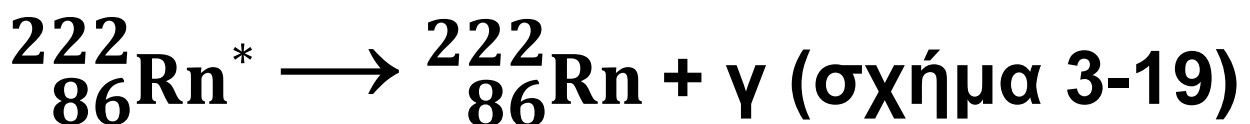
Πολύ συχνά ένας πυρήνας, μετά από μία διάσπαση α ή β, μεταστοι-

χειώνεται σε άλλο πυρήνα, ο οποίος βρίσκεται σε μία διεγερμένη ενεργειακή στάθμη. Ο νέος πυρήνας τότε μεταπίπτει σε μία χαμηλότερη ενεργειακή στάθμη με ταυτόχρονη εκπομπή ενός ή περισσότερων φωτονίων. Η διαδικασία αυτή είναι παρόμοια με τη διαδικασία εκπομπής φωτός από άτομα, όταν ηλεκτρόνια μεταπίπτουν από ανώτερες ενεργειακές στάθμες σε χαμηλότερες.



3-19 Αποδιέγερση πυρήνα Rn^* με εκπομπή ακτινοβολίας γ .

Τα φωτόνια που εκπέμπονται κατά τις αποδιεγέρσεις πυρήνων ονομάζονται ακτίνες ή σωματίδια γ και έχουν πολύ υψηλές ενέργειες σε σχέση με τις ενέργειες των φωτονίων του ορατού φωτός. Ένα παράδειγμα εκπομπής ακτινών γ παρουσιάζεται ως εξής:



Το σύμβολο (*) δηλώνει διεγερμένη στάθμη.

Ας σημειωθεί ότι κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ δεν αλλάζει ούτε το Z ούτε το A του πυρήνα.

Στη φύση υπάρχουν πολλά ραδιενεργά στοιχεία που διασπώνται αυθόρμητα. Συχνά, όταν ένας ραδιενεργός πυρήνας διασπάται, ο θυγατρικός πυρήνας μπορεί να είναι κι αυτός ασταθής. Τότε συμβαίνει μια σειρά διαδοχικών διασπάσεων, μέχρι να καταλήξουμε σε ένα σταθερό πυρήνα.

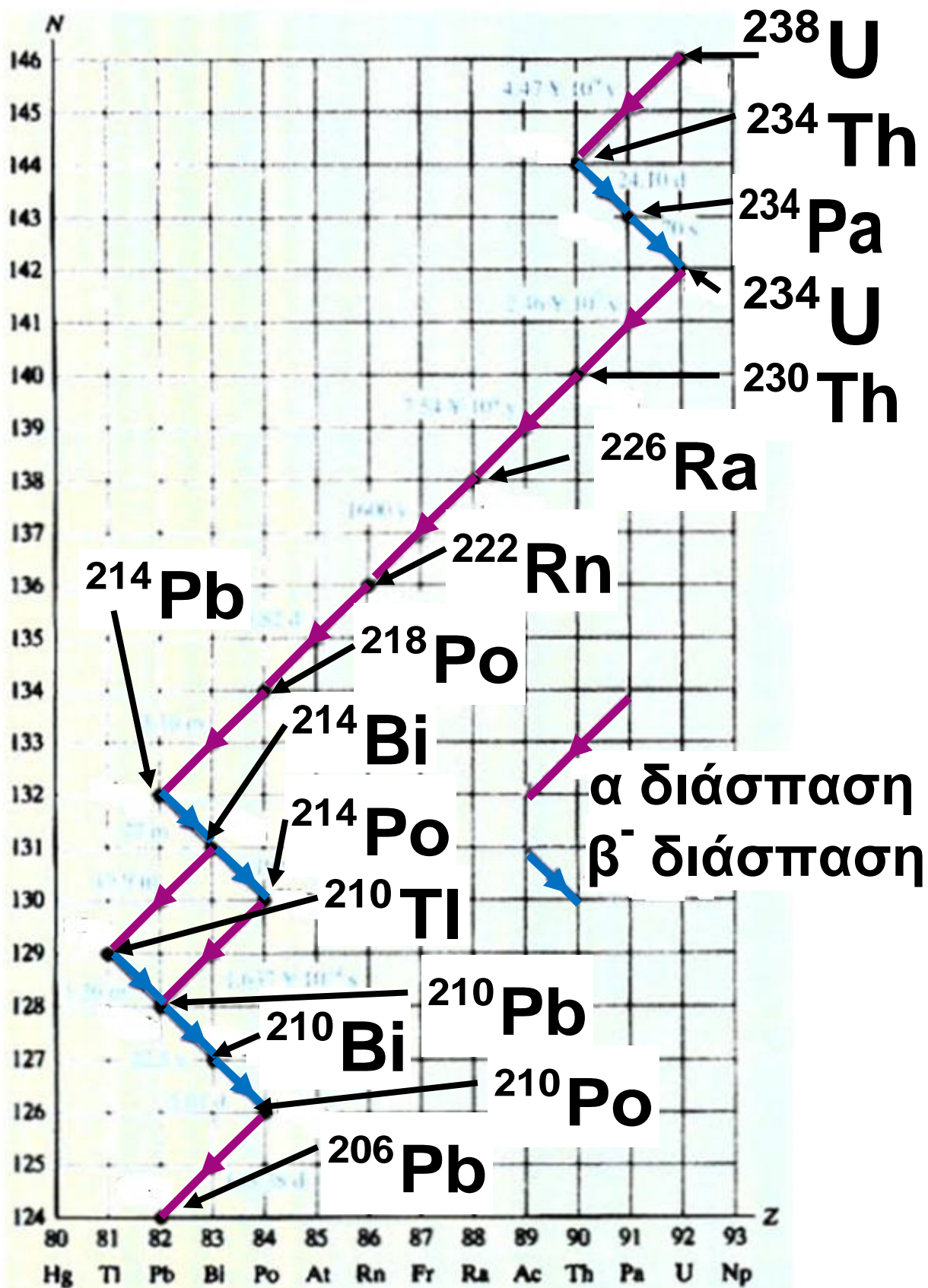
Διεισδυτική ικανότητα των σωματιδίων α , β και γ

Τα σωματίδια α , β και γ , που εκπέμπονται στις διασπάσεις α , β και γ των πυρήνων, έχουν διαφορετική διεισδυτική ικανότητα. Δηλαδή:

- Τα σωμάτια α μόλις που διαπερνούν ένα φύλλο χαρτιού.
- Τα σωματίδια β μπορούν να διαπεράσουν φύλλα αλουμινίου πάχους λίγων εκατοστών.
- Τα σωματίδια γ μπορούν να διαπεράσουν αρκετά εκατοστά μολύβδου. Λόγω της μεγάλης διεισδυτικής ικανότητας απαιτούνται αυξημένα μέτρα προφύλαξης από αυτά.

3-20 Ο ραδιενεργός πυρήνας που απαντάται πιο συχνά στη φύση είναι του U-238, ο οποίος με μια σειρά από 14 διασπάσεις, οι οποίες αποτελούνται από 8 εκπομπές α και 6 εκπομπές β, καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του Pb-206.

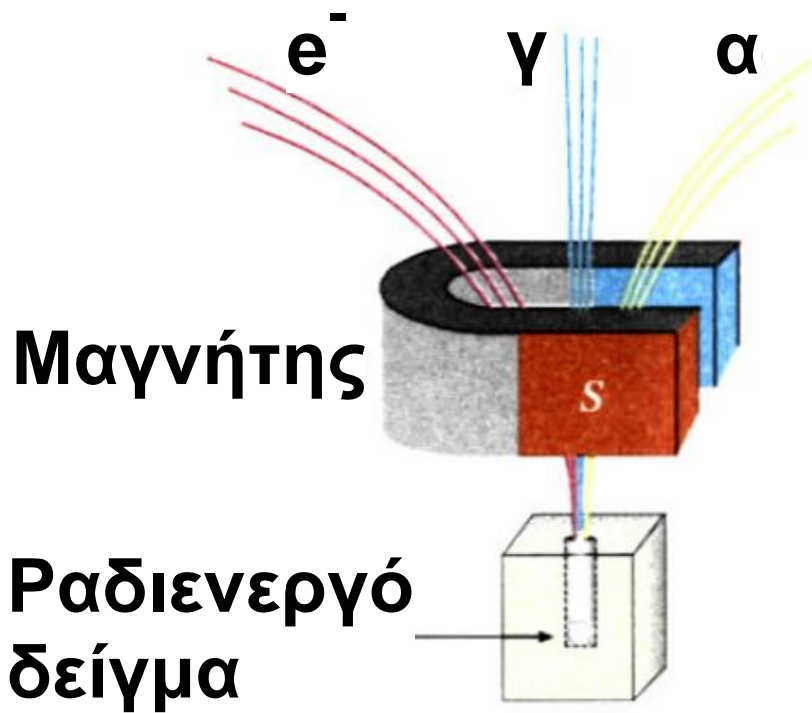
(στην επόμενη σελίδα)



Τα σωματίδια α και β , επειδή είναι φορτισμένα, κατά τη διέλευσή τους μέσα από την ύλη χάνουν σταδιακά την ενέργειά τους αλληλεπιδρώντας ηλεκτρικά με αυτήν. Τα φωτόνια γ στην πορεία τους είτε χάνουν όλη την ενέργειά τους με μία αλληλεπίδραση κατά την οποία απορροφούνται είτε περνούν ανεπηρέαστα.

Διαχωρισμός των σωματιδίων α , β και γ

Τα σωματίδια α , β και γ μπορούν να διαχωριστούν με τη βοήθεια ενός μαγνητικού πεδίου. Τα θετικά φορτισμένα σωματίδια α αποκλίνουν προς μια κατεύθυνση από το πεδίο, τα αρνητικά φορτισμένα σωματίδια β αποκλίνουν προς την αντίθετη κατεύθυνση και η ηλεκτρικά ουδέτερη ακτινοβολία γ δεν αποκλίνει καθόλου (σχήμα 3-21).



3-21 Διαχωρισμός ακτινοβολιών α, β και γ από μαγνητικό πεδίο.

Ρυθμοί διάσπασης - Χρόνος ημι-ζωής

Ας θεωρήσουμε ένα δείγμα από άτομα ραδιενεργού στοιχείου. Ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων ελαττώνεται, καθώς αυτοί διασπώνται. Το φαινόμενο όμως αυτό είναι καθαρά στατιστικό. Κανείς δεν μπορεί να προβλέψει ποιος πυρήνας θα διασπαστεί και ποια χρονική στιγμή.

Έστω ότι κάποια χρονική στιγμή υπάρχουν N αδιάσπαστοι πυρήνες. Ο αριθμός των διασπάσεων ΔN , που θα συμβούν κατά το αμέσως επόμενο στοιχειώδες χρονικό διάστημα Δt , είναι σύμφωνα με τη στατιστική ανάλογος του αριθμού N και του χρονικού διαστήματος Δt . Δηλαδή:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (3.3)$$

Το λ ονομάζεται σταθερά της διάσπασης. Το πρόσημο (-) δηλώνει ότι πρόκειται για μείωση του αριθμού των πυρήνων.

Η σταθερά λ είναι μεγάλη για ραδιενεργούς πυρήνες που διασπώνται γρήγορα και μικρή γι' αυτούς που διασπώνται αργά.

Η παραπάνω σχέση γράφεται και ως εξής:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (3.4)$$

και δηλώνει ότι ο ρυθμός μεταβολής του N είναι κάθε χρονική στιγμή ανάλογος του N .

Η απόλυτη τιμή του ρυθμού μεταβολής του αριθμού των πυρήνων ονομάζεται **ενεργότητα του δείγματος**. Στο S.I. (διεθνές σύστημα μονάδων) μονάδα ενεργότητας είναι το **1 Becquerel (1Bq)** και ορίζεται ως μία διάσπαση ανά δευτερόλεπτο ($1\text{Bq} = 1\text{διάσπαση/s}$).

