

Veliki Hadronski Sudarač (LHC) (10 poena)

Molimo vas da prije nego što počnete sa izradom zadatka pročitate opšte upute koje su date u odvojenoj koverti.

U ovom zadatku baviti ćemo se fizikom LHC-a (Large Hardon Collider), akceleratora čestica koji se nalazi u CERN-u. CERN je najveća laboratorija u fizici čestica na svijetu, koja za cilj ima davanje odgovora na neka od najfundamentalnijih pitanja u prirodi. Dva snopa čestica ubrzanih do visokih energija, vođena su jakim magnetnim poljem kroz prsten akceleratora i prinuđena na međusobni sudar. Raspodjela protona unutar prstena akceleratora nije homogena, već su protoni raspoređeni unutar podsnopova (bunches) u okviru glavnog snopa. Novonastale čestice u sudarima posmatraju se detektorima. Neki od parametara LHC-a mogu se naći u tabeli 1.

Prsten LHC-a	
Obim prstena	26659 m
Broj podsnopova unutar glavnog snopa protona	2808
Broj protona u jednom podsnopu	1.15×10^{11}
Protonski snopovi	
Energija protona	7.00 TeV
Energija centra mase	14.0 TeV

Tabela 1: Tipične numeričke vrijednosti bitnih LHC parametara

Fizičari koji se bave fizikom čestica koriste pogodne jedinice za energiju, impuls i masu: energija se mjeri u elektronvoltima [eV]. Po definiciji, 1 eV je količina energije koju dobije čestica elementarnog naelektrisanja e , nakon što prođe kroz razliku potencijala od jedan volt ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2/\text{s}^2$).

Impuls se mjeri u jedinicama eV/c i masa u jedinicama eV/c^2 , gdje je c brzina svjetlosti u vakuumu. Kako 1 eV predstavlja malu količinu energije, fizičari često koriste jedinice poput 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 ubrzanjem protona ili elektrona. Dio B bavi se identifikacijom čestica nastalih u sudarima u CERN-u.

Dio A. LHC akcelerator (6 poena)

Ubrzanje:

Pretpostavite da su protoni ubrzani razlikom potencijala V tako da im je brzina uporediva sa brzinom svjetlosti. Zanimarite gubitke energije uzrokovane zračenjem ili sudarima sa drugim česticama.

A.1 Napišite egzaktni izraz bez aproksimacija za konačnu brzinu protona v nakon ubrzanja, u funkciji razlike potencijala V i fizikalnih konstanti. 0.7pt

Budući eksperimenti u CERN-u planiraju koristiti protone iz LHC-a i sudarati ih sa elektronima energije 60.0 GeV.

- A.2** Za čestice veoma visokih energija i male mase, relativna devijacija $\Delta = (c - v)/c$ konačne brzine v od brzine svjetlosti je veoma mala. Napišite Δ razvijajući/aproksimirajući je do članova prvog reda i izračunajte Δ za elektrone energije 60.0 GeV koristeći napon ubrzavanja V i fizikalne konstante. 0.8pt

Vratimo se sada na protone u LHC-u. Pretpostavite da cijev prstena u kojoj se kreće snop čestica ima kružni oblik.

- A.3** Izvedite izraz za magnetnu indukciju B potrebnu da bi se snop protona održao na kružnoj putanji. Izraz treba da sadrži samo energiju protona E , obim kružne putanje L , fundamentalne konstante i brojeve. Možete koristiti pogodne aproksimacije ako je njihov efekat zanemariv (u odnosu na broj značajnih cifara). Izračunajte vrijednost magnetne indukcije B za protone energije $E = 7.00$ TeV, zanemarujući interakciju između protona. 1.0pt

Izračena snaga:

Naelektrisanje koje se kreće ubrzano zrači energiju u vidu elektromagnetnih talasa. Izračena snaga P_{rad} naelektrisane čestice koja se konstantnom brzinom kreće po kružnoj putanji zavisi jedino od ubrzanja čestice a , vrijednosti naelektrisanja q , brzine svjetlosti c i permitivnosti vakuuma ϵ_0 .

