

FESTKÖRPERPHYSIK

Monopole aus Nanomagneten

Magnetische Monopole sind hypothetische Elementarteilchen, nach denen Physiker bislang vergeblich fahndeten. Nun gelang es, sie als »Quasiteilchen« in einer Anordnung von Nanomagneten zu erzeugen und sichtbar zu machen – bei Raumtemperatur!

VON LAURA HEYDERMAN, FRITHJOF NOLTING UND HANS-BENJAMIN BRAUN

Gewöhnliche Stabmagnete enthalten einen Nord- und einen Südpol. Diese lassen sich nicht – etwa durch Zersägen in der Mitte – voneinander trennen. Versucht man es, haben auch die Teilstücke wieder zwei Pole. Es ist wie in Goethes »Zauberlehrling«, wo aus jedem zerschlagenen Besen zwei neue entstehen.

Dennoch vermuten Physiker schon lange, dass es auch magnetische Monopole gibt. Sie wären nicht untrennbar aneinander gebunden, sondern könnten sich wie elektrisch positiv und negativ geladene Teilchen unabhängig voneinander bewegen und miteinander wechselwirken. Wie sich ihre Existenz mit der Quantenmechanik und den maxwellschen Gleichungen für die Elektrodynamik in Einklang bringen lässt, hat bereits vor 80 Jahren der briti-

sche Physiker Paul Dirac (1902–1984) untersucht. Er entwickelte damals ein mathematisches Modell, in dem die Nord- und Südpole zwar noch über eine Art Faden verbunden sind, der den magnetischen Fluss zwischen ihnen transportiert; doch ist dieser »Dirac String« so elastisch, dass sich die Pole beliebig weit voneinander entfernen können.

Die Suche nach magnetischen Monopolen blieb bisher vergeblich. Oft gibt es zu Elementarteilchen allerdings Gegenstücke mit analogen Eigenschaften in Festkörpern: so genannte Quasiteilchen. So entsprechen sich zum Beispiel das Positron und die Lochladungsträger in Halbleitern. Existieren also von den bislang nicht greifbaren elementaren magnetischen Monopolen womöglich Pendant in Feststoffen?

Vor drei Jahren zeigten Claudio Castelnovo von der University of Oxford (England), Roderich Moessner vom Max-Planck-Institut für Physik komplexer Systeme in Dresden und Shivaji Sondhi von der Princeton University (New Jersey), dass in einem speziellen magnetischen Kristallsystem – einem so genannten Spineis – theoretisch Quasiteilchen auftreten können, die sich wie unabhängige Nord- und Südpole verhalten. Einigen Forschergruppen – darunter eine, mit der Castelnovo und Moessner zusammenarbeiteten – ist es inzwischen gelungen, nahe am absoluten Temperaturnullpunkt experimentelle Hinweise auf solche Monopole zu finden. Allerdings vermochten sie es nicht, die Objekte auch direkt sichtbar zu machen. Außerdem wäre es von Vorteil, magnetische Mono-

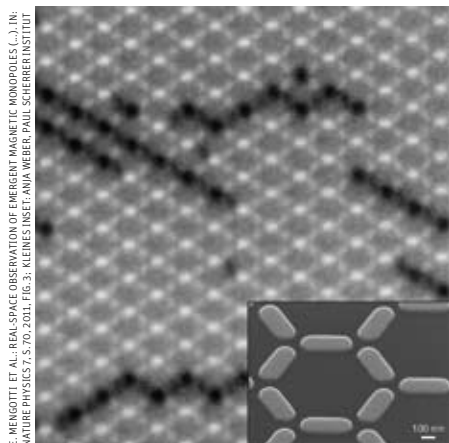
pole bei Raumtemperatur erzeugen zu können.

Das ist unserem Team nun gelungen. Statt natürliche Kristalle zu untersuchen, haben wir mit modernsten Techniken der Nanolithografie ein künstliches Spineis-System erschaffen, dessen Materialeigenschaften sich unmittelbar kontrollieren lassen. Mittels eines speziellen Mikroskops konnten wir den magnetischen Zustand zudem direkt sichtbar machen sowie durch Vergleich mit theoretischen Vorhersagen und Ergebnissen von Computersimulationen bestätigen, dass tatsächlich Quasiteilchen mit den Eigenschaften magnetischer Monopole vorlagen.

