

Antiwasserstoff im Labor

Antimaterie – Spiegelbild oder Zerrbild

ALBAN KELLERBAUER

Im Urknall entstanden anfangs gleiche Mengen von Materie und Antimaterie, doch heute dominiert gewöhnliche Materie das beobachtbare Universum. Die Ursache für diese Asymmetrie gehört zu den großen, ungelösten Rätseln der Physik. Experimente mit kalten Atomen aus Antimaterie könnten eine Antwort liefern. An ihrer Erzeugung im Labor arbeiten derzeit mehrere Forscherteams.

Vor über zehn Jahren gelang es der Gruppe von Walter Oelert erstmals, am Europäischen Kernforschungszentrum CERN in Genf Antiwasserstoff zu erzeugen. Seitdem arbeiten mehrere Teams daran, dieses einfachste Antimaterie-Atom möglichst effizient im Labor herzustellen. Den beiden Genfer Experimenten Athena (Abbildung 1) und Atrap, die ich später näher vorstelle, gelang das 2002 bis 2004 sehr erfolgreich. Allerdings fehlt bisher noch die Möglichkeit, die relativ heißen Antiwasserstoffatome nach ihrer Entstehung so weit abzukühlen und abzubremesen, dass sie für weitere Experimente speicherbar sind. Die Herstellung solch kalten Antiwasserstoffs ist nun das nächste Ziel der an diesen Experimenten beteiligten Physiker. Sobald Antiwasserstoff im Labor „handhabbar“ geworden ist, lässt sich mit ihm eine der großen, ungelösten Fragen der Physik angehen: Warum gibt es in unserem Universum heute so gut wie keine Antimaterie?

Um diese Frage tiefer zu verstehen, schauen wir uns die Eigenschaften von Antimaterie näher an; einige grundlegende Fakten sind auf www.phiuз.de unter „Special Features/Zusatzmaterial zu den Heften“ zusammengestellt. Schon in den 1950er-Jahren beschrieb Wolfgang Pauli, wie sich Teilchen und Antiteilchen zueinander verhalten müssten [1]. Danach ergibt sich ein Antiteilchen, wenn man die mathematischen Operatoren C (Charge conjugation, Ladungsumkehr), P (Parität, Umkehr der Raumrichtungen) und T (Umkehr der Zeitkoordinate) in beliebiger Reihenfolge anwendet. Des Weiteren sind alle Gesetze der Physik invariant bezüglich der kombinierten CPT-Transformation. Demnach hätten Teilchen und deren Antiteilchen – höchstens von einem Vorzeichen abgesehen – exakt die gleichen grundlegenden Eigenschaften wie Masse, Ladung und Halb-



Wolfgang Pauli
(1900–1958),
Nobelpreis für
Physik 1945.

wertszeit. Dieses CPT-Theorem ist heute fester Bestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik. Abbildung 2 zeigt, wie die nacheinander ausgeführten Operationen Ladungsumkehr, Parität und Zeitumkehr ein Elektron in sein Antiteilchen, ein Positron, überführen.

Auch in unserer täglichen Erlebniswelt ist Antimaterie bei Weitem nicht so exotisch, wie sie auf den ersten Blick erscheinen mag. So entsteht zum Beispiel beim Betazerfall von neutronenarmen Atomkernen jeweils ein Positron. Solche Nuklide können künstlich hergestellt werden, kommen aber auch natürlich vor. Antiteilchen entstehen auch, wenn kosmische Strahlung, also hochenergetische Protonen und Atomkerne von fernen Sternen, auf die Erdatmosphäre trifft und dort mit Gasatomen wechselwirkt. Die dabei erzeugten Teilchenschauer bestehen aus elektromagnetischer Strahlung und Millionen oder sogar Milliarden von subatomaren Teilchen, viele davon aus Antimaterie.

Seltsames Ungleichgewicht

Nach unserem heutigen Verständnis von der Entstehung des Universums sind im Urknall, der vor etwa 13,7 Milliarden Jahren stattgefunden hat, neben Raum und Zeit auch die Elementarteilchen entstanden, die das Weltall bevölkern. Eine wichtige Untergruppe innerhalb der Teilchenarten stellen die Baryonen dar. Das sind Materieteilchen, die ausschließlich aus Quarks bestehen. Ihre aus Antiquarks zusammengesetzten Gegenstücke sind die Antibaryonen. Überraschenderweise ist im für uns beobachtbaren Teil des Universums heute nur noch gewöhnliche baryonische Materie in nennenswertem Umfang vorhanden [2]. Experimentelle Untersuchungen haben gezeigt, dass Antiprotonen zwar in durchaus messbaren Zahlen auf die Erdatmosphäre auftreffen. Das Verhältnis von Teilchen zu Antiteilchen beträgt etwa 10 000:1. Aus der Energieverteilung dieser Antiprotonen kann man jedoch schließen, dass es sich um sekundäre Teilchen handelt, die im interstellaren Medium unserer Milchstraße aus primärer kosmischer Strahlung entstehen. Davon unterscheiden muss man die Suche nach Kernen von Anti-Atomen. Diese können nicht aus primärer kosmischer Strahlung entstanden sein, sondern müssen einem Nukleosyntheseprozess (beispielsweise im Innern einer Antimaterie-Sonne) entstammen. Im Jahre 1998 flog das AMS-01-Experiment an Bord der Weltraumfähre Discovery

