

Schritt für Schritt zu kleineren Werten

Eine neue Messung des elektrischen Dipolmoments des Neutrons halbiert die bisherige Obergrenze und reduziert den systematischen Fehler wesentlich.

Jörg Pretz

Nach heutigem Verständnis waren in einer sehr frühen Phase des Universums Materie und Antimaterie im Gleichgewicht, sodass sich Teilchen und Antiteilchen eigentlich vollständig gegenseitig vernichtet haben sollten. Nur wenn es zuvor in den fundamentalen Wechselwirkungen zu Symmetriebrechungen gekommen ist, konnte das, was wir heute als Materie bezeichnen, die Oberhand gewinnen.

Der russische Physiker und Friedensnobelpreisträger Andrei Sacharow hat 1967 gezeigt [1], dass die CP -Verletzung eine der notwendigen Bedingungen ist, um aus einem anfänglichen Gleichgewicht zu einem materiedominierten Universum zu gelangen. Dabei ist die Kombination aus Spiegelsymmetrie (Parität P) und der Symmetrie der Ladungsumkehr (Ladungskonjugation C) verletzt. Doch die CP -Verletzung fällt als fester Bestandteil des Standardmodells der Teilchenphysik viele Größenordnungen zu klein aus, um die beobachtete Asymmetrie von Materie und Antimaterie zu erklären.

Um dieses Rätsel zu lösen, gilt es, weitere CP -verletzende Mechanismen

Kurzgefasst

Heißes Eis und Helium

Uranus und Neptun bestehen vor allem aus Helium und Ammoniak. Ob beide miteinander reagieren, hängt von den Umgebungsvariablen ab. Unter hohem Druck und hoher Temperatur, wie sie im Inneren der beiden Planeten herrschen, bildet Ammoniak zusammen mit Wasser und Methan ein „heißes Eis“. Kommt dieses in Kontakt mit Helium, entstehen stabile Mischungen von He-NH_3 . Das verändert den inneren Aufbau der Planeten. Ein internationales Forscherteam hat nun erstmals die Phasendiagramme der zugehörigen Kristallstrukturen berechnet. Hochdruckexperimente in Diamantdruckzellen könnten die Resultate bestätigen.

C. Liu et al., Phys. Rev. X **10**, 021007 (2020)

Bethe-Strings erstmals untersucht

Ein räumlich dreidimensionaler Kristall ist magnetisch eindimensional, wenn die magnetischen Momente in einer Kette ausgerichtet sind. In einem Bethe-String zeigen zwei oder mehr der hintereinanderliegenden Momente in die gleiche Richtung. Einer internationalen Kollaboration ist es nun gelungen, in Kristallen aus $\text{SrCo}_2\text{V}_2\text{O}_8$ solche Strings mittels Neutronenstreuexperimenten zu untersuchen: Nur die Co-Atome tragen ein magnetisches Moment, das sie entlang einer Kristallachse ausrichten. Die experimentellen Daten bestätigen Bethes Vorhersagen aus dem Jahr 1931.

A. K. Bera et al., Nat. Phys. (2020), DOI: 10.1038/s41567-020-0835-7

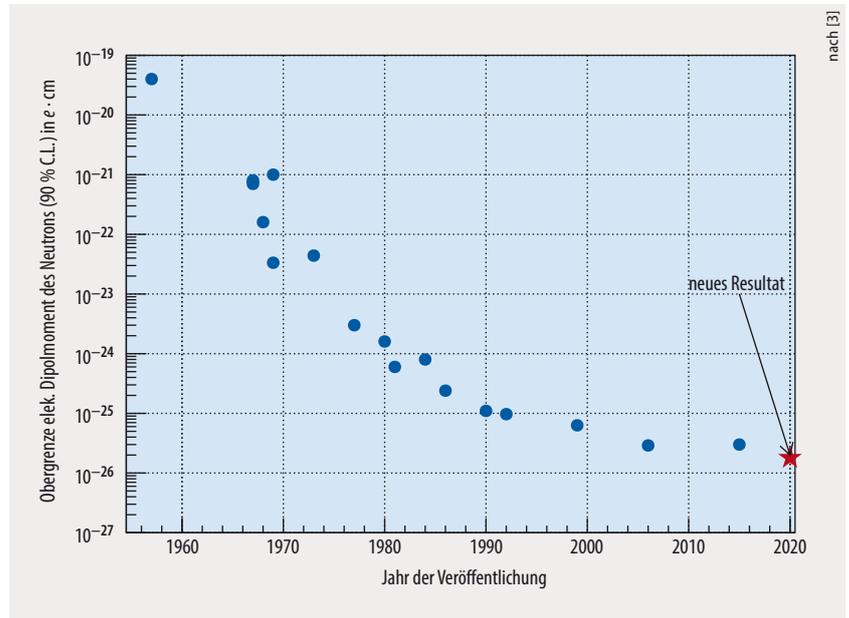


Abb. 1 In den letzten Jahrzehnten gelang es, die experimentell ermittelte Obergrenze des elektrischen Dipolmoments des Neutrons um mehrere Größenordnungen zu reduzieren. Sie liegt aber immer noch weit oberhalb des Werts von etwa 10^{-32} e·cm, der sich im Rahmen des Standardmodells ergibt.

