

Ballonexperimente zur Erforschung der kosmischen Strahlung

Manfred Simon

Die kosmische Strahlung hat seit ihrer Entdeckung vor fast 90 Jahren die physikalische Forschung dieses Jahrhunderts begleitet und wesentlich beeinflusst. Während die Teilchen mit Energien jenseits von ca. 10^{12} eV so selten sind, dass sie sich nur indirekt durch ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre nachweisen lassen, ist der Teilchenfluss bei niedrigeren Energien groß genug, um sie mittels Satelliten- oder Ballonexperimenten direkt zu detektieren.

Die Teilchenenergien der kosmischen Strahlung erstrecken sich vom MeV-Bereich bis zu 10^{20} eV. Der Teilchenfluss hängt über ein Potenzgesetz von der Energie ab, sodass bei einer Energie von 10^{15} eV nur mit rund einem Teilchen pro m^2 und Jahr zu rechnen ist. Solch ein geringer Fluss lässt sich nicht mehr direkt im Weltraum durch Satelliten- oder Ballonexperimente vermessen, da die realisierbaren Sammelflächen zu klein wären. Man bedient sich daher bei den hohen Energien einer indirekten Messmethode, indem man die Wechselwirkung der energiereichen Teilchen in der Atmosphäre ausnutzt und die dabei entstehenden sekundären Teilchen mit erdgebundenen Experimenten detektiert (vgl. hierzu die Beiträge von H. Blümer und K. H. Kampert bzw. von H. Krawczynski et al. in diesem Heft). Verständlicherweise haben es daher die indirekten Messungen schwer, eindeutig auf die physikalischen Parameter wie Ladung, Ladungsvorzeichen und Masse der primären Teilchen zu schließen. Daher weiß man bereits bei Energien oberhalb von etwa 10^{12} eV sehr wenig über die Teilchen. Besser wird die Situation bei tieferen Energien: Dann reichen die Flüsse aus, um die primären Teilchen im Weltraum mittels Satelliten- oder Ballonexperimenten direkt zu detektieren.

Bei diesen direkten Messungen waren es insbesondere die Ballonexperimente, die wesentlich zum heutigen Stand des Wissens beige-

tragen haben. Die Universität Siegen ist an diesen Ballonexperimenten schon über viele Jahre beteiligt, und ich möchte im Folgenden einige Messkonzepte vorstellen und exemplarisch über einige wichtige Messergebnisse berichten.

Ballonexperimente und ihre experimentellen Konzepte

Abbildung 1 zeigt den Aufstieg eines Ballongespanns. Es besteht aus Ballon, Fallschirm und Nutzlast. Diese Ballone haben ein Volumen von bis zu 10^6 m^3 und bringen Nutzlasten von bis zu 3 Tonnen in Höhen von etwa 40 km. Oberhalb des Experiments verbleibt dann nur noch eine Atmosphärensäule von $3 - 5 \text{ g/cm}^2$ (Luftdichte · Weg). Da die mittlere freie Weglänge von Protonen in Luft etwa 80 g/cm^2 beträgt, kommt die Ballonflughöhe der Weltraumbedingung also sehr nahe¹⁾.

Geflogen werden diese Experimente an verschiedenen Orten, im Wesentlichen jedoch in entlegenen Regionen des amerikanischen Kontinents, so in Kanada oder in New Mexico, USA. Ihre technische Durchführung liegt in der Verantwortung des *National Scientific Balloon Facility* (NSBF) der NASA. Ballonflüge gibt es jedoch auch in Russland, Japan und Australien. Die Flugdauer beträgt typischerweise 24 Stunden. Will man längere Flugdauern erreichen, so besteht die Möglichkeit, in der Antarktis zu fliegen, wo das Ballongespann innerhalb von etwa zehn Tagen den Pol umrundet. Diese Möglichkeit reduziert jedoch die maximal zulässige Nutzlast auf etwa die Hälfte und erhöht die Gefahr eines Totalverlustes des Experiments. Erdumkreisungen in geringen geographischen Breiten werden gegenwärtig auch angestrebt, wodurch man die Flugdauern auf etwa 100 Tage erhöhen könnte. Wegen des Tag-Nacht-Rhythmus und der damit einhergehenden Temperaturschwankungen werden für diese Flüge jedoch spezielle Ballone benötigt, an denen das NSBF gegenwärtig arbeitet.

