

# Der Kosmos im Licht von Gamma-Strahlung sehr hoher Energie

Die HEGRA Cherenkov-Teleskope erlauben Einblicke in das nicht-thermische Universum

Henric Krawczynski, Antje Kohnle, Götz Heinzelmann und Heinz Völk

Auf der Kanarischen Insel La Palma erforscht eine deutsch-spanisch-armenische Kollaboration mit dem HEGRA-Experiment (High Energy Gamma-Ray Astronomy) den Kosmos im Licht sehr hochenergetischer Gamma-Strahlung<sup>1)</sup>. Da Gamma-Quanten sehr hoher Energie (rund  $10^{12}$  eV) nicht aus einer thermischen Teilchenverteilung stammen können, bedeutet dies die Erkundung des nicht-thermischen Universums, im Unterschied zum thermischen Kosmos, mit dem sich der Großteil der Astronomie beschäftigt. Über diese Gamma-Astronomie wird hier berichtet. Seit Ende 1996 ist ein stereoskopisches System von abbildenden atmosphärischen Cherenkov-Teleskopen in Betrieb, eines der weltweit empfindlichsten Instrumente in diesem Energiebereich.

In den letzten Jahren ist es gelungen, kosmische Photonen mit sehr hohen Energien (Very High Energy = VHE) zwischen einigen hundert GeV und vielen TeV ( $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$ ) eindeutig mit so genannten abbildenden Cherenkov-Teleskopen nachzuweisen. Damit wurde ein neues Beobachtungsfenster zum Studium des Kosmos geöffnet (siehe [1, 2] für eine Übersicht zur VHE-Gamma-Astronomie und zur Technik der abbildenden Cherenkov-Teleskope).

## Das nicht-thermische Universum

Die Cherenkov-Teleskope von HEGRA (Abb. 1 und 2) gestatten es, das „nicht-thermische“ Universum im Licht von Photonen mit Energien von einigen hundert GeV zu untersuchen. Vermutlich spielen sehr verdünnte, nicht-thermische Plasmen mit außerordentlich hohen Energien der einzelnen geladenen Teilchen in unserem Universum eine ganz wesentliche Rolle. Im Gegensatz zu thermischen Systemen (Beispiel: die Photosphäre der Sonne, die bei einer Temperatur  $T$  von etwa 5700 K das sichtbare Sonnenlicht emittiert) ist ein nicht-thermisches kosmisches Gas (oder Plasma) durch eine sehr geringe Dichte der Plasmateilchen gekennzeichnet. Daher können Zweiteilchen-Wechselwirkungen nicht für ein (noch nicht einmal lokales) thermisches Gleichgewicht des gesamten Systems sorgen, das einer Boltzmann-Verteilung  $\propto \exp(-E/kT)$  der Gesamtenergie auf alle mikroskopischen Teilchenenergien  $E$  des Gases entspricht (dabei ist  $\frac{1}{2}kT$  die thermische Energie pro Freiheitsgrad). In diesem Fall können ver-



Abb. 1:

Das HEGRA-Observatorium ist Teil des *Observatorio del Roque de los Muchachos (ORM)* auf La Palma in etwa 2200 m Meereshöhe. Die fünf Teleskope des stereoskopischen Cherenkov-Teleskopsystems sind durch weiße Pfeile gekennzeichnet; der gelbe Pfeil zeigt das als unabhängiger Detektor betriebene Teleskop CT1. Die anderen, in diesem Artikel nicht behandelten Instrumente sind als schachbrettartiges Detektorfeld zu erkennen. Das ORM wird vom spanischen *Instituto de Astrofísica de Canarias* betrieben und beherbergt auch Teleskope der optischen Astronomie sowie ein Sonnenobservatorium. Im Hintergrund oben links liegen die Wohn- und Betriebsgebäude und in der Tiefe ist das Blau des Atlantischen Ozeans auszumachen.

gleichsweise wenige geladene Teilchen in Wechselwirkungen mit makroskopischen Anregungen des Systems, wie z. B. mit magnetohydrodynamischen Wellen, sehr hohe Energien erreichen. Die Verteilung der nicht-thermischen Teilchen folgt typischerweise einem Potenzgesetz  $\propto E^{-\gamma}$  mit einem konstanten Index  $\gamma$ . Nicht-thermische und thermische Komponenten eines Gases können nebeneinander im gleichen Raumgebiet existieren und wechselwirken miteinander. Das Interessante hierbei ist nun, dass die nicht-thermischen Teilchenkomponenten – sieht man von sehr dichten Systemen wie Sterne oder Planeten ab – in kosmischer Materie in der Regel einen den thermischen Anteilen vergleichbaren und oft sogar größeren Bruchteil der gesamten kinetischen Energiedichte tragen.

Das bekannteste „lokale“ Beispiel einer nicht-thermischen Teilchenpopulation ist die so genannte kosmische Strahlung, die seit Milliarden von Jahren aus der Milchstraße auf die Erde trifft (vgl. den Beitrag von H. Blümler und K.-H. Kampert in diesem Heft). In der hadronischen Komponente der kosmischen Strahlung (hochionisierte Atome) steckt eine enorme Energie. In

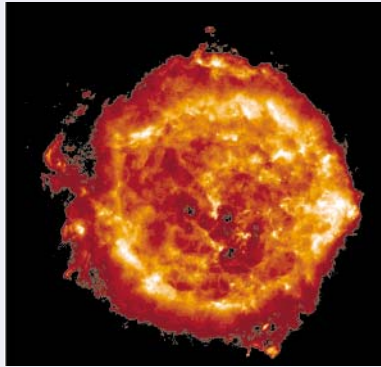
1) Weitere Information zum HEGRA-Experiment ist unter [www.wpos6.physik.uni-wuppertal.de:8080](http://www.wpos6.physik.uni-wuppertal.de:8080) zu finden.

