

Large Hadron Collider (10 puncte)

Te rugăm să citești instrucțiunile generale aflate într-un plic separat, înainte să începi această problemă.

În această problemă se analizează fizica acceleratorului de particule LHC (Large Hadron Collider) de la CERN. CERN este cel mai mare laborator din lume de fizică a particulelor. Scopul său fundamental este acela de a pătrunde în înțelesul legilor fundamentale ale naturii. Două fascicule de particule sunt accelerate la energii înalte, ghidate de-a lungul inelului acceleratorului cu ajutorul unui câmp magnetic intens. Apoi cele două fascicule sunt făcute să se ciocnească unul cu celălalt. Protonii nu sunt distribuiți uniform de-a lungul circumferinței acceleratorului, ci sunt adunați în așa numitele pachete/grupuri. Particulele rezultate în urma ciocnirilor sunt observate cu detectori mari. Câțiva parametri pentru LHC pot fi găsiți în tabelul 1.

Inelul LHC	
Circumferința inelului	26659 m
Numărul de pachete dintr-un fascicul de protoni	2808
Numărul de protoni dintr-un pachet	$1,15 \times 10^{11}$
Fascicule de protoni	
Energia protonilor	7,00 TeV
Energia centrului de masă	14,0 TeV

Tabelul 1: Valorile numerice tipice ale parametrilor relevanți pentru LHC.

Fizica particulelor elementare folosește unități convenabile pentru energie, impuls și masă. Energia este măsurată în electroni volți [eV]. Prin definiție 1 eV este cantitatea de energie dobândită de o particulă cu sarcina elementară e , care se deplasează sub o diferență de potențial de un volt ($1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$).

Impulsul se măsoară în unități eV/c și masa în unități eV/c^2 , unde c este viteza luminii în vid. Întrucât 1 eV este o cantitate foarte mică de energie, fizicienii din fizica particulelor folosesc adesea MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) sau TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Partea A studiază accelerarea protonilor sau a electronilor. Partea B se ocupă cu identificarea particulelor produse în coliziunile de la CERN.

Partea A. Acceleratorul LHC (6 puncte)

Accelerarea:

Presupune că protonii au fost accelerați sub o tensiune V , astfel încât viteza lor este foarte apropiată de viteza luminii. Neglijază orice pierdere de energie prin radiație sau prin ciocnire cu alte particule.

A.1 Determină expresia exactă a vitezei finale v a protonilor, ca funcție de tensiunea de accelerare V și de constante fizice. 0.7pt

Un proiect pentru un viitor experiment la CERN propune să se utilizeze protoni de la LHC care să fie ciocniți cu electroni care au energia de 60,0 GeV.

- A.2** Pentru particule cu energie înaltă și cu masă mică, deviația relativă $\Delta = (c-v)/c$ a vitezei finale v față de viteza luminii este foarte mică. Determină o aproximație de ordinul întâi pentru Δ și calculează Δ pentru electroni cu energia de 60,0 GeV, folosind tensiunea de accelerare V și constante fizice. 0.8pt

Acum să revenim la protonii din LHC. Presupune că tubul pentru fascicul are o formă circulară.

- A.3** Dedu o expresie pentru densitatea de flux magnetic uniform B , necesară pentru a menține fasciculul de protoni pe o traiectorie circulară. Expresia trebuie să conțină numai energia E a protonilor, circumferința L , constante fundamentale și numere. Poți folosi aproximații adecvate, dacă efectul lor este mai mic decât precizia dată de cel mai mic număr de cifre semnificative. Calculează densitatea de flux magnetic B pentru un proton cu energia de $E = 7,00$ TeV, neglijând interacțiunile dintre protoni. 1.0pt

Puterea radiată:

O particulă încărcată electric care este accelerată radiază energie, sub formă de unde electromagnetice. Puterea radiată P_{rad} de o particulă încărcată electric, care circulă cu o viteză unghiulară constantă, depinde numai de accelerația acesteia a , de sarcina sa electrică q , de viteza luminii c și de permitivitatea electrică a vidului ϵ_0 .

- A.4** Folosește analiza dimensională pentru a determina o expresie a puterii radiate P_{rad} . 1.0pt

Formula reală a puterii radiate conține un factor $1/(6\pi)$; mai mult, un tratament complet relativist conduce la un factor suplimentar de multiplicare γ^4 , cu $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Calculează puterea totală radiată P_{tot} de LHC, pentru un proton de energie $E = 7,00$ TeV (vezi tabelul 1). Poți folosi aproximații adecvate. 1.0pt

Accelerarea liniară:

La CERN, protonii în repaus sunt accelerați într-un accelerator liniar de lungime $d = 30,0$ m, utilizând o diferență de potențial $V = 500$ MV. Presupune că acest câmp electric este omogen. Un accelerator liniar constă din două armături, așa cum este schițat în figura 1.

