

INTERVIEW

Reise durch den Urknall

Martin Bojowald über den Anfang der Welt

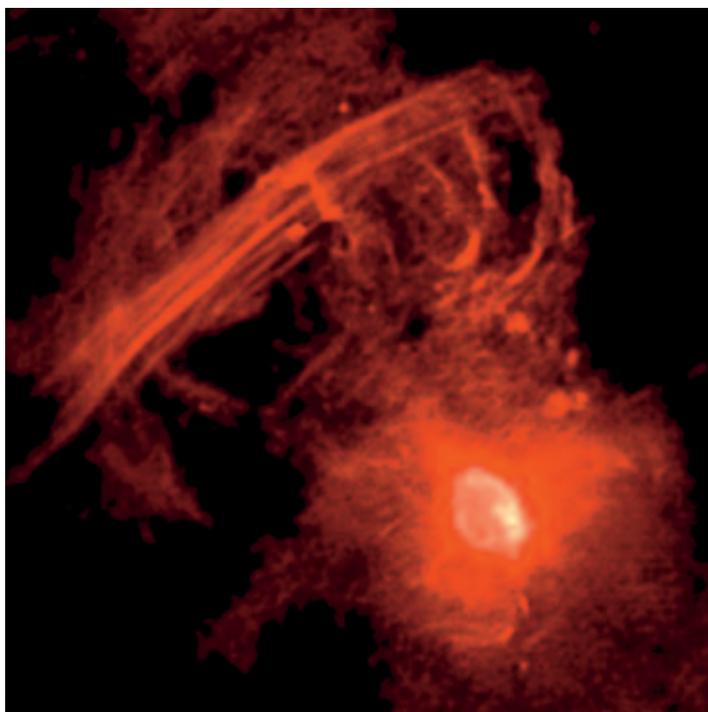
DAS GESPRÄCH FÜHRTE MAIKE POLLMANN

Wer fragt, was vor dem Urknall war, wird von den meisten Physikern belächelt. Schließlich entstanden vor schätzungsweise 13,7 Milliarden Jahren überhaupt erst Zeit und Raum – ein »davor« macht damit also keinen Sinn. Martin Bojowald hat da allerdings eine andere Theorie.

Spektrumdirekt: Herr Bojowald, wir haben den Urknall im Lauf der Jahre als »Anfang von Allem« akzeptiert – auch wenn er noch so unvorstellbar sein mag. Sie stellen die moderne Schöpfungsgeschichte nun in Frage. Warum?

Martin Bojowald: Die meisten Physiker hatten immer Probleme mit dieser Anfangsinterpretation. Dennoch wurde sie populär gemacht und ist sicherlich auch ein interessantes Bild. Aber die mathematischen Gleichungen, aus denen man angeblich diese Konsequenz ziehen kann, machen am Urknall selbst auf einmal keinen Sinn mehr: Es ergeben sich Dinge wie unendlich große Dichten oder unendlich hohe Temperaturen. Die Physik würde an diesem Punkt zusammenbrechen – damit liegt aber auch seine Interpretation außerhalb der Theorie. Die Aufgabe war, das jetzige Modell zu erweitern, so dass es zwar immer noch das gleiche Expansionsverhalten nach dem Urknall beschreibt, am Urknall selbst aber nicht zusammenbricht. Mit der Quantengravitation wurde das möglich.

Fortsetzung Seite 4



© NRAO/AUI/NSFF/Zadeh et al.

WELTRAUMCHEMIE

Moleküle im All

Über die Geheimnisse der außerirdischen Chemie

VON MAIKE POLLMANN

Die Bedingungen im Weltall sind harsch und dennoch finden Astronomen dort eine erstaunliche Varietät an komplexen Molekülen. Nicht alle sind bisher identifiziert und manche geben sogar große Rätsel auf.

Wie kam das Leben auf die Erde? Bisher kann niemand diese Frage mit Sicherheit beantworten. Spekulieren lässt sich dagegen gut. Denkbar wäre beispielsweise eine Anreise aus dem Weltall – mit Hilfe von Meteoriten. Tatsächlich lassen sich eine ganze Reihe von Aminosäuren in diesen Gesteinsbrocken finden. Deshalb sollte man annehmen, dass die »Bausteine des Lebens« auch im Weltall existieren können.

»Irgendwie müssen sie ja in die Meteoriten gekommen sein«, sagt Karl Menten vom Max-Planck-

Institut für Radioastronomie. Man muss allerdings vorsichtig sein, mahnt er. »Landet ein Meteorit auf unserem Planeten, wird er schnell kontaminiert: Leben auf der Erde ist unglaublich aggressiv.« Der Fund von Aminosäuren, die in der Natur nicht oder nur äußerst selten vorkommen, sprechen allerdings für einen außerirdischen Ursprung. Trotz dieser Indizien gelang es bisher nicht, Aminosäuren auch in den Weiten des Weltalls auszumachen.

Chemiebaukasten im All

Stattdessen erspähten Astronomen dort aber jede Menge

Fortsetzung Seite 2

Liebe
Leserin,
lieber
Leser,

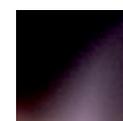


obwohl das Universum unter ständiger Beobachtung steht, gibt es uns noch zahllose Rätsel auf. Genug Stoff also für ein Themenspezial Astronomie, in dem wir den Stand der Ermittlungen für Sie zusammenfassen: vom altbekannten Begleiter der Erde bis hin zum vermeintlichen Anfang von Raum und Zeit – und sogar ein wenig darüber hinaus.

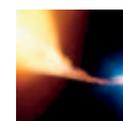
Eine spannende Lektüre wünscht Ihnen

Maïke Pollmann

IN DIESER AUSGABE:



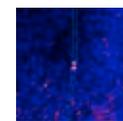
KOSMISCHE STRAHLUNG
Spuren Dunkler Materie aufgespürt?



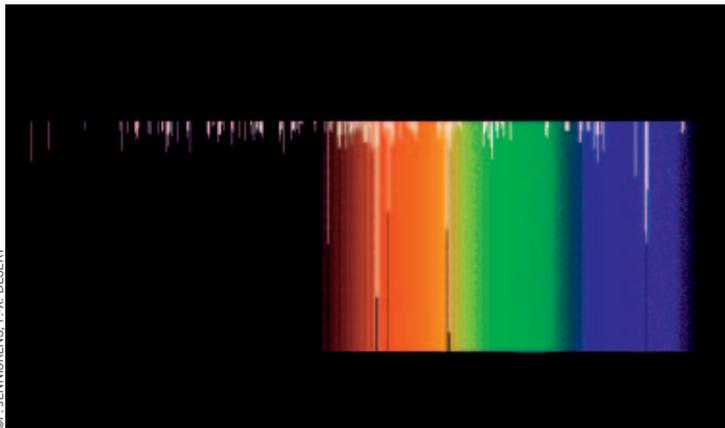
STERNPHYSIK
Vorläufer zweier Supernovae identifiziert



MONDGEOLOGIE
Auch unser Trabant besaß einst einen eigenen Dynamo



FERNE WELTEN
Planeten um fremde Sonnen direkt beobachtet



© JENNIFERS F.X. DESERT

Diffuse interstellare Banden

Molekülwolkspektren weisen diese oder ähnliche Absorptionslinien im sichtbaren Spektralbereich auf. Woher sie stammen, ist bislang noch ein Rätsel.

andere organische, also auf Kohlenstoff basierende, Moleküle: Insgesamt kamen in interstellaren Nebeln oder den Hüllen alter Sterne inzwischen rund 150 verschiedene Exemplare zusammen. Darunter Verbindungen wie Formaldehyd, Ameisensäure oder Methanol.

Besonders freute Karl Menten der Fund von Aminoacetonitril ($\text{NH}_2\text{CH}_2\text{CN}$). 15 Jahre lang hatte er mit Hilfe radioastronomischer Methoden nach diesem nahen Verwandten der Aminosäure Glycin gefahndet. Fündig wurden er und seine Kollegen schließlich in der »Heimat der großen Moleküle« – einem besonders dichten Nebel nahe dem galaktischen Zentrum, in dem sich anscheinend besonders viele komplexe Verbindungen tummeln.

Der einzige Weg ihnen auf die Schliche zu kommen, führt über die aus dem Weltall empfangene elektromagnetische Strahlung: Interstellare Staubteilchen und Moleküle absorbieren, emittieren und streuen Licht und hinterlas-

sen so ihren individuellen Fingerabdruck – in Form von charakteristischen Spektrallinien. Aus deren Gestalt und Intensität lässt sich sogar auf deren Häufigkeit, der Umgebungstemperatur und Dichte schließen.

Auf Spurensuche

Natürlich müssen Forscher – wie jeder gute Kriminalist – die Fingerabdrücke kennen, bevor sie solche Aussagen machen können. Astrophysiker wie Friedrich Huisken von der Laborastrophysikgruppe des Max-Planck-Instituts für Astronomie an der Universität Jena erzeugen deshalb sehr genaue Spektren in ihrem Labor. »Man muss die Experimente natürlich unter solchen Bedingungen durchführen, wie sie im Weltall vorherrschen: zum einen bei sehr niedrigen Temperaturen und zum anderen in sehr geringen Dichten«, beschreibt er seine Arbeit.

Die im Labor untersuchten Moleküle decken aber noch längst nicht alles ab, was dort oben herumschwirrt und so tummeln sich immer noch viele herren-

Am galaktischen Zentrum

Ein Panorama-Röntgenblick über mehrere hundert Lichtjahre zeigt die Nachbarschaft des galaktischen Zentrums. Supernova-Überreste, Schwarze Löcher und Hunderte von namenlosen Punktquellen – Neutronensterne oder Weiße Zwerge – erhellen diese Region im Röntgenlicht. Sie enthält ebenfalls riesige Molekülwolken, in denen Sterne entstehen, wie Sagittarius A, B1, B2 und C. Ein besonders dichter Teil von Sagittarius B2 ist auch bekannt als die »Heimat der großen Moleküle«.



© NASA/JIMASS/DWANG ET AL.

lose Linien in den Spektren von Molekülwolken. »Im sichtbaren Bereich liegen etwa 300 unidentifizierte Linien, die so genannten diffusen interstellaren Banden«, erklärt Huisken. »Interessanterweise beobachtet man diese Linien nicht nur in einem Objekt, sondern praktisch in allen.« Es gäbe zwar feine Unterschiede, aber im Prinzip seien diese intensiven Absorptionslinien in jeder Molekülwolke vorhanden. »Diese Spezies müssen dort also in großer Häufigkeit vorkommen«, fügt der Physiker hinzu. Sie zuzuordnen, sei ein großes Ziel der Laborastrophysik.

