

Umstritten ist ein möglicher Einfluss der Sonnenflares, welche die Strahlungsintensität der Sonne modulieren, auf das Klima der Erde. Eine Multiskalen-Kreuzkorrelationsanalyse³⁾ offenbarte auf langen Zeitskalen einen analogen Verlauf von rekonstruierten 150jährigen Temperaturreihen einerseits und aus historischen Katalogen der Sonnenfleckenanzahl rekonstruierter Sonnenaktivität andererseits; es zeigten sich auch Ähnlichkeiten in den Wartezeitverteilungen [5]. Die Folgerung, dass das Erdklima stark von der Sonnenaktivität beeinflusst ist, passt aber nicht zu Klimamodel-Simulationen mit selektiver Berücksichtigung unterschiedlicher externer Einflüsse. Diese ergaben, dass die Sonnenaktivität für eine Reproduktion der in langjährigen Temperaturmessreihen gefundenen universellen Langzeitkorrelationen (siehe z. B. [6]) kaum wesentlich ist, sondern eher die Vulkanaktivität [7]. Unumstritten ist hingegen ein störender Einfluss der Sonnenflares auf Radiosignale, Satelliten und Stromnetze auf der Erde – daher ist ihre Vorhersage (wie bei Erdbeben) ein wichtiges Ziel.

A priori ist klar, dass ein Vergleich einzelner statistischer Eigenschaften von Zeitreihen keine endgültigen Folgerungen über die Universalität der Prozesse ermöglicht. Dennoch regen gleiche statistische Eigenschaften dazu an, über ähnliche Erklärungsmuster und Mechanismen nachzudenken.⁴⁾ Sie sind damit für die Forschung interessant und konstruktiv und könnten in dem hier betrachteten Fall die Vorhersage von Erdbeben und Sonnenflares gleichermaßen voranbringen.

JAN W. KANTELHARDT

- [1] L. de Arcangelis et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 051102 (2006)
- [2] A. Corral, Phys. Rev. Lett. **92**, 108501 (2004)
- [3] A. Bunde et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 048701 (2005)
- [4] K. Yamasaki et al., PNAS **102**, 9424 (2005)
- [5] N. Scafetta et al., Phys. Rev. E **69**, 026303 (2004)
- [6] A. Bunde und J. W. Kantelhardt, Phys. Bl. **57**, 49 (2001)
- [7] D. Vyushin et al., Geophys. Res. Lett. **31**, L10206 (2004)
- [8] E. Lippiello, L. de Arcangelis und C. Godano, Europhys. Lett. **72**, 678 (2005)

Verschränkung auf Knopfdruck

Halbleiter-Quantenpunkte sind vielversprechende Quellen für verschränkte Photonen.

Verschränkte Photonen sind ein unerlässliches Werkzeug für grundlegende Experimente in der Quantenoptik. Mit ihrer Hilfe ist es beispielsweise gelungen, die Verletzung der Bellschen Ungleichungen, Teleportation und Quantenkryptographie zu demonstrieren [1]. Zurzeit basieren Quellen zur Erzeugung von verschränkten Photonen fast ausschließlich auf der sogenannten *down*-Konversion, einem nichtlinearen Effekt, der in optischen Kristallen auftritt und bei dem aus einem Photon zwei Photonen niedriger Energie erzeugt werden [2]. In der Arbeitsgruppe von Andrew Shields am Toshiba Lab Europe (Cambridge) ist es jetzt gelungen, eine neuartige Quelle für verschränkte Photonen zu realisieren, die auf einer Halbleiter-Nanostruktur basiert [3]. Im Unterschied zur zufälligen Paarerzeugung in den *down*-Konversions-Quellen findet hier die Erzeugung „on demand“ statt, d. h. zu einem bestimmten Zeitpunkt lässt sich genau ein einzelnes verschränktes Photonenpaar erzeugen.

Andrew Shields und Mitarbeiter nutzten einen Kaskadenzerfall in einem einzelnen InAs-Quantenpunkt oder „künstlichen Atom“ [4]. Interessanterweise läuft dieser Prozess ganz ähnlich in „echten“ Atomen ab, und wurde zum Beispiel schon im berühmten Experiment von Alain Aspect [5] genutzt, um die Verletzung der Bellschen Ungleichung mit Hilfe von verschränkten Photonen zu zeigen. Bei der neuen Quelle wird zunächst in einem Quantenpunkt durch gepulste optische Anregung ein sog. Biexziton-Zustand (XX) erzeugt,