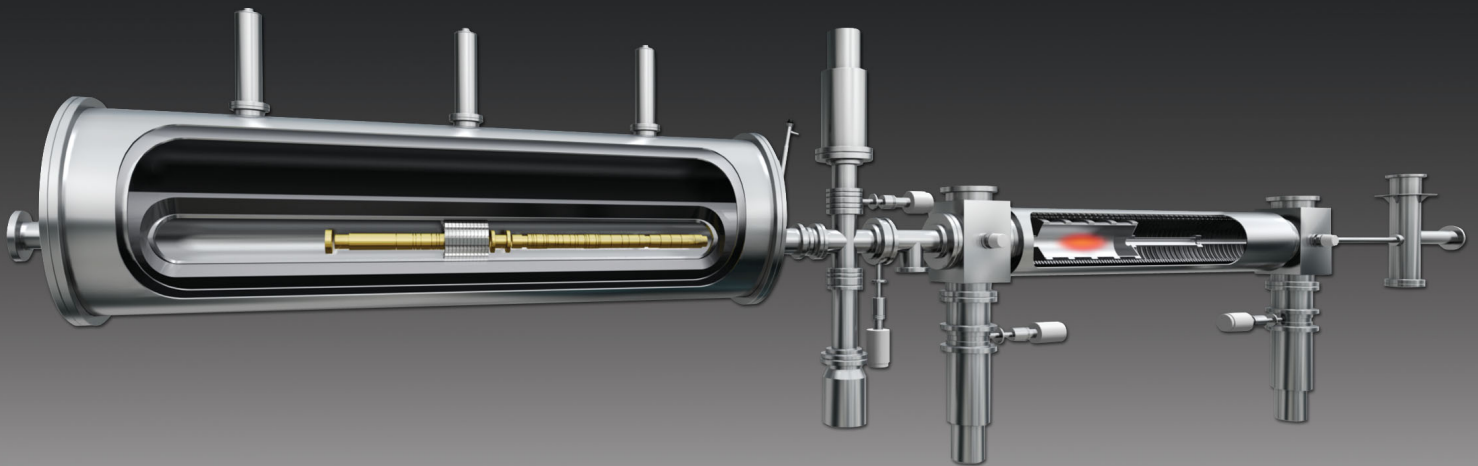


Abb. 1 Antiwasserstoff-Experiment Athena. In dem aufgeschnittenen Gehäuse des supraleitenden Magneten links sind Penning-Falle und Detektor zu sehen. Rechts die Positronenquelle mit einer Wolke Positronen (rot) im Akkumulator. Insgesamt ist die Anlage etwa 7,50 m lang.

zehn Tage lang in 400 Kilometern Höhe um die Erde und registrierte schwere Atomkerne. Es wies mehrere Millionen Heliumkerne nach, aber keinen einzigen Antiheliumkern [3].

Für diese Beobachtung gibt es lediglich zwei Erklärungsansätze: Entweder es ist schon beim Urknall mehr Materie als Antimaterie entstanden, oder aber das Ungleichgewicht hat sich im Laufe der Expansion und Abkühlung des Universums herausgebildet. Die erste Möglichkeit wird wegen des Singularitätscharakters des Urknalls für nicht wahrscheinlich gehalten. Schauen wir uns also die Zweite genauer an.

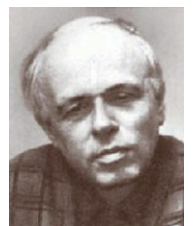
Etwa 380 000 Jahre nach dem Urknall hatte sich das Universum ausreichend ausgedehnt und abgekühlt, um die Bildung von atomarem Wasserstoff zuzulassen. Doch schon zuvor hatte sich der größte Teil der ursprünglich erzeugten Teilchen und deren Antiteilchen wieder vernichtet, unter Aussendung von Lichtquanten. Nehmen wir nun an, dass die experimentell beobachtete Mikrowellen-Hintergrundstrahlung ausschließlich von diesem Vorgang herrührt. Dann können wir folgenden Asymmetrieparameter definieren:

$$\eta = \frac{n(B) - n(\bar{B})}{n(\gamma)}$$

$n(B)$ und $n(\bar{B})$ stellen die Dichten von Baryonen und Antibaryonen dar, $n(\gamma)$ die Photonendichte der Hintergrundstrahlung. Aus der Anzahl der Galaxien im beobachtbaren Universum und seiner Größe ergibt sich eine Baryonendichte von rund $4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^{-3}$. Die Antibaryonendichte $n(\bar{B})$ ist verschwindend gering und hat für die Berechnung von η keine Bedeutung. Aus der Temperatur der Hintergrundstrahlung kann man eine Photonendichte von circa $4 \cdot 10^8 \text{ m}^{-3}$ errechnen. Damit ergibt sich ein Asymmetrieparameter im Bereich von 10^{-10} .

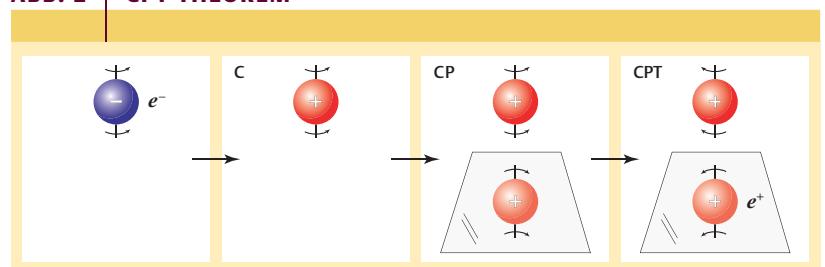
Wir können also annehmen, dass von jeweils 10 Milliarden im Urknall entstandenen Baryonen sich alle bis auf eines mit einem Antiteilchen-Partner vernichtet haben. Aus dem restlichen winzigen Bruchteil haben sich die etwa 100 Milliarden beobachtbaren Galaxien und letztlich unser Sonnensystem herausgebildet. Es liegt nahe, die Gründe für diese folgenschwere Asymmetrie in einer Abweichung von der perfekten Entsprechung zwischen Materie und Antimaterie zu suchen.

Schon 1967 hat der russische Physiker und spätere Friedensnobelpreisträger Andrei Sacharow eine mögliche Erklärung für die Entstehung einer Baryonen-Asymmetrie aufgestellt [4]. Als notwendige Bedingungen müssten danach sowohl die C- und die CP-Symmetrie als auch die Erhaltung der Baryonenzahl verletzt sein. Außerdem muss es während der frühen Entstehungsgeschichte des Universums eine Epoche thermischen Ungleichgewichts gegeben haben. Im Laufe der Jahre ist eine große Zahl von mehr oder minder exotischen Modellen entwickelt worden, die ein Zusammentreffen dieser Voraussetzungen im frühen Universum produziert. Zwar ist in den 1960er-Jahren beim Zerfall der exotischen Kaonen - Teilchen, die ein „seltsames“ Quark



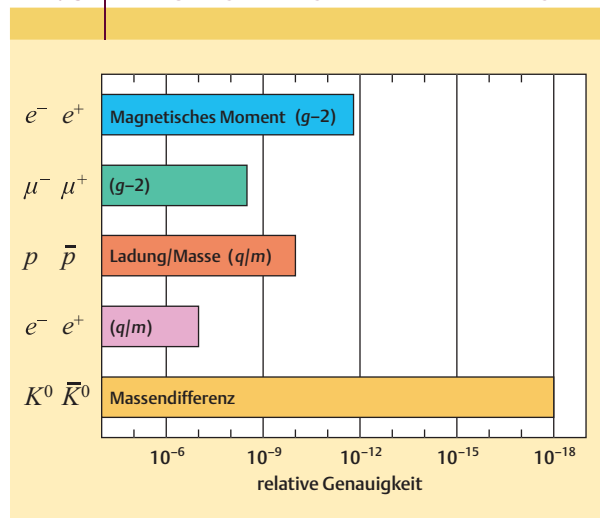
Andrei Sacharow (1921–1989), Friedensnobelpreis 1975.

ABB. 2 | CPT-THEOREM



Von links nach rechts: Die Operationen Ladungsumkehr, Parität und Zeitumkehr überführen ein Elektron in ein Positron.

