

Suche nach dem elektrischen Dipolmoment des Neutrons Ein Weg zur Lösung des kosmischen Antimaterie-Rätsels?

GEORG BISON | DIETER RIES | PHILIPP SCHMIDT-WELLENBURG

Warum blieb nach dem Urknall keine Antimaterie übrig? Dies ist eine der großen ungelösten Fragen der Physik. Eine mutmaßliche Ursache könnte eine starke Verletzung der sogenannten CP-Symmetrie gewesen sein. Nach allgemeinen Prinzipien der Teilchenphysik müsste diese allerdings zu einem messbaren elektrischen Dipolmoment von Elementarteilchen führen. Neutronen sind für eine solche Messung besonders gut geeignet, erfordern aber hochempfindliche Präzisionsexperimente.

Schon frühe Zeichen menschlicher Kreativität, etwa die siebzehntausend Jahre alten Höhlenmalerei von Lascaux, beschäftigten sich mit dem beobachtbaren Universum. Höchstwahrscheinlich haben sich unsere Vorfahren schon viel früher Gedanken über die von ihnen bewohnte Erde gemacht und sich gefragt, wie diese entstanden ist.

In dieser Tradition und ganz ähnlich motiviert, beschäftigen wir uns noch heute mit der Frage nach der Entstehung und der Funktionsweise unseres Universums. Die Astro- und Teilchenphysik haben es im letzten Jahrhundert geschafft, in einem ausgesprochen kreativen Prozess die gesamte 13,8 Mrd. Jahre alte Entstehung des Universums mit Hilfe einiger weniger mathematischer Grundideen und Symmetrien zu beschreiben.

Dieser Erfolg der beiden Standardmodelle der Teilchenphysik und der Kosmologie, die jedes experimentelle Resultat in den Labors der Teilchenphysik korrekt beschreibt, deckt aber auch sehr klar die verbleibenden großen Fragen auf. Neben dem großen Rätsel, was die mikroskopischen Bestandteile der dunklen Materie sind, beschäftigt uns vor allem die Frage, warum Materie und Antimaterie während des Urknalls nicht in fast gleichen Mengen produziert wurden [1, 2]. Das Standardmodell der Teilchenphysik, so erfolgreich es ist, kann nicht erklären, warum in unserem Universum fast ausschließlich Materie existiert.

Unter der Grundannahme eines in sich symmetrischen Urknalls würde das Standardmodell (SM) zu einem leeren, nur von Photonen gefüllten Universum führen. Der russische Physiker und Friedensnobelpreisträger Andrei Sacharow

hat 1967 drei notwendige Kriterien für ein Universum mit Materie formuliert [3]. Zwei dieser Kriterien werden im SM nicht erfüllt. Dies begründet das große Interesse und die intensiven Bemühungen in der theoretischen Teilchenphysik, das SM zu erweitern. Dabei werden Konzepte favorisiert, die mit den geringsten Veränderungen und Ergänzungen möglichst viele Probleme lösen.

Eine der notwendigen Zutaten ist eine erhebliche Verletzung der kombinierten Symmetrie aus Ladungskonjugation (Charge, C) und Punktspiegelung (Parity, P), die sogenannte CP-Verletzung. Ein solcher Effekt, der in vielen Erweiterungen des SM ganz natürlich besteht, würde zu einem messbaren elektrischen Dipolmoment (EDM) der Elementarteilchen führen [4].

EINE ERHEBLICHE VERLETZUNG DER CP-SYMMETRIE WÜRDEN ZU EINEM MESSBAREN ELEKTRISCHEN DIPOLMOMENT DER ELEMENTARTEILCHEN FÜHREN

Diese fabelhafte Verbindung einer in Laboren messbaren Eigenschaft von Elementarteilchen mit dem ersten Moment unseres Universums macht die Suche nach einem EDM des Neutrons zu einem der besonders spannenden und vielversprechenden Experimente auf der Suche nach der Lösung eines der letzten großen Rätsel des Universums (Abbildung 1).

Elementarteilchen werden durch Masse, Ladung und ihren quantisierten Drehimpuls (Spin) beschrieben. Fermionen wie das Elektron, das Proton oder auch das Neutron gehören zu den Spin-1/2-Teilchen mit $m_s = \pm \hbar/2$. Die Stärke der Kopplung des Spins an ein magnetisches Feld wird magnetisches Dipolmoment, μ , genannt. Analog definiert man die Kopplung des Spins eines Elementarteilchens an ein elektrisches Feld als elektrisches Dipolmoment. Während das magnetische Dipolmoment in einem magnetischen Feld CP-invariant ist, verletzt das elektrische Dipolmoment in einem elektrischen Feld genau diese Symmetrie. Eine Symmetrieverletzung liegt immer dann vor, wenn die Zustände, das heißt, die Energieeigenwerte, mit und ohne

This is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits use, distribution and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Symmetrietransformation voneinander unterscheidbar sind (Abbildung 2).

Bereits 1950 wurde von den beiden späteren Nobelpreisträgern, Norman F. Ramsey und Edward M. Purcell, an US-amerikanischen der Harvard University die erste Messung des Neutronen-EDM (nEDM) gemacht [5]. Sie verwendeten dafür einen thermischen Neutronenstrahl des Graphite-Reaktors in Oak Ridge, der ursprünglich im Manhattan-Projekt zum Bau der ersten Atombomben verwendet wurde. Abbildung 3 zeigt die Geschichte der nEDM-Messungen. In den ersten Jahrzehnten wurden die Messungen an Neutronenstrahlen durchgeführt, seit dem Ende der 1970er-Jahre wurden nur noch gespeicherte Neutronen verwendet.