- A.4** Koristeći dimenzionalnu analizu napišite izraz za izračenu snagu P_{rad} . 1.0pt

Stvarna formula za izračenu snagu uključuje i faktor $1/(6\pi)$; pored toga, potpuno relativističko izvođenje daje dodatni multiplikativni faktor γ^4 , gdje je $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Izračunajte ukupnu izračenu snagu P_{tot} u LHC-u snopova protona koji međusobno idu u susret, energije $E = 7.00$ TeV (pogledajte tabelu 1). Možete koristiti pogodne aproksimacije. 1.0pt

Linearno ubrzanje:

U CERN-u, protoni koji miruju su najprije ubrzani linearnim akceleratorom dužine $d = 30.0$ m prolazeći kroz razliku potencijala od $V = 500$ MV. Pretpostavite da je električno polje u linearnom akceleratoru homogeno/uniformno. Linearni akcelerator se sastoji od dvije ploče kao što je prikazano na slici 1.

A.6 Odredite vrijeme T potrebno da protoni prođu kroz ovo polje.

1.5pt

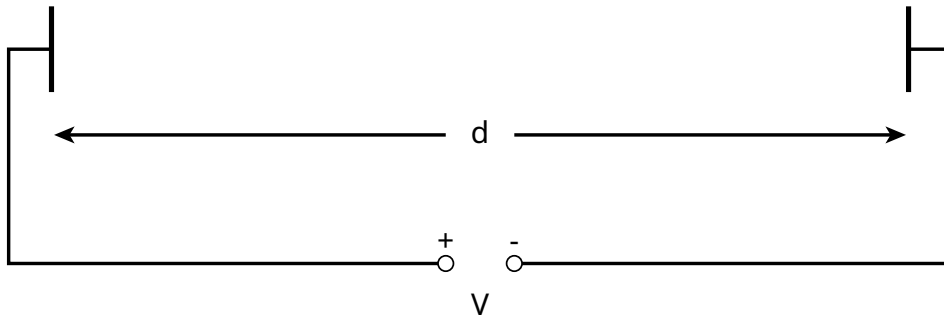


Figure 1: Skica linearnog akceleratora.

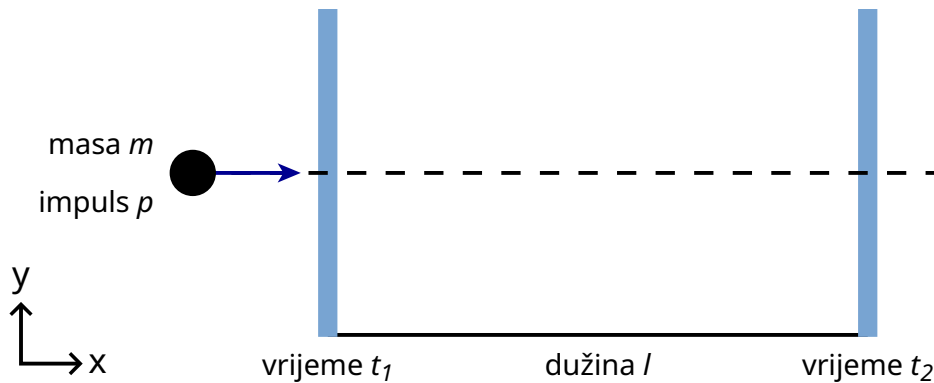
Dio B. Identifikacija čestica (4 poena)

Vrijeme leta:

Da bismo analizirali procese međudjelovanja čestica, veoma je važno identifikovati čestice visokih energija koje nastaju prilikom sudara. Jednostavna metoda sastoji se od mjerenja vremena (t) potrebnog da čestica poznatog impulsa pređe udaljenost l u tzv. ToF (Time of Flight) detektoru. Tipične čestice koje identifikujemo u detektoru zajedno sa odgovarajućim masama date su u tabeli 2.

Čestica	Masa [MeV/c ²]
Deuterij	1876
Proton	938
naelektrisani Kaon	494
naelektrisani Pion	140
Elektron	0.511