ABB. 3 | VERGLEICH TEILCHEN MIT ANTEILCHEN



Die bis heute genauesten experimentellen Vergleiche der Eigenschaften von Elektronen, Myonen, Positronen und neutralen Kaonen mit ihren jeweiligen Antiteilchen, mit Angabe der relativen Genauigkeiten.

enthalten – tatsächlich eine CP-Verletzung beobachtet worden. Die Verletzung ist aber so schwach, dass die bestehenden Modelle die beobachtete Baryonen-Asymmetrie nicht erklären können. Vor einigen Jahren ist jedoch erkannt worden, dass sich ein Baryonen-Überschuss auch lediglich aus einer Verletzung der CPT-Symmetrie und einer Nichterhaltung der Baryonenzahl ergeben könnte, und zwar zudem ohne die zusätzliche Bedingung des thermischen Ungleichgewichts [5]. Dieser Ansatz geht natürlich über die heutige Physik weit hinaus.

Die CPT-Symmetrie ergibt sich zwingend von selbst aus der Quantenfeldtheorie, der theoretischen Beschreibung der Elementarteilchen und deren Wechselwirkungen. Dazu müssen jedoch bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein. Zu diesen Bedingungen zählen unter anderem eine flache Raum-Zeit-Struktur und die Punktförmigkeit von Elementarteilchen. Im Lichte jüngerer Entwicklungen in der theoretischen Teilchenphysik, wie der String-Theorie, werden solche bislang als selbstverständlich angesehenen Voraussetzungen aber zunehmend hinterfragt. Elementarteilchen können demnach als Vibrationen eines Fadens (String) beschrieben werden, aus deren Frequenz und Amplitude sich die Masse der Teilchen ergibt. Auf unvorstellbar kleinen Längenskalen könnten zudem zusätzliche räumliche Dimensionen existieren.

Solche Ab-initio-Ansätze können allerdings bislang keine Aussage über die Stärke einer möglichen CPT-Verletzung treffen. Sie können auch nicht vorhersagen, in welchen der grundlegenden Eigenschaften eines Teilchens sie sich ausdrücken würde. Die Gruppe um den theoretischen Physiker Alan Kostelecky hat eine Erweiterung zum Standardmodell (Standardmodell-Erweiterung, SME) entwickelt, die eine explizite, das heißt künstlich eingefügte, CPT-Verlet-

zung enthält [6]. Auch in diesem Modell ist die Stärke der Verletzung zwar ein beliebiger Parameter. Es erlaubt jedoch in gewissen Grenzen eine Aussage darüber, in welchen Eigenschaften die Asymmetrie bevorzugt zu Tage treten könnte.

Antimaterie-Studien

Auf der Suche nach einer Ursache für die Baryonen-Asymmetrie sind bereits einige sehr präzise Vergleiche zwischen einzelnen Eigenschaften von Teilchen und deren Antiteilchen durchgeführt worden. Abbildung 3 gibt einen Überblick über die bis heute erfolgten Messungen und deren relative Genauigkeiten. Daraus ist ersichtlich, dass sich die Messungen durchaus schon im Bereich einer möglichen Abweichung von etwa 10^{-10} bewegen. In die Ergebnisse gehen allerdings zum Teil auch theoretische Modelle ein, so dass es sich bei diesen Ungenauigkeiten nicht ausschließlich um experimentelle Obergrenzen für eine Abweichung handelt. Es muss auch betont werden, dass die Abwesenheit einer CPT-Verletzung in einer Eigenschaft eines Teilchens, zum Beispiel der Masse, keine Rückschlüsse auf die anderen Eigenschaften erlaubt.

Daher bleiben ähnliche hochpräzise Vergleichsmessungen weiterhin von großem Interesse, insbesondere wenn sie die bisher experimentell erreichte Genauigkeit noch steigern. Eine vielversprechende Vergleichsgröße ist die Frequenz des atomaren 1S-2S-Übergangs im (Anti-)Wasserstoff. Wegen seiner relativ langen mittleren Lebensdauer von 122 Millisekunden und der damit verbundenen sehr schmalen Linienbreite eignet sich der metastabile 2S-Zustand besonders gut für hochpräzise Messungen. Die Gruppe um Theodor Hänsch (Physik-Nobelpreis 2005, siehe Interview in Physik in unserer Zeit 2006, 37(1), 10 und 37(2), 62) hat mit der Methode der Zwei-Photonen-Spektroskopie diesen Übergang am Wasserstoff mit einer relativen Ungenauigkeit von $2 \cdot 10^{-14}$ vermessen.

Diese Präzision macht die aus der Übergangsfrequenz berechnete Rydberg-Konstante zur am genauesten bekannten fundamentalen physikalischen Größe überhaupt. Es liegt nahe, dieses Experiment auch am Antiwasserstoffatom durchzuführen, sobald es im Labor dafür präpariert werden kann. Ein so hochpräziser Vergleich der atomaren Spektren von Wasserstoff und Antiwasserstoff könnte vielleicht einen Hinweis auf fundamentale Unterschiede zwischen Materie und Antimaterie ergeben.

Ein anderer Themenbereich, dem in den letzten Jahren verstärkt theoretische Arbeiten gewidmet wurden, ist die Wirkung der Schwerkraft auf Antimaterie. Die Schwerkraft ist die einzige der vier fundamentalen Wechselwirkungen, die sich bislang einer Vereinheitlichung zu einer „Weltformel“ mit den anderen Kräften widersetzt. Es gibt Versuche, den bei den anderen Kräften erfolgreichen Formalismus einer Quantenfeldtheorie auch auf die Gravitation zu übertragen. Quantenfeldtheorien führen die Wechselwirkung zwischen Teilchen auf den Austausch virtueller Teilchen

zurück. Bei der elektromagnetischen Wechselwirkung zum Beispiel sind das virtuelle Photonen.

In Quantengravitationstheorien übernimmt diesen Part das – hypothetische – Graviton. Da bisher ausschließlich eine anziehende Schwerkraft beobachtet wurde, schließen Theoretiker daraus, dass es sich beim Graviton um ein Austauschteilchen mit Spin 2 (Gravitensor) handeln muss. Dieses wäre in seiner Wirkung der Newtonschen Formulierung der Schwerkraft äquivalent, nach der die Gravitationswechselwirkung zwischen zwei Massen mit dem Quadrat ihrer Entfernung voneinander abnimmt.

Aber auch Austauschteilchen mit Spin 0 (Graviskalar) oder Spin 1 (Gravivektor) sind denkbar. Das skalare und tensorielle Graviton würden eine identische Wirkung auf Teilchen aus Antimaterie und aus Materie entfalten. Ein vektorielles Graviton würde dagegen auf Antimaterie eine abstoßende Kraft ausüben. Antimaterie fiel also in einem solchen Gravitationsfeld gleichsam „nach oben“. Allerdings hätten solche nichtnewtonschen Anteile der Schwerkraft auch Auswirkungen auf normale Materie, allen voran eine Abweichung von ihrer quadratischen Abstandsabhängigkeit. Bis heute ergab jedoch kein Experiment – von hochempfindlichen Gravitationswaagen bis hin zu einer präzisen Vermessung von Planetenbahnen – auf den ihnen zugänglichen Längenskalen Hinweise auf eine solche Abweichung. Es gibt auch physikalische Argumente, warum zumindest ein starker vektorieller Anteil an der Schwerkraft nicht zu erwarten ist.

