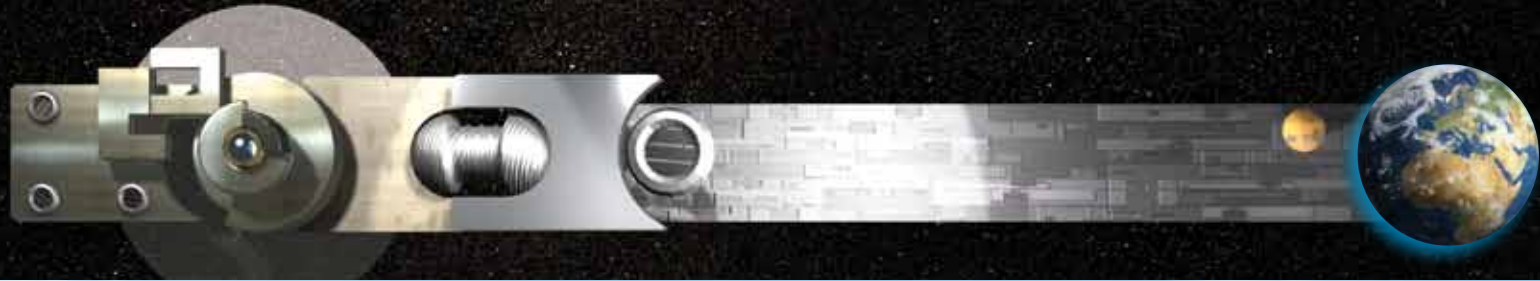




MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK



MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRICHE PHYSIK



INHALTSVERZEICHNIS

| | |
|-------------|---|
| Seite 4-9 | Das Institut |
| Seite 10-11 | Wissenschaft am MPE |
| Seite 12-19 | Bis ins Innerste: Galaxien, Galaxienkerne und superschwere Schwarze Löcher |
| Seite 20-25 | Zurück zum Anfang: Galaxienentwicklung, großräumige Struktur und Kosmologie |
| Seite 26-29 | Der Röntgenhintergrund: Das Rätsel ist gelöst |
| Seite 30-35 | Von der Geburt bis zum Tod: Sternentwicklung und das interstellare Medium |
| Seite 36-41 | Komplexe Plasmen: Ein neuer Materiezustand |
| Seite 42-45 | Wissenstransfer: Forschung für alle |
| Seite 46 | Impressum |





Grundlagenforschung und Weltraumtechnologie

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

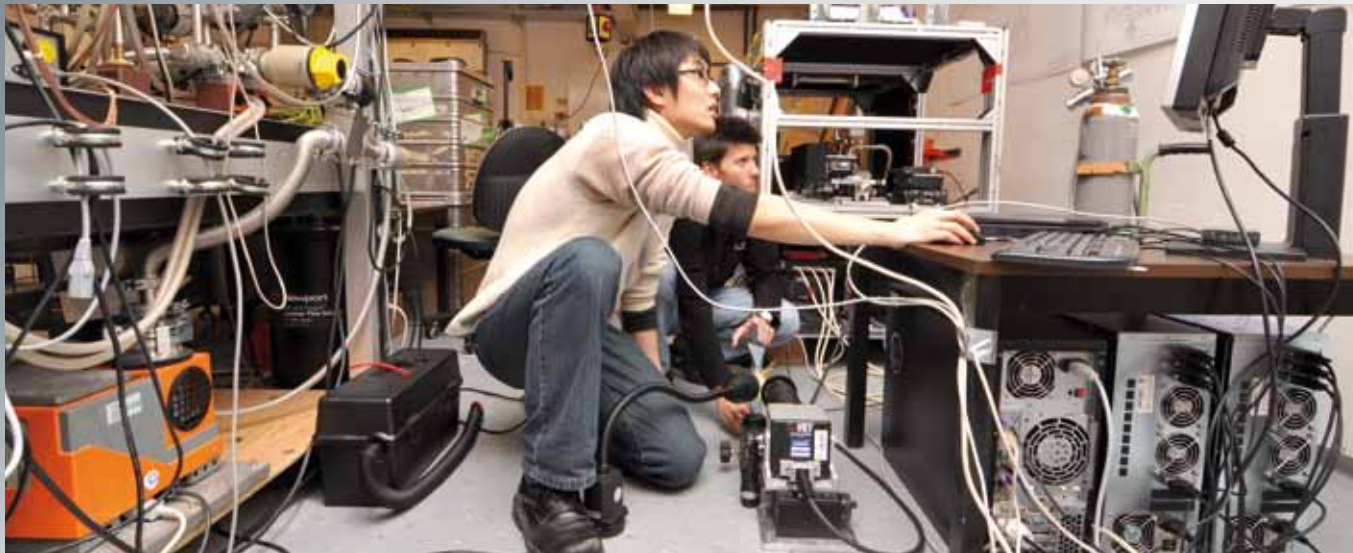
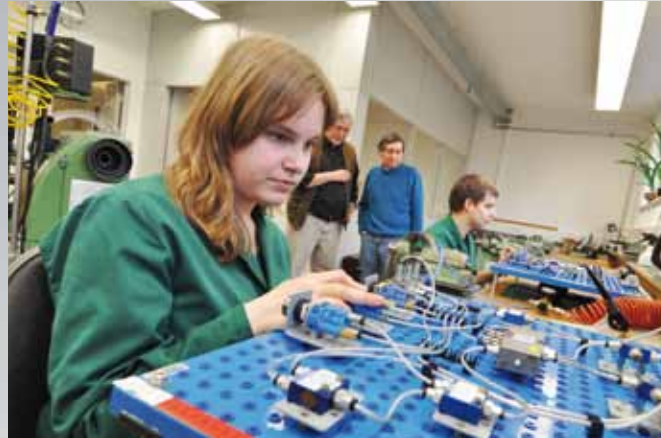
Die Astronomie entwickelte sich in den letzten Jahrzehnten zu einem zentralen Thema der modernen Physik. In keinem anderen Forschungsgebiet hat sich unser Horizont dermaßen schnell erweitert und an keiner anderen physikalischen Disziplin ist die Öffentlichkeit so stark interessiert. Schwarze Löcher, Dunkle Energie, Dunkle Materie, 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 Astro- und Plasmaphysik.

Das Institut ist Teil der größten Ansammlung 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 Plasmaphysik (IPP) und dem Max-Planck-Institut für Quantenoptik (MPQ) stellt der Garchinger Campus eines der größten wissenschaftlichen Zentren der Welt dar.

Die Forschungsfelder am MPE reichen von der Physik und Chemie von Sternen und der Materie dazwischen, über exotische



DAS INSTITUT



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 Theorie. Die MPE-Theoriegruppe begann 1994 mit dem Studium der Plasmaphysik im Labor und ist seitdem die größte nicht-astronomische Gruppe am MPE.

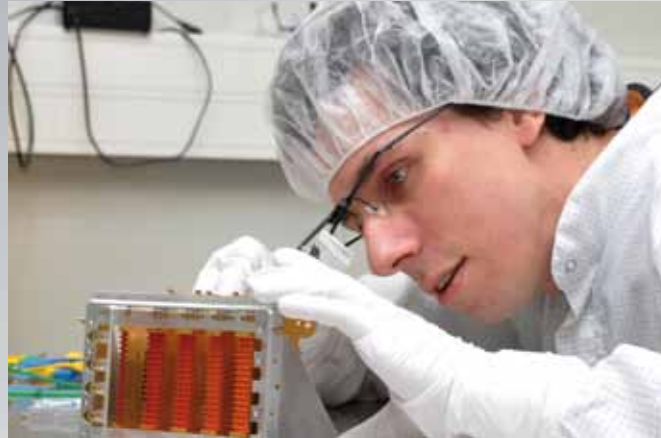
Der Name des MPE leitet sich von den Objekten und Methoden seiner Forschung ab, die anfangs ausschließlich extraterrestrisch waren. Heute wird zwar ein Teil der Arbeiten auf der Erde durchgeführt, entweder in Labors oder mit bodengebundenen Teleskopen, viele Experimente müssen aber außerhalb der Erdatmosphäre 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. 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 2009 gestarteten Herschel-Observatorium – hat heute eine ähnlich große Bedeutung wie ROSAT. Neben seinen Werkstätten und Testanlagen betreibt das MPE, gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Physik, das Max-Planck-Institut Halbleiterlabor zur Entwicklung und zum Bau von Halbleiterdetektoren für die Astronomie. Diese werden inzwischen auch an industrielle Interessenten vertrieben. Da die Entwicklung neuer Instrumentierung oft komplex ist und Zeit braucht, sind viele der Ingenieure und Projektwissenschaftler langfristig oder fest am MPE angestellt. Mit über 400 Angestellten ist das MPE das größte der astronomischen Institute der Max-Planck-Gesellschaft.

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 acht führenden Institutionen der Weltraumforschung; 16 Prozent 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 MPA, der Universitätssternwarte und der ESO. 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. Gefördert durch Stipendien, nehmen etwa 70 Doktoranden an gemeinsamen Kursen teil und verfolgen Forschungsprojekte an den vier Instituten. Die Studenten fertigen ihre Doktorarbeit in einer anregenden Atmosphäre an und können darüberhinaus 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.

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 die Möglichkeit Praktika zu machen 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.

Das MPE professionalisierte seine Öffentlichkeitsarbeit in den letzten Jahren durch die Schaffung einer neuen Stelle – womit sich zum ersten Mal in der Geschichte des Instituts eine hauptamtliche Kraft der Öffentlichkeitsarbeit widmet. Eine der wichtigsten Aufgaben besteht darin, eine breitere Öffentlichkeit als bisher zu erreichen. Regelmäßige „News“ auf der Webseite sowie neue Medien zielen darauf ab, insbesondere junge Menschen anzusprechen und in ihnen die Begeisterung für die Astrophysik zu wecken. Ein großes Projekt war die Kosmologie-Ausstellung im Deutschen Museum in München, die das MPE 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



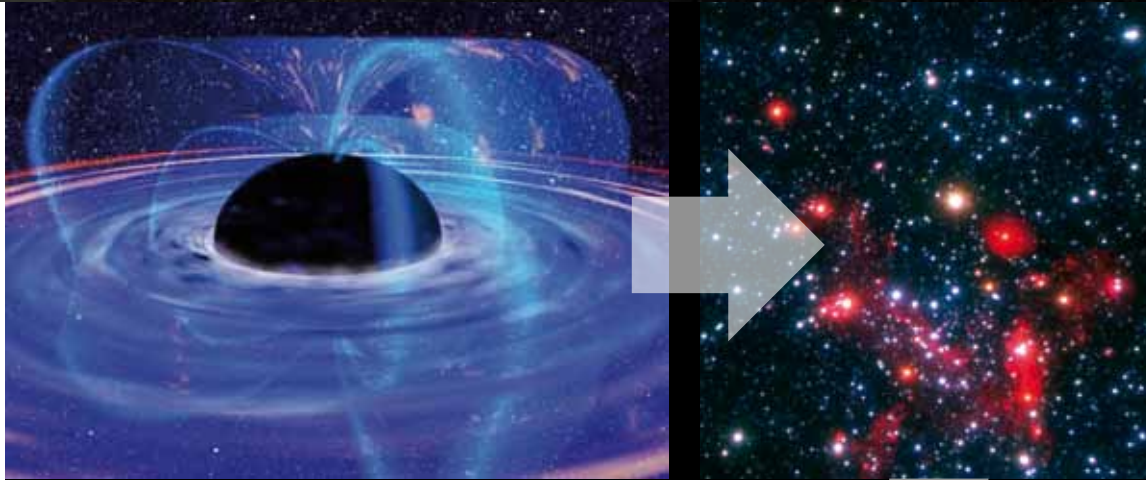
Die weitere Entwicklung des Instituts wird, wie schon bisher, von den ständigen Änderungen der Forschungsgebiete und -instrumente beeinflusst werden. Die beobachtende Astronomie von hohen Energien bis zu optischen und Millimeter-Wellenlängen soll dabei weiterhin die wichtigste Rolle am Institut spielen. Die Untersuchung astronomischer Themen mit Beobachtungen quer über die gesamte Bandbreite des elektromagnetischen Spektrums erhält dabei mehr Gewicht, ebenso wie die auf Beobachtungen aufbauende Theorie. Der Wissenstransfer aus der Wissenschaft hin zu Anwendungen und Kollaborationen mit der Industrie wird dabei weiterhin eine wichtige Rolle für das Institut spielen.

