

zwischen den Gruppen wird als ein asymmetrisch verbundener Zufallsgraph angenommen. Die Übertragungswahrscheinlichkeiten werden zufällig gewählt und so normiert, daß das Modell einem kritischen Verzweigungsprozeß entspricht. Ähnlich einem kritischen Sandhaufen beobachtet man in diesem Modell Aktivitätslawinen aller Größenordnungen mit einer Statistik, die sich mit den experimentellen Hirndaten deckt (Abb. a). Bringt man das Hirngewebe mit Hilfe einer Droge in einen hyperaktiven Zustand, so erhält man im Experiment eine Lawinenverteilung, die durch den überkritischen Bereich des Modells reproduziert wird (Abb. b). Außerdem reproduziert das Modell die charakteristischen metastabilen Zustände der Neuronenanregungen, aus denen sich die „Traumsequenzen“ zusammensetzen. Insgesamt lassen sich damit die wesentlichen Eigenschaften der Messungen an Neuronengruppen des Rattenkortex durch ein vergleichsweise einfaches Modell beschreiben.

Weitere Simulationen des Modells erlauben Spekulationen über die Bedeutung des kritischen Punktes im Hinblick auf die Funktion des Gehirns. Variiert man den Verzweigungsparameter des Modells, so findet man, daß die Zahl der metastabilen Zustände genau dann maximal ist, wenn die Aktivität einem kritischen Verzweigungsprozeß gehorcht. Dies könnte ein Hinweis darauf sein, daß der kritische Punkt eine gute Wahl ist, weil dies beispielsweise die Speicherkapazität des neuronalen Gewebes optimieren könnte. Solch weitgehende Schlüsse sind nach dieser einzelnen Studie sicher noch nicht möglich. Mit der erfolgreichen quantitativen Kombination großskaliger neuronaler Aktivitätsmessungen mit theoretischen Ansätzen aus Perkolations-theorie und nichtlinearer (diskreter) Dynamik stößt diese Arbeit jedoch ein methodisches Fenster auf, das uns einen neuen Blickwinkel und vielleicht neue Werkzeuge auf dem Weg zum Verständnis neuronaler Informationsverarbeitung an die Hand gibt.

STEFAN BORNHOLDT

- [1] K. Louie und M. A. Wilson, *Neuron* **29**, 145-156 (2001)
- [2] J. M. Beggs und D. Plenz, *J. Neurosci.* **23**, 11167 (2003)
- [3] C. Haldemann und J. M. Beggs, *Phys. Rev. Lett.* **94**, 058101 (2005)

■ Ordnung dank Chaos

Nichtzerfließende elektronische Wellenpakete auf Kepler-Bahnen

Die Tatsache, dass quantenmechanische Wellenpakete zerfließen, wird uns bei der ersten Begegnung mit der Quantenmechanik im Studium als unumstößliche Wahrheit eingefloßt – mit einer Ausnahme, dem harmonischen Oszillator. Dafür hatte Schrödinger bereits 1926 „pendelnde Wellengruppe(n) als undulationsmechanisches Bild des Massenpunktes“ konstruiert, die sich im Laufe der Zeit *nicht* auf ein immer größeres Raumgebiet ausdehnen [1]. Diese Wellengruppen kennen wir heute unter dem Namen „kohärente Zustände“. Schrödingers Arbeit endet mit einer bemerkenswerten Vorhersage, die uns freilich vor dem Hintergrund unserer überlegenen Kenntnis befremdlich erscheint: in gleicher Weise ließen sich Wellengruppen konstruieren, „welche auf hochquantigen Keplerellipsen umlaufen und das undulationsmechanische Bild des Wasserstoffelektrons sind“, lediglich habe man hier mit größeren „rechen-technischen Schwierigkeiten“ zu rechnen. Natürlich wissen wir, dass es derartige Wellengruppen nicht geben kann – wegen der Anharmonizität des Coulomb-Spektrums. Und so musste Schrödinger bei der Durchführung seines Programms scheitern.

