

# Aktuelle Entwicklungen in der Antimaterie-Forschung

## Das Antimaterie-Rätsel

ALBAN KELLERBAUER

*2011 war für die Antimateriephysik ereignisreich. Vom Flug des Alpha-Magnet-Spektrometers zur Raumstation ISS bis zum Einfang von kalten Antiwasserstoffatomen am CERN gab es viele Highlights. Sie bringen uns der Beantwortung der Frage näher, warum es im Universum ein starkes Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie gibt.*

Wenn man einen Außerirdischen trifft und dieser einem die *linke* Hand zum Gruß reicht, so scherzte einst Richard Feynman [1], solle man sich hüten: Er könnte aus Antimaterie bestehen! In diesem Fall wäre tatsächlich Vorsicht geboten, denn beim Kontakt von Antimaterie mit gewöhnlicher Materie vernichten sich beide gegenseitig und setzen dabei eine enorme Energiemenge frei. Dieser Vorgang wird Annihilation genannt. Entsprechend der von Albert Einstein postulierten Äquivalenz von Energie und Materie entsteht bei der Annihilation mehr Energie als bei jedem anderen chemischen oder physikalischen Vorgang. Nach der bekannten Formel

$$E = mc^2 \quad (1)$$

erzeugt zum Beispiel die Vernichtung eines halben Gramms Antimaterie mehr Energie als die Explosion der Atombombe von Hiroshima. Doch wie groß ist überhaupt die Wahrscheinlichkeit, dass es ferne Sonnen und Planeten aus Antimaterie gibt; dass wir einst einem Außerirdischen gegenüberstehen werden, der uns die linke Hand reicht?

Seit bald 15 Jahren können wir auf diese wichtige Frage eine vorläufige Antwort geben. Im Juni 1998 wurde das AMS-01-Experiment (Alpha Magnetic Spectrometer) an Bord der Raumfähre Discovery in eine Erdumlaufbahn gebracht und war hundert Stunden in Betrieb. Das Ziel der AMS-Kollaboration unter der Leitung von Samuel Ting war es, mit Hilfe eines Teilchendetektors Ausschau nach Antimaterie-Atomkernen zu halten.

Der leichteste Vertreter dieser Spezies ist das Antiproton, der Kern des Antiwasserstoffatoms. Es entsteht, wenn hochenergetische kosmische Strahlung durch interstellare Materie tritt. Man spricht dann von sekundären Antimaterieteilchen. Ganz anders sieht es bei schwereren Kernen wie Helium aus. Sie entstehen heute ausschließlich durch Kernfusion in einer Sonne – im Fall des Antiheliums in ei-

ner Antisonne. Solche Antiteilchen werden als primäre Antimaterie bezeichnet. Das AMS-01-Experiment hat insgesamt knapp drei Millionen Heliumkerne nachgewiesen, jedoch keinen einzigen Antiheliumkern [2].

Nach mehr als zehnjähriger Entwicklungszeit hat im Mai 2011 auch das AMS-02-Experiment seine Arbeit in der Erdumlaufbahn aufgenommen (Abbildung 1). Es handelt sich um eine Weiterentwicklung von AMS-01, die für einen dauerhaften Betrieb an Bord der internationalen Raumstation ISS ausgelegt ist. Der Detektor hat eine Gesamtmasse von mehr als 6,7 Tonnen und besteht aus insgesamt sechs Modulen. Diese sind in der Lage, Geschwindigkeit, Ladung, Energie und räumliche Orientierung von geladenen und neutralen Teilchen aufzuzeichnen, die sie durchqueren. Ein Sternensensor kontrolliert ständig die Position der Apparatur relativ zu den Fixsternen.

Das Hauptziel von AMS-02 ist es, insgesamt etwa tausend Mal mehr Atomkerne nachzuweisen als AMS-01. Mit dieser gesteigerten Empfindlichkeit kann es die Suche nach Antimateriesonnen bis an die sichtbare Grenze des sich ausbreitenden Universums ausdehnen. Ferner ist der Detektor auch in der Lage, die hypothetischen Neutralino- und Stranglet-Teilchen nachzuweisen. Beide werden als heiße Kandidaten für die Dunkle Materie gehandelt.

### Wo ist die Antimaterie?

Das Messergebnis von AMS-01 deutet darauf hin, dass es im heutigen Universum keinerlei primäre Antimaterie mehr gibt. Dabei müssten beim Urknall vor etwa 13,7 Milliarden Jahren ganz genau gleiche Mengen von Materie und Antimaterie entstanden sein. Innerhalb der darauffolgenden Sekundenbruchteile annihilierte aber der Großteil der entstandenen Antimaterie mit Materie und wandelte sich in Photonen um. Dies ist der Ursprung der kosmischen Hintergrundstrahlung.

Überraschenderweise blieb nach diesem gigantischen Feuerwerk jedoch ein winzig kleiner Teil gewöhnlicher Materie übrig. Aus diesem Bruchteil besteht die Erde, unser Sonnensystem – ja, das gesamte sichtbare Universum. Stellvertretend für die gesamte Materie wird meistens das Ungleichgewicht von baryonischer Materie betrachtet, das heißt von Teilchen, die aus drei Quarks bestehen. Man spricht daher von Baryonenasymmetrie. Dieses Ungleichgewicht von Antimaterie und gewöhnlicher Materie ist eines der großen Rätsel der modernen Physik.

Rückblende: Im Jahr 1930 stellte der britische Physiker Paul Dirac fest, dass die von ihm aufgestellte und später auch nach ihm benannte quantenmechanische Wellengleichung für das Elektron auch Lösungen mit negativer Energie hat. Anstatt diese Lösungen einfach als „unphysikalisch“ außer acht zu lassen, postulierte er, dass es auch Teilchen mit negativer Energie geben müsste, deren Eigenschaften denen von normalen Teilchen bis aufs Haar gleichen [3]. Lediglich die Vorzeichen einiger fundamentaler Eigenschaften, wie die elektrische Ladung, wären genau entgegengesetzt.

