

Das Universum aus Sicht des Neutrons

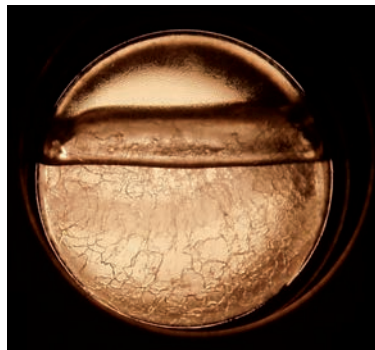
Experimente mit Neutronen ergänzen Hochenergieexperimente an Beschleunigern, um Rätsel aus dem frühen Universum zu lösen.

Stephan Paul

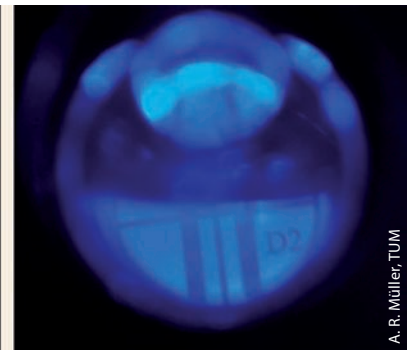
Unser heutiges Wissen über die Entwicklung des Universums ist geprägt durch das Standardmodell der Kosmologie und der Teilchenphysik. Neben Experimenten an Beschleunigeranlagen bzw. in Untergrundlaboren dienen vor allem Präzisionsexperimente bei sehr niedrigen Energien dazu, Aussagen zu Vorgängen im frühen Universum zu treffen. Hierbei spielt das Neutron aufgrund seiner Eigenschaften eine wichtige Rolle.

Die Standardmodelle der Kosmologie und der Teilchenphysik erlauben Aussagen über die Existenz physikalischer Abläufe und ihre Zusammenhänge, die unsere Vorstellung über die Geschichte des Universums prägen. Dabei extrapolieren wir die Theorie in Bereiche der Temperatur, der Energiedichte und räumlicher Dimensionen, die experimentell direkt nicht zugänglich sind. Dieses gewagte Unterfangen wird jedoch durch Beobachtungen aus dem Labor und Betrachtungen des Himmels gestützt. Das Standardmodell beruht konzeptionell auf Annahmen zur räumlichen Dimensionalität, Brechung fundamentaler Symmetrien (z. B. CP) und Existenz Dunkler Materie. Hierzu wurden bisher keine oder nur unzureichende experimentelle Antworten gefunden. Andere Stützpfeiler der Kosmologie sind die Details der kosmischen Hintergrundstrahlung, das genaue Verständnis der primordialen Nukleosynthese sowie die Existenz des Big Bang. Alle diese Konzepte betreffen direkt oder indirekt die ersten drei Minuten unseres Universums.

Wie aber können wir diese Hypothesen stützen oder präzisere Aussagen zu Schlüsselvorgängen im sehr frühen Universum machen? Neben astronomischen Beobachtungen sind diese Fragen vor allem mit dem Verständnis des Mikrokosmos verbunden. Hier spielen Experimente an Beschleunigeranlagen (Symmetrieuntersuchungen) oder in Untergrundlaboratorien (Suche nach Dunkler Materie) sowie Präzisionsexperimente bei sehr niedrigen Energien eine Schlüsselrolle. Neutronen sind dabei aufgrund ihrer Eigenschaften – wie der elektrischen Neutralität, ihrer im Vergleich zu Atomen kleinen elektrischen Polarisierbarkeit sowie ihrer Lebensdauer von fast 15 Minuten – ideale Untersuchungsobjekte. Zudem sind sie in der Natur zahlreich vorhanden, wenn auch immer nur in gebundener Form. Wie aber können wir mit Neutronen unsere Vorstellung von den Vorgängen im frühen Universum



Bei Stößen mit einem Moderator geben Neutronen Energie ab, bis sie als ultrakalt gelten. Als Moderator können Deuteriumkristalle dienen (links: trüber Deuteriumkristall aus der Gasphase gefroren; rechts: transparenter Deuteriumkristall aus der Flüssigphase ausgefroren)



teriumkristall aus der Gasphase gefroren; rechts: transparenter Deuteriumkristall aus der Flüssigphase ausgefroren

untermauern? Wir wollen dazu im Folgenden spezifische Fragestellungen diskutieren sowie Messkonzepte und ihre experimentelle Umsetzung vorstellen. Alle diese Präzisionsmessungen unterliegen einigen Grundvoraussetzungen wie hoher Energieauflösung, hoher Sensitivität und Reduktion von Falscheffekten. Hohe Energieauflösung erfordert lange Beobachtungszeiten bei stabilen Bedingungen, hohe Sensitivität verlangt hohe Empfindlichkeit für kleine Messeffekte bei kleinem statistischen Rauschen des Messsignals, und die Vermeidung von Falscheffekten stellt höchste Anforderungen an die Apparatur.

Das Rätsel der beobachteten Asymmetrie zwischen Materie und Antimaterie im Universum (Baryogenese) ist direkt verknüpft mit der Brechung der CP-Symmetrie, d. h. der gleichzeitigen Anwendung der räumlichen Spiegel- und Ladungssymmetrie. Der russische Physiker Andrei Sacharow verknüpfte die Baryogenese mit drei Bedingungen für den zugrundeliegenden teilchenphysikalischen Prozess: mit der Verletzung der

KOMPAKT

- Ein elektrisches Dipolmoment des Neutrons könnte die Frage der Baryogenese klären. Allerdings gibt es dafür bislang nur eine obere, sehr niedrige Schranke.
- Die Lebensdauer des Neutrons von etwa 15 Minuten beeinflusst die Heliumhäufigkeit in der Frühphase des Universums. Bisherige Messungen der Lebensdauer weichen jedoch stark voneinander ab.
- Experimente mit Neutronen ermöglichen es zudem, z. B. eine Paritätsverletzung oder das Gravitationsgesetz zu untersuchen.

Prof. Dr. Stephan Paul, Physik-Department, TU München, James-Frank-Str. 1, 85748 Garching

1) Heute werden auch Szenarien diskutiert, in denen das Ungleichgewicht über Prozesse mit Leptonen (d. h. Neutrinos oder Elektronen) ablaufen sollte und welche sich in komplexer Weise in die Materie/Antimaterie-Asymmetrie übersetzen ließe. In diesem „Leptonsektor“ hat man über die Umwandlung der Neutrinosorten ineinander schon eine Verletzung der Leptonenfamilienquantenzahl gefunden, nicht aber eine CP-Verletzung.