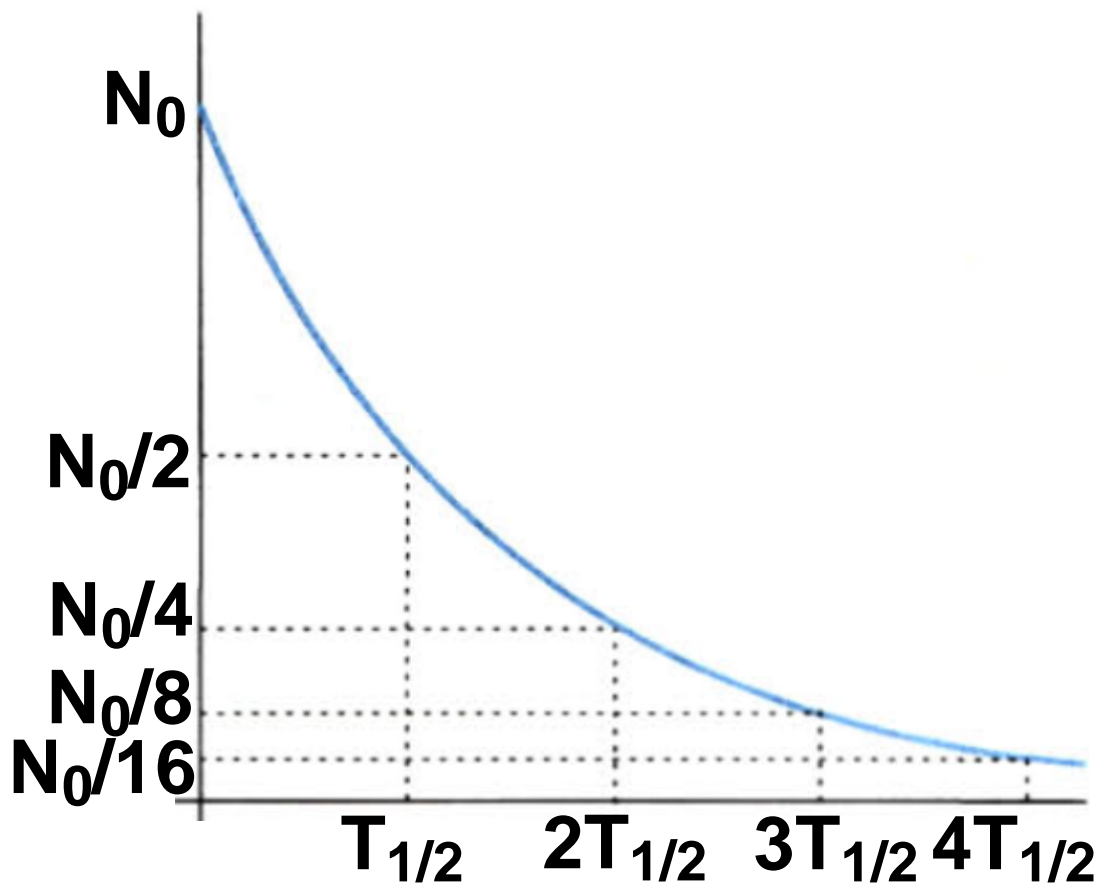
Ο χρόνος υποδιπλασιασμού ή ημιζωή $T_{1/2}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται, ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού αριθμού N_0 . Στη συνέχεια πάλι οι μισοί από εκεί-

**νους που απομένουν διασπώνται
μέσα στο επόμενο διάστημα $T_{1/2}$
κ.ο.κ.**

**Στο σχήμα 3-22 φαίνεται ότι ο αριθ-
μός των πυρήνων που απο μένουν,
μετά από διαδοχικά χρονικά δια-
στήματα $T_{1/2}$ είναι $N_0/2$, $N_0/4$, $N_0/8$
κ.ο.κ.**

**Αποδεικνύεται ότι η μαθηματική
μορφή της καμπύλης του σχήματος
είναι:**

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3.5)$$



3-22 Καμπύλη διάσπασης για ένα δείγμα ραδιενεργού στοιχείου.

Αν στη σχέση 3.5 βάλουμε $N = N_0/2$ έχουμε:

$$\frac{N_0}{2} = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \quad \text{ή} \quad \frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

από όπου λογαριθμίζοντας παίρνουμε τη σχέση που συνδέει την ημιζωή με τη σταθερά λ .

Δηλαδή:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (3.6)$$

Εξετάζοντας τους γνωστούς χρόνους υποδιπλασιασμού διαπιστώνουμε μια αφάνταστα μεγάλη ποικιλία. Στο ένα άκρο βρίσκονται μερικά εξαιρετικά βραχύβια στοιχειώδη σωματίδια με χρόνους υποδιπλασιασμού 10^{-20} s ή και λιγότερο. Στο άλλο άκρο βρίσκονται οι ραδιενεργοί πυρήνες με χρόνους υποδιπλασιασμού που κυμαίνονται από 10^{-3} s μέχρι και περισσότερο από 10^{15} χρόνια.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 7

Ο $^{12}_6\text{C}$ είναι ένα ραδιενεργό ισότοπο, που έχει ημιζωή 5730 χρόνια. Αν αρχικά σε ένα δείγμα υπήρχαν 1600 πυρήνες, πόσοι θα απέμεναν

αδιάσπαστοι μετά από 22920 χρόνια;

ΛΥΣΗ Αφού μετά από 5730 χρόνια απομένουν περίπου οι μισοί πυρήνες, δηλαδή 800, μετά από άλλα 5730 χρόνια απομένουν περίπου 400 και τέλος σε 4 ημιζωές (22920 χρόνια) απομένουν περίπου 100 πυρήνες.

Βέβαια δεν πρέπει να ξεχνάμε ότι το φαινόμενο είναι στατιστικό και ο αριθμός των 1600 πυρήνων είναι σχετικά μικρός, για να ισχύουν με ακρίβεια οι στατιστικοί νόμοι.

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 8

Το ραδιενεργό ^{57}Co εκπέμπει σωμάτια β και έχει χρόνο υποδιπλασιασμού 272 ημέρες.

(α) Βρείτε τη σταθερά διάσπασής του.

(β) Πόσους ραδιενεργούς πυρήνες πρέπει να έχει μια πηγή Co, ώστε να παρουσιάζει ενεργότητα

$$3,7 \times 10^4 \text{ Bq};$$

(γ) Πόση ενεργότητα θα έχει μετά από 272 ημέρες;

ΛΥΣΗ (α) Ο χρόνος υποδιπλασιασμού είναι:

$$T_{1/2} = (272 \text{ ημέρες})(86400 \text{ s/ημέρα}) = 23,5 \times 10^6 \text{ s}$$

Συνεπώς η σταθερά διάσπασης είναι:

$$\lambda = 0,693 / 23,5 \times 10^6 \text{ s} = 29,5 \times 10^{-9} \text{ s}^{-1}$$

(β) Η ενεργότητα είναι η απόλυτη τιμή του ρυθμού διάσπασης και αυτή ισούται με λN .

Συνεπώς $-\Delta N / \Delta t = \lambda N$ και

$$N = \frac{-\Delta N / \Delta t}{\lambda} = \frac{3,7 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}}{29,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}} =$$

$$= 1,25 \cdot 10^{12} \text{ πυρήνες}$$

(γ) Μετά από 272 ημέρες ο αριθμός των πυρήνων θα έχει ελαττωθεί στο μισό, οπότε και η ενεργότητα θα είναι η μισή, δηλαδή $1,85 \times 10^4$ Βq.

Ραδιοχρονολόγηση

Η διάσπαση β του $^{14}_6\text{C}$ βρίσκει μία από τις πιο συνηθισμένες εφαρμογές στη χρονολόγηση οργανικών δειγμάτων. Ο $^{14}_6\text{C}$ δημιουργείται στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας ως αποτέλεσμα πυρηνικών αντιδράσεων που προκαλούνται από σωματίδια της κοσμικής ακτινοβολίας. Η αναλογία του $^{14}_6\text{C}$ προς τον $^{12}_6\text{C}$ είναι σταθερή στην ατμόσφαιρα και ίση περίπου με $1,3 \times 10^{-12}$.

Όλοι οι ζωντανοί οργανισμοί έχουν την ίδια αναλογία του $^{14}_6\text{C}$ προς τον

$^{12}_6\text{C}$ λόγω του ότι παίρνουν άνθρακα από το φυσικό τους περιβάλλον και αποβάλλουν συνεχώς διοξείδιο του άνθρακα στο περιβάλλον τους.

Όταν όμως ο οργανισμός πεθάνει, σταματάει να προσλαμβάνει άνθρακα και η αναλογία του $^{14}_6\text{C}$ προς τον $^{12}_6\text{C}$ ελαττώνεται ως αποτέλεσμα της διάσπασης β του $^{14}_6\text{C}$.

Μετρώντας σήμερα την ενεργότητα ανά μονάδα μάζας σε δείγματα από οργανικά υλικά, προσδιορίζουμε το ποσοστό του $^{14}_6\text{C}$ που έχει απομείνει και έτσι μπορούμε να προσδιορίσουμε και το χρονικό διάστημα που παρήλθε μετά το θάνατο του οργανισμού από τον οποίο προήλθε το οργανικό υλικό.

Παρόμοιες τεχνικές χρησιμοποιούνται και για τη χρονολόγηση γεωλογικών δειγμάτων. Αρχικά ένα πέτρωμα περιείχε μόνο το ισότοπο ^{40}K . Με την πάροδο του χρόνου η διάσπαση του ^{40}K έδωσε ^{40}Ar με χρόνο ημιζωής $1,28 \times 10^9$ χρόνια. Η ηλικία του πετρώματος βρίσκεται με σύγκριση των συγκεντρώσεων των στοιχείων ^{40}K και ^{40}Ar .

3-23 Οι παλαιοντολόγοι μπορούν να υπολογίσουν την ηλικία ενός απολιθώματος μετρώντας την ποσότητα του C-14 που περιέχει.

(εικόνα στην επόμενη σελίδα)



**Δείγμα απολιθώματος καίγεται
και μετατρέπεται σε CO₂**



Οι ζωντανοί οργανισμοί απορροφούν C-14 όσο ζουν

Απαριθμητής ακτινοβολίας μετράει τον αριθμό ηλεκτρονίων που εκπέμπονται

ΠΑΡΑΔΕΙΓΜΑ 3 – 9

Η ενεργότητα του ατμοσφαιρικού άνθρακα, που οφείλεται στην παρουσία $^{14}_6\text{C}$, είναι 0,255Bq ανά γραμμάριο άνθρακα. Στην ανάλυση ενός αρχαιολογικού δείγματος, που περιέχει 0,4g άνθρακα, παρατηρήθηκαν 0,0386 διασπάσεις/s.

Πόση είναι η ηλικία του δείγματος;

Ο χρόνος ημιζωής του $^{14}_6\text{C}$ είναι 5730 χρόνια.

ΛΥΣΗ Αν το ποσοστό του $^{14}_6\text{C}$ ήταν το ίδιο όπως στην ατμόσφαιρα, η ενεργότητα του θα ήταν $(0,255\text{Bq/gr}) \times 0,4\text{gr} = 0,102\text{Bq}$. Ο παρατηρούμενος όμως ρυθμός διάσπασης είναι 0,0386Bq. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία του σημερινού αριθμού του $^{14}_6\text{C}$ προς αυτόν που υπήρχε την εποχή που πέθανε

ο οργανισμός του δείγματος είναι:

$$\frac{N}{N_0} = \frac{0,0386}{0,102} = 0,378$$

Λογαριθμίζουμε τώρα την εξίσωση

$N = N_0 e^{-\lambda t}$, λύνουμε ως προς t και

βρίσκουμε:

$$t = \frac{\ln(N_0 / N)}{\lambda} = \frac{0,971}{1,21 \cdot 10^{-4} \text{ χρ}^{-1}} =$$

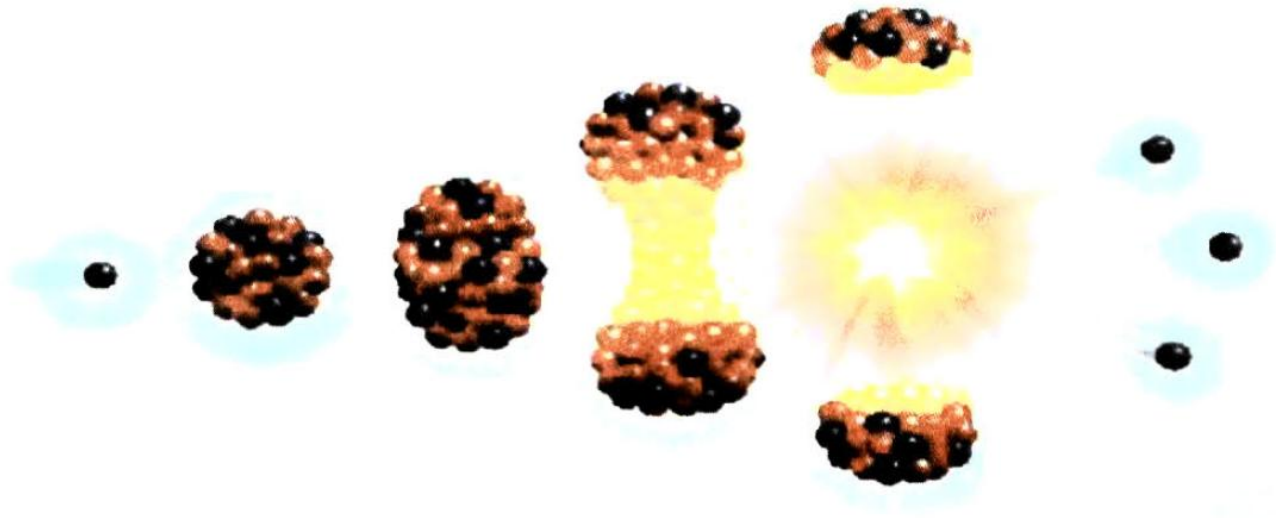
= 8030 χρόνια

Η σταθερά λ έχει την τιμή:

$$\lambda = \frac{0,693}{5730 \text{ χρ}} = 1,21 \cdot 10^{-4} \text{ χρ}^{-1}$$

3.4 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ

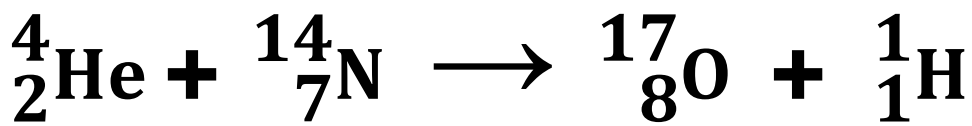
Κατά το βομβαρδισμό πυρήνων - στόχων με κινούμενα σωματίδια συχνά παρατηρούνται νέοι πυρήνες μετά την κρούση. Τέτοιες κρούσεις ονομάζονται πυρηνικές αντιδράσεις.