Wenige Jahre später wurde tatsächlich das Antiteilchen des Elektrons, das Positron, in kosmischer Strahlung nachgewiesen. Heute wissen wir, dass jedes der bekannten Elementarteilchen einen Antimateriepartner hat. Dieser Gleichklang zwischen Materie und Antimaterie hängt eng mit den diskreten Symmetrien C für die Ladungsumkehr, P für die Raumspiegelung oder Parität und T für die Zeitumkehr zusammen. Sie spielen in der Quantenmechanik eine große Rolle.

Das von Wolfgang Pauli 1955 aufgestellte CPT-Theorem besagt, dass die Gesetze der Physik unverändert bleiben, wenn man auf ein System nacheinander die Operatoren C, P und T anwendet [4]. Der Beweis dieses Lehrsatzes beruht auf einigen grundlegenden Annahmen, die heute Teil des Standardmodells sind. Pauli setzte außerdem voraus, dass die Gesetze durch eine Quantenfeldtheorie beschrieben werden. Diese Annahme trifft derzeit aber nicht auf die Schwerkraft zu, wie wir später sehen werden.

Eine wichtige Schlussfolgerung des CPT-Theorems ist es, dass man durch die Anwendung der kombinierten Operation CPT aus einem Materieteilchen seinen Antimateriepartner erhält und umgekehrt. Diese Operationen sind am Beispiel des Elektrons in Abbildung 2 verdeutlicht, das durch CPT in ein Positron umgewandelt wird. Zunächst waren Physiker davon ausgegangen, dass auch jede einzelne der Transformationen C, P und T die physikalischen Gesetze unverändert lässt. Diese Vermutung stellte sich jedoch bald als falsch heraus.

### Verletzte Symmetrien

Im Jahr 1956 bemerkten die chinesisch-amerikanischen Theoretiker Tsung-Dao Lee und Chen-Ning Yang bei einer sorgfältigen Sichtung der wissenschaftlichen Literatur, dass die Erhaltung der Paritätssymmetrie durch die schwache Wechselwirkung noch nie experimentell überprüft worden war – im Gegensatz zur elektromagnetischen Wechselwirkung und zur starken Kernkraft. Der ebenfalls chinesischstämmigen Experimentalphysikerin Chien-Shiung Wu gelang es schon wenige Monate später, einen entsprechenden Versuch durchzuführen.

Kernstück des Experiments war eine Probe des radioaktiven Metalls  $^{60}\text{Co}$ , das unter Aussendung eines Elektrons und eines Antineutrinos mit einer Halbwertszeit von 5,27 Jahren in das stabile Nuklid  $^{60}\text{Ni}$  zerfällt. Wu kühlte das Material zunächst auf 10 mK ab und richtete den Kernspin



**Abb. 1** Das Alpha Magnetic Spectrometer AMS-02 an der Internationalen Raumstation ISS, etwas oberhalb der Bildmitte (Foto: NASA).

der Atome mit Hilfe eines äußeren Magnetfelds in eine Vorzugsrichtung aus (Polarisation). Anschließend beobachtete sie mit Hilfe von Szintillatoren die Impulsrichtung der beim Betazerfall frei werdenden Elektronen.

Betrachten wir zunächst die Aussagekraft des Experiments: Der Kernspin ist, wie jeder Drehimpuls, ein Kreuzprodukt aus einem Orts- und einem Impulsvektor. Wird der Operator P auf den Atomkern angewendet, so ändern beide Basisvektoren ihre Vorzeichen, der Kernspin bleibt in Betrag und Richtung aber unverändert. Anders verhält es sich mit dem Impuls des ausgesendeten Elektrons. Dieser kehrt nach einer Raumspiegelung seine Richtung um.

Wenn die Paritätssymmetrie beim Betazerfall erhalten wäre, müssten im Schnitt genauso viele Elektronen in Richtung des Kernspins austreten wie in die Gegenrichtung, da sich der Prozess sonst von seinem Spiegelbild unterscheiden würde. Tatsächlich beobachtete Wu aber eine weitgehende Richtungskorrelation zwischen der Polarisation der Kobaltkerne und den Impulsen der emittierten Elektronen. Sie bewies so, dass die schwache Wechselwirkung die Paritäts-Symmetrie verletzt [5]. Noch im selben Jahr 1957 erhielten Yang und Lee, nicht jedoch Wu, den Nobelpreis für Physik.

In der Folge vermutete man, dass wenigstens die kombinierte CP-Symmetrie von allen Wechselwirkungen erhalten wird. Unter dem Eindruck der überraschenden Entdeckung der P-Verletzung wurde auch die CP-Symmetrie von schwachen Zerfallsprozessen recht bald intensiv untersucht. Die amerikanischen Physiker James Cronin und Val Fitch studierten 1964 den Zerfall der neutralen Kaonen  $K^0 = d\bar{s}$  und ihrer Antiteilchen  $\bar{K}^0 = s\bar{d}$ , die aus Paaren von Down- ( $d$ ) und Strange ( $s$ )-Quarks beziehungsweise deren Antiquarks bestehen.



**Samuel Ting (geb. 1936), Nobelpreis für Physik 1976**  
(Foto: Wikipedia).

Diese kurzlebigen Teilchen, die künstlich nur im Beschleuniger hergestellt werden können, zerfallen zumeist entweder in zwei oder drei Pionen. Sie können nur durch die schwache Wechselwirkung zerfallen, da sie die einzige ist, die den Quarktyp (Flavor) eines Teilchens ändern kann. Durch die Kombination mehrerer solcher Prozesse können sich  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  sogar ineinander umwandeln. So kann es zu einer Vermischung der Quantenzustände und zur Ausbildung von CP-Eigenzuständen  $K_1$  und  $K_2$  kommen (siehe „Mischung der neutralen Kaonen“ gegenüberliegende Seite).

Wenn wir zunächst voraussetzen, dass der Zerfall der neutralen Kaonen die CP-Symmetrie erhält, dürfte der Zustand  $K_1$  nur zu zwei Pionen,  $K_2$  nur zu drei Pionen zerfallen. Wegen der geringeren Zerfallsenergie läuft der zweite Prozess viel langsamer ab als der erste. In der Tat werden beim Zerfall von neutralen Kaonen zwei Populationen mit Halbwertszeiten von  $9,0 \cdot 10^{-11}$  s und  $5,1 \cdot 10^{-8}$  s beobachtet.

