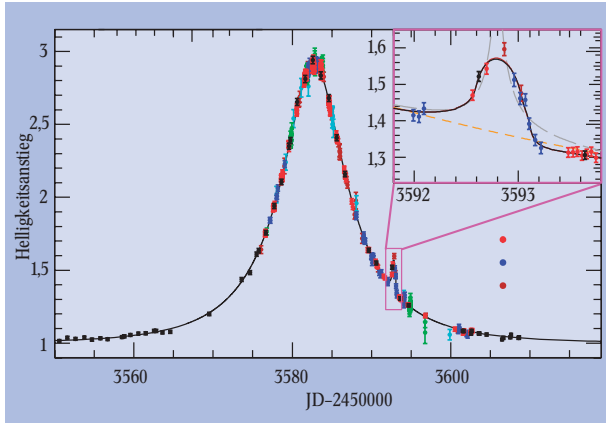


zwischen Begleiter und Primärstern der Linse. Für den „gelinsten“ Hintergrundstern kann man annehmen, dass er sich nahe des Galaktischen Zentrums befindet, wo fast alle Sterne dieses Feldes liegen, also in einer Entfernung von etwa 8,5 kpc ($1 \text{ pc} = 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$). Über die Linse bzw. insbesondere den Primärstern



Im Sommer 2005 haben verschiedene Teleskope (verschieden farbige Punkte) beobachtet, wie die Helligkeit eines Sterns zweimal anstieg. Die Ursache dafür ist der Gravitationslinseneffekt, vermutlich von einem Stern mit Planeten, der zwischen Erde und Hintergrundstern durchgezogen ist. Der Ausschnitt zeigt den zweiten Peak vergrößert (1σ -Messfehlerbalken) sowie die erwarteten Lichtkurven für drei verschiedene Modelle: Einzellinse vor Einzelstern (gestrichelt braun), Doppellinse vor Einzelstern (durchgezogene Linie) und Einzelstern vor Doppellinse (gestrichelt grau). JD bezeichnet den fortlaufenden Julianischen Tag, dessen Startpunkt JD = 0 der 1. Januar 4713 v. Chr. war. (aus: [1] bzw. planet.iap.fr/OB05390.news.html)

1) Der Planetenkandidat erhielt die vorläufige Bezeichnung OGLE-05-BGL-390Lb, wobei das b üblicherweise den ersten bei einem Stern detektierten Planeten bzw. Planetenkandidaten bezeichnet, der Rest des Namens den Stern selbst, in diesem Fall das Mikrogravitationslinseneignis detektiert mit OGLE (Optical Gravitational Lensing Experiment).

2) Es ist jedoch extrem unwahrscheinlich, dass die beiden Peaks zufällig innerhalb kurzer Zeit von zwei unabhängigen, nicht-gebundenen Objekten erzeugt wurden.

Prof. Dr. Ralph Neu-
häuser, Astrophy-
sikalisches Institut,
Friedrich-Schiller-
Universität Jena,
Schillergäßchen 2-3,
07745 Jena

weiß man aber wenig, da die Linse nicht direkt beobachtet wurde: Alle Photonen stammen von dem Hintergrundstern. Daher kennt man weder die Masse der Linse noch ihre Entfernung und somit auch insbesondere nicht die Masse des Begleiters.

Man kann sich jedoch überlegen, welche Masse und welche Entfernung (in bestimmten Fehlerintervallen) wahrscheinlich sind. Nach der Massenverteilung der Sterne in unserer und anderen Galaxien wird als wahrscheinlichste Masse des Primärsterns $0,22^{+0,21}_{-0,11}$ Sonnenmassen angenommen (1σ -Fehler). Bei einer deutlich größeren Masse des Primärsterns wäre die Masse des Begleiters allerdings deutlich größer als publiziert. Das gleiche Problem ergibt sich auch beim Abstand zwischen Stern und Begleiter, der sich aus dem zeitlichen Abstand der beiden Peaks ergibt, wenn man die Entfernung kennt. Beaulieu et al. argumentieren mithilfe eines galaktischen Modells und der Nicht-Detektion des Begleiters, dass der Abstand bei 1 bis 3 AE liegt, dies ist aber nicht wirklich gemessen worden.

Hier liegt ein Hauptproblem des Mikrogravitationslinseneffekts: Da Entfernung und Masse der Linse unbekannt sind, kann man die Masse eines Begleiters nicht messen, sondern nur schätzen. Damit bleibt unsicher, ob es sich überhaupt um einen Planeten handelt, also um einen Begleiter mit weniger als etwa 13 Jupitermassen. Desweiteren ist nicht sicher, dass die beiden linsenden Objekte überhaupt ein Doppelsystem bilden, also zusammengehören, umeinander kreisen und in der gleichen Entfernung stehen. Daher kann man bezweifeln, dass der zweite Peak überhaupt von einem Begleiter erzeugt wurde.²⁾

Leider kann solch ein Mikrogravitationslinseneignis auch nie durch eine weitere Beobachtung bestätigt werden, wie sonst in der Naturwissenschaft üblicherweise verlangt, denn dieselbe Linse wird nie wieder vor einem anderen Stern herziehen. Die Methode ist zudem nicht ge-
eicht, was z. B. an einem bekannten Stern mit Begleiter bekannter Masse im Prinzip geschehen könnte.