Erhaltung der Baryonquantenzahl, der Brechung der CP-Symmetrie sowie einem thermischen Ungleichgewicht.¹⁾ Ein Zerfall des Protons würde die Baryonquantenzahl verletzen, bisher hat man aber noch keine Anzeichen dafür gefunden. Dagegen wurde die Verletzung der CP-Symmetrie in Zerfällen verschiedener Mesonen bereits nachgewiesen. Sie ist inzwischen theoretisch gut verstanden, aber zu klein, um die beobachtete Baryogenese zu erklären. Daher sind andere Systeme, in denen eine CP-Verletzung bei Baryonen („Baryonsektor“) auftreten könnte, gefragt.

Vielversprechend erscheint dabei eine versteckte Eigenschaft des Neutrons – sein elektrisches Dipolmoment (EDM). Das elektrische Dipolmoment eines sphärisch symmetrischen Fermions kann nur entlang der Spinrichtung eines Teilchens ausgerichtet sein, verletzt aber die Zeitumkehrinvarianz und die Spiegelsymmetrie (Abb. 1). Die Paritätstransformation P dreht die Position der Ladungen relativ zur Spinrichtung um. Bei der Zeitumkehr T dreht sich die Richtung des Spins, nicht aber die Position der Ladungen. Wegen des CPT-Theorems, wonach jede lokale Lorentz-invariante Eichtheorie unter den kombinierten Operationen C, P und T invariant ist, entspricht eine Zeitumkehrverletzung einer CP-Verletzung.

Tritt nun ein EDM auf, lässt sich ein Experiment konstruieren, in dem die Zeitumkehr T verletzt wird und damit auch CP. Das Neutron ist aber nur dann der Retter in der Not, wenn sein EDM um mindestens sechs Größenordnungen dasjenige übersteigt, das sich aus dem Standardmodell der Teilchenphysik ergibt. Wenn wir nach einem „großen“ EDM des Neutrons suchen, erforschen wir also gleichzeitig die Physik jenseits des Standardmodells. Dabei geht es um das Verständnis mikroskopischer Prozesse auf Längenskalen, die sich bisher nur an Hochenergiebeschleunigern untersuchen lassen. Deren Energiebegrenzung steht die Empfindlichkeit des EDM-Nachweises gegenüber. Ob mit hoher Sensitivität bei hohen Energien oder mit höchster Präzision bei kleinen Energien – es handelt sich um dieselben teilchenphysikalischen Prozesse.

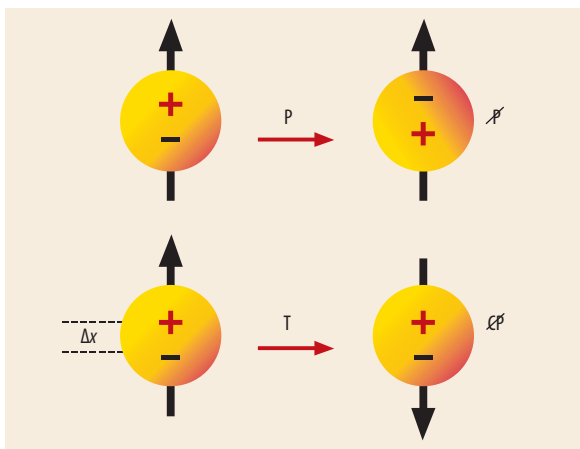


Abb. 1 Das elektrische Dipolmoment $d = e \cdot \Delta x$ eines Teilchens ist proportional zum Abstand der Ladungen im Teilchen und verletzt die Spiegelsymmetrie und die Zeitumkehrinvarianz, da die Raumspiegelung P nur das Dipolmoment invertiert (oben), die Zeitumkehr T nur den Spin (unten).

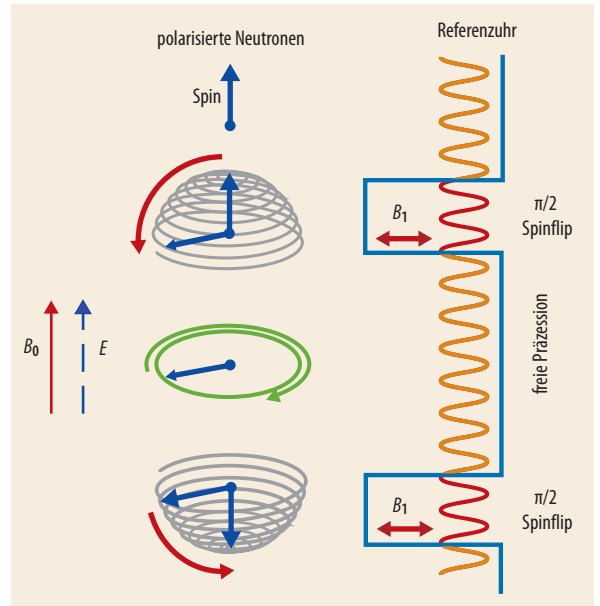


Abb. 2 Ramseys EDM-Experiment zur Bestimmung der Larmor-Präzessionsfrequenz basiert auf dem Vergleich zweier unabhängiger Uhren (vgl. Text).

Typische elektrische Dipolmomente von Molekülen liegen bei $10^{-10} e \cdot \text{cm}$. Für das Neutron sagt das Standardmodell $10^{-32} e \cdot \text{cm}$ vorher. Experimente haben eine obere Schranke von $2,7 \cdot 10^{-26} e \cdot \text{cm}$ ergeben. Um diesen Wert zu veranschaulichen, stelle man sich vor, dass das Neutron die Größe der Erde besitze. Dann müsste eine potenzielle Trennung von Elementarladungen im Neutron kleiner sein als $1 \mu\text{m}$. In der Tat sagen Modelle im Rahmen der Supersymmetrie Werte voraus, die nur einen Faktor 100 kleiner sind als die bisherige obere Grenze. Einen so kleinen Effekt experimentell zu bestimmen, ist entsprechend schwierig.

Die vielversprechendste Messmethode der separierten oszillierenden Felder hat Norman Ramsey 1949 entwickelt (Abb. 2). Das Experiment basiert auf dem Vergleich zweier unabhängiger Uhren. Die eine entspricht einer externen Referenzfrequenz, die andere dem in einem Magnetfeld ($1 \mu\text{T}$) präzedierenden Neutronenspin. Der Abgleich beider Uhren erfolgt durch einen $\pi/2$ -Spinflip des nun ausgerichteten Neutronenspins. Das Neutron präzediert frei in einem statischen B -Feld, bevor der relative Phasenschub der Uhren über einen weiteren $\pi/2$ -Spinflip, der mit die Referenzuhr getaktet ist, bestimmt wird. Die resultierende Neutron-Polarisation als Funktion der Referenzfrequenz ergibt ein Ramsey-Muster, aus dem sich der Frequenzunterschied und eine Abhängigkeit von einem parallel zum B -Feld angelegten elektrischen Feld E (20 kV cm^{-1}) sehr präzise ablesen lassen. Die Änderung der Larmor-Frequenz $\delta\omega_L = d_n \cdot E$ gibt direkt die Größe des elektrischen Dipolmoments d_n an. Für ein EDM von $10^{-28} e \cdot \text{cm}$ entspricht sie einer Energieverschiebung von 10^{-24} eV .

