

Experimente mit der „Antiwelt“

Mit Hilfe von Präzisionsexperimenten an Antiwasserstoff könnte sich der Materieüberschuss im Universum erklären lassen.

Dieter Grzonka, Walter Oelert und Jochen Walz

Zwar sind beim Urknall zunächst gleichviel Materie und Antimaterie entstanden, aber im Laufe der Zeit muss sich ein Materieüberschuss ausgebildet haben, dem wir letztlich unsere Existenz verdanken. Künstlich erzeugte Antiwasserstoffatome bieten nun ein enormes Potenzial, um die fundamentale Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie präzise zu messen. Am CERN ist es in den letzten Jahren gelungen, relativ kalte Antiwasserstoffatome in großer Anzahl zu erzeugen. Im nächsten Schritt wird es darum gehen, noch kältere Antiatome in einer magnetischen Falle zu speichern und daran grundlegende Experimente durchzuführen. Dazu gehören sowohl spektroskopische Untersuchungen als auch Experimente zur Gravitation.

Vor nunmehr zehn Jahren wurden am Europäischen Teilchenphysik-Zentrum CERN erstmals Antiwasserstoffatome nachgewiesen. Diesem Erfolg des PS210-Experiments [1] am Antiprotonen-Speicherring LEAR folgte die Bestätigung durch Experimente am Fermilab in den USA [2]. Auch wenn die prinzipielle Existenz von Antiwasserstoffatomen von niemandem ernsthaft angezweifelt wurde, gelang ihr experimenteller Nachweis doch erst viele Jahrzehnte nach der Beobachtung ihrer Bausteine, dem Positron (Abb. 1, links) und dem Antiproton. Die (Wissenschafts-)Presse berichtete – zweifelsohne beflügelt durch Spekulationen über Antimaterie in der Welt des Science Fiction – weltweit über die erste Beobachtung von einigen wenigen Antiatomen, die sich jedoch nicht für weitergehende Experimente nutzen ließen.

Inzwischen arbeiten am CERN die beiden Kollaborationen ATHENA und ATRAP (Abb. 1, rechts) am ehrgeizigen Ziel der Präzisions-spektroskopie von Antiwasserstoff und dem Vergleich mit gewöhnlichem Wasserstoff. Hintergrund ist die grundlegende Frage, ob die Spektrallinien und Übergänge in Atomen und ihren Pendants aus der „Antiwelt“ übereinstimmen. Eine große Hürde auf dem Weg dahin ist bislang die vergleichsweise geringe

KOMPAKT

- ▶ Am Antiproton Decelerator (AD) des CERN wurden im Jahre 2002 erstmals kalte Antiwasserstoffatome erzeugt.
- ▶ Sehr effizient gelingt dies in Dreikörperstößen. Die Atome, die dabei entstehen, sind aber zu heiß, um in einer magnetischen Falle gespeichert zu werden.
- ▶ Kältere, aber zahlenmäßig noch zu wenige Antiatome wurden durch Ladungsaustausch von Rydberg-Positronium mit Antiprotonen erzeugt und beobachtet.
- ▶ Das Ziel der Experimente besteht darin, den 1s–2s-Übergang bzw. die Hyperfeinaufspaltung in Wasserstoff und Antiwasserstoff zu vergleichen.

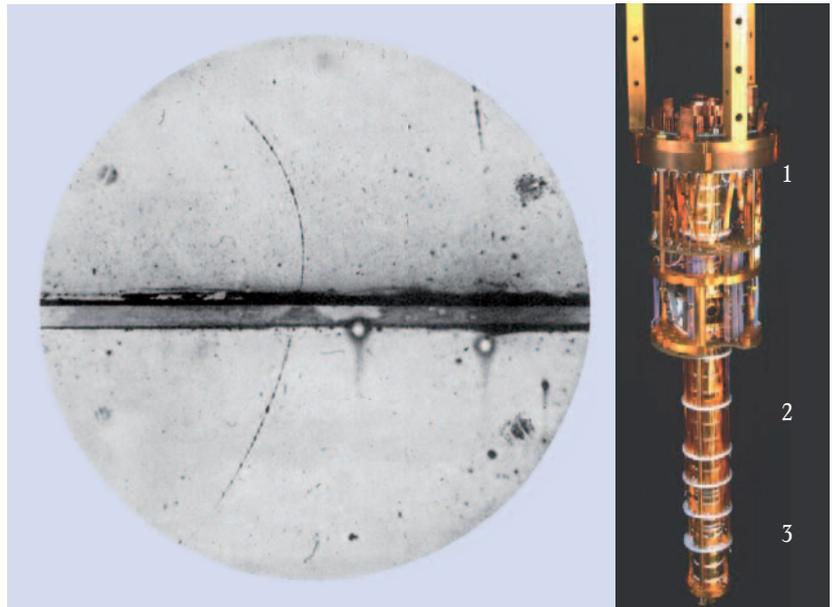


Abb. 1: Durch diese Nebelkammeraufnahme wies Carl D. Anderson 1932 anhand der Krümmung der Teilchenspuren erstmals das Antiteilchen Positron oder Anti-Elektron nach. Viele Jahrzehnte später gelang es auch, Antiprotonen zu beobachten, bis schlussendlich 1995 die ersten Antiwasserstoffatome, bestehend aus Positron und Antiproton, erzeugt wurden. Das ehr-

geizige Ziel, präzise Messungen an kalten Antiwasserstoffatomen vorzunehmen, soll u. a. mit dem ATRAP-Experiment erreicht werden. Zentraler Bestandteil sind sog. Penning-Fallen für Positronen (1) und Antiprotonen (3), die in einer speziellen Kammer (2) miteinander wechselwirken (Quelle: C. D. Anderson, Phys. Rev. 43, 491 (1933), Foto: P. Horowitz).

Zahl der verfügbaren Antiatome. Zwar lassen sich am CERN für die AD-Experimente derzeit effektiv etwa $3,5 \times 10^5$ Antiprotonen pro Sekunde erzeugen, doch diese absolute und unerreichbare Obergrenze für die Erzeugung von Antiwasserstoff liegt schon mehr als zehn Größenordnungen unter dem üblicherweise verfügbaren Fluss von kalten Wasserstoffatomen! Für die angestrebte Präzisionsspektroskopie von Antiwasserstoff sind darüber hinaus kalte Antiatome im Grundzustand erforderlich, die sich in einer magnetischen Falle speichern lassen. Ein Mechanismus wie beim PS210-Experiment, bei dem Anti-

Dr. Dieter Grzonka, Prof. Dr. Walter Oelert, Institut für Kernphysik, Forschungszentrum Jülich, 52425 Jülich; Prof. Dr. Jochen Walz, Arbeitsgruppe QUANTUM, Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Staudingerweg 7, 55128 Mainz

wasserstoff durch Teilchenkollisionen bei hohen Geschwindigkeiten von ca. 95 % der Lichtgeschwindigkeit erzeugt wird (vgl. Abb. 2d), ist dafür ungeeignet. Der Erfolg dieses Experimentes war aber sehr hilfreich bei den Bemühungen, aus dem ehemaligen Antiproton Accumulator den Antiproton Decelerator (AD) zu bauen, an dem ATHENA und ATRAP Ende 2000 ihre Tätigkeit aufnahmen.

