

Übungen zu Moderne Experimentalphysik II, Teil 2 (Kern- und Teilchenphysik) Wintersemester 2023/24

Übungsblatt Nr. 3

Bearbeitung bis 16.01.2024

Tutorium: 18.01.2024

Saalübung: 17.01.2024

Link zur ILIAS-Hauptseite:

https://ilias.studium.kit.edu/goto.php?target=crs_2198626&client_id=produktiv

Vorbemerkung: Auf diesem Blatt setzen Sie sich eingehend mit dem CMS-Experiment auseinander.

Aufgabe 1: CMS-Detektor¹

(2+3+1+2+2+1+3+1+2+1+2=20 Punkte)

In der folgenden Aufgabe wollen wir uns mit dem CMS-Detektor am LHC beschäftigen. Er besteht im Zentralbereich aus mehreren (hohl-)zylinderförmigen Detektorsystemen, die konzentrisch um den Interaktionspunkt der Proton-Proton-Kollisionen angeordnet sind [1]. Der innerste Teil des CMS-Detektors ist ein Spurdetektor mit etwa $L = 1.1$ m Radius. Dieser ist umschlossen von einem elektromagnetischen Kalorimeter („ECAL“), das wiederum von einem hadronischen Kalorimeter („HCAL“) umschlossen wird.

Spurdetektor und Kalorimeter befinden sich innerhalb einer supraleitenden Magnetspule mit einem Durchmesser von 5.9 m, die ein homogenes Magnetfeld der Stärke $B = 3.8$ T parallel zur Zylinderachse erzeugt. Außerhalb der Spule befinden sich Myondetektoren. Abbildung 2 zeigt die typische CMS-Signatur eines Higgs-Zerfalls in vier Elektronen.

Verschaffen Sie sich im ersten Teil der Aufgabe einen Überblick über die Funktion eines Spurdetektors und lösen Sie dazu die folgende Teilaufgaben:

- a) Welche Arten von Spurdetektoren kennen Sie? Beschreiben Sie zwei Typen von Spurdetektoren in wenigen Sätzen.

¹Die in dieser Aufgabe verwendeten Zahlenwerte sind [1, 3, 2] entnommen.

- b) In einem zylindrischen Spurdetektor herrsche ein Magnetfeld der Stärke B , dessen Feldlinien parallel zur Achse des Detektors orientiert seien (generisches Beispiel). Ein geladenes Teilchen mit Impuls p fliege von der zentralen Achse des Detektors zu seiner Außenwand, senkrecht zum Magnetfeld, vgl. Abb. 1. Der Bogen der Teilchenbahn habe eine Länge L . Zeigen Sie, dass für die relative Impulsauflösung gilt

$$\frac{\sigma_p}{p} \propto \frac{8\sigma_x}{0.3BL^2} \cdot p,$$

wobei σ_x die Auflösung einer einzelnen Ortsmessung entlang der Teilchenbahn sei und σ_x , L in Meter, B in Tesla und p in GeV gegeben seien. Nehmen Sie an, dass der Bahnradius $R \gg L$ ist und zeigen Sie zunächst, dass dann für die Sagitta s der Bahn näherungsweise gilt

$$s = \frac{L^2}{8R}.$$

Benutzen Sie dann den Zusammenhang zwischen Impuls, Bahnradius, Sagitta und Ortsauflösung.

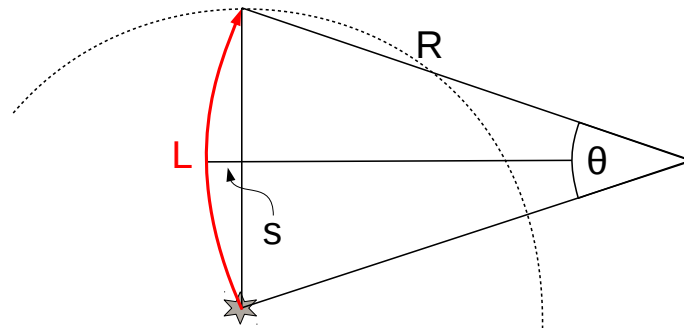


Abbildung 1: Illustration der in der Teilaufgabe b) verwendeten Anordnung. Die rekonstruierte Teilchenspur (roter Pfeil) führt von der zentralen Detektorachse (Stern) zur Außenwand (gestrichelte Linie), wobei der Bahnradius R ist und die Sagitta der Bahn s . Der Länge der Teilchenbahn beträgt L .

Nun wenden wir uns dem Spurdetektor des CMS-Experiments zu. Er besteht aus 13 konzentrisch angeordneten Lagen von Siliziumpixel- und -streifenmodulen mit einer exzellenten Ortsauflösung der einzelnen Spurpunkte zwischen etwa $10 \mu\text{m}$ in den inneren und $50 \mu\text{m}$ in den äußeren Lagen.

