2.2 Hochenergieastrophysik

2.2.1 Das CRT-Projekt

K. Bernlöhr, W. Hofmann, G. Leffers, M. Panter, U. Trunk, R. Zink

Die Cosmic-Ray-Tracking- (CRT-) Detektoren sind Geräte zum Nachweis der Spuren von Teilchen in ausgedehnten Luftschauern, die vor allem von hochenergetischen Kernen aber auch von Elektronen und Gammastrahlen ausgelöst werden. Die CRT-Detektoren bestehen aus zwei runden Driftkammern von je 2.5 m^2 Nachweisfläche und einer 10 cm starken Eisenplatte dazwischen. Elektronen und Myonen können mit CRT-Detektoren sehr gut unterschieden werden. Zehn Detektoren befinden sich im Einsatz beim HEGRA-Experiment auf La Palma (Kanarische Inseln, Spanien) auf eine Höhe von 2200 m. Messungen haben gezeigt, daß die CRT-Detektoren die früheren Erwartungen bezüglich Auflösung und Unterscheidung von Elekronen und Myonen erfüllen und in mancher Hinsicht gar übertreffen. Die zehn Geräte auf La Palma werden derzeit in der Regel zusammen mit der HEGRA-Luftschaueranlage betrieben.

Die Winkelverteilungen von Teilchen in Luftschauern können anhand der kombinierten Daten von CRT und HEGRA sehr genau studiert werden. Die Hauptanwendung dieser Messungen ist die Suche nach Änderungen in der Zusammensetzung der kosmischen Teilchenstrahlung bei Energien im Bereich des sogenannten Knies im Flußspektrum, das zwischen 10^{15} und 10^{16} eV auftritt. Erste Ergebnisse zeigen einen langsamen Anstieg der mittleren Teilchenmasse bei Energien knapp unterhalb des Knies. Mit weiteren Daten wird diese Kombination von Instrumenten auch Messungen bei Energien oberhalb des Knies ermöglichen.

2.2.1.1 Einleitung

Die Erde ist einem ständigen Strom hochenergetischer Teilchen von außerhalb des Sonnensystems ausgesetzt, der kosmischen Teilchenstrahlung. Diese besteht ganz überwiegend aus Protonen und vollständig ionisierten Atomkernen. Da diese Teilchen im galaktischen Magnetfeld abgelenkt und gestreut werden, kann aus ihrer Ankunftsrichtung nicht auf Herkunfts- oder Beschleunigungsort geschlossen werden. Die Natur der kosmischen Beschleuniger kann daher praktisch nur anhand von Quellen hochenergetischer γ-Strahlung sowie aus der Zusammensetzung der Teilchenstrahlung erschlossen werden.

Ursprüngliches Ziel des CRT-Projekts war der Aufbau eines Experiments mit nahezu 400 CRT-Detektoren zur Suche nach Quellen sehr hochenergetischer γ-Strahlung [1, 2]. CRT-Detektoren bestehen aus zwei runden Driftkammern von je 2.5 m^2 Fläche, die übereinander angeordnet sind, mit einer 10 cm dicken Eisenplatte als Myonenfilter dazwischen.

Gegenüber konventionellen Szintillatorexperimenten versprechen Spurdetektoren eine deutlich niedrigere Energiegrenze zum Schauernachweis und eine verbesserte Winkelauflösung [3]. In Verbindung mit der Möglichkeit, die von Protonen und Kernen ausgelösten hadronischen Schauer durch Myonerkennung zu unterdrücken, würde ein solches CRT-Experiment niedrigere Nachweisgrenzen für γ-Quellen als jedes existierende Experiment erreichen, ausgenommen die abbildenden Tscherenkow-Teleskope. Letztere sind im Gegensatz zu CRT jedoch in ihrer Meßzeit auf klare, mondlose Nächte beschränkt und können nur jeweils zur Beobachtung einer einzelnen möglichen Quelle verwendet werden.

