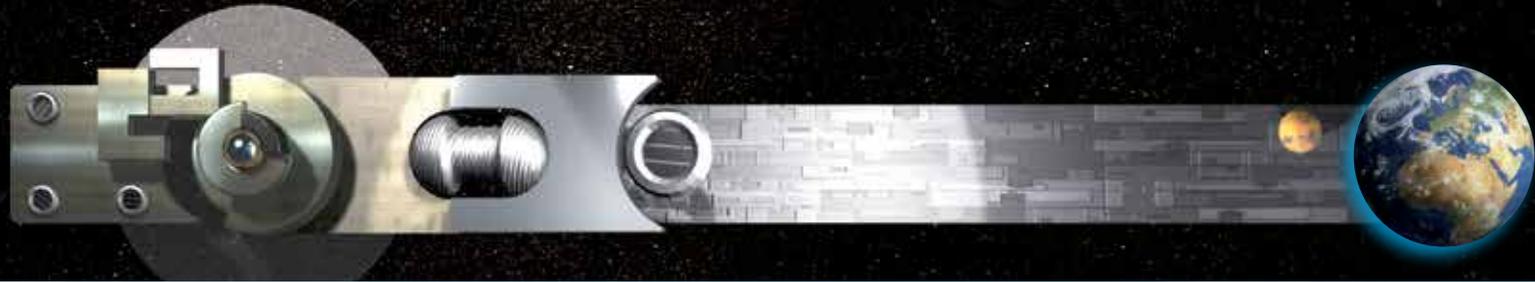




MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRICHE PHYSIK



Seite 4-9	Das Institut
Seite 10-11	Wissenschaft am MPE
Seite 12-17	Sterngeburt: Wie Sterne entstehen
Seite 18-21	Sterne: Leben und Tod
Seite 22-27	Schwarze Löcher: leicht und schwer
Seite 28-35	Galaxien: Welteninseln aus Sternen, Staub und Gas
Seite 36-41	Kosmologie: Zurück zum Anfang
Seite 42	Impressum



Grundlagenforschung und Weltraumtechnologie

Ein Blick hinter die Kulissen des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik

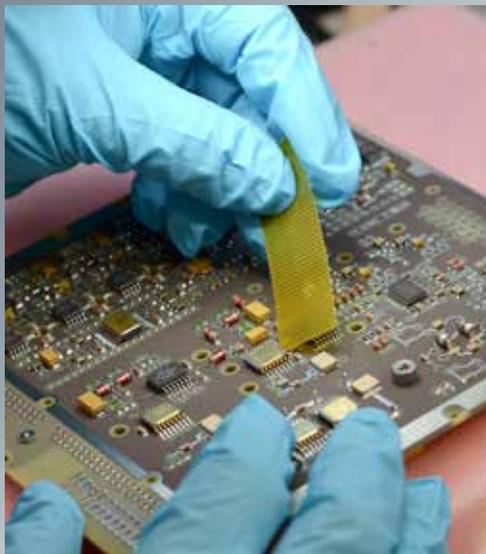
Die Astronomie entwickelte sich in den letzten Jahrzehnten zu einem zentralen Thema der modernen Physik. In keinem anderen Forschungsgebiet hat sich unser Horizont dermaßen schnell erweitert und an keiner anderen physikalischen Disziplin zeigt die Öffentlichkeit ein größeres Interesse. Schwarze Löcher, Dunkle Materie, Dunkle Energie, extrasolare Planeten – die großen Entdeckungen der letzten Jahre bescherten uns ein neues Bild des Universums. An vorderster Front der astronomischen Forschung steht dabei das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) in Garching bei München. Seit seiner Gründung 1963 entwickelte sich das MPE zu einem führenden Forschungsinstitut für die experimentelle Astrophysik.

Das Institut ist Teil einer der größten Ansammlungen bedeutender astrophysikalischer Forschungseinrichtungen in Europa. Direkt neben dem MPE befinden sich die Europäische Südsternwarte (ESO), das Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) und der Exzellenzcluster „Ursprung und Struktur des Universums“, mit denen das MPE eng zusammenarbeitet. Zusammen mit der Technischen Universität München, dem Max-Planck-Institut für Plasma-physik (IPP) und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) stellt der Garchinger Campus eines der größten wissenschaftlichen Zentren der Welt dar.





DAS INSTITUT



Die Forschungsfelder am MPE reichen von der Physik und Chemie von Sternen und der Materie dazwischen, über exotische Objekte wie Neutronensterne und Schwarze Löcher, bis hin zu nahen und fernen Galaxien und der Kosmologie. Hierfür nutzen die Wissenschaftler hauptsächlich experimentelle Methoden und beobachten den Kosmos über mehr als zwölf Größenordnungen im elektromagnetischen Spektrum. Jede der vier großen wissenschaftlichen Gruppen am Institut wird von einem Direktor geleitet: Infrarot- und Submillimeter/Millimeter-Astronomie, optische und interpretative Astronomie, Hochenergie-Astrophysik und das Zentrum für astrochemische Studien.

Der Name des MPE leitet sich von den Objekten und Methoden seiner Forschung ab, die anfangs ausschließlich extraterrestrisch waren. Heute wird zwar ein Teil der Arbeiten auf der Erde durchgeführt, entweder in Labors oder mit bodengebundenen Teleskopen, viele Experimente müssen aber seit jeher ohne störende Erdatmosphäre stattfinden, wohin sie mit Flugzeugen, Raketen oder Raumsonden gebracht werden. Seinen ausgezeichneten Ruf errang das Institut hauptsächlich durch den Bau und die Anwendung von technologisch und wissenschaftlich innovativen Instrumenten, die oft hausintern in den eigenen Werkstätten gebaut werden. Um diese auch umfangreich testen zu können, unterhält das Institut nicht nur ein eigenes Testlabor, eine Integrationshalle und Reinräume, sondern auch die PANTER-Röntgenanlage mit einem 130 Meter langen Strahlrohr. Da die Entwicklung neuer Instrumentierung meist komplex ist und Zeit braucht, sind viele der Ingenieure und Projektwissenschaftler langfristig oder fest am MPE angestellt. Mit etwa 400 Angestellten ist das MPE das größte der astronomischen Institute der Max-Planck-Gesellschaft.



Schon in den ersten Jahren nach seiner Gründung durch Reimar Lüst 1963 begann das Institut sich durch den Bau von hervorragenden Instrumenten einen Namen zu machen. So entwickelte das MPE beispielsweise in den 1960er Jahren ein Instrument für AZUR, die erste deutsche Raumsonde, die 1969 gestartet wurde. In den folgenden Jahrzehnten wurde das Institut zu einer weltweit geachteten Institution für die Entwicklung innovativer Technologien für die Wissenschaft. Dies gipfelte in den 1990er Jahren mit dem Start des Röntgensatelliten ROSAT, der dem MPE Weltruhm bescherte und nachhaltige Auswirkungen auf viele verschiedene astronomische Forschungsfelder hatte. Mit seinem Plasmaexperiment PKE-Nefedov eröffnete das MPE 2001 die Ära wissenschaftlicher Experimente auf der internationalen Raumstation ISS. Das PACS-Projekt – die Beteiligung des MPE am Herschel-Observatorium – hatte 2009 - 2013 eine ähnlich große Bedeutung wie ROSAT.

Für die Forschung am MPE werden Instrumente eingesetzt, die das Institut entweder allein oder – oft in einer leitenden Rolle – in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen entwickelt. Theoretiker, Beobachter, Experimentatoren, Ingenieure und Techniker arbeiten am MPE eng zusammen. Diese interne Verzahnung ist sehr produktiv und bildet die Grundlage für den Erfolg der Forschungsprojekte am Institut. Die Zusammenarbeit mit anderen führenden Forschungseinrichtungen, sowohl auf nationaler als auch internationaler Ebene, ist ein weiterer wichtiger Erfolgsfaktor.

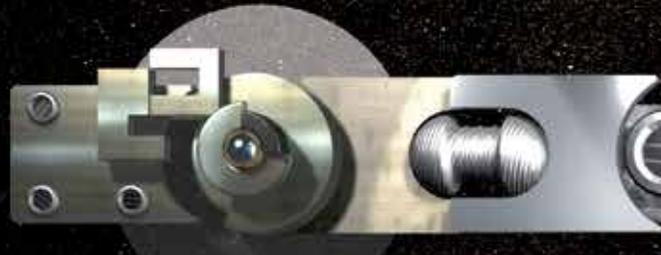


DAS INSTITUT



So verlangt insbesondere die Größe und Komplexität der Instrumente für Weltraumprojekte oft nach der Expertise verschiedener Institute. Das MPE genießt sowohl in der Wissenschaft als auch in der Technologiesparte einen ausgezeichneten Ruf: Gemessen an der Anzahl zitierter Veröffentlichungen gehört das MPE zu den führenden Institutionen der Weltraumforschung; einige der am häufigsten zitierten Autoren in Europa arbeiten als Forscher am MPE.

Die wissenschaftlichen Spitzenleistungen des Instituts sind nur durch seine hervorragenden wissenschaftlichen und technischen Mitarbeiter, sowie die hoch qualifizierten jungen Studenten und Postdocs möglich. Deshalb wurde im Jahr 2000 die „International Max Planck Research School“ (IMPRS) für Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München vom MPE gegründet, zusammen mit dem MPI für Astrophysik, der Universitätssternwarte und der Europäischen Südsternearte. Die Schule steht Studenten aus der ganzen Welt offen und lockt viele hoch qualifizierte und motivierte junge Menschen an, die eine Promotion in Physik und Astronomie anstreben. Etwa 75 Doktoranden nehmen an gemeinsamen Kursen teil und verfolgen Forschungsprojekte an den vier Instituten. Die Studenten fertigen ihre Doktorarbeit in einer anregenden Atmosphäre an und können darüber hinaus ein breites Hintergrundwissen in verschiedensten astrophysikalischen Themengebieten aufbauen, das weit über ihr eigenes Forschungsprojekt hinausgeht. Viele ehemalige Studenten des MPE wurden zu angesehenen Persönlichkeiten in Wissenschaft und Industrie.

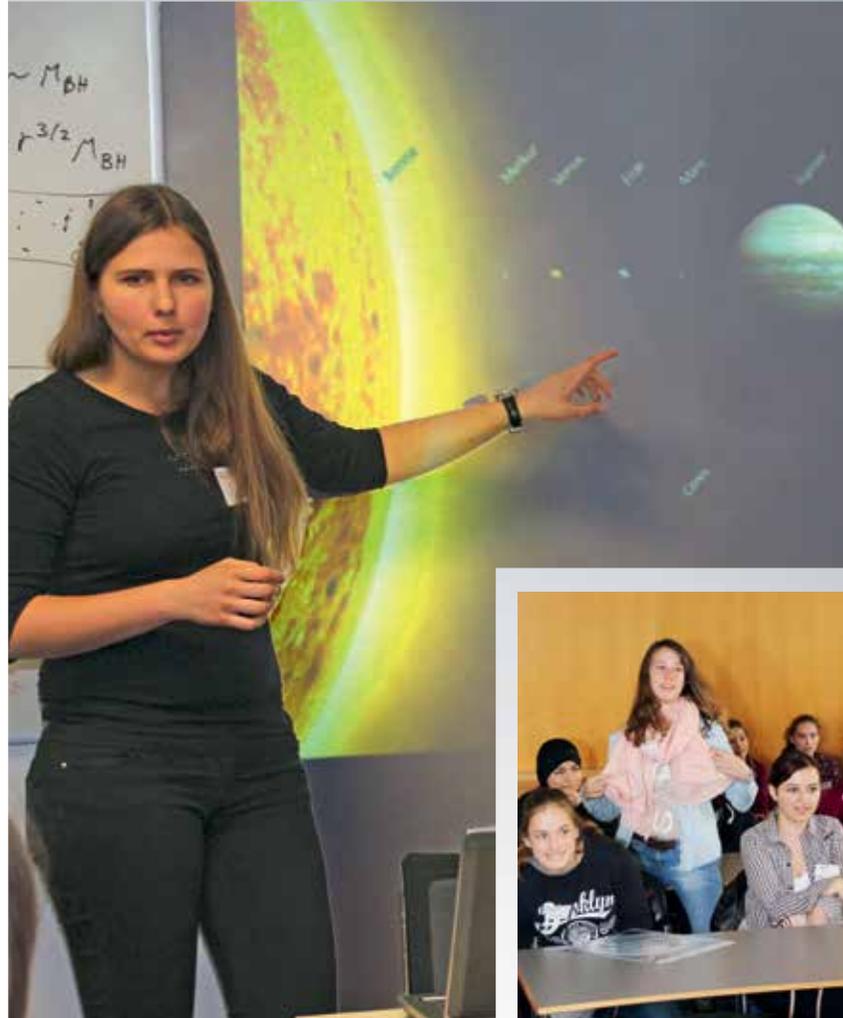


DAS INSTITUT

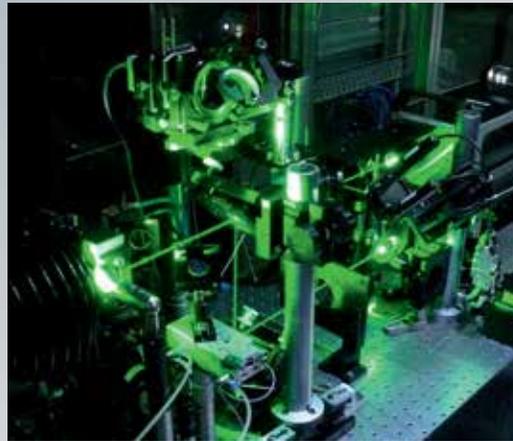


Die Ausbildung des Nachwuchses ist eine Grundvoraussetzung, die Exzellenz der Forschung aufrecht zu erhalten. Um junge Menschen für die Forschung zu interessieren, bietet das MPE Schülern und Studenten Praktika an und unterstützt die berufliche Ausbildung junger Menschen in seinen technischen Abteilungen. Das Institut fördert auch gezielt junge Frauen, um sie dazu zu ermutigen eine Karriere als Wissenschaftlerin, Ingenieurin oder Technikerin einzuschlagen, und beteiligt sich seit 2008 an der deutschlandweiten Initiative „Girls` Day“. Beim alle zwei Jahre stattfindenden Tag der offenen Tür organisiert das MPE ein spezielles Kinderprogramm, das so beliebt ist, dass inzwischen andere Institute ähnliche Initiativen begonnen haben.

Neben diesen Großveranstaltungen betreibt das Institut eine breit gefächerte Öffentlichkeitsarbeit, die von Führungen für Schulklassen und Gruppen, regelmäßigen News und Pressemeldungen auf der Webseite, internen und externen Vorträgen bis hin zur Beteiligung an Ausstellungen reicht. Damit will das MPE insbesondere junge Menschen ansprechen und bei ihnen die Begeisterung für die Astrophysik wecken. Ein großes Projekt war die Kosmologie-Ausstellung im Deutschen Museum in München, die das MPE für das Internationale Jahr der Astronomie 2009 zusammen mit MPA, MPP, ESO und dem Exzellenzcluster Universe entwickelte. Diese Ausstellung nimmt den Besucher mit auf eine Zeitreise, vom Urknall bis zur Gegenwart und sogar in die Zukunft mit Prognosen über das Schicksal unseres Universums.



DAS INSTITUT



Die weitere Entwicklung des Instituts wird, wie schon bisher, von den ständigen Änderungen der Forschungsgebiete und -instrumente beeinflusst. Die beobachtende Astronomie von hohen Energien bis zu optischen und Millimeter-Wellenlängen soll dabei weiterhin die wichtigste Rolle am Institut spielen. Die Untersuchung astronomischer Themen mit Beobachtungen über die gesamte Bandbreite des elektromagnetischen Spektrums steht dabei im Fokus und wird ergänzt durch auf die Beobachtungen aufbauende Theorie.

Das MPE sieht einer interessanten Zukunft entgegen: In Kürze wird der im Bau befindliche Röntgensatellit eROSITA die erste vollständige Himmelsdurchmusterung im mittleren Röntgenbereich durchführen, um Licht auf die geheimnisvolle Dunkle Energie zu werfen, und das satellitengestützte Röntgenobservatorium ATHENA befindet sich in der Entwurfsphase. Bei Wellenlängen im optischen und nahen Infrarotbereich sind Wissenschaftler vom MPE und anderer europäischer Institutionen an der EUCLID-Weltraummission beteiligt, die derzeit vorbereitet wird, um das Dunkle Universum zu untersuchen. Diese Projekte werden durch bodengebundene Observatorien, wie das Large Binocular Telescope ergänzt, für das unsere ersten Instrumente in Betrieb sind. Arbeiten an Instrumenten für das derzeit größte optische Teleskop der Welt, das VLT der ESO, sind noch in vollem Gange, insbesondere für GRAVITY, das die Möglichkeit bieten wird, alle vier Teleskope interferometrisch auf einmal zu nutzen. Für die folgende Teleskopgeneration des „European Extremely Large Telescope“ (E-ELT) leitet das MPE die Entwicklung der Kamera MICADO, die das „First Light“ des E-ELTs aufnehmen und analysieren soll.

