

Braune Zwerge

Entstehung, Scheiben, Doppelsysteme und Atmosphären

VON CORYN BAILER-JONES, WOLFGANG BRANDNER UND THOMAS HENNING

Für Sterne sind sie zu massearm, für Gasplaneten zu massereich. Diese Sonderstellung in der Hierarchie der Himmelskörper macht Braune Zwerge zu begehrten Forschungsobjekten. Denn mit ihrer Hilfe lässt sich besser verstehen, wie Sterne und Planeten aufgebaut sind, wie sie entstehen und sich weiter entwickeln.

▲ Abb. 1: Braune Zwerge (hier mit einem Trabanten im Vordergrund) können in Doppelsystemen vorkommen und ein komplexes Wettersystem in ihren Atmosphären aufweisen.



Bild: Vordergrund: Matthias Hänel/Hintergrund: Heinrich Weiß/Collage: AMQ/SuW

kaum ändern. Die Energie, die durch das Umwandeln von Wasserstoffkernen in Heliumkerne in der Zentralregion des Sterns freigesetzt wird, lässt ihn leuchten. Dabei hält der Strahlungsdruck, der von innen nach außen wirkt, der Gravitation, die von außen nach innen drückt, die Waage.

Der Name Hauptreihe rührt daher, dass alle Sterne, die sich in diesem Stadium des Wasserstoffbrennens befinden, auf einem schmalen Band zu liegen kommen, wenn man ihre Leuchtkraft gegen ihre inverse Temperatur aufträgt. Dieses Band, die Hauptreihe, verläuft in diesem Diagramm von links oben nach rechts unten. Von der Masse des jeweiligen Sterns hängt seine Lage auf der Hauptreihe ab.

Die massereichsten Sterne liegen links oben – sie sind heiß und leuchten sehr hell. Da sie ihren Wasserstoffvorrat rasch verbrauchen, verweilen sie weniger als eine Million Jahre auf der Hauptreihe. Weiter unten auf der Hauptreihe, bei den Sternen geringerer Masse, sind die Zentraltemperaturen geringer und somit die Kernreaktionen weniger heftig. Folglich leuchten diese Sterne nicht so hell und verbleiben lange auf der Hauptreihe.

Was geschieht, wenn wir Objekte immer kleinerer Masse betrachten? Die Theorie des Sternaufbaus sagt eine Grenze von etwa 0,075 Sonnenmassen voraus, unterhalb der keine Wasserstofffusion mehr möglich ist. Gaskugeln unterhalb dieser »Grenze für Wasserstoffbrennen« sollten dennoch leuchten, weil sie infolge des Gravitationsdrucks schrumpfen und dabei potenzielle Energie in Wärme umwandeln. Im Laufe der Zeit werden sie immer kühler und leuchtschwächer. Da ihre Oberflächentemperatur noch geringer ist als die von Roten Zwergen, den kühlest Hauptreihensternen, gab man ihnen den Namen »Braune Zwerge«.

Die Entdeckungsgeschichte

In den 1980er und 1990er Jahren fanden Astronomen bei tiefen Durchmusterungen im Optischen und Infraroten sowie bei der Suche nach Sternen mit hoher Eigenbewegung eine Handvoll Objekte mit sehr geringer Leuchtkraft und niedriger Temperatur – Kandidaten für Braune Zwerge also.

Doch wie sollte man prüfen, ob die Massen dieser Objekte tatsächlich unter der Grenze für Wasserstofffusion lagen? Eine direkte Bestimmung der Masse, wie sie über eine Bahnbewegung möglich ist, schied aus, da diese Himmelskörper alleine durchs All zogen. Die Astronomen mussten sich deshalb auf Sternaufbau-

und Entwicklungsmodelle für Braune Zwerge stützen und aus der beobachteten Leuchtkraft und Effektivtemperatur die Masse ableiten. Da die Modelle jedoch mit einigen Unwägbarkeiten behaftet waren, ließ sich nicht eindeutig entscheiden, ob die Massen der Kandidaten wirklich über oder unter der maßgeblichen Grenze lagen.

Ein wichtiger Durchbruch gelang schließlich mit dem »Lithium-Test«, den Rafael Rebolo und seine Mitarbeiter am Instituto de Astrofísica de Canarias (IAC) auf Teneriffa vorschlugen. Lithium »brennt« in thermonuklearen Reaktionen bei etwas niedrigeren Temperaturen als Wasserstoff. Die meisten Sterne enthalten nur wenig Lithium – ein beim Urknall erzeugtes Element – und brauchen es deshalb in kurzer Zeit auf (massearme Sterne innerhalb von etwa 100 Millionen Jahren, massereichere schneller).

Die meisten Braunen Zwerge (mit Ausnahme der massereichsten) sind hingegen zu kühl, um Lithium zu verbrennen. Wenn wir also Lithium in der Atmosphäre eines massearmen Objekts durch die entsprechende Absorptionslinie in seinem Spektrum nachweisen, dann wissen wir, dass es sich um einen Braunen Zwerg handelt.

Wenngleich sich dieser Test in vielen Fällen als nützlich erwiesen hat, ist er leider nicht immer eindeutig. Sehr junge massearme Sterne hatten womöglich noch nicht genügend Zeit, ihr Lithium abzubauen, sodass sie sich nicht von Braunen Zwergen unterscheiden lassen. Zudem sind die massereichsten der Braunen Zwerge heiß genug, ihr Lithium zu verbrennen – auch in diesen Fällen würde der Lithium-Test in die Irre führen.

Der erste wirklich eindeutige Nachweis eines Braunen Zwergs gelang 1995 einem Team um Tadashi Nakajima vom California Institute of Technology in Pasadena. Die Gruppe entdeckte einen sehr leuchtschwachen, kühlen Begleiter des massearmen Sterns Gliese 229 (Abb. 2). Das Bemerkenswerte an diesem Begleiter, genannt Gl 229B: Seine Atmosphäre weist starke Methan-Absorptionsbanden auf (Abb. 3). Methanmoleküle können sich nur bei Temperaturen bilden, die sehr viel niedriger sind als bei irgendeinem Stern möglich. Daher musste Gl 229B ein Brauner Zwerg sein. Seine Atmosphäre ist so kühl, weil er bereits einige Milliarden Jahre alt ist. Ohne nukleare Energiequelle kühlen Braune Zwerge im Laufe der Zeit ab und werden immer leuchtschwächer. Darum sind sie in fortgeschrittenem Alter schwer zu entdecken. Doch wenn es gelingt, sie aufzuspüren, lassen sie sich anhand ihrer charakteristischen kühlen

Einer der großen Erfolge der Astrophysik des 20. Jahrhunderts ist die Entwicklung detaillierter Modelle des Sternaufbaus. Als Grundlage dienten physikalische Theorien der Mechanik, der Thermodynamik, des Strahlungstransports und später auch der Kernphysik. Die nun etablierten Modelle beschreiben Aufbau, Eigenschaften und zeitliche Entwicklung von Sternen äußerst präzise.

Besonders wichtig war die Entdeckung der Hauptreihe: Alle Sterne durchlaufen in ihrer Entwicklung eine relativ ruhige und stabile Phase der Wasserstofffusion, in der sich die Zustandsgrößen wie Temperatur und Leuchtkraft

Atmosphäre von massearmen Sternen unterscheiden.

Heute kennen wir Hunderte von Braunen Zwergen. Sie scheinen in der Sonnenumgebung (und vermutlich überall in der Galaxis) ebenso häufig zu sein wie Hauptreihensterne. Wegen ihrer geringen Masse tragen sie jedoch nur einen kleinen Bruchteil zur Gesamtmasse des Milchstraßensystems bei. Daher ist es sehr unwahrscheinlich, dass sie einen wesentlichen Beitrag zur »Fehlenden Masse« oder »Dunklen Materie« liefern.