Tom Gallagher und sein Team von der University of Virginia liefern nun jedoch den (experimentellen!) Gegenbeweis [2]: In der vorliegenden Arbeit, die frühere Ergebnisse [3, 4] geschickt zu einem

vollständigen Bild zusammensetzt, zeigen sie, dass es in der Tat möglich ist, Schrödingers Desiderat zu erfüllen, wenn man nur eine geeignete, zeitlich periodische Störung des Systems zulässt. Über diese fundamentale Einsicht hinaus eröffnen die Resultate völlig neue Perspektiven für eine *robuste* kohärente Quantenkontrolle.

Der experimentelle Zugang von Gallagher ist ebenso einfach wie elegant: Man nehme Lithium-Atome (oder ein beliebiges anderes Einelektronen-System), rege das Valenzelektron in einen Rydberg-Zustand an, setze diese einem nahresonanten Mikrowellenfeld aus und ionisiere schließlich das System mittels eines elektrischen Feldimpulses, dessen zeitliche Dauer kurz verglichen mit der Kepler-Periode des gewählten Rydberg-Zustands ist. Der Feldimpuls liefert einen Schnappschuss des quantenmechanischen Elektrons – genauer: seiner Wahrscheinlichkeitsdichte – auf dem anfänglich präparierten Kepler-Orbit. Und das überraschende Ergebnis besteht nun darin, dass ein mehrmaliges solches „Anblitzen“ des Elektrons während einer Kepler-Periode eine klare Korrelation zwischen der Position des Elektrons entlang der Trajektorie und dem Zeitpunkt, zu dem der Auslöser gedrückt wurde, liefert. Mit anderen (bzw. mit Schrödingers) Worten: Die elektronische Wahrscheinlichkeitsdichte hält dauernd zusammen und breitet sich *nicht* im Laufe der Zeit auf ein immer größeres Raumgebiet (entlang der Kepler-Ellipse) aus – dies führte ja zu einem Verlust der beobachteten Korrelation.

KURZGEFASST...

■ Dunkle Galaxie entdeckt

Astronomen haben Hinweise auf eine Galaxie entdeckt, die fast ausschließlich aus Dunkler Materie besteht. Die „dunkle Galaxie“ VIRGOHI21 befindet sich im 50 Millionen Lichtjahre entfernten Virgo-Haufen und rotiert wie eine gewöhnliche Galaxie. Mit einem Radioteleskop ließ sich VIRGOHI21 nur aufgrund der darin enthaltenen Wasserstoff-Wolke nachweisen. Anhand der Rotationsgeschwindigkeit schätzten die Astronomen ab, dass die Gesamtmasse etwa 10^{11} Sonnenmassen beträgt, tausendmal mehr als diejenige des beobachteten Wasserstoffs. Da keine Sterne zu beobachten sind, vermuten die Forscher, dass der Rest der Galaxie aus Dunkler Materie bestehen muss.
R. Minchin et al., *Astrophys. J.* **622**, L21 (2005)

■ Heißer Kollaps

Bei der sog. Sonolumineszenz emittieren durch Schallwellen getriebene Gasblasen Licht, wenn sie kollabieren. Dabei können die Blasen extreme Temperaturen erreichen, die nun erstmals von amerikanischen Physikern gemessen wurden. Indem sie für ihr Sonolumineszenz-Experiment Edelgase wie Argon und Xenon und konzentrierte Schwefelsäure verwendeten, erzeugten die Physiker über tausendmal mehr Photonen als bei Sonolumineszenz in Wasser. Damit waren sie in der Lage, anhand der Details der beobachteten Spektren auf eine Temperatur von 15 000 K an der Oberfläche der kollabierenden Blase zu schließen – eine Temperatur, wie sie etwa auf der Oberfläche von Sternen herrscht.
D. J. Flannagan und K. S. Suslick, *Nature* **434**, 52 (2005)

