

Das Alpha Magnetic Spectrometer auf der ISS

Auf der Suche nach kosmischer Antimaterie

STEFAN SCHAEEL

Im Mai 2011 wurde das Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) mit dem letzten Flug des Space-Shuttles Endeavour auf die Internationale Raumstation gebracht. Seitdem erfasst es die geladene kosmische Strahlung mit bisher nie erreichter Präzision und liefert neue Einblicke in hochenergetische Prozesse in unserer Milchstraße. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Natur der Dunklen Materie und zur Frage der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum.



Abb. 1 Das AMS-02-Experiment auf der Internationalen Raumstation (Foto: NASA).

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivs License, which permits use and distribution in any medium, provided the original work is properly cited, the use is non-commercial and no modifications or adaptations are made.

AMS-02 ist das größte Experiment zur Grundlagenforschung auf der Internationalen Raumstation ISS [1]. Seine Masse beträgt 7 t, das instrumentierte Volumen beträgt 5 m auf 4 m auf 3 m, und die NASA schätzt die Entwicklungs- und Baukosten auf 1,5 Milliarden US-Dollar. Initiiert wurde dieses Forschungsprojekt im Jahr 1994 vom amerikanischen Physik-Nobelpreisträger Samuel Ting vom MIT, der die AMS-02-Kollaboration auch heute noch leitet.

Bereits 1912 entdeckte Victor Hess bei Ballonflügen, dass der Fluss an geladenen Teilchen mit der Höhe des

Ballons stetig zunimmt [2] (s. a. Physik in unserer Zeit **2012**, 43(4), 168). Diesen Fluss an geladenen Teilchen, der von außerhalb der Erdatmosphäre stammt, bezeichnen wir heute als geladene kosmische Strahlung. 1936 wurde Hess für diese Entdeckung mit dem Physik-Nobelpreis ausgezeichnet. Bis in die 1950er-Jahre entstanden aus der Untersuchung der kosmischen Strahlung die Grundlagen der heutigen Elementarteilchenphysik, so wurden das Positron, das Pion und das Myon erstmalig in der kosmischen Strahlung nachgewiesen.

Die Energieskala der kosmischen Strahlung, die AMS-02 untersucht, ist die GeV-Skala, also 10^9 eV. Die höchstenergetischen Teilchen in der kosmischen Strahlung erreichen durchaus makroskopische Energien, mit 100 J entspricht ihre kinetische Energie dann der eines Tennisballs mit einer Geschwindigkeit von über 200 km/h.

Der Fluss der kosmischen Strahlung nimmt extrem schnell als Funktion der Energie ab (Abbildung 2). Wegen seiner Form in dieser doppelt-logarithmischen Darstellung wird der Fluss mit einem gestreckten Bein verglichen [3]. Oberhalb des „Knies“ trifft etwa ein Teilchen pro Jahr auf eine Fläche von 1 m^2 , oberhalb der Ferse ist es nur noch etwa ein Teilchen pro Jahr auf eine Fläche von 1 km^2 .

Das Spektrum der kosmischen Strahlung

Auf den ersten Blick folgt der Fluss Φ der kosmischen Strahlung in guter Näherung einem einfachen Potenzgesetz, $\Phi(E) = C(E/\text{GeV})^\gamma$. Dabei ist C eine Konstante mit der Dimension $[C] = 1/(\text{m}^2 \text{ sr s})$, welche die absolute Normierung festlegt, und der Exponent $\gamma = -2,78$ der sogenannte spektrale Index, der die Energieabhängigkeit charakterisiert. Dies ist genau der funktionale Zusammenhang, den man aufgrund der Beschleunigung der Teilchen, etwa in den Schockfronten von Supernova-Explosionen, und der anschließenden Ausbreitung im interstellaren Medium in unserer Galaxie erwarten würde. Aufgrund der Magnetfelder innerhalb der Milchstraße geht die Richtungsinformation bei diesem Transportprozess weitgehend verloren.

Betrachtet man dieses Energiespektrum etwas genauer, erkennt man Strukturen im Fluss der kosmischen Strahlung. Die prominenteren haben eigene Namen, wie das „Knie“ und die „Ferse“. An diesen Stellen ändert sich der spektrale Index γ . Besonders deutlich wird dies, wenn man die domi-

nante Energieabhängigkeit von $\Phi(E)$ herausnimmt und den Fluss so skaliert, wie in Abbildung 3 dargestellt. Jetzt sind Strukturen klar erkennbar, die uns Hinweise auf die Details der Beschleunigungsmechanismen und auf die physikalischen Phänomene beim Transport der kosmischen Strahlung von den Quellen bis zur Erde geben. So vermuten wir, dass Supernova-Explosionen in unserer Milchstraße die Teilchen in der kosmischen Strahlung nur bis zum „Knie“ beschleunigen können. Woher die beobachteten Strukturen genau kommen, ist Gegenstand der aktuellen Forschung und erlaubt uns Einblicke in hochenergetische Prozesse weit außerhalb unseres Sonnensystems.

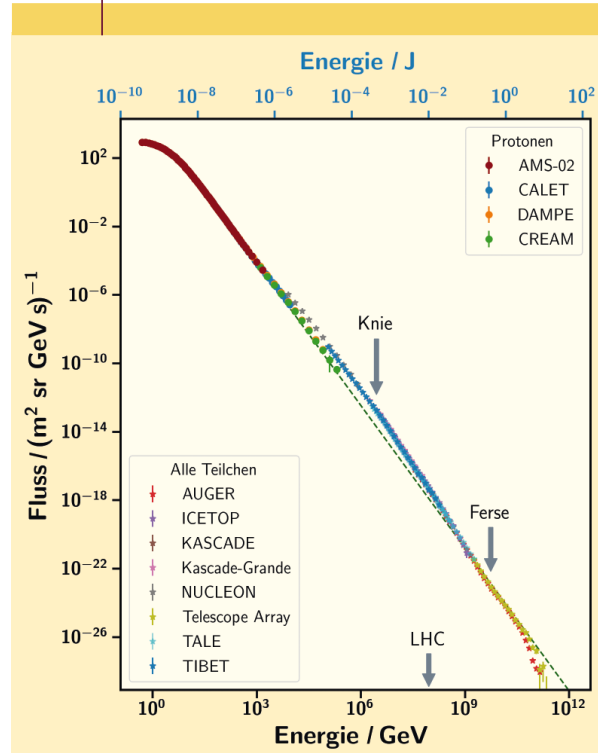
Es fällt auf, dass die Ergebnisse der einzelnen Experimente oft systematisch gegeneinander verschoben sind. Dies zeigt die experimentellen Schwierigkeiten bei den Messungen. Häufig kann insbesondere die absolute Energieskala nicht genau genug bestimmt werden. Bei Energien unterhalb des Knies kann die Kernladung Z zuverlässig identifiziert werden, sodass man etwa zwischen Protonen ($Z = 1$) und Helium-Kernen ($Z = 2$) unterscheiden kann. Bei den höchsten Energien ist dies nur eingeschränkt möglich.

