

# Heidelberg

## Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH)

Prof. Dr. Norbert Christlieb  
- Geschäftsführender Direktor des ZAH -  
c/o Landessternwarte Königstuhl  
Königstuhl 12  
69117 Heidelberg

www.zah.uni-heidelberg.de  
Tel.: +49-(0)6221-54-1801  
E-Mail: info@zah.uni-heidelberg.de  
Fax: +49-(0)6221-54-4221

### **Anschriften der Institute des ZAH**

Astronomisches Rechen-Institut (ARI), Mönchhofstr. 12-14, 69120 Heidelberg  
Tel.: +49-(0)6221-54-1801 E-Mail: egrauer@ari.uni-heidelberg.de

Institut für Theoretische Astrophysik (ITA), Albert-Ueberle-Str. 2, 69120 Heidelberg  
Tel.: +49-(0)6221-54-4837 E-Mail: ita-verwaltung@zah.uni-heidelberg.de

Landessternwarte Königstuhl (LSW), Königstuhl 12, 69117 Heidelberg  
Tel.: +49-(0)6221-54-1700 E-Mail: d.mueller-wolkenstein@lsw.uni-heidelberg.de

## **0 Allgemeines**

Das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg (ZAH) ist die größte Forschungseinrichtung für Astronomie und Astrophysik an einer deutschen Universität. Das ZAH bündelt die Einrichtungen Astronomisches Rechen-Institut (ARI), Institut für Theoretische Astrophysik (ITA) und Landessternwarte Königstuhl (LSW). Diese drei Institute sind auf drei Standorte im Stadtgebiet von Heidelberg verteilt.

Das ZAH beteiligt sich an der strukturierten Förderung junger Wissenschaftler:innen, z.B. über die Heidelberger „Graduate School for Physics (HGSFP)“ oder die „International Max Planck Research School for Astronomy and Cosmic Physics (IMPRS)“. Talentierte Nachwuchswissenschaftler:innen bietet das ZAH die Möglichkeit, eine eigene Forschungsgruppe aufzubauen und sich von Heidelberg aus international wissenschaftlich zu etablieren. Ergänzend ermöglichen Förderprogramme wie die „Gliese-Fellowship“ aussichtsreichen jungen Forscher:innen mehrjährige Forschungsaufenthalte am ZAH in Heidelberg.

Forscher:innen des ZAH untersuchen die Entstehung von Planeten, Sternen, Galaxien und großen Strukturen im Universum, die Entwicklung von Sternen und Galaxien, suchen und entdecken extrasolare Planeten, konstruieren und bauen Messinstrumente für Teleskope und beteiligen sich an Entwicklung und Betrieb astronomischer Forschungssatelliten.

Die Ausbildung von Physiker:innen wird von der Fakultät für Physik und Astronomie der Universität Heidelberg gebündelt. In diesem Rahmen bietet das ZAH ein umfangreiches Ausbildungsprogramm für die astronomische und astrophysikalische Ausprägung des Heidelberger Physikstudiums im Bachelor- und Master-Programm sowie im Promotionsstudiengang Astronomie an. Schwerpunkte sind die beobachtende Astronomie, die theoretische Astrophysik und numerische Simulationen astrophysikalischer Vorgänge. Darüber hinaus unterstützt das ZAH die astronomische Öffentlichkeitsarbeit im „Haus der Astronomie“ auf dem Königstuhl personell und mit fachlicher Expertise im Rahmen von Vorträgen und öffentlichkeitswirksamen Veranstaltungen.

## 1 Besondere Ereignisse

### 1.1 125 Jahre Landessternwarte Königstuhl

Am 20. Juni 1898 wurde die Landessternwarte auf dem Königstuhl bei einem Festakt in der Alten Aula der Universität Heidelberg gegründet. 125 Jahre später, am 20. Juni 2023, wurde erneut gefeiert, bei einem Festakt in der Aula der Neuen Universität. Mehr als 600 Gäste hatten sich eingefunden, um in repräsentativem Rahmen dem Jubiläum zu gedenken und die Geschichte und Fortschritte der Heidelberger Astronomie zu feiern.

Der Abend wurde durch das Collegium Musicum unter Leitung von Universitätsmusikdirektor Michael Sekulla eingeleitet. Im Anschluß begrüßte der Rektor der Universität Heidelberg, Prof. Dr. Bernhard Eitel, die Gäste und erinnerte in seiner treffenden und spannenden Ansprache setzenden Ansprache daran, dass die Heidelberger Astronomie viel älter als 125 Jahre ist und bis ins 16. Jahrhundert zurück reicht. Im Grunde sei sie auch ein Kind der Universität. Lediglich in den Wirren des dreißigjährigen Krieges kam die Astronomie in Heidelberg bis zum Ende des 17. Jahrhunderts zum Erliegen, erlangte aber wieder mit Ordinarius Christian Mayer (1719-1783) an Bedeutung, der ab 1751 Physik, Chemie und Mineralogie an der Universität Heidelberg lehrte. Mayer war es, der Kurfürst Karl Theodor von der Wichtigkeit astronomischer Forschung und der Notwendigkeit der Einrichtung einer Sternwarte überzeugte. Und so entstand in Mannheim bis 1774 die kurfürstliche Hofsternwarte. 1880 wurden die Instrumente nach Karlsruhe verlagert. 1896 passierte dies erneut, diesmal aber auf den Heidelberger Königstuhl. Dort bildeten sie zusammen mit den Instrumenten der Heidelberger Privatsternwarte von Max Wolf die Grundausrüstung der neuen großherzoglichen Bergsternwarte, der heutigen Landessternwarte.

Der amtierende Direktor der Landessternwarte, Prof. Dr. Andreas Quirrenbach, fasste in seiner Ansprache viele Aspekte der wissenschaftlichen Entwicklung der Landessternwarte zusammen. Bemerkenswert war für ihn die Tatsache, dass die Sternwarte ursprünglich auf dem Gaisberg hätte errichtet werden sollen, die Entscheidung für den Königstuhl jedoch wegen des nahegelegenen Zementwerks und die damit verbundene Staubentwicklung fiel. Von 1962 bis 1975 war Prof. Dr. Hans Elsässer (1929-2003) Direktor der Landessternwarte. Seine Initiative führte zur Gründung des Max-Planck-Instituts für Astronomie und des Calar-Alto-Observatoriums in Südspanien.

Seit 2005 ist die Landessternwarte in das Zentrum für Astronomie der Universität Heidelberg integriert und betreibt breit aufgestellt astronomische Forschung sowie die Entwicklung und den Bau astronomischer Messinstrumente für die modernsten und größten Teleskope unter europäischer Verantwortung.

Bevor sich Prof. Dr. Harald Lesch mit seiner Festrede auf die Bühne begeben konnte, wurde das Publikum auf diesen Höhepunkt musikalisch eingestimmt. Dafür sorgte Maria Mokhova, eine begnadete Konzert-Organistin, die der den gesamten oberen Bereich der Bühne der Neuen Aula einnehmenden Universitätsorgel Melodien aus dem Kinofilm „Interstellar“ entlockte und eigens für den Abend einstudiert hatte. Die gewaltigen und beeindruckenden Klangwelten stimmte sie die Anwesenden auf den Höhepunkt des Abends ein, der von Prof. Dr. Joachim Wambsganss vorbereitet wurde. Amüsant, kurzweilig und interessante Details verratend stellte er den Festredner Harald Lesch vor.

Harald Lesch, der selbst drei Jahre als Postdoktorand an der Landessternwarte verbrachte, begeisterte mit seinen Betrachtungen zur Faszination, die von moderner astrophysikalischer Forschung ausgeht und mit all ihren Methoden und technischen Fortschritten eine Erkenntnisgewinn ermöglicht hat, der einen einfach nur staunen lassen muss. Er bezeichnet dies treffend als „Die größte Geschichte aller Zeiten“. Den musikalischen Ausklang zum Vortrag und zum Festakt gestaltete wiederum Maria Mokhova mit passenden Melodien aus der allseits bekannten Filmreihe „Star Wars“.

