

## Radioaktiver Fingerabdruck

Supernova-Explosionen verraten sich durch instabile Eisenisotope in der Tiefsee und auf dem Mond.

Unsere Sonne befindet sich im eher ruhigen Außenbereich der Milchstraße. In den „aktiven“ Regionen z. B. in ihrem Inneren finden dagegen häufig Sternexplosionen statt. In den letzten Jahrzehnten verschmolz das Wissen zur Sternentwicklung mit astronomischen Messungen der Sonnenumgebung zu einem überraschenden Bild: Die Sonne ist umgeben von interstellaren Hohlräumen und Gaswolken. Diese Dynamik passt nicht zum Bild einer ruhigen Umgebung. Theoretiker der TU Berlin kombinierten in Simulationsrechnungen nun astronomische Daten zu nahen Sterngruppen mit den Auswirkungen, welche die Sterne auf ihre Umgebung und die Eigenheiten des interstellaren Gases haben [1]. Sie zeigten, dass die Strukturen im interstellaren Gas der Sonnenumgebung durch Sternexplosionen zu erklären sind. So entstand vor etlichen Millionen Jahren die „lokale Blase“.

Die Sternexplosionen verändern aber nicht nur die Dichte des interstellaren Gases, sondern auch seine chemische Zusammensetzung. Kernfusion setzt im Innern des Sterns Energie frei, stabilisiert einen massereichen Stern über Millionen von Jahren gegen seine Schwerkraft und verhindert die sonst unvermeidliche Kontraktion. Am Ende der Entwicklungsgeschichte ist die

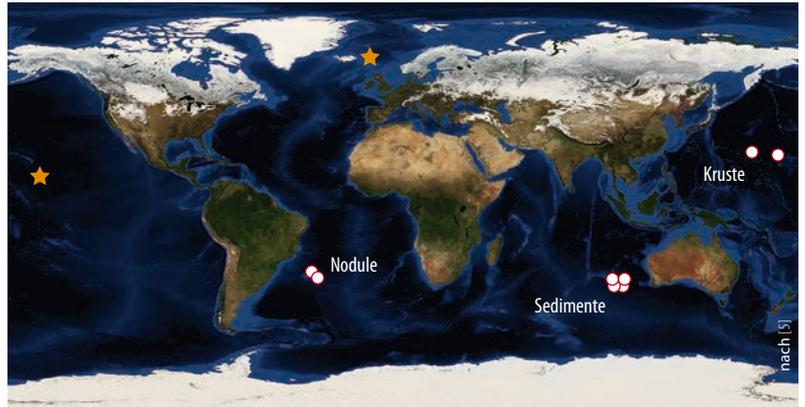


Abb. 1 Insgesamt 139 Proben aus Tiefseekruste, Sedimenten und Nodulen wurden auf ihren Gehalt an  $^{60}\text{Fe}$  unter-

sucht. Zusammen mit zwei älteren Messungen (Sterne) decken die Proben große Teile der Erdoberfläche ab.

Kernenergie aufgebraucht, und der Stern kollabiert unter seiner eigenen Schwerkraft. Daraus entwickelt sich eine Supernova-Explosion, welche die Gashülle des Sterns in den interstellaren Raum schleudert. Die Hülle ist mit Isotopen angereichert, die bei der Kernfusion im Innern entstanden. Manche Isotope sind instabil und zerfallen in stabile Atomkerne. Das Verhältnis der instabilen Isotope zu stabilen Kernen des gleichen Elements erlaubt die Datierung der Sternexplosion – ähnlich der Radiocarbon-Methode. Das Isotop  $^{60}\text{Fe}$  entsteht z. B. durch Kernreaktionen im Innern massiver Sterne in späten Entwicklungsphasen [2]: Die sukzessive Anlagerung von Neutronen erzeugt aus dem im Stern vorhandenen stabilen Eisen-

isotopen das neutronenreiche instabile Isotop  $^{60}\text{Fe}$ . Dank einer Halbwertszeit von 2,6 Millionen Jahren belegen die  $^{60}\text{Fe}$ -Isotope, einmal durch die Supernova-Explosion ins All geschleudert, die Sternexplosion noch nach einigen Millionen Jahren.

Mehrere aktuelle Artikel zum Nachweis von  $^{60}\text{Fe}$ -Isotopen unterstützen die Erkenntnisse zur Entstehung der „lokalen Blase“. Verschiedene Gruppen wiesen  $^{60}\text{Fe}$  in Gesteinsproben aus der Tiefsee, in Mondstaub und in kosmischer Strahlung in Erdnähe nach [3, 4, 5]. Alle Untersuchungen zeigen übereinstimmend, dass die  $^{60}\text{Fe}$ -Isotope in einem engen Zeitfenster entstanden sind: Massereiche Sterne wirken offensichtlich ganz in der Nähe unserer kosmischen Heimat. Zwei der Sternexplosionen, welche die „lokale Blase“ erzeugten, ereigneten sich wohl weniger als 300 Lichtjahre von der Erde entfernt. Die abgestoßenen Gashüllen mit frisch synthetisiertem Material überströmten vor etwa 1,5 bis 3 Millionen Jahren unser Sonnensystem.