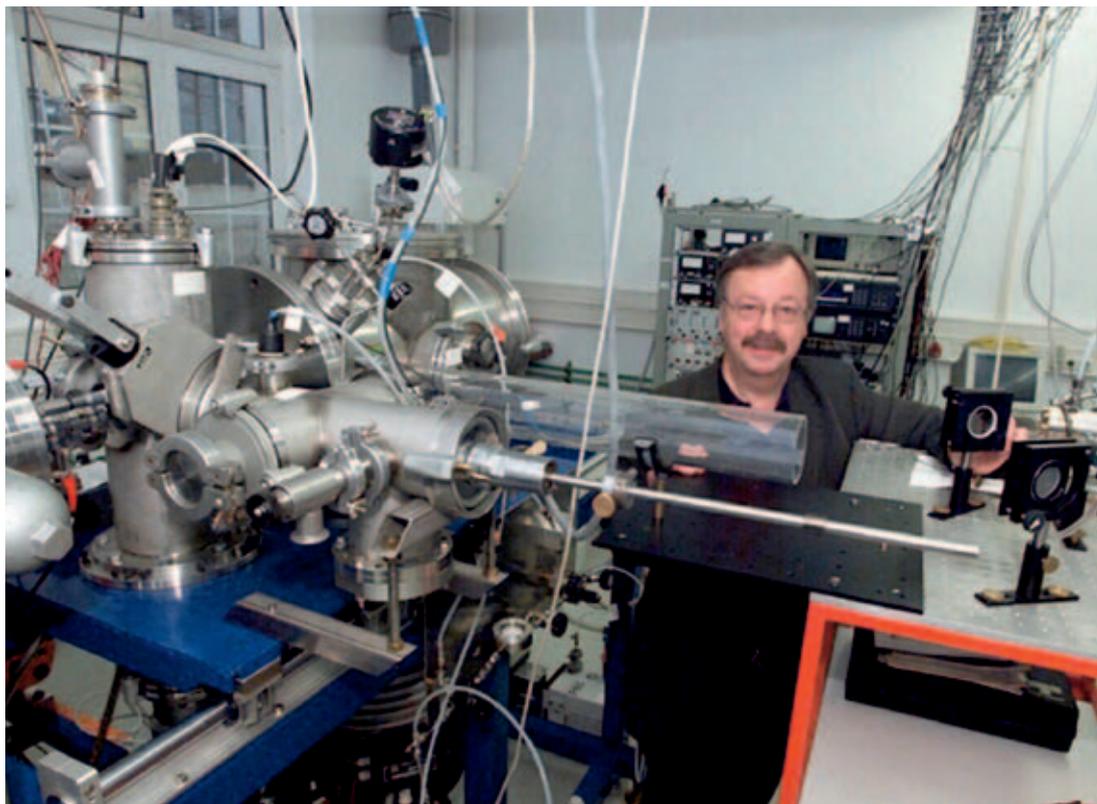
Molekül-Casting

»Zunächst einmal muss man sich geeignete Kandidaten überlegen«, sagt Huisken. Die Auswahl wird anhand der bekannten Elementhäufigkeiten im All getroffen – zum Beispiel ist neben Wasserstoff und Sauerstoff auch Kohlenstoff ein wichtiger Bestandteil. Denkbar wären etwa gerade Kohlenstoffketten. Eine andere Klasse sind die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAKs), die sich aus mehreren

Benzolringen zusammensetzen. Astronomisch gesehen zählen sie bereits zum Staub, der etwa ein Prozent der interstellaren Materie ausmacht. Auf der Erde lassen sich die PAKs beispielsweise in Kohle, Erdöl oder den Abgasen von Dieselmotoren finden. Als Reinsubstanz für Analysezwecke kosten sie allerdings viel Geld, bedauert der Forscher.

Im infraroten Wellenlängenbereich beobachten Astronomen die Emission dieser Moleküle. »Man weiß also, dass es diese Klasse dort oben gibt«, sagt Huisken. Das Problem ist nun, dass man sich hunderttausende verschiedene PAKs vorstellen kann und alle – wenn auch unterschiedliche Moleküle – im Infraroten an derselben Position ihren Fingerabdruck hinterlassen. Zumindest in diesem Spektralbereich verlieren sie also ihre Individualität.

Im ultravioletten und sichtbaren Licht könnte man sie unterscheiden. Allerdings ist in den meisten Fällen unbekannt, an welcher Stelle die einzelnen PAKs dort ihre Spuren hinterlassen. Huis-



Molekularstrahlapparatur

Friedrich Huisken vor einer Molekularstrahlapparatur im Forschungslabor der Jenaer Laborastrophysiker. In diesen und anderen Apparaturen untersuchen er und sein Team Moleküle unter »Weltraumbedingungen«.

ken und sein Team haben in den vergangenen Jahren die Spektren verschiedener polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe gemessen, wie etwa Naphthalen oder Anthracen. Leider war darunter bis jetzt kein Molekül, das mit astrophysikalischen Beobachtungen übereinstimmt.

Frustrierende Jagd

»Je länger wir und Kollegen mit diesen PAKs arbeiten, desto skeptischer sind wir, dass sie für die rätselhaften Linien verantwortlich sind«, kommentiert Huisken. Es könne sich auch um eine ganz andere Molekülklasse handeln. Manche Wissenschaftler gehen nicht ganz so weit: Sie wollen die PAKs erst einmal leicht verändern und zum Beispiel ein Stickstoffatom einbauen. Aber auch hier gäbe es wieder unglaublich viele verschiedene Molekülvarianten. Und warum sollte gerade eine spezielle dort oben so häufig auftreten, dass sie derart starke Absorptionslinien erzeugt?

Gäbe es viele verschiedene Verbindungen, die jeweils andere Linien beisteuern, würden sie

nur einen großen Untergrund im Spektrum erzeugen, verdeutlicht Huisken die Problematik. Eine Lösung scheint bisher nicht in Sicht. Liegt es an den falschen Kandidaten oder an unzureichenden Versuchsbedingungen? Schließlich sei es extrem schwierig die astrophysikalischen Bedingungen exakt zu reproduzieren. So sind die Proben oft Sauerstoff ausgesetzt, wenn auch nur in extrem geringen Mengen – im Vakuum des Weltalls kommt so etwas nicht vor.

»Das man die gesuchten Linien nicht beobachtet, heißt aber noch nicht unbedingt, dass es die von uns vermuteten Moleküle dort oben überhaupt nicht gibt«, sagt Huisken. Vielleicht ist ihre Häufigkeit und damit ihre Intensität einfach zu gering, womit sie im Wust der übrigen Linien verschwinden. Dieser Umstand könnte auch auf die bislang unauffindlichen Aminosäuren im All zutreffen. Denn je komplexer die Verbindungen sind, desto mehr interne Energiezustände können sie besitzen und damit umso mehr Spektrallinien.

Vielseitige Moleküle

»Stellen sie sich nur Methanol (CH_3OH) vor«, sagt Karl Menten, »es kann nicht nur rotieren – die einzelnen Atome können sich darin auch vom Kohlenstoffatom wegbewegen – das Molekül schwingt – oder aber die OH-Bindung verdreht sich relativ zu den anderen.« Dadurch hat das Molekül enorm viele Möglichkeiten, seine interne Energie, die es durch Kollisionen mit dem millionenmal häufigeren Wasserstoffmolekülen erhält, zu verteilen. Da sich nun alle Methanolkoleküle in einer interstellaren Wolke über sehr viele der verfügbaren Energiezustände verteilen, sind die von ihnen ausgesandten Spektrallinien relativ schwach – dabei ist Methanol noch ein ziemlich häufiges Molekül.

»Aminoacetonitril können wir gerade noch nachweisen«, verrät der Physiker. Wäre es nur halb so häufig wie es ist, hätten die Forscher es nicht mehr aufspüren können. »Glycin und auch andere Aminosäuren sind wahrscheinlich da, aber die einzelnen Spektrallinien sind so schwach,

dass man sie mit heutiger Technik nicht mehr detektieren kann.« In ein paar Jahren wird das vielleicht möglich sein – etwa mit der aus 50 Einzelteleskopen bestehenden Radioteleskopanlage ALMA (Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array), das gerade in der Atacamawüste aufgebaut wird. »Da bin ich ziemlich zuversichtlich«, sagt Menten.

Und was ist nun mit dem Leben aus dem All? Es ist wohl ziemlich klar, dass das Wasser aus dem Weltall zu uns kam, meint Menten. »Und wenn sie Wasser haben und einfache Moleküle, dann entstehen wahrscheinlich zwangsläufig komplexere Moleküle wie Aminosäuren – auch ohne dass welche aus dem Weltall anreisen – weil einfach alles sehr dicht zusammen ist.« Vielleicht, so gibt er zu bedenken, sind ja auch nicht die Bausteine des Lebens, sondern gleich das Leben selbst auf unseren Planeten gereist – in Form von Bakterien. Darauf gäbe es derzeit aber erst recht keine eindeutige Antwort. <<

FORTSETZUNG VON SEITE 1

Reise durch den Urknall

spektrumdirekt: Und wie sieht nun Ihre Alternative aus?

Martin Bojowald: Die Theorie, die ich verwende, ist die so genannte Schleifenquantengravitation, die in den frühen 1990er Jahren entwickelt wurde. Die Theorie ist mathematisch ziemlich kompliziert, da man ja die allgemeine Relativitätstheorie und die Quantenphysik kombinieren muss. Physikalisch ist das Bild dabei, dass man nicht mehr von einer kontinuierlichen Raumzeit ausgeht – wie das Gummituch, das oft als Bild dafür dient. Wegen der Quanteneigenschaften ist

die Raumzeit selbst aus diskreten Bausteinen, einer Art Raumzeitatomen, aufgebaut. Auf großen Skalen sind sie nicht bemerkbar, bei kleinen Größen und hohen Dichten wirken sie sich aber entscheidend aus.

spektrumdirekt: Was hätte das denn für Konsequenzen für den Urknall. Gibt es ihn noch?

Martin Bojowald: Das Urknallmodell – als weit reichenderes Bild – bleibt im Wesentlichen unangetastet. Denn darunter versteht man nicht nur das, was sich in der allgemeinen Relativitätstheorie als Singularität ergibt,

sondern auch die Phase danach, die immer noch sehr dicht ist, aber nicht unendlich dicht. Die Urknallsingularität selbst kann aber zumindest in den Modellen, die wir bisher untersucht haben, automatisch verhindert werden, indem man den diskreten Aufbau der Raumzeit mit in Betracht zieht.

spektrumdirekt: Und was tritt an Stelle der Singularität?

Martin Bojowald: In der allgemeinen Relativitätstheorie ziehen sich zwei Massen immer an. Ab-

stoßungskräfte, wie etwa zwischen zwei gleichnamigen Ladungen, treten dort klassischerweise nicht auf. Die atomare Struktur kann die Gravitationskraft allerdings ändern und insbesondere auch zu abstoßenden Kräften führen. Man kann sich das wie einen Schwamm vorstellen, der zwar Wasser aufnehmen kann, aber nicht beliebig viel. Wenn auch der Raum atomar aufgebaut ist, kann er Energie aufnehmen, aber die Menge ist begrenzt. Dem unendlichen Anwachsen der Energie und insbesondere der Energiedichte, wie man es in der allgemeinen Relativitätstheorie hätte,

Was ist eigentlich spektrumdirekt?

spektrumdirekt ist die Online-Zeitung aus dem Verlag Spektrum der Wissenschaft.

