

# Max-Planck-Institut für Astronomie Heidelberg-Königstuhl



# Jahresbericht 2016

**Titelbild:**

Diese verkleinerte Ansicht des gesamten Himmels, der vom Standort des Pan-STARRS Observatoriums auf Hawaii sichtbar ist, ist das Ergebnis einer halben Million Aufnahmen mit jeweils etwa 45 Sekunden Belichtungszeit über einen Zeitraum von vier Jahren. Die Form ergibt sich aus der Darstellung der Himmelskugel als zweidimensionale Karte, ähnlich einer Weltkarte, wobei das südliche Viertel weggelassen wurde. Die Scheibe der Milchstraße ist als gelblicher Bogen zu sehen, der Staub erscheint als rötlichbraune Filamente. Der Hintergrund besteht aus Milliarden von schwachen Sternen und Galaxien. Würde das Bild in voller Auflösung gedruckt, wäre es mehr als zwei Kilometer lang; gleichzeitig müsste man sehr genau hinsehen, um alle Details zu erkennen. Siehe Kapitel II.2, Seite 24.

Quelle: Danny Farrow, Pan-STARRS1 Science Consortium und Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

# Max-Planck-Institut für Astronomie

Heidelberg-Königstuhl



## Jahresbericht

# 2016

## Max-Planck-Institut für Astronomie

*Wissenschaftliche Mitglieder, Kollegium, Direktoren:*

Prof. Thomas Henning (Geschäftsführender Direktor)

Prof. Hans-Walter Rix (Direktor)

*Wissenschaftlicher Referent:*

Dr. Klaus Jäger (Telefon: +49 6221 528 379)

*Öffentlichkeitsarbeit (Leitung), Haus der Astronomie (Leitung):  
Verwaltung (Leitung):*

Dr. Markus Pössel (Telefon: +49 6221 528 261)

Mathias Voss (Telefon: +49 6221 528 230)

*MPIA-Observatorien:*

Dr. Roland Gredel (Telefon: +49 6221 528 264)

*Emeritierte Wissenschaftliche Mitglieder:*

*Ehemalige Wissenschaftliche Mitglieder:*

Prof. Immo Appenzeller, Heidelberg

Prof. Karl-Heinz Böhm, Seattle † 2. März 2015

Prof. Guido Münch, La Jolla

Prof. George H. Herbig, Honolulu † 12. Oktober 2013

*Auswärtige Wissenschaftliche Mitglieder:*

Prof. Steven V. W. Beckwith, Berkeley

Prof. Rafael Rebolo, Teneriffa

Prof. Willy Benz, Bern

Prof. Volker Springel, Heidelberg

*Fachbeirat:*

Prof. Dr. Edwin Bergin, Michigan

Dr. Philip John Huxley, Virginia

Prof. Dr. Kenneth Freeman, Canberra

Prof. Dr. Heike Rauer, Berlin

Prof. Dr. Rolf-Peter Kudritzki, Hawaii

Prof. Dr. Sabine Schindler, Innsbruck

Prof. Dr. Fred Lo†, Virginia

Prof. Dr. Peter Schneider, Bonn

Prof. Dr. Christopher McKee, Berkeley

*Kuratorium:*

Lars Lindberg Christensen, Garching

Stephan Plenz, Wiesloch

Prof. Dr. Reinhold Ewald, Stuttgart

Prof. Dr. Andreas Reuter, Heidelberger

Dr. Peter Hartmann, Mainz

Prof. Dr. Roland Sauerbrey, Dresden

Prof. Dr. Matthias Hentze, Heidelberg

Dr. Bernd Scheifele, Heidelberg

Dr. Caroline Liepert, Stuttgart

Prof. Dr. Andreas Tünnermann, Jena

Prof. Dr. Karlheinz Meier, Heidelberg

Dr. Markus Weber, Oberkochen

Dr. Wolfgang Niopek, Heidelberg

Dr. Bernd Welz, Walldorf

*Anschrift:* MPI für Astronomie, Königstuhl 17, D-69117 Heidelberg

*Telefon:* +49 6221 5280

*Fax:* +49 6221 528 246

*E-Mail:* sekretariat@mpia.de

*Internet:* www.mpia.de

## Calar-Alto-Observatorium

*Anschrift:* Centro Astronómico Hispano Alemán, Calle Jesús Durbán 2/2, E-04004 Almería

*Telefon:* +34 950 230 988, 0034 950 632 500

*Fax:* +34 950 632 504

*E-Mail:* info@caha.es

*Internet:* www.caha.es

## Arbeitsgruppe »Laboratorastrophysik«, Jena

*Anschrift:* Institut für Festkörperphysik der FSU, Helmholtzweg 3, D-07743 Jena

*Telefon:* +49 3641 947 354

*Fax:* +49 3641 947 308

*E-Mail:* cornelia.jaeger@uni-jena.de

---

© 2017 Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg

*Herausgeber:* Thomas Henning, Hans-Walter Rix

*Redaktion:* Markus Pössel

*Graphik-Redaktion:* Axel M. Quetz

*Lektorat/Korrektur:* Sigrid Brümmer, Markus Pössel, Axel M. Quetz

*Texte:* Ingrid Apfel (V.3), Wolfgang Brandner (III.3), Thomas Henning (II.1), Ralph Hofferbert (III.5), Klaus Jäger (V.1–2), Knud Jahnke (III.2), Oliver Krause (III.2), Martin Kürster (III.1, III.4, III.5), Markus Pössel (I, II.3–7, IV.1–3), Hans-Walter Rix (II.2); mit Beiträgen der unter den jeweiligen Texten als Ansprechpartner/Beteiligte angegebenen Mitarbeiter

*Listenteil:* Axel M. Quetz

*Graphiken und Layout:* Karin Meißner, Judith Neidel

*Druck:* Baier Digitaldruck, 69126 Heidelberg

Gedruckt im November 2017

ISSN 1437-2924; Internet: ISSN 1617-0490

# Inhalt

<b>Vorwort</b> .....	5	<b>IV. Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit</b> .....	87
<b>I. Das Institut im Überblick</b> .....	7	IV.1 Universitäre Lehre und Doktorandenförderung	88
Unsere Forschungsgebiete .....	8	IV.2 Wissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit .....	90
MPIA-Teleskope in aller Welt .....	10	IV.3 Haus der Astronomie .....	92
Weltraumteleskope .....	12	<b>V. Menschen und Ereignisse</b> .....	99
Infrastruktur .....	14	V.1 Auszeichnungen und Preise .....	100
MPIA in Zahlen .....	15	V.2 Besondere Events und Konferenzen .....	105
<b>II. Forschung: Abteilungen, Kooperationen, Highlights</b> .....	17	V.3 Beruf und Familie / Doppelkarrieren (Dual Career) / Work-Life-Balance .....	107
II.1 Planeten- und Sternentstehung .....	18	<b>VI. Anhang</b> .....	109
II.2 Galaxien im kosmologischen Kontext .....	24	VI.1 Mitarbeiter .....	110
II.3 Wissenschaftliche Initiativen .....	30	VI.2 Gästeliste .....	112
II.4 Extrem kalte Scheibe rund um jungen Stern bietet staubige Überraschung .....	32	VI.3 Tagungen, Vorträge .....	112
II.5 Big Data schreibt (galaktische) Geschichte: Die erste globale Alterskarte unserer Milchstraße	36	VI.4 Lehre und Service .....	116
II.6 Detailreiche Bilder eines planetaren Embryos zeigen Turboversion der Planetenentstehung ...	43	VI.5 Weitere Aktivitäten am Institut.....	119
II.7 Das versteckte Innenleben des Orionnebels: Tanzende Filamente und eine neuartige Möglichkeit der Sternentstehung .....	48	VI.6 Haus der Astronomie .....	120
II.8 Planet in habitabler Zone um erdnächsten Stern entdeckt .....	54	VI.7 Veröffentlichungen .....	124
II.9 Geschichte der Sternentstehung auf kosmischen Skalen .....	59	VI.8 Zusammenarbeit mit Firmen .....	145
<b>III. Instrumentierung und Technik</b> .....	65		
III.1 Instrumentierung für bodengebundene Astronomie .....	66		
III.2 Instrumentierung für Weltraumteleskope .....	71		
III.3 CIAO – Wellenfrontsensoren für das GRAVITY-Instrument .....	76		
III.4 Übersicht aktueller Projekte .....	80		
III.5 Technische Abteilungen .....	84		



## Vorwort

**E**in weiterer Umlauf um die Erde liegt hinter uns – ein weiteres Jahr voll spannender astronomischer Erkenntnisse und Entwicklungen am Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA). Fortschritte waren dabei wie in den letzten Jahren nicht nur bei unserem Verständnis der Entstehung von Galaxien, Sternen und Planeten zu verzeichnen, sondern auch bei Entwurf und Konstruktion einiger der fortschrittlichsten Instrumente für astronomische Teleskope am Boden und im Weltraum.

Mit diesem Jahresbericht möchten wir sowohl unseren Kollegen, als auch der allgemeinen Öffentlichkeit weitergehende Informationen über die Aktivitäten unseres Instituts liefern – von den wissenschaftlichen Highlights des Jahres über den aktuellen Stand unserer Instrumentierungsprojekte am Boden und im Weltraum, aber auch über unsere Aktivitäten im Bereich Öffentlichkeitsarbeit und akademische Ausbildung, sowie über wichtige Veranstaltungen und Auszeichnungen des vergangenen Jahres.

*Thomas Henning, Hans-Walter Rix*

Heidelberg, November 2017



# I. Das Institut im Überblick



## Unsere Forschungsgebiete: Galaxien und Kosmologie

**Galaxien** gibt es in verschiedenen Größen und Formen. Woher kommen diese Unterschiede? Und woraus ergibt sich, wieviele Sterne in einer Galaxie entstehen?

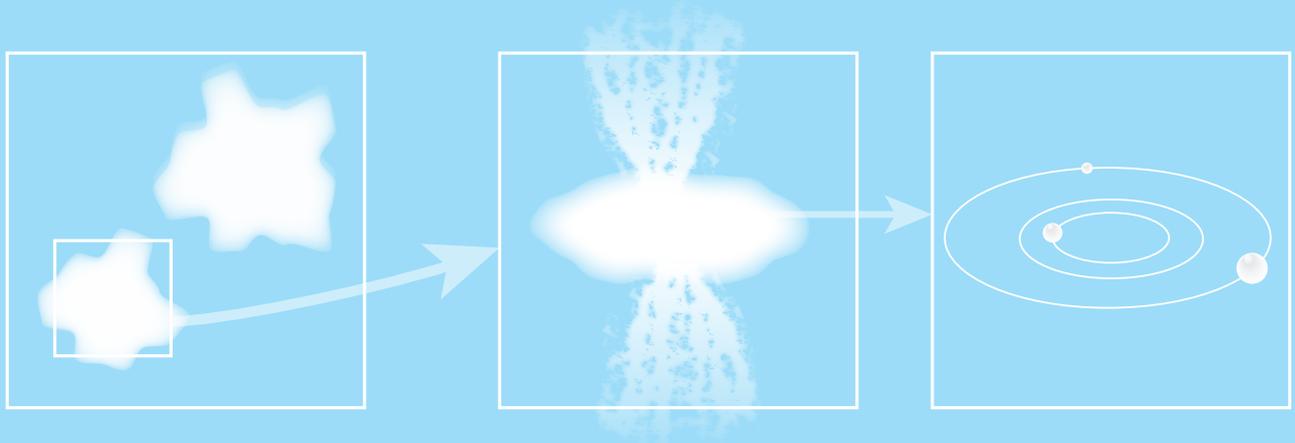
Unsere Heimatgalaxie, die **Milchstraße**, ist eine gigantische Spiralgalaxie mit mehreren hundert Milliarden Sternen. Hier können wir Sternentstehung und Strukturbildung von nahem beobachten und Daten sammeln, die beim Verständnis der Galaxienentwicklung insgesamt helfen.

In den Zentren der Galaxien befinden sich **supermassereiche Schwarze Löcher**. Wie hängt die Masse solcher Schwarzen Löcher mit der Gesamtmasse der Sterne der Galaxie zusammen – trotz der Größenordnungen, die dazwischen liegen? Wann und wie kommt es in der Umgebung Schwarzer Löcher durch Materieeinfall zu Prozessen, die für einige der hellsten Leuchtphänomene im Universum verantwortlich sind, für die Quasare?

**Galaxien wachsen**, wenn sie mit anderen Galaxien verschmelzen oder kleinere Galaxien verschlucken. Wie funktionieren diese Wachstumsprozesse im einzelnen? Wie beeinflussen sie die Eigenschaften der unterschiedlichen Galaxientypen?

Wie sind **Dunkle Materie** und Wasserstoffgas auf den größten kosmischen Skalen verteilt, über hunderte von Millionen Lichtjahre hinweg? Wie hängt die Verteilung mit der Entwicklung der Galaxien über die letzten Milliarden Jahre zusammen? Wie entstand die heutige reiche Struktur aus einem anfangs fast perfekt gleichförmigen Universum?

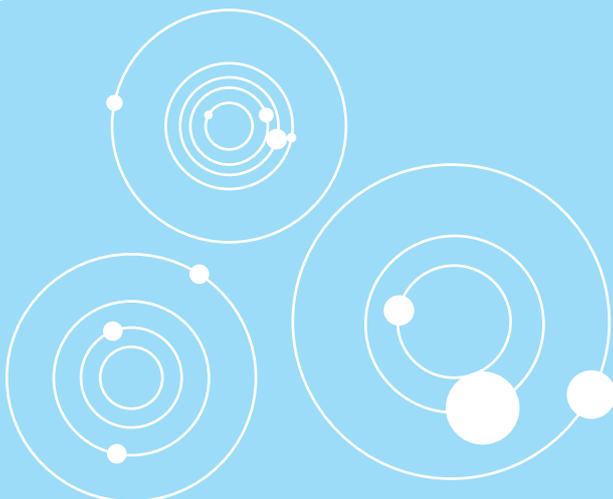
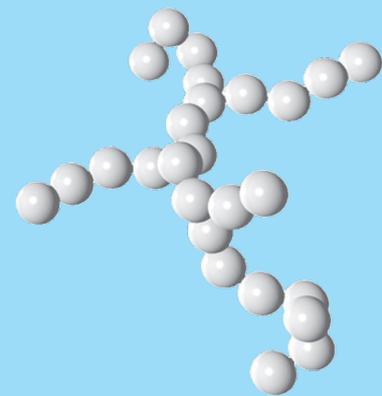
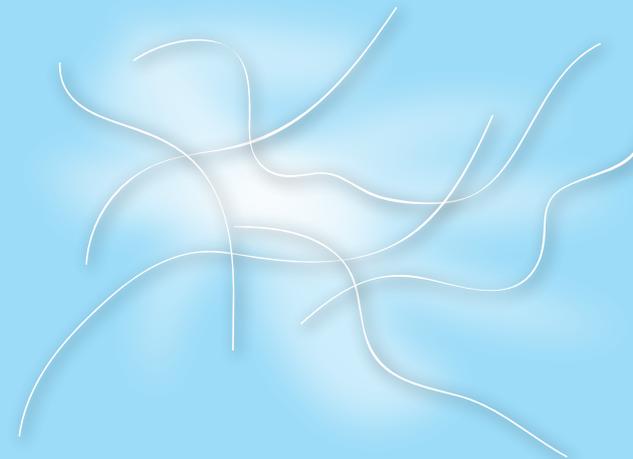
# Planeten- und Sternentstehung



**Sterne entstehen**, wenn überdurchschnittlich dichte Regionen kalter Gas- und Staubwolken unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Rund um einen jungen Stern entstehen aus einer wirbelnden Materiescheibe Planeten. Was passiert dort im einzelnen, und woraus ergibt sich die Vielfalt der beobachteten Planetensysteme?

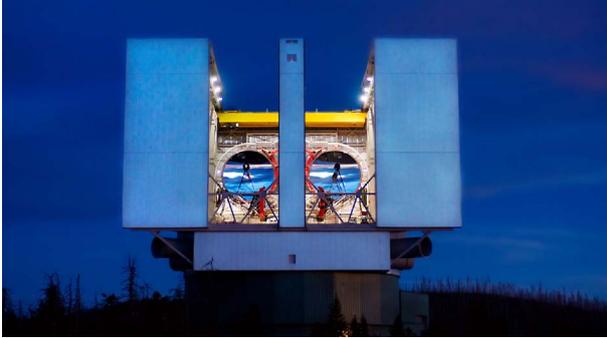
Wie beeinflussen **Magnetfelder**, welche der interstellaren Wolken kollabieren und Sterne bilden? Welche Rolle spielen **Turbulenzen** innerhalb dieser Wolken?

Welche sind die unterschiedlichen Phasen der **Planetenentstehung** – von winzigen zusammenklebenden **Staubkörnern** bis zu Objekten tausende Kilometer im Durchmesser? Was sagen uns Laborexperimente über die Eigenschaften kosmischen Staubs und darüber, wie man seine Eigenschaften nachweisen kann?



Seit 1995 haben Astronomen mehr als 3700 **Exoplaneten** nachgewiesen, also Planeten, die andere Sterne umkreisen als die Sonne. Was können diese vielfältigen Systeme uns über die Planetenentstehung verraten?

## MPIA-Teleskope in aller Welt



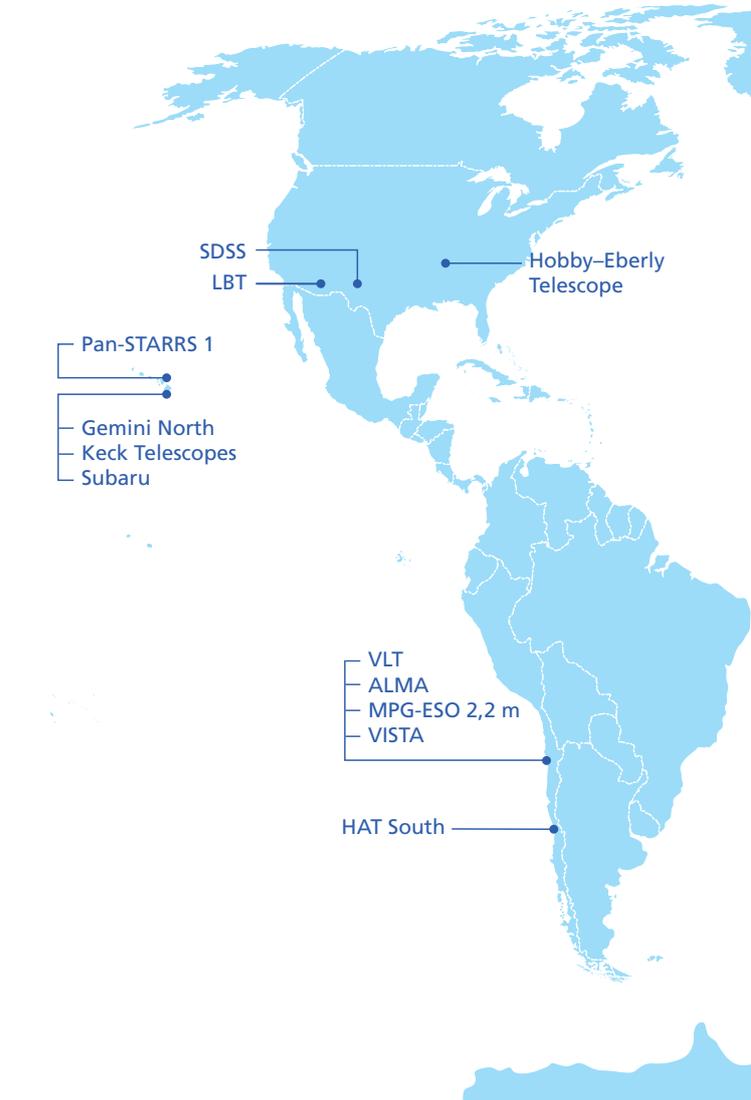
Das MPIA ist am Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham in Arizona beteiligt. Das LBT besitzt zwei 8,4-Meter-Spiegel auf einer Montierung.



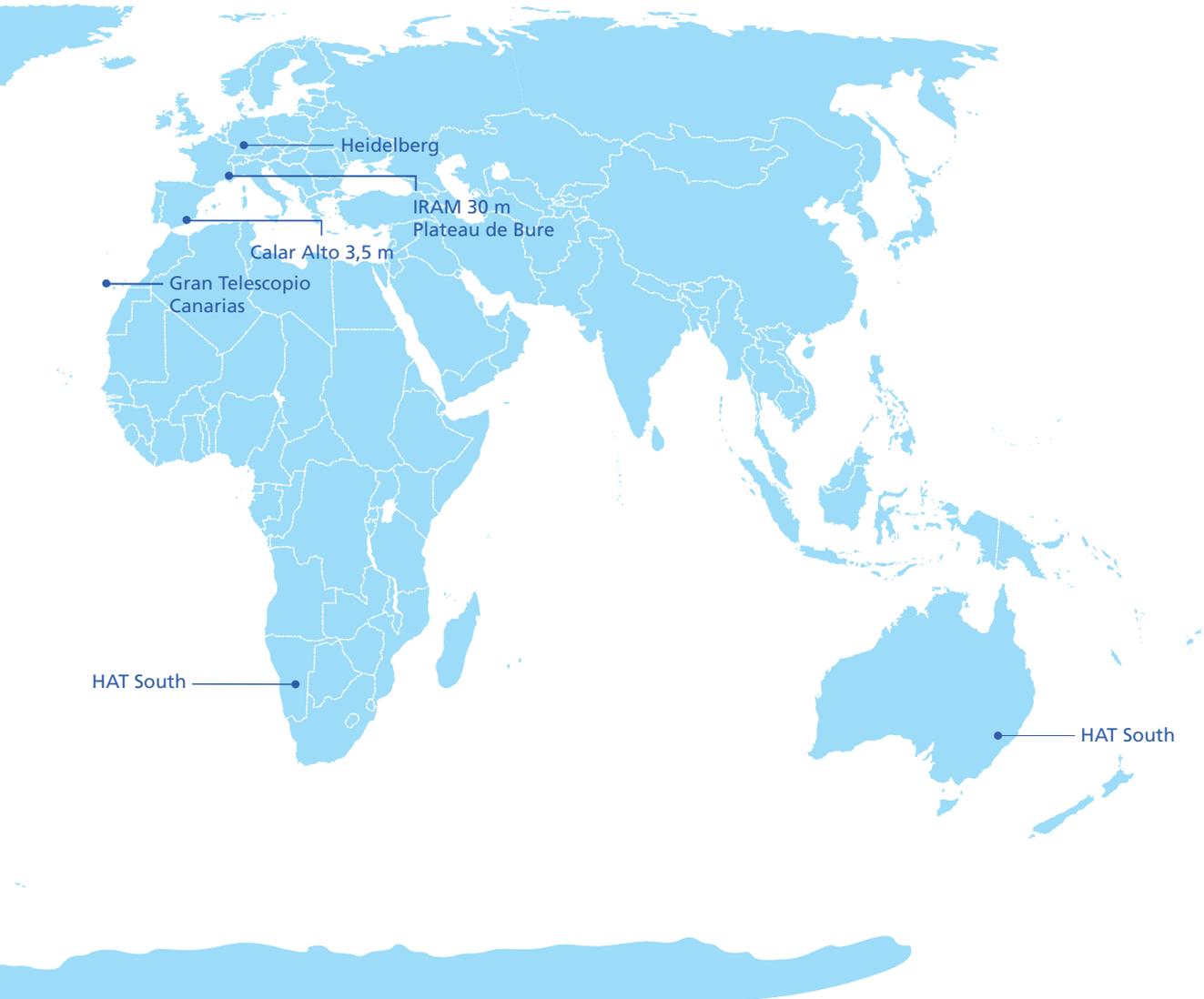
Für das Very Large Telescope der ESO am Paranal-Observatorium ist das MPIA an der Entwicklung der Instrumente SPHERE, MATISSE und GRAVITY beteiligt.



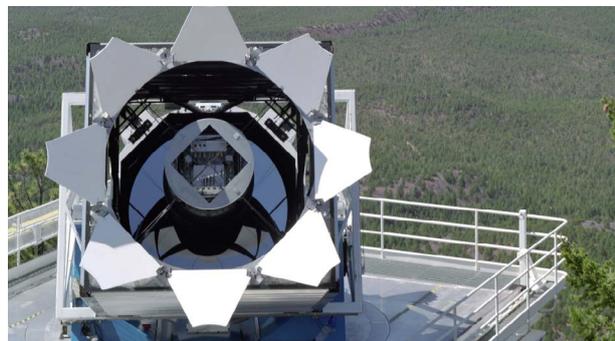
MPIA-Forscher nutzen das ALMA-Teleskop auf der Chajnantor-Hochebene in der Atacama-Wüste, um einige der kältesten und einige der entferntesten Objekte im Weltall zu beobachten. ALMA ist ein Interferometer für Beobachtungen im Millimeter- und Submillimeterwellenbereich.



Das MPIA ist Teil des PS1 Science Consortium, welches das Pan-STARRS1-Teleskop auf Haleakala auf Hawaii betreibt. PS1 hat wiederholt Übersichtsaufnahmen von weiten Teilen des Nachthimmels angefertigt und auf diese Weise eine Art »Himmelsfilm« erstellt, der 2016 erstmals veröffentlicht wurde.

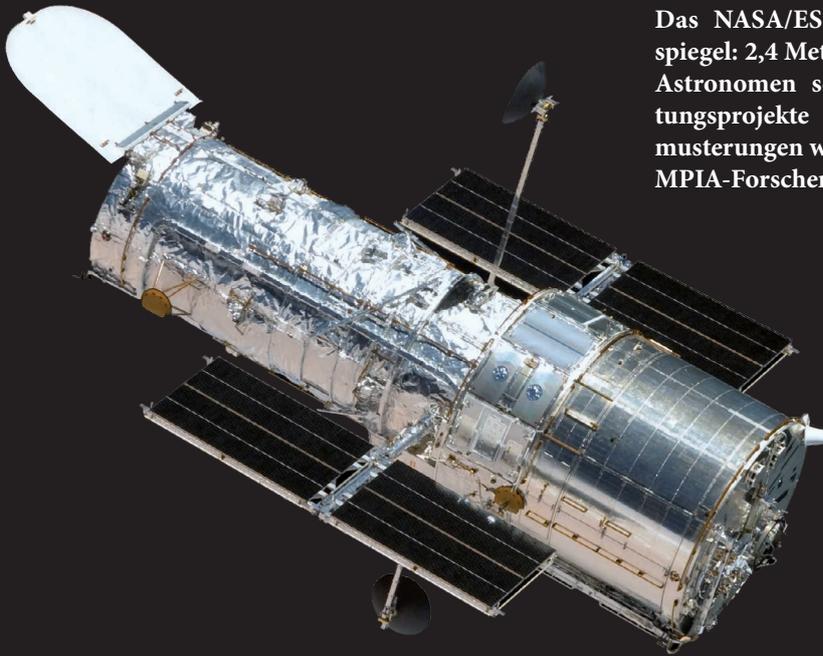


Das Calar-Alto-Observatorium in Südspanien, in den 1970er Jahren vom MPIA aufgebaut, wird als gemeinsames deutsch-spanisches Zentrum betrieben. In diesem Jahr hat das Instrument CARMENES mit MPIA-Beteiligung seinen Beobachtungsbetrieb aufgenommen.



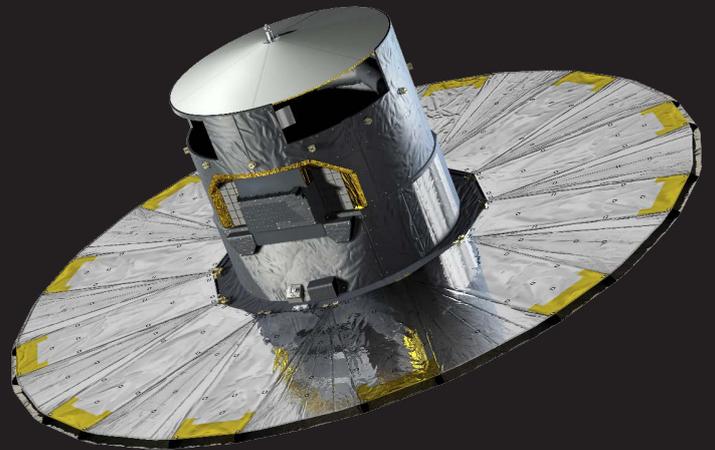
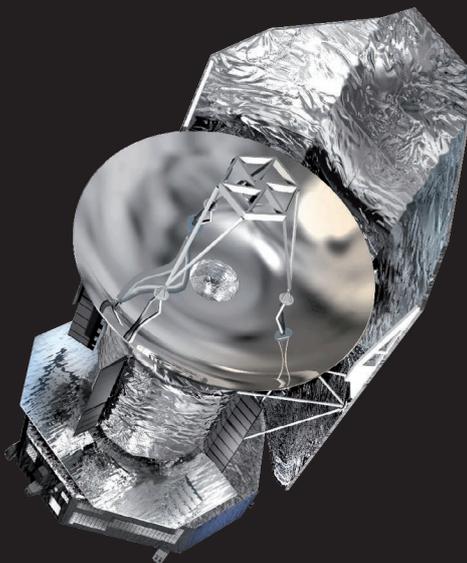
Das MPIA ist Mitglied des Sloan Digital Sky Survey (SDSS), einer spektroskopischen Durchmusterung mit einem 2,5-Meter-Teleskop in New Mexico. Das Projekt liefert für eine große Zahl astronomischer Objekte Spektren in einheitlich hoher Qualität.

## Weltraumteleskope



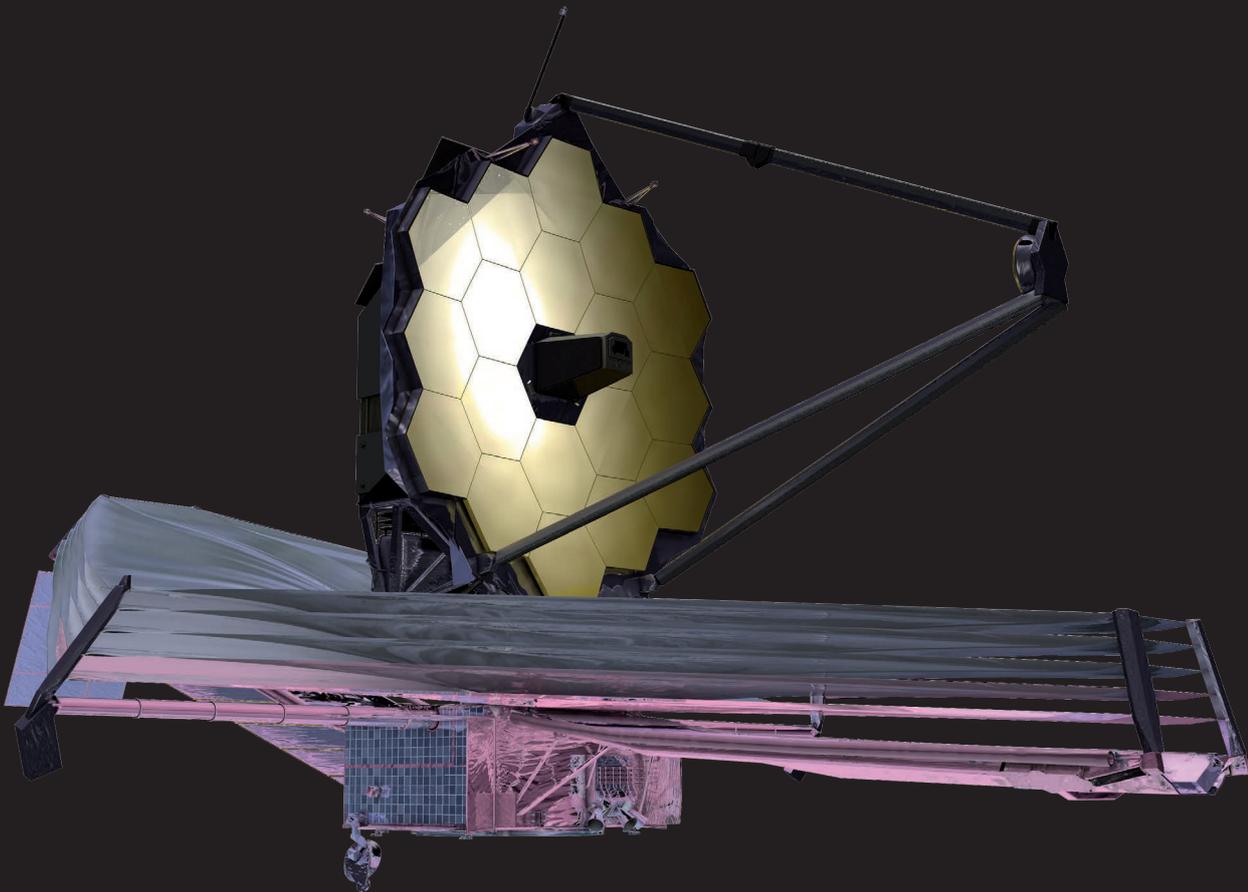
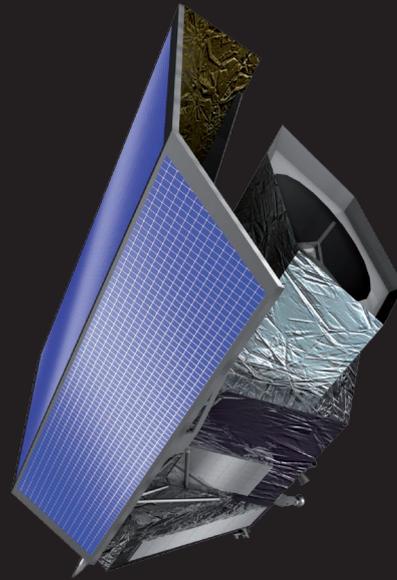
Das NASA/ESA-Weltraumteleskop Hubble (Hauptspiegel: 2,4 Meter Durchmesser) wird auch von MPIA-Astronomen seit Jahren für erfolgreiche Beobachtungsprojekte genutzt – inklusive größerer Durchmusterungen wie COSMOS oder CANDELS, an denen MPIA-Forscher maßgeblich beteiligt sind.

An der Konstruktion des ESA-Infrarot-Weltraumteleskops Herschel war das MPIA in wichtiger Rolle beteiligt: Am Institut wurden wichtige Teile des PACS-Instruments von Herschel entwickelt. Auch für eine Reihe von Beobachtungsprogrammen mit Herschel zeichnete das MPIA verantwortlich.



Der ESA-Astrometriesatellit Gaia vermisst die Entfernung von mehr als einer Milliarde Sternen mit nie zuvor erreichter Präzision. Die MPIA-Gaia-Gruppe ist federführend dabei, auf dieser Basis die astrophysikalischen Eigenschaften der Beobachtungsobjekte zu rekonstruieren.

Für die ESA-Mission Euclid, die 2020 starten soll, entwickeln MPIA-Wissenschaftler Kalibrationsstrategien und sind außerdem bei der Konstruktion des Nahinfrarot-Spektrometers und -Photometers NISP beteiligt. Euclid soll Schlüssel Fragen nach der Natur der Dunklen Energie und der Dunklen Materie klären helfen.



Das James Webb Space Telescope (JWST, Spiegeldurchmesser 6,5 Meter) soll 2018 als Nachfolger des Hubble-Teleskops ins All starten. Das MPIA ist an der Entwicklung zweier der Instrumente beteiligt: Des Mittel-Infrarotinstruments MIRI und des nahinfraroten Spektrografen NIRSPEC.

## Infrastruktur



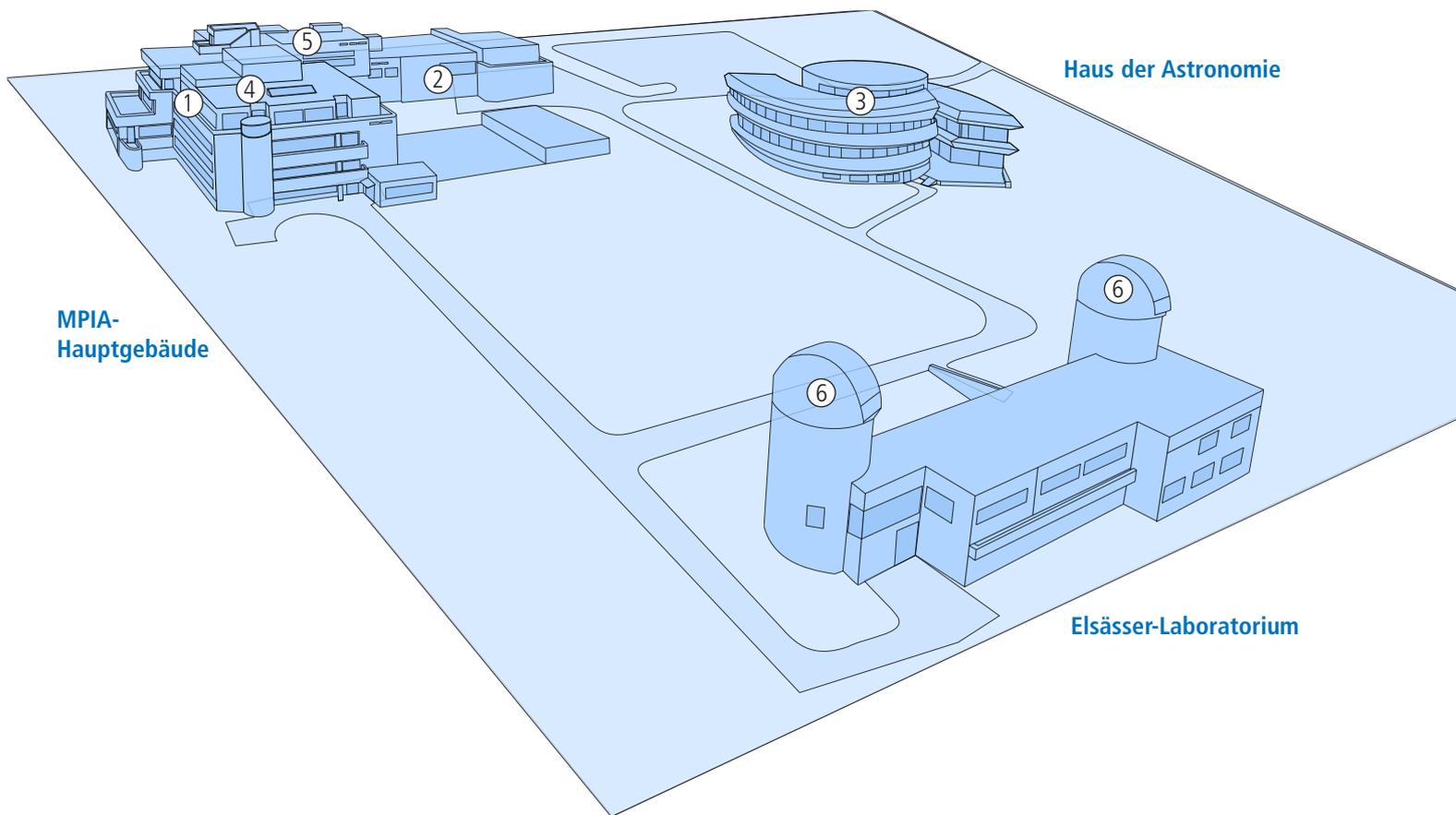
Spezialbibliothek mit knapp 9000 Monographien und Zugang zu rund 100 astronomischen Zeitschriftenserien



Experimentier- und Montagehallen mit Reinraumbereichen für Instrumentierung



Zwei Hörsäle und acht Besprechungs-/Workshopräume, hier die sogenannte Star-Box



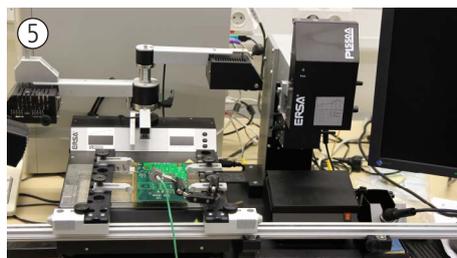
MPIA-Hauptgebäude

Haus der Astronomie

Elsässer-Laboratorium



IT-Infrastruktur inklusive Kapazitäten für den Umgang mit großen Datenmengen



Werkstätten und Konstruktionsbüro, hier: Elektronik-Abteilung



Teleskope für Test- und Ausbildungszwecke, hier: KING-Teleskop mit 70 cm Spiegeldurchmesser



336

### Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter

arbeiten am MPIA. Davon sind 242 Wissenschaftler, darunter 115 Juniorwissenschaftler oder Visiting Scientists und 80 Doktoranden.



1000

### Tage

nach dem Start veröffentlichte die Gaia-Mission ihre ersten Daten (DR1), basierend auf der Beobachtung von 1.142.679.769 Himmelskörpern.



5

### unabhängige Forschungsgruppen

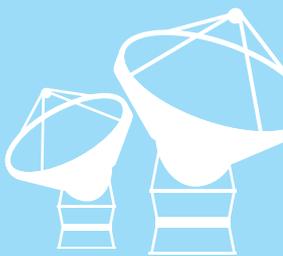
beherbergt das Institut im Jahre 2015: zwei Emmy-Noether-Gruppen (DFG), zwei Max-Planck-Forschungsgruppen sowie eine Gruppe der Alexander-von-Humboldt-Stiftung.



113000

### CPUs

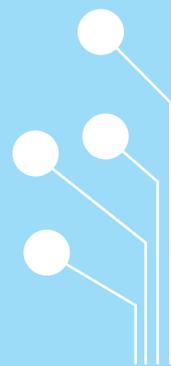
haben der MPG-Supercomputer HYDRA und seine Erweiterung DRACO zusammen. MPIA-Forscher nutzen beide Computer für aufwändige Simulationen der Planeten- und Sternentstehung.



150

### Stunden Beobachtungszeit

auf ALMA, dem größten Millimeter/Submillimeter-Observatorium, bekamen Fabian Walter und Kollegen für Beobachtungen ferner Galaxien bewilligt.



3500

### Kabel

wurden für die GRAVITY-CIAO-Systeme von Hand verlötet.

# MPIA in Zahlen



## II. Forschung: Abteilungen, Kooperationen, Highlights

## II.1 Abteilungen

## Planeten- und Sternentstehung: Die PSF-Abteilung

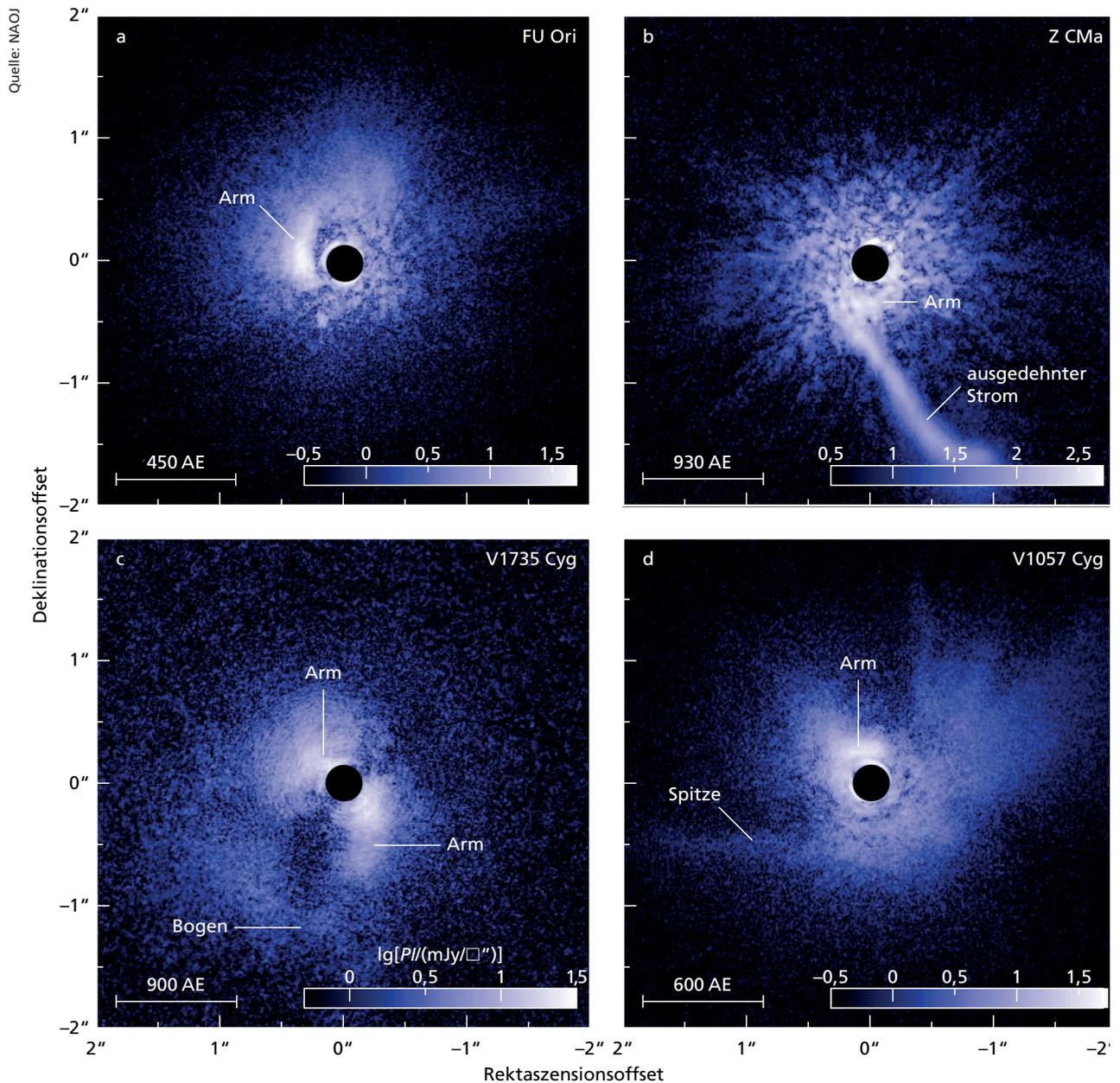


Abb. II.1.1: FU-Orionis-Objekte sind Sternembryos: Protosterne, umgeben von großen, asymmetrischen Scheiben aus Gas und Staub. Mithilfe des Subaru-Teleskops (8 Meter Spiegeldurchmesser) auf Mauna Kea, Hawaii, gelang es einer Forschungs-

gruppe, zu der auch MPIA-Wissenschaftler zählen, Infrarotbilder (H- und K-Band) von vier solcher Scheiben zu erstellen. Die Bilder sind so detailscharf, dass sie Scheibenstrukturen wie Spiralarme und Gasklumpen in den Scheiben erkennen lassen.

## Die Herkunft der Sterne und ihrer Planeten

Sternentstehung ist ein fundamentaler kosmischer Prozess. Sterne bestimmen die Struktur ganzer Galaxien ebenso wie die chemische Zusammensetzung des Kosmos, und sie schaffen die nötigen Voraussetzungen für die Entstehung von Leben.

Sterne werden in den dichten Kernregionen von Molekülwolken geboren – gigantischer Wolken kalten Gases, mit dem tausendfachen der Masse der Sonne – die instabil werden und unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren. Bei diesem Kollaps können einige Teilregionen sich soweit verdichten und aufheizen, dass Kernfusionsreaktionen einsetzen: ein neuer Stern ist entstanden. Die Entstehung von Planeten ist ein natürliches Nebenprodukt der Entstehung nicht allzu massereicher Sterne. Sie spielt sich in den protoplanetaren Scheiben aus Gas und Staub ab, die junge Sterne umgeben. Vor 4,5 Milliarden Jahren ist auch unser eigenes Sonnensystem auf diese Weise entstanden.

**Abb. II.1.2:** Protoplanetare Scheibe um den jungen Stern TW Hydrae. Die in beiden Bildern sichtbaren ringförmigen Lücken könnten auf das Vorhandensein von Planeten hindeuten. Das Zoombild zeigt die innere Scheibenregion. Dort befindet sich eine Lücke, deren Abstand vom Stern dem Abstand der Erde von der Sonne entspricht. Damit ist die-

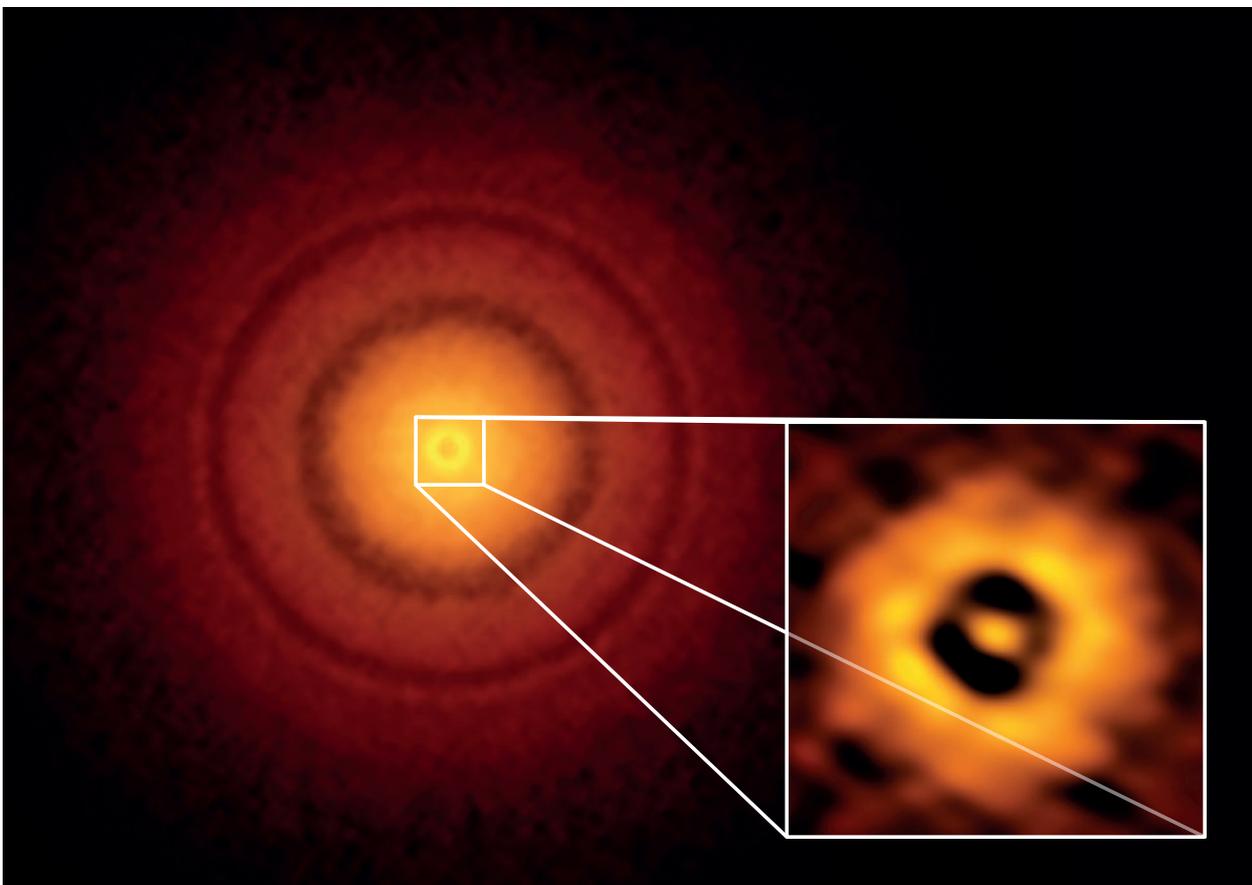
Die Forscher in der PSF-Abteilung gehen einem breiten Spektrum von offenen Fragen zur Stern- und Planetenentstehung nach. Auf ihrer Suche nach Antworten nutzen sie Beobachtungen in diversen Wellenlängenbereichen ebenso wie umfangreiche Computersimulationen und Laborexperimente.

## Direkte Beobachtungen der Entstehung von Sternen und Planeten

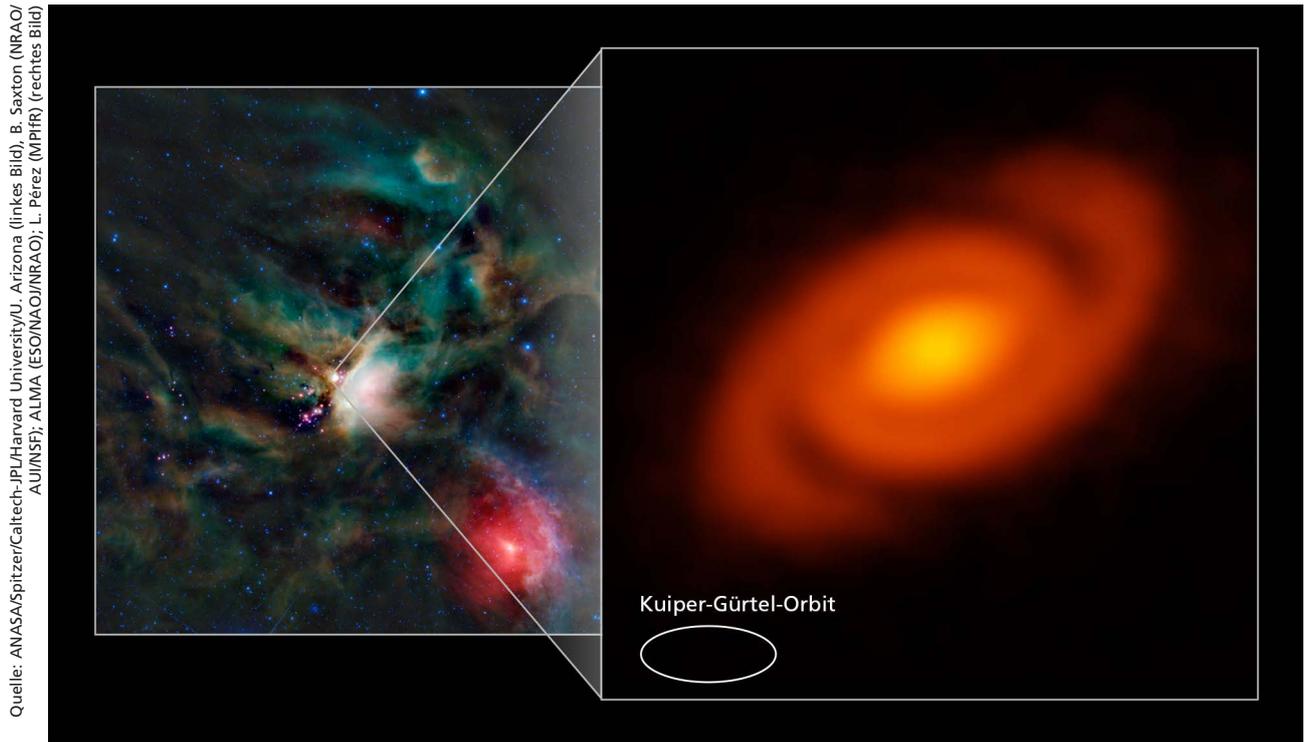
Bei den astronomischen Beobachtungsmethoden waren über das letzte Jahrzehnt hinweg beachtliche Fortschritte zu verzeichnen. Die Beobachtungsprogramme der PSF-Abteilung decken ein breites Spektrum an Wellenlängen vom sichtbaren Licht bis zu Infrarot- und Radiostrahlung ab, wobei der Schwerpunkt auf hoher räumlicher Auflösung sowie auf hochauflösenden Spektren liegt.

Die Forscher der PSF-Abteilung nutzen bei ihrer Arbeit diverse Teleskope und Observatorien, etwa das

ses Bild, das von einer Forschergruppe mit MPIA-Beteiligung mit dem ALMA-Observatorium aufgenommen wurde, das erste Mal, dass in einer solchen Scheibe Strukturen so klein (astronomisch gesehen) wie das innere Sonnensystem sichtbar gemacht wurden.



Quelle: S. Andrews (Harvard-Smithsonian CfA), ALMA (ESO/NAOJ/NRAO)



**Abb. II.1.3:** Mithilfe des ALMA-Observatoriums hat eine Astronomengruppe mit Beteiligung von MPIA-Forschern eine auffällige Spiralarm-Struktur in der Gas- und Staubscheibe des jungen Sterns Elias 2-27 entdeckt. Zum ersten Mal konnte dabei gezeigt werden, dass die Spiralstruktur die Region nahe der Mittelebene der Scheibe einschließt, wo neue Planeten geboren werden. Derartige Strukturen können ent-

weder Folge der Anwesenheit junger Planeten sein oder aber die Bedingungen schaffen, unter denen neue Planeten überhaupt erst entstehen können. Links: Die Rho-Ophiuchi-Sternentstehungsregion, rund 350 Lichtjahre von uns entfernt. Rechts: Thermische Strahlung der protoplanetaren Scheibe, die den jungen Stern Elias 2-27 umgibt.

Hubble-Weltraumteleskop und bodengestützte Observatorien wie das Very Large Telescope der ESO, das Large Binocular Telescope in Arizona, NOEMA (Northern Extended Millimeter Array) auf dem Plateau de Bure, das Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array ALMA und das Karl G. Jansky Very Large Array. Wissenschaftler der PSF-Abteilung sind außerdem an den Vorbereitungen für die Forschungen mit dem James Webb Space Telescope (JWST) beteiligt, das 2018 starten soll. Beobachtungen mit diesen Teleskopen geben Einblicke in die Physik und Chemie des interstellaren Mediums und der frühesten Stadien von Stern- und Planetenentstehung.

Hohe räumliche Auflösung – die Fähigkeit, winzigste Details abzubilden – ist der Schlüssel zu vielen der Beobachtungen, die unser Verständnis der Stern- und Planetenentstehung erweitern. Die Größenskalen, auf denen Molekülwolken fragmentieren und kollabierende Unterwolken bilden, oder auf denen Planeten in protoplanetaren Scheiben entstehen, sind astronomisch gesehen sehr klein.

Die PSF-Abteilung ist an mehreren Projekten beteiligt, die sich dieser Herausforderung stellen: Die Technik der Adaptiven Optik gleicht die Verzerrungen aus, die Bilder astronomischer Objekte beim Durchgang durch die Erdatmosphäre erleiden. So können große Teleskope ein besonders großes Auflösungsvermögen erreichen.

Für sogenannte interferometrische Beobachtungen wiederum werden mehrere Teleskope so zusammengeschaltet, dass das resultierende Auflösungsvermögen dem eines deutlich größeren Einzelteleskops entspricht. Infrarot-Interferometrie mit Großteleskopen und großen Basislinien ist ebenso Teil unserer Beobachtungsprogramme wie die Nutzung von (Sub-)Millimeter- und Radio-Interferometern.

### Sternentstehung verstehen

Eine der Schlüsselfragen der Sternentstehung betrifft die Massenverteilung neuer Sterne, die Initial Mass Function (IMF): Wie wahrscheinlich ist es, dass beim Kollaps einer Molekülwolke Sterne mit geringerer Masse (wie unsere Sonne) oder mit höheren Massen (wie einige der Objekte im Sternentstehungsgebiet des Orion) entstehen? Konkreter: Wie hängt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Stern der Masse  $M$  entsteht, vom Wert von  $M$  ab?

Das führt zu der allgemeineren Frage, welche Eigenschaften einer Wolke die Eigenschaften der Sterne beeinflussen, die aus der Wolke entstehen, und welche physikalischen Prozesse dabei welche Rolle spielen. Offen sind dabei insbesondere die Fragen danach, wie Magnetfelder oder Turbulenz das Einsetzen der Sternentstehung beein-

flüssen – auch davon hängt die Massenverteilung der dabei gebildeten Sterne oder substellaren Objekte ab.

Im allgemeinen werden kollabierende Molekülwolken fragmentieren, so dass nebeneinander Doppel- oder noch umfangreichere Mehrfachsysteme entstehen. Besonders massereiche Sterne bilden sich ganz generell in größeren Haufen, in denen das Umfeld für die Sternentstehung dann natürlich deutlich komplexer ist als anderswo. Die schnelle Entwicklung massereicher Protosterne und die damit zusammenhängenden energetischen Phänomene machen es zu einer großen Herausforderung, die Entwicklungswege massereicher Sterne nachzuvollziehen.

Wie entstehen Molekülwolken aus Wolken von Wasserstoffatomen? Was reguliert den Beginn und die Effizienz von Sternentstehungsprozessen? Was löst die Fragmentierung von Molekülwolken aus? Welche Rolle spielen Filamentstrukturen bei der Sternentstehung? Gibt es eine maximale Masse für neue Sterne, und wie lange dauert es, bis ein Sternhaufen entstanden ist? Diesen und weiteren Fragen gehen die Wissenschaftler der PSF-Abteilung nach.

---

### Ein Blick ins Verborgene

Die frühesten Stadien der Sternentwicklung sind hinter enormen Mengen von Staub und Gas verborgen und können nur durch empfindliche Beobachtungen im Ferninfrarot- und (Sub-)Millimeterbereich nachgewiesen werden. In späteren Stadien senden die betreffenden Objekte bereits selbst nachweisbare Mengen von Wärmestrahlung aus und werden bei nah- und mittelinfraroten Wellenlängen sichtbar. Noch später treiben die jungen Sterne ihren Kokon aus Gas und Staub auseinander und lassen sich dann auch im sichtbaren Licht beobachten.

Ein Grundgesetz der Hydrodynamik, nämlich die Erhaltung des Drehimpulses, führt dazu, dass Materie vor allem auf dem Umweg über eine zirkumstellare Scheibe auf einen Protostern einfällt. Scheiben rund um T-Tauri-Sterne – junge Sterne mit einer Masse von bis zu 3 Sonnenmassen – und die etwas massereichen Herbig Ae/Be-Sterne sind natürliche Geburtsstätten für Planetensysteme.

Während der Protostern noch Materie aus der ihn umgebenden Scheibe anzieht (Akkretion) wird einiges von dem Material senkrecht zur Scheibenebene hinausgeschleudert – in Form von Ausflüssen molekularer Gase ebenso wie in Form ionisierter Jets. Die direkte Beobachtung von Scheiben und den damit assoziierten Phänomenen kann Aufschlüsse sowohl über die Entstehung unseres eigenen Sonnensystems als auch, allgemeiner, über die Vielfalt von Planetensystemen liefern.

---

### Beobachtungen vom Boden und aus dem Weltraum

Eines der Ziele der PSF-Abteilung besteht darin, die frühesten Phasen der Entwicklung sowohl für Sterne niedriger Masse als auch für massereiche Sterne zu verstehen

– wobei die Ergebnisse zu Sternen niedriger Masse wiederum wichtige Informationen zu den Voraussetzungen der Planetenentstehung liefern, während Wissen über massereiche Sterne zum Verständnis der Entwicklung von Galaxien wichtig ist.

Mithilfe von Weltraumteleskopen wie dem Hubble-Teleskop sowie mit bodengestützten Infrarot-, (Sub-)Millimeter- und Radioteleskopen beobachten und untersuchen die PSF-Forscher die Sternentstehung ebenso wie die anschließende Entwicklung junger Sterne – von substellaren Objekten bis hin zu den Sternen mit den größten bislang bekannten Massen. Dazu haben die Wissenschaftler umfangreiche Beobachtungsprogramme ins Leben gerufen, die einige der besten Observatorien weltweit nutzen.

Aktuell ist die PSF-Abteilung dabei, eine Reihe von Beobachtungsprojekten im Themengebiet Sternentstehung und protoplanetare Scheiben für das James Webb-Weltraumteleskop vorzubereiten (James Webb Space Telescope, JWST), den Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops, der 2018 starten soll. Als Konsortiumsmitglied für das JWST-Instrument MIRI haben wir Zugriff auf ein garantiertes Kontingent an Beobachtungszeit mit diesem Instrument.

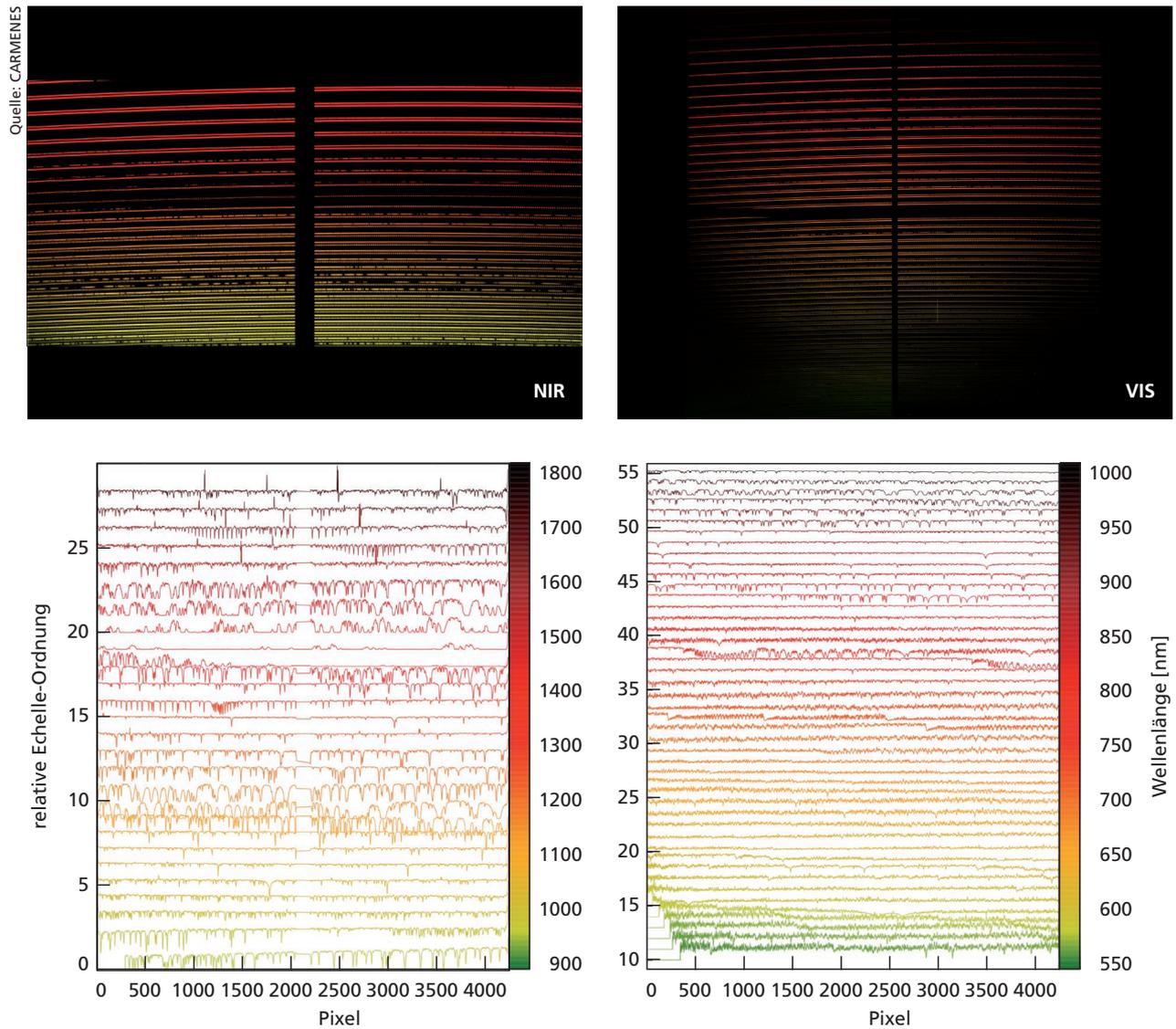
Ein weiteres Instrument, dessen Konstruktion gerade begonnen hat, wird mit am Start sein, wenn das größte bodengestützte Teleskop der nächsten Generation in Betrieb geht: das derzeit im Bau befindliche European Extremely Large Telescope (E-ELT) mit 39 Metern Spiegeldurchmesser. Die PSF-Abteilung wird das Kamerasystem und einen Teil der Adaptiven Optik für METIS liefern, dem Instrument für Beobachtungen im mittleren Infrarotbereich für das E-ELT.

---

### Planetenentstehung und Planeten um andere Sterne

Mit dem Nachweis der ersten extrasolaren Planeten im Jahre 1995 trat die Erforschung der Planetenentstehung in protoplanetaren Scheiben in eine neue Phase ein. Anstatt nur auf ein einziges Beispiel zurückgreifen zu können – unser eigenes Sonnensystem – standen den Astronomen nun zunächst dutzende, dann hunderte und inzwischen tausende Beispiele für Planetensysteme zur Verfügung, die sich untersuchen und miteinander vergleichen ließen.

Astronomen der PSF-Abteilung nehmen aktiv Teil an Beobachtungsprogrammen, mit denen sich solche Planeten mithilfe direkter Abbildungen, durch die Transitmethode und über Radialgeschwindigkeitsmessungen von Beobachtungszielen des Weltraumteleskops Kepler nachweisen lassen. Das HATSouth-Transitnetzwerk mit drei Beobachtungsstationen in Chile, Australien und Namibia hat uns geradezu eine Flut neuer Entdeckungen beschert, und die Missions-Verlängerung K2 des Kepler-Weltraumteleskops erlaubt es uns, Supererden um vergleichsweise helle Sterne nachzuweisen.



**Abb. II.1.4:** Spektrum eines typischen M-Sterns, aufgenommen mit dem Instrument CARMENES. M-Sterne sind Rote Zwergsterne, die häufigste Sorte von Sternen im Universum. CARMENES hat 2016 den Beobachtungsbetrieb am 3,5-Meter-Teleskop am Calar Alto aufgenommen; Detektoren, der Kryostat, Elektronik und Software stammen vom MPIA. Das Instrument führt eine Durchmusterung von M-Sternen durch, misst deren Spektren und sucht auf dieser Grundlage nach Planeten um diese Sterne. Die Bilder links zeigen das Detektorbild der CARMENES-Spektrografen (oben: nahinfrarot, unten:

sichtbares Licht). Die zweidimensionale Struktur, mit untereinanderliegenden Reihen von Spektraldaten, ist typisch für sogenannte Echelle-Spektrografen wie bei CARMENES. Jede Reihe ist dabei doppelt: Im oberen Teil ist das Spektrum des Sterns zu sehen, direkt darunter ein Vergleichsspektrum eines Fabry-Perot-Etalons zu Referenzzwecken. Rechts sind jeweils die extrahierten Spektraldaten gezeigt – insbesondere die zahlreichen Absorptionslinien mit ihren wohldefinierten Minima sind deutlich sichtbar.

Der neue Spektrograf CARMENES am Calar-Alto-Observatorium ist eines der vielseitigsten Instrumente für die Suche nach Exoplaneten um sogenannte M-Zwergsterne. Jüngst hat eine auf mehrere Jahre angelegte Durchmusterung begonnen, die Planeten mit geringer Masse um diese roten Sterne finden und deren Eigenschaften systematisch studieren soll.

Das Konsortium des Planetenjäger-Instruments SPHERE, an dem das MPIA als Co-PI-Institut in einer Leitungsposition beteiligt ist, führt derzeit die größte

Durchmusterung durch, die mithilfe eines Teleskops der 10-Meter-Klasse direkte Abbildungen von Exoplaneten anfertigt. Außerdem erhalten wir von diesem Instrument Bilder von Scheiben, in denen Planeten entstehen, mit einem nie zuvor erreichten Detailreichtum – von Ringen bis hin zu Spiralarmen, die auf eine komplexe Dynamik der Wechselwirkung von Planeten und Scheibe hindeuten.

Die Abteilung ist außerdem in entscheidender Position am LEECH-Programm am Large Binocular Telescope

(LBT) in Arizona beteiligt und hat am Very Large Telescope der ESO in Chile eine Suche nach jungen Planeten begonnen, die NACO nutzt, ein Instrument mit Adaptiver Optik.

Zwei weitere Instrumente, an denen die PSF-Abteilung in technischer ebenso wie in wissenschaftlicher Hinsicht beteiligt ist, stehen kurz vor der Inbetriebnahme: GRAVITY und MATISSE am Very Large Telescope Interferometer (VLTI) der ESO. GRAVITY hat bereits erste Aufnahmen erstellt (»first light«) und beginnt jetzt erste beeindruckende wissenschaftliche Ergebnisse zu liefern. Mit diesen Instrumenten wird es möglich sein, protoplanetare Scheiben mit bis dahin nicht erreichter räumlicher Auflösung zu untersuchen – ideale Ergänzung für unsere Beobachtungen mit den (Sub-)Millimeter-Interferometern IRAM und ALMA.

---

### Stern- und Planetenentstehung im Computer

Für ein tieferes Verständnis dessen, was bei der Planeten- und Sternentstehung abläuft, ist es nötig, die Zusammenhänge zwischen astronomischen Beobachtungen und den zugrundeliegenden physikalischen Prozessen aufzuklären. Die theoretischen Arbeiten der PSF-Abteilung konzentrieren sich auf umfangreiche numerische Simulationen protoplanetarischer Scheiben, inklusive des Wechselspiels zwischen Strahlung, Dynamik, Chemie und der Entwicklung der Staubkörner. Weitere Forschungsthemen der Theorie-Gruppe sind die Entstehung massereicher Sterne sowie die Sternentstehung auf galaktischen Skalen.

Die Theoriegruppe der PSF-Abteilung entwickelt Software zur Simulation mehrdimensionalen Strahlungstransports, die nachvollziehen kann, wie sich Strahlung durch Molekülwolken, deren verdichtete Kernregionen, protoplanetare Scheiben sowie durch die Atmosphäre von Planeten ausbreitet. Mithilfe der Software lassen sich einerseits Bilder und Spektren interpretieren, die Wolken oder Scheiben zeigen. Umgekehrt erlaubt es die Software, für magneto-hydrodynamische Simulationen zu erschließen, wie sich die betreffenden Objekte für astronomische Beobachter darstellen würden.

Eine weitere wichtige Anwendung der Strahlungstransports-Software betrifft Planetenatmosphären. Für sie lässt sich mithilfe der Software berechnen, welche

Transmissions- oder Emissionsspektren bodengebundene oder Weltraumteleskope für verschiedene Sorten von Exoplaneten messen würden.

Gerade angelaufen ist ein vielseitiges Programm, das den Bogen schlägt zwischen der Planetenentstehung einerseits und den Eigenschaften der Planeten und ihrer Atmosphären andererseits. Das Programm dient zur Vorbereitung der Analyse von planetaren Spektren, wie sie das JWST aufnehmen können wird.

---

### Vom Kosmos ins Laboratorium und zurück

Ein besseres Verständnis der Physik des interstellaren Mediums und protoplanetarischer Scheiben setzt Detailkenntnisse der mikrophysikalischen Prozesse in Gas und Staub unter den betreffenden Umgebungsbedingungen voraus. Dasselbe gilt für die Interpretation von Spektren der Objekte. Solche Detailkenntnisse wiederum lassen sich nur durch gezielte experimentelle Forschung im Labor erlangen.

Dementsprechend gehört zur PSF-Abteilung eine Gruppe Labor-Astrophysik, die am Institut für Festkörperphysik der Universität Jena angesiedelt ist. Diese Gruppe erforscht die spektroskopischen Eigenschaften von Nano- und Mikropartikeln sowie von komplexen Molekülen, insbesondere von polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffen (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) als einer wichtigen Klasse von Molekülen die in Gasform in astronomischen Umgebungen vorkommen. Die Gruppe erforscht außerdem die Entstehungsmöglichkeiten für kleine Partikel (z.B. Staubkörner) und deren Wechselwirkung mit molekularen Eisschichten.

Eine ganz andere Verbindung zwischen Kosmos und Labor, nämlich mit den Laboren unserer Kollegen in den Lebenswissenschaften, strebt eine andere Initiative an: die Heidelberg Origins of Life Initiative (HIFOL), welche die PSF-Abteilung jüngst zusammen mit anderen wissenschaftlichen Instituten in Heidelberg gegründet hat. Ziel der Initiative ist es, die grundlegenden physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse zu verstehen, die bei der Entstehung von Leben eine Rolle spielen, und Zusammenhänge mit den astrophysikalischen Bedingungen herzustellen, die für die Entstehung von Leben wichtig sind.

## II.2 Abteilungen

# Galaxien im kosmologischen Kontext: Die Abteilung Galaxien und Kosmologie

### Wie das Universum interessant wurde

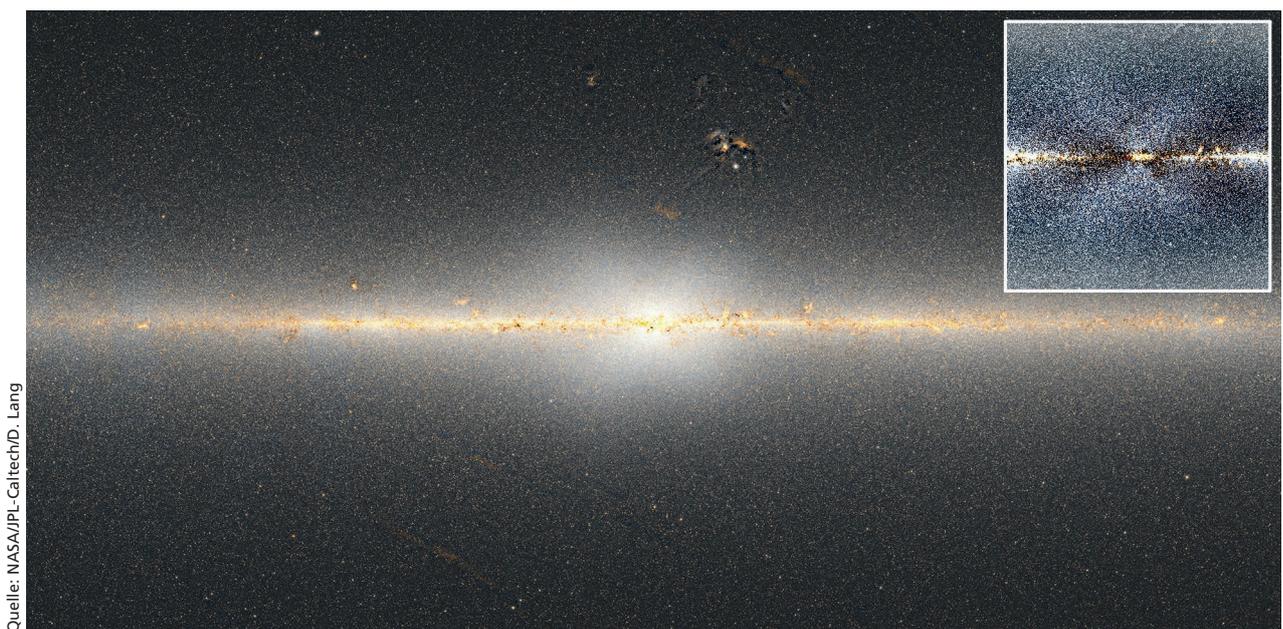
Kurz nach dem Urknall war das Universum fast perfekt homogen und einfach, mit anderen Worten: ebenso elegant wie langweilig. Das ist ein markanter Gegensatz zum heutigen Universum mit seiner reichen Hierarchie an Strukturen auf einem weiten Spektrum von Längenskalen – von den Filamenten der Galaxienverteilung im sogenannten kosmischen Netz bis hinunter zu Galaxien, Sternhaufen, einzelnen Sternen und ihren Planeten. Dieser Reichtum an Struktur macht das Universum sowohl interessant als auch komplex. Die Entstehung all dieser großräumigen Strukturen scheint durch Gravitations-Instabilitäten vorangetrieben zu werden: durch Materie, die sich unter dem allgegenwärtigen Einfluss der Schwerkraft zusammenzieht und so größere Strukturen bildet, die ihrerseits kollabieren und sich zusammenziehen. Auf der Größenskala der Galaxien kommt noch eine Vielzahl weiterer physikalischer Effekte ins Spiel.

**Abb. II.2.1:** In dieser Karte der Milchstraße, erstellt von Dustin Lang aus Daten des NASA-Infrarotsatelliten WISE, erkannte Melissa Ness vom MPIA eine verräterische X-förmige Anordnung von Sternen aus dem Bulge (der Zentralregion unserer Galaxie). Das Vorhandensein dieser Struktur zeigt an,

Um nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ zu verstehen, wie in einem expandierenden Universum die um uns herum beobachtbaren Strukturen entstehen, benötigen die heutigen Modelle eine besondere Zutat: sogenannte Dunkle Materie, die zwar Masse und damit auch Gravitationsanziehung besitzt, aber nicht mit elektromagnetischer Strahlung in Wechselwirkung tritt. Die genaue Natur dieser Dunklen Materie ist derzeit noch ungeklärt. Und es kommt noch schlimmer: Beobachtungen zeigen, dass sich die Expansion des Kosmos beschleunigt. Um das erklären zu können, müssen Astronomen einen noch exotischeren Inhaltsstoff postulieren: Dunkle Energie, die als eine Art abstoßende Kraft wirken kann.

An einigen Orten im Universum führen Gravitations-Instabilitäten zu dichten Konzentrationen Dunkler Materie. Dort kann sich auch normale Materie sammeln und konzentrieren, so dass sich aus dichten Gaswolken Sterne bilden. Diese Orte nennen wir Galaxien, und zumindest von der Größenskala her sind sie die zentralen Elemente in der Strukturhierarchie des Kosmos.

dass sich der Bulge durch dynamische Wechselwirkungen von Sternen innerhalb unserer Milchstraße gebildet hat, nicht, wie andere Modelle postulierten, durch die Verschmelzung kleinerer Galaxien mit der Milchstraße.



## Von der Milchstraße zum Verständnis von Galaxien

Unsere Heimatgalaxie, die Milchstraße, ist eine in vieler Hinsicht durchschnittliche Galaxie – und damit ein idealer Testfall, wenn man verstehen will, welche physikalischen Mechanismen bei der Entstehung und Entwicklung von Galaxien am Werke sind. In einer Hinsicht ist unsere Galaxie natürlich etwas ganz besonderes, und zwar was die Detailgenauigkeit angeht, mit der wir sie untersuchen können. In unserer eigenen Galaxie können wir die dreidimensionalen Strukturen rekonstruieren und Stern für Stern Umlaufbahnen, Alter und chemische Zusammensetzung bestimmen.

Damit können wir Fragen stellen wie: Wann und wo wurden die Sterne geboren? Haben sich ihre Umlaufbahnen seither signifikant verändert? Wie haben sich die Häufigkeiten der chemischen Elemente mit der Zeit verschoben? Solche Informationen ermöglichen ganz eigene Möglichkeiten, die kosmologischen Modelle der Galaxienentstehung sowie die entsprechenden Simulationen zu testen. Umfangreiche neue photometrische, astrometrische und spektroskopische Durchmusterungen stellen reichhaltige Daten bereit und bescheren diesem Teilgebiet der Forschung aktuell eine rasante und spannende Entwicklung.

## Die richtigen Fragen stellen

Zahlreiche Forschungsprojekte in der GC-Abteilung stehen vor dem Hintergrund der hier umrissenen Grundfragen. Wie so oft liegt der Schlüssel zu erfolgreicher For-

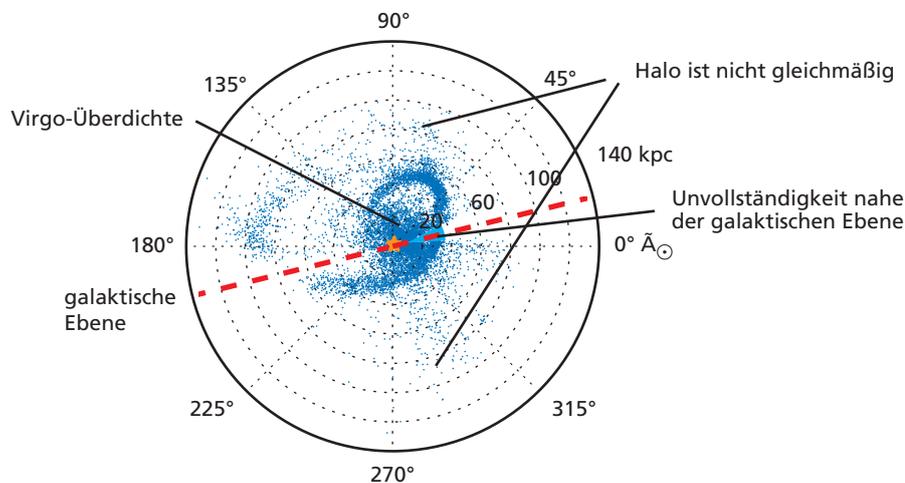
schung darin, Grundfragen in praktische Forschungsfragen zu übersetzen, die sich mit den heute verfügbaren Methoden und Werkzeugen beantworten lassen.

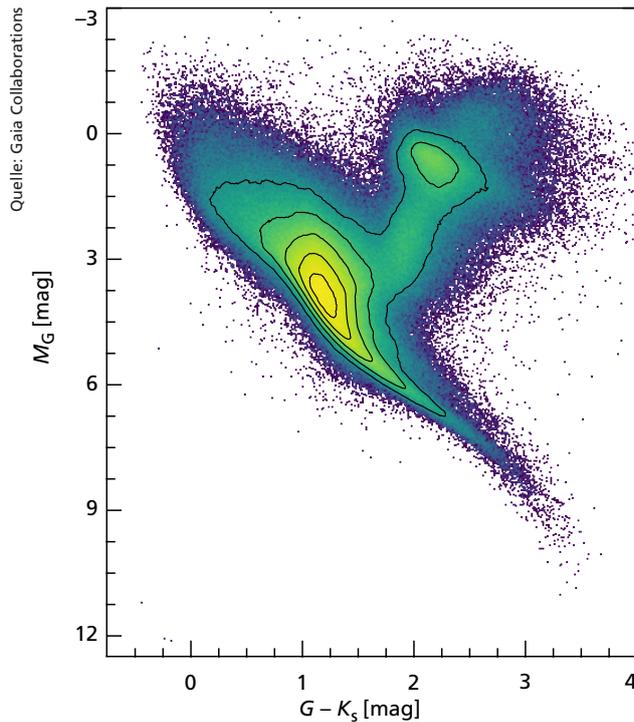
Eine Reihe dieser Forschungsfragen betreffen allgemeinere Aspekte der Galaxienentstehung. Welches sind die Eigenschaften des intergalaktischen Mediums, also des extrem dünnen Gases in den Zwischenräumen zwischen den Galaxien? Dort befindet sich die Mehrzahl der Atome im gesamten Universum. Wie ist dieses Gas aus dem kosmischen Netz in die Galaxien gelangt? Wie wird einiges davon wieder aus den Galaxien ausgestoßen? Und wo und wie wird atomares zu molekularem Gas, so dass Sterne entstehen können? Oder, um die Frage nach dem Verhältnis der Galaxien und dem kosmischen Netz allgemeiner zu formulieren: Welche Arten von Galaxien halten sich in den unterschiedlich großen Halos aus Dunkler Materie auf, die das kosmische Netz enthält?

Der Prozess der Sternentstehung auf der Ebene von Galaxien dürfte der Schlüssel zum Aussehen der Galaxien sein. Wann, wie und mit welcher Effizienz wurde das Gas in den Galaxien in Sterne umgesetzt? Die Frage nach dem Wann kann man untersuchen, indem man sehr weit entfernte Galaxien beobachtet. Da das Licht dieser Galaxien einige Zeit benötigt, um uns zu erreichen, sehen wir diese Galaxien immer so, wie sie zu einer bestimmten Zeit in der Vergangenheit waren. Das Wie lässt sich erforschen, indem man für uns nähere Galaxien detaillierte Karten der Verteilung des Gases (also des Rohmaterials der Sternentstehung) und der Sternentstehungsgebiete erstellt.