Die kosmische Strahlung besteht zu 99% aus Atomkernen und zu 1% aus Elektronen. Die Kerne wiederum bestehen zu 90% aus Protonen, zu 9% aus Helium-Kernen und zu 1% aus schwereren Kernen. Diese Zusammensetzung ist stark energieabhängig, so beträgt das Proton-Helium-Verhältnis bei 1000 GeV schon nur noch 4 zu 1. Im Rahmen von detaillierten Modellen lassen sich so die Messungen der Protonen bei kleineren Energien durchaus mit dem gemessenen Fluss aller Teilchen bei höheren Energien in Übereinstimmung bringen [4]. Damit lässt sich unter anderem die scheinbare Diskrepanz zwischen den Ergebnissen des chinesischen Forschungssatelliten DAMPE (Dark Matter Particle Explorer) und des in einem russischen Satelliten installierten Experiments NUCLEON in Abbildung 3 verstehen.

Wir werden durch die Erdatmosphäre und durch das Erdmagnetfeld von dieser Strahlung abgeschirmt, sonst wäre vermutlich kein Leben auf der Erdoberfläche möglich. Die Strahlenbelastung durch die kosmische Strahlung ist eine der großen Hürden für bemannte Raumfahrtmissionen im Sonnensystem, wie einen Flug zum Mars. Außerhalb des schützenden Erdmagnetfeldes beträgt die Strahlenbelastung 0,9 Sv/a, die für Menschen tödliche Dosis liegt bei rund drei Sievert. Ein detailliertes Verständnis der geladenen kosmischen Strahlung ist also die Voraussetzung, um geeignete Konzepte für die Abschirmung eines Crew-Kompartiments zu ermöglichen.

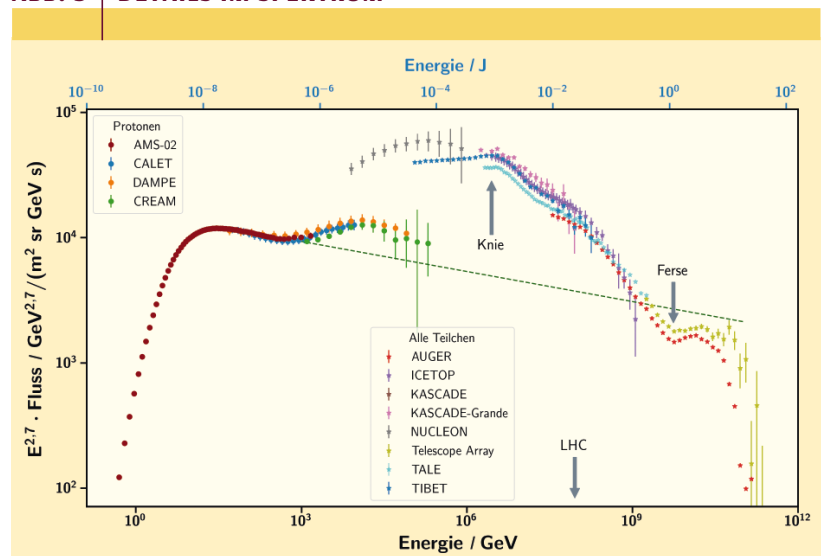
AMS-02 gibt aber auch Antworten auf grundlegende Fragen. Die Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie ist ungeklärt. Des Weiteren besteht das uns umgebende Universum aus Materie. Die Umwandlung von Energie in Materie verläuft aber weitgehend symmetrisch, es wird genauso viel Materie wie Antimaterie produziert. Was ist dann nach der heißen Anfangsphase des Universums, dem

ABB. 2 | FLUSS DER KOSMISCHEN STRAHLUNG



Neuere Messungen des Flusses der kosmischen Strahlung als Funktion der Energie mit verschiedenen Experimenten seit 2000. Die gestrichelte grüne Linie entspricht einem einfachen Potenzgesetz $\Phi(E) = C E^{-2,78}$. Die Daten sind von C. Evoli zusammengestellt worden [3]. LHC zeigt hier die Energie an, die ein Teilchen der kosmischen Strahlung haben müsste, um bei einer Kollision mit einem anderen, ruhenden Teilchen dieselbe Energie freizusetzen wie beim LHC am CERN bei Proton-Proton-Kollisionen mit einer Schwerpunktsenergie von 13 TeV.

ABB. 3 | DETAILS IM SPEKTRUM



Der Fluss der kosmischen Strahlung multipliziert mit der Energie zur Potenz 2,7. Ansonsten gelten die gleichen Erläuterungen wie zu Abbildung 2.

Urknall, mit der Antimaterie passiert? Es gibt zwar sehr kleine Abweichungen von dieser Symmetrie, aber diese reichen bei Weitem nicht, um die beobachtete Asymmetrie zu erklären. Könnte es also noch Antimaterie geben, die vom Urknall übrig ist? Dies sind nur einige wenige Beispiele für die offenen Fragen zu den Grundlagen der modernen Physik, zu deren Aufklärung AMS-02 beitragen kann.

Die Ursprünge der Teilchenphysik wurden bis in die 1950er-Jahre mit der Untersuchung der kosmischen Strahlung erarbeitet. Erst danach wurde der weitere wissenschaftliche Fortschritt durch Messungen an Teilchenbeschleunigern dominiert. In den 1990er-Jahren wurde klar, dass diese Entwicklung mit dem LHC-Beschleuniger am CERN zu einem vorläufigen Höhepunkt und Abschluss kommen würde. Das ultimative Labor ist aber der Kosmos mit seinen extrem hochenergetischen Prozessen bei Supernovaexplosionen oder in der Umgebung von Schwarzen Löchern. Dabei werden Teilchen auf viel höhere Energien beschleunigt, als dies auf der Erde möglich wäre. Mit der ISS ergaben sich dann in den 1990er-Jahren ganz neue Forschungsmöglichkeiten, die mit AMS-02 aufgegriffen wurden.

Die präzise Vermessung der geladenen kosmischen Strahlung erfordert ein Magnet-Spektrometer. Ein Teilchendetektor vermisst die Flugbahn der Teilchen in einem Magnetfeld. Aus der Krümmung ergeben sich das Ladungsvorzeichen und die Rigidität $R = p/Z$, die ein Maß für die magnetische Steifigkeit ist. Dabei ist p der Impuls des Teilchens und Z seine Ladung. Ein Proton mit der Ladung $Z = +1$ hat also eine positive Rigidität, das dazugehörige Antiteilchen, das Antiproton, eine negative Rigidität. Nur mit einem Magnet-Spektrometer kann zwischen Materie und Antimaterie unterschieden werden.