Der Versuch von Cronin und Fitch bestand darin, die Übereinstimmung der langlebigen Kaonen mit dem Zustand  $K_1$  zu überprüfen. Dafür ließen sie einen Strahl neutraler Kaonen zunächst eine 15 m lange Flugstrecke durchlaufen, um die langlebige Komponente auszuwählen. Anschließend suchten sie unter den Zerfallsprodukten nach Ereignissen mit nur zwei Pionen. Tatsächlich beobachten sie, dass etwa 0,2 % der langlebigen Kaonen auf diese Weise zerfielen [6]. Somit war belegt, dass die schwache Wechselwirkung auch die CP-Symmetrie verletzt. Im heutigen Standardmodell ist die CP-Verletzung durch die sogenannte Quark-Mischungsmatrix verursacht.

Wie bei den Kaonen beobachtet man eine Mischung der Quark-Eigenzustände auch bei den  $B$ -Mesonen sowie bei den  $D$ -Mesonen. 2001 fanden die Experimente BaBar (SLAC National Accelerator Laboratory, USA) und Belle (KEK, Japan) fast zeitgleich eine CP-Verletzung beim Zerfall des neutralen  $B$ -Mesons. Die Messungen waren im Einklang mit den Ergebnissen vom  $K$ -Zerfall und mit dem Formalismus der Quark-Mischungsmatrix.

Ganz anders sieht es mit neuesten Ergebnissen vom Large Hadron Collider (LHC) am CERN aus. Wie Mitarbeiter des LHCb-Experiments unter der Leitung von Pierluigi Campana bei einer Beschleunigerkonferenz im Herbst 2011 berichteten, verdichten sich die Hinweise auf eine starke CP-Verletzung beim Zerfall des  $D$ -Mesons  $D^0 = c\bar{u}$  ( $c$ : Charme-,  $u$ : Up-Quark). Die Forscher betrachteten Teilchenkollisionen, bei denen Paare von  $D$ - und Anti- $D$ -Mesonen entstanden waren. Mit Hilfe des mehr als 10 m hohen und 20 m

langen LHCb-Detektors identifizierten sie daraufhin die Zerfälle der kurzlebigen Teilchen in die CP-Eigenzustände  $\pi\pi$  und  $KK$  mit dem CP-Eigenwert +1.

Eine mögliche CP-Verletzung träte dadurch zutage, dass sich die Zerfallswahrscheinlichkeiten der Ausgangsteilchen  $D^0$  und  $\bar{D}^0$  in diese Zustände unterscheiden. In den vergangenen 15 Jahren haben vergleichbare Messungen an anderen Beschleunigern im Rahmen der Messungengenauigkeit keine Abweichung gezeigt. Die LHCb-Kollaboration maß nun die Wahrscheinlichkeiten für alle vier möglichen Zerfälle. Anstatt jedoch die Differenz der Zerfallsraten von  $D^0$ -Teilchen und  $\bar{D}^0$ -Teilchen zu Pionen und die entsprechende Größe für Kaonen getrennt zu betrachten, subtrahierten die Forscher die beiden Differenzen voneinander. Dadurch konnten sie systematische Fehler minimieren.

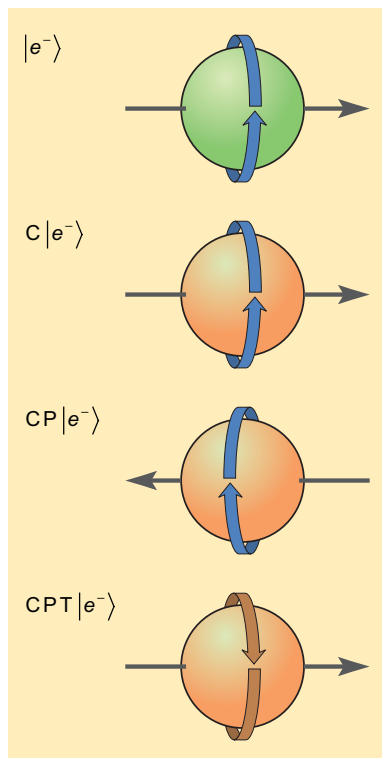
Dabei fanden sie eine Asymmetrie von 0,8 %, etwa einen Faktor zehn größer als die im Standardmodell mit Quark-Mischungsmatrix vorgesehene CP-Verletzung [7]. Die Ergebnisse basieren bislang auf etwa der Hälfte der Daten aus dem Jahr 2011 und haben eine statistische Signifikanz von  $3,5 \sigma$ . Falls sich diese Beobachtung bestätigen sollte, wäre sie ein klares Anzeichen für neue Physik außerhalb des Standardmodells.

Die beobachteten Verletzungen der diskreten Symmetrien sind relevant für unsere Ausgangsfrage. Mitte der 1960er-Jahre untersuchte der sowjetische Physiker und spätere Friedensnobelpreisträger Andrei Sacharow den Grund für die beobachtete Dominanz von gewöhnlicher Materie. Er stellte fest, dass die Baryonenasymmetrie unmittelbar nach dem Urknall während einer Periode thermischen Ungleichgewichts zustande gekommen sein könnte. Voraussetzung dafür

wäre neben der offensichtlichen Nichterhaltung der Baryonenzahl sowohl die Verletzung der C- als auch der CP-Symmetrie [8].

Die beim Kaonenzerfall experimentell beobachtete CP-Verletzung war jedoch viel zu schwach, um für die Baryonenasymmetrie verantwortlich zu sein. Erst dreißig Jahre später wurde erkannt, dass das Materie-Antimaterie-Ungleichgewicht auch durch eine Verletzung der CPT-Symmetrie in Verbindung mit der Nichterhaltung der Baryonenzahl entstanden sein könnte [9]. Welcher der beiden Prozesse der entscheidende ist, ist allerdings noch nicht geklärt.

