

Übungen zu Moderne Experimentalphysik III (Teilchen und Hadronen) Sommersemester 2020

Übungsblatt Nr. 7

Bearbeitung bis 29.06.2020

Wir bieten im Juli ein freiwilliges Beratungstutorium zur Prüfungsvorbereitung an. Ziel ist es, offen gebliebene Fragen zum Vorlesungsstoff zu beantworten. Darüber hinaus wird es einige allgemeine Hinweise zur mündlichen Prüfung geben. Geben Sie bitte hier kurz Feedback, ob Sie Interesse an dem Beratungstutorium haben. Weitere Details werden zeitnah über ILIAS bekannt gegeben.

Aufgabe 1: Rapidity und Pseudorapidity

(2+1+1=4 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 β entlang der z -Achse und zeigen Sie, dass Rapiditäten wie folgt transformieren:

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

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

- b) Was folgt aus dieser Transformation für die Differenz $\Delta y = y_1 - y_2$ von Rapiditäten in verschiedenen Bezugssystemen?
- c) Da die Masse von Teilchen im Experiment oft nicht messbar ist, wird auch die Pseudorapidity η verwendet, die definiert ist über

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

wobei θ den Winkel zwischen Teilchenflugrichtung und z -Achse bezeichnet. Zeigen Sie, dass für masselose Teilchen $y = \eta$ gilt.

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

Aufgabe 2: Higgs-Boson-Produktion und Nachweis beim CMS-Experiment
(2+1+1+3+2=9 Punkte)

Das Higgs-Boson wird in den Proton-Proton-Kollisionen am LHC mit einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 13$ TeV vorwiegend durch den Gluon-Gluon-Fusionsprozess über ein sog. „Top-Dreieck“ erzeugt, vgl. Abb. 1. Alle anderen Produktionskanäle werden für diese Aufgabe vernachlässigt. Mit einem Verzweigungsverhältnis von etwa 0.2% zerfällt das Higgs-Boson in zwei Photonen. Die Detektorsignale eines solchen Ereignisses sind in Abb. 2 visualisiert.

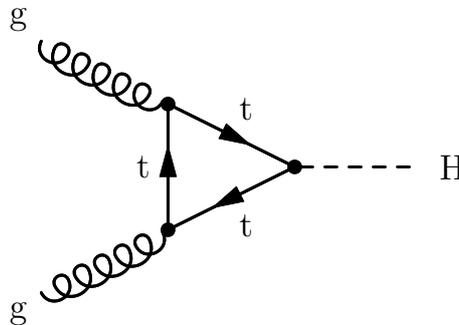


Abbildung 1: Higgs-Boson-Produktion durch Gluon-Gluon-Fusion.

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

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.

- 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 Aufgabe 1 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.

- d) 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 der in Aufgabe 1 gegebenen Formel und berechnen Sie damit p_H .

- e) Welche minimalen und maximalen Werte ergeben sich für die Impulsbruchteile x_1 und x_2 bei einer Schwerpunktsenergie von $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$, mit der der LHC voraussichtlich ab dem Jahr 2022 betrieben wird?

Was erwarten Sie deshalb für die Änderung der Produktionsrate von $H \rightarrow \gamma\gamma$ -Ereignissen durch die Erhöhung der Schwerpunktsenergie von 13 auf 14 TeV? Diskutieren Sie das Ergebnis nur qualitativ, es ist keine Rechnung nötig.