Der Proportionalitätsfaktor der Impulsauflösung aus Aufgabenteil b) hängt von der Anzahl N der Ortsmessungen entlang der Teilchenbahn ab, und es gilt die „Glückstern-Formel“:

$$\frac{\sigma_p}{p} = \sqrt{\frac{720}{N+4}} \cdot \frac{\sigma_x}{0.3BL^2} \cdot p.$$

Nehmen Sie an, dass in jeder Detektorlage eine Ortsmessung vorliegt und rechnen Sie mit einer mittleren Ortsauflösung von $\sigma_x = 25 \mu\text{m}$.

Beantworten Sie nun die folgende Frage:

- c) Wie groß ist die relative Impulsauflösung für geladene Teilchen mit einem Impuls von 50 GeV, die sich vom Kollisionspunkt senkrecht zum Magnetfeld nach außen bewegen?

Die zweite Schicht des Detektors stellt das elektromagnetische Kalorimeter dar.

- d) Beschreiben Sie kurz die Funktionsweise eines elektromagnetischen Kalorimeters zur Bestimmung von Teilchenenergien. Beziehen Sie in Ihrer Erklärung das Heitler-Modell ein, das Sie aus der Vorlesung kennen.
- e) Motivieren Sie, warum die relative Energieauflösung eines elektromagnetischen Kalorimeters in erster Näherung angenommen werden kann zu

$$\frac{\sigma_E}{E} = \frac{A}{\sqrt{E}},$$

wobei E die Energie des einfallenden Teilchens in GeV und A eine detektorspezifische Konstante ist. Die Energieauflösung σ_E ist definiert als die Standardabweichung der gemessenen Energien bei vielen Einzelmessungen.

Das ECAL des CMS-Experiments besteht aus 23 cm langen Bleiwolframatkristallen (PbWO_4), entsprechend 25.8 Strahlungslängen X_0 und etwa einer hadronischen Wechselwirkungslänge λ .

- f) Wie groß ist die relative Energieauflösung des ECAL für Elektronen mit einer Energie von 50 GeV? Die detektorspezifische Proportionalitätskonstante des CMS-ECAL ist $A = 0.036 \text{ GeV}^{1/2}$.
- g) Vergleichen Sie die Auflösung von Spurdetektor und ECAL für Elektronen (hinreichend großer Energien, so dass $E = p$). Ab welcher Energie wird die Auflösung des ECAL besser als die des Spurdetektors? Stellen Sie die Spurdetektor- und ECAL-Auflösung als Funktion der Elektronenenergie für Energien zwischen 1 GeV und 100 GeV mit einem von Ihnen ausgewählten Computerprogramm graphisch dar und diskutieren Sie das Resultat. Bilden Sie beide Kurven zur besseren Vergleichbarkeit im selben Diagramm ab.
- h) Bisher haben wir bei der Auflösung des Spurdetektors nur den Effekt der Ortsauflösung berücksichtigt. Aufgrund des vergleichsweise hohen Materialbudgets im CMS-Spurdetektor gibt es aber auch einen nicht zu vernachlässigenden Beitrag C_{mps} zur relativen Impulsauflösung durch Vielfachstreuung. Dieser ist in etwa konstant mit² $C_{\text{mps}} = 0.01$, so dass gilt

$$\left(\frac{\sigma_p}{p}\right)^2 = (C_{\text{pos}} \cdot p)^2 + C_{\text{mps}}^2,$$

²Zahlenwert abgeschätzt aus [2].

mit dem aus Aufgabenteil c) bekannten Faktor

$$C_{\text{pos}} = \sqrt{\frac{720}{N+4}} \cdot \frac{\sigma_x}{0.3BL^2}.$$

Stellen Sie auch in diesem Falle die Auflösung für Elektronen zwischen 1 GeV und 100 GeV graphisch dar und vergleichen Sie mit den Ergebnissen im vorherigen Aufgabenteil.

- i) Ein weiterer Nachteil des hohen Materialbudgets ist, dass die Energiemessung im ECAL verfälscht wird: die Strecke vom Kollisionspunkt zum ECAL entspricht im Zentralbereich einer Dicke von etwa $0.4 X_0$. Welchen Teil seiner Energie verliert ein Elektron vom Kollisionspunkt im Mittel, bevor es das ECAL erreicht? Wie viele Photonen konvertieren im Mittel in ein Elektron-Positron-Paar?

