

SMOLUCHOWSKI-WARBURG-PREIS

Der Himmel in neuem Licht

Hochenergie-Gamma-Astronomie mit den H.E.S.S.-Teleskopen

Werner Hofmann

Fünf mächtige Spiegelteleskope zeigen im Hochland von Namibia gen Himmel, um hochenergetische Gammaquanten zu registrieren, die von nichtthermischen Quellen aus dem Universum stammen. Die Gamma-Himmelskarten enthüllen eine Vielzahl kosmischer Teilchenbeschleuniger in und jenseits unserer Galaxis.

In den letzten zwei Jahrzehnten hat sich für die Astronomie ein neues Wellenlängenfenster geöffnet: Mittels bodengebundener Teleskope lässt sich das Universum im Licht hochenergetischer Gammastrahlen bei Quantenenergien von Tera-Elektronenvolt (TeV, 10^{12} eV) beobachten – also bei einer Energie, die etwa tausend Milliarden Mal höher ist als die der Quanten des sichtbaren Lichts. Die erste Quelle solcher Strahlung wurde 1989 mit dem amerikanischen Whipple-Teleskop entdeckt: der Krebsnebel, Überrest der Supernova-Explosion von 1054 [1].

Gammastrahlung im Tera-Elektronenvolt-Bereich zeigt uns einen neuen Aspekt des Kosmos: das „nichtthermische Universum“. Normales sichtbares Licht sowie die Strahlung in einem weiten Bereich des Spektrums elektromagnetischer Strahlung stammen von heißen Körpern im Universum. Die charakteristische Energie solcher Strahlung entspricht der Temperatur des strahlenden Körpers; so emittieren heiße blaue Sterne kurzwelligeres Licht als rote Sterne. Im Universum sind keine Objekte denkbar, die heiß genug wären, um direkt Hochenergie-Gammastrahlung zu emittieren. Stattdessen nimmt man an, dass die Strahlung in und um kosmische Teilchenbeschleuniger entsteht, die Elementarteilchen auf extrem hohe Energien beschleunigen – weit über die irdischer Beschleuniger. Gammastrahlen entstehen als Sekundärprodukte, wenn diese Teilchen mit Materie (dem interstellaren Gas) oder Strahlung (z. B. normalem Sternenlicht) in der Umgebung der Quelle kollidieren. Hochenergetische Gammastrahlung ermöglicht es daher, kosmische Teilchenbeschleuniger sichtbar zu machen und zu studieren. Bislang ist die Funktionsweise dieser Beschleuniger sowie ihr Einfluss auf die Entwicklung des Kosmos und seiner Galaxien nur unvollständig verstanden.

Der Durchbruch dieses jungen Bereichs der Astronomie war primär durch eine neue Nachweismethode möglich: die abbildende atmosphärische Cherenkov-Technik (Abb. 1). Ein hochenergetisches Gammaquant



Das H.E.S.S.-System besteht aus vier Cherenkov-Teleskopen mit 12 m Durchmesser, die seit 2004 in Betrieb sind, und dem H.E.S.S. II-Teleskop mit 28 m Durchmesser, das seit 2012 den Gamma-Energiebereich zu kleineren Energien hin erweitert.

wechselwirkt mit Atomkernen der oberen Atmosphäre und erzeugt Sekundärteilchen, die wiederum Gammaquanten abstrahlen, die ihrerseits wechselwirken, sodass eine Kaskade von Teilchen entsteht, die viele Kilometer durch die Atmosphäre läuft. Die Kaskadenteilchen erzeugen dabei das blaue Cherenkov-Licht, das mit einem kleinen Öffnungswinkel von etwa einem Grad in Flugrichtung der Teilchen abgestrahlt wird und auf der Erde einen Lichtfleck von etwa 250 Meter Durchmesser erzeugt (Abb. 1). Trifft der Lichtfleck ein abbildendes Teleskop, kann dieses ein Bild der Teilchenkaskade im Cherenkov-Licht aufnehmen und aus der Geometrie der Kaskade die Richtung des Gammaquants bestimmen sowie aus der Lichtintensität seine Energie. Bildlich gesprochen fotografiert das Teleskop

