

ASTROPHYSIK DIE QUELLE DER ENERGIEREICHSTEN TEILCHEN

Astrophysiker haben erstmals die Herkunft eines extrem energiereichen Neutrinos nachgewiesen. Es kommt von außerhalb der Milchstraße und hat das halbe Universum durchquert.

So könnte es sich zugetragen haben: Vor 3,78 Milliarden Jahren, in einer fernen, noch jungen Galaxie, stellt ein supermassereiches Schwarzes Loch seinen Appetit. Große Mengen von Wasserstoffgas verschwinden auf Nimmerwiedersehen hinter seinem Ereignishorizont. Doch einigen Teilchen gelingt die Flucht. Von starken Magnetfeldern beschleunigt, werden diese Wasserstoffatomkerne in zwei gegenläufig gerichteten Strahlen ins All katapultiert und können so der Anziehungskraft des Gravitationsmonsters entkommen.

Nach kurzer Zeit prallen einige der Teilchen mit anderen Atomkernen zusammen. Unter den Trümmern dieser Kollisionen befinden sich auch so genannte Myon-Neutrinos – ungeladene, extrem leichtgewichtige Teilchen, die sich mit beinahe Lichtgeschwindigkeit davonmachen. Ohne von Magnetfeldern oder anderer Materie beeinflusst zu werden, fliegt eines von ihnen geradlinig auf eine Spiralgalaxie namens Milchstraße zu, genauer auf einen blauen Planeten in einem der Außenbezirke.

Lange deutet nichts darauf hin, dass ihm dort etwas Aufregendes begegnen könnte. Neutrinos durchdringen dickste Wände, ja ganze Planeten, ohne eine Spur zu hinterlassen. Sie fliegen einfach immer weiter geradeaus. Doch wenige Jahre bevor das 3,78 Milliarden Jahre alte Neutrino auf der Erde ankommt, haben deren Bewohner eine ausgeklügelte Falle errichtet: Einen Detektor namens IceCube (siehe Spektrum 8/2007, S. 38). Er besteht aus mehr als 5000 hochempfindlichen Lichtsensoren, die über einen Kubikkilometer verteilt im ewigen Eis der südlichen Polarkappe versenkt wurden.

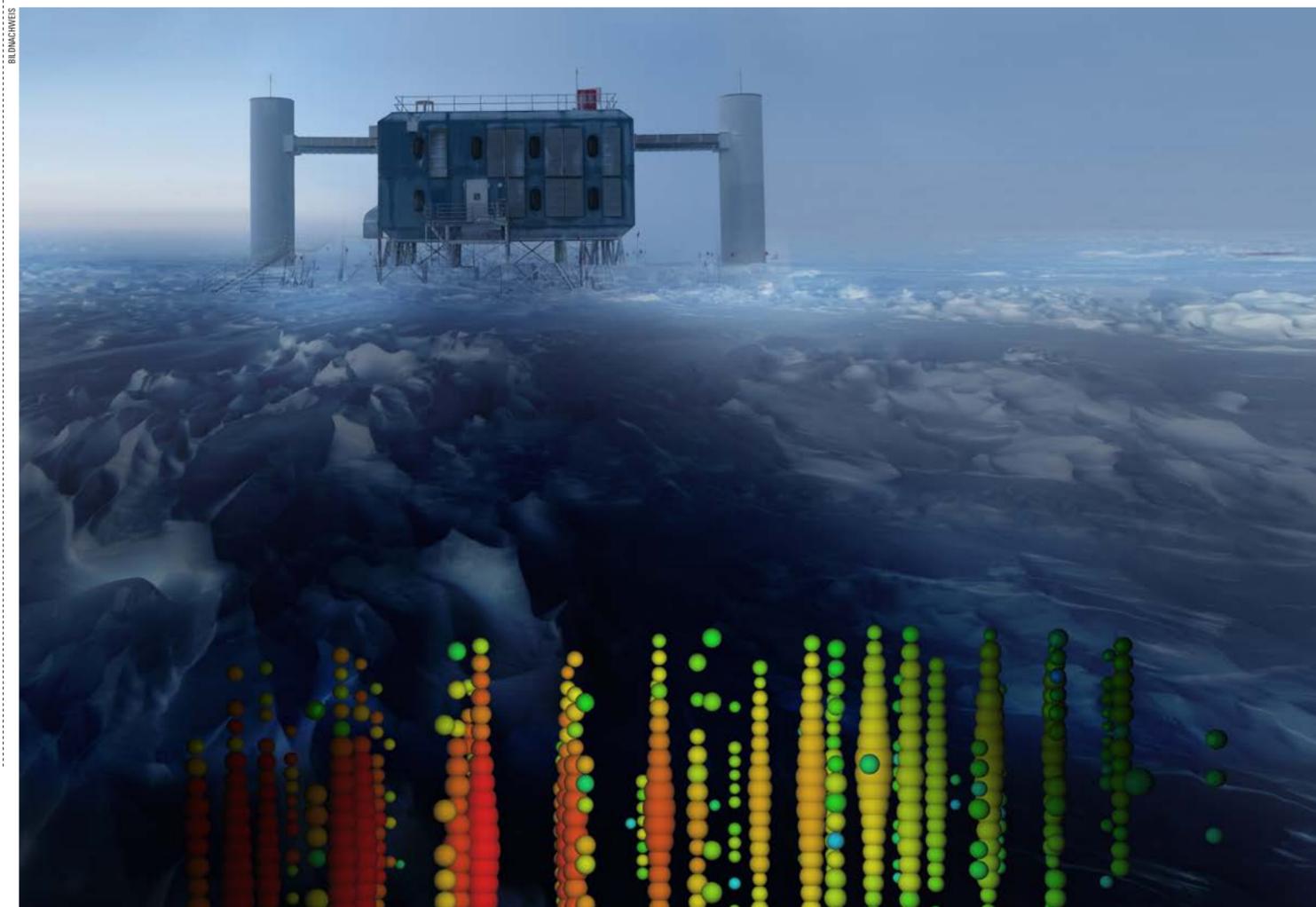
Ein ultrakurzer Lichtblitz für die Geschichtsbücher
Als das Neutrino am 22. September 2017, um 22:54:30 Uhr mitteleuropäischer Zeit in das Eis der Antarktis eindringt, geschieht etwas, was ihm seit seiner Abreise nicht passiert ist: Es rast in einen Atomkern und verwandelt sich dabei in ein so genanntes Myon-Elementarteilchen – und wegen der in IceCube installierten Elektronik werden Menschen über dieses Ereignis sofort informiert. Denn anders als das Neutrino ist das Myon als schwerer Verwandter des Elektrons elektrisch geladen. Bei seinem Weg durch das Eis der Antarktis setzt das Teilchen daher für kurze Zeit bläuliche Lichtpulse frei, so genannte Cherenkov-Strahlung, die von den Fotosensoren im Eis aufgefangen wird.