In erster Linie zu Tests der Leistungsfähigkeit der im Rahmen des CRT-Projekts entwickelten Detektoren [4] waren 1993 und 1994 insgesamt zehn Detektoren beim HEGRA-Experiment auf La Palma [5] installiert worden. Diese Tests wurden mittlerweile weitgehend abgeschlossen. Die ursprünglichen Erwartungen werden danach erfüllt oder sogar überschritten [6]. Parallel dazu wurden in Heidelberg Untersuchungen an der Ausleseelektronik durchgeführt.

In Kombination mit dem HEGRA-Experiment, insbesondere der Szintillatoranlage, haben die CRT-Detektoren auf La Palma mit der Untersuchung der Zusammensetzung der ultrahochenergetischen Strahlung einen neuen Anwendungszweck gefunden. Inbesondere Änderungen der Zusammensetzung im Energiebereich von etwa 10^{14} eV, wo noch direkte Messungen durch Ballonexperimente vorliegen, bis etwa 10^{16} eV oder mehr, also oberhalb des Knies im Flußspektrum, können studiert werden.

2.2.1.2 Messungen in Heidelberg

Es gibt zwei unterschiedliche Schaltungen für die Vorverstärker der CRT-Detektoren. Jeder der beiden Typen hat seine Vor- und Nachteile. Die Messungen mit zwei Detektoren zum Vergleich der beiden verschiedenen Typen von Vorverstärkern wurden abgeschlossen [7]. Im einen Detektor waren dabei die ladungsempfindlichen Vorverstärker, wie bei den Detektoren auf La Palma, zum Einsatz gekommen. Im anderen Detektor wurden stromempfindliche VV49-II verwendet und die Pulsformer dafür angepaßt. Ansonsten wurden identische Auslesesysteme eingesetzt, unter Verwendung des am MPIK entwickelten 40-MHz-FADC-Systems. Szintillationszähler wurden eingesetzt, um die CRT-Detektoren bevorzugt auf Ereignisse mit sehr vielen Spuren zu triggern.

Die ladungsempfindlichen Verstärker gehen nach etwa 20 Hits pro Draht und Ereignis, entsprechend mehr als 20 geladenen Teilchen je Detektor, in Sättigung. Die stromempfindlichen Verstärker haben dagegen ein höheres Ausleserauschen, was zu einer um etwa 15% schlechteren Auflösung anhand von Ladungsteilung und einer um etwa 45% schlechteren Auflösung anhand der segmentierten Kathodenstreifen führt. In der Ortsauflösung in Driftrichtung unterscheiden sich die beiden Typen nicht nennenswert.

Die anhand der Schaltungen beider Verstärkertypen erwarteten Rauschwerte sind konsistent mit den gemessenen Auflösungswerten. Auch die Sättingungseffekte bei den ladungsempfindlichen Verstärkern stimmen gut mit den Erwartungen überein. Trotz dieser Sättigungseffekte werden die ladungsempfindlichen Verstärker wegen ihrer überlegenen Ortsauflösung beibehalten.

2.2.1.3 Messungen auf La Palma

Mit den zehn Detektoren beim HEGRA-Experiment auf La Palma wurden 1995 fast ausschließlich Daten mit Trigger von der HEGRA-Anlage genommen. Die Daten sollen vor allem zur Untersuchung der Zusammensetzung der ultrahochenergetischen Teilchenstrahlung dienen. Zusätzliche Messungen wurden zur Kalibration der Detektororientierung relativ zur HEGRA-Anlage durchgeführt. Dazu wurde die Neigung der Detektorbehälter mit einer Wasserwaage gemessen und mehrere Detektoren, insbesondere die beiden außerhalb der eigentlichen HEGRA-Anlage, wurden über mehrere Wochen hinweg mit einer speziell konstruierten Triggervorrichtung für vertikal einfallende Myonen betrieben.

