

- [1] K. Southwell, Nature, **416**, 205 (2002).
 [2] M. Greiner, O. Mandel, T. Esslinger, T. Hänsch, I. Bloch, Nature, **415**, 39 (2002).
 [3] M. Greiner, O. Mandel, T. Hänsch, I. Bloch, Nature, **419**, 51 (2002).
 [4] C. Orzel, A. Tuchman, M. Fenselau, M. Yasuda, M. Kasevich, Science, **291**, 2386 (2001).
 [5] D. Jaksch, C. Bruder, J. Cirac, C. Gardiner, P. Zoller, Phys. Rev. Lett., **81**, 3108 (1998).

Antiwasserstoff bei 15 K

Die ATHENA-Kollaboration am CERN hat ein Etappenziel zur Speicherung und Spektroskopie von „ruhemdem“ Antiwasserstoff erreicht

Heisenberg soll einmal gesagt haben: „Die Entdeckung der Antimaterie ist vielleicht der größte aller vielen großen Schritte in der Physik dieses Jahrhunderts“. Nun, das Jahrhundert Heisenbergs ist vorbei und auch Dirac würde am 8. August 2002 seinen 100sten Geburtstag gefeiert haben. Fast zeitgleich mit diesem Datum ist es der ATHENA-Kollaboration*) am Antiprotonen Decelerator (AD) des CERN gelungen, erste deutliche Signale der Produktion von Antiwasserstoff bei Temperaturen von 15 K nachzuweisen [1]. Dieses Resultat ist ein weiterer Meilenstein auf dem Wege zu kaltem, in einer Falle gespeichertem, „ruhemdem“ Antiwasserstoff; ein guter Erfolg für die ATHENA-Kollaboration, die Techniker und Wissenschaftler am AD, das Forschungszentrum CERN und für die Gemeinschaft der Physiker.

Nach spekulativen Vorstellungen im Altertum bis hin zu dem amüsanten Brief des Physikers Sir Arthur Schuster, der 1898 ebenfalls – wie ATHENA – seine Erkenntnisse zu „Potential Matter“ in der Zeitschrift Nature veröffentlichte, begann die wirkliche Geschichte zur Antimaterie in den 20er Jahren des vorigen Jahrhunderts. Auf der Grundlage seiner berühmten Wellengleichung zur relativistischen Theorie des Elektrons postulierte Dirac die Existenz von „Löchern“ gleicher Masse, aber mit entgegengesetzter Ladung. Diesen genialen theoretischen Vorhersagen folgte sehr schnell der experimentelle Nachweis von Positronen (1932) und Antiprotonen (1956). Zweifelsfrei ist heute jedem Elementarteilchen sein entsprechendes Antiteilchen zuzuordnen.

Das Antiwasserstoff-Atom ist das einfachste elektrisch neutrale System, das aus den beiden Bausteinen hadronischer und leptonischer Familien, den Antiteilchen zu Proton und Elektron besteht. *Schnelle* Antiwasserstoff-Atome wurden bereits vor einiger Zeit im Flug erzeugt und nachgewiesen, zuerst 1995 am CERN [2] und bald darauf am Fermilab [3]. Die Produktionsraten waren dabei allerdings so gering, dass – ganz abgesehen von systematischen Problemen aufgrund der nahezu relativistischen Geschwindigkeit – weitere Untersuchungen, etwa durch Laserspektroskopie, aussichtslos waren und sind.

Faszinierend ist die Aussicht, Spektrallinien des Antiwasserstoff-Atoms mit denjenigen des gewöhnlichen Wasserstoff-Atoms mit höchster Genauigkeit zu vergleichen. Aus dem CPT-Theorem folgt, dass Wasserstoff und Antiwasserstoff *identische* Spektrallinien haben sollten. Jede noch so geringe Abweichung zwischen beiden würde eindeutig das CPT-Theorem und damit das gegenwärtige Standardmodell der Elementarteilchenphysik in Frage stellen. Die Prüfung der CPT-Symmetrie durch vergleichende Laserspektroskopie von Wasserstoff- und Antiwasserstoff-Atomen wurde kürzlich in einer theoretischen Arbeit diskutiert [5]. Ausgehend von einer modifizierten Dirac-Gleichung, bei der *ad hoc* CPT-verletzende Terme eingefügt wurden, konnte gezeigt werden, dass diese im Prinzip durch Laserspektroskopie nachweisbar sind.