Dr. Henric Krawczynski, Dr. Antje Kohnle, Prof. Dr. Heinz Völk, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 103980, D-69029 Heidelberg; Prof. Dr. Götz Heinzelmann, II. Institut für Experimentalphysik, Universität Hamburg, Luruper Chaussee 149, D-22761 Hamburg

unserer Galaxie z.B. ist ihre Energiedichte mit der Energiedichte des Sternenlichts und des interstellaren Magnetfelds vergleichbar. Dies macht die Frage nach den Orten und Mechanismen der Teilchenbeschleunigung, also den Quellen der hochenergetischen Strahlung, überaus interessant. Die geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung selbst geben hierüber keinen Aufschluss, denn sie werden durch das mit der Milchstraße verbundene Magnetfeld stark abgelenkt und treffen dann nahezu isotrop auf der Erde ein<sup>2)</sup>.

### Supernova-Überreste und Teilchenbeschleunigung

Die Abbildung zeigt Cassiopeia A, einen ca. 320 Jahre alten Supernova-Überrest in etwa 10000 Lichtjahren Entfernung. R. Tuffs nahm dieses Bild mit dem Radio-Teleskop-System „Very Large Array“ (New Mexico) bei 6 cm Wellenlänge auf. Der Durchmesser des Überrests beträgt rund 15 Lichtjahre. Bei der Explosion eines Sterns als Supernova wird ein beträchtlicher Anteil der Sternmaterie mit bis zu zehn Prozent der Lichtgeschwindigkeit in den interstellaren Raum geschleudert. Zunächst breitet sich diese Materie in alle Richtungen frei aus, gibt dann jedoch mehr und mehr seine Energie an das interstellare Medium ab, gegen das es anläuft. Da die Schallgeschwindigkeit im ungestörten interstellaren Medium klein ist gegenüber der Geschwindigkeit der Auswurfmasse, entstehen durch das Aufeinanderprallen beider Plasmen Kompressions-Stoßwellen (*Schocks*), die im Laufe der Zeit immer größere Teile der inneren und der äußeren Materie aufheizen. Man nimmt an, dass geladene Teilchen, die durch Magnetfeldstörungen, also durch kollektive Effekte, in der Umgebung der Stoßwelle diffusiv an diese gebunden sind, durch wiederholtes Überqueren der Stoßwelle außerordentlich viel Energie gewinnen können (die so genannte Fermi-Beschleunigung erster Ordnung). Das Energiespektrum der beschleunigten Teilchen folgt dabei einem Potenzgesetz. Dieser



Beschleunigungsvorgang lässt sich modellhaft durch die Reflexion eines Teilchens zwischen zwei Spiegeln, die sich aufeinander zu bewegen, veranschaulichen. Die Spiegel sind dabei durch Magnetfelder realisiert und ihre Bewegung durch unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten vor und hinter der Stoßwelle. Im Radiobild von Cassiopeia A ist deutlich ein heller Ring, der so genannte „Radioring“ zu erkennen. Man vermutet, dass es sich um die Projektion einer sphärischen Stoßwelle handelt, die Elektronen beschleunigt, die dann durch Synchrotronstrahlung zu der beobachteten Radioemission führen. VHE-Beobachtungen können nun anhand der Form des Energiespektrums entscheiden, ob Cassiopeia A nicht nur Elektronen, sondern auch Atomkerne beschleunigt.

Die Quellen der kosmischen Strahlung sind dennoch der direkten Beobachtung zugänglich, weil einzelne Teilchen mit Atomkernen des lokalen thermischen Hintergrundmediums inelastisch stoßen und dabei neutrale Pionen hoher Energie erzeugen, die sehr rasch in beobachtbare Gamma-Photonen zerfallen. Diese Photonen erreichen uns auf direktem Wege und weisen daher auf ihre Quellen zurück, d. h. sie machen Astronomie möglich. Analoge Messungen sind im Prinzip auch mit Neutrinos möglich (vgl. den Beitrag von C. Spiering in diesem Heft). Durch den Nachweis dieser Photonen erhofft man sich Aufklärung über die nicht-thermischen Quellen der primären geladenen Teilchen, die „kosmischen Beschleuniger“, die bis heute unentdeckt geblieben sind. Sie werden in den energiereichsten Objekten des Universums, insbesondere in den Supernova-Überresten, den super-massiven Schwarzen Löchern im Zentrum von Galaxien und den so genannten Gamma-Ray-Burstern vermutet.

