2.2 Hochenergieastrophysik

2.2.1 Das CRT-Projekt

K. Bernlöhr, S. Gamp, C. Harries, W. Hofmann, T. Kihm, G. Leffers, V. Matheis, M. Panter, U. Trunk, T. Wolf, R. Zink

In the Cosmic Ray Tracking (CRT) project, drift chambers have been developed as tracking detectors for secondary particles in cosmic-ray initiated air showers. Ten CRT detectors are now operated at the HEGRA experiment on La Palma, Canary Islands (Spain), at an altitude of 2200 m. For a large part of the time since October, 1993, these detectors have been taking data together with the HEGRA array. During the rest of the time, most of the CRT detectors were operated as a stand-alone mini-array with its own air-shower trigger. The long-term experience with the CRT detectors shows that they work very well even at mountain-altitude conditions. The detector performance meets or even exceeds initial goals. Data from CRT have been used to search for very-high-energy γ-rays from gamma-ray bursts (GRB). The composition of the charged cosmic rays is examined with data from CRT and the HEGRA array.

2.2.1.1 Einleitung

Das Spektrum der kosmischen Teilchenstrahlung fällt mit zunehmender Energie so stark ab, daß bei Energien oberhalb einiger 100 GeV die Nachweisflächen von Ballon- oder Satellitenexperimenten nicht mehr ausreichen. Stattdessen wird die Atmosphäre als Targetmedium benutzt und Sekundärteilchen oder Tscherenkowlicht der Teilchenkaskaden (*Luftschauer*) nachgewiesen. Bei Experimenten, die Sekundärteilchen am Boden messen, wird meist die Ankunftsrichtung des Primärteilchens aus den Ankunftszeiten von Sekundärteilchen bestimmt. Das Cosmic-Ray-Tracking-Projekt nutzt dagegen die Tatsache, daß die Richtung der Sekundärteilchen am Boden meist nur wenige Grad von der der Primärteilchen oberhalb der Atmosphäre abweicht. Die Primärteilchenrichtung kann daher mit weit weniger Sekundärteilchen rekonstruiert werden, als dies bei der klassischen Szintillatormatrix-Methode der Fall ist [1, 2, 3].

Als Spurdetektoren für CRT werden Driftkammern verwendet, die mit wenigen Auslesekanälen eine große Detektorfläche erreichen können. Zum besseren Nachweis von Quellen hochenergetischer γ-Strahlung sollte der Untergrund aus geladenen Teilchen (Protonen und Atomkernen) unterdrückt werden. Die CRT-Detektoren (siehe Abb. 1) sind daher so ausgelegt, daß sie zwischen Myonen, die in γ-induzierten Luftschauern nur in sehr geringer Zahl auftreten, und anderen Sekundärteilchensorten unterscheiden können. Der eigentliche Detektor, bestehend aus den zwei Driftkammern von 1.8 m Durchmesser und der Eisenplatte befindet sich in einem gasdichten Behälter, der mit einem Argon-Methan-Gemisch gefüllt ist.

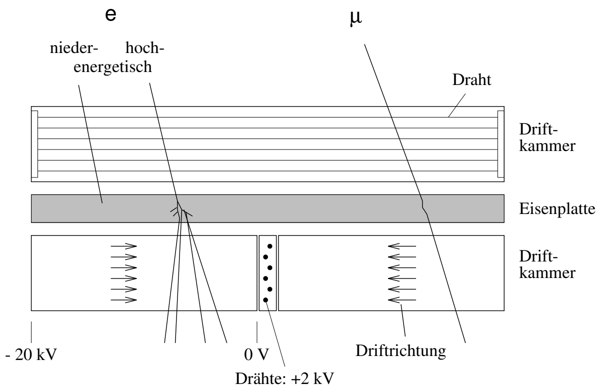

Abbildung 1: *CRT-Detektoren bestehen aus zwei runden Driftkammern von 1.8 m Durchmesser und einer 10 cm dicken Eisenplatte. Obere und untere Kammer sind zur besseren Kalibration der Driftgeschwindigkeit um 90° gedreht. Elektronen werden in der Eisenplatte in der Regel absorbiert. Auch die selteneren hochenergetischen Elektronen, die in der Platte aufschauern, können erkannt werden. Myonen durchqueren die Platte dagegen mit kleinem Streuwinkel.*

Das am MPI entwickelte Elektroniksystem für die CRT-Detektoren besteht aus ladungsempfindlichen Vorverstärkern direkt an den Driftkammern im Detektorbehälter sowie Pulsformern, FADC-System, Monitorkarte, Triggerkarte und Event-Grader-Empfänger, die sich zusammen mit einem lokalen Motorola-68040-Rechner in einem VME-Überrahmen in einem separaten Elektronikschrank befinden. Für die Zentralstation des kleinen CRT-Arrays auf La Palma kommt noch das Event-Grader-Sendermodul zum Verteilen gemeinsamer Trigger samt Ereignisnummer und ein Modul zum Lesen der Daten einer Rubidium-Uhr hinzu.