Kriterien für Nachweis und Definition

Wegen ihrer geringen Masse sind Braune Zwerge kühl. Ihre Effektivtemperatur liegt typischerweise unter 2000 Kelvin. Deshalb erscheinen sie rotglühend, wobei der Großteil ihrer Strahlung im nahen Infrarotbereich (bei Wellenlängen zwischen 1 und 2 μm) ausgesandt wird und nur sehr wenig im Optischen (Abb. 4). Dieser Umstand liefert uns eines der wichtigsten Nachweiskriterien für Braune Zwerge, nämlich die im Gegensatz zu fast allen Sternen äußerst roten optisch-infraroten Farben. Überdies zeigen Berechnungen des thermochemischen Gleichgewichts, dass sich bei diesen niedrigen Temperaturen zahlreiche Moleküle sowie flüssige und feste Kondensate (insgesamt »Staub« genannt) bilden.

Dies zeigt sich deutlich in den Spektren der Braunen Zwerge, die in zwei breite Spektralklassen unterteilt wurden. Die erste Klasse, »L« genannt, ist durch Metallhydrid-Linien (z.B. CrH und FeH) und neutrale Alkalimetalle (Na, K, Rb, Cs) in ihren roten optischen Spektren (0.6 – 1.0 μm) gekennzeichnet. Die zweite Klasse, »T«, kann durch starke Wasser- und insbesondere Methanbanden im nahen Infrarot (1 – 2.5 μm) identifiziert werden. Gl 229B ist der Prototyp der T-Zwerge.

Die Zuordnung von Effektivtemperaturen zu diesen Spektralklassen ist wegen der komplexen Chemie und der möglichen Dynamik in ihren Atmosphären schwierig, wie wir später noch sehen werden. In etwa überdecken die L-Zwerge den Temperaturbereich von 2100 bis 1300 Kelvin, die T-Zwerge den von 1300 bis 800 Kelvin. L- und T-Typen sind damit die kühlere Fortsetzung der bekannten Spektralklassensequenz O, B, A, F, G, K, M (siehe SuW 5/2004, S. 20). Bei der Beschreibung ihrer spektralen Energieverteilung bezeichnen wir M-, L- und T-Zwerge gemeinsam als »ultrakühle Zwerge«. Welcher Masse eine bestimmte Spektralklasse entspricht – ob es also ein massearmer Stern oder ein Brauner Zwerg ist – hängt vom Alter des Objekts ab. Der Grund hierfür liegt darin,

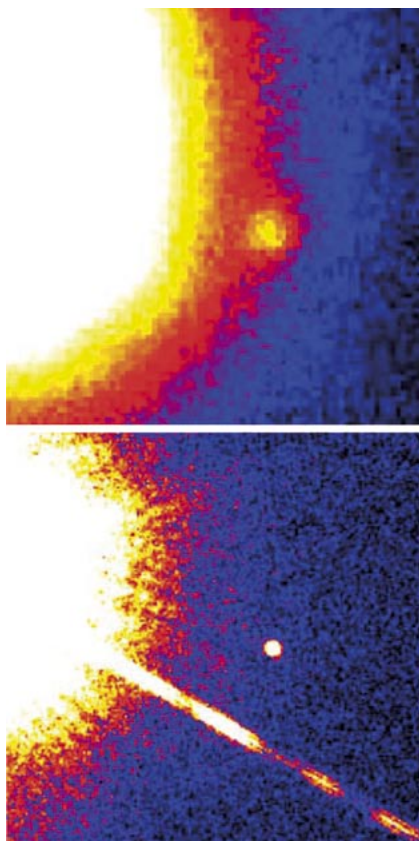
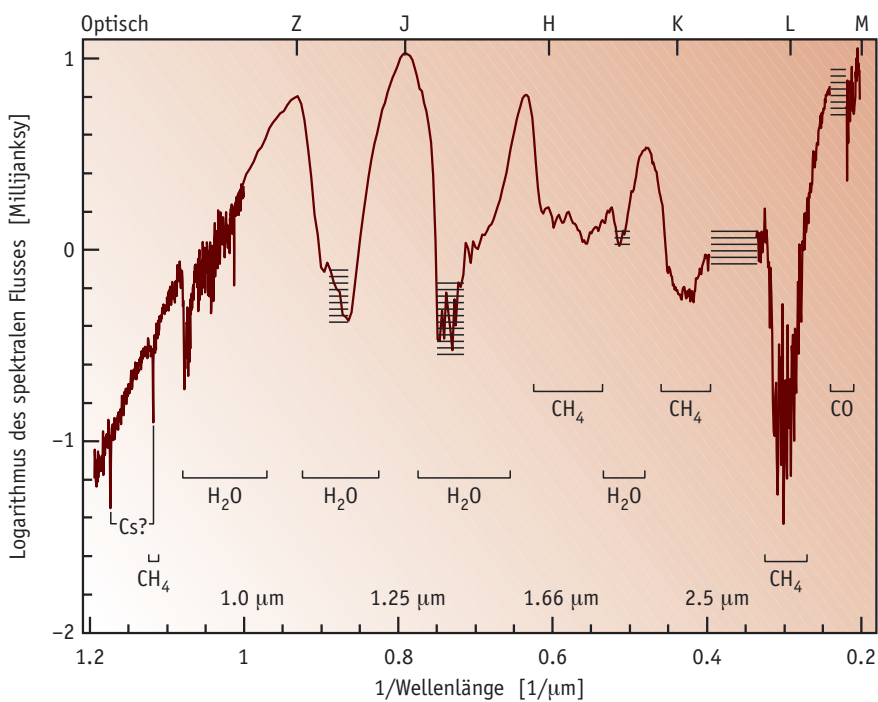


Abb. 2: Ein kühler Brauner Zwerg (jeweils in der Bildmitte) umkreist den Stern Gliese 229 (jeweils links im Bild). Die Entdeckungsaufnahme oben entstand mit dem 1.5-Meter-Teleskop auf dem Mount Palomar im November 1994, die Bestätigungsaufnahme unten mit dem Weltraumteleskop HUBBLE im Februar 1995.

Abb. 3: Das Spektrum von Gliese 229B im nahen Infrarot enthält Banden von Methan (CH_4) und Wasser (H_2O). Die Wellenlänge steigt nach rechts an; oben ist die Position der photometrischen Standardfilter angegeben. An den durch horizontale Striche markierten Regionen war die Erdatmosphäre zu dicht, um nützliche Messungen vom Boden aus zu gestatten. (Aus: Oppenheimer et al., ApJ, 502, 932, 1998)



dass Braune Zwerge mit der Zeit abkühlen und somit beim Altern immer spätere Spektraltypen erreichen.

Die Massen Brauner Zwerge liegen zwischen 0.012 und 0.075 Sonnenmassen (was 13 bis 80 Jupitermassen entspricht). Der obere Wert ist durch die Grenze des Wasserstoffbrennens definiert: Unterhalb von 0.075 Sonnenmassen erreichen Druck und Temperatur im Innern des Himmelskörpers nicht mehr die für das Einsetzen der Wasserstofffusion erforderlichen Mindestwerte. Nur eine Deu-

terium-Tritium-Fusion zündet für kurze Zeit, die jedoch bald wieder aussetzt. Unterhalb von 0.012 Sonnenmassen ist auch kein Deuterium-Tritium-Brennen möglich. Himmelskörper, deren Masse kleiner ist als dieser Wert, sind Planeten. In ihnen kann grundsätzlich keine Kernfusion stattfinden.

Bedeutet dies, dass es ein Kontinuum zwischen Planeten und Sternen gibt? Ja und nein. Jedes gasförmige Objekt, das kein Wasserstoffbrennen zünden kann, nennen wir ein »Objekt substellarer Mas-

se«. In diese Kategorie fallen sowohl Braune Zwerge als auch Planeten. Allgemein wird ein Planet definiert als ein Himmelskörper, der sich in der Akkretionsscheibe eines Sterns gebildet hat, also in der zirkumstellaren Ansammlung von Material, das vom Sternentstehungsprozess übrig geblieben ist. Im Unterschied dazu entstehen Sterne beim Kollaps einer Gaswolke im interstellaren Medium. Objekte, die auf diese Weise entstanden, aber zu wenig Masse mitbekommen haben, um die Fusion von Wasserstoff zu zünden, würden wir Braune Zwerge nennen.