Eine wichtige Klasse von Objekten, die mit HEGRA auf VHE-Strahlung hin untersucht werden, sind die erwähnten Supernova-Überreste, von denen man glaubt,

dass sie die gesuchten Beschleuniger der galaktischen kosmischen Strahlung bis zu Energien von etwa  $10^{15}$  eV sind (siehe Infokasten „Supernova-Überreste und Teilchenbeschleunigung“). VHE-Beobachtungen könnten diese vor vielen Jahren aufgestellte und theoretisch untermauerte Hypothese bestätigen oder aber auch zurückweisen: In der Nähe von Supernova-Überresten sollte die erhöhte Dichte beschleunigter Atomkerne aufgrund von Wechselwirkungen mit der umliegenden Materie (und  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ -Prozessen) zu erhöhter Emission von VHE-Photonen führen. Abschätzungen zeigen, dass es mit HEGRA gelingen könnte, diese VHE-Photonen bei einigen Supernova-Überresten nachzuweisen. Aufgrund der hohen Energiedichte der kosmischen Strahlung in unserer Galaxie könnte ein Verständnis ihrer Beschleunigung von wesentlicher Bedeutung für das Verständnis der Galaxienentwicklung sein. Dazu nur ein Beispiel: Infolge der häufigen Supernova-Explosionen im Frühstadium der Entwicklung von Galaxien sollte die kosmische Strahlung einen großen Teil der anfangs interstellaren Materie aus Galaxien herausdrängen und dadurch die weitere Entwicklung massiv mitbestimmen.

Die leuchtkräftigsten bisher gefundenen VHE-Quellen gehören zur Klasse der aktiven galaktischen Kerne. Dem weithin akzeptierten Paradigma zufolge befinden sich diese Objekte, super-massive Schwarze Löcher von  $10^7$  bis  $10^9$  Sonnenmassen, im Zentrum vieler großer Galaxien. In manchen der aktiven galaktischen Kerne führen verschiedene Prozesse, wahrscheinlich unter maßgeblicher Beteiligung von Materieakkretion des Schwarzen Lochs, zur Entstehung zweier riesiger kollimierter Materieausflüsse (Jets), die die Galaxie in entgegengesetzter Richtung, teilweise mit relativistischen Geschwindigkeiten durchqueren und manchmal sogar noch weit über die sichtbare Galaxie hinausragen. VHE-Gamma-Strahlung hat man bisher von BL-Lac-Objekten nachgewiesen, einer Untergruppe der so genannten Blazare, das heißt von aktiven galaktischen Kernen, bei denen einer der Jets auf den Beobachter gerichtet ist. Hierzu zählen die Galaxien Markarian 421 (Mkn 421) und Markarian 501 (Mkn 501), auf die weiter unten eingegangen wird. Die VHE-Beobachtungen liefern einzigartige Informationen über die Struktur und Zusammensetzung der Jets und zusätzlich Hinweise auf die Art der Energie-Extraktion aus dem Schwarzen Loch (Rotationsenergie) oder aus der Umgebung des Schwarzen Loches (Gravitationsenergie aus Materieakkretion). Wahrscheinlich wird die VHE-Strahlung in diesen Objekten durch beschleunigte Elektronen und Positronen in so genannten inversen Compton-Stößen erzeugt. Die TeV-Elektronen (oder Positronen) geben dabei einen beträchtlichen Teil ihrer Energie in einem Stoß an niederenergetische Photonen ab. In sehr dichten Quellen können zudem auch Bremsstrahlungsprozesse eine Rolle spielen.

Mit VHE-Photonen von BL-Lac-Objekten lässt sich noch ein ganz anderer, besonders interessanter Aspekt untersuchen. Auf dem langen Weg von den extragalaktischen Quellen können die TeV-Photonen ( $\gamma_{\text{TeV}}$ ) mit den Photonen der extragalaktischen Infrarot-Hintergrundstrahlung ( $\gamma_{\text{IR}}$ ) wechselwirken und durch Paarbildungsprozesse ( $\gamma_{\text{TeV}} + \gamma_{\text{IR}} \rightarrow e^+e^-$ ) vernichtet werden<sup>3)</sup>. Die gemessene Form der Energiespektren extragalaktischer TeV-Quellen enthält Informationen über die noch unbekanntere Intensität der Hintergrundstrahlung im Wellenlängenbereich von 1 – 50  $\mu\text{m}$ , da die „extra-

2) Lediglich bei den Teilchen der höchsten gemessenen Energien ist die Ablenkung weitgehend vernachlässigbar, sodass aus der rekonstruierten Ankunftsrichtung vermutlich auf den Ursprung geschlossen werden kann.

3) Es sei angemerkt, dass TeV-Photonen nicht mit den Photonen des 2,7-K-Mikrowellenhintergrundes wechselwirken, weil die Schwerpunktsenergie nicht zur Bildung eines  $e^+e^-$ -Paares ausreicht.

galaktische Extinktion“ der VHE-Photonen durch Paarbildungsprozesse mit zunehmender Energie sehr schnell ansteigt und die gemessenen Energiespektren dann einen charakteristischen Abfall zeigen. Da die Infrarot-Hintergrundstrahlung durch die Abstrahlung von Sternen, aktiven galaktischen Kernen und Staub seit der Entstehung des Universums zustande kommt, lassen sich aus der Messung wichtige Schlüsse über die Geschichte der Stern- und Galaxienentwicklung und somit über die Strukturbildung des Universums ziehen. Die Zukunft der VHE-Gamma-Astronomie liegt sicher zum Teil in diesem Gebiet der beobachtenden Kosmologie. Direkte Messungen der Infrarot-Hintergrundstrahlung sind wegen des Streulichtes aus dem Sonnensystem und der Eigenstrahlung unserer Galaxie außerordentlich schwierig.