Der anschließende Empfang der Gäste konnte bei bestem Wetter im Innenhof der Neuen Universität stattfinden. Dies war eine Gelegenheit für zahlreiche ehemalige Mitglieder der Sternwarte sich nach vielen Jahren wiederzusehen. Aber auch für die in großer Zahl erschienenen Studierenden unterschiedlichster Fachrichtungen war es eine Chance, den Wissenschaftsstar Harald Lesch aus nächster Nähe zu erleben und mit ihm ein paar Gedanken austauschen zu können. Der Festakt zum 125jährigen Gründungsjubiläum wurde als dem Urgestein der Heidelberger Astronomie würdig gelobt. Als solcher wird er sicher noch lange Zeit im Gedächtnis aller Beteiligten, Gäste wie Organisatoren bleiben.

## 1.2 Wissenschaftsjahr 2023 „Unser Universum“ und Roadshow „Universe on Tour“

Im Wissenschaftsjahr 2023, das unter dem Motto „Unser Universum“ stand, warfen Wissenschaft, Politik und Gesellschaft aus vielfältigen Perspektiven einen Blick von der Erde ins All und wieder zurück. Es ging sowohl um uralte Menschheitsfragen nach Sinn und Sein, als auch um aktuelle wissenschaftliche Erkenntnisse der Weltraumforschung, der Astronomie sowie weiteren Natur- und Geisteswissenschaften. In vielschichtigen Perspektiven entstand so ein Bogen von den Anfängen des Weltalls bis hin zu den drängendsten Themen unserer Zeit wie dem Klimawandel, dem Umweltschutz oder der Erschließung neuer Energiequellen. Disziplinübergreifend und im Verbund verschiedener Forschungsbereiche wurden im Wissenschaftsjahr 2023 wichtige Themen rund um das Weltall beleuchtet.

Als Teil der im Wissenschaftsjahr stattfindenden Aktionen war die Roadshow „Universe on Tour – Licht aus! Sterne an!“ mit einem mobilen Planetarium und Ausstellungszelt auf Deutschland-Tour. Von 19. bis 23. Juli gastierte sie auch in Heidelberg auf dem Universitätsplatz im Herzen der Heidelberger Altstadt. Die faszinierende Show lud ihre Gäste auf eine Reise ins Weltall ein – von der Beobachtung des Himmels mit bloßem Auge über die Erfindung des Teleskops bis hin zur heutigen Astronomie. Eine Begleitausstellung informierte zur Rolle von Licht als Informationsträger und zeigte die Auswirkung von Lichtverschmutzung auf die Umwelt, beleuchtet aber insbesondere auch die Heidelberger astrophysikalische Forschung.

Eingebettet in das Gastspiel der Roadshow in Heidelberg boten die hiesige Forschungsinstitutionen ergänzend eine Reihe von Vorträgen von Heidelberger Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern an, die ihr jeweiliges Forschungsgebiet in einem kurzweiligen Vortrag allgemeinverständlich erklärten. In der Woche der Roadshow fanden in im Gebäude der „Neuen Universität“ folgende Vorträge statt, die insgesamt mehrere hundert Zuhörer begeisterten: Wie baut man eine Milchstrasse? (Hans-Walter Rix), Kochrezepte für bewohnbare Planeten (Hubert Klahr), Was wir vom Universum sehen können (Matthias Bartelmann), Auf der Suche nach der zweiten Erde (Joachim Wambsganz), The First Astronomers: How Indigenous Elders read the stars (Duane Hamacher), Der Puls der Sterne (Saskia Hekker), Gaias Datenschatz - ein Riesenschritt für die Astronomie (Stefan Jordan), Architekten des Universums: Wie schwarze Löcher die Entwicklung von Galaxien beeinflussen (Dominika Wylezalek), Und sie leuchtet doch! Dunkle Materie ans Licht gebracht (Hardy Simgen).

## 2 Personal und Ausstattung

### 2.1 Personalstand (Stand zum 31.12.2023)

*Direktor:innen und Professor:innen: 10 (davon 2 am HITS<sup>1</sup>)*

Prof. Dr. Norbert Christlieb (LSW); Prof. Dr. Cornelis Dullemond (ITA); Prof. Dr. Eva Grebel (ARI); Prof. Dr. Ir. Saskia Hekker (HITS/LSW); Prof. Dr. Ralf Klessen (ITA); Prof. Dr. Michela Mapelli (ITA); Prof. Dr. Andres Quirrenbach (LSW); Prof. Dr. Fritz Röpke (HITS/LSW); Prof. Dr. Björn Malte Schäfer (ARI); Prof. Dr. Joachim Wambsgank (ARI)

*Wissenschaftliche Mitarbeiter: 70*

*Nachwuchsgruppenleiter:innen: 6*

Dr. Melanie Chevance (ITA), Dr. Kathryn Kreckel (ARI), Dr. Dylan Nelson (ITA), Dr. Nicole Reindl (LSW), Dr. Andreas Sander (ARI), Dr. Dominika Wylezalek (ARI)

*Promovierende: 52*

*Bachelor-/Masterstudierende: 13/36*

*Sekretariat und Verwaltung: 11*

*Technische Mitarbeiter:innen: 10*

### 2.2 Auszeichnungen und Ehrungen

Die Gaia-Kollaboration erhält den Berkeley-Preis 2023 für verdienstvolle Arbeiten in der Astronomie. Dieser Erfolg ist auch dem Gaia-Team am ARI unter der Leitung von Michael Biermann zu verdanken. (13.01.2023)

Der MERAC-Preis 2023 der europäischen Astronomischen Gesellschaft (EAS) für den/die besten Nachwuchsforscher:innen geht an Dominika Wylezalek (ZAH/ARI) für ihre Studien zu supermassiven Schwarzen Löchern und an Dylan Nelson (ZAH/ITA) für seine führende Rolle in der computergestützten Astrophysik. (05.04.2023)

Die Astronomische Gesellschaft ehrt Dominika Wylezalek (ZAH/ARI) mit dem Ludwig-Biermann-Preis für ihre Forschungsleistungen auf dem Gebiet der Entwicklung von Galaxien und massereichen Schwarzen Löchern. (30.8.2023)

Die Zeitschrift *Astronomy & Astrophysics* gibt die Ernennung von drei neuen Mitherausgebern in sein Redaktionsteam bekannt, darunter Andreas Koch-Hansen (ZAH/ARI) mit seiner Expertise zum Themenbereich Sternpopulationen. (19.09.2023)

Die Universität Heidelberg ernennt Andreas Koch-Hansen zum neuen außerplanmäßigen Professor und erkennt damit seine herausragenden Leistungen in Forschung und Lehre an. (21.09.2023)

Mélanie Chevance, Emmy Noether-Nachwuchsgruppenleiterin am ITA/ZAH, erhält den Hengstberger-Preis 2023. Der Preis unterstützt sie bei der Organisation eines wissenschaftlichen Symposiums am Internationalen Wissenschaftsforum Heidelberg (IWH) im Jahr 2024. (21.10.2023)

Die Patzer-Stiftung ehrt jährlich die besten Publikationen von Doktoranden und jungen Postdocs am MPA und ZAH. Dieses Jahr sind Emily Hunt (ZAH/LSW) und Mohammadreza Ayromlou (ZAH/ITA) unter den drei Preisträgern. (22.11.2023)

---

<sup>1</sup> Anschrift: HITS gGmbH, Heidelberger Institut für Theoretische Studien, Schloss-Wolfsbrunnenweg 35, 69118 Heidelberg

## 2.3 Instrumente und Rechenanlagen

### *Waltz-Teleskop der Landessternwarte*

Das Waltz-Teleskop nahm 1906 seinen Betrieb auf. Es wurde seinerzeit von der Familie Waltz finanziert und war das erste große Spiegelteleskop, dessen Optik von Carl Zeiss Jena gebaut wurde. Der Durchmesser des Hauptspiegels beträgt 60cm. Um die Astronomie-Ausbildung auch in experimenteller Hinsicht zu ermöglichen wurde in den vergangenen Jahren ein hochauflösender Echelle-Spektrograph für den Nasmyth-Fokus des Waltz-Teleskops entwickelt und in der Werkstatt der Landessternwarte gebaut. Dieses Instrument erlaubt präzise Messungen von Radialgeschwindigkeiten und ermöglicht in Verbindung mit dem revidierten Teleskop eine Genauigkeit der Messungen von mindestens 5 m/s. Damit ist u.a. die Entdeckung von Exoplaneten möglich. Der Spektrograph hat eine spektrale Auflösung von 64000. Als Referenz für die Messung der Spektrallinienverschiebungen wird eine Jodzelle verwendet, die am Institut für Astrophysik in Göttingen gebaut wurde.

