

Scharfe Augen für höchste Energie

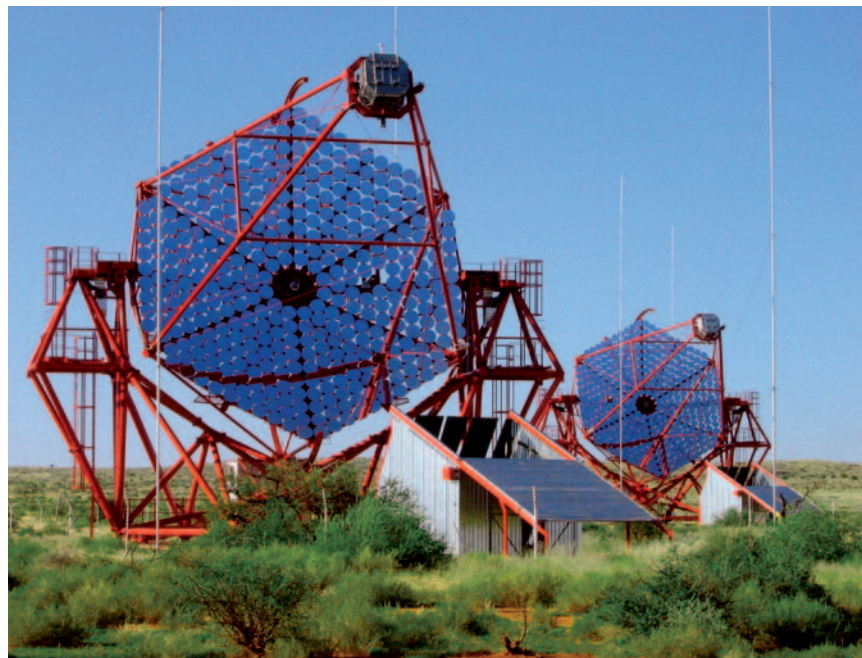
Die H.E.S.S. -Teleskope durchforsten den Himmel nach Quellen hochenergetischer Gammastrahlung.

Christopher van Eldik und Werner Hofmann

Vier mächtige Spiegelteleskope zeigen im Hochland von Namibia gen Himmel. Ungestört vom Licht großer Städte eröffnet sich hier ein optimaler Blick auf den zentralen Bereich der Milchstraße und für die Suche nach den rätselhaften Quellen hochenergetischer Gammastrahlung.

Viele Namibia-Reisende kennen die C26, eine Staubpiste, die von Windhuk nach Südwesten in das Khomas-Hochland, über den Gamsberg-Pass mit seinen reizvollen Aussichten und weiter durch den malerischen Namib-Naukluft-Park nach Walvis Bay an der Atlantikküste führt. Auf der Farm Goellschau, 100 km von Windhuk und etwa 5 km abseits der Straße, findet sich eine unerwartete Attraktion in der recht kargen, aber durch ihre Weitläufigkeit faszinierenden Landschaft: die vier riesigen Teleskope des High Energy Stereoscopic System, kurz H.E.S.S., welche Namibia zu einem Mekka der Hochenergie-Gamma-Astronomie machen. In mondlosen Nächten, wenn sich das Band der Milchstraße über das Firmament zieht, richten sich die vier mächtigen Spiegelteleskope auf ausgesuchte Himmelsregionen und zeichnen die schwachen Lichtspuren auf, die entstehen, wenn hochenergetische Teilchen – Gammaquanten sowie geladene Teilchen der kosmischen Strahlung – in die Atmosphäre eintreten. Bis zu 300 solcher Spuren werden jede Sekunde aufgezeichnet, nur ganz wenige davon stammen aber von hochenergetischen Gammaquanten. Diesen gilt das primäre Interesse des international zusammengesetzten H.E.S.S.-Teams. Diese Gammaquanten dienen als Boten, um kosmische Teilchenbeschleuniger in unserer Galaxis wie auch in fernen Galaxien zu untersuchen. Der Standort Namibia zeichnet sich aus durch einen optimalen Blick auf den zentralen Bereich unserer Milchstraße und auf das Galaktische Zentrum mit seinem supermassiven Schwarzen Loch. Zugleich bietet er klare Nächte, geringe Lichtverschmutzung durch Städte und ein mildes Klima, das es erlaubt, die Teleskope ohne kostenintensive Schutzgebäude zu betreiben. Doch woher rührt das Interesse der Wissenschaftler an der Gammastrahlung?

Die Erde ist einem permanenten Fluss elektromagnetischer Strahlung und Teilchenstrahlung aus dem Weltall ausgesetzt. Die elektromagnetische Strahlung überdeckt einen weiten Frequenzbereich, von Radiowellen (10^8 Hz und darunter) bis zu extrem



kurzwelliger Gammastrahlung (10^{29} Hz und darüber), entsprechend Energien pro Strahlungsquant von μeV bis zu mehr als 10^{14} eV. Teilchen der kosmischen Teilchenstrahlung erreichen sogar Energien bis zu 10^{20} eV. Die klassische optische Astronomie nutzt nur etwa eine des mindestens 70 Oktaven umfassenden Spektrums der elektromagnetischen Strahlung. Erst im Laufe des letzten Jahrhunderts erweiterten die Radio- und Infrarotastronomie das Beobachtungsfenster am langwelligeren Ende des Spektrums und die UV-, Röntgen- und Gammaastronomie am kurzwelligeren Ende. Da die

Die großen Spiegel der vier H.E.S.S.-Teleskope bestehen aus jeweils 382 Elementen mit einem Durchmesser von 60 Zentimetern.

KOMPAKT

- Da die Erdatmosphäre für Gammastrahlung undurchlässig ist, beobachtet man diese meist mithilfe von satellitengestützten Teleskopen.
- Deren Nachweisfläche ist jedoch zu gering, um hochenergetische Gammaquanten zu beobachten, da deren Häufigkeit mit wachsender Energie immer geringer wird.
- Erdgebundene Teleskope wie das High Energy Stereoscopic System H.E.S.S. können dagegen die durch die Gammaquanten ausgelösten Teilchenkaskaden anhand des von ihnen erzeugten Cherenkov-Lichts beobachten.
- H.E.S.S. gelang es mit dieser Methode u. a., erstmals die Stoßwelle einer Supernova als Quelle hochenergetischer Gammastrahlung abzubilden.

Dr. Christopher van Eldik und Prof. Dr. Werner Hofmann, Max Planck Institut für Kernphysik, Postfach 103980, 69029 Heidelberg

Atmosphäre diese lang- bzw. kurzwellige Strahlung jedoch meist absorbiert, lässt sie sich nur von hoch fliegenden Flugzeugen, Ballonen oder Satelliten aus beobachten. Der hohe Aufwand für diese Techniken zahlt sich jedoch aus, weil solche Beobachtungen eine neue Sicht auf das Universum eröffnen. Staubwolken etwa, die im optischen Bereich den Blick auf das Zentrum der Milchstraße verstellen, sind im Infrarot- und besonders im Gammabereich nahezu transparent.

