



ASTROPHYSIK

Unter Beobachtung

Seit zehn Jahren registriert und charakterisiert das Observatorium AMS-02 auf der Internationalen Raumstation die kosmische Strahlung.

Martin Pohl

Das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) befindet sich seit Mai 2011 auf der Traverse der Internationalen Raumstation ISS. Das Detektorsystem hat seither 176 Milliarden Teilchen der kosmischen Strahlung in einer erdnahen Umlaufbahn registriert. Diese einzigartige Statistik wirft ein neues Licht auf den Ursprung der kosmischen Teilchen und ihren Weg von den Quellen bis ins Sonnensystem. Als unkonventionelle Quellen

könnten auch die Dunkle Materie oder kleine Reste von Antimaterie zur kosmischen Strahlung beitragen.

Kosmische Strahlen bestehen aus hochenergetischen, elektrisch geladenen Teilchen, die aus kosmischen und astrophysikalischen Quellen stammen – die meisten aus unserer Milchstraße. Wenn sie mit einer Intensität von etwa einem Teilchen pro cm^2 und Sekunde auf



die Erdatmosphäre treffen, haben sie eine lange Reise hinter sich. Geleitet von Magnetfeldern und in Wechselwirkung mit interstellarem Gas und Plasma diffundieren sie einige Millionen Jahre durch unsere Galaxie. Daher steckt die Physik ihrer Quellen und ihres Weges auch mehr als hundert Jahre nach ihrer Entdeckung voller Rätsel.

Der Nachweis des extraterrestrischen Ursprungs der „Luftelektrizität“ gelang Victor Francis Hess 1912 bei seinen Ballonfahrten. In den folgenden Jahren fand eine Fülle von Experimenten in immer größeren Höhen statt, sodass sich ein detailliertes Bild der Ionisationsrate als Funktion der Höhe ergab (**Abb. 1**). Als Pioniere nutzten Werner Regener und sein Student Georg Pfozter in Stuttgart Wetterballons mit Geiger-Müller-Zählrohren. Sie bestimmten in den 1930er-Jahren den Fluss kosmischer Teilchen – ihre Anzahl pro Flächen- und Zeiteinheit – als Funktion der Höhe und verglichen ihn mit der Ionisationsrate. Aufgrund der gleichen Höhenabhängigkeit folgerten sie, dass einzelne geladene Teilchen die „Luftelektrizität“ auslösen. Heute gilt Regener, den das Nazi-Regime aus seiner akademischen Position drängte, als einer der Pioniere der Geophysik. Während seine Ergebnisse kaum über die Fachwelt hinaus-

drangen, erregten die bemannten Stratosphärenflüge von Auguste Piccard und Max Cosyns ungeahnte öffentliche Aufmerksamkeit. Dreißigtausend Zuschauende und zahlreiche Medien verfolgten 1932 den Start ihres Ballonflugs vom Militärgelände in Dübendorf bei Zürich. Ein Bataillon der schweizerischen Armee hielt den Ballon mit seiner Aluminiumkapsel während der Befüllung am Boden. Die beiden „Eroberer der Stratosphäre“ avancierten zu Volkshelden in der Schweiz und in Belgien: Hervé hat Piccard als „Professor Bienlein“ in den Tim-und-Struppi-Comics unsterblich gemacht.

Maximum und Plateau

In etwa zwanzig Kilometern Höhe erreicht die Ionisation durch kosmische Strahlen das sogenannte Regener-Pfozter-Maximum und nimmt danach ab. Die ersten Messungen außerhalb der Erdatmosphäre führte James van Allen 1947 mit einer bei der Besetzung Deutschlands erbeuteten V2-Rakete durch. Die Zählrate erreicht bei etwa fünfzig Kilometern ein Plateau etwa auf der Hälfte des Maximums: Van Allen hat vermutlich als Erster kosmische Primärstrahlung beobachtet. Danach hat er mit den Explorer- und Pioneer-Missionen die nach ihm benannten Strahlungsgürtel der Erde entdeckt – Regionen, in denen das geomagnetische Feld Sekundärteilchen der kosmischen Strahlung speichert. Auf den Pionier der Erforschung kosmischer Strahlen im Weltraum folgten Messungen mit den sowjetischen Proton- und Sokol-Missionen in einer erdnahen Umlaufbahn.

