

Ein Höhenflug der Physik

Vor hundert Jahren entdeckte Victor Hess die kosmische Strahlung.

Michael Walter

Im Jahr 1912 stieg der österreichische Physiker Victor Franz Hess siebenmal mit einem Ballon auf, um die Ionisierung der Atmosphäre zu messen. Bei der letzten Fahrt erreichte er eine Höhe von über fünf Kilometern. Das Elektrometer an Bord zeigte in dieser Höhe einen unerwartet starken Anstieg der Ionisation. Dies, so war sich Hess sicher, konnte nur durch eine extraterrestrische Strahlung hervorgerufen worden sein.

Elektrizität und neuartige Strahlenarten waren entscheidende Faktoren des Fortschritts in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts. Die von Heinrich Geißler 1857 in Thüringen entwickelte Gasentladungsröhre galt zwar zunächst als Spielerei. Doch als William Crookes in England damit zwölf Jahre später die Kathodenstrahlung nachwies, begann eine wissenschaftliche und technische Erfolgsgeschichte. So entdeckte Conrad Röntgen mit einer Kathodenstrahlröhre 1895 zufällig die nach ihm benannte Strahlung. Nur wenige Monate später beobachtete Henri Becquerel ebenfalls zufällig eine unbekannte Strahlung, und damit die Radioaktivität. Und 1897 konnte Joseph John Thomson nachweisen, dass Kathodenstrahlen aus Elektronen bestehen.

In Paris begann Marie Curie Ende 1897, die „Becquerel-Strahlung“ mit einem von ihrem Mann Pierre entwickelten Elektrometer zu untersuchen. Elektrometer waren zu dieser Zeit schon seit mehr als hundert Jahren für die Messung elektrischer Ladungen im Einsatz. Marie Curie konnte damit die Intensität der ionisierenden Strahlung von Uran und den von ihrem Mann neu entdeckten radioaktiven Elementen Thorium, Radium und Polonium messen. Weitere Untersuchungen von Ernest Rutherford und



Victor Franz Hess Gesellschaft

Victor Hess (rechts im Ballonkorb) wird nach einer seiner Ballonfahrten in den Jahren 1911/12 von Neugierigen umringt.

anderen führten zu der Erkenntnis, dass sich die ionisierende Strahlung aus drei Arten zusammensetzt, den α -, β - und γ -Strahlen.

Die ionisierende Strahlung lieferte auch eine Erklärung für ein Phänomen, das schon Charles Coulomb um 1785 beschäftigt hatte. Luft wurde allgemein als guter Isolator betrachtet. Allerdings zeigte sich, dass ein elektrisch geladener metallischer Leiter mit der Zeit die Ladung verlor, auch wenn er nur von Luft umgeben war und gut isoliert in einem geschlossenen Gefäß lagerte. Die Erklärung lieferten um 1900 Julius Elster und Hans Geitel und unabhängig von ihnen der Schotte Charles Wilson. Die Leitfähigkeit der Luft wird durch die ionisierende Strahlung hervorgerufen, die von radioaktiven Substanzen aus der Umgebung stammen. Die drei waren vermutlich die ersten, die Messungen der im Erdboden und in der umgebenden Luft vorkommenden ionisierenden Strahlung in der Natur durchführten. Während Wilson später für die Entwicklung der Nebelkammer

den Nobelpreis erhielt, sind die beiden Physiklehrer und Hobbyforscher aus Wolfenbüttel heute den meisten wahrscheinlich völlig unbekannt. Dabei waren sie damals mit der Entwicklung der Photozelle, ihren Untersuchungen zur Elektrizität der Atmosphäre und zur ionisierenden Strahlung anerkannte Kapazitäten [1]. Zwischen 1904 und 1911 wurden sie sieben Mal für den Nobelpreis nominiert. Den Ruf an eine Universität haben sie abgelehnt, um als Gymnasiallehrer mit Privatlabor unabhängig zu bleiben.¹⁾

