

HOCHTEMPERATUR-SUPRALEITUNG

🔊 Diesen Artikel können Sie als Audiodatei beziehen; siehe www.spektrum.de/audio

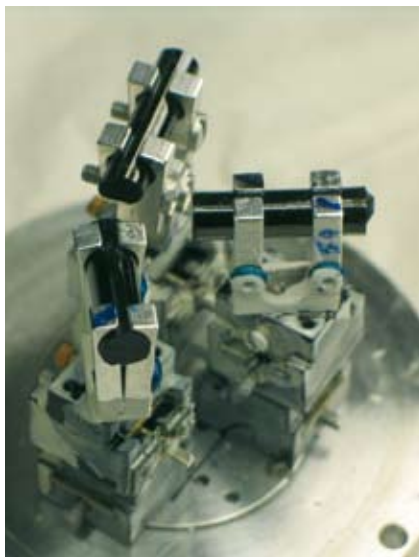
Magnetisch angezogene Paare

Noch immer ist der Mechanismus der Hochtemperatur-Supraleitung nicht endgültig geklärt. In einem neuen Experiment konnte die favorisierte Theorie jedoch weiter punkten.

Von Emanuela Buyer

Einmal angeregt, kann ein Strom in Supraleitern von selbst zeitlich unbegrenzt fließen. Diese Entdeckung machte 1911 Heike Kamerlingh-Onnes bei Versuchen an Quecksilber, das bis nahe an den absoluten Temperatur-Nullpunkt ($-273,15$ Grad Celsius) heruntergekühlt war. Wie sich später zeigte, tritt der Effekt auch bei einigen anderen Metallen und Legierungen auf – aber stets nur unterhalb von -250 Grad Celsius.

Drei geschliffene PLCCO-Kristalle sind für die Neutronenstreuung in Aluminiumhalter eingespannt. Über Präzisionswinkelmesser lassen sie sich so ausrichten, dass ihre Achsen exakt in dieselbe Richtung zeigen. Damit sieht der Neutronenstrahl die drei Proben, als wäre es eine einzige. Dieser Trick sorgt für eine stärkere Streuung und damit eine höhere Empfindlichkeit und Genauigkeit der Messung.



PENGCHENG DAI, STEPHEN D. WILSON UND DAMI RICHARDS, UNIVERSITÄT TENNESSEE, KNOXVILLE (UT)

Erst 1986 entdeckten Georg Bednorz und Karl Alex Müller am IBM-Forschungszentrum Zürich eine Klasse kupferhaltiger keramischer Materialien mit einer sehr viel höheren »Sprungtemperatur«: Sie werden schon ab -140 Grad Celsius supraleitend. Weil in diesem Fall Kühlung mit flüssigem Stickstoff genügt, sind solche »Kuprate« in ihrer technischen Anwendung bedeutend billiger als normale Supraleiter.

Aber nicht nur in der Sprungtemperatur unterscheiden sie sich von ihren metallischen Gegenstücken; auch der Mechanismus muss ein anderer sein. Deshalb stricken Theoretiker fleißig an Modellen, um die Hochtemperatur-Supraleitung zu erklären. Die Experimentatoren wiederum unterwerfen die jeweiligen Erklärungsversuche dem Praxistest.

Zu diesem Zweck fahnden sie in den verschiedenen Kupraten nach besonderen Eigenschaften, die zum vorgeschlagenen Mechanismus passen. Dabei haben sie im supraleitenden Zustand unter anderem verräterische magnetische Anregungen entdeckt, wie sie nach dem aussichtsreichsten Modell durch die Materialproben fließen sollten. Allerdings gibt es zwei Klassen von Kupraten, und der Nachweis gelang zunächst nur bei der einen. Vor Kurzem hatten Physiker um Pengcheng Dai und Stephen Wilson von der Universität von Tennessee in Knoxville nun auch bei einem Vertreter der anderen Klasse Erfolg (*Nature*, Bd. 442, S. 59).

Im Jahr 1972 lieferten John Bardeen, Leon Cooper und John Robert Schrieffer die Erklärung für die Supraleitung in Metallen. Demnach verursacht ein Leitungselektron eine kurzfristige Verzerrung im Atomgitter, durch die ein weiteres Elektron angezogen wird. Dieses

bildet mit dem ersten dann ein so genanntes Cooper-Paar, das dank seiner besonderen quantenmechanischen Eigenschaften kollisions- und damit reibungslos durch den Leiter gleiten kann.

Der Mechanismus setzt allerdings voraus, dass das Gitter sehr langsam schwingt, was nur bei extrem tiefen Temperaturen der Fall ist. In Hochtemperatur-Supraleitern kann es auf diese Weise also nicht zur Paarbildung kommen. Eines scheint jedoch sicher: Auch in diesen Materialien müssen zwei Elektronen zusammenfinden. Die Frage ist nur, wie. Nach der allgemein favorisierten Theorie sorgen magnetische Kräfte für den Zusammenhalt.

Anders als supraleitende Metalle sind die Kuprate bei Raumtemperatur Nichtleiter. Die am wenigsten gebundenen, äußersten Elektronen des Kupfers befinden sich in diesem Fall im Zwiespalt. Generell streben sie nach dem Zustand geringster Energie. Gemäß der Heisenbergschen Unschärferelation lässt die räumliche Fixierung eines Teilchens dessen Impuls ansteigen. Würden die Elektronen sich frei bewegen, wäre ihre kinetische Energie also niedriger als im ortsfesten Zustand, in dem sie, anschaulich gesprochen, rapide hin- und herschwingen. Bei einem Ausreißversuch müssten sie sich jedoch ihren Kollegen auf benachbarten Plätzen nähern, was eine erhöhte Coulomb-Abstoßung zur Folge hätte. Die Elektronen der Kuprate, bei denen dieser Effekt überwiegt, bleiben darum lieber an Ort und Stelle.

