

## ΦΥΣ. 331

### 4<sup>η</sup> Εργασία

Επιστροφή: Παρασκευή 10/11/23

- 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:
  - 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  $6.5 TeV$ . Υπολογίστε την ολική ισχύ που εκπέμπεται ως ακτινοβολία synchrotron όταν λειτουργεί ο LHC. Εκφράστε την απάντησή σας σε  $GeV/s$  και  $J/s$ . Συγκρίνετε το αποτέλεσμά σας με την ισχύ που εκπέμπει ένα φούρνος μικροκυμάτων που συνήθως είναι της τάξης των  $1000W$ .
  - Ο μεγάλος επιταχυντής ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων (LEP) έφερνε σε σύγκρουση ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια σε μέγιστη ενέργεια κέντρου-μάζας  $206 GeV$ . 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.
  - 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;

(a) Η ισχύς  $P$ , που γίνεται εξαιτίας συνυγράτρους ακτινοβολίας είναι:

$$P = \frac{e^2}{8\pi\epsilon_0 m^4 c^2 R^2} E^4 \eta^4 \quad \text{όπου } e \text{ το φορτίο των ηλεκτρονίου, } \eta: \text{η ταχύτητα των ακτινοβολίων}$$

Στον LHC, η ταχύτητα των πρωτονίων είναι σχεδόν ίδια με την ταχύτητα των φωτός. Γράφομε την παρανομή σχίσης σε βούλες  $GeV$  για την ενέργεια  $E$  των ακτινοβολίων και την μέση της μέσης των φωτίων,  $\bar{P}$  εμφραγμένη  $GeV km$ :

$$P \approx 3 \times 10^{-4} \left( \frac{1 km}{R} \right)^2 \left( \frac{E}{m} \right)^4 eV \cdot s^{-1} \quad \text{Για τον LHC: } \frac{E}{m} \approx 7000 \text{ GeV} \quad \text{και } R_{LHC} = 27 km$$

Επίσημα για τον LHC η απώλεια ισχύς σαν πρωτότυπο είναι:

$$P_{LHC} \approx 40 MeV \cdot s^{-1}$$

Az Depicofor által előállított röviden körülbelül 1000 db. röviden körülbelül 1000 db. röviden körülbelül 1000 db.

Ο κανόνιος αριθμού πυρσωνών  $N_p$  στην LHC είναι ο αριθμός των πυρσών  $\alpha \beta$  δίδυμος έντονος αριθμού πυρσωνών μέσα σε μια περιοχή:  $N_p = 2808 \cdot 1.55 \times 10^{11} \approx 3.2 \times 10^{14}$

*Endiurus* ολίγην τρέχει αυτοβοτειαν σε λόφους σινηγμόρων αυτοβοτειδών.

$$P_{\text{tot}} \approx 40 \cdot 3.2 \times 10^{14} \text{ MeV/s} \approx 1.3 \cdot 10^{13} \text{ GeV/s}$$

Necesitaremos en el parámetro  $\eta/s$  el valor de  $1 \text{ GeV} \approx 1.6 \times 10^{10} \text{ J}$  para separar  
los resultados entre los de  $W$  y  $W'$ :  $P_{\text{tot}} \approx 1.6 \cdot 10^{-10} \cdot 1.3 \times 10^3 \text{ W} \Rightarrow P_{\text{tot}} \approx 2 \cdot 10^3 \text{ W}$

(8) Η λογική των γενετικών δομών αυτού του είδους αρχικά προσέπραξη είναι:

$$P = \frac{e^2}{G_E m_e^4 c^{12}} \frac{E^4}{R^2} v^4$$

**GEOGRAPHIE**  
Hierdie geografie beskryf ons geografie van LEP en sy bewoners soos K  
eens n plek wat uitverdigbaar was vir woonstel soos Ystad. Die plek wat ons  
was die bewoners van tog ingryp wat daar was! V.S.C.

