

## Wankelmütige Kerne

Manche angeregten Kernzustände geben ihre Energie in Einfach- und Doppel-Gammazerfällen ab.

Im Jahr 1931 veröffentlichte die spätere Nobelpreisträgerin Maria Göppert-Mayer den Artikel „Über Elementarakte mit zwei Quantensprüngen“ in den *Annalen der Physik* [1]. Elementarakte bezeichnen die elektroschwachen Übergänge im Atomkern; ein Quantensprung beschreibt die Abstrahlung eines Photons oder eines Elektrons. In der auch als Göttinger Dissertation bekannten Arbeit untersuchte Maria Göppert-Mayer die gleichzeitige Abstrahlung zweier Photonen (Doppel-Gammazerfall), zweier Elektronen (Doppel-Betazerfall) oder eines Photons zusammen mit einem Elektron (radiativer Betazerfall). Die theoretischen Grundlagen entstanden unter Anleitung von Max Born [2].

Einfache Beta- und Gammazerfälle sind erlaubte Prozesse und lassen sich leicht untersuchen. Dagegen sind Doppel-Gammazerfall und Doppel-Betazerfall Prozesse höherer Ordnung und treten viel seltener auf. Sie zu beobachten ist nahezu unmöglich, wenn gleichzeitig ein erlaubter Prozess stattfindet. Durch neueste Detektoren und ausgeklügelte Abschirmung ist Darmstädter Kernphysikern um Norbert Pietralla und Thomas Aumann erstmals am Beispiel von  $^{137}\text{Ba}$  in einem Koinzidenzexperiment der Nachweis gelungen, dass Einfach- und Doppel-Gammazerfälle in Atomkernen koexistieren [3].

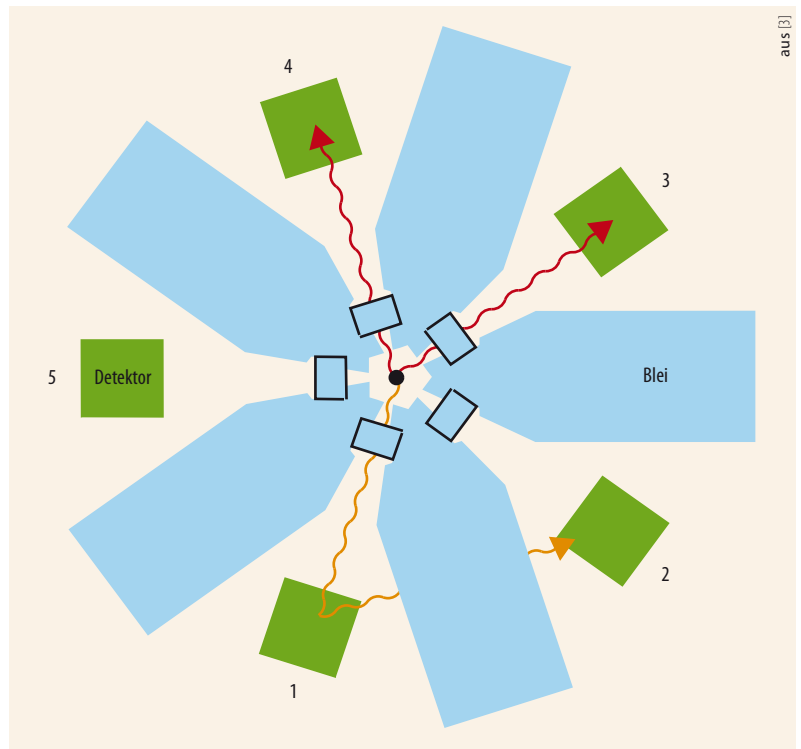


Abb. 1 Das Experiment zum Nachweis der Koexistenz von Einfach- und Doppel-Gammazerfall besteht aus fünf Szintillationsdetektoren (grün), die durch besonders geformte Bleiabsorber (hellblau) voneinander abgeschirmt sind. Beim

Doppel-Gammazerfall weist man damit zwei einzelne Gammaquanten nach (rot). Dazu müssen Einfach-Gammazerfälle (orange) aussortiert werden, die durch Mehrfachstreuung sehr ähnliche Signale im Aufbau erzeugen.

Im Gegensatz zum Atomkern ist in der Atomhülle die Parallelität der beiden Prozesse leichter nachzuweisen. Die relativ geringe Energie der atomaren Röntgenstrahlung wird in der Regel durch genau eine Wechselwirkung, den Photoeffekt, vollständig im Detektor abgegeben. Nukleare Gammastrahlung benötigt dagegen häufig mehrere Wechselwirkungen mittels des Compton-Effekts, um ihre Energie vollständig zu übertragen. Prinzipiell ist in einem Koinzidenzexperiment der doppelte Zerfall eindeutig nachgewiesen, wenn in zwei Detektoren Signale mit der passenden Summenenergie auftreten [4].

