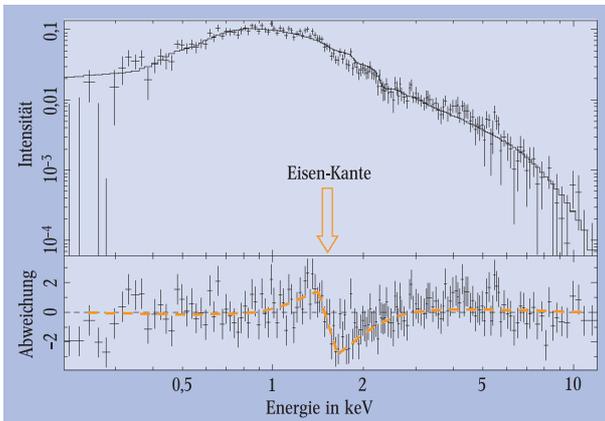


Frühe Eisenzeit im All

Röntgenbeobachtungen des Quasars APM 08279+5255 zeigen eine unerwartet hohe Eisenhäufigkeit im jungen Universum und deuten auf eine sehr heftige Sternentstehungsphase relativ kurz nach dem Urknall hin.

Im April 2002 beobachtete der Röntgensatellit XMM-Newton (X-Ray Multi-Mirror Mission) den sehr leuchtkräftigen Quasar APM 08279+5255. Günther Hasinger und Stefanie Komossa vom MPI für Astrophysik in Garching sowie Norbert Schartel von der ESA gelang es nun anhand der Röntgenspektren, eine dreifach höhere Eisenhäufigkeit als im Sonnensystem nachzuweisen [1]. Diese Entdeckung ist deshalb so erstaunlich, da wir diesen Quasar zu einer Zeit sehen, als das Universum knapp 1,5 Milliarden Jahre alt war, während die Sonne erst etwa 9 Milliarden Jahre nach dem Urknall entstanden ist.



Das UV-Absorptionsspektrum des Quasars APM 08279+5255. Bei einer Energie von 1,55 keV tritt eine Struktur auf, die auf die Absorption von Eisen zurückgeführt wird.

Quasare gehören zu den leuchtkräftigsten Objekten im Universum, die sich wegen der enormen Energien, die sie abstrahlen, bis zu sehr großen Entfernungen beobachten und im Detail untersuchen lassen. Man geht davon aus, dass Quasare in ihrem Zentrum ein sehr massereiches Schwarzes Loch (mit ca. 10^9 Sonnenmassen) beherbergen, das die Materie in unmittelbarer Umgebung aufsaugt. Dabei werden große Mengen Energie freigesetzt und abgestrahlt. Der auftretende große Strahlungsdruck schleudert einen Teil der einströmenden Materie als Wind mit sehr hohen Geschwindigkeiten ($\sim 0,1c$) wieder hinaus. Bei günstiger „Windrichtung“, d. h., wenn der Quasar durch diesen

Schleier ausströmender Materie hindurchscheint, lassen sich sehr breite, blauverschobene Absorptionsstrukturen im ultravioletten Spektralbereich beobachten.

Aufgrund seiner hohen Rotverschiebung von $z = 3,91$ bietet APM 08279+5255 die Möglichkeit, den Zustand und die Zusammensetzung des ihn umgebenden Gases im frühen Kosmos zu untersuchen. Die so genannte Rotverschiebung $z = (\lambda_{\text{obs}} - \lambda_{\text{ruhe}}) / \lambda_{\text{ruhe}}$ ist ein Maß dafür, wie stark das Licht eines Objektes aufgrund der Expansion des Universums zu größeren Wellenlängen λ verschoben ist. Je größer die Rotverschiebung ist, um so weiter ist ein Objekt entfernt und um so weiter blickt man in die Vergangenheit zurück. So entspricht eine Rotverschiebung von $z \approx 4$ einem Alter des Universums von etwa 1,5 Milliarden Jahren.

