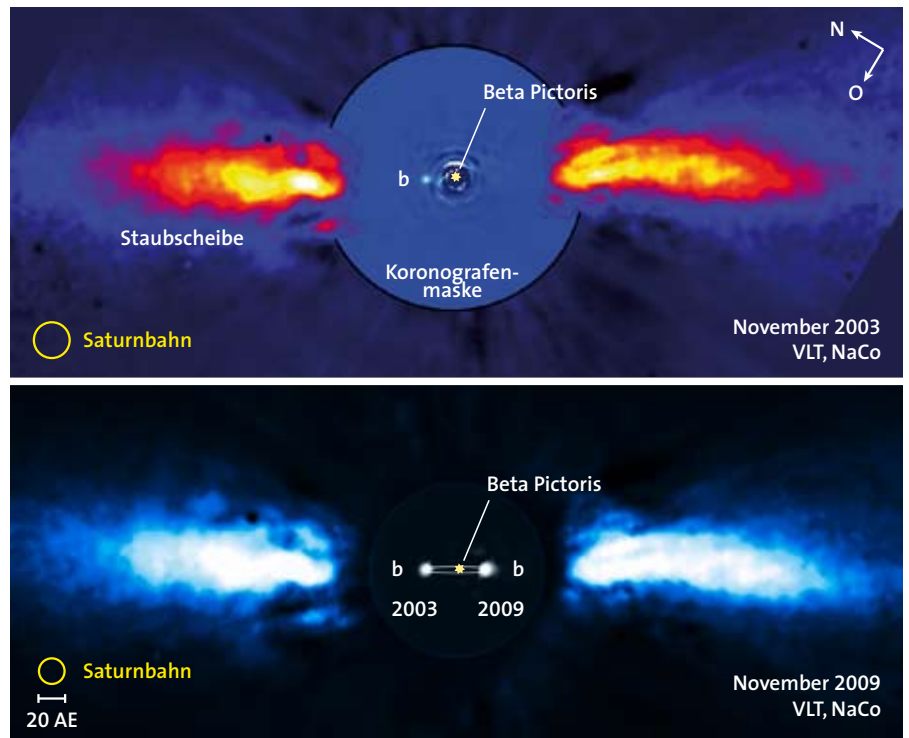


Im Jahr 2008 analysierten französische Astronomen nochmals ihre Aufnahmen von Beta Pictoris aus dem Jahr 2003 mit einer anderen Methode und fanden dabei ein Lichtpünktchen nordöstlich des Zentralsterns: Beta Pictoris b. Die Aufnahmen gelangen mit NaCo, einer Kamera mit adaptiver Optik am Very Large Telescope (VLT). Die Fotomontage (unten) zeigt Beta Pictoris b an zwei Positionen. Der jeweils direkt abgebildete Planet befand sich im Jahr 2003 nordöstlich und im Jahr 2009 dann südwestlich von seinem Zentralstern. Der Gasriese umrundet seinen Zentralstern in einem Abstand von 8 bis 13 Astronomischen Einheiten (AE); das entspricht ungefähr der Entfernung des Saturn zur Sonne.



ESO / Anne-Marie Lagrange

Gasplanet bei Beta Pictoris fotografiert

Astronomen gelang es zum ersten Mal, den Weg eines extrasolaren Planeten von einer Seite auf die gegenüberliegende Seite seines Zentralsterns direkt zu verfolgen. Es sind die ersten Direktaufnahmen eines Exoplaneten, der so nahe um seinen Zentralstern kreist wie der Saturn um die Sonne.