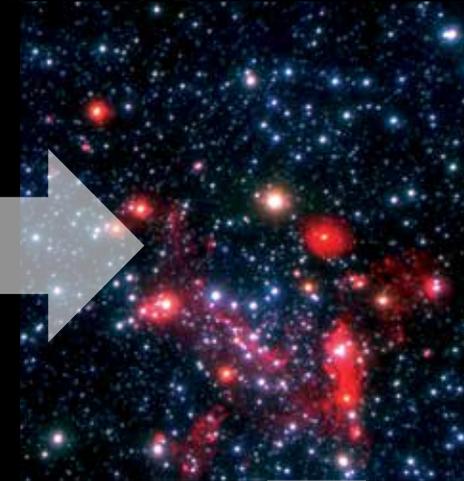
Wissenschaft am MPE

Auch wenn die Astronomie in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht hat, bleiben wichtige Fragen weiterhin offen: Verstehen wir die Extreme des Universums? Wie entstehen Galaxien und wie entwickeln sie sich? Was sind Dunkle Materie und Dunkle Energie und wie beeinflussen sie die Entwicklung des Universums?

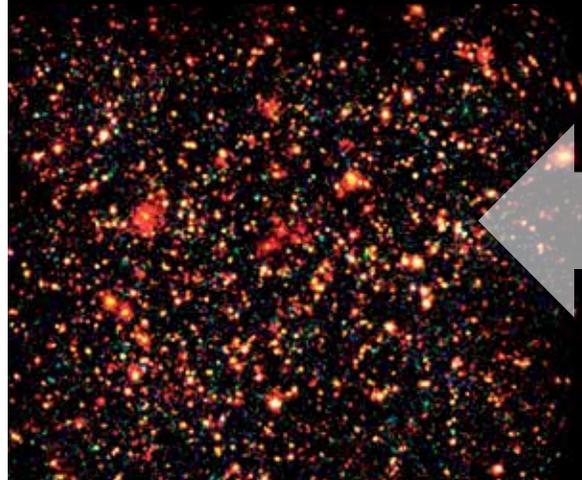
Am MPE versuchen wir diese und andere Fragen zu beantworten, indem wir insbesondere zwei entscheidende wissenschaftliche Themen untersuchen: Schwarze Löcher und Galaxien. Schwarze Löcher sind extreme Objekte im Weltall, die wir sowohl als die ausgebrannten Überreste von Sternen als auch als riesige Massenansammlungen in den Zentren von Galaxien finden. Die Galaxien insgesamt und ihre Entwicklung können uns etwas über die Geschichte des Universums verraten und so bei kosmologischen Fragestellungen helfen.

Drei der vier Gruppen am MPE erforschen diese Themen über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg, in Verbindung mit Theorie, die auf diese Beobachtungen aufbaut. Die Ergebnisse aus einem Wellenlängenbereich können mit denen bei anderen Energien überprüft werden; damit bestätigen sie unsere Annahmen über die physikalischen Prozesse im Universum.

Die kosmischen Objekte werden dabei sowohl einzeln und detailliert in unserer kosmischen Nachbarschaft als auch allgemein und oft statistisch tief im All untersucht. Da in der Astronomie eine große Entfernung gleichbedeutend ist mit einem Blick in die Vergangenheit (aufgrund der endlichen Lichtlaufzeit) können wir so die Geschichte und Entwicklung dieser Objekte und – zumindest in mancher Hinsicht – die Geschichte des Universums insgesamt verfolgen.



Schwarze Löcher sind eines der Hauptforschungsthemen am MPE. Wir untersuchen diese extremen Objekte im Weltall auf den unterschiedlichsten Skalen: als ausgebrannte Überreste von explodierten Sternen, in den Zentren unserer Milchstraße und benachbarter Galaxien, aber auch in weit entfernten Galaxien, als das Universum noch in den Kinderschuhen steckte.



WISSENSCHAFT



Die Wissenschaftler am MPE beobachten astronomische Objekte in vielen verschiedenen Wellenlängenbereichen und nutzen – oft selbst entwickelte – Instrumente auf der Erde und auf Satelliten. Zusätzlich werden Experimente im Labor durchgeführt, um astronomische Erkenntnisse besser zu verstehen.

Durch die genaue „Vermessung“ des Schwarzen Lochs in unserer Milchstraße und von Schwarzen Löchern in nahen Galaxien können wir beispielsweise die Signale dieser Objekte aus den Tiefen des Alls abschätzen. Während die „lokalen“ Beobachtungen hauptsächlich bei Infrarot- und optischen Wellenlängen durchgeführt werden, erreicht uns das gesamte Signal der fernen Schwarzen Löcher als diffuser Röntgenhintergrund. Dass unsere lokalen Abschätzungen aufgrund von energieärmer Strahlung überraschend gut mit den Messungen der hochenergetischen Strahlung der weit entfernten Objekte übereinstimmen, stärkt unser Vertrauen in die Zuverlässigkeit unseres derzeitigen Bildes vom Universum.

Seit 2014 wird die astrophysikalische Forschung am MPE ergänzt durch die Astrochemie, die Beobachtungen mit Teleskopen, Arbeiten im Labor sowie theoretische Überlegungen und Simulationen an einem Ort und in einer Gruppe zusammenführt. Die Wissenschaftler erforschen die Geburt von Sternen und Planeten (jungen Planetensystemen) in unserer Milchstraße, auch und insbesondere auf molekularer Ebene. Damit werden wir nicht nur die Entstehung unseres Sonnensystems sondern auch die Herkunft von komplexen organischen Molekülen in Kometen und Asteroiden besser verstehen.

Die verschiedenen Gruppen am MPE arbeiten Hand in Hand, um die spezifischen und einzigartigen Informationen aus allen Wellenlängenbereichen bestmöglich zu nutzen und so gemeinsam das Universum als Ganzes zu erforschen.

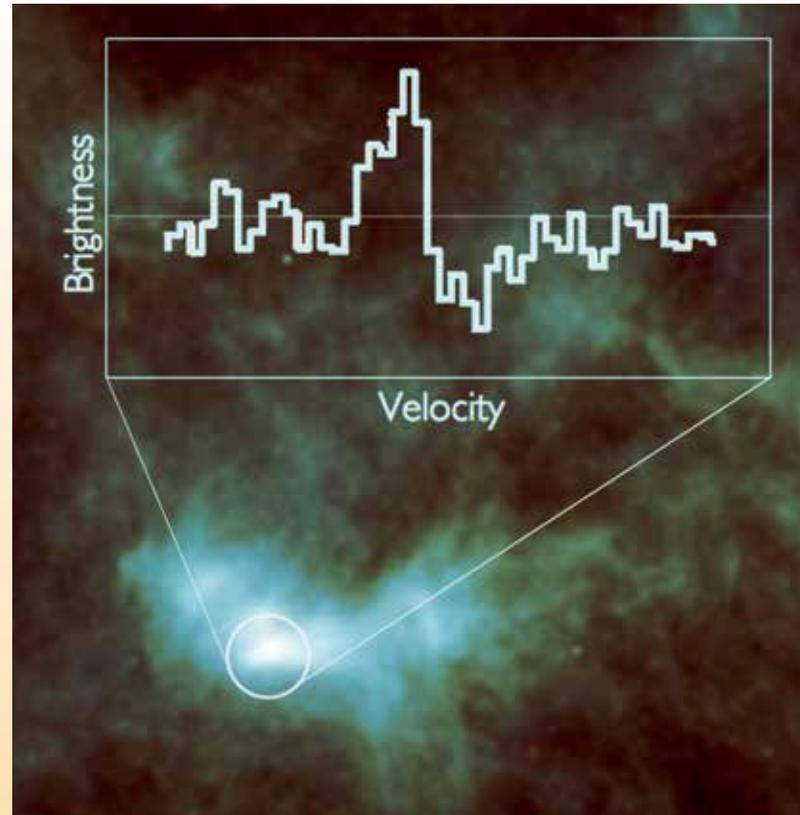


Astrochemie – ein Puzzlespiel

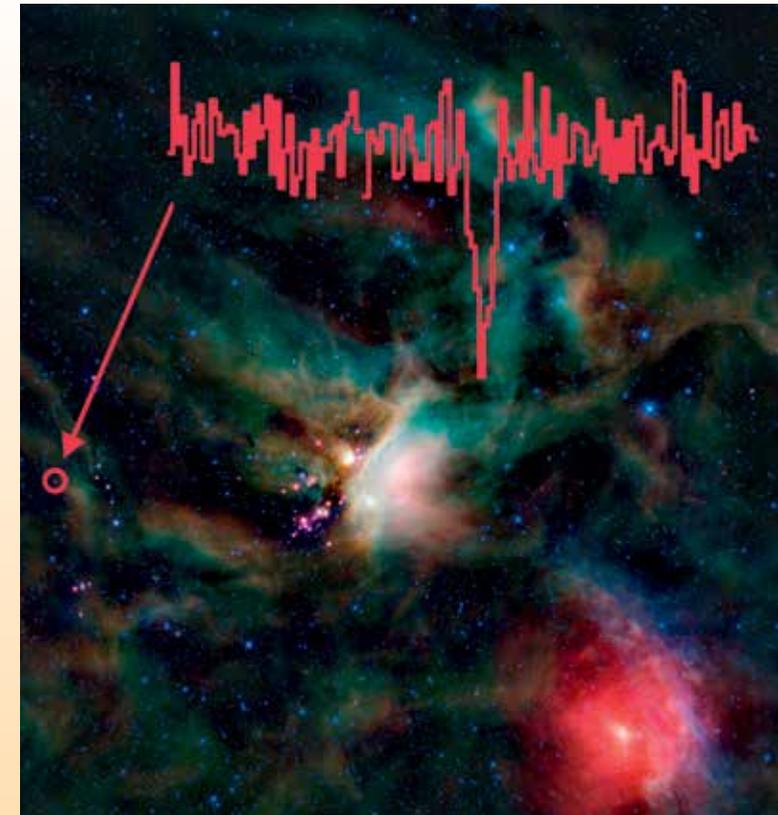
Dichte Gas- und Staubwolken sind die Voraussetzung für das Entstehen neuer Sterne. Diese Wolken müssen dicht und massereich, gleichzeitig aber auch sehr kalt sein, da sonst der Druck des (warmen) Gases zu groß wäre und kein Gravitationskollaps eintreten könnte. Diese riesigen Molekülwolken sind mit etwa 10 Kelvin (rund -260°C) sehr kalt – das interstellare Gas ist mit etwa 100 Kelvin (oder rund -170°C) dagegen „warm“.

Sie bestehen hauptsächlich aus molekularem Wasserstoff, dazu kommen atomarer Wasserstoff und andere einfache Moleküle wie z.B. Kohlenmonoxid, Wasser und Spuren komplexer, organischer Verbindungen (wie beispielsweise Methanol). Außerdem enthalten sie etwa 1% interstellaren Staub, der eine ganz besondere Rolle spielt.

Dieser Staub blockiert die energiereiche Strahlung von Sternen in der Nähe und ermöglicht so, dass sich komplexe organische Moleküle bilden können. Teilweise können sich Moleküle auch an die Staubkörner anlagern. Insgesamt führt dies zu einem sehr komplexen Aufbau der Wolke, für deren Beobachtung empfindliche Instrumente nötig sind.



In dieser kalten Molekülwolke L1544 im Sternbild Stier wurde zum ersten Mal der „Fingerabdruck“ von Wasser nachgewiesen. Neben einem derart einfachen Molekül können im Zusammenspiel mit Staubkörnern und der energiereichen Strahlung nahegelegener Sterne aber auch komplexe Moleküle entstehen.

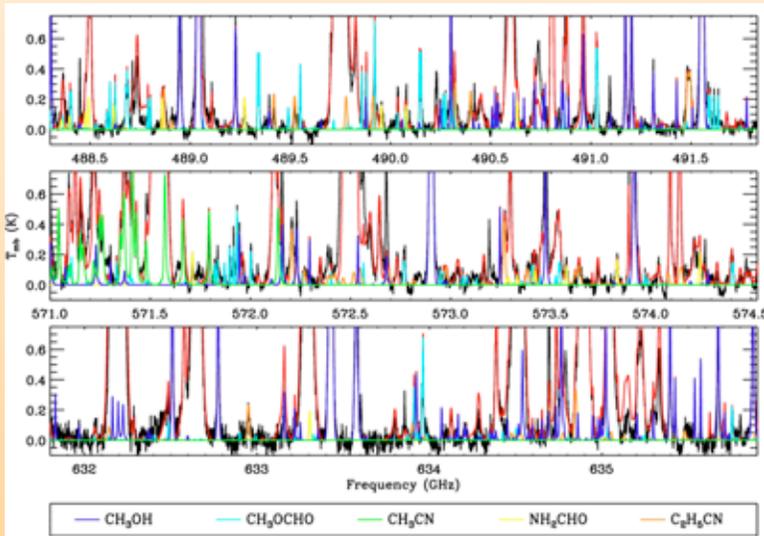


Diese Falschfarbenaufnahme zeigt den Rho Ophiuchus-Komplex, eine Sternentstehungsregion, die etwa 400 Lichtjahre von der Erde entfernt ist. Die Absorptionslinie eines besonderen Wasserstoffmoleküls aus der kalten Wolke aus molekularem Gas und Staub um drei junge Protosterne erlaubt eine Altersbestimmung der Wolke: die dichten Wolkenkerne, in denen Sterne entstehen, sind mindestens eine Million Jahre alt.

STERNGEBURT



Viele der Moleküle in Sternentstehungsregionen strahlen im Radiobereich. Nach seiner Fertigstellung wird NOEMA aus zwölf 15-Meter Radioantennen bestehen (wie hier in dieser Fotomontage gezeigt). MPE-Astronomen nutzen diesen Teleskopverbund zusammen mit anderen Beobachtungsstationen wie ALMA, um insbesondere das kalte Gas in Galaxien zu untersuchen.



Im Spektrum einer Sternentstehungsregion überlagern sich die „Fingerabdrücke“ der verschiedenen Moleküle, wie hier in dieser Simulation einer kalten, dichten Molekülwolke in der Milchstraße.

Um die Stern- und Planetensysteme in ihrer Frühphase beobachten zu können, setzen die Astronomen am MPE spezielle Teleskope für Radio-, Submillimeter- oder Infrarotwellenlängen ein, da die Wolken zu kalt und dicht sind, um sie mit optischen Teleskopen beobachten zu können. Die Herausforderung für die Astronomen ist es, die richtigen Wellenlängen zu finden, um die Strahlung der Wolken bestmöglich nachweisen zu können.

Eine zusätzliche Schwierigkeit besteht darin, dass nur bestimmte (komplexe) Moleküle beobachtbare Emissionslinien haben. Um die Ergebnisse zu verstehen, brauchen die Wissenschaftler Kenntnisse in Chemie. Die Strahlung der unterschiedlichen Moleküle überlappt und diese Signaturen gilt es zu entwirren, um so mehr über die komplexe Chemie, den Einfluss von Magnetfeldern und Turbulenzen sowie die genauen Bedingungen bei der Stern- und Planetenbildung zu erfahren. Diese astrochemischen Studien – in der Theorie, im Labor und mit Beobachtungen – führt die CAS-Gruppe am MPE durch.

„Wir bringen hier das Know-How aus Theorie, Labor und Beobachtungen zusammen und können damit die Lücken schließen im Verständnis der verschiedenen Phasen der Entstehung von Sternen wie unserer Sonne und Planeten wie unserer Erde. Gleichzeitig verfolgen wir nach, wie sich die chemische Komplexität im Laufe der Zeit ändert.“

Paola Caselli, MPE-Direktorin und Leiterin des Zentrums für Astrochemische Studien



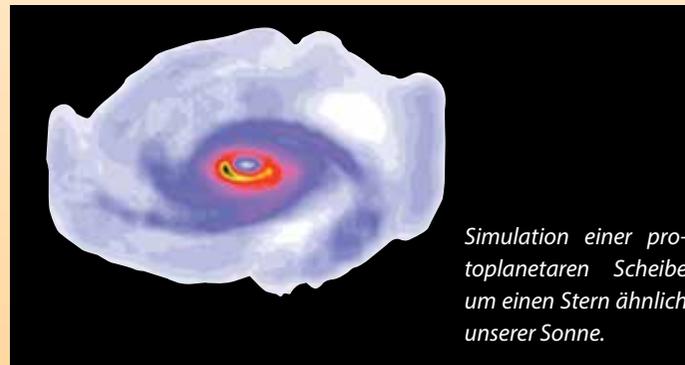
Die kosmische Recyclingfabrik

Der prinzipielle Weg zur Entstehung eines neuen Sterns ist heute recht gut verstanden: Interstellare Gas- und Staubwolken sind nicht gleichförmig im All verteilt, sie befinden sich größtenteils in den Spiralarmen von Galaxien, wo das Gas durch vorangegangene Sternenerationen mit schweren Elementen angereichert wird. In diesen Wolken gibt es „Klumpen“ oder Regionen, in denen das Gas dichter ist als in der unmittelbaren Umgebung. Diese Klumpen verdichten sich aufgrund ihrer eigenen Schwerkraft und bilden zunächst einen „prästellaren Kern“, der sich weiter verdichtet und schließlich im Zentrum einen Protostern bildet. Gleichzeitig entsteht eine Akkretionsscheibe, da das interstellare Material einen Drehimpuls besitzt und nicht direkt auf den Protostern einstürzen kann. Protoplanetare Scheiben sind also ein ganz natürliches Nebenprodukt der Sternentstehung. Nach wenigen Millionen Jahren ist der Protostern schließlich dicht und heiß genug geworden, so dass in seinem Innern das stellare Fusionsfeuer zündet – ein neuer Stern ist geboren.