Auf Basis vieler Beobachtungen hat sich seither ein Konsensmodell entwickelt, das die Eigenschaften der kosmischen Strahlung qualitativ zusammenfasst. Strahlung mit Energien bis zu einigen 10^6 GeV stammt im Wesentlichen aus Supernovae in der Milchstraße; sie besteht aus Sternmaterial, Atomkernen und Elektronen. Teilchen mit höherer Energie können ihre Galaxie verlassen: Diese könnten also auch von außerhalb der Milchstraße stammen. In der Milchstraße sind die Quellen kosmischer Strahlung zufällig verteilt. Ihre beobachtete Energiedichte lässt sich aus der Dichte und Rate von Supernovae erklären. Die Beschleunigung einzelner Teilchen auf hohe Energien findet in Plasma-Schockwellen statt, die von Supernovae ausgehen. Das führt zu einem Potenzspektrum des Teilchenflusses Φ , der als Teilchenzahl pro Flächen-, Zeit- und Raumwinkeleinheit definiert ist. Der differentielle Fluss $d\Phi/dE$ gibt den Teilchenfluss pro Energieintervall an und nimmt mit dem Spektralindex γ ab: $d\Phi/dE \propto E^{-\gamma}$. Ein größerer Index entspricht einem weicherem Spektrum, ein kleinerer einem härteren. Für Atomkerne sollte der Spektralindex unabhängig von Typ und Energie etwa 2,7 betragen. Da Elektronen und Positronen schon bei Energien von 10 MeV durch Bremsstrahlung Energie verlieren, ist ein etwas höherer Wert von etwa 3,0 zu erwarten.

Die Teilchen diffundieren durch Material und Plasma der Milchstraße und bleiben in der Galaxie etwa 15 Millionen Jahre lang gespeichert. Dabei verwirbeln sie so gründlich, dass ihre Richtungsinformation verloren geht und sich ein annähernd isotroper und homogener interstellarer Teilchenfluss ergibt. Während primäre Teilchen direkt

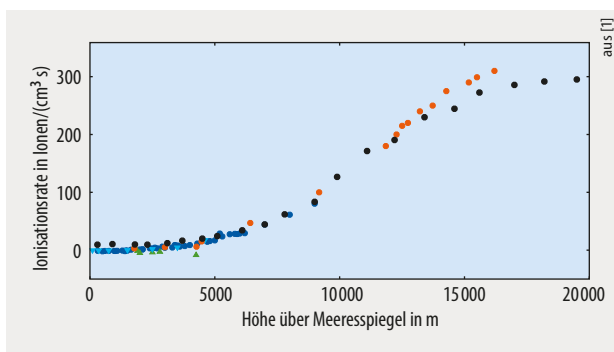


Abb. 1 Die Ionisationsrate als Funktion der Höhe über dem Meeresspiegel haben Albert Gockel (\blacktriangle 1909–10), Victor Francis Hess (\blacktriangledown 1912), Werner Kohlhörster (\bullet 1913–14) und Auguste Piccard (\bullet 1932) mit bemannten Ballonflügen gemessen. Werner Regener und Georg Pfozter (\bullet 1934) erreichten noch größere Höhen mit unbemannten Wetterballons.

von den Quellen stammen, entstehen sekundäre bei der Wechselwirkung mit der interstellaren Materie und besitzen im Mittel weniger Energie. Daher sind die Spektren der Sekundärteilchen weicher bzw. ihr Spektralindex ist größer. Dieser sollte aber für alle Sekundärteilchen gleich sein. Die Diffusion im turbulenten interstellaren Plasma vergrößert den Spektralindex aller Teilchen um einen konstanten Beitrag unabhängig von ihrer Energie.

In Ballons und auf Raketen lassen sich nur kleine Detektoren transportieren, was die direkte Beobachtung auf Energien unterhalb einiger TeV einschränkt. Höhere Energien sind nur indirekt durch großflächige Luftschauerdetektoren auf der Erde zugänglich. Für einige Atomkerne und Anti-Wasserstoff ließ sich der differentielle Fluss bis zu

einer Energie von 10^6 GeV bestimmen (**Abb. 2a**): Er nimmt gemäß einem Potenzgesetz um fast drei Größenordnungen pro Energie-Dekade ab. Der Fluss der wenigen nachgewiesenen Elektronen und Positronen fällt sogar noch steiler ab (**Abb. 2b**). Die Resultate von AMS-02 decken mit deutlich höherer Genauigkeit als andere Experimente den Bereich bis zu einigen TeV ab.

