

Στοιχειώδη σωματίδια

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 16



Εικόνα 16.1

Στα Γάλλο - Ελβετικά σύνορα 100 μέτρα κάτω από το έδαφος έχει κατασκευασθεί κυκλικό τούνελ μήκους 27 χιλιομέτρων μέσα στο οποίο θα επιταχύνονται πρωτόνια που η τελική τους ταχύτητα θα φθάνει το 999,999 % της ταχύτητας του φωτός.



Εικόνα 16.2

Ο επιταχυντής LEP του Πανευρωπαϊκού εργαστηρίου πυρηνικών ερευνών (CERN).

Στο εσωτερικό του δακτυλίου επιταχύνονται ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια σε πολύ μεγάλες ταχύτητες. Οι φυσικοί πιστεύουν ότι στη περιοχή της σύγκρουσης δημιουργούνται συνθήκες ανάλογες με αυτές που υπήρχαν στα πρώτα δευτερόλεπτα της δημιουργίας του σύμπαντος.

Τα σωματίδια που παράγονται σ' αυτές τις συγκρούσεις θεωρούμε ότι αποτελούν και τα θεμελιώδη συστατικά της ύλης.

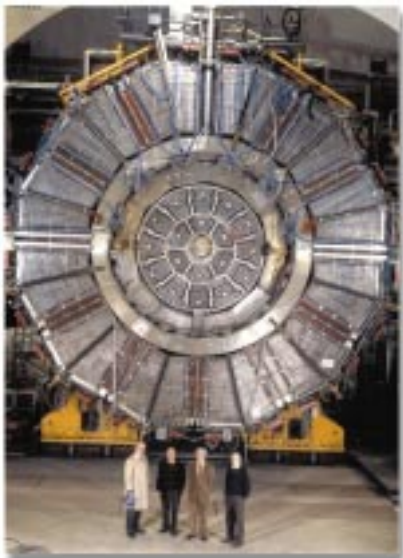
Από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος; Ποια είναι τα θεμελιώδη συστατικά της ύλης;

Η ιδέα ότι η ύλη αποτελείται από θεμελιώδη ή στοιχειώδη σωματίδια εκφράσθηκε αρχικά από τους αρχαίους Έλληνες. Τον 5^ο αιώνα π.Χ. οι Έλληνες φιλόσοφοι Λεύκιππος και Δημόκριτος υπέθεσαν ότι η ύλη αποτελείται από αδιαίρετα σωματίδια, τα οποία ονόμασαν άτομα. Η ιδέα αυτή διατηρήθηκε στην αφάνεια μέχρι τις αρχές του 19^{ου} αιώνα, οπότε ο Άγγλος χημικός Ντάλτον (Dalton) υπέθεσε ότι τα στοιχεία αποτελούνται από άτομα. Ο Ράδερφορντ στα σημαντικά πειράματά του 1911 βομβάρδισε την ύλη με μικροσκοπικά φορτισμένα βλήματα (σωματίδια α) και ανακάλυψε ότι τα άτομα έχουν εσωτερική δομή. Αποτελούνται από τον πυρήνα και τα ηλεκτρόνια. Ο πυρήνας του ατόμου του υδρογόνου ονομάσθηκε πρωτόνιο. Ο βομβαρδισμός των πυρήνων οδήγησε στην εκπομπή και την ανακάλυψη των άλλων συστατικών του πυρήνα, των νετρονίων, το 1932. Συγχρόνως μέχρι το 1930 αναπτύχθηκε μια νέα θεωρία, η κβαντική μηχανική που ήταν κατάλληλη για την περιγραφή της συμπεριφοράς των σωματιδίων σε ατομική και υποατομική κλίμακα. Η ανάπτυξη όμως της θεωρίας συνδυάσθηκε με την συνδρομή της τεχνολογίας που επέτρεψε τη βαθύτερη διείσδυση στο εσωτερικό των συστατικών του πυρήνα.

Επιταχυντές και ανιχνευτές

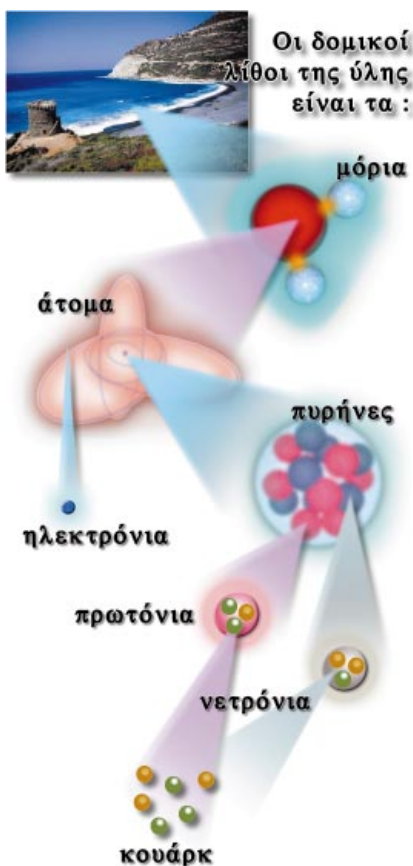
Αρχικά η πειραματική μελέτη της δομής του πυρήνα βασίσθηκε στη χρήση σωματιδίων α ή β από ραδιενεργά στοιχεία που υπάρχουν στη φύση. Η βαθύτερη όμως διείσδυση στο εσωτερικό των πρωτονίων και νετρονίων απαιτούσε τη σύγκρουσή τους με σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας. Για αυτό κατασκευάσθηκαν διατάξεις στις οποίες, με χρήση ηλεκτρικών και μαγνητικών πεδίων, επιταχύνονται φορτισμένα σωματίδια τα οποία στη συνέχεια κατευθύνονται προς ένα στόχο ή συγκρούονται μεταξύ τους. Οι διατάξεις αυτές ονομάσθηκαν **επιταχυντές**.

Εκτός όμως από τη πραγματοποίηση των πυρηνικών αντιδράσεων, για την ανακάλυψη της δομής της ύλης απαιτείται



Εικόνα 16.3

Ο ανιχνευτής ALEPH του Πανευρωπαϊκού εργαστηρίου πυρηνικών ερευνών (CERN). Συσκευή με την οποία ανιχνεύονταν σωματίδια που παράγονταν στον επιταχυντή LEP.



Εικόνα 16.4

Σχηματική αναπαράσταση της δομής της ύλης.

και η καταγραφή των αποτελεσμάτων τους, δηλαδή η καταγραφή των σωματιδίων που παράγονται και των ενεργειών τους. Από τα φωτογραφικά φιλμ που χρησιμοποιήθηκαν αρχικά για την ανίχνευση των ραδιενεργών ακτινοβολιών υπήρξε μεγάλη εξέλιξη στη συνέχεια και κατασκευάστηκαν πολλές συσκευές για την ανίχνευση φορτισμένων σωματιδίων και φωτονίων. Αυτές οι συσκευές ονομάζονται **ανιχνευτές**. Όταν φορτισμένα σωματίδια κινούνται με μεγάλες ταχύτητες και συγκρούονται με άτομα τότε προκαλούν τον ιονισμό τους. Το φαινόμενο αυτό αξιοποιούν οι επιστήμονες για την κατασκευή των περισσότερων τύπων ανιχνευτών.

