



GEORG-AUGUST-UNIVERSITÄT
GÖTTINGEN

Fakultät für
Physik 

Praktikumsprotokoll

Spezialisierungspraktikum in der Kern- und Teilchenphysik

angefertigt von

Philip Marszal

aus Kassel

am II. Physikalischen Institut

Praktikumszeitraum: 2. März 2015 bis 31. März 2015

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen	3
2.1. Das Standardmodell	3
2.2. Quantenchromodynamik	3
2.2.1. Allgemeines	3
2.2.2. Regge-Theorie	4
2.2.3. Die starke Kopplungskonstante α_s	4
2.3. Jet-Physik	5
2.3.1. Hadronisation	5
2.3.2. Transversale Masse	5
2.4. Top-Quark Physik	6
2.5. Vorhersage des Top-Quarks	6
2.6. Entdeckung und Eigenschaften	6
2.7. Produktion von Top-Quarks	7
2.8. Higgs-Boson Physik	7
3. Detektorphysik	9
3.1. Teilchen in Materie	10
3.1.1. Bethe-Bloch	10
3.1.2. Elektronen und Photonen	10
3.2. Gas-Detektoren	10
3.2.1. Geiger-Zähler	10
3.2.2. Driftkammer	10
3.2.3. Time-Projection-Chamber	10
3.3. Teilchen Identifikation	10
3.3.1. Energieverlust	10
3.3.2. Time of Flight	10

3.3.3. Cherenkov Strahlung	10
bergangsstrahlung10subsection.3.3.4	
3.4. Cherenkov Detektoren	10
3.5. Halbleiter Detektoren	10
3.5.1. Halbleiter	10
3.5.2. StrahlungsschÄrden	10
3.5.3. Signalerzeugung	10
3.5.4. Silizium Detektor	10
3.6. Kalorimeter	10
3.6.1. Elektromagnetische Schauer	10
3.6.2. Hadronische Schauer	10
3.6.3. Sampling und homogene Kalorimeter	10
3.6.4. EnergieauflÖsung	10
4. Werkzeuge	11
4.1. Werkzeuge	11
4.2. ROOT Data Analysis Framework	11
4.3. Grid-Computing	11
5. Ergebnisse	13
6. Diskussion	15
7. Zusammenfassung	17
A. Anhang	19

Nomenklatur

Lateinische Buchstaben

Variable	Bedeutung	Einheit
A	Querschnittsfläche	m^2
c	Geschwindigkeit	m/s

Griechische Buchstaben

Variable	Bedeutung	Einheit
α	Winkel	$^\circ$; —
ϱ	Dichte	kg/m^3

Indizes

Index	Bedeutung
m	Meridian
r	Radial

Abkürzungen

Abkürzung	Bedeutung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
max	maximal

1. Einleitung

Um sich mit den komplexen Themen einer Bachelorarbeit im Bereich Teilchenphysik auseinandersetzen zu können, ist ein grundlegendes Verständnis der Theorie und experimentellen Methoden der Hochenergie-Physik notwendig. Im Verlauf des Spezialisierungspraktikums wurden Themen von den Anfängen der Quantenchromodynamik (QCD), über das Standardmodell, bis hin zu 'Beyond the Standardmodel' bearbeitet. Es wurde sich intensiv damit beschäftigt wie man Vorgänge der Teilchenphysik experimentell messen kann. Im letzten Teil des Spezialisierungspraktikums, wurden fundamentale Werkzeuge für die Analyse von experimentellen Daten aus Kollisionsexperimenten (insbesondere des LHC am CERN) behandelt.

