

Hvor er neutrinoen? (10 points)

Når to protoner med meget høj energi kolliderer i 'Large Hadron Collider' (LHC) kan der dannes mange partikler. Disse kan f.eks. være elektroner, muoner, neutrinoer, kvarker og deres antipartikler. De fleste af disse partikler kan detekteres af detektoren, som står rundt om kollisionspunktet. Eksempelvis kan kvarker gennemgå en process kaldet *hadronisation*, hvorunder de bliver til et væld af subatomare partikler kaldes en "jet".

Det meget høje magnetfelt gør at selv banerne for ladede partikler med meget høj energi krummer nok til at deres bevægelsesmængde (impuls) kan bestemmes. ATLAS detektoren bruger en superledende solenoide til at producere et konstant og uniformt magnetfelt på 2.00 Tesla i den indre del af detektoren, som omslutter kollisionspunktet. Ladede partikler med bevægelsesmængder (impulser) under en hvis grænse vil have baner, der er så afbøjede, at de forbliver i den indre del af detektoren, og derfor ikke detekteres. Neutrinoer vil ej heller detekteres, da de ikke vekselvirker med detektoren.

Data: Elektronens masse, $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg; Elementarladningen, $e = 1.60 \times 10^{-19}$ C;

lysets hastighed, $c = 3.00 \times 10^8$ m s $^{-1}$; vakuumpermittiviteten, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$ F m $^{-1}$

Del A. ATLAS Detektor fysik (4.0 point)

- A.1** Udled et udtryk for cyklotronradius, r , af den cirkulære bane en elektron laver, når den bliver påvirket af en magnetisk kraft vinkelret på dens hastighed. Radius, r , skal angives som funktion af elektronens kinetiske energi, K , ladning, e , masse, m , og magnetfeltet, B . Antag at elektronen er en ikke-relativistisk klassisk partikel. 0.5pt

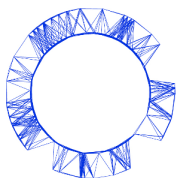
Elektroner produceret i ATLAS-detektoren skal behandles relativistisk. Imidlertid holder formlen for cyklotronradius også i det relativistiske tilfælde, så længe man betragter bevægelsesmængden (impulsen) relativistisk.

- A.2** Beregn den mindste værdi af en elektrons bevægelsesmængde (impuls) som tillader den at undslippe den indre del af detektoren i den radiale retning. Den indre del af detektoren er cylindrisk med en radius på 1.1 meter og elektroner produceres i kollisionspunktet i midten af denne cylinder. Udtryk dit svar i enheden MeV/c. 0.5pt

Når en relativistisk partikel med ladning e og hvilemasse m accelereres vinkelret på bevægelsesretningen vil den udsende elektromagnetisk stråling, såkaldt synkrotronstråling. Den udstrålede effekt er givet ved

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

hvor a er accelerationen og $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.



- A.3** En partikel kaldes ultrarelativistisk, hvis dens fart er meget tæt på lysets fart. 1.0pt
For en ultrarelativistisk partikel kan den udstrålede effekt skrives som:

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

hvor ξ er et reelt tal, n og k er hele tal, E er energien af den ladede partikel og B er størrelsen af magnetfeltet.
Bestem ξ , n og k .

- A.4** I den ultrarelativistiske grænse kan energien af elektronen som funktion af tiden skrives: 1.0pt

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

hvor E_0 er energien til tiden $t = 0$.
Bestem α som en funktion af e , c , B , ϵ_0 og m .

- A.5** Betragt en elektron produceret i kollisionspunktet med bevægelse i radial retning og en energi på 100 GeV. 0.5pt
Estimer energien, som elektronen mister p.g.a. synkrotronstråling, inden den forlader den indre del af detektoren? Udtryk dit svar i enheden MeV.