### Nachweis durch Cherenkov-Licht aus der Atmosphäre

Während Röntgenstrahlung mit keV-Energien und Gamma-Strahlung bis zu einigen 10 GeV aufgrund der Absorption in der Erdatmosphäre von Satelliten aus gemessen werden, ist dies im VHE-Energiebereich wegen der geringen Photonenströme de facto unmöglich. Auf Satelliten sind zurzeit nur Nachweisflächen in der Größenordnung von  $1 \text{ m}^2$  machbar (beim Compton-Observatorium sind es ca.  $0,25 \text{ m}^2$ ). Die integralen Gamma-Flüsse astrophysikalischer Quellen fallen aber typischerweise ungefähr umgekehrt proportional zur Energie ab. So beträgt der Fluss der stärksten galaktischen VHE-Quelle, des Krebs-Nebels, oberhalb 1 TeV ungefähr ein Photon pro Tag und  $100 \text{ m}^2$ . Die Cherenkov-Teleskope von HEGRA haben dagegen eine effektive Nachweis-Fläche von mehr als  $10^5 \text{ m}^2$ . Die dabei ausgenutzte Technik der Luftschauerbeobachtungen wird im Folgenden beschrieben.

Dringt ein sehr hochenergetisches Photon in die Atmosphäre ein, so erzeugt es in etwa 20 km Höhe im Kernfeld eines Luftmoleküls ein  $e^+e^-$ -Paar. Die Positronen und Elektronen erzeugen dann durch Bremsstrahlung erneut Photonen, die ihrerseits wieder zu Paarerzeugungen führen. In einem kaskadenartigen Prozess wird so die gesamte Primärenergie aufgebraucht; es entsteht ein so genannter elektromagnetischer Luftschauer, der schließlich durch Energieverluste der sekundären Teilchen ausstirbt (siehe Infokasten „Stereoskopische Luftschauerbeobachtungen“). Für ein primäres Photon mit  $10^{12} \text{ eV}$  erreicht der Schauer sein Maximum mit rund 1000 Elektronen und Positronen in etwa 8 km Höhe. Für die VHE-Gamma-Astronomie ist es nun entscheidend, dass die Elektronen und Positronen des Luftschauers in der Atmosphäre Cherenkov-Licht erzeugen, das am Erdboden im ultravioletten bis blauen Wellenlängenbereich auch dann noch nachgewiesen werden kann, wenn die erzeugenden Teilchen den Erdboden selbst gar nicht erreichen. Cherenkov-Licht entsteht immer dann, wenn sich eine elektrische Ladung – hier Elektron und Positron – in einem Medium

schneller bewegt als das Licht in diesem Medium; bei einem Brechungsindex von 1,0001 in 8 km Höhe über dem Erdboden beträgt diese Grenzgeschwindigkeit 99,99% der Vakuumlichtgeschwindigkeit. Das Cherenkov-Licht, stark nach vorne gerichtet, leuchtet am Erdboden eine Kreisfläche mit einem Radius von 120 m gleichmäßig aus und fällt dann nach außen ab. Es lässt sich mit Sammelspiegeln von typischerweise 3 – 10 m Durchmesser (die nur einen winzigen Teil der ausgeleuchteten Kreisfläche überdecken) optisch abbilden und mit Hilfe von Photomultipliern nachweisen. Man erhält im empfindlichen Wellenlängenbereich der Photomultiplier etwa zehn Cherenkov-Photonen pro 100 GeV Primärenergie und  $\text{m}^2$ . Der Cherenkov-Lichtblitz dauert nur wenige Nanosekunden und lässt sich daher von den statistisch eintreffenden Photonen des Nachthimmels trennen. Aufgrund der geringen Intensität des Cherenkov-Lichtblitzes sind Beobachtungen nur bei klarem und im wesentlichen mondlosen Nachthimmel möglich.

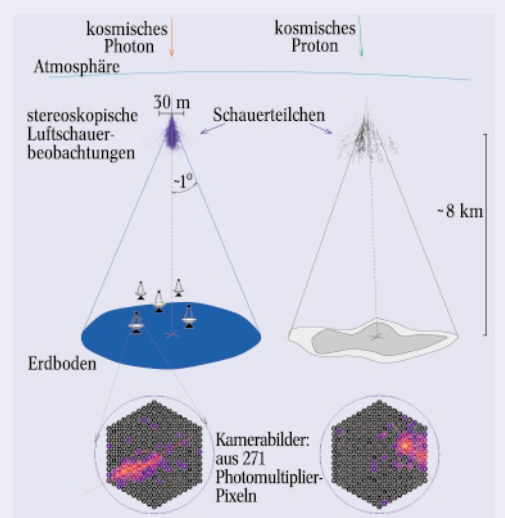
Die primären VHE-Photonen werden also indirekt über das in der Atmosphäre durch Luftschauer erzeugte Cherenkov-Licht nachgewiesen. Eine Analyse des Abbildes eines Luftschauers in der Fokalebene des Sammelspiegels ermöglicht es dann, die Richtung und Energie des Primärteilchens zu bestimmen sowie den Untergrund zu reduzieren (siehe Infokasten „Stereoskopische Luftschauerbeobachtungen“). Das HEGRA-Experiment umfasst darüber hinaus noch weitere Felder von Luftschauerdetektoren, mit denen sich auch das Energiespektrum und die chemische Zusammensetzung der hadronischen Komponente der galaktischen kosmischen Strahlung bis  $10^{16} \text{ eV}$  erforschen lässt [3]. Auf diese Experimente wird hier aus Platzgründen nicht näher eingegangen.