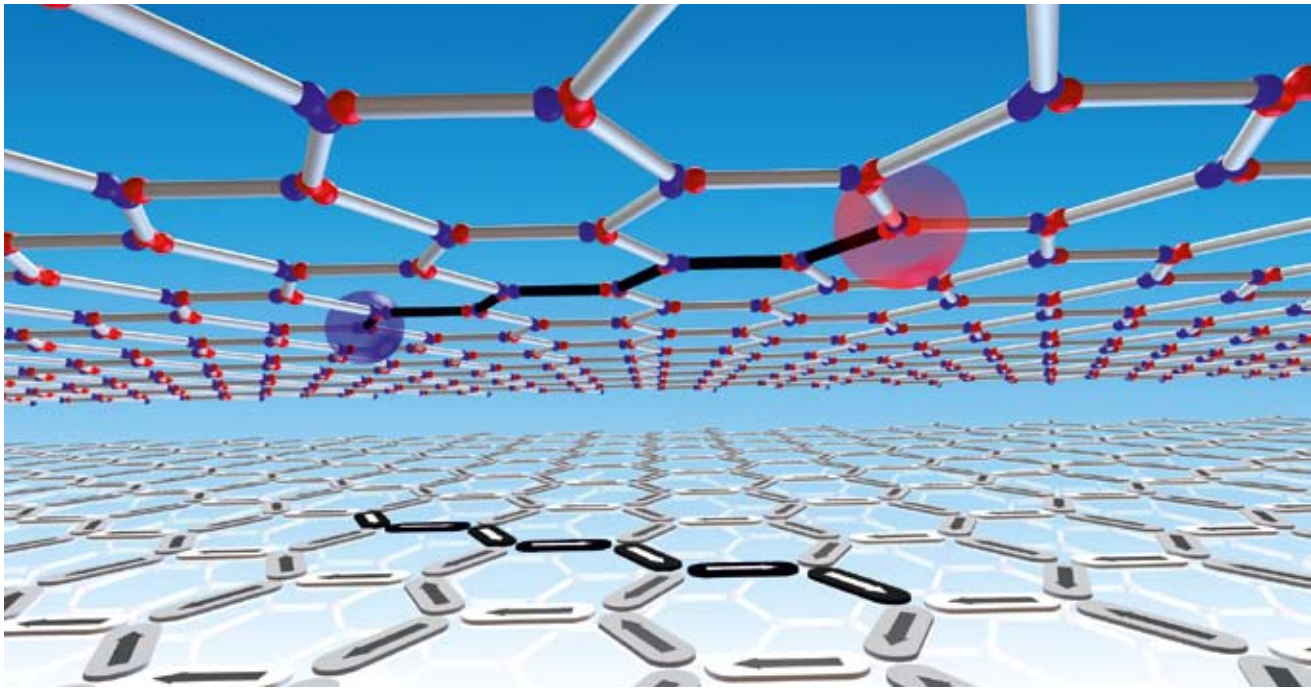
Quasiteilchen im Wabengitter

Bei unserem künstlichen Spineis-System handelt es sich um ein ebenes Gitter aus winzigen, nur einige hundert Nanometer langen Stabmagneten, die Elena Mengotti, Doktorandin am Paul Scherrer Institut (PSI) in Villigen (Schweiz), in Form einer Honigwabengitterstruktur zusammengefügt hat. An den Kreuzungspunkten treffen drei solche Nanomagnete mit ihren Enden aufeinander. Dabei handelt es sich entweder um einen Nord- oder einen Südpol. Wegen der ungeraden Zahl der aneinanderstoßenden Nanomagnete ist eine der beiden Polsorten immer in der Überzahl. Die Kreuzungspunkte tragen deshalb eine »magnetische Nettoladung«.

Im Ausgangszustand ist an das Gitter ein Magnetfeld angelegt. Dadurch zeigen die magnetischen Momente der Nanomagnete zur selben Seite. Das Resultat ist ein geordnetes Muster aus



In dieser Röntgenaufnahme des Nanomagnetgitters erscheinen Dirac Strings (siehe Grafik S. 13) als dunkle Linien. Unten ist das rasterelektronenmikroskopische Bild einer einzelnen Wabe eingblendet.



JURI HONEGGER, PAUL SCHERRER-INSTITUT

Zum Erzeugen magnetischer Monopole diente den Autoren ein zweidimensionales Gitter aus wabenartig angeordneten Nanomagneten. Diese sind in der unteren Bildhälfte als Dipole (Pfeile) und in der oberen als Hanteln mit entgegengesetzten Ladungen (rot und blau) an den Enden dargestellt. An den Kreuzungspunkten bleibt jeweils eine Nettoladung. Im Ausgangszustand zeigen alle Nanomagnete mit ihrem Nordpol nach links. Beim Umma-

gnetisieren klappen einzelne von ihnen um und reißen dabei ihre Nachbarn wie fallende Dominosteine mit. Dadurch entstehen Stellen mit umgekehrter magnetischer Nettoladung, die sich als Monopol-Quasiteilchen (große blaue und rote Kugel) frei durch die Honigwabenstruktur bewegen können. Sie sind über eine Kette von umgeklappten Nanomagneten (schwarze Hanteln) miteinander verbunden – die so genannten Dirac Strings.

alternierenden magnetischen Ladungen – ähnlich der Oberfläche eines Kochsalzkristalls, auf der sich positive und negative Ionen abwechseln.

In diesem Zustand sind keine Monopole vorhanden; denn benachbarte Kreuzungspunkte tragen entgegengesetzte magnetische Nettoladungen und verhalten sich wie die räumlich fixierten Nord- und Südpole gewöhnlicher Magnete. Damit Monopole entstehen, muss das äußere Magnetfeld umgekehrt werden. Als Folge davon beginnen einzelne Nanomagnete umzuklappen. Dadurch treten Abweichungen vom idealen Muster der alternierenden magnetischen Ladungen auf.

Diese Störungen können sich frei durch die Honigwabenstruktur bewegen – das entscheidende Merkmal magnetischer Monopole. Sie verschwinden erst wieder, wenn alle Nanomagnete umgeklappt sind und sich erneut ein perfektes Muster gebildet hat, bei dem

das System nun in die andere Richtung magnetisiert ist.

Um zu verstehen, was bei dieser Umpolung genau passiert, muss man den Vorgang etwas näher betrachten. Sobald ein einzelner Nanomagnet umgeklappt ist, folgen die Nachbarn wie eine Reihe umfallender Dominosteine und hinterlassen dabei eine Spur, an deren Enden sich die Monopole als Quasiteilchen befinden: eine physische Realisierung des Dirac Strings. Diesen Dirac String konnten Elena Mengotti und ihre Kollegin Arantxa Fraile Rodríguez jetzt mit der Synchrotron-Lichtquelle Schweiz (SLS) am PSI sichtbar machen. Er erschien als schwarze Linie auf Mikroskopbildern, welche die Magnetisierungsrichtung der Nanomagnete mit 10000-facher Vergrößerung zeigten. Zur Abbildung diente extrem intensive, zirkular polarisierte Röntgenstrahlung, deren Absorption unter anderem von der Magnetisierungsrichtung abhängt.