AMS-02 ist das einzige Magnet-Spektrometer im Welt- raum. Je höher der Impuls der Teilchen ist, desto weniger weicht die Flugbahn im Magnetfeld von einer geraden Linie ab. Die Stärke des Magnetfeldes, die Länge der Strecke im Magnetfeld und die Einzelpunktauflösung des Detektors, der die Flugbahn vermisst, legen die Auflösung des Magnet-Spektrometers fest. Die charakteristische Größe hierfür ist die „Maximum Detectable Rigidity“ (MDR). Bis zu dieser Rigidität kann das Magnet-Spektrometer zwischen einer geraden Flugbahn und einer Kreisbahn unterscheiden. Für AMS-02 beträgt die MDR 2 TV für Protonen, 3,2 TV für Helium und 3,7 TV für Eisen.

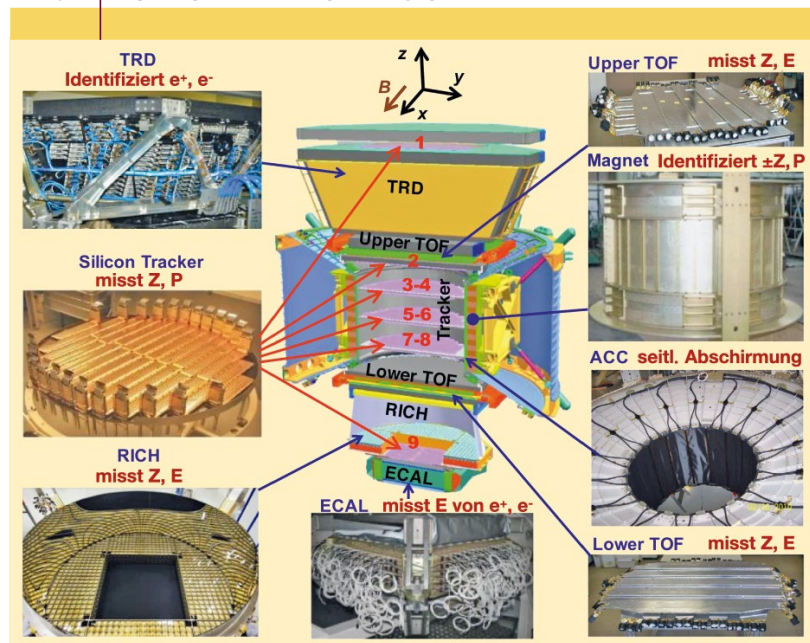
Das einzige Magnet-Spektrometer im Orbit

Einen Magneten in den erdnahen Weltraum zu bringen, ist technisch eine große Herausforderung. Wie eine Kompass- nadel will der Magnet sich im Erdmagnetfeld ausrichten. Die dabei auftretenden elektromagnetischen Kräfte sind deutlich größer als die heutigen technischen Möglichkeiten zur langfristigen Lagestabilisierung eines Raumfahrzeugs. Es musste deshalb ein Magnet entwickelt werden, dessen ex- ternes Dipolmoment vernachlässigbar ist. Bei AMS-02 über- nimmt diese Aufgabe ein zylinderförmiger Permanentmag- net mit einer Masse von 1,9 t, der im Inneren ein homoge- nes Magnetfeld von 0,14 T erzeugt (Abbildung 4). Aufgebaut ist er aus einzelnen kleinen Permanentmagneten, die so an- geordnet sind, dass die Feldlinien im Inneren der Zylinder- wand geschlossen werden können und damit das verblei- bende externe Dipolmoment zu vernachlässigen ist. Getestet wurde dieses Konzept 1998 mit dem AMS-01-Experiment [5] an Bord des Space-Shuttles Discovery. AMS-01 zeichnete dort zehn Tage lang Teilchen der geladenen kosmischen Strah- lung auf. Der Testflug war ein voller Erfolg, und anschlie- ßend wurde der Bau von AMS-02 für die ISS begonnen.

AMS-02 ist ein moderner Teilchendetektor und in sei- ner Funktionsweise am ehesten mit einer elektronischen Kamera vergleichbar. Er macht etwa 600 Bilder der kos- mischen Strahlung pro Sekunde, um die elektrische Ladung der Teilchen, ihre Energie und ihre Masse zu bestimmen (Abbildungen 4 und 5). Der Magnet ist mit einem Silizium- Spurdetektor (Silicon Tracker) instrumentiert, der die Flug- bahnen der geladenen Teilchen in neun Ebenen mit einer Einzelpunktauflösung von besser als 0,01 mm vermisst. Magnet und Silizium-Spurdetektor bilden das Magnet- Spektrometer.

Die geladene kosmische Strahlung deponiert beim Durchgang durch Materie einen kleinen Teil ihrer Energie in den Detektorlagen durch Ionisation der Atome. Diesen Effekt können wir messen, er wird durch die Bethe-Bloch- Formel [6] beschrieben. Die deponierte Energie wächst dabei quadratisch mit der Ladungszahl Z . Sowohl Silizium- Spurdetektor als auch das Flugzeit-System (TOF, Time-of- Flight) messen nicht nur das Vorhandensein von Signalen, sondern auch die Signalhöhen und können damit die La- dungszahl Z bestimmen. Aus der Flugzeit kann bei nied- rigen Energien, also wenigen GeV, auch die Masse der

ABB. 4 | KOMPONENTEN VON AMS-02



Der Aufbau des Experiments.

Teilchen bestimmt werden. Um dies auch bei höheren Energien zu ermöglichen, verfügt AMS-02 über weitere Subdetektoren. Dazu gehören ein Übergangsstrahlungsdetektor (Transition-Radiation-Detector, TRD), ein Ring Imaging Cherenkov Counter (RICH), ein elektromagnetisches Kalorimeter (ECAL) sowie ein Anti-Koinzidenz-Zähler (ACC). TRD und ACC wurden in Deutschland am KIT in Karlsruhe und der RWTH Aachen entwickelt und gebaut.

Technisch ist der Bau eines so komplexen Teilchendetektors schon für Anwendungen auf der Erde eine enorme Herausforderung. Solche Detektoren finden sich heute etwa am CERN in Genf beim LHC, 100 m unter der Erdoberfläche in großen Kavernen, die hervorragend von der Umgebung abgeschirmt sind. Für ein Experiment im Weltraum müssen ganz andere Anforderungen erfüllt werden. Die mechanischen Belastungen beim Start mit einer Rakete oder einem Space-Shuttle sind gewaltig. Die Temperaturschwankungen im Orbit aufgrund der wechselnden Sonneneinstrahlung liegt bei $\pm 100^\circ\text{C}$. Jährliche Reparaturen und Wartungsarbeiten wie am LHC sind praktisch nicht möglich. Die komplexe Ausleselektronik muss auch mit der Strahlenbelastung im Weltraum zurecht kommen. Durch „Single Event Latchups“ kommt es immer wieder zu unerwarteten Störungen und Ausfällen, die manuell von der Erde aus in kürzester Zeit korrigiert werden müssen.

