



VERSCHRÄNKTES LEBEN?

Der Physiker Hans Briegel denkt über Quantenphänomene in der lebenden Natur nach und kommt zu erstaunlichen Ergebnissen.

Erwin Schrödinger lehnte sich ziemlich weit aus dem Fenster: In seinem 1944 erschienenen Essay „Was ist Leben“ philosophierte der österreichische Physiker weit über die Grenzen der Quantenphysik hinaus. Sehr spekulativ, aber seiner Zeit voraus, dachte er laut über „Informations-Moleküle“ des Lebens nach, als erste theoretische Ansätze der Biogenetik, zehn Jahre vor der Entdeckung der DNA. Des Weiteren führte er Konzepte wie „Negentropie“ ein und begründete damit die sogenannte Nichtgleichgewichtsthermodynamik. 65 Jahre später denkt Hans Briegel über ähnliche Probleme im

Spannungsfeld zwischen Physik und Biologie nach, wobei er weniger spekuliert, sondern die Werkzeuge der modernen Quanteninformatik nutzt. Hans Briegel ist seit 2003 Professor am Institut für Theoretische Physik und wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) in Innsbruck. Er arbeitet an konkreten Fragestellungen, inwiefern die Quantenphysik eine Rolle in biologischen Prozessen spielt.

Im Labor können atomare Quantenzustände mittlerweile extrem genau manipuliert werden. Das wird zum Beispiel mit einzelnen gefangenen



Ionen von den Innsbrucker Experimentalphysikern sehr erfolgreich demonstriert, und nährt den Traum, eines Tages vielleicht einen Quantencomputer bauen zu können. Wenn man jetzt von Quanteneffekten in der Biologie spricht, scheint es auf den ersten Blick recht absurd – die Umgebung der Systeme könnte unterschiedlicher nicht sein. Im Experiment sind Ultrahochvakuum und hochstabile Laser notwendig. Die Atome müssen extrem gekühlt werden, um Quantenphänomene wie Verschränkung zu erzeugen und nachzuweisen. Die Apparaturen füllen ein komplettes Labor, der Aufwand ist immens.

„Biologische Systeme sind warm, feucht und verrauscht“, sagt Briegel. „Daher hat man sich lange Zeit nicht vorstellen können, dass extreme Quantenphänomene wie Verschränkung in so einer Umgebung überhaupt eine Rolle spielen können.“ Verschränkung ist jene bizarre quantenmechanische Korrelation von Teilcheneigenschaften, die die Quanteninformation letztendlich so mächtig macht. Sie ist aber auch ein überaus delikates Phänomen, das sehr leicht durch äußere Einflüsse zerstört werden kann, was als Dekohärenz bezeichnet wird.

Zur großen Überraschung wurden dennoch in den letzten Jahren Quantenphänomene in der

Biologie nachgewiesen und erforscht. Ein prominentes Beispiel ist die Photosynthese, ein zentraler Mechanismus zur Umwandlung von Energie in der Natur. Ein anderer Fall ist der innere Kompass der Zugvögel, wie der des Rotkehlchens. Zu diesem Kompass hat die Arbeitsgruppe von Hans Briegel auch einige interessante Rechnungen vorgelegt. Sie untersuchten den sogenannten Radikalpaarmechanismus, der eine wichtige Rolle in der Spin-Chemie spielt und auch für den magnetischen Orientierungssinn der Vögel verantwortlich gemacht wird.

KOMPASS DER VÖGEL

Nach einer verbreiteten Hypothese „sehen“ Vögel das Erdmagnetfeld, indem in ihrem Auge magnetisch sensitive biochemische Prozesse stattfinden. Etwas genauer gesagt, werden durch absorbiertes Licht Moleküle mit zwei ungepaarten Elektronen gebildet, ein Radikalpaar. Das Magnetfeld beeinflusst die Konfiguration der magnetischen Momente der Elektronen (Spins) und bestimmt damit die nachfolgenden biochemischen Reaktionen, welche die Vögel als Reiz spüren.

Der Spin des Elektrons ist auch eine rein quantenmechanische Eigenschaft. Eine interessante Fra-

Der magnetische Orientierungssinn von Zugvögeln wird mit dem Radikalpaarmechanismus erklärt. Man vermutet im Auge von Vögeln Magnetrezeptoren, die durch Photonen aktiviert werden und sogenannte Radikalpaare bilden. Abhängig von der Ausrichtung der Rezeptoren im Erdmagnetfeld sollen dann im Auge unterschiedliche biochemische Reaktionen ablaufen.