Unterstützt von Elster und Geitel, hat der Meteorologe Franz Linke zwischen 1902 und 1903 auf sechs Fahrten mit einem Wasserstoffballon auch die Ionisation der Atmosphäre in Abhängigkeit von der Höhe gemessen [2]. Wissenschaftliche Ballonfahrten wurden in Berlin besonders von den Meteorologen perfektioniert. Beispielsweise hat Richard Aßmann mit unbemannten Ballonen die Temperaturinversion oberhalb von 10 km Höhe gemessen und damit die Stratosphäre entdeckt. In Linkes

1) vgl. Physik Journal, Oktober 2007, S. 9

Dr. Michael Walter,
Deutsches Elektronen-Synchrotron
DESY, Platanenallee
6, 15738 Zeuthen

2) Unklar ist, warum diese Beobachtungen nicht von den nachfolgenden Akteuren und auch nicht von Erich Miehlnickel [3] zitiert wurden. Miehlnickel publizierte die Entwicklung der Höhenstrahlungsforschung in der Zeit von 1900 bis 1936.

Auswertung der Daten ([2], S. 87) finden sich sehr interessante Ergebnisse. So beobachtete er eine Zunahme der Ionisation mit der Höhe unabhängig vom Wetter, und bei einer Höhenfahrt zeigte das Elektrometer zunächst eine Abnahme der Ionisation verglichen mit dem am Boden gemessenen Wert; zwischen 1000 und 3000 Meter einen Anstieg auf den Bodenwert und dann in 5500 Meter Höhe einen vierfach größeren Wert. Wie später zu sehen sein wird, ist dieses Resultat dem von Hess durchaus ähnlich. Allerdings kam Linke aufgrund der Unsicherheit der Messungen zur Schlussfolgerung, „dass die Ursache der Ionisierung in erster Linie an der Erde zu suchen ist“ ([2], S. 88).²⁾

In Kanada untersuchte ab 1903 eine Gruppe um Rutherford die Absorption von γ -Strahlen in Abhängigkeit von der Dicke verschiedener Materialien. Adam S. Eve entwickelte aus den Messwerten ein Absorptionsgesetz und konnte abschätzen, dass eine 1000 Meter dicke Atmosphärensicht 99 Prozent der energiereichsten γ -Strahlung einer radioaktiven Quelle absorbiert.

Für die weitere Forschung spielte das von Theodor Wulf entwickelte Zweifaden-Elektrometer (Abb. 1) eine zentrale Rolle. Es setzte sich

wegen der besseren Reproduzierbarkeit und höheren Genauigkeit der Messungen rasch als Standardinstrument durch. Die Fertigung erfolgte, wie für viele nachfolgende Geräte, in der Braunschweiger Firma Günther & Tegetmeyer [4]. Wulf setzte die Ionisationsmessungen von Elster und Geitel an der Erdoberfläche, in Bergwerken und unter Wasser fort. Zusammen mit Albert Gockel von der Universität Freiburg/Schweiz führte Wulf die ersten Beobachtungen in den Alpen durch. Dabei fanden sie keinen Hinweis auf einen Anstieg der Ionisation mit der Höhe, aber in ihrer Publikation prägten sie den Begriff „kosmische Strahlung“ ([5], S. 910), der Robert Millikan zugesprochen wird, obwohl der ihn erst 18 Jahre später einführte.

Aus den Ergebnissen der bisherigen Messungen zog Wulf die Schlussfolgerung, dass „die durchdringende Strahlung von primär radioaktiven Substanzen verursacht wird, welche in den obersten Erdschichten liegen, bis etwa 1 m unter der Oberfläche.“ Um diese Hypothese zu belegen, führte er 1910 Messungen auf dem Eiffelturm durch. Entsprechend dem Absorptionsgesetz von Eve sollte die Strahlung in 300 Meter Höhe 74 Prozent

schwächer sein als am Boden. Die Werte von Wulf ergaben aber nur eine Abschwächung um 13 Prozent, was auf die Existenz radioaktiver „Emanationen“ (Ausstrahlungen) in der Atmosphäre hinwies.

