

■ Flippig in der Falle

Die Beobachtung eines einzelnen Protonenspins, der umklappt, ebnet den Weg zu einem präzisen Test der CPT-Symmetrie.

Bei der Kernspinresonanz werden täglich die magnetischen Eigenschaften von Protonen ausgenutzt, um Bilder für die medizinische Diagnostik zu erhalten oder die Struktur von Molekülen aufzuklären. Dieses Verfahren beruht darauf, das Umklappen von sehr vielen Protonenspins zu detektieren. Wenn es jedoch darum geht, die Eigenschaften des Protons an sich möglichst präzise zu vermessen, dann setzt der störende Einfluss der Atome in der Umgebung eine Grenze. Im Gegensatz hierzu gehören Experimente an einzelnen, isolierten elementaren Teilchen und Atomen oft zu den genauesten in der Physik, da sie unter sehr genau kontrollierten Bedingungen und ohne den störenden Einfluss von Nachbarn ablaufen. Auf dem Weg, das magnetische Moment des Protons möglichst präzise zu bestimmen, ist es Stefan Ulmer und Kollegen aus Heidelberg, Mainz und Darmstadt kürzlich erstmals gelungen, das Umklappen eines einzelnen Protonenspins nachweisbar zu beobachten [1].

Das Experiment ist zugleich ein Meilenstein auf dem Weg, die Eigenschaften eines Protons und eines Antiprotons präzise zu vergleichen und damit das CPT-Theorem zu testen. Dieses Theorem, das in der Physik wegen seiner vielfältigen Konsequenzen eine sehr wichtige Rolle spielt, besagt, dass alle physikalischen Gesetze unverändert bleiben, wenn man zugleich Teilchen durch Antiteilchen ersetzt, rechtshändige durch linkshändige Koordinaten vertauscht und die Zeitvariable in physikalischen Vorgängen rückwärts laufen lässt. Als Folge davon sollten die Eigenschaften von Teilchen und Antiteilchen vollständig identisch sein. Die Herausforderung an Präzisionsmessungen besteht nun darin, dies insbesondere für die kleinsten stabilen Bausteine der Materie, Proton und Elektron, zu überprüfen. Eine Verletzung der CPT-Symmetrie könnte

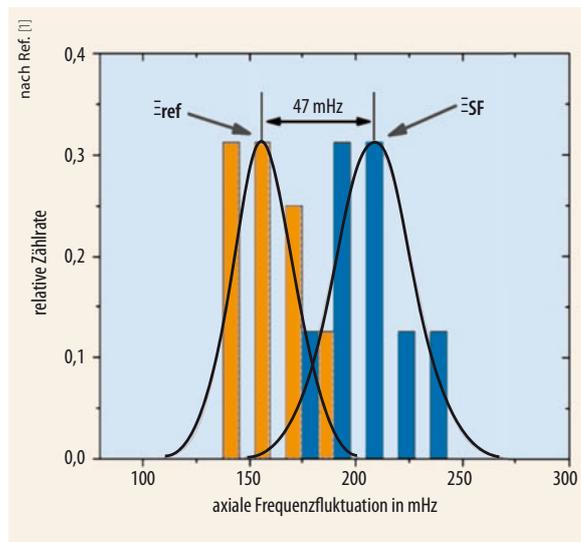


Abb. 1 Der Spinflip eines Protons lässt sich durch die Verschiebung der axialen Oszillationsfrequenz nachweisen. Gezeigt ist der Abstand von einer künstlichen Referenzlinie (orange), welche die gleichen Frequenzfluktuationen aufweist, aber keinen Spinflip repräsentiert. Ohne den Spinflip gäbe es die blaue Linie nicht.

weitreichende Folgen haben, z. B. auch eine Verletzung der Lorentz-Invarianz.

Einzelne geladene Teilchen lassen sich in einer Penning-Falle speichern, die auch im Experiment von Ulmer und Kollegen das zentrale Instrument darstellt. Unter dem Einfluss des darin herrschenden starken Magnetfelds bewegen sich die Protonen auf Kreisbahnen. Ein geeignet überlagertes statisches elektrisches Quadrupolfeld schließt die Falle. Die Teilchen führen im Potential der Falle Oszillationen durch, die sich als Quantenzustände eines harmonischen Oszillators beschreiben lassen. Die Protonen sind über die elektromagnetischen Felder an die Apparatur gekoppelt und nehmen deren Temperatur an. Gleichzeitig induzieren die oszillierenden Teilchen Ströme in den Elektroden, die sich mit kryogenen Verstärkern messen lassen.

Zu den herausragenden Erfolgen von Experimenten mit Ionenkäfigen zählen die Bestimmung von Teilchenmassen und fundamentalen Konstanten genauso wie der Beweis des Ergodentheorems, der Nachweis von Quantensprüngen bei atomaren Übergängen und Präzisionstests fundamentaler Symmetrien wie CPT und Lorentz-Invarianz [2, 3]. Solche Experimente bei niedrigsten Energien sind in

ihrer Aussagekraft komplementär zu Hochenergieexperimenten und übertreffen diese in ihrer Genauigkeit oft noch deutlich. Eines der Glanzstücke des Feldes sind die mit dem Nobelpreis ausgezeichneten Arbeiten von Hans Dehmelt und Mitarbeitern an einzelnen gekühlten Elektronen und Positronen in einer Penning-Falle [4]. Diese Messungen lieferten seit den 80er-Jahren neben einer genauen Bestätigung von CPT den besten Test der Quantenelektrodynamik sowie der Lorentz-Invarianz von Leptonen. Auch der präziseste Wert für die Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkung, die Feinstrukturkonstante α , wurde so bestimmt. Erst kürzlich gelang es, diese Messungen mit einem in wesentlichen Teilen ähnlichen Ansatz noch zu verbessern [5].

