

vom flüssigen Eisen stammt, sowie eine verschwindende thermische Expansion der festen Phase [2]. Beim Erreichen des Schmelzpunkts entsteht an der Oberfläche der Probe eine geschmolzene Schicht, im darunterliegenden festen Teil hört zum gleichen Zeitpunkt trotz weiter ansteigender Laserleistung die Ausdehnung des Festkörpers auf. Eine genaue Bestimmung der Temperatur und der Gitterkonstanten ist nur durch die hohe Zeitauflösung (im Sekundenbereich) möglich.

Dieses Schmelzkriterium ist ein Fortschritt gegenüber anderen Versuchen in der Diamantstempelzelle, da es Diffraktionsexperimente [9] mit der Beendigung der thermischen Expansion verknüpft. Dies geht einher mit einer konstanten Temperatur der Probe trotz erhöhter Laserleistung, was zusammen mit optischen Beobachtungen von Bewegung an der Oberfläche der Probe bereits in der Vergangenheit als Schmelzkrite-

rium benutzt wurde [10]. In letzter Zeit ist die Bestimmung des Lamb-Mössbauer-Faktors in nuklearer Resonanz-Streuung (Synchrotron-Mössbauer) dazugekommen [11], dessen Abnahme ein Verschwinden des elastischen Resonanzsignals des Kristalls, und damit seiner Festigkeit, aufzeigt.

Mit ihrer Analyse erhalten Azellini et al. [2] eine Schmelzkurve, die in etwa den DFT-Molekulardynamik-Simulationen von Alfe et al. [6] folgt (Abb. 2) und deren Extrapolation durch die Werte der Schockwellenexperimente führt [4, 5]. Die neu bestimmten Werte liegen damit deutlich höher als bisherige Messungen in der Diamantstempelzelle [9–11]. Die Autoren erklären die niedrigeren Werte, die auf optischen Beobachtungen basieren [10], mit einer thermisch aktivierten Rekristallisation von Eisen zu größeren Kristallen, was Beugungsmuster von Einkristallen dokumentieren.

Die Extrapolation der gemessenen Schmelzkurve ergibt eine Temperatur beim Druck des inneren Erdkerns von 6230 ± 500 K [2]; die tatsächliche Temperatur des Erdkerns wird durch die leichten Elemente im Erdkern allerdings etwas niedriger sein [1], vergleichbar mit der Photosphäre der Sonne.

Gerd Steinle-Neumann

- [1] G. Steinle-Neumann, Physik Journal November 2008, S. 27
- [2] S. Anzellini et al., Science **340**, 464 (2013)
- [3] O. Narygina et al., PCM **38**, 203 (2011)
- [4] J. M. Brown und R. G. McQueen, J. Geophys. Res. **91**, 7485 (1986)
- [5] J. H. Nguyen und N. C. Holmes, Nature **427**, 339 (2004)
- [6] D. Alfe et al., Phys. Rev. B **65**, 165118 (2002)
- [7] A. Laio et al., Science **287**, 1027 (2000)
- [8] A. B. Belonoshko et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 3638 (2000)
- [9] G. Y. Shen et al., Geophys. Res. Lett. **25**, 373 (1998)
- [10] R. Boehler, Nature **363**, 534 (1993)
- [11] J. M. Jackson et al., Earth Planet. Sci. Lett. **362**, 143 (2013)

■ Präzision am Antiproton

Ein Fallenexperiment am CERN bestätigt mit bislang unerreichter Genauigkeit, dass die magnetischen Momente von Proton und Antiproton übereinstimmen.

Paul Dirac stellte 1928 auf der Suche nach einer relativistischen Formulierung der Quantenmechanik seine Theorie des Elektrons auf [1]. Daraus ergaben sich zwei weitreichende Folgerungen: die Existenz des Antiteilchens des Elektrons (Positron) und das magnetische Spinnmoment des Elektrons. Im heutigen Verständnis beschreibt eine relativistische Quantenfeldtheorie die fundamentalen Wechselwirkungen, basierend auf dem Standardmodell der elektroschwachen und der starken Wechselwirkung. In den relativistischen Quantenfeldtheorien kommt die Symmetrie zwischen einem Teilchen und seinem Antiteilchen im CPT-Theorem zum Ausdruck, nach dem die physikalischen Gesetze unverändert bleiben, wenn man zugleich Teilchen durch Antiteilchen ersetzt (C: Ladungskonjugation), rechtshändig durch linkshändig