Das MPE sieht einer interessanten Zukunft entgegen: Kürzlich startete der Herschel-Satellit, der langwellige Strahlung von den kältesten und entferntesten Objekten im Universum beobachtet. Der im Bau befindliche Röntgensatellit eROSITA wird die erste vollständige Himmeldurchmusterung im mittleren Röntgenbereich durchführen, um Licht auf die geheimnisvolle Dunkle Energie zu werfen, und das satellitengestützte Röntgenobservatorium IXO befindet sich in der Entwurfsphase. Bei Wellenlängen im optischen und nahen Infrarotbereich haben Wissenschaftler vom MPE und anderer europäischer Institutionen die Euclid-Mission vorgeschlagen, um die Dunkle Energie vom Weltraum aus zu untersuchen. Diese Projekte werden durch bodengebundene Observatorien, wie das Large Binocular Telescope ergänzt, für das unsere ersten Instrumente gerade in Betrieb genommen werden. Arbeiten an Instrumenten für das derzeit größte optische Teleskop der Welt, das VLT der ESO, sind noch in vollem Gange, während die Wissenschaftler mit dem European Extremely Large Telescope bereits über die folgende Teleskop-Generation nachdenken.

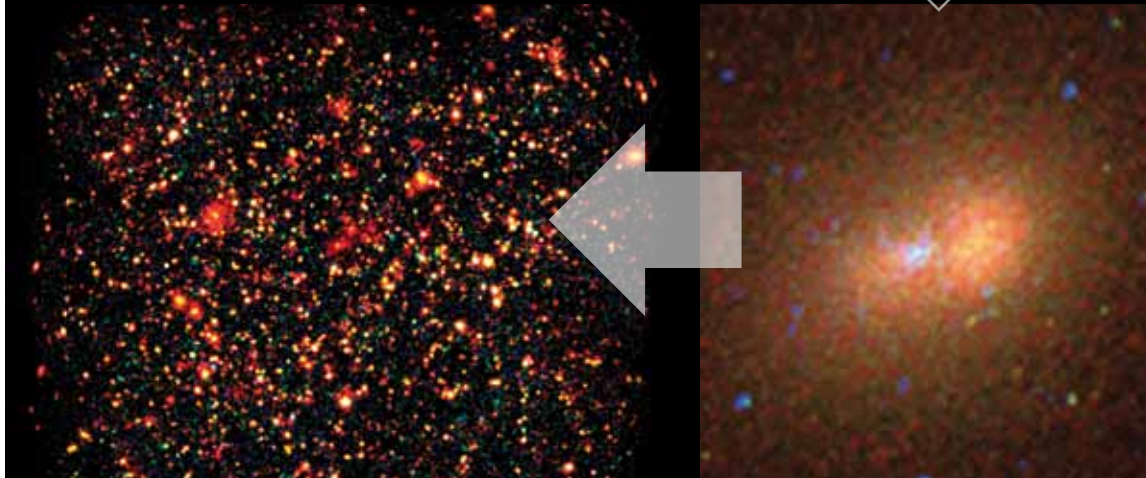
Wissenschaft am MPE

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? Am MPE versuchen wir diese und andere Fragen zu beantworten indem wir uns auf zwei entscheidende wissenschaftliche Themen konzentrieren: Schwarze Löcher und Galaxien. Schwarze Löcher sind extreme Objekte im Weltall, die wir sowohl als die ausgebrannten Überreste von Sternen als auch als riesige Massenansammlung 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.

Alle Gruppen am MPE erforschen diese Themen über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg, in Verbindung mit auf den Beobachtungen aufbauender Theorie. Die Ergebnisse aus einem oder zwei Wellenlängenbereichen können mit denen aus anderen Bereichen überprüft werden; damit bestätigen sie unsere Annahmen über die physikalischen Prozesse im Universum. Objekte werden sowohl einzeln und detailliert in unserer kosmischen Nachbarschaft als auch allgemein und oft statistisch tief im All untersucht. Da in der Astronomie Entfernung gleichbedeutend ist mit einem Blick in die Vergangenheit (aufgrund der Lichtlaufzeit) können wir so die Geschichte und Entwicklung dieser Objekte und – zumindest in mancher Hinsicht – die Geschichte des Universums insgesamt nach verfolgen.



Schwarze Löcher sind eines der Hauptforschungsthemen am MPE. Wir untersuchen diese extremen Objekte im Weltall 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.





Die Wissenschaftler am MPE beobachten astronomische Objekte in vielen verschiedenen Wellenlängen und nutzen – oft selbst entwickelte – Instrumente auf der Erde und auf Satelliten. Zusätzlich werden Experimente sowohl im Labor als auch auf der ISS im All durchgeführt.

Durch 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 vorhersagen. Während die „lokalen“ Beobachtungen hauptsächlich bei Infrarot- und optischen Wellenlängen durchgeführt werden, erreicht uns das gesamte, aufsummierte Signal der Schwarzen Löcher als diffuser Röntgenhintergrund. Dass unsere lokalen Abschätzungen ausgehend von niederenergetischer Strahlung überraschend gut mit den Messungen der hochenergetischen Strahlung von weit entfernten Objekten übereinstimmen, stärkt unser Vertrauen in die Zuverlässigkeit unseres gegenwärtigen Bildes vom Universum. Die astronomischen Gruppen am MPE arbeiten Hand in Hand, um die spezifischen und einzigartigen Informationen aus den verschiedenen Wellenlängen bestmöglich zu nutzen und so gemeinsam das Universum als Ganzes zu erforschen.

Die astronomische Forschung am MPE wird durch physikalische Experimente ergänzt, die sowohl im Labor als auch im Weltraum durchgeführt werden. Die Theoretiker am MPE entdeckten, dass ein staubiges Plasma unter bestimmten Bedingungen einen Plasmakristall bildet. Diese „komplexen Plasmen“ werden theoretisch und experimentell in unterschiedlichsten Umgebungen untersucht: eingeschränkt durch die Schwerkraft auf der Erde in unseren Laboren, unter kurzzeitiger Schwerelosigkeit bei Parabelflügen und permanent ohne Schwerkraft auf der Internationalen Raumstation ISS. Diese Studien erlauben zum einen ein fundamental besseres Verständnis der Plasmaphysik, zum anderen können sie aber auch zu nützlichen Anwendungen in anderen Bereichen führen.



GALAXIEN

Bis ins Innerste – Galaxien, Galaxienkerne und superschwere Schwarze Löcher

Galaxien, wunderschöne und eindrucksvolle Welteninseln aus Sternen und Gas, sind die Bausteine des sichtbaren Universums. Jede Galaxie ist einzigartig; ihre Form, Größe und Masse geben uns Hinweise darauf, wie sie entstanden ist und sich seit den Anfängen des Universums bis heute entwickelt hat. Unsere Milchstraße ist beispielsweise eine große Spiralgalaxie mit ungefähr 200 Milliarden Sternen und die Sonne darin ein eher durchschnittlicher Stern.

Die Wissenschaftler am MPE untersuchen die Eigenschaften, das Verhalten und die Entwicklung von Galaxien über das gesamte elektromagnetische Spektrum hinweg, sowohl im nahen als auch im fernen Universum, das uns etwas über die Vergangenheit verrät. Eine der bemerkenswertesten Entdeckungen des letzten Jahrhunderts ist es, dass nahezu alle großen Galaxien ein massereiches Schwarzes Loch enthalten. Wenn diese Schwarzen Löcher weitere Materie an sich ziehen, werden ihre Muttergalaxien „aktiv“, sie verändern ständig ihre Helligkeit. Ein Großteil unserer Arbeit am MPE beschäftigt sich deshalb mit den Zentralregionen von Galaxien, wo sich diese extrem massereichen Schwarzen Löcher (mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen) befinden.

In Zukunft hoffen wir mithilfe unserer Untersuchungen des Schwarzen Lochs im Zentrum unserer Milchstraße verschiedene Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie überprüfen zu können, wie die Hypothese, dass Schwarze Löcher den Raum krümmen. Die Wechselwirkung des Schwarzen

Lochs mit seiner unmittelbaren Umgebung ist ebenfalls wichtig: Wie bilden sich die sogenannten Akkretionsscheiben und Jets in aktiven Galaxien und welchen physikalischen Gesetzen gehorchen sie? Wie beeinflusst es die umgebenden Sterne? Wir untersuchen aber nicht nur den Einfluss eines massereichen Schwarzen Lochs auf seine Nachbarschaft, sondern auch auf die Galaxie als Ganzes.

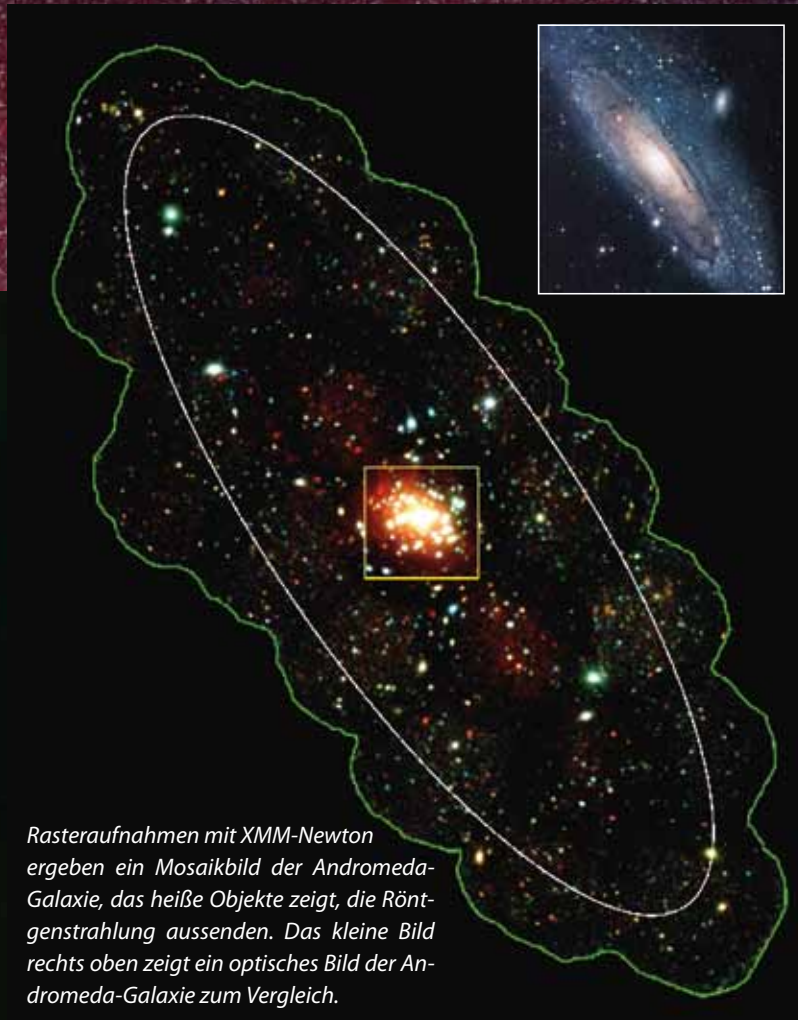
Messier 101 ist eine Spiralgalaxie, die ungefähr 15 Millionen Lichtjahre entfernt ist. Unsere eigene Galaxie, die Milchstraße, ist ebenfalls eine Spiralgalaxie, ähnlich wie diese.