Aufwändige Computersimulationen von Remo Hügli am University College Dublin (Irland) bestätigten, dass sich der Ummagnetisierungsprozess lawinenartig entlang eines eindimensionalen Pfads vollzieht. In konventionellen magnetischen Materialien, wie sie etwa in Festplatten von Computern verwendet werden, läuft er dagegen völlig anders ab: durch zweidimensionales Wachstum von magnetischen Domänen mit der neuen Orientierung.

Die Bildung der Monopole als Quasiteilchen ist nicht mit den Eigenschaften der einzelnen Nanomagnete allein erklärbar, sondern ergibt sich erst aus deren Zusammenspiel. Analog gilt etwa für eine Welle, dass sie zwar aus einzelnen Wassermolekülen besteht, ihr Verhalten aber nicht einfach aus deren Eigenschaften ableitbar ist. Deshalb beschreiben Physiker sie nicht anhand der Dynamik dieser Einzelmoleküle, sondern als ein kollektives Phänomen. Ein

solches Auftauchen einer neuen Eigenschaft beim Zusammenspiel von Komponenten, die selbst nicht über diese Eigenschaft verfügen, bezeichnen Wissenschaftler als Emergenz. Der theoretische Physiker Philip W. Anderson, Nobelpreisträger von 1977 und Experte für Magnetismus und Unordnung, fand dafür einmal die ebenso knappe wie treffende Formulierung »*More is different*«.

Quasiteilchen ermöglichen neue Einsichten in das kollektive Verhalten eines Systems, und so ist es faszinierend,

dass Diracs theoretische Vision eines Monopols in einem künstlich erschaffenen Gebilde aus Nanomagneten endlich realisiert werden konnte. Diese Monopol-Quasiteilchen lassen sich nicht nur direkt beobachten, sondern auch gezielt beeinflussen. Das eröffnet vielleicht einmal die Möglichkeit, sie als neue Bauelemente für die Speicherung und Verarbeitung von Informationen zu verwenden. Und wer weiß, womöglich finden Forscher zu diesem nun identifizierten Quasiteilchen eines Ta-

ges sogar das Gegenstück in der Welt der Teilchenphysik.

Laura Heyderman ist Leiterin der Forschungsgruppe »Magnetische Nanostrukturen« am Paul Scherrer Institut. **Frithjof Nolting** leitet dort die Forschungsgruppe »Mikroskopie und Magnetismus«. Daneben hat er eine Titularprofessur am Swiss Nanoscience Institute der Universität Basel inne. **Hans-Benjamin Braun** ist Professor für theoretische Physik am University College Dublin und leitet dort die Gruppe für theoretische Festkörperphysik.

ARCHÄOASTRONOMIE

Arithmetik aus Babylonien?

Der Mechanismus von Antikythera, ein Apparat zur Berechnung astronomischer Ereignisse, galt bislang als Inbegriff altgriechischer Wissenschaft. Doch nun stellen einige Historiker dies in Frage.

VON JO MARCHANT

Vor 2000 Jahren baute ein griechischer Handwerker ein komplexes Uhrwerk, das den Gang der Sonne, des Mondes und der Planeten mit Zeigern und Zifferblättern darstellte. Indem er eine Kurbel drehte, konnte der Erbauer ihre Positionen am Himmel vorausberechnen. Sehr wahrscheinlich vermochte dieser »antike Computer«, wie er gern titulierte, auch Sonnenfinsternisse und andere kosmische Ereignisse vorherzusagen. Der Name des genialen Erfinders ging verloren. Aber sein nach dem Fundort, der Insel Antikythera, benannter Mechanismus veränderte unsere Ansichten über das technische Knowhow der antiken Welt.

Antike im Video

Eine viertelstündige Filmdokumentation über den Antikythera-Mechanismus aus dem Jahr 2008 sowie einen Kurzfilm über den Nachbau des Instruments mit Lego-Bausteinen finden Sie als Onlinevideos unter:

www.spektrum.de/artikel/1061768

Immer wieder versuchen Forscher, die Maschine zu rekonstruieren; ihre Bewunderung für die Fertigkeiten des Erbauers wie für das Wissen der Antike ist dabei stets gewachsen (Spektrum der Wissenschaft 5/2010, S. 62). Doch vor Kurzem meldete der Historiker James Evans von der University of Puget Sound in Tacoma (US-Bundesstaat Washington) Zweifel an: Dieser Apparat entspräche nicht griechischer Astronomie, sondern babylonischer!

Die Überreste des fraglichen Mechanismus wurden 1901 aus einem Schiffswrack geborgen und werden heute im Archäologischen Nationalmuseum in Athen aufbewahrt: 82 größere und kleinere Fragmente korrodierter und ineinander verbackener Zahnräder und Anzeigeelemente aus Bronze. Sie wurden vermessen, fotografiert und geröntgt sowie vor wenigen Jahren erstmals mit einem Computertomografen durchleuchtet. Verschiedene Indizien sprechen für eine Fertigung im frühen 1. oder 2. Jahrhundert v. Chr.

Das mutmaßlich römische Schiff sank aber wohl erst zwischen 70 und 60 v. Chr. Einige Historiker wie Attilio Mas-

trocinque von der Universität in Verona glauben, der Frachter hatte Kriegsbeute geladen: Rom kämpfte damals gegen den pontischen König Mithridates VI. Dabei sei den Eroberern laut dem griechischen Chronisten Strabon auch ein mysteriöser »Globus von Billarius« in die Hände gefallen und seitdem verschollen – möglicherweise der geheimnisvolle Mechanismus.

Ein Wunderwerk aus Holz und Bronze

Einst umschloss diesen ein hölzerner Kasten, etwa 30 Zentimeter hoch und 20 breit, mit mehr als 30 bronzenen Zahnrädern. Das Gehäuse trug griechische Inschriften. Auf seiner Vorderseite befand sich ein großes, kreisrundes Zifferblatt mit zwei konzentrischen Skalen. Die eine trug Monatsnamen und Teilstriche für die 365 Tage des Jahres; die andere war eine 360-Grad-Skala mit Symbolen der zwölf Tierkreiszeichen.