Enofámos; o Poxar em São Domingos da Cal:

$$\frac{P_{LEP}}{P_{LHC}} = \left( \frac{m_p E_{LEP}}{m_e E_{LHC}} \right)^{\frac{1}{2}}$$

$$\text{Ansatz} \quad \frac{m_p}{m_e} \approx \frac{938}{0.511} \Rightarrow \frac{m_p}{m_e} \approx 1.8 \times 10^3 \quad \leftarrow \quad \frac{E_{\text{KEP}}}{E_{\text{LHC}}} \approx \frac{0.906}{13} \approx 1.6 \times 10^{-2}$$

$$\Rightarrow \left( \frac{m_p E_{LEP}}{m_e E_{LHC}} \right)^4 \simeq \left( 1.8 \times 10^3 \cdot 1.6 \times 10^{-9} \right)^4 \simeq 29^4 \Rightarrow \boxed{\frac{P_{LEP}}{P_{LHC}} \simeq 7 \times 10^5}$$

$$\text{Endrejus apai } P_{LHC} \approx 40 \text{ GeV/s} \quad \text{et} \quad P_{LEP} \approx 10 \cdot 7 \times 10^3 \Rightarrow P_{LEP} \approx 9.8 \times 10^4 \text{ GeV/s}$$

2. Ο ανιχνευτής τροχιών του ATLAS στο LHC, είναι ένας κυλινδρικός ανιχνευτής με εξωτερική ακτίνα 1.1 μέτρα που βρίσκεται σε 2T 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  $GeV$ , 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  $17\mu m$ . 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 τιμής 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.

(α) Ένα φορτισμένο σωματίδιο το οποίο δεν φθάνει στο καλορίμετρο, έχει τροχιά η οποία τιμήσεται στο βεγκτικό πεδίο, με διάφερο που είναι μεγαρότερη από την ανισότητα μετρήσεων αφέντων αιώδεων ενδιάμεσων της θέσης του ανιχνευτή τροχιών. Επομένως η ανισότητα της τροχιάς του ανιχνευτή τροχιών, έχει μετρηθεί σε μέτρη περίπου  $0.55m$ . Η ανισότητη εγκάρσιας ορμής του ανιχνευτή τροχιών αντίστοιχης θέσης:

$$P_T \approx \frac{R |\vec{B}|}{3} \approx \frac{0.55m \cdot 2T}{3} GeV \Rightarrow P_T \approx 0.37 GeV$$

(β) Για ένα σωματίδιο με πολύ μεγάλη εγκάρσια ορμή, για να παρατηρήσεται καρεκλώση της τροχιάς του. Θα πρέπει να γεγγάρεται πολύ γρήγορα στην αύριον προσεχείς <sup>προσεχείς</sup> ανιχνευτή τροχιών, να έχει αποκαλυψει μετρές 1 pixel, από την επόμενη γραμμή. Με βάση την υπόθεση αυτή, θα υπολογίσεται την ανισότητα καρεκλώσης της αύριον προσεχείς της τροχιάς της  $P_T$ . Στη γραφή ένα φρέσκως γράμμα της  $P_T$

Πλευρές των τριγώνων καθολίζονται,  $R$ , τιμές πλευρών των τριγώνων των ανιχνευτών  $r_t$ , και η μετατόπιση είναι το μήκος  $R + \text{τομέας ενός pixel } \Delta x$ .



$$\text{Θα είχαμε } R^2 + r_t^2 = (R + \Delta x)^2 \Rightarrow R^2 + r_t^2 = R^2 + 2R\Delta x + \Delta x^2 \Rightarrow r_t^2 = 2R\Delta x + \Delta x^2$$

Αλλά  $\Delta x \ll R$  οπότε  $(R + \Delta x)^2 = R^2(1 + \epsilon) \approx R^2(1 + 2\epsilon)$   $\Rightarrow r_t^2 \approx 2R\Delta x \Rightarrow$

$$R = \frac{r_t}{\sqrt{2\Delta x}} \approx \frac{0.5}{2 \cdot 1.7 \times 10^{-5} \text{ m}} \Rightarrow R \approx 7.3 \times 10^3 \text{ m}$$

Η ανιχνευτής εγκάρσια σύριγγα  $P_\perp$  θα είναι:  $P_\perp \approx \frac{R|B|}{3} = \frac{7.3 \times 10^3 \cdot 2}{3} \approx 4.9 \times 10^3$

(g) Η αβεβαιότητα στην προσδιορίση της σύριγγας ενός ανιχνεύτη φέρεται στην εγκάρσια σύριγγα, είναι σήμερα πολύ μεγάλη.

