



Neue Ergebnisse der Gammaastronomie

Das HESS-Experiment in Namibia untersucht den Himmel bei höchsten Energien

VON HEINRICH J. VÖLK

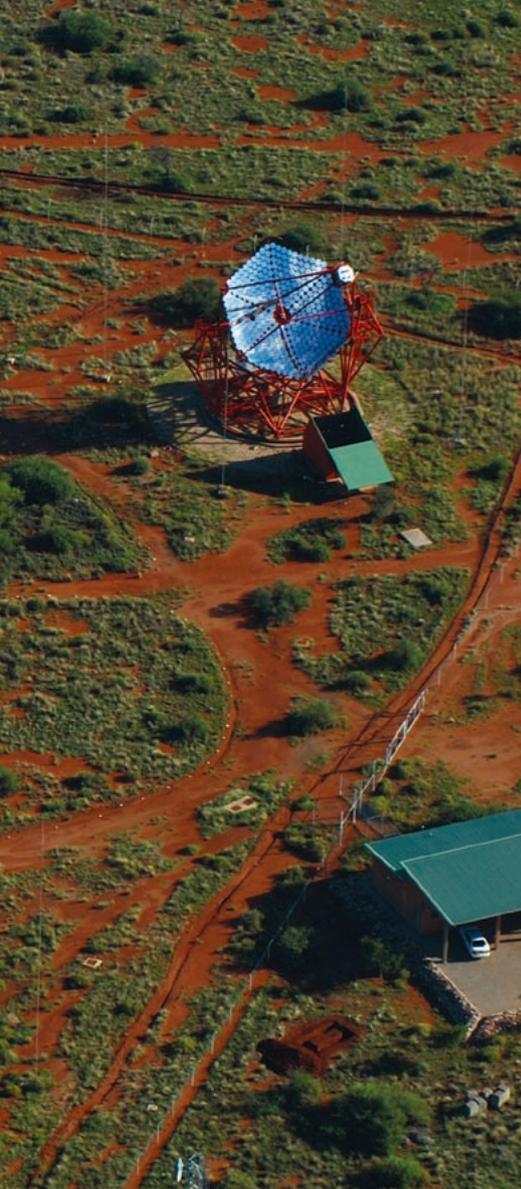
Die vier Teleskope des High-Energy Stereoscopic System (HESS) – seit Ende 2003 in vollem Betrieb – untersuchen die höchsten Photonenenergien und damit die energiereichsten Objekte und Prozesse im Universum. Dieser Artikel beschreibt die bisher wichtigsten Resultate.

Unsere Atmosphäre ist etwas Wunderbares: Sie beschützt uns, indem sie die kurzwellige Ultraviolett-, Röntgen- und Gammastrahlung absorbiert, die von der Sonne und unterschiedlichsten kosmischen Katastrophen stammt – und lässt sichtbares Licht (und Radiowellen) durch.

So haben wir nachts bei gutem Wetter einen freien Blick auf die Sterne. Je größer die Höhe über dem Meer und je trockener die Luft, umso klarer ist die Sicht. Jeder Besucher Namibias wird unter den vielfältigen Eindrücken, die dieses Land hinterlässt, den großartigen Nachthimmel in Erinnerung behalten.

Und doch ist in Namibia nahe dem Gamsberg auch ein Observatorium für Gammastrahlung zu finden, das High-Energy Stereoscopic System (HESS). Seine vier Teleskope untersuchen *vom Erdboden aus* die Lichtquanten mit den höchsten Energien, die das Sonnensystem aus dem Kosmos erreichen. Dieser Widerspruch zur Abschirmung durch die Atmosphäre löst sich auf, wenn man bedenkt, dass die irdische Lufthülle die Lichtquanten (auch Photonen genannt) zwar absorbiert, ihre Energie aber nicht vernichtet.

Energie und Impuls eines auf die Atmosphäre treffenden hochenergetischen Gammaquants werden zunächst in



◀ Abb. 1: Die vier 13-m-Teleskope des High Energy Stereoscopic System (HESS) befinden sich auf der Farm Göllschau im namibischen Khomas-Hochland. Der Name des Projektes soll auch auf den Physiker Viktor Franz Hess (1883–1964) hinweisen, der im Jahr 1912 die kosmische Strahlung entdeckte. (Bild: Philippe Plailly/Eurelios)

so stark, dass man ihn mit einem hinreichend großen optischen Lichtsampler abbilden und daraus sowohl die Richtung als auch die Energie (bzw. die Frequenz) des ursprünglichen Gammaquants bestimmen kann (Abb. 2, Seite 38).

Damit bedient sich der noch junge Zweig der Gammaastronomie bei hohen Energien einer sehr ungewöhnlichen Technik der optischen Beobachtung: Die gesamte Atmosphäre oberhalb des Teleskops fungiert als Detektor [4]. Solche Tscherenkow-Teleskope stellen ähnlich hohe Anforderungen an die Qualität eines Standorts wie optische Sternwarten. Insofern sind der berühmte Gamsberg und seine engere Nachbarschaft auch eine exzellente Umgebung für die Gammaastronomie. Zudem läuft dort die Zentralregion des Milchstraßensystems nahezu durch den Zenit und erlaubt so einen günstigen Blick in das astrophysikalisch aktivste und deshalb besonders interessante Gebiet unserer Galaxis. Das HESS-Experiment in Namibia ist seit Ende 2003 in vollem Betrieb. An ihm sind, unter Führung des Max-Planck-Instituts für Kernphysik in Heidelberg, etwa hundert Wissenschaftler aus europäischen und afrikanischen Ländern beteiligt.

Nichtthermische Strahlungsprozesse

Der Energiebereich der Gammaquanten ist nach oben nicht begrenzt. Der Fluss solcher Photonen aus dem Weltall nimmt allerdings mit zunehmender Energie stark ab. Die bislang höchsten gemessenen Gammaenergien betragen etwa 10^{14} Elektronvolt (eV) – das sind 14 Größenordnungen mehr als die Energie eines optischen Photons! Die untere Grenze, zur Röntgenastronomie hin, liegt laut Konvention bei einigen 10^5 eV. Andererseits können wir vom Erdboden aus praktisch keine Quantenenergien unterhalb von 10^9 eV nachweisen. Die bodengebundene Gammaastronomie umfasst also knapp fünf Zehnerpotenzen in der Energie.

Das Spezifische an der Gammaastronomie – was man also nicht auch mit Beobachtungen der Radio-, Infrarot-, optischen oder Röntgenastronomie erforschen kann – sind die hohen Energien

der nachgewiesenen Photonen und, teilweise, die Strahlungsprozesse, in denen sie erzeugt beziehungsweise vernichtet werden.

Die Lichtemission von Sternen wird von Kernprozessen in deren tiefem Inneren gespeist, erfolgt dann aber bei sehr viel niedrigeren Energien durch Atome und Moleküle in der Sternatmosphäre. Das »kalte« interstellare Medium und der Staub strahlen letztlich nur, weil sie zuvor stellare Photonen absorbiert haben. Diese Emissionsprozesse spielen sich bei Energien ab, die unterhalb der Bindungsenergie von Wasserstoff oder Helium liegen, also unterhalb von einigen 10 eV.

Wird das Gas mechanisch geheizt, indem zum Beispiel schnelle Gasströme, die von Supernovaexplosionen oder Sternwinden herrühren, in Stoßwellen abgebremst werden, wodurch die kinetische Energie der Teilchen in thermische Energie übergeht, so kann die Temperatur des Gases sehr viel höhere Werte erreichen – typischerweise einige tausend oder sogar zehntausend Elektronvolt. Dann kommt zu der Abstrahlung aus atomaren Übergängen insbesondere die Frei-frei-Strahlung von energiereichen Elektronen hinzu, die durch elektromagnetische Wechselwirkung an Atomkernen »gebremst« werden. Das ist das Gebiet der Röntgenastronomie, und die Entdeckung der akkretierenden Doppelsterne im Röntgenlicht durch Riccardo Giacconi und Kollegen im Jahre 1962 führte zur allgemeinen Erkenntnis, dass ein großer Teil des Universums durch schnelle Gasströme mechanisch aufgeheizt wird – sei es durch Akkretion auf kompakte Objekte oder durch Massenverlust von Sternen und Galaxien, also durch Prozesse, bei denen sehr große Energiemengen umgesetzt werden.