In einem Detektorarray können sich Vielfach-Wechselwirkungen allerdings auf mehrere Detektoren verteilen (Abb. 1). Ein Koinzidenzexperiment klärt daher nicht eindeutig, ob die gesamte Energie von einem oder zwei Gammaquanten stammt. Koexistieren Einfach- und

Doppel-Gammazerfall, so stammt die dominierende Komponente im Spektrum von Einfach-Gammazerfällen.

In Atomkernen mit doppelten Schalenabschlüssen gibt es angeregte Zustände, die ausschließlich durch Doppel-Gammaemission in den energetischen Grundzustand zerfallen. In diesem Fall ist die störende Hintergrundstrahlung des Einfach-Gammazerfalls nicht vorhanden, und der Doppel-Gammazerfall tritt in reiner Form auf. Daher gelang in früheren Experimenten der Nachweis des Doppel-Gammazerfalls z. B. in  $^{16}\text{O}$  und einigen anderen doppelt-magischen Atomkernen [5, 6].

Manche Kernzustände unterscheiden sich in Spin und Parität deutlich vom Grundzustand. Dann ist der Einfach-Gammazerfall unterdrückt, aber nicht verboten, weil er einem Übergang mit hoher Multipolarität entspricht. In diesem Fall

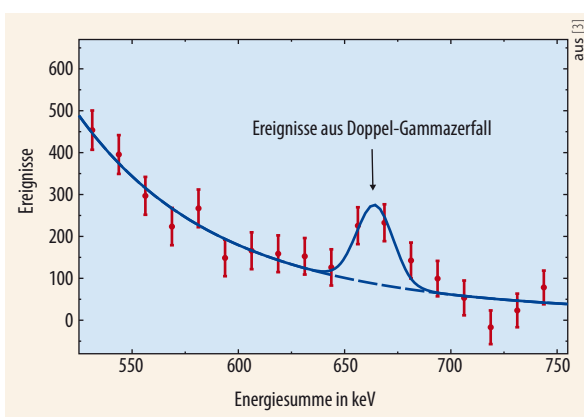


Abb. 2 Zwei Detektoren, die unter einem Winkel von  $144^\circ$  zueinander stehen, beobachten in Summe deutlich mehr Ereignisse bei 662 keV als im Untergrund (gestrichelt) zu erwarten sind.

könnte es möglich sein, erstmals gleichzeitig den Doppel-Gammazerfall zu beobachten. Theoretische Vorhersagen ergaben ein experimentell zugängliches Verhältnis der beiden Zerfälle in  $^{137}\text{Ba}$  [7, 8].

Das Isotop  $^{137}\text{Ba}$  entsteht in einem angeregten Zustand beim Betazerfall von  $^{137}\text{Cs}$ , einer vielfach genutzten Eichquelle für Gammadetektoren. Der angeregte Zustand in  $^{137}\text{Ba}$  mit einer Energie von 662 keV ist ein Isomierzustand. Er existiert wesentlich länger als ein typischer Kernzustand, weil ein Zerfall in den Grundzustand nur durch magnetische Hexadekapolstrahlung möglich ist. Dieser sog. M4-Übergang ist aufgrund des großen Drehimpulsübertrags stark unterdrückt.

Der Doppel-Gammazerfall ist ein quantenelektrodynamischer Prozess zweiter Ordnung, der über die virtuelle Anregung von weiteren Kernzuständen abläuft. Drehimpuls- und Energieübertrag verteilen sich gemäß den Erhaltungsgesetzen auf zwei Gammaquanten. Die Multipolarität der Übergänge kann dabei kleiner sein. Im Fall von  $^{137}\text{Ba}$  sind die Kombinationen M2-E2 oder E3-M1 möglich, je nachdem, welche Eigenschaften der virtuelle Zustand besitzt. Die Energie des Übergangs verteilt sich dabei beliebig auf die beiden emittierten Gammaquanten, sodass nur die in Summe zu messende Energie von 662 keV festgelegt ist.

Der Doppel-Gammazerfall ist in Konkurrenz zum Einfach-Gamma-

zerfall nur mit einem optimierten Verfahren nachweisbar, das den Spagat schafft, den Untergrund durch geeignete Absorber zu minimieren und die Wahrscheinlichkeit für den gleichzeitigen Nachweis zweier Gammaquanten zu maximieren. Detektoren aus dem anorganischen Szintillationsmaterial  $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$  sind sehr schnell und besitzen sowohl hohe Nachweiswahrscheinlichkeit als auch ausreichende Energieauflösung. Die schnelle Antwort des Szintillationsdetektors erlaubt ein kurzes Koinzidenzfenster, also eine kleine Zeitspanne, für die Signale als gleichzeitig gelten. Eine geschickte Abschirmung der Detektoren sorgt dafür, dass sich koinzidente Ereignisse aus Einfach- und Doppel-Gammazerfällen unterscheiden. Durch die Mehrfachstreuung vergeht mehr Zeit zwischen Ereignissen aus Einfach-Gammazerfällen, sodass sie nicht mehr in das Koinzidenzfenster fallen und aussortiert werden. Ereignisse mit einer Energie von 662 keV, die sich in zwei Detektoren aufsummieren, stammen folglich vom Doppel-Gammazerfall.