Die beobachtete Strahlung ist in den meisten Frequenzbereichen thermischen Ursprungs, das heißt, sie wird von heißen Objekten emittiert. Abgesehen vom Urknall und vielleicht von der Hawking-Strahlung sehr leichter Schwarzer Löcher gibt es aber keine Objekte, die so heiß sind, dass sie Photonen im GeV- oder gar TeV-Bereich aussenden. Die Beobachtung hochenergetischer Gammastrahlung mit GeV- und TeV-Energien (10^9 bzw. 10^{12} eV) und darüber hinaus ist deshalb besonders reizvoll, weil diese sog. nicht-thermische Strahlung anderen Ursprungs sein muss. In der Tat folgt die Energieverteilung dieser Strahlung typischerweise Potenzspektren mit einer Flussdichte der Gammaquanten $F(E) \sim E^{-\Gamma}$ und einem „spektralen Index“ $\Gamma \sim 2-3$. Die Spektren enthalten keinerlei Hinweis auf eine charakteristische Energie- oder Temperaturskala, wie man sie bei der thermischen Strahlung findet. Die Gamma-Astronomie bei hohen Energien hat sich zum Ziel gesetzt, dieses „nicht-thermische Universum“ zu erforschen.

Es gilt als gesichert, dass kosmische Teilchenbeschleuniger geladene Teilchen – Elektronen, Positronen und Atomkerne – auf extrem hohe Energien beschleunigen. Die Gammastrahlung entsteht als Sekundärprodukt, wenn diese Teilchen mit interstellarer Materie oder Feldern wechselwirken. Bei der Kollision von Atomkernen mit Gasteilchen werden unter anderem neutrale Pionen erzeugt, die in zwei Gammaquanten zerfallen. Elektronen können bei der „Inversen Compton-Streuung“ Lichtquanten oder

Quanten des Mikrowellenhintergrunds auf GeV- und TeV-Energien hochstreuern (Infokasten). In beiden Fällen spiegelt die Energieverteilung der Gammaquanten das Spektrum der Primärteilchen wider. Kosmische Teilchenbeschleuniger, wie die unten näher besprochenen Supernova-Überreste, geben ihre Teilchen nur langsam – auf Zeitskalen von 1000 bis 10 000 Jahren – an ihre Umgebung ab, und die Teilchendichte in der Beschleunigungsregion ist sehr viel höher als im normalen interstellaren Medium. Daher sind diese Regionen besonders intensive Quellen von Gammastrahlung. Im Gegensatz zu den geladenen Teilchen, die auf ihrem Weg vom Beschleuniger zur Erde in interstellaren Magnetfeldern abgelenkt werden und jede Richtungsinformation verlieren, kann man mit Gammaquanten kosmische Beschleuniger direkt abbilden und damit die Quellen und Beschleunigungsmechanismen der kosmischen Teilchenstrahlung identifizieren und untersuchen.

Augen für hochenergetische Strahlung

Da die Atmosphäre für Gammastrahlung undurchlässig ist, erforscht man den MeV- und GeV-Energiebereich mit Satelliten-Experimenten. Solche Instrumente haben aber den Nachteil einer vergleichsweise kleinen Nachweisfläche. Mit wachsender Energie nimmt der Fluss der Gammaquanten rasch ab, so dass sich diese Technik für Energien oberhalb von einigen 10 GeV nicht mehr eignet. Gerade dieser Bereich ist aber für das Verständnis der kosmischen Teilchenbeschleuniger von großem Interesse. Hier hat die Cherenkov-Technik in den letzten Jahren einen Durchbruch ermöglicht [1].

Cherenkov-Teleskope nutzen die Erdatmosphäre als Nachweismedium. In der Nähe von Atomkernen der Lufthülle können Gammaquanten in Paare aus Elektronen und Positronen konvertieren, die bei Wechselwirkung mit Kernen wiederum neue Gammaquanten abstrahlen, welche ihrerseits konvertieren usw. Dadurch bildet sich in der oberen Atmosphäre eine Elektron-Positron-Kaskade aus, die mit zunehmender Tiefe langsam ausstirbt, da sich die Energie des Primärteilchens immer weiter verteilt, sodass irgendwann keine neuen Teilchen mehr erzeugt werden können (Abb. 1). Im Maximum der Kaskade – in etwa 10 km Höhe – enthält ein solcher „Teilchenschauer“ viele tausend Teilchen, wobei deren Zahl proportional zur Energie des primären Gammaquants zunimmt. Die meisten Schauerteilchen sind hochrelativistisch. In 10 km Höhe ist der Brechungsindex der Luft etwa 1,0001, die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Lichts damit $0,9999 c$, wobei c die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ist. Elektronen mit einer Energie oberhalb von 35 MeV fliegen damit schneller als Licht sich ausbreitet und emittieren – in Analogie zum Überschallknall eines mit Überschallgeschwindigkeit fliegenden Flugzeugs – Cherenkov-Licht im optischen und nahen UV-Bereich. Das in Form eines Kegels gebündelte Licht leuchtet auf dem

PROZESSE

Gammaquanten aus Proton-Kern-Kollisionen

Stöße von beschleunigten Protonen an Atomkernen der sie umgebenden Materie sind ein wichtiger Prozess zur Erzeugung hochenergetischer Gammaquanten. Bei einer typischen Gasdichte von einem Teilchen pro cm^3 beträgt die Lebensdauer eines Protons etwa 10^7 Jahre; typischerweise reagiert daher nur ein kleiner Teil aller Protonen innerhalb der Quelle. Protonen mit einer Energieverteilung $N_p(E) \sim E^{-\Gamma}$ erzeugen ein Gamma-Energiespektrum $N_\gamma(E) \sim E^{-\Gamma}$, d. h. der spektrale Index der Gammastrahlung entspricht dem der Primärteilchen, jedoch ist die Energie des Gammaquants etwa eine Größenordnung kleiner als die des primären Protons. Neben Protonen tragen in geringerem Umfang auch beschleunigte schwerere Kerne zur Gammaproduktion bei.

Inverse Compton-Streuung

In der Inversen Compton-Streuung wird ein niederenergetisches Photon, z. B. aus dem Mikrowellen-Hintergrund, an einem Elektron gestreut und kann dabei einen signifikanten Teil der Elektronen-Energie übernehmen. Im Strahlungsfeld des Mikrowellen-Hintergrunds mit einer Energiedichte von $0,26 \text{ eV/cm}^3$ verliert ein Elektron seine Energie auf Zeitskalen von $10^6/E_{\text{TeV}}$ Jahren durch die Inverse Compton-Streuung; dabei erzeugen Elektronen mit einer $E^{-\Gamma}$ -Energieverteilung ein flacheres Gamma-Spektrum der Form $E^{-(\Gamma+1)/2}$.