Aber schon damals häuften sich seit einem halben Jahrhundert Indizien, dass zumindest in der Umgebung des Sonnensystems eine Gaskomponente vorhanden ist, deren Teilchen noch viel höhere Energien aufweisen. Die ersten Belege dafür fanden sich 1912, als der österreichische Physiker Victor F. Hess in seinen Ballonexperimenten die kosmische Strahlung entdeckte. Heute ist klar, dass nicht nur die Sonnenumgebung, sondern das gesamte Milchstraßensystem von geladenen Teilchen erfüllt ist – vor allem von Protonen, deren individuelle Energien alle vorstellbaren thermischen Energien weit übersteigen und typischerweise von etwa 10^9 eV bis zu mehr als 10^{20} eV reichen. Sie strahlen vor allem im Gammalicht. Und was astrophysikalisch besonders bedeutsam ist: Energiedichte und Druck dieses Teilchenensembles sind vergleichbar mit denen des interstellaren Gases, das unter anderem im Röntgenlicht strahlt.

schnelle Elektronen und Positronen (die positiv geladenen Antiteilchen der Elektronen) sowie in Gammaquanten niedrigerer Energie umgewandelt. Diese Sekundärteilchen fliegen praktisch mit Lichtgeschwindigkeit in der Richtung des primären Gammaquants weiter. Ihre Anzahl wächst durch weitere Prozesse dieser Art lawinenartig an.

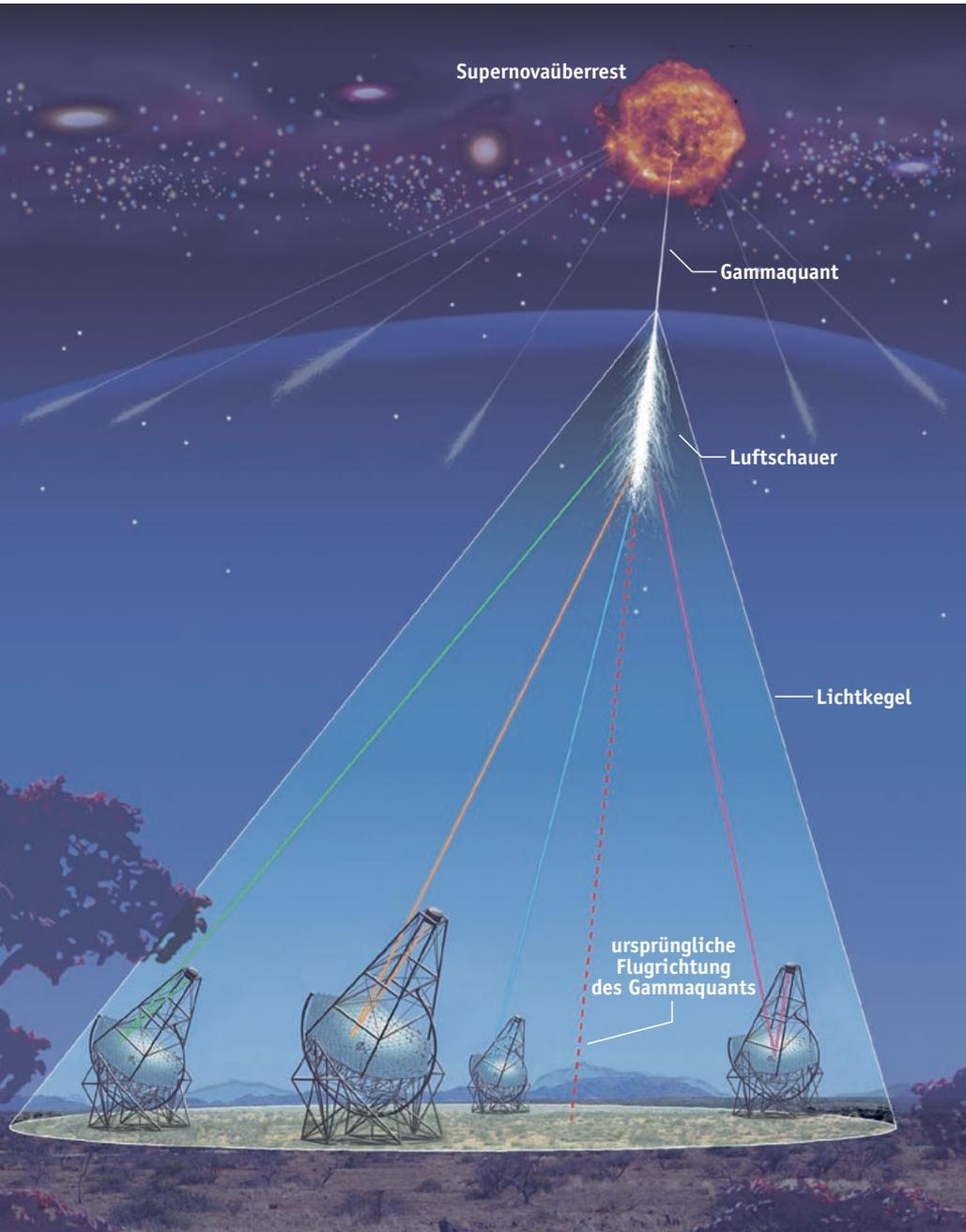
Deutlich unterhalb von etwa acht Kilometer Höhe über dem Erdboden ist die Energie der meisten sekundären Teilchen dann so gering geworden, dass sie nur noch die Luftatome etwas aufheizen und aussterben; die Erdoberfläche erreichen sie selbst nicht mehr. Aber die Elektronen und Positronen des Schauers tun noch etwas auf ihrem Weg durch die Atmosphäre: Sie erzeugen einen nach vorne gerichteten Lichtkegel von etwa einem Grad Öffnung, dessen Wellenlängen vom Ultravioletten über das Optische bis zum Infraroten reichen: Dieses so genannte Tscherenkow-Licht erreicht bei klarem Himmel den Erdboden [1–3].

Ist die Energie des primären Gammaquants genügend hoch, dann ist auch der nur einige Nanosekunden dauernde Tscherenkow-Blitz der Sekundärteilchen

Das Teleskopsystem

Die vier Hess-Teleskope stehen auf den Ecken eines Quadrats von 120 Meter Kantenlänge. Diese Standfläche kann von dem Tscherenkov-Lichtkegel eines in die Hochatmosphäre eindringenden Gammaquants gerade ausgeleuchtet werden. Durch Zusammenschalten der Teleskope entsteht ein stereoskopisches System, das – wie die Triangulation in der Landvermessung – eine rein geometrische Rekonstruktion der Richtung des primären Gammaquants erlaubt. Aus den Signalen lassen sich auch der gedachte Durchstoßpunkt durch den Erdboden sowie die Energie des Primärteilchens ermitteln. Die in den Teleskopen registrierten Gammaereignisse werden von den viel häufigeren, in ihrer Herkunftsrichtung gleichmäßig über

◀ Abb. 2: Hess weist hochenergetischer Gammastrahlung vom Boden aus nach. Die von einer astronomischen Quelle ausgesandten Gammaquanten erzeugen in der oberen Erdatmosphäre Luftschauer aus sekundären Teilchen. Jeder dieser Schauer löst wiederum einen Lichtblitz aus, der sich kegelförmig ausbreitet und synchron von den vier Teleskopen der Hess-Anlage erfasst wird. (Graphik: Reinhold Henkel/Spektrum der Wissenschaft)



Auch das hochenergetische Teilchenensemble kann seine Energien nur durch mechanische Prozesse erreicht haben. Aber die Verteilung der Teilchenenergien entspricht im Gegensatz zum heißen Röntgen gas nicht einer thermischen Verteilung, die durch Zweierstöße solcher Teilchen charakterisiert ist, sondern einem Potenzgesetz in der Energie. Eine solche »nichtthermische« Verteilung der Gesamtenergie auf die einzelnen Teilchen ergibt sich, wenn die Energiezufuhr durch »kollektive« Stöße geschieht, wobei ein geladenes Teilchen mit dem Magnetfeld einer ganzen Wolke anderer Partikel in Wechselwirkung tritt.

Diese Teilchenwolken haben eine makroskopische Masse (typischerweise mehrere Sonnenmassen) und eine kinetische Energie (Relativgeschwindigkeiten von mehreren tausend Kilome-

tern in der Sekunde). Sie benehmen sich wie massereiche Wände, an denen einzelne Partikel, wie Protonen oder Elektronen, einfach reflektiert werden und Energie gewinnen können, ohne mit ihnen in ein thermisches Gleichgewicht zu kommen.

Am effektivsten erfolgt diese Beschleunigung in Stoßwellen. Die resultierenden nichtthermischen Verteilungen strahlen unter anderem dadurch, dass ein hochenergetisches Proton mit einem niederenergetischen Proton oder Atomkern des kalten Gases zusammenstößt und dabei ein so genanntes Pion erzeugt, das anschließend sofort in zwei Gammaquanten zerfällt. Diesen Prozess gibt es nur in der Gammaastronomie, weil er eine Energie von mindestens 10^8 eV erfordert, entsprechend der Ruheenergie des Pions von $1,35 \times 10^8$ eV.

