

Grosse astronomische Forschungseinrichtungen: Ihre fundamentale Bedeutung für die Schweizer Astronomie

Herausgeber

Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
Platform Mathematics, Astronomy and Physics (MAP)
Haus der Akademien | Laupenstrasse 7 | Postfach | 3001 Bern

Ein Projekt der Platform Mathematics, Astronomy and Physics (MAP)

map@scnat.ch, www.naturwissenschaften.ch/organisations/map

Autoren

Michael Meyer, ETH Zürich; Georges Meylan, EPF Lausanne; Georges Meynet, Universität Genf;
Alexandre Refregier, ETH Zürich; Friedrich-Karl Thielemann, Universität Basel

Redaktion

Olivier Dessibourg, Wissenschaftsjournalist

Redaktionelle Mitarbeit

Christian Preiswerk, Platform MAP

Übersetzung

Zieltext AG, Zollikon

Review deutsche Version

Bruno Leibundgut, European Southern Observatory; D-Garching; Friedrich-Karl Thielemann

Layout

Olivia Zwygart

Titelbild

D. Kordan/ESO

Druck

Ackermanndruck AG, Köniz

1. Auflage, 2017 (1900 Ex. deutsch/700 Ex. französisch/400 Ex. englisch)

Die Broschüre kann kostenlos bezogen werden bei der «Platform MAP»

oder unter www.naturwissenschaften.ch/organisations/map.

© Akademien der Wissenschaften Schweiz, 2017

Zitiervorschlag

Akademien der Wissenschaften Schweiz (2017)

Grosse astronomische Forschungseinrichtungen:

Ihre fundamentale Bedeutung für die Schweizer Astronomie.

Swiss Academies Communications 12 [?]

ISSN (print) 2297-1793

ISSN (online) 2297-1807

DOI: 10.5281/zenodo.1067988

Grosse astronomische Forschungseinrichtungen: Ihre fundamentale Bedeutung für die Schweizer Astronomie

sc | nat 

Swiss Academy of Sciences
Akademie der Naturwissenschaften
Accademia di scienze naturali
Académie des sciences naturelles

Inhalt

| | |
|---|----|
| 1. Einleitung..... | 6 |
| 2. Sterne und Planeten | 8 |
| 2.1 Entstehung..... | 8 |
| 2.2 Die Entwicklung der Sterne | 11 |
| 2.3 Tod und Explosion von Sternen..... | 13 |
| 3. Galaxien..... | 16 |
| 3.1. Entstehung und Entwicklung..... | 16 |
| 4. Das Universum | 18 |
| 4.1 Die kosmische Hintergrundstrahlung..... | 18 |
| 4.2 Messung von Gravitation und Gravitationswellen..... | 19 |
| 4.3 Untersuchungen der grossräumigen Struktur des Universums..... | 20 |
| 4.4 Das Square Kilometre Array..... | 21 |
| 5. Verbindungen zu angrenzenden Forschungsgebieten..... | 23 |
| 6. Zusammenfassung..... | 23 |
| Anhang | 24 |

Das Very Large Telescope (VLT) der ESO während eines Tests des neuen Laserleitsternsystems.
Das System ermöglicht es, die Verzerrungen der Beobachtung durch die permanente Bewegung der Luft
in der Atmosphäre fast vollständig zu korrigieren, um so schärfere Bilder zu erhalten. Quelle: ESO/Y. Beletsky



Luftaufnahme vom Standort des Very Large Telescope (VLT) der ESO auf dem Cerro Paranal in der Atacamawüste in Chile. Das Paranal-Observatorium mit den vier großen 8,2-Meter-Hauptteleskopen des VLT liegt auf 2600 Metern über dem Meeresspiegel, im Hintergrund der Gipfel des 6720 Meter hohen Vulkans Lullillaco in 190 km Entfernung. Quelle: ESO/G.Hüdepohl (atacamaphoto.com)

Die beiden vergangenen Jahrzehnte waren ein goldenes Zeitalter der Astrophysik und Kosmologie mit grossen Fortschritten in allen Bereichen der beobachtenden Astronomie und der theoretischen Forschung. Schweizer Astronominen und Astronomen konnten dank der vielen modernen Einrichtungen, die ihnen überall auf der Welt zur Verfügung stehen, massgeblich zu diesen Fortschritten beitragen. Die moderne astronomische Forschung wäre ohne regelmässigen Zugang zu diesen Einrichtungen und ohne internationale Kooperationen undenkbar. Die vorliegende Broschüre soll ein Schlaglicht auf deren Einfluss und Wichtigkeit für die Schweizer Forschenden werfen. Einen detaillierteren Einblick in alle derzeitigen und zukünftigen Projekte bieten die Schweizer «Roadmap for Astronomy» und ihre jeweiligen Updates.¹

¹ www.naturalsciences.ch/service/publications/47646-update-to-the-roadmap-for-astronomy-in-switzerland-2007---2016.

1. Einleitung

Im Jahr 1995 machten Michel Mayor und Didier Queloz von der Universität Genf eine bahnbrechende Entdeckung: sie fanden den ersten Planeten, der um eine fremde Sonne kreist – einen sogenannten *extrasolaren Planeten*. Ihre Entdeckung löste eine Vielzahl von Beobachtungen und theoretischen Arbeiten zu *Exoplaneten* aus. Von grundlegendem Interesse dabei ist die Frage, ob auf solchen Planeten elementare Lebensformen existieren könnten.

Auch für die *Kosmologie* waren die beiden letzten Jahrzehnte eine Zeit grosser, wenn nicht revolutionärer Weiterentwicklungen. Einer der bedeutendsten Fortschritte ergab sich aus Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background, CMB). Dieses Licht entstand rund 380 000 Jahre nach dem Urknall und enthält detaillierte Informationen über diese ferne Vergangenheit. Wegen der Ausdehnung des Universums sank die Temperatur dieser elektromagnetischen Strahlung von einem ursprünglich sehr hohen Wert auf derzeit sehr geringe 2,725 Kelvin oder $-270,4^\circ$ Celsius ab. Theoretisch vorhergesagte kleine Temperaturschwankungen und deren Messungen durch drei aufeinander folgende Satelliten (**COBE**, **WMAP**, **Planck**) erlauben eine weit bessere Eingrenzung kosmologischer Modelle als jemals zuvor.

Die Verbindung zwischen den Anfängen des Universums und der Entstehung der heute vorhandenen Planeten ist mit grossen Fragen verbunden. Planeten bilden sich aus rotierenden Scheiben aus Staub und Gas rund um ein heisses zentrales Objekt (einen Stern), der selbst aus einer kontrahierenden kalten Gaswolke entstanden ist. *Sterne entwickeln sich* im Verlauf der Zeit und «verbrennen» kontinuierlich leichte (chemische) Elemente zu schwereren, strahlen Wärme und Licht ab und können ihr Leben in gigantischen Explosionen beenden, deren herausgeschleudertes Material alle neu entstandenen Elemente enthält. Diese Endstadien der Sternentwicklung und die Zusammensetzung des ausgeworfenen Materials sind die Grundlage unseres Verständnisses der Entwicklung und gegenwärtigen Zusammensetzung *unserer Galaxie (der Milchstrasse) und der vielen anderen beobachteten Galaxien*.

Diesbezügliche Forschungen zeigten schon sehr früh, dass die in Sternen und dem Gas des interstellaren Mediums enthaltene Masse nicht auszureichen scheint, um die Beobachtungen zu erklären. Der Schweizer Astronom Fritz Zwicky postulierte daher bereits im Jahr 1933 die Existenz einer zusätzlichen, unsichtbaren Materie, der *dunklen Materie*. Unser heutiges Universum scheint aus

5 Prozent «normaler» Materie (z. B. Atomen, mit anziehender Gravitationskraft), 26 Prozent *dunkler Materie* (unbekannter Art, mit ebenfalls anziehender Gravitationskraft) und 69 Prozent *dunkler Energie* (ebenfalls unbekannter Art, die eine abstossende Kraft ausübt) zu bestehen. Letztere ist mit einer anderen bedeutenden und unerklärten Beobachtung verknüpft, die im Jahr 1998 gemacht wurde: der unerwarteten Beschleunigung der *Ausdehnung des Universums*.

Bislang sprechen die Fortschritte in Beobachtung und Theorie für das *Standardmodell der Kosmologie*, das einfachste Modell, das alle beobachteten Eigenschaften des Kosmos hinreichend gut erklären kann. Die Suche nach Antworten auf die verbleibenden Fragen – sei es hinsichtlich des Lebens auf Exoplaneten oder der Natur der «dunklen» Bestandteile des Universums – erfordert Beobachtungen sowohl von sehr schwach leuchtenden nahen Sternen und Planeten wie von helleren, jedoch sehr entfernten Galaxien. Hierfür werden *modernste astronomische Einrichtungen* für alle Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums benötigt. Unglücklicherweise lässt die Erdatmosphäre nur bestimmte Wellenlängen bis zum Boden durchdringen (Abb. 1).