Auf Basis der Ramsey-Methode ist es durch Reduktion des statistischen Rauschens und Kontrolle der experimentellen Bedingungen in den letzten 50 Jahren gelungen, die Sensitivität um sechs Größenordnungen zu steigern. Ein großer Phasenschub

verlangt eine lange Präzession des Neutronenspins im *B*- und *E*-Feld. Das ist möglich mit polarisierten ultrakalten Neutronen (UCN)²⁾, die fünf Minuten in einem oberflächenbehandelten mechanischen Kasten bleiben, ehe ihre Spinstellung analysiert wird (Infokasten „Neutronenquellen“). Jedoch können kleinste zeitliche Magnetfeldänderungen oder magnetische Inhomogenitäten denselben Effekt verursachen wie ein EDM. Daher schützt eine Magnetfeldabschirmung die Speicherkammer vor äußeren Einflüssen, und ein System von Magnetometern kontrolliert die Stabilität des Magnetfeldes. Die Münchner Gruppe um Peter Fierlinger arbeitet mit einem System aus hochpräzisen Spinuhren mit Cs, ³He, ¹²⁹Xe und ¹⁹⁹Hg in dem weltbesten magnetisch abgeschirmten Raum [4, 5]. Diese Entwicklungen sowie eine Reihe weiterer Maßnahmen sollte eine Empfindlichkeit von ca. 10⁻²⁸ e · cm ermöglichen [6]. Dazu sind UCN-Quellen nötig mit etwa 10⁶ Neutronen pro Messzyklus. Ebenso werden mindestens zwei Spinpräzessionskammern gleichzeitig genutzt, mit jeweils entgegengesetzt orientierten elektrischen Feldern. Somit genügt es, eine Differenzmessung aus den beiden Kammern durchzuführen, was Störsignale eliminiert.

Die Lebensdauer des Neutrons

Die Entstehung der ersten Elemente (primordiale Nukleosynthese) stellt über den Anteil des aus Nukleonen gewonnenen Heliums eine empfindliche Messlatte für das Standardmodell der Kosmologie dar [7]. Die kritischen Randbedingungen sind Temperatur, Nukleonendichte und die Kopplungsstärke der schwachen und starken Wechselwirkungen. Die schwache Wech-

selwirkung spielt hierbei doppelt mit. Sie bestimmt die gegenseitige Umwandlungsrate von Neutronen in Protonen und damit das stöchiometrische Verhältnis der beiden bei Erreichen der kritischen Temperatur, wenn also durch die Expansion des Universums keine Elektronen und Antineutrinos für den umgekehrten Betazerfall durch Einfang an Protonen mehr zur Verfügung stehen. Danach ändert sich das Mengenverhältnis der beiden Komponenten nur noch durch den schwachen Zerfall der Neutronen. Gleichzeitig fusionieren Neutronen und Protonen zu Kernen über die starke Wechselwirkung. Dies geschieht aber erst nachhaltig, wenn die Umgebungstemperatur unter die Schmelztemperatur von Deuterium gefallen ist, dem leichtesten stabilen Element. Von da an kann sich ⁴He durch weitere Anlagerungsprozesse bilden, bis die Nukleonendichte durch die fortlaufende Expansion so weit abgesunken ist, dass auch dieser Prozess zum Erliegen kommt. Das „window of opportunity“ ist also sehr kurz, und die ⁴He-Bildungsrate wird durch die Expansionsgeschwindigkeit (Hubble-Konstante) und die Lebensdauer der Neutronen empfindlich mitbestimmt.

Die Neutronenlebensdauer stellt den Zusammenhang zwischen der Baryonendichte und dem Bruchteil der in ⁴He gebundenen Nukleonen her (Abb. 3).³⁾ Die für die Nukleosynthese verfügbare Neutronendichte hängt sehr empfindlich von der Neutronenlebensdauer ab, da die hier auftretenden Kopplungskonstanten *g_A* und *g_V* das Verhältnis *N_n/N_p* sowohl nach dem ersten Ausfrieren (*N_n/N_p* ≈ 1/6) als auch beim Beginn der Fusionsprozesse (*N_n/N_p* ≈ 1/7) bestimmen.

Wie gut aber stimmen Vorhersagen des Standardmodells der Kosmologie mit Beobachtungen überein? Diese sind durch zwei Unsicherheiten in ihrer Aussa-

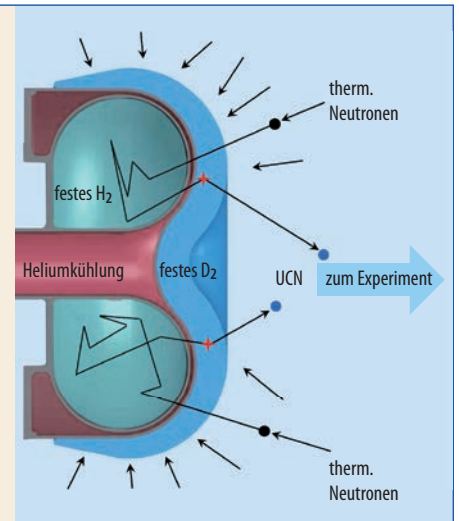
2) Ultrakalt heißen Neutronen, wenn sie kinetische Energien kleiner als 300 neV besitzen und sich magnetisch, mechanisch oder gravitativ speichern lassen. Sie bewegen sich mit *v* < 5 m/s.

3) Zu diesem Zeitpunkt können keine schwereren Elemente entstehen, da es keine stabilen Kerne mit der Massenzahl *A*=5 und *A*=7 gibt. Dies ist eine unüberwindbare Hürde für einen fortgesetzten Anlagerungsprozess von Nukleonen.