Einen anderen Zugang aber mit ähnlichem Ergebnis wählte der Italiener E. Pacini. Er führte 1910 und 1911 mit Wulfischen Elektrometern Ionisationsmessungen an Land und auf dem Meer in 300 Meter Entfernung vom Ufer durch. Auf dem Meer und speziell unter der Wasseroberfläche erwartete man einen wesentlich geringeren Anteil radioaktiver Substanzen. Die Resultate zeigten jedoch, dass die auf dem Meer gemessene Ionisationsrate auf eine durchdringende Strahlung hinweist, die unabhängig von der erdgebundenen Strahlung ist, vergleichbar mit der Schlussfolgerung von Wulf.

Ballonfahrten zur Messung der Ionisationsrate in der Atmosphäre führten 1908 Karl Bergwitz, ein Schüler von Elster und Geitel, und von 1909 bis 1911 Albert Gockel in der Schweiz durch. Bergwitz beobachtete zunächst eine Abnahme der Ionisation und dann einen konstanten Wert in 1300 bis 2000 Meter Höhe. Weitere Messungen waren nicht möglich, da der Detektor undicht und so funktionsuntüchtig wurde. Es ist überliefert, dass Bergwitz keine weiteren Ballonfahrten durchführte, „weil ein älterer Hochschullehrer mit dem Hinweis auf den möglichen Verlust der wissenschaftlichen Reputation, sollte er weiter dem Gedanken an eine extraterritoriale Strahlung nachhängen, davon abgeraten habe“ ([4], S. 204). Auch Gockel kam zu Resultaten, die der nach Eve erwarteten Abnahme der Ionisationsrate widersprach. In Höhen oberhalb von 1000 Meter hat er im Ballon noch 70 Prozent der Ionisation gemessen, die vor der Fahrt an der Erdoberfläche registriert wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungen von Wulf, Gockel und Pacini deuteten übereinstimmend darauf hin, dass eine durchdringende Strahlung in der Atmosphäre existiert. Daher widmete sich der österreichische Physiker Victor

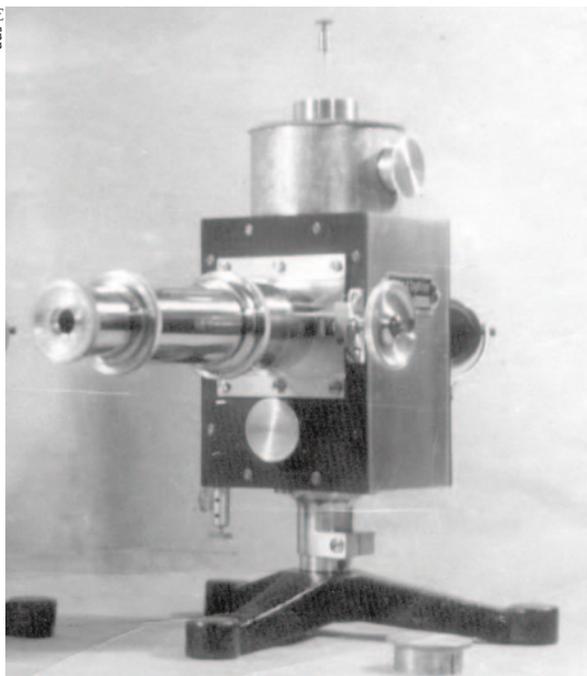


Abb. 1 Der deutsche Jesuit Theodor Wulf lehrte ab 1905 Physik am Ignatius Colleg im holländischen Valkenburg. Er entwickelte das Zweifaden-Elektro-

meter, das sich wegen seiner hervorragenden Eigenschaften rasch zum Standardinstrument der Forschung entwickelte.