Damit ist das Neutrino enttarnt. Es erhält den Namen IceCube-170922A – und wird wohl in die Wissenschaftsgeschichte eingehen. Denn bei ihm handelt es sich mit großer Wahrscheinlichkeit um das erste Neutrino aus einer

weit entfernten Galaxie, bei dem Wissenschaftler den Ursprungsort ausfindig machen konnten. Bisher war – abgesehen von der Sonne, die pro Sekunde unzählige der Teilchen ausspuckt – nur eine Neutrinoquelle im Weltall identifiziert worden: die Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke, einer Satellitengalaxie der Milchstraße. Vor 31 Jahren traf ein ganzer Schwall Neutrinos aus der Explosion die irdischen Detektoren. Seither gelten Supernovae als eine wichtige Quelle für Neutrinos, allerdings nur bis zu einer bestimmten Teilchenenergie.

Völlig überraschend ist die nun verkündete Entdeckung des extragalaktischen Neutrinos, die Wissenschaftler rund um den Globus als Sensation feiern, derweil nicht: In den

Est, occus am endis etur, nobitatat ut officitiunt quis eicitam esse cori am volut perunti alibus simpore ctusam aboressit vent. Liquis asperum reprotati volorro occum ab



vergangenen Jahren haben die Forscher von IceCube immer wieder Hinweise darauf entdeckt, dass irgendwo im All Neutrinos auf gewaltige Energien beschleunigt werden. So registrierte der Südpol-Detektor seit August 2008 mehrere hundert Teilchen pro Jahr, die offenbar aus den Tiefen des Alls stammen.

Die meisten von ihnen sind wesentlich energiereicher als die Neutrinos aus der Sonne. Da ihre Herkunftsrichtungen über den gesamten Himmel verteilt sind, galt es als sehr wahrscheinlich, dass sie nicht aus der Scheibe der Milchstraße stammen, sondern von fernen Galaxien. Und dort bringen in erster Linie die turbulenten Umgebungen von Schwarzen Löchern im Kern der Galaxien die notwendigen Energien auf, um die Teilchen derart stark anzuschubsen.

Doch bislang war es nicht gelungen, eine neutrinoschleudernde Galaxie auch wirklich zu identifizieren. Mit 170922A scheint dies nun zum ersten Mal geglückt zu sein. Nur 43 Sekunden, nachdem IceCubes Echtzeit-Auswertesystem das Neutrino erkannt hatte, übermittelte es einen automatisierten Alarm an andere Observatorien auf der ganzen Welt. Vier Stunden später folgte eine detailliertere Information mit genauer Positionsangabe.

Zum Zeitpunkt des Alarms war klar: Sofern das Neutrino tatsächlich aus dem Umfeld eines Schwarzen Lochs stammt, sollte die davongeschleuderte Materie auch energiereiche elektromagnetische Strahlung praktisch aller

Wellenlängen ausgestoßen haben. Und dieses Licht musste dann gleichzeitig auf der Erde ankommen und mit geeigneten Teleskopen messbar sein.

Schwarzes Loch mit großem Hunger

Die aus den IceCube-Daten rekonstruierten Himmelskoordinaten deuteten auf einen Punkt im nördlichen Teil des Sternbilds Orion, von dem das Neutrino offenbar stammte. Tatsächlich liegt nur 0,1 Grad neben der Position eine seit Längerem bekannte Gammastrahlenquelle: der Blazar TXS 0506+056 im Sternbild Orion. Blazare sind eine Unterart der aktiven Galaxien – Galaxien also, deren zentrales Schwarzes Loch große Materiemengen verschlingt.

avjigivuagoup

Bei einem Blazar ist zusätzlich einer der beiden Materiestrahlen, entlang derer sich die vom Schwarzen Loch fliehende Materie bewegt, direkt auf die Erde gerichtet. Die Partikelschleudern verraten sich daher oftmals durch minuten- oder auch jahrelange Ausbrüche, während derer sie große Mengen Gammastrahlung aussenden. Damit war ein Verdächtiger ausgemacht. Um ihn zu überführen, mussten die Astrophysiker nun nur noch einen solchen Gammastrahlenausbruch ausfindig machen, dessen Strahlung aus genau derselben Richtung kommt wie das IceCube-Neutrino.

Am 22. September 2017 reagierte als erstes Gammateleskop der amerikanische Satellit Fermi auf den Alarm vom Südpol. Fermis Large Area Telescope (LAT) liefert seit 2008 alle drei Stunden ein Bild des gesamten Himmels im Gammalicht. Tatsächlich berichtete die Fermi-Kollaboration am 28. September, dass sich TXS 0506+056 seit April 2017 in einem Zustand erhöhter Aktivität befunden hatte.

Einige Tage später bestätigten auch die MAGIC-Teleskope auf der Kanareninsel La Palma, eines von drei großen bodengestützten Gammaobservatorien, ein energiereiches Gammasignal von TXS 0506+056 – das erste Mal überhaupt von dieser Quelle. Es folgten weitere Beobachtungen mit Röntgen-, Radio- und optischen Teleskopen. Schließlich gelang es Astronomen mit dem optischen Zehn-Meter-Teleskop GranTeCan, ebenfalls auf La Palma, die Entfernung des Blazars zu bestimmen: Sie entspricht der oben genannten Lichtlaufzeit von 3,78 Milliarden Jahren.

Alle diese Beobachtungen deuteten darauf hin, dass das Neutrino 170922A tatsächlich aus dem Blazar stammt. Doch nach dem 22. September registrierte IceCube kein weiteres Neutrino aus TXS 0506+056 mehr. Könnte es sich womöglich nur um einen Zufall gehandelt haben? Gibt es wirklich einen kausalen Zusammenhang zwischen der Gammastrahlung und dem Neutrino?

Zwar geben die Forscher die Wahrscheinlichkeit für einen solchen Zufall mit weniger als 0,15 Prozent an – völlig auszuschließen ist er mit nur einem einzelnen Neutrino aber nicht. Es mussten also noch andere Indizien her. Deshalb haben sich die Wissenschaftler durch die im Lauf der vergangenen neun Jahre gesammelten Daten ihres Detektors gearbeitet. Schließlich betrachtet IceCube

anders als zum Beispiel optische Teleskope keine einzelnen Objekte, sondern registriert Neutrinos, die aus allen möglichen Richtungen auf die Nordhemisphäre der Erde treffen und damit einmal quer durch die Erdkugel geflogen sind (Neutrinos aus der südlichen Hemisphäre lassen sich hingegen nur schwer von Myonen aus der Atmosphäre unterscheiden, die keine so großen Strecken durch die Erde zurücklegen können).

Und siehe da: Bereits Ende 2015 fing der Detektor aus der Richtung von TXS 0506+056 eine Reihe von Neutrinos auf. Damals registrierte das Observatorium über einen Zeitraum von mehreren Wochen rund ein Dutzend der Teilchen über dem zu erwartenden Detektorrauschen. Die hatten zwar weniger Energie als 170922A mit seinen 290 Teraelektronvolt und sind aus diesem Grund nicht gleich aufgefallen (zum Vergleich: ein Protonenstrahl im 27 Kilometer großen Large Hadron Collider des CERN kreist mit sieben Teraelektronvolt). Eine solche Häufung an der Position eines bekannten Blazars ist aber ein weiterer, unabhängiger Beleg für die Hypothese, dass TXS 0506+056 tatsächlich eine Neutrinoquelle ist.