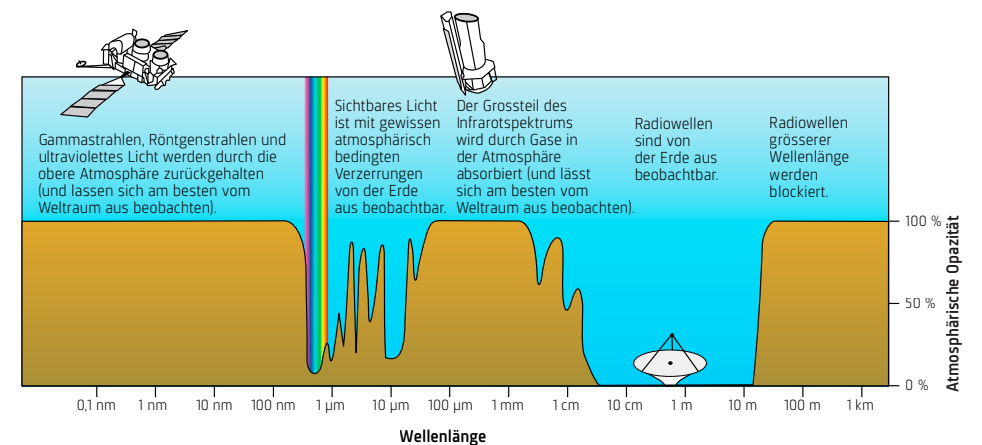


Abb. 1: Die meisten Licht-Wellenlängen erreichen nie den Erdboden, sondern werden durch unsere Atmosphäre absorbiert. Sie können durch Weltraumteleskope beobachtet werden, die sich ausserhalb der Atmosphäre befinden. Sichtbares Licht und die meisten Radiowellen erreichen jedoch die Erde (durch das «optische Fenster» für sichtbares Licht und durch das «Radiofenster») und können dort mit Teleskopen beobachtet werden. Auch ein geringer Anteil der Infrarotstrahlung (IR) und der ultravioletten Strahlung (UV) erreicht den Erdboden. Quelle: NASA/Wikimedia Commons

Wir brauchen daher sowohl *Teleskope auf der Erde* als auch *Satelliten*, die nicht durch die Absorptionseigenschaften der Erdatmosphäre beeinträchtigt werden. Da die Schweiz vollwertiges Mitglied sowohl der ESA als auch der ESO ist, haben ihre Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler direkten Zugriff auf die Satelliten² der ESA und die erdgebundenen Teleskope³ der ESO. Diese beiden Faktoren tragen ganz wesentlich zur *sehr hohen Qualität der astronomischen und kosmologischen Forschung in der Schweiz* bei, auch mit einer Reihe von in der Planung bzw. schon in der Umsetzung befindlichen Projekten.

2. Sterne und Planeten

2.1 Entstehung

Sterne und die sie umgebenden Planeten bilden sich aus kontrahierenden Gas- und Staubwolken. Zunächst sind die aus diesem Material entstehenden *«Protosterne»* noch sehr kühl und verbergen sich hinter riesigen Mengen kleiner Staubteilchen. Um ihre Entstehungsprozesse beobachten zu können, benötigt man daher Infrarotteleskope oder Radioteleskope, die Millimeterwellen empfangen können. Das Weltraumteleskop **Herschel** der ESA ist nicht nur ausreichend empfindlich, es ermöglicht auch die spektroskopische Erkennung neuer Moleküle, die entscheidend für das Verständnis des Energiebudgets des interstellaren Mediums sowie der organischen Chemie der Moleküle sind, die die Vorstufen des Lebens bilden.

Auch mit den Instrumenten des **Very Large Telescope (VLT)** der ESO in Chile kann die Entstehung von Sternen und Planeten beobachtet werden. Viele dieser Instrumente wurden unter wesentlicher Mitwirkung der Schweiz entwickelt. Der Bau von **ESPRESSO** wird durch Schweizer Astronominnen und Astronomen geleitet. Dieser Spektrograph ersetzt das in der Schweiz hergestellte **HARPS**, das lange Zeit das leistungsfähigste Instrument für die Planetensuche mittels *Messung der Radialgeschwindigkeit* war. Bei dieser Methode wird die kleine periodische Veränderung der Position eines Sterns infolge der Schwerkraft des ihn umkreisenden Exoplaneten gemessen, was im Jahr 1995 zur ersten Entdeckung dieser Planeten durch Schweizer Astronomen führte.



Abb. 2: Im Jahr 2012 entdeckten Schweizer Astronominnen und Astronomen einen Planeten mit etwa der Masse der Erde auf einer Umlaufbahn um den der Erde nächstgelegenen Stern Alpha Centauri B (Sichel rechts im Bild). Dies ist der leichteste Exoplanet, der je in einer Umlaufbahn um einen sonnenähnlichen Stern entdeckt wurde. Möglich wurde dies mit dem HARPS-Instrument des 3,6-Meter-Teleskops am La-Silla-Observatoriums der ESO in Chile. Quelle: ESO

Auch an der Entwicklung des **Next Generation Transit Survey (NGTS)** am Paranal-Observatorium der ESO war die Schweiz beteiligt. NGTS versucht, Exoplaneten anhand der von der Erde aus sichtbaren scheinbaren Helligkeitsänderungen zu erkennen, die Planeten beim Vorbeiziehen (Transit) vor ihrem Stern verursachen. Der mit der Schweiz als Hauptpartner entstandene Satellit **CHEOPS** baut auf den Erkenntnissen von HARPS und NGTS auf und ist die erste S-Klasse-Mission der ESA (S für «small» oder klein). Der Satellit soll im Jahr 2018 starten. Er wird erdähnliche Planeten um eine Reihe von Sternen erkennen können und die Zusammensetzung von Planeten analysieren, die kleiner sind als Uranus oder Neptun. Als krönenden Abschluss dieser Arbeiten wird die ESA im Jahr 2024 **PLATO** starten, um erdgrosse Planeten zu finden (Beispiel in Abb. 2), die sich in Umlaufbahnen um ihre Sterne bewegen und flüssiges Wasser auf der Oberfläche theoretisch zulassen, womit die Entwicklung von Leben denkbar wäre.

Auch die Teilnahme an den Missionen der ESA zur Erforschung des Sonnensystems kommt der Planetenforschung in der Schweiz zugute. Von 2014 bis 2016 lieferte die Raumsonde **Rosetta** atemberaubende Bilder des Kometen 67P/CG (Abb. 3). Das mitgeführte *Massenspektrometer Rosina* sowie durch Schweizer Forsch-

² www.esa.int/spaceinimages/Images/2013/02/ESA_Fleet_Across_Spectrum_poster_2013

³ www.eso.org/public/teles-instr

de entwickelte Kameras ermöglichten Einblicke in die Zusammensetzung dieses Himmelskörpers. Auch am **ExoMars Orbiter**, der seit 2016 den Roten Planeten umkreist, ist die Schweiz, mit Kameras, beteiligt. Daneben wird die Schweiz an künftigen Missionen wie dem **ExoMars2020 Lander** und **JUICE** mitarbeiten. Der Start der **JUICE**-Mission, die ab 2030 die Monde des Jupiters erforschen soll, ist für 2022 geplant.

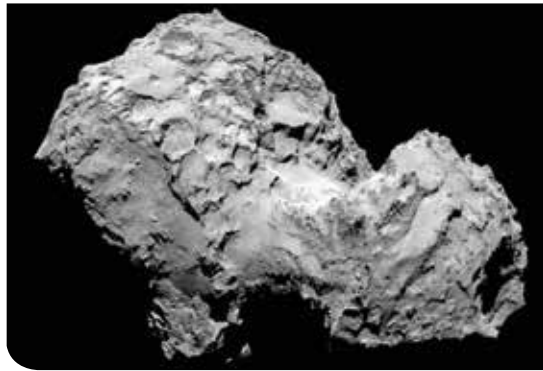


Abb. 3: Komet 67P/Churyumov-Gerasimenko, von Rosetta aus gesehen. Quelle: ESA

Im Jahr 2018 werden NASA, ESA und die Canadian Space Agency das **James Webb Space Telescope (JWST)** starten, das Bilder im Spektrum zwischen langwelligem sichtbarem Licht bis hin zum Infrarotbereich (0,6 bis 27 Mikrometer Wellenlänge) mit noch nie dagewesener Auflösung und Empfindlichkeit aufnehmen und Einblicke in die Zusammensetzung von Planeten anderer Sterne sowie Beobachtungen der entferntesten Ereignisse im Universum ermöglichen wird. Die Schweiz ist Mitglied des europäischen **MIRI**-Konsortiums (Mid InfraRed Instrument), das dieses leistungsfähige Instrument für das **JWST** entwickelt und baut.