Die Kunst der Laserspektroskopie des gewöhnlichen Wasserstoff-Atoms ist sehr weit entwickelt. In den letzten 25 Jahren gelang es durch die Entwicklung von neuen Techniken, die Auflösung um etwa sechs Größenordnungen zu steigern. Die gegenwärtig beste Auflösung für den 1S–2S-Übergang des gewöhnlichen Wasserstoff-Atoms liegt bei 1,8 Teilen in 10^{14} [5]. Noch beeindruckender als die enorme Präzision für die 1S–2S-Spektroskopie ist vielleicht die Tatsache, dass es die moderne höchstauflösende Laserspektroskopie offensichtlich erlaubt, Kern-Eigenschaften zu beobachten. So kommt der derzeit genaueste Wert für den Struktur-Radius des Deuterons aus der Analyse der Isotopie-Verschiebung des 1S–2S-Übergangs für Wasserstoff und Deuterium [6]. Daher lässt die höchstauflösende La-

aserspektroskopie von Antiwasserstoff äußerst interessante Ergebnisse erwarten.

Nicht zuletzt wegen des Erfolges der ersten Beobachtung von Antiwasserstoff-Atomen am CERN wurde eine neue Generation von Experimenten am eigens hierfür gebauten Antiprotonen Decelerator (AD) begonnen. Die Antiprotonen werden am CERN durch Proton-Schwermetall-Stöße erzeugt, wohingegen die Positronen Zerfallsprodukte des Isotops ^{22}Na sind. Beide Teilchensorten werden im AD beziehungsweise in den einzelnen Experimenten gekühlt und moderiert. Ausgehend von Antiproton- und Positron-Plasmen mit Temperaturen von einigen Kelvin wollen die Experimente ATHENA und ATRAP#) kalte Antiwasserstoff-Atome synthetisieren und diese anschließend in einer magnetischen Falle speichern. Dadurch lässt sich die Wechselwirkungszeit der Atome mit Laserstrahlen so weit verlängern, dass sehr genaue Laserspektroskopie von Antiwasserstoff-Atomen möglich wird.

Die im AD bei 3,5 GeV gesammelten Antiprotonen werden hierfür über verschiedene Stufen auf Beschleuniger- und Experimentseite um mehr als 12 Größenordnungen abgebremst (Abb. 1). Das gebildete Antiwasserstoff-Atom muss aber immer noch um mindestens weitere zwei Größenordnungen abgekühlt werden, bevor es in einer magnetischen Falle effizient für Untersuchungen seiner physikalischen Eigenschaften gespeichert werden kann.

Was ist nun bislang am AD und den beiden Experimenten ATHENA und ATRAP, die sich der Untersuchung des Objektes Antiwasserstoff verschrieben haben, geschehen? ATHENA veröffentlichte kürzlich die beobachtete Signatur der Erzeugung von Antiwasserstoff-Atomen. Auf dem Weg zu diesem Ziel demonstrierte ATRAP die entscheidenden technischen Schritte: die Nutzung verschachtelter Penning-Fallen, um Positronen und Antiprotonen einzufangen und zu überlagern, das Aufsammeln mehrerer Injektionen von Antiprotonen aus dem AD in einer Falle und das Kühlen von Antiprotonen durch Positronen. Die ATRAP-Kollaboration konnte vielversprechende Signale der Produktion von Antiwasserstoff beobachten, hat jedoch aus einer Reihe von Gründen – der sta-

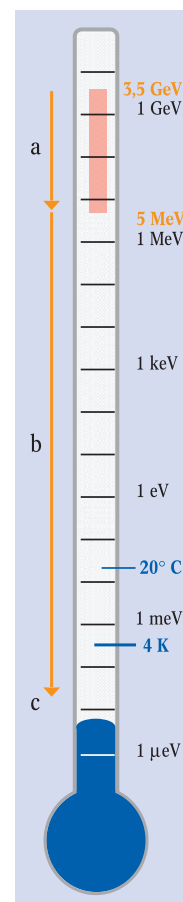


Abb. 1: Um Antiwasserstoff zu produzieren, müssen die Antiprotonen um 12 Größenordnungen abgebremst werden, zunächst im AD-Speicherring selbst (a), anschließend im Experiment mit einer Folie sowie durch Elektronen- und Laserkühlen (b). Bis zum Ziel, kalten Antiwasserstoff zu speichern (c), fehlen noch weitere zwei Größenordnungen.

