

Suur hadronite põrguti (10 punkti)

Palun lugege enne selle ülesande kallale asumist eraldi ümbrikus asuvat üldjuhendit (*general instructions*).

Selles ülesandes tuleb vaatluse alla CERNis asuva LHC (*Large Hadron Collider* - suur osakeste põrguti) osakeste kiirendi füüsika. CERN on maailma suurim osakestefüüsika labor, mille peamine eesmärk on saada teadmisi looduse fundamentaalseaduste kohta. Kaks osakeste kiirendatakse suurtele energiatele, juhitakse tugevate magnetväljade abil mööda ringkiirendit ning lastakse üksteisega põrkuda. Prootonid ei ole mööda ringjoonelist kiirendit ühtlaselt jaotunud, vaid on kogutud n-ö kimpudesse. Põrgetes tekkinud osakesi registreeritakse suurtes osakeste detektorites. Mõned LHC parameetrid on toodud tabelis 1.

LHC kiirendi ring	
Ringi ümbermõõt	26659 m
Kimpude arv prootonite kiires	2808
Prootonite arv ühes kimpus	1.15×10^{11}
Prootonite kiired	
Prootonite energia	7.00 TeV
Massikeskme energia	14.0 TeV

Tabel 1: Oluliste LHC parameetrite arväärtused.

Osakestefüüsikud kasutavad energia, impulsi ja massi esitamiseks mugavaid ühikuid. Energias mõõdetakse elektronvoltides [eV]. Vastavalt definitsioonile on 1 eV energia, mille saab osake elementaarlaenguga e , kui liigub läbi potentsiaalide vahe üks volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$).

Osas A tegeleme prootonite ja elektronide kiirendamisega. Osas B tegeleme CERNi põrgetes tekkinud osakeste identifitseerimisega.

Osa A. LHC kiirendi (6 punkti)

Kiirendamine:

Eeldagem, et prootonid kiirendatakse pingega V suurtele kiirustele, mis on väga lähedased valguse kiirusele. Samuti eeldagem, et võime jätta arvestamata kiirguslikud energiakaod ja põrked teiste osakestega.

A.1 Leidke prootonite lõppkiiruse v täpne avaldis funktsioonina kiirendavast pingest V ja füüsikalistest konstantidest. 0.7pt

Ühes tulevases CERNi eksperimendis on plaanis kasutada LHC kiirendist pärit prootoneid ja põrgatada neid elektronidega, millel on energia 60.0 GeV.

A.2 Väga kõrge energiaga, kuid väikse massiga osakeste lõppkiiruse v suhteline erinevus $\Delta = (c - v)/c$ valguse kiirusest on väga väike. Leidke esimest järku ligikaudne avaldis Δ jaoks ja arvutage Δ energiaga 60.0 GeV elektronide jaoks, kasutades kiirendavat pinget V ja füüsikalisi konstante (lehekülj G0-3). 0.8pt

Liigume nüüd tagasi LHC prootonite juurde. Eeldagem, et kiirtekanal on ringikujuline.

- A.3** Avaldage magnetinduktsioon B , mis on vajalik hoidmaks prootonite kiirt kiirendi ringjoonelisel trajektoorigil. See avaldis peaks sisaldama ainult prootoni energiat E , trajektoori ümbermõõtu L , fundamentaalkonstante ja arve. Võite kasutada sobivaid ligikaudseid lihtsustusi, kui nende mõju on väiksem tüvenumbrite täpsusest. 1.0pt
- Arvutage magnetinduktsioon B mis on vajalik prootoni jaoks energiaga $E = 7.00$ TeV, jättes arvestamata prootonite vahelise interaktsiooniga.

Kiiratud võimsus:

Kiirendatav osake kiirgab elektromagnetlaineid – seega energiat. Konstantse nurkkiirusega mööda ringjoont liikuva laetud osakese kiiratud võimsus P_{rad} sõltub ainult selle osakese kiirendusest a , laengust q , valguse kiirusest c ja vaakumi dielektrilisest läbitavusest ϵ_0 .