Vermutlich gaben Zeiger auf diesen Zifferblättern das Datum an sowie die Positionen von Sonne, Mond und den fünf damals bekannten Planeten relativ zu den Sternbildern des Zodiakus. Au-

ßerdem repräsentierte eine drehbare Kugel – zur Hälfte schwarz, zur Hälfte silbern – die Mondphasen. Buchstaben auf der Tierkreisskala verwiesen den Benutzer auf Inschriften, die über das Erscheinen und Verschwinden wichtiger Sterne im Jahresverlauf informierten.

Auch die Gehäuserückseite war belegt. Ein spiralförmiges Zifferblatt stellte den so genannten Metonzyklus dar, einen 235-monatigen Kalender, der annähernd 19 Jahre umfasst. Nach dieser Zeit wiederholen sich die Längen der Mondphasen im Jahresverlauf. Darunter befand sich das Anzeigeblatt des 223-monatigen Saroszyklus, gleichfalls in Spiralförmigkeit. Er diente der Berechnung von Sonnen- und Mondfinsternissen. Beide Zyklen waren bereits den Babyloniern bekannt.

Original griechisch hingegen schienen andere Vorrichtungen, da sie die ureigenen geometrischen Kosmosmodelle der Griechen verkörperten. Diese basierten auf idealen Kreis- und Kugel-Formen, um die Bewegungen der Planeten zu beschreiben. Solche Entwürfe waren zunächst eher qualitativ und philosophisch motiviert anstatt präzise bestimmt. Aber im 2. Jahrhundert v. Chr. versuchten Gelehrte wie Hipparch auf Rhodos die griechischen Modelle nach babylonischem Vorbild auch quantitativ zu untermauern und mit Himmelsbeobachtungen abzugleichen. Der Antikythera-Apparat gilt als State of the Art jener geometrischen Theorien.

Darauf verweisen auch Röntgenaufnahmen, die einen Mechanismus im Mechanismus sichtbar gemacht haben, der vermutlich die am Firmament sichtbare Bewegung des Mondes nachbildete. Weil dessen Umlaufbahn elliptisch ist, scheint er an bestimmten Punkten schneller voranzukommen als an anderen. Für die antiken Naturphilosophen ein Problem, war man doch überzeugt, dass alle Himmelskörper perfekt kreisförmige Bahnen beschreiben sollten. Hipparch war im 2. Jahrhundert v. Chr. der Erste, der eine Lösung fand. Die Mondbewegung entstehe durch Überlagerung zweier Kreisbahnen: zum einen einer Bahn um die Erde, auf welcher zum anderen der Mittel-



ANTIKYTERA MECHANISM RESEARCH PROJECT /
ARCHAIOLOGISCHES NATIONALMUSEUM ATHEN

Einst war er der komplexeste Apparat der Antike, heute geben die vor der Insel Antikythera geborgenen Fragmente (hier mit 18 Zentimeter Breite das größte) der Forschung Rätsel auf.

punkt einer engeren mit Umlaufe. Der Mond führte demnach eine exzentrische Bewegung aus, daher sein eigentümliches Verhalten am Himmel.

Der Mechanismus von Antikythera scheint dies in Vollendung nachzuahmen, wie der Astronom Mike Edmunds von der Cardiff University (Wales) und seine Kollegen 2006 in der Zeitschrift »Nature« darlegten: Ein Stift auf einem Zahnrad, der sich in einem Schlitz in einem anderen Zahnrad bewegen kann, wird von letzterem mitgenommen und somit in Rotation versetzt. Dabei dreht er sich aber um die eigene, leicht versetzte Achse. Edmunds und weitere Wissenschaftler nehmen an, dass der Erfinder mit einer ähnlicher Technik auch den Weg der Sonne und der damals bekannten Planeten modelliert hat. Zwar fehlen die dafür erforderlichen Zahnräder, aber die Vermutung klingt plausibel: Griechische Astronomen hätten mit exzentrischen Modellen die Planetenbewegungen mit ihren

Beobachtungen in Einklang zu bringen versucht. Die Grundidee, die von Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. weiterentwickelt wurde, setzte jeden Planeten in einen kleinen Kreis, Epizykel genannt, dessen Zentrum um die Erde rotiert. Erst Johannes Kepler erkannte im 17. Jahrhundert, dass es sich in Wahrheit um elliptische Umlaufbahnen handelt.

Um zu veranschaulichen, wie der Antikythera-»Computer« funktioniert haben könnte, versuchte Michael Wright, Kurator am Science Museum in London, ihn nachzubauen. Mit kleineren Zahnrädern, die auf größeren laufen, konnte er die Epizykel der Planeten Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn sowie die variierende Geschwindigkeit der Sonnenbewegung darstellen. Mit dem Antikythera-Mechanismus schienen die Griechen ihre Theorie der Epizykel in Bronze gegossen zu haben.

Doch nun stellt James Evans die bisherigen Erkenntnisse auf den Kopf. Er untersuchte erneut das Zifferblatt der

das erste beziehungsweise letzte Erscheinen am nächtlichen Himmel. In diesem Fall hätte jeweils ein einfaches Zahnradgetriebe mit einer konstanten Geschwindigkeit als Zeigerantrieb genügt. Die verschiedenen, von den Babyloniern entdeckten Perioden wären dann durch die Übersetzungsverhältnisse im jeweiligen Getriebe modelliert worden – ohne epizyklische Komponenten.

Evans und Jones hoffen nun, dass die Inschriften auf der Vorderseite mehr verraten. Sie liegen im Innern der Fragmente und wurden erst durch Röntgenaufnahmen zugänglich. Agamemni Tselikas, Direktor des Zentrums für Geschichte und Paläografie in Athen, und Yanis Bitsakis, Physiker an der dortigen Universität, versuchen sie zu rekonstruieren. Bis jetzt haben sie Erwähnungen von Mars, Merkur und Venus entziffert sowie Hinweise auf bestimmte Bahnpunkte.