Um die Sternexplosionen so genau zu datieren, ist es zunächst wichtig zu wissen, wieviel  $^{60}\text{Fe}$  im Sterninnern erzeugt und während der Supernova emittiert wird. Allerdings lassen sich die physikalischen Vorgänge im Innern von Sternen nur schwer genau genug modellieren und sind nur schwierig zu be-

### KURZGEFASST

#### Ursprung geklärt

Mit Hilfe von IceCube am Südpol wiesen Forscher ein Neutrino mit mehr als zwei PeV Energie nach. Mit 95 Prozent Wahrscheinlichkeit stammt es vom heftigsten Blazar, der je am Südhimmel beobachtet wurde. Blazare beschleunigen Protonen auf relativistische Energien, sodass Pionen entstehen, bei deren Zerfall auch Neutrinos frei werden. Ort und Zeit des Blazars stimmen gut mit den Werten überein, die aus den IceCube-Daten für das Neutrino folgen. Damit steht der extragalaktische Ursprung des Neutrinos wohl fest. M. Kadler et al., Nature Physics (2016), doi:10.1038/nphys3715

#### Kernuhr in Reichweite

Kernuhren könnten die Genauigkeit der besten Atomuhren um einen Faktor 10 verbessern. Voraussetzung dafür sind Zustände im Atomkern, die sich mit einem UV-Laser anregen lassen. Deutsche Forscher wiesen nun erstmals direkt ein Isomer des radioaktiven Isotops  $^{229}\text{Th}$  nach, dessen Anregungsenergie zwischen 6,3 und 18,3 eV beträgt. Seine lange Lebensdauer von einigen Minuten bis zu Stunden macht das Isomer zu einem vielversprechenden Kandidaten für die Entwicklung einer sehr genauen Kernuhr. L. van der Wense et al., Nature 533, 47 (2016)

obachten. Beispielsweise erlauben es erst die Neutrinomessungen der letzten Jahre, auf das Innere unserer Sonne zu schließen [6]. Innerer Aufbau und Energietransport in massereichen Sternen sind jedoch viel komplexer. Gleichzeitig entwickeln sich diese Sterne rascher als unsere Sonne und verändern die chemische Zusammensetzung des interstellaren Gases. Daher arbeiten Kernphysiker und Astrophysiker gemeinsam daran, diejenigen Prozesse zu verstehen, bei denen radioaktive Isotope erzeugt und im interstellaren Gas verteilt werden. Im Fall von  $^{60}\text{Fe}$  gilt es, die Produktion im Sterninnern genau genug zu bestimmen und den Transport in den interstellaren Raum nachzuvollziehen [2]. Messungen der Wirkungsquerschnitte von Kernreaktionen sind dazu ebenso nötig wie hydrodynamische Simulationen. Die sukzessive Anreicherung von  $^{60}\text{Fe}$  im interstellaren Medium beruht auf dem Kreislauf der Materie von Sternbildung über Supernova-Explosionen bis zum Einbau in nachfolgende Sterngenerationen. Aufwändige Simulationen sind nötig, um zu bestimmen, wie sich die chemische Zusammensetzung des interstellaren Gases entwickelt hat.

Vor fast zwanzig Jahren haben Forscher mit Teleskopen, die Gammastrahlung nachweisen, in unserer Galaxie das charakteristische Leuchten des radioaktiven Zerfalls von  $^{26}\text{Al}$  entdeckt, dessen Zerfallszeit eine Million Jahre beträgt [7]. Zehn Jahre darauf gelang auch der Nachweis des etwa siebenmal leuchtschwächeren  $^{60}\text{Fe}$  [8]. In unserer mehr als 11 Milliarden alten Galaxie werden auch heute noch regelmäßig neue Elemente erzeugt und freigesetzt. Eine Kartographierung belegte, dass  $^{26}\text{Al}$  großräumig verteilt entlang der gesamten galaktischen Scheibenebene entsteht, wobei die inneren Bereiche der Milchstraße mit ihrer größeren Anzahl massereicher Sterne besonders hervorstechen [7].

Eine amerikanische Gruppe hat seit 1997 die Zusammensetzung kosmischer Strahlung in Erdnähe mit dem Massenspektrometer CRIS auf dem ACE-Satelliten untersucht

[3]. Dabei wiesen sie insgesamt fünfzehn  $^{60}\text{Fe}$ -Isotope nach. Offenbar wurden sie interstellar auf die hohen Energien kosmischer Strahlung beschleunigt und erreichen uns nun mit dieser. Die Autoren diskutieren als wahrscheinlichen Ursprung das Superblasen-Modell: In einer Entfernung von weniger als 2500 Lichtjahren beschleunigten Supernova-Explosionen die kosmische Strahlung und radioaktive Isotope wie  $^{60}\text{Fe}$ .

### Sternenstaub auf der Erde

In Proben einer Tiefsee-Ozeankruste wies eine Gruppe Münchner und Wiener Physiker 2004 erstmals  $^{60}\text{Fe}$  nach [9]. Um die 69 Atomkerne zu extrahieren, verwendeten sie die hochsensitive und hochselektive beschleunigerbasierte Massenspektrometrie (AMS).