Täglich berichtet die Redaktion von spektrumdirekt verständlich und unterhaltsam über neueste Erkenntnisse aus Wissenschaft und Forschung.

In den Händen halten Sie ein Themenspezial Astronomie. Wenn es Ihnen gefällt, besuchen Sie uns doch auf

www.spektrumdirekt.de

Weitere Informationen finden Sie unter

www.spektrumdirekt.de/info



spektrumdirekt.de

wird dann in Form von Abstoßungskräften entgegengewirkt. In der rückwärtigen Entwicklung würde es also nicht auf einen einzigen Punkt kollabieren, wie es klassisch der Fall wäre, sondern es gibt eine minimale Ausdehnung, die sehr klein ist, aber nicht null, und wo die Energiedichten sehr hoch sind, aber nicht unendlich. An dieser Stelle würde das Universum von der Kraft praktisch zurückgestoßen und in eine andere Phase vor dem Urknall übergehen.

spektrumdirekt: Es gab also noch eine Zeit vor dem Urknall?

Martin Bojowald: Ja, in diesem Bild gäbe es tatsächlich eine Zeit vor dem Urknall. Das Universum hätte vorher eine kollabierende Phase gehabt – es wäre also nicht ausdehnend wie wir es derzeit beobachten. Stattdessen verminderte sich seine Größe im Lauf der Zeit, womit die Dichte stieg und letztlich zu diesen starken Abstoßungskräften führte. Die Dichte muss dafür natürlich sehr hoch sein – es ist fast unvorstellbar: Sie entspricht etwa einer Billion Sonnenmassen, die auf der Größe eines einzelnen Proton konzentriert sind. Immerhin ist sie nicht unendlich, das heißt, die mathematischen Gleichungen, die wir benutzen, funktionieren immer noch. Sie können damit weiter extrapoliert werden, um zu schauen, wie das Universum vor dem Urknall ausgesehen haben könnte.

spektrumdirekt: Wie genau sind solche Blicke in das »alte« Universum?

Nun, die Gleichungen sind nicht sehr genau, weil noch einige unbekannt Parameter darin sind, die man noch bestimmen muss – entweder durch Beobachtungen des derzeitigen Universums oder durch genauere Rechnungen. Aber zumindest die groben Ei-

genschaften können extrapoliert werden. Und man kann einige, wenn auch nicht viele, Eigenschaften des Universums vor dem Urknall erahnen.

spektrumdirekt: Letztlich ist das – zumindest bis jetzt – nichts weiter als mathematische Spielerei. Wie zuverlässig sind die Ergebnisse?

Martin Bojowald: Die Rechnungen sind sehr stark durch Konsistenzbedingungen eingeschränkt. Allein die Kombination von allgemeiner Relativitätstheorie und Quantentheorie, die wir zunächst einmal mathematisch durchzuführen versuchen, ist so kompliziert, dass es einfach gar nicht viele Möglichkeiten gibt. Wenn man eine umfassende Theorie hat – und derzeit haben wir keine, von der man sagen kann, dass sie die endgültige Theorie der Quantengravitation ist – sind doch viele Eigenschaften bekannt, die auf Grund von Konsistenzbedingungen so sein sollten, wie wir es momentan in den Gleichungen sehen. Und darauf stützen wir uns. Es ist natürlich immer schwierig, zu sagen, wie genau man sich auf jedes Detail verlassen sollte. Aber die hauptsächlichen Effekte, also zum Beispiel, dass es zu einem abstoßenden Verhalten der Kraft kommt und dass die Dichte nicht unendlich groß gewesen sein kann, das sind Eigenschaften, die man schon auf Grund von allgemeineren Konstruktionen mittlerweile gesehen hat. Aber am Ende ist es natürlich richtig, dass die Rechtfertigung nur von Beobachtungen kommen kann, selbst wenn diese indirekt sind.

spektrumdirekt: Was könnte das zum Beispiel sein?

Martin Bojowald: Es sind im Wesentlichen kosmologische Beobachtungen. Zurzeit gibt es ja schon sehr genaue Aufnahmen

der Mikrowellenhintergrundstrahlung, die aus einer Zeit einige hunderttausend Jahre nach dem Urknall kommt, als es für das Licht erstmals möglich wurde, das Universum ungehindert zu durchdringen. Obwohl diese Phase ziemlich lange nach dem dichtesten Umkehrpunkt auftrat, könnten immer noch kleine Spuren darin zu finden sein – insbesondere in Form von Abweichungen gegenüber dem Verhalten, das man auf Grund der rein klassischen Theorie erwarten würde. Die Rechnungen und auch die Beobachtungen müssen noch genauer werden, aber im Prinzip gibt es diese Testmöglichkeiten.

spektrumdirekt: Können Sie abschätzen, wie lange ein möglicher Nachweis dauern wird?

Martin Bojowald: Das ist schwer zu sagen. Es gibt viele Satellitenmissionen, die derzeit in Planung sind. Zum Beispiel der Planck-Satellit, der bald starten soll und auch in einigen Jahren die ersten Ergebnisse liefern wird. Und das wird die derzeitige Datenlage noch viel genauer machen. Man kann schlecht abschätzen, ob es damit schon zu beobachtbaren Konsequenzen kommen sollte. Eine weitere Größenordnung in der Genauigkeit und vor allem der Zeit, die man zurückblicken kann, käme dann hoffentlich in einigen Jahrzehnten mit Gravitationswellendetektoren, die kleine Schwingungen in der Raumzeit selbst aufnehmen. Anders als Licht können diese Wellen aus weit früheren Zeiten der Urknallphase zu uns vordringen. Wenn es einmal möglich wird, das genaue Spektrum der Gravitationswellen aufzuzeichnen, dann sollten wir die Modelle, die wir derzeit über das frühe Universum machen, sehr viel konkreter machen können.

spektrumdirekt: Sie sind also zuversichtlich im Lauf Ihres Lebens



©FREDRIC WEBER, PENN STATE

Martin Bojowald

Der deutsche Physiker Martin Bojowald (geboren 1973) forscht derzeit an der Pennsylvania State University in den USA.

noch zu erfahren, ob Sie Recht haben?

Martin Bojowald: Ich denke schon, dass man zumindest sehr stichhaltige Test erwarten kann in absehbarer Zeit. Und dann könnte sich die Theorie durchaus als falsch erweisen, wenn die Abweichungen von der klassischen Gravitation zu stark sind.

spektrumdirekt: Wie läuft so eine Rechnung überhaupt ab?

Martin Bojowald: Die Hauptarbeit ist eigentlich nicht die eigentliche Rechnung, sondern die Gleichungen aufzustellen und herzuleiten, mit denen man dann die Rechnungen durchführt. Das Problem ist ja, dass die Theorie nicht vollkommen vorliegt. Es ist also nicht so, wie zum Beispiel in der Quantenmechanik, wo strikt geregelt ist, welche Art von Gleichung man für ein bestimmtes Problem benutzen muss. Die Quantengravitation wird aber gerade erst entwickelt. Man muss zunächst überlegen, wie man die Gleichungen eigentlich zu benutzen hat. Das kann sich in manchen Fällen über Jahre hinziehen,

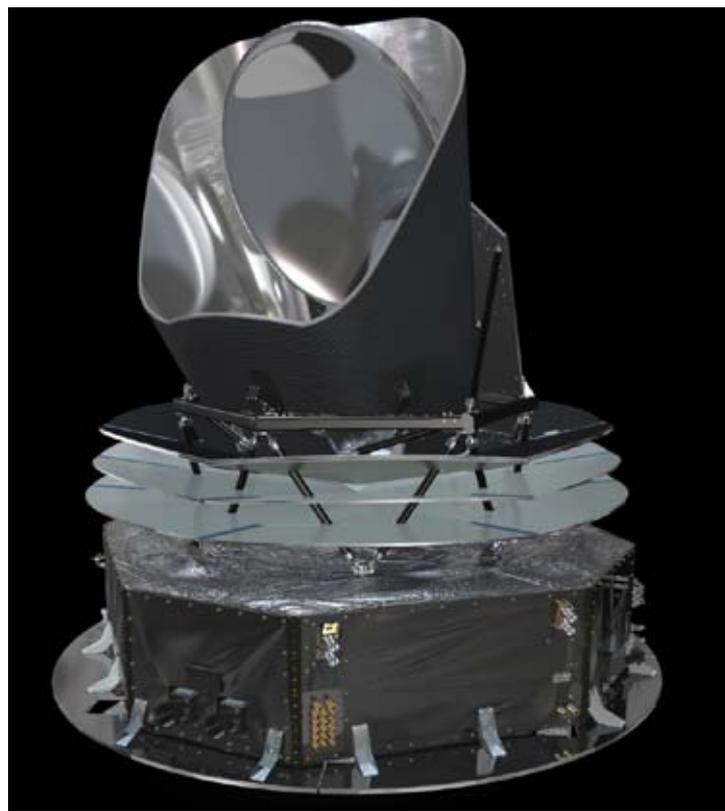
bis der entscheidende Einfall kommt. Die Lösung ist dann meist gar nicht mehr so schwierig – in den einfacheren Fällen gibt es Standardmethoden und der Computer rechnet für einen.

spektrumdirekt: Sind Sie der Erste, dem eine Reise durch den Urknall gelungen ist?

Martin Bojowald: Schon in den 1930er Jahren gab es oszillierende Weltbilder, in denen angenommen wurde, dass das Universum irgendwie durch den Urknall hindurchkäme – das war immer mal wieder populär. Als das Urknallmodell etabliert wurde, vor allem die Expansion des Universums, wurde allerdings weniger Wert auf die Phase vor dem Urknall gelegt. Doch in den 1970er, und intensiver in den 1990er Jahren wurden unterschiedliche Modelle zu diesen oszillierenden Universen aufgestellt. Das Erste, was mit der Schleifenquantengravitation möglich wurde, die ich ja benutze, ist eine wirklich komplette Entwicklung – zumindest im Modellsystem – des Universums durch den Urknall hindurch. Vorher hatte man die Unendlichkeit nicht wirklich verhindern können.

spektrumdirekt: Wie haben Sie es geschafft?

