

## ΦΥΣ. 331

### 4<sup>η</sup> Εργασία

Επιστροφή: Παρασκευή 10/11/23

1. Η ακτινοβολία synchrotron μπορεί να αποτελέσει σημαντική πηγή απωλειών ενέργειας σε έναν κυκλικό επιταχυντή. Το ποσό των απωλειών ενέργειας λόγω ακτινοβολίας synchrotron εξαρτάται από παραμέτρους λειτουργίας και κατασκευής των επιταχυντών, και έτσι διάφορα πειράματα διαχειρίζονται την ακτινοβολία synchrotron με διαφορετικούς τρόπους. Στην άσκηση αυτή θα δούμε πόσο σημαντική μπορεί να είναι η ακτινοβολία synchrotron:  
(α) Στο δακτυλίδι του LHC και σε κατάσταση λειτουργίας των προδιαγραφών του επιταχυντή, υπάρχουν 2808 πακέτα πρωτονίων που το καθένα περιέχει  $1.15 \times 10^{11}$  πρωτόνια που το καθένα έχει ενέργεια  $6.5 \text{ TeV}$ . Υπολογίστε την ολική ισχύ που εκπέμπεται ως ακτινοβολία synchrotron όταν λειτουργεί ο LHC. Εκφράστε την απάντησή σας σε  $\text{GeV/s}$  και  $\text{J/s}$ . Συγκρίνετε το αποτέλεσμα σας με την ισχύ που εκπέμπει ένα φούρνος μικροκυμάτων που συνήθως είναι της τάξης των  $1000 \text{ W}$ .  
(β) Ο μεγάλος επιταχυντής ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων (LEP) έφερνε σε σύγκρουση ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια σε μέγιστη ενέργεια κέντρου-μάζας  $206 \text{ GeV}$ . Ο επιταχυντής LEP χρησιμοποιούσε την ίδια σήραγγα με τον LHC. Υπολογίστε την ολική ισχύ της ακτινοβολίας synchrotron από ένα ηλεκτρόνιο για την περίπτωση του επιταχυντή LEP.  
(γ) Ένας λόγος για τον οποίο ο επιταχυντής LHC μπορεί να φέρει σε σύγκρουση πρωτόνια σε πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από την ενέργεια που έδινε ο επιταχυντής LEP σε σύγκρουση ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια, οφείλεται στο γεγονός ότι τα πρωτόνια εκπέμπουν πολύ μικρότερη ακτινοβολία synchrotron από ότι τα ηλεκτρόνια. Για την ίδια ισχύ εκπεμπόμενης ακτινοβολίας synchrotron, πόσο μεγαλύτερη μπορεί να είναι η ενέργεια των πρωτονίων του LHC συγκρινόμενη με την ενέργεια των ηλεκτρονίων στο LEP;
2. Ο ανιχνευτής τροχιών του ATLAS στο LHC, είναι ένας κυλινδρικός ανιχνευτής με εξωτερική ακτίνα  $1.1$  μέτρα που βρίσκεται σε  $2 \text{ T}$  μαγνητικό πεδίο ενός σωληνοειδούς. Ακριβώς μετά τον ανιχνευτή τροχιών υπάρχει μια περιοχή με μηδενικό μαγνητικό πεδίο, όπου βρίσκεται το ηλεκτρομαγνητικό καλορίμετρο.  
(α) Η ενέργεια των φορτισμένων σωματιδίων που δεν μπορούν να βγουν από τον ανιχνευτή τροχιών μετριέται με πολύ μεγάλο σφάλμα γιατί τα σωματίδια αυτά δεν φθάνουν στο καλορίμετρο. Υπολογίστε την ελάχιστη εγκάρσια ορμή,  $p_T$ , σε  $\text{GeV}$ , που πρέπει να έχει ένα ηλεκτρόνιο για να φθάσει στο καλορίμετρο.  
(β) Ο ανιχνευτής τροχιών από υλικό ημιαγωγού, είναι υποσύστημα του ανιχνευτή τροχιών και είναι ένας κύλινδρος η ακτίνα του οποίου είναι  $0.5$  μέτρα. Αποτελείται από στρώματα πυριτίου που επιτρέπουν την μέτρηση της θέσης των σωματιδίων με ακρίβεια  $17 \mu\text{m}$ . Η τροχιά φορτισμένου σωματιδίου πολύ μεγάλης ενέργειας δεν καμπυλώνει ιδιαίτερα στο μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα το φορτίο τους να μην μετριέται με μεγάλη ακρίβεια. Υπολογίστε την