Η αβεβαιότητα στην σύριγγα είναι:  $\Delta P_\perp \approx P_\perp^2 \left( \Delta \frac{1}{R} \right)$

Ανά το (b) ερώτημα, βρίσκεται η ανιχνευτής εγκάρσια σύριγγα στην προσδιορίση  $P_\perp$  είναι:  $\frac{1}{R} = \frac{2\Delta x}{r_t^2}$ .

Η τροχιά θα διπλασιάζεται όταν οπουδήποτε στο pixel περισσότερο  $\Delta x$  θα διπλασιάζεται. Είχαμε πάλι επειγόντες οι οι τροχιές της εγκάρσιας σύριγγας είναι ίδιε. Εφείσος η αβεβαιότητα στην σύριγγα θα είναι:

$$\Delta P_\perp \approx P_\perp^2 \frac{2\Delta x}{r_t^2} \approx 3.2 \times 10^3 \text{ GeV}$$

Με τόση μεγάλη αβεβαιότητα, η τροχιά της εγκάρσιας σύριγγας,  $P_\perp$ , ενός τόσο ενεργετικού ανιχνεύτη είναι ουσιαστικά αγνωστής!!

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  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

$$\text{Η φωτεινότητα της δέσμης } S \text{ πλέον από τη σχέση: } \boxed{l = \frac{n_1 n_2}{A} f} \text{ όπου:}$$

$$f: \text{η συχνότητα διασταύρωσης των πλευτών στη δέσμη} = \boxed{\frac{C}{2\pi R}} \text{ ακίνητη επιταχυντής}$$

$$n_1, n_2: \text{ο αριθμός των πλευτών της κάθε δέσμης}$$

Το ρεύμα της δέσμης, είναι ο αριθμός των πλευτών της δέσμης επί το φορτίο των σωματιδίων της δέσμης επί τη συχνότητα περιστροφής των πλευτών:  $I = qf \Rightarrow$

$$\Rightarrow I = nqf \quad \left\{ \Rightarrow l = \frac{f \frac{I_1}{qR} \cdot \frac{I_2}{qR}}{\pi r^2} = \frac{I_1 I_2 f}{(qR)^2 \pi r^2} = \frac{I_1 I_2}{q^2 r^2 \pi R^2} \right.$$

$$\text{Η επιφάνεια της δέσμης θα είναι: } A = \pi r^2 \text{ όπου } r: \text{η ακτίνα της δέσμης}$$

$$\text{Επομένως: } \boxed{l = \frac{I_1 I_2 \cdot 2R}{q^2 r^2 C}} \Rightarrow l = \frac{2 \cdot (300m) (0.010A) (0.005A)}{(1.602 \cdot 10^{-19})^2 \cdot 2.997 \cdot 10^8 \cdot (10^{-6})^2} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow l = 2.6 \cdot 10^{18} \Rightarrow l = 1.3 \cdot 10^{35} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \Rightarrow l = 1.3 \cdot 10^{35} \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} \left( \frac{1\text{m}}{100\text{cm}} \right)^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \boxed{l = 1.3 \cdot 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}}$$

4. Θεωρήστε ότι έχετε ένα σωματίδιο το οποίο διαπερνά 100μμ πυριτίου. Βρείτε τον μέσο αριθμό ηλεκτρόνιων που παράγονται. Δίνεται ότι η μέση ενέργεια διέγερσης του πυριτίου είναι 3.6eV.

Υποθέσομε ότι έχουμε ένα φορεστικό σωματίδιο, φορέσου  $Z=1$ , και ότι το σωματίδιο αυτό απεριφέρεται σαν σωματίδιο ελάχιστης ιονισμού πανίσχυσης. Η απώλεια ενέργειας ανά ποντίδα φύσης, φύση πετρελαϊκής βασικής, θεωρείται ότι είναι έφιξης, Bethe-Bloch δύνεται απώλεια.

$$-\frac{dE}{dx} = N \rho \frac{Z}{A} \frac{\beta^2}{\gamma^2} \left[ \ln \frac{2mc^2 \gamma^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right] \quad \text{όπου } N = 0.307 \text{ MeV/mol cm}^2$$

Για ένα σωματίδιο ελάχιστης ιονισμού πανίσχυσης, η εξίσωση για  $\frac{dE}{dx}$  από την ενέργεια του σωματιδίου είναι τέτοια της Ιογερμηνικής δύνης  $E_{\text{eff}}$ .