Ένας ανιχνευτής μπορεί να έχει μέγεθος πολλών μέτρων, μάζα πάνω από 10 τόνους και κόστος δεκάδες εκατομμύρια ευρώ. Οι επιταχυντές σε συνδυασμό με τους ανιχνευτές επιτρέπουν την εξιχνίαση των μυστικών της δομής της ύλης. Συγχρόνως ο σχεδιασμός και η κατασκευή τους έδωσε μεγάλη ώθηση στην ανάπτυξη της σύγχρονης τεχνολογίας σε τομείς όπως η υπεραγωγιμότητα, οι ηλεκτρονικοί υπολογιστές και η αναζήτηση νέων υλικών. Αξίζει να σημειωθεί ότι ο ιστός επικοινωνίας (Web) που εφαρμόζεται σήμερα διεθνώς στο διαδίκτυο (internet) και αποτελεί την μεγαλύτερη πρόοδο των τελευταίων χρόνων στην τεχνολογία των επικοινωνιών, επινοήθηκε αρχικά από επιστήμονες στο Πανευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN) για τις ανάγκες των πειραμάτων Φυσικής Στοιχειωδών Σωματιδίων.

16.1 Στοιχειώδη σωματίδια

Το 1932 οι επιστήμονες πίστευαν ότι το **πρωτόνιο**, το **νετρόνιο** και το **ηλεκτρόνιο** είναι οι βασικοί δομικοί λίθοι της ύλης.

Είχε φθάσει μήπως το τέλος της ιστορίας των σωματιδίων;

Το μέλλον απέδειξε πως είμαστε ακόμη στην αρχή. Η πρώτη μεγάλη ανακάλυψη ήρθε από προσεκτική πειραματική μελέτη της γνωστής ραδιενεργού ακτινοβολίας β. Οι επιστήμονες για την ερμηνεύσουν θεώρησαν ότι το νετρόνιο διασπάται σε ένα πρωτόνιο και ένα ηλεκτρόνιο. Όταν όμως οι πειραματικοί προσδιόρισαν με ακρίβεια την ενέργεια των σωματιδίων που παράγονταν σε αυτή την αντίδραση διαπίστωσαν ότι δεν διατηρείται! Το 1931 ο Αυστριακός φυσικός Πάουλι προκειμένου να αποκαταστήσει τη διατήρηση της ενέργειας πρότεινε ότι μαζί με το πρωτόνιο και το ηλεκτρόνιο στην παραπάνω αντίδραση παράγεται και ένα επιπλέον

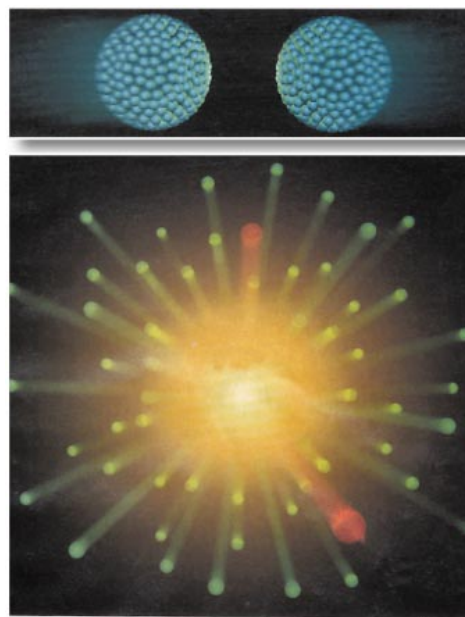
ον σωματίδιο που ονομάστηκε **νετρίνο** (δηλαδή «μικρό» ουδέτερο σωματίδιο). Το νετρίνο αλληλεπιδρά ιδιαίτερα ασθενικά με την ύλη και για αυτό ανιχνεύθηκε πειραματικά μόλις το 1956.

Το 1936 οι επιστήμονες παρατηρώντας προσεκτικά τις ακτινοβολίες που έφθαναν στη Γη από το διάστημα (κοσμικές ακτίνες) διαπίστωσαν την ύπαρξη ενός σωματιδίου που είχε ίδιο φορτίο με το φορτίο το ηλεκτρόνιο αλλά ήταν 200 φορές βαρύτερο από αυτό. Το νέο σωματίδιο ονομάστηκε **μiónιο**.

Το μεγάλο άλμα για τη κατανόηση της δομής της ύλης έγινε από τον Αμερικανό φυσικό Γκελ-Μαν (Gell-Mann) το 1964, όταν πρότεινε ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια δεν είναι στοιχειώδη αλλά αποτελούνται από άλλα μικρότερα σωματίδια τα οποία ονόμασε **κουάρκ**.

Από το τέλος της δεκαετίας του 1960 μέχρι και τις αρχές της δεκαετίας του 1980, σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στα εργαστήρια των Η.Π.Α. (SLAC στην Καλιφόρνια και Fermilab στο Σικάγο) και της Ευρώπης (CERN στην Ελβετία και DESY στη Γερμανία), προέκυψαν έμμεσες ενδείξεις για την ύπαρξη των κουάρκ. Η πειραματική όμως επιβεβαίωση της ύλης κουάρκ, στην κατάσταση που προϋπήρξε στο Σύμπαν τα πρώτα εκατομμυριοστά του δευτερολέπτου μετά την μεγάλη έκρηξη, αναμένεται να προκύψει από πειράματα σύγκρουσης βαριών ιόντων που πραγματοποιούνται στο CERN και στο εργαστήριο BNL της Νέας Υόρκης των ΗΠΑ. Στα πειράματα αυτά πυρήνες με μεγάλο μαζικό αριθμό, π.χ. μόλυβδου και χρυσού, επιταχύνονται και αποκτούν μεγάλες ταχύτητες. Στην περιοχή σύγκρουσης των πυρήνων δημιουργούνται συνθήκες μεγάλης θερμοκρασίας και πυκνότητας ύλης (όπως στο αρχικό σύμπαν). Αυτό έχει ως αποτέλεσμα τα κουάρκ που βρίσκονται παγιδευμένα στο εσωτερικό των νουκλεονίων να ελευθερωθούν και να σχηματίσουν «ατμούς» από ύλη κουάρκ σε μια διαδικασία «βρασμού» σε πολύ υψηλές θερμοκρασίες. Οι πρώτες πειραματικές ενδείξεις για την ύπαρξη αυτής της νέας κατάστασης της ύλης (ύλη κουάρκ) ανακοινώθηκαν από το εργαστήριο CERN στις αρχές του έτους 2000.