**Abb. II.2.2:** Verteilung von RR-Lyrae-Kandidaten, also Objekten, die vorläufig als Mitglieder einer bestimmten Klasse veränderlicher Sterne identifiziert wurden, in der und rund um die Milchstraße. Das Diagramm nutzt Beobachtungsdaten der Pan-STARRS1-Durchmusterung (PS1), an welcher das MPIA beteiligt ist. Besonders an PS1 ist, dass die Durchmusterung jede Himmelsregion mehrmals aufsucht, um so Daten zur zeitlichen Veränderung von Objekten zu liefern. RR-Lyrae-Sterne ändern rhythmisch ihre Helligkeit. Aus der Periode der Änderung lässt sich auf die absolute Helligkeit von Sternen dieser Sorte schließen; im Vergleich mit der tatsächlich beobachteten Helligkeit ergibt sich der Abstand des

Sterns von der Erde. Nina Hernitschek vom MPIA konnte in den PS1-Daten mehr als 150 000 Objekte identifizieren, bei denen es sich um RR-Lyrae-Veränderliche handeln dürfte. Deren räumliche Verteilung erlaubt Rückschlüsse auf die Struktur unserer Galaxis und deren direkter Nachbarschaft. Die Abbildung zeigt den Sagittarius-Gezeitenstrom, Überbleibsel einer Zwerggalaxie, die über die letzten Milliarden Jahre hinweg mit der Milchstraße verschmolzen ist. Die vorderen (Bogen oben rechts) und hinteren Teile (unten links) der langgezogenen Struktur des Gezeitenstroms sind deutlich zu erkennen.





Ein weiteres Forschungsgebiet der GC-Abteilung beschäftigt sich mit den zentralen Schwarzen Löchern der Galaxien. Warum ist es möglich, die Masse des zentralen Schwarzen Lochs vorherzusagen, wenn man die Gesamtmasse der Galaxie kennt? Wie entstehen diese supermassereichen Schwarzen Löcher, und wie wachsen sie?

Die meisten Galaxien sind soweit von uns entfernt, dass wir ihre Sterne – als ihre wichtigsten und typischsten Bestandteile – nicht einzeln beobachten können. Und doch enthalten die chemische Zusammensetzung und die Umlaufbahnen der einzelnen Sterne Hinweise darauf, wo und wann sie entstanden sind. Dass wir Sterne in nahen Galaxien – und insbesondere in unserer eigenen Galaxie, der Milchstraße, individuell beobachten können, stellt damit eine einzigartige Möglichkeit dar, Prozesse der Galaxienentstehung zu verfolgen. Die Herausforderung besteht darin, die Milchstraße zu einer Art von Stein von Rosetta der Galaxienentwicklung zu machen. Dazu müssen wir allerdings alles nur Mögliche über die individuellen Eigenschaften der Sterne und die Eigenschaften von Sternpopulationen lernen. Spektroskopische Beobachtungen und die derzeit laufende Weltraummission Gaia liefern die nötigen Beobachtungsdaten.

### Von der Beobachtung zur Simulation

Um Antworten auf all diese Fragen zu finden, verfolgt die GC-Abteilung drei grundsätzlich verschiedene Ansätze. Zum einen untersuchen wir Galaxien in unserer direkten Nachbarschaft, als Repräsentanten der heutigen

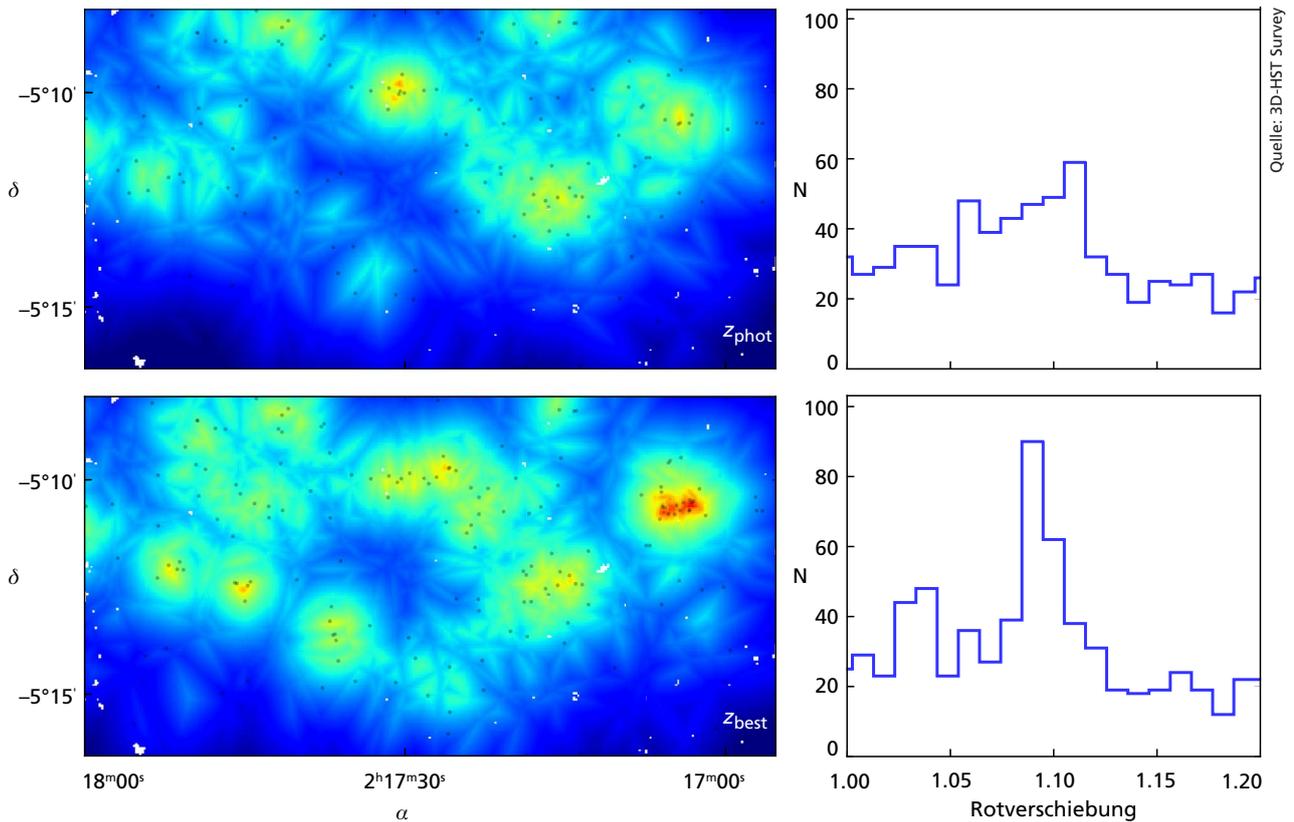
Abb. II.2.3: Hertzsprung-Russell-Diagramm (Farbe gegen absolute Helligkeit) für 1004 204 Sterne, deren Parallaxen mit dem Gaia-Satelliten bestimmt und im Rahmen des ersten Gaia-Daten-Release DR1 im September 2016 veröffentlicht wurden. Diagramme dieser Art spielen eine wichtige Rolle, um die Eigenschaften und die Entwicklung von Sternen zu verstehen. Die dafür nötige Bestimmung von Absolutwerten für Größen wie die Helligkeit, welche die Kenntnis des Abstandes der betreffenden Objekte von der Erde voraussetzt, ist ein zentrales Ziel der Gaia-Mission. Das MPIA-Gaia-Team unter der Leitung von Coryn Bailer-Jones ist federführend bei der Bestimmung astrophysikalischer Parameter aus den Gaia-Daten. Es nutzt dabei Algorithmen, um die Gaia-Beobachtungen zu klassifizieren und interpretieren.

Eigenschaften des Universums. Dabei nutzen wir insbesondere die Detailgenauigkeit aus, mit der sich unsere direkte kosmische Umgebung im Vergleich zu fernerer Galaxien beobachten lässt.

Zweitens können wir direkt in vergangene Epochen sehen, wenn wir sehr weit entfernte Objekte betrachten (entsprechend großen kosmologischen Rotverschiebungswerten  $z$ ). Astronomen sehen schließlich immer in die Vergangenheit, und wenn das Licht einer fernen Galaxie 9 Milliarden Jahre benötigt, um uns hier auf der Erde zu erreichen, dann zeigen unsere Beobachtungen diese Galaxie so, wie sie vor neun Milliarden Jahren war. Außerdem vergleichen wir unsere Beobachtungen mit physikalischen Modellen. Diese Strategie erfordert vielfältige Beobachtungsmöglichkeiten: Durchmusterungsteleskope, die umfangreiche Stichproben kosmischer Objekte liefern, ebenso wie die größten verfügbaren Teleskope, deren Eigenschaft, viel Licht zu sammeln, unverzichtbar ist für die Beobachtung leuchtschwacher Quellen. Erst Techniken wie adaptive Optik und Interferometrie ermöglichen bei entfernten Objekten die nötige Detailgenauigkeit. Umfassende Studien der Galaxienentwicklung benötigen Daten aus allen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums, von Röntgenstrahlung bis hin zu Radiowellen.

### Kooperation und Initiativen

Das MPIA ist in führender Rolle an einer Reihe weltweiter Beobachtungsprogramme beteiligt, die sich den hier skizzierten Forschungsfragen widmen. Dazu gehören sehr tiefe Aufnahmen mit ALMA, die dichtes Gas bei hoher Rotverschiebung nachweisen sollen, ebenso wie umfangreiche Programme am VLT oder an den Keck-Teleskopen, die das intergalaktische Medium studieren, sowie eine VLT-Legacy-Durchmusterung von Galaxien mit hoher Rotverschiebung. Außerdem sind wir führend an einem großen Beobachtungsprogramm mit dem VLA des National Radio Astronomy Observatory in New Mexico, USA, sowie an einem Projekt beteiligt, das mit dem Plateau de Bure-Interferometer von IRAM in den französischen Alpen Gas in vergleichsweise nahen Galaxien untersucht.

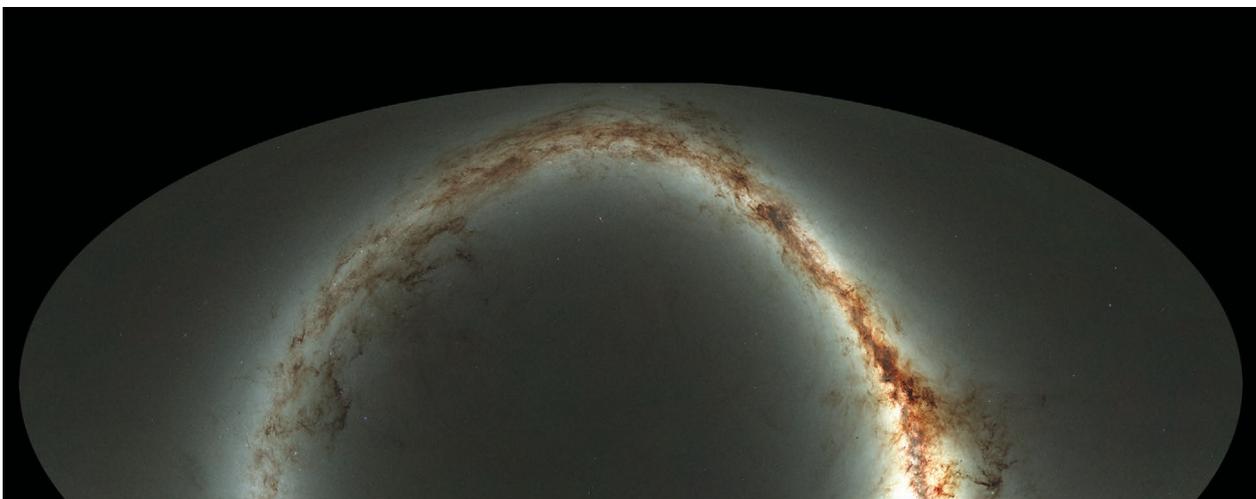


**Abb. II.2.4:** Die 3D-HST-Durchmusterung mit dem Weltraumteleskop Hubble, deren Daten 2016 veröffentlicht wurden, liefert spaltlose spektroskopische Rotverschiebungen für 40 000 schwach leuchtende Galaxien. Daraus können Astronomen dreidimensionale Karten der Galaxienverteilung bei Rotverschiebungen um  $z \sim 1$  erstellen, entsprechend weit entfernten Regionen, deren Licht rund 8 Milliarden Jahre zu uns

unterwegs war. Die Abbildung zeigt eine zweidimensionale Karte der Galaxiendichte bei Rotverschiebungen zwischen  $z = 1,07$  und  $z = 1,11$ . Größere Dichten sind gelb und rot gekennzeichnet. An der Durchmusterung waren MPIA-Direktor Hans-Walter Rix (co-PI) und MPIA-Mitarbeiter Arjen van der Wel (co-I) beteiligt.

**Abb. II.2.5:** Der gesamte von Hawaii aus sichtbare Himmel, aufgenommen im Rahmen der Pan-STARRS1-Durchmusterung (PS1). PS1 veröffentlichte im Dezember 2016 erste Datensätze. Das Bild setzt sich aus einer halben Million Aufnahmen zusammen, Belichtungszeit jeweils 45 Sekunden, die mit dem Pan-STARRS1-Teleskop (Spiegeldurchmesser 1,8 Meter) über einen Zeitraum von vier Jahren hinweg aufgenom-

men wurden. Das Himmelsbild ist als Projektion dargestellt, ähnlich den Projektionen der Erdkugel auf eine ebene Karte; der südliche Quadrant ist dabei ausgespart. Die Milchstraße ist als leuchtendes Band zu sehen. Den Hintergrund bilden Milliarden schwach leuchtender Sterne und Galaxien. In voller Auflösung ausgedruckt wäre dieses Bild über 2 Kilometer breit. MPIA ist Mitgliedsinstitut des PS1 Science Consortium.



Quelle: Danny Farrow, Pan-STARRS1 Science Consortium und Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Umfangreiche spektroskopische Durchmusterungen nahegelegener Galaxien erfassen die Kinematik der Sternbewegungen. Das erlaubt Rückschlüsse auf die dynamische Struktur und auf die Natur des zentralen Schwarzen Lochs der Galaxie.

Das MPIA spielt außerdem eine Schlüsselrolle bei der Erstellung dreidimensionaler Karten unserer Milchstraße mithilfe der PS1-Durchmusterung und von Gaia, sowie in großen spektroskopischen Durchmusterungen, von denen sich die Forscher ein besseres Verständnis der Vorgeschichte unserer Galaxie erhoffen.

Last but not least ist das MPIA für die Photometrie im Infrarotbereich im Rahmen der Euclid-Mission der ESA verantwortlich. Euclid soll einen der rätselhaftesten Aspekte der Physik auf kosmischen Skalen erforschen: die Natur der Dunklen Energie.



## II.3 Abteilungen

# Wissenschaftliche Initiativen

Wissenschaft ist vernetzt, und größere Forschungsvorhaben werden von mehreren Instituten gemeinsam in Angriff genommen: in größeren Konsortien oder als Kooperation zwischen ausgewählten Instituten. Das MPIA

ist integraler Teil der internationalen astronomischen Forschungslandschaft und an zahlreichen Initiativen beteiligt.



### PanSTARRS 1 Sky Survey

Das PS1 Science Consortium betreibt das Pan-STARRS1-Teleskop auf dem Berg Haleakala auf Hawaii. Die astronomische Kamera des Teleskops ist die größte Digitalkamera der Welt. Sie wird genutzt, um eine Art »Himmelsfilm« zu drehen: weite Teile des Himmels zu unterschiedlichen Zeitpunkten wieder und wieder aufzunehmen, um so insbesondere auch Veränderungen von Himmelsobjekten nachweisen zu können. Zu dem Konsortium gehören neben dem MPIA noch neun andere Institutionen aus vier Ländern. Die Durchmusterung ist inzwischen abgeschlossen und die Daten Ende 2016 der internationalen Community zur Verfügung gestellt worden.



### Sloan Digital Sky Survey IV

Das MPIA ist Mitglied im Sloan Digital Sky Survey IV (SDSS), einer spektroskopischen Durchmusterung, welche das 2,5-Meter-Teleskop der Sloan Foundation am Apache Point Observatory nutzt. Frühere SDSS haben die Astronomie revolutioniert: Durch ihre umfassenden und hochwertigen spektroskopischen Daten wurden statistische Auswertungen möglich, die vorher nicht durchführbar gewesen wären.



### Sonderforschungsbereich 881: Das Milchstraßensystem

Das MPIA ist beteiligt an dem von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereich 881 an der Universität Heidelberg. Der SFB 881 untersucht Eigenschaften unserer Heimatgalaxie, um daraus Rückschlüsse zum einen auf deren Aufbau und Entstehung, zum anderen auf die Entstehung von Galaxien allgemein zu ziehen.



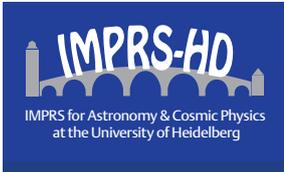
### Heidelberg Initiative for the Origins of Life

Die Heidelberg Initiative for the Origins of Life (HIFOL) bringt Forscher aus den Bereichen Astrophysik, Geowissenschaften, makromolekulare Chemie, statistische Physik und Lebenswissenschaften der Universität Heidelberg, des Max-Planck-Instituts für Astronomie, des Max-Planck-Instituts für Kernphysik und des Heidelberger Instituts für Theoretische Studien zusammen, die gemeinsam Forschung zur Entstehung des Lebens im Universum betreiben.



### DFG Schwerpunktprogramm SPP 1573: Das interstellare Medium

Das MPIA nimmt am SPP 1573 der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) teil, das der Erforschung des interstellaren Mediums gewidmet ist: der hochverdünnten Mischung aus geladenen Teilchen, Atomen, Molekülen und Staubkörnern in den Raumregionen zwischen den Sternen einer Galaxie.



### International Max Planck Research School »Astronomy and Cosmic Physics«

Das MPIA ist an der International Max Planck Research School »Astronomy and Cosmic Physics« an der Universität Heidelberg beteiligt, die deutschen und internationalen Studenten ein systematisches Doktorandenstudium in einem international konkurrenzfähigen Forschungsumfeld ermöglicht (vgl. Abschnitt IV.1).



### HAT-South

Dieses Kooperationsprojekt des MPIA mit der Princeton University, der Australian National University und der Pontificia Universidad Catolica de Chile sucht mithilfe eines Netzwerks von sechs identischen Teleskopen auf der Südhalbkugel nach Exoplanetentransits. Die Teleskope befinden sich in Namibia, in Australien und in Chile. Das Netzwerk hat unterdessen mehr als 30 neue Exoplaneten identifiziert, darunter einige besonders interessant Objekte.



### CARMENES-Radialgeschwindigkeitsurvey

Das MPIA ist an einer mehrjährigen Durchmusterung zur Suche nach extrasolaren Planeten um M-Sterne mithilfe des neuen hochauflösenden Spektrographen CARMENES am Calar-Alto-Observatorium beteiligt. An diesem Projekt wirken mehrere deutsche und spanische Forschungsinstitute mit. Der Spektrograph besteht sowohl aus einem optischen als auch einem infraroten Arm.



### SHINE und ISPY: Direkte Suche nach Exoplaneten und ihre Charakterisierung

Mit dem SHINE-Survey sucht das MPIA gemeinsam mit den anderen Instituten des SPHERE-Konsortiums nach Exoplaneten durch Aufnahmen mit extremer adaptiver Optik am VLT der ESO und charakterisiert die Atmosphären bekannter direkt abgebildeter Planeten. Parallel führt das Institut gemeinsam mit der Heidelberger Landessternwarte und dem Genfer Observatorium einen L-Band-Survey (ISPY) nach Exoplaneten mit dem Instrument NACO am VLT durch.

Weitere Initiativen, an denen das MPIA aktiv beteiligt ist, sind das deutsche Interferometriezentrum für den optischen und infraroten Wellenlängenbereich FrInGe, das europäische Netzwerk Opticon für Institute, die sich an der Entwicklung von Instrumenten und Teleskopen im Bereich des sichtbaren und Infrarotlichts engagieren, das internationale Konsortium Chemistry in Disks (CID) zur Chemie und Physik in protoplanetaren Scheiben, die strategische Suche SEEDS nach Exoplaneten und ihren Scheiben am Subaru-

Teleskop und die Exoplaneten-Suchkampagne LEECH am Large Binocular Telescope. Die Laborastrophysikgruppe des MPIA ist an einer DFG-Forschergruppe beteiligt.

Im Oktober 2015 hatte das MPIA außerdem eine Vereinbarung mit dem Institut für Physik und Astronomie (IFA) der Universität Valparaiso (UV) in Chile getroffen, die erste Max-Planck-Tandem-Gruppe im Fachgebiet Astronomie in Chile ins Leben zu rufen: eine Forschungsgruppe am IFA, die eng mit dem MPIA assoziiert sein wird.

## II.4 Wissenschaftliches Highlight

# Extrem kalte Scheibe rund um jungen Stern bietet staubige Überraschung

**Dass die protoplanetare Scheibe mit dem Spitznamen »Fliegende Untertasse« Rätsel aufgibt, hat nichts mit Außerirdischen zu tun, sondern mit winzigen Partikeln kosmischen Staubs. Eine neue Messung der Staubtemperatur in dieser Scheibe mit dem Teleskopverbund ALMA ergab überraschend niedrige Werte von nur 7 Grad über absolut Null (7 K). Die beteiligten Astronomen, darunter Dmitry Semenov vom Max-Planck-Institut für Astronomie, fanden, dass sich diese Temperatur nur durch ungewöhnliche Eigenschaften der Staubkörner in der Scheibe erklären lässt. Damit könnten solche Staubscheiben allgemein massereicher sein als bislang angenommen – mit Konsequenzen für die Planeten, die darin entstehen.**

Astronomen weisen Strahlung nach, die sie aus unterschiedlichen Richtungen erreicht. Mit dieser grundlegenden Feststellung sollte eigentlich klar sein, dass derartige Messungen immer Messwerte größer oder gleich Null ergeben werden: Entweder erreicht uns aus einem bestimmten Himmelsgebiet Strahlung oder eben nicht.

---

### Ein negativer Messwert und seine Erklärung

Deswegen erscheint es auf den ersten Blick absurd, dass Messwerte für die Strahlung, die man von einem bestimmten Himmelsobjekt empfängt, negativ sein könnten. Genau das war allerdings bei Beobachtungen der Fall, die ein Team von Astronomen unter der Leitung von Stephane Guilloteau (Laboratoire d'Astrophysique de Bordeaux) vornahm, zu dem auch Dmitry Semenov, Thomas Henning und Til Birnstiel vom Max-Planck-Institut für Astronomie gehören.

Die Astronomen nutzten den Teleskopverbund ALMA in Chile, um eine protoplanetare Scheibe mit dem Spitznamen »Fliegende Untertasse« zu untersuchen. Die Scheibe umkreist den jungen Stern 2MASS J16281370-2431391 in der Rho-Ophiuchi-Sternentstehungsregion im Sternbild Schlangenträger (Ophiuchus), rund 400 Lichtjahre von der Erde entfernt. Protoplanetare Scheiben sind die Geburtsstätten von Planeten: Scheiben aus Gas und Staub, die junge Sterne umgeben; innerhalb dieser Scheiben verklumpen kleiner Partikel zu größeren, bis auf Zeitskalen von einigen Millionen von Jahren größere Objekte und schließlich Planeten entstehen.

Was hat es mit den negativen Werten auf sich? Ein Teil der Lösung betrifft die Technik von ALMA. Bei diesem

Verbundteleskop auf der Chajnantor-Hochebene in den chilenischen Anden, fast 5000 Meter über dem Meeresspiegel, werden 66 einzelne Radioantennen für Millimeter- und Submillimeterstrahlung zusammengeschaltet. Auf diese Weise erreicht ALMA eine Detailschärfe – die Astronomen reden vom Auflösungsvermögen – wie sie sonst nur mit einem ungleich größeren Teleskop möglich wäre. Üblicherweise ergeben sich die kleinsten Details, die ein Teleskop unterscheiden kann, aus dem Durchmesser des Teleskops. Bei der Interferometrie ist stattdessen der größte Abstand zwischen den beteiligten Einzelteleskopen die relevante Längenskala. In seiner ausgedehntesten Konfiguration erreicht ALMA damit dasselbe Auflösungsvermögen wie eine Radioantenne mit 16 Kilometern Durchmesser!

Was bei solchen Beschreibungen oft unerwähnt bleibt, in diesem Falle aber entscheidend ist, ist dass diese Fähigkeit, mit vergleichbar geringem Aufwand kleinste Details sichtbar zu machen, Einschränkungen besitzt. Je nach Positionierung der beteiligten Antennen kann es sein, dass ALMA zwar winzigste Details nachweisen, deutlich ausgedehntere Strukturen aber nicht abbilden kann. Im Falle der Beobachtungen der Fliegenden Untertasse konnte ALMA zwar die Details der protoplanetaren Scheibe zeigen, war aber weitgehend blind für den Umstand, dass der Bildhintergrund durch eine der Molekülwolken im Rho Ophiuchi-Komplex mit weitgehend konstanter Helligkeit erleuchtet wurde.

---

### Eine ungewöhnlich kalte Scheibe

Die negativen Messwerte sind daher die Konsequenz des Umstandes, dass die Scheibe (die ALMA sehen kann) weniger Strahlung abgibt als der Bildhintergrund (den ALMA nicht nachweisen kann). Das löst das drängendste Problem, nämlich das der negativen Werte; die extrem niedrigere Temperatur der Scheibe ist aber auch für sich genommen überraschend. Bereits Molekülwolken sind sehr kalt, mit typischen Temperaturen im Bereich von 8 bis 10 Kelvin oder sogar noch weniger. (10 Kelvin entsprechen -263 Grad Celsius, oder 10 Grad Celsius über dem absoluten Nullpunkt).

Die negativen Messwerte zeigen an, dass die Fliegende Untertassen-Scheibe noch kälter sein muss als das, mit Temperaturen zwischen 5 und 8 Kelvin. Im Vergleich mit den meisten Modellen für solche Scheiben ist das unerwartet wenig. Schließlich befindet sich

im Scheibenzentrum ein Stern, der die Scheibe vom Zentrum aus anstrahlt. Dadurch muss sich die Scheibe zwangsläufig erwärmen – wobei das Ausmaß der Erwärmung allerdings von der Masse und den Eigenschaften des Staubs abhängt (etwa Korngröße, Zusammensetzung und Porosität). Dieser Umstand ist der Alltagssituation vergleichbar, bei der sich unterschiedliche Gegenstände, die man in die Sonne legt, je nach Material unterschiedlich erwärmen.

Astronomen berechnen die Erwärmung der Scheibe mithilfe von Strahlungstransport-Modellen: Simulationen, die nachvollziehen, welche Auswirkungen das Sternenlicht auf die unterschiedlichen Scheibenregionen hat, wie Licht in den unterschiedlichen Regionen gestreut und absorbiert wird, wie sich die unterschiedlichen Regionen erwärmen und wie ihre Wärmestrahlung dann wiederum andere Teile der Scheibe beeinflusst.

Im Vergleich mit den Ergebnissen solcher Modellrechnungen sind die Staubtemperaturen in der Fliegende Untertassen-Scheibe in der Tat sehr niedrig. In den einfachsten Modellen, die von kugelförmigen, kompakten Staubkörnern ausgehen, ist es schlichtweg unmöglich, dass Staubkörner diese Temperaturen erreichen.

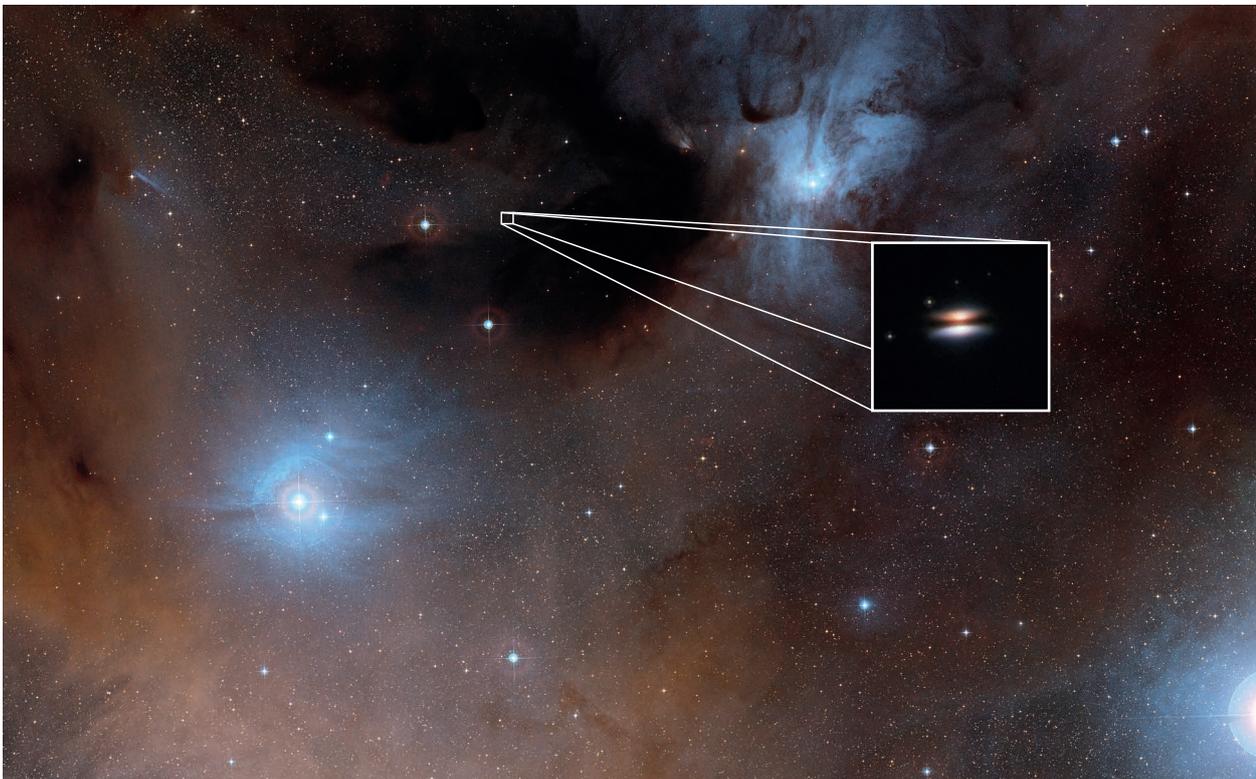
**Abb. II.4.1:** Die Rho-Ophiuchus-Sternentstehungsregion, 400 Lichtjahre von der Erde entfernt. Das kleine Bild zeigt eine Infrarotaufnahme der protoplanetaren Scheibe mit dem Spitznamen »Fliegende Untertasse«, aufgenommen mit dem Weltraumteleskop Hubble. Jüngste Beobachtungen haben gezeigt, dass der Staub in dieser Scheibe unerwartet kalt ist.

### Eine komplexere Sorte Staub

An dieser Stelle wandten sich die Astronomen an Dmitry Semenov, seines Zeichens Astrochemiker und Astrophysiker am Max-Planck-Institut für Astronomie. Semenov erforscht die chemischen Prozesse, die in protoplanetaren Scheiben stattfinden und bei denen die Staubkörner und ihre Oberflächeneigenschaften eine zentrale Rolle spielen.

Semenov wusste, dass derart geringe Temperaturen in den betreffenden physikalischen Modellen nur dann zu erreichen waren, wenn die Staubkörner langwellige elektromagnetische Strahlung deutlich effizienter abstrahlen konnten als normal. Eine Möglichkeit dazu findet sich in einer Arbeit, die Semenov bereits im Jahre 2000 veröffentlichte, als er noch Physikstudent an der Universität Petersburg war und sich mit der Wechselwirkung von Strahlung mit den Staubkörnern in Kometenschweifchen beschäftigte.

In den allermeisten Modellen wird angenommen, die Staubkörner seien kugelförmig und kompakt. In seiner Arbeit zu Kometenstaub hatte Semenov allerdings auch kompliziertere Sorten von Staub untersucht. Seine Ergebnisse zeigen eine Möglichkeit für die Hintergründe der niedrigen Staubtemperaturen der Fliegenden Untertasse auf: Staubkörner aus elektrisch leitfähigem Material (etwa bestimmten organischen Verbindungen oder eisenhaltigen Verbindungen), die eine längliche Form haben oder aber (Schema Schweizer Käse) porös und löchrig sind, könnten in der Tat bei langen Wellenlängen deutlich stärker strahlen und den Staub auf diese Weise ab-



Quelle: Digitized Sky Survey 2/NASA/ESA, ESO/NASA/ESA

kühlen. So ließen sich selbst in der Scheibenebene, wo die Staubkörner häufig von Molekülen des umgebenden Gases angestoßen werden, extrem kalte Staubkörner erzielen (die sogar kühler sind als das sie umgebende Gas!).

Semenovs Lösung ist nicht die einzige Möglichkeit für die extrem kalte Fliegende Untertasse. Alternativ könnte es einen Temperaturunterschied zwischen den größeren Staubkörnern einerseits und den kleineren andererseits geben. Für eine Population größerer Staubkörner beispielsweise würde es bei gleicher Gesamtmasse weniger häufig zu Zusammenstößen mit den Gasmolekülen kommen, und die Temperaturen von Gas und Staub könnten sich auseinanderentwickeln. Im Extremfall könnte der Staub in der Scheibenebene, der weitgehend von äußerer Strahlung abgeschirmt ist, kühler sein als das ihn umgebende Gas – zumindest in den äußeren Scheibenregionen, bei Abständen von mehr als 10 astronomischen Einheiten (dem zehnfachen der durchschnittlichen Entfernung der Erde von der Sonne) vom Zentralstern.

Insgesamt dürfte die natürlichste Erklärung für die überraschend niedrigen Temperaturmesswerte bei der Fliegenden Untertasse eine Kombination beider Faktoren sein: einerseits eine Entkopplung von Gas- und Staubtemperatur in den äußeren Scheibenregionen (deren Temperatur die ALMA-Beobachtungen erfassen), andererseits Staubeigenschaften (Korngrößen, Abweichungen von der Kugelform und weitere Faktoren), die es dem Staub erlauben, besonders effektiv abzustrahlen. Weitere Beobachtungen, die zeigen könnten, ob diese Erklärung in der Tat zutrifft, sind in Vorbereitung.

### Staub mit Folgen

Eine Temperatur mit geringerem Wert als erwartet klingt zunächst einmal nicht besonders spektakulär – könnte aber Konsequenzen haben, die bis zu unserem Verständnis der Planetenentstehung reichen.

Ein Grund dafür ist der Umstand, dass Astronomen die Menge an Gas in protoplanetaren Scheiben wie der Fliegenden Untertasse nicht direkt messen können. Ein häufiges Verfahren, die Gasmasse abzuschätzen, orientiert sich an der Masse des in der Scheibe enthaltenen Staubes. Mithilfe eines durch Beispielmessungen bestimmten Umrechnungsfaktors wird dann aus der Staubmasse die Gasmasse abgeschätzt. Für Staub mit unterschiedlichen Eigenschaften könnte dieser Umrechnungsfaktor allerdings einen deutlich anderen Wert haben. Das hätte Auswirkungen auf die Massenschätzungen für protoplanetare Scheiben und damit auch auf die Vorhersage, welche Planeten (massereich oder massearm? Näher am Stern oder ferner?) sich in der betreffenden Scheibe bilden könnten.

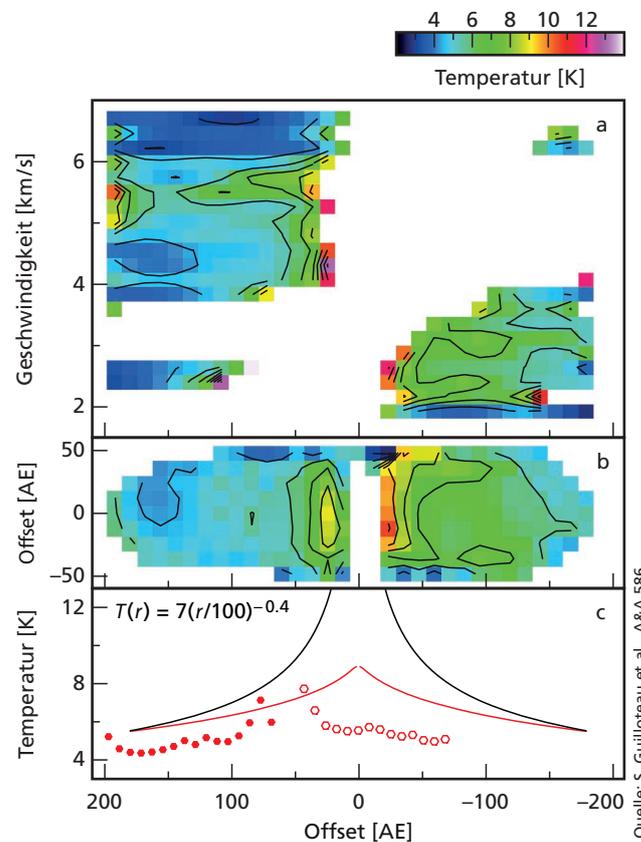
Darüber hinaus sind Staubeigenschaften für die früheste Phase der Planetenentstehung wichtig. Ganz

am Anfang stehen Staubkörner, die miteinander verklumpen und etwas größere Konglomerate bilden. Das Verklumpungsverhalten hängt dabei von Form und Oberflächeneigenschaften ab, inklusive des Vorhandenseins von Wassereis, das in bestimmten Phasen des Verklumpungsprozesses als eine Art Kitt wirkt.

Auch Überlegungen zur Chemie der protoplanetaren Scheiben hängen von den Staubeigenschaften ab. Staubkörner mit ihren vergleichsweise großen Oberflächen sind die Mini-Laboratorien, in denen chemische Reaktionen in der Scheibe bis hin zur Entstehung komplexer organischer Moleküle ablaufen. Es ist sogar möglich, dass die Staubchemie dafür verantwortlich ist, einige der chemischen Verbindungen zu schaffen, die später für die Entstehung von Leben auf einem aus der Scheibe gebildeten Planeten wichtig werden.

Veränderte Staubeigenschaften ändern auch die Verhältnisse in den Laboratorien, in denen die betreffenden Verbindungen entstehen. Auf kälteren Staubkörnern etwa dürften Oberflächenreaktionen langsamer ablaufen als auf warmen. Einige organische Reaktionen könnten dabei so langsam werden, dass sie auf den relevanten Zeitskalen keine Rolle mehr spielen. In diesem Falle müssten die Astronomen sich anderen Reaktionen zuwenden, um die organischen Moleküle zu erklären, die sich in Kometen und kohlenstoffhaltigen

Abb. II.4.2: Temperaturkarte der Staubscheibe der »Fliegenden Untertasse«. Blau zeigt niedrigere, rot höhere Temperaturen an.





Quelle: ALMA (ESO/NAO/NRAO)/A. Caproni (ESO)

**Abb. II.4.3:** Einige der Antennen des ALMA-Observatoriums in der Atacama-Wüste in Chile. Die Millimeter- und Submillimeterstrahlung, welche diese Antennen nachweisen

können, ist ideal geeignet, um die Temperatur von sehr kaltem Staub zu bestimmen.

Meteoriten (kohligen Chondriten) finden. Alternativen böten etwa das Innere kohlenstoffhaltiger Asteroiden, wo bei Vorliegen von flüssigem Wasser ähnliche Reaktionen ablaufen könnten. Aber von den Details einmal abgesehen: Klar dürfte sein, dass jeder, der die Chemie in solchen protoplanetaren Scheiben verstehen möchte, tunlichst die Formen, Oberflächeneigenschaften und Temperaturen der beteiligten Staubkörner kennen sollte!

*Dmitry Semenov, Thomas Henning und Til Birnstiel*

*in Zusammenarbeit mit*

*S. Guilloteau (Université de Bordeaux/CNRS, Floirac),  
V. Piétu (IRAM, Saint Martin d'Hères),*

*E. Chapillon (Université de Bordeaux/CNRS; IRAM),  
E. Di und A. Dutrey (beide University of Bordeaux/CNRS)  
und N. Grosso (Observatoire Astronomique de Strasbourg)*

## II.5 Wissenschaftliches Highlight

# Big Data schreibt (galaktische) Geschichte: Die erste globale Alterskarte unserer Milchstraße

**Dank neuer Verfahren, das Alter Roter Riesensterne zu bestimmen, haben Astronomen erstmals auf großen Skalen die Altersstruktur unserer Milchstraße kartiert. Dazu bestimmten sie das Alter von fast 100 000 Roten Riesen in Abständen von bis zu 50 000 Lichtjahren vom galaktischen Zentrum. So konnte eine Gruppe von Astronomen unter der Leitung von Melissa Ness und Marie Martig vom Max-Planck-Institut für Astronomie außerdem wichtige Teile des heutigen Verständnisses unserer Heimatgalaxie testen. Insbesondere bestätigt die Karte, dass unsere Heimatgalaxie von innen nach außen gewachsen ist und sich daher heute die meisten alten Sterne in den inneren Regionen befinden.**

In den letzten fünfzehn Jahren spielt »Big Data« auch in der Astronomie eine immer größere Rolle. Große Durchmusterungen erfassen und untersuchen mittlerweile Millionen astronomischer Objekte, seien es ferne Galaxien oder Sterne in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße. Eine Pionierrolle spielte dabei der Sloan Digital Sky Survey (SDSS), der im Jahre 2000 systematische Beobachtungen mit einem eigenen 2,5-Meter-Teleskop am Apache Point Observatory im US-Bundesstaat New Mexico begann. Das Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) war ein Partner in diesem ersten SDSS und ist auch an der derzeit laufenden vierten Ausgabe SDSS IV der Durchmusterung beteiligt. Darüber hinaus haben MPIA-Forscher – wie zahllose andere Astronomen weltweit – die Daten genutzt, die der SDSS online öffentlich zur Verfügung stellt.

Zwei der Beobachtungsprogramme des SDSS, sie heißen APOGEE und APOGEE-2, konzentrieren sich direkt auf Sterne innerhalb unserer Milchstraße. APOGEE steht dabei für das Apache Point Observatory Galactic Evolution Experiment, sinngemäß die »Messungen am Apache Point Observatory zur Entwicklung unserer Milchstraße«. Ziel der beiden Programme ist es zu rekonstruieren, wie unsere Milchstraße entstanden ist und sich über die letzten Milliarden Jahre hinweg weiterentwickelt hat.

---

### Durchmusterungsdaten und astronomische Regenbögen

Teleskopbeobachtungen liefern den Astronomen zu nächst einmal reichhaltige Daten zum Licht, das die betreffenden Sterne oder anderen Himmelsobjekte aussen-

den. Besonders viele Informationen erhält man dabei durch spektroskopische Durchmusterungen (wie bei den verschiedenen SDSS-Durchmusterungen). Dabei wird für jedes der untersuchten Himmelsobjekte ein Spektrum aufgenommen, das genau zeigt, wie sich das Licht des Objekts auf die unterschiedlichen möglichen Wellenlängen verteilt – wieviel Licht also beispielsweise in einem engen Bereich der Farbe blau, in einem engen Bereich im Roten oder eben bei einer von tausenden verschiedener Teilfarben ausgesandt wird, die Astronomen bei solchen Messungen unterscheiden.

Das Ergebnis ist ein hochdifferenzierter Regenbogen von Farben, die sich zwischen den unsichtbaren Radiowellen und Infrarotfarben jenseits des roten Endes des Regenbogens bis hin zum lila-blau des kurzwelligen Endes erstrecken und jenseits davon nur noch mithilfe von Weltraumteleskopen zu beobachten sind, da unsere Atmosphäre die Strahlungssorten mit den höchsten Energien abschirmt.

In der Praxis kann jede Durchmusterung nur einen Teil des gesamten Spektrums erfassen. APOGEE beschränkt sich auf hochaufgelöste und hochempfindliche Beobachtungen im Nahinfrarotbereich. Bei solchen Wellenlängen werden die Staubwolken, die weite Teile der Milchstraße vor den Blicken optischer Teleskope verbergen, so gut wie durchsichtig. APOGEE hat damit klare Sicht auf die gesamte Milchstraße. Der Spektrograf von APOGEE nimmt Spektren im Wellenlängenbereich zwischen 1,52  $\mu\text{m}$  und 1,69  $\mu\text{m}$  auf (H-Band) und unterscheidet in diesem Bereich fast 2300 unterschiedliche »Teilfarben« (entsprechend einer spektralen Auflösung von  $R=22\,500$  bei typischem Signal-zu-Rauschen-Verhältnis  $S/N > 100$ ).

APOGEE hat mehr als 100 000 Rote Riesensterne erfasst. Ein Stern wird zum Roten Riesen, nachdem er den Wasserstoff in seinem Kern zu Helium verschmolzen hat. Rote Riesen sind typischerweise sehr leuchtstark und damit auch auf große Distanzen nachweisbar. APOGEE kann einen typischen Roten Riesen noch in rund 80 000 Lichtjahren Entfernung nachweisen, und damit so gut wie überall in unserer Milchstraße. Außerdem ist die Leuchtkraft eines Roten Riesen weitgehend unabhängig vom Alter oder der chemischen Zusammensetzung des Sterns. Das macht es einfach, bei einer Durchmusterung eine repräsentative Auswahl solcher Sterne zu erfassen ohne befürchten zu müssen, dass Sterne mit bestimmten Eigenschaften systematisch über- oder unterrepräsentiert sind.

## Big Data: Immer nur so gut wie die Analyse-Werkzeuge

Ohne gute Analysewerkzeuge nützt es herzlich wenig, umfangreiche Daten zur Verfügung zu haben. Wer die Entwicklungsgeschichte der Milchstraße verstehen möchte, muss aus den Daten insbesondere Informationen gewinnen, wie alt die vielen verschiedenen Sterne in unserer Milchstraße sind. Die Entwicklungsmodelle für unsere Milchstraße sagen eine ganz bestimmte Altersverteilung vorher: Die mächtige Scheibe, in der sich die meisten Sterne von Galaxien wie unserer Milchstraße befinden, sollte sich von innen nach außen gebildet haben. Heute würde man daher erwarten, die älteren Sterne vor allem in den inneren Regionen zu finden, weiter draußen dagegen zunehmend jüngere Sterne.

Außerdem ist die Scheibe den Entwicklungsmodellen zufolge mit der Zeit immer dicker geworden. In größerem Abstand von der Scheibenebene erwartet man daher

**Abb. II.5.1:** Altersverteilung für Rote Riesensterne quer durch unsere Milchstraße, wie sie Melissa Ness und ihre Kollegen erstellt haben. Die Stichprobe ist hier in eine Simulation einer milchstraßenartigen Galaxie eingebettet. Die unterschiedlichen Farben der Stichproben-Pixel zeigen die unterschiedlichen Sternalter an: rot für die ältesten Sterne, grün für Ster-

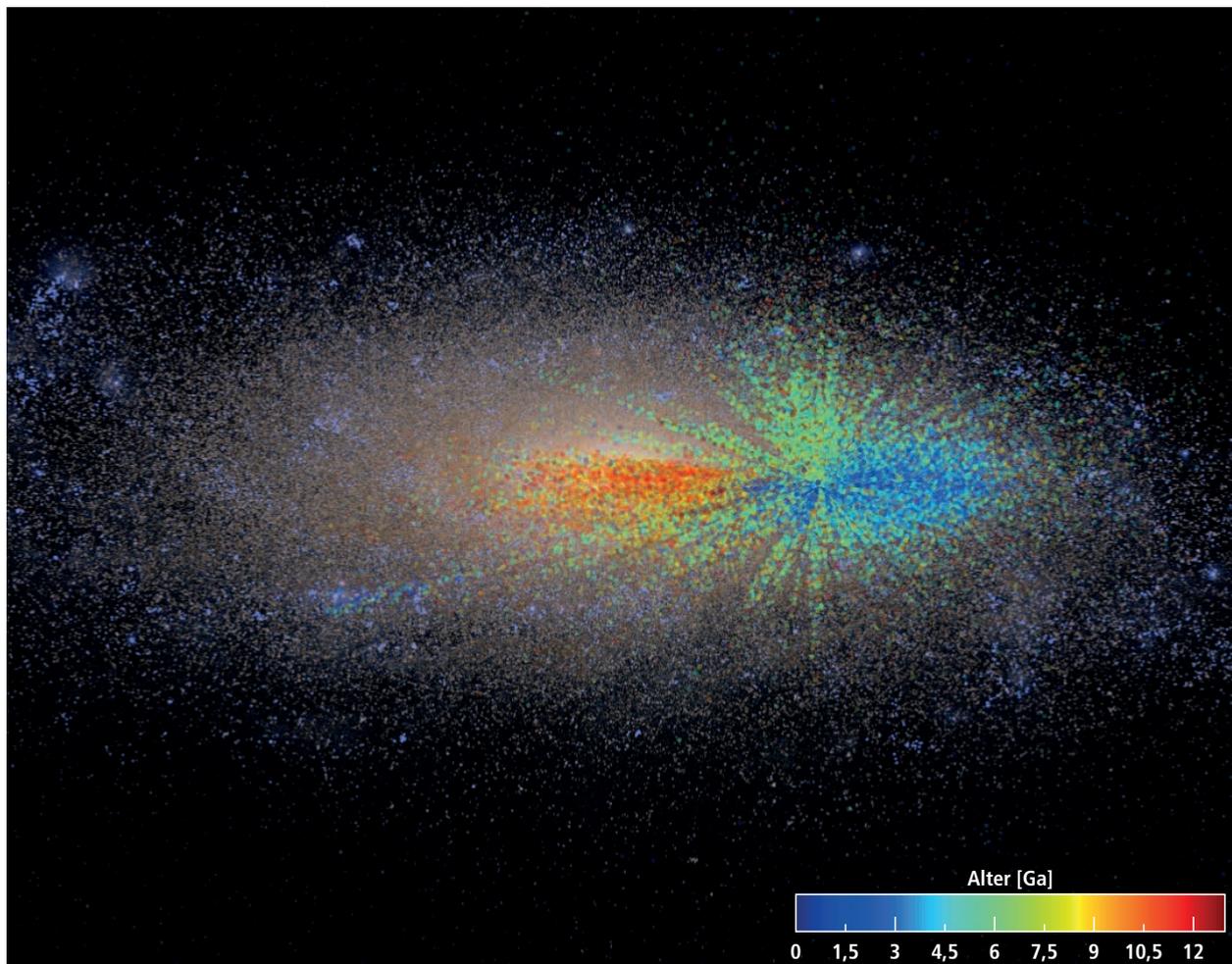
in heutiger Zeit mehr und mehr jüngere Sterne, und zwar mit zunehmendem Maximalabstand von der Ebene, je weiter man vom galaktischen Zentrum nach außen geht.

Um diese Vorhersagen und damit unser heutiges Verständnis der Entwicklung unserer Heimatgalaxie testen zu können muss man daher das Alter einer Vielzahl von Sternen bestimmen und dabei Daten bei möglichst vielen Abständen vom galaktischen Zentrum und von der Scheibenebene gewinnen.

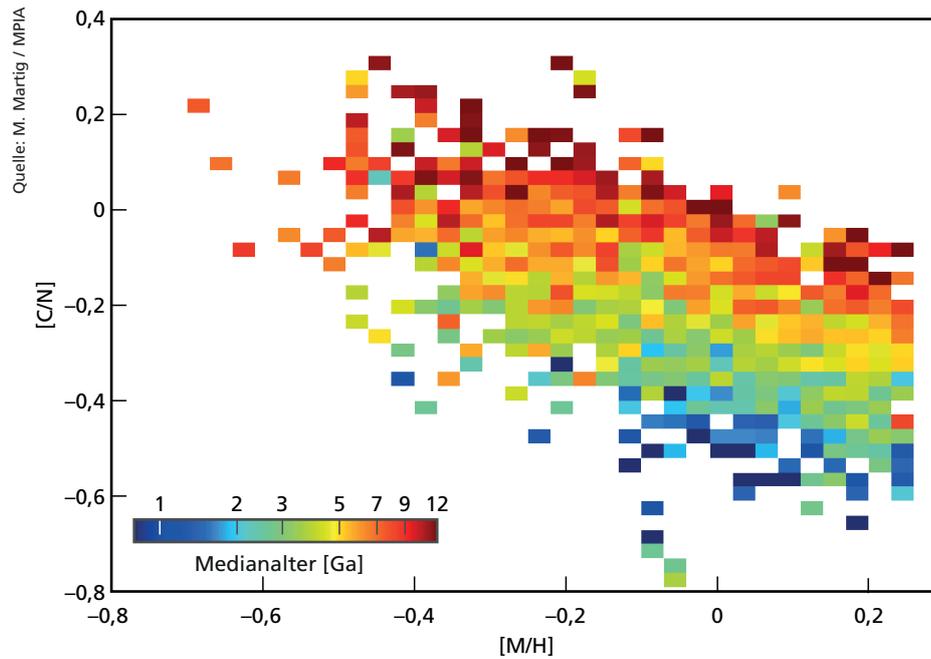
## Altersbestimmung von Sternhaufen

Allerdings sieht man Sternen ihr Alter nicht einfach so an. Altersbestimmungen ergeben sich immer aus einer Kombination von Beobachtungen mit Modellen der Sternentwicklung und nutzen Zusammenhänge zwischen dem Sternalter und anderen, direkter nachweisbaren Sterneigenschaften aus.

ne mittleren Alters und blau für die jüngsten Sterne. Die Altersverteilung, einschließlich der deutlich sichtbaren Konzentration älterer Sterne hin zum galaktischen Zentrum, bestätigt die Aussagen der heutigen Modelle für die Entwicklung unserer Milchstraße.



Quelle: M. Ness, G. Stinson / MPA



**Abb. II.5.2:** Beziehung zwischen den Häufigkeiten bestimmter chemischer Elemente in Sternatmosphären (die mithilfe von Spektroskopie nachgewiesen werden können) und der Sternmasse für Rote Riesensterne mit bekannten Massen und Spektren in der APOKASC-Stichprobe. Auf der waagerechten Achse ist die Häufigkeit von Metallen (das sind in der Astro-

nomie alle Elemente schwerer als Helium) im Vergleich zum Wasserstoff aufgetragen, auf der senkrechten Achse die relativen Häufigkeiten von Kohlenstoff C und Stickstoff N. Die Pixelfarben zeigen das mittlere Alter der Sterne im betreffenden Bereich des Diagramms an.

Bisher basierten Altersschätzungen für Rote Riesensterne jeweils auf einer von drei Bestimmungsmethoden – jede allerdings mit bestimmten Einschränkungen behaftet. Bei Sternen, die Teil ein und desselben (offenen) Sternhaufens sind, kann man davon ausgehen, dass sie zur gleichen Zeit entstanden und damit auch gleich alt sind. Außerdem haben sich solche Sterne aus ein und derselben Molekülwolke gebildet und weisen daher sehr ähnliche chemische Zusammensetzungen auf.

In einem Diagramm, das Sternhelligkeiten und -temperaturen gegeneinander aufträgt ([Effektiv-]Temperatur-Helligkeitsdiagramm) bilden die Sterne eines solchen Sternhaufens eine charakteristische Verteilung. Auf einer länglichen, linearen Struktur (»Hauptreihe«) liegen all diejenigen Sterne, die im Sternkern Wasserstoff zu Helium fusionieren (»Hauptreihensterne«), in einem anderen Bereich diejenigen Sterne, die bereits zu Roten Riesen geworden sind.

Die absolute Helligkeit eines Hauptreihensterns – also seine Strahlungsleistung – hängen direkt mit der Temperatur des Sterns zusammen. Aus solch einem Diagramm lässt sich daher auf Sternhelligkeiten und auf diesem Umweg auch auf die Abstände der betreffenden Sterne zurückschließen (Vergleich der Strahlungsleistung mit derjenigen Strahlung, die hier auf der Erde ankommt).

Aus demselben Diagramm lässt sich auch auf das Alter des Sternhaufens schließen: Sterne mit höherer Masse werden nach kürzerer Zeit zu Roten Riesen als solche

mit niedrigerer Masse. Andererseits sind Sterne mit höherer Masse leuchtstärker. Kombiniert man diese beiden Eigenschaften, dann lässt sich das Alter des Sternhaufens daraus bestimmen, wo in dem Diagramm der »Abknickpunkt« liegt, der diejenigen leuchtkräftigeren (masse-reicheren) Sterne, die bereits zu Roten Riesen geworden sind, von jenen leuchtvärmeren (masseärmeren) scheidet, die noch auf der Hauptreihe liegen.

Leider sind solche Sternhaufen vergleichsweise selten. Außerdem verlaufen sich die Sterne solcher Haufen typischerweise nach einigen Milliarden Jahren. Das Alter von sehr alten Roten Riesen lässt sich auf diese Weise daher nicht bestimmen.

## Unterriesen und Chemie

Eine andere Methode erlaubt Altersschätzungen für sogenannte Unterriesen: Sterne, die gerade aufgehört haben, in ihren Kernregionen Wasserstoff zu verbrennen, also gerade dabei sind, die Hauptreihe zu verlassen und dabei sind, zu Roten Riesen zu werden. Für solche Sterne lässt sich aus der Kombination von Parameterwerten für die (effektive) Temperatur, die Gravitationsbeschleunigung an der Sternoberfläche und die chemische Zusammensetzung (insbesondere die Häufigkeit von Eisen,  $[Fe/H]$ ) auf das Sternalter zurückschließen. Diese Parameter lassen sich aus dem Sternspektrum aber vergleichsweise direkt bestimmen.

Leider sind solche Unterriesen deutlich weniger leuchtstark als Rote Riesen und lassen sich daher nur bis zu deutlich geringeren Distanzen beobachten. Mit der heute für Durchmusterungen verfügbaren Teleskop-technik wäre es nicht möglich, Unterriesen bis hinaus zu hinreichend großen Abständen nachzuweisen, um ein repräsentatives Bild des gesamten Milchstraßensystems zu rekonstruieren.

Die dritte Methode ist eher qualitativer Art. Mit der Zeit entstehen bei den Kernfusionsprozessen der Sterne immer schwerere Elemente. Massereiche Sterne produzieren die schwerstmöglichen Elemente, wenn sie als Supernova explodieren – und schleudern diese Elemente dann auch gleich ins All hinaus. Sterne, deren Atmosphären nur winzige Mengen dieser schwersten Elemente enthalten, dürften daher frühzeitig entstanden sein, noch bevor unsere Heimatgalaxie durch Supernovae mit schwereren Elementen angereichert wurde. Sie sind daher sehr alt. Allerdings geben solche Schätzungen nur darüber Aufschluss, wieviele Stern- generationen einem gegebenen Stern vorangegangen sind. Quantitativ lässt sich das Alter des Sterns daraus nicht ermitteln.

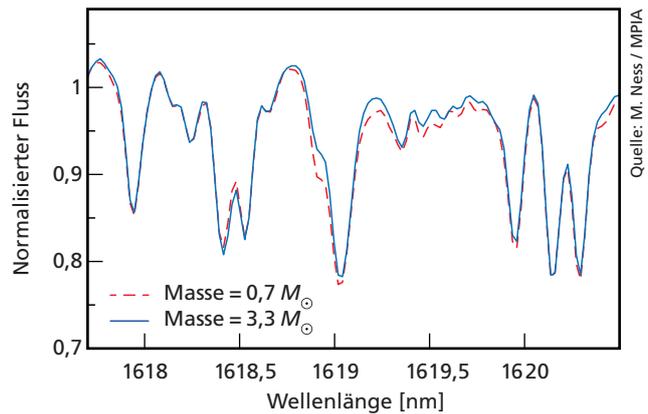
### Spektroskopische Altersbestimmung

Keine dieser Methoden wird dem Datenreichtum spektroskopischer Durchmusterungen wie APOGEE gerecht – keine erlaubt es den Astronomen, das Alter Roter Riesen direkt aus ihren Spektren abzulesen!

Diese Lücke schließen die erwähnten neuen Werkzeuge: Zwei sich ergänzende Methoden, die es erlauben, das Alter einzelner Roter Riesensterne zu bestimmen, entwickelt von den beiden MPIA-Postdoktoranden Marie Martig und Melissa Ness.

Beide Methoden greifen auf eine ganz besondere Art von Daten zurück, die erst durch Messungen des europäischen (CNES/ESA) Satelliten CoRoT und des NASA-Satelliten Kepler zugänglich geworden sind. Beide Satelliten sind in der Öffentlichkeit eher durch die zahlreichen Planeten um andere Sterne bekannt, die sie nachweisen konnten. Aber dieselben Messungen, anhand derer sich die betreffenden Exoplaneten nachweisen lassen, nämlich die hochgenaue Vermessung winziger Helligkeitsvariationen von Sternen, hat den Forschern auch Daten über ein ganz anderes Phänomen geliefert, nämlich über Sternoszillationen.

Sterne sind keine statischen Gasbälle (genauer: Plasmabälle), sondern sie schwingen und verändern dabei fortwährend auf Zeitskalen von Stunden, Minuten oder Sekunden ihre Größe und damit auch ihre Helligkeit. Genau wie der Klang einer Glocke Rückschlüsse auf Größe, Form und Materialeigenschaften der Glocke erlaubt, lassen sich aus Sternoszillationen Rückschlüsse auf fundamentale Eigenschaften von Sternen ziehen – unter anderem auf ihre Masse.



**Abb. II.5.3:** Beispiele für die Unterschiede in den Spektren Roter Riesensterne in Abhängigkeit von der Sternmasse. Die hier eingezeichneten Unterschiede ergeben sich aus dem flexiblen statistischen Modell, das Ness et al. mit The Cannon erstellten. Zu sehen ist der Unterschied zwischen einem Roten Riesen mit  $0,7$  Sonnenmassen und einem mit  $3,3$  Sonnenmassen. Aus Unterschieden dieser Art schließen Ness et al. auf die Massen der beobachteten Roter Riesen.

Vor kurzem wurde ein Katalog namens APOKASC veröffentlicht. Er enthält die Daten von fast 2000 Roten Riesensternen, deren Masse über Sternoszillationen mithilfe des Kepler-Satelliten bestimmt und deren Spektren im Rahmen der APOGEE-Durchmusterung aufgenommen wurden. Hervorgegangen ist der Katalog aus einem gemeinsamen Projekt des APOGEE-Teams und des Kepler Asteroseismic Science Consortium (Asteroseismologie ist dasjenige Teilgebiet der Astronomie, das sich mit Sternschwingungen beschäftigt).

Das schaffte ideale Voraussetzungen für Forscher, die sich für Zusammenhänge zwischen den Massen und den Spektrumseigenschaften von Roten Riesen interessieren, denn für diese beträchtliche Stichprobe von Sternen lagen schließlich Informationen über das eine wie das andere vor.

Bei Roten Riesen besteht andererseits ein direkter Zusammenhang zwischen der Masse und dem Alter. Die Masse des Sterns bestimmt, wieviel Zeit ein Stern auf der Hauptreihe verbringt, sprich: wie lange er in seinen Kernregionen Wasserstoff zu Helium verbrennt. Direkt im Anschluss wird der Stern zum Roten Riesen – allerdings nur für vergleichsweise kurze Zeit, bevor der Stern dann in die nächste Phase seines Lebens eintritt. Die kurze Dauer der Rote-Riesen-Phase bedeutet: Wer aus der Masse eines Roten Riesen abschätzt, wieviel Zeit der Stern auf der Hauptreihe verbracht hat, besitzt damit bereits eine gute Abschätzung für das Gesamtalter des Roten Riesen.

### Altersbestimmung dank Sternmischmaschine

Die spektrale Altersbestimmungs-Methode von Martig und ihren Kollegen basiert auf grundlegenden physikalischen Überlegungen wie folgt: Sterne mit mehr als

30% mehr Masse als die Sonne verschmelzen Wasserstoff im sogenannten CNO-Prozess über die Zwischenstufen Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) zu Helium. Ihre Kernregionen enthalten aufgrund der dabei ablaufenden Prozesse mehr Stickstoff-14 ( $^{14}\text{N}$ ) und weniger Kohlenstoff-12 ( $^{12}\text{C}$ ), als anderweitig zu erwarten. Je größer die Masse des Sterns, desto höher ist dabei die Temperatur in seinen innersten Regionen, und umso größer ist wiederum derjenige Bereich, in dem die Bedingungen für die CNO-Fusion gegeben sind. Daraus folgt: Je größer die Sternmasse, desto größer die Veränderungen der chemischen Zusammensetzung, und insbesondere der Zunahme des Stickstoff- und Abnahme des Kohlenstoff-Anteils.

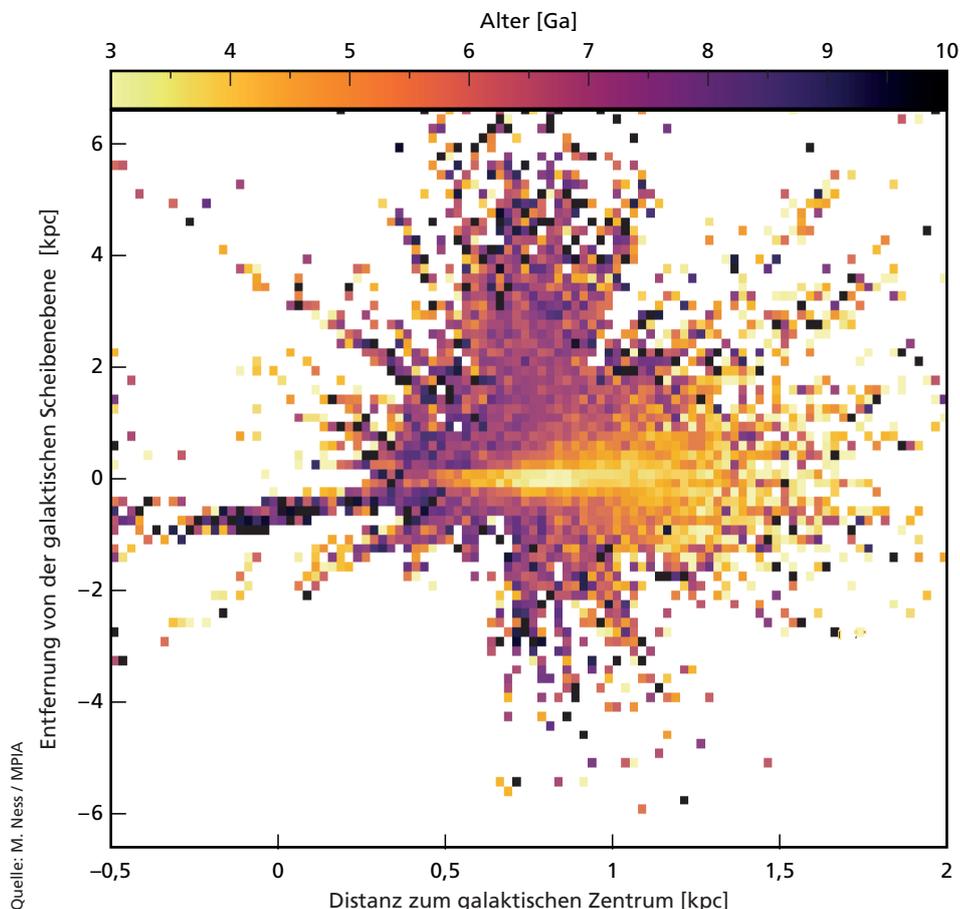
Sterne mit Massen bis zur zehnfachen Sonnenmasse besitzen unter ihren äußersten Schichten sogenannte Konvektionszonen. Dort wird das Sternmaterial pausenlos umgewälzt: heißeres Material steigt nach oben, kühleres Material sinkt ab, analog zu den Vorgängen in ei-

nem Topf mit brodelnd kochendem Wasser. Wenn solche Sterne die Hauptreihe verlassen und zu Roten Riesen werden, dann verändert sich ihre Struktur. Insbesondere die Konvektionszonen reichen dann tiefer in den Stern hinein als sonst. Bei Sternen, in denen CNO-Fusion stattgefunden hat, wird dadurch auch Material aus denjenigen Regionen nach oben transportiert, dessen chemische Zusammensetzung sich durch die CNO-Prozesse in charakteristischer Weise verändert hat, mit entsprechend mehr Stickstoff und weniger Kohlenstoff-12 (»first dredge-up«).

Damit gelangt das betreffende Material in die äußeren Sternregionen, deren chemische Zusammensetzung sich aus dem Sternspektrum ablesen lässt: Was dort an chemischen Elementen vorhanden ist, absorbiert und streut Licht bei ganz bestimmten, für das betreffende Element charakteristischen Frequenzen. So entsteht ein »chemischer Fingerabdruck« von dunklen Spektrallinien (Absorptionslinien) im Sternspektrum. Damit ist vorge-

**Abb. II.5.4:** Altersverteilung für eine Stichprobe von Roten Riesensternen in unterschiedlichen Abständen vom galaktischen Zentrum bis hin zu den Randgebieten unserer Milchstraße. Die waagerechte Achse zeigt die Abstände vom galaktischen Zentrum, die senkrechte Achse die Entfernung des Sterns von der galaktischen Scheibenebene (nicht maßstabgetreu). Die Farbgebung der Pixel zeigt das durchschnittliche Alter der Roten Riesen an, die Ness et al. in der betreffenden

Region im Diagramm beobachtet haben. Deutlich sichtbar ist, dass junge Sterne insbesondere nahe der Scheibenebene vorkommen. Auch die Altersverteilung, die anzeigt, dass die Scheibe unserer Milchstraße von innen nach außen gewachsen ist und das mit der Zeit immer mehr Sterne in immer weiter außen liegenden Regionen hinzugekommen sind, ist gut zu sehen.



zeichnet, wie sich das Alter eines Roten Riesen aus seinem Spektrum ableiten lassen könnte: Man lese aus dem Spektrum die Häufigkeit von Kohlenstoff-12 und Stickstoff-14 ab, insbesondere das Verhältnis von Stickstoff zu Kohlenstoff und schließe daraus auf die Masse des Sterns, und daraus wiederum auf das Sternalter.

Diese Möglichkeit wurde erstmals 2015 anhand der APOGEE-Daten von Thomas Masseron und Gerry Gilmore von der Universität Cambridge erkannt. Marie Martig unternahm dann den entscheidenden nächsten Schritt: mithilfe der Daten für 1475 Rote Riesen aus dem APOKASC-Katalog, für die es dank der Kepler-Messungen Massenwerte gab, leitete sie einen quantitativen Zusammenhang zwischen Stickstoff-/Kohlenstoffhäufigkeit und Sternalter ab.

In Abbildung 2 ist die entsprechende Korrelation gut zu sehen. Dort ist das Mengenverhältnis Kohlenstoff zu Stickstoff  $[C/N]$  gegen die Gesamthäufigkeit von Metallen in der Sternatmosphäre aufgetragen ( $[M/H]$ ), wobei im astronomischen Sprachgebrauch »Metalle« alle Elemente schwerer als Helium einschließt). Die Farben zeigen die betreffenden Sternalter an – von blau für mittlere Sternalter um die eine Milliarde Jahre bis zu dunkelrot für Sterne mit einem Alter von 12 Milliarden Jahren.

### Die Daten (fast) für sich selbst sprechen lassen

Einen anderen Ansatz wählten Melissa Ness und Kollegen. Ihrer Herangehensweise haben sie den klangvollen Namen The Cannon gegeben, nach der US-Astronomin Annie Jump Cannon (1863–1941), mit ihrer bahnbrechenden Klassifikation von Sternspektren Vorreiterin für unser heutiges Verständnis von Sternstruktur und -entwicklung.

The Cannon kann auf jede stellare Durchmusterung angewandt werden, deren Daten durchweg unter vergleichbaren Bedingungen mit einem einzigen Instrument aufgenommen und in gleicher Weise aufbereitet (reduziert) wurde. Das Verfahren besteht aus zwei Schritten: Im ersten wird ein Trainings-Datensatz einem genau definierten Rezept folgend ausgewertet. Dabei werden die Spektren und die Zielgrößen, die für die Untersuchung von Interesse sind, über ein allgemeines und flexibles statistisches Modell verknüpft. Bei den Zielgrößen kann es sich um Größen wie Temperatur, Gravitationsbeschleunigung an der Sternoberfläche handeln oder, zentral für das hier behandelte Thema, die Masse des Sterns. Das statistische Modell setzt nicht voraus, dass man die Physik der Sterne versteht – es stellt einfach anhand der Trainingsdaten einen Zusammenhang zwischen den Spektraldaten und den Sternparametern her (genauer: liefert eine Wahrscheinlichkeits-Dichtefunktion für diese Parameter).

Nachdem sie 1639 Rote Riesen aus dem APOKASC-Katalog als Trainings-Datensatz verwendet hatten, erhielten Ness und ihre Kollegen ein statistisches Modell, das

Sternmassen mit einer Genauigkeit von rund 20% aus den Spektraldaten erschließen konnte. In Abbildung 3 (auf der Hauptseite der Pressemitteilung) ist ein kleiner Teil von zwei Beispielspektren zu sehen, der zeigt, wie sich das Spektrum dem Modell zufolge in Abhängigkeit von der Sternmasse ändern sollte.

Die Astronomen überprüften ihren Ansatz, indem sie ihre Rechnungen mehrmals wiederholten und dabei nur einen Großteil des Trainings-Datensets nutzten, um das Modell abzuleiten. Die restlichen Sterne des Datentests nutzten sie anschließend, um das Modell zu testen.

### Die Altersstruktur der Milchstraße

Mithilfe eines Zusammenhangs zwischen Spektraldaten und Sternmasse bzw. -alter lässt sich aus den APOGEE-Daten, die knapp 100 000 Rote Riesen erfassen, eine repräsentative Karte erstellen, welche die Altersstruktur der Milchstraße sichtbar macht. Da die Sternparameter (insbesondere Temperatur und Masse) es erlauben, die absolute Helligkeit des betreffenden Sterns abzuschätzen, lassen sich für alle diese Sterne auch die Abstände zur Erde bestimmen. Das Resultat ist eine dreidimensionale Alterskarte.

Solche Karten erstellen sowohl Martig et al. als auch Ness et al. mit ihren jeweiligen Verfahren zur spektralen Altersbestimmung. Die Karte von Ness und Kollegen, in Abbildung 4 zu sehen, deckt einen großen Bereich der Milchstraße ab und enthält insbesondere einen Querschnitt, der sowohl das galaktische Zentrum als auch die Randgebiete unserer Milchstraße rund 65 000 Lichtjahre vom Zentrum entfernt umfasst. In Abbildung 4 ist zu sehen, wie sich diese dreidimensionale Karte in eine Simulation einbetten lässt, die unsere Heimatgalaxie als Ganzes zeigt.

Zum Vergleich: Die bislang beste Durchmusterung für Sterne, deren Alter bekannt waren, die Genf-Kopenhagen-Durchmusterung (Geneva-Copenhagen Survey), erfasst gerade einmal die kosmische Nachbarschaft unseres Sonnensystems bis hin zu Abständen von rund 330 Lichtjahren um uns herum. Damit waren die Möglichkeiten, die Entwicklung unserer Heimatgalaxie zu testen, ziemlich eingeschränkt.

Die neue, weit umfassendere Karte von Ness und Kollegen erlaubt es, unser Verständnis der Entwicklung unserer Milchstraße weit aussagekräftiger auf die Probe zu stellen. Wie den Modellen nach zu erwarten zeigt die Karte insbesondere, dass sich in der Scheibenebene in zunehmender Entfernung vom galaktischen Zentrum in der Tat zunehmend jüngere Sterne finden. Dies bestätigt das Bild vom allmählichen Wachstum der Milchstraße, die mit einer vergleichsweise kleinen Scheibe beginnt und sich weiter und weiter nach außen hin vergrößert, während sich mehr und mehr Sterne bilden.

Die Karte zeigt auch, dass bei gegebenem Abstand vom galaktischen Zentrum in der Scheibenebene jüngere Sterne anzutreffen sind als weiter von der Ebene entfernt. Es ist unklar, ob die älteren Sterne die größeren Geschwindigkeiten, dank derer sie sich von der Scheibenebene entfernen konnten, bereits bei der Geburt oder durch spätere Wechselwirkungen (»kinematisches Aufheizen«) bekommen haben.

### Werden wir einmal die komplette Geschichte der Milchstraße schreiben können?

Die Ergebnisse von Martig et al. und von Ness et al. sind wichtige Schritte im Rahmen einer allgemeineren Entwicklung. Über die nächsten Jahre hinweg werden Durchmusterungen wie APOGEE-2 und die hochgenaue Karte von Sternpositionen und -bewegungen des Gaia-Satelliten der ESA Daten über die Sterne unserer Milchstraße liefern, die in Qualität und Quantität weit über alles bisher Verfügbare hinausgehen.

Analysemethoden wie die hier beschriebenen und ihre Gegenstücke etwa zum Nachweis der Häufigkeiten bestimmter chemischer Elemente in den Sternatmosphären, mit denen sich aus diesen Daten physikalische Sternereigenschaften (»Label«) bestimmen lassen, werden aus diesem Datenpool eine gigantische galaktische Volkszählung machen, die Alter, Massen und Zusammensetzung einer großen Zahl von Sternen erfasst.

In Kombination mit Simulationen zur Galaxien- und Sternentstehung hoffen Astronomen, aus solch einer Datensammlung die Sternentstehungs-Geschichte unserer Milchstraße insgesamt rekonstruieren zu können: wie viele Sterne in den verschiedenen Epochen unserer galaktischen Geschichte entstanden sind, in welchen Regi-

onen dies stattfand, und wie die Sterne das Rohmaterial unserer Heimatgalaxie durch die in ihnen entstehenden schwereren chemischen Elemente verändert haben. Solche Veränderungen und das Vorhandensein schwererer Elemente sind Voraussetzung für die Entstehung von Planeten und letztlich auch von Lebewesen.

Das ist für sich genommen bereits ein interessantes Thema. Solche Ergebnisse würden aber noch viel weitere Kreise ziehen. Die meisten Sterne im Universum entstehen in Galaxien mit ähnlichen Massen wie die Milchstraße. Die Geschichte unserer Heimatgalaxie ist damit ein guter Ausgangspunkt für ein tieferes Verständnis der Sternentstehung, Galaxienentwicklung und chemischen Evolution im Rest des Universums.

*Melissa Ness, Marie Martig,  
Hans-Walter Rix, David Hogg  
(auch: New York University),  
Morgan Fouesneau und Anna Y.Q. Ho  
(auch: Caltech)*

*in Zusammenarbeit mit*

*Marc H. Pinsonneault (Ohio State University),  
Szabolcs Mészáros  
(ELTE Gothard Astrophysical Observatory, Hungary),  
D. A. García-Hernández und Olga Zamora  
(both Instituto de Astrofísica de Canarias und  
Departamento de Astrofísica, Universidad de La Laguna),  
Aldo Serenelli (Instituto de Ciencias del Espacio  
(ICE/CSIC-IEEC) Campus UAB)  
und Victor Silva Aguirre (Aarhus University)*

M. Ness et al. 2015: »The Cannon: A data-driven approach to Stellar Label Determination« in *Astrophysical Journal* Bd. 808, Artikel-Nr. 16. DOI: 10.1088/0004-637X/808/1/16

M. Ness et al. 2016: »Spectroscopic Determination of Masses (and Implied Ages) for Red Giants« in *Astrophysical Journal* Bd. 823, Artikel-Nr. 114. DOI: 10.3847/0004-637X/823/2/114

M. Martig et al. 2016: »Red giant masses and ages derived from carbon and nitrogen abundances« in *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* Bd. 456, S. 3655–3670. DOI: 10.1093/mnras/stv2830

## II.6 Wissenschaftliches Highlight

# Detailreiche Bilder eines planetaren Embryos zeigen Turboversion der Planetenentstehung

Beobachtungen mit dem Radioteleskop VLA in New Mexico zeigen die inneren Partien der Planeten-Geburtsstätte rund um den jungen Stern HL Tauri so detailreich wie nie zuvor. Deutlich sichtbar ist dabei ein riesiger Staubklumpen mit dem drei- bis achtfachen der Erdmasse, der ideale Bedingungen für die Entstehung eines Planeten bietet. Die Masse des neuen Planeten dürfte zwischen jener der Erde und jener des Neptun liegen. Das Vorhandensein des Klumpens zeigt eine Lösung für ein grundlegendes Problem der Planetenentstehung auf: wie Planeten innerhalb der relativ kurzen Zeit entstehen können, die für ihr Wachstum zur Verfügung steht.

Das Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) benutzt eine Technik namens Interferometrie, um Daten von 66 hochpräzisen Radioantennen genau so zu kombinieren, dass in dem entstehenden Bild Details sichtbar werden, wie sie nur ein kilometergroßes einzelnes Radioteleskop liefern könnte. Als ALMA 2014 fertiggestellt wurde, begannen die Astronomen, das Observatorium in seiner detailschärfsten Konfiguration zu testen; dabei sind die ALMA-Teleskope über eine Fläche mit

Abb. II.6.1: Die protoplanetare Staubscheibe um den jungen Stern HL Tauri, links: frühere Beobachtungen mit dem ALMA-Observatorium, die durch Lücken getrennte helle Lücken zeigten; rechts: die neuen Beobachtungen mit dem

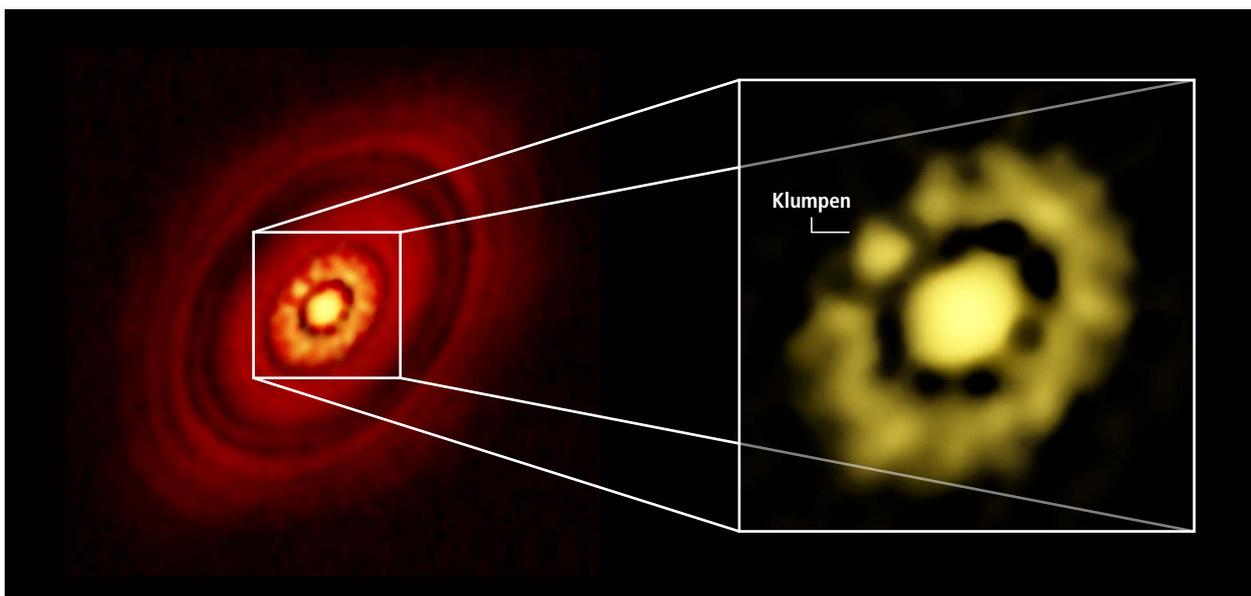
Durchmesser 16 Kilometer verteilt. Eines der Testobjekte, das sie sich ausgeguckt hatten, war die protoplanetare Scheibe rund um den jungen Stern HL Tauri.

### Eine helle Staubscheibe

Die Scheibe rund um HL Tauri wird von Astronomen bereits seit mehr als einem Jahrzehnt untersucht. Im Wellenlängenbereich der Millimeterwellen ist sie eine der hellsten bekannten Staubscheiben und damit ein vielversprechendes Ziel, um das Auflösungsvermögen von ALMA zu testen. Bei solchen Millimeterwellen empfangen die Astronomen die Wärmestrahlung von Staubpartikeln in der Wolke, deren Größen zwischen Bruchteilen eines Mikrometers und mehreren Millimetern liegen.

HL Tauri ist ein sehr junger Stern vom Typ der sogenannten T Tauri-Sterne. Er ist nur zwischen rund einer und zwei Millionen Jahre alt und, wie bei derart jungen Sternen üblich, noch weitgehend innerhalb einer ausgedehnten Hülle von Gas verborgen. Von der Erde aus gesehen befindet sich der Stern im Sternbild Stier (lat. Taurus). Er ist fast 460 Lichtjahre von uns entfernt.

VLA, die zusätzliche Strukturen der inneren Ringe sichtbar machen. Bei dem als Klumpen gekennzeichneten Objekt dürfte es sich um ein Planetenembryo handeln – eine Region, in der gerade ein Planet entsteht.



Quelle: Carrasco-Gonzalez et al. 2016; Bill Saxton, NRAO/AUI/NSF, ALMA (ESO/NAO/NRAO)

Das ALMA-Bild der Scheibe um HL Tauri übertraf die kühnsten Erwartungen der Astronomen. Noch nie zuvor hatte es eine derart detailreiche Abbildung einer Scheibe gegeben, und entsprechend enthusiastisch waren die Reaktionen in der astronomischen Community. Die kleinsten erkennbaren Strukturen in diesem Bild sind nur rund 3,5 bis 10 astronomische Einheiten groß (wobei eine astronomische Einheit dem mittleren Abstand Erde-Sonne entspricht).

### Frühreife Planeten?

Die Strukturen der Scheibe sind nicht nur vom Detailreichtum her beeindruckend, sondern das Vorhandensein der deutlich erkennbaren Ringe stellt durchaus eine Überraschung dar. Die einfachste Interpretation dieser Ringe, die durch klar erkennbare Lücken voneinander abgegrenzt sind, läuft auf das Vorhandensein von fertig entwickelten Planeten heraus. Diese Planeten sind in der Scheibe entstanden, befinden sich jetzt auf Umlaufbahnen innerhalb der Restscheibe und haben Gas und Staub entlang ihrer Bahnen weitgehend aufgesammelt, so dass die markanten Lücken entstanden sind. Ein analoges Phänomen in unserem eigenen Sonnensystem sind Unterteilungen der Saturnringe, die durch die Anwesenheit sogenannter Scherhundmonde entstanden sind.

Das Vorhandensein fertig entwickelter Planeten wäre allerdings nur schwerlich mit den heutigen Modellen der Planetenentstehung vereinbar. HL Tauri ist ein vergleichsweise junger Stern. Im Alter von ein bis zwei Millionen Jahren sollten Sterne zwar kleinere Planeten im innersten Bereich ihrer protoplanetaren Scheibe gebildet haben können. Dafür, dass sich auch bei größeren Abständen zwischen 10 und 100 astronomischen Einheiten (10-100 mal dem Abstand Erde-Sonne) Planeten gebildet haben könnten, sollte die Zeit allerdings nicht gereicht haben. Aber in diesem Abstandsbereich befinden sich die beobachteten Lücken zwischen den Ringen.

