



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
2.2.4. Partonen Verteilungen (PDF)	5
2.3. Jet-Physik	5
2.3.1. Hadronisation	5
2.3.2. Transversale Masse	6
2.4. Top-Quark Physik	6
2.5. Vorhersage des Top-Quarks	6
2.6. Entdeckung und Eigenschaften	7
2.7. Produktion von Top-Quarks	7
2.8. Higgs-Boson Physik	7
2.8.1. Der Higgs-Mechanismus	7
2.8.2. Entdeckung	8
3. Detektorphysik	9
3.1. Teilchen in Materie	9
3.1.1. Bethe-Bloch	9
3.1.2. Elektronen und Photonen	9
3.2. Gas-Detektoren	11
3.2.1. Geiger-Zähler	11
3.2.2. Driftkammer	11
3.2.3. Time-Projection-Chamber	11

3.3. Teilchen Identifikation	11
3.3.1. Energieverlust	11
3.3.2. Time of Flight	11
3.3.3. Cherenkov Strahlung	11
3.3.4. Übergangsstrahlung	11
3.4. Cherenkov Detektoren	11
3.5. Halbleiter Detektoren	11
3.5.1. Halbleiter	11
3.5.2. Strahlungsschäden	11
3.5.3. Signalerzeugung	11
3.5.4. Silizium Detektor	11
3.6. Kalorimeter	12
3.6.1. Elektromagnetische Schauer	12
3.6.2. Hadronische Schauer	12
3.6.3. Sampling und homogene Kalorimeter	12
3.6.4. Energieauflösung	12
4. Werkzeuge	13
4.1. Werkzeuge	13
4.2. ROOT Data Analysis Framework	13
4.3. Grid-Computing	13
5. Ergebnisse	15
6. Diskussion	17
7. Zusammenfassung	19
A. Anhang	21

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 verfügt 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 führende Form der QCD ist die Regge-Theorie, die Vorgänge 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 $\alpha(m^2)$ eingeführt, die den Drehimpuls in Abhängigkeit von der Energie darstellen. Die Energien an denen die Trajektorien ganzzahlige Werte annehmen entsprechen der Ruhemasse von Austauschpartikeln 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 Präsentation:*

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

Betrachtet man alle bisher experimentell beobachteten Austauschpartikeln für die Streuung, folgt dass der Wirkungsquerschnitt (WQS) mit steigender Schwerpunktsenergie \sqrt{s} sinken müsste. Allerdings wird beobachtet, dass der WQS steigt. Dafür führt die Regge-Theorie das sogenannte *Pomeron* ein. Die Trajektorie des Pomerons soll gerade den Zuwachs des WQS erklären. Dieses Austauschpartikel lässt sich auf den Austausch von Gluonen bzw. Glueballs zurückführen.

2.2.3. Die starke Kopplungskonstante α_s

So wie die elektromagnetische Wechselwirkung, wird auch die Stärke 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 führt zu dem Effekt, dass die Kopplungskonstante α_{em} bei steigenden Energien (d.h. geringerem Abstand zur Ladung) größer wird, weil weniger Abschirmung vorhanden ist. Dasselbe Phänomen gibt es bei der Farbladung. Jedoch wird die Abschirmung durch Quark-Antiquark-Paare von einer Verstärkung der Ladung durch Gluonen übertroffen. Aus diesem Effekt folgt die asymptotische Freiheit der Quarks, die besagt dass die Kraft zwischen Quarks bei steigender Energie abnimmt. Auch Hadronisation hängt mit dem Verhalten der starken Wechselwirkung bei unterschiedlichen Energien zusammen.

2.2.4. Partonen Verteilungen (PDF)

Bei der Untersuchung von Hadron-Kollisionen ist es für die theoretische Behandlung nötig die Partonendichte innerhalb der Hadronen zu kennen, da diese sich direkt auf die Wirkungsquerschnitte der aller Reaktionen auswirkt. Gerade der Impuls der einzelnen Partonen spielt eine wichtige Rolle. Analog zum Formfaktor beim WQS von elastischen Stößen, gibt es bei inelastischen Stößen die sogenannten Strukturfunktionen, aus denen sich der WQS berechnen lässt. Die Strukturfunktionen hängen gleichzeitig von den Matrixelementen der betrachteten Prozesse im Hadron ab. Betrachtet man Gluon-Bremsstrahlung und Paarbildung als Prozesse innerhalb des Hadrons, so lassen sich die Dokshitzer–Gribov–Lipatov–Altarelli–Parisi Gleichungen (DGLAP) aufstellen, die Integro-Differentialgleichungen für die Partonverteilung in Abhängigkeit von dem Impulsübertrag beim inelastischen Stoß und dem Impulsanteil des Partons am Hadron-Impuls darstellen. *Moonstersatz* PDFs finden hauptsächlich in Monte-Carlo-Simulationen Anwendung.