Bei der normalen Datennahme wurde dazu übergegangen, die Spurrekonstruktion *online* durchzuführen und nur Spurdaten aber keine Roh- und Hitdaten mehr aufzuzeichnen. Dadurch wurde die Datenmenge deutlich reduziert und die *Offline*-Spurrekonstruktion entfällt. Bei der Triggerrate der HEGRA-Anlage (meist etwa 8–12 Hz) ist die Online-Rekonstruktion noch nicht mit einer nennenswerten Totzeit der Rechner an den Detektorstationen verbunden. Mit Ausnahme einiger Kalibrationsmessungen wurde die Datennahme wie in den Vorjahren von Heidelberg aus über Internet gesteuert. Der Wechsel von Magnetbandkasetten und kleinere Wartungsarbeiten wurden dankenswerterweise vom HEGRA-Personal übernommen.

Die CRT-Detektoren selbst arbeiteten einwandfrei. Selbst ein Wechsel des Zählgases (Argon-Methan 80:20) war nicht erforderlich. Die CRT-Detektoren werden daher weiterhin der Zielsetzung gerecht, daß auch eine größere CRT-Anlage mit geringem Wartungsaufwand betrieben werden kann.

2.2.1.4 Schauerrekonstruktion

Aus den Spurdaten der CRT-Detektoren kann die Schauerrichtung anhand eines Maximum-Likelihood-Verfahrens [8] bestimmt werden. Da die Position des Schauerkerns mit den wenigen CRT-Detektoren auf La Palma in der Regel nicht bestimmt werden kann, wird bei Daten mit HEGRA-Trigger optional die Kernposition aus den Szintillatordaten verwendet. Für den Aufbau auf La Palma diente dieses Rekonstruktionsverfahren vor allem zur Demonstration der mit den Spurdetektoren erreichbaren Winkelauflösung. Dabei diente die aus HEGRA-Szintillatordaten rekonstruierte Schauerrichtung zum Vergleich.

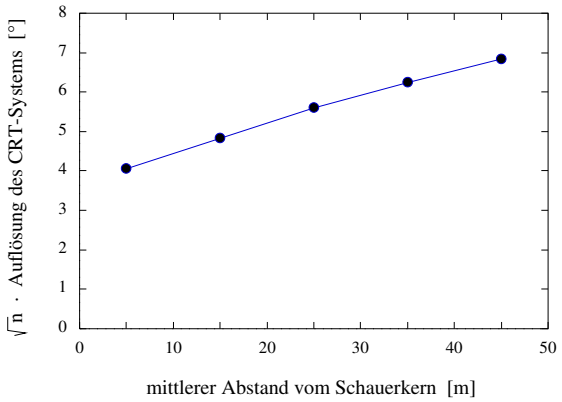

Abbildung 1: Winkelauflösung des CRT-Systems auf La Palma multipliziert mit der Wurzel aus der Zahl der zum Fit verwendeter Spuren als Funktion des mittleren Abstands der Spuren vom Schauerkern.

Die erzielte Auflösung (siehe Abb. 1) entspricht scheinbar nicht ganz den früheren Erwartungen einer Auflösung von $(3°–4°)/\sqrt{n}$ [3] (mit Spurzahl n) für eine große CRT-Anlage. Die Diskrepanz ist jedoch weitgehend darauf zurückzuführen, daß bei diesen Tests Ereignisse mit vielen Spuren je Detektor verwendet werden mußten (typisch etwa 10–30 Spuren auf 6 Detektoren verteilt). Dabei treten bereits merkliche Beeinträchtigungen der Spurrekonstruktion ein. In einem typischen Ereignis in einer großen CRT-Anlage wäre die mittlere Spurdichte wesentlich geringer. Für eine solche Anlage scheint daher eine Auflösung von etwa $4°/\sqrt{n}$ als realistisch erreichbar unter Verwendung der Detektoren mit Edelstahlbehältern. Mit Aluminiumbehältern wäre wegen der geringeren Streuung der Elektronen im Behälterdeckel eine etwas bessere Winkelauflösung erzielbar.