Messprinzip

Das Neutronen-EDM kann mit sehr hoher Präzision gemessen werden, da es möglich ist, die relevante Information in eine Frequenz zu übersetzen. Frequenzmessungen sind sehr oft die Basis von Präzisionsexperimenten, da dieses Messprinzip viele Störeffekte unterdrückt, weil ein oszillierendes Signal sich gut vom Rauschhintergrund separieren lässt. So sind Atomuhren als Frequenzstandards die genauesten Realisierungen einer physikalischen Maßeinheit, die wir derzeit kennen. Bei der Messung des Neutronen-EDMs setzen wir, genau wie in einer Atomuhr, das Ramsey-Verfahren ein, welches das Signal eines Frequenzgenerators mit der Eigenfrequenz eines physikalischen Systems hochgenau vergleicht. Dieser Vergleich bestimmt den Unterschied zwischen den beiden Frequenzen. Im Fall der Atomuhr dient er dazu, die Frequenz des Generators zu korrigieren, damit sie immer gleich der wohldefinierten Eigenfrequenz ist.

Die zu messende Eigenfrequenz unseres physikalischen Systems bei der Suche nach dem Neutronen-EDM ist die Präzessionsfrequenz der Neutronenspins in einem konstanten elektrischen Feld. Aus praktischen Gründen legen wir bei unserem nEDM-Experiment am Paul Scherrer Institut (PSI) zusätzlich zum elektrischen Feld ein konstantes Magnetfeld an. Effektiv messen wir so die magnetische Präzessionsfrequenz und deren durch das elektrische Feld induzierte Änderungen.

Neutronen verhalten sich wie magnetische Kreisel, wobei die Stärke des Magneten dem magnetischen Moment und der Drehimpuls des Kreisels dem Spin der Neutronen entsprechen. Die Kombination aus diesen beiden Eigenschaften führt dazu, dass Neutronen im Magnetfeld präzedieren, also um die Magnetfeldachse eine Kreiselmotiv vollführen. Die Frequenz der Kreiselmotiv, die Präzessions- oder Larmor-Frequenz, ist proportional zum magnetischen Moment der Neutronen und zum angelegten Magnetfeld, das in unserem Experiment einen Betrag von einem Mikrottesla hat. Unter diesen Bedingungen kreiseln die Neutronen mit einer Frequenz von etwa 30 Hz um das Magnetfeld.

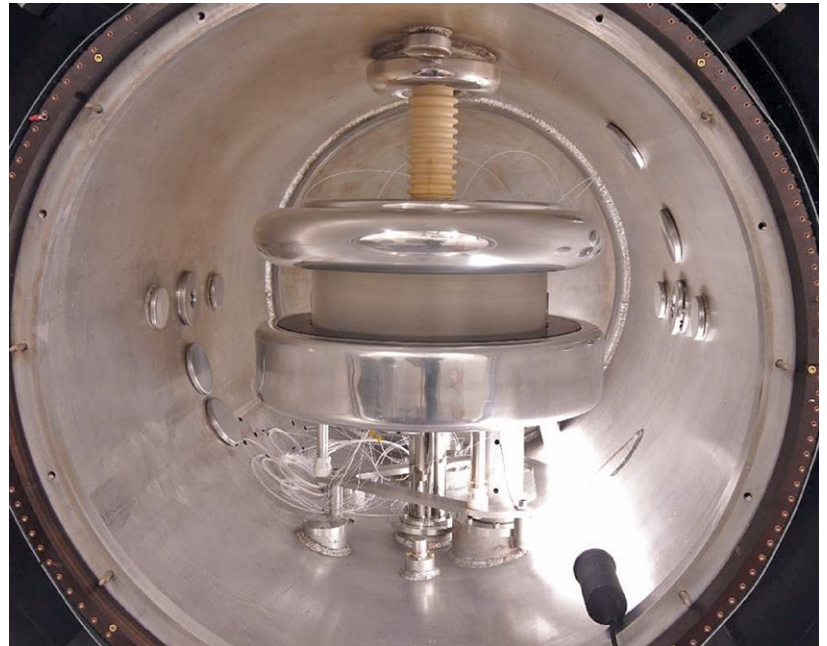
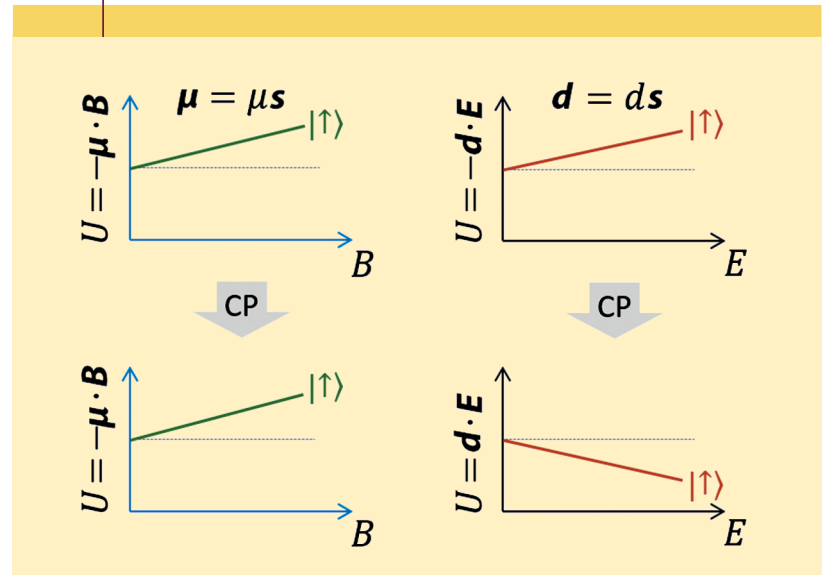