Auf dem langen und hindernisreichen Weg hin zur Untersuchung der „Physik der Gegenwelt“ konnte im Jahre 2002 – im Jahr des 100. Geburtstages von Paul Dirac, der 1928 die Existenz von Antimaterie vorhergesagt hatte – von der ATHENA- und wenig später von der ATRAP-Kollaboration die Produktion von kalten Antiwasserstoffatomen bei beachtlichen Erzeugungsraten veröffentlicht werden. Diese Atome der Antimaterie sind allerdings immer noch zu heiß, um in einer magnetischen Falle gehalten zu werden. Die hohe Produktionsrate und ein alternativer neuer Erzeugungsmechanismus geben jedoch allen Anlass zur Hoffnung, dass das Ziel des Vergleiches physikalischer Messgrößen von Wasserstoff und Antiwasserstoff erreichbar ist.

Die verletzte Symmetrie?

Der Hauptaspekt bei diesem Vergleich sind mögliche Verletzungen der Symmetrie zwischen Materie und Antimaterie, der CPT-Symmetrie. CPT steht dabei für die Spiegelung der elektrischen Ladung (C: charge), der Ortskoordinaten (P: parity) und der Zeitkoordinate (T: time). Jeder physikalische Prozess, der durch eine lokale relativistische Quantenfeldtheorie wie das Standardmodell der Teilchenphysik beschrieben wird, muss invariant unter den gleichzeitigen Operationen C, P und T sein. Eine Verletzung dieser CPT-Symmetrie würde eine signifikante Erweiterung des Standardmodells erfordern.¹⁾

Die CPT-Symmetrie ist nicht zuletzt für die Frage nach unserer Existenz von Bedeutung. Während beim Urknall zunächst gleichviel Materie und Antimaterie aus Energie entstanden sind, scheint sich im Laufe

1) Im Standardmodell der Teilchenphysik gibt es keinen zwingenden Grund dafür, dass Prozesse auch unter den einzelnen Operationen C, P und T invariant sind. So wurden beispielsweise in Systemen von K^0 - und B^0 -Mesonen und ihren Antiteilchen Verletzungen der CP-Symmetrie nachgewiesen.

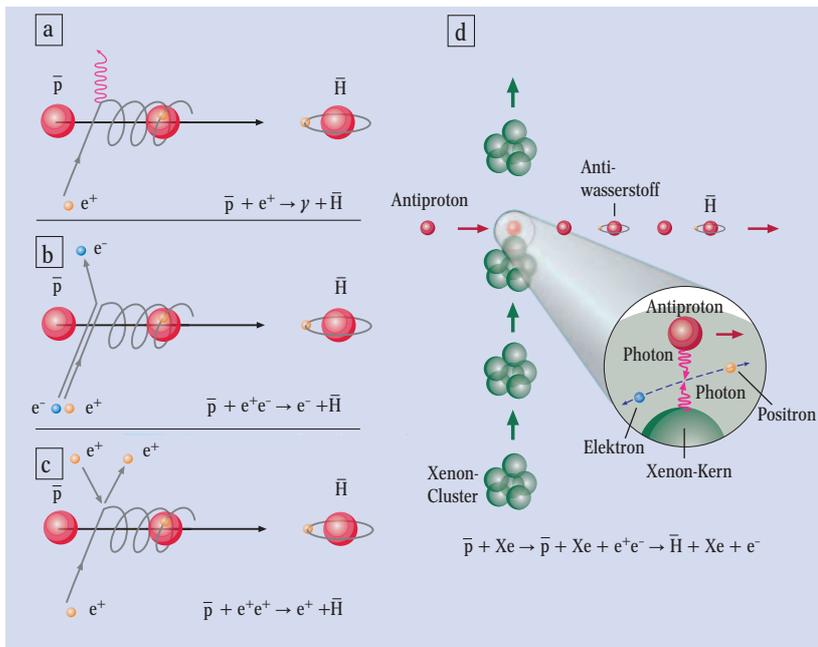


Abb. 2: Antiwasserstoff (\bar{H}) kann entstehen, wenn Antiprotonen und Positronen direkt miteinander rekombinieren (a). Wesentlich effizienter ist aber die Produktion durch Dreikörperstöße, z. B. mit

einem zusätzlichen Elektron (b), Positron (c) oder durch Stöße mit Xenon-Clustern (d) wie beim ersten erfolgreichen Experiment PS210 am CERN in Genf.

Messgröße	Obergrenze
$ m_p - m_{\bar{p}} /m_p$	$< 1,0 \cdot 10^{-8}$
$ q_p + q_{\bar{p}} /e$	$< 1,0 \cdot 10^{-8}$
$(q_{\bar{p}}/m_{\bar{p}} - q_p/m_p)/(q_p/m_p)$	$(-9 \pm 9) \cdot 10^{-11}$
$(m_{e^+} - m_{e^-})/\bar{m}$	$< 8 \cdot 10^{-9}$
$ q_{e^+} + q_{e^-} /e$	$< 4 \cdot 10^{-8}$
$(g_{e^+} - g_{e^-})/\bar{g}$	$(-0,5 \pm 2,1) \cdot 10^{-12}$
$(g_{\mu^+} - g_{\mu^-})/\bar{g}$	$(-2,6 \pm 1,6) \cdot 10^{-8}$
$ m_{K^0} - m_{\bar{K}^0} /\bar{m}$	$< 10^{-18}$
$(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0})/\bar{m}$	$(8 \pm 8) \cdot 10^{-18}$

Tab. 1: Differenz einiger Messgrößen von Teilchen und entsprechendem Antiteilchen, (m = Masse, q = Ladung, g = gyromagnetisches Verhältnis, \bar{m} bzw. \bar{g} sind die gemittelten Werte) [5].

der Entwicklung ein Materieüberschuss ausgebildet zu haben. Nach Andrej Sacharow ist es dafür notwendig, dass die Baryonenzahl keine Erhaltungsgröße ist, verknüpft mit C- und CP-Verletzung in einem thermischen Ungleichgewicht [3]. Diese Bedingungen erscheinen aus heutiger Sicht selbstverständlich: Um aus einem symmetrischen Zustand mit gleicher Zahl von Baryonen und Antibaryonen zu einem Materieüberschuss zu kommen, muss es natürlich Prozesse geben, welche die Zahl der Baryonen ändern. Ein solcher Prozess kann nur dann zu einem Materieüberschuss führen, wenn die C- bzw. CP-Symmetrie verletzt ist, denn die C-Transformation transformiert eine Materie-produzierende Reaktion in eine Antimaterie-produzierende Reaktion. Und ein merkbarer Überschuss entsteht schließlich nur, wenn ein thermisches Ungleichgewicht herrscht, d. h. wenn eine Reaktion bevorzugt in eine Richtung abläuft.