KOMPAKT

- Die Erdatmosphäre absorbiert Gammaquanten. Zum Nachweis beobachten erdgebundene Spiegelteleskope wie H.E.S.S. daher die durch die Gammaquanten ausgelösten Teilchenkaskaden anhand von Cherenkov-Licht.
- Inzwischen sind über 150 kosmische Quellen hochenergetischer ($> 10^{11}$ eV) Gammastrahlung bekannt, viele davon jenseits unserer Galaxis.
- Bislang ist es noch nicht gelungen, Quellen zu finden, die Teilchen bis zu 10^{15} eV beschleunigen. Möglicherweise befindet sich nahe des Zentrums unserer Galaxis ein solcher Beschleuniger.

Prof. Dr. Werner Hofmann, MPI für Kernphysik, Postfach 103980, 69029 Heidelberg – Preisträgerartikel anlässlich der Verleihung des Smoluchowski-Warburg-Preises 2015.

die Spur eines Gammaquants, genauso wie man die Spur eines Meteors mit einer normalen Kleinbildkamera aufnehmen kann. Da das Cherenkov-Licht nicht sehr intensiv ist – nur etwa ein blaues Lichtquant pro Quadratmeter – sind Teleskope mit großen Lichtsammelflächen notwendig – oft 100 Quadratmeter und mehr. Zudem lässt es sich nur in dunklen Nächten beobachten. Die Cherenkov-Lichtblitze dauern nur einige Milliardstel Sekunden, sodass die Kameras auf extrem kurze „Belichtungszeiten“ von ca. 10^{-8} Sekunden optimiert sein müssen. Nur dann hebt sich der blaue Cherenkov-Blitz von dem selbst beim dunkelsten Nachthimmel vorhandenen Restlicht ab. State-of-the-art-Instrumente wie das High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) in Namibia (Foto S. 51) bestehen aus mehreren Teleskopen, welche die Teilchenkaskade aus verschiedenen Richtungen „fotografieren“ und damit ihre genaue räumliche Rekonstruktion ermöglichen. Der große Vorteil eines Cherenkov-Teleskops besteht darin, dass seine Nachweisfläche – d. h. die Fläche, über die sich einfallende Gammastrahlung detektieren lässt – der Größe des Cherenkov-Lichtflecks von etwa 50 000 Quadratmetern entspricht. Im Gegensatz dazu beträgt die Nachweisfläche bei einem Satelliten, der Strahlung oberhalb der Atmosphäre nachweist, nur knapp ein Quadratmeter. Die große Nachweisfläche ist wichtig, da der Fluss hochenergetischer Gammaquanten sehr klein ist – für starke Quellen etwa ein Quant pro Quadratmeter und Jahr. Um ein Bild einer Gammaquelle zu erzeugen, braucht es viele 100 bis 1000 Quanten und somit oft etliche 100 Stunden Beobachtungszeit.

Die derzeit betriebenen Cherenkov-Teleskope – das H.E.S.S.-System mit fünf Teleskopen in Namibia, das MAGIC-System mit zwei Teleskopen auf La Palma und das VERITAS-System mit vier Teleskopen in Arizona

– gehören zur dritten Generation von Instrumenten. Die Kombination aus großen Spiegelflächen mit Fokalebeneinstrumentierung mit feinen Pixeln und weitem Gesichtsfeld sowie die stereoskopische Abbildung der Teilchenkaskaden mit mehreren Teleskopen haben die Empfindlichkeit dramatisch verbessert. Zudem ist es gelungen, den omnipräsenten Untergrund durch isotrop einfallende Teilchen kosmischer Strahlung stark zu unterdrücken. Auch die Bildanalyse hat große Fortschritte gemacht; so brauchten die H.E.S.S.-Teleskope anfangs etwa 35 Stunden Beobachtungszeit, um eine Quelle mit einem Fluss von einem Prozent des Flusses des Krebsnebels zu detektieren; heute ist das in weniger als 10 Stunden möglich, unter anderem durch Maschinen-Lernalgorithmen zur Klassifikation der Bilder.