Die Akzeptanz eines Experiments ergibt sich grob aus dem Produkt seiner Fläche und dem abgedeckten Raumwinkelbereich. Sie bestimmt seine Zählrate und damit auch seine Reichweite in der Energie. Für die gesamte Statistik ist darüber hinaus die Betriebsdauer entscheidend. Aus den gemessenen Spektren und Zusammensetzungen der kosmischen Strahlung lassen sich Produktions-, Beschleunigungs- und Transportmechanismen ableiten. Da Details bei einer doppelt logarithmischen Auftragung nicht erkennbar sind, gilt es für genauere Studien, das gefundene Potenzgesetz aus der Energieabhängigkeit herauszurechnen.

Das AMS-Projekt

In der Teilchenphysik spielen an Beschleunigern komplexe Detektorsysteme eine wichtige Rolle. Die Konzepte lassen sich auch auf die kosmische Strahlung übertragen. Allerdings gab es erst in den 1990er-Jahren konkrete Planungen zu derartigen Projekten, weil die wenigsten Detektoren die Bedingungen während eines Ballonflugs oder eines Raketenstarts unbeschadet überstehen [2]. Im Weltraum sorgen zusätzlich Temperaturschwankungen und Strahlungsbelastung für eine sehr technologiefeindliche Umgebung. Das erste realisierte weltraumgestützte Spektrometer war das PAMELA-Experiment der WiZARD-Kollaboration. Hier fanden moderne Technologie und Analysemethoden aus

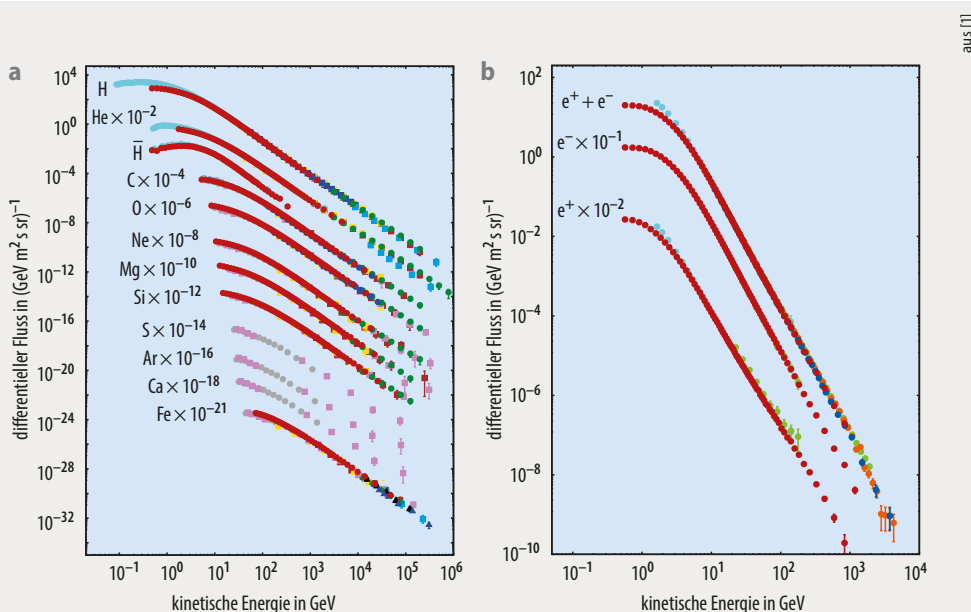


Abb. 2 Den differentiellen Fluss kosmischer Atomkerne und von Anti-Wasserstoff (a) haben neben AMS-02 (\bullet) auch die Ballon-Experimente ATIC (\blacksquare), CREAM (\blacksquare), RUNJOB (\blacksquare) und TRACER (\blacksquare), die Weltraum-Experimente CALET (\bullet), HEAO (\bullet), NUCLEON (\bullet) und PAMELA (\bullet) sowie die Luftschauer-Experimente H.E.S.S. (\blacktriangle) und VERITAS (\blacktriangle) bestimmt. Zu Elektronen und Positronen bzw. ihrer Summe (b) liefern die Weltraum-Experimente AMS-02 (\bullet), CALET (\bullet), DAMPE (\bullet), Fermi-LAT (\bullet) und PAMELA (\bullet) präzise Daten.

der Teilchenphysik an Beschleunigern ihren Weg in die systematische Erforschung der kosmischen Strahlung [3]. PAMELA war auf dem russischen Satelliten Resurs-DK in erdnaheer Umlaufbahn installiert und lieferte Daten von 2006 bis 2016.