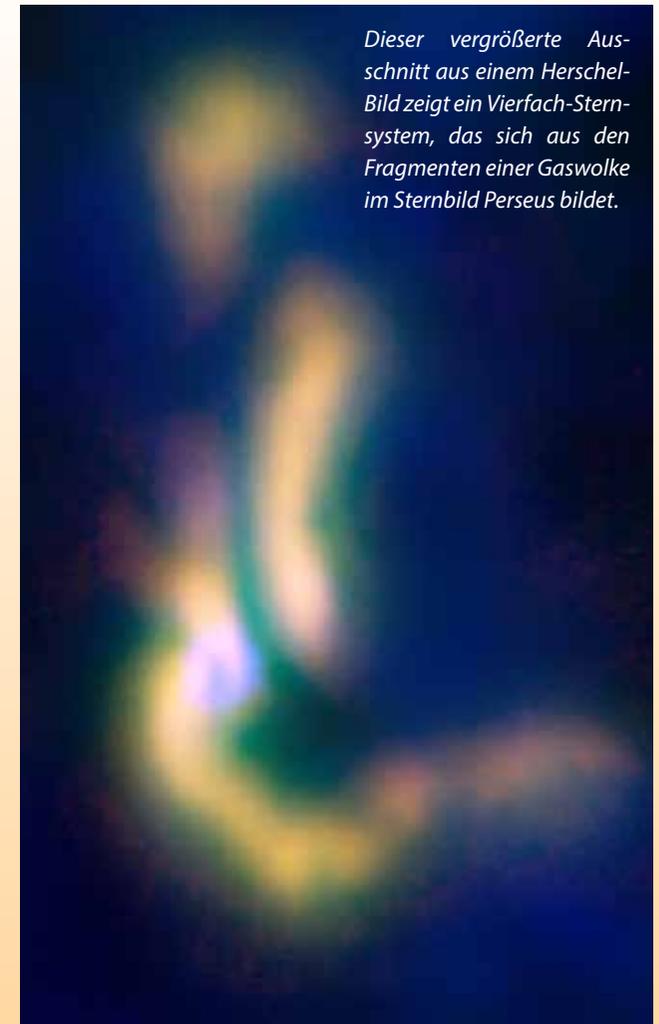
Doch warum und wann bildet sich in einer interstellaren Wolke ein neuer Stern? Welche genauen Bedingungen müssen herrschen? Wie läuft die Stern- und Planetenentstehung im Detail ab? Und wie kann man diese Sternentstehungsregionen überhaupt beobachten? Die Forscher am MPE suchen gezielt nach den besten Beobachtungsstrategien um die dichten Gas- und Staubwolken zu durchdringen.



Die protoplanetare Scheibe um den jungen Stern HL Tauri, aufgenommen vom ALMA-Observatorium (kleines Bild) im Infrarotbereich. Es zeigt ein derzeit sich entwickelndes Planetensystem, etwa 1 Million Jahre alt, in dem junge Planeten schon ihre Bahnen ziehen.



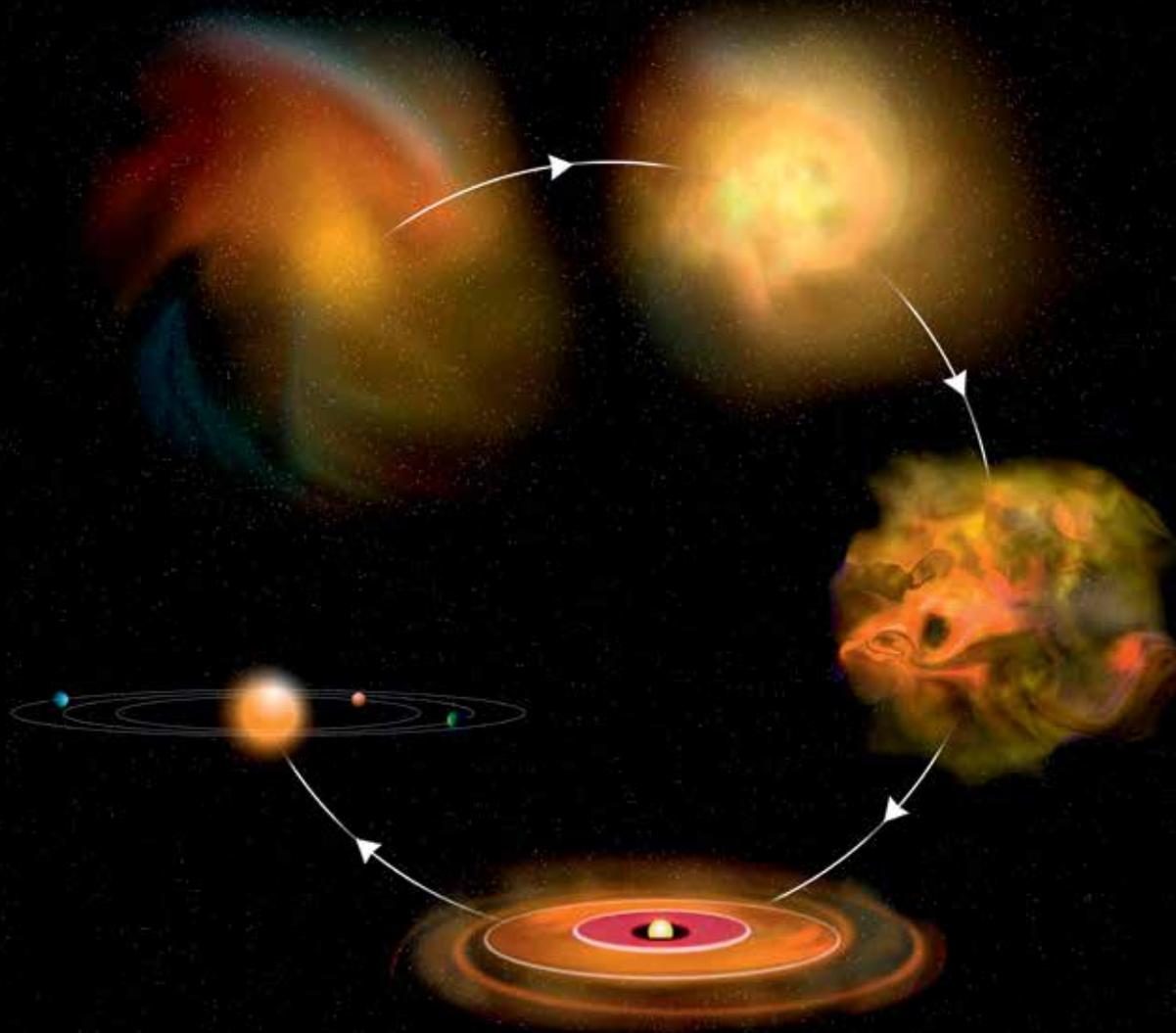
Simulation einer protoplanetaren Scheibe um einen Stern ähnlich unserer Sonne.



Dieser vergrößerte Ausschnitt aus einem Herschel-Bild zeigt ein Vierfach-Sternsystem, das sich aus den Fragmenten einer Gaswolke im Sternbild Perseus bildet.



STERNGEBURT



Sterne und Planeten entstehen in diffusen Gaswolken (oben links), die sich verdichten (oben rechts) um einen Protostern (Mitte), eine proto-planetare Scheibe (unten) und schließlich ein neues Planetensystem zu bilden. Im Laufe ihres Lebens erzeugen die Sterne schwere Elemente und geben diese nach ihrem explosiven Ende ins All zurück - für die nächste Sternengeneration.



Junge Sterne – Ein Blick in die Kinderstube

Die Entstehung von Sternen spielt sich gewöhnlich in dichten Wolken aus Gas und Staub ab und ist deshalb vor den Augen optischer Teleskope verborgen. Mit Infrarot-Detektoren können wir einen Blick in diese Kinderstube werfen und die jungen Sterne direkt beobachten. Die Infrarotbilder und -Spektren, wie zum Beispiel von Herschel/PACS, erlauben es den MPE-Wissenschaftlern die physikalische und chemische Zusammensetzung und auch die Entwicklung der jungen Sterne zu vermessen und so ihre Entstehung besser zu verstehen.

In unserer Milchstraße untersuchen wir die Entstehung einzelner Sterne. In anderen Galaxien betrachten wir die Sternentstehung global, d.h. statistisch, wobei wir nach spezifischen Merkmalen in den Galaxienbildern und -spektren suchen. Solche Studien verraten uns etwas über die Sternentstehungsgeschichte des Universums und die Entwicklung von Galaxien.

Zwei Aufnahmen einer Molekülwolke im Sternbild Orion, einer riesigen Sternentstehungsregion mit dem „Pferdekopfnebel“ im Bild rechts. Im optischen Licht (oben) erscheint der Nebel größtenteils dunkel, nur einige wenige neu geborene Sterne sind zu sehen. Das infrarote Licht allerdings enthüllt die beeindruckende innere Struktur der Wolke, deren Gestalt von gewaltigen Sternwinden geprägt ist.



Pferde-
kopfnebel
↙



Pferde-
kopfnebel
↙



➔ Wenn sich dichte Gasklumpen in interstellaren Wolken zusammenziehen, zündet das nukleare Brennen: Ein neuer Stern ist geboren.



Dieses Infrarotbild, aufgenommen mit dem Herschel-Weltraumteleskop, zeigt den jungen Stern Fomalhaut und die ihn umgebende Staubscheibe.



Der junge, sonnenähnliche Stern Herbig Haro 46, fotografiert mit dem Spitzer-Weltraumteleskop, gewinnt an Masse mittels Akkretion, verliert aber auch Materie durch einen Gas-Jet. Er zeigt damit das typische Verhalten eines neugeborenen Sterns.



Ein chaotisches Netz aus Gas und Staub in der Sternentstehungsregion Cygnus-X. Die rötlichen Objekte in diesem Bild sind junge Sterne, die mit den Infrarotaugen von Herschel sichtbar werden.



Leben und Tod – Sternentwicklung und das interstellare Medium

Die Entwicklung der Sterne und ihr Schicksal, sowohl einzeln als auch als Gruppe, hängen stark von ihrer Wechselwirkung mit dem umliegenden interstellaren Medium ab.

Sterne entstehen in interstellaren Gaswolken. Dichte Klumpen kollabieren durch ihre eigene Schwerkraft, Dichte und Temperatur steigen bis zum Erreichen eines kritischen Punktes, an dem das nukleare Feuer zündet und Wasserstoff zu Helium fusioniert: ein neuer Stern ist geboren. Während eines Großteil seines Lebens strahlt der Stern mit einer annähernd konstanten Rate, bis sein atomarer Brennstoff verbraucht ist.

Für Sterne mit niedriger Masse endet die Sternentwicklung relativ friedlich in so genannten Weißen Zwergsternen. Massereiche Sterne beenden ihr Leben in gewaltigen Explosionen – Supernovae –, aus denen Neutronensterne oder Schwarze Löcher hervorgehen. In beiden Fällen wird ein großer Teil der stellaren Masse ausgeschleudert und im interstellaren Medium wieder verwendet: daraus entstehen neue Sterne und kleinere Objekte wie Planeten. Da schwere Elemente nur in Sternen erzeugt werden können, stammt das gesamte für die Entstehung von Leben notwendige Material, insbesondere Kohlenstoff und Sauerstoff, aus erloschenen Sternen.

Gas und Staub des interstellaren Mediums spielen eine wichtige Rolle sowohl bei der Entstehung von Sternen, aber auch in späteren Phasen der Sternentwicklung. Wie die neu erzeugten Elemente in Sternwinden und Sternexplosionen mit dem umgebenden Gas vermischt und in die nächste Generation von Sternen eingebaut werden, ist immer noch weitgehend unverstanden.

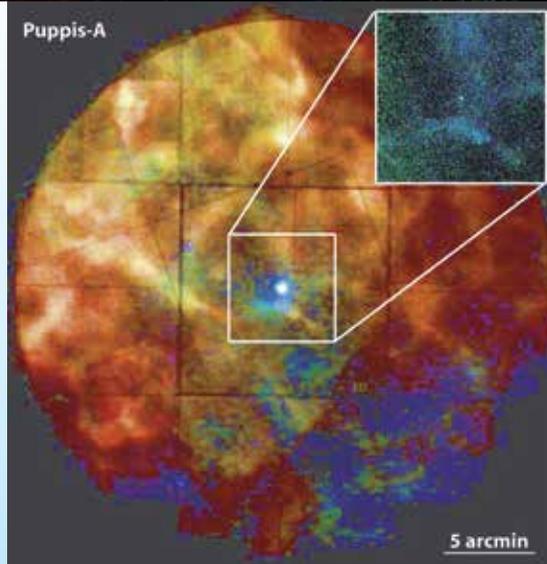


Dieses Bild einer Region in unserer Milchstraße mit vielen Sternen im Sternbild Schütze wurde mit dem Hubble-Weltraumteleskop aufgenommen. Es zeigt viele Sterne mit unterschiedlichen Farben, die unterschiedliche Temperaturen haben.



STERNE

Der Supernovaüberrest Puppis-A, wie er von den Röntgensatelliten XMM-Newton und Chandra (kleines Bild) beobachtet wurde. Vor etwa 5000 Jahren kollabierte ein massereicher Stern, explodierte als Supernova und hinterließ eine Gaswolke und einen Neutronenstern im Zentrum.



Der planetarische Nebel M27, aufgenommen am Wendelstein-Observatorium. Ein alter Stern hat seine Sternatmosphäre in das interstellare Medium geblasen, und dabei unsere Milchstraße mit neu erzeugten Elementen angereichert.

STERNE



Mit seinen Infrarot-Augen blickt das LUCI-Instrument des MPE am Large Binocular Telescope hinter den Vorhang aus Staub auf die junge Sternentstehungsregion Sh-2 255.



Dieses Herschel-Bild zeigt eine Reihe von Sternentstehungsregionen in der Molekülwolke W48. Die Sternentstehung wurde hier wahrscheinlich extern ausgelöst: Dutzende Supernovae explodierten vor über 10 Millionen Jahren.

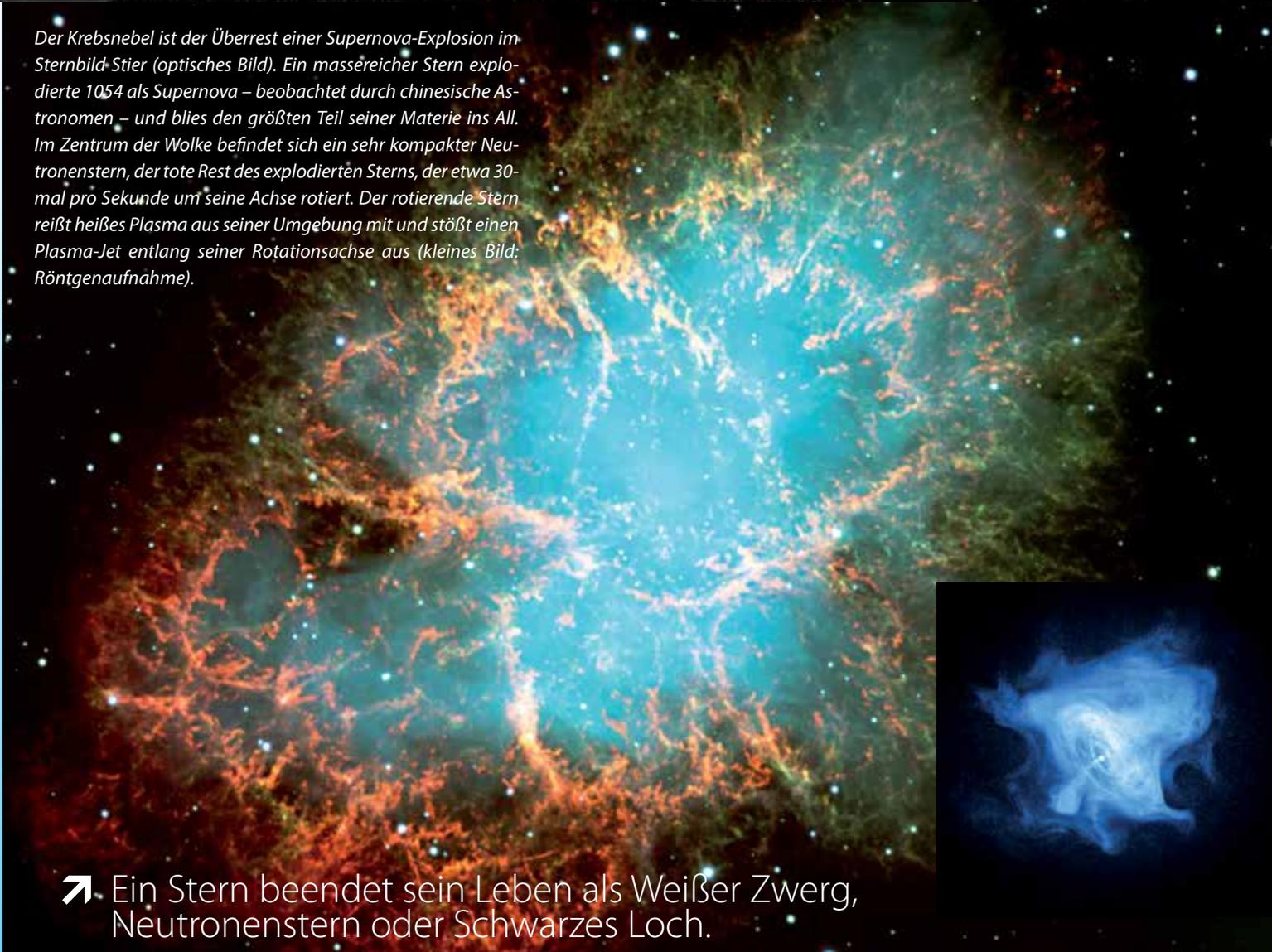


Sternentod – Die extremen Überreste

Weißer Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, so genannte „kompakte“ Objekte, haben eine gewaltige Materiedichte und bilden die Endprodukte in den Entwicklungsstadien von Sternen. Die enormen Gravitations- und oft auch magnetischen Kräfte nahe ihrer Oberfläche bringen ungewöhnliche physikalische Prozesse in ihrer Umgebung zum Vorschein. Beim Aufsammeln von Materie, beispielsweise von einem Begleitstern, wird ein Teil der Gravitationsenergie in Strahlung umgewandelt, wodurch wir diese kompakten Objekte überhaupt erst untersuchen können; sie strahlen hauptsächlich im energiereichen Röntgen- und Gammabereich, da die sehr schnell einfallende Materie die Auftreffregion sehr stark erhitzt. Bei magnetischen Objekten kann es sogar zu einer starken Beschleunigung des einfallenden Plasmas kommen, was zum Ausstoß in einem so genannten „Jet“ führt.