Υποθέσομε ότι το σωματίδιο είναι σαν περιοχή των αλινού ελάχιστων, (grit) μηρούσιμη και υπολογίζομε το δεξιό πέριο της εφίασης για ένα συγκεκριμένο πυρίτιον.

$$-\frac{dE}{dx} = (0.307 \text{ MeV/mol cm}^2) \frac{2.33 \text{ g/cm}^3 \cdot 14}{28.1 \text{ g/mol}} \left[ \ln \frac{2 \cdot 0.511 \text{ MeV} \cdot 4^2}{16 \cdot 14^{0.8} \text{ eV}} - 1 \right] \Rightarrow$$

$$\boxed{-\frac{dE}{dx} = 3.7 \text{ MeV/cm}^2}$$

Ο αριθμός των βεργάριων ηλεκτρόνιων που παράγονται από τη πέριεργη εύστρατης παραγωγής σωματιδίου από πυρίτιο πάχους  $d=100\mu\text{m}$  είναι επομένως:

$$n_{e-0} = \frac{|dE/dx| \cdot d}{E} = \frac{3.7 \text{ MeV cm}^2 \cdot 10^{-2} \text{ cm}}{3.6 \text{ eV}} \Rightarrow n_{e-0} \approx 10^4$$

όπου  $E$  είναι η τέτοια ενέργεια διέγερσης του πυρίτιου,  $i.e. 3.6 \text{ eV}$ .

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 καταγίδα 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 μιόνιο ενέργειας  $24 GeV$ ;

(α) Η διακριτική ικανότητα ενός φωτόνιού εξαρτάται από τον αριθμό των λευκών ιόντων που παραγίνονται. Στο διαμάντι, προστέλλεται σεργία  $W=5eV$  ώστε να παραχθεί ένα λευκός ιόντων.

$$\text{Εποιείναι ότι ακτίνες - X με ενέργεια } E = 100 \text{ keV ο αριθμός των λευκών ιόντων που θα δημιουργηθούν είναι: } n_{\text{λευκά}} = \frac{E}{W} \Rightarrow n_{\text{λευκά}} = \frac{100 \text{ keV}}{5eV} = 20 \cdot 10^3$$

$$\begin{aligned} \text{Η διακριτική ικανότητα ενέργειας } G &= \frac{E}{\sqrt{n_{\text{λευκά}}}} = \frac{100 \text{ keV}}{\sqrt{20 \cdot 10^3}} \\ \Rightarrow G_E &= \frac{100 \text{ keV}}{10 \sqrt{2}} \Rightarrow G_E = \frac{\sqrt{2}}{2} \text{ keV} \Rightarrow G_E \approx 0.7 \text{ keV} \end{aligned}$$

(β) Η πυκνότητα των σιδήρων είναι  $d = 7.87 g/cm^3$ , το μήκος ακτινοβολίας είναι  $X_0 = 1.77cm$  ενώ η κριτική ενέργεια  $E_C = 24 MeV$ .

Ένα ηλεκτρόνιο με ενέργεια  $E = 24 GeV$  εισερχόμενο σε έναν ανιχνευτή θα χάσει ενέργεια προσελάτες με ηλεκτροφωγήν την ιατρική γραμμή της οποίας. Ως σερφαστεί θα είναι ο αριθμός των ηλεκτρονίων στην καταγίδα για να παραχθεί ένας ιόντων στο 1. Οι έχοντες εποιείναι:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{24 \cdot 10^3 \text{ MeV}}{24 \cdot \text{NeV}} \Rightarrow \frac{E}{E_0} = 1000$$

Ta tov apidio taw saferisicav (Tepovian) cns uucrigidən anoxiav ~20 pīm anoxobias ja va anopobrav 1000 n Tepovice cns uucig Enokius anoxeicav:  $20 \cdot 1.77 \text{ cm} = \underline{35.4 \text{ cm}}$

- (8) Ta fuovce xarav evipye fitow covigioi be  $dE/dx \approx 2 \text{ MeV/gr cm}^2$   
 Ta va ocofezige enokius éra fuovo evipyeas  $24 \text{ GeV}$  da xpeootei raxos  
 ieo be:  $t = \frac{E_0}{dE/dx} = \frac{24 \cdot 10^3 \text{ cm}}{2 \cdot 7.87} = \frac{24 \cdot 10^3}{15.74} \text{ cm} \Rightarrow \underline{t = 15.2 \text{ m}}$