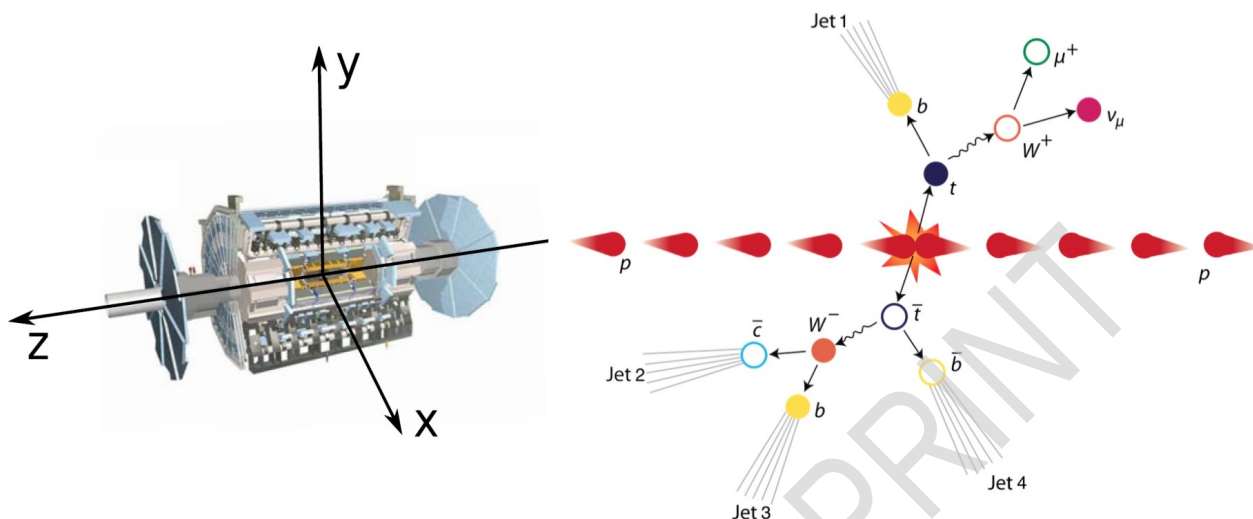
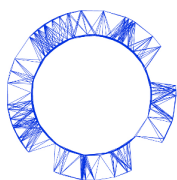
- A.6** Bestem et udtryk for cyklotronfrekvensen af elektronen som funktion af tiden. 0.5pt
Antag at elektronen er ultrarelativistisk.

Del B. At finde neutrinoen (6.0 point)

Kollisionen mellem de to protoner i figur 1 producerer en top kvark (t) og en anti-top kvark (\bar{t}), de tungeste elementarpartikler, der hidtil er observeret. Top kvarken henfalder til en W^+ boson og en bottom kvark (b), mens anti-top kvarken henfalder til en W^- boson og en anti-bottom kvark (\bar{b}). I tilfældet beskrevet i figur 1 henfalder W^+ bosonen til en anti-muon (μ^+) og en neutrino (ν). W^- bosonen henfalder til en kvark og en anti-kvark. Denne opgave handler om at bestemme bevægelsesmængden (impulsen) af neutrinoen ved brug af de forskellige målinger. **Antag, for at forenkle udregningerne, at alle partikler og jets, udover top kvarken og W^\pm bosonerne, er masseløse.**

Bevægelsesmængderne (impulserne) af produkterne fra topkvarken kan, bortset fra neutrinoens bevægelsesmængde (impuls) i z -retningen, bestemmes eksperimentelt. Den samlede bevægelsesmængde (impuls) af produkterne i det transverse plan (xy -planen) er 0, mens den samlede bevægelsesmængde (impuls) i z -retningen ikke nødvendigvis er. Man kan hermed finde neutrinoens impuls i den transversale retning.

Den 4. juni 2015 kl. 00:21:24 GMT+1 detekterede ATLAS en proton-proton kollision som den på figur 1.



Figur 1. Skematisk representation af ATLAS detektoren med koordinatsystem (venstre) og proton-proton kollision (højre).

Nedenfor er angivet bevægelsesmængderne (impulserne) for de tre produkter for topkvarkens henfald, heriblandt neutrinoen.

