

Wo ist das Neutrino? (10 Punkte)

Wenn am Large Hadron Collider (LHC) am CERN zwei Protonen aufeinanderstoßen, können dabei mehrere Teilchen entstehen, wie Elektronen, Myonen, Protonen, Neutrinos, Quarks und ihre jeweiligen Antiteilchen. Die meisten dieser Teilchen kann der um den Kollisionspunkt herum angebrachte Teilchendetektor nachweisen. So durchlaufen zum Beispiel die Quarks einen sogenannten Hadronisierungsprozess, bei dem sie in einen Schauer subatomarer Teilchen verwandelt werden, einem sogenannten "Jet". Zusätzlich erlaubt das hohe Magnetfeld im Detektor selbst bei geladenen Teilchen sehr hoher Energie, über die Ablenkung ihrer Bahn ihren Impuls zu bestimmen. Der ATLAS-Detektor benutzt einen supraleitenden Solenoidmagnet, der im sogenannten Inneren Detektor ein konstantes Magnetfeld von 2,00 Tesla in der direkten Umgebung des Kollisionspunktes erzeugt. Geladene Teilchen mit einem Impuls unterhalb eines bestimmten Wertes werden dabei so stark abgelenkt, dass sie auf einer Bahn im Magnetfeld umherkreisen und sehr wahrscheinlich nicht nachgewiesen werden. Das Neutrino wiederum kann aufgrund seiner Eigenschaften überhaupt nicht nachgewiesen werden, dass es ohne irgendeine Wechselwirkung durch den Detektor durchfliegt.

Daten:

Ruhemasse des Elektrons $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg; Elementarladung $e = 1,60 \cdot 10^{-19}$ C;

Lichtgeschwindigkeit $c = 2,99 \cdot 10^8$ m s⁻¹;

dielektrische Leitfähigkeit (Permittivität) im Vakuum $\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ F m⁻¹

Teil A. Die Physik des ATLAS-Detektors (4.0 Punkte)

- A.1** Leite die Bestimmungsgleichung her für den Zyklotronradius r . Dies ist der Radius der Kreisbahn eines Elektrons, das einem senkrecht zu seiner Bewegungsrichtung ausgerichteten Magnetfeld ausgesetzt ist. 0.5pt

Bestimme r als Funktion seiner kinetischen Energie K ; dem Betrag seiner Ladung e ; seiner Masse m ; und der Magnetfeldstärke B .
Betrachte das Elektron als nichtrelativistisches klassisches Teilchen.

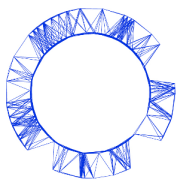
Die Elektronen, die im ATLAS-Detektor entstehen, müssen relativistisch behandelt werden. Die Formel für den Zyklotronradius gilt jedoch auch für relativistische Bewegungen, solange man den relativistischen Impuls berücksichtigt.

- A.2** Berechne den Minimalwert für den Impuls eines Elektrons, der es ihm erlaubt, aus dem Inneren Detektor radial zu entkommen. Der Innere Detektor hat die Form eines Zylinders mit dem Radius 1.1 m. Das Elektron entsteht am Kollisionspunkt genau im Zentrum des Zylinders. Gib den Wert in MeV/ c an. 0.5pt

Ein relativistisches Teilchen der Ladung e und Ruhemasse m gibt bei Beschleunigung normal zur Geschwindigkeit elektromagnetische Synchrotronstrahlung ab. Die dabei abgestrahlte Leistung ist

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

wobei a der Beschleunigung entspricht und $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$.



- A.3** Ein Teilchen nennt man ultrarelativistisch, wenn seine Geschwindigkeit fast Lichtgeschwindigkeit beträgt. Für ein ultrarelativistisches Teilchen kann die abgestrahlte Leistung ausgedrückt werden als: 1.0pt

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

Dabei ist ξ eine reelle Zahl, n, k sind ganzzahlig, E ist die Energie des geladenen Teilchens und B die Stärke des Magnetfelds.

Bestimme ξ , n und k .

- A.4** Im ultrarelativistischen Grenzfall ist die Energie des Elektrons als Funktion der Zeit gegeben durch: 1.0pt

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

dabei ist E_0 die Anfangsenergie des Elektrons. Bestimme α als Funktion von e , c , B , ϵ_0 und m .

- A.5** Betrachte ein Elektron, das am Kollisionspunkt in radialer Richtung mit einer Energie von 100 GeV erzeugt wird. 0.5pt

Schätze den Betrag der Energie ab, welchen das Elektron durch Synchrotronstrahlung verliert, bis es den Inneren Detektor verlässt. Gib den Wert in MeV an.