Σήμερα πιστεύουμε ότι τα πραγματικά στοιχειώδη σωματίδια ομαδοποιούνται σε δυο οικογένειες, **κουάρκ** και **λεπτόνια**. Τα κουάρκ είναι τα συστατικά των πρωτονίων και των νετρονίων. Τα λεπτόνια είναι σωματίδια όπως το ηλεκτρόνιο, το μiónιο και το νετρίνο. Υπάρχουν συνολικά 6 κουάρκ και 6 λε-



Εικόνα 16.5

Η μικρή μεγάλη έκρηξη
Στη περιοχή σύγκρουσης των βαριών ιόντων η ύλη παίρνει τη μορφή που είχε τις πρώτες στιγμές της δημιουργίας του σύμπαντος.



Εικόνα 16.6

Τα κουάρκ είναι οι δομικοί λίθοι του πρωτονίου και του νετρονίου.

πτόνια που κατατάσσονται σε 3 οικογένειες κατά σειρά αυξανόμενης ενέργειας στην οποία εμφανίζονται. Η συνήθης ύλη αποτελείται από σωματίδια της πρώτης οικογένειας.

Σύμφωνα με το πρότυπο των κουάρκ τα νουκλεόνια αποτελούνται το καθένα από τρία κουάρκ δυο τύπων τα u (up) και d ($down$). Τα κουάρκ έχουν φορτίο που ισούται με κλάσμα του στοιχειώδους ηλεκτρικού φορτίου, του ηλεκτρονίου, e : Το κουάρκ u (πάνω) $= 2/3e$ και το κουάρκ d (κάτω) $-1/3e$

ΠΙΝΑΚΑΣ 16.1

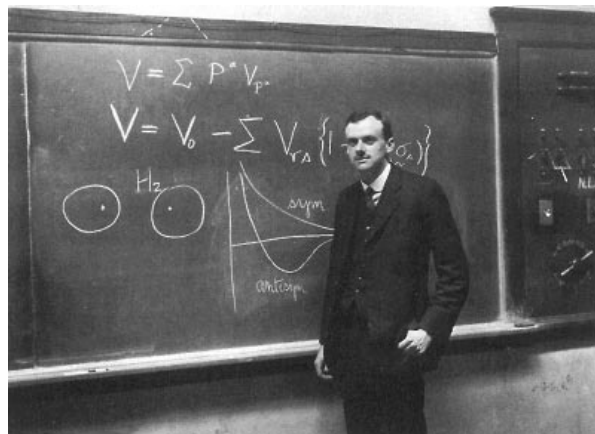
Στοιχειώδη σωματίδια της ύλης και οι οικογένειες τους.

		ΛΕΠΤΟΝΙΑ		ΚΟΥΑΡΚ	
Τα σωματίδια που αποτελούν την συνήθη ύλη ανήκουν σε αυτήν την οικογένεια.	πρώτη οικογένεια	ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟ είναι υπεύθυνο για τα ηλεκτρικά φαινόμενα και τις χημικές αντιδράσεις. Έχει φορτίο -1 e^-	ΝΕΥΤΡΙΝΟ του ΗΛΕΚΤΡΟΝΙΟΥ Δεν έχει ηλεκτρικό φορτίο και πιθανόν ούτε μάζα. Έκαστομύρια τέτοια σωματίδια διαπερνούν το σώμα μας κάθε στιγμή. ν_{e^-}	UP έχει ηλεκτρικό φορτίο $+2/3$. Κάθε πρωτόνιο έχει δύο u και κάθε νετρόνιο ένα. u	DOWN έχει ηλεκτρικό φορτίο $-1/3$. Κάθε πρωτόνιο έχει ένα d και κάθε νετρόνιο δύο. d
Τα σωματίδια αυτά υπήρχαν στα πρώτα δευτερόλεπτα της δημιουργίας του σύμπαντος. Σήμερα τα βρίσκουμε σε ακτινοβολίες που έρχονται από το διάστημα ή σε επιταχυντές.	δεύτερη οικογένεια	ΜΙΟΝΙΟ σωματίδιο βαρύτερο από το ηλεκτρόνιο. Ο χρόνος ζωής του είναι δύο χιλιοστά του δευτερολέπτου. μ	ΝΕΥΤΡΙΝΟ του ΜΙΟΝΙΟΥ σχηματίζεται ταυτόχρονα με το μόνιο κατά τη διάσπαση άλλων σωματιδίων. ν_{μ}	CHARM σωματίδιο βαρύτερο από τα u και d . Ανακαλύφθηκε το 1974. c	STRANGE σωματίδιο βαρύτερο από τα u και d . Ανακαλύφθηκε το 1964. s
	τρίτη οικογένεια	ΤΑΦ ακόμα βαρύτερο σωματίδιο. Ασταθές σωματίδιο. Ανακαλύφθηκε το 1976. τ	ΝΕΥΤΡΙΝΟ του ΤΑΦ Σχηματίζεται ταυτόχρονα με το ΤΑΦ. Ανακαλύφθηκε το 2000. ν_{τ}	ΤΟΡ ακόμα βαρύτερο σωματίδιο. Ανακαλύφθηκε το 1995. t	BOTTOM ακόμα βαρύτερο σωματίδιο. Ανακαλύφθηκε το 1977. b

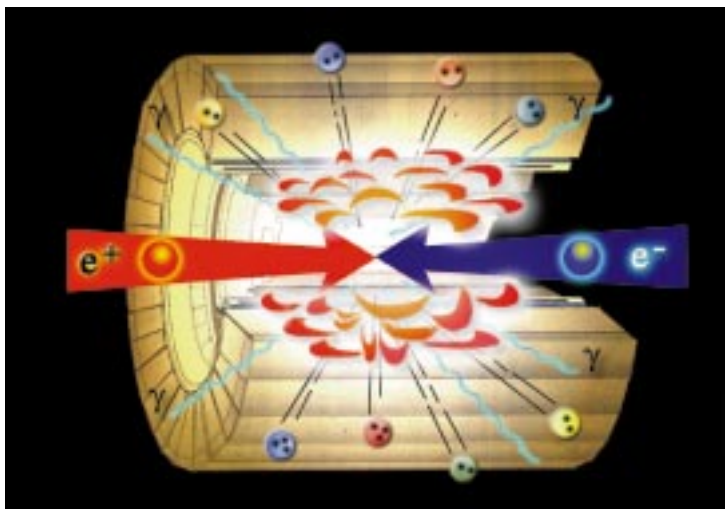


Αντισωματίδια

Το 1928 ο Άγγλος φυσικός Ντιράκ (Dirac) συνδύασε τη θεωρία της Σχετικότητας με την Κβαντική Μηχανική. Η θεωρία του προέβλεπε την ύπαρξη σωματιδίων που η μάζα τους έπρεπε να είναι ίση με τη μάζα των ηλεκτρονίων το δε φορτίο τους ίσο αλλά αντίθετο με το φορτίο των ηλεκτρονίων. Το 1932 ο Αμερικανός φυσικός Άντερσον παρατηρώντας τις κοσμικές ακτίνες ανακάλυψε τα σωματίδια που είχαν τα χαρακτηριστικά των σωματιδίων του Ντιράκ. Τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν **αντιηλεκτρόνια ή ποζιτρόνια**.



