

ΦΥΣ. 331

1^η Εργασία

Επιστροφή: Παρασκευή 30/09/23

1. Στο πρόβλημα αυτό θα πρέπει να χρησιμοποιήσετε δεδομένα και πίνακες που περιέχονται στο «βιβλίο των σωματιδίων» ή διαφορετικά *Particle Data Book* που ανανεώνεται και κρατιέται online στην ηλεκτρονική διεύθυνση <http://pdg.lbl.gov>. Στη διεύθυνση αυτή υπάρχουν πάρα πολλές πληροφορίες και επισκοπήσεις σχετικά με σωματίδια, ιδιότητές τους και φαινόμενα που έχουν παρατηρηθεί. Για την άσκηση αυτή θα χρησιμοποιήσετε την κατηγορία [Particle Listings](#) που όπως και κάθε άλλη ενότητα αποτελεί link για άλλες ιστοσελίδες.

(α) Βρείτε τα μποζόνια W , Z . Συγκρίνετε τις μάζες των σωματιδίων αυτών με αυτή του πρωτονίου. Εκτιμήστε την εμβέλεια των δυνάμεων που φέρονται από τα W και Z και συγκρίνετέ την με το μέγεθος του πρωτονίου.

(β) Βρείτε τα σωματίδια μ^+ , τ^+ , K^+ , π^+ , π^0 , ρ^0 , D^+ , B^+ , J/ψ και καταγράψτε τους χρόνους ζωής τους. Με βάση τη πληροφορία αυτή ποιες είναι οι αλληλεπιδράσεις που είναι υπεύθυνες για τις διασπάσεις των σωματιδίων αυτών; Υπολογίστε την μέση απόσταση που θα διανύσουν τα σωματίδια αυτά πριν διασπαστούν (στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου) υποθέτοντας ότι έχουν ορμή 10 GeV/c. Πληροφοριακά το περιεχόμενο σε quark των σωματιδίων K^+ , π^+ , π^0 , ρ^0 , D^+ , B^+ , J/ψ είναι: $K^+ \rightarrow d\bar{s}$, $\pi^+ \rightarrow u\bar{d}$, $\pi^0 = \frac{u\bar{u}-d\bar{d}}{\sqrt{2}}$ το ρ^0 έχει το ίδιο περιεχόμενο με το π^0 , $D^+ \rightarrow c\bar{d}$, $B^+ \rightarrow u\bar{b}$ ενώ το $J/\psi \rightarrow c\bar{c}$. Τα σωματίδια αυτά είναι δέσμιες καταστάσεις ζεύγους quark-antiquark ($q\bar{q}$) και ονομάζονται μεσόνια. Όλα τα παραπάνω μεσόνια αποτελούν τις χαμηλότερες ενεργειακά καταστάσεις του δεδομένου συνδυασμού. Οι καταστάσεις αυτές έχουν μηδενική συνολική στροφορμή (τροχιακή και ιδιοστροφορμή) ζεύγους εκτός από τα ρ^0 και J/ψ που έχουν συνολική στροφορμή 1. Η συνολική αυτή στροφορμή είναι το σπιν του σωματιδίου.

(γ) Παρατηρήστε τη διάσπαση του μ^+ και του τ^+ λεπτονίων. Γιατί οι τρόποι διάσπασης των σωματιδίων αυτών είναι τόσο διαφορετικοί;

(δ) Στο πάνω μέρος της ατμόσφαιρας, κοσμική ακτινοβολία πολύ υψηλής ενέργειας, παράγει ίδιο αριθμό π^+ και π^- τα οποία διασπώνται μετέπειτα. Τα προϊόντα διάσπασής τους διασπώνται επίσης. Ποιος ο λόγος του αριθμού των νετρίνο ηλεκτρονίων ως προς τον αριθμό των νετρίνο μιονίων που φθάνουν στην επιφάνεια της γης; Υποθέστε ότι όλα τα ασταθή σωματίδια διασπώνται πριν φθάσουν στην επιφάνεια της γης. Η υπόθεση αυτή βέβαια δεν είναι σωστή.

(ε) Ένας πειραματικός κατασκεύασε έναν ανιχνευτή πυριτίου μεγέθους 3cm x 3cm ώστε να μπορέσει να μετρήσει με ακρίβεια τις τροχιές φορτισμένων σωματιδίων. Ο ανιχνευτής αυτός (και θα πούμε περισσότερα για τους ανιχνευτές αυτούς) έχει πολλούς αισθητήρες ανάγνωσης ηλεκτρικών σημάτων που παράγονται από τον ιονισμό του υλικού καθώς διαπερνάται από κάποιο φορτισμένο σωματίδιο. Οι αισθητήρες αυτοί απέχουν 50μm μεταξύ τους. Για τον έλεγχο της σωστής λειτουργίας του ανιχνευτή, ο πειραματικός είχε χρησιμοποιήσει στο παρελθόν κάποιο επιταχυντή σωματιδίων όπου τοποθέτησε τον ανιχνευτή πυριτίου ανάμεσα σε δυο άλλους ανιχνευτές που λειτουργούσαν σωστά και επέτρεψε δέσμη να περάσουν από την διάταξη. Ωστόσο αποφάσισε στην προκειμένη περίπτωση να χρησιμοποιήσει ροή μιονίων στην επιφάνεια της γης. Υπολογίστε πόσο χρόνο θα χρειαστεί ώστε να συλλέξει το σήμα από 1000 μόνια για κάθε αισθητήρα του ανιχνευτή του. Η ροή κάθετων μιονίων στην επιφάνεια της γης είναι $I \sim 1 \text{ cm}^{-2}\text{min}$. Για την ροή μιονίων κοσμικής ακτινοβολίας στην επιφάνεια της γης μπορείτε να διαβάσετε και πάλι την ιστοσελίδα του *Particle Data Group* και ιδιαίτερα το link

