



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική

Ενότητα: Σύγχρονη Φυσική

Βαρουτάς Δημήτρης
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Πληροφορικής και Τηλεπικοινωνιών

Φυσική των στοιχειωδών σωματιδίων και κοσμολογία

Τα άτομα ως στοιχειώδη σωματίδια

- **Άτομα**
 - Από το επίθετο «άτομος», που σημαίνει αδιαίρετος.
 - Οι αρχαίοι Έλληνες πίστευαν ότι τα άτομα ήταν τα απολύτως βασικά συστατικά της ύλης που δεν επιδέχονταν περαιτέρω διαίρεση.
- **Τα συστατικά των ατόμων**
 - Πρωτόνια, νετρόνια, και ηλεκτρόνια.
 - Μετά το 1932, τα σωματίδια αυτά θεωρούνταν ως στοιχειώδη.
 - Οι επιστήμονες θεωρούσαν ότι η ύλη αποτελείται από αυτά τα σωματίδια.

Εισαγωγή

Ανακάλυψη νέων σωματιδίων

- **Νέα σωματίδια**
 - Από τις αρχές της δεκαετίας του 1940 και μετά, σε πειράματα συγκρούσεων υψηλής ενέργειας μεταξύ γνωστών σωματιδίων ανακαλύφθηκαν πολλά «νέα» σωματίδια.
 - Τα νέα αυτά σωματίδια είναι ασταθή με πολύ σύντομη ημίσεια ζωής.
 - Μέχρι σήμερα έχουν καταγραφεί περισσότερα από 300 τέτοια σωματίδια.
- Έπρεπε να βρεθεί μια συστηματική κατάσταση των χαρακτηριστικών των σωματιδίων που θα βοηθούσε στην καλύτερη κατανόησή τους.

Εισαγωγή

Στοιχειώδη σωματίδια – Κουάρκ

- Οι φυσικοί αναγνωρίζουν πλέον ότι τα περισσότερα σωματίδια αποτελούνται από **κουάρκ**.
 - Εξαιρέσεις αποτελούν τα φωτόνια, τα ηλεκτρόνια, και μερικά ακόμα σωματίδια.
- Το μοντέλο των κουάρκ περιόρισε το μεγάλο πλήθος των σωματιδίων.
- Το μοντέλο των κουάρκ προέβλεψε με επιτυχία την ύπαρξη νέων συνδυασμών κουάρκ, οι οποίοι στη συνέχεια ανακαλύφθηκαν και πειραματικά.

Ενότητα Σ8.1

Θεμελιώδεις δυνάμεις

- Όλα τα φυσικά φαινόμενα μπορούν να περιγραφούν με βάση τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων:
 - την *πυρηνική δύναμη*,
 - την *ηλεκτρομαγνητική δύναμη*,
 - την *ασθενή δύναμη*,
 - τη *βαρυτική δύναμη*.
- Οι δυνάμεις αναφέρονται σε φθίνουσα σειρά έντασης.

Ενότητα Σ8.1

Πυρηνική δύναμη

- Είναι μια ελκτική δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ νουκλεονίων.
- Είναι η πιο ισχυρή από τις θεμελιώδεις δυνάμεις.
- Έχει πολύ μικρή εμβέλεια.
 - Μικρότερη από 10^{-15} m.
 - Σε μεγαλύτερες αποστάσεις, είναι αμελητέα.

Ενότητα Σ8.1

Ηλεκτρομαγνητική δύναμη

- Συγκρατεί τα ηλεκτρόνια στους πυρήνες για να σχηματίσουν τα άτομα, και συνδέει τα άτομα μεταξύ τους για να σχηματίσουν τα μόρια.
- Είναι περίπου 10^2 φορές ασθενέστερη από την πυρηνική δύναμη.
- Το μέτρο αυτής της δύναμης μεγάλης εμβέλειας είναι αντιστρόφως ανάλογο του τετραγώνου της απόστασης μεταξύ των σωματιδίων που αλληλεπιδρούν.

Ενότητα Σ8.1

Ασθενής δύναμη

- Σε αυτήν οφείλεται η αστάθεια ορισμένων πυρήνων.
 - Είναι υπεύθυνη για τις διεργασίες διάσπασης.
- Είναι περίπου 10^5 φορές ασθενέστερη από την πυρηνική δύναμη.

Ενότητα Σ8.1

Βαρυτική δύναμη

- Η γνωστή δύναμη που συνδέει τους πλανήτες, τους αστέρες, και τους γαλαξίες.
- Έχει αμελητέα επίδραση στα στοιχειώδη σωματίδια.
- Είναι δύναμη μεγάλης εμβέλειας.
- Είναι περίπου το 10^{39} φορές ασθενέστερη από την ισχυρή δύναμη.
 - Είναι η πιο ασθενής από τις τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις.

Ενότητα Σ8.1

Φυσική ερμηνεία των δυνάμεων

- Οι δυνάμεις που αναπτύσσονται μεταξύ των σωματιδίων συχνά περιγράφονται με την ανταλλαγή φορέων που ονομάζονται **σωματίδια πεδίου**.
 - Τα σωματίδια πεδίου ονομάζονται επίσης **μποζόνια θασμίδας**.
 - Τα σωματίδια που αλληλεπιδρούν εκπέμπουν και απορροφούν συνεχώς σωματίδια πεδίου.
 - Η εκπομπή ενός σωματιδίου πεδίου από ένα σωματίδιο και η απορρόφησή του από ένα άλλο σωματίδιο εκδηλώνεται ως δύναμη ανάμεσα στα δύο σωματίδια που αλληλεπιδρούν.
 - Οι φορείς της δύναμης είναι τα σωματίδια πεδίου.

Ενότητα Σ8.1

Οι δυνάμεις και οι φορείς τους

Αλληλεπίδραση	Σχετική ένταση	Εμβέλεια δύναμης	Φορέας δύναμης	Μάζα σωματιδίου πεδίου (GeV/c ²)
Παγκόσμια	1	απειροστική	γκλουόνιο	0
Ηλεκτρομαγνητική	10^{-2}	∞	φωτόνιο	0
Ασθενής	10^{-6}	απειροστική	μποζόνια W [±] , Z ⁰	80.4, 81.4, 91.2
Βαρυτική	10^{-39}	∞	gravitόνιο	0

Ενότητα Σ8.1

Paul Adrien Maurice Dirac

- 1902–1984
- Βρετανός φυσικός
- Συνέβαλε:

- στην κατανόηση της αντίληψης,
- στην ενοποίηση της κβαντικής μηχανικής και της σχετικότητας,
- στην ανάπτυξη της κβαντικής φυσικής και της κοσμολογίας.

- Το 1933 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.



Ενότητα Σ8.2

Η περιγραφή του ηλεκτρονίου από τον Dirac

•Ο Dirac ανέπτυξε μια σχετικιστική κβαντομηχανική περιγραφή του ηλεκτρονίου.

- Έτσι εξήγησε με επιτυχία την πρόβλεψη του spin του ηλεκτρονίου και τη μαγνητική του ροπή.

•Η κυματική εξίσωση απαιτούσε λύσεις που αντιστοιχούσαν σε αρνητικές ενεργειακές καταστάσεις.

•Ο Dirac παρέκαμψε αυτή τη δυσκολία με την αξιωματική παραδοχή ότι όλες οι καταστάσεις αρνητικής ενέργειας είναι κατειλημμένες.

- Το σύνολο των ηλεκτρονίων που καταλαμβάνουν αυτές τις καταστάσεις αναφέρονται ως θάλασσα Dirac.

•Τα ηλεκτρόνια της θάλασσας Dirac δεν μπορούν να παρατηρηθούν άμεσα επειδή, σύμφωνα με την απαγορευτική αρχή του Pauli, δεν μπορούν να αλληλεπιδρούν με εξωτερικές δυνάμεις.

Ενότητα Σ8.2

Η ερμηνεία του Dirac

•Κάποια αλληλεπίδραση μπορεί να είναι αρκετά έντονη ώστε να διενεργεί το ηλεκτρόνιο σε κατάσταση θετικής ενέργειας.