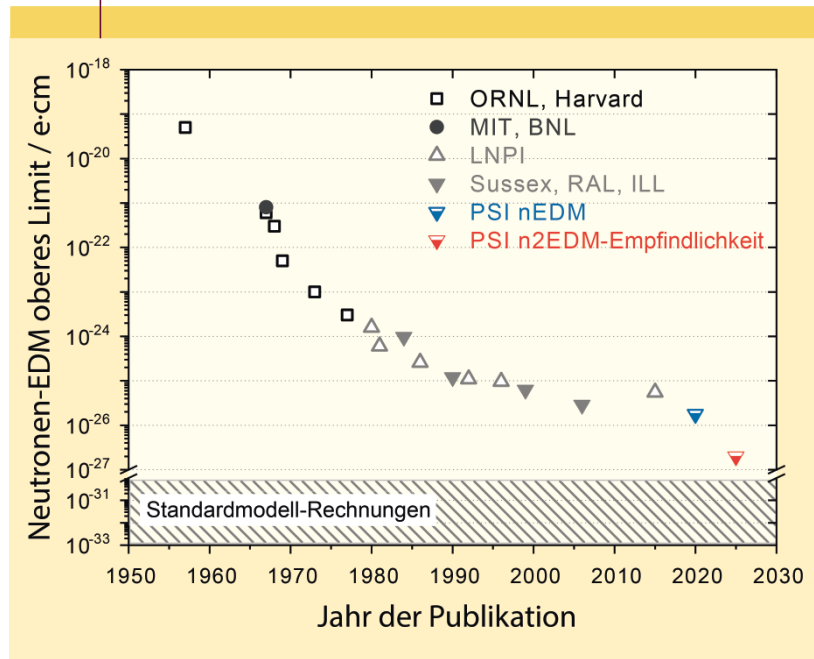
Abb. 1 Blick in die geöffnete Vakuummutter. Das eigentliche Experiment läuft im Inneren der zylindrischen Neutronenkammer im Zentrum ab. Sie besteht aus zwei silbernen schimmernden Hochspannungselektroden für das elektrische Feld, dazwischen ist in weiß ein Isolatorring angeordnet. Unten ist das Rohr des Neutronenleiters erkennbar, der die ultrakalten Neutronen in die Kammer zwischen die Elektroden führt.

ABB. 2 | ELEKTRISCHES DIPOLMOMENT DES NEUTRONS



Potentielle Energie eines Neutrons mit Spin $\frac{1}{2}$ in einem magnetischen (links) und elektrischen (rechts) Feld. Obere Reihe: Im Ausgangszustand nimmt die potentielle Energie mit der Feldstärke zu, das Neutron hat dabei ein negatives magnetisches Dipolmoment. Der Einfachheit halber gehen wir hier davon aus, dass das hypothetische elektrische Dipolmoment ebenfalls negativ sei. Untere Reihe: Unter Anwendung der CP-Symmetrietransformation auf beide Ursprungszustände verändern sich die Energieeigenschaften des magnetischen Dipolmoments nicht. Beim elektrischen Dipolmoment dagegen nimmt nun die potentielle Energie für denselben Spinzustand mit steigendem elektrischen Feld ab. Es verletzt damit die CP-Symmetrie.

ABB. 3 | HISTORIE DER NEUTRONEN-EDM-MESSUNGEN



Geschichte der Messungen des elektrischen Dipolmoments (EDM) von Neutronen. Bis in die späten 1970er-Jahre wurden sie an Neutronenstrahlen durchgeführt. Ab Ende der Siebzigerjahre wechselte man zu ultrakalten, speicherbaren Neutronen. Vom Paul Scherrer Institut (PSI) in der Schweiz stammt die neueste, hier aufgeführte Messung, ebenso die eingezeichnete theoretische Empfindlichkeit der im Aufbau befindenden Nachfolgemessung.

Falls Neutronen neben dem bekannten magnetischen Dipolmoment auch ein elektrisches Dipolmoment besitzen, addiert sich zu der magnetisch induzierten Präzession ein Term, der proportional zum elektrischen Dipolmoment und dem Betrag des angelegten elektrischen Feldes ist. Die Präzessionsfrequenz ändert sich also um einen kleinen Betrag, der vom elektrischen Feld abhängt. Diese Änderung ist winzig. Um sie erfassen zu können, haben wir die Empfindlichkeit unseres Experiments so gesteigert, dass sie noch eine Änderung von 30.000.000.000 Hz auf 30.000.000.058 Hz erfassen kann. An dem kleinen Unterschied von lediglich 58 nHz wird deutlich, dass eine präzise Messung der Präzessionsfrequenz entscheidend für den Erfolg des Experiments ist.

Woher kommen die Neutronen?

Neutronen kommen in unserem Alltag nie frei vor, sondern immer nur zusammen mit Protonen als Baustein von Atomkernen. Jedoch splintern Neutronen ab, wenn Atomkerne in Kernreaktoren gespalten oder schwere Atomkerne mit hochenergetischen Teilchen beschossen werden (Spallation). In beiden Fällen bewegen sich die Neutronen direkt nach ihrer Freisetzung mit mehr als 10000 km/s und lassen sich daher nicht gut untersuchen. Umgibt man die Neutronenquelle zum Beispiel mit Wasser, können die Neutronen durch elastische Stöße mit den Wassermolekülen

Energie abgeben. Die Neutronen werden moderiert, bis sie nur noch etwa 2 km/s schnell sind.

