

Was haben Sonnenflares und Erdbeben gemeinsam?

Universelle statistische Eigenschaften bei ganz unterschiedlichen physikalischen Systemen geben Hinweise auf einen ähnlichen physikalischen Antriebsmechanismus.

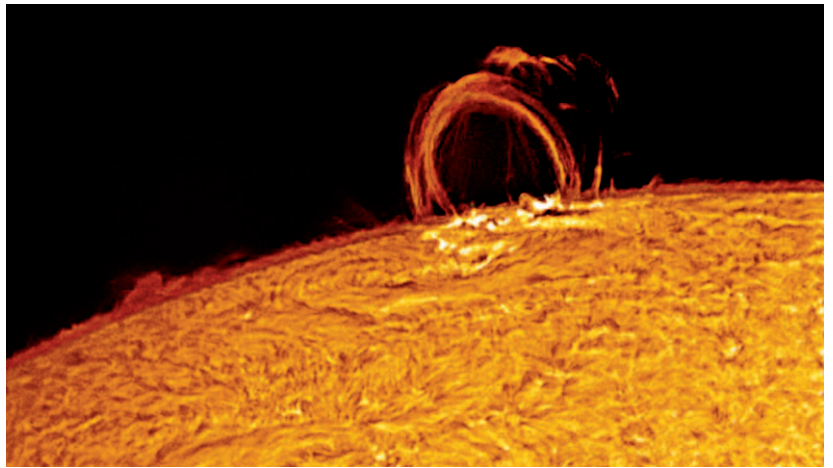
Die Suche nach einer Übertragbarkeit von Interpretationen, Erklärungsansätzen und Modellen von einem Teilgebiet der Physik in ganz andere Teilgebiete hat eine lange und oft fruchtbare Tradition. So haben beispielsweise Bak, Tang und Wiesenfeld vor knapp 20 Jahren den Begriff der „selbstorganisierten Kritikalität“ (*self-organized criticality*) geprägt und mit einem allgemeinen Modellansatz die in vielen komplexen Systemen auftretenden $1/f$ -Fluktuationen¹⁾ zu erklären versucht. Damit gelang es z. B., eine Brücke zwischen Lawinenbildung, Erdbeben und Waldbränden, aber auch Verkehrsstaus, Stromausfällen und der Größe von Städten und Firmen zu schlagen.

In einer kürzlich veröffentlichten Arbeit haben nun italienische Physiker eine Parallele zwischen Erdbeben und Sonnenflares, d. h. Eruptionen innerhalb der Chromosphäre der Sonne, gezogen [1]. Während Erdbeben meist damit verbunden sind, dass sich zwischen den tektonischen Platten der Erdkruste mechanische Spannungen abbauen bzw. umverteilen, reorganisieren sich bei den Flares die Magnetfeldlinien im Sonnenplasma, sodass magnetische Energie in kinetische Energie der geladenen Teilchen überführt wird. Flares dauern im Gegensatz zu Sonnenflecken oder Protuberanzen nur einige Minuten und sind an der emittierten Röntgenstrahlung erkennbar. Ihre Anzahl von durchschnittlich fünf bis zehn pro Tag schwankt sehr stark mit dem ungefähr elfjährigen Sonnenzyklus.

1) Das Leistungsspektrum, d. h. das Betragsquadrat der Fourier-Transformierten von Zeitreihen, ist dabei proportional zum Kehrwert der Frequenz f .

2) De Arcangelis et al. [1] zeichnen die Verteilungen $D(\tau)$ für Erdbeben und Sonnenflares trotz unterschiedlicher $\bar{\tau}$ (3,6 bis 14,7 Stunden) ohne Reskalierung in ein Bild, was als methodische Schwäche der Arbeit anzusehen ist.

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



Eruptionen auf der Sonne, sog. Sonnenflares, weisen statistische Eigenschaften auf, die denen von Erdbeben ähneln. (Foto: J. Newton/NASA)

Auf den ersten Blick handelt es sich bei Erdbeben und Sonnenflares also um physikalisch sehr verschiedene Phänomene. Die Autoren von [1] vergleichen die Ereignisse jedoch nicht anhand der physikalischen Prozesse und auch nicht anhand konkreter Modelle, sondern sie analysieren Kataloge von experimentellen Daten und vergleichen bestimmte statistische Eigenschaften der Zeitreihen. Damit ist ihr Ansatz methodisch ähnlich dem von Wigner bei der Analyse komplexer Anregungsspektren schwerer Atomkerne. Dieser Ansatz führte zur Theorie der Zufallsmatrizen und ist inzwischen u. a. auch in der Festkörperphysik ungeordneter Systeme gebräuchlich. De Arcangelis et al. betrachten für Erdbeben die Daten der letzten 36 Jahre aus Süd-Kalifornien und stützen sich für Sonnenflares auf 2,5- bis 11-jährige Datenreihen von drei Röntgen-Detektor-Satelliten mit unterschiedlichen Energiebereichen [1]. Konkret vergleichen sie

- (i) die Verteilung der Zeiten zwischen den registrierten Ereignissen (Wiederkehrintervall-Verteilung),
- (ii) die Verteilung der Intensitäten der Ereignisse (Magnitudenverteilung, bei Erdbeben: Gutenberg-Richter-Gesetz) und
- (iii) den Abfall der Häufigkeit kleinerer Ereignisse in Abhängigkeit vom zeitlichen Abstand zu einem vorhergehenden großen Ereignis (bei Erdbeben: Omori-Gesetz für Nachbeben).