Es gibt jedoch Möglichkeiten, das Material leitend zu machen. Dazu kann man etwa Elektronen entfernen und so freie Plätze für die Wanderung schaffen. Aber auch der umgekehrte Trick funktioniert. Wenn man Elektronen hinzufügt,

Die neu entdeckten magnetischen Anregungen im Hochtemperatur-Supraleiter PLCCO sind hier als Resonanzspitzen auf einer CuO_2 -Gitterebene dargestellt. Angezogen durch magnetische Kräfte umkreist ein Elektronenpaar die Hauptresonanz. Im Hintergrund ist die grobe Struktur des Kristalls zu erkennen; die weißen Kugeln stehen für Sauerstoff, die lachsfarbenen für Kupfer und die blauen für das Seltenerdmetall Praseodym. Der besseren Übersicht halber wurden die Sauerstoff-, Lanthan- und Ceratome in den Räumen zwischen den CuO_2 -Ebenen weggelassen.

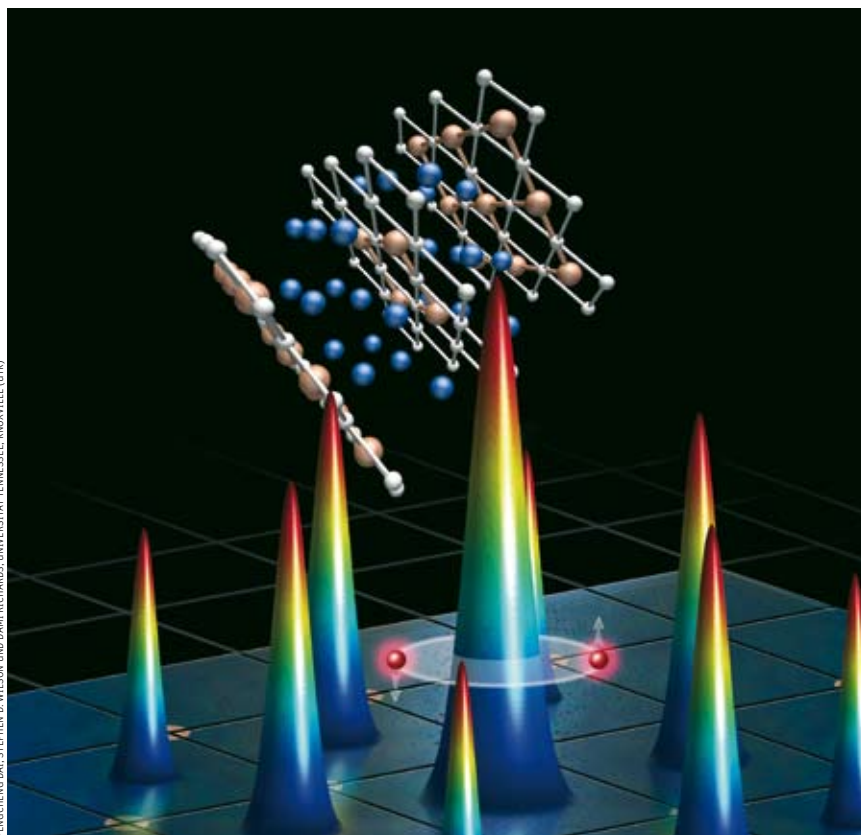
werden sie überall gleich stark abgestoßen, weil sie keinen angestammten Platz haben. Damit gibt es für sie keinen Grund mehr, lokalisiert zu bleiben.

Das Entfernen oder Hinzufügen von Ladungsträgern eröffnet zugleich einen Mechanismus zur Paarbildung. Elektronen haben nämlich eine Eigenschaft namens Spin. Dadurch kann man sie sich als winzige Stabmagnete vorstellen. In einem Kuprat stehen die Spins der äußeren Elektronen des Kupfers im Normalfall antiparallel. Dadurch kompensieren sich ihre magnetischen Momente paarweise. Bei einer Änderung der Elektronenzahl wird diese Ordnung jedoch gestört.

Bewegen sich nun Elektronen durch den Leiter, ziehen sie eine Spur von Magnetismus hinter sich her, weil in ihrem Fahrwasser die benachbarten Elementarmagnete umklappen. Physiker sprechen von Spinfluktuationen. Der Theorie nach sollten die Wechselwirkungen zwischen den Spins schon bei mäßig tiefen Temperaturen so stark sein, dass ein wanderndes Elektron durch die lokal begrenzten magnetischen Kräfte, die es induziert, ein zweites anziehen kann, das dann mit ihm ein Paar bildet.

Beweis mit Neutronen

Spinfluktuationen lassen sich durch Streuung von Neutronen nachweisen. Dafür bringt man das zu untersuchende Kuprat in einen Strahl dieser Kernbausteine, der nach Richtung und Impuls genau definiert ist. Da die starken Coulomb-Kräfte keine Auswirkung auf die Flugbahn der ungeladenen Teilchen haben, kommt der Einfluss der viel schwächeren magnetischen Felder zum Tragen. Eine starke Ablenkung, die bei bestimmter Einfallrichtung des Strahls und Ener-



gie der Neutronen auftritt – Physiker sprechen von Resonanz –, zeigt die Existenz einer magnetischen Störung und die Richtung, in welche sie sich bewegt.