2.2.1.2 Stand des Projekts

Nachdem in den vergangenen Jahren die CRT-Detektoren und die gesamte Elektronik zur Einsatzreife entwickelt wurden, waren 1993 acht CRT-Detektoren beim HEGRA-Experiment auf La Palma [4] in einer Höhe von 2200 m in Betrieb genommen worden. Zwei weitere Detektoren wurden im April zur Anlage auf La Palma hinzugefügt. Diese beiden Detektoren waren zuvor zu Tests von Einzel- und koinzidenten Triggerraten im Zuge einer Diplomarbeit [5] in Heidelberg eingesetzt worden. Auch das CRT-Mini-Array auf La Palma wurde zu Tests von koinzidenten Triggerraten herangezogen. Der Schwerpunkt des Projekts hat sich weitgehend auf Messungen mit diesen zehn Detektoren auf La Palma verlagert. Die CRT-Detektoren einschließlich der am MPI entwickelten Elektronik haben sich im Dauereinsatz als sehr zuverlässig erwiesen.

Nach der Emeritierung von Prof. Heintze hatte sich das Physikalische Institut der Universität Heidelberg allmählich aus dem Projekt zurückgezogen und die von seinen Mitarbeitern gebauten CRT-Detektoren an das MPI abgegeben. Die noch im ursprünglichen Design mit sphärischen Detektorbehältern aus Aluminium gebauten fünf Detektoren wurden 1994 am MPI teilweise auf die neue CRT-Ausleseelektronik umgebaut.

Die Detektoren mit gedrückten Aluminiumbehältern haben offenbar Nachteile in Hinsicht auf die Qualität des Zählgases, das nach bisheriger Erfahrung bei den Edelstahlbehältern nur etwa einmal pro Jahr ausgetauscht werden muß. Bei den Aluminiumbehältern sind Austausch- oder Reinigungszyklen für das Gas etwa alle 1–2 Monate erforderlich (siehe auch [6]). Ob dies auf Ölrückstände durch den Herstellungsprozess oder Dichtigkeitsprobleme zurückzuführen ist, konnte noch nicht geklärt werden.

Auf La Palma wurde die im Oktober 1993 begonnene gemeinsame Datennahme mit dem HEGRA-Array fortgesetzt, und zwar mit zwei Detektoren nahezu das ganze Jahr über. Mit den anderen Detektoren wurden etwa neun Monate lang Messungen ohne HEGRA durchgeführt zur Suche nach hochenergetischen Photonen von Gamma-Ray-Bursts und nach einer Abschattung der kosmischen Teilchenstrahlung durch Sonne und Mond.

Die Messungen gemeinsam mit HEGRA haben nicht nur zur Bestimmung der mit CRT-Detektoren erreichbaren Auflösung gedient, sondern versprechen auch wichtige Beiträge zur mittleren Zusammensetzung der ultrahochenergetischen Teilchenstrahlung zu liefern. Das Studium der Zusammensetzung könnte auch das wesentliche Ziel einer mittelfristigen Fortführung des CRT-Projekts auf dem gegenwärtigen Stand werden. Zum Verständnis der Beschleunigungsmechanismen der kosmischen Teilchenstrahlung sind insbesondere Änderungen in der Zusammensetzung bei Energien nahe dem sogenannten *Knie* im Spektrum (rund 10^{15} eV) sehr interessant.

Im Hinblick auf eine mögliche Option zum Bau einer größeren CRT-Anlage an einem hochgelegenen Standort wird weiterhin mit der Universität und dem Astronomischen Forschungszentrum (CIDA) in Merida, Venezuela, zusammengearbeitet. Bei Merida ist ein Standort in 3700 m Höhe bei mildem Klima und guter Infrastruktur vorhanden. Ein derart hochgelegener Ort ist vor allem zum Erreichen einer niedrigen Energieschwelle für die Suche nach Gammaquellen sehr wichtig.

2.2.1.3 Messungen in Heidelberg

Mit einem Aufbau aus einem großen CRT-Detektor und einem kleineren Prototypen waren 1993 Messungen zur Untersuchung möglicher Driftfeldverzerrungen in den CRT-Driftkammern gemacht worden. Die Auswertung dieser Daten ergab in der Tat kleine Verzerrungen, die anhand der internen Kalibration einzelner Detektoren mit Myonspuren kaum feststellbar sind. Die Verzerrungen, die zu einem systematischen Fehler in der Spursteigung bis zu 3% entsprechend einem Winkelfehler von 0.5° bei 20° Zenitwinkel führen, können nach einmaliger Kalibration aber in der Auswertung leicht berücksichtigt werden.