Erdboden eine Kreisfläche von über 120 m Radius aus (Abb. 1). Ein geeigneter Lichtdetektor auf dieser Fläche kann das Cherenkov-Licht und damit auch das primäre Gammaquant nachweisen. Die Nachweisfläche erhöht sich dadurch auf etwa 50 000 Quadratmeter, ein gewaltiger Vorteil gegenüber Satellitenexperimenten, die nur maximal einen Quadratmeter erreichen. Allerdings ist der Cherenkov-Lichtblitz extrem schwach – bei Gamma-Energien um 1 TeV treffen auf jeden Quadratmeter nur etwa 100 Photonen auf – und dauert nur einige Nanosekunden. Cherenkov-Teleskope nutzen daher große Spiegelflächen, um das Licht zu sammeln und auf eine „Kamera“ zu fokussieren. Die Kamera enthält Photodetektoren, gekoppelt mit einer schnellen Elektronik, welche effektive „Belichtungszeiten“ im Bereich von etwa 10 ns erlaubt; bei längeren Belichtungszeiten würde das schwache Lichtsignal im Restlicht des Nachthimmels untergehen.

Moderne Cherenkov-Teleskope verfügen über segmentierte Photodetektoren in der Fokalebene und können damit ein echtes Bild des Luftschauers aufzeichnen. Dieses Bild eines Luftschauers (Abb. 1) lässt sich grob vergleichen mit der Spur eines Meteors, der in der Erdatmosphäre verglüht. Aus der Orientierung des Luftschauers ergibt sich die Richtung des primären Gammaquants, aus der Intensität des Bildes – d. h. der Zahl der Teilchen im Luftschauber – seine Energie. Die Form des Luftschauers erlaubt es bis zu einem gewissen Grad, von Gammaquanten induzierte Elektron-Positron-Schauer von solchen zu trennen, welche die isotrop einfallende kosmische Strahlung auslöst.

An zwei solcher Instrumente, dem MAGIC-Teleskop auf La Palma und dem H.E.S.S.-Teleskopsystem in Namibia, sind deutsche Arbeitsgruppen maßgeblich beteiligt.¹⁾ H.E.S.S. gehört zu einer neuen Generation von stereoskopischen Cherenkov-Teleskopen, bei denen mehrere Teleskope die Teilchenkaskade aus verschiedenen Blickwinkeln beobachten. Mit einem einzelnen Teleskop ist es nämlich nicht ganz einfach, die exakte Orientierung der Kaskade im Raum und damit die genaue Richtung des Primärquants zu bestimmen – schließlich sieht man nur die Projektion der Kaskade in einer Ebene. Mehrere Teleskope dagegen bieten eine stereoskopische Sicht und erlauben eine eindeutige Rekonstruktion der Geometrie, in völliger Analogie zum räumlichen Sehen mit zwei Augen, und erzielen damit eine hohe Richtungsauflösung. Da hierdurch auch der genaue Abstand der Teleskope zur Kaskade bekannt ist, lässt sich die nachgewiesene Lichtmenge exakter in eine Schauerenergie umrechnen und somit die spektroskopische Auflösung verbessern. Koinzidenzmessungen mehrerer Teleskope erlauben es ferner, sowohl den Untergrund durch Kaskaden der kosmischen Strahlung als auch den Einfluss des Nachthimmelslichts zu reduzieren.

Im HEGRA-Teleskopsystem auf La Palma kam zum ersten Mal die stereoskopische Technik im praktischen Betrieb zum Einsatz.²⁾ H.E.S.S. hat die Empfindlichkeit mit einer weiter perfektionierten Technik um eine Größenordnung gesteigert. Die Spiegel der vier H.E.S.S.-

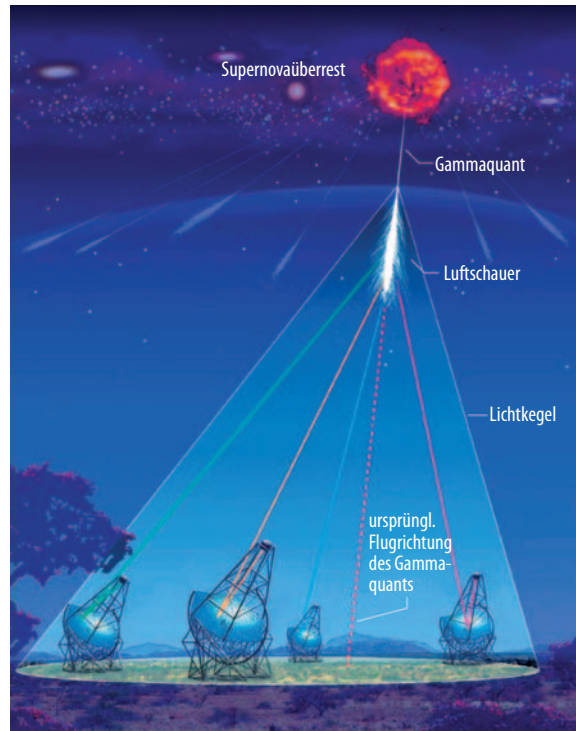


Abb. 1 Die in einer kosmischen Quelle erzeugten hochenergetischen Teilchen erzeugen sekundäre Gammaquanten, die sich im Gegensatz zu den geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung geradlinig ausbreiten und in der Erdatmosphäre eine Teilchenkaskade („Luftschauber“) auslösen, die auf die Strahlungsquelle zurückzeigt. Die Teleskope bilden das in der Teilchenkaskade erzeugte Cherenkov-Licht ab.

Teleskope haben eine Fläche von je 107 Quadratmetern und bestehen aus Kostengründen aus je 382 einzelnen Facetten, die das Cherenkov-Licht auf Kameras aus je 960 Photodetektoren abbilden. Die Spiegelfläche bestimmt die Nachweisschwelle des Instruments: Etwa 1000 Cherenkov-Photonen muss der Spiegel aufsammeln, um einen Luftschauber sicher nachzuweisen und ein gutes Bild der Kaskade zu liefern. Bei H.E.S.S. wird diese Zahl ab Gamma-Energien von etwa 100 GeV erreicht. Wichtig für den Erfolg von H.E.S.S. ist das große Gesichtsfeld von 5 Grad – etwa zehnmal größer als der Mond Durchmesser –, welches die systematische Durchmusterung ausgedehnter Himmelsbereiche erlaubt.

Die Milchstraße im Gamma-Licht

Selbst mit dem großen Gesichtsfeld der H.E.S.S.-Teleskope wären über 2000 Beobachtungsfelder erforderlich, um den ganzen Himmel abzudecken – bei einer Beobachtungsdauer von 10 Stunden pro Feld und einer jährlich verfügbaren Beobachtungszeit von etwa 1000 Stunden ein aufwändiges Unterfangen. Sinnvoller ist das Kartografieren eindimensionaler Strukturen. Einer der großen Erfolge von H.E.S.S. ist die erste sensitive Durchmusterung der Milchstraße nach TeV-Gammaquellen [2]. Dazu wurde die Galaxis mit einer typischen Schrittweite von 1° in überlappende Beobachtungsfelder aufgeteilt und verteilt über mehrere Jahre fast 1000 Stunden lang beobachtet (Abb. 2).