In Kupraten mit Elektronenmangel ließen sich schon vor einigen Jahren solche Resonanzen feststellen. Um als Hinweis auf den Mechanismus der Supraleitung gelten zu können, müssen sie aber auch in den Materialien mit überschüssigen Elektronen auftreten. Dies konnte nun die erwähnte Gruppe aus Tennessee nachweisen. Ausschlaggebend für ihren Erfolg war der in diesem Jahr fertig gestellte Hochfrequenz-Isotopen-Reaktor SNS des US-Nationallabors Oak Ridge, der dank seiner hohen Pulsdichte genauere Daten liefert als frühere Neutronenquellen.

Als Untersuchungsmaterial wählten die US-Forscher ein Kuprat der Zusammensetzung $\text{Pr}_{0,88}\text{LaCe}_{0,12}\text{CuO}_{4,8}$ (kurz PLCCO). Es enthält außer Kupfer und Sauerstoff die Seltenerdmetalle Praseodym, Lanthan und Cer. Um einen Elektronenüberschuss zu erzeugen, wurden ihm Sauerstoffatome entzogen (»Reduktion«), sodass die zu deren Bindung benötigten Elektronen zurückblieben. Das resultierende PLCCO verliert zwar erst bei -249 Grad Celsius seinen elektrischen Widerstand, ist aber dennoch sei-

ner Struktur nach ein Hochtemperatur-Supraleiter.

An ihm konnten Dai und Wilson per Neutronenstreuung die erhofften Spinfluktuationen messen. Dabei bestätigte sich zugleich ein Zusammenhang zwischen der Resonanzenergie des Neutronenstrahls und der Sprungtemperatur des untersuchten Hochtemperatur-Supraleiters. Andere Wissenschaftler hatten diese Proportionalität bei Kupraten mit Elektronendefizit gefunden und als Gerade dargestellt: Der Messpunkt der Gruppe aus Tennessee fiel gleichfalls auf diese Linie.

Für Pengcheng Dai beweist das die Existenz eines fundamentalen Zusammenhangs zwischen Spinfluktuationen und Supraleitung. Offen bleibt jedoch, welches von beiden die Ursache und welches die Wirkung ist. Rufen die gemessenen Spinfluktuationen tatsächlich die Supraleitung hervor oder verhält es sich vielleicht umgekehrt? Verursachen also in Wahrheit die durch einen anderen Mechanismus gepaarten Elektronen nachträglich die magnetischen Anomalien? Auf diese Frage gibt es leider noch keine Antwort.

EMANUELA BUYER hat Physik studiert und ist derzeit Referendarin in Singen.

Wirkstoffe aus dem Spiegelland

Vom Schlankheitsmittel bis zum Medikament gegen das Erblinden im Alter reicht das Spektrum einer neuen Klasse von Wirkstoffen, die Spiegelbilder natürlicher Moleküle sind. Ihr Vorteil: Weder lösen sie eine Immunreaktion aus noch werden sie vom Körper abgebaut.

Von Thorsten Braun

Von wirksamen Medikamenten gegen Übergewicht erhofft sich die Pharmabranche Umsätze in Milliardenhöhe. Im Frühjahr vergangenen Jahres sicherte sich deshalb die US-Firma Pfizer die Rechte an einem Wirkstoff, den die Noxxon Pharma AG aus Berlin entwickelt hat. NOX-B11, so sein Kürzel, blockiert das Hormon Ghrelin, das in der Magenschleimhaut produziert wird und den Appetit anregt.

»Testpersonen, denen Ghrelin verabreicht wurde, aßen bis zu dreißig Prozent mehr«, sagt Noxxon-Chef Sven Klussmann. NOX-B11 soll diesen appetitsteigernden Effekt des natürlichen Hormons neutralisieren. »Mäuse, die unseren Wirkstoff erhielten«, berichtet Klussmann, »verloren bis zu zehn Prozent Gewicht.« Zusammen mit Pfizer will Noxxon die Substanz zur Marktreife

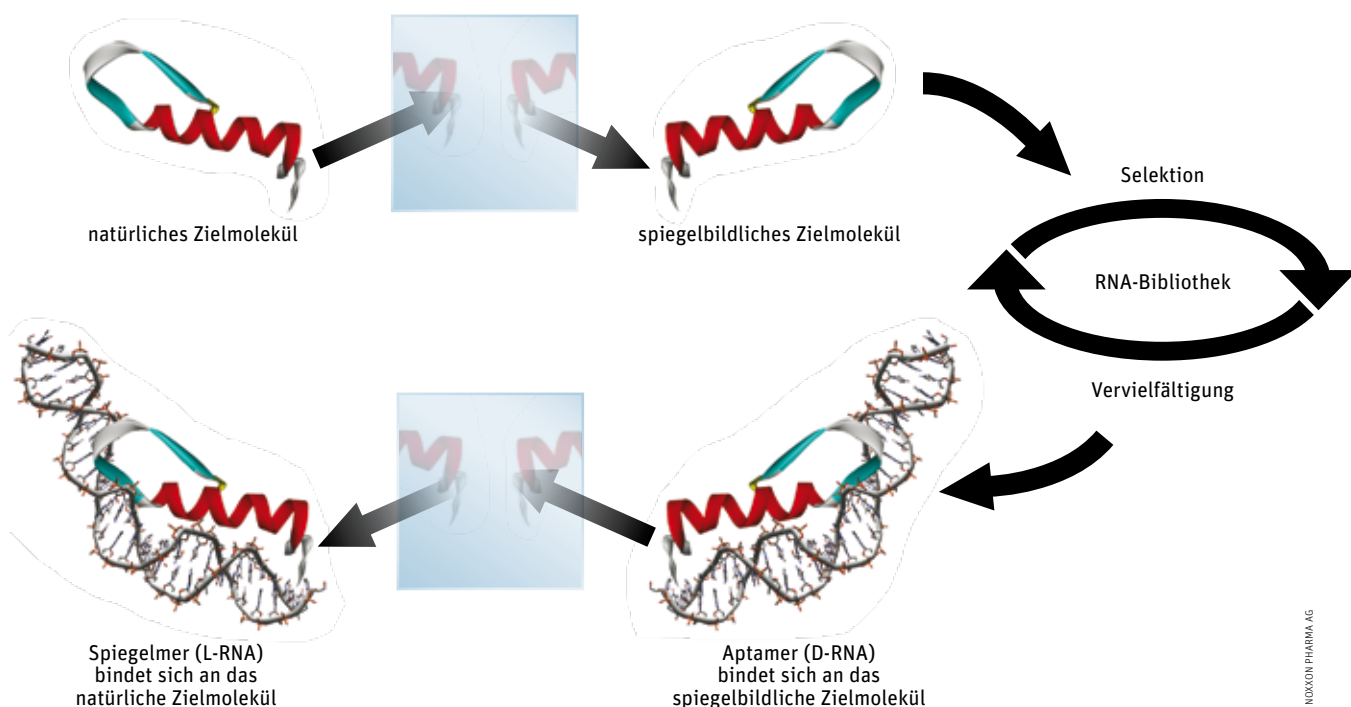
entwickeln. Ende dieses Jahres sollen erste klinische Tests beginnen.