- Η ελάχιστη ενέργεια που απαιτείται ισούται με: $2m_e c^2$

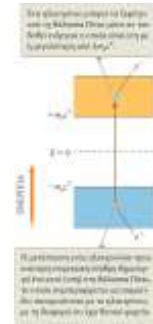
•Έτσι, δημιουργείται μια οπή στη θάλασσα Dirac.

•Η οπή μπορεί να αλληλεπιδράσει με εξωτερικές δυνάμεις και άρα μπορεί να γίνει αντιληπτή.

•Η οπή αλληλεπιδρά περίπου όπως και το ηλεκτρόνιο, με τη διαφορά ότι η οπή έχει θετικό φορτίο.

•Η οπή είναι το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου.

- Το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου ονομάζεται ποζιτρόνιο.



Ενότητα Σ8.2

Αντισωματίδια

•Για κάθε γνωστό σωματίδιο υπάρχει ένα αντίστοιχο αντισωματίδιο.

- Αυτό προκύπτει από μια εκδοχή της κβαντικής μηχανικής που διατύπωσε ο Dirac, η οποία συνδυάζει αρχές της ειδικής σχετικότητας.
- Κάποια σωματίδια είναι ίδια με τα αντισωματίδιά τους.
 - Το φωτόνιο και το ουδέτερο πiónιο (π^0).

•Το αντισωματίδιο ενός φορτισμένου σωματιδίου έχει την ίδια μάζα με το σωματίδιο, αλλά αντίθετο φορτίο.

•Το ποζιτρόνιο (το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου) ανακαλύφθηκε από τον Anderson το 1932.

- Από τότε, έχει παρατηρηθεί πειραματικά πολλές φορές.

•Επίσης έχουν ανακαλυφθεί αντυπρωτόνια και αντινετρόνια.

Ενότητα Σ8.2

Δίδυμη γέννηση

•Μια συνηθισμένη πηγή ποζιτρονίων είναι η **δίδυμη γέννηση**.

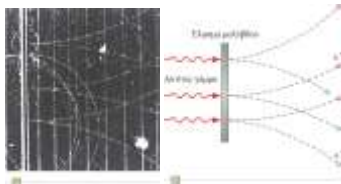
•Σε αυτή τη διεργασία, ένα φωτόνιο ακτίνες γάμμα με αρκετά μεγάλη ενέργεια αλληλεπιδρά με έναν πυρήνα, οπότε δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου.

•Για τη δημιουργία του ζεύγους, το φωτόνιο πρέπει να έχει ελάχιστη ενέργεια:

- $2m_e c^2$

Ενότητα Σ8.2

Δίδυμη γέννηση (συνέχεια)



•Φωτογραφία δίδυμης γέννησης, όπου τα ζεύγη δημιουργήθηκαν από ακτίνες γάμμα με ενέργεια 300 MeV, οι οποίες προσέκρουαν σε ένα έλασμα μολύβδου.

•Η ελάχιστη ενέργεια για τη δημιουργία του ζεύγους είναι 1.02 MeV.

•Η πλεονάζουσα ενέργεια εμφανίζεται ως κινητική ενέργεια των δύο σωματιδίων.

Ενότητα Σ8.2

Εξαύλωση

•Ωστόσο, μπορεί να συμβεί και μια διεργασία η οποία είναι αντίστροφη της δίδυμης γέννησης, η **εξαύλωση**.

•Σε κατάλληλες συνθήκες, ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο εξαυλώνονται και παράγουν δύο φωτόνια ακτίνων γάμμα.

- $e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$

Ενότητα Σ8.2

Hideki Yukawa

•1907–1981

•Ιάπωνας φυσικός

•Το 1949 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής, επειδή πρόβλεψε την ύπαρξη των μεσονίων.

•Ανέπτυξε την πρώτη θεωρία που εξηγούσε τη φύση της πυρηνικής δύναμης.



Ενότητα Σ8.3

Μεσόνια

•Η ύπαρξη των μεσονίων προβλέφθηκε από τη θεωρία που εξηγεί τη φύση της πυρηνικής δύναμης.

•Για να εξηγήσει την πυρηνική δύναμη, ο Yukawa χρησιμοποίησε την ιδέα της ύπαρξης σωματιδίων που δρουν ως φορείς δυνάμεων.

•Πρότεινε ότι υπάρχει ένα σωματίδιο το οποίο, όταν ανταλλάσσεται μεταξύ των νουκλεονίων του πυρήνα, δημιουργεί την πυρηνική δύναμη.

- Αυτό το σωματίδιο ονομάστηκε **μεσόνιο**.

Ενότητα Σ8.3

Μεσόνια (συνέχεια)

•Ο Yukawa πρόβλεψε ότι η μάζα του σωματιδίου είναι περίπου 200 φορές μεγαλύτερη από τη μάζα του ηλεκτρονίου.

•Κατά τη δεκαετία του 1930 έγιναν προσπάθειες να αποδειχθεί η ύπαρξη του σωματιδίου μέσω της μελέτης των κοσμικών ακτίνων.

•Ανακαλύφθηκαν περισσότερα από ένα σωματίδια:

- το **μεσόνιο π** ή **πιόνιο**
- το **μίσονιο (μ)**
 - Ανακαλύφθηκε πρώτο, αλλά διαπιστώθηκε ότι δεν ήταν μεσόνιο.

Ενότητα Σ8.3

Πιόνιο

•Υπάρχουν τρεις μορφές πιονίων.

- Αντιστοιχούν σε τρεις καταστάσεις φορτίου:

- π^+ και π^-
 - Καθένα με μάζα $139.6 \text{ MeV}/c^2$
 - Αντισωματίδια
- π^0
 - Μάζα $135.0 \text{ MeV}/c^2$

- Τα πιόνια είναι πολύ ασταθή σωματίδια.

- Για παράδειγμα το π^+ , το οποίο έχει μέσο χρόνο ζωής $2.6 \times 10^{-8} \text{ s}$, διασπάται σε ένα μίσονιο και ένα αντινετρίνο.

Ενότητα Σ8.3

Μιόνια

•Υπάρχουν δύο μορφές μιονίων.

- το μ^- και το αντισωματίδιό του, μ^+ .

•Το μίσονιο είναι ασταθές.

- Έχει μέσο χρόνο ζωής $2.2 \mu\text{s}$.
- Διασπάται σε ένα ηλεκτρόνιο, ένα νετρίνο, και ένα αντινετρίνο.

Ενότητα Σ8.3

Richard Feynman

•1918–1988

•Αμερικανός φυσικός

•Ανέπτυξε την κβαντική ηλεκτροδυναμική.

- Δηλαδή τη θεωρία της αλληλεπίδρασης του φωτός με την ύλη, τόσο με βάση τη σχετικότητα όσο και την κβαντική φυσική.

•Το 1965 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.

•Εργάστηκε στο Project Manhattan.

•Συμμετείχε στην επιτροπή διερεύνησης της τραγωδίας του διαστημικού λεωφορείου Challenger και απέδειξε τα αποτελέσματα της χαμηλής θερμοκρασίας στους δακτυλίους από καουτσούκ που χρησιμοποιούνταν σε αυτό.



Ενότητα Σ8.3

Διαγράμματα Feynman

•Πρόκειται για μια σχηματική αναπαράσταση της αλληλεπίδρασης μεταξύ δύο σωματιδίων.

- Τα **διαγράμματα Feynman** πήραν το όνομά τους από τον φυσικό Richard Feynman, ο οποίος τα επινόησε.

•Το διάγραμμα Feynman είναι ένα ποιοτικό γράφημα του χρόνου (απεικονίζεται στον κατακόρυφο άξονα) συναρτήσει του χώρου (απεικονίζεται στον οριζόντιο άξονα).

- Οι πραγματικές τιμές του χρόνου και του χώρου δεν έχουν σημασία.
- Η συνολική μορφή του γραφήματος αναπαριστά τη διεργασία.