Die Kombination dieser Voraussetzungen führte zu unterschiedlichen Modellen, die einen Materieüberschuss beschreiben. In GUT-Modellen (Grand Unified Theories) wird die Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie durch massive Bosonen hervorgerufen, die die Baryonenzahl verletzen. Alternative Modelle werden diskutiert, wie die elektroschwache Baryogenese, die Leptogenese oder der Affleck-Dine-Mechanismus. Für weitergehende Erläuterungen zu diesem Themenkomplex sei auf die Fachliteratur verwiesen, wie z. B. [4]. Alle diese Modelle haben aber Schwierigkeiten, eine Asymmetrie in der richtigen Größenordnung zu generieren. Eine Alternative, die zu großen Baryonenasymmetrien führen könnte, sind CPT-verletzende Wechselwirkungen, die selbst in einem thermischen Gleichgewicht Asymmetrien verursachen können.

Experimente zur Suche nach einer möglichen CPT-Verletzung wurden bereits mit verschiedenen Teilchen (Leptonen, Mesonen, Baryonen) durchgeführt. Bei CPT-Invarianz sollten alle Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen, wie Masse, Ladung und magnetisches Moment, identisch sein. Tabelle 1 zeigt die experimentell ermittelten Obergrenzen für die Differenz verschiedener Messgrößen von Teilchen und Antiteilchen. Hinweise auf CPT-Verletzung ließen sich bislang nicht finden. Hervorzuheben ist dabei die kleine Obergrenze aus dem Massenvergleich von K^0/\bar{K}^0 von 10^{-18} , wobei zu bemerken ist, dass dieser Massenvergleich nicht direkt gemessen ist, sondern Modellrechnungen mit eingehen.

Zu beachten ist außerdem, dass die Zahlen in Tab. 1 nicht ohne weiteres zu vergleichen sind. Die verschiedenen Messgrößen müssen dafür zunächst auf eine gemeinsame Skala bezogen werden, wozu z. B. das SME

(Standard Modell Extension) herzunehmen wäre [6, 7]. In diesem Modell wird eine CPT-Verletzung durch ein äußeres Feld „von Hand“ eingebracht, wobei sich in der Lagrange-Funktion, die ein System beschreibt, CPT-verletzende Terme mit Koeffizienten ergeben, die direkt in Energieeinheiten angegeben sind. Damit lässt sich die Sensitivität unterschiedlicher Experimente besser vergleichen, natürlich auch nur im Rahmen dieses Modells. Trotz der bereits vorliegenden Tests ist es wichtig, die CPT-Invarianz in unterschiedlichen Systemen (Wechselwirkungen und Teilchenfamilien) weiter zu untersuchen.

Auf Grund der enormen Präzision laserspektroskopischer Untersuchungen ist das Antiwasserstoffatom eines der Systeme, das dabei für die Prüfung der CPT-Symmetrie eine besonders hohe experimentelle Genauigkeit verspricht. Eine CPT-Verletzung würde bedeuten, dass Übergangsfrequenzen und Spektrallinien in Wasserstoff und Antiwasserstoff nicht übereinstimmen. Herausragendes Beispiel hierfür ist der 1s–2s-Übergang, dessen Absolutfrequenz von rund 2466 THz am Max-Planck-Institut für Quantenoptik in Garching in den letzten Jahren immer genauer gemessen wurde. Die dabei erreichte Präzision liegt inzwischen bei 2 Teilen in 10^{14} . Für die im Zuge dieser Experimente entwickelten optischen Metrologie mit Frequenzkämmen hat T. W. Hänsch im Jahre 2005 den Nobelpreis erhalten. Während die ATRAP-Kollaboration den 1s–2s-Übergang messen möchte, plant die ASACUSA-Kollaboration, die am AD Experimente zu antiprotonischen Atomen betreibt, die Hyperfeinaufspaltung des Grundzustands von 1,420 GHz mit einem Antiwasserstoff-Atomstrahl zu messen [8]. Dieser Übergang wurde im gewöhnlichen Wasserstoff mit einer Präzision im Bereich von 10^{12} gemessen.

Das Rezept für Antiwasserstoff

Die Herstellung von Antiwasserstoff ist im Grundsatz klar: Man nehme Antiprotonen und Positronen, lasse beide miteinander reagieren und rekombinieren. Dabei kann die überschüssige Energie abgestrahlt werden (Abb. 2a). Da aber Energie- und Impulserhaltung gleichzeitig erfüllt sein müssen, entsteht bei diesem Prozess nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit Antiwasserstoff. Unter den Bedingungen der Experimente sind die Rekombinationsraten in Dreikörperstößen deutlich größer. Hierbei fungiert ein dritter Reaktionspartner quasi als Katalysator. Der Reaktionspartner kann z. B. ein zusätzliches Elektron oder Positron sein (Abb. 2b, c). An erfolgreichen Tagen werden auf diese Weise heute am CERN einige hunderttausend Antiwasserstoffatome produziert.

Das ATRAP- und das ATHENA-Experiment sind in ihrem prinzipiellen Aufbau sehr ähnlich und benutzen Penning-Fallen (siehe Infokasten), in denen sich geladene Teilchen, wie Versuche mit einzelnen Antiprotonen gezeigt haben, über mehrere Monate stabil halten und präzise untersuchen lassen [9]. Da die Penning-Falle nur Teilchen mit einem Ladungsvorzeichen speichern kann, sind zwei ineinander geschachtelte Fallen notwendig („nested Penning trap“): Eine weite Potentialmulde speichert die negativ geladenen Antiprotonen und darin eine kleinere invertierte Potentialmulde die positiven Positronen. Ein erzeugtes elektrisch neutrales Antiwasserstoffatom wird aber in keiner der Penning-Fallen gefangen, sodass in der nächsten Stufe dieser Experimente eine weitere magnetische Falle vorgesehen ist.

In beiden Experimenten werden Positronen aus einer radioaktiven ^{22}Na -Quelle gewonnen, einem β^+ -Strahler, bei dessen Hauptzerfallskanal Positronen mit bis zu 550 keV Energie entstehen. Mit unterschiedlichen Techniken werden diese moderiert, sodass

Penning-Falle

In einer Penning-Falle begrenzt das konstante Magnetfeld eines supraleitenden Solenoiden die Bewegung geladener Teilchen in radialer Richtung (z), während durch ein elektrisches Quadrupolfeld eine Potentialmulde in axialer Richtung (x, y) erzeugt wird. Für ein ideales Quadrupolfeld sind hyperbolisch geformte Elektroden erforderlich, aber in der Praxis werden zylindrische Ringelektroden verwendet, die das Einbringen des Teilchenstrahls erleichtern (Abb.).