3-24 Αναπαράσταση πυρηνικής αντίδρασης μετά από σύλληψη νετρονίου από πυρήνα.

Ο Rutherford ήταν ο πρώτος που παρατήρησε πυρηνικές αντιδράσεις κατά το βομβαρδισμό πυρήνων αζώτου με σωματία α. Η διαδι-

κασία που συνέβη μπορεί να παρασταθεί ως εξής:



Στις πυρηνικές αντιδράσεις ισχύουν οι νόμοι διατήρησης του φορτίου, της ορμής και της ενέργειας. Στην τελευταία συμπεριλαμβάνονται η κινητική ενέργεια και η ενέργεια που αντιστοιχεί στη μάζα ηρεμίας. Ένας πρόσθετος νόμος διατήρησης είναι η διατήρηση του συνολικού αριθμού των νουκλεονίων. Στην παραπάνω αντίδραση η διατήρηση αυτή επιβεβαιώνεται από την εξισορρόπηση των μαζικών αριθμών στα δύο μέλη της αντίδρασης. Επίσης η διατήρηση του φορτίου επιβάλλει να ισούται το άθροισμα των αρχικών ατομικών αριθμών με το άθροισμα των τελικών ατομικών αριθμών.

Η διαφορά των μαζών ηρεμίας πριν και μετά την αντίδραση προσδιορίζει την ενέργεια Q της αντίδρασης, σύμφωνα με την ισοδυναμία μάζας και ενέργειας.

Έτσι στην αντίδραση $A + B \longrightarrow \Gamma + \Delta$ η ενέργεια Q της αντίδρασης ορίζεται ως:

$$Q = (M_A + M_B - M_\Gamma - M_\Delta)c^2 \quad (3.7)$$

Όταν το Q είναι θετικό, η μάζα των προϊόντων είναι μικρότερη από αυτήν των αντιδρώντων, ενώ η κινητική ενέργεια των προϊόντων είναι μεγαλύτερη. Μια τέτοια αντίδραση ονομάζεται **εξώθερμη**.

Όταν το Q είναι αρνητικό, η μάζα των προϊόντων είναι μεγαλύτερη και η κινητική τους ενέργεια αντίστοιχα μικρότερη. Μια τέτοια αντίδραση ονομάζεται **ενδόθερμη**.

Πυρηνική σχάση

Μια πολύ σημαντική κατηγορία πυρηνικών αντιδράσεων είναι εκείνη στην οποία συμβαίνει απορρόφηση νετρονίων από βαρείς πυρήνες.

Ένα είδος τέτοιων αντιδράσεων είναι η πυρηνική σχάση, κατά την οποία ένας βαρύς πυρήνας (π.χ.

$^{235}_{92}\text{U}$) σχάζεται σε δύο

μικρότερους πυρήνες. Σε μια τέτοια αντίδραση η ολική μάζα ηρεμίας των προϊόντων είναι μικρότερη από την αρχική μάζα ηρεμίας.

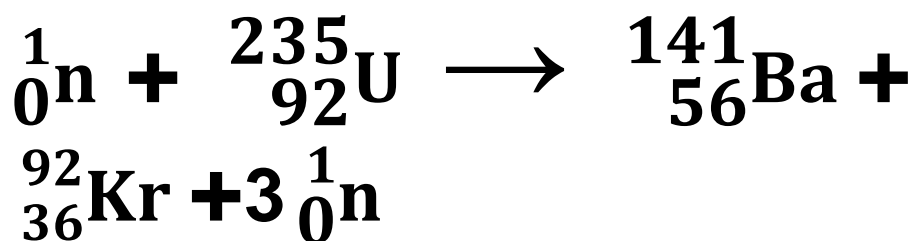


3-25 Ο τέταρτος αντιδραστήρας στο Τσερνομπίλ μέσα στη σαρκοφάγο του από τσιμέντο. Στο Τσερ-

νομπίλ το 1986 είχαμε το μεγαλύτερο πυρηνικό ατύχημα στην ανθρωπινή ιστορία.

Η πρώτη πυρηνική σχάση παρατηρήθηκε το 1939 από τους Otto Hahn (Ότο Χαν) και Fritz Strassman (Φριτς Στράσμαν) μετά από βομβαρδισμό $^{235}_{92}\text{U}$ με νετρόνια.

Υπάρχουν περίπου 90 διαφορετικοί συνδυασμοί των δύο θυγατρικών πυρήνων που αποτελούν τα θραύσματα του πυρήνα ουρανίου. Ένας από αυτούς, που αποτελεί συνηθισμένη διαδικασία σχάσης, είναι και ο εξής:



Η αντίδραση αυτή είναι ισχυρά εξώθερμη και τα θραύσματα της σχάσης, καθώς και τα νετρόνια,

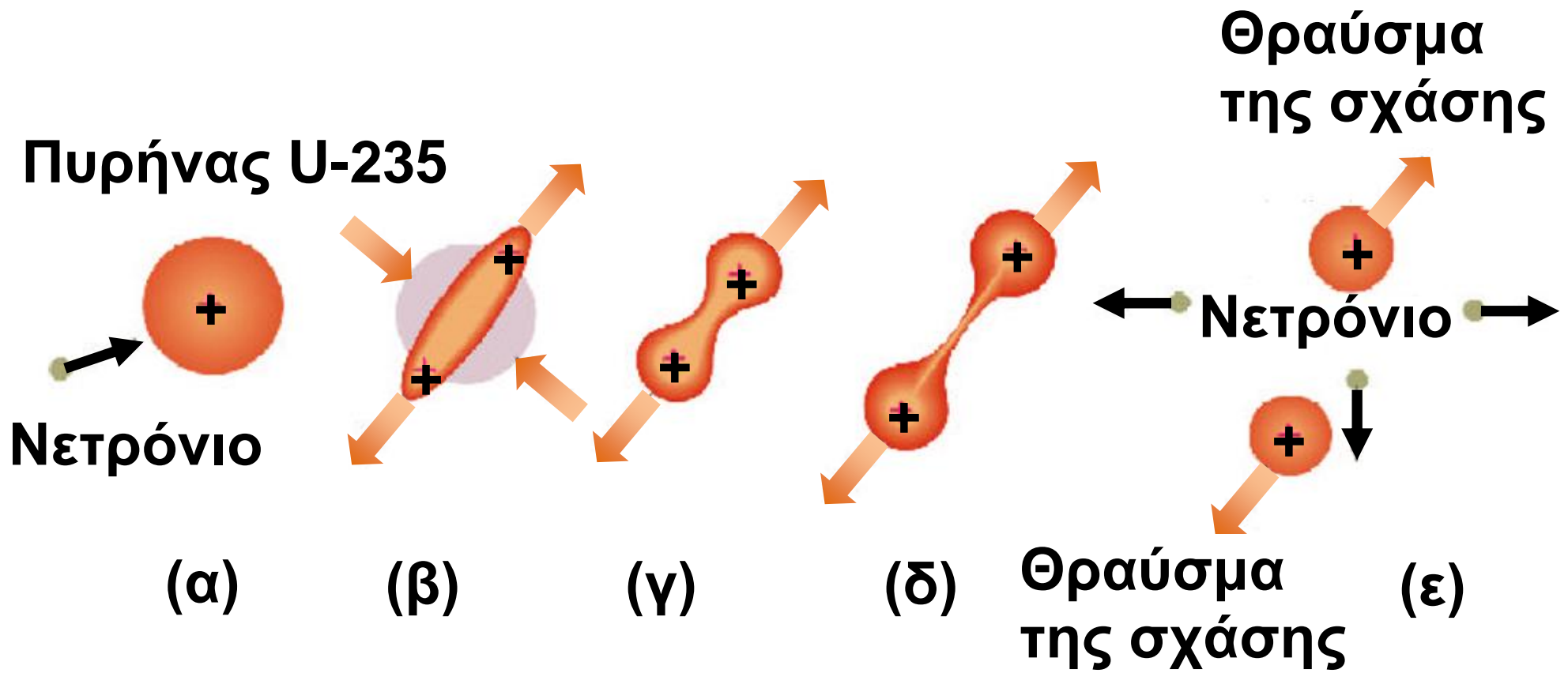
έχουν μια υψηλή κινητική ενέργεια της τάξης των 200MeV.

Μπορούμε να καταλάβουμε ποιοτικά το μηχανισμό της σχάσης, αν παρομοιάσουμε τον πυρήνα με μια σταγόνα σχεδόν σφαιρικού σχήματος. Καθώς ο πυρήνας συλλαμβάνει ένα νετρόνιο, με την πρόσθετη ενέργεια που παίρνει αρχίζει να ταλαντώνεται βίαια. Κατά τις ταλαντώσεις του αυτές παραμορφώνεται έντονα κατά τέτοιο τρόπο, ώστε στο μέσον του να σχηματίζεται ένα στένωμα (λαιμός), που χωρίζει δύο λοβούς. Η ηλεκτρική άπωση μεταξύ των δύο λοβών τους ωθεί σε αποκόλληση. Οι δύο λοβοί αποχωρίζονται και αποτελούν τα θραύσματα της σχάσης (σχήμα 3-26).

Τα νετρόνια που αποδεσμεύονται κατά τη σχάση ενός πυρήνα

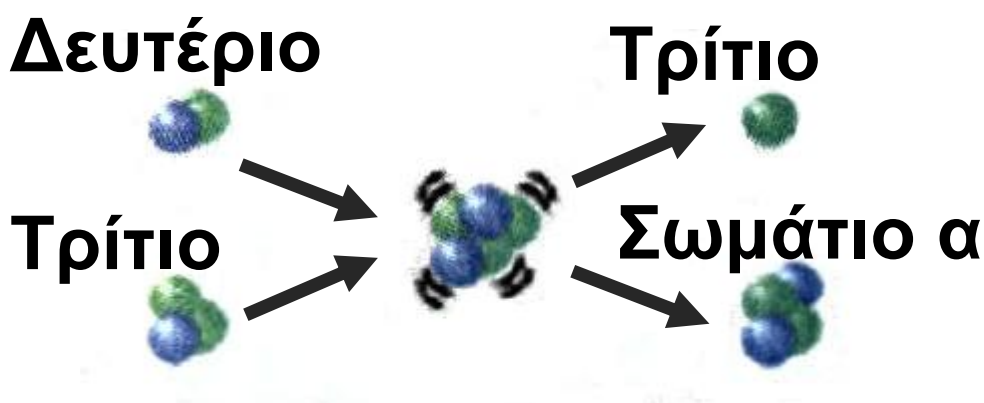
μπορούν στη συνέχεια να προκαλέσουν νέα σχάση σε άλλους πυρήνες και έτσι να έχουμε μια αλυσιδωτή αντίδραση. Αν η αλυσιδωτή αυτή αντίδραση δεν ελεγχθεί, δηλαδή δεν προχωρήσει αργά, τότε έχει ως αποτέλεσμα μια βίαιη έκρηξη και την απελευθέρωση ενός τεράστιου ποσού ενέργειας, ακόμη και από ένα γραμμάριο ουρανίου. Αυτή η μη ελεγχόμενη σχάση αποτελεί την αρχή λειτουργίας της ατομικής βόμβας. Αντίθετα, σε έναν αντιδραστήρα παραγωγής ηλεκτρικής ισχύος επιβραδύνονται με κατάλληλο μηχανισμό τα παραγόμενα νετρόνια, ώστε να διατηρούν μια αυτοσυντηρούμενη αλυσιδωτή αντίδραση, η οποία όμως θα προχωρεί αργά και ελεγχόμενα, χωρίς να οδηγεί σε έκρηξη.

