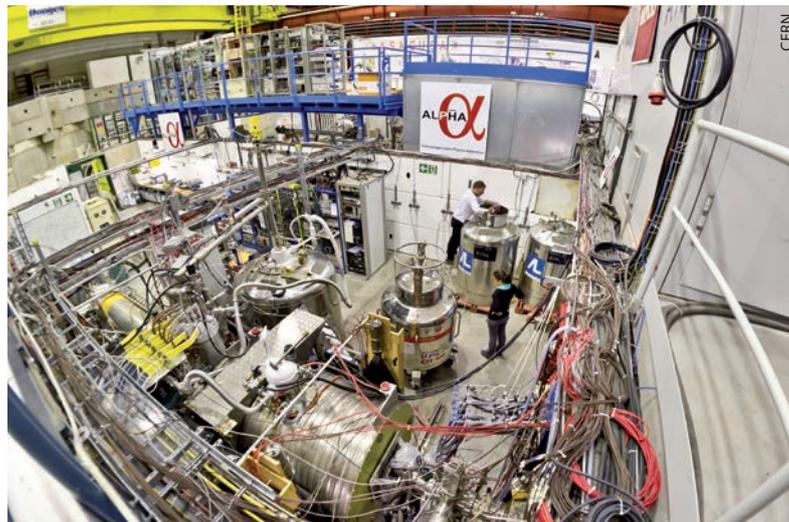


■ Die Vermessung der Antiwelt

Die erstmalige Laseranregung von Antiwasserstoff bestätigt mit hoher Präzision, dass sich Wasserstoff und Antiwasserstoff gleich verhalten.

Wasserstoff hat als einfachstes aller Atome schon immer eine besondere Rolle gespielt: So erklärte z. B. Niels Bohrs Atommodell die Spektrallinien atomaren Wasserstoffs, und Paul Dirac führte die Feinstruktur in Wasserstoff auf den Elektronenspin zurück. Die Diracsche Wellengleichung liefert zwei Lösungen: eine für das Elektron und eine für sein positiv geladenes Gegenstück, das Positron. Heute wissen wir, dass die Welt scheinbar vollkommen symmetrisch ist: Zu jedem Teilchen kennen wir ein Antiteilchen. Um zu testen, ob sich auch Atome und Antiatome gleich verhalten, hat die ALPHA-Kollaboration am CERN einen atomaren Übergang in Antiwasserstoff untersucht und eine sehr gute Übereinstimmung mit Wasserstoff gefunden [1].

Weil Teilchen und Antiteilchen sich gegenseitig vernichten, wenn sie sich begegnen („annihilieren“), existieren sie in unserer Welt normalerweise nur für Sekundenbruchteile. Antiwasserstoff ist das einzige Atom aus Antimaterie, das bisher künstlich hergestellt wurde – nur am CERN gibt es zurzeit die dafür nötigen Maschinen. Hoch-



Das ALPHA-Experiment ist am Antiproton Decelerator des CERN aufgebaut.

energetische Protonen kollidieren mit einem Metallklotz und erzeugen dabei Antiprotonen. Der „Antiproton Decelerator“ (AD) fängt sie in einem Speicherring ein, um sie für die Experimente zu kühlen und abzubremesen [2]. Dieser Aufbau, der Teile der Infrastrukturen nutzt, die auch den LHC bedienen, verwendet Komponenten seines Vorgängers LEAR: An diesem „Low Energy Antiproton Ring“ erzeugte die Gruppe um Walter Oelert vom Forschungszentrum Jülich 1995

die ersten zehn Atome Antiwasserstoff. Heute verteilt der Antiproton Decelerator alle zwei Minuten etwa 10^7 Antiprotonen an sechs verschiedene Experimente – der Laserspektroskopie von Antiwasserstoff haben sich die ATRAP- und die ALPHA-Kollaborationen verschrieben. Für beide Experimente werden die Antiprotonen zunächst in einer komplexen doppelten Penning-Falle gestoppt und dort mit Positronen aus dem radioaktiven Zerfall von ^{22}Na zusammengebracht.

Beim ALPHA-Experiment fangen die Forscher etwa 90 000 Antiprotonen ein und mischen sie vorsichtig mit 1,6 Millionen Positronen. Dabei entstehen etwa 25 000 Atome Antiwasserstoff, von denen jedoch im Mittel nur 14 Atome mit einer Temperatur von weniger als 0,5 K kalt genug sind, um in einer magnetischen Neutralatomfalle (Durchmesser 44 mm, Länge 280 mm) länger als 1000 Sekunden gespeichert zu werden [3]. Resonant mit dem 1S-2S-Übergang in Wasserstoff wird Laserlicht der Wellenlänge 243 nm in einen Fabry-Pérot-Resonator eingekoppelt und beleuchtet so einen Teil des Fallenvolumens (Abb. 1). Bewegt sich ein Antiatom durch dieses Laserfeld, können es zwei Photonen dopplerrfrei in den metastabilen

