



Eine Sonde in der Falle

Experimente mit radioaktiven Molekülonen ermöglichen es, die *CP*-Verletzung hochpräzise zu untersuchen.

Konstantin Gaul und Robert Berger

Der enorme Überschuss von Materie gegenüber Antimaterie gilt als eines der größten Rätsel der Physik. Dieses Ungleichgewicht – auch als Baryonenasymmetrie bezeichnet – weist unter anderem darauf hin, dass zum Zeitpunkt der Entstehung unseres Universums die kombinierte Symmetrie von Ladungskonjugation *C* und Parität *P* verletzt gewesen sein muss [1]. Obwohl das Standardmodell der Teilchenphysik Mechanismen enthält, die eine solche Symmetrieverletzung bewirken, reicht deren vorhergesagter Grad nicht aus, um die vorhandene Asymmetrie zu erklären [2].

Theoretische Modelle sagen voraus, dass die Prozesse mit einer genügend großen *CP*-Verletzung bei Energien jenseits einiger TeV stattfinden. Am Large Hadron Collider lässt sich der Bereich bis 13 TeV untersuchen; Präzisionsexperimente mit Atomen und Molekülen könnten helfen, auf den PeV-Bereich zu schließen. Schon jetzt tragen sie zu den stringentesten Tests von *CP*-Verletzung bei und schließen Teilchen bis zu 30 TeV aus [3]. Solche Experimente basieren auf gut kontrollierbaren atomaren oder molekularen Systemen, deren innere Elektronen- und Kernstruktur *CP*-Verletzungseffekte um viele Größen-

ordnungen verstärken. Elemente mit hoher Kernladungszahl sind besonders interessant, da führende Beiträge zur *CP*-Verletzung von kurzreichweitigen Wechselwirkungen der Atomkerne mit den Elektronen herrühren.

Die Aussicht, auch polyatomare Moleküle mit Lasern zu kühlen [4], machte mehr- und schweratomige Moleküle wie RaOH [5] oder YbOH [6] zu Kandidaten für die Suche nach Physik jenseits des Standardmodells. Solche Moleküle besitzen extrem langlebige Rotationszustände, die durch Parität und/oder Zeitumkehr miteinander verknüpft sind. Ihre kleine Zustandsbreite kann die experimentelle Unsicherheit reduzieren [6]. Experimentelle Fortschritte gibt es insbesondere bei radiumhaltigen Molekülen. So ließ sich kürzlich erstmals ^{225}RaF mit hochauflösender Laserspektroskopie untersuchen [7]. Kurzlebige Isotope wie ^{225}Ra sind oft deformiert und besitzen große Kernmomente [5, 6, 8], was die Suche nach neuer Physik zusätzlich begünstigt.

Nun haben zwei unabhängige Forschungsteams berichtet, wie solch hochsensitive, radiumhaltige molekulare Ionen im Experiment zu kontrollieren sind und bei der Suche nach *CP*-Verletzung helfen können.

Andrew Jayich von der University of California, Santa Barbara, und sein Team haben eine experimentelle Methode vorgestellt, um radiumhaltige Molekülonen herzustellen und zu identifizieren [9]. Phelan Yu und Nicholas Hutzler vom California Institute of Technology haben für eine dieser Spezies berechnet, dass sich ihre spektroskopischen Eigenschaften hervorragend eignen, um diskrete Symmetrien zu überprüfen [10].