Am zweckmäßigsten unterscheiden wir also Planeten und Braune Zwerge nicht anhand ihrer Eigenschaften oder Massen, sondern anhand der Art ihrer Entstehung. Bisher wissen wir allerdings noch nicht, welches die kleinste Masse ist, die ein Objekt beim Kollaps einer interstellaren Wolke erhalten kann. Es könnte durchaus sein, dass diese Untergrenze kleiner ist als die Masse, die ein Riesenplanet ansammeln kann. In diesem Falle würden sich die Massenfunktionen von Braunen Zwergen und Planeten überlappen.

Als »stellare Embryos« aus dem Nest geworfen?

Wie wir im Folgenden erkunden werden, gibt es zahlreiche neue Ideen und Theorien, wie Braune Zwerge entstehen könnten. Mindestens vier verschiedene Mechanismen werden diskutiert:

- dynamische Ausstoßung eines »stellaren Embryos« aus seinem Molekülwolkenmutterkern durch gravitative Wechselwirkungen,
- opazitätsbegrenzte Fragmentation einer durch Stoßwellen komprimierten Gasschicht,
- gravitative Instabilitäten in zirkumstellaren Akkretionsscheiben, sowie
- Photoverdampfung kleiner Wolkenkerne in Entstehungsgebieten massereicher Sterne.

Welchem dieser Mechanismen der Vorzug gebührt, ist noch unklar. Im Kern des Orionnebel-Haufens zum Beispiel,

▶ Abb. 4: Ultrakühle Zwerge, zu denen auch die Braunen Zwerge gehören, leuchten überwiegend im nahen Infrarot zwischen 1 und 2 μm . Dargestellt sind die Spektren verschiedener Objekte mit von oben nach unten fortschreitender Spektralklasse, von den späten M-Zwergen (M7) zu den späten L-Zwergen (L7). Markante Molekülbanden sind gekennzeichnet. (Aus: Leggett et al. *ApJ*, 548, 908, 2001)

wo genügend massereiche Sterne mit intensiver UV-Strahlung vorhanden sind, könnte die Auflösung von Akkretionshüllen um protostellare Kerne geringer Masse als Erklärung zutreffen. Aber in Regionen wie dem Taurus-Auriga-Sternentstehungsgebiet, wo es keine massereichen Sterne gibt, scheidet eine solche Photoverdampfung als Mechanismus von vornherein aus.

Die Suche nach einem universelleren Entstehungsmechanismus führte Bo Reipurth von der Universität Hawaii und Cathie Clarke von der Universität Cambridge zu einer speziellen These: Demnach wären Braune Zwerge substellare Objekte, weil sie zu einem frühen Zeitpunkt aus kleinen, neu entstandenen Vielfachsternsystemen ausgestoßen wurden, die durch dynamische Wechselwirkungen ihrer Mitglieder instabil wurden und zerfielen. Demnach wären Braune Zwerge auf ihrem Weg zu einem werdenden Stern gescheitert – der Verdichtungs- und Akkretionsprozess wurde unterbrochen, ehe sich ein Kern bilden konnte, dessen Masse für das Zünden der Wasserstofffusion ausgereicht hätte.

In einem kleinen Vielfachsternsystem, das gerade im Entstehen begriffen ist, konkurrieren die einzelnen Mitglieder um die einfallende Materie, und dasjenige, das am langsamsten wächst, wird am ehesten herausgeschleudert. Doch auch wenn die Mitglieder fast gleiche Massen haben, sind diese Systeme so instabil, dass unweigerlich ein Mitglied zu einem frühen Zeitpunkt, wenn es noch sehr wenig Masse hat, ausgestoßen wird. Dieser Mechanismus hat jüngst viel Aufmerksamkeit erregt, da er möglicherweise erklärt, warum Braune Zwerge so selten als

enge Begleiter normaler Sterne vorkommen und warum es kaum weite Doppelsysteme aus Braunen Zwergen gibt.

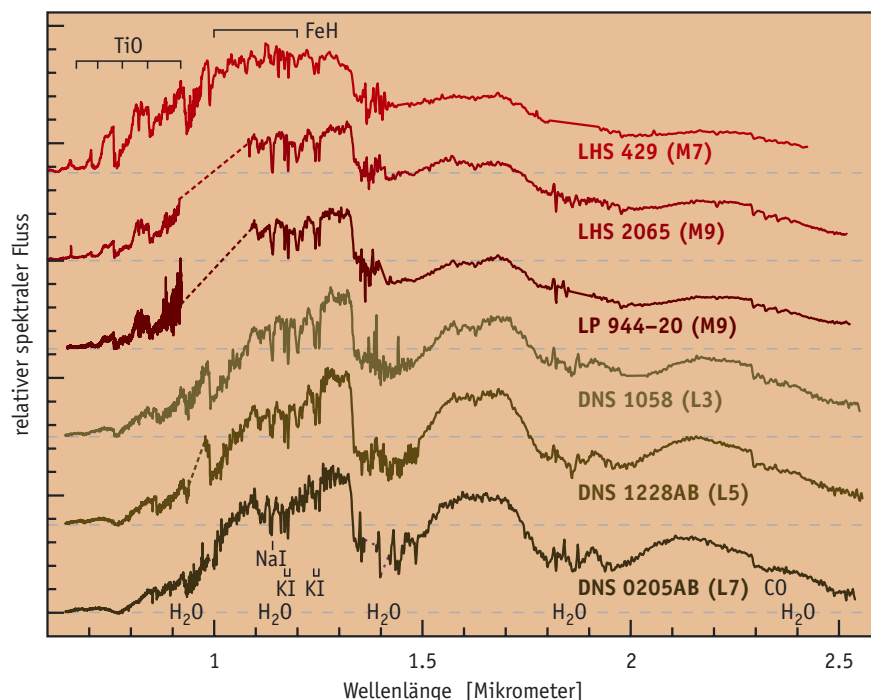
Natürlich müssen sich die substellaren Kerne selbst vor ihrem Heraussschleudern aus dem Mehrfachsystem gebildet haben. Hydrodynamische Rechnungen weisen darauf hin, dass dies in gravitativ instabilen Scheiben oder in kollabierenden Gas- und Staubfilamenten geschieht.

Im Rahmen seiner Doktorarbeit untersuchte Stefan Umbreit am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg mit Hilfe statistischer N-Körper-Simulationen den dynamischen Zerfall nicht-hierarchischer Dreifachsysteme als Bildungsmechanismus. Diese Studie zeigt, dass Akkretion und nachfolgende Schrumpfung von Dreifachsystemen die Geschwindigkeiten ihrer Mitglieder im Vergleich zu nicht-akkretierenden Systemen deutlich anwachsen lässt und die Ausstoßung noch wahrscheinlicher macht.

Scheiben um Braune Zwerge

Dynamische Ausstoßung ist ein heftiger Vorgang. Darum ist zu erwarten, dass Braune Zwerge, die auf diese Weise entstehen, keine Akkretionsscheiben hoher Masse zurückbehalten. Aus dem gleichen Grund scheint die Entstehung von sehr weiten Doppelsystemen aus Braunen Zwergen eher unwahrscheinlich, denn derart schwach gebundene Systeme dürften beim Ausschleudern eher auseinandergerissen werden.

