

## Veliki hadronski sudarivač (10 bodova)

Molimo vas pročitajte opće upute koje se nalaze u posebnoj omotnici prije nego započnete ovaj zadatak.

U ovom zadatku, razmotrena je fizika ubrzivača čestica LHC (Lagre Hadron Collider) na CERNu. CERN je najveći svjetski laboratorij za čestičnu fiziku. Njegov glavni zadatak je proniknuti u fundamentalne prirodne zakone. Dvije zrake čestica ubrzane su na visoke energije, te vođene snažnim magnetskim poljem duž prstena ubrzivača, a potom sudarene jedna s drugom. Protoni nisu jednoliko rapršeni po obodu ubrzivača nego su skupljeni u tzv. svežnjeve. Nastale čestice proizvedene sudarima promatraju se s velikim detektorima. Neki od parametara LHCa mogu se vidjeti u tablici 1.

LHC prsten	
Opseg kruga	26659 m
Broj svežanja po protonskoj zraci	2808
Broj protona po svežnju	$1.15 \times 10^{11}$
Protonske zrake	
Energija protona	7.00 TeV
Energija centra mase	14.0 TeV

Tablica 1: Tipične numeričke vrijednosti relevantnih LHC parametara.

Čestični fizičari koriste pogodnije jedinice za energiju, količinu gibanja i masu: Energija se mjeri u elektronvoltima [eV]. Po definiciji, 1 eV je iznos energije koju je čestica elementarnog naboja,  $e$ , dobila prolazeći kroz razliku potencijala od jedan volt ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

Količina gibanja se mjeri u jedinicama  $eV/c$ , a masa u jedinicama  $eV/c^2$ , gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakuumu. Budući je 1 eV vrlo mali iznos energije, čestični fizičari često koriste MeV ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) ili TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

Dio A bavi se ubrzanjima protona ili elektrona. Dio B odnosi se na identifikaciju čestica nastalih u sudarima na CERNu.

### Dio A. LHC ubrzivač (6 bodova)

#### Ubrzavanje:

Pretpostavite da su protoni ubrzani naponom  $V$  takvim da je njihova brzina vrlo blizu brzini svjetlosti i zanemariti gubitke energije uslijed zračenja ili sudara s drugim česticama.

<b>A.1</b>	Odredite egzaktni izraz za konačnu brzinu $v$ protona kao funkciju napona ubrzanja $V$ , i fizikalnih konstanti.	0.7pt
------------	--	-------

Dizajn budućeg eksperimenta na CERNu ima u planu iskoristiti protone iz LHCa za sudar s elektronima energije 60.0 GeV.

- A.2** Za čestice velike energije i male mase relativna devijacija  $\Delta = (c - v)/c$  konačne brzine  $v$  u odnosu na brzinu svjetlosti je vrlo malena. Pronađite odgovarajuću aproksimaciju prvog reda za  $\Delta$  i izračunajte  $\Delta$  za elektrone energije 60.0 GeV koristeći napon za ubrzavanje  $V$  i fizikalne konstante. 0.8pt

Vraćamo se protonima u LHCu. Pretpostavite da je cijev zrake kružnog oblika.

- A.3** Odredite izraz za jednoliku magnetsku indukciju  $B$  potrebnu za održavanje protonske zrake na kružnoj putanji. Izraz treba sadržavati samo energiju protona  $E$ , opseg kruga  $L$ , fundamentalne konstante i brojeve. Možete se koristiti prikladnim aproksimacijama ako je njihov utjecaj manji od preciznosti dane najmanjim brojem značajnih znamenki. Izračunajte magnetsku indukciju  $B$  protona energije  $E = 7.00$  TeV, zanemarujući pritom međudjelovanje protona. 1.0pt

### Zračena snaga:

Ubrzana nabijena čestica zrači energiju u obliku elektromagnetskog vala. Zračena snaga  $P_{\text{rad}}$  nabijene čestice koja kruži stalnom kružnom brzinom ovisi samo o njenoj akceleraciji  $a$ , njenom naboju  $q$ , brzini svjetlosti  $c$  i permitivnosti vakuuma  $\epsilon_0$ .