**3-26 Τα στάδια σε μια πυρηνική
σχάση όπως περιγράφονται από το
μοντέλο της υγρής σταγόνας για
τον πυρήνα**



Πυρηνική σύντηξη

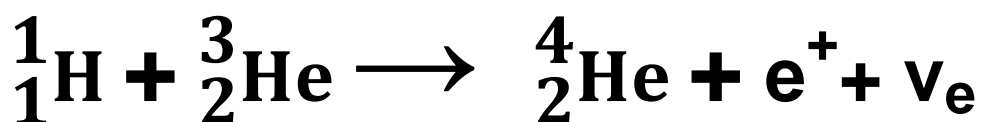
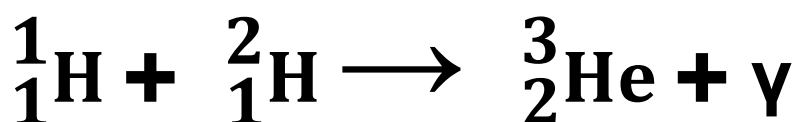
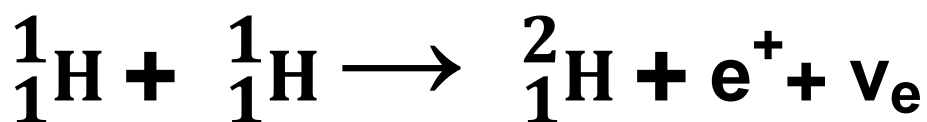
Στην ενότητα 3.1 είδαμε ότι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των ελαφρών πυρήνων είναι μικρότερη από την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο των βαρύτερων. Η διαδικασία της συνένωσης δύο ελαφρών πυρήνων, για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο, λέγεται πυρηνική σύντηξη.



3-27 Η σύντηξη δευτερίου και τριτίου σχηματίζει πυρήνα He και ένα νετρόνιο.

Επειδή η μάζα ηρεμίας του τελικού πυρήνα είναι μικρότερη από το

άθροισμα των μαζών των αρχικών πυρήνων, υπάρχει μια απώλεια μάζας, η οποία συνοδεύεται από αντίστοιχη αύξηση της ενέργειας της τελικής κατάστασης. Τρία τέτοια παραδείγματα σύντηξης είναι τα παρακάτω:



Αυτή η σειρά των αντιδράσεων, που λέγεται κύκλος πρωτονίου - πρωτονίου, πιστεύεται ότι συμβαίνει στο εσωτερικό του Ήλιου αλλά και άλλων αστεριών, όπου αφθονεί το υδρογόνο, και από αυτήν προέρχεται η ενέργεια των άστρων.

Τα ποζιτρόνια που παράγονται στις αντιδράσεις αυτές συγκρούονται στο εσωτερικό του Ήλιου με ηλεκ-

τρόνια, τα ζεύγη αυτά εξαϋλώνονται και η ενέργειά τους μετατρέπεται σε ακτινοβολία γ .

Επομένως ολόκληρος ο κύκλος και των τριών αντιδράσεων ισοδυναμεί τελικά με μία αντίδραση, όπου $4 \text{ }^1_1\text{H}$ συντήκονται και δημιουργούν έναν πυρήνα ^4_2He , ενώ ταυτόχρονα εκπέμπεται ακτινοβολία γ και νετρίνα.

Βλέπουμε ότι η ενέργεια του Ήλιου προέρχεται από το «πυρηνικό καύσιμο» υδρογόνο, καθώς αυτό μετατρέπεται βαθμιαία σε ήλιο. Αν υποθεθεί ότι η παραγωγή ενέργειας στον Ήλιο, καθώς και η ακτινοβολία του, θα συνεχιστούν με τους ίδιους ρυθμούς, εκτιμάται ότι ο Ήλιος διαθέτει αρκετά καύσιμα στον πυρήνα του για να διατηρήσει την υπάρ-

χουσα λαμπρότητά του για 5-9 δισεκατομμύρια χρόνια περίπου. Για να συμβεί σύντηξη μεταξύ δύο πυρήνων, πρέπει να προσεγγίσουν αρκετά μεταξύ τους, ώστε να υπερνικηθεί η ηλεκτρική άπωση και να επικρατήσει η ισχυρή πυρηνική δύναμη. Για να συμβεί αυτό, πρέπει οι πυρήνες να αποκτήσουν πολύ υψηλή κινητική ενέργεια της τάξης των $0,7\text{MeV}$. Τόσο μεγάλη όμως κινητική ενέργεια μόνο σε εξαιρετικά υψηλή θερμοκρασία μπορεί να αποκτηθεί από έναν πυρήνα. Η θερμοκρασία, για να προκληθεί αντίδραση σύντηξης, είναι της τάξης των 10^8K . Στις θερμοκρασίες αυτές τα άτομα έχουν πια ιονισθεί τελείως, δηλαδή έχουν χάσει τα ηλεκτρόνιά τους, και η ιονισμένη αυτή κατάσταση, όπου έχουμε μόνο

ηλεκτρόνια και πυρήνες, λέγεται πλάσμα.

Τέτοιες θερμοκρασίες συναντάμε στη φύση μόνο στα άστρα. Οι υψηλές αυτές θερμοκρασίες δικαιολογούν την ονομασία θερμοπυρηνικές αντιδράσεις με την οποία χαρακτηρίζονται συχνά οι αντιδράσεις σύντηξης.



3-28 Στην προσπάθεια να επιτευχθεί ελεγχόμενη σύντηξη δοκιμάζεται η μέθοδος συγκράτησης του πλάσματος με μαγνητικό πεδίο.

Σε πολλά εργαστήρια στον κόσμο καταβάλλεται έντονη προσπάθεια κατασκευής θερμοπυρηνικού αντι-

δραστήρα, όπου θα γίνεται ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη. Δυστυχώς τόσο υψηλές θερμοκρασίες είναι εξαιρετικά δύσκολο να επιτευχθούν και να συντηρηθούν για αρκετό χρονικό διάστημα, ώστε να έχουμε πρακτικά αξιοποιήσιμη παραγωγή ενέργειας.

Αν πάντως επιτευχθεί αξιοποιήσιμη ελεγχόμενη πυρηνική σύντηξη, το ενεργειακό κέρδος για τον άνθρωπο θα είναι σημαντικό, αφού το «πυρηνικό καύσιμο» που προτείνεται είναι το δευτέριο, που υπάρχει άφθονο και φθηνό στο νερό των θαλασσών.

Το πρόβλημα των πυρηνικών αποβλήτων

Ένα από τα μεγαλύτερα προβλήματα, που συνοδεύουν τη λειτουργία των πυρηνικών αντιδραστήρων, είναι αυτό της διαχείρισης των

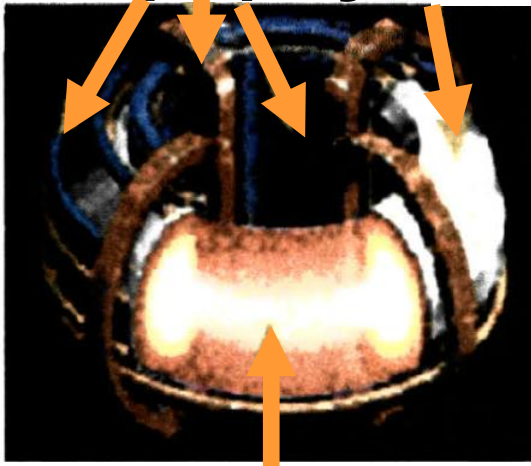
αποβλήτων τους. Τα απόβλητα του αντιδραστήρα είναι τα ραδιενεργά υλικά που εμφανίζονται ως προϊόντα των αντιδράσεων, καθώς και τα μέταλλα της «καρδιάς» του αντιδραστήρα, όταν αυτή πρέπει να αντικατασταθεί. Αυτά τα υψηλής ραδιενέργειας υλικά περιέχουν ισότοπα με μεγάλους χρόνους υποδιπλασιασμού και πρέπει να αποθηκευτούν για πολύ μεγάλη χρονική διάρκεια, ώστε να μην προκαλέσουν περιβαλλοντική μόλυνση.

Επί του παρόντος η λύση στο πρόβλημα αυτό είναι να τα τοποθετούμε σε καλά σφραγισμένα κιβώτια και να τα θάβουμε βαθιά σε ορυχεία.

Πάντως πρέπει να αναφερθεί ότι ένα ακόμη πλεονέκτημα των αντιδραστήρων σύντηξης, σε σχέση με τους αντιδραστήρες σχάσης, είναι

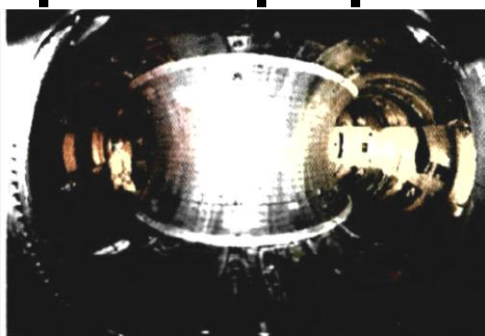
τα λίγα ραδιενεργά κατάλοιπα που αφήνουν.

Μαγνήτες Θάλαμος κενού



Πλάσμα

3-29 Σε έναν ερευνητικό αντιδραστήρα ΤΟΚΑΜΑΚ το ρεύμα που θερμαίνει το πλάσμα είναι αρκετά εκατομμύρια amperes και η θερμοκρασία μεγαλύτερη από 10^8 K.



3-30 Τα ΤΟΚΑΜΑΚ αποτελούν την πιο επιτυχημένη προσπάθεια κατασκευής αντιδραστήρων σύντηξης.

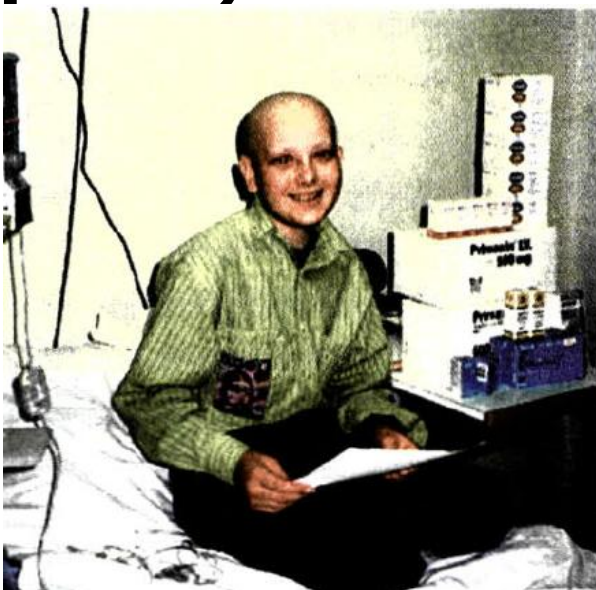
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ

A. Βλάβες από ακτινοβολία

Όταν η ύλη απορροφά ακτινοβολία, μπορεί να υποστεί σοβαρές βλάβες. Το είδος και ο βαθμός των ζημιών εξαρτάται από πολλούς παράγοντες, μεταξύ των οποίων είναι το είδος και η ενέργεια της ακτινοβολίας, καθώς και οι ιδιότητες του υλικού που την απορροφά. Για παράδειγμα, μέταλλα που χρησιμοποιούνται στους πυρηνικούς αντιδραστήρες εξασθενούν πολύ με το βομβαρδισμό τους από νετρόνια υψηλής ενέργειας. Η ζημιά εδώ οφείλεται σε μετακινήσεις των ατόμων μέσα στο μέταλλο, οι οποίες έχουν ως συνέπεια την αλλαγή των μηχανικών ιδιοτήτων του μετάλλου.

Οι βλάβες από πυρηνικές ακτινοβολίες στους βιολογικούς οργανισμούς οφείλονται κυρίως στον ιονισμό που προκαλούν αυτές οι ακτινοβολίες σε ουσίες που βρίσκονται μέσα στα κύτταρα.

