

Lielais hadronu pretkūļu paātrinātājs (10 punkti)

Pirms sāc risināt šo uzdevumu, izlasi vispārīgos norādījumus, kas atrodami atsevišķajā aploksnē.

Šajā uzdevumā mēs apskatīsim ar daļiņu paātrinātāju LHC (*Large Hadron Collider* – Lielais hadronu pretkūļu paātrinātājs) saistīto fiziku. LHC atrodas CERNā — pasaules lielākajā daļiņu fizikas laboratorijā. Tās galvenais uzdevums ir izziņāt dabas fundamentālos likumus.

Divi daļiņu kūļi tiek paātrināti līdz augstajai enerģijai, stūrēti pa paātrinātāja apli ar stipra magnētiskā lauka palīdzību un beigās tiek ietriekti viens otrā. Paātrinātās daļiņas (protoni) nav sadalītas vienmērīgi pa riņķa līniju, bet tiek koncentrētas porcijās (angl. *bunches*). Sadursmju rezultātā rodas daļiņas, kas tiek novērotas ar lieliem detektoriem. Daži LHC parametri ir atrodami Tabulā 1.

LHC aplis	
Apļa apkārtmērs	26659 m
Porciju skaits uz vienā protonu kūlī	2808
Protonu skaits vienā porcijā	1.15×10^{11}
Protonu kūļi	
Protona enerģija	7.00 TeV
Masas centra enerģija	14.0 TeV

Tabula 1: Tipiskās raksturīgo LHC parametru skaitliskās vērtības.

Daļiņu fizikā ir ērti lietot sekojošās mērvienības enerģijai, impulsam un masai. Enerģiju mēra elektron-voltos [eV]. Pēc definīcijas 1 eV ir enerģija, ko daļiņa ar elementārlādiņu e iegūst, šķērsojot vienu voltu lielu potenciālu starpību ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

Impulsa mērvienība ir eV/c un masas — eV/c^2 , kur c ir gaismas ātrums vakuumā. Tā kā 1 eV ir ļoti maza enerģija, daļiņu fizikā bieži lieto MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) un TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

A daļā tiek aplūkota protonu un elektronu paātrināšana. B daļa ir saistīta ar sadursmēs radušos daļiņu identificēšanu CERNā.

A daļa. LHC paātrinātājs (6 punkti)

Paātrinājums:

Pieņem, ka protons tika paātrināts ar spriegumu V tā, ka tā ātrums ir ļoti tuvu gaismas ātrumam un neņem vērā jebkādu enerģijas zudumus, kas saistīti ar starojumu vai sadursmēm ar citām daļiņām.

A.1 Iegūsti precīzu protonu gala ātruma v izteiksmi, kas satur paātrinošo spriegumu V un fizikālās konstantes. 0.7pt

Vienā no nākotnes eksperimentiem CERNā ir plānots pētīt LHC protonu sadursmes ar elektroniem, kuru enerģija ir 60.0 GeV.

- A.2** Daliņām ar lielu enerģiju un mazu miera masu, ātruma v relatīvā novirze $\Delta = (c - v)/c$ no gaismas ātruma ir ļoti maza. Atrodi pirmās kārtas tuvinājumu lielumam Δ , izmantojot paātrinājo spriegumu V un fizikālās konstantes. Aprēķini Δ elektronam ar enerģiju 60.0 GeV. 0.8pt

Atgriezīsimies pie LHC protoniem. Pieņemsim, ka caurule, pa kuru riņķo kūlis, ir apaļa.

- A.3** Iegūsti izteiksmi homogēna magnētiskā lauka indukcijai B , kas ir nepieciešama, lai protoni turpinātu kustēties par riņķveida trajektoriju. Izteiksmē drīkst ietīt tikai protonu enerģija E , apļa apkārtmērs L , fundamentālās konstantes un skaitļi. Tu drīksti izmantot atbilstošus tuvinājumus, ja tie neietekmē precizitāti, ko ierobežo mazākais zīmīgo ciparu skaits. 1.0pt

Aprēķini magnētiskā lauka indukciju B protoniem ar enerģiju $E = 7.00$ TeV, neņemot vērā protonu savstarpējo mijiedarbību.

Izstarotā jauda:

Paātrināta lādēta daļiņa izstaro enerģiju elektromagnētisko viļņu formā. Izstarotā jauda P_{rad} lādētai daļiņai, kas kustas pa riņķveida orbītu ar nemainīgu leņķisko frekvenci, ir atkarīga tikai no daļiņas paātrinājuma a , daļiņas lādiņa q , gaismas ātruma c un elektriskās konstantes ϵ_0 .