Ενότητα Σ8.3

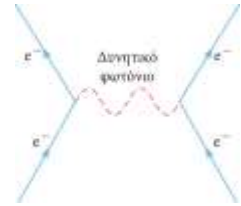
Διάγραμμα Feynman – Δύο ηλεκτρόνια

•Το φωτόνιο είναι το σωματιδίο πεδίου το οποίο αποτελεί τον φορέα της ηλεκτρομαγνητικής δύναμης μεταξύ των ηλεκτρονίων.

•Το φωτόνιο μεταφέρει ενέργεια και ορμή από το ένα ηλεκτρόνιο στο άλλο.

•Ονομάζεται **δυναμικό φωτόνιο**.

- Δεν μπορεί να ανιχνευτεί άμεσα, επειδή απορροφάται από το δεύτερο ηλεκτρόνιο σχεδόν αμέσως μετά την εκπομπή του από το πρώτο ηλεκτρόνιο.



Ενότητα Σ8.3

Το δυναμικό φωτόνιο

•Η ύπαρξη του δυναμικού φωτονίου φαίνεται να παραβιάζει την αρχή διατήρησης της ενέργειας.

- Ωστόσο, επειδή το δυναμικό φωτόνιο έχει πολύ μικρό χρόνο ζωής, βάσει της αρχής της αβεβαιότητας, η πλεονάζουσα ενέργεια του φωτονίου είναι μικρότερη από την αβεβαιότητα στην ενέργειά του.
- Επειδή το δυναμικό φωτόνιο έχει πολύ μικρό χρόνο ζωής, $\Delta E \approx \hbar/2 \Delta t$.

•Στο πλαίσιο των περιορισμών της αρχής της αβεβαιότητας, η ενέργεια του συστήματος διατηρείται.

Ενότητα Σ8.3

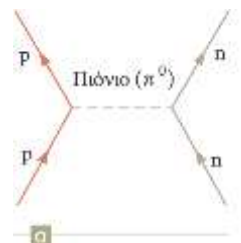
Διάγραμμα Feynman – Πρωτόνιο και νετρόνιο (το μοντέλο του Yukawa)

•Η αλληλεπίδραση γίνεται μέσω της πυρηνικής δύναμης.

•Η ύπαρξη του πιονίου θα παραβιάζε την αρχή διατήρησης της ενέργειας, αν το σωματίδιο δεν απέδιδε την ενέργειά του σε σύντομο χρονικό διάστημα.

•Σύμφωνα με τη θεωρία, η ενέργεια ηρεμίας του πιονίου είναι $\approx 100 \text{ MeV}/c^2$.

- Αυτό συμφωνεί σε μεγάλο βαθμό με τα πειραματικά αποτελέσματα.



Ενότητα Σ8.3

Αλληλεπίδραση νουκλεονίων – Περισσότερα σχετικά με το μοντέλο του Yukawa

•Το χρονικό διάστημα που χρειάζεται το πιόνιο για να μεταφερθεί από το ένα νουκλεόνιο στο άλλο δίνεται από τη σχέση:

$$\Delta t \approx \frac{\hbar}{2E_\pi} = \frac{\hbar}{2m_\pi c^2}$$

•Η απόσταση που μπορεί να διανύσει το πιόνιο είναι $c\Delta t$.

•Βάσει αυτών των στοιχείων, υπολογίζεται ότι η ενέργεια ηρεμίας του πιονίου είναι περίπου 100 MeV.

Ενότητα Σ8.3

Αλληλεπίδραση νουκλεονίων (τελική διαφάνεια)

•Στην ουσία, ένα σύστημα δύο νουκλεονίων μπορεί να μετατραπεί σε δύο νουκλεόνια και ένα πιόνιο, αρκεί να επιστρέψει στην αρχική του κατάσταση σε πολύ μικρό χρονικό διάστημα.

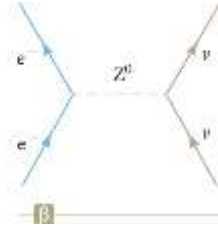
•Οι φυσικοί συχνά λένε ότι ένα νουκλεόνιο υφίσταται **διακυμάνσεις** καθώς εκπέμπει και απορροφά σωματίδια πεδίου.

- Αυτές οι διακυμάνσεις είναι συνέπεια του συνδυασμού της κβαντικής μηχανικής και της ειδικής σχετικότητας.

Ενότητα Σ8.3

Διάγραμμα Feynman – Ασθενής αλληλεπίδραση

- Ένα ηλεκτρόνιο και ένα νεutrino αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς δύναμης.
- Το Z^0 είναι το σωματίδιο-φορέας.
 - Την ασθενή δύναμη μπορεί να φέρει και το σωματίδιο W^\pm .
 - Τα σωματίδια W^\pm και Z^0 ανακαλύφθηκαν το 1983 στο CERN.



Ενότητα Σ8.3

Η πυρηνική δύναμη και η ισχυρή δύναμη

- Η *πυρηνική δύναμη* ονομαζόταν παλαιότερα *ισχυρή δύναμη*.
- Σήμερα ο όρος *ισχυρή δύναμη* χρησιμοποιείται αποκλειστικά για τη δύναμη που αναπτύσσεται μεταξύ κουάρκ.
 - Η μεταξύ σωματιδίων που αποτελούνται από κουάρκ.
- Η *πυρηνική δύναμη* είναι η δύναμη η οποία, πριν καθιερωθεί η θεωρία των κουάρκ, θεωρούσαν ότι αναπτύσσεται μεταξύ νουκλεονίων.
 - Μπορεί να θεωρηθεί ως δευτερεύον αποτέλεσμα της ισχυρής δύναμης.
 - Μερικές φορές ονομάζεται *υπολειμματική ισχυρή δύναμη*.

Ενότητα Σ8.3

Κατηγοριοποίηση των σωματιδίων

- Όλα τα σωματίδια, εκτός από τα σωματίδια πεδίου, μπορούν να ενταχθούν σε δύο μεγάλες κατηγορίες.
- Κατηγοριοποιούνται βάσει της μορφής της αλληλεπίδρασης.
 - Αδρόνια – αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής δύναμης.
 - Λεπτόνια – αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς δύναμης.

Ενότητα Σ8.4

Αδρόνια

- Αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής δύναμης.
- Υπάρχουν δύο κατηγορίες αδρονίων, τα *μεσόνια* και τα *βαρυόνια*, τα οποία διακρίνονται βάσει της μάζας και του spin τους.
 - Μεσόνια
 - Έχουν μηδενικό ή ακέραιο spin (0 ή 1).
 - Τελικά διασπώνται σε ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, νεutrίνα, και φωτόνια.
 - Βαρυόνια
 - Έχουν μάζα ίση ή μεγαλύτερη από εκείνη του πρωτονίου.
 - Έχουν ημιακέραιες τιμές spin (1/2 ή 3/2).
 - Εκτός από το πρωτόνιο, όλα τα βαρυόνια διασπώνται έτσι ώστε στα τελικά παράγωγα της διάσπασης να υπάρχει πάντα ένα πρωτόνιο.
- Δεν είναι στοιχειώδη σωματίδια, αλλά αποτελούνται από κουάρκ.

Ενότητα Σ8.4

Λεπτόνια

- Δεν αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής δύναμης.
- Έχουν spin 1/2.
- Τα λεπτόνια φαίνεται ότι είναι πραγματικά στοιχειώδη σωματίδια.
 - Δεν έχουν υποκείμενη δομή.
 - Είναι σημειακά σωματίδια.
- Οι επιστήμονες πιστεύουν ότι υπάρχουν μόνο έξι λεπτόνια, μαζί με τα αντισωματίδιά τους:
 - Το ηλεκτρόνιο και το νεutrino του.
 - Το μιονόνιο και το νεutrino του.
 - Το ταυ και το νεutrino του.