Um die Neutronen noch weiter abzubremsen, wird am PSI ein Kristall aus gefrorenem Deuterium, also schwerem Wasserstoff, verwendet, in dem die Neutronen durch das Anregen von Gitterschwingungen fast alle kinetische Energie abgeben. Danach bewegen sich einige Neutronen mit 8 m/s oder weniger. Dies entspricht einer Temperatur von wenigen Millikelvin, weshalb sie ultrakalte Neutronen genannt werden (s. „Ultrakalte Neutronen“ auf S. 194). Diese besitzen auch die faszinierende Eigenschaft, dass sie an geeigneten Materialien unter jedem Einfallswinkel totalreflektieren. Dadurch lassen sie sich in Rohren leiten und in speziellen Gefäßen für Hunderte von Sekunden speichern.

Was passiert in unserem Experiment?

Abbildung 4 zeigt den Aufbau des Experiments. Ein beschichtetes Glasrohr leitet die Neutronen von der Quelle zum Experiment. Dabei passieren sie ein 5 T starkes Magnetfeld, das für eine Spinrichtung eine unüberwindbare Potentialbarriere darstellt. Für die andere Spinrichtung ist das Magnetfeld ein Potentialtal, das diese Neutronen problemlos durchqueren können. Somit erreichen nur Neutronen mit einer Spinrichtung das Experiment. Dieser Vorgang definiert den Anfangszustand, in dem alle Spins perfekt polarisiert, also ausgerichtet, sind. In diesem Zustand werden die Neutronen vorsichtig in eine Kammer im Experiment geleitet, wo die weiteren Schritte erfolgen. Die Neutronen befinden sich dabei immer im Vakuum, um Kollisionen mit Gasmolekülen zu vermeiden.

Die Neutronenkammer im Inneren des Experiments ist in einem etwa 1,5 m³ großen Vakuumtank montiert, der wiederum von magnetischen Abschirmblechen umgeben ist. Auf den Tank sind viele Spulen gewickelt, die es uns ermöglichen, ein sehr homogenes Magnetfeld zu erzeugen. Die magnetische Abschirmung verhindert zusammen mit einer aktiven Kompensation, dass externe Magnetfelder das Experiment stören. Zusätzlich zu den Neutronen befinden sich Quecksilberatome des Isotops ¹⁹⁹Hg in der Kammer, die ebenfalls über die optisch ausgelesene Larmor-Frequenz f_{Hg} das Magnetfeld messen. Das optische Auslesen geschieht durch einen Strahl von Ultraviolettlicht, der die Neutronenkammer durchquert [6].

Im Ausgangszustand zeigen alle Spins der Neutronen entlang des vertikalen Magnetfelds nach oben. Dieser Zustand ist stabil, und wie bei einem perfekt vertikal stehenden Kreisel entsteht noch keine Präzession. Die Präzessionsbewegung wird dadurch eingeleitet, dass die Neutronenspins um 90° in die Ebene senkrecht zum Magnetfeld gekippt werden. Dies geschieht mit einem Magnetresonanzpuls, also einem Magnetfeld, das senkrecht zum Hauptmagnetfeld steht und mit einer gegebenen Frequenz rotiert. Der Magnetresonanzpuls ist für eine bestimmte Zeitspanne aktiv, die so gewählt wird, dass er die Spins um genau 90° dreht.