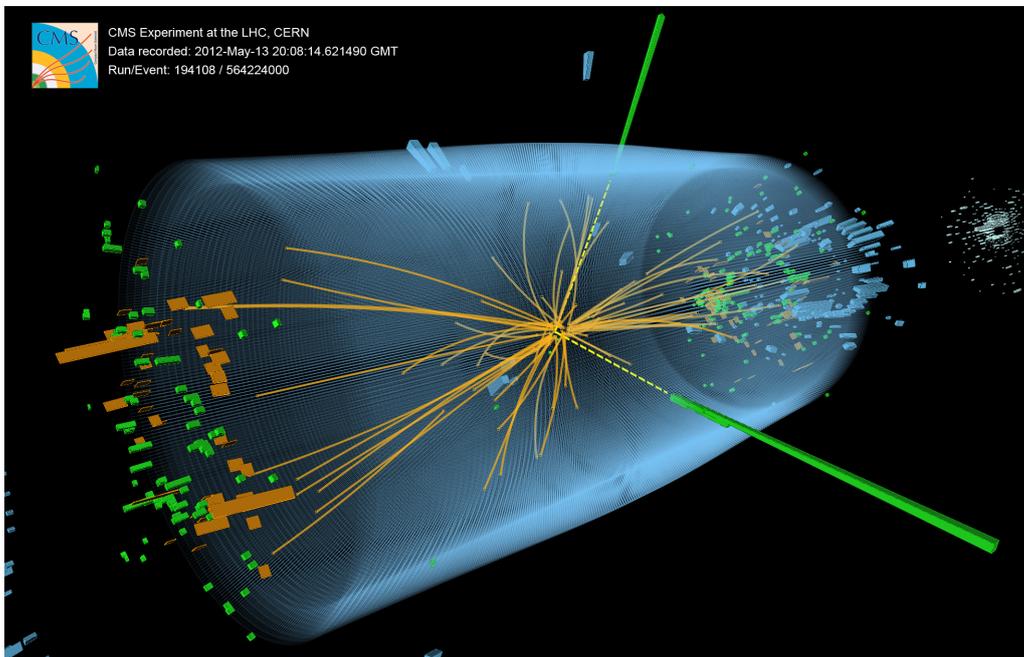


Abbildung 2: Detektorsignatur eines $H \rightarrow \gamma\gamma$ -Kandidatenerignisses, welches im Mai 2012 im CMS-Detektor gemessen wurde, entnommen aus [1]. Deutlich zu erkennen sind die beiden großen Energiedepositionen im elektromagnetischen Kalorimeter (grüne Türme) ohne assoziierte Spur (Spuren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

Aufgabe 3: Invariante Zwei-Myonen-Masse beim CMS-Experiment
(1+2+3=6 Punkte)

Mit dem CMS-Detektor werden die in Proton-Proton-Kollisionen am LHC entstehenden Teilchen vermessen. Unter anderem wird nach Zerfällen von schweren Teilchen in zwei Myonen gesucht. Dazu werden Ereignisse selektiert, in denen zwei Myonen mit entgegengesetzter Ladung detektiert werden, und aus deren gemessenen Vierervektoren die invariante Masse berechnet. In Abb. 3 ist die Verteilung der so rekonstruierten invarianten Zwei-Myonen-Masse gezeigt, die aus den ersten Proton-Proton-Kollisionsereignissen bei einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV bestimmt wurden.

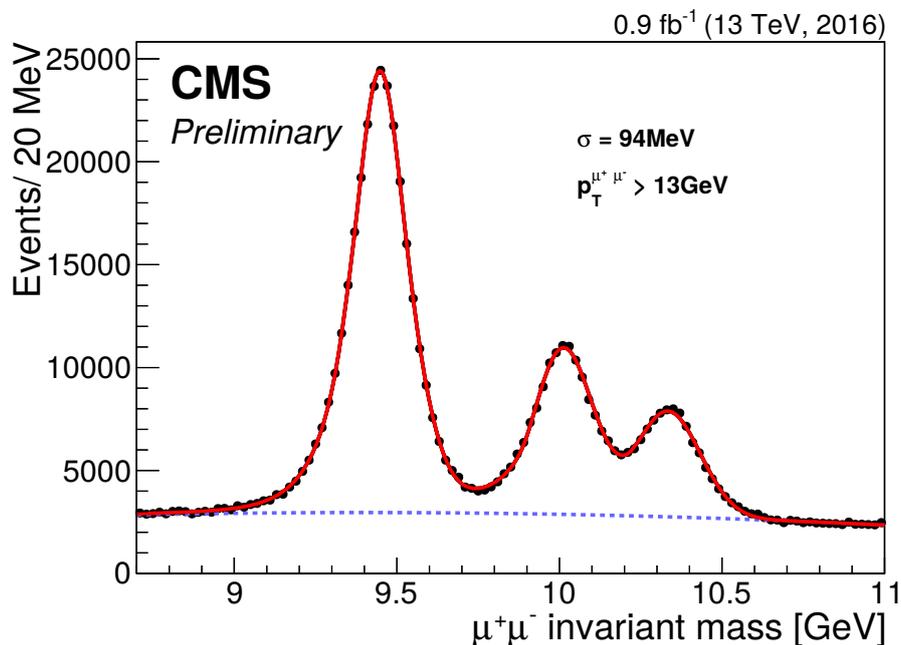


Abbildung 3: Invariante Zwei-Myonen-Masse, rekonstruiert aus mit dem CMS-Detektor im Mai 2016 aufgezeichneten Proton-Proton-Kollisionsereignissen, die einer integrierten Luminosität von 0.9 fb^{-1} entsprechen. Entnommen aus [2].

- Welchen in zwei Myonen zerfallenden Teilchen $X \rightarrow \mu^+ \mu^-$ entsprechen die beobachteten Resonanzen?
- Betrachten Sie die Resonanz bei 9.5 GeV, deren gemessene Breite $\sigma = 94 \text{ MeV}$ beträgt. Wie vergleicht sich dies mit der erwarteten Zerfallsbreite des Teilchens X und der Impulsauflösung des CMS-Detektors für Myonspuren?