Das chemisch vorbehandelte und gereinigte Probenmaterial dient dabei als Teilchenquelle eines Beschleunigers. Der Ionenstrahl durchläuft nach der Beschleunigung verschiedene Filter, welche die Isotope nach ihrer Massen- und Ladungszahl selektieren. Die gesuchten Isotope treffen spezielle Detektoren am Ende der Strahlführung an einer festgelegten Stelle und werden so identifiziert und gezählt. Mit wenigen Milligramm Probenmaterial sind Isotopenverhältnisse wie  $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$  bis zu Grenzwerten von  $10^{-16}$  nachweisbar [10]. Das Verfahren ist umso präziser und empfindlicher, je höher die

Strahlenergie ist. Die Datierung der Probe erfolgt ebenfalls mit AMS: Die Anzahl radioaktiver Isotope, die kosmische Strahlung in der Erdatmosphäre mit bekannter Rate erzeugt (z. B.  $^{10}\text{Be}$  oder  $^{26}\text{Al}$ ), legt das Alter der Proben fest. Je nachdem, wie schnell die Krusten- oder Sedimentschichten wachsen, lässt sich der Zeitpunkt, zu dem die Probe entstanden ist, bis auf einige 100 000 Jahre bestimmen.

Weil die Zahl der nachgewiesenen  $^{60}\text{Fe}$ -Isotope sehr gering war (vgl.  $N_{\text{Avogadro}} = 6 \times 10^{23}$ ) und nur eine Probe vorlag, waren sich die Forscher des kosmischen Ursprungs nicht vollkommen sicher [9]. Zwei neue Veröffentlichungen bestätigen nun die Hypothese, dass die  $^{60}\text{Fe}$ -Isotope aus nahen Supernovae stammen. Eine umfangreiche Messreihe zeigt, dass sich  $^{60}\text{Fe}$  in Tiefseeproben von Pazifik sowie Indischem und Atlantischem Ozean findet (Abb. 1). Die beteiligten Wissenschaftler wiesen mittels AMS das radioaktive Isotop in langsam wachsenden Tiefseekrusten, in schneller wachsenden Nodulen<sup>§</sup> und Sedimenten nach [5]. Das Verhältnis von  $^{60}\text{Fe}/\text{Fe}$  in 139 Materialproben verschiedenen Alters zeigt, dass die Erde vor wenigen Millionen Jahren dem anhaltenden Einfall radioaktiven Materials ausgesetzt war (Abb. 2). Münchner Physiker untersuchten Materialproben aus dem Mondgestein des Apollo-Programms [4]. Sie fanden ebenfalls Anreicherungen von  $^{60}\text{Fe}$ .

Prof. Dr. Roland Diehl, Excellence Cluster „Universe“, TU München und Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, 85748 Garching bei München

§) Nodule sind kleine unregelmäßig geformte Klumpen mineralischen Materials, deren Zusammensetzung sich deutlich von den umgebenden Sedimenten unterscheidet.

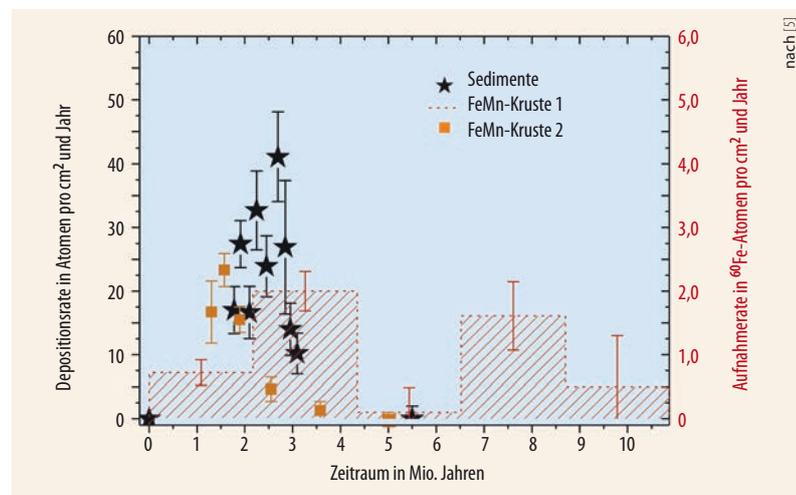


Abb. 2 Die Konzentration von  $^{60}\text{Fe}$  in Sedimenten (schwarz) und Tiefseekrusten (orange, rot) ist vor etwa 1,5 bis 3 Millio-

nen Jahren deutlich erhöht. Im Mittel finden sich in diesem Zeitraum  $6,7 \times 10^4$  Atome pro Gramm Probenmaterial.

Obwohl die Datierung durch das ständige „Umgraben“ der oberen Mondsichten durch Meteoriten schwierig ist, unterstützen die Messungen ein Szenario, in dem etwa  $10^8$   $^{60}\text{Fe}$ -Isotope pro  $\text{cm}^2$  die Erde und den Mond vor etwa 1,5 bis 3 Millionen Jahren erreichten. Diese Isotope stammen vermutlich nicht von einer einzigen Supernova-Explosion.

