

Голям Адронен Колайдер (10 точки)

Моля прочетете общите указания от отделния плик преди да започнете да решавате задачата.

В тази задача ще се обсъжда физика, свързана с ускорителя на частици LHC (Large Hadron Collider) от CERN . Два снопа от елементарни частици се ускоряват до високи енергии. Движението им по кръга на ускорителя се управлява със силно магнитно поле. След това те се сблъскват един с друг. Протоните не са разпределени равномерно по кръга, а са групирани в т. нар. пакети. Частиците, получени при тези сблъсъци се регистрират с големи детектори. Някои параметри на LHC са дадени в table 1.

LHC кръг	
Обиколка на кръга	26659 m
Брой на пакетите от протони в кръга	2808
Брой на протоните в един пакет	1.15×10^{11}
Пакети от протони	
Кинетична енергия на протоните	7.00 TeV
Енергия на протоните спрямо центъра на масата при сблъсък	14.0 TeV

Table 1: Типични стойности на някои параметри на LHC.

В тази област на физиката се използват извънсистемни единици за енергия, импулс и маса: енергията се мери в електрон-волти [eV]. По определение, 1 eV е кинетичната енергия, която получава частица с елементарен електричен заряд e , когато се придвижва между точки с потенциална разлика 1 волт ($1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2\text{s}^{-2}$).

Импулсът се мери в единици eV/c , а масата - в единици eV/c^2 , където c е скоростта на светлината във вакуум. Тъй като 1 eV е малка единица за енергия, често се използват кратните ѝ MeV ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$), GeV ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) or TeV ($1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

В Part A се разглежда ускорение на протони или електрони. В Part B целта е да се идентифицират частици, продукт на сблъсъците на пакетите в CERN.

Part A. LHC ускорител (6 точки)

Ускорение:

Протоните се ускоряват от състояние на покой с напрежение V , така че тяхната скорост става близка до скоростта на светлината. Всякакви енергетични загуби от излъчване се пренебрегват.

A.1 Намерете точната формула за скоростта v на протоните като функция на ускоряващото напрежение V и дадени в таблиците константи. 0.7pt

В CERN се планира експеримент по сблъсък между протони, ускорени от LHC, и електрони с кинетична енергия 60.0 GeV.

- A.2** За частици с голяма кинетична енергия и малка маса на покой, относителното отклонение $\Delta = (c - v)/c$ на крайната им скорост v от скоростта на светлината е много малка. Намерете приближена формула за Δ за електрони, ускорени от напрежение V , и изчислете стойността на Δ за електрони с кинетична енергия 60.0 GeV. 0.8pt

Нека сега разгледаме движението на другите частици, протоните, по кръга на LHC.

- A.3** Получете израз за магнитната индукция B на еднородно магнитно поле, необходимо да задържи протоните върху кръговата им траектория. Изразът да съдържа само кинетичната енергия на един протон E , дължината на кръга L и табулирани константи. Изчислете магнитната индукция B , когато протонът има кинетична енергия $E = 7.00$ TeV. 1.0pt

Мощност на излъчването:

Заредена частица, движеща се с ускорение, излъчва електромагнитни вълни. Мощността на вълните P_{rad} , излъчени от заредена частица, движеща се с постоянна скорост по окръжност, зависи само от нейното центростремителното ускорение a , заряда q , скоростта на светлината c и диелектричната проницаемост на вакуума ϵ_0 .

- A.4** Използвайки метода на размерностите намерете израз за мощността на излъчване P_{rad} . 1.0pt

Точната формула за мощността на излъчване съдържа множител $1/(6\pi)$; В релятивисткия случай тя съдържа допълнителен множител γ^4 , където $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Изчислете пълната излъчена мощност P_{tot} от пакетите в LHC, за кинетична енергия на един протон $E = 7.00$ TeV (виж table 1). Може да използвате подходящо приближение. 1.0pt

Линейно ускорение:

В CERN, протоните първоначално се ускоряват от покой в линеен ускорител с дължина $d = 30.0$ m и напрежение $V = 500$ MV. Приемете, че електричното поле е еднородно. Линейният ускорител, състоящ се от две метални плочи, е скициран на Figure 1.

- A.6** Определете времето T , за което протоните стигат от единия електрод до другия. 1.5pt

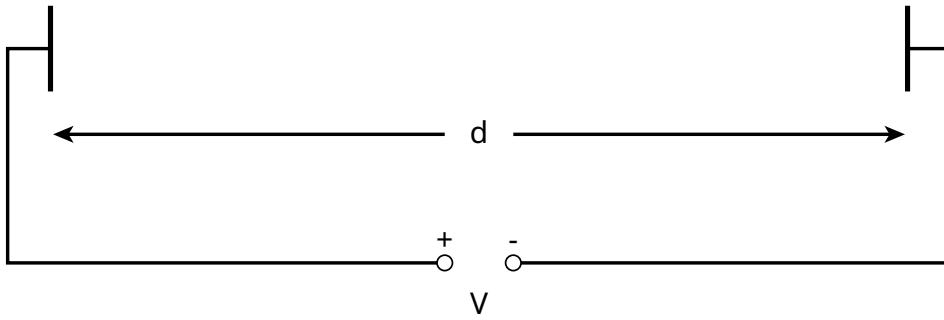


Figure 1: Схема на линейния ускорител.

Part B. Идентифициране на частици (4 points)

Време за прелитане (Time of flight):

Прост метод за идентифицирането на неизвестни частици, продукт на сблъсъците, е да се измерва времето (t), за което частица с определен импулс прелита разстояние l . Това се извършва в т. нар. Time-of-Flight (ToF) детектор. Неизвестните частици (и техните маси) са измежду дадените в table 2.