Um dies zu überprüfen, schätzte Umbreit mittels N-Körper-Simulationen die Dichteprofile und die Lebensdauer von Scheiben um Braune Zwerge ab. Die Frage dabei war auch, ob sich durch Ausstoßung



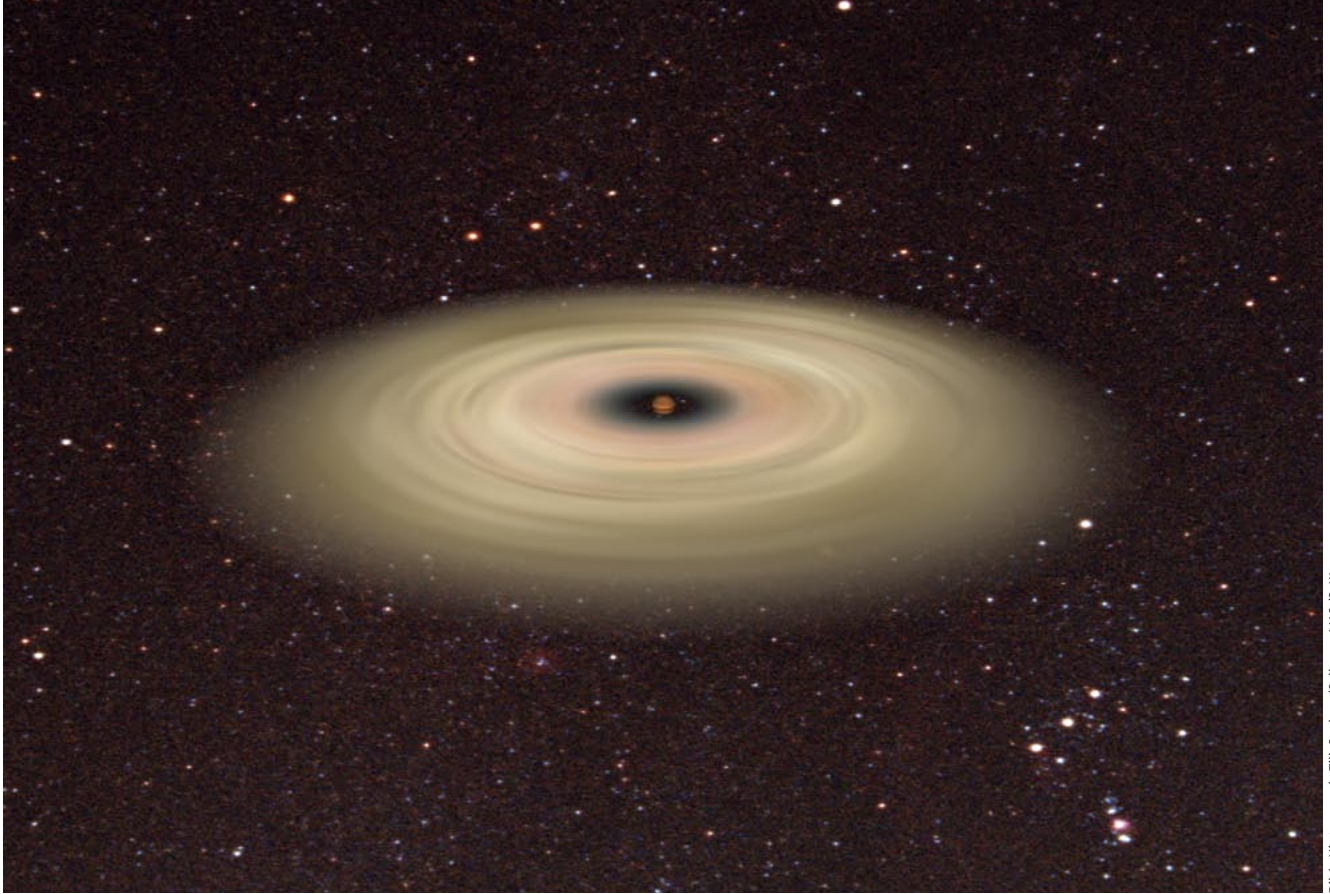


Bild: Hintergrund: Tili Credner/Collage- AMO/SuW

▲ Abb. 5: Junge Braune Zwerge sind offenbar von kompakten Staubscheiben umgeben. In ihnen könnten sich in Analogie zum Sonnensystem Planetesimale und letztlich sogar Planeten und Monde entwickeln.

ßung sehr enge Doppelsysteme aus Braunen Zwergen formieren und die ausgestoßenen Objekte dabei doch genügend große Akkretionsscheiben zurückbehalten, um sie in einem typischen Alter von 1 bis 5 Millionen Jahren beobachten zu können.

Die Simulationen ergaben, dass die Scheiben direkt nach einer nahen Begegnung (die zur Ausstoßung führt) stark gestutzt sind. Ihre Ausdehnung liegt meist unter fünf Astronomischen Einheiten, und sie enthalten gewöhnlich weniger als eine Jupitermasse. Wegen der allgemein niedrigen Akkretionsraten in den Scheiben von Braunen Zwergen sollten jedoch mindestens zwölf Prozent dieser massearmen Scheiben länger als eine Million Jahre überdauern. Deshalb sollte unter den jüngsten Braunen Zwergen der Anteil derjenigen, die von einer Akkretionsscheibe umgeben sind, zwar gering sein, aber eben doch feststellbar. Überdies ist ein höherer Anteil zu erwarten, wenn sich weite Doppelsysteme aus Braunen Zwergen bilden können. Diese Vorhersage lässt sich durch Beobachtungen überprüfen.

Einen Hinweis auf die Natur von Braunen Zwergen und ihre Entstehung könnte ihre offenkundige Ähnlichkeit mit klas-

sischen T-Tauri-Sternen liefern. Solche Objekte sind massearme Sterne, die sich noch in der Kontraktionsphase befinden und noch nicht das Hauptreihenstadium erreicht haben. Jüngste spektroskopische Durchmusterungen weisen darauf hin, dass junge Braune Zwerge bis zu ihrer unteren Massegrenze von 13 Jupitermassen T-Tauri-ähnliche Scheibenakkretion zeigen; als Indikator für Akkretion diente hierbei Strahlung in der Wasserstoff-Alpha-Linie ($H\alpha$). Diese Ähnlichkeit lässt einen gemeinsamen Scheibenakkretionsprozess für Braune Zwerge und klassische T-Tauri-Sterne vermuten, bei dem möglicherweise auch Magnetfelder eine entscheidende Rolle spielen.

Der nächste Schritt besteht darin, nach direkten Anzeichen für Scheiben um Braune Zwerge zu suchen und ihre Massen zu bestimmen. Wie bei den T-Tauri-Sternen hat man erste Hinweise auf solche Scheiben bei Durchmusterungen im nahen Infrarot erhalten, die einen Strahlungsüberschuss über das erwartete photosphärische Niveau hinaus anzeigten. Ein noch besserer Indikator ist erhöhte Emission im Wellenlängenbereich um 10 μm , hervorgerufen durch warmen zirkumstellaren Staub. Der erste Nachweis von Braunen Zwergen bei diesen Wellenlängen gelang anhand von Breitbandbeobachtungen der Sternentstehungsgebiete Chamäleon I und Rho Ophiuchi, die mit der Infrarotkamera ISOCAM an Bord des Infrared Space Observatory (ISO) durchgeführt worden waren.

Thomas Henning hat zusammen mit seinen Studenten Daniel Apai und Ilaria

Pascucci (jetzt an der University of Arizona) sowie Michael Sterzik von der Eso nach der Strahlung von Braunen Zwergen im mittleren Infrarot gesucht, insbesondere nach der charakteristischen Emissionsbande von Silikaten bei 10 μm . Diese Bande hat ein enormes analytisches Potenzial, da sie sowohl die optische Tiefe des emittierenden Materials als auch die Größe der Staubkörner anzeigt. In einem jungen Objekt – Chamäleon H α 2, das sich in dem rund 450 Lichtjahre entfernten Sternentstehungsgebiet Chamäleon I befindet – fanden wir einen klaren Hinweis auf thermische Staubemission. Überraschenderweise zeigt dieser Kandidat für einen Braunen Zwerg keinerlei Silikat-Emissionsbande, was entweder auf eine ziemlich flache Scheibengeometrie oder auf beachtliches Staubwachstum hinweist.