Der Fortschritt in der Nachweisteknik zeigt sich vielleicht am besten dadurch, dass die Zahl detektierter Hochenergie-Gammaquellen in den letzten Jahren schnell auf inzwischen über 150 gestiegen ist (Abb. 2) [2]. Diese große Zahl war eine ziemliche Überraschung; denn zuvor wurde angenommen, dass kosmische Teilchenbeschleunigung selten und ungewöhnlich ist. Teilchenbeschleunigung tritt in einer Vielzahl von Objekten auf: in Supernova-Überresten – den ringförmigen Stoßwellen explodierter Sterne –, um Pulsare, heiße Sterne oder an Schwarzen Löchern [3]. Die anfangs „exotische“ Gamma-Astronomie bei höchsten Energien ist zu einem regulären Gebiet der Astronomie geworden; Cherenkov-Teleskope können inzwischen Himmelskarten im Gammalicht aufzeichnen (Abb. 3a), komplex geformte Strahlungsquellen auflösen (Abb. 3b), ihre Position mit einer Genauigkeit von etwa 10 Bogensekunden bestimmen und Lichtkurven variabler Strahlungsquellen mit einer Auflösung von Minuten aufnehmen. Der Spektralbereich deckt drei

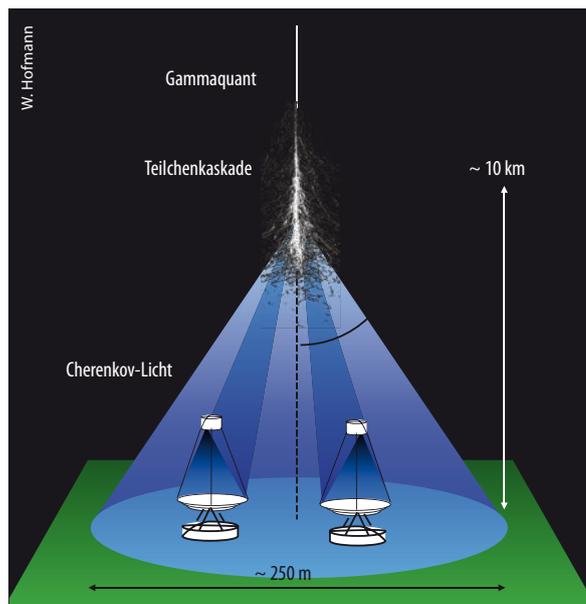


Abb. 1 Cherenkov-Prinzip: Das einfallende hochenergetische Gammaquant löst in der Erdatmosphäre eine Teilchenkaskade aus. Die Kaskadenteilchen strahlen gebündeltes blaues Cherenkov-Licht aus, das große Teleskope abbilden können.

