

Suuri hadronitörmäytin (Large Hadron Collider, LHC) (10 pistettä)

Lue erillisessä kuoressa olevat yleisohjeet ennen tämän tehtävän aloittamista.

Tässä tehtävässä tarkastellaan maailman suurimman hiukkasfysiikan tutkimuslaitoksen CERNin LHC-hiukkaskiihdyttimellä (Large Hadron Collider) tehtävää tutkimusta, jonka tavoitteena on kehittää ymmärrystämme luonnon toiminnan lainalaisuuksista, luonnonlajista. Kaksi hiukkassuihkua kiihdytetään ja lopulta ohjataan ympyränmuotoisessa kiihdytinrenkaassa voimakkaiden magneettikenttien avulla törmäämään toisiinsa. Korkeaenergisissä törmäyksissä syntyviä hiukkasia tutkitaan suurilla ilmaisimilla. Lisää tietoa kiihdyttimestä löydät taulukosta 1.

LHC-rengas	
Renkaan ympärysmitta (piiri)	26659 m
Protonisuihkon muodostavien kimppujen lukumäärä	2808
Kimppun sisältämien protonien lukumäärä	1.15×10^{11}
Protonisuihkut	
Protonien energia	7.00 TeV
Törmäysenergia massakeskipistekoordinaatistossa	14.0 TeV

Taulukko 1: LHC-kiihdyttimeen liittyviä lukuarvoja

Hiukkasfyysikot käyttävät omia käteviä energian, liikemäärän ja massan yksiköitä: Energian yksikkönä käytetään elektronivolttia [eV]. Yksi elektronivoltti 1 eV vastaa energiaa, jonka yhden sähköisen alkeisvarauksen omaava hiukkanen saa kulkiessaan yhden voltin potentiaalieron läpi ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

Liikemäärää mitataan yksikössä eV/c ja massaa vastaavasti yksikössä eV/c^2 , missä c on valon nopeus tyhjiössä. Koska 1 eV vastaa hyvin pientä energiamäärää, käytetään usein yksiköitä MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) sekä TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Osassa A tarkastellaan protonien ja elektronien kiihdyttämistä. Osassa B tarkastellaan törmäyksissä syntyvien hiukkasten tunnistamista.

Osa A. LHC-kiihdytin (6 pistettä)

Kiihdytys:

Oletetaan, että protoneja on kiihdytetty jännitteellä V siten, että nopeus on hyvin lähellä valonnopeutta. Jätä huomiotta säteilyn ja muiden hiukkasten kanssa tapahtuvien törmäysten aiheuttamat energiahäviöt.

A.1 Ilmaise protonien loppunopeus v kiihdytysjännitteen V ja luonnonvakioiden avulla. 0.7pt

Tulevaisuudessa LHC:llä tuotettuja protoneja on tarkoitus törmäyttää 60.0 GeV (liike-energian omaavien) elektronien kanssa.

- A.2** Korkeaenergisille hiukkasille, joiden lepomassa on pieni, loppunopeuden suhteellinen poikkeama $\Delta = (c - v)/c$ valonnopeudesta on hyvin pieni. Käytä poikkeaman lausekkeeseen ensimmäisen asteen approksimaatiota ja laske poikkeama Δ kiihdytysjännitteen V ja luonnonvakioiden avulla 60.0 GeV elektroneille.

0.8pt

Palataan vielä LHC:hen ja protoneihin. Oletetaan suihkun radan olevan ympyrän muotoinen.

- A.3** Johda protonisuihkun ympyräradalla pitämiseksi vaaditun homogeenisen ja yhdensuuntaisen magneettikentän magneettivuon tiheyden B lauseke. Lausekkeessa saa esiintyä ainoastaan protonien energia E , radan ympärysmitta L , luonnonvakioita sekä numeroita. Voit käyttää myös approksimaatioita, mikäli niiden vaikutus on pienempi kuin merkitsevien lukujen asettama tarkkuus. Laske magneettivuon tiheys B protoneille, joille $E = 7.00$ TeV. Jätä huomiotta protonien keskinäinen vuorovaikutus.

1.0pt

Säteilyteho:

Kiihtyvässä liikkeessä oleva sähköisesti varattu hiukkanen säteilee energiaa sähkömagneettisina aaltoina. Vakikulmanopeudella ympyrärataa kiertävän hiukkasen säteilyteho P_{rad} riippuu ainoastaan sen kiihtyvyydestä a ja varauksesta q , sekä valonnopeudesta c ja tyhjiön permittiivisyydestä ϵ_0 .

- A.4** Määritä säteilytehon P_{rad} lauseke dimensioanalyysin avulla.