der aus zwei gebundenen Elektron-Loch-Paaren besteht (Abb. 1). Die Paare können dann in einem Kaskadenzerfall strahlend rekombinieren, zunächst in den Exziton-Zustand (ein Elektron-Loch-Paar, X) und dann in den Grundzustand („leerer“ Quantenpunkt). In einem idealen rotationssymmetrischen Quantenpunkt wird dabei entweder zunächst ein rechts- und dann ein links-zirkular polarisiertes Photon emittiert oder umgekehrt (Abb. 1b). Diese beiden Zerfallspfade sind prinzipiell ununterscheidbar, sodass der resultierende Zustand ein polarisationsverschränkter Zustand der Form $|\psi\rangle = (|\sigma^+\rangle|\sigma^-\rangle + |\sigma^-\rangle|\sigma^+\rangle)/\sqrt{2}$

ist. Da ganz gezielt nur ein einzelner Quantenpunkt angeregt wird, entsteht natürlich auch nur ein einziges Photonenpaar, das dann zeitlich sehr genau in einem Zeitfenster von etwa einer Nanosekunde (entsprechend der natürlichen Lebensdauer der Quantenpunktanregung) lokalisiert ist.

Problematisch war an dieser Methode jedoch bisher, dass Quantenpunkte als künstlich hergestellte Strukturen Asymmetrien aufweisen [6]. Diese können durch die Anisotropie der Kristallstruktur oder der internen Felder im Halbleitermaterial bedingt sein. Die Asymmetrien führen über die Elektron-Loch-Austauschwechselwirkung zu einer Aufspaltung des im idealen Fall entarteten Exziton-Zustandes (Abb. 1a). Da die beiden Zerfallskanäle dann unterscheidbar sind, werden nicht-verschränkte Photonenpaare mit linearer Polarisation emittiert, deren Polarisationsachse i. A. mit einer charakteristischen Kristallachse zusammenfällt [7].

Dem Forscherteam ist es nun gelungen, dieses Problem mit gleich zwei Ansätzen zu lösen. Zunächst führten bessere Wachstumsbedingungen dazu, dass die Probe schlichtweg eine größere Anzahl

3) Die Zeitreihen wurden mit Wavelet-Analyse in langsame und schnelle Fluktuationen zerlegt und für die einzelnen Komponenten dann Kreuzkorrelationskoeffizienten bestimmt.

4) Zu einem Modellierungsansatz für Erdbeben unter Berücksichtigung von Langzeitkorrelationen im Sinne einer erweiterten selbstorganisierten Kritikalität siehe [8].

Juniorprof. Priv.-Doz. Dr. Jan W. Kantelhardt, Zentrum für Computational Nanoscience, Fachbereich Physik, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, von-Seckendorff-Platz 1, 06099 Halle (Saale)

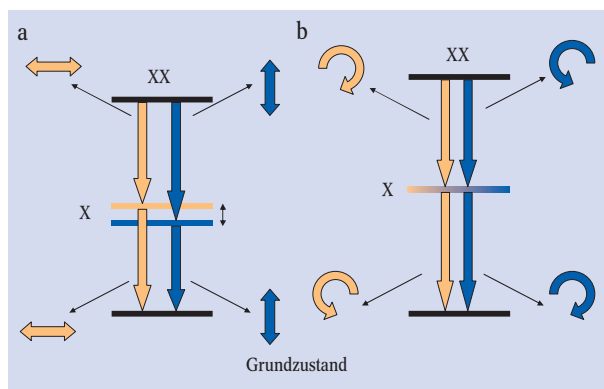


Abb. 1: Bei der Erzeugung verschränkter Photonen in einem Kaskadenzerfall sind bei einem symmetrischen Quantenpunkt (b) die zwei möglichen Zerfallskanäle (hellblau und dunkelblau) ununterscheidbar. Eine Asymmetrie erzeugt eine Aufspaltung des mittleren (Exziton-)Zustandes (a), was zu einer Unterscheidbarkeit führt. Die Pfeile deuten die Polarisation der jeweils emittierten Photonen an (nach [9]).

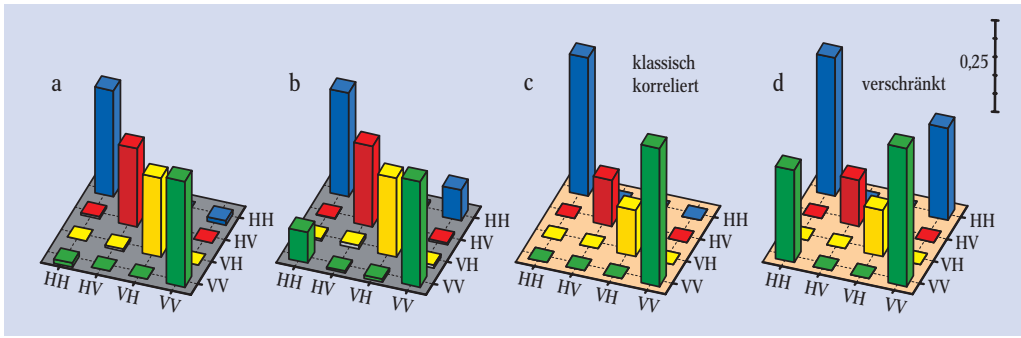


Abb. 2: Die experimentell rekonstruierte Dichtematrix des Zweiphotonenzustandes unterscheidet sich stark bei Quantenpunkten mit nicht-verschwindender (a) bzw. verschwindender (b) Aufspaltung des Exziton-