Die Messung von Triggerraten aus den Drahtsignalen einzelner CRT-Detektoren [5] hatte höhere Raten ergeben, als anfangs nach Angaben der Particle Data Group [7] erwartet. So werden z.B. in Heidelberg in der oberen Driftkammer Raten von etwa 850 Hz erreicht, wobei in den Daten dann auch meist eine Teilchenspur gefunden wird, während etwa 440 Hz erwartet wurden.

Genauere Untersuchungen zeigten, daß die CRT-Detektoren einen größeren Teil der niederenergetischen Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung nachweisen, als in den Messungen mit Geigerzählern aus den 1940er Jahren, die den Angaben in [7] zugrunde liegen.

Durch Rauschen oder Detektoreffekte bedingte Trigger spielen demgegenüber keine Rolle. Die um rund 36% höheren Raten auf 2200 m Höhe auf La Palma im Vergleich zu Heidelberg (300 m Höhe) ergeben sich aus der geringeren Abschwächung in der Atmosphäre.

Zur Verbesserung der Rekonstruktion von Ereignissen mit einer großen Spurzahl wurde, basierend auf den Detektoren des Physikalischen Instituts, ein Detektor mit stromempfindlichen Vorverstärkern aufgebaut. Dieser wurde ebenso wie ein weiter, mit ladungsempfindlichen Vorverstärkern ausgestatteter Detektor mit mehreren Szintillationszählern vornehmlich auf Ereignisse mit großer Spurzahl getriggert. Die Vor- und Nachteile beider Varianten in Bezug auf Detektorauflösung und Sättigung bei großer Zahl registrierter Teilchen werden damit untersucht.

Die bisher verwendeten, ladungsintegrierenden Vorverstärker gehen nach etwa 20 oder mehr Hits pro Draht und Ereignis in Sättigung, während dies bei den stromempfindlichen Vorverstärkern nicht auftritt. Falls man ein Array nur aus CRT-Detektoren aufbaut, kann die Ortsbestimmung des Schauerzentrums verbessert werden, wenn derartige Sättigungseffekte vermieden werden.

Die mit den stromempfindlichen Vorverstärkern erreichte Auflösung ist geringfügig schlechter als mit den ladungsempfindlichen. In Drahtrichtung, wo das Rauschen für die Ortsbestimmung aus Ladungsteilung und dem Schwerpunkt der auf Kathodenstreifen induzierten Ladung entscheidend ist, sind die ladungsempfindlichen Vorverstärker bei nur wenigen Spuren merklich (10–15%) besser, die stromempfindlichen dagegen bei vielen Spuren.

2.2.1.4 Datennahme mit CRT-Detektoren auf La Palma

Auf La Palma sind zehn CRT-Detektoren beim HEGRA-Experiment in Betrieb. Acht davon sind nahe der Mitte der Szintillator-Anlage; zwei weitere befinden sich außerhalb der Anlage, in 120 und 190 m Abstand von der Mitte. Letztere dienen zur Messung von Myonen bei großem Abstand vom Schauerzentrum, mit Schwerpunkt auf der Untersuchung der mittleren chemischen Zusammensetzung der geladenen kosmischen Strahlung ab etwa 70 TeV Primärenergie.

Während die Detektoren außerhalb der HEGRA-Anlage fast ausschließlich mit Triggern vom HEGRA-Array Daten nahmen, wurden die sechs bzw. acht Detektoren innerhalb über etwa neun Monate als autarkes Mini-Array betrieben. Damit wird eine niedrigere Energieschwelle als mit dem HEGRA-Array erreicht, wenn auch mit einer kleineren effektiven Fläche, innerhalb der Schauer nachgewiesen werden. Diese Messungen ohne HEGRA dienten der Suche nach hochenergetischen Schauern aus der Richtung von Gamma-Ray-Bursts und nach einer Abschattung der isotropen geladenen kosmischen Strahlung durch Sonne und Mond.

Das ganze Jahr über wurde die Datennahme fast ausschließlich über Internet von Heidelberg aus gesteuert. Die gesamte Datennahmeprozedur ist aus diesem Grunde weitgehend automatisiert. Der Wechsel von Magnetbandkasetten wurde meist vom HEGRA-Personal auf La Palma vorgenommen. Insgesamt wurden etwa 170 Gigabyte CRT-Daten aufgezeichnet.

