

## Didysis hadronų kolaidėris (10 taškų)

Prieš pradėdami spręsti šį uždavinį perskaitykite bendrąsias instrukcijas iš atskiro voko.

Šiame uždavinyje nagrinėsime CERN'e esančio LHC (Large Hadron Collider, Didysis hadronų kolaidėris) dalelių greitintuvo fiziką. CERN yra didžiausia pasaulyje dalelių fizikos laboratorija. Jos pagrindinis tikslas yra atskleisti fundamentinius gamtos dėsnius. Du priešpriešai nukreiptų dalelių pluoštai pagreitinami iki didelių energijų, o panaudojant stiprų magnetinį lauką šie pluoštai nukreipiami išilgai apskritiminio greitintuvo. Pluošte protonai išilgai apskritimo pasiskirsčiusios ne tolygiai, bet sudaro tam tikrus klasterius ("pliūpsnius"). Protonų susidūrimo metu atsirandančios naujos dalelės yra stebimos naudojant didelius detektorius. Keli LHC parametrai yra pateikiami 1 lentelėje.

LHC žiedas	
Žiedo apskritimo ilgis	26659 m
Klasterių ("pliūpsnių") skaičius viename protonų pluošte	2808
Protonų skaičius viename klasteryje	$1.15 \times 10^{11}$
Protonų pluoštai	
Protonų energija	7.00 TeV
Energija masės centro atžvilgiu	14.0 TeV

1 lentelė: Kai kurių LHC parametrų tipinės skaitinės vertės

Dalelių fizikoje naudojami kitokie nei SI vienetai energijai, judesio kiekiui bei masei matuoti. Energija matuojama elektronvoltais [eV]. Pagal apibrėžimą 1 eV yra energijos kiekis, kurį gauna elementarų krūvį  $e$  turinti dalelė ją pagreitinus 1 V potencialų skirtumu ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

Atitinkamai judesio kiekis matuojamas  $\text{eV}/c$  vienetais, o masė –  $\text{eV}/c^2$  vienetais, čia  $c$  yra šviesos greitis vakuume. Kadangi 1 eV yra labai mažas energijos kiekis, dalelių fizikoje dažnai naudojami MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) ar TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

A dalyje nagrinėjamas protonų ir elektronų greitinimas. B dalyje analizuojama, kaip identifikuojamos CERN'e dalelių susidūrimų metu atsirandančios naujos dalelės.

### A dalis. LHC greitintuvas (6 taškai)

#### Greitinimas:

Tarkime, protonai buvo pagreitinami įtampa  $V$  iki greičio, labai artimo šviesos greičiui. Be to, nepaisykime jokių energijos nuostolių dėl spinduliavimo ir susidūrimų su kitomis dalelėmis.

**A.1** Užrašykite tikslią išraišką galutiniam protonų greičiui  $v$  apskaičiuoti. Atsakymą užrašykite kaip funkciją nuo greitinančiosios įtamos  $V$  ir fizikinių konstantų. 0.7pt

Ateities eksperimentuose CERN'e planuojama panaudoti protonus iš LHC ir ištirti jų susidūrimą su elektronais, kurių energija yra 60.0 GeV.

- A.2** Didelės energijos ir mažos rimties masės dalelėms galutinio greičio  $v$  santykinis nuokrypis nuo šviesos greičio,  $\Delta = (c - v)/c$ , yra labai mažas. Gaukite šio nuokrypio  $\Delta$  pirmos eilės aproksimaciją ir apskaičiuokite  $\Delta$  elektronams, kurių energija yra 60.0 GeV. Atsakyme naudokite greitinančiąją įtampą  $V$  ir fizikines konstantas. 0.8pt

Dabar grįžkime prie LHC naudojamų protonų. Tarkime, kad vamzdis, kuriame juda dalelių plūštas, yra žiedo pavidalo.

- A.3** Išveskite išraišką vienalyčio magnetinio lauko, reikalingo išlaikyti protonų pluoštą apskritiminėje orbitoje, srauto tankiui  $B$  rasti. Šioje išraiškoje turi būti tik protonų energija  $E$ , orbitos apskritimo ilgis  $L$ , fizikinės konstantos bei skaičiai. Jūs galite atlikti tam tikrus supaprastinimus, jeigu jų efektas yra mažesnis už tikslumą, kurį nusako atsakymo paskutinis reikšminis skaičius. Apskaičiuokite magnetinio lauko srauto tankį  $B$ , naudojamą protonams, kurių energija  $E = 7.00$  TeV. Protonų tarpusavio sąveikos nepaisykite. 1.0pt

### Spinduliavimo galia:

Bet kokia su pagreičiu judanti jelektrinta dalelė spinduliuoja energiją elektromagnetinio lauko pavidalu. Pastoviu kampiniu greičiu besisukančios dalelės spinduliavimo galia  $P_{\text{rad}}$  priklauso tik nuo dalelės pagreičio  $a$ , jos krūvio  $q$ , šviesos greičio  $c$  ir elektrinės konstantos  $\epsilon_0$ .