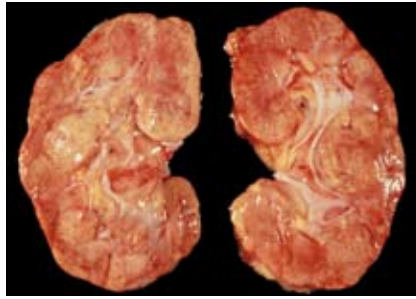
NOX-B11 ist ein künstliches Molekül und gehört zur Klasse der Aptamere. Darunter versteht man RNA- oder DNA-Ketten aus 25 bis 35 Nucleotiden, die als viel versprechende Arzneikandidaten gelten. Sie können andere Moleküle zielsicher erkennen und blockieren und gleichen damit den Antikörpern. Aber anders als diese »lösen sie keine Abstoßungsreaktionen aus und lassen sich mit einem biochemischen Routineverfahren einfach produzieren«, erklärt Michael Famulok, Professor für Biochemie an der Universität Bonn, der selbst an Aptameren forscht.

Zur Gewinnung dient der Selex-Prozess (englisch für *systematic evolution of ligands by exponential amplification*), den mehrere US-Wissenschaftler Ende der 1980er Jahre entwickelt haben. Dabei bringt man eine Lösung aus bis zu einer

Billiarde kurzer, zufällig erzeugter RNA- oder DNA-Stücke in Kontakt mit dem Zielmolekül, das auf einem Träger fixiert ist. Diejenigen Schnipsel, die haften bleiben, werden dann per Polymerasekettenreaktion vervielfältigt und weiteren Bindungstests unterworfen. So lässt sich schließlich ein Nucleotidstrang finden, der am besten zum Zielmolekül passt.

Die auf diese Weise isolierten Aptamere haben allerdings auch Nachteile. So gleichen sie natürlichen Nucleinsäurefragmenten im Körper und werden wie diese enzymatisch abgebaut. Selbst wenn das nicht passiert, scheiden die Nieren die relativ kleinen Moleküle, bevor sie ihre Wirkung richtig entfalten können, schon wieder aus. Bislang müssen Aptamer-Bausteine deshalb nachträglich modifiziert werden. Dabei versieht man die Nucleotide chemisch mit Anhängseln, sodass die körpereigenen Scheren nicht mehr ansetzen können. Um zu ver-





BEIDE FOTOS: AG FOCUS / SPI

◀ Noch in diesem Jahr sollen klinische Tests mit zwei Spiegelmeren beginnen. Das eine dient zur vorbeugenden Behandlung der diabetischen Retinopathie, die bei Zuckerkranken auftritt und Blutungen sowie Blutgefäßwucherungen im Auge auslöst (links). Das andere soll gegen allergische Entzündungen der Niere beim Lupus nephritis (rechts) helfen.

hindern, dass das Aptamer durch die feinen Maschen der Nierenfilter rutscht, wird es zusätzlich an ein rund doppelt so großes Polyethylenglykol-Molekül gekoppelt.

»Vor allem das Modifizieren der Nucleotide ist sehr Zeit raubend, da bei jeder einzelnen Veränderung die Gefahr besteht, dass das Aptamer nicht mehr an das Zielmolekül andockt«, gesteht Faumulok. Immerhin hat das erste auf diese Weise abgewandelte Aptamer im Mai vergangenen Jahres den Sprung auf den deutschen Arzneimittelmarkt geschafft: Unter dem Namen Macugen von den US-Firmen Pfizer und Eyetech Pharmaceuticals vertrieben, hilft es bei der altersabhängigen Makuladegeneration, einer bislang nicht behandelbaren Augenkrankheit.

Die Wissenschaftler von Noxxon haben sich eine andere Methode einfallen lassen, um den Aptamer-Abbau im Körper zu verhindern. Im Mittelpunkt steht dabei eine pfiffige Idee: Von vielen Molekülen existieren zwei verschiedene Formen, die sich wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten. Das gilt auch für Nucleotide, und diesen Umstand macht sich Noxxon zu Nutze. »Wir erzeugen einfach spiegelbildliche Versionen der RNA-Bausteine und bauen damit Aptamer-Spiegelbilder auf«, erläutert Klussmann.