In der ersten Jahreshälfte hatten an drei Detektoren fehlerhafte Lötstellen nachgelötet werden müssen, die sich aufgrund der großen Tag-Nacht-Temperaturschwankungen gelöst hatten. Durch eine geringfügige Änderung in der Befestigung dieser Kabel sollten solche Fehler bei neu gebauten bzw. reparierten Driftkammern nicht mehr auftreten. Ansonsten waren keine nennenswerten Ausfälle zu verzeichnen; Detektoren und Elektronik arbeiteten das ganze Jahr über einwandfrei. Aus der bisherigen Betriebserfahrung über zwei Jahre kann man davon ausgehen, daß auch ein größeres CRT-Array (mit wesentlich mehr Detektoren) mit geringem Personalaufwand vor Ort betrieben und gewartet werden kann.

2.2.1.5 Spurrekonstruktion und Winkelauflösung

Aus Schauerdaten, die mit dem HEGRA-Array-Trigger aufgenommen wurden, konnte die Effizienz der Spurrekonstruktion sowie die Winkelauflösung der CRT-Detektoren bestimmt werden.

Die Spurrekonstruktion erfolgt zunächst in Driftrichtung und dann mit den zugehörigen Spurpunkten in Drahtrichtung. In Driftrichtung können für jede Spur maximal sechs Punkte durch die einzelnen Drahtsignale erhalten werden, in Drahtrichtung ist bei vier Drähten eine Ortsrekonstruktion möglich. Myonen werden dadurch erkannt, daß sie die Eisenplatte ohne große Streuung durchqueren; es muß also sowohl in der oberen wie in der unteren Kammer eine Spur gefunden werden.

Myonen mit typischen Energien von einigen GeV durchqueren das Zählgas in den Driftkammern ohne nennenswerte Ablenkung und werden sicher als gerade Spuren erkannt. Elektronen von einigen MeV dagegen können erheblich gestreut werden. Ein Kriterium zur Klassifizierung von Spuren ist die Zahl der Zähldrähte, auf denen ein Puls gefunden wurde (4, 5 oder 6). Abgesehen von Teilchen, die die Außenwand oder die Drahtebene einer Driftkammer durchqueren, sollten gerade Spuren mit Hits auf allen sechs Drähten rekonstruiert werden.

Bei Myonen ist das weitgehend der Fall. Aus dem Verhältnis von 4-, 5- und 6-Hit-Myonspuren weit weg vom Rand und der Drahtebene kann man schließen, daß weniger als 0.5% der Myonen zu keiner rekonstruierten Spur in einer Kammer führen und sogar weniger als 0.1%, wenn ein Myon das einzige Teilchen im Detektor ist. Auch in Drahtrichtung werden die geraden Myonspuren gut rekonstruiert. Die Nachweiseffizienz für Myonen kann daher fast völlig durch die Detektorgeometrie sowie Vielfachstreuung und Energieverlust in der Eisenplatte beschrieben werden.

Bei Elektronen mit geringer Energie führen vor allem Streuprozesse im Zählgas dazu, daß vielfach zwar alle sechs Drähte ein Signal liefern, beim anschließenden Spurfit jedoch einzelne Drahtsignale aufgrund der zu großen Abweichung von einer Geraden verworfen werden. Während bei einzelnen Myonspuren im inneren Kammerbereich nur 0.2% 4-Hit-Spuren gefunden werden, sind es bei einzelnen Nicht-Myonspuren dagegen 14%.

Spuren, die in Driftrichtung nur mit vier Hits rekonstruiert werden konnten, zeigen auch in Drahtrichtung eine deutlich schlechtere Rekonstruktionseffizienz. Sie liegt bei rund 90%, während für 5- und 6-Hit-Spuren 98–99.5% erreicht werden. Die schlechten Spuren sind vor allem niederenergetische Elektronen, die teils aus Konversionen von Gammas im Detektordeckel stammen.

Zur Bestimmung der Winkelauflösung des CRT-Detektors können verschiedene Verfahren angewandt werden. Aus den Spurfitresidu-