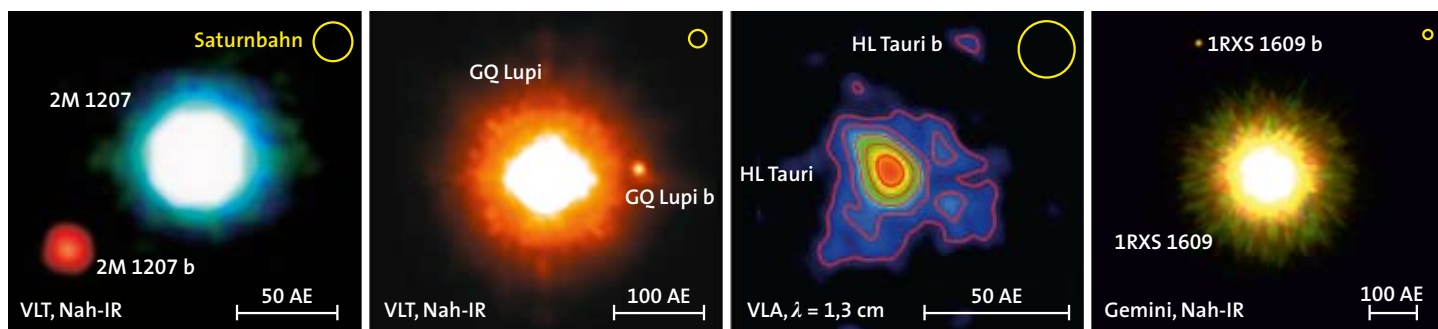
Direktaufnahmen von extrasolaren Planeten faszinieren nicht nur professionelle Astronomen. Gelingt es zudem, ihr Licht zu spektroskopieren, so erschließt sich die chemische Zusammensetzung ihrer Oberflächen und Atmosphären. Damit lässt sich dann sogar herausfinden, ob auf ihnen Leben existieren könnte. Bisher gelangen jedoch nur wenige direkte Abbildungen (siehe die Bilder unten und den Kasten auf S. 28).

Direktaufnahmen im sichtbaren Licht sind kaum möglich, da die Planeten vom gleißenden Licht ihres Zentralsterns mil-

lionenfach überstrahlt werden. Im nahen Infrarotlicht ist die Aussicht auf Erfolg deutlich größer, weil der Helligkeitsunterschied dort erheblich geringer ausfällt. Während Sterne ihr Helligkeitsmaximum im sichtbaren Licht erreichen, strahlen Planeten hingegen im Infrarotbereich am stärksten. Je jünger und massereicher der Exoplanet ist, desto mehr Wärmestrahlung sendet er aus. Suchprogramme zur direkten Abbildung von Exoplaneten konzentrieren sich daher auf möglichst junge und nahe Sterne. Planeten, die ihren Zentralstern in großer Entfernung umrunden,

lassen sich mit dieser Methode naturgemäß am leichtesten abbilden. Allerdings müssen Astronomen stets nachweisen, dass die beiden Objekte tatsächlich durch ihre Schwerkraft miteinander verbunden sind und nicht nur wegen eines Projektionseffekts benachbart erscheinen. Gelegentlich entpuppte sich dabei ein Exoplaneten-Kandidat als Vorder- oder als Hintergrundobjekt wie im Fall von GJ 758 c.

Für kleine und mittlere Abstände des Planeten vom Stern eignet sich zur Suche nach Exoplaneten die Radialgeschwindigkeitsmethode. Mit ihrer Hilfe gelangen die



meisten Entdeckungen. Dabei verfolgen die Astronomen das Spektrum des Sterns über Tage bis Jahre, denn in dessen Spektrallinien spiegelt sich die Schwerkraftwirkung eines umlaufenden Planeten um den Zentralstern mit dem Rhythmus seiner Umlaufperiode wider. Forscher nutzen weitere Methoden zur Suche nach Exoplaneten, zum Beispiel den Mikrolinsen-Effekt. Dabei zieht ein Stern mit seinem Planeten vor einem weiter entfernt liegenden Stern vorüber und wirkt als Gravitationslinse. Es entsteht ein charakteristisches Flackern, das Rückschlüsse auf Masse und Größe der Objekte zulässt – allerdings bleibt es bei einer einzelnen Beobachtung. Mit diesen Methoden allein lässt sich aber noch nichts über die chemische Zusammensetzung des Planeten herausfinden.