Um all dem die Krone aufzusetzen, behauptet Evans sogar, dass auch der epizyklische Antrieb der Mondberech-

nung der babylonischen Arithmetik entspräche, nicht der Epizykel-Theorie Hipparchos. Denn der Stift-Schlitz-Mechanismus ergäbe eine weit größere Variation der Geschwindigkeit, als dessen Modell verlange, sie entspräche eher dem, was die Babylonier bei ihren Berechnungen verwendeten. »Vielleicht überlegte ein Handwerker, wie er die unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Mondes gemäß der babylonischen Theorie mittels Zahnrädern umzusetzen könne – und kam durch Zufall auf die Idee mit dem epizyklischen Antrieb.«

Anders ausgedrückt wären Epizykel dann kein Einfall der Naturphilosophen gewesen, sondern eine Erfindung von Mechanikern. Als griechische Astronomen bemerkten, wie genau diese Apparaturen die Beobachtungen modellierten, könnten sie die Idee der einander überlagernden Kreisbewegungen übernommen haben.

Für deren Quelle gibt es tatsächlich kaum Belege. Meist gilt der griechische Astronom und Mathematiker Apolloni-

us von Perge als Urheber, der im 3. Jahrhundert v. Chr. in Alexandria wirkte. Interessanterweise scheinen auch Zahnräder in dieser Zeit aufgekommen zu sein. Der legendäre Archimedes von Syrakus soll einfache Getriebe zur Kraftübersetzung verwendet haben.

»Vielleicht sollten wir die Beziehung zwischen Handwerk und Astronomie überdenken«, schlägt Evans vor. »Meist gilt sie als Einbahnstraße, aber vielleicht war sie damals ein Zusammenspiel.« Mit anderen Worten: Als jener griechische Handwerker den Antikythera-Mechanismus austüftelte, um möglicherweise babylonische Theorie in Bronze zu gießen, inspirierte er die Gelehrten seiner Zeit zu einer neuen Sichtweise auf das Universum.

Jo Marchant ist Autor von »Decoding the Heavens«, einem Buch zum Thema.

© Nature Publishing Group

www.nature.com

Nature 468, S. 496–498, 25. November 2010

www.spektrum.de/aboplus

Der Premiumbereich – exklusiv für Abonnenten von Spektrum der Wissenschaft



Treue Leser von **Spektrum der Wissenschaft** profitieren nicht nur von besonders günstigen Abokonditionen, exklusiv auf sie warten unter www.spektrum.de/aboplus auch eine ganze Reihe weiterer hochwertiger Inhalte und Angebote, unter anderem:

- Alle **Spektrum der Wissenschaft**-Artikel seit 1993 im Volltext



- ▶ Ein Mitgliedsausweis, dessen Inhaber in zahlreichen Museen und wissenschaftlichen Einrichtungen Vergünstigungen erhält

- ▶ Vergünstigte Sonderhefte und das Produkt des Monats zum Spezialpreis



Spektrum
DER WISSENSCHAFT

Wissenschaft aus erster Hand

www.spektrum.de/aboplus

Defekte Kraftwerke in grauen Zellen

Beim Parkinsonsyndrom sterben Neurone in einer bestimmten Hirnregion ab, weil ihre Energieversorgung gestört ist. Diese neue Erkenntnis könnte Möglichkeiten zur Behandlung der Krankheit in einem frühen, noch symptomfreien Stadium eröffnen.

VON GERLINDE FELIX

Bei der Parkinsonkrankheit, umgangssprachlich auch als Schüttellähmung bezeichnet, gehen nach und nach die Nervenzellen des grau-schwarzen Mittelhirnkerns (Substantia nigra) zu Grunde. Diese Neurone produzieren den Botenstoff (Neurotransmitter) Dopamin und sind für die Feinabstimmung von Bewegungen wichtig. Innerhalb von fünf bis sieben Jahren stirbt bei Parkinsonpatienten etwa die Hälfte von ihnen ab. Dadurch reduzieren sich Spontanbeweglichkeit, Gestik und Mimik. Muskeln versteifen, und die ruhende Hand beginnt zu zittern.

Warum die Nervenzellen der Substantia nigra absterben, ist bis heute nicht geklärt. Schon seit einiger Zeit aber haben Forscher die zellinternen Mitochondrien im Visier. In ihnen läuft die so genannte Atmungskette ab. Dabei setzen diverse Enzyme Wasserstoff stufenweise mit Sauerstoff zu Wasser um und speichern die frei werdende Energie in Form des Moleküls Adenosintri-phos-

phat. Für das Gehirn sind diese zellulären Kraftwerke ganz besonders wichtig; denn das Organ macht zwar nur zwei Prozent des Körpergewichts aus, verbraucht aber 20 Prozent der verfügbaren Energie.

Wissenschaftler an der Harvard Medical School in Cambridge (Massachusetts) haben nun festgestellt, wie die mitochondriale Atmungskette im Vorfeld der Parkinsonkrankheit Schaden nehmen kann (*Science Translational Medicine* 2/52, S. 73). Ihre Erkenntnisse sind das Ergebnis einer Metaanalyse, die 17 Studien mit Gewebeproben von insgesamt 410 Menschen umfasst und im Rahmen des internationalen GPEX-Projekts (Global PD Gene Expression) durchgeführt wurde.