Wegen der höheren Masse des Protons sind bei diesem die relevanten Oszillationsfrequenzen etwa drei Größenordnungen kleiner als beim Elektron. Darin liegt die experimentelle Herausforderung des Experimentes von Ulmer und Kollegen. Durch Einstrahlen von Mikrowellen bei der Larmor-Frequenz ist es ihnen gelungen, erstmals den Spin eines einzelnen Protons nachweisbar umzuklappen. Das Proton befand sich dabei in einer 3,8 K kalten Falle mit stark inhomogenem

Magnetfeld. In einer solchen Falle weisen die beiden möglichen Zustände des Spins leicht unterschiedliche axiale Oszillationsfrequenzen auf. Klappt der Protonspin um, verschiebt sich das Oszillationssignal bei 674 kHz um 190 mHz, was im Bereich des im Experiment gefundenen Rauschens liegt. In einer ausgeklügelten Messreihe, bei der die Experimentatoren vor allem das Rauschen meisterlich beherrscht haben, konnten sie die Spinflips eindeutig nachweisen (Abb. 1) und deren Abhängigkeit von der eingestrahlten Larmor-Frequenz messen.

Damit ist die Grundlage gelegt für die nun anstehenden Präzisionsmessungen. Ein weit schmaleres Signal und damit eine höhere Genauigkeit sind zu erwarten, wenn die Spinflips in einer zweiten, dicht

benachbarten Falle mit allerdings sehr homogenem Magnetfeld induziert werden. Lediglich zum Nachweis der Spinrichtung werden die Protonen wieder in die Analysefalle mit stark inhomogenem Magnetfeld transferiert (Abb. 2). Ein ähnliches Experiment plant auch eine konkurrierende Gruppe in Harvard [6].

Nach der nun erwarteten Präzisionsmessung der Larmor-Frequenz am einzelnen Proton unter Ausnutzung einer Doppelfalle steht ein Umzug an eine Antiprotonquelle wie dem AD Ring am CERN oder der zukünftigen FLAIR Facility bei FAIR in Darmstadt an, um Messungen am Antiproton durchzuführen. Die treibende Kraft bei dem nun eröffneten Rennen resultiert aus der Frage, wie die evidente Abwesenheit von Antimaterie im heutigen Universum zu erklären ist, nachdem im Urknall Materie und Antimaterie in gleichen Mengen entstanden sein sollten. Eine Beobachtung von CPT-Verletzung könnte zusammen mit einer vielerorts gesuchten Verletzung der Baryonzahlerhaltung eine mögliche Erklärung liefern.

Klaus Jungmann

- [1] S. Ulmer et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 253001 (2011)
- [2] R.K. Mittleman et al., Phys. Rev. Lett. **83**, 2116 (1999)
- [3] R. Bluhm et al., Phys. Rev. D **57**, 3932 (1998)
- [4] R.S. Van Dyck et al., Rev. Lett. **59**, 26 (1987)
- [5] D. Hanneke et al., Phys. Rev. Lett. **100**, 120801 (2008)
- [6] N. Guise et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 143001 (2010)

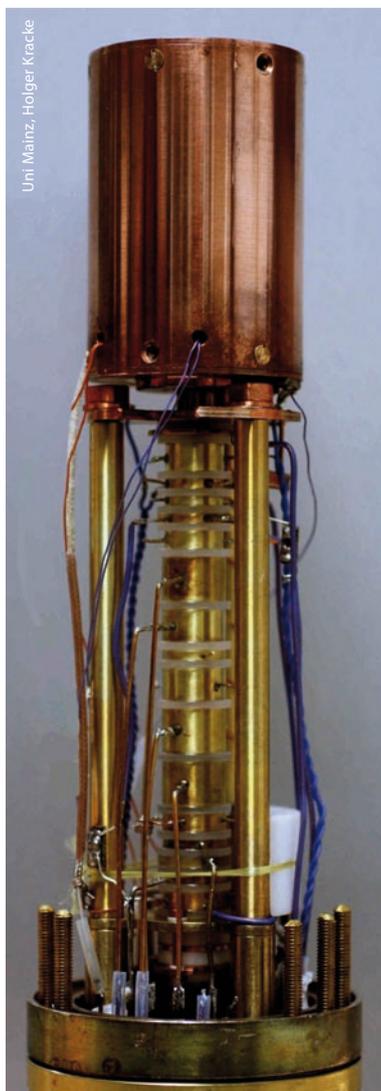


Abb. 2 Die Elektrodenkonfiguration der Mainzer Doppel-Penning-Falle für Protonen. Sie sitzt im Inneren eines Magneten mit 1,89 Tesla.