Doch prinzipiell erlaubt der Mikrogravitationslinseneffekt, Planeten mit einigen Erdmassen in Abständen von 1 bis 5 AE zu detektieren oder Planeten in großen Entfernungen zu entdecken. Statistisch könnte man also Aussagen über die Häufigkeit von Planeten in der gesamten Galaxie machen. Leider hat man aber bisher trotz großen Aufwands nur drei Kandidaten gefunden.

Auch andere Methoden zur Entdeckung extrasolarer Planeten haben ihre Schwächen, so bleibt bei der Radialgeschwindigkeits-Methode die Masse des Begleiters unsicher und damit die Frage unbeantwortet, ob er überhaupt ein Planet ist. Die Transit- und Astrometrie-Methoden sind in weniger als einem Dutzend Fällen erfolgreich gewesen. Bei der direkten Detektion eines Planeten, also in einem recht weiten Abstand vom Stern, kann man dessen Masse nicht direkt dynamisch mit dem dritten Kepler-Gesetz bestimmen, weil ein Orbit Jahrhunderte dauert.

Bei GQ Lupi b wurde die Masse durch zwei verschiedene theoretische Modellrechnungen (zur Entstehung und zur Atmosphäre) auf ein bis drei Jupitermassen genau bestimmt [2], wobei aber beide Theorien Annahmen und Vereinfachungen machen, deren mögliche systematische Fehler umstritten sind. Diese Theorien

ließen sich aber testen und eichen, wenn man indirekt detektierte Planeten(kandidaten) mit bekannten Massen direkt detektieren würde, also ihre Helligkeiten direkt messen könnte. Dies wäre mit neuen, verbesserten Interferometrie-Instrumenten an den 8-Meter-Spiegeln des Very Large Telescopes der Europäischen Südsternwarte möglich.

RALPH NEUHÄUSER

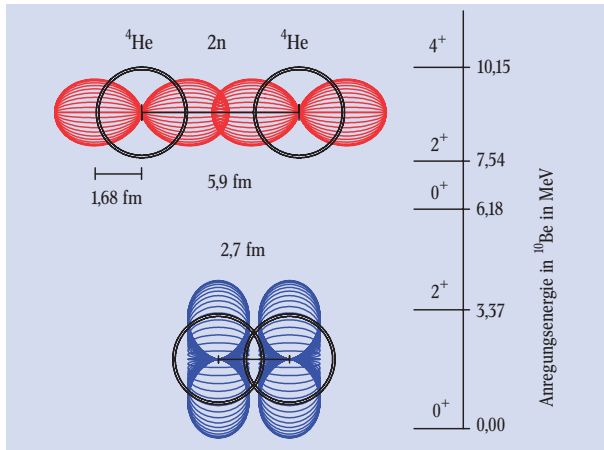
- [1] J.-P. Beaulieu et al., Nature **439**, 437 (2006)
- [2] R. Neuhauser, E. W. Guenther, G. Wuchterl, M. Mugrauer, A. Bedalov und P. H. Hauschildt, A&A **435**, L13 (2005)

Das beste Molekül der Kernphysik

Moleküle, wie sie aus der Chemie bekannt sind, werden durch eine langreichweitige Austauschwechselwirkung der Valenz-Elektronen gebunden. Dabei hält die elektrostatische Abstoßung der positiv geladenen Kerne die Zentren der Atome auf Abstand. Kann es analoge „Moleküle“ auch aus gebundenen Atomkernen geben? Stabile Kernmoleküle sind unmöglich, denn die Reichweite der attraktiven nuklearen Wechselwirkung ist einfach zu kurz gegenüber der repulsiven Coulomb-Wechselwirkung, um zwei Kerne in größerem Abstand durch Valenz-Neutronen zusammen zu halten. Aus diesem Grunde haben stabile Kerne im Grundzustand keine Molekülstruktur. Als Anregungszustände von Kernen existieren Kernmoleküle aber. Einer internationalen Kollaboration um Martin Freer, Universität Birmingham, ist es kürzlich gelungen, ein solches Kernmolekül in ^{10}Be zu identifizieren [1]. Da dieses Molekül zudem *langlebig* ist, sollte es zum „besten Molekül der Kernphysik“ gekürt werden.