Das HCAL ist ein Sampling-Kalorimeter mit abwechselnden Lagen aus Messingabsorbern und Plastiksintillatoren, dessen Dicke etwa 6 hadronischen Wechselwirkungslängen λ entspricht. Für das HCAL³ ist $A = 1.2 \text{ GeV}^{1/2}$.

- j) Wie groß ist die relative Energieauflösung des HCAL für Pionen mit einer Energie von 50 GeV?
- k) Warum verwendet man das ECAL alleine nicht zur Messung der Energie von geladenen Pionen? Skizzieren Sie zur Erklärung die mittlere Energie eines geladenen Pions in Abhängigkeit der transversalen Entfernung zum Kollisionspunkt.

Abb. 2 zeigt als Beispiel eine Visualisierung der Spurdetektor- und ECAL-Messungen in einem Proton-Proton-Kollisionsereignis.

Literatur

- [1] The CMS experiment at the CERN LHC. *JINST*, 3:S08004, 2008.
- [2] Description and performance of track and primary-vertex reconstruction with the cms tracker. *JINST*, 9(10):P10009, 2014.
- [3] S. Abdullin, V. Abramov, B. Acharya, N. Adam, M. Adams, P. Adzic, N. Akchurin, U. Akgun, E. Albayrak, R. Alemany-Fernandez, and Almeida. The cms barrel calorimeter response to particle beams from 2 to 350 GeV/c. *Eur. Phys. J.*, 60:359–373, 2009.
- [4] Lucas Taylor Thomas McCauley. Candidate events in the CMS Standard Model Higgs Search using 2010 and 2011 data. CMS Collection., Dec 2011.

³Strenggenommen gilt dieser Wert für eine kombinierte ECAL+HCAL-Messung.

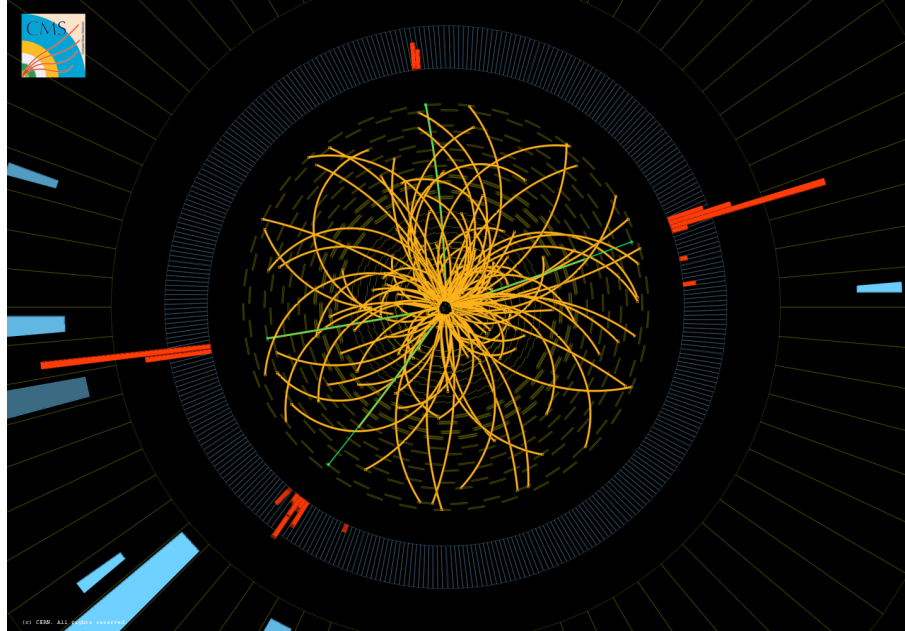


Abbildung 2: Visualisierung der Signaturen („event display“), welche die in einem Proton-Proton-Kollisionsereignis entstandenen Teilchen im CMS-Detektor erzeugen. Die Zylinderachse des Detektors zeigt in die Papierebene hinein, der Kollisionspunkt befindet sich im Bildmittelpunkt. Dargestellt sind die in konzentrischen Lagen angeordneten Module des Spurdetektors (Streifen im Zentralbereich) sowie das ECAL und HCAL (mittlerer und äußerer Kreis aus Trapezoiden). Die gelben und grünen gekrümmten Linien stellen rekonstruierte Teilchenspuren dar, die roten Balken visualisieren Energieeinträge im ECAL (die Höhe ist proportional zur gemessenen Energie). Deutlich zu erkennen sind vier Elektronsignaturen: jeweils eine Spur, hier grün hervorgehoben, sowie ein zugeordneter Energieeintrag im ECAL. Bei dem Ereignis, das am 25. Juni 2011 aufgezeichnet wurde, handelt es sich um einen Kandidaten für den Zerfall eines Higgs-Bosons in vier Elektronen. Entnommen aus [4].