Ενότητα Σ8.4

Αρχές διατήρησης

- Στη μελέτη των στοιχειωδών σωματιδίων παίζουν σημαντικό ρόλο ορισμένες αρχές διατήρησης.
- Ηδη έχουμε μελετήσει τις παρακάτω αρχές διατήρησης:
 - Αρχή διατήρησης της ενέργειας.
 - Αρχή διατήρησης της ορμής.
 - Αρχή διατήρησης της στροφορμής.
 - Αρχή διατήρησης του ηλεκτρικού φορτίου.
- Δύο επιπλέον αρχές είναι οι εξής:
 - Αρχή διατήρησης του βαρυονικού αριθμού.
 - Αρχή διατήρησης του λεπτονικού αριθμού.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του βαρυονικού αριθμού

•Όποτε δημιουργείται ένα βαρυόνιο κατά τη διάρκεια μιας διάσπασης ή μιας πυρηνικής αντίδρασης, δημιουργείται και ένα αντιβαρυόνιο.

• B είναι ο **βαρυονικός αριθμός**.

- $B = +1$ για τα βαρυόνια
- $B = -1$ για τα αντιβαρυόνια
- $B = 0$ για όλα τα άλλα σωματίδια.

•Σύμφωνα με την **αρχή διατήρησης του βαρυονικού αριθμού**, κάθε φορά που συντελείται μια πυρηνική αντίδραση ή διάσπαση, το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών πριν από τη διεργασία πρέπει να ισούται με το άθροισμα των βαρυονικών αριθμών μετά τη διεργασία.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του βαρυονικού αριθμού και ευστάθεια του πρωτονίου

•Οι απόψεις σχετικά με το αν το πρωτόνιο διασπάται ή όχι δίστανται.

•Εφόσον ο βαρυονικός αριθμός διατηρείται, το πρωτόνιο δεν μπορεί να διασπαστεί.

•Ωστόσο, σύμφωνα με κάποιες πρόσφατες θεωρίες, το πρωτόνιο είναι ασταθές και ο βαρυονικός αριθμός δεν είναι απόλυτα διατηρήσιμη ποσότητα.

- Το μόνο που μπορούμε να πούμε επί του παρόντος είναι ότι το πρωτόνιο έχει ημιαία ζωή τουλάχιστον 10^{33} έτη.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του βαρυονικού αριθμού – Παράδειγμα

•Ο βαρυονικός αριθμός διατηρείται στην παρακάτω αντίδραση;

$p + n \rightarrow p + p + n + \bar{p}$

- Βαρυονικοί αριθμοί:
 - Πριν: $1 + 1 = 2$
 - Μετά: $1 + 1 + 1 + (-1) = 2$
- Ο βαρυονικός αριθμός διατηρείται.
- Εφόσον ισχύει η αρχή διατήρησης της ενέργειας, η αντίδραση μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του λεπτονικού αριθμού

•Υπάρχουν τρεις αρχές διατήρησης που αφορούν τους λεπτονικούς αριθμούς, ένας για κάθε οικογένεια λεπτονίων.

•Σύμφωνα με την **αρχή διατήρησης του ηλεκτρονικού λεπτονικού αριθμού**, όποτε συμβαίνει μια πυρηνική αντίδραση ή διάσπαση, το άθροισμα των ηλεκτρονικών λεπτονικών αριθμών πριν από τη διεργασία πρέπει να ισούται με το άθροισμα των ηλεκτρονικών λεπτονικών αριθμών μετά τη διεργασία.

•Τιμές του ηλεκτρονικού λεπτονικού αριθμού:

- $L_e = 1$ για το ηλεκτρόνιο και το νεutrino του.
- $L_e = -1$ για το ποζιτρόνιο και το αντισυντρόνιο του ηλεκτρονίου.
- $L_e = 0$ για όλα τα υπόλοιπα σωματίδια.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του λεπτονικού αριθμού (συνέχεια)

•Όταν σε μια διάσπαση εμπλέκονται μόνια, διατηρείται ο μιονικός λεπτονικός αριθμός.

•Όταν σε μια διάσπαση εμπλέκονται σωματίδια ταυ, διατηρείται ο λεπτονικός αριθμός της οικογένειας του λεπτονίου ταυ.

- Οι τιμές του μιονικού λεπτονικού αριθμού και του λεπτονικού αριθμού του λεπτονίου ταυ αντιστοιχίζονται με παρόμοιο τρόπο όπως και οι τιμές του ηλεκτρονικού λεπτονικού αριθμού.

Ενότητα Σ8.5

Αρχή διατήρησης του λεπτονικού αριθμού – Παράδειγμα

•Ο λεπτονικός αριθμός διατηρείται στην παρακάτω αντίδραση;

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

• Ελέγχουμε τον ηλεκτρονικό λεπτονικό αριθμό:

- Πριν: $L_e = 0$ Μετά: $L_e = 1 + (-1) + 0 = 0$
- Ο ηλεκτρονικός λεπτονικός αριθμός διατηρείται.

• Ελέγχουμε τον μιονικό λεπτονικό αριθμό:

- Πριν: $L_\mu = 1$ Μετά: $L_\mu = 0 + 0 + 1 = 1$
- Ο μιονικός λεπτονικός αριθμός διατηρείται.

• Επομένως, και οι δύο αριθμοί διατηρούνται, κάτι που σημαίνει ότι η διάσπαση μπορεί να πραγματοποιηθεί.

Ενότητα Σ8.5

Παράδοξα σωματίδια

• Διαπιστώθηκε ότι κάποια σωματίδια που ανακαλύφθηκαν τη δεκαετία του 1950 παρουσίαζαν ασυνήθιστες ιδιότητες, γι' αυτό τα σωματίδια αυτά ονομάστηκαν **παράδοξα**.

• Μερικές από αυτές τις ασυνήθιστες ιδιότητες είναι οι εξής:

- Πάντα δημιουργούνται ανά ζεύγη.
- Παρά το γεγονός ότι δημιουργούνται από αντιδράσεις με υψηλό ρυθμό αλληλεπιδράσεων μέσω της ισχυρής δύναμης, δεν διασπώνται με υψηλό ρυθμό σε σωματίδια που αλληλεπιδρούν μέσω της ισχυρής δύναμης.
 - Αντιθέτως, διασπώνται πολύ αργά, κάτι που είναι χαρακτηριστικό της ασθενούς αλληλεπιδράσης.

Ενότητα Σ8.6

Παραδοξότητα

• Για την ερμηνεία αυτών των ασυνήθιστων ιδιοτήτων των παράδοξων σωματιδίων ορίστηκε ένας νέος κβαντικός αριθμός, S , ο **κβαντικός αριθμός της παραδοξότητας**.

• Έπρεπε να διατυπωθεί και η αντίστοιχη **αρχή διατήρησης της παραδοξότητας**.

- Σύμφωνα με αυτή την αρχή, σε μια πυρηνική αντίδραση ή διάσπαση, η οποία οφείλεται στην ισχυρή δύναμη, η παραδοξότητα διατηρείται.
- Δηλαδή, το άθροισμα των κβαντικών αριθμών παραδοξότητας πριν από τη διεργασία πρέπει να ισούται με το άθροισμα των κβαντικών αριθμών παραδοξότητας μετά τη διεργασία.
- Σε διεργασίες που οφείλονται στην ασθενή αλληλεπιδράση, η παραδοξότητα ίσως να μη διατηρείται.
 - Η ισχυρή αλληλεπιδράση και η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπιδράση υπακούουν στην αρχή διατήρησης της παραδοξότητας.

Ενότητα Σ8.6

Ανίχνευση παράδοξων σωματιδίων σε θαλάμο φυσαλίδων

• Οι διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν σε τροχιές ουδέτερων σωματιδίων.