1) Bei H.E.S.S. arbeiten Wissenschaftler des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg und der Universitäten Berlin, Bochum, Erlangen, Hamburg, Heidelberg und Tübingen zusammen mit Arbeitsgruppen aus Frankreich, England, Irland, Polen, Armenien, Südafrika und Namibia.

2) vgl. Physikal. Blätter, März 2000, S. 47

Wie Perlen auf einer Schnur zeigt die Karte eine Vielzahl von Gammaquellen – jede ein kosmischer Teilchenbeschleuniger –, die sich entlang des galaktischen Äquators aufreihen. Während vor den H.E.S.S.-Beobachtungen in dieser Region nur drei Gammaquellen bekannt waren, existiert nun eine ganze Karte der Galaxis im Hochenergie-Gammalicht. Fast alle diese Objekte werden als ausgedehnte und strukturierte Quellen mit einer Größe von einigen zehntel Grad aufgelöst; bei einer typischen Entfernung von einigen 10 000 Lichtjahren impliziert das eine Größe der Strahlungsquellen von etlichen 10 Lichtjahren. Etwa eine Handvoll der Gammaquellen lässt sich eindeutig Supernova-Überresten zuordnen, rund 20 sind höchstwahrscheinlich mit Pulsarwindnebeln assoziiert, eine mit einem Binärsystem; bei weiteren 20 Objekten ist die Identifikation unsicher. Eine besonders interessante Klasse bildet ein knappes Dutzend Objekte, bei denen auf Röntgen- und Radiokarten kein plausibles Gegenstück zu finden ist, es daher außer der Gammaemission keine weiteren Hinweise auf hochenergetische Prozesse gibt. Im Folgenden werden wir einige dieser Objekte und Objektklassen näher unter die Lupe nehmen; eine Diskussion der mit H.E.S.S. bisher detektierten extragalaktischen Gammaquellen muss hier aus Platzgründen entfallen.

Supernova-Überreste – die Quellen der kosmischen Teilchenstrahlung ?

Der Energieinhalt kosmischer Teilchenstrahlung in unserer Galaxis wird auf $5 \cdot 10^{48}$ Joule geschätzt. Aus der Analyse von Strahlungsspuren in Meteoriten und anderen Messungen ist bekannt, dass sich die Intensität der kosmischen Strahlung in den letzten 10^9 Jahren nicht dramatisch verändert hat. Da die Teilchen aber auf einer (etwas von der Teilchenenergie abhängigen) Zeitskala von einigen 10^7 Jahren in den

intergalaktischen Raum hinaus diffundieren und verloren gehen, impliziert dies, dass die kosmische Strahlung mit etwa 10^{34} J/s „nachgefüttert“ werden muss. Supernova-Explosionen gelten als die plausibelste Energiequelle; bei einer Rate von einer galaktischen Supernova in etwa 30 Jahren und einer dabei freiwerdenden kinetischen Energie von 10^{44} Joule muss eine Supernova als Teilchenbeschleuniger eine Effizienz von etwa 10 Prozent aufweisen. Einen Mechanismus dafür bietet die Stoßwellenbeschleunigung: Wenn das in der Supernova-Explosion eruptionsartig ausgestoßene Material auf das interstellare Medium trifft, schiebt es dieses vor sich her und baut eine Stoßwelle auf. In den irregulären Magnetfeldern im Bereich der Stoßwelle können nun Teilchen gefangen werden und mehrfach zwischen dem ruhenden Medium vor der Stoßwelle und dem sich bewegenden Medium hinter der Stoßwelle hin- und herdiffundieren. Nach jedem Wechsel gewinnt das Teilchen Energie durch Streuung an den sich im Mittel auf das Teilchen zu bewegenden turbulenten Magnetfeldern. Der Energiezuwachs pro Zyklus, $\Delta E/E \sim v/c$, ist allerdings gering, da die Geschwindigkeit v der Schockwelle nur einige wenige Prozent der Lichtgeschwindigkeit beträgt. Der Beschleunigungsprozess ist daher sehr langsam, mit Zeitskalen von 100 bis 1000 Jahren. Da ferner bei jedem Zyklus eine gewisse Wahrscheinlichkeit besteht, dass das Teilchen aus dem Bereich der Stoßwelle hinausgestreut wird, entsteht ein Spektrum von Energien mit vielen niederenergetischen und wenigen hochenergetischen Teilchen. Relativ leicht lässt sich zeigen, dass die Schockbeschleunigung Potenzspektren mit einem spektralen Index von etwa $\Gamma = 2 - 2,2$ für starke Stoßwellen erzeugt. Da hochenergetische Teilchen schneller aus der Galaxis heraus diffundieren, ist das auf der Erde beobachtete Spektrum der kosmischen Strahlung steiler und hat einen Index von etwa 2,7. Mit der Beobachtung des Supernova-Überrestes RX J1713.7-3946 hat H.E.S.S. einen wichtigen

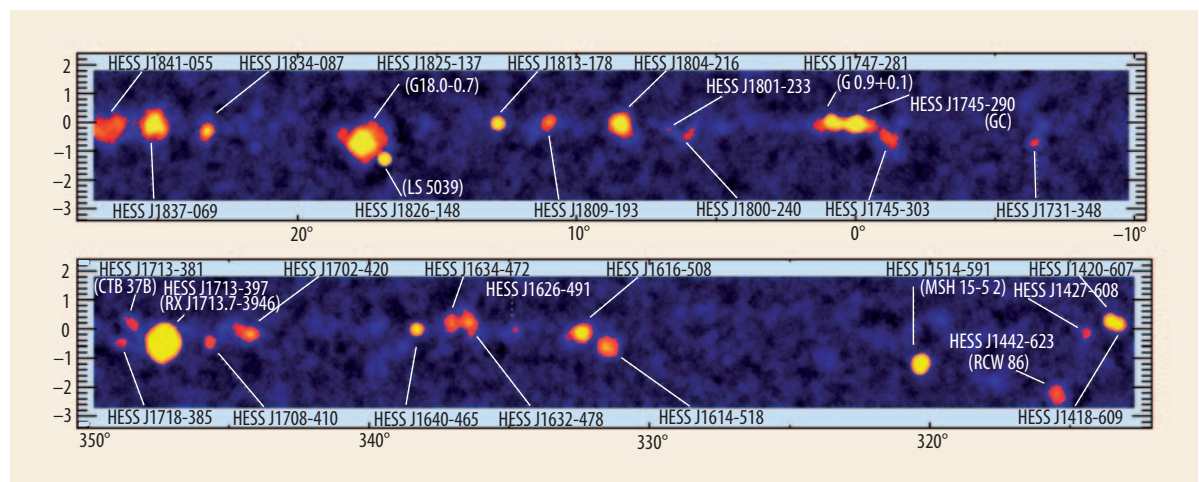


Abb. 2 Der zentrale Bereich der Milchstraße im Licht hochenergetischer Gammastrahlung als Ergebnis des H.E.S.S. Galactic Plane Survey. Das obere Band zeigt den Bereich von -10 bis $+27$

Grad galaktischer Länge, das untere den Bereich von 313° bis 350° (entsprechend -47° bis -10°). Die meisten der Gammaquellen sind ausgedehnt; nur eine Handvoll sind Punktquellen auf der Skala der

Auflösung von einigen Bogenminuten. Die Kennzeichnung der Strahlungsquelle, z. B. HESS J1825-137, bezieht sich auf ihre Position am Himmel (hier: $18\text{h } 25\text{m}$ Rektaszension, $-13,7^\circ$ Deklination).