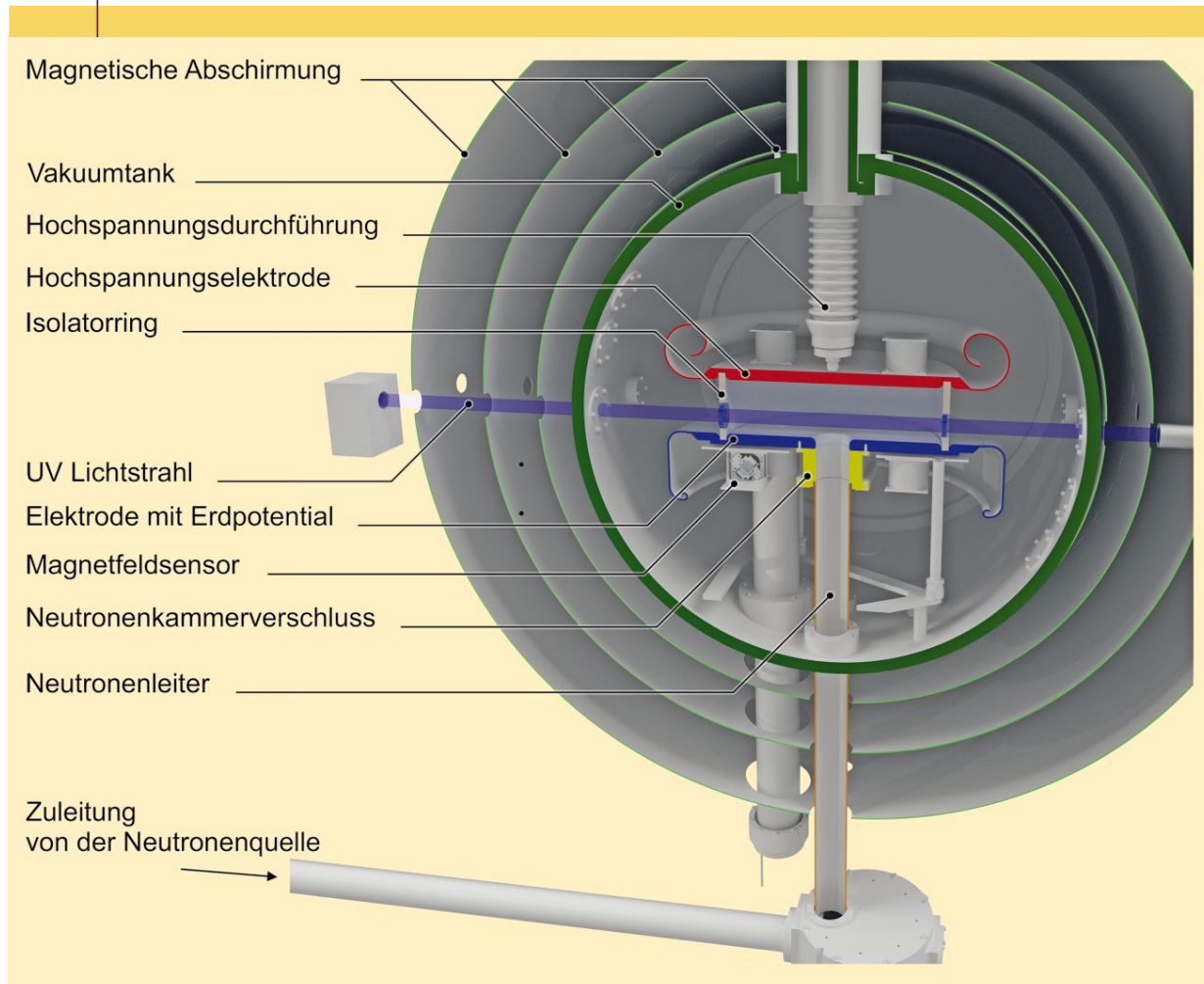
Sobald die Neutronen nicht mehr ganz vertikal stehen, beginnen sie, mit ihrer Präzessionsfrequenz zu kreiseln. Der Magnetresonanzpuls ist dann besonders effizient, wenn seine Rotationsfrequenz genau der Präzessionsfrequenz entspricht. Nur unter dieser Resonanzbedingung bleibt der optimale Phasenwinkel zwischen dem Magnetresonanzpuls und den Neutronenspins bestehen. Diese Situation ist ganz analog zum Anschubsen einer Schaukel. Nur wenn der Schubs zum richtigen Zeitpunkt kommt, wird die Schaukelbewegung effektiv verstärkt.

Als nächsten Schritt könnten wir einen zweiten Magnetresonanzpuls verwenden, um die Neutronenspins um insgesamt 180° nach unten zu drehen. Damit wären die Spins wieder in einem stabilen Zustand, zwar antiparallel zum Anfangszustand, aber wieder parallel zum Magnetfeld. Im Detektor würden die Neutronen mit Spin nach oben und unten getrennt gezählt werden, sodass wir überprüfen

könnten, ob die eingestrahelten Pulse die richtige Frequenz hatten. Diese Methode heißt Rabi-Flopping und würde uns im Prinzip schon ermöglichen, auf die Präzessionsfrequenz der Neutronen zu schließen.

Die extreme Präzision, die wir für die Suche nach dem Neutronen-EDM benötigen, lässt sich auf diese Weise allerdings nicht erreichen. Dafür benötigen wir einen weiteren Zwischenschritt, der von Norman Ramsey entwickelt wurde und seinen Nobelpreis motivierte. Ramseys Methode besteht darin, zwischen dem ersten und dem zweiten Magnetresonanzpuls eine möglichst lange Zeit zu warten. Zur Verdeutlichung können wir uns vorstellen, dass wir die Schaukel synchron zu einem mitlaufenden Metronom anschubsen. Wenn wir nun eine Zeit lang aussetzen und dann wieder schubsen, wird die Effizienz ganz empfindlich davon abhängen, ob das Metronom und die Schaukel die gleiche Frequenz haben.

ABB. 4 | EXPERIMENT



Ein beschichtetes Glasrohr leitet die polarisierten Neutronen von unten in die Neutronenkammer (Mitte). Diese befindet sich zwischen den beiden Hochspannungselektroden, die das elektrische Feld erzeugen. Die Magnetfeldspulen liegen außerhalb der großen Vakuumkammer mit mehreren Abschirmungen und sind hier nicht dargestellt. Der ultraviolette Lichtstrahl dient dazu, die Larmor-Frequenz der Quecksilberatome des Isotops ^{199}Hg auszulesen. Sie dienen als Messsonden im gleichen Volumen, in dem sich die Neutronen befinden, um die Stärke des Magnetfelds präzise zu messen.

ULTRAKALTE NEUTRONEN

Gesamte kinetische Energie: < 335 neV,
maximale Geschwindigkeit: 8 m/s.

Wechselwirkungen

Starke Kernkraft:

Führt zu teilweise abstoßendem Fermi-Potential:

^{58}Ni : 335 neV, Eisen: 190 neV.

Elektromagnetisch:

Magnetisches Moment: $-60 \text{ neV} / T$,

Spinpolarisation: möglich.

Gravitation:

$100 \text{ neV} / m$.

Schwache Wechselwirkung:

Zerfall $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Lebensdauer: 880 s.