• Στο κάτω μέρος της φωτογραφίας, σχηματίζονται τα παράδοξα σωματίδια Λ^0 και K^0 σύμφωνα με την αντίδραση:

$$\pi^- + p \rightarrow K^0 + \Lambda^0$$

• Στη συνέχεια, τα Λ^0 και K^0 **διασπώνται** σύμφωνα με τις αντιδράσεις:

$$\Lambda^0 \rightarrow \pi^- + p$$



Ενότητα Σ8.6

Murray Gell-Mann

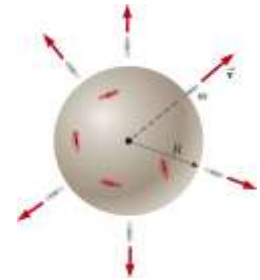
• 1929–

• Αμερικανός φυσικός

• Μελέτησε τα υποατομικά σωματίδια.

- Έδωσε στα κουάρκ το όνομά τους.
- Ανέπτυξε το νοητικό σχήμα που είναι γνωστό ως **οκταπλός δρόμος**.

• Το 1969 τιμήθηκε με το βραβείο Νόμπελ Φυσικής.



Ενότητα Σ8.7

Ο οκταπλός δρόμος

• Για την ομαδοποίηση των σωματιδίων σε οικογένειες έχουν προταθεί πολλά συστήματα κατηγοριοποίησης.

- Αυτά τα συστήματα βασίζονται στο spin, τον βαρυονικό αριθμό, την παραδοξότητα, κ.λπ.

• Ο **οκταπλός δρόμος** είναι ένα συμμετρικό νοητικό σχήμα που πρότειναν οι Gell-Mann και Ne'eman.

- Μπορούν να αναπτυχθούν πολλά συμμετρικά σχήματα.

• Ο οκταπλός δρόμος έχει πολλά κοινά στοιχεία με τον περιοδικό πίνακα των στοιχείων.

- Μεταξύ άλλων, πρόβλεψε την ύπαρξη σωματιδίων που δεν είχαν ανακαλυφθεί ακόμα.

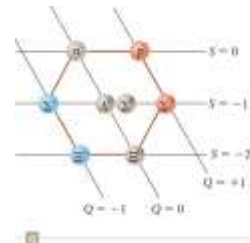
Ενότητα Σ8.7

Σχήμα οκταπλού δρόμου για τα βαρυόνια

• Εξαγωνικό σχήμα για τα οκτώ βαρυόνια με spin $\frac{1}{2}$.

• Σχεδιάζουμε το γράφημα της παραδοξότητας συναρτήσει του φορτίου σε ένα πλαγιωμένο σύστημα συντεταγμένων.

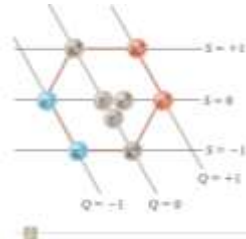
• Έξι από τα βαρυόνια σχηματίζουν ένα εξάγωνο, ενώ τα εναπομένοντα δύο βρίσκονται στο κέντρο του εξαγώνου.



Ενότητα Σ8.7

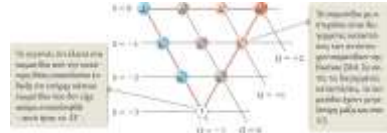
Σχήμα οκταπλού δρόμου για τα μεσόνια

- Το σχήμα αφορά τα μεσόνια με spin 0.
- Σχεδιάζουμε το γράφημα της παραδοξότητας συνάρτησης του φορτίου σε ένα πλαισιωμένο σύστημα συντεταγμένων.
- Και πάλι προκύπτει ένας εξαγωνικός σχηματισμός.
- Κάθε σωματίδιο στην περιμετρο του εξαγώνου βρίσκεται απέναντι (αντιδιαμετρικά) από το αντισωματίδιό του.
- Τα εναπομένοντα τρία μεσόνια βρίσκονται στο κέντρο του εξαγώνου.
 - Αυτά τα τρία σωματίδια είναι ίδια με τα αντισωματίδιά τους.



Ενότητα Σ8.7

Σχήμα οκταπλού δρόμου για τα βαρυόνια με spin 3/2



- Στην εικόνα φαίνεται το σχήμα οκταπλού δρόμου για τα εννέα βαρυόνια με spin 3/2 που ήταν γνωστά εκείνη την εποχή.
- Στο σχήμα προέκυψε μια κενή θέση.
- Ο Gell-Mann πρόβλεψε το σωματίδιο που έλειπε, καθώς και τις ιδιότητές του.
- Περίπου τρία χρόνια αργότερα, το σωματίδιο ανακαλύφθηκε και επιβεβαιώθηκαν όλες οι ιδιότητες που είχε προβλέψει ο Gell-Mann.

Ενότητα Σ8.7

Κουάρκ

- Τα αδρόνια είναι σύνθετα σωματίδια με συγκεκριμένο μέγεθος και δομή.
- Τα αδρόνια διασπώνται σε άλλα αδρόνια.
- Υπάρχουν πολλά διαφορετικά αδρόνια.
- Προτάθηκε ότι τα στοιχειώδη σωματίδια των αδρονίων είναι τα **κουάρκ**.
 - Την ύπαρξή τους πρότειναν, ανεξάρτητα ο ένας από τον άλλο, ο Gell-Mann και ο Zweig.
 - Η ονομασία *κουάρκ* δόθηκε από τον Gell-Mann.

Ενότητα Σ8.8

Το αρχικό μοντέλο των κουάρκ

- Το μοντέλο περιλαμβάνει τρεις τύπους, ή **γεύσεις**, κουάρκ:
 - **επάνω** (u - up)
 - **κάτω** (d - down)
 - **παράδοξο** (s - strange)
- Τα παραπάνω κουάρκ έχουν κλασματικό ηλεκτρικό φορτίο.
 - +2e/3, -e/3, και -e/3 αντίστοιχα.
- Τα κουάρκ έχουν spin 1/2.
 - Όλα τα κουάρκ είναι φερμιόνια.
- Σε κάθε κουάρκ αντιστοιχεί ένα αντικουάρκ.
 - Το αντικουάρκ έχει αντίθετο ηλεκτρικό φορτίο, αντίθετο βαρυονικό αριθμό, και αντίθετη παραδοξότητα.

Ενότητα Σ8.8

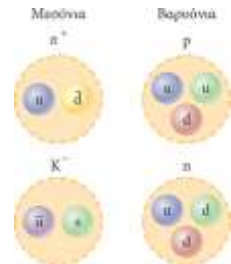
Το αρχικό μοντέλο των κουάρκ – Κανόνες

- Όλα τα αδρόνια, που ήταν γνωστά όταν διατυπώθηκε η αρχική θεωρία, μπορούν να καθοριστούν με τη βοήθεια τριών κανόνων:
 - Κάθε μεσόνιο αποτελείται από ένα κουάρκ και ένα αντικουάρκ.
 - Γ' αυτό έχει βαρυονικό αριθμό 0.
 - Κάθε βαρυόνιο αποτελείται από τρία κουάρκ.
 - Κάθε αντιβαρυόνιο αποτελείται από τρία αντικουάρκ.

Ενότητα Σ8.8

Τα κουάρκ που απαρτίζουν μερικά αδρόνια – Παραδείγματα

- Τα μεσόνια είναι ζεύγη κουάρκ-αντικουάρκ.
- Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ.



Ενότητα Σ8.8

Προσθήκες στο αρχικό μοντέλο των κουάρκ – Χάρη

- Οι ασυμφωνίες που προέκυψαν μεταξύ των προβλέψεων του μοντέλου των κουάρκ και των πειραματικών αποτελεσμάτων υποδείκνυαν την ύπαρξη ενός ακόμα κουάρκ.
- Στο τέταρτο κουάρκ (c), αποδόθηκε η ιδιότητα της **χάρης** (charm), για την οποία ορίστηκε ένας νέος κβαντικός αριθμός, C.
- Η χάρη διατηρείται στις ισχυρές και τις ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, αλλά όχι στις ασθενείς αλληλεπιδράσεις.
- Το 1974, ανακαλύφθηκε ένα νέο μεσόνιο, το J/Ψ, που αποδείχθηκε ότι είναι ένα ζεύγος «χαριτωμένου» κουάρκ και «χαριτωμένου» αντικουάρκ.