NEUTRONENQUELLEN

Eine hohe Empfindlichkeit erfordert ein geringes statistisches Rauschen und somit eine hohe Zahl von Untersuchungsobjekten. Daher liefern Forschungsreaktoren wie das Institut Laue-Langevin (ILL) in Grenoble oder die Forschungsneutronenquelle Heinz-Maier-Leibnitz (FRM II) in Garching sehr intensive Strahlen kalter bzw. ultrakalter Neutronen (UCN). Alternativ zu Spaltungsprozessen lassen sich Neutronen über Spallation von Kernen durch intensiven Protonenbeschuss erzeugen. Entsprechende Anlagen finden sich in Los Alamos (USA) oder am Paul-Scherrer-Institut (PSI) in der Schweiz bzw. sind in der Planung wie die europäische Spallationsquelle ESS im schwedischen Lund. Die dort erzeugten Neutronen haben jedoch viel zu hohe Energien von einigen MeV und müssen in Wasserstoff oder Deuterium gekühlt werden, bis sie eine mittlere Temperatur von ca. 40 K besitzen. Neutronen mit einer Energie von einigen meV werden über Superspiegel selektiert und transportiert. Durch geschickte Oberflächenbehandlung der Neutronenleiter (Querschnitt 50 bis 100 cm²) sind Strahlen Spinpolarisierter Neutronen mit Flüssen von 10⁹ Neutronen/(cm² · s) möglich.

Für Experimente, in denen Neutronen in Fallen gespeichert werden oder sehr langsam über Probenoberflächen laufen sollen, ist diese Energie um ein Vielfaches zu groß. Starke Quellen ultrakalter Neutronen erfordern eine weitere Verdichtung des Phasenraumes, was durch superthermische UCN-Quellen gelingt. In diesen erfolgt die Moderation über einen Einbahnprozess, d. h. die Wechselwirkung mit der Umgebung ist nicht im thermischen Gleichgewicht. Neutronen können an geeignet gewählte Materialien zwar Energie effizient abgeben, aber kaum aufnehmen. Als „Konverter“ dienen kryogene Materialien bei Temperaturen von 5 bis 7 K [1, 2]. Favorisiert sind derzeit Deuteriumkristalle, auch wenn ihr sicherer Einsatz bei höchsten Flussdichten von Neutronen (d. h. nahe am Brennelement) eine technologische Herausforderung ist. Der Energieübertrag auf den Konverter geschieht über die Anregung von Phononen, wobei die Ausbeute subtil vom Kristall abhängt. Solche Quellen sind in Los Alamos, am PSI und am Mainzer Triga-Reaktor in Betrieb. Die stärkste Quelle soll 2017 am FRM II in Betrieb gehen (Abb.) [3].



Bei der neuen Quelle für UCN am FRM II werden gefrorener Wasserstoff und Deuterium 60 cm weit vom Reaktorkern platziert. Thermische Neutronen werden im Wasserstoff durch Stöße vormoderniert, bevor sie ihre restliche Energie in einem einzigen Stoß an den 2 cm dicken Deuteriumkristall abgeben.

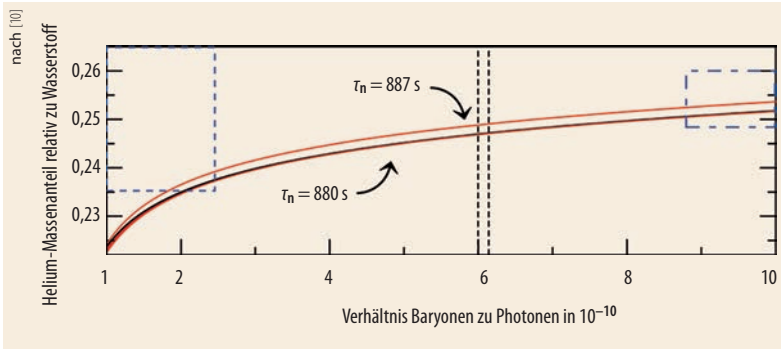


Abb. 3 Zusammenhang zwischen primordialer Heliumhäufigkeit und Verhältnis von Baryonen zu Photonen im frühen Universum. Die gestrichelten Kästchen sind die relativen Messfenster für das Massenverhältnis $^4\text{He}/\text{H}$. Die systematische Unsicherheiten liegen bei $\pm(3-6)\%$.

gekräft begrenzt: durch die systematischen Unsicherheiten bei der Bestimmung des primordial erzeugten Heliums in sehr frühen Galaxien und die genaue Kenntnis der Lebensdauer des Neutrons. Verschiedene Messungen bzw. Messmethoden ergeben widersprüchliche Ergebnisse, die deutlich voneinander abweichen.

Die Neutronenlebensdauer lässt sich mit zwei Methoden ermitteln. Bei der einen sammelt man die Zerfallsprodukte aus einem bestimmten Volumen eines Neutronenstrahls mit bekanntem Geschwindigkeitsspektrum auf und zählt sie. Dafür ist es erforderlich, absolute Größen wie Neutronenfluss und die Nachweiseffizienz für Zerfallsprodukte zu kennen. Bei dieser Methode treten keine Verlustmechanismen für Neutronen aus dem Zerfallsvolumen auf. Bei der zweiten Methode speichert man UCN in einer Falle und zählt die nach verschiedenen Speicherzeiten verbliebenen Neutronen, um die Zerfallszeit zu erhalten. Dabei ist keine absolute Eichung notwendig, da man die Werte entlang einer exponentiellen Zerfallskurve bestimmt, bei der nur die Steigung wesentlich ist. Allerdings ist auszuschließen, dass es zusätzlich zum β -Zerfall andere Verlustmechanismen für Neutronen gibt. Zwar konvergieren die Messungen mit der Speichermethode durch nachträglich ermittelte Korrekturen zu einem Wert von ca. 880 Sekunden [8], jüngste Messungen mit der Strahlmethode zeigen aber einen deutlich höheren Wert von 887 Sekunden [9]. Diese experimentelle Inkonsistenz wirkt sich auf die erwartete Heliumhäufigkeit Y_p aus, wobei $\delta Y_p / Y_p = 0,8 \delta \tau_n / \tau_n$ ist und somit $\delta Y_p \approx 0,0025$ (Abb. 3) [7].

Präzisere Messungen sind also notwendig, wobei das Hauptaugenmerk auf der genauen Abschätzung möglicher Falscheffekte durch die Messmethode bzw. die Apparatur liegen muss [11]. Das Rauschen aufgrund statistischer Prozesse für jede Einzelmessung sollte deutlich kleiner sein als mögliche systematische Abhängigkeiten von experimentellen Bedingungen. Ein Beispiel ist das PENeLOPE-Experiment, das derzeit durch die Gruppe des Autors entwickelt und aufgebaut wird [12]. Dabei werden ultrakalte Neutronen in einer großen Magnetflasche mit hohem Volumen-zu-Wand-Verhältnis gespeichert und ihre zeitliche Abnahme bestimmt

(Abb. 4). Bislang wurde die Zahl der Neutronen nach einer verbleibenden Speicherzeit t_s bestimmt und gleichzeitig die Zahl der eingefüllten Neutronen kontrolliert. Nun liegt der Schwerpunkt auf dem Nachweis der beim Zerfall entstehenden Protonen in Echtzeit. Dadurch lassen sich die gespeicherten Neutronen effizient nutzen, da sich ihre zeitliche Abnahme bei jedem Messzyklus sehr präzise bestimmen lässt. Zusätzlich werden gemäß der klassischen Methode nach jedem Speichervorgang die noch vorhandenen Neutronen gezählt.