Genau dies passiert mit unseren Neutronen. Die Magnetresonanzpulse dauern jeweils 2 s, und die Wartezeit beträgt $T = 180 \text{ s}$. Wenn die Präzessionsfrequenz der Neutronen und die Frequenz des Funktionsgenerators, der die Pulse erzeugt, nicht identisch sind, wird sich in der Wartezeit die Phase zwischen den beiden Oszillationen ändern. Diese Phasendifferenz ϕ führt zu einem weniger effizienten Puls, und damit ist der zweite Puls nicht mehr in der Lage, die Neutronenspins komplett um 180° zu rotieren. Durch die lange Wartezeit kann auch ein kleiner Frequenzunterschied zu einer relevanten Phasendifferenz anwachsen und messbar gemacht werden. Die Neutronen-Larmor-Frequenz des Systems, $f_n = f_{\text{rf}} + \phi/T$, ist die Summe aus Referenzfrequenz, f_{rf} , und Phasendifferenz geteilt durch Wartezeit.

Zur Messung des EDM vergleichen wir die Phasendifferenzen für Versuchsanordnungen, in denen das elektrische Feld zuerst parallel, dann antiparallel zum Magnetfeld ausgerichtet ist. Falls das EDM des Neutrons existiert, führt dies bei einer Addition der elektrischen und magnetischen Präzessionsfrequenzen zu Unterschieden, weil das Vorzeichen dieser Frequenzen von der relativen Ausrichtung der beiden Felder abhängt (s. „Messverfahren“ auf S. 195). Wenn wir also die Larmor-Frequenz in zwei verschiedenen Feldkonfigurationen messen, können wir aus der Differenz das Neutronen-EDM bestimmen.

Bei einer solchen Präzisionsmessung ist auch die Datenanalyse, die am Ende zum Resultat führt, hochkomplex. Nachdem aus den gemessenen Daten der richtige Mittelwert gebildet wurde, müssen mögliche systematische Fehlerquellen identifiziert, untersucht und beziffert oder ausgeschlossen werden. Die Genauigkeit der Fehlerabschätzungen geht genauso in die Unsicherheit des Endergebnisses mit ein wie die statistische Empfindlichkeit des Mittelwerts.

Ein Beispiel für einen solchen systematischen Effekt ist die Drehung der Erde, und damit des Laborsystems, in dem das Experiment stattfindet. Während die Neutronen und Quecksilberatome für drei Minuten ungestört präzedieren, dreht sich die Erde um etwa $0,75^\circ$ weiter. Dadurch verschieben sich die Larmor-Frequenzen und damit auch die Magnetfelder messbar. Diese Verschiebung muss also in der Datenanalyse wieder abgezogen werden. Glücklicherweise ist die Winkelgeschwindigkeit der Erde sehr genau bekannt, sodass dieser Effekt keine signifikante Vergrößerung der Gesamtunsicherheit nach sich zieht.

Da das Endresultat also zu großen Teilen von der Behandlung systematischer Effekte während der Datenanalyse abhängt, ist es wichtig dafür zu sorgen, dass dies unvoreingenommen passiert. Ganz analog zu blinden oder doppelt blinden medizinischen Studien wird daher auch in der Physik sogenanntes Blinding verwendet. Wenn es einen Literaturwert oder frühere Messungen einer Größe gibt, sorgt man dafür, dass im Verlauf der Analysearbeit der Endwert nicht bekannt ist, sodass keine Voreingenommenheit dazu führen kann, zum Beispiel nicht nach weiteren Effekten zu suchen, sobald der Literaturwert erreicht ist.

Im Fall unserer nEDM-Messung haben wir dies folgendermaßen gelöst. In den Messdaten, die zur Analyse zur Verfügung standen, wurden unmittelbar nach Datenaufnahme die Anzahl der gemessenen Neutronen in den beiden Detektoren so verändert, dass zusätzlich zum wahren Mittelwert ein falsches nEDM-Signal auftaucht. Die Größe des falschen Signals wurde von einem Programm zufällig, aber nach gewissen Kriterien ausgewählt, und war nicht bekannt.

Damit wäre es schon möglich gewesen, ohne durch die Ergebnisse früherer Messungen beeinflusst zu sein, die Analyse der Daten durchzuführen. Um noch besser gegen Fehler abgesichert zu sein, wurden die Daten noch dupliziert, jedes Duplikat mit einem weiteren unbekanntem falschen nEDM-Signal versehen und die Analyse dann von zwei unterschiedlichen Gruppen durchgeführt. Damit war sichergestellt, dass keine der beiden Analysegruppen von vorherigen Resultaten oder den Resultaten der anderen Gruppe voreingenommen sein konnte.

Resultat

Erst nach Abschluss aller Analysearbeiten haben wir die Verfälschungen des nEDM-Resultats für beide Gruppen aufgedeckt. Bereits zuvor hatten wir beschlossen, die Algorithmen und Auswahlkriterien, die beide Gruppen entwickelt hatten, nicht mehr zu verändern. Beide Resultate waren jetzt innerhalb ihrer Unsicherheiten identisch, woraufhin der erste Verfälschungsschritt auch aufgehoben wurde. Das finale Resultat der Messung ist der Mittelwert zwischen den beiden Analyseergebnissen [6]:

$$d_n = (0,0 \pm 1,1 \text{ stat} \pm 0,2 \text{ sys}) \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm}, \quad (1)$$

wobei „stat“ für den statistischen und „sys“ für den systematischen Fehler stehen, e ist die Elementarladung.

