

Titel der Arbeit

BACHELORARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades  
Bachelor of Science  
(B. Sc.)  
im Fach Physik



eingereicht an der  
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät  
Institut für Physik  
Humboldt-Universität zu Berlin

von  
Herrn Jan-Lukas Krieg  
geboren am 09.01.1995 in Berlin

Betreuung:

1. *Prof. Dr. Thomas Lohse*
2. *Priv.-Doz. Dr. K. Hennig*

eingereicht am:     *10. Februar 1999*

# Widmung

Hier folgt dann eine Widmung.

# Contents

<b>1</b>	<b>gamma-Astronomie</b>	<b>2</b>
1.1	Entstehung hochenergetischer Strahlung . . . . .	2
1.2	Quellen hochenergetischer Strahlung . . . . .	3
1.3	Detektion von Strahlung . . . . .	3
1.3.1	Luftschauer . . . . .	3
1.3.2	Cherenkov Strahlung . . . . .	3
1.3.3	Bodengestützten Detektion der Cherenkovstrahlung . . . . .	4
<b>2</b>	<b>Das Cherenkov Telescope Array</b>	<b>5</b>
2.1	Design-Konzept . . . . .	5
2.2	Prototyp in Adlershof . . . . .	5
2.2.1	Kameras des MST . . . . .	5
2.2.2	Koordinatens des MST . . . . .	6
<b>3</b>	<b>Bildanalyse</b>	<b>7</b>
3.1	CCD Kameras . . . . .	7
3.2	Verwendete Kamera . . . . .	7
3.3	Helligkeit der Bilder . . . . .	7
3.4	Korrelation der Werte . . . . .	8
3.4.1	Abhängigkeit von der Belichtungszeit . . . . .	8
3.4.2	Abhängigkeit vom gain . . . . .	8
3.5	Fazit . . . . .	8
<b>4</b>	<b>Pointingmodell</b>	<b>9</b>
4.1	Koordinatens des MST . . . . .	9
4.2	Kameras des MST . . . . .	9
4.3	Entwicklung von Pointingmodellen . . . . .	9
4.4	Vereinfachtes Pointingmodell für feste Azimutwerte . . . . .	9

# List of Figures

# List of Tables

# Chapter 1

## gamma-Astronomie

Die Astronomie ist die Wissenschaft des Universums und beschreibt die Bewegung und Eigenschaften von Himmelskörpern wie Planeten oder Galaxien, interstellarer Materie und Strahlung. Betrachtete man früher nur Licht im optisch sichtbaren Bereich, so sind im 20. Jahrhundert einige zusätzliche Quellen dazugekommen. Dazu zählen die von Viktor HESS durch Ballonversuche entdeckte kosmische Strahlung, die Röntgen-/bzw die Gammastrahlung sowie die Neutrinoastronomie. Die Gammaastronomie beschäftigt sich mit Photonen im Bereich von bis . Photonen haben den Vorteil, dass sie nicht wie geladene Teilchen durch elektromagnetische Felder abgelenkt werden und somit ihre Quelle leichter detektiert werden kann. Zudem sind sie auch noch deutlich leichter zu detektieren als Neutrinos. Da die Energie dieser Photonen so hoch ist, können sie nicht thermischen Ursprungs sein sondern kommen aus anderen Quellen, deren Untersuchung das Ziel der Hochenergie-Gamma-Astronomie ist.

### 1.1 Entstehung hochenergetischer Strahlung

#### **inverser Comptoneffekt**

Durch den Comptoneffekt können hochenergetische Photonen einen Teil ihres Impulses und Energie an ein freies Elektron übergeben. Dieser Prozess kann auch invers ablaufen und somit kann ein niederenergetisches Photon, zum Beispiel aus dem kosmischen Mikrowellenhintergrund (E), durch einen Stoß mit einem Elektron eine hohe Energie bekommen.

#### **Zerfall von schweren Teilchen**

Zerfallen schwere Teilchen in Photonen, so wird die Ruheenergie dieses Teilchens in kinetische Energie der Photonen umgewandelt. Ein Beispiel hierfür ist der Zerfall des neutralen Pions, die häufig bei der Kollision von Atomkernen entstehen. Das Pion hat eine Ruhemasse von  $135\text{ MeV}$  und zerfällt fast ausschließlich in zwei Photonen, die dann eine Energie von ungefähr  $68\text{ MeV}$  haben.

#### **Materie-Antimaterie-Annihilation**

Bei der Kollision von Materie mit Antimaterie vernichten sich die beiden Teilchen und es entstehen neue. Dies können Photonen sein oder Teilchen, die wiederum in Photonen zerfallen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist die Elektron-Positron-Annihilation. Besitzen die beiden Teilchen keine kinetische Energie, so zerfallen sie in zwei Photonen mit der Energie  $E=511\text{ keV}$ .