Es gibt für AMS-02 keine sichere Parkposition auf der ISS. Jedes technische Problem muss innerhalb von vier Stunden gelöst werden, sonst besteht die Gefahr, dass AMS-02 zu weit abkühlt und dabei irreparablen Schaden nimmt. Entsprechend wird der Betrieb des Experiments auf der ISS rund um die Uhr von einem Team von Experten in einem Kontrollraum am CERN in Genf überwacht.

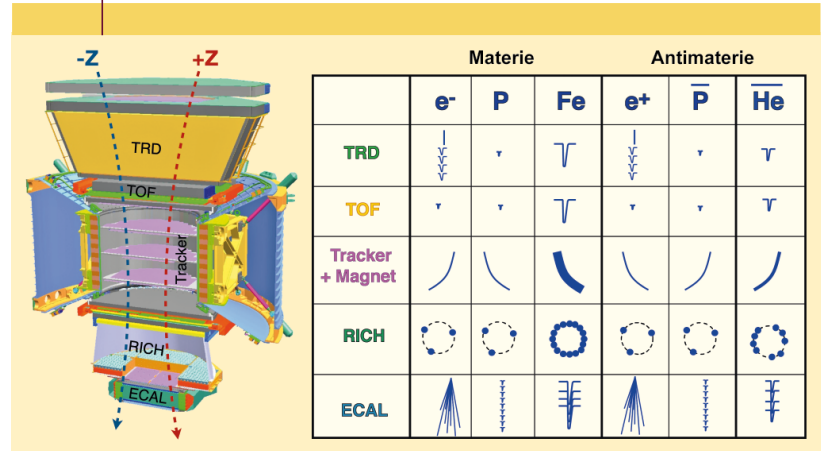
Auch auf der ISS kommt es immer wieder zu unerwarteten Störungen, so im Dezember 2020, als ein unerwarteter Stromausfall AMS-02 lahmlegte. Die primäre Aufgabe der ISS ist es, eine sichere und funktionsfähige Arbeitsumgebung für die Astronauten zu schaffen, erst in zweiter Linie ist die Raumstation eine Wissenschaftsplattform für Experimente. Daher musste AMS-02 warten, bis die Versorgung der ISS gesichert war.

AMS-02 war ursprünglich für einen Betrieb von drei Jahren aufgelegt und sollte dann mit dem Space-Shuttle wieder zur Erde zurückgebracht werden. Das Space-Shuttle-Programm wurde jedoch 2011 eingestellt, AMS-02 befindet sich jetzt seit zehn Jahren auf der ISS und arbeitet immer noch einwandfrei. Dies war jedoch nur durch eine Reparaturmission möglich, die 2019 und 2020 durchgeführt wurde.

Feinmechanik im Raumanzug

Der Silizium-Spurdetektor im Innern des Magneten von AMS-02 produziert einen Wärmestrom von 120 W. Diese Wärme muss durch ein Zwei-Phasen- CO_2 -Kühlsystem zu Radiatoren auf der Außenseite von AMS-02 abtransportiert werden, sonst erhitzen sich die empfindlichen Silizium-Module zu stark und werden zerstört. Für dieses Kühlsystem wurden vier redundante Pumpen eingebaut. 2013 zeig-

ABB. 5 | SPUREN KOSMISCHER STRAHLUNG



Teilchen der kosmischen Strahlung durchfliegen AMS-02 von oben nach unten. Teilchen unterschiedlicher Masse, elektrischer Ladung und Energie hinterlassen in den Subdetektoren charakteristische Signaturen, anhand derer sie identifiziert werden können. AMS-02 hat eine geometrische Akzeptanz von $0,1 \text{ m}^2 \text{ sr}$.

ten sich erste Probleme bei dem Betrieb der Pumpen. 2016 wurde klar, dass AMS-02 ein neues Kühlsystem braucht, welches anschließend an der RWTH Aachen in enger Zusammenarbeit mit der NASA und Wissenschaftlern vom MIT entwickelt, gebaut und getestet wurde. 2019 wurde es mit einer Antares-Rakete zur ISS gebracht und in vier Außen-Einsätzen von den Astronauten Luca Parmitano und Andrew Morgan installiert (s. Titelbild vorne auf dem Heftumschlag).

Dabei mussten acht Anschlussleitungen von lediglich 4 mm Dicke durchtrennt werden und anschließend mit dem neuen Kühlsystem vakuumdicht bei einem Druck von 50 bar verbunden werden. Eine Aufgabe, von der die NASA am Anfang sagte, man wisse nicht, ob dies technisch für einen Astronauten im Raumanzug überhaupt möglich sei. Nachher teilte sie uns mit, dass dies die komplizierteste Operation in der Geschichte der bemannten Raumfahrt gewesen ist. Die Reparatur war ein voller Erfolg, AMS-02 ist damit gut gerüstet für einen möglichen weiteren Betrieb auf der ISS bis 2030.

Diese Beschreibung zeigt, dass AMS-02 ein Unikat ist. An Entwicklung und Bau haben 600 Wissenschaftler und Ingenieure aus 60 Forschungsinstituten und Universitäten 17 Jahre lang gearbeitet. Solch ein Instrument hat es vorher noch nicht gegeben. Die gesamte Ausleselektronik wurde selbst entwickelt und in Taiwan gefertigt. Jeder Chip wurde dafür an der GSI in Darmstadt auf seine Strahlenhärte getestet. Die eingesetzte Elektronik war am Ende zehnmals schneller als alles, was für Weltraumexperimente normalerweise zur Verfügung steht. Wissenschaft auf diesem Niveau ist ohne internationale Kooperation nicht möglich, kein Land wäre dazu alleine in der Lage. Bei AMS-02 arbeiten selbst China und Taiwan friedlich und konstruktiv mit allen anderen Partnern zusammen, und das in einem Hochtechnologiebereich wie der Raumfahrt.

Primäre und sekundäre kosmische Strahlung

Die Messungen von AMS-02 erreichen eine mehr als zehnmal höhere Präzision als vergleichbare Experimente vorher. Die Messunsicherheiten bewegen sich in vielen Fällen im Bereich von wenigen Prozent und erlauben uns damit neue Einblicke in die Erzeugung, Beschleunigung und Propagation der geladenen kosmischen Strahlung. Keines der Ergebnisse von AMS-02 war in dieser Form vorhergesagt worden.

Das Energiespektrum der geladenen kosmischen Strahlung ist komplizierter als erwartet. Abbildung 6 zeigt die Messungen von AMS-02 zu den verschiedenen Elementen in der kosmischen Strahlung [1]. Es fällt auf, dass sich zunächst zwei Gruppen zeigen, die sogenannte primäre und die sekundäre kosmische Strahlung.

