

Διάλεξη 14: Μεσόνια και αντισωματίδια

Μεσόνια

Όπως αναφέρθηκε προηγουμένως (διάλεξη 13) η έννοια των στοιχειωδών σωματιών άλλαξε πολλές φορές μέχρι σήμερα. Μέχρι το 1934 ο κόσμος των στοιχειωδών σωματιδίων περιλάμβανε τα πρωτόνια και τα νετρόνια τα οποία σχηματίζουν τον πυρήνα του ατόμου γύρω από τον οποίο υπάρχουν τα ηλεκτρόνια σε συγκεκριμένες ενεργειακές στάθμες. Το βασικό ερώτημα που επιχείρησε να λύσει τότε ο Yukawa ήταν: "ποια είναι η δύναμη εκείνη που κρατά ενωμένα τα νουκλεόνια ώστε να σχηματίζουν διάφορες δέσμιες καταστάσεις παρά την άπωση Coulomb".

Από την ύπαρξη και μόνο των πυρήνων συμπεραίνει κάποιος ότι η δύναμη αυτή είναι κατά πολύ ισχυρότερη της H/M δύναμης. Επιπλέον, σχεδόν όλη η εμπειρία που διαθέτει ο άνθρωπος από την καθημερινή του ζωή οφείλεται σε αλληλεπιδράσεις H/M φύσεως και της βαρύτητας. Επομένως μια τόσο ισχυρή δύναμη θα έπρεπε να είναι πολύ έντονα αντιληπτή εκτός εάν η εμβέλεια μιας τέτοιας δύναμης είναι τόσο μικρή ώστε να μην "παίζει" κανένα απολύτως ρόλο στον μακρόκοσμο. Με το πιο πάνω σκεπτικό δόθηκε αμέσως η εξήγηση για την απουσία της **ισχυρής αλληλεπίδρασης** στην καθημερινή μας ζωή. Πρόκειται δηλαδή για μια **ισχυρή δύναμη η οποία έχει πολύ μικρή εμβέλεια (~fm)**. Μία δεύτερη σκέψη που οδήγησε τον Yukawa στην πρόβλεψη της ύπαρξης των μεσονίων οφείλεται στην γενική αποδοχή-σκέψη ότι οποιαδήποτε μορφή δύναμης σχετίζεται με τον αντίστοιχο φορέα. Είναι γνωστό ότι ο φορέας των H/M αλληλεπιδράσεων είναι το φωτόνιο. Παρομοίως στην περίπτωση των ασθενών αλληλεπιδράσεων κατά τον Yukawa θα πρέπει να υπάρχει ένας αντίστοιχος φορέας του οποίου η μάζα μπορεί να βρεθεί ως εξής:

Εφόσον η αλληλεπίδραση δύο νουκλεονίων γίνεται μέσω ανταλλαγής σωματιών η αρχή διατήρησης της ενέργειας παραβιάζεται κατά ποσότητα ίση με την ενέργεια μάζας των παραγόμενων σωματιών. Η παραβίαση αυτή δεν επιτρέπεται όμως να είναι μεγαλύτερη από αυτή που επιτρέπει η αρχή απροσδιοριστίας του Heisenberg.

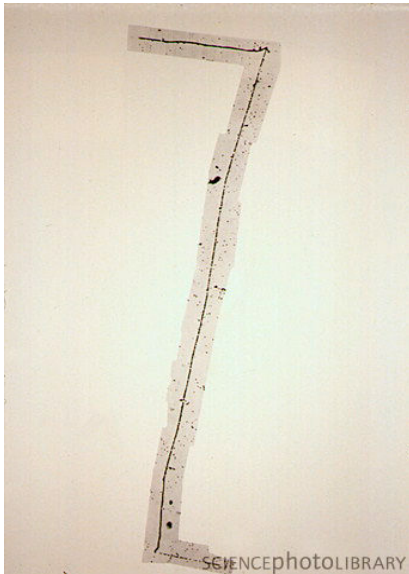
$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

$$\Delta t \cdot c = d \approx 1 \text{ fm} \Rightarrow \Delta t = \frac{d}{c}$$

όπου θεωρήσαμε ότι η μέγιστη ταχύτητα είναι αυτή του φωτός και για την απόσταση d θεωρήσαμε την τυπική διάσταση του 1 fm. Αν μετατρέψουμε την ενέργεια σε μάζα έχουμε από τις παραπάνω εξισώσεις:

$$m_{\pi} c^2 \cdot \Delta t \approx \frac{\hbar}{2} \Rightarrow m_{\pi} c^2 = \frac{\hbar c}{2d} \Rightarrow m_{\pi} c^2 = \frac{197.3 \text{ MeV fm}}{2 \cdot 1 \text{ fm}} \approx 100 \text{ MeV}$$