Der Bau des **Extremely Large Telescope (ELT)** für die ESO hat eben begonnen. Mit seinem 39 m grossen Hauptspiegel wird dies das weltweit grösste erdgestützte Teleskop sein (Abb. 4) und auf Jahrzehnte hinaus eine Einrichtung auf Weltklasseniveau bleiben. Die Inbetriebnahme ist für 2024 geplant. Schweizer Astroninnen und Astronomen planen, sich an der Entwicklung von Instrumenten für diese Plattform zu beteiligen. Sie wird in der Lage sein, Planeten um einige der nächstgelegenen Sterne mit annähernd Erdgrösse, möglicherweise innerhalb der habitablen Zonen, spektroskopisch zu charakterisieren. Ausserdem wird sie zur Erforschung der entferntesten Galaxien beitragen.

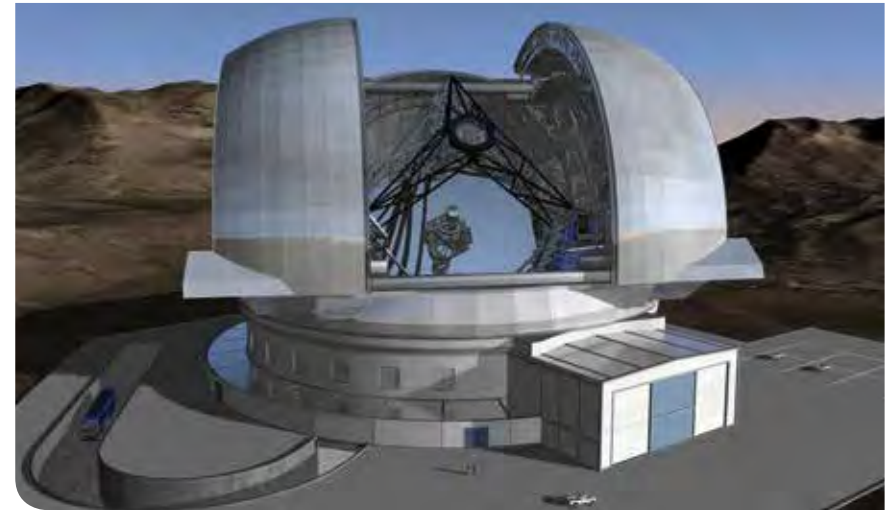


Abb. 4: Das Extremely Large Telescope (ELT) der ESO mit seinem 39 m grossen Hauptspiegel wird das weltweit grösste Teleskop für den optischen und nahen Infrarotbereich sein – 16 Mal lichtstärker als die derzeit grössten optischen Teleskope. Es wird in der Lage sein, atmosphärische Störungen zu korrigieren und 16 Mal schärfere Bilder als das Hubble-Weltraumteleskop zu liefern. Das ELT wird die detaillierte Erforschung von Planeten um andere Sterne, der ersten Galaxien im Universum, supermassiver Schwarzer Löcher und des «dunklen Sektors» des Universums ermöglichen. Quelle: ESO

2.2 Die Entwicklung der Sterne

Die Entwicklung der Sterne, von ihrer Geburt bis zu ihren Endstadien, wird in der Schweiz sehr intensiv erforscht. Darüber hinaus können Sterne in vieler Hinsicht genutzt werden – von ihrer Funktion als Uhren für das Alter von Galaxien bis hin zu ihrer Rolle als kosmische Laboratorien, die Einblicke in die Physik flüchtiger Teilchen wie *Neutrinos* oder die Veränderung von *Naturkonstanten* im Lauf der kosmischen Geschichte gewähren.

In physikalischer Hinsicht sind Sterne sehr komplexe Objekte, in denen die vier *Grundkräfte der Natur* (Gravitation, elektromagnetische Kraft, schwache und starke Kernkraft) im Rahmen zahlreicher Prozesse interagieren. Sie ermöglichen somit die Erforschung von Prozessen weit jenseits des Temperatur- und Dichtebereichs, der in Labors auf der Erde studiert werden könnte – physikalische Forschung an den Grenzen unseres heutigen Wissens. Entscheidend hierfür sind detaillierte und zuverlässige Modelle, die die Entwicklung von Sternen anhand

ab initio geltender physikalischer Prinzipien vorhersagen Diese müssen mittels neuer Beobachtungen getestet werden, die bald zur Verfügung stehen werden.

Um die Aktivität unseres Sterns, der Sonne, und ihre potenziellen Auswirkungen auf das *Weltraumwetter* anhand der ausgesandten *Sonnenwind-Teilchen* einschätzen zu können, brauchen wir Beobachtungssatelliten. Die Schweiz beteiligt sich an mehreren entsprechenden Missionen. **NORSAT-1** startete im Juli 2017, **PROBA-3** wird 2020 folgen. Die Mission **Solar Orbiter** der ESA, die im Jahr 2018 beginnen soll und an der zwei Schweizer Institute aktiv beteiligt sind, wird unser Verständnis der Sonne einen grossen Schritt voranbringen.

Die *Asteroseismologie* gestattet Einblicke in das Geschehen unter der Oberfläche von Sternen. Dazu werden Pulsationen auf der Oberfläche der Sterne beobachtet. Diese «Sternbeben» lassen entsprechende Rückschlüsse auf die Physik im Innern zu. Das Verfahren wurde erstmals erfolgreich auf die Sonne angewandt. Dank Satelliten wie dem europäischen **CoRoT** (2006 bis 2013) und seinem amerikanischen Gegenstück **Kepler**, der seit 2009 in Betrieb ist, lässt es sich nun auch auf andere Sterne übertragen. Beide Satelliten gestatten insbesondere die Untersuchung der Physik und der Entwicklungsgeschichte roter Riesensterne in der Milchstrasse. Mittels Asteroseismologie lassen sich auch die Masse und der Durchmesser von Sternen mit bislang unerreichter Genauigkeit eingrenzen. Das Verfahren ist damit auch von unschätzbarem Nutzen für die Charakterisierung der Planeten dieser Sterne.

Interferometrie bezeichnet das Verfahren, viele Teleskope gleichzeitig auf das gleiche Objekt auszurichten und das erfasste Licht zu kombinieren. Das **Very Large Telescope Interferometer (VLTI)** ist eine erdgestützte Einrichtung des Paranal-Observatoriums der ESO und eines der besten Instrumente seiner Art. Mit dem VLTI ist es nun möglich, die Oberfläche anderer Sterne als der Sonne zu beobachten, was beispielsweise zur Entdeckung von Objekten geführt hat, die aufgrund ihrer sehr schnellen Rotation die Form eines Rugby-Balls besitzen.

Einen prominenten Platz unter den heutigen Einrichtungen mit potenziell riesigen Auswirkungen auf die Stellarphysik nimmt die **GAIA**-Mission der ESA ein (Abb. 5). Dieser im Jahr 2013 gestartete Satellit wird fünf Jahre lang eine Milliarde astronomischer Objekte, hauptsächlich Sterne, beobachten. Das entspricht rund 1% der gesamten Sternpopulation der Milchstrasse. Aus den Ergebnissen wird eine dreidimensionale Karte unserer Galaxie entstehen. Dieser *Variability Catalogue of Stars* wird zeigen, wie faszinierend und unbekannt unsere galaktische Nachbarschaft noch immer ist. Die Schweizer Astronominen und Astronomen werden ihn in grossem Umfang nutzen.

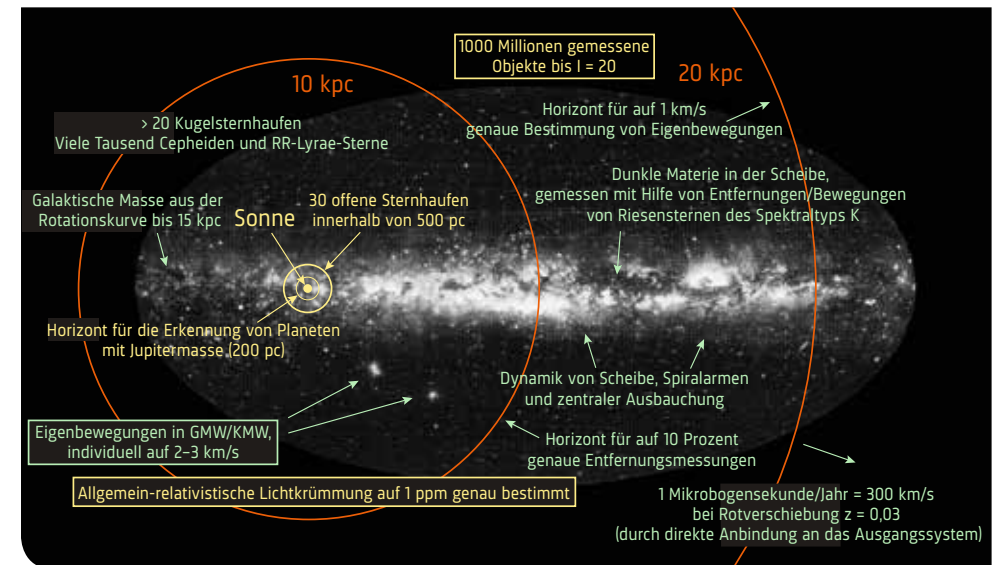


Abb. 5: Darstellung der Reichweite von GAIA und der zu erwartenden Beiträge zum Wissen um unsere Galaxie. (1 kpc = 3262 Lichtjahre = 31×10^{15} km) Quelle: ESA/Lund Observatory

Das Licht, das alle Sterne im Lauf ihrer Entwicklung aussenden, enthält die unverwechselbare *Signatur der chemischen Elemente* der interstellaren Wolke, aus der sie einst entstanden sind. Alte Sterne, die in sehr frühen Entwicklungsstadien der Milchstrasse entstanden sind, und alle jüngeren Sterne liefern daher Erkenntnisse über die Gaszusammensetzung unserer Galaxie im Verlauf ihrer Entwicklungsgeschichte. Für die betreffenden Beobachtungen eignen sich unter anderem das **VLT**, das **Hubble-Weltraumteleskop** von ESA/NASA und **GAIA**.