Diese Spiegelmere, wie er die neue Stoffklasse nennt, werden von natürlichen Enzymen nicht erkannt und deshalb auch nicht abgebaut. Trotzdem sind

sie wie Aptamere fähig, sich an Zielmoleküle anzulagern – ähnlich einer linken Hand, die genauso wie eine rechte Gegenstände festhalten kann. Allerdings eignet sich das Selex-Verfahren nicht dafür, aus einem Sortiment von Spiegelmeren dasjenige mit der größten Affinität zum Zielmolekül zu finden; denn mit spiegelbildlichen Nucleotiden funktioniert die Polymerasekettenreaktion nicht.

Die Noxxon-Forscher fanden jedoch einen eleganten Ausweg aus dem Dilemma. Sie erzeugen vom Zielmolekül – in der Regel ein Protein – ebenfalls eine spiegelbildliche Version, indem sie statt normaler L-Aminosäuren die spiegelbildlichen D-Formen verwenden. Dafür suchen sie dann mit Hilfe des Selex-Verfahrens das passende Aptamer. »Wenn wir dieses Aptamer spiegeln, haben wir die Bauanleitung für das Spiegelmer, das sich an das eigentliche Zielmolekül heften kann«, erklärt Klussmann.

Doppelter Spiegeltrick

Diese auf den ersten Blick verwirrende Vorgehensweise lässt sich wieder mit einem Beispiel aus der makroskopischen Welt veranschaulichen: Wenn jemand für seine linke Hand (Zielmolekül) einen linken Handschuh (Spiegelmer) benötigt, aber bloß rechte Handschuhe zur Auswahl hat, nimmt er einfach seine rechte Hand (Spiegelbild des Zielmoleküls) und sucht den passenden rechten Handschuh (Aptamer) heraus. Diesen spiegelt er dann und erhält so den linken Handschuh, der automatisch an die linke Hand passt.

Die erstmalige Synthese von Spiegelmeren gelang Klussmann schon in der ersten Hälfte der 1990er Jahre während seiner Doktorarbeit an der Freien Universität Berlin. 1997 war er einer der Mitgründer von Noxxon. »Die Bausteine der Spiegelmere produzieren wir mittlerweile im Kilogramm-Maßstab«, sagt Klussmann. »Sie zu Spiegelmeren zu ver-

knüpfen, ist kinderleicht und geht genauso schnell wie bei normalen Aptameren.« Danach muss an das fertige Molekül nur noch ein Polyethylenglykol gehängt werden, um ein zu schnelles Ausscheiden über die Nieren zu verhindern, was aber kein großer Aufwand ist.

Außer NOX-B11 haben Noxxons Wissenschaftler inzwischen sieben weitere Spiegelmere entwickelt, die bereits in Tierversuchen erprobt wurden. Darunter sind zwei Exemplare, die der Noxxon-Chef in Eigenregie weiterentwickeln möchte und deren klinische Erprobung beim Menschen eventuell schon in diesem Jahr beginnt. Das eine, NOX-E36, zielt auf Lupus nephritis, eine entzündliche Nierenerkrankung. Das andere, NOX-A12, soll gegen die diabetische Retinopathie helfen; diese Augenerkrankung tritt vor allem bei Diabetikern auf, die schon lange zuckerkrank sind. Falls die klinischen Studien erfolgreich verlaufen, hofft Klussmann auf eine Zulassung der beiden Wirkstoffe bis 2012.

Derweil suchen die Wissenschaftler bei Noxxon den Einsatzbereich der Spiegelmere zu erweitern. Bislang beschränkte er sich auf mobile Proteine in der Blutbahn wie Ghrelin. Denn Oligonucleotide können keine Zielmoleküle innerhalb einer Zelle blockieren, weil sie dort nicht hineinkommen. Das könnte sich jedoch bald ändern: »Wir haben molekulare Vehikel entwickelt, so genannte kationische Polymere, mit deren Hilfe wir Spiegelmere in Zellen hineintransportieren«, berichtet Klussmann. Bei Mäusen funktioniert das bereits. Sollte der Ansatz auch beim Menschen erfolgreich sein, hätten Spiegelmere einen weiteren großen Vorteil gegenüber Antikörpern. Die sind laut Klussmann so groß, dass wohl kaum eine Chance besteht, sie in Zellen einzuschleusen.

◀ Spiegelmere lassen sich nur über einen Umweg erzeugen. Man spiegelt zunächst das Zielmolekül und sucht aus einer RNA-Bibliothek ein Aptamer, das sich daran bindet. Nachdem dieses vervielfältigt und seine Sequenz ermittelt worden ist, muss man es wiederum spiegeln, damit ein Wirkstoff entsteht, der sich an das Zielmolekül anlagert.

THORSTEN BRAUN ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Berlin.

Neues über die ersten Galaxien

Mit dem Subaru-Teleskop auf Hawaii haben japanische Astronomen jetzt die bisher fernste Galaxie entdeckt und spektroskopisch untersucht.

Sie ist nur 750 Millionen Jahre nach dem Urknall entstanden und ermöglicht damit einen seltenen Blick ins frühe Universum.

Von Georg Wolschin

Das beobachtbare Universum entstand, wie die jüngsten Daten des Satelliten WMAP zur kosmischen Hintergrundstrahlung zeigen, vor 13,7 Milliarden Jahren bei einer gewaltigen Explosion: dem Urknall. Seitdem expandiert der Kosmos und kühlt sich ab. Heute hat die Hintergrundstrahlung, die sich als eine Art Nachglühen des Urknalls auffassen lässt, nur noch eine Temperatur von 2,7 Kelvin.

Die über drei Jahre gesammelten WMAP-Daten geben auch indirekt Aufschluss über die ersten Sterne; denn deren Ultraviolett-Licht hat den Strahlungshintergrund polarisiert – was sich

sehr genau messen lässt. Demnach flammten etwa 300 Millionen Jahre nach dem Urknall die ersten Sonnen auf.