δηλαδή περίπου 200 φορές η μάζα του ηλεκτρονίου και 9 φορές λιγότερο από την μάζα του πρωτονίου. Λόγω ακριβώς της πρόβλεψης αυτής τα συγκεκριμένα σωματίδια-φορείς της ισχυρής αλληλεπίδρασης ονομάστηκαν **μεσόνια**.



Σχήμα 1: Ίχνος σε φωτογραφικό υλικό της αποδιέγερσης ενός μεσονίου π^- το οποίο εισέρχεται από κάτω δεξιά. Όταν το μεσόνιο π^- αποδιεγείρεται αποδίδει ένα μιονίο και ένα αντινετρίνο. Στην συνέχεια το μιονίο αποδιεγείρεται και αυτό με τη σειρά του αποδίδοντας ένα ηλεκτρόνιο, ένα αντινετρίνο (e^-) και ένα νετρίνο (μ^-). Τα νετρίνα δεν καταγράφονται λόγω απουσίας ηλεκτρικού φορτίου.

Αυτή ήταν και μια από τις πρώτες προβλέψεις σωματίου που ακόμα δεν είχε πειραματικά επιβεβαιωθεί.

Βέβαια το νέο αυτό σωματίδιο δεν άργησε καθόλου να βρεθεί. Μερικά χρόνια αργότερα καταγράφηκε αυτό το σωματίδιο με μάζα γύρω στα $135 \text{ MeV}/c^2$. Μάλιστα αρχικά δημιουργήθηκε αρκετά μεγάλη σύγχυση γύρω από το θέμα αυτό διότι τελικώς τα μεσόνια αποδιεγείρονται σε ένα μιονίο και σε ένα αντινετρίνο (η μια από τις τρεις περιπτώσεις αποδιέγερσης) και επιπλέον τα σωματίδια τα οποία προέβλεπε η θεωρία του Yukawa είναι τρία: π^0 , π^+ και π^- .

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad \mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu \quad \mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

Στην πιο πάνω εικόνα παρατηρείται το ίχνος σε φωτογραφικό υλικό μια αποδιέγερσης ενός π^- μεσονίου. Χωρίς να μπορούμε σε λεπτομέρειες αρκεί να πούμε ότι τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν ισχυρά με τη ύλη και αποδιεγείρονται σύμφωνα με τις πιο πάνω εξισώσεις σε ένα μιονίο και σε ένα νετρίνο ή αντινετρίνο. Στη συνέχεια το μιονίο που δημιουργείται αποδιεγείρεται και αυτό με την σειρά μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης σε ένα ηλεκτρόνιο ένα αντινετρίνο ηλεκτρονίου και ένα νετρίνο μιονίου. Τα μεσόνια π ή πιόνια δεν είναι τα μόνα μεσόνια. Αργότερα ανακαλύφθηκαν και άλλα τα οποία είχαν και μεγαλύτερες μάζες. Για να θυμηθούμε λίγο τον πίνακα των στοιχειωδών σωματιδίων της προηγούμενης διάλεξης (13) θα πρέπει σε αυτό το σημείο απλώς να αναφερθεί ότι **τα μεσόνια αποτελούνται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ** και δεν είναι με την αυστηρή έννοια του όρου στοιχειώδη σωματίδια. Αντίθετα τα προϊόντα της αποδιέγερσης τους είναι λεπτόνια τα οποία είναι στοιχειώδη σωματίδια. Τα παραπάνω

σχήματα αποδιέγερσης μπορούν να εξηγηθούν με περισσότερη λεπτομέρεια αλλά αυτό θα γίνει αργότερα όταν μιλήσουμε για συμμετρίες και νόμους διατήρησης.