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

GALAXIEN



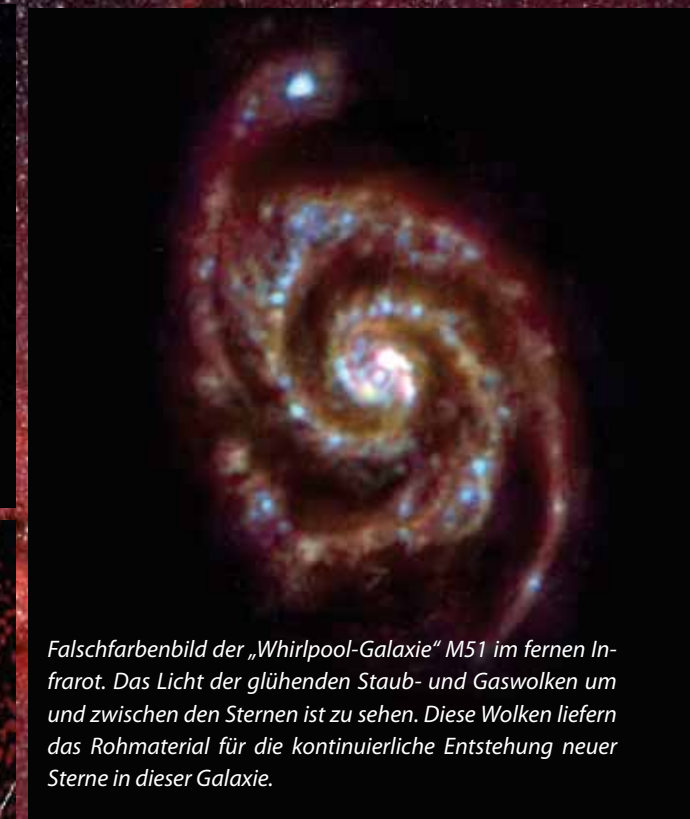
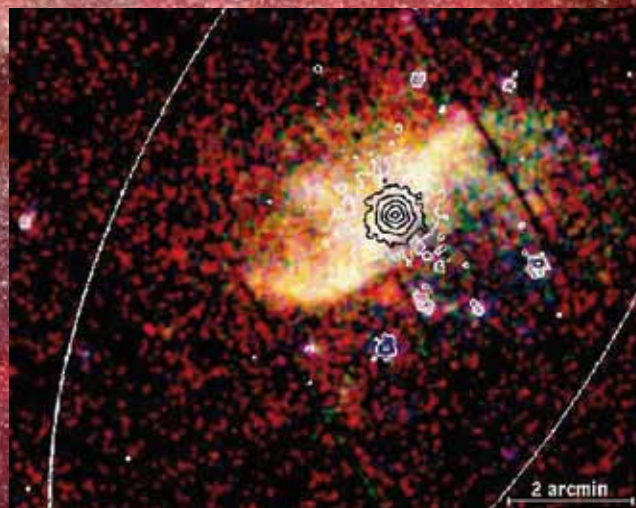
GALAXIEN



Rasteraufnahmen mit XMM-Newton ergeben ein Mosaikbild der Andromeda-Galaxie, das heiße Objekte zeigt, die Röntgenstrahlung aussenden. Das kleine Bild rechts oben zeigt ein optisches Bild der Andromeda-Galaxie zum Vergleich.



Die ultra-leuchtkräftige Galaxienverschmelzung IRAS 06035-7101, aufgenommen in sehr hoher Auflösung mit der SINFONI-Kamera des MPE. Verschmelzende Galaxien lösen sehr intensive Sternentstehung aus und sorgen so für sehr helle Objekte.



Falschfarbenbild der „Whirlpool-Galaxie“ M51 im fernen Infrarot. Das Licht der glühenden Staub- und Gaswolken um und zwischen den Sternen ist zu sehen. Diese Wolken liefern das Rohmaterial für die kontinuierliche Entstehung neuer Sterne in dieser Galaxie.

◀ 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.



GALAXIEN

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, und später auch 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 Massendichte dar! Quasiperiodisches Aufflackern in dieser zentralen Region, das wir im Nah-Infraroten gemessen haben, deutet darauf hin, dass das Schwarze Loch schnell rotiert.

Um das Galaktische Zentrum zukünftig sehr viel genauer zu vermessen, entwickeln wir zur Zeit das „GRAVITY“-Instrument. Es wird das Licht der vier VLT-Teleskope als Interferometer zusammen führen, und damit eine sehr viel bessere Winkelauflösung ermöglichen. GRAVITY soll uns einen Blick auf den Ereignishorizont des Schwarzen Lochs erlauben.

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.

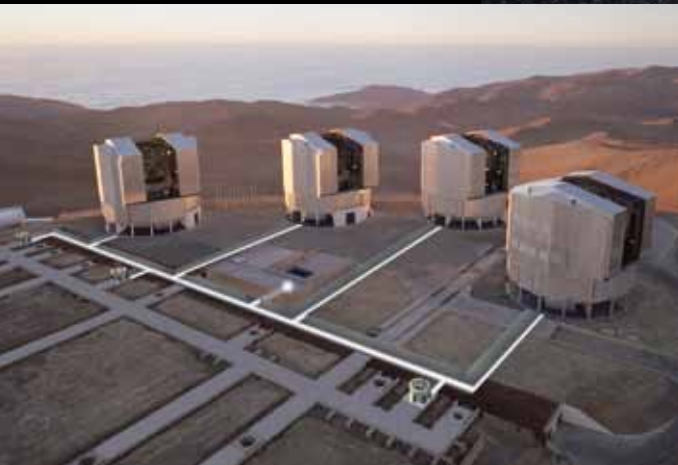
SgrA*

6 Lichttage

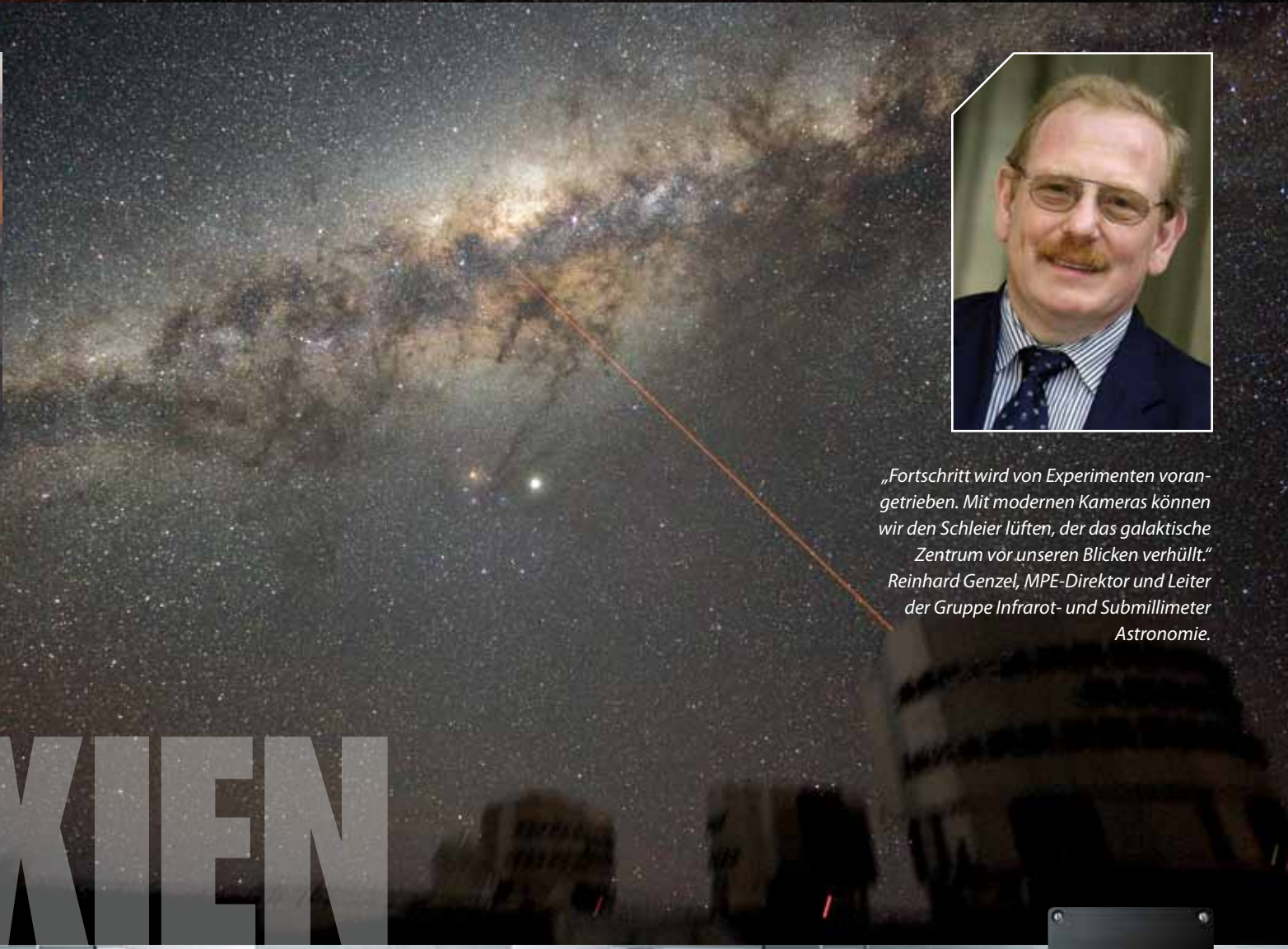
6 Lichtmonate

Das Nachfolgeinstrument, SINFONI, verbindet die SPIFFI-Kamera, die hier von einem MPE-Team ans VLT montiert wurde, mit adaptiver Optik und kann sogar Spektren vom galaktischen Zentrum aufnehmen.





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



„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.