Στον όρο «ακτινοβολίες» περιλαμβάνονται: οι ραδιενεργές α, β, γ, τα νετρόνια, καθώς και η υψηλής ενέργειας ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία, όπως π.χ. οι ακτίνες Χ. Στο σχηματισμό ιόντων οφείλεται και το όνομά τους ως ιονίζουσες ακτινοβολίες.



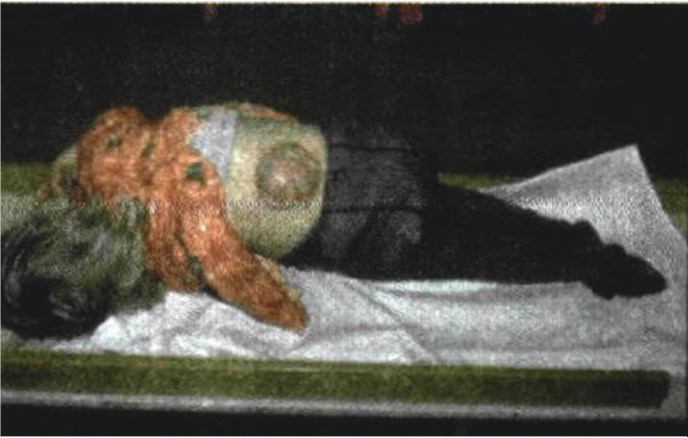
3-31 Άτομο που έχει εκτεθεί σε ακτινοβολίες έχει χάσει τα μαλλιά του.

Η λειτουργία των κυττάρων μπορεί να διαταραχθεί σοβαρά, όταν σχηματισθούν μέσα στο κύτταρο δραστικά ιόντα ή ρίζες ως αποτέλεσμα της ακτινοβολίας. Για παράδειγμα, σχηματισμός ιόντων υδροξυλίου και υδρογόνου μπορεί να προκαλέσει χημικές αντιδράσεις διάσπασης δεσμών σε πρωτεΐνες και να επιφέρει αλλαγές στο γενετικό υλικό των κυττάρων (DNA). Μεγάλες ποσότητες ακτινοβολίας κατάστρέφουν μεγάλο αριθμό μορίων σε ένα κύτταρο και προκαλούν το θάνατο του. Αν και ο θάνατος ενός κυττάρου δεν αποτελεί συνήθως πρόβλημα, ο θάνατος πολλών κυττάρων μπορεί να έχει ως αποτέλε-

σμα μια μη αντιστρεπτή βλάβη του οργανισμού.

Είναι πιθανόν επίσης κύτταρα που θα επιζήσουν από την ακτινοβολία να έχουν υποστεί βλάβες και κατά τον πολλαπλασιασμό τους να δημιουργήσουν νέα μεταλλαγμένα κύτταρα που πολύ συχνά οδηγούν στην εμφάνιση καρκίνου.

Βλάβες από ακτινοβολία μπορεί να προκληθούν επίσης και στο γενετικό υλικό των γενετικών κυττάρων. Στην περίπτωση αυτή οι αλλαγές των γονιδίων οδηγούν σε μεταβολές διάφορων χαρακτηριστικών των απογόνων του οργανισμού.



3-32 Οι τρεις παραπάνω εικόνες δείχνουν τις παραμορφωτικές βλάβες σε απογόνους ατόμων που δέχτηκαν πυρηνικές ακτινοβολίες μετά το πυρηνικό ατύχημα του Τσερνομπίλ.

Ως απορροφηθείσα δόση ακτινοβολίας ορίζεται η ενέργεια που έχει αποτεθεί στους ιστούς ανά χιλιόγραμμο μάζας. Μια συνηθισμένη μονάδα μέτρησής της είναι το 1rad, το οποίο ορίζεται ως η ποσότητα ακτινοβολίας που αποθέτει 0,01J ενέργειας ανά χιλιόγραμμο μάζας του ιστού (1rad = 0,01J/kg). Στο σύστημα S.I. μονάδα είναι το 1Gray (1Gy = 1J/kg).

Η απορροφηθείσα δόση δεν αποτελεί μόνη της μέτρο των βιολογικών επιπτώσεων και αυτό διότι τα βιολογικά αποτελέσματα δεν εξαρτώνται μόνο από τη δόση αλλά και από το είδος της ακτινοβολίας. Έτσι, για παράδειγμα, μια δεδομένη δόση ακτινοβολίας προκαλεί δέκα

φορές περισσότερες βιολογικές βλάβες από ίση δόση ακτίνων Χ.

Για να είναι οι δόσεις συγκρίσιμες ως προς τα βιολογικά τους αποτελέσματα, χρησιμοποιείται το μέγεθος ισοδύναμη δόση με μονάδα μέτρησης το 1rem και κυρίως το υποπολλαπλάσιό του 1millirem. Παραθέτουμε μερικούς αριθμούς για σύγκριση.

Μία ακτινογραφία θώρακα αποθέτει γύρω στα 20-40mrem. Ισοδύναμη δόση 500rem σε μικρό χρονικό διάστημα σε ολόκληρο το σώμα συνήθως οδηγεί στο θάνατο μέσα σε λίγες ημέρες. Εντοπισμένη δόση 10000rem προκαλεί πλήρη καταστροφή του ιστού. Η κοσμική ακτινοβολία και η φυσική ραδιενέργεια του εδάφους αντιστοιχούν σε ισοδύναμη δόση

0,1rem ανά έτος στην επιφάνεια της θάλασσας. Η τιμή αυτή αυξάνεται με το ύψος.

B. Χρήσεις της ακτινοβολίας

Ραδιενεργά σωματίδια μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως ιχνηθέτες χημικών στοιχείων σε διάφορες αντιδράσεις. Στη Βιολογία το ραδιενεργό ισότοπο ^{15}O , όταν εισαχθεί κατάλληλα στο ριζικό σύστημα του φυτού, κυκλοφορεί στη συνέχεια μέσα σ' αυτό και μπορούμε, μετρώντας τη ραδιενέργεια στα διάφορα μέρη του, να βγάλουμε συμπεράσματα για την πορεία του μεταβολισμού, δηλαδή του συνόλου των αντιδράσεων που γίνονται σε έναν οργανισμό (σχήμα 3-34).

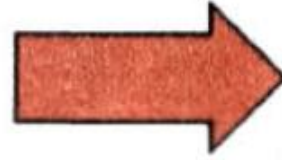


3-33 Ακτινοβολία γ χρησιμοποιείται για καταστροφή καρκινικών κυττάρων. Υψηλή δόση εστιάζεται σε μικρή περιοχή με τη βοήθεια σκόπευσης με laser.

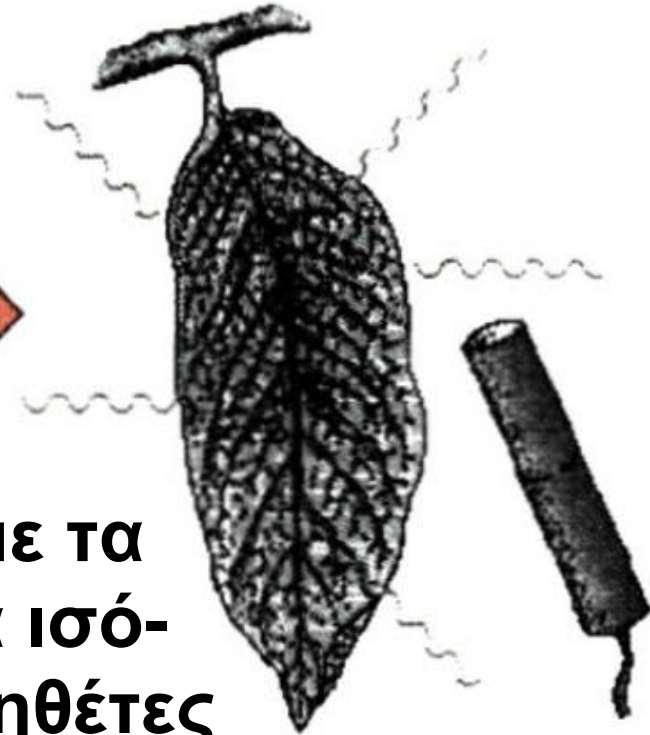
3-34 Η χρήση ραδιοϊσότοπων ως ιχνηθετών.



**Υδατικό διάλυμα
εμπλουτισμένο με
τα ραδιοϊσότοπα
O-15 ή O-19**



**Τα μόρια με τα
ραδιενεργά ισό-
τοπα ως ιχνηθέτες
παίρνουν μέρος
στις διαδικασίες
μεταβολισμού, ό-
πως ακριβώς και
τα μη ραδιενεργά
ισότοπα**



**Με ένα μετρητή
ακτινοβολίας
μπορούμε να
χαρτογραφήσου-
με την πορεία του
μεταβολισμού.**

Η χρήση του ραδιενεργού ιωδίου για τη μελέτη της λειτουργίας του θυρεοειδούς αδένου είναι επίσης μια γνωστή εφαρμογή. Σχεδόν όλη η διακίνηση του ιωδίου στον οργανισμό μας, που προσλαμβάνεται από το αλάτι και από τις θαλάσσιες τροφές, γίνεται μέσω του θυρεοειδούς. Εισάγεται λοιπόν στον οργανισμό μια μικρή ποσότητα ραδιενεργού ιωδίου (^{131}I) υπό μορφή διαλύματος NaI . Μερικές ώρες αργότερα μετριέται με κατάλληλες συσκευές η ακτινοβολία του ^{131}I και συνεπώς η συγκέντρωσή του σε διάφορα όργανα του σώματος.

Οι ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται επίσης στην Ιατρική για επιλεκτική καταστροφή ιστών, όπως είναι οι όγκοι. Ως πηγές χρησιμοποιούνται τεχνητά παραγόμενα ισότοπα. Ένα

από τα πιο συνηθισμένα είναι το ^{60}Co .

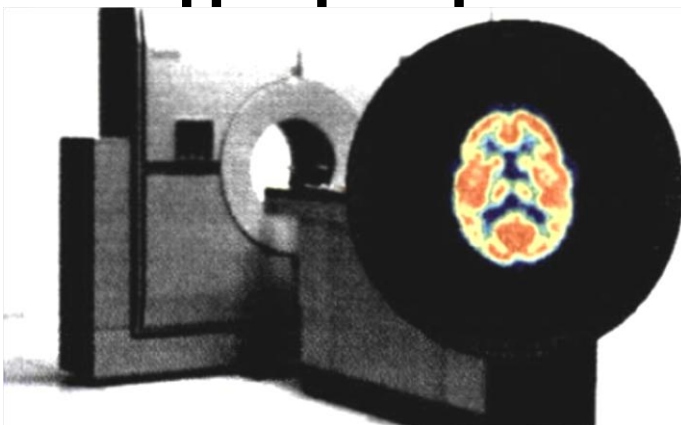
Μια μέθοδος ιατρικής απεικόνισης, κυρίως του εγκεφάλου, είναι η τομογραφία εκπομπής ποζιτρονίων (PET). Με αυτή χορηγούνται στον ασθενή ισότοπα στοιχείων, όπως άνθρακα, οξυγόνου κτλ., που εκπέμπουν ποζιτρόνια με διάσπαση β. Όταν ένα ποζιτρόνιο εξαϋλώνεται μετά από σύγκρουση με ηλεκτρόνιο, εκπέμπονται δύο φωτόνια γ, που ανιχνεύονται από κυκλική διάταξη ανιχνευτών γύρω από το κεφάλι του ασθενούς. Στη συνέχεια, με τη βοήθεια υπολογιστή, σχηματίζεται μια εικόνα εγκάρσιας τομής του εγκεφάλου (σχήματα 3-35, 3-36).

Ακτινοβολίες χρησιμοποιούνται επίσης για την αποστείρωση και τη συντήρηση μερικών κατηγοριών

τροφίμων, αφού με τον τρόπο αυτό καταστρέφονται οι παθογόνοι μικροοργανισμοί.



3-35 Ένα ποζιτρόνιο, που εκπέμπεται από το ισότοπο που έχει χορηγηθεί στον ασθενή, συγκρούεται με κάποιο ηλεκτρόνιο ατόμου και δημιουργούνται δύο φωτόνια, τα οποία καταγράφει η συσκευή PET.



3-36 Συσκευή τομογραφίας με εκπομπή ποζιτρονίου. Η εικόνα παριστά-

νει τομή εγκεφάλου σχηματισμένη από υπολογιστή, ο οποίος επεξεργάζεται τα δεδομένα της συσκευής.

ΔΡΑΣΤΗΡΙΟΤΗΤΑ

Ο σκοπός της δραστηριότητας αυτής είναι να δείξει ότι ο εκθετικός νόμος που συναντάμε στις ραδιενεργές διασπάσεις δεν είναι κάποιος φυσικός νόμος των πυρήνων, αλλά ένας στατιστικός νόμος. Στο νόμο αυτό υπακούουν όλα τα φαινόμενα, στα οποία το να συμβεί ένα γεγονός, ανάμεσα σε μια σειρά πιθανών ενδεχομένων, έχει μια συγκεκριμένη πιθανότητα.