Auf ein geladenes Teilchen wirkt auf Grund der elektrischen und magnetischen Felder die Kraft:

$$\vec{F} = m \vec{a} = -e \nabla V + e \vec{v} \times \vec{B}. \quad (1)$$

Mit einem elektrischen Quadrupolpotential und einem konstanten Magnetfeld:

$$V = V_0 (z^2 - x^2/2 - y^2/2)/2d^2; \quad \vec{B} = (0, 0, B_z), \quad (2)$$

ergeben sich daraus die Bewegungsgleichungen

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= (eV_0/2md^2) x + \omega_c \dot{y}; \\ \ddot{y} &= (eV_0/2md^2) y - \omega_c \dot{x}; \\ \ddot{z} &= -(eV_0/md^2) z. \end{aligned} \quad (3)$$

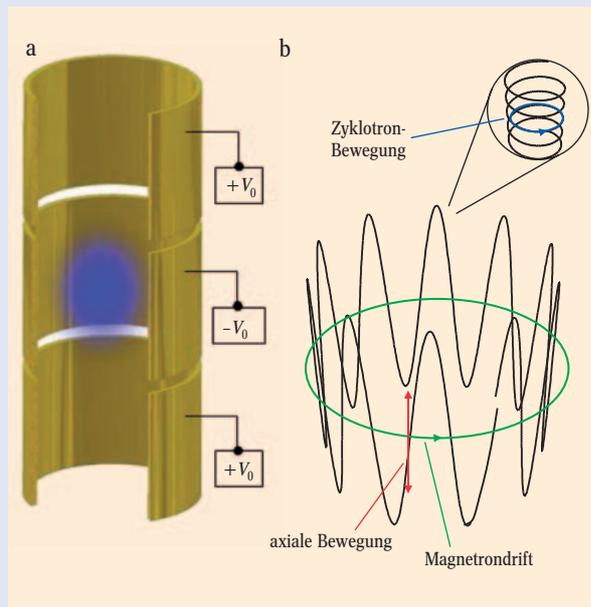
mit der Zyklotronfrequenz eines geladenen Teilchens in einem konstanten Magnetfeld: $\omega_c = eB/m$. Die Bewegung in z -Richtung ist entkoppelt von x und y und liefert eine harmonische Schwingung mit der Frequenz

$$\omega_z = (eV_0/md^2)^{1/2}. \quad (4)$$

Die beiden gekoppelten Differentialgleichungen für x und y führen zu einer modifizierten Zyklotronbewegung mit

$$\omega'_c = (\omega_c + (\omega_c^2 - 2\omega_z^2)^{1/2})/2, \quad (5)$$

und einer langsamen Magnetronbewegung mit Frequenz



$$\omega'_m = (\omega_c - (\omega_c^2 - 2\omega_z^2)^{1/2})/2. \quad (6)$$

Die Abbildung zeigt schematisch die Bewegung eines einzelnen geladenen Teilchens in der Falle. Bei den typischen Arbeitsbedingungen ergeben sich die folgenden Frequenzen: Zyklotron: 150 GHz (Elektron) bzw. 82 MHz (Proton); modifizierte Zyklotronbewegung: 30 MHz bzw. 1,6 MHz und Magnetronbewegung: 3 kHz bzw. 15,4 kHz.

ATHENA je Experiment etwa 50 Millionen und ATRAP etwa eine Größenordnung weniger einfängt.

Die Antiprotonen entstehen durch Beschuss eines Targets mit Protonen. Sie werden im Antiproton Decelerator (AD) gesammelt, gespeichert und stufenweise über stochastische Kühlung und Elektronenkühlung abgebremst. Die Experimente erhalten alle 86 Sekunden Pulse von 200 ns Dauer mit etwa $3 \cdot 10^7$ Antiprotonen einer kinetischen Energie von 5 MeV. Dünne Folien bremsen die Antiprotonen in den keV-Bereich ab, bevor sie in die Fallenregion gelangen, wo sie mithilfe von Potentialen am Eingang und Ausgang eingefangen werden. Die Ausbeute ist dabei durch die sehr breite Energie- und Winkelverteilung nach der Abbremsung in Folien auf einige 10^{-4} beschränkt: Von den $3 \cdot 10^7$ Antiprotonen, die der AD pro Puls liefert, stehen nur etwa 20 000 zur weiteren Verfügung. In der Falle reduziert Elektronenkühlung die Energie der Antiprotonen. Dazu werden in der weiten Potentialmulde für die Antiprotonen zusätzliche Potentialtöpfe mit Tiefen von einigen Volt eingestellt und mit Elektronen gefüllt. Beim Durchgang durch diese Elektronenwolken kühlen die Antiprotonen auf die Temperatur der Elektronen ab, die ihrerseits durch Synchrotronstrahlung auf der kryogenen Umgebungstemperatur von 4,2 K bleiben. Sind die Antiprotonen nach einigen Sekunden abgekühlt, kann das Potential am Falleneingang wieder geöffnet werden, um gegebenenfalls Antiprotonen aus dem nächsten AD-Zyklus zu akkumulieren.

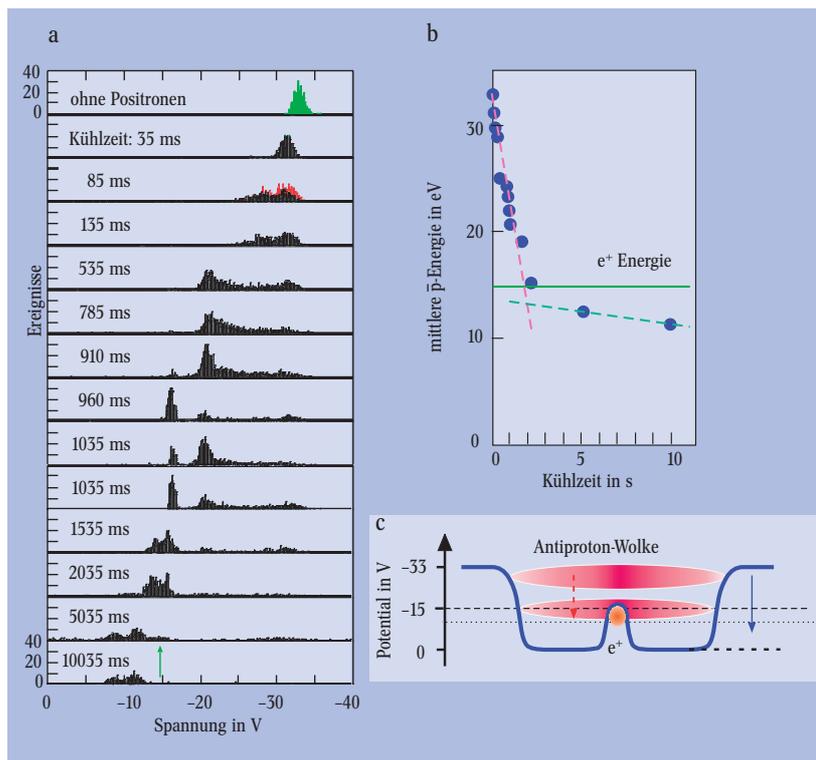


Abb. 3: Zeitliche Abhängigkeit der Kühlung von Antiprotonen durch Positronen.
 ▶ a) Energieverteilungen der Antiprotonen (annihilierende Antiprotonen) als Funktion der Fallenspannung) für wachsende Aufenthaltsdauern.
 ▶ b) Die Energie der Antiprotonen nimmt als Funktion der Kühlzeit mit einer Zeitkonstanten von einigen Sekunden ab. Der Kühlprozess durch die Positronen sollte dann bei etwa 15 V aufhören, gemäß dem eingestellten Potential-

verlauf. Dass er, allerdings mit größerer Zeitkonstante, fortgesetzt wird, ist vermutlich auf einen Verdampfungs-Kühlmechanismus zurückzuführen. Bei Stößen zwischen den Antiprotonen kann es zu Umverteilung von kinetischer Energie kommen, wobei ein Stoßpartner nach dem Stoß kälter ist und das heißere Antiproton wieder mit den kalten Positronen wechselwirken kann.
 ▶ c) Die verwendete Potentialstruktur.