Solch hohe Teilchenenergien treten in unserer Galaxis hauptsächlich in räumlich lokalisierten Quellen auf. Sie sind aber nicht auf das Milchstraßensystem beschränkt, wie Beobachtungen zeigen. Genau diesem »nichtthermischen Universum« gilt die Aufmerksamkeit von HESS. Im Folgenden werde ich zunächst die Beiträge beschreiben, die HESS bei der Suche nach den bisher unbekanntenen Quellen der Gammastrahlung geleistet hat, und danach auf die Perspektiven der Gammaastronomie in der weiteren Entwicklung der Astrophysik eingehen.

Hochenergie-Astrophysik

Eines der Hauptgebiete der Gammaastronomie ist die Hochenergie-Astrophysik. Sie befasst sich vor allem mit den Quellen der hochenergetischen Teilchen, die zugleich die Quellen der Gammastrahlung sein sollten. Als solche kennen wir im Milchstraßensystem die – recht zahlreichen – Nebel um junge Pulsare, die diffusen Überreste von Supernovaexplosionen, die Röntgen-Doppelsterne mit gerichteten Ausströmungen (so genannte Mikroquasare), eine diffuse galaktische

den Himmel verteilten Ereignissen, die von geladenen Teilchen der kosmischen Strahlung erzeugt werden, anhand ihrer schlankeren Bilder in den abbildenden Kameras unterschieden und durch eine Bildanalyse herausgefiltert.

Das HESS-System besteht aus vier Teleskopen mit je 107 m² Spiegelfläche und vier »SMART«-Kameras mit je 960 Photomultipliern von je 0.16 Grad Gesichtsfeld, die sich zu einem Gesamtgesichtsfeld von etwa fünf Grad pro Kamera aufaddieren. Die Winkelauflösung des Systems ist besser als 0.1 Grad pro Ereignis, die Energieauflösung beträgt 10 bis 15 Prozent, und die Energieschwelle liegt im Zenit bei 10¹¹ eV. Dies erlaubt Gammaastronomie im Teraelektronvolt-Bereich (1 TeV = 10¹² eV).

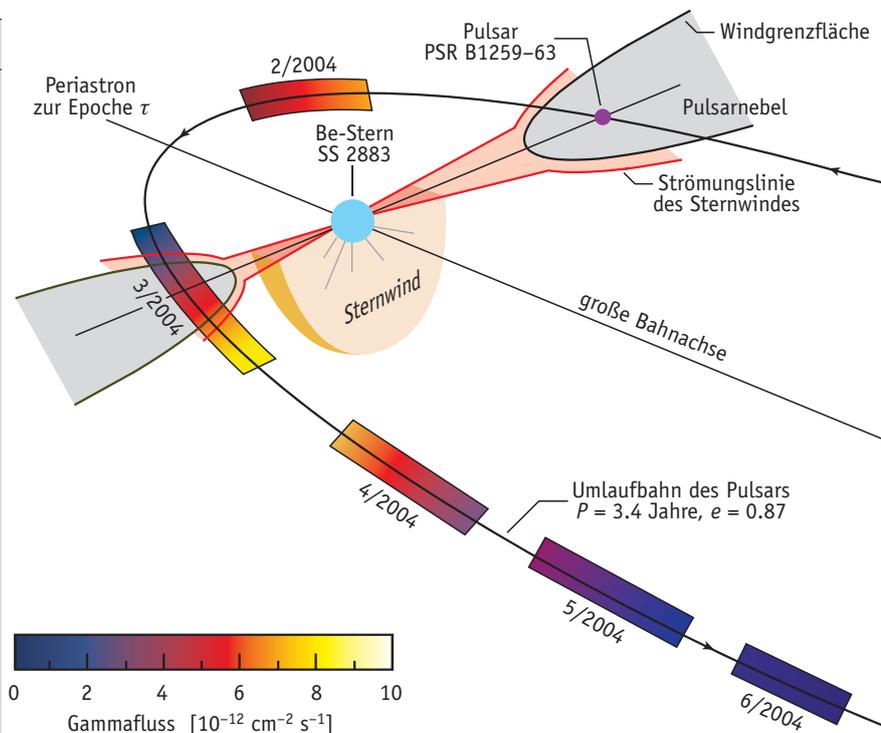
Daraus ergibt sich die Empfindlichkeit des Systems: Eine Stunde Beobachtungszeit ist ausreichend für den Nachweis einer Energieflussdichte von 10⁻¹⁸ Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde bei 0.1 TeV, beziehungsweise von 10⁻¹⁹ Joule pro Quadratcentimeter und Sekunde bei 1 TeV. Mit dieser Empfindlichkeit lässt sich der Krebsnebel im Zenit in etwa 30 Sekunden nachweisen. Zum Vergleich: Der erste Nachweis des Krebsnebels im TeV-Bereich im Jahr 1989 erforderte eine Messzeit von etwa 50 Stunden.

Gammaemission durch die Teilchen der kosmischen Strahlung (vor allem aus großen Molekülwolken, die durch das Bad in der kosmischen Strahlung zum Leuchten angeregt werden), und möglicherweise neuartige Quellen, die noch unbekannt Objekten zuzuordnen sind. Extragalaktische Gammaquellen sind aktive galaktische Kerne (AGN), beispielsweise Blazare und die Kerne der Radiogalaxien. Aber auch Starburst-Galaxien, verschmelzende Galaxien, Galaxienhaufen und Gammastrahlungsausbrüche (Gamma Ray Bursts) sollten bedeutende Gammaquellen sein. Wegen ihrer geringen Photonenflüsse konnten diese extragalaktischen Objekte bislang noch nicht bei TeV-Energien nachgewiesen werden.

Betrachten wir nun einige ausgewählte Ergebnisse, zu denen HESS beigetragen hat.

Der Pulsar PSR B1259-63

Die Radioemission dieses rotierenden Neutronensterns zeigt eine Periode von 43 Millisekunden; der Pulsar umläuft einen so genannten Be-Stern auf einer sehr exzentrischen Bahn einmal in 3.4 Jahren.



Die Oberflächentemperatur des Be-Sterns beträgt 23 000 Kelvin, und er verliert Masse in Form eines Windes, der vermutlich von dem starken stellaren Magnetfeld auf die Umgebung seiner Äquatorebene konzentriert wird (Abb. 3).

Die schnelle Rotation des Pulsars wird nach und nach abgebremst, weil auch er – zumindest bei etwas größeren Abständen von der Oberfläche – einen Wind von Elektronen und Positronen emittiert, der sich fast mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Aber irgendwann muss auch dieser ultrarelativistische Wind mit dem umgebenden Windgas des Be-Sterns ins Druckgleichgewicht kommen. Deshalb kann sich der Pulsarwind nicht frei ausbreiten, sondern er wird vermutlich seitlich eingeschnürt und nimmt die Form eines Kometenschweifes an, dessen Symmetrieachse, grob gesprochen, radial vom Be-Stern wegweist. Die Elektronen und Positronen des Pulsarwindes werden in diesem theoretischen Bild an der Grenzfläche in einer Stoßfront auf sehr hohe Energien beschleunigt und machen mit den Photonen des heißen Be-Sterns inverse Compton-Stöße, die diese Photonen nun ihrerseits auf Energien im Gammastrahlungsbereich bringen. Überdies senden die hochenergetischen Elektronen und Positronen im Magnetfeld des Pulsarwindes auch noch Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich aus.

Das klingt recht kompliziert, aber interessant. Man kann das nämlich alles aus Messungen ableiten! Aus Radiomesungen erhält man die Pulsarperiode und die Umlaufzeit. Den Be-Stern kann man im Optischen beobachten und so auch seine Temperatur bestimmen, das Rönt-

genlicht weist man von einem Röntgensatelliten aus nach. Dass es sich bei den Quellen der Gammastrahlung wirklich um beschleunigte Pulsarteilchen handelt, ergibt sich eindeutig aus den mit HESS durchgeführten Messungen. Denn die Teilchen, welche für die nachgewiesene Emission verantwortlich sind, müssen mindestens so viel Energie haben wie die Gammaquanten, die sie erzeugen, also etwa 10¹² eV. Und aus dem Verhältnis von Synchrotron- zu Gammafluss kann man die mittlere Magnetfeldstärke zu etwa 10⁻⁴ Tesla bestimmen. Das passt gut zusammen, wenn man annimmt, dass das Energiespektrum der strahlenden Elektronen und Positronen

sowohl das gemessene Synchrotron-spektrum im Röntgenbereich, als auch das inverse Compton-spektrum im Gammabereich bestimmt. Unter dieser Annahme wurde die Form des von HESS gemessenen Gammaskpektrums auch richtig vorhergesagt [5].