- A.4** Naudodami dimensijų analizę nustatykite išraišką spinduliavimo galiai  $P_{\text{rad}}$  apskaičiuoti. 1.0pt

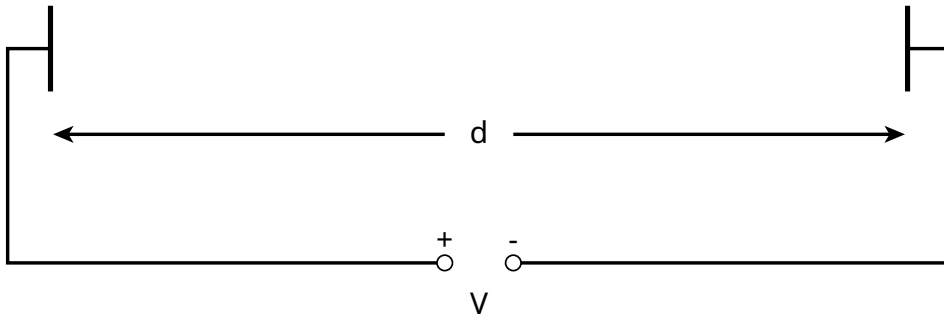
Tikroji spinduliavimo galios formulė turi papildomą daugiklį  $1/(6\pi)$ ; be to, išvedant ją reliatyvistiniu atveju atsiranda dar vienas papildomas daugiklis  $\gamma^4$ , čia  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Apskaičiuokite LHC kolaideryje stebimą viso pluošto pilnutinę spinduliavimo galią  $P_{\text{tot}}$ , kai protonų energija  $E = 7.00$  TeV (žr. 1 lentelę). Galite naudoti tinkamus supaprastinimus. 1.0pt

### Tiesinis greitinimas:

CERN'e iš pradžių nejudantys protonai greitunami naudojant tiesų greitintuvą, kurio ilgis  $d = 30.0$  m ir galų potencialų skirtumas  $V = 500$  MV. Tiesus greitintuvas sudarytas iš dviejų plokštelių (žr. 1 pav.), tarp kurių sudaromas vienalytis elektrinis laukas.

- A.6** Apskaičiuokite laiką  $T$ , kurį protonai juda šiame elektriniame lauke. 1.5pt



1 pav.: Greitintuvo modulio schema.

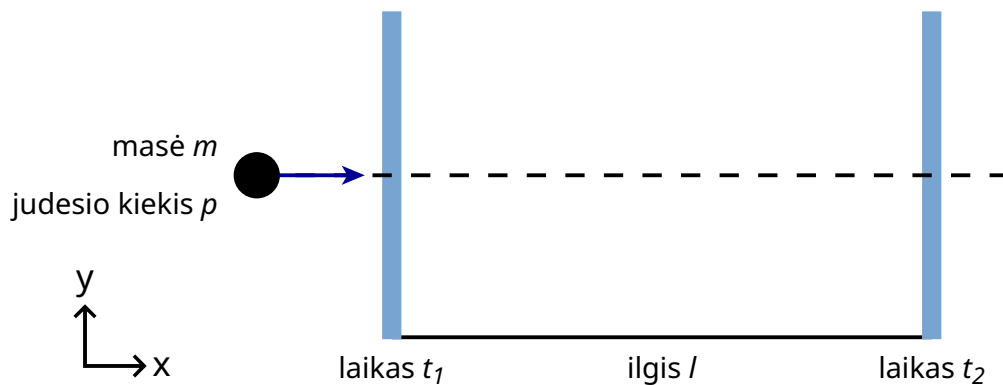
## B dalis. Dalelių identifikavimas (4 taškai)

### Lėkio trukmė:

Norint suprasti dalelių sąveikos ypatumus, būtina tiksliai identifikuoti naujas daleles, susidarančias pradinų dalelių susidūrimo metu. Vienas paprastas būdas yra išmatuoti laiką  $t$ , per kurį dalelė, kurios judesio kiekis yra žinomas, nulekia tam tikrą žinomą kelią  $l$ . Šis laikas išmatuojamas specialiame lėkio trukmės (*Time-of-Flight*, ToF) detektoriuje. Kelios tipinės dalelės, kurios yra identifikuojamos detektoriuje, kartu su jų masėmis išvardintos 2 lentelėje.

Dalelė	Masė [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deuteronas	1876
Protonas	938
Elektringasis kaonas	494
Elektringasis pionas	140
Elektronas	0.511

2 lentelė: Dalelės ir jų masės.

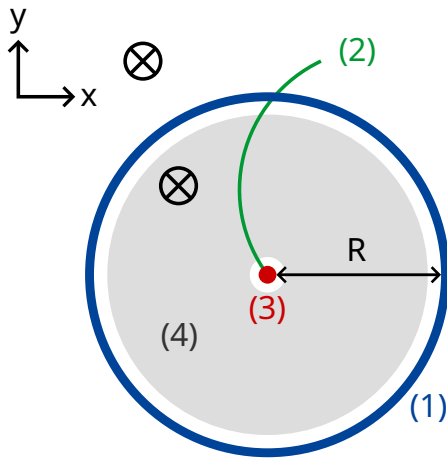


2 pav.: Lėkio trukmės detektoriaus principinė schema.