2.3 Tod und Explosion von Sternen

Auch das Lebensende von Sternen wird von vielen Schweizer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern untersucht. Es wird hauptsächlich durch die ursprüngliche Masse des Objekts bestimmt (Abb. 6). Sterne mit weniger als acht Sonnenmassen beenden ihr Leben als *Weisse Zwerge*: Nachdem der Stern in seinem Innern Wasserstoff und Helium «verbrannt» hat (und zunächst zu einem *Roten Riesen* geworden ist), stösst er seine äussere Hülle langsam als Sternwind ab, aus dem sich ein sogenannter planetarischer Nebel bildet. Manche dieser

planetarischen Nebel können mit einfachen erdgebundenen Teleskopen beobachtet werden. Die zurückbleibenden dichten Kerne der Sterne werden durch den Quantendruck des kalten und dichten Elektronengases stabilisiert und bilden einen Weissen Zwerg, der typischerweise etwa ebenso massereich wie die Sonne ist, jedoch nur wenig grösser als die Erde.

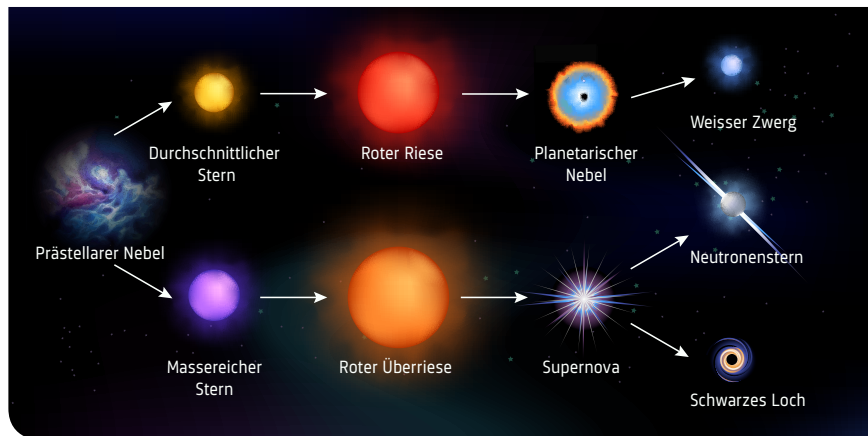


Abb. 6: Sterne entwickeln sich abhängig von ihrer ursprünglichen Masse unterschiedlich.
Quelle: Shutterstock

Massereiche Sterne durchlaufen alle verbleibenden Stufen der Kernfusion, vom Kohlenstoff- bis zum Silizium-«Brennen». Sie wachsen, bis sie schliesslich zu *Überriesen* werden, bevor ihr zentraler Eisenkern kollabiert und sie als (Kernkollaps-) *Supernova* explodieren. Dabei entsteht ein sehr kurzer aber extrem energiereicher *Helligkeitsausbruch* (so hell wie eine ganze Galaxie). Ereignisse dieser Art, die von der Erde aus mit den Teleskopen von ESO oder ESA detailliert beobachtet werden (Abb. 7), könnten zu der Annahme verleiten, hier sei gerade ein neuer Stern geboren worden. Tatsächlich kennzeichnen sie den Tod eines Sterns.

Das Endstadium kann dann ein *Neutronenstern* sein, ein extrem dichtes Objekt, das nahezu ausschliesslich aus Neutronen besteht und durch den Quantendruck des kalten Neutronengases und abstossende Kernkräfte stabilisiert wird. Durch die Beobachtung von *Neutrinos*, die den extrem dichten Neutronenstern bereits innerhalb weniger Sekunden nach dem Kollabieren verlassen, konnte nachgewiesen werden, dass unser grundlegendes Verständnis von Kernkollaps-Supernovae richtig ist – ein Forschungsgebiet, auf dem Schweizer Forschende sehr aktiv sind. Oder der Stern wird zu einem *Schwarzen Loch*, begleitet von Phänomenen

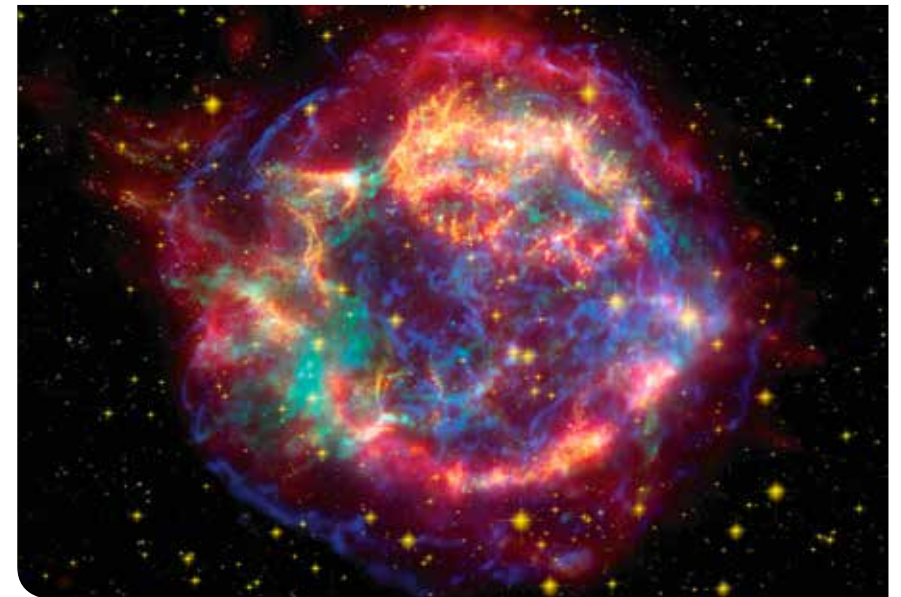


Abb. 7: CAS A, das Überbleibsel einer (Kernkollaps-)Supernova, die vor rund 300 Jahren im Sternbild Cassiopeia zu beobachten war. Falschfarbenbild anhand der Daten aus drei Quellen. In roter Farbe die Infrarotdaten des Spitzer Space Telescope (NASA), orangefarben das durch das Hubble-Weltraumteleskop (NASA/ESA) beobachtete sichtbare Licht, in blauer und grüner Farbe die Daten des Chandra X-ray Observatory (NASA). Der cyanfarbene Fleck etwas ausserhalb der Mitte ist der Rest des Kerns des Sterns, ein stark magnetisierter Neutronenstern.
Quelle: NASA/JPL-Caltech

wie einer *Hypernova* (einer extrem lichtstarken Supernova) und/oder einem *Gammablitz* (einem gigantischen Energieausbruch, bei dem Gammastrahlen ausgesandt werden). Das **New Technology Telescope (NTT)** der ESO, das **VLT** sowie das **JWST** sind in der Lage, Lichtkurven zu messen – und die im Zeitverlauf nachlassende Leuchtkraft nach Explosionen zu verfolgen. Effiziente Folgebeobachtungen über ausgedehnte Zeiträume hinweg erfordern den Zugang zu Teleskopen der 8- bis 10-m-Klasse sowie für noch detailliertere Untersuchungen zum **ELT**.

In *Doppelsternsystemen*, in denen ein Weisser Zwerg von einem anderen Stern begleitet wird, kann der Weisse Zwerg Masse von seinem Begleiter absaugen. Sobald dies dazu führt, dass der Weisse Zwerg eine bestimmte Masse überschreitet (1,4 Sonnenmassen), kommt es zu einer Explosion, einer sogenannten *Typ Ia-Supernova*. Da es sich hierbei um kalibrierbare Lichtquellen im Kosmos handelt,

haben diese Phänomene die Entdeckung der *sich beschleunigenden Ausdehnung des Universums* ermöglicht – auch dies ein Forschungsgebiet, auf dem die Schweizer Astronominen und Astronomen aktiv sind.