Aus Abb. 3 geht auch hervor, dass sich der Pulsar im sternnächsten Punkt, dem Periastron, von der Erde aus gesehen hinter der Sternwindscheibe befinden sollte. Leider war in dieser Phase Vollmond, HESS konnte also nicht beobachten – die Photomultiplier würden bei solch hoher Himmelselligkeit durchbrennen. Aber die von HESS gemessene Lichtkurve im Gammabereich suggeriert gleichwohl, dass der Gammastrahlungsfluss im Periastron ein Minimum haben sollte (Abb. 4). Die Frage ist allerdings, warum? Denn die Dichte der Sternphotonen ist in diesem Punkt ja sogar maximal!

Eine Erklärung, die Okkie de Jager von der Universität Potchefstroom (Südafrika) und ich favorisieren, ist die folgende: Im Periastron befindet sich der Pulsar außerhalb der dichten Sternwindscheibe. Seine eigene Windhülle kann sich also wieder ausdehnen, und dabei verlieren die Teilchen adiabatisch an Energie. Das heißt: Die Anzahl der gemessenen Elektronen und Positronen oberhalb einer Energie

von 380 GeV (3.8×10^{11} eV) nimmt ab. Zugleich bewegen sich die Teilchen in der Pulsarwindhülle (mit Geschwindigkeiten nahe der Lichtgeschwindigkeit) vorzugsweise radial von uns weg, wodurch ihre Gammastrahlung einem abschwächenden Dopplereffekt unterliegt. Es ist durchaus plausibel, dass beide Prozesse zusammen die Zunahme der Sternphotonendichte überkompensieren können. Gemeinsam mit Messungen in anderen Wellenlängenbereichen kann das HESS-Resultat also die ganze komplexe Dynamik einer Pulsarwindhülle plausibel bestätigen.

Das Gebiet um das Galaktische Zentrum

In der innersten Region unserer Galaxis gibt es eine große Anzahl nicht-thermischer Quellen, darunter mehrere Überreste von Supernovaexplosionen, aber auch große Molekülwolken, mit denen diese Objekte möglicherweise zusammenhängen. Das eigentliche Zentrum der Galaxis, bezeichnet als Sgr A*, ist ein Schwarzes Loch mit etwa drei Millionen Sonnenmassen. HESS hat diese Region beobachtet und drei Quellen von Gammastrahlung nachgewiesen. Die mit Abstand stärkste Quelle ist um Sgr A* selbst konzentriert (Abb. 5 a). Eine andere diskrete Quelle liegt ein Grad von Sgr A* entfernt: der Supernovaüberrest G0.9+0.1, der von einem Pulsarwind-Nebel dominiert wird. Schließlich aber ist der ganze Bereich in ein diffuses Gammalicht getaucht, das räumlich mit den großen Ansammlungen interstellarer Materie (den Molekülwolken) korreliert ist (Abb. 5 b).

Der mit Sgr A* assoziierte Fluss von Gammaquanten fällt in Form eines Potenzgesetzes mit zunehmender Energie ab: $dN/dE \propto E^{-2.3}$ (Abb. 6). Ob die unmittelbar bei Sgr A* gelegene Gammaquel-

le mit Sgr A* selbst übereinstimmt oder nicht, ist nicht entschieden. Die gegenwärtige Ausrichtungsgenauigkeit der vier HESS-Teleskope (etwa 20 Bogensekunden in beiden Himmelskoordinaten) ist dazu nicht ausreichend.

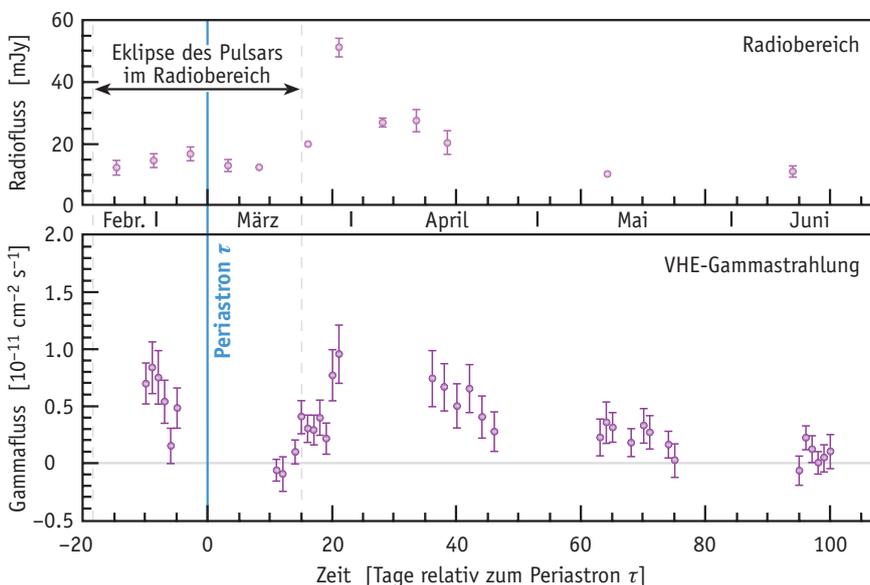
Um zu entscheiden, ob die Gammaemission von dem zentralen Schwarzen Loch selbst, von seiner unmittelbaren Umgebung (etwa der Akkretionsströmung oder einem jetförmigen Ausfluss) oder aber von einer ausgedehnten Quelle in der engeren Nachbarschaft stammt, müssen deshalb andere Eigenschaften herangezogen werden. Wichtige Kriterien sind beispielsweise das Energiespektrum und mögliche Zeitvariationen des Gammaflusses. Bislang wurden keinerlei zeitliche Veränderungen gefunden, was gegen die Strahlung einer Akkretionsströmung oder eines Jets spricht.

In der Tat gibt es in unmittelbarer Nähe des Schwarzen Lochs einen großen Supernovaüberrest, genannt Sgr A East, der die hochenergetischen Teilchen liefern könnte, welche die Gammastrahlung emittieren. Die Form des Gammaskpektrums (Abb. 6) wäre annähernd konsistent mit frisch erzeugten Teilchen der kosmischen Strahlung, die den Überrest schon verlassen haben und nun Stöße mit dem dichten Gas in der Umgebung machen, oder auch mit eben beschleunigten Teilchen im Supernovaüberrest Sgr A East selbst. Theoretisch könnte man sich sogar einen kontinuierlichen Übergang zwischen diesen beiden Strahlungsmechanismen vorstellen. Dies würde zugleich auch das diffuse Gammalicht in der weiteren Umgebung (Abb. 5 b) erklären.

Die exotischste und zugleich wissenschaftlich am weitesten gehende Erklärung des HESS-Ergebnisses für das Galaktische Zentrum wäre eine dominante, stationäre Gammastrahlung, die als Folge der Selbstvernichtung von Teilchen der Dunklen Materie im Zentrum der Galaxis entsteht. Es gibt kosmologische Modelle, die genau dies postulieren. Demnach könnten die leichtesten aus dem Urknall übrig gebliebenen supersymmetrischen Teilchen, die so genannten Neutralinos, in ihrer Summe als Dunkle Materie die Materiedichte im Universum dominieren, sich gleichzeitig in den Zentren von Galaxien ansammeln und sich bei Zusammenstößen unter Aussendung von Gammastrahlung gegenseitig vernichten.