Journal of Reviews of Modern Physics: 240, 13 (1941)

300

B. ROSSI AND K. GREISEN

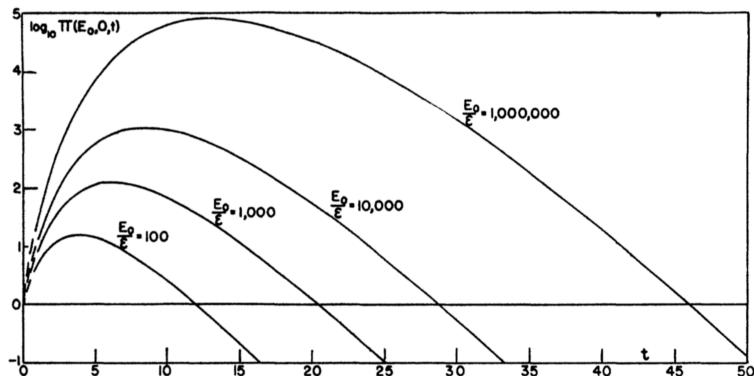


FIG. 19. "Total" number of electrons  $\Pi(E_0, 0, t)$  for electron initiated showers, calculated under approximation B, according to Eq. (2.104). Multiplication by  $\epsilon/V_0$  yields the specific ionization  $j(E_0, t)$  [see Eq. (2.110)].

6. Εξηγήστε πως χρησιμοποιώντας δύο ανιχνευτές Cherenkov τον έναν μετά τον άλλο, θα μπορούσατε να ταυτοποιήσετε τρία σωματίδια διαφορετικής μάζας αλλά ίδιας ορμής.

Όπως έχει αναγραφεί και στο διαδίκτυο, το ματιό του Cherenkov, είναι η ωχύτηρα β που λειτουργεί σε σκαριών τοχύτηρα των φωτός στο αυγενεργήτινο λόγο,  $\beta = \frac{1}{n}$  οπου η είναι ο δείκτης διαδίκτυου λόγος.

Δεδομένου ότι έχουμε δύο Cherenkov ανιχνευτές A & B, του χρησιμοποιούνται σερπανί, η ανιχνευτική συσκευής γρίπης αυξεσιδικών διαφορετικών μέσων από  
i διαφορετικούς λόγους, οπότε τα γρίπη αυξεσιδικά έχουν τοχύτηρες  $\beta_1 < \beta_2 < \beta_3$ , γιατρεί  
να επιτευχθεί, διέταξε των δύο Cherenkov των δύο ανιχνευτών στα τέτοια

$$n_A = \frac{1}{\beta_3} \text{ και } n_B = \frac{1}{\beta_2}. \text{ Με τον τρόπο :}$$

(1) Το σωματίδιο 1 είναι μία μικρή από τα ματιά του Cherenkov πριν του δύο  
ανιχνευτών ( $\beta_1 \leq \frac{1}{n_A}, \frac{1}{n_B}$ ). και σήμερα δεν παρήγει γρίπη στα δύο ανιχνευτά.

(2) Το σωματίδιο 2 είναι μία μικρή από τα ματιά του Cherenkov πριν το γρίπη  
ανιχνευτή A ( $\beta_2 > \frac{1}{n_A}$ ) αλλά είναι μία μικρή από τα ματιά του πριν το  
B ανιχνευτή ( $\beta_2 < \frac{1}{n_B}$ ). Επομένως παρήγει γρίπη τώρα στον A ανιχνευτή

(3) Το γρίπη σωματίδιο είναι μία μικρή από τα ματιά του πριν το σωματίδιο A ή B  
και στα ανιχνευτή B ( $\beta_3 > \frac{1}{n_A}, \frac{1}{n_B}$ ), επομένως παρήγει αλλά μετά  
δύο ανιχνευτών.

7. Η τεχνική PET (positron emission tomography), στηρίζεται στην εξαύλωση  $e^+e^-$  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  $e^+e^-$  εξαύλωνται 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 ενέργεια τους.

