

Εργασία 5<sup>η</sup>

Επιστροφή: Τρίτη 08.11.22

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 μετريέται 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 μετريέται με μεγάλη ακρίβεια. Υπολογίστε την μέγιστη εγκάρσια ορμή,  $p_T$ , σε  $\text{GeV}$  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. Όπως έχει αναφερθεί, τα μόνια δεν σταματούν στο καλορίμετρο, και ως αποτέλεσμα είναι δυσκολότερο να υπολογίσουμε την τετραορμή τους. Στο πείραμα ATLAS για παράδειγμα, το μαγνητικό πεδίο και ο ανιχνευτής μιονίων χρησιμοποιούνται για την μέτρηση της ενέργειας των μιονίων. Η ένταση του μαγνητικού πεδίου του σωληνοειδούς που χρησιμοποιείται για την

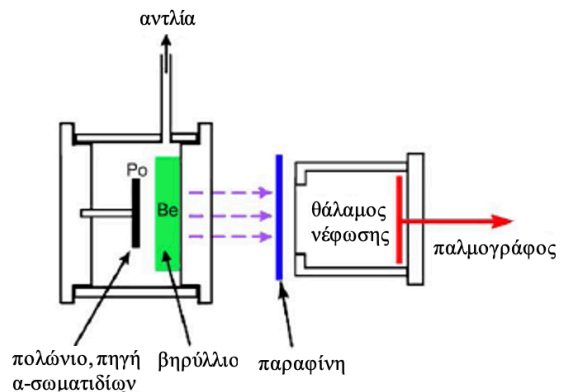
καμπύλωση των τροχιών των φορτισμένων σωματιδίων είναι  $B_{sol}$  σε Tesla. Το μαγνητικό πεδίο του τοροειδούς μαγνήτη μέσα στον οποίο βρίσκεται ο ανιχνευτής μιονίων είναι  $B_{tor}$ . Αν ένα μίονιο παρατηρηθεί να έχει τροχιά με ακτίνα καμπύλωσης  $R_{sol}$  στο σωληνοειδές μαγνήτη και ακτίνα καμπύλωσης  $R_{tor}$  στον τοροειδή μαγνήτη, υπολογίστε το μέτρο της εγκάρσιας συνιστώσας,  $p_T$ , και επιμήκους συνιστώσας,  $p_z$ , της ορμής του μιονίου. Δώστε την απάντησή σας συναρτήσει του φορτίου, του μαγνητικού πεδίου και της ακτίνας καμπυλότητας.

Υπόδειξη: Θεωρήστε τις συνιστώσες της ορμής που είναι κάθετες στο μαγνητικό πεδίο του σωληνοειδούς και του τοροειδούς μαγνήτη.

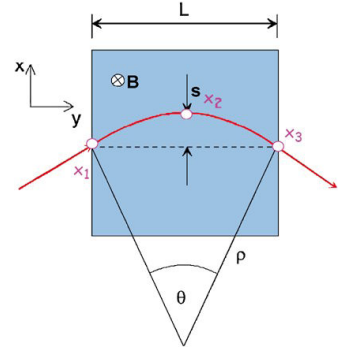
4. Στα τέλη της δεκαετίας του 1980, ξεκίνησε η κατασκευή του μεγαλύτερου επιταχυντή πρωτονίων που σχεδιάστηκε. Ο επιταχυντής αυτός που ονομάζονταν SSC θα κατασκευάζονταν στο Waxatchie του Texas των ΗΠΑ και θα είχε ενέργεια 20 TeV για κάθε δέσμη που θα περιστρέφονταν σε ένα δαχτυλίδι περιφέρειας 87 km. Ο επιταχυντής θα ήταν έτοιμος για συγκρούσεις 2-3 χρόνια μετά την λειτουργία του LHC (αρχικά πλάνα έλεγα για αρχές του 2000). Τελικά λόγω διαφόρων συγκυριών, το κόστος κατασκευής του επιταχυντή αυτού έφθασε σε πολύ υψηλά για την εποχή κριτήρια και το πρόγραμμα σταμάτησε αφού μάλιστα είχε ανοίξει το tunnel της δέσμης και των μαγνητών.