Abgesehen von den derzeitigen Schwierigkeiten, das mit HESS beobachtete Gammaskpektrum im Rahmen supersymmetrischer Theorien zu deuten, muss dann die Ruheenergie mc^2 des Neu-

▼ Abb. 4: Die Lichtkurve des Pulsars PSR B1259–63 im Radiobereich (oben, bei 1.4 GHz) und im Gammabereich oberhalb von 380 GeV (unten) weist deutliche Schwankungen auf. Die HESS-Messungen suggerieren ein Minimum des Gammaflusses im Periastron (blaue vertikale Linie), obwohl wegen des Vollmonds zu jener Zeit keine Messungen möglich waren. (Aus [6])



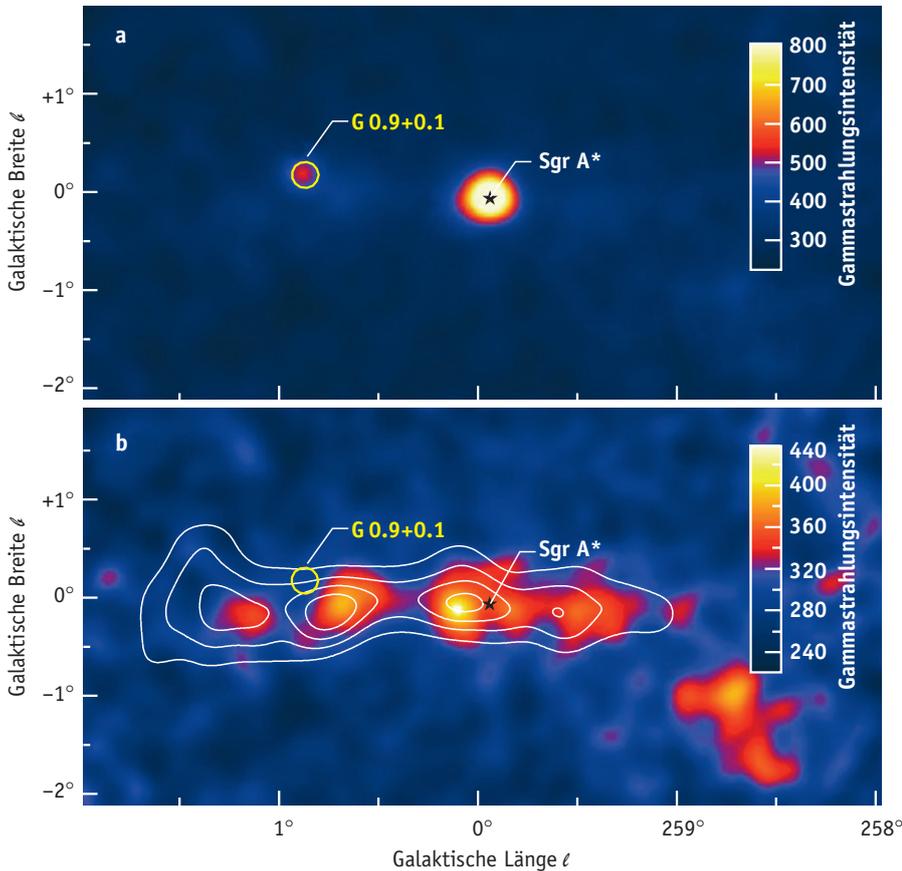
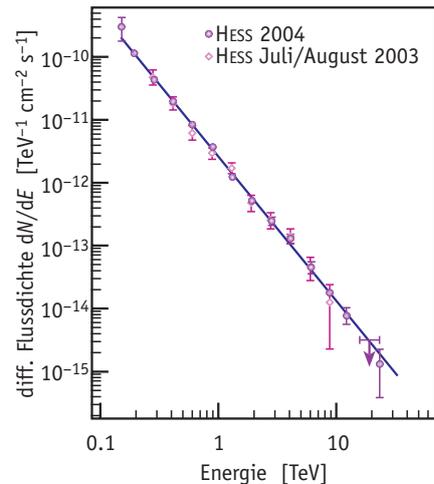


Abb. 5: HESS wies in der inneren Region unseres Milchstraßensystems zwei diskrete Gammaquellen nach (a). Die stärkere der beiden fällt innerhalb von einer Bogenminute mit Sgr A*, dem dynamischen Zentrum der Galaxis (schwarzer Stern) zusammen, die schwächere mit dem Supernovaüberrest G0.9+0.1 (gelber Kreis) in der galaktischen Ebene. Nach Subtraktion der beiden dominanten Punktquellen bleibt eine diffuse Komponente als dritte Quelle übrig (b). Sie korreliert mit der Verteilung der Molekülwolken, die hier durch die beobachtete Radioemission des CS-Moleküls (weiße Konturlinien) gekennzeichnet sind. (Aus [8])

Abb. 6: Das mit HESS gemessene Gammagespektrum der Zentralregion um Sgr A* erstreckt sich bis jenseits von 20 TeV. (Aus [7])



Wegen der hohen Energien der kosmischen Strahlung konzentriert sich das Interesse auf die Messmethoden der Gamma- und der Neutrinoastronomie. Da die Neutrinoastronomie aber noch in den Kinderschuhen steckt, sind Gammaquanten die derzeit einzigen direkten Boten, die über das Vorhandensein solcher hochenergetischen Teilchen in ihren Quellen über astronomische Distanzen hinweg Auskunft geben können.

Während die theoretischen Aspekte im Wesentlichen verstanden sind, gibt es bislang nur wenige quantitative Messungen der Gammastrahlung, weil die Flüsse selbst nahe gelegener Objekte meist recht niedrig sind. HESS hat zwei junge Supernovaüberreste detailliert beobachtet und dabei erstmals solche Objekte auch räum-

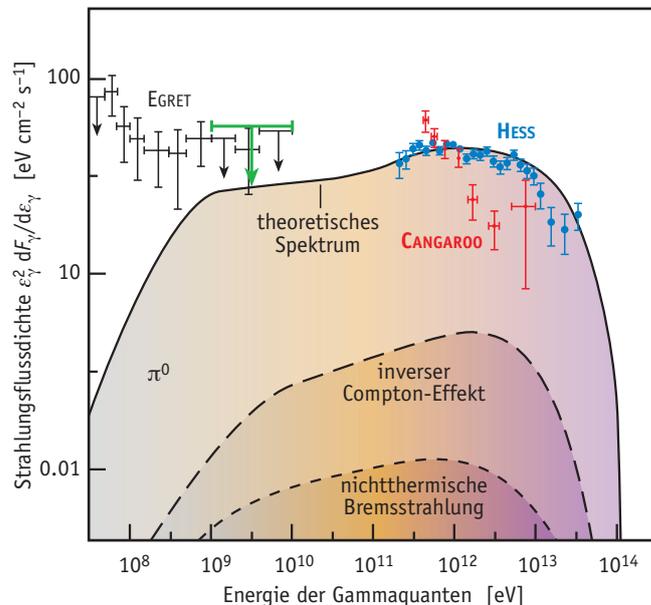
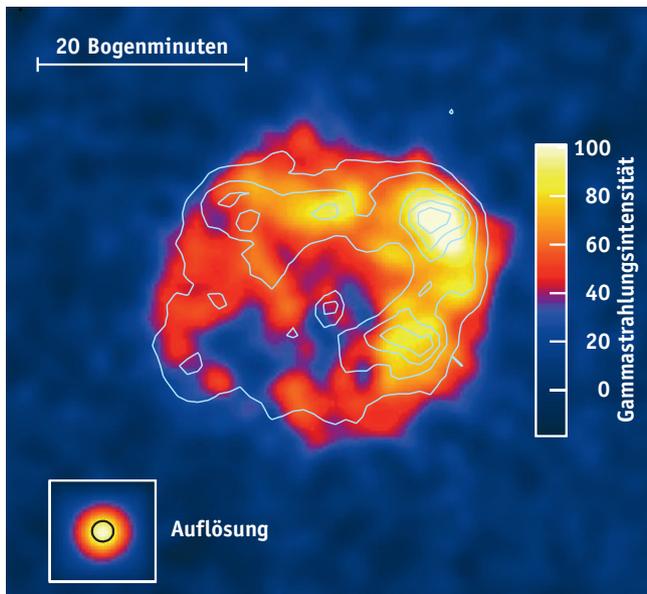
tralinos natürlich größer sein als die maximale Energie des resultierenden Gammagespektrums. Nach Abb. 6 entspricht dies mindestens einem Wert von 20 TeV. Weil aber der größte Teilchenbeschleuniger der vorhersehbaren Zukunft, der Large Hadron Collider im CERN bei Genf, lediglich Schwerpunktsenergien unterhalb von 10 TeV erreichen wird, können diese Teilchen in Beschleunigerexperimenten nicht gefunden werden. Falls also der aus dem Galaktischen Zentrum stammende Gammafluss tatsächlich der Annihilation von Dunkler Materie zuzuschreiben ist, so könnte nur die Astrophysik die Klärung dieser Frage in Angriff nehmen – eine sehr interessante Perspektive.

Der Ursprung der galaktischen kosmischen Strahlung

Die Überreste von Supernovae sind die primären Kandidaten für die Quellen der kosmischen Strahlung, die wir in unserem Milchstraßensystem beobachten, bis zu dem Knick im Spektrum bei etwa 10^{15} eV. Der Hauptgrund für diese Vermutung liegt in der Notwendigkeit einer außerordentlich hohen Energiezufuhr. Es ist nämlich bekannt, dass diese Teilchen nach ihrer Erzeugung aus dem uns zugänglichen Teil des Milchstraßensystems (bis etwa 30000 Lichtjahre oberhalb und unterhalb der Scheibe) innerhalb von etwa 30 Millionen Jahren entweichen. Um diesen Verlust zu kom-

pensieren, muss jede Supernova im Mittel etwa zehn Prozent ihrer gesamten hydrodynamischen Explosionsenergie von 10^{44} Joule in ultrarelativistische Teilchen umwandeln – eine enorme Forderung, die von keinem anderen astrophysikalischen Einzelprozess erfüllt wird. (10^{44} Joule entsprechen übrigens der Explosionsenergie von 2×10^{28} Megatonnen des Sprengstoffs TNT!)