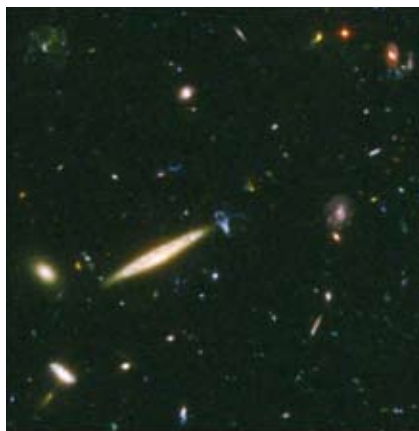
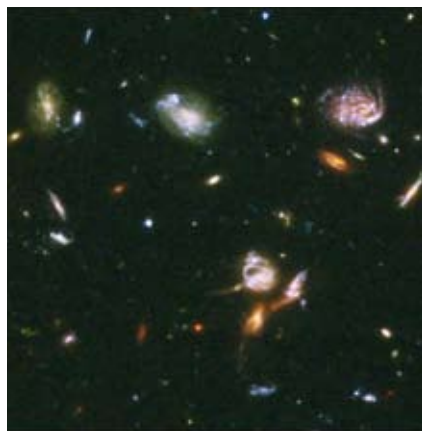
Dagegen gibt es kaum Informationen darüber, wann sich die ersten Galaxien bildeten (siehe Spektrum der Wissenschaft 1/2007, S. 46). Was an Licht von ihnen zu uns dringt, ist extrem schwach. Deshalb lässt es sich nur mit hochempfindlichen Instrumenten auf Weltraumsatelliten oder großen Teleskopen am Erdboden registrieren. Das macht den direkten Nachweis der ersten Sternsysteme äußerst schwierig.

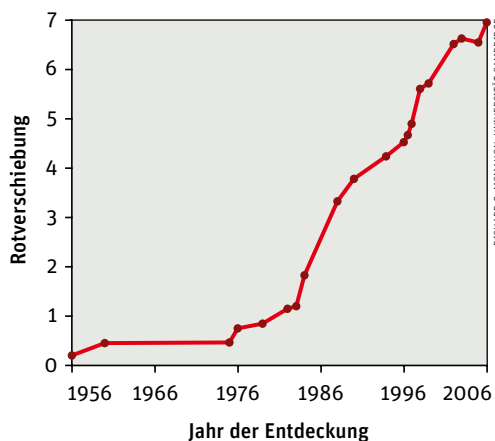
Die Expansion des Alls bedingt, dass wir Objekte aus der Frühzeit des Universums heute in sehr großer Entfernung sehen. Das von ihnen ausgesandte Licht

wurde auf dem langen Weg zur Erde durch das sich ausdehnende Universum gestreckt, sodass sich seine Wellenlänge wie bei der Hintergrundstrahlung in den roten bis infraroten Bereich des Spektrums verschoben hat. An dieser Verschiebung können Astronomen erkennen, in welcher Entfernung sich ein kosmisches Objekt befindet und wie alt es folglich ist.

Vor zwanzig Jahren hatten die entlegenen bekannten Galaxien eine Rot- ▷

▷ Diese Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops zeigen weit entfernte Galaxien mit mutmaßlichen Rotverschiebungen jenseits von 7.





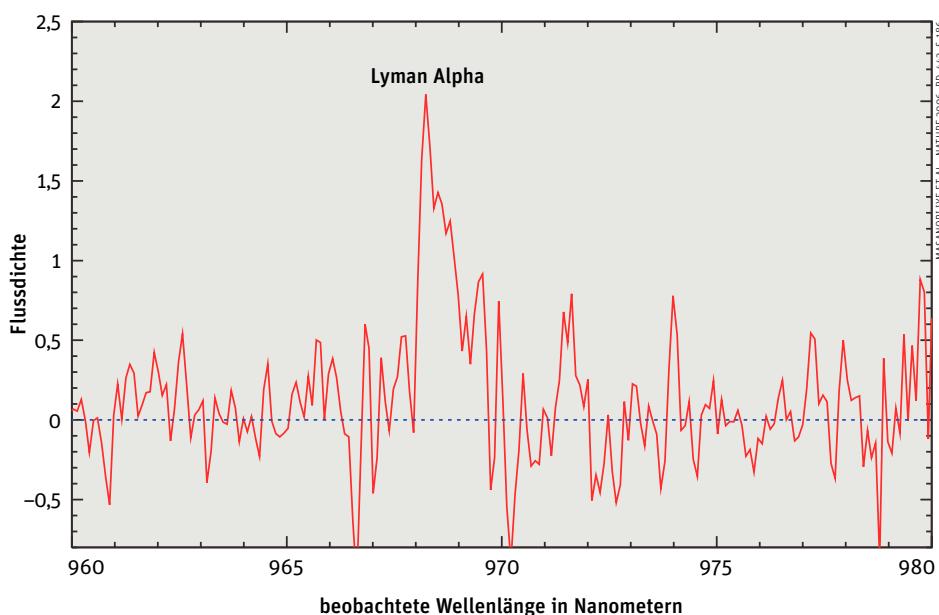
▲ Die Rotverschiebungen der ältesten bekannten Galaxien sind in den vergangenen zwei Jahrzehnten stark gestiegen.

▷ verschiebung – sie ist gleich dem Streckungsfaktor der Wellenlänge minus 1 – von weniger als 2, zehn Jahre danach waren die Astronomen bei 4,55 angelangt, und 2002 lag der Rekord bei 6,56 (Bild oben). In der Folge nutzten Astronomen die Gravitationswirkung von Galaxienhaufen, die als eine Art Linse wirken und das Licht von Objekten dahinter bis zu hundertfach verstärken. Dadurch konnten sie noch wesentlich schwächer leuchtende Quellen erkennen. Im Jahr 2004 gab es Berichte, wonach mit dieser Methode zwei Galaxien mit Rotverschiebungen von 7 und 11 entdeckt worden seien (Spektrum der Wissenschaft 6/2004, S. 20). Der zweistellige Wert entspräche einem Alter von nur 460 Millionen Jahren.