Ενότητα Σ8.8

Και άλλες προσθήκες – Υψηλό και χαμηλό κουάρκ

- Οι νέες ανακαλύψεις δημιούργησαν την ανάγκη για ένα πιο σύνθετο μοντέλο κουάρκ.
- Έτσι, προτάθηκαν δύο νέα κουάρκ:
 - **υψηλό** (t – top) ή **αληθινό**
 - **χαμηλό** (b – bottom) ή **όμορφο**
- Προστέθηκαν οι κβαντικοί αριθμοί της **καρυφαιότητας** (topness) και της **πυθμνικότητας** (bottomness).
- Επαλήθευση των προβλέψεων:
 - Το χαμηλό κουάρκ (b) ανακαλύφθηκε σε ένα μεσόνιο Υ το 1977.
 - Το υψηλό κουάρκ (t) ανακαλύφθηκε στο Fermilab το 1995.

Ενότητα Σ8.8

Ο αριθμός των σωματιδίων

- Σήμερα, οι φυσικοί πιστεύουν ότι γνωρίζουν όλα τα δομικά στοιχεία της ύλης.
- Έξι κουάρκ με τα αντισωματίδιά τους.
- Έξι λεπτόνια με τα αντισωματίδιά τους.
- Τέσσερα σωματίδια πείδιου.

Ενότητα Σ8.8

Τα κουάρκ από τα οποία αποτελούνται κάποια βαρυόνια

- Στον πίνακα φαίνονται τα κουάρκ από τα οποία αποτελούνται κάποια βαρυόνια.
- Τα βαρυόνια αποτελούνται από τρία κουάρκ.
- Μόνο το υψηλό κουάρκ και το χαμηλό κουάρκ υπάρχουν στα αδρόνια που συναντάμε στη συνηθισμένη ύλη.

Βαρυόνιο	Συνθήκη συνθήκη
p	uud
n	udd
Δ ⁺⁺	uuu
Δ ⁺	uud
Δ ⁰	udu
Δ ⁻	udd
Σ ⁺⁺	uud
Σ ⁺	uud
Σ ⁰	uds
Σ ⁻	dds
Ξ ⁰	uds
Ξ ⁻	dds
Ω ⁻	sss
Λ ⁰	uds
Λ ⁻	dds

Ενότητα Σ8.8

Ιδιότητες των στοιχειωδών σωματιδίων

Σωματίδιο	Μάζα (σε eV/c ²)	Φορτίο
Quarks		
u	2.3 x 10 ⁻⁹	+2/3
d	4.8 x 10 ⁻⁹	-1/3
s	9.8 x 10 ⁻⁹	-1/3
c	1.87 x 10 ⁻⁸	+2/3
b	4.2 x 10 ⁻⁹	-1/3
t	177 x 10 ⁻⁹	+2/3
Leptons		
e	9.1 x 10 ⁻³¹	-1
μ	1.89 x 10 ⁻²⁸	-1
τ	1.78 x 10 ⁻²⁷	-1
ν _e	< 2.3 x 10 ⁻³⁶	0
ν _μ	< 2.3 x 10 ⁻³⁶	0

Ενότητα Σ8.8

Περισσότερα σχετικά με τα κουάρκ

- Δεν έχει παρατηρηθεί ποτέ κάποιο απομονωμένο κουάρκ.
- Οι φυσικοί πιστεύουν ότι σε κανονικές θερμοκρασίες, τα κουάρκ είναι μόνιμα περιορισμένα στο εσωτερικό των συνηθισμένων σωματιδίων λόγω της ισχυρής δύναμης.
- Σήμερα βρίσκονται σε εξέλιξη προσπάθειες να δημιουργηθεί **πλάσμα κουάρκ-γκλουονίων**, μια κατάσταση της ύλης στην οποία τα κουάρκ απελευθερώνονται από τα νετρόνια και τα πρωτόνια.
 - Τόσο το RHIC όσο και το CERN ανακοίνωσαν ότι βρήκαν ενδείξεις για την ύπαρξη πλάσματος κουάρκ-γκλουονίων, αλλά κανένα από τα δύο εργαστήρια δεν έχει δώσει πειστικές πειραματικές αποδείξεις που να επιβεβαιώνουν την ύπαρξή του.

Ενότητα Σ8.8

Χρώμα

- Παρατηρήθηκε ότι ορισμένα σωματίδια αποτελούνταν από συνδυασμούς κουάρκ οι οποίοι παραβίαζαν την απαγορευτική αρχή.
 - Τα κουάρκ είναι φερμιόνια με ημιακέραιο spin, οπότε πρέπει να υπακούουν στην απαγορευτική αρχή.
- Αυτό εξηγείται με μια επιπλέον ιδιότητα που ονομάζεται **φορτίο χρώματος**.
 - Η ιδιότητα του χρώματος που αποδίδεται στα κουάρκ δεν έχει να κάνει με την οπτική αντίληψη των χρωμάτων.

Ενότητα Σ8.9

Πολύχρωμα κουάρκ

- Το φορτίο χρώματος μπορεί να είναι κόκκινο, μπλε, ή πράσινο.
 - Στα αντικουάρκ αποδόθηκαν τα χρώματα αντικόκκινο, αντιπράσινο, και αντιμπλέ.
 - Αυτοί είναι οι «κβαντικοί αριθμοί» του φορτίου χρώματος.
- Η ιδιότητα του χρώματος υπακούει στην απαγορευτική αρχή.
- Όταν στο ίδιο βαρυόνιο απαντώνται και τα τρία χρώματα, δίνουν λευκό χρώμα (οπότε το βαρυόνιο ονομάζεται και άχρωμο).
- Τα βαρυόνια και τα μεσόνια είναι πάντα άχρωμα.

Ενότητα Σ8.9

Κβαντική χρωματοδυναμική (Quantum Chromodynamics, QCD)

- Η κβαντική χρωματοδυναμική είναι μια νέα θεωρία που περιγράφει πώς τα κουάρκ αλληλεπιδρούν μεταξύ τους βάσει του φορτίου χρώματος.
- Η ισχυρή δύναμη μεταξύ των κουάρκ συχνά ονομάζεται και **δύναμη χρώματος**.
- Φορέας της ισχυρής δύναμης μεταξύ των κουάρκ είναι τα **γκλουόνια**.
 - Τα γκλουόνια είναι σωματίδια χωρίς μάζα.
- Όταν ένα κουάρκ εκπέμπει ή απορροφά ένα γκλουόνιο, το χρώμα του κουάρκ ενδέχεται να αλλάξει.

Ενότητα Σ8.9

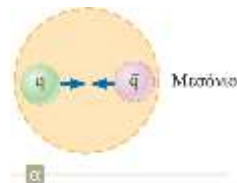
Περισσότερα σχετικά με το φορτίο χρώματος

- Σωματίδια με το ίδιο χρώμα απωθούνται, ενώ σωματίδια με αντίθετο χρώμα έλκονται.
 - Σωματίδια με διαφορετικό χρώμα έλκονται, αλλά με μικρότερη ένταση από εκείνη της ελκτικής δύναμης που αναπτύσσεται μεταξύ ενός σωματιδίου και του αντισωματιδίου αντίθετου χρώματος.
- Η δύναμη χρώματος μεταξύ δύο άχρωμων αδρονίων είναι αμελητέα σε μεγάλες αποστάσεις.
 - Η συνισταμένη ισχυρή δύναμη μεταξύ των κουάρκ που τα αποτελούν δεν είναι ακριβώς μηδέν σε μικρές αποστάσεις.
 - Αυτή η υπολειμματική ισχυρή δύναμη είναι η πυρηνική δύναμη με την οποία δεσμεύονται τα πρωτόνια με τα νετρόνια και σχηματίζουν τους πυρήνες.