### Die HEGRA-Cherenkov-Teleskope

Fünf der insgesamt sechs HEGRA-Teleskope sind von der gleichen Bauart und bilden das stereoskopische Cherenkov-Teleskopsystem [4]. Sie besitzen einen Spiegel mit einem Durchmesser von 3,5 m (Abb. 2), in dessen Fokalebene sich eine Kamera aus 271 Photomultipliern befindet mit einem Gesichtsfeld von  $4,3^\circ$  Durch-

#### Stereoskopische Luftschauerbeobachtungen

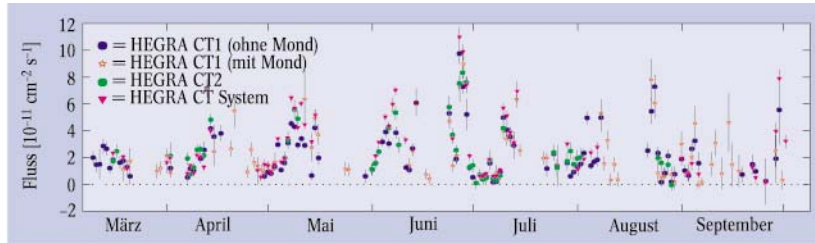
Das primäre Photon löst einen Luftschauer aus, der in der Atmosphäre einen Cherenkov-Lichtkegel erzeugt (linkes Bild). Über das Cherenkov-Licht wird der Luftschauer auf die Kamera abgebildet. Die Bilder sind grob ellipsenförmig. Die lange Halbachse spiegelt das longitudinale Schauerprofil wider. Die kurze Halbachse zeigt die laterale Ausdehnung des Schauers durch Vielfachstreuung. Das Teleskopsystem triggert, wenn mindestens zwei Teleskope koinzident Lichtsignale empfangen. Bereits mit den Bildern von zwei Teleskopen lässt sich die Schauerachse und somit die Herkunftsrichtung des Primärphotons eindeutig rekonstruieren. Schauer, die von Teilchen der geladenen und isotrop einfallenden kosmischen Strahlung ausgelöst werden (rechtes Bild), sind aufgrund der bei starken Wechselwirkungen entstehenden großen Transversalimpulse breiter und durch Schauerfluktuationen auch unregelmäßiger. Diese Eigenschaften spiegeln sich in den Bildern wider. Exemplarisch ist unten je ein Kamerabild eines photon- und eines hadroninduzierten Luftschauers gezeigt. Aus der stereoskopisch rekonstruierten Richtung und über die Form der Schau-



erbilder lässt sich insgesamt der Untergrund durch hadroninduzierte Schauer (für eine Punktquelle) um einen Faktor  $O(10^4)$  unterdrücken.

messer. Vier dieser Teleskope stehen an den Ecken eines Quadrats mit 100 m Seitenlänge und eines steht im Zentrum. Das Besondere des HEGRA-Experimentes ist, dass die fünf Teleskope gemeinsam benutzt werden, um Schauer stereoskopisch zu beobachten. Zu diesem Zweck verwendet man nur Schauer, die koinzident in mindestens zwei Teleskopen registriert werden. Die verschiedenen Bilder desselben Luftschauers erlauben es, die Schauerachse dreidimensional zu rekonstruieren und die Herkunftsrichtung der Primärteilchen mit einer in diesem Energiebereich zuvor unerreichten Auflösung

**Abb. 2:** Eines der fünf gleichartigen Cherenkov-Teleskope des stereoskopischen HEGRA-Teleskopsystems auf der Kanarischen Insel La Palma. Der 8,5-m<sup>2</sup>-Spiegel ist aus einzelnen Segmenten mit je 60 cm Durchmesser aufgebaut und fokussiert das in der Atmosphäre erzeugte Cherenkov-Licht auf die Kamera in der Fokalebene. Die Kamera besteht aus 271 Photomultipliern, die ein Gesichtsfeld von 4,3° Durchmesser überdecken.



**Abb. 3:** Der Fluss von Photonen mit  $E > 1,5$  TeV aus der Richtung des BL-Lac-Objektes Mkn 501, gemessen mit dem Cherenkov-Teleskopsystem und mit zwei Einzelteleskopen, „CT1“ und „CT2“. Das Teleskop CT2 wurde im August 1998 in das stereoskopische System integriert, welches nun aus fünf Teleskopen besteht. Jeder Datenpunkt entspricht dem Messergebnis einer Nacht. Die Lücken in der Lichtkur-

ve entstanden durch Beobachtungspausen aufgrund von Mondschein. Nur das Einzelteleskop CT1 wurde teilweise auch bei Mondschein betrieben. Man erkennt, dass der Fluss von Tag zu Tag um weit mehr als einen Faktor 2 variiert und in Ausbrüchen um mehr als eine Größenordnung ansteigt. Es ist noch nicht bekannt, welche Prozesse zu diesen Ausbrüchen führen.

von 0,1° zu bestimmen. Da die Atmosphäre wie ein aktives Kalorimeter wirkt, ist die Menge des den Erdboden erreichenden Cherenkov-Lichts in guter Näherung proportional zur Energie des Primärphotons. Kennt man die Lage der Schauerachse, so genügen die Lichtdichtemessungen an den Positionen der Teleskope, um Energieauflösungen zwischen 10 % und 20 % zu erreichen.

