

## TEILCHENPHYSIK LASERSPEKTROSKOPIE MIT ANTIMATERIE

**Erstmals haben Physiker ultraviolette Strahlungsübergänge bei einem Antimaterie-Atom beobachtet und höchst präzise gemessen. Wie die Ergebnisse zeigen, ist die fundamentale Symmetrie im Standardmodell der Teilchenphysik offenbar nicht verletzt. Damit bleibt weiterhin ungeklärt, warum das Universum praktisch keine Antimaterie enthält.**

Als es Paul Dirac 1928 gelang, eine Theorie der Quantenmechanik zu formulieren, die mit der speziellen Relativitätstheorie vereinbar ist, war der Preis dafür das Postulat von Antimaterie. Diese Antiteilchen sollten ihren gewöhnlichen Partnern in allen Quanteneigenschaften gleichen, ihre Ladung würde jedoch das jeweils entgegengesetzte Vorzeichen aufweisen. Die bekanntesten Kandidaten unter ihnen sind die positiv geladenen Positronen als Antiteilchen der Elektronen und die negativ geladenen Antiprotonen als Pendant zu den Protonen.

Seit Carl Anderson die Positronen 1932 in Sekundärereignissen der kosmischen Höhenstrahlung nachwies, gibt es keinen Zweifel mehr an der Existenz von Antimaterie, wenngleich das Universum nahezu ausschließlich aus Materie besteht. Diese Materie-Antimaterie-Asymmetrie ist noch immer eines der großen Rätsel der Physik.

Eng damit verknüpft ist die Frage nach grundlegenden Symmetrien in der Teilchenphysik. Das Standardmodell der Teilchenphysik geht von der so genannten CPT-Invarianz aus. Ihr zufolge bleibt bei jeglichen Prozessen von Teilchen- oder Kernzerfällen die fundamentale Symmetrie der simultanen Raumpiegelung (Paritätstransformation, P), sowie der Zeit- und Ladungsumkehr (T und C) erhalten. Diese Eigenschaft schränkt aber auch die Möglichkeiten zu einer sinnvollen Erweiterung des Standardmodells entsprechend ein.

Wäre die CPT-Invarianz unter gewissen Umständen verletzt, ließe sich damit der Überschuss an gewöhnlicher Materie erklären. Ob diese Symmetrie jedoch tatsächlich in der Natur exakt erhalten ist oder nicht, ist nach wie vor eine offene Frage.

Vom Zerfall bestimmter Mesonen (jeweils bestehend aus einem Quark-Antiquark-Paar) weiß man hingegen, dass eine weniger starke Symmetrie, die so genannte CP-Invarianz, bereits im Rahmen des Standardmodells verletzt ist. In Systemen neutraler K- und B-Mesonen haben Physiker die Verletzung dieser Symmetrie experimentell sehr genau untersucht. Sie reicht jedoch nicht aus, um die beobachtete Materie-Antimaterie-Asymmetrie zu erklären. Dazu benötigt man neue Mechanismen wie die so genannte Leptogenese oder eben eine Verletzung der CPT-Invarianz, die jenseits des Standardmodells liegt.

Deshalb suchen die Forscher intensiv nach einer Verletzung der CPT-Symmetrie. Bei Teilchenzerfällen ließ sie sich bisher nicht nachweisen. Mit einem anderen Ansatz fahnden die Wissenschaftler nach Unterschieden bei Energieübergängen in Atomen beziehungsweise Antiatomen.

Einen ersten solchen Test legten Mitarbeiter der ALPHA-Kollaboration am CERN in Genf vor. Sie haben den Übergang vom Grundzustand in den ersten angeregten Zustand (1S nach 2S) bei Antiwasserstoff-Atomen mittels Laserspektroskopie auf etwa zwei Zehnmilliardstel ( $10^{-10}$ ) genau gemessen.

Mit dieser Methode lassen sich die atomaren Energieniveaus hochpräzise bestimmen, da das Laserlicht auf einen schmalen Wellenlängenbereich beschränkt ist. Von besonderer Bedeutung ist der Übergang vom Grundzustand des Wasserstoffatoms – dem so genannten  $1S_{1/2}$ -Zustand – in den mit einer Achtelsekunde vergleichsweise langlebigen ersten angeregten  $2S_{1/2}$ -Zustand. Die Anregungsfrequenz dazu fällt jedoch in den ultravioletten Bereich des elektromagnetischen Spektrums. Das erschwert die Spektroskopie enorm, da sich die nötigen, extrem kurzen Wellenlängen nicht mit gewöhnlichen Farbstofflasern erzeugen lassen.

Um das Problem zu lösen, greifen die Physiker zu einem Trick. Sie regen die Atome gleichzeitig mit zwei Lichtquanten der doppelten Wellenlänge an. Damit erfüllen sie nicht nur die Energie-, sondern zugleich die Drehimpulserhaltung. Mit dieser Zweiphotonenspektroskopie mit gegenläufigen Laserstrahlen lässt sich außerdem die Dopplerverbreiterung der Spektrallinien umgehen, die durch die Restbewegung der Atome in einer Falle bezüglich der absorbierten Laserstrahlung zu Stande kommt. Die Messgenauigkeit des 1S-2S-Übergangs in atomarem Wasserstoff liegt mit dieser von Theodor Hänsch und seinen Kollegen entwickelten Methode inzwischen bei wenigen Billiondstel ( $10^{-15}$ ). Damit ist die optische Spektroskopie heutzutage eine der präzisesten Messmethoden der Physik.

### **Antiprotonen und Positronen lassen sich leicht fangen, neutraler Antiwasserstoff jedoch nicht**

Die Idee, auf diese Weise auch den 1S-2S-Übergang von Antiwasserstoff zu messen und damit die CPT-Invarianz zu untersuchen, ist bereits 30 Jahre alt. Sie experimentell umzusetzen, war jedoch alles andere als einfach.