Zustandes. Dies entspricht den theoretisch erwarteten Dichtematrizen für einen klassisch korrelierten (c) und einen verschränkten (d) Photonenzustand (nach [3]).

von Quantenpunkten mit verschwindender Exzitonenaufspaltung enthält. Das notwendige Kriterium dafür ist, dass die Aufspaltung kleiner als die homogene Linienbreite (typischerweise 1 – 1,5 μeV) ist. Darüber hinaus gelang es unter gewissen Bedingungen, die Exziton-Aufspaltung mithilfe eines externen Magnetfelds parallel zur Probenebene durchzustimmen bzw. auf null zu reduzieren. Diese Methode erlaubt es dann, die Unterscheidbarkeit der beiden Zerfallskanäle der Kaskade und damit die Verschränkung der Photonen beliebig ein- oder auszuschalten.

In einer aktuellen Veröffentlichung untersuchten Shields und Mitarbeiter nun diese beiden Fälle [3]. Abbildung 2 zeigt das Resultat einer tomographischen Rekonstruktion der Dichtematrix des Zwei-Photonen-Zustandes.^{*)} Dazu wurde ein Satz von Koinzidenzmessungen bei 16 unterschiedlichen Stellungen von Polarisatoren durchgeführt [8]. Die Beobachtung von Nebendiagonalelementen in der Dichtematrix ist eine Signatur von Verschränkung und lässt sich bei dem asymmetrischen Quantenpunkt nicht beobachten. Nachdem die ersten Quellen noch eine starke Beimischung von Hintergrundstrahlung aus der Probe aufwiesen, gelang es in einer verbesserten Struktur, auch dieses Problem zu beheben [9]. Die Photonenpaare erfüllten dann klar die Kriterien für Verschränkung.

Die Erzeugung verschränkter Photonenpaare mit einem Quantenpunkt ist ein Durchbruch im Gebiet der Quantenoptik im Festkörper. Mit der Verfügbarkeit der Nanostrukturierungstechnologie und der Möglichkeit einer elektrischen Anregung ist eine kompakte integrierte Quelle für verschränkte Photonen „on demand“ möglich geworden. Besonders interessant

ist auch folgender Aspekt: Nach der Emission eines Photons liegt eine Verschränkung zwischen dem Polarisationszustand des Photons und des Quantenpunktes vor. Es wäre denkbar, dies in zukünftigen Experimenten für die Übertragung von Verschränkung oder für Quan-

teninformationstransfer zwischen zwei Halbleiter-Nanostrukturen auszunutzen.

OLIVER BENSON

- [1] D. Bouwmeester, A. K. Ekert und A. Zeilinger, *The Physics of Quantum Information*, Springer, Berlin (2000)
- [2] P. G. Kwiat et al., *Phys. Rev. Lett.* **75**, 4337 (1995)
- [3] R. M. Stevenson et al., *Nature* **439**, 179 (2006)
- [4] O. Benson et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 2513 (2000)
- [5] A. Aspect, J. Dalibard und G. Roger, *Phys. Rev. Lett.* **49**, 1804 (1982)
- [6] A. Greilich et al., *Phys. Rev. B* **73**, 045323 (2006); R. Seguin et al., *Phys. Rev. Lett.* **95**, 257402 (2005)
- [7] E. Moreau et al., *Phys. Rev. Lett.* **87**, 183601 (2001); C. Santori et al., *Phys. Rev. B* **66**, 045308 (2002); S. M. Ulrich et al., *Appl. Phys. Lett.* **83**, 1848 (2003)
- [8] D. F. James et al., *Phys. Rev. A* **64**, 052312 (2001)
- [9] R. J. Young et al., *New J. Phys.* **8**, 1 (2006)

^{*)} Die Dichtematrix erlaubt eine vollständige Beschreibung eines Quantensystems.

Prof. Dr. Oliver Benson, Institut für Physik, Humboldt-Universität zu Berlin, Hausvogteiplatz 5-7, 10117 Berlin

Faszination Halo



Diese faszinierenden Sonnenhalos waren am 20. Dezember über Davos zu beobachten. Je nach Form und Orientierung von Eiskristallen in hohen Cirrus- und Cirrostratus-Wolken entstehen durch Brechung und Spiegelung des Lichts daran 22°- und 46°-Ring, Nebensonne (rechts) und Lichtsäule (Mitte) sowie Zirkumzentalbogen (ganz oben) und umschriebener Halo (Mitte). (Foto: Ch. Rixen, SLF, wa.sl.f.ch/index.php?id=8572, vgl. auch R. Greenler, *Phys. Blätter*, Februar 1998, S. 133)