

## Διάλεξη 18: Καθιερωμένο πρότυπο (1978-?)

### Φορείς αλληλεπιδράσεων

| Αλληλεπίδραση | Ισχύς      | Εμβέλεια  | Φορέας              |
|---------------|------------|-----------|---------------------|
| Ισχυρή        | 1          | $\sim fm$ | g-γλουόνιο          |
| H/M           | $10^{-2}$  | $1/r^2$   | γ-φωτόνιο           |
| Ασθενής       | $10^{-9}$  | $\sim fm$ | $W^\pm, Z$ μποζόνια |
| Βαρυτική      | $10^{-38}$ | $1/r^2$   | Γκραβιτόνιο         |

Από την συστηματική μελέτη των σωματιδίων, των τρόπων αποδιέγερσης τους, και την καταγραφή των ιδιοτήτων τους μέχρι στιγμής **διαπιστώθηκε ότι τα στοιχειώδη δομικά υλικά της ύλης είναι τα κουάρκ και τα λεπτόνια**. Στο σημείο αυτό **θα πρέπει να προσθέσουμε φυσικά και τους φορείς των αλληλεπιδράσεων**.

Γνωρίζουμε βέβαια ότι ο φορέας αλληλεπίδρασης για τις η/μ δυνάμεις είναι το **φωτόνιο**. Ο ηλεκτρομαγνητισμός γενικότερα είναι από τις πλέον ολοκληρωμένες θεωρίες της φυσικής τόσο σε κλασικό επίπεδο όσο και στην κβαντομηχανική του θεώρηση.

Όσον αφορά στην **βαρυτική αλληλεπίδραση ο φορέας είναι το γκραβιτόνιο**. Αυτή η αλληλεπίδραση είναι και η ασθενέστερη και για τον λόγο αυτό, θεωρούμε με ασφάλεια ότι δεν παίζει κανέναν ρόλο στην φυσική στοιχειωδών σωματιδίων και ως εκ τούτου δεν πρόκειται να ασχοληθούμε άλλο με αυτό το θέμα.

Η ασθενής αλληλεπίδραση παρουσιάζει ιδιαίτερο ενδιαφέρον μια και όπως και η ισχυρή διαθέτει πολύ μικρή εμβέλεια και παίζει σημαντικό ρόλο στην αποδιέγερση ασταθών πυρηνικών συστημάτων και πολλών σωματιδίων (όπως για παράδειγμα η αποδιέγερση των παράδοξων σωματιδίων). **Σε αντίθεση όμως με την ισχυρή αλληλεπίδραση η ασθενής αλληλεπίδραση δεν διαμορφώνει δέσμιες καταστάσεις οπότε δεν υπάρχει κάποιο ασφαλές κριτήριο προσδιορισμού της εμβέλειας της αλληλεπίδρασης**. Για τον λόγο αυτό η πρόβλεψη της μάζας του αντίστοιχου φορέα δεν μπορεί να γίνει με τον τρόπο του Yukawa. Έτσι πολλά χρόνια η επιστημονική κοινότητα επιδόθηκε σε έναν αγώνα για τον προσδιορισμό της μάζας των φορέων της ασθενούς αλληλεπίδρασης όπου τελικά προβλέφθηκε με εξαιρετική ακρίβεια μέσω της θεωρίας ενοποίησης των η/μ και των ασθενών αλληλεπιδράσεων. Ο θεωρητικός προσδιορισμός της μάζας των **ενδιάμεσων μποζονίων W και Z που αποτελούν τους φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης** είναι από τα ομορφότερα παραδείγματα συμφωνίας θεωρίας και πειράματος. Πράγματι μετά από αρκετά χρόνια ο Carlo Rubbia και η ομάδα του επιβεβαίωσαν πλήρως τις θεωρητικά προβλεπόμενες μάζες των ενδιάμεσων μποζονίων κερδίζοντας παράλληλα το βραβείο Nobel.

