

**Übungen zu  
Moderne Experimentalphysik III  
(Kerne und Teilchen)  
Sommersemester 2017**

---

**Übungsblatt Nr. 11**

Ausgabe: Di, 18.07.2017

Abgabe: Di, 25.07.2017 (13:30) Briefkasten Geb. 30.23

---

Name des Übungsgruppenleiters und Gruppenbuchstabe:

Namen der bearbeitenden Gruppe:

**Aufgabe 1: Higgs-Boson bei CMS**

(10 Punkte)

Die Rapidity eines Teilchens ist (in natürlichen Einheiten) definiert durch

$$y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + p_z}{E - p_z},$$

mit der Energie  $E$  und der  $z$ -Komponente  $p_z$  des Impulses  $\vec{p}$ .

- a) Betrachten Sie einen longitudinalen Lorentzboost  $\beta$  entlang der  $z$ -Achse und zeigen Sie, dass Rapiditäten wie folgt transformieren:

$$y \xrightarrow{\beta} y' = y - \tanh^{-1} \beta. \quad (1)$$

*Hinweis:* Es ist  $\tanh x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$ .

- b) Was folgt mit (1) für die Differenz  $\Delta y = y_1 - y_2$  von Rapiditäten in verschiedenen Bezugssystemen?

Da die Masse von Teilchen im Experiment oft nicht messbar ist, wird auch die Pseudorapidity  $\eta$  verwendet, die definiert ist über

$$\eta = -\ln \left( \tan \frac{\theta}{2} \right),$$

wobei  $\theta$  den Winkel zwischen Teilchenflugrichtung und  $z$ -Achse bezeichnet.

- c) Zeigen Sie, dass für masselose Teilchen  $y = \eta$  gilt.

*Hinweis:* Es ist  $\cos 2x = \cos^2 x - \sin^2 x$ .

Betrachten Sie nun Higgs-Boson-Produktion und -Zerfall bei CMS. Das Higgs-Boson wird in den Proton-Proton-Kollisionen am LHC mit einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 13$  TeV vorwiegend durch den sog. „Gluon-Gluon-Fusionsprozess“ mit einem „Top-Dreieck“ erzeugt, vgl. Abb. 1. Mit einem Verzweigungsverhältnis von etwa 0,2% zerfällt das Higgs-Boson in zwei Photonen. Die Detektorsignale eines solchen Ereignisses sind in Abb. 2 visualisiert.

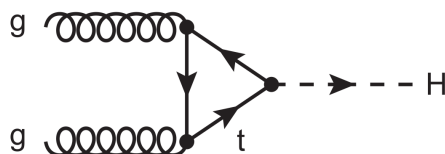


Abbildung 1: Higgs-Boson-Produktion durch Gluon-Gluon-Fusion.

- d) Warum kann das Higgs-Boson in zwei Photonen zerfallen, obwohl Photonen masselos sind? Zeichnen Sie relevante Feynmandiagramme des Prozesses.
- e) Warum ist der Zerfall  $H \rightarrow \gamma\gamma$  des Higgs-Boson in zwei Photonen trotz des kleinen Verzweigungsverhältnisses experimentell gerade an Hadronen-Collidern besonders günstig?

Die Akzeptanz des elektromagnetischen Kalorimeters von CMS deckt den Bereich bis  $|\eta| = 2,6$  ab. In niedrigster Ordnung wird sich das Higgs-Boson parallel zur  $z$ -Achse bewegen. Nehmen Sie an, dass sich im Ruhesystem des Higgs-Bosons die beiden Photonen in der Ebene senkrecht zur  $z$ -Achse („Transversalebene“) bewegen.

- f) Geben Sie für den Fall, dass die beiden Photonen gerade noch im Kalorimeter detektiert werden, also für  $\eta_\gamma = 2,6$ , die Rapidität des Higgs-Bosons (ebenfalls im Laborsystem) an. Wie groß ist die Pseudorapidität des Higgs-Bosons in diesem Fall?

*Hinweis:* Nutzen Sie das Ergebnis aus b). Betrachten Sie die Differenz der Rapiditäten des Higgs-Bosons und eines der Photonen und überlegen Sie sich, wie groß diese im Ruhesystem des Higgs-Bosons ist.

- g) Was sind in diesem Fall ( $\eta_\gamma = 2,6$ ) die minimalen und maximalen Werte der Impulsbruchteile  $x_1$  und  $x_2$  der beiden Gluonen im Anfangszustand Abb. 1? Wie groß sind  $x_1$  und  $x_2$  für den Fall, dass das Higgs-Boson im Laborsystem in Ruhe produziert wurde?

*Hinweis:* Überlegen Sie sich, wie der Viererimpuls  $p_H$  des Higgs-Bosons im Laborsystem mit  $x_1$  und  $x_2$  und den Viererimpulsen der kollidierenden Protonen zusammenhängt. Bestimmen Sie den Boost zwischen dem Laborsystem und dem Ruhesystem des Higgs-Bosons mit Hilfe von (1) und berechnen Sie damit  $p_H$ .

- h) Welche minimalen und maximalen Werte ergeben sich für die Impulsbruchteile  $x_1$  und  $x_2$  bei einer Schwerpunktsenergie von  $\sqrt{s} = 8$  TeV, mit der der LHC im Jahr 2012 betrieben wurde?

