

Hol van a neutrínó? (10 pont)

Ha két nagy energiájú proton ütközik a Nagy Hadron Ütköztetőben (Large Hadron Collider, LHC), sokféle részecske keletkezhet, mint elektronok, müonok, neutrínók, kvarkok, valamint ezek antirészecskéi. A részecskék legtöbbje detektálható az ütközést körülvevő detektorok segítségével. Például a kvarkok átesnek egy úgynevezett *hadronizációs* folyamaton, melynek hatására szubatomiikus részecskezár jön létre, amely részecskezárakat 'jet'-eknek hívjuk. A detektorokban található nagy mágneses tér alkalmas továbbá arra, hogy még az igen nagy energiájú töltött részecskéket is eltérítse annyira, hogy azok impulzusa meghatározható legyen. Az ATLAS detektorban szupravezető szolenoid tekerceket használnak arra, hogy időben állandó, homogén 2.00 tesla indukciójú mágneses teret hozzanak létre az ütközési zóna körül. Azok a töltött részecskék, amelyeknek az impulzusa egy bizonyos érték alatt van, olyan mértékben eltérülnek, hogy pályájuk önmagába záródik, aminek hatására azokat nem detektáljuk. A neutrínókat pedig egyáltalán nem tudjuk detektálni, mert természetükből adódóan úgy haladnak át a detektoron, hogy azzal nem lépnek kölcsönhatásba.

Adatok: elektron nyugalmi tömege: $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; Elemi töltés nagysága: $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C;

A fénysebesség: $c = 3.00 \times 10^8$ m s⁻¹; a vákuum dielektromos állandója: $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m⁻¹

A Rész: Az ATLAS detektor fizikája (4.0 pont)

- A.1** Vezesd le az r ciklotron sugarat megadó összefüggést egy olyan körpályán keringő elektron esetén, amely csak a mágneses térrel hat kölcsön. A mágneses indukció vektora merőleges a részecske sebességére. Fejzed ki a sugarat a K kinetikus energia, az e töltés, az m tömeg és a B mágneses indukció függvényében! Feltételezd, hogy az elektron egy nemrelativisztikus, klasszikus részecske! 0.5pt

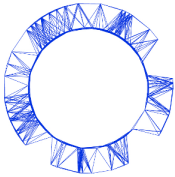
Az ATLAS detektorban keletkező elektronokat relativisztikus megközelítésben kell tárgyalni. A ciklotron sugárra levezetett összefüggésünk mégis alkalmas a relativisztikus mozgás tárgyalására, ha relativisztikus impulzust alkalmazunk.

- A.2** Számítsd ki a keletkező elektron minimális impulzusát, amely ahhoz szükséges, hogy elhagyja a detektort, feltételezve, hogy a részecske sugár irányban indult. A detektor belseje henger alakú, melynek sugara 1.1 méter. Az elektron a részecskeütközés során keletkezik a henger középpontjában. Az eredményt MeV/ c egységben fejezd ki! 0.5pt

Ha egy m nyugalmi tömegű, e töltésű relativisztikus részecske a sebességére merőleges irányban gyorsul, elektromágneses sugárzást bocsájt ki, melyet szinkrotron-sugárzásnak nevezünk. A kisugárzott teljesítményt az alábbi összefüggés adja meg:

$$P = \frac{e^2 a^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

ahol a gyorsulás és $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.



- A.3** Egy részecskét ultrarelativisztikusnak nevezünk, ha a sebessége igen közel van a fénysebességhez. Egy ultrarelativisztikus részecske által kibocsátott teljesítmény kifejezhető az alábbi formában: 1.0pt

$$P = \xi \frac{e^4}{\epsilon_0 m^k c^n} E^2 B^2,$$

ahol ξ egy valós szám, n, k egész számok, E a töltött részecske energiája, B pedig a mágneses indukció értéke. Határozd meg ξ -t, n -t és k -t.

- A.4** Ultrarelativisztikus közelítésben az elektron energiáját az alábbi összefüggés adja meg az idő függvényében: 1.0pt

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \alpha E_0 t},$$

ahol E_0 az elektron kezdeti energiája. Határozd meg az α paramétert e, c, B, ϵ_0 és m függvényében!