Was also ist da los? Es handelt sich um ein Phasenkopplungsphänomen [5], das zu den fundamentalsten und allgemeinsten strukturellen Eigenschaften nichtlinearer Systeme zählt und sich am besten im klassischen Phasenraum – aufgespannt durch kanonische Wirkungs- und Winkelvariablen – verstehen lässt: Die Wahl eines nahresonanten Mikrowellenfeldes, d. h. einer zeitlich periodischen Störung, deren Frequenz nahe der klassischen Umlauffrequenz des Elektrons entlang seiner Rydberg-Bahn liegt, führt zu einer dramatischen strukturellen Änderung des in Abwesenheit der äußeren Störung vollständig integrierbaren Phasenraums¹: Lokal, d. h. zentriert um die (Umlauffrequenz und Bindungsenergie fixierende) klassische Wirkung der resonant getriebenen Kepler-Bahn, entsteht eine „elliptische Resonanzinsel“, während das Gros des Phasenraumvolumens von chaotischen Trajektorien bevölkert wird (Abb.). Resonant getriebene klassische Trajektorien werden *innerhalb* dieser elliptischen Insel „eingefangen“ und nichtlinear an die Phase des treibenden Mikrowellenfeldes gekoppelt; die maximale Phasendifferenz ist durch die Ausdehnung der Insel in der kanonischen Winkelvariablen (die nichts anderes als die Position des klassischen Elektrons auf der Kepler-Trajektorie parametrisiert) beschränkt [5]. Letztere wird mit zunehmender Stärke der äußeren Störung zugunsten der die Insel umschließenden chaotischen Phasenraumkomponente *abnehmen*; die „chaotische See“ ist also tatsächlich Korrelat einer „scharfen“ Phasenkopplung. Dies ist dem Kolmogorov-Arnol'd-Moser (KAM)-Theorem [6] zu verdanken – elliptische Inseln sind strukturell robust in einer chaotischen Phasenraumumgebung. Zum quantenmechanischen, nichtzerfließenden Wellenpaket benötigen wir nun nur noch ein semiklassisches Quantisierungsargument: Ist das Phasenraumvolumen der Resonanzinsel groß genug, um einen quantenmechanischen Eigenzustand zu beherbergen, wird die nichtlineare Phasenkopplung auch im Mikrokosmos zur Realität – daher das Experiment im Rydberg-Bereich.

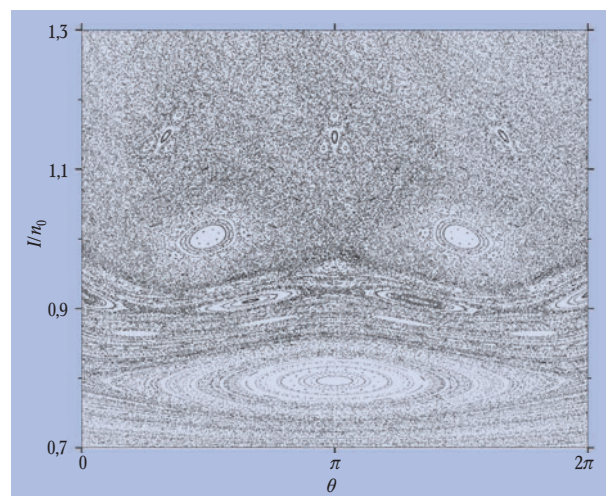
Die Experimentatoren zeigen in ihrer Arbeit noch mehr: Indem sie die Mikrowellenfrequenz auf geeigneter Zeitskala (weder zu langsam noch zu schnell) durchstimmen, gelingt es, die Ausdehnung der Kep-

ler-Trajektorie, auf der das elektronische Wellenpaket umläuft, stetig zu verändern, entsprechend also das Elektron auf seiner Umlaufbahn zu beschleunigen oder zu bremsen – ohne merklichen quantenmechanischen Populationsverlust. In unserem obigen Phasenraumbild entspricht das Durchstimmen der Frequenz einer langsamen Änderung der Resonanzbedingung zwischen Antrieb und Kepler-Dynamik, d. h. einer Verschiebung des Zentrums der Resonanzinsel zu größeren oder kleineren klassischen Wirkungen (dies ist strikt äquivalent zu größeren oder kleineren Kepler-Ellipsen) im Phasenraum. Quantenmechanisch entspricht es einer Folge adiabatischer und diabatischer Übergänge zwischen Eigenzuständen des periodisch getriebenen atomaren Systems, mit der Mikrowellenfrequenz als Kontrollparameter [7].