Archiv der Jesuiten

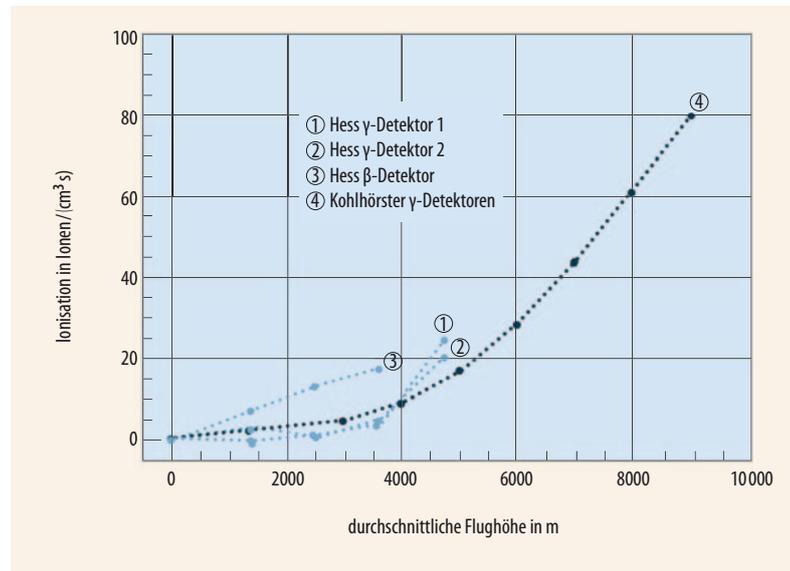
Franz Hess der Aufgabe, die Absorption von γ -Strahlen in der Atmosphäre zu messen. Hess hatte in Graz Physik studiert [6] und von 1906 bis 1910 bei Franz Exner an der Universität Wien gearbeitet, einem Experten für elektrische Phänomene der Atmosphäre. Mit der Gründung des Instituts für Radiumforschung der Akademie der Wissenschaften wurde Hess 1910 Assistent bei Stefan Meyer, dem ersten Direktor.³⁾

Die Hypothese einer durchdringenden Strahlung in der Atmosphäre beruhte darauf, dass das Absorptionsgesetz von Eves richtig sei. Das überprüfte Hess mit den stärksten im Institut verfügbaren γ -Quellen. Mit Absorptionsmessungen, bei denen der Abstand zwischen Detektor und Quelle bis zu 90 Meter betrug, bestätigte er Eves Gesetz.

Aufstieg eines Physikers

Der nächste Schritt war die Planung und Durchführung eigener Ballonfahrten. Hess ließ sich 1911 von Günther & Tegetmeyer zwei verbesserte, druckfeste Elektrometer für die Messung der γ -Strahlung und einen Detektor mit dünnen Wänden für die β -Strahlung fertigen. Noch im selben Jahr absolvierte er zwei Fahrten. Die erste bestätigte die Beobachtung von Gockel, dass die Ionisation in 1000 Meter Höhe fast den Bodenwert erreicht. Auf der zweiten Fahrt machte er die interessante Entdeckung, dass die Strahlung in den Nachtstunden dieselbe Intensität hat, wie am Tage. Damit konnte er die Sonne als Quelle der γ -Strahlung ausschließen.

Die Kaiserliche Akademie der Wissenschaften finanzierte 1912 sieben weitere Fahrten. Da in Wien nur Leuchtgas als Ballonfüllung zur Verfügung stand, beschränkte sich Hess zunächst bei sechs bis zu neunstündigen Fahrten auf die systematische Untersuchung der Ionisation der Atmosphäre bis auf etwa 2000 Meter Höhe. Die erste Fahrt am 17. April 1912 fand während einer partiellen Sonnenfinsternis statt. Für Hess war das wesentliche Ergebnis: „Da kein Einfluß der



M. Walter

Abb. 2 Victor Hess und Werner Kohlhörster zeigten mit ihren Ballonmessungen, dass die Ionisation in der Atmosphäre mit wachsender Höhe ansteigt.