In Doppelsternsystemen mit Neutronensternen kann es zu einer Reihe verschiedener Explosionen kommen, die Röntgen- und (kurze) *Gammablitze* (sowie auch Gravitationswellen, vgl. 4.2) aussenden, welche sich mit dem Weltraumobservatorium *XMM Newton* der ESA oder dem Gammastrahlen-Observatorium *INTEGRAL* beobachten lassen. Das *INTEGRAL Science Data Center (ISDC)*, das nun auch aktiv an anderen Weltraummissionen und erdbasierten Projekten mit primärem wissenschaftlichen Schwerpunkt auf hochenergetischen Phänomenen beteiligt ist, ist in der Schweiz angesiedelt.

3. Galaxien

3.1 Entstehung und Entwicklung

Galaxien sind Ansammlungen von Sternen, interstellarem Gas, oftmals zusätzlich zentralen, extrem massereichen Schwarzen Löchern (mit typischerweise einigen Millionen bis einigen Milliarden Sonnenmassen) und dunkler Materie – die sich wesentlich auf ihre Gravitationseigenschaften, ihre Entstehung und ihre Entwicklung auswirken. Ihre Grösse kann sehr unterschiedlich sein. Typische Galaxien enthalten rund 100 Millionen Sterne. Elliptische Riesengalaxien können um einen Faktor 100 grösser sein; Zwerggalaxien auch einige Grössenordnungen kleiner.

Die Entstehung und Entwicklung von Galaxien kann anhand eines astronomischen Phänomens, der *Rotverschiebung*, studiert werden. Diese ist immer dann zu beobachten, wenn sich eine Lichtquelle vom Beobachter entfernt, wie dies aufgrund der Ausdehnung des Universums der Fall ist. Diese Fluchtbewegung führt zu einer Verschiebung der durch das sich entfernende Objekt ausgesendeten Strahlung in Richtung grösserer Wellenlängen, d.h. in den «Rotbereich» des elektromagnetischen Spektrums. Die Auswertung dieser Verschiebung lässt Aussagen über die Entfernung und den Zeitpunkt der Lichtemission durch die Strahlungsquelle, und damit auch über ihr Alter zu.

Das *VLT* wird eine der bedeutendsten Einrichtungen für die solche Untersuchungen bleiben. Eines seiner wichtigsten Instrumente der zweiten Generation, das kürzlich in Betrieb genommene *MUSE*, wird die detaillierte Erforschung der Masse und des Alters von Galaxien ermöglichen. Astronominen und Astronomen an Schweizer Instituten arbeiten an wesentlichen Aspekten dieses Forschungsgebiets. Damit werden auch bahnbrechende Untersuchungen der Entwicklung des «kosmischen Netzes» möglich, d.h. der Verteilung von Materie, Galaxien und Galaxienhaufen, womit der Gaseinfall in Galaxien und die Rolle des Wachstums Schwarzer Löcher ermittelt werden können.

Auch *MOONS* wird zu weiteren grossen Fortschritten führen. Dieser im *nahen Infrarotbereich (nIR)* arbeitende Spektrograph der nächsten Generation wird im Jahr 2019 seinen Betrieb aufnehmen und weit entfernte Galaxienpopulation bei grossen Rotverschiebungen und damit bis zu zehn Milliarden Jahren in der Vergangenheit (d.h. bis fast zu den Anfängen des Universums) ebenso genau beobachten können wie dies heute mit nahe gelegenen Galaxien möglich ist. Das Upgrade von *SINFONI* für den Einsatz mit einer neuen adaptiven Optik (*ERIS*) wird ergänzend IR-Spektren der entferntesten Einzelgalaxien liefern. Das Teleskop-Array *ALMA* (sowie die Einrichtungen des *IRAM/PdB*), in Verbindung mit den genannten optischen und IR-Instrumenten, wird detaillierte Forschungen zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien ermöglichen.

Darüber hinaus sind die Astronominen und Astronomen an Schweizer Instituten gut vorbereitet, um eine wichtige Rolle bei der Entwicklung einer Hochenergie-Astrophysik-Mission (Röntgenastronomie) der ESA (*ATHENA*), mit wahrscheinlichem Start im Jahr 2028, zu spielen. *ATHENA* wird im kommenden Jahrzehnt eine wichtige Rolle für das Verständnis der Wechselwirkung zwischen Galaxien und den in ihnen enthaltenen Schwarzen Löchern spielen.

Um den Zusammenhang zwischen der Entstehung von Sternen und der Entwicklung von Galaxien herzustellen, wird Expertise in Infrarot- und Millimeterwellentechnologien immer wichtiger. Dank des Zugangs zu optischen und IR-Einrichtungen, wie dem *VLT* und demnächst dem *JWST*, werden Schweizer Astronominen und Astronomen auch weiterhin zum Spitzenfeld dieses sich schnell entwickelnden Bereichs gehören. Für zukünftige Projekte, z. B. den japanischen Satelliten *SPICA*, dessen Start für 2022 vorgesehen ist, kann auf die bisherigen erfolgreichen Infrarotmissionen der ESA (z. B. *ISO* und *Herschel*) aufgebaut werden. Weitere Aspekte der Galaxienentstehung und -entwicklung werden in 2.2 in Bezug auf die Milchstrasse und 4.3/4.4 zur Entstehung und Entwicklung grossräumiger Strukturen im Universum diskutiert.

4. Das Universum

Untersuchungen zum Verständnis der Natur von dunkler Materie, dunkler Energie, sowie der *Inflation* (der extrem schnellen Ausdehnung während der ersten Augenblicke des Universums) und der *Gravitation* führen auf einige der schwierigsten Fragen der modernen Kosmologie und Grundlagenphysik. Bei ihrer Lösung spielen Schweizer Astronominen und Astronomen eine führende Rolle in wichtigen internationalen erdgebundenen wie Weltraum-Experimenten und theoretischen Studien.

4.1 Die kosmische Hintergrundstrahlung

Die kosmische Hintergrundstrahlung, das *erste (noch heute zu beobachtende) Licht*, welches rund 380 000 Jahre nach dem Urknall entstand, zeichnet ein hochpräzises Bild des frühen Universums. Die bisher genauesten Beobachtungen stammen von der im Jahr 2009 gestarteten **Planck**-Mission der ESA. An den Daten und der Veröffentlichung (Abb. 8 aus dem Jahr 2013) waren als Mitglieder des Kernteams auch Astrophysikerinnen und Astrophysiker aus der Schweiz beteiligt. Damit wurden die in der Einleitung genannten Werte zu normaler und dunkler Materie wie dunkler Energie präzisiert und das Alter des Universums auf 13,8 Milliarden Jahre bestimmt. Mit diesen (und weiteren) Aktualisierungen wird die Genauigkeit des *kosmologischen Standardmodells* deutlich verbessert und unser Wissen um den Aufbau des heutigen und des frühen Universums weiter vorangebracht. Darüber hinaus sind Schweizer Astronominen und Astronomen an theoretischen Untersuchungen dieser frühen Phase des Universums beteiligt, insbesondere an der Schnittstelle zur Teilchenphysik.

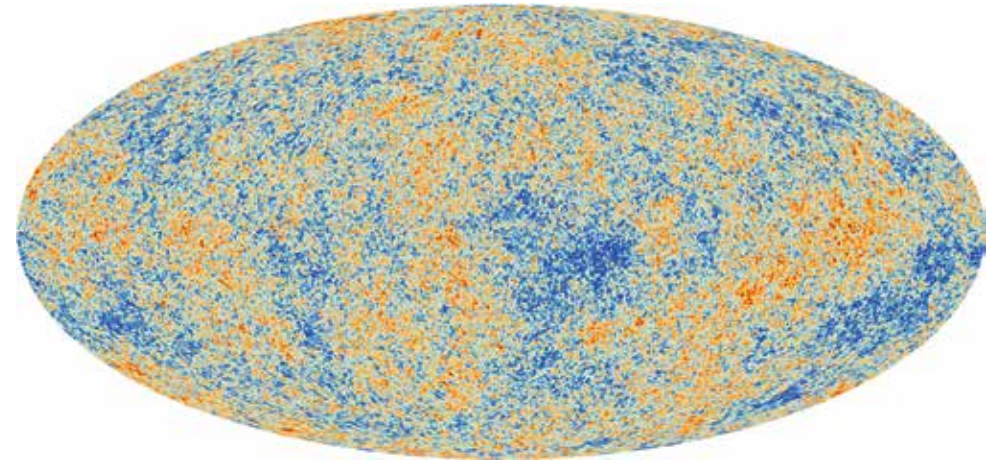


Abb. 8: Die durch den **Planck**-Satelliten der ESA beobachteten Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung. Die kosmische Hintergrundstrahlung ist eine Momentaufnahme des ältesten Lichts im Universum als dieses erst 380 000 Jahre alt war. Die Strahlung gibt die winzigen Temperaturunterschiede wieder, die sich Regionen mit leicht unterschiedlicher Dichte zuordnen lassen und die Keimzellen aller künftigen Strukturen sind: der heutigen Sterne und Galaxien.