ΠΕΙΡΑΜΑ

1. Αγοράστε από το περίπτερο δύο κουτιά από τα μικρά σοκολατάκια M&M's. Βάλτε τα όλα μαζί σε ένα κουτί, ανακινήστε το, ώστε να ανακατευτούν καλά, και αδειάστε το

περιεχόμενο σε ένα τραπέζι. Μετρήστε το συνολικό αριθμό των M&M's. Γράψτε τον αριθμό αυτό στο πρώτο κουτάκι της δεύτερης σειράς του πίνακα που φαίνεται παρακάτω.

Αριθμ. μέτρησης	1	2	3	4	5	6	7
M&M's που απέμειναν							

Απομακρύνετε εκείνα τα σοκολατάκια που έχουν στην επάνω όψη τους το M. Μια καλή ιδέα θα ήταν να τα φάτε! Μετρήστε το συνολικό αριθμό που απέμεινε τώρα στο τραπέζι και σημειώστε στο κουτάκι της μέτρησης υπ' αριθμ. 2.

Επαναλάβετε τη διαδικασία αυτή 7 συνολικά φορές. Αν ο αριθμός των M & M's που απομένει γίνει 0 σε κάποια δοκιμή, το πείραμα σταματάει και το 0 δε θα το περιλάβετε στις μετρήσεις σας.

2. Χαράξτε τη γραφική παράσταση,

όπου στον άξονα x θα βάλετε τον αντίστοιχο αύξοντα αριθμό της μετρησης και στον άξονα y τα σοκολατάκια που απέμεναν κάθε φορά. Παρατηρήστε την εκθετική μορφή της συνάρτησης.

3. Δοκιμάστε να χαράξετε στους ίδιους άξονες την εκθετική καμπύλη $N = N_0 e^{-0,5x}$

όπου N_0 ο αρχικός αριθμός των M&M's. Συγκρίνετε τις δύο καμπύλες.

Σημείωση: Ο εκθέτης 0,5 είναι η πιθανότητα να εμφανιστεί το M στην επάνω όψη από κάθε σοκολατάκι σε κάθε ρίψη. Αντιστοιχεί στη σταθερά λ των πυρήνων, η οποία εκφράζει την πιθανότητα διάσπασής τους ανά μονάδα χρόνου. Εδώ εκφράζει την πιθανότητα απόσυρσης του σοκολατιού ανά ανακίνηση του κουτιού.

ΣΥΝΟΨΗ 3ου ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ

- Ο πυρήνας του ατόμου αποτελείται από πρωτόνια και νετρόνια. Βρίσκεται στο κέντρο του ατόμου και έχει ακτίνα μερικές δεκάδες χιλιάδες φορές μικρότερη από την ακτίνα του ατόμου.
- Η ταυτότητα ενός πυρήνα είναι ο ατομικός του αριθμός Z και ο μαζικός του αριθμός A . Πυρήνες με ίδιους ατομικούς αριθμούς αλλά διαφορετικούς μαζικούς, λέγονται ισότοποι.
- Η μάζα ενός πυρήνα είναι πάντα μικρότερη από το άθροισμα των μαζών των ελεύθερων νουκλεονίων που τον αποτελούν. Η διαφορά αυτή των μαζών ονομάζεται έλλειμμα μάζας. Δηλαδή ισχύει:

$$M = Zm_p + Nm_n - M_{\pi}$$

□ Η ισοδύναμη ενέργεια E_B που αντιστοιχεί στο έλλειμμα μάζας ονομάζεται ενέργεια σύνδεσης του πυρήνα. Δηλαδή ισχύει:

$$E_B = (\Delta M)c^2$$

□ Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο σε έναν πυρήνα τόσο σταθερότερος είναι ο πυρήνας αυτός.

□ Η δύναμη που συγκρατεί τα νουκλεόνια στον πυρήνα είναι η ισχυρή πυρηνική δύναμη, που δρα μόνο σε πολύ κοντινές αποστάσεις μεταξύ των γειτονικών νουκλεονίων.

□ Η ενέργεια του πυρήνα είναι κβαντωμένο μέγεθος. Ο πυρήνας έχει διακριτές ενεργειακές στάθμες.

□ Σε κάθε σωματίο αντιστοιχεί το αντισωματίό του. Όταν αυτά

συνενωθούν, εξαϋλώνονται και μετατρέπονται σε φωτόνια ή δημιουργούνται άλλα σωματία.

□ Τα νουκλεόνια αποτελούνται από quarks up και down, που φέρουν ως φορτία κλάσματα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου. Τα quarks δεν εμφανίζονται ελεύθερα.

□ Τα λεπτόνια είναι 6 σωματίδια που δεν εκδηλώνουν ισχυρές αλληλεπιδράσεις. Στην ομάδα αυτή ανήκουν το ηλεκτρόνιο και το νεutrίνο.

□ Οι θεμελιώδεις δυνάμεις είναι: η ισχυρή, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η βαρυτική. Οι άλληλεπιδράσεις σε θεμελιώδες επίπεδο ερμηνεύονται με ανταλλαγή σωματιδίων που είναι φορείς των δυνάμεων.

□ Οι πιο πολλοί πυρήνες είναι ασταθείς και μεταπίπτουν σε σταθερούς πυρήνες με διασπάσεις α , β και γ . Το φαινόμενο ονομάζεται ραδιενέργεια.

□ Στην πυρηνική σχάση ένας βαρύς πυρήνας με απορρόφηση νετρονίων χωρίζεται σε δύο μεγάλα θραύσματα και ελευθερώνονται νέα νετρόνια. Η σχάση είναι αντίδραση εξώθερμη.

□ Στην πυρηνική σύντηξη δύο ελαφροί πυρήνες συνενώνονται, για να σχηματίσουν ένα βαρύτερο. Η αντίδραση αυτή είναι εξώθερμη.

□ Οι πυρηνικές ακτινοβολίες προκαλούν βλάβες, αλλά βρίσκουν και πολλές χρήσεις στην Ιατρική, στη βιομηχανία, στη Γεωπονία κτλ.

ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Τι ονομάζουμε ισότοπους πυρήνες; Σε τι μοιάζουν τα ισότοπα ενός στοιχείου Χ;

2. Δίνονται οι πυρήνες:

(α) ${}^{12}_6\text{C}$, (β) ${}^{14}_6\text{C}$, (γ) ${}^{13}_6\text{C}$,

(δ) ${}^{14}_7\text{N}$, (ε) ${}^{16}_8\text{O}$, (ζ) ${}^{17}_8\text{O}$

i. Ποιοι από τους παραπάνω πυρήνες περιέχουν τον ίδιο αριθμό: πρωτονίων, νετρονίων, νουκλεονίων;

ii. Ποιοι περιστοιχίζονται από τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στο ουδέτερο άτομο;

iii. Ποιοι είναι ισότοπα του ίδιου στοιχείου;

3. Τι ονομάζουμε ενέργεια σύνδεσης ενός πυρήνα;

4. Ο πυρήνας Χ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο $8,8\text{MeV}$, ενώ

ο πυρήνας Υ έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο 7,6MeV. Ποιος από τους δύο είναι πιο σταθερός;

5. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:

Η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο εμφανίζει τις μεγαλύτερες τιμές για πυρήνες μαζικών αριθμών. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο ενός πυρήνα τόσο είναι ο πυρήνας.

Ένας πυρήνας με μεγάλο μαζικό αριθμό έχει ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο από έναν πυρήνα μεσαίου μαζικού αριθμού και μπορεί να σε δύο μεσαίους πυρήνες ενέργεια υπό μορφή των θραυσμάτων.

6. Στο πείραμα του Rutherford υποθέστε ότι ένα σωματίο α μικρής κινητικής ενέργειας κατευθύνεται μετωπικά προς τον πυρήνα ενός ατόμου. Γιατί το σωματίο δεν έρχεται σε επαφή με τον πυρήνα;

7. Πώς εξηγείται το ότι ένας πυρήνας δε διασπάται, αν και τα πρωτόνια του απωθούνται μεταξύ τους;

8. Ποιες είναι οι σημαντικότερες ιδιότητες της ισχυρής πυρηνικής δύναμης;

9. Να αντιστοιχίσετε τις διάφορες αλληλεπιδράσεις με τα σωματίδια φορείς τους:

α. Ισχυρή

β. Ασθενής

γ. Βαρυτική

δ. Ηλεκτρομα-
γνητική

A. φωτόνιο

B. βαρυτόνιο

Γ. W^+ , W^- , Z^0

Δ. γκλουόνιο

10. Το περιεχόμενο σε quarks του νετρονίου είναι udd. Ποιο είναι το περιεχόμενο σε quarks του αντινετρονίου; Το νετρόνιο και το αντινετρόνιο ταυτίζονται;

11. Ποια στοιχειώδη σωματίδια υπάρχουν στην ύλη που παρατηρούμε σήμερα στο Σύμπαν;

12. Χαρακτηρίστε καθεμιά από τις παρακάτω προτάσεις ως σωστή ή λανθασμένη:

α. Ένα ποζιτρόνιο και ένα ηλεκτρόνιο εξαϋλώνονται και στη θέση τους παράγεται ένα φωτόνιο.

β. Ένα λεπτόνιο (μ) αλληλεπιδρά με ένα πρωτόνιο με ισχυρή αλληλεπίδραση ανταλλάσσοντας ένα γκλουόνιο.

γ. Τα λεπτόνια είναι συνολικά έξι, εκ των οποίων τα τρία μόνο έχουν ηλεκτρικό φορτίο.

δ. Ένα αδρόνιο αποτελείται από τα παρακάτω quarks: (u, d).

ε. Σε κάθε στοιχειώδες σωματίδιο αντιστοιχεί και ένα αντισωματίδιο.

13. Ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο με αμελητέες κινητικές ενέργειες εξαϋλώνονται και σχηματίζονται δύο φωτόνια. Πόση ενέργεια έχουν συνολικά τα δύο φωτόνια;

14. Συμπληρώστε τα κενά στο παρακάτω κείμενο:

Τα νουκλεόνια δομούνται από

Τα λεπτόνια είναι μια ξεχωριστή κατηγορία στοιχειωδών σωματιδίων, που δε συμμετέχουν σε

..... αλληλεπιδράσεις. Τα

..... είναι οι φορείς των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων.

Δύο quarks αλληλεπιδρούν ισχυρά ανταλλάσσοντας ένα

15. Τι είναι η μεταστοιχείωση;

16. Ποιο φαινόμενο ονομάζεται ραδιενέργεια; Ποια είδη ραδιενεργών ακτινοβολιών υπάρχουν;

17. Τι ονομάζουμε χρόνο υποδιπλασιασμού ενός ραδιενεργού πυρήνα;

18. Γιατί, όσο αυξάνεται ο ατομικός αριθμός των πυρήνων, χρειάζεται να υπάρχουν όλο και περισσότερα νετρόνια, για να εξασφαλιστεί η σταθερότητα των πυρήνων;

19. Ένα φιλμ που βρίσκεται μέσα σε ένα κουτάκι από παχύ χατόνι κινδυνεύει να προσβληθεί από παρακείμενες πηγές:

i. ακτίνων α,

ii. ακτίνων γ,

iii. ακτίνων β.

20. Υποθέστε ότι μία δέσμη περιέχει σωματίδια α , β και γ , τα οποία θέλουμε να διαχωρίσουμε. Υποδείξτε κατάλληλο πειραματικό τρόπο.