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. Grundlagen

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 die Vierevektoren 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 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 T EVATRON 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 L EP am C ERN würde vorherrschend über Anniihilation der Elektronen geschehen. Diese Anniihilation kann über Photon oder Z-Boson stattfinden. Es ist in erster Ordnung nur möglich Top-Paare zu erzeugen, weswegen eine besonders hohe Schwerpunktsenergie notwendig wäre. Es wären ca. 340 GeV nötig gewesen während die Höchstleistung des LEP bei 209 GeV lag. Am T EVATRON wurden hauptsächlich Top-Paare durch Anniihilation 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 allerings die Quark-Generation gewechselt werden, weswegen diese Reaktion unterdrückt ist. Am L HC werden Top-Quarks vor allem über Gluon-Gluon-Wechselwirkungen erzeugt.

2.8. Higgs-Boson Physik

2.8.1. Der Higgs-Mechanismus

Das Higgs-Boson ist das neuste Teilchen des Standardmodells. Es wurde 1964 von Peter Higgs *et al.* zusammen mit dem Higgs-Mechanismus postuliert. Der Higgs-Mechanismus erklärt die Masse der W^\pm - und Z^0 -Bosonen. Nach der allgemeinen Eichtheorie können Austauschbosonen keine Masse haben. Um dies zu erklären führten Higgs das Weak-Symmetry-Breaking ein, nachdem das Potential im Lagrangian über zwei Minima verfügt. Wenn man nun das Potential um eines der Minima entwickelt, so tauchen durch die Entwicklung neue Felder auf von denen eines das Higgs-Feld darstellt. Das andere Feld spielt wirkt sich nur als komplexe Phase aus und kann aufgrund der lokalen Eichinvarianz

2. Grundlagen

absorbiert werden. Die Existenz eines Higgs-Feldes suggeriert die Existenz eines massiven neutralen skalaren Bosons, welches Higgs-Boson genannt wird. Über die sogenannte Yukawa-Kopplung koppelt das Higgs-Boson auch an Fermionen, und erzeugt auch deren Masse.

2.8.2. Entdeckung

Im Jahr 2012 wurde am LHC in Genf ein neutrales Skalarboson mit einer Masse von $125.36 \pm 0.37(\text{stat.}) \pm 0.18(\text{syst.})$ GeV entdeckt. Damit stimmt es in seinen Eigenschaften mit dem gesuchten Higgs-Boson überein. Es wurde zunächst über die Zerfallskanäle $H \rightarrow 4\ell$, $H \rightarrow \gamma\gamma$, $H \rightarrow e\nu\mu\nu$ und Zerfallskanäle zu ZZ^* , WW^* , $\tau^+\tau^-$ und $b\bar{b}$ gemessen.

3. Detektorphysik

3.1. Teilchen in Materie

3.1.1. Bethe-Bloch

Geladene Teilchen die sich durch Materie bewegen verlieren durch Interaktionen mit den Atomen an Energie. Diese Interaktionen umfassen Bremsstrahlung bei hohen Energien, Ionisation bei mittleren Energien und Anregung von Atomen bei geringen Energien. Der Energieverlust in Abhängigkeit von der Energie des Teilchens ist in Abb. 3.1 dargestellt. *Rpp2012-rev-passage-particles-matter* Für schwere geladene Teilchen, wie z.B. das Muon wird der Energieverlust durch Ionisation durch die Bethe-Bloch Formel beschrieben.

$$-\left\langle \frac{dE}{dx} \right\rangle = K \cdot \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \cdot \left[\frac{1}{2} \ln \left(\frac{2m_e c^2 \cdot \beta^2 \cdot \gamma^2 \cdot T_{max}}{I^2} \right) - \beta^2 - \frac{\delta(\beta\gamma)}{2} \right]$$

Diese Formel hängt lediglich von der Ladung z und der relativistischen Geschwindigkeit β des Teilchens und dem Material K ab. Sie hängt explizit nicht von der Masse des Teilchens ab. Sie gibt den mittleren Energieverlust pro Strecke an. Um diesen Mittelwert ist der Energieverlust nach der Landau-Verteilung verteilt.

3.1.2. Elektronen und Photonen

Photonen und Elektronen verlieren ihre Energie in Materie hauptsächlich durch Bremsstrahlung (Elektronen), und Paarerzeugung (Photonen). Weil ein Elektron durch Bremsstrahlung Photonen aussendet und ein Photon durch Paarerzeugung Elektronen erzeugt sind beide Vorgänge eng miteinander verbunden. Eine Materialkonstante, die eine wichtige Rolle spielt ist die Strahlungslänge X_0 . Sie entspricht der Länge nachdem ein Elektron in Materie alles bis auf $1/e$ seiner Energie abgegeben hat. Gleichzeitig ist es $7/9$ der mittleren freien Weglänge eines Photons in diesem Material. Die aufeinander folgende Bremsstrahlung und Paarerzeugung von Photonen und Elektronen führt zu einer Teilchenkaskade, wie schematisch in Abb. ?? dargestellt.

