

Велики хадронски сударац (10 поена)

Молимо вас да прочитате општа упутства која се налазе у посебном коверту, прије него што почнете са радом.

Тема овог задатка је физика која описује процесе у ЛХЦ (LHC -Large Hadron Collider) акцелератору (убрзивачу) честица који се налази у ЦЕРН-у. ЦЕРН је највећа лабораторија за физику елементарних честица на свијету. Основни циљ ове лабораторије је потпуни увид у основне законе природе. Два снопа честица високих енергија се крећу унутар прстена акцелератора вођена јаким магнетним пољем, да би се коначно сударила, један са другим. Протони нијесу хомогено распоређени у снопу, него су груписани у такозване гроздове. Честице које настану у оваквим сударима се виде уз помоћ великих детектора. Неки од параметара ЛХЦ-а су дати у табели 1.

ЛХЦ прстен	
Обим прстена	26659 m
Број гроздова честица у снопу протона	2808
Број протона у грозду	1.15×10^{11}
Снопови протона	
Енергија протона	7.00 TeV
Енергија у систему центра масе	14.0 TeV

Табела 1: Типичне бројне вриједности значајних параметара ЛХЦ-а.

У физици елементарних честица се користе подесне јединице за енергију, импулс и масу: енергија се изражава у електрон-волтима [eV]. По дефиницији, 1 eV је количина енергије коју добија честица елементарног наелектрисања, e , која се креће кроз разлику потенцијала од једног волта ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$).

Импулс се изражава у јединицама eV/c а маса у eV/c^2 , где је c брзина свјетлости у вакууму. Пошто је 1 eV веома мала количина енергије, користе се чешће MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) или TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Дио А се бави убрзавањем протона или електрона. Дио В је посвећен идентификацији честица насталих приликом судара у ЦЕРН-у.

Дио А. ЛХЦ акцелератор (6 поена)

Убрзање:

Претпоставите да су протони убрзани напоном V тако да им је брзина врло блиска брзини свјетлости. Занемарите све губитке енергије услед зрачења или судара са осталим честицама.

A.1 Изведите израз за коначну брзину v протона у зависности од напона V и физичких константи. 0.7pt

План за будући експеримент у ЦЕРН-у је да се протони добијени из ЛХЦ-а сударају са електронима енергија од 60.0 GeV.

- A.2** За честице високих енергија и малих маса мировања релативно одступање коначне брзине од брзине свјетлости $\Delta = (c - v)/c$, је врло мало. Нађите погодну апроксимацију за Δ и израчунајте Δ за електроне енергија 60.0 GeV, користећи напон и физичке константе. 0.8pt

Вратимо се на протоне у ЛХЦ-у. Претпоставите да је извор снопа кружног облика.

- A.3** Изведите израз за густину флукса хомогеног магнетног поља B које је неопходно да одржава протоне на кружној путањи. Израз треба да садржи само енергију протона E , обим L , основне константе и бројеве. Можете да користите прикладне апроксимације ако је њихов ефекат мањи од тачности одређене најмањим бројем значајних цифара. Израчунајте густину магнетног флукса B за протоне енергије $E=7.00$ TeV, занемарујући интеракцију између протона. 1.0pt

Израчена снага:

Наелектрисане честице које се крећу убрзано зраче енергију у облику електромагнетних таласа. Израчена снага P_{rad} наелектрисане честице која кружи константном угаоном брзином зависи само од убрзања a , наелектрисања q , брзине свјетлости c , као и од диелектричне константе вакуума ϵ_0 .