Noch während der Planungsphase von PAMELA schlug Samuel C. C. Ting 1994 vor, ein Spektrometer mit hundertfach größerer Akzeptanz und vollständiger Teilchenidentifikation für die geplante Internationale Raumstation ISS zu bauen: das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) – benannt nach dem damaligen Codenamen „Alpha Station“ der ISS. Das Pilot-Experiment AMS-01 befand sich 1998 zehn Tage lang an Bord der Raumfähre Discovery [4]. Bau und Betrieb des endgültigen Detektors AMS-02 hat eine internationale Kollaboration organisiert, die heu-

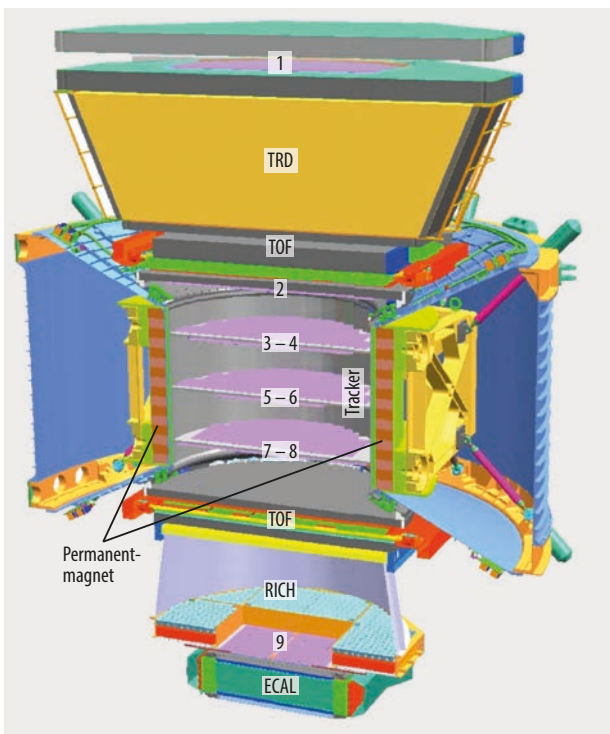


Abb. 3 Ein Schnitt durch den Detektor AMS-02 zeigt den zylindrischen Permanentmagneten, der den inneren Teil des Spektrometers mit den Tracker-Ebenen 2 bis 8 umschließt. Die Ebenen 1 und 9 messen die Position der Teilchen beim Ein- und Austritt aus dem Spektrometer. Weitere Details finden sich im Text.

te aus etwa 500 Wissenschaftlern und Ingenieurinnen von 56 Institutionen aus 16 Ländern besteht. Tests und Kalibrierungen fanden am CERN statt, bevor AMS-02 im Mai 2011 mit der letzten Mission des Space Shuttle Endeavor zur ISS transportiert wurde. Der Detektor ist $(5 \times 4 \times 3) \text{ m}^3$ groß und 7,5 Tonnen schwer (Abb. auf Seite 32/33).

Das Herz von AMS-02 ist ein magnetisches Spektrometer für geladene Teilchen (Abb. 3). Ein zylindrischer Permanentmagnet erzeugt ein dipolares Magnetfeld von etwa 0,15 T. Dieses verläuft senkrecht zur Achse des offenen Zylinders, die wiederum zum Zenith zeigt. Das Magnetfeld lenkt die geladenen Partikel auf eine gekrümmte Bahn; Spurdetektoren bestimmen deren Radius. Diese neun Lagen doppelseitig ausgelesener Silizium-Streifendetektoren garantieren zum einen eine hohe Ortsauflösung und messen zum anderen die Ladung der Teilchen.

Weitere Detektorsysteme dienen der Teilchenidentifikation: Ein von oben einfallendes Teilchen durchläuft alle Schichten nacheinander. Ein Zähler für Übergangsstrahlung (TRD) unterscheidet leichte von schweren Teilchen, da Elektronen beim Übergang zwischen Materialien mit verschiedenen Brechungsindizes deutlich mehr Röntgenlicht aussenden als Protonen oder Atomkerne. Vier Lagen aus Szintillationsdetektoren (TOF) registrieren Zeit und Ort des Teilchendurchgangs, woraus sich Flugrichtung und Geschwindigkeit ergeben. Ein weiterer Detektor (RICH) weist die Ringe von Cherenkov-Licht nach, die entstehen, wenn sich relativistische Teilchen in Materie bewegen. Daraus folgen Geschwindigkeit und Ladung. Abschließend misst ein Kalorimeter für elektromagnetische Schauer (ECAL) die

Energie von Elektronen, Positronen und Photonen. Durch den Vergleich mit dem Impuls im Spektrometer und mit den Eigenschaften des Teilchenschauers lassen sie sich von Hadronen unterscheiden.