Σύμφωνα με το σχεδιασμό, προβλέπονταν ότι για να επιτευχθεί η ενέργεια των 20 TeV, κάθε δαχτυλίδι του SSC θα έπρεπε να περιλαμβάνει 4000 διπολικούς μαγνήτες, ο καθένας 16m μήκος και έντασης μαγνητικού πεδίου 7T. Αυτό σημαίνει ότι περισσότερο από το μισό μήκος της περιφέρειας του tunnel του επιταχυντή θα καταλαμβάνονταν από τους διπολικούς μαγνήτες. Αν θέλατε να κατασκευάσετε ένα σύγχροτρο για χρήση σε πειράματα συγκρούσεων σταθερού στόχου και ισοδύναμης ενέργειας στο σύστημα αναφοράς του κέντρου μάζας,  $(E_{CM} = \sqrt{s} = 40TeV)$  και χρησιμοποιούσατε ανάλογο σχεδιασμό μαγνητών, ποιο θα έπρεπε να ήταν το μήκος της περιφέρειας του tunnel του επιταχυντή αυτού;

5. Στο άρθρο το οποίο έστειλε ο J. Chadwick για να ανακοινώσει την ανακάλυψη του νετρονίου, περιγράφει την παρατήρηση πρωτονίων που εκπέμπονται από στόχο που περιείχε άτομα υδρογόνου. Ο υδρογενής στόχος είχε εκτεθεί σε άγνωστη ακτινοβολία που ήταν ιδιαίτερα διεισδυτική και που εκπέμπονταν από βηρύλλιο όταν βομβαρδίζονταν από α-σωματίδια προερχόμενα από πολώνιο όπως φαίνονται στο διπλανό σχήμα της διάταξης. Τα πρωτόνια με μάζα  $m_p$  εκπέμπονταν με μέγιστη ταχύτητα  $3 \times 10^9 \text{ cm/s}$ . Η ακτινοβολία που εκπέμπονταν από το βηρύλλιο φαινόταν να είναι ουδέτερη και επομένως πιθανόν να προέρχονταν είτε από φωτόνια ή σύμφωνα με την θεωρία του Chadwick, από ουδέτερα σωματίδια μάζας παρόμοιας του πρωτονίου. Υποθέτοντας ότι η ακτινοβολία προέρχονταν από φωτόνια και ότι τα πρωτόνια εκπέμπονται μέσω του φαινομένου Compton που προκαλούσαν τα προσπίπτοντα φωτόνια, υπολογίστε την ενέργεια των φωτονίων  $E_\gamma$ . Δικαιολογήστε γιατί αυτή η ενέργεια των φωτονίων είναι ασυμβίβαστη με την παρατήρηση. Τέλος συζητήστε τους λόγους για τους οποίους ο Chadwick εισήγαγε την υπόθεση της ύπαρξης των νετρονίων.



6. 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  $\Delta s = 200 \text{ } \mu\text{m}$  (όπου  $\Delta s$  το σφάλμα στη μέτρηση της  $s$ ).
7. 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  $100 \text{ keV}$  (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 φθινότερων και πιο πυκνών υλικών. Υπολογίστε πόσο πάχος σιδήρου απαιτείται για να απορροφηθεί πλήρως ένα ηλεκτρόνιο ενέργειας  $24 \text{ GeV}$ . 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  $X_0 = 1.77 \text{ cm}$  και η πυκνότητά του  $d = 7.87 \text{ g/cm}^3$  και η κριτική ενέργεια.
- (γ) Τι πάχος θα πρέπει να έχει ένας ανιχνευτής από σίδηρο ώστε να σταματήσει ένα μόνιο ενέργειας  $24 \text{ GeV}$ ;
8. Για τη διάσπαση  $\pi^- p \rightarrow \Lambda^0 K^0$ , η ιδιοκατάσταση των ισχυρών αλληλεπιδράσεων  $|K^0\rangle$  παράγεται τη χρονική στιγμή  $t = 0$ . Υποθέστε ότι οι ιδιοκαταστάσεις της μάζας είναι:  $|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$  και  $|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$  με μάζες  $m_1$  και  $m_2$  και χρόνους ζωής  $\tau_1$  και  $\tau_2$  αντίστοιχα. Θεωρήστε ακόμα ότι η διαφορά μάζας τους είναι  $\Delta m = m_1 - m_2$ . Γράψτε την χρονοεξάρτηση της κυματοσυνάρτησης του καονίου συναρτήσει των  $|K_1\rangle$ ,  $|K_2\rangle$ ,  $\tau_1$ ,  $\tau_2$ ,  $m_1$  και  $m_2$ . Θυμηθείτε ότι ο χρόνος ζωής εξαρτάται από το τετράγωνο της κυματοσυνάρτησης. Ποιά είναι η πιθανότητα συναρτήσεως του χρόνου για το παραγόμενο καόνιο να επιζήσει και να παρατηρηθεί (μέσω των αλληλεπιδράσεων του) σαν  $|\bar{K}^0\rangle$  αν  $\tau_1$  είναι πάρα πολύ μεγάλος (σχεδόν άπειρος) όπως και στις περιπτώσεις όπου  $\Delta m = 0$  ή  $\Delta m = \frac{2\hbar}{c^2\tau_2}$ .