Για τις ισχυρές αλληλεπιδράσεις η πρόβλεψη του Yukawa ήταν ότι τα πρωτόνια και τα νετρόνια αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης με αντίστοιχο φορέα τα μεσόνια π. Με την ανακάλυψη και την τελική παραδοχή όμως ότι τα νετρόνια και τα πρωτόνια δεν είναι πλέον στοιχειώδη σωματίδια αλλά τα ίδια αποτελούνται από δέσμιες καταστάσεις των κουάρκ διατυπώθηκε ένα εύλογο ερώτημα. "Αφού λοιπόν τα νετρόνια και τα πρωτόνια δεν είναι στοιχειώδη σωματίδια μήπως η αλληλεπίδρασή τους δεν αποτελεί την πιο άμεση εκδήλωση της ισχυρής αλληλεπίδρασης δεδομένου μάλιστα ότι

γίνεται μέσω ενός μεσονίου το οποίο αποτελείται από ένα κουάρκ και ένα αντι-κουάρκ;". "Μήπως δηλαδή η έλξη πρωτονίου και νετρονίου αποτελεί μια πιο σύνθετη εκδήλωση των ισχυρών αλληλεπιδράσεων όπως ακριβώς σχετίζονται οι δυνάμεις Van der Waals με την η/μ αλληλεπίδραση;" Επομένως γρήγορα έγινε κατανοητό ότι προκειμένου να "δούμε" τις βασικές αρχές της αλληλεπίδρασης θα πρέπει να εστιάσουμε στα δομικά υλικά και στο πως αυτά αλληλεπιδρούν και όχι σε σύνθετους σχηματισμούς όπως είναι τα πρωτόνια και τα νετρόνια. Το σωστό λοιπόν ερώτημα είναι: **"Ποιο είναι εκείνο το σωματίδιο το οποίο είναι ο φορέας της ισχυρής αλληλεπίδρασης και ανταλλάσσεται μεταξύ των κουάρκ. Ο φορέας λοιπόν αυτός είναι το γλουόνιο. Τα γλουόνια μεταφέρουν χρώμα και για τον λόγο αυτό όπως και τα κουάρκ δεν μπορούν να υπάρξουν ως ελεύθερα σωματίδια. Μπορούν όμως να υπάρξουν ως άχρωμες μπάλες γλουονίων (glueballs) αλλά και μέσα στα αδρόνια (αδρόνια= τα σωματίδια εκείνα τα οποία αποτελούνται από κουάρκ. Δηλαδή, τα μεσόνια και τα βαρυόνια). Σήμερα μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα από την μελέτη σκέδασης πρωτονίων σε εξαιρετικά υψηλές ενέργειες ότι τα γλουόνια υπάρχουν και μάλιστα έχουν σαφώς παρατηρηθεί δομές jet όπου μπορούν να εξηγηθούν μέσω της αποδιέγερσης μπαλών γλουονίων και κουάρκ.**

## Λεπτόνια

| $l$        | $Q$ | $L_e$ | $L_\mu$ | $L_\tau$ |
|------------|-----|-------|---------|----------|
| $e$        | -1  | 1     | 0       | 0        |
| $\nu_e$    | 0   | 1     | 0       | 0        |
| $\mu$      | -1  | 0     | 1       | 0        |
| $\nu_\mu$  | 0   | 0     | 1       | 0        |
| $\tau$     | -1  | 0     | 0       | 1        |
| $\nu_\tau$ | 0   | 0     | 0       | 1        |

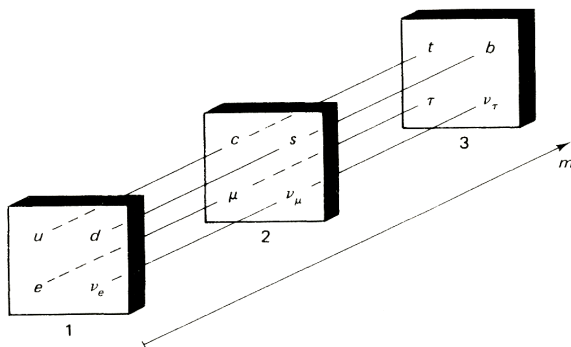
Πέραν των φορέων των αλληλεπιδράσεων σύμφωνα με την τρέχουσα άποψη για το καθιερωμένο πρότυπο η ύλη μας αποτελείται από λεπτόνια και κουάρκς. Πιο πάνω υπάρχει ένας συνοπτικός πίνακας των λεπτονίων όπου παρουσιάζονται οι κβαντικοί αριθμοί και το φορτίο τους. Φυσικά όλα αυτά τα έχουμε δει προηγουμένως και απλώς στο σημείο αυτό θα πρέπει να σημειωθεί ότι στον πίνακα αυτό παρουσιάζονται μόνο τα σωματίδια των λεπτονίων. Τα αντίστοιχα αντισωματίδια έχουν αντίθετους κβαντικούς αριθμούς και προφανώς αντίθετο φορτίο. Δεδομένου ότι ο παραπάνω πίνακας περιέχει έξι λεπτόνια χωρισμένα σε τρεις διαφορετικές γενιές αυτό σημαίνει ότι αν λάβουμε υπόψη και τα αντισωματίδια τότε έχουμε συνολικά 12 λεπτόνια.