Allerdings beruhte die gemessene Rotverschiebung auf einer relativ schwachen und nicht sehr scharfen Emissionslinie mit unsicherer Zuordnung und war deshalb spektroskopisch keineswegs gut abgesichert. Außerdem konnten andere Astronomen mit ihren Computerprogrammen das ältere Objekt bei der Analyse der Originaldaten nicht finden. Erst kürzlich schlug außerdem ein Versuch fehl, die betreffende Galaxie mit dem Spitzer-Weltraumteleskop zu beobachten.

Das zeigt, wie wichtig es ist, zu fundierten, spektroskopisch einwandfrei belegten Ergebnissen über die ersten Galaxien zu kommen. Dabei geht es inzwischen nicht mehr primär darum, den jeweiligen Rotverschiebungsrekord zu brechen. Vielmehr möchten die Astronomen erfahren, ob sich die beobachteten Eigenschaften der Galaxien im frühen Universum qualitativ ändern. Besonders interessant sind Informationen darüber, wie die Häufigkeit der Sternsysteme mit ihrem Alter variiert. Das erlaubt wichtige Rückschlüsse auf die Entstehungsgeschichte der Galaxien.

Ende letzten Jahres hat nun ein Team von zehn japanischen Astronomen um Masanori Iye einen zweifelsfreien spektroskopischen Nachweis einer Galaxie namens IOK-1 bei einer Rotverschiebung von 6,96 vorgelegt (*Nature*, Bd. 443, S. 186). Das Licht dieses Objekts wurde nur 750 Millionen Jahre nach dem Urknall ausgesandt. Damit handelt es sich um die bisher älteste sicher nachgewiesene Galaxie.



Die japanischen Forscher benutzten das 8,2-Meter-Subaru-Teleskop auf dem Gipfel des Mauna Kea auf Hawaii. Zur Aufnahme diente eine Infrarotkamera mit 84 Millionen Bildpunkten. Im Laufe der Durchmusterung eines quadratischen Feldes mit einer Seitenlänge von 14,6 Grad in dem betreffenden Entfernungsbereich wurden 41 533 Quellen fotometrisch nachgewiesen. Alle bis auf zwei waren jedoch auch bei kürzeren Wellenlängen beobachtbar. Deshalb schieden sie als Kandidaten für hohe Rotverschiebungen im Bereich von 7 aus. Von den beiden verbliebenen Objekten fertigten die Astronomen dann mit der Kamera Focas (*faint object camera and spectrograph*) 17 Aufnahmen mit jeweils einer halben Stunde Belichtungszeit an.

Emissionslinie verrät Alter

Zur anschließenden spektrometrischen Analyse diente ein eigens entwickelter schmalbandiger Filter, der auf die so genannte Lyman-Alpha-Emission des neutralen Wasserstoffs zugeschnitten ist. Im Labor liegt diese Linie im ultravioletten Spektralbereich bei 121,6 Nanometern und markiert den Übergang eines Elektrons aus dem ersten angeregten in den Grundzustand. Indem die Gruppe um Iye die elf Spektren mit dem besten Verhältnis von Signal zu Rauschen überlagerte, konnte sie im Spektrum der ersten Quelle IOK-1 die Lyman-Alpha-Linie klar bei 968,2 Nanometern ausmachen (Bild links unten). Das entspricht der schon erwähnten Rotverschiebung von 6,96 oder einem Alter der Galaxie von 12,95 Milliarden Jahren. Die zweite Quelle erwies sich dagegen als zu schwach, um bei den bisherigen Belichtungszeiten eine Spektralanalyse durchzuführen.

In der untersuchten Himmelsregion gibt es folglich mindestens eine und höchstens zwei Galaxien, die schon 750 Millionen Jahre nach dem Urknall existierten. Dagegen wurden im selben Gebiet früher bereits sechs Sternsysteme mit einer Rotverschiebung um 6,6 ent-

◀ Im Spektrum der Galaxie IOK-1 mit einer Rotverschiebung von 6,96 lässt sich bei 968,2 Nanometern zweifelsfrei die Lyman-Alpha-Emissionslinie des Wasserstoffs erkennen. Diesem spektroskopischen Nachweis liegen elf jeweils halbstündige Belichtungen zu Grunde.

deckt. Diese sind demnach 250 Millionen Jahre später entstanden.

Der Vergleich ist nun aufschlussreich: Offenbar nahm die Häufigkeit von Galaxien in der kurzen Zeitspanne zwischen 12,95 und 12,7 Milliarden Jahren vor unserer Zeit auf das Drei- bis Sechsfache zu. Dieser plötzliche Anstieg deutet darauf hin, dass das Universum zu Beginn dieses Zeitraums – also 750 Millionen Jahre nach dem Urknall – noch zu jung war, um eine größere Anzahl von stark leuchtenden Galaxien zu bilden.

Neueste Ergebnisse von Rychard J. Bouwens und Garth D. Illingworth, die an der Universität von Kalifornien in Santa Cruz arbeiten, weisen in dieselbe Richtung. Die beiden Forscher fanden in den Ultra-Deep-Field-Daten des Weltraumteleskops Hubble, die allerdings keine spektroskopischen Messungen beinhalten, nur eine einzige leuchtende Galaxie im Rotverschiebungsbereich von 7 bis 8 (*Nature*, Bd. 443, S. 189). Wären die Sternsysteme in dieser Entfernung genauso häufig wie bei einer Rotverschiebung von 6, müsste die zehnfache Menge auftreten.