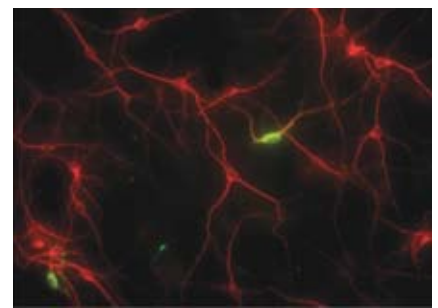
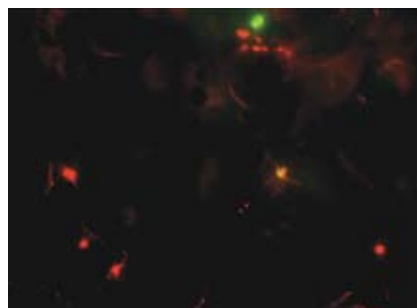
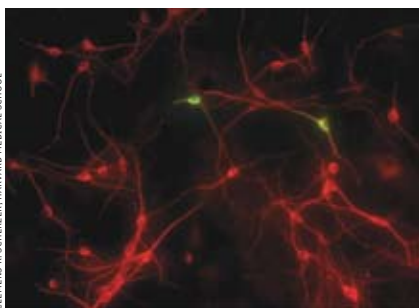
Der Harvard-Wissenschaftler Clemens Scherzer und seine Mitarbeiter analysierten sämtliche von den GPEX-Mitgliedern publizierte Daten über Gewebeproben aus der Substantia nigra verstorbener Menschen, die entwe-

der schon an Parkinsonsymptomen litten, eine noch unauffällige (subklinische) Frühform der Erkrankung aufwiesen oder aber völlig gesund waren.

Verräterisches Transkriptom

Im Mittelpunkt des Projekts stand das so genannte Transkriptom von Dopamin produzierenden Nervenzellen: die Gesamtheit der darin aktiven Gene. Abweichungen zwischen gesunden Personen und Parkinsonpatienten fanden sich bei zehn Gruppen von Genen. Auf diesen sind – so das interessante Ergebnis – ausnahmslos Proteine verschlüsselt, die für die Energieproduktion in den Mitochondrien oder deren Erhalt und Reparatur benötigt werden.

Das spricht deutlich für einen Defekt dieser zellulären Kraftwerke als Ursache der Parkinsonkrankheit: Wahrscheinlich können sie nicht mehr genügend Energie produzieren. Schäden erleiden die Nervenzellen aber wohl auch dadurch, dass hochreaktive Zwi-



Dopamin produzierende Nervenzellen, in dieser Aufnahme mit einem grünen Fluoreszenzfarbstoff markiert, sind normalerweise über viele Fortsätze, hier rot eingefärbt, miteinander verbunden (links). Diese Fortsätze verschwinden nach Injektion des Proteins Alpha-Synuclein, dessen zerstörerische Wirkung auf bestimmte Neurone bekannt ist (Mitte). Wurde zuvor jedoch das Gen *PGC-1-alpha* aktiviert, bleiben sie erhalten (rechts).

schenprodukte der Atmungskette nicht normal weiterverarbeitet oder entsorgt werden. Von beidem sind Dopamin produzierende Nervenzellen als ausgesprochene »Energiefresser« besonders stark betroffen.

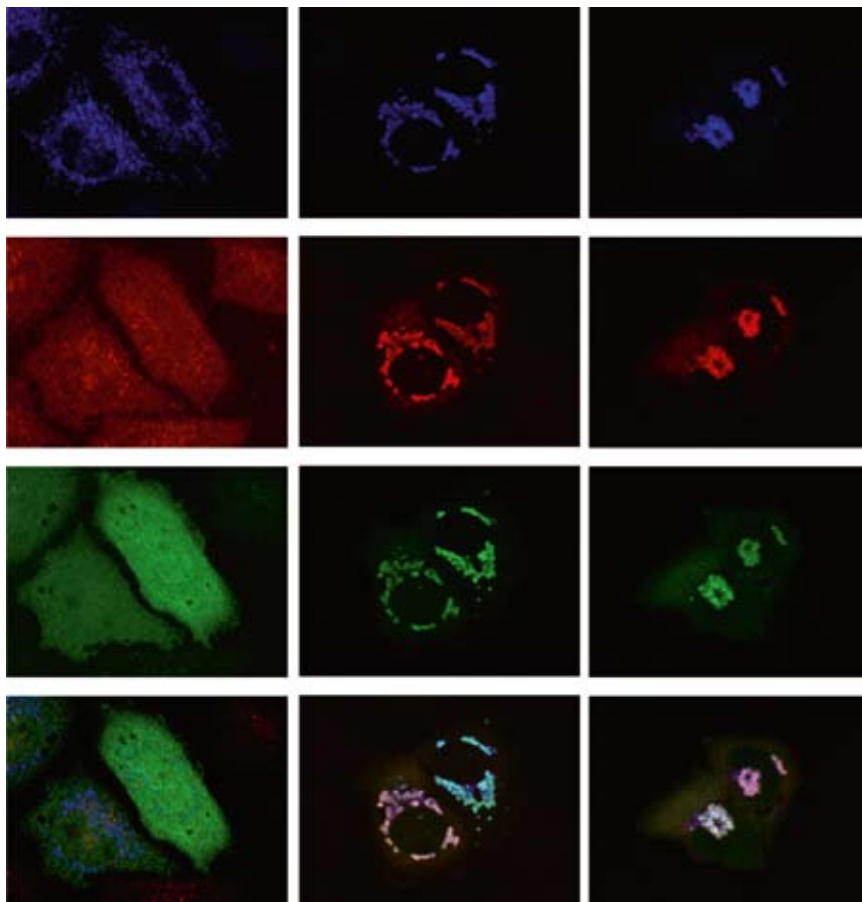
Noch etwas anderes fiel bei der Analyse der Daten auf: Alle Erbfaktoren aus den zehn Gruppen unterstehen einem »Master-Gen« namens *PGC-1alpha* (*peroxisome proliferator-activated receptor gamma coactivator-1alpha*). Es reguliert sie ähnlich wie der Hauptschalter eines Sicherungskastens die Stromversorgung im Haus.