Πωλ Ντιράκ (Paul Dirac, 1902 –1984)
Άγγλος φυσικός που προέβλεψε την ύπαρξη του ποζιτρονίου.



Εξαύλωση

Δίδυμη γένεση: και το φως έγινε ύλη

Το ποζιτρόνιο είναι παράδειγμα ενός αντισωματιδίου ή ενός σωματιδίου αντιύλης. Όταν συγκρουστούν ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο εξαυλώνονται και η ενέργειά τους μετατρέπεται σε φωτόνια. Η ύλη μετατρέπεται κατευθείαν σε ενέργεια. Αντίστροφα ένα φωτόνιο μπορεί να μετατραπεί σε ένα ζεύγος ηλεκτρονίου ποζιτρονίου. Αυτή η διαδικασία ονομάζεται δίδυμη γένεση.

Ύλη και αντιύλη

Όλα τα σωματίδια, και τα στοιχειώδη, έχουν και τα αντισωματίδια τους. Το 1955 δημιουργήθηκε και παρατηρήθηκε για πρώτη φορά στο εργαστήριο ζεύγος πρωτονίου-αντιπρωτονίου. Τα κουάρκ και τα λεπτόνια δημιουργούνται και καταστρέφονται πάντα κατά ζεύγη σωματιδίου – αντισωματιδίου. Σύμφωνα με τη προηγούμενη πρόταση θα έπρεπε να περιμένουμε να υπάρχει ίδιος αριθμός σωματιδίων και αντισωματιδίων στο Σύμπαν. Παρόλα αυτά σήμερα γνωρίζουμε ότι τα σωματίδια είναι περισσότερα από τα αντισωματίδια χωρίς να γνωρίζουμε ακριβώς την αιτία.

16.2 Θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις

Όλες οι δυνάμεις που εμφανίζονται στη φύση ανάγονται σε τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις. Με σειρά μειούμενης ισχύος αυτές είναι: Η ισχυρή, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής, η βαρυτική αλληλεπίδραση.

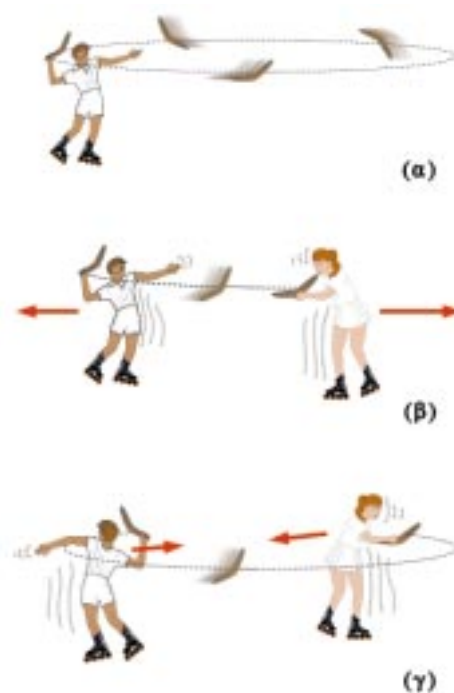
Η ηλεκτρομαγνητική και η βαρυτική αλληλεπίδραση εκδηλώνονται και σε φαινόμενα της καθημερινής ζωής. Η δύναμη της βαρύτητας είναι πολύ ασθενέστερη από την ηλεκτρομαγνητική. Γι' αυτό η ηλεκτρομαγνητική δύναμη κυριαρχεί σε μικρή κλίμακα. Είναι η δύναμη που είναι υπεύθυνη για τη δομή των ατόμων και των μορίων καθώς και για τις φυσικές και χημικές ιδιότητες των στοιχείων. Από την άλλη μεριά η δύναμη της βαρύτητας παίζει κυρίαρχο ρόλο στο σχηματισμό των άστρων και τη συμπεριφορά του σύμπαντος σε μεγάλη κλίμακα. Οι άλλες αλληλεπιδράσεις εμφανίζονται αποκλειστικά στο εσωτερικό του πυρήνα. Η ισχυρή συνδέει τα κουάρκ μέσα στα νουκλεόνια καθώς και τα νουκλεόνια μέσα στον πυρήνα. Η ασθενής αλληλεπίδραση είναι υπεύθυνη για τη διάσπαση β δηλ τη μετατροπή του νετρονίου σε πρωτόνιο με την ταυτόχρονη εκπομπή ενός ηλεκτρονίου. Από τα στοιχειώδη σωματίδια τα κουάρκ αλληλεπιδρούν με ισχυρές και ασθενείς δυνάμεις ενώ τα λεπτόνια μόνο με ασθενείς.

Στην Κλασσική φυσική περιγράφουμε την αλληλεπίδραση σωματιδίων με τις δυνάμεις που προβλέπουν νόμοι, όπως ο νόμος της παγκόσμιας έλξης του Νεύτωνα ή ο νόμος του Κουλόμπ.

Στην Κβαντική θεωρία μπορούμε να περιγράψουμε την αλληλεπίδραση μέσω εκπομπής και απορρόφησης σωματιδίων. Για παράδειγμα δυο φορτισμένα σωματίδια αλληλεπιδρούν ηλεκτρομαγνητικά, εκπέμποντας και απορροφώντας **φωτόνια**. Δυο κουάρκ αλληλεπιδρούν ισχυρά, εκπέμποντας και απορροφώντας σωματίδια που τα ονομάζουμε **γκλουόνια**. Τα σωματίδια που ανταλλάσσονται ονομάζονται φορείς της αλληλεπίδρασης. Δηλαδή τα φωτόνια είναι φορείς της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης ενώ τα γκλουόνια της ισχυρής.

Τα χαρακτηριστικά των αλληλεπιδράσεων είναι:

- Οι φορείς (κάθε αλληλεπίδραση χαρακτηρίζεται και από διαφορετικό φορέα)
- Η εμβέλεια, δηλαδή η απόσταση που πρέπει να προσεγγίσουν τα σωματίδια ώστε να ασκείται μεταξύ τους δύναμη.



Εικόνα 16.7

Μηχανικό ανάλογο της αλληλεπίδρασης μεταξύ δυο σωματιδίων.

(α) Ο νεαρός της εικόνας (σωματίδιο) πετάει το μπούμεραγκ (φορέα αλληλεπίδρασης).

Το μπούμεραγκ επιστρέφει (το σωματίδιο δεν ασκεί δύναμη).

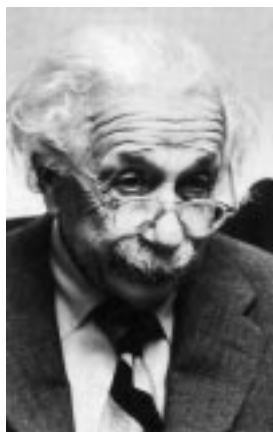
(β) Ο νεαρός (σωματίδιο 1) πετάει το μπούμεραγκ (φορέα) δεξιά και κινείται αριστερά. Η νεαρά (σωματίδιο 2) πιάνει το μπούμεραγκ και κινείται δεξιά (Το 1 απωθεί - αλληλεπιδρά με το 2).