Tabelle 1 nennt die zurzeit welt-

weit existierenden Ballonexperimente und deren wissenschaftliche Messziele. Zur Identifizierung der verschiedenen Teilchen und zur Messung ihrer physikalischen Parameter benutzt man unterschiedliche Messdetektoren, die aus dem Bereich der Elementarteilchenphysik (Hochenergiephysik) und der Kernphysik stammen.

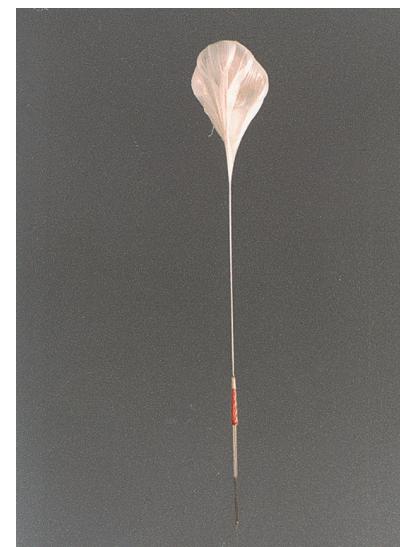


Abb. 1:
Aufstieg eines Ballonexperimentes. Der Ballon, der ein Volumen von 10^6 m^3 haben kann, bringt die Experimente mit einem Gewicht von bis zu 3 Tonnen in Höhen von etwa 40 km.

Abbildung 2 zeigt exemplarisch solch ein modernes Messsystem, an dem wir von der Universität Siegen aus, neben Forschergruppen vom Goddard Space Flight Center, NASA, und dem Caltech, Pasadena, beteiligt sind. Dieses ISOMAX-Experiment vermittelt die typische Größe und Komplexität der heutigen Ballonexperimente. Es ist etwa 2,5 m hoch und hat eine Masse von 2 Tonnen. Im Zentrum dieses Experiments befindet sich ein starkes supraleitendes Magnetspektrometer, das den Impuls einfallender Protonen noch bei 100 GeV auf 6 % genau zu messen gestattet. Ergänzt wird dieses Spektrometer durch Szintillationszähler, Aerogel-Cherenkov-Zähler und eine Flugzeitmessung, welche die Ladung und die Geschwindigkeit der einfallenden Teilchen messen. Dabei werden Zeitauflösungen von weniger als 100 ps erzielt [1].

ISOMAX zielt wie auch die anderen Ballonexperimente darauf ab, die Zusammensetzung der einfal-

Prof. Dr. Manfred Simon, Fachbereich Physik, Universität Siegen, Walter-Flex-Str. 3, D-57068 Siegen

1) Die Angabe in g/cm^2 ist die relevante physikalische Größe, denn die tatsächliche Weglänge hängt von der Materieverteilung längs eines Weges ab. Man erhält sie, indem man den Wert in g/cm^2 dividiert durch die mittlere Dichte des Gases auf dem Weg.

lenden kosmischen Teilchen (Hadronen, Leptonen, Kerne, Antimaterie) und deren Energiespektren besser kennen zu lernen. Aus diesen Beobachtungen lassen sich dann Rückschlüsse ziehen auf den Ursprung dieser Teilchen, auf ihre Beschleunigungsprozesse im Kos-

mos, auf ihre Nukleosynthese und auf ihre Ausbreitung im interstellaren Raum. Doch auch die Suche nach Antimaterie und dunkler Materie ist Gegenstand dieser Forschung. Im Folgenden möchte ich dazu einige Beispiele geben und auch zeigen, welche messtechnische Reife diese Ballonexperimente heute erreicht haben.



Abb. 2:
Das Ballonexperiment ISOMAX vereint ein supraleitendes Magnetspektrometer mit Szintillationszählern, Aerogel-Cherenkov-Zählern und einer Flugzeitmessung. ISOMAX repräsentiert die typische Größe und Komplexität von heutigen Ballonexperimenten. Es dient dazu, die Element- und Isotopenzusammensetzung der primär aus dem Weltraum einfallen- den Teilchen direkt zu vermessen. Bei ISOMAX arbeiten die Universität Siegen, das Goddard Space Flight Center, NASA, sowie das Caltech in Kalifornien zusam- men.