Im Falle des jungen (etwa 1 Million Jahre alten) Braunen Zwergs CFHT-BD-Tau 4 hatten wir mehr Glück. Mit dem Thermal-Region Camera Spectrograph (T-ReCs) am 8-Meter-Teleskop GEMINI-SÜD gelang es uns, die charakteristische Silikat-Emissionsbande zu finden, die das Vorhandensein einer optisch dünnen Scheibenschicht bestätigt, ähnlich wie wir sie bei T-Tauri-Sternen beobachten. Eine genauere Analyse des Spektrums ergab einen ersten Hinweis auf Staubwachstum und sogar auf die Sedimentation von Staub in der Scheibe dieses Objekts.

Die nächste Herausforderung bestand darin, die Emission dieser Scheiben im Millimeterwellenbereich nachzuweisen. Diese ist ein direktes Maß für die Masse

der Scheibe, wobei jedoch die Opazität des Staubs bekannt sein muss. Mit Hilfe des SCUBA-Bolometers am JCMT-Submillimeter-Teleskop auf Hawaii und des MAMBO-Arrays am IRAM-30-m-Teleskop auf dem Pico Veleta (Spanien) entdeckten wir zum ersten Mal Millimeteremission von zwei jungen Braunen Zwergen bei einem Flussniveau von einigen Millijansky. Unter der Annahme ähnlicher Staubopazitäten, wie sie bei der Abschätzung der Scheibenmasse bei T-Tauri-Sternen verwendet werden, erhielten wir für die Scheiben Gesamtmassen von einigen Jupitermassen. Dies deutet auf die Möglichkeit hin, dass sich sogar in den Scheiben um Braune Zwerge Planeten bilden könnten.

Mit Hilfe der im mittleren Infrarot sehr empfindlichen Detektoren an Bord des Weltraumteleskops SPITZER könnte der Nachweis und die spektroskopische Untersuchung von Scheiben um Braune Zwerge zur Routinebeobachtung werden. Mit einem Spektraltyp von M9.5 und einer Masse von etwa 15 Jupitermassen ist OTS 44 im Sternentstehungsgebiet Chamäleon I heute der kälteste und masseärmste Braune Zwerg, bei dem man eine zirkumstellare Scheibe gefunden hat. Unterdessen haben wir mit SPITZER eine ganze Reihe von Spektren von Braunen Zwergen aufgenommen, die auf große Staubteilchen und kristalline Silikate hinweisen.

Dynamische Massenbestimmung in Doppelsystemen

Eine der grundlegenden Eigenschaften eines astronomischen Objekts – sei es ein Planet, ein Stern, ein Sternhaufen oder gar ein Galaxienhaufen – ist seine Masse. Das »Wiegen« eines entfernten Objekts geschieht häufig mit Hilfe des dritten Keplerschen Gesetzes. Im Falle von Doppelsystemen kann man die dynamischen Massen bestimmen, indem man die Umlaufbahnen verfolgt und die Bahnparameter berechnet.

Im Jahre 1998 begannen Wolfgang Brandner (damals am JPL/Caltech) und Eduardo Martin vom IAC (damals Universität von Kalifornien in Berkeley), mit dem Weltraumteleskop HUBBLE ultrakühle Sterne und Braune Zwerge vom Spektraltyp L mit hoher räumlicher Auflösung zu untersuchen. Sie wollten Doppelsternbegleiter identifizieren, um dynamische Massen für die immer noch schwer erfassbare Klasse der Braunen Zwerge ableiten zu können. Des Weiteren erhofften sie, aus den beobachteten Eigenschaften – wie Multiplizität, Verteilung der Abstände in Doppelsternen und Helligkeitsverhältnis ihrer Komponenten – Aufschlüsse über den Ursprung frei fliegender Dop-

pelsysteme aus Braunen Zwergen gewinnen zu können.

Mit der Entdeckung des ersten räumlich aufgelösten L-Zwerg-Doppelsystems DENIS-P J1228.2-1547 war der Studie sofort Erfolg beschieden. Wie in der Doktorarbeit von Hervé Bouy (jetzt am IAC) zusammengefasst ist, sind inzwischen über 100 L-Zwerge überprüft worden, wobei mehr als 20 Doppelsysteme mit Winkelabständen zwischen 0.1 und 0.5 Bogensekunden (entsprechend projizierten Abständen zwischen 1 und 10 Astronomischen Einheiten) in der Sonnenumgebung identifiziert wurden.

Vermessung der Bahnen

Für alle Doppelsysteme wurden Nachfolgebeobachtungen durchgeführt, um ihre Bahnbewegung zu überwachen und erste Schätzungen ihrer Umlaufperioden abzuleiten. DENIS-P J1228.2-1547 erwies sich als ein relativ fernes, langsames Doppelsystem mit einer Umlaufperiode von rund 50 Jahren (Abb. 6). Das L-Zwerg-Doppelsystem 2MASSW J0746425+2000321, das im Jahr 2000 mit dem Weltraumteleskop HUBBLE entdeckt wurde, besitzt jedoch eine sehr viel kürzere Umlaufperiode. In den vergangenen vier Jahren haben wir seine Bahnbewegung mit HUBBLE, dem GEMINI-NORD-Teleskop, dem Very Large Telescope (VLT) der ESO und dem KECK-Teleskop verfolgt. Bis Januar 2004 waren über 60 Prozent der Bahn erfasst, einschließlich des Durchgangs des Systems durch sein Periastron (Abb. 7).

Die Bahnparameter ergeben, dass das System eine Exzentrizität von 0.4 hat, im Oktober 2002 sein Periastron passierte und eine Umlaufperiode von 10.5 Jahren aufweist. Somit hatten wir ziemlich Glück, das Doppelsystem während seines Periastrondurchgangs zu erwischen, wodurch wir mehr als 60 Prozent der Umlaufbahn in weniger als vier Jahren erfassen konnten.

Zusammen mit der genau bekannten Entfernung von 39.84 ± 0.16 Lichtjahren ergibt dies für das System eine Gesamtmasse von 0.146 Sonnenmassen. Spektroskopische und photometrische Messungen der einzelnen Komponenten liefern dann Schätzungen für die Masse jedes einzelnen Objekts. Die Hauptkomponente (mit Spektraltyp L0) erwies sich als sehr massearmer Stern mit etwa acht Prozent der Sonnenmasse, während das Sekundärobjekt (Spektraltyp L1.5) mit einer Masse von 6.6 Prozent der Sonnenmasse (entsprechend 69 Jupitermassen) eindeutig substellar ist. Aufgrund der in beiden L-Zwergen nachgewiesenen H α -Strahlung ließ sich das Alter des Systems auf 150 bis 500 Millionen Jahre schätzen. Der Vergleich mit Entwick-



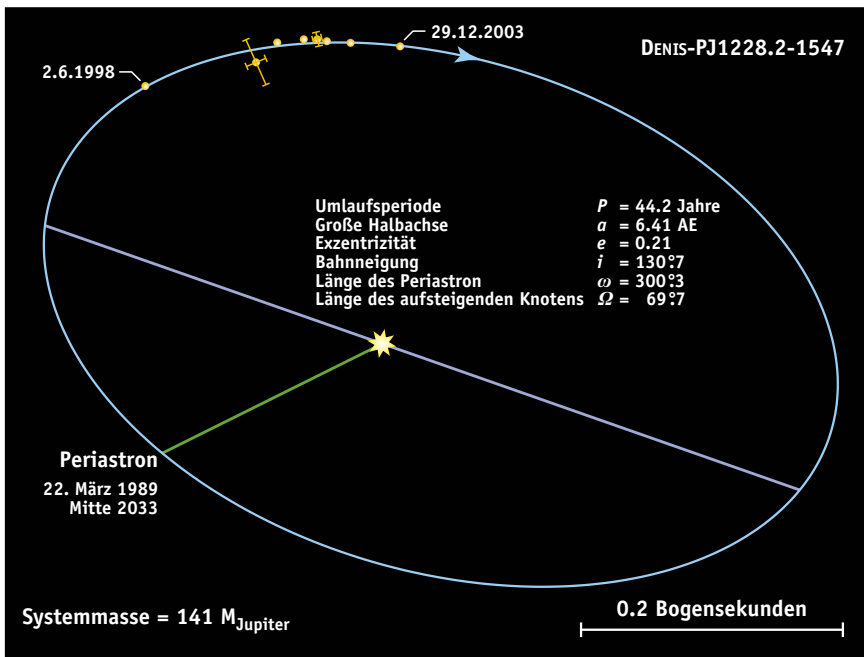
Bei uns sind Sie umfassend und aktuell informiert. Der Internetservice für Astronomie und Raumfahrt.