Ενότητα Σ8.9

Τα κουάρκ από τα οποία αποτελείται ένα μεσόνιο

- Ένα πράσινο κουάρκ έλκεται από ένα αντιπράσινο.
- Το ζεύγος κουάρκ-αντικουάρκ σχηματίζει ένα μεσόνιο.
- Το μεσόνιο που σχηματίζεται είναι άχρωμο.



Ενότητα Σ8.9

Τα κουάρκ από τα οποία αποτελείται ένα βαρυόνιο

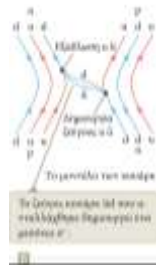
- Κουάρκ διαφορετικών χρωμάτων έλκονται μεταξύ τους.
- Τα τρία κουάρκ σχηματίζουν ένα βαρυόνιο.
- Κάθε βαρυόνιο περιέχει τρία κουάρκ με τρία διαφορετικά χρώματα.
- Το βαρυόνιο είναι άχρωμο.



Ενότητα Σ8.9

Ερμηνεία της αλληλεπίδρασης νετρονίου-πρωτονίου βάσει της κβαντικής χρωματοδυναμικής

- Κάθε κουάρκ του νετρονίου και του πρωτονίου εκπέμπει και απορροφά συνεχώς γκλουόνια.
- Η ενέργεια ενός γκλουονίου μπορεί να προκαλέσει τη δημιουργία ζευγών κουάρκ-αντικουάρκ.
- Όταν το νετρόνιο και το πρωτόνιο πλησιάσουν αρκετά το ένα το άλλο, τότε μπορεί να γίνει ανταλλαγή γκλουονίων και κουάρκ. Αυτή η ανταλλαγή δημιουργεί την πυρηνική δύναμη.
- Αυτό το μοντέλο αλληλεπιδράσεων μεταξύ των ναυκλεονίων, το οποίο βασίζεται στα κουάρκ, συμφωνεί με το μοντέλο ανταλλαγής πιονίων.



Ενότητα Σ8.9

Ενότητα Σ8.10

Στοιχειώδη σωματίδια – Η σύγχρονη εκδοχή

- Οι επιστήμονες πλέον πιστεύουν ότι υπάρχουν τρεις κατηγορίες πραγματικά στοιχειωδών σωματιδίων:
 - Λεπτόνια
 - Κουάρκ
 - Σωματίδια πεδίου
- Αυτοί οι τρεις τύποι σωματιδίων κατηγοριοποιούνται επίσης και ως φερμιόνια ή ως μποζόνια.
 - Τα κουάρκ και τα λεπτόνια είναι φερμιόνια (σπιν 1/2).
 - Τα σωματίδια πεδίου είναι μποζόνια (ακέραιο σπιν 1 ή μεγαλύτερο).

Ασθενής δύναμη

- Η ασθενής δύναμη εκδηλώνεται μέσω των μποζονίων W^+ , W^- , και Z^0 .
 - Λέμε ότι αυτά τα σωματίδια έχουν *ασθενές φορτίο*.
- Επομένως κάθε στοιχειώδες σωματίδιο μπορεί να έχει:
 - Μάζα
 - Ηλεκτρικό φορτίο
 - Φορτίο χρώματος
 - Ασθενές φορτίο
 - Μια ή περισσότερες από αυτές τις ιδιότητες μπορεί να έχει μηδενική τιμή.

Ενότητα Σ8.10

Ενότητα Σ8.10

Η θεωρία των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων

- Η θεωρία των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων ενοποιεί την ηλεκτρομαγνητική και την ασθενή αλληλεπίδραση.
- Η θεωρία δέχεται ως αξίωμα ότι η ασθενής αλληλεπίδραση και η ηλεκτρομαγνητική αλληλεπίδραση έχουν την ίδια ένταση όταν τα σωματίδια που συμμετέχουν έχουν πολύ υψηλή ενέργεια.
 - Οι δύο αλληλεπιδράσεις αποτελούν διαφορετικές εκφάνσεις της ίδιας ενιαίας ηλεκτρασθενούς αλληλεπίδρασης.

Το Καθιερωμένο Μοντέλο

- Ο συνδυασμός της θεωρίας των ηλεκτρασθενών αλληλεπιδράσεων και της κβαντικής χρωματοδυναμικής για την ισχυρή αλληλεπίδραση αναφέρεται στην φυσική σωματιδίων υψηλής ενέργειας ως **Καθιερωμένο Μοντέλο** ή **Πρότυπο**.
- Τα βασικά στοιχεία του Καθιερωμένου Μοντέλου είναι τα εξής:
 - Η ισχυρή δύναμη, που εκδηλώνεται μέσω των γκλουονίων, συγκρατεί τα κουάρκ μεταξύ τους ώστε να σχηματίζουν σύνθετα σωματίδια.
 - Τα λεπτόνια συμμετέχουν μόνο σε ηλεκτρομαγνητικές και ασθενείς αλληλεπιδράσεις.
 - Και σε βαρυτικές αλληλεπιδράσεις.
 - Η ηλεκτρομαγνητική δύναμη εκδηλώνεται μέσω των φωτονίων.
 - Η ασθενής δύναμη εκδηλώνεται μέσω των μποζονίων W και Z.
- Το Καθιερωμένο Μοντέλο δεν περιλαμβάνει ακόμα τη βαρυτική δύναμη.

Ενότητα Σ8.10

Ενότητα Σ8.10

Το Καθιερωμένο Μοντέλο – Συνοπτικός πίνακας



Οι μάζες των φορέων των δυνάμεων

- Γιατί το φωτόνιο δεν έχει μάζα ενώ τα μποζόνια W και Z έχουν;
 - Το Καθιερωμένο Μοντέλο δεν δίνει απάντηση σε αυτό το ερώτημα.
 - Η διαφορά συμπεριφοράς που παρατηρείται μεταξύ χαμηλών και υψηλών ενεργειών ονομάζεται *ρήξη της συμμετρίας* (ή *σπάσιμο της συμμετρίας*).
- Για να λυθεί το πρόβλημα των μαζών, προτάθηκε η ύπαρξη του **μποζονίου Higgs**.
 - Για να επιτευχθεί η ενέργεια που θα επέτρεπε την ανακάλυψη του μποζονίου Higgs, έπρεπε να χρησιμοποιηθούν μεγάλοι επιταχυντές με συγκρούμενες δέσμες. Φαίνεται ότι το μποζόνιο Higgs ανακαλύφθηκε το 2012 στο CERN.
 - Σε έναν επιταχυντή συγκρούμενης δέσμης, σωματίδια με ίση μάζα και ίση κινητική ενέργεια κινούνται σε αντίθετες κατευθύνσεις μέσα στον δακτύλιο του επιταχυντή και συγκρούονται μετωπικά, οπότε προκαλούν την απαιτούμενη αντίδραση.

Ενότητα Σ8.10

Τροχιές σωματιδίων μετά από σύγκρουση – Παράδειγμα από το Fermi Lab



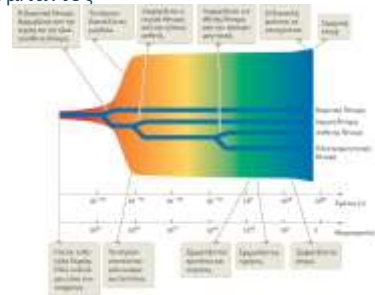
Ενότητα Σ8.10

Η Μεγάλη Έκρηξη

- Σύμφωνα με αυτή τη θεωρία κοσμολογίας, το σύμπαν είχε μια κατακλυσμιαία αρχή, που ονομάζεται Μεγάλη Έκρηξη. Δεν είναι δυνατό να ανακαλύψουμε τι συνέβαινε πριν από αυτήν.
- Επίσης, κατά τα πρώτα λεπτά μετά τη δημιουργία του σύμπαντος, οι τέσσερις αλληλεπιδράσεις ήταν εννοποιημένες.
 - Όλη η ύλη είχε τη μορφή πλάσματος κουάρκ-γλιουονίων.
- Με το πέρασμα του χρόνου και τη μείωση της θερμοκρασίας, οι δυνάμεις διαχωρίστηκαν.