Αντισωματίδια

Το επόμενο παράδειγμα στον τομέα των στοιχειωδών σωματιδίων όπου η θεωρητική πρόβλεψη προηγείται της πειραματικής παρατήρησης είναι εκείνο των **αντισωματιδίων**. Ο Dirac στην προσπάθειά του να συνδυάσει την θεωρία της σχετικότητας με την κβαντομηχανική οδηγήθηκε αρχικά σε ένα πολύ "περίεργο" αποτέλεσμα σύμφωνα με το οποίο ότι για κάθε ελεύθερο ηλεκτρόνιο το οποίο ακολουθεί την σχετικιστική εξίσωση ενέργειας:

$$E^2 - (\vec{p}c)^2 = m^2 c^4$$

θα πρέπει να θεωρηθούν και οι δύο μαθηματικά σωστές λύσεις

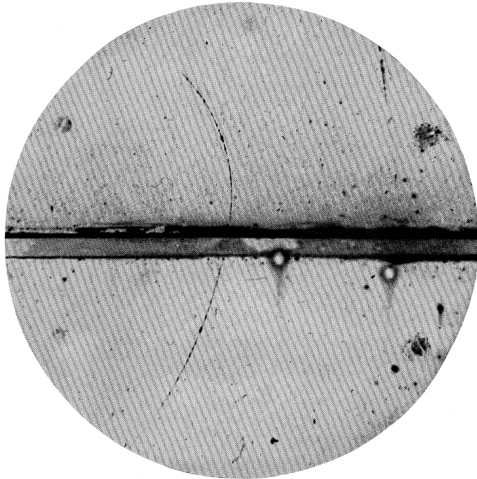
$$E = \pm \sqrt{(\vec{p}c)^2 + m^2 c^4}$$

Αυτό φυσικά ήταν ένα τεράστιο πρόβλημα διότι εφόσον υπάρχουν διαθέσιμες και οι δύο ενεργειακές καταστάσεις θα έπρεπε κάθε ηλεκτρόνιο με θετική ενέργεια να μεταπίπτει σε μια κατάσταση αρνητικής ενέργειας με ταυτόχρονη απελευθέρωση ενέργειας. Προκειμένου λοιπόν ο Dirac να "σώσει" την εξίσωσή του θεώρησε ότι αυτές οι στάθμες αρνητικής ενέργειας είναι ήδη κατειλημμένες από μια θάλασσα ηλεκτρονίων και λόγω της απαγορευτικής αρχής του Pauli δεν μπορεί να γίνει καμία τέτοια μετάπτωση. Αν τώρα στο σύστημα δοθεί αρκετή ενέργεια ώστε να "τραβήξουμε" ένα ηλεκτρόνιο από αυτή την θάλασσα τότε δημιουργείται ένα έλλειμμα αρνητικού φορτίου εκεί δηλαδή ένα θετικό φορτίο. Επίσης δημιουργείται ένα έλλειμμα αρνητικής ενέργειας δηλαδή θετική ενέργεια. Με άλλα λόγια μια "τρύπα" στην θάλασσα ηλεκτρονίων του Dirac αντιστοιχεί σε ένα σωματίο με θετικό φορτίο και θετική ενέργεια. Το πρόβλημα εκείνη την εποχή ήταν ότι ένα τέτοιο γνωστό σωματίο ήταν το πρωτόνιο με μάζα όμως 2000 φορές μεγαλύτερη από αυτή του ηλεκτρονίου.

Λίγο αργότερα το μυστήριο λύθηκε με την ανακάλυψη του ποζιτρονίου του αντισωματίου του ηλεκτρονίου (Anderson). Μάλιστα αργότερα μια πολύ πιο ελκυστική θεωρία από αυτή της θάλασσας των ηλεκτρονίων δημιουργήθηκε, όπου με άμεσο τρόπο οι λύσεις με αρνητική ενέργεια μπορούσαν να εκφραστούν ως λύσεις θετικής ενέργειας ενός διαφορετικού σωματίου: του **ποζιτρονίου**.