Es ist aber möglich, dass die Gravitation kleinere nicht-tensorielle Anteile hat – also auch eine geringe Menge an Gravitonen mit Spin 1 an der Wechselwirkung beteiligt sind. Solche Effekte wären aufgrund der entgegengesetzten Masse-„Ladung“ von Antiteilchen in einem Antimaterie-Experiment besonders leicht beobachtbar.

Nun treten subatomare Antiteilchen sogar natürlich auf und sind im Labor leicht herstellbar. Warum sind dann Messungen zur Antimaterie-Gravitation nicht schon längst durchgeführt worden?

Die Antwort liegt in der relativen Schwäche der Schwerkraft verglichen mit den anderen fundamentalen Kräften. So ist zum Beispiel die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung um etwa 37 Größenordnungen größer als diejenige der Gravitation. Da die verfügbaren subatomaren Antiteilchen alle eine elektrische Ladung haben, hatten die in jedem Laborexperiment unvermeidlichen elektrischen und magnetischen Streufelder bislang stets eine erheblich stärkere Wirkung auf die Teilchen als die zu beobachtende Schwerkraft. Präzisionsexperimente waren also völlig undenkbar.

Anti-Atome im Labor

Erst neutrale Systeme wie das Antiwasserstoffatom, die sich aus mehreren geladenen Antiteilchen zusammensetzen, eröffnen die Möglichkeit, Gravitationsexperimente mit Antimaterie durchzuführen. Zur Bildung solcher gebundener Atome kann es kommen, wenn die einzelnen Bestandteile

des Systems bei niedriger Energie wechselwirken. Beim Antiwasserstoff „rekombiniert“ dabei ein Antiproton mit einem Antielektron (Positron). Während Positronen natürlich vorkommen, stellt die Herstellung von niederenergetischen Antiprotonen eine große Herausforderung dar. Derzeit gibt es weltweit nur eine „Antimateriefabrik“, und zwar den Antiprotonenverzögerer AD (Antiproton Decelerator) am CERN.

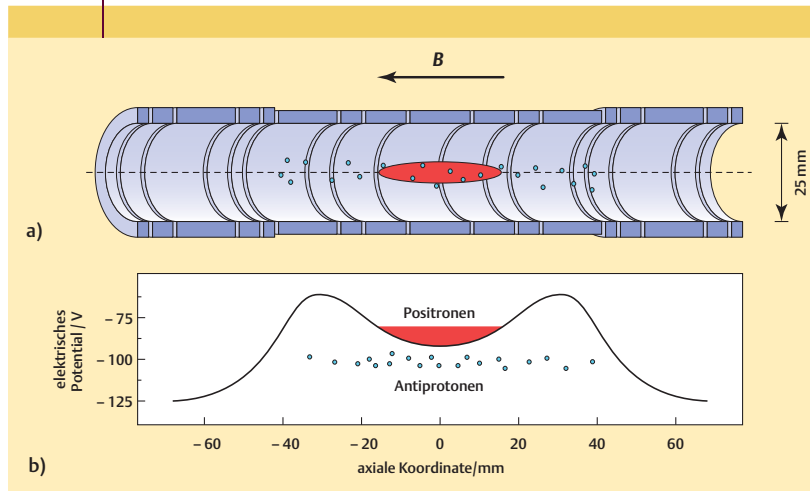
Am Vorgängerlabor des AD, dem Niederenergie-Antiprotonen-Ring Lear (Low-Energy Antiproton Ring), glückte 1995 zum ersten Mal die Herstellung von Antiwasserstoffatomen. Am PS210-Experiment unter der Leitung von Walter Oelert wurde ein Antiprotonenstrahl mit einem Strahl aus Atomclustern des Edelgases Xenon gekreuzt. Durch die Wechselwirkung der energiereichen Antiprotonen mit den Xenon-Kernen entstanden Positron-Elektron-Paare. In einigen wenigen Fällen bewegten sich ein Antiproton und ein Positron mit geringer Relativgeschwindigkeit parallel, so dass ein Antiwasserstoffatom entstehen konnte. Im Laufe mehrerer Tage konnte Oelerts Gruppe so insgesamt elf Antiwasserstoffatome herstellen [7]. Allerdings bewegten sich diese Antiatome mit 90 % der Lichtgeschwindigkeit. Deshalb waren sie für Messungen, die über den Nachweis ihrer kurzen Existenz hinausgingen, unbrauchbar.

Diese Beschränkung ist nun am AD überwunden worden. Dort wird etwa vierzigmal pro Stunde ein dickes Metalltarget mit 10^{13} Protonen beschossen, die zuvor auf eine Energie von 26 GeV beschleunigt wurden. Durch Wechselwirkung mit den Atomkernen des Targets entstehen neben anderen subatomaren Teilchen Paare von Protonen und Antiprotonen. Dabei werden jeweils etwa eine Million Protonen zur Herstellung eines einzigen Antiproton-Proton-Paares benötigt. Die Antiprotonen werden durch einen Massenfilter ausgewählt und in einen Speicherring mit einem Umfang von 190 m eingeschossen.

Dieser Ring soll nun die Energie der Antiprotonen um einen Faktor 700 verringern und dabei möglichst wenige von ihnen verlieren. Der AD verwendet für die Verzögerung die gleiche Technik, wie sie normalerweise in Teilchenbeschleunigern zum Einsatz kommt, allerdings mit umgekehrt gepolten Potentialen. Das Herzstück der Apparatur ist eine Hochfrequenz-Kavität, an der an einer Reihe von Spalten in der Strahlführung eine Wechselspannung anliegt. Sie ist so gesteuert, dass die durchfliegenden negativen Teilchen immer ein negatives Potential spüren und so in jeder Spalte abgebremst werden.

Am Ende eines etwa 90 s währenden Verzögerungszyklus haben die Antiprotonen eine Energie von etwa 5 MeV erreicht. Jetzt können sie zu einem der Experimente abgeschossen werden, die im Inneren des Rings installiert sind. Zwei dieser Experimente haben sich die Produktion von kaltem Antiwasserstoff auf die Fahnen geschrieben: Die konkurrierenden Gruppen Atrap unter der Leitung von Gerald Gabrielse und Athena, zunächst unter der Leitung von Rolf Landua, später von Alberto Rotondi.