Rekordjagd hält an

Derweil geht die Suche nach sehr alten Galaxien weiter. So hat Richard Ellis vom California Institute of Technology in Pasadena mit dem Gravitationslinseneffekt von Galaxienhaufen im Vordergrund sechs Kandidaten im Rotverschiebungsbereich um 10 gefunden. Das entspräche einem Alter von 13,2 bis 13,3 Milliarden Jahren. Noch ist freilich unklar, wie überzeugend die spektroskopischen Nachweise sind.

Insgesamt scheint sich jedenfalls herauszukristallisieren, dass es nach der Entstehung der ersten Sterne mindestens 400 Millionen Jahre gedauert hat, bis sich auch die ersten hell leuchtenden Galaxien gebildet haben. Im Moment lassen sie sich wegen der Nachweisgrenzen existierender Teleskope nur schwer aufspüren. Mit der nächsten Generation von Weltraum-Observatorien – insbesondere dem James Webb Space Telescope, das 2013 starten soll – dürfte sich das ändern. Dann könnte es gelingen, noch lichtschwächere frühe Galaxien zu entdecken und spektroskopisch einwandfrei zu identifizieren.

GEORG WOLSCHIN lehrt an der Universität Heidelberg theoretische Physik.

Springers Einwürfe

Doppelt hält nicht immer besser

Was fängt ein Ohrwurm mit zwei Penissen an?

MIT SEINEN ANDERTHALB BIS DREI ZENTIMETERN LÄNGE ist der Sandohrwurm *Labidura riparia* ein stattlicher kleiner Gliederfüßer. In erdig-sandigem Terrain schützt ihn das elegante Sportschuh-Hellbraun seines Chitinpanzers vor der penetranten Aufmerksamkeit räuberischer Vögel und anderer natürlicher Feinde. Nicht verwechseln sollte man ihn mit seinem häufigeren, aber plumperen Verwandten, dem Gemeinen Ohrwurm *Forficula auricularia* – wobei die Gemeinheit durchaus nicht auf Seiten des unschuldigen Insekts liegt, sondern beim Menschen, der dem wendigen Krabbeltier fälschlich unterstellt, es krieche Schlafenden ins Ohr und knabbere dann mit den hinteren Zangen am Trommelfell. (Okay, ich weiß, dass Biologen mit »gemein« nur »gewöhnlich« meinen.)

Viel Aufwand treiben die doch recht sympathischen kleinen Wesen mit ihrem Familienleben, vom auffälligen Balzverhalten der Männchen bis zur gründlichen Brutpflege der Weibchen. Dazu passt, dass dem Sandohrwurm Männchen für die Begattung gleich zwei symmetrisch angeordnete Penisse zur Verfügung stehen. Die daraus resultierende Wahlfreiheit zwischen rechts oder links teilt er mit allerlei Krebsen, Spinnen, Eidechsen und Schlangen. Manche Spinnen empfinden die Wahl übrigens eher als Qual: Sie reißen sich vor dem Akt eines der beiden Fortpflanzungsorgane aus und verspeisen es quasi zur Stärkung vorab (*Nature*, Bd. 444, S. 689).

Unser Sandohrwurm verhält sich da weit weniger dramatisch: Er benutzt den einen Penis und hält den anderen in Reserve. Wie der Verhaltensforscher Yoshitaka Kamimura von der Universität Hokkaido (Japan) kürzlich im »Journal of Morphology« berichtete, bevorzugen fast neunzig Prozent der Männchen das rechte Exemplar, während das linke zurückgezogen im Unterleib verharret. Bei Beschädigung oder gar Totalverlust des exponierten Begattungswerkzeugs kann dann jederzeit auf das geschützt bereitliegende Ersatzorgan zurückgegriffen werden.

SO WEIT, SO GUT, NUR: Wenn die doppelte Ausstattung so vorteilhaft ist, warum verfügt dann des Sandohrwurms naher Verwandter, der erwähnte Gemeine Ohrwurm, nur über einen Penis rechts und nicht auch über das linke Gegenstück – ganz zu schweigen von uns Menschen mit einem einzigen zentral angeordneten Glied?

Kamimura gibt zur Antwort, auf dem Evolutionsweg vom biologisch älteren Sandohrwurm zum jüngeren Verwandten sei der linke Penis quasi evolutionär eingespart worden, weil er ohnedies nur selten ins Spiel kommen musste. Eine angeborene Verhaltenspräferenz führte zu einer morphologischen Vereinfachung. Das zieht freilich sofort die Anschlussfrage nach sich, warum der Sandohrwurm just seinen rechten Penis so bevorzugt einsetzt.

An dieser spannenden Stelle muss Kamimura passen. Als Erklärung böte sich eine geringfügige Asymmetrie der weiblichen Anatomie an, die Kopulieren von schräg rechts nahelegt. Dann müssten allerdings Begattungsversuche mit dem rechten Penis merklich erfolgreicher sein als solche mit links. Doch das, so gesteht Kamimura freimütig ein, ist keineswegs der Fall.

So hütet der Sandohrwurm bis auf Weiteres das Geheimnis, warum er die Symmetrie seines Sexualverhaltens so eklatant bricht und ganz ohne ersichtlichen Grund der Verkehrsregel »rechts vor links« folgt. Vielleicht wird die weitere Erforschung des Rätsels auch zur Klärung der Frage beitragen, warum bei uns Menschen die meisten Organe doppelt vorhanden sind, während sich die egoistischen Gene ausgerechnet zur Weitergabe ihrer selbst mit einem einzigen Werkzeug zufrieden geben.



Michael Springer