KURZGEFASST

■ Beweis nach über 70 Jahren

Der Chemie-Nobelpreisträger Lars Onsager entwickelte 1943 eine Theorie, nach der sich zwei- und dreidimensionale Materialien bezüglich ihrer magnetischen Phasenübergänge gleich verhalten. Eine Gruppe südkoreanischer Physiker zeigte kürzlich experimentell mithilfe von Raman-Spektroskopie, dass der Übergang von Para- zu Antiferromagnetismus in FePS_3 für beide Geometrien bei der gleichen Temperatur von 118 K stattfindet. Für den ersten Beweis zu Onsagers Theorie erzeugten sie dreidimensionale FePS_3 -Kristalle und lösten zweidimensionale Schichten mit Klebeband ab – eine Technik, die schon für Graphen zum Einsatz kam.

J.-U. Lee et al., *Nano Lett.* **16**, 7433 (2016)

■ Gammapulsare aufgespürt

In den Daten des Fermi Gamma-ray Space Telescope (FGST) wurden kürzlich 13 neue Gammapulsare gefunden. Außerdem gibt es 105 weitere Kandidaten aus einer aufwändigen Blindsuche. Dazu nutzten die Astronomen aus Hannover Rechenleistung, die Freiwillige im Projekt Einstein@Home weltweit zur Verfügung stellen. Gammapulsare sind schnell rotierende Neutronensterne, die lediglich zwischen zehn- und hunderttausend Jahren alt sind. Um ihr Pulsieren nachzuweisen, sind lange Messreihen zu analysieren. In deren Verlauf kann sich der Pulsar milliardenfach um die eigene Achse drehen. Blindsuchen brauchen daher extrem viel Rechenzeit.

C. J. Clark et al., *Astrophys. J.* **834**, 106 (2017)

2S-Zustand anregen, der etwa 1/8 Sekunde lang lebt. Absorbiert das Antiatom währenddessen ein drittes Photon, ionisiert das Atom, woraufhin das freie Antiproton an den Wänden der Apparatur annihiliert. Die Laseranregung wird so nachgewiesen. Weil sich die Atome in einem starken Magnetfeld bewegen, tritt außerdem ein Stark-Effekt auf, der das Atom im 2S-Zustand über Mischung mit dem 2P-Niveau radiativ abregen kann. Wird hierbei ein Zeeman-Niveau erreicht, in dem sich das Atom nicht speichern lässt, annihiliert das Atom ebenfalls an den Wänden der Apparatur.

Bisher konnte die ALPHA-Kollaboration noch nicht die gesamte Resonanzlinie der 1S-2S-Anregung aufnehmen, sondern nur testen, bis zu welchem Niveau sich Wasserstoff und Antiwasserstoff gleich verhalten. Das eingesetzte Messprotokoll besteht darin, den Laser resonant und nicht-resonant einzustrahlen bzw. ganz abzuschalten. Mit einem ähnlichen Messprotokoll gelang es der ALPHA-Kollaboration bereits, die 1S-Hyperfeinaufspaltung von Antiwasserstoff und Wasserstoff mit einer Genauigkeit von 4×10^{-3} zu vergleichen [4]. Die drei Einstellungen wurden während des Experiments am Antiproton Decelerator jeweils elfmal durchgeführt.

Die 1S-2S-Übergangsfrequenz in Wasserstoffatomen ist aus unseren Arbeiten der Gruppe von Theodor W. Hänsch am Garching MPI für Quantenoptik mit einer Genauigkeit von einigen 10^{-15} bekannt, also mit einer absoluten Unsicherheit von 10 Hz. Ausgehend von dieser Frequenz errechneten die Forscher der ALPHA-Kollaboration, bei welcher Frequenz sie ein Resonanzsignal für Antiwasserstoff in ihrer Apparatur erwarten und stellten den Laser auf diese Frequenz ein. Beide Hyperfeinkomponenten der gefangenen Antiatome wechselwirkten jeweils 300 Sekunden lang mit dem Laserlicht, sodass sich die Annihilationen zählen ließen, die sich bei der erfolgreichen Anregung in den metastabilen 2S-Zustand ergaben. Auch während des Ausschaltens der Magnetfalle (1,5 Sekunden) wurden Annihilationen