- A.4** Kasutage dimensionaalset analüüsi, et leida kiiratud võimsuse P_{rad} avaldis. 1.0pt

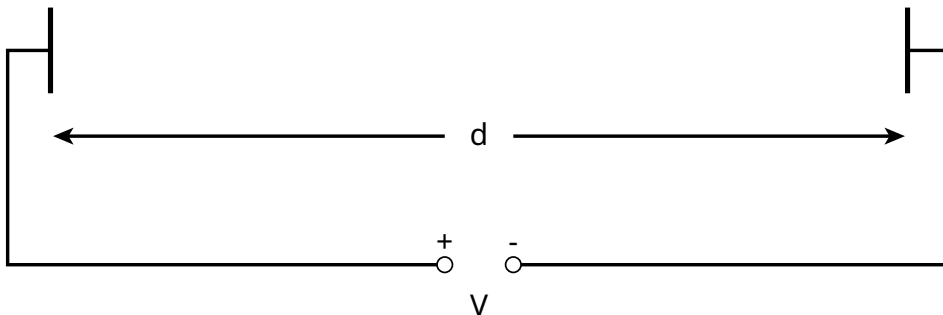
Kiiratud võimsuse korrektne valem sisaldab veel ka tegurit $1/(6\pi)$. Lisaks annab täpne relativistlik tuleuskäik ka täiendava teguri γ^4 , kus $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Arvutage summaarne LHCs kiiratud võimsus P_{tot} , kui ühe prootoni energia on $E = 7.00$ TeV (NB! vt tabel 1). Võite kasutada sobivaid ligikaudseid lihtsustusi. 1.0pt

Lineaarne kiirendamine:

CERNis kiirendatakse prootoneid paigalseisust lineaarse kiirendiga pikkusega $d = 30.0$ m ja pingega $V = 500$ MV. Eeldage, et elektriväli on homogeenne. Lineaarne kiirendi koosneb kahest plaadist nagu näidatud joonisel 1.

- A.6** Leidke aeg T , mis kulub prootonitel selle elektrivälja läbimiseks. 1.5pt



Joonis 1: Kiirendi skeem.

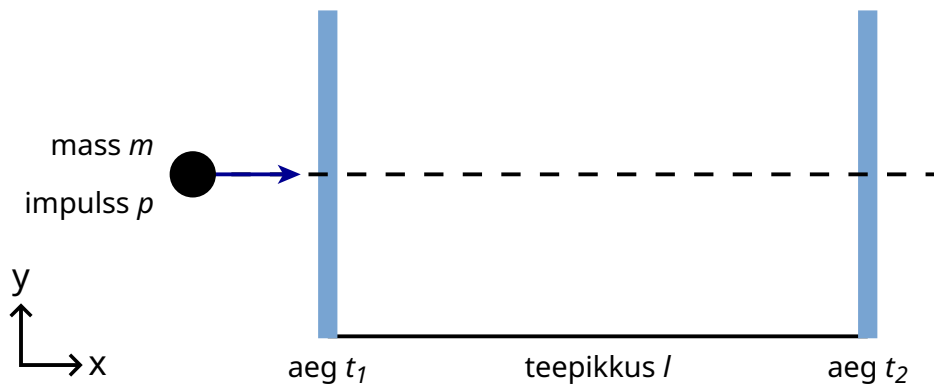
Osa B. Osakeste tuvastamine (4 punkti)

Lennuaeg:

Selleks, et interpreteerida osakeste interaktsiooni protsessi, on oluline identifitseerida neid kõrge energiaga osakesi, mis põrgetes tekivad. Lihtne meetod selleks on mõõta aega t , mis kulub teadaoleva impulsi osakesel vahemaa l läbimiseks n -ö lennuajadetektoris (LA-detektor). Tüüpilised osakesed, mida sellises detektoris identifitseeritakse, on koos nende massidega loetletud tabelis 2.

Osake	Mass [MeV/c ²]
deuteron	1876
prooton	938
laetud kaaon	494
laetud piion	140
elektron	0.511

Tabel 2: Osakesed ja nende massid.

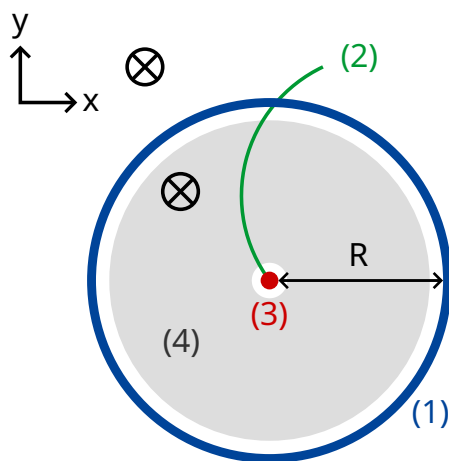


Joonis 2: Lennuajadetektori skeem.