Η γενικότερη θεώρηση των παραπάνω επιχειρημάτων επιβάλλει ότι για κάθε σωματίο υπάρχει το αντίστοιχο αντισωματίο το οποίο έχει ακριβώς το ίδιο σύμβολο με το αντίστοιχο σωματίο αλλά με μία παύλα από πάνω.

Πολλές φορές τα σωματίδια διαχωρίζονται από τα αντίστοιχα αντισωματίδια απλώς από το δείκτη πρόσημου του φορτίου του. Τέτοια παραδείγματα είναι το ηλεκτρόνιο (e^-) με το ποζιτρονιο (e^+) ή τα μιονία μ^- και μ^+ . Φυσικά το τι λέμε σωματίο και τι αντισωματίο είναι αρκετά αυθαίρετο και σίγουρα σχετίζεται με το γεγονός ότι ο κόσμος είναι γεμάτος από ηλεκτρόνια ενώ διαθέτει πολύ λίγα ποζιτρόνια.



Σχήμα 2: Ένα ποζιτρόνιο εισέρχεται από το κάτω μέρος της φωτογραφίας εντός ενός μαγνητικού πεδίου. Στο μέσο του θαλάμου νέφωσης υπάρχει φύλλο μολύβδου (6mm) όπου το ποζιτρόνιο χάνει μέρος της ενέργειας του. Για τον λόγο αυτό η καμπυλότητα της τροχιάς του είναι κατά πολύ μεγαλύτερη (μικρότερη ακτίνα) μετά την διέλευση από τον μόλυβδο.

Πείραμα Anderson

Η πρώτη παρατήρηση του ποζιτρονίου έγινε το 1933 από τον Anderson στο Caltech (California Institute of Technology) των ΗΠΑ. Αρχικά ο Anderson παρατήρησε την διέλευση ενός θετικά φορτισμένου σωματιδίου. **Το πρόσημο του φορτίου προκύπτει από την φορά του μαγνητικού πεδίου ($B=1.5\text{ T}$)** που για την συγκεκριμένη φωτογραφία έχει κατεύθυνση προς το εσωτερικό της σελίδας και από την φορά στην καμπυλότητα της τροχιάς του σωματιδίου. **Το σημείο εισόδου διαχωρίστηκε από το σημείο εξόδου από την απλή παρατήρηση της μεταβολής της καμπυλότητας της τροχιάς καθώς το σωματίδιο διέρχεται μέσα από ένα φύλλο μολύβδου πάχους 6 mm.** Όπως φαίνεται στο σχήμα 2 η τροχιά του σωματιδίου παρουσιάζει μικρότερη καμπυλότητα στο κάτω μέρος από ότι στο άνω μέρος. Αυτό αντίστοιχα σημαίνει ότι στο κάτω μέρος η ταχύτητα του θετικά φορτισμένου σωματιδίου ήταν κατά πολύ μεγαλύτερη από ότι στο άνω μέρος. Ένα τρίτο σημείο παρατήρησης είναι ότι η απώλεια ενέργειας κατά την διέλευση του σωματιδίου από τον μόλυβδο. **Η απώλεια ενέργειας αυτή είναι αντίστοιχη με την διέλευση ενός θετικά φορτισμένου σωματιδίου με μάζα και φορτίο ίσο (σε απόλυτη τιμή) με αυτό του ηλεκτρονίου και με ενέργεια 63 MeV. Μετά την έξοδο από τον μόλυβδο η ενέργεια του σωματιδίου υπολογίστηκε από την καμπυλότητα της τροχιάς του ίση με 23 MeV.**

Παράδειγμα

Υπολογίστε την ακτίνα της τροχιάς του ποζιτρονίου που για πρώτη φορά παρατήρησε ο Anderson για μαγνητικό πεδίο $B=1.5 \text{ T}$ και για τις δύο ενέργειες των 63 MeV και 23 MeV . Δηλαδή πριν και μετά από την διέλευση του σωματιδίου από το φύλλο μολύβδου.

$$B|u|q = \frac{mu^2}{R} \Rightarrow BqR = mu \Rightarrow p = BqR \Rightarrow R = \frac{p}{Bq}$$

Από την ειδική θεωρία της σχετικότητας έχουμε (εδώ θα δουλέψουμε στο SI):