Τα φωτόνια τα οποία ευπέβινται σαν ζεύγια των φύγων  $e^+e^-$  ευρεύνονται

$$\text{Όπ. έχουν ενέργεια: } E_\gamma = \frac{M_{e^+}c^2}{2} \Rightarrow E_\gamma = m_e \text{ εφόσον } M_{e^+} = 2m_e \text{ (ενημέρωση)}$$

Στην διεργασία στην ανίδαση Compton, τα φωτόνια που συδιέργασαν έχουν ενέργεια

$$E'_\gamma = \frac{E_\gamma}{1 + E_\gamma/m_e(1 - \cos\theta)}$$

Αν η την παρεντικών σχετική έκπτυξη δίπλα στην ενέργεια των εφερόμενων ηλεκτρονίων θα είναι για  $\cos\theta = 1$  και  $\cos\theta = -1$

$$KE_{min}^e = E_\gamma - (E'_\gamma)_{max} = E_\gamma - E_\gamma = 0$$

$$KE_{max}^e = E_\gamma - (E'_\gamma)_{min} = E_\gamma - \frac{2E_\gamma m_e}{E_\gamma + 2m_e} = \frac{E_\gamma^2 + 2m_e E_\gamma - 2m_e E_\gamma}{E_\gamma + 2m_e} = \frac{E_\gamma^2}{E_\gamma + 2m_e} = \frac{m_e^2 c^2}{3m_e}$$

$$\Rightarrow KE_{max}^e = \frac{1}{3} m_e \Rightarrow KE_{max}^e \approx 0.17 \text{ MeV}$$

8. Υπολογίστε τον μέσο αριθμό σωματιδίων που περιέχονται σε μια ηλεκτρομαγνητική καταιγίδα που δημιουργησε ένα φωτόνιο ενέργειας 50 GeV που έχει διαπεράσει 10, 13 και 20cm σιδήρου.

Τα σωματίδια που περιέχονται σε μια ηλεκτρομαγνητική καταιγίδα προτίχονται από διάφορη γένη, όπως πρωτοτοπικές φωτονίες, και φωτονίες που ελεγχόνται από bremsstrahlung από ηλεκτρόνια και ποστρόνια. Η απότομη επίτελη είναι ελαττώνυμης ενέργειας των σωματιδίων που θα ευνίψει.

Και σας δύο περιπτώσεις, η διάφορη γένη και η ακανοβόλια bremsstrahlung λόρδοι και θεωρήσουμε πως διεργασίες που παραγόνται σωματίδια με ενέργειας ισούνται (κατά λίγο όπως) της της ενέργειας των σωματιδίων που τις προκαλεῖ. Αναλαβόντας τα σωματίδια που παραγίνονται με ενέργεια των σωματιδίων που τα παραγίνεται.

Η διεργασία στρέφεται στα σωματίδια που παραγόνται από την ενέργεια των σωματιδίων που παραγίνεται από την αποτέλεση της κρίσιμης ενέργειας. Τα σωματίδια μάζας αυτού της ενέργειας αυτή χαρακτηρίζονται ως διεργασίες από την ενέργεια που παραγίνεται από την ενέργεια των σωματιδίων που παραγίνεται από την ενέργεια της κρίσιμης ενέργειας.

Η ενέργεια που έχουν σωματίδια αφού έχουν διεργασίες υπόλοιπο πάχος  $x$ , δίνεται από την έντονη:  $E = E_0 e^{-x/\lambda}$  όπου  $E_0$  είναι της αρχικής ενέργειας των σωματιδίων,  $\lambda$  το πάχος των σιδηρών και  $\lambda_0$  είναι το πάχος ακανοβόλιας των σιδηρών.

Για σιδηρό, το πάχος ακανοβόλιας είναι:  $\lambda_0 = 13.84 \text{ cm}^2 / \text{g}$  που αναπορεύεται  $b = \lambda_0 / d = 13.84 / 7.864 = 1.76 \text{ cm}$  όπου  $d = 7.864 \text{ g/cm}^3$  είναι το πάχος των σιδηρών. Επειδής περί από 10cm σιδήρου, η τέλης ενέργεια των μάζας σωματιδίων είναι:

$$E_{10} = E_0 e^{-x/\lambda} = (5 \times 10^4) e^{-10/1.76} \Rightarrow E_{10} = 170.4 \text{ MeV}.$$