Calsky

Der Astrokalender im Internet, individuell konfigurierbar:

- Satelliten (z.B. ISS, Iridium)
- Planeten, Sonne und Monde
- Sonnen- & Mondfinsternisse
- Kometen, Asteroiden, Deep-Sky
- Polarlichtwarnungen
- Email-Warnservice

<http://www.calsky.com/>



▲ Abb. 6: DENIS-PJ1228.2-1547 ist ein System aus zwei Braunen Zwergen mit einer Umlaufperiode von rund 50 Jahren. Der Stern und die orangefarbenen Messwerte markieren die relativen Positionen der beiden Komponenten in der Zeit von Juni 1998 bis Dezember 2003. Darüber gezeichnet ist eine mögliche Bahn (blau) aufgrund der astrometrischen Daten. Die graue Linie ist die Knotenlinie, die grüne Linie zeigt den Ort des Periastrons.

▼ Abb. 7: Die Bahnbewegung des L-Zwerg-Doppelsystems 2MASS WJ0746425+2000321 konnte inzwischen fast über einen gesamten Umlauf beobachtet werden. Jeder Punkt auf der Ellipse entspricht einer Messung mit einem bodengebundenen Teleskop oder dem Weltraumteleskop HUBBLE.

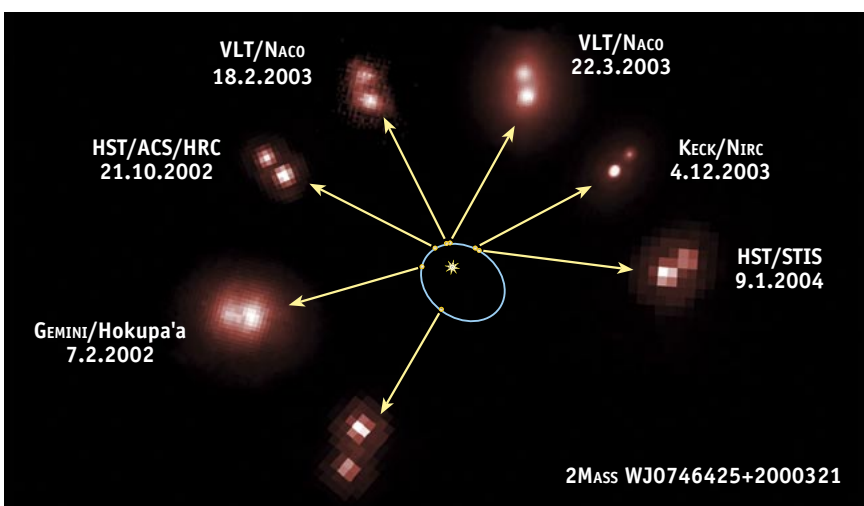
lungsmodellen, den Isabelle Baraffe von der École Normale Supérieure in Lyon mit ihrer Gruppe durchgeführt hat, zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Beobachtungen.

In jüngster Zeit beobachteten Forscher des MPI für Astronomie zusammen mit Laird Close vom Steward Observatory in Tucson (Arizona) das rund 40 Millionen Jahre alte Vielfachsystem AB Doradus. Aufgrund astrometrischer VLBI-Daten und Messungen mit dem Satelliten HIPPARCOS war bereits bekannt, dass es einen substellaren Begleiter besitzt. Mittels Aufnahmen mit hohem Kontrast – gewonnen mit adaptiver Optik am VLT – gelang es diesem Team zum ersten Mal, diesen Begleiter namens AB Doradus C direkt abzubilden und ein Spektrum aufzunehmen, das auf den Spektraltyp M8 hinweist. Aus der Kombination der Daten ergibt sich eine dynamische Masse von etwa 87 Jupitermassen. Nach dem Vergleich mit theoretischen Entwicklungsmodellen scheint dieses Objekt knapp die Hälfte der

erwarteten Leuchtkraft zu haben. Anders ausgedrückt: Für dieses relativ junge Alter unterschätzen die Modelle die Masse eines Objekts gegebener Leuchtkraft um einen Faktor 2. Folglich könnten einige sehr kühle Objekte, die als »Objekte planetarer Masse« bezeichnet wurden, in Wahrheit größere Massen aufweisen.

Als Nebenprodukt unserer Suche nach jungen Gasplaneten mit Hilfe des neuartigen Spectral Differential Imager (Gerät für spektrale differenzielle Abbildungen) am NACO-Instrument am VLT entdeckten wir zusammen mit Mark McCaughrean vom Astrophysikalischen Institut Potsdam (jetzt an der Universität Exeter), dass Epsilon Indi B, der uns am nächsten gelegene T-Zwerg, ebenfalls ein Doppelsystem ist. Beide Komponenten weisen eine Methanatmosphäre auf und gehören zur Spektralklasse T1 beziehungsweise T6, entsprechend ihren Effektivtemperaturen von etwa 1250 und 800 Kelvin (Abb. 8). Die besten Massenabschätzungen, abgeleitet aus dem Vergleich mit theoretischen Entwicklungswegen, ergeben 44 und 28 Jupitermassen. Somit ist die Sekundärkomponente des Doppelsystems Epsilon Indi B doppelt so massereich wie die Massengrenze zwischen Riesenplaneten und Braunen Zwergen.

Unsere fortlaufenden Überwachungen der Bahnbewegungen von Doppelsystemen aus Braunen Zwergen sollten in naher Zukunft Massenabschätzungen für eine größere Zahl von Braunen Zwergen und somit noch strengere Einschränkungen für theoretische Struktur- und Entwicklungsmodelle liefern. Micaela Stumpf, Doktorandin am MPI für Astronomie, analysiert zurzeit die Daten eines HUBBLE-Programms, in dem bei den zwölf nächstgelegenen, isolierten, jungen L-Zwergen nach Begleitern mit planetarer Masse gesucht wird. Kürzlich konnten wir zusammen mit Hervé Bouy auch das erste L/T-Zwerg-Dreifachsystem (DENIS-PJ020529.0-115925) identifizieren.



