

Διάλεξη 13: Στοιχειώδη σωματρία

Φυσική στοιχειωδών σωματίων

Η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων είναι ο τομέας της φυσικής ο οποίος προσπαθεί να απαντήσει στο βασικότατο ερώτημα: **“Ποια είναι τα στοιχειώδη δομικά συστατικά της ύλης”**. Η φυσική στοιχειωδών σωματιδίων προφανώς ασχολείται με το μικρό και το ελάχιστο. Σαν τομέας αναζήτησης μπορεί να θεωρηθεί ίσως ένας από τους πρώτους στην ιστορία της ανθρώπινης σκέψης. Μάλιστα, πολλοί τοποθετούν αυτή την αναζήτηση πίσω στα χρόνια του Δημόκριτου. Μέσα από τα χρόνια που πέρασαν το τι οι φυσικοί θεωρούσαν στοιχειώδες και αδιαίρετο συστατικό της ύλης άλλαξε δραματικά. Δυστυχώς ή ευτυχώς δεν μπορώ να αποκλείσω ότι κάτι μπορεί στο μέλλον πάλι να αλλάξει ως προς τις σημερινές μας θεωρήσεις.



Σχήμα 1: Τομείς της Φυσικής ως συνάρτηση της ενέργειας και των φυσικών διαστάσεων του υπό μελέτη αντικειμένου.

Πριν κάποιος ξεκινήσει την ουσιαστική περιγραφή του αντικειμένου της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων καλό θα ήταν να τοποθετηθεί το αντικείμενο αυτό στον χάρτη του πιο πάνω σχήματος. Με την κλασική μηχανική περιγράφονται με εξαιρετική επιτυχία σχεδόν όλα τα φυσικά φαινόμενα της καθημερινής μας ζωής. Πηγαίνοντας όμως σε μικρότερες διαστάσεις γρήγορα έγινε αντιληπτό η αναγκαιότητα αλλά και η επιτυχία χρήσης της κβαντομηχανικής. Ένας άλλος παράγοντας που θα οδηγήσει σε διαφορετική θεώρηση των φυσικών νόμων πέρα από τις φυσικές διαστάσεις είναι και ενέργεια του φαινομένου με το οποίο ασχολούμαστε. Σήμερα γνωρίζουμε ότι καθώς η ενέργεια και οι ταχύτητες του φαινομένου που εξετάζουμε αυξάνουν – και μάλιστα για ταχύτητες κοντά σε αυτή του φωτός – η χρήση των εξισώσεων της κλασικής μηχανικής θα πρέπει να αντικατασταθεί από τις αντίστοιχες εξισώσεις της θεωρίας της σχετικότητας.

Λοιπόν, η φυσική στοιχειωδών σωματίων ασχολείται και με τα δύο. Δηλαδή με τις μικρότερες δυνατές διαστάσεις αλλά και με μεγάλες ενέργειες. Αυτό λοιπόν το κομμάτι της φυσικής περιγράφεται από την κβαντική θεωρία πεδίου.

Παράδειγμα

Το γεγονός ότι οι μεγάλες ενέργειες και οι μικρές διαστάσεις είναι δύο έννοιες άρρηκτα συνδεδεμένες μεταξύ τους μπορεί πολύ εύκολα να γίνει κατανοητό από το μήκος κύματος de Broglie.

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

όπου βλέπουμε ότι το μήκος κύματος οποιουδήποτε σωματίου εξαρτάται από την ορμή του και μάλιστα **όσο μεγαλύτερη η ορμή του σωματιδίου τόσο μικρότερο το μήκος κύματος**. Επομένως εύκολα καταλαβαίνουμε ότι αν θέλουμε να "δούμε" μικρότερες διαστάσεις θα πρέπει να πάμε σε μικρά μήκη κύματος σωματιδίων που χρησιμοποιούμε ως μέσο αναγνώρισης του μικρόκοσμου. Μικρά μήκη κύματος από την παραπάνω εξίσωση σημαίνει μεγάλη ορμή ή αντίστοιχα μεγάλες ενέργειες.