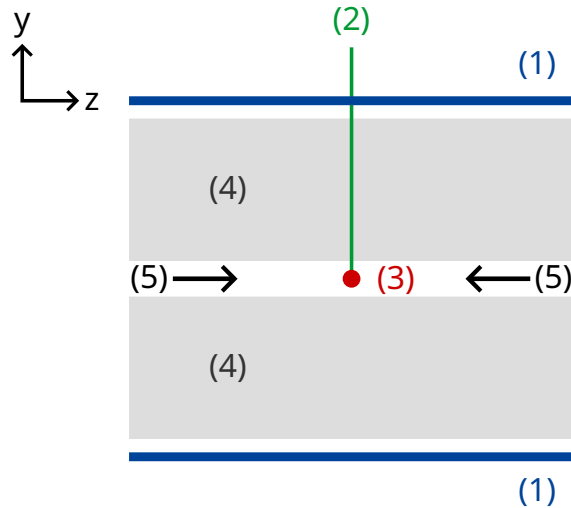
- B.1** Išreikškite dalelės masę  $m$  per jos judesio kiekį  $p$ , užfiksuotą nulėktą kelią  $l$  ir lėkio trukmę  $t$ . Tarkite, jog dalelės krūvis lygus elementariajam krūviui  $e$ , o detektoriuje ji lekia greičiu, artimu šviesos greičiui  $c$ , išilgai tiesios linijos statmenai detektoriaus plokštelėms (žr. 2 pav.). 0.8pt

- B.2** Apskaičiuokite ToF detektoriaus minimalų ilgį  $l$ , kuriam esant galima patikimai identifikuoti elektringąjį kaoną jį atskiriant nuo elektringojo piono, kai abiejų dalelių judesio kiekiai yra  $1.00 \text{ GeV}/c$ . Kad dalelės būtų patikimai atskirtos viena nuo kitos, reikalaujama, kad jų išmatuotos lėkio trukmės skirtųsi daugiau nei triguba detektoriaus laikinė skiriamoji geba. Pastaroji ToF detektoriumi paprastai yra  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

Panagrinėkime, kaip LHC susidariusios dalelės identifikuojamos dviejų pakopų detektoriuje, kurį sudaro trajektorijos detektorius (registruojantis dalelės trajektoriją) bei ToF detektorius. 3 pav. parodyta detektorių schema protonų pluoštams atitinkamai statmenoje ir išilginėje plokštumose. Abu detektoriai yra susidūrimo vietą supantys vamzdžiai, išdėstyti taip, kad protonų pluoštai skrietų tiksliai išilgai jų ašies. Trajektorijos detektorius išmatuoja naujai susidariusių elektringųjų dalelių trajektoriją joms judant magnetiniame lauke (pastarasis nukreiptas išilgai protonų pluoštų). Trajektorijos spindulys  $r$  leidžia nustatyti dalelės skersinę judesio kiekio dedamąją  $p_T$ . Kadangi susidūrimo laiko momentas yra žinomas, ToF detektoriumi reikalingas tik vienas vamzdis lėkio trukmei nustatyti (t. y. laiko intervalui tarp susidūrimo ir registravimo ties ToF vamzdžiu, esančiu iškart už detektavimo kameros). Spręsdami šį uždavinį galite tarti, jog visos po susidūrimo susidariusios dalelės lekia statmenai pradiniams protonų pluoštams, t. y. jos neturi judesio kiekio komponentės, nukreiptos lygiagrečiai protonų pluoštams).



detektorių skerspjūvio vaizdas



išilginis vaizdas ties  
vamzdžių centru

- (1) - ToF vamzdis
- (2) - trajektorija
- (3) - susidūrimo taškas
- (4) - trajektorijos detektavimo vamzdis
- (5) - protonų pluoštai
- ⊗ - magnetinis laukas

3 pav.: Dalelių identifikavimui naudojamų detektorių schema. Abu detektoriai - trajektorijos ir ToF - yra vamzdžiai, kurių viduryje ir įvyksta susidūrimas. Kairėje: skersinis detektorių vaizdas stebint išilgai protonų pluošto krypties; dešinėje: vaizdas žiūrint protonų srautams statmena kryptimi. Po susidūrimo susidariusi dalelė lekia statmenai pradiniam protonų srautui.

**B.3** Išreikškite dalelės masę per magnetinio lauko indukciją  $B$ , ToF vamzdžio spindulį  $R$ , fundamentines konstantas bei išmatuotus dydžius – trajektorijos spindulį  $r$  ir lėkio trukmę  $t$ . 1.7pt

Atlikus eksperimentą, buvo užregistruotos 4 dalelės, kurias dabar norime identifikuoti. Trajektorijos detektoriuje naudojamo magnetinio lauko indukcija buvo  $B = 0.500$  T, ToF vamzdžio spindulys  $3.70$  m. Matavimų rezultatai yra lentelėje žemiau ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ).

Dalelė	Trajektorijos spindulys $r$ [m]	Lėkio trukmė $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Apskaičiavę visų dalelių mases, identifikuokite jas.

0.8pt