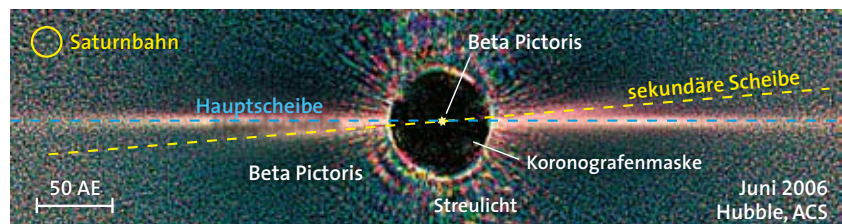
Anders verhält es sich bei der Beobachtung von Transits. Exoplaneten mit kleinen Bahnradien ziehen von der Erde aus gesehen periodisch vor ihrem Zentralstern vorbei, sofern wir von der Kante her auf die Bahn des Planeten blicken. Wegen der statistischen Verteilung ist dies allerdings nur für einen kleinen Bruchteil der Objekte erfüllt. Während des Transits schwächt der Exoplanet das Licht seines Zentralgestirns eine Zeitlang geringfügig ab und verrät sich durch diese Helligkeitsschwankung des Sterns. Bei einer geringen Zahl von Transitplaneten gelang es indirekt sogar, aus der Differenz bei unterschiedlichen Bahn- und somit Beleuchtungsphasen das Spektrum des Exoplaneten zu ermitteln. Dabei handelte es sich durchweg um heiße Jupiter.

Beta Pictoris b

Die neueste Direktaufnahme eines Exoplaneten gelang nun mit Hilfe des Very Large Telescope (VLT) an der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile. Es ist ein Begleiter von Beta Pictoris (siehe Bilder links oben). Das ist der zweithellste Stern im Sternbild Maler (lateinisch: *Pictor*). Bei der Deklination von -51 Grad kann er nur

Zwei sich durchdringende Staubscheiben

Ein Forscherteam um David Golimowsky von der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland) beobachtete Beta Pictoris im Jahr 2006 mit dem Weltraumteleskop Hubble und dessen Advanced Camera for Surveys (ACS). Deren extrem hohe räumliche Auflösung enthüllte, dass die verbogene Staubscheibe aus zwei gegeneinander geneigten und sich durchdringenden Staubscheiben besteht, die auf älteren Bildern nicht aufgelöst waren. Die kleinere, schwächere Staubscheibe ist gegenüber der großen, dichteren Scheibe um rund vier Grad geneigt und erstreckt sich mindestens bis 260 Astronomische Einheiten vom Stern. Dies deutete nach Ansicht der Forscher auf einen sich bildenden Planeten oder Braunen Zwerg mit einer Masse von einer bis 20 Jupitermassen hin.



NASA / ESA / David Golimowsky

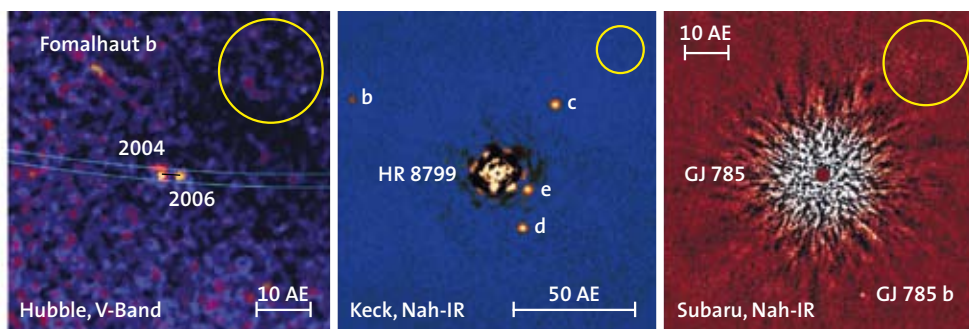
südlich des 39. Breitengrads über den Horizont steigen. Beta Pictoris besitzt 1,75 Sonnenmassen, steht 63 Lichtjahre von der Erde entfernt und ist mit einem Alter von zwölf Millionen Jahren noch sehr jung. Sein Begleiter Beta Pictoris b ist ein Gasriese mit der neunfachen Masse des Jupiter, der seinen Zentralstern in einem Abstand von 8 bis 13 Astronomischen Einheiten umläuft – vergleichbar mit der Entfernung, in dem sich Saturn um die Sonne bewegt. Bisherige Direktaufnahmen gelangen nur von Exoplaneten in deutlich größerem Abstand von ihrem Zentralstern (siehe Grafik S. 28).