Verfinsterung auf die durchdringende Strahlung zu bemerken war, werden wir schließen dürfen, dass selbst, wenn ein Teil der Strahlung kosmischen Ursprungs sein sollte, er kaum von der Sonne ausgeht, wenigstens solange man eine direkte, geradlinig sich ausbreitende γ -Strahlung im Auge hat“ ([7], S. 1086). Zwei weitere Nachtfahrten bestätigten diese Hypothese. Diese hatten außerdem den Vorteil, dass die atmosphärischen Verhältnisse in der Nacht viel stabiler waren als am Tage, sodass der Ballon für mehrere Stunden auf konstanter Höhe gehalten werden konnte. Die anderen Fahrten bestätigten die schon bekannte Existenz einer durchdringenden Strahlungskomponente in der Atmosphäre.

Die siebte Fahrt sollte schließlich in noch größere Höhen führen. Dazu nutzte Hess den mit 1680 Kubikmeter Wasserstoff gefüllten Ballon „Böhmen“ des deutschen Luftfahrtvereins in Böhmen. Er startete am Morgen des 7. August in Aussig an der Grenze zu Sachsen (jetzt Ústí nad Labem, Tschechien) zusammen mit dem Ballonführer Hauptmann Wilhelm Hoffory und dem meteorologischen Beobachter Ernst Wolf. Über dem Schwielochsee im Süden Brandenburgs erreichten sie die maximale Höhe von 5350 Meter und maßen bis dahin die Ionisationswerte für die Detektoren in Abhängigkeit von der Höhe (Abb. 2). Da Hess trotz Sauerstoffbeatmung unter Beschwerden litt, setzte er ver-

sehtlich den β -Detektor noch unterhalb von 4000 Meter Höhe außer Betrieb. Die beiden γ -Detektoren zeigten in 3600 m Höhe etwa 4 bis 5 Ionen pro Kubikzentimeter und Sekunde mehr als am Boden an. Die Rate stieg dann bei einer mittleren Höhe von 4700 Meter auf 20–24 Ionen / (cm³ s). Die mit dem β -Detektor gemessene Ionisation stieg kontinuierlich auf etwa 17 Ionen / (cm³ s) in 3600 Meter Höhe. Frühere Beobachtungen hatten gezeigt, dass die Ionisation in den Wolken anstieg. Deren Einfluss konnte bei den Messungen ausgeschlossen werden, da es nur eine dünne Wolkendecke in etwa 6000 Meter Höhe gab.

Hess landete mittags in Bad Saarow/Pieskow etwa 60 Kilometer südöstlich von Berlin. Zusammenfassend schrieb er: „Die Ergebnisse der vorliegenden Beobachtungen scheinen am ehesten durch die Annahme erklärt werden zu können, dass eine Strahlung von sehr hoher Durchdringungskraft von oben her in unsere Atmosphäre eindringt, und auch noch in deren untersten Schichten einen Teil der in geschlossenen Gefäßen beobachteten Ionisation hervorruft“ ([7], S. 1090).

Von der Bestätigung ...

Hess konnte zwar sicher sein, dass seine sehr sorgfältigen Messungen die Schlussfolgerung erlaubte, eine extraterrestrische Strahlung

3) Eine wichtige Aufgabe des Radiuminstituts war es, weltweit andere Laboratorien mit geeigneten radioaktiven Quellen zu versorgen. Mehr zur Geschichte des Instituts findet sich in: S. Fengler und C. Forstner, Von der Radiumforschung zur Kernphysik, Physik Journal, Februar 2011, S. 34