Το ίδιο ακριβώς μπορούμε να το καταλάβουμε και με την χρήση της αρχής απροσδιοριστίας (Heisenberg):

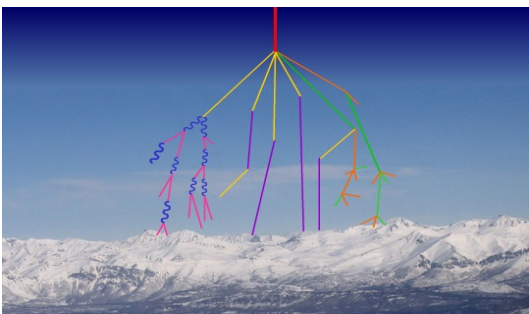
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar$$

όπου μας λέει ακριβώς το ίδιο πράγμα. Δηλαδή αν θέλουμε να έχουμε μικρό Δx θα πρέπει το Δp να είναι μεγάλο.

Τρόποι παραγωγής στοιχειωδών σωματιών

Δεδομένης της επιθυμίας μας να ανακαλύψουμε τα στοιχειώδη συστατικά του κόσμου ένα βασικό ζήτημα που τίθεται αφορά στον τρόπο παραγωγής τους. Οι τρεις βασικοί μηχανισμοί παραγωγής στοιχειωδών σωματιών είναι:

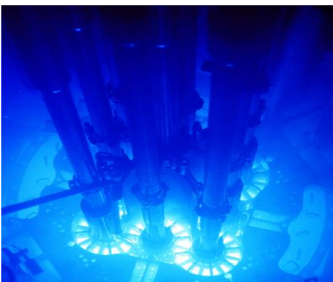
α) **Μέσω κοσμικής ακτινοβολίας**. Ακτίνες φορτισμένων σωματιών (~90% πρωτόνια) εισέρχονται στην ατμόσφαιρά με ενέργειες που ξεπερνούν κάποιες φορές τα 10^{20} eV!! Πρόκειται για τεράστιες ενέργειες οι οποίες ξεπερνούν κατά πολλές τάξεις μεγέθους ακόμα και τις μεγαλύτερες ενέργειες που μπορεί ανθρώπινο εργαστήριο να επιταχύνει σωματίδια. Από αυτή την άποψη και μόνο οι ενέργειες αυτές αποτελούν ένα "δώρο" της φύσης για αυτούς που εργάζονται στην έρευνα των στοιχειωδών σωματιδίων.



Σχήμα 2: Αναπαράσταση του καταγισμού των αντιδράσεων που μπορούν να συμβούν όταν ένα σωματίδιο κοσμικής ακτινοβολίας εισέλθει στην γήινη ατμόσφαιρα.

Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται το πως εξελίσσονται τέτοια φαινόμενα. Αρχικά το σωματίο υψηλής ενέργειας εισέρχεται στην ατμόσφαιρα και στην συνέχεια δημιουργείται μια αλληλουχία παραγόμενων σωματίων τα οποία είτε δημιουργούν νέα σωματία με τη σειρά τους η αποδιεγείρονται. Μοιάζει δηλαδή με το φαινόμενο της χιονοστιβάδας.

Το πλεονέκτημα της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ότι λόγω των πολύ υψηλών ενεργειών σχηματίζονται ένας τεράστιος αριθμός σωματίων, με μάζες ενίοτε πολύ μεγάλες (ανάλογα με την αρχική ενέργεια). Δεύτερο πλεονέκτημα είναι ότι αυτό το φυσικό εργαστήριο παρέχεται "δωρεάν" δηλαδή χωρίς την χρήση κάποιας επιταχυντικής διάταξης. Το πρόβλημα όμως είναι ότι οτιδήποτε συμβαίνει γίνεται με μη ελεγχόμενο τρόπο κάτω από μη ελεγχόμενες συνθήκες οπότε και η επιστημονική καταγραφή των γεγονότων αυτών είναι δύσκολη.