Bereits vor 30 Jahren hätten Astronomen der Sternwarte Genf als Entdecker des ersten extrasolaren Planeten in die Geschichte eingehen können. Sie überwachten seit 1975 die Helligkeit von Beta Pictoris, und an zwei Tagen im Jahr 1981 wurde diese unerklärlicherweise schwächer. Schon damals vermuteten die französischen Astronomen, dass es sich dabei um ei-

nen Planeten handeln könnte, der vor dem Stern vorbeizog. Die damaligen Messungen passen tatsächlich gut mit den neuen Aufnahmen zusammen. Es handelte sich wahrscheinlich um genau denselben Planeten, der seinen Zentralstern mit einer noch unsicheren Umlaufdauer zwischen 17 und 35 Jahren umkreist. Trifft dies zu, so wäre der nächste Transit im Zeitraum zwischen 2013 und 2020 zu erwarten.

Verräterischer Staub

Schon in den 1980er Jahren stießen Astronomen auf indirekte Hinweise, dass insbesondere junge Sterne häufig von Staubscheiben umgeben sind. Da Staub das sichtbare Licht eines Sterns absorbiert und im infraroten Wellenlängenbereich wieder abgibt, verrät sich eine Staubscheibe über den so genannten Infrarotexzess. Körper besitzen einen gemäß ihrer Temperatur typischen Verlauf der abgestrahlten Energie – die Schwarzkörperkurve. Dies gilt sowohl für Sterne als auch für



Bilder von links nach rechts: ESO / ESO / University of St. Andrews / Gemini / Hubble / Herzberg Institute of Astrophysics / MPIA

In bislang acht Sonnensystemen ließen sich Exoplaneten abbilden. Die Aufnahmen sind in zeitlicher Reihenfolge von links nach rechts angeordnet. GQ Lupi b und GJ 758 b könnten sich noch als Braune Zwerge herausstellen und im Fall von HL Tauri b ist weiterhin fraglich, ob es sich überhaupt um einen Planeten handelt.

die deutlich kühleren Staubscheiben. Im Infraroten summiert sich zur Helligkeit des Sterns diejenige der Staubscheibe und sorgt für eine in diesem Spektralbereich überhöhte Gesamthelligkeit – den Infrarotexzess.

Im Jahr 1984 entdeckten Forscher mit Hilfe des ersten Infrarotsatelliten IRAS um den jungen A3-Hauptreihenstern Beta Pictoris, der durch seinen Infrarotexzess aufgefallen war, eine solche Scheibe – damals eine Sensation. Sie erstreckt sich über mehr als 400 Astronomische Einheiten zu beiden Seiten des Sterns (siehe Bilder S. 26 und 27). Seither galt Beta Pictoris als ers-

tes Indiz dafür, dass sich auch um andere Sterne Planeten bilden könnten. Denn wo eine Staubscheibe existiert, so glaubte man, da sind Planeten nicht fern. Aufnahmen des Weltraumteleskops Hubble aus den Jahren 1995 und 1997 lassen Verzerrungen und Ausbeulungen in der Staubscheibe erkennen. Dies werteten die Astronomen als verräterische Zeichen für eine Störung durch die Schwerkraft eines unsichtbaren Objekts (siehe SuW 4/1996, S. 256, sowie 8/2006, S. 10).

Hubble-Aufnahmen aus dem Jahr 2006 enthüllten zudem, dass die Staubscheibe in Wirklichkeit aus zwei gegeneinan-