Die Analyse der hochenergetischen Emission kompakter Sterne und ihrer Umgebung erlaubt es uns, ihre physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise Typ, Masse sowie die chemische Zusammensetzung, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit des umgebenden Plasmas zu bestimmen. Diese Erkenntnisse helfen uns die eigentümliche Physik, die die Akkretion und die Teilchenbeschleunigung rund um diese energiereichen Objekte steuert, besser zu verstehen.

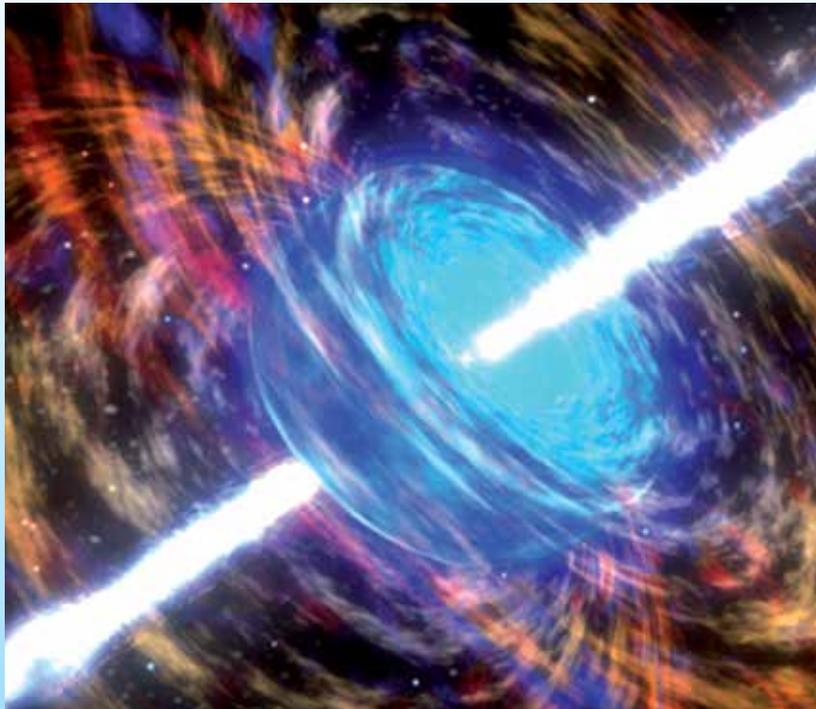
Der Krebsnebel ist der Überrest einer Supernova-Explosion im Sternbild Stier (optisches Bild). Ein massereicher Stern explodierte 1054 als Supernova – beobachtet durch chinesische Astronomen – und blies den größten Teil seiner Materie ins All. Im Zentrum der Wolke befindet sich ein sehr kompakter Neutronenstern, der tote Rest des explodierten Sterns, der etwa 30-mal pro Sekunde um seine Achse rotiert. Der rotierende Stern reißt heißes Plasma aus seiner Umgebung mit und stößt einen Plasma-Jet entlang seiner Rotationsachse aus (kleines Bild: Röntgenaufnahme).



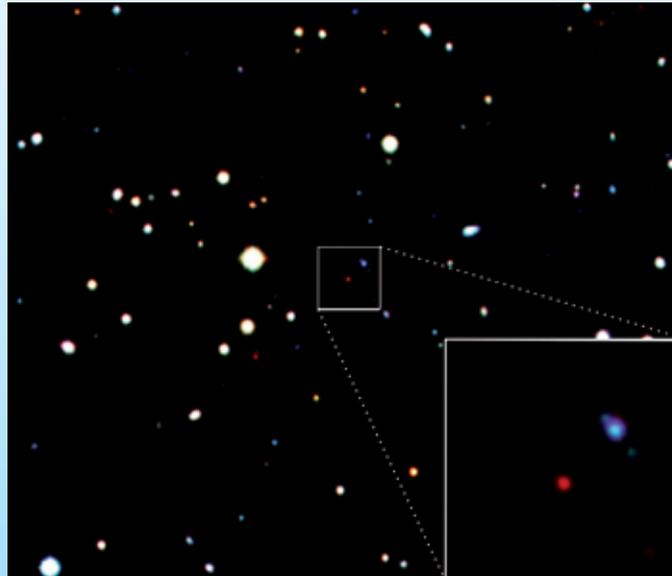
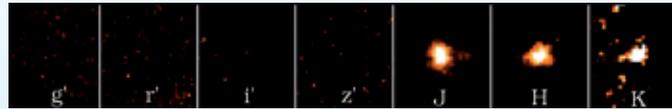
➤ Ein Stern beendet sein Leben als Weißer Zwerg, Neutronenstern oder Schwarzes Loch.



STERNE



Bildliche Darstellung eines Gammablitzes: ein junger, massereicher Stern beendet sein Leben durch die Implosion seiner Zentralregion in ein Schwarzes Loch. Dies führt zu einer gewaltigen Explosion und einem schnellen Plasma-Jet, die die beobachtbaren Eigenschaften eines GRB bestimmen.



Das rote Objekt in diesem von GROND aufgenommenen Bild ist der GRB vom 23. April 2009, eines der entferntesten, beobachteten Objekte. Durch seine An- oder Abwesenheit in bestimmten Spektralbändern (Bildreihe oben), können wir seine Entfernung und damit sein Alter abschätzen. Die Explosion ereignete sich vor etwa 13,1 Milliarden Jahren, als das Universum nur etwa 5 Prozent seines jetzigen Alters hatte.

Fast jeden Tag werden die Astronomen Zeuge gewaltiger Explosionen, die irgendwo im Universum stattfinden. Diese Explosionen dauern nur ein paar Sekunden und sind besonders im Gammabereich sichtbar. Diese Blitze – die so genannten „Gamma Ray Bursts“ oder GRBs – sind dramatische Ereignisse: Sie sind die hellsten Leuchtfeuer im Universum und noch aus sehr großen Entfernungen sichtbar. Aufgrund ihrer enormen Leuchtkraft stellen GRBs regelmäßig Entfernungsrekorde auf.

Oft beobachtet man bei diesen GRBs ein Nachglühen bei Röntgen-, optischen und Infrarot-Wellenlängen. Wahrscheinlich ist es entweder die Explosion eines massereichen Sterns oder sind es zwei verschmelzende Neutronensterne, die einen GRB auslösen. In beiden Fällen entsteht ein Schwarzes Loch.

➤ Gammastrahlenausbrüche sind die größten Explosionen, die wir im gesamten Universum kennen.



SCHWARZE LÖCHER

Schwarze Löcher – leicht und schwer

Schwarze Löcher sind geheimnisvolle Objekte im All, bei denen die Materie so extrem verdichtet ist, dass die Gravitationskraft an ihrer Oberfläche (bzw. ihrem „Ereignishorizont“) so stark wird, dass nichts – nicht einmal Licht – sie wieder verlassen kann. Der Ereignishorizont ist eine Art „Einbahnstraße“, die nur in eine Richtung befahrbar ist: Licht und Materie können hinein, aber nicht mehr heraus.

Trotzdem leuchten Schwarze Löcher im All oft sehr hell, sie produzieren auf engstem Raum sehr viel Energie. Dies geschieht allerdings knapp außerhalb des Ereignishorizonts, wenn Materie beim Einfall auf das Schwarze Loch ihre Bewegungsenergie abgibt. Dadurch wird die Materie rund um das Schwarze Loch sehr stark aufgeheizt und strahlt hell ins All.

Die Astronomen gehen davon aus, dass Schwarze Löcher unter anderem durch den Zusammenbruch eines sehr schweren Sterns am Ende seines Lebens entstehen. Dabei werden die Gravitationskräfte so enorm hoch, dass kein Gegendruck den Zusammenfall aufhalten kann und die Materie sich fast bis zum Unendlichen verdichtet. Bei diesem Szenario entstehen die „leichten“ stellaren Schwarzen Löcher mit Massen zwischen 5 bis 20 Mal der Masse unserer Sonne. Vermutlich verhindern Quanteneffekte auf sehr kleinen Skalen aber den Zusammenbruch auf ein „Null-Volumen“.

Der Stern Eta Carinae ist mit etwa 100 Sonnenmassen einer der massereichsten Sterne der Milchstraße. Er wird voraussichtlich in einer Hypernova explodieren und dabei ein Schwarzes Loch erzeugen. Das Bild, aufgenommen vom ESO VLT, zeigt den instabilen Stern im nahen Infraroten.



Künstlerische Darstellung eines engen Doppelsternsystems, bestehend aus einem normalen Stern und einem Schwarzen Loch. Das Schwarze Loch sammelt die abfließende Materie des normalen Sterns in einer Akkretionsscheibe. Diese leuchtet hell auf bevor die Materie über den Ereignishorizont im Schwarzen Loch verschwindet.

SCHWARZE LÖCHER

Künstlerische Darstellung des Zentrums einer Aktiven Galaxie, eines Quasars. Ein massereiches Schwarzes Loch mit vielleicht 1 Milliarde Sonnenmassen verschlingt die Materie im Galaxienzentrum und erzeugt dabei die typischen Quasareigenschaften.

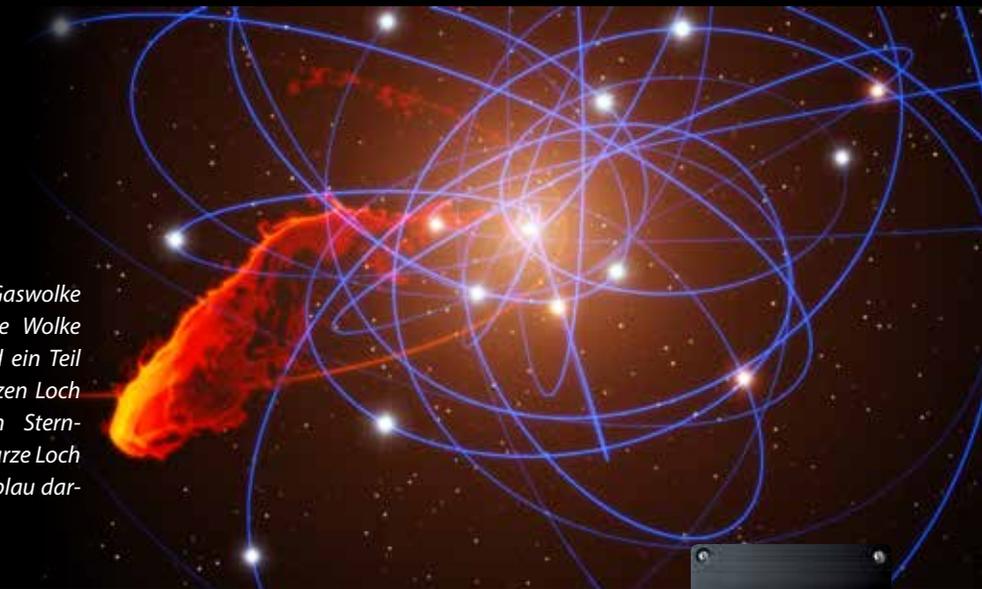
In den Zentren von Galaxien gibt es super-massereiche Schwarze Löcher, mit Massen von einer Million bis zu einigen Milliarden Sonnenmassen. Ihre Entstehungsgeschichte ist derzeit noch nicht sicher geklärt. Man geht allerdings davon aus, dass die ersten Sterne im Universum oft sehr massereich waren, sich schnell entwickelten und in einer Hypernova-Explosion die ersten Schwarzen Löcher erzeugten. Diese akkretierten die umgebende Materie, zum Beispiel ganze Sterne oder auch Gas und Staub. Dadurch sind sie im Laufe der kosmischen Entwicklung auf ihre aktuelle Masse angewachsen.

Am MPE ist die Erforschung von Schwarzen Löchern ein wichtiges Thema. Wir beschäftigen uns generell mit dem Nachweis von Schwarzen Löchern, vermessen aber auch die Eigenschaften von sowohl stellaren als auch massereichen Schwarzen Löchern.

Simulationen eines Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße, Sgr A, und des akkretierten Gases darum. Das (nicht sichtbare) Schwarze Loch verzerrt die Raumzeit und damit wird das Licht vom Gas hinter dem Schwarzen Loch abgelenkt. Zusammen mit dem Dopplereffekt durch die Bewegung des Gases auf dem Beobachter zu entsteht die charakteristische, hier sichtbare Bogenform.*



Simulation der Bahn einer Gaswolke im galaktischen Zentrum. Die Wolke nähert sich dem Zentrum und ein Teil ihrer Masse wird vom Schwarzen Loch verschluckt. Die gemessenen Sternbahnen um das zentrale Schwarze Loch in unserer Milchstraße sind in blau dargestellt.



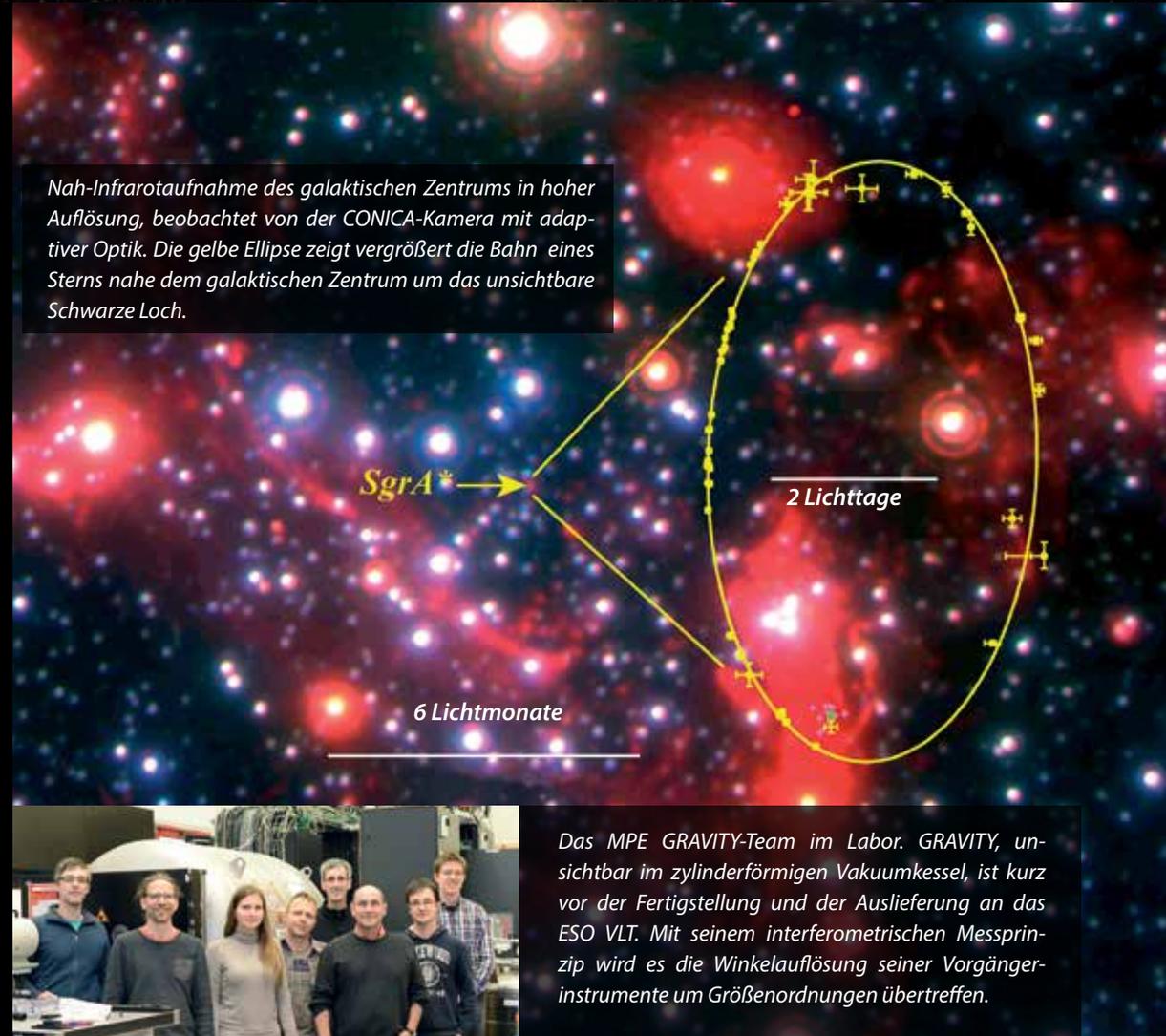
SCHWARZE LÖCHER

Das galaktische Zentrum – ein einzigartiges Labor

Der nächstgelegene galaktische Kern ist das Zentrum unserer Milchstraße, das „nur“ etwa 25.000 Lichtjahre entfernt ist. Seine relative Nähe ermöglicht es uns, die physikalischen Prozesse in der Umgebung eines extrem massereichen Schwarzen Lochs genau zu untersuchen. Unsere Forschung konzentrierte sich dabei zunächst darauf, die Existenz des Schwarzen Lochs nachzuweisen, später darauf dessen Eigenschaften zu bestimmen. Seit 1992 beobachten wir deshalb das galaktische Zentrum regelmäßig im Nah-Infrarotbereich mit hoher räumlicher Auflösung; zu Design und Bau der hierfür nötigen Instrumente für die ESO-Teleskope leistete das MPE einen erheblichen Beitrag.