Partikel	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
anti-muon (μ^+)	-24.7	-24.9	-12.4
jet 1 (j_1)	-14.2	+50.1	+94.1
neutrino (ν)	-104.1	+5.3	—

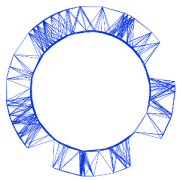
- B.1** Bestem en ligning der relaterer kvadratet af W^+ bosonens masse, m_W^2 , med (komponenterne af) bevægelsesmængderne (impulserne) for neutrinoen og anti-muonen angivet ovenfor. Brug i ligningen neutrinoens og anti-muonens transversale bevægelsesmængder (impulser),

$$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \text{ og } \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$
og deres bevægelsesmængder (impulser) i z -retningen, $p_z^{(\mu)}$ og $p_z^{(\nu)}$. 1.5pt

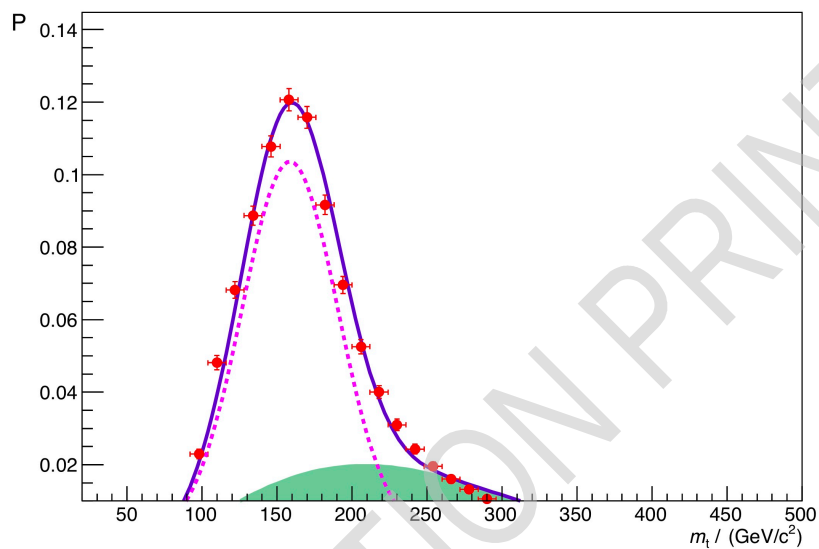
- B.2** Antag at W^+ bosonen har massen $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$. Beregn de to mulige værdier for neutrinoens bevægelsesmængde (impuls) i z -retningen, $p_z^{(\nu)}$. Angiv dit svar i enheden GeV/c . 1.5pt

- B.3** Beregn topkvarkens masse i hver af de to tilfælde fra forrige opgave. Angiv dit svar i enheden GeV/c^2
[Såfremt du ikke fandt de to løsninger i B.2, brug da værdierne
 $p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c$ og $p_z^{(\nu)} = -180 \text{ GeV}/c$.] 1.0pt

Det normaliserede antal kollisioner (*Collision Events*) for målinger af top kvarkens masse (som målt i eks-



perimentet) har to komponenter: det såkaldte "signal" (svarende til henfald af top kvarker) og "baggrund" (svarende til begivenheder fra andre processer, der ikke inkluderer top kvarker). Eksperimentel data indeholder begge processer, se figur 2.



Figur 2. Topkvarkens massefordeling, som bestemt ved eksperimentet. D.v.s. det normaliserede antal kollisioner langs y-aksen og topkvarkens masse langs x-aksen. Punkterne svarer til data, den stiplede linje svarer til "signal" og det skraverede til "baggrund".

B.4 Hvilken af den to muligheder i forrige spørgsmål er højst sandsynligt den rigtige? Brug ovenstående figur. 1.0pt
Estimer sandsynligheden for den mest sandsynlige løsning.

B.5 Bestem afstanden, som topkvarken tilbagelægger, inden den henfalder. Brug den mest sandsynlige løsning. Antag at topkvarken har en halveringstid på 5×10^{-25} s i hvile. 1.0pt