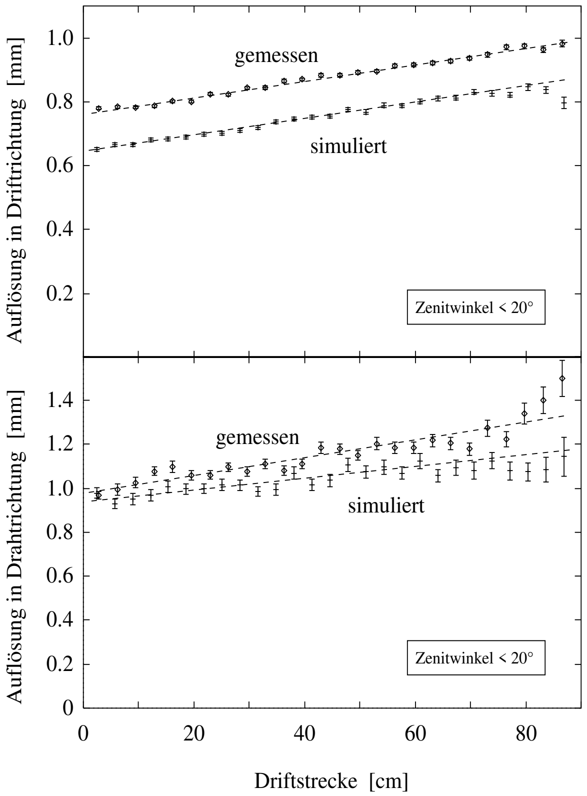

Abbildung 2: *Ortsauflösung von CRT-Detektoren in Driftrichtung (oben) und Drahtrichtung (unten) aus Messungen und aus detaillierten Detektorsimulationen, jeweils als Funktion der Driftstrecke.*

en kann die Auflösung getrennt für die Drift- und Drahtrichtung bestimmt werden. In Driftrichtung beträgt die mittlere Auflösung rund 0.9 mm, entsprechend 0.31°, in Drahtrichtung rund 1.1 mm, entsprechend 0.43°. Dies stimmt gut mit der aus einer detaillierten Detektorsimulation [8] erwarteten Auflösung überein (siehe Abb. 2). Aufgrund der Elektronendiffusion hängt die Auflösung etwas von der Driftstrecke und aufgrund von Ionisationsfluktuationen vom Zenitwinkel ab.

Als zweite Methode bietet sich der Vergleich von Myonspuren in der oberen und unteren Driftkammer an. Wird die Vielfachstreuung der Myonen in der Eisenplatte berücksichtigt, so ergibt sich 0.4° pro Kammer in einer Projektion.

Als dritte Methode dient der Vergleich der Richtung von CRT-Myonspuren mit der aus dem HEGRA-Array rekonstruierten Schauerrichtung. In der Projektion in die senkrecht zur Verbindungslinie von der Schauerachse zum Detektor liegenden Ebene sind Myon- und Schauerrichtung bis auf einen Streuwinkel der Größenordnung 0.1° identisch. Die gemessene Winkelverteilung setzt sich aus der Myonwinkelauflösung der CRT-Detektoren und der Schauerauflösung von HEGRA zusammen. Erstere ist praktisch unabhängig von der Schauergröße, letztere verbessert sich mit zunehmender Schauergröße, d.h. zunehmender Zahl von Teilchen im Schauer (siehe Abb. 3). Diese Methode führt zu einer Winkelauflösung für einzelne Myonen in Luftschauern von etwa 0.4°.

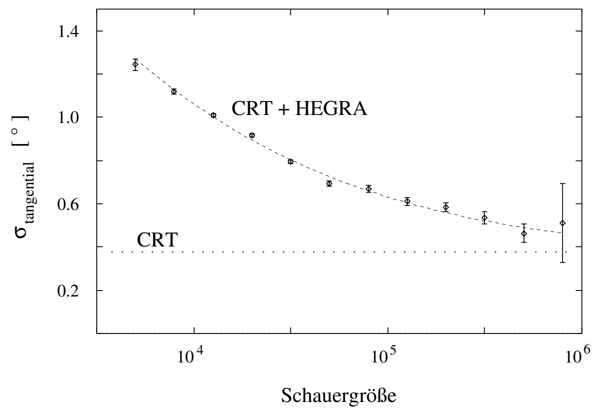

Abbildung 3: *Winkelauflösung von mit CRT-Detektoren gemessenen Myonspuren relativ zu der mit dem HEGRA-Szintillatorarray rekonstruierten Schauerrichtung in einer Projektion als Funktion der HEGRA-Schauergröße. Die reine CRT-Auflösung kann daraus zu etwa 0.4° abgeschätzt werden (punktierte Linie).*

2.2.1.6 Untersuchung der Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Abgesehen von der direkten Beobachtung von Quellen kosmischer Strahlung anhand der dort produzierten γ-Strahlung ist die Zusammensetzung der geladenen Teilchen der wichtigste Test für eine Theorie der Beschleunigung und Ausbreitung der ultrahochenergetischen kosmischen Strahlung, insbesondere im Bereich um das Knie im Energiespektrum (bei etwa 10^{15} eV).

Direkte Messungen durch Satelliten- und Ballonexperimente, die die Elementzugehörigkeit einzelner Teilchen angeben können, sind nur bis zu einigen TeV zuverlässig und mit sehr grossen statistischen Unsicherheiten bis etwa 100 TeV verfügbar.