TXS 0506+056 gehört zwar zu den 50 hellsten Quellen für Gammastrahlen am Himmel, doch es gibt noch weit hellere und nähere Blazare. Warum sollte ausgerechnet dieser Blazar der erste sein, von dem IceCube ein energiereiches Neutrino empfängt? Die Forscher erklären das mit seiner Position am Himmel. Von IceCube am Südpol aus gesehen steht TXS 0506+056 flach unter dem Horizont. Das bedeutet, dass Neutrinos aus dieser Richtung eine weniger lange Strecke durch die Erdkugel zurücklegen müssen, als die von weiter nördlich stehenden Objekten. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein solches Neutrino vor Erreichen des Detektors von der Erdmasse absorbiert

wird, ist daher kleiner.

Mit 170922A beginnt ein neues Kapitel der Neutrinoforschung. Das Ereignis eignet sich auch als Paradebeispiel für die so genannte Multi-Messenger-Astronomie: Mit verschiedenen Instrumente beobachten Wissenschaftler ein und dasselbe Phänomen am Himmel – und erlangen durch die Kombination der Messdaten tiefere Einblicke in die zu Grunde liegenden Mechanismen.

Bestätigt sich der Befund, dass Blazare Neutrinos ins All feuern, dann sind die Astrophysiker auch in einem zentralen Rätsel ihrer Disziplin ein Stück weitergekommen: Seit Jahrzehnten gehen sie der Frage nach, welche Prozesse im Weltall Teilchen und Atomkerne auf so hohe Energien beschleunigen können, dass sie auch nach einer Milliarden Jahre währenden Reise noch gut nachweisbar sind.

Für Neutrinos könnte eine der Hauptquellen dieser kosmischen Strahlung nun identifiziert sein. Allerdings gehen Experten davon aus, dass Blazare für nur 30 bis 80 Prozent des gesamten kosmischen Neutrinoflusses verantwortlich sein können. Es muss also noch weitere Produktionsstätten der flüchtigen Teilchen geben. Für die ziemlich neue Berufssparte der Neutrinoastronomie wird die Arbeit also so schnell nicht ausgehen. ◀

Jan Hattenbach ist Wissenschaftsjournalist auf La Palma.

QUELLEN

The IceCube Collaboration et al.: Multimessenger observations of a flaring blazar coincident with high-energy neutrino IceCube-170922A. In: Science 361, Ausgabe 6398, 2018

The IceCube Collaboration et al.: Neutrino emission from the direction of the blazar TXS 0506+056 prior to the IceCube-170922A alert. In: Science 361, Ausgabe 6398, 2018

NEUROWISSENSCHAFTEN HUNGER KONTRA SCHMERZ

Eine bestimmte Gruppe von Hirnzellen reguliert, welche der konkurrierenden Empfindungen Hunger und Schmerz Vorfahrt hat. Dabei entscheidet die Art des Schmerzes.

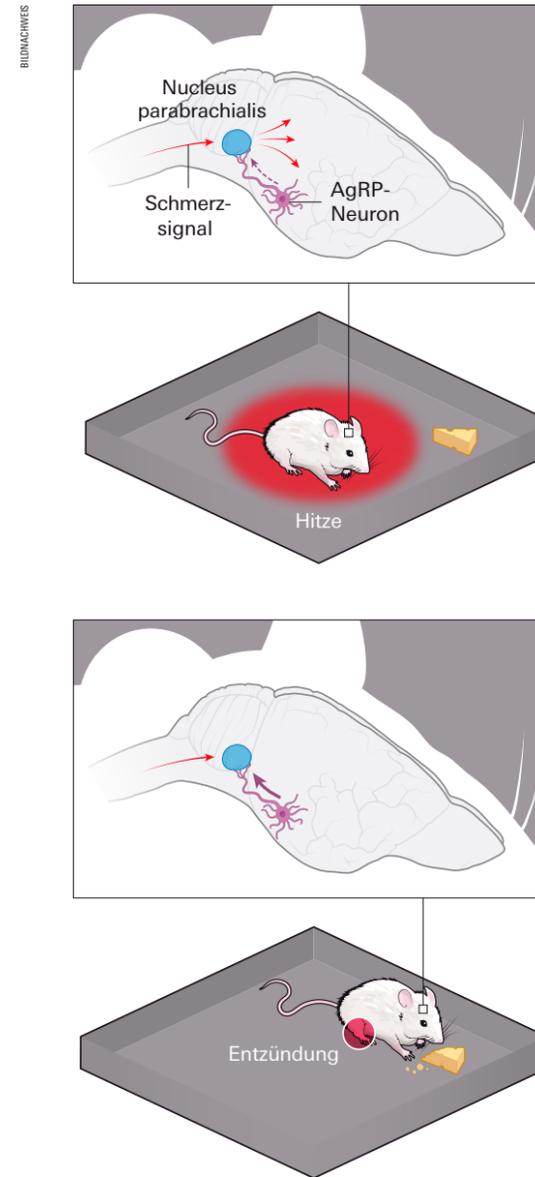
Zu den grundlegenden Bedürfnissen des Körpers gehören die regelmäßige Versorgung mit Nährstoffen sowie die Vermeidung von Gewebeschäden, was das Gehirn jeweils als Hunger oder Schmerz registriert. Beides lässt sich aber kaum gleichzeitig befriedigen, da hierfür Verhaltensweisen notwendig sind, die sich gegenseitig ausschließen. Wie entscheidet das Gehirn, was in einer bestimmten Situation am dringendsten ist?

Wie die Arbeitsgruppe von Nicholas Betley von der University of Pennsylvania in Philadelphia (USA) herausgefunden hat, hängt diese Priorisierung von der Art des Schmerzes ab: Hirnzellen, die das Hungergefühl vermitteln, unterdrücken chronische Beschwerden, wie sie etwa durch Entzündungen entstehen. Ein akuter Schmerz

dagegen – der eine unmittelbare Bedrohung signalisiert – dämpft die Aktivität dieser Neurone und stuft damit die Nahrungsaufnahme in der Dringlichkeit herab.

Das Team ließ Labormäuse 24 Stunden lang fasten und untersuchte dann ihr Schmerzverhalten. Dabei zeigte sich, dass die hungrigen Mäuse langanhaltende Schmerzen, wie sie bei chronischen Krankheiten oder Wunden auftreten, offenbar weniger empfanden als eine Kontrollgruppe. Dagegen reagierten sie trotz Hungers gleich stark auf akute Schmerzen, ausgelöst durch Chemikalien, Hitze oder Gewalteinwirkung.

