

## A Nagy Hadronütköztető (10 pont)

Mielőtt elkezded a feladat megoldását, olvasd el a külön borítékban lévő általános utasításokat!

Ez a feladat a CERN-ben működő részecskegyorsító, a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) fizikájával foglalkozik. A CERN a legnagyobb részecskefizikai laboratóriuma. Célja, hogy betekintést nyújtson a természet alapvető törvényeibe. Két részecskenyalábot gyorsítanak fel nagy energiára úgy, hogy azokat erős mágneses térrel gyorsítógyűrűben vezetik, és utána egymással ütköztetik őket. A protonok nem egyenletesen oszlanak el a gyorsító kerületén, hanem úgynevezett csomagokba rendeződve. Az ütközés során keletkezett részecskéket nagy detektorokkal figyelik meg. Az LHC néhány paramétere az 1. táblázatban található.

LHC gyűrű	
Gyűrű kerülete	26659 m
Részecskecsomagok száma egy protonnyalábban	2808
Protonok száma egy részecskecsomagban	$1.15 \times 10^{11}$
Protonnyalábok	
Protonok energiája	7.00 TeV
Tömegközépponti energia	14.0 TeV

1. táblázat: Az LHC releváns paramétereinek jellemző numerikus értékei.

A részecskefizikusok alkalmasabb egységeket használnak az energia, az impulzus és a tömeg kifejezésére: az energiát elektronvoltban [eV] mérik. Definíció szerint 1 eV energiát nyer az az  $e$  elemi töltéssel rendelkező részecske, amelyik 1 volt potenciálkülönbségen haladt át ( $1 \text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-2}$ ).

Az impulzust  $eV/c$ , a tömeget  $eV/c^2$  egységekben adják meg, ahol  $c$  a vákuumbeli fénysebesség. Mivel 1 eV nagyon kicsi energiamennyiség, a részecskefizikusok gyakran MeV-ot ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ ), GeV-ot ( $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ ) vagy TeV-ot ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ) használnak.

Part A a protonok vagy az elektronok gyorsításával, Part B a CERN-ben ütközéskor keletkezett részecskék azonosításával foglalkozik.

### Part A. Az LHC gyorsító (6 pont)

#### Gyorsítás

Tegyük fel, hogy a protonokat  $V$  feszültséggel gyorsítjuk fel a fénysebességhez nagyon közeli sebességre. Hanyagoljuk el a sugárzásból és más részecskékkel való ütközésből eredő energiaveszteségeket.

**A.1** Add meg a protonok  $v$  végsebességének pontos kifejezését a  $V$  gyorsítófeszültség és fizikai állandók függvényében! 0.7pt

Egy tervezet szerint a CERN-ben egy jövőbeli kísérlethez azt tervezik, hogy az LHC-ből érkező protonokat 60.0 GeV energiájú elektronokkal ütköztetik.

- A.2** Egy nagy energiájú és kicsi tömegű részecskére a  $v$  végsebesség és a fénysebesség közötti  $\Delta = (c - v)/c$  relatív eltérés nagyon kicsi. Adj elsőrendű közelítést  $\Delta$ -ra, és számítsd ki  $\Delta$  értékét 60.0 GeV energiájú elektronokra, a  $V$  gyorsítófeszültség és fizikai állandók segítségével! 0.8pt

Most visszatérünk az LHC-beli protonokra. Tegyük fel, hogy a nyalábvezető cső kör alakú.

- A.3** Vezess le egy kifejezést a  $B$  homogén mágneses indukció nagyságára, ami ahhoz szükséges, hogy a protonnyalábot kör alakú pályán tartsuk! A kifejezés csak a protonok  $E$  energiáját, az  $L$  kerületet, fizikai állandókat és számokat tartalmazhat. Használhatsz megfelelő közelítéseket, ha azok hatása az utolsó értékes jegy pontosságánál kisebb. Számítsd ki a  $B$  mágneses indukciót, elhanyagolva a protonok közötti kölcsönhatásokat, ha a proton energiája  $E = 7.00$  TeV. 1.0pt

### Kisugárzott teljesítmény

Egy gyorsuló, töltött részecske elektromágneses hullám formájában energiát sugároz. Az állandó szögsebességgel keringő, töltött részecske által kisugárzott  $P_{\text{rad}}$  teljesítmény csak az  $a$  gyorsulásától, a  $q$  töltésétől, a  $c$  fénysebességtől és a vákuum  $\varepsilon_0$  permittivitásától függ.