In erster Näherung lässt sich das Röntgenspektrum von APM 08279+5255 mit einer einfachen Kombination eines Potenzgesetzes der Kontinuumemission und zusätzlicher Absorption durch Gas in der unmittelbaren Umgebung des Quasars beschreiben. Allerdings fanden Hasinger und sein Team im Röntgenspektrum des Quasars signifikante Abweichungen von dieser Näherung. Besonders auffällig ist die ausgeprägte Absorptionsschwäche bei einer Energie von ca. 1,55 keV (Abb.). Die Forscher schreiben diese Absorption hochionisiertem Eisen (Fe XVII) zu. Unter der Annahme eines Absorptionswirkungsquerschnitts von $2,7 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-2}$ schätzen sie eine Säulendichte des Eisens im ausströmenden Wind von $N_{\text{Fe}} \approx 1,7 \times 10^{19} \text{ cm}^{-2}$ ab. Die beobachtete Absorptionsschwäche der Fe K-Linie lässt sich in Relation zu Absorptionsschwächen von Sauerstoff, Neon, Magnesium und Eisen bei geringeren Energien konsistent beschreiben, wenn man annimmt, dass das Verhältnis Eisen zu Sauerstoff im Quasar etwa dreimal so hoch ist wie im Sonnensystem [1].

Dieses Ergebnis aus Röntgenmessungen stimmt gut überein mit Ergebnissen, die bereits durch Untersuchungen von Emissionslinien im ultravioletten Spektralbereich für Quasare hoher Rotverschiebung gefunden worden sind [2–4].

Das bemerkenswert hohe Vorkommen eines schweren Elements wie Eisen erfordert eine vorangegangene Epoche sehr intensiver Sternentstehung. Die ersten Stern-

entstehungsphasen im frühen Universum verliefen sehr viel heftiger als die eher gemächliche Bildung von Sternen, wie wir sie gegenwärtig in der Milchstraße beobachten. Während in der Milchstraße und allgemein in Spiralgalaxien jährlich nur etwa einige Sonnenmassen in Sterne umgewandelt werden, müsste die Sternentstehungsrate in diesen frühen, sich bildenden Galaxien bis zu 1000 Sonnenmassen pro Jahr betragen haben. Damit verbunden ist eine im Laufe der Zeit deutlich höhere Rate an Supernova-Explosionen. Der größte Teil des Eisens entsteht in Supernova-Explosionen vom Typ Ia. Hierbei handelt es sich um Sterne in Doppelsternsystemen, die von ihrem Begleiter Materie akkretieren, bis sie eine kritische Masse überschreiten und explodieren. Da die Entwicklungszeitskala der Vorläufersterne von Supernovae Ia etwa 1 Milliarde Jahre beträgt, eignet sich die Messung relativer Eisenhäufigkeiten gewissermaßen als kosmologische Uhr. So deuten die für Quasare bei hohen Rotverschiebungen abgeschätzten Elementhäufigkeiten darauf hin, dass die erste Epoche sehr heftiger Sternentstehung viel früher als gedacht, d. h. bereits wenige Hundertmillionen Jahre nach der Entstehung des Universums begann und die Umgebung von Quasaren mit schweren Elementen anreicherte.

MATTHIAS DIETRICH

- [1] G. Hasinger, N. Schartel und S. Komossa, *Astrophys. Journal* **573**, L77 (2002)
- [2] F. Hamann und G. Ferland, *Ann. Review Astron. & Astrophysics* **37**, 487 (1999)
- [3] M. Dietrich und U. Wilhelm-Erkens, *Astronomy & Astrophysics* **354**, 17 (2000)
- [4] M. Dietrich, I. Appenzeller, M. Vestergaard und S. J. Wagner, *Astrophys. Journal* **564**, 581 (2002)

Transistoren aus einzelnen Molekülen

Die „molekulare Elektronik“ verfolgt die technologische Vision, elektronische Schaltkreise aus organischen Molekülen aufzubauen. Moleküle sollen dabei die Funktion von Dioden, Speicherbausteinen oder Transistoren übernehmen, was zu einer immensen Verkleinerung und Verbilligung gegenüber der Siliziumtechnologie führen könnte.

Dr. Matthias Dietrich, Department of Astronomy, University of Florida, 211 Bryant Space Science Center, Gainesville, USA

Diese Vision ist zwar nicht neu, aber das Arbeitsgebiet gewinnt in jüngster Zeit erheblich an Fahrt, getrieben durch bemerkenswerte experimentelle und theoretische Fortschritte in der Grundlagenforschung.