Die Ursache dafür verbirgt sich im Hypothalamus des Gehirns, der verschiedene neuronale Strukturen enthält, welche die Nahrungsaufnahme regulieren. Eine davon, der



Ex escieni hictota tqiberum fugiat id quo is sitati illorum veles non perites trumquam, nimporeit aut estiu repudae voluptas eate reerius volor sollabore resequis a que nis excerror ad que ime pore nisimus ame poris evel moluptat et quateculpa nes aliquid utatem et optas

Nucleus arcuatus, beinhaltet eine Gruppe von Nervenzellen, die den Neurotransmitter AgRP (Agouti-related Protein) produzieren und damit Nahrungsbedarf signalisieren: Die Aktivierung der AgRP-Neurone löst gieriges Fressen aus, während Tiere, bei denen diese Zellen zerstört worden sind, kaum noch Futter zu sich nehmen. Wie Betley und seine Kollegen jetzt beobachteten, fördert die Stimulation der AgRP-Neurone die schmerzhemmenden Effekte des Hungers. Werden diese Nervenzellen hingegen stillge-

legt, bleibt die Schmerzunterdrückung aus.

AgRP-Neurone stehen mit vielen anderen Hirnarealen in Kontakt. Nicht alle dieser Verbindungen regulieren allerdings die Nahrungsaufnahme. Um die schmerzhemmenden Verknüpfungen bei Entzündungen aufzuspüren, aktivierte Betleys Arbeitsgruppe systematisch AgRP-Neurone, die mit sieben verschiedenen Hirnregionen interagieren. Dabei beobachteten die Forscher eine besonders starke Unterdrückung entzündlicher Schmerzen, wenn sie Verbindungen stimulierten, die zum Nucleus parabrachialis im Hinterhirn ziehen. Diese Struktur gehört zum zentralen schmerzverarbeitenden Netzwerk, das entsprechende Signale aus dem Rückenmark in verschiedene Hirnregionen verteilt. Dabei steigern Schmerzreize die Aktivität von Neuronen des lateralen Nucleus parabrachialis (IPBN), die Signale von AgRP-Zellen empfangen, wohingegen Nahrungsaufnahme ihre Aktivität hemmt. Demnach unterdrücken IPBN-Neurone den Appetit in kritischen Situationen, wenn die Futtersuche riskant sein könnte, während ihre Hemmung durch AgRP-Neurone diese Blockade bei länger anhaltenden Entzündungen abschaltet.

savaavae

AgRP-Zellen produzieren drei verschiedene Neurotransmitter, die eine Nahrungsaufnahme ankurbeln: das namensgebende AgRP sowie g-Aminobuttersäure (GABA) und das Neuropeptid Y (NPY). Eine solche simultane Signalübertragung über mehrere Neurotransmitter ist bei vielen Hirnzellen verbreitet, was es erschwert, die Rolle der einzelnen Substanzen gezielt aufzuklären. Die Forscher um Betley überwand dieses Hindernis, indem sie jeden Neurotransmitter gesondert in den IPBN injizierten. So fanden sie heraus, dass weder AgRP noch GABA eine Schmerzlinderung hervorruft. NPY hingegen unterdrückt entzündlich bedingte Beschwerden über den Y1-Rezeptor auf der Zelloberfläche von IPBN-Neuronen.

Schließlich zeigten die Wissenschaftler, dass akuter Schmerz die Aktivität von AgRP-Neuronen rasch und ausgeprägt herunterfahren lässt. Eine ähnliche Aktivitätsreduktion tritt auf, wenn ein Tier Nahrung wittert, was vermutlich dazu dient, die appetitgesteuerte Futtersuche einzustellen und das Gefundene zu fressen. Signale aus weiteren Hypothalamus-Strukturen, die nicht zum Nucleus arcuatus gehören, unterstützen dieses Verhalten.

Damit ergibt sich folgendes Bild: Akuter Schmerz löst eine Verhaltensänderung aus, indem er die Aktivität der AgRP-Neurone drosselt. Dadurch können diese Nervenzellen wiederum nachgelagerte, in die Nahrungsaufnahme involvierte Hirnregionen nicht mehr aktivieren. Gleichzeitig alarmieren jetzt akut auftretende Schmerzsignale aus dem Rückenmark über den IPBN weitere Hirnareale und leiten dort die Abwehr schädlicher Reize ein (siehe linke Grafik auf S. XX).

Dagegen erfordern entzündlich bedingte Schmerzen keine rasche Verhaltensänderung. Die aktivierten AgRP-Neurone unterdrücken entsprechende Signale und hemmen vermutlich die IPBN-Neurone. Die Schmerzinformati-

Wie das Gehirn Prioritäten setzt

Die Arbeitsgruppe von Nicholas Betley beschreibt, wie Nervenzellen, die den Neurotransmitter AgRP (Agouti-related Protein) produzieren, die beiden konkurrierenden Empfindungen von Hunger und Schmerz im Mausgehirn regulieren: Spürt das Versuchstier akuten Schmerz, etwa durch Hitze an den Pfoten, gelangen entsprechende Signale an den Nucleus parabrachialis (links). Gleichzeitig werden die AgRP-Neurone gehemmt (gestrichelter Pfeil), so dass die Schmerzsignale über den Nucleus parabrachialis ungehindert weitere Hirnareale erreichen können.

Bei langanhaltender Pein etwa durch eine Entzündung, bleiben dagegen die appetitfördernden AgRP-Neurone aktiv. Diese Nervenzellen senden dann Signale an den Nucleus parabrachialis und blockieren hier die Weiterleitung der Schmerzinformationen – das Tier kann seinen Hunger stillen.

onen erreichen daher nicht andere Hirnregionen – die Futtersuche geht also weiter (siehe rechte Grafik auf S. XX). Dieser bislang unbekannt Mechanismus der Priorisierung widerstreitender Bedürfnisse erhellt, wie der Hypothalamus sowohl die neurochemischen Charakteristika von Hirnzellen, als auch ihre spezifische Verschaltung nutzt, um zur Situation passende Verhaltensentscheidungen zu treffen.

Die Arbeit von Betley und seinen Kollegen erlaubt unterschiedliche Schlussfolgerungen: Erstens erscheint das Schmerzlinderungspotenzial der AgRP-Neurone vergleichbar mit dem von Opiaten – zumindest bei länger anhaltenden Beschwerden. Wie die Autoren betonen, legen die beobachteten Unterschiede in der Verarbeitung akuter und chronischer Pein nahe, dass diese auch unterschiedlich behandelt werden sollten, indem man an verschiedene Zellpopulationen oder Zielproteinen medikamentös angreift. Zudem wäre es sicherlich hilfreich, Schmerzmittel zu entwickeln, denen die Nebenwirkungen der Opiate fehlen. Als möglichen Angriffspunkt solcher Wirkstoffe schlagen die Forscher die NPY-Signalübertragung am Y1-Rezeptor im IPBN vor.