Die Untersuchung der kosmischen Strahlung und der Materialproben deutet darauf hin, dass Supernovae auch in unserer „lokalen Blase“ wirken. Dies steht im

Einklang mit astrophysikalischen Modellen zur Elementsynthese in Sternen und zur Entwicklung von Galaxien. Überraschend ist es dabei, dass Sternexplosionen auch die unmittelbare Sonnenumgebung in der aktuellen kosmischen Epoche prägen. Obwohl Astronomen heute die physikalischen Prozesse im Universum hauptsächlich mit den unterschiedlichsten, spezialisierten Teleskopen untersuchen, trägt hier die Analyse von Materialproben im Labor zu überraschenden astronomischen Erkenntnissen bei.

Roland Diehl

- [1] D. Breitschwerdt et al., Nature 532, 73 (2016)
- [2] M. Limongi und A. Chieffi, Astron. Astroph. 647, 483 (2006)
- [3] W. R. Binns et al., Science 10.1126/science.aad6004 (2016)
- [4] L. Fimiani et al., Phys. Rev. Lett. 116, 151104 (2016)
- [5] A. Wallner et al., Nature 532, 69 (2016)
- [6] W. Haxton et al., Ann. Rev. Astron. Astroph. 51, 21 (2013)
- [7] N. Prantzos und R. Diehl, Phys. Rep. 267, 1 (1996)
- [8] W. Wang et al., Astron. Astroph. 469, 1005 (2007)
- [9] K. Knie et al., Phys. Rev. Lett. 93, 171103 (2004)
- [10] H.-A. Synal, Int. J. Mass Spectrom. 349-350, 192 (2013)

## Tsunami-Monsterwellen fast aus dem Nichts

Kleinste Unebenheiten des Ozeanbodens beeinflussen Ort und Amplitude extremer Wellen.

#) Inzwischen gibt es mehrere beeindruckende Videos dieser Extremereignisse, die im Englischen auch freak oder rogue waves heißen.

Seit Jahrhunderten existieren Berichte von Seeleuten über Monsterwellen, die urplötzlich auftauchen und in Sekundenschnelle über Schiffe hinwegrollen. Jeder hielt die Geschichten für übertrieben, bis ein Ereignis am Neujahrstag 1995 zum Umdenken führte. Am Nachmittag herrschte auf der Draupner-Ölplattform in der Nordsee raues Wetter. Die Unterschiede von etwa acht Metern zwischen Wellenberg und -tal waren nicht ungewöhnlich für die Jahreszeit, als sich plötzlich eine Welle mit 26 Metern Höhe auftürmte, die nach zehn Sekunden wieder verschwand. Da der Wellengang routinemäßig registriert wurde, war die Existenz von Monsterwellen zum ersten Mal unzweifelhaft nachgewiesen.<sup>#)</sup>

Die großen Amplituden stellen Extremwerte der statistischen Verteilung dar. Vor mehr als hundert Jahren nahm Lord Rayleigh an, dass sich an jedem Ort die Amplitude  $h$  durch eine Überlagerung von vielen unabhängigen Komponenten der Form  $h_n(t) = a_n \cos(\omega_n t) + b_n \sin(\omega_n t)$  beschreiben lässt. Sind  $a_n$  und  $b_n$  zufällig verteilt und unkorreliert, folgt aus dem zentralen Grenzwertsatz für die Amplituden eine Rayleigh-Verteilung und damit für die Verteilung der Intensitäten  $I = h^2$  eine abfallende Exponentialfunktion. Die Rayleigh-Verteilung

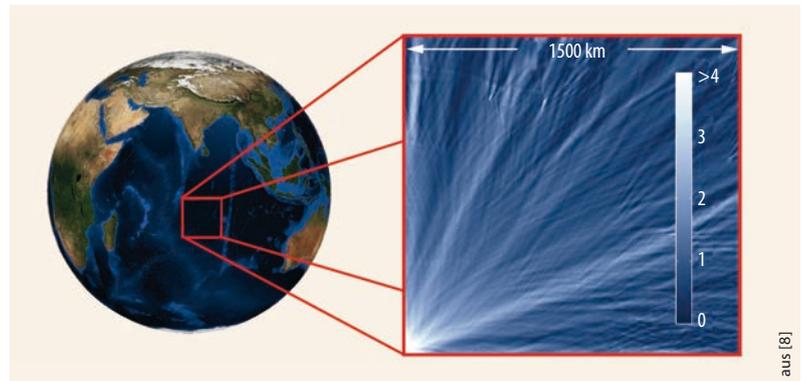


Abb. 1 Selbst die geringen Tiefenunterschiede in der simulierten Region des Indischen Ozeans erzeugen Kaustiken mit großen Überhöhungen bzw. Tsunamiwellen.

unterschätzt das Auftreten extremer Amplituden um mehrere Größenordnungen. Nichtlineare Effekte sind eine mögliche Erklärung. Bereits in den 1980er-Jahren entwickelten russische Physiker nichtlineare Wellengleichungen, die geschlossene analytische Lösungen zuließen. Sie können die extremen Amplituden erklären. Eine der Lösungen, der „Peregrine breather“, entsteht und verschwindet scheinbar im Nichts. Hamburger Physiker realisierten dieses Phänomen 2011 experimentell [1].