Martin Bojowald: Der Zufall hat sicher eine große Rolle gespielt. Ich habe mir kosmologische Modelle angesehen und versucht, sie mathematisch zu vereinfachen. Auch hier war der längste Teil der Arbeit, die Gleichungen verlässlich aufzustellen. Rund zwei Jahre hat es gedauert, bis ich beginnen konnte, sie zu lösen. Mit den Lösungen stellte sich dann heraus, dass es das Bild des Universums vor dem Urknall gab, was ich wirklich nicht erwartet hatte. Ich hatte ja keine Annahmen in die Gleichungen gesteckt, um zu diesem Ergebnis zu gelangen. Vielmehr ergab es sich fast zwangsläufig aus den Rechnungen. Das ist meiner Ansicht nach ein wichtiger Gesichtspunkt für die Verlässlichkeit der Resultate: Wenn man auf eine gewisse Eigenschaft abzielt, kann man selten vermeiden, irgendwelche Vorurteile hineinzustecken. In dem Fall war das Ziel eigentlich ein ganz anderes, vielleicht bescheidener: Ich wollte die Theorie mathematisch testen und dann ergab sich physikalisch diese Konsequenz – zunächst in sehr einfachen Mo-



dellen, mit der Zeit dann auch in komplexeren.

spektrumdirekt: Haben sie Ihren Ergebnissen getraut?

Martin Bojowald: Ich habe sie zunächst mal für eine Kuriosität gehalten. Wenn man mit vereinfachten Modellen startet, wie es damals der Fall war, ist nie auszuschließen, ob die Resultate vielleicht eine Konsequenz der starken Vereinfachung sind. Erst als realistischere Modelle untersucht wurden, und diese Eigenschaften immer noch auftraten, wurde klar, dass man es als verlässlich ansehen konnte.

spektrumdirekt: Eigentlich ist theoretische Physik alles andere als publikumswirksam. Wie erklären Sie sich, dass das im Fall der Kosmologie nicht zu gelten scheint?

Martin Bojowald: Nun, es ist sicher schwierig das alles im Detail zu verstehen, selbst für Leute die jahrelang daran forschen. Aber die Bilder die man daraus entwi-

Planck-Satellit

Planck wird gemeinsam mit dem Weltraumteleskop Herschel von einer Ariane-5-Rakete ins All gebracht. Dort soll der Satellit die kosmische Mikrowellen-Hintergrundstrahlung mit bisher unerreichter Präzision kartieren.

ckelt, können nach einiger Zeit doch so vereinfacht werden – also auf das Wesentliche reduziert werden –, dass man sie ohne zu viel Vorbildung zumindest einsehen und erahnen kann, welche Konsequenzen sich ergeben. In meinem Fall wäre das zum Beispiel die Reduktion auf die abstoßende Kraft. Dadurch wird alles viel intuitiver und es fällt leichter Weltbilder herzuleiten, aber auch sie zu vermitteln. Denn wenn das einmal gelungen ist, muss man sich keine Gedanken mehr machen über die quantenmechanische Wellenfunktion, die das ganze Universum beschreiben würde. Das wäre sicherlich viel zu kompliziert.

spektrumdirekt: Herr Bojowald, vielen Dank für das Gespräch. <<

Urknall als Zwischenstadium

Nach bisheriger Auffassung entstanden Zeit, Raum und Materie erst im Urknall, womit sich die Frage nach dem davor erübrigt, denn das gab es schlichtweg nicht. In manchen modernen Theorien stellt der Big Bang hingegen nur ein Zwischenstadium dar – einen Übergang von einem vorherigen zum uns bekannten Universum. So erscheint auch die alte Frage in ganz neuem Licht.

MONDGEOLOGIE

Verkernt

Auch unser Trabant besaß einst einen eigenen Dynamo

VON DANIEL LINGENHÖHL

Der Mond ist das Kind der Erde – wenngleich unfreiwillig durch einen üblen Zusammenstoß mit einem marsgroßen Körper gezeugt. Seitdem umkreist uns der Trabant zwar in astronomisch nächster Nähe, unser Wissen über ihn ist jedoch immer noch oberflächlich. Ein uraltes Gestein lässt nun aber tief blicken.

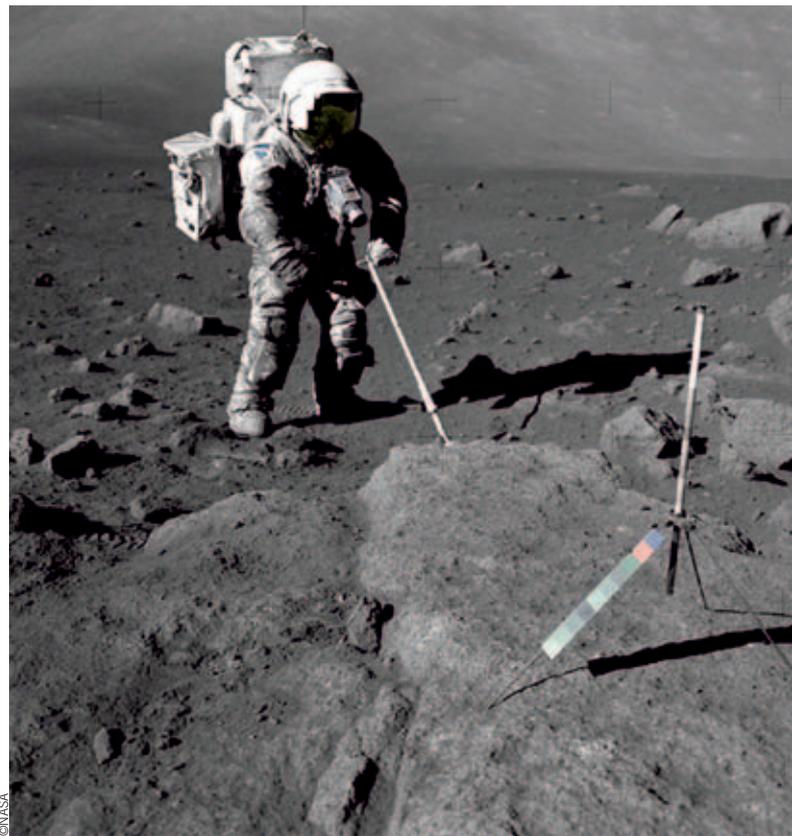
Harrison Hagan »Jack« Schmitt könnte unter seinesgleichen viele Neider haben – durfte er doch als bislang einziger Geologe an einer NASA-Mission zum Mond teilnehmen und dort zu Forschungszwecken Gesteine sammeln. Eine Aufgabe, der er vortrefflich nachkam: Niemals sammelten Astronauten mehr lunares Material und brachten es zurück zur Erde als während des Aufenthalts von Apollo 17 auf unserem Trabanten im Dezember 1972.

Unter den Proben befand sich auch ein Stein namens Troktoolit 76535, der mehr als 35 Jahre später den Geowissenschaftler Ian Garrick-Bethell vom Massachusetts Institute of Technology in Cambridge zu Euphorie hinriß: »Er ist wahrscheinlich das schönste Mondgestein mit seinen hellgrünen und milchig-weißen Kristallen.« Doch der Ultramafit – so genannt wegen seines extrem hohen Anteils an Magnesium und Eisen – begeisterte Garrick-Bethell und seine Kollegen nicht nur optisch, sondern vor allem auch geologisch: »Er gehört zu den ältesten und ursprünglichsten Proben, die wir besitzen.« Troktoolit 76535 sollte den Forschern also einiges zur Frühzeit des Mondes aussagen. Die Wissenschaftler interessierte vor allem, warum viele Mondgesteine magnetisiert worden waren, obwohl der Erdbegleiter – zumindest gegenwärtig – gar kein globales Magnetfeld besitzt. Die Ursachenforschung gestaltete sich bislang jedoch sehr schwierig, da die meisten Mondgesteinsproben

aus Brekzien stammen und damit aus Gesteinstrümmern, die in einer feinkörnigen Grundmasse neu zusammengefasst wurden, nachdem beispielsweise Meteoriteneinschläge das Ausgangsmaterial zerschossen hatten.

Durch einen derartigen Beschuss können sehr kurzlebige örtliche Magnetfelder entstehen, die zwischen wenigen Sekunden bis zu einem ganzen Tag andauern, wenn der Aufprall extrem heftig ausfällt. Sie hinterlassen durchaus magnetisierte Spuren im Material, die sich jedoch von jenen unterscheiden, die von einem langzeitigen magnetischen Dynamo stammen – wie ihn etwa der flüssige äußere Eisenkern der Erde darstellt: Die Bewegungen des elektrisch leitenden Eisens führen zum »Dynamo-Effekt« und erzeugen elektrische Ströme, deren Magnetfeld an der Erdoberfläche nachweisbar sind.

Auch Troktoolit 76535 weist Magnetisierungsspuren auf, jedoch keine Anzeichen späterer Umformungen durch Asteroidenbombardements, die normalerweise die Spuren früherer Magnetisierungen übertünchen und ersetzen. Tatsächlich stammen seine Magnetzeugnisse noch immer aus der Zeit vor etwa 4,2 Milliarden Jahren. Dieses hohe Alter, mit dem der ultramafische Metusalem alle bislang bekannten Erd- und Marsgesteine übertrifft, ermittelte Garrick-Bethells Team durch eine Isotopenanalyse. Nach seiner Entstehung blieb der Stein dann offensichtlich mehrere Millionen Jahre im Einflussbe-



Harrison Hagan Schmitt auf dem Mond

Während der Apollo-17-Mission landete Schmitt als erster und bislang letzter Geologe auf dem Erdtrabanten.

reich eines Magnetfelds, wie verschiedene Messungen mit einem Magnetometer ergaben – ein Magnetfeld, das nach den Schätzungen der Forscher zwischen 0,3 und 1 Mikrottesla stark war. Zum Vergleich: Jenes der Erde beträgt an der Oberfläche 50 Mikrottesla – etwa ein Prozent eines herkömmlichen Hufeisenmagneten.

Dies setzt jedoch einen flüssigen Eisenkern im Mond voraus. Das wird allerdings auch Jahrzehnte nach der letzten Apollo-Mission heftig in Wissenschaftlerkreisen immer noch heftig diskutiert, obwohl die Mondfahrer großflächige Lavaströme auf dem Trabanten nachgewiesen hatten. Ein bewegtes Inneres ist zwingend notwendig für Magmatismus, doch genügte dies vielen Forschern noch nicht als endgültigen Beleg eines Mond-

dynamos. Sie beharrten darauf, dass der Mond stets als »kalter« Gesteinsbrocken um uns kreiste und sich nie so weit aufheizte, dass sich ein flüssiger Kern hätte bilden können. Garrick-Bethell und seine Kollegen haben nun womöglich den Gegenbeweis erbracht, wobei ihr Zeuge noch aus der relativen Frühzeit unseres Begleiters stammt und dessen Magnetfeld abbildet. Doch mehren sich die Hinweise auf eine weitere Überraschung: Eventuell besitzt der Mond sogar heute noch ein kleines, teilweise liquides Zentrum mit maximal 350 Kilometer Durchmesser. Es wird also vielleicht Zeit, dass bald wieder einmal ein Geologe in unsere lunaren Nachbarschaft reist. <<

Garrick-Bethell, I. et al.: Early Lunar Magnetism. In: Science 323, S. 356-359, 2009.



Mondbrekzie

Die meisten Gesteinsproben vom Mond bestehen aus so genannten Brekzien: Gesteinen, die aus anderem Gesteinsmaterial zusammengesetzt sind und durch ein Bindemittel zusammengehalten werden.

