

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.

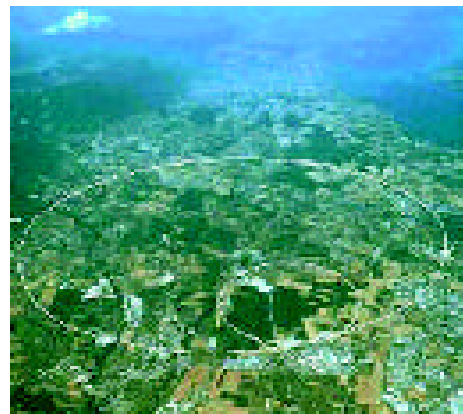
Σε κάθε **σωμάτιο** αντιστοιχεί και ένα **αντισωματίτιο**.

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.

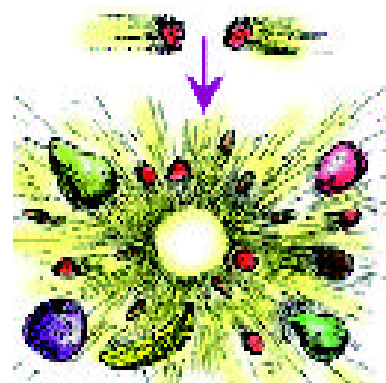
Ο πιο συνηθισμένος τρόπος δημιουργίας του ποζιτρονίου είναι το **φαινόμενο της παραγωγής ζεύγους ποζιτρονίου - ηλεκτρονίου**.

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:

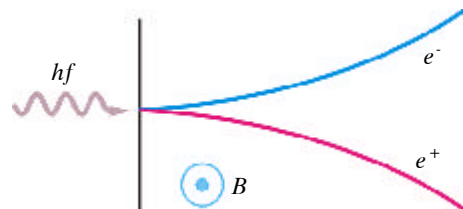
$$E = 2m_e c^2 = 2(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3 \times 10^8 \text{ m/sec})^2 = 1,64 \times 10^{-13} \text{ J} = 1,02 \text{ MeV}.$$



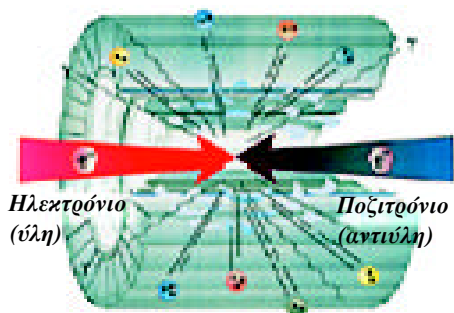
3-9 Ο μεγάλος επιταχυντής στο CERN στη Γενεύη. Έχει περιφέρεια 27km και βρίσκεται 100m κάτω από το έδαφος. Τα σωματίδια μέσα σ' αυτόν ταξιδεύουν σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και διαγράφουν αυτή την περιφέρεια 11000 φορές το δευτερόλεπτο.



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 σωματιδίων 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.

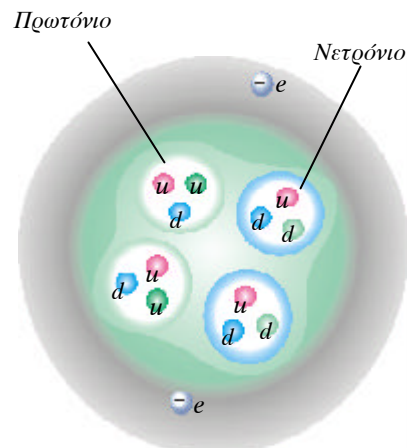
Φυσικά υπάρχουν και τα αντισωματίδια όλων των παραπάνω σωματιδίων.

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 (συνχνά 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