zu finden. Hier spielen elektrische Dipolmomente eine entscheidende Rolle. Teilchen mit nicht verschwindendem Spin und nicht entartetem Grundzustand können nur dann

ein permanentes elektrisches Dipolmoment besitzen, wenn die Symmetrie unter Zeitumkehr T verletzt ist. Setzt man die Gültigkeit des CPT -Theorems voraus, entspricht das aber gerade der CP -Verletzung. Berechnungen im Standardmodell sagen verschwindend kleine elektrische Dipolmomente voraus. Ergeben sich in Messungen größere Werte, könnten bisher unbekannte CP -verletzende Wechselwirkungen die Ursache sein.

Aufgrund dieses fundamentalen Zusammenhangs erweitert eine neue Messung des elektrischen Dipolmoments des Neutrons am Paul Scherrer Institut in Villigen [2] die mehr als 60-jährige Geschichte entsprechender Experimente (**Abb. 1**): Die ersten gehen auf die Physik-Nobelpreisträger Edward M. Purcell und Norman F. Ramsey zurück. Der nun gemessene Wert ist wie alle vorherigen Ergebnisse mit Null verträglich: $d = (0,0 \pm 1,1_{\text{stat}} \pm 0,2_{\text{sys}}) \cdot 10^{-26}$ e·cm. Daraus lässt sich mit einem Konfidenz-

niveau von 90 % eine Obergrenze von $|d| < 1,8 \cdot 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ ableiten.

Für das aktuelle Experiment kamen spinpolarisierte ultrakalte Neutronen zum Einsatz. Im Allgemeinen beeinflusst ein elektrisches Dipolmoment d den Spin des Teilchens genauso wie das magnetische Dipolmoment μ : Der Spinvektor präzediert mit der Larmor-Frequenz von

$$f = \frac{1}{\pi\hbar} |\mu \cdot \vec{B} + d \cdot \vec{E}|.$$

Aus der Magnetresonanztomographie ist der erste Summand der Gleichung mit dem Magnetfeld \vec{B} wohl bekannt. In einem reinen elektrischen Feld \vec{E} mit der Feldstärke 10 kV/cm präzediert ein Neutron mit einer Frequenz von etwa 1 nHz, falls sein elektrisches Dipolmoment $2 \cdot 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ beträgt. Eine Larmor-Frequenz in der gleichen Größenordnung tritt bereits für magnetische Störfelder von nur 10^{-16} T auf. Daher findet die Messung mit einem überlagerten magnetischen Kontrollfeld statt (**Abb. 2**). Dieses ist einmal parallel und einmal antiparallel zum elektrischen Feld ausgerichtet, sodass sich, durch Umpolung des elektrischen Feldes, zwei Präzessionsfrequenzen $f_{\uparrow\uparrow}$ und $f_{\downarrow\downarrow}$ ergeben. Sofern sich das magnetische Feld zwischen den Messungen nicht geändert hat, liefert die Differenz der beiden Frequenzen das gesuchte elektrische Dipolmoment.

Die gewünschte Genauigkeit lässt sich eigentlich nur erreichen, wenn das Magnetfeld innerhalb von 10^{-13} T über einen Zeitraum von mehreren Stunden stabil bleibt. Dies ist technisch nicht möglich, sodass spinpolarisierte Quecksilberatome des Isotops ^{199}Hg als Co-Magnetometer die Schwankungen registrieren. Deren Obergrenze des elektrischen Dipolmoments ist im Vergleich zum Neutron verschwindend klein [4]. Kleinste Änderungen des Magnetfelds sind optisch messbar. Mithilfe des zeitlichen Verlaufs lässt sich die Messung des Experiments korrigieren.