GALAXIEN



Nahe Galaxien – Fallstudien für Galaxienphysik

Mit detaillierten und langfristigen Messungen konnten wir nachweisen, dass unsere Milchstraße in ihrem Zentrum ein massereiches Schwarzes Loch beherbergt. Aber was ist mit anderen Galaxien? Für eine Untersuchung eignen sich am besten unsere Nachbargalaxien, deren Kerne wir mit modernen Instrumenten im Detail untersuchen können. Aber obwohl uns diese Galaxien auf kosmischen Skalen nahe sind, so sind sie doch zu weit entfernt, um die Umlaufbahnen von Sternen um ihr Zentrum direkt zu messen, wie in unserer Milchstraße. Die mittlere Bewegung der innersten Sterne erlaubt uns aber eine Massenbestimmung, und so entdeckten wir zum Beispiel im Zentrum unserer Nachbargalaxie Andromeda ein Schwarzes Loch mit ungefähr 140 Millionen Sonnenmassen. Die innersten Sterne umkreisen das Schwarze Loch mit Geschwindigkeiten von mehr als 1000 Kilometern pro Sekunde.

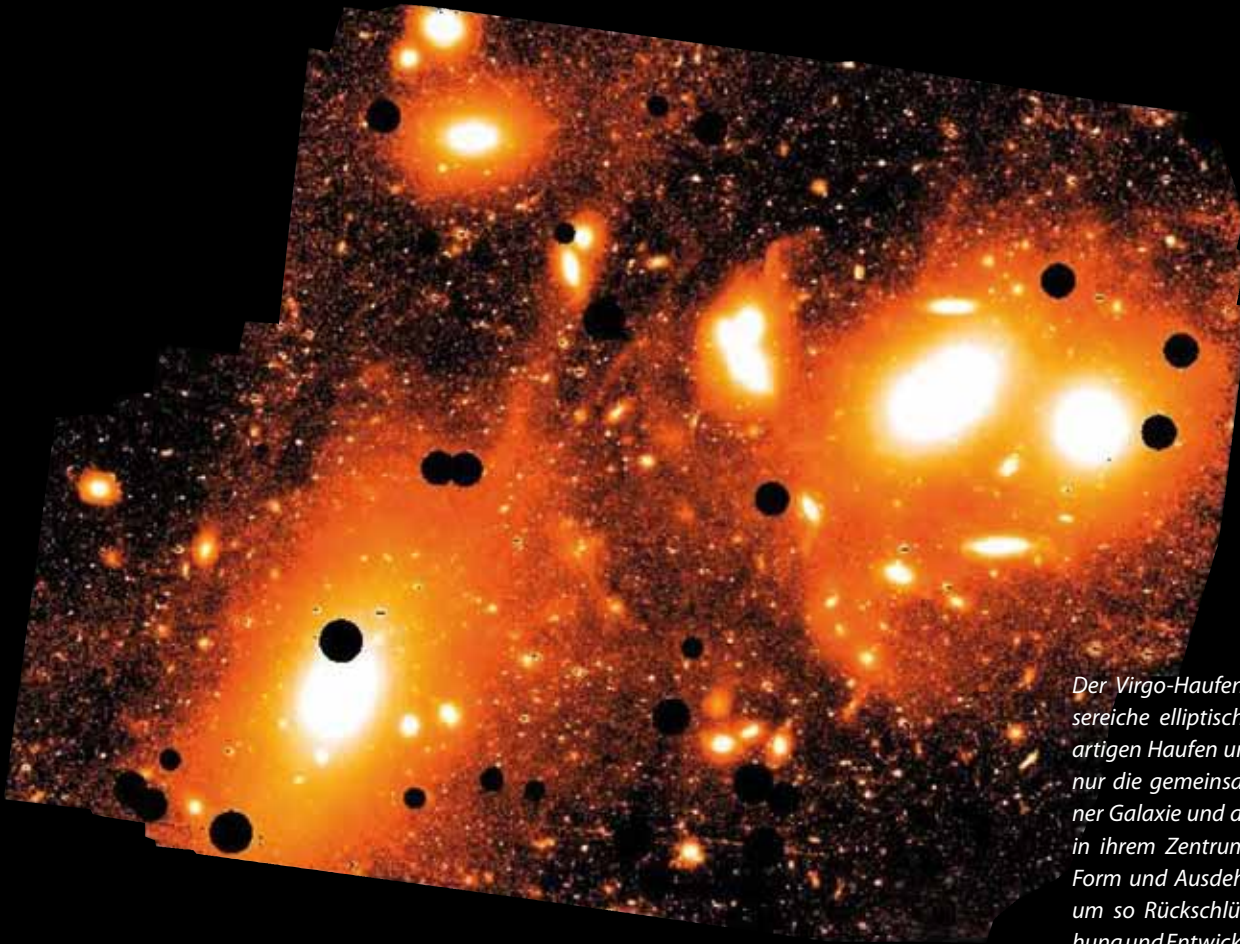
Derartige Messungen lassen darauf schließen, dass wahrscheinlich jede leuchtstarke Galaxie ein zentrales Schwarzes Loch enthält, das umso größer ist, je massereicher die Galaxie ist. Dieser einfache Zusammenhang legt nahe, dass zwischen der Entwicklung einer Galaxie und ihres Schwarzen Loches eine Wechselbeziehung besteht. Die zugrunde liegenden Prozesse zu verstehen, ist zurzeit ein heißes Thema bei der Erforschung der Galaxienentwicklung am MPE.



„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 auch etwas über die Dunkle Materie und die Dunkle Energie.“ MPE-Direktor Ralf Bender, Leiter der Gruppe optische und interpretative Astronomie.

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 Untersuchung des zentralen Bereichs liefert unter anderem eine Massenbestimmung des Schwarzen Lochs.

GALAXIEN



Der Virgo-Haufen enthält viele massereiche elliptische Galaxien. In derartigen Haufen untersuchen wir nicht nur die gemeinsame Entwicklung einer Galaxie und des Schwarzen Lochs in ihrem Zentrum sondern auch die Form und Ausdehnung der Galaxien, um so Rückschlüsse auf ihre Entstehung und Entwicklungsgeschichte ziehen zu können. Die schwarzen Kreise deuten an, wo helle Vordergrundsterne aus dem Bild entfernt wurden.

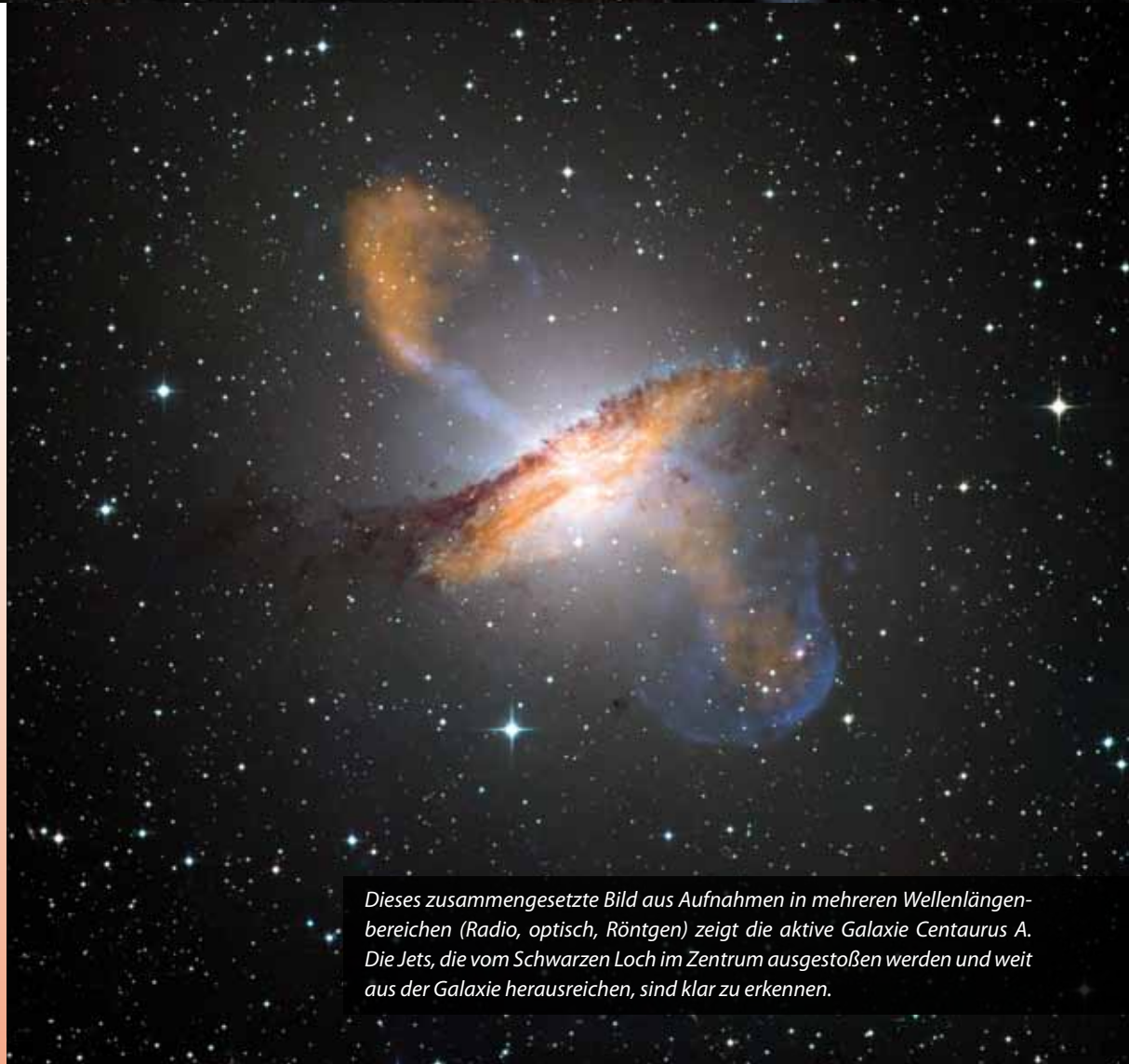
In benachbarten Galaxien sind allerdings nicht nur die Zentralregionen interessant, sondern auch die Randgebiete. Die Bewegung einzelner Sterne in den Außenbezirken von Galaxien gibt Aufschluss über ihre Größe und die Beschaffenheit ihrer Halos. Nach dem gegenwärtig bevorzugten Modell der Galaxienbildung sind elliptische Galaxien die am weitesten entwickelten Objekte. Sie haben mehrere Wechselwirkungen und auch Verschmelzungen mit anderen Galaxien hinter sich. Die Kartierung ihrer Größen und Formen gibt uns Hinweise auf ihre Entwicklungsgeschichte, wodurch wir unsere Modelle überprüfen können.

Um die Größe einer elliptischen Galaxie zu bestimmen, messen wir die Geschwindigkeiten von so genannten „planetarischen Nebeln“, Sonnen-ähnlichen Sternen in einer bestimmten Phase ihrer Entwicklung, die ein eindeutiges Signal zur Identifikation und für Geschwindigkeitsmessungen aussenden. Elliptische Galaxien sind von ausgedehnten, diffusen Sternhalos umgeben und wahrscheinlich in Halos aus Dunkler Materie eingebettet. Überraschenderweise zeigten unsere Messungen, dass einige Galaxien sehr viel kleiner sind als erwartet, was das bevorzugte Entwicklungsmodell in Frage stellt. Insbesondere zeigten Messungen von Messier 87, einer riesigen elliptischen Galaxie im Virgohaufen, einen anisotropen Halo mit einem steilen radialen Gradienten. Dies weist eher auf ein stetiges Wachstum von Messier 87 durch die Verschmelzung mit kleineren Galaxien hin als auf die Verschmelzung von zwei größeren (Spiral-)Galaxien – und offenbart so die Geschichte dieser elliptischen Galaxie.

