

Kde je neutríno? (10 bodov)

Pri zrážke dvoch protónov s veľmi veľkými energiami vo Veľkom hadrónovom urýchľovači (LHC) môžu vznikať rôzne častice, ako elektróny, mióny, neutrína, kvarky, a ich antičastice. Väčšinu z nich môžeme zaregistrovať pomocou detektorov, rozmiestnených v okolí miesta zrážky. Napr. kvarky prechádzajú procesom *hadronizácie*, v dôsledku ktorého sa menia na spŕšky hadrónov - úzke lúče subatomárnych častíc - ktoré nazývame výtrysk. Silné magnetické pole, v ktorom sú detektory umiestnené, navyše zakrivuje trajektórie vysokoenergetických častíc tak, že je možné určiť ich hybnosť. V detektore ATLAS sa používa sústava supravodivých solenoidov (cievok), ktoré vytvárajú vnútri detektorov obklopujúcich miesto zrážky konštantné homogénne magnetické pole s indukciou 2 T. Trajektórie nabitých častíc, ktorých hybnosť je menšia ako určitá hodnota, sa zakrivujú tak silno, že sa pohybujú po uzavretých kružniciach a k detektorom sa tak nedostanú, a teda nebudú registrované. Neutríno v dôsledku svojej povahy preletí cez detektory bez interakcie s nimi a tiež nebude registrované.

Hodnoty: hmotnosť elektrónu $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; elementárny náboj $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C;

rýchlosť svetla $c = 3 \times 10^8$ m s⁻¹; permitivita vákua $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m⁻¹

Časť A. Fyzika detektora ATLAS (4.0 bodu)

- A.1** Odvodte vzťah pre cyklotrónový polomer r , t.j. polomer kružnicovej trajektórie elektrónu v magnetickom poli kolmom na smer jeho pohybu. Vyjadrite tento polomer pomocou kinetickej energie elektrónu K , veľkosti jeho náboja e , hmotnosti m , a indukcie magnetického poľa B . Predpokladajte, že elektrón nie je relativistická častica. 0.5pt

Elektróny vznikajúce v detektore ATLAS sú v skutočnosti relativistické. Vzťah pre cyklotrónový polomer však zostáva rovnaký ak v ňom uvažujeme relativistickú hybnosť častice.

- A.2** Vypočítajte najmenšiu hodnotu hybnosti elektrónu, pri ktorej môže elektrón vyletieť za hranicu vnútornej časti detektora, ktorá má tvar valca s polomerom 1,1 m. Elektrón vzniká v mieste zrážky protónov, ktoré sa nachádza v strede valca. Výsledok vyjadrite v jednotkách MeV/c. 0.5pt

Keď sa relativistická častica s nábojom e a pokojovou hmotnosťou m pohybuje s dostredivým zrýchlením, vyžaruje elektromagnetické žiarenie, ktoré nazývame synchrotrónové žiarenie. Výkon synchrotrónového žiarenia je daný vzťahom

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

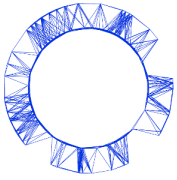
kde a je zrýchlenie a $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.

- A.3** Častica sa nazýva ultrarelativistická, ak jej rýchlosť je veľmi blízka rýchlosti svetla. Pre ultrarelativistickú časticu môžeme vyžiarený výkon vyjadriť v tvare 1.0pt

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

kde ξ je reálne číslo, $n, k \in \mathbb{N}$, E je energia nabitej častice a B je veľkosť magnetickej indukcie. Nájdite ξ , n a k .

Theory



IPHO 2018
Lisbon, Portugal

Q2-2

Slovakia (Slovakia)

- A.4** V ultrarelativistickom prípade sa energia mení s časom podľa vzťahu 1.0pt

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

kde E_0 je začiatočná energia elektrónu. Vyjadrite α pomocou e , c , B , ϵ_0 a m .