Magnetische Flaschen fangen Neutronen aufgrund der Wechselwirkung ihres magnetischen Dipolmoments $\vec{\mu}_n$ mit einem magnetischen Gradientenfeld $\vec{\nabla}\vec{B}$ ohne Berührung mit Materie. Dies gelingt nur für Neutronen, deren relative Orientierung von $\vec{\mu}_n$ mit dem Gradienten zu einer abstoßenden Kraft $\vec{F} = \vec{\mu}_n \cdot \vec{\nabla}\vec{B}$ führt (low-field seekers). Dabei ist es wichtig, dass die Neutronen auch fernab der Wände keinen feldfreien Raum durchfliegen und die Spinorientierung erhalten bleibt. Dies erfordert eine komplexe Magnetfeldanordnung. Die magnetische Flasche hat zwar seitliche Wände sowie einen Boden, sie ist aber nach oben hin offen. Die Schwerkraft sorgt für eine vertikale Potentialhürde von ca. 100 neV/m und verhindert so, dass Neutronen nach oben entweichen. Die Reflexion an den Wänden erfolgt aber nur fast verlustfrei, da Spinflips auftreten können und die Neutronen dann nicht mehr gespeichert werden.

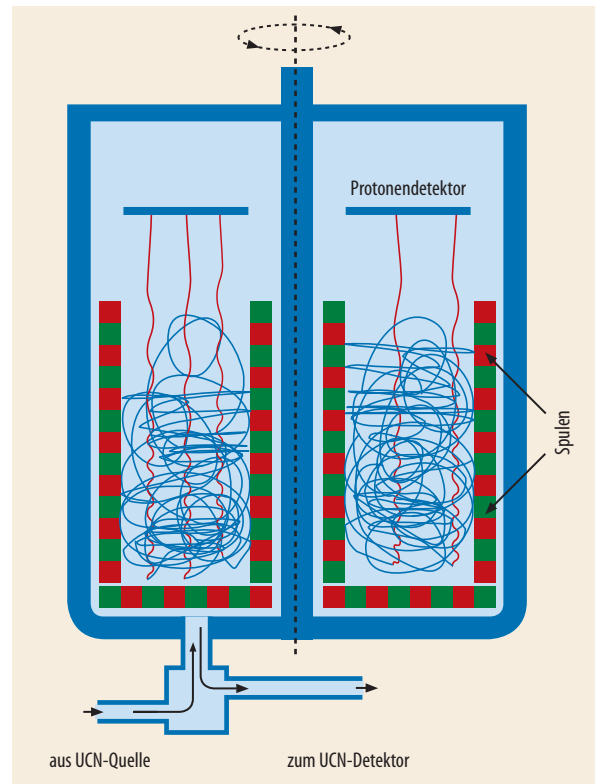


Abb. 4 Querschnitt durch das Münchner Experiment zur Bestimmung der Neutronenlebensdauer (rotationssymmetrisch um die Vertikale): rote und grüne Quadrate symbolisieren die supraleitenden Spulen mit jeweils entgegengesetzter Stromrichtung, die blauen Linien entsprechen Flugbahnen einzelner Neutronen, die roten Linien den Flugbahnen extrahierter Zerfallsprotonen. Nicht eingezeichnet ist die Spule für ein zusätzliches axialsymmetrisches B -Feld im Speichervolumen.

Das Speichervolumen des PENELOPE-Experiments beträgt rund 800 Liter und ist damit um ein Vielfaches größer als bei bisherigen Experimenten (Abb. 4). Befüllt wird bei fast ausgeschaltetem Magnetfeld von unten her. Anschließend wird das Magnetfeld innerhalb von rund 100 Sekunden auf den Sollwert erhöht. Das magnetische Fallenfeld entsteht durch viele supraleitende Helmholtz-Spulen, die übereinander montiert und in umgekehrter Richtung vom Strom durchflossen werden. Das größte effektive Magnetfeld im Inneren des Kryostaten beträgt rund 6 T, die abstoßenden Kräfte zwischen benachbarten Spulen 1 MN, die maximale Energie für speicherbare Neutronen ca. 65 neV. Ein elektrisches Feld von etwa 10 kV saugt die Zerfallsprotonen aus dem Zerfallsvolumen nach oben zum Detektor hin ab. Dieser besteht aus tausend fensterlosen Avalanche Photodioden (LAAPD).

Wenn die UCN-Quelle am Münchner Forschungsreaktor planmäßig funktioniert, kann diese Anordnung rund 10^8 Neutronen pro Füllvorgang speichern. Für jeden Messzyklus von 15 Minuten beträgt das statistische Rauschen noch eine Sekunde und entspricht damit dem gesamten statistischen Rauschen der bisher besten Lebensdauerexperimente. Ziel der Gesamtmessung ist es, die Lebensdauer mit einer verbleibenden Unkenntnis von unter 0,1 Sekunden zu bestimmen.

Asymmetrien im Neutronenzerfall

In der Frühgeschichte des Universums wurde nicht nur die CP-Symmetrie gebrochen und für eine Asymmetrie von Materie und Antimaterie gesorgt, unser Universum ist auch für gewisse Abläufe als Linkshän-