Obwohl die für die molekulare Elektronik zentrale Frage „Wie fließt Strom durch ein Molekül?“ recht einfach klingt, stellt sich doch die Physik dahinter als ausgesprochen komplex dar. In den USA wurden nun zeitgleich sehr schöne Experimente durchgeführt, die dieser Frage nachgehen. Den Forschern in Cornell und Berkeley [1] sowie Harvard und Berkeley [2] ist es gelungen, mit organometallischen Molekülen einen Einzelmolekültransistor zu bauen, dessen elektronische Eigenschaften im Wesentlichen von einem zentralen Kobalt-Ion (Cornell) bzw. Vanadium-Komplex (Harvard) bestimmt werden.

Experimente mit einzelnen Molekülen setzen zwei Kontakte voraus, deren Abstand der Länge eines Moleküls entspricht (ca. 0,5 – 2 nm), also weit unter dem Auflösungsvermögen lithographischer Methoden liegt. Dieser geringe Abstand lässt sich erreichen, indem man eine kleine Metallbrücke auf ein Halbleitersubstrat strukturiert und sie mit moderaten Stromstärken „durchbrennt“. Zu einem Transistor fehlt allerdings noch eine dritte Elektrode. In beiden Experimenten koppelt eine Gateelektrode kapazitiv an das Molekül an und beeinflusst dessen elektrochemisches Potential. Dies gelang vor zwei Jahren erstmals mit einem C_{60} -Molekül [3], und nun zum ersten Mal an einem organischen Einzelmolekül.

Wie ist es nun möglich, Moleküle zwischen die Kontakte zu platzieren? Der Grundgedanke ist, die Wechselwirkung zwischen Molekül und Elektrode so zu wählen, dass das Molekül sich selbst anordnet. Dies erfordert ein wohlüberlegtes Design des Moleküls. Im Falle des Cornell-Experiments ist es ein Molekül, das mit zwei Schwefelbindungen an den beiden Goldelektroden anhaften kann [1]. Der zentrale, elektronisch aktive Teil ist allerdings ein metallischer Kern: ein Kobalt-Ion, das als Komplex von zwei klammerartigen terpyridinyl-Liganden umgeben ist. Der umgebende Ligand hält also einerseits das Co-Ion mechanisch fest, andererseits sorgt er für eine wohldefi-

nierte elektrostatische Umgebung. Von diesen Komplexen ist (durch elektrochemische Analysen in Lösung) bekannt, dass das Co-Ion bei vergleichsweise niedrigen Potentialen ein Elektron abgeben kann, d. h. ein Co^{2+} zum Co^{3+} wird. Diese Eigenschaft ist natürlich für die Leitfähigkeit eines Molekülkontakts von großer Bedeutung, da bei einem solchen Potential ein Elektron von einer Zuleitung auf das Zentralion und weiter zur anderen Zuleitung hüpfen kann, ohne dass diese kurzzeitige Aufladung Energie kosten würde. Ist das Potential hingegen so, dass die Ladung des Zentralions genau festgelegt ist, kann kein Strom fließen. In der Sprache der Nanophysik spricht man dann von Coulomb-Blockade.

Die Abbildung zeigt die Stromspannungs-Kennlinie des Einzelmolekültransistors, gemessen bei sehr tiefen Temperaturen ($T < 100$ mK). Bei passender Gatespannung ist die Kennlinie näherungsweise eine Gerade (schwarze Linie): Strom kann auch bei kleinen Spannungen fließen, der Transistor ist also offen. Bei anderen Gatespannungen (farbige Linien) ist die Ladung auf dem Zentralion fest definiert und deshalb Stromfluss erst ab einer gewissen Schwellenspannung möglich. Wer an technische Anwendungen denkt, sei aber gewarnt: Dieser Transistor hat im geöffneten Zustand immer noch einen Widerstand, der größer als 100 M Ω ist.