(γ) Ο νεαρός πετάει το μπούμεραγκ προς τα αριστερά και κινείται δεξιά. Η νεαρά πιάνει το μπούμεραγκ και κινείται αριστερά (τα 1 και 2 έλκονται).

- Η σχετική ισχύς.
Στον παρακάτω πίνακα παρουσιάζονται οι τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις με τα χαρακτηριστικά τους.

ΠΙΝΑΚΑΣ 16. 11

ΤΑ ΣΩΜΑΤΙΔΙΑ ΦΟΡΕΙΣ ΑΛΛΗΛΕΠΙΔΡΑΣΕΩΝ	
<div>ΙΣΧΥΡΗ</div> <div>ΗΛΕΚΤΡΟΜΑΓΝΗΤΙΚΗ</div> <div>ΑΣΘΕΝΗΣ</div> <div>ΒΑΡΥΤΙΚΗ</div>	<p>ΓΚΛΟΥΟΝΙΑ : τα σωματίδια αυτά είναι υπεύθυνα για δυνάμεις μεταξύ των κουάρκ.</p>  <p>Η τεράστια ενέργεια που απελευθερώνει η διάσπαση του πυρήνα είναι αποτέλεσμα της ισχυρής δύναμης</p> <p>ισχύς : 1 εμβέλεια : μικρή (10^{-15} m)</p>
	<p>ΦΩΤΟΝΙΑ : τα σωματίδια αυτά αποτελούν το φως και είναι υπεύθυνα για τις δυνάμεις μεταξύ των φορτισμένων σωματιδίων.</p>  <p>Ηλεκτρικά, μαγνητικά και χημικά φαινόμενα είναι αποτελέσματα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης</p> <p>ισχύς : $1/137$ εμβέλεια : μεγάλη (άπειρη)</p>
	<p>ΜΠΟΖΟΝΙΑ : τα σωματίδια αυτά είναι υπεύθυνα για την ασθενή δύναμη μεταξύ κουάρκ και λεπτονίων.</p>  <p>Μερικές περιπτώσεις πυρηνικών αντιδράσεων είναι αποτέλεσμα της ασθενούς δύναμης (διάσπαση β)</p> <p>ισχύς : 10^{-9} εμβέλεια : πολύ μικρή (10^{-18} m)</p>
	<p>ΒΑΡΥΤΟΝΙΑ : τα σωματίδια αυτά είναι υπεύθυνα για τη βαρυτική δύναμη μεταξύ όλων των σωματιδίων που έχουν μάζα.</p>  <p>Το βάρος μας και οι κινήσεις των πλανητών είναι αποτελέσματα της βαρυτικής δύναμης</p> <p>ισχύς : 10^{-38} εμβέλεια : μεγάλη (άπειρη)</p>



Άλμπερτ Αϊστέιν

Ενοποίηση αλληλεπιδράσεων

Βαρύτητα και Ηλεκτρομαγνητισμός: η πρώτη προσπάθεια

Γιατί υπάρχουν οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις; είναι πράγματι διαφορετικές μεταξύ τους;

Πάνω από μισό αιώνα οι θεωρητικοί φυσικοί οραματίζονται την περιγραφή όλων των αλληλεπιδράσεων της φύσης με ένα ενιαίο τρόπο. Ο Αϊνστάιν προσπάθησε επί πολλά χρόνια να δημιουργήσει μια ενοποιημένη θεωρία με τη βοήθεια της οποίας θα μπορούσε να περιγράψει με ένα ενιαίο τρόπο τον ηλεκτρομαγνητισμό και τη βαρύτητα. Η προσπάθεια του δεν στέφθηκε από επιτυχία.

Ηλεκτρομαγνητισμός και ασθενείς αλληλεπιδράσεις: η πρώτη επιτυχία

Το 1967 οι Αμερικανοί Γκλάσσοου και Γουάϊνμπεργκ και ο Πακιστανός Σαλάμ πρότειναν μια θεωρία που ενοποιεί την ηλεκτρομαγνητική και την ασθενή δύναμη.

Η θεωρία προβλέπει ότι σε υψηλές ενέργειες, όπως αυτές που μπορούμε να πετύχουμε σε συγκρούσεις σωματιδίων στους σύγχρονους επιταχυντές, οι δυο αλληλεπιδράσεις έχουν τα ίδια χαρακτηριστικά: ισχύ και εμβέλεια. Έτσι ενοποιούνται σε μια ενιαία αλληλεπίδραση που ονομάζεται *ηλεκτρασθενής*. Η θεωρία προβλέπει την ύπαρξη 4 σωματιδίων που είναι οι φορείς της αλληλεπίδρασης, ένα από αυτά είναι το φωτόνιο. Η θεωρία επιβεβαιώθηκε το 1983 σε πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο Ευρωπαϊκό Κέντρο Πυρηνικών Ερευνών (CERN), όπου συγκρούονταν πρωτόνια με αντιπρωτόνια.



ΓΚΛΑΣΣΟΥ



ΓΟΥΑΪΝΜΠΕΡΓΚ



ΣΑΛΑΜ

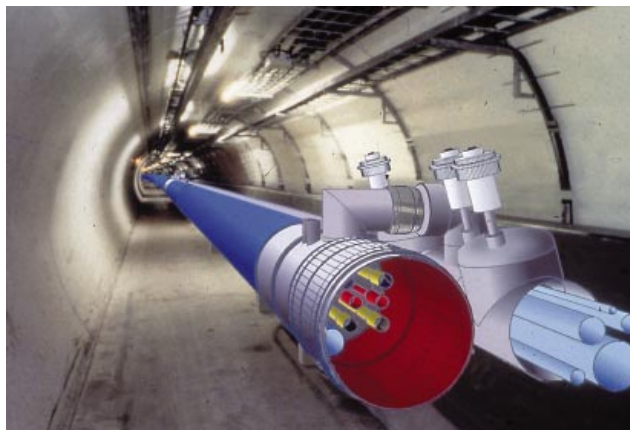
Ηλεκτρασθενής και ισχυρή αλληλεπίδραση: Η μεγάλη ενοποίηση

Στη δεκαετία του 1980 οι επιστήμονες κατέβαλαν προσπάθειες για την ενιαία περιγραφή των ηλεκτρασθενών και των ισχυρών δυνάμεων. Έτσι διατυπώθηκαν διάφορες θεωρίες οι οποίες αποκαλούνται θεωρίες μεγάλης ενοποίησης. Η ανάπτυξη αυτών των θεωριών βρίσκεται σε εξέλιξη. Οι περισσότερες από τις θεωρίες μεγάλης ενοποίησης προβλέπουν ότι το πρωτόνιο δεν είναι σταθερό, αλλά διασπάται σε λεπτόνια και φωτόνια. Για τον έλεγχο αυτής της πρόβλεψης σχεδιάστηκαν και πραγματοποιήθηκαν πειράματα, τα οποία διήρκεσαν για πάνω από τρία χρόνια. Στα πειράματα αυτά δεν παρατηρήθηκε διά-

σπαση του πρωτονίου. Οι θεωρίες αναθεωρούνται και νέα πειράματα σχεδιάζονται.