Die primäre kosmische Strahlung besteht aus Kernen wie Helium (He), Kohlenstoff (C), Sauerstoff (O) und Eisen (Fe), also aus Elementen, die direkt in der stellaren Kernfusion erzeugt werden. Diese Strahlung teilt sich dann noch einmal in zwei Gruppen, (He, C, O, Fe) und (Ne, Mg, Si), auf. Überraschend ist, dass der Eisenfluss eine andere Energieabhängigkeit zeigt als (Ne, Mg, Si), die doch mit ihrer Kernladung viel näher bei Eisen liegen.

Die sekundäre kosmische Strahlung besteht unter anderem aus Lithium (Li), Beryllium (Be) und Bor (B), also Elementen, die erst durch Wechselwirkungen mit dem interstellaren Medium bei der Ausbreitung der primären kosmischen Strahlung erzeugt werden. Sowohl primäre als auch sekundäre kosmische Strahlung zeigen eine Veränderung

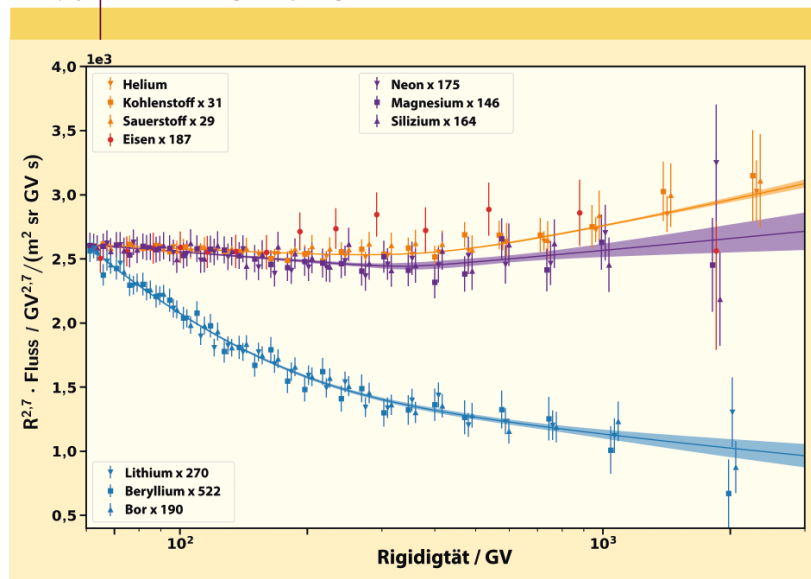
des spektralen Index oberhalb einer Rigidität von rund 200 GV (Abbildung 6).

Wenn die Ursache im Beschleunigungsmechanismus der primären kosmischen Strahlung läge, würde sich das Spektrum der primären und sekundären Strahlung genau gleich verändern. Liegt die Ursache hingegen in Diffusionsprozessen der geladenen Kerne im interstellaren Medium, dann sollte der Effekt in der sekundären Strahlung etwa doppelt so stark sein wie in der primären kosmischen Strahlung. Genau das hat AMS-02 beobachtet.

Die Ursache dafür ist im Detail bis heute nicht zufriedenstellend geklärt. Es gibt vielversprechende Ansätze, die Ergebnisse von AMS-02 in konsistenten Modellen zu beschreiben [8–10]. Bisher ist deren Vorhersagekraft aber noch gering, was sich darin zeigt, dass bisher bei jeder neuen Publikation von AMS-02 die gemessenen Datenpunkte deutlich von den vorhergesagten Energiespektren abgewichen sind. Dies veranschaulicht die physikalischen Schwierigkeiten in der Modellbildung, und hier liegt sicherlich noch einiges an Arbeit vor uns.

In Abbildung 7 ist das Energiespektrum der 1,9 Millionen Positronen gezeigt, die AMS-02 bisher aufgezeichnet hat. In dieser Form der Darstellung findet sich zunächst ein Anstieg bis 6 GeV, dann ein Plateau, gefolgt von einem weiteren Anstieg bis $(284 \pm 91 - 64)$ GeV und anschließend ein starker Abfall, den man als Cutoff bezeichnet. Die Signifikanz für diesen Cutoff beträgt vier Standardabweichungen in dem hier verwendeten, einfachen phänomenologischen Modell. Ganz anders verhalten sich die Elektronen. Hier kann AMS-02 bis zu einer Energie von 1,9 TeV einen vergleichbaren exponentiellen Cutoff ausschließen [1].

ABB. 6 | PRIMÄRE UND SEKUNDÄRE KERNE



Vergleich der von AMS-02 gemessenen Flüsse von primären (oben) und sekundären (unten) Kernen in der kosmischen Strahlung [1]. Die Flüsse wurden passend zum He-Fluss skaliert, um die unterschiedliche Energieabhängigkeit zu verdeutlichen. Die Linien zeigen eine Anpassung an die Datenpunkte mit einem einfachen Potenzgesetz, welches eine Änderung des spektralen Index bei einer Rigidität oberhalb von rund 200 GV erlaubt, um den unterschiedlichen spektralen Verlauf zu verdeutlichen. Die farblich schraffierten Bereiche zeigen die 68,3%-Konfidenzkonturen.

Positronenüberschuss wirft Fragen auf

Positronen sind selten in der kosmischen Strahlung. Wir glauben, dass das uns umgebende Universum aus Materie besteht. Positronen sollten eigentlich nur bei der Wechselwirkung der Atomkerne mit dem interstellaren Medium erzeugt werden und damit sehr selten sein. Aufgrund dieser besonderen Rolle sind sie aber auch besonders empfindliche Proben für neue physikalische Phänomene, wie insbesondere die Annihilation von Teilchen der Dunklen Materie. Auch in solchen Prozessen können Positronen erzeugt werden. Schon im Jahr 1990 haben Turner und Wilzek [11] einen Überschuss von Positronen als eine mögliche Signatur für Dunkle Materie interpretiert.

Wegen der Energieerhaltung sollte der Positronenfluss oberhalb der Masse der Dunkle-Materie-Teilchen stark abfallen. Genau dieses Verhalten hat AMS-02 erstmals beobachtet. Inzwischen hat sich auch die Astrophysik mit dieser Frage beschäftigt und mit Pulsaren eine weitere potenzielle Quelle für Positronen identifiziert. Es gibt inzwischen über tausend Veröffentlichungen, die sich mit den möglichen Ursachen des Positronenüberschusses in der kosmischen Strahlung beschäftigen. AMS-02 könnte bis zum Jahre 2030 weitere Daten nehmen. Dieser Zuwachs in der Datenmenge und die kontinuierliche Verbesserung der Analysetechniken