2.2.1.5 Untersuchung der Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Der Schwerpunkt der laufenden Untersuchungen mit den CRT-Detektoren auf La Palma ist die Messung von Änderungen der Zusammensetzung nahe des *Knies*. Das Knie im Flußspektrum der kosmischen Strahlung zwischen 10^{15} und 10^{16} eV wird vielfach mit einem Übergang von Supernovaüberresten als vorherrschende Teilchenbeschleuniger zu einem zweiten, noch unbekannten Typ von Quellen in Verbindung gebracht. Insofern könnten Änderungen der Zusammensetzung in diesem Energiebereich Aufschluß auf die Natur der Quellen geben.

Das bei CRT verfolgte Verfahren beruht auf Unterschieden in den Winklverteilungen insbesondere von Myonen aber auch von Elektronen relativ zur Schauerrichtung, je nach Art des Primärteilchens. Die Ankunftsrichtung der Teilchen wird anhand der CRT-Detektoren bestimmt, die Richtung der Schauerachse aus Daten der HEGRA-Szintillatoranlage. In einer Reihe von Abstandsintervallen wird jeweils der Medianwert der *Radialwinkel* berechnet, d.h. der in die jeweils durch Schauerkern und CRT-Position definierte Ebene projizierten Winkel zwischen Teilchenspuren und Schauerachsen (siehe Abb. 2). Damit kann zwar nicht die Art des Primärteilchens eines einzelnen Schauers ermittelt werden, jedoch können *Mittelwerte* der Zusammensetzung bestimmt werden. Im Fall von Myonen kann etwa $\langle \ln A \rangle$, der mittlere Logarithmus der Massenzahl A der Primärteilchen, angegeben werden.

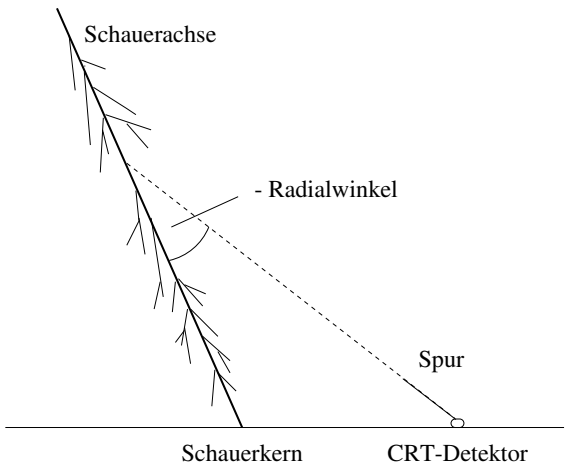

Abbildung 2: Definition des Radialwinkels (negativ für in der dargestellten Weise von der Schauerachse kommende Spuren).

Wie alle anderen *indirekten* Verfahren zur Messung der Zusammensetzung, bei denen das Primärteilchen nicht unmittelbar gemessen wird sondern nur Luftschauer, ist dieses Verfahren auf den Vergleich mit Simulationen angewiesen.

Im Gegensatz zur Mehrzahl bisheriger Verfahren anderer Experimente hat das Verfahren unter Verwendung von CRT- und HEGRA-Daten zwei wichtige Vorteile: Die wesentlichen instrumentellen Effekte sind sehr gut verstanden bzw. können aus den Daten selbst ermittelt werden und die Ergebnisse können mit denen von Ballonexperimenten im Energiebereich unterhalb 10^{15} eV unmittelbar verglichen werden. Ein Vielzahl anderer instrumenteller Effekte wird dabei anhand von Ergebnissen detaillierter Detektorsimulationen [9] parametrisiert. Das Verfahren verspricht daher eine sehr gute Kontrolle systematischer Fehler. Abbildung 3 zeigt den Verlauf der gemessenen Medianwerte von Myonradialwinkeln im Vergleich mit Simulationsrechnungen.