Aus den drei Teilen des Resultats (1) lassen sich nun folgende Schlüsse ziehen:

- Im Rahmen der Messgenauigkeit wurde kein von Null verschiedenes elektrisches Dipolmoment des Neutrons gemessen.
- Die Ungenauigkeit des Resultats wird durch die statistische Unsicherheit dominiert. Durch längeres Messen hätte sich also mit demselben Aufbau ein besseres Resultat erzielen lassen. Allerdings skaliert die statistische Unsicherheit mit der Wurzel der Anzahl der Wiederholungen. Um also die statistische Unsicherheit um einen Faktor 5 zu verkleinern, wären 25-mal mehr Messungen nötig gewesen wären. Dies würde zu einer nicht akzeptablen Messzeit von 50 Jahren führen.
- Die systematische Unsicherheit ist sowohl im Vergleich zur statistischen Unsicherheit, aber auch im Vergleich zu allen vorhergegangenen Messungen, drastisch verkleinert worden. Dies haben wir im Wesentlichen erreicht, weil wir das Magnetfeld, in dem die Messung stattfindet, extrem genau charakterisieren und kontrollieren konnten. Auch das theoretische Verständnis der einzelnen systematischen Effekte, die zur Unsicherheit beitragen, wurde verbessert. Die Art und das Verständnis des verwendeten Aufbaus versetzte uns in die Lage, noch deutlich genauere Resultate zu liefern.

Schlussendlich stellt sich die Frage, was das Resultat nun für die Suche nach Prozessen bedeutet, welche die CP-Symmetrie verletzen und daher das Verständnis der Materie-Antimaterie-Asymmetrie verbessern könnten. Für eine vorläufige - Antwort ist es sinnvoll, das Messresultat etwas anders auszudrücken. Da sich die Genauigkeit der Messung sehr gut quantifizieren lässt und kein Hinweis auf ein Neutronen-EDM gefunden wurde, kann man äquivalent schreiben:

$$|d_n| < 1,8 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm},$$

mit einem Konfidenzniveau von 90%. Sollte also das CP-verletzende Neutronen-EDM existieren, muss es kleiner sein, als dies mit der Messgenauigkeit des durchgeführten Experiments auflösbar gewesen wäre.

Dieses Resultat hat eine wichtige Folge: Es liefert einen deutlich kleineren Grenzwert für das nEDM als verschärfte Bedingung, die jede neu entwickelte Theorie, die das Standardmodell der Teilchenphysik erweitern soll, erfüllen muss. Speziell die Tatsache, dass die systematische Unsicherheit unseres Ergebnisses deutlich kleiner als das statistisch dominierte Limit ist, motiviert eine Entwicklung verbesserter Messapparaturen mit einem gesteigerten Neutronenfluss für die Zukunft. Damit ließe sich die statistische Unsicherheit schneller reduzieren, und wir würden noch präzisere Messergebnisse erzielen.

Ausblick

Genau an dieser Stelle setzen die Zukunftspläne unserer Kollaboration am PSI an. Schon lange bevor die Analysen des

MESSVERFAHREN

Die Messung der Neutronen-Präzessionsfrequenz in einer Feldkonfiguration dauert nur fünf Minuten. Für eine differentielle Messung braucht es eine weitere Messung mit umgepoltem elektrischem Feld. Dabei muss man sicherstellen, dass zwischen den beiden Messungen das Magnetfeld sich nicht verändert, zum Beispiel durch das An- oder Ausschalten eines Magneten im Nachbarlabor. Ein aktives und ein passives magnetisches Schild um die Vakuumkammer reduzieren mögliche Störungen um einen Faktor von mehr als Zehntausend.

Als weitere Maßnahme wird eine relative Messung mit Hilfe einer zweiten, magnetfeldsensitiven Methode durchgeführt. Diesen Zweck erfüllt das Quecksilbermagnetometer. Für jede fünfminütige Messung bilden wir das Verhältnis der beiden Larmor-Frequenzen, $R = f_n/f_{\text{Hg}}$; dadurch wird in erster Näherung jegliche Veränderung des Magnetfeldes kompensiert. Tatsächlich änderte sich R so langsam, dass wir nur alle fünf Stunden das elektrische Feld umpolen mussten und die Frequenzmessungen über diesen

Zeitraum mitteln konnten. Jedes Umpolen des elektrischen Feldes führte zu einer fünfminütigen Pause.

Unter anderem die Möglichkeit, nicht nach jeder Messung, sondern nur alle fünf Stunden das elektrische Feld zu ändern, ermöglichte uns die genaueste aller jemals gemachten Messungen des Neutronen-EDMs in nur zwei Jahren.

Das EDM haben wir aus der Differenz zweier aufeinanderfolgender Perioden mit unterschiedlichem elektrischem Feld berechnet:

$$d_n = h(R_- - R_+) \frac{\langle f_{\text{Hg}} \rangle}{E_1 - E_2} / 2,$$

wobei h das Plancksche Wirkungsquantum ist, R_{\pm} sind die Verhältnisse der Larmor-Frequenzen der Neutronen zu den Hg-Atomen bei gegensätzlich gepolten elektrischen Feldern mit den Feldstärken E_1 und E_2 . Im Anschluss mittelten wir über die einzelnen d_n -Werte. Insgesamt haben wir über 50 000 Einzelmessungen durchgeführt und mehr als 300 d_n -Werte zum finalen Ergebnis gemittelt.

hier vorgestellten Resultats abgeschlossen waren, haben wir Pläne für ein Nachfolgeexperiment erstellt, Aufgaben verteilt, Teile entwickelt und produziert. Der neue Aufbau, der „n2EDM“ heißen wird, wird am selben Platz an der UCN-Quelle am PSI aufgebaut werden. Das Vorgängerexperiment wurde inzwischen zerlegt und an seiner Stelle eine neue Magnetfeldabschirmung installiert. Diese dämpft Änderungen des Magnetfelds noch wesentlich stärker ab und wird so zu wesentlich stabileren und homogeneren Magnetfeldern führen.