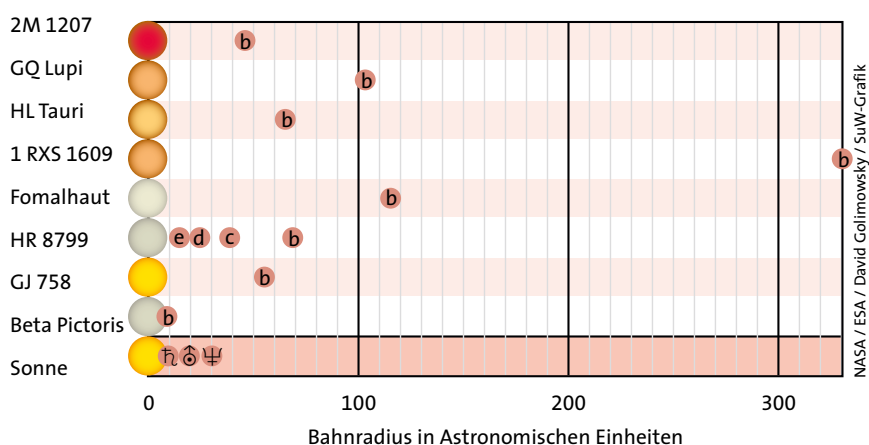
der geneigten und sich durchdringenden Scheiben besteht, die auf den älteren Bildern nicht aufgelöst waren (siehe Bild S. 27). Die kleinere, schwächer leuchtende Staubscheibe ist gegenüber der großen, dichteren Scheibe um etwa vier Grad geneigt und erstreckt sich über mindestens 260 Astronomische Einheiten. Die beste Erklärung für diese Beobachtung ist ein sich bildender Planet oder Brauner Zwerg mit einer Masse von bis zu 20 Jupitermassen, der den Stern in einer gegenüber der Hauptscheibe geneigten Bahn umläuft. Er wirkt dabei mit seiner Schwerkraft auf die Materie der Hauptscheibe ein und zieht sie aus ihr heraus, so dass sie sich allmählich entlang der Bahnebene des Planeten ansammelt. Auch in unserem Sonnensystem gibt es einen Planeten, der sich auf einer geneigten Umlaufbahn bildete: Merkur umläuft die Sonne auf einer um sieben Grad gegen die Ekliptikebene gekippten Bahn.

Messungen mit der mit einem adaptiven optischen System ausgerüsteten Infrarotkamera NaCo am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO in Chile lieferten schließlich den endgültigen Beweis. Aufnahmen aus dem Jahr 2003 ließen nordöstlich von Beta Pictoris bereits einen schwach leuchtenden Punkt innerhalb der zirkumstellaren Staubscheibe erkennen. Zu dieser Zeit konnten Forscher jedoch noch nicht ausschließen, dass es sich um ein anderes Objekt vor oder hinter dem Stern handelte. Im November 2008 befand sich der leuchtende Punkt immer noch auf der nordöstlichen Seite. Aber Anfang 2009 war er dann verschwunden. Er tauchte allerdings Ende 2009 auf der südwestlichen Seite des Sterns wieder auf (siehe Bild S. 26).

Im Zusammenhang mit den vorherigen Beobachtungen beweisen die beiden Direktaufnahmen eindeutig, dass das Objekt gravitativ an den Stern Beta Pictoris gebunden ist. Anfang 2009 befand sich der Exoplanet demnach entweder hinter seinem Zentralstern, oder aber in einem solch geringen Winkelabstand, dass er sich auf den mit adaptiver Optik errungenen Aufnahmen nicht auflösen ließ. Beta Pictoris b besitzt genau die richtige Masse und eine passende Umlaufdauer, um die erwähnten Verzerrungen in der Staubscheibe zu erklären. Somit können zukünftig auch andere, ähnliche Beobachtungen zur Vorhersage von Exoplaneten dienen.

Direkt abgebildete Exoplaneten

Die Grafik unten enthält die wenigen Exoplaneten-Kandidaten, von denen bisher direkte Abbildungen gelungen sind. Sie sind in der Reihenfolge ihrer Entdeckung von oben nach unten aufgeführt und gemäß ihrer Bahnradialen entlang der horizontalen Achse aufgetragen. Beta Pictoris b hält dabei den Rekord mit dem geringsten Bahnradius, der etwa demjenigen des Saturn entspricht. Die Farbe der Sterne entspricht ihrem Spektraltyp. Wegen ihrer doch recht großen Masse könnten sich die Kandidaten GQ Lupi b und GJ 758 b möglicherweise noch als Braune Zwerge entpuppen. Auch HL Tauri b ist ein unsicherer Kandidat, dessen mögliches Alter von gerade mal 1600 Jahren ihn eher zum Proto- denn zum Exoplaneten macht.