1.0pt

Säteilytehon täydellinen klassinen lauseke sisältää lisäksi tekijän $1/(6\pi)$. Täydellinen relativistinen muoto sisältää vielä lisäksi tekijän γ^4 , missä $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Laske LHC:n protoneille, joille $E = 7.00$ TeV (ks. taulukko 1), niiden kokonaissäteilyteho P_{tot} . Voit käyttää sopivia approksimaatioita.

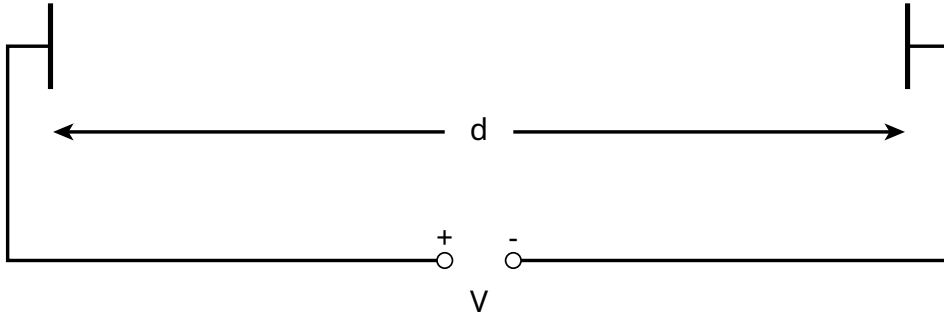
1.0pt

Lineaarinen kiihdytys:

Ennen LHC:n ympyrärataa levossa olevat protonit kiihdytetään lineaarikiihdyttimellä, jonka pituus on $d = 30.0$ m ja kiihdytysjännite on $V = 500$ MV. Oletetaan, että kiihdyttävä sähkökenttä on homogeeninen. Lineaarikiihdytin koostuu kahdesta levystä kuvan 1 mukaisesti.

A.6 Määritä protoneilta sähkökentän läpikulkuun kuluva (lento-) aika T .

1.5pt



Kuva 1: Periaatekuva lineaarikiihdyttimestä.

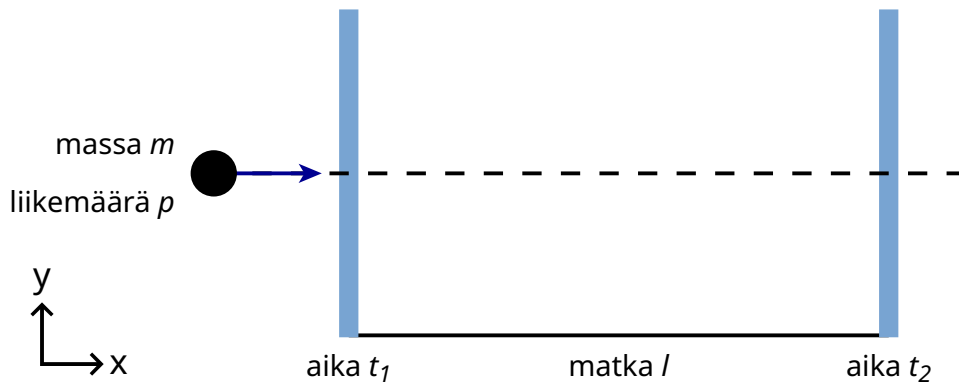
Osa B. Hiukkasten tunnistaminen (4 pistettä)

Lentoaika:

Törmäyksessä syntyvien korkeaenergistien hiukkasten tunnistaminen on tärkeää vuorovaikutusprosessin ymmärryksen kannalta. Tämä voidaan tehdä yksinkertaisesti määrittämällä aika (t), joka hiukkaselta kuluu matkan l kulkemiseen lentoaikailmaisimessa (Time-of-Flight- eli ToF-ilmaisimessa). Taulukossa 2 on tietoa muutamista tyypillisistä tunnistettavista hiukkasista.

Hiukkanen	Massa [MeV/c ²]
Deuteroni	1876
Protoni	938
Kaoni (varattu hiukkanen)	494
Pioni (varattu hiukkanen)	140
Elektroni	0.511

Taulukko 2: Hiukkasia massoineen.

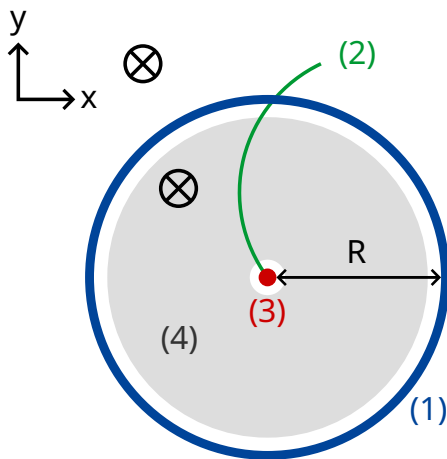


Kuva 2: Periaatekuva lentoaika-/ToF-ilmaisimesta.