που αναφέρεται στην επισκόπηση σχετικά με κοσμική ακτινοβολία και συγκεκριμένα την παράγραφο 28.3.

(στ) Κοιτάζτε για το τι είναι γνωστό σχετικά με το λόγο των ποσοστών διακλάδωσης (ή διάσπασης) του K^+ . Συγκεκριμένα ενδιαφερόμαστε για τον λόγο $R = \frac{Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^- e^+ \nu_e)}{Br(K^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ e^- \bar{\nu}_e)}$. Θα παρατηρήσετε ότι ενώ ο αριθμητής έχει κάποιο ποσοστό διακλάδωσης, η διάσπαση του παρονομαστή δεν έχει παρατηρηθεί. Προσπαθήστε να εξηγήσετε το λόγο για τον οποίο δεν έχει παρατηρηθεί η δεύτερη διάσπαση. Θα σας βοηθούσε η πληροφορία ότι το K^+ είναι δέσμια κατάσταση $u\bar{s}$ και ότι ένα quark μπορεί να εκπέμψει ένα gluon το οποίο με τη σειρά του μπορεί να διασπαστεί σε ζεύγος quark-antiquark. Τα quarks με τη σειρά τους μπορεί να δημιουργήσουν δέσμιες καταστάσεις με τα άλλα quarks του K^+ . Το π^+ είναι δέσμια κατάσταση $u\bar{d}$ ενώ τα π^- είναι δέσμια κατάσταση $d\bar{u}$. Με βάση τις πληροφορίες αυτές, προσπαθήστε να σχεδιάσετε το διάγραμμα Feynman της διάσπασης του αριθμητή.

2. Η ωκύτητα ή γρηγοράδα (rapidity), y , είναι μια κινηματική μεταβλητή χρήσιμη για περιγραφή συγκρούσεων σε επιταχυντές αδρονίων όπως ο LHC ή το Tevatron στο Fermilab.

Θεωρήστε συγκρούσεις $p\bar{p}$ ή pp . Θα μπορούσε κάποιος να περιγράψει την κινηματική των παραγόμενων σωματιδίων συναρτήσει κυλινδρικών συντεταγμένων. Για παράδειγμα θεωρώντας την διεύθυνση της δέσμης των σωματιδίων σαν το z -άξονα που δείχνει προς την κατεύθυνση κίνησης των πρωτονίων, και χρησιμοποιώντας την συνιστώσα της ορμής στο εγκάρσιο στη δέσμη επίπεδο (XY). Η συνιστώσα αυτή της ορμής ονομάζεται εγκάρσια ορμή και συμβολίζεται με P_T . Για την συμπλήρωση των συντεταγμένων χρειάζονται δυο γωνίες. Η πολική γωνία, θ , μεταξύ του z -άξονα και του διανύσματος της ορμής, και η αζιμουθιακή γωνία, ϕ , μεταξύ του x -άξονα και του διανύσματος της εγκάρσιας ορμής, P_T . Ωστόσο είναι πολύ πιο βολικό να αντικαταστήσουμε την γωνία θ με την ωκύτητα, y , η οποία ορίζεται σύμφωνα με την σχέση: $y = \frac{1}{2} \ln \frac{E+P_z}{E-P_z}$, όπου E η ενέργεια του σωματιδίου και P_z η z -συνιστώσα της ορμής. Μπορούμε να μελετήσουμε μερικά χαρακτηριστικά της ωκύτητας:

(α) Θα δούμε αργότερα στις διαλέξεις ότι η ενεργός διατομή παραγωγής ενός σωματιδίου είναι ανάλογη ενός παράγοντα του φασικού χώρου ίσο με d^3P/E , όπου P είναι η ορμή και E η ενέργεια του σωματιδίου. Σε αναλογία με τον στοιχειώδη όγκο σε κυλινδρικές συντεταγμένες ($dV = \frac{d\rho^2 dz d\phi}{2}$) ισχύει ότι $\frac{d^3P}{E} = \frac{dP_T^2 dP_z d\phi}{2E}$. Δείξτε ότι $\frac{d^3P}{E} = \frac{1}{2} dP_T^2 dy d\phi$. Από την στιγμή που η ενεργός διατομή παραγωγής σωματιδίων εξαρτάται ισχυρά από την P_T και ασθενέστερα από την ωκύτητα, y , η παραγωγή σωματιδίων αναμένεται να είναι ομοιόμορφη ως προς την ωκύτητα.