Neben den geringen Cherenkov-Lichtintensitäten besteht das Hauptproblem beim Nachweis der kosmischen Photonen mit der Luftschauertechnik in dem Untergrund der geladenen kosmischen Strahlung, die mit einer hohen Rate isotrop einfällt und deren Teilchen ebenfalls Luftschauer erzeugen. Innerhalb des typischen Gesichtsfeldes von einigen Grad Öffnungswinkel beobachtet man etwa 10000-mal mehr hadronische Schauer als photoninduzierte Schauer. Das stereoskopische Teleskopsystem von HEGRA erreicht eine Unterdrückung dieses Untergrundes um einen Faktor  $O(10^4)$  für Punktquellen! Dank seiner exzellenten Winkelauflösung und dieser wirkungsvollen Unterdrückung des hadronischen Untergrundes ist das vollständige HEGRA-Teleskopsystem nunmehr das empfindlichste Instrument der VHE-Gamma-Astronomie für Energien oberhalb von 500 GeV weltweit. HEGRA verfügt über

ein weiteres, als unabhängiger Detektor betriebenes Teleskop (CT1), vor allem zur Überwachung variabler Quellen. Bei einem Einzelteleskop wird die Projektion der Richtung eines Ereignisses ermittelt. Das Signal einer Punktquelle macht sich dann als ein Überschuss von Ereignissen in der Nähe einer bestimmten Projektionsrichtung bemerkbar. Tatsächlich benutzte die Whipple-Kollaboration ein solches Einzelteleskop mit einem Spiegel von 10 m Durchmesser, um 1989 erstmalig die VHE-Strahlung des Krebs-Nebels signifikant nachzuweisen und in den folgenden Jahren die beiden aktiven galaktischen Kerne Mkn 421 und Mkn 501 als VHE-Quellen zu entdecken.

### Die extragalaktischen Objekte Mkn 501 und Mkn 421

Im März 1997, kurz nachdem HEGRA die stereoskopischen Messungen mit vier Teleskopen begonnen hatte, stieg die VHE-Intensität von Markarian 501, einer etwa 500 Millionen Lichtjahre entfernten Galaxie des BL-Lac-Typs stark an und sie wurde zur hellsten bekannten VHE-Quelle am Himmel. In den darauf folgenden Monaten beobachtete HEGRA, zusammen mit anderen VHE-Observatorien weltweit, dramatische Aktivitätsausbrüche und -einbrüche [5]. Das Signal der Quelle war so stark, dass es auch als „Test-Gamma-Strahl“ zur Überprüfung der Funktionalität des neuen Instrumentes benutzt werden konnte. Während starker Aktivitätsausbrüche wurden bis zu 700 Photonen je Stunde (1997 insgesamt 38000 TeV-Photonen) registriert, was einer Flusssteigerung um einen Faktor von rund 30 im Vergleich zu den Vorjahren entspricht. Abbildung 3 zeigt die mit den HEGRA-Cherenkov-Teleskopen gemessene Aktivität von Mkn 501 während 1997 [5]. Einzelne Aktivitätsausbrüche, deren Ursache noch nicht geklärt ist, sind deutlich zu erkennen. Es könnte sein, dass jeder Ausbruch dem Aufeinanderprallen zweier Teilgebiete des Materie-Jets entspricht, die sich mit unterschiedlicher Geschwindigkeit ausbreiten. Das über die 1997er Beobachtungen zeitgemittelte VHE-Spektrum ist in Abbildung 4 gezeigt [5]. Es lässt sich durch ein Potenzgesetz bei niedrigen Energien, modifiziert durch ein exponentielles Abfallen bei Energien oberhalb von 5 TeV, beschreiben. Aufgrund der sehr guten Energieauflösung des Instrumentes ist das Spektrum von Mkn 501 in seiner Qualität unübertroffen. Photonen wurden bis zu einer Energie von 16 TeV nachgewiesen. Dies hatten wir nicht von vornherein erwartet, denn es war nicht klar, ob Photonen dieser Energie die Erde erreichen können, ohne durch Paarbildungsprozesse mit der intergalaktischen Infrarotstrahlung absorbiert zu werden. Die Beobachtung von Mkn-501-Photonen mit Energien bis zu 16 TeV lässt sich, für sich genommen, bereits dazu benutzen, die Intensität der intergalaktischen Strahlungsfelder nach oben hin signifikant einzuschränken.

Auch das BL-Lac-Objekt Mkn 421 wurde mit den HEGRA-Teleskopen ähnlich detailliert untersucht. Hier beobachtete HEGRA eine stark veränderliche Aktivität, die jedoch im Mittel um fast eine Größenordnung geringer war als bei Mkn 501. Das über die Beobachtungen der Jahre 1997 und 1998 zeitgemittelte Spektrum ist in Abbildung 4 ebenfalls dargestellt. Der Fluss fällt mit ansteigenden Energien deutlich schneller ab als bei Mkn 501. Aufgrund der ähnlichen Entfernungen beider Quellen (etwa 450 Millionen Lichtjahre für Mkn 421), muss man den Unterschied auf die inhären-

ten Eigenschaften der Quelle zurückführen.

Schließlich hat HEGRA gemeinsam mit den Röntgensatelliten ASCA, BeppoSAX und RXTE intensive Beoberkungskampagnen durchgeführt. Durch die beobachteten korrelierten Aktivitätsänderungen können die verschiedenen physikalischen Prozesse der Emission und der extragalaktischen Absorption getrennt werden. Die Eigenschaften der Emission bei den verschiedenen Energien lassen sich durch Synchrotronstrahlung (Röntgen) und durch inverse Compton-Prozesse (TeV-Photonen) beschreiben.