Um einen Eindruck von der Komplexität der Messung zu erhalten, sei erwähnt, dass der Schwerpunkt der ultrakalten Neutronen sich um $(3,9 \pm 0,3) \text{ mm}$ von dem der ^{199}Hg -Atome unterscheidet, da diese sich

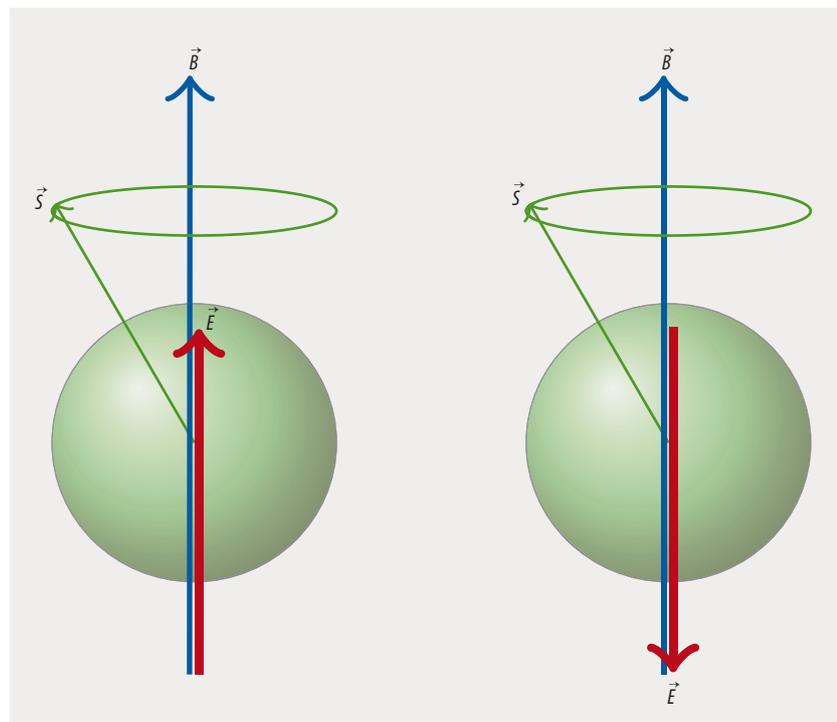


Abb. 2 Um das elektrische Dipolmoment des Neutrons experimentell zu bestimmen, muss die Larmor-Präzessionsfrequenz des Spinvektors \vec{S} in zwei Feldkonfigurationen bekannt sein: zum einen bei parallel ausgerichteten elektrischen und magnetischen Feldvektoren \vec{E} und \vec{B} (a), zum anderen bei antiparalleler Ausrichtung (b).

bei Raumtemperatur befinden. Die Unsicherheit dieses Werts und der nichtlineare Gradient des Magnetfelds rufen den Hauptanteil des systematischen Fehlers des neuen Resultats hervor.

Dieser Wert verbessert die früheren Ergebnisse fast um einen Faktor zwei. Das bisherige obere Limit von 2015 stammt aus einer Reanalyse eines Experiments von 2006 und liegt bei $3 \cdot 10^{-26} \text{ e}\cdot\text{cm}$ [5]; sein systematischer Fehler war fünfmal größer als der systematische Fehler des jetzt vorgestellten Resultats. Bei der neuen Messung dominiert der statistische Fehler. Dieser lässt sich allerdings nicht durch eine längere Messzeit signifikant reduzieren, da diese bereits zwei Jahre betrug. Beim bereits laufenden Nachfolgeprojekt n2EDM ist eine neue Apparatur im Einsatz mit signifikant höherer Effizienz, beispielsweise bei der Anzahl der nachgewiesenen Neutronen pro Messzyklus [6]. Das wird die Sensitivität um einen Faktor zehn verbessern.

Die bisher erreichte Sensitivität reicht aus, um auch Erweiterungen des Standardmodells zu testen, die elektrische Dipolmomente erlauben,

z. B. supersymmetrische Modelle. Das nun veröffentlichte Null-Resultat schränkt deren Parameterraum weiter ein. Letztlich genügt es nicht, nur Neutronen zu untersuchen, um diese Modelle zu bestätigen oder zu falsifizieren. Daher gibt es weltweit Bestrebungen, auch die elektrischen Dipolmomente von Atomen und Molekülen in Fallen sowie von geladenen Teilchen, wie Myonen, Protonen und Deuteronen, an Speicherringen zu messen.

- [1] A. D. Sakharov, Pisma Zh. Eksp. Teor. Fiz. 5, 32 (1967), [Usp. Fiz. Nauk 161, 61 (1991)]
- [2] C. Abel et al., Phys. Rev. Lett. 124, 081803 (2020)
- [3] J.-C. Peng, Mod. Phys. Lett. A 23, 1397 (2008)
- [4] B. Graner et al., Phys. Rev. Lett. 116, 161601 (2016)
- [5] J. M. Pendlebury et al., Phys. Rev. D 92, 092003 (2015)
- [6] C. Abel et al., EPJ Web Conf. 219, 02002 (2019)

Autor

Prof. Dr. Jörg Pretz, Institut für Kernphysik, FZ Jülich GmbH, 52425 Jülich und III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, 52074 Aachen