

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	1.15×10^{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 Δ -ra, és számítsd ki Δ 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_{rad} teljesítmény csak az a gyorsulásától, a q töltésétől, a c fénysebességtől és a vákuum ε_0 permittivitásától függ.

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

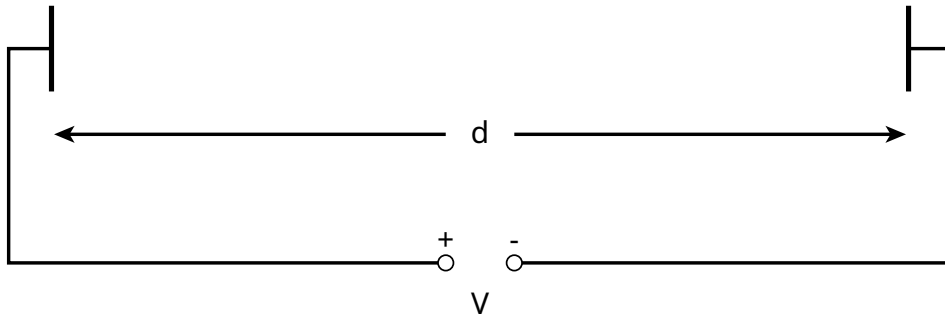
A kisugárzott teljesítmény valódi alakja tartalmaz egy $1/(6\pi)$ faktort. Ezenfelül a relativisztikus levezetés egy γ^4 szorzófaktort is ad, ahol $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$.

- A.5** Számítsd ki az LHC P_{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.

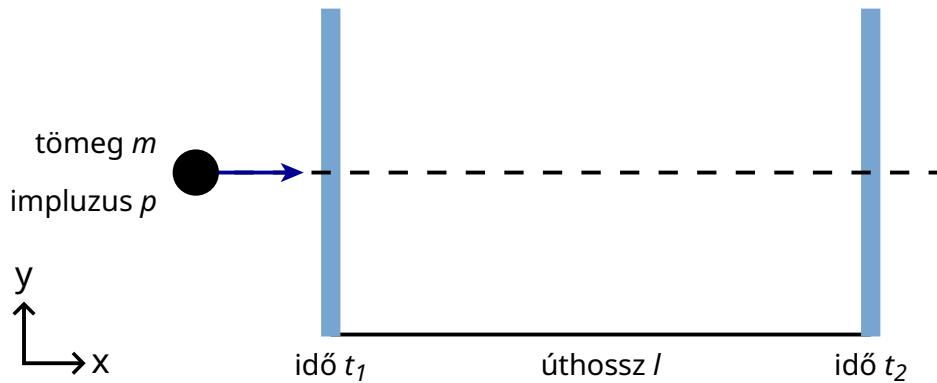
Part B. Részecskeazonosítás (4 pont)

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 ²]
Deuteron	1876
Proton	938
Töltött kaon	494
Töltött pion	140
Elektron	0.511

2. táblázat: Részecskék és tömegeik.

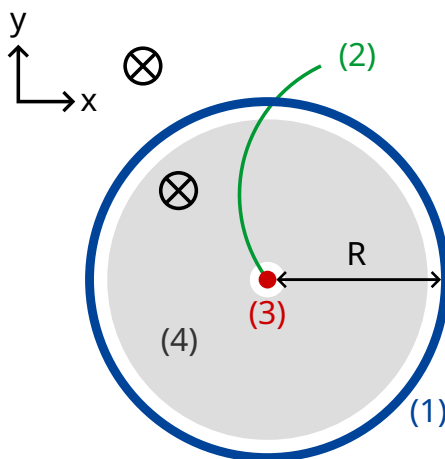


2. ábra: A repülési idő detektor sematikus ábrája.

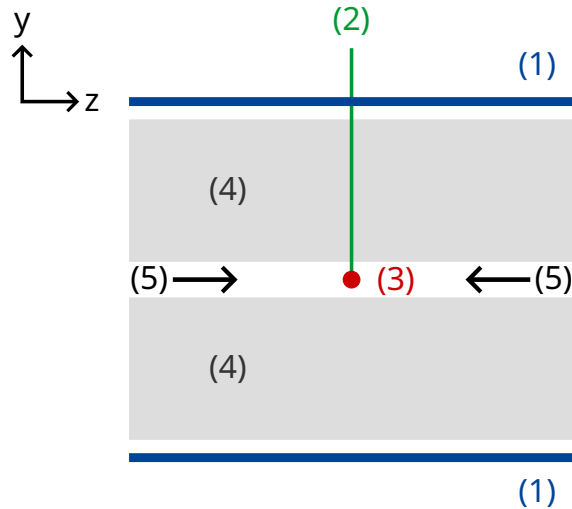
- B.1** Fejezd ki a részecske m tömegét a p impulzus, az l repülési úthossz és a t repülési idő függvényében feltételezve, hogy a részecske az e elemi töltéssel rendelkezik, és a ToF detektorban a c fénysebességhez nagyon közeli sebességgel egyenes pályán, a két érzékelési síkra merőlegesen halad (lásd 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 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 ($1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$):

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