(β) Δείξτε ότι κάτω από μια διαμήκη ώθηση (στην z -διεύθυνση) με ταχύτητα β , η ωκύτητα του σωματιδίου αλλάζει σύμφωνα με την σχέση $y \rightarrow y + \Delta y$ όπου $\beta = \tanh(\Delta y)$. Η σημασία αυτού είναι ότι παρόλο που το σύστημα του εργαστηρίου ταυτίζεται με το σύστημα κέντρου μάζας των αδρονικών συγκρούσεων, δεν ταυτίζεται με το σύστημα κέντρου μάζας των παρτονικών συγκρούσεων. Παρτόνιο είναι κάποιο από τα συστατικά των αδρονίων της δέσμης (quark ή gluon) που έρχεται σε σύγκρουση με ένα παρτόνιο από αδρόνιο της άλλης δέσμης. Αυτό συμβαίνει γιατί τα παρτόνια μεταφέρουν μέρος μόνο της ενέργειας του πρωτονίου και σε πρώτη προσέγγιση δεν έχουν καθόλου εγκάρσια ορμή (ως προς την διεύθυνση κίνησης του πρωτονίου). Σαν αποτέλεσμα, δουλεύοντας στο χώρο $P_T - y - \phi$, ο μετασχηματισμός από τις μεταβλητές ως προς το σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας των συγκρουόμενων παρτονίων, είναι πολύ απλός αφού η εγκάρσια ορμή και

η γωνία φ είναι αμετάβλητες ως προς επιμήκειες ωθήσεις (ωθήσεις δηλαδή κατά μήκος της δέσμης).

(γ) Δείξτε ότι για σωματίδιο μάζας m , στο σύστημα αναφοράς του εργαστηρίου ισχύει:

$$-\frac{1}{2} \ln \frac{s}{m^2} < y < \frac{1}{2} \ln \frac{s}{m^2}$$

όπου s είναι το τετράγωνο της ενέργειας του κέντρου μάζας των αδρονικών συγκρούσεων και $m \ll \sqrt{s}$.

(δ) Δείξτε ότι καθώς $m \rightarrow 0$ ή ισοδύναμα ότι $m \ll E$ τότε $y \rightarrow \eta = -\ln \left(\tan \left(\frac{\theta}{2} \right) \right) = \ln \left(\cot \left(\frac{\theta}{2} \right) \right)$. Η ποσότητα η ονομάζεται ψευδο-ωκύτητα (*pseudorapidity*). Σχεδιάστε την ψευδο-ωκύτητα συναρτήσει της γωνίας θ σε μοίρες.

(ε) Θεωρήστε τώρα μια σκέδαση όπου υπάρχει μεγάλη εγκάρσια μεταφορά ενέργειας, και τέτοια ώστε $q\bar{q} \rightarrow q\bar{q}$. Βέβαια τα quarks και anti-quarks που βγαίνουν από την σκέδαση αυτή δεν μπορούν να μετρηθούν στον ανιχνευτή εφόσον δεν υπάρχουν ελεύθερα quarks ή gluons. Αντίθετα τα quarks αυτά θα θρυμματιστούν σε ένα σύνολο από αδρόνια (π , K , p ...). Τα αδρόνια αυτά έχουν μικρή εγκάρσια ορμή ως προς την διεύθυνση διάδοσης του αρχικού quark ή anti-quark. Σαν αποτέλεσμα, τα αδρόνια αυτά σχηματίζουν μια συστοιχία κινούμενη πολύ κοντά στην αρχική διεύθυνση των quarks και εμφανίζονται στον ανιχνευτή σαν ένα spray από σωματίδια που ονομάζεται *jet*. Θεωρήστε ότι q_L και q_T είναι οι τυπικές τιμές των ορμών των αδρονίων από τον θρυμματισμό του quark ή antiquark, όπως μετρούνται κατά μήκος και εγκάρσια ως προς την διεύθυνση κίνησης του αρχικού quark ή antiquark. Θεωρήστε επίσης ότι $q_T \ll q_L$ και $m \ll q_L$, όπου m , η τυπική μάζα αυτών των αδρονίων.

Δείξτε ότι τα *jets* είναι σχεδόν κυκλικά στον η - φ χώρο, δηλαδή $\Delta\eta \approx \Delta\varphi$ όπου $\Delta\eta$ και $\Delta\varphi$ είναι οι συνηθισμένες διαστάσεις των *jets* ως προς τις η - φ συντεταγμένες. Δείξτε ακόμα ότι το η - φ μέγεθος των *jets* από τον θρυμματισμό ενός quark δεδομένης εγκάρσιας ορμής είναι ανεξάρτητο της ωκύτητας του αρχικού quark.

Αυτό είναι ο λόγος που ορμές των *jets* μετρούνται συνήθως αθροίζοντας τις ορμές όλων των αδρονίων που περιέχονται μέσα σε ένα κώνο στον η - φ χώρο. Ο αλγόριθμος αυτός εύρεσης της ορμής ενός *jet* ονομάζεται *αλγόριθμος σταθερού κώνου*.