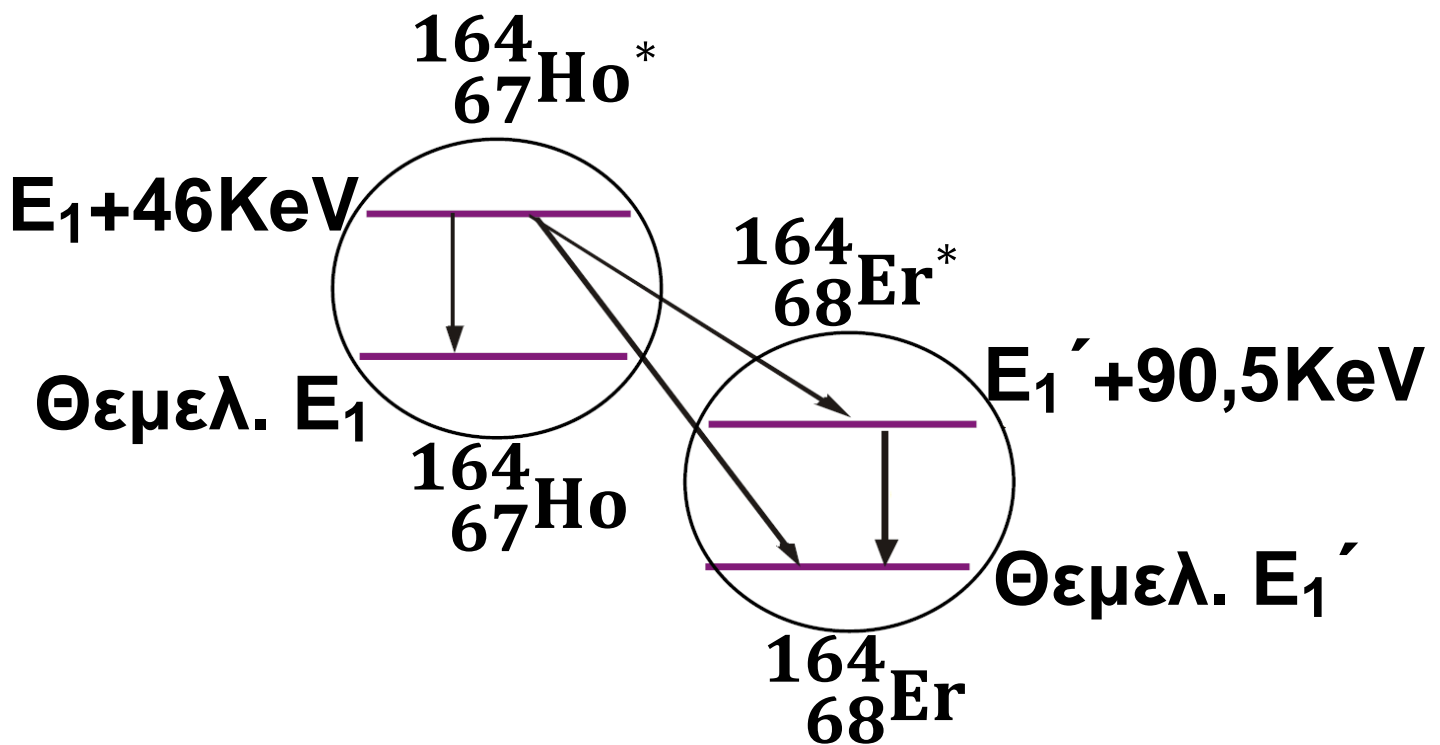
21. Ποιος πυρήνας θα προέλθει από τη διάσπαση β^- ενός πυρήνα ${}^{14}_6\text{C}$;

22. Το παρακάτω σχήμα δείχνει διαφορετικές διασπάσεις μιας αρχικά διεγερμένης κατάστασης του πυρήνα ${}^{164}_{67}\text{Ho}$ η οποία διασπάται κατά διάφορους τρόπους:

α. Χαρακτηρίστε καθεμιά από αυτές ως διάσπαση α , διάσπαση β και διάσπαση γ .

β. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις γ υπολογίστε τις αντίστοιχες ενέργειες των φωτονίων που παράγονται.

γ. Για όποιες από αυτές είναι διασπάσεις β συμπληρώστε τις αντίστοιχες αντιδράσεις.



23. Ποιες πυρηνικές αντιδράσεις ονομάζουμε σχάσεις και ποιες συντήξεις;

24. Σε τι διαφέρει ο μηχανισμός σχάσης που γίνεται σε έναν αντιδραστήρα από το μηχανισμό σχάσης σε μια πυρηνική βόμβα;

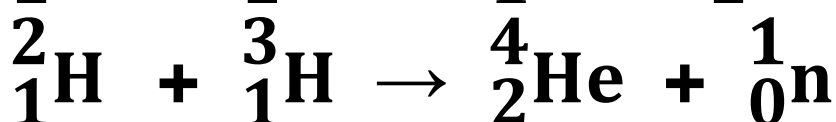
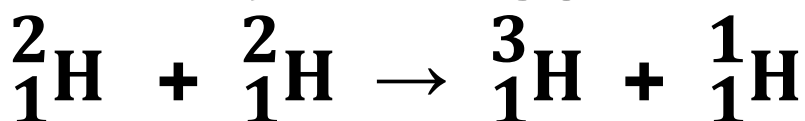
25. Σε οποιαδήποτε πυρηνική αντίδραση ισχύουν οι παρακάτω ιδιότητες:

α. Το άθροισμα των ατομικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσο.

β. Το άθροισμα των μαζικών αριθμών στο πρώτο και στο δεύτερο μέλος της αντίδρασης είναι ίσο.

Εξηγήστε ποιοι βασικοί νόμοι διατήρησης δικαιολογούν τις ιδιότητες αυτές.

26. Ποιες από τις παρακάτω αντιδράσεις είναι πυρηνικές συντήξεις και ποιες πυρηνικές σχάσεις;



27. Να αντιστοιχίσετε τα στοιχεία της αριστερής στήλης με αυτά της δεξιάς.

A. Αριθμός νετρονίων ατόμου. α. A

B. Αριθμός νουκλεονίων ατόμου. β. N

Γ. Αριθμός πρωτονίων ατόμου. γ. Z

Δ. Αριθμός ηλεκτρονίων στο ιονισμένο άτομο.

28. Να χαρακτηρίσετε ως σωστή (Σ) ή λανθασμένη (Λ) την παρακάτω πρόταση:

Σε πολύ μικρές αλλά όχι αμελητέες αποστάσεις (π.χ. $d = 10^{-5} \text{ m}$) οι ηλεκτρικές δυνάμεις είναι πολύ ισχυρές ενώ οι πυρηνικές αμελητέες.

29. Με τα σύμβολα m_1 , m_2 , m_3 , και m_4 συμβολίζουμε αντίστοιχα: τη

μάζα ενός πυρήνα A που υφίσταται αυθόρμητη σχάση, το άθροισμα των μαζών των πυρήνων που παράγονται από τη σχάση του A , το άθροισμα των μαζών δύο άλλων πυρήνων που συντήκονται, και τέλος τη μάζα του πυρήνα που παράγεται από τη σύντηξη των προηγούμενων. Ποια από τις παρακάτω προτάσεις είναι σωστή;

α. $m_1 > m_2$ και $m_3 > m_4$

β. $m_1 = m_2$ και $m_3 = m_4$

γ. $m_1 < m_2$ και $m_3 < m_4$

δ. $m_1 > m_2$ και $m_3 < m_4$

30. Δίνεται ότι η ισοδύναμη ενέργεια της μάζας ηρεμίας ενός ηλεκτρονίου ή ενός ποζιτρονίου είναι $0,51\text{MeV}$. Ποια από τις παρακάτω ενέργειες ενός φωτονίου είναι ικανή να δώσει ένα ζεύγος ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου.

- α. 0,51MeV
- β. 1,02MeV
- γ. 0,12MeV
- δ. 1MeV

ΑΣΚΗΣΕΙΣ ΚΑΙ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ

Για τα προβλήματα να θεωρηθούν γνωστά τα παρακάτω φυσικά μεγέθη:

$$|q_e| = |q_p| = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C},$$

$$m_p = 1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,007277 \text{ u},$$

$$m_n = 1,6750 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,008665 \text{ u},$$

$$m_e = 9,109 \times 10^{-31} \text{ kg} = 5,486 \times 10^{-4} \text{ u}.$$

Μάζες των ουδέτερων ατόμων:

$${}^1_1\text{H} = 1,00783 \text{ u}, \quad {}^7_3\text{Li} = 7,01600 \text{ u},$$

$${}^4_2\text{He} = 4,00260 \text{ u}, \quad {}^{56}_{26}\text{Fe} = 55,934939 \text{ u},$$

$${}^{230}_{90}\text{Th} = 230,033128 \text{ u},$$

$${}^{226}_{88}\text{Ra} = 226,025403 \text{ u},$$

$$1 \text{ u} = 1,66055 \times 10^{-27} \text{ kg},$$

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}.$$

Αριθμός Avogadro = $6,023 \times 10^{23}$
πυρήνες/mole πυρήνων,
 $1 \text{ MeV} = 4,45 \times 10^{-20} \text{ KWh}$ και
 $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

1. Χρησιμοποιήστε ενεργειακές μεθόδους, για να υπολογίσετε την ελάχιστη απόσταση που μπορεί να πλησιάσει ένα σωματίο α το οποίο βάλλεται μετωπικά από πολύ μακριά, με αρχική ενέργεια $0,5 \text{ MeV}$, εναντίον ενός ακίνητου πυρήνα $^{197}_{79}\text{Au}$. Υποθέστε ότι ο πυρήνας παραμένει σε ηρεμία κατά την κρούση. Πόση θα ήταν η απόσταση αυτή, αν η ενέργεια του σωματίου ήταν $3,5 \text{ MeV}$;

2. Υπολογίστε την ενέργεια σύνδεσης και την ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο για τον πυρήνα $^{56}_{26}\text{Fe}$.

3. Ο χρόνος υποδιπλασιασμού του ^{131}I είναι 8,04 ημέρες. Υπολογίστε τη σταθερά διάσπασης του ισότοπου αυτού. Βρείτε επίσης τον αριθμό των πυρήνων ^{131}I που περιέχονται σε ένα δείγμα ενεργότητας $1,85 \times 10^4 \text{ Bq}$.

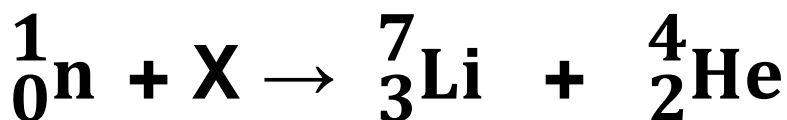
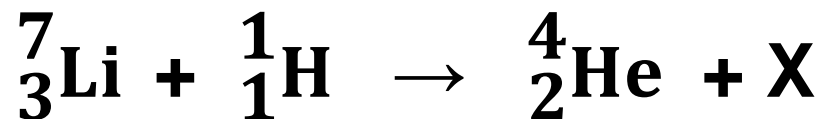
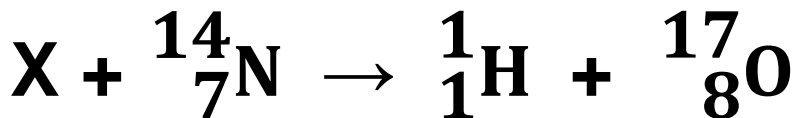
4. Ένα δείγμα κάποιου ραδιοϊσότοπου, μόλις παρασκευαστεί, έχει ενεργότητα $37 \times 10^7 \text{ Bq}$. Μετά από 4 ώρες η ενεργότητα του δείγματος έγινε $29,6 \times 10^7 \text{ Bq}$. Βρείτε τη σταθερά διάσπασης και το χρόνο υποδιπλασιασμού του ισότοπου.

Ποια θα είναι η ενεργότητα του δείγματος 30 ώρες μετά την παρασκευή του;

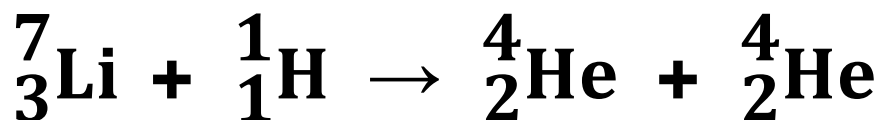
5. Υπολογίστε την κινητική ενέργεια ενός σωματίου α που εκπέμπεται από ένα ακίνητο πυρήνα $^{230}_{90}\text{Th}$.

Αγνοήστε την κινητική ενέργεια του θυγατρικού πυρήνα ${}^{226}_{88}\text{Ra}$.

6. Να συμπληρώσετε τις παρακάτω πυρηνικές αντιδράσεις:



7. Η πρώτη πυρηνική αντίδραση στην οποία χρησιμοποιήθηκαν σωματίδια προερχόμενα από επιταχυντή πραγματοποιήθηκε από τους Cockroft και Walton και ήταν η παρακάτω:



Υπολογίστε την τιμή της ενέργειας Q αυτής της αντίδρασης. Είναι ενδόθερμη ή εξώθερμη;

8. Υπολογίστε την ενέργεια που αποδεσμεύεται, όταν $1\text{kg } ^{235}\text{U}$ παθαίνει σχάση. Λάβετε υπόψη ότι η ενέργεια που αποδεσμεύεται ανά πυρήνα που διασπάται είναι 208MeV .