Quelle: ESA/The Planck Collaboration

4.2 Messung von Gravitation und Gravitationswellen

Die *Allgemeine Relativitätstheorie (ART)* wurde im Jahr 1915 während seiner Jahre in Bern und Zürich durch Albert Einstein entwickelt. Die Theorie sagt *Gravitationswellen* voraus, ein Kräuseln der Raum-Zeit-Krümmung, die sich wie Wellen fortbewegen und durch Ereignisse wie die Verschmelzung zweier sehr dichter Objekte (wie z. B. Schwarzer Löcher oder Neutronensterne) entstehen. Der erste Nachweis dieser Gravitationswellen übereinstimmend mit der Allgemeinen Relativitätstheorie gelang erst 2015 mit dem erdgestützten amerikanischen Gravitationswellen-Observatorium **LIGO**, welches kontinuierlich neue faszinierende Ergebnisse liefert. Falls Abweichungen von den Vorhersagen der ART auftreten, könnten diese auf dunkle Materie oder dunkle Energie zurückzuführen sein.

Die Schweiz war am Bau des 2015 gestarteten ESA-Satelliten **LISA-Pathfinder** beteiligt, der die technische Machbarkeit der **LISA**-Mission feststellen sollte. Die Aufgabe von **LISA** ist das Entdecken und Untersuchen niederfrequenter Gravitationsstrahlung, d. h. bei niedrigeren Frequenzen als LIGO. Diese entspricht dem Energieverlust, den Objekte aufgrund des Aussendens von Gravitationswellen

erleiden. LISA eröffnet der astrophysikalischen Forschung ganz neue Möglichkeiten und kann (im Gegensatz zu LIGO, welches nur auf Objekte in der Grösse von Sternmassen empfindlich ist) massive bis supermassive Schwarze Löcher (wie sie im Zentrum von Galaxien auftreten) aufspüren, die in kosmologischen Entfernungen verschmelzen. Der Start der Mission (mit möglicher Unterstützung durch die NASA) soll in den 2030er Jahren, möglicherweise sogar früher, stattfinden.

Die ART sagt auch die *Ablenkung von Licht durch Gravitation* vorher. Astronominen und Astronomen nutzen diesen Effekt, um grosse Masseansammlungen zu entdecken, die das Licht entfernter liegender Quellen ähnlich wie eine Linse ablenken. Fritz Zwicky wies bereits 1937 darauf hin, dass Galaxienhaufen in diesem Sinn wie *Gravitationslinsen* wirken könnten. Dieser Effekt wurde jedoch erst 1979 durch Beobachtungen bestätigt und ist heute als «starker Gravitationslinseneffekt» bekannt. Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler nutzen heute vornehmlich den «schwachen Gravitationslinseneffekt», der sich nur über mehrere Quellen hinweg beobachten lässt und durch den sich die Formverteilung eines Hintergrundensembles von Galaxien statistisch ändert.

4.3 Untersuchungen der grossräumigen Struktur des Universums

Die *Large Scale Structure (LSS)*, die grossräumige Struktur des Universums, beschreibt Galaxien- und Materieverteilungen auf Massstäben, die weit grösser sind als einzelne Galaxien. Grossräumige Strukturen im Universum können bis zu mehreren Milliarden Lichtjahren überspannen. Sie entstehen durch Gravitation und erhalten durch diese ihre Form. Ihre Untersuchung ergänzt die Informationen der kosmischen Hintergrundstrahlung über das frühe Universum und ist entscheidend für das Verständnis der Zeit, in der die dunkle Energie seine Expansion dominiert. Die entsprechenden Messungen können mit Weitfeldaufnahmen und -spektroskopie im sichtbaren, nahen Infrarot- und Radiobereich durchgeführt werden.

Die Schweiz spielt eine führende Rolle bei der Erforschung der LSS. Erst kürzlich wurde sie für einen Zeitraum von fünf Jahren vollwertiges Mitglied des Experiments **Dark Energy Survey (DES)** am Blanco-Teleskop (4 m) in Cerro Tololo, Chile. **DES** ist für den schwachen Gravitationslinseneffekt optimiert und wird einzigartige Bilder von 5000 Quadratgrad in fünf Wellenlängenbändern im Bereich des sichtbaren Lichts liefern. Auch am **Baryonic Oscillations Spectroscopy Sur-**

vey (BOSS) sind Schweizer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler beteiligt. Sie leiten dessen Erweiterung, **eBOSS**. *Baryonische akustische Oszillationen* sind regelmässige, periodisch auftretende Fluktuationen der Dichte der sichtbaren Materie im Universum, verursacht aus der Wechselwirkung von Gravitation und Strahlungsdruck. Darüber hinaus haben sie das Projekt **COSMOGRAIL** angestossen, dessen Leitung sie auch innehaben. Das Projekt soll helfen, die Expansion des Universums zu verstehen, indem bestimmte Himmelskörper, sogenannte *Quasare*, deren Licht durch den Gravitationslinseneffekt abgelenkt wurde, über lange Zeiträume hinweg verfolgt werden. Die entsprechenden Arbeiten werden mit dem Schweizer **Euler-Teleskop** am La-Silla-Observatorium der ESO in Chile durchgeführt.

Auch an der Entwicklung künftiger Weitfelduntersuchungen arbeiten Schweizer Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler mit. Das **Dark Energy Spectroscopic Instrument (DESI)** ist ein sehr leistungsfähiger künftiger Multiobjekt-Spektrograph, der in der Lage sein wird, die Positionen und die Rotverschiebung von mehreren zehn Millionen Galaxien zu messen. An der Entwicklung kosmologischer Radioexperimente wie **BINGO**, das für die Messung baryonischer akustischer Oszillationen optimiert ist, ist die Schweiz ebenfalls beteiligt. Die Teilnahme mehrerer Schweizer Gruppen am US-geleiteten **Large Synoptic Survey Telescope (LSST)**, am Standort Cerro Pachon in Chile, das im Jahr 2022 vollständig betriebsbereit sein wird, stellt einen zumindest teilweisen Zugang zu dessen umfangreichen erdbasierten Enddaten sicher.

Und nicht zuletzt beteiligen sich viele Schweizer Institute intensiv an den Vorbereitungen für den ESA-Satelliten **Euclid**, der (auf Grundlage früherer Ergebnisse des GAIA-Satelliten) die Natur der dunklen Energie und die grossräumige Verteilung dunkler Materie erforschen soll. Sie spielen eine führende Rolle in den Bereichen Theorie, Beobachtungen, Simulationen, Signalverarbeitung, Datenreduktion und Hardware und stellen eines der wissenschaftlichen Datenzentren. In den Jahren 2020 bis 2026 wird somit eine umfassende Sammlung weltraumbasierter Daten zu Kosmologie und aussergalaktischer Astrophysik entstehen.

4.4 Das Square Kilometre Array

Das **Square Kilometre Array (SKA)** ist ein Projekt für den Bau des weltweit grössten Radioteleskops mit einer Gesamt-Sammelfläche von etwa einem Quadratkilometer, d.h. einer Million Quadratmetern. Das SKA wird mit Tausenden von

Parabolantennen und bis zu einer Million Antennen arbeiten. Die Grösse des SKA bedeutet sowohl hinsichtlich der technischen Realisierung als auch der Forschung und Entwicklung einen riesigen Sprung nach vorne. Als Standorte wurden aus vielen wissenschaftlichen und technischen Gründen sowohl Südafrika als auch Westaustralien ausgewählt. Die beiden sehr abgelegenen Standorte haben unter anderem den Vorteil, dass dort nur geringe Störungen durch Radiowellen zu erwarten sind.

Das SKA soll einige der grössten Fragen der Astronomie beantworten. Die beispiellose Empfindlichkeit Tausender einzelner Radiowellenempfänger, die zum SKA zusammengeschaltet werden, wird den Astronominnen und Astronomen Einblicke in die Entstehung und Entwicklung der ersten Sterne und Galaxien nach dem Urknall bieten. Wir werden damit besser erklären können, wie die ersten Schwarzen Löcher und Sterne entstanden sind, welche Rolle der kosmische Magnetismus spielt, Gravitation und dunkle Energie verstehen und, möglicherweise, ob es Leben auf anderen Planeten gibt. Das SKA wird in praktisch alle Bereiche von Astrophysik und Kosmologie hineinwirken.

Auch Schweizer Astronominnen und Astronomen sind sehr an einer starken wissenschaftlichen und technischen Beteiligung am SKA interessiert. Derzeit hat die Schweiz einen Beobachterstatus. Einige Universitäten prüfen jedoch gemeinsam mit dem Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation (SBFI), inwieweit eine konkretere Beteiligung möglich wäre.