Exoplaneten mit direkter Abbildung

Planet	Masse in Jupitermassen	Bahnradius in Astronomischen Einheiten	Monat und Jahr der Entdeckung
2M 1207 b	4	46	9/2004
GQ Lupi b*	21,5	103	3/2005
HL Tauri b**	~14	65	4/2008
1 RXS 1609 b	8	~330	9/2008
Fomalhaut b	<3	115	11/2008
HR 8799 b/c/d	7/10/10	68/38/24	11/2008
GJ 758 b*	10–40	~55	11/2009
HR 8799 e	9	14,5	6/2010
Beta Pictoris	9	8–13	6/2010

* Wegen ihrer möglicherweise zu großen Masse könnte es sich bei GQ Lupi b und GJ 758 b auch um Braune Zwerge handeln. ** Im Radiobereich entdeckter Protoplanet.

ZUM NACHDENKEN

Staub von Beta Pictoris



Auf rund zwölf Millionen Jahre schätzen die Astronomen das Alter des Beta-Pictoris-Systems. Es ist noch voller Trümmer aus seiner Entstehungszeit, die in der zirkumstellaren Scheibe umlaufenden. Unser eigenes Sonnensystem dürfte in einigen Punkten große Ähnlichkeit mit ihm gehabt haben. Bei der Kollision größerer Körper entstehen beim $d = 19,44$ pc von uns entfernten Stern Beta Pictoris große Mengen kleiner und kleinster Körnchen. Ein Teil von ihnen entfernt sich mit großer Geschwindigkeit vom Kollisionsort.

An dieser Stelle kommt AMOR ins Spiel, das *Advanced Meteor Orbit Radar* in Neuseeland. Die Einrichtung verfolgt mit Hilfe von Radarechos das Eintreten kleiner Staubpartikel in die Erdatmosphäre und gewinnt daraus Aussagen über deren Herkunft. In ihrer Veröffentlichung aus dem Jahr 2000 benennen die Forscher einen gut definierten Teilchenstrom interstellaren Ursprungs, dessen Quelle sie mit Beta Pictoris identifizieren.

Aufgabe 1: Die AMOR-Forscher geben für die aus der zirkumstellaren Scheibe

von Beta Pictoris austretenden Teilchen eine (dortige) Geschwindigkeit von $v_{ej} = 29$ km/s an. Die Raumgeschwindigkeit des Beta-Pictoris-Systems beträgt $v_{\beta Pic} = 3,26$ km/s und die Richtung der Bewegung ist um den Winkel $\theta = 19^\circ$ gegen die Sichtlinie zu Beta Pictoris verschoben. Die Relativgeschwindigkeit v_{Staub} der Teilchen im Bezug auf die Sonne lässt sich dann mit Hilfe der folgenden Gleichung ermitteln:

$$v_{Staub} = v_{\beta Pic} \cdot \cos(180^\circ - \theta) + v_{ej}$$

Wie groß ist diese Relativgeschwindigkeit der Teilchen?

Aufgabe 2: Wie lange benötigen die Partikel, um die Strecke von Beta Pictoris zu unserem Sonnensystem zurückzulegen? 1 pc = 1 AE/tan($1^\circ/3600$), 1 AE = $149,6 \cdot 10^6$ km. AMQ

Ihre Lösungen senden Sie bitte bis zum **15. März 2011** an: Redaktion SuW – Zum Nachdenken, Max-Planck-Institut für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg. Fax: 06221 528246.

Einmal im Jahr werden unter den erfolgreichen Lösern **Preise** verlost: siehe S. 115

Die Entdeckung von Beta Pictoris b ermöglicht auch die Überprüfung verschiedener Theorien zur Entstehung von Riesenplaneten und ihrer Wechselwirkung mit der Staubscheibe. Beispielsweise sagt die so genannte Kalter-Start-Theorie voraus, dass junge Gasriesen wie Beta Pictoris b eine deutlich geringere Helligkeit besitzen sollten, als nun tatsächlich beobachtet wurde. Demnach überschätzt diese Theorie die Energiemenge, die bei der Entstehung von Planeten verlorengeht.