Tabela 2: Čestice i njihove mase

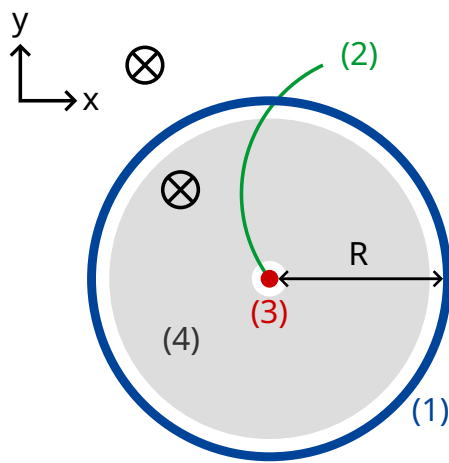


Slika 2: Šematski prikaz ToF detektora

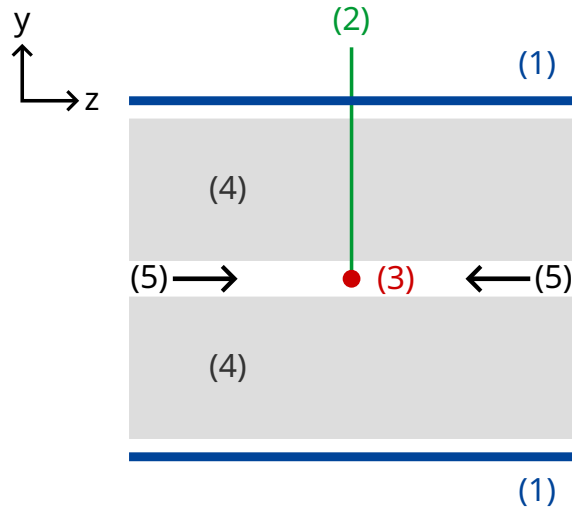
- B.1** Izrazite masu čestice m preko veličina: impulsa p , dužine l i vremena leta t , pretpostavljajući da čestica naelektrisanja e putuje veoma velikom brzinom uporedivoj brzini svjetlosti po pravolinijskoj trajektoriji koja je okomita na dvije detekcijske ploče ToF detektora. (pogledajte sliku 2). 0.8pt

- B.2** Izračunajte minimalnu dužinu ToF detektora l za koju će naelektrisani kaon biti sigurno razdvojen od naelektrisanog piona ako su impulsi obje čestice jednaki i iznose $1.00 \text{ GeV}/c$. Za sigurno razdvajanje čestica potrebno je da razlika u vremenima leta čestica bude tri puta veća od vremenske rezolucije detektora. Tipična vremenska rezolucija ToF detektora je 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Čestice nastale u tipičnom LHC detektoru identifikuju se u dvodijelnom (two stage) detektoru koji se sastoji od detektora trajektorije čestica (tracking detektor) i ToF detektora. Slika 3 prikazuje postavku za identifikaciju u okomitoj (transverzalnoj) i paralelnoj (longitudinalnoj) ravni u odnosu na snop protona. Oba detektora su cijevi koje obuhvataju područje u kojem se događaju reakcije. Dakle, snopovi protona prolaze kroz sredinu ovih cijevi. Detektor trajektorije mjeri trajektoriju naelektrisane čestice koja prolazi kroz magnetno polje koje ima pravac paralelan pravcu kretanja protona. Radijus trajektorije r omogućuje nam da izmjerimo transverzalni impuls čestice p_T . Kako je vrijeme sudara poznato, za ToF detektor potrebna je samo jedna ploča da bi se odredilo vrijeme leta. Dakle, vrijeme leta odgovara vremenu potrebnom da čestica nastala u crvenog tački sudara dođe do plave ToF cijevi. Ova ToF cijev postavljena je neposredno iza detektora trajektorije, koji je ustvari komora koja bilježi trajektoriju čestice. Za ovaj zadatak možete pretpostaviti da se sve čestice nastale u sudaru protona kreću u ravni okomitoj na snop protona. To ustvari znači da nastale čestice nemaju komponentu impulsa u pravcu snopova protona.



transverzalna ravan



poprečni presjek po sredini cijevi i
longitudijalni pogled
duž pravca snopova

- (1) - ToF cijev
- (2) - trag čestice
- (3) - tačka sudara
- (4) - detektor trajektorije
- (5) - snopovi protona
- ⊗- magnetno polje

Slika 3 : Eksperimentalna postavka za identifikaciju čestica koja se sastoji od komore za detekciju trajektorije i ToF detektora. Oba detektora su cijevi koje okružuju tačku sudara smještenu u sredini. Lijevo: transverzalni pogled na ravan okomitu na snopove protona. Desno: longitudinalni pogled paralelan snopovima protona. Nastale čestice se kreću u ravni okomitoj na pravac snopova protona, te pri kretanju ne gube energiju.

B.3 Izrazite masu čestice preko veličina: magnetne indukcije B , radijusa ToF cijevi R , 1.7pt
fundamentalnih konstanti i izmjerenih vrijednosti : radijusa trajektorije čestice
 r i vremena leta t .

U eksperimentu smo detektovali četiri čestice i želimo ih identifikovati. Magnetna indukcija unutar detektora trajektorije iznosi $B = 0.500$ T. Radijus ToF cijevi R iznosi 3.70 m. Mjerenja u eksperimentu data su u tabeli ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Čestica	Radijus trajektorije čestice r [m]	Vrijeme leta t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.32	25

B.4 Identifikujte ove četiri čestice računajući njihove mase.

0.8pt