

■ Mit Teilchendetektoren gegen Atomwaffen

Myonen-Radiographie und Antineutrino-messungen können helfen, mögliche Entwendungen abgebrannter Brennelemente aus Zwischenlagern zu detektieren.

Im Nuklearen Nichtverbreitungsvertrag haben sich die fünf Atom-mächte USA, Frankreich, China, Großbritannien und Russland zur nuklearen Abrüstung verpflichtet. Den anderen Mitgliedsstaaten untersagt das auch als Atomwaffensperrvertrag bekannte Abkommen den Erwerb und Bau von Kernwaffen. Neben militärischen Forschungsaktivitäten erfordert dies insbesondere den Besitz spaltbarer Materialien, die auch im Rahmen der zivilen Nutzung der Kernenergie verwendet und produziert werden. Aufgabe der Internationalen Atomenergiebehörde IAEA ist es, die Einhaltung des Vertrags zu kontrollieren. Daher besteht ein Schwerpunkt ihrer Arbeit darin, eventuelle Abzweigungen spaltbarer Materialien aus dem zivilen Kernenergiesektor für militärische Zwecke zeitnah zu detektieren. Verifikationsmethoden sind Vor-Ort-Inspektionen in nuklearen Anlagen, um unter anderem durch den Nachweis von Neutronen und Gammastrahlung vorhandene spaltbare Materialien zu vermessen. Darüber hinaus kommen Überwachungsmethoden wie beispielsweise Videokameras oder das Anbringen von Siegeln an Behältern mit spaltbaren Materialien zum Einsatz.



In Behältern, die wie die Castoren im Zwischenlager Gorleben abgebrannte Brennelemente enthalten, befinden sich weltweit mehrere tausend Tonnen Plutonium.

Forschungsbedarf besteht bei der Verifikation abgebrannter Brennelemente in Zwischenlagern, die Plutonium enthalten. Zwar müsste das Plutonium zunächst in Wiederaufarbeitungsanlagen abgetrennt werden, was großen technischen Aufwand bedeutet. Allerdings lagert in einem einzigen Behälter wie den Castoren genug Plutonium für mehrere Sprengköpfe. Allein aus zivilen Kernenergie-Programmen haben sich insgesamt über zweitausend Tonnen Plutonium in abgebrannten Brennelementen angesammelt [1]. Für eine Kernwaffe werden unabhängigen Einschät-

zungen zufolge nur ein bis sechs Kilogramm Plutonium benötigt [2].

Weil die Behälter die Strahlung aus dem Inneren sehr gut abschirmen, lässt sich durch Messungen mit Gamma- oder Neutronendetektoren nicht jedes Entwenden von Brennelementen erfassen – insbesondere, wenn sie in der Mitte des Behälters platziert sind [3]. Daher setzt die IAEA bislang auf Videoüberwachung und Siegel, sucht aber nach alternativen Methoden für den Fall, dass diese Techniken versagen.

Eine Idee ist es, den Inhalt der Behälter durch Myonen-Radiographie zu verifizieren. Myonen entstehen in der Höhenstrahlung und können die Brennelementbehälter passieren. Als geladene Teilchen streuen sie aufgrund der Coulomb-Wechselwirkung vielfach an der Materie im Behälter. Die Wahrscheinlichkeitsverteilung des insgesamt resultierenden Streuwinkels lässt sich dabei durch eine Normalverteilung annähern, deren Varianz mit der Anzahl der vom Myon durchlaufenen Strahlungslängen ansteigt [4]. Die Strahlungslänge selbst verringert sich mit steigender Ordnungszahl des Materials. So streuen Myonen beispielsweise an Uranbrennstoff besonders stark.

US-amerikanische Forscher haben nun anhand von Simula-

KURZGEFASST

■ Und ewig schwingt die Saite...