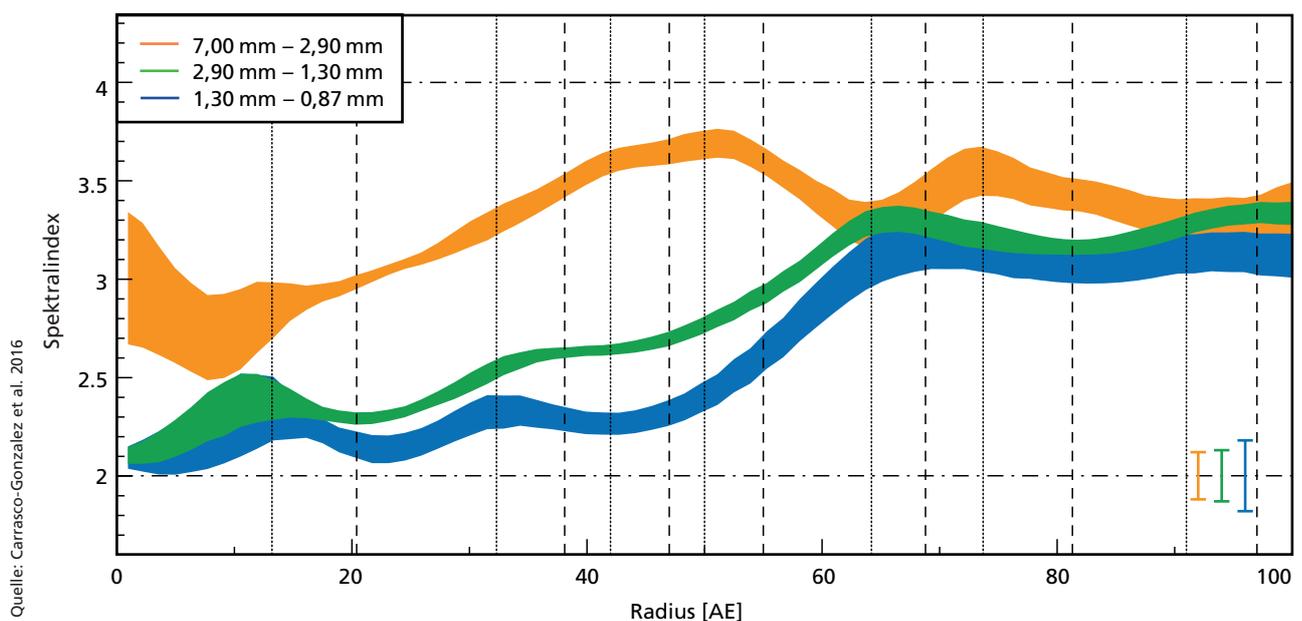
### Beobachtungen mit dem VLA

Die ALMA-Ergebnisse zogen eine Reihe von Folgebeobachtungen nach sich – inklusive ergebnisloser Suchen nach den Planeten, die man in den Lücken der Scheibe vermutete. Jetzt hat eine Beobachtungskampagne mit dem Karl G. Jansky Very Large Array (VLA) in New Mexico dem Bild von HL Tauri ein entscheidendes Puzzlestück hinzugefügt.

Durchgeführt und ausgewertet wurden die Beobachtungen durch eine Forschergruppe, zu der Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astronomie (MPIA), der

**Abb. II.6.2:** Je nach Lichtfrequenz (oder: Farbe) strahlen die einzelnen Regionen von HL Tau unterschiedlich viel Licht aus. Der Zusammenhang von abgestrahlter Menge (Flussdichte) und Strahlungsfrequenz  $\nu$  lässt sich dabei in guter Näherung in verschiedenen Frequenzbereichen durch jeweils ein Potenzgesetz  $F_\nu \sim (\nu/\nu_0)^\beta$  beschreiben. Der Parameter  $\beta$  heißt Spektralindex. Die Graphik zeigt, wie sich der Spektralindex der Staubemission in der HL Tau-Scheibe für verschiedene Wellenlängenbereiche mit zunehmendem Abstand vom Scheibenmittelpunkt verändert. Sie beruht auf einer kombinierten Analyse der ALMA und JVLA-Daten in Carrasco-Gonzalez et al. (2016).

Die Positionen der wichtigsten dunklen (D) und hellen (B) Ringe ist angedeutet. Die Staubgrößenverteilung hat einen großen Einfluß auf den Wert von  $\beta$ . Die Graphik zeigt die Tendenz, daß sich der  $\beta$ -Wert nach innen verringert, zumindest im Bereich von 50 – 10 AU. Das kann auf die Existenz größerer Staubteilchen im inneren Scheibenbereich hindeuten. Dieser Trend, und das wirkliche Niveau der Indexwerte, ist am klarsten zu sehen beim Spektralindex zwischen den zwei längsten Wellenlängen (ALMA 3 mm und JVLA 7 mm, orange), da hier Absorptionseffekte (die uns nur einen Teil des Scheibenlichts empfangen lassen) die geringste Rolle spielen.



Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), des National Radio Astronomy Observatory (NRAO) der USA als Betreiberin des VLA sowie des spanischen Spanish Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) gehören. Die leitenden Wissenschaftler sind Carlos Carrasco González (UNAM) und Thomas Henning (MPIA).

Das VLA ist ein großes Radio-Interferometer, dessen insgesamt 27 Antennen, angeordnet entlang der Arme einer gigantischen Y-Form, bei längeren Wellenlängen messen als die von ALMA. Die HL Tauri-Beobachtungen fanden an 10 verschiedenen Terminen zwischen Dezember 2014 und September 2015 statt. Sie nutzten die größte Anordnung der Antennen, bei der die äußersten Antennen bis zu knapp 40 Kilometer voneinander entfernt sind. Insgesamt wurden auf diese Weise 45 Stunden lang Messdaten aufgenommen. Dies geschah bei Wellenlängen um 7 Millimeter (Q-Band, 39–47 GHz, und damit bei deutlich längeren Wellenlängen als den 0,87, 1,3 und 2,9 Millimetern der ALMA-Beobachtungen).

Es handelt sich um die bislang empfindlichsten und detailreichsten Beobachtungen der Scheibe von HL Tauri bei diesen Wellenlängen. Empfangen wird, wie im Falle der ALMA-Beobachtungen, auch hier die von den Staubteilchen in der Scheibe ausgesandte Strahlung.

### Ein klares Bild der innersten Scheibenregionen

Die neuen VLA-Bilder zeichnen das bislang klarste Bild der inneren Regionen der Scheibe um den jungen Stern. Diese Regionen sind interessant, weil sie die potenziellen Geburtsstätten für Planeten ähnlich denen unseres Sonnensystems sind – Planeten ähnlich der Erde, dem Neptun oder sogar dem Jupiter.

Der Umstand, dass die neuen Beobachtungen bei längeren Radiowellenlängen stattfanden, sorgte auch dafür, dass die Forscher nicht nur die Oberfläche der Staubscheibe sehen, sondern auch Licht aus allen tieferen Regionen empfangen konnten. (Im Sprachgebrauch der Physiker ist die Staubscheibe bei den kürzeren ALMA-Wellenlängen »optisch dick«, bei den längeren Wellenlängen der VLA-Beobachtungen »optisch dünn«.) Damit ließ sich aus den Beobachtungen auch die Gesamtmenge des dort vorhandenen Staubs abschätzen.

Die Beobachtungen erlauben es außerdem, die Größen der im Beobachtungsgebiet vorhandenen Staubkörner abzuschätzen. Demnach sind die Körner in den innersten Scheibengebieten größer als die weiter außen befindlichen Körner. Das entspricht dem, was man anhand von Untersuchungen an anderen, weiter entwickelten Scheiben erwartet hätte. Die größten der Körner scheinen Durchmesser von fast einem Zentimeter zu besitzen. Damit sind diese »Kiesel« genau so groß, dass sie sich in bestimmten Bereichen der Gasströmung sammeln und dort zu größeren Objekten wachsen können, die sich letztlich zu Planeten zusammenschließen.

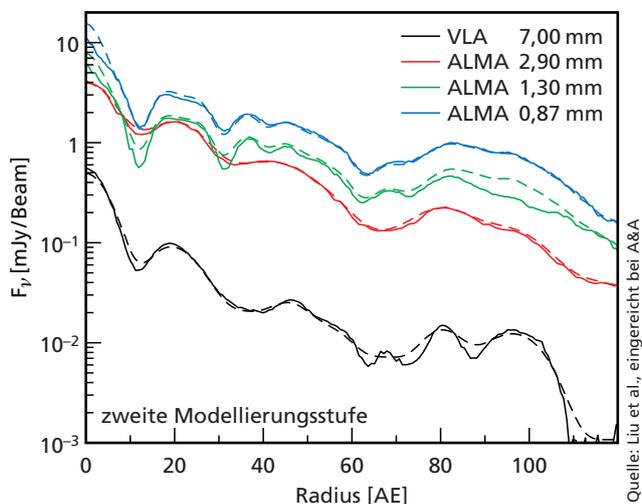
### Der planetare Embryo

Die neuen Beobachtungen legen nahe, dass die HL Tauri-Scheibe nicht überraschend weit entwickelt ist und bereits massereiche Planeten gebildet hat, sondern dass sie sich im Gegenteil in einem der frühesten Stadien der Planetenentstehung befindet. Damit müssten die markanten Ringe, die in dem ALMA-Bild sichtbar sind, eine alternative Erklärung haben – sie könnten beispielsweise durch dynamische Instabilitäten in der Scheibe zustande gekommen sein, also dadurch, dass bestimmte Strömungsmuster in solch einer Scheibe zu einer ungleichmäßigen Materieverteilung führen.

Am spannendsten ist dabei die Möglichkeit, dass die Ringe und ihre Unterstrukturen nicht eine Folge, sondern ein wichtiger Teil des Prozesses der Planetenentstehung sein könnten. Die neuen Bilder zeigen, dass die Ringe in der innersten Scheibenregion alles andere als glatt sind. Insbesondere ist dort ein heller Fleck sichtbar, der durch eine dichte Konzentration von Staub hervorgerufen scheint, mit einer Gesamtmasse zwischen 3 und 8 Erdmassen.

Die Staubkörner in diesem Klumpen scheinen etwas größer zu sein als im Rest der Scheibe, und es scheint, als könnte dies die erste direkte Abbildung eines der frühesten Stadien der Planetenentstehung sein. Der Klumpen wäre damit so etwas wie ein planetarischer Embryo, der

**Abb. II.6.3:** Strahlungstransport-Modellierung der radialen HL-Tau-Helligkeitsprofile bei den ALMA- und JVA-Wellenlängen, basierend auf der Anpassung der Staub-Säulendichteverteilung. Gezeigt sind hier die beobachteten (durchgehende Linien) und die modellierten (gestrichelte Linien) Flussverteilungen entlang der Scheiben-Hauptachse. Es stellte sich heraus, daß nicht alle Bilder gleichzeitig gut angepasst werden konnten, wenn man für alle Staubteilchen-Größen dieselbe relative radiale Verteilung annahm. Diese Graphik zeigt deshalb eine weitere Stufe der Modellierung, in der wir für verschieden große Staubteilchen unterschiedliche radiale Säulendichte-Profile bei der Anpassung erlaubten. Die Fits sind dann deutlich besser, wenn die größeren Teilchen mehr in den inneren Bereichen der Scheibe konzentriert sind.



bereits in diesem frühen Stadium genügend Masse enthält, um einen Planeten wie unsere Erde oder sogar wie den Neptun hervorzubringen.

---

### Planetenentstehung in der Scheibe

Das allgemeine Szenario für die Planetenentstehung ist seit Jahrzehnten dasselbe (und einige Aspekte gehen noch deutlich weiter zurück): Ein junger Stern ist von einer protoplanetaren Scheibe aus Gas und Staub umgeben. Darin befindliche kleine Staubkörnchen verklumpen mit der Zeit zu immer größeren Gebilden, bis schließlich Objekte entstanden sind, die massereich sind, um sich auch über ihre Gravitationsanziehung zu Planetenvorläufern (Planetesimalen) und schließlich zu Planeten zusammenzufinden.

Schon länger ist bekannt, dass dieses Szenario ein Problem mit den verfügbaren Zeiträumen hat. Im Laufe von rund zehn Millionen Jahren gelingt es der intensiven Strahlung des jungen Sterns, die Gas- und Staubteilchen der protoplanetaren Scheibe zu zerstreuen; übrig bleiben nur die größeren Gebilde, die bis dahin bereits entstanden sind.

Doch zumindest wenn man mit einer homogenen Scheibe beginnt, sind Kollisionen zwischen den kleinen Ausgangsobjekten zu wenig häufig und zu wenig effektiv, als dass die Größe dieser Objekte rasch genug wachsen könnte. Außerdem führen sie zu häufig zu Fragmentierung als dazu, dass größere Verbundobjekte entstehen. Unter solchen Bedingungen ist es unmöglich, dass sich Planeten und insbesondere große Gasplaneten hinreichend schnell bilden. Noch bevor die Planeten hinreichend groß geworden wären, hätte der Stern Gas und Staub der Scheibe zerstreut und das weitere Wachstum damit vorzeitig gestoppt.

---

### Die Rolle großräumiger Scheibenstrukturen

Vor rund 10 Jahren konnten Wissenschaftler der Theoriegruppe Stern- und Planetenentstehung am Max-Planck-Institut für Astronomie zeigen, dass der Planetenentstehungsprozess insgesamt deutlich beschleunigt werden kann, wenn der Staub nicht gleichmäßig und homogen in der ganzen Scheibe verteilt ist, sondern an einigen Orten deutlich höhere Konzentrationen aufweist. Solche Konzentrationen können sich aus Strömungsmustern des Gases der Scheibe ergeben, etwa aus gigantischen Wirbeln oder sogenannten Zonenströmungen – Strömungsmustern, die spontan in rotierenden Fluidsystemen entstehen; in der Erdatmosphäre beispielsweise der Jetstream oder die Zyklone und Antizyklone.

Eine gute Analogie dafür, was mit dem Staub passiert, ist ein langsam strömender Fluss, auf dessen Oberfläche Zweige, Blätter und andere Kleinteile treiben. Je nach Strömungsmuster sammelt sich das Treibgut in be-

stimmten Oberflächenregionen, etwa an Wasserwirbeln. Die Sammelstellen sind auf der Oberfläche klar sichtbar. Analog dazu sammeln sich Staub und Kiesel vermehrt in bestimmten Strömungsmustern des umgebenden Gases. So wird die Staubkonzentration in bestimmten eng begrenzten Bereichen deutlich erhöht.

Ein Szenario, in dem das Vorhandensein solcher Strömungsmuster die Planeten-Entstehungsprozesse beschleunigt, würde in etwa so aussehen: Instabilitäten aufgrund von Magnetfeldern oder von Temperaturgefällen innerhalb der protoplanetaren Scheibe führen zur Ausbildung großräumiger Strukturen wie den beobachteten Ringen und Lücken. Dichte und massereiche Ringe, die zahlreiche Kiesel enthalten, könnten fragmentieren und dabei dichtere Klumpen hervorbringen. Diese wiederum würden dann unter ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren, noch weitere Masse auf sich ziehen und am Ende Planeten hervorbringen.

Die neuen Beobachtungen liefern einen Schnappschuss genau solcher Vorgänge: Die Massenmessungen zeigen, dass die inneren Ringe, die im ALMA-Bild sichtbar sind, in der Tat hinreichend dicht und massereich sind, wie es das Szenario erfordert. Der deutlich sichtbare Klumpen in den neuen VLA-Bildern ist das erste Bild von Fragmentierung innerhalb eines Rings einer protoplanetaren Scheibe. Erstmals sehen Astronomen diese schnelle Form der Planetenentstehung direkt in Aktion.

Das für die Planetenentstehung nötige Rohmaterial befindet sich in der Scheibe. Die VLA-Beobachtungen zeigen, dass die innere Scheibenregion Staub mit einer Gesamtmasse zwischen 10 und 50 Erdmassen enthält. Kombiniert man diese Aussage mit den ALMA-Daten, dann kommt man für die Gesamtmasse des Staubes in der HL Tauri-Scheibe auf zwischen 300 und 900 Erdmassen (zwischen einer und drei Jupitermassen, oder zwischen einem oder drei Tausendstel Sonnenmassen). Zum Vergleich: Im heutigen Sonnensystem findet man nur rund 60 Erdmassen an festem Material, vor allem in Form der erdähnlichen Planeten und der festen Kerne der Gasplaneten. Entsprechende Rechnungen zeigen, dass die protoplanetare Scheibe unseres Sonnensystems rund 180 Erdmassen an Feststoffen enthalten haben dürfte, damit sich die Festkörper darin hinreichend schnell bilden konnten, bevor die protoplanetare Scheibe zerstreut wurde. Solche Abschätzungen sind aber derzeit noch recht unsicher, da wir nicht wissen, wie effizient Feststoffe wie Staub bei der Planetenentstehung in fertige Planeten umgesetzt werden.

---

### Nächste Schritte mit ALMA und dem VLA

Als nächsten Schritt werden die Forscher sowohl die ALMA-Daten als auch die neuen VLA-Beobachtungen nutzen, um ein detailliertes Modell der Scheibe zu erstellen. Dafür werden nicht nur das Dichteprofil von Gas und Staub sowie die beobachteten Strukturen modelliert,

sondern es wird auch simuliert, wie das Licht des Zentralsterns in den verschiedenen Regionen der Scheibe absorbiert und wieder emittiert wird, und wie sich unter dem Einfluss der Strahlung in unterschiedlichen Scheibenregionen unterschiedliche Temperaturen einstellen (Strahlungstransportrechnungen).

Genauere Kenntnisse über die Verteilung des Gases geben dann wiederum Anhaltspunkte dafür, welcher der verschiedenen infrage kommenden Mechanismen den inneren Ring erzeugt und zu seiner Fragmentierung geführt haben dürfte. Ebenso werden dann Abschätzungen möglich, wie lange der Klumpen noch brauchen dürfte, um sich zu einem oder mehreren festen Körpern zusammenzuziehen – zu einer Wolke von Planetesimalen oder sogar zu einem fertigen Planeten.

Besonders interessant versprechen derzeit in Planung befindliche Beobachtungen zu werden, die zeigen können sollten, ob der helle Klumpen derzeit Gas und Materie aus seiner Umgebung auf sich zieht (Akkretion) oder nicht. Daran entscheidet sich, ob es sich tatsächlich um ein Vorläuferobjekt handelt, das sich im Laufe der Zeit zu einem Planeten auswächst. Solche Beobachtungen nutzen die Strahlung bestimmter Moleküle um nachzuweisen, dass in der betreffenden Region Energie in der Weise freigesetzt wird, wie man es erwartet, wenn Gas auf einen Protoplaneten fällt. Die Form der Spektrallinien liefert weitere Hinweise darauf, dass sich die betref-

fende Materie tatsächlich im Fall auf eine Zentralmasse befindet. Aus der Akkretionsrate sollte es sogar möglich sein, die Masse des in Entstehung befindlichen Planeten abzuschätzen.

*Thomas Henning, Hendrik Linz, Til Birnstiel,  
Roy van Boekel und Hubert Klahr*

*in Zusammenarbeit mit*

*Carlos Carrasco-González  
(Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM),  
Claire J. Chandler  
(National Radio Astronomy Observatory, NRAO),  
Laura Pérez (NRAO und Max-Planck-Institut  
für Radioastronomie, Bonn, MPIfR),  
Luis F. Rodríguez and Roberto Galván-Madrid (UNAM),  
Guillem Anglada  
(Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC),  
Mario Flock (JPL, Caltech), Enrique Macías (CSIC),  
Karl Menten (MPIfR),  
Mayra Osorio (CSIC),  
Leonardo Testi  
(ESO, INAF Arcetri, Excellence Cluster »Universe«),  
José M. Torrelles (CSIC-IEEC)  
und Zhaohuan Zhu (Princeton University)*

## II.7 Wissenschaftliches Highlight

# Das versteckte Innenleben des Orionnebels: Tanzende Filamente und eine neuartige Möglichkeit der Sternentstehung

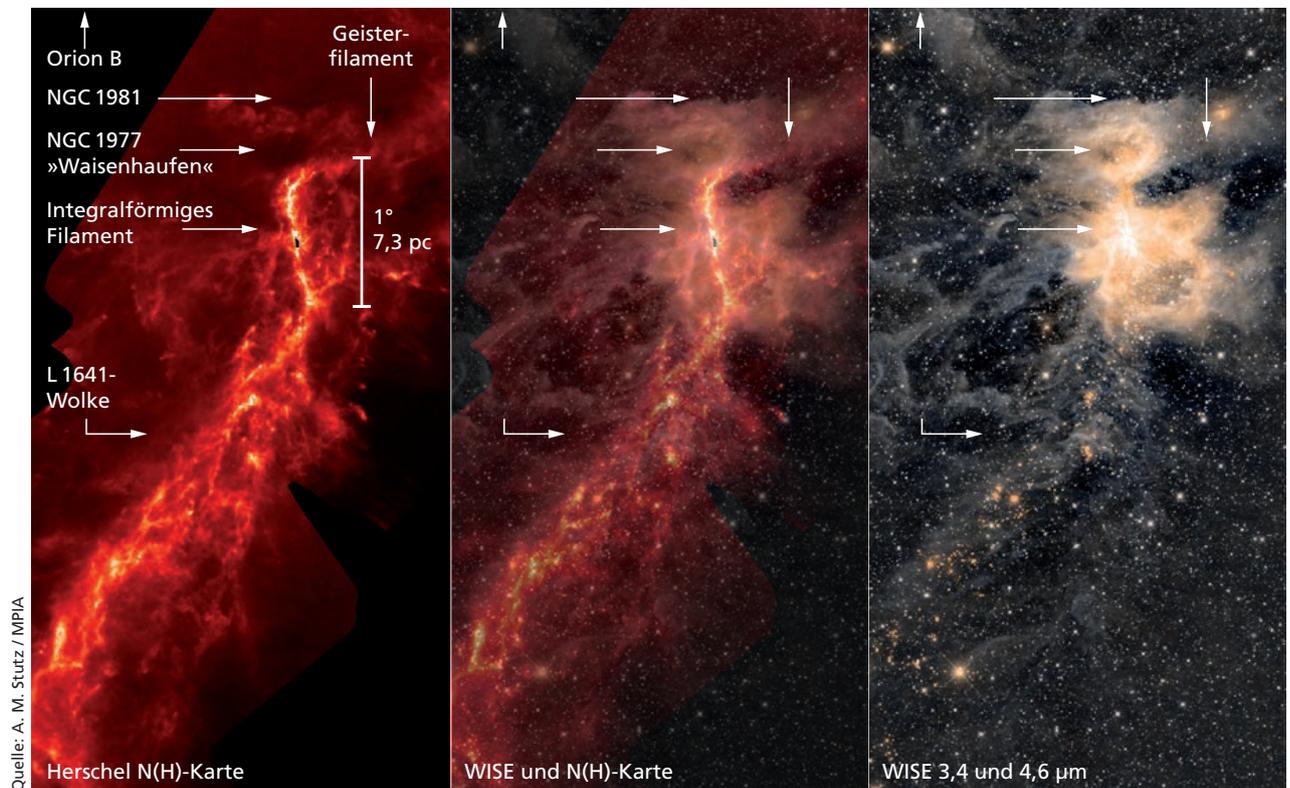
Im Weltall können in vergleichsweise kurzer Zeit ganze Sternhaufen entstehen. Aus einer Untersuchung eines Gas- und Staubfilaments, zu dem auch der bekannte Orionnebel gehört, schlagen Amelia Stutz und Andrew Gold vom Max-Planck-Institut für Astronomie einen neuen Mechanismus für diese ultraschnelle Sternentstehung vor. Ihren Untersuchungen nach ist das Filament eine flexible Struktur, zusammengehalten durch Gravitation und stabilisiert durch Magnetfelder, die hin und her schwingt. Dies und die Lage der Sternhaufen rund um das Filament legt nahe, dass Instabilitäten, wie sie aus der Plasmaphysik bekannt sind, für die schnelle Bildung von Sternhaufen verantwortlich sein könnten.

Abb. II.7.1: Bild des Sternentstehungsgebiets Orion A. Zu erkennen sind das integralförmige Filament, die zwei Sternhaufen oberhalb des Filaments sowie im Süden die Wolke L1641. Linkes Bild: (Säulen-)Dichtekarte für Wasserstoff aus Daten des Weltraumteleskops Herschel. Rechtes Bild: Infrarotbild des Weltraumteleskops WISE (Lang 2014). Mitte: Kombination der zwei Bilder.

In groben Zügen ist die Sternentstehung sehr einfach. Man nehme eine sehr kalte Wolke, bestehend aus Wasserstoffgas und etwas Staub. Regionen der Wolke, die hinreichend kalt sind, werden unter dem Einfluss ihrer eigenen Schwerkraft kollabieren und neue Sterne bilden.

Bei genauerer Betrachtung sieht die Situation deutlich komplizierter aus. Insbesondere scheint es zwei Arten der Sternentstehung zu geben. In gewöhnlichen, kleineren Molekülwolken entstehen nur einer oder ein paar Sterne, bis sich das Gas der Wolke über einen Zeitraum von rund 3 Millionen Jahren zerstreut hat. Größere Wolken leben rund zehn Mal länger und können einen anderen, deutlich spektakulären Modus der Sternentstehung aufweisen, in dem ganze Sternhaufen auf einmal entstehen, inklusive sehr massereicher Sterne.

Es gibt zwar eine Reihe von Vermutungen, aber keine umfassend getesteten Modelle für die Entstehung ganzer Sternhaufen und dafür, wie die entsprechenden Wolken in der astronomisch gesehen vergleichsweise kurzen Zeit von Millionen von Jahren eine so große Anzahl von Sternen erzeugen können. Die meisten Erklärungsansätze gehen von einer Art Kettenreaktion aus, in



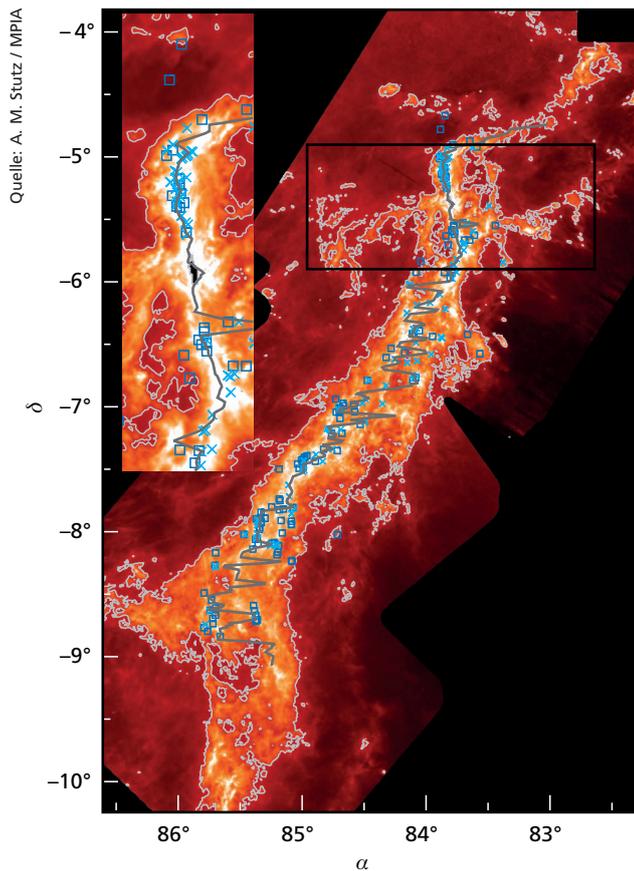


Abb. II.7.2: Orte der Protosterne in der Orion-A-Wolke, aus Daten des Weltraumteleskops Herschel (nach Furlan et al. 2016). Im integralförmigen Filament (kleines Bild) liegen die Protosterne entlang des Rückgrats.

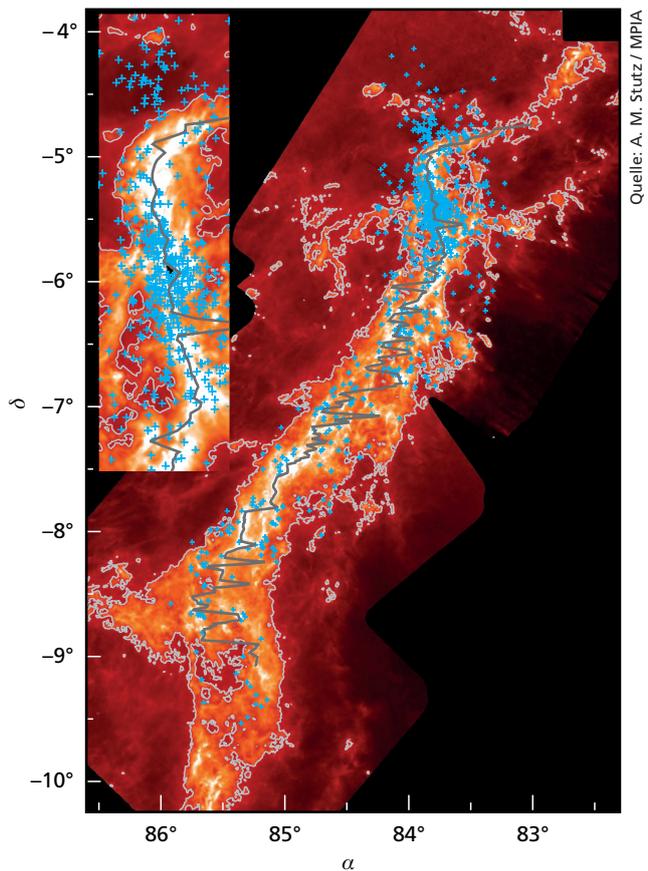


Abb. II.7.3: Aufenthaltsorte der jungen Sterne in der Orion-A-Wolke (Vor-Hauptreihensterne der Klasse II nach Megeath et al. 2010). Gezeigt sind nur Sterne, deren Radialgeschwindigkeiten aus der Apogee-Durchmusterung bekannt sind. Im Gegensatz zu den Protosternen (Abbildung 3) befinden sich die Sterne im wesentlichen alle außerhalb des Filaments.

der die Entstehung der ersten Sterne in der Wolke die Entstehung weiterer Sterne auslöst. Als Auslöser kommen zum Beispiel die Supernovaexplosionen der massereichsten (und daher kurzlebigsten) gerade entstandenen Sterne infrage.

### Ein Filament aus Gas und Staub

Jüngst haben Amelia M. Stutz und Andrew Gould vom Max-Planck-Institut für Astronomie einen alternativen Mechanismus für die Sternhaufen-Entstehung vorgeschlagen. Dabei spielen Magnetfelder in und um die Molekülwolke und dynamische Instabilitäten eine Rolle, und eines der bekanntesten Objekte des Nachthimmels: der Orionnebel, der selbst mit dem bloßen Auge als schwaches Nebelfleckchen am Himmel zu sehen ist und in Aufnahmen etwa des Weltraumteleskops Hubble, aber auch solchen von engagierten Amateurastronomen eine beeindruckende Farbenpracht entfaltet. Im Infrarotlicht betrachtet zeigt der Orionnebel allerdings noch ein ganz anderes Gesicht – und das hängt direkt mit dem neuen von Stutz und Gould vorgeschlagenen Sternentstehungsmechanismus zusammen.

Die Schlüsselrolle kommt dabei einer Karte der Staubverteilung in der Sternentstehungsregion Orion A zu, die Stutz und Jouni Kainulainen (ebenfalls vom MPIA) im Mai 2015 veröffentlicht haben. Die Karte basiert auf Beobachtungen der betreffenden Region mit dem Weltraumobservatorium Herschel im ferninfraroten Wellenlängenbereich zwischen 160 und 500  $\mu\text{m}$ . Bei solchen Wellenlängen lässt sich die Wärmestrahlung des kalten Staubs nachweisen, der in Molekülwolken anzutreffen ist. Stutz nutzte diese Daten, um die Dichteverteilung des kalten Staubs in der betreffenden Region zu kartieren (genauer: die Säulendichte als zweidimensionale Projektion der Dichteverteilung auf die Himmelskugel).

Mit einer Entfernung von nur 1300 Lichtjahren ist Orion A das der Erde nächste Gebiet, in dem auch massereiche Sterne entstehen (Abbildung II.4.1). Die auffälligste Struktur in dieser Region heißt integralförmiges Filament (integral-shaped filament, ISF), da seine Form einem langgestreckten Buchstaben S und damit dem Integralzeichen der Mathematiker ähnelt. Das Filament besteht aus Gas und Staub im Verhältnis von ca. 110 zu 1.

Der Orionnebel, wie man ihn aus den berühmten Aufnahmen kennt, befindet sich im mittleren Abschnitt dieses Filaments.

Vereinfacht gesehen ist das integralförmige Filament wie ein langgestreckter, deformierter Zylinder geformt, dessen Durchmesser entlang seiner Länge etwas variiert. Wie sich der Durchmesser entlang des Filaments ändert, lässt sich aus den zweidimensionalen Infrarotbildern abschätzen. Der Durchmesser des Filaments beträgt ein paar Lichtjahre. Mithilfe von Spektrallinien für Kohlenstoff-13-Monoxid [insbesondere für den Übergang  $^{13}\text{CO}(2-1)$ ] und anderen Linien, welche die Anwesenheit von Materie höherer Dichte anzeigen, lässt sich rekonstruieren, wie sich die Materie im Filament bewegt; solche Rekonstruktionen bestätigen das vereinfachte Bild der allgemeinen Struktur des Filaments.

Mithilfe solch eines vereinfachten Strukturmodells und der Herschel-Daten konnten Stutz und Gould die Massenverteilung in dem Filament rekonstruieren, sowie das Gravitationspotential im Filament und in den umgebenden Raumgebieten. Wie zu erwarten hat das Filament eine Art besonders dichtes »Rückgrat«, das im Zentrum des Zylinders entlang läuft. Innerhalb und außerhalb des Filaments, bis hin zu Abständen von rund 25 Lichtjahren von dem zentralen Rückgrat, ändert sich die Dichte mit einem einfachen Potenzgesetz, nämlich mit  $r^{-1,6}$ .

---

### Das Filament im Griff der kosmischen Spirale

So weit, so gut. Aber als Stutz anschließend die Orte der Protosterne und der jungen Sterne in dem Filament zu bestimmen begann, war das Ergebnis durchaus überraschend. Die Protosterne benahmen sich genau so wie erwartet: sie fanden sich entlang des zentralen Rückgrats des Filaments, in der Region größter Dichte, also genau dort, wo man erwarten würde, dass es durch den Kollaps von Teilregionen der Wolke zur Bildung neuer Sterne kommt (Abbildung II.4.2). Die jungen Sterne dagegen (Fachbegriff: Vor-Hauptreihensterne der Klasse II) fanden sich vornehmlich außerhalb des Filaments (Abbildung II.4.3). Irgendetwas musste entweder das Filament oder eben die jungen Sterne beschleunigt haben, um die Trennung von beiden zu bewirken. Was war das geschehen? Was hatte die jungen Sterne hinausgeworfen, oder das Filament von den jungen Sternen wegschwenken lassen?

Ein wichtiger Teil der Erklärung ergibt sich aus einer anderen besonderen Eigenschaft des Filaments. Bereits 1997 hatte eine Analyse von Carl Heiles von der University of California at Berkeley auf der Basis von Untersuchungen der 21-cm-Linie atomaren Wasserstoffs gezeigt, dass das integralförmige Filament von einem Magnetfeld umgeben ist. Solch ein Magnetfeld bewirkt, dass sich die 21-cm-Linie in zwei Spektrallinien aufspaltet (sog. Zeeman-Effekt). Weitere Informationen über das Magnet-

feld ergaben sich aus Untersuchungen der Polarisation des aus diesem Bereich empfangenen Lichts (Matthews & Wilson 2000).

Diese Beobachtungen sind gut mit einem spiralförmigen Magnetfeld vereinbar, dessen Feldlinien das Filament wie eine Art Sprungfeder einschließen. In der Filamentmaterie sind die Feldlinien verankert, weil sie mit dem geringen Anteil von ionisiertem, und daher elektrisch geladenen Anteil von Teilchen in dem Wasserstoffgas wechselwirken.

---

### Ein störungsanfälliger Zustand

Im Vergleich der Magnetfeldmessungen mit ihrer Rekonstruktion des Gravitationspotentials fanden Stutz und Gould, dass magnetische und Schwerkrafteinflüsse auf das Filament ziemlich genau gleich groß sind. Direkt bei dem schmalen Filament ist die im Magnetfeld gespeicherte Energie gleich groß wie die Gravitations-Bindungsenergie. Um einen Abschnitt des Filaments ein wenig (nämlich um rund 3 Lichtjahre) aus der Mitte der umgebenden Masseverteilung hochzuheben benötigt man ungefähr dieselbe Menge an Energie, wie sie in den Magnetfeldern des Filamentabschnitts gespeichert ist.

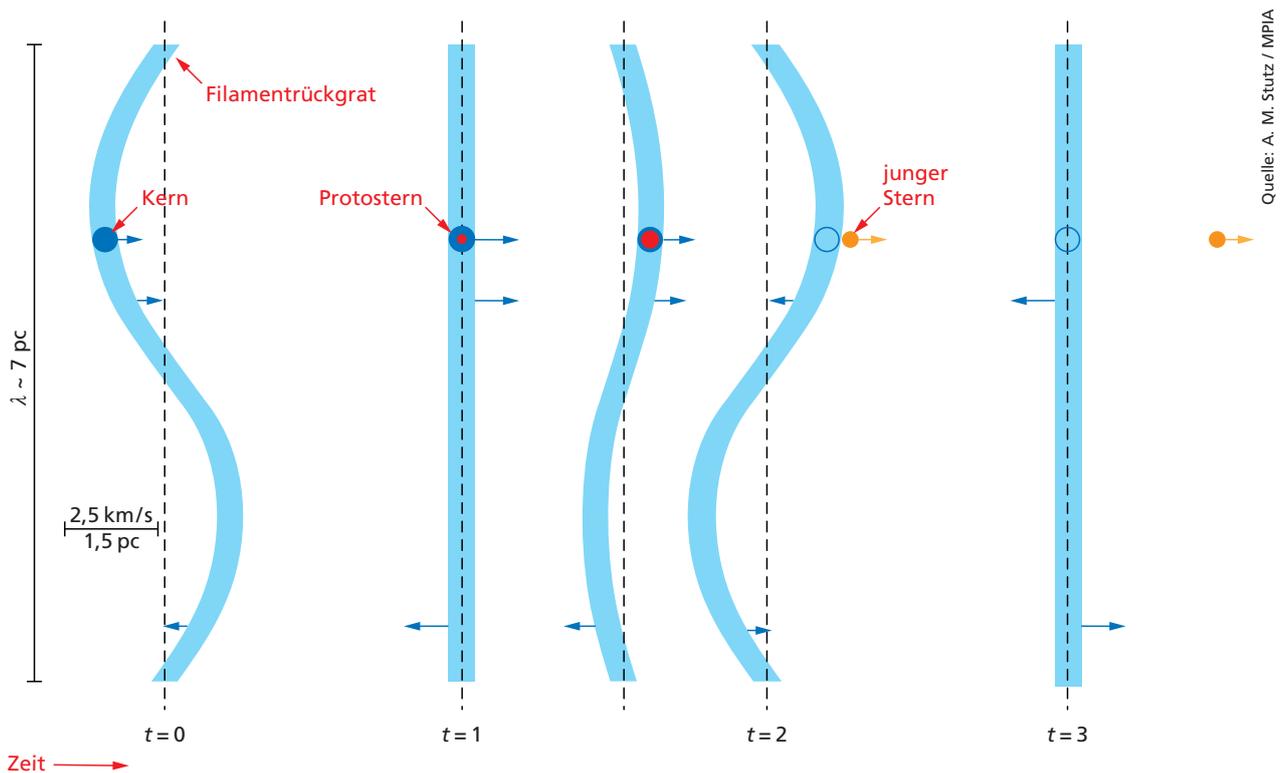
Unter diesen Umständen ist das Filament weit mehr als eine Staub- und Gasansammlung, zusammengehalten von der eigenen Schwerkraft. Es wird zu einer gigantischen, biegsamen Struktur, fast 100 Lichtjahre lang, die sich großräumig bewegen und oszillieren kann – und deren Regionen zum Teil auch instabil werden können! Diese Eigenschaften sind der Schlüssel nicht nur zu der Erklärung der vereinsamten jungen Sterne sondern könnten auch die rasche Entstehung ganzer Sternhaufen erklären, die in der Nähe des Filaments zu sehen sind.

---

### Gravitation gegen Magnetismus

Ganz allgemein haben Magnetfelder in einer Molekülwolke eine stabilisierende Wirkung. Wird die Wolke samt ihrer magnetischen Feldlinien zusammengedrückt, dann rücken die Feldlinien dabei zusammen; das entspricht einem stärkeren Feld und damit auch einer höheren Menge an Energie, die im Magnetfeld gespeichert ist. Daraus ergibt sich ein magnetischer Druck, der jedem Zusammenziehen der Wolke entgegenwirkt. Das Gravitationsfeld wirkt natürlich in die Gegenrichtung und versucht, die Teilchen der Wolke zusammenzuziehen und so eine Kompression oder gar den Kollaps der Wolke herbeizuführen.

Für ein längliches Objekt wie das integralförmige Filament ist die Magnetfeldenergie stärker hin zur Mittelachse konzentriert als die Gravitationsfeldenergie. Innerhalb der innersten paar Lichtjahre vom Rückgrat der Wolke



**Abb. II.7.4:** Skizze des Schleudermechanismus für Sterne. Solange das Objekt noch ein Protostern ist, wird es vom schwingenden Filament mitgeführt. Ist der Protostern zu einem jungen Stern und dabei ungleich kompakter geworden, ist die Wechselwirkung mit dem Filament nicht mehr stark genug, um das Objekt hinreichend stark zu beschleunigen. Der junge Stern wird zurückgelassen, während das Filament zurückschwingt, oder wie aus einer Steinschleuder fliegen gelassen.

benden Materieverteilung, bekommt die Gravitation die Überhand und zieht das auf Abwege geratene Filamentssystem zurück in Richtung Mittellinie. Transversale Verformungen und der Einfluss der Gravitation können sich so zu einer hinreichend stabilen Schwingung des Filaments im Ganzen zusammenfinden.

aus sind Magnet- und Schwerkräfteinflüsse fast gleich groß. Erst in größeren Abständen von der Wolke gewinnt die Gravitation die Oberhand.

In einer Situation, in der magnetische und Gravitationsenergie gleich oder so gut wie gleich sind, heben sich die Einflüsse dieser beiden Wechselwirkungen weitgehend auf. Unter solchen Bedingungen bewirken kleine Änderungen im Volumen der Wolke so gut wie keine Änderungen der Gesamtenergie der Wolke. Netto gibt es daher keinen Druck, oder keine Spannung, die solchen Änderungen entgegenwirkt. Das sind ideale Voraussetzungen für Schwankungen auf kleinen Skalen: Störungen und Fluktuationen, wie sie in der wirklichen Welt unvermeidbar sind, werden nicht unterdrückt, sondern können sich entlang des Filaments ausbreiten und sich zu großräumigen Schwingungen zusammenfinden, die das Filament als Ganzes in Bewegung setzen.

Eine bestimmte Art von Schwingung ist transversal, setzt Teile des Filaments also relativ zur Filamentachse seitwärts in Bewegung. Eine solche Seitwärtsbewegung wird allerdings durch die Gravitation der das Filament umgebenden Materieverteilung begrenzt: Entfernt sich das Filament zu weit von der Mittellinie der es umge-

### Das Filament als Sternschleuder

Das bringt uns direkt zu der Erklärung, die Stutz und Gould für die verstoßenen jungen Sterne vorschlagen (Abbildung II.4.4): Protosterne bilden sich entlang des Rückgrats des Filaments, wo Gas und Staub am dichtesten sind. Aber das Filament als ganzes schwingt hin und zurück, auf einer Zeitskala von rund 600 000 Jahren, Gas, Staub und Magnetfeld gleichermaßen in Bewegung, aneinander gekoppelt durch die Wechselwirkung des Magnetfelds mit den Ionen im Gas, welche etwaige Bewegung wiederum durch gegenseitige Stöße an die anderen Gasteilchen und die Staubeilchen weitergeben.

Solange der Protostern seinen Kollaps noch nicht vollendet hat, ist er leicht genug, um von der Filamentbewegung mitgeführt zu werden. Dementsprechend behalten Protosterne ihre Position im Rückgrat des Filaments bei. Das ändert sich, wenn der Kollaps abgeschlossen und ein kompakter junger Stern entstanden ist, der naturgemäß eine deutlich höhere Dichte besitzt. Ein solches Objekt können Kollisionen mit Gasteilchen der umgebenden Materie nicht einfach in Bewegung setzen. Dementsprechend wird es zurückgelassen, wenn das Filament seine

Schwingung fortsetzt, oder allgemeiner: es fliegt mit derjenigen Geschwindigkeit weiter, die ihm das Filament vor der Entkopplung noch mitgeben konnte.

Das ergibt genau die Situation, wie sie die Beobachtungen der Orion-A-Region zeigen: mitgeführte Protosterne entlang des Rückgrats des Filaments und junge Sterne, die das Filament bei seiner Weiterbewegung zurückgelassen hat.

---

### Eine auffällige Aufreihung von Sternhaufen

Das Bild von einem schwingenden Filament als gebundenes System von Gas und Staub, zusammengehalten von seiner Schwerkraft und stabilisiert durch seine Magnetfelder, hat aber noch eine weitere interessante Konsequenz. Die Hinweise darauf ergeben sich aus der Anordnung der Sternhaufen im Filament und in seiner Nachbarschaft. Von Norden nach Süden haben wir dabei zunächst einmal eine Lücke, die das integralförmige Filament von der nächsten großen Molekülwolke nördlich von ihr, genannt Orion B, trennt. Unterhalb von Orion B liegen aufgereiht drei Sternhaufen, jeweils in etwa gleich weit voneinander entfernt: NGC 1981, dann NGC 1977, beide noch in der Lücke, und dann der Orionnebel-Haufen (Orion Nebula Cluster, ONC) in der Mitte des integralförmigen Filaments. Noch weiter im Süden geht das Filament in den deutlich weiteren, ausgefransten Rest der Orion-A-Wolke über, der als L1641 bezeichnet wird.

Die räumliche Anordnung entspricht einer zeitlichen Reihenfolge: NGC 1981 ist rund 5 Millionen Jahre alt, und die massereichen, hellen Sterne darin hatten hinreichend Zeit, um Gasreste aus der Geburtsepoche des Sternhaufens zu zerstreuen. Mit einem Alter von zwei Millionen Jahren ist NGC 1977 deutlich jünger und enthält dementsprechend noch Gas und Staub aus der Zeit seiner Entstehung. Die hellen Sterne des Haufens regen das Wasserstoffgas zum Leuchten an und verleihen NGC 1977 eine farbenfrohes Erscheinungsbild. Der Orionnebel-Haufen ist noch jünger. Dort ist die Sternentstehung auch heute noch in vollem Gange.

Für Stutz und Gould zeigt diese Ordnung aufeinander folgende Episoden der Sternentstehung an: Ursprünglich hätten sich alle drei Regionen im Inneren des integralförmigen Filaments befunden, doch über Millionen Jahre hinweg hätten sich nacheinander, vom Norden angefangen, die drei Haufen gebildet. Jeder neu entstehende Haufen hätte dann das Gas und den Staub des Filaments in seiner Umgebung zerstreut. Für den ältesten noch sichtbaren Haufen, NGC 1981, ist dieser Prozess soweit fortgeschritten, dass es keinerlei Verbindung mehr mit dem heutigen Filament gibt. (Hätte es vor NGC 1981 Haufen gegeben, die sich noch früher gebildet hätten, dann dürften sich in der Zwischenzeit auch deren Sterne soweit zerstreut haben, dass sie in heutigen Beobachtungen nicht mehr nachweisbar wären.)

Im Westen von NGC 1977 existiert ein dünner Streifen von Gas und Staub, den Stutz und Gould das »Geisterfilament« nennen. Diese Struktur scheint ein Überbleibsel der Entstehung von NGC 1977 zu sein, die ebenfalls im integralförmigen Filament stattgefunden haben dürfte. Der Orionnebel-Haufen dagegen liegt mitten im heute noch sichtbaren Filament, tut aber sein möglichstes, das Filament mit seinen zahlreichen frisch entstandenen hellen, massereichen Sternen von innen heraus zu zerstören.

---

### Ein neuer Mechanismus für die Sternentstehung

Während dieser Entstehungssequenz scheint das Filament von Norden her immer weiter geschrumpft zu sein, als sich nacheinander die verschiedenen Sternhaufen bildeten. Stutz und Gould schlagen vor, dass diese Systematik eine direkte Konsequenz des Zusammenspiels der Magnetfelder und der Gravitation gewesen sein könnte, welche die einzelnen Abschnitte des Filaments nacheinander hat kollabieren lassen. Der genaue physikalische Ablauf dieses Prozesses ist noch unklar, obwohl es interessante Analogien zu sogenannten Pinch-Instabilitäten gibt, wie sie Physiker aus der Plasmaphysik kennen.

Magnetfelder verkomplizieren die physikalische Beschreibung einer Situation und werden in einfachen physikalischen Modellen für astronomische Phänomene oft vernachlässigt. Die Ergebnisse von Stutz und Gould legen nahe, dass dies zumindest im Falle der Entstehung ganzer Sternhaufen ein Fehler sein dürfte. Noch ist der von ihnen propagierte Mechanismus allerdings nur ein Vorschlag, kein bis ins Detail ausgearbeitetes physikalisches Modell. Wie geht es von hier aus weiter?

Als erstes sind die Theoretiker gefordert, die in der Lage sein sollten, Situationen in Sternentstehungsgebieten zu simulieren. Eine quantitative Erklärung der von Stutz und Gould rekonstruierten Verhältnisse in Orion A, inklusive einer Beschreibung, welche Art von Instabilität die Entstehung von Sternhaufen in Serie hervorruft, dürfte der wichtigste Schritt sein, um den vorgeschlagenen neuen Mechanismus zu etablieren.

---

### Zukünftige Beobachtungen

Außerdem sind weitere Beobachtungen gefragt – angefangen beim Orionnebel-Haufen selbst, welchem wir derzeit ja gerade bei seiner Entstehung zusehen können. Das Modell von Stutz und Gould sagt vorher, dass die Protosterne in diesem Haufen eng entlang des Filament-Rückgrats entstehen sollten. Ein konkurrierendes Modell, der »kalte Kollaps«, postuliert dagegen zahlreiche Unter-Filamente, die auf das Rückgrat zulaufen und jeweils dicht genug sind, um neue Sterne entstehen zu lassen. Diesem Modell nach sollten die Protosterne nicht entlang des Rückgrats angeordnet sein, sondern eben entlang dieser Sub-Filamente, die ihrerseits auf das Rückgrat zu fallen.

Ungünstigerweise ist die Region des Orionnebel-Haufens in den verfügbaren Daten der Weltraumteleskope Herschel und Spitzer so hell, dass ihr Licht die Detektoren der Teleskope geradezu überwältigt: In den entsprechenden Bildern sind diese Regionen gesättigt, und es gibt keinerlei Möglichkeit, darin Gas, junge Sterne und Protosterne auseinanderzuhalten. Neue Beobachtungen mit dem ALMA-Observatorium, das auf Millimeter- und Submillimeter-Wellenlängen spezialisiert ist, könnten diese Regionen im Detail abbilden und so herausfinden, welche der unterschiedlichen Vorhersagen am besten mit den Beobachtungsdaten vereinbar ist.

Dann wäre da noch die Aufgabe, dieselben Prozesse in anderen astronomischen Objekten zu identifizieren. Welche Bedeutung der neu vorgeschlagene Entstehungsmechanismus hat hängt schließlich maßgeblich davon ab, wie häufig er vorkommt. Handelt es sich um die übliche Art und Weise, wie binnen kurzer Zeit viele und auch sehr massereiche Sterne entstehen? Oder laufen die entsprechenden Prozesse eher selten ab, unter ganz besonderen Bedingungen, die in der Orion-A-Wolke zu finden sind, aber so gut wie nirgends sonst? In letzterem Falle wäre der neue Mechanismus für die große Frage, wie Galaxien ganz allgemein neue Sterne bilden, nur von sehr untergeordneter Bedeutung.

Ein geeignetes Beobachtungsobjekt für diesen Zweck ist die Sternentstehungsregion NGC 1333 im Sternbild Perseus, die der Orion-A-Wolke in einiger Hinsicht recht ähnlich ist. Die Molekülwolke Cepheus OB3, 2300 Lichtjahre entfernt im Sternbild Cepheus, ist ein noch aussichtsreicherer Kandidat. Ihre Morphologie weist sowohl interessante Filamentstrukturen als auch, in diesem Zusammenhang besonders wichtig, eine Reihe von Sternhaufen in unmittelbarer Nähe der Filamente auf.

Um den Mechanismus zu testen, den Stutz und Gould vorgeschlagen haben, sind detaillierte Studien des dichten Gases und seiner Bewegung sowie der Protosterne und jungen Sterne in und um diese Filamente nötig. Einige der erforderlichen Daten gibt es bereits in den Archiven des inzwischen außer Dienst gestellten Weltraumobservatoriums Herschel. Andere Daten, etwa zur genauen Lokalisierung der Protosterne und zur großräumigen Kartierung der Gasbewegungen in den Cepheus-OB3-Wolken müssen noch aufgenommen werden – wiederum mit dem ALMA-Observatorium. Liegen diese Daten vor, dann sollten Stutz und Gould entscheiden können, ob die Orion-A-Molekülwolke ein Sonderfall ist oder ob die Geburt von Sternhaufen in einem Reigen magnetisch eingeschlossener Filamente der übliche Weg ist, wie in unserem Kosmos rasch ganze Haufen neuer Sterne entstehen.

*Amelia M. Stutz*

*(inzwischen Universidad de Concepción, Chile)*

*und Andrew Gould*

*(weitere Affiliation: Emeritus bei der Ohio State University)*

## II.8 Wissenschaftliches Highlight

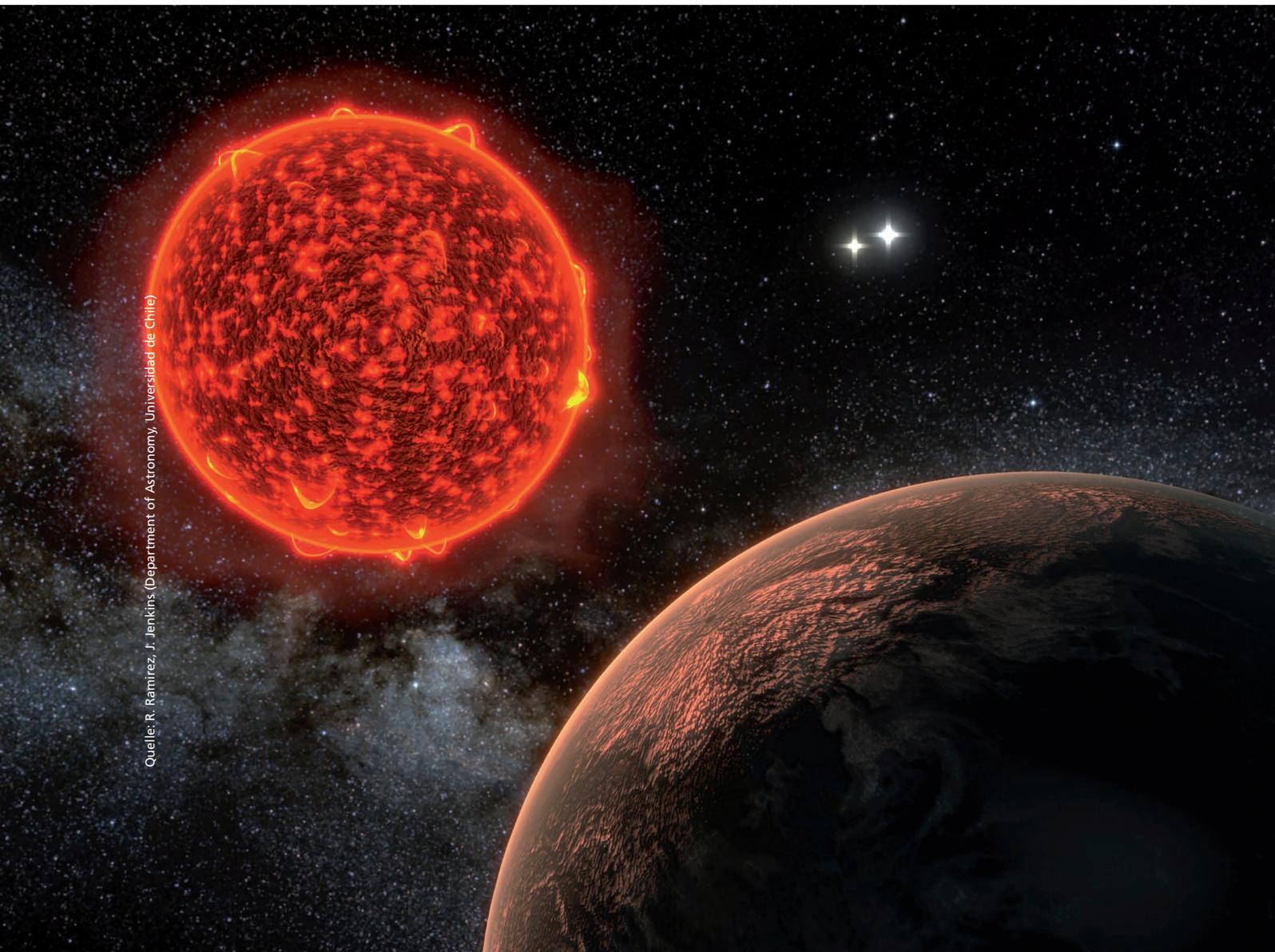
# Planet in habitabler Zone um erdnächsten Stern entdeckt

Astronomen haben einen Planeten entdeckt, der den erdnächsten Stern außerhalb unseres Sonnensystems umkreist, Proxima Centauri. Der Planet, Proxima Centauri b, umläuft seinen Stern in der sogenannten habitablen Zone, also dort, wo auf einem Planeten im Prinzip flüssiges Wasser existieren könnte. Die Entdeckung gelang mit der Radialgeschwindigkeitsmethode, die nach winzigen Bewegungsänderungen von Sternen sucht, wie sie durch umlaufende Planeten verursacht werden. Zusätzlich zu neuen Messdaten nutzte die Auswertung Spektren, die MPIA-Astronom Martin Kürster und Kollegen zwischen 2000 und 2007 aufgenommen hatten.

Abb. II.8.1: Künstlerische Darstellung des neu entdeckten Planeten um Proxima Centauri, den der Erde nächsten Stern.

In einer Entfernung von knapp mehr als vier Lichtjahren ist Proxima der nächste Stern außerhalb unseres Planetensystems, und damit schon lange ein Liebling der Science Fiction-Autoren. Ebenso interessant ist der Stern für all diejenigen, die sich für die längerfristige Zukunft der Raumfahrt interessieren. Aber eine Raumsonde in Richtung eines fernen Sterns zu schicken ist die eine Sache – noch weit interessanter ist es, wenn der Stern einen Planeten besitzt. Insbesondere falls es sich um einen Planeten handelt, der möglicherweise die richtigen Bedingungen für die Entstehung von Leben bieten könnte.

Neue Beobachtungen einer Gruppe von Astronomen unter der Leitung von Guillem Anglada-Escudé (Queen Mary University of London) haben jetzt genau dies gefunden: einen Planeten, der Proxima Centauri mit einer Umlaufzeit von 11,2 Tagen umkreist, in einer Entfernung



von nur 7 Millionen Kilometern vom Stern (entsprechend 5% der durchschnittlichen Entfernung von der Erde zur Sonne, und einem Achtel vom Sonnenabstand des Merkur).

Der indirekte Nachweis gelang mithilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode, die es Astronomen erlaubt, eine untere Grenze für die Masse des Planeten abzuschätzen. Die Minimalmasse stellt zugleich einen guten Schätzwert für die Masse des Planeten dar. Für Proxima Centauri b ergibt sich auf diese Weise eine Masse von nur 1,3 Erdmassen.

### Ein Planet in der habitablen Zone

Aus dem Umstand, dass Proxima Cen b eine der Erdmasse vergleichbare Masse besitzt, folgt zwar noch lange nicht, dass auf diesem Planeten geeignete Bedingungen für Leben herrschen. Aber trotz seiner großen Nähe zu seinem Heimatstern befindet sich dieser Planet immerhin in der Region, die in der Astronomie habitable Zone genannt wird. Auf Planeten in der habitablen Zone rund um den Heimatstern können im Prinzip Temperaturen herrschen, welche die Existenz von flüssigem Wasser erlauben – eine entscheidende Voraussetzung für Leben, wie wir es von der Erde her kennen.

Grund dafür ist, dass es sich bei Proxima Centauri um einen sogenannten roten Zwergstern handelt (»Spektraltyp M5.5Ve«). Solche Sterne sind deutlich masseärmer und leuchtschwächer als unsere Sonne: Proxima besitzt nur rund 12% der Masse der Sonne, und 0,17% ihrer Leuchtkraft. Zwischen 70 und 80 Prozent aller Sterne in der Nachbarschaft unseres Sonnensystems sind rote Zwerge, und dieser Häufigkeitswert dürfte auch für den Rest unserer Heimatgalaxie repräsentativ sein.

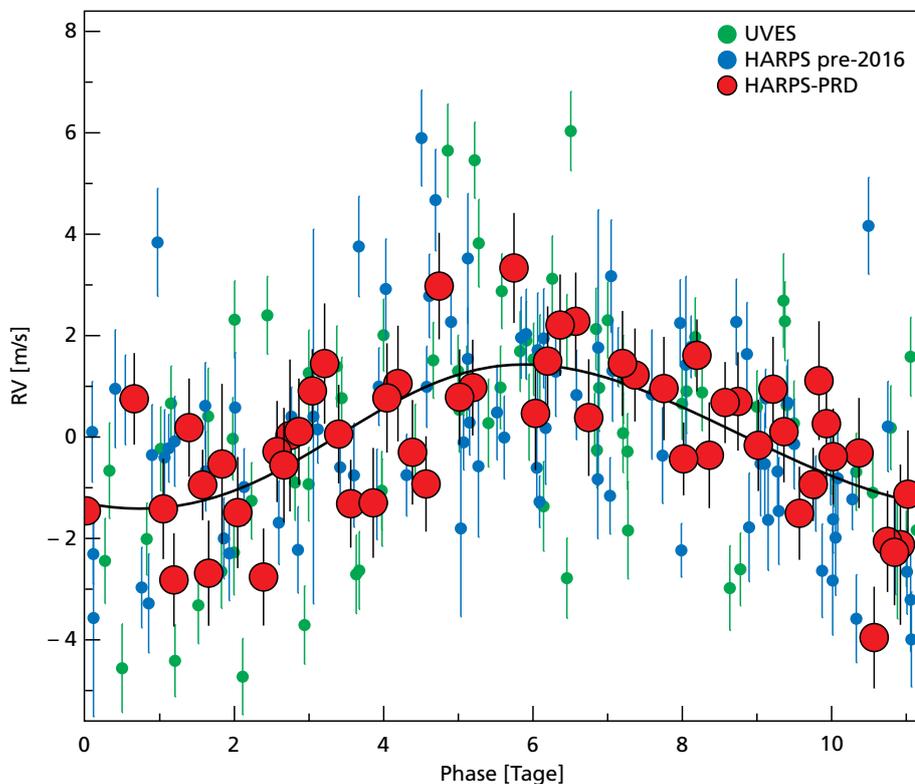
Andererseits ist es wahrscheinlich, dass die Nähe des Planeten Proxima Cen b zu seinem Stern zu gebundener Rotation führt, also dazu, dass der Planet dem Stern immer dieselbe Seite zuwendet. Auf dieser Hälfte des Planeten würde damit ewiger Tag herrschen, mit entsprechend hohen Temperaturen, und auf der anderen ewige Nacht.

### Ungemütliche Umweltbedingungen

Rote Zwerge mit einem Drittel oder weniger der Sonnenmasse sind komplett konvektiv: ihre Materie ist unaufhörlich in Bewegung ähnlich jener in einem Topf kochenden Wassers, das durch intensives Brodeln komplett durchmischt wird.

Abb. II.8.2: Radialgeschwindigkeitsmessungen von Beobachtungen aus 16 Jahren, gefaltet mit der 11,2-Tage-Periode des Planetenkandidaten. Verschiedene Symbole unterscheiden die Daten der Pale-Red-Dot-Kampagne (PRD), HARPS-Beob-

achtungen vor 2016, sowie die früheren Daten von UVES. Die durchgezogene Linie beschreibt die am besten zu den Daten passende Keplerbahn.



Quelle: Guillem Anglada-Escudé et al., School of Physics and Astronomy, Queen Mary University of London, UK / Max-Planck-Institut für Astronomie

Ein beträchtlicher Anteil roter Zwerge, darunter auch Proxima Centauri, besitzt außerdem vergleichsweise starke Magnetfelder und weist erhebliche stellare Aktivität auf. Dabei entstehen immer wieder sogenannte Flares: plötzliche Freisetzungen von magnetischer Feldenergie, die zu kurzen, deutlichen Anstiegen der Sternhelligkeit führen.

Die stellare Aktivität des Sterns führt außerdem zu hochenergetischen Teilchen, Ultraviolett- und Röntgenstrahlung, die den Planeten bombardieren – auch das sind ungünstige Voraussetzungen für Leben auf Proxima Centauri b. Mit einiger Wahrscheinlichkeit könnte diese Strahlung sogar ausreichen, dass der Planet seine komplette Atmosphäre verliert.

Konkretere Informationen über die Umweltbedingungen auf Proxima Centauri b sollten sich aus zusätzlichen Beobachtungen ergeben, wie sie die Entdeckung des neuen Planeten nach sich ziehen dürfte. Ein möglicher Nachweis von Leben, oder zumindest von chemischen Eigenschaften, welche die Existenz von Leben auf dem Planeten nahelegen, dürfte zwar noch einige Jahrzehnte auf sich warten lassen. Bis dahin sind die Beobachtungsergebnisse aber durchaus auch von allgemeinerem Interesse – nämlich als Möglichkeit, näheres über einen Planeten zu erfahren, der einen Vertreter der häufigsten Sternsorte in unserer Galaxis umkreist. Für Astronomen, die sich für die Systematik der Planetenentstehung in unserer Heimatgalaxie interessieren, ein hochinteressantes Studienobjekt.

---

### Geduldige Suche

Entdeckungen von Exoplaneten, also von Planeten um andere Sterne als die Sonne, sind heutzutage so häufig, dass bei weitem nicht mehr über jede davon in den Massenmedien berichtet wird. Rund 3500 Exoplaneten haben Astronomen mittlerweile gefunden. Das legt die Frage nahe, warum Proxima Centauri b, unser neuester nächster Nachbar, nicht schon deutlich früher entdeckt wurde. Tatsächlich gibt es eine Kombination von Gründen für die späte Entdeckung.

Die meisten Entdeckungen von Exoplaneten gehen auf das Konto des NASA-Weltraumteleskops Kepler. Dieses Teleskop kann die Helligkeit vieler verschiedener Sterne mit großer Genauigkeit bestimmen. Planeten, deren Umlaufbahnen genau so orientiert sind, dass sie aus Sicht eines Beobachters auf der Erde vor ihren Heimatsternen vorbei laufen, schatten regelmäßig einen kleinen Teil ihres Sterns ab. Astronomen, die Sternhelligkeiten überwachen, können in solchen Fällen nachweisen, dass der entsprechende Stern in für solche Planetendurchgänge charakteristischer Weise vorübergehend etwas an Helligkeit verliert.

Auch bei Proxima Centauri haben Astronomen in der Vergangenheit nach solchen systematischen Helligkeitsschwankungen gesucht, bisher allerdings ohne Erfolg. Es

wird weiterhin noch nach diesen sogenannten »Planetentransits« gesucht, aber die Wahrscheinlichkeit dafür, dass die geeignete Orientierung vorliegt, ist nicht hoch. Gibt es am Ende keine Transits, dann würde das freilich nicht ausschließen, dass Proxima einen Planeten besitzt. Es zeigt nur, dass es dort keinen hinreichend großen Planeten gibt, der von der Erde aus gesehen genau vor Proxima vorbeiläuft.

Jüngst schuf ein seltenes Zusammentreffen sogar die Möglichkeit für eine ungewöhnliche Form des möglichen Nachweises von Exoplaneten: Im Oktober 2014 und Februar 2016 zog Proxima Centauri von der Erde aus gesehen sehr nahe vor je einem anderen, weiter entfernten Stern vorbei. Dabei hätte der sogenannte Mikro-Gravitationslinseneffekt zum Tragen kommen können: Besäße Proxima einen Planeten, der im entscheidenden Moment direkt vor einem der entfernteren Sterne vorübergezogen wäre, hätte die Masse des Planeten das Licht des Sterns abgelenkt und verstärkt – eine plötzliche, kurze Helligkeitszunahme auf Grundlage von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie. Dass auch dieser Nachweis nicht gelang heißt allerdings nicht, dass Proxima keinen Planeten besitzt, sondern nur, dass ein etwaiger Planet nicht zur richtigen Zeit am richtigen Ort war.

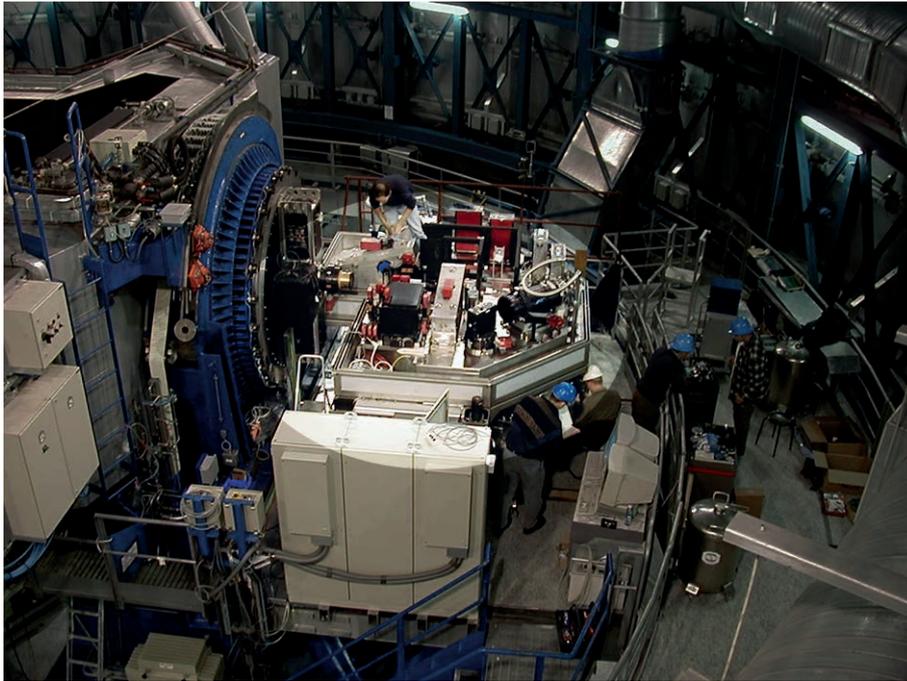
---

### Die Suche nach winzigen Schwankungen

Damit bleibt eine weitere Standardmethode für den Nachweis von Exoplaneten übrig: die Radialgeschwindigkeitsmethode, die winzige Hin- und Herbewegungen des Sterns nachweist, wie sie sich ergeben, wenn ein Stern und ein Planet unter Einfluss der Schwerkraft um ihren gemeinsamen Schwerpunkt kreisen. Analog dazu, wie das Martinshorn eines Feuerwehr- oder Polizeiwagens allmählich seine Tonhöhe ändert, wenn solch ein Einsatzfahrzeug am Beobachter vorbei fährt, werden die Frequenzen von Sternenlicht ein wenig hin zum blauen Ende verschoben, wenn sich der Stern auf die Erde zu bewegt, und zum roten Ende hin, wenn sich der Stern von der Erde entfernt.

Die Spektren von Sternen – regenbogenähnliche Zerlegungen des Sternenlichts in unzählige Farbtöne, entsprechend unterschiedlichen Wellenlängen/Frequenzen – enthalten charakteristische Muster von tausenden von schmalen, dunklen Linien. Präzisionsmessungen, die zeitabhängige Blau- und Rotverschiebungen der Linien dokumentieren, können so die langsame, durch den umkreisenden Planeten hervorgerufene Bewegung des Sterns nachweisen und damit einen indirekten Hinweis auf die Anwesenheit des Planeten geben.

Auch an Proxima Centauri wurden über die vergangenen Jahrzehnte hinweg entsprechende Messungen vorgenommen, freilich wiederum ohne dass ein Planet hätte nachgewiesen werden können. Allerdings hängt das Ausmaß der Sternbewegung von der Masse des Planeten und vom Abstand zwischen Planet und Stern ab. Die erfolg-



Quelle: ESO

**Abb. II.8.3:** Der Spektrograf UVES zum Zeitpunkt seiner Installation am Very Large Telescope der Europäischen Südsternwarte ESO im Jahre 1999. Mit UVES verfolgten Martin Kürster und Kollegen von 2000 bis 2007 die Radialgeschwindigkeit unter anderem von Proxima Centauri. Die Daten reich-

ten zwar nicht aus, den Planeten Proxima b zu entdecken, erlauben es in Kombination mit den neueren Messungen des Pale Red Dot-Teams aber, die jetzt gelungene Entdeckung abzusichern.

losen Messungen können daher nur ausschließen, dass Proxima einen Planeten mit einer bestimmten Mindestmasse und in einem bestimmten Abstandsbereich vom Stern besitzt.

Die Sternbewegung, die der jetzt tatsächlich mit dieser Methode entdeckte Proxima Centauri b mit seiner vergleichsweise kleinen Masse hervorruft, liegt nahe der Messgrenzen heutiger astronomischer Instrumente. Sie kann nur mit einem Spektrografen nachgewiesen werden, der über Jahre hinweg konsistente, genaue Messungen vornehmen und Proxima hinreichend oft zu unterschiedlichen Zeiten beobachten kann.

### Geduld und Genauigkeit

Die erste der Voraussetzungen erfüllt der Spektrograf HARPS am 3,6-Meter-Teleskop am La Silla-Observatorium der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile auf alle Fälle. Der Spektrograf wurde direkt auf die Erfordernisse der Planetenjagd mit Hilfe der Radialgeschwindigkeitsmethode hin ausgelegt und liefert seit 2003 zuverlässige und genaue Messwerte.

Im Jahre 2013 beobachteten Guillem Anglada-Escudé, der zu jener Zeit an der Universität Göttingen tätig war, und Kollegen den Stern Proxima Centauri mit HARPS und fanden Hinweise auf die mögliche Existenz von Planeten mit Umlaufzeiten von 11,2 Tagen, 13,6 Tagen und 18,3 Tagen.

Die Daten waren allerdings nicht aussagekräftig genug, um definitiv auf die Existenz einer oder gar mehrerer der Planetenkandidaten schließen zu können. Die Astronomen konnten nicht ausschließen, dass es sich um Fälle von falschem Alarm handelte: um Störeinflüsse, die das Vorhandensein von Planeten lediglich vorspiegeln.

Die Daten reichten allerdings aus um Anglada-Escudé davon zu überzeugen, dass er eine gezielte Suche nach dem oder den Planeten von Proxima organisieren sollte. Er nannte sein Projekt »Pale Red Dot«. Der Name leitet sich von Bezeichnung »Pale Blue Dot« her, bleicher blauer Punkt, mit dem Carl Sagan den Blick auf die Erde aus großer Entfernung, von der Raumsonde Voyager 1 aus, beschrieb. Für Pale Red Dot beantragte Anglada-Escudé zum einen Beobachtungszeit für den Spektrografen HARPS. Außerdem sollte die Suche durch verschiedene kleinere Teleskope unterstützt werden, welche die Helligkeit von Proxima überwachen und es so ermöglichen sollten, den Einfluss möglicher stellarer Aktivität besser einzuberechnen. Die HARPS-Messungen fanden an stolzen 54 Nächten zwischen dem 18. Januar und dem 30. März 2016 statt.

Anglada-Escudé, der zu jenem Zeitpunkt bereits an die Queen Mary University of London gewechselt hatte, traf dabei von Anfang an Vorbereitungen, um die Öffentlichkeit an seinem Projekt teilhaben zu lassen: auf den »Pale Red Dot«-Webseiten mit erklärenden Blogbeiträgen und mit weiteren Beiträgen, welche die Kampagne in den sozialen Medien begleiteten.

Mit Fortgang der Beobachtungen zeigten sich immer stärkere Anzeichen für die Existenz eines Planeten. Zur Zeit der dreißigsten Beobachtungsnacht war so gut wie sicher, dass Proxima Centauri in der Tat von einem Planeten umkreist wurde.

### Planet oder stellare Aktivität?

Allerdings galt dabei auch: Weil der rote Zwerg Proxima Centauri aktiv ist und ein starkes Magnetfeld besitzt, erwarten die Astronomen, dass in seiner Atmosphäre häufig dunkle, kühlere Flecken auftreten sollten – die rote-Zwerg-Version der Sonnenflecken, die man durch ein (fachgerecht abgeschirmtes) Teleskop auf unserer Sonne beobachten kann. Solche Flecken beeinflussen die Radialgeschwindigkeitsmessungen: Sie verändern das Spektrum und können im ungünstigsten Falle die Anwesenheit eines Planeten vortäuschen, wo gar keiner existiert.

Um die Beobachtungen abzusichern, müssen solche Effekte gebührend berücksichtigt werden. Ausgerechnet das Alpha-Centauri-System, ein Doppelsternsystem, das so nahe an Proxima steht, dass Proxima sogar der dritte Stern im Bunde sein könnte, bietet ein mahnendes Beispiel: Zwischen 2012 und 2015 waren zahlreiche Astronomen der Überzeugung, der erdnächste Planet außerhalb unseres Sonnensystems sei Alpha Centauri Bb, im Umlauf um Alpha Centauri B. Inzwischen herrscht breiter Konsens, dass es sich um einen Fehlnachweis handelte – eine Auswertung, die zeigt, wie schwierig es ist, Radialgeschwindigkeitsschwankungen aufgrund eines Planeten sauber von den diversen anderen Störeinflüssen (eben zum Beispiel Sternflecken) zu trennen.

Im Falle von Proxima Centauri ergibt sich letzte Sicherheit (soweit dies in der Wissenschaft möglich ist) aus älteren Beobachtungen, die Martin Kürster vom Max-Planck-Institut für Astronomie (MPIA) und sein ehemaliger Doktorand Michael Endl (derzeit an der Universi-

ty of Texas at Austin) durchgeführt und gemeinsam mit Kürsters ehemaligem Doktoranden Mathias Zechmeister (damals am MPIA, jetzt an der Universität Göttingen) analysiert hatten. Die Beobachtungen waren Teil einer systematischen Suche nach Begleitern von M-Zwergen (wie die roten Zwergsterne von den Astronomen genannt werden), vorgenommen im Zeitraum von 2000 bis 2007 mit dem UVES-Spektrografen am Very Large Telescope (VLT) der ESO.

Bereits in den alten Messungen zeigte sich ein Signal, das einem Planeten mit Umlaufdauer 11,2 Tagen entspricht. Aber es war allein mit den alten Daten nicht möglich zu entscheiden, ob das Signal tatsächlich von einem Planeten stammt oder durch eine zufällige Kombination von Störeinflüssen entstanden war. Die Kombination der alten mit den neuen Messungen dagegen bestätigt eindrucksvoll, dass die Pale-Red-Dot-Kampagne tatsächlich einen echten Planeten gefunden hat. Ein Störsignal auf der Basis stellarer Aktivität wäre über die vergangenen 16 Jahre unmöglich so konstant geblieben.

Seit der Veröffentlichung der Entdeckung sind eine Vielzahl weiterer Forschungsarbeiten erschienen, die sich mit dem Proxima Centauri-System und insbesondere mit der möglichen Bewohnbarkeit von Proxima b beschäftigen. Eine deutlich ungewöhnlichere Reaktion: Die Initiative »Breakthrough Starshot« des russischen Unternehmers Yuri Milner, deren ehrgeiziges Ziel darin besteht, binnen einer Generation unbemannte Raumsonden zum nächsten Sternensystem zu schicken, änderte ihr Ziel: jetzt soll als erstes Proxima Centauri b angeflo-

*Martin Kürster*

*in Zusammenarbeit mit*

*Guillem Anglada-Escudé und dem Pale Red Dot Team*

## II.9 Wissenschaftliches Highlight

# Geschichte der Sternentstehung auf kosmischen Skalen: ALMA dokumentiert Sternen-Rohmaterial in fernen Galaxien im Hubble Ultra Deep Field

Untersuchungen mit dem Teleskopverbund ALMA haben dokumentiert, welches Rohmaterial seit der Frühzeit rund 3 Milliarden Jahre nach dem Urknall im Kosmos zur Verfügung stand. Die Beobachtungen unter der Leitung von Fabian Walter vom Max-Planck-Institut für Astronomie nahmen dazu das sogenannte Hubble Ultra Deep Field (HUDF) ins Visier, das erstmals 2003/2004 vom Weltraumteleskop Hubble bis ins Detail abgebildet wurde. Dies sind die ersten hochempfindlichen Beobachtungen des HUDF im Millimeterwellenbereich, die auch spektrale Informationen enthalten und die Galaxien zeigen können, deren Licht rund 10 Milliarden Jahre zu uns unterwegs war.

Mit zunehmender Entfernung sieht ein astronomisches Objekt zunehmend leuchtschwächer aus. Paradebeispiel ist unsere Sonne: ein eher durchschnittlicher Stern, der nur deswegen so ungleich heller aussieht als die Sterne am Nachthimmel, weil er uns so nahe ist. Der sonnen nächste Stern ist mehr als 60 000 Mal soweit von uns entfernt wie die Sonne. Das definiert einen wichtigen Entwicklungsstrang astronomischen Fortschritts: immer größere Teleskope sammeln immer mehr Licht, und mithilfe langer Belichtungszeiten können Astronomen auf diese Weise Bilder von immer leuchtschwächeren Objekten erstellen.

Jede astronomische Beobachtung führt in die Vergangenheit – wir sehen beispielsweise die Andromedagalaxie nicht so, wie sie jetzt ist, sondern so, wie sie vor rund 2,5 Millionen Jahren war, denn so lange braucht das Licht der Galaxie, um uns zu erreichen. Auf der Suche nach immer leuchtschwächeren Objekten dringen die Astronomen entsprechend immer weiter in die Vergangenheit vor.

---

### Hubble Deep Field und Ultra Deep Field

Ein Meilenstein dieser Art von Fortschritt war das Hubble Deep Field: insgesamt 140 Stunden an Belichtungszeit mit dem Weltraumteleskop Hubble, als Ziel eine kleine Region am Nordhimmel, nur rund ein Prozent der scheinbaren Fläche des Vollmonds am Himmel. Die Region war so gewählt, dass sie kaum Sterne enthielt und der Blick auf ferne Galaxien auch nicht durch Staub innerhalb unserer Milchstraße behindert wurde. Rund 3000 Galaxien finden sich in diesem eigenen Bild, und die fast 1000 wissenschaftlichen Fachartikel, die auf das

Hubble Deep Field zurückgehen, zeigen eindrucksvoll, wieviele Informationen in einer solchen umfangreichen, repräsentativen Stichprobe stecken.

In den Jahren 2003/2004 wurde eine noch tiefere Aufnahme angefertigt, das Hubble Ultra Deep Field (HUDF), genau so groß wie das Deep Field. Das HUDF zeigt fast 10 000 Galaxien. Die entferntesten davon sind uns so fern, dass ihr Licht für fast 13 Milliarden Jahre unterwegs war, ehe es uns erreichte. Die Lage des HUDF war bewusst so gewählt worden, dass es für die Großteleskope der Südhalbkugel sichtbar ist, insbesondere die Teleskope der Europäischen Südsternwarte (ESO) in Chile und, in jüngerer Zeit, für das internationale Millimeter/Submillimeter-Observatorium ALMA («Atacama Large Millimeter/submillimeter Array») in der Atacama-Wüste.

Astronomen nutzen verschiedene Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums, um ihre Beobachtungsobjekte zu verstehen. Nachdem das Weltraumteleskop Hubble für das HUDF bereits exzellente Bilder im sichtbaren Licht, im Nahinfraroten und im UV-Licht geliefert hatte, dauerte es nicht lange, bis andere Observatorien die Messungen ergänzten. Röntgenbeobachtungen beispielsweise erlauben es, die im HUDF sichtbaren aktiven Galaxien (bei denen Materie auf das zentrale Schwarze Loch fällt) zu untersuchen.

---

### Mikrowellen dank ALMA

Eine wichtige Wellenlängenregion fehlte bislang allerdings weitgehend in der kosmischen Geschichtsschreibung des HUDF: Millimeter- und Submillimeterwellen. Erst als das ALMA-Observatorium, ein Teleskopverbund mit ca. 50 Antennen, die so zusammengeschaltet werden, dass sie das Auflösungsvermögen eines einzigen, riesigen Teleskopes erreichen, 2015 vollständig in Betrieb genommen war, rückten tiefe Aufnahmen des Hubble Ultra Deep Field in den Bereich des technisch Möglichen. Erst dann wurden die interessantesten Galaxien im HUDF auch in diesem Wellenlängenbereich beobachtbar – bis hinaus zu jenen Galaxien, die wir so sehen, wie sie bloße 3 Milliarden Jahre nach dem Urknall waren, fast 11 Milliarden Jahre vor unserer Zeit (Rotverschiebung  $z=2$ ). Diese Galaxien erlauben Einblicke in eine besonders interessante Epoche der kosmischen Geschichte.

Bis heute haben die Astronomen nur ein grobes Bild von der kosmischen Geschichte der Galaxien- und Stern-

entstehung, aber bereits dieses Bild enthält einige interessante Trends. Eine Eigenschaft, die sich dem Universum in jeder Epoche zuordnen lässt, ist die Sternentstehungsrate: Wie viele Sonnenmassen an Materie werden pro Zeiteinheit (z.B. pro Jahr) und Raumvolumen in neue Sterne umgesetzt? Sterne entstehen, wenn molekulares Gas in Galaxien unter seiner eigenen Schwerkraft kollabiert und sich bestimmte Teilregionen dabei so stark aufheizen, dass Kernfusionsreaktionen beginnen können.

In unserer Milchstraße entstehen derzeit pro Jahr Sterne mit der bescheidenen Gesamtmasse von rund einer Sonnenmasse. Untersuchungen der Sternentstehung in fernen Galaxien haben gezeigt, dass Galaxien im frühen Universum deutlich produktiver waren als heutzutage. Die Astronomen schließen das unter anderem aus der Beobachtung bestimmter Spektrallinien und ultravioletter Strahlung, die entstehen, wenn Molekülwolken kollabieren und sich neue Sterne bilden. Diesem Kriterium nach sind seit dem Urknall zunächst im Mittel immer mehr Sterne entstanden. Zwischen 3 und 6 Milliarden Jahren nach dem Urknall war ein Maximum an Produktivität erreicht, und seither ist die kosmische Sternentste-

hungsrate immer weiter gefallen. Das heutige Universum produziert der Masse nach pro Volumeneinheit nur noch rund ein Zehntel soviel Sterne wie zu Zeiten maximaler Produktivität.

### Die Geschichte der Sternentstehung verstehen

Eine wichtige Aufgabe der extragalaktischen Astronomie besteht darin, diese Entwicklung zu verstehen: War das eine Angelegenheit von Angebot und Nachfrage, mit neuen Reservoiren an molekularem Gas, die mit der Zeit verfügbar wurden? Welche Rolle spielten Mechanismen, welche das Gas aufgeheizt (und damit für die Sternentstehung ungeeignet gemacht) haben, wie etwa Supernovae, große Mengen an jungen Sternen, oder aktive Galaxienkerne?

Millimeter- und Submillimeterbeobachtungen können helfen, Antworten auf diese Fragen zu finden. Wo Beobachtungen im sichtbaren Licht wie mit dem Weltraumteleskop Hubble das Vorhandensein von Atomen zeigen und die Beobachtung von deren charakteristischen Spektrallinien ermöglichen, zeigen Infrarotbeobachtungen typischerweise die Spektrallinien von Molekülen und die Wärmestrahlung von Staub. Für weit entfernte Galaxien, deren Licht durch die kosmische Expansion rotverschoben ist, sind solche Moleküllinien in den Bereich der Millimeterstrahlung verschoben.

**Abb. II.9.1:** Das Hubble Ultra Deep Field (HUDF) zeigte sich dem Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA) als Fundgrube von Galaxien, die reich an Kohlenmonoxid sind (orange) und damit Potenzial für Sternentstehung haben.

Quelle: B. Saxton (NRAO/AUI/NSF); ALMA (ESO/NAO/NRAO); NASA/ESA Hubble



**Kohlenstoffmonoxid verrät Wasserstoffmoleküle**

Besonders interessant für alle, die an der kosmischen Geschichte der Sternentstehung interessiert sind, sind Spektrallinien von Kohlenstoffmonoxid, CO. Kohlenstoffmonoxid ist aufgrund seiner Strahlungseigenschaften deutlich einfacher nachweisbar als der so gut wie unsichtbare molekulare Wasserstoff. Daher stellen die Astronomen für ferne Galaxien Kohlenmonoxid-Beobachtungen auf und ziehen daraus dann Rückschlüsse auf den vorhandenen molekularen Wasserstoff. Mit solchen Messungen lässt sich der Geschichte der Sternentstehungsrate eine Geschichte der wechselnden Häufigkeit des Rohmaterials der Sternentstehung gegenüberstellen – eine Schlüsselinformation darüber, was in fernen Galaxien in punkto Sternentstehung vor sich geht.