Zudem gibt es einen Prozess, der Teilchen an der Stoßwelle beschleunigt, mit der die expandierende Explosionswolke das umgebende interstellare Medium aufheizt und komprimiert. Der Theorie zufolge sollte dabei ein Energiespektrum relativistischer Teilchen entstehen, das bis zu sehr hohen Energien von etwa 10^{15} eV reicht und in jeder Dekade der Energie eine gleich hohe Energiedichte aufweist. Ferner sollte der Prozess sehr wirkungsvoll sein und eine Effizienz von zehn Prozent durchaus erreichen. Diese Vorstellung ist in den letzten 25 Jahren entwickelt worden und gehört mit der Theorie der Atmosphären und des inneren Aufbaus von Sternen zu den wenigen astrophysikalischen Theorien, die es erlauben, quantitative Vorhersagen zu machen. Voraussetzung dafür sind entsprechende Messungen der Objekte bei anderen Wellenlängen, etwa im Radio- und Röntgenbereich, und eine Kenntnis der Umgebungsparameter, wie etwa der Umgebungsdichte der Quellen oder ihrer Entfernung.



▲ Abb. 7: Zu den jungen Supernovaüberresten, die HESS erstmals räumlich gut auflösen konnte, gehört RXJ 1713.7–3946. Die Aufnahme im hochenergetischen Gammalicht ist hier farbcodiert, wobei die lineare Farbskala in Einheiten von Überschuss-Gammaereignissen pro geeigneter Flächeneinheit (schwarzer Kreis im Inset) angegeben ist. Die hellblauen Konturlinien zeigen die mit dem Satelliten ASCA gemessene Röntgenhelligkeit an. Der Durchmesser des Objekts am Himmel entspricht der doppelten Größe des Vollmonds, und sein Fluss im hochenergetischen Gammalicht ist etwa halb so stark wie derjenige des Krebsnebels. (Nach [9])

lich gut auflösen können: den großen Supernovaüberrest RXJ 1713.7–3946 in der galaktischen Ebene im Sternbild Skorpion (Abb. 7) und das ähnliche, sogar zwei Grad am Himmel messende Objekt RXJ 0852.0–4622, auch Vela junior genannt, weil es im Sternbild Vela (Segel des Schiffes) steht, längs der Sichtlinie zum noch viel ausgedehnteren Vela-Supernovaüberrest.

Ich will mich hier auf RXJ 1713.7–3946 beschränken. Man erkennt in Abb. 7 die nahezu sphärische Form der Explosionswolke. Sie korreliert gut mit der nichtthermischen Röntgenstrahlung, die man als Synchrotronstrahlung äußerst hochenergetischer Elektronen interpretiert. Dieses Gammabild bei Energien von einem TeV ist der erste direkte und räumlich aufgelöste Nachweis, dass es Teilchen mit noch höherer Energie als einem TeV in solch einem Objekt gibt. Der Supernova-

überrest steht vermutlich in einer Entfernung von rund 3000 Lichtjahren; sein Alter haben wir auf Grund chinesischer Annalen mit 1612 Jahren angenommen. Leider sind die Radiomessungen zu spärlich, um seine Gammaemission eindeutig vorherzusagen zu können. Aus den vorhandenen Daten lassen sich aber plausible Parameter ableiten, die mit der Entfernung und der Expansionsgeschwindigkeit der Quelle konsistent sind.

Das Ergebnis können wir mit dem von HESS gemessenen Energiespektrum vergleichen (Abb. 8). Die gemessene spektrale Energieverteilung ist unterhalb von etwa einem TeV tatsächlich flach, hat also in jeder Dekade die gleiche Energiedichte, wie oben erwähnt, und stimmt mit der theoretischen Rechnung gut überein. Zudem zeigt die Theorie, dass die Gammastrahlung hauptsächlich von dem Pionzerfall (Zerfall eines π^0

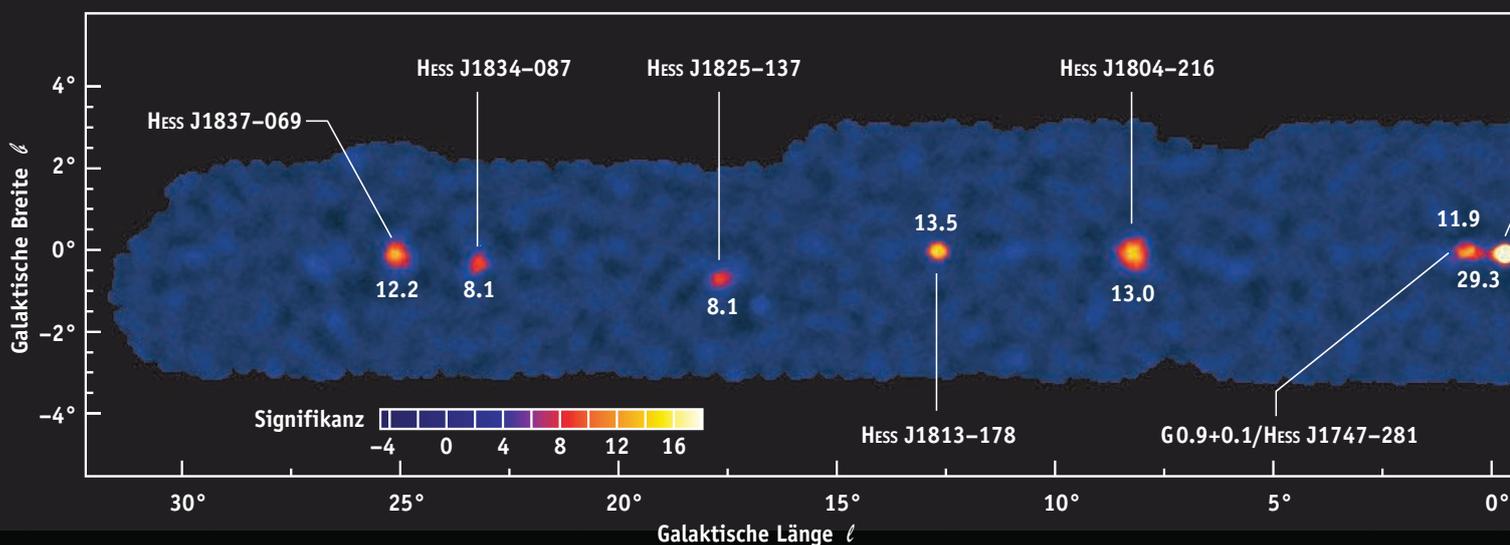


Abb. 8: Mit verschiedenen Instrumenten wurde die spektrale Energieverteilung der Gammaemission des Supernovaüberrests RXJ 1713.7–3946 gemessen. Die Daten des EGRET-Experiments an Bord des Compton Gamma Ray Observatory bei niedrigen Energien werden durch die (grün markierte) obere Grenze charakterisiert, während HESS (blau) und das japanisch-australische Experiment CANGAROO (rot) oberhalb von 10^{11} eV Daten lieferten. Die Beiträge zum Energiespektrum aus dem Zerfall neutraler Pionen (π^0), aus dem inversen Compton-Effekt und aus der nichtthermischen Bremsstrahlung sind angegeben. (Aus [10])

in zwei Gammaquanten) stammt, der von beschleunigten nuklearen Teilchen herrührt, vor allem von Protonen. Nach der Theorie hat der Überrest bis heute auch etwa zehn Prozent seiner gesamten Energie in nukleare relativistische Teilchen (Protonen) umgewandelt. Eine ähnliche Analyse der Daten von Vela junior ist gerade in Arbeit. Wegen der Unsicherheit der Entfernung von Vela junior – er könnte vor oder hinter dem Vela-Supernovaüberrest stehen – ist das Ergebnis nicht eindeutig. Grob gesprochen aber ist die Situation analog zu der in RXJ 1713.7–3946.