- A.4** Koristeći dimenzionalnu analizu odredite izraz za zračenu snagu  $P_{\text{rad}}$ . 1.0pt

Stvarna formula za zračenu snagu sadrži faktor  $1/(6\pi)$ ; također, potpuni relativistički izvod daje dodatni multiplikativni faktor  $\gamma^4$ , gdje je  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

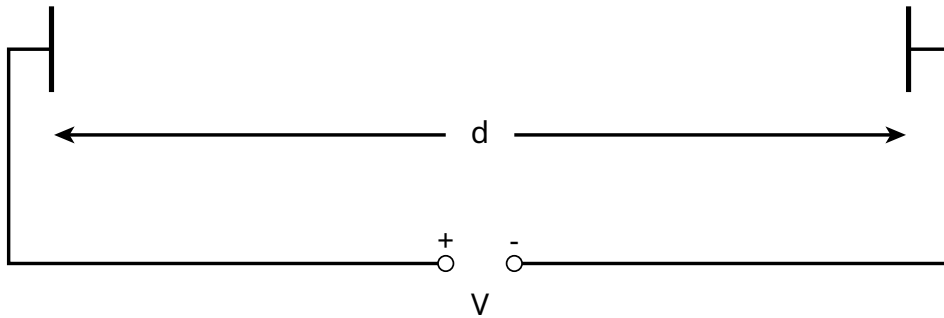
- A.5** Izračunajte ukupnu zračenu snagu  $P_{\text{tot}}$  LHCa za proton energije  $E = 7.00$  TeV (Bilješka u tablici 1). Smijete iskoristiti prikladne aproksimacije. 1.0pt

### Linearno ubrzavanje

U CERNu, protoni su iz mirovanja ubrzani linearnim akceleratorom duljine  $d = 30.0$  m razlikom potencijala  $V = 500$  MV. Pretpostavite da je električno polje homogeno. Linearni ubrzivač se sastoji od dvije ploče kao što je prikazano na Slici 1,

**A.6** Odredite vrijeme  $T$  potrebno protonima da prođu kroz ovo polje.

1.5pt



Slika 1: Skica modula za ubrzavanje

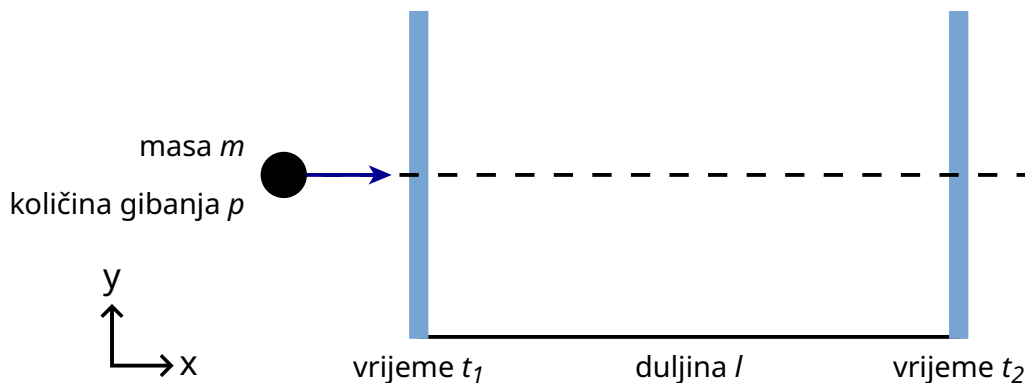
## Dio B. Određivanje čestica

### Vrijeme proleta:

Važno je identificirati viskoenergijske čestice nastale sudarima da bismo mogli protumačiti interakcijske procese. Jednostavna metoda je da mjerite vrijeme ( $t$ ) koje je potrebno čestici poznate količine gibanja da prijeđe udaljenost  $l$  u tzv. Time-of-Flight (ToF) detektoru. Tipične čestice koje se identificiraju u detektoru zajedno s njihovim masama navedene su u tablici 2.

Čestica	Masa [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deuterij	1876
Proton	938
nabijeni Kaon	494
nabijeni Pion	140
Elektron	0.511

Tablica 2: Čestice i njihove mase.

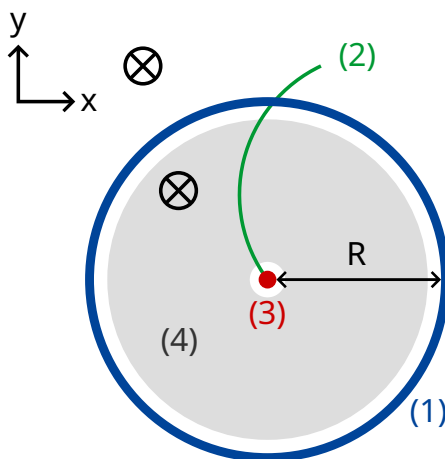


Slika 2: Shematski prikaz time-of-flight detektora.