ABB. 4 | PENNING-FALLE



Speichern geladener Teilchen: a) Schnittbild einer zylindrischen Penning-Falle. Durch statische elektrische und magnetische Felder werden geladene Teilchen in allen Raumrichtungen eingeschlossen. b) Ein geschichtetes elektrisches Potential erlaubt es, sowohl negative als auch positive Teilchen gleichzeitig in der Penning-Falle einzuschließen.

Abbildung 1 zeigt einen Überblick über die gesamte Apparatur des Athena-Experiments. Beiden Experimenten gemein ist ihr Kernstück, eine Penning-Falle zum Einschluss der geladenen Teilchen (Abbildung 4) [8]. Auch Positronen werden von beiden Gruppen auf die gleiche Weise erzeugt. In einer intensiven radioaktiven Quelle zerfällt das Nuklid Natrium-22 durch Betazerfall. Sie emittiert stetig Positronen mit hoher Energie. Diese werden in einem Moderator abgebremst und in einer großen Penning-Falle gesammelt, während die Antiprotonen noch im Ring umlaufen.

Selbst nach dem intensiven Verzögerungsprogramm im AD-Ring haben die Antiprotonen noch eine zu hohe Energie, um in einer Penning-Falle eingefangen zu werden. Daher ist am Eingang zur Falle eine dünne Metallfolie angebracht, die die Bewegungsenergie der Antiprotonen nochmals um einen Faktor 1000 reduziert. Leider ist dieser letzte Abbremschritt sehr verlustreich: Von etwa 10^7 ausgeschossenen Antiprotonen bleiben nur noch etwa 10^4 übrig. Diese können nun aber sehr effizient in der Penning-Falle eingeschlossen und gespeichert werden. Die Atrap-Gruppe hat es sogar geschafft, im Laufe etwa einer Stunde mehr als 30 Antiprotonenpulse vom AD ohne nennenswerte Verluste in die gleiche Falle zu laden.

Rekombination

Abbildung 4 illustriert, wie geladene Teilchen in einer Penning-Falle beliebig lange gespeichert werden können. Wie kann man nun die entgegengesetzt geladenen Antiprotonen und Positronen in einer solchen Falle zusammenbringen? Die Lösung liegt in einer raffinierten Anordnung der elektrischen Potentiale, die Gerald Gabrielse 1988 entwickelt hat [9]. Dazu wird ein geschichtetes Potential in Form des Buchstabens „M“ erzeugt (Abbildung 4b). Die

ses hält die positiv geladenen Positronen im zentralen Well gefangen, während die negativ geladenen Antiprotonen von den seitlichen Wänden des Potentials eingeschlossen werden.

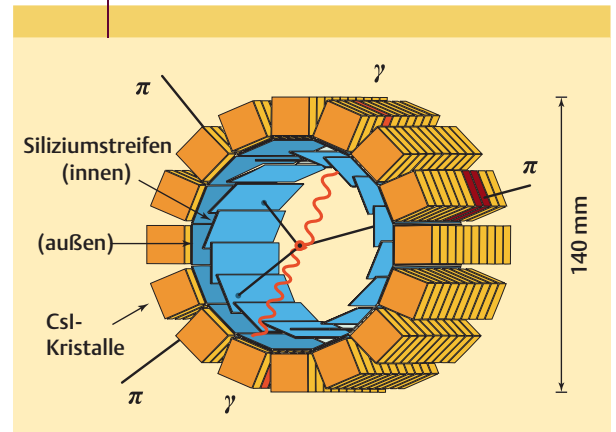
Zunächst müssen nun die Positronen abgekühlt werden. Dazu nutzen wir eine interessante Eigenschaft der Penning-Falle: Die leichten Positronen folgen in deren starken Magnetfeld Kreisbahnen mit einer sehr hohen Rotationsfrequenz im Bereich von 100 GHz. Das beschleunigt sie kräftig, und sie strahlen einen Teil ihrer Bewegungsenergie als elektromagnetische Strahlung ab. So kühlen sie in weniger als einer Sekunde auf das Temperaturniveau der Falle ab, die durch flüssiges Helium auf etwa 4 K gehalten wird.

Wenn die kalten Positronen im geschichteten Potential vorbereitet sind, werden nun die heißen Antiprotonen in die Falle eingeschossen. Sie reflektieren zwischen den äußeren Potentialwänden hin und her und laufen dabei jedes Mal durch die Positronenwolke. Stöße mit den kalten Positronen kühlen die Antiprotonen auf die Falltemperatur ab. Nach etwa einer Zehntelsekunde hat ein Großteil der Teilchen dieselbe Temperatur erreicht und die Rekombination kann einsetzen. Mit dieser Technik gelang 2002 zunächst Athena und kurz darauf auch Atrap erstmals die Produktion von kaltem Antiwasserstoff [10, 11].

Wie gewonnen, so zerronnen

Das magnetische und das elektrische Feld der Penning-Falle wirken nur auf elektrisch geladene Teilchen. Sobald sich ein neutrales Antiwasserstoffatom bildet, bewegt es sich ab diesem Zeitpunkt völlig unbeeinflusst von den Feldern auf einer geraden Flugbahn weiter. Zwangsläufig trifft es nach einigen Mikrosekunden auf eine der Fallenelektroden auf. Der Verlust des eben erst entstandenen Antiwasserstoffs mag bedauerlich sein. Er ist aber für den Nachweis wich-

ABB. 5 | ANTIWASSERSTOFF-DETEKTOR



Der Detektor von Athena umschließt die (hier nicht gezeigte) Penning-Falle. Mehr als 8000 Siliziumstreifen-Detektoren (blau) registrieren geladene Pionen. Die 192 Cäsiumiodid-Szintillatoren (gelb) messen die Energie von Photonen.

tig, dass in den beiden AD-Experimenten wirklich gebundene Anti-Atome entstanden sind.

Wenn ein Antiwasserstoffatom auf ein gewöhnliches Atom an der Elektrodenoberfläche trifft, setzt ein Prozess ein, dessen Signatur unverwechselbar ist. Zunächst annihiliert das Positron des Antiwasserstoffatoms mit einem Elektron aus der Hülle eines Atoms der Fallenelektrode. Das nun wieder nackte Antiproton trifft kurz danach auf einen Atomkern des Elektrodenmaterials und annihiliert mit einem Neutron oder Proton. Beim Nachweis des charakteristischen Signals dieser doppelten Annihilation hatte die Athena-Gruppe dank ihres raffinierteren Detektors die Nase vorn. Trotz seiner Komplexität hätte er in einem Schuhkarton Platz (Abbildung 5). Die Stärke der Nachweismethode liegt in der Möglichkeit, alle Detektordaten räumlich und zeitlich zu korrelieren und zu einem Gesamtbild zusammenzufügen. Das Verfahren ist im zusätzlichen Text erläutert, der in www.phiu.z.de unter „Special Features/ Zusatzmaterial zu den Heften“ bereitsteht.