Wir können uns jetzt fragen: Ist das Jahrhundertproblem des Ursprungs der galaktischen kosmischen Strahlung damit gelöst? Im Grundsatz ist das der Fall. Es gibt nämlich eine Reihe von weiteren experimentellen Ergebnissen, die nur in diesem theoretischen Rahmen zu verste-

hen sind. Andererseits möchte man am liebsten noch mehr Beobachtungen zur Verfügung haben. Vier bekannte junge Objekte bieten sich dazu an: die Supernovae der Jahre 1006 (Sternbild Wolf), 1572 (Sternbild Cassiopeia) und 1604 (Sternbild Schlangenträger) sowie Cassiopeia A. Letztere Quelle wurde bereits von dem HESS-Vorgänger HEGRA mit niedriger Statistik entdeckt und sollte der Theorie zufolge ebenfalls durch π^0 -Zerfall dominiert sein. Ihre Bestätigung in einem breiten Energiebereich sollte alle Skeptiker überzeugen.

Neue Quellen in der galaktischen Ebene

Im Jahr 2004 hat HESS den ersten Teil einer Durchmusterung der galaktischen Ebene von -30° bis $+30^\circ$ in galaktischer Länge und -3° bis $+3^\circ$ in galaktischer Breite abgeschlossen. Die mittlere Gammaflussdichte der Durchmusterung beträgt etwa drei Prozent des Flusses des Krebsnebels (Abb. 9). Einschließlich jüngerer Nachbeobachtungen von Querkandidaten aus der ursprünglichen Durchmusterung wurden 14 bislang unbekannte Quellen mit sehr hochenergetischer Gammaemission gefunden (so genannte VHE-Quellen, wobei VHE für *very high energy* steht). Die Mehrzahl davon konnte bislang noch nicht in anderen Wellenlängenbereichen identifiziert werden.

Damit hat erstmals ein TeV-Instrument nicht nur Quellen untersucht, die in anderen Wellenlängenbereichen bereits gut bekannt waren, sondern eine erfolgreiche Suche nach neuen Quellen durchgeführt. Dabei geht die Suche nach Gegenstücken in anderen Wellenlängenbereichen natürlich weiter. Die meisten der bekannten Gegenstücke sind jun-

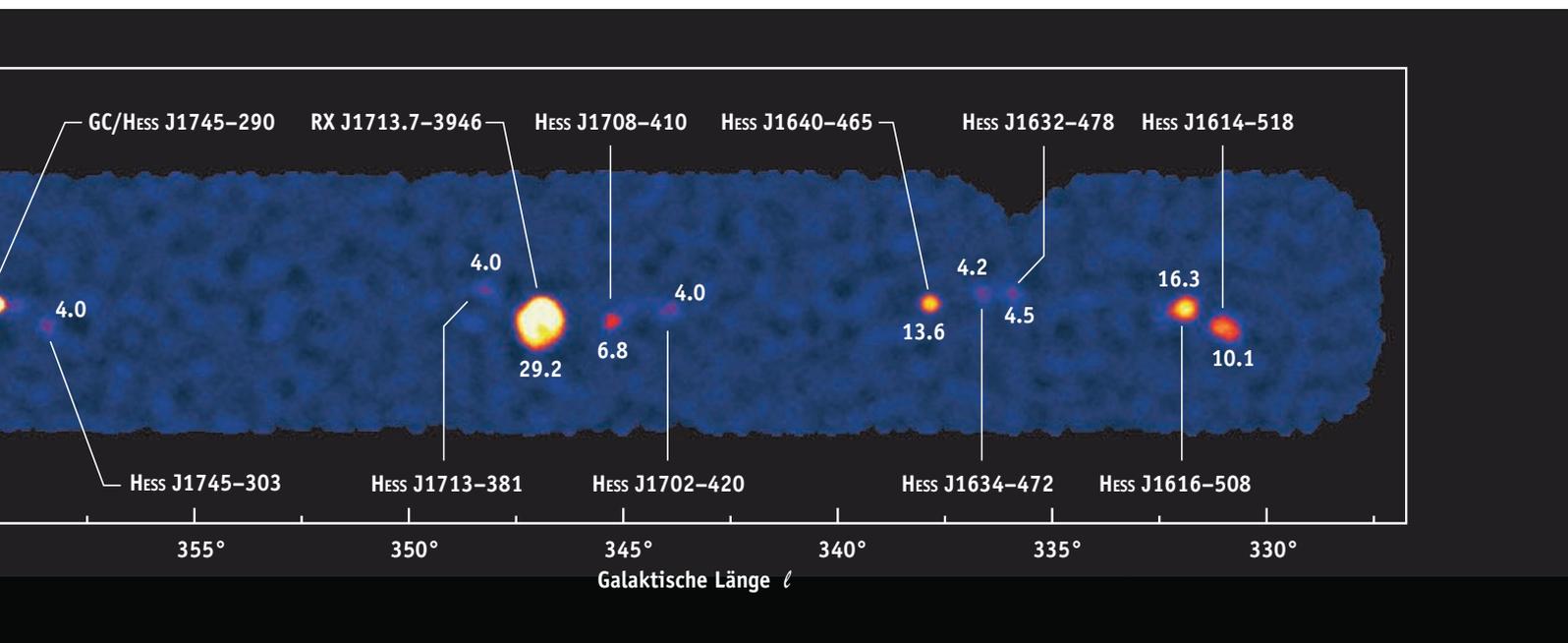
ge Pulsarwind-Nebel sowie Supernovaüberreste. Die neuen Quellen haben inzwischen eine weltweite Aktivität mit satellitengestützten Instrumenten wie INTEGRAL, ASCA, CHANDRA, XMM und ASTRO-E2 sowie mit bodengebundenen Radioteleskopen ausgelöst.

Das extragalaktische diffuse Hintergrundlicht

An extragalaktischen VHE-Quellen sind bisher vor allem Blazare bekannt. Dieser spezielle Typus aktiver galaktischer Kerne (AGN) zeichnet sich durch jetartige Ausströmungen der zentralen extrem massereichen Schwarzen Löcher aus, die auf uns gerichtet sind. Die Astronomen möchten insbesondere herausfinden, wie diese Jets zusammengesetzt sind. Die TeV-Strahlung stammt vermutlich aus dem innersten Teil der Jets. Daraus nährt sich die Hoffnung, die Zentralbereiche der aktiven galaktischen Kerne selbst besser verstehen zu lernen.

Die TeV-Emission von Blazaren hat aber vor allem auch eine kosmologische Bedeutung. Sie rührt daher, dass die Gammaquanten sehr hoher Energie im extragalaktischen Raum mit den dort vorhandenen niederenergetischen Photonen des diffusen sichtbaren und infraroten Lichts in Wechselwirkung treten können. Also Wechselwirkung von

Abb. 9: HESS hat die galaktische Ebene in einem Bereich von $\pm 30^\circ$ in Länge und $\pm 3^\circ$ in Breite um das galaktische Zentrum systematisch durchmustert. Dabei wurden die hier angegebenen Quellen mit hoher statistischer Signifikanz (mehr als 4σ) nachgewiesen. (Aus [11])



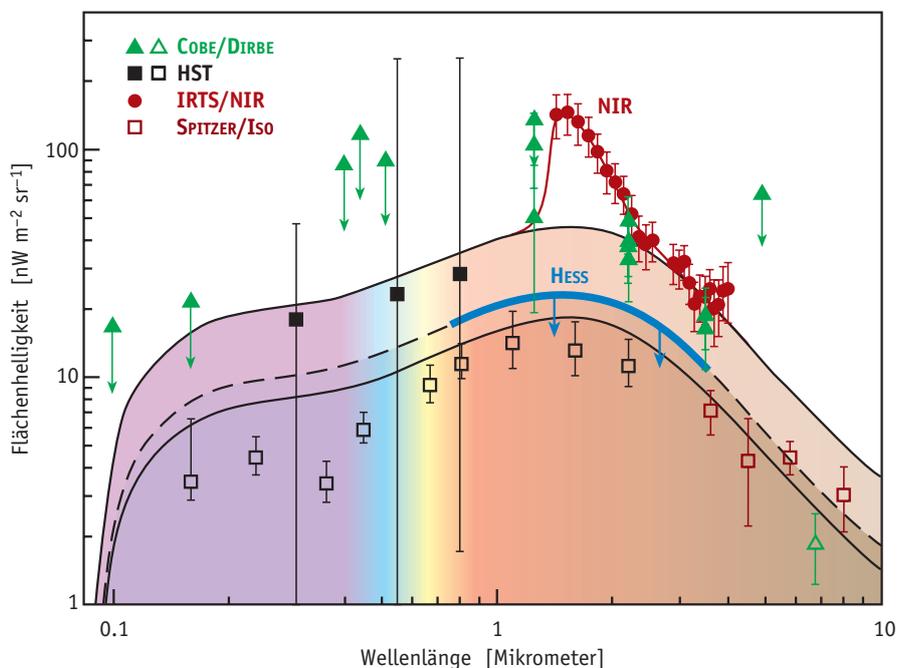
Glossar

Be-Stern: Ein Stern vom Spektraltyp B, der von einer Gasscheibe umgeben ist; durch die Strahlung des Sterns angeregt, sendet die Scheibe ein Emissionslinienspektrum aus