Was erwarten Sie deshalb für die Änderung der Produktionsrate von  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Ereignissen durch die Erhöhung der Schwerpunktsenergie von 8 auf 13 TeV? Diskutieren Sie das Ergebnis nur qualitativ, es ist keine Rechnung nötig.

## Aufgabe 2: Neutrino-Oszillationen

(10 Punkte)

Im vergangenen Jahr wurden Takaaki Kajita und Arthur B. McDonald mit dem Nobelpreis in Physik ausgezeichnet für ihre Schlüsselbeiträge zu dem Super-Kamiokande- bzw. SNO-Experiment, mit denen der Nachweis von Neutrinooszillationen gelang. Lesen Sie den von der Royal Swedish Academy of Science aus diesem Anlass herausgegeben Artikel „Neutrino Oscillations“ [2] und beantworten Sie folgende Fragen, ggf. durch weitere Recherche:

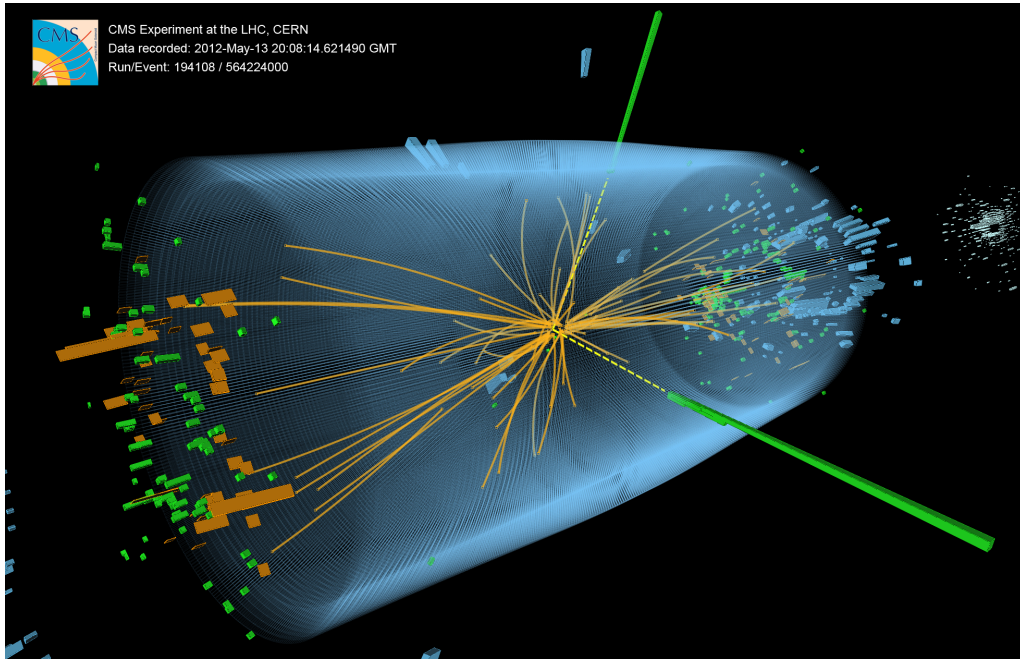


Abbildung 2: Detektorsignatur („event display“) eines  $H \rightarrow \gamma\gamma$  Kandidatenereignisses, welches im Mai 2012 im CMS-Detektor gemessen wurde, entnommen aus [1]. Deutlich zu erkennen sind die beiden großen Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter (grüne Türme) ohne assoziierte Spur (Spuren sind als gelbe Linien dargestellt), was eine typische Photonensignatur darstellt.

- a) Fassen Sie kurz das Rätsel um die solaren und atmosphärischen Neutrinos zusammen, das vor den Resultaten der SNO- und Super-Kamiokande-Experimenten bestand. Welche Ursachen für die beobachteten Defizite im Neutrinofluss wurden diskutiert?
- b) Beschreiben Sie das Prinzip und das Ergebnis des SNO-Experiments. Welche Nachweisreaktionen wurden verwendet? Zeichnen Sie die relevanten Feynmandiagramme. Was unterschied das SNO-Experiment von vorherigen Experimenten zur Messung solarer Neutrinos, wodurch der Nachweis der Neutrinooszillationen möglich war?
- c) Beschreiben Sie das Prinzip und das Ergebnis des Super-Kamiokande-Experiments. Welche Nachweisreaktionen wurden verwendet? Zeichnen Sie die relevanten Feynmandiagramme.
- d) Was impliziert die Existenz von Neutrinooszillationen für die Massen von Neutrinos? Wovon hängen in einem vereinfachten Modell mit nur zwei Neutrino flavors die Amplitude und Phase der Oszillationen ab?
- e) Kann man durch Vermessung von Neutrinooszillationen die Massen der Neutrinos bestimmen?

## Literatur

- [1] T. McCauley and L. Taylor, “CMS Higgs Search in 2011 and 2012 data: candidate photon-photon event (8 TeV)”. CMS-PHO-EVENTS-2012-003 <https://cds.cern.ch/record/1459459>, 2013.
- [2] Nobelprize.org. Nobel Media AB, “The Nobel Prize in Physics 2015 - Advanced Information”. Web. 8 Jul 2016. [http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2015/advanced.html](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2015/advanced.html), 2014.