- A.5** Uvažujme elektrón, ktorý vyletuje z miesta zrážky v radiálnom smere s energiou 100 GeV. Koľko energie stratí elektrón v dôsledku synchrotrónového žiarenia, kým opustí vnútornú časť detektora? Výsledok uďte v MeV. 0.5pt

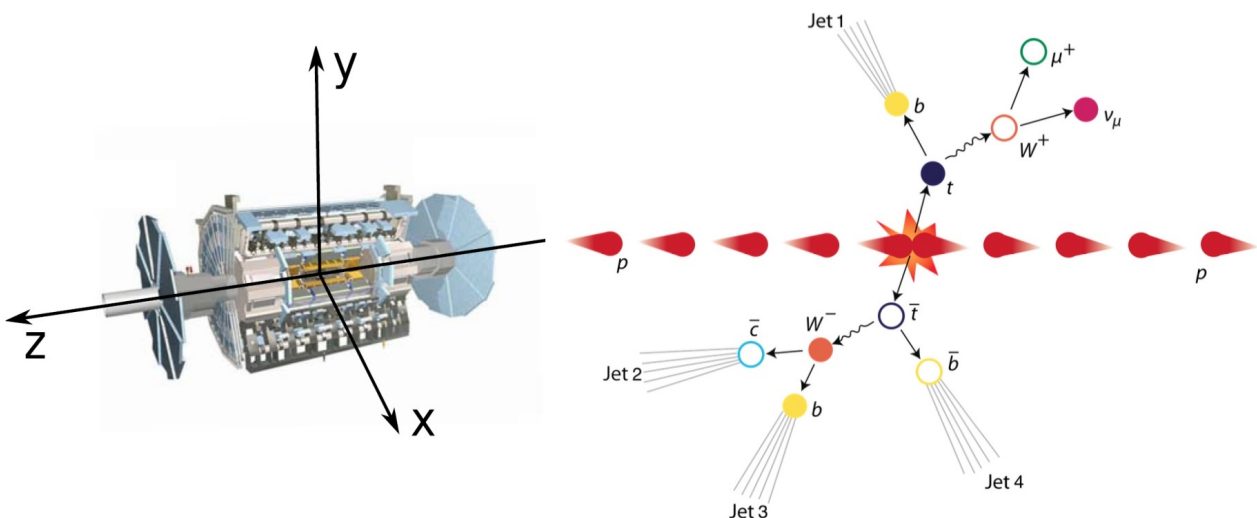
- A.6** Nájdite vzťah pre synchrotrónovú frekvenciu elektrónu v závislosti od času v ultrarelativistickom prípade. 0.5pt

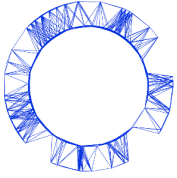
Časť B. Hľadanie neutrína (6.0 bodu)

Na obrázku 1 je znázornená zrážka dvoch protónov, pri ktorej vznikol top kvark (t) a anti-top kvark (\bar{t}) - dve najťažšie elementárne častice, ktoré boli doteraz zaregistrované. Top kvark sa rozpadá na W^+ bozón a bottom kvark (b), zatiaľ čo anti-top kvark sa rozpadá na W^- bozón a anti-bottom kvark (\bar{b}). V prípade zobrazenom na Obrázku 1 sa W^+ bozón rozpadá na anti-mión (μ^+) a neutríno (ν_μ), a W^- bozón sa rozpadá na kvark a anti-kvark. V úlohe sa vyžaduje nájdienie neutrína zo známych hybností niektorých registrovaných častíc. **Pre jednoduchosť predpokladáme, že všetky častice v úlohe majú nulovú hmotnosť, okrem top kvarku a W^+ a W^- bozónov.**

Hybnosti produktov rozpadu top kvarku možno určiť pomocou experimentu, pozri tabuľku, okrem hybnosti neutrína v smere osi z . Celková hybnosť častíc v konečnom stave zachytených detektorom je nulová iba v priečnej xy rovine, ale nie v smere z zrážky. Môžeme tak určiť priečnu hybnosť neutrína z chýbajúcej hybnosti v priečnej rovine.

4.júna 2015 experiment ATLAS na LHC zaznamenal o 00:21:24 GMT+1 (miestny čas v Ženeve) zrážku dvoch protónov, podobnú tej na Obrázku 1.





Obrázok 1. Umiestnenie sústavy súradníc v detektore ATLAS (vľavo) zrážky dvoch protónov (vpravo).