### *70cm-Teleskop der Landessternwarte*

Bei diesem Instrument handelt es sich um ein Cassegrain-Teleskop mit einem Hauptspiegeldurchmesser von 70 cm bei einer Brennweite 560 cm (f:8). Das Teleskop wurde in der Werkstatt der Landessternwarte gebaut und 1988 erstmals in Betrieb genommen. Aktuell wird es nach umfangreicher Modernisierung im Rahmen des astrophysikalischen Praktikums eingesetzt, um Teilnehmenden die grundlegenden Prinzipien der Photometrie mittels einer CCD-Kamera (Feldgröße 8' x 5'.3) und photometrischer Farbfilter zu vermitteln.

### *SkyPole an der Landessternwarte*

Am 14. Oktober 2023 wurde an der Landessternwarte der sogenannte „SkyPole“ eröffnet. Der Bau der Anlage wurde durch eine großzügige Förderung der Klaus-Tschira-Stiftung (KTS) ermöglicht. Es handelt sich dabei um ein Gerät, mit dessen Hilfe Himmelskörper in der Nacht, in der Dämmerung und ggf. sogar am Tag ohne weitere Hilfsmittel gefunden werden können. Die künstlerisch-architektonische Installation besteht dabei aus einem großen Mast, der von einer kreisförmigen Geländefläche umgeben ist, in die gleichmäßig angeordnet leuchtende Bodenmarkierungen mit Koordinatenangaben eingebettet sind. Um ausgewählte Objekte wie Sternbilder, Planeten oder Himmelserscheinungen aufzufinden, muss man sich auf eine zuvor mit einer App oder einem wetterfest installierten Computer berechnete Bodenmarkierung stellen und über eine der Markierungen auf dem SkyPole auf die Position am Himmel peilen. Das Erkunden des Nachthimmels wird so auch zu einem gemeinsamen Erlebnis der ganz besonderen Art. Nähere Infos zum SkyPole finden sich unter <https://www.skypole.de>.

### *Rechenanlagen*

Wichtigste Rechenressource sind die landes- und bundesweiten Cluster auf den HPC-Tiers 0-3, auf denen ZAH-Wissenschaftler Rechenzeit beantragen können. Daneben nutzen einige Einzelprojekte dedizierte Rechner für Aufgaben, die in massiv-parallelen Clustern schlecht abbilden lassen. Dazu gehören u.a. sechs AMD-Threadripper-Maschinen mit besonders hoher Single-Core-Leistung, zwei Maschinen mit modernen Ada-GPUs für Experimente mit ML-Methoden sowie vier schnelle Datenbankserver mit je bis zu 1.5 TB RAM und 180 TB SSD-Speicher für die Gaia-, JASMINE- und Spacecraft Digital Twin-Projekte. Weiterhin werden ein Storage- und ein Datenbank-Server für einen Mirror des GAVO-Archives am ZAH betrieben. Für den allgemeinen Betrieb gibt es zuletzt einen Virtualisierungs-Cluster und einen Ceph-Storage-Cluster.

## 3 Wissenschaftliche Arbeiten

Die astrophysikalische Forschung am ZAH deckt ein breites Spektrum in Theorie und Beobachtung ab, das von Exoplaneten und nahegelegenen Sternen über die Milchstraße, externe Galaxien und Quasare bis hin zur Mikrowellenhintergrundstrahlung reicht. Das

ZAH ist auch an der Entwicklung und dem Bau von Instrumenten sowie der Entwicklung spezieller Hard- und Software beteiligt. Die Forschung am ZAH ist hauptsächlich in Forschungsgruppen organisiert und konzentriert. Zwei Forschungsgruppen sind am ZAH und dem Heidelberger Institut für Theoretische Studien (HITS) tätig. Im Folgenden sind die wichtigsten Gruppen und teilweise ihre in 2023 erzielten Forschungsergebnisse beschrieben. Einen vollständigen Überblick der Forschungsleistung geben die referierten wissenschaftlichen Publikationen. Es wurde die englische Bezeichnung der Arbeitsgruppen beibehalten.

### 3.1 Galactic Archaeology (Norbert Christlieb/Hans-Günther Ludwig)

Die Gruppe für Galaktische Archäologie an der Landessternwarte Heidelberg beschäftigt sich mit der Suche nach den metallärmsten und damit ältesten Sternen der Milchstraße und der Bestimmung ihrer chemischen Häufigkeitsmuster. Diese Sterne sind wichtige Instrumente für das Studium beispielsweise der Entstehung und chemischen Entwicklung der Galaxie, der Eigenschaften (z. B. Masse, Rotation) der ersten Generation massereicher Sterne, die als Supernovae vom Typ II explodierten, und der in ihnen stattfindenden Nukleosyntheseprozesse. Die Gruppe hat eine führende Rolle in der großflächigen Himmelsdurchmusterung, die voraussichtlich ab Ende 2025 mit dem 4MOST-Multi-Objekt-Spektrografen am 4m-VISTA-Teleskop der ESO in Chile durchgeführt werden wird. Der hochauflösende Spektrograf dieses Instruments wurde an der LSW konstruiert und gebaut.

### 3.2 Planet Formation (Cornelis Dullemond)

Die Gruppe untersucht, wie Planeten und Exoplaneten aus kosmischem Staub in protoplanetaren Scheiben entstehen. Dies geschieht mithilfe numerischer Modelle, wobei der Schwerpunkt auf der Struktur, der Entstehung und der Entwicklung von Planetengeburtorten (protoplanetaren Scheiben), der Koagulation, Fragmentierung und Bewegung von Staubaggregaten in diesen Scheiben, der Entstehung von Planetesimalen (d. h. 1-100 km großen Körpern wie Kometen und Asteroiden), dem unkontrollierten und oligarchischen Wachstum von Planetenembryonen aus Schwärmen von Planetesimalen und den N-Körper-Wechselwirkungen zwischen neu entstandenen Planeten liegt. Darüber hinaus werden Methoden und Codes für den mehrdimensionalen Strahlungstransport entwickelt, die in zirkumstellarer und interstellarer Materie eingesetzt werden können.

### 3.3 Galaxy Evolution (Eva Grebel)

Diese Gruppe untersucht hauptsächlich anhand von Sternpopulationsstudien, wie sich Galaxien bilden und entwickeln. Besondere Forschungsschwerpunkte sind Zwerggalaxien, die Milchstraße und Sternhaufen. Chemische und kinematische Untersuchungen von RR Lyrae-Sternen im äußeren Halo der Milchstraße ( $< 165$  kpc) zeigen, dass viele dieser Objekte akkretiert wurden und sie zum Teil ihren Ursprung in massereichen Satelliten wie der Großen Magellanschen Wolke und Sagittarius haben (Medina, Grebel). Die im Rahmen des nun abgeschlossenen SFB 881 begonnenen Studien der Spiralarmstruktur und des "Warps" der Milchstraßenscheibe mittels Cepheiden (Grebel, Dékány, Lemasle) wurden fortgesetzt und mit dynamischen Untersuchungen verbunden (Dehnen). Potential-Dichtemodelle für Balkenspiralen und Methoden zur Bestimmung der Rotationsgeschwindigkeit von Balken wurden entwickelt (Dehnen, Aly).