Zweitens zeigt die detaillierte Beschreibung eines Signalwegs, in dem Informationen über zwei negative Zustände (Hunger und Schmerz) interagieren, wie sich auch andere biologische Mechanismen aufklären lassen, die über komplexe und dynamisch regulierte Hierarchien menschlicher und tierischer Verhaltensweisen entscheiden. Prinzipiell ähnliche, aber in anderen Hirnregionen ablaufende Mechanismen könnten die Nahrungsaufnahme hungrierer Mäuse bei Entzündungen weiter fördern, etwa

über eine schmerzlindernde Wirkung während des Fressens. Dieser Effekt dürfte von AgRP-Zellen unabhängig verlaufen, da deren Aktivität nach der sensorischen Wahrnehmung von Futter ja abnimmt. Die Hierarchie der Verhaltensweisen während der Nahrungsaufnahme wird daher vermutlich von anderen Nervenzellgruppen kontrolliert – möglicherweise von Neuronen im lateralen Hypothalamus, der mit dem Nucleus parabrachialis verbunden ist und mehrere Nervenzellansammlungen enthält, die bei der Nahrungsaufnahme aktiv sind.

Auch bei Essstörungen wie Anorexie treten negativ empfundene Zustände auf, die miteinander konkurrieren: Hunger und Widerwillen gegen Essen. Mit Speisen assoziierte Reize lösen die Aversion aus und hemmen so die Nahrungsaufnahme. Das Verständnis der Interaktionen zwischen Neuronen, die das Hungergefühl vermitteln und solchen, die emotionale Reaktionen auf Nahrung kontrollieren, könnte dazu beitragen, die neuronalen Mechanismen von Essstörungen aufzuklären. ◀

Alexey Ponomarenko ist promovierter Biologe am Institut für Klinische Neurowissenschaften und Medizinische Psychologie der Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf. Tatiana Korotkova ist promovierte Biologin am Max-Planck-Institut für Stoffwechselforschung in Köln.

QUELLE

Alhadeff, A. L. et al.: A Neural Circuit for the Suppression of Pain by a Competing Need State. In: Cell 173, S. 140–152, 2018

nature

© Nature Publishing Group

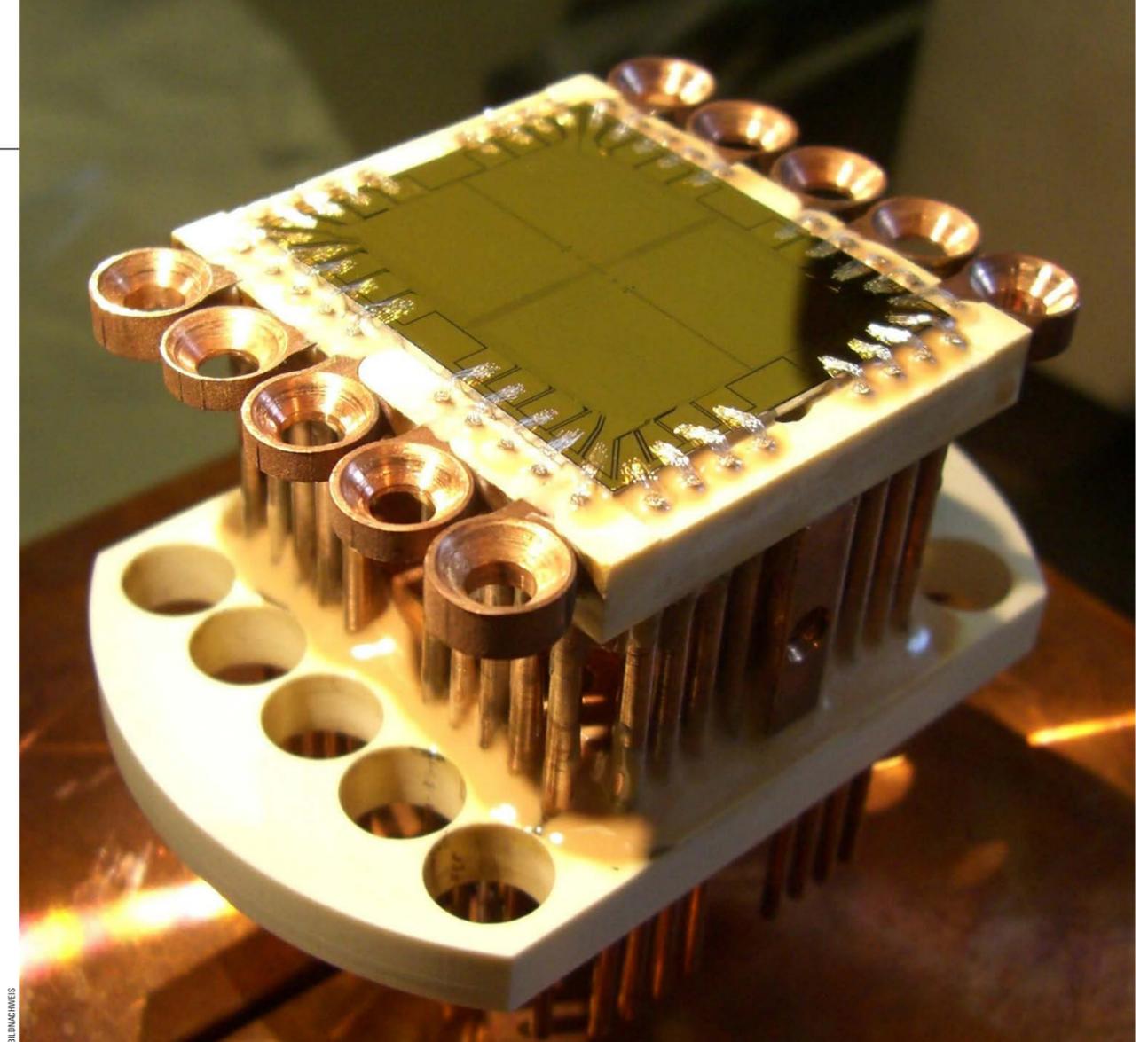
www.nature.com

Nature 556, S. 445–446, 26. April 2018

PHYSIK QUANTENZIGARREN IN RÄTSELHAFTEM GLEICHTAKT

Wissenschaftler haben zwei besonders geformte, ultrakalte Atomwolken quantenmechanisch gekoppelt. Dabei glichen sich die Eigenschaften beider Objekte viel stärker aneinander an als die etablierten Modelle erlauben.

► Nur wenn man es mit wenigen Teilchen zu tun hat, lassen sich die Gleichungen der Quantenmechanik überhaupt exakt lösen – und selbst das ist aufwändig. Quantensysteme aus hunderten oder tausenden Atomen sind auch mit den besten Computern nicht vollständig berechenbar. Physiker müssen die Wissenslücken bei den grundlegenden Gesetzen der Vielteilchen-Quantenphysik deswegen mit Experimenten schließen.



BILDARCHIV

Werden dünne Wolken aus tausenden Atomen auf extrem niedrige Temperaturen abgekühlt und gleichzeitig in einem engen Bereich festgehalten, findet ein spezieller Phasenübergang statt: Die Atome verlieren ihre Individualität und verhalten sich als ein einziges Quantenobjekt – ein so genanntes Bose-Einstein-Kondensat entsteht. Die Wolken sind im Labor hervorragend kontrollierbar, etwa mit Hilfe elektromagnetischer Felder. Außerdem lassen sich kalte Atome gut von ihrer Umgebung trennen, eine unverzichtbare Voraussetzung, um Quanteneffekte zu beobachten.