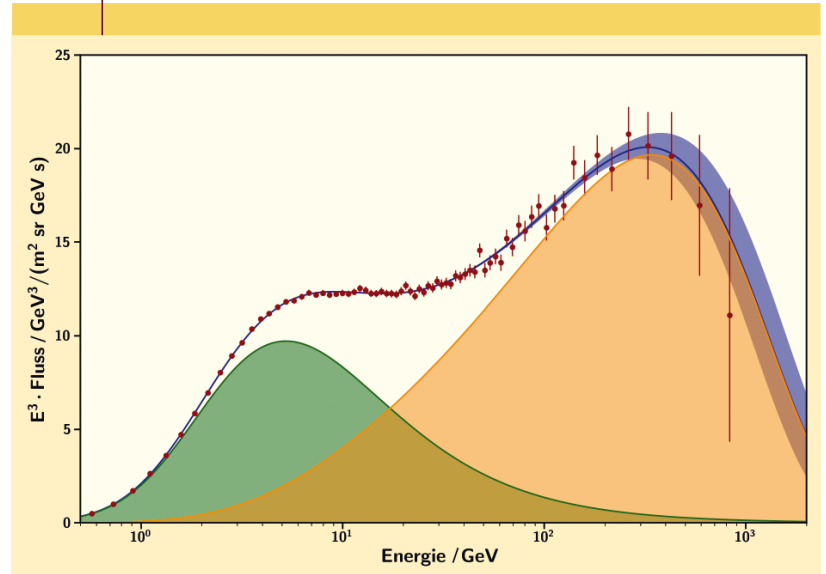
würden es uns erlauben, manche der heute noch diskutierten Modelle auszuschließen. Auch hier werfen die Messungen von AMS-02 mehr Fragen auf, als sie beantworten. Doch genau dies ist die Aufgabe von erfolgreichen Experimenten zur Grundlagenforschung.

Das sich zeitlich mit einer Periode von 22 Jahren ändernde Magnetfeld der Sonne wirkt sich unterschiedlich auf Teilchen mit positiver und negativer Ladung aus (Abbildung 8). Auch Eruptionen auf der Sonne wirken sich auf die Energiespektren aus. AMS-02 misst die Flüsse der kosmischen Strahlung nicht nur als Funktion der Energie, sondern auch der Zeit. Dies erlaubt Rückschlüsse auf die Ausbreitung der geladenen kosmischen Strahlung im Sonnensystem und damit Vorhersagen für die Strahlenbelastung für bemannte Flüge im Sonnensystem. Außerdem erlauben es detaillierte, aus diesen Daten abgeleitete Modelle, den Einfluss des solaren Magnetfeldes für die in der Umgebung der Erde gemessenen Energiespektren zu korrigieren und damit die lokalen, interstellaren Spektren außerhalb des Sonnensystems zu bestimmen. Diese sollten sich zeitlich praktisch nicht mehr verändern und können dann direkt mit astrophysikalischen Modellen zur Beschleunigung und zum Transport der kosmischen Strahlung in unserer Milchstraße verglichen werden.

Gibt es schwere Antimateriekern in der kosmischen Strahlung?

In den über 170 Milliarden Ereignissen, die AMS-02 inzwischen aufgezeichnet hat, finden sich auch sehr seltene Prozesse. So finden wir in einem von 100 Millionen Helium-Ereignissen eine Signatur, die experimentell nur zu einem Antihelium-Kern passt. Unser Verständnis der Sekundärproduktion von Antihelium im interstellaren Medium ist mit dieser Beobachtung nicht verträglich. Woher stammen also diese Antihelium-Ereignisse? Es kommen zwei Helium-Isotope in der kosmischen Strahlung vor, He-3 und He-4. Bei der Sekundärproduktion im interstellaren Medium müssen sich für Anti-He-3 zwei Antiprotonen und ein Antineutron im Phasenraum nahe genug kommen, um dessen Kern zu bilden, für Anti-He-4 zwei Antiprotonen und zwei Anti-

ABB. 7 | POSITRONENSPEKTRUM



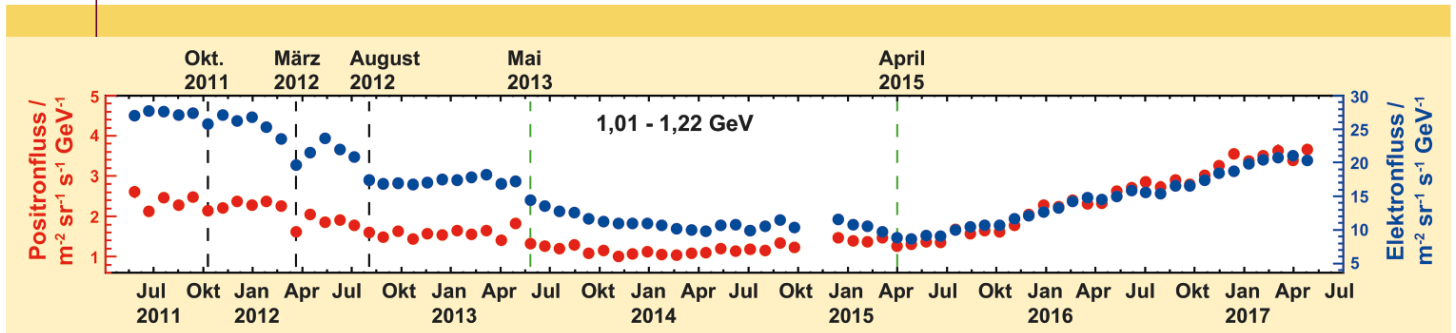
Das von AMS-02 gemessene Energiespektrum der Positronen in der kosmischen Strahlung (rote Punkte) [1]. Die Modell-Kurve (blau) ist eine Anpassung an die Daten. Der blau schattierte Bereich zeigt das 68,3%-Konfidenzintervall an. Der grün schattierte Bereich zeigt den Beitrag durch die Sekundärproduktion von Positronen im interstellaren Medium, wie er vor den Messungen von HEAT, AMS-01, PAMELA und AMS-02 [1 und Referenzen darin] auch erwartet wurde. Der orange schattierte Bereich zeigt die zusätzliche Komponente, die durch einen Quellterm mit einem exponentiellen Cutoff bei $E_c = (810 \pm 310 - 180)$ GeV sehr gut beschrieben wird.

Neutronen. Anti-He-4 sollte deshalb etwa 1000-mal seltener in der kosmischen Strahlung vorkommen als Anti-He-3.

AMS-02 beobachtet aber sowohl Anti-He-3 als auch Anti-He-4-Kerne mit einer Rate von knapp einem Ereignis pro Jahr. Sollte sich diese Beobachtung bestätigen, wäre es eine wissenschaftliche Sensation, denn sie würde die Frage nach der Materie-Antimaterie-Asymmetrie nach dem Urknall in einem völlig neuen Licht erscheinen lassen.