Indirekte Messungen in Luftschauern lassen degegen kaum eine Elementzuordnung einzelner Schauer zu. Bestenfalls kann eine Zuordnung zu Elementgruppen angestrebt werden. Statistische Analysen von Luftschauerdaten haben weniger den Anspruch die Elementzugehörigkeit einzelner Primärteilchen zu messen, als zumindest eine mittlere Massenzahl der hochenergetischen Teilchen zu bestimmen. Bisherige Versuche anderer Experimente, z.B. anhand der Lateralverteilung von Myonen oder dem Verhältnis von Elektronen zu Myonen, haben keine klaren Ergebnisse geliefert.

Die CRT-Detektoren können zusammen mit den HEGRA-Szintillator- und/oder AIROBICC-Arrays nicht nur Myonlateralverteilungen und Elektron-zu-Myon-Verhältnisse messen, sondern auch Winkelverteilungen von Myonen und Elektronen in Schauern.

Vereinfacht ausgedrückt entwickeln sich die Schauer, die von schweren Kernen (wie z.B. Eisen) als Primärteilchen ausgelöst werden, in größerer Höhe als solche von leichten Kernen (wie z.B. Protonen). Bei gegebenem Abstand vom Schauerzentrum sind Sekundärteilchen in einem Eisenschauer daher im Mittel weniger gegen die Schauerachse geneigt als in einem Protonschauer. Sowohl bei der Elektron- wie bei der Myonkomponente bestehen zwischen einer reinen Protonen- und einer reinen Eisenzusammensetzung durchaus meßbare Unterschiede, wie Simulationen von Luftschauern mit CORSIKA [9] und anschließenden Detektorsimulationen zeigen.

Da sich Schauer schwerer Kerne in größerer Höhe entwickeln, werden sie auch stärker in der Atmosphäre abgeschwächt und bei gleicher Primärenergie erreichen weniger Sekundärteilchen als bei Protonschauern den Boden. In den mit Teilchendetektoren am Boden, z.B. dem HEGRA-Szintillator-Array, getriggerten Daten sind Schauer schwerer Kerne deshalb stark unterdrückt gegenüber denen leichter Kerne. Bei der Myonkomponente wird dies aber zum Teil wieder kompensiert durch die höhere Zahl von Myonen in Schauern schwerer Kerne. Die Elektronkomponente ist dagegen fast nur auf die leichtesten Kerne der hochenergetischen kosmischen Strahlung sensitiv.

Die Auswertung der Elektronkomponente [8], einschließlich detaillierter Detektorbehandlung, ergibt in der Tat eine Winkelverteilung die weitgehend mit reinen Protonen verträglich ist (siehe Abb. 4). Schwere Kerne sind für die Elektronkomponente zu stark unterdrückt. Eine

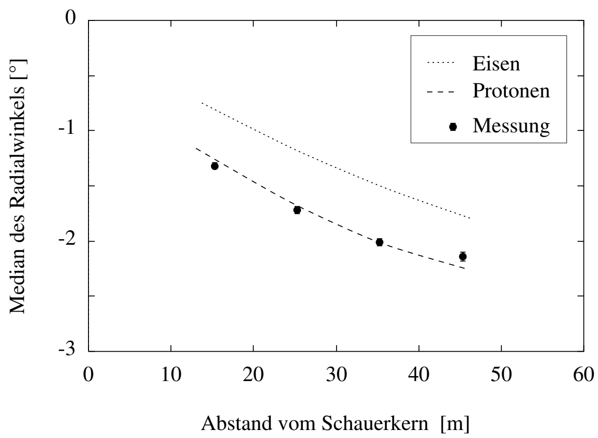

Abbildung 4: *Median des Radialwinkels von Elektronspuren in CRT-Detektoren gegen die HEGRA-Schauerachse als Funktion des Abstands vom Schauerzentrum. Die gemessenen Werte sind durch die vom HEGRA-Trigger bedingte Schauerselektion mit reinen Protonen verträglich.*

vorläufige Analyse der Myonkomponente läßt erkennen, daß die ultrahochenergetische kosmische Strahlung bei Energien von einigen hundert TeV in Wirklichkeit einen hohen Anteil schwerer Elemente enthält.

