

Veliki hadronski trkalnik (10 točk)

Preden se lotiš reševanja naloge preberi Splošna navodila.

Pri tej nalogi obravnavamo pospeševalnik delcev LHC (Large Hadron Collider) v CERNu, ki je največji laboratorij za fiziko delcev na svetu. Raziskovalci fizike delcev odkrivajo osnovne zakone narave. Dva curka delcev, ki ju skozi pospeševalnik usmerja močno magnetno polje, pospešijo do visokih energij. Protoni niso enakomerno razporejeni vzdolž curka, ampak združeni v gruče. Curka delcev naposled trčita. Nove delce, ki ob trku curkov nastanejo, zaznajo veliki detektorji. Nekateri parametri trkalnika LHC so v tabeli 1.

LHC obroč	
Obseg obroča	26659 m
Število gruč protonov v curku protonov	2808
Število protonov v gruči	1.15×10^{11}
Protonski curek	
Energija protonov	7.00 TeV
Energija trka v težiščnem sistemu	14.0 TeV

Tabela 1: Parametri LHC.

V fiziki delcev uporabljamo velikostnim redom prilagojene enote za energijo, gibalno količino in maso. Energijo merimo v elektron-voltih [eV], pri čemer ustreza energija 1 eV spremembi energije delca z osnovnim nabojem e , ki ga pospeši (ali zavre) napetost 1 V ($1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$).

Gibalno količino merimo v enoti eV/c in maso v enoti eV/c^2 , kjer je c hitrost svetlobe v vakuumu. Ker je 1 eV majhna enota, pogosto uporabimo tudi večje enote MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) ali TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

V delu A obravnavamo pospeševanje protonov in elektronov. V delu B obravnavamo identifikacijo novih delcev, nastalih pri trkih v LHC.

Del A. LHC trkalnik (6 točk)

Pospeševanje

Predpostavi, da protone pospeši tolikšna napetost V , da je njihova hitrost potem zelo blizu c . Zanemari izgube energije zaradi sevanja in trkov z drugimi delci med pospeševanjem.

A.1 Izpelj eksakten izraz za končno hitrost protonov v . Hitrost izrazi s pospeševalno napetostjo V in fizikalnimi konstantami. 0.7pt

V CERNu v prihodnosti načrtujejo eksperiment, pri katerem bodo protoni iz LHC trkali z visokoenergetskimi elektroni z energijo 60.0 GeV.

- A.2** Hitrost delcev v , katerih energija je zelo velika v primerjavi z njihovo mirovno energijo, se zelo malo razlikuje od svetlobne hitrosti. Relativno odstopanje $\Delta = (c - v)/v$ je zelo majhno. Poišči približek prvega reda za Δ , izrazi ga s pospeševalno napetostjo V in fizikalnimi konstantami ter izračunaj Δ za elektron z energijo 60.0 GeV. 0.8pt

Vrnimo se k protonom v LHC trkalniku. Predpostavi, da ima curek krožen presek.

- A.3** Izpelji izraz za gostoto homogenega magnetnega polja B , ki drži protone na krožni poti. Izraz naj vsebuje le energijo protonov E , obseg obroča L , fizikalne konstante in številke. Za količine, ki ne vplivajo na pomembne številke v rezultatu, lahko uporabiš ustrezne približke. 1.0pt
Izračunaj gostoto magnetnega polja B za proton z energijo $E = 7.00$ TeV. Interakcijo med protoni zanemari.

Sevalna moč

Nabit pospešen delec seva elektromagnetno valovanje. Sevalna moč P_{rad} nabitega delca, ki kroži s konstantno kotno hitrostjo, je odvisna le od pospeška delca a , naboja delca q , hitrosti svetlobe c in influenčne konstante ϵ_0 .

- A.4** Z dimenzijsko analizo poišči izraz za sevalno moč P_{rad} . 1.0pt

Pravilni izraz za sevalno moč vsebuje številski faktor $1/(6\pi)$. Poleg tega pridemo s popolno relativistično obravnavo še dodatni multiplikativni faktor γ^4 , kjer je $\gamma = (1 - \frac{v^2}{c^2})^{-\frac{1}{2}}$.