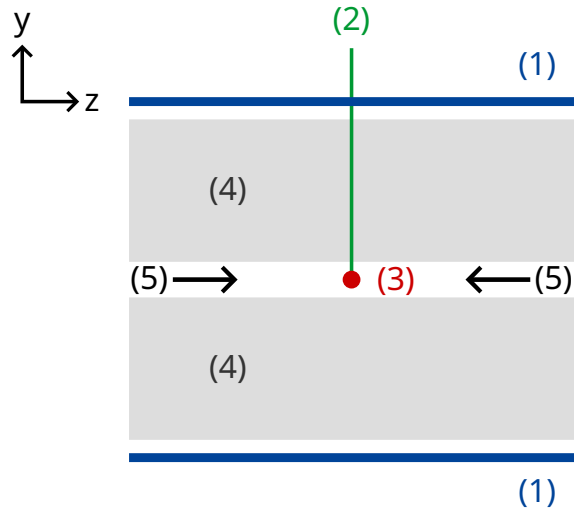
- B.1** Izrazite masu  $m$  čestice pomoću količine gibanja  $p$ , duljine leta  $l$  i vremena proleta  $t$ , pretpostavljajući da čestice imaju elementarni naboj  $e$  i putuju brzinama bliskim  $c$  po ravnoj stazi u ToF detektoru te da putuju okomito na dvije ploče detektora (vidi sliku 2). 0.8pt

- B.2** Izračunajte minimalnu duljinu  $l$  ToF detektora koja omogućava sigurno raspoznavanje nabijenih kaona od nabijenih piona, pri čemu svaki ima količinu gibanja od  $1.00 \text{ GeV}/c$ . Za dobro raspoznavanje potrebno je da je razlika vremena proleta veća od trostrukog vremena rezolucije detektora. Tipično vrijeme rezolucije ToF detektora iznosi  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

U sljedećem, čestice nastale u tipičnom LHC detektoru se identificiraju u detektoru s dva stadija koji se sastoji od detektora praćenja i ToF detektora. Slika 3 prikazuje postav u transverzalnoj i u longitudinalnoj ravnini u odnosu na protonsku zraku. Oba detektora su cijevi koje okružuju područje interakcije sa zrakom koja prolazi sredinom cijevi. Detektor praćenja mjeri putanju nabijene čestice koja prolazi kroz magnetsko polje čiji je smjer paralelan sa protonskim zrakama. Polumjer putanje  $r$  omogućuje određivanje transverzalne količine gibanja  $p_T$  čestice. S obzirom da je vrijeme sudara poznato, ToF detektoru je potrebna samo jedna cijev za mjerenje vremena proleta koje se mjeri od točke sudara do ToF cijevi. Ova ToF cijev se nalazi tik izvan komore za praćenje. Za ovaj zadatak možete pretpostaviti da sve čestice nastale sudarom putuju okomito na protonske zrake, što znači da nastale čestice nemaju količinu gibanja u smjeru protonskih zraka.



transverzalna ravnina



udarni presjek  
longitudinalni prikaz u središtu  
cijevi duž zrake

- (1) - ToF cijev
- (2) - putanja
- (3) - točka sudara
- (4) - cijev za praćenje
- (5) - protonske zrake
- ⊗ - magnetsko polje

Slika 3: Eksperimentalni postav za identifikaciju čestica s komorom za praćenje i ToF detektorom. Oba detektora su cijevi koje okružuju točku sudara u sredini. Lijevo: transverzalni prikaz okomit na zraku, Desno: longitudinalni prikaz paralelan sa zrakom. Čestica putuje okomito na na zraku.

**B.3** Izrazite masu čestice koristeći magnetsku indukciju  $B$ , polumjer  $R$  ToF cijevi, 1.7pt  
osnovne konstante i mjerene veličine: polumjer putanje  $r$  i vrijeme proleta  $t$ .

Detektiramo četiri čestice i želimo ih identificirati. Magnetska indukcija u detektoru praćenja iznosi  $B = 0.500$  T. Polumjer  $R$  ToF cijevi iznosio je 3.70 m. Ovdje su mjerenja ( $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$ ):

Čestica	Polumjer putanje $r$ [m]	Vrijeme proleta $t$ [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Identificirajte te četiri čestice računajući njihove mase. 0.8pt