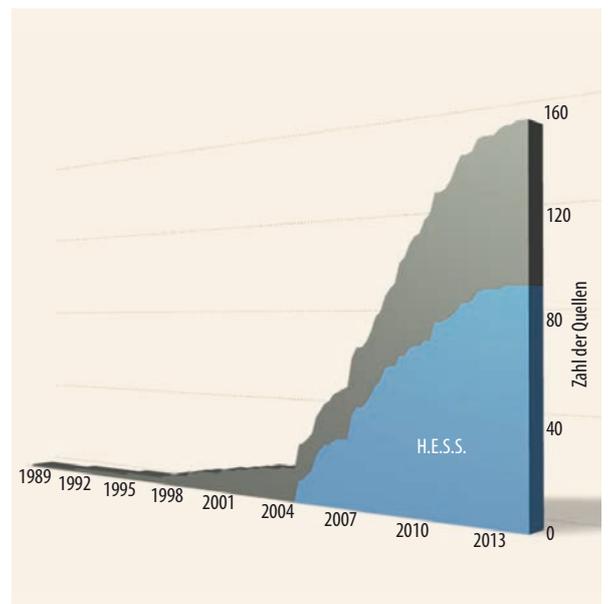
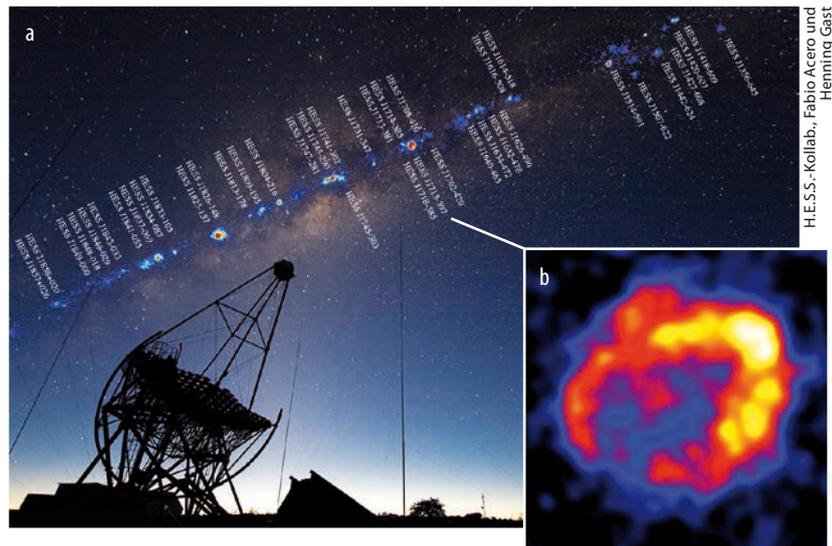


Abb. 2 Die Zahl der bekannten kosmischen Quellen von Hochenergie-Gammastrahlung ist in den letzten zehn Jahren stark gestiegen. Die H.E.S.S.-Teleskope haben einen nicht unerheblichen Teil davon entdeckt.

Abb. 3 Die Fotomontage zeigt die Milchstraße im sichtbaren Licht über einem H.E.S.S.-Teleskop kombiniert mit der von H.E.S.S. erstellten Gammakarte des zentralen Bereichs der Milchstraße (a). Die verschiedenen Gammastrahlungsquellen sind mit ihrer astronomischen Kennzeichnung angegeben (HESS Jx-y, wobei x, y die Koordinaten der Quelle sind). Gammastrahlung aus dem Supernova-Überrest RX J1713.7-3946 zeichnet die Kontur der Supernova-Schale nach (b) und zeigt, dass die Schockwelle Teilchen auf hohe Energien beschleunigt.



H.E.S.S.-Kollab., Fabio Acero und Henning Gast

Größenordnungen in der Energie der Gammaquanten von einigen 10^{10} eV bis zu vielen 10^{13} TeV ab. Im Jahr 2009 wurde H.E.S.S. als eines der zehn weltweit erfolgreichsten Observatorien identifiziert [4], in einer Liga mit Observatorien, deren Bau und Betrieb vielfach teurer ist.

Ein allgemeiner Überblick der Ergebnisse der Hochenergie-Gammaastronomie sprengt den Rahmen dieses Artikels; daher seien beispielhaft nur einige neuere Ergebnisse der H.E.S.S.-Teleskope genannt.