- A.5** Tekintsünk egy elektront, mely az ütközési pontban keletkezik, és sugár irányban indul el. Kezdeti energiája 100 GeV. Becsüld meg, mennyi energiát veszít az elektron a szinkrotron sugárzás következtében, amíg kilép a detektor belsejéből? Az eredményt MeV egységben fejezd ki! 0.5pt

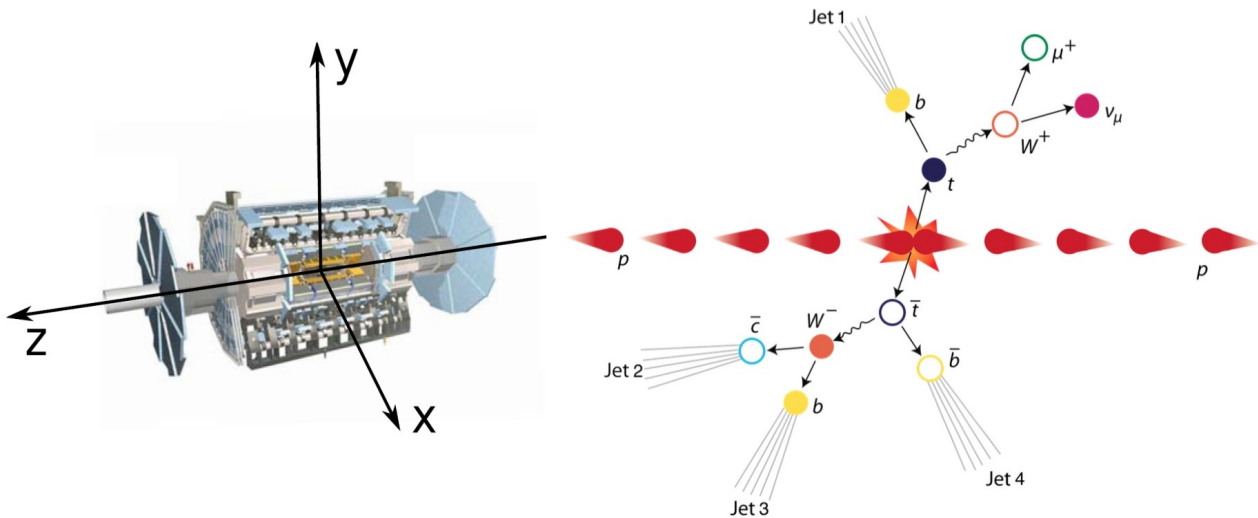
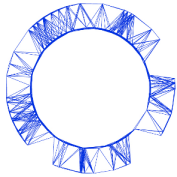
- A.6** Határozd meg a keringő elektron ciklotron-frekvenciáját az idő függvényében ultrarelativisztikus közelítésben! 0.5pt

B Rész: A neutrínó megtalálása

Az 1. ábrán látható, ahogy két proton ütközése során keletkezik egy *top* kvark (t) és egy *anti-top* kvark (\bar{t}), melyek a legnehezebb elemi részecskék, melyet valaha is detektáltak. A *top* kvark felbomlik egy W^+ bozonra és egy *bottom* kvarkra (b), amíg az *anti-top* kvark felbomlik egy W^- bozonra és egy *anti-bottom* kvarkra (\bar{b}). Ahogy az 1. ábrán látható, a W^+ bozon felbomlik egy *anti-müonra* (μ^+) és egy *neutrínóra* (ν). A W^- bozon felbomlik egy kvarkra és egy antikvarkra. A feladat az, hogy rekonstruáljuk a neutrínó teljes impulzusát a detektált részecskék impulzusának ismeretében. **Az egyszerűség kedvéért tekintsünk el attól hogy a részecskék és a 'jet'-ek tömeggel rendelkeznek, csak a top kvark, és a W^\pm bozon tömegét vegyük figyelembe.**

A top kvark bomlástermékeinek impulzusa meghatározható a mérések útján (lásd a táblázatot), kivéve a neutrínó impulzusának ütközés tengelyével (z-tengely) párhuzamos összetevőjét. A végtermékek teljes impulzuszórájának csak a transzverzális síkkal (xy-sík) párhuzamos komponense zérus, az impulzus ütközéssel párhuzamos (z) komponense nem tekinthető nullának.

2015 június 4-én az ATLAS detektor az LHC-ben lezajlott kísérlet során az 1. ábrán látható proton-proton ütközést rögzítette.