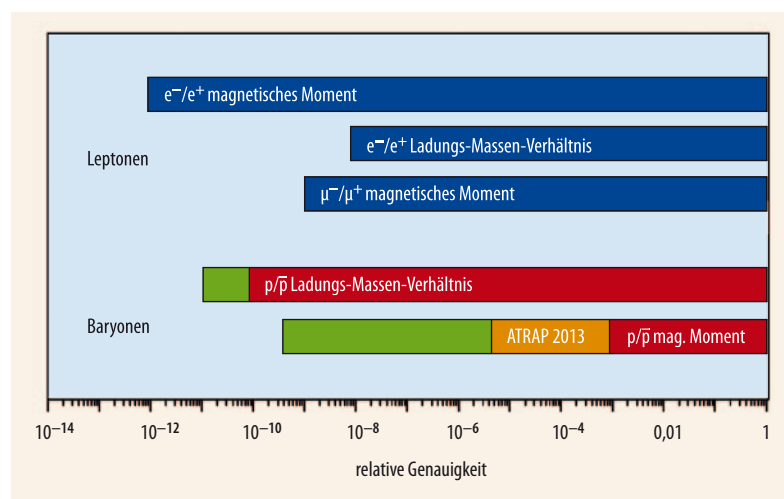


Abb. 1 Bisher erreichte Genauigkeiten beim Vergleich der Eigenschaften von Elektronen und Positronen, Myonen und Antimyonen (blau) bzw. Protonen und

Antiprotonen (rot) sowie das Ergebnis von ATRAP (orange). Geplante Experimente zielen nochmal eine deutlich höhere Genauigkeit an (grün).

Koordinaten vertauscht (P: Raumspiegelung) und die Zeitvariable rückwärts laufen lässt (T: Zeitumkehr). Bleibt die CPT-Symmetrie erhalten, so sind die trägen Massen,

die Lebensdauern, die elektrischen Ladungen und die magnetischen Momente (letztere bis auf das Vorzeichen) von Teilchen und Antiteilchen exakt gleich. Bis zum

heutigen Tage liegt uns keine einzige Beobachtung vor, die auf eine Verletzung der CPT-Symmetrie – und damit Physik jenseits des Standardmodells – hindeuten würde. Ob die CPT-Symmetrie universell gilt, ist eine offene Frage, besonders angesichts der Tatsache, dass sich die Gravitationswechselwirkung bislang einer quantenfeldtheoretischen Formulierung entzieht.

Ionenfallen bieten ideale Voraussetzungen, um die Symmetrie zwischen Teilchen und Antiteilchen mit sehr hoher Genauigkeit zu überprüfen: Ein einzelnes Teilchen lässt sich – fast ungestört von seiner Umgebung und praktisch beliebig lange – im elektromagnetischen Feld einer Falle speichern, kühlen und untersuchen. In bisherigen Experimenten konnten Hans Dehmelt (Nobelpreis 1989) und seine Gruppe die Verhältnisse von Ladung zu Masse e/m_e und die magnetischen Momente μ_e von Elektron und Positron in einer Penning-Falle miteinander vergleichen (Abb. 1) [2]. In den 1990er-Jahren gelang es, ein einzelnes Antiproton zu isolieren und sein Ladungs-Massen-Verhältnis $q/m_{\bar{p}}$ mit dem eines einzelnen Protons im starken Magnetfeld B einer Penning-Falle zu vergleichen [3]. Das Verhältnis $q/m_{\bar{p}}$ ergibt sich