der aufgewachsen. Die Aufhebung der Links-Rechts-Symmetrie (Parität) geschah rund 10^{-13} Sekunden nach dem Urknall über eine spontane Symmetriebrechung, die dem Higgs-Feld und damit den Austauscheteilchen der schwachen Wechselwirkung ihre Massen gegeben hat. Nur linkshändige Fermionen und rechtshändige Antifermionen beteiligen sich an Prozessen der schwachen Wechselwirkung, bei der sich die Ladung des Zerfallsteilchens ändert. Dies wiederum wirkt sich auf den Zerfall des Neutrons aus, bei dem die Zerfallsprodukte über den Spin der beteiligten Teilchen kinematisch miteinander korreliert sind (Infokasten „Neutronenzerfall“). Diese Korrelationen liefern aber nicht nur sehr präzise Auskunft über die Paritätsverletzung und geben Hinweise auf eine eventuelle kleine verbleibende Rechtshändigkeit unseres Universums. Der Neutronzerfall erlaubt es auch, nach weiteren, bisher nicht beobachteten Kopplungsarten der schwachen Wechselwirkung zu suchen. Zwar sind die erwarteten Effekte sehr klein, jedoch sollte sich durch ein neuartiges Instrument am FRM II die experimentelle Empfindlichkeit um den Faktor 10 verbessern. An einem neuen hochintensiven Strahl kalter polarisierter Neutronen ($2 \cdot 10^{10}$ Neutronen/cm²·s) am FRM II wird das Instrument PERC aufgebaut [13]. In einem acht Meter langen magnetischen Kanal zerfallen etwa 10^6 Neutronen pro Sekunde, deren geladene Zerfallsteilchen transversal magnetisch eingefangen und über ein System starker magnetischer Ablenkmagnete in angeschlossene Experimente zur Analyse gelangen. Damit sinkt das statistische Rauschen vieler Korrelationsmessungen um mehr als eine Größenordnung. Bastian Märkisch (TU München) leitet dieses Experiment, das in zwei Jahren in Betrieb gehen soll.

4) Dies gilt unter der Annahme, dass Neutrinos quasi masselos sind, auf jeden Fall aber leichter als die halbe Masse des Z-Bosons.

NEUTRONENZERFALL

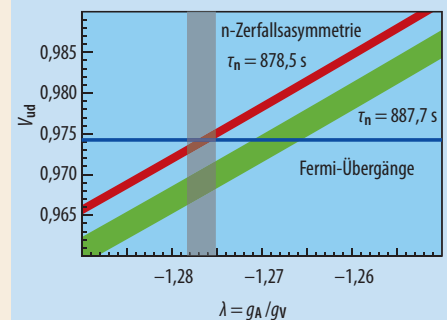
Das Neutron zerfällt über die Reaktion $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$. Die mittlere Lebensdauer des freien Neutrons beträgt etwa $\tau \approx 880$ s. Diese Naturkonstante findet Eingang in das Standardmodell der Kosmologie und bestimmt zusammen mit der Baryonendichte die Heliumhäufigkeit aus der Frühphase des Universums. Zudem erlaubt sie es, die Zahl der Quarkfamilien zu bestimmen. Im Standardmodell der Teilchenphysik gilt die Annahme, dass Quarks und Leptonen in Familien auftreten mit jeweils zwei Mitgliedern, die sich u. a. durch eine Ladungseinheit unterscheiden. Die schwache Wechselwirkung kann Übergänge innerhalb dieser Familien induzieren. Man geht von einer Symmetrie in der Anzahl der Familien zwischen Quarks und Leptonen aus. Die Zahl der Leptonfamilien ist durch die totale Zerfallsbreite des neutralen Z-Bosons beschränkt.⁴⁾

Die Unitarität der CKM-Quarkmischungsmatrix (benannt nach Cabibbo, Kobayashi und Maskawa) schränkt die Existenz weiterer Quark-Familien indirekt ein. Diese Matrix stellt die Verbindung zwischen den Quarks als Eigenzustände der starken Wechselwirkung (Masse) und der schwachen Wechselwirkung

(Übergang zwischen zwei Quarkflavours innerhalb einer Familie) dar. Das Matrixelement $|V_{ud}|$ beschreibt den Übergang eines d- in ein u-Quark, also den mikroskopischen Prozess im Neutronenzerfall.

Für den Zerfall des freien Neutrons gibt es zwei Szenarien, die mit den Spins des Neutrons und der auslaufenden Teilchen verbunden sind. Im Gamow-Teller-Übergang trägt das Leptonpaar ganzzahligen Spin $S_{e-\bar{\nu}_e} = 1$. Der Spin des auslaufenden Protons und des Neutrons sind daher entgegengesetzt. Im Fermi-Übergang ist der Spin des Leptonpaares $S_{e-\bar{\nu}_e} = 0$, und das Proton übernimmt die Spinrichtung vom zerfallenden Neutron. g_A und g_V bezeichnen die jeweiligen Übergangsstärken, ihr Verhältnis λ beträgt etwa 1,27 (Abb.).

Für die totale Zerfallsrate, also das Inverse der Lebensdauer, treten beide Komponenten auf: $\Gamma = \hbar/\tau \propto (1+3|\lambda|^2) \cdot |V_{ud}|^2$. Dagegen lässt sich $g_V \cdot |V_{ud}|^2$ in ausgesuchten Kernzerfällen gezielt bestimmen. Um das Verhältnis λ zu messen, muss man Korrelationen im Neutronenzerfall ausnutzen, z. B. die Emissionsrichtung der Elektronen relativ zur Spinrichtung des Neutrons. Während absolute Zerfallsraten immer



Zusammenhang zwischen $|V_{ud}|$ und dem Verhältnis der schwachen Kopplungen für zwei Werte der Neutronenlebensdauer, die den jeweils besten Ergebnissen der beiden Messmethoden entsprechen. Das graue und blaue Band entsprechen den direkten Messungen dieser Größen. Das Standardmodell verlangt die Übereinstimmung der drei Messgrößen in einem Punkt.

ein Produkt aus Kopplungskonstanten und CKM-Matrixelement darstellen, sind Zerfallskorrelationen frei von $|V_{ud}|$.

Test des Gravitationsgesetzes

Die Geschichte des Universums beginnt vor 13,8 Milliarden Jahren, wobei nach heutigen Vorstellungen Energiedichten vorlagen, die unsere Erfahrung von Raum und Zeit außer Kraft setzen. Strings sind ein Versuch, die auf kleinsten Längenskalen ablaufende Physik zu beschreiben. Ihre mathematische Umsetzung erfordert jedoch eine andere Raum-Zeit-Struktur von mindestens sieben zusätzlichen Raumdimensionen. Da diese in unserer heutigen Erfahrungswelt keine Rolle zu spielen scheinen, stellt sich die Frage, welches Schicksal sie erlitten haben. Die Phase der Inflation ca. 10^{-35} Sekunden nach dem Urknall erklärt das Verschwinden dieser Dimensionen. In dieser Phase sollte sich das Universum um rund 50 Größenordnungen ausgedehnt haben. Dies könnte zu einer Hierarchie der Raumdimensionen geführt haben, die drei flache und viele aufgerollte Dimensionen beinhaltet. Die Zahl der flachen Raumdimensionen ist nur durch die Gültigkeit von Newtons Gravitationstheorie bestätigt. Zusätzliche kleine Raumdimensionen würden das bekannte Abstandsgesetz der Gravitation bei kurzen Abständen modifizieren. Dies mag phantastisch klingen, jedoch ist das Gravitationsgesetz bei kleinen Abständen nur bis etwa $10\ \mu\text{m}$ getestet. Entsprechende Experimente erfordern die Bewegung großer Massen. Aufgrund von Polarisierungseffekten an den Oberflächen und damit zusätzlich wirkenden elektromagnetischen Kräften sind die Korrekturen auf die Messergebnisse jedoch groß. Es bietet sich daher an, das Neutron als elektrisch neutrale und nicht polarisierbare Sonde einzusetzen.