Eigenschaften von Zwerggalaxien in Wechselwirkung mit massereichen Galaxien in der Lokalen Gruppe, im Virgo-Haufen und anderen zentralen Galaxien im nahen Universum wurden anhand von Beobachtungen und TNG50-Simulationen untersucht und der Einfluss auf den Gasgehalt, die Sternentstehungsgeschichten und Zeitpunkt des Einfalls quantifiziert (Grebel, Pasquali, Bidaran, Engler). Staudruckeffekte und Gezeitenwechselwirkungen sind die Haupttreiber bei der Entwicklung einfallender Satelliten. Zudem wurden Akkretionssignaturen und diffuse Halos massereicher Galaxien detektiert und ihre Populationseigenschaften erforscht (Jackson, Pasquali, Grebel, Koch-Hansen).

Einfall entlang großräumiger Filamente spielt eine Schlüsselrolle beim Wachstum von Galaxienhaufen und ihrer dominanten Galaxien (Pasquali, Jackson). Die Mehrheit der massereichen Frühtypgalaxien (in erster Linie elliptische Galaxien) zeigen  $\alpha$ -Elementanreicherung und keine Entwicklung des  $[\alpha/\text{Fe}]$ -Verhältnisses während der letzten 6.5 Milliarden Jahre (Pasquali). Die massereichsten elliptischen Galaxien bildeten innerhalb kurzer Zeit den Großteil ihrer Sternmasse bereits vor 9 Milliarden Jahren mit supersolaren Häufigkeiten und zeigen seitdem keine nennenswerte weitere Änderung des Metallgehalts mehr, während masseärmere elliptische Galaxien vielfach mehr Entwicklung und Sternentstehungsaktivität in den vergangenen 9 Milliarden Jahren aufweisen (Pasquali).

### 3.4 Theory and Observations of Stars at HITS and LSW (Saskia Hekker)

Sterne sind eine wichtige Quelle elektromagnetischer Strahlung im Universum, mit der viele Phänomene untersucht werden können, von fernen Galaxien über das interstellare Medium bis hin zu Exoplaneten. Aufgrund ihrer Undurchsichtigkeit sagte einst Sir Arthur Eddington 1926, dass „auf den ersten Blick das tiefe Innere der Sonne und der Sterne für wissenschaftliche Untersuchungen weniger zugänglich zu sein scheint, als jede andere Region des Universums“ („at first sight it would seem that the deep interior of the Sun and stars is less accessible to scientific investigation than any other region of the universe“). Durch moderne mathematische Methoden und die Menge und Qualität verfügbarer Daten ist es nun jedoch trotzdem möglich geworden, die innere Sternstruktur direkt durch Sternschwingungen zu erforschen: eine Methode, die als Asteroseismologie bekannt ist. Hierzu werden die Eigenschaften von Wellen verwendet, um Rückschlüsse auf die innere Beschaffenheit von Sternen zu ziehen. Schwingungen, die auf den ganzen Stern einwirken, enthüllen so Informationen, die durch die undurchsichtige Oberfläche normalerweise verborgen sind. Diese asteroseismischen Informationen der Weltraumobservatorien wie CoRoT, Kepler, K2, TESS, SONG und Plato kombiniert mit astrometrischen Beobachtungen von Gaia, spektroskopischen Daten von SDSS-V APOGEE, Interferometrie, Photometrie und hochmodernen Sternmodellen wie MESA, geben Einblicke in die Sternstruktur und die physikalischen Prozesse, die in Sternen ablaufen.

Das Ziel der Theory and Observations of Stars (TOS) Forschungsgruppe am HITS ist die Untersuchung dieser physikalischen Prozesse, die in Sternen ablaufen, und wie sich diese in Abhängigkeit von der Sternentwicklung verändern. Die Gruppe konzentriert sich hierbei unter anderem auf sogenannte Hauptreihen-Sterne geringer Masse, „Unterriesen“ und rote Riesensterne. Diese Sterne sind deshalb interessant, weil sich ihre innere Struktur schnell ändert. Da sie potenziell von Planeten umgeben und kosmologische „Standardkerzen“ für Galaxienstudien sind, können sowohl die Exoplanetenforschung als auch die Galaxien-Archäologie vom wachsenden Verständnis dieser Sterne profitieren.

### 3.5 Star Formation (Ralf Klessen)

Diese Gruppe beschäftigt sich mit verschiedenen Aspekten der Sternentstehung in der Galaxis sowie im frühen Universum. Interstellare Turbulenzen und die Entstehung und Entwicklung von Molekülwolken werden ebenso untersucht wie die dynamische Entwicklung der Milchstraße und ihrer Satellitengalaxien. Da diese Forschung stark auf Computersimulationen beruht, arbeitet die Gruppe auch an der Entwicklung und Verbesserung numerischer Methoden für die Astrophysik.

Beobachtung von polarisiertem Licht, das von ausgerichteten interstellaren Staubkörnern ausgeht, erlaubt es, die Ausrichtung des Galaktischen Magnetfelds zu untersuchen. Die genauen physikalischen Prozesse, die zu einer kohärenten großräumigen Kornausrichtung führen, sind jedoch nicht vollständig erforscht. Auf mikroskopischer Ebene wurden daher verschiedene Mechanismen untersucht, die zur Ausrichtung fraktaler Staubkörner und anschließend zur Staubbpolarisierung führen (Reissl, Stefan et al.).

Ein neu entwickeltes Deep-Learning-Tool wurde entwickelt, das Sternparameter wie die effektive Temperatur, die Oberflächengravitation oder Extinktion junger massearmer Sterne

schätzt, indem es theoretische Sternatmosphärenmodelle mit einem invertierbaren neuronalen Netzwerk (cINN) verbindet. Die Gruppe konnte zeigen, dass die cINNs die betrachteten Sternparameter über einen weiten Bereich von Spektraltypen mit hoher Zuverlässigkeit ableiten können (Kang, Da Eun et al.).

Die erste Generation von Sternen, oft „Population III“ genannt, entsteht aus metallfreiem Urgan bei Rotverschiebungen  $z \sim 30$  und darunter. Sie dominiert die kosmische Sternentstehungsgeschichte bis  $z \sim 15-20$ . In einem Review-Artikel wurden aktuelle theoretische Modelle zur Entstehung, den Eigenschaften und der Auswirkung von Pop-III-Sternen zusammengefasst und mit Beobachtungsdaten verknüpft. Unter extremen Bedingungen können sich supermassive Pop-III-Sterne bilden, die Massen von mehreren  $10^5 M_\odot$  erreichen. Ihre Überreste könnten die Keime der supermassiven Schwarzen Löcher sein, die in Quasaren mit hoher Rotverschiebung beobachtet werden (Klessen, Ralf et al.).

### 3.6 Gravitational Wave Astrophysics (Michela Mapelli)

Der erste direkte Nachweis von Gravitationswellen im Jahr 2015 hatte neue Perspektiven für die Untersuchung kompakter Objekte und ihrer Vorläufersterne eröffnet. Diesbezüglich betreibt diese Gruppe Astrophysik mit Gravitationswellenquellen. Sie untersucht die Entstehung (binärer) kompakter Objekte mithilfe astrophysikalischer Modelle und validiert diese anhand von Gravitationswellendaten. Was sind die Endprodukte der Entwicklung von Doppelsternen? Können wir aus hierarchischen Ketten von Verschmelzungen kompakter Objekte in Sternhaufen massive schwarze Löcher bilden? Dies sind nur einige der wichtigsten offenen Fragen, die mit numerischen Modellen der Entwicklung von Doppelsternen und der Dynamik von Sternhaufen beantwortet werden sollen. Die Ergebnisse werden sowohl mit elektromagnetischen als auch mit Gravitationswellendaten verglichen, um Vorhersagen für zukünftige Detektoren wie dem „Einstein-Teleskop“ zu treffen.