aus einer präzisen Messung der Umlauffrequenz $\omega_c = (q/m_{\bar{p}}) \cdot B$, die die kreisförmige Zyklotronbewegung des Teilchens und seines Antiteilchens im Magnetfeld der Falle charakterisiert. Die magnetischen Momente μ_p von Proton und Antiproton dagegen ließen sich bis vor Kurzem nicht mit Ionenfallen messen, da sie im Vergleich zu den magnetischen Momenten von Elektron/Positron um einen Faktor von etwa 650 kleiner und deshalb wesentlich schwieriger zu bestimmen sind. Unsere Kenntnis dieser beiden Größen beruht auf Messungen am Wasserstoffatom in einem Maser mit überlagertem Magnetfeld bzw. an antiprotonischen Atomen, in denen das Antiproton in der Hülle als „schweres Elektron“ gebunden ist. Die genauen Werte der magnetischen Momente sind $\mu_p = (2,792\,847\,356 \pm 23) \cdot \mu_K$ für das Proton bzw. $\mu_{\bar{p}} = (-2,7933 \pm 61) \cdot \mu_K$ für das Antiproton, wobei μ_K das Kernmagneton bezeichnet.

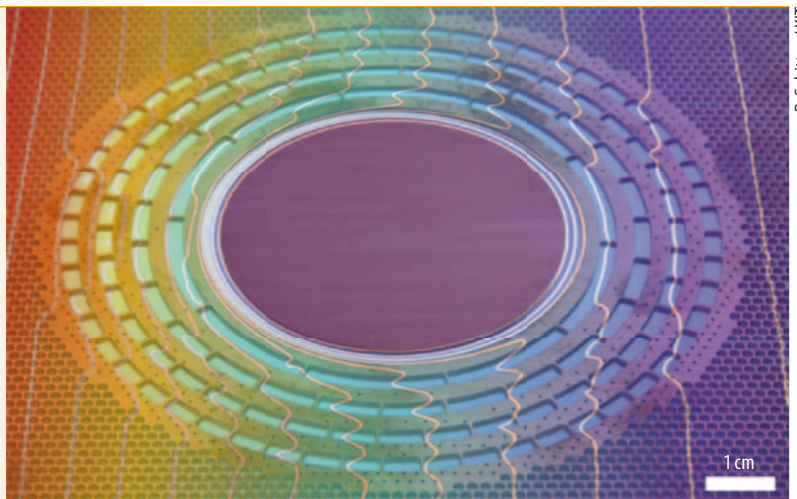
Die stetig weiterentwickelten Messmethoden in Ionenfallen haben es in den letzten Jahren ermöglicht, die Larmor-Frequenz $\omega_L = (\mu_p/\mu_K) \cdot (q/m_p) \cdot B$ des Spins eines einzelnen Protons in einer Penning-Falle zu messen [4, 5]. Die Larmor-Frequenz hängt mit der

Kreiselbewegung des Protonenspins um die Magnetfeldachse zusammen und gibt direkt Auskunft über das magnetische Moment des Teilchens. Der experimentelle Durchbruch beruht darauf, dass eine Magnetfeldinhomogenität die Bewegung eines einzelnen Protons in einer Penning-Falle beeinflusst. Analog zum „klassischen“ Stern-Gerlach-Effekt am Atomstrahl hängt auch dieser auf Dehmelt zurückgehende kontinuierliche Stern-Gerlach-Effekt von der räumlichen Orientierung des Protonenspins ab [6]. Allerdings führt er nicht zu einer räumlichen Aufspaltung wie beim Atomstrahl, sondern verschiebt die Frequenz ω_z der Teilchenszillation parallel zur Magnetfeldachse. Die präzise Messung der Schwingungsfrequenz ω_z erlaubt es, direkt auf die Ausrichtung seines magnetischen Spinmoments zurückzuschließen. Da die Messung von ω_z die Spinausrichtung nicht beeinflusst, ist sie zerstörungsfrei im Sinne des quantenmechanischen Messprozesses (Quantum Non-demolition-Messung). Damit ist es möglich geworden, Kernresonanzspektroskopie (NMR) an einem einzelnen Teilchen durchzuführen [4]. In dieser spektroskopischen Methode wird ein resonantes

THERMISCHE TARNKAPPE

Längst können sich nicht mehr nur Science-Fiction-Helden unter Tarnkappen verbergen. Zumindest im Labor erlauben es Metamaterialien bereits, Licht und Schall um Objekte herum zu lenken und diese somit unsichtbar oder „unhörbar“ zu machen. Nun hat ein Team aus Karlsruhe und Marseille gezeigt, dass sich mithilfe von Metamaterialien auch die Ausbreitung von Wärme beeinflussen lässt. Da die Wärmeleitungsgleichung ebenso wie die Wellengleichungen aus Optik und Akustik invariant unter gewissen Koordinatentransformationen ist, lässt sich die Methode der Transformationsoptik darauf anwenden. Diese erlaubt es, ein ausgedehntes Objekt in einem Punkt verschwinden zu lassen und die dafür notwendige Koordinatenverzerrung auf eine reale Metamaterialstruktur abzubilden.