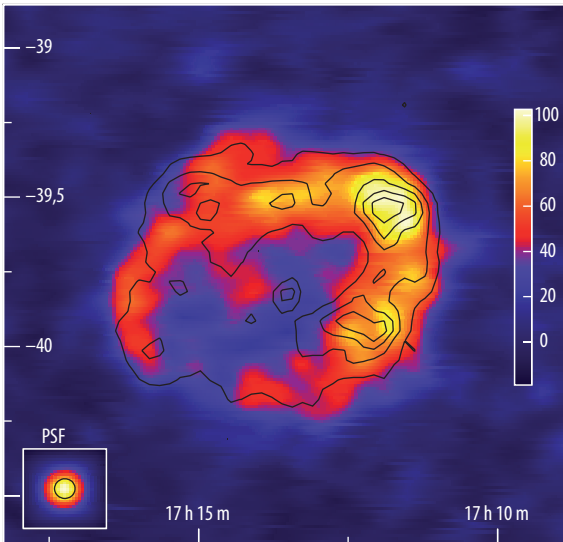


Abb. 3 Die Gammastrahlung des Supernova-Überrests RX 1713.7-3946 zeichnet genau die aus Röntgendaten (Konturlinien) bekannte Struktur der Supernova-Schale nach, die einen Durchmesser von knapp einem Grad besitzt [4]. Die runde Struktur in dem Inset links unten ist ein Maß für die Winkelauflösung (*point spread function*) und zeigt, wie eine Punktquelle aussehen würde.

Beitrag geleistet, dieses Szenario zu verifizieren [3, 4]. Zum ersten Mal gelang es, die Stoßwelle eines Supernova-Überrests als Quelle hochenergetischer Gammastrahlung abzubilden (Abb. 3). Überhaupt wurde damit zum ersten Mal die Struktur einer TeV-Quelle aufgelöst. Das Spektrum der Gammastrahlung folgt einem Potenzgesetz mit einem spektralen Index von 2, bricht dann aber bei Energien von einigen 10 TeV langsam ab. Unter der Annahme, dass die Gammastrahlung in der Kollision beschleunigter Protonen mit Gasteilchen entsteht, impliziert dies, dass dieser kosmische Teilchenbeschleuniger eine Grenzenergie von einigen 100 TeV erreicht.

Pulsarwindnebel – ein kosmisches Plasmalabor

Ein signifikanter Teil aller neu entdeckten Quellen scheint mit Pulsaren und Pulsarwindnebeln assoziiert zu sein – ein zumindest für uns etwas unerwartetes Ergebnis. Vermutlich sind auch etliche der bisher nicht identifizierten Quellen von diesem Typ.

Im Zentrum einer Supernova-Explosion entsteht häufig ein Pulsar, also ein schnell rotierender Neutronenstern, dessen Rotationsachse nicht mit der Ausrichtung seines starken Dipol-Magnetfelds übereinstimmt. Das mitbewegte Magnetfeld induziert elektrische Felder, in denen Elektron-Positron-Paare erzeugt und zu einem relativistischen Wind beschleunigt werden. Wenn das umgebende interstellare Material den Wind abbremst, werden die Teilchen isotrop gestreut: ein Pulsarwindnebel entsteht. Durch Synchrotronstrahlung und inverse Compton-Streuung leuchtet der Nebel im Röntgen- bzw. Gamma-Licht. Die Schockwellenbeschleunigung erklärt die typische, einem Potenzgesetz folgende Energieverteilung der Elektro-

nen (und Gammaquanten). H.E.S.S. liefert wichtige Erkenntnisse zu den Details der Beschleunigungsmechanismen und Energieumsetzung, die noch nicht verstanden sind.

Aus den mit H.E.S.S. gemessenen Gammaflüssen von Pulsarwindnebeln folgt, dass ein Pulsar etwa ein Prozent seiner Energie als hochenergetische Gammastrahlung abstrahlt, mit signifikanter Variation zwischen einzelnen Objekten. Extrapoliert man das Gammaskpektrum zu kleineren Energien, so zeigt sich, dass einige 10 Prozent der über das Dipolfeld des Pulsars abgestrahlten Energie letztlich in kinetische Energie hochenergetischer Elektronen umgewandelt werden – ein erstaunlicher Wirkungsgrad.

H.E.S.S.-Beobachtungen belegen, dass die meisten dieser kosmischen Elektronenbeschleuniger unerwartet große Objekte sind, mit einer Ausdehnung von einigen zehntel Grad, entsprechend einigen 10 Lichtjahren. Ferner sind die Gammaquellen oft gegenüber dem Pulsar versetzt (Abb. 4); dies liegt möglicherweise daran, dass Pulsare in der Supernova-Explosion einen Kick bekommen und mit einigen 100 km/s davonfliegen, wodurch der Pulsarwindnebel die Form eines Kometenschweifs erhält. Eine detaillierte Untersuchung des Spektrums identifiziert den Pulsar aber eindeutig als Ursache der Gammastrahlung: Wie erwartet wird das Spektrum mit wachsender Entfernung vom Pulsar immer „weicher“, d. h. niederenergetischer, da die Elektronen des Pulsarwindnebels allmählich ihre Energie durch Strahlung verlieren.

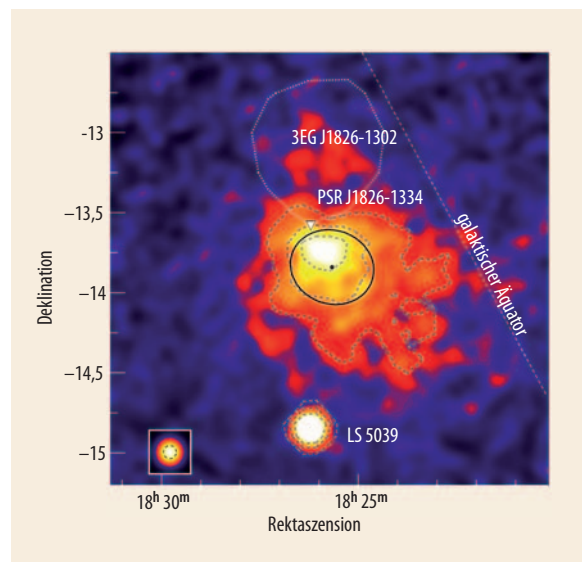


Abb. 4 Gammastrahlung aus der Umgebung des Pulsars PSR J1826-1334 als typisches Beispiel für einen Pulsarwindnebel. Innerhalb von 67 h wurden etwa 5000 Gammaquanten detektiert [5]. Farblich kodiert ist die Intensität der Gammastrahlung (von schwarz nach gelb), das schwarze Quadrat zeigt den Schwerpunkt der Emission. Warum die Gammaquelle HESS J1825-137 gegenüber dem Pulsar (kleines Dreieck am oberen Ende der Quellenregion) versetzt ist, ist nicht im Detail verstanden; ein ähnlicher Effekt wird aber für viele andere Pulsarwindnebel beobachtet. Gut ein Grad südlich des Pulsars wird das Binärsystem LS 5039 als punktförmige Strahlungsquelle sichtbar.