Am Atominstytut der Technischen Universität Wien haben wir an einem solchen System einen überraschenden Effekt entdeckt, der sich mit den bisher bekannten Regeln der Quantenmechanik nicht ausreichend erklären lässt. Dazu haben wir Rubidiumatome in einer Kammer mit Ultrahochvakuum auf eine Temperatur von wenigen Nanokelvin gebracht und in einem Magnetfeld gefangen gehalten. Normalerweise versucht man bei einem Bose-Einstein-Kondensat, die Atome auf einen winzigen Punkt zu konzentrieren. Ein Atomchip genanntes Gerät in den Wiener Labors (siehe Bild oben) ermöglicht durch hochpräzise elektromagnetische Felder allerdings auch geome-

Mit den Schaltkreisen auf einem etwa drei Zentimeter großen »Atomchip« erzeugen die Forscher elektromagnetische Felder, mit denen sie Teilchen einfangen. Diese schweben dann dicht über der Oberfläche und lassen sich für Experimente weiter manipulieren.

trisch kompliziertere Konfigurationen. In Kombination mit externen Magnetspulen zwangen wir die ultrakalten Atomwolken in eine besondere dreidimensionale Form. Wir begrenzten den Raum, in dem sich die Atome aufhalten konnten, eng in einer Richtung, ließen ihn hingegen in einer anderen viel weiter ausgedehnt. So entstand eine Art Zigarre, die etwa tausendmal länger war als breit.

Die Atome können in so einem Zustand nur bestimmte, diskrete Energien annehmen. Welche das sind, hängt nach den Gesetzen der Quantenphysik vom verfügbaren Platz ab: Je schmaler der Aufenthaltsbereich, umso größer wird der Abstand zwischen den quantenphysikalisch erlaubten Werten. Wenn die Temperatur der Atomwolke dabei sehr niedrig ist, verfügt jedes Teilchen nur über wenig Energie. Dann schafft man es durch Einsperren der Atome, dass sie bloß den geringstmöglichen Wert annehmen – bereits der

nächsthöhere Energiezustand ist unerreichbar. In diesem Fall haben alle Atome denselben Quantenzustand, und ein Bose-Einstein-Kondensat entsteht.

Was aber passiert mit der zigarrenförmigen Atomwolke? Ihre Bewegungsenergie setzt sich aus zwei mathematisch separierbaren Komponenten zusammen: In Längsrichtung der Zigarre haben die Atome relativ viel Platz. Dort kann die Bewegungsenergie viele, nah beieinanderliegende Werte annehmen. Senkrecht dazu sind die Atome stark beschränkt. Bei der richtigen Temperatur entsteht ein »Quasi-Kondensat«, bei dem sich die Atome in der engen Richtung wie ein Bose-Einstein-Kondensat verhalten, während sie in der anderen unterschiedliche Quantenzustände annehmen können.

Hin und her springende Atome sorgen für eine quantenmechanische Verbindung

Die passenden elektromagnetischen Felder ermöglichen sogar zwei zigarrenförmige Atomwolken nebeneinander. Wenn der Abstand zwischen beiden sehr klein ist, dann können einzelne Atome von einer Wolke zur anderen wechseln. Zwar erlauben es die Gesetze der klassischen Physik nicht, die Barriere des elektromagnetischen Felds zu überwinden. Doch weil die Energie eines Quantenteilchens eine gewisse Unschärfe haben kann, bewegt es sich mit Hilfe des so genannten Tunneleffekts gelegentlich durch herkömmlich verbotene Bereiche hindurch.

Solche Atome koppeln beide Wolken quantenphysikalisch miteinander. Das hat Auswirkungen auf die »Phase« der Atomwolken, eine entscheidende Eigenschaft eines Bose-Einstein-Kondensats. Die Phase kommt einzig durch die Welleneigenschaften der Materie zu Stande, in der klassischen Physik gibt es dafür keine Entsprechung. So wie eine akustische Welle eine Abfolge von Wellenbergen und -tälern ist, hat auch ein Bose-Einstein-Kondensat (oder das zigarrenförmige Quasi-Kondensat) Welleneigenschaften und zu jedem Zeitpunkt einen bestimmten Wert zwischen Berg und Tal.

Die Phasen der Atomwolken selbst sind prinzipiell nicht messbar. Allerdings lässt sich die Phasendifferenz zwischen beiden untersuchen: Schwingen die Quasi-Kondensate im gleichen Takt oder leicht versetzt zueinander? Das lässt sich herausfinden, indem man die elektromagnetische Barriere entfernt. Dann vereinen sich die Atomwolken und interagieren. Es kommt zu einer beobachtbaren Interferenz, ähnlich wie bei dem bekannten Doppelspalt-Experiment.

Man kann gezielt eine bestimmte Phasendifferenz zwischen den beiden Atomwolken erzeugen und dann beobachten, wie sie sich im Lauf der Zeit verändert. Ein Vergleich aus der klassischen Welt ist die Vorstellung zweier Pendeluhren, die gleich schnell, aber zueinander leicht versetzt ticken. Die Kopplung der beiden Atomwolken durch das Hin- und Herwechseln von Atomen entspräche dann einem Gummiband zwischen den Pendeln. Durch dieses sollten die Uhren sich synchronisieren – ihre Phasen angleichen – und nach einiger Zeit wieder desyn-

chronisieren. Wenn die Energie im System perfekt erhalten bleibt, sollten sich Synchronisierung und Desynchronisierung theoretisch endlos abwechseln.

Bei den Atomwolken haben wir erstaunlicherweise etwas ganz anderes beobachtet: Die Phasen der beiden Atomwolken glichen sich extrem rasch aneinander an und blieben synchronisiert. Das ist genau das, was man in einem dissipativen System erwarten würde, aus dem Energie verlorengeht. Bei den Pendeluhren kann das etwa durch ein nicht perfekt elastisches Gummiband geschehen, das bei jedem Dehnen ein bisschen Energie in Wärme umwandelt. Doch bei den Atomwolken ist aus theoretischer Sicht völlig unklar, welcher Mechanismus dahinter steckt.

Das Experiment ist von der Umwelt sehr gut isoliert, und trotzdem deuten die Messergebnisse auf einen Verlust von Energie hin. Da diese nicht einfach verschwinden kann, muss sie auf irgendwelche anderen Parameter des Systems übertragen werden. Denkbar wäre etwa, dass sich die Bewegungsenergie in Zigarren-Längsrichtung ändert, weil die verschiedenen Ebenen miteinander gekoppelt sind. Doch nach allen derzeit bestehenden Theorien dürfte kein Kopplungsmechanismus stark genug sein, um diesen extrem starken und schnellen Dämpfungseffekt zu erklären. Sind also die entsprechenden Theorien unvollständig?