Die neue Tarnkappe besteht aus ringförmigen Silikonstrukturen in einer dünnen Kupferplatte. Die Kombination aus einem guten und einem schlechten Lei-



ter führt die Wärme um den zentralen Bereich herum, ohne dass dies am Rand bemerkbar wäre, da der Umweg zeitlich kompensiert wurde. Die Linien konstanter Temperatur (weiß) sind vor und nach dem Hindernis parallel. Das Verhalten außerhalb der Ringstruktur gleicht

dabei einer soliden Metallplatte. Erhitzt man diese am linken Rand, fließt die Wärme gleichmäßig nach rechts, die Temperatur nimmt von links nach rechts ab (farbig kodiert).

R. Schittny et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 195901 (2013)

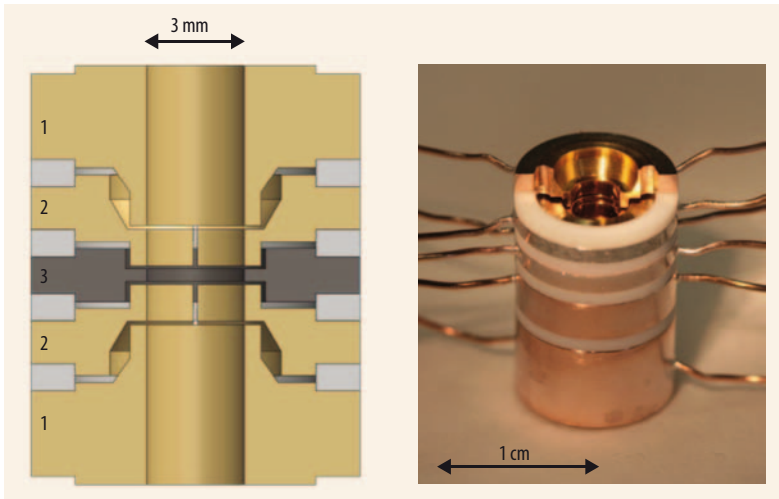


Abb. 2 Fünf zylindrische Elektroden (1: Endkappen, 3: Ringelektrode) erzeugen das elektrostatische Potential der Penning-Falle, welches das (Anti)proton parallel zu den Magnetfeldlinien einschließt. Die Korrektorelektroden (2) die-

nen dazu, anharmonische Anteile des Fallenpotentials zu minimieren. Für das Foto wurde eine Hälfte der oberen Korrektorelektrode entfernt, damit man ins Innere der Falle sehen kann.

Radiofrequenzfeld auf das gespeicherte Proton eingestrahlt und somit ein Umklappen des Spins induziert. Die gemessene Häufigkeit der Spin-Quantensprünge und das Durchstimmen der Radiofrequenz liefern eine Resonanzkurve der Larmor-Frequenz des Protons und damit das magnetische Moment des Teilchens.

Die ATRAP-Kollaboration am CERN bei Genf hat diese Methode nun erstmals auf ein einzelnes Antiproton angewandt [7]. Zunächst wurden dafür Antiprotonen aus dem Speicherring AD (Antiproton Decelerator) extrahiert, mithilfe einer dünnen Folie abgebremst und in einer Penning-Falle eingefangen (Abb. 2). Dort kühlten die Antiprotonen durch Stöße mit gespeicherten kalten Elektronen auf eine Temperatur von 4 K ab. Die Anzahl der Antiprotonen wird reduziert, bis schließlich ein einzelnes Teilchen in der Falle verbleibt. Die Schwingungsfrequenzen des Antiprotons in der Falle lassen sich über eine Frequenzanalyse der Spiegelströme, die es in den Fallenelektroden durch seine Bewegung induziert, mit hoher Genauigkeit ermitteln. Die Ströme liegen nur in der Größenordnung von Femtoampere. Um die Spinausrichtung des Antiprotons mit der Stern-Gerlach-Methode bestimmen zu können, sorgt die zentrale Ringelektrode

aus ferromagnetischem Material (Eisen) für die nötige Magnetfeldinhomogenität.