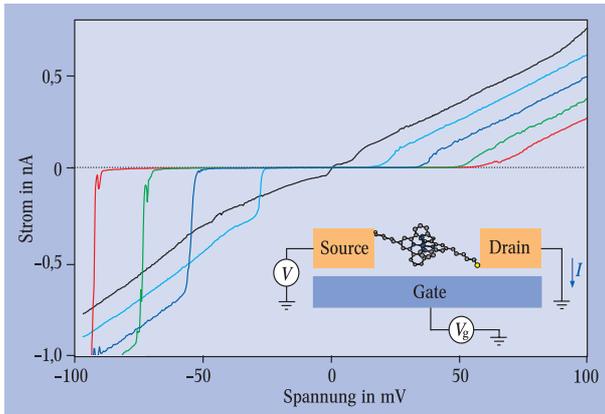
Da gegenwärtig keine Mikroskopietechnik in der Lage ist, einzelne Moleküle im Spalt aufzulösen, erhält man Informationen über den Kontakt nur durch elektrische Messungen. Das gut nachvollziehbare Leitverhalten zeigt, dass tatsächlich ein Molekülkontakt vorliegt. Die beobachtete Streuung der Parameter von Probe zu Probe aufgrund mikroskopischer Unterschiede macht glaubhaft, dass einzelne Moleküle den Kontakt bilden [4].

Verkürzt man in einem weiteren Experiment die Ankerketten des Moleküls, so verbessert man die Kopplung an die Zuleitungen. Stellt man durch eine passende Gatespannung eine ungerade Zahl von Elektronen am Zentralion ein, so trägt dieses ein magnetisches Moment, das zu dem Kondo-Effekt führt: Dieser ist von magnetischen Störstellen in Metallen bekannt, wo eine komplexe dynamische Abschirmung des Störstellenspins durch die Spins der Leitungselektronen den

Dr. Heiko B. Weber,
Institut für Nano-
technologie, For-
schungszentrum
Karlsruhe, Postfach
3640, 76021 Karlsruhe

Widerstand zu tiefen Temperaturen hin logarithmisch ansteigen lässt. In den letzten Jahren wurde der Kondo-Effekt auch im Leitwert von sehr kleinen Strukturen wie Halbleiterquantenpunkten oder -ringen entdeckt. Die Phänomenologie ist hierbei allerdings eine andere, denn der Leitwert – nicht der Widerstand – steigt zu tiefen Temperaturen hin logarithmisch an. Analog dazu steigt beim Cornell-Experiment der Leitwert erstaunlicherweise bis nahe an den Idealwert von $2e^2/h$, was angesichts der komplizierten Molekül-Gold-Kopplung nicht selbstverständlich ist.

Im Harvard-Experiment wurde ein Molekül mit einem Divanadium-Kern gewählt, der viel enger in die Molekülstruktur eingewoben ist [2]. Hier kommt die molekulare Struktur des Gesamtmoleküls stärker zum Tragen, der Spin ist nicht auf einem Atom lokalisiert. Obwohl deshalb eine mikroskopische Deutung der Transportprozesse schwierig erscheint, zeigt der Molekülkontakt eine ganz ähnliche Phänomenologie der Kondo-Physik wie im zuvor beschriebenen Experiment.



Strom-Spannungskennlinien des Einzelmolekültransistors [1]. Bunte Linien: Ist die Ladung des zentralen Co-Ions festgelegt, dann ist der Strom bei kleinen Spannungen aufgrund der Coulomb-Abstoßung (Coulomb-Blockade) sehr stark unterdrückt. **Stellt man an der Gateelektrode hingegen das Potential so ein, dass der Co^{2+} - und der Co^{3+} -Zustand gleiche Energie besitzen, kann man das Ion kontinuierlich „umladen“. Dann kann Strom auch bei kleinsten Spannungen fließen (schwarze Linie).**

Die besondere Bedeutung dieser Experimente liegt darin, dass hier einige neue Techniken und ein sehr ausgefeiltes Moleküldesign zusammenwirken, um wohlvertraute Effekte auf der allerkleinsten Skala eines einzelnen Moleküls wiederzufinden: den Einzelelektronentransistor und den Kondo-Effekt. Die molekulare Elektronik bewegt sich weitgehend in noch nicht beschriftetem Neuland. Deshalb ist es um so wichtiger, dass man an Beispiel-

systemen die physikalischen Prinzipien klar identifizieren kann. Somit ist ein wichtiger Meilenstein für die molekulare Elektronik erreicht. Mit Sicherheit werden weit komplexere Experimente und vielleicht auch technologische Neuerungen folgen.

HEIKO B. WEBER

- [1] J. Park et al., Nature **417**, 722 (2002).
- [2] W. Liang et al., Nature **417**, 725 (2002).
- [3] H. Park et al., Nature **407**, 57 (2000).
- [4] J. Reichert et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 176804 (2002).