- A.4** Користећи димензиону анализу нађите израз за израчену снагу P_{rad} . 1.0pt

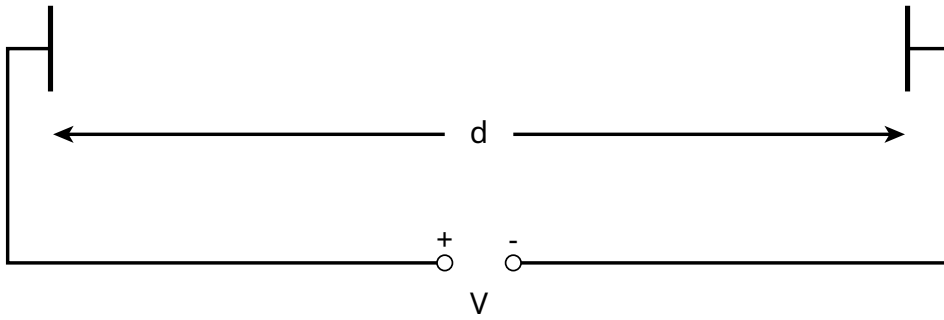
Прави израз за израчену снагу садржи фактор $1/(6\pi)$; такође извођење које у потпуности користи релативистичке ефекте даје додатни мултипликативни фактор γ^4 , гдје је $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Израчунајте укупну израчену снагу P_{tot} ЛХЦ-а за протоне енергије $E = 7.00$ TeV (погледајте табелу 1). Можете да користите прикладне апроксимације. 1.0pt

Линеарно убрзавање:

У ЦЕРН-у протони се убрзавају у линеарном акцелератору дужине $d = 30.0$ m. Крећу из мировања кроз разлику потенцијала $V=500$ MV. Претпоставите да је електрично поље хомогено. Линеарни акцелератор се састоји од двије плоче као што је приказано на слици 1.

- A.6** Одредите вријеме T које је потребно протонима да прођу кроз електрично поље. 1.5pt



Слика 1: Скица акцелератора

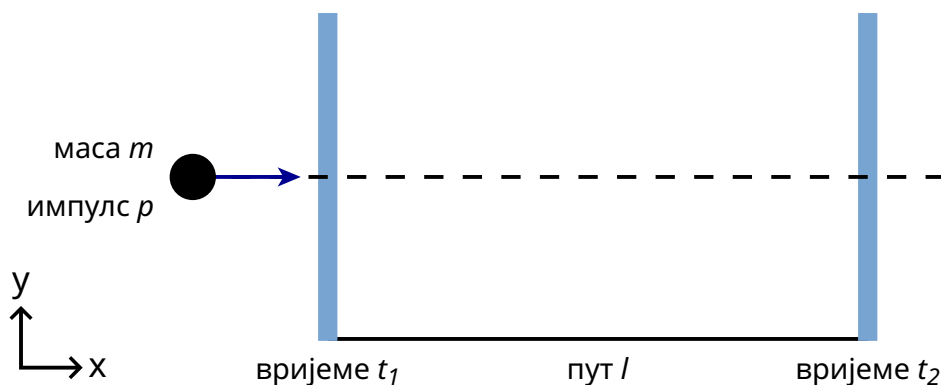
Део Б. Идентификација честица (4 поена)

Вријеме лета:

Важно је идентификовати честице високих енергија које се стварају приликом судара да би се протумачио процес интеракције. Једноставан начин је да се измјери вријеме t потребно честици познатог импулса да пређе пут l , такозваним детектором времена лета (Time-of-Flight (ToF) detector). Типичне честице идентификоване у детектору су приказане у табели 2., у којој су дате и њихове масе.

Честица	маса [MeV/c ²]
Деутерон	1876
Протон	938
наелектрисани Каон	494
наелектрисани Пион	140
Електрон	0.511

Табела 2. Честице и њихове масе.

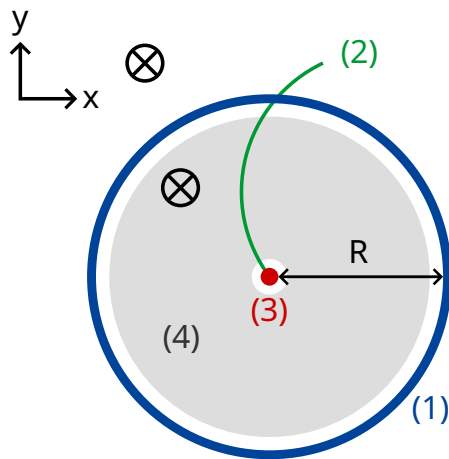


Схематски приказ детектора времена лета.