Das Binärsystem LS 5039

Eine im Vergleich zu Pulsarwindnebeln seltene, aber hochinteressante Objektklasse sind Binärsysteme. Mit H.E.S.S. wurde erstmals hochenergetische Gammastrahlung aus dem Binärsystem LS 5039 nachgewiesen [6]. Dieses System besteht aus einem blauen Riesenstern, den ein kompakter Begleiter – ein Neutronenstern oder ein schwarzes Loch – umkreist (Abb. 5). Viele Sterne in unserer Galaxis bilden solche Doppelsternsysteme; Einzelsterne wie unsere Sonne sind eher eine Ausnahme. Aber selten kommen sich Doppelsterne so nahe wie in LS 5039: Der Abstand der beiden beträgt nur einen Bruchteil des Abstands zwischen Erde und Sonne, und der kleinste Abstand auf der exzentrischen Bahn des Begleiters entspricht der doppelten Größe des blauen Sterns. Eine Umrundung des Riesensterns dauert nur knapp vier Tage. In neueren umfangreichen Beobachtungen mit H.E.S.S. gelang es, eine zyklische Veränderung der Intensität der Gammastrahlung entlang der Bahn des Begleiters nachzuweisen [7] (Abb. 5); LS 5039 ist damit die erste „Uhr“ am Gammastrahlenhimmel. Ein weiteres solches System, LS I +61 303, hat das MAGIC-Teleskop als Gammaquelle entdeckt [8].

Die genaue Natur beider Systeme ist umstritten. Wenn es sich bei dem Begleiter des massiven Sterns um ein Schwarzes Loch handelt, so saugt dieses Materie des Sterns auf und kann, analog zu aktiven Galaxien, einen Plasma-„Jet“ aussenden, dessen Stoßwellen Teilchen beschleunigen. Alternativ könnte der Begleiter ein Pulsar sein, dessen Pulsarwind mit dem Sonnenwind des massiven Sterns kollidiert und dadurch zu einer Art Kometenschweif verformt wird. Die Stoßwellen der Kollisionszone der beiden Winde können sehr effektiv Teilchen beschleunigen. An solchen Systemen ist besonders interessant, dass sich der Abstand der beiden Objekte aufgrund des elliptischen Orbits des Begleiters periodisch ändert. Daher lässt sich untersuchen, wie der Beschleunigungsprozess auf die sich ändernden Umgebungsbedingungen reagiert.

Die gemessene Gammastrahlung aus Richtung von LS 5039 ist am stärksten, wenn der kompakte Begleitstern von der Erde aus gesehen „vor“ dem blauen Stern steht, und am schwächsten, wenn er dahinter steht. Da die Bahnebene aber gegen die Sichtlinie gekippt ist, kann es sich dabei nicht um einen reinen Abschattungseffekt handeln. Hinzu kommt, dass sich auch das Spektrum der Gammastrahlen entlang des Orbits ändert: „Vor“ dem blauen Stern ist die Strahlung sehr viel „härter“, das heißt energetischer. Vermutlich verursacht ein Absorptionseffekt zu einem signifikanten Teil die Modulation: Steht der kompakte Begleiter – die Quelle der Strahlung – hinter dem massiven Zentralstern, so müssen die Gammaquanten auf ihrem Weg zum Beobachter durch das intensive Lichtfeld dieses Sterns fliegen. Wenn aber TeV-Gammaquanten mit eV-Lichtquanten „kollidieren“, so reicht die Schwerpunktenergie, um Elektron-Positron-Paare zu erzeugen. Durch das intensive Strahlungsfeld des Zentralsterns und den kleinen Abstand der beiden Sterne ist die Dichte der Lichtquanten so hoch, dass im hinteren Teil des Orbits praktisch alle Gammaquanten absorbiert werden. Diesem Effekt überlagert ist vermutlich noch eine Modulation des Spektrums der beschleunigten Teilchen. Die Modellierung solch eines komplexen Systems wird Details der Beschleunigungsmechanismen offenbaren, die bei statischen Quellen nicht zugänglich sind.

Das Zentrum unserer Galaxis

Das galaktische Zentrum ist ein Astrophysik-Labor der besonderen Art. Um das supermassive Schwarze Loch Sgr A* gruppieren sich auf engstem Raum ein Cluster von heißen Sternen, massereiche Gasvorkommen und Supernova-Überreste, die auf komplexe Art miteinander wechselwirken. H.E.S.S.-Beobachtungen beantworten die spannende Frage, welche dieser Objekte Gammastrahlung aussenden [9, 10]. Zwei im Rahmen der Winkelauflösung punktförmige Quellen dominieren

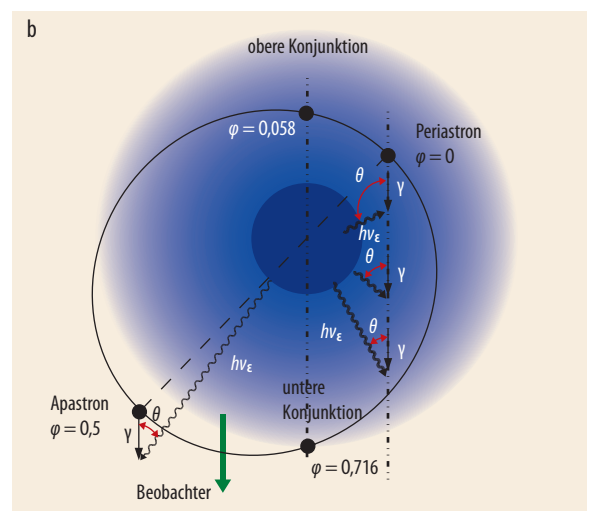
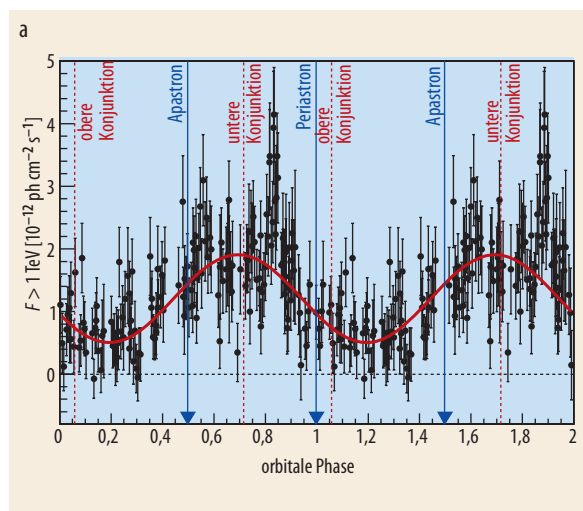