Bei allen diesen Beobachtungen spielen Spektrallinien daher eine zentrale Rolle. Aus ihnen kann man außerdem die kosmische Rotverschiebung für die betreffenden Objekte erschließen, die in den Standardmodellen der Kosmologie direkt mit der Entfernung jener Objekte zusammenhängt. So entsteht aus derartigen Messungen eine dreidimensionale Karte des Kosmos.

**Staub und Wasser**

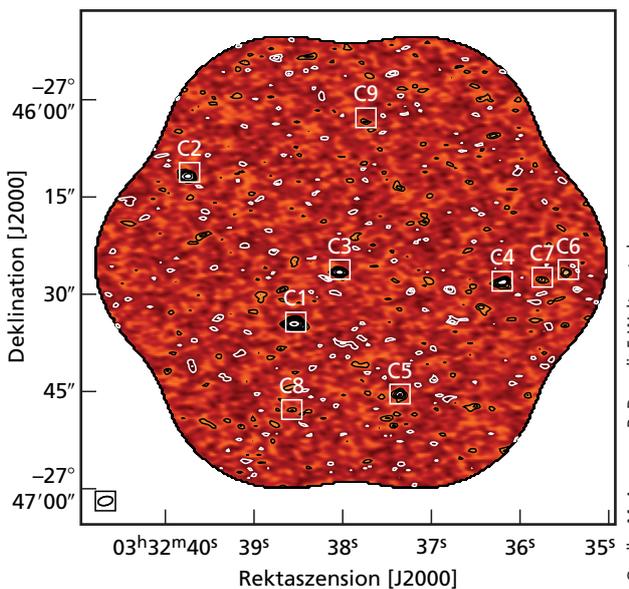
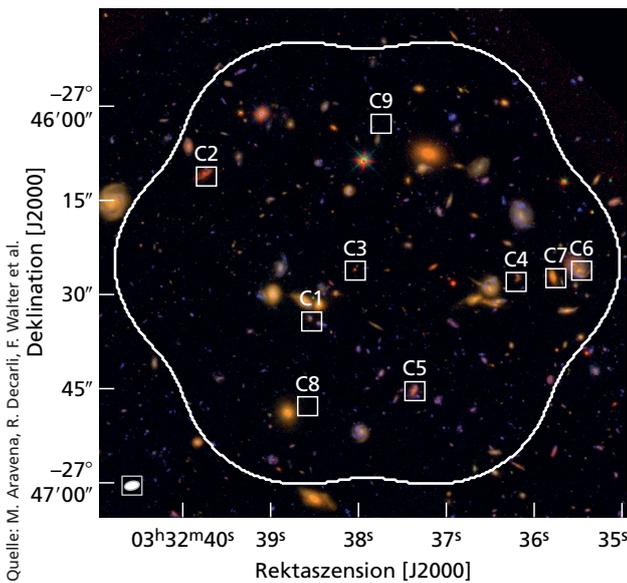
Kontinuumsstrahlung, die über breite Frequenzbereiche ausgesandt wird, enthält weitere Informationen. Dabei handelt es sich vor allem um thermische Strahlung von kosmischem Staub. Das ist aus zweierlei Gründen interessant. Erstens besteht eine direkte Beziehung zwi-

schen der Menge an kosmischem Staub und der Menge an molekularem Wasserstoff in einer Galaxie. Diese Beziehung ist zwar nicht so zuverlässig und so gut getestet wie jene zwischen molekularem Wasserstoff und Kohlenmonoxid-Molekülen, aber sie erlaubt eine Konsistenzprüfung der CO-Ergebnisse. Außerdem gilt: die wichtigste Quelle für die Aufheizung des kosmischen Staubs in einer Galaxie ist die Sternentstehung, genauer: die Strahlung heißer, junger, massereicher Sterne. Aus der thermischen Strahlung des aufgeheizten Staubs lässt sich daher direkt auf die Sternentstehungsrate einer Galaxie schließen.

Bislang waren derartige Millimeter/Submillimeter-Beobachtungen nur für einzelne, direkt anvisierte Galaxien möglich. Aber als sich Fabian Walter vom Max-Planck-Institut für Astronomie und seine internationalen Kollegen Gedanken über die Leistungsfähigkeit von ALMA machten, kamen sie darauf, dass die Empfindlichkeit und das Auflösungsvermögen des Observatoriums (also die Fähigkeit, kleine Details am Himmel auseinanderzuhalten) es möglich machen sollten, eine »blinde Suche«, also eine Beobachtung ohne konkret vorgegebene Beobachtungsziele, im Ultra Deep Field vorzunehmen und so die vielen anderen Beobachtungen jener Himmelsregion zu ergänzen. Walter und Kollegen überprüften diese Hypothese mit einem Pilotprogramm unter Zuhilfenahme des IRAM Plateau de Bure Interferometers im ursprünglichen Hubble Deep Field (welches

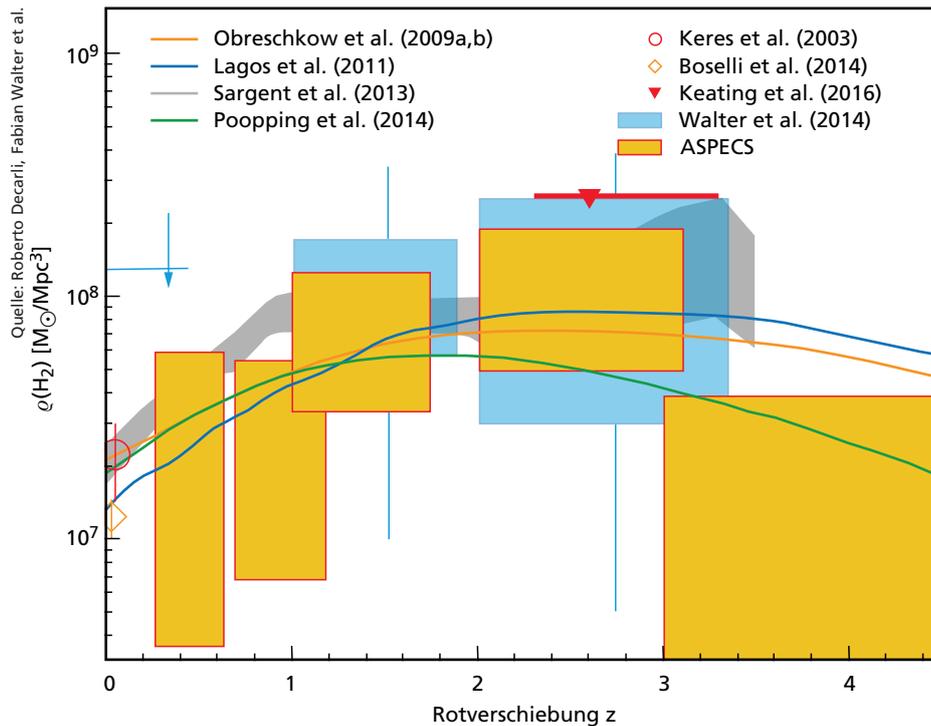
**Abb. II.9.2:** Hubble Ultra Deep Field mit Markierungen an den Orten der zehn mit Millimeterstrahlung nachgewiesenen Galaxien. (An einem der markierten Orte, C2, stehen zwei Galaxien hintereinander.)

**Abb. II.9.3:** Signal-zu-Rauschen-Karte der ALMA-Abbildung des betrachteten Ausschnitts aus dem Hubble Ultra Deep Field bei 1,2 Millimetern. Schwarze und weiße Konturen zeigen positive und negative Helligkeitswerte. (Negative Werte sind ein Artefakt des Messprinzips von ALMA, das Strahlungsflüsse auf großen Skalen nicht nachweisen kann.) Konturen entsprechen einer Helligkeit von 12,7  $\mu$ Jy pro Antennenstrahl malgenommen mit  $\pm 2, 3, 4, 5, 8, 12, 20$  bzw.  $40$ . Die Kästchen zeigen die Positionen der nachgewiesenen Quellen. C2 enthält zwei der Galaxien, die im Text erwähnt werden.



Quelle: M. Aravena, R. Decarli, F. Walter et al.

Quelle: M. Aravena, R. Decarli, F. Walter et al.



**Abb. II.9.4:** Massendichte für molekularen Wasserstoff, aufgetragen gegen die kosmische Zeit (konkret: mitbewegte Massendichte aufgetragen gegen die Rotverschiebung  $z$ ). Die orangenen Rechtecke zeigen diejenigen Wertebereiche an, die

aus den hier beschriebenen ALMA-Messungen folgen. Ebenfalls eingetragen sind Vorhersagen aufgrund von Modellen (*Linien*) und aufgrund einer Extrapolation verfügbarer Daten (*graue Fläche*).

von ALMA nicht sichtbar ist). In der Tat bestätigten diese Ergebnisse, welche im Jahr 2014 veröffentlicht wurden, dass die Beobachtungsstrategie die erwünschten Ergebnisse zeigt.

#### 40 Stunden im Hubble Ultra Deep Field

Zwischen Juli 2014 und April 2015 beobachtete ALMA dann mit 50 seiner Antennen für rund 40 Stunden das südliche Sternbild Fornax (chemischer Ofen), wo sich das Ultra Deep Field befindet, und fing dabei Licht von einer rund eine Bogenminute mal eine Bogenminute großen Himmelsregion auf, rund einem Siebtel des HUDF. Bereits kurz nach Ende der Beobachtungen wussten Walter und seine Kollegen, dass ihre blinde Suche erfolgreich gewesen war. Eine genauere Analyse über die nachfolgenden Monate bestätigte den Nachweis von zehn Galaxien.

Die Beobachtungen zeichnen ein faszinierendes Bild vom Rohmaterial der Sternentstehung während des »Goldenen Zeitalters« maximal produktiver Sternentstehung in unserem Kosmos. Je weiter die Forscher in die Vergangenheit zurückblicken, umso mehr Gas findet sich in den damaligen Galaxien. Dieses Ergebnis war bereits aus Studien einzelner Galaxien bekannt, insbesondere durch Beobachtungen mit dem IRAM Plateau de Bure Interferometers und dessen Nachfolger NOEMA

(Northern Extended Millimeter Arrays). Die von Walter und Kollegen durchgeführte »blinde Suche« ermöglichte dann die Bestimmung der kosmischen Dichte des molekularen Gases. Diese Zunahme an Gasgehalt dürfte also der Grund für die beachtliche Zunahme der Sternentstehungsraten sein, die während des Höhepunkts der Galaxienentstehung vor rund 10 Milliarden Jahre einsetzte.

Die Galaxien, die mit den Millimeter-Beobachtungen gefunden wurden, können auch in den HUDF-Beobachtungen im sichtbaren und im Infrarotlicht identifiziert werden – obwohl niemand genau hätte voraussagen können, welche der Galaxien in dem berühmten Hubble-Bild auch im Millimeter-Bereich als helle Quellen sichtbar sein würden. Tatsächlich gilt: Obwohl die Stichprobe der neuen Messungen nicht besonders groß ist, liefert sie Hinweise darauf, dass die beobachtete Helligkeit der Galaxie und die Größe ihres Vorrats an molekularem Wasserstoff (aus dem sich zukünftige Sterne bilden können) weniger direkt miteinander zusammenhängen als zuvor vermutet. Die Forscher haben offenbar Galaxien entdeckt, die in anderen tiefen Durchmusterungen des UDF nicht so einfach zu identifizieren sind.

#### Ein zukünftiges Großprogramm

Während die Ergebnisse bereits für sich genommen von Interesse sind, spielen sie gleichzeitig eine wichtige Rolle

als Wegbereiter zukünftiger Messungen. Kohlenstoffmonoxidreiche Galaxien, wie die im UDF gefundenen, leisten offenbar einen beachtlichen Beitrag zur gesamten Sternentstehungsgeschichte unseres Kosmos und sind damit höchst interessante Objekte für weitere Untersuchungen.

Tatsächlich hat das internationale Team unter der Leitung von Walter, Aravena und Carilli unter anderem aufgrund der neuen Ergebnisse das erste großangelegte Beobachtungsprogramm (Large Observation Program) mit ALMA bewilligt bekommen: Beispiellose 150 Stunden an Beobachtungszeit, mit der im Jahre 2017 ein Grossteil des Ultra Deep Fields kartiert werden soll. Aus ihren jetzigen Ergebnissen extrapolieren die Astronomen, dass das Programm insgesamt mehr als 50 im Millimeterbereich sichtbare Galaxien zwischen der Jetztzeit (Rotverschiebung  $z = 0$ ) und einer Zeit liefern sollte, zu

der das Universum nur einige Milliarden Jahre alt war. Damit sollten sich weitere Fragen zur kosmischen Geschichte auch statistisch behandeln lassen – wichtige weitere Puzzlestücke für das Rätsel der Sternentstehung in unserem Universum.

*Fabian Walter, Roberto Decarli,  
Hans-Walter Rix und Arjen van der Wel*

*in Zusammenarbeit mit*

*Manuel Aravena (UDP, Chile),  
Chris Carilli (National Radio Astronomy Observatory,  
New Mexico, USA, University of Cambridge, UK),  
Rychard Bouwens (Sternwarte Leiden, Niederlande)  
und 35 weiteren Mitgliedern des ASPECS-Teams*

F. Walter et al. 2016: »ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Survey Description«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

M. Aravena et al. 2016: »ALMA spectroscopic survey in the Hubble Ultra Deep Field: Continuum number counts, resolved 1.2-mm extragalactic background, and properties of the faintest dusty star forming galaxies«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

R. Decarli et al. 2016: »ALMA spectroscopic survey in the Hubble Ultra Deep Field: CO luminosity functions and the evolution of the cosmic density of molecular gas«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

R. Decarli et al. 2016: »ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Molecular gas reservoirs in high-redshift galaxies«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

M. Aravena et al. 2016: »ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Search for [CII] line and dust emission in  $6 < z < 8$  galaxies«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

R. Bouwens et al. 2016: »ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: The Infrared Excess of UV-selected  $z=2-10$  galaxies as a function of UV-continuum Slope and Stellar Mass«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*

C. Carilli et al. 2016: »ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: implications for spectral line intensity mapping at millimeter wavelengths and CMB spectral distortions«, angenommen zur Veröffentlichung im *Astrophysical Journal*



### III. Instrumentierung und Technik

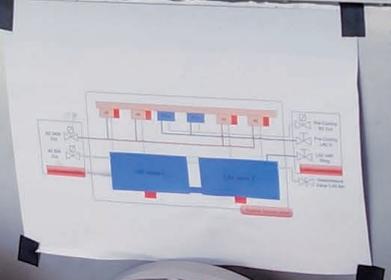
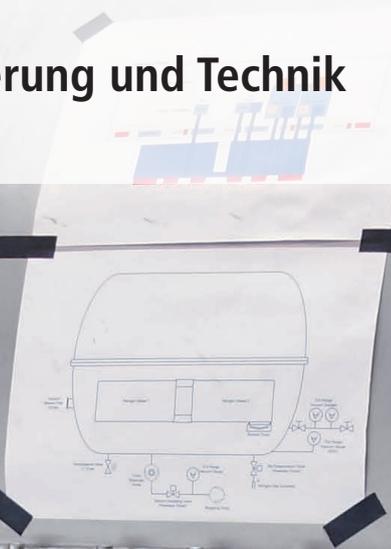


STÖHR

FLANGE 07

FLANGE 08

FLANGE 10



### III.1 Überblick

## Instrumentierung für bodengebundene Astronomie

**Die Schwerpunkte der MPIA-Aktivitäten im Bereich bodengebundene Instrumentierung lagen 2015 in den Bereichen Spektroskopie, Bildgebung höchster Qualität sowie interferometrische Instrumente für die ESO-Teleskope VLT/VLTI und VISTA und für das Large Binocular Telescope (LBT), sowie Durchmusterungsinstrumente für das Calar Alto-Observatorium. Außerdem ist das MPIA am Bau von zweien der drei Instrumente beteiligt, die für die Erstausrüstung des E-ELT vorgesehen sind, eines geplanten Teleskops der nächsten Generation mit 39 Meter Spiegeldurchmesser.**

---

#### Instrumentierung für das Large Binocular Telescope (LBT)

LUCI 1 und LUCI 2 sind zwei kryogen gekühlte Instrumente für den Nahinfrarotbereich, die bildgebende Kameras und Spektrografen enthalten, mit denen sich mehrere Objekte gleichzeitig untersuchen lassen. Die beiden Instrumente wurden für das Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham in Arizona gebaut, als Kooperationsprojekt mit der Landessternwarte Heidelberg, dem Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching, der Universität Bochum und der Fachhochschule für Technik und Design in Mannheim.

Die LUCI-Instrumente bieten ein Bildfeld der Größe 4 mal 4 Bogenminuten, in dem die Bildqualität nur durch die Atmosphäreigenschaften (Seeing) begrenzt werden. Das entspricht etwas mehr als einem Sechzigstel der scheinbaren Größe des Vollmonds am Himmel und ist für astronomische Kameras an Teleskopen wie dem LBT ein ungewöhnlich großes Bildfeld.

Anfang 2010 wurden die ersten Spektren und Bilder veröffentlicht, die mit LUCI 1 aufgenommen worden waren. Besonders an diesen Instrumenten ist ihre Nutzung sogenannter Adaptiver Optik (AO): Spiegel, die in Echtzeit verformt werden und so einen Großteil der Störungen ausgleichen können, den das Licht ferner Objekte beim Durchgang durch die Erdatmosphäre erfährt.

Mithilfe der adaptiven Sekundärspiegel des Teleskops sind über ein Bildfeld von rund einer halben mal einer halben Bogenminute beugungsbegrenzte Beobachtungen möglich, also Beobachtungen, die nur noch durch die Abbildungseigenschaften des Teleskops beschränkt werden, nicht aber durch die atmosphärischen Beobachtungsbedingungen. LUCI 2 wurde 2014 auf volle Funktionalität der Adaptiven Optik aufgerüstet und Anfang

2015 erfolgreich im AO-Betrieb getestet. Später im Jahr wurde dieselbe Nachrüstung auch bei LUCI 1 vorgenommen, und im März 2016 bei ersten Himmelsbeobachtungen getestet.

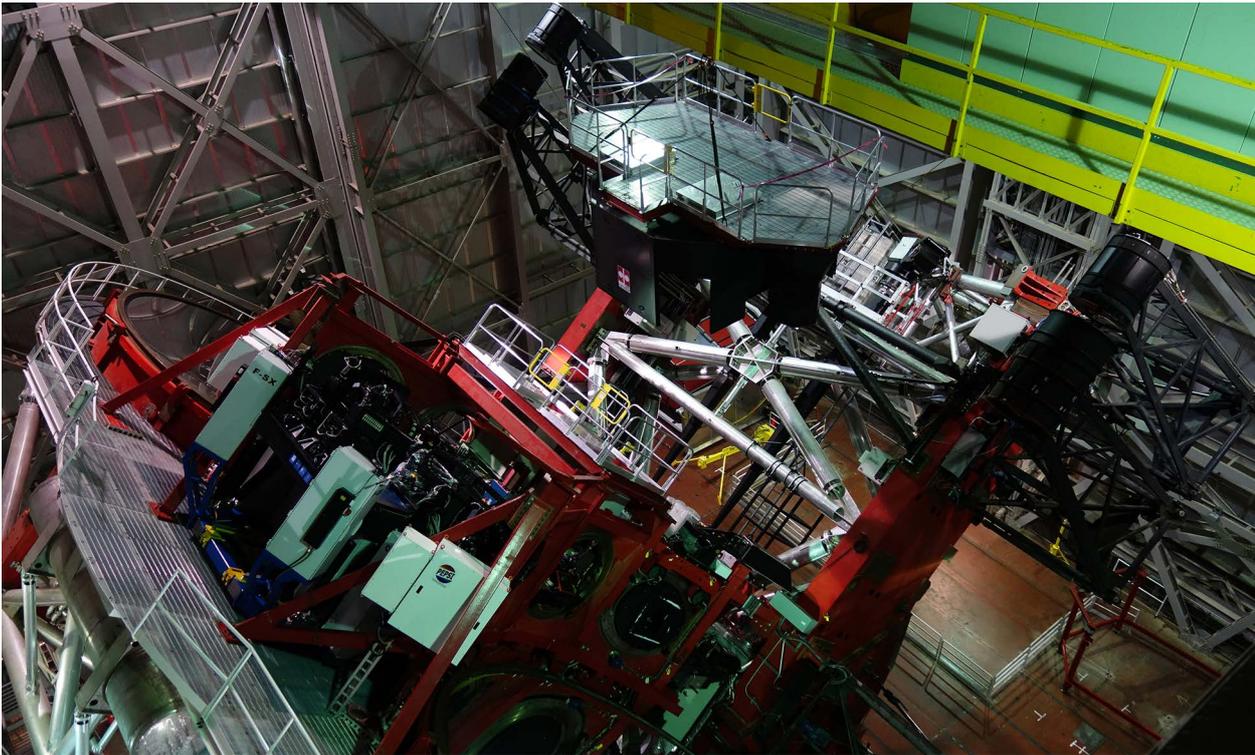
Adaptive Optik ermöglicht den Benutzern ein spektrales Auflösungsvermögen von mehreren zehntausend, mit anderen Worten: Die Wellenlängenunterschiede, die auf diese Weise nachgewiesen werden können, entsprechen Bruchteilen eines Zehntausendstels der beobachteten Wellenlänge. Messungen während des Beobachtungseinsatzes zeigen, dass sich in den Nahinfrarot-Bändern H und K sehr gute AO-Korrekturen erreichen lassen (Strehl-Ratio besser als 70%).

Die Vorbereitung (comissioning) auf den wissenschaftlichen Beobachtungsbetrieb geht sowohl für LUCI 1 als auch für LUCI 2 weiter. Zu den zahlreichen wissenschaftlichen Einsatzmöglichkeiten für die vielseitigen LUCI-Instrumente gehört beispielsweise die Sternentstehung in nahegelegenen Galaxien.

Adaptive Optik nutzt Referenzsterne, um zu beobachten, wie die atmosphärischen Störungen astronomische Bilder verzerren, und daraus die nötigen Korrekturen zu berechnen. Allerdings müssen solche Referenzsterne eine gewisse minimale Helligkeit besitzen – und es gibt keine Garantie, dass Astronomen innerhalb des Bildfeldes, welches ihr Beobachtungsobjekt enthält, gleichzeitig auch einen hinreichend hellen Stern finden werden! Das ist der Grund für die Entwicklung des Laser-Leitsternsystems ARGOS, das mithilfe von Laserstrahlen künstliche Referenzsterne am Nachthimmel erzeugt, die dann mit den beiden LUCI-Instrumenten angepeilt werden können.

ARGOS wurde 2015 erstmals bei Beobachtungen an einer Seite des LBT eingesetzt und auf dieser Seite bis Mitte 2015 komplett in Betrieb genommen. Die andere Seite hatte im Dezember 2015 »erstes Licht« und durchlief 2016 mehrere Testbeobachtungen. Das MPIA spielte in all diesen Projektphasen eine wichtige Rolle.

Das mit Abstand größte laufende Instrumentierungsprojekt am MPIA ist nach wie vor LINC-NIRVANA (L-N), welches das nahinfrarote Licht beider Teleskopspiegel des LBT zusammenführen soll. Das Instrument wurde im letzten Jahr am MPIA auseinandergenommen und zum LBT verschickt, wo es im Oktober 2015 wohlbehalten ankam. Nach einer ersten Testinstallation der strukturellen Komponenten des Instruments im November 2015 wurde LINC-NIRVANA während des Großteils des Jahres 2016 wieder komplett zusammengesetzt: Im »Mountain Lab«, der LBT Integration Facility direkt am



Quelle: LBT

Abb. III.1.1: Hier ist LINC-NIRVANA (L-N) endlich am Large Binocular Telescope (LBT) auf dem Mount Graham in Arizona (USA) installiert. Potenziell kann dieses Instrument das LBT so hohe Auflösungen erreichen lassen wie ein Teleskop mit einem 23-Meter-Spiegel. LINC-NIRVANA wurde von einem Konsortium deutscher und italienischer Institute unter Leitung des MPIA konstruiert. Mit seinen zwei 8,4-Meter-Spiegeln auf

einer einzigen Montierung ist das LBT derzeit das größte Einzelteleskop der Welt, mit dem Lichtsammelvermögen eines 12-Meter-Teleskops. Das Bild zeigt einen letzten Blick auf die optischen Systeme von LINC-NIRVANA (Mitte links) während der Installation der Instrumentenabdeckung (die aus der Bildmitte oben herangeführt wird).

Teleskop wurden jene Elemente, die für den Transport ausgebaut und gesondert verpackt worden waren, wieder eingebaut und richtig ausgerichtet. Auf einen ersten Testlauf im November 2016 wird im Januar 2017 eine zwei Jahre währende Inbetriebnahme (commissioning) folgen. MPIA ist im L-N-Konsortium das federführende Institut. Weitere Konsortiumsmitglieder sind die italienischen Observatorien (INAF), das Max-Planck-Institut für Radioastronomie in Bonn und die Universität Köln.

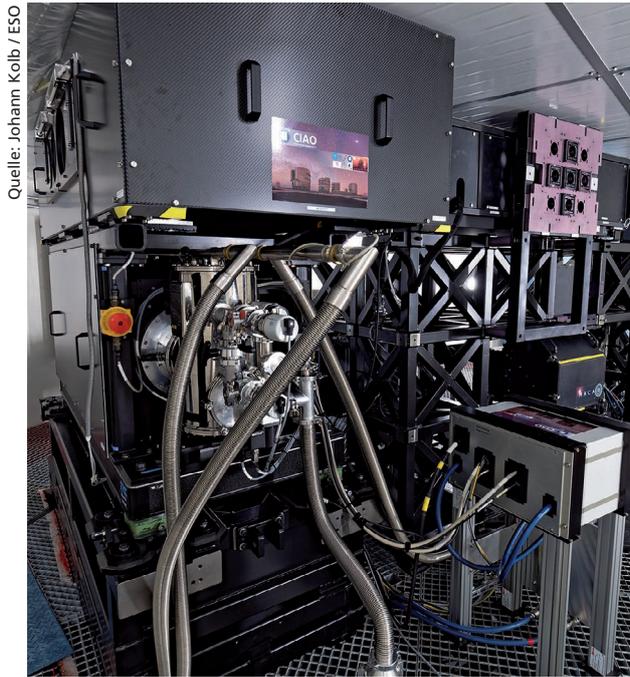
Erstes Ziel wird es sein, über ein Bildfeld von 10,5 mal 10,5 Bogensekunden bei nahinfraroten Wellenlängen zwischen 1 und 2,4  $\mu\text{m}$  mit multikonjugierter Adaptiver Optik korrigierte Bilder zu liefern. Ein optionaler zukünftiger Funktionsmodus soll beugungsbegrenzte Bilder mit der Auflösung eines 23-Meter-Teleskops ermöglichen. Dazu wird LINC-NIRVANA das Licht der beiden Hauptspiegel des LBT mithilfe sogenannter Fizeau-Interferometrie kombinieren.

Zu den wissenschaftlichen Zielen von LINC-NIRVANA gehören kosmologische Messungen an Supernovae ebenso wie Untersuchungen zur Entstehung von Galaxien, der Sternpopulationen und Sternentstehung in anderen Galaxien, Exoplaneten, die Multiplizität von Sternen, die Struktur von zirkumstellaren Scheiben sowie von Planeten unseres Sonnensystems und deren Atmosphären.

### Instrumentierung für ESO-Teleskope: VLT/VLTI und VISTA

Das MPIA ist an den Instrumenten MATISSE und GRAVITY der zweiten Generation für das Very Large Telescope Interferometer (VLTI) am Paranal-Observatorium der ESO beteiligt. Bei VLTI werden mehrere der Teleskope des Very Large Telescope (VLT) miteinander kombiniert, genauer: unterschiedliche Kombinationen der 8,2-Meter-Hauptteleskope und der 1,8-Meter-Hilfsteleskope.

Das MATISSE-Konsortium besteht aus neun Instituten unter der Leitung des Observatoire de la Côte d'Azur. Matisse soll das Licht aller vier VLT- Hauptteleskope im mittleren Infrarotbereich kombinieren. So wird es möglich, Bilder mit der extrem hohen Auflösung von 10–20 Millibogensekunden zu erschließen. Wissenschaftliche Anwendungen finden derart detailscharfe Bilder bei Studien Aktiver Galaxienkerne (AGN) ebenso wie bei der Entstehung von Planetensystemen und von massereichen Sternen und bei der Untersuchung der näheren Umgebung anderer Sterne. Das MPIA hatte seine Beiträge zu MATISSE in Form zweier Haupt-Kryostaten für Instrumente bereits 2014 zur Integration nach Nizza geliefert. Im Sommer 2017 soll das Instrument von dort zur ESO transportiert werden.



Quelle: Johann Kolb / ESO

Abb. III.1.2: Das zweite von vier CIAO-Wellenfront-Sensorsystemen wird im Coudé-Raum des Hauptteleskops 4 des Very Large Telescope der ESO am Paranal-Observatorium installiert.

GRAVITY kombiniert ebenfalls das Licht aller vier VLT-Hauptteleskope, allerdings im Nahinfrarotbereich. Federführend beim GRAVITY-Konsortium ist das Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching; zum Konsortium gehören das MPIA, die Observatorien in Paris und Grenoble sowie die Universitäten in Köln und Lissabon. Mithilfe eines sehr leistungsstarken Adaptiven Optik-Systems soll GRAVITY in einem 2 Bogensekunden durchmessenden Blickfeld hochpräzise astrometrische Messungen durchführen und außerdem extrem hochauflösende Bilder produzieren.

Während derjenige Teil des Instruments, der die Strahlen der verschiedenen Teleskope zusammenführt, bereits 2015 am Paranal installiert worden war und im Januar 2016 erste astronomische Testaufnahmen geliefert hatte, wurden weitere Komponenten, etwa das Metrologie-System sowie der MPIA-Hauptbeitrag, nämlich die vier Wellenfrontsensoren CIAO, erst in diesem Jahr installiert. CIAO steht für »Coudé Infrared Adaptive Optics«, also Adaptive Infrarot-Optik, die Licht des Coudé-Fokus (eines der »Licht-Ausgänge« des Teleskops) nutzt.

Der Testbetrieb (commissioning) von CIAO im Rahmen von GRAVITY begann im September 2016. Geht alles nach Plan, dann wird GRAVITY zusammen mit seinen vier CIAO-Systemen der Gemeinschaft der Astronomen ab Herbst 2017 für wissenschaftliche Beobachtungen zur Verfügung stehen.

Zu den wissenschaftlichen Anwendungen von GRAVITY gehören die Untersuchungen von Bewegungen in unmittelbarer Nähe des supermassereichen Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Galaxie, der direkte Nachweis

intermediärer Schwarzer Löcher in unserer Heimatgalaxie, der Milchstraße, die dynamische Massenbestimmung von Exoplaneten, Studien zu den Ursprüngen protostellarer Jets sowie die Abbildung von Sternen bzw. Gas in den verdeckten Regionen aktiver galaktischer Kerne (AGN), von Sternentstehungsregionen und von protoplanetaren Scheiben.

Insbesondere wird GRAVITY von 2017 bis 2018 das Objekt S2 nahe dem galaktischen Zentrum beobachten. Im Jahre 2018 wird das Objekt denjenigen Punkt seiner Bahn erreichen, der dem Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße am nächsten ist. Das wird Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie in einem Bereich extrem starker Gravitation ermöglichen.

Das Instrument SPHERE am Very Large Telescope (VLT), darauf spezialisiert, jupiterähnliche Exoplaneten abzubilden, hat im Frühjahr 2015 seinen regulären Beobachtungsbetrieb aufgenommen. Seither ist das Instrument erfolgreich im Einsatz und Gegenstand zahlreicher Beobachtungsanträge. Das MPIA ist bei SPHERE eines von mehreren federführenden Instituten (Co-PI) in einem Konsortium, zu dem auch das Laboratoire d'Astrophysique der Sternwarte Grenoble, das Laboratoire d'Astrophysique in Marseille, die ETH Zürich und die Universität Amsterdam gehören.

Die wichtigste Herausforderung für SPHERE liegt darin, den extrem großen Helligkeitsunterschied zwischen Exoplaneten und ihren Heimatsternen zu überwinden. Zu diesem Zweck nutzt das Instrument eXtreme Adaptive Optik (XAO) und Koronografie (also das mechanische Abschatten des Lichts des Sterns im Instrument selbst). SPHERE besitzt drei Untersysteme in der Brennebene, die differenzielle Bildanalyse (differential imaging) nutzen, also spezielle Vergleiche zwischen verschiedenen Bildern eines Planeten und seines Heimatsterns, die es ermöglichen, die realen Bilddaten von verschiedenen Störbeiträgen zu unterscheiden. Das erste der drei Unterinstrumente nutzt Polarimetrie im Bereich des sichtbaren Lichts, das zweite Doppelabbildungen im Nahinfrarotbereich und das dritte integrale Feldspektroskopie im infraroten J-Band.

Das Projekt 4MOST, zu dem das MPIA seit 2014 beiträgt, ist ein Multi-Objekt-Spektrograf für das 4,1-Meter-Durchmusterungsteleskop VISTA am Paranal-Observatorium der ESO. 4MOST ist derzeit in der vorläufigen Designphase, die im Oktober 2017 mit einer Begutachtung abgeschlossen werden und dann in die eigentliche Designphase übergehen soll.

Leitendes Institut für 4MOST ist das Astrophysikalische Institut Potsdam; das MPIA ist dabei für die Steuerelektronik des Instruments verantwortlich. 4MOST soll die Ursprünge unserer Heimatgalaxie ebenso untersuchen wie deren chemische und kinematische Struktur. Außerdem soll das Instrument Beiträge zur Untersuchung der Galaxienentwicklung leisten. Dafür kommen 2400 optische Fasern auf einem Bildfeld von 4 Quadratgrad zum Einsatz, mit denen sich gleichzeitig Spektren für bis zu 2400 unterschiedliche Objekte im Bildfeld aufnehmen lassen.

### Durchmusterungsinstrumente für das Calar Alto-Observatorium und andere Standorte

Die Panoramic Near-infrared Camera (PANIC), die Panorama-Kamera für Nahinfrarotlicht, ist ein vielseitig einsetzbares Instrument mit großem Bildfeld für das 2,2-Meter-Teleskop am Calar Alto-Observatorium (CAHA) – eine gemeinsame Entwicklung mit dem Instituto de Astrofísica de Andalucía. Mit vier Hawaii2-RG-Detektoren deckt dieses Instrument ein Bildfeld von 30 mal 30 Bogenminuten ab (entsprechend der scheinbaren Größe des Vollmonds am Himmel). Das erlaubt Durchmusterungen von extragalaktischen und galaktischen Objekten ebenso wie Himmelskörpern in unserem eigenen Sonnensystem. PANIC ist seit April 2015 in Betrieb. Derzeit wird diskutiert, ob zwei der vier Detektoren durch hochwertigere Modelle ersetzt werden sollen.

CARMENES ist ein hochauflösender Échelle-Spektrograf für sichtbares und nahinfrarotes Licht, der derzeit von einem Konsortium deutscher und spanischer Institutionen für das 3,5-Meter-Teleskop am CAHA gebaut wird. Nach erfolgreicher Inbetriebnahme beider Spektrografen in der zweiten Hälfte des Jahres 2015 begann das Instrument im Januar 2016 eine Durchmusterung von 300 Hauptreihensternen vom Typ M um in deren habitablen Zonen Exoplaneten zu finden.

Die Suche nach Exoplaneten, genauer: nach Transits solcher Planeten, ist das Ziel des HATSouth-Projekts, in dem das MPIA mit der Universität Princeton, der Australian National University und der Pontificia Universidad Católica de Chile zusammenarbeitet. HATSouth ist ein Netzwerk von 24 robotischen Kleinteleskopen am Las Campanas-Observatorium in Chile, am Siding Spring-Observatorium in Australien und am Standort von H.E.S.S. in Namibia. MPIA ist für die Bereitstellung des Standorts und den Betrieb der Teleskope in Namibia verantwortlich.

MPIA-Wissenschaftler nutzen weiterhin das ESO/MPG-2,2 Meter-Teleskop am Observatorium La Silla für spezielle Durchmusterungen.

### Das zukünftige European Extremely Large Telescope (E-ELT)

Im Jahre 2010 schloss eine ESO-Kommission unter der Leitung des MPIA die Suche nach dem Standort des zukünftigen 39-Meter-Teleskops European Extremely Large Telescope, E-ELT, ab. Die Wahl fiel auf den Berg Cerro Armazones in der chilenischen Atacamawüste, in direkter Nachbarschaft zum Paranal-Observatorium der ESO.

Ende 2014 beschloss das Leitungsgremium der ESO, der ESO Council, mit dem Bau des Teleskops und der ersten Generation von Instrumenten zu beginnen. Das MPIA ist an zweien der Instrumentierungsprojekte beteiligt: METIS und MICADO. METIS begann im Frühjahr 2015 mit seiner auf zwei Jahre angesagten vorläufigen Designphase, während MICADO zur gleichen Zeit mit Optimierungsstudien begann und im Oktober 2016 ebenfalls in die vorläufige Designphase übergang.

METIS ist eine Kombination aus Kamera und Spektrograf im Bereich der thermischen/mittelinfraroten Strahlung bei Wellenlängen zwischen 3 und 19 Mikrometern. Mithilfe von Adaptiver Optik wird das Instrument beugungsbegrenzte Beobachtungen zulassen. Zu den wissenschaftlichen Zielen des Instruments gehören Untersuchungen zu den Verhältnissen im frühen Sonnensystem, der Bildung und Entwicklung protoplanetarer Scheiben, des galaktischen Zentrums, der hellen Zentralregionen nahegelegener Galaxien, aktiver Galaxienkerne bei hohen Rotverschiebungen und hoch rotverschobene Gammastrahlungs-Ausbrüche.

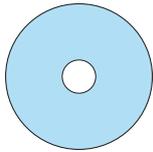
MICADO ist eine Kamera für den Nahinfrarotbereich. Mithilfe ihrer multikonjugierten Adaptiven Optik soll das Instrument eine sechs- bis siebenmal bessere Detailschärfe liefern als das James Webb Space Telescope (JWST), der designierte Nachfolger des Hubble-Weltraumteleskops. Das Instrument wird empfindlich genug sein, um Sterne mit bis zu 29 Magnituden Helligkeit nachweisen zu können – im sichtbaren Licht entspräche das Sternen, die mehr als eine Milliarde Mal schwächer sind als die schwächsten noch mit dem bloßen Auge sichtbaren Sterne. Das Instrument erreicht diese Empfindlichkeit in den nahinfraroten Wellenlängenbändern I bis K.

Zu den wissenschaftlichen Zielen für MICADO gehört die detaillierte Kartierung der chemischen Eigenschaften und der Bewegungsmuster in den Zentren von Galaxien, Sternhaufen und Sternpopulationen in der lokalen Gruppe (also jenem Galaxienhaufen, zu dem auch unsere Heimatgalaxie gehört). Außerdem soll das Instrument die Morphologie von Galaxien bei hohen Rotverschiebungen untersuchen, aufklären, wann in Galaxien wieviele und welche Sterne entstanden sind, und nach Schwarzen Löchern im mittleren Massebereich suchen. Weitere Untersuchungen werden sich den dynamischen Eigenschaften von Kugelsternhaufen widmen, koronographischen Abbildungen von Exoplaneten mit hohem Kontrast, der Bestimmung der Alter, Metallizitäten und Massen der ersten elliptischen Galaxien sowie der Physik von Pulsaren, Magnetaren, und akkretierenden Weißen Zwergen.

*Martin Kürster  
für die Technischen Abteilungen des MPIA*

## Teleskopspiegel im Vergleich

Die Abbildungen zeigen Form, Struktur und Größe der Hauptspiegel ausgewählter Teleskope, die von MPIA-Wissenschaftlern genutzt werden oder für die das MPIA Beiträge zur Instrumentierung leistet, beziehungsweise geleistet hat.



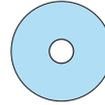
**Herschel-Weltraumteleskop**  
3,5 m



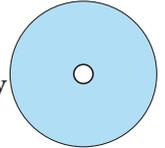
**Infrared Space Observatory**  
Hauptspiegel 0,6 m



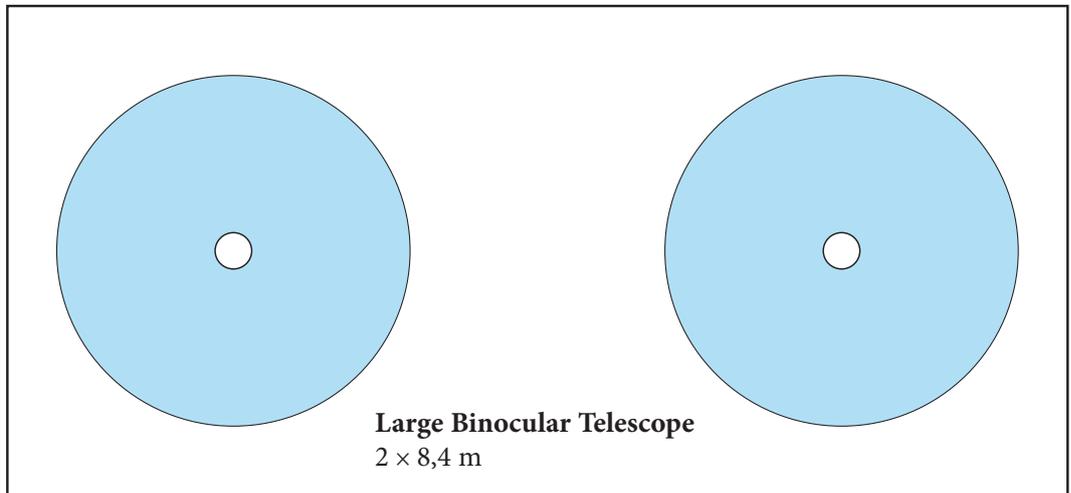
**Spitzer-Weltraumteleskop**  
Hauptspiegel 0,85 m



**Hubble-Weltraumteleskop**  
2,4 m

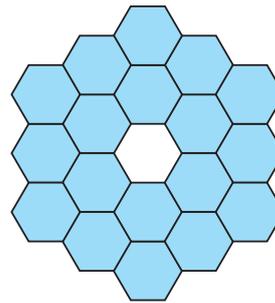
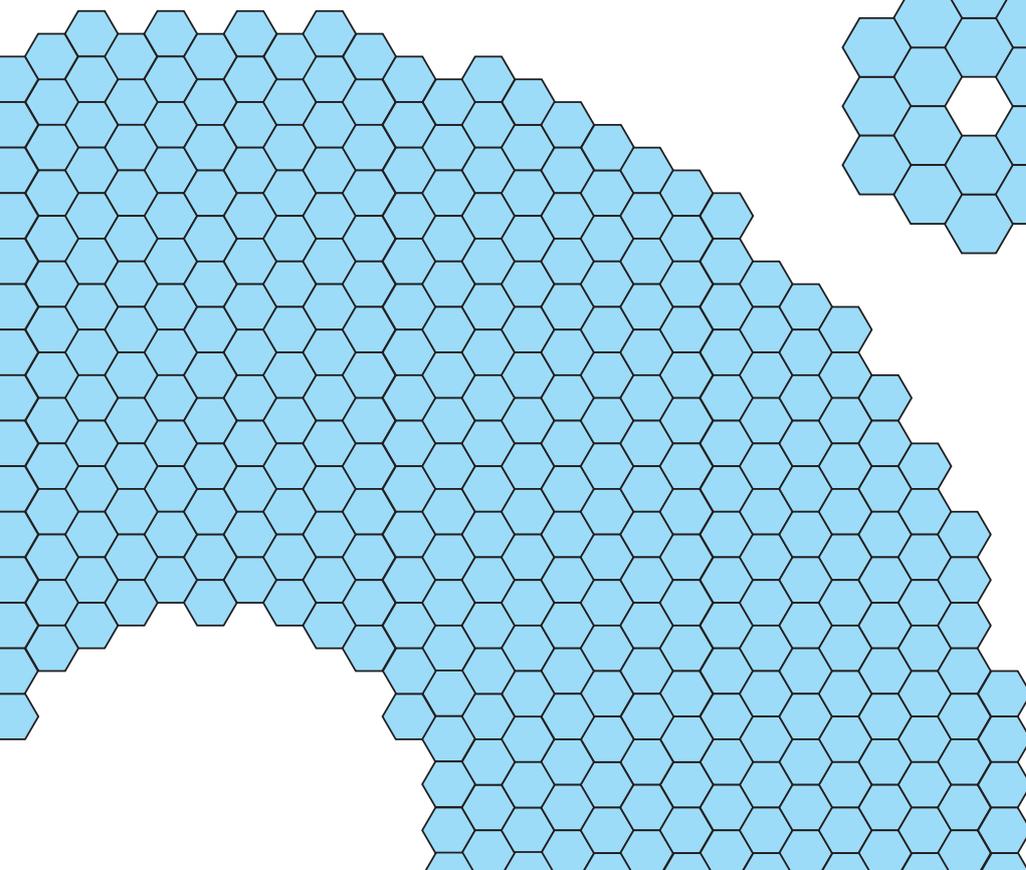


**Calar Alto Observatory**  
3,5 m

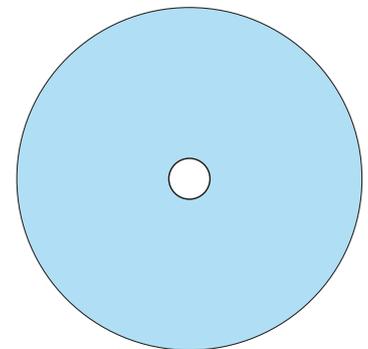


**Large Binocular Telescope**  
 $2 \times 8,4$  m

**European Extremely Large Telescope**  
39,3 m (Ausschnitt)



**James Webb Space Telescope**  
6,5 m



**Very Large Telescope**  
 $4 \times 8,2$  m

## III.2 Überblick

# Instrumentierung für Weltraumteleskope

### James Webb Space Telescope (JWST)

Das James Webb Space Telescope (JWST), ein Weltraumteleskop für Wellenlängen vom sichtbaren Licht bis zum mittleren Infrarotbereich, soll im Frühjahr 2019 starten. JWST, der designierte Nachfolger des Weltraumteleskops Hubble, wird mit seinem 6,5-Meter-Spiegel und vier wissenschaftlichen Instrumenten das leistungsfähigste Weltraumobservatorium der nächsten zehn Jahre sein.

Das MPIA ist in Deutschland das führende Institut für die Entwicklung von Instrumentierung für das JWST. Als Mitglied eines europäischen Konsortiums ist das MPIA verantwortlich für die Entwicklung der kryogenen Filterradmechanismen, die benötigt werden, um die optischen Komponenten des Mittelinfrarot-Instruments MIRI präzise und zuverlässig zu positionieren. Das Institut hat außerdem die leitende Rolle beim Design der elektrischen Systeme des Instruments. MIRI besteht aus einer hochauflösenden Kamera und einem Spektrometer mittlerer Auflösung für den Wellenlängenbereich zwischen 5 und 28 Mikrometer.

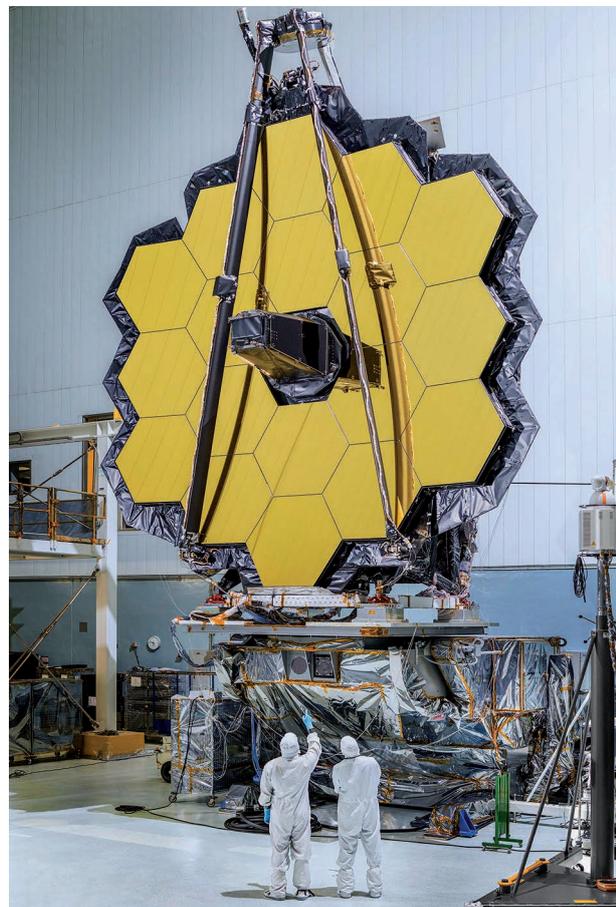
Das MPIA hat außerdem wichtige Komponenten wie kryogene Motoren und hochpräzise Positions-Sensoren zu dem Nahinfrarotspektrografen NIRSPEC beigetragen, dem zweiten der wissenschaftlichen Instrumente des JWST, das überwiegend in Europa entwickelt wurde.

Seit der Auslieferung des MIRI-Instruments an das Goddard Space Flight Center der NASA in den Vereinigten Staaten und seiner Integration in das Instrumenten-Modul des Teleskops sind die Instrumente einer Reihe strenger Tests unterzogen worden. Nach der dritten komplett gekühlten Testkampagne CV3 mit allen vier Instrumenten des JWST wurde das Instrumenten-Modul im Januar 2016 erfolgreich wieder aufgewärmt. Das NIRSPEC-Instrument wurde direkt vor CV3 mit den für den Weltraumeinsatz vorgesehenen Detektoren sowie dem Mikroverschluss-Feld ausgerüstet, das es NIRSPEC ermöglicht, mehrere Beobachtungsobjekte gleichzeitig zu untersuchen. Alle Filterradmechanismen des MPIA haben sich in den Tests zuverlässig bewährt.

Das JWST-Team am MPIA hat vor Ort direkt an der Vorbereitung, der Durchführung und der Analyse der Tests mitgewirkt. Außerdem sind die betreffenden MPIA-Mitarbeiter bereits damit befasst, die zukünftige Datenverarbeitungs-Pipeline für das MIRI-Instrument mit zu entwickeln.

Nach der letzten Testkampagne unter Vakuum-Bedingungen und mit realistischen thermischen Verhältnissen wurde das Instrumentenmodul des JWST in das eigentliche Teleskop mit seinen 18 Hauptspiegelsegmenten eingebaut (Abbildung III.2.1). Die damit voll integrierten Instrumente wurden anschließend auf die akustischen und die Vibrationstests vorbereitet – zwei der wichtigsten Tests für Weltraumteleskope überhaupt, da sich an ihnen entscheidet, ob Raumfahrzeug und Instrumente hinreichend stabil sind, um die Belastungen des Raketenstarts und des Weltraumflugs auszuhalten.

**Abb. III.2.1:** NASAs Spiegel für das James Webb Space Telescope (JWST) in komplett entfaltetem Zustand: Mit seinen sechseckigen Spiegelsegmenten sieht der Spiegel, hier in einem Reinraum des Goddard Space Flight Center in Greenbelt, Maryland, wie ein gigantisches Puzzle aus. Die vier wissenschaftlichen Instrumente des Weltraumobservatoriums sind bereits auf der Spiegelrückseite installiert.



Quelle: NASA



Abb. III.2.2: Im großen Reinraum des Goddard Spaceflight Center der NASA bereiten Ingenieure und Techniker das James Webb Space Telescope auf eine Serie von Akustik- und Vibrationstests vor. Für den Transport zwischen den

verschiedenen Testständen, die sich außerhalb des Haupt-Reinraums befinden, wurde das JWST in einem schützenden Reinraumzelt untergebracht.

Für die akustischen Tests wurde das Teleskop in ein Reinraumzelt eingewickelt und in die mit fast 30 cm dicken Stahltüren gesicherte akustische Testkammer transportiert (Abbildung III.2.2). Das Reinraumzelt schützt Teleskop und Instrumente vor Staub und Dreck. In der Testkammer wurde das Teleskop dem ohrenbetäubenden Lärm eines Raketenstarts und so insbesondere auch den entsprechenden Vibrationen ausgesetzt. Es folgten Vibrationstests auf leistungsstarken »Rütteltischen«, die sicherstellen, dass das JWST dem unvermeidbaren Schütteln bei seinem Raketenflug gewachsen ist. Die komplexen Vibrationstests wurden bis in das Jahr 2017 hinein weitergeführt.

In der zweiten Jahreshälfte 2016 liefen die Vorbereitungen für das wissenschaftliche JWST auf Hochtouren, da bereits im Januar 2017 der erste »Call for Guaranteed Time Observations«, also die Ausschreibung für Beobachtungszeit seitens der an der Konstruktion beteiligten Wissenschaftler, herausgehen würde. Für seine Beiträge zum MIRI-Instrument stehen dem MPIA und den anderen Instituten des europäischen MIRI-Konsortiums insgesamt 450 Stunden JWST-Beobachtungszeit zu. Diese werden genutzt werden, um Untersuchungen zum frühen Universum, zu Exoplaneten und zu zirkumstellaren Scheiben durchzuführen. Das MPIA hat dabei die Leitung des Scheiben-Beobachtungsprogramms übernommen.

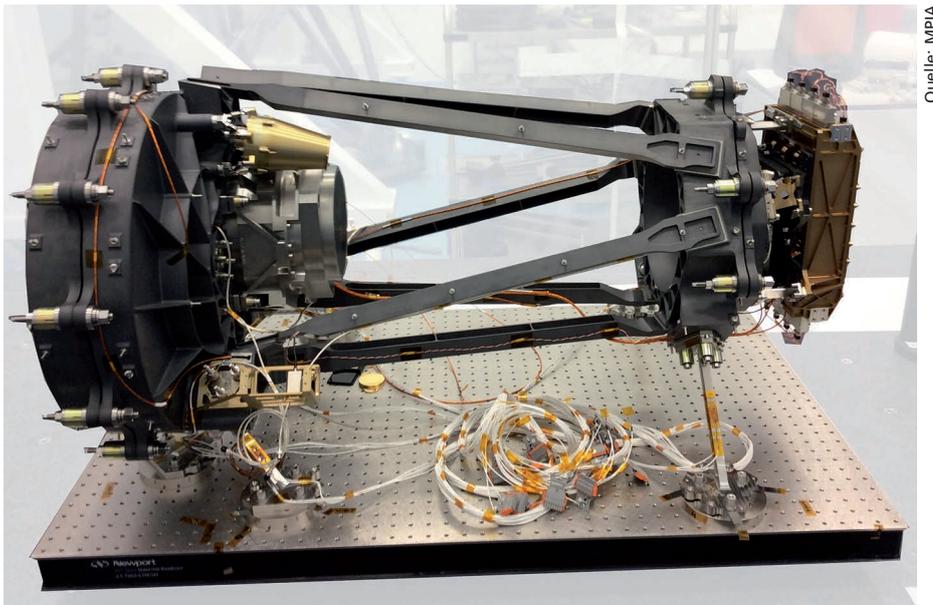
### Herschel und SPICA

Das Infrarot- und Submillimeter-Weltraumobservatorium Herschel der ESA startete 2009 in den Weltraum und lieferte bis April 2013 Beobachtungsdaten. Das Jahr 2016 hinweg befand sich die Mission in der *post-operations phase*,

der Phase nach dem eigentlichen Teleskopbetrieb. In dieser Phase wurden die Daten, die Herschel während seiner vier Jahre Beobachtungsbetrieb aufgenommen hatte, zusammengestellt und archiviert. In diesem Jahr lag der Schwerpunkt insbesondere auf der Kalibration und Analyse der Daten vor ihrer endgültigen Aufnahme in das Herschel-Archiv. Das Archiv folgt den Standards der Virtuellen Observatorien und erlaubt so ein effizientes Suchen.

Das MPIA war bei Herschel einer der Hauptpartner bei der Entwicklung des PACS-Instruments, einer Kombination aus Kamera und Spektrograf, die im Wellenlängenbereich von 60 bis 210 Mikrometer Beobachtungen mit nie zuvor erreichter Empfindlichkeit und räumlicher Auflösung vornehmen konnte. (Geleitet wurde das Konsortium vom Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik in Garching.) Das MPIA war für die Entwicklung des Fokalebene-Choppers (eines Instruments, das häufige Vergleiche zwischen einem Beobachtungsobjekt und dem Himmelshintergrund erlaubt) ebenso verantwortlich wie für die Charakterisierung der Spektrometer-Kameras und deren bei  $-270^{\circ}\text{C}$  betriebenen Ausleseelektronik. Eine solche Charakterisierung ist zwingend notwendig, um die Daten dieser Instrumente richtig interpretieren zu können.

Das Institut koordinierte außerdem eine Vielzahl von Aufgaben bei der Kalibration des Instruments und war dafür verantwortlich, den Plan für die entscheidenden Funktionstests des Instruments und die für die Kalibration maßgebliche Dokumentation zu erstellen. Insbesondere fiel die detaillierte Missionsplanung für die Tage der Funktionstest-Phase des PACS-Instruments mithilfe maßgeschneiderter Software in die alleinige Zuständigkeit des MPIA-Teams. Auch die Beobachtungs-Datenbanken wur-



Quelle: MPIA

**Abb. III.2.3:** Das Struktur- und Wärmeeigenschaften-Modell (Structural and Thermal Model, STM) von NISP nach der Integration. Sichtbar ist die dunkle mechanische Struktur aus

Siliziumcarbid mit der (goldenen) Struktur des Fokalebenefelds rechts. Der MPIA-Beitrag zu diesem Modell ist das STM der Kalibrationsquelle (goldene, oben links).

den vom MPIA-Team an das Herschel Science Center am ESAC in Villafranca (Spanien) und an das Mission Operations Center bei der ESOC in Darmstadt übergeben. Das Team erstellte außerdem einen passenden Kalibrationsplan für den Routinebetrieb von Herschel und entwickelte anhand von Labormessungen eine Methode, die Ge:Ga-Detektorfelder des Spektrometers nach ihrer Reise in den Weltraum optimal in Betrieb zu nehmen.

Die Beobachtungen des Weltraumteleskops Herschel waren in diesem Wellenlängenbereich empfindlicher und besser aufgelöst als jemals zuvor, und dürften auch für die folgenden Jahre die besten verfügbaren Daten ihrer Art bleiben. Daher wird auch jetzt noch ein beträchtlicher Aufwand getrieben, diese Daten möglichst gut aufzuarbeiten. Es ist sehr unwahrscheinlich, dass die Astronomen in der näheren Zukunft bessere Daten als diese zur Verfügung haben werden – dementsprechend hoch ist die Motivation, aus den vorhandenen Daten so viel an Informationen herauszuholen wie möglich.

Als möglicher Nachfolger für Herschel ist das Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics im Gespräch (SPICA, wörtlich etwa das »Infrarot-Weltraumteleskop für Kosmologie und Astrophysik«). Das Teleskop ist einer der Kandidaten im Cosmic Vision-Wissenschaftsprogramm der ESA. SPICA soll einen kalten Spiegel mit 2,5 Metern Durchmesser erhalten und wäre damit insbesondere bei spektroskopischen Messungen rund zwei Größenordnungen empfindlicher als Herschel.

SPICA wurde im Oktober 2016 als Mission der M-Klasse für den ESA-Start M5 im Jahre 2029 vorgeschlagen. Die Mission soll unter europäischer Leitung mit umfangreichen Beiträgen der japanischen Raumfahrtagentur JAXA erfolgen. Im europäischen Konsortium für SPICAs SAFA-

RI-Instrument übernimmt das MPIA die Verantwortung für das kryogene Testen der Detektoren sowie die Definition und das Design des zweidimensionalen Kippspiegelmechanismus, der zur Himmelskartierung und für die Kalibration des Instruments eine entscheidende Rolle spielt.

## Euclid

Die Euclid-Mission der ESA soll Ende der 2020er Jahre gestartet werden, um Fragen nach der Natur der Dunklen Materie und der Dunklen Energie zu beantworten. Diese beiden Konzepte der modernen Kosmologie sind noch bei weitem nicht vollständig verstanden: Dunkle Materie zeigt dabei keinerlei Wechselwirkung mit Licht oder anderen Formen elektromagnetischer Strahlung, beeinflusst aber durch ihre Schwerkraft Aufbau und Entwicklung von Galaxien und Galaxienhaufen sowie die kosmische Expansion. Dunkle Energie wurde eingeführt, um die überraschende Entdeckung erklären, dass sich die kosmische Expansion mit der Zeit nicht verlangsamt sondern beschleunigt – ein Umstand, der erst 1999 nachgewiesen wurde und seinen Entdeckern den Physik-Nobelpreis 2011 einbrachte.

Euclid soll mit extrem wirklichkeitstreuen Abbildungen und Spektren im sichtbaren und nahinfraroten Bereich die Entfernungen, räumliche Verteilung und Formen von rund einer Milliarde Galaxien ermitteln, die sich auf rund die Hälfte der Himmelskugel verteilen. Ziel ist es, daraus die Evolution der kosmischen Expansion und die (zeitabhängige!) Verteilung der Dunklen Materie von einem Zeitpunkt vor 10 Milliarden Jahren (Rotverschiebung  $z = 2$ ) bis heute zu erschließen.

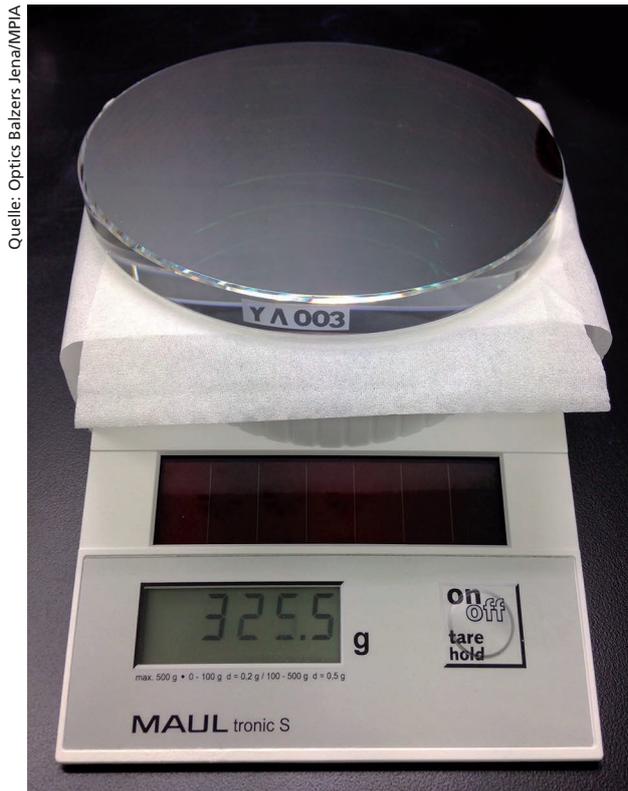


Abb. III.2.4: Der Y-Band-Infrarotfilter des NISP-Instruments von Euclid mit seiner beidseitigen Interferenz-Beschichtung nach der Fertigstellung in Jena. NISP hat drei solcher Filter mit 130 Millimetern Durchmesser und einem Durchlassbereich bei Wellenlängen zwischen 950 und 2000 Nanometern – die größten Infrarotfilter, die je auf einem Astronomiesatelliten zum Einsatz gekommen sind.

Die Definitionsphase der Filter ist jetzt abgeschlossen. Aus extrem durchlässigem Zerodur-3001-Glas wurden hochpräzise bemessene Rohlinge mit einem Durchmesser von 130 Millimeter gefertigt, die eine Seite leicht gekrümmt. Ein unbeschichteter Rohling wurde 2016 an die Partner ausgeliefert, die für die Befestigung der Filter am Filterrad zuständig sind. Ein voll funktionsfähiges Ingenieursmodell mit dem aus 300 Schichten bestehenden Interferenzfilter des Bandpasses (Abbildung III.2.4), beschichtet in Jena, wurde gefertigt und ab Ende des Jahres ersten Tests unterzogen.

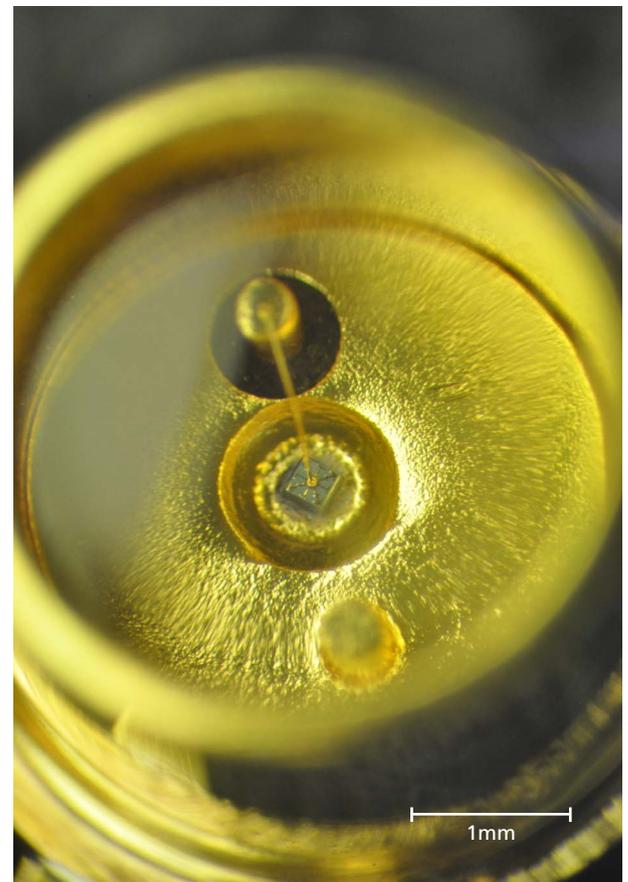
Der zweite Hardware-Beitrag ist eine Kalibrationslampe für Nahinfrarotstrahlung, die federführend vom MPIA entwickelt wurde. Das Licht wird dabei von LEDs erzeugt, die jeweils in schmalen Fenstern innerhalb des

Die Hardware-Beiträge des MPIA zu dem nahinfraroten Euclid-Instrument NISP, für welches Frankreich die Führungsrolle innehat, haben über das Jahr 2016 hinweg große Fortschritte gemacht. Zentral waren dabei die Critical Design Reviews (CDR), in denen geprüft wird, ob die Instrumente den Anforderungen sowohl der wissenschaftlichen Fragestellung als auch einer Weltraummission allgemein genügen. Dass Euclid diese Prüfungen nach Jahren von Planung und Design bestanden hat bedeutet, dass jetzt die Fertigung derjenigen Komponenten beginnen kann, die dann tatsächlich in den Weltraum fliegen werden.

Eine der Voraussetzungen für das Bestehen war die Fertigung eines Modells für die strukturellen und thermischen Eigenschaften (structural and thermal model, STM), mit dessen Hilfe verifiziert werden konnte, dass die Wärmeleiteigenschaften und die Strukturfestigkeit des Instruments zum einen den Anforderungen genügen, zum anderen durch die theoretischen Modelle und Simulationen adäquat beschrieben werden. Das STM ist ein Modell im Maßstab eins zu eins, und damit für NISP mehr als einen Meter lang (Abbildung III.2.3). Das Modell bestand sämtliche Tests, inklusive Vibrations-Experimente zur Simulation des Rütteln und Schütteln während der Startphase.

MPIA steuert zwei wichtige Hardware-Komponenten für NISP bei: zum einen Nahinfrarot-Filter, die zwischen 950 nm und 2000 nm Wellenlänge drei spezifische Bandpässe für das Instrument definieren, und zum anderen die Kalibrations-Lichtquelle mit fünf LED-Bandpässen im gleichen Wellenlängenbereich. Beide Beiträge werden von der deutschen Raumfahrtagentur DLR finanziert.

Abb. III.2.5: Mikroskopbild einer der LEDs für die Kalibrationslampe des Euclid-Instruments NISP. In der Mitte ist der Halbleiter-Würfel mit seiner elektrischen Anschlussleitung sichtbar. Der Gesamtdurchmesser des LED-Gehäuses beträgt nur 4,5 Millimeter.



NISP-Wellenlängenbereichs Licht aussenden. Die LEDs für das Projekt wurden aus Halbleiter-Würfeln maßgefertigt. Jeder Würfel wurde in ein Gehäuse eingeklebt, elektrisch kontaktiert und wird durch eine hermetisch abgeschlossene Glashülle geschützt (Abbildung III.2.5).

Im Verlauf des Jahres 2016 wurde die Qualifikationsphase für diese LEDs weitgehend abgeschlossen. Ein erstes komplett funktionsfähiges Verifikations-Modell der Kalibrationslampe wurde gefertigt und wird ab dem ersten Halbjahr 2017 getestet (Abbildung III.2.6). Sowohl das Qualifikationsmodell als auch die für den Weltraumeinsatz vorgesehenen Exemplare sollten bis Ende 2017 fertiggestellt sein.

Zusätzlich zu den Beiträgen zur Hardware, die von Felix Hormuth koordiniert werden, stellt das MPIA wichtige Funktionsträger innerhalb der NISP-Instrumentengruppe: Knud Jahnke, Leiter der Euclid-Gruppe am MPIA, ist Photometrie-Instrumentenwissenschaftler; Stefanie Wachter leitet die Kalibration und Gregor Seidel ist für die Simulation des Instruments zuständig. Damit tragen MPIA-Wissenschaftler insbesondere dazu bei, im Unterschied zu den formal geforderten Eigenschaften auch die tatsächlichen Eigenschaften des Instruments zu verstehen, beispielsweise die Grenzempfindlichkeit und die Unsicherheiten der Kalibration.

In diesem Jahr war es dabei besonders wichtig, für den Critical Design Review ein weitgehend fertiges Kalibrationskonzept und dessen Umsetzung zu spezifizieren. Dazu wurden die verschiedenen Beiträge zur Kalibrationsgenauigkeit untersucht, detaillierte Prozeduren unter anderem für die Kalibration der Linearität des Detektors festgelegt, und die auf dem Detektor vorhandenen elektrischen Restladungen ebenso untersucht wie die Verzerrung der Bilder, die NISP für die Fotometrie benutzt (und deren Verzerrung sich aufgrund leicht unterschiedlicher Filterpositionen von Bild zu Bild ein wenig ändern kann).

Gleichzeitig war das MPIA an einer Evaluation zur Auswahl der besten Nahinfrarot-Detektoren für das Instrument beteiligt, die NASA und ESA getroffen haben. Ziel der Evaluation war es, die möglichen Detektoren der Qualität nach zu ordnen. Ausschlaggebend war dafür die für den jeweiligen Detektor erwartete Leistung im Hinblick auf Bildartefakte, Empfindlichkeitsunterschiede von Pixel zu Pixel und ähnliche Effekte. Die Evaluation ist bislang noch nicht abgeschlossen; erste Detektoren sollten im ersten Halbjahr 2017 geliefert werden.

Insgesamt liegt der Euclid-Beitrag des MPIA gut im Zeitplan, der die Fertigstellung des NISP-Instruments für Ende 2018 und dessen Integration in das Weltraumteleskop bei der ESA für das Jahr 2019 vorsieht. Dann verlagert sich der Schwerpunkt der Beteiligung des MPIA auf Beiträge zur Computer-Infrastruktur des Bodenseg-



Quelle: von Hoerner & Sulger/MPIA

**Abb. III.2.6:** Voll funktionsfähiges Testmodell der Kalibrationslampe des Euclid-Instruments NISP. Dieses Modell wird dazu genutzt, zu verifizieren, dass das Design der Lampe den Anforderungen in punkto Richtungsabhängigkeit, Intensität und Stabilität des abgegebenen Lichts genügt. Die Lampeneinheit ist nur rund 140 Millimeter hoch.

ments und nach Missionsstart auf die Auswertung des riesigen und in mehrerlei Hinsicht beispiellosen Datensatzes, den Euclid liefern soll.

Insbesondere plant das MPIA interessante Analysen, die jenseits der hauptsächlichen wissenschaftlichen Ziele der Mission liegen. Die Beobachtungsdaten sollen insgesamt mehr als ein Drittel der Himmelskugel abdecken. Sie werden zum einen hochauflösende Bilder (0,1 Bogensekunde) im sichtbaren Licht umfassen, zum anderen im Infraroten einen tiefen Blick ins Weltall erlauben ( $S/N=5$  für Punktquellen der Helligkeit 24 mag). Die wissenschaftlichen Fragestellungen, die sich mit ihrer Hilfe angehen lassen, sind vielfältig und reichen von der Charakterisierung der Evolution von Galaxien bis zur Entdeckung und Untersuchung von Exoplaneten.

*Oliver Krause für die Infrarot-Weltraumastonomie-Gruppe  
und  
Knud Jahnke für die Euclid-Gruppe*

### III.3 Highlight Instrumentierung

## CIAO – Wellenfrontsensoren für das GRAVITY-Instrument

Die vier Wellenfrontsensoren des GRAVITY-Instruments sind 2016 erfolgreich am Paranal-Observatorium der Europäischen Südsternwarte (ESO) installiert worden. GRAVITY ist ein Nahinfrarot-Instrument der zweiten Generation für das Very Large Telescope Interferometer (VLTI). Das Instrument kombiniert das Licht der vier Unit Telescopes (8,2 Meter Spiegeldurchmesser) um so Bilder mit deutlich höherer Auflösung aufzunehmen, als es mit jedem einzelnen dieser Teleskope möglich wäre. Alternativ kann GRAVITY auch das Licht der vier Auxiliary Telescopes (1,8 Meter Spiegeldurchmesser) des VLTI kombinieren. Die wichtigsten wissenschaftlichen Ziele von GRAVITY sind Beobachtungen des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße sowie Untersuchungen junger stellarer Objekte (young stellar objects, YSOs) sowie einiger der massereichsten Sterne der Milchstraße in fortgeschrittenen Entwicklungsstadien.

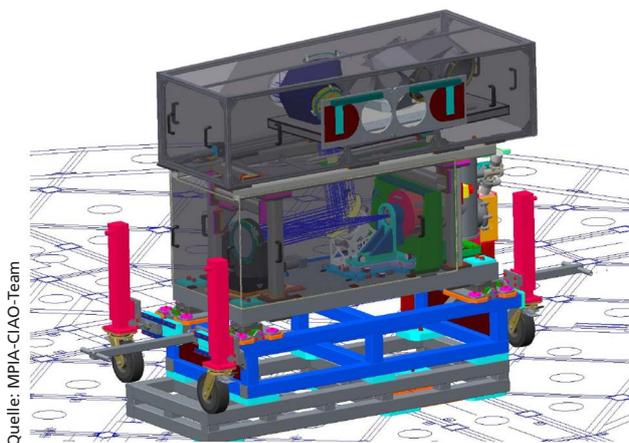
Die Beobachtungen des galaktischen Zentrums und seiner direkten Umgebung haben zum einen ein besseres Verständnis der physikalischen Prozesse zum Ziel, die sich dort abspielen. Sie sollen auch dazu dienen, Vorhersagen von Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie im Grenzfall sehr starker Gravitationsfelder zu überprüfen. Beide Vorhaben hängen entscheidend von dem hohen räumlichen Auflösungsvermögen von GRAVITY ab, welches es erlaubt, kleinste Details zu dokumentieren. Beide Zielsetzungen können nur erreicht werden, weil GRAVITY im Nahinfrarotbereich arbeitet. Das galaktische Zentrum ist von der Erde aus gesehen hinter dunklen (und staubigen) interstellaren Wolken verborgen. Diese Wolken sind für sichtbares Licht so gut wie undurchsichtig, lassen Nahinfrarotlicht aber weitgehend unbeeinflusst passieren.

Alle bodengestützten astronomischen Beobachtungen werden durch die Atmosphäre gestört (Seeing-Effekt): Wenn das Licht astronomischer Objekte auf seinem Weg ins Teleskop turbulente Luftschichten unserer Atmosphäre durchquert, wird es verzerrt und abgelenkt. Das Resultat sind verschwommene Bilder mit deutlich begrenzter räumlicher Auflösung, sprich: deutlich begrenzten Möglichkeiten, auf diesen Bildern feine Details zu unterscheiden. Deswegen ist GRAVITY mit Adaptiver Optik (AO) für Infrarotlicht ausgestattet, je ein Gerät für jedes der Unit Telescopes, mit deren Hilfe die atmosphärischen Störungen weitgehend ausgeglichen werden können.

Insgesamt besteht GRAVITY aus fünf Komponenten. Das zentrale Element ist das Beam Combiner Instrument (BCI), zu deutsch Strahlkombinierer, der in einem großen Kryostaten im VLTI-Laboratorium unterhalb der Teleskopplattform untergebracht ist. Hier wird das Licht von vier separaten Teleskopen (zum Beispiel der vier UTs) zusammengeführt und kombiniert. Der Strahlkombinierer wurde in der zweiten Hälfte des Jahres 2015 installiert und wird derzeit mit verschiedenen Kombinationen von ATs und UTs in Betrieb genommen, und anhand wissenschaftlicher Beobachtungsobjekte getestet.

Die adaptive Optik wird durch vier identische Systeme namens Coudé Infrared Adaptive Optics (CIAO) umgesetzt, frei übersetzt die Adaptive Infrarot-Optik am Coudé-Fokus. Letzterer bietet die Möglichkeit, das Licht auf eine Art und Weise aus dem Teleskop herauszuleiten, die unabhängig von der Orientierung des Teleskops ist. Im Gegensatz zu einer Kamera, die sich mit dem Teleskop mit dreht, steht das Licht dann im sogenannten Coudé-Raum unterhalb der Teleskopmontierung zur Verfügung, wo es von stationären Geräten wie CIAO weiterverarbeitet werden kann.

Das MPIA war dafür verantwortlich, die CIAO-Systeme zu konstruieren. Dies geschah in enger Zusammenarbeit mit der ESO und mit dem GRAVITY-Konsortium unter der Leitung des Max-Planck-Instituts für Extraterrestrische Physik in Garching (dem PI-Institut für GRAVITY).



Quelle: MPIA-CIAO-Team

**Abb. III.3.1:** Optomechanisches Design des CIAO-Systems: Licht fällt über den AO-Moden-Selektor oben auf dem CIAO-Turm in das System, trifft auf einen flachen Umlenkspiegel (mittig in gelb), wird auf einen parabolischen Spiegel (links) umgelenkt und fällt auf einen optischen Derotator bevor es in den kalten Kryostaten (rechts) gelangt. Die optische Bank für die Optik sitzt auf einer Stahlstruktur (blau), die ihrerseits auf einem Rahmen ruht (unten, grau), der die Schnittstelle zum Coudé-Raum im Boden bildet. Die Räder, die benötigt werden um CIAO in den Coudé-Raum zu fahren, sind in eingezogener Position zu sehen.

## Design von CIAO

Jedes Adaptive-Optik-System muss zunächst die Verzerrungen aufgrund der atmosphärischen Störungen analysieren und sie in einem zweiten Schritt korrigieren. Zu diesem Zweck vereint CIAO einen Wellenfrontsensor (sogenannter Shack-Hartmann-Sensor, WFS), der in den nahinfraroten H- und K-Bereichen arbeitet (Wellenlängen zwischen 1,45 und 2,45 Mikrometer), mit einem verformbaren, bimorphen Spiegel, der zum MACAO-System (Multi-Application Curvature Adaptive Optics) der ESO gehört. Bimorphe Spiegel bestehen aus zwei Schichten piezoelektrischen Materials; sie lassen sich gezielt verformen, indem man an diesen Schichten an unterschiedlichen Positionen Spannungen anlegt.

Um die atmosphärischen Störungen auszugleichen, analysiert CIAO das Signal des Wellenfrontsensors mithilfe des von der ESO entwickelten Systems Standard Platform for Adaptive optics Real Time Applications (SPARTA) und schickt das berechnete Korrektursignal an den verformbaren Spiegel. Die Korrektur erfolgt in Echtzeit, bis zu 500-mal pro Sekunde.

Jedes der vier CIAO-Systeme erhält mithilfe des Star Separator Systems (deutsch etwa das Sternen-Trenner-System) einen Teil des Teleskoplichts zugeleitet, welches dann durch die interne warme Optik in den kalten Kryostaten und dort auf den Infrarotdetektor fällt. Die warmen und kalten Komponenten des Wellenfrontsensor sitzen auf einer mechanischen Struktur, die ihrerseits auf dem Boden des Coudé-Raums befestigt ist. Für die Installation wurden die CIAO-Systeme auf ihren Rädern in den Coudé-Raum gefahren, die danach demontiert wurden.

Der optomechanische Aufbau eines CIAO-Systems ist in Abbildung III.3.1 zu sehen. Zu dem warmen, ungekühlten Teil der Optik gehören ein Mechanismus, mit dem verschiedene Betriebsmodi der Adaptiven Optik ausgewählt werden können (der AO-Moden-Selektor), ein flacher Umlenkspiegel, ein Parabolspiegel und ein Pupillen-Rotator. Im Kryostaten sorgt eine Maske zur Sichtfeldbegrenzung dafür, dass nur Licht innerhalb eines zwei Bogensekunden großen Zielbereichs in das Instrument fällt. Es folgt eine Linse auf einem piezoelektrisch in zwei Richtungen beweglichen Verschiebetisch, welcher die Pupille senkrecht zur Strahlrichtung verschieben kann.

**Abb. III.3.2:** Links: Das erste CIAO-System im Coudé-Raum des Unit Telescopes UT1 am Paranal-Observatorium der ESO in Chile im März 2016. Die optomechanischen Komponenten sind im Inneren des Turmes, geschützt durch eine Abdeckung. Auch der Kryostat, der am Turm angebracht ist, ist zu sehen (silbern). Vor dem Turm befinden sich die Vakuumpumpe und der

Elektronikkasten für den Detektor im Inneren des Kryostaten. Die schwarze Struktur rechts vom CIAO-System ist das Star Separator System. Rechts: Die CIAO-Elektronikschränke befinden sich in einem separaten Raum in der Nähe des Coudé-Raums.



Quelle: MPIA-CIAO-Team

Eine achromatische Doppel-Linse bildet die Pupille dann direkt auf das Linsen-Gitter ab, das verwendet wird, um die atmosphärische Verzerrung zu analysieren. Das Filtrerrad des Instruments enthält einen HK-Band-Filter von 1,45 bis 2,45 Mikrometer, zwei Neutralfilter und einen Sperrfilter. Das Shack-Hartmann-Linsenfeld besteht aus  $9 \times 9$  Einzelementen, von denen 68 zu mehr als 50% beleuchtet sind. Das Linsen-Gitter ist direkt vor dem Infrarot-Detektor installiert.

Beim Detektor handelt es sich um einen neu entwickelten Elektronen-Multiplier vom Typ SELEX SAPHIRA, der durch metallorganische Gasphasenepitaxie hergestellt wurde. Für genaue Messungen ist dabei aktive Kühlung notwendig: Objekte bei Raumtemperatur geben beträchtliche Mengen an Infrarotstrahlung ab, welche die Genauigkeit von Nahinfrarotmessungen begrenzt. Um diese thermische Hintergrundstrahlung zu begrenzen, wird der Detektor bei 95 K ( $-178,15^\circ\text{C}$ ) betrieben, die vorgeschaltete kalte Optik bei 140 K ( $-133,15^\circ\text{C}$ ). Ausgehend vom Detektorsignal rekonstruiert der SPARTA-Computer in Echtzeit die einfallende Wellenfront und berechnet die entsprechenden Korrektursignale, um die atmosphärische Verzerrung auszugleichen.

Konkret berechnet der Computer einen Vektor von Kontrollspannungen, die über eine Hochspannungs-Verstärkerbox an den verformbaren Spiegel angelegt werden. Der Spiegel verformt sich dabei entsprechend und

kann so die atmosphärischen Störungen der Wellenfront soweit ausgleichen, wie es für die Zusammenführung des Lichts der vier unterschiedlichen Unit Telescopes im Strahlkombinierer nötig ist.

### Zusammenbau und Integration der CIAO-Systeme

In einem Zeitraum von sieben Monaten im Jahr 2016 wurden alle vier CIAO-Systeme erfolgreich am Paranal-Observatorium installiert und in Betrieb genommen. Dazu musste jedes System zunächst in der Integrationshalle auf dem Paranal aufgebaut und erneut getestet werden, bevor es dann im entsprechenden Coudé-Raum unter einem der Unit Telescopes installiert und korrekt ausgerichtet wurde.

In der Integrationshalle wurde jedes der Systeme komplett zusammgebaut und die warme Optik ausgerichtet. Für die kalte Optik wurde die Justierung beibehalten, die bereits am MPIA vorgenommen wurde; das war möglich, weil der Kryostat vom MPIA mitsamt der darin befindlichen Optik verschickt worden war. Für das erste System begann der Zusammenbau am 16. Februar 2016. Nach 15 Tagen, Anfang März, wurde das korrekt ausgerichtete CIAO-System in den Coudé-Raum des Unit Telescope 1 (UT1) transportiert und installiert.

Für die Installation im Coudé-Raum werden die CIAO-Systeme mit Rädern ausgestattet und an ihre Position gefahren. Dann werden sie auf einen Verbindungsrahmen zum Coudé-Raum-Boden installiert und die Räder

Abb. III.3.3: Mitglieder des CIAO-MPIA-Teams und der ESO in einem der UT-Coudé-Räume im September 2016 am Paranal-Observatorium.



Quelle: MPIA

werden demontiert. Die Elektronik für das Auslesen des Detektors befindet sich in einem kleinen Schrank direkt neben CIAO im Coudé-Raum, während zwei weitere große Elektronik-Schränke in umgebenden Räumen installiert sind. Eine Woche nach der ersten Installation im März war das erste CIAO-System bereits voll funktionsfähig und korrekt auf das Star Separator System hin ausgerichtet (vgl. Abbildung III.3.2). Nach einer Optimierungs- und Validierungsphase begannen Anfang April die ersten Testaufnahmen von astronomischen Objekten und damit die eigentliche Inbetriebnahme.

Das zweite CIAO-System wurde im April/Mai installiert. Nachdem damit bereits zwei Wellenfrontsensoren einsatzbereit waren, wurde im August das erste Mal eine interferometrische Zusammenschaltung getestet – mit den Unit Telescopes UT1 und UT4, ihren jeweiligen CIAO-Systemen und dem GRAVITY-Strahlkombinierer BCI. Die letzten beiden CIAOs wurden zwischen August und September an den Unit Telescopes UT2 und UT3 installiert. Am 19. September 2016 konnte erstmals das komplette GRAVITY-Instrument mit dem Strahlkombinierer BCI und vier CIAOs an allen vier Unit Telescopes als Einheit in Betrieb genommen werden.

### Wissenschaftliche Perspektiven für GRAVITY und CIAO

Die wissenschaftlichen Beobachtungen mit GRAVITY finden im Nahinfrarot-Band bei Wellenlängen zwischen 2 und 2,4 Mikrometer statt. Durch die Kombination der sechs interferometrischen Basislinien zwischen den vier Auxiliary Telescopes oder den vier Unit Telescopes, kann das Instrument das Auflösungsvermögen eines Teleskops im sichtbaren Licht mit einem Spiegeldurchmesser von mehr als hundert Metern erreichen, mit anderen Worten: um mit einem Einzelteleskop dieselbe Detailschärfe wie in dieser interferometrischen Anordnung zu erreichen, müsste das Einzelteleskop einen Spiegeldurchmesser von mehr als hundert Metern haben.