- A.6** Determină timpul T , necesar protonilor pentru a trece prin acest câmp. 1.5pt

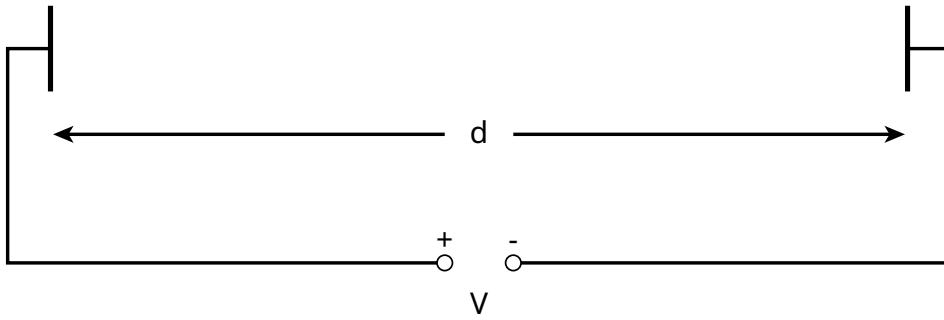


Figura 1: Schița unui modul al acceleratorului.

Partea B. Identificarea particulei (4 puncte)

Timpul de zbor:

Pentru a interpreta procesul de interacție, este important să se identifice particulele de mare energie care sunt generate prin ciocnire. O metodă simplă este aceea de a măsura timpul (t), de care are nevoie o particulă cu impuls cunoscut ca să parcurgă o lungime l , în așa-numitul detector Timp-de-Zbor (ToF /Time-of-Flight). Particulele tipice care sunt identificate în detector, împreună cu masele lor sunt indicate în tabelul 2.

Particula	Masa [MeV/c^2]
Deuteron	1876
Proton	938
Kaon cu sarcină electrică	494
Pion cu sarcină electrică	140
Electron	0,511

Tabelul 2: Particule și masele lor.

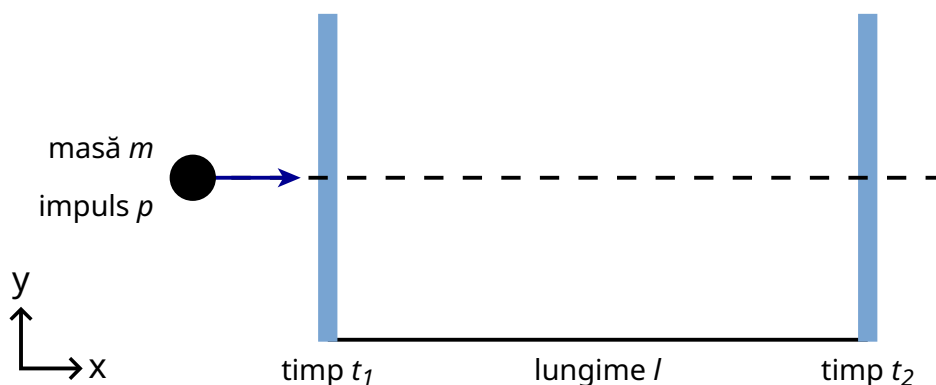
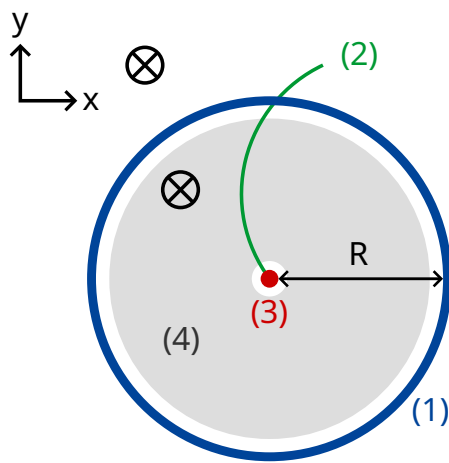


Figura 2: Vedere schematică a unui detector Timp-de-Zbor.