Το τελικό όνειρο των θεωρητικών φυσικών είναι να περιγράψουν με ενιαίο τρόπο και τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις μεταξύ των οποίων είναι και η βαρύτητα. Μια θεωρία που θα πετύχαινε κάτι τέτοιο αποκαλείται *θεωρία των πάντων*.

Ο κλάδος της φυσικής, ο οποίος ασχολείται με τη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων και τις αλληλεπιδράσεις τους, ονομάζεται φυσική στοιχειωδών σωματιδίων. Αυτή η περιοχή της γνώσης είναι ιδιαίτερα συναρπαστική γιατί δίδονται απαντήσεις σε σημαντικά ερωτήματα που απασχολούν τους επιστήμονες. Αλλά κάθε απάντηση φαίνεται να δημιουργεί νέα ερωτήματα. Πάντως το βασικό ερώτημα: από τι είναι φτιαγμένος ο κόσμος, δεν έχει απαντηθεί ακόμη πλήρως.



Ο μεγάλος επιταχυντής πρωτονίων (LHC). Σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε στο CERN με συνεργασία επιστημόνων από όλες της Ευρωπαϊκές χώρες. Στο εσωτερικό του θα συγκρούονται πρωτόνια με μεγάλες ταχύτητες και θα δημιουργούνται συνθήκες παρόμοιες με αυτές που επικρατούσαν αμέσως μετά τη μεγάλη έκρηξη.

16.3 Δημιουργία του σύμπαντος

Πως δημιουργήθηκε το σύμπαν;

Η ερώτηση μπορεί να φαίνεται παράξενη όταν τίθεται σ' ένα κεφάλαιο που ασχολείται με τα σωματίδια και τις δυνάμεις που ασκούνται μεταξύ τους.

Τι σχέση υπάρχει ανάμεσα στη συμπεριφορά των θεμελιωδών σωματιδίων στο μικρόκοσμο και στο σύμπαν που επεκτείνεται σε άπειρα μεγάλες αποστάσεις;

Σήμερα οι επιστήμονες πιστεύουν ότι το αφάνταστα μικρό και το ασύλληπτα μεγάλο συνδέονται στενά. Η μελέτη του τρόπου που αλληλεπιδρούν τα σωματίδια όταν αυτά έχουν πολύ υψηλές ενέργειες και βρίσκονται σε πολύ μικρές αποστάσεις μας βοηθάει ουσιαστικά να καταλάβουμε αυτά που συνέβαιναν στο πολύ μακρινό παρελθόν στο σύμπαν.

Ως τις αρχές του εικοστού αιώνα υπήρχε η αντίληψη ότι το σύμπαν ήταν στατικό, δηλαδή οι διαστάσεις του ήταν αμετάβλητες. Γύρω στο 1930 προέκυψαν ενδείξεις για το αντίθε-



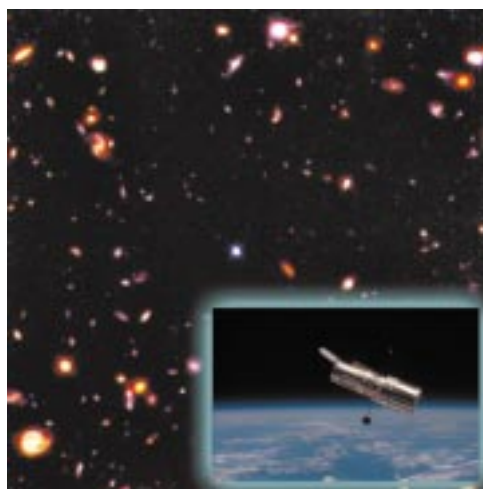
Εικόνα 16.8

Ο Χάμπλ (Edwin Hubble) ο αστρονόμος που παρατήρησε την απομάκρυνση των γαλαξιών και μίλησε για διαστολή του σύμπαντος, ενώ εργάζεται στο τηλεσκόπιο.



Εικόνα 16.9

A. Penzias και R. Wilson δίπλα στη κεραία μικροκυμάτων με την οποία ανίχνευσαν το 1965 ακτινοβολία που επιβεβαιώνει τη θεωρία της μεγάλης έκρηξης.



Εικόνα 16.10

Το διαστημικό τηλεσκόπιο Hubble με το οποίο οι επιστήμονες μπορούν να δουν περιοχές του σύμπαντος όπου δημιουργούνται νέα αστέρια, υπάρχει ύλη κουάρκ κλπ.

το. Οι επιστήμονες μελετώντας τις ακτινοβολίες που εκπέμπονταν από πολύ μακρινούς γαλαξίες και έφθαναν έως εμάς κατέληξαν στο συμπέρασμα ότι αυτοί οι γαλαξίες απομακρύνονταν από τον δικό μας. Δεν υπάρχει κάποιος ειδικός λόγος που να μας κάνει να πιστεύουμε ότι ο δικός μας γαλαξίας βρίσκεται στο κέντρο του σύμπαντος. Το σύμπαν φαίνεται να διαστέλλεται (εικόνα 16.8).

Μια θελκτική θεωρία για την ερμηνεία της διαστολής του σύμπαντος αποτελεί η θεωρία της **Μεγάλης Έκρηξης** (Big Bang) Κάποια στιγμή στο παρελθόν όλη η ύλη του σύμπαντος ήταν συγκεντρωμένη σε μια πολύ μικρή περιοχή. Τόσο η πυκνότητα όσο και η θερμοκρασία, δηλαδή η ενέργεια των σωματιδίων, είχαν σε αυτή τη περιοχή ασύλληπτα τεράστιες τιμές. Με μια τρομερή έκρηξη η ύλη διασκορπίστηκε προς κάθε κατεύθυνση και το σύμπαν άρχισε να διαστέλλεται και να ψύχεται. Αυτό το γεγονός της δημιουργίας του σύμπαντος συνέβη πριν περίπου 20 δισεκατομμύρια χρόνια. Όμως μέσα στο πρώτο δευτερόλεπτο της δημιουργίας συνέβησαν καταπληκτικά γεγονότα.

Οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις που είχαν αρχικά ενιαίο χαρακτήρα, δηλαδή ένα είδος φορέα, άρχισαν να διαφοροποιούνται η μια από την άλλη. Τη χρονική στιγμή $t = 10^{-43}$ s, που λέγεται και χρόνος Πλάνκ, το σύμπαν είχε διαστάσεις περίπου 10^{-35} m και θερμοκρασία περίπου 10^{32} K. Εκείνη τη στιγμή η δύναμη της βαρύτητας διαφοροποιήθηκε από τις υπόλοιπες αλληλεπιδράσεις. Κατά την περίοδο από $t = 10^{-43}$ s ως $t = 10^{-36}$ s οι τρεις αλληλεπιδράσεις ηλεκτρομαγνητική, ισχυρή και ασθενής ήταν ενοποιημένες δηλαδή είχαν τον ίδιο φορέα. Το σύμπαν αποτελούνταν από ένα μίγμα κουάρκ και λεπτονίων τα οποία μετασχηματίζονταν το ένα στο άλλο.