Diese Redundanz der gemessenen Geschwindigkeit und elektrischen Ladung sowie der Energien und Impulse ist eine der Stärken von AMS-02. Im Zusammenspiel der Komponenten gelingt es zum Beispiel, die seltenen Positronen von den viel häufigeren Protonen praktisch untergrundfrei zu trennen. Den Absolutwert der elektrischen Ladung bestimmen alle Detektoren mit unterschiedlicher Auflösung, sodass sich auch verschiedene Atomkerne sicher unterscheiden lassen.

Die Elektronik des Spurdetektor-Systems sondert etwa 140 W Wärmeleistung im Inneren des Magneten ab. Um die Präzision der Messungen zu garantieren, muss dessen Temperatur jedoch auf etwa $1 \text{ }^\circ\text{C}$ konstant bleiben. Dafür sorgt eine Zwei-Phasen-Kühlung mit flüssigem Kohlendioxid. Die vier redundanten Pumpen zeigten jedoch 2015 Abnutzungserscheinungen, die den langfristigen Weiterbetrieb gefährdeten. Bei vier Außenbordeinsätzen installierte die Besatzung der ISS im Januar 2020 ein verbessertes Kühlsystem – wohl die herausforderndste Operation seit der Reparatur des Hubble-Teleskops. Damit kann AMS-02 voraussichtlich bis zum Ende des ISS-Betriebs weiter messen. Ein zusammenfassender Bericht erklärt die Funktion und Leistungsfähigkeit des Detektors im Detail und sammelt die Ergebnisse der ersten sieben Betriebsjahre [5].

Kosmische Kerne

Die Analyse der Zusammensetzung kosmischer Strahlen erlaubt einen Blick in das kosmische kernphysikalische Labor – über einen Zeitraum von kurz nach dem Urknall bis heute [6]. So stammen Wasserstoff- und Heliumkerne mehrheitlich aus der primordialen Nukleosynthese einige Minuten nach dem Big Bang [7]. Turbulente Magnetfelder in den Schockwellen nach Supernova-Explosionen beschleunigen sie auf hohe Energien. Daher werden Spek-

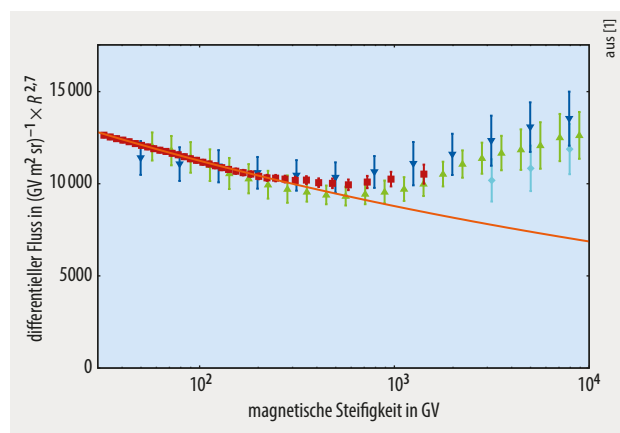


Abb. 4 Die Weltraum-Experimente NUCLEON (\blacklozenge), DAMPE (\blacktriangledown), CALET (\blacktriangle) und AMS-02 (\blacksquare) haben den differentiellen Fluss von Protonen als Funktion der magnetischen Steifigkeit R bestimmt. Der Vergleich mit dem Potenzgesetz $R^{2.7}$ (orange) zeigt die Abweichung bei großer Steifigkeit.

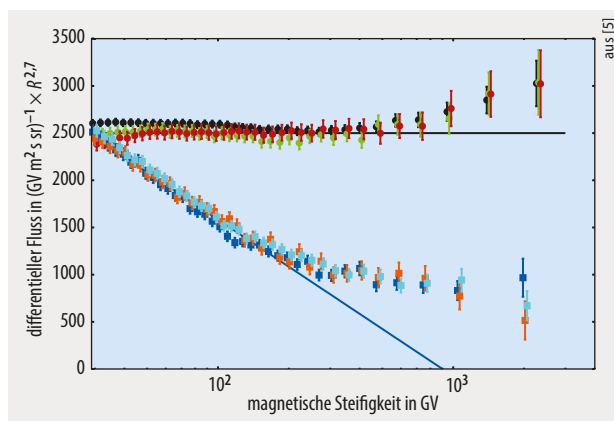


Abb. 5 Der differentielle Fluss primärer Kerne in der kosmischen Strahlung – Helium (●), Kohlenstoff (●) und Sauerstoff (●) – unterscheidet sich deutlich von dem der Sekundärprodukte aus Wechselwirkungen mit interstellarer Materie: Lithium (■), Beryllium (■) und Bor (■). Alle Flüsse sind bei niedriger Energie auf Helium skaliert; die Linien gehören zu einem jeweils konstanten Spektralindex.