Damit Kernmoleküle als Anregungszustände von Kernen existieren können, ist ein sehr trickreicher Bindungsmechanismus notwendig. In den meisten Fällen reichen die Bindungskräfte nicht aus, um einen teilchen-stabilen^{*)} Zustand zu erreichen, sodass die molekulare Struktur als angeregter Resonanzzustand beobachtet wird. Molekulare Strukturen in leichten Kernen wurden bereits vor einiger Zeit ausführlich von Wolfram von Oertzen diskutiert [2]. Ein spektakuläres Beispiel

dafür ist das $({}^6\text{He})_2$ -Molekül, das ${}^{12}\text{Be}$ als Gesamtstruktur hat und aus zwei ${}^6\text{He}$ -Substrukturen (Clustern) besteht. Die von Martin Freer 1999 am GANIL, Caen, gemessenen Rotationspektren zeigen, dass die beiden ${}^6\text{He}$ -Cluster etwa 6 fm voneinander entfernt sind [3]. Das ist fast das Dreifache ihres Radius von nur



Molekulare ${}^4\text{He}:2n:{}_4^4\text{He}$ -Bande mit $(\sigma)^2$ -Bindung, die die lang gestreckte Form des Kernmoleküls unterstützt (oben). Die Valenz-Orbitale der Neutronen sind nur mit ihrer Winkelabhängigkeit gezeigt. Die ${}^{10}\text{Be}$ -Grundzustandskonfiguration mit $(\pi)^2$ -Bindung hat keine molekulare Struktur, der größere Überlapp der ${}^4\text{He}$ -Cluster ist deutlich zu sehen (unten). Rechts ist das Niveau-Schema der beiden Rotationsbanden dargestellt.

2,30 fm [4]! Ein weiteres Beispiel ist ein Zustand in ${}^{12}\text{C}$ (Quantenzahlen 0^+ , Anregungsenergie: 7,65 MeV), der aus drei α -Clustern (${}^4\text{He}$ -Kerne) besteht und nur 287 keV über der Schwelle des Zerfalls in ${}^8\text{Be}$ und α -Teilchen liegt. Diese so genannte Hoyle-Resonanz hat größte astrophysikalische Bedeutung für die Synthese von ${}^{12}\text{C}$ im 3α -Stoß, ohne sie wäre die Häufigkeit von ${}^{12}\text{C}$ im Universum nicht zu erklären.

Die Lebensdauer dieser teilcheninstabilen Kernmoleküle ist extrem kurz, sie liegt im Bereich von 10^{-18} bis 10^{-21} s. Bei stärkerer Bindung könnte aber eine molekulare Struktur auch im Bereich teilchenstabiler Zustände auftreten mit einer um viele Größenordnungen verlängerten Lebensdauer. Das Molekül kann dann auf der Zeitskala der Nukleonenbewegung als stationär betrachtet werden (es zerfällt durch einen elektro-magnetischen Übergang in den Grundzustand).

Ein Kernmolekül lässt sich analog zu einem gewöhnlichen Molekül über die Rotationsbanden charakterisieren und identifizieren. Die Anregungsenergien E_x der einzelnen Bandenmitglieder folgen dabei der Beziehung $E_x = E_0 + a J(J+1)$ mit dem Drehimpuls J . In dem von Freer et al. untersuchten ${}^{10}\text{Be}$ -Molekül

liegt der Kopf der Rotationsbande ($J = 0$, positive Parität: 0^+) bei 6,18 MeV Anregungsenergie und hat eine Lebensdauer von 1,1 ps, weil er teilchen-stabil ist. Zwar gab es bereits früher deutliche Hinweise experimenteller [2] und theoretischer [5, 6] Art darauf, dass dieser Zustand Teil einer molekularen Struktur ist. Als einziges weiteres Mitglied der Bande war aber nur noch der Zustand 2^+ bei 7,54 MeV bekannt. Durch die neuen Messungen und die Identifizierung des lang gesuchten 4^+ -Zustands der Bande bei 10,15 MeV ist die molekulare Struktur jetzt auch experimentell abgesichert. Der gemessene dritte Punkt ist dabei der „springende“, denn erst durch ihn wird die oben genannt funktionelle Abhängigkeit von J und damit der Rotationscharakter der Bande bestätigt.

In der Messung wurde die Methode der elastischen Resonanzstreuung verwendet, um den Spin und die α -Zerfallsbreite zu bestimmen. Ein radioaktiver ${}^6\text{He}$ -Strahl wurde in eine mit ${}^4\text{He}$ -Gas gefüllte Streukammer geschossen; gestreute ${}^6\text{He}$ -Teilchen wurden zusammen mit ${}^4\text{He}$ -Rückstoßkernen in Ring-Detektoren in Koinzidenz nachgewiesen. Der Gasdruck war so eingestellt, dass die ${}^6\text{He}$ -Ionen des Strahls in der Mitte der Kammer gerade soweit abgebremst waren, dass im $({}^6\text{He}+{}^4\text{He})$ -Schwerpunktsystem eine Energie von 2,74 MeV erreicht wurde, die bei Addition der Schwellenenergie (7,41 MeV) die Resonanzenergie von 10,15 MeV ergibt. Die Winkelkorrelation der beiden Teilchen ${}^6\text{He}$ und ${}^4\text{He}$ zeigt, dass die Resonanz eine gerade Parität hat und zu $J = 4$ gehört.