Die Nutzer am AD haben kürzlich vorgeschlagen, zwischen den AD und die Experimente einen weiteren Entschleuniger (ELENA) einzufügen [10], der die Antiprotonen verlustfrei auf etwa 100 keV abbremst soll. Dies vermeidet die Verluste in den Moderatorfolien und steigert die Ausbeute der Antiprotonen und folgerichtig auch der Antiwasserstoffatome um Größenordnungen.

Damit kalter Antiwasserstoff entstehen kann, müssen die kalten Antiprotonen mit Positronen wechselwirken. In ersten Experimenten dazu wurde die Kühlung der Antiprotonen beim Durchgang durch eine Positronenwolke in einer verschachtelten Penning-Falle untersucht. Dazu wurde nach unterschiedlichen Kühlzeiten der Potentialwall der Penning-Falle abgesenkt und die Zahl der Antiproton-Annihilationen als Funktion des Fallenpotentials gemessen. Damit ein Antiproton aus der Penning-Falle entweichen kann, muss seine kinetische Energie die Höhe des Potentialwalls übersteigen. Somit ist die Höhe des Potentialwalls direkt proportional zur Energie der Antiprotonen. Die Ergebnisse dieses sog. „sympathischen“ Kühlens von Antiprotonen mit Positronen zeigen klar eine Wechselwirkung zwischen Antiprotonen und Positronen bei niedrigen relativen Energien, die Voraussetzung für die Bildung von Antiwasserstoff (Abb. 3). Sehr wahrscheinlich ist bereits in diesen Experimenten Antiwasserstoff entstanden.

Der Nachweis

Der nächste Schritt war nun der Nachweis der produzierten Antiwasserstoffatome, der recht einfach erscheint: Trifft ein Antiwasserstoffatom auf Materie, so annihiliert das Positron mit einem Elektron in zwei γ -Quanten mit 511 keV und das Antiproton annihiliert mit einem Nukleon im Mittel zu 3,5 Pionen. Eine ko-zidente Detektion dieser beiden Signale sollte eine eindeutige Signatur liefern. Allerdings werden bei der Annihilation eines Antiprotons auch hochenergetische γ -Quanten aus dem π^0 -Zerfall sowie aus der Anregung von Kernen erzeugt. Über Paarbildung liefern diese γ -Quanten Positronen und erzeugen in der nachfolgenden Vernichtungsstrahlung ebenfalls zwei γ -Quanten mit 511 keV. Somit gibt es einen Untergrundanteil in den Antiwasserstoffsignalen, der auf die einfache Annihilation von Antiprotonen zurückzuführen ist.

Das ATHENA-Experiment wies Antiwasserstoff über diese Signale nach [11]. Ein wesentlicher Punkt war dabei die Detektion des Annihilationsortes mit einem Detektionssystem, das aus Si-Mikrostreifendetektoren für die geladenen Annihilationsteilchen und CsI-Szintillationsdetektoren für den γ -Nachweis besteht (Abb. 4).

Aus Platzmangel konnte die ATRAP-Kollaboration im bereits vorhandenen Magneten keine Detektoren zur Spurrekonstruktion der Zerfallsprodukte aus der Antiwasserstoff-Vernichtung installieren. Die verwendete Anordnung aus szintillierenden Fasern erlaubte es lediglich, einen Trefferpunkt nachzuweisen (Abb. 5). Hierdurch war der ATRAP-Gruppe der von ATHENA praktizierte Nachweis nur mit einem Verhältnis von Signal zu Untergrund von etwa 2:1 und nicht zufriedenstellender Reproduzierbarkeit in den verschiedenen Experimentphasen möglich.

Bei ATRAP wurde deshalb ein in der Atomphysik gängiges Nachweisverfahren über Feldionisation von Antiwasserstoffatomen in Rydberg-Zuständen verwendet [12]. Der besondere Reiz dieses Verfahrens liegt darin, die Antiprotonen aus den feldionisierten Antiwasserstoffatomen zwischenspeichern, um sie

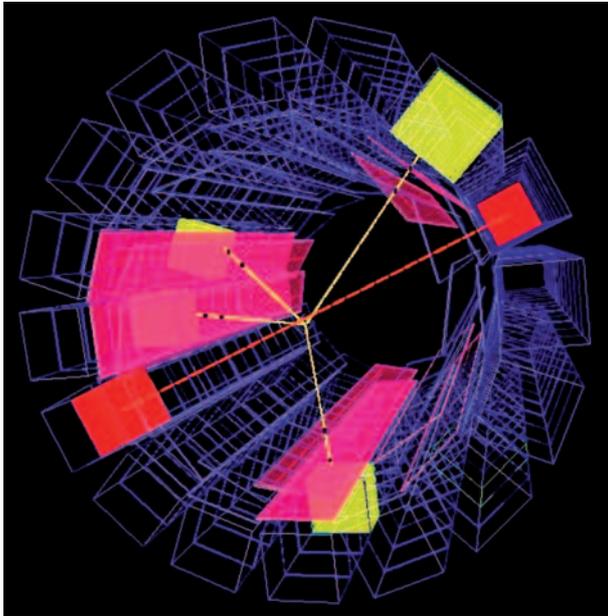


Abb. 4: Ein typisches ATHENA-Ereignis, das der Vernichtung eines Antiwasserstoffatoms zugeschrieben wird. Die Detektorelemente, zwei innere Lagen von Si-Mikrostreifendetektoren sowie eine äußere Lage von Cs-Kristallen, sind als Gittermodell dargestellt. Der gesamte Detektor ist ca. 16 cm lang. Farbige dargestellte Detektorelemente zeigen ein Signal. Die gelben Linien zeigen die Spuren geladener Pionen, die roten Linien die entgegengesetzt fliegenden 511-keV-Photonen aus dem Positronenzerfall.

später ohne störende Untergrundsignale zählen zu können (Abb. 6). Antiwasserstoffatome, die in der Positronenregion (T5) gebildet werden, verlassen ungehindert die Region und annihilieren zu einem Großteil an der Fallenwand. Der Anteil, der die Region hoher Feldstärke (EET) erreicht, wird dort feldionisiert und deponiert sein Antiproton im „Ionisationsbereich“. Die Protonen werden nach Ablauf des Experiments, in einer Phase frei von Untergrundstrahlung, gezählt (Abb. 6c).

