

## Велики хадронски сударац (10 поена)

Молимо вас да прочитате општа упутства која се налазе у посебном коверту, пре 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 свету. 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 нису 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	$1.15 \times 10^{11}$
Снопови протона	
Енергија протона	7.00 TeV
Енергија у систему центра масе	14.0 TeV

Табела 1: Типичне бројне вредности 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 светлости 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 ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ).

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

### Део А. ЛХЦ акцелератор (6 поена)

#### Убрзање:

Претпоставите да су протони убрзани напоном  $V$  тако да им је брзина врло блиска брзини светлости. 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 светлости  $\Delta = (c - v)/c$ , је врло мало. Нађите погодну апроксимацију за  $\Delta$  и израчунајте  $\Delta$  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  $E = 7.00 \text{ TeV}$ , занемарујући интеракцију између протона. 1.0pt

### Израчена снага:

Наелектрисане честице које се крећу убрзано зраче енергију у облику електромагнетних таласа. Израчена снага  $P_{\text{rad}}$  наелектрисане честице која кружи константном угаоном брзином зависи само од убрзања  $a$ , наелектрисања  $q$ , брзине светлости  $c$ , као и од диелектричне константе вакуума  $\epsilon_0$ .

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

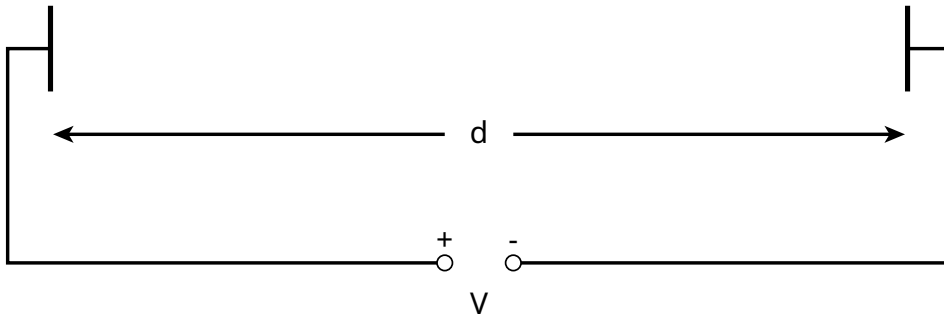
Прави израз за израчену снагу садржи фактор  $1/(6\pi)$ ; такође извођење које у потпуности користи релативистичке ефекте даје додатни мултипликативни фактор  $\gamma^4$ , где је  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

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

### Линеарно убрзавање:

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

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



Слика 1: Скица акцелератора

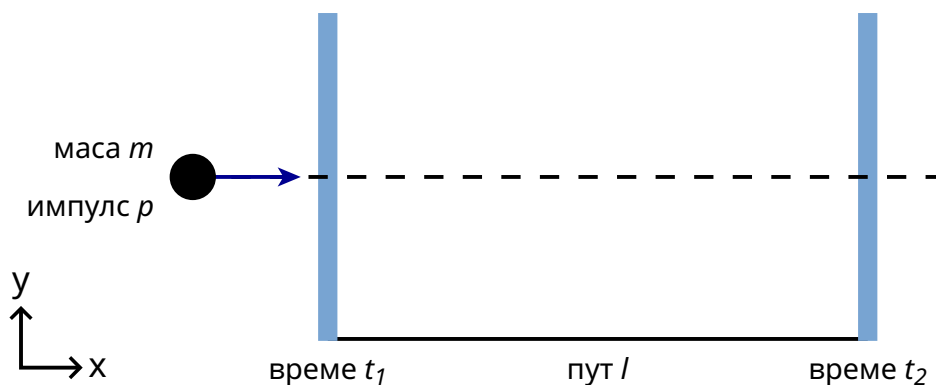
## Део Б. Идентификација честица (4 поена)

### Време лета:

Важно је идентификовати честице високих енергија које се стварају приликом судара да би се протумачио процес интеракције. Једноставан начин је да се измери време  $t$  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 <sup>2</sup> ]
Деутерон	1876
Протон	938
наелектрисани Каон	494
наелектрисани Пион	140
Електрон	0.511

Табела 2. Честице и њихове масе.

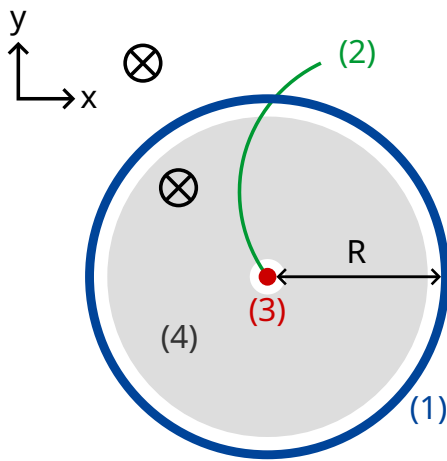


Схематски приказ детектора времена лета.

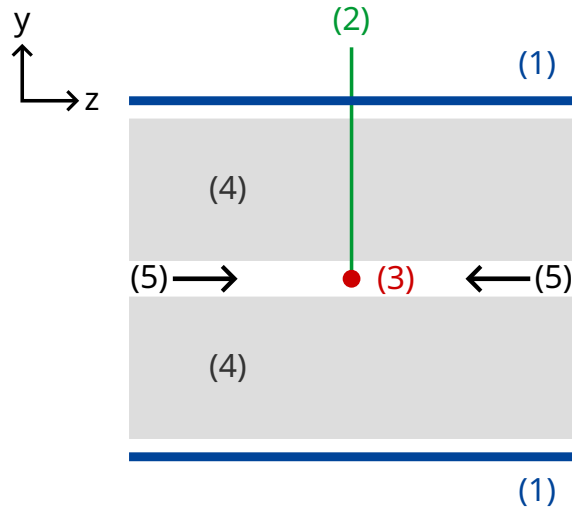
- В.1** Изразити масу  $m$  у зависности од импулса  $p$  дужине лета  $l$  и времена лета  $t$  претпостављајући да се честице елементарног наелектрисања  $e$  крећу брзином блиском брзини светлости, правим путањама унутар детектора, и да се крећу нормално на две плоче детектора (слика 2). 0.8pt

**B.2** Израчунајте најмању дужину детектора времена лета  $l$  која омогућава поуздано разликовање наелектрисаног каона од наелектрисаног пиона, при чему обе 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  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 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 две равни, трансверзалној и лонгитудиналној у односу на снап протона. Оба детектора су у облику цеви које окружују област интеракције, и снап пролази по средини цеви. Детектор трагова мери 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 време судара, за детектор времена лета је потребна само једна цев да би се измерило време лета (време протекло од судара до детекције у цеви 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 снап, што значи да настале честице немају компоненту импулса дуж правца снопа протона.



трансверзална раван



попречни пресек  
бочне стране  
цеви дуж снопа

- (1) - Цев детектора времена лета
- (2) - траг
- (3) - место 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 цеви које окружују место судара у средини. Слика лево: поглед на трансверзалну раван нормалну на снап протона. Слика десно: поглед на лонгитудинлну раван паралелну снопу. Честица се креће нормално на снап.

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

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

Честица	Полупречник трајекторије $r$ [m]	Време 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