Die kosmische Strahlung als energiereiche Materieprobe

Abbildung 3 zeigt die mit dem Ballonexperiment ALICE am Rande der Atmosphäre bei etwa 1 GeV/Nukleon gemessene Ladungsverteilung der kosmischen Strahlung für Ladungen mit $Z \geq 8$. Kleinere Ladungen wurden bei dieser Messung experimentell unterdrückt. Bei diesen Energien wissen wir also sehr genau, woraus die kosmische Strahlung besteht. Es handelt sich um eine energiereiche kosmische Materieprobe, die etwa die folgende Zusammensetzung hat: 85 % Protonen, 12 % Heliumkerne, 2 % schwere Atomkerne (siehe Abb. 3) und 1 % Elektronen. Bei höheren Energien, soweit die Messungen eine Aussage zulassen (~ 50 GeV/Nukleon), bleibt diese Zusammensetzung in den wesentlichen Zügen unverändert. Diese kosmische Materieprobe enthält alle Elemente des Periodensystems, stammt aber nicht aus unserem eigenen Sonnensystem, sodass wir testen können, ob die Materiezusammensetzung unseres Sonnensystems typisch ist für

den interstellaren Raum. Im Wesentlichen stimmen die Elementhäufigkeiten überein, was darauf schließen lässt, dass auch die kosmischen Teilchen vorwiegend in Sternen produziert werden.

Es zeigen sich jedoch auch gravierende Unterschiede. So treten die leichten Elemente Li, Be und B übermäßig in der kosmischen Strahlung auf [2]. Man erklärt diese Anreicherung durch Spallationsreaktionen der schwereren Elemente ($Z \geq 6$) mit dem interstellaren Gas. Aus den Messdaten folgt, dass Teilchen von etwa 1 GeV/Nukleon im Mittel etwa 10 g/cm^2 im interstellaren Raum durchlaufen haben, bevor sie die Erde erreichen. Diese relativ große Zahl besagt, dass die Teilchen der kosmischen Strahlung über einen längeren Zeitraum an die Milchstraße gebunden sein müssen, denn bei einer direkten Durchquerung unserer Milchstraße, von einem Rand zum anderen, würden nur etwa $0,16 \text{ g/cm}^2$ aufgesammelt werden. Verantwortlich sind die interstellaren Magnetfelder, die die geladenen Teilchen durch Lorentz-Kräfte an die Milchstraße binden. Folgt man den heutigen Modellvorstellungen, so halten sich die Teilchen etwa 10^7 bis 10^8 Jahre in unserer Milchstraße auf, bevor sie in den intergalaktischen Raum entweichen [3]. Die kosmische Strahlung repräsentiert somit eine sehr junge Materieprobe – das Alter der Sonne beträgt etwa $4 \cdot 10^9$ Jahre – und erlaubt Einblicke in die zeitliche Entwicklung der Materiezusammensetzung in der Milchstraße.

Auch wenn noch präzise Vorstellungen über die Ausbreitung der hochenergetischen Teilchen der kosmischen Strahlung in der Milchstraße fehlen, so verdichtet sich doch das Bild, dass diese Teilchen durch Diffusionsprozesse weite Bereiche unserer Milchstraße gleichmäßig füllen und Teil des interstellaren Mediums sind. Gestützt wird diese Vorstellung auch durch die Gamma-Beobachtungen. Denn im Lichte der harten γ -Photonen, die aus dem Zerfall der π^0 stammen – die π^0 stammen wiederum vorwiegend aus der Wechselwirkung der hochenergetischen Protonen mit dem interstellaren Gas – erscheint unsere Milchstraße als ein flächiges helles Band [4]. Nimmt man die in Sonnen Nähe gemessene Energiedichte der kosmischen Strahlung von etwa 1 eV/cm^3 – dieser Wert ist vergleichbar mit der Energiedichte