2.2.1.7 Rekonstruktion von Schauern anhand von Teilchenspuren

Im Rahmen einer Diplomarbeit wurde gezeigt, daß mittels neuronaler Netze eine etwa ebenso gute Rekonstruktion wie durch Maximum-Likelihood-Verfahren zu erwarten ist [10], allerdings bei wesentlich geringerer Rechenzeit, wenn die neuronalen Netze einmal geeignet trainiert sind. Da die Rechenzeit mit den bisherigen Daten von der kleinen Anlage auf La Palma aber noch kein Problem darstellt, werden Schauer bisher nur nach Maximum-Likelihood-Verfahren rekonstruiert. Die Position des Schauerkerns, die mit den wenigen CRT-Detektoren nur schlecht bestimmt werden kann, wird dabei aus den zugehörigen Daten des HEGRA-Arrays gewonnen.

Im derzeit verwendeten Verfahren werden die mit den einzelnen Detektoren gemessenen Spuren der Sekundärteilchen erst in ein gemeinsames Koordinatensystem transformiert. Wie im Abschnitt 2.2.1.5 beschrieben, bestehen Unterschiede in der Qualität rekonstruierter Spuren, die bei der Schauerrekonstruktion nicht im Detail berücksichtigt werden können. Es werden anfangs nur die 6-Hit- und guten 5-Hit-Spuren verwendet und nach einer Korrelationsanalyse noch ein Teil der übrigen 4- und 5-Hit-Spuren. Mit den so vorselektierten Spuren wird die Schauerrichtung dann schließlich per Maximum-Likelihood-Verfahren bestimmt.

Da die Richtungskorrelation der Sekundärteilchen mit der Schauerachse mit zunehmendem Abstand zwischen Teilchen und Schauerkern schlechter wird, sollte die Auflösung als Funktion des Abstands vom Schauerkern zum Mittelpunkt der CRT-Detektoren betrachtet werden. Die von 6 CRT-Detektoren erreichte Auflösung der Schauerrichtung wurde aus dem Vergleich mit dem HEGRA-Array bestimmt, wobei die Auflösung von HEGRA so weit wie möglich berücksichtigt wurde (siehe Abb. 5). Schon beim Nachweis von nur 20 Spuren beträgt die Auflösung rund 0.86 Grad bei 0–10 m Kernabstand (siehe Tabelle 1).

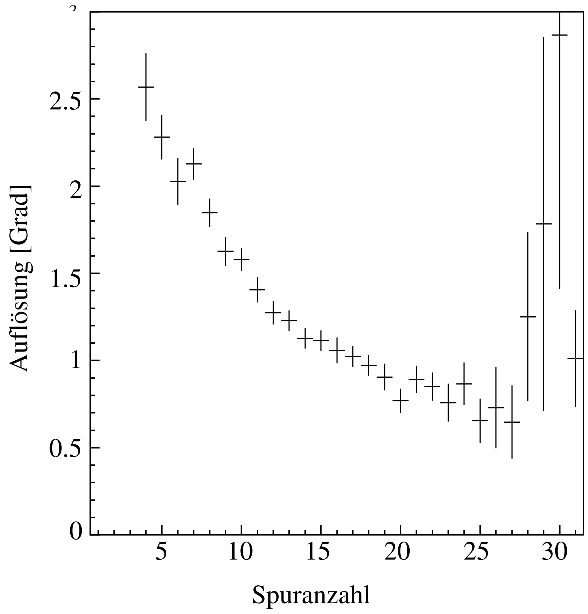

Abbildung 5: *Winkelauflösung des aus sechs Detektoren bestehenden CRT-Arrays als Funktion der Anzahl der zur Rekonstruktion verwendeten Spuren. Distanz zum Schauerkern 0–10 m.*

Tabelle 1: *Winkelauflösung des CRT-Arrays für 20 Spuren als Funktion der Distanz vom Schauerkern zum Mittelpunkt der sechs Detektoren.*

Distanz	Auflösung
0–10 m	0.86°
10–20 m	1.10°
20–30 m	1.29°
30–40 m	1.44°
40–50 m	1.51°

2.2.1.8 Suche nach Gamma-Ray-Bursts

Gamma-Ray-Bursts (GRB) sind sporadische Ausbrüche von γ-Strahlung, die isotrop am Himmel verteilt sind. Die Natur der Quellen ist nach wie vor völlig unbekannt und ihre Erforschung ist eine der derzeit interessantesten Aufgaben in der Astrophysik. Vom BATSE-Experiment an Bord des CGRO- (Compton Gamma Ray Observatory) Satelliten wird im Mittel etwa ein Burst pro Tag gefunden. Von den verschiedenen CGRO-Experimenten wurden dabei γ-Quanten mit Energien von 30 keV bis zu einigen GeV gemessen.

Ob von GRBs auch Photonen im TeV-Bereich auftreten, wurde mit bodengebundenen Experimenten großer Nachweisfläche untersucht und zwar mit der HEGRA-Szintillatormatrix (40 TeV Energieschwelle) mit einer Nachweisfläche von $4{\cdot}10^4$ m^2 und der CRT-Testanlage (etwa 10 TeV Energieschwelle) mit kleinerer effektiver Fläche.