Auch eine Verletzung der CPT-Symmetrie ist innerhalb des heutigen Standardmodells der Teilchenphysik nicht denkbar. Neuere theoretische Ansätze, die eine Vereinheitlichung der fundamentalen Wechselwirkungen zu einer



**Abb.2 Die kombinierte Anwendung der Operatoren C (Ladungsumkehr), P (Parität) und T (Zeitumkehr) überführt ein Elektron in ein Positron. Die horizontalen Pfeile bezeichnen den Impuls des Teilchens, die kreisförmigen Pfeile seinen Spin.**

„Weltformel“ anstreben, stellen jedoch einige der Grundvoraussetzungen in Frage, auf denen das CPT-Theorem fußt. Als Beispiel sei die Superstringtheorie genannt: Bei ihr gilt auf den kleinsten Längenskalen das Prinzip der Lokalität, also des Verbots der Fernwirkung, nicht mehr – und das widerspricht dem von Pauli aufgestellten CPT-Theorem, das grundsätzlich nur für lokale und kausale Theorien gilt.

Man kann die CPT-Symmetrie überprüfen, indem man die Eigenschaften von Antiteilchen mit denen ihrer Partner aus gewöhnlicher Materie vergleicht und nach Abweichungen sucht. In den letzten Jahrzehnten ist eine Vielzahl solcher Messungen durchgeführt worden. So wurden beispielsweise die *g*-Faktoren, also die magnetischen Momente, von Elektron und Positron mit einer relativen Genauigkeit von  $2 \cdot 10^{-12}$  und die Massen von Proton und Antiproton auf  $9 \cdot 10^{-11}$  genau verglichen. Bisher ist bei keinem dieser Experimente eine CPT-Verletzung beobachtet worden.

**Antiwasserstoff in der Falle**

Die Übergangsfrequenz zwischen dem Grundzustand (1S) und dem metastabilen angeregten Zustand (2S) des Wasserstoffatoms ist mit einer relativen Ungenauigkeit von  $4 \cdot 10^{-15}$  die derzeit am präzisesten bekannte physikalische Größe [10]. Die Messungen der Gruppe um Theodor Hänsch beruhen auf der sogenannten dopplerfreien Spektroskopie, bei der zwei aus entgegengesetzten Richtungen auf das Atom treffende Photonen gemeinsam zur Anregung beitragen. So wird die Verschiebung der Übergangsfrequenz durch die Wärmebewegung der Atome, also der Dopplereffekt, vermindert. Die gemessene Frequenz wird durch einen Frequenzkamm auf eine Caesium-Atomuhr zurückgeführt (Physik-Nobelpreis 2005, siehe Interview mit Hänsch in Physik in unserer Zeit 2006, 37(1), 10 und 37(2), 62)).

Nun läge es nahe, die gleiche Messung auch an Antiwasserstoff durchzuführen, um die CPT-Symmetrie mit der höchstmöglichen Genauigkeit zu überprüfen. Aus diesem Grund wird seit Anfang der 1990er-Jahre fieberhaft an der Herstellung von Antiwasserstoff aus seinen Bestandteilen Antiproton und Positron gearbeitet. Allerdings gibt es im Universum keine primäre Antimaterie. Wie kann man diese dann erzeugen, um sie im Labor untersuchen zu können?

Der Schlüssel liegt wieder in der Energie-Masse-Äquivalenz. Aus großen Mengen Energie können Paare von Materie- und Antimaterieteilchen erzeugt werden. Zu diesem Zweck werden am CERN hochenergetische Protonen auf eine metallische Zielscheibe geschossen, wo daraufhin paarweise Protonen und Antiprotonen entstehen. Die Antiprotonen werden durch einen magnetischen Filter ausgewählt und dann in den Antiproton Decelerator (Antiprotonen-Verzögerer, AD), einen Speicherring mit einem Umfang von 190 m, eingespeist.

In diesem laufen sie zunächst fast mit Lichtgeschwindigkeit um, bevor sie durch einen umgekehrten Linearbeschleuniger innerhalb von etwa 100 s bis auf eine Energie

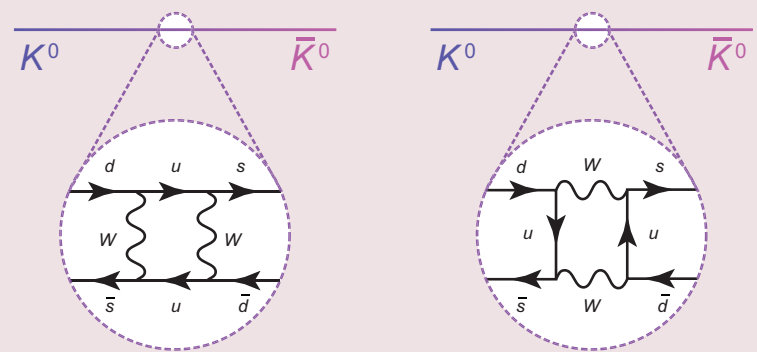
von 5 MeV abgebremst werden. Gleichzeitig wird der Strahl radial gekühlt und kollimiert. Anschließend werden jeweils etwa  $3 \cdot 10^7$  Antiprotonen an eines der am AD angesiedelten Antimaterie-Experimente verteilt.

2002 gelang es Wissenschaftlern am Athena-Experiment unter der Leitung von Rolf Landua erstmals, kalten Antiwasserstoff in einer Ionenfalle herzustellen [11]. Dazu fingen sie die vom AD gelieferten Antiprotonen in einer Penning-Falle ein und bremsten sie weiter bis auf wenige Kelvin ab. Dann brachten sie sie mit ebenso kalten Positronen aus einer radioaktiven Quelle in Kontakt. Dabei entstanden spontan Antiwasserstoffatome, die jedoch, da elektrisch neutral, nicht länger eingeschlossen blieben.



**Paul Dirac (1902–1984), Nobelpreis für Physik 1933**  
(Foto: nobelprize.org).

**MISCHUNG DER NEUTRALEN KAONEN**



**Zwei Wege, über die ein  $K^0$ -Meson sich in sein Antiteilchen verwandeln kann.**

Wird der quantenmechanische Zustand eines Teilchens durch die Anwendung eines der diskreten Operatoren C, P oder T (oder einer Kombination davon) auf sich selbst abgebildet, bezeichnet man ihn als Eigenzustand der jeweiligen Transformation. Einen dabei auftretenden konstanten Vorfaktor nennt man den Eigenwert des Operators.