Jayich hat mit seinem Team Ra^+ -Ionen in einer linearen Paul-Falle gefangen und mit Lasern Dopplergekühlt [9]. Durch Zugabe von Methanoldampf synthetisierten sie in der Falle RaOH^+ - und RaOCH_3^+ -Ionen und charakterisierten diese mit einer neuen Technik optischer Massenspektrometrie. Dabei kühlen Ra^+ -Ionen die Molekülonen sympathetisch und fangen diese in einer geordneten Struktur ein, dem sogenannten Coulomb-Kristall. Im konkreten Fall bestand dieser aus zwei atomaren Ionen mit dem Molekülion in der Mitte. Um solche Kristalle zu charakterisieren, bedarf es üblicherweise zusätzlicher elektrischer Felder, die den Kristall bei der Messung zerstören können. Alternativ lassen sich Phasenübergänge messen. Im Vorfeld muss die

◀ **Abb. 1** Bei der optischen Massenspektrometrie treiben zwei Laser (rot, blau) den kohärenten Populationseinfang der Ra^+ -Ionen. Dieser regt die axiale Schwingungsbewegung des Coulomb-Kristalls an, der aus drei Ionen besteht und in der Quadrupolfalle (orange) gefangen ist. Die Kamera (grau) beobachtet die Fluoreszenz der Ra^+ -Ionen, deren axiale Schwingungsfrequenz von der Masse der Ionen abhängt.

Masse des Moleküls bekannt sein, um kurze Messzeiten zu erzielen – das ist mit der neuen Methode nicht nötig. Die Charakterisierung erfolgt hier über einen kohärenten Populationseinfang des Ra^+ -Ions.

Dabei erzeugt ein zweiter Laser einen Superpositionszustand im Ra^+ -Ion, sodass Licht des Kühllasers nicht mehr absorbiert und spontan emittiert wird oder bei geeigneter Verstimmung zu einer lokalen Aufheizung führt. Die Anordnung der Laser verstärkt in axialer Richtung die Schwingungen des Coulomb-Kristalls (**Abb. 1**), deren Frequenz vom Masse-Ladungsverhältnis abhängt. Diese Bewegungen zeigen sich in der Fluoreszenz der Ra^+ -Ionen, die eine CCD-Kamera mit Photoelektronenvervielfacher aufzeichnet. Das Verfahren erlaubt Messzeiten von 3 s bei einem Auflösungsvermögen $m/\Delta m$ von 800 – andere Methoden brauchen mehr als eine Minute. So ermöglicht es die neue Methode erstmals, komplexe Moleküle zu untersuchen, die kurzlebige Isotope enthalten. Außerdem zerstört sie in der Regel den Coulomb-Kristall nicht.

Phelan Yu und Nicholas Hutzler charakterisierten mit ausführlichen

Berechnungen die Hyperfeinstruktur von RaOCH_3^+ [10]. Sie konnten zeigen, dass nahezu entartete K -Dubletts vorliegen. Ist die Aufspaltung dieser Zustände entgegengesetzter Parität gering, reichen äußerst kleine externe elektrische Felder aus, um die Moleküle zu polarisieren und ihre Achse perfekt parallel zum Spin auszurichten. Das ergibt eine hohe Sensitivität für den Nachweis diskreter Symmetrieverletzung. Aufgrund der geschlossenen Elektronenschale des Radiums dominiert die dipolare Kernspin-Wechselwirkung die K -Dubletts, sodass diese eine Größenordnung schwächer aufspalten als in vergleichbaren Radikalen wie CaOCH_3 . Komplexe Moleküle wie RaOCH_3^+ sind diesbezüglich dreiatomigen Molekülen wie RaOH überlegen, weil deren ℓ -Dubletts meist deutlich stärker aufspalten. Ferner leben K -Dubletts länger als ℓ -Dubletts, was den resultierenden systematischen Messfehler reduziert. Die Oktupoldeformation von Isotopen wie ^{225}Ra führt zu einem großen Schiff-Moment [8]. Dieses elektrische Dipolmoment des Kerns ist P, T -ungerade; es wechselt also das Vorzeichen entweder bei P - oder T -Umkehr. Aufgrund des CPT -Theo-

rems sind Moleküle mit ^{225}Ra daher besonders sensitiv, um CP -Verletzung nachzuweisen.