*) <http://athena.web.cern.ch/athena/>

#) <http://hussle.harvard.edu/~atrap/>

tistischen Signifikanz, dem Zweifel an der Eindeutigkeit und der Möglichkeit einer Fehlinterpretation – diese Ergebnisse bisher noch nicht veröffentlicht.

Die Physiker der ATHENA-Kollaboration nutzten die Gunst die Stunde, freuten sich über eine hohe Ladungsrate und Dichte der Posi-

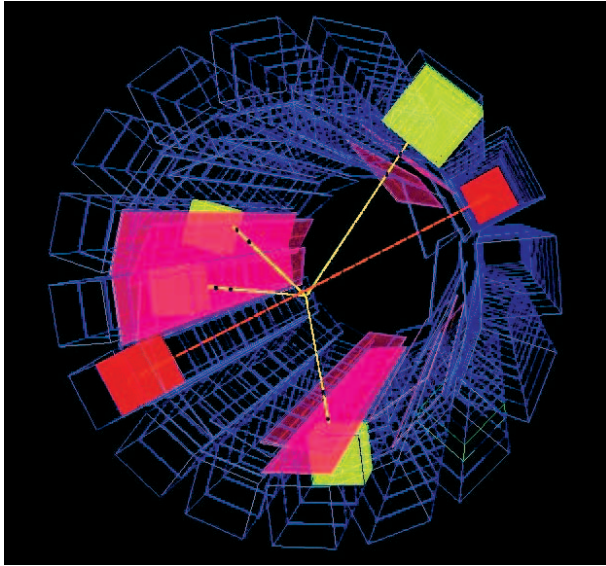


Abb. 2: Eine typische Ereignissignatur, wie sie der Vernichtung eines Antiwasserstoff-Atoms an der Wand der Teilchenfalle zuge-schrieben wird. Das Antiproton annihiliert mit einem Proton zu vier geladenen Pionen (gelbe Spuren), die in Mikrostreifendetektoren (violett) und CsI-Kristallen (gelbe Würfel) nachgewiesen werden. Das Positron annihiliert mit einem Elektron zu zwei entgegengesetzt gerichteten γ -Quanten (rote Spuren), die ebenfalls in CsI-Kristallen detektiert werden (rote Würfel).

tronen sowie über ein Spur-rekonstruierendes Detektionssystem. Die neutralen Antiwasserstoff-Atome driften an den Fallenrand, wo Antiproton und Positron vernichtet werden. Die Beobachtung entsprechender Spuren zu gleicher Zeit ($\Delta t \approx 5 \mu\text{s}$) und am gleichen Ort ($\Delta x \approx 8 \text{ mm}$) liefert den Hinweis auf die Produktion von Antiwasserstoff-Atomen (Abb. 2).

ATHENA hat nun 131 ± 22 solcher Ereignisse überzeugend nachgewiesen. Nach Aussagen der Kollaboration ist in dem durchgeführten Experiment weder der Produktionsmechanismus noch der Quantenzustand des beobachteten Gebildes ($\bar{p} + e^+ = \bar{H}^0$) bekannt. Hier warten noch viele Probleme darauf, von den Kollaborationen am AD gelöst zu werden. Viel Glück ist beiden, der ATHENA- und der ATRAP-Gruppe zu wünschen; denn schlussendlich wartet spannende, fundamentale Physik auf Antworten.

WALTER OELERT

Prof. Dr. Walter Oelert, Institut für Kernphysik I, Forschungszentrum Jülich, und CERN, Genf

- [1] M. Amoretti et al., Nature **419**, 456 (2002)
- [2] G. Baur et al., Phys. Lett B **368**, 251 (1996)
- [3] G. Blanford et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 3037 (1998)
- [4] R. Bluhm et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 2254 (1999)
- [5] M. Niering et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5496 (2000)
- [6] A. Huber et al., Phys. Rev. Lett. **80**, 468 (1998)

Wie glaubwürdig sind Klimamodelle?