KOSMISCHE STRAHLUNG

Spuren Dunkler Materie aufgespürt?

Das Experiment PAMELA an Bord eines Forschungsatelliten hat einen systematischen Anstieg im Verhältnis von Positronen zu Elektronen in einem Energiebereich nachgewiesen, der mit dem Zerfall der Dunklen Materie in Zusammenhang gebracht werden kann. Allerdings könnten die überschüssigen Positronen ebenso wahrscheinlich von einem Pulsar oder einer anderen astronomischen Quelle stammen.

Vom Juli 2006 bis Februar 2008 analysierten Piergiorgio Picozza und Kollegen die Kosmischen Strahlung mit PAMELA (*Payload for Antimatter/Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*) im Energiebereich von 1,5 bis 100 Gigaelektronenvolt. Insgesamt registrierten sie rund 150 000 Elektronen und etwa 9400 Positronen. Fast über die gesamte Breite stellten die Wissenschaftler dabei einen starken

Anstieg des Positronenanteils fest. Dieses Ergebnis sei nicht mit solchen Antiteilchen vereinbar, die aus Kollisionen zwischen Kernen der Kosmischen Strahlung und Atomen der interstellaren Materie hervorgehen und den größten Teil der Positronen aus dem All ausmachen. Die Wissenschaftler um Picozza schließen deshalb, dass entweder die derzeit gültigen Modelle der Kosmischen Strahlung überarbeitet werden müssten oder aber eine primäre Quelle innerhalb oder in der Nähe der Milchstraße die Positronen erzeugt. Dies könnten Pulsare oder Mikroquasare oder die Annihilation von Dunkler Materie sein. Denn treffen die bislang hypothetischen Partikel der Dunklen Materie auf ihre Antiteilchen, sollen beide in eine Vielzahl von subatomaren Teilchen, einschließlich Elektronen und Positronen, zerstrahlen. Den tatsächlichen Ursprung können

Picozza und sein Team auf Grund der noch unzureichenden Datennlage nicht feststellen.

Der größte Teil der galaktischen Kosmischen Strahlung, die sich aus Protonen, Elektronen und Ionen zusammensetzt, stammt vermutlich aus Supernova-Überresten, wo die Partikel auf extreme Geschwindigkeiten beschleunigt werden. Antiteilchen machen dabei nur einen geringen Bruchteil der Strahlung aus; hauptsächlich entstehen diese durch die Wechselwirkung der Kosmischen Strahlung mit der interstellaren Materie.

Dunkle Materie macht den gegenwärtigen Theorien zufolge den größten Teil der Masse im Universum aus. Auf ihre Existenz lässt sich bisher nur indirekt schließen, etwa aus ihrer Gravitationswirkung auf die sichtbare Materie. (mp) <<

DOSSIER Dunkle Materie



DUNKLE MATERIE

Auf den faszinierenden Aufnahmen von Hubble & Co scheint das Universum erfüllt von leuchtenden Sternen und Galaxien. Doch Astronomen zeichnen inzwischen ein ganz anderes Bild: Ein Großteil der Materie im All ist dunkel und aus einem Stoff aufgebaut, den bislang keiner kennt.

spektrumdirekt.de/dunklematerie

Adriani, O. et al.: An anomalous positron abundance in the cosmic rays with energies 1.5-100 GeV. In: Nature 458, S. 607-609, 2009.

ASTROBIOLOGIE

Lichtschwankungen sollen Exoplaneten-Ozeane entlarven

Astronomen um Stuart Wyithe von der University of Melbourne halten es in Zukunft für möglich, Meere und Kontinente auf Exoplaneten durch fotometrische Beobachtungen zu erkennen. Zur Probe analysierten sie die Lichtschwankungen des Widerscheins der Erde, die sich auf der Schattenseite des Mondes beobachten lassen. Ozeane spiegeln das Licht der Sonne in messbar anderen Wellenlängen als Landmassen, so die Forscher nach Auswertung ihrer Beobachtungsdaten.

Die Forscher hatten mit einem Spiegelteleskop von Australien

aus die unbesonnte Mondseite im ersten und letzten Viertel über mehrere Stunden beobachtet. Sie maßen dabei starke Schwankungen in der Lichtintensität des Erdscheins. Reproduzierbar sprunghaft in Richtung roter Wellenlängen änderte sie sich bei zunehmendem Mond im Laufe der Erdrotation, wenn der Lichtschein nicht mehr vom Indischen Ozean, sondern vom afrikanischen Kontinent zum Beobachtungspunkt auf dem Mond gespiegelt wurde. Diese Schwankung blieb bei abnehmendem Mond aus, wenn das Sonnenlicht durchgehend nur vom südlichen Pazifischen Ozean gen Mond re-

flektiert wurde. Schon früher hatten Forscher darauf hingewiesen, dass die von Himmelskörpern reflektierten Spektren in Zukunft einmal Hinweise etwa auf bestimmte Vegetationsformen auf fernen Planeten liefern könnten. Wyithes Team weist darauf hin, dass der Wechsel von Kontinent zu Ozeanreflektion sich in einem breiten Band verschiedener Wellenlängen bemerkbar macht, die bei zunehmend präziseren Instrumenten noch deutlich eher zu detektieren sein dürften. (jo) <<

Langford, S. et al.: Photometric Variability in Earthshine Observations. In: *Astrobiology* 9(3), 2009.



©THORSTEN KRÖME

Erdschein

Auf der Schattenseite des Mondes lässt sich das von der Erde reflektierte Licht beobachten.

STERNPHYSIK

Vorläufer zweier Supernovae identifiziert

Mit dem Weltraumteleskop Hubble und dem Gemini-Teleskop haben Forscher zwei Vorläufersterne einer Supernova vom Typ II aufgespürt. Wie bereits von der Theorie vorhergesagt und in einem anderen Fall bestätigt, handelt es sich dabei um so genannte Rote Überriesen.

Justyn Maund von der University of Copenhagen und Stephen Smartt von der Queen's University Belfast analysierten Aufnahmen von Weltraumregionen, in denen eine Sternexplosion stattgefunden hatte, jeweils vor und nach dem Ereignis. Sie konnten nachweisen, dass in zwei Himmelsregionen Rote Überriesen exakt an den Positionen fehlten, an denen einige Jahre zuvor eine Typ-II-Supernova auftrat. Diese einfache, aber zeitaufwändige Methode lässt keinen Zweifel daran, dass die beiden Sterne die

Vorläufer von SN 2003gd in der Galaxie M74 und SN 1993J in der Galaxie M81 waren, berichten die beiden Wissenschaftler. Den ursprünglichen Begleiter des Roten Riesens, der zu SN 1993J führte, konnten sie hingegen auch nach dessen Verschwinden noch ausfindig machen.

Bereits die Typ-II-Supernova SN 1987A war eindeutig mit einem verschwundenen Überriesen assoziiert worden. Andere Studien belegten lediglich, dass die Positionen von Stern und Supernova räumlich übereinstimmten, ohne sie mit letzter Sicherheit zu identifizieren.

Supernovae resultieren aus dem internen Kollaps massereicher Sterne am Ende ihrer Entwicklung. Nach dem zeitlichen Verlauf ihrer Helligkeit sowie ihrem Emissionsspektrum unterteilen

Astronomen die Explosionen in verschiedene Klassen. Typ-II-Supernovae weisen im Gegensatz zu Supernovae vom Typ I beispielsweise starke Wasserstofflinien auf. (mp) <<

Maund J. R., Smartt S. J.: The Disappearance of the Progenitors of Supernovae 1993J and 2003gd. In: *Science* 10.1126/science.1170198, 2009.

Wasserstoffraub

So ähnlich könnte es aussehen: Ein Roter Riese explodiert, nachdem ihm bereits ein Teil seines Wasserstoffgases von einem blauen Begleitstern entrisen wurde. Beobachtungen mit dem Hubble-Teleskop lassen einen solchen Prozess für die Supernova 1993J wahrscheinlich erscheinen.



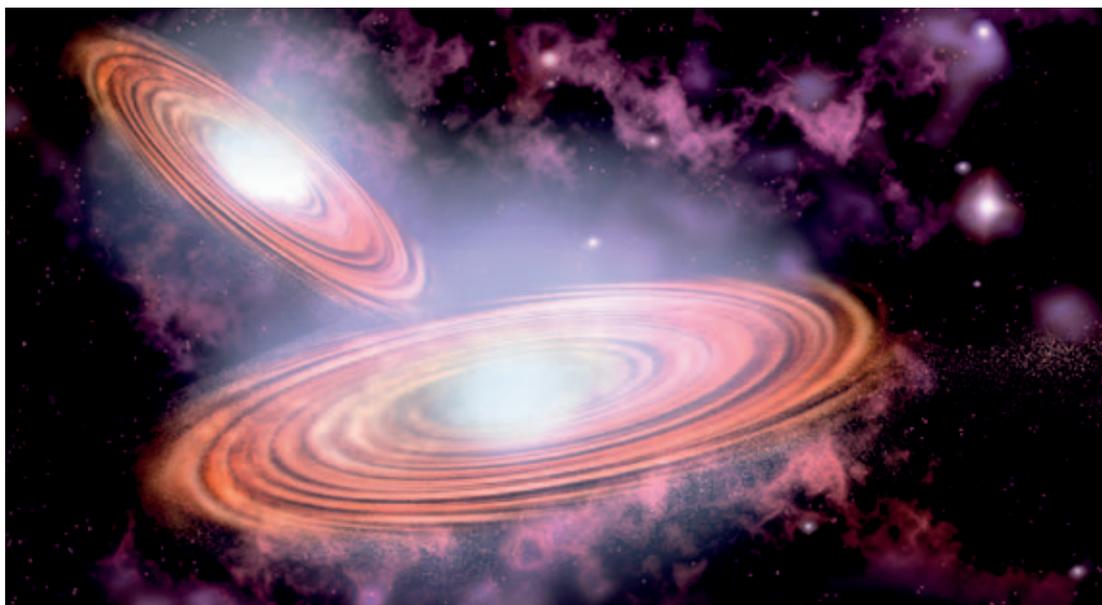
©ESA UND JUSTYN R. MAUND (UNIVERSITY OF CAMBRIDGE)

AKTIVE GALAXIEN

Enges Doppelsystem aus Schwarzen Löchern

In einer mehrere Milliarden Lichtjahre entfernten Galaxie umkreisen sich womöglich zwei Schwarze Löcher in relativ geringem Abstand. Bisher sind erst wenige Kandidaten für ein derartiges Doppelsystem bekannt, obwohl sie im Universum recht häufig vorkommen sollten.