Es besteht kein Zweifel, dass nichtlineare Effekte für die Wellenausbreitung wichtig sind. Aber auch lineare Theorien können zu Wellen mit extremen Amplituden führen: Wenn die Wellenlängen groß gegenüber der Wassertiefe sind und

die Wellen damit die Unebenheiten am Meeresgrund spüren. Das ist für Tsunamiwellen der Fall: Sie besitzen typische Wellenlängen von einigen hundert Kilometern und sind damit groß gegenüber den Ozeantiefen von einigen Kilometern. Für sie erscheint der Ozean damit als Flachwasser, sodass ihre Geschwindigkeit  $c$  von der Wassertiefe  $H$  gemäß  $c = \sqrt{gH}$  abhängt, wobei  $g$  die Fallbeschleunigung ist. Jede Änderung der Wassertiefe beeinflusst also die Propagation der Wellen an der Oberfläche.

Eine linearisierte Wellengleichung beschreibt Wellen in flachem Wasser:

$$\partial_t^2 h(\mathbf{x}, t) = c_0^2 [1 - \beta(\mathbf{x})] \Delta h(\mathbf{x}, t) \quad (1)$$

mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit  $c_0 = \sqrt{gH_0}$  und dem skalierten

Tiefenprofil  $\beta(x) = 1 + B(x)/H_0$ . Dabei ist  $B(x) < 0$  die Wassertiefe am jeweiligen Ort und  $H_0 = \langle B(x) \rangle$  die mittlere Tiefe. An der Oberfläche eines Ozeans mit örtlich variabler Tiefe deformieren die Bodenunebenheiten eine ebene Wellenfront zunächst nur wenig, dann immer mehr, bis sich schließlich Faltungen herausbilden. Eine Projektion auf die Ausbreitungsrichtung führt dazu, dass die Umkehrpunkte in den Faltungen Kaustiken hervorrufen. Diese aus der Optik bekannten Brennpunkte finden sich hier wieder, weil Gl. (1) auch die Ausbreitung von Licht in einem Medium mit örtlich veränderlichem Brechungsindex  $n(x) = [1 - \beta(x)]^{-1}$  beschreibt.

Dennoch wurden Kaustiken lange Zeit nicht in Zusammenhang mit Monsterwellen gebracht. Erst die Untersuchungen an einem Elektronengas, das zweidimensional in einer Halbleiterschichtstruktur eingeschlossen war, führten zum Umdenken [2]. Nach Durchgang der Elektronen durch eine Blende bildeten sich auffällige, verästelte Transportpfade. Mikrowellenexperimente in einer Anordnung mit zufällig verteilten Streuern [3] bestätigten die Vermutung, dass es sich dabei um Kaustiken handelte [4].

Heute ist bekannt, dass Fluktuationen im Bodenprofil des Ozeans zu Fokussierung führen [5, 6]. Eine Simulation der National Oceanic and Atmospheric Administration einer Tsunami-Welle nach einem Erdbeben in Japan weist vielfach verästelte Kaustiken über den ganzen Pazifik bis hin zur amerikanischen Küste auf [7]. Allerdings besitzt der Pazifikgrund ein extremes Tiefenprofil, das Tiefseegräben mit über zehn Kilometern Tiefe ebenso einschließt wie zahlreiche Inselgruppen. Aber auch äußerst geringe Variationen reichen aus, um Tsunamiwellen zu erzeugen, wie eine Göttinger Arbeitsgruppe jetzt zeigen konnte [8]. Sie simulierte die Ausbreitung von Tsunamiwellen in einer Gegend im Indischen Ozean, in der bei einer mittleren Tiefe von vier Kilometern die Variationen des Grundes mit einer Varianz von 6,9 Prozent besonders klein sind.

Auch hier ergibt sich das für Kaustiken charakteristische Verzweigungsmuster: Die Intensität in den Zweigen ist bis zu einem Faktor 5 überhöht (Abb. 1).

In der Simulation erzeugt eine Punktquelle die Wellen, deren Wellenlänge von zwanzig Kilometern für Tsunamis eher klein ist. Das Tiefenprofil entstand aus Daten, die überwiegend aus Echolotmessungen von Schiffen und Gravitationsanomalie-Messungen durch Satelliten stammen. Die Unsicherheit der Tiefenvariationen lag bei einigen Prozent. Um deren Einfluss auf das Ergebnis abzuschätzen, addierten die Forscher zum Tiefenprofil Fluktuationen mit einer Varianz von vier Prozent. Diese kleinen Veränderungen ergaben bereits völlig andere Verzweigungsmuster. Die exakte Lage der Kaustiken vorherzusagen, ist mit den derzeitigen Unsicherheiten der Tiefenprofile nicht möglich.

Allerdings lässt sich der Abstand abschätzen, in dem die Kaustiken ihre größte Wirksamkeit entfalten. Erste Kaustiken treten nicht vor Durchlaufen einer bestimmten Distanz auf. Zur quantitativen Beschreibung eignet sich der Szintillationsindex, für ebene Wellen gegeben durch

$$S(x) = \frac{\langle I^2 \rangle_y}{\langle I \rangle_y^2} - 1, \quad (2)$$

mit der Fortschrittsrichtung  $x$ . Die Intensität wird über die dazu senkrechte Richtung  $y$  gemittelt. Für radiale Wellen ist  $x$  durch den Abstand  $r$  von der Quelle zu ersetzen und über alle Richtungen zu mitteln. Läuft eine ebene Welle über ein simuliertes Tiefenprofil, zeigen sich im Abstand zwischen 3000 und 6000 km besonders hohe Intensitäten, und der Szintillationsindex besitzt ein ausgeprägtes Maximum (Abb. 2).