#### **Bremstrahlung**

Durchfliegen hochenergetische Teilchen Materie, so kann es vorkommen, dass diese eng an den Atomen vorbeifliegen und abgelenkt werden. Durch diese Ablenkung werden Photonen abgestrahlt.

## unbekannte Effekte

Hochenergetische Photonen koennen auch nach Prinzipien erzeugt werden, die man heute noch nicht versteht. So koennte es moeglich sein, dass hochenergetische Photonen durch den Zerfall von Partikeln der dunklen Materie stammen. Die Supersymmetrie sagt zum Beispiel den Zerfall von schweren WIMPS in Photonen voraus. Durch Detektion solcher Ereignisse liesse sich auf neue Physik schliessen.

## 1.2 Quellen hochenergetischer Strahlung

Ziel VHE-Astronomie ist es die Quellen hochenergetischer Gammastrahlung zu erforschen. Folgende Quellen sind bekannt:

### Pulsare

Kollabieren die Äeberreste einer Supernova von einem Durchmesser von ca  $10^6 km$  auf ca  $20 km$  entsteht ein Neutronenstern, der sich aufgrund der Drehimpulserhaltung sehr schnell dreht. Solche Konstrukte nennt man Pulsare. Durch die schnelle Rotation entstehen starke elektromagnetische Felder, die geladene Partikel beschleunigen k̈¶nnen. Pulsare strahlen ungef̈¶hr  $10^{42} eV/s$  ab.

### Bin̈¶re Systeme

Befindet sich ein Neutronenstern oder Pulsar in einem System mit einem normalen Stern, entsteht durch absaugen von Materie eine Akkretitionsscheibe um den Neutronenstern beziehungsweise um den Pulsar. Da die Materie in diesem System durch Gravitation beschleunigt wird, werden Energien der Gr̈¶¶enordnung  $10^{19} eV$  erzeugt.

### Gamma Ray Bursts

Gamma Ray Bursts sind Strahlungsausbr̈¶che die zwischen Bruchteilen von Sekunden bis zu ca 30 Sekunden dauern k̈¶nnen. Die Quelle dieser Bursts ist nicht bekannt, man vermutet jedoch die Kollisionen zweier Neutronensternen bzw die Kollisionen eines Neutronensterns mit einem schwarzen Loch.

## 1.3 Detektion von Strahlung

Prinzipiell laesst sich zwischen bodengestuetzter und satellitengestuetzter Gammaastronomie unterscheiden. Durch den Einsatz von Satelliten vermeidet man den stoerenden Einfluss der Erdatmosphaere, muss dafuer Abstriche in der Groesse der Detektoren machen und mit hohen Kosten kalkulieren. Hier soll sich nur mit der bodengestuetzten Variante beschaeftigt werden.

### 1.3.1 Luftschauer

Treten hochenergetische Photonen in die Materie ein, so wechselwirken sie mit dieser ueber Paarbildung. Das entstehende Elektron bzw Positron verliert daraufhin Energie durch Bremsstrahlung, worauf die entstehenden Photonen wieder durch Paarbildung wechselwirken koennen. Somit steigt die Anzahl der Teilchen exponentiell an und die durchschnittliche Energie nimmt exponentiell ab, bis die Teilchen ionisierend sind und der Schauer verschwindet. Die entstehenden Teilchen lassen sich nicht direkt nachweisen, da der Schauer bereits in einer Hoehe von ca 10km verschwindet.

### 1.3.2 Cherenkov Strahlung

Cherenkov Strahlung tritt auf, wenn geladene Teilchen in Materie schneller als Photonen bewegen und lässt sich analog zum Überschallknall erklären. Das geladene Teilchen polarisiert auf seiner Trajektorie die einzelnen Atome, die somit Licht sphärisch abstrahlen. Da sich das Teilchen allerdings schneller als das Licht bewegt, entsteht ein Kegel konstruktiver Interferenz. Somit entsteht ein Lichtblitz, der sich kegelförmig mit dem Öffnungswinkel  $\theta = \arccos\left(\frac{1}{\beta n}\right)$  ausbreitet.