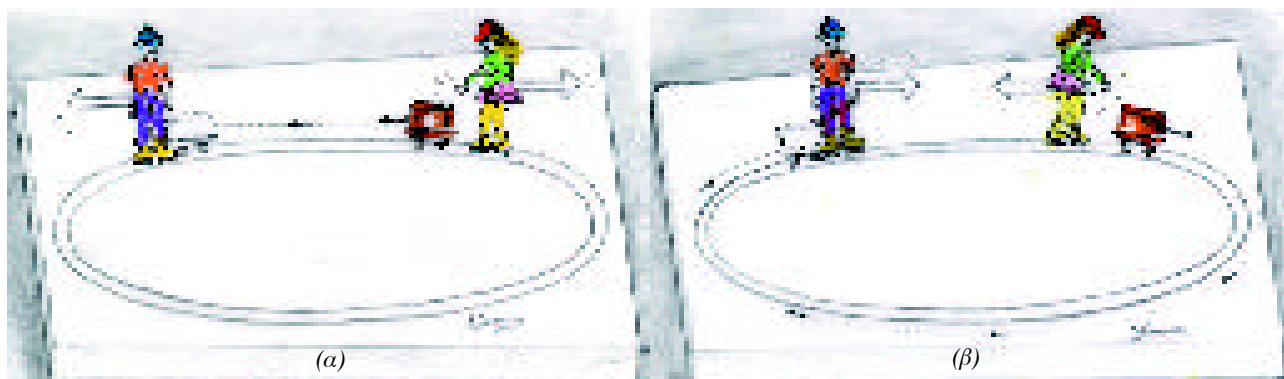


3-14 Τα πρωτόνια και τα νετρίνια του πυρήνα αποτελούνται από τρία quarks το καθένα.

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
Ηλεκτρομαγνή	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.

Η ΑΡΧΑΙΟΛΟΓΙΑ ΤΟΥ ΣΥΜΠΑΝΤΟΣ

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

Μεγάλη έκρηξη

10^{32} βαθμοί

10^{27} βαθμοί

10^{15} βαθμοί

10^{-43} δευτερόλεπτα

10^{-34} δευτερόλεπτα

10^{-10} δευτερόλεπτα

10^{10} βαθμοί

10^9 βαθμοί

3000 βαθμοί

18 βαθμοί

3 βαθμοί Kelvin

1 δευτερόλεπτο

3 λεπτά

300000 έτη

1 δισεκατομμ. έτη

15 δισεκατομμ. έτη

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

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:

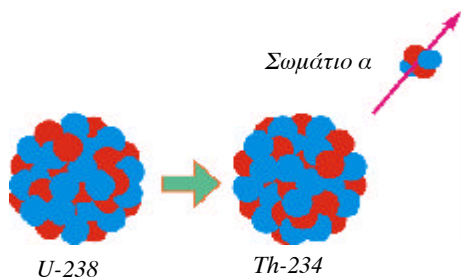
Ας θεωρήσουμε έναν πυρήνα με μεγάλο ατομικό αριθμό Z , στον οποίο οι ηλεκτρικές απωστικές δυνάμεις μεταξύ των πρωτονίων μόλις που αντισταθμίζονται από τις ισχυρές πυρηνικές δυνάμεις, που όμως δρουν μόνο μεταξύ γειτονικών νουκλεονίων. Αν συνεχίσουμε να προσθέτουμε πρωτόνια, ο πυρήνας γίνεται αρκετά μεγάλος 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 μεταπίπτει αυθόρμητα σε άλλο πυρήνα, εκλύεται ενέργεια με ταυτόχρονη εκπομπή ακτινοβολίας. Το φαινόμενο 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.

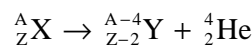


3-17 Διάσπαση α του U-238 σε Th-234 με ταυτόχρονη εκπομπή σωματίου α .

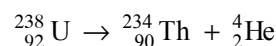
Διάσπαση α

Το **σωμάτιο 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.

Επίσης ο συνολικός μαζικός αριθμός στο αριστερό μέλος είναι ίσος με τον αντίστοιχο στο δεξιό μέλος (δηλαδή $238=234+4$), επειδή

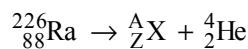
αυτό επιβάλλει η διατήρηση του συνολικού αριθμού των νουκλεονίων. Θα δούμε και σε άλλες παραγράφους ότι οι διατηρήσεις αυτές πρέπει να ικανοποιούνται σε κάθε πυρηνική αντίδραση.

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;

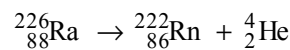
ΛΥΣΗ Η διάσπαση μπορεί να γραφεί ως εξής:



Η σύγκριση των ατομικών και μαζικών αριθμών δεξιά και αριστερά του βέλους μάς δείχνει ότι ο θυγατρι-

κός 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_2He 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:

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

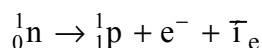
Ας σημειωθεί ότι το μεγαλύτερο μέρος αυτής της ενέργειας αποτελεί κινητική ενέργεια του σωματιδίου α .

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.

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 αντινεutrino:

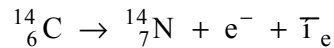


Έτσι ο αριθμός των πρωτονίων Z στο θυγατρικό πυρήνα αυξάνεται κατά 1, ενώ ο αριθμός των νετρονίων μειώνεται κατά 1, οπότε ο συνολικός αριθμός των νουκλεονίων A δε μεταβάλλεται.