Staub in der Atmosphäre beeinflusst die Spektralklasse

Die Atmosphären Brauner Zwerge sind sehr kühl, so dass sich dort viele Moleküle gebildet haben und sogar feste und flüssige »Staub«-Teilchen aus der Gasphase auskondensierten. Dies führt zu zwei drastischen Effekten. Erstens wird die Zustandsgleichung der Atmosphäre durch die Erhöhung der mittleren Molekülmasse verändert. Zweitens ändern sich die Opazitäten, was zur Folge hat, dass sich das Spektrum stark ändert. Wasser (und bei niedrigeren Temperaturen auch Methan) erzeugt tiefe Absorptionsbanden, während der Staub zu einer Rück erwärmung führt, die einen Großteil des Strah-

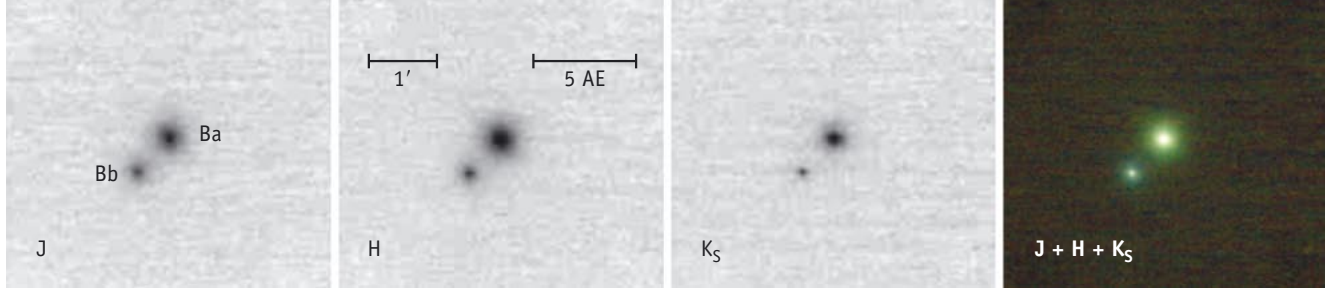
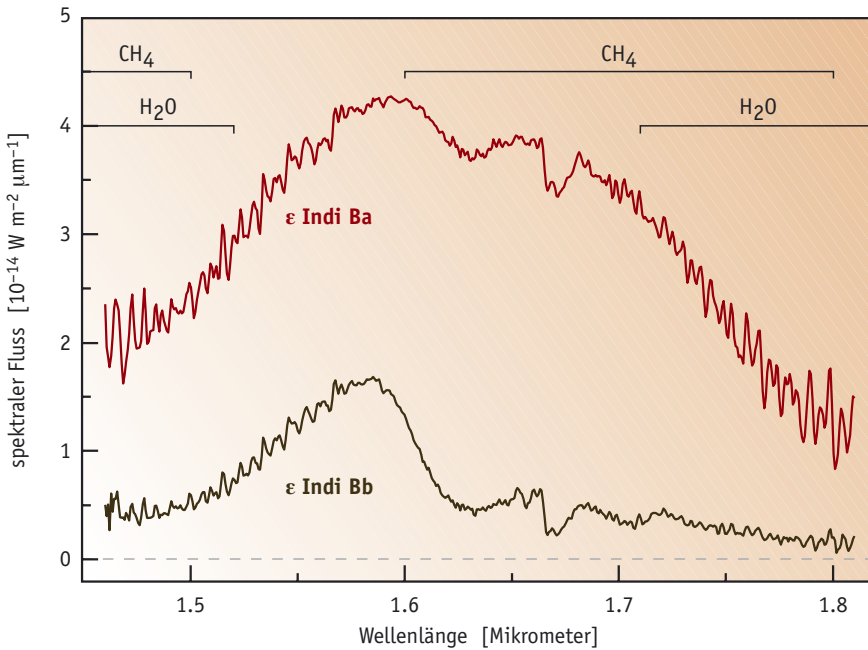


Abb. 8: Epsilon Indi B (oben in Direktaufnahmen) ist das uns am nächsten gelegene Doppelsystem aus Braunen Zwergen. Die Spektren beider Komponenten weisen Methan-Absorptionsbanden auf.

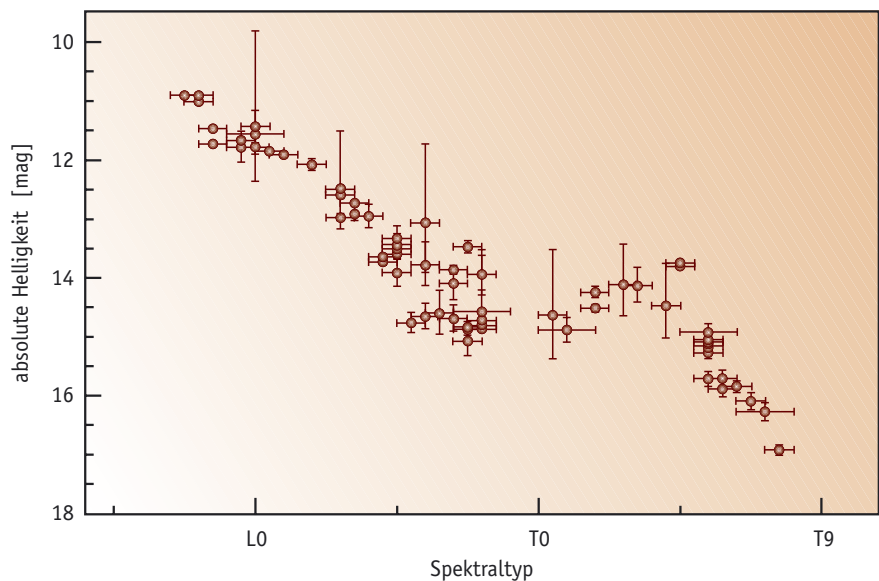
Abb. 9: Die Relation zwischen absoluter Helligkeit (hier im J-Band) und Spektralklasse verläuft bei ultrakühlen Zwergen nicht monoton. Der Anstieg der J-Band-Helligkeit beim Übergang von den späten L- zu den frühen oder mittleren T-Typen hängt vermutlich mit der Auflösung von Staubwolken bei diesen geringen Temperaturen zusammen. (Nach Vrba et al, AJ 127, 2948, 2004)



lungsfusses in den Nahinfrarotbereich des Spektrums umverteilt. Sehr breite Linien neutraler Alkalimetalle beeinflussen ebenfalls das Spektrum. Infolgedessen weicht es im Optischen und im nahen Infrarot von demjenigen eines Schwarzen Körpers deutlich ab.

Insbesondere der Staub ist aus zwei Gründen von großem Interesse. Um die Atmosphären von Braunen Zwergen korrekt modellieren und ihre beobachteten Spektren interpretieren zu können, ist eine geeignete selbstkonsistente Behandlung des Staubs nötig: Nur dann lassen sich die richtigen Parameter ableiten (vor allem die Effektivtemperatur, die chemischen Häufigkeiten und letztlich auch das Alter).

In der Tat haben neuere Messungen der Parallaxen von Braunen Zwergen und ihrer Strahlungsflüsse im mittleren Infrarot gezeigt, dass es keine monotone Relation zwischen den oben beschriebenen Spektralklassen L und T und der Effektivtemperatur gibt. Im Allgemeinen bringen wir spätere Spektralklassen mit kühleren Objekten in Verbindung, was für Hauptreihensterne auch zutrifft. Aufgrund des thermochemischen Gleichgewichts würden wir dementsprechend auch erwarten, dass die Sequenz L0, L1, L2, ... T0, T1, T2 ... immer niedrigeren Effektivtemperaturen entspricht. Doch dies ist offenbar nicht der Fall. Speziell beim Übergang von späten L- zu frühen oder mittleren T-Typen ist ein Anstieg der Effektivtemperatur zu beobachten (Abb. 9). Es scheint

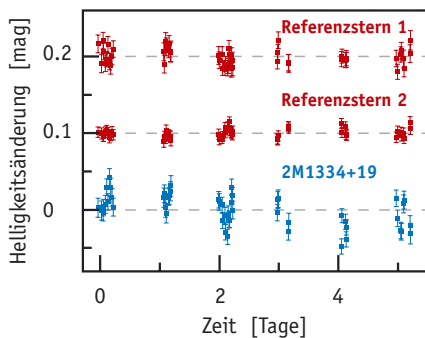


in der Tat so zu sein, dass diese Spektralklassen genauso viel mit den Staubeigenschaften zu tun haben wie mit den Effektivtemperaturen.