So ist beispielsweise das neutrale Pion  $\pi = u\bar{u}$  ein Eigenzustand der Ladungsumkehr C mit dem Eigenwert +1, da der Operator den Ladungszustand des Teilchens auf sich selber abbildet. Unter der Voraussetzung, dass die einzelnen Teilchen *K* und  $\pi$  den Paritätseigenwert -1 tragen, kann man nun leicht überprüfen, dass  $K^0$  und  $\bar{K}^0$  nicht Eigenwerte des kombinierten CP-Operators sind.

Die schwache Wechselwirkung ist in der Lage, einen Quarktyp (Flavor) in einen anderen umzuwandeln. Über den Austausch von zwei *W*-Bosonen ist es sogar möglich, dass sich ein  $K^0$ -Meson in sein Antiteilchen umwandelt und umgekehrt (Abbildungen). Durch

diesen Mechanismus können sich die folgenden CP-Eigenzustände  $K_1$  und  $K_2$  herausbilden:

$$|K_1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|d\bar{s}\rangle + |s\bar{d}\rangle)$$

$$|K_2\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|d\bar{s}\rangle - |s\bar{d}\rangle).$$

Für sie gilt

$$CP|K_1\rangle = +|K_1\rangle$$

$$CP|K_2\rangle = -|K_2\rangle.$$

Die Bestimmung der CP-Eigenwerte der Endzustände des Kaonenzerfalls ist schwieriger. Der Grund: Es handelt sich um Mehrteilchen-Zustände, deren Drehmomente relativ zueinander sich auf die Paritäts-Eigenwerte auswirken. Im Endergebnis gilt für die Zerfallsprodukte (unabhängig von ihrer elektrischen Ladung):

$$CP|\pi\pi\rangle = +|\pi\pi\rangle$$

$$CP|\pi\pi\pi\rangle = -|\pi\pi\pi\rangle.$$



**Chien-Shiung Wu (1912–1997).**

Beim Auftreffen dieser Teilchen auf die Fallenelektroden entstand ein charakteristisches Annihilationssignal, mit dessen Hilfe die Antiwasserstofferzeugung elegant nachgewiesen werden konnte (siehe Physik in unserer Zeit 2007, 38(4), 168). Gleichzeitig waren jedoch die erzeugten Antiatome für weitere Messungen verloren. Daher entwickelten die am AD angesiedelten Experimente Atrap und Alpha ihre Apparaturen weiter, so dass sie den Einfang und die Beobachtung des neutralen Antiwasserstoffs erlaubten.

Alpha, eines der beiden Nachfolgeexperimente von Athena, konnte letztes Jahr melden, dass erstmals der Einfang von Antiwasserstoff gelungen war. Wie wurde dies erreicht? Nach wie vor wird für den Einschluss der Ausgangsprodukte Antiproton und Positron eine Penning-Falle benötigt. Sie besteht aus einem homogenen Magnetfeld entlang der Fallenchse und einem elektrischen Quadrupol-

feld, das an die zylindrischen Fallenelektroden angelegt wird. Das neutrale Antiwasserstoffatom wird in einer magnetischen Falle eingeschlossen. Der Gradient eines inhomogenen Magnetfelds  $\mathbf{B}$  übt auf das magnetische Moment  $\boldsymbol{\mu}$  des Atoms eine Kraft  $\mathbf{F}$  der Form

$$\mathbf{F} = \pm \boldsymbol{\mu} \nabla B \quad (2)$$

aus. Im Grundzustand hat das magnetische Moment den Betrag des Bohr-Magnetonen

$$\mu = \mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}, \quad (3)$$

wobei  $e$  und  $m_e$  die Ladung und Masse des Elektrons bezeichnen,  $\hbar$  ist das Plancksche Wirkungsquantum. Das Vorzeichen der Krafrichtung – zum Magnetfeldminimum oder -maximum hin – hängt von der (zufälligen) Ausrichtung des Positronenspins relativ zum äußeren Magnetfeld ab. Im besten Fall wird also die Hälfte der Atome eingefangen.

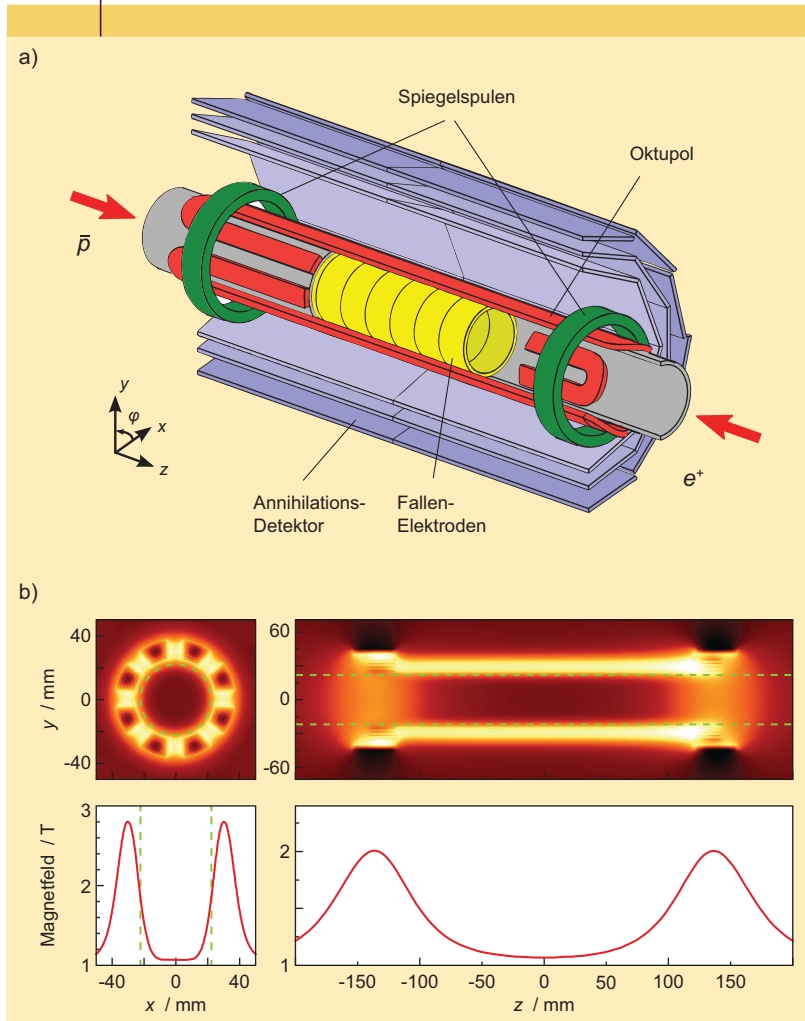
Die Schwierigkeit besteht darin, die beiden Fallentypen so zu kombinieren, dass sich ihre Felder nicht gegenseitig stören. Insbesondere der Radialanteil der magnetischen Falle ist problematisch, weil er die zylindrische Symmetrie der Penning-Falle bricht. Dadurch kann die Speicherzeit der Ionen beeinträchtigt werden. Das Problem wird dadurch vermindert, dass Alpha eine radiale Falle mit einer hohen Multipolordnung verwendet, weil so die Feldstärke zur Fallenchse hin schnell abnimmt.

Die bei Alpha eingesetzte Fallenanordnung ist in Abbildung 3a gezeigt. Die radiale Falle besteht aus sogenannten Racetrack-Spulen (im Bild rot), die ein Oktupolfeld mit einer Feldstärke von etwa 1,7 T erzeugen. Für den Einschluss in axialer Richtung sind zwei kreisförmige Spiegelspulen zuständig (grün). Die Feldstärke des Solenoidmagneten (nicht gezeigt) beträgt 1 T. Daraus ergibt sich eine Tiefe der magnetischen Falle von knapp 1 T, was 0,6 K in Temperatureinheiten entspricht (Abbildung 3b).

Im Frühsommer 2011 gelang es Alpha, einzelne Antiwasserstoff-Atome viele hundert Sekunden lang in der magnetischen Falle zu speichern [12, 13]. Wie schon bei Athena werden die Antiprotonen und die Positronen in einem geschachtelten elektrischen Potential eingeschlossen (Abbildung 4). Ihre Temperatur beträgt einige 10 K. Durch eine schwache Hochfrequenzanregung der Antiprotonen werden die beiden Teilchenwolken zum Überlappen gebracht, so dass spontan Antiwasserstoff entsteht.

Ein kleiner Teil der Antiwasserstoffatome, deren Temperatur unterhalb 0,6 K liegt, bleibt in der magnetischen Falle eingeschlossen. Nach einer Wartezeit von bis zu 1000 s fährt man das Magnetfeld der Oktupolspulen innerhalb weniger Hundertstelsekunden herunter. Die Anti-Atome verlassen daraufhin die Falle und annihilieren an den Elektroden. Dieses Signal nimmt ein Siliciumstreifen-Detektor auf, der die gesamte Falle in drei Lagen umschließt (in Abbildung 3a hellblau). Damit ist die Speicherung von neutralem Antiwasserstoff nachgewiesen.

**ABB. 3 | KOMBINIERTER IONEN- UND ATOMFALLE**



**a) Anordnung der Magnetspulen und Elektroden der kombinierten Ionen- und Atomfalle von Alpha: Oktupolspulen (rot), Spiegelspulen (grün), Fallenelektroden (gelb). Der Solenoid für die Erzeugung des starken axialen Magnetfelds ist nicht abgebildet. b) Die Magnetfeldstärke in der radialen und axialen Projektion (oben) und auf der Achse als Funktion der radialen und axialen Koordinate (unten) (Bilder: a) CERN, b) Nature Publishing Group).**

Der Alpha-Gruppe gelang es in einem weiteren Experiment sogar, einen ersten Schritt hin zur Antiwasserstoffspektroskopie zu machen: Mit einem Mikrowellensignal änderten die Forscher die Ausrichtung des Positronenspins im Antiwasserstoff relativ zum äußeren Magnetfeld [14]. Dadurch kehrt sich die Krafrichtung der magnetischen Falle für diese Teilchen um, sie werden also aus der Falle herausbeschleunigt. Die beobachtete Korrelation des typischen Annihilationssignals mit der resonanten Mikrowellenanregung beweist, dass die Hyperfeinstruktur von Antiwasserstoff zumindest grob mit der von Wasserstoff übereinstimmt.

### Fällt der Anti-Apfel nach oben?

Einen anderen Ansatz verfolgt unsere Aegis-Gruppe um Michael Doser, die ebenfalls aus der Athena-Kollaboration hervorgegangen ist. Wie bereits erwähnt stellt die Schwerkraft einen Sonderfall unter den Wechselwirkungen dar. Sie wird als einzige nicht durch eine Quantenfeldtheorie beschrieben. In der Allgemeinen Relativitätstheorie ist die Schwerkraft ein geometrisches Phänomen. Testkörper bewegen sich entlang einer Geodäte, der kürzesten Verbindung zwischen zwei Punkten, in der vierdimensionalen Raumzeit. Diese ist durch Materie gekrümmt.

Aus diesem Ansatz folgt das schwache Äquivalenzprinzip, wonach alle Körper unabhängig von ihrer Zusammensetzung in einem Schwerfeld gleich schnell fallen. Für Körper aus gewöhnlicher Materie haben Messungen dieses Postulat mit hoher Genauigkeit bestätigt. In einer hypothetischen Quantengravitation sind hingegen sowohl negative Masseladungen als auch exotische Gravitonen denkbar, die beide zu einer Abweichung vom Äquivalenzprinzip für Antimaterie führen könnten.