Aktive Galaxienkerne – Monster im All

Einige Galaxien haben sehr helle Zentren und ändern zudem noch ständig ihre Helligkeit, die sogenannten „Aktiven Galaxien“. Sie können bis zu einer Billion Mal leuchtkräftiger sein als unsere Sonne. Für diese Aktivität verantwortlich ist das zentrale Schwarze Loch, das Materie aus seiner Umgebung „auffrisst“. Dabei emittieren diese Objekte oft über das gesamte elektromagnetische Spektrum eine messbare Strahlung, von Radio- bis hin zu Gammawellenlängen. Die Energie hierfür stammt aus der starken gravitativen Anziehung eines extrem massereichen Schwarzen Lochs. Viele dabei auftretende Phänomene, wie beispielsweise die Plasma-Jets, die mit fast Lichtgeschwindigkeit ausgestoßen werden, sind immer noch rätselhaft. Am MPE versuchen wir mit den derzeitigen Satellitenmissionen im Röntgen- und Gammabereich wie Chandra, XMM-Newton und Fermi einen Einblick in diese Phänomene zu gewinnen.

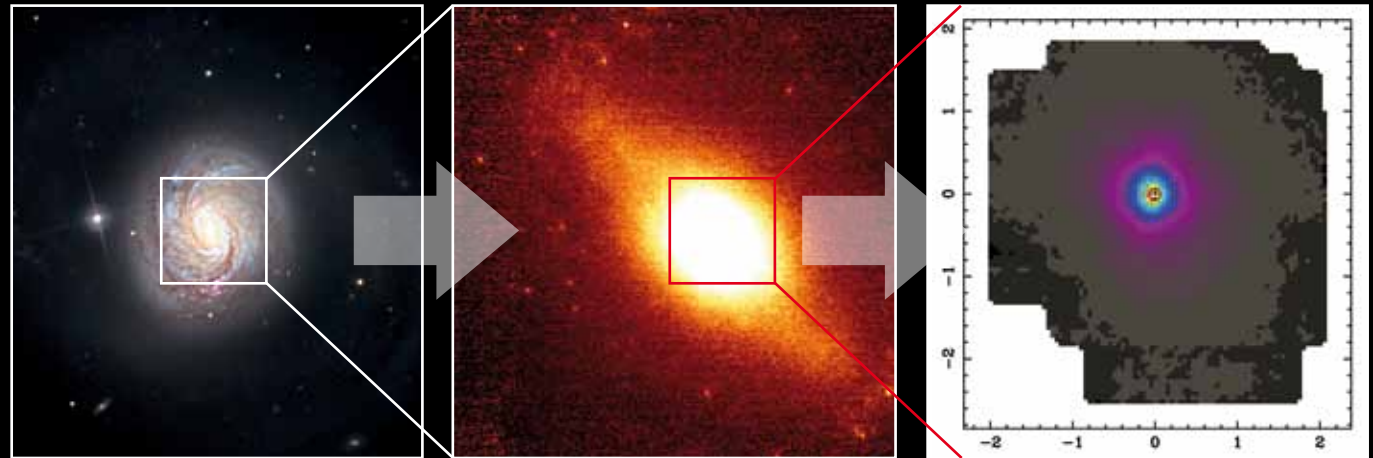
Die Zentren von Galaxien sind oft hinter dicken Staubwolken versteckt, die uns den Blick versperren. Die Spitzer- und Herschel-Satelliten können mit ihren „Infrarotaugen“ diesen Staub durchdringen und ins Herz eines aktiven Galaxienkerns blicken. Dies erlaubt uns, die Bedeutung der unterschiedlichen Prozesse bei der Erzeugung der Strahlung zu erfassen. Ergänzende Beobachtungen mit Observatorien auf der Erde, wie SINFONI am VLT, können den aktiven Kern außerordentlich detailliert darstellen. Das Zusammenspiel von Gas und Sternen wird sichtbar und wie es die „Heizung“ des Schwarzen Lochs beeinflusst. Indem wir die Bewegung der Sterne messen, können wir das Schwarze Loch wiegen – ein wichtiger Schritt um zu verstehen, wie das Schwarze Loch und seine Muttergalaxie gemeinsam wachsen und sich entwickeln.



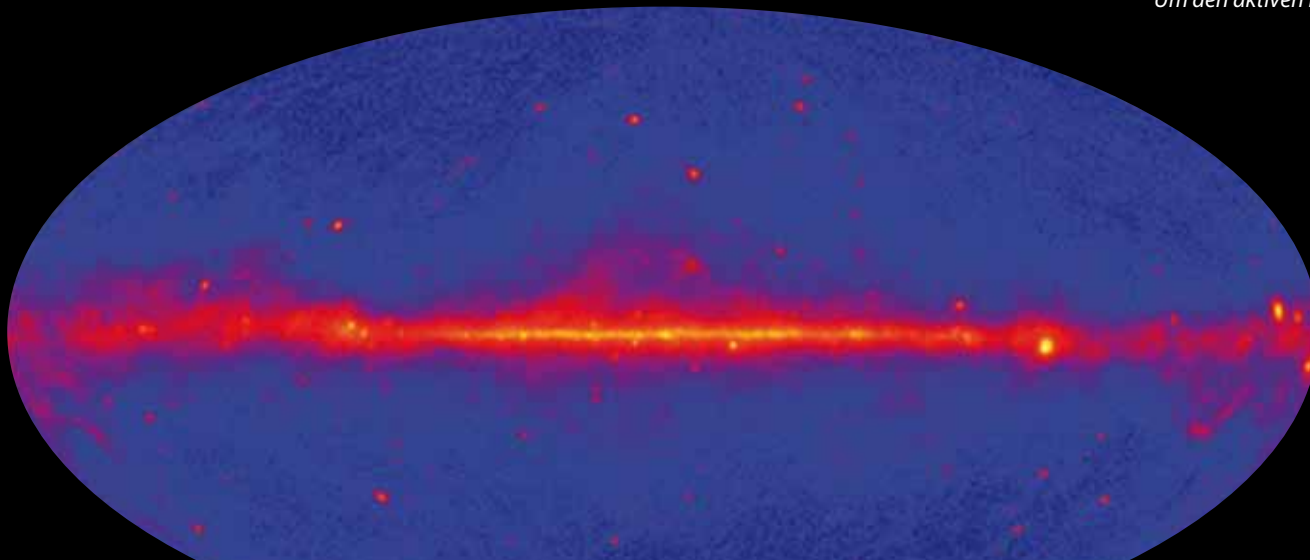
Dieses zusammengesetzte Bild aus Aufnahmen in mehreren Wellenlängenbereichen (Radio, optisch, Röntgen) zeigt die aktive Galaxie Centaurus A. Die Jets, die vom Schwarzen Loch im Zentrum ausgestoßen werden und weit aus der Galaxie herausreichen, sind klar zu erkennen.



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



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.



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 in der Milchstraße: Pulsare, also rotierende Neutronensterne.

Zurück zum Anfang – Galaxienentwicklung, großräumige Strukturen und Kosmologie

In den letzten zwei Jahrzehnten wurde die Vorstellung, wie sich unser Universum, samt Milchstraße und Sonne darin, seit dem Urknall vor 13,7 Milliarden Jahren entwickelt hat, immer genauer. Die ersten kleinen Galaxien und Schwarzen Löcher bildeten sich in Ansammlungen Dunkler Materie ungefähr eine Milliarde Jahre nach dem Urknall, danach wuchsen größere Galaxien und Galaxienhaufen auf kosmischen Zeitskalen.

Am MPE vereinen wir die Expertise aus verschiedenen Gruppen, um gemeinsam 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? In den letzten Jahren haben die Astronomen viele Hinweise dafür gefunden, dass die geheimnisvolle Dunkle Materie und Dunkle Energie einen wesentlichen Einfluss auf die Gestalt unseres Universums hatten und immer noch haben. Das MPE ist an vielen internationalen Projekten beteiligt, die Antworten auf diese grundlegenden Fragen suchen.

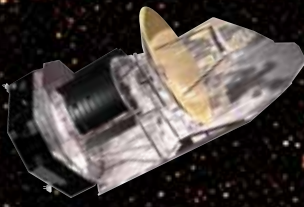
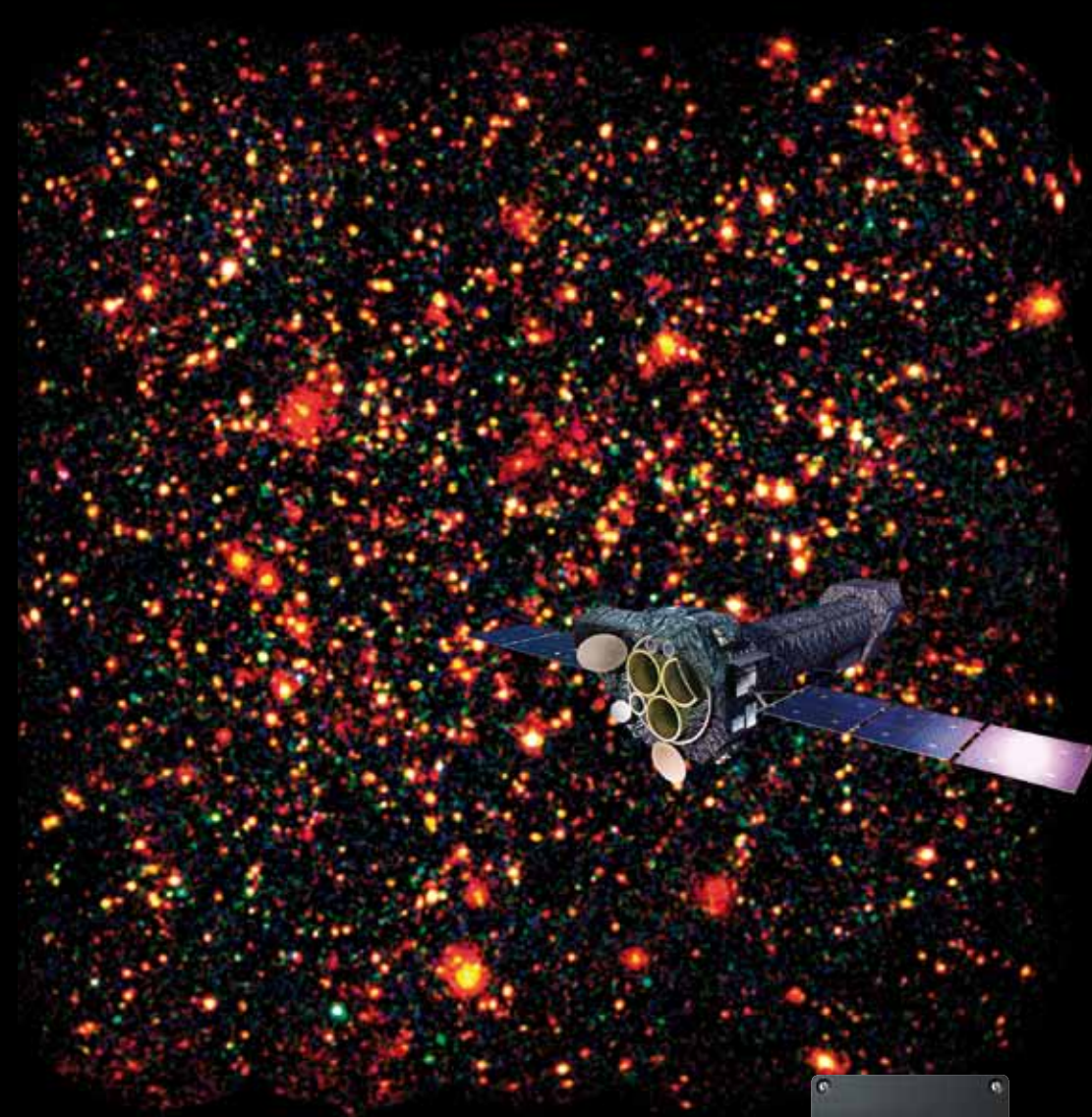
Ein Blick außerhalb unserer Galaxie ins tiefe Universum enthüllt seine gegenwärtige Form: Milliarden von Galaxien mit einer riesigen Vielfalt an Formen und Größen. Dieses optische Bild ist wohlbekannt, aber wir beobachten diese fernen Galaxien jetzt auch bei anderen Wellenlängen...