- A.4** Izmantojot dimensiju analīzi, izrisini izstarotās jaudas P_{rad} izteiksmi. 1.0pt

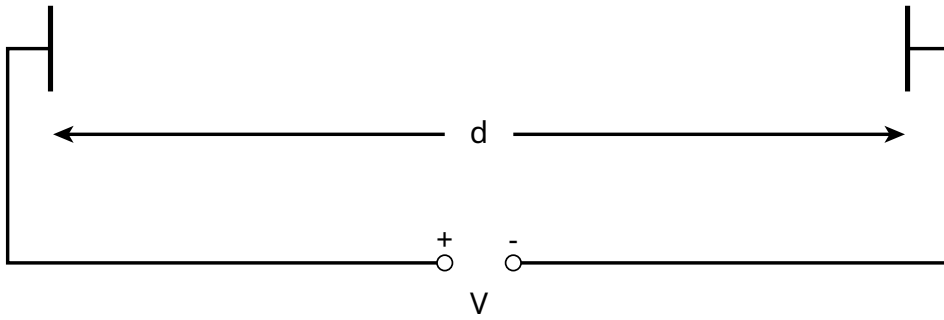
Lai iegūtu izstarotās jaudas precīzo formulu, kas pilnībā ņem vērā relativitātes efektus, iegūtais rezultāts papildus jāpareizina ar $1/(6\pi)$ un ar γ^4 , kur $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Aprēķini pilno LHC izstaroto jaudu P_{tot} pie protonu enerģijas $E = 7.00$ TeV (ņem vērā Tabulu 1). Tu drīksti izdarīt piemērotus tuvinājumus. 1.0pt

Lineārs paātrinājums

CERNā protoni no sākotnējā miera stāvokļa tiek paātrināti ar lineāru paātrinātāju, kura garums ir $d = 30.0$ m un potenciālu starpība $V = 500$ MV. Pieņem, ka elektriskais lauks ir homogēns. Lineārais paātrinātājs sastāv no divām platēm, kas ir shematiski attēlotas 1. attēlā.

- A.6** Nosaki laiku T , kurā protoni iziet cauri paātrinātajam laukam. 1.5pt



1. attēls: Paātrinātāja moduļa shematiskais attēls.

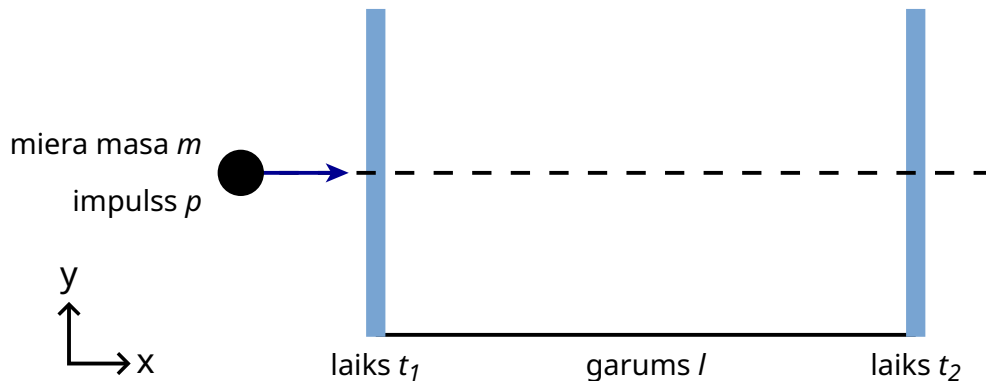
B daļa. Daļiņu identificēšana (4 punkti)

Caurlidošanas laiks:

Lai varētu pareizi interpretēt mijiedarbības procesu, ir svarīgi identificēt augstas enerģijas daļiņas, kas rodas sadursmes rezultātā. Viena vienkārša metode ir mērīt laiku t , kurā daļiņa ar zināmu impulsu veic ceļu l tā saucamajā caurlidošanas laika (ToF, *Time of Flight*) detektorā. Biežāk detektējamo daļiņu veidi un atbilstošās miera masas ir uzskaitīti Tabulā 2.

Daļiņa	Masa [MeV/c ²]
deitrons	1876
protons	938
lādēts kaons	494
lādēts pions	140
elektrons	0.511

Tabula 2: Daļiņas un to masas.

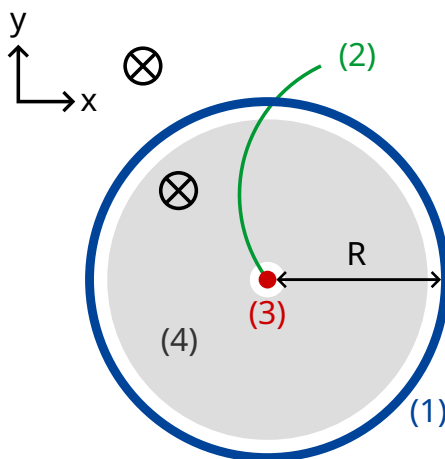


2. attēls: Caurlidošanas laika detektora shematiskais attēls.