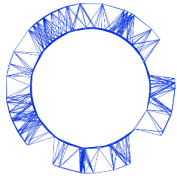
- A.6** Bestimme einen Ausdruck für die Zyklotronfrequenz des Elektrons als Funktion der Zeit im ultrarelativistischen Grenzfall. 0.5pt

Teil B. Auffinden des Neutrinos (6.0 Punkte)

Abbildung 1 zeigt die Kollision zweier Protonen, die ein Top-Quark (t) und ein Anti-Top-Quark ($\bar{t}$) erzeugt, den schwersten jemals beobachteten Elementarteilchen. Das Top-Quark zerfällt in ein W^+ -Boson und ein Bottom-Quark (b), das Anti-Top-Quark in ein W^- -Boson und ein Anti-Bottom-Quark ($\bar{b}$). In dem in Abbildung 1 beschriebenen Fall zerfällt das W^+ -Boson in ein Anti-Myon (μ^+) und ein Neutrino (ν), und das W^- -Boson in ein Quark und ein Anti-Quark. Die Aufgabe dieser Übung ist die Rekonstruktion des Gesamtimpulses des Neutrinos unter Benutzung der Impulse einiger detektierter Teilchen. **Der Einfachheit halber betrachten wir alle Teilchen und Jets in dieser Aufgabe als masselos, mit Ausnahme des Top-Quarks und der $W^\pm$ -Bosonen.**

Die Impulse der Zerfallsprodukte des Top-Quarks können aus dem Experiment bestimmt werden (siehe Tabelle), außer der Komponente des Neutrinoimpulses entlang der z -Achse. Die Summe der linearen Impulse der im Detektor nachgewiesenen Endteilchen ist nur in der transversalen Ebene (xy -Ebene) gleich Null, aber nicht entlang der Kollisionslinie (z -Achse). Daher lässt sich der transversale Impuls des Neutrinos aus dem fehlenden Impuls in der transversalen Ebene bestimmen.

Am 4. Juni 2015 um 0:21:24 Ortszeit registrierte das ATLAS-Experiment am LHC eine Proton-Proton-



Kollision der in Abbildung 1 dargestellten Form.

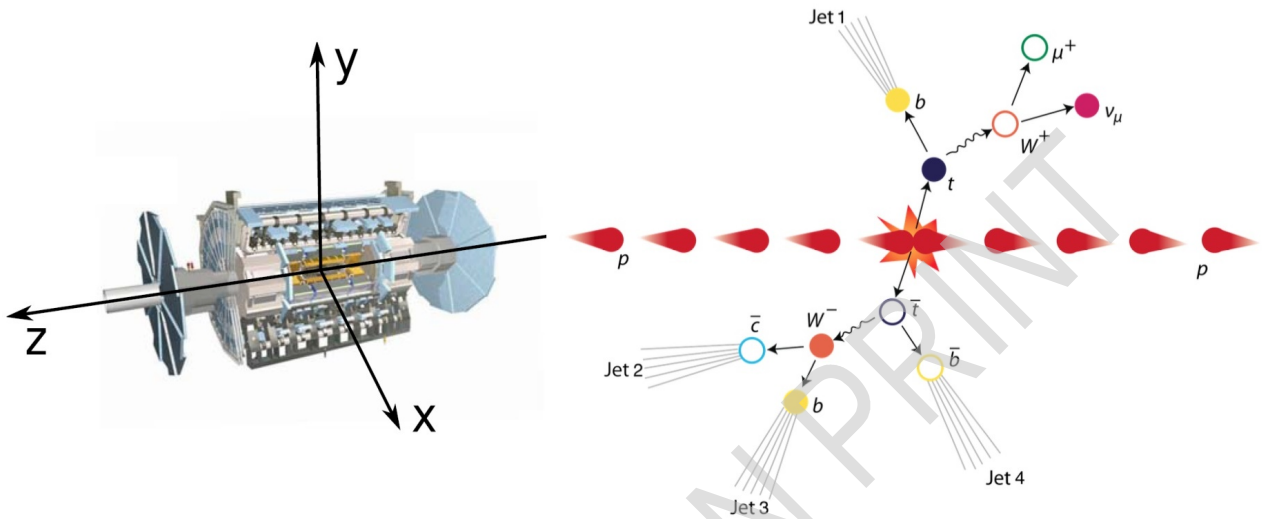


Abbildung 1. Schematische Darstellung des Koordinatensystems des ATLAS-Detektors (links) und der Proton-Proton-Kollision (rechts).

Die folgende Tabelle zeigt den linearen Impuls der drei Endteilchen nach dem Zerfall des Top-Quarks einschließlich des Neutrinos für jede der Komponenten.