➔ Tiefe Himmelsaufnahmen erlauben uns einen Blick in die Vergangenheit.

KOSMOLOGIE



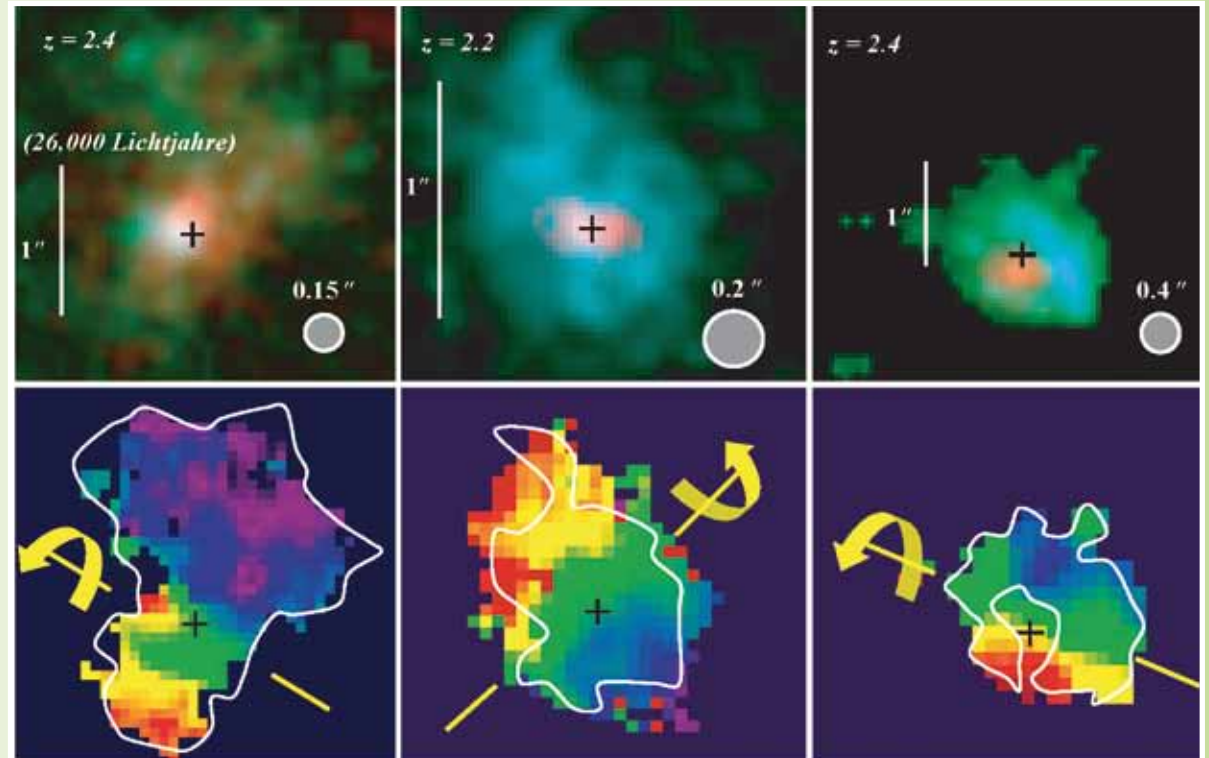
Das zwei Quadratgrad große COSMOS-Feld (Cosmic Evolution Survey) bedeckt eine Himmelsfläche, die etwa zehnmal so groß ist wie der Vollmond. Es befindet sich im Sternbild Löwe und öffnet ein Fenster ins tiefe Universum. Das Feld wird von allen modernen Observatorien von Radio- bis hin zu Röntgenwellenlängen beobachtet und das MPE beteiligt 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 von tiefen Himmelsaufnahmen, wie beim COSMOS-Feld, in verschiedenen Wellenlängen geben den Astronomen Hinweise auf die Entwicklungsgeschichte des Universums.



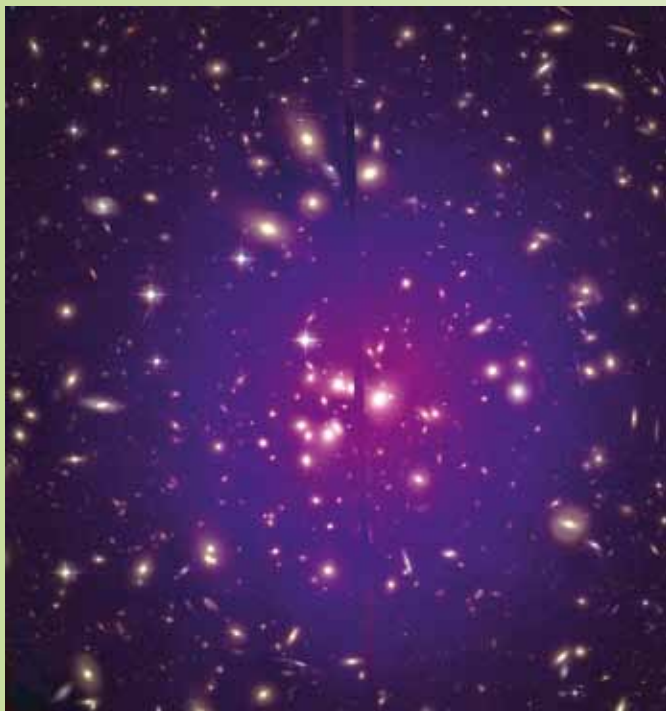
Höchste Auflösung – ein scharfer Blick auf Galaxien und ihre Entwicklung

Durch Beobachtungen und Simulationen konnten die Astronomen die Rahmenbedingungen für die Bildung und Entwicklung von Galaxien im jungen Universum verstehen. Demzufolge bildeten sich Galaxien, als Gas sich in den Zentren massereicher Halos aus Dunkler Materie sammelte und abkühlte. Die Verschmelzung von Halos und Galaxien führte dann zu einem hierarchischen Anwachsen der Galaxienmasse. Unsere Beobachtungen testen dieses Szenario, indem sie Details in jungen Galaxien mit noch nie dagewesener Auflösung deutlich machen. Dies wird möglich mit dem SINFONI-Instrument, das Techniken der adaptiven Optik mit der MPE-SPIFFI-Kamera an den VLT-Teleskopen der ESO kombiniert.

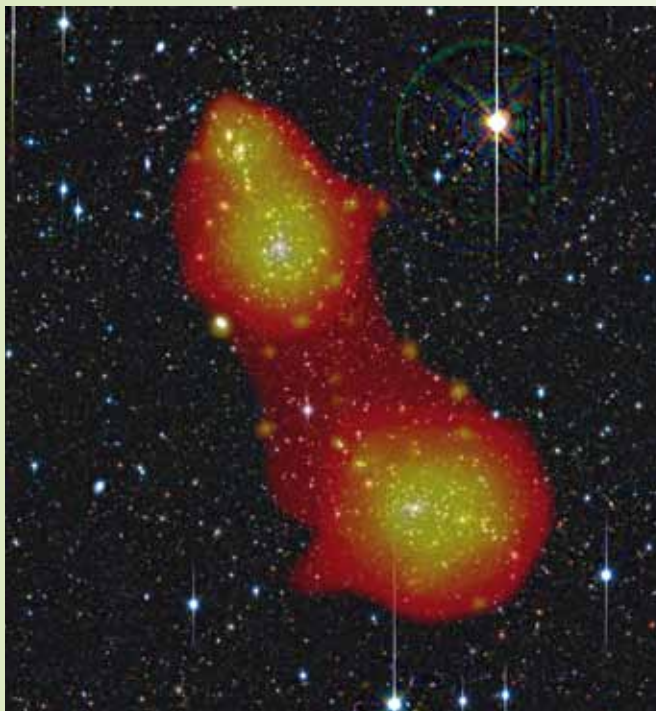
Da verschmelzende Galaxien in der Vergangenheit häufiger waren, sollten große Galaxien Anzeichen derartiger Ereignisse zeigen und insbesondere komplexe Gasbewegungen aufweisen. Wir fanden allerdings heraus, dass es bereits im jungen Universum, nur etwa drei Milliarden Jahre nach dem Urknall, schon massereiche, rotierende Scheibengalaxien ähnlich unserer Milchstraße gab. Diese Entdeckung war eine große Überraschung, da die Entwicklungsmodelle derartige Galaxien erst sehr viel später vorhersagten. Die Existenz und die Eigenschaften dieser frühen Scheibengalaxien liefern deshalb neue Randbedingungen für die Entwicklungsmodelle von Galaxien. Mit der adaptiven Optik und den VLT-Teleskopen können wir nun sehr viel mehr Galaxien auf kleinsten räumlichen Skalen beobachten und so unser Verständnis der Entstehung und frühen Entwicklung von Galaxien vertiefen.



Entfernte Galaxien unter dem Mikroskop: Das Infrarot-Spektrometer SINFONI enthüllt die Gasbewegung in frühen Galaxien. Die obere Bildreihe zeigt die Verteilung von Sternen (rot) und ionisiertem Gas (blau) in frühen Galaxien, die untere Bildreihe die Bewegung des Gases, wobei die Farben unterschiedliche Geschwindigkeiten repräsentieren. Das Gas scheint um die gelb eingezeichnete Achse zu rotieren. Scheibenähnliche Galaxien wie unsere Milchstraße gab es also bereits im frühen Universum, nur etwa drei Milliarden Jahre nach dem Urknall.



Zusammengesetztes Bild aus optischen (gelbe Quellen) und Röntgenaufnahmen (diffuse blaue Emission) des Galaxienhaufens Abell 1689. Die Röntgenemission beweist, dass diese Galaxien gravitativ gebunden sind und damit einen Haufen bilden. Die Bilder von mehreren Hintergrundgalaxien werden durch den Gravitationslinseneffekt stark verzerrt.



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.

Galaxienhaufen – Superlative im All

Galaxienhaufen sind die größten klar definierten und voll entwickelten Objekte im Universum; sie umfassen bis zu mehreren Tausend Einzelgalaxien. In optischen Bildern sieht man sie einfach nur als eine Ansammlung von Galaxien, Röntgenbeobachtungen allerdings zeigen 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 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 im Universum und das allmähliche Wachsen der Strukturen, die wir heute sehen, herauszufinden. Besonders interessant sind dabei Verschmelzungen von Galaxienhaufen, woraus wir genau ableiten können, wie solche Gebilde wachsen. Mithilfe des Gravitationslinseneffekts können wir die Masse eines Haufens bestimmen und – durch eine detaillierte Analyse – sogar die Massenverteilung im Haufen.