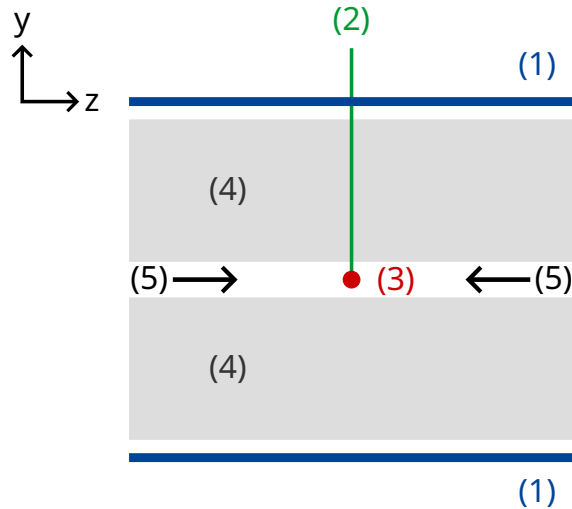
- B.1** Izsaki daļiņas miera masu m ar impulsa p , nolidotā ceļa l un lidojuma laika t palīdzību, pieņemot, ka daļiņas ir lādētas ar elementārlādiņu e un ceļo ar gaismas ātrumam tuvu ātrumu pa taisnu trajektoriju caur ToF detektoru perpendikulāri abām detektēšanas plaknēm (skaties 2. attēlu). 0.8pt

B.2 Aprēķini minimālo ToF detektora garumu l , kas būtu nepieciešams, lai skaidri atšķirtu lādētu kaonu no lādēta pīona, ja tiem ir vienādi impulsi, $1.00 \text{ GeV}/c$ katram. Skaidrai izšķiršanai ir nepieciešams, lai caurlidošanas laiku starpība būtu vismaz trīs reizes lielāka par detektora laika izšķirtspēju. Tipiska ToF detektora laika izšķirtspēja ir 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Zemāk mēs apskatām tipisko LHC detektoru, kas identificē sadursmes rezultātā radušās daļiņas. Tas sastāv no divām daļām: trajektorijas detektora un ToF detektora. 3. attēlā ir parādīti šīs iekārtas divi šķēsgriezumi: perpendikulāri (šķērseniski) un paralēli (gareniski) protonu kūļiem. Abi detektori ir caurules, kas ieskauj sadursmju apgabalu. Kūļi saduras cauruļu centrā. Trajektorijas detektors reģistrē lādētas daļiņas trajektoriju, tai izlidojot caur magnētisko lauku, kas ir vērstas paralēli protonu kūļiem. Zinot trajektorijas rādiusu r , ir iespējams izrēķināt daļiņas šķērsenisko impulsu p_T (T – *transverse*). Tā kā sadursmes brīdis ir zināms, ToF detektoram pietiek ar vienu cauruli, kas kā čaula ieskauj trajektorijas detektēšanas kameru no ārpuses. Caurlidošanas laiks tiek skaitīts no sadursmes brīža līdz brīdim, kad daļiņas sasniedz ToF čaulu. Šajā uzdevumā drīkst uzskatīt, ka visām daļiņām, kas rodas sadursmēs, nav impulsa komponentes protonu kūļu virzienā.



šķērseniskais griezum



gareniskais cauruļu griezum
gar kūļu līniju

- (1) - ToF detektora caurule
- (2) - trajektorija
- (3) - sadursmes punkts
- (4) - trajektorijas detektora caurule
- (5) - protonu kūļi
- ⊗ - magnētiskais lauks

3. attēls: Eksperimentālā iekārta daļiņu identificēšanai ar trajektorijas kameru un ToF detektoru. Abi detektori ir caurules ar sadursmju punktu centrā. Pa kreisi: šķēsgriezums kūļiem perpendikulārajā plaknē. Pa labi: griezum paralēli kūļiem. Detektējamā daļiņa lido perpendikulāri kūļiem.

B.3 Izsaki daļiņas miera masu, izmantojot sekojošus lielumus: magnētiskā lauka indukcija B , ToF caurules rādiuss R , fundamentālās konstantes un izmērītie lielumi – trajektorijas rādiuss r un caurlidošanas laiks t . 1.7pt

Mēs esam detektējuši četras daļiņas un gribam tās identificēt. Magnētiskā lauka indukcija trajektoriju detektorā bija $B = 0.500$ T. ToF caurules rādiuss ir $R = 3.70$ m. Mērījumu tabula ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Daļiņa	Trajektorijas rādiuss r [m]	Caurlidošanas laiks t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Identificē četras daļiņas, aprēķinot to masas. 0.8pt