Es genügt, hier die Größenordnungen zu betrachten. Machen Sie eine einfache Abschätzung: nehmen Sie an, dass X im Laborsystem in Ruhe produziert wird und sich die beiden Myonen in der transversalen Ebene bewegen.

Hinweis: In dem betrachteten Impulsbereich ist die Myonimpulsauflösung beim CMS-Detektor durch die Messung des inneren Spurdetektors bestimmt. Diese wurde z.B. in Aufgabe 1 auf Aufgabenblatt 4 bestimmt. Das Ergebnis ist nochmals in Abb. 4 dargestellt.

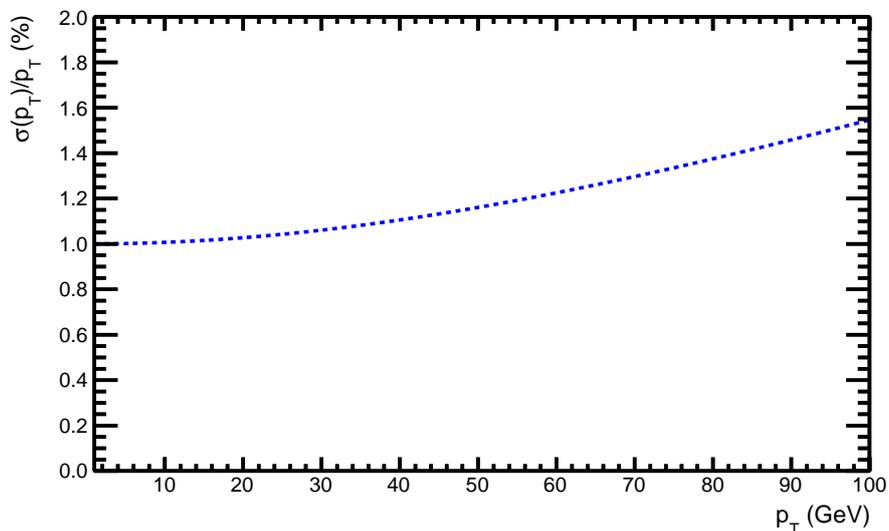


Abbildung 4: Relative Impulsauflösung des CMS-Spurdetektors.

- c) Die invariante Masse des Zwei-Myon-Systems kann auch für schwerere Resonanzen verwendet werden, so wird z.B. die wohlbekannte Z-Resonanz bei $m_Z = 91.188$ GeV verwendet um die Myonrekonstruktion zu validieren. Kann man durch solche Myonenpaare im entsprechendem Massenbereich auch eine Resonanz des Higgs-Bosons beobachten? Begründen Sie Ihre Antwort. Welche experimentellen Vor- und Nachteile hätte dieser Zerfallskanal?

Aufgabe 4: Jet-Algorithmus

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: In der Vorlesung haben Sie gelernt, dass an Hadron-Collidern aufgrund des Confinements in der Quantenchromodynamik sehr viele verschiedene Hadronen erzeugt werden. Oft ist es jedoch weder möglich noch notwendig, jedes einzelne Hadron im Experiment genau zu rekonstruieren. Ein wichtiges Objekt zur Ereignisrekonstruktion sind sog. *Jets*, bestehend aus einer Kollektion von verschiedenen Hadronen. Machen Sie sich vertraut mit dem beim CMS-Experiment hauptsächlich verwendeten Jet-Algorithmus, dem anti- k_t -Algorithmus [3], und stellen Sie ihn in einem kurzen Vortrag vor.

Aufgabe 5: b-Tagging beim CMS-Experiment

(0 Punkte)

Nur für aktiven Beitrag: Jets, welche durch die Hadronisierung von Bottom-Quarks entstehen, spielen eine wichtige Rolle in Analysen von Prozessen der Hochenergiephysik am LHC, wie z.B. beim Top-Quark oder dem Higgs-Boson. Lesen Sie dazu die entsprechende Publikation [4] des CMS-Experimentes (bis einschließlich Kapitel 5) und erläutern Sie das sog. *b-Tagging* in einem kurzen Vortrag.

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] CMS Collaboration, “Muon performance in early 2016 collision data”. CMS-DP-2016-027, <http://cds.cern.ch/record/2161025>, 2016.
- [3] M. Cacciari, G. P. Salam, and G. Soyez, “The anti- k_t jet clustering algorithm”, *JHEP* **04** (2008) 063, [arXiv:0802.1189](https://arxiv.org/abs/0802.1189).
[doi:10.1088/1126-6708/2008/04/063](https://doi.org/10.1088/1126-6708/2008/04/063).
- [4] CMS Collaboration, “Identification of heavy-flavour jets with the CMS detector in pp collisions at 13 TeV”, *JINST* **13** (2018), no. 05, P05011, [arXiv:1712.07158](https://arxiv.org/abs/1712.07158). [doi:10.1088/1748-0221/13/05/P05011](https://doi.org/10.1088/1748-0221/13/05/P05011).