Es wurde untersucht, ob sich das Spektrum von Gamma-Ray-Bursts innerhalb der von BATSE gemessenen Zeitfenster (typischerweise einige Sekunden) und Winkelfenster (zwischen 4 und etwa 20 Grad Radius) bis in den hochenergetischen Teil fortsetzt, in dem die HEGRA- und CRT-Anlagen sensitiv werden (*flaring counterpart search*). Da keine signifikanten Überschüsse festgestellt wurden, wurden obere Abschätzungen des integralen Flusses im 90% Vertrauensbereich gemacht. Sie deuten auf einen Abbruch des Spektrums zwischen einigen GeV und einigen TeV hin (siehe Abb. 6).

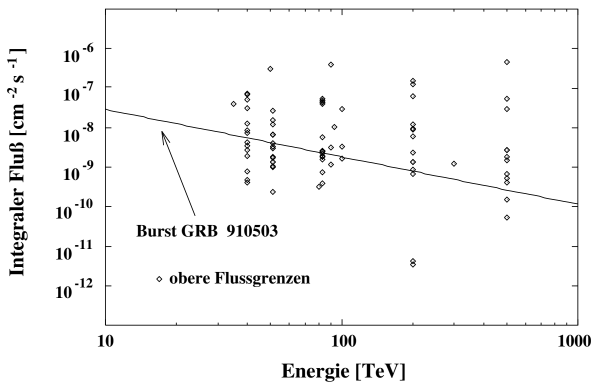

Abbildung 6: *Obere Abschätzungen (90% Vertrauensbereich) von Flußgrenzen für die in den BATSE Zeit- und Winkelfenstern untersuchten Burstereignisse bei Annahme des extrapolierten Spektrums von Burst GRB 910503.*

Auch für eine länger anhaltende Emission hochenergetischer γ-Strahlung in den ersten Wochen nach von BATSE beobachteten Bursts aus deren Richtung gibt es keine Hinweise. Der integrale Fluß bei Annahme einer dauerhaften Emission von γ-Strahlung (*quiescent counterpart search*) wurde aus Daten des CRT-Detektorsystems und der HEGRA-Szintillatormatrix abgeschätzt. Die oberen Flußgrenzen aus CRT- und HEGRA-Daten für zwei Burstpositionen liegen weit unterhalb der in den TeV-Bereich extrapolierten Burst-Spektren der CGRO-Instrumente.

Gleichfalls wurde in einem zeitlich erweiterten Fenster (bis zu 12 Stunden) nach verzögerten hochenergetischen Photonen gesucht (*fading counterpart search*). Dies wird von einigen Theorien erwartet und konnte für die behandelten Objekte nicht bestätigt werden.

Falls GRB-Quellen sehr nahe Objekte sind, können auch geladene Teilchen ohne große Ablenkung durch solare bzw. interstellare Magnetfelder die Erde erreichen. Da in keinem der Suchfenster innerhalb eines Kreises mit 5 Grad Radius um die Position der Burstquelle ein signifikanter Überschuß festgestellt wurde, kann die Emission von einfach geladenen Teilchen mit mehr als 10^{14} eV praktisch ausgeschlossen werden, falls die Burst-Quellen weniger als einige 1000 A.E. entfernt sind, also im Sonnensystem selbst sind oder in dessen unmittelbaren Umgebung.

[1] J. Heintze et al. 1988, Cosmic Ray Tracking – ein neuer Weg für die γ-Astronomie bei hohen Energien, Proposal an das BMFT;
M. Feuerstack et al. 1990, Addendum to the proposal "Cosmic Ray Tracking – A New Approach to High-Energy γ-Astronomy"
[2] J. Heintze et al. 1989, Nucl. Instr. and Meth. A277, 29
[3] J. Heintze et al. 1989, Exp. Astron. 1, 21
[4] F. Aharonian et al. 1993, XXIII ICRC, Calgary, Contributed Papers Vol. 4, 291
[5] T. Wolf, Diplomarbeit, Heidelberg 1994
[6] S. Polenz, Doktorarbeit, Universität Heidelberg 1994
[7] J. J. Hernandez et al. 1994, Review of Particle Properties, Phys. Rev. D 50, 1173
[8] R. Zink, Doktorarbeit, Heidelberg 1995
[9] J. N. Capdevielle et al. 1992, Kernforschungszentrum Karlsruhe, Report KfK 4998
[10] C. Harries, Diplomarbeit, Heidelberg 1994
[11] V. Matheis, Doktorarbeit, Heidelberg 1994