Tabelle 1: Die zurzeit weltweit existierenden Ballonexperimente (n = Nukleon)

Name des Experiments	wissenschaftliche Messziele	Energiebereich
Antimaterie		
HEAT	e^+, e^- Antiprotonen	5 – 50 GeV 0,2 – 30 GeV
CAPRICE	atmosph. μ -Spektren, e^+, e^- , Antiprotonen	0,5 – 50 GeV
BESS	Antiprotonen	0,25 – 3 GeV
Element- und Isotopenzusammensetzung		
ISOMAX	Beryllium 10, Isotope mit $2 \leq Z \leq 8$	0,2 – 3 GeV/n
TIGER	Elemente $30 \leq Z \leq 40$	> 0,5 GeV/n
Energiespektren		
BETS	Elektronenspektrum	10 – 100 GeV
RICH	Proton- und Heliumspektren	20 – 200 GeV/n
JACEE	Spektren $1 \leq Z \leq 26$	1 – 100 TeV
ATIC	Proton- und Heliumspektren	10 – 10^4 GeV
TRACER	Spektren $8 \leq Z \leq 26$	< 10 TeV/n
RUNJOB	Spektren $Z \leq 26$	< 100 TeV/n
BACH	Silizium- und Eisenspektren	< 1000 TeV/n

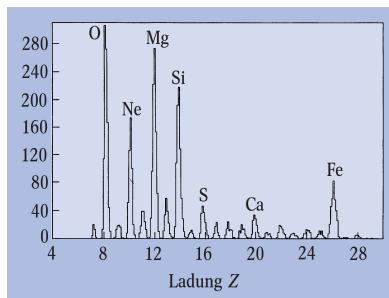


Abb. 3:
Die Ladungsverteilung der am Rande der Atmosphäre einfallenden Atomkerne, gemessen bei etwa 1 GeV/Nukleon mit dem Ballonexperiment ALICE. Die kleineren Ladungen wurden bei dieser Messung experimentell unterdrückt. Wie diese Messung zeigt, repräsentiert die kosmische Strahlung eine hochenergetische Materieprobe, die nicht aus unserem eigenen Sonnensystem stammt.

des interstellaren Magnetfeldes – und überträgt diese auf die gesamte Milchstraße, so repräsentieren die Teilchen der kosmischen Strahlung die enorme Gesamtenergie von etwa 10^{66} eV. Da diese Teilchen alle 10^7 Jahre in der Milchstraße ausgetauscht werden, ergibt sich für die Quellen der kosmischen Strahlung die enorme Leistung von etwa 10^{51} eV/s. Diese ist etwa um einen Faktor 10^7 größer als die über alle Frequenzen aufsummierte Leuchtkraft unserer Sonne. Aus diesem Grund und wegen des Vorhandenseins der sehr energiereichen Teilchen können normale Sterne, so wie unsere Sonne, kaum für den Ursprung der kosmischen Strahlung verantwortlich sein.

Überhaupt hat kaum eine andere Frage die Physiker in diesem Jahrhundert so beschäftigt wie die Frage nach dem Ursprung der kosmischen Strahlung. Intuitiv hat die hohe Energie dieser Teilchen eigentlich schon früh auf die energiereichsten kosmischen Objekte in unserer Milchstraße hingewiesen, nämlich auf die Supernova-Explosionen. Doch ein direkter Beweis steht nach wie vor aus. Um einen möglichen Hinweis zu finden, sucht man nach feineren Signaturen in der Zusammensetzung der Strahlung, insbesondere bei den Isotopen, denn diese reagieren besonders sensibel auf Kern-Brennprozesse. Der CNO-Zyklus, einer der Prozesse zur Fusion von Wasserstoff zu Helium, ist ein gutes Beispiel dafür [5].