Zwar lässt sich nur ein kleiner Anteil aller Ereignisse komplett rekonstruieren. Detaillierte Simulationen erlauben es aber, aus den beobachteten Parametern mit hoher Genauigkeit auf die Anzahl der tatsächlich erzeugten Antiwasserstoffatome rückzuschließen. Daraus ergibt sich, dass Athena zwischen 2002 und 2003 aus ungefähr 8 Millionen Antiprotonen insgesamt etwa 1,25 Millionen Antiwasserstoffatome erzeugt hat.

Viele Wege zum gleichen Ziel

Man kann leicht einsehen, dass die Bildung eines gebundenen Systems aus zwei aufeinander prallenden Teilchen nicht gleichzeitig Energie und Impuls erhalten kann. Deshalb braucht die Rekombination von (Anti-)Wasserstoff immer noch einen dritten Reaktionspartner. Dieser kann ein Photon sein, das vom Atom ausgesandt wird. Oder er ist ein weiteres Positron, das durch einen Stoß den nötigen Impuls aufnimmt und danach den Wechselwirkungsbereich des neu gebildeten Atoms wieder verlässt. Der erste Prozess heißt Strahlungs-Rekombination (Abbildung 6a), der zweite Dreikörper-Rekombination (Abbildung 6b).

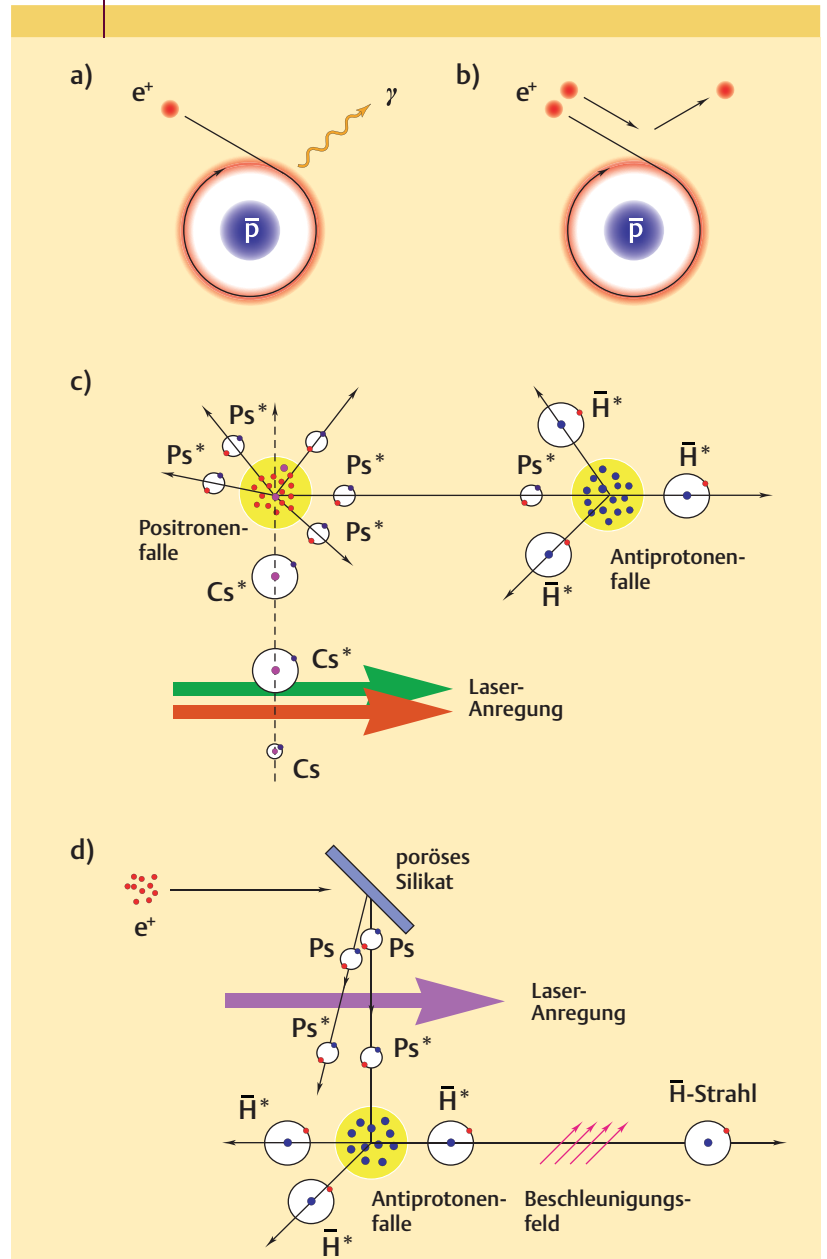
Welcher dieser beiden Rekombinations-Mechanismen vorrangig für die beobachtete Erzeugung des Antiwasserstoffs verantwortlich ist, ist nicht nur eine akademische Frage. Die beiden Prozesse stellen nämlich Anti-Atome mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften her. Das kann für die weitere Verwendung in Präzisionsmessungen von großer Bedeutung sein. Theoretisch entstehen bei der Strahlungs-Rekombination vornehmlich Anti-Atome, die sich in niedrig angeregten Zuständen oder im Grundzustand befinden, während bei der Dreikörper-Rekombination in erster Linie höher angeregte Zustände bevölkert werden. Außerdem zeigen die Produktionsraten der beiden Mechanismen unterschiedliche Abhängigkeiten von der Temperatur und Dichte der beteiligten Positronen. Die Experimente mit Athena konnten bislang nicht abschließend klären, welcher der beiden Rekombinationsprozesse bei ihnen dominiert.

Die meisten Argumente sprechen bisher jedoch dafür, dass der Antiwasserstoff in erster Linie durch Dreikörperstöße entsteht.

Ein Käfig für kalte Atome

Die bisherigen Antiwasserstoff-Experimente waren speziell für die Herstellung von kaltem Antiwasserstoff und dessen destruktiven Nachweis konzipiert. Sobald Anti-Atome entstanden, verließen sie die Ionenfalle und waren für weitere

ABB. 6 REKOMBINATION VON ANTIWASSERSTOFF



Prozesse zur Bildung von Antiwasserstoff \bar{H} : a) Bei der Strahlungs-Rekombination ist ein Photon als Partner beteiligt, b) bei der Dreikörper-Rekombination ein weiteres Positron. c) Mehrstufiger resonanter Ladungsaustausch von Cäsium-Atomen mit Positronen und Antiprotonen, d) Erzeugung von Rydberg-Positronium in einer porösen Oberfläche und anschließender resonanter Ladungsaustausch mit Antiprotonen.

Messungen verloren. Der nächste logische Schritt auf dem Weg zu Präzisionsmessungen ist die Suche nach einer Möglichkeit, den entstandenen Antiwasserstoff zu speichern und eine ausreichende Zahl von Atomen anzusammeln. Ideal wäre die in der Atomphysik äußerst erfolgreiche Methode des Laserkühlens, bei der Atomen durch die gerichtete Absorption von Photonen ein bremsender Impuls übertragen wird. Leider macht die extrem kurze Wellenlänge des 1S-2P-Übergangs in (Anti-)Wasserstoff von 121,6 nm einen Strich

durch diese Rechnung. Dafür stehen noch keine ausreichend leistungsfähigen Dauerstrichlaser zur Verfügung.