Die vorliegende Arbeit liefert (zusammen mit [4]) ein Musterbeispiel für die ungeahnten Möglichkeiten kohärenter Quantenkontrolle mittels komplexer (hier im Sinne chaotischer) Dynamik: Nichtzerfließende quantenmechanische Wellenpakete mit praktisch beliebig langer Lebensdauer zu erzeugen, ist ein absolutes Novum – bisher hatte man sich mit Rydberg-Wellenpaketen zu begnügen, die entweder nach einigen zehn Kepler-Perioden kollabierten oder aber den experimentell praktisch unvermeidbaren Streufeldern ebenso rasch erlagen [8]. Gallagher & Co präparieren generische quantenmechanische Eigenzustände periodisch getriebener Quantensysteme, die – dank KAM – experimentelle Schmutzeffekte souverän wegstecken, Lebensdauern von wenigstens 15000 Kepler-Zyklen aufweisen, und deren Trajektorien auch noch in Echtzeit deformierbar sind – alles mit vergleichsweise moderatem experimentellen Aufwand.

Ist damit alles klar? Nicht ganz: Die Experimentatoren bemerken selbst, dass der Kontrast der Schnappschüsse des Elektrons auf seiner Kepler-Bahn zu wünschen übrig lässt. Hierfür gibt es mehrere Ursachen, die letztlich auf die Dimensionalität des atomaren Objektes zurückzuführen sind: Weder in der Anregung noch im Nachweis der Wellenpakete ist der experimentelle Zugang selektiv bezüglich der zur Laserpolarisation transversalen Komponente des Konfigurationsraumes. Sicherlich haben wir es daher hier mit (kohärenten oder inkohä-

renten) Überlagerungen verschiedener Wellenpaketeigenzustände zu tun, die sich in ihrer transversalen Dynamik unterscheiden [5]. In der Zukunft wird die Anregung eines einzelnen Wellenpaketes es ermöglichen, dieses durch Einstrahlen eines zusätzlichen Radiofrequenz-



Typische Struktur des durch die klassische Wirkung I (gemessen in Vielfachen der Hauptquantenzahl n_0 des nahresonant getriebenen Rydberg-Niveaus) und den kanonischen Winkel θ aufgespannten klassischen Phasenraums eines periodisch getriebenen Rydberg-Elektrons: Neben dominant chaotischen („verrauschten“) Gebieten (der „chaotische See“) erkennt man konzentrische Inselstrukturen – Ankerplätze für nichtdispersierende Wellenpakete. Je kleiner deren Ausdehnung in θ , desto besser ihre (dispersionsfreie) Lokalisierung entlang der durch θ parametrisierten Kepler-Ellipse.

feldes kontrolliert an andere Wellenpaketzustände zu koppeln und dadurch kohärente Wellenpaketdynamik in transversaler Richtung zu induzieren. Die Lebensdauer dieser neuen Quantenobjekte lässt dann einen deutlichen Qualitätssprung in der kohärenten Kontrolle komplexer Quantensysteme erhoffen.

ANDREAS BUCHLEITNER

- [1] E. Schrödinger, Die Naturwissenschaften **14**, 664 (1926)
- [2] H. Maeda, D. V. L. Norum und T. F. Gallagher, Science Express DoI:10.1126/Science.1108470
- [3] M. W. Noel, W. M. Griffith und T. F. Gallagher, Phys. Rev. A **62**, 63401 (2000)
- [4] H. Maeda und T. Gallagher, Phys. Rev. Lett. **92**, 133004 (2004)
- [5] A. Buchleitner, D. Delande und J. Zakrzewski, Phys. Rep. **368**, 409 (2002)
- [6] A. J. Lichtenberg und M. A. Leiberman, Regular and Stochastic Motion, Springer, Berlin (1983)
- [7] M. Kalinski und J. Eberly, Opt. Express **1**, 216 (1997)
- [8] J. A. Yeazell und J. C. R. Stroud, Phys. Rev. **43**, 5153 (1991)

¹ Quantenmechanisch zur starken Mischung des feldfreien Anfangszustandes mit benachbarten Rydberg-Niveaus.

Dr. Andreas Buchleitner, AG Nichtlineare Dynamik in Quantensystemen, Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme, Nöthnitzerstr. 38, 01187 Dresden