KOSMOMORPHIE

Das Schicksal des Universums – Dunkle Materie und Dunkle Energie

Die Astronomen wissen, dass sich Sterne in Galaxien und einzelne Galaxien in Haufen viel zu schnell bewegen, 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 über die sichtbare Materie hinaus noch sehr viel unsichtbare Materie geben – die so genannte „Dunkle Materie“. Wir schätzen, dass es etwa fünfmal mehr dunkle als sichtbare Materie gibt, was die Dunkle Materie zu einer zentralen Größe bei der Entwicklung unseres Universums macht. Nicht-leuchtende Himmelskörper wie zum Beispiel Planeten können nur einen geringen Teil dieser fehlenden Masse ausmachen, andere Kandidaten wie schwach wechselwirkende, exotische Teilchen sind allerdings noch nicht beobachtet worden.

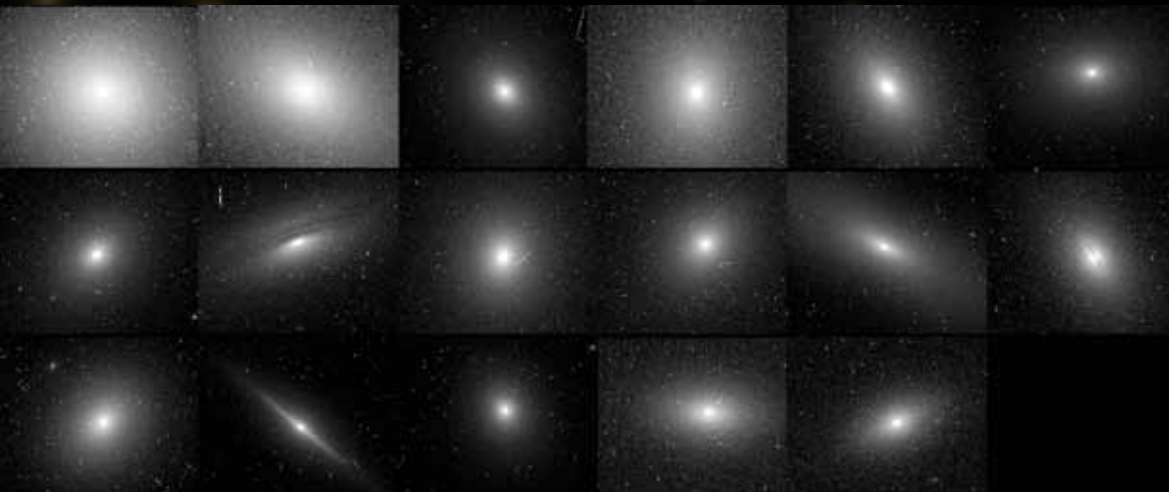
Das MPE beteiligt sich aktiv an der Suche nach der Dunklen Materie, indem es deren Masse und Verteilung in Galaxien und Galaxienhaufen misst. Eine wichtige Methode ist hierbei der so genannte „Gravitationslinseneffekt“, durch den ein Lichtstrahl von einem massereichen Objekt, wie zum Beispiel einer Galaxie oder einem Galaxienhaufen, abgelenkt wird. Das verzerrte Bild oder sogar Mehrfachbilder der Hintergrundobjekte erlauben es uns, die Gesamtmasse eines „linsenden“ Objekts zu berechnen und damit den Anteil an Dunkler Materie zu bestimmen.

Die Dunkle Materie ist nicht gleichmäßig im Universum verteilt sondern entlang von so genannten Filamenten. Die leuchtende Materie, Sterne und Galaxien, folgt der Dunklen Materie. In nahen Galaxien können wir die Bewegung der Sterne verfolgen und uns so die Verteilung der Dunklen Materie erschließen. Wir suchen aber auch in unserer eigenen Milchstraße nach dunklen Objekten. Da der Gravitationslinseneffekt einen Stern kurzzeitig heller erscheinen lässt, wenn ein nicht-leuchtendes Objekt vor ihm vorbeizieht, beobachten wir regelmäßig in Richtung unserer Nachbargalaxie Andromeda. Damit können wir nichtleuchtende Himmelsobjekte finden und ihren Massenanteil an der Dunklen Materie abschätzen.



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

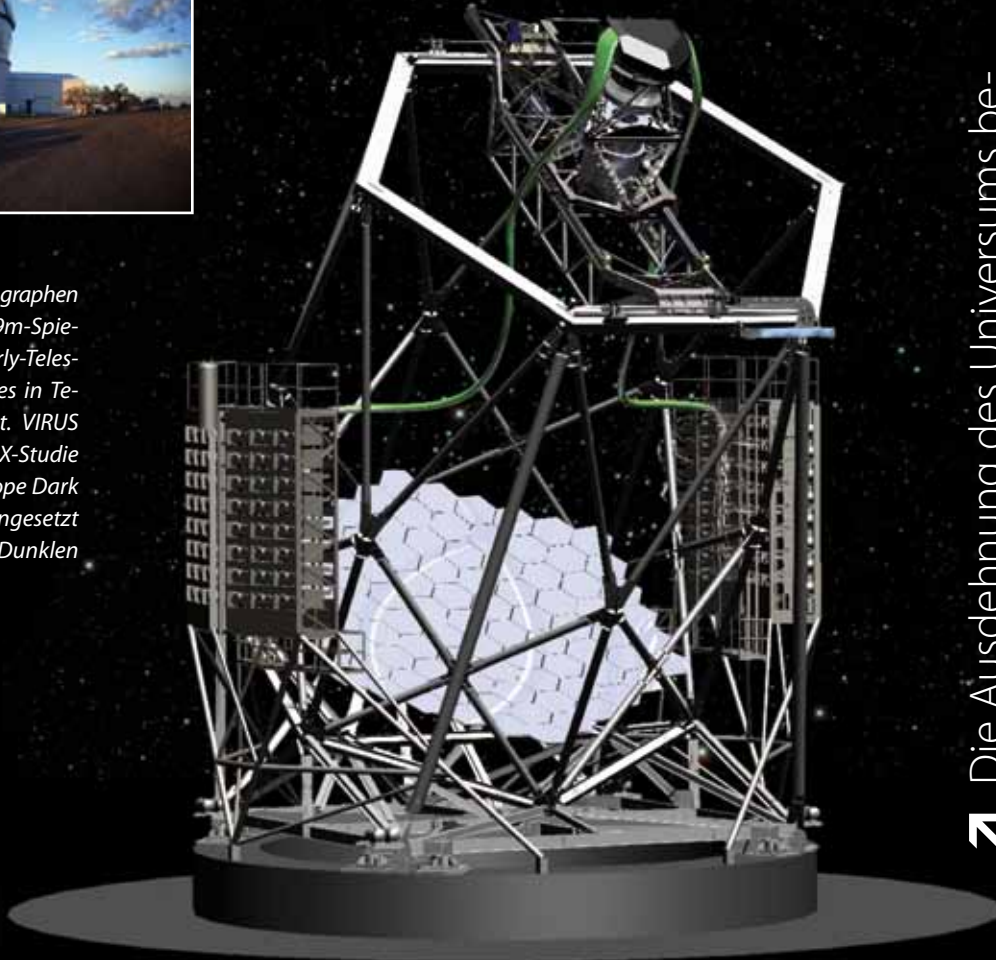
Der massereiche Galaxienhaufen Abell 2218 wirkt wie ein Gravitationsteleskop und lenkt das Licht dahinter liegender Objekte ab. Die bogenförmigen Strukturen sind typische Anzeichen für den Gravitationslinseneffekt.



Eine Ansammlung elliptischer Galaxien aus dem Coma-Haufen. Durch Messung der Sternbewegung in diesen Galaxien erkannten MPE-Wissenschaftler, dass die Galaxien in dichte Halos aus Dunkler Materie eingebettet sind. Die sehr hohe Dichte der Dunklen Materie weist darauf hin, dass diese Galaxien sehr alt sind – Überbleibsel aus einer Zeit, als das Universum noch viel kleiner war.



Die 100 VIRUS-Spektrographen werden neben dem 9m-Spiegel des Hobby-Eberly-Teleskops auf Mount Folkes in Texas, USA, angebracht. VIRUS wird in der HETDEX-Studie (Hobby-Eberly Telescope Dark Energy Experiment) eingesetzt werden, um nach der Dunklen Energie zu suchen.



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

Vor etwa 15 Jahren wurden detaillierte Messungen an weit entfernten Supernova-Explosionen durchgeführt um zu messen, wie die Ausdehnungsgeschwindigkeit des Universums mit der Zeit abnimmt. Überraschenderweise war das Ergebnis aber, 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.

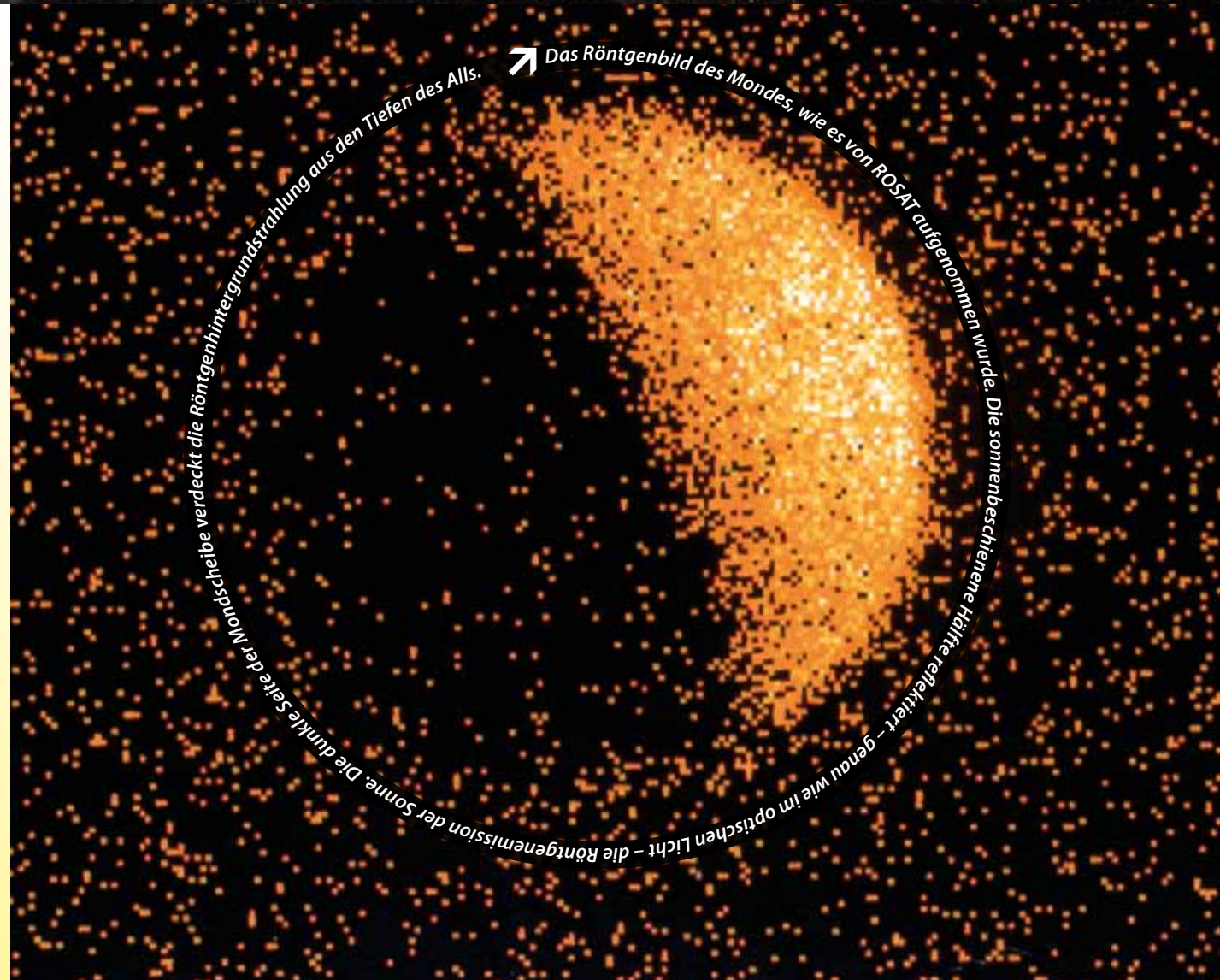
Die MPE-Wissenschaftler versuchen die Zustandsgleichung, das heißt Druck und Dichte, der Dunklen Energie als Funktion der Zeit zu bestimmen. Dafür müssen die Astronomen wissen, wie sich das Universum seit dem Urknall ausgedehnt hat. Akustische Wellen, die durch Quantenfluktuationen angeregt wurden, prägten 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 wird zum Beispiel die HETDEX-Studie die Position und Rotverschiebung (d.h. Entfernung) von Millionen Galaxien exakt bestimmen. Wissenschaftler am MPE entwerfen und schreiben die Computer-Software um derart riesige Datenmengen zu analysieren, Informationen über die Dunkle Energie daraus zu gewinnen und so deren Geheimnis zu lüften.