## Κουάρκ

| q | Q    | D  | U | S  | C | B  | T |
|---|------|----|---|----|---|----|---|
| d | -1/3 | -1 | 0 | 0  | 0 | 0  | 0 |
| u | 2/3  | 0  | 1 | 0  | 0 | 0  | 0 |
| s | -1/3 | 0  | 0 | -1 | 0 | 0  | 0 |
| c | 2/3  | 0  | 0 | 0  | 1 | 0  | 0 |
| b | -1/3 | 0  | 0 | 0  | 0 | -1 | 0 |
| t | 2/3  | 0  | 0 | 0  | 0 | 0  | 1 |

Όπως και στην περίπτωση των λεπτονίων έτσι και για τα κουάρκ υπάρχουν έξι "γεύσεις" και αντίστοιχα τρεις γενιές από αυτά. Τα αντικουάρκ έχουν αντίθετο πρόσημο στο φορτίο αλλά και αντίθετο πρόσημο στους υπόλοιπους κβαντικούς αριθμούς. Ένα επιπλέον χαρακτηριστικό που παρουσιάζουν τα κουάρκ είναι ο κβαντικός αριθμός του χρώματος. Έτσι έχουμε 6 κουάρκ. Αν λάβουμε υπόψιν τα αντίστοιχα αντισωματρία έχουμε 12 και τέλος λαμβάνοντας υπόψη ότι για κάθε κουάρκ ή αντικουάρκ έχουμε τρία χρώματα αυτό μας κάνει συνολικά 36 διαφορετικά κουάρκ.

## Μάζες λεπτονίων και κουάρκ



Σχήμα 1: Γραφική αναπαράσταση του διαχωρισμού των στοιχειωδών σωματιδίων σε τρεις διαφορετικές γενιές ανάλογα με την μάζα τους

Μέχρι στιγμής αναφέρθηκε αρκετές φορές ο διαχωρισμός των σωματιδίων σε "γενιές". Από το παραπάνω σχήμα φαίνεται τελικά ότι οι διαφορετικές γενιές στοιχειωδών σωματιδίων παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές στις μάζες τους. Ο όρος γενιά προφανώς προέκυψε από το γεγονός ότι βαρύτερα σωματίνια παράγονται πιο δύσκολα - με την έννοια ότι απαιτούνται ολοένα και ισχυρότερες επιταχυντικές διατάξεις - επομένως τόσο περισσότερο καθυστερεί η πειραματική επιβεβαίωση. Πράγματι στον πιο κάτω πίνακα μπορεί εύκολα κανείς να διακρίνει τις διαφορετικές γενιές λεπτονίων και κουάρκ ότι παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές ως προς τις μάζες τους.

| Λεπτόνια                 | Μάζα                | Κουάρκ   | Μάζα               |
|--------------------------|---------------------|----------|--------------------|
| $\nu_e$                  | $<2 \times 10^{-6}$ | <b>u</b> | 2                  |
| $\nu_\mu$                | $<0.2$              | <b>d</b> | 5                  |
| $\nu_\tau$               | $<18$               | <b>s</b> | 100                |
| <b>e</b>                 | 0.511               | <b>c</b> | 1200               |
| <b><math>\mu</math></b>  | 106                 | <b>b</b> | 4200               |
| <b><math>\tau</math></b> | 1777                | <b>t</b> | $1.74 \times 10^5$ |

## Σύνοψη

|                             | Γενιά   |           |            | Φορτίο | Αλληλεπιδρούν με: |     |          |
|-----------------------------|---------|-----------|------------|--------|-------------------|-----|----------|
|                             | 1η      | 2η        | 3η         |        | Ισχυρές           | H/M | Ασθενείς |
| Quarks (U)x3 χρώματα        | u       | c         | t          | +2/3   | ΝΑΙ               | ΝΑΙ | ΝΑΙ      |
| Quarks (D)x3 χρώματα        | d       | s         | b          | -1/3   | ΝΑΙ               | ΝΑΙ | ΝΑΙ      |
| Φορτισμένα Λεπτόνια         | e       | $\mu$     | $\tau$     | -1     | ΟΧΙ               | ΝΑΙ | ΝΑΙ      |
| Ουδέτερα λεπτόνια (νετρίνα) | $\nu_e$ | $\nu_\mu$ | $\nu_\tau$ | 0      | ΟΧΙ               | ΟΧΙ | ΝΑΙ      |