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

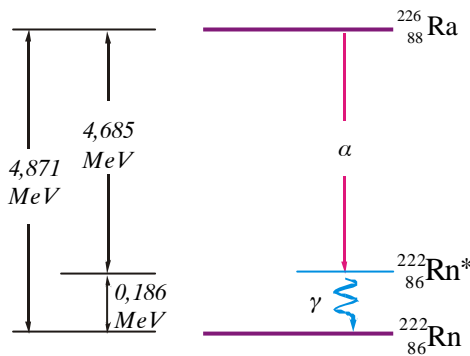


3-18 Τα νεutrina αλληλεπιδρούν τόσο ασθενικά με την ύλη, ώστε πολύ δύσκολα μπορούμε να τα παρατηρήσουμε. Ένα νεutrino μπορεί να περάσει μέσα από τη Γη σαν να μην υπήρχε καθόλου αυτή.



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 ταχύτητές τους φτάνουν ακόμη και το 99,9% της ταχύτητας του φωτός.

Επειδή το αντινεutrino αλληλεπιδρά πολύ ασθενικά με την ύλη, η παρατήρησή του είναι εξαιρετικά δύσκολη. Παρουσιάζει μάλιστα ιστορικό ενδιαφέρον ότι, όταν παρατηρήθηκε η παραπάνω διάσπαση β, το νεutrino 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.

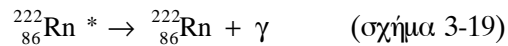


3-19 Αποδιέγερση πυρήνα Rn* με εκπομπή ακτινοβολίας γ.

Διάσπαση γ

Πολύ συχνά ένας πυρήνας, μετά από μία διάσπαση α ή β, μετασχηματίζεται 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.

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



Το σύμβολο (*) δηλώνει διεγερμένη στάθμη.

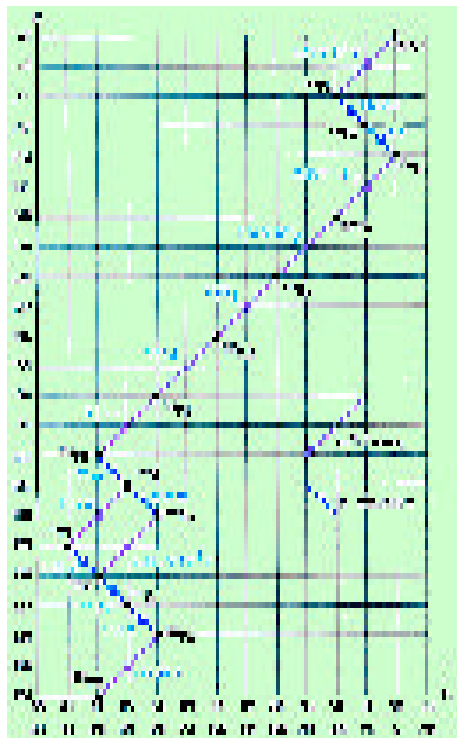
Ας σημειωθεί ότι κατά την εκπομπή της ακτινοβολίας γ δεν αλλάζει ούτε το Z ούτε το A του πυρήνα.

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 σωματίδια 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.

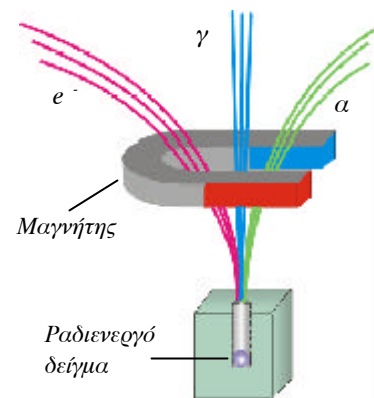


3-20 Ο ραδιενεργός πυρήνας που απαντάται πιο συχνά στη φύση είναι τον U-238, ο οποίος με μια σειρά από 14 διασπάσεις, στις οποίες συμπεριλαμβάνονται 8 εκπομπές α και 6 εκπομπές β, καταλήγει στο σταθερό ισότοπο του Pb-206.

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 απορροφώνται 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 ημιζωής

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 Ν αδιάσπαστοι πυρήνες. Ο αριθμός των διασπάσεων ΔΝ, που θα συμβούν κατά το αμέσως επόμενο στοιχειώδες χρονικό διάστημα Δt, είναι σύμφωνα με τη στατιστική ανάλογος του αριθμού Ν 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 παραπάνω σχέση γράφεται και ως εξής:

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

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

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 (1Bq=1 διάσπαση/s).