Stattdessen lässt sich ein anderer Effekt nutzen: Statische elektrische oder magnetische Felder haben zwar keine Wirkung auf neutrale Teilchen, ihre Gradienten üben jedoch Kräfte auf das elektrische oder das magnetische Moment von Atomen aus. Das Potential eines Atoms mit dem magnetischen Moment μ in einem Magnetfeld \mathbf{B} beträgt

$$U = -\mu\mathbf{B},$$

so dass Atome je nach Ausrichtung des magnetischen Moments eine Kraft hin zum Minimum oder zum Maximum des Magnetfeldes erfahren (Abbildung 7a). Für unsere experimentellen Zwecke suchen wir eine Magnetfeldkonfiguration, die in radialer Richtung gesehen ein Minimum auf der Fallachse hat. Das bieten uns radiale Multipolfallen, die einen Magnetfeldverlauf der Form

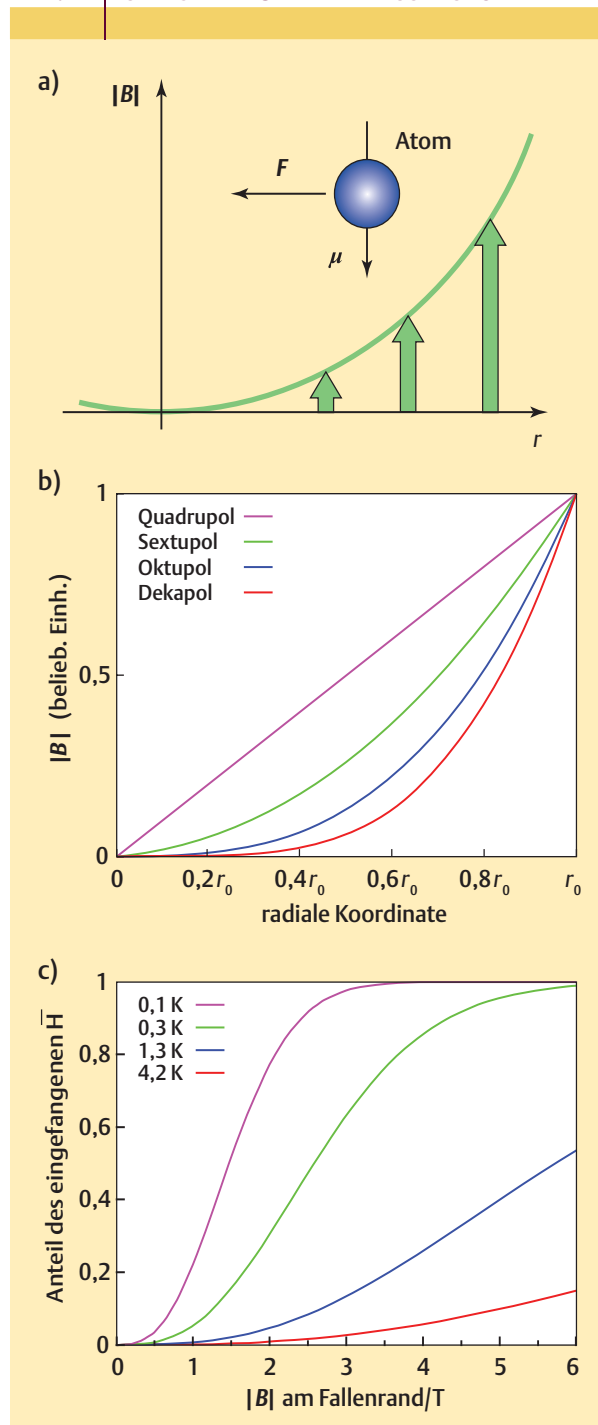
$$B(r) = k_s r^{(s-1)}$$

aufweisen. Dabei steht s für die Ordnung des Multipols (Quadrupol: $s = 2$, Sextupol: $s = 3$ usw.), k_s ist eine von s abhängige Konstante. Abbildung 7b zeigt diesen Verlauf für die ersten vier Ordnungen. Dabei ist k_s jeweils so gewählt, dass das Magnetfeld an den Fallenelektroden den gleichen Betrag hat.

Die Bedingungen für den Einschluss der geladenen Teilchen, also der Positronen und Antiprotonen, und des entstandenen neutralen Antiwasserstoffs kann man nun gleichzeitig erreichen. Dazu überlagert man ein solches Multipolfeld dem Solenoidmagneten, der für das homogene Magnetfeld der Penning-Falle sorgt. Allerdings schafft eine solche Multipolfalle auch ein neues Problem: Sie zerstört die zylindrische Symmetrie der Penning-Falle, was die Stabilität der Positronenwolke gefährdet. Diese bildet wegen ihrer hohen Dichte und Teilchenzahl ein Plasma, das mit hoher Geschwindigkeit um die eigene Achse rotiert. Abbildung 7b zeigt, dass Magnetfelder höherer Ordnung in der Nähe der Fallennitte sanfter ansteigen, was einen geringen Einfluss auf die Positronen erwarten lässt. Tatsächlich haben Messungen ergeben, dass eine Quadrupolfalle die Plasmastabilität vollständig zerstört, während eine Sextupolfalle ein Elektronenplasma mehrere Minuten lang ohne Verluste speichern kann [12].

In der Näherung eines idealen Gases kann man berechnen, welchen Anteil der erzeugten Anti-Atome eine magnetische Multipolfalle in Abhängigkeit von ihrer Temperatur einfangen kann. Abbildung 7c zeigt diese Größe für verschiedene Temperaturen. In ihr ist noch nicht berücksichtigt, dass höchstens die Hälfte aller Anti-Atome eine Kraft hin zum Zentrum der Falle erfahren. Nach jüngsten Berechnungen liegt dieser Anteil sogar deutlich unter 50 %. Aus supraleitenden Spulen kann man heute Multipolmagneten mit Feldstärken von etwa 1 T herstellen. Dies entspricht bei einem Solenoidfeld von 6 T einer Fallentiefe von etwa

ABB. 7 | SPEICHER FÜR ANTIWASSERSTOFF



Magnetische Multipolfalle:
a) Kraft auf das magnetische Moment eines Atoms im inhomogenen Magnetfeld, b) Betrag des Magnetfeldes für radiale magnetische Multipolfallen unterschiedlicher Ordnung, c) Anteil der eingeschlossenen Atome als Funktion ihrer Temperatur.

0,1 T. Damit kann man bei einer Erzeugungstemperatur von 4 K eine Einfangeffizienz im Promillebereich erwarten.