### 1.3.3 Bodengestützte Detektion der Cherenkovstrahlung

Da aufgrund der Atmosphäre weder das primäre Photon noch die Teilchen des Luftschauers detektiert werden können, versucht man die Cherenkovstrahlung, die durch den Luftschauer entsteht zu detektieren. Dazu muss eine grosse Fläche abgedeckt werden, da selbst bei vertikaler Einstrahlung der Schauer einen Durchmesser von ca 250m haben kann



# Chapter 2

## Das Cherenkov Telescope Array

Mit dem Bau des Cherenkov Telescope Arrays (CTA) werden verschiedene Ziele verfolgt:

- Verbesserung des Sensitivitätslevels um eine Größenordnung auf 1TeV
- Erhöhung der Detektionsfläche/Photonenrate->Zugang zu kurzzeitigen Ereignissen
- Erhöhung der Winkelauflösung/des Sichtfeldes
- Energieabdeckung von 20GeV bis 300TeV
- Verbesserung der Vermessungsfähigkeit, Überwachungsfähigkeit und Flexibilität->gleichzeitige Beobachtung von Objekten in verschiedenen Feldern
- Datenproduktion und Tools auf für nicht Experten
- Abdeckung des gesamten Himmels (nord+süd)

### 2.1 Design-Konzept

Um sowohl die südliche als auch die nördliche Hemisphäre abzudecken, wird das CTA in der Atacamawüste in Chile und auf der zu Spanien gehörenden Insel La Palma errichtet.

### 2.2 Prototyp in Adlershof

In Adlershof wurde 2012 vom DESY ein Prototyp des MSTs errichtet um den mechanischen Aufbau zu testen, Pointingmodelle zu entwickeln und um die einzelnen Spiegel zu testen und auszurichten.

#### 2.2.1 Kameras des MST

Der Prototyp des MST besitzt drei Kameras in der Mitte des Reflektors. Die Sky-CCD,  $f\lambda_{\frac{1}{4}}$  die im hier folgenden ein Pointingmodell entwickelt wird, ist schräg montiert, sodass sie am Detektorarm vorbei guckt um Bilder des Nachthimmels aufzunehmen. Aus diesen Bildern lassen sich mithilfe der Astrometry-Software die Koordinaten der Kamera bestimmen, die als die wahren Koordinaten angenommen werden.

### 2.2.2 Koordinatensystem des MST

Als geeignetes Koordinatensystem für den Betrieb eines Teleskops erweist sich ein mit zwei Winkeln zu beschreibendes System, das den Kugelkoordinaten ähnelt. Der Azimutwinkel behält seinen Namen und zeigt in der Regel bei  $0^\circ$  in Richtung Norden. Der Polarwinkel behält ebenfalls seine Bedeutung und wird Elevation genannt.

# Chapter 3

## Bildanalyse

Zu Beginn war der MST Prototyp in Adlershof noch nicht mit einem Cherenkovdetektor ausgestattet, sondern nur mit einfachen CCDs. Mit diesen wurde die Helligkeit des Nachthimmels beobachtet.

### 3.1 CCD Kameras

### 3.2 Verwendete Kamera

Das MST ist mit verschiedenen Kameras ausgestattet, wobei nur Bilder der sogenannten Sky-CCD verwendet wurden. Die Sky-CCD ist eine Kamera des Typs Prosilica GC 1350 mit folgenden technischen Daten.

Die Bilder wurden mit drei verschiedenen Belichtungszeiten (1s, 10s und 20s) und vier verschiedenen gain-Verstärkungsstufen (0dB, 7dB, 14dB und 21dB) aufgenommen. Die Bilder wurden in Schwarz-Weiß mit einer Farbtiefe von 8Bit aufgenommen, das heißt jedem Pixel wird ein Wert von 0 bis 255 zugewiesen, wobei der Wert 255 der maximalen Helligkeit entspricht.

### 3.3 Helligkeit der Bilder

Um die Helligkeit der Bilder zu bestimmen wurde auf das arithmetische Mittel verzichtet, da dieses durch den Einfluss heißer Pixel in Richtung zu hoher Helligkeit verschoben wird. Heiße Pixel sind Pixel, die nicht ordnungsgemäß funktionieren und nicht proportional auf das einfallende Licht reagieren, sondern schneller hell werden. Gerade bei längeren Belichtungszeiten kommt es so vor, dass diese Pixel auch bei eher dunklen Bildern des Nachthimmels den maximalen Helligkeitswert annehmen. Um diesen Effekt zu minimieren, wurde jeweils der Median der Verteilung berechnet. Da die Helligkeit der Pixel der Digitalkamera nur ganzzahlige Werte annehmen kann, aber gerade im dunklen Bereich eine präzisere Helligkeit erreicht werden soll, wurde die Verteilung innerhalb eines Bins als kontinuierlich. Zudem wurde noch die Breite der Verteilung berechnet. Dazu wurde der Bereich einer Standardabweichung also 37, % links und rechts des zuvor berechneten Medians gewählt.