μέγιστη εγκάρσια ορμή,  $p_T$ , σε  $GeV$  ενός ηλεκτρονίου το οποίο ανιχνεύεται από τον ανιχνευτή τροχιών ημιαγωγού, και η τροχιά του έχει καμπυλωθεί.

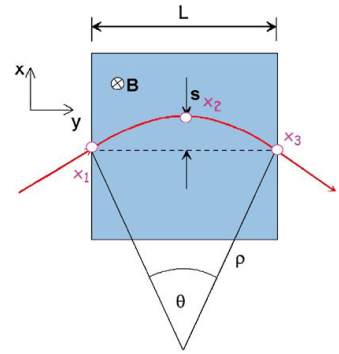
(γ) Υπολογίστε την αβεβαιότητα στη τιμή της εγκάρσιας ορμής,  $p_T$ , για σωματίδιο μεγάλης εγκάρσιας ορμής η τροχιά του οποίου μόλις και καμπυλώνει στο μαγνητικό πεδίο. Εκτιμήστε την αβεβαιότητα αυτή με βάση την διακριτική ικανότητα του ανιχνευτή τροχιών ημιαγωγού.

3. Ένας κυκλικός επιταχυντής έχει μέσο φορτίο ηλεκτρονίων  $10mA$  και μέσο φορτίο ποζιτρονίων ( $e^+$ )  $5mA$ . Αν το δαχτυλίδι του επιταχυντή έχει ακτίνα  $100m$  και οι δέσμες των ηλεκτρονίων και ποζιτρονίων αποτελούνται μόνο από ένα πακέτο ηλεκτρονίων και ένα πακέτο ποζιτρονίων, ακτίνας  $r=1\mu m$  και μήκους  $2mm$ , να βρεθεί η μέση φωτεινότητα του επιταχυντή σε  $cm^{-2} s^{-1}$ .
4. Θεωρήστε ότι έχετε ένα σωματίδιο το οποίο διαπερνά  $100\mu m$  πυριτίου. Βρείτε τον μέσο αριθμό ηλεκτρονίων που παράγονται. Δίνεται ότι η μέση ενέργεια διέγερσης του πυριτίου είναι  $3.6eV$ .
5. Όπως το γερμάνιο και το πυρίτιο, ο άνθρακας σε κρυσταλλική μορφή διαμαντιού συμπεριφέρεται σαν ημιαγωγός και για το λόγο αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την κατασκευή ενός ανιχνευτή σωματιδίων από διαμάντια. Η ενέργεια που απαιτείται για την δημιουργία ενός ζεύγους ιόντων στο διαμάντι είναι  $W=5eV$ . Υπολογίστε τη διακριτική ικανότητα ενέργειας ενός ανιχνευτή διαμαντιού για φωτόνια ενέργειας  $100 keV$  (ακτίνες X).  
(β) Τα διαμάντια, ακόμα και τα τεχνητά, είναι αρκετά ακριβά για την κατασκευή ενός σχετικά μεγάλου ανιχνευτή και για τον λόγο αυτό καταφεύγουμε στη χρήση φθηνότερων και πιο πυκνών υλικών. Υπολογίστε πόσο πάχος σιδήρου απαιτείται για να απορροφηθεί πλήρως ένα ηλεκτρόνιο ενέργειας  $24 GeV$ . Δηλαδή ποιο θα πρέπει να είναι το πάχος ώστε η καταίγίδα του ηλεκτρονίου να σταματήσει μέσα στον ανιχνευτή. Δίνεται ότι το μήκος ακτινοβολίας του Fe είναι  $X_0=1.77cm$  και η πυκνότητά του  $d=7.87 g/cm^3$  και η κριτική ενέργεια.  
(γ) Τι πάχος θα πρέπει να έχει ένας ανιχνευτής από σίδηρο ώστε να σταματήσει ένα μόνιο ενέργειας  $24 GeV$ ;