Aus der Analyse der Eigenschaften der Rotationsbande ergibt sich, dass die beiden α -Cluster 5,9 fm voneinander entfernt sind

(Abb.). Im Vergleich dazu ist der Grundzustand von ${}^{10}\text{Be}$ wesentlich kompakter. Im Molekülzustand bleibt zwischen den beiden α -Clustern, die hier einen Durchmesser von 3,36 fm haben, viel Platz. Wie können die α -Cluster über diese große Distanz gebunden werden? Diese Frage ist zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht quantitativ geklärt. Der Mechanismus beruht sicher auf dem Austausch des korrelierten Neutronenpaares. Bereits in ${}^6\text{He}$ bildet das Neutronenpaar ein Halo mit einem mittleren Radius von 2,97(3) fm [4], es ist also fast doppelt so ausgedehnt wie der α -Rumpf. Im molekularen ${}^{10}\text{Be}$ -Zustand ist die elektrostatische Abstoßung der Rümpfe relativ gering. Die Neutronen- $(\sigma)^2$ -Orbitale an den beiden Zentren der α -Cluster überlappen sich offenbar noch so stark, dass sie die Struktur stabilisieren. Die Korrelation der beiden Neutronen spielt dabei die entscheidende Rolle, denn in ${}^9\text{Be}$ ist die molekulare Bande bei 1,68 MeV mit nur einem einzelnen Valenz-Neutron ($\alpha:n:\alpha$) nicht gebunden. Es wäre nun interessant, weitere Mitglieder der molekularen Bande in ${}^{10}\text{Be}$ nachzuweisen und ähnliche Strukturen auch in anderen Kernen mit der Struktur Cluster:2n:Cluster zu finden.

HANS GERHARD BOHLEN

- [1] M. Freer et al., Phys. Rev. Lett. **96**, 042501 (2006).
- [2] W. von Oertzen, Z. Phys. A **354**, 37 (1996); W. von Oertzen, Z. Phys. A **357**, 355 (1997).
- [3] M. Freer et al., Phys. Rev. Lett. **82**, 1383 (1999).
- [4] G. D. Alkhalov et al., Nucl. Phys. A **712**, 269 (2002).
- [5] Y. K. Kanada-En'yo, H. Horiuchi und A. Dote, Phys. Rev. C **60**, 064304 (1999).
- [6] N. Itagaki und S. Okabe, Phys. Rev. C **61**, 044306 (2000).

#) Ein teilchen-stabiler angeregter Zustand liegt zwischen Grundzustand und der niedrigsten Teilchen-Emissionsschwelle (meistens Neutronenschwelle), er kann also nicht durch Teilchen-Emission zerfallen.

Dr. Hans Gerhard Bohlen, Hahn-Meitner-Institut Berlin, Glienicke Str. 100, 14109 Berlin

KURZGEFASST...

■ Kugelblitze aus der Mikrowelle

Kugelförmige Blitze sind faszinierende Leuchterscheinungen, die sehr selten bei Gewittern beobachtet werden. Israelischen Forschern ist es nun gelungen, Kugelblitze im Labor zu erzeugen. Sie konzentrierten dazu die Strahlung einer gewöhnlichen Haushalts-Mikrowelle mithilfe einer Stabantenne auf ein Silikat-Substrat, bis dieses punktförmig aufschmolz. Entfernten sie dann die Antenne vom Substrat, so löste sich ein Kugelblitz und schwebte wenige Millisekunden in der Luft. Die Forscher erhoffen sich aus diesen Arbeiten Erkenntnisse darüber, wie und unter welchen

Bedingungen Kugelblitze in der Natur entstehen können.

V. Dikhtyar und E. Jerby, Phys. Rev. Lett. **96**, 045002

■ Flackernde Neutronensterne

Ein internationales Astronomenteam hat eine neue Art rotierender Neutronensterne entdeckt, die wenige Millisekunden kurze Radiopulse aussenden – im Gegensatz zu Pulsaren aber nicht in regelmäßigen Abständen, sondern mit Pausen von einigen Minuten bis zu einigen Stunden dazwischen. Die Ursache für das Flackern dieser *Rotating Radio Transients* ist bislang unbekannt. M. A. McLaughlin et al., Nature **439**, 817 (2006)