Indem wir die Positionen der Sterne nahe dem galaktischen Zentrum mit extrem hoher Präzision vermessen haben, konnten wir zeigen, dass sie sich auf Keplerbahnen um eine zentrale Masse bewegen, die etwa vier Millionen Mal „schwerer“ ist als unsere Sonne. Der innerste Stern nähert sich dieser zentralen Masse dabei auf bis zu 18 Lichtstunden – ungefähr vier Mal die Neptunbahn um die Sonne. Ein Schwarzes Loch stellt die einzige realistische Erklärung für eine derart hohe aber unsichtbare Massendichte dar und bildet damit den bisher zuverlässigsten Hinweis, dass Schwarze Löcher tatsächlich existieren. Für dieses wissenschaftliche Ergebnis bekam Prof. Reinhard Genzel 2012 den Crafoord-Preis in Astronomie von der Königlich Schwedischen Akademie der Wissenschaften verliehen.

Um das galaktische Zentrum zukünftig noch sehr viel genauer zu vermessen, entwickelt das MPE derzeit das GRAVITY-Instrument. Es wird das Licht der vier VLT-Teleskope als Interferometer zusammen führen und damit eine sehr viel bessere Winkelauflösung ermöglichen. GRAVITY wird uns einen Blick auf den Ereignishorizont des Schwarzen Lochs erlauben, so dass wir die Gravitationskraft besser erforschen können. Insbesondere werden wir das quasiperiodische Aufflackern im Nah-Infrarotlicht in dieser zentralen Region detailliert vermessen können und so die Grenzen der Allgemeinen Relativitätstheorie ausloten.



Nah-Infrarotaufnahme des galaktischen Zentrums in hoher Auflösung, beobachtet von der CONICA-Kamera mit adaptiver Optik. Die gelbe Ellipse zeigt vergrößert die Bahn eines Sterns nahe dem galaktischen Zentrum um das unsichtbare Schwarze Loch.

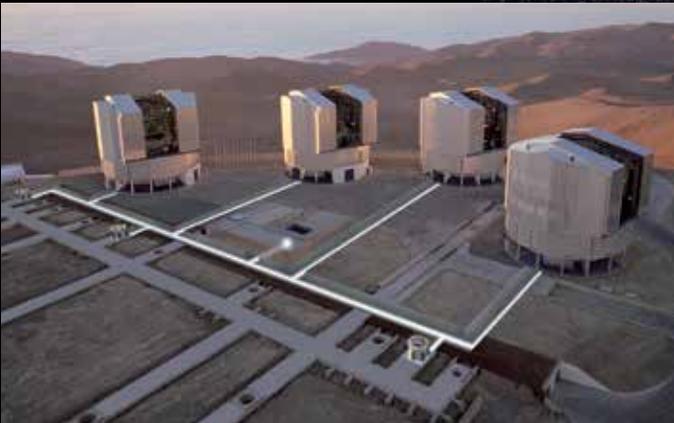
Sgr A*

2 Lichttage

6 Lichtmonate

Das MPE GRAVITY-Team im Labor. GRAVITY, unsichtbar im zylinderförmigen Vakuumkessel, ist kurz vor der Fertigstellung und der Auslieferung an das ESO VLT. Mit seinem interferometrischen Messprinzip wird es die Winkelauflösung seiner Vorgängerinstrumente um Größenordnungen übertreffen.

SCHWARZE LÖCHER



Das GRAVITY-Instrument wird die vier hier gezeigten VLT-Teleskope der ESO nutzen, um interferometrische Aufnahmen mit bisher unerreichter Winkelauflösung zu machen.



SCHWARZE LÖCHER



„Fortschritt wird von Experimenten vorangetrieben. Mit modernen Kameras können wir den Schleier lüften, der das galaktische Zentrum vor unseren Blicken verhüllt.“

Reinhard Genzel, MPE-Direktor und Leiter der Gruppe Infrarot- und Submillimeter Astronomie

SCHWARZE LÖCHER

Aktive Galaxienkerne – Monster im All

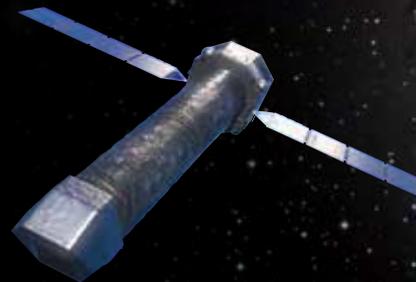
Einige Galaxien haben sehr helle Zentren und ändern zudem noch ständig ihre Helligkeit, die so genannten „Aktiven Galaxien“. Sie können bis zu einer Billion Mal leuchtkräftiger sein als unsere Sonne. Für diese Aktivität ist das zentrale Schwarze Loch verantwortlich, das mit seiner enormen Gravitationskraft Materie aus seiner Umgebung anzieht, in einer Akkretionsscheibe sammelt und schließlich „auffrisst“. Dabei emittieren diese Objekte eine messbare Strahlung oft über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg, von Radio- bis hin zu Gammawellenlängen.

Viele der dabei auftretenden Phänomene, wie beispielsweise die Form sowie die Heizung der Akkretionsscheiben oder die Plasma-Jets, die mit fast Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen werden, sind immer noch rätselhaft. Die Forscher am MPE versuchen mit den derzeitigen Satellitenmissionen im Röntgen- und Gammabereich, Chandra, XMM-Newton und Fermi, einen Einblick in diese Phänomene der Akkretionsphysik zu gewinnen.

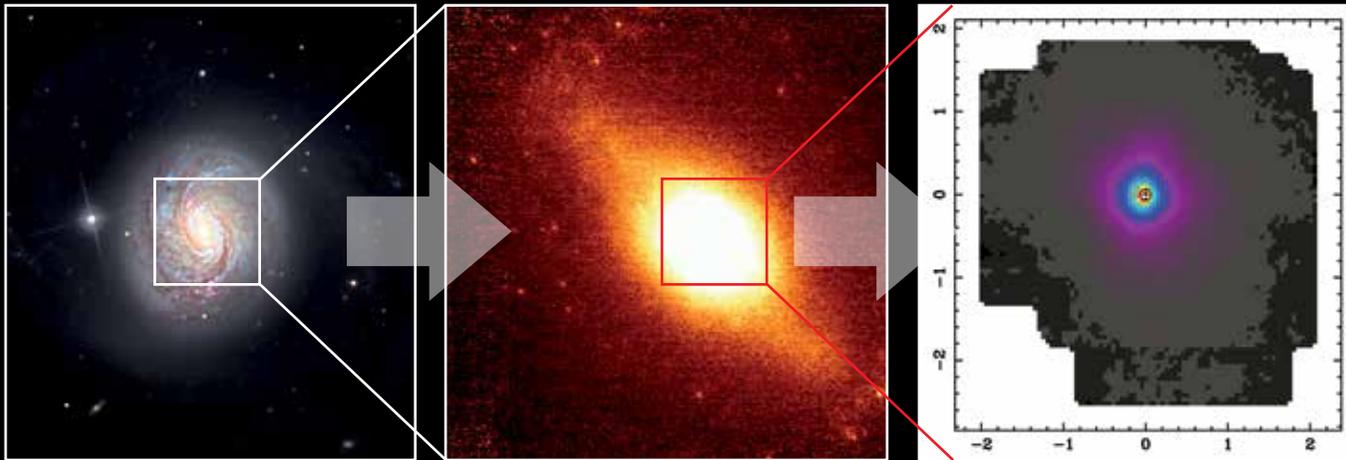
Mit dem zukünftigen Röntgenobservatorium ATHENA, dem viel empfindlicheren Nachfolger der derzeitigen Röntgenteleskope, sollen dann auch die Aktiven Galaxien in der Frühzeit des Universums vermessen werden. ATHENA soll nicht nur die ersten Schwarzen Löcher im Universum beobachten, sondern auch erforschen wie sie wachsen und wie sie das sich entwickelnde Universum beeinflussen.

Dieses zusammengesetzte Bild aus Aufnahmen in mehreren Wellenlängenbereichen (Radio, optisch, Röntgen) zeigt die aktive Galaxie Centaurus A. Die Jets, die vom Schwarzen Loch im Zentrum ausgestoßen werden und weit aus der Galaxie herausragen, sind klar zu erkennen.

➔ Die Vorgänge in Galaxien werden durch die Aktivitäten ihrer zentralen Schwarzen Löcher beeinflusst.



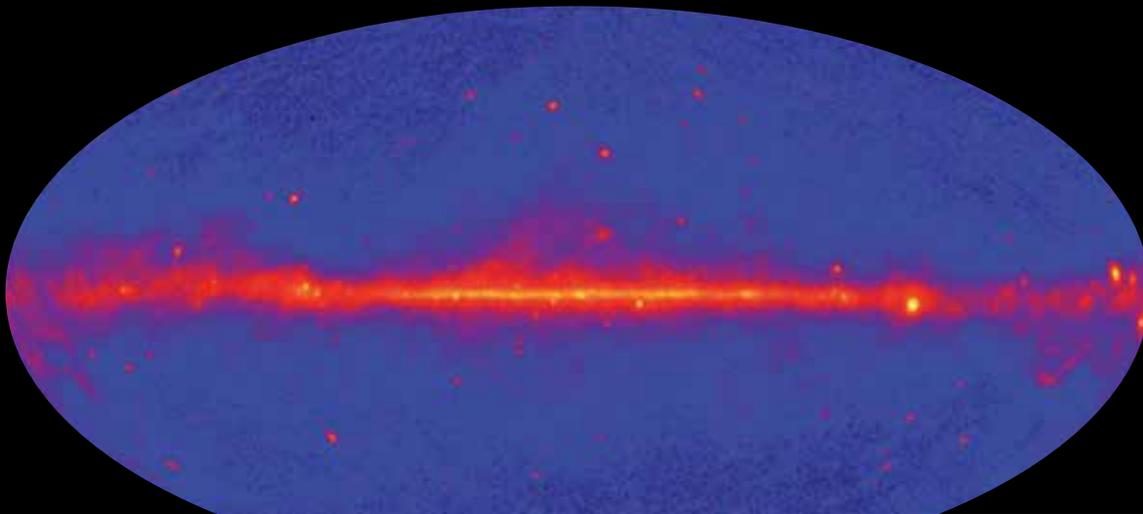
Künstlerische Darstellung von ATHENA. Über die gemessene Röntgenemission lassen sich die Eigenschaften der zentralen Schwarzen Löcher in aktiven Galaxien ableiten.



Ein Zoom in das innerste Zentrum der aktiven Galaxie NGC 1068, im optischen (links) und nah-infraroten Spektralbereich (Mitte, rechts). Um den aktiven Kern zu beobachten (rechts), sind die VLT-Teleskope und die hohe Auflösung der SINFONI-Kamera, entwickelt am MPE, nötig.

Oft sind die Zentren von Galaxien aber auch hinter dicken Staubwolken versteckt, die uns den direkten Blick darauf verwehren. Mit „Infrarotaugen“ kann man allerdings diesen Staub durchdringen und ins Herz eines aktiven Galaxienkerns blicken. Dies eröffnet uns einzigartige Einblicke, welche Prozesse bei der Erzeugung der zentrumsnahen Strahlung eine wichtige Rolle spielen.

Beobachtungen mit Observatorien auf der Erde, wie dem VLT mit den Instrumenten SINFONI und in Zukunft insbesondere auch GRAVITY, liefern uns außerordentlich detaillierte Bilder des aktiven Kerns und damit auch vom Akkretionsfluss. Das Zusammenspiel von Gas und Sternen wird sichtbar, und man erkennt, welchen Einfluss es auf die „Heizung“ der Galaxienzentren hat. Indem wir die Bewegung der Sterne in den Zentren von Galaxien messen, können wir ihr Schwarzes Loch „wiegen“ – ein wichtiger Schritt um zu verstehen, wie das Schwarze Loch und seine Muttergalaxie gemeinsam wachsen und sich entwickeln.



Aktive Galaxienkerne senden uns hochenergetische Gammastrahlung aus den Tiefen des Universums; in dieser vollständigen Himmelsaufnahme beobachtet vom Fermi-Weltraumteleskop sind sie als Punktquellen ober- und unterhalb der diffusen Gammastrahlung entlang der galaktischen Scheibe zu erkennen. Die Quellen auf oder nahe der galaktischen Scheibe sind größtenteils Objekte der Milchstraße, fast alles Pulsare, das heißt rotierende Neutronensterne.

GALAXIEN

Galaxien – Welteninseln aus Sternen, Staub und Gas

Blicken wir in einer klaren Nacht zum Himmel, so sehen wir nicht nur Sterne und Planeten, sondern auch ein schwach schimmerndes Band, das sich über den gesamten Himmel erstreckt: die Milchstraße. Das ist unsere Heimat im Universum, eine Spiralgalaxie mit etwa 200 Milliarden Sternen. Die Sonne ist darin ein eher durchschnittlicher Stern, der in einem Abstand von 25000 Lichtjahren in etwa 200 Millionen Jahren einmal das Zentrum unserer Milchstraße umläuft.

Galaxien sind wunderschöne und eindrucksvolle Welteninseln, die hauptsächlich aus Sternen, Staub und Gas bestehen und meist in Halos aus Dunkler Materie eingebettet sind. Es gibt sie in allen möglichen Größen und Formen, von Zwerggalaxien mit wenigen tausend Sternen bis zu gigantischen elliptischen Galaxien mit 100 Billionen Sternen. Jede Galaxie ist einzigartig und ihre Form, Größe und Masse geben uns Hinweise darauf, wie sie entstanden ist und sich seit den Anfängen des Universums bis heute entwickelt hat.

Die Wissenschaftler am MPE studieren Galaxien über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg, sowohl in unserer kosmischen Nachbarschaft als auch im fernen Universum, wodurch wir quasi in die Vergangenheit blicken können. Sie suchen Antworten auf wichtige Fragen: Wie und wann sind Galaxien entstanden und verläuft ihre Entwicklung? Warum sind scheibenförmige Spiralgalaxien richtige Sternfabriken, wohingegen in massereichen, elliptischen Galaxien kaum neue Sterne entstehen?