ZUR PERSON

Hans J. Briegel (*1962 in Ochsenhausen, Deutschland) studierte Physik an der Ludwig-Maximilians-Universität München, wo er sich 2002 auch habilitierte. Seit 2003 ist er Professor für Theoretische Physik an der Universität Innsbruck und Wissenschaftlicher Direktor am Institut für Quantenoptik und Quanteninformation (IQOQI) der Österreichischen Akademie der Wissenschaften (ÖAW).

ge ist hierbei, ob die Elektronenspins verschränkt sind bzw. ob eine Verschränkung für die Funktion des Kompasses notwendig ist. Briegel und seine Kollegen Jianming Cai und Gian Giacomo Guerreschi rechneten den Fall für zwei verschiedene Moleküle durch. Im Gegensatz zu den einzelnen Ionen der Innsbrucker Experimentalphysiker sind die biochemischen Moleküle so komplex und exotisch wie ihre Namen: Pyren-Dimethylanilin (PyDMA) und ein Molekül in Chryptochrom, wobei Letzteres der mögliche Kandidat für den Kompass des Rotkehlchens ist.

Nach den vorliegenden Ergebnissen scheint der Chryptochrom-Kompass zwar auch ohne Verschränkung zu funktionieren. Aber die Frage, ob Vögel für ihre Orientierung die Verschränkung zunutze machen, bleibt offen, bis der genaue molekulare Mechanismus geklärt ist. Briegels Gruppe hat dazu experimentelle Methoden aus dem Repertoire der Quanteninformationsverarbeitung vorgeschlagen, um die verschiedenen Hypothesen gegeneinander zu testen. Diese können allerdings wohl nur in Experimenten in der Spin-Chemie eingesetzt werden, da die dafür notwendigen Hochfrequenzfelder für die Vögel möglicherweise schädlich wären. „In diesem Fall würde ich auf den zu erwartenden Erkenntnisgewinn lieber verzichten“, meint Briegel.

Aber auch ohne Verschränkung im Vogelkompass bleibt die Geschichte spannend und interessant. Die theoretischen Arbeiten von Briegel zeigen nämlich, wie überhaupt Verschränkung in der Wärme und im Rauschen von biologischen Systemen bestehen kann. Die entscheidende

Erkenntnis ist hier, dass Leben kein Gleichgewichtszustand ist. „Lebende Organismen sind ständigen Stoffwechselprozessen unterworfen, die Energie zuführen und Entropie abführen“, erklärt Briegel. Mit anderen Worten, biologische Systeme im thermischen Gleichgewicht sind tot.

DYNAMISCHE VERSCHRÄNKUNG

Schrödingers Begriff der Negentropie ist zwar nicht mehr aktuell, aber Hans Briegel geht es genau um das Konzept des thermodynamischen Ungleichgewichts, und dieses „bietet bislang unerwartete Freiräume für das Auftreten neuartiger Quanteneffekte“. Einer davon, auf den der Theoretiker in diesem Zusammenhang gestoßen ist, ist die sogenannte dynamische Verschränkung. Obwohl in der verrauschten Umgebung von warmen komplexen Biomolekülen keine statische Verschränkung möglich ist, kann die molekulare Bewegung, die zum Beispiel bei einer Formänderung von Proteinen geschieht, vorübergehende Verschränkungsprozesse auslösen.

Noch ist völlig ungeklärt, ob eine solche Verschränkung auch wirklich in der Natur vorkommt oder was für einen Nutzen sie überhaupt hätte. Aber Briegel hat demonstriert, dass sie nach der Quantentheorie durchaus möglich ist. Er zeigt damit den Biologinnen und Biologen, wo sie gezielt nach Quanteneffekten suchen können. Bei der Komplexität der Strukturen stehen viele experimentelle Antworten noch aus. Es sind erst die Anfänge eines neuen interdisziplinären Forschungsfeldes – der Quantenbiologie.

Als Quanteninformationsexperten haben die Innsbrucker Physiker einen idealen Ausgangspunkt. „Die Informationsverarbeitung spielt eine zentrale Rolle in der Biologie“, sagt Briegel. Und die neuen Interpretationen der Quantenphysik zusammen mit den experimentellen Fortschritten haben die Konzepte der Informationsverarbeitung revolutioniert. Die Frage, ob Quanteninformation in der Biologie eine Rolle spielt, scheint gar nicht mehr so absurd.

Auf der Suche nach Antworten können alle Seiten der Wissenschaft nur gewinnen. Es gibt viele Parallelen bei den Konzepten. Zum Beispiel ist für die Funktion eines Quantencomputers wie beim klassischen Rechner die Fehlerkorrektur essenziell. Und für lebende Organismen, wie Briegel betont, genauso: „Auch in biologischen Zellen passiert ständig Fehlerkorrektur.“ Es ist also gut möglich, dass auch hier, wie schon oft in der Geschichte, neue Einblicke in die inneren Getriebe der Natur, neue Ideen für die menschliche (Quanten-)Technologie hervorbringen. Auch wenn das Leben nicht verschränkt ist. ak



Ultrahochvakuum und hochstabile Laser sind notwendig, um im Labor atomare Quantenzustände zu kontrollieren.