1. ábra. Az ATLAS detektor sematikus képe a koordináta-rendszerrel (balra) proton-proton ütközés (jobbra).

A top kvark bomlásából származó három részecske impulzusának komponenseit tartalmazza az alábbi táblázat.

Részecske	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
anti-müon (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
'jet' 1 (j_1)	-14.2	+50.1	+94.1
neutrínó (ν)	-104.1	+5.3	—

B.1 Vezess le összefüggést, mely megadja a W^+ bozon tömegének m_W^2 négyzetét a neutrínó és az anti-müon táblázatban található impulzus-komponenseinek ismeretében! A válaszodat fejezd ki a neutrínó és az anti-müon alább definiált transzverzális impulzusaival,

$$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \text{ és } \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$

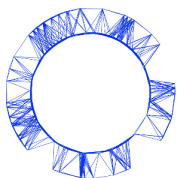
valamint z -tengellyel párhuzamos $p_z^{(\mu)}$ és $p_z^{(\nu)}$ impulzus-komponenseivel!

B.2 Feltételezve, hogy a W^+ bozon tömege $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$, számítsd ki a neutrínó z -tengellyel párhuzamos $p_z^{(\nu)}$ impulzus-komponensét! Két megoldás létezik!

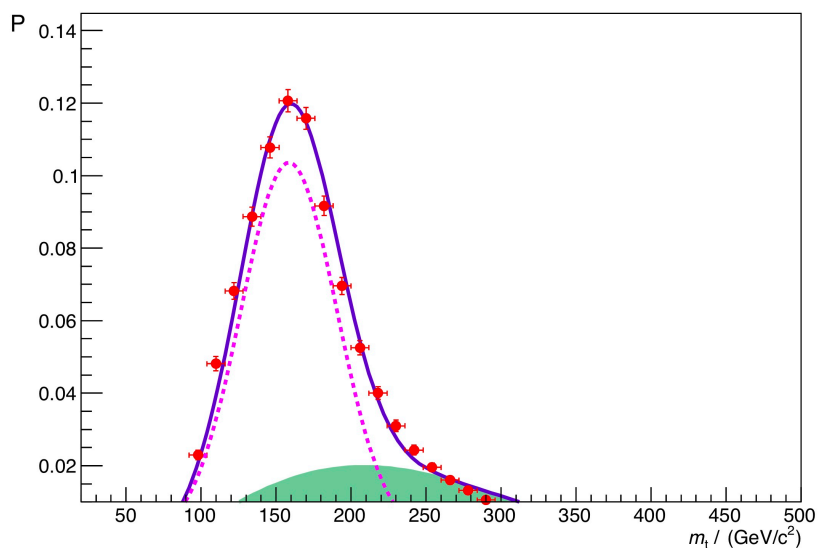
B.3 Számítsd ki a top kvark tömegét az előző feladat mindkét megoldása esetén! Fejezd ki a megoldást GeV/c^2 egységben. [Ha nem sikerült kiszámítanod a B.2. feladat két megoldását, számolj a következőkkel:

$$p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c \text{ és } p_z^{(\mu)} = -180 \text{ GeV}/c.]$$

Azon események normalizált száma, amikor a top kvarkot adott tömegűnek mérjük, két részből áll: az úgynevezett 'jel'-ből, amely a top kvark bomlásokból adódik, és egy 'hátter'-ből, amely egyéb, top kvark



bomlást nem tartalmazó fizikai folyamatokból ered. A kísérleti adatok mindkét folyamatot tartalmazzák, lásd a 2. ábrát.



2. ábra. A top kvark mérés útján meghatározott tömegének valószínűségi eloszlása. A diagramon a tömegmérések normalizált számát ábrázoltuk a kvarktömeg függvényében. A pontok felelnek meg a mérési adatoknak. A szaggatott vonal ábrázolja a 'jelet', a sötétített terület pedig a 'háttér'

B.4 A két korábbi tömegeredmény közül melyiket tekinthetjük leginkább helyesnek a top kvarkok tömegeloszlásának ismeretében? Adj becslést a legvalószínűbb megoldás valószínűségére! 1.0pt

B.5 Számítsd ki, mekkora utat tesz meg a top kvark, mielőtt elbomlik? Használd a legnagyobb valószínűségű tömegmegoldást! A top kvark várható élettartama nyugalmi állapotban 5×10^{-25} s. 1.0pt