Beobachtet GRAVITY gleichzeitig zwei astronomische Objekte in seinem Bildfeld, dann kann es den Winkelabstand der beiden Objekte mit großer Genauigkeit bestimmen (hochpräzise Astrometrie). Das BCI beugt das Nahinfrarotlicht des interferometrischen Signals außerdem, so dass automatisch auch eine spektrale Untersuchung der astronomischen Beobachtungsobjekte möglich ist. Des Weiteren kann GRAVITY jeden dieser Beobachtungsmodi mit polarimetrischen Messungen verknüpfen.

Im Zentrum unserer Heimatgalaxie wird GRAVITY die Umlaufbahnen der Sterne verfolgen, welche um das zentrale supermassereiche Schwarze Loch unserer Milchstraße kreisen. Deren Bahnelemente kön-

nen so mit nie gekannter Genauigkeit bestimmt werden. Von Beobachtungen der unmittelbaren Umgebung des Schwarzen Lochs erhoffen sich die Astronomen den Nachweis weiterer, bislang noch nicht beobachteter Sterne, die das Schwarze Loch in noch geringerem Abstand umkreisen als alle bislang bekannten Sterne. Durch Beobachtungen von Strahlungsausbrüchen (flares) kann man etwas über die physikalischen Prozesse in der sogenannten Akkretionsscheibe des Schwarzen Lochs lernen, in der diese Ausbrüche nach heutigem Wissensstand erzeugt werden. So sollte sich das Gravitationspotenzial des Schwarzen Lochs in unmittelbarer Nähe des Horizonts des Schwarzen Lochs (nur wenige Schwarzschild-Radien entfernt) ausmessen lassen. Das wiederum entspricht Tests der Vorhersagen, die Einsteins Allgemeine Relativitätstheorie für die unmittelbare Umgebung eines Schwarzen Lochs trifft.

Die MPIA-Forschungen mit GRAVITY werden sich vor allem jungen Sternen (young stellar objects, YSOs) widmen, mit einem Alter zwischen weniger als einer Million Jahren und einigen Dutzend Millionen Jahren. In nahegelegenen Sternentstehungsregionen wird GRAVITY in der Lage sein, die Vorgänge in den protoplanetaren Scheiben solcher YSOs auf räumlichen Skalen von weniger als einer astronomischen Einheit zu erforschen, sprich: auf denselben Größenordnungen wie jenen der Erdumlaufbahn in unserem Sonnensystem. Damit kann GRAVITY Aufschlüsse über die physikalischen Prozesse geben, die eine Rolle bei der Entstehung erdähnlicher Planeten spielen.

Weitere Untersuchungen der MPIA-Forscher werden sich den massereichsten Sternen in der Milchstraße widmen, ihrer Entwicklung und ihren Endstadien. Dazu hat bereits während der Inbetriebnahme des Instruments ein langfristiges Beobachtungsprogramm des massereichen Sterns Eta Carinae begonnen, der sich der Endphase seiner Entwicklung nähert und astronomisch gesehen bald (nämlich innerhalb der nächsten paar tausend Jahre) in einer Supernova-Explosion enden sollte.

*Das MPIA-CIAO-Team:*

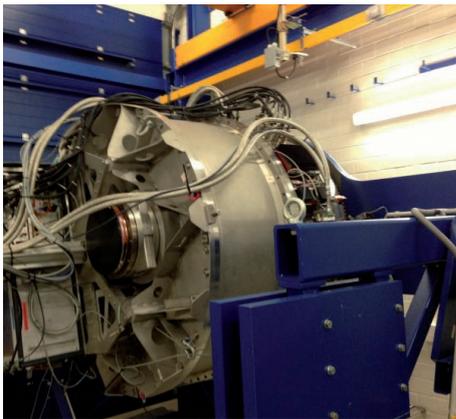
*Wolfgang Brandner, Silvia Scheithauer, Thomas Henning,  
Tobias Adler, Matthias Alter, Peter Bizenberger,  
Armin Böhm, Casey Deen, Monica Ebert,  
Ulrich Grözinger, Stefan Hippler, Armin Huber,  
Zoltan Hubert, Ralf Klein, Martin Kulas, Werner Laun,  
Rainer Lenzen, Marcus Mellein, Eric Müller,  
Friedrich Müller, Javier Moreno-Ventas, Udo Neumann,  
Johana Panduro, José Ramos, Ralf-Rainer Rohloff,  
Eric Müller, Friedrich Müller, Javier Moreno-Ventas,  
Udo Neumann, Johana Panduro,  
José Ramos, Ralf-Rainer Rohloff*

### III.4 Instrumentierung am MPIA

## Übersicht aktueller Projekte

Astronomische Instrumente sind oft spezialisiert und für bestimmte Einsatzbereiche besonders geeignet. Diese Übersicht zeigt die aktuellen **Instrumentierungsprojekte des Instituts**. Fast alle davon sind astronomi-

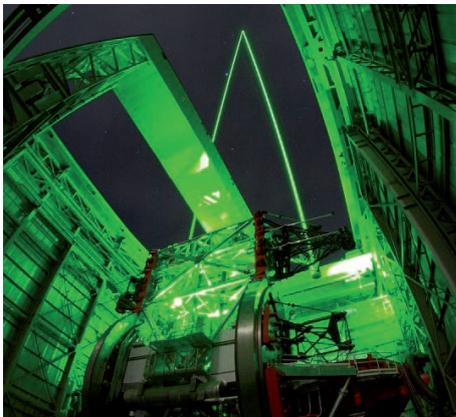
sche Kameras oder aber Spektrografen, welche das Licht in seine Teilfarben zerlegen. Die einzige Ausnahme ist ARGOS, der Kameras/Spektrografen unterstützt, indem er künstliche Lasersterne an den Himmel projiziert.



### LUCI 1 + 2

LBT NIR spectroscopic Utility with Camera and Integral-Field Unit

Teleskop	Large Binocular Telescope, Mt. Graham, Arizona
Wellenlängen	Nahinfrarot, 0,85 – 2,5 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Galaxienhaufen und Sternhaufen
Auflösung	30 – 90 mas (wellenlängenabhängig mit AO)
Besonderheiten	kann gleichzeitig mehrere Objekte beobachten
Beiträge MPIA	Elektronik, Software, Detektoren, Kryo, Integration
Status	In Betrieb. MPIA-Projektanteil abgeschlossen



### ARGOS

Advanced Rayleigh guided Ground layer adaptive Optics System

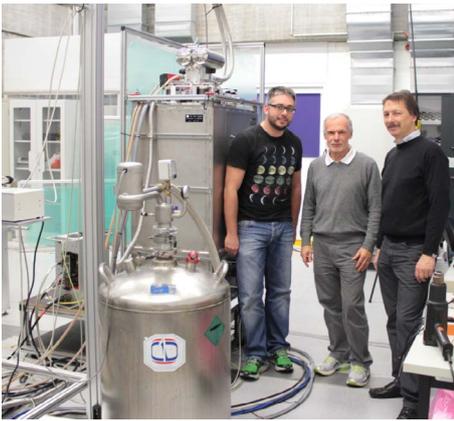
Teleskop	Large Binocular Telescope, Mt. Graham, Arizona
Wellenlängen	-
Beobachtungsziele	-
Auflösung	-
Besonderheiten	Erzeugt mit Lasern einen künstlichen Stern für das AO-System
Beiträge MPIA	Tests, Steuerungssoftware, Kalibration
Status	Binokularer Betrieb mit beiden LUCIs



### LINC-NIRVANA

LBT IInterferometric Camera –  
Near-InfraRed Visual Adaptive interferometer for Astronomy

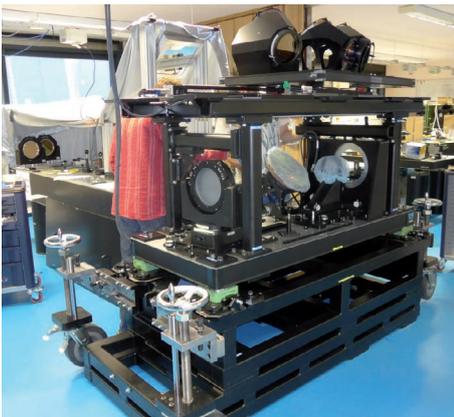
Teleskop	Large Binocular Telescope, Mt. Graham, Arizona
Wellenlängen	Nahinfrarotlicht, 1,1 – 2,4 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Sternhaufen, Schwarze Löcher, protoplanetare Scheiben
Auflösung	30–90 mas (wellenlängenabhängig); Interferometrie: 10–30 mas
Besonderheiten	Adaptive Optik für ein besonders großes Blickfeld
Beiträge MPIA	PI-Institut, Projektleitung, Optik, Elektronik, Software
Status	Am LBT installiert, wartet auf Inbetriebnahme



## MATISSE

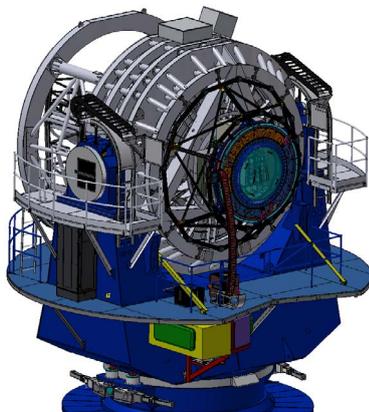
Multi AperTure mid-Infrared SpectroScopic Experiment

Teleskop	Very Large Telescope, Paranal, Chile
Wellenlängen	Mittlerer Infrarotbereich (3 – 25 $\mu\text{m}$ = L-, M-, N-Bänder)
Beobachtungsziele	Aktive Galaxien, protoplanetare Scheiben, heiße/ältere Sterne
Auflösung	3 – 26 mas je nach Wellenlänge und beteiligten Teleskopen
Besonderheiten	Bildrekonstruktion aus interferometrischen Daten
Beiträge MPIA	Integration Kryostat mit Optik/Detektoren, Elektronik, Tests
Status	Beginn Aufbau am VLT Herbst 2017



## GRAVITY

Teleskop	Very Large Telescope, Paranal, Chile
Wellenlängen	Nahinfrarot, 2,2 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Schwarzes Loch Milchstraße, Planeten, Braune Zwerge, Disks/Jets
Auflösung	4 mas bei der Erstellung von Bildern
Besonderheiten	Hochpräzise Astrometrie bis hinunter zu 10 mas
Beiträge MPIA	vier Wellenfrontsensoren (Adaptive-Optik-Systeme)
Status	alle vier am AO konstruierten AO-Einheiten installiert



## 4MOST

Teleskop	VISTA-Teleskop, Paranal, Chile
Wellenlängen	420 – 900 nm
Beobachtungsziele	Milchstraße und Galaxien, kosmische Strukturen
Auflösung	Spektrale Auflösung 5000 – 20000 (keine Bilder)
Besonderheiten	2400 Fasern auf einem Bildfeld von 4 Quadratgrad
Beiträge MPIA	Kontrollelektronik
Status	Vorläufige Designphase

Jede Kamera und jeder Spektrograf arbeitet in einem charakteristischen **Wellenlängenbereich** des elektromagnetischen Spektrums. Für die MPIA-Forscher ist dabei zum einen das sichtbare Licht besonders interessant, das wir mit eigenen Augen wahrnehmen können, zum anderen das Infrarotlicht: Im Nahinfraroten (direkt hinter der Grenze des sichtbaren Bereichs) kann man durch kosmische Staubwolken einfach hindurchsehen; im mittleren Infrarotbereich senden z.B. protoplanetare Scheiben Licht aus und im Ferninfraroten sieht man die kältesten oder aber entferntesten Objekte unseres Universums.

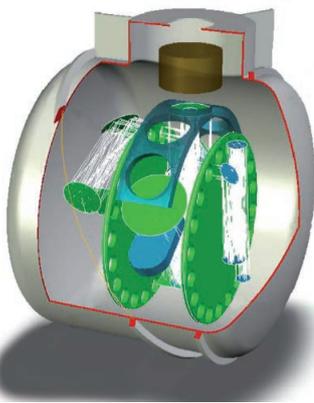
Astronomische Objekte sind extrem weit entfernt. Umso wichtiger ist das **Auflösungsvermögen**, also die Fähigkeit, winzige Details unterscheiden zu können. Es wird als Winkel angegeben – eine Kamera mit Auflösung 0,1 Bogensekunden kann Objekte, die 0,1 Bogensekunden am Himmel voneinander entfernt sind, gerade noch getrennt abbilden. Eine Bogensekunde ist dabei das 1/3600te eines Winkelgrads. Eine Millibogensekunde (abgekürzt mas) ist eine tausendstel Bogensekunde.



## CARMENES

Calar Alto High-Resolution Search for M Dwarfs with Exoearths with Near-infrared and Optical Échelle Spectrographs

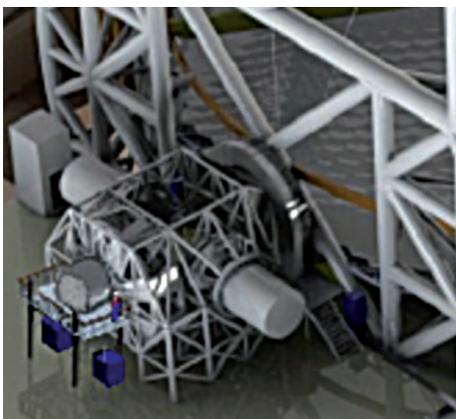
Teleskop	3,5-Meter-Teleskop, Calar Alto
Wellenlängen	Nahinfrarot und sichtbares Licht, 0,5 – 1,7 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Planeten (auch erdähnliche) um 300 M-Zwergsterne
Auflösung	Spektrales Auflösungsvermögen von 82 000 (keine Bilder)
Besonderheiten	Zwei präzise Spektrografen zur Radialgeschwindigkeitsmessung
Beiträge MPIA	NIR-Detektor, Kryostat, Elektronik, Software, Integrationshalle
Status	Regelbetrieb, Durchmusterung läuft, Projekt abgeschlossen



## MICADO

Multi-AO Imaging Camera for Deep Observations

Teleskop	European Extremely Large Telescope
Wellenlängen	Nahinfrarot, 1,1 – 2,5 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Sternbewegungen in Galaxien, Zwerggalaxien, erste Supernovae
Auflösung	6 – 13 Millibogensekunden je nach Wellenlänge
Besonderheiten	Hohe Empfindlichkeit, präzise Astrometrie
Beiträge MPIA	Kaltes Filterrad, Kalibration für die Astrometrie
Status	Vorläufige Designphase



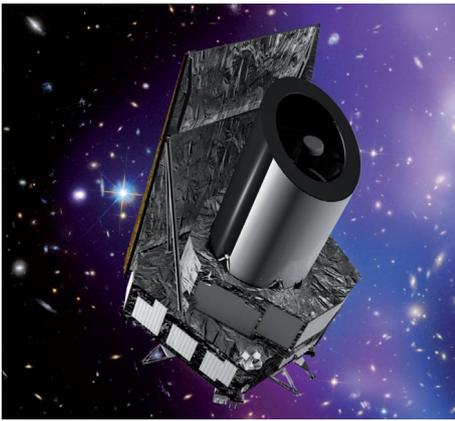
## METIS

Mid-infrared E-ELT Imager and Spectrograph

Teleskop	European Extremely Large Telescope
Wellenlängen	Mittleres Infrarot (3 – 19 $\mu\text{m}$ = L/M-, N- und Q-Band)
Beobachtungsziele	Scheiben, Exoplaneten, Schwarze Löcher, Galaxien bei hohem z
Auflösung	16 – 74 mas je nach Wellenlänge
Besonderheiten	Koronografie und Polarimetrie möglich
Beiträge MPIA	Imager und Beiträge zur Adaptiven Optik
Status	Vorläufige Designphase

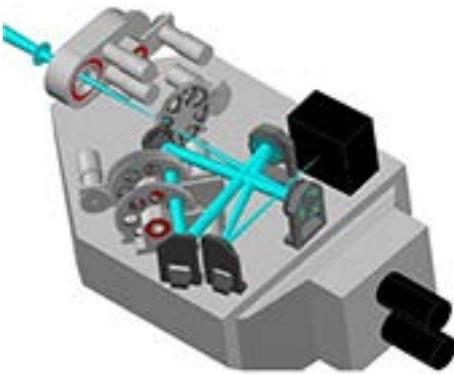
Jedes Instrument hat **Besonderheiten** in punkto Fähigkeiten oder Eigenschaften. Das kann ein besonders großes Bildfeld sein, dass es ermöglicht, ausgedehnte Objekte auf ein und derselben Aufnahme zu erfassen, oder adaptive Optik, um die Störeinflüsse der Atmosphäre auszugleichen. Oder aber besondere Abbildungsarten (Polarimetrie), oder die Möglichkeit, Teile des Bildes auszublenden (Koronografie). Oder aber Interferometrie, also das Zusammenschalten mehrerer Teleskope, die so dieselbe Detailschärfe erreichen wie ein deutlich größeres Einzelteleskop.

Instrumente werden so geplant, dass sie für bestimmte **Beobachtungsziele** besonders geeignet sind. Für die MPIA-Forscher sind dies Beobachtungen im Rahmen unserer Forschungsbereiche Planeten- und Sternentstehung, Galaxien und Kosmologie. Typische Ziele sind daher Sternentstehungsregionen, die hinter Staubwolken verborgen sind und daher nur im Infraroten beobachtet werden, oder auch fernste Galaxien, deren Licht durch die kosmische Expansion ebenfalls ins Infrarote verschoben worden ist.



## EUCLID

Teleskop	Euclid bezeichnet das Weltraumteleskop als Ganzes
Wellenlängen	Sichtbares Licht 0,5 – 0,9 $\mu\text{m}$ , Infrarotlicht 0,965 – 2,0 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	kosmische Struktur, Beschleunigung der Expansion
Auflösung	86 – 344 Millibogensekunden je nach Wellenlänge
Besonderheiten	Galaxienmorphologie, photometrische IR-Rotverschiebung
Beiträge MPIA	Teile der IR-Kalibrationseinheit, organisatorische Unterstützung
Status	Vorläufiges Design abgeschlossen 2015



## SHARK-NIR

Teleskop	Large Binocular Telescope, Mt. Graham
Wellenlängen	Nahinfrarot, 0,96 – 1,7 $\mu\text{m}$
Beobachtungsziele	Direkter Nachweis von Exoplaneten
Auflösung	Bilder: 30 – 50 mas, Spektren: R ~ 100 & 800
Besonderheiten	Galaxienmorphologie, photometrische IR-Rotverschiebung
Beiträge MPIA	Steuerung für Motoren
Status	Abschließende Designphase

Für jedes Instrument geben wir seinen **aktuellen Status** an. Die Entwicklung und Konstruktion astronomischer Instrumente durchläuft verschiedene Phasen, angefangen von intensiver Planung und etwaigen vorbereitenden Technologietests. Gegen Ende der Konstruktionsphase findet je nach Komplexität des Instruments noch eine Integration statt, bei der verschiedene Komponenten, nicht selten von unterschied-

lichen Instituten beigetragen, zusammengefügt werden. Anschließend folgt das Kommissionieren, also die Installation am Teleskop selbst, mit dem Meilenstein des »ersten Lichts« (first light) bei Aufnahmen der ersten Bilder und Spektren. Nach wissenschaftlichen Testbeobachtungen kann das Instrument dann in den regulären Beobachtungsbetrieb übergehen.

### III.5 Highlights

## Technische Abteilungen

Beobachtende Astronomie stellt Anforderungen an Teleskope und Instrumente, die sich regelmäßig an der Grenze des technisch Machbaren bewegen. Die an Teleskopen eingesetzten Messinstrumente sind daher fast immer Neuentwicklungen mit enger Beteiligung der Forscher selbst. Entwicklung und Bau solcher Messinstrumente – von hochempfindlichen CCD-Kameras und Helligkeitsmessern bis hin zu Spektrografen – zählen seit jeher zum Tätigkeitsfeld der Wissenschaftler, Ingenieure, Techniker und Elektroniker am Max-Planck-Institut für Astronomie.

Die Technischen Bereiche des MPIA umfassen die Konstruktionsabteilung, Feinwerktechnik, Elektronik-, Software- und Instrumentierungsabteilung. Mit ihren leistungsfähigen Werkstätten und Entwicklungsbüros ermöglichen uns diese Abteilungen die Entwicklung und den Bau modernster astronomischer Beobachtungsinstrumente. Sie kommen am Calar-Alto-Observatorium, den Großteleskopen der Europäischen Südsternwarte (ESO), am Large Binocular Telescope (LBT) und auf Weltraum-Observatorien der Europäischen Weltraumagentur ESA zum Einsatz.



Quelle: MPIA

### Der AstroTechTalk – Eine Vortragsreihe speziell für Nicht-WissenschaftlerInnen

Seit Sommer 2014 wird der MPIA-Hörsaal jeweils freitags für eine etwas andere Art von Vortrag geöffnet. Die Idee: den hiesigen IngenieurInnen, TechnikerInnen, aber auch den KollegInnen aus der Verwaltung und allen anderen nicht-wissenschaftlichen Bereichen auf leicht verständliche Weise zu erklären, worum es bei astronomischer Forschung und Instrumentierung eigentlich geht. Der AstroTechTalk erfreut sich seither einer bunten Mischung aus Vorträgen, mit einer großen Vielfalt von Themen – von der Inbetriebnahme einer astronomischen Kamera bis hin zu Frequenzkämmen, Höhenkrankheit oder neu entdeckten Planeten in unserer interstellaren Nachbarschaft.

Neben Vortragenden aus dem MPIA selbst haben wir mittlerweile auch Gäste anderer wissenschaftlicher Institutionen wie beispielsweise dem Fraunhofer IOF, der Sternwarte Leiden oder der ESA. Auch Firmen wie Schott, Airbus und Heidenhain sind immer herzlich willkommen, uns etwas über die industriellen Anwendungen in der Astronomie zu erzählen.

### Stuerelektronik für die CIAO-Module von GRAVITY

Die Coudé Infrared Adaptive Optics (CIAO) ist ein System der Adaptiven Optik im Infrarotbereich am Coudé-Fokus des Very Large Telescope (VLT) der ESO für das Instrument GRAVITY (siehe Kapitel III.3 auf S. XX). Jede der vier CIAO-Einheiten verwendet einen Shack-Hartmann-Wellenfrontsensor im nahinfraroten H+K-Band, um Verzerrungen des Lichts astronomischer Objekte durch die Erdatmosphäre zu erkennen. Diese Verzerrungen werden dann gezielt ausgeglichen, um die Beobachtungsqualität zu erhöhen. Dieses Jahr wurde jedes der vier Hauptteleskope (UT) des VLT der mit einem CIAO-System ausgerüstet.

Die Elektronikabteilung des MPIA hat die Stuerelektronik für die CIAO-Einheiten entwickelt, hergestellt und in Betrieb genommen. Das Steuersystem stellt die Verbindung zwischen der Hardware, die in den Coudé-Räumen der UTs installiert ist, und der nutzerseitigen Software her.

**Abb. III.5.1:** Schaltschränke für eine der CIAO-Einheiten am Paranal-Observatorium in Chile.

15.1.2016	Andreas Quirrenbach (ZAH, LSW Heidelberg)	The commissioning of CARMENES
22.1.2016	Ralph Hofferbert	On the way to the stars: Shipping of LINC-NIRVANA to the LBT
29.1.2016	Werner Laun	No silhouettes for the VLTI, two massive stainless steel sculptures from Matisse
19.2.2016	Jeroen Bouwman	Precise spectro-photometry from space
26.2.2016	Florian Rodler	The search for Earth 2.0
11.3.2016	Markus Pössel	Gravitational waves and how to detect them
1.4.2016	Mark Norris	Seeing Further, Denser, Deeper - Science with LINC-NIRVANA
15.4.2016	Alexander Sivitilli	Laser Alignment Teleskop
22.4.2016	Frank Kittmann	What does a Ranger and a Bastard on Mount Graham?
3.6.2016	Thales Gutcke	What do galaxies consist of? State-of-the-art simulations of galaxy formation
10.6.2016	Markus Feldt	METIS - Future perspective and current status
17.6.2016	Florian Schindler (Dr. Johannes Heidenhain GmbH)	High-precision angular gauges for telescopes
1.7.2016	Nadine Neumayer	What makes ARGOS unique?
16.9.2016	Michael Biermann (ARI)	GAIA as seen by a First Look Scientist
23.9.2016	Anna Boehle (UCLA)	Upgrade of the detector in the integral field spectrograph OSIRIS
30.9.2016	Martin Kuerster	A special planet on our cosmic doorstep: Proxima Centauri b
7.10.2016	Silvia Scheithauer	CIAO - Wavefront sensors for GRAVITY
14.10.2016	Claudia Reinlein (Fraunhofer IOF, Jena)	Active and Adaptive Optics at the Fraunhofer IOF
21.10.2016	Eike Guenther + Michael Pluto (TLS, Tautenburg)	Instrumentation projects of the Thüringer Landessternwarte Tautenburg
28.10.2016	Santiago Barboza	The MICADO derotator and its test stand at MPIA
4.11.2016	Stefan Hippler	Adaptive optics for VLT and E-ELT
11.11.2016	Vianak Naranjo	Characterization of Infrared Detectors - What is that?
18.11.2016	Sascha Douffet	Safety officers - Main actors and their tasks
25.11.2016	Michael Boehm (ISYS, Stuttgart)	OVMS-plus: Disturbance compensation at the LBT
9.12.2016	Thomas Henning	Astronomy in Heidelberg – From the Königstuhl into the World

Die AstroTechTalk-Vorträge des Jahres 2016. Für Vortragende von außerhalb des MPIA ist die jeweilige Affiliation angegeben.

Insgesamt wurden 4000 Kilogramm an Elektronik-Hardware mit einem Gesamtwert von rund € 640.000 an das Paranal-Observatorium verschickt. Ganze 47 am MPIA entwickelte und hergestellte Elektronik-Einschübe und 37 fertig gekaufte Steuereinheiten wurden in 12 Schaltschränken installiert. Steckverbindungen für rund 700 Verbindungskabel und 3500 Leitungen wurden dabei in der Elektronikwerkstatt hergestellt.

Zwischen März und August 2016 wurde die Steuerungselektronik für CIAO erfolgreich an jedem der Hauptteleskope des VLT installiert. Ein arbeitsreiches

Jahr für die Abteilung, in dem sechs der insgesamt zehn Mitarbeiter alle Hände voll mit der Herstellung, dem Zusammenbau, den Test- und Transportvorbereitungen sowie am Ende der Inbetriebnahme der vier CIAO-Systeme zu tun hatten.

*Ralph Hofferbert, Martin Kürster,  
Lars Mohr, Vianak Naranjo und José Ramos*



## IV. Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit



## IV.1 Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit

# Universitäre Lehre und Doktorandenförderung

Das MPIA nimmt seine Verantwortung, den wissenschaftlichen Nachwuchs zu fördern, auf mehreren Ebenen sehr ernst. Unser Engagement beginnt bereits im Grundstudium: Sowohl die Direktoren als auch die Forschungsgruppenleiter sind an der Universität Heidelberg in der Lehre aktiv. In diesem Jahr gehörten dazu beispielsweise die Vorlesung zur Sternentstehung (Thomas Henning, Henrik Beuther) oder die Vorlesung Stellare Astrophysik (Maria Bergemann) nebst zahlreichen Tutorien, Seminaren und Fortgeschrittenenvorlesungen im Bereich der Astronomie.

Bachelor- und Masterstudenten der Universität Heidelberg und anderer Universitäten können am MPIA ihre Abschlussarbeiten anfertigen. Zusätzlich gibt es für Studenten die Möglichkeit, im Rahmen des MPIA-Sommerpraktikums (Koordination: B. Goldmann) Erfahrungen mit eigener Forschung zu sammeln.

Ein Schwerpunkt unserer Nachwuchsförderung liegt bei der Doktorandenausbildung. Ganz allgemein sind die International Max Planck Research Schools (IMPRS) seit langen Jahren fester Bestandteil der Doktorandenförderung in der Max-Planck-Gesellschaft. MPIA beteiligt sich dabei an der 2004 gegründeten International Max Planck Research School for Astronomy & Physics at the University of Heidelberg (IMPRS-HD), der in diesem Jahr wieder

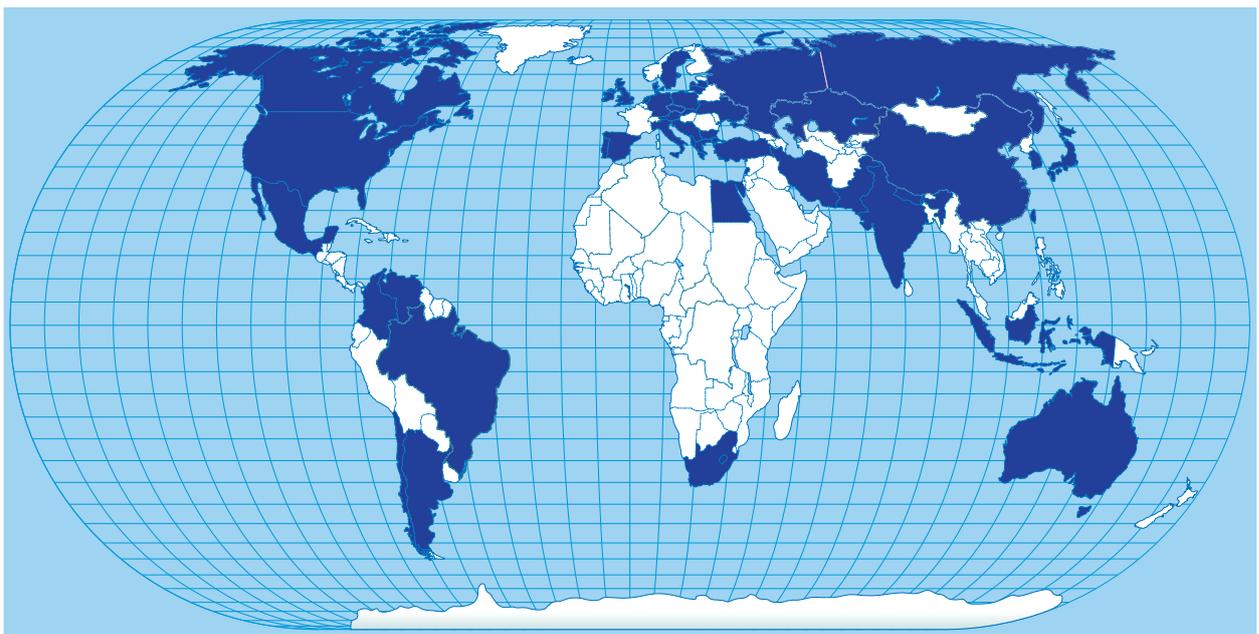
rund 90 Doktoranden angehören. Koordinator der IMPRS ist Christian Fendt vom MPIA.

Das Jahr 2016 war ein besonders erfolgreiches Jahr, was die Einwerbung neuer Doktoranden betrifft. Durch die Einwerbung neuer Mittel der Heidelberger astronomischen Institute konnten 32 neue IMPRS-Doktoranden ein Forschungsprojekt antreten. Diese waren aus 195 Bewerbern aus der ganzen Welt ausgesucht worden. Bemerkenswerterweise hatten Ende 2016 genau 200 IMPRS-Studenten ihre Promotion abgeschlossen.

Die IMPRS-HD bleibt weiterhin stark international ausgerichtet: Unter den 195 Bewerbern, die sich für 2016 beworben hatten, befanden sich 18 deutsche Bewerber, 58 nicht-deutsche Europäer, 68 Bewerber aus Asien (darunter 39 Inder), 20 aus dem mittleren Osten und 24 aus Nord- und Südamerika.

An dieser Stelle sollte auch der hohe Frauenanteil bei den Bewerbern der IMPRS-HD erwähnt werden. Von 195 Bewerbern waren 79 weiblich, entsprechend einem Anteil von 40.5%. Davon wurden 47 Bewerberinnen auf die Shortlist gesetzt, entsprechend fast 60% und damit mehr als es anteilig Bewerberinnen gab. Während das allgemeine Auswahlverfahren durch die IMPRS-HD organisiert wird und die Vertreter der IMPRS-HD die Vorauswahl treffen, liegt die letzte Entscheidung darüber, wer am besten in ein Projekt passt, natürlich beim Projektleiter und Betreuer. Am Ende des Auswahlverfahrens

**Abb. IV.1.1:** Herkunftsländer der (jetzigen und ehemaligen) IMPRS-HD-Studenten.



rens waren es 14 neue Doktorandinnen, die in der jetzt 12. Generation der IMPRS-HD starten, und damit einen Frauenanteil von etwa 44% abbilden.

Zum ersten Mal wurde 2016 ein neues Verfahren zur Verteilung der Mittel der IMPRS-HD zur Nachwuchsförderung angewendet. Diese Mittel sollten seit 2016 als sogenannte »IMPRS-Fellowships« den zwei bis drei besten der Bewerber angeboten werden. Diese können sich dann ein Projekt ihrer Wahl unter den angebotenen Projekten aussuchen (also z.B. auch eines, für das sonst keine Finanzierung verfügbar wäre). Auch besteht die Möglichkeit, Projekte verschiedener Betreuer in der 4-jährigen Laufzeit des Fellowships durchzuführen. Die Kandidaten für die Fellowships werden von denjenigen Betreuern, welche die Interviews geführt haben, vorgeschlagen und dann vom IMPRS-Board diskutiert und ausgewählt. Im Jahr 2016 haben sich dabei mit Marta Reina Campos und Johanna Corona zwei Bewerberinnen durchgesetzt. Auch in der Vorschlagsliste zeigte sich die Stärke der Bewerberinnen: 11 der 14 vorgeschlagenen Kandidaten waren weiblich.

Eine Weltkarte mit den Herkunftsländern aller 288 aktuellen und früheren IMPRS-HD-Studenten seit Gründung der Doktorandenschule im Jahre 2004 zeigt Abbildung IV.1.1.

Das IMPRS-Programm bietet nicht nur einen zentralen Bewerbungs- und Zulassungsbetrieb, in dem Kandidaten mit für sie geeigneten Betreuern zusammengebracht werden, sondern auch regelmäßige Treffen des persönlichen Betreuerenteams jedes IMPRS-Studenten, in denen Fortgang und Richtung der Arbeit diskutiert werden. Zum Programm gehören auch Pflicht-Lehrveranstaltungen, die sicherstellen sollen, dass IMPRS-Doktoranden bei ihrem Abschluss umfangreiche vertiefte Kenntnisse in Astronomie besitzen.

Die IMPRS-Fellows treffen sich bei wöchentlichen Seminaren, um ihre Arbeit und ihre Ideen zu diskutieren. Noch deutlich intensiverer Austausch ist beim jährlichen Retreat möglich. Gesellige Veranstaltungen runden das Programm ab.

Abb. IV.1.2: Teilnehmer der IMPRS-Sommerschule 2016.



Quelle: C. Fendt / MPIA



Quelle: C. Fendt / MPIA

Abb. IV.1.3: Mitglieder der neuen, 12ten IMPRS-Generation beim IMPRS-Retreat auf Thessaloniki.

Ein weiteres Angebot der IMPRS-HD ist die jährliche Internationale Sommerschule. Im Jahre 2016 fand sie zum Thema »Astrostatistics & Data Mining« statt. Die wissenschaftliche Leitung hatte Coryn Bailer-Jones vom MPIA; als Hauptdozenten waren Dan Foreman-Mackey (University of Washington), Daniela Huppenkothen (New York University), Robert Lupton (Princeton University) und Benjamin Wandelt (Institute for Astrophysics, Paris) eingeladen worden. Dieses Thema stieß auf besonders großes Interesse bei den Bewerbern: Aus 223 Bewerbungen mussten 90 Teilnehmer ausgesucht werden.

Christian Fendt

## IV.2 Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit

# Wissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit

Die Astronomie ist ein faszinierendes Thema, und die Astronomen des Max-Planck-Instituts für Astronomie sehen es seit langem als Teil ihrer Verantwortung an, ihre Forschung in die Öffentlichkeit, in die Schulen und in die Medien zu tragen. Zu diesem Zweck beantworten unsere Forscher Medienanfragen und reisen für öffentliche Vorträge zu Orten in ganz Deutschland (und manchmal auch darüber hinaus!). Die wissenschaftlichen Highlights in Kapitel II dieses Jahresberichts wurden sämtlich in Form von Pressemitteilungen veröffentlicht und führten zu einer teils regionalen, teils deutschlandweiten Berichterstattung über die Forschungsergebnisse des MPIA.

Auf unserem Campus befindet sich das Haus der Astronomie als Zentrum für astronomische Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit, das von der Max-Planck-Gesellschaft betrieben wird (welche die Leitung wiederum an das MPIA delegiert hat). Nähere Informationen zur Tätigkeit des Hauses der Astronomie bietet Abschnitt IV.3.

Für die breite Öffentlichkeit bieten Königstuhl-Führungen die Möglichkeit, unser Institut direkt zu erleben. Durchgeführt werden die Führungen von den MPIA Outreach Fellows: Doktoranden, die sich am Institut beson-

ders stark für die Öffentlichkeit engagieren. Diese Führungen beinhalten in der Regel einen Besuch des 70 cm KING-Teleskops und seit neuestem auch einen Besuch bei dem großartigen Modell der 100 der Sonne nächsten Sterne, das von Martin Kürster und weiteren Mitgliedern der technischen Abteilungen des MPIA konstruiert wurde.

In diesem Jahr sind wir außerdem direkt auf die Straße gegangen: Am 9. Mai 2016 boten Mitarbeiter von MPIA und HdA, ausgestattet mit kleinen Teleskopen, Passanten auf den Neckarwiesen die Möglichkeit, mit eigenen Augen den Merkurtransit zu sehen und zu beobachten, wie das kleine dunkle Planetenscheibchen vor der hellen Sonnenscheibe vorbei zog.

Das MPIA bietet außerdem eine Reihe von Angeboten an, die sich direkt an Schülerinnen und Schüler wenden. Eines ist das Schülerpraktikum Astronomie (Organisation: Klaus Meisenheimer) für Schülerinnen und Schüler der Klassenstufen 10 und 11. In Zusammenarbeit mit der

Abb. IV.2.1: Teilnehmerinnen des Girls' Day 2016 im Haus der Astronomie.





Quelle: M. Pössel / HdA

Abb. IV.2.2: Teilnehmerinnen des Girls' Day 2016 im Haus der Astronomie.

Landessternwarte und dem Astronomischen Rechen-Institut (die beide zum Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg gehören) bieten wir dieses Praktikum bereits seit 2002 an. Beim diesjährigen Schülerpraktikum vom 17. bis 21. Oktober konnten sich 12 interessierte Teilnehmerinnen und Teilnehmer sowohl Grundkonzepte wie auch praktische Methoden der Astronomie aneignen.

Darüber hinaus nimmt das MPIA regelmäßig am bundesweiten Girls' Day teil, einem eintägigen Programm für

Schülerinnen im Alter von 13 bis 18 Jahren (Organisation: C. Liefke, M. Pössel, S. Brümmer). Ziel des Girls' Day ist es, Schülerinnen die Möglichkeit zu geben, Erfahrungen mit Berufen zu sammeln, in denen Frauen unterrepräsentiert sind. Für den diesjährigen Girls' Day am 28. April konnten insgesamt 16 junge Frauen Teleskope aus dem globalen Netzwerk des Las Cumbres Observatory nutzen, um per Fernsteuerung über das Internet selbst Galaxien und Sternhaufen zu beobachten.

Abb. IV.2.3: Astronomie für alle auf den Neckarwiesen: Beobachtungen des Merkur-Transits am 9. Mai 2016.

*Markus Pössel, Klaus Jäger,  
Axel M. Quetz, und Klaus Meisenheimer*



Quelle: M. Pössel / HdA

### IV.3 Öffentlichkeits- und Bildungsarbeit

## Haus der Astronomie

**Das Haus der Astronomie (HdA) ist das Zentrum für astronomische Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit auf dem MPA-Campus. Ziel des Hauses der Astronomie ist es, die Faszination der Astronomie in die breite Öffentlichkeit und in die Schulen zu tragen und den Austausch der Astronomen untereinander und mit den Kollegen angrenzender Wissensgebiete zu fördern.**

Das Haus der Astronomie ist eine ungewöhnliche Institution im Grenzbereich zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit. Sein markantes galaxienförmiges Gebäude beherbergt ein Team von Astronomen und Astronomie-Didaktikern, die insbesondere Materialien und Werkzeuge entwickeln, die für die astronomische Öffentlichkeitsarbeit oder in Schulen und Kindergärten eingesetzt werden können. Im Jahre 2016 besuchten mehr als 10.000 Menschen das Haus der Astronomie - von Besu-

chern unserer allgemeinverständlichen Vorträge oder von Führungen bis hin zu Schüler- oder Kindergarten-Gruppen, Studierenden, Lehrer/innen oder Erzieher/innen, die zu Workshops oder Vorlesungen kamen sowie Astronom/innen und Ingenieur/innen, die das Haus der Astronomie für Konferenzen oder Besprechungen nutzten.

---

#### Astronomie für die Öffentlichkeit

Unsere Aktivitäten für die allgemeine Öffentlichkeit umfassen PR, online verfügbare Materialien und die Organisation öffentlicher Veranstaltungen. Als deutscher Knoten des ESO Science Outreach Network (ESON) unterstützen wir außerdem die Europäische Südsternwarte (ESO) bei ihrer deutschsprachigen Öffentlichkeitsarbeit.

Abb. IV.3.1: Das galaxienförmige Gebäude des Hauses der Astronomie im Januar 2016.



**Faszination Astronomie** Haus der Astronomie  
 Vortragsreihe im Haus der Astronomie  
 MPIA-Campus, Königstuhl 17, 69117 Heidelberg  
 Immer am zweiten Donnerstag im Monat um 19 Uhr

- 13. Okt. Die innere Uhr der Galaxien  
 2016 Dr. Kai Noeske, Max-Planck-Institut für Astronomie und Haus der Astronomie
- 17. Nov. Galaxienentstehung im Supercomputer  
 2016 Prof. Dr. Volker Springel, Heidelberger Institut für Theoretische Studien und Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg
- 08. Dez. Auf der Suche nach der zweiten Erde  
 2016 Prof. Dr. Cornelis Dullemond, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg
- 12. Jan. Ein Ozean im äußeren Sonnensystem – Die Raumsonde Cassini erforscht den spektakulären Saturnmond Enceladus  
 2017 Dr. Frank Postberg, Institut für Geowissenschaften der Universität Heidelberg und Institut für Raumfahrtssysteme der Universität Stuttgart

Aufgrund von Umbauarbeiten im Auditorium müssen die Termine im August und September 2016 leider entfallen.

Unkostenbeitrag: 5 €  
 Kartenvorverkauf: www.haus-der-astronomie.de  
 Zigarren Grimm, Sofienstraße 11, 69115 Heidelberg  
 Crazy Diamond, Poststraße 42, 69115 Heidelberg

MPIA – Campus Königstuhl 17 69117 Heidelberg Haus der Astronomie

**Haus der Astronomie – Highlights**  
 Dienstag, den 19. Juli 2016 um 19 Uhr im HdA  
 anlässlich der bevorstehenden Premiere des neuen Star Trek-Films

**Physik und Astronomie von Raumschiff Enterprise**

Dr. Olaf Kretzer, Sternwarte und Planetarium Suhl

Unkostenbeitrag 5 €, Kartenvorverkauf online unter: www.haus-derastronomie.de bei Zigarren Grimm, Sofienstr. 11, 69115 Heidelberg oder bei Crazy Diamond, Poststr. 42, 69115 Heidelberg

Abb. IV.3.2: Poster für Veranstaltungen im Haus der Astronomie, erstellt von der MPIA-Grafikabteilung sowie von Carolin Liefke (rechts unten).

MPIA – Campus Königstuhl 17 69117 Heidelberg ZAH

**Astronomie am Sonntagvormittag 2016**  
 Haus der Astronomie, sonntags um 11 Uhr

**Leben im Universum**

- 25. Sep. Sternentstehung in Galaxien  
 Dr. Eva Schinnerer, Max-Planck-Institut für Astronomie
- 16. Okt. Erdähnliche Planeten und die Entstehung des Lebens  
 Prof. Dr. Thomas Henning, Max-Planck-Institut für Astronomie
- 23. Okt. Chemische Wege zum Ursprung des Lebens  
 Prof. Dr. Oliver Trapp, Ludwig-Maximilians-Universität München und Max-Planck-Institut für Astronomie
- 30. Okt. Die Suche nach Planetensystemen und Leben im Weltall  
 Prof. Dr. Andreas Quirrenbach, Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg

Unkostenbeitrag: 5 €, Kartenvorverkauf online unter: www.haus-der-astronomie.de bei Zigarren Grimm, Sofienstr. 11, 69115 Heidelberg oder bei Crazy Diamond, Poststraße 42, 69115 Heidelberg

MPIA-Campus Königstuhl 17 69117 Heidelberg Haus der Astronomie

**Haus der Astronomie – Highlights**  
 Donnerstag, 30. Juni 2016 um 19 Uhr

**Erdnahe Asteroiden – Gefahr aus dem All**

Dr. Gerhard Drolshagen  
 Space-Situational-Awareness-Programm der ESA

**ASTERIOD DAY**  
 30 JUNE

Unkostenbeitrag: 5 €  
 Kartenvorverkauf: www.hausderastronomie.de  
 Zigarren Grimm, Sofienstraße 11, 69115 Heidelberg  
 Crazy Diamond, Poststraße 42, 69115 Heidelberg

An öffentlichen Veranstaltungen im Haus der Astronomie bieten wir eine monatliche Vortragsreihe »Faszination Astronomie« mit 12 Vorträgen sowie »Astronomie am Sonntagvormittag« mit vier Vorträgen. Im Rahmen unserer Reihe »HdA-Highlights« gab es am 30. Juni, dem »Asteroidentag«, eine Präsentation über die Gefahr von erdnahen Asteroiden von Gerhard Drolshagen vom Space Situational Awareness-Programm der ESA, sowie eine Präsentation über die Physik und Astronomie von Raumschiff Enterprise von Olaf Kretzer aus Suhl.

In unserer Reihe »Science meets fiction« ging es dieses Jahr weiter mit dem Film »Der Marsianer«, inklusive einer wissenschaftlichen Einführung durch HdA-Mitarbeiter Markus Nielbock. Die Vorführung war Teil unserer »Space Days« vom 29. bis 31. Mai, bei denen auch der Astronaut Reinhold Ewald einen öffentlichen Vortrag hielt. Auch ein Bastelwettbewerb für Schüler/innen war Teil der Space Days.

Insgesamt fanden zu Vortragsveranstaltungen dieser Art im Jahre 2016 knapp 2900 Besucher den Weg ins Haus der Astronomie.

Für weitergehend interessierte Mitglieder der Öffentlichkeit und insbesondere für Studierende der Universität Heidelberg bot Markus Pössel (zusammen mit Björn Malte Schäfer) im Wintersemester die Studium-Generale-Vorlesung »Rote Riesen, Schwarze Löcher – wo-

**Abb. IV.3.3:** Roland Bähr und Carolin Liefke beim »Zusammenkochen« eines künstlichen Kometenkerns mithilfe von Kohlenstoff und flüssigem Stickstoff bei einer Lehrerfortbildung im Haus der Astronomie im Mai 2016.

her wissen wir das alles? Methoden der Astronomie für Nicht-Physiker« an.

Wie in den vorangehenden Jahren war die größte externe Veranstaltung, an der wir beteiligt waren, auch in diesem Jahr die »Explore Science« vom 15. bis 19. Juni. Rund 46.000 Besucher fanden zu diesen naturwissenschaftlichen Erlebnistagen der Klaus Tschira Stiftung ihren Weg in den Luisenpark in Mannheim. Außerdem hielten HdA-Mitarbeiter mehr als vierzig öffentliche Vorträge an verschiedenen Orten in Deutschland.

In Zusammenarbeit mit dem Sonderforschungsbereich SFB 881 »Das Milchstraßensystem« beteiligten wir uns an der Ausstellung »Einstein inside«, die derzeit Deutschland bereist und im September/Oktober 2016 in Heidelberg zu Gast war. Unser Beitrag besteht in einem Modell des ESA-Astrometriesatelliten Gaia (hergestellt in Zusammenarbeit mit der MPIA-Feinwerktechnik-Werkstatt) und einem Roll-Up zur galaktischen Archäologie.

Aus Anlass des Merkur-Transits im Mai waren wir außerdem vor Ort auf den Neckarwiesen mit einer Beobachtungsstation mit Kleinteleskopen unterwegs (vgl. Abschnitt IV.2).

### Wissenschaftsaustausch

Das Haus der Astronomie wird regelmäßig für wissenschaftliche Konferenzen und Treffen genutzt. Mit dem zentralen Hörsaal und zwei Workshopräumen ist es bestens geeignet für wissenschaftliche Veranstaltungen mit bis zu rund 80 Teilnehmern.





Quelle: M. Pössel / HdA

Die MPIA-Sommerkonferenz 2016, organisiert von Bram Venemans und Kollegen, trug den Titel »Illuminating Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch« und fand vom 27. Juni bis zum 1. Juli mit rund 80 Teilnehmern im HdA statt. Weitere Treffen waren das dritte Heidelberg-Harvard-Meeting »Physics of Star Formation: The Milky Way and Beyond« (Organisation: Henrik Beuther) sowie ein Workshop zum Thema Ganzkuppel-Inhalte, für den zahlreiche Vertreter deutscher Planetarien den Weg zu uns fanden (Organisation: Kai Noeske).

Zusätzlich zu den hier genannten fanden 44 kleinere wissenschaftliche und organisatorische Treffen mit insgesamt rund 1100 Teilnehmern statt.

## Visualisierung

Eine der Empfehlungen des Fachbeirats des Max-Planck-Instituts für Astronomie aus dem Jahr 2013 lautete, am Haus der Astronomie eine Stelle für wissenschaftliche Visualisierungsarbeit zu schaffen. Ziel der Stelle würde es sein, Visualisierungen und Animationen von astronomischen Objekten und Phänomenen für die klassische zweidimensionale Darstellung und für Planetarien geeignete Ganzkuppelpräsentationen zu erstellen und in Zusammenarbeit mit den MPIA-Wissenschaftlern neue und innovative Visualisierungstechniken für astronomische Daten zu entwickeln.

Im April 2016 konnten wir diese Position mit dem Visualisierungsspezialisten Thomas Müller besetzen. Mit einer Promotion in Physik zu relativistischer Visualisierung an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen (Prof. Hanns Ruder), mehrjähriger Erfahrung als Postdoc am Institut für Visualisierung und interaktive Systeme der Universität Stuttgart sowie Tätigkeiten für eine Ausgründung im Bereich Ganzkuppel-Software ist Müller eine ideale Besetzung für diese Stelle, und wir freuen uns auf umfangreiche zukünftige HdA-Visualisierungsaktivitäten!

Abb. IV.3.4: Einige der Planeten des neuen Planetenwegs, der das HdA und den MPIA-Campus mit der benachbarten Landessternwarte verbindet. Der Planetenweg, dessen Neufassung von Olaf Fischer koordiniert wurde, wird für Führungen und bei Workshops gerne genutzt.

## Astronomie für Schule und Kindergarten

Unser Flaggschiff im Bildungsbereich ist das Projekt »Wissenschaft in die Schulen!« (WIS) gemeinsam mit der populärwissenschaftlichen Zeitschrift *Sterne und Weltraum* (Verlagsgruppe Spektrum der Wissenschaft). Die Leitung von WIS-Astronomie hat HdA-Mitarbeiter Olaf Fischer, der mit seinem Team von (überwiegend externen) Autoren in diesem Jahr 14 Beiträge erstellte, mit denen sich neueste astronomische Forschung direkt ins Klassenzimmer bringen lässt. WIS-Astronomie wurde gefördert von der Reiff-Stiftung zur Förderung der Amateur- und Schulastronomie.

Weitere Materialien für weiterführende Schulen entwickelte Cecilia Scorza im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 881 »Das Milchstraßensystem«, für welchen das HdA der wichtigste Partner bei der Öffentlichkeitsarbeit ist.

Unsere erfolgreichste Entwicklung ist nach wie vor die Grundschulbox Astronomie, im englischen Sprachraum *Universe in a Box* (entwickelt von Cecilia Scorza mit Beiträgen von Natalie Fischer), die in mehr als 70 Ländern im Einsatz ist. Interessierte Schulen und Kindergärten können die Grundschulbox direkt vom Haus der Astronomie ausleihen.

Seit März 2015 ist das HdA einer der Partner im Projekt *EU Space Awareness*, das von der EU im Rahmen des *Horizon-2020*-Programms gefördert wird. Bis Ende 2016 haben wir für dieses Projekt 20 neue Aktivitäten und Materialien entwickelt: 15 davon zum Thema Klimawandel, die Teil einer neuen »Klimabox« werden sollen, und fünf zum Thema Navigation. Teil der Entwicklungsarbeit war dabei die von Marco Türk angefertigte Qualifikationsarbeit für sein Lehramtsstudium Physik

an der Universität Heidelberg. Die Materialien werden derzeit getestet und verbessert und werden vor ihrer Veröffentlichung außerdem noch einem Peer-Review-Verfahren unterzogen (C. Scorza, M. Nielbock).

Im Jahre 2016 besuchten mehr als 2500 Schul- und Kindergartenkinder das Haus der Astronomie für insgesamt 148 Workshops für verschiedene Altersgruppen. Die Workshops schließen üblicherweise Hands-On-Aktivitäten ein, nutzen unser digitales Planetarium und werden oft von uns genutzt, um neu entwickelte Materialien in der Praxis zu testen. In diesem Jahr haben wir neue Workshopkonzepte in Zusammenarbeit mit der Jungen Uni Heidelberg (N. Fischer) sowie für die diesjährige Explore Science (M. Nielbock) entwickelt.

Zu den externen Veranstaltungen für Schüler gehören dieses Jahr Kurse an der JuniorAkademie Baden-Württemberg in Adelsheim zum Thema Sonne (C. Liefke) und an der Deutschen SchülerAkademie Torgelow (O. Fischer) sowie ein fünftägiger Kurs für Schüler auf dem Bildungscampus Heilbronn zu den Themen Navigation und Orientierung (O. Fischer, M. Nielbock).

**Abb. IV.3.5:** Modell des ESA-Satelliten Gaia, gebaut vom HdA in Zusammenarbeit mit der Feinwerktechnik-Werkstatt des MPIA für die Ausstellung »Einstein inside«, die im September 2016 in Heidelberg zu Gast war und jetzt durch Deutschland zieht.

### Angebote für Multiplikatoren im Bildungsbereich

Lehrer/innen und Erzieher/innen spielen für die wissenschaftliche Öffentlichkeitsarbeit eine Schlüsselrolle. Sie für die Wissenschaft zu begeistern und sie dabei zu unterstützen, diese Begeisterung an die von ihnen betreuten Kinder und Jugendlichen weiterzugeben, dürfte eine der effektivsten Strategien für die Öffentlichkeitsarbeit darstellen.

Im Bereich Studium fanden in diesem Jahr für Lehramtsstudenten Physik an der Universität Heidelberg zwei Seminare (O. Fischer, C. Liefke) sowie unser jährlicher Blockkurs »Astronomie für Lehramtsstudierende« (O. Fischer, C. Liefke, M. Pössel, C. Scorza) statt. Natalie Fischer hielt die Vorlesung »Grundlagen der Astronomie für die Schule« an der Pädagogischen Hochschule Heidelberg.

Lehrerfortbildungen im Haus der Astronomie in diesem Jahr waren unsere bundesweite Fortbildung »Per Anhalter durch die Galaxis« im November, die von der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung finanziert wurde, die eintägige Fortbildung »Kometen und Kosmologie« für das Kultusministerium Baden-Württemberg (M. Pössel, C. Liefke) sowie eine eintägige Fortbildung für Lehrer aus dem Saarland. Im Bereich Kindergarten und Grundschule gab es 21 Fortbildungsveranstaltungen sowie zahlreiche Beratungsgespräche. Unter anderem entwickelten wir im Rahmen unserer Zusammenarbeit mit der Forscherstation Heidelberg eine neue Art von Lehrerfortbildung, die Astronomie und Lesefähigkeit miteinander verbindet (N. Fischer).



An externen Lehrerfortbildungen waren wir in diesem Jahr in Baden-Württemberg und Thüringen beteiligt. Die diesjährige mobile Lehrerfortbildung der Reiff-Stiftung zur Förderung der Amateur- und Schulastronomie fand in Brandenburg und Berlin statt (Strausberg, Werde, Berlin, Königs Wusterhausen, Frankfurt/Oder, Cottbus, Herzberg). Neu im Programm haben wir eine Reihe von Veranstaltungen (»kosmische Trilogie«) an der Landesakademie für Fortbildung und Personalentwicklung an Schulen des Landes Baden-Württemberg, die Lehrern den Einstieg in die Astronomie ermöglichen soll.

Auch der »Teleskopführerschein« ging im November in Adelsheim in eine weitere Runde (O. Fischer/C. Liefke). Dieser Kurs qualifiziert Lehrer außerdem, am Teleskopleihprogramm des HdA teilzunehmen, das von der Reiff-Stiftung gefördert wird und derzeit über 30 Geräte verfügt (8 Dobsons, 22 Refraktoren auf äquatorialen GoTo-Montierungen; C. Liefke).

Unsere binationale deutsch-italienische Sommerschule, finanziert von der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, fand dieses Jahr im September zum Thema Planeten- und Sternentstehung in Florenz statt.

Astronomische Bildungs- und Öffentlichkeitsarbeit hängt entscheidend von den Bedingungen für den Astronomieunterricht in der Schule und davon ab, dass es Lehrer gibt, die mit viel Engagement und Fachkenntnis Astronomie unterrichten. Das HdA arbeitet auf mehreren Ebenen darauf hin, solche astronomiefreundlichen Bedingungen zu fördern. So reformiert die Universität Heidelberg, einer der HdA-Partner, derzeit ihren Lehrplan für das Lehramtsstudium Physik Gymnasium. Das HdA hat diesen Prozess aktiv unterstützt und seine Rolle in der Lehrerbildung an der Universität Heidelberg ausgebaut.

Baden-Württemberg hat in den vergangenen Jahren seine Bildungspläne neu gefasst. Nach einem Offenen Brief (koordiniert von M. Pössel) mit mehr als 1200 Unterschriften im Herbst 2015, der für eine stärkere Rolle der Astronomie in diesen Bildungsplänen eintrat, dürfen wir nun das Landesinstitut für Schulentwicklung als Organisation, die mit der Entwicklung der neuen Bildungspläne betraut ist, aktiv unterstützen und beraten.

---

### Forschungsprojekte mit Schülern

Schüler und Schülerinnen haben am Haus der Astronomie verschiedene Möglichkeiten, eigene Erfahrungen mit wissenschaftlicher Forschung zu sammeln. Im Rahmen der IASC-Pan-STARRS-Asteroidensuche - Schüler suchen in den Daten der Pan-STARRS-Durchmusterung nach Asteroiden und haben dadurch eine realistische Chance, im Asteroidengürtel bis dahin unbekannte Asteroiden zu entdecken - hat Carolin Liefke insgesamt 33 Schülergruppen betreut, die an drei Suchkampagnen teilgenommen haben.

Unsere Aktivitäten im Bereich per Internet fernsteuerbarer Teleskope wie Faulkes/LCOGT (C. Liefke) waren in diesem Jahr aufgrund technischer Umstellungen weniger umfangreich. Neu war, dass bei LCOGT erstmals 40-cm-Teleskope hinzukamen. Wie in den vorangehenden Jahren spielten die fernsteuerbaren Teleskope wieder eine wichtige Rolle beim HdA/MPIA-Girls' Day.

Erstmals besuchte Anfang Januar 2016 eine Gruppe Würzburger Gymnasiasten das von uns mit betreute, fernsteuerbare ROTAT-Teleskop am Observatoire de Haute Provence. Gemeinsam mit Lehrer Stephan Lück installierten und testeten sie an einem der kleineren Teleskope einen spaltlosen Spektrografen samt Kamera, die nun für alle Anwender zur Verfügung stehen. Gleichzeitig wurden wichtige Wartungsarbeiten durchgeführt, um das Teleskop und vor allem den Kuppelspalt wieder in Betrieb zu nehmen (C. Liefke mit D. Elsässer). Weitere Wartungsarbeiten wurden im Oktober durch den Nutzer Jost Jahn durchgeführt. Die Teleskope waren die meiste Zeit verfügbar und wurden unter anderem für ein Forschungsprojekt über Exoplaneten-Transits von zwei Gymnasiasten unter der Leitung von C. Liefke eingesetzt. Das Projekt wurde beim Regionalwettbewerb Jugend Forscht Südbaden eingereicht.

Ein weiteres Jugend-forscht-Projekt (Regionalwettbewerb Nordbaden) unter der Leitung von C. Liefke entstand aus der Zusammenarbeit mit dem Heidelberger Life Science Lab, wo Mitglieder der Astrophysik-AG aus einer Regentonne und einem sphärischen 60-cm-Spiegel aus MPIA-Beständen ein kostengünstiges Cherenkov-Teleskop konstruierten. Eine Gruppe von Schülern des Hector-Seminars testete außerdem als Forschungsprojekt den neu angeschafften Echelle-Spektrografen (C. Liefke).

Unser Praktikumsprogramm bestand in diesem Jahr wieder aus zwei Berufsorientierungswochen (BOGY-Praktikum, C. Liefke) mit insgesamt 13 Teilnehmern. Unser dreiwöchiges Internationales Sommerpraktikum, an dem regelmäßig Teilnehmer der International Summer Science School Heidelberg teilnehmen, umfasste verschiedene Schülerforschungsprojekte, bei denen sich die zehn Teilnehmer aus Deutschland, Italien, Spanien, Australien und der Türkei insbesondere mit online verfügbaren astronomischen Bild- und Katalogdaten befassen (M. Pössel).

---

### Verbindungen knüpfen: Netzwerke und Kooperationen

Auf internationaler Ebene finden unsere wichtigsten Kooperationen im Rahmen der EU-UNAWA- und EU-Space-Awareness-Netzwerke sowie als Teil des DAAD-Exzellenzzentrums der Universität Heidelberg in Chile statt.

Regional setzen wir insbesondere unsere fruchtbare Zusammenarbeit mit der Forscherstation, dem Klaus-

Tschira-Kompetenzzentrum für frühe naturwissenschaftliche Bildung in Heidelberg fort. Zentraler Teil der Zusammensetzung ist eine gemeinsame Stelle (N. Fischer) zur Entwicklung von Lehrmaterialien und Lehrerfortbildungen.

Unsere Zusammenarbeit mit der ESO, betreffend die »ESO Supernova« (ES) als noch im Bau befindliche »große Schwester« des HdA lief in diesem Jahr verstärkt weiter, insbesondere durch die Arbeit von Cecilia Scorza, die sich intensiv an der Erstellung von Bildungskonzepten für die ES beteiligt. Auf dieser Grundlage werden Planetariumsvorführungen, Ausstellungsinhalte für Kindergarten- und Schülergruppen, Führungskonzepte und Schulworkshops entwickelt. Zu den HdA-Beiträgen gehört außerdem die Entwicklung von Veranstaltungen zur Lehrerfortbildung, eine Strategie für den Aufbau eines ES-Lehrernetzwerkes sowie das Verbundprojekt »Astronomical Concepts« zusammen mit Partnern der Sternwarte Leiden zur Verbesserung der astronomischen Grundbildung in europäischen Schulen.

Darüber hinaus war das HdA auch auf relevanten Tagungen und Konferenzen vertreten, etwa bei der Jahrestagung der Gesellschaft deutschsprachiger Planetaren und dem Public-Outreach-Treffen der Astronomischen Gesellschaft.

*Markus Pössel, Sigrid Brümmer,  
Natalie Fischer, Olaf Fischer,  
Carolin Liefke, Alexander Ludwig,  
Thomas Müller, Markus Nielbock,  
Kai Noeske, Matthias Penselin,  
Cecilia Scorza und Jakob Staude*

## V. Menschen und Ereignisse



## V.1 Menschen und Ereignisse

# Auszeichnungen und Preise

Auch im Jahr 2016 konnten sich einige Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter aus den wissenschaftlichen und technisch-administrativen Bereichen des MPIA über Preise, Auszeichnungen und Fördermittel freuen. Dabei gab es auch dieses Jahr wieder eine Auszeichnung im Rahmen der verschiedenen Förderprogramme des European Research Council (des Europäischen Forschungsrats). Bei den sogenannten ERC-Grants müssen alle Anträge auf Fördermittel die herausragende Bedeutung der Projekte sowie die Exzellenz der beteiligten Wissenschaftler belegen.

### ERC Advanced Grant im Umfang von 2.5 Mio Euro für Eva Schinnerer

Eva Schinnerer, Wissenschaftlerin in der MPIA-Abteilung Galaxien und Kosmologie, hat einen mit 2.5 Millionen Euro dotierten ERC Advanced Grant erhalten. Der Titel des ERC-Projekts ist »Die Physik der Sternentstehung und ihre Regulierung« und Beobachtungen mit dem Atacama Large Millimeter Array (ALMA) werden darin eine besondere Rolle spielen.

Abb. V.1.1: Eva Schinnerer



Quelle: E. Schinnerer / MPIA

Um die Entstehung und Entwicklung des Universums zu verstehen, müssen Bedingungen, Effizienz und Regulierungsmechanismen der Sternentstehung in Galaxien genau erforscht werden. Damit sich ein konsistentes Bild ergibt, muss dies über mehrere Größenordnungen hinweg erfolgen – von lokalen Sternentstehungsgebieten in unserer eigenen Milchstraße bis hin zu kosmologischen Skalen über eine Vielzahl von Galaxien und lange Zeiträume hinweg. Im Rahmen einer internationalen Kollaboration sollen dazu insbesondere detaillierte Beobachtungen naher Spiralgalaxien mit ALMA und tiefe Beobachtungen des COSMOS Deep Field miteinander kombiniert werden. Gerade das neue ALMA-Observatorium erlaubt einen ausgezeichneten Einblick in die Eigenschaften von Molekülwolken, die ja das Ausgangsmaterial für neue Sterne sind.

Die umfangreichen Mittel des European Research Council ermöglichten Schinnerer die Einrichtung einer Arbeitsgruppe aus mehreren Postdocs, deren Aufbau im Herbst 2016 begann und die eng mit der bereits existierenden Gruppe von Frau Schinnerer zusammenarbeiten wird.

Eva Schinnerer arbeitete zwischen 1995 und 1999 zunächst am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik (MPE) in Garching in der Gruppe von Reinhard Genzel und promovierte 1999 an der Ludwig-Maximilians-Universität in München. Danach forschte sie in den USA als Postdoc am California Institute of Technology (Caltech) in Pasadena und am National Radio Astronomy Observatory (NRAO) in Socorro. Seit 2004 ist sie als Staff Scientist am MPIA und leitet dort eine Gruppe aus drei Postdocs und fünf Doktoranden.

### Ludwig-Biermann-Förderpreis der Astronomischen Gesellschaft (AG) für Karin Lind

Der Ludwig-Biermann-Förderpreis der Astronomischen Gesellschaft (AG) wurde auf der AG-Herbsttagung 2016 in Bochum im Rahmen der feierlichen Eröffnungsveranstaltung an Karin Lind verliehen.

Mit diesem nach dem deutschen Astrophysiker Ludwig Biermann (1907-1986) benannten Nachwuchspreis ehrt die Astronomische Gesellschaft herausragende Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler, denen damit insbesondere ein Forschungsaufenthalt an einem Institut nach Wahl ermöglicht werden soll. Karin Lind überzeugte die Gutachter durch ihre fundamenta-



Quelle: K. Lind

len und herausragenden Leistungen im Bereich der theoretischen Modellierung astronomischer Spektren.

Die Preisträgerin studierte zunächst Astrophysik an der Universität von Uppsala, arbeitete zeitweise in Garching bei München am Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) und der ebenfalls dort befindlichen Zentrale der Europäischen Südsternwarte ESO, sowie an der Universität Cambridge. Sie erhielt 2014 ein Marie Curie Fellowship und wurde 2015 mit dem prestigeträchtigen Sofia-Kovalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung ausgezeichnet. Inzwischen leitet sie eine Forschungsgruppe am MPIA.

Abb. V.1.2: Karin Lind

Abb. V.1.3: MPG Vizepräsident Prof. Dr. Ferdi Schüth und Dr. Eduardo Enrique Banados Torres (rechts) bei der Preisverleihung in Saarbrücken im Juni 2016.

### Otto-Hahn-Medaille für Eduardo Banados

Eduardo Enrique Banados Torres ist von der Max-Planck-Gesellschaft (MPG) als einer von zwölf Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern der Chemisch-Physikalisch-Technischen Sektion der MPG mit der Otto-Hahn-Medaille ausgezeichnet worden. Mit der Ehrung auf der MPG-Jahresversammlung in Saarbrücken wurden seine Arbeiten zur Untersuchung von Quasaren in der Frühzeit des Universums gewürdigt.

Mit der Verleihung der nach dem berühmten deutschen Chemiker und Nobelpreisträger benannten Medaille ehrt die MPG jährlich einige ihrer herausragenden Nachwuchswissenschaftlerinnen und Nachwuchswissenschaftler.

In seiner Forschung befasst sich Banados mit Fragen rund um die Bildung der ersten Sterne, Galaxien, massereichen Schwarzen Löcher und der großräumigen Strukturen im Universum. Besonders die Erforschung der Quasare – aktive Zentren von Galaxien bei hoher Rotverschie-



Quelle: Bertram Somieski/ MPI for Informatics

bung – spielt eine wichtige Rolle, um die Ereignisse in der Frühzeit des Universums und die kosmologische Entwicklung besser zu verstehen. Hier würdigt die MPG Eduardo Banados »für grundlegende Arbeiten, die maßgeblich zum Verständnis von Quasaren in der Frühzeit des Universums beigetragen haben.«

Eduardo Banados war bis Ende 2015 am MPIA und wechselte dann als Postdoktorand an die Carnegie Observatorien in Pasadena/Kalifornien (USA). Dort setzt er derzeit die im Rahmen seiner Dissertation in Heidelberg durchgeführten Arbeiten im Bereich der beobachtenden Kosmologie fort.

#### Dieter-Rampacher-Preis für Michael Maseda

Die Max-Planck-Gesellschaft hat Michael Maseda mit dem Dieter-Rampacher-Preis ausgezeichnet. Mit diesem Preis ehrt die MPG jährlich die erfolgreiche Promotion der jüngsten Doktorandin bzw. des jüngsten Doktoranden des Vorjahres (in diesem Fall des Jahres 2015) in der Max-Planck-Gesellschaft.

Der Preis wurde von Hermann Rampacher, einem fördernden Mitglied der Max-Planck-Gesellschaft, zum Andenken an dessen 1945 im Alter von nur 20 Jahren gefallenen Bruder und Physik-Studenten Dieter Rampacher gestiftet.

Michael Maseda beschäftigte sich in seiner Dissertation im Rahmen der International Max-Planck Research School (IMPRS-HD) mit der Entwicklung von

Galaxien. Dabei untersuchte er mithilfe der Nah-Infrarot-Spektroskopie insbesondere Zwerggalaxien mit aktiver Sternentstehung in größeren kosmologischen Distanzen (bei Rotverschiebungen von  $z > 1$ ).

Seit Ende 2015 ist Maseda im Rahmen eines NOVA-Fellowship als Postdoc an der Universität Leiden (Niederlande) tätig.

#### Reimar-Lüst-Stipendium für Adriana Pohl

Ebenfalls von der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet wurde Adriana Pohl. Die Nachwuchswissenschaftlerin erhielt das Reimar-Lüst-Stipendium und damit eine zweijährige Förderung ihrer Forschungsarbeit.

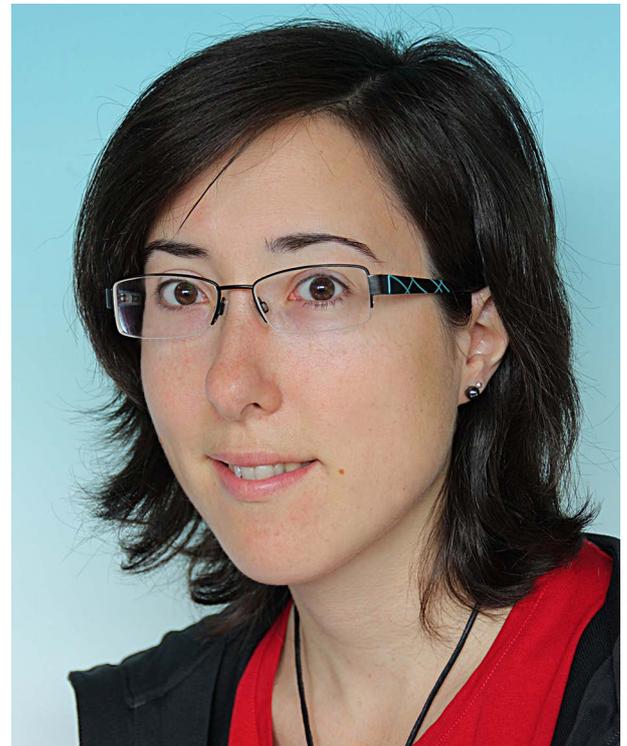
Adriana Pohl ist derzeit als Doktorandin in der Abteilung Planeten- und Sternentstehung am MPIA und in der Gruppe Planetenentstehung des Instituts für Theoretische Astrophysik (ITA) des Zentrums für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) tätig. In ihrer Doktorarbeit beschäftigt sie sich mit der detaillierten Modellierung protoplanetarischer Scheiben. Dabei geht es insbesondere darum, den Strahlungstransport von Streulicht bei Wellenlängen vom Nah-Infrarot bis zu Millimeterwellen zu erfassen und damit kürzlich gemachte Aufnahmen solcher Scheiben um Sterne zu verstehen. Denn dank neuer Beobachtungstechniken gelingen mit Instrumenten wie SPHERE nun spektakuläre Aufnahmen, die u.a. sogar Spiralstrukturen zeigen. Adriana Pohl erzeugt mit ihren Modellen in Verbindung mit Parametern, die die

Abb. V.1.4: Michael Maseda



Quelle: M. Maseda / MPG

Abb. V.1.5: Adriana Pohl



Quelle: D. Anders / MPIA



Quelle: Jonas Syed / MPIA

Abbildungsqualität der Instrumente simulieren, künstliche Aufnahmen, die mit den realen Daten verglichen werden können.

Das Reimar-Lüst-Stipendium wird seit 1983 an solche Doktorandinnen/Doktoranden bzw. Postdoktorandinnen/Postdoktoranden vergeben, die eine besondere Förderung aufgrund ihrer exzellenten Leistungen verdienen. Die Gelder stammen aus Erträgen einer Stiftung mit Spenden deutscher Wirtschaftsunternehmen, die aus Anlass des 60. Geburtstages von Reimar Lüst, dem früheren MPG-Präsidenten, ins Leben gerufen wurde.

### Die Patzer-Preise 2016

Am 25. November 2016 fand im Hörsaal des MPIA wieder die feierliche Verleihung des Ernst-Patzer-Preises zur Förderung von Nachwuchswissenschaftlern statt. Der jährlich vergebene Ernst Patzer Preis wurde vom Kunstliebhaber und Philosophen Ernst Patzer gestiftet und von seiner Witwe eingerichtet. Die Stiftung vergibt ihre Preise an junge Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler am MPIA und anderen Instituten in Heidelberg und will die Forschung insbesondere auf dem Gebiet der Astronomie fördern. Mit den Preisen werden die besten Publikationen ausgezeichnet, die während der Promotion oder der ersten Postdoc-Phase entstanden und in einem referierten Fachjournal publiziert worden sind.

Die drei Auszeichnungen gingen an:

- Adriana Pohl (MPIA-Abteilung Planeten- und Sternentstehung sowie der Gruppe Planetenentstehung am Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) des Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH)) für ihre Publikation »Investigating dust trap-

Abb. V.1.6: Die Patzer-Preisträger 2016: Adriana Pohl, Sara Rezaeikhoshbakhhat und Richard Teague (von links).

ping in transition disks with millimeter-wave polarization« (Pohl et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics*, 593, A12)

- Sara Rezaeikhoshbakhhat (MPIA-Abteilung Galaxien und Kosmologie) für ihre Publikation »Inferring the three-dimensional distribution of dust in the Galaxy with a non-parametric method« (Rezaei et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics* in press)
- Richard Teague (MPIA-Abteilung Planeten- und Sternentstehung) für seine Publikation »Measuring Turbulence in TW Hya with ALMA: Methods and Limitations« (Teague et al. 2016, *Astronomy & Astrophysics* 592, A49)

Über die Vergabe entscheidet ein Auswahlgremium, dem zwei MPIA-Wissenschaftler und ein externer Heidelberger Wissenschaftler angehören.

### Doppelte Auszeichnung der MPG: Preis für die MPIA-Feinwerktechnik / Azubi-Preis für Lukas Reichert

Nach 2014 wurde die feinmechanische Werkstatt des MPIA in diesem Jahr erneut für ihr besonderes Engagement in der Berufsausbildung mit dem Preis der Max-Planck-Gesellschaft ausgezeichnet. Darüber hinaus erhielt Lukas Reichert den Azubipreis der MPG für herausragende Leistungen in der Berufsausbildung.

Jährlich zeichnet die Max-Planck-Gesellschaft drei institutionelle Ausbildungsstätten für ihr besonderes Engagement in der Berufsausbildung aus. Erneut zählt das MPIA mit seiner feinmechanischen Werkstatt zu den Preisträgern. Die MPG und das Preiskomitee möchten



**Abb. V.1.7:** Der Ausbildungsleiter der Feinwerktechnik, Stefan Meister (links) und Azubi-Preisträger Lukas Reichert.

mit diesem Preis ihre Wertschätzung für die Leistungen aller Ausbilderinnen und Ausbilder zum Ausdruck bringen. Mit der Auszeichnung sollen Institute hervorgehoben werden, die sich beispielsweise durch innovative Ausbildungskonzepte, die Intensität der Betreuung, Angebote zur Kooperation mit externen Partnern oder durch die Vermittlung von Zusatzqualifikationen außergewöhnlich stark für die Ausbildung junger Menschen einsetzen.

Seit 2007 vergibt die Max-Planck-Gesellschaft zudem jährlich den Azubipreis für herausragende Leistungen in der Berufsausbildung. Mit dem Preis würdigt die MPG nicht nur die herausragende berufliche und schulische Leistung während der Ausbildung, sondern auch die persönliche Entwicklung und das soziale Engagement der Auszubildenden. Schon mehrfach wurde der Azubi-Preis an Auszubildende des MPIA vergeben.

Der diesjährige Preisträger Lukas Reichert arbeitet in der Feinwerktechnik des MPIA. Er erhält die Auszeichnung für herausragende Leistungen im Bereich der Präzisionsmechanik.

## V.2 Menschen und Ereignisse

### Besondere Events und Konferenzen

Die erste Hälfte des Jahres war durch die intensive Vorbereitung auf die Evaluation durch den Fachbeirat geprägt, der das MPIA vom 22. bis 24. Juni nach drei Jahren wieder besuchte. Die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Instituts waren sehr zufrieden darüber, dass die wissenschaftliche Leistung des MPIA erneut mit »herausragend« bewertet wurde.

Der jährliche Besuch des Instituts durch das Kuratorium fand am 28. November statt. Dieses Gremium ist eine wichtige Unterstützung für das MPIA in Fragen rund um die Wissenschaftspolitik, die öffentliche Wahrnehmung und mögliche Kontakte in der Gesellschaft. Die Institutsleitung berichtete ausführlich über spezielle Entwicklungen im Institut mit einem besonderen Schwerpunkt auf den Instrumentierungsprojekten und der Wissenschaft.

Wie in den Jahren zuvor organisierten MPIA-Wissenschaftlerinnen und -Wissenschaftler auch 2016 wieder lokale und externe Konferenzen oder waren maßgeblich an der Durchführung anderer Meetings beteiligt.

Die diesjährige MPIA-Sommerkonferenz (vom 27. Juni bis 1. Juli) im Haus der Astronomie (HdA) auf dem MPIA Campus war bereits die fünfte Konferenz dieser Reihe und hatte diesmal den Titel »Illuminating the Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch«.

Ebenfalls im HdA wurde unter dem Titel »Physics of Star Formation: Milky Way and Beyond« zwischen dem 8. und 10. November der dritte Heidelberg-Harvard Workshop veranstaltet.

Zwischen dem 12. und 16. September fand im Max-Planck-Haus in Heidelberg die 11. Heidelberger IM-PRS-Summer School statt. In diesem Jahr war das The-

Abb. V.2.1: Die Teilnehmer der MPIA-Sommerkonferenz 2016 vor dem Haus der Astronomie auf dem MPIA-Campus.



Quelle: MPIA

ma »Astrostatistics & Data Mining« und der Workshop war wieder eine Kombination aus wissenschaftlichen Vorträgen, Vorlesungen und praktischen Übungen.

Außerdem sind MPIA-Mitarbeiterinnen und -Mitarbeiter regelmäßig an der Organisation von Konferenzen beteiligt, die auf Schloss Ringberg am Tegernsee durchgeführt werden. Schloss Ringberg ist ein besonderer Tagungsort der Max-Planck-Gesellschaft. Hervorzuheben ist 2016 die Tagung »The Early Phase of Star Formation« (EPOS) (26. Juni – 1. Juli). Diese alle zwei Jahre stattfindenden Meetings begannen bereits 2006 – also vor 10 Jahren - und aus diesem Anlass stand als zentrale Frage im Fokus, ob wir seit damals tatsächlich besser verstehen, wie sich Sterne aller Massen inmitten von Molekülwolken bilden.

Teil des akademischen Lebens am MPIA waren auch besondere ganztägige wissenschaftliche Kolloquien (wie z.B. am 29. April), aber auch der MPIA Career Day am

21. April. In dieser Veranstaltung berichteten verschiedene Gäste aus Unternehmen oder Forschungsorganisationen – darunter auch ehemalige Studenten des MPIA – über mögliche wissenschaftliche Karrierewege außerhalb der Forschungsinstitute. Darüber hinaus fanden auch wieder zahlreiche weitere Meetings zu aktuellen oder kommenden Instrumentierungsprojekten, Observatorien oder Missionen statt – wie z.B. zu METIS, ALMA oder Gaia.

MPIA und HdA waren auch wieder an der Herbsttagung der Astronomischen Gesellschaft (AG) durch organisatorische Unterstützung, wissenschaftliche Vorträge, und einer Sondersitzung zur Öffentlichkeitsarbeit beteiligt. Die Konferenz mit dem Titel »The Many Facets of Astrophysics - Photons, Particles, and Spacetime«, fand diesmal in Bochum statt (12.-16. September). Dort wurde auch der Biermann-Preis an Karin Lind überreicht (siehe Kap. 5.1).

### V.3 Menschen und Ereignisse

## Beruf und Familie / Doppelkarrieren (Dual Career) / Work-Life-Balance

**Wissenschaft bietet die Möglichkeit für anspruchsvolle und erfüllende berufliche Betätigung, die aber auch zur Herausforderung werden kann. Für junge Wissenschaftler stellt sich ab einem bestimmten Karriereabschnitt die Frage nach der Vereinbarkeit von Beruf und Familie. Familienfreundliche Maßnahmen gelten außerdem als wichtige Bausteine, um für mehr Chancengerechtigkeit in der Wissenschaft zu sorgen.**

Eine Karriere in der Forschung erfordert Flexibilität und Mobilität, und ist gerade in der Anfangsphase durch im Mehrjahrestakt wechselnde Arbeitsorte gekennzeichnet. Das stellt Paare, bei denen beide Lebenspartner eine wissenschaftliche Karriere anstreben (Doppelkarriere oder Dual Career), vor ganz eigene Herausforderungen. Eine familienfreundliche Personalstrategie bedeutet daher auch, für die Lebenspartner neu eingestellter Wissenschaftler die richtigen beruflichen Bedingungen zu schaffen.

Die bereits seit vielen Jahren am MPIA etablierten Maßnahmen für eine bessere Vereinbarkeit von Beruf, Familie und Privatleben werden kontinuierlich weiter

entwickelt und sind fest in der Personalarbeit des Instituts verankert. Mit familien- und lebensphasenbewussten Personalmaßnahmen für alle Beschäftigten möchte das MPIA aktiv eine zukunftsorientierte Personalpolitik gestalten.

Eine gute Vereinbarkeit von Beruf, Familie und Privatleben erleichtert den Newcomern am MPIA aus mehr als 40 Ländern den Start in einen neuen Berufsabschnitt in Forschung und Wissenschaft.

Eine funktionierende Work-Life-Balance ist eine der Grundvoraussetzungen, um die Herausforderungen im Beruf mit Erfolg meistern zu können und gilt inzwischen als einer der Schlüssel, um einem zukünftigen Fachkräftemangel entgegen zu wirken.

*Ingrid Apfel*

#### Familienfreundliches MPIA

- Familienbewusste Personalführung für Frauen und Männer
- Flexible Gestaltung von Arbeitszeit und Arbeitsort in besonderen Lebensabschnitten (z.B. Kinderbetreuungszeiten, Pflegezeiten, Dual Career-Situationen)
- Belegrechte in Kindertagesstätten für Kinder von 8 Wochen bis 6 Jahren
- Kinderbetreuungsraum und Baby-Office
- Kongress-Betreuung
- Back-up-Notfall-Betreuung über den Familienservice.
- Angebote Ferienbetreuung über Bündnis für Familie Heidelberg
- Dual Career Programm
- Kontakthalteprogramme bei vorübergehendem Ausstieg aus dem Beruf in besonderen Lebensabschnitten
- Förderung von Elternzeit für Väter
- Unterstützung neuer Mitarbeiter durch das International Office bei Wohnungssuche, Suche von geeigneten Schulen und Kinderbetreuungsplätzen.
- Vermittlungsservice für Familien über den PME Familienservice im Bereich Kinderbetreuung, Seniorenbetreuung und haushaltsnahen Dienstleistungen.