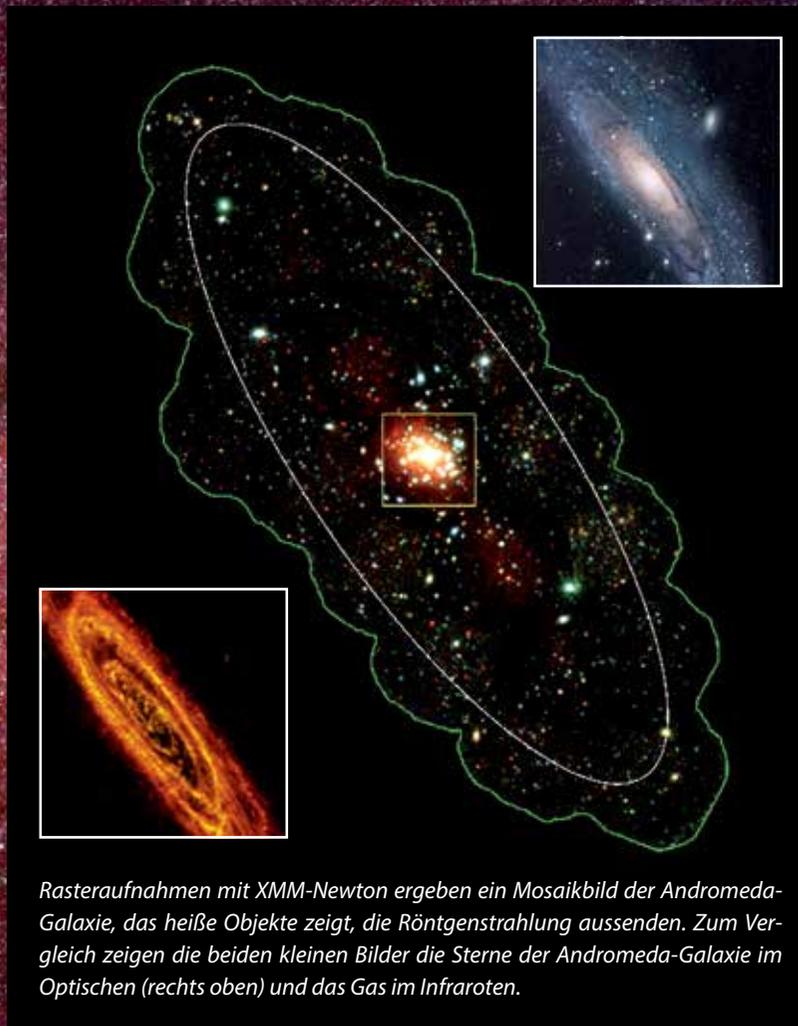
Ein besonders spannendes Forschungsgebiet für die Wissenschaftler am MPE sind auch die massereichen Schwarzen Löcher in den Zentren der Galaxien. Wenn diese Schwarzen Löcher Materie aus der Umgebung an sich ziehen und verschlucken werden ihre Muttergalaxien „aktiv“, sie verändern ständig ihre Helligkeit.

Messier 101 ist eine Spiralgalaxie, die ungefähr 15 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Unsere Galaxie, die Milchstraße ist ebenfalls eine Spiralgalaxie, ähnlich wie diese.

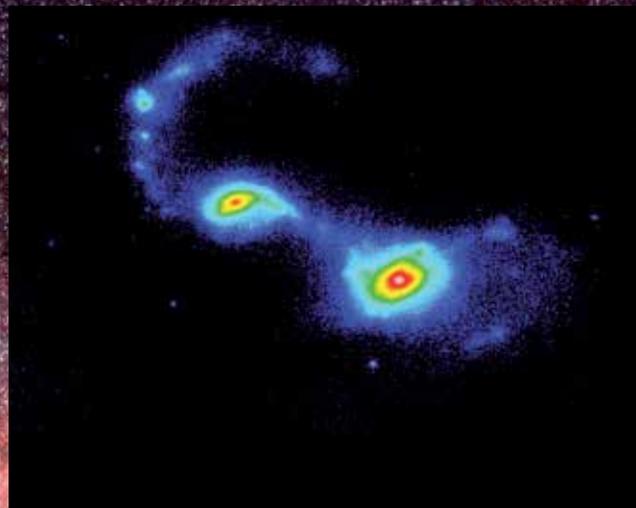
Die Galaxien NGC 4567 und 4568, die „Siamesischen Zwillinge“, sind zwei zusammenprallende Galaxien im Virgo-Haufen, etwa 50 Millionen Lichtjahre entfernt.

GALAXIEN

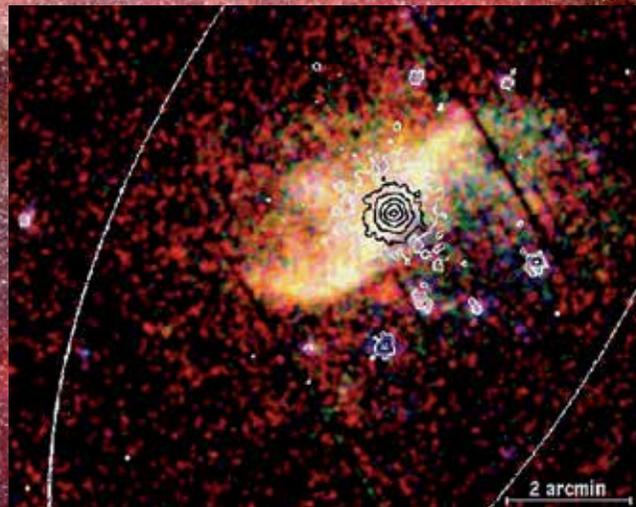
GALAXIEN



Rasteraufnahmen mit XMM-Newton ergeben ein Mosaikbild der Andromeda-Galaxie, das heiße Objekte zeigt, die Röntgenstrahlung aussenden. Zum Vergleich zeigen die beiden kleinen Bilder die Sterne der Andromeda-Galaxie im Optischen (rechts oben) und das Gas im Infraroten.



Die Galaxienverschmelzung IRAS 06035-7101, die im Infraroten ultra-leuchtkräftig ist. Das Bild wurde aufgenommen in sehr hoher Auflösung mit der ESO NACO-Kamera und PARSEC, dem Laserleitsternsystem des MPE. Verschmelzende Galaxien lösen sehr intensive Sternentstehung aus und sorgen so für sehr helle Objekte.



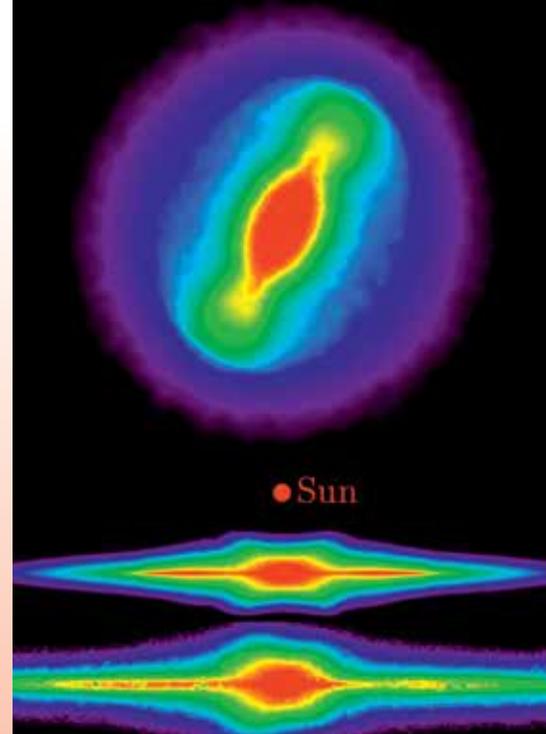
Die aktive Galaxie NGC 4258, wie sie mit XMM-Newton im Röntgenlicht beobachtet worden ist. Diese Falschfarbenaufnahme zeigt die weiche Röntgenstrahlung insbesondere im Zentralbereich. Die Konturen deuten die harte Röntgenstrahlung an, die hauptsächlich vom aktiven Kern im Zentrum ausgesendet wird. Die weiße Linie zeigt die optische Größe der Galaxie.

Nahe Galaxien – Fallstudien für Galaxienphysik

In nahen Galaxien können wir viele Details erkennen, die bei weit entfernten Galaxien für unsere Teleskope unsichtbar – nicht auflösbar – sind. Um den Aufbau und die Struktur von Galaxien detailliert zu erforschen, beobachten wir deshalb regelmäßig unsere Nachbargalaxien, aber auch die Nächste von allen, unsere eigene Galaxie, die Milchstraße.

Obwohl das Zentrum unserer Milchstraße „nur“ etwa 25000 Lichtjahre entfernt ist, kennen wir den Aufbau ihrer Innenbereiche nur unvollkommen. Dichte Gas- und Staubwolken verhüllen nämlich die Sicht auf das Zentrum. Verschiedene Durchmusterungen unserer Milchstraße im Nahinfrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums, wo die galaktischen Staubwolken durchsichtiger sind, erlaubten die Positionen und Entfernungen von Millionen von roten Riesensternen zu bestimmen. Mit diesem Datensatz konnten wir die innere Region unserer Milchstraße dreidimensional vermessen und vollständige Karten erstellen, sowohl von ihrer zentralen Verdickung, dem so genannten galaktischen Bulge, als auch dem länglichen Balken durch ihr Zentrum.

Im Gegensatz zur früheren Ansicht, dass Bulge und Balken zwei unterschiedliche Komponenten unserer Galaxis sind, zeigt es sich nun, dass sie der innere und der äußere Teil ein und derselben Struktur sind, die in der Seitenansicht eine „erdnussartige“ Form hat. Der Balken liegt genau in der mittleren Ebene unserer Milchstraße und ist länger und flacher als bisher angenommen. Dies deutet darauf hin, dass die Milchstraße einst eine reine Sternscheibe war, die vor Milliarden von Jahren einen flachen Balken ausbildete. Die neue Karte unserer inneren Milchstraße kann man nun nutzen, um die Dynamik und Entwicklung unserer Milchstraße zu erforschen, zum Beispiel den Einfluss des Balkens auf die Bahnen der Sterne in Sonnennähe.



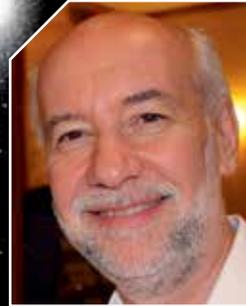
Das Bild oben zeigt das neue Milchstraßenmodell in Aufsicht. Der zentrale Bulge und der längere Balken sind als zusammenhängende Struktur erkennbar, die eine erdnussartige Form hat. Das mittlere Bild zeigt das Modell in der Seitenansicht, das untere Bild von der Sonne aus gesehen.



Die Milchstraße über einem ESO-Teleskop in Chile. Ihr Sternenband erstreckt sich über das gesamte Bild. Man kann deutlich die galaktische Scheibe und die verbreiterte Zentralregion erkennen, den so genannten galaktischen Bulge. Die dunklen Regionen entstehen durch die Staub-Absorption von Sternenlicht.

Ein Modell unserer Milchstraße, mit den Spiralarmen in der Scheibe und dem hellen galaktischen Bulge, den Milliarden von Sternen in der Zentrumsregion.

GALAXIEN



„Galaxien sind die Grundbausteine des Universums. Hier bilden sich Sterne und Planeten und in ihren Zentren finden wir sehr massereiche Schwarze Löcher – die extremsten Objekte, die wir kennen. Galaxien verraten uns aber auch etwas über die Dunkle Materie und die Dunkle Energie.“

Ralf Bender, MPE-Direktor und Leiter der Gruppe Optische und Interpretative Astronomie

Ein weiteres wichtiges Studienobjekt ist vor allem unsere große Schwestergalaxie in der lokalen Galaxien-Gruppe, die Andromeda-Galaxie. Spektroskopische Messungen verraten dabei etwas über die Bewegungsmuster von Sternen und Staub. So wissen wir beispielsweise, dass die Rotationsgeschwindigkeit von Andromeda bis zu zweihundert Kilometer pro Sekunde beträgt und dass sich Andromeda und Milchstraße aufeinander zu bewegen – in etwa 4 Milliarden Jahren werden die beiden Galaxien „zusammenstoßen“.

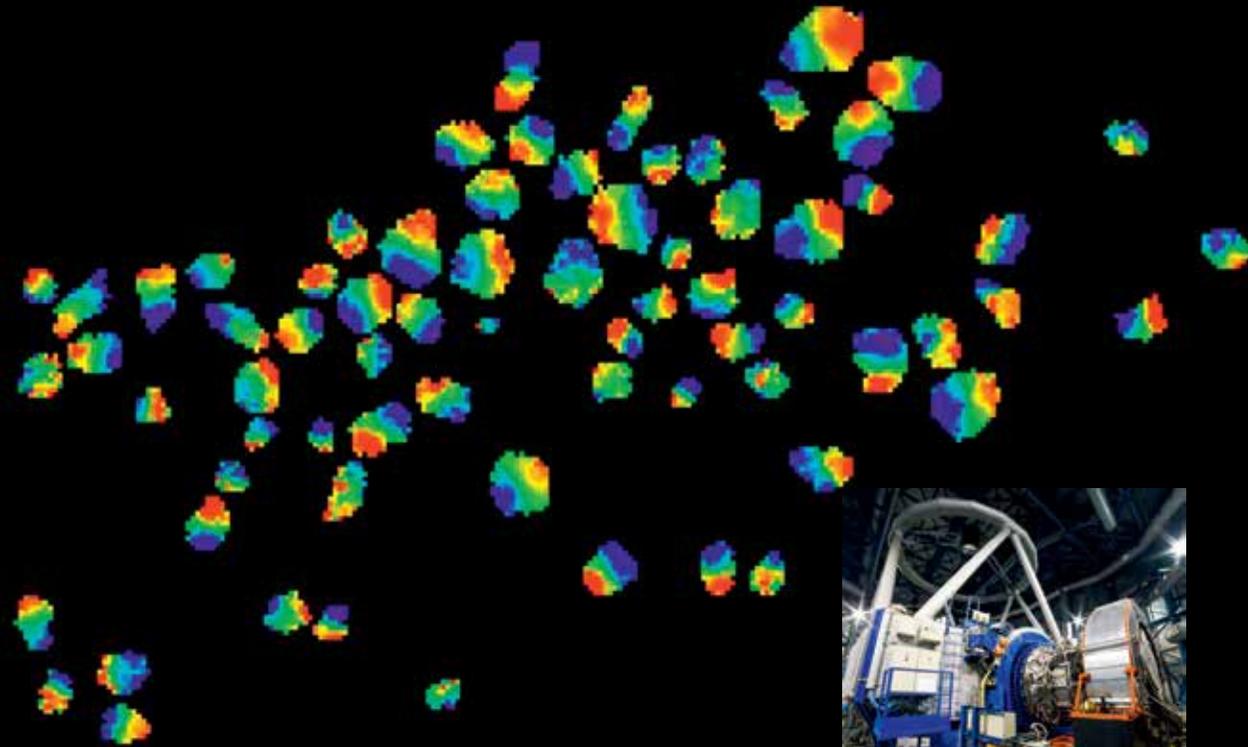
Die mittlere Geschwindigkeit der innersten Sterne, die sich mit mehr als 1000 Kilometer pro Sekunde bewegen, liefert uns die Masse im Zentrum: dort befindet sich ein Schwarzes Loch mit ungefähr 140 Millionen Sonnenmassen. Messungen dieser Art an weiteren nahen Galaxien führten zu einer bedeutenden Entdeckung des 20. Jahrhunderts: wahrscheinlich enthalten alle leuchtstarken Galaxien ein zentrales Schwarzes Loch, das umso größer ist, je massereicher der zentrale Bulge der Galaxie ist. Dieser einfache Zusammenhang legt nahe, dass zwischen der Entwicklung einer Galaxie und der ihres Schwarzen Loches eine Wechselbeziehung besteht. Die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen, ist zurzeit ein heißes Thema bei der Erforschung der Galaxienentwicklung am MPE.

Um die Physik in Galaxien zu verstehen, untersucht das MPE nicht nur unsere eigene Milchstraße sondern auch benachbarte Galaxien, wie die hier gezeigte Andromeda-Galaxie. Die spektroskopische Analyse einzelner Beobachtungsfelder über Andromeda hinweg liefert ihr Geschwindigkeitsfeld. Das Farbspektrum repräsentiert Rotationsgeschwindigkeiten von bis zu 180 Kilometer pro Sekunde. Im blauen Farbbereich rotiert Andromeda auf uns zu, während sie sich im roten Farbbereich von uns weg bewegt.

Höchste Auflösung – ein scharfer Blick auf frühe Galaxien und ihre Entwicklung

Durch Beobachtungen und Simulationen versuchen die Astronomen der Entwicklungsgeschichte von Galaxien näher zu kommen. Heute gibt es große elliptische Galaxien, scheibenförmige Spiralgalaxien sowie irreguläre Galaxien. Mit Präzisionsmessungen bei infraroten, optischen und Röntgen-Wellenlängen trugen MPE-Wissenschaftler dazu bei, die grundlegenden Schritte in der Galaxienentwicklung zu entschlüsseln. Wir wissen, dass sich Galaxien bildeten, wenn sich baryonisches Gas in den Zentren massereicher Halos aus Dunkler Materie aufgrund deren Gravitationskraft ansammelte und abkühlte. Weil dieses Gas einen Drehimpuls mitbrachte, entstanden scheibenartige Protogalaxien schon 500 bis 800 Millionen Jahre nach dem Urknall.

Mit dem KMOS-Spektrographen und den VLT-Teleskopen der ESO können wir heute bis zu 24 Galaxien parallel beobachten und damit viel mehr Galaxien auf kleinsten räumlichen Skalen und in sehr tiefer Vergangenheit vermessen. Dies führt zu einem besseren Verständnis der Entstehung und frühen Entwicklung von Galaxien. Die MPE KMOS-Himmelsdurchmusterung vermisst dabei in einer „Zeitreise“ etwa 1000 weit entfernte Galaxien spektroskopisch, deren Licht zwischen 6 und 11 Milliarden Jahre unterwegs war. Dadurch ergab sich eine Art „Volkszählung“: wie junge Galaxien typischerweise aussehen, welche physikalischen Prozesse wirksam sind und auch wie sie sich entwickeln. Mehr als zwei Drittel der jungen Protogalaxien enthalten sogar schon eine rotierende Scheibe. Die Existenz und die Eigenschaften dieser frühen rotierenden Scheibengalaxien liefern neue Randbedingungen für die Entwicklungsmodelle von Galaxien.