5. Verbindungen zu angrenzenden Forschungsgebieten

Die klassische Astronomie betrachtet heute den gesamten Wellenlängenbereich von Abbildung 1. Dieses Dokument beschreibt auch die Erweiterung auf die Beobachtung von Gravitationswellen. Die kürzlich erstmals beobachtete Verschmelzung von zwei Neutronensternen hat den Beginn einer Multi-Messenger Ära eingeleitet mit der Beobachtung von Gravitationswellen (GW170817), einem Gamma-Blitz, Röntgen- und Radio-Signalen sowie Emission in optischen Wellenlängen und dem nahen Infrarot (mit Schweizer Beteiligung an der Modellierung, der LIGO-Kollaboration zu Gravitationswellen und Gamma-Beobachtungen mit dem INTEGRAL-Satelliten). Die Sonne und Supernova 1987A sind schon in Neutrinos beobachtet worden, dies könnte bei zukünftigen Neutronensternverschmelzungen mit anderen Beobachterwinkeln ebenfalls auftreten. Entsprechend tragen angrenzende Forschungsgebiete, wie die *Astroteilchenphysik* auf verschiedene Weise zum Verständnis astrophysikalischer Objekte und des Universums als Ganzem bei. Dazu gehört die Beobachtung von *Neutrinos* (z. B. ICECUBE), *hochenergetischer kosmischer Strahlung* (z. B. AMS), und *sehr hochenergetischer Gammastrahlung* (z. B. CTA). Die «Swiss Roadmap for Particle Physics» sowie ihre Updates⁴ enthalten eine Beschreibung dieser Instrumente.

6. Zusammenfassung

Wie bereits in der Einleitung umrissen, arbeiten Schweizer Astronominnen und Astronomen sehr erfolgreich im absoluten Spitzenfeld der astrophysikalischen Forschung mit. **Sie sind dazu in der Lage, weil sich die Schweiz an europäischen (und anderen internationalen) Kooperationen und Organisationen beteiligt und entsprechende Beiträge leistet. Es sind diese Kooperationen und Organisationen, die den Zugang zu grossen Beobachtungseinrichtungen ermöglichen, die von keinem Land alleine zu betreiben wären.**

⁴ https://naturwissenschaften.ch/organisations/chipp/meetings_documentation/95387-chipp-roadmap-achievements-status-and-outlook-implementation-of-the-road-map-2005-2010

Anhang

Verzeichnis der astronomischen Satelliten und Teleskope sowie der Beobachtungs- und Kooperationsprogramme, die im Text erwähnt werden.

Status: a = abgeschlossen; b = in Betrieb, p = in Vorbereitung oder im Bau

Gelb = bodengestützte Infrastruktur; blau = Instrumente und Beobachtungsprogramme im Weltraum

| | |
|---|---|
| ALMA: Der <i>Atacama Large Millimeter Array</i> ist eines der wichtigsten Gemeinschaftsprojekte zwischen der ESO, den USA und Japan zum Bau und Betrieb eines Teleskopverbundes von 66 Antennen mit bis zu 12 m Durchmesser für Millimeter-Wellenlängen, verteilt auf einer Fläche von 200 km ² auf dem Chajnantor Plateau, auf 5000 m Höhe in Chile. Die Anlage wurde 2012 fertiggestellt. | b |
| AMS: Der <i>Alpha Magnetic Spectrometer</i> ist ein (Astro-)Teilchen-Detektor neuester Bauart, gebaut zum Betrieb als externes Modul an der Internationalen Raumstation ISS zur Suche von Antimaterie und dunkler Materie. Das Instrument macht Präzisionsmessungen der Zusammensetzung und der Teilchenflussdichte der kosmischen Strahlung. | b |
| ATHENA: Das <i>Advanced Telescope for High-ENERgy Astrophysics</i> der ESA dient der Erforschung von heisser und energiereicher Umgebung während der Entstehung von grossräumigen Strukturen im Universum und der Entstehung und des Wachstums von Schwarzen Löchern. | p |
| BINGO: Das Projekt zur Beobachtung baryonischer akustischer Oszillationen in neutralen Gasen (<i>Baryon acoustic oscillations In Neutral Gas Observations</i>) ist ein Gemeinschaftsprojekt von Forschergruppen aus Grossbritannien, Brasilien, Uruguay, Saudi-Arabien und der Schweiz. | p |
| BOSS: Dieses Beobachtungsprojekt (auf Basis des 2,5-Meter-Teleskops in Apache Point, USA) fokussiert auf die Kartierung des Universums im grösstmöglichen Massstab, mit dem Ziel, die grösste je produzierte 3D-Darstellung von Galaxien herzustellen. | b |
| CHEOPS: <i>CHaracterising ExOPlanet Satellite</i> ist die erste «kleine» Mission im wissenschaftlichen Programm der ESA, die der Untersuchung des Transits von Exoplaneten mittels Hochpräzisions-Photometrie dient. Das Projekt steht unter der Co-Leitung der ESA und der Schweiz. | p |

| | |
|---|---|
| COBE: COBE war der erste von drei Satelliten der <i>COsmic Background Explorer mission</i> (NASA, 1989–1993) zur Untersuchung der Kosmischen Mikrowellenhintergrundstrahlung (Cosmic Microwave Background [CMB]), und zwar mittels Präzisionsmessungen der diffusen Strahlung über die ganze Himmelsphäre im Wellenlängenbereich von 1 Mikrometer bis 1 cm. Die Resultate führten 2006 zum Nobelpreis in Physik. | a |
| CoRoT: Diese Mission der ESA unter der Bezeichnung <i>CONvection, ROTation and planetary Transits</i> , operationell zwischen 2006 und 2013, war in der Lage, das Innere von Sternen zu erkunden. Dabei wurde vor allem die Untersuchung der Sternoberfläche mittels akustischer Wellen eingesetzt (Asteroseismologie). | a |
| COSMOGRAIL: Das Projekt <i>COSmological MONitoring of GRAVitational Lenses</i> hat zum Ziel, die Zeitverschiebungen der meisten bekannten Quasare, die dem Gravitationslinseneffekt unterliegen, mit einer Genauigkeit von unter 3% zu messen. Damit kann schlussendlich die Hubble Konstante H ₀ bestimmt werden. | b |
| CTA: Das <i>Cerenkov Telescope Array</i> ist eine grosse Astroteilchen-Forschungsanlage zur Messung höchstenergetischer Gammastrahlung. | p |
| DES: <i>Dark Energy Survey</i> – ein Beobachtungsprogramm zur Himmelsdurchmusterung über 5000 Quadratgrad, was einem Achtel des Himmels entspricht. | b |
| DESI: Das <i>Dark Energy Spectroscopic Instrument</i> misst baryonische akustische Oszillationen und die räumliche Verzerrung der Rotverschiebungen von Galaxien. | p |
| eBOSS: Das Programm <i>Extended Baryon Oscillation Spectroscopic Survey</i> (eBOSS) ermöglicht eine Präzisionsmessung der Expansionsgeschichte des Universums über eine Zeitdauer von 80% der kosmischen Geschichte, als das Universum weniger als drei Milliarden Jahre alt war, und wird damit unsere erst lückenhaften Kenntnisse der Natur der Dunklen Materie verbessern. | b |
| ELT: Das <i>Extremely Large Telescope</i> ist ein 40-Meter-Teleskop im optischen bis Infrarot-Bereich, nach Fertigstellung von ALMA mittelfristig das prioritäre Projekt der ESO. | p |
| ERIS: <i>Enhanced Resolution Imager and Spectrograph</i> : ein Spektrograph mit verbesserter Auflösung für das VLT. | p |
| ESPRESSO: Ein superstabiler hochauflösender optischer Spektrograph, der am kombinierten Coudé-Fokus der vier Teleskope des VLT installiert wird. | p |
| Euclid: Satellitenmission der ESA zur Kartierung der Geometrie des dunklen Universums mittels Untersuchung der Distanz-Rotverschiebungs-Beziehung und der kosmischen Entwicklung bis zu einer Rotverschiebung von ~2, was einem Beobachtungszeitraum von etwa 10 Milliarden Jahren entspricht. | p |