Angesichts der Schwierigkeiten bei der Massenbestimmung relativistischer Schwerionen gelangen erst in der jüngsten Zeit unter Verwendung moderner Messtechnik wirkli-

che Fortschritte. Abb. 4 illustriert ein überzeugendes Beispiel dafür: Sie zeigt die mit dem ISOMAX-Experiment erzielte Massentrennung der beiden am Rande der Atmosphäre einfallenden Heliumisotope. Die Isotope trennen sich teilweise mit einer Massenauflösung von besser als 0,2 amu. Ermöglicht wurde diese Darstellung durch eine präzise Vermessung von drei unabhängigen physikalischen Größen: Ladung, Geschwindigkeit und Steifigkeit (Impuls/Ladung), denn bei gleicher Steifigkeit ist ${}^3\text{He}$ schneller als ${}^4\text{He}$. Diese Massentrennung ist die beste, die bisher auf diesem Gebiet erzielt werden konnte, insbesondere in diesem relativ hohen Energiebereich von bis zu einigen GeV/Nukleon. Bei kleineren Energien (~ 100 MeV/Nukleon) haben in den letzten Jahren auch einige Satellitenexperimente, insbesondere Ulysses und ACE, zu einer Verbesserung der Massenbestimmung auch bei schweren Elementen beigetragen.

Diesen und anderen Ergebnissen zufolge scheint die kosmische Strahlung jedoch nicht aus frisch synthetisierten Elementen zu bestehen, die direkt aus den Supernova-Explosionen stammen. Es ist eher eine Materieprobe aus dem interstellaren Gas, die, heutigen theoretischen Vorstellungen folgend, durch die von den Supernova-Explosionen ausgelösten Stoßwellen beschleunigt wurde [6].

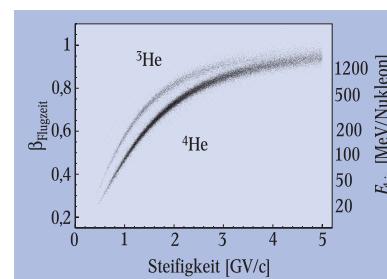


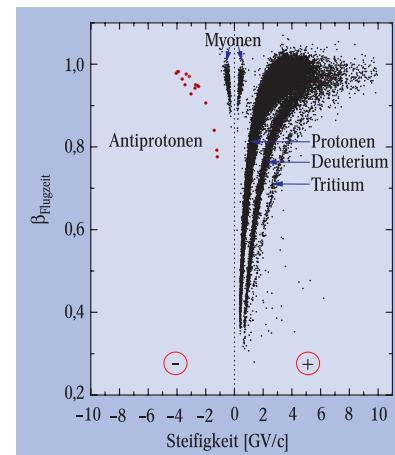
Abb. 5:
Die mit dem Ballonexperiment IMAX detektierten galaktischen Antiprotonen. Die Antiprotonen geben sich zu erkennen durch ihre Krümmungsrichtung im Magnetspektrometer und durch ihre Masse. Alle bisher gemessenen Antiprotonen sind verträglich mit der Vorstellung einer sekundären Produktion über Stöße der kosmischen Teilchen mit dem interstellaren Gas [8].

Suche nach Antimaterie und dunkler Materie

Ein weiteres wichtiges Thema der Astroteilchenphysik ist die Suche nach kosmischer Antimaterie, denn es berührt eine der fundamentalen Fragen der Physik und bewegt die Kosmologie wie auch die Elementarteilchenphysik. Wieso erscheint unsere Welt eigentlich so unsymmetrisch in der Baryonenanzahl, d. h. wieso gibt es so viel Materie und so wenig Antimaterie? Jedenfalls deuten die Gamma-Beobachtungen darauf hin, dass es keine Antimaterie bis hoch zu Skalen von Superhaufen von Galaxien im Universum gibt [7]. Trotz dieser Schlüsse aus den Gamma-Beobachtungen wurde auch in der kosmischen Strahlung nach diesen Teilchen gesucht.

Neuere Messungen haben Antiprotonen in der kosmischen Strahlung gefunden, doch deren Existenz überrascht nicht: Man erwartet einen gewissen Anteil als Folge der Wechselwirkung der kosmischen Strahlung mit dem interstellaren Gas. Abbildung 5 zeigt die ersten, auch von ihrer Masse her, eindeutig identifizierten galaktischen Antiprotonen. Diese Messung gelang 1992 mit dem Ballonexperiment IMAX, an dem wiederum die Universität Siegen, das GSFC, Caltech und die NMSU (New Mexico State University) beteiligt waren. Die in dieser Darstellung gezeigten Antiprotonen geben sich durch ihre

Abb. 4:
Die beiden Isotope des Heliums in der kosmischen Strahlung, gemessen mit dem Ballonexperiment ISOMAX. Diese Darstellung illustriert die Messgenauigkeit, mit der sich heute unter Verwendung moderner Messtechnik die Massen der einfallenden Teilchen bestimmen lassen. Isotopenmessungen sind von Bedeutung, um besser auf die kernphysikalischen Brennprozesse schließen zu können.