Um die Atmosphären der Braunen Zwerge zu verstehen, müssen wir demnach den Staub untersuchen. In einer statischen Atmosphäre (in der es keine Konvektion gibt) bilden sich Staubkörner, wachsen und lagern sich gravitativ in Regionen tief im Innern der Atmosphäre ab. Der direkten Beobachtung im Spektrum wären sie dann entzogen (obwohl das Fehlen von in Staubkörnern eingeschlossenen Elementen beobachtet würde). In einer dynamischen Atmosphäre hingegen wirkt die aufwärts gerichtete Konvektion

dem Niederregnen entgegen: Abgesunkene Elemente werden wieder nach oben in die sichtbare Atmosphäre gewirbelt, wodurch die staubreiche Zusammensetzung erhalten bleibt. Konvektion ist ein komplexer Prozess und wird von der Rotation des Himmelskörpers beeinflusst. Deshalb ist der Staub womöglich nicht gleichmäßig über die Oberfläche des Braunen Zwergs verteilt. Es könnten Bänder vorhanden sein, wie wir sie auf Jupiter sehen, oder großräumige, unbeständige und ungleichmäßig verteilte Wolken.

Obwohl wir Braune Zwerge (noch) nicht räumlich auflösen können, sollten sich Wolkenstrukturen anhand von Veränderung des Gesamtlichts nachweisen



▲ Abb. 10: Der L1.5-Zwerg 2M1334+19 zeigt im I-Band Helligkeitsschwankungen (blau). Um Störungen durch die Erdatmosphäre zu kompensieren, wurden gleichzeitig die Helligkeitsschwankungen von zwei Vergleichssterne im selben Feld beobachtet (rot, um 0.1 bzw. 0.2 mag nach oben verschoben).

lassen. Staub erhöht die optische Dichte und verändert deutlich das Spektrum. Während ein Brauner Zwerg rotiert, kann sich die Gesamtmenge des Staubs auf seiner uns zugewandten Hemisphäre ändern, so dass sich auch die von ihm in unsere Richtung ausgesandte Lichtmenge ändert. Mit anderen Worten: Wir würden in jenen Teilen des Spektrums, die vom Staub beeinflusst werden, eine periodische Helligkeitsänderung des Braunen Zwergs beobachten.

Diese Idee veranlasste Coryn Bailer-Jones und Reinhard Mundt (ebenfalls vom MPI für Astronomie), eine Reihe von Braunen Zwergen mit Rot- und Infrarotfiltern zu überwachen, um nach Helligkeitsvariationen zu suchen. Von den anfänglich zwanzig ausgewählten Objekten zeigte immerhin die Hälfte statistisch signifikante photometrische Schwankungen, allerdings mit sehr geringen Amplituden zwischen 0.5 und 8% (Abb. 10).

Einige dieser Schwankungen waren periodisch, mit Perioden von wenigen Stunden. Doch in anderen Fällen verliefen sie unregelmäßig. Könnte es sein, dass jene Braunen Zwerg sehr langsam rotieren, sodass unsere begrenzte Beobachtungsdauer noch nicht einmal eine einzige Rotationsperiode überdeckt hatte?

Um dies zu überprüfen, maßen wir mit Hilfe des hochauflösenden Spektrographen UVES am VLT die Rotationsgeschwindigkeiten einiger Brauner Zwerg. Rotation verbreitert die Spektrallinien. Durch sorgfältige Messung der Linienbreite lässt sich somit die Rotationsgeschwindigkeit messen. Die Beobachtungen zeigten, dass unsere Objekte sehr rasch rotieren. Unsere Überwachung hätte also eine Periodizität in den Helligkeitsschwankungen entdecken müssen.

Immerhin hatten wir eine deutliche Variabilität beobachtet. Warum aber keine Periode? Die wahrscheinlichste Erklärung ist, dass die Schwankung nichtperiodisch ist. Das bedeutet, dass die Gebilde auf der Oberfläche des Braunen Zwerg zeitlich nicht stabil sind. Genauer: Sie sind weniger als eine Rotationsperiode lang stabil. Wir kennen Beispiele für so etwas: Die Sonnenflecken auf unserem Zentralgestirn sind üblicherweise nur für etwa eine Rotationsperiode stabil. Könnte es sich auf Braunen Zwergen genauso verhalten? Und welcher Art sind diese Oberflächengebilde? Sind es wirklich Staubwolken?

Um den physikalischen Grund für die Schwankungen zu untersuchen, hat Coryn Bailer-Jones ein Programm zur spektroskopischen Überwachung einer Reihe von Braunen Zwergen begonnen. Mit Hilfe neuester Atmosphärenmodelle haben wir Vorhersagen über die Art der Veränderungen getroffen, die wir aufgrund der Änderungen im Staub quer durch das Spektrum erwarten. Es zeigt sich, dass die bedeutsamsten Veränderungen im nahen Infrarot auftreten, und dass unsere Daten tatsächlich Veränderungen von Staubwolken bei Braunen Zwergen nahelegen.

Eine neue Spektralklasse Y?

Die Erforschung Brauner Zwerg lebt gerade aufregende Zeiten. Sie begann mit den ersten theoretischen Vorhersagen in den 1960er Jahren, gefolgt von detaillierten Modellrechnungen und der Entdeckung potenzieller Kandidaten Ende der 1980er und Anfang der 1990er Jahre, und schließlich von der sicheren Identifikation der ersten Braunen Zwerg im Jahre 1995. Im Laufe des vergangenen Jahrzehnts gab es beeindruckende Fortschritte bei ihrem Nachweis sowie ihrer Charakterisierung mittels Beobachtungen, wie auch Fortschritte bei theoretischen Entwicklungs- und Atmosphärenmodellen.

Ein Teil der spannendsten Untersuchungen findet im mittleren Infrarot statt, zum Beispiel mit dem Weltraumteleskop SPITZER, das von unschätzbarem Wert ist für die Erkundung von zirkumstellaren Scheiben sowie der Entstehung von Braunen Zwergen und ihren ersten Entwicklungsstadien: Dies wird von entscheidender Bedeutung sein bei der Beurteilung, wie viel diese mit der Sternentstehung gemein haben. Ebenso geben uns hoch aufgelöste Direktaufnahmen im nahen Infrarot Aufschluss über die Doppelsternnatur Brauner Zwerg und die Statistik massearmer Begleiter, darunter auch Objekte mit vielleicht nur wenigen Jupitermassen.

Tiefe Durchmusterungen mit Weitwinkelkameras werden zunehmend

lichtschwächere Populationen von Braunen Zwergen in der Galaxis aufspüren, sodass es uns möglich sein wird, ihre Entwicklung und den Einfluss ihrer Umgebung auf diese Entwicklung zu untersuchen. Theoretische Fortschritte bei Modellrechnungen von Staubwolken werden uns erlauben, die beobachteten Spektren besser zu interpretieren; und genauere Beobachtungen, darunter Überwachungen und hochauflösende Spektroskopie, werden weitere Erkenntnisse über ihre kühlen, komplexen Atmosphären liefern.

Während die Beobachtungen zu immer lichtschwächeren und masseärmeren Objekten vordringen, könnten wir schon bald eine neue Spektralklasse jenseits der kühlest T-Zwerg benötigen: für jene Objekte, deren Temperatur derjenigen von Jupiter ähnelt. Der Buchstabe Y wurde dafür schon reserviert. □



Coryn Bailer-Jones leitet am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe zur Erforschung der Eigenschaften und der Entstehung von

Braunen Zwergen. Zudem leitet er einen Teil der Datenauswertungskonsortiums für den Astrometrie-Satelliten GAIA, der ab etwa 2011 die Struktur und Entwicklung unserer Galaxis erkunden soll.



Wolfgang Brandner

entwickelte zunächst an der Universität Hawaii, dann bei der Europäischen Südsternwarte und seit 2003 am MPI für Astronomie Beobachtungsprogramme zur direkten Entdeckung extrasolarer Planeten und doppelter Brauner Zwerg.



Thomas Henning ist Direktor am Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg und leitet dort die Abteilung

Stern- und Planetenentstehung; zudem ist er Mitherausgeber unserer Zeitschrift »Sterne und Weltraum«.