Nach 53 Tagen Messzeit fanden die Darmstädter Forscher in den Koinzidenzspektren, dass auf 487 805 Einfach-Gammazerfälle ein einziger Doppel-Gammazerfall kam (Abb. 2). Dieses Verhältnis stimmt sehr gut mit theoretischen Vorhersagen im sog. Quasiteilchen-Phononmodell überein [3]. Der Winkel, unter dem die beiden Gammaquanten emittiert werden,

hängt von den Eigenschaften des Kernzustands ab, der im Doppel-Gammazerfall als Zwischenzustand virtuell bevölkert wird. Durch den symmetrischen Aufbau mit fünf Detektoren ergeben sich Winkel von  $72^\circ$  und  $144^\circ$  zwischen zwei Detektoren. Auch hier bestätigte das Experiment die von der Theorie berechneten Eigenschaften.

Fast 85 Jahre nach der Vorhersage durch Maria Göppert-Mayer untermauert das aktuelle Experiment damit erstmals die Koexistenz von Einfach- und Doppel-Gammazerfall in Atomkernen. Die Kombination aus neuester Detektortechnik und einer zeitaufwändigen Analyse liefert die Antwort auf lange bestehende Fragen der Kernphysik, zu denen auch der viel diskutierte Doppel-Betazerfall gehört. Darüber hinaus werden aktuelle Fragestellungen aus der Theorie, wie z. B. nach den Eigenschaften des verallgemeinerten elektromagnetischen Kernmaterie-Polarisationstensors, auch experimentell zugänglich.

Horst Lenke

- [1] M. Göppert-Mayer, Ann. Phys. **401**, 203 (1931)
- [2] M. Göppert, Naturwissenschaften **17**, 932 (1929)
- [3] C. Walz et al., Nature **406**, 526 (2015)
- [4] P. H. Mokler und R. W. Dunford, Phys. Scr. **69**, C1 (2004)
- [5] B. A. Watson et al., Phys. Rev. Lett. **35**, 1333 (1975)
- [6] J. Kramp et al., Nucl. Phys. **A474**, 414 (1987)
- [7] W. Beusch, Helv. Phys. Acta **33**, 363 (1960)
- [8] V. K. Basenko et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. **56**, 94 (1992)

Prof. Dr. Horst Lenke, Institut für Theoretische Physik, Universität Gießen, 35392 Gießen

## KURZGEFASST

### ■ Zerplatze Ballons

Mithilfe von Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigten französische Forscher, dass Ballons auf zwei unterschiedliche Arten zerplatzen. Als Ursache machten sie den inneren Druck aus, der ein Maß für die Belastung der Gummihülle ist. Bei geringem Druck platzt der Ballon entlang eines einzigen Risses auf. Oberhalb eines Grenzwerts entstehen viele kleine Risse; der Ballon zerreißt in diesem Fall in unzählige Stücke. Die Ergebnisse gelten auch für andere Prozesse. Ein Beispiel ist die Frage, wie sich Risse in spröden Materialien bilden. S. Moulinet und M. Adda-Bedia, Phys. Rev. Lett. **115**, 184301 (2015)

### ■ Quantisiertes Hotel

Das Hilbert-Hotel ist ein mathematisches Gedankenspiel zu einem Gasthaus mit unendlich vielen Zimmern. Selbst voll belegt bietet es durch geschicktes Tauschen der Zimmer beliebig vielen weiteren Gästen Platz. Einem internationalen Team ist es gelungen, den Zimmertausch auf kontinuierliche quantenmechanische Systeme zu übertragen. In der Theorie vervielfacht ein deterministisches Protokoll die Eigenzustände des Systems und erzeugt freie Zustände. Experimentell verdreifachte das Team Eigenmoden eines Lasers. V. Potoček et al., Phys. Rev. Lett. **115**, 160505 (2015)

### ■ Frustrierte Magnete

Elektronen versuchen stets, ihre Spins antiparallel auszurichten, um ihre Energie zu minimieren. Bei drei Elektronen führt diese antiferromagnetische Kopplung unweigerlich zu Frustration, sodass der Grundzustand des Systems nicht eindeutig bestimmt ist. Mittels Kernspinresonanz an einem Einkristall des Minerals  $\text{ZnCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2$  fanden amerikanische Forscher heraus, dass dieser frustrierte Quantenmagnet einen Grundzustand besitzt, der sich wie eine Spinflüssigkeit verhält. Der Grundzustand entspricht also einer Überlagerung vieler Spin-Konfigurationen. M. Fu et al., Science **350**, 655 (2015)