### 3.7 Instrumentation (Andreas Quirrenbach)

Die Gruppe arbeitet derzeit an verschiedenen Instrumentierungsprojekten. Für den Spektrographen CARMENES, installiert und betrieben am Calar Alto 3.5m Teleskop, werden nach wie vor konstruktive Updates gefertigt sowie die regelmäßige Wartung durchgeführt. Der am ESO 4m VISTA Teleskop zu installierende Spektrograph 4MOST, bei dem die Landessternwarte für die hochauflösende Komponente und die Bediensoftware verantwortlich zeichnet, ist nahezu fertiggestellt. CUBES, vorgesehen für das ESO VLT, befindet sich auf dem Weg zum final design review. Für den 2nd Earth Spektrographen, vorgesehen für das 2.2m Teleskop auf La Silla, wurde mit dem detaillierten Design der Optik und Mechanik begonnen. Auch für den hochauflösenden ANDES Spektrographen, der am ESO 39m ELT installiert werden soll, wurde am preliminary design der Optik für den K-band Spektrographen gearbeitet. Für MOSAIC, der ebenfalls am ESO 39m ELT betrieben werden soll, wurde ebenfalls mit dem preliminary design der Optik des visuellen Spektrographen begonnen.

### 3.8 Exoplanets (Andreas Quirrenbach/Sabine Reffert)

Die Exoplanetengruppe der Landessternwarte konzentriert sich auf die Suche und Charakterisierung von Exoplaneten um verschiedene Sterntypen, darunter M-Zwerg und K-Riesen. Dazu wird hauptsächlich Dopplerspektroskopie verwendet, aber auch andere Methoden wie direkter Bildgebung und Astrometrie werden für die Suche nach Planeten verwendet. Dazu werden Teleskope auf der ganzen Welt, aber auch auf dem heimischen Königstuhl verwendet (siehe Abschnitt *Instrumente*, um nach den subtilen Signaturen von Planeten zu suchen. Ein besonderes Interesse der Gruppe gilt dynamischen Analysen von Mehrplanetensystemen, die helfen zu verstehen, wie Planetensysteme entstehen und sich entwickeln.

### 3.9 Physics of Stellar Objects (Friedrich Röpke)

Die am HITS und ZAH arbeitende Forschungsgruppe „Physics of Stellarer Objects“ versucht, die Prozesse in Sternen und bei Sternexplosionen auf der Grundlage umfangreicher numerischer Simulationen zu verstehen. Neu entwickelte numerische Techniken und die stetig wachsende Leistungsfähigkeit von Supercomputern ermöglichen eine Modellierung stellarer Objekte in beispiellosem Detail und höchster Präzision.

Ein Hauptziel ist die Modellierung der thermonuklearen Explosionen weißer Zwergsterne, die zum astronomischen Phänomen der Supernovae vom Typ Ia führen. Diese sind die Hauptquellen des Elements Eisen und haben als Entfernungsindikatoren in der Kosmologie eine wichtige Rolle gespielt, was u.a. zur spektakulären Entdeckung der beschleunigten Expansion des Universums führte. Mehrdimensionale fluiddynamische Simulationen in Kombination mit Nukleosyntheseberechnungen und Strahlungstransportmodellen liefern ein detailliertes Bild der physikalischen Prozesse in Supernovae vom Typ Ia, werden aber auch auf andere Arten kosmischer Explosionen angewendet.

Die klassische astrophysikalische Theorie beschreibt Sterne als eindimensionale Objekte im hydrostatischen Gleichgewicht. Dieser Ansatz war äußerst erfolgreich. Er erklärt, warum Sterne in unterschiedlichen Konfigurationen beobachtet werden und vermittelt ein qualitatives Verständnis der Sternentwicklung. Die vereinfachenden Annahmen begrenzen jedoch die Vorhersagekraft solcher Modelle. Mit neu entwickelten numerischen Werkzeugen untersucht die Gruppe dynamische Phasen der Sternentwicklung in dreidimensionalen Simulationen. Ihr Ziel ist es, eine neue Generation von Sternmodellen zu konstruieren, die auf einer verbesserten Beschreibung der in ihnen ablaufenden physikalischen Prozesse basiert.

### 3.10 Statistics and Cosmology (Bjoern Malte Schaefer)

Die Forschungsgruppe untersucht statistische Eigenschaften der großräumigen Strukturen im Universum und erforscht die Sensitivität kosmologischer Methoden wie Linseneffekte und CMB-Anisotropien zur Einschränkung kosmologischer Modelle und zur Messung kosmologischer Parameter. Die wichtigsten Werkzeuge sind die kosmische Störungstheorie zur Beschreibung von Strukturwachstumsprozessen und Statistiken wie Markov-Ketten zur Erforschung von Parameterräumen, nicht-Gaußschen Zufallsprozessen und statistischer Inferenz. Darüber hinaus untersucht die Gruppe Gezeitenwechselwirkungen von Galaxien mit der umgebenden großräumigen Struktur und arbeitet an der Beschreibung dieser Ausrichtungsprozesse in der Sprache schwacher Linseneffekte. Die Anwendungen dieser Untersuchungen erfolgt in PLANCK- und EUCLID-Projekten.

### 3.11 Gravitational Lensing (Joachim Wambsganz)

Als Gravitationslinsen bezeichnet man Objekte, die durch ihre Masse in der Lage sind, das von verschiedenen (Hintergrund-)Quellen wie Sternen, Galaxien oder Quasaren emittierte Licht von seiner geradlinigen Ausbreitung abzulenken. Dadurch verändern sich die Positionen dieser Quellen an der Himmelssphäre, sie werden vergrößert, in ihrer Form verzerrt oder verstärkt. Die spektakulärsten Phänomene sind Mehrfachbilder einer einzigen Hintergrundquelle. In dieser Forschungsgruppe werden u.a. mehrfach abgebildete Quasare hinsichtlich Helligkeitsänderungen, Lichtkurven, Zeitverzögerungsbestimmung und Mikrolinseneffekt untersucht. Darüber hinaus wird der Gravitationslinseneffekt genutzt, um (Exo-)Planeten um andere Sterne zu entdecken.

### 3.12 Virtual Observatory/eScience (Joachim Wambsganz/Markus Demleitner)

Die Astronomie ist eine extrem datenintensiven Wissenschaft. Das sogenannte Data-Mining vielfältiger und/oder großer Datensammlungen macht daher große Teile der aktuellen Forschung aus. Dies erfordert die Entwicklung und ständige Pflege und Verbesserung einer leistungsfähigen Infrastruktur. Das ARI leistet hierbei einen Beitrag, indem es sich über die deutsche VO-Organisation GAVO (German Astrophysical Virtual Observatory) am

internationalen Virtuellen Observatorium beteiligt, für das es ein Datenzentrum betreibt und Serversoftware sowie Benutzerprogramme (z. B. Splat) und Standards für Computerprotokolle und Datenmodelle entwickelt.

Im Rahmen des PUNCH4NFDI Projekts wurden diverse open-source Datenmanagementtools entwickelt. Darunter befinden sich u.a. ein Forum zum Austausch von Datenmanagementlösungen, sowie die Suchmaschine `physics.tools` für wissenschaftliche Software, deren Datenbank aus in Publikationen genannter Software erstellt wurde. Eine KI-basierte Weiterentwicklung der Suchmaschine wurde begonnen. Ebenfalls wurde die Software ELMA entwickelt, die Echtzeitdatenreihen analysieren kann und bei Abweichungen einen Alarm sendet.