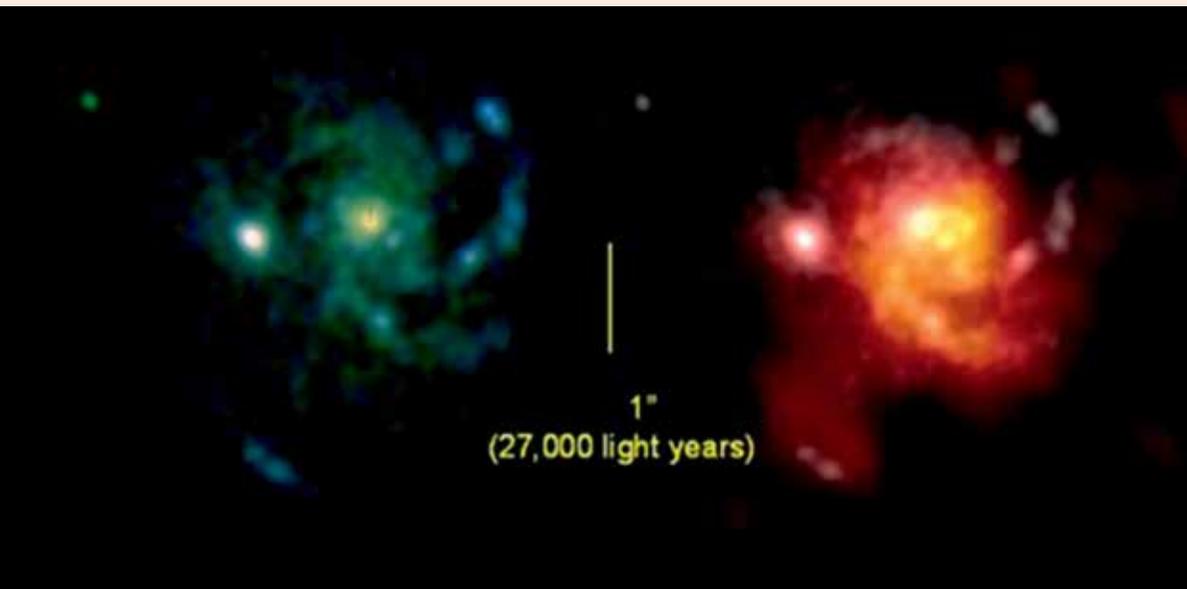
Entfernte Galaxien unter dem Mikroskop: Der Infrarot-Spektrograph KMOS (kleine Bilder) enthüllt die Gasbewegung in frühen Galaxien. Die Farben repräsentieren unterschiedliche Gasgeschwindigkeiten: von blau, sich auf uns zu bewegendes Gas, bis nach rot, sich von uns weg bewegendes Gas. Das weist eher auf rotierende Scheiben hin als auf das turbulente Verschmelzen zweier kleinerer Galaxien. Weiter zeigt es, dass es Scheiben-ähnliche Galaxien wie unsere Milchstraße bereits im frühen Universum gab, nur etwa drei Milliarden Jahre nach dem Urknall.





➤ Junge Galaxien sind die Sternfabriken im frühen Universum – viel produktiver als heute.

Mit anderen Beobachtungen, wie zum Beispiel mit den IRAM Teleskopen in den französischen Alpen, fanden Wissenschaftler am MPE heraus, dass die frühen Galaxien viel mehr molekulares Gas enthielten als Galaxien heute. Dieser Befund erklärt die deutlich erhöhte Sternentstehungsrate im frühen Universum. Während in unserer Milchstraße heute noch etwa 2 bis 3 Sterne pro Jahr entstehen, waren es vor etwa 10 Milliarden Jahren etwa zwanzigmal mehr.



Zwei Ansichten einer typischen Galaxie, etwa 5,5 Milliarden Jahre nach dem Urknall, als das Universum nur etwa 40% seines heutigen Alters hatte. Das molekulare Gas, nachgewiesen vom IRAM-Interferometer (rechtes Bild), folgt der vom Hubble-Weltraumteleskop fotografierten Verteilung der gebildeten Sterne (linkes Bild). Die Masse des kalten Gases in dieser Galaxie ist etwa zehnmal größer als in heutigen Galaxien.



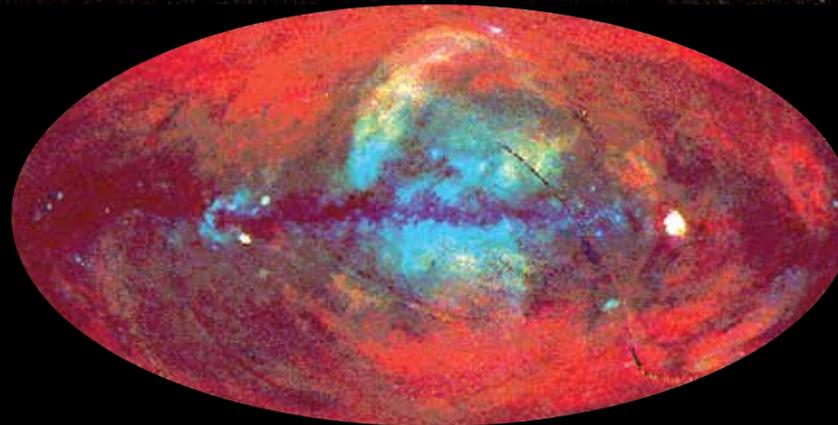
Das Interferometer des Radioastronomischen Instituts im Millimeterbereich (IRAM) am Plateau de Bure. Es befindet sich in den südlichen französischen Alpen in einer Höhe von 2600 Metern.

Der Galaxien-Hintergrund

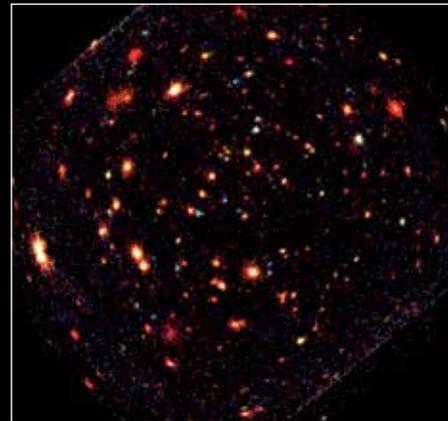
Im Juni 1962 machten amerikanische Astronomen mit einem Röntgendetektor auf einer Höhenforschungsrakete zwei bahnbrechende Entdeckungen, die die Geburt der Röntgenastronomie darstellten: im Sternbild Skorpion fanden sie eine starke Röntgenquelle, und – unerwartet und überraschend – schien der ganze Himmel im Röntgenlicht zu leuchten. Eine geheimnisvolle Strahlung erreicht uns aus allen Richtungen: der Röntgenhintergrund. Seinen Ursprung zu finden wurde zum vorrangigen Ziel der Röntgenastronomie – und das MPE war seit Beginn an vorderster Front dabei.

Der MPE-Röntgensatellit ROSAT, der 1990 in eine Erdumlaufbahn geschossen wurde und das damals empfindlichste Teleskop für weiche (0.1 – 2 keV) Röntgenstrahlung an Bord hatte, löste das Rätsel: 80 Prozent des Röntgenhintergrundes stammte aus einzelnen, punktförmigen Lichtquellen. Diese Entdeckung warf jedoch die Frage auf, welche astronomischen Objekte für diese Strahlung verantwortlich sind. Mit großen optischen Teleskopen wurden die einzelnen Objekte nachbeobachtet und man fand immer so genannte „Aktive Galaxienkerne“. In deren Zentrum wächst ein gewaltiges Schwarzes Loch, indem es Materie aus seiner Umgebung verschlingt und dabei energiereiche Röntgenstrahlung abgibt.

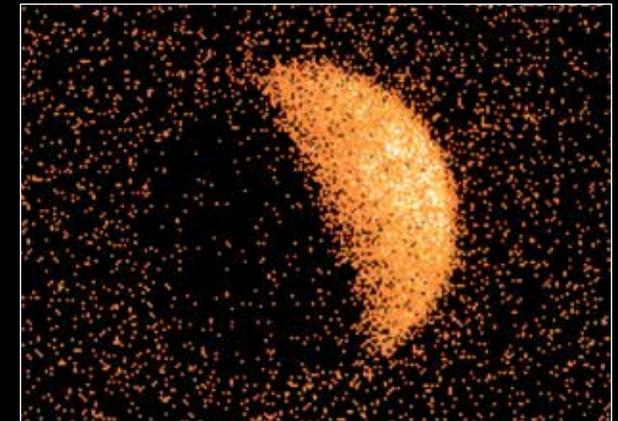
Die heutigen Röntgeninstrumente, XMM-Newton und Chandra, konnten im Bereich der weichen Röntgenstrahlung (bis etwa 2 keV) mittlerweile fast 100 Prozent des Röntgenhintergrundes als einzelne Quellen nachweisen. Bei höheren Energien bis zu 10 keV ist die Situation nach wie vor unklar. Hier sollen die zukünftigen Instrumente, wie der MPE-Satellit eROSITA und das ESA-Röntgenobservatorium ATHENA mit MPE-Beteiligung, eine führende Rolle spielen.



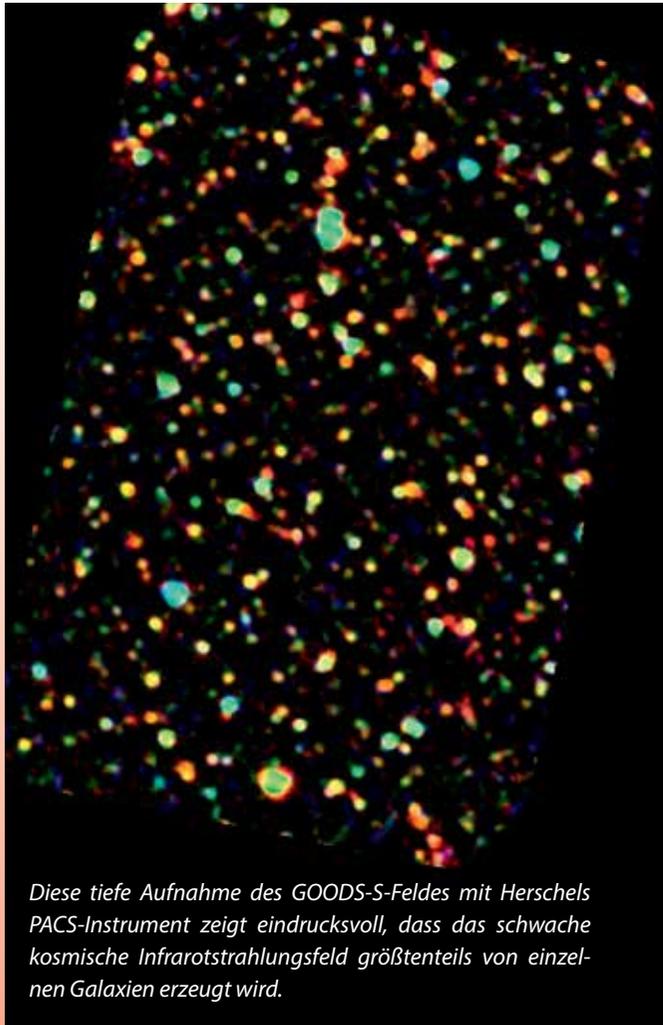
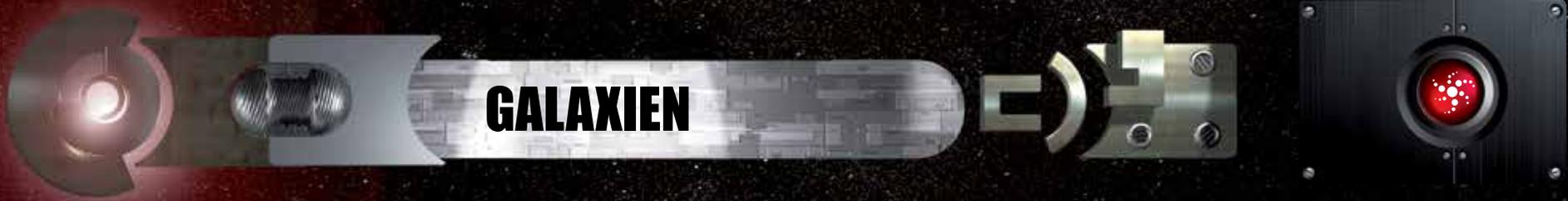
Der diffuse Röntgenhintergrund wie er von ROSAT über den ganzen Himmel gemessen wurde. Die Farben entsprechen unterschiedlichen Röntgenenergien. Das allgegenwärtige rote Leuchten, der extragalaktische Röntgenhintergrund, wurde in einigen kleinen Himmelsregionen wie dem „Lockman-Hole“ in viele einzelne Röntgenquellen aufgelöst.



Tiefe Beobachtungen des „Lockman-Hole“ mit XMM-Newton. Viele Röntgenquellen mit unterschiedlichen Farben, d.h. Temperaturen, sind in der Aufnahme zu erkennen, was insgesamt die Röntgenhintergrundstrahlung ergibt. Die Quellen sind aktive Galaxienkerne in deren Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch Materie verschlingt.



Das Röntgenbild des Mondes, wie es von ROSAT aufgenommen wurde. Die Sonnen-beschienene Hälfte reflektiert – genau wie im optischen Licht – die Röntgenemission der Sonne. Die dunkle Seite der Mondscheibe verdeckt die Röntgenhintergrundstrahlung aus den Tiefen des Alls.



Diese tiefe Aufnahme des GOODS-S-Feldes mit Herschels PACS-Instrument zeigt eindrucksvoll, dass das schwache kosmische Infrarotstrahlungsfeld größtenteils von einzelnen Galaxien erzeugt wird.



Der Herschel-Satellit erforschte mit seinen drei Instrumenten, darunter „PACS“ (Photodetector Array Camera and Spectrometer) vom MPE, den Himmel im Infrarot-Bereich des elektromagnetischen Spektrums. PACS (kleines Bild) analysierte im Brennpunkt des Spiegels die einfallende Infrarotstrahlung.

➤ Der kosmische Hintergrund besteht aus vielen einzelnen Quellen.

Wie im Röntgenbereich schimmert der Himmel aber auch im Infrarotlicht. Von Beginn an war die Vermutung, dass diese Strahlung – wie im Röntgenlicht – von vielen einzelnen, damals nicht auflösbaren Quellen stammte.

Mit Hilfe verschiedener Infrarotweltraumteleskope sind die MPE-Wissenschaftler angetreten um die Natur dieser diffusen Strahlung zu klären. Wie im Röntgenbereich wurden auch im Infraroten ausgewählte Himmelsfelder lange beobachtet um noch einzelne schwache und weit entfernte Objekte nachweisen zu können. Die neusten und besten Ergebnisse erreichten wir mit dem am MPE gebauten PACS-Instrument auf dem Herschel-Satelliten der ESA. PACS lieferte die entscheidende Bestätigung: es konnte etwa 75% des diffusen IR-Hintergrundes in einzelne Galaxien auflösen. Über die nun bekannten Helligkeiten und Abstände – auch zeitlich – dieser Galaxien lässt sich auch die Geschichte der Sternentstehung im Universum nachzeichnen.

Zurück zum Anfang – Großräumige Strukturen und Kosmologie

Im Laufe der letzten zwei Jahrzehnte erarbeiteten sich die Astronomen eine klare Vorstellung davon, wie unser Universum, samt der Milchstraße und unserer Sonne darin, entstand und sich entwickelte: Es begann mit einem Urknall vor etwa 13,8 Milliarden Jahren und dehnte sich gleich am Anfang in einer so genannten „inflationären“ Phase sehr schnell – mit Überlichtgeschwindigkeit – aus. Nach 10^{-30} Sekunden war es so groß wie eine Orange und nach etwa einer tausendstel Sekunde so groß wie unser Sonnensystem. Nach etwa 3 Minuten bildeten sich die ersten Elemente, aus denen etwa 400 Millionen Jahre später die ersten Sterne entstanden. Kleine Galaxien und Schwarze Löcher entstanden in Verdichtungen Dunkler Materie ungefähr eine halbe bis eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, danach wuchsen größere Galaxien und Galaxienhaufen auf kosmischen Zeitskalen. Neben der geheimnisvollen Dunklen Materie gibt es noch die geheimnisvolle Dunkle Energie, eine Art Antigravitation, die das Universum beschleunigt expandieren lässt.

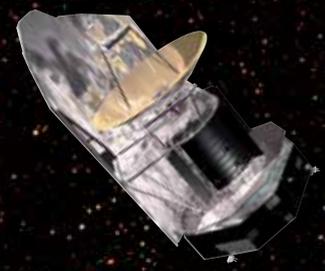
Am MPE vereinen wir die Expertise aus verschiedenen Gruppen, um gemeinsam diese Vorstellung zu überprüfen und einige der Schlüsselfragen der modernen Kosmologie zu beantworten: Wie erhielt das Universum seine gegenwärtige Struktur? Wie und wann wurden die ersten Sterne geboren? Wie und wann bildeten sich Galaxien und großräumige Strukturen? Was sind Dunkle Materie und Dunkle Energie?