Damit treten wir jedoch in die Quantenwelt ein, die zwar wohl definierte Energieniveaus bereit hält, aber hohe Messpräzision verlangt. Stellen wir uns ein Neutron vor, das gefangen ist in einem eindimensionalen Topf. Der Boden sei eine für Neutronen spiegelnde

Oberfläche, ein Neutronen absorbierender Deckel nur wenige Mikrometer darüber. Seitlich gibt es keine Begrenzungen. Entlang der Vertikalen wirkt das lineare Gravitationspotential, und durch die Randbedingungen ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit in vertikaler Richtung quantisiert. Der Absorber reduziert die Wellenfunktion am Deckel auf Null. Die Lösungen des Eigenwertproblems sind Airy-Funktionen (Abb. 5). Damit Neutronen in einem solchen Topf überleben, muss die vertikale Komponente ihrer kinetischen Energie bei einigen peV liegen, entsprechend der Abstände der vertikal angeordneten Energieniveaus. Somit sind wieder UCN nötig. Vor zehn Jahren ist es einem Team am ILL gelungen, die Ortsquantisierung im Gravitationsfeld der Erde mit einem ortsempfindlichen Neutronendetektor erstmals nachzuweisen. Da Ortsmessungen immer ungenauer sind als Frequenzmessungen, wurden in einem zweiten Experiment mithilfe der Rabi-Methode Übergänge zwischen den verschiedenen Energiezuständen der Gravitation induziert. So ließ sich der Energieabstand einiger Eigenzustände mit guter Präzision nachweisen. Diese Messungen, durchgeführt unter Leitung von Hartmut Abele (TU Wien), stimmen mit Newtons Gravitationspotential hervorragend überein.

Die gemessene Linienbreite der Eigenzustände und damit die Energieauflösung der Messung ist durch die Aufenthaltsdauer der Neutronen im mechanischen Resonator gegeben und aufgrund der Methode auf 10^{-14} eV limitiert. Wir können uns aber ein passendes Ramsey-Experiment überlegen (Abb. 6). In einem solchen Experiment sind Zustandspräparation und -analyse zeitlich und räumlich voneinander getrennt – oben haben wir es mit dem Uhrenvergleich durch einen $\pi/2$ -Spinflip beschrieben. Der $\pi/2$ -Spinflip polarisierter Neutronen mit einem Radiofrequenzpuls erzeugt eine kohärente Überlagerung von Spin-up und

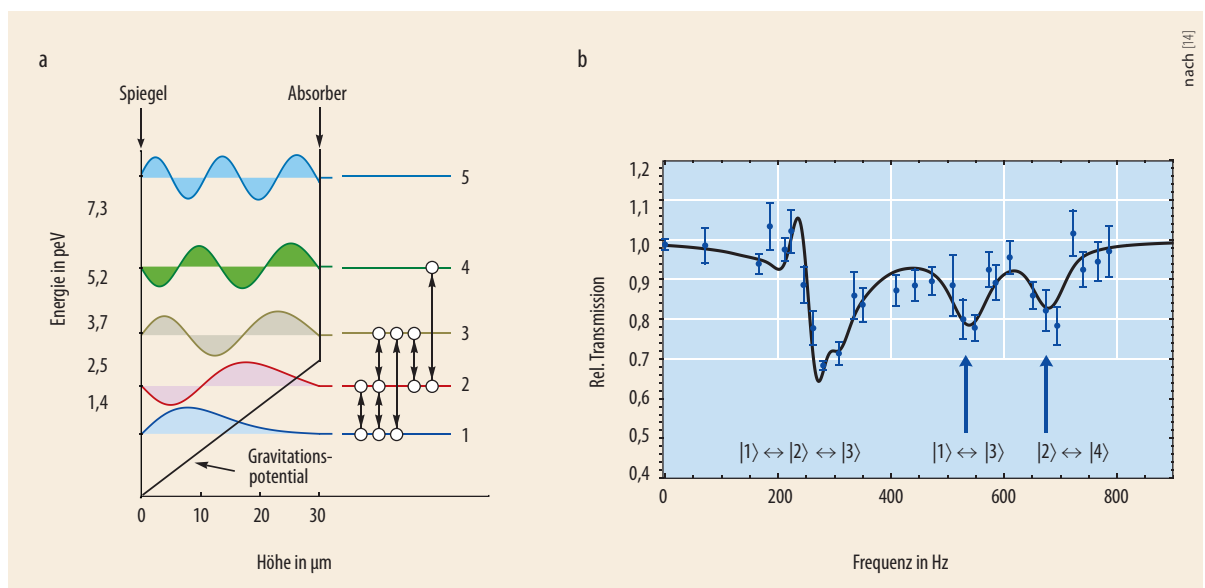


Abb. 5 Niveauschema und Wellenfunktionen für Neutronen im Schwerfeld der Erde (a). Die Neutronen sind in Richtung des Schwerfeldes durch einen Spiegel

am Boden und einen Absorber als Deckel eingeschlossen. Rabi-Spektrum (b) für einen Neutronenstrahl im gravitativen Grundzustand bei Einstrahlung von

Schallwellen in einem Resonator. Die Intensitätsminima entsprechen den induzierten Übergängen in a.

Spin-down mit fester Phasenbeziehung. Ändert nun ein elektrisches Feld die relative Energie der beiden Spin-Zustände, führt dies zu einer Modifikation der zeitlichen Propagation der beiden Zustände. Wir erhalten also eine relative Phasenverschiebung, die zu einer Phasenverschiebung der Überlagerung gegenüber dem externen Radiofrequenzfeld führt.