Könnte also ein Fehler bei dieser Regulation, der schon in einem sehr frühen, noch symptomlosen Stadium auftritt, eine Hauptursache der Parkinsonkrankheit sein? Denkbar wäre, dass *PGC-1alpha* auf Grund einer Mutation seine Aufgabe nicht mehr richtig erfüllt oder in zu geringer Konzentration gebildet wird.

In diesem Fall könnte das Protein zum Ansatzpunkt einer frühzeitigen Diagnose oder sogar Therapie der Parkinsonkrankheit werden. Das bestätigen Versuche, bei denen Jean-Christophe Rochet und seine Mitarbeiter an der Purdue University in West Lafayette (Indiana) das Gen *PGC-1alpha* in künstlich gezüchteten Dopamin produzierenden Nervenzellen aktivierten. Diese waren daraufhin sowohl gegen das Pestizid Rotenon gefeit, das parkinsonartige Symptome hervorruft, als auch gegen das Protein Alpha-Synuclein, das als hauptverantwortlich für den Untergang der Neurone in der Substantia nigra gilt.

Schon früher hatte ein Team um Bruce M. Spiegelman vom Dana-Farber Cancer Institute in Boston (Massachusetts) gezeigt, dass MPTP (Methylphenyltetrahydropyridin) bei Mäusen ohne funktionierendes *PGC-1alpha* sehr viel mehr Dopamin produzierende Neurone absterben lässt. Rauschgiftsüchtige, die sich diese Substanz in den 1980er Jahren versehentlich statt der Designerdroge MPPP (Methylphenylpropionoxypiperidin) verabreichten, waren an der Schüttellähmung erkrankt.

Bereits Anfang 2010 veröffentlichten Wissenschaftler des Hertie-Instituts



LIANE SCHÜSTER, UNIVERSITÄT TÜBINGEN

Die fluoreszenzmikroskopischen Aufnahmen von zwei Nervenzellen zeigen – von oben nach unten – die Mitochondrien (blau), die Proteine PINK1 (rot) und Parkin (grün) sowie alle drei Zellbestandteile zusammen. Anfangs liegen PINK1 und Parkin gleichmäßig verteilt im Zellplasma vor (links). Zwei Stunden nach einer chemischen Schädigung der Mitochondrien haben sie sich an deren Außenmembran angereichert (Mitte). Weitere zwei Stunden später erscheinen die Mitochondrien in der Nähe des Zellkerns zu einem kompakten Müllpaket verdichtet (rechts).

für klinische Hirnforschung am Universitätsklinikum Tübingen unter Leitung von Wolfdieter Springer weitere Ergebnisse zur Entstehung von Parkinson (*Nature Cell Biology* 12, S. 119–131). Dabei ging es um die beiden nicht von *PGC-1alpha* regulierten Gene *PINK1* und *Parkin*. Schon länger war bekannt, dass sie in mutierter Form die Krankheit mit verursachen; unklar blieb aber, auf welche Weise.

Nur so viel stand fest: Das von *Parkin* kodierte Enzym gleichen Namens kennzeichnet zum Abbau bestimmte Proteine. Es ähnelt somit Waldarbeitern, die zu fällende Bäume rot markieren. Sein gezieltes Ausschalten bei Mäusen stört folglich die Entsorgung

defekter Mitochondrien. Die Rolle des mitochondrialen Enzyms PINK1 und sein Zusammenwirken mit Parkin bei der Parkinsonkrankheit lag jedoch im Dunkeln. Springer und seine Mitarbeiter brachten nun Licht in dieses Dunkel.

Demnach reichert sich PINK1 in der Außenmembran defekter Mitochondrien an. Dort lockt es das frei in der Zellflüssigkeit schwimmende Parkin an. Dieses verpasst dem geschädigten Organell die Abbaumarkierung in Form des kleinen Moleküls Ubiquitin, das es an das Protein VDAC1 (*voltage-dependent anion channel 1*) an der Oberfläche des Mitochondriums heftet. Weitere Ubiquitinmoleküle lagern sich an das

Macht Sex hellseherisch?

Erotik soll Blick in die Zukunft ermöglichen.

Einer Umfrage zufolge halten zwei Drittel der amerikanischen Psychologen außersinnliche Wahrnehmung für möglich. Wie ich vermute, sind auch hier zu Lande viele Seelenforscher ähnlich aufgeschlossen für Telepathie und Präkognition. Unter ihnen dürfte ein demnächst im renommierten »Journal of Personality and Social Psychology« erscheinender Artikel nur müdes Achselzucken oder gar einverständliches Kopfnicken auslösen.

Mit aufwändigen Versuchsreihen möchte der unter Fachkollegen angesehene Psychologe Daryl Bem, Professor emeritus an der Cornell University im US-Bundesstaat New York, ein für alle Mal den strengen Nachweis führen, dass wir das naturgegebene Vermögen besitzen, mit einem sechsten Sinn in die Zukunft zu schauen. Dieser von manchen Psychologen offenbar lange gehegte Wunsch ist, wenn man Bem folgt, jetzt endlich in Erfüllung gegangen. Wie sich auch ohne Präkognition leicht vorhersehen lässt, haben sich allerdings die Nörgler und Skeptiker sofort auf die im Internet vorveröffentlichte Arbeit (<http://dbem.ws/FeelingFuture.pdf>) gestürzt und methodische Haare in der extrasensorischen Suppe gesucht.