## VI. Anhang



## VI. Anhang

### VI.1 Mitarbeiter

---

#### Abteilung Planeten- und Sternentstehung

**Direktor:** Thomas Henning

**Infrarot-Weltraumastronomie:** Oliver Krause, Zoltan Balog, Jeroen Bouwman, Örs Hunor Detre, Ulrich Grözinger, Ulrich Klaas, Hendrik Linz, Jürgen Schreiber, Amelia Stutz

**Sternentstehung:** Henrik Beuther, Aida Ahmadi, Jorge Abreu, Simon Bihl, Roxana Chira, Bertrand Goldman, Jouni Kainulainen, Joe Mottram, Michael Rugel, Sarah Sadavoy, Yuan Wang, Shiwei Wu

**Scheiben, Exoplaneten:** Thomas Henning, Ludmila Carone, Markus Feldt, Miriam Keppler, Ralf Launhardt, Anne-Lise Maire, Luigi Mancini, André Müller, Arianna Musso-Barcucci, Dimitry Semenov, Trifon Trifonov, Nicole Pawellek, Adriana Pohl, Paula Sarkis, Richard Teague, Fei Yan, Liu Yao, Roy van Boekel, Shiwei Wu

**Theorie SP:** Hubertus Klahr, Hans Baehr, Tilman Birnstiel, Michael Butler, Natascha Manger, Mykola Malynin, Paul Mollière, Andreas Schreiber

**Laborastrophysik:** Cornelia Jäger, Walter Hagen, Sergy Krasnokutski, Gaël Rouillé, Alexey Potapov

**Deutsches Interferometriezentrum FRINGE:** Wolfgang Brandner, Casey Deen, Stefan Hippler, Taisiya Kopytova, Matthias Samland, Maria Wöllert

**ERC Forschungsgruppe:** Jouni Kainulainen, Manuel Riener, Miaomiao Zhang

---

#### Abteilung Galaxien und Kosmologie

**Direktor:** Hans-Walter Rix

**Galaxienentwicklung:** Hans-Walter Rix, (einschliesslich ERC Advanced Grant Forschungsgruppe), Bernd Husemann, Laura Inno, Jan Rybizki, Johanna Coronado, Nina Hernitschek, Jakob Herpich, Marie Martig, Melissa Ness, Branimir Sesar, Wilma Trick, Xiangxiang Xue, Greg Stinson

**Gaia-Durchmusterung:** Coryn Bailer-Jones, Maria Süveges, René Andrae, Tri Astraatmadja, Kester Smith, Sara Rezaeikhoshbakht, Morgan Fouesneau

**Hochaufgelöste Astronomie:** Thomas Herbst, Kalyan K. Radhakrishnan, Rosalie McGurk

**Astrophysikalische Jets:** Christian Fendt, Qian Qian, Christos Vourellis, Dennis Gassmann

**Struktur in aktiven Galaxienkernen:** Klaus Meisenheimer, Bernhard Dorner

**Extragalaktische Sternentstehung:** Eva Schinnerer, (einschliesslich ERC Advanced Grant Forschungsgruppe), Emer Brady, Sharon Meidt, Miguel Querejeta, Kazimierz Sliwa, Kathryn Kreckel, Neven Tomicic, Sarah Leslie, Philipp Lang, Liu Daizhong, I-Ting Ho

**Entwicklung von Galaxien und ihren Schwarzen Löchern:** Knud Jahnke, (EUCLID-Projekt-Gruppe), Stefanie Wachter, Felix Hormuth, Gregor Seidel

**Inter- und Zirkumgalaktisches Medium:** Joe Hennawi, (unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe), Fabrizio Arrigoni Battaia, Anna Christina Eilers, Cristina Javiera Garcia, Ilya Khrykin, Girish Kulkarni, Khee-Gan Lee, Elisabeta Lusso, Gabriele Maier, Jose Onorbe, Alberto Rorai, Tobias Schmidt, Jonathan Stern, Michael Walther, Gabor Worsack

**Struktur und Dynamik von Galaxien:** Glenn van de Ven, Akin Yildirim, Anna Sippel, Ling Zhu, Remco van den Bosch, Ryan Leaman, Athanasia Tstasi, Paolo Bianchi, Yulong Zhuang, Ying Chi Leung, Alina Boecker, Sophia Milanov

**Galaxienentstehung im Dunklen Universum:** Andrea Macciò (unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe), Thales Gutcke, Tobias Buck, Jonas Frings

**Theoriegruppe Galaxien und Kosmologie:** Annalisa Pillepich, (unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe), Mark Lovell, Kiyun Yun

**Instrumentierung:** Jörg-Uwe Pott, Santiago Barboza, Michael Boehm, Kirsten Schnuelle, Martin Glück, Gabriele Rodeghiero, Joel Sanchez, Johannes Esser, Felix Widmann

**Stellare Spektroskopie und Sternpopulationen:** Maria Bergemann (unabhängige Forschungsgruppe), Valeriy Vasilyev, Mikhail Kovalev, Joachim Bestenlehner, Tim Moellers

**Galaxienzentren:** Nadine Neumayer (unabhängige Max-Planck-Forschungsgruppe), Mayte C. Alfaro Cuello, Iskren Y. Georgiev, Nikolay Kacharov, Alessandra Mastrobuono-Battisti, Arianna Picotti

**Stellare Physik und die Entwicklung chemischer Elemente:** Karin Lind (Alexander von Humboldt Sofja-Kowalewskaja-Forschungsgruppe), Sven Buder, Yeisson Osorio, \Asa Sk\`ulad\`ottir, Anish Amarsi, Diane Feuillet, Xudong Gao

**Entstehungsgeschichte der Galaxien:** Arjen van der Wel (ERC Consolidator Grant Forschungsgruppe), Priscilla Chauke, Caroline Straatman, Po-Feng Wu, Kai Noeske, Ivana Barisic, Joshua Van Houdt

---

### Weitere Mitarbeiter

**Wissenschaftl. Referent der Institutsleitung:** Klaus Jäger

**MPIA-Observatorien:** Roland Gredel

**Öffentlichkeitsarbeit:** Markus Pössel (Leitung), Klaus Jäger und Axel M. Quetz

**Verwaltung:** Mathias Voss (Leitung)

**Haus der Astronomie:** Markus Pössel (Leitung)  
Sigrid Brümmer-Wissler, Natalie Fischer, Olaf Fischer, Carolin Liefke, Alexander Ludwig, Thomas Müller (seit 1.5.), Markus Nielbock, Kai Noeske (bis 31.12.), Matthias Penselin, Tobias Schultz (bis 31.8.), Cecilia Scorza, Jakob Staude; Staatsexamenskandidaten: Can Demirakca, Heiko Depping, Paul Eckartz, Johannes Fröschle, Fabian Gebhart, Dennis Hoffmann, Waldemar Schlötzer, Andreas Stöcklin, Edgar Teske, Marco Türk; Studentische Hilfskräfte: Jan Eberhardt, Sophia Haude (bis 31.3.), Simon Kopf (seit 1.3.), Katja Reichert, Valentina Rohnacher (1.11. – 30.11.), Andreas Stöcklin (6/2016), Elisabeth Zepf (1.11.–30.11.); Unterstützung bei Workshops für Kindergarten und Grundschule: Esther Kolar

**Technische Abteilungen:** Martin Kürster (Leitung), Praktikant: Jonathan Kolar (ab 1.9.)

– **Konstruktion:** Ralf-Rainer Rohloff (Leitung), Harald Baumeister (Stellvertreter), Monica Ebert, Armin Huber, Norbert Münch

– **Feinwerktechnik:** Armin Böhm (Leitung), Stefan Meister (Stellvertreter), Mario Heitz, Tobias Maurer, Klaus Meixner, Felix Sennhenn (ab 27.2.) Tobias Stadler; Azubis, Praktikanten, studentische Hilfskräfte: Francisco Ortiz, Lukas Reichert, Leon Schädel, Matthias Schend (bis 26.2.), Christoph Schwind, Felix Sennhenn (bis 26.2.), Larissa Stadter, Philipp Wilhelm (ab 1.9.)

– **Elektronik:** Lars Mohr (Leitung), José R. Ramos (Stellvertreter), Tobias Adler, Matthias Alter, Heiko Ehret, Ralf Klein, Michael Lehmitz, Ulrich Mall, Achim Ridinger, Frank Wrhel

– **Instrumentierungssoftware/Projekt-EDV:** Florian Briegel (Leitung), Udo Neumann (Stellvertreter), Jürgen Berwein, José Borelli, Frank Kittmann (bis 30.9.), Martin Kulas, Richard Mathar, Alexey Pavlov, Clemens Storz (bis 29.2.)

– **Instrumentierung und Projektabwicklung:** Peter Bizenberger (Leitung), Thomas Bertram (Stellvertreter), María Concepción Cárdenas Vázquez (ab 1.2.), Wolfgang Gässler, Ralf Hofferbert, Werner Laun, Markus Mellein, Javier Moreno-Ventas, Eric Müller, Friedrich Müller, Vianak Naranjo, Johana Panduro, Diethard Peter (bis 31.8.), Silvia Scheithauer; Azubis, Praktikanten, studentische Hilfskräfte: Alexander Sivitilli (bis 31.5.)

### Administrativ-Technische Service-Abteilungen:

– **Bibliothek:** Monika Dueck

– **EDV-Gruppe:** Donald Hoard (Leitung), Björn Binroth (Stellvertreter), Ulrich Hiller, Andreas Hummelbrunner, Marco Piroth, Frank Richter

– **Fotolabor:** Doris Anders

– **Graphikabteilung:** Axel M. Quetz (Leitung), Karin Meißner, Carmen Müllerthann (Elternzeit bis 21.5.), Judith Neidel

– **Sekretariate:** Sigrid Brümmer, Marina Gilke, Carola Jordan, Susanne Koltes-Al-Zoubi, Sabine Otto, Heide Seifert, Huong Witte-Nguy

– **Technischer Dienst und Kantine:** Frank Witzel (Leitung), Markus Nauß (Stellvertreter), Hartmut Behnke, Sascha Douffet, Gabriele Drescher, Marion Jung, Pascal Krämer, Frank Lang, Britta Witzel, Elke Zimmermann

– **Verwaltung:** Mathias Voss (Leitung), Ingrid Apfel (Stellvertreterin), Danuta Hoffmann Arnim Wolf; Einkauf: Arnim Wolf, Doris Anders; Finanzen: Danuta Hoffmann, Doris Anders, Heidi Enkler-Scharpegge, Marc-Oliver Lechner, Manuela Reifke, Christine Zähringer; Personal: Ingrid Apfel, Jana Baier, Christiane Hölscher, Daniela Scheerer (bis 31.7.), Lilo Schleich, Tina Wagner; Empfang: Ina Beckmann, Madeline Dehen; Auszubildende/Studenten: Tina Brill (ab 1.9.), Amir Dedar (ab 1.10.), Henock Lebasse (bis 31.8.), Matthias Rohrmann (ab 1.10.), Anica Till (bis 30.9.)

**Für das Institut tätige ehemalige Mitarbeiter:** Christoph Leinert, Dietrich Lemke

**Verstorbene ehemalige Mitarbeiter:**

Im Jahr 2016 verstarben leider die langjährigen Mitarbeiter des MPIA Prof. Dr. Josef Fried und Werner Westermann.

Josef Fried war in vier Jahrzehnten in der wissenschaftlichen Erforschung junger Sterne, aktiver Galaxien und Quasare tätig. Darüber hinaus hat er sich durch wichtige Instrumentierungsentwicklungen für unser Observatorium auf dem Calar Alto in Südspanien sehr verdient gemacht.

Werner Westermann war über drei Jahrzehnte hinweg in der Elektronikabteilung unseres Instituts tätig und hat dabei die Entwicklung hochkomplexer elektronischer Komponenten für zahlreiche astronomische Instrumente, die an den verschiedensten Observatorien zum Einsatz gekommen sind, begleitet.

Mit Josef Fried und Werner Westermann verliert das MPIA nicht nur zwei fachlich hervorragende Kollegen, sondern auch zwei warmherzige und liebenswürdige Menschen, die wir in unseren Gedanken behalten werden.

**VI.2 Gästeliste**

**Wissenschaftliche Gäste:** Ruggero De Vita, Univ. Milano, 4. Jan. – 30. Apr.; Wei Zhu, Ohio State Univ., 5. – 23. Jan.; Alex Cridland, McMaster Univ., 1. – 29. Feb.; Vitaly Akimkin, Russian Academy of Science, 21. Feb. – 12. März; Thomas Nordlander, Uppsala Univ., 22. Feb. – 5. März; Anish Amarsi, Australian Nat. Univ., 22. Feb. – 6. März; Nico Disch, Univ. Heidelberg, 22. Feb. – 15. März; Charli Sakari, Univ. Washington, 19. März – 2. Apr.; Andrew Graus, Univ. California, 3. Apr. – 9. Apr.; Coral Wheeler, Univ. California, 3. Apr. – 9. Apr.; Victor Debattista, Univ. Lancashire, 30. Apr. – 30. Juni; Ben K.D. Pearce, McMaster Univ., 1. Mai – 1. Aug.; Francesca Pinna, IAC, 2. – 29. Mai; JD Smith, Univ. Toledo, 9. Mai – 31. Juli; Rupali Chandar, Univ. Toledo, 22. Mai – 31. Juli; Ian Crossfield, Univ. Arizona, 1. Juni – 31. Juli; Joshua Lothringer, Univ. Arizona, 1. Juni – 31. Juli; Elisabeth Mills, Univ. Arizona, 1. Juni – 31. Juli; Patricio Sanhueza, NAOJ, 2. – 17. Juni; David Nidever, NOAO/LSST, 5. – 19. Juni; Amy Reines, NOAO, 5. – 19. Juni; Paula Johns, Univ. Toledo, 5. – 20. Juni; Toshiki Saito, Tokyo Univ., 6. – 24. Juni; Angie Wolfgang, Penn State Univ., 16. Juni – 17. Juli; Eduardo Banados, Carnegie Obs., 20. Juni – 7. Juli; Eduardo Banados, Carnegie Observatory, 20. Juni – 7. Juli; Jeremy Lim, Univ. Hongkong, 20. Juni – 26. Aug.; Katharine Kretke, Research Institute Boulder, 20. Juni – 28. Juli; Sebastian Lopez, Univ. Chile, 26. Juni – 20.

Juli; Julianne Dalcanton, Univ. Washington, 1. – 29. Juli; Andrea Maccio, NYU Abu Dhabi, 1. – 31. Juli; Aaron Dutton, NYU Abu Dhabi, 1. – 31. Juli; Aura Obreja, NYU Abu Dhabi, 1. – 31. Juli; David Hogg, NYU, 1. Juli – 14. Aug.; Guiseppe Bono, Univ. Rome, 3. – 24. Juli; Alberto Rorai, Univ. Cambridge, 3. Juli – 9. Juli; Nushkia Chamba, NYU Abu Dhabi, 7. – 29. Juli; Dan Foreman-Mackey, Univ. Washington, 9. – 23. Juli; Ruth Angus, Oxford Univ., 9. – 23. Juli; Carmelo Arcidiacono, Bologna Univ., 10. – 29. Juli; Olga Zakhochay, Main Astronomical Observatory of Ukraine, 15. Juli – 14. Okt.; Rachel Bezanson, Univ. Arizona, 25. Juli – 19. Aug.; Shmuel Bialy, Tel Aviv Univ., 28. Juli – 11. Aug.; Boris Gaensicke, Univ. Warwick, 26. – 31. Aug.; Nikolai Voshchinnikov, St. Petersburg State Univ., 8. Sep. – 6. Okt.; Somayeh Sheik Nezami, School of Astronomy, Teheran, 1. Okt. – 12. Dez.; Zofia Szczesna, Univ. Krakow, 1. Okt. – 30. Nov.; Felix Widmann, Univ. Heidelberg, 14. Okt. – 28. Feb. 2017; Tomonari Michiyama, Univ. Tokyo, 18. Okt. – 2. Dez.; Masafusa Onoue, NAO, 29. Nov. – 29. Jan. 2017

Durch die regelmäßig stattfindenden internationalen Treffen und Veranstaltungen am MPIA hielten sich zahlreiche weitere Gäste kurzfristig am Institut auf, die hier nicht im Einzelnen aufgeführt sind.

**VI.3 Tagungen, Vorträge****Veranstaltete Tagungen am MPIA:**

METIS Consortium Meeting 2, HdA, 5.–7. Apr. (Scheithauer, Feldt, Scheerer)  
Wissenschaftliches Festkolloquium für Thomas Henning, HdA/MPIA, 29. Apr. (Marine Gilke, Klaus Jäger u. a.)  
THOR Team Meeting, HdA, 2.–4. Mai (Beuther)

CARMENES Data Visualization and Analysis Meeting, 16.–17. Juni (Kürster)  
Fachbeirat/Vergleichende Evaluation des MPIA, MPIA Heidelberg, 22.–24. Juni (K. Jäger, Rix, Henning, Gilke, Jordan u.a.)  
CORE Team Meeting, MPIA Heidelberg, 11.–13. Juli (Beuther, Mottram, Bosco)

5th annual MPIA Summer conference. Illuminating the Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch, HdA, 27. Juni–1. Juli (Venemans, Walter, Hennawi, Henning)  
 CORE Team Meeting, 11.–13. Juli (Ahmadi, Beuther, Mottram, Bosco)  
 ARGOS Consortium meeting, 19.–20. Juli (Gässler)  
 IMPRS Summer School 2016, MPIA, 12.–16. Sep. (Bailer-Jones, Fendt, Witte-Nguy)  
 3rd Harvard-Heidelberg meeting, HdA Heidelberg, 8.–10. Nov. (Beuther, Henning, Mottram, Schinnerer)  
 SFNG Team meeting, HdA, 14.–16. Dez. (Schinnerer, Sliwa, Jordan)

#### Andere veranstaltete Tagungen:

APOGEE AAS Session & Workshop, Cocoa Beach, USA, 7.–10. Jan. (Ness)  
 Astrochemistry as a diagnostic of Stars and Planet Formation, Bordeaux, Frankreich 12.–13. Jan. (Semenov)  
 ARGOS Consortium meeting, OAA, Florenz, 15.–16. Feb. (Gässler)  
 The Reionization Epoch: New Insights and Future Prospects, Aspen Center for Physics, Aspen, USA, 7. März (Walter)  
 Herschel PACS ICC- and ESA hand-over review meeting, ESAC Villafranca, Spanien, 7.–9. März (Schreiber)  
 ISM-SPP Student Workshop 2016: Feedback Processes and modelling of the ISM, Freising, 15. März (Tomicic)  
 14th Gaia DPAC CU8 plenary meeting, Potsdam, 6.–8. Apr. (Bailer-Jones)  
 Resolving Planet Formation in the Era of ALMA and Extreme AO, ESO/Santiago de Chile, 16.–20. Mai (Henning)  
 Exoplanets I, Davos, Schweiz 3.–7. Juli (Henning)  
 A multi-messenger view of mergers and multiple supermassive black holes, EWASS Symposium S3, Athen, Griechenland, 4.–7. Juli (Decarli)  
 4MOST Preliminary Design Review, ESO München, 14.–17. Juni (Gässler)  
 Symposium Max Planck Society, Valparaíso, Chile, 24. Juli (Henning)  
 From Wall to Web, 24.–29. Juli, Harnack-Haus, Berlin (Rix)  
 APOGEE Workshop, Madison, USA, 25.–26. Juni (Ness)  
 Early Phases of Star Formation (EPOS) 2016, Schloss Ringberg, 26. Juni–1. Juli (Henning, Beuther, Linz, Ahmadi, Rugel, Gilke)  
 From Wall to Web, Berlin, 24.–29. Juli (Hennawi, Worseck, Onorbe, Farina, Stern, Davies, Walther, Sorini, Schmidt, Eilers, Hiss, Heilker)  
 The Chemical Evolution of Galaxies, MIAPP Workshop, Munich Institute for Astro- and Particle Physics, München, 25. Juli–19. Aug. (Bergemann)  
 Deconstructing Galaxies at Cosmic Noon, Lorentz Center, Leiden, Niederlande, 1.–5. Aug. (van der Wel)

The 8th meeting on Cosmic Dust, Tokio, 17.–21. Aug. (C. Jäger)  
 4MOST Assembly-Integration-Verification meeting, LSW-ZAH, Heidelberg, 8.–9. Sep. (Gässler)  
 Tagung der Astronomischen Gesellschaft »The Many Facets of Astrophysics – Photons, Particles, and Spacetime«, Bochum, 12.–16. Sep. 2016 (K. Jäger)  
 International workshop »Multiple Faces of Interstellar Dust« Garching, München, 13.–16. Sep. (C. Jäger)  
 »Public Outreach in der Astronomie«, AG-Tagung, Bochum, 14. Sep. (K. Jäger, Pössel)  
 4MOST All Hands Meeting, LSW Heidelberg, 19.–23. Sep. (Gässler)  
 Half a Decade of ALMA: Cosmic Dawns Transformed, Indian Wells, CA, USA, 20.–23. Sep. (Schinnerer)  
 Japan-Germany Planet & Disk Workshop, Ishigaki Island, Japan, 23. Sep.–1. Okt. (Henning)  
 Missing links from disks to planets, Budapest, Hungary, 9.–14. Okt. (Henning, Semenov)  
 Gaia Sprint 2016, Simons Foundation Center for Computational Astrophysics, New York, NY, 17.–21. Okt. (Rix, Trick)  
 PSF Retreat, Tagungshaus Wildbad, Rothenburg ob der Tauber, 24.–26. Okt. (van Boekel, Scheithauer, Gilke, Henning)  
 15th Gaia DPAC CU8 plenary meeting, Toulouse, 7.–8. Nov. (Bailer-Jones)  
 ISSI comets-disks meeting, Bern, Schweiz, 5.–9. Dez. (Semenov)  
 Herschel PACS ICC close-out meeting, MPE, Garching, 12. Dez. (Schreiber)

#### Eingeladene Vorträge, Kolloquien:

Jorge Abreu-Vicente: »Improve the column densities and temperatures using Fourier-space of planck and herchel images«, Star Formation 2016 conference, Exeter University, 25. Aug. (Vortrag); »Molecular Cloud Structure at Galactic Scales«, Universität zu Köln, Köln, 21. Nov. (Kolloquium)  
 Coryn A. L. Bailer-Jones: »Inference with Gaia« Statistical Challenges in Modern Astronomy 6, Pittsburgh, USA, Juni (Vortrag); »The first Gaia data release«, Tagung der Astronomischen Gesellschaft, Bochum, 12.–16. Sep. (Vortrag)  
 Maria Bergemann: »Disks in Galaxies«, Munich Joint Conference, Garching, 11.–15. Juli (Vortrag); Oxford University, Department of Physics, Oxford, UK, 18. Okt. (Vortrag); Astrophysics Research Institute, Liverpool John Moores University, Liverpool, UK, 19. Okt. (Kolloquium); Meeting on Nuclear Astrophysics in Germany, Darmstadt, 15.–16. Nov. (Vortrag); Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Göttingen, 22. Nov. (Seminar)  
 Henrik Beuther: From stars to massive stars, Gainesville, Florida, USA, 5.–9. Apr. (Vortrag)  
 Bram Venemans: Osservatorio Astronomico di Brera, Milano, Italien, 6. Okt. (Kolloquium); Osservatorio

- Astronomico di Roma, Rom, Italien, 12. Okt. (Kolloquium)
- Roberto Decarli: »Physical Characteristics of Normal Galaxies at  $z < 2$ «, Leiden, Niederlande, 17.–21. Okt. (Vortrag)
- Christian Fendt: »How to make astrophysical jets? MHD simulations of the accretion-ejection structure«, Institut für Astronomie und Astrophysik, Tübingen, 11. Jan. (Kolloquium); »How to make astrophysical jets? Models of gravity«, RTG renewal conference, Oldenburg, 6. Okt. (Vortrag); »AGN jets & stellar jets – MHD simulations«, Workshop, Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, National Taiwan University, Taipei, Taiwan, 11. Nov. (Vortrag); »How to make astrophysical jets?«, Institute of Astronomy and Astrophysics, Academia Sinica, Taipei, Taiwan, 16. Nov. (Kolloquium)
- Wolfgang Gässler: Trends in Microscopy: »Grasping Higher Dimensions«, »Adaptive Optic in Astronomy«, Center for Regenerative Therapies Dresden – CRTD, Dresden, 22.–24. Feb. (Vortrag)
- Roland Gredel: KIT, Institut für physikalische Chemie, Karlsruhe, 22. Jan. (Vortrag); KIS, Freiburg, 28. Jan. (Kolloquium)
- Thomas Henning: University of Albanova, Stockholm, Schweden, 18. März (Kolloquium); Konferenz EPOS »The Early Phase of Star Formation«, Schloss Ringberg, 26. Juni–1. Juli (Vortrag); Symposium Max Planck Society, Valparaíso, Chile, 24. Juli (Vortrag); University of Hokkaido, Sapporo, Japan, 10. Aug. (Kolloquium); »Zeiss Anniversary Colloquium«, University of Jena, 10. Sep. (Kolloquium); Konferenz »Evolution of Chemical Complexity: From simple interstellar molecules to terrestrial biopolymers«, Libice, Tschechien, 12.–14. Sep. (Vortrag); Workshop »Japan-Germany Planet & Disk Workshop«, Ishigaki Island, Japan, 23. Sep.–1. Okt. (Vortrag); Workshop »Missing links from Disks to Planets«, Budapest, Ungarn, 10.–12. Okt. (Vortrag); Universität Rostock, 12. Nov. (Kolloquium); Konferenz ECLA – European Conference on Laboratory Astrophysics 2016: »Gas on the Rocks«, Madrid, Spanien, 20.–23. Nov. (Vortrag)
- Cornelia Jäger: Formation routes of cosmic dust, European Conference on Laboratory Astrophysics ECLA2016, »Gas on the Rocks«, Madrid, Spanien, 21.–25. Nov. (Vortrag); Experimental emergence of carbonaceous molecules: PAHs and fullerenes – International workshop on »The past and future of AstroPAH research«, Noordwijk, Niederlande, 30. Okt.–4. Nov. (Vortrag)
- Klaus Jäger: Rat Deutscher Sternwarten (RDS), Universität Bochum, Bochum, 12. Sep. (Vortrag)
- Nikolay Kacharov: »The spectroscopic survey of nuclear star clusters – differences and similarities to globular clusters«, Multiple Populations in Globular Clusters: Where do we stand?, Sexten, Italien, 25.–29. Juli (Vortrag); »The X-Shooter spectroscopic survey of nuclear star clusters in nearby galaxies«, Wilhelm und Else Heraeus-Seminar: Stellar aggregates over mass and spatial scales, Bad Honnef, 5.–9. Dez. (Vortrag); »The nuclear star clusters survey – kinematics and stellar populations from X-Shooter integrated light spectroscopy«, Kapteyn Astronomical Institute, Groningen, Niederlande, 9. Nov. (Kolloquium)
- Jouni Kainulainen: Early Phase of Star Formation, Schloss Ringberg, 27. Juni (Vortrag); Heidelberg-Harvard Meeting, MPIA, 8.–10. Nov. (Vortrag); Australian National University/Mt. Stromlo Observatory, Canberra, Australien, 7. Dez. (Kolloquium)
- Martin Kürster: »Communication and Data Visualization«, 1st CARMENES world-wide meeting and 5th CARMENES scientific meeting, Internationales Wissenschaftlichforum Heidelberg, 21.–24. Nov. (Vortrag)
- Ryan Leaman: IAU Symposium 321 »Formation and Evolution of Galaxy Outskirts«, Toledo, Spanien, 14.–18. März (Vortrag)
- Dietrich Lemke: »Max-Planck-Institut für Astronomie – Origins, Foundation, Development, External Relations«, Workshop »Opening new windows on the cosmos«, MPI für Wissenschaftsgeschichte, Berlin, Sep. (Vortrag)
- Luigi Mancini: XXIV Convegno Nazionale del GAD, Osservatorio Astronomico di Agerola, Agerola, Italien, 7.–8. Okt. (Vortrag); How to detect and characterize Exoplanets, Department of Physics, University of Rome Tor Vergata, Roma, Italien, 17. März (Kolloquium); Detection and characterization of Transiting Exoplanets, Astronomical Observatory of Naples, Napoli, Italien, 1. Dez. (Kolloquium)
- Marie Martig: What shapes galaxies? Baltimore, USA, 26. Apr. (Vortrag); Industrial revolution in Galactic astronomy, London, UK, 14. Okt. (Vortrag); Dark Matter Distribution in the Era of Gaia, Stockholm, Schweden, 17. Okt. (Vortrag); Liverpool John Moores University, Liverpool, UK, 2. Sep. (Kolloquium); Observatoire de Strasbourg, Straßburg, Frankreich, 9. Sep. (Kolloquium)
- Nicolas Martin: Pontificia Universidad Católica de Chile, Santiago, Chile, 21. Apr. (Kolloquium); AIP, Potsdam, 21. Juli (Kolloquium); Institute for Astronomy, University of Hawaii, Honolulu, USA, 18. Nov. (Kolloquium); IAP, Paris, Frankreich, 2. Dez. (Kolloquium); New York University in Abu Dhabi, Abu Dhabi, 14. Dez. (Kolloquium)
- Alessandra Mastrobuono-Battisti: »The mass assembly history of Nuclear Star Clusters«, GEPI-Observatoire de Paris, Frankreich, 2. Okt. (Kolloquium); »Star Clusters as Cosmic Laboratories for Astrophysics, Dynamics and Fundamental Physics«, Osservatorio astronomico di Roma, Italien, 27. Apr. (Kolloquium); »Simulating the mass assembly history of Nuclear star clusters: what we learn from the Milky Way center«, Königstuhl Colloquium, MPIA, 26. März (Kolloquium)

- Rosalie McGurk: The Changing Face of Galaxies: Uncovering Transformational Physics, Hobart, Tasmanien, 18.–23. Sep. (Vortrag)
- Klaus Meisenheimer: »CANIS – Calar Alto Northern Infrared Survey«, workshop »New instrumentation and Legacy Projects for Calar Alto«, Granada, Spanien 13.–4. Okt. (Vortrag)
- Paul Mollière: Center for Exoplanets and Habitable Worlds (CEHW Seminar), Penn State University, University Park, PA, 8. Sep. (Vortrag); Leiden Observatory, Leiden, Niederlande, 20. Sep. (Vortrag)
- Melissa Ness: »New formation of the Galactic bulge« University of Virginia, USA, Jan. (Kolloquium); »Stellar age map of the Milky Way«, University of Surrey, UK, Feb. (Kolloquium); »APOGEE and Gaia«, AIP, APOGEE Survey Review, 24.–28. Apr. (Vortrag); SDSS Annual Meeting, »Stellar age map of the Milky Way«, Madison, USA, 26.–29. Juni (Vortrag); Industrial Resolution in Galactic Archeology, »Data-driven spectroscopy«, Sesto, Italien, Juli (Vortrag); Gaia CU8 meeting, The Milky Way & Environment, »Overview of the Milky Way bulge«, Paris, Frankreich, Sep. (Vortrag)
- Nadine Neumayer: Kolloquium at the University of Surrey, Guildford, UK 10. März (Kolloquium); Physiks Kolloquium, Hochschule Mannheim, Mannheim, 9. Juni (Kolloquium); STSci Kolloquium, Baltimore, Maryland, USA, 9. Nov. (Kolloquium); Princeton University, Princeton, New Jersey, 10. Nov. (Vortrag); Stellar aggregates over mass and spatial scales, Bad Honnef, 5.–11. Dez. (Vortrag); Physics Colloquium at McMaster University, Hamilton, Ontario, Kanada (Kolloquium)
- Annalisa Pillepich: »Follow-up of wide-area X-ray surveys: Science, Facilities, Programs eROSITA/CAASTRO/4MOST workshop«, Schloss Ringberg, 25. Apr. (Vortrag); »Computational Galaxy Formation«, Schloss Ringberg, 12. Mai. (Vortrag); »Dwarf Galaxies Workshop«, ESO, Garching, 13. Nov. (Vortrag)
- Alexey Potapov: »Observing homemade comets: a being developed experiment«, Workshop on Laboratory Astrophysics: Interstellar Gas, Dust and Ice, Schloss Ringberg, Kreuth, 28.–30. Sep. (Vortrag); »Observing homemade comets: a being developed experiment«, PSF workshop 2016, Rothenburg ob der Tauber, 24.–26. Okt. (Vortrag)
- Hans-Walter Rix: »How the Milky Way's Disk was shaped?«, University of Michigan, Ann Arbor, USA, 7. Apr. (Kolloquium); »How to assemble the Galaxy«, University of Amsterdam, Amsterdam, Niederlande, 20 Apr. (Kolloquium); »The Evolution of the Galactic Disk«, Leiden University, Niederlande, 21. Apr. (Kolloquium), Miller Colloquium »The Milky Way as a model organism for galaxy formation«, University of California, Berkeley, USA, 6. Okt. (Kolloquium)
- Gaël Rouillé: Cold synthesis of carbon and silicate dust, International Conference on »Multiple Faces of Interstellar Dust«, Garching, 13.–16. Sep. (Vortrag)
- Eva Schinner: Next Generation Very Large Array (ngVLA) workshop, Kissimmee, Florida, USA, 4. Jan. (Vortrag); Joint Astronomical Kolloquium Heidelberg, Heidelberg, 19. Jan. (Kolloquium); The interplay between turbulence and micro-physical processes, EWASS Special Session S11, Athen, Griechenland, 4. Juli (Vortrag); Discs in Galaxies, Joint ESO/MPA/MPE/LMU/TUM conference, München, 11.–15. Juli (Vortrag); 3rd Harvard-Heidelberg meeting, Heidelberg, 8.–10. Nov. (Vortrag)
- Andreas Schreiber: Nagoya University, Laboratory of Theoretical Astronomy and Astrophysics, Nagoya, Japan, 3. Okt. (Kolloquium); Tokyo Institute of Technology, Earth-Life Science Institute, Tokyo, Japan, 23. Sep. (Kolloquium); ZARM, Bremen, 29. Juli (Kolloquium); Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Hannover, 5. Feb. (Kolloquium)
- Dima Semenov: »Astrochemistry as a diagnostic of Stars and Planet Formation«, Bordeaux, Frankreich, 12., 13. Jan. (Vorträge); »Half a Decade of ALMA«, Palm Springs, USA, 18.–24. Sep. (Vortrag); »Complex Organic Molecules in Space: Gas-Phase Routes and Isotopic Enrichment. First Annual Meeting of the WG1/WG4 COST Action 1401 Our Astrochemical History«, Pisa, Italien, 7.–8. März (Vortrag)
- Brani Sesar: University of Victoria, Kanada, 18. Feb. (Kolloquium)
- Anna Sippel: New York University Abu Dhabi, Abu Dhabi, 16. Nov. (Kolloquium); Centre for Astrophysics and Supercomputing, Swinburne University of Technology, Melbourne, Australien, 8. Dez. (Kolloquium)
- Daniele Sorini: Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, USA, 18. Nov. (Kolloquium); University at Zurich, Zürich, Schweiz, 20. Jan. (Kolloquium)
- Jonathan Stern: Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, Boston, USA, 22. Apr. (Vortrag); Canadian Institute for Theoretical Astrophysics, Toronto, Kanada, 21. Apr. (Vortrag); University of Chicago, Chicago, USA, 24. Mai (Vortrag); Northwestern University, Evanston, 23. Mai (Vortrag); Carnegie Observatories, Pasadena, 27. Mai (Vortrag); UC Berkeley, Berkeley, CA, USA, 26. Mai (Vortrag)
- Neven Tomicic: Talk at ISM-SPP Student Workshop 2016: »Feedback Processes and modelling of the ISM«, Freising, 15. März (Vortrag); Colloquium at Camino El Observatorio, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 13. Okt. (Kolloquium)
- Roy van Boekel: Max Planck-Chile Symposium, Cooperation Conference Millennium Science Initiative (ICM), Max-Planck Society In coordination with the Congress of the Future, Valparaíso, Chile, 21.–22. Jan. (Vortrag); »Exoplanets, bridging the gap between theory and observations«, Bad Honnef, 28. Nov.–1. Dez. (Vortrag)
- Glenn van de Ven: »MUSE Workshop«, Vitacura, Chile, Feb. (Talk); »The interplay between local and global processes in galaxies«, Cozumel, Mexico, 11.–

15. Apr. (Vortrag); »Dwarf Galaxies Workshop«, ESO, Garching, 10.–13. Okt. (Vortrag); Institute for Astronomy, University at Wien, Wien, Österreich, Nov. (Kolloquium)
- Arjen van der Wel: The Galaxy Life Cycle, Venedig, Italien, 24.–28. Nov. (Vortrag); In Situ View of Galaxy Formation, Schloss Ringberg, 31. Nov.–4. Dez. (Vortrag)
- Fabian Walter: The Reionization Epoch: New Insights and Future Prospects, Aspen Center for Physics, 7. März (Vortrag); Physical Characteristics of Normal Galaxies at  $z > 2$ , Leiden Observatory, 17. Okt. (Vortrag)
- Populärwissenschaftliche Vorträge:**
- Jorge Abreu-Vicente: »Astronomy for kids«, Elementary School PP Somascos, A Guarda, Spanien, 21. Jan.
- Markus Feldt: »Auf der Suche nach Geschwistern der Erde«, Kopernikus-Schule, Freigericht, 11. Nov.
- Bertrand Goldman: »Des planètes, en voulez-vous, en voilà!«, Jardin des Sciences, Université de Stasbourg, Le Repère, Schirmeck, Frankreich, 28. Apr.; »Des planètes de toutes sortes!«, Kids University, Jardin des Sciences, Université de Strasbourg, Straßburg, Frankreich, 2. Juni
- Thomas Henning: Caesarium, Bonn, 10. März; »Vom Venus-Transit zum Schwarzen Loch«, 250 Jahre Astronomie in der Kurpfalz, Schwetzingen, 19. März
- Stefan Hippler: »Adaptive Optiken für VLT und E-ELT«, Bundesweite WE-Heraeus-Lehrerfortbildung zur Astronomie, Haus der Astronomie, Heidelberg, 12. Nov.
- Felix Hormuth: »Garching im Weltall«, Stadtbücherei Garching, Garching, 15. Jan.; »Die Entdeckung von Asteroiden«, Technische Universität München, München, 30. Juni
- Klaus Jäger: »Die Jagd nach Licht – Wie Astronomen ihre fantastischen Bilder machen«, Pfalzmuseum für Naturkunde, Bad Dürkheim, 4. Feb.; »Science at MPIA«, International Summer Science School, MPIA, Heidelberg, 21. Juli; »Wissenschaft auf dem Königstuhl«, Heidelberg Laureate Forum, Haus der Astronomie, 21. Sep.; »Der lange Weg zu den Galaxien – Entfernungsbestimmungen im All«, POLLICHIA Herbsttagung, Pfalzmuseum für Naturkunde, Bad Dürkheim, 6. Nov.; »Groß und Klein – Heiß und Kalt – Rekorde im Kosmos«, Planetarium Mannheim, 7. Dez.
- Nikolay Kacharov: »The mysteries of globular clusters«, Astronomy Summer School »Beli Brezi«, Bulgarien, 4. Aug.; »Proxima – Origin of the chemical elements«, Astro-club Sliven, Bulgarien, 19. Dez.
- Martin Kürster: »Wie groß ist das Universum?«, Hochschule Mannheim, 10. Nov.; »Exoplaneten – beim Nachbarstern und in der Milchstraße«, Hohenstaufen-Gymnasium Kaiserslautern, 15. Nov.; »Wie groß ist das Universum?«, Volkssternwarte Darmstadt, 19. Nov.
- Dietrich Lemke: »Wie Max Wolf die Astronomie auf den Heidelberger Königstuhl brachte« Vortrag bei der Tagung »Vom Venus-Transit zum Schwarzen Loch, 250 Jahre Astronomie in der Kurpfalz«, Schwetzingen, März; »Am Anfang war der Urknall«, Vortrag beim Freundeskreis der Evangelischen Akademie Tutzing, Weiden, Okt.; »Weltraumteleskope – Entdeckungen im unsichtbaren Universum«, Vortrag im Planetarium Wolfsburg, Nov.
- Alessandra Mastrobuono-Battisti: »Traveling across the Universe: from the Big Bang to the Solar System«, Latina, Italien, 26. Apr.
- André Müller: »Das Very Large Telescope Interferometer am Paranal Observatorium in Chile«, Astronomische Gesellschaft Urania Zürich, Schweiz, 20. Mai; »Was macht eigentlich ein Astronom«, F+U Bilinguale Grundschule, Heidelberg, 21. Juli
- Hans-Walter Rix: Miller Seminar »Galaxy formation«, University of California, Berkeley, USA, 4. Okt.
- Eva Schinner: Sternentstehung in Galaxien, »Astronomie am Sonntagvormittag«, Haus der Astronomie, Heidelberg, 25. Sep.
- Wilma Trick: »Die dunkle Seite von Galaxien – ihre Entstehungsgeschichte und Enträtselung durch die Dynamik der Sterne«, Tag der Schulastronomie im Rahmen des MNU-Bundeskongresses 2016, Leipzig, 22. Feb.

## VI. 4 Lehre und Service

### Lehrveranstaltungen

#### Wintersemester 2015/2016:

- Tri L. Astraatmadja: Monte Carlo methods in astronomy, Southeast Asian Young Astronomers Collaboration (SEAYAC) 2015 Meeting, Krabi, Thailand (Workshop, Tutorial)
- Coryn A. L. Bailer-Jones, School »Good practices in astrostatistics«, IUCAA, Pune, Indien, January (Vorlesung)
- Henrik Beuther, Thomas Henning: Star Formation (Vorlesung)
- Henrik Beuther, Jouni Kainulainen: Star Formation (Seminar)
- Henrik Beuther, Eva Schinnerer, Ryan Leaman, Ludmila Carone: Königstuhl-Colloquium (zusammen mit Sabine Reffert, Stefan Wagner, ITA/LSW)
- Christian Fendt, Klaus Meisenheimer: Seminar on current research topics (IMPRS 1) (Oberseminar, mit Stefan Wagner, ITA/LSW)

Christian Fendt: Übungen zur Experimentalphysik I (Übungen)  
 Thomas Henning: Physics of Star Formation (Oberseminar)  
 Cornelia Jäger, Harald Mutschke: Laboratory Astrophysics (Friedrich-Schiller-Universität, Seminar)  
 Knud Jahnke, Hubert Klahr: Entstehung kosmischer Strukturen vom Urknall bis Heute (Bachelor-Pflichtseminar, zusammen mit Hans-Günter Ludwig, LSW)  
 Knud Jahnke: Allgemeine Relativitätstheorie: Schwarze Löcher, Haus der Astronomie (Lehrerfortbildung)  
 Viki Joergens: Protostars and Planets (Master-Pflichtseminar)  
 Nadine Neumayer: Experimentalphysik I (Übungen)  
 Adriana Pohl: Einführung in die Astronomie und Astrophysik I (Übungen)  
 Hans-Walter Rix: Experimentalphysik I (Übungsgruppe)  
 Hans-Walter Rix: Cosmology Block Course (Blockkurs, mit Matteo Maturi, ZAH)  
 Thomas Robitaille: Python: Programming for Scientists (Blockkurs)  
 Thomas Robitaille: Python workshop, Universität Wien (Vorlesung)  
 Thomas Robitaille: TIARA summer school in Numerical Astrophysics (Vorlesung)  
 Thomas Robitaille: SAMCSS summer school on Monte-Carlo Radiative Transfer (Vorlesung)  
 Neven Tomicic: Introduction for Astronomy and astrophysics (Übungen)

### Sommersemester 2016

Maria Bergemann: Stellar Astrophysics, MVAstro2 (Vorlesung, Übungen, Seminar)  
 Coryn A. L. Bailer-Jones: »38th International School for Young Astronomers«, Teheran, Iran, August 2016 (Vorlesung)  
 Henrik Beuther, Christian Fendt, Nadine Neumayer: IMPRS (Seminar)  
 Henrik Beuther, Eva Schinnerer, Ryan Leaman, Ludmila Carone: Königstuhl-Colloquium (zusammen mit Sabine Reffert, Stefan Wagner, ITA/LSW)  
 Christian Fendt, Henrik Beuther, Nadine Neumayer: Seminar on current research topics (IMPRS 2), (Forschungsseminar)  
 Christian Fendt: Experimentalphysik II (Übungen)  
 Thomas Henning: Physics of Star Formation (Oberseminar)  
 Cornelia Jäger, Harald Mutschke: Laboratory Astrophysics (Friedrich-Schiller-Universität, Vorlesung, Seminar)  
 Alessandra Mastrobuono-Battisti: The origin of Universe: from the Big Bang to the Solar System, Sapienza University of Rome, Latina, Italien, 26. April (öffentliche Vorlesung)  
 Hans-Walter Rix: Cosmology, 24. Aug.–1. Sep. (Blockkurs)  
 Michael Rugel: FP30 – CCD photometry in modern astronomy (Übungen)

### Wintersemester 2016/2017

Henrik Beuther, Eva Schinnerer, Ryan Leaman, Ludmila Carone: Königstuhl-Colloquium (zusammen mit Sabine Reffert, Stefan Wagner, ITA/LSW)  
 Coryn A. L. Bailer-Jones: Experimental Physics III – Quantum mechanics (Übungen)  
 Maria Bergemann: Stellar Atmospheres (Oberseminar)  
 Christian Fendt, Klaus Meisenheimer: Seminar on current research topics (IMPRS 1) (Oberseminar, mit Stefan Wagner, ITA/LSW)  
 Christian Fendt, Frank Bigiel: Interstellares Medium, Sternentstehung und -entwicklung (Bachelor-Pflichtseminar)  
 Thomas Henning: Physics of Star Formation (Oberseminar)  
 Stefan Hippler: Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene II: F36 Wellenfrontanalyse mit einem Shack-Hartmann-Sensor (Praktikum)  
 Cornelia Jäger, Harald Mutschke: Laboratory Astrophysics (Seminar)  
 Jouni Kainulainen: Sternentstehung – Star Formation (Master-Pflichtseminar)  
 Nico Krieger, Michael Rugel: Physikalisches Praktikum für Fortgeschrittene II: F30 Stellare CCD-Photometrie (Praktikum)  
 Nadine Neumayer: Bachelor-Seminar Meilensteine der Galaxienentwicklung (Seminar)  
 Dima Semenov: Holger Kreckel, Dima Semenov: Molecular Astrophysics: from Theory to Lab to Observations (Vorlesung)  
 Anna Sippel: An introduction to gravitational-wave astrophysics, 37th Heidelberg Physics Graduate Days (mit Pau Amaro-Seaone, Max-Planck-Institut für Gravitationsphysik, Kurs)  
 Glenn van de Ven: Galaxies block course (Vorlesung, Übungen, mit Thorsten Lisker, ARI/ZAH)

---

### Mitarbeit in Gremien

Coryn A. L. Bailer-Jones: Manager of the subconsortium »Astrophysical Parameters« (CU8) in the Gaia Data Processing and Analysis Consortium; Mitglied des Gaia Data Processing and Analysis Consortium Executive; Gutachter bei der Swiss National Science Foundation  
 Maria Bergemann: Mitglied des 4MOST Science Coordination Board; Mitglied des Committee for the 4MOST Scientific Technical Steering Committee; Gast der MPG Perspektivenkommission  
 Henrik Beuther: Institutsvertreter in der CPT-Sektion der MPG; Mitglied des DFG Fachkollegiums 311, Astrophysics; APEX TAC; Mitglied im Board der Patzer-Stiftung; Mitglied im Auswahlkomitee des Patzer-Preises; Gutachter bei ERC, DFG, ANR  
 Roy van Boekel: Mitglied des MPIA-STAC  
 Glenn van de Ven: Mitglied im Auswahlkomitee des Patzer-Preises

- Arjen van der Wel: Planungsmitglied beim HST TAC
- Christian Fendt: Gutachter und Mitglied beim DAAD, Auswahlkommission, International promovieren; Gutachter beim ERC; Gutachter bei der Alexander von Humboldt-Stiftung
- Wolfgang Gässler: Mitglied im 4MOST Scientific Technical Steering Committee
- Bertrand Goldman: Mitglied im ESO OPC Panel
- Roland Gredel: Bewertungsausschuss des Dutch astrochemistry network DAN-II; Mitglied des Opticon board; Mitglied des Telescope Directors Forum; Mitglied des Panels optical/ir facilities der RDS-Denkschrift
- Thomas Henning: Mitglied im Matisse Steering Committee; Mitglied in der MPI-Berufungskommission (MPI für Dynamik und Selbstorganisation); Mitglied in den Berufungskommissionen der ETH Zürich und der University of Valparaíso; Mitglied im National Cospar Committee; Mitglied im ESO Council; Mitglied im LBT Board; Mitglied im CAHA Executive Committee; Vorsitzender der LBTB-Beteiligungsgesellschaft; Mitglied im Evaluation Panel der University of Turku; Mitglied der Leopoldina und Obmann für Astronomie; Mitglied des Stern-Gerlach Prize Committee; Mitglied in verschiedenen PhD committees in Deutschland, Frankreich und den Niederlanden; Mitglied in der IAU Laboratory Astrophysics Commission; Mitglied in den WFIRST und LUVOIR Science Teams;
- Stefan Hippler: Gutachter für Promotionsstipendien 2016 der Carl-Zeiss-Stiftung
- Cornelia Jäger: Gutachterin bei der NWO; Mitglied des Gremiums des DFG Priority Program »The Physics of the Interstellar Medium«
- Mitglied des Strategiekomitees »Laboratory Astrophysics« des RDS
- Klaus Jäger: Mitglied im Vorstand der Astronomischen Gesellschaft (Amt des Pressereferenten); Vertreter der MPIA-Institutsleitung im RDS; Wissenschaftlicher Beirat der International Summer Science School Heidelberg (ISH); Pressearbeit LBTB; Mitglied im Arbeitskreis Wissenschaftsmarketing der Stadt Heidelberg; 2. Vorsitzender im Förderverein des »Haus der Astronomie«
- Martin Kürster: Gutachter für die Israel Science Foundation
- Dietrich Lemke: Mitglied des Critical Design Review (CDR) Boards für die Kalibrations-Einheit des NIPS-Instruments auf dem Euclid-Satelliten der ESA
- Hendrik Linz: Mitglied des IRAM Program Committee
- Nicolas Martin: Mitglied des Science Advisory Committee of the Canada-France-Hawaii Telescope; Mitglied des Canada-France-Hawaii Telescope French TAC; Mitglied der Science Advisory Group und des Science Team executive for the Maunakea Spectroscopic Explorer project; Mitglied des Pan-STARRS1 Science Council; Mitglied des Strasbourg University Board of Graduate Studies in Physics
- Klaus Meisenheimer: Beratung der DFG zum SFB »The Origin of Cosmic Rays«
- Melissa Ness: Co-Vorsitz im APOGEE-2 science Gremium.
- Nadine Neumayer: Mitglied im CFHT TAC; Mitglied des Organisationkomitees für die Heidelberg Physics Graduate Days
- Jörg-Uwe Pott: Vorsitz in der FP7-2/OPTICON Future of interferometry working group
- Hans-Ealter Rix: Mitglied der MPG Tenure Track Kommission und des Elisabeth-Schiemann-Kollegs; Mitglied des ESA SAC, des ESA-Euclid Science Team, des ESA-Euclid Board, des ESA NIRSPEC-Science Team, Mitglied des ESO Visiting Committee; Mitglied des STScI Visiting Committee; Mitglied des Nova Evaluation Boards; Mitglied des Alexander von Humboldt Auswahlgremiums; Mitglied des SDSS Science Advisory Boards; Mitglied bei etlichen internationalen Berufungskommissionen
- Gaël Rouillé: Gutachter bei der National Commission for Scientific Research
- Eva Schinner: Mitglied des ESO STC; Vorsitz des ESO STC sub-committee ESAC; Vorsitz des ALMA ASAC; Mitglied des RDS executive Committee; Mitglied des IAU Division H Steering Committee
- Dima Semenov: Co-Leiter der Working Group 2 »Icy grain surface chemistry«, EU COST Action 1401 »Our Astro-Chemical History«; Gutachter beim IdEx Bordeaux Post-Doctoral Fellowships program 2016, ANR
- Glenn van de Ven: Mitglied im Beirat des Calar Alto Legacy Integral Field Area (CALIFA) Survey für das MPIA
- Fabian Walter: Wissenschaftlicher Redakteur bei AJ/ApJ/ApJS; Mitglied im IRAM Science Advisory Committee; Mitglied im NRAO Users Committee; Mitglied im Science Advisory Committee for the Next Generation Very Large Array (ngVLA)
- Gabor Worseck: Mitglied des MPIA Strategic TAC (CAHA, LBT); Gutachter für HST Cycle 23 mid-cycle proposals (community-based)

## VI. 5 Weitere Aktivitäten am Institut

- Es wurden zwölf Pressemitteilungen veröffentlicht und zahlreiche Rundfunk- und Fernsehinterviews gegeben (Klaus Jäger, Markus Pössel, Axel M. Quetz und andere).
- Die 4-teilige Vortragsreihe Astronomie am Sonntag Vormittag im September und Oktober organisierte Markus Pössel.
- Für den Girls' & Boys' Day am 28. April am Institut war Sigrid Brümmer verantwortlich; viele Mitarbeiter haben sich beteiligt.
- Das Kuratorium des Instituts tagte am 28. November (Klaus Jäger und andere).
- Das Schülerpraktikum Astronomie vom 17.–21. Okt. organisierte und leitete Klaus Meisenheimer mit Unterstützung von Nadine Neumayer, Silvia Scheithauer und Klaus Jäger.
- Im Laufe des Jahres wurden insgesamt 720 Besucher in 26 Gruppen durch das Institut geführt (Axel M. Quetz, Markus Pössel, Andreas Schreiber, Wilma Trick und andere) sowie mehrere besondere Gruppen durch Klaus Jäger.
- Coryn A. L. Bailer-Jones war Ombudsmann des MPIA. Thales Gutcke und Rosalie McGurk bekleideten das Amt der Gleichstellungsbeauftragten.
- Ralf Launhardt bekleidet das Amt des Schwerbehinderten-Vertreters. Seine Vertreter sind Matthias Alter und Mary Madeline Dehen.
- Postdoc-Vertreter waren Jouni Kainulainen, Melissa Ness und Laura Zschaechner.
- Aida Ahmadi und Richard Teague übernahmen im April das Amt der Studentensprecher am MPIA von Simon Bihr, Emer Brady und Thales Gutcke.
- Maria Bergemann: Vertreter der Max Planck Research Group Leader in der Chemisch-Physikalisch-Technischen (CPT) Sektion der Max-Planck-Gesellschaft
- Henrik Beuther: Organisator der Patzer-Preis-Kolloquiums
- Thomas K. Henning: Herausgeber von *Sterne und Weltraum*, Mitglied in den Editorial Boards von *Living Reviews in Computational Astrophysics*, *Molecular Astrophysics* und des *Star Formation Newsletter*
- Ralf Hofferbert, Wolfgang Gässler: Organisatoren des AstroTechTalk
- Conelia Jäger: Informationsstand Laboratory Astrophysics at the FSU Jena am Tag der Physik der FSU Jena (18. März); Interview für den Podcast »...heute schon geforscht? von Welt der Physik, Folge Laborastrophysik (14. April); Gastherausgeber der special proceedings Planetary and Space Science Cosmic Dust VIII, 2016
- Klaus Jäger: Presse- und Kurzmitteilungen für MPIA, Astronomische Gesellschaft/RDS, LBTB; Mitwirkung am MPIA-Jahresbericht; Mitwirkung an PR- und Bildungsveranstaltungen des MPIA und HdA u.a. Girls' Day, Schülerpraktika, International Summer Science School Heidelberg; Interviews, Beratung, Beiträge für Fernsehen, Rundfunk und diverse Printmedien (z.B. ZDF, SWR, dpa, Berliner Morgenpost, Sterne und Weltraum); Experte für Astronomie beim SWR in der Fernsehsendung Kaffee oder Tee? mit Produktion und Konzeption von astronomischen Einspielfilmen und Grafiken; Konzeption, Produktion und Moderation der AstroViews von »Sterne und Weltraum« (zusammen mit Uwe Reichert, SuW) sowie von Videos und Musik für Planetarien, AG und weitere Medien; Filme zu Gaia für ESA/DPAC/Genius (gemeinsam mit Stefan Jordan/ARI) und für das Astronomische Institut der Ruhr-Universität Bochum zur AG-Tagung in Bochum; MPIA Career Day
- Dietrich Lemke: Associated Editor des Journal of Astronomical Instrumentation
- Alessandra Mastrobuono-Battisti: Organisation Astronomie bezogener Projekte für Mittelschulen (Cagliari, Italien)
- Rosalie McGurk: Beteiligung an der Heidelberg International School
- Nadine Neumayer: Organisation des Galaxy Coffee am MPIA
- Anna Sippel: Astronomie-AG Grundschule Eschelbronn (PI) Wöchentliche Doppelstunde, regulärer Schulunterricht (Jan.–Apr.)
- Hagen Walter: Informationsstand Laboratory Astrophysics at the FSU Jena am Tag der Physik der FSU Jena (18. März); Interview für den Podcast »...heute schon geforscht?« von Welt der Physik, Folge Laborastrophysik (14. April)

## VI. 6 Haus der Astronomie

**Leiter:** Markus Pössel

**Sekretariat:** Sigrid Brümmer

**Wissenschaftliche Mitarbeiter:** Natalie Fischer, Olaf Fischer, Carolin Liefke, Alexander Ludwig, Thomas Müller (seit 5/2016), Markus Nielbock, Kai Noeske (bis 12/2016), Matthias Penselin, Tobias Schultz (bis 8/2016), Cecilia Scorza, Jakob Staude

Im Bereich der Durchführung von Workshops für Kindergarten und Grundschule wurden wir von Frau Esther Kolar unterstützt.

**Studentische und wissenschaftliche Hilfskräfte:** Jan Eberhardt, Simon Kopf (seit 3/2016), Valentina Rohnacher (11/2016), Katja Reichert, Andreas Stöcklin (6/2016), Elisabeth Zepf (11/2016)

### Lehrveranstaltungen

#### Wintersemester 2015/2016:

N. Fischer: »Grundlagen der Astronomie für die Schule«, Pädagogische Hochschule Heidelberg  
O. Fischer, C. Liefke, M. Nielbock, M. Pössel und C. Scorza: »Einführung in die Astronomie für Lehramt an Gymnasien Physik« (Vorlesung, Übung und Praktikum), Universität Heidelberg

#### Sommersemester 2016:

O. Fischer und C. Liefke: »Moderne Großteleskope und Instrumente« (Seminar), Universität Heidelberg

#### Wintersemester 2016/2017:

N. Fischer: »Grundlagen der Astronomie für die Schule«, Pädagogische Hochschule Heidelberg  
O. Fischer und C. Liefke: »Das Leben der Sterne« (Seminar), Universität Heidelberg  
M. Pössel mit B.M. Schäfer: »Rote Riesen, Schwarze Löcher - woher wissen wir das alles? Methoden der Astronomie für Nicht-Physiker« (Vorlesung), Universität Heidelberg

### Mitarbeit in Gremien

Natalie Fischer ist Mitkoordinatorin des UNAWE-Programms in Deutschland.  
Carolin Liefke ist kooptiertes Vorstandsmitglied der Vereinigung der Sternfreunde (Aufgabenbereich Jugendarbeit und Schule) und Mitglied im Kuratorium der Reiff-Stiftung für Amateur- und Schulastronomie.  
Kai Noeske ist Gründungsmitglied der »Arbeitsgemeinschaft Fulldome« der Gesellschaft deutschsprachiger Planetarien.

Markus Pössel ist National Outreach Contact für Deutschland der IAU, Mitglied im Kuratorium der Reiff-Stiftung für Amateur- und Schulastronomie und Berater der Teilkommission Physik der Bildungscommission Informatik, Mathematik, Physik am Landesinstitut für Schulentwicklung, Stuttgart.

Cecilia Scorza ist deutsche Koordinatorin der »European Association for Astronomy Education«, deutsche Koordinatorin des EU-UNAWE-Programms, deutsche Koordinatorin des EUSPACE-AWE-Programms, Mitglied der IAU-Bildungscommission sowie der Schulkommission der Astronomischen Gesellschaft und des Office for Astronomy Development (OAD) der IAU als Beraterin für den Bereich Lateinamerika.

Jakob Staude ist Kurator der Reiff-Stiftung für Amateur- und Schulastronomie.

Das Haus der Astronomie ist deutscher Knoten des »ESO Science Outreach Network« (C. Liefke, M. Pössel).

### Veranstaltungen, Vorträge

#### HdA-Veranstaltungen und Kooperationsveranstaltungen im HdA

Vortragsreihe »Faszination Astronomie«, 13 Termine mit insgesamt 1224 Besuchern, 14.1.–8.12. (Organisation: C. Liefke)

Eine Familienveranstaltung (4.12.) und vier Sondervorträge mit insgesamt 445 Besuchern (M. Pössel, C. Liefke, N. Fischer, K. Noeske)

Girls' Day (HdA und Max-Planck-Institut für Astronomie, C. Liefke und M. Pössel) und Boys' Day (HdA, E. Kolar) 28.4.

HdA Space Days: Filmvorführung »Der Marsianer« mit einleitendem wissenschaftlichem Vortrag, Vortrag des ESA-Astronauten Dr. Reinhold Ewald, Bastelwettbewerb und Schüler-Workshop (M. Nielbock, C. Liefke, N. Fischer) 29.–31.5.

MPIA Summer Conference 2016 »Illuminating the Dark Ages: Quasars and Galaxies in the Reionization Epoch«, 27.6.–1.7. (B. Venemans u.a.)

Realschulwettbewerb »NANU« in Kooperation mit dem Kultusministerium Baden-Württemberg, 13.–15.7.

Fulldome-Workshop, 28.9.–29.9. (K. Noeske)

Physics of Star Formation: The Milky Way and Beyond (3rd Heidelberg-Harvard Meeting) 7.–9.11. (H. Beuther)

Gaia Data Access Meeting des Astronomischen Recheninstituts, 21.–24.11. (H. Heint)

SFNG Team Meeting, 14.–16.12. (E. Schinnerer)

LEGA-C Team meeting, 28.11.–2.12. (K. Noeske)

Gemeinsame Vortragsreihe »Astronomie am Sonntagvormittag« mit dem MPIA, 4 Termine, 25.9.–30.10., mit insgesamt 417 Besuchern (M. Pössel)

- Lehrerfortbildung »Kometen und Kosmologie: Aktuelles aus der Astronomie für die Schule für das Kultusministerium Baden-Württemberg«, 4.5. (M. Pössel)
- Bundesweite Lehrerfortbildung zur Astronomie der Wilhelm und Else Heraeus-Stiftung, 10.–12.11. (O. Fischer)
- Lehrerfortbildung für das Saarland, »Suchen und Finden von kosmischen Objekten«, 17.12. (O. Fischer)
- 12 kleinere wissenschaftliche Treffen mit insgesamt 200 Teilnehmern
- 6 Fortbildungen für angehende ErzieherInnen mit 128 Teilnehmern (N. Fischer)
- 1 Fortbildungen mit 5 Terminen für Kindergartenpädagogen, 2 Fortbildungen mit je 5 Terminen für Grundschulpädagogen in Kooperation mit der Forscherstation Heidelberg mit 16, 19 und 8 Teilnehmern (N. Fischer)
- 1 Workshop »Bilderbuch Sternenhimmel« mit 3 Terminen für Kindergarten- und Grundschulpädagogen in Kooperation mit der Forscherstation Heidelberg mit 16 Teilnehmern
- 48 Führungen durch HdA-Mitarbeiter, 39 Königstuhlführungen durch Studenten von MPIA und LSW sowie 76 durch den Förderverein der Landessternwarte mit insgesamt 3603 Teilnehmern
- 74 Workshops für Grundschule und Kindergarten mit insgesamt 1350 Kindern (N. Fischer, E. Kolar); 23 Familienworkshops mit insgesamt 300 Kindern (E. Kolar, S. Schwemmer); 15 Ferienprogramme und ähnliche Workshops mit insgesamt 190 Teilnehmern (N. Fischer, E. Kolar), 36 Workshops für die Klassenstufen 5–13 mit insgesamt 750 Schülern (O. Fischer, A. Ludwig, M. Nielbock, M. Penselin, T. Schultz, C. Scorza)
- 32 organisatorische und sonstige Treffen, hauptsächlich MPIA mit ca. 450 Teilnehmern
- Beiträge zu/ Beteiligung an externen Veranstaltungen**
- Lehrerfortbildungsprojekt Chile, Fortbildungen in Antofagasta, Santiago und Concepcion, insgesamt 292 Teilnehmer, 1.–26.1. (O. Fischer)
- Life Science Lab Heidelberg, Wochenendseminar »Kosmologie« in Landau/Pfalz, 16.–18.1. (M. Pössel mit B. M. Schäfer)
- Juniorakademie im Bildungscampus Heilbronn und im HdA (gemeinsam mit M. Nielbock), Thema: »Orientierung am Sternenhimmel und auf der Erde. Die irdische Beobachtung des Sternenhimmels und die himmlische Beobachtung der Erde«, 8.–12. 2. (O. Fischer, M. Nielbock)
- Junge Universität Heidelberg, Workshop »Eine Reise durch das Weltall – DAS Spiel!«, 27.2. (N. Fischer)
- Kinderuniversität der Academia Engiadina, Samedan, Schweiz, »Inseln des Lebens im Weltall«, 8.–9.4. (M. Nielbock)
- Informationsstand mit Bildungsmaterialien beim Kolloquium der Forscherstation Heidelberg, 26.4. (N. Fischer)
- Informationsstand mit Bildungsmaterialien und 3 Workshops beim Kongress »Experimentieren in der Grundschule« der Chemie-Verbände Baden-Württemberg in Kirchheim unter Teck, 11.5. (N. Fischer)
- Mobile Lehrerfortbildung in Brandenburg und Berlin, 6.–17.6. (O. Fischer, A. Stöcklin)
- Experimentierstation und Workshops für Grundschulkinder in Kooperation mit der Astronomieschule e.V. (N. Fischer [Organisation], E. Kolar) sowie Experimentierstation, Vorträge und Workshops für die Sekundarstufe (M. Nielbock [Organisation], O. Fischer, K. Hoffmann, C. Liefke, M. Nielbock, K. Noeske, M. Pössel, C. Scorza) bei den wissenschaftlichen Erlebnistagen »Explore Science« in Mannheim, 2016 unter dem Motto »Kosmos Mensch«, 15.–19.6.
- Astrokurs bei der Deutschen SchülerAkademie in Torgelow am See, Thema: »Die Sonne - Heimatstern und Lebensspenderin«, 16 Teilnehmer, 21.7.–6.8. (O. Fischer)
- Exkursion nach La Palma mit dem Naturwissenschaftlichen Labor am Friedrich-Koenig-Gymnasium Würzburg, 26.7.–2.8. (C. Liefke)
- Planetariumsveranstaltung und Diskussion im Rahmen des Aufbaukurs I: »Was ist Leben« der Tschira-Jugendakademie im Planetarium Mannheim, 5.8. und 5.9. (N. Fischer)
- Lehrerfortbildung in der Sternwarte Sonneberg, 24.–26.9. (O. Fischer)
- Leitung des Astronomiekurses bei der JuniorAkademie Baden-Württemberg in Adelsheim, 10.–12.6., 26.8.–8.9. und 14.–16.10. (C. Liefke mit D. Elsässer, Technische Universität Dortmund)
- Informationsstand des HdA auf der Astro-Messe AME in Villingen-Schwenningen, 10.9. (C. Liefke)
- Informationsstand mit Bildungsmaterialien bei dem Kongress »MINT Zukunft schaffen« in Mannheim, 23.9.–24.9. (N. Fischer)
- Vorstellung neuer astronomischer Bildungsmaterialien beim Space Education International Workshop in der Universität Leiden, Niederlande, 18.–22.10. (M. Nielbock, C. Scorza)
- Vorführung und Aktionen »Infrarotlicht und Treibhauseffekt« beim Internationalen Evangelischen Jugendklimagipfel, Lauterbach/Hessen, 17.10. (K. Noeske)
- Informationsstand des HdA auf dem Teachers' Day der Heidelberg School of Education, 8.11. (C. Liefke)
- Lehrerfortbildung für chilenische Lehrer, 1.–4.12. (C. Scorza)
- Zentrale Lehrerfortbildung »Blicke zum Sternhimmel« am Landesschulzentrum für Umwelterziehung in Adelsheim, 28.–30.11. (O. Fischer, C. Liefke)
- Workshops und Beobachtungsabend bei der Fortbildung »Lebensraum Nacht« für Umweltpädagogen im Rhöniversum Oberelsbach, 5.–6.12. (C. Liefke)

## Weitere Aktivitäten

Natalie Fischer: Entwicklung und Testen neuer Bildungsmaterialien anlässlich der Explore Science Mitmachausstellung, dem Workshop der Jungen Universität Heidelberg, 3 Lehrerberatungen, 25 Ausleihvorgänge der »Universe in a Box«.

Olaf Fischer: Betreuung einer Staatsexamensarbeit: Andreas Stöcklin: »Spektroskopie in den Naturwissenschaften«; Weiterbildung von 3 Lehrern des chil. Netzwerkes zur Astronomie 27.11.–10.12.

Carolin Liefke: Betreuung von zwei Schülern im Rahmen der Kooperationsphase des Hector-Seminars bei einem Projekt zur astronomischen Spektroskopie; wissenschaftliche Mentorentätigkeit in der Astrophysik-AG des Heidelberger Life-Science Labs; Betreuung von zwei Jugend-Forscht-Projekten über den Selbstbau eines Cherenkov-Teleskops (Regionalwettbewerb Nordbaden) und zur Auswertung von Exoplanetentransitlichtkurven (Regionalwettbewerb Südbaden); Betreuung von jeweils 7, 7 und 19 teilnehmenden Schulen aus Deutschland bei den Asteroidensuchkampagnen der International Astronomical Search Collaboration mit dem Pan-STARRS-Teleskop PS1 vom 1.2.–7.3., 31.3.–5.5. und 21.11.–20.12.; Betreuung der schulischen Nutzer der Faulkes/ LCOGT- und ROTAT-Remote-Teleskope; Teilnahme an der Kleinplanetentagung an der Archenhold-Sternwarte in Berlin; Betreuung von zwei BOGY-Praktika mit insgesamt 13 Schülern (4.–8.4., 24.–28.10.), Betreuung des Teleskop-Projekts der Offenen Jugendwerkstatt Karlsruhe (OJW).

Markus Nielbock: Betreuung einer Staatsexamensarbeit: Marco Johannes Türk: »Our Fragile Planet – Experimente für den Schulunterricht zum Thema Treibhauseffekt und Klimawandel« (mit O. Fischer); Entwicklung von diversen Unterrichtsmaterialien im Rahmen von EU Space Awareness (mit C. Scorza). Übersetzung der Artikel der Reihe »Space Scoop« der UNAWE- und EUSPACE-AWE-Netzwerke.

Kai Noeske: Erstellung einer Anleitung zur sicheren Sonnenfinsternis-Beobachtung für Spiegel Online (mit N. Fischer). Betreuung des Internationalen Sommerpraktikums des HdA (gleichzeitig Praktikum der International Summer Science School der Stadt Heidelberg): 8 Teilnehmer (27.7.–15.8.).

Markus Pössel: Betreuung von drei individuellen Praktika (25.1.–5.2., 26.9.–14.10., 12.12.16–10.3.17), Betreuung des Internationalen Sommerpraktikums des HdA (gleichzeitig Praktikum der International Summer Science School der Stadt Heidelberg): 9 Teilnehmer (25.7.–13.8.), davon drei Langzeitpraktikanten (26.6.–13.8.). Betreuung von zwei Staatsexamensarbeiten: Johannes Fröschle: »Bayesianische Analysen kosmologischer Himmelsdurchmusterungen«; Fabian Gebhardt: »Adaptive Optik: Grundlage der Leistungsfähigkeit heutiger Großteleskope« (mit M. Feldt, S. Hippler).

Cecilia Scorza: Betreuung von vier chilenischen Netzwerklehrern (29.11.–12.12.). Betreuung eines Praktikums zum Thema »Sternbilder im Vergleich«. Betreuung eines BOGY-Praktikums zum Thema »Unser zerbrechlicher Planet« mit drei Schülern, 31.10.–4.11. (mit M. Nielbock).

## Vorträge

Natalie Fischer: »Sternstunden« – Zwischenbericht im Rahmen der Kooperation zwischen Forscherstation und Haus der Astronomie, Forscherstation Heidelberg, 17.11.

Olaf Fischer: »Mond und Beobachtungsabend«, Schloss Osterburg Weida, 19.3.; »Mann im Mond«, Kinderuniversität Gera, 21.9.

Carolin Liefke: »Erdnahe Asteroiden«, Astronomische Vereinigung Karlsruhe, 11.1.; »Spacy fliegt zum Mond«, Kindervortrag an der Starkenburg-Sternwarte Heppenheim, 12.2.; »Erdnahe Asteroiden«, Bad Mergentheimer Sternennacht, 12.3.; »Neues aus dem Reich der extrasolaren Planeten«, Taubensuhler Astronomische Nächte, 2.4.; »Astronominnen«, Ausstellungseröffnung im Stadtmuseum Leonberg, 22.4.; »Spacys Reise über die Milchstrasse«, Kindervortrag an der Starkenburg-Sternwarte Heppenheim, 13.5.; »Fünf Jahre Asteroidensuche für Schüler mit Pan-STARRS«, Kleinplanetentagung in Berlin, 19.6.; »Neues aus dem Reich der extrasolaren Planeten«, Amateurastronomen Max Valier Bozen, 4.7.; »Neues aus dem Reich der extrasolaren Planeten«, Regiomontanus-Sternwarte Nürnberg, 12.11.; »Neues aus dem Reich der extrasolaren Planeten«, Volkssternwarte Würzburg, 19.9.; »Erdnahe Asteroiden«, Odilienschule Dillingen/Saar, 19.11.; »Die Wiege der Sterne – Sternentstehung im Orion und anderswo«, Planetarium Wolfsburg, 7.12.

Thomas Müller: »Relativistische Visualisierung – Eine Reise zu fernen Planeten«, AK Astronomie, Studium Generale an der Universität Stuttgart, 29.6.

Markus Nielbock: »Die Geschichte des Teleskops – von der Antike bis zur Neuzeit«, Engadiner Astronomiefreunde, Academia Engiadina, Samedan, Schweiz, 9.4.; »How to inspire children with space and astronomy«, SpaceUp, Institut für Raumfahrtssysteme, Universität Stuttgart, 17.7.;

»Discover the Space Awareness activities for your classroom«, EU Space Awareness webinar series, 15.12.

Kai Noeske: »Das Hubble-Weltraumteleskop: Unser neues Bild des Weltalls«, Sternenwelt Vogelsberg, Feldatal-Stumpertenrod, 7.1.; »Die Geschichte des Lichts im Universum«, Planetarium Mannheim, 6.4.; »Das Hubble-Weltraumteleskop: Unser neues Bild des Weltalls«, Freundeskreis der Himmelskunde Bad Salzschlirf, 11.6.; »Das Hubble-Weltraumteleskop: Unser neues Bild des Weltalls«, VHS Vogelsbergkreis, 16.9.; »Mitmach-Modelle aus Menschen«, Jahrestagung Astronomische Gesellschaft Bochum,

- 14.9.; »Die innere Uhr der Galaxien«, Heidelberg, 13.10.; »Die Geschichte des Lichts im Universum Sternenwelt Vogelsberg«, Feldatal-Stumpertenrod, 29.10.; »Wo kommen die Galaxien, Sterne und Planeten her?«, Gudrun-Pausewang-Grundschule Maar, 14.11.; »Die Geschichte des Lichts im Universum«, VHS Vogelsbergkreis, 2.12.; »Die Geschichte des Lichts im Universum«, Sternfreunde Rüsselsheim, 9.12.; »Der Weltraum: Warum finde ich den interessant?«, Schulzentrum Wascherde Lauterbach, 16.12.
- Matthias Penselin: Lehrerfortbildung »Orientierung am Sternenhimmel und Himmelsbeobachtung«, Bad Wildbad, 17.–19.10.; DPG-Fortbildungskurs »Licht, Bild und Farbe«, Bad Honnef, 21.–25.10.
- Markus Pössel: »100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie: Und was kommt als nächstes?«, Heppenheim, 19.1.; »100 Jahre Schwarze Löcher: Schwarzschilds folgenreiche Formel«, Vortragsreihe Faszination Astronomie, Haus der Astronomie, Heidelberg 17.2.; »Gravitational waves and how to detect them«, AstroTechTalk, MPIA Heidelberg, 11.3.; »Physik im Internet (und offline) anbieten und nutzen«, LEIFI-Querdenkertreffen, Dahlenburg-Ellringen, 31.3.; »Von Einstein zum Nachweis von Gravitationswellen«, MINT-Tagung des MNU-Landesverbands Franken, Nürnberg, 21.10.; »100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie: Und was kommt als nächstes?«, Vortragsreihe zur Ausstellung »Einstein inside«, Heidelberg, 2.11.; »100 Jahre Allgemeine Relativitätstheorie: Und was kommt als nächstes?«, Würzburg, 7.11.
- Cecilia Scorza: »Die Entstehung der Milchstraße«, Hildesheim, 29.2.; »Das Islam Heritage Kit«, Leiden/Niederlande, 14.4.; »Die Suche nach der zweiten Erde«, ESO, Garching, 1.7.; »Intercultural education and the Islam Heritage Kit«, Leiden/Niederlande, 19.10.
- Veröffentlichungen**
- Fischer, Olaf: »Die Sonne am Himmel – Betrachtungen mit dem Flaschenglobus« in »Wissenschaft in die Schulen!« 3/2016 in Bezug zu »Sonne aktuell« in Sterne und Weltraum 3/2016
- Fischer, Olaf; Quetz, Axel M.: »Die neue Welle« in »Wissenschaft in die Schulen Extra« 4/2016 in Bezug zu »Eine neue Ära der Astrophysik – Das Zeitalter der Gravitationswellen-Astronomie hat begonnen« in Sterne und Weltraum 4/2016, S. 24–35
- Fischer, Olaf: »Damit wir uns am Himmel nicht verirren – die drehbare Sternkarte« in Wissenschaft in die Schulen 5/2016 in Bezug zu »Aktuelles am Himmel: Der Himmel im Überblick« in Sterne und Weltraum 5/2016
- Fischer, Olaf; Krüger, Harald: »Vom Ursprung unserer Ozeane« in Wissenschaft in die Schulen Extra 9/2016 in Bezug zu »Alles klar zur Landung« in Sterne und Weltraum 9/2016, Sparte »Welt der Wissenschaft«, S.26ff
- Fröschle, Johannes: »Bayesianische Analysen kosmologischer Himmelsdurchmusterungen«. Staatsexamensarbeit Universität Heidelberg, Juni 2016
- Gebhart, Fabian: »Adaptive Optik: Grundlage der Leistungsfähigkeit heutiger Grossteleskope«. Staatsexamensarbeit Universität Heidelberg, Juni 2016
- Liefke, Carolin: »Der Heliowiewer – Sonnenbeobachtung mit dem Computer«, Wissenschaft in die Schulen, 10/2016
- Lippok, Nils et al. (inkl. Nielbock, Markus): »Earliest phases of star formation (EPoS). Dust temperature distributions in isolated starless cores« in Astronomy & Astrophysics, 592, A61
- Müller, Thomas G. et al. (inkl. Nielbock, Markus): »Far-infrared photometric observations of the outer planets and satellites with Herschel-PACS« in Astronomy & Astrophysics, 582, A109
- Penselin, Matthias: »Spektren fotografieren und auswerten«, RAABits Physik, 02/2016
- Pössel, Markus: »Street Lights as Standard Candles« in astroEDU 1535 (2016). [E-Print: arXiv:1702.02391]
- Pössel, Markus: »Modelle der Sternentstehung« in Sterne und Weltraum 8/2016, S. 28–39
- Pössel, Markus: »Gravitational Waves and Cosmic Expansion: Similarities and Differences« in K.–H. Lotze & Stefan Völker (eds.), Proceedings of the Heraeus Summer School »Astronomy from 4 Perspectives: Gravitational Wave Astronomy« (Jena, 31. August – 5. September 2015), S. 37–48. [E-Print: arXiv:1703.10051]
- Pössel, Markus: »Die erste globale Alterskarte unserer Milchstraße« in Sterne und Weltraum 5/2016, S. 28–33
- Scorza, Cecilia: »Das Unsichtbare sichtbar machen« in Unterricht Physik10/2016, S. 42
- Stöcklin, Andreas: »Spektroskopie in den Naturwissenschaften«. Staatsexamensarbeit Universität Heidelberg, September 2016
- Türk, Marco Johannes: »Our Fragile Planet – Experimente für den Schulunterricht zum Thema Treibhauseffekt und Klimawandel«. Staatsexamensarbeit Universität Heidelberg, September 2016
- Van der Wel, Arjen et al. (inkl. Kai Noeske): »The LEGA-C Survey: The Physics of Galaxies 7 Gyr ago« in The Messenger, 164, 36–40
- Van der Wel, Arjen et al. (inkl. Kai Noeske): »The VLT LEGA-C Spectroscopic Survey: The Physics of Galaxies at a Lookback Time of 7 Gyr« in The Astrophysical Journal Supplement Series vol. 223, Issue 2, article id. 29, 12pp

## VI.7 Veröffentlichungen

### In Zeitschriften mit Referee-System:

- Abbott, B.P., Abbott, R., Abbott, T.D., Abernathy, M.R., Acernese, F., Ackley, K., Adams, C., Adams, T., Addesso, P., Adhikari, R.X., Adya, V.B., Affeldt, C., Agathos, M., Agatsuma, K., Aggarwal, N., Aguiar, O.D., Aiello, L., Ain, A., Ajith, P., Allen, B., Allocca, A., Altin, P.A., Anderson, S.B., Anderson, W.G., Arai, K. et al.: Localization and broadband follow-up of the gravitational-wave transient GW150914. *The Astrophysical Journal Letters* 826, id. L13 (8 pp.) (2016).
- Abreu-Vicente, J., Ragan, S., Kainulainen, J., Henning, T., Beuther, H. and Johnston, K.: Giant molecular filaments in the Milky Way. II. The fourth Galactic quadrant. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A131 (20 pp) (2016).
- Akiyama, E., Hashimoto, J., baobabu Liu, H., i-hsiu Li, J., Bonnefoy, M., Dong, R., Hasegawa, Y., Henning, T., Sitko, M.L., Janson, M., Feldt, M., Wisniewski, J., Kudo, T., Kusakabe, N., Tsukagoshi, T., Momose, M., Muto, T., Taki, T., Kuzuhara, M., Satoshi, M., Takami, M., Ohashi, N., Grady, C.A., Kwon, J., Thalmann, C. et al.: Spiral structure and differential dust size distribution in the LKHa 330 disk. *The Astronomical Journal* 152, id. 222 (7 pp) (2016).
- Amarsi, A.M., Lind, K., Asplund, M., Barklem, P.S. and Collet, R.: Non-LTE line formation of Fe in late-type stars - III. 3D non-LTE analysis of metal-poor stars. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1518-1533 (2016).
- Andrews, S.M., Wilner, D.J., Zhu, Z., Birnstiel, T., Carpenter, J.M., Pérez, L.M., Bai, X.-N., Öberg, K.I., Hughes, A.M., Isella, A. and Ricci, L.: Ringed substructure and a gap at 1 au in the nearest protoplanetary disk. *The Astrophysical Journal Letters* 820, id. L40 (5 pp) (2016).
- Anglada-Escudé, G., Amado, P.J., Barnes, J., Berdiñas, Z.M., Butler, R.P., Coleman, G.A.L., de La Cueva, I., Dreizler, S., Endl, M., Giesers, B., Jeffers, S.V., Jenkins, J.S., Jones, H.R.A., Kiraga, M., Kürster, M., López-González, M.J., Marvin, C.J., Morales, N., Morin, J., Nelson, R.P., Ortiz, J.L., Ofir, A., Paardekooper, S.-J., Reiners, A., Rodríguez, E. et al.: A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri. *Nature* 536, 437-440 (2016).
- Apai, D., Kasper, M., Skemer, A., Hanson, J.R., Lagrange, A.-M., Biller, B.A., Bonnefoy, M., Buenzli, E. and Vigan, A.: High-cadence, high-contrast imaging for exoplanet mapping: Observations of the HR 8799 planets with VLT/SPHERE satellite-spot-corrected relative photometry. *The Astrophysical Journal* 820, id. 40 (12 pp) (2016).
- Aravena, M., Decarli, R., Walter, F., Bouwens, R., Oesch, P.A., Carilli, C.L., Bauer, F.E., Da Cunha, E., Daddi, E., González-López, J., Ivison, R.J., Riechers, D.A., Smail, I., Swinbank, A.M., Weiss, A., Anguita, T., Bacon, R., Bell, E., Bertoldi, F., Cortes, P., Cox, P., Hodge, J., Ibar, E., Inami, H., Infante, L. et al.: The ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Search for [CII] line and dust emission in 6. *The Astrophysical Journal* 833, id. 71 (22 pp) (2016).
- Aravena, M., Decarli, R., Walter, F., Da Cunha, E., Bauer, F.E., Carilli, C.L., Daddi, E., Elbaz, D., Ivison, R.J., Riechers, D.A., Smail, I., Swinbank, A.M., Weiss, A., Anguita, T., Assef, R.J., Bell, E., Bertoldi, F., Bacon, R., Bouwens, R., Cortes, P., Cox, P., González-López, J., Hodge, J., Ibar, E., Inami, H. et al.: The ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Continuum number counts, resolved 1.2 mm extragalactic background, and properties of the faintest dusty star-forming galaxies. *The Astrophysical Journal* 833, id. 68 (20 pp) (2016).
- Arellano Ferro, A., Bramich, D.M., Figuera Jaimés, R., Giridhar, S., Kains, N., Kuppuswamy, K., Jørgensen, U.G., Alsubai, K.A., Andersen, J.M., Bozza, V., Browne, P., Calchi Novati, S., Damerdjij, Y., Diehl, C., Dominik, M., Dreizler, S., Elyiv, A., Giannini, E., Harpsøe, K., Hessman, F.V., Hinse, T.C., Hundertmark, M., Juncher, D., Kerins, E., Korhonen, H. et al.: Erratum: A detailed census of variable stars in the globular cluster NGC 6333 (M9) from CCD differential photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 1188-1189 (2016).
- Arias, V., Guglielmo, M., Fernando, N., Lewis, G.F., Bland-Hawthorn, J., Bate, N.F., Conn, A., Irwin, M.J., Ferguson, A.M.N., Ibata, R.A., McConnachie, A.W. and Martin, N.: NGC 147, NGC 185 and CassII: a genetic approach to orbital properties, star formation and tidal debris. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 1654-1665 (2016).
- Arrigoni Battaia, F., Hennawi, J.F., Cantalupo, S. and Prochaska, J.X.: The stacked Ly $\alpha$  emission profile from the circum-galactic medium of  $z \sim 2$  quasars. *The Astrophysical Journal* 829, id. 3 (21 pp) (2016).
- Arulanantham, N.A., Herbst, W., Cody, A.M., Stauffer, J.R., Rebull, L.M., Agol, E., Windemuth, D., Marengo, M., Winn, J.N., Hamilton, C.M., Mundt, R., Johns-Krull, C.M. and Gutermuth, R.A.: Seeing through the ring: Near-infrared photometry of V582 Mon (KH 15D). *The Astronomical Journal* 151, id. 90 (16 pp) (2016).
- Asensio-Torres, R., Janson, M., Hashimoto, J., Thalmann, C., Currie, T., Buenzli, E., Kudo, T., Kuzuhara, M., Kusakabe, N., Abe, L., Akiyama, E., Brandner, W., Brandt, T.D., Carson, J., Egner, S., Feldt, M., Goto, M., Grady, C., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S., Henning, T., Hodapp, K., Ishii, M. et al.: Polarimetry and flux distribution in the debris disk around HD 32297. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A73 (10 pp) (2016).
- Astraatmadja, T.L. and Bailer-Jones, C.A.L.: Estimating distances from parallaxes. II. Performance of Bayesian distance Estimators on a Gaia-like catalogue. *The Astrophysical Journal* 832, id. 137 (26 pp) (2016).
- Astraatmadja, T.L. and Bailer-Jones, C.A.L.: Estimating distances from parallaxes. III. Distances of two million stars in the Gaia DR1 catalogue. *The Astrophysical Journal* 833, id. 119 (6 pp) (2016).
- Baines, E.K., Döllinger, M.P., Guenther, E.W., Hatzes, A.P., Hrudkova, M. and van Belle, G.T.: Spectroscopic and interferometric measurements of nine K giant stars. *The Astronomical Journal* 152, id. 66 (8 pp) (2016).
- Baldwin, A.T., Watkins, L.L., van der Marel, R.P., Bianchini, P., Bellini, A. and Anderson, J.: Hubble Space Telescope Proper Motion (HSTPROMO) catalogs of Galactic globular clusters. IV. Kinematic profiles and average masses of blue straggler stars. *The Astrophysical Journal* 827, id. 12 (12 pp) (2016).