Noch sind wir aber nicht so weit. Ein Erklärungsversuch [12] weist auf eine mögliche Produktion von Anti-He-3 in den Zerfällen von schweren Baryonen hin, die ein b-Quark enthalten. Diese Baryonen könnten bei der Annihilation

ABB. 8 | POSITRONENFLUSS



Der Fluss von Elektronen (blau) und Positronen (rot) als Funktion der Zeit [1] im Energieintervall 1,01 bis 1,22 GeV. Das solare Magnetfeld beeinflusst Teilchen mit positiver Ladung anders als Teilchen mit negativer Ladung. Deutlich erkennbare Strukturen, die in mehreren Energie-Intervallen auftreten und mit der Aktivität der Sonne in Verbindung gebracht werden können, sind durch die vertikalen gestrichelten Linien gekennzeichnet.

von Teilchen der Dunklen Materie erzeugt werden, eine sehr interessante Verbindung zur Teilchenphysik mit dem LHCb-Experiment am CERN. Wie die vielen Konjunktive in diesen Sätzen zeigen, bewegen wir uns hier an den Grenzen des heutigen Wissenstands in der Physik.

Bei dieser extrem kleinen Rate von 1 in 100 Millionen ist es sehr schwierig, ein experimentelles Artefakt auszuschließen, dass einmal in 100 Millionen Fällen das Ladungsvorzeichen durch eine Wechselwirkung des einfallenden Helium-Kerns mit dem Detektormaterial falsch rekonstruiert wird. Deshalb ist dieses Resultat bisher nicht von AMS-02 publiziert worden, die systematischen Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Auch hier erhoffen wir uns von der weiteren Datennahme in den kommenden Jahren mehr Klarheit. Genau solche völlig unerwarteten Beobachtungen machen die Forschung aber so spannend.

Wie geht es weiter?

AMS-02 soll noch bis zum Ende der Lebensdauer der ISS, voraussichtlich 2030, weiter betrieben werden. Viele Fragen, die mit AMS-02 aufgeworfen wurden, könnten dann mit dem Nachfolgeexperiment, „AMS-100: The next generation magnetic spectrometer in Space“ (Abbildung 9) untersucht werden [13]. Bau- und Entwicklung von AMS-02 haben 17 Jahre gedauert, man sollte also jetzt anfangen, das Nachfolgeexperiment auf den Weg zu bringen.

AMS-100 könnte etwa ab dem Jahre 2035 am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 2 (L2) die kosmische Strahlung mit einer 1000-mal höheren Sensitivität vermessen als AMS-02. Im Jahr 2031 könnte AMS-02 einen einmaligen Datensatz

aus zwanzig Jahren Messzeit zur Verfügung stellen. Zwanzig Jahre entsprechen 1000 Wochen. Das bedeutet, nach einer Woche würde AMS-100 die Resultate von AMS-02 verifiziert haben, in der zweiten Woche beträten wir wissenschaftliches Neuland.

Die Planung gestaltet sich derzeit wie folgt: Um dies zu ermöglichen, verfügt AMS-100 über einen dünnen hochtemperatursupraleitenden Magneten mit einem Durchmesser von 4 m und einer Länge von 6 m. Das Innere des Magneten ist als klassischer Teilchendetektor ausgelegt, bei dem sich im Zentrum jedoch nicht das Strahlrohr des Teilchenbeschleunigers befindet, sondern das Kalorimeter. AMS-100 hat eine Masse von etwa 40 t, ist also lediglich sechsmal so schwer wie AMS-02. Es soll mit einem Starship [14] der Firma Space-X zum L2 gebracht werden und dort die kosmische Strahlung für mindestens elf Jahre vermessen. Dieser Zeitraum entspricht einem halben Sonnenzyklus. Aufgrund der modernen Entwicklungen der Raumfahrt reduzieren sich damit die Startkosten für AMS-100 im Vergleich zu AMS-02 um einen Faktor drei.

AMS steht bei AMS-100 für „A Magnetic Spectrometer“, die Zahl 100 gibt die geometrische Akzeptanz von $100 \text{ m}^2 \text{ sr}$ an. Damit werden erstmalig direkte Messungen der geladenen kosmischen Strahlung bis zu Rigiditäten von 100 TV möglich sein. Das Kalorimeter erweitert den Energiebereich bis über das „Knie“ in der kosmischen Strahlung hinaus und erlaubt damit einen nahtlosen Anschluss an die indirekten Messungen der großflächigen Detektoren auf der Erdoberfläche. AMS-100 wird Positronen und Antiprotonen bis zu einer Energie von 10 TeV vermessen können und damit klären, ob die Energiespektren dieser seltenen Antimaterie-Teilchen tatsächlich Rückschlüsse auf die Natur der Dunklen Materie erlauben.

AMS-100 hat die Sensitivität, um eine mögliche Anisotropie in der Ankunftsrichtung zu beobachten, wie man sie in Pulsarmodellen zum Ursprung der Positronen erwarten würde. Sollten tatsächlich Antihelium-Kerne in der kosmischen Strahlung vorkommen, so wie es die AMS-02-Daten andeuten, würde AMS-100 mehr als 1000 solcher Ereignisse pro Jahr aufzeichnen und durch die präzise Messung der Energiespektren Hinweise auf den Ursprung dieser Antikern liefern.

Dieses Spektrometer ist aber nicht nur ein ausgezeichnetes Instrument zur Beobachtung der geladenen kosmischen Strahlung. AMS-100 kann hochenergetische Photonen in der kosmischen Strahlung auf zwei Arten nachweisen. Zum einen mit dem Kalorimeter und zum anderen darüber, dass Photonen in der nur 3 mm dicken Wand des Magneten in ein Elektron-Positron-Paar konvertieren. Die anschließende Messung der beiden Spuren im Silizium-Spurdetektor erlaubt im TeV-Bereich eine Winkelauflösung, die die der heutigen Experimente um Größenordnungen übertrifft. Damit wird es erstmals möglich, detaillierte Karten über die Quellen der Erzeugung von hochenergetischen Teilchen in astrophysikalischen Objekten wie dem Krebsnebel zu erstellen.

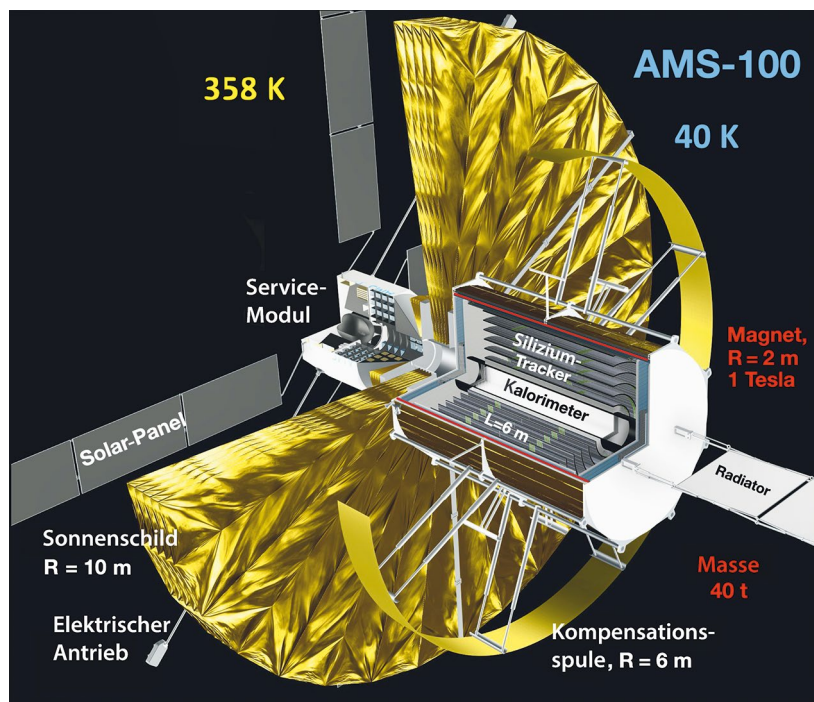


Abb. 9 Künstlerische Darstellung des AMS-100-Experiments am Sonne-Erde-Lagrange-Punkt 2.