Частица	Маса [MeV/c^2]
деутрон	1876
протон	938
зареден каон	494
зареден пион	140
електрон	0.511

Table 2: Частици и техните маси.

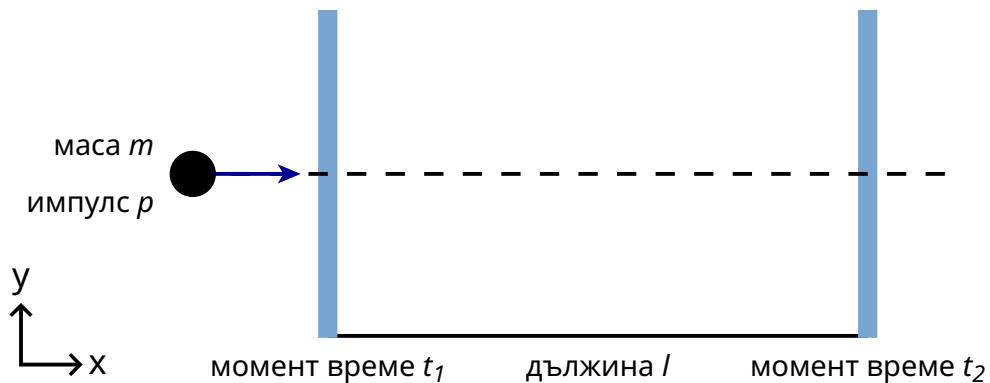
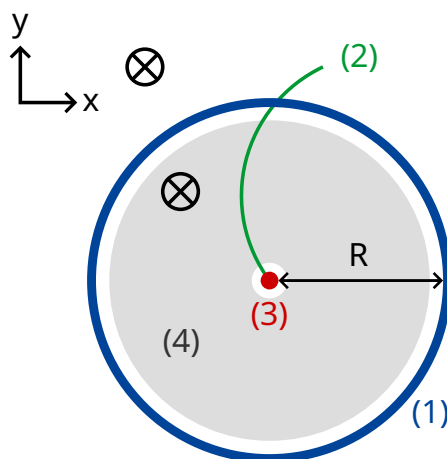


Figure 2: Схема на time-of-flight detector.

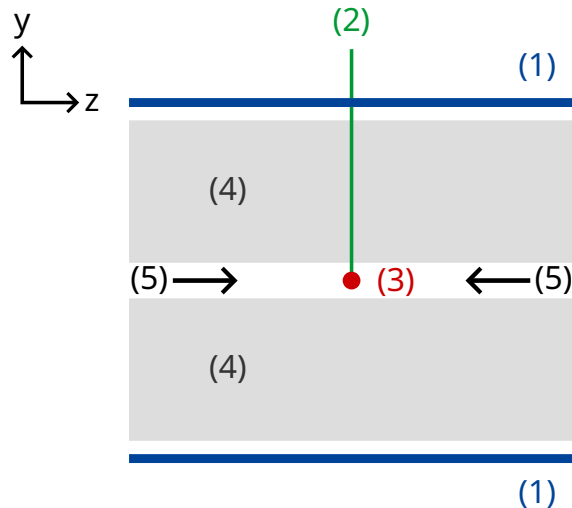
- B.1** Получете израз за масата в покой m на частица като функция на нейния импулс p , дължината l и времето на прелитане t , предполагайки че частицата има електричен заряд e и се движи с голяма постоянна скорост през ToF детектора (виж figure 2). 0.8pt

B.2 Изчислете минималната дължина l на ToF детектор, с който може да се различи зареден каон от зареден пион, ако импулсите и на двете частици са $1.00 \text{ GeV}/c$. Приема се, че за сигурно различаване на частиците, разликата във времената им на прелитане трябва да е поне три пъти по-голяма от резолюцията на детектора, която е 150 ps ($1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$). 0.7pt

Възникналите при сблъсъци в LHC частици се идентифицират като минават през детектор, който е едновременно треков детектор и ToF детектор. Figure 3 показва две сечения на апаратурата, успоредно и перпендикулярно на протонните пакети. Детекторът е цилиндрична тръба, която огражда мястото на сблъсъка. Трековият детектор измерва траекторията на частицата, когато тя се движи в еднородно магнитно поле. Радиусът r на тази траектория определя напречния импулс p_T на частицата. Тъй като времето на удара на протонните пакети е известно, то остава да се определи времето на прелитане на частицата до тръбата. Приема се, че образуваните частици се движат в равнина, перпендикулярна на направлението на движение на протонните снопове.



напречна равнина



надлъжно сечение
равнина съдържаща правата
на движение на протоните

- (1) - ToF тръба
- (2) - трек
- (3) - точка на сблъсък
- (4) - треков детектор
- (5) - протонни пакети
- ⊗ - магнитно поле

Figure 3 : Експериментална установка за детектиране на частици, състояща се от трекова камера и ToF детектор. Двата детектора са тръба, ограждаща точката на сблъсък в средата. Вляво: сечение, перпендикулярно на движението на протонните пакети. Вдясно: сечение, надлъжно на движението на протонните пакети.

B.3 Изразете масата на покой на частицата чрез магнитната индукция B , радиуса R на ТоF тръбата, фундаментални константи и измерваните величини: радиуса на кривина r на трека и времето на прелитане t . 1.7pt

Трябва да се идентифицират четири частици. Магнитната индукция е $B = 0.500$ Т. Радиусът R на ТоF тръбата е 3.70 m. По-долу са измерванията ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

Частича	Радиус на кривина на траекторията r [m]	Време на прелитане t [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

B.4 Изчислете масата на четирите неизвестни частици и определете техния вид. 0.8pt