Der Gruppe von Tobias Kippenberg an der EPFL ist es gelungen, eine Saite im Nanoformat zu erzeugen, die bei einer Frequenz von 1 MHz zehn Minuten lang schwingt. Das entspricht einer Gitarrensaitenlänge, die – einmal angeschlagen – einen Monat lang klingt. Möglich wird dies durch ein extremes Überdehnen des Materials: Die Saite ist nur 1 nm dick, dabei aber 1 cm lang. Damit könnte man die winzigen Kräfte von 10^{-18} N „hörbar“ machen, die auftreten, wenn sich Laserlicht in einem Wellenleiter bewegt – oder umgekehrt versuchen, im Lichtfeld die Vakuumfluktuationen der Saite zu „sehen“.
A. H. Ghadimi et al., *Science* (2018), DOI: 10.1126/science.aar6939

■ Frühreife Haufen

Massereiche Vorläufer von Galaxienhaufen sind nach neuesten Beobachtungen mit ALMA und APEX viel früher entstanden, als es Modelle bisher vorhersagten. Bereits weniger als 1,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall setzte die Haufenbildung ein. Indiz dafür sind zwei schwache Lichtflecken, die mit dem Weltraumteleskop Herschel bei einer Rotverschiebung von $z = 4,3$ entdeckt wurden. Sie entpuppten sich als Gruppen von 10 bzw. 14 massereichen, sternbildenden Galaxien und befinden sich in einem Umkreis von etwa 50 kpc, dem Abstand von Milchstraße und Magellanschen Wolken.
I. Oteo et al., *ApJ* **856**, 72 (2018) und T. B. Miller et al., *Nature* **556**, 469 (2018)

tionen und Messungen gezeigt, dass sie durch den Nachweis des mittleren Streuwinkels unterscheiden können, ob die Behälter teilweise oder vollständig mit Brennelementen gefüllt sind [5]. Sie verwenden dazu zwei auf gegenüberliegenden Seiten der Behälter platzierte Anordnungen von Driftröhren, welche die Myonenspuren messen. Daraus lässt sich die Verteilung der Streuwinkel als Funktion der Position im Behälter berechnen. Bei fehlenden Brennelementen ist der durchschnittliche Streuwinkel an der entsprechenden Position geringer als bei einem vorhandenen Brennelement (Abb. 1). Typische Messzeiten betragen in der vorliegenden Studie drei Monate, was sich durch eine optimierte Detektorkonfiguration reduzieren könnte. Der Nachweis, wie zuverlässig einzelne fehlende Brennelemente detektiert werden, steht aber noch aus.

Forensik mit Antineutrinos

Eine weitere Methode besteht darin, den Inhalt der Behälter anhand des Flusses von Antineutrinos zu bestimmen. Diese entstehen durch Betazerfälle der radioaktiven Nuklide und treten aus den Behältern aus. In Szintillationsdetektoren erzeugen sie ein charakteristisches Signal: Beim inversen Betazerfall entstehen aus einem Elektron-Antineutrino und einem Proton ein Neutron sowie ein Positron. Während das Positron seine Energie rasch im Detektor deponiert, erfolgt der Nachweis des Neutrons verzögert, weil dazu ein Moderationsprozess nötig ist.

Forscher der Universität Mainz und der Virginia Tech in den USA haben mit Simulationen gezeigt, dass der Nachweis von Antineutrinos es unter anderem erlaubt, das Abzweigen abgebrannter Brennelemente aus Zwischenlagern zu detektieren [6]. Eine Herausforderung ist hierbei, dass der inverse Betazerfall aufgrund seiner Massenbilanz erst ab Neutrinoenergien von etwa 1,8 MeV stattfindet. Gerade langlebige Nuklide emittieren jedoch häufig Antineutrinos mit geringerer Energie. Daher nutzen