- Balog, Z., Siegler, N., Rieke, G.H., Kiss, L.L., Muzerolle, J., Gutermuth, R.A., Bell, C.P.M., Vinkó, J., Su, K.Y.L., Young, E.T. and Gáspár, A.: Protoplanetary and transitional disks in the open stellar cluster IC 2395. *The Astrophysical Journal* 832, id. 87 (17 pp) (2016).
- Bañados, E., Venemans, B.P., Decarli, R., Farina, E.P., Mazzucchelli, C., Walter, F., Fan, X., Stern, D., Schlafly, E., Chambers, K.C., Rix, H.-W., Jiang, L., McGreer, I., Simcoe, R., Wang, F., Yang, J., Morganson, E., De Rosa, G., Greiner, J., Baloković, M., Burgett, W.S., Cooper, T., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K.W. et al.: The Pan-STARRS1 distant  $z > 5.6$  quasar survey: More than 100 quasars within the first Gyr of the universe. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 227, id. 11 (27 pp) (2016).
- Baran, N., Smolčić, V., Milaković, D., Novak, M., Delhaize, J., Gastaldello, F., Ramos-Ceja, M.E., Pacaud, F., Bourke, S., Carilli, C.L., Etori, S., Hallinan, G., Horellou, C., Koulouridis, E., Chiappetti, L., Miettinen, O., Melnyk, O., Mooley, K., Pierre, M., Pompei, E. and Schinnerer, E.: The XXL Survey. IX. Optical overdensity and radio continuum analysis of a supercluster at  $z = 0.43$ . *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A8 (15 pp) (2016).
- Baron, D., Stern, J., Poznanski, D. and Netzer, H.: Evidence that most type-I AGNs are reddened by dust in the host ISM. *The Astrophysical Journal* 832, id. 8 (16 pp) (2016).
- Baruteau, C., Bai, X., Mordasini, C. and Mollière, P.: Formation, orbital and internal evolutions of young planetary systems. *Space Science Reviews* 205, 77-124 (2016).
- Bastian, N., Niederhofer, F., Kozhurina-Platais, V., Salaris, M., Larsen, S., Cabrera-Ziri, I., Cordero, M., Ekström, S., Geisler, D., Georgy, C., Hilker, M., Kacharov, N., Li, C., Mackey, D., Mucciarelli, A. and Platais, I.: A young cluster with an extended main-sequence turnoff: confirmation of a prediction of the stellar rotation scenario. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, L20-L24 (2016).
- Beccari, G., Bellazzini, M., Battaglia, G., Ibata, R., Martin, N., Testa, V., Cignoni, M. and Correnti, M.: The StEllar Counterparts of COmpact high velocity clouds (SECCO) survey. II. Sensitivity of the survey and the atlas of synthetic dwarf galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A56 (18 pp) (2016).
- Bekeraïté, S., Walcher, C.J., Falcón-Barroso, J., Garcia Lorenzo, B., Lyubenova, M., Sánchez, S.F., Spekkens, K., van de Ven, G., Wisotzki, L., Ziegler, B., Aguerrí, J.A.L., Barrera-Ballesteros, J., Bland-Hawthorn, J., Catalán-Torrecilla, C. and Garcia-Benito, R.: Space density distribution of galaxies in the absolute magnitude - rotation velocity plane: a volume-complete Tully-Fisher relation from CALIFA stellar kinematics. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A114 (16 pp) (2016).
- Bekeraïté, S., Walcher, C.J., Wisotzki, L., Croton, D.J., Falcón-Barroso, J., Lyubenova, M., Obreschkow, D., Sánchez, S.F., Spekkens, K., Torrey, P., van de Ven, G., Zwaan, M.A., Ascasibar, Y., Bland-Hawthorn, J., González Delgado, R., Husemann, B., Marino, R.A., Vogelsberger, M. and Ziegler, B.: The CALIFA and HIPASS circular velocity function for all morphological galaxy types. *The Astrophysical Journal Letters* 827, id. L36 (6 pp) (2016).
- Bellm, E.C., Kaplan, D.L., Breton, R.P., Phinney, E.S., Bhalerao, V.B., Camilo, F., Dahal, S., Djorgovski, S.G., Drake, A.J., Hessels, J.W.T., Laher, R.R., Levitan, D.B., Lewis, F., Mahabal, A.A., Ofek, E.O., Prince, T.A., Ransom, S.M., Roberts, M.S.E., Russell, D.M., Sesar, B., Surace, J.A. and Tang, S.: Properties and evolution of the redback millisecond pulsar binary PSR J2129-0429. *The Astrophysical Journal* 816, id. 74 (12 pp) (2016).
- Bennett, D.P., Rhie, S.H., Udalski, A., Gould, A., Tsapras, Y., Kubas, D., Bond, I.A., Greenhill, J., Cassan, A., Rattenbury, N.J., Boyajian, T.S., Luhn, J., Penny, M.T., Anderson, J., Abe, F., Bhattacharya, A., Botzler, C.S., Donachie, M., Freeman, M., Fukui, A., Hirao, Y., Itow, Y., Koshimoto, N., Li, M.C.A., Ling, C.H. et al.: The first circumbinary planet found by microlensing: OGLE-2007-BLG-349L(AB)c. *The Astronomical Journal* 152, id. 125 (14 pp) (2016).
- Benz, A.O., Bruderer, S., van Dishoeck, E.F., Melchior, M., Wampfler, S.F., van der Tak, F., Goicoechea, J.R., Indriolo, N., Kristensen, L.E., Lis, D.C., Mottram, J.C., Bergin, E.A., Caselli, P., Herpin, F., Hogerheijde, M.R., Johnstone, D., Liseau, R., Nisini, B., Tafalla, M., Visser, R. and Wyrowski, F.: Water in star-forming regions with Herschel (WISH). VI. Constraints on UV and X-ray irradiation from a survey of hydrides in low- to high-mass young stellar objects. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A105 (38 pp) (2016).
- Berg, T.A.M., Ellison, S.L., Sánchez-Ramírez, R., Prochaska, J.X., Lopez, S., D'Odorico, V., Becker, G., Christensen, L., Cupani, G., Denney, K. and Worseck, G.: Chemical abundances of the damped Lyman  $\alpha$  systems in the XQ-100 survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 3021-3037 (2016).
- Bergemann, M., Serenelli, A., Schönrich, R., Ruchti, G., Korn, A., Hekker, S., Kovalev, M., Mashonkina, L., Gilmore, G., Randich, S., Asplund, M., Rix, H.-W., Casey, A.R., Jofre, P., Pancino, E., Recio-Blanco, A., de Laverny, P., Smiljanic, R., Tautvaisiene, G., Bayo, A., Lewis, J., Koposov, S., Hourihane, A., Worley, C., Morbidelli, L. et al.: The Gaia-ESO Survey: Hydrogen lines in red giants directly trace stellar mass. *Astronomy and Astrophysics* 594, id. A120 (20 pp) (2016).
- Bergfors, C., Brandner, W., Bonnefoy, M., Schlieder, J., Janson, M., Henning, T. and Chauvin, G.: Characterization of close visual binaries from the AstraLux Large M Dwarf Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 2576-2585 (2016).
- Berghea, C.T., Makarov, V.V., Frouard, J., Hennessy, G.S., Dorland, B.N., Veillette, D.R., Dudik, R.P., Magnier, E.A., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Denneau, L., Flewelling, H., Kaiser, N., Tonry, J.L., Wainscoat, R.J. and Sesar, B.: A global astrometric solution for Pan-STARRS referenced to ICRF2. *The Astronomical Journal* 152, id. 53 (16 pp) (2016).
- Bernard, E.J., Ferguson, A.M.N., Schlafly, E.F., Martin, N.F., Rix, H.-W., Bell, E.F., Finkbeiner, D.P., Goldman, B., Martínez-Delgado, D., Sesar, B., Wyse, R.F.G., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Draper, P.W., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Kudritzki, R.-P., Magnier, E.A., Metcalfe, N., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: A synoptic map of halo substructures from the Pan-STARRS1  $3\pi$  Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1759-1768 (2016).
- Bétrémieux, Y.: Effects of refraction on transmission spectra of gas giants: decrease of the Rayleigh scattering slope and breaking of retrieval degeneracies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 4051-4060 (2016).
- Beuther, H., Bihl, S., Rugel, M., Johnston, K., Wang, Y., Walter, F., Brunthaler, A., Walsh, A.J., Ott, J., Stil, J., Henning, T., Schierhuber, T., Kainulainen, J., Heyer, M., Goldsmith, P.F., Anderson, L.D., Longmore, S.N., Klessen, R.S., Glover, S.C.O., Urquhart, J.S., Plume, R., Ragan, S.E., Schneider, N., McClure-Griffiths, N.M., Menten, K.M. et al.: The HI/OH/Recombination line survey of the

- inner Milky Way (THOR). Survey overview and data release 1. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A32 (21 pp) (2016).
- Beygu, B., Kreckel, K., van der Hulst, J.M., Jarrett, T.H., Pelletier, R., van de Weygaert, R., van Gorkom, J.H. and Aragon-Calvo, M.A.: The void galaxy survey: Star formation properties. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 394-409 (2016).
- Bianchini, P., Norris, M.A., van de Ven, G., Schinnerer, E., Bellini, A., van der Marel, R.P., Watkins, L.L. and Anderson, J.: The effect of unresolved binaries on globular cluster proper-motion dispersion profiles. *The Astrophysical Journal Letters* 820, id. L22 (7 pp) (2016).
- Bianchini, P., van de Ven, G., Norris, M.A., Schinnerer, E. and Varri, A.L.: A novel look at energy equipartition in globular clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 3644-3654 (2016).
- Bielby, R.M., Tummuangpak, P., Shanks, T., Francke, H., Crighton, N.H.M., Bañados, E., González-López, J., Infante, L. and Orsi, A.: The VLT LBG redshift survey - V. Characterizing the  $z = 3.1$  Lyman  $\alpha$  emitter population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 4061-4080 (2016).
- Bigiel, F., Leroy, A.K., Jiménez-Donaire, M.J., Pety, J., Usero, A., Cormier, D., Bolatto, A., Garcia-Burillo, S., Colombo, D., González-García, M., Hughes, A., Kepley, A.A., Kramer, C., Sandstrom, K., Schinnerer, E., Schrubba, A., Schuster, K., Tomićic, N. and Zschaechner, L.: The EMPIRE Survey: Systematic variations in the dense gas fraction and star formation efficiency from full-disk mapping of M51. *The Astrophysical Journal Letters* 822, id. L26 (7 pp) (2016).
- Bihl, S., Johnston, K.G., Beuther, H., Anderson, L.D., Ott, J., Rugel, M., Bigiel, F., Brunthaler, A., Glover, S.C.O., Henning, T., Heyer, M.H., Klessen, R.S., Linz, H., Longmore, S.N., McClure-Griffiths, N.M., Menten, K.M., Plume, R., Schierhuber, T., Shanahan, R., Stil, J.M., Urquhart, J.S. and Walsh, A.J.: Continuum sources from the THOR survey between 1 and 2 GHz. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A97 (24 pp) (2016).
- Bimstiel, T., Fang, M. and Johansen, A.: Dust evolution and the formation of planetesimals. *Space Science Reviews* 205, 41-75 (2016).
- Biscani, F. and Izzo, D.: A complete and explicit solution to the three-dimensional problem of two fixed centres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 3480-3493 (2016).
- Boardman, N.F., Weijmans, A.-M., van den Bosch, R., Zhu, L., Yildirim, A., van de Ven, G., Cappellari, M., de Zeeuw, T., Emsellem, E., Krajnović, D. and Naab, T.: The low dark matter content of the lenticular galaxy NGC 3998. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 3029-3043 (2016).
- Boley, P.A., Kraus, S., de Wit, W.-J., Linz, H., van Boekel, R., Henning, T., Lacour, S., Monnier, J.D., Stecklum, B. and Tuthill, P.G.: A multi-wavelength interferometric study of the massive young stellar object IRAS 13481-6124. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A78 (16 pp) (2016).
- Bonnefoy, M., Zurlo, A., Baudino, J.L., Lucas, P., Mesa, D., Maire, A.-L., Vigan, A., Galicher, R., Homeier, D., Marocco, F., Gratton, R., Chauvin, G., Allard, F., Desidera, S., Kasper, M., Moutou, C., Lagrange, A.-M., Antichi, J., Baruffolo, A., Baudrand, J., Beuzit, J.-L., Boccaletti, A., Cantalloube, F., Carillet, M., Charton, J. et al.: First light of the VLT planet finder SPHERE. IV. Physical and chemical properties of the planets around HR8799. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A58 (15 pp) (2016).
- Borisova, E., Lilly, S.J., Cantalupo, S., Prochaska, J.X., Rakic, O. and Worseck, G.: Constraining the lifetime and opening angle of quasars using fluorescent Lyman  $\alpha$  emission: The case of Q0420-388. *The Astrophysical Journal* 830, id. 120 (15 pp) (2016).
- Borissova, J., Ramírez Alegría, S., Alonso, J., Lucas, P.W., Kurtev, R., Medina, N., Navarro, C., Kuhn, M., Gromadzki, M., Retamales, G., Fernandez, M.A., Agurto-Gangas, C., Chené, A.-N., Minniti, D., Contreras Pena, C., Catelan, M., Decany, I., Thompson, M.A., Morales, E.F.E. and Amigo, P.: Young stellar clusters containing massive young stellar objects in the VVV Survey. *The Astronomical Journal* 152, id. 74 (23 pp) (2016).
- Bouwens, R.J., Aravena, M., Decarli, R., Walter, F., da Cunha, E., Labbé, I., Bauer, F.E., Bertoldi, F., Carilli, C., Chapman, S., Daddi, E., Hodge, J., Ivison, R.J., Karim, A., Le Fevre, O., Magnelli, B., Ota, K., Riechers, D., Smail, I.R., van der Werf, P., Weiss, A., Cox, P., Elbaz, D., Gonzalez-Lopez, J., Infante, L. et al.: ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: The infrared excess of UV-selected  $z = 2-10$  galaxies as a function of UV-continuum slope and stellar mass. *The Astrophysical Journal* 833, id. 72 (32 pp) (2016).
- Bovy, J., Rix, H.-W., Green, G.M., Schlafly, E.F. and Finkbeiner, D.P.: On galactic density modeling in the presence of dust extinction. *The Astrophysical Journal* 818, id. 130 (11 pp) (2016).
- Bovy, J., Rix, H.-W., Schlafly, E.F., Nidever, D.L., Holtzman, J.A., Shetrone, M. and Beers, T.C.: The stellar population structure of the Galactic disk. *The Astrophysical Journal* 823, id. 30 (20 pp) (2016).
- Bozza, V., Shvartzvald, Y., Udalski, A., Calchi Novati, S., Bond, I.A., Han, C., Hundertmark, M., Poleski, R., Pawlak, M., Szymański, M.K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Soszyński, I., Ulaczyk, K., group, O., and Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Fausnaugh, M., Gaudi, B.S., Gould, A. et al.: Spitzer observations of OGLE-2015-BLG-1212 reveal a new path toward breaking strong microlens degeneracies. *The Astrophysical Journal* 820, id. 79 (10 pp) (2016).
- Brahm, R., Jordán, A., Bakos, G.Á., Penev, K., Espinoza, N., Rabus, M., Hartman, J.D., Bayliss, D., Ciceri, S., Zhou, G., Mancini, L., Tan, T.G., de Val-Borro, M., Bhatti, W., Csabry, Z., Bento, J., Henning, T., Schmidt, B., Rojas, F., Suc, V., Lázár, J., Papp, I. and Sári, P.: HATS-17b: A Transiting compact warm Jupiter in a 16.3 day circular orbit. *The Astronomical Journal* 151, id. 89 (11 pp) (2016).
- Brammer, G.B., Marchesini, D., Labbé, I., Spitler, L., Lange-Vagle, D., Barker, E.A., Tanaka, M., Fontana, A., Galametz, A., Ferré-Mateu, A., Kodama, T., Lundgren, B., Martis, N., Muzzin, A., Stefanon, M., Toft, S., van der Wel, A., Vulcani, B. and Whitaker, K.E.: Ultra-deep K S-band imaging of the Hubble Frontier Fields. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 226, id. 6 (11 pp) (2016).
- Brieva, A.C., Gredel, R., Jäger, C., Huisken, F. and Henning, T.: C60 as a probe for astrophysical environments. *The Astrophysical Journal* 826, id. 122 (11 pp) (2016).
- Brook, C.B., Santos-Santos, I. and Stinson, G.: The different baryonic Tully-Fisher relations at low masses. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 638-645 (2016).
- Brown, A.G.A., Vallenari, A., Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Mignard, F., Drimmel, R., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C.A.L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D.W., Eyer, L., Jansen, F., Jordi, C., Katz, D., Klioner, S.A., Lammers, U., Lindegren, L., Luri, X., O'Mullane,

- W., Panem, C., Pourbaix, D., Randich, S., Sartoretti, P., Siddiqui, H.I. et al.: Gaia data release 1. Summary of the astrometric, photometric, and survey properties. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A2 (23 pp) (2016).
- Buck, T., Dutton, A.A. and Macciò, A.V.: Simulated  $\Lambda$ CDM analogues of the thin plane of satellites around the Andromeda galaxy are not kinematically coherent structures. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 4348-4365 (2016).
- Butsky, I., Macciò, A.V., Dutton, A.A., Wang, L., Obreja, A., Stinson, G.S., Penzo, C., Kang, X., Keller, B.W. and Wadsley, J.: NIHAO project II: halo shape, phase-space density and velocity distribution of dark matter in galaxy formation simulations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 663-680 (2016).
- Caldú-Primo, A. and Schruha, A.: Molecular gas velocity dispersions in the Andromeda galaxy. *The Astronomical Journal* 151, id. 34 (17 pp) (2016).
- Calistro Rivera, G., Lusso, E., Hennawi, J.F. and Hogg, D.W.: AGNfitter: A Bayesian MCMC approach to fitting spectral energy distributions of AGNs. *The Astrophysical Journal* 833, id. 98 (20 pp) (2016).
- Carilli, C.L., Chluba, J., Decarli, R., Walter, F., Aravena, M., Wagg, J., Popping, G., Cortes, P., Hodge, J., Weiss, A., Bertoldi, F. and Riechers, D.: The ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Implications for spectral line intensity mapping at millimeter wavelengths and CMB spectral distortions. *The Astrophysical Journal* 833, id. 73 (6 pp) (2016).
- Carrasco-González, C., Henning, T., Chandler, C.J., Linz, H., Pérez, L., Rodríguez, L.F., Galván-Madrid, R., Anglada, G., Birnstiel, T., van Boekel, R., Flock, M., Klahr, H., Macias, E., Menten, K., Osorio, M., Testi, L., Torrelles, J.M. and Zhu, Z.: The VLA view of the HL Tau disk: Disk mass, grain evolution, and early planet formation. *The Astrophysical Journal Letters* 821, id. L16 (6 pp) (2016).
- Casey, A.R., Ruchti, G., Masseron, T., Randich, S., Gilmore, G., Lind, K., Kennedy, G.M., Koposov, S.E., Hourihane, A., Franciosini, E., Lewis, J.R., Magrini, L., Morbidelli, L., Sacco, G.G., Worley, C.C., Feltzing, S., Jeffries, R.D., Vallenari, A., Bensby, T., Bragaglia, A., Flaccomio, E., Francois, P., Korn, A.J., Lanzafame, A., Pancino, E. et al.: The Gaia-ESO Survey: revisiting the Li-rich giant problem. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 3336-3352 (2016).
- Chandar, R., Whitmore, B.C., Dinino, D., Kennicutt, R.C., Chien, L.-H., Schinnerer, E. and Meidt, S.: The age, mass, and size distributions of star clusters in M51. *The Astrophysical Journal* 824, id. 71 (12 pp) (2016).
- Chen, M.C.-Y., Di Francesco, J., Johnstone, D., Sadavoy, S., Hatchell, J., Mottram, J.C., Kirk, H., Buckle, J., Berry, D.S., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M.J., Fich, M., Jenness, T., Nutter, D., Pattle, K., Pineda, J.E., Quinn, C., Salji, C., Tisi, S., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D., Bastien, P., Bresnahan, D., Butner, H., Chrysostomou, A. et al.: The JCMT Gould Belt Survey: Evidence for dust grain evolution in Perseus star-forming clumps. *The Astrophysical Journal* 826, id. 95 (20 pp) (2016).
- Chen, X., Arce, H.G., Zhang, Q., Launhardt, R. and Henning, T.: Rotating bullets from a variable protostar. *The Astrophysical Journal* 824, id. 72 (14 pp) (2016).
- Chira, R.-A., Siebenmorgen, R., Henning, T. and Kainulainen, J.: Appearance of dusty filaments at different viewing angles. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A90 (19 pp) (2016).
- Choudhary, A., Stecklum, B. and Linz, H.: Hubble imaging of V1331 Cygni: proper motion study of its circumstellar structures. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A106 (13 pp) (2016).
- Ciceri, S., Mancini, L., Henning, T., Bakos, G., Penev, K., Brahm, R., Zhou, G., Hartman, J.D., Bayliss, D., Jordán, A., Csabry, Z., de Val-Borro, M., Bhatti, W., Rabus, M., Espinoza, N., Suc, V., Schmidt, B., Noyes, R., Howard, A.W., Fulton, B.J., Isaacson, H., Marcy, G.W., Butler, R.P., Arriagada, P., Crane, J.D. et al.: HATS-15b and HATS-16b: Two massive planets transiting Old G dwarf stars. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128, id. 074401 (16 pp) (2016).
- Ciceri, S., Mancini, L., Southworth, J., Lendl, M., Tregloan-Reed, J., Brahm, R., Chen, G., D'Ago, G., Dominik, M., Figuera Jaimes, R., Galianni, P., Harpsøe, K., Hinse, T.C., Jørgensen, U.G., Juncher, D., Korhonen, H., Liebig, C., Rabus, M., Bonomo, A.S., Bott, K., Henning, T., Jordán, A., Sozzetti, A., Alsubai, K.A., Andersen, J.M. et al.: Physical properties of the planetary systems WASP-45 and WASP-46 from simultaneous multiband photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 990-1002 (2016).
- Cignoni, M., Sabbi, E., van der Marel, R.P., Lennon, D.J., Tosi, M., Grebel, E.K., Gallagher, J.S., III, Aloisi, A., de Marchi, G., Gouliermis, D.A., Larsen, S., Panagia, N. and Smith, L.J.: Hubble Tarantula Treasury Project V. The star cluster Hodge 301: The old face of 30 Doradus. *The Astrophysical Journal* 833, id. 154 (11 pp) (2016).
- Civano, F., Marchesi, S., Comastri, A., Urry, M.C., Elvis, M., Cappelluti, N., Puccetti, S., Brusa, M., Zamorani, G., Hasinger, G., Aldcroft, T., Alexander, D.M., Allevaro, V., Brunner, H., Capak, P., Finoguenov, A., Fiore, F., Fruscione, A., Gilli, R., Glotfelty, K., Griffiths, R.E., Hao, H., Harrison, F.A., Jahnke, K., Kartaltepe, J. et al.: The Chandra Cosmos Legacy Survey: Overview and point source catalog. *The Astrophysical Journal* 819, id. 62 (18 pp) (2016).
- Conn, A.R., McMonigal, B., Bate, N.F., Lewis, G.F., Ibata, R.A., Martin, N.F., McConnachie, A.W., Ferguson, A.M.N., Irwin, M.J., Elahi, P.J., Venn, K.A. and Mackey, A.D.: Major substructure in the M31 outer halo: distances and metallicities along the giant stellar stream. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 3282-3298 (2016).
- Cook, B.A., Conroy, C., Pillepich, A., Rodriguez-Gomez, V. and Hernquist, L.: The information content of stellar halos: Stellar population gradients and accretion histories in early-type illustris galaxies. *The Astrophysical Journal* 833, id. 158 (15 pp) (2016).
- Covey, K.R., Agüeros, M.A., Law, N.M., Liu, J., Ahmadi, A., Laher, R., Levitan, D., Sesar, B. and Surace, J.: Why are rapidly rotating M dwarfs in the Pleiades so (Infra)red? New period measurements confirm rotation-dependent color offsets from the cluster sequence. *The Astrophysical Journal* 822, id. 81 (26 pp) (2016).
- Cridland, A.J., Pudritz, R.E. and Alessi, M.: Composition of early planetary atmospheres - I. Connecting disc astrochemistry to the formation of planetary atmospheres. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 3274-3295 (2016).
- Croft, R.A.C., Miralda-Escudé, J., Zheng, Z., Bolton, A., Dawson, K.S., Peterson, J.B., York, D.G., Eisenstein, D., Brinkmann, J., Brownstein, J., Cen, R., Delubac, T., Font-Ribera, A., Hamilton, J.-C., Lee, K.-G., Myers, A., Palanque-Delabrouille, N., Pâris, I., Petitjean, P., Pieri, M.M., Ross, N.P., Rossi, G., Schlegel, D.J.,

- Schneider, D.P., Slosar, A. et al.: Large-scale clustering of Lyman  $\alpha$  emission intensity from SDSS/BOSS. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 3541-3572 (2016).
- Crossfield, I.J.M., Ciardi, D.R., Petigura, E.A., Sinukoff, E., Schlieder, J.E., Howard, A.W., Beichman, C.A., Isaacson, H., Dressing, C.D., Christiansen, J.L., Fulton, B.J., Lépine, S., Weiss, L., Hirsch, L., Livingston, J., Baranec, C., Law, N.M., Riddle, R., Ziegler, C., Howell, S.B., Horch, E., Everett, M., Teske, J., Martinez, A.O., Obermeier, C. et al.: 197 candidates and 104 validated planets in K2's first five fields. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 226, id. 7 (20 pp) (2016).
- Csengeri, T., Leurini, S., Wyrowski, F., Urquhart, J.S., Menten, K.M., Walmsley, M., Bontemps, S., Wienen, M., Beuther, H., Motte, F., Nguyen-Luong, Q., Schilke, P., Schuller, F., Zavagno, A. and Sanna, C.: ATLASGAL-selected massive clumps in the inner Galaxy. II. Characterisation of different evolutionary stages and their SiO emission. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A149 (50 pp) (2016).
- Csengeri, T., Weiss, A., Wyrowski, F., Menten, K.M., Urquhart, J.S., Leurini, S., Schuller, F., Beuther, H., Bontemps, S., Bronfman, L., Henning, T. and Schneider, N.: The ATLASGAL survey: distribution of cold dust in the Galactic plane. Combination with Planck data. *Astronomy and Astrophysics* 585, id. A104 (10 pp) (2016).
- D'Abrusco, R., Cantiello, M., Paolillo, M., Pota, V., Napolitano, N.R., Limatola, L., Spavone, M., Grado, A., Iodice, E., Capaccioli, M., Peletier, R., Longo, G., Hilker, M., Mieske, S., Grebel, E.K., Lisker, T., Wittmann, C., van de Ven, G., Schipani, P. and Fabbiano, G.: The extended spatial distribution of Globular Clusters in the core of the Fornax cluster. *The Astrophysical Journal Letters* 819, id. L31 (8 pp) (2016).
- da Silva, R., Lemasle, B., Bono, G., Genovali, K., McWilliam, A., Cristallo, S., Bergemann, M., Buonanno, R., Fabrizio, M., Ferraro, I., François, P., Iannicola, G., Inno, L., Laney, C.D., Kudritzki, R.-P., Matsunaga, N., Nonino, M., Primas, F., Przybilla, N., Romaniello, M., Thévenin, F. and Urbaneja, M.A.: Neutron-capture elements across the Galactic thin disk using Cepheids. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A125 (15 pp) (2016).
- Davies, F.B. and Furlanetto, S.R.: Large fluctuations in the hydrogen-ionizing background and mean free path following the epoch of reionization. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 1328-1339 (2016).
- Davies, F.B., Furlanetto, S.R. and McQuinn, M.: Quasar ionization front Ly $\alpha$  emission in an inhomogeneous intergalactic medium. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 3006-3023 (2016).
- Dawson, K.S., Kneib, J.-P., Percival, W.J., Alam, S., Albareti, F.D., Anderson, S.F., Armengaud, E., Aubourg, É., Bailey, S., Bautista, J.E., Berlind, A.A., Bershad, M.A., Beutler, F., Bizyaev, D., Blanton, M.R., Blomqvist, M., Bolton, A.S., Bovy, J., Brandt, W.N., Brinkmann, J., Brownstein, J.R., Burtin, E., Busca, N.G., Cai, Z., Chuang, C.-H. et al.: The SDSS-IV Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey: Overview and early data. *The Astronomical Journal* 151, id. 44 (34 pp) (2016).
- de Blok, W.J.G., Walter, F., Smith, J.-D.T., Herrera-Camus, R., Bolatto, A.D., Requena-Torres, M.A., Crocker, A.F., Croxall, K.V., Kennicutt, R.C., Koda, J., Armus, L., Boquien, M., Dale, D., Kreckel, K. and Meidt, S.: Comparing [C II], HI, and CO dynamics of nearby galaxies. *The Astronomical Journal* 152, id. 51 (10 pp) (2016).
- de Boer, J., Salter, G., Benisty, M., Vigan, A., Boccaletti, A., Pinilla, P., Ginski, C., Juhasz, A., Maire, A.-L., Messina, S., Desidera, S., Cheetham, A., Girard, J.H., Wahhaj, Z., Langlois, M., Bonnefoy, M., Beuzit, J.-L., Buenzli, E., Chauvin, G., Dominik, C., Feldt, M., Gratton, R., Hagelberg, J., Isella, A., Janson, M. et al.: Multiple rings in the transition disk and companion candidates around RX J1615.3-3255. High contrast imaging with VLT/SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A114 (16 pp) (2016).
- de Gregorio-Monsalvo, I., Barrado, D., Bouy, H., Bayo, A., Palau, A., Morales-Calderón, M., Huéramo, N., Morata, O., Merín, B. and Eiroa, C.: A submillimetre search for pre- and proto-brown dwarfs in Chamaeleon II. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A79 (11 pp) (2016).
- de Val-Borro, M., Bakos, G.Á., Brahm, R., Hartman, J.D., Espinoza, N., Penev, K., Ciceri, S., Jordán, A., Bhatti, W., Csabry, Z., Bayliss, D., Bento, J., Zhou, G., Rabus, M., Mancini, L., Henning, T., Schmidt, B., Tan, T.G., Tinney, C.G., Wright, D.J., Kedziora-Chudczer, L., Bailey, J., Suc, V., Durkan, S., Lázár, J. et al.: HATS-31b through HATS-35b: Five transiting hot Jupiters discovered by the HATSouth survey. *The Astronomical Journal* 152, (2016).
- Deacon, N.R., Kraus, A.L., Mann, A.W., Magnier, E.A., Chambers, K.C., Wainscoat, R.J., Tonry, J.L., Kaiser, N., Waters, C., Flewelling, H., Hodapp, K.W. and Burgett, W.S.: A Pan-STARRS 1 study of the relationship between wide binarity and planet occurrence in the Kepler field. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 4212-4230 (2016).
- Deacon, N.R., Schlieder, J.E. and Murphy, S.J.: A nearby young M dwarf with a wide, possibly planetary-mass companion. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 3191-3199 (2016).
- Decarli, R., Walter, F., Aravena, M., Carilli, C., Bouwens, R., da Cunha, E., Daddi, E., Elbaz, D., Riechers, D., Smail, I., Swinbank, M., Weiss, A., Bacon, R., Bauer, F., Bell, E.F., Bertoldi, F., Chapman, S., Colina, L., Cortes, P.C., Cox, P., González-López, J., Inami, H., Ivison, R., Hodge, J., Karim, A. et al.: The ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Molecular gas reservoirs in high-redshift galaxies. *The Astrophysical Journal* 833, id. 70 (21 pp) (2016).
- Decarli, R., Walter, F., Aravena, M., Carilli, C., Bouwens, R., da Cunha, E., Daddi, E., Ivison, R.J., Popping, G., Riechers, D., Smail, I.R., Swinbank, M., Weiss, A., Anguita, T., Assef, R.J., Bauer, F.E., Bell, E.F., Bertoldi, F., Chapman, S., Colina, L., Cortes, P.C., Cox, P., Dickinson, M., Elbaz, D., González-López, J. et al.: ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: CO luminosity functions and the evolution of the cosmic density of molecular gas. *The Astrophysical Journal* 833, id. 69 (12 pp) (2016).
- Dong, H., Li, Z., Wang, Q.D., Lauer, T.R., Olsen, K.A.G., Saha, A., Dalcanton, J.J. and Groves, B.A.: High-resolution mapping of dust via extinction in the M31 bulge. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 2262-2273 (2016).
- Dorner, B., Giardino, G., Ferruit, P., Alves de Oliveira, C., Birkmann, S.M., Böker, T., De Marchi, G., Gnata, X., Köhler, J., Sirianni, M. and Jakobsen, P.: A model-based approach to the spatial and spectral calibration of NIRSpec onboard JWST. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A113 (18 pp) (2016).

- Douglas, S.T., Agüeros, M.A., Covey, K.R., Cargile, P.A., Barclay, T., Cody, A., Howell, S.B. and Kopytova, T.: K2 rotation periods for low-mass Hyads and the implications for gyrochronology. *The Astrophysical Journal* 822, id. 47 (18 pp) (2016).
- Drass, H., Haas, M., Chini, R., Bayo, A., Hackstein, M., Hoffmeister, V., Godoy, N. and Vogt, N.: The bimodal initial mass function in the Orion nebula cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 1734-1744 (2016).
- Drlica-Wagner, A., Bechtol, K., Allam, S., Tucker, D.L., Gruendl, R.A., Johnson, M.D., Walker, A.R., James, D.J., Nidever, D.L., Olsen, K.A.G., Wechsler, R.H., Cioni, M.R.L., Conn, B.C., Kuehn, K., Li, T.S., Mao, Y.-Y., Martin, N.F., Neilsen, E., Noel, N.E.D., Pieres, A., Simon, J.D., Stringfellow, G.S., van der Marel, R.P. and Yanny, B.: An ultra-faint galaxy candidate discovered in early data from the Magellanic Satellites Survey. *The Astrophysical Journal Letters* 833, id. L5 (7 pp) (2016).
- Dunham, M.M., Offner, S.S.R., Pineda, J.E., Bourke, T.L., Tobin, J.J., Arce, H.G., Chen, X., Di Francesco, J., Johnstone, D., Lee, K.I., Myers, P.C., Price, D., Sadavoy, S.I. and Schnee, S.: An ALMA search for substructure, fragmentation, and hidden protostars in starless cores in Chamaeleon I. *The Astrophysical Journal* 823, id. 160 (23 pp) (2016).
- Dutton, A.A., Macciò, A.V., Dekel, A., Wang, L., Stinson, G., Obreja, A., Di Cintio, A., Brook, C., Buck, T. and Kang, X.: NIHAO IX: the role of gas inflows and outflows in driving the contraction and expansion of cold dark matter haloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 2658-2675 (2016).
- Dutton, A.A., Macciò, A.V., Frings, J., Wang, L., Stinson, G.S., Penzo, C. and Kang, X.: NIHAO V: too big does not fail - reconciling the conflict between  $\Lambda$ CDM predictions and the circular velocities of nearby field galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, L74-L78 (2016).
- Eiroa, C., Rebollido, I., Montesinos, B., Villaver, E., Absil, O., Henning, T., Bayo, A., Canovas, H., Carmona, A., Chen, C., Ertel, S., Iglesias, D.P., Launhardt, R., Maldonado, J., Meeus, G., Moór, A., Mora, A., Mustill, A.J., Olofsson, J., Riviere-Marichalar, P. and Roberge, A.: Exocomet signatures around the A-shell star  $\phi$  Leonis? *Astronomy and Astrophysics* 594, id. L1 (5 pp) (2016).
- Erroz-Ferrer, S., Knapen, J.H., Leaman, R., Díaz-García, S., Salo, H., Laurikainen, E., Querejeta, M., Mu noz-Mateos, J.C., Athanassoula, E., Bosma, A., Comerón, S., Elmegreen, B.G. and Martínez-Valpuesta, I.: H $\alpha$  Kinematics of S4G spiral galaxies - III. Inner rotation curves. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 1199-1213 (2016).
- Espinoza, N., Bayliss, D., Hartman, J.D., Bakos, G.Á., Jordán, A., Zhou, G., Mancini, L., Brahm, R., Ciceri, S., Bhatti, W., Csbury, Z., Rabus, M., Penev, K., Bento, J., de Val-Borro, M., Henning, T., Schmidt, B., Suc, V., Wright, D.J., Tinney, C.G., Tan, T.G. and Noyes, R.: HATS-25b through HATS-30b: A Half-dozen new inflated transiting hot Jupiters from the HATSouth Survey. *The Astronomical Journal* 152, id. 108 (18 pp) (2016).
- Evans, D.F., Southworth, J., Maxted, P.F.L., Skottfelt, J., Hundertmark, M., Jørgensen, U.G., Dominik, M., Alsubai, K.A., Andersen, M.I., Bozza, V., Bramich, D.M., Burgdorf, M.J., Ciceri, S., D'Ago, G., Figuera Jaimes, R., Gu, S.-H., Haugbølle, T., Hinse, T.C., Juncher, D., Kains, N., Kerins, E., Korhonen, H., Kuffmeier, M., Mancini, L., Peixinho, N. et al.: High-resolution Imaging of Transiting Extrasolar Planetary systems (HITEP). I. Lucky imaging observations of 101 systems in the southern hemisphere. *Astronomy and Astrophysics* 589, id. A58 (20 pp) (2016).
- Farina, E.P., Fumagalli, M., Decarli, R. and Fanidakis, N.: The cluster-scale environment of PKS 2155-304. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 618-625 (2016).
- Fausnaugh, M.M., Denney, K.D., Barth, A.J., Bentz, M.C., Bottorff, M.C., Carini, M.T., Croxall, K.V., De Rosa, G., Goad, M.R., Horne, K., Joner, M.D., Kaspi, S., Kim, M., Klimanov, S.A., Kochanek, C.S., Leonard, D.C., Netzer, H., Peterson, B.M., Schnülle, K., Sergeev, S.G., Vestergaard, M., Zheng, W.-K., Zu, Y., Anderson, M.D., Arévalo, P. et al.: Space telescope and optical reverberation mapping project. III. Optical continuum emission and broadband time delays in NGC 5548. *The Astrophysical Journal* 821, id. 56 (25 pp) (2016).
- Federrath, C., Rathborne, J.M., Longmore, S.N., Kruijssen, J.M.D., Bally, J., Contreras, Y., Crocker, R.M., Garay, G., Jackson, J.M., Testi, L. and Walsh, A.J.: The link between turbulence, magnetic fields, filaments, and star formation in the central molecular zone cloud G0.253+0.016. *The Astrophysical Journal* 832, id. 143 (18 pp) (2016).
- Feng, S., Beuther, H., Henning, T., Semenov, D., Palau, A. and Mills, E.A.C.: Resolving the chemical substructure of Orion-KL (Corrigendum). *Astronomy and Astrophysics* 590, id. C1 (2 pp) (2016).
- Feng, S., Beuther, H., Semenov, D., Henning, T., Linz, H., Mills, E.A.C. and Teague, R.: Inferring the evolutionary stages of the internal structures of NGC 7538 S and IRS1 from chemistry. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A46 (32 pp) (2016).
- Feng, S., Beuther, H., Zhang, Q., Henning, T., Linz, H., Ragan, S. and Smith, R.: Are infrared dark clouds really quiescent? *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A21 (29 pp) (2016).
- Feng, S., Beuther, H., Zhang, Q., Liu, H.B., Zhang, Z., Wang, K. and Qiu, K.: Outflow detection in a 70  $\mu$ m dark high-mass core. *The Astrophysical Journal* 828, id. 100 (8 pp) (2016).
- Fernández, X., Gim, H.B., van Gorkom, J.H., Yun, M.S., Momjian, E., Popping, A., Chomiuk, L., Hess, K.M., Hunt, L., Kreckel, K., Lucero, D., Maddox, N., Oosterloo, T., Pisano, D.J., Verheijen, M.A.W., Hales, C.A., Chung, A., Dodson, R., Golap, K., Gross, J., Henning, P., Hibbard, J., Jaffé, Y.L., Donovan Meyer, J., Meyer, M. et al.: Highest redshift image of neutral hydrogen in emission: A CHILES detection of a starbursting galaxy at  $z = 0.376$ . *The Astrophysical Journal Letters* 824, id. L1 (7 pp) (2016).
- Figuera Jaimes, R., Bramich, D.M., Kains, N., Skottfelt, J., Jørgensen, U.G., Horne, K., Dominik, M., Alsubai, K.A., Bozza, V., Burgdorf, M.J., Calchi Novati, S., Ciceri, S., D'Ago, G., Evans, D.F., Galianni, P., Gu, S.-H., Harpsøe, K.B.W., Haugbølle, T., Hinse, T.C., Hundertmark, M., Juncher, D., Kerins, E., Korhonen, H., Kuffmeier, M., Mancini, L. et al.: Many new variable stars discovered in the core of the globular cluster NGC 6715 (M 54) with EMCCD observations. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A120 (17 pp) (2016).
- Figuera Jaimes, R., Bramich, D.M., Skottfelt, J., Kains, N., Jørgensen, U.G., Horne, K., Dominik, M., Alsubai, K.A., Bozza, V., Calchi Novati, S., Ciceri, S., D'Ago, G., Galianni, P., Gu, S.-H., Harpsøe, K.B.W., Haugbølle, T., Hinse, T.C., Hundertmark, M., Juncher, D., Korhonen, H., Mancini, L., Popovas, A., Rabus, M., Rahvar, S.,

- Scarpetta, G. et al.: Exploring the crowded central region of ten Galactic globular clusters using EMCCDs. Variable star searches and new discoveries. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A128 (22 pp) (2016).
- Finkbeiner, D.P., Schlafly, E.F., Schlegel, D.J., Padmanabhan, N., Jurić, M., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Denneau, L., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Magnier, E.A., Metcalfe, N., Morgan, J.S., Price, P.A., Stubbs, C.W. and Tonry, J.L.: Hypercalibration: A Pan-STARRS1-based recalibration of the Sloan Digital Sky Survey photometry. *The Astrophysical Journal* 822, id. 66 (12 pp) (2016).
- Flaherty, K.M., DeMarchi, L., Muzerolle, J., Balog, Z., Herbst, W., Megeath, S.T., Furlan, E. and Gutermuth, R.: Spitzer observations of long-term Infrared variability among young stellar objects in Chamaeleon I. *The Astrophysical Journal* 833, id. 104 (22 pp) (2016).
- Foreman-Mackey, D., Morton, T.D., Hogg, D.W., Agol, E. and Schölkopf, B.: The population of long-period transiting exoplanets. *The Astronomical Journal* 152, id. 206 (18 pp) (2016).
- Frank, B.S., de Blok, W.J.G., Walter, F., Leroy, A. and Carignan, C.: The impact of molecular gas on mass models of nearby galaxies. *The Astronomical Journal* 151, id. 94 (30 pp) (2016).
- Fridlund, M., Hatzes, A. and Liseau, R.: The way forward. *Space Science Reviews* 205, 349-372 (2016).
- Fritzewski, D.J., Kitz, M., Mugrauer, M., Neuhäuser, R., Adam, C., Briceño, C., Buder, S., Butterley, T., Chen, W.-P., Dinçel, B., Dhillon, V.S., Ermann, R., Garai, Z., Gilbert, H.F.W., Ginski, C., Greif, J., Hardy, L.K., Hernández, J., Huang, P.C., Kellerer, A., Kundra, E., Littlefair, S.P., Mallonn, M., Marka, C., Pannicke, A. et al.: Long-term photometry of IC 348 with the Young Exoplanet Transit Initiative network. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 2396-2417 (2016).
- Fu, H., Hennawi, J.F., Prochaska, J.X., Mutel, R., Casey, C., Cooray, A., Kereš, D., Zhang, Z.-Y., Clements, D., Isbell, J., Lang, C., McGinnis, D., Michałowski, M.J., Mooley, K., Perley, D., Stockton, A. and Thompson, D.: The circumgalactic medium of submillimeter galaxies. I. First results from a radio-identified sample. *The Astrophysical Journal* 832, id. 52 (11 pp) (2016).
- Fuhrmann, K., Chini, R., Kaderhandt, L., Chen, Z. and Lachaume, R.: Evidence for very nearby hidden white dwarfs. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 1682-1686 (2016).
- Fumagalli, M., Franx, M., van Dokkum, P., Whitaker, K.E., Skelton, R.E., Brammer, G., Nelson, E., Maseda, M., Momcheva, I., Kriek, M., Labbé, I., Lundgren, B. and Rix, H.-W.: Ages of massive galaxies at  $0.5 > z > 2.0$  from 3D-HST rest-frame optical spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 822, id. 1, (13 pp) (2016).
- Furlan, E., Fischer, W.J., Ali, B., Stutz, A.M., Stanke, T., Tobin, J.J., Megeath, S.T., Osorio, M., Hartmann, L., Calvet, N., Poteet, C.A., Booker, J., Manoj, P., Watson, D.M. and Allen, L.: The Herschel Orion Protostar Survey: Spectral energy distributions and fits using a grid of protostellar models. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 224, id. 5 (45 pp) (2016).
- Galbany, L., Stanishev, V., Mourão, A.M., Rodrigues, M., Flores, H., Walcher, C.J., Sánchez, S.F., García-Benito, R., Mast, D., Badenes, C., González Delgado, R.M., Kehrig, C., Lyubenova, M., Marino, R.A., Mollá, M., Meidt, S., Pérez, E., van de Ven, G. and Vilchez, J.M.: Nearby supernova host galaxies from the CALIFA survey. II. Supernova environmental metallicity. *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A48 (25 pp) (2016).
- García-Burillo, S., Combes, F., Ramos Almeida, C., Usero, A., Krips, M., Alonso-Herrero, A., Aalto, S., Casasola, V., Hunt, L.K., Martín, S., Viti, S., Colina, L., Costagliola, F., Eckart, A., Fuente, A., Henkel, C., Márquez, I., Neri, R., Schinnerer, E., Tacconi, L.J. and van der Werf, P.P.: ALMA resolves the torus of NGC 1068: Continuum and molecular line emission. *The Astrophysical Journal Letters* 823, id. L12 (6 pp) (2016).
- Garufí, A., Quanz, S.P., Schmid, H.M., Mulders, G.D., Avenhaus, H., Boccaletti, A., Ginski, C., Langlois, M., Stolker, T., Augereau, J.-C., Benisty, M., Lopez, B., Dominik, C., Gratton, R., Henning, T., Janson, M., Ménard, F., Meyer, M.R., Pinte, C., Sissa, E., Vigan, A., Zurlo, A., Bazzon, A., Buenzli, E., Bonnefoy, M. et al.: The SPHERE view of the planet-forming disk around HD 100546. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A8 (13 pp) (2016).
- Gavilan, L., Jäger, C., Simionovici, A., Lemaire, J.L., Sabri, T., Foy, E., Yagoubi, S., Henning, T., Salomon, D. and Martínez-Criado, G.: Hard X-ray irradiation of cosmic silicate analogs: structural evolution and astrophysical implications. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A144 (8 pp) (2016).
- Georgiev, I.Y., Böker, T., Leigh, N., Lützgendorf, N. and Neumayer, N.: Masses and scaling relations for nuclear star clusters, and their co-existence with central black holes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 2122-2138 (2016).
- Ginski, C., Mugrauer, M., Seeliger, M., Buder, S., Ermann, R., Avenhaus, H., Mouillet, D., Maire, A.-L. and Raetz, S.: A lucky imaging multiplicity study of exoplanet host stars - II. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 2173-2191 (2016).
- Ginski, C., Stolker, T., Pinilla, P., Dominik, C., Boccaletti, A., de Boer, J., Benisty, M., Biller, B., Feldt, M., Garufí, A., Keller, C.U., Kenworthy, M., Maire, A.L., Ménard, F., Mesa, D., Milli, J., Min, M., Pinte, C., Quanz, S.P., van Boekel, R., Bonnefoy, M., Chauvin, G., Desidera, S., Gratton, R., Girard, J.H.V. et al.: Direct detection of scattered light gaps in the transitional disk around HD 97048 with VLT/SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A112 (11 pp) (2016).
- Goad, M.R., Korista, K.T., De Rosa, G., Kriss, G.A., Edelson, R., Barth, A.J., Ferland, G.J., Kochanek, C.S., Netzer, H., Peterson, B.M., Bentz, M.C., Bisogni, S., Crenshaw, D.M., Denney, K.D., Ely, J., Fausnaugh, M.M., Grier, C.J., Gupta, A., Horne, K.D., Kaastra, J., Pancoast, A., Pei, L., Pogge, R.W., Skielboe, A., Starkey, D. et al.: Space Telescope and Optical Reverberation Mapping Project. IV. Anomalous behavior of the broad ultraviolet emission lines in NGC 5548. *The Astrophysical Journal* 824, id. 11 (10 pp) (2016).
- Gómez-Leal, I., Codron, F. and Selsis, F.: Thermal light curves of Earth-like planets: 1. Varying surface and rotation on planets in a terrestrial orbit. *Icarus* 269, 98-110 (2016).
- Gonzalez, O.A., Gadotti, D.A., Debattista, V.P., Rejkuba, M., Valenti, E., Zoccali, M., Coccato, L., Minniti, D. and Ness, M.: Comparing the properties of the X-shaped bulges of NGC 4710 and the Milky Way with MUSE. *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A7 (10 pp) (2016).
- González-García, B., Manoj, P., Watson, D.M., Vavrek, R., Megeath, S.T., Stutz, A.M., Osorio, M., Wyrowski, F., Fischer, W., Tobin, J.J., Sánchez-Portal, M., Diaz Rodriguez, A.K. and Wilson, T.L.:

- Herschel/PACS far-IR spectral imaging of a jet from an intermediate mass protostar in the OMC-2 region. *Astronomy and Astrophysics* 596, id. A26 (8 pp) (2016).
- Gordon, K.D., Fousneau, M., Arab, H., Tchernyshyov, K., Weisz, D.R., Dalcanton, J.J., Williams, B.F., Bell, E.F., Bianchi, L., Boyer, M., Choi, Y., Dolphin, A., Girardi, L., Hogg, D.W., Kalirai, J.S., Kapala, M., Lewis, A.R., Rix, H.-W., Sandstrom, K. and Skillman, E.D.: The Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. XV. The BEAST: Bayesian extinction and stellar tool. *The Astrophysical Journal* 826, id. 104 (20 pp) (2016).
- Gould, A.: Microlensing by Kuiper, Oort, and free-floating panets. *Journal of Korean Astronomical Society* 49, 123-126 (2016).
- Grassitelli, L., Chené, A.-N., Sanyal, D., Langer, N., St-Louis, N., Bestenlehner, J.M. and Fossati, L.: Diagnostics of the unstable envelopes of Wolf-Rayet stars. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A12 (14 pp) (2016).
- Green, J.D., Yang, Y.-L., Evans, N.J., II, Karska, A., Herczeg, G., van Dishoeck, E.F., Lee, J.-E., Larson, R.L. and Bouwman, J.: The CDF Archive: Herschel PACS and SPIRE spectroscopic data pipeline and products for protostars and young stellar objects. *The Astronomical Journal* 151, id. 75 (23 pp) (2016).
- Guidi, G., Tazzari, M., Testi, L., de Gregorio-Monsalvo, I., Chandler, C.J., Pérez, L., Isella, A., Natta, A., Ortolani, S., Henning, T., Corder, S., Linz, H., Andrews, S., Wilner, D., Ricci, L., Carpenter, J., Sargent, A., Mundy, L., Storm, S., Calvet, N., Dullemond, C., Greaves, J., Lazio, J., Deller, A. and Kwon, W.: Dust properties across the CO snowline in the HD 163296 disk from ALMA and VLA observations. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A112 (12 pp) (2016).
- Guilloteau, S., Piétu, V., Chapillon, E., Di Folco, E., Dutrey, A., Henning, T., Semenov, D., Birnstiel, T. and Grosso, N.: The shadow of the Flying Saucer: A very low temperature for large dust grains. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. L1 (5 pp) (2016).
- Guilloteau, S., Reboussin, L., Dutrey, A., Chapillon, E., Wakelam, V., Piétu, V., Di Folco, E., Semenov, D. and Henning, T.: Chemistry in disks. X. The molecular content of protoplanetary disks in Taurus. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A124 (29 pp) (2016).
- Hacar, A., Kainulainen, J., Tafalla, M., Beuther, H. and Alves, J.: The Musca cloud: A 6 pc-long velocity-coherent, sonic filament. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A97 (12 pp) (2016).
- Han, C., Jung, Y.K., Udalski, A., Gould, A., Bozza, V., Szymański, M.K., Soszyński, I., Poleski, R., Kozłowski, S., Pietrukowicz, P., Skowron, J., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł. and Collaboration, O.: OGLE-2014-BLG-0257L: A microlensing brown dwarf orbiting a low-mass M dwarf. *The Astrophysical Journal* 822, id. 75 (7 pp) (2016).
- Han, C., Udalski, A., Gould, A., Zhu, W., Street, R.A., Yee, J.C., Beichman, C., Bryden, C., Calchi Novati, S., Carey, S., Fausnaugh, M., Gaudi, B.S., Henderson, C.B., Shvartzvald, Y., Wibking, B., Szymański, M.K., Soszyński, I., Skowron, J., Mróz, P., Poleski, R., Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Pawlak, M. et al.: OGLE-2015-BLG-0479LA,B: Binary gravitational microlens characterized by simultaneous ground-based and space-based observations. *The Astrophysical Journal* 828, id. 53 (9 pp) (2016).
- Han, C., Udalski, A., Lee, C.-U., Gould, A., Bozza, V., Szymański, M.K., Soszyński, I., Skowron, J., Mróz, P., Poleski, R., Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Ulaczyk, K., Wyrzykowski, Ł., Pawlak, M., Collaboration, T.O., Albrow, M.D., Chung, S.-J., Kim, S.-L., Cha, S.-M., Jung, Y.K., Kim, D.-J., Lee, Y., Park, B.-G., Ryu, Y.-H. et al.: Space-based microlens parallax observation as a way to resolve the severe degeneracy between microlens-parallax and lens-orbital effects. *The Astrophysical Journal* 827, id. 11 (6 pp) (2016).
- Hankins, M.J., Lau, R.M., Morris, M.R., Sanchez-Bermudez, J., Pott, J.U., Adams, J.D. and Herter, T.L.: Infrared observations of the Quintuplet proper members using SOFIA/FORCAST and Gemini/TReCS. *The Astrophysical Journal* 827, id. 136 (14 pp) (2016).
- Hanson, R.J., Bailer-Jones, C.A.L., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Tonry, J.L., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: Dust in three dimensions in the Galactic plane. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 3604-3615 (2016).
- Hawkins, K., Jofrè, P., Heiter, U., Soubiran, C., Blanco-Cuaresma, S., Casagrande, L., Gilmore, G., Lind, K., Magrini, L., Masseron, T., Pancino, E., Randich, S. and Worley, C.C.: Gaia FGK benchmark stars: new candidates at low metallicities. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A70 (18 pp) (2016).
- Haworth, T.J., Ilee, J.D., Forgan, D.H., Facchini, S., Price, D.J., Boneberg, D.M., Booth, R.A., Clarke, C.J., Gonzalez, J.-F., Hutchison, M.A., Kamp, I., Laibe, G., Lyra, W., Meru, F., Mohanty, S., Panić, O., Rice, K., Suzuki, T., Teague, R., Walsh, C., Woitke, P. and authors, C.: Grand challenges in protoplanetary disc modelling. *Publications of the Astronomical Society of Australia* 33, id. e053 (22 pp) (2016).
- Heintz, K.E., Fynbo, J.P.U., Krogager, J.-K., Vestergaard, M., Møller, P., Arabsalmani, M., Geier, S., Noterdaeme, P., Ledoux, C., Saturni, F.G. and Venemans, B.: Serendipitous discovery of a projected pair of QSOs separated by 4.5 arcsec on the Sky. *The Astronomical Journal* 152, id. 13 (4 pp) (2016).
- Heller, R. and Pudritz, R.E.: The search for extraterrestrial intelligence in Earth's solar transit zone. *Astrobiology* 16, 259-270 (2016).
- Helminiak, K.G., Kuzuhara, M., Mede, K., Brandt, T.D., Kandori, R., Suenaga, T., Kusakabe, N., Narita, N., Carson, J.C., Currie, T., Kudo, T., Hashimoto, J., Abe, L., Akiyama, E., Brandner, W., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S., Henning, T., Hodapp, K.W., Ishii, M. et al.: SEEDS direct Imaging of the RV-detected companion to V450 Andromedae, and characterization of the system. *The Astrophysical Journal* 832, id. 33 (13 pp) (2016).
- Henderson, C.B., Poleski, R., Penny, M., Street, R.A., Bennett, D.P., Hogg, D.W., Gaudi, B.S., Team, K.C.M.S., Zhu, W., Barclay, T., Barentsen, G., Howell, S.B., Mullally, F., Udalski, A., Szymański, M.K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł., Pietrukowicz, P., Soszyński, I., Ulaczyk, K., Pawlak, M., OGLE Project, T., Sumi, T. et al.: Campaign 9 of the K2 mission: Observational parameters, scientific drivers, and community involvement for a simultaneous space- and ground-based microlensing survey. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128, id. 128:124401 (22 pp) (2016).
- Henshaw, J.D., Longmore, S.N. and Kruijssen, J.M.D.: Seeding the Galactic Centre gas stream: gravitational instabilities set the initial conditions for the formation of protocluster clouds. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, L122-L126 (2016).
- Hermitschek, N., Schlafly, E.F., Sesar, B., Rix, H.-W., Hogg, D.W., Ivezić, Ž., Grebel, E.K., Bell, E.F., Martin, N.F., Burgett, W.S., Flewelling,

- H., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Magnier, E.A., Metcalfe, N., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: Finding, characterizing, and classifying variable sources in multi-epoch sky surveys: QSOs and RR Lyrae in PS1 3 data. *The Astrophysical Journal* 817, id. 73 (26 pp) (2016).
- Herrera-Camus, R., Bolatto, A., Smith, J.D., Draine, B., Pellegrini, E., Wolfire, M., Croxall, K., de Looze, I., Calzetti, D., Kennicutt, R., Crocker, A., Armus, L., van der Werf, P., Sandstrom, K., Galametz, M., Brandl, B., Groves, B., Rigopoulou, D., Walter, F., Leroy, A., Boquien, M., Tabatabaei, F.S. and Beirao, P.: The ionized gas in nearby galaxies as traced by the [N II] 122 and 205  $\mu\text{m}$  transitions. *The Astrophysical Journal* 826, id. 175 (17 pp) (2016).
- Hodge, J.A., Swinbank, A.M., Simpson, J.M., Smail, I., Walter, F., Alexander, D.M., Bertoldi, F., Biggs, A.D., Brandt, W.N., Chapman, S.C., Chen, C.C., Coppin, K.E.K., Cox, P., Dannerbauer, H., Edge, A.C., Greve, T.R., Ivison, R.J., Karim, A., Knudsen, K.K., Menten, K.M., Rix, H.-W., Schinnerer, E., Wardlow, J.L., Weiss, A. and van der Werf, P.: Kiloparsec-scale dust disks in high-redshift luminous submillimeter galaxies. *The Astrophysical Journal* 833, id. 103 (15 pp) (2016).
- Hogg, D.W., Casey, A.R., Ness, M., Rix, H.-W., Foreman-Mackey, D., Hasselquist, S., Ho, A.Y.Q., Holtzman, J.A., Majewski, S.R., Martell, S.L., Mészáros, S., Nidever, D.L. and Shetrone, M.: Chemical Tagging Can Work: Identification of Stellar Phase-space Structures Purely by Chemical-abundance Similarity. *The Astrophysical Journal* 833, id. 262 (13 pp) (2016).
- Horiuchi, S., Bozek, B., Abazajian, K.N., Boylan-Kolchin, M., Bullock, J.S., Garrison-Kimmel, S. and Onorbe, J.: Properties of resonantly produced sterile neutrino dark matter subhaloes. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 4346-4353 (2016).
- Hornbeck, J.B., Swearingen, J.R., Grady, C.A., Williger, G.M., Brown, A., Sitko, M.L., Wisniewski, J.P., Perrin, M.D., Lauroesch, J.T., Schneider, G., Apai, D., Brittain, S., Brown, J.M., Champney, E.H., Hamaguchi, K., Henning, T., Lynch, D.K., Petre, R., Russell, R.W., Walter, F.M. and Woodgate, B.: Panchromatic imaging of a transitional disk: The disk of GM Aur in optical and FUV scattered light. *The Astrophysical Journal* 829, id. 65 (16 pp) (2016).
- Howard, C.S., Pudritz, R.E. and Harris, W.E.: Simulating radiative feedback and star cluster formation in GMCs - I. Dependence on gravitational boundedness. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 2953-2974 (2016).
- Hurley, J.R., Sippel, A.C., Tout, C.A. and Aarseth, S.J.: A dynamical gravitational wave source in a dense cluster. *Publications of the Astronomical Society of Australia* 33, id. e036 (9 pp) (2016 online).
- Ibata, R.A., Lewis, G.F. and Martin, N.F.: Feeling the pull: a study of natural galactic accelerometers. I. Photometry of the delicate stellar stream of the Palomar 5 globular cluster. *The Astrophysical Journal* 819, id. 1 (13 pp) (2016).
- Inno, L., Bono, G., Matsunaga, N., Fiorentino, G., Marconi, M., Lemasle, B., da Silva, R., Soszyński, I., Udalski, A., Romaniello, M. and Rix, H.-W.: The panchromatic view of the Magellanic Clouds from classical Cepheids. I. Distance, reddening, and geometry of the Large Magellanic Cloud disk. *The Astrophysical Journal* 832, id. 176 (20 pp) (2016).
- Izotov, Y.I., Orlitová, I., Schaerer, D., Thuan, T.X., Verhamme, A., Guseva, N.G. and Worseck, G.: Eight per cent leakage of Lyman continuum photons from a compact, star-forming dwarf galaxy. *Nature* 529, 178-180 (2016).
- Izotov, Y.I., Schaerer, D., Thuan, T.X., Worseck, G., Guseva, N.G., Orlitová, I. and Verhamme, A.: Detection of high Lyman continuum leakage from four low-redshift compact star-forming galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 3683-3701 (2016).
- Izumi, T., Kohno, K., Aalto, S., Espada, D., Fathi, K., Harada, N., Hatsukade, B., Hsieh, P.-Y., Imanishi, M., Krips, M., Martín, S., Matsushita, S., Meier, D.S., Nakai, N., Nakanishi, K., Schinnerer, E., Sheth, K., Terashima, Y. and Turner, J.L.: Submillimeter-HCN diagram for energy diagnostics in the centers of galaxies. *The Astrophysical Journal* 818, id. 42 (23 pp) (2016).
- Jäger, C., Sabri, T., Wendl, E. and Henning, T.: Ion-induced processing of cosmic silicates: A possible formation pathway to GEMS. *The Astrophysical Journal* 831, id. 66 (8 pp) (2016).
- Jameson, K.E., Bolatto, A.D., Leroy, A.K., Meixner, M., Roman-Duval, J., Gordon, K., Hughes, A., Israel, F.P., Rubio, M., Indebetouw, R., Madden, S.C., Bot, C., Hony, S., Cormier, D., Pellegrini, E.W., Galametz, M. and Sonneborn, G.: The relationship between molecular gas, H I, and star formation in the low-mass, low-metallicity Magellanic Clouds. *The Astrophysical Journal* 825, id. 12 (24 pp) (2016).
- Janesh, W., Morrison, H.L., Ma, Z., Rockosi, C., Starkenburg, E., Xue, X.X., Rix, H.-W., Harding, P., Beers, T.C., Johnson, J., Lee, Y.S. and Schneider, D.P.: The SEGUE K Giant Survey. III. Quantifying galactic halo substructure. *The Astrophysical Journal* 816, id. 80 (20 pp) (2016).
- Janson, M., Thalmann, C., Boccaletti, A., Maire, A.-L., Zurlo, A., Marzari, F., Meyer, M.R., Carson, J.C., Augereau, J.-C., Garufi, A., Henning, T., Desidera, S., Asensio-Torres, R. and Pohl, A.: Detection of sharp symmetric features in the circumbinary disk around AK Sco. *The Astrophysical Journal Letters* 816, id. L1 (5 pp) (2016).
- Janz, J., Norris, M.A., Forbes, D.A., Huxor, A., Romanowsky, A.J., Frank, M.J., Escudero, C.G., Faifer, F.R., Forte, J.C., Kannappan, S.J., Maraston, C., Brodie, J.P., Strader, J. and Thompson, B.R.: The AIMSS Project - III. The stellar populations of compact stellar systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 617-632 (2016).
- Jennings, Z.G., Romanowsky, A.J., Brodie, J.P., Janz, J., Norris, M.A., Forbes, D.A., Martinez-Delgado, D., Fagioli, M. and Penny, S.J.: Erratum: »NGC 3628-UCD1: A possible  $\omega$  Cen analog embedded in a stellar stream« (2015, *ApJL*, 812, L10). *The Astrophysical Journal Letters* 817, id. L10 (1 pp) (2016).
- Jiang, L., Shen, Y., McGreer, I.D., Fan, X., Morganson, E. and Windhorst, R.A.: Reverberation Mapping with Intermediate-band Photometry: Detection of Broad-line H $\alpha$  Time Lags for Quasars at  $0.2 < z < 0.4$ . *The Astrophysical Journal* 818, id. 137 (11 pp) (2016).
- Johnson, L.C., Seth, A.C., Dalcanton, J.J., Beerman, L.C., Fouesneau, M., Lewis, A.R., Weisz, D.R., Williams, B.F., Bell, E.F., Dolphin, A.E., Larsen, S.S., Sandstrom, K. and Skillman, E.D.: Panchromatic Hubble Andromeda Treasury. XVI. Star cluster formation efficiency and the clustered fraction of young stars. *The Astrophysical Journal* 827, id. 33 (24 pp) (2016).
- Johnson, M.C., Gandolfi, D., Fridlund, M., Csizmadia, S., Endl, M., Cabrera, J., Cochran, W.D., Deeg, H.J., Grziwa, S., Ramirez, I., Hatzes, A.P., Eigmüller, P., Barragán, O., Erikson, A., Guenther, E.W., Korth, J., Kuutma, T., Nespral, D., Pätzold, M., Palle, E.,

- Prieto-Arranz, J., Rauer, H. and Saario, J.: Two hot Jupiters from K2 Campaign 4. *The Astronomical Journal* 151, id. 171 (9 pp) (2016).
- Jones, G.C., Carilli, C.L., Momjian, E., Wagg, J., Riechers, D.A., Walter, F., Decarli, R., Ota, K. and McMahon, R.: New constraints on themolecular gas in the prototypical HyLIRGs BRI1202–0725 and BRI1335–0417. *The Astrophysical Journal* 830, id. 63 (12 pp) (2016).
- Kains, N., Bramich, D.M., Arellano Ferro, A., Figuera Jaimes, R., Jørgensen, U.G., Giridhar, S., Penny, M.T., Alsubai, K.A., Andersen, J.M., Bozza, V., Browne, P., Burgdorf, M., Calchi Novati, S., Damerdj, Y., Diehl, C., Dodds, P., Dominik, M., Elyiv, A., Fang, X.-S., Giannini, E., Gu, S.-H., Hardis, S., Harpsøe, K., Hinse, T.C., Hornstrup, A. et al.: Estimating the parameters of globular cluster M 30 (NGC 7099) from time-series photometry (Corrigendum). *Astronomy and Astrophysics* 588, id. C2 (1 pp) (2016).
- Kainulainen, J., Hacar, A., Alves, J., Beuther, H., Bouy, H. and Tafalla, M.: Gravitational fragmentation caught in the act: the filamentary Musca molecular cloud. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A27 (13 pp) (2016).
- Kannan, R., Vogelsberger, M., Stinson, G.S., Hennawi, J.F., Marinacci, F., Springel, V. and Macciò, A.V.: Galaxy formation with local photoionization feedback - II. Effect of X-ray emission from binaries and hot gas. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 2516-2529 (2016).
- Kaplan, K.F., Jogee, S., Kewley, L., Blanc, G.A., Weinzirl, T., Song, M., Drory, N., Luo, R. and van den Bosch, R.C.E.: The VIRUS-P Exploration of Nearby Galaxies (VENGA): spatially resolved gas-phase metallicity distributions in barred and unbarred spirals. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 1642-1682 (2016).
- Kasliwal, M.M., Cenko, S.B., Singer, L.P., Corsi, A., Cao, Y., Barlow, T., Bhalerao, V., Bellm, E., Cook, D., Duggan, G.E., Ferretti, R., Frail, D.A., Horesh, A., Kendrick, R., Kulkarni, S.R., Lunnan, R., Palliyaguru, N., Laher, R., Masci, F., Manulis, I., Miller, A.A., Nugent, P.E., Perley, D., Prince, T.A., Quimby, R.M. et al.: iPTF search for an optical counterpart to gravitational-wave transient GW150914. *The Astrophysical Journal Letters* 824, id. L24 (9 pp) (2016).
- Kasper, M., Santhakumari, K.K.R., Herbst, T.M. and Köhler, R.: New circumstellar structure in the T Tauri system. A near-infrared high-contrast imaging study. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A50 (8 pp) (2016).
- Kataoka, A., Tsukagoshi, T., Momose, M., Nagai, H., Muto, T., Dullemond, C.P., Pohl, A., Fukagawa, M., Shibai, H., Hanawa, T. and Murakawa, K.: Submillimeter polarization observation of the protoplanetary disk around HD 142527. *The Astrophysical Journal Letters* 831, id. L12 (6 pp) (2016).
- Kelso, C., Savage, C., Valluri, M., Freese, K., Stinson, G.S. and Bailin, J.: The impact of baryons on the direct detection of dark matter. *Journal of Cosmology and Astro-Particle Physics* 08, id. 071 (26 pp) (2016 online).
- Kendrew, S., Beuther, H., Simpson, R., Csengeri, T., Wienen, M., Lintott, C.J., Povich, M.S., Beaumont, C. and Schuller, F.: The Milky Way Project and ATLASGAL: The distribution and physical properties of cold clumps near infrared bubbles. *The Astrophysical Journal* 825, id. 142 (12 pp) (2016).
- Khorrami, Z., Lanz, T., Vakili, F., Lagadec, E., Langlois, M., Brandner, W., Chesneau, O., Meyer, M.R., Carillet, M., Abe, L., Mouillet, D., Beuzit, J.L., Boccaletti, A., Perrot, C., Thalmann, C., Schmid, H.-M., Pavlov, A., Costille, A., Dohlen, K., Le Mignant, D., Petit, C. and Sauvage, J.F.: VLT/SPHERE deep insight of NGC 3603's core: Segregation or confusion? *Astronomy and Astrophysics* 588, id. L7 (4 pp) (2016).
- Khrykin, I.S., Hennawi, J.F., McQuinn, M. and Worseck, G.: The He II proximity effect and the lifetime of quasars. *The Astrophysical Journal* 824, id. 133 (24 pp) (2016).
- Kim, D.-W. and Bailer-Jones, C.A.L.: A package for the automated classification of periodic variable stars. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A18 (15 pp) (2016).
- Kim, J.-h., Agertz, O., Teyssier, R., Butler, M.J., Ceverino, D., Choi, J.-H., Feldmann, R., Keller, B.W., Lupi, A., Quinn, T., Revaz, Y., Wallace, S., Gnedin, N.Y., Leitner, S.N., Shen, S., Smith, B.D., Thompson, R., Turk, M.J., Abel, T., Arraki, K.S., Benincasa, S.M., Chakrabarti, S., DeGraf, C., Dekel, A., Goldbaum, N.J. et al.: The AGORA High-resolution Galaxy Simulations Comparison Project. II. Isolated Disk Test. *The Astrophysical Journal* 833, id. 202 (34 pp) (2016).
- Kimura, H., Kolokolova, L., Li, A., Kaneda, H., Jäger, C. and Augereau, J.-C.: Cosmic dust VIII. Planetary and Space Science 133, 1-6 (2016).
- Kimura, M., Isogai, K., Kato, T., Ueda, Y., Nakahira, S., Shidatsu, M., Enoto, T., Hori, T., Nogami, D., Littlefield, C., Ishioka, R., Chen, Y.-T., King, S.-K., Wen, C.-Y., Wang, S.-Y., Lehner, M.J., Schwamb, M.E., Wang, J.-H., Zhang, Z.-W., Alcock, C., Axelrod, T., Bianco, F.B., Byun, Y.-I., Chen, W.-P., Cook, K.H. et al.: Repetitive patterns in rapid optical variations in the nearby black-hole binary V404 Cygni. *Nature* 529, 54-58 (2016).
- Kirk, H., Di Francesco, J., Johnstone, D., Duarte-Cabral, A., Sadavoy, S., Hatchell, J., Mottram, J.C., Buckle, J., Berry, D.S., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M.J., Fich, M., Jenness, T., Nutter, D., Pattle, K., Pineda, J.E., Quinn, C., Salji, C., Tisi, S., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D., Bastien, P., Bresnahan, D., Butner, H., Chen, M. et al.: The JCMT Gould Belt Survey: A first look at dense cores in Orion B. *The Astrophysical Journal* 817, id. 167 (23 pp) (2016).
- Kirk, H., Johnstone, D., Di Francesco, J., Lane, J., Buckle, J., Berry, D.S., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M.J., Fich, M., Hatchell, J., Jenness, T., Mottram, J.C., Nutter, D., Pattle, K., Pineda, J.E., Quinn, C., Salji, C., Tisi, S., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D. and team, T.J.G.B.S.: The JCMT Gould Belt Survey: Dense Core Clusters in Orion B. *The Astrophysical Journal* 821, id. 98 (18 pp) (2016).
- Klaassen, P.D., Mottram, J.C., Maud, L.T. and Juhasz, A.: The winds from HL Tau. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 627-633 (2016).
- Klassen, M., Pudritz, R.E., Kuiper, R., Peters, T. and Banerjee, R.: Simulating the formation of massive protostars. I. Radiative feedback and accretion disks. *The Astrophysical Journal* 823, id. 28 (23 pp) (2016).
- Köhler, R., Kasper, M., Herbst, T.M., Ratzka, T. and Bertrang, G.H.-M.: Orbits in the T Tauri triple system observed with SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A35 (8 pp) (2016).
- Kong, S., Tan, J.C., Caselli, P., Fontani, F., Pillai, T., Butler, M.J., Shimajiri, Y., Nakamura, F. and Sakai, T.: The deuterium frac-

- tion in massive starless cores and dynamical implications. *The Astrophysical Journal* 821, id. 94 (23 pp) (2016).
- Konishi, M., Grady, C.A., Schneider, G., Shibai, H., McElwain, M.W., Nesvold, E.R., Kuchner, M.J., Carson, J., Debes, J.H., Gaspar, A., Henning, T.K., Hines, D.C., Hinz, P.M., Jang-Condell, H., Moromartín, A., Perrin, M., Rodigas, T.J., Serabyn, E., Silverstone, M.D., Stark, C.C., Tamura, M., Weinberger, A.J. and Wisniewski, J.P.: Discovery of an inner disk component around HD 141569 A. *The Astrophysical Journal Letters* 818, id. L23 (8 pp) (2016).
- Konishi, M., Matsuo, T., Yamamoto, K., Samland, M., Sudo, J., Shibai, H., Itoh, Y., Fukagawa, M., Sumi, T., Kudo, T., Hashimoto, J., Kuzuhara, M., Kusakabe, N., Abe, L., Akiyama, E., Brandner, W., Brandt, T.D., Carson, J.C., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S. et al.: A substellar companion to Pleiades III 3441. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68, id. 92 (9 pp) (2016).
- Kopytova, T.G., Brandner, W., Tognelli, E., Prada Moroni, P.G., Da Rio, N., Röser, S. and Schilbach, E.: Single stars in the Hyades open cluster. Fiducial sequence for testing stellar and atmospheric models. *Astronomy and Astrophysics* 585, id. A7 (7 pp) (2016).
- Kóspál, Á., Ábrahám, P., Csengeri, T., Gorti, U., Henning, T., Moór, A., Semenov, D.A., Szűcs, L. and Güsten, R.: Cold CO gas in the disk of the young eruptive star EX Lup. *The Astrophysical Journal Letters* 821, id. L4, (4 pp) (2016).
- Kovtyukh, V., Lemasle, B., Chekhonadskikh, F., Bono, G., Matsunaga, N., Yushchenko, A., Anderson, R.I., Belik, S., da Silva, R. and Inno, L.: The chemical composition of Galactic beat Cepheids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 2077-2086 (2016).
- Krasnokutski, S.A., Kuhn, M., Renzler, M., Jäger, C., Henning, T. and Scheier, P.: Ultra-low-temperature reactions of carbon atoms with hydrogen molecules. *The Astrophysical Journal Letters* 818, id. L31 (5 pp) (2016).
- Kreckel, K., Blanc, G.A., Schinnerer, E., Groves, B., Adamo, A., Hughes, A. and Meidt, S.: Characterizing spiral arm and Interarm star formation. *The Astrophysical Journal* 827, id. 103 (9 pp) (2016).
- Krogager, J.-K., Fynbo, J.P.U., Heintz, K.E., Geier, S., Ledoux, C., Møller, P., Noterdaeme, P., Venemans, B.P. and Vestergaard, M.: The Extended High A(V) Quasar Survey: Searching for dusty absorbers toward mid-infrared-selected quasars. *The Astrophysical Journal* 832, id. 49 (21 pp) (2016).
- Kun, M., Wolf-Chase, G., Moór, A., Apai, D., Balog, Z., O'Linger-Luscusk, J. and Moriarty-Schieven, G.H.: The young stellar population of LYNDs 1340. An infrared view. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 224, id. 22 (34 pp) (2016).
- Lacerna, I., Hernández-Toledo, H.M., Avila-Reese, V., Abonza-Sane, J. and del Olmo, A.: Isolated elliptical galaxies in the local Universe. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A79 (22 pp) (2016).
- Lacour, S., Biller, B., Cheetham, A., Greenbaum, A., Pearce, T., Marino, S., Tuthill, P., Pueyo, L., Mamajek, E.E., Girard, J.H., Sivaramakrishnan, A., Bonnefoy, M., Baraffe, I., Chauvin, G., Olofsson, J., Juhasz, A., Benisty, M., Pott, J.-U., Sicilia-Aguilar, A., Henning, T., Cardwell, A., Goodsell, S., Graham, J.R., Hibon, P., Ingraham, P. et al.: An M-dwarf star in the transition disk of Herbig HD 142527. Physical parameters and orbital elements. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A90 (8 pp) (2016).
- Lagrange, A.-M., Langlois, M., Gratton, R., Maire, A.-L., Milli, J., Olofsson, J., Vigan, A., Bailey, V., Mesa, D., Chauvin, G., Boccaletti, A., Galicher, R., Girard, J.H., Bonnefoy, M., Samland, M., Menard, F., Henning, T., Kenworthy, M., Thalmann, C., Beust, H., Beuzit, J.-L., Brandner, W., Buenzli, E., Cheetham, A., Janson, M. et al.: A narrow, edge-on disk resolved around HD 106906 with SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. L8 (6 pp) (2016).
- Landoni, M., Falomo, R., Treves, A., Scarpa, R. and Farina, E.P.: Circumgalactic medium of quasars: C IV absorption systems. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 267-271 (2016).
- Lane, J., Kirk, H., Johnstone, D., Mairs, S., Di Francesco, J., Sadavoy, S., Hatchell, J., Berry, D.S., Jenness, T., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D. and Team, T.J.G.B.S.: The JCMT Gould Belt Survey: Dense core clusters in Orion A. *The Astrophysical Journal* 833, id. 44 (22 pp) (2016).
- Lang, D., Hogg, D.W. and Schlegel, D.J.: WISE photometry for 400 million SDSS sources. *The Astronomical Journal* 151, id. 36 (12 pp) (2016).
- Läscher, R., Greene, J.E., Seth, A., van de Ven, G., Braatz, J.A., Henkel, C. and Lo, K.Y.: The black hole–bulge mass relation in megamaser host galaxies. *The Astrophysical Journal* 825, id. 3 (40 pp) (2016).
- Lau, M.W., Prochaska, J.X. and Hennawi, J.F.: Quasars probing quasars. VIII. The physical properties of the cool circumgalactic medium surrounding  $z \sim 2-3$  massive galaxies hosting quasars. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 226, id. 25 (51 pp) (2016).
- Lee, K.-G., Hennawi, J.F., White, M., Prochaska, J.X., Font-Ribera, A., Schlegel, D.J., Rich, R.M., Suzuki, N., Stark, C.W., Le Fèvre, O., Nugent, P.E., Salvato, M. and Zamorani, G.: Shadow of a colossus: A  $z = 2.44$  galaxy protocluster detected in 3D Ly forest tomographic mapping of the COSMOS field. *The Astrophysical Journal* 817, id. 160 (16 pp) (2016).
- Leroy, A.K., Hughes, A., Schrupa, A., Rosolowsky, E., Blanc, G.A., Bolatto, A.D., Colombo, D., Escala, A., Kramer, C., Kruijssen, J.M.D., Meidt, S., Pety, J., Querejeta, M., Sandstrom, K., Schinnerer, E., Sliwa, K. and Usero, A.: A portrait of cold gas in galaxies at 60 pc resolution and a simple method to test hypotheses that link small-scale ISM structure to galaxy-scale processes. *The Astrophysical Journal* 831, id. 16 (33 pp) (2016).
- Lim, W., Tan, J.C., Kainulainen, J., Ma, B. and Butler, M.J.: The distribution of mass surface densities in a high-mass protocluster. *The Astrophysical Journal Letters* 829, id. L19 (8 pp) (2016).
- Lindroos, L., Knudsen, K.K., Fan, L., Conway, J., Coppin, K., Decarli, R., Drouart, G., Hodge, J.A., Karim, A., Simpson, J.M. and Wardlow, J.: Estimating sizes of faint, distant galaxies in the submillimetre regime. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 1192-1202 (2016).
- Lippok, N., Launhardt, R., Henning, T., Balog, Z., Beuther, H., Kainulainen, J., Krause, O., Linz, H., Nielbock, M., Ragan, S.E., Robitaille, T.P., Sadavoy, S.I. and Schmiedeke, A.: Earliest phases of star formation (EPoS). Dust temperature distributions in isolated starless cores. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A61 (16 pp) (2016).
- Liu, H.B., Galván-Madrid, R., Vorobyov, E.I., Kóspál, Á., Rodríguez, L.F., Dunham, M.M., Hirano, N., Henning, T., Takami, M., Dong, R., Hashimoto, J., Hasegawa, Y. and Carrasco-González, C.:

- Absence of significant cool disks in young stellar objects exhibiting repetitive optical outbursts. *The Astrophysical Journal Letters* 816, id. L29 (6 pp) (2016).
- Liu, H.B., Takami, M., Kudo, T., Hashimoto, J., Dong, R., Vorobyov, E.I., Pyo, T.-S., Fukagawa, M., Tamura, M., Henning, T., Dunham, M.M., Karr, J.L., Kusakabe, N. and Tsuribe, T.: Circumstellar disks of the most vigorously accreting young stars. *Science Advances* 2, id. e1500875 (7 pp) (2016).
- Lomax, J.R., Wisniewski, J.P., Grady, C.A., McElwain, M.W., Hashimoto, J., Kudo, T., Kusakabe, N., Okamoto, Y.K., Fukagawa, M., Abe, L., Brandner, W., Brandt, T.D., Carson, J.C., Currie, T.M., Egner, S., Feldt, M., Goto, M., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S., Henning, T., Hodapp, K.W., Inoue, A., Ishii, M. et al.: Constraining the movement of the spiral features and the locations of planetary bodies within the AB Aur system. *The Astrophysical Journal* 828, id. 2 (8 pp) (2016).
- López, S., D'Odorico, V., Ellison, S.L., Becker, G.D., Christensen, L., Cupani, G., Denney, K.D., Pâris, I., Worseck, G., Berg, T.A.M., Cristiani, S., Dessauges-Zavadsky, M., Haehnelt, M., Hamann, F., Hennawi, J., Iršič, V., Kim, T.-S., López, P., Lund Saust, R., Ménard, B., Perrotta, S., Prochaska, J.X., Sánchez-Ramírez, R., Vestergaard, M., Viel, M. et al.: XQ-100: A legacy survey of one hundred  $3.5 < z < 4.5$  quasars observed with VLT/X-shooter. *Astronomy and Astrophysics* 594, id. A91 (26 pp) (2016).
- López-Gonzaga, N., Burtcher, L., Tristram, K.R.W., Meisenheimer, K. and Schartmann, M.: Mid-infrared interferometry of 23 AGN tori: On the significance of polar-elongated emission. *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A47 (11 pp) (2016).
- Luo, R., Hao, L., Blanc, G.A., Jogee, S., van den Bosch, R.C.E. and Weinzirl, T.: The VIRUS-P exploration of nearby galaxies (VENGA): Radial gas inflow and shock excitation in NGC 1042. *The Astrophysical Journal* 823, id. 85 (22 pp) (2016).
- Lyubenova, M., Martín-Navarro, I., van de Ven, G., Falcón-Barroso, J., Galbany, L., Gallazzi, A., García-Benito, R., González Delgado, R., Husemann, B., La Barbera, F., Marino, R.A., Mast, D., Mendez-Abreu, J., Peletier, R.F.P., Sánchez-Blázquez, P., Sánchez, S.F., Trager, S.C., van den Bosch, R.C.E., Vazdekis, A., Walcher, C.J., Zhu, L., Zibetti, S., Ziegler, B., Bland-Hawthorn, J. and Collaboration, C.: IMF shape constraints from stellar populations and dynamics from CALIFA. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 3220-3225 (2016).
- Macciò, A.V., Udrescu, S.M., Dutton, A.A., Obreja, A., Wang, L., Stinson, G.R. and Kang, X.: NIHAO X: reconciling the local galaxy velocity function with cold dark matter via mock H I observations. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, L69-L73 (2016).
- Maciejewski, G., Dimitrov, D., Mancini, L., Southworth, J., Ciceri, S., D'Ago, G., Bruni, I., Raetz, S., Nowak, G., Ohlert, J., Puchalski, D., Saral, G., Derman, E., Petrucci, R., Jofre, E., Seeliger, M. and Henning, T.: New transit observations for HAT-P-30 b, HAT-P-37 b, TrES-5 b, WASP-28 b, WASP-36 b and WASP-39 b. *Acta Astronomica* 66, 55-74 (2016).
- Mackey, A.D., Beasley, M.A. and Leaman, R.: No sign (yet) of intergalactic globular clusters in the Local Group. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, L114-L118 (2016).
- Maire, A.-L., Bonnefoy, M., Ginski, C., Vigan, A., Messina, S., Mesa, D., Galicher, R., Gratton, R., Desidera, S., Kopytova, T.G., Millward, M., Thalmann, C., Claudi, R.U., Ehrenreich, D., Zurlo, A., Chauvin, G., Antichi, J., Baruffolo, A., Bazzon, A., Beuzit, J.-L., Blanchard, P., Boccaletti, A., de Boer, J., Carle, M., Cascone, E. et al.: First light of the VLT planet finder SPHERE. II. The physical properties and the architecture of the young systems PZ Telescopii and HD 1160 revisited. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A56 (24 pp) (2016).
- Mairs, S., Johnstone, D., Kirk, H., Buckle, J., Berry, D.S., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M.J., Fich, M., Graves, S., Hatchell, J., Jenness, T., Mottram, J.C., Nutter, D., Pattle, K., Pineda, J.E., Salji, C., Di Francesco, J., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D., Bastien, P., Bresnahan, D., Butner, H., Chen, M., Chrysostomou, A., Coudé, S. et al.: The JCMT Gould Belt Survey: a first look at Southern Orion A with SCUBA-2. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 4022-4048 (2016).
- Man, A.W.S., Greve, T.R., Toft, S., Magnelli, B., Karim, A., Ilbert, O., Salvato, M., Le Floch, E., Bertoldi, F., Casey, C.M., Lee, N., Li, Y., Navarrete, F., Sheth, K., Smolčić, V., Sanders, D.B., Schinnerer, E. and Zirm, A.W.: Confirming the existence of a quiescent galaxy population out to  $z=3$ : A stacking analysis of mid-, far-infrared and radio data. *The Astrophysical Journal* 820, id. 11 (14 pp) (2016).
- Mancini, L., Giordano, M., Mollière, P., Southworth, J., Brahm, R., Ciceri, S. and Henning, T.: An optical transmission spectrum of the transiting hot Jupiter in the metal-poor WASP-98 planetary system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 1053-1061 (2016).
- Mancini, L., Kemmer, J., Southworth, J., Bott, K., Mollière, P., Ciceri, S., Chen, G. and Henning, T.: An optical transmission spectrum of the giant planet WASP-36 b. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 1393-1402 (2016).
- Mancini, L., Lillo-Box, J., Southworth, J., Borsato, L., Gandolfi, D., Ciceri, S., Barrado, D., Brahm, R. and Henning, T.: Kepler-539: A young extrasolar system with two giant planets on wide orbits and in gravitational interaction. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A112 (12 pp) (2016).
- Mancini, L., Southworth, J., Ciceri, S., Tregloan-Reed, J., Crossfield, I., Nikolov, N., Bruni, I., Zambelli, R. and Henning, T.: Erratum: Physical properties, star-spot activity, orbital obliquity and transmission spectrum of the Qatar-2 planetary system from multicolour photometry. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 4266-4266 (2016).
- Manjavacas, E., Goldman, B., Alcalá, J.M., Zapatero-Osorio, M.R., Béjar, V.J.S., Homeier, D., Bonnefoy, M., Smart, R.L., Henning, T. and Allard, F.: Hunting for brown dwarf binaries and testing atmospheric models with X-Shooter. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 1341-1363 (2016).
- Manoj, P., Green, J.D., Megeath, S.T., Evans, N.J., II, Stutz, A.M., Tobin, J.J., Watson, D.M., Fischer, W.J., Furlan, E. and Henning, T.: The evolution of far-infrared CO emission from protostars. *The Astrophysical Journal* 831, id. 69 (11 pp) (2016).
- Marchesi, S., Civano, F., Elvis, M., Salvato, M., Brusa, M., Comastri, A., Gilli, R., Hasinger, G., Lanzuisi, G., Miyaji, T., Treister, E., Urry, C.M., Vignali, C., Zamorani, G., Allevato, V., Cappelluti, N., Cardamone, C., Finoguenov, A., Griffiths, R.E., Karim, A., Laigle, C., LaMassa, S.M., Jahnke, K., Ranalli, P., Schawinski, K. et al.: The Chandra COSMOS Legacy survey: optical/IR identifications. *The Astrophysical Journal* 817, id. 34 (23 pp) (2016).