Σχήμα 3: Φωτογραφία του εσωτερικού ενός αντιδραστήρα. Το χαρακτηριστικό μπλε φως αποδίδεται στην ακτινοβολία Cherenkov.

β) **Από πυρηνικούς αντιδραστήρες** όπου η υψηλή διαθέσιμη ενέργεια από κάθε γεγονός σχάσης οδηγεί σε αρκετά μεγάλες ροές νετρίνων, ακτίνων β και γάμα αλλά και φορτισμένων σωματίων. **Σήμερα πλέον η χρήση των αντιδραστήρων στην μελέτη στοιχειωδών σωματιδίων είναι περιορισμένη.**



Σχήμα 4: Εναέρια φωτογραφία της περιοχής όπου εδράζεται το CERN (Ευρωπαϊκό Ίδρυμα Πυρηνικών Ερευνών). Στην φωτογραφία αποδίδεται η διάμετρος του μεγαλύτερου επιταχυντή του κόσμου, του LHC (Large Hadron Collider).

γ) Το μεγαλύτερο μέρος της έρευνας στον τομέα της φυσικής των στοιχειωδών σωματίων έχει εστιάσει στην μελέτη των αποτελεσμάτων από τεράστιες επιταχυντικές διατάξεις όπως αυτή του LHC στο CERN. Αυτός είναι και ο μεγαλύτερος επιταχυντής στον κόσμο με ενέργειες που θα φτάσουν τα 7 TeV ανά δέσμη πρωτονίου. Τα στοιχειώδη σωματία παράγονται από την ενέργεια που

απελευθερώνεται κατά την σύγκρουση των δύο αντιθέτων κινούμενων πρωτονίων από τις δύο δέσμες. Η ανίχνευση τους λαμβάνει χώρα σε 4 ανεξάρτητους σταθμούς μέτρησης. Για να δοθεί λίγο η αίσθηση του μεγέθους του επιταχυντή αξίζει να αναφερθεί ότι η περιφέρειά του είναι γύρω στα 27 km.

Τρόποι ανίχνευσης

Η παραγωγή των στοιχειωδών σωματιδίων φυσικά δεν αρκεί για να μάθουμε κάτι για αυτά. Πρέπει να καταγραφούν και να προσδιοριστούν οι ιδιότητές τους όπως για παράδειγμα η μάζα τους, το φορτίο τους, ο χρόνος ζωής τους και ο τρόπος αποδιέγερσης τους.

Ο βασικός μηχανισμός λειτουργίας των περισσοτέρων ανιχνευτών βασίζεται στον ιονισμό της ύλης που προκαλείται από ταχέως κινούμενα φορτισμένα σωματίδια. Ο ιονισμός αυτός με την σειρά του προκαλεί πληθώρα φαινομένων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των σωματιδίων. Έτσι σήμερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία ανιχνευτών ανάλογα με τις πειραματικές ανάγκες. Τέτοιοι ανιχνευτές μπορεί να είναι θάλαμοι φυσαλίδων, σπινθηριστές, ανιχνευτές ημιαγωγών, ανιχνευτές αερίου κτλ. Οι ανιχνευτικοί σταθμοί των σύγχρονων πειραμάτων της φυσικής υψηλών ενεργειών περιέχουν μια μεγάλη ποικιλία ανιχνευτών με διαφορετικούς ρόλους ώστε να εξαχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη πληροφορία από κάθε γεγονός σύγκρουσης. Το θέμα της ανίχνευσης σωματιδίων θα συζητηθεί σε ξεχωριστή διάλεξη.