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené hodnoty zložiek hybností troch častíc v konečnom stave (vrátane neutrína), ktoré vznikajú pri rozpade top kvarku.

Častica	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
anti-mión (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
výtrysk 1 (j_1)	-14.2	+50.1	+94.1
neutríno (ν)	-104.1	+5.3	—

- B.1** Nájdite rovnicu vyjadrujúcu súvis kvadrátu hmotnosti m_W^2 bozónu W^+ a zložiek hybnosti neutrína a anti-miónu z vyššie uvedenej tabuľky. Výsledok vyjadrite pomocou priečných hybností neutrína a anti-miónu

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

a ich hybností $p_z^{(\mu)}$ a $p_z^{(\nu)}$ v smere osi z .

1.5pt

- B.2** Predpokladajte, že W^+ bozón má hmotnosť $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$. Vypočítajte dve možné riešenia pre hybnosť neutrína $p_z^{(\nu)}$ v smere osi z . Odpoveď uveďte v jednotkách GeV/c.

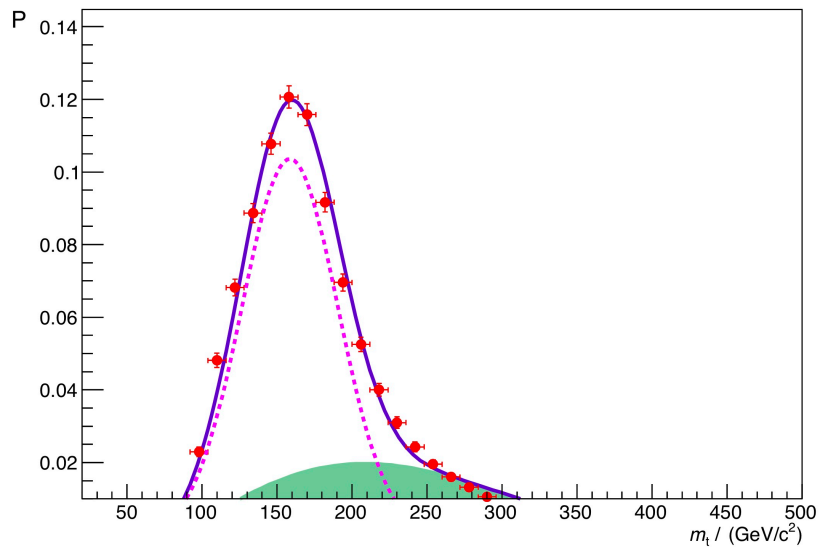
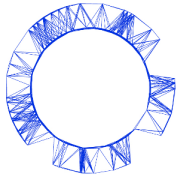
1.5pt

- B.3** Vypočítajte hmotnosť top kvarku pre každé z dvoch predchádzajúcich riešení. Výsledok vyjadrite v jedn. GeV/c^2 [Ak ste v časti B.2 nezískali dve riešenia, použite

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

1.0pt

Normovaná početnosť zrážkových udalostí pre meranie hmotnosti top kvarku (ako udáva experiment) má dve zložky: jedna je tzv. "signál" (zodpovedá rozpadu top kvarku), druhá je "pozadie" (zodpovedá udalostiam z iných procesov, ktoré nezahŕňajú top kvarky). Experimentálne dáta zahŕňajú obidva procesy, obr. 2.



Obrázok 2. Normovaná početnosť udalostí E ako funkcia hmotnosti top kvarku. Bodky zodpovedajú dátam. Čiarkovaná čiara zodpovedá "signálu" a tieňovaná plocha "pozadiu".

- B.4** Na základe normovanej početnosti E podľa hmotnosti top kvarku rozhodnite, ktoré z dvoch možných predchádzajúcich riešení je pravdepodobne správne. Určte normovanú početnosť zodpovedajúcu pravdepodobnejšiemu riešeniu. 1.0pt
- B.5** Vypočítajte vzdialenosť prekonanú top kvarkom do okamihu jeho rozpadu pre pravdepodobnejšie riešenie. Predpokladajte, že stredná pokojová doba života kvarku je 5×10^{-25} s. 1.0pt