Bisher gab es wenig Grund, um an den grundlegenden Formalismen der quantenmechanischen Wechselwirkungen zu zweifeln. Dazu gehört etwa das so genannte Sine-Gordon-Modell, mit dem man eindimensionale Bose-Einstein-Kondensate berechnen kann. Es wurde in Experimenten bisher mit großem Erfolg bestätigt. Niemand hatte erwartet, dass die Atomwolken mit ihrer Desynchronisierung die Vorhersagen so eklatant verletzen würden.

Eine überraschende Erkenntnis mit vielleicht weit reichenden Folgen

Mit der Erkenntnis, dass die Kopplung durch den Tunneleffekt überraschend starke Auswirkungen hat, hofft unser Team, weitere Forschungen anzustoßen, um das mathematische Verständnis solcher interatomaren Wechselwirkungen zu verbessern. Schließlich gehört das genaue Verhalten von Vielteilchen-Quantensystemen zu den großen ungelösten Problemen der modernen Physik. Es ist eng mit vielen grundlegenden Rätseln verwoben – vom Zustand des frühen Universums kurz nach dem Urknall bis hin zur Frage, warum die merkwürdigen Effekte der Quantenphysik nur auf winzigen Längenskalen beobachtet werden können, während größere Objekte den Gesetzen der klassischen Physik gehorchen. ◀

Marine Pigneur promoviert in Quantenoptik am Atominstitut der TU Wien.

QUELLE

Pigneur, M. et al.: Relaxation to a Phase-Locked Equilibrium State in a One-Dimensional Bosonic Josephson Junction. In: Physical Review Letters 120, 173601, 2018

ELEKTROCHEMIE UMWELTFREUNDLICHERE DÜNGERPRODUKTION

Vor gut einhundert Jahren revolutionierte der Haber-Bosch-Prozess die Landwirtschaft. Doch das Verfahren zur Herstellung von Ammoniak belastet die Umwelt stark. Forschern ist es nun gelungen, den Rohstoff für Kunstdünger mittels Elektrolyse zu synthetisieren.

Am 13. Oktober 1908 meldete der spätere Nobelpreisträger Fritz Haber ein Patent an. Es beschreibt, wie sich Ammoniak (NH₃) aus Wasserstoff (H₂) und Stickstoff (N) herstellen lässt. Zusammen mit Carl Bosch entwickelte er dafür eine Produktionsanlage. Fünf Jahre später synthetisierten sie Ammoniak im Industriemaßstab – das Haber-Bosch-Verfahren war geboren.

Die Chemiker lösten damit ein schon zu ihrer Zeit drängendes Problem: Die Weltbevölkerung wuchs rasch und wollte ernährt werden. Um die landwirtschaftlichen Erträge zu steigern, brauchte man stickstoffhaltigen Dünger – und der lässt sich aus Ammoniak herstellen. Rasch etablierte sich daher das Haber-Bosch-Verfahren als unentbehrliche Grundlage moderner Nahrungsmittelproduktion. 2017 erzeugten Anlagen rund um den Globus ungefähr 144 Millionen Tonnen Ammoniak, Tendenz stetig steigend. Damit gehört es zu den zehn weltweit meist produzierten Chemikalien.

In den über einhundert Jahren seit dem Bau der ersten Anlage hat sich der Prozess kaum verändert. Dabei ist der Optimierungsbedarf groß: Das Haber-Bosch-Verfahren

schluckt nicht nur beachtliche Mengen an Energie. Es beruht auch auf fossilen Rohstoffen (der dafür benötigte Wasserstoff entsteht oft durch Kohlevergasung) und setzt enorm viel CO₂ frei – etwa ein Prozent der global produzierten Treibhausgase gehen zulasten der Ammoniaksynthese.

Chemiker suchen daher inzwischen nach einer umweltfreundlicheren Alternative. Eine Möglichkeit dazu ist die Herstellung von Ammoniak durch Elektrolyse. In einer elektrochemischen Zelle können Stickstoffgas (N₂) und Wasser (H₂O) zu Ammoniak reagieren, während man Strom zuführt. Dieser lässt sich aus erneuerbaren Quellen gewinnen. Außerdem verbraucht der Prozess selbst weder Erdöl noch Erdgas, setzt also auch kein CO₂ frei.

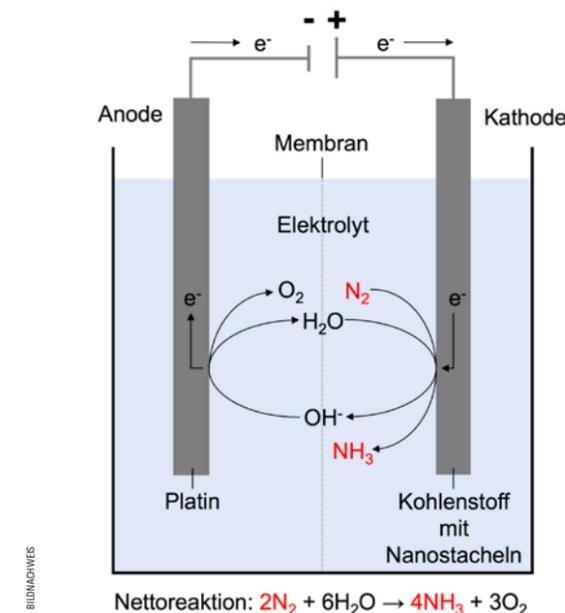
Das klingt zwar vielversprechend, ist allerdings ineffizient: In Laborexperimenten konnte man bisher nur verschwindend geringe Mengen an Ammoniak mittels Elektrolyse herstellen. Forschern um Adam J. Rondinone vom Oakridge Laboratory in Tennessee, USA, gelang nun ein kleiner Durchbruch. Die Chemiker entdeckten einen Katalysator, der die Reaktion etwa zehnmal so effizient ablaufen lässt.

Die Elektrolyse entspricht dem umgekehrten Prozess in einer Batterie. Man benutzt zwei Elektroden, eine Kathode und eine Anode, an deren einem Ende man jeweils eine elektrische Spannung anlegt, während das andere in einen wässrigen Elektrolyten eintaucht. Stickstoffgas und Wasser reagieren an der Kathode zu Ammoniak. Die Reaktion ist eine Reduktion, benötigt also Elektronen. Neben Ammoniak entstehen Hydroxylionen (OH⁻), die durch den Elektrolyten zur Anode gelangen und dort wieder zu Wasser oxidieren. Dabei werden Elektronen freigesetzt, die über den äußeren Stromkreis zur Kathode wandern, wo sie wiederum für die Reduktion von Stickstoff zur Verfügung stehen.

Soweit die Theorie. In der Praxis gibt es jedoch einen Haken: Stickstoffgas ist extrem reaktionsträge, weshalb die Reduktion unendlich langsam abläuft. Um Ammoniak in größeren Mengen zu gewinnen, braucht man daher einen Reaktionsbeschleuniger, auch Katalysator genannt. Allerdings sind gängige Katalysatoren aus Eisen, Platin oder Gold nicht selektiv genug. Sie begünstigen vor allem eine andere Reaktion an der Kathode: die Umsetzung von Wasser zu Wasserstoff. Deshalb entsteht selbst mit Katalysator kaum Ammoniak.