nachgewiesen zu haben. Dennoch war eine unabhängige Bestätigung der Resultate unbedingt erforderlich. Diesen wichtigen Schritt machte Werner Kolhörster in den folgenden zwei Jahren (Abb. 3). Er hatte 1911 in Halle seine Dissertation über „Beiträge zur Kenntnis der radioaktiven Eigenschaften des Karlsbader Sprudels“ verteidigt und eine dreijährige Anstellung als Assistent an der Universität erhalten. Mit Unterstützung des Halleschen Aero-Physikalischen Forschungsfonds konnte Kolhörster angeregt durch die Arbeiten von Wulf, Gockel und Hess die ersten drei Ballonfahrten im Sommer 1913 durchführen. Für die Messungen in großer Höhe ließ er bei Günther & Tegetmeyer neue Elektrometer mit guter Druckstabilität und Temperaturkonstanz aus Aluminium fertigen. Mit Wasserstoffballons erreichte Kolhörster Höhen von 4100, 4300 und 6300 Meter Höhe und bestätigte die Resultate von Hess. Eine weitere Fahrt führte im Juni 1914 sogar 9300 Meter hoch und zeigte in beeindruckender Weise den Zuwachs der Ionisation auf 80,4 Ionen / (cm³ s) (Abb. 2). Kolhörster fasste die Ergebnisse wie folgt zusammen: „Die Strahlung ist [...] bedeutend härter (als die von Ra-C-Quellen, Autor) und sie wird erst durch eine Luftschicht von 7 km Dicke bei Atmosphärendruck auf 1 Proz. absorbiert. Man darf vermuten, dass eine durchdringende



Abb. 3 Werner Kolhörster bestätigte mit seinen Ballonmessungen die Resultate von Victor Hess.

Strahlung kosmischen Ursprungs existiert, die wohl zum größten Teil von der Sonne herrührt“ ([8], S. 721). Warum er die Sonne als mögliche Quelle favorisierte, ist unklar, denn das folgte ja nicht aus den Messungen und widersprach den Ergebnissen von Hess bei Fahrten während der Sonnenfinsternis und in der Nacht.

Die Protagonisten der kosmischen Strahlung trafen natürlich auch auf Zweifel und Ablehnung. Allerdings nahmen die Forschungsaktivitäten und Publikationen aufgrund des Weltkrieges rapide ab.

... zur „Neuentdeckung“

In den USA begann am Caltech nach dem Ersten Weltkrieg ein Programm zur Erforschung der durchdringenden Strahlung. Zusammen mit Ira S. Bowen hat Millikan 1921 unbemannte Ballonaufstiege mit einem einfachen Elektrometer mit automatischer Aufzeichnung der Daten durchgeführt. Ein Ballon erreichte eine Höhe von 15 500 Meter, aber ohne Angabe von Gründen gelang es, nur einen Ionisationswert oberhalb von 5500 Meter zu messen. Dieser gemittelte Wert von 46,2 Ionen / (cm³ s) war einen Faktor drei höher als die Ionisation am Boden und vergleichbar mit der Messung von Hess in 4700 Meter Höhe. Im Abstract der Publikation vom April 1926 kommt Millikan mit diesem einzigen, durchaus fragwürdigen Wert zu dem gewagten Schluss: „This is only 25 percent of the value to be expected from the observations of Hess and of Kolhörster and constitutes definite proof that there exists no penetrating radiation of cosmic origin having an absorption coefficient as large as 0,57 per meter of water“ ([9], S. 353).

Auf der anderen Seite wurde Millikan schon im November 1925, also fünf Wochen, bevor der Artikel eingereicht wurde, in der New York Times als Entdecker der „Millikan-Strahlung“ gefeiert [10]: „Milikan has gone out beyond our highest atmosphere in search for the cause of a radiation mysteri-

ously disturbing the electroscopes of the physicists. [...] The mere discovery of these rays is a triumph of the human mind that should be acclaimed among the capital events of these days. [...] ‚Millikan rays‘ ought to find a place in our planetary scientific directory all the more because they would be associated with a man of such fine and modest personality.“ Millikan, der 1923 den Nobelpreis für die Bestimmung der Elementarladung erhalten hatte, genoss als einer der bekanntesten Physiker der USA eine hohe Medienpräsenz.