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - (m_0c^2)^2}}{c} = \frac{\sqrt{(63 + 0.511)^2 - 0.511^2} \text{ MeV}}{c} = 63.5 \frac{\text{MeV}}{c} = \frac{63.5 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$p = 3.4 \cdot 10^{-20} \text{ kgr(m/s)}$$

ομοίως για 23 MeV έχουμε:

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - (m_0c^2)^2}}{c} = \frac{\sqrt{(23 + 0.511)^2 - 0.511^2} \text{ MeV}}{c} = 23.5 \frac{\text{MeV}}{c} = \frac{23.5 \cdot 10^6 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}$$

$$p = 1.26 \cdot 10^{-20} \text{ kgr(m/s)}$$

$$\text{Για } 63 \text{ MeV} : R = \frac{p}{Bq} = \frac{3.4 \cdot 10^{-20} \text{ kgr(m/s)}}{1.5 \text{ T} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0.14 \text{ m}$$

$$\text{Για } 23 \text{ MeV} : R = \frac{p}{Bq} = \frac{1.26 \cdot 10^{-20} \text{ kgr(m/s)}}{1.5 \text{ T} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ C}} = 0.05 \text{ m}$$

Πράγματι αυτές είναι και οι ακτίνες των τροχιών που παρατήρησε ο Anderson στο σχήμα 2.

Μετά την ανακάλυψη του ποζιτρονίου παρατηρήθηκαν τα αντισωματία του πρωτονίου του νετρονίου και όλων των μέχρι τότε γνωστών σωματίων.

Το κάθε αντισωματίο έχει την ίδια μάζα και ακριβώς αντίθετο φορτίο από το αντίστοιχο σωματίο. Επιπλέον έχει το ίδιο σπιν και αντίθετους τους κβαντικούς αριθμούς από αυτούς του σωματίου. Επίσης πολλά γνωστά σωματία όπως το φωτόνιο (γ) ή το π^0 ταυτίζονται με το αντίστοιχο αντισωματίο.

Σύμφωνα λοιπόν με τον ορισμό που δώσαμε εμείς συνέβη να ζούμε σε έναν κόσμο ύλης. Το γιατί τελικώς από την αρχή δημιουργίας του σύμπαντος επικράτησε η ύλη επικράτησε έναντι της αντιύλης δεν είναι ακόμα και σήμερα τόσο εύκολο ερώτημα να απαντηθεί. Σίγουρα όμως ξέρουμε ότι η αντιύλη ή αλλιώς τα αντισωματίδια όταν έρθουν σε επαφή με την ύλη ή τα αντίστοιχα σωματίδια εξαϋλώνονται (με μεγάλη πιθανότητα) με την μετατροπή της μάζας τους σε φωτόνια.

Στο σημείο αυτό θα πρέπει να αναφερθεί η **συμμετρία διασταύρωσης (crossing symmetry)**

$$A + B \rightarrow C + D$$

$$A \rightarrow \bar{B} + C + D$$

$$A + \bar{C} \rightarrow \bar{B} + D$$

$$\bar{C} + \bar{D} \rightarrow \bar{A} + \bar{B}$$

Σύμφωνα με την συμμετρία διασταύρωσης σε μια αντίδραση σωματιδίων ή σε μια διαδικασία αποδιέγερσης μπορούμε να μεταφέρουμε τα μέλη της εξίσωσης από το δεξί μέλος στο αριστερό και αντίστροφα μετατρέποντας κάθε φορά το μεταφερόμενο σωματίο στο αντίστοιχο αντισωματίο. Αυτό φυσικά μπορεί να γίνει στην πράξη αν και μόνο αν είναι ενεργειακά επιτρεπτό. Δηλαδή μια αποδιέγερση που είναι επιτρεπτή σύμφωνα με την συμμετρία διασταύρωσης δεν θα παρατηρηθεί ποτέ αν οδηγεί σε βαρύτερα προϊόντα.

Ένα ίσως υπερβολικό παράδειγμα εφαρμογής της συμμετρίας διασταύρωσης είναι το εξής:

$$\gamma + e^- \rightarrow \gamma + e^-$$

$$e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

όπου η σκέδαση Compton σχετίζεται με την εξαϋλωση ενός ηλεκτρονίου και ενός ποζιτρονίου.