Todd Boroson und Tod Lauer vom National Optical Astronomy Observatory in Tucson analysierten die Emissionsspektren von 17 500 Quasaren, die im Rahmen des Sloan Digital Sky Survey – einer großflächigen Himmelsdurchmusterung – erfasst worden waren. Die von den aktiven Galaxienkernen ausgehende Strahlung enthält sowohl Informationen über das zentrale Schwarze Loch als auch über die Materie, welche um das kompakte Objekt kreist. Trieben also zwei solcher Exemplare ihr Unwesen darin, würden sie charakteristische Spuren im Licht des Quasars hinterlassen.



Doppelter Satz

Boroson und Lauer stießen aber nur im Fall von Objekt SDSS J153636.22+044127.0 auf viel versprechende Besonderheiten: einen doppelten Satz

an Emissionslinien, den die beiden Wissenschaftler durch die Existenz zweier eng gebundener Schwarzen Löcher erklären. Um auszuschließen, dass sich in ihren Beobachtungen lediglich zwei große Galaxien überlagern, bestimmten sie die Rotverschiebung der beiden Quellen – mit Hilfe derer sich die Entfernung abschätzen lässt. Tatsächlich bestätigten sie mit einer Wahrscheinlichkeit von 99,7 Prozent, dass es sich nur um ein einziges System handelt.

»Wenn es dennoch aus einer Überlagerung hervorgeht, muss eines der Objekte recht merkwürdig sein«, bestärkt Boroson die Ergebnisse. Die Hypothese der beiden Forscher wäre sogar überprüfbar, wenn der Quasar über mehrere Jahre beobachtet würde: Auf Grund der Bahnbewegungen sollte sich seine Signatur im Lauf der Zeit merklich ändern. Die untersuchte Galaxie ging laut den Wissenschaftlern aus der Fusion zweier kleinerer Sternsysteme

hervor, die jeweils ein Schwarzes Loch enthielten. Anhand der Bahngeschwindigkeiten berechneten Boroson und Lauer, dass eines der beiden eine Masse von rund 20 Millionen Sonnen besitzt, während das andere etwa 50-mal massereicher ist. Beide umrunden sich in einem Abstand von einem Drittel Lichtjahr und brauchen für einen kompletten Umlauf rund 100 Jahre, schätzen die Forscher.

Hierarchisches Wachstum

Ihr Fund unterstützt die These, dass das Wachstum von Strukturen im Universum hierarchisch verläuft. Bereits vorher gab es Kandidaten für ein Doppelsystem aus zwei Schwarzen Löchern. Allerdings waren deren Abstände meist viel größer als im Fall von SDSS J153636.22+044127.0. Zudem ließen die Daten oftmals auch andere Interpretationsmöglichkeiten zu – mit weitaus größeren Wahrscheinlichkeiten als bei Boroson und Lauer. Viele Galaxien sammeln sich in größe-

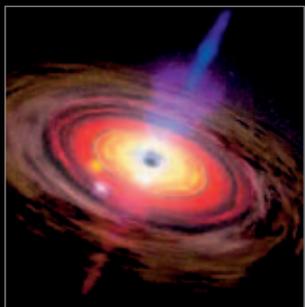
Schwarze Löcher im Doppel

Ein Doppelsystem aus zwei supermassereichen Schwarzen Löchern. Auf Grund der hohen Temperaturen leuchtet die um das Zentrum kreisende Materie hell auf.

ren Gruppen von bis zu einigen tausend Exemplaren, in denen beizeiten einzelne Systeme miteinander kollidieren und verschmelzen können. Besitzen die Kollisionspartner ein supermassereiches Schwarzes Loch in ihrem Zentrum, sollten diese auf Grund der enormen Anziehungskraft umeinander kreisen und sich schließlich womöglich zu einem noch größeren Massemonster vereinen, vermuten Wissenschaftler. Somit könnten theoretisch Galaxien mit zwei oder sogar mehreren Schwarzen Löchern in ihrem Inneren existieren. (mp) <<

Boroson, T. A., Lauer T. R.: A candidate sub-parsec supermassive binary black hole system. In: Nature 458, S. 53-55, 2009

DOSSIER Schwarze Löcher



SCHWARZE LÖCHER

Wer ihnen zu nahe kommt, hat verspielt: Schwarze Löcher verleiben sich bereitwillig jegliche Materie ein, derer sie habhaft werden können. Für Astronomen bergen die Massezentren noch viele spannende Rätsel.

spektrumdirekt.de/
schwarzeloecher

SONNENSYSTEM

Bizarrer Saturnmond-Gürtelgrat entstand beim Bremsen

Die hervorragendste geologische Attraktion des Saturnmondes Iapetus – sein den ganzen Äquator wie ein Gürtel umspannendes Gebirgsband mit bis zu 20 Kilometer hohen Gipfeln – schob sich wohl durch Konvektionsprozesse empor, als der früher schnell rotierende Mond mehr und mehr abgebremst wurde. Diese nicht ganz neue Theorie frischten Forscher der Johns Hopkins University nun nach Computersimulationen mit ein paar zusätzlichen Erklärungsansätzen auf.

Das Team um James Roberts ermittelte zunächst, dass der Mond sich einst wohl einmal alle 16 Stunden um sich selbst gedreht hatte, dann aber durch die Gravitation des Saturn verlangsamt wurde. Der Mond rotiert heute einmal pro Saturnumlauf alle 79 Tage und dreht dem Gasriesen immer dieselbe Seite zu.

Während des allmählichen Bremsvorgangs und der einhergehenden geologischen Deformation sei etwa 100 Millionen Jahre lang ständig Wärme im Mondinneren entstanden. Diese haben sich aber vor allem unter dem Äquatorbereich verteilt, ergab die Simulation. Dadurch hätten sich besonders hier stetig angewärmte, auftriebende Eismassen aus dem Mondinneren nach oben geschoben

und wären im Äquatorbereich durch die Oberfläche gebrochen, spekulieren Roberts und Co. Nachdem der Bremsprozess abgeschlossen war, sei keine geologische Wärme mehr produziert worden, worauf der konvektiv empor gehobene Äquatorgrat auf dem erkaltenden Mond einfro.

Die Rotation vieler, dem Iapetus grundsätzlich ähnlicher Monde wurden im Sonnensystem allerdings ebenso abgebremst, ohne dass dabei ein Äquatorgrat entstand, gibt Roberts zu. Tatsächlich aber sei der Saturnmond wohl viel heftiger verlangsamt worden als alle anderen Planetenbegleiter.

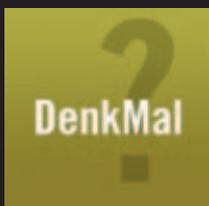
Seit der prominente Bergrücken bei einem Vorbeiflug der Raumsonde Cassini in der Neujahrsnacht 2005 erstmals erkannt wurde, schlugen verschiedene Forscher sehr unterschiedliche Theorien zur Entstehung der Formation vor. Einige Forscher glauben etwa, dass Iapetus früher einen eigenen Ring gesammelt hatte, bevor er auf seine heute entfernte Umlaufbahn geriet. Die Ringtrümmer seien dann nach und nach aus ihrem Orbit über dem Äquator auf den Mond gestürzt. (jo) <<

Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands (23.-27.3.2009)

**Iapetus aus der Nähe**

Am 10. September 2007 rauschte die Raumsonde Cassini sehr dicht am Saturnmond Iapetus vorbei – beste Gelegenheit für einen genauen Blick auf den mysteriösen, mondumspannenden Bergrücken, der dem Mond das Aussehen einer pockennarbigten Walnuß gibt.

©NASA/JPL/SPACE SCIENCE INSTITUTE

**WAS BEZEICHNEN ASTRONOMEN ALS SPAGHETTISIERUNG?**

- a) Verdrillen von Magnetfeldlinien
- b) Konsequenz der Stringtheorie
- c) Effekt in der Nähe von Schwarzen Löchern
- d) Ansammlung von Materie um Protostern

Antwort auf Seite 14

EXTRASOLARE PLANETEN

Paparazzi mit Fernziel

Planeten um fremde Sonnen direkt beobachtet

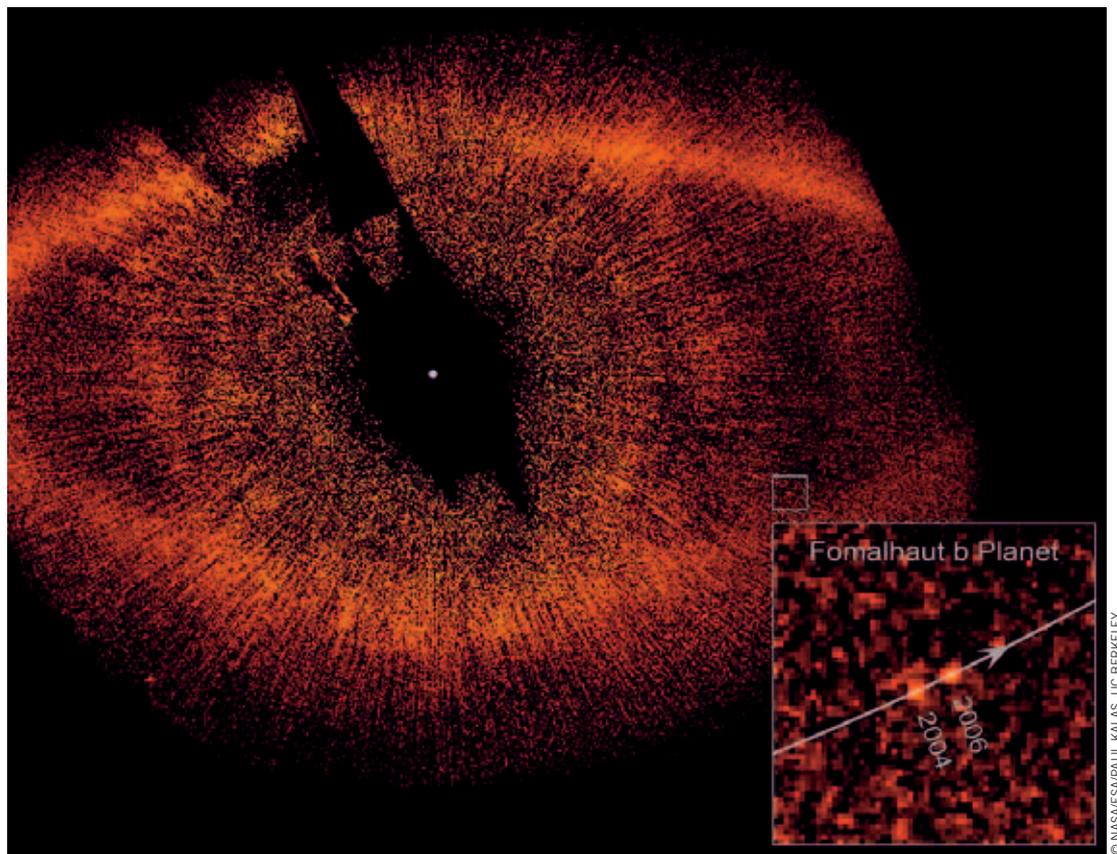
VON MAIKE POLLMANN

Mehr als 300 extrasolare Planeten sind inzwischen bekannt – allesamt durch indirekte Methoden aufgespürt. Waren Astronomen vor zehn Jahren noch zutiefst gerührt von einem solchen Fund, träumen sie inzwischen längst davon, die fremden Welten direkt vor die Linse zu kriegen. Für einige ging der Wunsch im November 2008 endlich in Erfüllung: Verrieselte Bilder zeigen die Trabanten zweier ferner Sonnen.