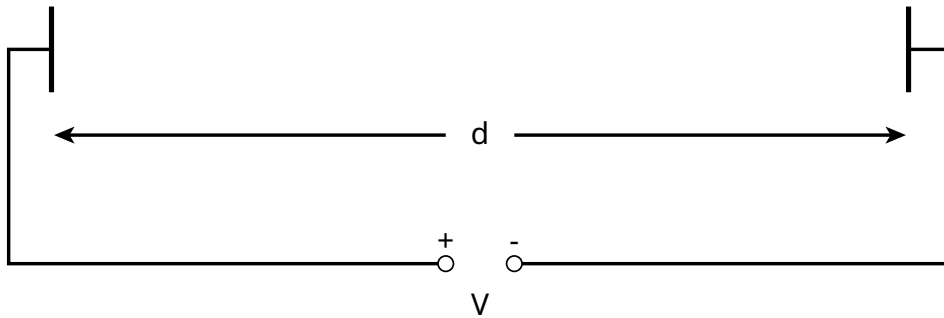
- A.5** Izračunaj energijski tok P_{tot} trkalnika LHC, kjer imajo protoni v curku energijo $E = 7.00$ TeV (upoštevaj podatke v tabeli 1). Lahko uporabiš primerne približke. 1.0pt

Linearno pospeševanje

V CERNu protone, ki spočetka mirujejo, v linearnem delu pospeševalnika na poti $d = 30.0$ m najprej pospeši napetost $V = 500$ MV. Linearni del pospeševalnika sestavljata dve plošči v razmiku d , kot kaže slika 1. Predpostavimo, da je pospeševalno električno polje homogeno.

A.6 Izračunaj čas T , v katerem protoni preletijo linearni del pospeševalnika.

1.5pt



Slika 1: Skica linearnega dela pospeševalnika.

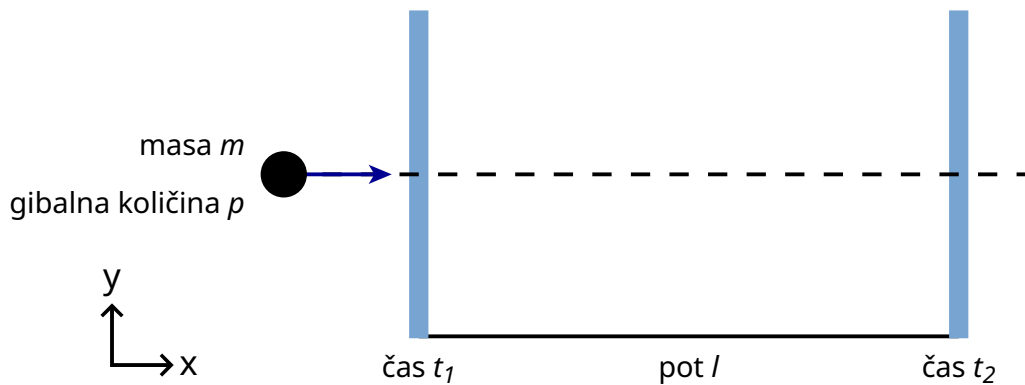
Del B. Identifikacija delcev (4 točke)

Čas preleta ToF

Da bi razumeli interakcijo med trkajočimi delci, je pomembno, da ugotovimo, kateri visokoenergetski delci ob trku nastanejo. Preprosta metoda vključuje merjenje časa t , v katerem delec z znano gibalno količino prepotuje pot l , v tako imenovanem Time-of-Flight (ToF) detektorju. Podatki o tipičnih delcih, identificiranih v detektorju ToF, so v tabeli 2.

Delec	Masa [MeV/c ²]
deuteron	1876
proton	938
nabiti kaon	494
nabiti pion	140
elektron	0.511

Tabela 2: Delci in njihove mase.



Slika 2: Skica ToF detektorja.