- Marino, A.F., Milone, A.P., Casagrande, L., Collet, R., Dotter, A., Johnson, C.I., Lind, K., Bedin, L.R., Jerjen, H., Aparicio, A. and Sbordone, L.: Chemical abundances in the multiple sub-giant branch of 47 Tucanae: insights on its faint sub-giant branch component. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 610-623 (2016).
- Marsh, K.A., Kirk, J.M., André, P., Griffin, M.J., Könyves, V., Palmeirim, P., Men'shchikov, A., Ward-Thompson, D., Benedettini, M., Bresnahan, D.W., Francesco, J.D., Elia, D., Motte, F., Peretto, N., Pezzuto, S., Roy, A., Sadavoy, S., Schneider, N., Spinoglio, L. and White, G.J.: A census of dense cores in the Taurus L1495 cloud from the Herschel. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 342-356 (2016).
- Martig, M., Fouesneau, M., Rix, H.-W., Ness, M., Mészáros, S., García-Hernández, D.A., Pinsonneault, M., Serenelli, A., Aguirre, V.S. and Zamora, O.: Red giant masses and ages derived from carbon and nitrogen abundances. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 3655-3670 (2016).
- Martig, M., Minchev, I., Ness, M., Fouesneau, M. and Rix, H.-W.: A radial age gradient in the geometrically thick disk of the Milky Way. *The Astrophysical Journal* 831, id. 139 (6 pp) (2016).
- Martin, N.F., Geha, M., Ibata, R.A., Collins, M.L.M., Laevens, B.P.M., Bell, E.F., Rix, H.-W., Ferguson, A.M.N., Chambers, K.C., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: Is Draco II one of the faintest dwarf galaxies? First study from Keck/DEIMOS spectroscopy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, L59-L63 (2016).
- Martin, N.F., Ibata, R.A., Collins, M.L.M., Rich, R.M., Bell, E.F., Ferguson, A.M.N., Laevens, B.P.M., Rix, H.-W., Chapman, S.C. and Koch, A.: Triangulum II: A very metal-poor and dynamically hot stellar system. *The Astrophysical Journal* 818, id. 40 (7 pp) (2016).
- Martin, N.F., Ibata, R.A., Lewis, G.F., McConnachie, A., Babul, A., Bate, N.F., Bernard, E., Chapman, S.C., Collins, M.M.L., Conn, A.R., Crnojević, D., Fardal, M.A., Ferguson, A.M.N., Irwin, M., Mackey, A.D., McMonigal, B., Navarro, J.F. and Rich, R.M.: The PAndAS View of the Andromeda Satellite System. II. Detailed Properties of 23 M31 Dwarf Spheroidal Galaxies. *The Astrophysical Journal* 833, id. 167 (27 pp) (2016).
- Martin, N.F., Jungbluth, V., Nidever, D.L., Bell, E.F., Besla, G., Blum, R.D., Cioni, M.-R.L., Conn, B.C., Kaleida, C.C., Gallart, C., Jin, S., Majewski, S.R., Martínez-Delgado, D., Monachesi, A., Muñoz, R.R., Noël, N.E.D., Olsen, K., Stringfellow, G.S., van der Marel, R.P., Vivas, A.K., Walker, A.R. and Zaritsky, D.: SMASH I: A very faint globular cluster disrupting in the outer reaches of the LMC? *The Astrophysical Journal Letters* 830, id. L10 (6 pp) (2016).
- Martín-Navarro, I., Brodie, J.P., van den Bosch, R.C.E., Romanowsky, A.J. and Forbes, D.A.: Stellar populations across the black hole mass–velocity dispersion relation. *The Astrophysical Journal Letters* 832, id. L11 (5 pp) (2016).
- Martínez-Delgado, D., Läsker, R., Sharina, M., Toloba, E., Fliri, J., Beaton, R., Valls-Gabaud, D., Karachentsev, I.D., Chonis, T.S., Grebel, E.K., Forbes, D.A., Romanowsky, A.J., Gallego-Labordá, J., Teuwen, K., Gómez-Flechoso, M.A., Wang, J., Guhathakurta, P., Kaisin, S. and Ho, N.: Discovery of an ultra-diffuse galaxy in the Pisces–Perseus supercluster. *The Astronomical Journal* 151, id. 96 (13 pp) (2016).
- Martínez-Galarza, J.R., Smith, H.A., Lanz, L., Hayward, C.C., Zezas, A., Rosenthal, L., Weiner, A., Hung, C., Ashby, M.L.N. and Groves, B.: Variations of the ISM compactness across the main sequence of star forming galaxies: Observations and simulations. *The Astrophysical Journal* 817, id. 76 (18 pp) (2016).
- Mastrobuono-Battisti, A. and Perets, H.B.: Second-generation stellar disks in dense star clusters and cluster ellipticities. *The Astrophysical Journal* 823, id. 61 (8 pp) (2016).
- Matsunaga, N., Feast, M.W., Bono, G., Kobayashi, N., Inno, L., Nagayama, T., Nishiyama, S., Matsuoka, Y. and Nagata, T.: A lack of classical Cepheids in the inner part of the Galactic disc. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 414-420 (2016).
- Matter, A., Labadie, L., Augereau, J.C., Kluska, J., Crida, A., Carmona, A., Gonzalez, J.F., Thi, W.F., Le Bouquin, J.-B., Olofsson, J. and Lopez, B.: Inner disk clearing around the Herbig Ae star HD 139614: Evidence for a planet-induced gap? *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A11 (17 pp) (2016).
- McClure, M.K., Bergin, E.A., Cleaves, L.I., van Dishoeck, E.F., Blake, G.A., Evans, N.J., II, Green, J.D., Henning, T., Öberg, K.I., Pontoppidan, K.M. and Salyk, C.: Mass measurements in protoplanetary disks from hydrogen deuteride. *The Astrophysical Journal* 831, id. 167 (13 pp) (2016).
- McLeod, A.F., Gritschneider, M., Dale, J.E., Ginsburg, A., Klaassen, P.D., Mottram, J.C., Preibisch, T., Ramsay, S., Reiter, M. and Testi, L.: Connecting the dots: a correlation between ionizing radiation and cloud mass-loss rate traced by optical integral field spectroscopy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 3537-3569 (2016).
- McMonigal, B., Bate, N.F., Conn, A.R., Mackey, A.D., Lewis, G.F., Irwin, M.J., Martin, N.F., McConnachie, A.W., Ferguson, A.M.N., Ibata, R.A. and Huxor, A.P.: Major substructure in the M31 Outer Halo: the East Cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 405-416 (2016).
- McMonigal, B., Lewis, G.F., Brewer, B.J., Irwin, M.J., Martin, N.F., McConnachie, A.W., Ibata, R.A., Ferguson, A.M.N., Mackey, A.D. and Chapman, S.C.: The elusive stellar halo of the Triangulum galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 4374-4388 (2016).
- Mechtley, M., Jahnke, K., Windhorst, R.A., Andrae, R., Cisternas, M., Cohen, S.H., Hewlett, T., Koekemoer, A.M., Schramm, M., Schulze, A., Silverman, J.D., Villforth, C., van der Wel, A. and Wisotzki, L.: Do the most massive black holes at  $z = 2$  grow via major mergers? *The Astrophysical Journal* 830, id. 156 (29 pp) (2016).
- Meidt, S.E.: How galactic environment regulates star formation. *The Astrophysical Journal* 818, id. 69 (16 pp) (2016).
- Meingast, S., Alves, J., Mardones, D., Teixeira, P.S., Lombardi, M., Großschedl, J., Ascenso, J., Bouy, H., Forbrich, J., Goodman, A., Hacar, A., Hasenberger, B., Kainulainen, J., Kubiak, K., Lada, C., Lada, E., Moitinho, A., Petr-Gotzens, M., Rodrigues, L. and Román-Zúñiga, C.G.: VISION - Vienna survey in Orion. I. VISTA Orion A Survey. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A153 (31 pp) (2016).
- Mentz, J.J., La Barbera, F., Peletier, R.F., Falcón-Barroso, J., Lisker, T., van de Ven, G., Loubser, S.I., Hilker, M., Sánchez-Janssen, R., Napolitano, N., Cantiello, M., Capaccioli, M., Norris, M., Paolillo, M., Smith, R., Beasley, M.A., Lyubenova, M., Muñoz, R. and Puzia, T.: Abundance ratios and IMF slopes in the dwarf elliptical

- cal galaxy NGC 1396 with MUSE. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 2819-2838 (2016).
- Mesa, D., Vigan, A., D'Orazi, V., Ginski, C., Desidera, S., Bonnefoy, M., Gratton, R., Langlois, M., Marzari, F., Messina, S., Antichi, J., Biller, B., Bonavita, M., Cascone, E., Chauvin, G., Claudi, R.U., Curtis, I., Fantinel, D., Feldt, M., Garufi, A., Galicher, R., Henning, T., Incorvaia, S., Lagrange, A.-M., Millward, M. et al.: Characterizing HR 3549 B using SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A119 (12 pp) (2016).
- Miguel, Y. and Ida, S.: A semi-analytical model for exploring Galilean satellites formation from a massive disk. *Icarus* 266, 1-14 (2016).
- Min, M., Bouwman, J., Dominik, C., Waters, L.B.F.M., Pontoppidan, K.M., Hony, S., Mulders, G.D., Henning, T., van Dishoeck, E.F., Woitke, P., Evans, N.J., II and Team, D.: The abundance and thermal history of water ice in the disk surrounding HD 142527 from the DIGIT Herschel Key Program. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A11 (11 pp) (2016).
- Minchev, I., Chiappini, C. and Martig, M.: Milky Way chemo-dynamics in the era of Gaia. *Astronomische Nachrichten* 337, 944-948 (2016).
- Miralles-Caballero, D., Díaz, A.I., López-Sánchez, Á.R., Rosales-Ortega, F.F., Monreal-Ibero, A., Pérez-Montero, E., Kehrig, C., García-Benito, R., Sánchez, S.F., Walcher, C.J., Galbany, L., Iglesias-Páramo, J., Vilchez, J.M., González Delgado, R.M., van de Ven, G., Barrera-Ballesteros, J., Lyubenova, M., Meidt, S., Falcon-Barroso, J., Mast, D., Mendoza, M.A. and Collaboration, C.: First survey of Wolf-Rayet star populations over the full extension of nearby galaxies observed with CALIFA. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A105 (31 pp) (2016).
- Miranda, M.S., Pilkington, K., Gibson, B.K., Brook, C.B., Sánchez-Blázquez, P., Minchev, I., Few, C.G., Smith, R., Domínguez-Tenreiro, R., Obreja, A., Bailin, J. and Stinson, G.S.: Origin of the metallicity distribution in the thick disc. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A10 (14 pp) (2016).
- Mizuki, T., Yamada, T., Carson, J.C., Kuzuhara, M., Nakagawa, T., Nishikawa, J., Sitko, M.L., Kudo, T., Kusakabe, N., Hashimoto, J., Abe, L., Brander, W., Brandt, T.D., Egner, S., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S., Henning, T., Hodapp, K.W., Ishii, M., Iye, M. et al.: High-contrast imaging of  $\epsilon$  Eridani with ground-based instruments. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A79 (8 pp) (2016).
- Mogotsi, K.M., de Blok, W.J.G., Caldú-Primo, A., Walter, F., Ianjamasimanana, R. and Leroy, A.K.: HI and CO velocity dispersions in nearby galaxies. *The Astronomical Journal* 151, id. 15 (11 pp) (2016).
- Molinari, S., Merello, M., Elia, D., Cesaroni, R., Testi, L. and Robitaille, T.: Calibration of evolutionary diagnostics in high-mass star formation. *The Astrophysical Journal Letters* 826, id. L8 (8 pp) (2016).
- Molinari, S., Schisano, E., Elia, D., Pestalozzi, M., Traficante, A., Pezzuto, S., Swinyard, B.M., Noriega-Crespo, A., Bally, J., Moore, T.J.T., Plume, R., Zavagno, A., di Giorgio, A.M., Liu, S.J., Pilbratt, G.L., Mottram, J.C., Russeil, D., Piazzi, L., Veneziani, M., Benedettini, M., Calzoletti, L., Faustini, F., Natoli, P., Piacentini, F., Merello, M. et al.: Hi-GAL, the Herschel infrared Galactic Plane Survey: photometric maps and compact source catalogues. First data release for the inner Milky Way:  $+68^\circ \geq l \geq -70^\circ$ . *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A149 (33 pp) (2016).
- Momcheva, I.G., Brammer, G.B., van Dokkum, P.G., Skelton, R.E., Whitaker, K.E., Nelson, E.J., Fumagalli, M., Maseda, M.V., Leja, J., Franx, M., Rix, H.-W., Bezanson, R., Da Cunha, E., Dickey, C., Förster Schreiber, N.M., Illingworth, G., Kriek, M., Labbé, I., Ulf Lange, J., Lundgren, B.F., Magee, D., Marchesini, D., Oesch, P., Pacifici, C., Patel, S.G. et al.: The 3D-HST survey: Hubble Space Telescope WFC3/G141 grism spectra, redshifts, and emission line measurements for  $\sim 100,000$  galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 225, id. 27 (35 pp) (2016).
- Monelli, M., Martínez-Vázquez, C.E., Bernard, E.J., Gallart, C., Skillman, E.D., Weisz, D.R., Dolphin, A.E., Hidalgo, S.L., Cole, A.A., Martin, N.F., Aparicio, A., Cassisi, S., Boylan-Kolchin, M., Mayer, L., McConnachie, A., McQuinn, K.B.W. and Navarro, J.F.: The ISLANDS Project. I. Andromeda XVI, an extremely low mass galaxy not quenched by reionization. *The Astrophysical Journal* 819, id. 147 (14 pp) (2016).
- Monroe, T.R., Prochaska, J.X., Tejos, N., Worseck, G., Hennawi, J.F., Schmidt, T., Tumlinson, J. and Shen, Y.: The UV-bright Quasar Survey (UVQS): DRI. *The Astronomical Journal* 152, id. 25 (11 pp) (2016).
- Moór, A., Kóspál, Á., Ábrahám, P., Balog, Z., Csengeri, T., Henning, T., Juhász, A. and Kiss, C.: New debris disks in nearby young moving groups. *The Astrophysical Journal* 826, id. 123 (16 pp) (2016).
- Mordasini, C., van Boekel, R., Mollière, P., Henning, T. and Benneke, B.: The imprint of exoplanet formation history on observable present-day spectra of hot Jupiters. *The Astrophysical Journal* 832, id. 41 (32 pp) (2016).
- Morganson, E., Conn, B., Rix, H.-W., Bell, E.F., Burgett, W.S., Chambers, K., Dolphin, A., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K., Kaiser, N., Magnier, E.A., Martin, N.F., Martínez-Delgado, D., Metcalfe, N., Schlafly, E.F., Slater, C.T., Wainscoat, R.J. and Waters, C.Z.: Mapping the Monoceros Ring in 3D with Pan-STARRS1. *The Astrophysical Journal* 825, id. 140 (26 pp) (2016).
- Mortlock, A., Conselice, C.J., Hartley, W.G., Duncan, K., Lani, C., Ownsworth, J.R., Almaini, O., van der Wel, A., Huang, K.-H., Ashby, M.L.N., Willner, S.P., Fontana, A., Dekel, A., Koekemoer, A.M., Ferguson, H.C., Faber, S.M., Grogin, N.A. and Kocevski, D.D.: Erratum: Deconstructing the Galaxy stellar mass function with UKIDSS and CANDELS: the impact of colour, structure and environment. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 3478-3478 (2016).
- Mountrichas, G., Georgakakis, A., Menzel, M.-L., Fanidakis, N., Merloni, A., Liu, Z., Salvato, M. and Nandra, K.: The clustering amplitude of X-ray-selected AGN at  $z \sim 0.8$ : evidence for a negative dependence on accretion luminosity. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 4195-4204 (2016).
- Müller, T.G., Balog, Z., Nielbock, M., Moreno, R., Klaas, U., Moór, A., Linz, H. and Feuchtgruber, H.: Far-infrared photometric observations of the outer planets and satellites with Herschel-PACS. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A109 (21 pp) (2016).
- Mullins, A.M., Loughnane, R.M., Redman, M.P., Wiles, B., Guegan, N., Barrett, J. and Keto, E.R.: Radiative transfer of HCN: interpreting observations of hyperfine anomalies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 2882-2892 (2016).
- Muñoz-Mateos, J.C., Sheth, K., Gil de Paz, A., Meidt, S., Athanassoula, E., Bosma, A., Comerón, S., Elmegreen, D.M., Elmegreen, B.G., Erroz-Ferrer, S., Gadotti, D.A., Hinz, J.L., Ho, L.C., Holwerda,

- B., Jarrett, T.H., Kim, T., Knäpen, J.H., Laine, J., Laurikainen, E., Madore, B.F., Menendez-Delmestre, K., Mizusawa, T., Regan, M., Salo, H., Schinnerer, E. et al.: Erratum: "The Impact of Bars on Disk Breaks as Probed by S4G Imaging" (2013, ApJ, 771, 59). *The Astrophysical Journal* 818, id. 101 (1 pp) (2016).
- Nelson, E.J., van Dokkum, P.G., Förster Schreiber, N.M., Franx, M., Brammer, G.B., Momcheva, I.G., Wuyts, S., Whitaker, K.E., Skelton, R.E., Fumagalli, M., Hayward, C.C., Kriek, M., Labbé, I., Leja, J., Rix, H.-W., Tacconi, L.J., van der Wel, A., van den Bosch, F.C., Oesch, P.A., Dickey, C. and Ulf Lange, J.: Where stars form: Inside-out growth and coherent star formation from HST H $\alpha$  maps of 3200 galaxies across the main sequence at  $0.7 < z < 1.5$ . *The Astrophysical Journal* 828, id. 27 (24 pp) (2016).
- Ness, M. and Freeman, K.: The metallicity distribution of the Milky Way bulge. *Publications of the Astronomical Society of Australia* 33, id.e022 (8 pp) (2016).
- Ness, M., Hogg, D.W., Rix, H.-W., Martig, M., Pinsonneault, M.H. and Ho, A.Y.Q.: Spectroscopic determination of masses (and implied ages) for red giants. *The Astrophysical Journal* 823, id. 114 (19 pp) (2016).
- Ness, M. and Lang, D.: The X-shaped bulge of the Milky Way revealed by WISE. *The Astronomical Journal* 152, id. 14 (4 pp) (2016).
- Ness, M., Zasowski, G., Johnson, J.A., Athanassoula, E., Majewski, S.R., García Pérez, A.E., Bird, J., Nidever, D., Schneider, D.P., Sobek, J., Frinchaboy, P., Pan, K., Bizyaev, D., Oravetz, D. and Simmons, A.: APOGEE kinematics. I. Overview of the kinematics of the Galactic bulge as mapped by APOGEE. *The Astrophysical Journal* 819, id. 2 (16 pp) (2016).
- Norris, M.A., Van de Ven, G., Schinnerer, E., Crain, R.A., Meidt, S., Groves, B., Bower, R.G., Furlong, M., Schaller, M., Schaye, J. and Theuns, T.: Being WISE II: Reducing the influence of star formation history on the mass-to-light ratio of quiescent galaxies. *The Astrophysical Journal* 832, id. 198 (14 pp) (2016).
- Obermeier, C., Henning, T., Schlieder, J.E., Crossfield, I.J.M., Petigura, E.A., Howard, A.W., Sinukoff, E., Isaacson, H., Ciardi, D.R., David, T.J., Hillenbrand, L.A., Beichman, C.A., Howell, S.B., Horch, E., Everett, M., Hirsch, L., Teske, J., Christiansen, J.L., Lépine, S., Aller, K.M., Liu, M.C., Saglia, R.P., Livingston, J. and Kluge, M.: K2 discovers a busy bee: An unusual transiting Neptune found in the Beehive cluster. *The Astronomical Journal* 152, id. 223 (12 pp) (2016).
- Obermeier, C., Koppenhoefer, J., Saglia, R.P., Henning, T., Bender, R., Kodric, M., Deacon, N., Riffeser, A., Burgett, W., Chambers, K.C., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Kudritzki, R.-P., Magnier, E.A., Metcalfe, N., Price, P.A., Sweeney, W., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: Pan-Planets: Searching for hot Jupiters around cool dwarfs. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A49 (15 pp) (2016).
- Obreja, A., Stinson, G.S., Dutton, A.A., Macciò, A.V., Wang, L. and Kang, X.: NIHAO VI. The hidden discs of simulated galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, 467-486 (2016).
- Oh, D., Hashimoto, J., Carson, J.C., Janson, M., Kwon, J., Nakagawa, T., Mayama, S., Uyama, T., Yang, Y., Kudo, T., Kusakabe, N., Abe, L., Akiyama, E., Brandner, W., Brandt, T.D., Currie, T., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S., Henning, T., Hodapp, K.W. et al.: Resolved near-infrared image of the inner cavity in the GM Aur transitional disk. *The Astrophysical Journal Letters* 831, id. L7 (6 pp) (2016).
- Oh, D., Hashimoto, J., Tamura, M., Wisniewski, J., Akiyama, E., Currie, T., Mayama, S., Takami, M., Thalmann, C., Kudo, T., Kusakabe, N., Abe, L., Brandner, W., Brandt, T.D., Carson, J.C., Egner, S., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S., Henning, T., Hodapp, K.W. et al.: Near-infrared imaging polarimetry of LkCa 15: A possible warped inner disk. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68, id. L3 (6 pp) (2016).
- Ohta, Y., Fukagawa, M., Sitko, M.L., Muto, T., Kraus, S., Grady, C.A., Wisniewski, J.P., Swearingen, J.R., Shibai, H., Sumi, T., Hashimoto, J., Kudo, T., Kusakabe, N., Momose, M., Okamoto, Y., Kotani, T., Takami, M., Currie, T., Thalmann, C., Janson, M., Akiyama, E., Follette, K.B., Mayama, S., Abe, L., Brandner, W. et al.: Extreme asymmetry in the polarized disk of V1247 Orionis. *Publications of the Astronomical Society of Japan* 68, id. 53 (12 pp) (2016).
- Olofsson, J., Samland, M., Avenhaus, H., Caceres, C., Henning, T., Moór, A., Milli, J., Canovas, H., Quanz, S.P., Schreiber, M.R., Augereau, J.-C., Bayo, A., Bazzon, A., Beuzit, J.-L., Boccaletti, A., Buenzli, E., Casassus, S., Chauvin, G., Dominik, C., Desidera, S., Feldt, M., Gratton, R., Janson, M., Lagrange, A.-M., Langlois, M. et al.: Azimuthal asymmetries in the debris disk around HD 61005. A massive collision of planetesimals? *Astronomy and Astrophysics* 591, id. A108 (22 pp) (2016).
- Ordenes-Briceño, Y., Georgiev, I.Y., Puzia, T.H., Goudfrooij, P. and Arnaboldi, M.: Compact stellar systems in the polar ring galaxies NGC 4650A and NGC 3808B: Clues to polar disk formation. *Astronomy and Astrophysics* 585, id. A156 (15 pp) (2016).
- Ordenes-Briceño, Y., Taylor, M.A., Puzia, T.H., Muñoz, R.P., Eigenthaler, P., Georgiev, I.Y., Goudfrooij, P., Hilker, M., Lançon, A., Mamon, G., Mieske, S., Miller, B.W., Peng, E.W. and Sánchez-Janssen, R.: Faint dwarf galaxies in Hickson Compact Group 90. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1284-1290 (2016).
- Orsi, Á.A., Fanidakis, N., Lacey, C.G. and Baugh, C.M.: The environments of high-redshift radio galaxies and quasars: probes of protoclusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 3827-3839 (2016).
- Ortiz, M., Reffert, S., Trifonov, T., Quirrenbach, A., Mitchell, D.S., Nowak, G., Buenzli, E., Zimmerman, N., Bonnefoy, M., Skemer, A., Defrère, D., Lee, M.H., Fischer, D.A. and Hinz, P.M.: Precise radial velocities of giant stars. IX. HD 59686 Ab: a massive circumstellar planet orbiting a giant star in a 13.6 au eccentric binary system. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A55 (14 pp) (2016).
- Palaversa, L., Gezari, S., Sesar, B., Stuart, J.S., Wozniak, P., Holl, B. and Ivezić, Ž.: Revealing the nature of extreme coronal-line emitter SDSS J095209.56+214313.3. *The Astrophysical Journal* 819, id. 151 (7 pp) (2016).
- Parfenov, S.Y., Semenov, D.A., Sobolev, A.M. and Gray, M.D.: Towards detecting methanol emission in low-mass protoplanetary discs with ALMA: the role of non-LTE excitation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 2648-2663 (2016).
- Pascucci, I., Testi, L., Herczeg, G.J., Long, F., Manara, C.F., Hendlar, N., Mulders, G.D., Krijt, S., Ciesla, F., Henning, T., Mohanty, S., Drabek-Maunder, E., Apai, D., Szűcs, L., Sacco, G. and Olofsson,

- J.: A steeper than linear disk mass–stellar mass scaling relation. *The Astrophysical Journal* 831, id. 125 (19 pp) (2016).
- Patrick, L.R., Evans, C.J., Davies, B., Kudritzki, R.-P., Hénault-Brunet, V., Bastian, N., Lapenna, E. and Bergemann, M.: Chemistry and kinematics of red supergiant stars in the young massive cluster NGC 2100. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 3968-3976 (2016).
- Penev, K., Hartman, J.D., Bakos, G.Á., Ciceri, S., Brahm, R., Bayliss, D., Bento, J., Jordán, A., Csabry, Z., Bhatti, W., de Val-Borro, M., Espinoza, N., Zhou, G., Mancini, L., Rabus, M., Suc, V., Henning, T., Schmidt, B., Noyes, R.W., Lázár, J., Papp, I. and Sári, P.: HATS-18b: An extreme short-period massive transiting planet spinning up its star. *The Astronomical Journal* 152, id. 127 (11 pp) (2016).
- Penzo, C., Macciò, A.V., Baldi, M., Casarini, L., Oñorbe, J. and Dutton, A.A.: Effects of coupled dark energy on the Milky Way and its satellites. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 2490-2501 (2016).
- Pérez, L.M., Carpenter, J.M., Andrews, S.M., Ricci, L., Isella, A., Linz, H., Sargent, A.I., Wilner, D.J., Henning, T., Deller, A.T., Chandler, C.J., Dullemond, C.P., Lazio, J., Menten, K.M., Corder, S.A., Storm, S., Testi, L., Tazzari, M., Kwon, W., Calvet, N., Greaves, J.S., Harris, R.J. and Mundy, L.G.: Spiral density waves in a young protoplanetary disk. *Science* 353, 1519-1521 (2016).
- Perrot, C., Boccaletti, A., Pantin, E., Augereau, J.-C., Lagrange, A.-M., Galicher, R., Maire, A.-L., Mazoyer, J., Milli, J., Rousset, G., Gratton, R., Bonnefoy, M., Brandner, W., Buenzli, E., Langlois, M., Lannier, J., Mesa, D., Peretti, S., Salter, G., Sissa, E., Chauvin, G., Desidera, S., Feldt, M., Vigan, A., Di Folco, E. et al.: Discovery of concentric broken rings at sub-arcsec separations in the HD 141569A gas-rich, debris disk with VLT/SPHERE. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. L7 (9 pp) (2016).
- Perrotta, S., D’Odorico, V., Prochaska, J.X., Cristiani, S., Cupani, G., Ellison, S., López, S., Becker, G.D., Berg, T.A.M., Christensen, L., Denney, K.D., Hamann, F., Pâris, I., Vestergaard, M. and Worseck, G.: Nature and statistical properties of quasar associated absorption systems in the XQ-100 Legacy Survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 3285-3301 (2016).
- Pinilla, P., Flock, M., Ovelar, M.d.J. and Birnstiel, T.: Can dead zones create structures like a transition disk? *Astronomy and Astrophysics* 596, id. A81 (13 pp) (2016).
- Pohl, A., Kataoka, A., Pinilla, P., Dullemond, C.P., Henning, T. and Birnstiel, T.: Investigating dust trapping in transition disks with millimeter-wave polarization. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A12 (11 pp) (2016).
- Pokhrel, R., Gutermuth, R., Ali, B., Megeath, T., Pipher, J., Myers, P., Fischer, W.J., Henning, T., Wolk, S.J., Allen, L. and Tobin, J.J.: A Herschel-SPIRE survey of the Mon R2 giant molecular cloud: analysis of the gas column density probability density function. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 22-35 (2016).
- Poleski, R., Zhu, W., Christie, G.W., Udalski, A., Gould, A., Bachelet, E., Skottfelt, J., Calchi Novati, S., Szymański, M.K., Soszyński, I., Pietrzyński, G., Wyrzykowski, L., Ulaczyk, K., Pietrukowicz, P., Kozłowski, S., Skowron, J., Mróz, P., Pawlak, M., Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Fausnaugh, M., Gaudi, B.S., Henderson, C.B., Pogge, R.W. et al.: The Spitzer Microlensing Program as a probe for globular cluster planets: Analysis of OGLE-2015-BLG-0448. *The Astrophysical Journal* 823, id. 63 (11 pp) (2016).
- Pon, A., Johnstone, D., Caselli, P., Fontani, F., Palau, A., Butler, M.J., Kaufman, M., Jiménez-Serra, I. and Tan, J.C.: Mid-J CO shock tracing observations of infrared dark clouds. II. Low-J CO constraints on excitation, depletion, and kinematics. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A96 (23 pp) (2016).
- Pon, A., Kaufman, M.J., Johnstone, D., Caselli, P., Fontani, F., Butler, M.J., Jiménez-Serra, I., Palau, A. and Tan, J.C.: Mid-J CO shock tracing observations of infrared dark clouds. III. SLED fitting. *The Astrophysical Journal* 827, id. 107 (22 pp) (2016).
- Popping, G., van Kampen, E., Decarli, R., Spaans, M., Somerville, R.S. and Trager, S.C.: Sub-mm emission line deep fields: CO and [C II] luminosity functions out to  $z = 6$ . *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 93-110 (2016).
- Povich, M.S., Townsley, L.K., Robitaille, T.P., Broos, P.S., Orbin, W.T., King, R.R., Naylor, T. and Whitney, B.A.: Rapid circumstellar disk evolution and an accelerating star formation rate in the infrared dark cloud M17 SWex. *The Astrophysical Journal* 825, id. 125 (24 pp) (2016).
- Price-Whelan, A.M., Johnston, K.V., Valluri, M., Pearson, S., Küpper, A.H.W. and Hogg, D.W.: Chaotic dispersal of tidal debris. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 1079-1098 (2016).
- Price-Whelan, A.M., Sesar, B., Johnston, K.V. and Rix, H.-W.: Spending too much time at the Galactic bar: Chaotic fanning of the Ophiuchus stream. *The Astrophysical Journal* 824, id. 104 (14 pp) (2016).
- Prusti, T., de Bruijne, J.H.J., Brown, A.G.A., Vallenari, A., Babusiaux, C., Bailer-Jones, C.A.L., Bastian, U., Biermann, M., Evans, D.W., Eyer, L., Jansen, F., Jordi, C., Klioner, S.A., Lammers, U., Lindgren, L., Luri, X., Mignard, F., Milligan, D.J., Panem, C., Poinsignon, V., Pourbaix, D., Randich, S., Sarri, G., Sartoretti, P., Siddiqui, H.I. et al.: The Gaia mission. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A1 (36 pp) (2016).
- Pshirkov, M.S., Vasiliev, V.V. and Postnov, K.A.: Evidence of Fermi bubbles around M31. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459, L76-L80 (2016).
- Querejeta, M., Meidt, S.E., Schinnerer, E., García-Burillo, S., Dobbs, C.L., Colombo, D., Dumas, G., Hughes, A., Kramer, C., Leroy, A.K., Pety, J., Schuster, K.F. and Thompson, T.A.: Gravitational torques imply molecular gas inflow towards the nucleus of M 51. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A33 (19 pp) (2016).
- Querejeta, M., Schinnerer, E., García-Burillo, S., Bigiel, F., Blanc, G.A., Colombo, D., Hughes, A., Kreckel, K., Leroy, A.K., Meidt, S.E., Meier, D.S., Pety, J. and Sliwa, K.: AGN feedback in the nucleus of M 51. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A118 (21 pp) (2016).
- Rabus, M., Jordán, A., Hartman, J.D., Bakos, G.Á., Espinoza, N., Brahm, R., Penev, K., Ciceri, S., Zhou, G., Bayliss, D., Mancini, L., Bhatti, W., de Val-Borro, M., Csabry, Z., Sato, B., Tan, T.-G., Henning, T., Schmidt, B., Bento, J., Suc, V., Noyes, R., Lázár, J., Papp, I. and Sári, P.: HATS-11b AND HATS-12b: Two transiting hot Jupiters orbiting subsolar metallicity stars selected for the K2 campaign 7. *The Astronomical Journal* 152, id. 88 (13 pp) (2016).
- Reggiani, M., Meyer, M.R., Chauvin, G., Vigan, A., Quanz, S.P., Biller, B., Bonavita, M., Desidera, S., Delorme, P., Hagelberg, J., Maire, A.-L., Boccaletti, A., Beuzit, J.-L., Buenzli, E., Carson, J., Covino, E., Feldt, M., Girard, J., Gratton, R., Henning, T., Kasper, M., Lagrange, A.-M., Mesa, D., Messina, S., Montagnier, G. et

- al.: The VLT/NaCo large program to probe the occurrence of exoplanets and brown dwarfs at wide orbits . III. The frequency of brown dwarfs and giant planets as companions to solar-type stars. *Astronomy and Astrophysics* 586, id. A147 (7 pp) (2016).
- Ridden-Harper, A.R., Snellen, I.A.G., Keller, C.U., de Kok, R.J., Di Gloria, E., Hoeijmakers, H.J., Brogi, M., Fridlund, M., Vermeersen, B.L.A. and van Westrenen, W.: Search for an exosphere in sodium and calcium in the transmission spectrum of exoplanet 55 Cancri e. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A129 (13 pp) (2016).
- Rix, H.-W., Ting, Y.-S., Conroy, C. and Hogg, D.W.: Constructing polynomial spectral models for stars. *The Astrophysical Journal Letters* 826, id. L25 (5 pp) (2016).
- Rodeghiero, G., Giro, E., Canestrari, R., Pernechele, C., Sironi, G., Pareschi, G., Lessio, L. and Conconi, P.: Qualification and Testing of a Large Hot Slumped Secondary Mirror for Schwarzschild-Couder Imaging Air Cherenkov Telescopes. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128, id. 128:055001 (12 pp) (2016).
- Romanowsky, A.J., Martínez-Delgado, D., Martín, N.F., Morales, G., Jennings, Z.G., GaBany, R.J., Brodie, J.P., Grebel, E.K., Schedler, J. and Sidonio, M.: Satellite accretion in action: a tidally disrupting dwarf spheroidal around the nearby spiral galaxy NGC 253. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, L103-L107 (2016).
- Röser, S., Schilbach, E. and Goldman, B.: Nine new open clusters within 500 pc from the Sun. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A22 (6 pp) (2016).
- Ruan, J.J., Anderson, S.F., Green, P.J., Morganson, E., Eracleous, M., Myers, A.D., Badenes, C., Bershad, M.A., Brandt, W.N., Chambers, K.C., Davenport, J.R.A., Dawson, K.S., Flewelling, H., Heckman, T.M., Isler, J.C., Kaiser, N., Kneib, J.-P., MacLeod, C.L., Paris, I., Ross, N.P., Runnoe, J.C., Schlafly, E.F., Schmidt, S.J., Schneider, D.P., Schwobe, A.D. et al.: The Time-Domain Spectroscopic Survey: Understanding the optically variable sky with SEQUELS in SDSS-III. *The Astrophysical Journal* 825, id. 137 (16 pp) (2016).
- Ruchti, G.R., Feltzing, S., Lind, K., Caffau, E., Korn, A.J., Schnurr, O., Hansen, C.J., Koch, A., Sbordone, L. and de Jong, R.S.: A new algorithm for optimizing the wavelength coverage for spectroscopic studies: Spectral Wavelength Optimization Code (SWOC). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 461, 2174-2191 (2016).
- Ruge, J.P., Flock, M., Wolf, S., Dzyurkevich, N., Fromang, S., Henning, T., Klahr, H. and Meheut, H.: Gaps, rings, and non-axisymmetric structures in protoplanetary disks: Emission from large grains. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A17 (10 pp) (2016).
- Ruiz-Lara, T., Pérez, I., Florido, E., Sánchez-Blázquez, P., Méndez-Abreu, J., Lyubenova, M., Falcón-Barroso, J., Sánchez-Menguiano, L., Sánchez, S.F., Galbany, L., García-Benito, R., González Delgado, R.M., Husemann, B., Kehrig, C., López-Sánchez, Á.R., Marino, R.A., Mast, D., Papaderos, P., van de Ven, G., Walcher, C.J., Zibetti, S. and Team, C.: No direct coupling between bending of galaxy disc stellar age and light profiles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, L35-L39 (2016).
- Rumble, D., Hatchell, J., Pattle, K., Kirk, H., Wilson, T., Buckle, J., Berry, D.S., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M.J., Fich, M., Jenness, T., Johnstone, D., Mottram, J.C., Nutter, D., Pineda, J.E., Quinn, C., Salji, C., Tisi, S., Walker-Smith, S., Francesco, J.D., Hogerheijde, M.R., Ward-Thompson, D., Bastien, P., Bresnahan, D., Butner, H. et al.: The JCMT Gould Belt Survey: evidence for radiative heating and contamination in the W40 complex. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 4150-4175 (2016).
- Ryu, T., Sato, B.e., Kuzuhara, M., Narita, N., Takahashi, Y.H., Uyama, T., Kudo, T., Kusakabe, N., Hashimoto, J., Omiya, M., Harakawa, H., Abe, L., Ando, H., Brandner, W., Brandt, T.D., Carson, J.C., Currie, T., Egener, S., Feldt, M., Goto, M., Grady, C.A., Guyon, O., Hayano, Y., Hayashi, M., Hayashi, S.S. et al.: High-contrast imaging of intermediate-mass giants with long-term radial velocity trends. *The Astrophysical Journal* 825, id. 127 (13 pp) (2016).
- Sabbi, E., Lennon, D.J., Anderson, J., Cignoni, M., van der Marel, R.P., Zaritsky, D., De Marchi, G., Panagia, N., Gouliermis, D.A., Grebel, E.K., Gallagher, J.S., III, Smith, L.J., Sana, H., Aloisi, A., Tosi, M., Evans, C.J., Arab, H., Boyer, M., de Mink, S.E., Gordon, K., Koekemoer, A.M., Larsen, S.S., Ryon, J.E. and Zeidler, P.: Hubble Tarantula Treasury Project. III. Photometric catalog and resulting constraints on the progression of star formation in the 30 Doradus region. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 222, id. 11 (25 pp) (2016).
- Sadavoy, S.I., Stutz, A.M., Schnee, S., Mason, B.S., Di Francesco, J. and Friesen, R.K.: Dust emissivity in the star-forming filament OMC 2/3. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A30 (11 pp) (2016).
- Salomon, J.-B., Ibata, R.A., Famaey, B., Martin, N.F. and Lewis, G.F.: The transverse velocity of the Andromeda system, derived from the M31 satellite population. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 4432-4440 (2016).
- Sánchez, S.F., García-Benito, R., Zibetti, S., Walcher, C.J., Husemann, B., Mendoza, M.A., Galbany, L., Falcón-Barroso, J., Mast, D., Aceituno, J., Aguerri, J.A.L., Alves, J., Amorim, A.L., Ascasibar, Y., Barrado-Navascues, D., Barrera-Ballesteros, J., Bekeraïté, S., Bland-Hawthorn, J., Cano Díaz, M., Cid Fernandes, R., Cavichia, O., Cortijo, C., Dannerbauer, H., Demleitner, M., Díaz, A. et al.: CALIFA, the Calar Alto Legacy Integral Field Area survey. IV. Third public data release. *Astronomy and Astrophysics* 594, id. A36 (21 pp) (2016).
- Sanchez-Bermudez, J., Hummel, C.A., Tuthill, P., Alberdi, A., Schödel, R., Lacour, S. and Stanke, T.: Unveiling the near-infrared structure of the massive-young stellar object NGC 3603 IRS 9A\* with sparse aperture masking and spectroastrometry. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A117 (13 pp) (2016).
- Sánchez-Ramírez, R., Ellison, S.L., Prochaska, J.X., Berg, T.A.M., López, S., D'Odorico, V., Becker, G.D., Christensen, L., Cupani, G., Denney, K.D., Pâris, I., Worseck, G. and Gorosabel, J.: The evolution of neutral gas in damped Lyman  $\alpha$  systems from the XQ-100 survey. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 4488-4505 (2016).
- Santos-Santos, I.M., Brook, C.B., Stinson, G., Di Cintio, A., Wadsley, J., Domínguez-Tenreiro, R., Gottlöber, S. and Yepes, G.: The distribution of mass components in simulated disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 476-483 (2016).
- Schaerer, D., Izotov, Y.I., Verhamme, A., Orlitová, I., Thuan, T.X., Worseck, G. and Guseva, N.G.: The ionizing photon production efficiency of compact  $z \sim 0.3$  Lyman continuum leakers and comparison with high-redshift galaxies. *Astronomy and Astrophysics* 591, id. L8 (4 pp) (2016).

- Schinnerer, E., Groves, B., Sargent, M.T., Karim, A., Oesch, P.A., Magnelli, B., LeFevre, O., Tasca, L., Civano, F., Cassata, P. and Smolčić, V.: Gas Fraction and Depletion Time of Massive Star-forming Galaxies at  $z \sim 3.2$ : No Change in Global Star Formation Process out to  $z > 3$ . *The Astrophysical Journal* 833, id. 112 (9 pp) (2016).
- Schlafly, E.F., Meisner, A.M., Stutz, A.M., Kainulainen, J., Peek, J.E.G., Tchernyshyov, K., Rix, H.-W., Finkbeiner, D.P., Covey, K.R., Green, G.M., Bell, E.F., Burgett, W.S., Chambers, K.C., Draper, P.W., Flewelling, H., Hodapp, K.W., Kaiser, N., Magnier, E.A., Martin, N.F., Metcalfe, N., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: The Optical-infrared extinction curve and its variation in the Milky Way. *The Astrophysical Journal* 821, id. 78 (25 pp) (2016).
- Schlieder, J.E., Crossfield, I.J.M., Petigura, E.A., Howard, A.W., Aller, K.M., Sinukoff, E., Isaacson, H.T., Fulton, B.J., Ciardi, D.R., Bonnefoy, M., Ziegler, C., Morton, T.D., Lépine, S., Obermeier, C., Liu, M.C., Bailey, V.P., Baranec, C., Beichman, C.A., Defrère, D., Henning, T., Hinz, P., Law, N., Riddle, R. and Skemer, A.: Two small temperate planets transiting nearby M dwarfs in K2 campaigns 0 and 1. *The Astrophysical Journal* 818, id. 87 (15 pp) (2016).
- Schlieder, J.E., Skemer, A.J., Maire, A.-L., Desidera, S., Hinz, P., Skrutskie, M.F., Leisenring, J., Bailey, V., Defrère, D., Esposito, S., Strassmeier, K.G., Weber, M., Biller, B.A., Bonnefoy, M., Buenzli, E., Close, L.M., Crepp, J.R., Eisner, J.A., Hofmann, K.-H., Henning, T., Morzinski, K.M., Schertl, D., Weigelt, G. and Woodward, C.E.: The LEECH Exoplanet Imaging Survey: Orbit and component masses of the intermediate-age, late-type binary NO UMa. *The Astrophysical Journal* 818, id. 1 (10 pp) (2016).
- Schmidt, K.B., Treu, T., Bradač, M., Vulcani, B., Huang, K.-H., Hoag, A., Maseda, M., Guaita, L., Pentericci, L., Brammer, G.B., Dijkstra, M., Dressler, A., Fontana, A., Henry, A.L., Jones, T.A., Mason, C., Trenti, M. and Wang, X.: The Grism Lens-Amplified Survey from Space (GLASS). III. A census of Ly $\alpha$  emission at  $z > 7$  from HST spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 818, id. 38 (22 pp) (2016).
- Schmidt, T.M., Bigiel, F., Klessen, R.S. and de Blok, W.J.G.: Radial gas motions in The HI Nearby Galaxy Survey (THINGS). *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 2642-2664 (2016).
- Schmidt, T.O.B., Neuhauser, R., Briceño, C., Vogt, N., Raetz, S., Seifahrt, A., Ginski, C., Mugrauer, M., Buder, S., Adam, C., Hauschildt, P., Witte, S., Helling, C. and Schmitt, J.H.M.M.: Direct Imaging discovery of a second planet candidate around the possibly transiting planet host CVSO 30. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A75 (15 pp) (2016).
- Schneider, G., Grady, C.A., Stark, C.C., Gaspar, A., Carson, J., Debes, J.H., Henning, T., Hines, D.C., Jang-Condell, H., Kuchner, M.J., Perrin, M., Rodigas, T.J., Tamura, M. and Wisniewski, J.P.: Deep HST/STIS visible-light imaging of debris systems around solar analog hosts. *The Astronomical Journal* 152, id. 64 (21 pp) (2016).
- Scicluna, P., Wolf, S., Ratzka, T., Costigan, G., Launhardt, R., Leinert, C., Ober, F., Manara, C.F. and Testi, L.: Understanding discs in binary YSOs - detailed modelling of VV CrA. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 458, 2476-2491 (2016).
- Segura-Cox, D.M., Harris, R.J., Tobin, J.J., Looney, L.W., Li, Z.-Y., Chandler, C., Kratter, K., Dunham, M.M., Sadavoy, S., Perez, L. and Melis, C.: The VLA Nascent Disk and Multiplicity Survey: First Look at Resolved Candidate Disks around Class 0 and I Protostars in the Perseus Molecular Cloud. *The Astrophysical Journal Letters* 817, id. L14 (6 pp) (2016).
- Sesar, B., Price-Whelan, A.M., Cohen, J.G., Rix, H.-W., Pearson, S., Johnston, K.V., Bernard, E.J., Ferguson, A.M.N., Martin, N.F., Slater, C.T., Chambers, K.C., Flewelling, H., Wainscoat, R.J. and Waters, C.: Evidence of fanning in the Ophiuchus stream. *The Astrophysical Journal Letters* 816, id. L4 (4 pp) (2016).
- Shankar, F., Bernardi, M., Sheth, R.K., Ferrarese, L., Graham, A.W., Savorgnan, G., Allevato, V., Marconi, A., Läsker, R. and Lapi, A.: Selection bias in dynamically measured supermassive black hole samples: its consequences and the quest for the most fundamental relation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 460, 3119-3142 (2016).
- Sharon, C.E., Riechers, D.A., Hodge, J., Carilli, C.L., Walter, F., Weiß, A., Knudsen, K.K. and Wagg, J.: A total molecular gas mass census in  $Z \sim 2-3$  star-forming galaxies: Low-J CO excitation probes of galaxies' evolutionary states. *The Astrophysical Journal* 827, id. 18 (25 pp) (2016).
- Shin, I.-G., Ryu, Y.-H., Udalski, A., Albrow, M., Cha, S.-M., Choi, J.-Y., Chung, S.-J., Han, C., Hwang, K.-H., Jung, Y.K., Kim, D.-J., Kim, S.-L., Lee, C.-U., Lee, Y., Park, B.-G., Park, H., Pogge, R.W., Yee, J.C., Pietrukowicz, P., Mroz, P., Kozłowski, S., Poleski, R., Skowron, J., Soszynski, I., Szymanski, M.K. et al.: A Super-Jupiter microlens planet characterized by high-cadence KMTNet Microlensing Survey observations of OGLE-2015-BLG-0954. *Journal of Korean Astronomical Society* 49, 73-81 (2016).
- Shvartzvald, Y., Li, Z., Udalski, A., Gould, A., Sumi, T., Street, R.A., Calchi Novati, S., Hundertmark, M., Bozza, V., Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Drummond, J., Fausnaugh, M., Gaudi, B.S., Henderson, C.B., Tan, T.G., Winking, B., Pogge, R.W., Yee, J.C., Zhu, W., Tsapras, Y., Bachelet, E., Dominik, M., Bramich, D.M. et al.: The first simultaneous microlensing observations by two space telescopes: Spitzer and Swift reveal a brown dwarf in event OGLE-2015-BLG-1319. *The Astrophysical Journal* 831, id. 183 (11 pp) (2016).
- Siqueira-Mello, C., Chiappini, C., Barbuy, B., Freeman, K., Ness, M., Depagne, E., Cantelli, E., Pignatari, M., Hirschi, R., Frischknecht, U., Meynet, G. and Maeder, A.: Looking for imprints of the first stellar generations in metal-poor bulge field stars. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. A79 (16 pp) (2016).
- Skemer, A.J., Morley, C.V., Zimmerman, N.T., Skrutskie, M.F., Leisenring, J., Buenzli, E., Bonnefoy, M., Bailey, V., Hinz, P., Defrère, D., Esposito, S., Apai, D., Biller, B., Brandner, W., Close, L., Crepp, J.R., De Rosa, R.J., Desidera, S., Eisner, J., Fortney, J., Freedman, R., Henning, T., Hofmann, K.-H., Kopytova, T., Lupu, R. et al.: The LEECH Exoplanet Imaging Survey: Characterization of the Coldest Directly Imaged Exoplanet, GJ 504 b, and Evidence for Superstellar Metallicity. *The Astrophysical Journal* 817, id. 166 (10 pp) (2016).
- Smiljanic, R., Romano, D., Bragaglia, A., Donati, P., Magrini, L., Friel, E., Jacobson, H., Randich, S., Ventura, P., Lind, K., Bergemann, M., Nordlander, T., Morel, T., Pancino, E., Tautvaišienė, G., Adibekyan, V., Tosi, M., Vallenari, A., Gilmore, G., Bensby, T., François, P., Koposov, S., Lanzafame, A.C., Recio-Blanco, A., Bayo, A. et al.: The Gaia-ESO Survey: Sodium and aluminium abundances in giants and dwarfs. Implications for stellar and Galactic chemical evolution. *Astronomy and Astrophysics* 589, id. A115 (15 pp) (2016).

- Snaith, O.N., Bailin, J., Gibson, B.K., Bell, E.F., Stinson, G., Valluri, M., Wadsley, J. and Couchman, H.: The history of stellar metallicity in a simulated disc galaxy. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 3119-3141 (2016).
- Sorini, D., Oñorbe, J., Lukić, Z. and Hennawi, J.F.: Modeling the Ly $\alpha$  forest in collisionless simulations. *The Astrophysical Journal* 827, id. 97 (23 pp) (2016).
- Southworth, J., Tregloan-Reed, J., Andersen, M.I., Calchi Novati, S., Ciceri, S., Colque, J.P., D'Ago, G., Dominik, M., Evans, D.F., Gu, S.-H., Herrera-Cordova, A., Hinse, T.C., Jørgensen, U.G., Juncher, D., Kuffmeier, M., Mancini, L., Peixinho, N., Popovas, A., Rabus, M., Skottfelt, J., Tronsgaard, R., Unda-Sanzana, E., Wang, X.-B., Wertz, O., Alsubai, K.A. et al.: High-precision photometry by telescope defocussing - VIII. WASP-22, WASP-41, WASP-42 and WASP-55. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 4205-4217 (2016).
- Steinacker, J., Bacmann, A., Henning, T. and Heigl, S.: Prestellar core modeling in the presence of a filament. The dense heart of L1689B. *Astronomy and Astrophysics* 593, id.A6 (12 pp) (2016).
- Steinacker, J., Linz, H., Beuther, H., Henning, T. and Bacmann, A.: Mass estimates for very cold (<8 K) gas in molecular cloud cores. *Astronomy and Astrophysics* 593, id. L5 (4 pp) (2016).
- Stepanovs, D. and Fendt, C.: An extensive numerical survey of the correlation between outflow dynamics and accretion disk magnetization. *The Astrophysical Journal* 825, id. 14 (18 pp) (2016).
- Stern, J., Faucher-Giguère, C.-A., Zakamska, N.L. and Hennawi, J.F.: Constraining the dynamical importance of hot gas and radiation pressure in quasar outflows using emission line ratios. *The Astrophysical Journal* 819, id. 130 (20 pp) (2016).
- Stern, J., Hennawi, J.F., Prochaska, J.X. and Werk, J.K.: A universal density structure for circumgalactic gas. *The Astrophysical Journal* 830, id. 87 (22 pp) (2016).
- Stolker, T., Dominik, C., Avenhaus, H., Min, M., de Boer, J., Ginski, C., Schmid, H.M., Juhasz, A., Bazzon, A., Waters, L.B.F.M., Garufi, A., Augereau, J.-C., Benisty, M., Boccaletti, A., Henning, T., Langlois, M., Maire, A.-L., Ménard, F., Meyer, M.R., Pinte, C., Quanz, S.P., Thalmann, C., Beuzit, J.-L., Carbillet, M., Costille, A. et al.: Shadows cast on the transition disk of HD 135344B. Multiwavelength VLT/SPHERE polarimetric differential imaging. *Astronomy and Astrophysics* 595, id. A113 (21 pp) (2016).
- Street, R.A., Udalski, A., Calchi Novati, S., Hundertmark, M.P.G., Zhu, W., Gould, A., Yee, J., Tsapras, Y., Bennett, D.P., RoboNet Project, T., Consortium, M., Jørgensen, U.G., Dominik, M., Andersen, M.I., Bachelet, E., Bozza, V., Bramich, D.M., Burgdorf, M.J., Cassan, A., Ciceri, S., D'Ago, G., Dong, S., Evans, D.F., Gu, S.-h., Harkonnen, H. et al.: Spitzer parallax of OGLE-2015-BLG-0966: A cold Neptune in the Galactic disk. *The Astrophysical Journal* 819, id. 93 (12 pp) (2016).
- Stutz, A.M. and Gould, A.: Slingshot mechanism in Orion: Kinematic evidence for ejection of protostars by filaments. *Astronomy and Astrophysics* 590, id. A2 (14 pp) (2016).
- Tan, J.C., Kong, S., Zhang, Y., Fontani, F., Caselli, P. and Butler, M.J.: An ordered bipolar outflow from a massive early-stage core. *The Astrophysical Journal Letters* 821, id. L3 (8 pp) (2016).
- Tazzari, M., Testi, L., Ercolano, B., Natta, A., Isella, A., Chandler, C.J., Pérez, L.M., Andrews, S., Wilner, D.J., Ricci, L., Henning, T., Linz, H., Kwon, W., Corder, S.A., Dullemond, C.P., Carpenter, J.M., Sargent, A.I., Mundy, L., Storm, S., Calvet, N., Greaves, J.A., Lazio, J. and Deller, A.T.: Multiwavelength analysis for interferometric (sub-)mm observations of protoplanetary disks. Radial constraints on the dust properties and the disk structure. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A53 (19 pp) (2016).
- Teague, R., Guilloteau, S., Semenov, D., Henning, T., Dutrey, A., Piétu, V., Birnstiel, T., Chapillon, E., Hollenbach, D. and Gorti, U.: Measuring turbulence in TW Hydrae with ALMA: methods and limitations. *Astronomy and Astrophysics* 592, id. A49 (14 pp) (2016).
- Thalmann, C., Janson, M., Garufi, A., Boccaletti, A., Quanz, S.P., Sissa, E., Gratton, R., Salter, G., Benisty, M., Bonnefoy, M., Chauvin, G., Daemgen, S., Desidera, S., Dominik, C., Engler, N., Feldt, M., Henning, T., Lagrange, A.-M., Langlois, M., Lannier, J., Le Coroller, H., Ligé, R., Ménard, F., Mesa, D., Meyer, M.R. et al.: Resolving the planet-hosting inner regions of the LkCa 15 disk. *The Astrophysical Journal Letters* 828, id. L17 (6 pp) (2016).
- Ting, Y.-S., Conroy, C. and Rix, H.-W.: APOGEE chemical tagging constraint on the maximum star cluster mass in the alpha-enhanced galactic disk. *The Astrophysical Journal* 816, id. 10 (12 pp) (2016).
- Ting, Y.-S., Conroy, C. and Rix, H.-W.: Accelerated fitting of stellar spectra. *The Astrophysical Journal* 826, id. 83 (17 pp) (2016).
- Tobin, J.J., Kratter, K.M., Persson, M.V., Looney, L.W., Dunham, M.M., Segura-Cox, D., Li, Z.-Y., Chandler, C.J., Sadavoy, S.I., Harris, R.J., Melis, C. and Pérez, L.M.: A triple protostar system formed via fragmentation of a gravitationally unstable disk. *Nature* 538, 483-486 (2016).
- Tobin, J.J., Looney, L.W., Li, Z.-Y., Chandler, C.J., Dunham, M.M., Segura-Cox, D., Sadavoy, S.I., Melis, C., Harris, R.J., Kratter, K. and Perez, L.: The VLA nascent disk and multiplicity survey of Perseus protostars (VANDAM). II. Multiplicity of protostars in the Perseus molecular cloud. *The Astrophysical Journal* 818, id. 73 (36 pp) (2016).
- Tobin, J.J., Stutz, A.M., Manoj, P., Megeath, S.T., Karska, A., Nagy, Z., Wyrowski, F., Fischer, W.J., Watson, D.M. and Stanke, T.: Characterizing the youngest Herschel-detected protostars. II. Molecular outflows from the millimeter and the far-infrared. *The Astrophysical Journal* 831, id. 36 (29 pp) (2016).
- Tollet, E., Macciò, A.V., Dutton, A.A., Stinson, G.S., Wang, L., Penzo, C., Gutcke, T.A., Buck, T., Kang, X., Brook, C., Di Cintio, A., Keller, B.W. and Wadsley, J.: NIHAO - IV: core creation and destruction in dark matter density profiles across cosmic time. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 3542-3552 (2016).
- Toloba, E., Guhathakurta, P., Romanowsky, A.J., Brodie, J.P., Martínez-Delgado, D., Arnold, J.A., Ramachandran, N. and Theakanath, K.: New spectroscopic technique based on coaddition of surface brightness fluctuations: NGC 4449 and its stellar tidal stream. *The Astrophysical Journal* 824, id. 35 (11 pp) (2016).
- Trapp, O.: Synthesis of Cryptochiral (R,R)-2,3-Dideuterooxirane as Stereochemical Reference Compound and Chemical Correlation with D-(+)-Glyceraldehyde. *Israelian Journal of Chemistry* 56, 1082-1090 (2016).
- Trick, W.H., Bovy, J. and Rix, H.-W.: Action-based dynamical modeling for the Milky Way disk. *The Astrophysical Journal* 830, id. 97 (22 pp) (2016).

- Trick, W.H., van de Ven, G. and Dutton, A.A.: A spiral galaxy's mass distribution uncovered through lensing and dynamics. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 3151-3168 (2016).
- Troncoso Ibarren, P., Infante, L., Padilla, N., Lacerna, I., Garcia, S., Orsi, A., Muñoz Arancibia, A., Moustakas, J., Cristóbal-Hornillos, D., Moles, M., Fernández-Soto, A., Martínez, V.J., Cerviño, M., Alfaro, E.J., Ascaso, B., Arnalte-Mur, P., Nieves-Seoane, L. and Benítez, N.: Evolution of Balmer jump selected galaxies in the ALHAMBRA survey. *Astronomy and Astrophysics* 588, id. A132 (14 pp) (2016).
- van den Bosch, R.C.E.: Unification of the fundamental plane and Super Massive Black Hole Masses. *The Astrophysical Journal* 831, id. 134 (24 pp) (2016).
- van den Bosch, R.C.E., Greene, J.E., Braatz, J.A., Constantin, A. and Kuo, C.-Y.: Toward precision supermassive black hole masses using megamaser disks. *The Astrophysical Journal* 819, id. 11 (10 pp) (2016).
- van der Wel, A., Noeske, K., Bezanson, R., Pacifici, C., Gallazzi, A., Franx, M., Muñoz-Mateos, J.C., Bell, E.F., Brammer, G., Charlot, S., Chauké, P., Labbé, I., Maseda, M.V., Muzzin, A., Rix, H.-W., Sobral, D., van de Sande, J., van Dokkum, P.G., Wild, V. and Wolf, C.: The VLT LEGA-C Spectroscopic Survey: The physics of galaxies at a lookback time of 7 Gyr. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 223, id. 29 (12 pp) (2016).
- Venemans, B.P., Walter, F., Zschaechner, L., Decarli, R., De Rosa, G., Findlay, J.R., McMahon, R.G. and Sutherland, W.J.: Bright [C II] and dust emission in three  $z > 6.6$  quasar host galaxies observed by ALMA. *The Astrophysical Journal* 816, id. 37 (15 pp) (2016).
- Vigan, A., Bonnefoy, M., Ginski, C., Beust, H., Galicher, R., Janson, M., Baudino, J.-L., Buenzli, E., Hagelberg, J., D'Orazi, V., Desidera, S., Maire, A.-L., Gratton, R., Sauvage, J.-F., Chauvin, G., Thalmann, C., Malo, L., Salter, G., Zurlo, A., Antichi, J., Baruffolo, A., Baudoz, P., Blanchard, P., Boccaletti, A., Beuzit, J.-L. et al.: First light of the VLT planet finder SPHERE. I. Detection and characterization of the substellar companion GJ 758 B. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A55 (20 pp) (2016).
- Vivas, A.K., Olsen, K., Blum, R., Nidever, D.L., Walker, A.R., Martin, N.F., Besla, G., Gallart, C., van der Marel, R.P., Majewski, S.R., Kaleida, C.C., Muñoz, R.R., Saha, A., Conn, B.C. and Jin, S.: Variable stars in the field of the Hydra II ultra-faint dwarf galaxy. *The Astronomical Journal* 151, id. 118 (14 pp) (2016).
- Wakelam, V., Ruaud, M., Hersant, F., Dutrey, A., Semenov, D., Majumdar, L. and Guilloteau, S.: Importance of the H<sub>2</sub> abundance in protoplanetary disk ices for the molecular layer chemical composition. *Astronomy and Astrophysics* 594, id. A35 (5 pp) (2016).
- Walcher, C.J., Yates, R.M., Minchev, I., Chiappini, C., Bergemann, M., Bruzual, G., Charlot, S., Coelho, P.R.T., Gallazzi, A. and Martig, M.: Self-similarity in the chemical evolution of galaxies and the delay-time distribution of SNe Ia. *Astronomy and Astrophysics* 594, id. A61 (8 pp) (2016).
- Walker, R.C., Hardee, P.E., Davies, F., Ly, C., Junor, W., Mertens, F. and Lobanov, A.: Observations of the structure and dynamics of the inner M87 jet. *Galaxies* 4, id. 46 (2016 online).
- Walsh, A.J., Beuther, H., Bühr, S., Johnston, K.G., Dawson, J.R., Ott, J., Longmore, S.N., Luong, Q.N., Klessen, R.S., Ragan, S., McClure-Griffiths, N., Brunthaler, A., Urquhart, J., Menten, K., Bigiel, F., Wyrowski, F. and Rugel, M.: A survey for hydroxyl in the THOR pilot region around W43. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 3494-3510 (2016).
- Walsh, J.L., van den Bosch, R.C.E., Gebhardt, K., Yıldırım, A., Richstone, D.O., Gültekin, K. and Husemann, B.: A  $5 \times 10^9 M_{\odot}$  black hole in NGC 1277 from adaptive optics spectroscopy. *The Astrophysical Journal* 817, id. 2 (12 pp) (2016).
- Walter, F., Decarli, R., Aravena, M., Carilli, C., Bouwens, R., da Cunha, E., Daddi, E., Ivison, R.J., Riechers, D., Smail, I., Swinbank, M., Weiss, A., Anguita, T., Assef, R., Bacon, R., Bauer, F., Bell, E.F., Bertoldi, F., Chapman, S., Colina, L., Cortes, P.C., Cox, P., Dickinson, M., Elbaz, D., González-López, J. et al.: ALMA Spectroscopic Survey in the Hubble Ultra Deep Field: Survey description. *The Astrophysical Journal* 833, id. 67 (15 pp) (2016).
- Wang, D., Hogg, D.W., Foreman-Mackey, D. and Schölkopf, B.: A causal, data-driven approach to modeling the Kepler data. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific* 128, id. 094503 (13 pp) (2016).
- Wang, K., Testi, L., Burkert, A., Walmsley, C.M., Beuther, H. and Henning, T.: A census of large-scale ( $\geq 10$  PC), velocity-coherent, dense filaments in the Northern Galactic plane: Automated identification using minimum spanning tree. *The Astrophysical Journal Supplement Series* 226, id. 9 (17 pp) (2016).
- Wang, R., Wu, X.-B., Neri, R., Fan, X., Walter, F., Carilli, C.L., Momjian, E., Bertoldi, F., Strauss, M.A., Li, Q., Wang, F., Riechers, D.A., Jiang, L., Omont, A., Wagg, J. and Cox, P.: Probing the interstellar medium and star formation of the most luminous quasar at  $z = 6.3$ . *The Astrophysical Journal* 830, id. 53 (7 pp) (2016).
- Wang, Y., Audard, M., Fontani, F., Sánchez-Monge, Á., Busquet, G., Palau, A., Beuther, H., Tan, J.C., Estalella, R., Isella, A., Gueth, F. and Jiménez-Serra, I.: Ongoing star formation in the protocluster IRAS 22134+5834. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A69 (21 pp) (2016).
- Ward-Thompson, D., Pattle, K., Kirk, J.M., Marsh, K., Buckle, J., Hatchell, J., Nutter, D.J., Griffin, M.J., Di Francesco, J., André, P., Beaulieu, S., Berry, D., Broekhoven-Fiene, H., Currie, M., Fich, M., Jenness, T., Johnstone, D., Kirk, H., Mottram, J., Pineda, J., Quinn, C., Sadavoy, S., Salji, C., Tisi, S., Walker-Smith, S. et al.: The JCMT and Herschel Gould Belt Surveys: a comparison of SCUBA-2 and Herschel data of dense cores in the Taurus dark cloud L1495. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1008-1025 (2016).
- Watson, D.M., Calvet, N.P., Fischer, W.J., Forrest, W.J., Manoj, P., Megeath, S.T., Melnick, G.J., Najita, J., Neufeld, D.A., Sheehan, P.D., Stutz, A.M. and Tobin, J.J.: Evolution of mass outflow in protostars. *The Astrophysical Journal* 828, id. 52 (15 pp) (2016).
- Watson, L.C., Martini, P., Lisenfeld, U., Böker, T. and Schinnerer, E.: Testing the molecular-hydrogen Kennicutt-Schmidt law in the low-density environments of extended ultraviolet disc galaxies. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 455, 1807-1818 (2016).
- Westhues, C., Haas, M., Barthel, P., Wilkes, B.J., Willner, S.P., Kuraszkiewicz, J., Podigachoski, P., Leipski, C., Meisenheimer, K., Siebenmorgen, R. and Chini, R.: Star formation in 3CR radio galaxies and quasars at  $z < 1$ . *The Astronomical Journal* 151, id. 120 (53 pp) (2016).
- Widmann, F., Beuther, H., Schilke, P. and Stanke, T.: SiO: Not the perfect outflow tracer. *Outflow studies of the massive star forma-*

- tion region IRAS 19410+2336. *Astronomy and Astrophysics* 589, id. A29 (10 pp) (2016).
- Williams, A.A., Evans, N.W., Molloy, M., Kordopatis, G., Smith, M.C., Shen, J., Gilmore, G., Randich, S., Bensby, T., Francois, P., Koposov, S.E., Recio-Blanco, A., Bayo, A., Carraro, G., Casey, A., Costado, T., Franciosini, E., Hourihane, A., de Laverny, P., Lewis, J., Lind, K., Magrini, L., Monaco, L., Morbidelli, L., Sacco, G.G. et al.: The Gaia-ESO survey: Metal-rich bananas in the bulge. *The Astrophysical Journal Letters* 824, id. L29 (6 pp) (2016).
- Wofford, A., Charlot, S., Bruzual, G., Eldridge, J.J., Calzetti, D., Adamo, A., Cignoni, M., de Mink, S.E., Gouliermis, D.A., Grasha, K., Grebel, E.K., Lee, J.C., Östlin, G., Smith, L.J., Ubeda, L. and Zackrisson, E.: A comprehensive comparative test of seven widely used spectral synthesis models against multi-band photometry of young massive-star clusters. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 457, 4296-4322 (2016).
- Worseck, G., Prochaska, J.X., Hennawi, J.F. and McQuinn, M.: Early and extended helium reionization over more than 600 million years of cosmic time. *The Astrophysical Journal* 825, id. 144 (32 pp) (2016).
- Wu, S.-W., Bik, A., Bestenlehner, J.M., Henning, T., Pasquali, A., Brandner, W. and Stolte, A.: The massive stellar population of W49: A spectroscopic survey. *Astronomy and Astrophysics* 589, id. A16 (15 pp) (2016).
- Yan, R., Bundy, K., Law, D.R., Bershady, M.A., Andrews, B., Cherinka, B., Diamond-Stanic, A.M., Drory, N., MacDonald, N., Sánchez-Gallego, J.R., Thomas, D., Wake, D.A., Weijmans, A.-M., Westfall, K.B., Zhang, K., Aragón-Salamanca, A., Belfiore, F., Bizyaev, D., Blanc, G.A., Blanton, M.R., Brownstein, J., Cappellari, M., D'Souza, R., Emsellem, E., Fu, H. et al.: SDSS-IV MaNGA IFS Galaxy Survey—Survey design, execution, and initial data quality. *The Astronomical Journal* 152, id. 197 (32 pp) (2016).
- Yano, M., Kriek, M., van der Wel, A. and Whitaker, K.E.: The relation between galaxy structure and spectral type: Implications for the buildup of the quiescent galaxy population at  $0.5 < z < 2.0$ . *The Astrophysical Journal Letters* 817, id. L21 (7 pp) (2016).
- Yıldırım, A., van den Bosch, R.C.E., van de Ven, G., Dutton, A., Läsker, R., Husemann, B., Walsh, J.L., Gebhardt, K., Gültekin, K. and Martín-Navarro, I.: The massive dark halo of the compact early-type galaxy NGC 1281. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 456, 538-553 (2016).
- Zasowski, G., Ness, M.K., García Pérez, A.E., Martínez-Valpuesta, I., Johnson, J.A. and Majewski, S.R.: Kinematics in the galactic bulge with APOGEE. II. High-order kinematic moments and comparison to extragalactic bar diagnostics. *The Astrophysical Journal* 832, id. 132 (14 pp) (2016).
- Zauderer, B.A., Bolatto, A.D., Vogel, S.N., Carpenter, J.M., Peréz, L.M., Lamb, J.W., Woody, D.P., Bock, D.C.-J., Carlstrom, J.E., Culverhouse, T.L., Curley, R., Leitch, E.M., Plambeck, R.L., Pound, M.W., Marrone, D.P., Muchovej, S.J., Mundy, L.G., Teng, S.H., Teuben, P.J., Volgenau, N.H., Wright, M.C.H. and Wu, D.: The CARMA Paired Antenna Calibration System: Atmospheric phase correction for millimeter wave interferometry and its application to mapping the ultraluminous galaxy Arp 193. *The Astronomical Journal* 151, id. 18 (19 pp) (2016).
- Zhu, L., Romanowsky, A.J., van de Ven, G., Long, R.J., Watkins, L.L., Pota, V., Napolitano, N.R., Forbes, D.A., Brodie, J. and Foster, C.: A discrete chemo-dynamical model of the giant elliptical galaxy NGC 5846: dark matter fraction, internal rotation, and velocity anisotropy out to six effective radii. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 462, 4001-4017 (2016).
- Zhu, L., van de Ven, G., Watkins, L.L. and Posti, L.: A discrete chemo-dynamical model of the dwarf spheroidal galaxy Sculptor: mass profile, velocity anisotropy and internal rotation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 1117-1135 (2016).
- Zhu, W., Calchi Novati, S., Gould, A., Udalski, A., Han, C., Shvartzvald, Y., Ranc, C., Jørgensen, U.G., Poleski, R., Bozza, V., Beichman, C., Bryden, G., Carey, S., Gaudi, B.S., Henderson, C.B., Pogge, R.W., Porritt, I., Wibking, B., Yee, J.C., Pawlak, M., Szymański, M.K., Skowron, J., Mróz, P., Kozłowski, S., Wyrzykowski, Ł. et al.: Mass measurements of isolated objects from space-based microlensing. *The Astrophysical Journal* 825, id. 60 (10 pp) (2016).
- Zhu, W. and Gould, A.: Augmenting WFIRST microlensing with a ground-based telescope network. *Journal of Korean Astronomical Society* 49, 93-107 (2016).
- Zschaechner, L.K., Ott, J., Walter, F., Meier, D.S., Momjian, E. and Scoville, N.: High-resolution observations of molecular lines in Arp 220: Kinematics, morphology, and limits on the applicability of the ammonia thermometer. *The Astrophysical Journal* 833, id. 41 (10 pp) (2016).
- Zschaechner, L.K., Walter, F., Bolatto, A., Farina, E.P., Kruijssen, J.M.D., Leroy, A., Meier, D.S., Ott, J. and Veilleux, S.: The molecular wind in the nearest Seyfert galaxy Circinus revealed by ALMA. *The Astrophysical Journal* 832, id. 142 (17 pp) (2016).
- Zurlo, A., Vigan, A., Galicher, R., Maire, A.-L., Mesa, D., Gratton, R., Chauvin, G., Kasper, M., Moutou, C., Bonnefoy, M., Desidera, S., Abe, L., Apai, D., Baruffolo, A., Baudoz, P., Baudrand, J., Beuzit, J.-L., Blancard, P., Boccaletti, A., Cantalloube, F., Carle, M., Cascone, E., Charton, J., Claudi, R.U., Costille, A. et al.: First light of the VLT planet finder SPHERE. III. New spectrophotometry and astrometry of the HR 8799 exoplanetary system. *Astronomy and Astrophysics* 587, id. A57 (13 pp) (2016).

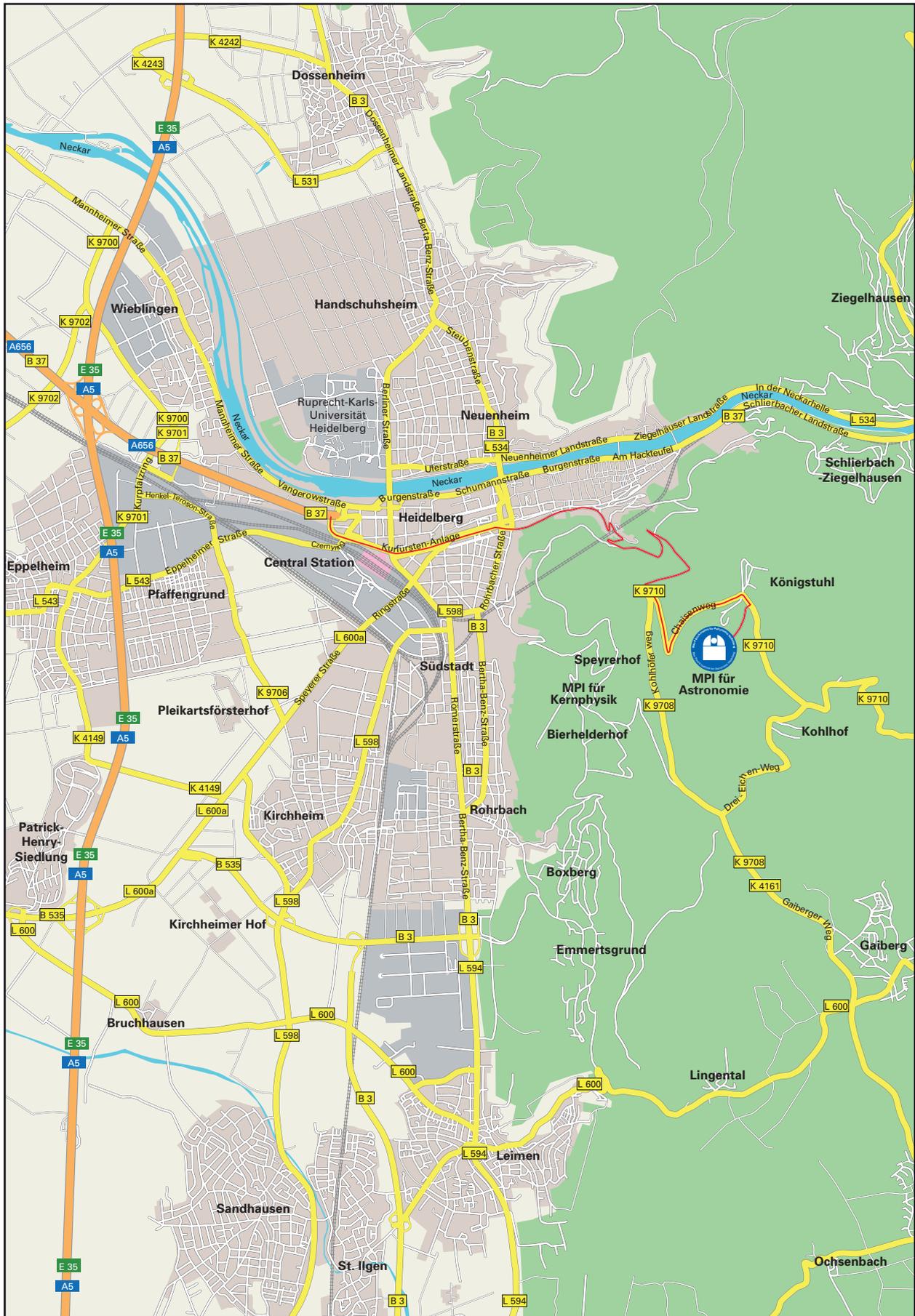
## VI.8 Zusammenarbeit mit Firmen

- A. Altenbach, Heidelberg  
 ADDITIVE, Friedrichsdorf  
 Adolf Pfeiffer, Mannheim  
 ADR, Thomery  
 Aerotech, Nürnberg  
 ALPHA Übersetzungen, Heidelberg  
 Alternate, Linden  
 AMERICA II EUROPE, Mönchengladbach  
 AMETEK, Meerbusch  
 Amphenol AIR, Saarlouis  
 asknet, Karlsruhe  
 AVIS, Oberursel  
 AXON KABEL, Leonberg  
 B.E.S.T., Forst  
 Backup Solutions, Stuttgart  
 Baier Digitaldruck, Heidelberg  
 Bechtle ÖA direkt, Neckarsulm  
 BG ETEM, Köln  
 Bildungshaus Kloster Schöntal, Schöntal  
 Blickle Räder+Rollen, Rosenfeld  
 Börsig, Neckarsulm  
 Breer Gebäudereinigung, Heidelberg  
 Bürklin, Oberhaching  
 Büro-Mix, Mannheim  
 BVS, Stuttgart  
 CADFEM, Grafing  
 Carl Roth, Karlsruhe  
 CHG Meridian, Weingarten  
 ColorDruck Solutions, Leimen  
 Computacenter, Ludwigshafen  
 COMTRONIC, Heiligkreuzsteinach  
 Conrad Electronic, Wernberg-Köblitz  
 Cryophysics, Darmstadt  
 CWS-boco Deutschland, Dreieich  
 D.H. Frank, Nußloch  
 Dannewitz, Gelnhausen  
 dataTec, Reutlingen  
 Dehn + Söhne, Neumarkt  
 Dell GmbH, Frankfurt am Main  
 DELTA-V, Wuppertal  
 Deti, Meckesheim  
 DHL Express, Köln  
 Dipl.-Ing. Robert Baust, Heidelberg  
 Discipulus, Heidelberg  
 Distrelec Schuricht, Bremen  
 DMG, Leonberg  
 Dörfler Dachtechnik, Oftersheim  
 DPV Elektronik, Eppingen  
 EBSCO Information Services, Berlin  
 Edmund Optics, Karlsruhe  
 Edwards, Kirchheim  
 EFB-Elektronik, Bielefeld  
 Elektro-Steidl, Weinheim  
 Engelbert Strauss, Biebergemünd  
 Enterprint, Schwetzingen  
 Europcar Inter Rent, Hamburg  
 EUROstor, Filderstadt  
 Farnell, Oberhaching  
 Faulhaber GmbH & Co, Schönaich  
 Federal Express Europe, Kelsterbach  
 FEGA & Schmitt, Ansbach  
 Fels Fritz Fachspedition, Heidelberg  
 FlowCAD, Feldkirchen  
 FPS-Werkzeugmaschinen, Wargau  
 Frankfurter Allgemeine Zeitung, Frankfurt  
     am Main  
 Fraunhofer IOF, Jena  
 Friedrich Heuser, Heidelberg  
 Fritz Zugck, Leimen  
 Gabler Werbeagentur, München  
 GAD Elektronik, Plankstadt  
 Ganter, Walldorf  
 Geier Metall-u.Stahlhandel, Mannheim  
 Gleich Service-Center, Kaltenkirchen  
 Glenair Electronic, Bad Homburg  
 Götz Gebäudemanagement, Regensburg  
 Gummispezialhaus Martin Körner,  
     Eppelheim  
 Güniker + Heck, Mannheim  
 Gutfleisch, Heidelberg  
 Häfele, Aulendorf  
 Hagemeyer Deutschland, Heidelberg  
 Hahn & Kolb, Ludwigsburg  
 Hamamatsu, Herrsching  
 Handwerkskammer Mannheim, Mannheim  
 Harald Tränkle, Heidelberg  
 Haufe Service Center, Freiburg i. Br.  
 HDI Global, Hannover  
 Hebezone, Hanau  
 HELUKABEL, Hemmingen  
 Hoffmann Göppingen, Göppingen  
 Horn, Stutensee  
 Hupkens Industrial Models, NK Maastricht  
 HWP Architekturbüro, Heidelberg  
 IBV - Ingenieurbüro, Heidelberg  
 IGEFA, Ahrensfelde/OT Blumberg  
 ILFA Feinstleiteteknik, Hannover  
 Ingenieurbüro Manfred Steinbach, Jena  
 Ingenieurbüro Schlossmacher,  
     Unterschleissheim  
 INNEO Solutions, Ellwangen  
 INTOS ELECTRONIC, Gießen  
 IOP Publishing, Bristol  
 Jacobi Eloxa, Altlußheim  
 Johann A. Meyer, Wildau  
 JUMO GmbH & Co, Fulda  
 Jungheinrich, Hamburg  
 K.-H.Weidler, Weinheim  
 KA-WE, Schwetzingen  
 Kai Ortlieb Buchbinderei, Eppelheim  
 KAISER + KRAFT, Stuttgart  
 Karl Scholl, Heidelberg  
 Kniel, Karlsruhe  
 KOCO MOTION, Dauchingen  
 Konica Minolta Businesss, Mannheim  
 Körber TH., Sensbachtal/Odw.  
 Kroschke, Braunschweig  
 L. Funk & Söhne, München  
 L.+H. Hochstein, Heidelberg  
 Lagrange TWMM, Mannheim  
 Lapp Kabel, Stuttgart  
 Laub Druck, Elztal-Dallau  
 LD Didactic, Hürth  
 Lehmanns Fachbuchhandlung, Heidelberg  
 Lemo Elektronik, München  
 Linde, Mainz-Kostheim  
 Losberger Modular Systems, Mannheim  
 LWS-Technik, Heilbronn  
 LYRECO Deutschland, Barsinghausen  
 Maas International, Bruchsal  
 Massmann, Hamburg  
 Mayer Omnibusbetrieb, Neckargemünd-  
     Dilsberg  
 Metalux Metallveredelungs, Altlußheim  
 MICROSTAXX, München  
 Möller-Wedel Optical, Wedel b. Hamburg  
 Mura Metallbau, Viernheim  
 National Instruments, München  
 Neumann Rupert Druckerei, Heidelberg  
 Newport Spectra-Physics, Darmstadt  
 noelem Normelemente, Markgröningen  
 Ocean Optics B.V., Ostfildern  
 Oerlikon, Köln  
 OMEGA Engineering, Deckenpfronn  
 OWIS, Staufen  
 Pascal Krämer, Neckarsteinach  
 PENTAIR, Straubenhardt  
 Pfeiffer & May, Heidelberg  
 PFEIFFER VACUUM, Asslar  
 Phoenix Contact, Blomberg  
 Physik Instrumente (PI), Karlsruhe  
 Phytron-Elektronik, Gröbenzell  
 POG - Präzisionsoptik Gera, Gera  
 pro-com DATENSYSTEME, Eislingen  
 Profimess, Bremerhaven  
 Radiant Zemax Europe, Stansted  
 Reichelt Elektronik, Sande  
 Rhein Neckar BUSINESS Travel, Heidelberg  
 Rhein-Neckar-Zeitung, Heidelberg  
 RS Components, Mörfelden-Walldorf  
 Rudolf Hehr, Heidelberg  
 Sanitär Raess, Heidelberg

SAUTER-Cumulus, Freiburg  
Schenker Deutschland, Mannheim  
Schulz Versorgungstechnik, Heidelberg  
Siemens, Mannheim  
Sky Blue Microsystems, München  
Sonepar Deutschland, Hannover  
SPHINX, Laudendach  
Springer, Heidelberg  
Stadt Heidelberg, Heidelberg  
Stäubli Tec Systems, Bayreuth  
Strippel, Karlsruhe

Süddeutsche Zeitung, München  
Tautz Druckluft+Sandstrahltech, Mannheim  
Technik Direkt, Würzburg  
tfi Ingenieure Elektrotechnik, Mannheim  
The MathWorks, Ismaning  
The Sheridan Press, Boston  
Theile Büro-Systeme, Speyer  
Thermodyne, Osnabrück  
Thorlabs, Dachau  
Tischer Gastro, Heidelberg  
TNT Express, Troisdorf

Total Walther, Langen  
Trinos Vakuum-Systeme, Göttingen  
TÜV Süd, Mannheim  
United Parcel Service, Neuss  
Vacom, Jena  
Vigot, Bremen  
Witzenmann, Pforzheim  
Witzenmann Rhein-Ruhr, Xanten  
Zoltan Hubert, Leimen





MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT