

Antimaterie im Labor

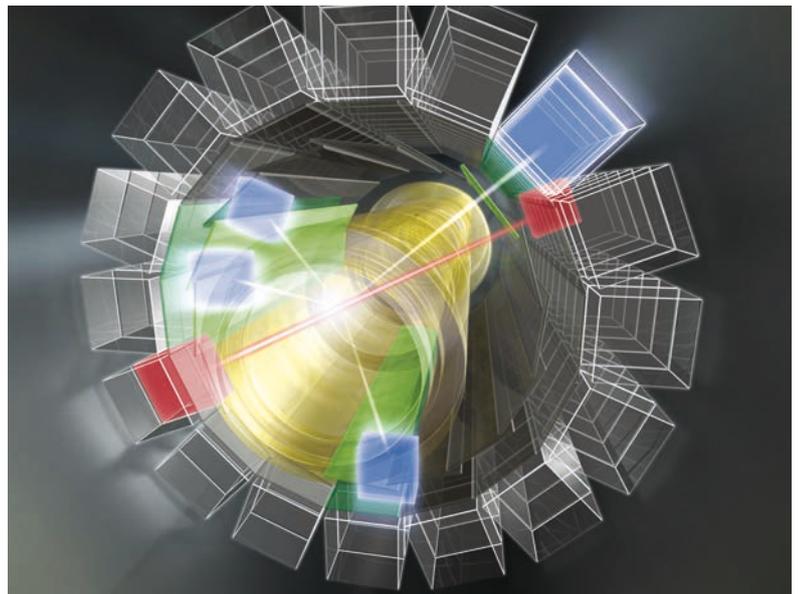
Am Antiproton Decelerator am CERN stehen erste Hochpräzisionsmessungen mit atomarer Antimaterie bevor.

Alban Kellerbauer

Warum ist das Universum erfüllt von gewöhnlicher Materie, obwohl beim Urknall gleiche Mengen an Materie und Antimaterie entstanden sind? Dies ist eine der großen offenen Fragen der Physik. Ihre Antwort hängt eng mit der Frage zusammen, ob ein Elementarteilchen und sein Antiteilchen abgesehen von Ladungsvorzeichen exakt gleiche Eigenschaften haben. Mehrere Experimente haben sich daher die Aufgabe gestellt, die Rydberg-Konstante von Wasserstoff und Antiwasserstoff zu vergleichen oder zu untersuchen, ob beide Teilchensorten in einem Gravitationsfeld in gleicher Weise abgelenkt werden.

Als Paul Dirac die heute nach ihm benannte quantenmechanische Wellengleichung zur Beschreibung der Fermionen aufstellte, fiel ihm bald auf, dass ihre Lösungen sowohl positive als auch negative Energieeigenwerte annehmen können. Auf der Grundlage dieser mathematischen Möglichkeit wagte er 1931 die Prognose, es müsse ein Teilchen mit derselben Masse, aber der umgekehrten elektrischen Ladung des Elektrons geben [1]. Schon im Folgejahr entdeckte Carl Anderson in Nebelkammeraufnahmen von kosmischen Strahlen das Positron, dessen Eigenschaften genau dieser Vorhersage entsprachen [2]. Heute wissen wir, dass jedes Elementarteilchen einen Antimaterie-Partner besitzt und dass sich die Eigenschaften dieser Paare – soweit sie präzise untersucht sind – mit großer Genauigkeit gleichen.

Die vielleicht frappierendste Eigenschaft von Antimaterie ist die Möglichkeit, sie nach Belieben aus dem „Nichts“ zu erschaffen, solange man entsprechend der Gleichung $E = mc^2$ genügend Energie zur Verfügung stellt. Da additive Quantenzahlen wie die Baryonen- und die Leptonenzahl ungefähr erhalten sind, müssen immer Paare von Materie- und Antimaterieteilchen entstehen (Paarbildung). Beim umgekehrten Prozess, der Annihilation, vernichten sich die Partner wieder zu Energie. Je nach Masse der Ausgangsteilchen entstehen dabei entweder Photonen oder zunächst leichtere massebehaftete Teilchen. Nachdem im Urknall gleiche Mengen Materie und Antimaterie entstanden waren, annihilierter der überwiegende Teil schon innerhalb der ersten Sekunde miteinander zu Photonen. Doch dieser Vorgang lief aus bisher unbekanntem Gründen nicht ganz symmetrisch ab: Am Ende blieb etwa ein Milliardstel gewöhnliche Materie übrig.



Der ATHENA-Detektor hat den Zerfall von Antiwasserstoff nachgewiesen. Bei der Annihilation des Antiprotons entstehen Pionen, die der Siliziumstreifen-Detektor (grün) registriert und auf einen gemeinsamen Vertex zurückführt.

Die Positronen-Annihilation erzeugt zwei Photonen, die sich in entgegengesetzte Richtungen ausbreiten und im CsI-Szintillator gemessen werden (rot). Die Pionen hinterlassen ebenfalls Signale in den CsI-Kristallen (blau).

Dieses Ungleichgewicht erscheint auf den ersten Blick vernachlässigbar, und doch verdanken wir ihm unsere Existenz. Sämtliche sichtbaren Himmelskörper bestehen aus diesem winzigen Rest gewöhnlicher (baryonischer und leptonischer) Materie. Doch woher wissen wir, ob es Sterne und Galaxien aus Antimaterie gibt?¹⁾ Atomkerne aus Antimaterie von $\overline{\text{He}}$ bis $\overline{\text{Fe}}$ kön-

1) Dirac nahm diese Möglichkeit 1933 in seinem Vortrag anlässlich der Entgegennahme des Nobelpreises vorweg: „It is quite possible that [some] stars [are] built up mainly of positrons and negative protons. In fact, there may be half the stars of each kind.“

KOMPAKT

- Eine Verletzung der sehr grundlegenden CPT-Symmetrie könnte den beobachteten Materieüberschuss im Universum erklären. Als Konsequenz würden Atome und ihre Antiatome verschiedene Eigenschaften aufweisen.
- Die große Herausforderung besteht darin, kalte Antiprotonen und Positronen zu erzeugen und daraus Antiwasserstoff herzustellen. Zudem müssen die erzeugten Antiatome in einer Falle eingeschlossen werden, um daran Präzisionsmessungen durchzuführen.
- Am CERN sollen die Experimente ATRAP, ASACUSA und ALPHA die Rydberg-Konstante bzw. die Hyperfein-Aufspaltung von Antiwasserstoff präzise messen, während AEGIS das schwache Äquivalenzprinzip für Antimaterie testen soll.

Priv.-Doz. Dr. Alban Kellerbauer, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Saupfercheckweg 1, 69117 Heidelberg

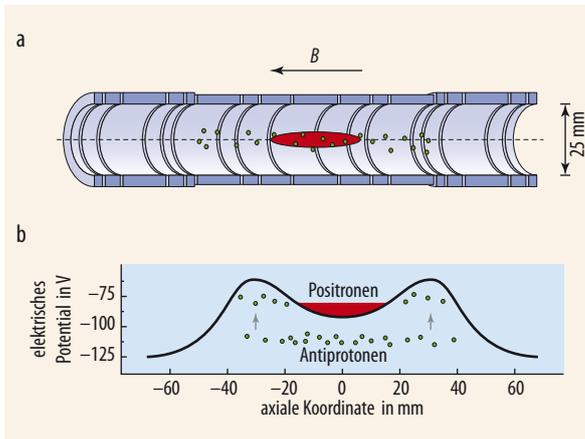


Abb. 1 Bei der zylindrischen Penning-Falle zum Einschluss von Ionen (a) ist das elektrische Potential an den Elektroden so gewählt, dass Antiprotonen (grün) und Positronen (rot) in benachbarten Potentialtöpfen eingeschlossen sind (b). Nach einer Kühlzeit von einigen Sekunden verbleiben die Antiprotonen in den seitlichen Potentialmulden.

Verletzte Symmetrien

In den Jahren 1954/1955 wiesen Gerhart Lüders und Wolfgang Pauli unabhängig voneinander nach, dass alle physikalischen Gesetze unverändert weiter gelten, wenn die CPT-Transformation auf ein System angewendet wird [3]. Für den Beweis dieses CPT-Theorems sind nur relativ moderate Annahmen nötig, wie Lokalität, Lorentz-Invarianz und Unitarität, die wir in der Regel implizit oder explizit voraussetzen. Erweiterungen des Standardmodells, z. B. durch String-Theorien, stellen diese aber durchaus infrage. Das CPT-Theorem gilt außerdem nur bei Wechselwirkungen, die sich durch eine Quantenfeldtheorie beschreiben lassen. Damit bleibt die Schwerkraft als einzige der vier fundamentalen Wechselwirkungen außen vor.

Sowohl die P- als auch die CP-Symmetrie sind in schwachen Prozessen verletzt, wie seit Jahrzehnten bekannt ist [4]. Ganz anders sieht es mit der CPT-Symmetrie aus. Da sie auf sehr grundlegenden Annahmen beruht, würde ihre Verletzung eine tiefgreifende Erweiterung des Standardmodells erfordern. Die diskreten Symmetrien CP und CPT könnten sich als Schlüssel zum Verständnis der Baryonen-Asymmetrie erweisen. Ein früher Erklärungsansatz stammt von Andrei Sacharow [5]. Er stellte fest, dass ein Materie-Überschuss entstehen konnte, falls während einer Epoche thermodynamischen Ungleichgewichts in der frühen Entwicklung des Universums die C- sowie die CP-Symmetrie verletzt waren. Die Nichterhaltung der Baryonenzahl kommt als offensichtliche weitere Bedingung hinzu.²⁾ Allerdings kann die elektroschwache Baryogenese innerhalb des Standardmodells den Materie-Überschuss quantitativ nicht erklären.

Auch eine Verletzung der CPT-Symmetrie kann einen Baryonen-Überschuss erzeugen, sogar ohne thermodynamisches Ungleichgewicht [7]. Eine CPT-Verletzung ist jedoch bislang nie beobachtet worden. Aus dem CPT-Theorem folgt, dass Antimaterieteilchen – höchstens abgesehen von einem Vorzeichen – genau dieselben Eigenschaften wie Materieteilchen haben müssen. Daher bietet der Vergleich ihrer fundamentalen Eigenschaften einen eleganten Zugang, um die CPT-Symmetrie zu überprüfen. Zahlreiche Experimente an verschiedensten (Anti-)Teilchenpaaren konnten bislang keine Abweichung nachweisen. Als Beispiel sei das Verhältnis von Ladung zu Masse bei Proton und Antiproton genannt, das mit einer relativen Messgenauigkeit von $9 \cdot 10^{-11}$ übereinstimmt. Beim bislang präzisesten CPT-Test stimmten die Massen des neutralen K-Mesons und seines Antiteilchens mit einer relativen Genauigkeit von $3 \cdot 10^{-19}$ überein [8].

Neben CPT-Tests an subatomaren Teilchen rückte in den 1990er-Jahren atomare Antimaterie in den Fokus. Ausgangspunkt war die immer höhere Genauigkeit bei der Spektroskopie an gewöhnlichem Wasserstoff. Heute ist die am Max-Planck-Institut für Quantenoptik durch Zwei-Photonen-Spektroskopie gemessene Übergangsfrequenz zwischen Grundzustand (1S) und metastabilem angeregten Zustand (2S) mit einer

2) Interessanterweise sind alle drei Sacharow-Bedingungen im Standardmodell erfüllt. Eine Nichterhaltung der Baryonenzahl kommt durch die chirale Quanten-Anomalie zustande, eine quantenmechanische Korrektur 2. Ordnung zur elektroschwachen Lagrange-Dichte [6].

3) Weitere Infos finden sich unter: <http://gabriele.se.physics.harvard.edu/gabriele/overviews/Antihydrogen/Antihydrogen.html>, <http://cern.ch/asacusa>, <http://cern.ch/alpha>, <http://cern.ch/aegis>

nen ihren Ursprung nur in primordialer bzw. stellarer Nukleosynthese haben. Insofern wäre ihr Nachweis in kosmischen Strahlen ein starkes Indiz für die Existenz von Antimaterie-Regionen. Bislang verlief die Suche nach solchen Teilchen mithilfe von ballon- und satellitengestützten Experimenten, z. B. mit dem AMS-Experiment auf der Raumstation ISS, jedoch erfolglos. Das bisher beobachtete Verhältnis von Antiprotonen zu Protonen ist mit der Paarbildung durch kosmische Strahlen im interstellaren Medium im Einklang. Schwerere Kerne wurden nicht beobachtet.

Das Ungleichgewicht zwischen baryonischer Materie und Antimaterie, die Baryonen-Asymmetrie, ist eine der großen ungelösten Fragen der modernen Physik. Ihre Beantwortung ist eng mit den diskreten Abbildungen C (Ladungsaustausch), P (Parität, Raumpiegelung) und T (Zeitumkehr) verknüpft, die das Verhältnis zwischen Materie und Antimaterie beschreiben. Die gemeinsame Anwendung der Operatoren CPT (in beliebiger Reihenfolge) wandelt ein Teilchen in sein Antiteilchen um. Ein Antiteilchen ist also gleichsam ein Teilchen, das eine entgegengesetzte Ladung trägt und sich in umgekehrter Richtung durch die Raumzeit bewegt. Dieser Tatsache trägt die Darstellung von Teilchen und Wechselwirkungen in Feynman-Diagrammen auf anschauliche Weise Rechnung.

Die bestehenden AD-Experimente		
Akronym ³⁾	Name	Physik-Ziel(e)
ATRAP	Antiproton/antihydrogen trap	CPT-Test durch H-Spektroskopie (1S–2S)
ASACUSA	Atomic spectroscopy and collisions using slow antiprotons	Laserspektroskopie an exotischen He ³ p-Atomen; H-Spektroskopie (Grundzustands-HFS)
ALPHA	Antihydrogen laser physics apparatus	CPT-Test durch H-Spektroskopie (1S–2S und Grundzustands-HFS)
AEGIS	Antimatter experiment: gravimetry, interferometry, spectroscopy	Test des schwachen Äquivalenzprinzips für Antimaterie; mittelfristig H-Spektroskopie

Tab. 1 Derzeit gibt es vier Experimente am Antiprotonenverzoögerer, an denen verschiedene Präzisionsmessungen mit Antiwasserstoff stattfinden.

Präzision von $4 \cdot 10^{-15}$ bekannt [9]. Dadurch ist die Rydberg-Konstante die derzeit am genauesten vermessene Naturkonstante. So liegt es nahe, eine Messung der „Anti-Rydberg-Konstante“ an Antiwasserstoff durchzuführen, um die CPT-Symmetrie mit möglichst hoher Genauigkeit zu überprüfen.

Eine Fabrik für Antimaterie

Weltweit gibt es derzeit nur einen einzigen Ort, an dem niederenergetische Antiprotonen für die Synthese von neutralen Antimaterie-Atomen erzeugt werden: am Antiprotonenverzögerer (Antiproton Decelerator, AD) am CERN in Genf. Er wurde von 1997 bis 2000 gebaut, nachdem sich 1995 an seinem Vorgänger LEAR (Low Energy Antiproton Ring) erstmals Antiwasserstoff herstellen ließ. Beim PS210-Experiment entstand Antiwasserstoff im Kreuzungspunkt eines umlaufenden Antiprotonenstrahls ($p = 1,94 \text{ GeV}/c$) mit einem Xenon-Atomstrahl durch Paarbildung von Positron und Elektron und anschließendem Einfang des Positrons. Durch die hohe Geschwindigkeit der Antiprotonen, und daher auch des Antiwasserstoffs, eigneten sich die produzierten Antiatome nicht für Präzisionsexperimente.

Der Antiprotonenverzögerer sollte dieses Manko beheben. Antiprotonen entstehen durch Paarbildung, wenn hochenergetische Protonen aus dem Proton-Synchrotron auf ein Schwermetall-Target treffen. Sie werden durch ein magnetisches Filter ausgewählt und in den Speicherring mit einem Umfang von etwa 200 m geleitet, der gleichsam als umgekehrter Beschleuniger ausgelegt ist. Hochfrequenzkavitäten bremsen die Antiprotonen von knapp 2,7 GeV auf eine Bewegungsenergie von 5,3 MeV ab. Gleichzeitig werden sie radial durch Elektronenkühlung und stochastische Kühlung

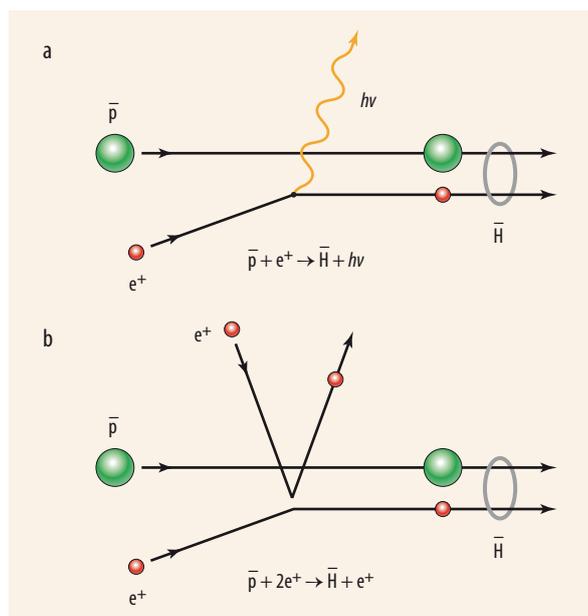


Abb. 2 Wenn Antiprotonen und Positronen gemischt werden, kann Antiwasserstoff durch Strahlungsrekombination (a) oder Dreikörper-Rekombination (b) entstehen.

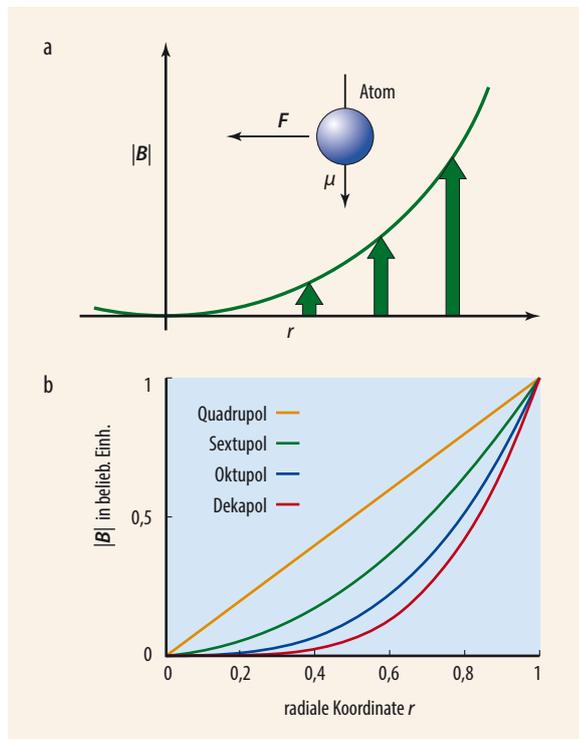


Abb. 3 Ein Magnetfeldgradient übt auf das magnetische Moment eines Atoms eine Kraft aus (a). Je höher die Ordnung der Multipolfälle ist, desto flacher verläuft der Betrag der magnetischen Flussdichte im Fallenzentrum (b).

zentriert. Am Ende des etwa 90 Sekunden dauernden AD-Zyklus erhält eines der Experimente etwa $3 \cdot 10^7$ Antiprotonen (Tab. 1).

Sowohl ALPHA als auch AEGIS sind aus dem 2004 beendeten ATHENA-Experiment hervorgegangen. Demnächst wird außerdem das BASE-Experiment in Betrieb gehen, das die magnetischen Momente von Antiproton und Proton vergleichen soll. Während ATRAP, ASACUSA und ALPHA in erster Linie CPT-Tests mit Antiwasserstoff anstreben, hat sich die AEGIS-Kollaboration zum Ziel gesetzt, das schwache Äquivalenzprinzip für Antimaterie zu überprüfen.⁴⁾ Bislang war es nicht möglich, diese grundlegende Frage experimentell zu untersuchen, da bei Antiprotonen oder Positronen die Kraft durch elektrische und magnetische Streufelder um viele Größenordnungen stärker ist als die Schwerkraft. Diese Beschränkung ließ sich erst mit neutraler Antimaterie überwinden.

Synthese und Nachweis von Antiwasserstoff

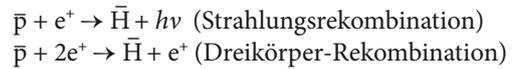
Ein erster wichtiger Meilenstein auf dem Weg zu Präzisionsmessungen an gespeichertem Antiwasserstoff war 2002 die Synthese von vergleichsweise kalten Antiatomen durch ATHENA und kurz darauf ATRAP. Beide Experimente nutzten dazu Penning-Fallen, um die Bestandteile von Antiwasserstoff (Antiprotonen und Positronen) einzufangen und zu mischen. Eine Penning-Falle besteht aus einem starken axialen Magnetfeld zum radialen Einschluss sowie aus einem (angenäherten) dreidimensionalen elektrischen Quadrupolfeld zum axialen Einschluss der geladenen Teilchen (Abb. 1a). Je nach Polung des elektrischen Feldes kann die Falle positive oder negative Ionen speichern.

4) Das schwache Äquivalenzprinzip (Weak equivalence principle, WEP) besagt, dass die Bewegung eines Probekörpers in einem Gravitationsfeld nicht von seiner Zusammensetzung und Struktur abhängt.

Zunächst reduziert eine dünne Folie die Energie der vom AD gelieferten Antiprotonen auf wenige keV. Anschließend fängt eine Penning-Falle mit starkem Magnetfeld (3 – 5 T) und einer Hochspannung an den äußersten Elektroden (bis 10 kV) sie ein. Mithilfe von Elektronen gelingt es, die Antiprotonen auf die Temperatur der mit flüssigem Helium gekühlten Falle (4 – 15 K) zu bringen. Die leichten Teilchen führen im starken Magnetfeld eine hochfrequente radiale Kreisbewegung mit der Frequenz $f_+ \approx qB/(2\pi m)$ aus (z. B. 28 GHz bei 1 T). Dabei geben sie Synchrotronstrahlung ab, so dass sie sich auf die Umgebungstemperatur abkühlen. Durch Coulomb-Stöße kühlen sie ihrerseits die Antiprotonen ab. Parallel dazu werden Positronen, die beim β^+ -Zerfall einer intensiven ^{22}Na -Quelle entstehen, moderiert und in einer zweiten, mit Puffergas gefüllten Penning-Falle akkumuliert und gekühlt.

Kernstück beider Experimente war ein Bereich in der Falle, der die entgegengesetzt geladenen Antiprotonen und Positronen nicht nur gleichzeitig einschließt, sondern sie auch noch räumlich zum Überlapp bringt. Dies lässt sich mit einem „geschachtelten“ Potential erreichen, das aus einem breiten Potentialtopf für negative Ionen mit einer umgekehrten zentralen Potentialmulde für positive Ionen besteht (Abb. 1b).

Zunächst werden Positronen in den zentralen Bereich transferiert. Wie zuvor die Elektronen kühlen sich diese durch Abgabe von Synchrotronstrahlung auf die Umgebungstemperatur ab. Schließlich werden Antiprotonen mit einigen eV in das äußere Potential gegeben. Dort oszillieren sie innerhalb der seitlichen Potentialflanken hin und her und verlieren durch Stöße mit Positronen Energie. Sobald die Bewegungsenergie der Positronen im Bezugssystem des Antiprotons die Bindungsenergie von (Anti-)Wasserstoff von 13,6 eV unterschreitet, können Antiproton und Positron zu atomarem Antiwasserstoff rekombinieren. Da bei dieser Zweikörper-Reaktion jedoch im Allgemeinen nicht gleichzeitig Energie und Impuls erhalten sein können, kommt ein weiterer Reaktionspartner ins Spiel, ein Photon oder ein weiteres Positron (Abb. 2):



Angesichts der hohen Positronendichte in der Penning-Falle dominiert der Dreikörperprozess und läuft mit hoher Rate ab. Mit dieser Technik erzeugten ATHENA und ATRAP etwa 10 000 Antiwasserstoff-Atome pro Tag.

Da Antiatome neutral sind, driften sie aus dem Zentrum heraus, bis sie auf eine der Fallenelektroden treffen. Dort annihilieren zuerst die Positronen mit Elektronen und dann die Antiprotonen mit Protonen oder Neutronen. Beim Nachweis der Antiwasserstoff-Synthese hatte ATHENA die Nase vorn, weil es mit einem komplexen, mehrlagigen Siliziumstreifen-Detektor die bei der Annihilation des Antiprotons entstehenden Pionen registrieren konnte. CsI-Szintillatoren wiesen die mit einem Öffnungswinkel von 180 Grad emittierten Photonen aus der Positron-Annihilation nach [10]. Entscheidend waren Ereignisse, bei denen beide Annihilationen zeitlich und räumlich korreliert stattfanden (Abb. auf S. 27).

Antiatome in der Falle

Die kurze Lebensdauer des Antiwasserstoffs zwischen Erzeugung und Annihilation an den Wänden der Ionenfalle reicht selbstredend nicht für Präzisionsmessungen aus. Wie lassen sich also die Antiatome einschließen? Neutrale Atome sind zwar unempfindlich gegen homogene elektrische und magnetische Felder. Der Gradient eines äußeren Magnetfelds \mathbf{B} übt jedoch eine Kraft $\mathbf{F} = \pm \mu \nabla B$ auf das magnetische Moment des Atoms aus (Abb. 3a). Dabei bezeichnet μ die Projektion des magnetischen Moments auf die Magnetfeldrichtung. Je nach (zufälliger) paralleler oder antiparalleler Ausrichtung ist die Kraft zum Minimum oder Maximum des Magnetfeldes (low- bzw. high-field seeker) gerichtet. Daher lässt sich im besten Fall die Hälfte aller Atome einfangen.

Ein Multipolfeld, dessen radiale Komponente die Form $B_r(r) = k_r r^{(s-1)}$ hat, erlaubt es, einen geeigneten

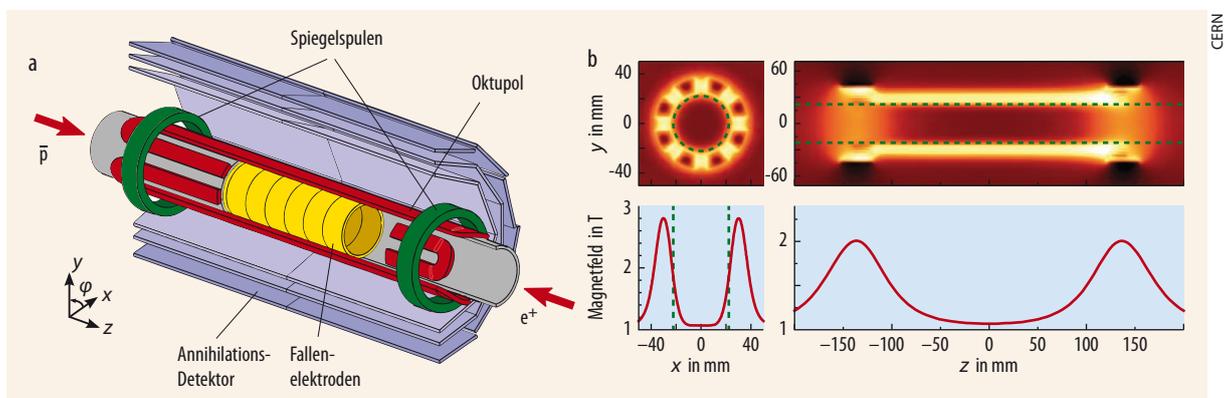


Abb. 4 a) Die kombinierte Ionen- und Atomfalle von ALPHA mit Oktupolspulen (rot), Spiegelspulen (grün) und Fallenelektroden (gelb). Der Solenoid für die Erzeugung des axialen Magnetfelds ist nicht abgebildet. b) Betrag der magnetischen

Flussdichte in der radialen und axialen Projektion (oben) und auf der Achse als Funktion der radialen und axialen Koordinate (unten).

Magnetfeldgradienten zu erzeugen. Dabei steht s für die Ordnung des Multipols (2: Quadrupol, 3: Sextupol usw.), k_s ist eine von s abhängige Konstante. Im Prinzip entsteht durch Überlagerung einer Penning-Falle mit einer radialen Multipolfalle eine kombinierte Falle, in der Antiwasserstoff produziert und gespeichert wird. Allerdings bricht der radiale Multipol die zylindrische Symmetrie der Penning-Falle, was zu einer kürzeren Lebensdauer der Ionenplasmen (Antiprotonen und Positronen) führt.

Die Lösung liefert ein Multipol höherer Ordnung, der in der Nähe des Fallenzentrums einen flacheren Magnetfeldverlauf aufweist (Abb. 3b). Daher verwendet das ALPHA-Experiment einen radialen Oktupol, wogegen sich die ATRAP-Kollaboration ungeachtet dieser Überlegungen für eine Quadrupolfalle entschieden hat. Für den Einschluss der Atome in axialer Richtung eignen sich einfache ringförmige Magnete, die das axiale Magnetfeld lokal erhöhen. Sie werden Spiegelspulen genannt, da sie die Atome entlang der z -Achse reflektieren (Abb. 4).

Für die Tiefe der Atomfalle gilt $\Delta B = (B_{\text{sol}}^2 + B_{\text{mult}}^2)^{1/2} - B_{\text{sol}}$. Heute sind supraleitende Multipolfallen mit einer Flussdichte von bis zu 1,5 T möglich. Bei einer Solenoid-Flussdichte von 1 T hat die Falle eine Tiefe von gut 0,8 T (oder gut 0,5 K in Temperatureinheiten, für Antiwasserstoff im Grundzustand mit $\mu = \mu_B$). Das Zahlenbeispiel zeigt, dass die Temperatur des Antiwasserstoffs entscheidend für den Anteil der eingefangenen Antiatome ist. Selbst bei einer Temperatur von 4,2 K hat eine 0,5 K tiefe Falle nur eine Einfangeffizienz im Promillebereich. Messungen von ATHENA und ATRAP haben aber ergeben, dass der in einem geschichteten Potential erzeugte Antiwasserstoff viele hundert K heiß ist – wahrscheinlich setzt Rekombination ein, bevor die Antiprotonen die Temperatur der Falle erreicht haben. Alternative Rekombinationstechniken können dieses Problem umgehen (Infokasten).

Aktuelle Entwicklungen

2010 gelang der ALPHA-Kollaboration erstmals der Einfang von Antiwasserstoff in der oben beschriebenen magnetischen Falle. In einem geschichteten Potential wurden Positronen und Antiprotonen, die durch Kühlung mit Elektronen sowie durch Verdampfungskühlung auf eine Temperatur von etwa 200 K gebracht worden waren, gemeinsam eingeschlossen. Wegen der niedrigen Temperatur der Antiprotonen waren die beiden Spezies zunächst axial separiert. Die schwache Anregung mit einem Wechselfeld brachte die Antiprotonen in Kontakt mit den Positronen. In eine Sekunde dauernden Mischzyklus entstanden so einige tausend Antiwasserstoff-Atome. Nach einer Wartezeit von knapp 0,2 Sekunden wurden die Spulen der magnetischen Falle abgeschaltet und die nun freien Antiatome mit einem Siliziumstreifen-Detektor nachgewiesen.

Bei ersten Messungen wurden je Mischzyklus im Schnitt nur 0,11 gespeicherte Antiwasserstoff-Atome

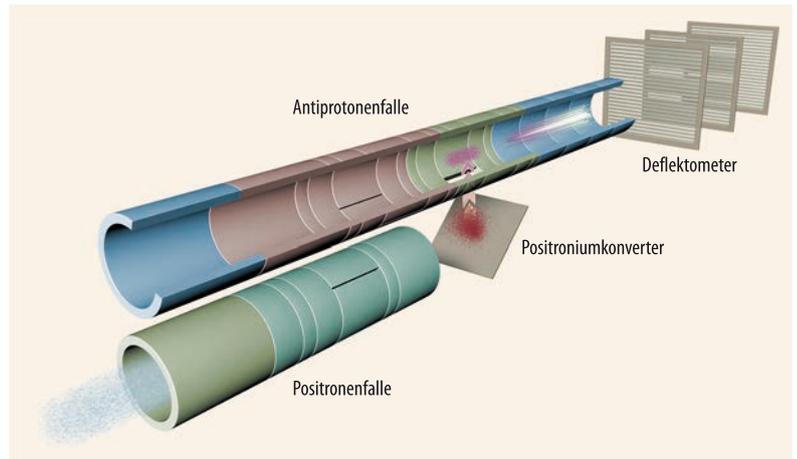


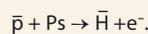
Abb. 5 Das AEGIS-Experiment soll die vertikale Ablenkung eines horizontalen Antiwasserstoffstrahls mithilfe eines Deflektometers mit einer Genauigkeit von wenigen μm bestimmen.

beobachtet. Eine verbesserte Kühlung der Antiprotonen erlaubte es jedoch, die Ausbeute bei weiteren Messungen 2011 um einen Faktor 5 zu steigern. Die Einfangrate von zuletzt etwa 10^{-4} ist kompatibel mit einer Antiwasserstoff-Temperatur von 20 bis 100 K. Besonders wichtig für zukünftige spektroskopische Messungen ist die Tatsache, dass die Antiatome gut 15 Minuten lang ohne nennenswerte Verluste gespeichert bleiben [12]. Die lange Speicherzeit stellt außerdem sicher, dass sich die Atome – wie erforderlich – im Grundzustand befinden. Im folgenden Jahr gelang es ATRAP ebenfalls, Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle einzufangen und zu speichern.

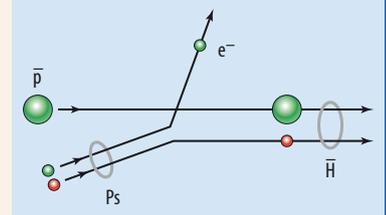
In einem weiteren Experiment machte die ALPHA-Kollaboration sogar einen ersten Schritt hin zur Spektroskopie von Antiwasserstoff. Dazu nutzte sie aus, dass man durch Übergänge zwischen verschiedenen Spinzuständen gespeicherte Atome aus der Falle entfernen kann. Die Gruppe speicherte Antiwasserstoffatome 240 Sekunden lang in der magnetischen Falle und induzierte währenddessen mit einem Mikrowellensignal der Frequenz 28,3 bzw. 29,7 Ghz die zwei möglichen Spin-Flip-Übergänge zwischen den durch den Zeeman-Effekt aufgespaltenen Hyperfeinzuständen. Bei resonanter Anregung verblieben

RESONANTER LADUNGAUSTAUSCH

Bei der Bildung von Antiwasserstoff bestimmt der Impuls der Antiprotonen, deren Masse etwa 2000-mal größer als die der Positronen ist, maßgeblich die Temperatur der erzeugten Antiatome. Auf dieser Überlegung beruht eine alternative Erzeugungsmethode für Antiwasserstoff: der resonante Ladungsaustausch von Positronium ($\text{Ps} = e^+e^-$) mit Antiprotonen gemäß der Reaktion



Anders als bei den geschichteten Potentialen bleiben die Antiprotonen



dabei in Ruhe und lassen sich durch Elektronenkühlen oder weitergehende Kühlmethoden auf die Temperatur der Falle oder darunter vorkühlen. Diese Rekombinationstechnik hat ATRAP entwickelt und 2004 zum ersten Mal umgesetzt [11]. Das AEGIS-Experiment verwendet das gleiche Prinzip.

5) Dieser Abschätzung liegt die Annahme zugrunde, dass die Schwerebeschleunigung von Antimaterie mit der von Materie identisch ist.

6) Der scheinbar fehlende Faktor 2 kommt dadurch zustande, dass die Teilchen anfangs eine aufwärtsgerichtete Geschwindigkeit haben müssen, um die ersten beiden Gitter horizontal zu durchlaufen.

7) <http://espace.cern.ch/elena-project>

8) http://irfu.cea.fr/en/Phocsa/Vie_des_labos/Ast/alltec.php?id_ast=2095

9) www.flairtfair.eu

nach dem Ende der Speicherzeit im Schnitt zehnmal weniger Antiatome in der Falle als bei verstimmter Anregung. Die gemessene Differenz der beiden Anregungsfrequenzen (1,42 GHz) entsprach im Rahmen der Messungengenauigkeit von 100 MHz der Hyperfeinaufspaltung in Wasserstoff ohne Magnetfeld [13].

Das AEGIS-Experiment ist seit 2010 im Aufbau und soll die Ablenkung eines horizontalen Strahls kalter Antiwasserstoff-Atome im Schwerfeld der Erde messen (Abb. 5). Bei einer Geschwindigkeit $v = 500$ m/s beträgt sie etwa $10 \mu\text{m}$ über eine Flugstrecke von einem Meter.⁵⁾ Ein Moiré-Deflektometer dient dazu, die Position des Strahls zu messen. Bei diesem klassischen Gegenstück zu einem Materiewellen-Interferometer entsteht statt eines Interferenzmusters ein Schattenbild. Drei Materiegitter sind jeweils im Abstand L zueinander angebracht. Die ersten beiden erzeugen ein periodisches Muster, dessen vertikale Position sich durch Verschieben des dritten Gitters mit einem dahinterliegenden Detektor analysieren lässt. Eine auf die Teilchen wirkende Beschleunigung $-g$ lenkt das Muster um eine Strecke $\delta y = -g(L/v)^2$ ab.⁶⁾ Alternativ kann ein ortsauflösender Detektor das dritte Gitter ersetzen [14].

Während die meisten Komponenten der AEGIS-Apparatur fertiggestellt sind, befindet sich das Moiré-Deflektometer noch in der Entwicklung. Beim Test eines verkleinerten Versuchsaufbaus mit Antiprotonen Ende 2012 bestand das Deflektometer aus zwei Gittern im Abstand $L = 25$ mm und mit einer Gitterkonstanten $d = 40 \mu\text{m}$ (Abb. 6). Eine hochauflösende Foto-Emulsion zeichnete die Annihilationsereignisse auf. Die Referenzposition (ohne Ablenkung) wurde bestimmt, indem ein Teil des Antiprotonenstrahls die Emulsion durch ein unmittelbar davor platziertes Gitter erreichte und sowohl die Moiré-Anordnung als auch das Kontaktgitter zusätzlich mit diffusem Licht beleuchtet wurde. Für das Licht wirkt das Materiegitter als Talbot-Lau-Interferometer, so dass auf der Emulsion ein charakteristisches Beugungsmuster entsteht. Da die Photonen sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten, ist ihre Ablenkung über die kurze Flugstrecke vernachlässigbar.

Die Position der Antiprotonen, die durch das Kontakt-Gitter auf die Emulsion trafen, stimmt erwartungsgemäß mit den Maxima des Lichtmusters überein (Abb. 7a). Antiprotonen, die das Deflektometer durchlaufen haben, sind dagegen in die positive y -Richtung abgelenkt. Werden die Ereignisse modulo d aufsummiert, lässt sich die Ablenkung durch einen Fit quantitativ bestimmen (Abb. 7b). So ergibt sich eine vertikale Ablenkung δy von $9,8 \pm 0,9$ (stat) $\pm 6,4$ (syst) μm , entsprechend einer nach oben gerichteten Kraft von 530 ± 50 (stat) ± 350 (syst) aN. Dies stimmt mit der Kraft überein, die ein magnetisches Streufeld von etwa 8 G ausübt. Obwohl die Gravitationskraft auf ein Antiwasserstoff-Atom viele Größenordnungen kleiner ist, ist die Ablenkung aufgrund der viel niedrigeren Geschwindigkeit und der längeren Flugstrecke vergleichbar wie bei dem Testexperiment mit Antiprotonen.

Ausblick

Auch auf der Beschleunigerseite steht die Entwicklung am Antiprotonenverzögerer nicht still. Ab 2015 wird die Anlage um einen Synchrotron-Speicherring namens ELENA (Extra Low Energy Antiproton Ring) mit einem Umfang von etwa 30 m erweitert.⁷⁾ Während bisher beim Abbremsen der Antiprotonen mit dünnen Folien rund 99,9 Prozent der Teilchen verloren gehen, werden sie mit ELENA in Zukunft quasi verlustfrei bis auf eine Energie von 100 keV abgebremst. Dadurch erhöht sich die Einfangeffizienz der AD-Experimente etwa um einen Faktor 30. Der ELENA-Ring wird außerdem zusätzliche Messplätze für neue Experimente schaffen, z. B. das bereits bewilligte GBAR-Experiment (Gravitational Behavior of Antihydrogen at Rest), das die Wirkung der Schwerkraft auf Antiwasserstoff mithilfe eines Atombrunnens untersuchen will und damit AEGIS Konkurrenz macht.⁸⁾ Mit dem Bau von ELENA ist die Zukunft der Antimaterie-Physik am CERN also auf viele Jahre gesichert.

Noch einen Schritt weiter geht die geplante Niederenergie-Erweiterung FLAIR der neuen Teilchenbeschleunigeranlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) in Darmstadt.⁹⁾ Nach mehrjährigen Verzögerungen hat 2013 in unmittelbarer Nachbarschaft der GSI der Bau von FAIR begonnen, die Inbetriebnahme ist derzeit für 2018 geplant. Langfristig wird die Anlage ein noch breiteres Physikprogramm mit Niederenergie-Antiprotonen ermöglichen. FLAIR soll gekühlte Antiprotonen bei Energien bis hinab zu

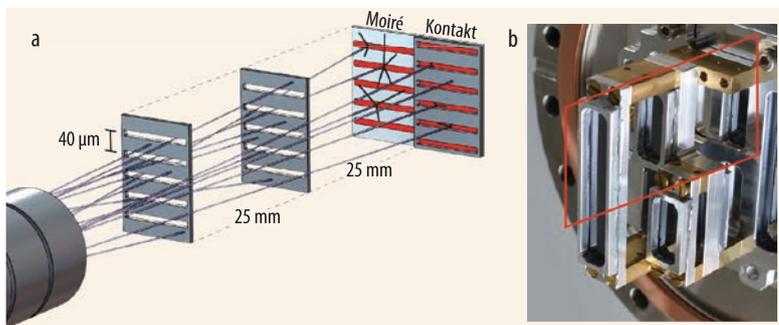


Abb. 6 Das Prinzip des Miniatur-Deflektometers erlaubt es, die vertikale Beschleunigung der Antiprotonen zu messen (a). In dem Foto (b) sind die der Skizze entsprechenden Komponenten hervorgehoben.

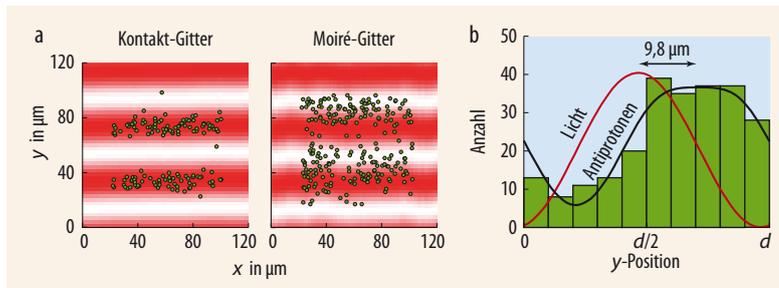


Abb. 7 a) Position der Antiprotonen-Anihilationsereignisse (grün) und des Lichtmusters (rot) hinter dem Kontaktgitter (links) und der Deflektometer-Anordnung (rechts). b) Modulo der Gitterkonstanten aufsummierte Antiprotonen-Anihilationsereignisse (grüne Bins und schwarze Linie), zum Vergleich die Intensität des Lichtmusters (rote Linie).

20 keV liefern, variable Pulsstrukturen via schneller und langsamer Extraktion bereitstellen und auch Stoß-Experimente mit gepulsten Strahlen im ultrakalten Speicherring (USR) ermöglichen. Aus Kostengründen ist der Bau des Speicherrings NESR (New Experimental Storage Ring) jedoch zurückgestellt. Da dieser das Bindeglied zwischen FAIR und FLAIR bildet, ist die Inbetriebnahme von FLAIR derzeit nicht absehbar.

Nach einer 18-monatigen Unterbrechung im Zuge des Upgrades des Large Hadron Colliders geht der Antiprotonenverzögerer in der zweiten Jahreshälfte 2014 wieder in Betrieb. Die verschiedenen Kollaborationen haben den Shutdown genutzt, um ihre Experimente zu verbessern und zu erweitern. So haben beispielsweise ALPHA und ATRAP ihre Apparaturen für den Zugang mit Lasern vorbereitet. In naher Zukunft ist also mit weiteren spannenden Ergebnissen zur Antimaterie-Physik zu rechnen. Erste fundamentale Messungen, wie ein präziser Vergleich der optischen Spektren von Wasserstoff und Antiwasserstoff oder eine Bestimmung der Schwerebeschleunigung von Antimaterie, sind für die nächsten zwei bis drei Jahre zu erwarten.

Literatur

- [1] *P. A. M. Dirac*, Proc. Roy. Soc. A **133**, 60 (1931)
- [2] *C. D. Anderson*, Phys. Rev. **43**, 491 (1933)
- [3] *G. Lüders*, Dan. Mat. Fys. Medd. **28** (5), 1 (1954); *W. Pauli*, in: Niels Bohr and the Development of Physics, McGraw-Hill, New York (1955), S. 30

- [4] *M. S. Sozzi*, Discrete Symmetries and CP Violation, Oxford University Press, New York (2008)
- [5] *A. D. Sakharov*, JETP Lett. **5**, 24 (1967)
- [6] *G. 't Hooft*, Phys. Rev. Lett. **37**, 8 (1976)
- [7] *O. Bertolami et al.*, Phys. Lett. B **395**, 178 (1997)
- [8] *J. Beringer et al.* (Particle Data Group), Phys. Rev. D **86**, 010001 (2012), S. 100
- [9] *C. G. Parthey et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 203001 (2011)
- [10] *M. Amoretti et al.*, Nature **419**, 456 (2002)
- [11] *C. H. Storry et al.*, Phys. Rev. Lett. **93**, 263401 (2004)
- [12] *G. B. Andresen et al.*, Nature Phys. **7**, 558 (2011)
- [13] *C. Amole et al.*, Nature **483**, 439 (2012)
- [14] *A. Kellerbauer et al.*, Nucl. Instrum. Methods B **266**, 351 (2008)

DER AUTOR

Alban Kellerbauer studierte Physik in Stuttgart und an der McGill University in Montréal. 2002 promovierte er in Heidelberg über einen experimentellen Test der CKM-Unitarität. Anschließend arbeitete er als CERN-Fellow an ATHENA mit. Seit 2006 leitet er eine Forschungsgruppe am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg, zunächst gefördert durch ein Emmy-Noether-Stipendium der DFG, seit 2011 durch einen Consolidator Grant des Europäischen Forschungsrats. 2007 war er Ko-Initiator des AEGIS-Experiments zur Antimaterie-Gravitation, an dem er nach wie vor beteiligt ist. 2009 habilitierte er sich über die Dynamik der Antiwasserstoff-Bildung in Penning-Fallen. Er ist Mitbegründer und Vorstandsmitglied der Young Academy of Europe.