Schnell geht die Fantasie mit den Menschen durch, wenn es um extrasolare Planeten geht: Eine zweite Erde mit üppiger Vegetation, vielleicht in kräftigen Rosatönen, mit bizarren Lebensformen, ja womöglich sogar intelligenten, sind in so manch bunter Illustration schon Realität. Alle bisherigen Ergebnisse ernüchtern jedoch, denn die uns bekannten fernen Welten – meist gewaltige Gasriesen – scheinen alles andere als lebensfreundlich zu sein.

Um die Objekte aufzuspüren, müssen Astronomen den Planeten nicht einmal direkt sehen – allein deren Einfluss auf ihre Sonne reicht aus. Zum Beispiel machen sich einige Trabanten bemerkbar, indem sie kraft ihrer Gravitation periodisch an ihrem Stern zerran. Oder aber, wenn das System günstig liegt, verdunkeln sie von uns aus gesehen für wenige Augenblicke das Leuchten ihres Zentralgestirns minimal, wenn sie davor entlangwandern. Mit diesen Methoden lässt sich schon erstaunlich viel herausfinden: die Architektur des Systems, Umlaufbahnen und -zeiten der Planeten, deren Massen und im Fall der Transitmethode manchmal sogar einiges über ihre Atmosphäre – wie etwa eine unwirtlich hohe Temperatur.

Allerdings geht diese Taktik nur dann auf, wenn der Planet seinem Mutterstern nicht allzu fern ist und zudem auch reichlich Masse besitzt. Und so träumen Astronomen schon lange davon, sie



endlich direkt abzulichten. Ein schwieriges Unterfangen, denn die begehrten Fotomodelle liegen dutzende Lichtjahre von uns entfernt und sind im besten Fall nur hunderttausendmal leuchtschwächer als ihr Stern. Wer von der Erde beobachten will, hat zudem mit Störungen in der Atmosphäre zu kämpfen, die jede noch so schöne Aufnahme verzerren.

Diesen Tücken rücken Sterngucker mit einigen Tricks zu Leibe: Adaptive Optik entzerzt das wabernde Bild auf irdischen Teleskopen, und so genannte Korono-

Fomalhaut und sein Planet

Auf diesem optischen Bild des Weltraumteleskops Hubble ist ein Planet zu erkennen, der den 25 Lichtjahre von der Erde entfernten Stern Fomalhaut entgegen dem Uhrzeigersinn umkreist. Für einen kompletten Orbit benötigt er 870 Jahre. Der Trabant ist 100 Millionen Mal lichtschwächer als sein Stern und befindet sich innerhalb eines ausgedehnten Staubgürtels um den Stern.

graphen halten das grelle Sternlicht zurück. Mit diesen Hilfsmitteln ging der lang gehegte Wunsch seit 2004 schon einige Male fast in Erfüllung. Leider nur entsprachen die Zielobjekte nicht ganz der Norm: Entweder ihr Mutterstern war nichts weiter als ein

schöder Brauner Zwerg, oder aber ihre Zugehörigkeit zum System galt nicht einmal als erwiesen.

Umso mehr feiert man nun die Aufnahmen von vier richtigen Planeten in zwei richtigen Pla-

Aufgeblasenes Sonnensystem?

So könnten die Planeten um den 130 Lichtjahre entfernten Stern HR 8799 im Vergleich zu unserem Sonnensystem angeordnet sein. Ein dem »heimischen« Kuipergürtel ähnlicher Ring soll auch ihn umspannen (in beiden Illustrationen rot eingefärbt). Auf Infrarotbildern ließen sich hier gleich drei Gasriesen auffinden.

netensystemen – auch wenn beide Zentralgestirne jünger, heißer und massereicher als unsere Sonne sind. Paul Kalas von der University of California in Berkeley und sein Team präsentieren Bilder des Weltraumteleskops Hubble, die einen Trabanten um den 25 Lichtjahre entfernten Stern Fomalhaut im Sternbild Südlicher Fisch zeigen [1]. Dagegen offenbaren die Infrarotbilder von Christian Marois vom Herzberg Institute of Astrophysics in British Columbia, Kanada, und seinen Kollegen gleich drei Gasriesen um den 130 Lichtjahre entfernten Stern HR 8799 im Sternbild Pegasus. Sie hatten das Keck-Observatorium und das Gemini-North-Teleskop in Hawaii bemüht [2].

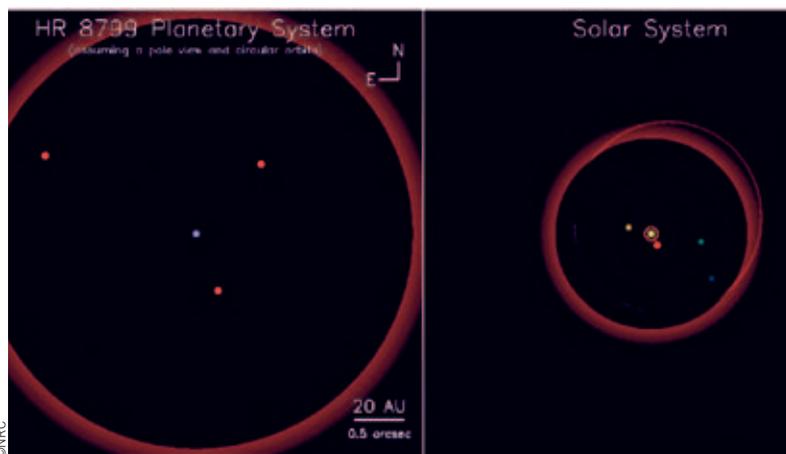
Wer nun gestochen scharfe Bilder erwartet, wird enttäuscht sein. Die Freude dreht sich um einige Pixel, die sich von den vielen anderen farblich absetzen. Um sicherzugehen, dass es sich dabei tatsächlich um Planeten handelt, mussten die beiden Teams zunächst deren Masse bestimmen. Und das ist gar nicht so einfach: Da ein Umlauf mehrere hundert Jahre dauert, ist an eine direkte Bestimmung vorerst nicht zu denken. Im Fall der drei heißen Jupiter schlossen die Astronomen um Marois deshalb mit Hilfe von deren Helligkeit auf die Masse.

Dazu leiteten sie aus ihren Daten zunächst die Leuchtkraft in verschiedenen infraroten Frequenzbereichen ab und verglichen sie dann mit theoretischen Entstehungsmodellen solcher Gasriesen. Da diese kurz nach ihrer Entstehung auch selbst noch Wärmestrahlung aussenden und nicht nur die ihres Sterns reflek-

tieren, hängt ihre Masseberechnung empfindlich vom Planetenalter ab. Mit einem geschätzten Wert von 30 bis 160 Millionen Jahren ergibt sich für die drei immerhin eine Masse von weniger als 13 Jupitermassen – vermutlich zwischen sieben und zehn.

Mit Sicherheit ließe sich das genaue Gewicht jedoch erst bestimmen, wenn Langzeitbeobachtungen mit einer höheren Auflösung vorliegen, berichten die Forscher. Braune Zwerge seien aber bereits jetzt auszuschließen. Aus den Bilddaten, die für zwei der drei über vier Jahre reichen, schlossen die Wissenschaftler zudem auf nahezu kreisförmige Umlaufbahnen, die 25 bis 70 Astronomische Einheiten (1 AE = Erde-Sonne-Distanz) vom Mutterstern entfernt liegen. Das System um HR 8799 vergleichen die Wissenschaftler auf Grund ähnlicher Proportionen mit einer vergrößerten Version unseres eigenen Sonnensystems.

Fomalhauts Begleiter zeichnet da ein weitaus weniger stimmiges Bild. So lässt er sich im nahen Infrarot überhaupt nicht beobachten. Bei einem geschätzten Alter von jugendlichen 200 Millionen Jahren sehr ungewöhnlich, da er von seiner turbulenten Geburt noch Hitze in sich tragen und damit hell in diesem Spektralbereich erstrahlen sollte. Die eingefangene optische Strahlung stammt hingegen vorrangig von seinem Mutterstern und wird nur an ihm reflektiert. Auch wenn Fomalhaut b, so der Name des Trabanten, 100 Millionen Mal lichtschwächer als sein Stern ist, wundern sich die Wissenschaftler über seine Helligkeit. Ein großes Ringsystem – viel riesiger als das



von Saturn – könnte der Grund sein. Es würde zusätzlich Sternlicht zurückwerfen. Um seine Masse abzuschätzen, schauten Kalas und seine Kollegen sich die Umgebung des Planeten genauer an. Glücklicherweise zieht dieser seine Kreise in einem ausgedehnten Staubgürtel, und je nach Anziehungskraft sollte er einen kleineren oder größeren Einflussbereich besitzen und seine Bahn mehr oder weniger von Staub und Geröll befreit haben. In der Tat hatte Fomalhaut b auf seiner elliptischen Bahn dem inneren Rand der Staubscheibe eine scharf definierte Kante verliehen. Im Jahr 2005 weckte das überhaupt erst den Verdacht auf einen Planeten in diesem System.

Die theoretischen Modelle über das Wechselspiel von Planet und Staubgürtel spucken, gefüttert mit den Beobachtungsdaten, eine Masse von weniger als drei Jupitern aus. Die Forscher tendieren aber zu einer einzigen. Seine Atmosphäre soll Berechnungen zufolge kälter als 130 Grad Celsius sein und damit vergleichsweise kühl. Von seinem Zentralgestirn befindet er sich in einem Abstand von 120 AE. Aufnahmen von 2004 und 2006 lassen eine Bahn vermuten, die ihn in 872 Jahren einmal um seinen Stern führt.

Zwischen dem Planeten und Fomalhaut wäre also noch genug Raum für weitere Trabanten, berichten die Forscher um Kalas.

Und auch das Team um Marois räumt in ihrem System noch Platz ein – sogar für terrestrische Planeten. Sie können es kaum abwarten, mit noch besseren Augen – wie denen des James Webb Space Telescope, das voraussichtlich 2013 starten soll – nachzusehen. <<

[1] Kalas, P. et al.: Optical Images of an Exoplanet 25 Light Years from Earth. In: Science 10.1126/science.1166609, 2008.

[2] Marois, C. et al.: Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799. In: Science 10.1126/science.1166585, 2008.

DOSSIER Exoplaneten



EXOPLANETEN

Früher einmal war der Glaube an Planeten um ferne Sterne den Sciencefiction-Autoren vorbehalten. Dann aber machten immer ausgefeiltere Mess- und Späh-Techniken aus der Sache des Glaubens eine des genauen Hinschauens – und siehe da: Exoplaneten kreisen offenbar in allen Ecken der Galaxis.

spektrumdirekt.de/exoplaneten



WAS BEZEICHNEN ASTRONOMEN ALS SPAGHETTISIERUNG?