2. Grundlagen

2.1. Das Standardmodell

Das Standardmodell(SM) beschreibt alle bekannten Elementarteilchen und die zwischen ihnen herrschenden Wechselwirkungen. Die Elementarteilchen sind dabei in drei verschiedene Gruppen aufgeteilt: Quarks, Leptonen und Eichbosonen. Quarks und Leptonen sind Fermionen während Eichbosonen offensichtlich Bosonen sind. Die drei grundlegenden Wechselwirkungen, die durch das SM beschrieben werden sind: die elektromagnetische Wechselwirkung, die schwache Wechselwirkung und die starke Wechselwirkung. Die Gravitation wird jedoch nicht durch das SM beschrieben. Jede Wechselwirkung verläuft über Austauschteilchen. Diese Teilchen sind die zur Kraft gehörenden Eichbosonen. Die Austauschteilchen der starken Wechselwirkung sind die Gluonen, die Austauschteilchen der elektromagnetischen Kraft sind die Photonen und die Austauschteilchen der schwachen Kraft sind die massiven W^\pm - und Z^0 -Bosonen. Die Fermionen des Standardmodells werden durch die Wechselwirkungen denen sie unterliegen charakterisiert. Neutrinos, die zu den Leptonen gehören, wechselwirken nur schwach, geladene Leptonen, wie z.B. das Elektron, wechselwirken schwach und elektromagnetisch. Quarks nehmen an jeder Wechselwirkung teil, insbesondere der starken Wechselwirkung.

2.2. Quantenchromodynamik

2.2.1. Allgemeines

Die Quantenchromodynamik ist die Theorie, die die starke Wechselwirkung beschreibt. Die Teilchen, die stark wechselwirken sind lediglich Quarks und Gluonen. So wie die elektromagnetische Kraft hat auch die starke Wechselwirkung eine Ladung, welche Farbe genannt wird. Es gibt dabei drei Farben: rot, grün und blau. Zusätzlich existieren noch die dazugehörigen Antifarben.

2. Grundlagen

2.2.2. Regge-Theorie

Die fÄ¼he Form der QCD ist die Regge-Theorie, die VorgÄ¼nge selbst bei nicht perturbativen Energien beschreiben kann. Der Kern der Regge-Theorie ist das Zulassen von komplexen Drehimpulsen bei Streuprozessen (Partialwellenansatz). Dabei werden sogenannte Trajektorien $\alpha(m^2)$ eingefÄ¼hrt, die den Drehimpuls in AbhÄ¼ngigkeit von der Energie darstellen. Die Energien an denen die Trajektorien ganzzahlige Werte annehmen entsprechen der Ruhemasse von Austauscheteilchen mit entsprechendem Drehimpuls. Auf diese Weise kann man, wenn man den Drehimpuls und die Masse eines Teilchens kennt, eine Reihe weiterer Teilchen vorhersagen. Im Rahmen der Streutheorie werden aus den Trajektorien die Wirkungsquerschnitte errechnet *Die Quelle ist: <http://school-diff2013.physi.uni-heidelberg.de/Talks/Poghosyan.pdf> ... Das ist eine Praesentation:*

$$\sigma_i \propto \left(\frac{s}{s_0} \right)^{\alpha_i(0)-1}$$

Betrachtet man alle bisher experimentell beobachteten Austauscheteilchen fÄ¼r die Streuung, folgt dass der Wirkungsquerschnitt (WQS) mit steigender Schwerpunktsenergie \sqrt{s} sinken mÄ¼sste. Allerdings wird beobachtet, dass der WQS steigt. DafÄ¼r fÄ¼hrt die Regge-Theorie das sogenannte *Pomeron* ein. Die Trajektorie des Pomerons soll gerade den Zuwachs des WQS erklÄ¼ren. Dieses Austauscheteilchen lÄ¼sst sich auf den Austausch von Gluonen bzw. Glueballs zurÄ¼ckfÄ¼hren.

2.2.3. Die starke Kopplungskonstante α_s

So wie die elektromagnetische Wechselwirkung, wird auch die StÄ¼rke der starken Wechselwirkung durch eine Kopplungskonstante bestimmt. Bei der elektromagnetischen Kraft wird eine theoretisch unendliche Ladung, durch Teilchen-Antiteilchen-Paare, die spontan entstehen und sich wieder vernichten, abgeschirmt. Dies fÄ¼hrt zu dem Effekt, dass die Kopplungskonstante α_{em} bei steigenden Energien (d.h. geringerem Abstand zur Ladung) grÄ¼Äer wird, weil weniger Abschirmung vorhanden ist. Dasselbe PhÄ¼nomen gibt es bei der Farbladung. Jedoch wird die Abschirmung durch Quark-Antiquark-Paare von einer VerstÄ¼rkung der Ladung durch Gluonen Ä¼bertroffen. Aus diesem Effekt folgt die asymptotische Freiheit der Quarks, die besagt dass die Kraft zwischen Quarks bei steigender Energie abnimmt. Auch Hadronisation hÄ¼ngt mit dem Verhalten der starken Wechselwirkung bei unterschiedlichen Energien zusammen.