| | |
|---|---|
| Euler Telescope: Das Schweizer 1,2-Meter-Leonhard-Euler-Teleskop am ESO-Standort La Silla wurde durch das Observatorium der Universität Genf gebaut und betrieben. | b |
| ExoMars: Exo-Biologie Mission zum Mars. | b |
| Gaia: ESA Raumsonde zur extrem genauen Positionsbestimmung und Photometrie von ca. 1 Milliarden Sternen der Milchstrasse. | b |
| HARPS: <i>High Accuracy Radial velocity Planet Searcher:</i> ein ultra-hochpräziser Spektrometer am ESO 3,6-Meter-Teleskop in La Silla. | b |
| Herschel Space Telescope: Ein ESA-Weltraumteleskop mit einem Spiegel von 3,5 m Durchmesser, das langwellige Strahlung aus einigen der kältesten und am weitesten entfernten Objekten des Universums auffängt. Herschel ist das einzige Weltraumteleskop, das einen Spektralbereich vom tiefen Infrarot- bis in den Sub-Millimeter Bereich abdeckt. | a |
| HIPPARCOS: Ein wissenschaftlicher Satellit der ESA, gestartet 1989 und in Betrieb bis 1993. Es war das erste Weltraumexperiment im Gebiet der Präzisionsastronomie und hat die Parallaxe von über 100 000 Sternen gemessen. | a |
| HST: <i>Hubble Space Telescope</i> , ein erdumlaufendes 2,5-Meter-Teleskop von NASA und ESA, in Betrieb seit 1990. | b |
| IceCube: Ein (Astro-)Teilchendetektor am Südpol zur Suche von Neutrinos aus den energiereichsten astronomischen Quellen. | b |
| Integral: Weltraum-Observatorium der ESA für hochenergetische Röntgen- und Gamma-Strahlung. | b |
| IRAM: <i>Institut de Radioastronomie Millimetrique</i> , ein französisches/Max-Planck/spanisches Institut für Millimeter-Radioastronomie und ein Hauptpartner von ALMA. | b |
| ISO: Das <i>Infrared Space Observatory</i> der ESA war weltweit das erste echte erdumkreisende Infrarot-Weltraumteleskop (1995–2006). | a |
| JUICE: <i>JUpiter ICy moons Explorer:</i> Weltraummission der ESA zur Erforschung der eisigen Jupiter-Monde. Start geplant für 2022. | p |
| JWST: <i>James Webb Space Telescope:</i> Das 6,5-Meter-Nachfolger-Teleskop von HST (und auch des Spitzer Weltraumteleskops) soll 2018 starten. Das JWST wird hauptsächlich im 1–28 μm Wellenlängenbereich operieren. | p |
| KEPLER: NASA Satellitenmission zur Erforschung der Struktur und Vielfalt von extrasolaren Planetensystemen. Kepler misst eine grosse Anzahl von Sternen und ihre Variationen. | b |

| | |
|---|---|
| LISA: <i>Laser Interferometer Space Antenna:</i> ist ein geplantes Weltraumprojekt der ESA. Es besteht aus mehreren Satelliten, die ein Interferometer bilden, welches empfindlich ist auf Gravitationswellen niedriger Frequenz, wie sie bei der Verschmelzung (super)massiver Schwarzer Löcher entstehen. | p |
| LISA-Pathfinder: Demonstrationssatellit der ESA zum Test von Technologien und Methoden im Hinblick auf die Vorbereitung einer Mission zur Messung von Gravitationswellen. Gestartet 2015. | b |
| LSST: <i>Large Synoptic Survey Telescope</i> – Weitfeld-Teleskop mit grosser Blendenöffnung zur schnellen Beobachtung schwacher Objekte über das ganze Himmelszelt. | p |
| MIRI: <i>Mid-InfraRed Imager:</i> Dieses Instrument wird von einem europäisch-amerikanischen Konsortium für das JWST gebaut. Es liefert Bilder und Spektralanalysen im 5–28 μm Wellenlängenband. | p |
| MOONS: Neues konzeptuelles Design für einen <i>Multi-Object Optical and Near-infrared Spectrograph</i> für das VLT. MOONS soll 2019 in Betrieb genommen werden. | p |
| MUSE: <i>Multi-Unit Spectroscopic Explorer</i> , ein Instrument der zweiten Generation für das VLT. Es besteht aus einem Ganzfeld-Spektrograph mit 90 000 Kanälen. | b |
| NGTS: <i>Next Generation Transit Survey:</i> Diese Anlage mit kleinen automatisierten Roboter-Teleskopen ist am ESO Standort Paranal in Chile installiert. | b |
| NORSAT-1: Kleiner norwegischer Satellit zur Untersuchung von Sonnenstrahlung und Weltall-Wetter und Monitoring des Schiffsverkehrs. Gestartet 2015. | b |
| NTT: <i>New Technology Telescope:</i> Ein Richey-Chretien-Teleskop der ESO mit einem 3,58 m Spiegel, wegbereitend für den Einsatz von aktiver Optik. | b |
| PLATO: <i>PLANetary Transits and Oscillations of stars:</i> eine Mission der ESA zur Messung von Planeten-Transits und Sternoszillationen. Start geplant für 2024. | p |
| PLANCK: ESA Weltraum-Observatorium zur Kartierung der Anisotropien der kosmischen Hintergrundstrahlung (CMB) im Mikrowellen- und Infrarot-Frequenzbereich, in Betrieb von 2009 bis 2013. Planck trug mit seiner hohen Empfindlichkeit und der besseren Winkelauflösung wesentlich zur Verbesserung der Ergebnisse von COBE und WMAP bei. | a |
| Proba-3: Eine Mission der ESA zur Demonstration der Machbarkeit des Formationsfliegens im Weltall. Ein Satelliten-Paar bildet einen fix konfigurierten 150 m langen Sonnen-Coronagraphen. Start geplant für 2018. | p |
| Rosetta: Diese Raumsonde der ESA flog zu einem Kometen, verfolgte diesen auf seiner Flugbahn und hat dabei seine physikalischen Eigenschaften und deren Veränderung untersucht. | a |

| | |
|--|---|
| SINFONI: Spectrograph for INtegral Field Observations in the Near Infrared: ein Spektrograph am VLT der ESO. | b |
| SKA: Square Kilometer Array: ein internationales Projekt zum Bau des grössten Radioteleskops der Welt mit einer Antennenfläche von insgesamt einem Quadratkilometer. | p |
| Solar Orbiter: Raumsonde der ESA zur Untersuchung der Physik der Sonne und der Heliosphäre. Start geplant für 2018. | p |
| SPICA: Space Infrared Telescope for Cosmology and Astrophysics: Japanischer Satellit, Start geplant für 2022. | p |
| Spitzer: Infrarot-Weltraumteleskop der NASA. | b |
| SPHERE: Instrument der zweiten Generation für das VLT der ESO, zur Entdeckung von grossen Jupiter-ähnlichen Planeten in der Umlaufbahn von benachbarten Sternen. | b |
| VLT: Very Large Telescope: höchstentwickeltes Observatorium der europäischen bodengebundenen Astronomie am Standort Paranal in Chile, bestehend aus vier Teleskopen mit je 8,2 m Spiegeldurchmesser. | b |
| VLTI: Very Large Telescope Interferometer: Mit der interferometrischen Verbindung der vier 8-Meter-Teleskope am VLT wird eine ausserordentlich hohe Auflösung zur Beobachtung von leuchtenden Objekten erreicht. | b |
| WMAP: Die Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (NASA, 2001–2009) ermöglichte eine markante Verbesserung der Kenntnisse der CMB im Anschluss an die COBE Mission, dank einer um den Faktor 20 verbesserten Auflösung. | a |
| XMM Newton: X-ray Multi-Mirror Mission der ESA, gestartet 1999, transportierte drei Röntgenteleskope mit hohem Datendurchsatz mit einem bisher unerreichten Nutzungsbereich. Das grosse Beobachtungsfeld und die Fähigkeit zu langen ununterbrochenen Belichtungen ermöglichte sehr empfindliche Beobachtungen. | b |

Wer wir sind?

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz vernetzen die Wissenschaften regional, national und international. Sie engagieren sich insbesondere in den Bereichen Früherkennung und Ethik und setzen sich ein für den Dialog zwischen Wissenschaft und Gesellschaft.

Die Akademien der Wissenschaften Schweiz sind ein Verbund der vier wissenschaftlichen Akademien der Schweiz:

- Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT)
- Schweizerische Akademie der Medizinischen Wissenschaften (SAMW)
- Schweizerische Akademie der Geistes- und Sozialwissenschaften (SAGW)
- Schweizerische Akademie der Technischen Wissenschaften (SATW)

sowie der Kompetenzzentren

- Zentrum für Technologiefolgenabschätzung (TA-SWISS)
- Stiftung Science et Cité

SCNAT – vernetztes Wissen in Dienste der Gesellschaft

Die Akademie der Naturwissenschaften Schweiz (SCNAT) mit ihren 35 000 Expertinnen und Experten engagiert sich regional, national und international für die Zukunft von Wissenschaft und Gesellschaft. Sie stärkt das Bewusstsein für die Naturwissenschaften als zentralen Pfeiler der kulturellen und wirtschaftlichen Entwicklung. Ihre breite Abstützung macht sie zu einem repräsentativen Partner für die Politik. Die SCNAT vernetzt die Naturwissenschaften, liefert Expertise, fördert den Dialog von Wissenschaft und Gesellschaft, identifiziert und bewertet wissenschaftliche Entwicklungen und legt die Basis für die nächste Generation von Naturwissenschaftlerinnen und Naturwissenschaftlern. Sie ist Teil des Verbundes der Akademien der Wissenschaften Schweiz.