Krümmungsrichtung im Magnet-spektrometer und durch ihre Masse zu erkennen.

Es zeigt sich jedoch, dass der Fluss aller bisher detektierten Antiprotonen – man hat mit verschiedenen Ballonexperimenten bisher über tausend gesehen – verträglich ist mit der Vorstellung dieser sekundären Produktion. Auf der Basis der jetzigen Datenlage gibt es keinen Hinweis auf einen erhöhten unerklärbaren Fluss von Antiprotonen in der Galaxis [8]. Die Suche nach Antikernen war bisher erfolglos; die obere Grenze für Anti-helium liegt heute etwa bei Anti-helium/Helium $\leq 10^{-6}$ [9].

Die Messungen an den Antiprotonen wie auch an den Positronen, über die ich hier nicht berichte, haben aber noch einen weiteren Reiz im Zusammenhang mit der wichtigen Suche nach der geheimnisvollen Dunklen Materie, für die die Astrophysik noch keine Erklärung hat, die aber offensichtlich mehr als 90 % der gravitativen Masse des Universums ausmacht. In diesem Zusammenhang wurden viele Ideen in Betracht gezogen. Diskutiert werden unter anderen auch masse-

reiche, schwach wechselwirkende Teilchen, die jenseits des Standardmodells der Teilchenphysik liegen. So ist es nicht ausgeschlossen, dass diese Teilchen im Universum mit ihren Antiteilchen annihilieren, hadronisieren und eine Quelle von zusätzlichen Antiprotonen wie auch Positronen bilden. Experimente suchen nach möglichen Signaturen in den Energiespektren. Auch wenn es bisher keine Hinweise gibt, so werden diese Beobachtungen in Anbetracht der großen physikalischen Bedeutung fortgesetzt.

Diese Beispiele zeigen, dass die Ballonexperimente einen wichtigen Beitrag zur Erforschung der kosmischen Strahlung leisten. Sie sind außerdem wesentlich kostengünstiger als Satellitenexperimente und werden auf kürzeren Zeitskalen realisiert. Da sie von ihrem experimentellen Aufbau her überschaubar bleiben, sind sie für Arbeitsgruppen an Universitäten in Hinblick auf die studentische Ausbildung besonders gut geeignet. Eine erweiterte Perspektive ergibt sich durch die Entwicklung der neuen Ballone, die Flugdauern bis zu 100 Tagen ermöglichen werden.

Danksagung

Finanziert werden diese Ballon-experimente durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft, und ich danke für die jahrelange Unterstü-tzung. Für weitere Informationen verweise ich auch auf unsere Homepage: <http://ida1.physik.uni-siegen.de/welcome.html>.

Literatur

- [1] J. W. Mitchell, 26th ICRC, Vol. 3, 113 (1999)
- [2] R. Schlickeiser, Sterne und Welt-raum **22**, 62 (1983)
- [3] M. Simon in: Topics in Cosmic Ray Astrophysics, M. A. Du Vernois (Hrsg.), Nova Scientific Press, New York 1999, S. 99
- [4] V. Schönfelder, Physik in unserer Zeit, November 1995, S. 262
- [5] G. Unsöld, B. Baschek, Der neue Kosmos, Springer Verlag 1988
- [6] L. O'C. Drury, Rep. Prog. Phys. **46**, 973 (1983)
- [7] A. Dudarewicz, A. W. Wolfendale, Mon. Not. R. Astron. Soc. **268**, 609 (1994)
- [8] M. Simon, A. Molnar, S. Roesler, Ap. J. **499**, 250 (1998)
- [9] M. Nozaki et al., 26th ICRC Vol. 3, 85 (1999)