### 3.13 Emmy Noether Research Group on Galactic Matter cycle (Mélanie Chevance)

Die Forschungsgruppe Galactic Matter Cycle nutzt modernste Mehrwellenlängenbeobachtungen, um die Massen- und Energieflüsse innerhalb von Galaxien zu charakterisieren, zu bestimmen, wie Gas in Sterne umgewandelt wird und wie Sterne Material zurück in das umgebende Medium werfen. Im Jahr 2023 hat die Gruppe zwei neue Mitglieder begrüßt: Andrea Romanelli beginnt seine Doktorarbeit und Dr. Lise Ramambason erhält eine Postdoc-Stelle. Jaeyeon Kim verließ die Gruppe, um als Kavli Fellow bei KIPAC/Stanford zu beginnen, nachdem sie im April 2023 ihre Doktorarbeit erfolgreich verteidigt hatte.

Die Mitglieder der Gruppe haben wichtige Beiträge zu den Themen Sternentstehung, Sternrückkopplung und interstellares Medium geleistet und im Jahr 2023 39 Artikel veröffentlicht. Dr. Chevance leitete ein Übersichts-kapitel für Protostars and Planets VII (Chevance et al. 2023), in dem die Fortschritte seit 2014 in unserem Verständnis der Entstehung und des Zusammenbruchs riesiger Molekülwolken, ihrer Sternentstehung und ihrer Zerstreuung durch Rückkopplung zusammengefasst werden.

Die Gruppe war auch stark an der Analyse einiger der ersten Beobachtungen des James Webb Space Telescope (JWST) beteiligt. Wir waren im Rahmen der PHANGS-Zusammenarbeit Mitautoren von 18 Artikeln, die diese revolutionären Beobachtungen nutzten. Insbesondere haben wir in Kim et al. (2023) gezeigt, dass die systematische Charakterisierung der frühen Phase der Sternentstehung, die zuvor auf eine Handvoll Galaxien beschränkt war, nun über die gesamte Population nahegelegener Galaxien hinweg möglich ist. Um diese Studie fortzusetzen, wurde ein großes Programm für das JWST (155 Stunden) angenommen (P.I. Leroy, Co-I. Chevance). Die Gruppe plant außerdem eine JWST-Durchmusterung der inneren hundert Parsec der Milchstraße, die das nächstgelegene supermassive Schwarze Loch, das größte Reservoir an dichtem Gas und die größte Sternendichte in unserer Galaxie beherbergen (Schoedel et al. 2023, inkl. Chevance). Es wurden auch Fortschritte bei der Charakterisierung der Eigenschaften des Gases in Umgebungen mit geringer Metallizität erzielt, insbesondere durch die Modellierung der Gesamtmenge an molekularem Gas in Zwerggalaxien (z. B. Ramambason et al. 2024).

### 3.14 ERC and Emmy Noether Research Group on the Baryonic Life Cycle (Kathryn Kreckel)

Diese Nachwuchsforschungsgruppe unter der Leitung von Kathryn Kreckel will Galaxienentwicklung verstehen, indem sie unser Verständnis der physikalischen Prozesse und lokalen Bedingungen verbessert, die ihren Aufbau von Sternmasse durch Sternentstehung vorantreiben. Im Jahr 2023 bestand die Gruppe aus 4 Postdocs, 3 Doktoranden und 3 Masterstudenten. Die Gruppenmitglieder waren Erstautoren von 7 Veröffentlichungen, darunter ein in Nature und ein zweiter in Nature Astronomy veröffentlichter Artikel, und Koautoren von weiteren 36 Veröffentlichungen. Die Arbeit innerhalb dieser Gruppe wird durch ein Emmy Noether-Stipendium der DFG und einen ERC Starting Grant finanziert.

Um die Energetik des Sternfeedbacks quantitativ einzuschränken, untersuchten Egorov et al. ionisierte Superblasen untersucht. Dazu wurde die kinetische Energie expandierender

Superblasen und die turbulenten Bewegungen im interstellaren Medium direkt mit der mechanischen Energie verglichen, die von massereichen Sternen in Form von Winden und Supernovae abgegeben wird. Dabei wurde festgestellt, dass stellare Rückkopplungen die dominierende Quelle für die Energieversorgung des ionisierten Gases in Regionen mit lokal (auf einer Skala von 50-500 pc) erhöhter Geschwindigkeitsdispersion sind, mit einer typischen Kopplungseffizienz von 10-20%. Um die Energiebilanz zwischen Gas und Sternen herzustellen, muss die Rückkopplung vor der Supernova berücksichtigt werden.

Mithilfe des großen PHANGS-MUSE-Programms konnte eine neue Technik entwickelt und angewendet werden, um die starken Emissionslinien aus H-II-Regionen in 19 nahegelegenen Spiralgalaxien mit einer Auflösung von  $\sim 50$  pc zu modellieren und die Elektronentemperaturen für die Nebel abzuleiten (Kreckel et al.). Diese neue Technik zur Messung der Elektronentemperaturen nutzt die wachsende Verfügbarkeit optischer integraler Feld-einheitsspektroskopiekarten über Galaxienproben hinweg und erhöht so die verfügbaren Statistiken im Vergleich zur direkten Erkennung von „Auroral lines“.

Darüber hinaus wurde die PHANGS-MUSE-Durchmusterung vorgestellt, ein 172-stündiges ESO-Großprogramm, das den MUSE-Integralfeldspektrographen am VLT verwendet, um 19 nahegelegene Spiralgalaxien mit einer Auflösung von  $\sum 50\%$  und 1,5 Millionen räumlich unabhängigen Spektren zu beobachten (Kreckel et al.).

Darüber hinaus arbeitet die Gruppe im Rahmen der SDSS-V-Zusammenarbeit daran, optische spektroskopische Karten zu verwenden und die innere Struktur der HII-Regionen der Milchstraße und der Lokalen Gruppe aufzulösen. Diese Beobachtungen ermöglichen es, präzise und genaue Messungen des gasförmigen Metallgehalts zu erhalten. Systematische Unsicherheiten in unseren Metallizitätsmessungen werden mithilfe umfangreicher neuer homogener Datensätze behandelt, die einzelne HII-Regionen in nahegelegenen Galaxien auflösen.

### 3.15 Emmy Noether Research Group on Computational Galaxy Formation and Evolution (Dylan Nelson)

Die Forschungsgruppe ist auf rechnergestützte Galaxienbildung und -entwicklung spezialisiert und entwirft und führt numerische Simulationen durch, zu verstehen wie Galaxien im Laufe der kosmischen Zeit wachsen. Wie Gas in, aus und um Galaxien fließt? Zu diesem Zweck betreibt die Gruppe die theoretische Modellierung der Galaxienbildung, des kosmischen Baryonenzyklus, der kosmologischen Gasakkretion, des zirkumgalaktischen Mediums und energetischer Rückkopplungsprozesse. Was ist der Ursprung, die Struktur und die Physik des zirkumgalaktischen Mediums (CGM) von Galaxien? Welchen Einfluss hat baryonische Rückkopplung, die von Supernovas und supermassiven Schwarzen Löchern angetrieben wird, auf das CGM und den Baryonenzyklus? Was sind die beobachtbaren Signaturen von kaltem (molekularem/ neutralem), warmem (ionisiertem) und heißem (z.B. Röntgenstrahlen emittierendem) Gas im interstellaren Medium (ISM) innerhalb von Galaxien, im zirkumgalaktischen und intracluster Medium (CGM/ICM) um Galaxien herum sowie im intergalaktischen Medium (IGM) auf großen Skalen?

Die Gruppe untersucht diese Fragen durch numerische Simulationen, die überwiegend mit AREPO durchgeführt werden, einem Finite-Volumen-Hydrodynamikcode, der auf einem bewegten unstrukturierten Netz basiert, und ist Leiter von Projekten wie IllustrisTNG und der TNG50-Simulation ([www.tng-project.org](http://www.tng-project.org)), GIBLE, TNG-Cluster, und cosmosTNG – nächsten Generation kosmologischer magnetohydrodynamischer Simulationen der Galaxienentwicklung und der großräumigen Strukturbildung.