In der wohl spektakulärsten seiner neun Versuchsreihen setzte Bem die Probanden vor einen Computerschirm, auf dem nebeneinander zwei Vorhänge zu sehen waren, und versprach ihnen, hinter einem der beiden könnten sie per Mausclick eine pornografische Szene aufdecken, während sich hinter dem anderen bloß ein neutrales Motiv verberge. Beim Auszählen der Trefferquote fand der wissensdurstige Forscher einen leichten Überhang von gelungenen Enthüllungen, den er stracks als eine naturwüchsige Fähigkeit zu erotischer Hellseherei interpretierte. Verbargen die virtuellen Vorhänge hingegen jeweils zwei ganz andere Motivgegensätze, etwa schöne Landschaft kontra eklige Spinne, so versagte die Präkognition kläglich.

Vielleicht habe sich, so mutmaßt Bem, die spezielle Gabe sexuell angeregter Präkognition im Lauf der Evolution entwickelt, weil sie Vorteile im Daseinskampf bot, insbesondere bei Gefahrenabwehr und Partnerwahl: Wie gut, wenn man schon vorher weiß, ob hinter dem Busch, auf den man neugierig zuhält, gleich ein paarungswilliger Partner hervorspringen wird!

An solchen mehr oder weniger plausiblen Geschichten habe ich durchaus meinen Spaß. Ich hätte mir den Artikel also gerne gefallen lassen, würde Bem nicht am Ende über die Physik hinter der extrasensorischen Wahrnehmung spekulieren. Wie nicht anders zu erwarten, bemüht er dafür – die Quanten. Wozu die nicht alles herhalten müssen! Bem zitiert Kraut und Rüben, wirft mit Begriffen wie Verschränkung, bellscher Ungleichung und Nichtlokalität um sich, als handle es sich um Kanonenkugeln, die den Zusammenhang von Ursache und Wirkung durchlöchern. Da der so genannte Kollaps der Wellenfunktion etwas mit dem Bewusstsein des Beobachters im Messprozess zu tun haben soll, wird die Abfolge von Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft flugs zur bloßen Ansichtssache erklärt. Voilà, fertig ist sie, wenigstens in groben Umrissen, die Physik der außersinnlichen Wahrnehmung.

Und auf einmal dämmert mir auch, wie Bem auf seinen Versuchsaufbau gekommen ist. Wie ich frequentierte er früher wohl einen der inzwischen ausgestorbenen Videoshops, die für ein paar Mark oder Dollar VHS-Kassetten verliehen. Bei den meisten gab es in der Ecke einen Vorhang, hinter dem man pornografisches Material vermuten durfte – mit einer hellseherischen Trefferquote von 100 Prozent!



Michael Springer

erste an und bilden eine Kette, die sich mit denen anderer markierter Organellen vereinigt, so dass ein Knäuel (Cluster) entsteht.

Zugleich erkennt das Adapterprotein p62/SQSTM1 – gewissermaßen der Müllmann der Zelle – diese Kette als Signal zum Aufräumen. Dazu verdichtet es das Knäuel zu einem kompakten Abfallbündel und hüllt es in eine Lipid-Protein-Membran für den Transport zu den Abbaustationen, den Lysosomen. Diese enthalten saure Enzyme, die Proteine spalten und deshalb nicht in die Zellflüssigkeit gelangen dürfen. Indem ihre Membran mit der des Müllpakets verschmilzt, gelangt der Abfall ins Innere des Lysosoms, wo er – risikolos für die Zelle – zerlegt wird.

Sind PINK1 und Parkin durch eine Mutation außer Gefecht gesetzt, läuft dieser komplizierte Vorgang nicht mehr reibungslos ab. Als Folge davon bleiben defekte Mitochondrien zu lange in der Nervenzelle.

Mitochondrien im Fokus

Die beiden Untersuchungen machen deutlich, dass eine gestörte Mitochondrienfunktion und die mangelhafte Entsorgung defekter Kraftwerke eine entscheidende Rolle bei der Entstehung der Parkinsonkrankheit spielen. Damit könnten sie mittelfristig auch eine neue Therapieoption eröffnen. So sind bereits Medikamente, die den Hauptschalter *PGC-1alpha* aktivieren, für andere Erkrankungen zugelassen, zum Beispiel für Diabetes.

Wichtig wäre allerdings auch, mit einem Biomarker die noch symptomfreie Frühform der Parkinsonkrankheit entdecken zu können. Dazu läuft derzeit an der Harvard Medical School eine Untersuchung (Harvard NeuroDiscovery Center Biomarker Study), in der Scherzer und Kollegen 15 aussichtsreiche Kandidaten untersuchen. »Außerdem gibt es viel versprechende Daten zu Alpha-Synuclein als Biomarker in der Gehirn-Rückenmark-Flüssigkeit«, so der Forscher.

Gerlinde Felix ist freie Medizin- und Wissenschaftsjournalistin in Wartenberg.

Ihr Erfolgspaket.

Lesen Sie 4 Wochen das Handelsblatt zum Preis von nur 31,50 €. Sie zahlen nur 1,50 € statt 2,10 € pro Ausgabe und sichern sich ein exklusives Dankeschön Ihrer Wahl.



... PLUS

CERRUTI Rollerball H204000CR
Rollerball aus der CERRUTI-Manufaktur mit auswechselbarer, schwarz schreibender Mine



... ODER

Troika Inukshuk H204000IK
Geduldsspiel und multifunktionales Schreibtisch-Objekt, bestehend aus 5 magnetischen Steinen (Kunstharz) und Edelstahlunterlage, grau.



... ODER

Bergmann popcube H204000CW
Retro-UKW-Radio mit Direct-Dock-in für fast alle gängigen MP3-Player, weiß. Lieferung ohne iPod.



**4 Wochen für nur
1,50 € pro Ausgabe**
28% Ersparnis + Geschenk

Bestellen Sie jetzt!

 **Online unter: www.handelsblatt.com/4wochenlesen**

 **Per Telefon: 0 180 5.99 00 10* • Code: H204000**

*0,14 €/Min. a. d. dt. Festnetz, Mobilfunkhöchstpreis 0,42 €/Min.

Handelsblatt

Substanz entscheidet.