3. Detektorphysik

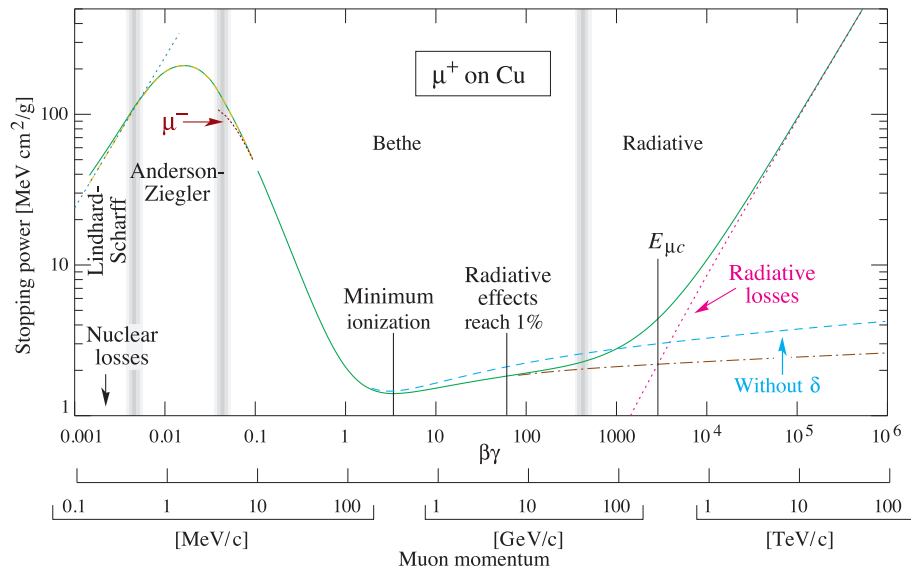


Abb. 3.1.: Energieverlust pro Strecke (Stopping power) aufgetragen gegen den Impuls eines Muons. Der Verlust durch Ionisation findet in einem Bereich von 10 MeV und 100 GeV statt[?].

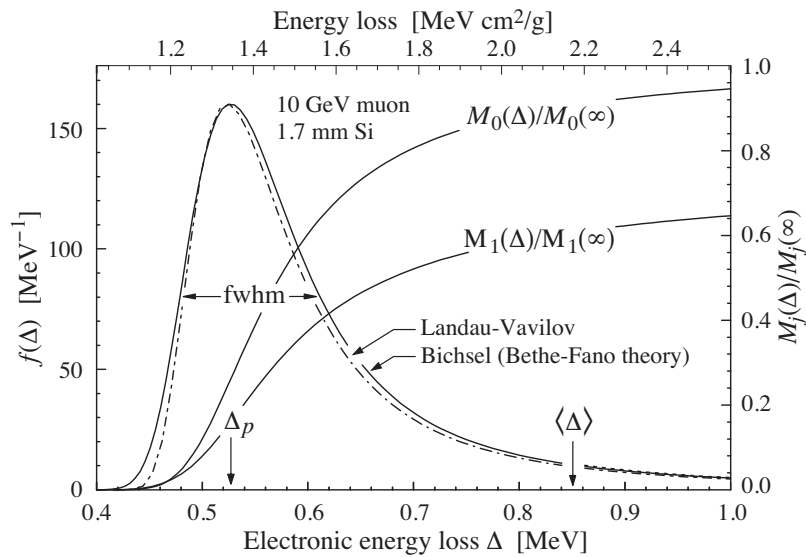


Abb. 3.2.: Landau-Verteilung des nach Bethe-Bloch berechneten Energieverlusts.[?]

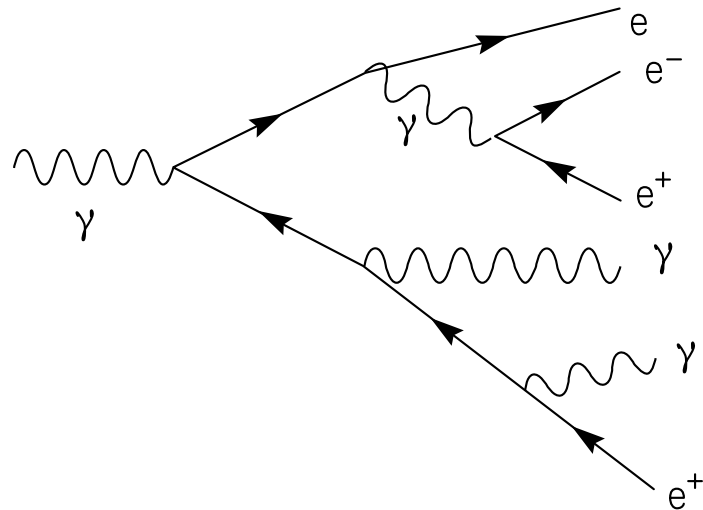


Abb. 3.3.: Schematische Darstellung einer Elektromagnetischen Kaskade auch Schauer genannt[?]. *Wikipedia*

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. Strahlungsschäden

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