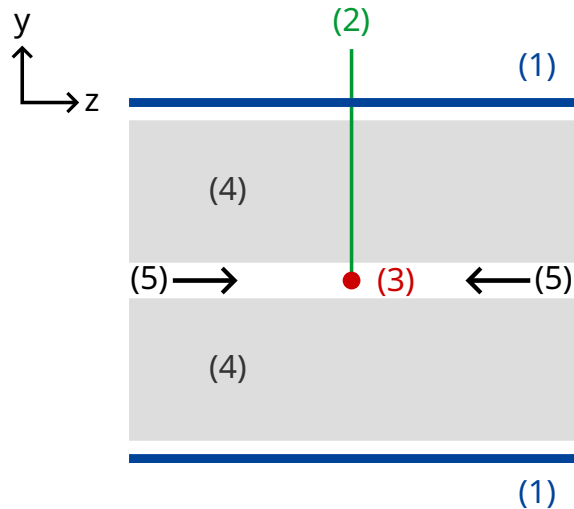
- B.1** Avaldage osakese seisumass m funktsioonina impulsi p , teepikkusest l ja lennuajast t . Eeldagem, et osakestel on elementaarlaeng e ning nad liiguvad valguse kiiruse c lähedastel kiirustel piki sirgjoonelisi trajektoore läbi LA-detektori risti detektori kahe plaadiga (vt joonis 2). 0.8pt

B.2 Arvutage LA-detektori minimaalne pikkus l , mis võimaldab kindlalt eristada laetud kaaonit laetud piionist, kui kummagi impulss on $1.00 \text{ GeV}/c$. Kindlaks eristamiseks on vaja, et lennuaegade erinevus oleks kolm korda suurem detektori ajalisest lahutusest. LA-detektori tüüpiline ajaline lahusus on 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Järgnevalt vaatleme, kuidas tüüpilises LHC detektoris tekkinud osakesed identifitseeritakse kaheastmelises detektoris, mis koosneb jäljedetektorist ja LA-detektorist. Joonisel 3 on näidatud sellise seadme rist- ja pikilõige (arvestatuna prootonite kiirte suunast). Kumbki detektor on toru, mis ümbritseb kiirte interaktsiooni piirkonda nii, et kiired läbivad torude keskpunkte. Jäljedetektor registreerib laetud osakese trajektoori, mis läbib magnetvälja, mille suund on paralleelne prootonite kiirtega. Trajektoori raadius r võimaldab tuvastada osakese ristsuunalist impulssi p_T . Et kokkupõrke ajaline hetk on teada, piisab LA-detektori ehitamiseks ainult ühest torust, et mõõta lennuaega kokkupõrkepunktist kuni LA-detektori toruni jõudmiseks. See LA-detektori toru paikneb väljaspool jäljedetektorit. Selles ülesandes võite eeldada, kokkupõrkes tekkinud osakesed liiguvad risti prootonite kiirtega, st tekkinud osakestel ei ole kiirtesuunalist impulssi.



ristlõige



pikisuunaline läbilõige, mis läbib
keskpunkti ja on paralleelne
kiirte suunaga

- (1) - LA-detektori toru
- (2) - osakese trajektoori
- (3) - kokkupõrkepunkt
- (4) - jäljedetektori toru
- (5) - prootonite kiired
- ⊗ - magnetväli

Joonis 3: Katseseade osakeste identifitseerimiseks, kasutades jäljedetektorit ja LA-detektorit. Mõlemaks detektoriks on toru, mis ümbritseb kokkupõrkepunkti nii, et see jääb torude keskele. Vasakul: ristvaade (risti kiirte suunaga). Paremal: pikivaade (paralleelne kiirte suunaga). Tekkinud osake liigub risti kiirte suunaga.

B.3 Avaldage osakese mass funktsioonina magnetinduksioonist B , LA-toru raadiusest R , fundamentaalkonstantidest ja mõõdetud suurustest: trajektoori raadius r ja lennuaeg t . 1.7pt

Detektoris registreeriti neli osakest ja nüüd on vaja need identifitseerida. Magnetinduksioon jäljedetektoris oli $B = 0.500$ T ja LA-detektori toru raadius oli 3.70 m. Siin on mõõtmistulemused ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

<i>Osake</i>	<i>Trajektoori raadius r [m]</i>	<i>Lennuaeg t [ns]</i>
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identifitseerige, st nimetage, need neli osakest, arvutades nende seisumassid. 0.8pt