Allerdings haben Messungen von Atrap und Athena gezeigt, dass die Antiwasserstoff-Atome mit viel höherer Temperatur erzeugt werden, als es die auf 4 K gekühlte Falle erwarten ließ. Vermutlich setzt die Rekombination schon ein, bevor die Antiprotonen von den Positronen vollständig auf die Fallentemperatur von 4 K abgekühlt sind. Die Antiprotonen haben eine fast zweitausend Mal größere Masse als die Positronen und bestimmen deshalb die Temperatur der erzeugten Anti-Atome.

Neben der Technik der verschachtelten Potentiale hat Atrap auch noch eine weitere Methode zur Antiwasserstoffherzeugung entwickelt, die dieses Problem umgeht. Sie basiert auf dem mehrfachen resonanten Ladungsaustausch zwischen Cäsiumatomen, Positronen und schließlich Antiprotonen (Abbildung 6c) [13]. Da bei dieser Technik die Antiprotonen schon vor der Rekombination auf die Fallentemperatur abgekühlt werden, können wir erwarten, dass Antiwasserstoff mit dieser niedrigen Temperatur entsteht. Leider ist diese Methode noch sehr ineffizient, so dass insgesamt erst einige wenige Anti-Atome auf diese Weise erzeugt werden konnten.

Perspektiven für die Zukunft

Im Jahr 2005 mussten die CERN-Beschleuniger eine Zwangspause einlegen, da sämtliche Kapazitäten für die Fertigstellung des neuen Teilchenbeschleunigers LHC benötigt wurden, der Ende 2007 in Betrieb gehen soll. So hatten auch die Teams der AD-Experimente Gelegenheit, über zukünftige Strategien nachzudenken. Zwei Nachfolgegruppen der Athena- und der Atrap-Kollaboration wollen mit verschiedenen Techniken versuchen, Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle einzuschließen. Falls dies gelingt, ist ihr Fernziel die Laserspektroskopie am 1S-2S-Übergang des Antiwasserstoffs.

Einen gänzlich anderen Weg schlägt die neu gebildete Aegis-Kollaboration ein. Anstatt Antiwasserstoff zu speichern, will sie einen Strahl aus Antiwasserstoff-Atomen herstellen und mit ihm direkt Experimente durchführen. Dazu wählt sie eine Produktionsmethode, die als Zwischenschritt hoch angeregtes Positronium erzeugt. Positronium ist das wasserstoffähnliche gebundene System aus einem Elektron und einem Positron. Aufgrund seiner starken Anregung hat es eine große Angriffsfläche. Dadurch erhöht sich die Wahrscheinlichkeit, dass bei der Wechselwirkung des Positroniums mit einer Wolke kalter Antiprotonen durch Ladungsaustausch Antiwasserstoff entsteht. Dieser befindet sich wegen der Energieerhaltung ebenfalls in hochangeregten Zuständen (Abbildung 6d). Solche Rydberg-Zustände reagieren sehr empfindlich auf elektrische Feldgradienten, dadurch kann so erzeugter Antiwasserstoff präzise abgebremst oder beschleunigt werden.

Mit dieser Technik will die Aegis-Gruppe einen kollimierten Strahl aus Antiwasserstoff erzeugen. Ihr Ziel ist die Untersuchung der Antimaterie-Gravitation. Der einfachste

Ansatz zu einer Bestimmung der Gravitationskonstante mit Anti-Atomen ist die Beobachtung eines horizontalen Teilchenstrahls über eine gewisse Flugstrecke. Simulationen haben ergeben, dass schon das einfache Ausmessen der Fallhöhe eines Antimateriestrahls über eine 2 m lange Strecke eine auf 10 % genaue Messung der Gravitationskonstante für Antimaterie erlauben würde. Es sind noch andere Techniken mit Antiwasserstoffstrahlen in Diskussion, die sich die Welleneigenschaft von Teilchen zunutze machen und die einen noch viel genaueren Wert liefern könnten.

Zusammenfassung

Obwohl im Urknall gleiche Mengen von Antimaterie und Materie entstanden sind, überwiegt letztere heute im beobachtbaren Universum. Die Ursache für diese Asymmetrie gehört zu den ungelösten Rätseln der Physik. Der Grund könnte darin liegen, dass Antimaterie kein absolut perfektes Spiegelbild der Materie ist. Um Antimaterie daraufhin zu untersuchen, muss sie im Labor zur Verfügung stehen. Die Erzeugung von Antiwasserstoff-Atomen im Labor gelingt seit 1995 erfolgreich am CERN. Doch bislang waren sie zu heiß, um sie zwischenzuspeichern und mit ihnen weiter experimentieren zu können. Dieses Ziel verfolgen derzeit mehrere Gruppen am CERN.

Stichworte

Antimaterie, Antiwasserstoff, Baryonen-Asymmetrie, CPT-Symmetrie, Gravitation, Penning-Falle, Lear, Athena, Atrap, Antiproton Decelerator, Aegis.

Literatur

- [1] W. Pauli (Hrsg.), Niels Bohr and the development of physics, New York, McGraw-Hill 1955.
- [2] E. W. Kolb, M. S. Turner, The Early Universe, Addison-Wesley 1990.
- [3] M. Aguilar, Phys. Rep. **2002**, 366, 354.
- [4] A. D. Sakharov, Sov. Phys. JETP **1967**, 5, 24.
- [5] O. Bertolami et al., Phys. Lett. B **1997**, 395, 178.
- [6] R. Bluhm et al., Phys. Rev. D **1998**, 57, 3932.
- [7] G. Baur et al., Phys. Lett. B **1996**, 368, 251.
- [8] L. S. Brown, G. Gabrielse, Rev. Mod. Phys. **1986**, 58, 233.
- [9] G. Gabrielse et al., Phys. Lett. A **1988**, 129, 38.
- [10] M. Amoretti et al., Nature **2002**, 419, 456.
- [11] G. Gabrielse et al., Phys. Rev. Lett. **2002**, 89, 213401.
- [12] M. Amoretti et al., Phys. Lett. A **2006**, 360, 141.
- [13] C. H. Storry et al., Phys. Rev. Lett. **2004**, 93, 263401.

Der Autor



Alban Kellerbauer, Studium der Physik in Stuttgart und an der McGill-Universität in Montréal (Kanada). Promotion 2002 in Heidelberg. Danach zunächst Postdoc am Experiment Isolde (CERN), dann 2003-2005 CERN-Fellow am Athena-Experiment. Seit 2006 Leiter der Emmy-Noether-Forschungsgruppe „Präzisionsexperimente mit gespeicherten Ionen und Antimaterie“ am Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg.

Anschrift

Dr. Alban Kellerbauer, Max-Planck-Institut für Kernphysik, Postfach 103980, D-69029 Heidelberg.
a.kellerbauer@mpi-hd.mpg.de