- A.4** Dimenzióanalízissel add meg a  $P_{\text{rad}}$  kisugárzott teljesítmény kifejezését! 1.0pt

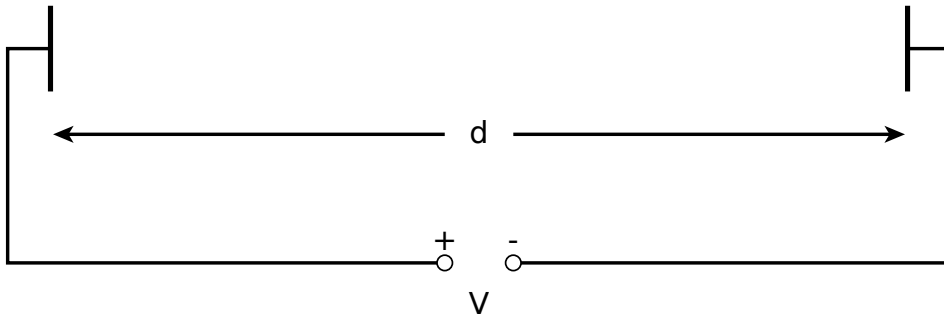
A kisugárzott teljesítmény valódi alakja tartalmaz egy  $1/(6\pi)$  faktort. Ezenfelül a relativisztikus levezetés egy  $\gamma^4$  szorzófaktor is ad, ahol  $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$ .

- A.5** Számítsd ki az LHC  $P_{\text{tot}}$  teljes kisugárzott teljesítményét, ha a proton energiája  $E = 7.00$  TeV (1. táblázat). Használhatsz alkalmas közelítéseket. 1.0pt

### Lineáris gyorsító

A CERN-ben nyugvó protonokat gyorsítanak fel  $d = 30.0$  m hosszúságú lineáris gyorsítóval  $V = 500$  MV potenciálkülönbségen keresztül. Tegyük fel, hogy az elektromos mező homogén. A lineáris gyorsító két lemezből áll, ahogyan azt az 1. ábra mutatja.

- A.6** Határozd meg azt a  $T$  időt, ami alatt a protonok áthaladnak ezen a mezőn! 1.5pt



1. ábra: A gyorsítóegység vázlata.

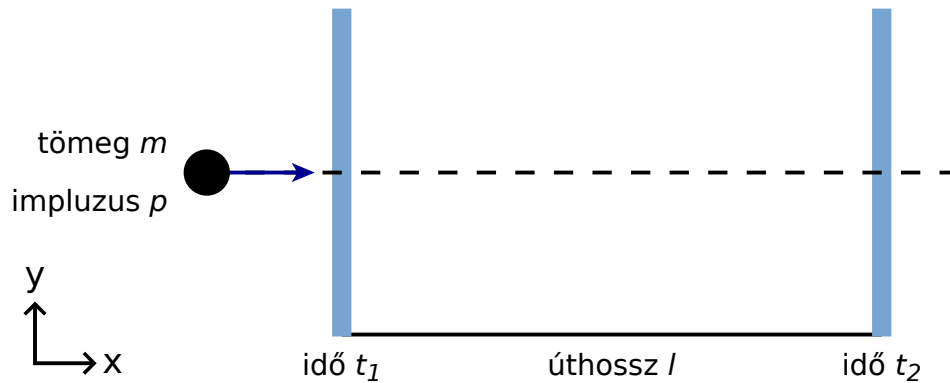
## Part B. Részecskeazonosítás (4 pont)

### Repülési idő

A kölcsönhatási folyamatok értelmezéséhez fontos az ütközésekben keletkező, nagy energájú részecskék azonosítása. Létezik egy egyszerű módszer, amivel azt az időt ( $t$ ) mérik, ami ahhoz szükséges, hogy egy ismert impulzusú részecske  $l$  utat tegyen meg egy ún. repülési idő (Time of Flight - ToF) detektorban. A detektorban azonosított, tipikus részecskék és tömegeik a 2. táblázatban találhatóak.

Részecske	Tömeg [MeV/c <sup>2</sup> ]
Deuteron	1876
Proton	938
Töltött kaon	494
Töltött pion	140
Elektron	0.511

2. táblázat: Részecskék és tömegeik.

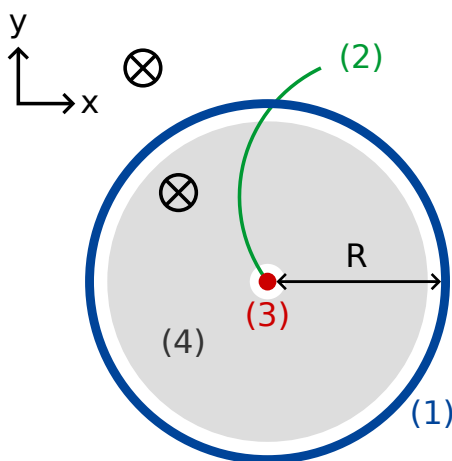


2. ábra: A repülési idő detektor sematikus ábrája.