### 3.16 Heisenberg Research Group on Hot Compact Stars (Nicole Reindl)

Die Gruppe (N. Reindl, M.Sc. N. Mackensen, L. Comanescu) untersucht heiße Weiße Zwerge und deren unmittelbare Vorläufer. Spektroskopische UV-Daten eines großen (130 orbits) HST Programms (PI: N. Reindl, Proposal ID 17113) wurden analysiert (N. Reindl, N.

Mackensen). Ferner wurden spektroskopische und photometrische Daten von verschiedenen Zentralsternen planetarischer Nebel (N. Reindl), heißen Weißen Zwergen mit ultrahoch angeregten Absorptionslinien (N. Reindl, N. Mackensen), engen Doppelsternsystemen (N. Reindl), Weißen Zwergen mit geschichteten Atmosphären (N. Reindl), und heißen, H-armen Vor-Weißen Zwergen analysiert (N. Reindl, L. Comanescu). Es wurde eine spektroskopische Nachverfolgung von heißen (Vor-)Weiße Zwergen mit LBT/MODS durchgeführt (N. Reindl, N. Mackensen). Weiterhin wurden Modellgitter für PG1159 Sterne (N. Mackensen) und O(He) Sterne (L. Comanescu, N. Reindl) gerechnet. Ergänzend laufen die Vorbereitungen für den 4MOST Survey. Mitarbeit an Projekten zu kurz- und langzeit veränderlichen Zentral Sternen planetarischer Nebel (N. Reindl, N. Mackensen). Außerdem Mitarbeit an spektroskopischen und kinematischen Untersuchungen schneller heißer Unterzwerge (N. Reindl).

### 3.17 Emmy Noether Research Group on Stellar Atmospheres and Mass Loss (Andreas Sander)

Die von Dr. Andreas Sander geleitete Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe untersucht Eigenschaften und Einfluss heißer Sterne und ihrer strahlungsgetriebenen Winde. Zentrales Werkzeug der Gruppe ist dabei die Berechnung und Weiterentwicklung von Atmosphärenmodellen mit dem PoWR-Code, die sowohl den Stern als auch seinen Wind beschreiben. Im Jahr 2023 umfasste die Gruppe zwei Postdocs, fünf Doktoranden und zwei Masterstudenten. Die Arbeit der Gruppe wird neben den Emmy-Noether-Mitteln auch durch eine DFG-Sachbeihilfe, ein DLR-Projekt, Exzellenzmittel sowie ein PhD-Fellowship der IMPRS-HD finanziert.

Ein wesentliches Standbein der Gruppe ist quantitative Spektralanalyse heißer Sterne (A. Sander, V. Ramachandran, M. Bernini Peron, E.C. Schösser). Highlights in diesem Bereich waren die erstmalige Entwicklung einer bisher nicht nachgewiesene wichtige Zwischenstation in der Entwicklung massereicher Doppelsterne (Ramachandran et al. 2023, A&A) und der erstmalige Nachweis einer Notwendigkeit von Röntgenemissionen bei späten B-Überriesen (Bernini-Peron et al. 2023, A&A). Neben der quantitativen Spektralanalyse von Einzel- und Mehrfachsternen beschäftigt sich die Gruppe auch mit dem resultierenden Feedback einzelner Sterne sowie ganzer Sternpopulationen. Dabei werden auch Modelle zur Vorhersage von Sterneigenschaften sowie zur Populationssynthese erstellt (R.R. Lefever, S. Kapoor). Ein weiteres Standbein der Nachwuchsgruppe ist die theoretische Untersuchung von strahlungsgetriebenen Sternwinden (A. Sander, R.R. Lefever, G. Gonzalez-Tora). Highlights in diesem Bereich waren die erstmalige Darstellung der Temperaturabhängigkeit des Wind-Massenverlusts von klassischen WR-Sternen veröffentlicht (Sander et al. 2023, A&A) sowie der quantifizierte Einfluss des Geschwindigkeitsfelds auf das emergente Spektrum von Wolf-Rayet-Sternen (Lefever et al. 2023, A&A). Die Gruppe hat zudem damit begonnen neuste Erkenntnisse aus 2D und 3D-Windsimulationen in 1D-Sternatmosphären abzubilden (A. Sander, G. Gonzalez-Tora).

Als Schnittstelle zwischen Theorie und Analyse heißer Sterne ist die Nachwuchsgruppe stark in der XShootU-Kollaboration involviert, die sich der Erforschung massereicher Sterne mit niedrigem Metallgehalt auf Basis der ULLYSES UV-Spektren sowie ergänzender XShooter-Spektren widmet. Seit Ende 2023 beteiligt sich die Gruppe zudem an der im Aufbau befindlichen BLOeM-Kollaboration zur Erforschung von massereichen Doppelsternen in der SMC. Weitere Kollaborationen und ergänzende Studien über die Auswirkung von Sternwinden runden die Arbeit der Gruppe ab. J. Josiek (Doktorand seit September 2023) hat mit den Arbeiten für die Veröffentlichung einer Studie über den Einfluss von Hauptreihen-Sternwinden auf die späte Sternentwicklung begonnen. C. Larkin (Doktorand, IMPRS Fellow) entwickelte 3D-Modelle, die u.a. die Möglichkeit der Teilchenbeschleunigung in kollidierenden Sternwinden und Supernovae-Explosionen näher untersuchen sollen. Im Oktober 2023 hat A. Sander ferner mit den Mitteln seines 2022 erhaltenen Hengstberger-Preises einen diskussionsorientierten Workshop zum Thema „A unified understanding of stellar yields“ mit 25 eingeladenen Teilnehmern aus aller Welt organisiert.

### 3.18 Emmy Noether Research Group on Galaxy Evolution and AGN (Dominika Wylezalek)

Das Hauptziel der im Rahmen des Emmy Noether-Stipendiums geförderten Forschung (Beginn September 2020) besteht darin zu verstehen, wie Galaxien entstehen und sich entwickeln und welche physikalischen Prozesse in verschiedenen kosmischen Epochen und auf verschiedenen räumlichen Skalen am wichtigsten sind. Konkret geht es darum, Beobachtungen zur Selbstregulierung supermassereicher Schwarzer Löcher und ihrer Wirtsgalaxien sowie ihrer klein- und großräumigen Umgebung zu finden. Die Gruppe beschäftigt zwei Promovierende, zwei Postdoktoranden und betreut drei Master- und zwei Bachelorstudierende.

Die Gruppe verfolgt einen Multi-Wellenlängen-, Multi-Technik-, Multi-Skalen- und Multi-Epochen-Ansatz. Bei niedriger Rotverschiebung nutzen wir den SDSS-MaNGA-Datensatz, um Galaxien neu zu klassifizieren (Alban et al. 2023) und systematisch Wind-Signaturen von AGN zu untersuchen (Alban et al. in prep., Kukreti et al. in prep.). Ein großes CO-Folgeprogramm von MaNGA-Galaxien (MASCOT, Wylezalek et al. 2022a) zeigt, dass Metalle durch AGN-Rückkopplung auf großen Skalen umverteilt werden können (Bertemes et al. 2023).

Mithilfe von Daten aus mehreren JWST IFU-Programmen untersucht die Gruppe hochrotverschobene AGN und deren Rückkopplungs- und Wind-Signaturen. Diese IFU-Daten zeichnen den inneren sub-kpc-AGN-Wind nach, was zusätzlich zu den MUSE-Daten im CGM-Maßstab (Wang et al. 2021, Wylezalek et al. 2022a, Wang et al. 2023, Bertemes et al. 2024, Wang et al. 2024) einen ergänzenden Blick auf die inneren paar kpc ermöglicht. Mit diesem Datensatz lassen sich die dichtesten Knoten der Galaxienbildung um ein hochverschobenen AGN identifizieren. Die Arbeit erhielt weltweite Anerkennung, einschließlich der Aufmerksamkeit der Medien durch mehrere Pressemitteilungen (NASA, ESA). Die Gruppe hat auch Projekte im Rahmen der SDSS-V Black Hole Mapper Survey gestartet und trägt zu mehreren Veranstaltungen zur Öffentlichkeitsarbeit bei. Die Gruppe wird außerdem von der Daimler-Benz Stiftung, der MERAC-Stiftung und dem DLR gefördert und nimmt an einem DAAD-CAPEs (Brasilien) Austauschprogramm teil.