Im November 1926 publizierten Millikan und Cameron einen Artikel über ihre Absorptionsmessungen der durchdringenden Strahlung in Bergseen in 3600 und 1577 m Höhe, in dem sie die Entdeckung der kosmischen Strahlung für sich beanspruchten. Das führte natürlich zu heftigen Reaktionen, speziell von Hess und Kolhörster, die deutlich machten, dass die Strahlung nichts anderes sei, als die von ihnen gemessene. Erst mit der Verleihung des Nobelpreises 1936 wurde die Entdeckung der kosmischen Strahlung durch Victor Hess und seine bedeutende Rolle bei der Entwicklung des neuen Forschungsgebietes entsprechend gewürdigt und in der Öffentlichkeit bekannt.

Ein neues Fenster zum Kosmos

Die Existenz der kosmischen Strahlung war ab Ende 1926 nicht zuletzt durch die „Neuentdeckung“ allgemein akzeptiert. Im Zentrum der weiteren Aktivitäten stand die Erforschung ihrer Eigenschaften. Dabei spielten neue Detektoren wie die von Wilson 1911 entwickelte Nebelkammer, der Geiger-Müller-Zähler (1928) und die Koinzidenzschaltung von Walther Bothe (1929) für den rasanten Erkenntnisgewinn eine entscheidende Rolle [11]. In Fotografien seines Nebelkammer-Experiments fand Dimitry Skobelzyn aus Leningrad 1927 zufällig Spuren hochenergetischer Teilchen. Ein nachfolgendes Experiment zeigte, dass es kosmische Teilchen

waren, und damit zumindest die sekundäre Komponente der kosmischen Strahlung Teilchencharakter hat. In Berlin bestätigten Bothe und Kolhörster 1928 diese Hypothese in einem bahnbrechenden Experiment. Sie verwendeten zum ersten Mal zwei Geiger-Müller-Zähler in Koinzidenzschaltung, eine Technik, die dann von Bruno Rossi (Florenz) perfektioniert wurde. Das Nebelkammer-Experiment von Skobelzyn setzten Carl Anderson (Caltech), Patrick Blackett (London) und Paul Kunze (Rostock) Anfang der 1930er-Jahre fort. 1933 entdeckte Anderson zufällig das Positron. In derselben Nebelkammer fanden Seth Neddermeyer und Anderson Spuren, deren Ionisation und Reichweite auf ein Teilchen hinwiesen, dessen Masse etwa 200 Elektronenmassen entsprechen müsste. Dieses „Mesotron“ wurde zunächst für das Teilchen gehalten, das Hideki Yukawa (Kyoto) 1935 in seiner Theorie zur Vermittlung der Kernkraft eingeführt hatte. Die hohe Durchdringungsfähigkeit und die längere Zerfallszeit ließen aber Zweifel aufkommen. Das Rätsel wurde erst 1947 mit der Entdeckung des Pions durch Donald Perkins (London) und Cecil Powell (Bristol) gelöst. Sie hatten die in den 1930er-Jahren von Marietta Blau in Wien entwickelte Foto-Emulsionstechnik vervollkommenet.

Von 1928, als erste Hinweise auf den Teilchencharakter der kosmischen Strahlung gefunden wurden, bis 1948, als der erste Teilchenbeschleuniger in Berkeley gezielte Experimente erlaubte, haben Experimente mit kosmischen Teilchen den rasanten Fortschritt der Elementarteilchenphysik ermöglicht. Die Separation Anfang der 1950er-Jahre in Astroteilchenphysik und in Elementarteilchenphysik an Beschleunigern war keine wirkliche Trennung. Es gab immer einen intensiven Austausch an Ideen, theoretischen Modellen, experimentellen Methoden, Simulations- und Analysesoftware, aber auch an Wissenschaftlern, die ins andere Gebiet wechselten.