Die Dynamik der Tsunamiwellen beschreibt die Göttinger Gruppe mit einem stochastischen Modell und findet ein Skalenverhalten für den mittleren Abstand  $l$ , den eine Trajektorie voranschreiten muss, bis sie auf die erste Kaustik trifft:

$$l = \alpha l_c \langle \beta^2 \rangle^{-1/3}. \quad (3)$$

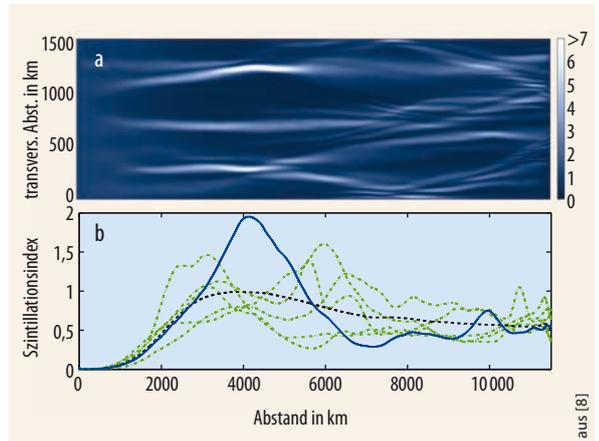


Abb. 2 Auch ebene Wellen zeigen Kaustiken über einem Tiefenprofil mit geringen Variationen (a). Der Szintillationsindex dieser Welle (blau) hat ein ausgeprägtes Maximum (b), das auch bei der Mittelung (schwarz) über andere Realisierungen (grün) erhalten ist.

Dabei ist  $l_c$  die Korrelationslänge für das Tiefenprofil und  $\langle \beta^2 \rangle$  die Varianz des relativen Tiefenprofils. Die Form der Quelle bestimmt den Parameter  $\alpha$ . Der mittlere Abstand des Maximums des Szintillationsindex folgt diesem Skalenverhalten, das experimentell bereits durch Transportuntersuchungen von Mikrowellen belegt ist [9].

Die Göttinger Arbeitsgruppe zeigte, dass relative Variationen im Tiefenprofil von einigen Prozent ausreichen, um Kaustiken mit großen Überhöhungen zu generieren. Der mittlere Abstand, in dem die Kaustiken ihre volle Kraft entwickeln, ist groß genug, damit sich für typische Tsunamis Vorwarnzeiten von einigen Stunden ergeben. Um vorherzusagen, wo genau sich die hohen Intensitäten entwickeln, sind präzisere Daten zu den Tiefenprofilen der Ozeane nötig.

Hans-Jürgen Stöckmann

- [1] A. Chabchoub et al., Phys. Rev. Lett. **106**, 204502 (2011)
- [2] M. A. Topinka et al., Nature **410**, 183 (2001)
- [3] R. Höhmann et al., Phys. Rev. Lett. **104**, 093901 (2010)
- [4] L. Kaplan, Phys. Rev. Lett. **89**, 184103 (2002)
- [5] M. V. Berry, Proc. R. Soc. Lond. A **463**, 3055 (2007)
- [6] E. J. Heller, L. Kaplan und A. Dahlen, J. Geophys. Res. **113**, C09023 (2008)
- [7] <http://1.usa.gov/IUV618g>
- [8] H. Delgado et al., Nature Physics **12**, 259 (2016)
- [9] S. Barkhofen et al., Phys. Rev. Lett. **110**, 164102 (2013)

Prof. Dr. Hans-Jürgen Stöckmann, AG Quantenchaos, Philipps-Universität Marburg, Renthof 5, 35032 Marburg

## ■ Geschickt geschaltet

An einem Doppelspalt aus zwei Atomen lässt sich durch Variation ihres Abstands zwischen klassischer und quantenmechanischer Interferenz umschalten.

Prof. Dr. Giovanna Morigi, Universität des Saarlandes, Theoretische Physik, Campus E26, 66041 Saarbrücken

In der klassischen Optik illustriert das Youngsche Doppelspaltexperiment in herausragender Weise das Konzept der Interferenz von Wellen. Zudem ist es ein Musterbeispiel für die Wellennatur von Photonen und Materie in der Quantenmechanik. Wird der Spalt selbst jedoch von Quantenobjekten gebildet, so erwarten uns unerwartete Effekte, die aus Interferenzprozessen am Doppelspalt entstehen und die das Interferenzmuster des gestreuten Lichtes drastisch ändern.

Bereits 1993 gelang ein Experiment, in dem zwei gefangene und mit Laserlicht bestrahlte Ionen den Doppelspalt bildeten [1]. Hierbei traten Interferenzstreifen auf, welche die Analogie zwischen zwei lichtstreuenden Ionen und den zwei Spalten des Youngschen Aufbaus bestätigten. In diesen frühen Arbeiten reduzierte allerdings unter anderem inelastisch gestreutes Licht den Kontrast. Dieser Anteil des Lichts lässt sich nicht durch klassische oszillierende Dipole beschreiben und resultiert aus der intrinsisch quantenmechanischen Natur der elektronischen Orbitale.