Die beiden Arbeiten zu RaOH^+ und RaOCH_3^+ zeigen deutlich, wie radioaktive Moleküle mit komplexer innerer Struktur in Hochpräzisionsexperimenten bei der Suche nach Physik jenseits des Standardmodells helfen können. Ihre Polarisierbarkeit, die Lebensdauer angeregter Zustände und die hohe Sensitivität auf das elektrische Kerndipolmoment eröffnen hierbei neue Chancen.

- [1] A. D. Sakharov, JETP Lett. 5, 24 (1967)
- [2] L. Canetti et al., New J. Phys. 14, 095012 (2012)
- [3] V. Andreev et al. (ACME Coll.), Nature 562, 355 (2018)
- [4] T. A. Isaev und R. Berger, Phys. Rev. Lett. 116, 063006 (2016)
- [5] T. A. Isaev et al., J. Phys. B 50, 225101 (2017)
- [6] I. Kozyryev et al., Phys. Rev. Lett. 118, 173201 (2017)
- [7] R. F. Garcia Ruiz et al., Nature 581, 396 (2020)
- [8] V. V. Flambaum, Phys. Rev. C 99, 035501 (2019)
- [9] M. Fan et al., Phys. Rev. Lett. 126, 023002 (2021)
- [10] P. Yu und N. R. Hutzler, Phys. Rev. Lett. 126, 023003 (2021)

Die Autoren

Konstantin Gaul und **Prof. Dr. Robert Berger**, Fachbereich Chemie, Philipps-Universität Marburg, Hans-Meerwein-Str. 4, 35032 Marburg

Kurzgefasst

Riesiger Rest

Das Röntgenteleskop eROSITA hat weit außerhalb der galaktischen Ebene einen bisher unbekanntes Überrest einer Supernova-Explosion detektiert. Ungewöhnlich ist neben der Position von „Hoinga“ auch seine Größe: Dieser größte bislang im Röntgenlicht detektierte Supernova-Rest bedeckt eine Fläche von der 90-fachen Größe der Vollmondscheibe. In den 30 Jahre alten ROSAT-Daten war Hoinga wegen seiner geringen Leuchstärke und der Position nicht aufgefallen. Außerhalb der galaktischen Ebene könnten also noch viele weitere Überraschungen in den künftigen Daten von eROSITA stecken.

W. Becker et al., A&A (2021),
DOI: 10.1051/0004-6361/202040156

Vereinfachte Vorhersage

Mit Feynman-Integralen lassen sich Prozesse bei hochenergetischen Teilchenkollisionen vorhersagen, die zum Beispiel am Large Hadron Collider auftreten. Allerdings ist ihre Berechnung äußerst aufwändig und häufig nur näherungsweise möglich, was einen Vergleich mit experimentellen Daten erschwert. Nun ist es theoretischen Physikern aus München und Hamburg gelungen, die Berechnung stark zu vereinfachen. Sie zeigten, dass sechs Polynome die relevanten Integrale charakterisieren. Die Polynome lassen sich mit einer Cluster-Algebra assoziieren, sind also durch feste Regeln miteinander verbunden.

D. Chicherin et al., Phys. Rev. Lett. 126, 091603 (2021)

Exotisches Eis

Eis ist vielfältig: Im Alltag begegnet es uns als filigrane Schneeflocke und massiver Eiskwürfel. Mikroskopisch betrachtet handelt es sich bei ihnen um Eis I. Doch es gibt zahlreiche weitere Kristallformen, zum Beispiel auf Eismonden. Kürzlich haben Forschende der U Innsbruck und ein japanisches Team die Struktur von Eis XIX mit Neutronenbeugung bestimmt. Diese exotische Form entsteht, wenn Eis langsam auf -200°C abgekühlt und der Druck auf 20 kbar erhöht wird. In Eis XIX bildet Sauerstoff ein eigenes Gitter, in dem sich der Wasserstoff geordnet einsortiert.

T. M. Gasser et al., Nat. Commun. 12, 1128 (2021); R. Yamane et al., Nat. Commun. 12, 1129 (2021)