Das Prinzip des Aegis-Experiments besteht darin, die Ablenkung eines horizontalen Antiwasserstoff-Strahls im Schwerfeld der Erde zu untersuchen [15]. Abbildung 5 zeigt eine Überblicksskizze der Apparatur. Zur Herstellung des Antiwasserstoffs macht sich Aegis eine Ladungsaustausch-Reaktion mit einem Umweg über das Positronium (Ps) zunutze:



Positronium ist der gebundene Zustand zwischen einem Elektron und einem Positron und hat eine sehr ähnliche Struktur wie das Wasserstoffatom. Man kann es mit hoher Effizienz durch Beschuss eines nanoporösen Materials mit Positronen erzeugen. Der Vorteil dieser Reaktion besteht darin, dass der entstehende Antiwasserstoff dieselbe Temperatur hat wie die vorgekühlten Antiprotonen, aus denen er gebildet wurde. Eine niedrige Temperatur ist entscheidend für die Messgenauigkeit des Experiments. Anschließend werden die Antiwasserstoff-Atome durch ein inhomogenes elektrisches Feld zu einem Strahl beschleunigt. Seine Geschwindigkeit  $v_{hor}$  in horizontaler Richtung liegt zwischen 400 und 700 m/s.

Die Wirkung der Schwerkraft wird durch die vertikale Ablenkung des Strahls über eine Flugstrecke von etwa 80 cm hinweg gemessen. Eine Erdbeschleunigung von  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  vorausgesetzt, ist mit einer Verschiebung von weniger als 0,01 mm zu rechnen. Da der Strahlfleck auf dem Detektor viel größer ist, ist eine so kleine Abweichung nicht direkt messbar. Daher verwendet Aegis eine Messanordnung, deren Prinzip sich an das von Ludwig Mach und Ludwig Zehnder entwickelte Materiewellen-Interferometer anlehnt.

Ein Mach-Zehnder-Interferometer besteht aus drei in gleichen Abständen  $L$  montierten Gittern mit feinen horizontalen Schlitzen. Beim Durchtreten des Strahls durch die ersten zwei Gitter entsteht ein Beugungsmuster am Ort des dritten. Das vertikal verschiebbare dritte Gitter fungiert als Analysator. Ein dahinter liegender Detektor zeichnet ein maximales Signal auf, wenn das Gitter in Überlapp mit dem Interferenzmuster gebracht wird. Schließlich wird die Fallhöhe des Musters als Funktion der Flugzeit aufgezeichnet.

Bei einer Temperatur von 100 mK ist der Öffnungswinkel des Antiwasserstoff-Strahls jedoch größer als der zu erwartende Beugungswinkel. Außerdem können Dekohärenzeffekte, zum Beispiel atomare Übergänge oder Annihilationen am Gitter, das Beugungsmuster zusätzlich verwaschen. Aus diesem Grund kommt bei Aegis ein Moiré-Deflektometer zum Einsatz. Es ist das klassische Gegenstück des eben beschriebenen, auf Teilchenwellen beruhenden Interferometers. Anstelle von Beugungsmaxima werfen die ersten beiden Gitter hier ein klassisches Schattenmuster auf das dritte. Die vertikale Fallhöhe des Musters ist jedoch in beiden Fällen gleich und beträgt

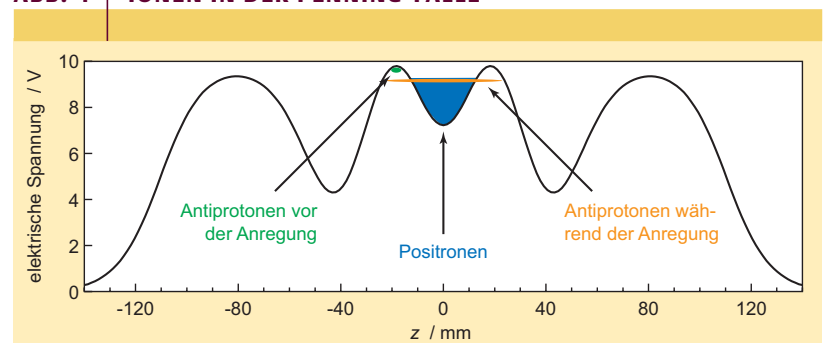
$$\delta x = -gT^2, \quad (5)$$

wobei  $T = L/v_{hor}$  die Flugzeit zwischen zwei Gittern bezeichnet. Die Schwerebeschleunigung  $g$  ergibt sich aus einer Anpassung der Gleichung (5) an eine Vielzahl von Messwerten mit unterschiedlichen Strahlgeschwindigkeiten  $v_{hor}$ . Simulationen haben ergeben, dass für eine Messung der Erdbeschleunigung auf 1 % relative Genauigkeit etwa  $10^5$  An-



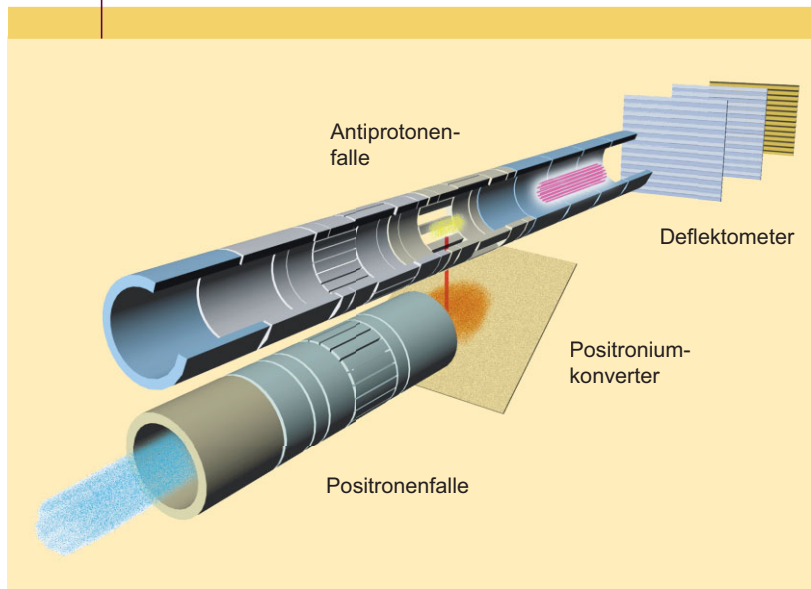
**Andrei Sacharov (1921–1989), Friedensnobelpreis 1975** (Foto: nobelprize.org).