### Die galaktischen Objekte Krebs-Nebel und Cassiopeia A

Der Krebs-Nebel, die erste Quelle, bei der VHE-Emission nachgewiesen wurde, befindet sich in unserer Milchstraße. Er ist der 6500 Lichtjahre entfernte Überrest einer Supernova-Explosion aus dem Jahre 1054 und gilt aufgrund seines zeitlich stabilen Flusses im untersuchten Energiebereich inzwischen als Eichquelle. Das Energiespektrum konnte von HEGRA im Energiebereich von 500 GeV bis zu 20 TeV präzise vermessen werden und wird in diesem Bereich gut durch ein Potenzgesetz beschrieben. Vom Radiowellenlängenbereich bis zu den Energien von vielen TeV ist das Energiespektrum des Krebs-Nebels in den wesentlichen Zügen verstanden. Der Großteil der Strahlung ist nicht-thermischen Ursprungs und wird von relativistischen Elektronen emittiert. Genau wie im Falle von Mkn 501 glaubt man, dass die nicht-thermische Strahlung bis zu Photonenergien von etwa 100 MeV Synchrotronstrahlung der Elektronen ist, während die höherenergetische Strahlung durch inverse Compton-Prozesse erzeugt wird. Die Kombination der Beobachtungen bei niedrigen Energien mit den VHE-Beobachtungen erlaubt es, das mittlere Magnetfeld in der für die nicht-thermische Strahlung verantwortlichen Region des Nebels zu 15 – 20 nT zu bestimmen (zum Vergleich: das mittlere Magnetfeld des interstellaren Mediums beträgt 0,5 nT). Die zugrunde liegenden Elektronenenergien müssen dabei bis hin zu 100 TeV reichen.

Von Cassiopeia A, einem ca. 320 Jahre alten Supernova-Überrest in 10000 Lichtjahren Entfernung (siehe Infokasten „Supernova-Überreste und Teilchenbeschleunigung“), zeigen die HEGRA-Beobachtungen ein mögliches Signal [6]. Cassiopeia A ist die hellste Radioquelle am Himmel. Eine Beobachtungsdauer von insgesamt 128 Stunden ergab einen Ereignisüberschuss mit einer statistischen Signifikanz von 4,5 Standardabweichungen. Die wichtigste Frage ist, ob dieses mögliche Signal auf beschleunigte Elektronen hinweist, oder aber auf Protonen, die dann zum Fluss der hadronischen kosmischen Strahlung beitragen. Die Messung des VHE-Spektrums dieser Quelle könnte diese Frage klären und erstmals eine Quelle der hadronischen kosmischen Strahlung direkt nachweisen.

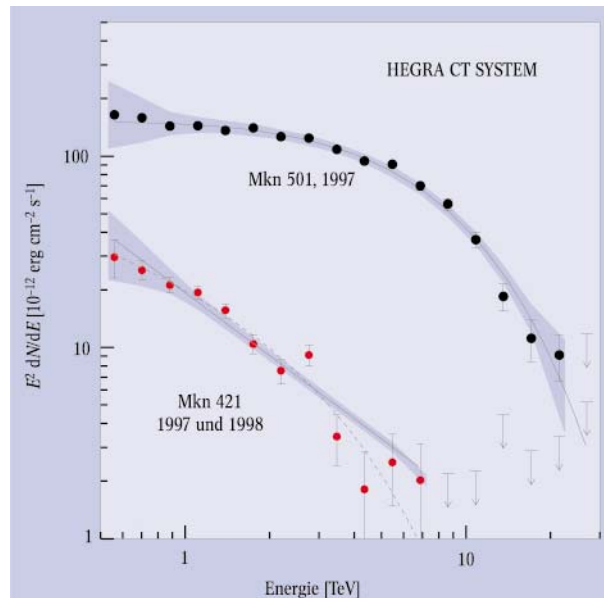
### Weitere Studien

Beschleunigte Hadronen sollten in vielen extragalaktischen Objekten mit hoher Energiedichte existieren. In den so genannten Starburst-Galaxien finden derart viele Supernova-Ereignisse statt, dass sich bei optimistischer Abschätzung (z. B. für die Galaxie M 82) die Möglichkeit zeigt, die erhöhte Dichte hochenergetischer Hadronen eventuell bereits mit den heutigen, gewiss aber mit zukünftigen Cherenkov-Teleskopen nachweisen zu können. Ähnliches gilt für nahe Galaxienhaufen,

wie z. B. für den aus vielen hundert Galaxien bestehenden Perseushaufen. In ihnen sollte eine riesige Population von „kosmischer Strahlung“ durch die individuellen Supernovae der Mitgliedsgalaxien oder aber auch durch „geschockte“ galaktische Winde und Akkretionsstoßfronten beschleunigt worden sein. Akkretionsstoßfronten entstehen dadurch, dass der Galaxienhaufen Materie aufammelt, also akkretiert, die dabei auf das so genannte Intra-Cluster-Gas „prallt“. In der bisher verfügbaren Zeit konnte HEGRA die VHE-Spuren der hochenergetischen Hadronen noch nicht eindeutig nachweisen, deren Energiedichte zumindest in unserer Galaxie die der hochenergetischen Elektronen um einen Faktor 100 übertrifft. Mit Ausnahme des möglichen Signals von Cassiopeia A lassen sich zur Zeit alle Beobachtungen durch beschleunigte Elektronen erklären, obwohl es auch alternative Ansätze gibt, die VHE-Signale von Mkn 501 und Mkn 421 durch beschleunigte Hadronen zu erklären. Die VHE-Gamma-Astronomie zum Studium nicht-thermischer Hadronen wartet also noch darauf, mit den heutigen, vielleicht aber auch erst mit den zukünftigen Cherenkov-Teleskopen erschlossen zu werden.