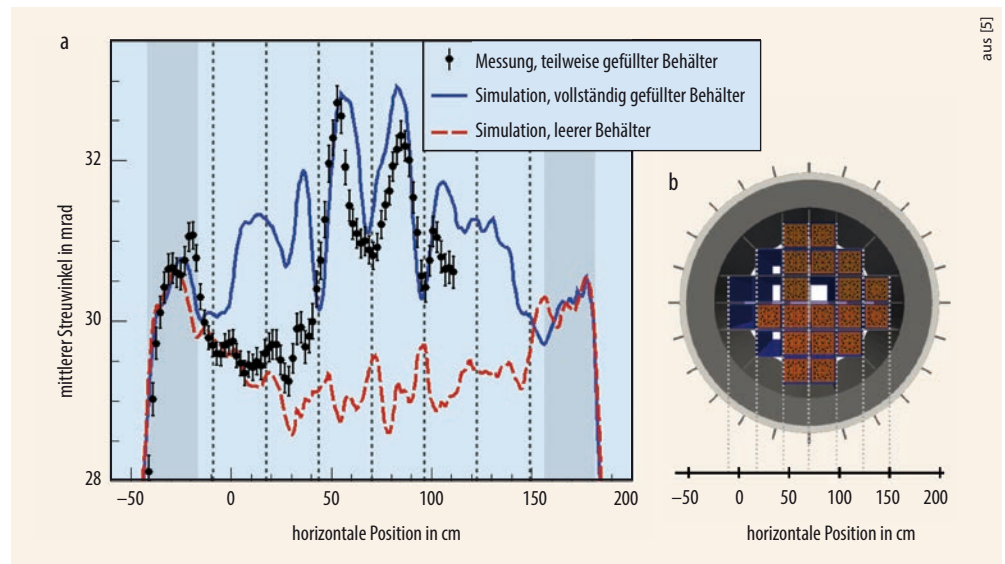


Abb. 1 Ein Vergleich von Simulationen vollständig gefüllter (a, blau) und leerer Behälter (rot) zeigt, dass der mittlere Streuwinkel der Myonen als Funktion der horizontalen Position im Behälter vom

Füllstand abhängt. Die Messdaten (Punkte) stammen von einem teilweise gefüllten Behälter (b). Die Werte liegen wie erwartet zwischen den Ergebnissen für die simulierten Konfigurationen.

die Autoren in den Simulationen längerlebige Nuklide wie ^{90}Sr : Mit einer Halbwertszeit von 29 Jahren zerfällt es in ein kurzlebige Nuklid (^{90}Y , $T_{1/2} = 64 \text{ h}$), das Antineutrinos mit Energien oberhalb der Detektionsschwelle emittiert.

Problematisch ist zudem der Hintergrund, der koinzidente Detektorsignale hervorruft, die als inverser Betazerfall interpretiert werden könnten. Dieser kann um Größenordnungen häufiger auftreten als die gesuchten Signale, lässt sich aber teilweise durch ortsaufgelöste Detektoren unterdrücken [7, 8]. Beispielsweise werden zufällig koinzidente Signale – im Gegensatz zu den korrelierten Signalen des inversen Betazerfalls – selten in örtlicher Nähe detektiert. Die Autoren der Studie nehmen an, dass zukünftig eine ausreichende Reduktion des Hintergrunds möglich ist, und berücksichtigen in ihren Simulationen nur Antineutrinos aus anderen Quellen als den Abfällen als Hintergrund.

Als Modell dient ein Zwischenlager mit zehn Jahre alten Abfällen, wobei in einem Fall drei Prozent der Abfälle fehlen. Das entspricht zwei halbleeren Behältern. Ein Detektor mit 20 t Szintillatormasse braucht in einer Entfernung von etwa 50 m eine Messzeit von ein bis zwei Jahren, um beide Fälle zu un-

terscheiden. Größere Detektoren, eine geringere Distanz oder jüngere Abfälle reduzieren die Messzeit. Mit den Neutrino-detektoren ergeben sich also noch längere Messzeiten als bei der Myonen-Radiographie. Allerdings können die Neutrino-detektoren in einiger Entfernung stehen und ein gesamtes Zwischenlager überwachen, während für die Myonen-Radiographie zwei Detektoren pro Behälter notwendig sind.

Um das Entwerden von Brennelementen zeitnah zu detektieren, gilt es in beiden Fällen, die Messzeiten zu reduzieren. Sofern dies gewährleistet ist, können beide neuen Verfahren dazu beitragen, eine Lücke bei der Verifikation von Zwischenlagern zu schließen.

Malte Götttsche

- [1] D. Albright et al., Institute for Science and International Security Report, 16. November 2015
- [2] H. M. Kristensen und R. S. Norris, Bull. At. Sci. **74**, 41 (2018)
- [3] P. Peerani und M. Galletta, Nucl. Eng. Des. **237**, 94 (2007)
- [4] C. Patrignani et. al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C **40**, 100001 (2016)
- [5] M. Durham et al., Phys. Rev. Applied **9**, 044013 (2018)
- [6] V. Brdar et al., Phys. Rev. Applied **8**, 054050 (2017)
- [7] Y. Abreu et al., JINST **12**, P04024 (2017)
- [8] N. S. Bowden et al., Applied antineutrino physics 2015 – conference summary, arXiv:1602.04759

Dr. Malte Götttsche, Graduiertenschule AICES und III. Physikalisches Institut B, RWTH Aachen, Schinkelstr. 2a, 52062 Aachen