Η κρίσιμη ενέργεια είναι  $E_c = 27.4 \text{ MeV}$ . Αν ο γύρος στην οδό τα σωματίδια κατέχει λίγο όπως έχουν την ίδια ενέργεια, ο αριθμός των σωματιδίων θα είναι:

$$n_{10} = \frac{E_0}{E_{10}} = \frac{5 \times 10^4}{170.4} \Rightarrow n_{10} = 293 \text{ superfícies}$$

Encontrámosmos assim uma espessura de  $x=13\text{cm}$  da seguinte:

$$E_{13} = \frac{E_0}{e^{x/\lambda}} = 5 \times 10^4 \cdot e^{-13/1.76} \Rightarrow E_{13} = 31.0 \text{ MeV}$$

Portanto temos uma espessura de  $13\text{cm}$  com um número de partículas de  $n_{13} = \frac{E_0}{E_{13}}$ . O número de partículas é igual ao número de partículas que passaram por uma distância de  $13\text{cm}$  com uma energia de  $E_0$ .

Para trás de  $13\text{cm}$  temos uma espessura de  $13.2\text{cm}$ , com uma energia de  $E_0$  e um número de partículas de  $n_{13}$ .

Portanto temos uma espessura de  $13.2\text{cm}$ , com uma energia de  $E_0$  e um número de partículas de  $n_{13}$ .

9. Ποια είναι η μέση ενέργεια που χάνεται για ηλεκτρόνια ορμής  $5 \text{ GeV}/c$  και για μίόνια της ίδιας ορμής  $5 \text{ GeV}/c$  που περνούν μέσω  $10\text{cm}$  άνθρακα;

Άνω τα γραφίτητα  $dE/dx$  ως προς  $b_f$  ή όπις, βρίσκουμε την ανώτατη ενέργεια για τόνια  $5\text{GeV}/c$ . Άνω το γράφημα δένομε ότι  $dE/dx$  είναι  $2.1 \text{ MeV}/\text{gr}/\text{cm}^2$ .

To D'Alberle γράφημα δε την αντιστοίχη των ανθρακών οποίες:  $\frac{dE}{dx} = 2.1 * 2.21 = 4.6 \text{ MeV}/\text{cm}$

Ενοψίως το τόνιο αυτού περάσει  $10\text{cm}$  ανθράκων θα έχει εναντίσει:

$$dE = 4.6 \text{ MeV}/\text{cm} * 10 \text{ cm} \Rightarrow \boxed{dE = 46 \text{ MeV}}$$

Tra το n' ηλεκτρόνιο υπολογίζουμε των περιπτώσεων  $b_f$  οποίες έχουμε:

$$P = b_f m \Rightarrow b_f = \frac{P}{m} = \frac{5000 \text{ MeV}}{0.511} \Rightarrow b_f = 9784$$

Για την αυτήν αυτήν των  $b_f$  και για ανθράκων,  $dE/dx = 2.6 \text{ MeV}/\text{gr}/\text{cm}^2$ .

To D'Alberle γράφημα με την αντιστοίχη των ανθρακών έχουμε

$$\frac{dE}{dx} = 2.6 * 2.21 = 5.75 \text{ MeV}/\text{cm} \Rightarrow dE/\text{10cm} = 5.75 * 10 \Rightarrow dE_{10\text{cm}} = 57.5 \text{ MeV}$$

Tra το n' ηλεκτρόνια μετρώντας διαρροή ανάλησης ενέργειας είναι λίγων αλευροβολίων Bransstrahlung. Η ενέργεια που χάνεται στο ηλεκτρόνιο φέρει την ίδιαν συμμετοχής αυτής είναι:  $E = E_0 e^{-x/X_0}$  όπου  $X_0$  το τόνιο αλευροβολίων που εξαρτάται από το υλικό και  $x$  η απόσταση που κάλυψε το ηλεκτρόνιο, ενώ  $E_0$  η αρχική ενέργεια του ηλεκτρονίου

$$\text{Η ενέργεια που θα χάσει το ηλεκτρόνιο θα είναι: } \Delta E = E_0 - E = E_0 (1 - e^{-x/X_0})$$