- a) Verdrillen von Magnetfeldlinien
 b) Konsequenz der Stringtheorie
 c) Effekt in der Nähe von Schwarzen Löchern
 d) Ansammlung von Materie um Protostern



© SIMULATION: HANNES RUDER, H. P. NOLLERT ET AL. UND AXEL MELLINGER

Antwort: Die Spaghettisierung beschreibt einen Effekt, der in der Nähe von Schwarzen Löchern auftritt.

Bis jetzt ist noch kein Mensch in die **Nähe von Schwarzen Löchern** vorgedrungen. Allerdings gibt es jede Menge Gedankenexperimente, die von Computersimulationen unterstützt, ein recht genaues Bild von dem zeichnen, was einen Astronauten dort erwarten würde.

Das Wort Spaghettisierung soll von Stephen Hawking geprägt worden sein, der in seinem Buch „Eine kurze Geschichte der Zeit“ den fiktiven Flug eines Astronauten in ein Schwarzes Loch beschreibt. Dabei wird er auf Grund der Gezeitenkräfte wie eine Spaghetti in die Länge gezogen. Denn die Anziehungskraft sinkt mit dem Quadrat des Abstands, und so werden seine Füße stärker angezogen als sein Kopf. Selbiges passiert auch bei freiem Fall auf der Erde, doch sind die Effekte hier so klein, dass sie nicht einmal messbar sind.

Bei einem Schwarzen Loch mit seiner enormen Gravitation sollten die zerreißenen Kräfte aber so groß werden, dass sie einfallende Objekte letztlich sogar zerreißen. Für Menschen würde eine Reise in die Singularität - den unendlich dichten und heißen Punkt, in dem alle Masse des

Schwarzen Lochs vereint ist - somit in jedem Fall tödlich verlaufen. Der Zeitpunkt hängt dabei sehr von der Größe des Schwarzen Lochs ab.

Für kleinere Schwarze Löcher mit der Masse einiger Dutzend Sonnen liegt der so genannte Ereignishorizont - jene theoretische Grenze hinter der alles auf Nimmerwiedersehen verschwindet - viel näher an der Singularität, und so würde er getötet, bevor er ihn überhaupt erreicht. Bei sehr großen Exemplaren, etwa solche in den Zentren von Galaxien, könnte er es in den Ereignishorizont schaffen.

Ob er dort den Tod durch Spaghettisierung oder durch Überhitzung stirbt, ist allerdings ungewiss. Andrew Hamilton von der Universität von Colorado stellte vor zwei Jahren die Überlegung an, dass das Schwarze Loch einen Teil der eingesaugten Materie wieder abstößt. Diese sammelt sich dann als heißes Plasma um die Singularität an, um wenig später doch noch verspeist zu werden. Ein Astronaut würde darin gegrillt.

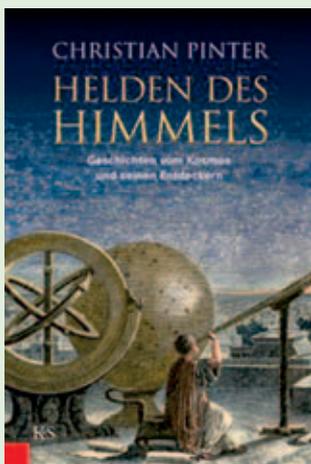
Verdrillte Magnetfeldlinien mögen zwar an Spaghetti erinnern, doch meist wird hier der Vergleich mit verwundenen Gummibändern vorgezogen. Zum Beispiel beim Magnetfeld der Sonne, das an die elektrisch geladenen Gasschichten gekoppelt ist. Die Magnetfeldlinien werden durch deren Dynamik zunehmend ver-

dreht und verdrillt, bis sich die aufgestaute Energie schließlich in heftigen Ausbrüchen auf der Sonnenoberfläche entlädt.

Bei der **Stringtheorie** ist der Name Programm: Die fundamentalen Bausteine der Materie sind winzige, eindimensionale Fäden. Wie die Saiten eines Instruments schwingen diese hin und her und repräsentieren je nach Anregung die einzelnen Elementarteilchen. Einige Theoretiker erhoffen sich mit Hilfe Stringtheorie eine Theorie von Allem zu entwickeln. Nur leider sind die Saiten so klein, dass sie wohl immer jenseits der Nachweisbarkeit bleiben.

Sammelt sich Materie um einen werdenden Stern an, so sprechen Astronomen von einer Akkretionsscheibe. Wie Spaghetti um eine Gabel, so drehen sich Gas und **Staub um den Protostern** - allerdings wandern sie dabei gemächlich in Richtung Zentrum. Der Vergleich hinkt also und schafft es damit wohl nicht in die Lehrbücher. <<

Maike Pollmann



Christian Pinter
Helden des Himmels

KREMARYR & SCHERIAU

ISBN: 3218007941

Dieses Buch können Sie im
Science-Shop für **22,90 € (D)**,
22,90 € (A) kaufen.
science-shop.de/artikel/983322

REZENSION

Von Göttern, Helden und Astronomen

Geschichten vom Kosmos und seinen Entdeckern« erzählt der freie Journalist Christian Pinter in seinem Buch »Helden des Himmels«, das teilweise überarbeitete Beiträge für die »Wiener Zeitung« enthält. Helden des Himmels, das sind für Pinter zunächst die Götter und Halbgötter der Antike. Durch ihre Abenteuer und Leiden verdienen sie sich einen festen Platz am Himmel in Form von Sternbildern wie Perseus, Orion oder Andromeda: Der Mensch schaut also zu den Sternen und zu den Göttern zugleich. Die Gruppierungen der Sterne beinhaltet für den nächtlichen Beobachter gleichzeitig Mythen zur Erklärung der Welt.

Seit Humanismus und Renaissance dienen diese Göttergeschichten nur noch als unterhaltsame Gedächtnisstütze, um sich am Himmel zurechtzufinden. Der Mensch selbst wird in dieser Zeit zum Helden des Himmels: Nikolaus Kopernikus, Tycho Brahe, Galileo Galilei, Johannes Kepler – um die berühmtesten zu nennen, über die Christian Pinter auch in seinem Buch berichtet. Die Geschwister Wilhelm und Karoline Herschel sind möglicherweise die letzten Vertreter dieses Typus von Helden. Sie sind noch Entdecker des Himmels, die in Selbstaufopferung und einsamen Genie den Himmel wissenschaftlich beschreiben, also ohne die »Hypothese Gott« (Pierre-Simon Laplace) zu verwenden.

An der Biografie des Joseph Fraunhofer wird eine weitere Bruchlinie in »Helden des Himmels« erkennbar: Mit

der zunehmenden Industrialisierung wird die Gesellschaft technisiert und die Arbeitsteilung forciert. So ist zwar Joseph Fraunhofer in der Astronomiegeschichte für die Entdeckung der Absorptionslinien im Sonnenspektrum bekannt, doch nutzte er diese Linien vor allem technisch zum Vermessen des Brechungsverhaltens seiner Gläser. Der wesentliche Beitrag Fraunhofers zur Astronomie bestand im Bau leistungsfähiger Refraktoren. Mit einem davon hat Johann Gottfried Galle den Planeten Neptun entdeckt, was nur gelang, weil der Theoretiker Urbain Le Verrier seine Position vorherberechnete. Die Hauptdarsteller nutzen also nun ingenieurstechnisch entwickelte Geräte, um Ideen der Physiker zu prüfen. Der letzte Held von diesem Schlag wiederum ist vielleicht Edwin Powell Hubble, mit dem das Buch folgerichtig endet.

Heute ist die Forschung dagegen so aufwändig und komplex, dass sie in großen, meist internationalen Institutionen organisiert wird: Die Erforschung des Himmels betreiben nun wenig »heldenhafte« Einrichtungen wie ESA, ESO, NASA. Von diesen modernen Einrichtungen handelt Christian Pinters Buch aber nicht mehr. Denn sein Thema ist nicht Astronomiegeschichte, sondern Geschichten von Astronomen. Es geht ihm auch nicht um enzyklopädische Vollständigkeit, viel lieber stellt er überraschende Aspekte heraus. So begegnet dem Leser der Astronom Johannes Kepler ausgerechnet als Sciencefiction-Autor, und über Nikolaus

Kopernikus lesen wir aus der Sicht seines einzigen Schülers Joachim Rheticus.

Das Buch von Christian Pinter ist aber auch nicht bloß anekdotisch – in ihrer Gesamtheit bieten die einzelnen kurzen Texte durchaus einen Überblick über den Wandel des astronomischen Weltbildes. Leider enthält das Buch keine einzige Abbildung. Der klar geschriebene Text von Christian Pinter lässt Abbildungen zunächst auch gar nicht vermischen, aber ich könnte mir schon vorstellen, dass in Sachen Astronomie unerfahrenen Lesern die eine oder andere erläuternde Abbildung helfen würde.

Und wo sind die Heldinnen? Auch das ist ein Kritikpunkt. An Karoline Herschel kommt man natürlich nicht vorbei, doch – wie Christian Pinter selber schreibt – stand sie zeitlebens im Schatten ihres Bruders und ihres Neffen. So hängen an dem Buch nach der Geschichte über Edwin Hubble noch drei kleine Kapitel über Sonnen- und Mondfinsternisse an. Schöner wäre es gewesen, beispielsweise noch von Vera Rubin zu berichten, der wir maßgebliche Beobachtungen zur Dunklen Materie verdanken. Schließlich stehen den Helden des Himmels längst Heldinnen zur Seite, und das ist ja auch eine schöne Entwicklung. <<

Stefan Taube

Der Rezensent hat Mathematik und Physik auf Lehramt studiert und ist Mitarbeiter beim Verlag Spektrum der Wissenschaft

5 x 5-Bewertung	
Inhalt	■ ■ ■ ■ □
Vermittlung	■ ■ ■ ■ □
Verständlichkeit	■ ■ ■ ■ ■
Lesespaß	■ ■ ■ ■ ■
Preis-Leistung	■ ■ ■ ■ □
Expertenwertung	23



Mit spektrumdirekt premium haben Sie Zugriff auf alle Artikel der Online-Zeitung spektrumdirekt sowie 13 Online-Fachlexika von Spektrum Akademischer Verlag:

www.wissenschaft-online.de/lexika

Auf Wunsch können Sie sich die Wochenausgabe im PDF-Format direkt ins Mail-Postfach schicken lassen.

Weitere Informationen finden Sie unter www.spektrumdirekt.de/info

Sie möchten das Premiumangebot von spektrumdirekt zwei Wochen lang kostenlos und unverbindlich testen?

Dann schicken Sie einfach eine E-Mail mit Ihrem Namen und dem Betreff

»Premium schnuppern« an: aboservice@wissenschaft-online.de