Für globale und lokale Erdbebenkataloge konnte Corral zeigen, dass die Verteilungsdichte der Wiederkehrintervalle τ zwischen Ereignissen oberhalb einer Intensitätsschwelle, deren Mittelwert $\bar{\tau}$ ist, durch eine verallgemeinerte

Gamma-Verteilung approximiert wird [2]:

$$D(\tau) \sim \frac{1}{\bar{\tau}} (\tau / \bar{\tau})^{\gamma-1} \exp\left[-(\tau / \bar{\tau})^{\delta} / B\right] \quad (1)$$

mit $\gamma \approx 0,67$ und $\delta \approx 1$. Wesentlich ist, dass durch das Skalieren der Verteilungen mit $\bar{\tau}$ die Daten für unterschiedliche Erdbebengebiete und Schwellenwerte auf eine universelle Kurve fallen.²⁾ Für die Verteilungsdichte der Intensitäten s von Erdbeben und Sonnenflares ist bekannt, dass $P(s/s_0) \sim (s/s_0)^{-\alpha}$ gilt mit $\alpha \approx 1,65$. Das Potenzgesetz der Omori-Verteilung für die Ereigniszahl zur Zeit t nach einem großen Ereignis, $N(t/t_0) \sim (t/t_0)^{-p}$ mit $p \approx 1$ bei Erdbeben [2], wurde nun erstmals auch bei Sonnenflares nachgewiesen [1].

Aus einer Übereinstimmung der drei Verteilungsdichten innerhalb der statistischen Ungenauigkeiten folgern die Autoren, dass man als Erklärungsansatz einen gleichartigen physikalischen Antriebsmechanismus verwenden sollte, der Umverteilung und Abbau der mechanischen bzw. magnetischen Spannungen gleichermaßen beschreibt. Zu bedenken ist bei der Frage der Universalität im Auftreten der Ereignisse allerdings, dass die Parameter s_0 und t_0 in $P(s/s_0)$ bzw. $N(t/t_0)$ für jeden Datensatz angepasst und nicht daraus bestimmt wurden. Weniger weit gehende Ähnlichkeiten entsprechender Verteilungen findet man u. a. in Klimadatenreihen, für die Gl. (1) mit $\gamma \approx 1$ und $\delta \approx 0,65$ gilt [3]. In Datenreihen der Volatilitäten, d. h. in den Beträgen der normierten Kursdifferenzen diverser Aktien und Währungsverhältnisse, wurde das Omori-Gesetz mit $p \approx 1$ gefunden, obwohl dafür Gl. (1) durch ein Potenzgesetz er-

KURZGEFASST...

■ kg-head
kg-Fließ

setzt werden muss [4].

Umstritten ist ein möglicher Einfluss der Sonnenflares, welcher 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 nach Bedarf 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 werden zunächst in einem Quantenpunkt durch gepulste optische Anregung zwei gebundene Elektron-Loch-Paare, ein

sog. Biexziton (XX) erzeugt (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, so dass 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

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)

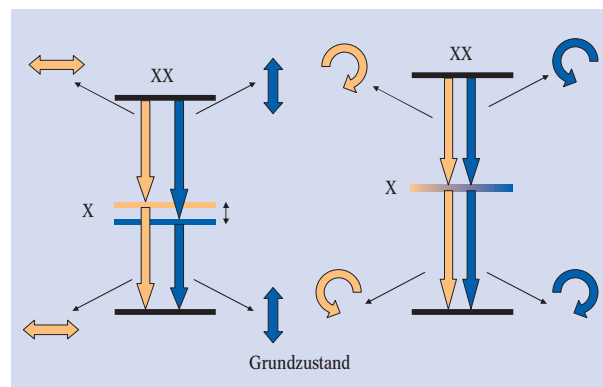


Abb. 1: Bei der Erzeugung verschränkter Photonen in einem Kaskadenzerfall sind bei einem symmetrischen Quantenpunkt (a) die zwei möglichen Zerfallskanäle (hellblau und dunkelblau) ununterscheidbar. Eine Asymmetrie erzeugt eine Aufspaltung des mittleren (Exziton-)Zustandes (a), was zu einer Unterscheidbarkeit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