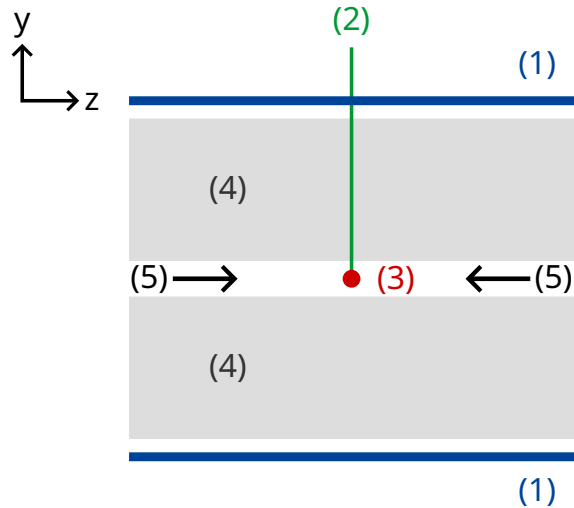
- B.1** Exprimă masa m a particulei, ca funcție de impulsul p , de lungimea de zbor l și de timpul de zbor t . Presupune că particulele au sarcina elementară e și se deplasează cu viteză apropiată de c în linie dreaptă în detectorul ToF și că ele se mișcă perpendicular pe cele două plane de detecție (vezi figura 2). 0.8pt

- B.2** Calculează lungimea minimă l a unui detector ToF, care permite să distingă într-o manieră sigură un kaon cu sarcină electrică de un pion cu sarcină electrică, dacă impulsurile ambelor particule sunt măsurate ca fiind $1,00 \text{ GeV}/c$. Pentru o bună separare, este necesar ca diferența dintre timpii de zbor să fie mai mare decât de trei ori rezoluția temporală a detectorului. Rezoluția tipică a detectorului ToF este 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

În cele ce urmează, particulele produse într-un detector tipic LHC sunt identificate cu ajutorul unui detector cu două etaje, constând dintr-un detector de urme și un detector ToF. Figura 3 evidențiază o vedere a dispozitivului în plan transversal, respectiv în plan longitudinal față de fasciculele de protoni. Ambii detectori sunt tuburi care înconjoară regiunea de interacție, cu fasciculul trecând prin mijlocul tuburilor. Detectorul de urme înregistrează traiectoria unei particule încărcate, care trece prin câmpul magnetic a cărui direcție este paralelă cu aceea a fasciculul de protoni. Raza r a traiectoriei permite să se determine impulsul transversal p_T al particulei. Întrucât timpul ciocnirii este cunoscut, detectorul ToF necesită doar un tub pentru a măsura timpul de zbor; timpul de zbor este măsurat din punctul de ciocnire până la tubul ToF. Acest tub ToF este situat imediat în afara camerei de observare a urmelor. Pentru această sarcină de lucru poți presupune că toate particulele create prin ciocnire se deplasează perpendicular pe fasciculele de protoni, ceea ce înseamnă că particulele create nu au impuls de-a lungul direcției fasciculelor de protoni.



plan transversal



secțiune transversală a
vederii longitudinale la centru
de-a lungul fasciculului din tub

- (1) -tubul ToF
- (2) - urma
- (3) - punctul de ciocnire
- (4) - tubul pentru urme
- (5) - fascicule de protoni
- ⊗ - câmpul magnetic

Figura 3: Dispozitivul experimental pentru identificarea particulei cu ajutorul camerei de observare a urmelor și a detectorului ToF. Ambii detectori sunt tuburi care înconjoară punctul de ciocnire aflat în mijlocul lor. Stânga: vedere transversală, perpendiculară pe linia fasciculului. Dreapta: vedere longitudinală, paralelă cu linia fasciculului. Particula se deplasează perpendicular pe linia fasciculului.

B.3 Exprimă masa particulei, ca funcție de densitatea de flux magnetic B , de raza R a tubului ToF, de constante fundamentale și de mărimi măsurate: raza r a urmei și timpul de zbor t . 1.7pt

S-au detectat patru particule, pe care dorim să le identificăm. Densitatea de flux magnetic în detectorul de urme a fost $B = 0,500$ T. Raza R a tubului ToF a fost de $3,70$ m. În cele ce urmează sunt prezentate rezultatele măsurărilor ($1 \text{ ns} = 10^{-9}$ s):

Particula	Raza traiectoriei r [m]	Timpul de zbor t [ns]
A	5,10	20
B	2,94	14
C	6,06	18
D	2,31	25

B.4 Identifică cele patru particule, calculând masele acestora.

0.8pt