Τα στοιχειώδη σωματίδια που αποτελούν τα συστατικά του κόσμου όπως είναι μέχρι σήμερα γνωστά σύμφωνα με το καθιερωμένο πρότυπο δίνονται για άλλη μια φορά στον πιο πάνω πίνακα. Στις τρεις τελευταίες στήλες δίνεται ο τρόπος αλληλεπίδρασης της κάθε κατηγορίας σωματιδίων. Στα παραπάνω στοιχειώδη σωματίδια θα πρέπει να προστεθούν και οι δώδεκα φορείς αλληλεπιδράσεων (βλ πίνακα πιο κάτω)

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

**Στα 60 αυτά σωματίδια θα πρέπει να προστεθεί και το σωματίδιο Higgs το οποίο είναι θεμελιώδους σημασίας για την επιβίωση του καθιερωμένου προτύπου. Είναι μάλιστα ένας από τους σημαντικούς λόγους για τους οποίους δημιουργήθηκε το LHC στο**

CERN. Αρκεί και μόνο να αναφερθεί ότι **ο μηχανισμός του καθιερωμένου προτύπου που προσδίδει τις παρατηρούμενες μάζες στα μέχρι τώρα γνωστά στοιχειώδη σωματάρια προϋποθέτει την ύπαρξη του σωματιδίου Higgs. Πολύ πρόσφατα (2012) το σωματάριο Higgs παρατηρήθηκε** και μάλιστα με ιδιότητες σε πλήρη συμφωνία με αυτές που είχαν προβλεφθεί πολύ νωρίτερα από θεωρητικούς υπολογισμούς. Έτσι σήμερα είμαστε στην ευχάριστη θέση να μιλάμε **για την πειραματική επιβεβαίωση του σωματιδίου Higgs με μάζα 126 GeV σπιν 0 και πάριτη θετική.**

Η πειραματική επιβεβαίωση της ύπαρξης του σωματιδίου Higgs σαφέστατα ισχυροποίησε την θέση του καθιερωμένου μοντέλου στο γενικότερο πλαίσιο της φυσικής στοιχειωδών σωματιδίων. Βέβαια από την πλευρά της θεωρητικής αλλά και πειραματικής αναζήτησης και έρευνας τίποτα δεν έχει τελειώσει. Το αντίθετο μάλιστα, θα έλεγε κάποιος ότι το ταξίδι μόλις ξεκίνησε και ότι έχουμε κάποιες καλές ενδείξεις ότι βρισκόμαστε σε σωστό δρόμο.

## Παραδείγματα

1) Το μποζόνιο Z έχει μάζα  $92 \text{ GeV}/c^2$ . Με δεδομένη την μάζα του να εκτιμηθεί η εμβέλεια της ασθενούς αλληλεπίδρασης.

$$\Delta E \cdot \Delta T \geq \hbar/2 \Rightarrow \Delta T \simeq \frac{\hbar}{(2 \cdot \Delta E)}$$

$$\hbar \cdot c = 197 \text{ MeV} \cdot \text{fm} \Rightarrow \hbar = (1/c) \cdot 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}$$

$$\Delta T \simeq \frac{(1/c) \cdot 0.197 \text{ GeV} \cdot \text{fm}}{2 \cdot 92 \text{ GeV}} \simeq (1/c) \cdot 10^{-3} \text{ fm}$$

$$\Delta x = c \cdot \Delta T \simeq 10^{-3} \text{ fm}$$

2) Να αποδειχθεί ότι σύμφωνα με το πρότυπο των κουάρκ δεν μπορεί να υπάρξει μεσόνιο με  $Q=+1$  και  $S=-1$  όπως επίσης με:  $Q=-1$  και  $S=+1$ .

Απάντηση:

Τα μεσόνια αποτελούν δέσμιες καταστάσεις ενός κουάρκ και ενός αντικουάρκ.

Για την πρώτη περίπτωση  $S=-1$  σημαίνει ότι περιέχει ένα κουάρκ  $s$  το οποίο έχει φορτίο  $Q=-1/3$ .

Επομένως προκειμένου να έχουμε ένα μεσόνιο θα πρέπει να προσθέσουμε ένα αντικουάρκ. Από τον πιο πάνω πίνακα των ιδιοτήτων των κουάρκ παρατηρούμε όμως ότι όλα τα αντικουάρκ έχουν φορτίο  $Q=1/3$  ή  $-2/3$ .

Αυτό σημαίνει ότι το φορτίο ενός μεσονίου με  $S=-1$  μπορεί να είναι  $Q=0$  ή  $Q=-1$ . Δεν υπάρχει δηλαδή πιθανότητα να έχουμε  $Q=+1$ .

Ομοίως και για την δεύτερη περίπτωση.