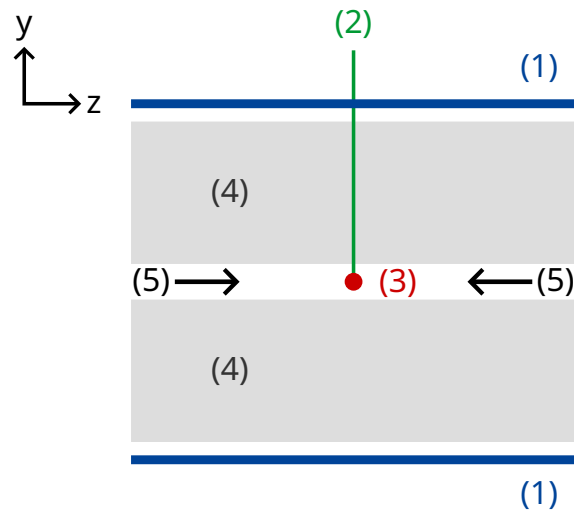
- B.1** Изразити масу m у зависности од импулса p дужине лета l и времена лета t претпостављајући да се честице елементарног наелектрисања e крећу брзином блиском брзини свјетлости, правим путањама унутар детектора, и да се крећу нормално на двије плоче детектора (слика 2). 0.8pt

B.2 Израчунајте најмању дужину детектора лета l која омогућава поуздано разликовање наелектрисаног каона од наелектрисаног пиона, при чему обје честице имају импулс од $1.00 \text{ GeV}/c$. За добро раздвајање је потребно да разлика у времену лета буде три пута већа од временске резолуције детектора. Стандардна резолуција детектора времена лета је 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Честице настале у стандардном ЛХЦ детектору се идентификују у двостепеном детектору који се састоји од детектора трагова и детектора времена лета. На слици 3 је приказана поставка у двије равни, трансверзалној и лонгитудиналној у односу на сноп протона. Оба детектора су у облику цијеви које окружују област интеракције, и сноп пролази по средини цијеви. Детектор трагова мјери путању наелектрисаних честица које пролазе кроз магнетно поље које је паралелно снопу протона. Ако се зна полупречник путање r може да се одреди трансверзална компонента импулса p_T честице. Пошто се зна вријеме судара, за детектор времена лета је потребна само једна цијев да би се измјерило вријеме лета (вријеме протекло од судара до детекције у цијеви детектора). Овакав детектор времена лета је постављен одмах до детектора трагова. У овом задатку претпоставите да се све честице настале у судару крећу нормално на протонски сноп, што значи да настале честице немају компоненту импулса дуж правца снопа протона.



трансверзална раван



попречни пресјек
бочне стране
цијеви дуж снопа

- (1) - Цијев детектора времена лета
- (2) - траг
- (3) - мјесто судара
- (4) - детектор трагова
- (5) - снап протона
- ⊗ - магнетно поље

Слика 3 : Поставка експеримента за идентификацију честица, са комором за трагове и детектором времена лета. Оба детектора су цијеви које окружују мјесто судара у средини. Слика лијево: поглед на трансверзалну раван нормалну на снап протона. Слика десно: поглед на лонгитудинлну раван паралелну снопу. Честица се креће нормално на снопу.

B.3 Изразите масу честица у зависности од густине магнетног флукса B , 1.7pt
полупречника цијеви са детектором времена лета R и измјерених
величина: полупречника r путање (трага) и времена лета t .

Детектоване су четири честице и треба их идентификовати. Густина магнетног флукса у детектору трага је била $B = 0.500 \text{ T}$. Полупречник R цијеви са детектором времена лета је била 3.70 m . Резултати мерења су ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Честица	Полупречник трајекторије r [m]	Вријеме лета t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Идентификујте ове четири честице на основу израчунате масе.

0.8pt