### 3.19 Gaia, JASMINE, Spacecraft Digital Twins (Michael Biermann)

Die Gaia-Gruppe in Heidelberg besteht aus 10 Mitgliedern, von denen ein Drittel Softwareentwickler sind. Dieses Team ist für entscheidende Aufgaben innerhalb des Gaia Data Processing and Analysis Consortiums (DPAC) verantwortlich. U.a. liegt die Leitung für die Verarbeitung der astrometrischen Daten des Gaia-Satelliten sowie die Koordination der Herstellung und Verifikation der astrometrischen Globallösung für den vierten Gaia-Katalog in dieser Arbeitsgruppe. Ihre Aufgaben umfassen darüber hinaus ein breites Spektrum an Aktivitäten, darunter die Sicherstellung der täglichen Qualitätskontrolle der wissenschaftlichen Rohdaten und des Funktionierens des Gaia-Satelliten (Gaia First Look), die Koordinierung und Auswertung bodengestützter Beobachtungen zur genauen Bestimmung der Umlaufbahn des Satelliten (GBOT), die Verwaltung eines Gaia-Partner-Datenzentrums (<https://gaia.ari.uni-heidelberg.de>), die Erstellung von 3D-Visualisierungen von Gaia-Daten (Gaia Sky, <https://gaiasky.space/>), die Leitung der Öffentlichkeitsarbeit des DPAC sowie die Leitung des DPAC Project Office, das alle Aufgaben zwischen den vielfältigen Arbeitsgruppen des DPAC koordiniert.

Die „Japan Astrometry Satellite Mission for Infrared Exploration“ (JASMINE) plant an Gaia anknüpfend das Zentrum der Milchstraße im Infraroten astrometrisch hochgenau zu vermessen, sowie nach Exoplaneten zu suchen. Anders als Gaia wird JASMINE aber nicht den gesamten Himmel kartographieren, sondern bestimmte Regionen anvisieren und diese wiederholt beobachten. Die Arbeitsgruppe in Heidelberg entwickelt in Zusammenarbeit mit den japanischen Kollegen ein direktes astrometrisches Lösungsverfahren für diese Mission, die im nächsten Jahrzehnt starten und dann drei Jahre lang beobachten soll. Dazu wurde ein massiv paralleler Supercomputercode für das astrometrische JASMINE Problem

erstellt, der auf dem bwUniCluster 2.0 eine Lösung für 9.2 Milliarden Beobachtungen von insgesamt 115.000 Sternen in wenigen Stunden berechnen kann. Darüber hinaus gibt es einen intensiven Erfahrungsaustausch zwischen der laufenden Gaia-Mission und der JASMINE Arbeitsgruppe.

Je komplexer Wissenschaftssatelliten werden, desto wichtiger ist die Kenntnis und Berücksichtigung der Satelliteneffekte in der wissenschaftlichen Datenaufnahme. Da zukünftige wissenschaftliche Satelliten immer genauer messen werden können, werden Störeffekte in den reinen wissenschaftlichen Rohdaten immer relevanter werden. Es wäre daher ideal, wenn man auf der Erde einen „Digitalen Satelliten-Zwilling“ hätte, den man parallel zum laufendem Betrieb im All nutzen könnte, um Störeffekte zu verstehen. Auf diese Weise könnte man neue Software entwickeln und ausprobieren, um diese Störeffekte in den Daten zu eliminieren. Das Ziel dieses Projekts ist es, einen solchen digitalen Zwilling zu erstellen, der am Beispiel des Bahn- und Lageregelungssystems des Gaia-Satelliten (AOCS = Attitude and Orbit Control System) einschließlich der verwendeten Sensorsysteme die gemessenen Drehraten der insgesamt mehr als 10-jährigen Mission besser verstehen hilft.

### 3.20 Computational Stellar Dynamics (Rainer Spurzem)

Die Forschungsgruppe untersucht Struktur, Dynamik und Massenverteilung von Sternsystemen. Dies reicht von der Entstehung und Entwicklung von Planetensystemen, der Entwicklung von Sternhaufen, der Milchstraße und anderen Galaxien bis hin zur newtonschen und relativistischen Dynamik von Schwarzen Löchern, die in dichte Sternsysteme eingebettet sind. Da mathematische Lösungen für reale astrophysikalische Systeme sehr selten sind, sind Computersimulationen ein wichtiges Werkzeug in diesem Bereich. Daten, die aus Hochleistungscomputermodellen gewonnen werden, werden mit Theorien oder Beobachtungen verglichen. Jüngst konnte die Entwicklung eines Sternhaufens mit einer Million Körpern simuliert und dabei Ergebnisse erzielt werden, die mit den Beobachtungsdaten von modernen erd- oder weltraumgestützten Teleskopen vergleichbar sind. Ferner wurde die Emission von Gravitationswellen (GW) aus Schwarzen Löchern in Sternhaufen über das gesamte GW-Spektrum berechnet. Einige der Vorhersagen liegen in derzeit beobachtbaren Frequenzbändern, andere werden erst in Zukunft beobachtbar sein. Im Silk Road-Projekt arbeiten die Gruppe mit den Nationalen Astronomischen Observatorien in China und anderen astrophysikalischen Instituten an der Seidenstraße (Kiew, Ukraine; Almaty, Kasachstan) zusammen. In Deutschland und China werden hochmoderne Supercomputing-Einrichtungen mit GPU-Beschleunigern eingesetzt.

### 3.21 Extragalactic & High Energy Astrophysics (Stefan Wagner)

Diese Forschungsgruppe arbeitet hauptsächlich im Bereich der Datenanalyse der von H.E.S.S. beobachteten hochenergetischen Gammastrahlung und weiterer Multiwellenlängendaten, sowie an Datenmanagementtools im Rahmen des PUNCH4NFDI Projekts der Nationalen Forschungsdateninfrastruktur.

Für H.E.S.S. wurden Monitoringdaten des Blazars PKS 1510-089 ausgewertet und veröffentlicht, die eine erstaunliche Ruhephase der Quelle zeigen. Weiterhin war die Gruppe an der Auswertung der Daten des Blazars PKS 0903-57 beteiligt, dessen Charakterisierung sich bisher als schwierig darstellte. Die H.E.S.S. Daten werden in Kürze veröffentlicht und belegen, dass es sich bei der Quelle um einen FSRQ handelt.

Die Gruppe erstellt federführend einen VHE Katalog von extragalaktischen Quellen auf Basis von H.E.S.S. und Fermi-LAT Daten. Weitere Studien mit H.E.S.S. Beobachtungen dienen der Suche nach dem Annihilationssignal von dunkler Materie, sowie der diffusen Emission der sogenannten Fermi-Bubbles.

Daten des galaktischen Zentrums von H.E.S.S. und XMM-Newton wurden dazu verwendet um die korrelierte Kurzzeitvariabilität in diesen Wellenlängenbereichen zu erforschen. Die Gruppe ist auch maßgeblich an der Überwachung des laufenden Betriebs von H.E.S.S. und der IT Infrastruktur beteiligt. Das Automatische Teleskop für Optisches Monitoring

(ATOM) in Namibia, welches als optisches Supportinstrument für H.E.S.S. agiert, wurde zu einem vollständig autonom agierendem Observatorium weiterentwickelt und die gewonnenen Beobachtungsdaten haben wertvolle Beiträge bei der Erforschung von aktiven Galaxienkernen geleistet.

## 4 Veröffentlichungen

### 4.1 In referierten Zeitschriften (371)

Eine Übersicht der Veröffentlichungen mit Autoren des ZAH in referierten Journalen für die Jahre 2005 bis 2023 ist zu finden unter <https://zah.uni-heidelberg.de/publications>.

Verantwortlich für den Inhalt: Dr. Guido Thimm