Langsame Antiwasserstoffatome

Durch Einstellen eines elektrischen Feldes zwischen Entstehungsort und Ionisationsbereich lassen sich Antiwasserstoffatome vorzeitig ionisieren. Dies ermöglicht die Analyse der Zustandsverteilung, da Rydberg-Zustände oberhalb einer gewissen Hauptquantenzahl bereits vorzeitig ionisiert werden und den Ionisationsbereich dann nicht erreichen. Durch Variation der Feldstärke in dieser Vor-Ionisationsstufe kann die Population der Rydberg-Zustände in der Produktion vermessen werden.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis dieser Experimente. Mit steigender Stärke des Vorionisationsfeldes nimmt die Anzahl der Antiwasserstoffatome N , die dieses Feld unbeschadet überstehen ab, wobei der Zusammenhang $N \sim F^{-2}$ gefunden wurde. Für Rydberg-Atome hängt die zur Ionisation erforderliche Feldstärke ab von der Hauptquantenzahl n gemäß $F_{ion} = 3,21 \cdot 10^8/n^4$ [V/cm]. Bei starken äußeren Magnetfeldern ist dieser Zusammenhang nicht eindeutig, die Zuordnung zwischen F und n ist nicht klar definiert, aber eine Korrelation zwischen F und n ist auch hier gegeben. Die gebildeten Antiwasserstoffatome verteilen sich über einen weiten Bereich von n -Werten.

Die Produktionsrate von Antiwasserstoff hängt neben anderen Parametern entscheidend von dem Grad der Überlagerung der beiden Antiprotonen- und

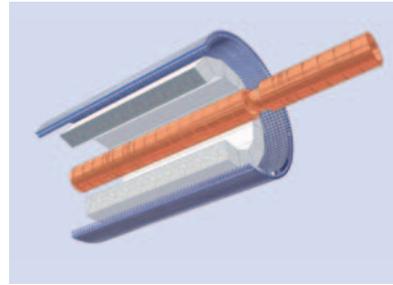


Abb. 5: Die Penning-Fallen des ATRAP-Experiments (Abb. 1) sind von Detektoren zum destruktiven Nachweis des Antiwasserstoffs umgeben. Zwölf Wismut-Germanium-Oxid-Kristalle (BGO, weiß) dienen zum Nachweis der γ -Strahlung mit 511 keV aus der Positronen-Annihilation, drei Lagen szintillierender Fasern (blaugrau) detektieren geladene Pionen aus der Antiproton-Annihilation.

Positronen-Wolken ab. Da diese Wolken aber keine statischen Gebilde darstellen, ist es wichtig, Parameter wie Dichte, Achsenverhältnisse der gestreckten oder abgeplatteten Ellipsoide, Rotationsfrequenzen, Plasmafrequenzen und Zyklotronfrequenzen zu kennen. Beide Kollaborationen am AD/CERN haben intensive Messungen dazu durchgeführt.²⁾

Entscheidend für physikalische Untersuchungen an Antiwasserstoffatomen ist es, sie über ihr magnetisches Moment in einer Falle festzuhalten. Mit supraleitenden Magnetspulen werden heute Feldunterschiede im Bereich von einigen Tesla erzielt, was einer Falltiefe von einigen Kelvin (0,67 K/T) entspricht. Abbildung 8 verdeutlicht die Bedeutung einer geringen Temperatur der einzufangenen Atome für die Einfangwahrscheinlichkeit. Selbst bei 4,2 K, der Temperatur von flüssigem Helium, liegt die mögliche Einfangrate bei lediglich einigen Prozent. Doch davon sind beide Experimente ATHENA (eine Kollaboration, die zukünftig getrennt unter den Namen ALPHA [13] und AEGIS [14] arbeiten wird) und ATRAP derzeit noch weit entfernt.

Für das effiziente Einfangen von Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle soll die kinetische Energie möglichst klein sein. Aus diesem Grund hat die ATRAP-Kollaboration die Geschwindigkeit der erzeugten Antiwasserstoffatome bestimmt. Hierzu wurde die Spannung für ein Vor-Ionisationsfeld bei T7 (siehe Abb. 6) sinusförmig mit Frequenzen bis zu 1 MHz moduliert und die Überlebensrate der erzeugten Antiatome gemessen. Diese Rate nimmt mit wachsender Frequenz ab, wenn die halbe Periodendauer des Vor-Ionisationsfelds kürzer wird als die Durchflugzeit durch das Vor-Ionisationsfeld. Über die Durchflugzeit ergibt sich aus

2) Die Einzelheiten dazu sind über die Internetseiten der Kollaborationen in der Literatur zu finden, <http://athena.web.cern.ch/athena.web> bzw. <http://hussle.harvard.edu/~atrap>.

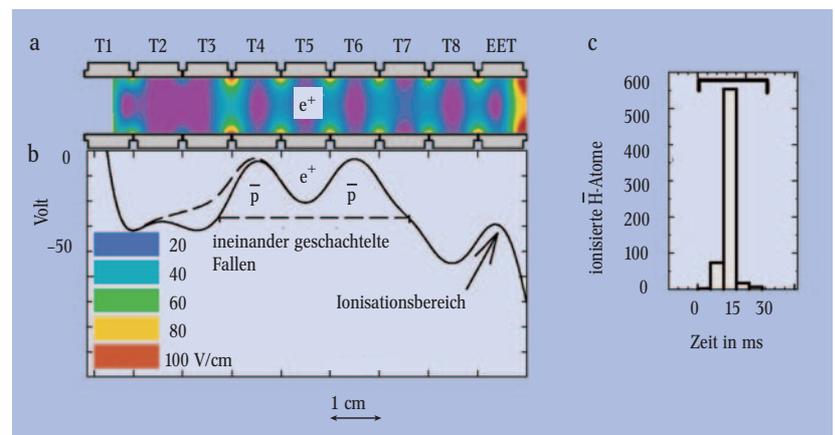


Abb. 6: Schematische Elektrodenanordnung der Falle, mit einer Darstellung der Feldstärken-Verteilung zum Ionisationsnachweis der Antiwasserstoffatome (a). Potentialverteilung auf der Fallenachse zur Kühlung der Antiprotonen durch Positronen (b). Die gestrichelte Linie zeigt die

Potentialmodifizierung, mit der Antiprotonen eingelassen werden, die zu Beginn des Experimentes bei T2 deponiert sind. Antiprotonen aus der Feldionisation von Antiwasserstoff werden aus dem Ionisationsbereich entlassen und untergrundfrei gezählt (c).

diesen Messungen die Geschwindigkeit bzw. die Temperatur der Antiwasserstoffatome. Es zeigt sich, dass die mittlere Temperatur bei etwa 2000 K liegt, entsprechend einer Energie von 200 meV. Das ist viel zu heiß für die Speicherung in einem magnetischen Feld.