Ogleich inelastische Streuung üblicherweise die Sichtbarkeit von Interferenzstreifen reduziert, kann sie durchaus Interferenzeffekte quantenmechanischer Natur verstärken, wie sie beispielsweise in Messungen der Intensitätskorrelation nachweisbar sind [2, 3]. In einer kürzlich erschienenen Veröffentlichung

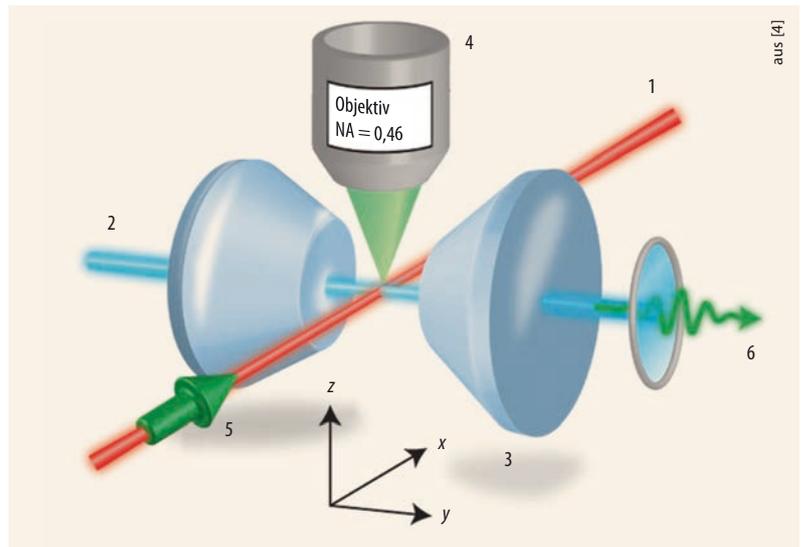


Abb. 1 Ein zweidimensionales optisches Gitter entsteht durch zurückreflektierte rot- (1) und blauverschobene (2) Laserstrahlen in einem optischen Resonator hoher Güte (3). Mittels eines Mikroskopobjektivs (4) lassen sich die Atome des

Gitters abbilden und deterministisch entfernen. Ein Atompaar wird durch einen Laser (5) angeregt. Die Transmission wird als Funktion der Atompositionen durch den Auskoppelspiegel (6) gemessen.

haben Wissenschaftler um Gerhard Rempe am MPI für Quantenoptik (MPQ) ein Experiment beschrieben, in dem sie das Zusammenspiel von klassischer und Quanteninterferenz beobachten und kontrollieren konnten [4]. Die klassische Interferenz geht dabei auf den kohärenten Anteil des Lichts zurück, die Quanteninterferenz resultiert aus der inelastischen Komponente. In dem Experiment erzeugten die Wissenschaftler ein optisches Gitter und füllten es mit Rubidiumatomen, die sie anschließend nach und nach wieder „aussortierten“, bis nur zwei übrig blieben. Diese zwei Atome platzierten sie

inmitten zweier hochreflektierender Spiegel, die einen halben Millimeter voneinander entfernt waren (Abb. 1). Die Atome waren dabei auf einen Bruchteil der Laserwellenlänge lokalisiert, und zwar mit einer Abweichung von nur rund 25 nm.

Ein Laser mit einer Wellenlänge von 780 nm regte die Atome transversal an. Der Resonator begünstigt die Lichtemission entlang der Spiegelachse und erhöht die Wechselwirkung zwischen dem gestreuten Licht und den Atomen, da er die emittierten Photonen einfängt. Der relative Abstand zwischen den Atomen innerhalb des Resonators bestimmt

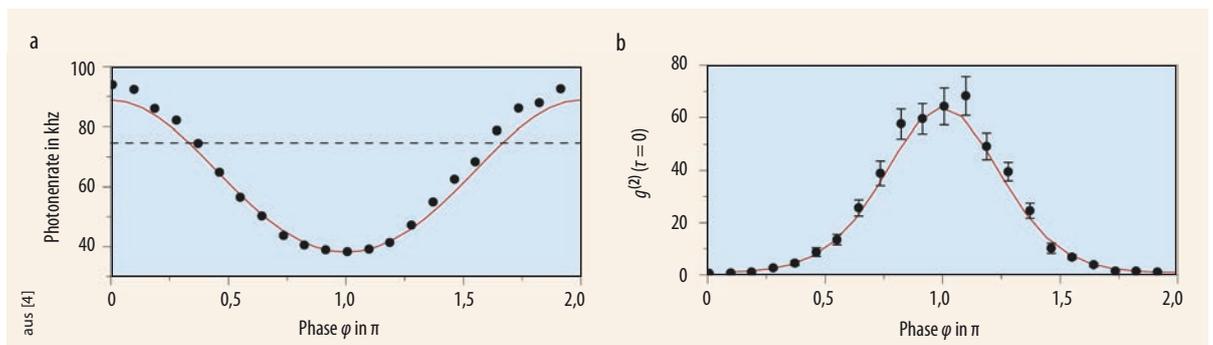


Abb. 2 Für resonante Anregung zeigt die Rate emittierter Photonen eine sinusförmige Modulation als Funktion der Phase  $\varphi$  (a). Der Wert der Korrelationsfunktion zweiter Ordnung

(Intensitätskorrelationsfunktion)  $g^{(2)}(\tau=0)$  zeigt einen Übergang von einer nahezu Poisson-förmigen Emission zu einer stark super-Poisson-förmigen.

die relative Phase der von den Atomen gestreuten Felder und damit auch die Intensität des Lichts, das aus dem Resonator austritt. Ähnlich wie beim Doppelspaltexperiment hängt die Intensität von der Distanz zwischen den Atomen ab.