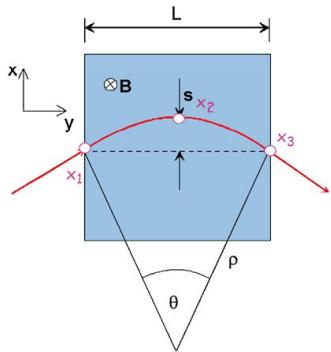
$$\text{Tη } 10\text{cm} \text{ ανθράκων, θα έχουμε: } \Delta E = 5000 \left[ 1 - e^{-10/(42.784)} \right] \text{ οπου}$$

υποδεικνύεται ότι  $E_0 \approx P$ , ενώ  $X_0 = 42.7 \text{ gr}/\text{cm}^2$  και  $d = 2.21 \text{ gr}/\text{cm}^3$  η πυκνότητα

$$\text{Οπού } \Delta E = 5000 \left[ 1 - e^{-221/42.7} \right] \Rightarrow \boxed{\Delta E = 2020 \text{ MeV}}$$

$$\text{Tο n' ηλεκτρόνιο εποφέλιως θα χάσει ανθράκων: } 2020 + 57.5 = 2077.5 \text{ MeV} = \underline{\underline{2.0778 \text{ GeV}}}$$

**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:

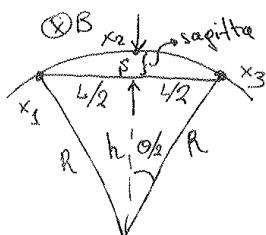


- (α) Την σχέση που συνδέει την εγκάρσια ορμή,  $p_T$ , με την  $s$ .  
 (β) Την ακρίβεια της μέτρησης της εγκάρσιας ορμής, αν  $p_T = 1 \text{ GeV}$ ,  $B = 10 \text{ kGauss}$ ,  $L = 1 \text{ m}$  και  $\Delta s = 200 \text{ } \mu\text{m}$  (όπου  $\Delta s$  το σφάλμα στη μέτρηση της  $s$ ).

(α) Η καμπυλότητα της τροχιάς και η sagitta μετρώνται ότι είναι αντίστροφές τηρούνται. Η ανισότητα της ορμής παρέχεται στη διεύθυνση των μαγνητικού πεδίου

είναι:

$$P_T = 0.3 B R \quad \text{όπου } P_T \text{ μετράται σε GeV, } B \text{ σε Tesla και } R \text{ σε m.}$$



Με βάση το Διπλανό σχήμα, θα ισχεί:

$$\frac{L/2}{R} = \sin \frac{\theta}{2} \approx \frac{\theta}{2} \quad (\text{για λιγότερη γραφική}) \Rightarrow \theta = \frac{L}{R} = \frac{0.3 B L}{P_T} \quad (A)$$

$$S = R - h = R - R \cos \frac{\theta}{2} = R \left( 1 - \cos \frac{\theta}{2} \right) \Rightarrow S \approx R \left( 1 - \left( 1 - \frac{1}{2} \frac{\theta^2}{4} \right) \right) \Rightarrow \\ \Rightarrow S = R \frac{\theta^2}{8} \stackrel{(A)}{\Rightarrow} \boxed{S \approx R \frac{0.3^2 B^2 L^2}{P_T^2 8}}$$

(β) Για ορμή  $P_T = 1 \text{ GeV/c}$ ,  $L = 1 \text{ m}$  και μαγνητικό πεδίο  $B = 10 \text{ kG} = 1 \text{ Tesla}$

η sagitta είναι:  $S = \frac{0.3}{8} \frac{B^2}{P_T} \cancel{\frac{0.3 L R}{P_T}} = \frac{0.3}{8} \frac{B^2 L^2}{P_T R} = \frac{0.3}{8} \frac{B^2 L^2}{P_T} \Rightarrow$

$$S = \frac{0.3}{8} \frac{1^2 \cdot 1}{1} \Rightarrow S \approx 0.038 \text{ m} \Rightarrow S = 3.8 \text{ cm}$$

Αγνοώντας τις αβεβαιότητες στο  $L$  και  $B$ , η κύρια αβεβαιότητα της μέτρησης είναι sagitta, καθορίζεται από αβεβαιότητα στη μέτρηση της ορμής.

$$\frac{\Delta P_T}{P_T} = \frac{\Delta S}{S} = \frac{200 \mu\text{m}}{0.038 \text{ m}} \Rightarrow \frac{\Delta P_T}{P_T} \approx 5 \cdot 10^{-3} = 0.5\%$$