tren als Funktion der magnetischen Steifigkeit R anstelle der Energie aufgetragen. Sie entspricht dem Verhältnis aus Impuls p und elektrischer Ladung Z der Teilchen: $R = p/Z$ in der Einheit Gigavolt. Experimentell ergibt sie sich als Produkt aus Krümmungsradius und Feldstärke. Wie bei anderen dominanten Komponenten der kosmischen Strahlung weicht das gemessene Spektrum der Protonen signifikant von einem einfachen Potenzspektrum ab (**Abb. 4**): Oberhalb von etwa 200 GV wird das Spektrum deutlich härter. Kalorimetrische Messungen bestätigen dies.

Leichte Kerne wie Lithium, Beryllium und Bor entstehen nur teilweise in der primordialen Nukleosynthese. Sie treten als Zwischenprodukte der Synthese schwererer Kerne im Sterninneren auf und sind daher in stellarer Materie stark unterrepräsentiert. In kosmischen Strahlen ist ihre Häufigkeit drei Größenordnungen höher, denn sie sind die Fragmente aus der Spallation schwerer Kerne auf dem Weg von den Quellen bis zu uns. Ihr Spektrum ist deutlich weicher als das der primären Kerne (**Abb. 5**), der Produkte der stellaren Nukleosynthese: Die Elemente von Helium über Kohlen- und Sauerstoff bis hin zu Eisen besitzen alle etwa das gleiche härtere Potenzspektrum.

Gemeinsam ist den Spektren aller Atomkerne, dass der Spektralindex bei etwa 200 GV kleiner wird. Warum die Spektren härter werden, ist nicht vollständig geklärt – es gibt eine Vielzahl astrophysikalischer Erklärungen [10]. Prinzipiell kommen neue Quellen oder stärkere „Beschleuniger“ in der Umgebung unseres Sonnensystems infrage. Da sich der Index bei den sekundären Spaltungsprodukten fast zweimal mehr ändert als bei den primären Kernen, könnte auch ein Effekt bei der Diffusion der Teilchen eine Rolle spielen [8], beispielsweise wenn der Transport durch die galaktische Scheibe anders verläuft als im Halo der Milchstraße [9].

Modelle, welche die Freisetzung, Beschleunigung und Diffusion kosmischer Strahlen in der Milchstraße quantitativ beschreiben, nutzen diese Informationen. Ein Beispiel ist der Code GALPROP.¹⁾ Alle verfügbaren Daten aus der As-

tro-, Kern- und Teilchenphysik helfen dabei, die Entstehung und den Weg der Teilchen von ihren Quellen bis zu uns zu verstehen. Präzisionsergebnisse, wie sie AMS-02 liefert, haben diese Modelle maßgeblich beeinflusst und werden das auch weiterhin tun. Erst wenn die Beiträge konventioneller astrophysikalischer Phänomene zur kosmischen Strahlung ausreichend verstanden sind, lassen sich unkonventionelle Quellen wie die Dunkle Materie zweifelsfrei nachweisen.

Kosmische Antimaterie

Da die Energiedichte der Dunklen Materie die der normalen Materie erheblich übersteigt, hat die Suche nach unkonventionellen Quellen aber bereits begonnen. Dazu eignen sich insbesondere die Komponenten der kosmischen Strahlung, die äußerst selten aus bekannten astrophysikalischen Vorgängen stammen. So ist die Gesamtrate von Anti-Wasserstoff \bar{H} mehr als vier Größenordnungen geringer als von Wasserstoff. Konventionell entstehen Antiprotonen bei der sekundären Produktion von Baryon-Antibaryon-Paaren. Quantitative Vorhersagen sind aber mit großen Unsicherheiten behaftet, sodass sich ein möglicher Beitrag aus Vernichtungsreaktionen oder Zerfällen von Teilchen der Dunklen Materie nur schwer angeben lässt.