Σε χρόνο $t = 10^{-32}$ s το σύμπαν ήταν μίγμα από κουάρκ και λεπτόνια, που διακρίνονταν πια μεταξύ τους και σωματίδια αλληλεπίδρασης (φορείς).

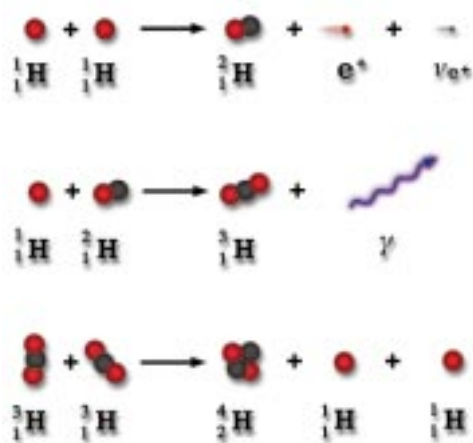
Σε χρόνο $t = 10^{-12}$ s η ασθενής δύναμη διαφοροποιείται από την ηλεκτρομαγνητική. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι θεωρίες της Αστροφυσικής υποστηρίζουν ότι οι δυο αλληλεπιδράσεις εμφανίζονται ενοποιημένες σε περιοχές του σύμπαντος όπου παρατηρούνται εκρήξεις κατά τις οποίες δημιουργούνται νέα αστέρια (σουπερνόβα).

Το σύμπαν συνέχιζε να διαστέλλεται και να ψύχεται οπότε σε $t = 10^{-5}$ s η θερμοκρασία του έπεσε στους 10^{13} K. Τότε τα κουάρκ άρχισαν να συνδέονται και να σχηματίζουν πρωτόνια και νετρόνια.

Σε χρόνο 3 λεπτά τα πρωτόνια και τα νετρόνια άρχισαν να συνδέονται και να σχηματίζουν πυρήνες. Άρχισε έτσι η εποχή της **πυρηνοσύνθεσης** (εικόνα 16.11). Αρχικά βέβαια σχηματίσθηκαν οι πυρήνες του δευτέρου ${}^2_1\text{H}$, του τρίτιου ${}^3_1\text{H}$ και του ηλίου ${}^4_2\text{H}$. Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία ουσιαστικά όλο το υδρογόνο και το ήλιο του σύμπαντος σχηματίσθηκαν τη περίοδο αυτή. Στη συνέχεια ο σχηματισμός πυρήνων σταμάτησε σχεδόν τελείως.

Περίπου 700.000 χρόνια μετά τη μεγάλη έκρηξη η θερμοκρασία του σύμπαντος έπεσε στους 3.000K και επομένως η κινητική ενέργεια των ηλεκτρονίων μειώθηκε. Έτσι τώρα μπορούσαν να παγιδευτούν από τις ελκτικές δυνάμεις των πυρήνων και να σχηματισθούν ηλεκτρικά ουδέτερα **άτομα** υδρογόνου και ηλίου. Μεταξύ τους δεν ασκούνται πλέον οι απωστικές ηλεκτρικές δυνάμεις αλλά μόνον η ελκτική βαρυτική δύναμη. Έτσι τα άτομα έλκουν το ένα το άλλο και η ύλη άρχισε να συσσωρεύεται, οπότε σχηματίζονται πρώτα τα άστρα και μετά οι γαλαξίες. Η διαδικασία αυτή άρχισε περίπου ένα δισεκατομμύριο χρόνια μετά τη δημιουργία του σύμπαντος και συνεχίζεται μέχρι σήμερα. Συγχρόνως στα αστέρια οι πυρήνες του υδρογόνου και του ηλίου συντηκονται, οπότε σχηματίζονται πυρήνες μεγαλύτερου ατομικού αριθμού και δημιουργούνται τα βαρύτερα στοιχεία.

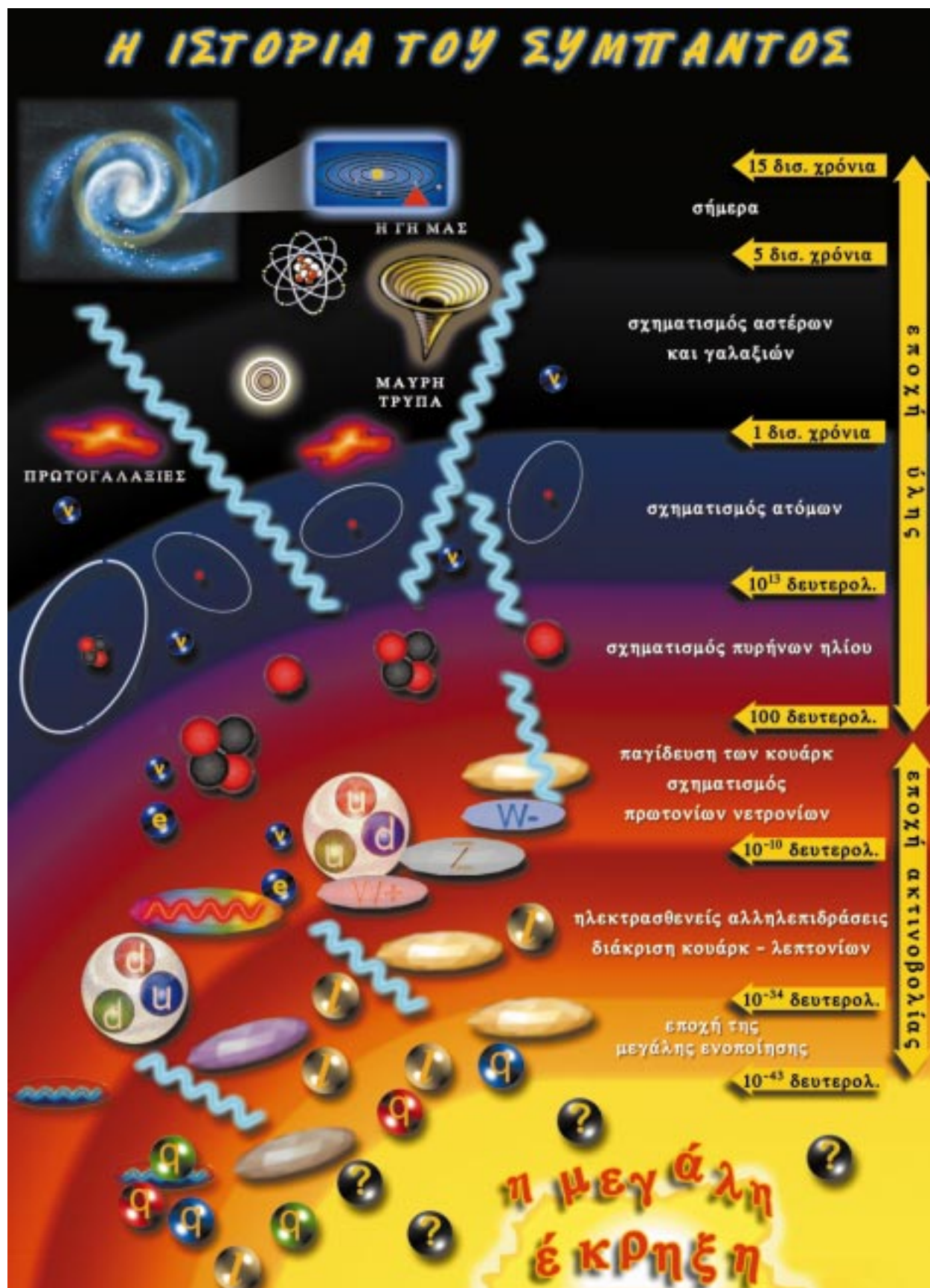
Μετά από 15 δισεκατομμύρια χρόνια η θερμοκρασία μειώθηκε στους 3K. Τότε σχηματίσθηκαν οι σύγχρονοι γαλαξίες μεταξύ των οποίων και ο γαλαξίας στον οποίο ανήκει και το ηλιακό μας σύστημα.