Photonenpaare: gemeinsam durch dick und dünn

Messungen der Transmission verschränkter Photonen durch metallische Gitter zeigen, dass die Verschränkung auch nach der Umwandlung in Oberflächenplasmonen erhalten bleibt.

Quantenkryptographie, Teleportation und Quantencomputing sind Phänomene, die auch außerhalb von Forscherkreisen Aufsehen erregen, nicht zuletzt weil sie sich unserem klassischen Naturverständnis entziehen. So ist die Nichtlokalität der Quantenwelt dafür verantwortlich, dass eine Messung an einem Teilchen instantan die Eigenschaften eines anderen Teilchens festlegen kann. Der Zustand eines derartigen Teilchenpaares heißt verschränkt, d. h. er kann nicht in Einzelteilchen-Wellenfunktionen faktorisiert werden.

Photonen zum Beispiel lassen sich durch parametrische Fluoreszenz in BBO-Kristallen leicht verschränken [1]. Dabei wird ein Pumpphoton in zwei zueinander orthogonal polarisierte Photonen von halber Energie umgewandelt. Es entstehen Photonen in zwei Propagationsrichtungen, deren Polarisationen isotrop verteilt, jedoch perfekt antikorreliert sind. Typischerweise können mit dieser Methode ca. 30 000 Photonenpaare pro Sekunde erzeugt werden.

Um den Grad der Verschränkung zu untersuchen, misst man in einem Aufbau wie in Abb. a die Polarisation der Photonenpaare mittels der Polarisatoren P1 und P2 und registriert sie in Koinzidenz auf den Photodetektoren D1 und D2. Gelingt eines der verschränkten Photonen durch den Polarisator P1, ist

die Wahrscheinlichkeit, dass das zweite Photon durch P2 transmittiert wird, gleich null, falls P1 und P2 parallel stehen, und eins, falls sie gegeneinander um 90° gedreht sind. Fixiert man P1 auf den Winkel ϕ_1 und misst die Koinzidenzzählrate als Funktion des Winkels von P2, erhält man eine Polarisationskorrelation wie in Abb. c. Sind die Photonen nicht verschränkt (z. B. durch eine ungewollte Messung der Polarisation eines der beiden Photonen), so ist die Wahrscheinlichkeit, ein Photon nach Transmission durch P2 zu detektieren, unabhängig von der Stellung von P1. Eine Beimischung unverschränkter Photonen verringert also den Kontrast der Messung, d. h. die Signalamplitude S dividiert durch die maximalen Zählrate Z . Somit ist der Kontrast ein Maß für die Verschränkung.

Zum Leidwesen derjenigen, die sich Anwendungen von Quantenphänomenen wie der Verschränkung erhoffen, zerstört eine Kopplung an die klassische Welt die Kohärenz der Quantenzustände. Als klassische Phänomene werden auch gemeinhin die so genannten Oberflächenplasmonen (OP) behandelt. Sie sind kollektive Schwingungen von etwa 10^{10} Elektronen, die an der Oberfläche von Metallen wellenartig propagieren können. Altewischer et al. [2] von der Universität Leiden zeigen jedoch, dass die Verschränkung sogar erhalten bleibt, wenn die Photonen in Oberflächenplasmonen und sodann wieder in Photonen umgewandelt werden. Die OP verhalten sich also wie ein Quantenphänomen.

Um eine Kopplung der Photonen an die OP-Moden zu gewährleisten, verwenden die niederländischen Forscher einen 200 nm dicken Goldfilm, der mit einem rechtwinkligen Lochraster (Gitterkonstante 700 nm, Lochdurchmesser 200 nm) versehen ist (siehe Abb. b). Bei geeigneter Wahl der Photonenenergie werden die diagonal verlaufenden OP-Moden auf der vorderen Filmseite resonant angeregt. Die optisch angeregten OP-Moden koppeln durch die Löcher an OP auf der Rückseite des Films, deren Energie dann wieder als Photonen abgestrahlt wird. Die erzielte Transmission von 4 % des einfallenden Lichts ist etwa zehnmal so groß wie es eine Rechnung auf Grund der Geometrie des Films erwarten ließe [3].