Für die leichtesten bekannten Antiteilchen, die Positronen e^+ , erregte bereits das PAMELA-Weltraumspektrometer den Verdacht auf eine unbekannte Quelle. Das Positronenspektrum von AMS-02 (**Abb. 6**) besitzt eine niederenergetische Komponente, die mit konventionellen, diffusen Quellen verträglich ist [5]. Bei hohen Energien kommt eine weitere Komponente hinzu, die heuristisch durch eine Quelle mit härterem Spektrum und exponentiellem Abfall zu erklären ist. Die Paarvernichtung von Teilchen der Dunklen Materie zu Elektronen und Positronen könnte dieses Verhalten erklären. Tatsächlich lässt sich dieser Beitrag auch im Elektronenspektrum finden, ist dort aber nicht

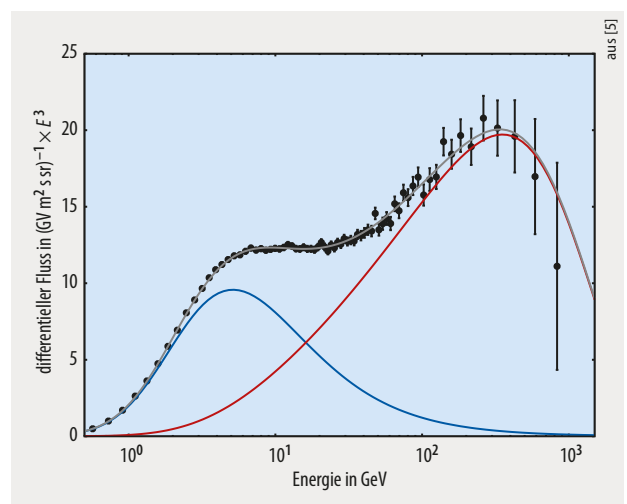


Abb. 6 Bei den Daten von AMS-02 (schwarz) zum differentiellen Fluss von Positronen ist die Summe aus statistischem und systematischem Fehler gezeigt. Der Diffusionsterm (blau) ist an die Daten angepasst und entspricht einer Sekundärproduktion von Positronen. Der verbleibende Quellenterm (rot) stammt aus einer primären, noch unbekanntem Quelle.

zwingend nötig, um die Daten zu erklären. Oberhalb einer Abschneide-Energie von (810_{-180}^{+310}) GeV fällt das Spektrum abrupt exponentiell ab. Bei einer Paarvernichtung käme dieser Wert der Masse der Primärteilchen gleich.

Elektron-Positron-Paare entstehen aber auch in elektromagnetischen Vorgängen. Ein astrophysikalisches Beispiel sind die schnell veränderlichen Magnetfelder von Pulsaren – rotierenden Neutronensternen, deren Rotationsachse nicht mit der Richtung ihrer magnetischen Achse übereinstimmt. Dadurch treten in einigen Regionen starke Felder auf, die durchaus sehr hochenergetische Positronen erzeugen könnten. Da Positronen leicht mit interstellarer Materie wechselwirken und verschwinden, müssten solche Punktquellen in der Nähe des Sonnensystems liegen. So können Positronen mit 100 GeV Energie nur von Quellen stammen, die einige zehntausend Jahre alt und etwa ein Kiloparsec ($\approx 3 \times 10^{16}$ km) entfernt sind [10]. Die erwartete leichte Anisotropie in den Einfallrichtungen der Positronen ließ sich bisher mit Obergrenzen auf dem Prozent-Niveau nicht nachweisen [5]. Wie weit eine Anisotropie verwischt, bleibt unklar, solange die diffusiven Propagationseffekte nicht besser verstanden sind.

Komplexe Antikerne

Besonders faszinierend ist die Suche nach komplexen Antikernen, wie Anti-Deuterium oder Anti-Helium, die sich aus Antiprotonen und -neutronen zusammensetzen. Sie entstehen äußerst selten, wenn Materie wechselwirkt: Die Bildungswahrscheinlichkeit nimmt mit jedem zusätzlichen Antinukleon um Größenordnungen ab. In den Daten von AMS-02 gibt es eine gute Handvoll Kandidaten für Anti-Helium – unter inzwischen 176 Milliarden registrierten kosmischen Teilchen.²⁾ Die Rate entspricht etwa einem Anti-Helium pro Jahr – oder pro 100 Millionen He-Kernen. Das ist so wenig, dass sich die systematische Signifikanz nur schwer beurteilen lässt. Insbesondere ist der erwartete Untergrund noch nicht ausreichend quantifiziert. Um sicherzustellen, dass auf dem Niveau von $1:10^8$ keine Fehlfunktion des Detektors vorliegt, gilt es, die Eigenschaften dieser seltenen Ereignisse besser zu verstehen. Bis dahin steht eine Publikation der AMS-02-Kollaboration zu komplexen kosmischen Anti-Kernen noch aus.