Warum die Temperatur der Atome so hoch ist und nicht in der Nähe der Umgebungstemperatur von 4,2 K liegt, ist nicht eindeutig geklärt, offensichtlich werden die Antiprotonen zu sehr aufgeheizt, wenn sie durch die Positronenwolke getrieben werden. (Im gekühlten

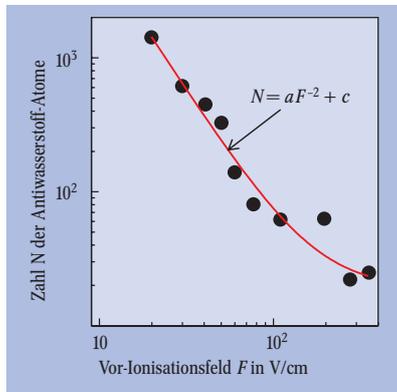


Abb. 7: Die Anzahl der Antiwasserstoff-Atome, die das Vor-Ionisationsfeld passieren, nimmt als Funktion des Vor-Ionisationsfeldes ab (Produktionsbedingungen mit $2,5 \cdot 10^5$ Antiprotonen und $5 \cdot 10^6$ Positronen).

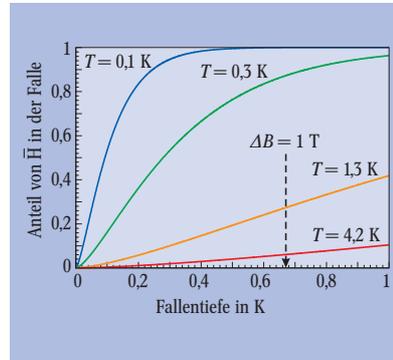
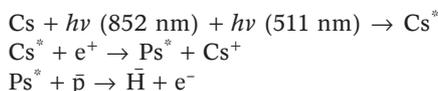


Abb. 8: Die Wahrscheinlichkeit des Einfangs von Antiwasserstoffatomen nimmt als Funktion ihrer Temperatur stark ab. Ein Fallradius von 1 cm führt zu einem ΔB von 1 T bei Feldgradienten von 100 T/m, entsprechend einer Falltiefe von 0,67 K.

Zustand befinden sich Antiprotonen und Positronen räumlich getrennt in ihren jeweiligen Penning-Fallen. Eine Überlagerung lässt sich nur durch Anregung erreichen.) Hier ist in den kommenden Jahren entscheidende Entwicklungsarbeit zu leisten. Ein Weg könnte darin bestehen, die Positronen zu den Antiprotonen zu führen, statt die Antiprotonen durch die Positronenwolke zu schicken.

Antiwasserstoff durch Ladungsaustausch

Als ein Schritt in diese Richtung hat die ATRAP-Kollaboration bereits Antiwasserstoffatome durch Ladungsaustausch mit Rydberg-Positronium erzeugt. Die Experimente fanden in einer verschachtelten Penning-Falle mit räumlich getrennten Antiprotonen- und Positronenwolken statt, wobei die Elektrode der Positronenfalle eine Öffnung für den Durchgang des Cs-Strahls aufweist. Im Einzelnen wird bei diesem Verfahren zunächst ein Strahl von Cäsium-Atomen durch zwei Laserstrahlen mit Wellenlängen bei 852 nm und 511 nm in Zustände bei $n \sim 37$ angeregt. Diese Rydberg-Atome fliegen durch eine gespeicherte Positronenwolke, wobei sich Leuchtelektronen des Cs^* mit Positronen zu angeregtem Positronium Ps^* verbinden können, das dann isotrop in alle Raumrichtungen davonfliegt. Einige der Ps^* dringen in 2 cm Entfernung in eine gespeicherte Antiprotonenwolke ein. Dabei können sich Positronen vom Positronium mit Antiprotonen zum Antiwasserstoff kombinieren, der sich wiederum in alle Raumrichtungen ausbreitet. Symbolisch lässt sich diese Prozessfolge mit doppelten Ladungsaustausch in drei Schritten wie folgt darstellen:



Durch die Feldionisationsmethode gelang es, in einem ersten Experiment 14 Antiwasserstoffatome untergrundfrei nachzuweisen. Eine isotrope Produktion vorausgesetzt, sollten in dem Experiment etwa 200 Antiwasserstoffatome erzeugt worden sein. Dies ist zwar über hundert mal weniger als bei der Erzeugung durch Dreikörperstöße, der große Vorteil besteht aber darin, dass eine geringe Temperatur der Antiwasserstoffatome erwartet wird. Sie sollte der Temperatur der Antiprotonen von 4,2 K entsprechen, da der Energieübertrag durch Positronium vernachlässigbar ist. Ein nennenswerter Anteil dieser Antiatome sollte also kalt genug sein, um in einer Magnetfalle gespeichert werden zu können. Der Reaktionsprozess ist außerdem derartig angelegt, dass die erzeugten Antiwasserstoffatome in einem wohl definierten Bereich von Rydberg-Zuständen sein sollten, was für eine mögliche laserinduzierte Abregung von entscheidender Bedeutung sein mag.

Ausblick

Im Jahr 2005 hat das CERN eine Pause bei der Produktion von Antiprotonen eingelegt, während der die Experimente weiterentwickelt wurden. Ab Mai 2006 will das CERN wieder Antiprotonen liefern. ATRAP hat in der Zwischenzeit einen neuen supraleitenden Solenoid in Betrieb genommen, der mit seiner Bohrung von 0,5 Meter Durchmesser Platz bietet für hinreichende Spurrekonstruktionen der Zerfallsprodukte, Laserzugang und eine magnetische Falle. Für die Speicherung von Antiprotonen und Positronen wird das homogene Magnetfeld des Solenoids benötigt. Die Magnetfalle erzeugt ein zusätzliches magnetisches Feld, das ausgehend vom Fallenzentrum in allen Richtungen ansteigt.

Der magnetische Feldgradient führt dann zu einer rücktreibenden Kraft auf das elektrisch neutrale Antiatom gemäß $\vec{F} = -\vec{\nabla}(\vec{\mu}\vec{B})$, wobei $\mu = \mu_B = eh/2m = 5,788 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T}$ das magnetische Moment des Positrons ist. Abbildung 9 zeigt das Prinzip der magnetischen Falle. Für den Einfang von Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle sind nur die Zustände nutzbar, bei denen in Abb. 9b die Energie mit zunehmendem Magnetfeld ansteigt, die sog. „low field

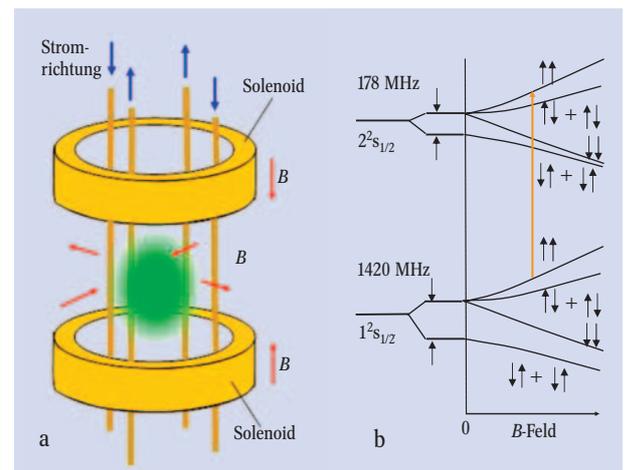


Abb. 9: Beispiel einer magnetischen Falle für neutrale Atome, bestehend aus zwei Spulen, die Gradienten in axialer Richtung erzeugen, und vier stromdurchflossenen Leitern, die eine radiale Quadrupolfeldverteilung bewirken (a). Vom Zentrum aus steigt der Betrag des Magnetfeldes in alle Richtungen an. Für die 1s-2s-Spektroskopie bietet sich der Übergang an, dessen Energie kaum vom äußeren Magnetfeld abhängt (orangener Pfeil, b). Der erste Pfeil symbolisiert den Elektronen-, der zweite den Protonenspin.