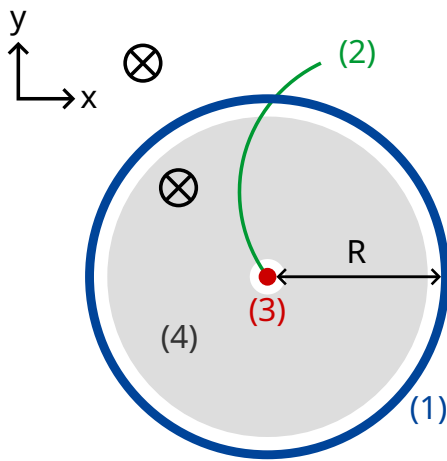
- B.1** Izrazi maso delca m z gibalno količino p , potjo preleta l in časom preleta t . Upoštevaj, da imajo delci osnovni naboj e , da se gibljejo s hitrostmi blizu c in da v ToF detektorju potujejo naravnost in v smeri, pravokotni na obe plošči (glej sliko 2). 0.8pt

- B.2** Izračunaj najmanjšo dolžino ToF detektorja l , ki je dovoljšnja, da lahko zanesljivo razlikujemo nabiti kaon in nabiti pion, ki imata oba gibalno količino $1.00 \text{ GeV}/c$. Razlika v časih preleta teh dveh delcev mora biti vsaj 3-krat tolikšna, kot je časovna ločljivost detektorja. Ločljivost ToF detektorja je 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

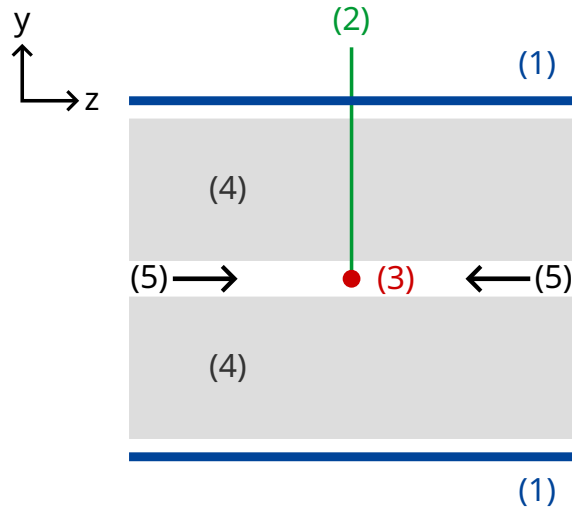
Novonastale delce v tipičnem LHC detektorju zaznava dvostopenjski detektor, ki ga sestavljata sledilna komora (detektor) in ToF detektor. Slika 3 kaže postavitev v dveh ravninah: pravokotni na protonski curek in vzporedni z njim. Oba detektorja sta cevi (ena v drugi), ki obkrožata območje trkov. Curka protonov se gibljeta po sredini obeh cevi. Sledilna komora zazna tir nabitega delca, ki potuje skozi magnetno polje. Magnetno polje je vzporedno curku protonov. Iz polmera tira r lahko določimo transversalno (prečno) komponento gibalne količine delca p_T .

Ker je trenutek trka znan, potrebuje ToF detektor le eno ploščo (oblikovano v cev) za merjenje časa preleta. Čas preleta je čas od trenutka trka do trenutka, ko novonastali delec zadene steno cevi ToF detektorja. Cev ToF detektorja je nameščena okoli cevi sledilne komore tik ob njej.

Pri tem delu naloge predpostavi, da vsi ob trkih novonastali delci potujejo v smereh, pravokotnih na smer vpadnih protonskih curkov in imajo zato gibalne količine, pravokotne na smer vpadnih protonskih curkov.



prerez cevi prečno na curek



prerez cevi vzdolž curka

- (1) - ToF cev
- (2) - tir
- (3) - mesto trka
- (4) - sledilna cev (komora)
- (5) - curka protonov
- ⊗ - magnetno polje

Slika 3 : Eksperimentalna postavitev za identifikacijo delcev s sledilno komoro in ToF detektorjem. Oba detektorja sta cevi, ki obkrožata mesto trka v sredini. Levo: prerez v prečni smeri (pravokotno na curek), desno: prerez vzdolž curka.

B.3 Maso delca m izrazi z gostoto magnetnega polja B , polmerom ToF cevi R , fizikalnimi konstantami in izmerjenima parametroma, polmerom tira r in časom preleta t . 1.7pt

Detektirali smo 4 različne delce, ki jih želimo identificirati. V sledilni komori je bila gostota magnetnega polja $B = 0.500$ T, polmer ToF cevi je $R = 3.70$ m. Rezultati meritev ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Delec	Polmer tirnice r [m]	Čas preleta t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Izračunaj mase delcev in jih identificiraj.

0.8pt