Υπόδειξη: Μπορείτε να βρείτε χρήσιμες πληροφορίες στο άρθρο *Journal of Reviews of Modern Physics*: 240, 13 (1941).

6. Εξηγήστε πως χρησιμοποιώντας δύο ανιχνευτές Cherenkov τον έναν μετά τον άλλο, θα μπορούσατε να ταυτοποιήσετε τρία σωματίδια διαφορετικής μάζας αλλά ίδιας ορμής.
7. Η τεχνική PET (positron emission tomography), στηρίζεται στην εξαΰλωση  $e^+e^-$  και την ανίχνευση και μέτρηση της ενέργειας των δύο φωτονίων από το ανιχνευτικό σύστημα της συσκευής. Τα ποζιτρόνια παράγονται από ένα ραδιοϊσότοπο που έχει εισαχθεί στο οργανικό υλικό για τον σκοπό αυτό. Το ζεύγος των  $e^+e^-$  εξαΰλωνεται σε ηρεμία σε ζευγάρι φωτονίων. Υποθέτοντας ότι τα φωτόνια ανιχνεύονται μέσω της ανίχνευσης ηλεκτρονίων που έχουν σκεδαστεί από τα φωτόνια μέσω φαινομένου Compton, βρείτε την ελάχιστη και μέγιστη ενέργειά τους.

8. Υπολογίστε τον μέσο αριθμό σωματιδίων που περιέχονται σε μια ηλεκτρομαγνητική καταιγίδα που δημιούργησε ένα φωτόνιο ενέργειας 50 GeV που έχει διαπεράσει 10, 13 και 20cm σιδήρου.
9. Ποια είναι η μέση ενέργεια που χάνεται για ηλεκτρόνια ορμής 5 GeV/c και για μόνια της ίδιας ορμής 5 GeV/c που περνούν μέσω 10cm άνθρακα;
10. Οι μεταβλητές που είναι απαραίτητες για την μέτρηση της ορμής ενός γρήγορα κινούμενου φορτισμένου σωματιδίου μέσα σε μαγνητικό πεδίο φαίνονται στο παρακάτω σχήμα, όπου  $L$  είναι η διάσταση του ανιχνευτή,  $B$  η ένταση του μαγνητικού πεδίου (η οποία είναι σταθερή) το οποίο θεωρούμε ότι είναι κάθετο στην διεύθυνση της δέσμης,  $\rho$  η ακτίνα καμπυλότητας της τροχιάς και  $s$  είναι απόσταση της χορδής από το μέσο του τόξου της τροχιάς του σωματιδίου. Θεωρούμε επίσης την προβολή της ορμής του σωματιδίου,  $p_T$ , στο επίπεδο κάθετο στην διεύθυνση της δέσμης. Αγνοώντας πολλαπλές σκεδάσεις Coulomb, προσδιορίστε:



(α) Την σχέση που συνδέει την εγκάρσια ορμή,  $p_T$ , με την  $s$ .

(β) Την ακρίβεια της μέτρησης της εγκάρσιας ορμής, αν  $p_T = 1 \text{ GeV}$ ,  $B = 10 \text{ kGauss}$ ,  $L = 1 \text{ m}$  και  $\Delta s = 200 \mu\text{m}$  (όπου  $\Delta s$  το σφάλμα στη μέτρηση της  $s$ ).