Der neue Experimentaufbau unterscheidet sich vom Vorgänger vor allem dadurch, dass nicht mehr eine, sondern zwei Kammern mit Neutronen befüllt werden, in denen zur selben Zeit zwei unterschiedliche Feldkonfigurationen gemessen werden können. Die Kammern sind jeweils 2,5-mal größer als zuvor und werden von neuentwickelten Neutronenleitern mit größerem Durchmesser befüllt. Dadurch wird es möglich sein, bei jeder Einzelmessung wesentlich mehr Neutronen zu speichern als je zuvor. Dies wird die statistische Unsicherheit drastisch verbessern. Zu einer weiteren Reduktion der systematischen Unsicherheit werden in Zukunft mehr als hundert Magnetometer eingesetzt, bisher sind es nur 16. Viele Detailverbesserungen, die zum Teil schon während der Laufzeit des vorherigen Experiments entwickelt und getestet wurden, werden in n2EDM

einfließen. Sie werden dafür sorgen, dass wir mit dem neuen Experiment schon ab nächstem Jahr erste neue, hochpräzise Messungen machen können.

Auch das neue Experiment wird dann nach Abschluss aller Optimierungen für einige Jahre messen. Ziel ist eine etwa zehnfach genauere Bestimmung des Neutron-EDMs.

Zusammenfassung

Warum blieb nach dem Urknall nur Materie übrig? Dies ist eine der großen ungelösten Fragen der Physik. Eine mutmaßliche Ursache könnte eine starke Verletzung der sogenannten CP-Symmetrie gewesen sein. Nach allgemeinen Prinzipien der Teilchenphysik müsste diese allerdings zu einem messbaren elektrischen Dipolmoment (EDM) von Elementarteilchen führen. Neutronen sind für die Suche nach EDMs besonders gut geeignet. Neue präzisere Daten lieferte jetzt das nEDM-Experiment am Paul Scherrer Institut. Es senkte den Grenzwert für ein EDM von Neutronen erheblich. Der neue Messwert verschärft somit die Bedingungen für neue Theorien, die das Standardmodell erweitern. Der im Aufbau befindliche Nachfolger n2EDM soll 2022 in Betrieb gehen und als Ziel das Neutronen-EDM zehnfach genauer bestimmen.

Stichwörter

Standardmodelle der Teilchenphysik und Kosmologie, Antimaterie-Rätsel, CP-Verletzung, elektrisches Dipolmoment des Neutrons, nEDM-Experiment, n2EDM-Experiment.

Danksagung

Open Access Veröffentlichung ermöglicht und organisiert durch Projekt DEAL.

Literatur

- [1] A. Kellerbauer, *Physik in unserer Zeit* **2012**, 43(4), 174.
- [2] A. Kellerbauer, *Physik in unserer Zeit* **2014**, 45(4), 168.
- [3] C. Kiesling, *Physik in unserer Zeit* **2019**, 50(3), 132.
- [4] T. Chupp et al., *Rev. of Mod. Phys.* **2019**, 91(1), 015001(55).
- [5] J.H. Smith et al., *Phys. Rev.* **1957**, 108, 120.
- [6] G. Ban et al., *Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. A* **2018**, 896, 129.
- [7] C. Abel et al., *Phys. Rev. Lett.* **2020**, 124, 081803, <https://t1p.de/PRL-EDM>

Die Autoren



Georg Bison studierte Physik an der Universität Bonn und promovierte 2000-2004 an der Universität Fribourg (Schweiz). Danach forschte er an der Universität Fribourg und als Gruppenleiter am Universitätsklinikum Jena. Seit 2002 trägt er zum Neutronen-EDM-Experiment bei und betreibt dies, seitdem er 2012 ans Paul Scherrer Institut wechselte, als Schwerpunkt seiner Forschungstätigkeit.



Dieter Ries hat Physik an der ETH Zürich studiert und anschließend von 2012 bis 2016 seine Doktorarbeit am Paul Scherrer Institut verfasst. Nach zwei Forschungsaufenthalten am PSI und an der Universität Bern ist er seit 2017 Juniorprofessor für Grundlagenforschung mit ultrakalten Neutronen an der Johannes Gutenberg-Universität Mainz.



Philipp Schmidt-Wellenburg studierte an der Technischen Universität München allgemeine Physik, bevor er am Institut Laue-Langevin in Grenoble promovierte. Seit 2009 ist er Wissenschaftler am Paul Scherrer Institut in der Schweiz und einer der Sprecher der internationalen nEDM-Kollaboration.

Anschrift

Dr. Georg Bison, Dr. Philipp Schmidt-Wellenburg, Paul Scherrer Institut, Forschungsstrasse 111, 5232 Villigen PSI Schweiz. Georg.Bison@psi.ch, Philipp.Schmidt-Wellenburg@psi.ch

Prof. Dr. Dieter Ries, Institut für Kernchemie, Johannes-Gutenberg-Universität Mainz, Fritz-Strassmann-Weg 2, 55128 Mainz. D.Ries@uni-mainz.de