Abb. 5 Die Gammastrahlung des Binärsystems LS 5039 ist als Funktion der Phase entlang des Orbits (a) nicht am Perias-

tron am intensivsten, wenn die beiden Sterne den kleinsten Abstand haben und ihre Wechselwirkung vermutlich am

stärksten ist, sondern um die untere Konjunktion, wenn der kompakte Begleiter vor dem massiven Zentralstern steht (b).

die Gammastrahlungskarte (Abb. 6a). Die Linke der beiden Quellen wird als Pulsarwindnebel im Supernova-Überrest G0.9+0.1 identifiziert, die andere liegt nahe beim galaktischen Zentrum. Wie nahe, zeigte sich erst nach mehrjähriger präziser Kalibrierung: Innerhalb der für Cherenkov-Teleskope bisher unerreichten Genauigkeit von zehn Bogensekunden stimmt die Quelle mit der Position des Schwarzen Lochs überein (Abb. 6c). Damit lässt sich z. B. der Supernova-Überrest Sgr A East, der sich in etwa einer Bogenminute Abstand teilweise um Sgr A* zieht, als Quelle der Strahlung ausschließen.

Gammastrahlung aus dem galaktischen Zentrum kann unter anderem durch Paarvernichtung hypothetischer Teilchen der Dunklen Materie entstehen – ein für Astronomen wie Teilchenphysiker besonders faszinierender Aspekt. Allerdings erstreckt sich das Spektrum der Gammastrahlung bis über 10 TeV und erfordert damit ungewöhnlich massive Dunkle-Materie-Teilchen, wenngleich solche, zum Beispiel im Rahmen supersymmetrischer Modelle, nicht ausgeschlossen sind. Die Form des Spektrums – ein Potenzgesetz mit einem Index von ca. 2,2 über einen weiten Energiebereich – schließt dann aber eine solche Interpretation weitgehend aus: Die in der Paarvernichtung supersymmetrischer Teilchen entstehenden Gammasppektren haben eine charakteristische Krümmung, die in den H.E.S.S.-Daten nicht sichtbar ist. Das beobachtete Potenzspektrum spricht daher für eine astrophysikalische Quelle, z. B. Teilchenbeschleunigung in Plasma-Stoßwellen in der Umgebung des Schwarzen Lochs. Dies

wäre auch eine natürliche Erklärung für die diffuse Gammastrahlung, die sich über etwa ein Grad entlang der galaktischen Ebene erstreckt (Abb. 6b) und das gleiche Energiespektrum aufweist wie die zentrale Quelle. Die Strahlungsintensität folgt weitgehend der aus Radiomessungen bekannten Masse dichter Gaswolken in diesem Bereich der Milchstraße und lässt sich durch Wechselwirkung der Teilchen aus dem zentralen Beschleuniger mit diesen Gasteilchen erklären. Zum ersten Mal kann man damit bei diesen Energien nicht nur einen kosmischen Teilchenbeschleuniger sehen, sondern auch die Spur, welche die Teilchen auf ihrem weiteren Weg durch die Galaxis hinterlassen. Nur Wolken in der Nähe des Zentrums werden beleuchtet, zu erklären mit einem möglicherweise relativ geringen Alter des Beschleunigers von etwa 10 000 Jahren; die weiter entfernten Wolken haben die Teilchen noch nicht erreicht. In der Tat gibt es verschiedene Hinweise darauf, dass das galaktische Zentrum in dieser Zeit aktiver war als heute, z. B. infolge eines höheren Masseinfalls in das Schwarze Loch.

Die Zukunft der Gammastrahlungs-Astronomie

In den letzten Jahren hat H.E.S.S. das Fenster der Gammastrahlungs-Astronomie weit aufgestoßen. Noch empfindlichere Instrumente sollen den großen Erfolg dieses jungen Zweigs der Astronomie in den nächsten Jahren fortsetzen. Das MAGIC-Instrument