9. Το έλλειμμα μάζας ενός πυρήνα με 7 πρωτόνια και 7 νετρόνια είναι $0,11543\text{u}$. Πόση είναι η ενέργεια σύνδεσης ανά νουκλεόνιο αυτού του πυρήνα;

10. Το έλλειμμα μάζας ενός πυρήνα με ίσο αριθμό πρωτονίων και νετρονίων είναι $\Delta M = 0,099197\text{u}$ και η ενέργεια σύνδεσής του ανά νουκλεόνιο είναι $7,7\text{MeV/νουκλεόνιο}$. Ποιος είναι ο ατομικός αριθμός του πυρήνα;

11. Πρωτόνιο βομβαρδίζει ακίνητο πυρήνα ^7_3Li με αποτέλεσμα τη

δημιουργία δύο σωματίων ${}^4_2\text{He}$. Αν η αρχική κινητική ενέργεια του πρωτονίου είναι 1MeV , πόση είναι η κινητική ενέργεια των δύο θραυσμάτων ${}^4_2\text{He}$;

ΕΓΚΩΜΙΟ ΤΗΣ ΒΑΣΙΚΗΣ ΕΡΕΥΝΑΣ

Η επιστήμη ανταποκρίνεται κατ' αρχάς σε μια ανάγκη που χαρακτηρίζει τον άνθρωπο ως άνθρωπο: την ανάγκη να γνωρίσει. Να ανακαλύψει τους θεμελιώδεις νόμους της φύσης, που διέπουν τον κόσμο στον οποίο ζούμε. Να παρατηρήσει, να ταξινομήσει τα παρατηρούμενα φαινόμενα, να φέρει στην επιφάνεια το απόλυτο και το αναλλοίωτο, μελετώντας τα φαινόμενα κάτω από ειδικές και ασυνήθιστες συνθήκες, δημιουργημένες από την ανθρώπινη ευφυΐα, αυτή είναι η ψυχή της βασικής έρευνας. Αυτή η έρευνα αναπτύσσεται, και πρέπει να αναπτυχθεί, με σκοπό να αυξάνει και να καθιστά ακριβέστερες τις γνώσεις.

Ωστόσο, ακόμη και αν αυτό μπορεί να φανεί παράδοξο, από αυτή την ελεύθερη έρευνα, πέρα από κάθε ιδέα εφαρμογής, γεννιούνται οι νέες ιδέες οι οποίες επιτρέπουν ακριβώς τις επιπλέον αποτελεσματικές εφαρμογές. Ο πρώτος στόχος της επιστήμης δεν είναι η εφαρμογή. Είναι, το επαναλαμβάνω, η καλύτερη κατανόηση των αιτιών και των νόμων που διέπουν τις φυσικές διαδικασίες. Αλλά μια καλύτερη κατανόηση των φυσικών διαδικασιών οδηγεί σχεδόν πάντοτε στη δυνατότητα να τις ελέγξουμε ή, τουλάχιστον, να ελέγξουμε άλλες διαδικασίες, οι οποίες σχετίζονται με αυτήν που είναι το αντικείμενο της έρευνας. Όπως είναι γνωστό, όσο η επιστήμη αναπτύσσεται τόσο περισσότερες και στενότερες

γίνονται οι σχέσεις που καθορίζονται μεταξύ των διαδικασιών οι οποίες αρχικά έμοιαζαν να μην έχουν καμία συγγένεια.

Η μελέτη του ηλιακού στέμματος, για παράδειγμα, μπορεί να οδηγήσει σε μια καλύτερη κατανόηση της συμπεριφοράς των ισχυρά ιονισμένων αερίων μέσα σε μαγνητικά πεδία. Και αυτό το θέμα αποδεικνύεται ότι έχει μεγάλη τεχνολογική σημασία. Αλλά οι αστροφυσικοί, που παρήγαγαν αυτές τις τεχνολογικά χρήσιμες γνώσεις, δεν είχαν καθόλου ως στόχο αυτή την εφαρμογή. Η εφαρμοσμένη έρευνα είναι εκείνη που μπόρεσε να επωφεληθεί, λίγο αργότερα, από τα αποτελέσματά τους, αξιοποιώντας ένα μέρος τους στη βιομηχανία.

Πρόσφατα ο H. Casimir έδειξε με εξαιρετικό τρόπο ότι οι αποφασιστικές τεχνικές πρόοδοι του 20ού αιώνα έχουν πραγματοποιηθεί από επιστήμονες οι οποίοι σε καμιά περίπτωση δεν εργάζονταν έχοντας ένα σαφώς καθορισμένο πρακτικό στόχο.

«Θα μπορούσε κανείς να αναρωτηθεί», γράφει για παράδειγμα, «αν οι υπολογιστές εφευρέθηκαν από ανθρώπους οι οποίοι ήθελαν να κατασκευάσουν υπολογιστές. Όμως προκύπτει ότι επινοήθηκαν γύρω στο 1930 από φυσικούς που ασχολούνταν με στοιχειώδη σωματίδια, επειδή ενδιαφέρονταν για την Πυρηνική Φυσική. Θα μπορούσε κανείς να αναρωτηθεί αν κάποιος ανακάλυψε τα ηλεκτρομαγνητικά κύματα θέλοντας να βελτιώσει τα μέσα

επικοινωνίας. Δε συνέβη όμως αυτό. Ανακαλύφθηκαν από το Hertz, που επιθυμούσε να προβάλει την ομορφιά της Φυσικής και στηριζόταν στις θεωρητικές διαπιστώσεις του Maxwell».

Ο Casimir πολλαπλασιάζει τα παραδείγματα και συμπεραίνει ότι «στον 20ό αιώνα σχεδόν δεν υπάρχει παράδειγμα καινοτομίας που να μην οφείλεται στη βασική επιστημονική σκέψη».

Συμμερίζομαι την άποψή του.

Επιπλέον προσθέτω ότι η ερμηνεία αυτού του γεγονότος είναι απλή: ο πειραματισμός και η παρατήρηση στα όρια της επιστήμης απαιτούν τεχνικά μέσα τα οποία υπερβαίνουν τις δυνατότητες της υπάρχουσας τεχνολογίας. Γι' αυτό ένας αριθμός σημαντικών τεχνολογικών επινοήσεων έχει ως αφετηρία όχι

την επιθυμία επίτευξης ενός ορισμένου πρακτικού σκοπού, αλλά τις απόπειρες διεύρυνσης των ορίων της γνώσης.

Τα συμπεράσματα που μπορούν να εξαχθούν από αυτές τις γενικές σκέψεις είναι πολύ συγκεκριμένα και φλέγοντα σε ό,τι αφορά την έρευνα στη Φυσική, ειδικά στη Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων και στην Αστροφυσική. Πράγματι είναι γνωστό ότι ο αναγκαίος εξοπλισμός για την παρατήρηση της συμπεριφοράς των στοιχειωδών σωματιδίων ή για τη μελέτη των ορίων του Σύμπαντος αποδεικνύεται εξαιρετικά δαπανηρός. Τα τεράστια κονδύλια που χρειάζονται ξεπερνούν συχνά τις δυνατότητες μιας και μόνο χώρας. Εάν έχει κανείς, όπως όντως έχουν

ορισμένοι, μια τεχνολογική άποψη της επιστήμης, θα αναρωτηθεί: «γιατί;» Τα μεσόνια και τα κουάρκ δεν εμφανίζονται παρά μόνο όταν η ύλη υποβληθεί σε μια εξαιρετικά υψηλή ενέργεια, που δεν είναι συνήθως εφικτή στη Γη: θα ήταν προτιμότερο να επενδύσουμε αυτά τα κολοσσιαία ποσά σε έρευνες πλησιέστερες προς τις οικονομικές και κοινωνικές μας φροντίδες.

Γι' αυτούς τους ίδιους λόγους η παραπάνω συλλογιστική είναι λανθασμένη, ακόμη και επικίνδυνη. Διότι, αναμφίβολα, από αυτές τις έρευνες θα προκύψουν κάποτε ευεργετικές εφαρμογές, αν τουλάχιστον η ανθρώπινη σύνεση τις προφυλάξει από τον παραλογισμό. Η τεχνητή ραδιενέργεια έφερε επαναστατικές αλλαγές σε πολλούς κλάδους της

Ιατρικής. Η διαδικασία της σχέσης είναι μια πηγή ενέργειας που η χρήση της συνεχώς διευρύνεται, είτε για καλό είτε για κακό σκοπό. Όλα οδηγούν στο να πιστέψουμε ότι στο μέλλον η Αστροφυσική και η Φυσική στοιχειωδών σωματιδίων, επειδή θα έχουν αφαιρέσει άλλο ένα μέρος του πέπλου που καλύπτει το άγνωστο, θα έχουν συγκρίσιμα, αν και μη προβλέψιμα αποτελέσματα. Ποιος ξέρει αν ορισμένες από τις δυσκολίες που γεννιούνται με την ανάπτυξη της τεχνολογίας δε θα μπορέσουν να λυθούν χάρη σ' αυτές τις έρευνες;

Θα μου επιτραπεί να προσθέσω, για να ολοκληρώσω, ότι η ανάπτυξη της βασικής έρευνας πρέπει να θεωρηθεί ως ένα είδος καθήκοντος: η ανθρώπινη

περιπέτεια αντιστοιχεί, αυτή τη στιγμή, στην περιπέτεια του Σύμπαντος, όπου η φύση, με τη μορφή του ανθρώπου, αρχίζει να κατανοεί τον εαυτό της. Από γενιά σε γενιά, χωρίς ανάπαυλα, πέρα από σύνορα, έχουμε χρέος να συμβάλουμε με μια συλλογική προσπάθεια στη διεύρυνση και στην εμπάθυνση αυτής της κατανόησης. Ίσως είναι μια από τις αρετές της βαριάς Φυσικής το γεγονός ότι έχει επιτρέψει την απόκτηση μιας τέτοιας συνείδησης, διότι απαιτούσε τη συνένωση διανοητών και τη συγκέντρωση κεφαλαίων από όλες τις χώρες. Απόσπασμα από το βιβλίο Η κβαντική επανάσταση του Victor Weisskopf.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΥΡΗΝΙΚΑ ΦΑΙΝΟΜΕΝΑ

3.1 ΙΔΙΟΤΗΤΕΣ ΤΩΝ ΠΥΡΗΝΩΝ	9
Το μέγεθος και η δομή των πυρήνων.....	13
Έλλειμμα μάζας - Ενέργεια σύνδεσης.....	22
Οι πυρηνικές δυνάμεις.....	32
Ο πυρήνας έχει ενεργειακές στάθμες.....	38
3.2 ΤΑ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΗ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ	42
Τα αντισωματία.....	44
Η ταξινόμηση των σωματίων.....	61

3.3 Η ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑ	67
Ρυθμοί διάσπασης - Χρόνος ημιζωής.....	84
Ραδιοχρονολόγηση.....	92
3.4 ΠΥΡΗΝΙΚΕΣ ΑΝΤΙΔΡΑΣΕΙΣ	98
Πυρηνική σχάση.....	101
Πυρηνική σύντηξη.....	107
3.5 ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ ΚΑΙ ΚΙΝΔΥΝΟΙ ΤΗΣ ΡΑΔΙΕΝΕΡΓΕΙΑΣ	115
Α. Βλάβες από ακτινοβολία	115
Β. Χρήσεις της ακτινοβολίας .	122
Δραστηριότητα	128
Σύνοψη 3ου κεφαλαίου	131
Ερωτήσεις	135
Ασκήσεις και Προβλήματα	146
Εγκώμιο της βασικής έρευνας...	152

Βάσει του ν. 3966/2011 τα διδακτικά βιβλία του Δημοτικού, του Γυμνασίου, του Λυκείου, των ΕΠΑ.Λ. και των ΕΠΑ.Σ. τυπώνονται από το ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ και διανέμονται δωρεάν στα Δημόσια Σχολεία. Τα βιβλία μπορεί να διατίθενται προς πώληση, όταν φέρουν στη δεξιά κάτω γωνία του εμπροσθόφυλλου ένδειξη «ΔΙΑΤΙΘΕΤΑΙ ΜΕ ΤΙΜΗ ΠΩΛΗΣΗΣ». Κάθε αντίτυπο που διατίθεται προς πώληση και δεν φέρει την παραπάνω ένδειξη θεωρείται κλεψίτυπο και ο παραβάτης διώκεται σύμφωνα με τις διατάξεις του άρθρου 7 του Νόμου 1129 της 15/21 μαρτίου 1946 (ΦΕΚ 1946, 108, Α').

Απαγορεύεται η αναπαραγωγή οποιουδήποτε τμήματος αυτού του βιβλίου, που καλύπτεται από δικαιώματα (copyright), ή η χρήση του σε οποιαδήποτε μορφή, χωρίς τη γραπτή άδεια του Υπουργείου Παιδείας, Διά Βίου Μάθησης και Θρησκευμάτων / ΙΤΥΕ - ΔΙΟΦΑΝΤΟΣ.