Zur Analyse des Zusammenhangs der Belichtungszeit bzw des gains auf die Helligkeit der Bilder wurde der Datensatz "run 199" verwendet, der am von bis aufgenommen wurde. Für jedes einzelne Bild wurde die Belichtungszeit und der gain sowie wie oben beschrieben der Median der Helligkeitsverteilung sowie deren Breite bestimmt

## 3.4 Korrelation der Werte

Im folgenden soll untersucht werden, wie sich Helligkeit und Breite in Abhängigkeit der Belichtungszeit und des gains verhalten.

### 3.4.1 Abhängigkeit von der Belichtungszeit

Eine längere Belichtungszeit bedeutet, dass die Blende der Kamera länger geöffnet bleibt. Daraus folgt die Erwartung, dass die Anzahl der detektierten Photonen proportional steigt und somit auch der Median der Helligkeitsverteilungen.

### 3.4.2 Abhängigkeit vom gain

## 3.5 Fazit

# Chapter 4

## Pointingmodell

Das Pointing von Teleskopen beschäftigt sich damit, dass das Teleskop so ausgerichtet wird, wie es erwünscht ist. Häufig ist das Problem, dass die eingestellte Position nicht exakt mit der gewünschten Position übereinstimmt. Gründe dafür können Fehler in der Präzision oder auch die Elastizität einzelner Bauteile sein. Da man die aufgenommenen Daten mit den bekannten Positionen am Himmel vergleichen kann, kann man versuchen ein Modell zu finden, welches die Fehler verkleinert oder im Idealfall sogar eliminiert.

### 4.1 Koordinatensystem des MST

Als geeignetes Koordinatensystem für den Betrieb eines Teleskops erweist sich ein mit zwei Winkeln zu beschreibendes System, das den Kugelkoordinaten ähnelt. Der Azimutwinkel behält seinen Namen und zeigt in der Regel bei  $0^\circ$  in Richtung Norden. Der Polarwinkel behält ebenfalls seine Bedeutung und wird Elevation genannt.

### 4.2 Kameras des MST

Der Prototyp des MST besitzt drei Kameras in der Mitte des Reflektors. Die Sky-CCD, für die im hier folgenden ein Pointingmodell entwickelt wird, ist schräg montiert, sodass sie am Detektorarm vorbei guckt um Bilder des Nachthimmels aufzunehmen. Aus diesen Bildern lassen sich mithilfe der Astrometry-Software die Koordinaten der Kamera bestimmen, die als die wahren Koordinaten angenommen werden.

### 4.3 Entwicklung von Pointingmodellen

Da man aus den gewünschten Koordinaten der CCD die Koordinaten des Drives bestimmen lässt, drückt man sie als Funktion voneinander aus.  $az_D = f_{az}(az_C, el_C)$   $el_D = f_{el}(az_C, el_C)$  Diese Funktionen werden so optimiert, dass die Gleichung möglichst gut erfüllt wird.

### 4.4 Vereinfachtes Pointingmodell für feste Azimutwerte

Zunächst wurde ein Datensatz (run281), bei dem die vier feste Elevationswerte am Drive eingestellt wurden, verwendet. In diesem Modell wird die Position der Kamera durch zwei Drehungen beschrieben (eine um die x-Achse und eine um die z-Achse). Somit lässt sich die Position des Drives bzw der Kamera durch die Richtungsvektoren beschreiben. Da sich diese Vektoren durch Transformationen die unabhängig von  $el$  und  $az$  sind ineinander überführen

lassen, kann das Modell auch entwickelt werden, indem die Drive und CCD Koordinaten in 4.3 untereinander tauscht. Das hat zum Vorteil, dass man die Funktionen nur  $f_{\tilde{A}_4^1}$  eine Variable fitten muss.

Die Richtungsvektoren lassen sich durch zwei weitere Drehungen um den Elevationswinkel und den Azimutwinkel in Position bringen. Aus den resultierenden Vektoren lassen sich wiederum die wahren Azimut- und Elevationswerte bestimmen.  $az = \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \text{ el} = \arcsin(z)$  wobei  $x, y$  und  $z$  den einzelnen Koordinaten der Vektoren entsprechen. Somit ergeben sich  $f_{\tilde{A}_4^1}$  dieses Modell folgende Funktionen. Hier  $m_{\tilde{A}_4^1}$ ssen noch die beiden Winkel durch Fits am Datensatz bestimmt werden. Die Fits wurden jeweils  $f_{\tilde{A}_4^1}$  die vier Azimutwerte und die beiden Pointingfunktionen unabhängig durchgeführt, sodass sich  $f_{\tilde{A}_4^1}$  jeden Fit neue Parameter ergeben. Zusätzlich wurden konstante Fehlerbalken berechnet, die die Bedingung  $\frac{\chi^2}{\text{dof}}$  erfüllen. Diese ergeben sich durch.

# Selbständigkeitserklärung

Text der Selbständigkeitserklärung.