seeker“. Für die hochauflösende 1s–2s-Spektroskopie bietet sich die Komponente ($F=1, m_{F=1}$) \rightarrow ($F=1, m_{F=1}$) an, deren Übergangsfrequenz näherungsweise unabhängig vom Magnetfeld ist. Die verbleibende Rest-Zeeman-Verschiebung von 186 kHz/T kann jedoch die Auflösung begrenzen. Deshalb sollen die Antiwasserstoffatome in der Magnetfalle durch Laser-Strahlung auf dem starken 1s–2p-Übergang (Lyman- α bei 122 nm Wellenlänge) bis herab in den Millikelvin-Bereich gekühlt werden. Dadurch verringert sich die räumliche Ausdehnung einer Antiwasserstoff-Wolke in inhomogenen Magnetfeld der Falle, und die Rest-Zeeman-Verbreiterung soll soweit unterdrückt werden, dass die angestrebten hohen Auflösungen von unter 1 kHz (bei 2466 THz Übergangsfrequenz) möglich werden.

Die Kombination von Penning-Falle mit einem magnetischen Gradientenfeld birgt noch prinzipielle Probleme, da die radiale Asymmetrie des Magnetfeldes zu Instabilitäten der gespeicherten geladenen Teilchen führen kann. Die optimale Konfiguration im Hinblick auf minimale Verluste der geladenen Teilchen bei maximaler Fallentiefe für die Antiwasserstoffatome wird zur Zeit untersucht.

Die vielversprechenden bisherigen Ergebnisse lassen auf eine spannende Zukunft für die präzise Untersuchung von Antiwasserstoffatomen hoffen. Die Speicherung von Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle wird dabei der nächste Schritt auf dem Weg zu präzisen Vergleichsmessungen zwischen Wasserstoff und Antiwasserstoff sein. Mit Antiwasserstoff steht zudem erstmals ein elektrisch neutrales und stabiles System ganz aus Antimaterie zur Verfügung. Möglicherweise erlaubt dies in fernerer Zukunft, die Fallbeschleunigung von Antimaterie direkt zu messen und somit das Einsteinsche Äquivalenzprinzip erstmals mit Antimaterie zu prüfen. Erstrebenswert sind dafür aber Temperaturen des Antiwasserstoffs im Sub-Millikelvin-Bereich. Das ist jenseits des derzeit Machbaren, und die Techniken zur Erzeugung und Manipulation von ultrakalten Antiwasserstoffatomen müssen erst noch entwickelt werden.

Die zukünftigen Untersuchungen werden weiterhin nur am Antiproton Decelerator des CERN möglich sein, der weltweit einzigen Quelle niederenergetischer Antiprotonen. Eine Ausweitung der Forschungsaktivitäten mit Antiprotonen ist aber in greifbarer Nähe durch die geplante Anlage FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) an der GSI in Darmstadt. Dieses neue Beschleunigerzentrum zur Forschung mit Ionen- und Antiprotonstrahlen wird auch eine Einrichtung für Studien mit niederenergetischen Antiprotonen und Ionen beinhalten, FLAIR (Facility for Low energy Antiproton and Ion Research), an der auch Untersuchungen am Antiwasserstoff geplant sind.

Danksagung

Wir bedanken uns bei allen, die das Projekt wohlwollend begleiten, insbesondere aber bei dem Team des AD-Beschleunigers für den hervorragenden Strahlbetrieb und bei den Kollegen der verschiedenen Experimente am AD für anregenden Gedankenaustausch.

Literatur

- [1] G. Baur et al., Phys. Lett. B **368**, 251 (1996)
- [2] G. Blanford et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 3037 (1998)
- [3] A. Sakharov, JETP Lett. **5**, 24 (1967)
- [4] M. Dine und A. Kusenko, Rev. Mod. Phys. **76**, 1 (2004)
- [5] S. Eidelman et al. (Particle Data Group), Phys. Lett. B **592**, 1 (2004) (<http://pdg.lbl.gov>)
- [6] D. Colladay und V. A. Kostelecký, Phys. Rev. **D55**, 6760 (1997), Phys. Rev., **D58**, 116002 (1998)
- [7] V. A. Kostelecký und R. Lehnert, Phys. Rev. **D63**, 065008 (2001)
- [8] CERN-SPSC-2003-009 and SPSC-I-226
- [9] W. Quint, Physikal. Blätter, Oktober 1996, S. 1005
- [10] Letter of Intent to the CERN SPSC, CERN-SPSC-2005-029 and SPSC-I-233
- [11] M. Amoretti et al., Nature **419**, 456 (2002)
- [12] G. Gabrielse et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 213401 (2002), Phys. Rev. Lett. **89**, 233401 (2002)
- [13] CERN-SPSC-2005-005 and SPSC-M-729
- [14] CERN-SPSC-2005-018 and SPSC-M-734

Die Autoren



Dieter Grzonka (Mitte) studierte Physik und promovierte an der Universität Münster, bevor er ans Institut für Kernphysik des Forschungszentrums Jülich wechselte, wo er am COSY-Beschleuniger experimentiert. Er war auch an den Versuchen zur ersten Beobachtung von Antiwasserstoffatomen im Fluge beteiligt und teilt seine Arbeitszeit zwischen Experimenten am COSY und AD gleichermaßen auf.

Walter Oelert (rechts) studierte Physik in Hamburg und Heidelberg, verbrachte seine Post-Doc Zeit in Pittsburgh und ist am Forschungszentrum Jülich angestellt und gleichzeitig apl. Professor an der Ruhr-Universität Bochum. Am CERN arbeitete er mit Antiprotonen an dem sehr erfolgreichen Low Energy Antiproton Ring und leitete die Gruppe, der die erste Beobachtung von Antiwasserstoffatomen gelang. Auch er teilt seine Arbeitszeit zwischen Forschungen am COSY und am AD/CERN auf.

Jochen Walz (links) studierte Physik in Konstanz und Hamburg. Er promovierte bei T. W. Hänsch an der LMU München und war wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPQ in Garching. Dort hat er eine kontinuierliche kohärente Lyman-Alpha-Quelle mit entwickelt, die künftig zur Kühlung von Antiwasserstoff benötigt wird. In der spannenden Phase der ersten Erzeugung von kaltem Antiwasserstoff war er CERN-Fellow und ist nun Professor am Institut für Physik der Universität Mainz.

Alle drei Autoren arbeiten an dem ATRAP-Experiment am CERN.