### Zukünftige Projekte

Weltweit gibt es mehr als ein halbes Dutzend Forschergruppen (z.B. Cangaroo, CAT, Durham, HEGRA, Telescope Array, Whipple), die auf der Nord- und der Südhalbkugel Cherenkov-Teleskope betreiben. Während das weitere Studium der vier zweifelsfrei etablierten VHE-Quellen – Mkn 501, Mkn 421, Krebs-Nebel sowie der nur vom Südhimmel aus beobachtbare Pulsar PSR B1706-44 – darüber hinausgehende, wichtige Erkenntnisse verspricht, werden zur Zeit kontinuierlich neue Klassen von Objekten auf Gamma-Emission hin unter-



**Abb. 4:** Die VHE-Energiespektren der beiden Galaxien Mkn 501 (1997) und Mkn 421 (1997-1998). Die Flüsse beider Quellen wurden mit dem Quadrat der Energie multipliziert und stellen somit ein Maß für den Energiefluss pro logarithmischer Bandbreite dar. Die Fehlerbalken zeigen die statistischen Fehler, die schraffierten Bänder zeigen die Abschätzung des systematischen Fehlers auf die Form der Spektren. Zusätzlich gibt es noch eine 15%-Unsicherheit auf der absoluten Energieskala. Obwohl beide Galaxien BL-Lac-Objekte sind und sich in ähnlichen Entfernungen von uns befinden, unterscheiden sich die Spektren deutlich voneinander. Dieses muss man auf inhärente Unterschiede der beiden Quellen zurückführen.

sucht. Zudem wird in Deutschland an zwei Nachfolgeprojekten gearbeitet. Das H.E.S.S.-Projekt (High Energy Stereoscopic System) ist ein System von anfangs 4 und schließlich 16 Cherenkov-Teleskopen mit je einem Reflektor von 12 m Durchmesser und ist der direkte Nachfolger des stereoskopischen HEGRA-Teleskopsystems. Die ersten vier Teleskope werden nacheinander in den Jahren 2000 bis 2002 in Namibia aufgebaut. Das System wird eine Energieschwelle von etwa 40 GeV erreichen und eine um eine Größenordnung bessere Empfindlichkeit als das HEGRA-System besitzen. Ein zweites Projekt, MAGIC (Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov-Telescope), zielt auf eine möglichst niedrige Energieschwelle von zunächst 30 GeV, die durch eine große Spiegelfläche von 17 m Durchmesser erreicht werden soll. Dieses Teleskop soll im Jahr 2001 auf dem Gelände des jetzigen HEGRA-Experiments in Betrieb genommen werden. Künftige Hybrid-Photodetektoren mit sehr hohen Quanteneffizienzen anstelle von Photomultipliern könnten in einem zweiten Schritt die Energieschwellen solcher Teleskope noch um einen Faktor 2 senken. Sowohl in den USA (Projekt VERITAS) als auch in Australien (Projekt Cangaroo III) werden nach dem Vorbild von HEGRA stereoskopische Systeme aufgebaut. Mit den neuen Instrumenten eröffnet sich auch ein sehr interessanter Aspekt der Astroteilchenphysik, nämlich die Suche nach der Vernichtungsstrahlung von Neutralinos aus dem galaktischen Zentrum [7]. Neutralinos sind hypothetische Teilchen, die man erwartet, wenn die schwache, elektromagnetische und starke Wechselwirkung mit der Gravitationswechselwirkung vereinigt wird (supersymmetrische Theorien). Diese Teilchen könnten sich aufgrund der Gravitation im Zentrum unserer Galaxis ansammeln und sich paarweise in Photonen im VHE-Bereich vernichten, wenn die Massen der Teilchen entsprechend hoch sind. Diese Teilchen könnten auch einen Beitrag zur Dunklen Materie in unserem Kosmos leisten.

Nachdem die VHE-Gamma-Astronomie mit den derzeitigen Instrumenten sehr erfolgreich begonnen hat, erwarten wir von den neuen, weltweit in Angriff genommenen Projekten in den nächsten Jahren einen enormen Aufschwung dieses Gebietes der Physik.

### Danksagung

Die hier dargestellten Ergebnisse sind das Resultat der gemeinsamen Arbeit der HEGRA-Kollaboration. Die Autoren danken den Kollegen der HEGRA-Kollaboration für die Diskussionen der letzten Jahre, die wesentlich zu ihrem Verständnis der experimentellen Methodik beigetragen haben. Felix Aharonian und Dieter Horns sei für die aufmerksame Durchsicht des Manuskripts gedankt.

### Literatur

- [1] H. J. Völk, F. A. Aharonian (Hrsg.), TeV Gamma-Ray Astrophysics, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht (1996)
- [2] F. A. Aharonian, C. W. Akerlof, *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.* **47**, 243 (1997)
- [3] F. Arqueros et al. (The HEGRA Collaboration), astro-ph/9908202
- [4] A. Daum et al., *Astropart. Phys.* **8**, 1 (1997)
- [5] F. A. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **342**, 69 (1999); *ibid.* **349**, 11 (1999); *ibid.* **349**, 27 (1999); *ibid.* **350**, 757 (1999)
- [6] G. Pühlhofer et al., *Proc. 26th ICRC*, **3**, 492 (1999)
- [7] L. Bergstrom, P. Ullio, J. Buckley, *Astropart. Phys.* **9**, 137 (1998) oder astro-ph/9712318