Ein Blick außerhalb unserer Galaxie ins tiefe Universum enthüllt seine gegenwärtige Form: Milliarden von Galaxien mit einer riesigen Vielfalt an Formen und Größen. Dieses optische Bild vom Hubble-Weltraumteleskop ist wohlbekannt, aber wir beobachten diese fernen Galaxien jetzt auch bei anderen Wellenlängen...

➔ Tiefe Himmelsaufnahmen erlauben uns einen Blick in die Vergangenheit.



Das zwei Quadratgrad große COSMOS-Feld (Cosmic Evolution Survey) bedeckt eine Himmelsfläche, die etwa zehnmals so groß ist wie der Vollmond. Es befindet sich im Sternbild Löwe und öffnet ein Fenster ins tiefe Universum. Das Feld wird von allen modernen Observatorien von Radio- bis hin zu Röntgenwellenlängen beobachtet und das MPE beteiligte sich an dieser internationalen Kampagne mit Herschel/PACS (links) im fernen Infrarot und mit XMM-Newton (rechts) im Röntgenbereich. Das Infrarotbild zeigt Galaxien in unterschiedlichen Falschfarben: rote Objekte sind weit entfernte oder staubige Galaxien, während blaue Objekte eher nahe Galaxien sind. Das Röntgenbild zeigt aktive Galaxien und diffuse Galaxienhaufen. Analysen der COSMOS-Aufnahmen in verschiedenen Wellenlängen geben den Astronomen Hinweise auf die Entwicklungsgeschichte des Universums.



Galaxienhaufen – Superlative im All

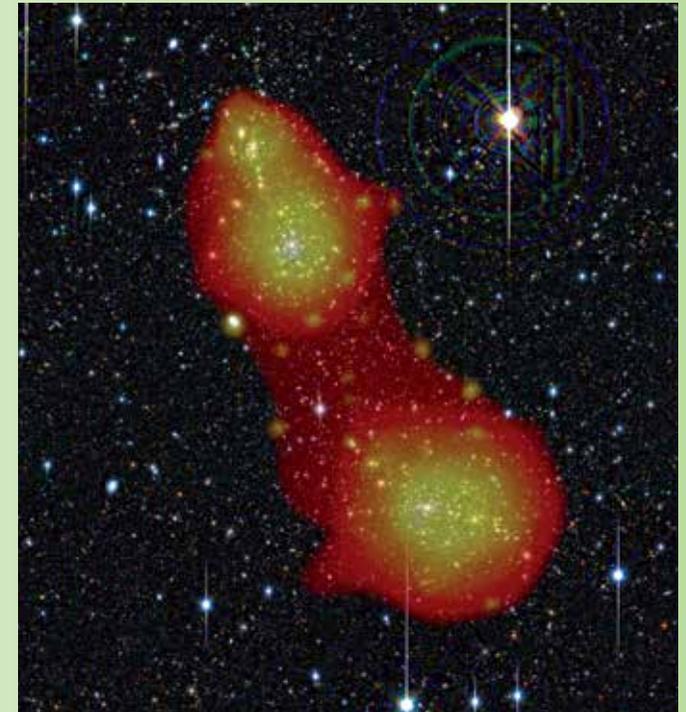
Galaxienhaufen sind die größten klar definierten und voll entwickelten Objekte im Universum; sie umfassen bis zu mehrere tausend Einzelgalaxien. In optischen Bildern sieht man dabei einfach nur eine Ansammlung von Galaxien, Röntgenbeobachtungen allerdings zeigen darüber hinaus die Strahlung eines heißen Gases, das den gesamten Haufen ausfüllt. Dies beweist, dass es sich bei Galaxienhaufen tatsächlich um zusammenhängende Gebilde handelt.

Diese größten Bausteine des Universums stellen wahrhaftige Superlative dar: Ihr im Röntgenbereich strahlendes Plasma hat eine Temperatur von mehreren zehn Millionen Grad und durch ihre riesige Masse krümmen sie mittels des Gravitationslinseneffekts die Lichtstrahlen von Hintergrundgalaxien, was zu stark verzerrten Bildern führen kann. Die Verschmelzung von Galaxienhaufen – ihre typische Art zu wachsen – gehört zu den energiereichsten Vorgängen im Universum. Dabei wird so viel Energie frei wie in einer Billion Supernova-Explosionen.

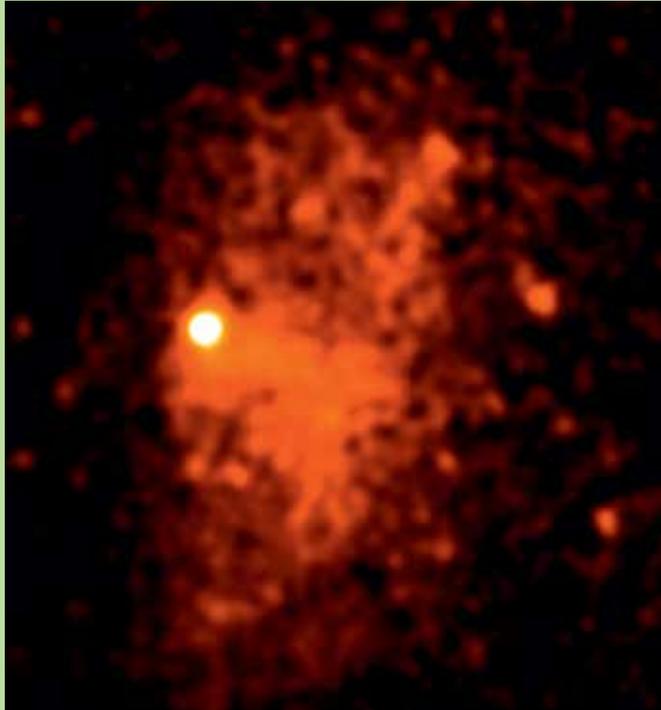
Die Wissenschaftler am MPE untersuchen Galaxienhaufen um mehr über die Verteilung der Materie und den Aufbau des Universums herauszufinden. Mithilfe des Gravitationslinseneffekts können wir die Masse eines Haufens bestimmen und – durch eine detaillierte Analyse – sogar die Massenverteilung im Haufen. Der Gravitationslinseneffekt ist eine der vielversprechendsten Methoden um über die Vermessung der Galaxienhaufen zu bestimmen, wieviel Dunkle Materie in einem Galaxienhaufen vorhanden ist um damit das Verhältnis von dunkler zu leuchtender Materie berechnen zu können.



Zusammengesetztes Bild aus einer optischen (einzelne Galaxien) und Röntgenaufnahmen (diffuse violette Emission) des Galaxienhaufens Abell 383. Die Röntgenemission beweist, dass diese Galaxien gravitativ gebunden sind und damit einen Haufen bilden. Direkt unterhalb des Zentrums zeigt sich ein Kreisbogen, ein typisches Zeichen einer Gravitationslinse.



Eine Brücke aus heißer Materie leuchtet im Röntgenbereich und verbindet die Galaxienhaufen Abell 222 und 223. Dies wurde mit dem Röntgenteleskop XMM-Newton zum ersten Mal beobachtet und zeigt so einen Teil der fehlenden baryonischen Materie im Universum. Die filamentartige Verbindung zwischen den beiden Haufen stützt auch die Theorie, dass die sichtbare Materie den Filamenten der Dunklen Materie folgt.



Röntgenbild eines Galaxienhaufens. Dieses System zeigt die Verschmelzung eines kleinen, kompakten Galaxienhaufens mit dem Haupthaufen. Der kleine dichte Haufen mit seinem hellen Kern durchstößt den weniger dichten Haufen wie ein Projektil.



Das eROSITA-Instrument des MPE wurde speziell dafür entwickelt, den gesamten Himmel mit seinen sieben Röntgenteleskopen abzurastern. Jedes enthält 54 ineinander geschachtelte Spezialspiegel. Sein großes Gesichtsfeld in Verbindung mit seiner hohen Empfindlichkeit für Röntgenstrahlung lässt die genaueste vollständige Himmelskarte im Röntgenbereich erwarten.



„eROSITA wird durch Gas und Staub ins tiefe All blicken. Indem es hunderttausend Galaxienhaufen entdeckt und damit die großräumige Struktur des Universums kartographiert, könnte es sogar die Geheimnisse der Dunklen Energie aufdecken. Desweiteren wird es Millionen von wachsenden Schwarzen Löchern beobachten.“

Kirpal Nandra, MPE-Direktor und Leiter der Gruppe Hochenergie-Astrophysik



Das Schicksal des Universums – Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Sterne in Galaxien und einzelne Galaxien in Haufen bewegen sich viel zu schnell, als dass die sichtbare Masse diese Gebilde zusammenhalten könnte. Da alle Bewegungen im All durch die Gravitation bestimmt werden, und diese durch Materie bewirkt wird, muss es also noch eine große Menge an unsichtbarer Materie geben – die so genannte „Dunkle Materie“. Sie gibt es in zwei Arten: als nicht-baryonische Materie in Form von exotischen Teilchen und in Form von baryonischer Materie als dunkle Himmelskörper. Wir schätzen, dass es insgesamt etwa fünfmal mehr nicht-baryonische als baryonische Materie im Universum gibt, wobei von dieser baryonischen Materie nur ein kleiner Teil sichtbar ist, z.B. als leuchtende Sterne.

Das MPE beteiligt sich aktiv an der Suche nach der Dunklen Materie. Die wichtigste Methode dafür ist der „Gravitationslinseneffekt“, durch den ein Lichtstrahl von einem Objekt mit Masse abgelenkt wird. So verzerren zum Beispiel Galaxienhaufen das Bild eines Hintergrundobjekts, woraus sich ihre Gesamtmasse berechnen lässt. Damit kann nun – über den Vergleich zur leuchtenden Materie – ihr dunkler Massenanteil bestimmt werden.

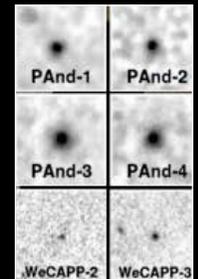
In nahen Galaxien können wir die Bewegung der Sterne verfolgen und daraus schließen, dass die Galaxien in Halos von Dunkler Materie eingebettet sind. Es bleibt die grundlegende Frage, welcher Art die Dunkle Materie ist, nichtbaryonische exotische Teilchen oder kompakte dunkle baryonische Objekte. Da der Gravitationslinseneffekt einen Stern kurzzeitig heller erscheinen lässt, wenn ein unsichtbares Objekt genau vor ihm vorbei zieht, beobachten wir regelmäßig in Richtung unserer Nachbargalaxie Andromeda. Ihre unzähligen Sterne erhöhen die Wahrscheinlichkeit ein solch seltenes Ereignis zu beobachten, damit nicht-leuchtende Himmelsobjekte zu finden und ihren Massenanteil an der Dunklen Materie abzuschätzen.

Der massereiche Galaxienhaufen Abell 2218 wirkt wie ein Gravitationsteleskop und lenkt das Licht dahinter liegender Objekte ab. Die bogenförmigen Strukturen sind typische Anzeichen für den Gravitationslinseneffekt.



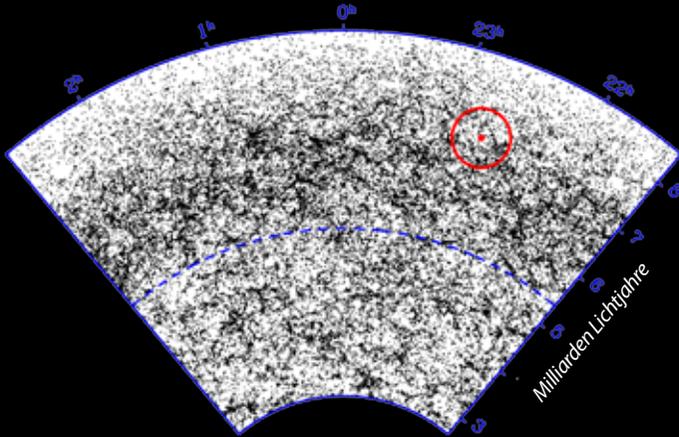
➔ Die Existenz der Dunklen Materie ergibt sich aus der fehlenden Masse in Galaxien und Galaxienhaufen.

Ein Ausschnitt der zentralen Region der Andromeda-Galaxie, aufgenommen mit dem Pan-STARRS Teleskop auf Hawaii. Er zeigt eine 15000 x 16500 Lichtjahre große Region. Die Positionen von 16 gefundenen Gravitationslinsen-Ereignissen sind eingetragen und rechts in deren Maximum gezeigt (Auswahl). Die verantwortlichen Objekte sind vermutlich leuchtschwache „Weiße Zwerge“ oder „Braune Zwerge“.



➤ Die Ausdehnung des Universums beschleunigt sich durch die Dunkle Energie.

Eine Karte der Galaxienverteilung in einem dünnen Schnitt durch den BOSS-Katalog. Jeder Punkt entspricht einer Galaxie. Der rote Kreis zeigt die Länge der baryonischen akustischen Oszillation, der Standard-Messlatte der Kosmologen. Die Wahrscheinlichkeit zwei Galaxien in diesem Abstand zu finden ist etwas höher als bei kleineren oder größeren Entfernungen.



Das 2,5-Meter Teleskop in Neu Mexiko in den USA, mit dem der Nordhimmel im so genannten „Sloan Digital Sky Survey“ nach Galaxien durchmustert wird.



Die ESA-Mission EUCLID soll in 2020er Jahren das „dunkle“ Universum erforschen, die Dunkle Materie und die Dunkle Energie.

Vor etwa 20 Jahren wurden detaillierte Messungen an weit entfernten Supernova-Explosionen durchgeführt um die Veränderung der Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums zu messen. Überraschenderweise stellte sich heraus, dass sich die Ausdehnung nicht verlangsamt sondern dass sich das Universum immer schneller ausdehnt. Ein unbekanntes Phänomen, nun „Dunkle Energie“ genannt, wirkt der Schwerkraft entgegen und beschleunigt so die Ausdehnung unseres Universums.

Die MPE-Wissenschaftler versuchen die Zustandsgleichung der Dunklen Energie, also die Beziehung zwischen Druck und Dichte, als Funktion der Zeit zu bestimmen. Dafür müssen die Astronomen wissen, wie sich das Universum seit dem Urknall ausgedehnt hat. Akustische Wellen, die durch Quantenfluktuationen angeregt wurden, prägten der Dichte des Ur-Plasmas ein Wellenmuster auf. Da sich Galaxien bevorzugt in (überdichten) Wellenbergen und nicht in (dünnere) Wellentälern bildeten, verraten Messungen der räumlichen Verteilung der Galaxien als Funktion der Entfernung etwas über die Ausdehnungsgeschichte des Universums und damit den Einfluss der Dunklen Energie.

Um diese räumliche Verteilung zu bestimmen, beteiligt sich das MPE intensiv an diversen Galaxienkartierungen, die auf großen Teleskopen durchgeführt werden. So zum Beispiel an der BOSS-Durchmusterung (Baryon Oscillation Spectroscopic Survey), die bisher für 1,2 Millionen Galaxien die genaue Position und Rotverschiebung bestimmt hat. Damit lässt sich das Wellenmuster des frühen Universums (bis zu 6 Milliarden Jahre zurück) und die Abstände zu Galaxien sowie ihre Geschwindigkeiten sehr genau berechnen. Der Vergleich mit Werten von nahen Galaxien, die uns das heutige Universum zeigen, erlaubt es den MPE-Wissenschaftlern die Entwicklung des Universums zu „sehen“, so die Eigenschaften der Dunklen Energie einzuschränken und damit deren Geheimnis näher zu kommen.

Eine ähnliche Aufgabe hat auch die zukünftige ESA-Mission EUCLID, an der das MPE ebenfalls beteiligt ist. EUCLID wird die dreidimensionale Verteilung der Galaxien im optischen und nah-infraroten Licht messen und damit die Evolution der kosmischen Strukturen zu noch früheren Zeiten, bis zu 10 Milliarden Jahre zurück, bestimmen. Dadurch wird EUCLID die gesamte Zeitspanne erfassen, in der die Dunkle Energie die Ausdehnung des Universums signifikant beschleunigte.



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Herausgeber:

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE)
Giessenbachstraße
85748 Garching
Telefon: +49 89 30000 - 0
Telefax: +49 89 30000 - 3569
E-Mail: mpe@mpe.mpg.de
<http://www.mpe.mpg.de>

Text und Redaktion:

Werner Collmar, Hannelore Hämmerle

Bildnachweis:

Titelbild: ESO/M. Kornmesser
Alle Bilder MPE mit Ergänzungen von
ESA, ESO, IRAM, NASA, NRAO/AUI/NSF,
dem Sloan Digital Sky Survey,
dem Space Telescope Science Institute,
dem Chandra X-ray Center, Bill Saxton,
Nathan Crockett, Vanessa Laspe und Peter Seiler

Design:

Peter Seiler

Druck:

deVega Medien GmbH

Juni 2015