Στοιχειώδη σωματίδια – Εισαγωγή

Το τι ακριβώς εννοούμε με τον όρο στοιχειώδες σωματίδιο έχει αλλάξει αρκετά μέσα στα τελευταία 100 χρόνια. Αρχικά ως δομικό στοιχείο της ύλης παρουσιάστηκε το άτομο. Στην συνέχεια διαπιστώθηκε ότι το άτομο αποτελείται από έναν πολύ μικρό θετικά φορτισμένο πυρήνα όπου περιβάλλεται από ηλεκτρόνια τα οποία καταλαμβάνουν συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Αργότερα διαπιστώθηκε ότι ο πυρήνας αποτελείται από νουκλεόνια δηλαδή από πρωτόνια και νετρόνια. Οπότε ως στοιχειώδη σωματίδια θεωρούνταν τα πρωτόνια, τα νετρόνια και τα ηλεκτρόνια μαζί με τα νετρίνα που είχαν προκύψει ως αποτέλεσμα της αρχής διατήρησής της ενέργειας κατά την β αποδιέγερση. Μόλις το 1964 η εικόνα άλλαξε πάλι. Τα πρωτόνια και τα νετρόνια δεν είναι καθόλου στοιχειώδη αλλά αποδείχθηκε ότι αποτελούνται από τρία σωματίδια; τα κουαρκς.

	Γενιά			Φορτίο	Αλληλεπιδρούν με:		
	1η	2η	3η		Ισχυρές	H/M	Ασθενείς
Quarks (U)x3 χρώματα	u	c	t	+2/3	NAI	NAI	NAI
Quarks (D)x3 χρώματα	d	s	b	-1/3	NAI	NAI	NAI
Φορτισμένα Λεπτόνια	e	μ	τ	-1	OXI	NAI	NAI
Ουδέτερα λεπτόνια (νετρίνα)	ν_e	ν_μ	ν_τ	0	OXI	OXI	NAI

Δύναμη	Όνομα	Σύμβολο	Πλήθος	Φορτίο	Ισχύς
Ισχυρές	Γλουόνια	g	8	0	1
H/M	Φωτόνια	γ	1	0	10^{-2}
Ασθενείς	W και Z	W^+, W^-, Z^0	3	$\pm 1, 0$	10^{-9}

Στους πιο πάνω πίνακες συνοψίζονται τα στοιχειώδη σωματάρια όπως τα γνωρίζουμε σήμερα σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο. Ο πάνω πίνακας περιέχει όλα τα σωματάρια ύλης με σπιν 1/2 (φερμιόνια). Βλέπουμε ότι υπάρχουν 6 κουάρκ και 6 λεπτόνια. Ο δεύτερος πίνακας αναφέρεται στους φορείς των 3 από τις 4 δυνάμεις της φύσης. Δεν γίνεται αναφορά στην δύναμη της βαρύτητας όπου ο ρόλος στις αλληλεπιδράσεις των στοιχειωδών σωματιδίων είναι μικρός. Τα σωματάρια-φορείς της βαρυτικής δύναμης ονομάζονται γκραβιτόνια και έχουν σπιν 2 (μποζόνια).

Σε αυτά τα σωματάρια θα πρέπει να προστεθεί και το μποζόνιο Higgs με σπιν 0 πάριτυ θετική και φορτίο 0 το οποίο παρατηρήθηκε για πρώτη φορά πριν από έναν περίπου χρόνο στα πειράματα CMS και ATLAS στο LHC στο CERN.

Έχει ενδιαφέρον να δούμε τα διάφορα σωματάρια σε σχέση με τις αλληλεπιδράσεις στις οποίες συμμετέχουν. Βλέπουμε ότι τα κουάρκ αλληλεπιδρούν και με τις τρεις αλληλεπιδράσεις. Τα φορτισμένα λεπτόνια όπως είναι το ηλεκτρόνιο, το μιονίο και το ταυ αλληλεπιδρούν με τις ασθενείς αλληλεπιδράσεις και τις H/M ενώ τα αντίστοιχα νετρίνα του ηλεκτρονίου, του μιονίου και του ταυ αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

Παράδειγμα

Θεωρώντας ότι το πρωτόνιο και το νετρόνιο αποτελούνται από τα κουάρκ u και d δώστε την σύνθεσή τους.

Λύση:

Από τα φορτία και δεδομένου ότι αποτελούνται από τρία κουάρκ έχουμε:

p: uud

n: ddu