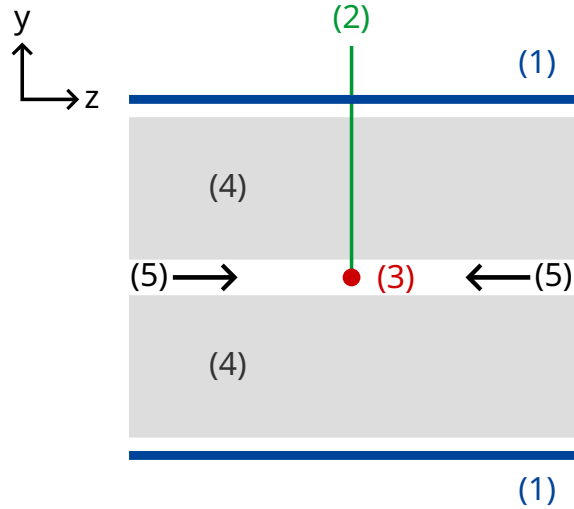
- B.1** Ilmaise hiukkasen lepomassa m sen liikemäärän p , lentomatkan l ja lentoajan t avulla. Oletetaan, että yhden alkeisvarauksen e omaavat hiukkaset kulkevat lähes valonnopeudella ja pitkin suoraa linjaa ToF-ilmaisimessa, ja että kulkusuunta on kohtisuorassa ilmaisilevyjä vastaan (ks. kuva 2). 0.8pt

B.2 Laske vähimmäispituus l , joka vaaditaan ToF-ilmaisimelta, jotta kaoni voidaan varmasti erottaa pionista, kun molempien liikemääriksi on mitattu $1.00 \text{ GeV}/c$. Erotuskykyä voidaan pitää hyvänä, kun lentoaika on vähintään kolme kertaa ilmaisimen erotuskyky ajan suhteen. ToF-ilmaisimen tyypillinen erotuskyky ajan suhteen on 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Tarkastellaan koeasetelmaa, missä LHC:llä tuotettuja hiukkasia tunnustetaan kaksiosaisella ilmaisinkoonpanolla, joka koostuu lentoratailmaisimesta ja ToF-ilmaisimesta. Koeasetelma on kuvattu hiukkas-suihkua vastaan kohtisuorana ja sen suuntaisena poikkileikkauksena kuvassa 3. Molemmat ilmaisimet on rakennettu suihkun suuntaisina putkina törmäyskohdan ympärille. Lentoratailmaisimittaa varatun hiukkasen lentorataa magneettikentässä, joka on yhdensuuntainen protonisuihkun kanssa. Lentoradan säteen r avulla voidaan laskea hiukkasen poikittainen liikemäärä p_T . ToF-ilmaisimittaus tarvitsee vain yhden ilmaisinputken, koska aika mitataan tunnetusta törmäyshetkestä. ToF-ilmaisimittaus on sijoitettu välittömästi lentoratailmaisimen ulkopuolelle. Tässä tehtävässä voit olettaa kaikkien törmäyksessä syntyvien hiukasten kulkevan poikittaissuunnassa suihkua vasten, toisin sanoen, että näillä hiukkasilla ei ole suihkun suuntaista liikemäärää.



poikittaistaso



suihkun rataa seuraava
pitkittäinen poikkileikkaus

- (1) - ToF-ilmaisimittaus (-putki)
- (2) - lentorata
- (3) - törmäyspiste
- (4) - lentoratailmaisimittaus
- (5) - protonisuihku
- ⊗ - magneettikenttä

Kuva 3: Lentoratailmaisimittaus ja ToF-ilmaisimittaus koostuva kokeellinen asetus hiukkasien tunnistusta varten. Molemmat ilmaisimet ovat laitteiston keskellä olevaa törmäyspistettä ympäröiviä putkia. Vasemmalla: suihkusuuntaa vastaan kohtisuora poikkileikkaus. Oikealla: suihkun suuntainen poikkileikkaus. Hiukkanen liikkuu kohtisuoraan suihkusta poispäin.

B.3 Ilmaise hiukkasen massa magneettivuon tiheyden B , ToF-ilmaisinputken säteen R , luonnonvakioden, mitatun lentoradan säteen r sekä mitatun lentoajan t avulla. 1.7pt

Olemme havainneet neljä hiukkasta ja haluamme tunnistaa ne. Lentoratailmisimessa käytetty magneettivuon tiheys oli $B = 0.500$ T. ToF-ilmaisinputken säde R oli 3.70 m. Mittausten tulokset olivat ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

<i>Hiukkanen</i>	<i>Lentoradan säde r [m]</i>	<i>Lentoaika t [ns]</i>
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Laske hiukkasten massat ja tunnistaa ne. 0.8pt