Eine kürzlich veröffentlichte statistische Analyse hat gezeigt, dass die gängigen Klimamodelle ein spezielles Verhalten der natürlichen Klimavariabilität der Atmosphäre ungenügend wiedergeben. Dennoch kann kein Zweifel daran bestehen, dass sich die Modelle bewährt und zahlreiche Tests bestanden haben.

Das System Erde zeichnet sich durch reichhaltige komplexe Dynamik aus, verursacht durch vielfältige intern rückgekoppelte Prozesse und Kreisläufe sowie externen Antrieb. Die systemare Betrachtungsweise, die Methoden der Nichtlinearen Dynamik entscheidend einbezieht, hat in den letzten Jahren zu wesentlichen neuen Einsichten und vielversprechenden Aussichten in den Erdwissenschaften geführt.

Von besonderem öffentlichen Interesse ist dabei die Klimaforschung, soll sie doch Probleme dezidiert lösen wie etwa die Frage, ob Klimavariationen anthropogen verursacht oder natürlich sind, und klimabedingte Katastrophen möglichst quantitativ vorhersagen – eine gigantische Herausforderung.

Ein wichtiges Werkzeug sind dabei dynamische Klimamodelle, die auf hydrodynamischen Gleichungen basieren und insbesondere Wechselwirkungen zwischen Atmosphäre, Ozean, Kryosphäre¹⁾ und Landoberfläche einbeziehen (Biosphäre und chemische Stoffkreisläufe werden zunehmend berücksichtigt). Die auf den leistungsfähigsten verfügbaren Computern laufenden, aufwändigen Programme sollen die Dynamik der wichtigsten Komponenten des Klimasystems simulieren. Mit ihnen werden beispielsweise Szenarien des künftigen, vom anthropogenen Treibhauseffekt veränderten Erdklimas berechnet.

Voraussetzung für die Glaubwürdigkeit derartiger Simulationen ist,

dass Klimamodelle auch die natürliche Variabilität des Klimas gut wiedergeben. Das führt zu dem äußerst schwierigen Problem, Realitätsnähe bzw. Reichweite und Aussagekraft der Klimamodelle zu testen. Dazu benutzt man moderne Messverfahren (z.B. Radiosondenaufstiege) wie auch historische klimatologische Messreihen als primäre Daten.

Beide Typen von Messreihen sind nicht hinreichend für die Validierung von Klimamodellen: Die aktuellen Daten überspannen nur wenige Dekaden, und die historischen stehen nur lokal auf relativen Zeitskalen von einigen hundert Jahre zur Verfügung wie etwa in Prag seit 1775.

Moderne Messtechnik ermöglicht es, Sedimente, Eisbohrkerne und viele andere Messobjekte detailliert zu untersuchen; sie erschließen sekundäre Informationsquellen für das erdgeschichtliche Klima bis vor etlichen tausend Jahren und darüber hinaus in wachsender zeitlicher Abtaste.

Die historischen klimatologischen Messreihen stellen seit langem eine besondere Herausforderung an die Methoden der Zeitreihenanalyse. Mittels linearer statistischer Verfahren werden seit etwa hundert Jahren „verborgene“ Periodizitäten in den Klimazeitreihen identifiziert. Die Verfahren der nichtlinearen Zeitreihenanalyse ließen neuartige Charakteristika und insbesondere Modellvergleiche erwarten; sie offenbarten aber auch die besonderen Schwierigkeiten mit den Klimadaten. Ein Meilenstein war die Bestimmung fraktaler Dimensionen aus einer Zeitreihe eines Sauerstoffisotops aus einem pazifischen Tiefsee-Bohrkern, aus der C. und G. Nicolis [1] folgerten, dass sich wichtige dynamische Eigenschaften des Klimasystems mit einigen wenigen (maximal sieben) gekoppelten gewöhnlichen Differentialgleichungen beschreiben lassen. Daher sollten Klimamodelle stark zu vereinfachen und mit signifikant geringerem Aufwand simulierbar sein. Es ist P. Grassberger zu verdanken, dass er auf ein Artefakt in den Rechnungen hinwies und somit diese überzogene Hoffnung schnell relativierte [2].

Dennoch wurde schon früh erkannt, dass mit geeigneten nichtlinearen Analysemethoden weitergehende Tests von Klimamodellen möglich sein sollten. Seitdem sind einige vielversprechende nichtlinea-