Frei-frei-Strahlung: Elektromagnetische Strahlung, die entsteht, wenn

freie Elektronen im elektrischen Feld eines Atomkerns abgelenkt werden; im Wellenlängenbereich der Röntgenstrahlung auch **Bremsstrahlung** genannt

Inverser Compton-Stoß: Stoß, durch den ein hochenergetisches Elektron Energie auf ein Photon überträgt



▲ Abb. 10: Die spektrale Energieverteilung des extragalaktischen Hintergrundlichts liefert Informationen über die Geschichte des Universums. Früheren Messungen zufolge sollte ein »Höcker« bei etwa 1,5 Mikrometer – die hier als NIR bezeichneten dunkelroten Datenpunkte – dem stark rotverschobenen UV-Licht einer ersten Sternengeneration entsprechen. Die mit Hess bestimmte obere Grenze (dicke blaue Kurve) liegt jedoch nur knapp über den Daten des integrierten Lichts von räumlich aufgelösten Galaxien (offene Symbole). Damit wird das Hintergrundlicht weitgehend auf die Beiträge ausdrücklich aufgelöster Galaxien zurückgeführt; etwaige Populationen von Galaxien mit geringer Flächendichte können also keine wesentliche Rolle spielen. Die gefüllten Datenpunkte (die zum Teil obere Grenzen wiedergeben) stammen aus direkten Messungen und liegen meist über den aus Modellen der Galaxienentwicklung abgeleiteten Kurven. (Nach [12])

Licht mit Licht! Dabei wird jeweils das Gammaquant absorbiert und ein energiereiches Elektron-Positron-Paar erzeugt. Auf diese Weise entsteht im Gammaskpektrum eines Blazars eine Absorptionssignatur, die Rückschlüsse auf die Stärke und das Spektrum der diffusen Photonen erlaubt.

Dieses diffuse extragalaktische Hintergrundlicht stammt zum einen von den Sternen und zum anderen von dem Staub längs der Sichtlinie durch das ganze Universum: Der Staub absorbiert teilweise das Sternlicht im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich und strahlt es anschließend im fernen Infraroten wieder ab. Da man dem Sehstrahl entlangblickend die zeitliche Entwicklung des Universums aufsummiert, enthält das Spektrum des extragalaktischen Hintergrundlichts Informationen über die Geschichte des Universums – also über die Entstehung der Galaxien und der Sterne sowie deren Entwicklung bis in die Gegenwart.

Die direkte Messung dieses sichtbaren beziehungsweise infraroten Strahlungshintergrunds ist außerordentlich schwierig: Das viel hellere Zodiakallicht im Sonnensystem – das durch Streuung des Sonnenlichts am interplanetaren Staub entsteht – und die Vordergrundemission des Milchstraßensystems müssen von der Messung abgezogen werden,

Literaturhinweise, Quellen

- [1] **Christian Stegmann:** Kosmische Strahlung – Die Suche nach den Quellen. SuW 3/2006, S. 24–34
- [2] **Thomas Bürhke:** Das Observatorium »Pierre Auger«. SuW 3/2006, S. 36–39
- [3] **Jürgen Brunner:** ANTARES – Astronomie in der Tiefsee. SuW 5/2006, S. 38–45
- [4] **Heinz Völk:** Gamma-Astronomie mit abbildenden Cherenkov-Teleskopen. SuW 11/1999, S. 948–953.
- [5] **J.G. Kirk, Lewis Ball und Olaf Skjæraasen:** Inverse Compton emission of TeV gamma rays from PSR1259–63. *Astroparticle Physics* **10**, 31–45 [1999]
- [6] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** Discovery of the binary pulsar PSR1259–63 in very-high-energy gamma rays around periastron with Hess. *A&A* **442**, 1 [2005]
- [7] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** Very high energy gamma rays from the direction of Sagittarius A*. *A&A* **425**, L13 [2004]
- [8] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** Discovery of very-high-energy γ -rays from the Galactic Centre ridge. *Nature* **439**, 695–698 [2006]
- [9] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** High-energy particle acceleration in the shell of a supernova remnant. *Nature* **432**, 75–77 [2004]
- [10] **E.G. Berezhko, H.J. Völk:** Theory of cosmic ray production in the supernova remnant RX J1713.7–3946. *A&A* **451**, 981–990 [2006]
- [11] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** The Hess Survey of the inner Galaxy in very high energy gamma rays. *ApJ* **636**, 777–797 [2006]
- [12] **Felix A. Aharonian et al. (Hess Collaboration):** A low level of extragalactic background light as revealed by γ -rays from blazars. *Nature* **440**, 1018–1021 [2006]

Weblinks zu diesem Beitrag unter: www.suw-online.de

bevor man den als isotrop anzunehmenden extragalaktischen Hintergrund übrig behält.

Die indirekte Messung des diffusen Hintergrundlichts mit Hilfe der Absorptionscharakteristiken der Gammastrahlung von Blazaren ist nicht mit diesem Problem behaftet, weil für sie die Photonen aus dem galaktischen Vordergrund vernachlässigbar sind wegen ihrer geringen Säulendichte. Deshalb lassen sich aus den Gammaspekten verschiedener Blazare Aussagen über den extragalaktischen Photonenhintergrund treffen.

Aus HESS-Beobachtungen an zwei Blazaren im Abstand von etwa zwei Milliarden Lichtjahren im Wellenlängenbereich von etwa einem bis drei Mikrometer ließ sich auf diese Weise das Spektrum des Hintergrundlichts ableiten (Abb. 10). Es liegt signifikant unter derzeitigen »direkten« Abschätzungen und nahe der unteren Grenze, die sich aus der Zählung von räumlich aufgelösten Galaxien entlang des Sehstrahls ergibt.

Daraus folgt: Die meisten Sterne und der meiste Staub befinden sich in Galaxien – und nicht etwa außerhalb davon im intergalaktischen Raum. Dieses Resultat war eigentlich zu erwarten, aber es widerlegt zugleich Behauptungen, wonach in dem betreffenden Wellenlängenbereich eine stark rotverschobene UV-

Strahlung in Form einer Überhöhung der Intensität beobachtet worden sei (der Höcker in Abb. 10). Man hatte diese Überhöhung den allerersten Sternen – der so genannten Population III – zugeschrieben, von denen man erwartete, dass ihr energiereiches Licht das frühe Universum nach einer Abkühlungsphase (dem »Dunklen Zeitalter« im Anschluss an den Urknall) wieder ionisieren und aufleuchten lassen würden (siehe auch die Abb. 2 auf S. 28 in diesem Heft). Diese Überhöhung gibt es nicht.

Angesichts des Umstands, dass die massereichen Sterne der ersten Generation schwere Elemente erzeugt und im Umgebungsmedium verteilt haben sollten (insbesondere durch Supernovaexplosionen), erschien es immer überraschend, dass diese ersten Sterne, die sich ja in extremer Distanz von uns befinden, alle zwischen ihnen und uns liegenden Galaxien überstrahlen sollten. Sie tun es also nicht! Die Suche nach einer Signatur der Sterne, die das Universum erstmals haben aufleuchten lassen, wird demnach weitergehen müssen...

Die Zukunft der Gammaastronomie

Die Gammaastronomie – insbesondere auch mit dem Satellitenteleskop GLAST, das Ende 2007 in eine Erdumlaufbahn gebracht werden soll – wird sich weiterhin

mit der Art von Objekten beschäftigen, die HESS entdeckt beziehungsweise so erfolgreich studiert hat. Die wichtigsten Zukunftsfragen liegen aber im Studium der großen extragalaktischen Objekte, wie der Starburst-Galaxien und der verschmelzenden Galaxien (Merger), der Galaxienhaufen, und schließlich der Gammastrahlungsausbrüche (Gamma Ray Bursts).

Mit HESS hat man bis jetzt solche Objekte noch nicht nachweisen können, hat aber auch noch keinen ernsthaften Versuch in der Form von wirklich tiefen Beobachtungen unternommen. Es besteht aber kaum ein Zweifel daran, dass diese Objekte Quellen von Gammastrahlung im TeV-Bereich sind. Mit HESS wurde also nur der Anfang in der Erforschung des nichtthermischen Universums gemacht. Sie wird ohne Zweifel eines der wichtigsten Gebiete in der Astronomie der Zukunft sein. □



Heinrich Völk, emeritierter Direktor am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, ist einer der Initiatoren des HESS-Projektes.

Anzeige