Extreme stellare Gamma-Quellen

Kürzlich gelang es erstmals, mit einzelnen stellaren Objekten verbundene Gammaquellen jenseits unserer Galaxis nachzuweisen. In einer 210 Stunden langen Beobachtung der Großen Magellanschen Wolke wurden drei Quellen identifiziert: der von einem Pulsar mit hochenergetischen Teilchen gefütterte Nebel N157B, der Supernova-Überrest N132D und die Superschale 30 Dor C (Abb. 4). Der Ursprung der hochenergetischen Teilchen in dieser 300 Lichtjahre durchmessenden „Schale“ ist nicht gut verstanden. Alle drei Quellen haben eine extrem hohe Gammaluminosität; offensichtlich sind in der Magellanschen Wolke mit ihrer im Vergleich zur Milchstraße hohen Sternentstehungsrate die Bedingungen für extreme kosmische Teilchenbeschleuniger günstiger als in der Milchstraße. Der Pulsar in N157B besitzt ähnliche Eigenschaften wie der Krebspulsar. Die Gammalichtstärke des umgebenden Pulsarnebelns ist aber sehr viel höher als die des Krebsnebels, was unter anderem an der intensiven optischen Strahlung in der Sternentstehungsregion in der Großen Magellanschen Wolke liegt: Die Gammastrahlung entsteht, wenn vom Pulsar zu hohen Energien beschleunigte Elektronen Lichtquanten zu sehr hohen Energien hin streuen (inverser Compton-Effekt). Die junge Supernova 1987a – der die H.E.S.S.-Beobachtungen der Großen Magellanschen Wolke ursprünglich galten – ist entgegen den Modellvorhersagen (noch) nicht im Gammalicht sichtbar.

Suche nach kosmischen „Pevatrons“

Die Suche nach kosmischen „Pevatrons“, also kosmischen Beschleunigern, die Teilchen bis 10^{15} eV erzeugen und damit die Quellen der kosmischen Strahlung in unserer Galaxis darstellen, ist eines der wichtigsten Ziele der Hochenergie-Gamma-Astronomie. Zunehmend genauere Messungen zeigen allerdings, dass die Gammaskpektren der meisten Objekte bei etwa 10^{13} eV abbrechen. Da die Primärteilchen etwa zehnfach höhere Energien haben, erreichen diese kosmischen Beschleuniger „nur“ etwa 10^{14} eV Maximalenergie. Allerdings gibt es einige vielversprechende Objekte, die derzeit Ziel von Nachfolgebeobachtungen sind, um die Spektren genauer zu vermessen: So wurde direkt neben der intensiven Quelle HESS J1640-465 das Objekt HESS J1641-463 an der Position des Supernova-Überrests SNR G338.5+0.1 entdeckt. HESS J1641-463 wurde zunächst von HESS J1640-465 überstrahlt, tritt aber bei Energien von einigen TeV immer deutlicher als eigenständige Quelle hervor, deren hartes Spektrum sich bis zu etwa 30 TeV ohne Zeichen eines Abbruchs vermessen ließ [6]. Eine Messung bis zu noch höheren Energien erfordert allerdings weit längere Beobachtungszeiten. Besonders interessant ist die Umgebung des Zentrums unserer Galaxis, wo bereits in frühen