Die erreichbare Winkelauflösung liegt in derselben Größenordnung wie für Röntgenteleskope. AMS-100 beobachtet wegen seiner Geometrie fast den gesamten Himmel kontinuierlich. Es muss also nicht extra ausgerichtet werden, um zeitlich veränderliche Phänomene wie Gamma-Blitze aufzuzeichnen. Somit liefert es hochaufgelöste Beobachtungsdaten der relevanten Himmelsregionen vor dem eigentlichen Ereignis und erlaubt damit ein bisher nicht mögliches Verständnis der zeitlichen Entwicklung.

Technisch wird dies mit dem neuen Solenoidmagneten aus einem Hochtemperatur-Supraleiter (HTS) erreicht. Dieser Solenoid befindet sich bei einer Temperatur von 60 K im thermischen Gleichgewicht mit seiner Umgebung. Das einfallende Sonnenlicht wird durch einen großen Sonnenschirm, ähnlich wie bei dem James-Webb-Weltraumteleskop, abgeschirmt.

Auch am L2 in 1,5 Millionen km Entfernung von der Erde ist das Magnetfeld der Sonne nicht zu vernachlässigen. Es wechselwirkt mit dem Dipolmoment des Solenoids und würde eine Lageregelung unmöglich machen. Um dies zu verhindern, ist AMS-100 mit einer entfaltbaren Kompensationsspule mit einem Durchmesser von 12 m ausgestattet, in der ein sehr schwaches entgegengerichtetes Magnetfeld erzeugt wird. Auch die Kompensationsspule ist aus einer lediglich 0,15 mm dicken HTS-Folie aufgebaut. Das Konzept für diese neuartigen HTS-Magnete wird zurzeit in einer internationalen Kooperation am CERN in Genf, der Universität Genf, der EPF-Lausanne und der RWTH Aachen erarbeitet.

Genau wie das sehr erfolgreiche AMS-02-Experiment auf der ISS kann AMS-100 nur als internationales Forschungsprojekt realisiert werden. Wir wissen heute, dass die moderne Physik unvollständig ist. Nur mit Experimenten, die physikalisches Neuland betreten, wie AMS-02 oder AMS-100, können wir den erforderlichen experimentellen Rahmen für solche Entwicklungen abstecken.

Zusammenfassung

Im Mai 2011 wurde das Alpha Magnetic Spectrometer mit dem letzten Flug des Space-Shuttles Endeavour auf die Internationale Raumstation gebracht. Seitdem erfasst es die geladene kosmische Strahlung mit bisher nie erreichter Präzision. Dabei liefert es neue Einblicke in hochenergetische Prozesse in unserer Milchstraße, die uns Rückschlüsse auf die Natur der Dunklen Materie und zur Frage der Materie-Antimaterie-Asymmetrie im Universum erlauben. Das Nachfolgeexperiment, AMS-100, könnte diese Messungen in der nächsten Dekade mit einer nochmals tausendfach höheren Sensitivität fortsetzen.

Stichwörter

Kosmische Strahlung, Alpha Magnetic Spectrometer, AMS-02, AMS-100, Internationale Raumstation, Materie-Antimaterie-Symmetrie, Positronenüberschuss.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] M. Aguilar et al., Phys. Rep. **2021**, 894, 1.
- [2] V. F. Hess, Physikalische Zeitschrift **1912**, 13, 1084.
- [3] S. P. Swordy, Space Science Rev. **2001**, 99, 85. Siehe https://github.com/carmeloevoli/The_CR_Spectrum. Hier finden sich auch die Referenzen zu den Original-Publikationen der einzelnen Experimente.
- [4] H. P. Dembinski, **2017**, arXiv:1711.11432v1.
- [5] M. Aguilar et al., Phys. Rep. **2002**, 366, 331.
- [6] H. Bethe, J. Ashkin, Passage of radiation through matter, in: Experimental Nuclear Physics (Hrsg.: E. Segrè), J. Wiley, New York 1953, S. 253.
- [7] V. L. Ginsburg, I. M. Frank, J. Exp. Theoret. Phys. (UdSSR) **1946**, 16, 15.
- [8] I. V. Moskalenko, A. W. Strong, Astrophys. J. **1998**, 493, 694.
- [9] M. A. Malkov, I. V. Moskalenko, Astrophys. J. **2021**, 911, 151.
- [10] P. Mertsch, A. Vittino, S. Sarkar, **2020**, arXiv:2012.12853v1 [astro-ph.HE]. GALPROP, <https://galprop.stanford.edu/>
- [11] M. S. Turner, F. Wilczek, Phys. Rev. D **1990**, 42, 1001.
- [12] M. W. Winkler, T. Linden, Phys. Rev. Lett. **2021**, 126, 101101.
- [13] S. Schael et al., Nucl. Instrum. Meth. A **2019**, 944, 162561.
- [14] https://www.spacex.com/media/starship_users_guide_v1.pdf

Zusatzmaterial

Den Zusatztext „Das Alpha Magnetic Spectrometer AMS-02“ finden Sie auf <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/piuz.202101620/supinfo> unter „Supporting Information“ oder scannen Sie den nebenstehenden QR-Code.

Zusatzmaterial



Der Autor



Stefan Schael studierte an den Universitäten Bonn und Heidelberg Physik und Astronomie. Er promovierte am KIT und habilitierte sich 1999 an der LMU München. Seit dem Jahre 2000 hat er einen Lehrstuhl für Experimentalphysik an der RWTH Aachen inne. Er ist stellvertretender Sprecher der AMS-02-Kollaboration. Sein zweiter Forschungsschwerpunkt ist die experimentelle Teilchenphysik am LHC. Bis 2015 war er am CMS-Experiment beteiligt, seitdem arbeitet er am LHCb-Experiment.

Anschrift

Prof. Dr. Stefan Schael, RWTH Aachen, I. Physikalisches Institut, Sommerfeldstr. 14, 52074 Aachen. schael@physik.rwth-aachen.de