Während sich Antiprotonen und Positronen dank ihrer Ladung recht einfach bewegen und in elektrischen beziehungsweise magnetischen Teilchenfallen einfangen lassen, ist das bei neutralem Antiwasserstoff sehr viel schwieriger. Mit speziellen magnetischen Fallen lässt sich aber das kleine magnetische Moment des Antiatoms ausnutzen. Da Antimaterie beim Kontakt mit normaler Materie zudem sofort zerstört wird, müssen die Parameter von elektrischem und magnetischem Feld in der Falle sehr präzise eingerichtet sein, um genügend Antiatome isolieren und dann per Laser anregen zu können.

Erstmals gelang es Forschern der ALPHA-Arbeitsgruppe unter der Ägide von Jeffrey Hangst im Jahr 2010, Antiwasserstoff in einer magnetischen Falle bei Tempera-



ALPHA ist eines von sechs Experimenten mit Antiprotonen am Europäischen Forschungszentrum CERN in Genf. Mit ihm haben Wissenschaftler erstmals einen ultravioletten Strahlungsübergang in Antiwasserstoff-Atomen gemessen.

turen von wenigen Grad über dem absoluten Nullpunkt zu speichern. Doch erst kürzlich konnten die Wissenschaftler die geeigneten Bedingungen für die Laserspektroskopie an Antiwasserstoff herstellen. Die Antiatome erzeugten sie, indem sie ein Plasma aus Antiprotonen vom Antiproton Decelerator (AD) mit Positronen aus einer radioaktiven Quelle mischten. Dabei war die Ausbeute relativ gering. Pro 15-minütigem Zyklus ließen sich etwa 25 000 Antiwasserstoff-Atome erzeugen. Zwei solcher Mischzyklen waren jedoch notwendig, um im Mittel 14 solcher Partikel für das Experiment in einer Falle für zehn Minuten zu speichern.

Die eingefangenen Atome bestrahlten die Physiker mit ultraviolettem Laserlicht einer Wellenlänge von 243 Nanometern, dessen Frequenz der Hälfte der 1S-2S-Übergangsenergie entsprach. Dabei berücksichtigen sie – analog zu Experimenten mit normaler Materie – die Verschiebung der Energieniveaus im Magnetfeld sowie die Hyperfeinaufspaltung, die durch die Wechselwirkung der Spins von Positron und Antiproton zu Stande kommt.

Danach waren 58 Prozent der Atome in den ersten angeregten Zustand gehoben und aus der Falle entwichen. Dieses Ergebnis lässt sich in eine Grenze für die mögliche Verletzung der CPT-Symmetrie bei Antiwasserstoff umrechnen.

Zur Kontrolle bestrahlten die Forscher den Antiwasserstoff mit Laserlicht etwas unterhalb der Resonanzfrequenz oder schalteten die Lichtquelle ganz ab. In beiden Fällen blieb die Anzahl der Atome in der Falle unverändert.

Diese Messungen zeigen, dass die CPT-Symmetrie bei Antiwasserstoff innerhalb einer Genauigkeit von etwa zwei Zehnmilliardstel erhalten bleibt. Für noch präzisere Aussagen über eine mögliche CPT-Verletzung planen die Forscher detaillierte Messungen der Linienform des 1S-2S-Übergangs. Da die Linienbreite unter anderem durch die Restbewegung der Antiatome in der Falle beeinflusst wird, soll diese ferner in einem künftigen Experiment durch Laserkühlung noch besser unterdrückt werden.

Mit Antiwasserstoff wollen die Physiker außerdem die Gültigkeit von Gravitationstheorien überprüfen. Da die Antiatome elektrisch neutral sind, lässt sich mit ihnen sehr viel präziser als mit geladenen Teilchen wie Positronen oder Antiprotonen testen, ob sich Materie und Antimaterie im Gravitationsfeld gleich verhalten, insbesondere ob Antimaterie wie erwartet nach unten und nicht etwa nach oben fällt. Auch die Basis der allgemeinen Relativitätstheorie, die Gleichheit von träger und schwerer Masse – das so genannte Äquivalenzprinzip – soll bei Antimaterie getestet werden; bei normaler Materie ist es mit hoher Genauigkeit erfüllt.

So sollen zwei Experimente zunächst die Beschleunigung von Antiwasserstoff im Gravitationsfeld der Erde mit einer Genauigkeit im Prozentbereich messen. Vor allem mit dem neuen, noch 2017 in Betrieb gehenden Antiprotonen-Ring ELENA (Extra Low Energy Antiproton ring) am CERN sollte es dann den Antiprotonen-Arbeitsgruppen in ein paar Jahren möglich sein, sowohl hochgenaue Ergebnisse zu diesem Thema zu liefern, als auch die spektroskopischen Messungen deutlich zu verbessern und auf Übergänge zwischen anderen Energieniveaus zu erweitern.

Für die Vereinigung des Standardmodells der Teilchenphysik mit der Gravitation wird das sicherlich wichtige Randbedingungen und neue Anregungen liefern. Viele Theorien wie etwa manche Stringtheorien, die auf eine solche Vereinigung hinarbeiten, setzen eine Verletzung der CPT-Symmetrie voraus – umso wichtiger ist es zu klären, ob sie in der Natur tatsächlich vorkommt. ◀

**Georg Wolschin** ist Professor am Institut für Theoretische Physik der Universität Heidelberg.

#### QUELLE

**Ahmdi, M. et al.:** Observation of the 1S–2S Transition in Trapped Antihydrogen. In: Nature 541, S. 506–510, 2016