Εικόνα 16.11

Πυρηνοσύνθεση

Διαδικασία σύνθεσης πυρήνων των ισοτόπων του υδρογόνου και του ηλίου. Η σειρά αυτή των αντιδράσεων πιστεύουμε ότι συμβαίνει στον Ήλιο.



ΕΡΩΤΗΣΕΙΣ

1. Από ποια στοιχειώδη σωματίδια αποτελείται η ύλη;
2. Σε ποιές από τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις συμμετέχει κάθε ένα από τα παρακάτω σωματίδια;
α) ηλεκτρόνιο β) πρωτόνιο γ) νεutrόνιο δ) νεutrίνο
3. Να αντιστοιχήσεις τις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις με τα σωματίδια - φορείς τους.

1. βαρυτική	α. φωτόνιο
2. ηλεκτρομαγνητική	β. W^+ , W^- , Z^0
3. ισχυρή	γ. βαρυόνιο
4. ασθενής	δ. γλουόνιο
4. Να κατατάξεις τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις με σειρά μειούμενης ισχύος.
5. Συμπλήρωσε το παρακάτω κείμενο:
Τα νουκλεόνια αποτελούνται από που έχουν Ηλεκτρικό φορτίο. Τα λεπτόνια δεν συμμετέχουν σε αλληλεπιδράσεις. Υπάρχουν κουάρκ και Λεπτόνια ταξινομημένα σε γενιές. Τα είναι οι φορείς των ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων. Δυο κουάρκ αλληλεπιδρούν ισχυρά ανταλλάσσοντας ένα.....
6. Να περιγράψεις πως συγκροτείται ένα πρωτόνιο και ένα νεutrόνιο σύμφωνα με το μοντέλο των κουάρκ.
7. Τι έχουν ίδιο και τι διαφορετικό ένα ηλεκτρόνιο, ένα πρωτόνιο, ένα αντιπρωτόνιο και ένα ποζιτρόνιο
8. Τι συμβαίνει σε μια διαδικασία εξαϋλωσης και τι σε μια δίδυμη γένεση; Σε αυτές τις διαδικασίες διατηρείται η μάζα, η ενέργεια. Να εξηγήσεις.
9. Τι θα συμβεί αν ένας μετεωρίτης που αποτελείται από αντιύλη πέσει στη Γη
10. Τι συνέβη με την μεγάλη έκρηξη;
11. Να χαρακτηρίσεις τις επόμενες προτάσεις σαν σωστές ή λάθος:
α) Το σύμπαν ξεκίνησε από μια μικρή περιοχή και άρχισε να διαστέλλεται;
β) Η θεωρία για την εξέλιξη του σύμπαντος βασίζεται στην παρατήρηση ότι οι γαλαξίες πλησιάζουν ο ένας τον άλλον;
γ) Αρχικά η ύλη του σύμπαντος ήταν πολύ θερμή και πολύ πυκνή;
δ) Κατά τη διαστολή του σύμπαντος η θερμοκρασία συνεχώς αυξάνεται;
ε) Οι θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις ήταν αρχικά διαχωρισμένες όταν στο σύμπαν επικρατούσαν πολύ υψηλές θερμοκρασίες και άρχισαν να ενοποιούνται καθώς το σύμπαν ψύχονταν;
στ) Η ύλη στο σύμπαν άρχισε να δομείται από το μικρόκοσμο στον μακρόκοσμο δηλαδή από τα κουάρκ και λεπτόνια, στα νουκλεόνια, στα άτομα, στα άστρα και τους γαλαξίες.

ΑΣΚΗΣΕΙΣ

1. Ποιο θα ήταν το ηλεκτρικό φορτίο ενός σωματιδίου που αποτελείται από 3u κουάρκ;
2. Το φορτίο ενός αντικουάρκ είναι αντίθετο από εκείνο ενός κουάρκ. Τα πιόνια αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ. Ποιο θα είναι το φορτίο των πιονίων που αποτελούνται:
 - α) από κουάρκ u και ένα αντικουάρκ d
 - β) από κουάρκ u και ένα αντικουάρκ u
 - γ) από κουάρκ d και ένα αντικουάρκ u
 - δ) από κουάρκ d και ένα αντικουάρκ d

Περίληψη κεφαλαίου 16: Στοιχειώδη σωματίδια

- Για τη μελέτη της δομής της ύλης χρησιμοποιούνται επιταχυντές και ανιχνευτές. Με τους επιταχυντές παράγονται δέσμες σωματιδίων μεγάλης ταχύτητας ενώ με τους ανιχνευτές καταγράφονται σωματίδια που προκύπτουν από τις πυρηνικές αντιδράσεις.
- Οι δομικοί λίθοι της ύλης είναι τα κουάρκ, από τα οποία αποτελούνται τα πρωτόνια και τα νετρόνια και τα λεπτόνια όπως το ηλεκτρόνιο και το νεutrίνο.
- Οι τέσσερις αλληλεπιδράσεις στη φύση είναι κατά σειρά ισχύος η ισχυρή, η ηλεκτρομαγνητική, η ασθενής και η βαρυτική. Η ισχυρή και η ασθενής εκδηλώνονται μόνο στο εσωτερικό του πυρήνα.
- Σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο το σύμπαν δημιουργήθηκε με μια Μεγάλη έκρηξη. Μετά τη δημιουργία του το σύμπαν διαστέλλεται και ψύχεται. Παράλληλα από ένα αρχικό μίγμα κουάρκ και λεπτονίων σχηματίστηκαν διαδοχικά τα νουκλεόνια, τα άτομα, τα άστρα και οι γαλαξίες.

Β Α Σ Ι Κ Ο Ι Ο Ρ Ο Ι

Επιταχυντές
Ανιχνευτές
Κουάρκ

Λεπτόνια
Μεγάλη έκρηξη