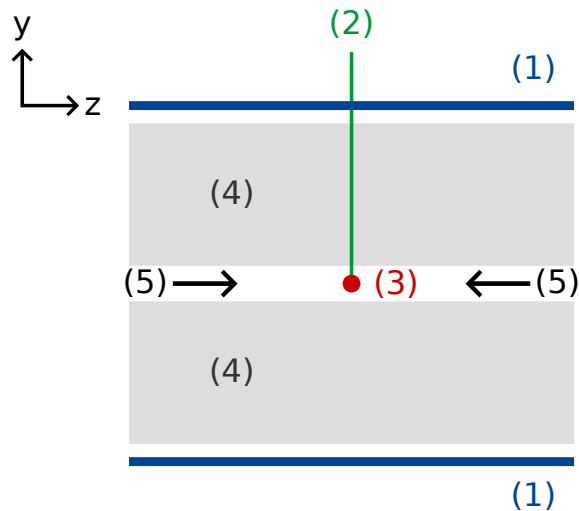
- B.1** Fejezd ki a részecske  $m$  tömegét a  $p$  impulzus, az  $l$  repülési úthossz és a  $t$  repülési idő függvényében feltételezve, hogy a részecske az  $e$  elemi töltéssel rendelkezik, és a ToF detektorban a  $c$  fénysebességhez nagyon közeli sebességgel egyenes pályán, a két érzékelési síkra merőlegesen halad (lásd a 2. ábrát)! 0.8pt

**B.2** Számítsd ki azon ToF detektor legkisebb  $l$  hosszát, amelyben a töltött kaon a töltött piontól biztosan megkülönböztethetők, ha mindkét részecske impulzusát  $1.00 \text{ GeV}/c$ -nek mérik! A jól elkülönítéshez az kell, hogy a repülési idők különbsége háromszor akkora legyen, mint a detektor időfelbontása. Egy ToF detektor tipikus felbontása  $150 \text{ ps}$  ( $1 \text{ ps} = 10^{-12} \text{ s}$ ). 0.7pt

A következőkben egy tipikus LHC detektorban létrejövő részecskéket olyan kétlépcsős detektorban azonosítjuk, amely egy nyomkövető detektorból és egy ToF detektorból áll. A 3. ábra mutatja az elrendezést a protonnyalábok kereszt- és hosszanti irányában. Mindkét detektor egy-egy cső, amelyek körülveszik a kölcsönhatási területet, benne a csövek közepén haladó nyalábbal. A nyomkövető detektor méri a protonnyalábbal párhuzamos irányú mágneses téren áthaladó töltött részecske pályáját. A pálya  $r$  sugarával meghatározható a részecske keresztirányú  $p_T$  impulzusa. Mivel az ütközés ideje ismert, a ToF detektorhoz csak egy cső szükséges ahhoz, hogy mérjék a repülési időt az ütközési pont és a ToF cső között. Ez a ToF cső szorosan a nyomkövető kamra külsején helyezkedik el. Ebben a feladatban felteheted, hogy az összes, ütközésben keletkezett részecske a protonnyalábokra merőlegesen halad. Ez azt jelenti, hogy a keletkező részecskék nem rendelkeznek a protonnyalábok irányába mutató impulzussal.



keresztirányú sík



a cső hosszirányú  
metszete közepén  
a nyaláb vonalával

- (1) - ToF cső
- (2) - pálya
- (3) - ütközési pont
- (4) - nyomkövetési cső
- (5) - protonnyalábok
- ⊗ - mágneses tér

3. ábra: A részecskeazonosítás kísérleti elrendezése a nyomkövető kamrával és a ToF detektorral. Mindkét detektor egy-egy cső, amelyek a közepén levő ütközési pontot veszik körül. Bal oldal: keresztirányú nézet a nyaláb vonalára merőlegesen. Jobb oldal: hosszanti nézet a nyaláb vonalával párhuzamosan.

**B.3** Fejezd ki a részecske tömegét a  $B$  mágneses indukcióval, a ToF cső  $R$  sugarával és fizikai állandókkal, valamint a mért mennyiségekkel: az  $r$  pályasugárral és a  $t$  repülési idővel! 1.7pt

Négy részecskét detektáltunk, és szeretnénk ezeket azonosítani. A nyomkövető detektorban a mágneses indukció  $B = 0.500$  T. A ToF cső  $R$  sugara  $3.70$  m. A mérési eredmények a következők ( $1 \text{ ns} = 10^{-9}$  s):

Részecske	$r$ pályasugár [m]	$t$ repülési idő [ns]
A	5.10	20
B	2.94	14
C	6.06	18
D	2.31	25

**B.4** Azonosítsd a négy részecskét a tömegük kiszámításával! 0.8pt