Teilchen	p_x (GeV/c)	p_y (GeV/c)	p_z (GeV/c)
Anti-Myon (μ^+)	-24,7	-24,9	-124
Jet 1 (j_1)	-14,2	+50,1	+94,1
Neutrino (ν)	-104,1	+5,3	—

- B.1** Leite eine Gleichung her für die Beziehung zwischen dem Quadrat der Masse des W^+ -Bosons m_W^2 und der Impulskomponenten von Neutrino und Anti-Myon der obigen Tabelle. Bestimme die Masse in Abhängigkeit der transversalen Impulse von Neutrino und Anti-Myon,

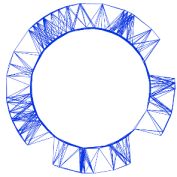
$$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \quad \text{and} \quad \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$

und der z -Komponenten ihrer Impulse, $p_z^{(\mu)}$ and $p_z^{(\nu)}$.

1.5pt

- B.2** Berechne die zwei möglichen Lösungen für den Impuls des Neutrinos entlang der z -Achse, $p_z^{(\nu)}$, unter Annahme einer Masse des W^+ -Bosons von $m_W = 80,4 \text{ GeV}/c^2$. Gib deine Antwort in GeV/c an.

1.5pt



- B.3** Berechnen Sie die Masse des Top-Quarks für jede der beiden vorherigen Lösungen. 1.0pt
 Gib deine Antwort in GeV/c^2 an.
 [Falls du die beiden Lösungen unter B.2 nicht bestimmen konntest, benutze
 $p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c$ and $p_z^{(\nu)} = -180 \text{ GeV}/c$.]

Die normalisierte Anzahl von Kollisionseignissen für die Messung der Masse des Top-Quarks (wie man sie aus dem Experiment erhält) besteht aus zwei Komponenten: dem sogenannten "Signal" (das dem Zerfall des Top-Quarks entspricht) und dem sogenannten "Hintergrund" (der Ereignissen aus anderen Prozessen entspricht, die keine Top-Quarks liefern). Die experimentellen Daten beinhalten beide Vorgänge, siehe Abbildung 2.

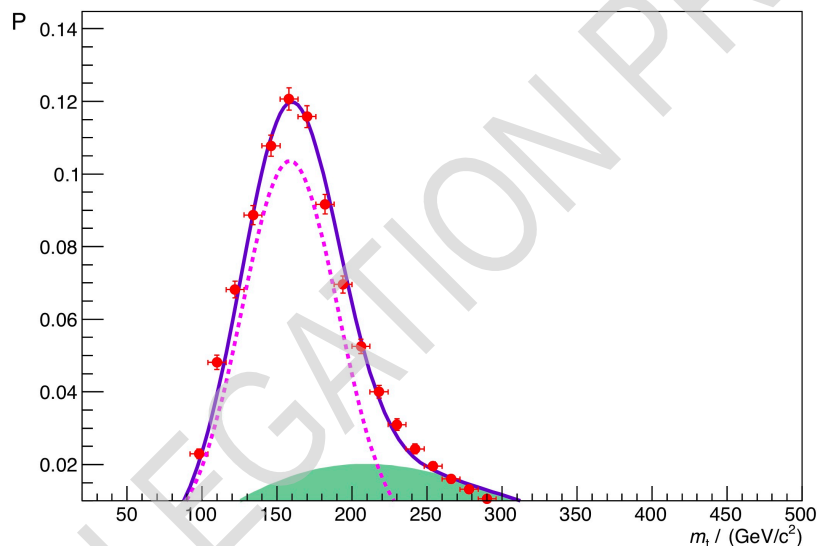


Abbildung 2. Massenverteilung des Top-Quarks, wie man sie aus dem Experiment erhält. Hier wurde die normalisierte Anzahl der Ereignisse gegen die Masse des Top-Quarks aufgetragen. Die Messpunkte entsprechen den aufgenommenen Daten. Die strichlierte Linie entspricht dem "Signal". Die Schattenfläche dem "Hintergrund".

- B.4** Welche der beiden obigen Lösungen für den Wert der Masse des Top-Quarks ist aufgrund der Massenverteilung eher korrekt? Schätze aus der Grafik die Wahrscheinlichkeit der wahrscheinlichsten Lösung ab. 1.0pt
- B.5** Berechne die vom Top-Quark zurückgelegte Wegstrecke, bevor es zerfällt, unter Verwendung der wahrscheinlichsten Lösung aus B.4. Nimm eine mittlere Lebensdauer im Ruhezustand von $5 \cdot 10^{-25} \text{ s}$ an. 1.0pt