Das Forschungsspektrum der Astroteilchenphysik hat sich bis

H.E.S.S. Collaboration



Abb. 4 Der H.E.S.S.-Array in Namibia, von dem hier zwei Teleskope zu sehen sind, misst die Cherenkov-Strahlung und untersucht damit die kosmische Gamma-

strahlung im Energiebereich von 100 GeV bis 100 TeV. Die Abkürzung H.E.S.S. steht für High Energy Stereoscopic System und soll an Victor Hess erinnern.

heute allerdings enorm erweitert [12]. Es reicht von der Zusammensetzung der kosmischen Strahlung und der Messung der Energie der verschiedenen Komponenten über die Teilchenstrahlung von der Sonne bis zum Einfluss kosmischer Strahlung auf das Klima und den Menschen. Aber auch nach einhundert Jahren gibt es immer noch kein volles Verständnis der Quellen kosmischer Strahlung. Supernovareste und Galaxien mit einem aktiven Kern sind die wahrscheinlichsten Kandidaten. Der größte Fortschritt kommt von der Messung der hochenergetischen γ -Strahlung.

Die Experimente H.E.S.S. (**Abb. 4**), MAGIC und VERITAS haben in den vergangenen Jahren mehr als hundert γ -Quellen untersucht. Die beiden größten Detektoranlagen zum Nachweis hadronischer Beschleuniger sind das Pierre Auger-Observatorium zur Messung geladener kosmischer Teilchen mit Energien über 10^{20} eV und das IceCube-Experiment am Südpol, das auf die Messung von Neutrinos spezialisiert ist. Beide erwarten in den kommenden Jahren interessante Ergebnisse. Mit der Inbetriebnahme des LHC am CERN gibt es wieder eine gemeinsame Vision der Teilchen- und Astroteilchenphysik: das Bestreben, die mysteriöse Natur der dunklen Materie zu klären.

Literatur

- [1] R. Fricke, J. Elster und H. Geitel, Döring Verlag, Braunschweig (1992)
- [2] F. Linke, Abhandl. K. Ges. Wiss. Göttingen 3, 1 (1904)
- [3] E. Miehlnickel, Höhenstrahlung, Verlag von Theodor Steinkopf, Dresden und Leipzig (1938)
- [4] R. Fricke, Günther & Tegetmeyer 1901–1958, AF-Verlag, Wolfenbüttel (2011)
- [5] A. Gockel und Th. Wulf, Phys. Z. 9, 907 (1908)
- [6] G. Federmann, Viktor Hess und die Entdeckung der kosmischen Strahlung, Diplomarbeit, Wien (2003), Web-Version: www.federmann.co.at/vfhess/
- [7] V. F. Hess, Phys. Z. 13 1084 (1912)
- [8] W. Kolhörster, Verh. DPG. 16 719 (1914)
- [9] R. A. Millikan, Phys. Rev. 27 353 (1926)
- [10] R. A. Millikan, Phys. Rev. 28 851 (1926)
- [11] D. J. X. Montgomery, Cosmic Ray Physics, Princeton University Press, Princeton (1949)
- [12] Dossier „Astroteilchenphysik“ auf www.pro-physik.de/phy/physik/dossier.html

DER AUTOR

Michael Walter (FV Teilchenphysik) war nach der Promotion ab 1971 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Hochenergiephysik der Akademie der Wissenschaften in Zeuthen und arbeitete an Blasenkammerexperimenten am CERN und in Serpuchow. Von 1980 bis 1990 forschte er am Neutrino-Experiment in Serpuchow. Seit 1991 arbeitet er am DESY und beteiligte sich an den Experimenten ARGUS und HERA-B. 2003 wechselte er zur Astroteilchenphysik in die Experimente AMANDA und IceCube und entwickelte ein Schülerprojekt zur Messung kosmischer Teilchen. Er bereitet derzeit das Symposium „100 Years Cosmic Rays“ vor, das vom 6. bis 8. August in Bad Saarow/Pieskow stattfinden wird, wo Hess nach seiner Ballonfahrt am 7. August 1912 landete.