Wir übersetzen dieses Schema auf ein Gravitationsexperiment. In einem ersten Topf präparieren wir Neutronen im gravitativen Zustand $n = 1$, entsprechend einer Spinpolarisation der Neutronen beim EDM. Über Vibrationsanregung mit einem externen Oszillator (Referenzuhr) geht dieser in eine kohärente Überlagerung von Zuständen mit $n = 1$ bzw. $n = 2$ über, entsprechend dem $\pi/2$ -Spinflip. Diese Zustandsmischung propagiert frei im Raum, was einer tanzenden Bewegung von Neutronen auf der Oberfläche eines perfekten Spiegels entspricht. Je länger die Strecke, desto größer die Störung der Überlagerung durch eine mögliche Abweichung vom Newtonschen Potential bei kleinen Abständen. Am Ende der Flugstrecke erzeugen wir wieder einen Vibrationsübergang. Ohne relative Phasenverschiebung der beiden Zustandskomponenten würde der Vibrationspuls wieder zu einem reinen Zustand mit $n = 1$ führen, der sich mit einem Zustandsanalysator nachweisen lässt. Eine Phasenverschiebung zwischen den beiden Komponenten führt aber zu einem anderen Ergebnis. Eine mögliche Phasenverschiebung kann durch eine kurzreichweitige gravitationsähnliche Wechselwirkung mit dem Hüpfboden (Spiegel) entstehen, die den Zustand $n = 1$ durch seine höhere Aufenthaltswahrscheinlichkeit nahe der Spiegeloberfläche stärker beeinflusst als den Zustand $n = 2$. Ramseys Methode entspricht der Beobachtung einer Interferenz zweier Schwingungen (mechanischer Frequenzgeber und hüpfendes Neutron), daher wird die Energieauflösung nur durch die Länge der getrennten Laufzeiten der beiden Oszillatoren bestimmt. Die Beobachtung der Rabi-Übergänge durch Hartmut Abele und seine Mitarbeiter zeigte kürzlich die Möglichkeiten der gravitativen Ramsey-Methode. Sie erlaubt derzeit eine Energieauflösung von 10^{-14} eV. Mit neuen UCN-Quellen und einer deutlich größeren zeitlichen Separation der beiden Oszillatoren durch Speicherung von UCN sollten sogar Energieauflösungen von $\Delta E \approx 10^{-20}$ eV möglich sein. Dies übersetzt sich in eine Empfindlichkeit gegenüber neuen gravitativen Kräften von etwa $10^4 G_{\text{Newton}}$ bei einem Abstand von $10 \mu\text{m}$. Experimente mit Neutronen werden damit um viele Größenordnungen empfindlicher als jedes andere Experiment.

Die Empfindlichkeit solcher Messungen ist bis auf Weiteres nur durch das Geschick des Experimentators und die nutzbare Zahl der UCN begrenzt. Es gibt bereits eine Weiterentwicklung, mit der sich die Neutralität des Neutrons um mehrere Größenordnungen genauer bestimmen lassen sollte als ihr derzeitiger Wert von 10^{-22} e.

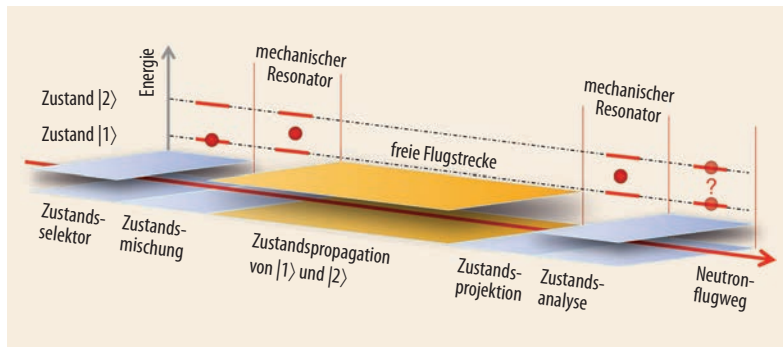


Abb. 6 Ramsey-Experiment zur Gravitation mit zwei räumlich separierten mechanischen Resonatoren (vgl. Text).

Zusammenfassung

Präzisionsmessungen mit Neutronen können komplementär zu Experimenten an Teilchenbeschleunigern Informationen zum frühen Universum geben [16]. In den letzten Jahren wurden in vielen Bereichen neue experimentelle Methoden und Messtechniken entwickelt. Die Messungen zur Gravitation stellen absolutes Neuland auf diesem Gebiet dar. Die Experimente sind langwierig, aber das Entdeckungspotenzial ist sehr groß.

*

Die hier beschriebenen Experimente stehen exemplarisch für eine weltweite Anstrengung an verschiedenen Forschungsanlagen, sie sind jedoch in ihrem Entdeckungspotenzial an vorderster Front. Ohne die Unterstützung durch den Forschungsschwerpunkt 1491 der DFG wären sie so nicht möglich geworden.

Literatur

- [1] F. M. Piegsa et al., Phys. Rev. C **90**, 015501 (2014)
- [2] A. Frei et al., Eur. Phys. J. A **34**, 119 (2007)
- [3] www.mlz-garching.de/instrumente/teilchenphysik/ucn.html
- [4] I. Altarev et al., arXiv:1501.07861 [physics.ins-det].
- [5] I. Altarev et al., Rev. Sci. Instrum. **85**, 075106 (2014)
- [6] I. Altarev et al., Nuovo Cim. C **035N04**, 122 (2012)
- [7] K. A. Olive, G. Steigman und T. P. Walker, Phys. Rept. **333**, 389 (2000)
- [8] S. S. Arzumanov et al., JETPL **95**, 248 (2012)
- [9] A. T. Yue et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 222501 (2013)
- [10] R. Ichimasa et al., Phys. Rev. D **90**, 023527 (2014)
- [11] S. Paul, Nucl. Instrum. Meth. A **611**, 157 (2009)
- [12] S. Materne et al., Nucl. Instrum. Meth. A **611**, 176 (2009)
- [13] D. Dubbers et al., Nucl. Instrum. Meth. A **596**, 238 (2008)
- [14] T. Jenke et al., Phys. Rev. Lett. **112**, 151105 (2014)
- [15] H. Abele et al., arXiv:1412.5013 [physics.ins-det]
- [16] D. Dubbers und M. Schmidt, Rev. Mod. Phys. **83**, 1111 (2011)

DER AUTOR

Stephan Paul (FV Hadronen und Kerne, Teilchenphysik) hat in Bonn studiert und in Heidelberg promoviert. Als wissenschaftlicher Mitarbeiter am MPIfK (Heidelberg) und CERN war er beteiligt an Messungen der Neutronenlebensdauer am ILL, der Erzeugung von Hyperkernen am KEK und der Physik am Hyperonstrahl am CERN. Außerdem war er Mitbegründer des COMPASS-Experiments am CERN und erster Co-Sprecher. 1997 erhielt er einen Ruf an die TU München. Er ist Sprecher des Exzellenzclusters Origin and Structure of the Universe und koordiniert den DFG-Schwerpunkt Teilchen- und Astrophysik mit kalten und ultrakalten Neutronen. In seiner Freizeit findet man ihn am Starnberger See oder in den Alpen.