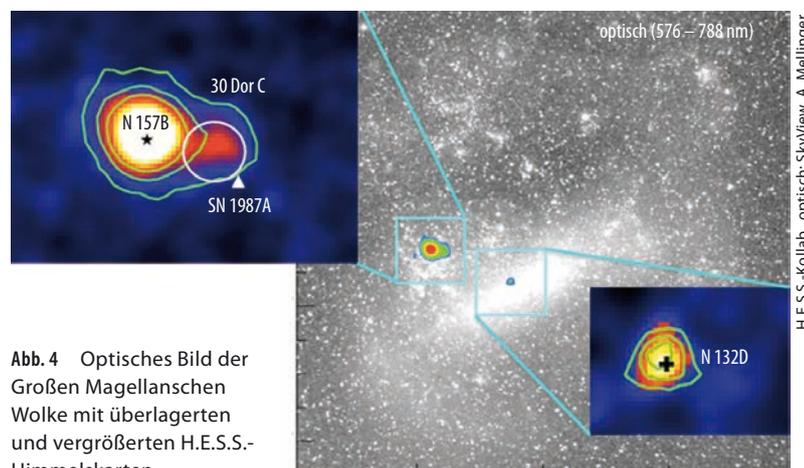
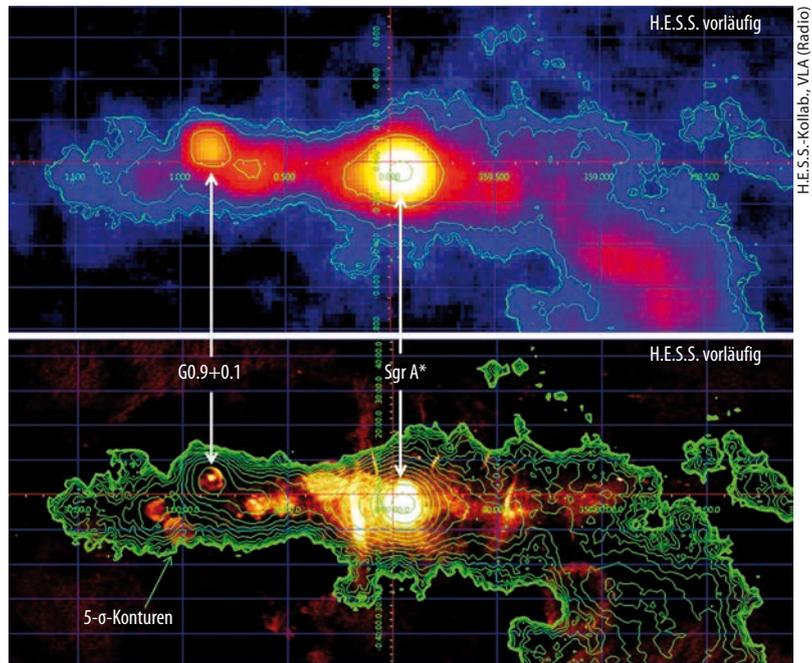


Abb. 4 Optisches Bild der Großen Magellanschen Wolke mit überlagerten und vergrößerten H.E.S.S.-Himmelskarten.

H.E.S.S.-Kollab., optisch: SkyView, A. Mellinger

Abb. 5 Hochenergie-Gammakarte des galaktischen Zentrums (oben). Die grünen Konturen (unten) zeigen die Intensität der Gammastrahlung (genauer gesagt die Signifikanz der Detektion) über einer Radiokarte der Region (Ausschnitt: etwa $3,5^\circ$ galaktische Länge oder 500 Parsec). Das galaktische Zentrum (Sgr A*) und der Supernova-Überrest G0.9+0.1 sind starke Gammaquellen. Die ausgedehnten Emissionsregionen korrelieren grob mit der Dichte interstellaren Gases in der Region, die Gammastrahlung entsteht daher höchstwahrscheinlich durch Wechselwirkung kosmischer Strahlung mit dem Gas. Die dafür erforderliche Teilchendichte der kosmischen Strahlung ist jedoch viel höher als die in der Umgebung der Erde gemessene, was auf einen oder mehrere leistungsfähige Beschleuniger nahe des galaktischen Zentrums schließen lässt [7].



H.E.S.S.-Daten harte Gammasppektrn auftraten [7]. Daher könnte ein sehr leistungsstarker Beschleuniger nahe des Zentrums unserer Galaxis den inneren Bereich mit hochenergetischen Teilchen fluten. Die komplexen Emissionsstrukturen in unserem galaktischen Zentrum beinhalten auch nach über 200 Stunden Beobachtungszeit noch viele Rätsel (Abb. 5). Die genauere Messung der Gammasppektrn in diesem Bereich ist Gegenstand aktueller Arbeit bei H.E.S.S.