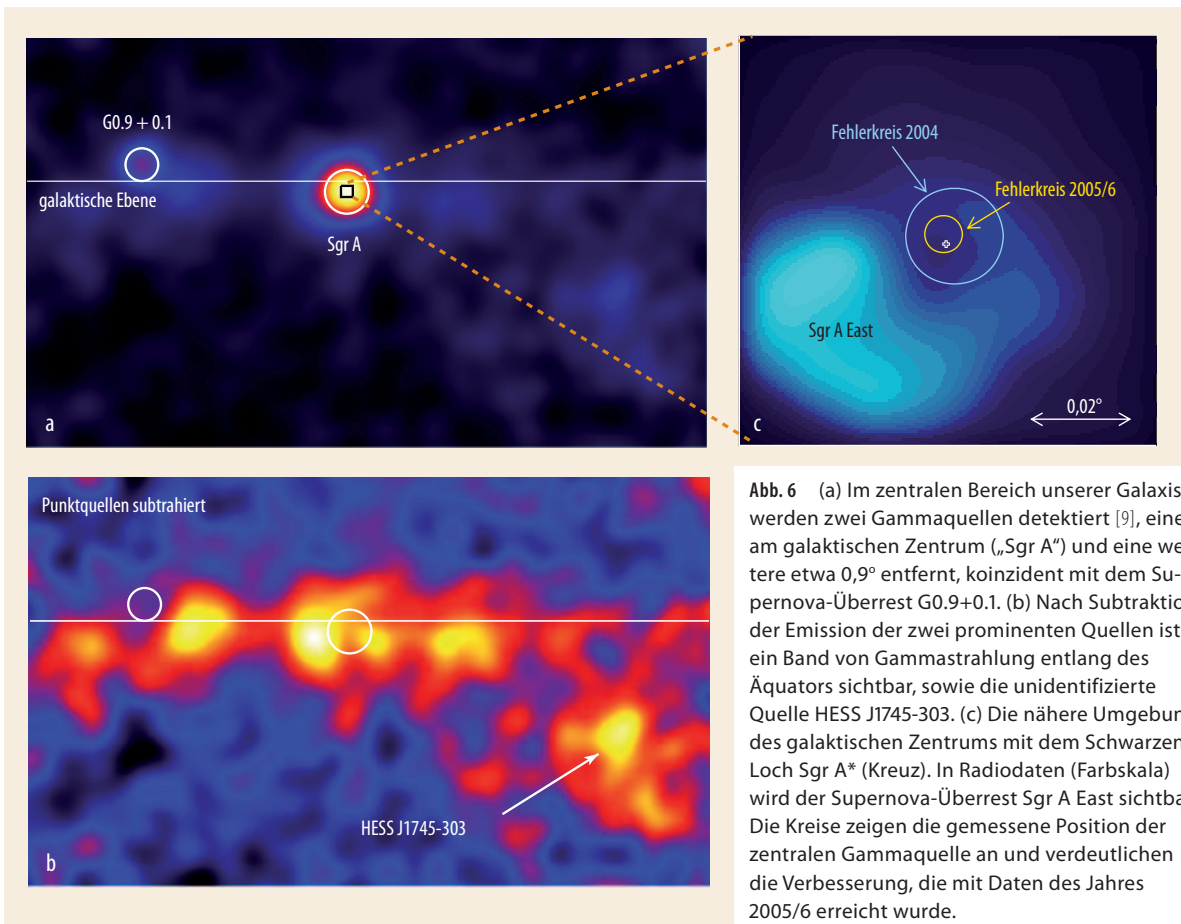


Abb. 6 (a) Im zentralen Bereich unserer Galaxis werden zwei Gammaquellen detektiert [9], eine am galaktischen Zentrum („Sgr A“) und eine weitere etwa 0,9° entfernt, koinzident mit dem Supernova-Überrest G0.9+0.1. (b) Nach Subtraktion der Emission der zwei prominenten Quellen ist ein Band von Gammastrahlung entlang des Äquators sichtbar, sowie die unidentifizierte Quelle HESS J1745-303. (c) Die nähere Umgebung des galaktischen Zentrums mit dem Schwarzen Loch Sgr A* (Kreuz). In Radiodaten (Farbskala) wird der Supernova-Überrest Sgr A East sichtbar. Die Kreise zeigen die gemessene Position der zentralen Gammaquelle an und verdeutlichen die Verbesserung, die mit Daten des Jahres 2005/6 erreicht wurde.

etwa, spezialisiert auf die Beobachtung des Nordhimmels, erhält gerade ein zweites Teleskop. Im Zentrum des H.E.S.S.-Arrays entsteht ein neues 30-m Teleskop, das mit der sechsfachen Spiegelfläche eines einzelnen H.E.S.S.-Teleskops die Sensitivität der ganzen Anlage bei hohen Energien steigern und die Energieschwelle deutlich senken wird. Zusammen mit dem GLAST-Satelliten (vorgesehener Start: Anfang 2008) werden damit 2009 Gammastrahlungs-Beobachtungen im Energiebereich von einigen 10 MeV bis 100 TeV möglich sein. GLAST soll Gammaquanten oberhalb der Atmosphäre direkt über Paarkonversion nachweisen; sein Energiebereich ist komplementär zu dem von Cherenkov-Teleskopen: Gammaquanten unterhalb von einigen 10 GeV erzeugen zu wenig Cherenkov-Licht für den Nachweis am Erdboden, andererseits sind für den Satelliten mit seiner vergleichsweise kleinen Nachweisfläche die seltenen höherenergetischen Gammaquanten nicht zugänglich. Der nächste große Schritt der Hochenergie-Gamma-Astronomie in Europa soll das Cherenkov Telescope Array (CTA) sein, das mit vielen Cherenkov-Teleskopen verschiedener Typen Energien von einigen 10 GeV bis zu einigen 100 TeV abdecken soll und dabei die Empfindlichkeit gegenüber existierenden Instrumenten um einen Faktor 10 steigert. CTA wird voraussichtlich etwa 1000 Hochenergie-Gammaquellen sichtbar machen. Alle in Europa auf diesem Gebiet arbeitenden Gruppen tragen das in der europäischen Astroteilchen-Roadmap³⁾ sehr positiv bewertete CTA-Projekt gemeinsam. CTA baut auf bekannten und erprobten Technologien auf und könnte relativ schnell – bis etwa 2015 – realisiert werden. Im Gegensatz zu existierenden Instrumenten, die wie die Experimente der Teilchenphysik organisiert sind, wird CTA als offenes Observatorium betrieben werden, analog zu optischen Observatorien oder Röntgensatelliten, bei denen jeder Astronom Beobachtungszeit beantragen kann.

Literatur

- [1] The Atmospheric Cherenkov Imaging Technique for Very High Energy Gamma-ray Astronomy, hrsg. von T. C. Weekes, Proc. Physics with Cosmic Accelerators, Bad Honnef (2004)
- [2] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Astrophys. Journal* **636**, 777 (2006)
- [3] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Nature* **432**, 75 (2004)
- [4] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **464**, 235 (2007)
- [5] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **460**, 365 (2006)
- [6] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Science* **309**, 746 (2005)
- [7] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **460**, 743 (2006)
- [8] MAGIC collaboration, J. Albert et al., *Science* **312**, 1771 (2006)
- [9] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Astron. Astrophys.* **425**, L13 (2004)
- [10] H.E.S.S. collaboration, F. Aharonian et al., *Nature* **439**, 695 (2006)

DIE AUTOREN

Werner Hofmann (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der Universität Karlsruhe, wo er 1977 mit einer Arbeit aus der Teilchenphysik promovierte. Nach der Habilitation an der Universität Dortmund im Jahr 1980 ging er 1982 als Heisenberg-Stipendiat an das Lawrence Berkeley Laboratory (USA) und forschte am SLAC; 1984 wurde er Assistant Professor an der Universität Berkeley, 1985 Associate Professor und 1987 Professor. Seit 1988 ist er Direktor am MPI für Kernphysik in Heidelberg.



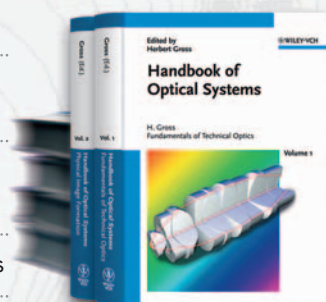
Christopher van Eldik (FV Teilchenphysik) studierte Physik an der Universität Dortmund und promovierte dort 2004 über Proton-Kern-Wechselwirkungen am HERA-Speicherring (DESY, Hamburg). Nach einem kurzen Postdoc-Aufenthalt am DESY wechselte er 2005 von der Teilchenphysik zur Gamma-Astronomie und beschäftigt sich seitdem am MPI für Kernphysik mit dem H.E.S.S.-Projekt. Seine Freizeit widmet er als Tenor der A-cappella-Comedy.



Shedding New Light on Optical Science

Featuring

- ▶ a unique overview of the entire field
- ▶ latest research results in a uniform style
- ▶ over 3,000 color illustrations
- ▶ hands-on expert knowledge



ISBN-10: 3-527-40382-5
ISBN-13: 978-3-527-40382-0

6 Volume Set

Price of each volume if purchased as part of the set:
€ 248.- / £ 175.- / US\$ 317.50

Each volume will be invoiced and despatched upon publication.

Single volume price:
Approx € 298.- / £ 210.- / US\$ 375.-

Set price:
€ 1488.- / £ 1035.- / US\$ 1860.-

Publication dates:

- Volumes 1 and 2: 2005
- Volume 3: December 2006
- Volume 4: September 2007
- Volume 5: January 2008
- Volume 6: October 2008



30825610_bu



Wiley • Tel.: +49 (0) 6201 - 606 400 • Fax: +49 (0) 6201 - 606 184
e-Mail: service@wiley-vch.de • www.wiley-vch.de