Das Team um Rondinone fand nun eine Lösung für das Problem. Sie kehrten den herkömmlichen Katalysatoren aus (Edel-)Metallen den Rücken zu und verwendeten

Da verovit aectendi ium adipсандenia dolecab oratet doluptatur as dem es endel il in nonsercilles nobit que volendae pror arcit quis dolest, nonsero etur, serio. Et



stattdessen nanometergroße Stacheln aus Kohlenstoff, die an der Spitze nur rund ein Dutzend Atome dick sind. Mit dem neuen Nanomaterial konnten die Forscher in einer Stunde pro Quadratmeter Katalysatoroberfläche ungefähr 100 Milligramm Ammoniak herstellen. Damit ist die Elektrolyse noch immer nicht konkurrenzfähig zum Haber-Bosch-Verfahren, doch die Aussichten sind vielversprechend. Das zeigt der so genannte Faraday'sche Wirkungsgrad des neuen Kohlenstoffkatalysators: Würden keine unerwünschten Nebenreaktionen – wie die Bildung von Wasserstoff – stattfinden und die Ausgangsstoffe vollständig zu Ammoniak reagieren, läge der Faraday'sche Wirkungsgrad bei einhundert Prozent. Mit den Nanostacheln erreichten die Wissenschaftler etwa zehn Prozent. Das ist zwar immer noch gering, verglichen mit früheren Studien allerdings eine mehr als zehnmals höhere Ausbeute.

pahfouahip aefafeq

Was macht den neuen Katalysator so viel besser als andere? Eine Besonderheit ist, dass er aus der Kohlenstoffvariante Graphit besteht. Erst seit ungefähr einem Jahrzehnt verwenden Wissenschaftler verschiedene Kohlenstoffmodifikationen als Katalysatoren in elektrochemischen Reaktionen. Bisher haben sie beispielsweise Kohlenstoffnanoröhren, Kohlenstofffasern, Graphit und Graphen eingesetzt. Die Forscher vom Oakridge Laboratory sind allerdings die ersten, die einen solchen Katalysator für die Ammoniakproduktion nutzen. Dabei hat das Element viele Vorteile: Es ist günstiger und weitaus umweltfreundlicher als die Metalle, auf die man üblicherweise zurückgreift. Und es katalysiert die Entstehung von Wasserstoff weniger gut.

Für die guten Ergebnisse ist jedoch nicht das verwendete Material allein verantwortlich. Das stellten die Forscher in einem Kontrollexperiment fest. Sie bombardierten die Kohlenstoffstacheln mit hochenergetischen Sauerstoffionen in einem Plasma, so dass die Spitzen abstumpften. Anschließend testeten sie diese in der elektrochemischen Zelle. Das Resultat? Es entstand wenig bis gar kein Ammoniak. Es scheint, als beschleunigten lediglich spitze Stacheln die Ammoniakproduktion. Die Autoren der Studie erklären die Beobachtung damit, dass die Spitzen das elektrische Feld um sie herum verstärken und die Elektronen im Stickstoffmolekül (N_2) aus dem Gleichgewicht bringen. Das hilft möglicherweise, die extrem starke Dreifachbindung zwischen den beiden Atomen zu brechen.

Die Chemiker beobachteten zudem eine effektivere Ammoniaksynthese, wenn sie ein in Wasser gelöstes Lithiumsalz als Elektrolyten nutzten. Natrium- und Kaliumsalze funktionierten hingegen weniger gut. Sie vermuten, dass die Lithiumionen (Li^+) Stickstoffmoleküle zur Elektrode transportieren. Stickstoffgas ist schlecht löslich in Wasser, bindet jedoch sehr gut an Lithiumionen. Letztere lagern sich außerdem um die Spitzen herum an und ver-

hindern so, dass Wassermoleküle Zugang zur Kathode haben und zu Wasserstoff reagieren.

Während das Team um Rondinone die Ammoniaksynthese mit Hilfe von Kohlenstoffnanostacheln weiterentwickeln will, erzielte eine weitere Gruppe von Wissenschaftlern kürzlich ähnlich gute Resultate mit einem ganz anderen Katalysator. Forscher um Xiaofeng Feng von der University of Central Florida im US-amerikanischen Orlando stellten aus dem Edelmetall Palladium Nanopartikel her, die sie auf einer Oberfläche aus kolloidalem Kohlenstoff (so genanntem Industrieruß) aufbrachten.

Genau wie die Kohlenstoffstacheln helfen die Palladiumpartikel, die Dreifachbindung zwischen den Stickstoffatomen im N_2 -Molekül zu brechen, allerdings auf eine andere Weise: Das Palladium erleichtert es Wasserstoffionen (H^+), sich an der Kathode anzulagern – als Palladiumhydrid. Die aus dem Wasser stammenden Wasserstoffionen reagieren schließlich mit dem Stickstoffgas zu Ammoniak. Durch die Zwischenlagerung am Palladium wird dieser Prozess beschleunigt.

Die beiden Nanokatalysatoren erzielten eine vergleichbare Ammoniakausbeute: Auch Feng und seine Kollegen erreichten einen Faraday'schen Wirkungsgrad von etwa zehn Prozent. Allerdings benötigten sie dafür eine geringere Spannung, 0,1 Volt gegenüber 1,2 Volt, die das Team um Rondinone anlegen musste. Dafür ist Kohlenstoff deutlich billiger als Palladium. Wollte man die genauen Kosten der Katalysatoren vergleichen, müsste man jedoch auch ihren Herstellungsaufwand mit einbeziehen. Darüber geben die Autoren in ihren Studien allerdings keine Auskunft.

Eine Ablösung des Haber-Bosch-Verfahrens durch Elektrolyse würde nicht nur Energie, CO_2 und fossile Brennstoffe einsparen. Daneben ist das elektrochemische Verfahren auch wesentlich flexibler. Man wäre nicht mehr auf riesige Produktionsanlagen angewiesen, sondern könnte Ammoniak im kleinen Maßstab dezentral herstellen: etwa in landwirtschaftlichen Regionen, wo ein entsprechender Bedarf an Düngemitteln herrscht. Damit ließen sich zusätzlich die Transportkosten reduzieren.

Bis dahin ist es allerdings noch ein weiter Weg. Die Entwicklung einer konkurrenzfähigen Ammoniaksynthese mittels Elektrolyse befindet sich erst im Anfangsstadium. Die Wissenschaftler sind aber optimistisch, die Ausbeute ihrer Verfahren weiter steigern zu können. Rondinone schätzt, dass man Ammoniak frühestens in ungefähr zehn Jahren im Industriemaßstab elektrolytisch herstellen können wird.

Anna Clemens ist promovierte Chemikerin und Wissenschaftsjournalistin in Prag.

QUELLEN

Song, Y. et al.: A physical catalyst for the electrolysis of nitrogen to ammonia. In: *Science Advances* 4, e1700336, 2018

Wang, J. et al.: Ambient ammonia synthesis via palladium-catalyzed electrohydrogenation of nitrogen at low overpotential. In: *Nature Communications* 9, 10.1038/s41467-018-04213-9, 2018