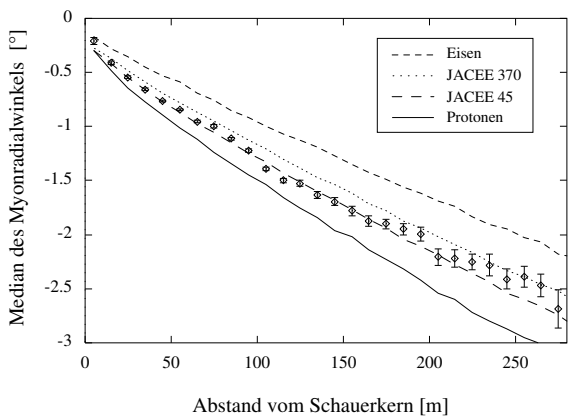

Abbildung 3: Medianwerte von Myonradialwinkeln als Funktion des Abstands vom Schauerkern, im Vergleich zu Simulationen für reine Protonen, reine Eisenkerne und direkten Messungen entsprechenden Zusammensetzungen [10].

Eine Analyse eines Teils der bisher aufgezeichneten Daten [11] zeigt, daß das Radialwinkel-Verfahren in guter Übereinstimmung mit direkten Messungen bei Energien bis zu einigen 10^{14} eV ist, sowohl für Myonspuren (siehe Abb. 4) als auch für Elektronspuren.

Es wird ein zunehmender Anteil schwerer Kerne bzw. ein abnehmender Anteil von Protonen im Energiebereich von etwa 10^{14}–$5 \cdot 10^{15}$ gefunden. Das vorhandene Datenmaterial wird derzeit weiter ausgebaut und sollte zur Messung von $\langle \ln A \rangle$ bis oberhalb 10^{16} eV, also deutlich oberhalb des Knies, ausreichen.

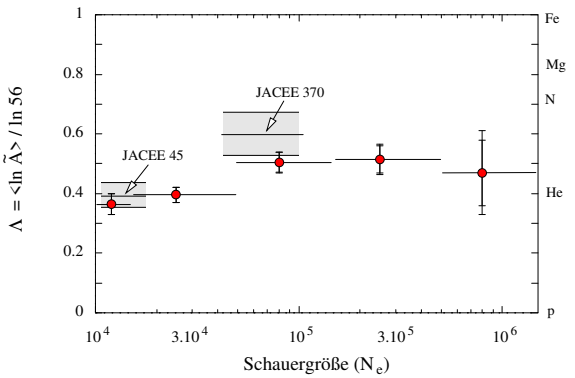

Abbildung 4: Der Parameter Λ (hier für Myonen als Funktion der Schauergröße) gibt an, wo die Meßwerte im Mittel zwischen den Erwartungen für reine Protonen ($\Lambda = 0$) und reine Eisenkerne ($\Lambda = 1$) liegen. Für Myonen gilt $\Lambda \approx \langle \ln A \rangle / \ln 56$. Zum Vergleich sind die aus direkten Messungen der JACEE-Kollaboration [10] erwarteten Werte samt statistischer Fehler dargestellt. Der dargestellte Bereich der Schauergröße entspricht Teilchenenergien von etwa 10^{14} bis fast 10^{16} eV.

[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] K. Bernlöhr 1996, Space Sci. Rev. 75, 185

[4] K. Bernlöhr et al. 1996, Nucl. Instr. and Meth. A369, im Druck, Januar 1996, (Paper I)

[5] V. Fonseca et al. 1995, Proc. 24th Intern. Cosmic Ray Conf., Rom, Band 1, S. 474

[6] K. Bernlöhr et al. 1996, Nucl. Instr. and Meth. A369, im Druck, Januar 1996, (Paper II)

[7] U. Trunk 1995, Diplomarbeit, Heidelberg

[8] G. Leffers 1995, Doktorarbeit, Heidelberg

[9] R. Zink 1995, Doktorarbeit, Heidelberg

[10] K. Asakimori et al. 1993, Proc. 23rd Intern. Cosmic Ray Conf., Calgary, Band 2, S. 21 und S. 25

[11] K. Bernlöhr 1995, Habilitationsschrift, Heidelberg