2.3. Jet-Physik

2.3.1. Hadronisation

Bei Kollisionen in Teilchenbeschleunigern wie dem LHC am CERN, entstehen zunächst freie Quarks. Allerdings sind freie Quarks in der Natur nicht nachzuweisen, da die starke Kopplungskonstante, bei wachsendem Abstand zwischen zwei Teilchen mit Farbladung, wächst. Ein einzelnes Quark hätte demnach ein unendliches Potential. Das Phänomen, dass Quarks nicht einzeln vorkommen wird als *Confinement* bezeichnet. Wenn nun bei einer Reaktion zwei Quarks entstehen, die entgegengesetzte Impulse haben bzw. sich auseinander bewegen, so steigt das Potential zwischen den Quarks an bis genug Energie im Potential ist um ein Quark-Antiquark-Paar zu erzeugen. Die beiden entstehenden Quarks bilden nun mit den beiden ursprünglichen Quarks stabile Hadronen. Dieser Prozess wird als Hadronisation bezeichnet. Aus einem einzelnen Quark entstehen dabei eine große Anzahl an Hadronen. Im Detektor werden deshalb Quarks als Hadronenschauer, auch Jets genannt, sichtbar. Beim Detektieren spielt das b -Quark eine besondere Rolle, da die Zeit, die das b -Quark zur Hadronisation braucht, im Vergleich zu allen anderen Quarks besonders lang ist und deshalb vom b -Quark stammende Jets (b -Jets) identifiziert werden können.

2.3.2. Transversale Masse

Mit der relativistischen Energie-Impuls-Beziehung lässt sich die Ruhemasse eines Teilchens aus seinem Vierer-Impuls p^μ berechnen. Auf diese Weise lässt sich aus zwei im Detektor gemessenen Teilchen die Ruhemasse des Mutterteilchens berechnen, da gelten muss:

$$M_{\text{Mutterteilchen}}^2 = p_\mu p^\mu = (p_{\text{Teilchen1}} + p_{\text{Teilchen2}})^2$$

Versucht man jedoch auf diese Weise die Masse eines W -Bosons zu rekonstruieren trifft man auf Schwierigkeiten. Zerfällt ein W -Boson in ein geladenes Lepton und ein Neutrino, so kann man die Vierervektoren nicht einfach addieren, da der Viererimpuls des Neutrinos nicht direkt gemessen werden kann, sondern nur anhand von Impulserhaltung rekonstruiert werden kann. Allerdings kann der Impuls in z -Richtung nicht rekonstruiert werden, da die im Beschleuniger kollidierenden Teilchen unterschiedliche Geschwindigkeiten in z -Richtung haben können. Deshalb wird in diesem Fall die transversale Masse definiert. Für die Masse des W -Bosons im $\ell\nu$ -Kanal erhält man dann die folgende

2. Grundlagen

Formel:

$$M_W^T = \sqrt{2E_\ell^T E_\nu^T (1 - \cos \Delta\Phi_{\ell,\nu})}$$

Dieser Wert hat eine obere Grenze bei der exakten Masse des W -Bosons.