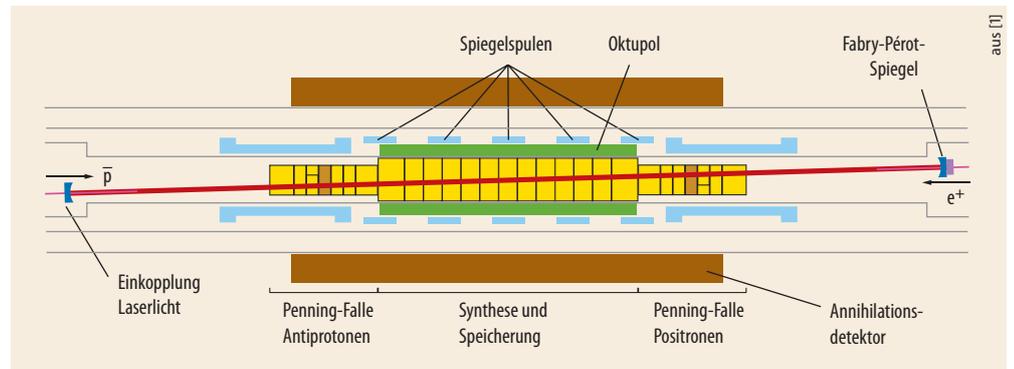


Abb. 1 Das ALPHA-Experiment kombiniert Penning-Fallen für die Antiprotonen (links) und Positronen (rechts) mit einer Neutralatomfalle für den Antiwasserstoff (Mitte): Ein Oktupolfeld fängt die Antiatome in radialer Richtung ein, axial stoppt sie das Feld fünf so genannter Spiegelspulen. Laser-

licht (rot) strahlt schräg in das Volumen der Falle ein, um den Antiwasserstoff in den metastabilen 2S-Zustand anzuregen. Ionisiert das Laserlicht ein Antiatom, weist ein Detektor um die Falle (braun) die Annihilation der freien Antiprotonen und die Laseranregung nach.

gezählt, die von zuvor nicht angeregten Antiatomen stammten.

Die beiden anderen Einstellungen des Lasers dienten dazu zu überprüfen, ob die beobachteten Annihilationen tatsächlich zu angeregten Antiatomen gehörten. Für eine nicht-resonante Einstrahlung wurde der Laser um 200 kHz gegenüber der berechneten Resonanzfrequenz verstimmt. Daher sollten keine Antiatome angeregt werden, und während der Messzeit sollte nur der Untergrund durch kosmische Strahlung auftreten. Während des Abschaltens der Magnetfalle sollten dagegen mehr Annihilationen zu beobachten sein, weil in der Falle mehr Antiatome „überleben“ können. Den gleichen Versuchsablauf mit ausgeschaltetem Laser nutzten die Forscher, um auszuschließen, dass das intensive Laserlicht den Antiwasserstoff unerwartet beeinflusst.

Der Vergleich der drei Einstellungen bestätigte, dass bei resonanter Einstrahlung 52 ± 10 Antiwasserstoff-Annihilationen mehr beobachtet wurden als in den beiden anderen Fällen. Dagegen stieg die Zahl der Annihilationen beim Abschalten der Magnetfalle signifikant an, sobald der Laser verstimmt oder ausgeschaltet war. Damit verhält sich der 1S-2S-Übergang in Antiwasserstoff genauso wie in Wasserstoff. Das Genauigkeitsniveau von 2×10^{-10} ergibt sich aus dem Frequenzunterschied von resonant und verstimmt eingestrahlt Laserlicht.

Mit ihren Experimenten will die ALPHA-Kollaboration das CPT-Theorem überprüfen, das als Grundlage des Standardmodells eine fundamentale Symmetrie postuliert: das gleichzeitige Austauschen von Teilchen und Antiteilchen (Charge, C), Spiegeln des Raums (Parity, P) und Umkehren der Zeit (Time reversal, T). Als Konsequenz müssen die Spektren von Antiwasserstoff und Wasserstoff exakt gleich sein. Der 1S-2S-Übergang in Wasserstoff ist noch fünf Größenordnungen genauer bekannt, als es die jetzige Messung für Antiwasserstoff erlaubt. Durch den Einsatz von Laserkühlung soll es mit dem ALPHA-Experiment in Zukunft gelingen, den Übergang in Antiwasserstoff genauer zu vermessen. Daneben zielen auch andere Experimente am Antiproton Decelerator darauf ab, das CPT-Theorem präzise mit der Spektroskopie von Antiwasserstoff zu testen. Die ATRAP-Kollaboration untersucht ebenfalls den 1S-2S-Übergang. Eine Präzisionsmessung der 1S-Hyperfeinaufspaltung ist Ziel der ASACUSA-Kollaboration. Am CERN steht die Tür weit offen, um die Antiwelt höchst präzise zu vermessen.

Randolf Pohl

- [1] M. Ahmadi et al. (ALPHA Coll.), Nature (2016), doi: 10.1038/nature21040
- [2] D. Grzonka, W. Oelert und J. Walz, Physik Journal, März 2006, S. 37
- [3] G. B. Andresen et al. (ALPHA Coll.), Nature Physics 7, 558 (2011)
- [4] C. Amole et al. (ALPHA Coll.), Nature 483, 439 (2012)

Prof. Dr. Randolf Pohl, Johannes Gutenberg-Universität Mainz, Institut für Physik, QUANTUM und Exzellenzcluster PRISMA, Staudingerweg 7, 55128 Mainz und Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 Garching