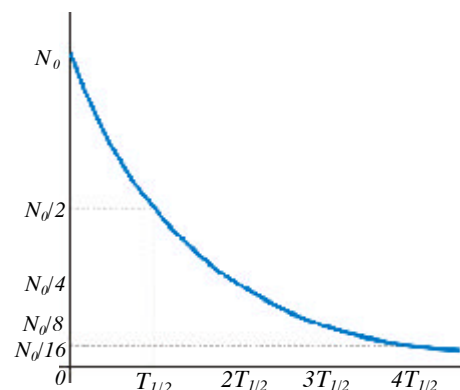
Ο **χρόνος υποδιπλασιασμού ή ημιζωής** $T_{1/2}$ είναι ο χρόνος που απαιτείται, ώστε ο αριθμός των ραδιενεργών πυρήνων να μειωθεί στο μισό του αρχικού αριθμού N_0 . Στη συνέχεια πάλι οι μισοί από εκείνους που απομένουν διασπώνται μέσα στο επόμενο διάστημα $T_{1/2}$ κ.ο.κ.

Στο σχήμα 3-22 φαίνεται ότι ο αριθμός των πυρήνων που απομένουν, μετά από διαδοχικά χρονικά διαστήματα $T_{1/2}$, είναι $N_0/2$, $N_0/4$, $N_0/8$ κ.ο.κ.

Αποδεικνύεται ότι η μαθηματική μορφή της καμπύλης του σχήματος είναι:

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

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



3-22 Καμπύλη διάσπασης για ένα δείγμα ραδιενεργού στοιχείου.

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

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

από όπου λογαριθμίζοντας παίρνουμε τη σχέση που συνδέει το χρόνο ημιζωής με τη σταθερά λ . Δηλαδή:

$$\hat{Q}_{1/2} = \frac{\ln 2}{\epsilon} = \frac{0,693}{\epsilon} \quad (3.6)$$

Εξετάζοντας τους γνωστούς χρόνους ημιζωής διαπιστώνουμε μια αφάνταστα μεγάλη ποικιλία. Στο ένα άκρο βρίσκονται μερικά εξαιρετικά βραχύβια στοιχειώδη σωματίδια με χρόνους ημιζωής 10^{-20} s ή και λιγότερο. Στο άλλο άκρο βρίσκονται οι ραδιενεργοί πυρήνες με χρόνους ημιζωής 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 χρόνο ημιζωής 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 οι μισοί

πυρήνες, δηλαδή 800, μετά από άλλα 5730 χρόνια απομένουν 400 και τέλος σε 4 ημιζωές (22920 χρόνια) απομένουν 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 σωματίδια β και έχει χρόνο ημιζωής 272 ημέρες.

α. Βρείτε τη σταθερά διάσπασης του.

β. Πόσους ραδιενεργούς πυρήνες πρέπει να έχει μια πηγή Co, ώστε να παρουσιάζει ενεργότητα $3,7 \times 10^4$ Bq;

γ. Πόση ενεργότητα θα έχει μετά από 272 ημέρες;

ΛΥΣΗ α. Ο χρόνος ημιζωής 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

$$N = \frac{-\Delta \hat{I} / \Delta t}{\epsilon} = \frac{3,7 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}}{29,5 \cdot 10^{-9} \text{ s}^{-1}} = 1,25 \cdot 10^{12} \text{ πυρήνες}$$

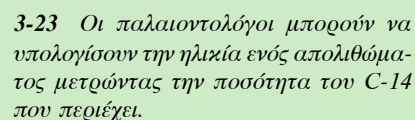
γ. Μετά από 272 ημέρες ο αριθμός των πυρήνων θα έχει ελαττωθεί στο μισό, οπότε και η ενεργότητα θα είναι η μισή, δηλαδή $1,85 \times 10^4$ Bq.

Ραδιοχρονολόγηση

Η διάσπαση β του $^{14}_6\text{C}$ βρίσκεται 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 $1,3 \times 10^{-12}$.

Όταν όμως ο οργανισμός πεθαίνει, 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 $^{14}_6\text{C}$.

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 βόσκεται με σύγκριση των συγκεντρώσεων των στοιχείων ^{40}K και ^{40}Ar .



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

ΔΥΣΗ Αν το ποσοστό του $^{14}_6\text{C}$ ήταν το ίδιο όπως στην ατμόσφαιρα, η ενεργότητά του θα ήταν $(0,255\text{Bq/gr}) \times 0,4\text{gr} = 0,102\text{Bq}$. Ο παρατηρούμενος όμως ρυθμός διάσπασης είναι $0,0386\text{Bq}$. Αυτό σημαίνει ότι η αναλογία του

$$\frac{N}{N_0} = \frac{0,0386}{0,102} = 0,378. \text{ Λογαριθμίζουμε τώρα την εξίσωση } N = N_0 e^{-\lambda t}, \text{ λύνουμε ως προς } t \text{ και βρίσκουμε:}$$

$$\text{Η σταθερά } \lambda \text{ έχει την τιμή: } \ddot{\epsilon} = \frac{0,693}{5730 \div \tilde{n}} = 1,21 \cdot 10^{-4} \div \tilde{n}^{-1}$$