Die nächste Generation

Noch gibt es viele offene Fragen hinsichtlich der Funktion kosmischer Teilchenbeschleuniger und ihrer Rolle im Kosmos. 2006 haben sich daher weltweit Wissenschaftler zusammengeschlossen und das Cherenkov Telescope Array (CTA) als Instrument der nächsten Generation vorgeschlagen. Es soll existierende Instrumente in vielen Dimensionen um bis zu eine Größenordnung übertreffen und diese Fragen angehen [8, 9]. 2008 wurde ein Konsortium gegründet, um den Bau zu planen und vorzubereiten. Das Konsortium umfasst heute über 1000 Mitglieder aus 194 Instituten in 31 Ländern. CTA soll an zwei Standorten entstehen (einer im Norden, einer im Süden) und mit bis zu 100 Teleskopen mit verbesserter Technologie eine Nachweisfläche von bis zu 10 km^2 erreichen. Die Aufnahme vieler Bilder jeder Teilchenkaskade wird eine genaue Rekonstruktion der Richtung erlauben. Ferner dienen drei verschiedene Teleskoptypen dazu, kosteneffektiv einen noch größeren Energiebereich abzudecken.

CTA soll als offenes Observatorium betrieben werden. Nach einer gewissen Latenzzeit werden ferner alle Daten frei zugänglich sein. Der Bau wird rund fünf Jahre dauern; derzeit ist allerdings die Finanzierung noch nicht vollständig gesichert. Für den südlichen Standort stehen Chile und Namibia zur Debatte, für

den Norden die Kanaren oder Mexiko; die Standortentscheidung soll noch 2015 fallen. CTA wird dem jungen Feld der Gamma-Astronomie bei höchsten Energien einen großen Schub geben und unser Verständnis des nichtthermischen Universums dramatisch verbessern.

Danksagung

Mein Dank gilt insbesondere den Kollegen der H.E.S.S.-Kollaboration für die langjährige intensive Zusammenarbeit; die Erfolge von H.E.S.S. beruhen auf ihrem Engagement und ihren Beiträgen. Dank geht auch an die Max-Planck-Gesellschaft für die optimalen Rahmenbedingungen.

Literatur

- [1] T. C. Weekes et al., *Astrophys. Journal* **342**, 379 (1989)
- [2] TeVCat-Quellenkatalog, <http://tevcat.uchicago.edu>
- [3] J. A. Hinton und W. Hofmann, *Annual Rev. Astronomy Astrophys.* **47**, 523 (2009)
- [4] J. P. Madrid und D. Macchetto, arXiv:0901.4552; *Nature* (2009) www.nature.com/news/2009/090206/full/news.2009.81.html
- [5] A. Abramowski et al. (H.E.S.S. Coll.), *Science* **347**, 406 (2015)
- [6] A. Abramowski et al. (H.E.S.S. Coll.), *Astrophysical Journal Letters* **794**, L1 (2014)
- [7] F. Aharonian et al. (H.E.S.S. Coll.), *Nature* **439**, 695 (2006)
- [8] M. Actis et al., *Experimental Astronomy* **32**, 193 (2011)
- [9] J. Hinton, S. Sarkar, D. F. Torres und J. Knapp (Hrsg.), *Seeing the High-Energy Universe with the Cherenkov Telescope Array*, *Astroparticle Physics* **43** (2013)

DER AUTOR

Werner Hofmann studierte Physik an der U Karlsruhe, wo er 1977 mit einer Arbeit aus der Teilchenphysik promovierte. Nach der Habilitation an der U Dortmund ging er 1982 als Heisenberg-Stipendiat an das Lawrence Berkeley Laboratory (USA); 1984 wurde er Assistant Professor an der U Berkeley, 1985 Associate Professor und 1987 Professor. Seit 1988 ist er Direktor am MPI für Kernphysik in Heidelberg. 2000 bis 2012 war er Sprecher der H.E.S.S.-Kollaboration; seit 2008 ist er Sprecher der CTA-Kollaboration.