Einer der überraschendsten Aspekte des Experiments ist, dass das gestreute Licht nur geringfügig von dem Abstand zwischen den Atomen abhängt – im Gegensatz zu dem Verhalten, das im freien Raum zu beobachten ist. Wenn der Abstand zwischen den Atomen gerade so groß eingestellt ist, dass die Streuung in den Resonator konstruktiv (also in Phase) ist, erfüllt dies die Bedingung für einen hellen Interferenzstreifen im Youngschen Experiment. In diesem Fall beobachteten die Wissenschaftler am MPQ allerdings eine viel geringere Intensität des emittierten Lichts, als im freien Raum zu erwarten wäre. Wählten sie den Abstand dagegen so, dass die Lichtemission in den Resonator einem dunklen Interferenzstreifen entsprechend destruktiv (also außer Phase) war, war die Intensität viel höher als im freien Raum (Abb. 2a).

Die Erklärung für diesen Unterschied beruht auf sehr unterschiedlichen Dynamiken: Die Verringerung der Intensität, wenn die Atome in Phase in die Resonatormode emittieren, beruht auf der Rückkopplung des Resonators. Das im Resonator gespeicherte Licht hat eine wohldefinierte Phasenbeziehung mit dem einfallenden Licht und neigt dazu, am Ort der Rubidiumatome destruktiv zu interferieren. Obwohl sowohl der Laser als auch das Feld des Resonators die Atome bestrahlen, ist es daher sprichwörtlich so, als würden sie im Dunkeln zurückgelassen. Paradoxiertweise kann dieser Effekt nur dann auftreten, wenn die von den Atomen ausgesandte Strahlung konstruktiv interferiert. Dieses Phänomen resultiert aus der elastischen Komponente des emittierten Lichts und wurde in [5, 6] vorhergesagt und in [7] erstmals nachgewiesen. Die Wissenschaftler am MPQ bestätigten nun durch die Messung der Intensitätskorrelation

die klassische Natur des Phänomens.

Des Weiteren konnten sie die Intensitätskorrelation des gestreuten Lichts für andere Abstände zwischen den Atomen messen (Abb. 2b) [4]. Die relativ hohe Intensität, wenn die Atome außer Phase emittierten, beruht auf einem quantenmechanischen Effekt, der kein klassisches Analogon besitzt. Denn nur der inelastisch gestreute Anteil des Lichts wird in den Resonator emittiert. Die Phase, die andernfalls die klassische Interferenz bestimmt, steuert hier die elektronische Anregung der beiden Atome. Sie regt diejenigen elektronischen Zustände an, die in den Resonator infolge einer Zwei-Photonen-Kaskadenemission streuen können. Beim Durchstimmen des Abstands zwischen den Atomen wechseln sich klassische und quantenmechanische Interferenz ab, was sich im Verhalten der Intensitätskorrelation niederschlägt.

Diese experimentellen Resultate erweitern unser Verständnis der nichtlinearen Eigenschaften von einzelnen Atomen in einem Resonator und legen den Grundstein für eine mikroskopische Umsetzung von nichtlinearen optischen Bauteilen mit quantenmechanischen Eigenschaften [8]. Sie ebnet damit den Weg zu einer kontrollierten Bildung von Quantenkorrelationen zwischen Atomen in optischen Resonatoren für den Einsatz in der Quanteninformation.

**Giovanna Morigi**

- [1] U. Eichmann, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, J. M. Gilligan, W. M. Itano, D. J. Wineland und M. G. Raizen et al., *Phys. Rev. Lett.* **70**, 2359 (1993)
- [2] W. Vogel und D.-G. Welsch, *Phys. Rev. Lett.* **54**, 1802 (1985)
- [3] H. Habibian, S. Zippilli und G. Morigi, *Phys. Rev. A* **84**, 033829 (2011)
- [4] A. Neuzner, M. Körber, O. Morin, S. Ritter und G. Rempe, *Nature Photon.* **10**, 303 (2016)
- [5] P. M. Alsing, D. A. Cardimona und H. J. Carmichael, *Phys. Rev. A* **45**, 1793 (1992)
- [6] S. Zippilli, G. Morigi und H. Ritsch, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 123002 (2004)
- [7] R. Reimann, W. Alt, T. Kampschulte, T. Macha, L. Ratschbacher, N. Thau, S. Yoon und D. Meschede, *Phys. Rev. Lett.* **114**, 023601 (2015)
- [8] S. Fernández-Vidal, S. Zippilli und G. Morigi, *Phys. Rev. A* **76**, 053829 (2007)