2.4. Top-Quark Physik

2.5. Vorhersage des Top-Quarks

Aus Experimenten mit Kaonen wurde deutlich, dass die CP -Symmetrie verletzt ist. Die Eigenzustände eines Kaons zur CP -Symmetrie können als Superpositionen von Kaon und Antikaon beschrieben werden. Beide Zustände zerfallen in Pionen, wobei die Masse des Kaons nur geringfügig größer ist als die Masse von drei Pionen. Nun haben zwei Pionen einen CP -Eigenwert von $+1$ während eine ungerade Anzahl von Pionen einen Wert von -1 hat. Daraus folgt, dass das Kaon mit $CP = 1$ schnell in zwei Pionen zerfällt, während das andere Kaon langsam in drei Pionen zerfällt. Im Experiment wurde nachgewiesen, dass selbst nach einer Zeit in der die kurzlebigen Kaonen zerfallen sein müssen, noch immer Kaonen in zwei Pionen zerfallen. Dies stellt eine Verletzung der CP -Symmetrie dar. Um diese CP -Brechung zu erklären muss eine komplexe Phase in die Elemente der CKM-Matrix eingeführt werden. Dies ist jedoch nur möglich wenn die Matrix mindestens eine Größe von 3×3 hat. Deswegen ist eine dritte Generation von Quarks notwendig.

2.6. Entdeckung und Eigenschaften

Quellen sind vor allem PDG Das Topquark wurde erstmals 1995 am Tevatron in den Detektoren DØ und CDF nachgewiesen. Mit einer Ruhemasse von $173.34 \pm 0.27(\text{stat.}) \pm 0.71(\text{sys.})$ GeV ist es das schwerste Elementarteilchen. Seine Zerfallsbreite ist 2.0 ± 0.5 GeV und seine Lebensdauer ist damit ca. $5 \cdot 10^{-25}$ s *Bessere Quelle als Wikipedia finden!!!*. Diese geringe Lebensdauer liegt deutlich unter der Zeit die das Top-Quark zur Hadronisation brauchen würde. Damit ist es das einzige Quark, das zerfällt bevor es Hadronisieren kann. Dies macht es besonders leicht die Masse des Top-Quarks zu bestimmen.

2.7. Produktion von Top-Quarks

Die Produktion von Top-Quarks am LEP am CERN wurde vorherrschend über Anihilation der Elektronen geschehen. Diese Anihilation kann über Photon oder Z -Boson stattfinden. Es ist in erster Ordnung nur möglich Top-Paare zu erzeugen, weswegen eine besonders hohe Schwerpunktsenergie notwendig war. Es waren ca. 340 GeV nötig gewesen während die Höchstleistung des LEP bei 209 GeV lag. Am TEVATRON wurden hauptsächlich Top-Paare durch Anihilation zweier leichter Quarks erzeugt. Aufgrund der geringen Energie (2 TeV) rühren der Großteil der Reaktionen von Quark-Quark-Interaktionen her. Wechselwirkungen zwischen Gluonen spielen eine untergeordnete Rolle. Die Produktion von einzelnen Top-Quarks kann nur über die schwache Wechselwirkung stattfinden. Dazu muss allerdings die Quark-Generation gewechselt werden, weswegen diese Reaktion unterdrückt ist. Am LHC werden Top-Quarks vor allem über Gluon-Gluon-Wechselwirkungen erzeugt.

2.8. Higgs-Boson Physik

3. Detektorphysik

3.1. Teilchen in Materie

3.1.1. Bethe-Bloch

3.1.2. Elektronen und Photonen

text

3.2. Gas-Detektoren

3.2.1. Geiger-Zähler

3.2.2. Driftkammer

3.2.3. Time-Projection-Chamber

text

3.3. Teilchen Identifikation

3.3.1. Energieverlust

3.3.2. Time of Flight

3.3.3. Cherenkov Strahlung

3.3.4. Übergangsstrahlung

text

3.4. Cherenkov Detektoren

text

3.5. Halbleiter Detektoren

3.5.1. Halbleiter

3.5.2. Strahlungsschnecken

3.5.3. Signalerzeugung

3.5.4. Silizium Detektor

text

3.6. Kalorimeter

3.6.1. Elektromagnetische Schauer

3.6.2. Hadronische Schauer

3.6.3. Sampling und homogene Kalorimeter

3.6.4. Energieauflösung

text

4. Werkzeuge

4.1. Werkzeuge

4.2. ROOT Data Analysis Framework

4.3. Grid-Computing

5. Ergebnisse

6. Diskussion

7. Zusammenfassung

A. Anhang

Literaturverzeichnis