Die meisten bisher identifizierten Riesenplaneten fanden sich bei älteren Sternen, während Beta Pictoris b um einen nur zwölf Millionen Jahre jungen Stern kreist. Wie sich Planeten in einem so kurzen Zeitraum bilden können, wird derzeit erforscht. Computersimulationen führen zu der Vorhersage, dass sich Staubscheiben um junge Sterne innerhalb von wenigen Millionen Jahren auflösen. Da neugebo-

renen Planeten somit rasch das Material ausgeht, muss die Planetenbildung innerhalb dieses Zeitraums abgeschlossen sein. Die Aufnahmen von Beta Pictoris b liefern den direkten Beweis dafür, dass Riesenplaneten schon innerhalb dieser vergleichsweise kurzen Zeit entstehen können.

MANUELA KUCHAR ist Physikerin und freie Wissenschaftsjournalistin.

Literaturhinweise

Lagrange, A.-M. et al.: A giant planet imaged in the disk of the young star Beta Pictoris. In: Science 329, S. 57–59, 2010

Lecavelier des Etangs, A. et al.: Is β Pictoris b the transiting planet of November 1981? In: Astronomy & Astrophysics 497, S. 557–562, 2009

ED-Apochromaten:



	ED 80	ED 102	ED 127
Öffnung:	80 mm (3,1")	102 mm (4")	127 mm (5")
Brennweite:	480 mm	700 mm	952,5 mm
Fotografische Blende:	f/6	f/7	f/7,5
Auflösungsvermögen:	1,45"	1,14"	0,9"
Max. Grenzgröße:	12,0 MAG	12,5 MAG	13,0 MAG
Max. sinnvolle Vergrößerung:	160-fach	210-fach	255-fach
Bildfeld im APS-C Format**:	2,86° x 1,9°	1,9° x 1,2°	1,44° x 0,96°
Tubuslänge (inkl. Taukappe):	48 cm	78 cm	99 cm
Gewicht:	3,4 kg	5,8 kg	9,9 kg
Optisches Design:	3 Linsen mit Luftspalt und ED-Element		
Vergütung der Linsen:	EMD™ (Enhanced Multilayer Deposition)		
Glasmaterial Objektivlinse:	HOYA® ED Glas - Dichte Fluor Kronglas FCD1		
Preis:	979,- €* 1.499,- €* 1.849,- €* 1.849,- €* 1.849,- €*		
Lieferumfang:	Optischer Tubus; Prismenschiene mit Klemmschrauben für Rohrschelle (nur ED 102 & ED 127); 1:10 Okularauszug; 2" Zenitspiegel; 25mm Weitwinkelokular mit 70° scheinbarem Gesichtsfeld; Tauschutzkappe; # Staubschutzdeckel; T-2 Bildfeldebner mit Canon EOS oder Nikon T2-Ring; Stabiler Transportkoffer		



Star Power!



100° Okulare:

	9mm	14mm	20mm
Brennweite:	12,5mm	14,5mm	14,4mm
Augenabstand:	100°	100°	100°
Scheinb. Gesichtsfeld:	15,7mm	24,4mm	34,8mm
Feldblende (virtuell):	9	9	9
Optische Elemente:	680g	890g	990g
Gewicht:	120,0mm	123,5mm	122,5mm
Höhe:	59,0mm	69,0mm	69,0mm
Durchmesser:	Kombination aus: Schwerkron, Leichtkron, Schwerflint, und Lanthan Gläser		
Optisches Material:	EMD™ (Enhanced Multilayer Deposition)		
Vergütung:	schwarz eloxiertes Aluminium;		
Gehäuse:	Abgedichtet; Stickstoffgefüllt		
Steckfassung:	2" (50,8mm), Edelstahl,		
Sonstiges:	Königliche Sicherungsnut		
	Laserbeschriftung mit Seriennummer;		
	Gummiarmierte Grifffläche;		
	Gummiaugenmuschel umklappbar;		
	Gewinde für Standard 2" Filter		

Preis: 399,- €* 439,- €* 519,- €* 519,- €*

EXPLORE
SCIENTIFIC

MEADE Instruments Europe GmbH & Co. KG
Gutenbergstraße 2 • 46414 Rhede/Westf.

Tel.: (0 28 72) 80 74 - 300 • FAX: (0 28 72) 80 74 - 333
Internet: www.meade.de • E-Mail: info.apd@meade.de