**ABB. 4 IONEN IN DER PENNING-FALLE**



**Geschachteltes elektrisches Potential an den Fallenelektroden zum gleichzeitigen Einschluss positiv geladener Positronen und negativ geladener Antiprotonen in der Penning-Falle (Bild: CERN).**

ABB. 5 | PRINZIP DES AEGIS-EXPERIMENTS



**Antiprotonen und Positronen werden in zwei parallelen Penning-Fallen innerhalb des gleichen Magneten gespeichert. In einem nanoporösen Material werden Positronen in Positronium umgewandelt. Die Positronium-Atome treten durch die vorgekühlten Antiprotonen (gelbe Wolke), und es entsteht kalter Antiwasserstoff (rosa Wolke). Durch ein inhomogenes elektrisches Feld werden die Antiwasserstoff-Atome in Richtung auf das Deflektometer beschleunigt, wo die Gravitationsmessung stattfindet (Bild: INFN/Internosei).**

tiwasserstoff-Atome bei einer Temperatur von 100 mK benötigt werden.

Nach mehr als zehn Jahren Forschungsarbeit haben die AD-Experimente bedeutende Meilensteine auf dem Weg zu Präzisionsmessungen mit Antimaterie erreicht. Mit dem Einfang von neutralem Antiwasserstoff sind nun alle Voraussetzungen für Laserspektroskopie an Antimaterie-Atomen erfüllt. Die beiden Kollaborationen Alpha und Atrap bauen derzeit ihre Apparaturen so um, dass ein Laserstrahl die gefangenen Teilchen erreichen kann.

So rückt der erste Test der CPT-Symmetrie in einem atomaren Antimateriesystem in greifbare Nähe. Er wird uns der Beantwortung der Frage näher bringen, ob die bereits beobachtete CP-Verletzung oder aber eine bislang hypothetische CPT-Verletzung für die Baryonen-Asymmetrie verantwortlich ist.

Derweil nähert sich Aegis mit großen Schritten einer Überprüfung des schwachen Äquivalenzprinzips mit Antimaterie. Allerdings befinden sich einige Teile des Aegis-Experiments, insbesondere das Moiré-Deflektometer, noch in der Entwicklung. Deshalb ist mit ersten Ergebnissen nicht vor 2014 zu rechnen.

#### Zum Thema



#### Geheimnisvoller Kosmos

T. Bührke,  
R. Wengenmayr  
(Hrsg.), 2. Aufl.,  
Wiley-VCH,  
Weinheim 2011,  
250 S., 186 Abb.  
(Farbe), geb.  
29,90 Euro. ISBN:  
3-527-41071-6.

#### Zusammenfassung

Die Abwesenheit von Antimaterie im Universum legt eine Verletzung der diskreten Symmetrien nahe, die die Beziehung zwischen Materie und Antimaterie beschreiben. Knapp zehn Jahre nach der ersten Herstellung von kalter Antimaterie am CERN gelang vor kurzem erstmals der Einfang von Antiwasserstoff. Mit seiner Hilfe möchten mehrere Experimente am Antiproton Decelerator das CPT-Theorem überprüfen. Auch die Wirkung der Schwerkraft auf Antiteilchen soll in den nächsten Jahren erstmals untersucht werden. Derweil gibt es Hinweise vom Large Hadron Collider auf eine Verletzung der CP-Symmetrie, die dem Standardmodell der Teilchenphysik widerspricht. Auch sie könnte den Materie-Überschuss im Universum erklären.

#### Stichworte

Antimaterie, diskrete Symmetrien, Antiwasserstoff, Äquivalenzprinzip, Anti-Gravitation, CP-Verletzung, CPT-Verletzung, Antiproton Decelerator, Large Hadron Collider.

#### Literatur

- [1] R. Feynman, Symmetry in Physical Laws, Vortrag an der Cornell University, Ithaca, New York, USA, 16. November 1964, [youtu.be/zQ6o1cDxV7o](https://youtu.be/zQ6o1cDxV7o).
- [2] M. Aguilar et al., Phys. Rep. **2002**, 366, 331.
- [3] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. A **1931**, 133, 60.
- [4] W. Pauli (Hrsg.), Niels Bohr and the development of physics, New York, McGraw-Hill 1955.
- [5] C. S. Wu et al., Phys. Rev. **1957**, 105, 1413.
- [6] J. H. Christenson et al., Phys. Rev. Lett. **1964**, 13, 138.
- [7] R. Aaij et al., Phys. Rev. Lett. **2012**, 108, 111602.
- [8] A. D. Sakharov, Sov. Phys. JETP **1967**, 5, 24.
- [9] O. Bertolami et al., Phys. Lett. B **1997**, 395, 178.
- [10] C. G. Parthey et al., Phys. Rev. Lett. **2011**, 107, 203001.
- [11] M. Amoretti et al., Nature **2002**, 419, 456.
- [12] G. B. Andresen et al., Nature **2010**, 468, 673.
- [13] G. B. Andresen et al., Nature Physics **2011**, 7, 558.
- [14] C. Amole et al., Nature **2012**, 483, 439.
- [15] A. Kellerbauer et al., Nucl. Instrum. Methods B **2008**, 266, 351.

#### Der Autor



Alban Kellerbauer, Promotion in Physik 2002 in Heidelberg. Postdoc am CERN an Isolde und am Antimaterie-Experiment Athena. Von 2006 bis 2008 Leiter einer Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe am MPI für Kernphysik (MPIK) in Heidelberg. 2007 Gründungsmitglied der Aegis-Kollaboration. Habilitation 2009 in Heidelberg. Seit 2011 Forschungsgruppenleiter am MPIK und Stipendiat eines ERC Starting Grants.

#### Anschrift

Priv.-Doz. Dr. Alban Kellerbauer, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, D-69117 Heidelberg.  
[a.kellerbauer@mpi-hd.mpg.de](mailto:a.kellerbauer@mpi-hd.mpg.de)