Die Messungen der Zyklotron- und der Spinpräzessionsfrequenz des Antiprotons in der Falle ergaben für sein magnetisches Moment einen Wert von $\mu_{\bar{p}} = (-2,792\,845 \pm 0,000\,012) \cdot \mu_K$. Eine Messung am Proton mit derselben Apparatur lieferte für das Verhältnis der magnetischen Momente $\mu_{\bar{p}}/\mu_p = -1,000\,000 \pm 0,000\,005$, in exzellentem Einklang mit der CPT-Symmetrie und damit der Vorhersage des Standardmodells der Elementarteilchen. Die relative Unsicherheit von $5 \cdot 10^{-6}$ bedeutet eine 680-fach höhere Messgenauig-

keit und damit präzisere Überprüfung der CPT-Symmetrie gegenüber den früheren Messungen von Energieniveaus in antiprotonischen Atomen.

Eine zweite Penning-Falle unmittelbar bei der beschriebenen Falle verspricht eine um drei bis vier Größenordnungen höhere Genauigkeit. In dieser Falle mit einem homogenen Magnetfeld wird ein Spin-Umkehrübergang angeregt, der schließlich in der ersten Falle nachgewiesen wird. Die BASE-Kollaboration hat kürzlich in einem Experiment an der Universität Mainz gezeigt, dass sich diese Zwei-Fallen-Methode an einem einzelnen Proton durchführen lässt [8]. Eine entsprechende Messung am Antiproton durch die BASE-Kollaboration am AD-Speicherring des CERN befindet sich derzeit in Vorbereitung.

Wolfgang Quint

- [1] P. A. M. Dirac, Proc. Roy. Soc. A **117**, 610 und **118**, 351 (1928)
- [2] R. S. Van Dyck, Jr., P. B. Schwinberg, H. G. Dehmelt, Phys. Rev. Lett. **59**, 26 (1987)
- [3] G. Gabrielse et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 3198 (1999)
- [4] S. Ulmer et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 253001 (2011)
- [5] G. Gabrielse, Phys. Rev. Lett. **108**, 153001 (2012)
- [6] W. Quint et al., Nucl. Instr. Meth. B **214**, 207 (2004)
- [7] J. DiSciaccia et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 130801 (2013)
- [8] A. Mooser et al., Phys. Lett. B (2013), DOI: 10.1016/j.physletb.2013.05.012

KURZGEFASST

■ Massereicher Pulsar

Mit großen Radioantennen und optischen Teleskopen hat ein Team unter der Leitung von Wissenschaftlern des MPI für Radioastronomie in Bonn den massereichsten bisher bekannten Neutronenstern und seinen Begleiter, einen Weißen Zwerg, untersucht. Der Pulsar hat die doppelte Sonnenmasse, die Umlaufperiode des Doppelsternsystems beträgt 2,5 Stunden. An diesem System lässt sich überprüfen, wie die Emission von Gravitationswellen die Umlaufperiode verkürzt – einmal mehr stimmt die Beobachtung mit der Vorhersage der Allgemeinen Relativitätstheorie überein.

J. Antoniadis et al., Science **340**, 1233232 (2013)

■ Kernschalenmodell bestätigt

Eine eindrucksvolle Bestätigung des Kernschalenmodells und des ihm zugrunde liegenden Konzepts von gepaarten Protonen und Neutronen ist einem internationalen Team mit Physikern aus Darmstadt, Heidelberg und Mainz gelungen. Sie erzeugten dazu an der ISOLDE-Anlage am CERN die neutronenreichen Cadmium-Isotope ^{107}Cd bis ^{129}Cd und untersuchten mit hochauflösender Laserspektroskopie die Hyperfeinstruktur. Genau wie vom Schalenmodell vorhergesagt wächst das daraus abgeleitete Quadrupolmoment des Kerns linear mit der Neutronenzahl an, falls diese ungerade ist. D. T. Jordanov et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 192501 (2013)

Priv. Doz. Dr. Wolfgang Quint, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstraße 1, 64291 Darmstadt