Ενότητα Σ8.11

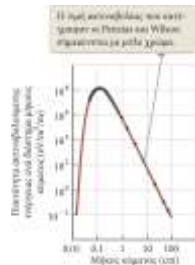
Σύντομη αναδρομή στην ιστορία του σύμπαντος



Ενότητα Σ8.11

Κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου (Cosmic Background Radiation, CBR)

- Η κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου είναι η κοσμική «λύμψη» που έχει απομείνει από τη Μεγάλη Έκρηξη.
- Η ακτινοβολία έχει ίδια ένταση προς όλες τις κατευθύνσεις.
- Η καμπύλη είναι παρόμοια με εκείνη ενός μέλανος σώματος σε θερμοκρασία 2.7 K.
- Η παρουσία μικρών ανομοιογενειών, επέτρεψε τον σχηματισμό των γαλαξιών και άλλων σωματιών.
- Ο δορυφόρος COBE ανακάλυψε ότι η ακτινοβολία υποβάθρου παρουσίαζε ανομοιογένειες που αντιστοιχούσαν σε θερμοκρασιακές διακυμάνσεις της τάξης των 0.0003 K.



Ενότητα Σ8.11

Ο νόμος του Hubble

- Σύμφωνα με την κοσμολογική θεωρία της Μεγάλης Έκρηξης, το σύμπαν διαστέλλεται.
- Ο Hubble διαπίστωσε από παρατηρήσεις ότι ολόκληρο το σύμπαν διαστέλλεται.
- Επιπλέον, το μέτρο των ταχυτήτων απομάκρυνσης των γαλαξιών από τη Γη αυξάνεται ευθέως ανάλογα με την απόστασή τους από εμάς.
 - Αυτός είναι ο νόμος του **Hubble**.
- Ο νόμος του Hubble μπορεί να γραφτεί ως εξής: $v = H \cdot R$.
 - Όπου H είναι η **σταθερά του Hubble**.
 - $H \approx 22 \times 10^{-3} \text{ m/s/ly}$

Ενότητα Σ8.11

Αναπάντητα ερωτήματα σχετικά με το σύμπαν

- Θα διαστέλλεται το σύμπαν για πάντα;
 - Οι αστρονόμοι και οι φυσικοί προσπαθούν να προσδιορίσουν τον ρυθμό διαστολής.
 - Εξαρτάται από το πόση είναι η μέση πυκνότητα του σύμπαντος σε σχέση με μια κρίσιμη πυκνότητα.
- Υπάρχει ελλείπουσα μάζα στο σύμπαν;
 - Η ποσότητα σκοτεινής ύλης φαίνεται να είναι πολύ μεγαλύτερη απ' όση μπορούμε να αντιληφθούμε.
 - Έχουν προταθεί διάφορα σωματίδια από τα οποία μπορεί να αποτελείται η σκοτεινή ύλη.

Ενότητα Σ8.11

Ένα άλλο αναπάντητο ερώτημα σχετικά με το σύμπαν

- Υπάρχει μυστηριώδης ενέργεια στο σύμπαν;
 - Κάποιες παρατηρήσεις έδειξαν ότι η διαστολή του σύμπαντος επιταχύνεται!
 - Για να εξηγηθεί αυτή η επιταχυνόμενη διαστολή, προτάθηκε η ύπαρξη της *σκοτεινής ενέργειας*.
 - Η σκοτεινή ενέργεια προκαλεί μια απωστική δύναμη, η οποία αυξάνει τον ρυθμό διαστολής.

Ενότητα Σ8.11

Κάποια ερωτήματα της σωματιδιακής φυσικής

- Γιατί υπάρχει τόσο λίγη αντιύλη στο σύμπαν;
- Είναι δυνατό να ενοποιηθεί η θεωρία της ισχυρής και της ηλεκτρομαγνητικής αλληλεπίδρασης;
- Γιατί τα κουάρκ και τα λεπτόνια σχηματίζουν τρεις παρόμοιες, αλλά ξεχωριστές οικογένειες;
- Είναι τα μίονια ίδια με τα ηλεκτρόνια, εκτός από τη διαφορά τους της μάζας, ή έχουν και άλλες μικρές διαφορές;
- Γιατί ορισμένα σωματίδια είναι φορτισμένα και άλλα ουδέτερα;
- Γιατί τα κουάρκ φέρουν κλασματικό φορτίο;
- Τι καθορίζει τις μάζες των θεμελιωδών συστατικών της ύλης;
- Μπορούν να υπάρξουν απομονωμένα κουάρκ;
- Τα λεπτόνια και τα κουάρκ έχουν υποκείμενη δομή;

Ενότητα Σ8.12

Μια νέα άποψη – Η θεωρία των χορδών

- Η **θεωρία των χορδών** είναι μια σύγχρονη απόπειρα να δοθεί απάντηση σε ορισμένα από τα παραπάνω ερωτήματα.
- Είναι μια απόπειρα να ενοποιηθούν οι τέσσερις θεμελιώδεις δυνάμεις μέσω της μοντελοποίησης όλων των σωματιδίων ως διάφορων κβαντισμένων τρόπων, ή καταστάσεων, ταλάντωσης μίας και μοναδικής οντότητας, μιας απίστευτα μικρής χορδής.
- Το τυπικό μήκος αυτής της χορδής είναι 10^{-35} m.
 - Αυτό ονομάζεται **μήκος Planck**.
- Σύμφωνα με τη θεωρία των χορδών, κάθε κβαντισμένη κατάσταση ταλάντωσης αντιστοιχεί σε ένα διαφορετικό στοιχειώδες σωματίδιο του Καθιερωμένου Μοντέλου.

Ενότητα Σ8.12

Παράγοντες που περιπλέκουν τη θεωρία των χορδών

- Απαιτεί **δέκα χωροχρονικές διαστάσεις**.
 - Εμείς μπορούμε να αντιληφθούμε τέσσερις διαστάσεις. Οι υπόλοιπες έξι διαστάσεις είναι **συμπαγοποιημένες**.
- Ένας άλλος παράγοντας που περιπλέκει τη θεωρία των χορδών είναι ότι είναι δύσκολο για τους θεωρητικούς των χορδών να καθοδηγήσουν τους πειραματικούς φυσικούς ως προς το τι να αναζητήσουν στα πειράματά τους.
 - Η πραγματοποίηση πειραμάτων απευθείας σε χορδές είναι ανέφικτη.

Ενότητα Σ8.12

Μια πρόβλεψη της θεωρίας των χορδών – Υπερσυμμετρία

- Μία από τις προβλέψεις της θεωρίας των χορδών είναι η **υπερσυμμετρία** (supersymmetry, SUSY).
 - Σύμφωνα με την υπερσυμμετρία, κάθε στοιχειώδες σωματίδιο έχει έναν υπερσύντροφο, ο οποίος δεν έχει ανακαλυφθεί ακόμα.
 - Πιστεύεται ότι η υπερσυμμετρία είναι σπασμένη και ότι οι μάζες των υπερσυμμετρικών σωματιδίων (υπερσυντρόφων) ξεπερνούν τις υπάρχουσες δυνατότητες ανίχνευσης.

Ενότητα Σ8.12

Μια άλλη προοπτική – Η θεωρία Μ

• Η θεωρία Μ προβλέπει την ύπαρξη ένδεκα διαστάσεων και βασίζεται σε μεμβράνες αντί για χορδές.

• Η θεωρία Μ ανάγεται στη θεωρία των χορδών αν οι ένδεκα διαστάσεις καταλήξουν σε δέκα, με τη συμπλοποίηση της ενδέκατης.

Τέλος

Στοιχειώδη σωμάτια και Κοσμολογία

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Βαρουτάς Δημήτρης. «Ηλεκτρομαγνητισμός - Οπτική - Σύγχρονη Φυσική. Σύγχρονη Φυσική». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση: <http://opencourses.uoa.gr/courses/DI121/>.



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