Wenn sich nur ein Teil der Kandidaten als wahre Ereignisse erweist, so sind es zu viele, um sie mit konventioneller Kern- und Astrophysik zu erklären. Dann sollte es irgendwo in der Galaxie einen kleinen Vorrat an Antimaterie geben, der etwa aus der Frühzeit des Universums überdauert hat. Das hat die Suche nach Sternen beflügelt, die aus Antimaterie bestehen könnten. Nach dem Standardmodell der Teilchenphysik unterscheiden sich ihre Spektren nicht von normalen Sternen. Allerdings sollte es Signale bei den Energien der Elektron-Positron- und Proton-Antiproton-Vernichtung geben. Im Katalog des Fermi-Satelliten trifft dies auf 14 Objekte zu [11]. Das entspricht etwa 2,5 Kan-

didaten pro Million normaler Sterne in einer Entfernung zwischen einigen 10^{14} und 10^{16} km. Wahrscheinlicher ist es jedoch, dass es sich dabei um normale Gammastrahlen-Emitter wie Pulsare oder Schwarze Löcher handelt.

Zukunftsprojekte

Es ist unklar, ob AMS-02 allein die Frage nach der Existenz kosmischer Antimaterie oder dem Teilcheninhalt Dunkler Materie abschließend beantworten wird. Auf absehbare Zeit bleibt es das einzige magnetische Spektrometer im All – also der einzige Detektor, der Materie von Antimaterie unterscheiden kann. Teams aus Deutschland [12] und Italien [13] haben im Zusammenhang mit dem ESA-Programm „Voyage 2050“ Projektskizzen für Nachfolgeprojekte von AMS-02 eingereicht. In einem kürzeren Zeitraum hofft das HERD-Projekt der Chinesischen Raumfahrtagentur unter Beteiligung von Mitgliedern der WiZARD- und AMS-Kollaborationen, einen großen kalorimetrischen Detektor auf der chinesischen Raumstation Tianhe zu installieren [14], um wenigstens die Summe von Elektronen und Positronen weiter zu untersuchen.

Literatur

- [1] V. Bindi, M. Panizza und M. Pohl, Introduction to the Physics of Cosmic Rays: The Cosmic Laboratory, CRC Press, in Vorbereitung.
- [2] M. Pohl, PoS(TIPP 2014)013 (2014)
- [3] O. Adriani et al. (PAMELA Coll.), Riv. Nuovo Cim. **40**, 473 (2017)
- [4] M. Aguilar et al. (AMS Coll.), Phys. Rep. **366**, 331 (2002)
- [5] M. Aguilar et al. (AMS Coll.), Phys. Rep. **894**, 1 (2021)
- [6] F.-K. Thielemann, Origin of the Elements, Part I & II, SPG Mitteilungen **63**, 24 (2021) und **64**, 29 (2021)
- [7] S. Weinberg, Die ersten drei Minuten, Piper, München (1997)
- [8] P. D. Serpico, J. Astrophys. Astron. **39**, 41 (2018)
- [9] N. Tomassetti, ApJL **752**, L13 (2012)
- [10] S. Gabici et al., Int. J. Mod. Phys. D **28**, 1930022 (2019)
- [11] S. Dupourqué et al., Phys. Rev. D **103**, 083016 (2021)
- [12] S. Schael et al., Nucl. Instr. Meth. A **944**, 162561 (2019)
- [13] R. Battiston et al., Exp. Astron. (2021), DOI: 10.1007/s10686-021-09708-w
- [14] F. Gargano et al., PoS(EPS-HEP2019)035 (2019)

Der Autor



Martin Pohl (FV Teilchenphysik und SPG-Doppelmitglied) ist emeritierter Professor der U Genf. Er war dort u. a. Direktor des Instituts für Kern- und Teilchenphysik und Leiter des Physik-Departements. Nach seiner Dissertation an der RWTH Aachen über Neutrinophysik forschte er am DESY und am CERN. Seit 1998 widmet er sich der experimentellen Astroteilchen-

physik. Zu seinen Projekten zählt neben AMS das Polarimeter POLAR für das chinesische Weltraumlabor Tiangong2. Vor kurzem veröffentlichte er das Buch „Particles, Fields, Space-Time: From Thomson’s Electron to Higgs’ Boson“.

Prof. Dr. Martin Pohl, Département de Physique Nucléaire et Corpusculaire, Université de Genève, 24, quai Ernest-Ansermet, CH-1211 Genève 4, Schweiz

1) Weitere Informationen unter <https://galprop.stanford.edu>

2) Weitere Informationen unter <https://cds.cern.ch/record/2320166>