Der Röntgenhintergrund – Das Rätsel ist gelöst

Im Juni 1962 hob eine amerikanische Rakete zu einem ballistischen Flug ab. Einige Minuten lang trug sie einen Röntgendetektor über die Erdatmosphäre, um nach Röntgenstrahlen aus dem All zu suchen. Ihr Ziel war es, die an der Mondoberfläche gestreute Röntgenstrahlung der Sonne zu messen, den Himmel aber auch nach möglichen anderen Röntgenquellen abzusuchen. Alles funktionierte einwandfrei und mit einer 5-minütigen Abtastung des Himmels war die Röntgenastronomie geboren. Die erwartete Strahlung des Mondes konnte man in dieser historischen Aufnahme nicht „sehen“, dafür aber machten die Astronomen zwei fundamentale Entdeckungen: im Sternbild Skorpion fanden sie eine starke Röntgenquelle, und – unerwartet und überraschend – schien der ganze Himmel im Röntgenlicht zu leuchten. Im Gegensatz zum nachtschwarzen optischen Himmel ist der Röntgenhimmel hell. Eine geheimnisvolle Strahlung erreicht uns aus allen Richtungen: der Röntgenhintergrund. Seinen Ursprung zu finden wurde zum vorrangigen Ziel der Röntgenastronomie, und das MPE war und ist an vorderster Front mit dabei.

Die ersten vollständigen Himmelskartierungen zeigten eine hohe Isotropie dieser Strahlung, was auf einen außergalaktischen Ursprung hinwies – allerdings war die Quelle vollkommen unklar. Die Frage was wir „sehen“, entweder eine diffuse Emissionsquelle, ein gleichmäßig verteiltes heißes Plasma, oder die Überlagerung vieler schwacher Röntgenquellen, die überall im Universum verteilt sind, blieb mehrere Jahrzehnte lang ungelöst.





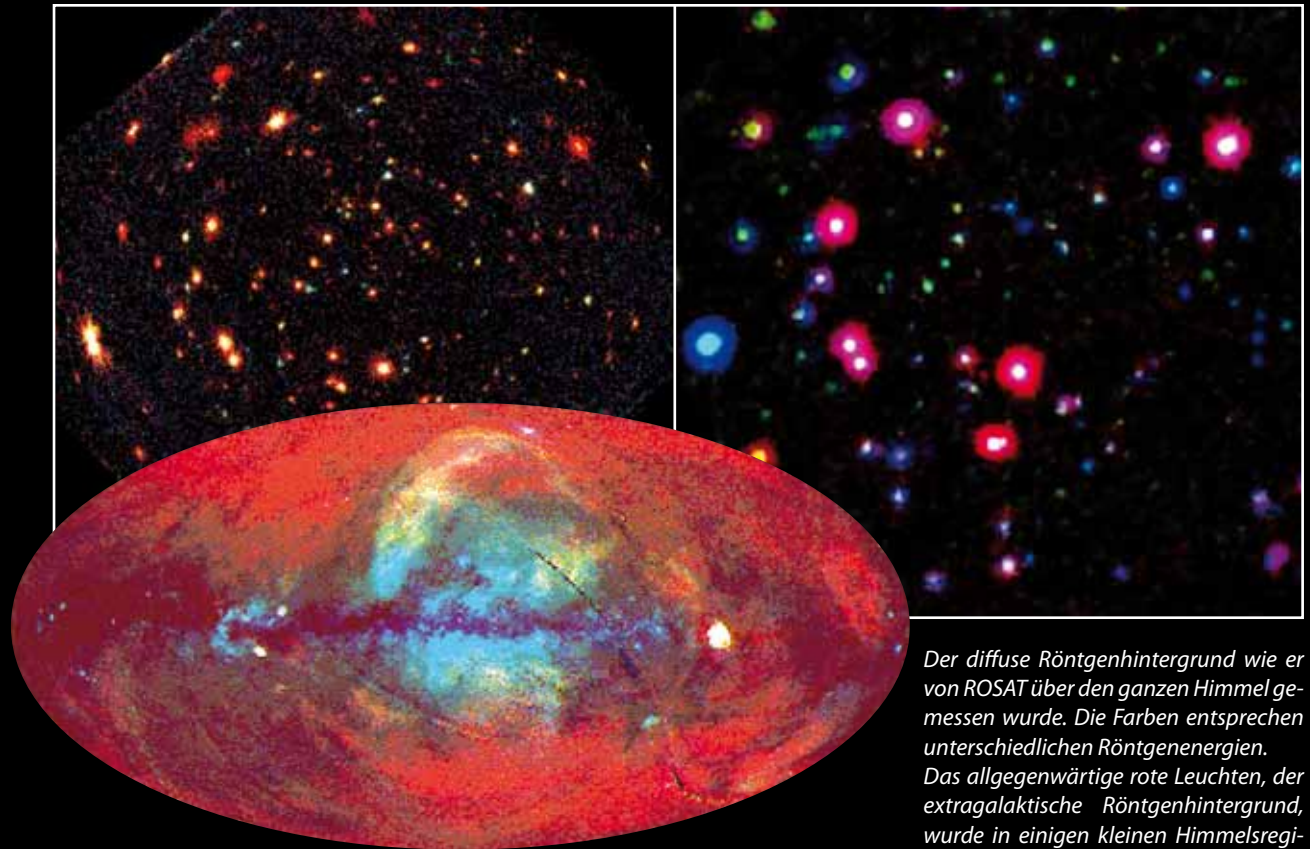
Der hochpräzise Röntgenspiegel wird mit extremer Genauigkeit im ROSAT-Satelliten eingebaut. Der Spiegel, hergestellt von der Firma Zeiss, stellte neue Rekorde in Bezug auf die Glätte der Oberfläche und die Exaktheit des Profils auf.

Auf der Suche nach Antworten entwickelte das MPE den Röntgensatelliten ROSAT, der 1990 in eine Erdumlaufbahn gebracht wurde und das zu dieser Zeit empfindlichste Teleskop für weiche Röntgenstrahlung (0.1 – 2 keV) an Bord hatte. Die Hauptziele der Mission waren eine vollständige Himmelsdurchmusterung, um weitere Röntgenquellen zu finden, helle Punktquellen im Detail zu untersuchen und das Geheimnis des Röntgenhintergrunds zu lüften. Dafür beobachtete ROSAT wiederholt einen kleinen Himmelsausschnitt, ungefähr so groß wie den Vollmond. In diesem Himmelsausschnitt, „Lockman-Hole“ genannt, ist unsere Milchstraße sehr durchsichtig für Röntgenstrahlen. Durch die Überlagerung vieler Einzelbilder blickte ROSAT damit tief ins Universum, entdeckte und vermaß immer schwächere Röntgenquellen. Der aufsummierte Strahlungsfluss dieser neu entdeckten Objekte und ein Vergleich mit dem Strahlungsfluss des Röntgenhintergrunds, ergibt ihren Anteil am allgemeinen, isotropen Röntgenschein. Am Ende der ROSAT-Mission trugen die einzelnen Quellen im Lockman-Hole zusammen rund 80 Prozent zum Strahlungsfluss des Röntgenhintergrunds bei. Oder mit anderen Worten: ROSAT löste 80 Prozent des Röntgenhintergrunds in punktförmige Lichtquellen auf. Dieses Ergebnis bestätigte die Hypothese der „vielen schwachen, punktförmigen Lichtquellen“ und löste so das Geheimnis des Röntgenhintergrunds.

Die Entdeckung der schwachen Röntgenquellen warf jedoch die Frage auf, welche astronomischen Objekte für diese Strahlung verantwortlich sind. Mit Hilfe der präzisen Positionsangaben von ROSAT fanden die Astronomen durch Folgebeobachtungen mit großen optischen Teleskopen, wie zum Beispiel dem Keck 10m-Teleskop auf Hawaii, in fast allen Fällen so genannte aktive Galaxienkerne, kurz AGNs. Bei diesen Galaxien wächst ein gewaltiges Schwarzes Loch im Zentrum, indem es sich von seiner Umgebung ernährt, und setzt dabei Röntgenstrahlung frei. Der Röntgenhintergrund stammt also von gewaltigen, Materie verschlingenden Schwarzen Löchern.

Der ROSAT-Satellit löste das Geheimnis des Röntgenhintergrunds im Bereich der weichen Röntgenstrahlung. Trotzdem blieb unklar, ob Einzelobjekte auch für den Röntgenhintergrund bei höheren Energien verantwortlich sind. Diese Frage wird von den derzeitigen Röntgensatelliten untersucht, dem amerikanischen Chandra-Observatorium und dem europäischen XMM-Newton-Observatorium, bei dem das MPE einer der größten Partner ist. Mit breiteren Energiebändern (bis zu 10 keV) und verbesserter Empfindlichkeit im Vergleich zu ROSAT können diese Observatorien auch die mittleren bis harten Röntgenstrahlen erforschen. Vom Lockman-Hole oder dem COSMOS-Feld, das etwa zehnmal größer ist als der Vollmond, machte XMM-Newton sehr tiefe Aufnahmen; andere, etwas kleinere Himmelsbereiche, wie das GOODS- oder das AEGIS-Feld wurden vom Chandra-Observatorium sogar noch öfter beobachtet. Diese Himmelsregion wurden von allen modernen großen Teleskopen in verschiedenen Wellenlängenbereichen von Radio- bis Röntgenenergien untersucht, um so Quellen tief im Universum zu erforschen und die Entwicklungsgeschichte des Universums aufzudecken.

Tiefe Beobachtungen des „Lockman-Hole“ mit XMM-Newton (links) und ROSAT (rechts). Viele Röntgenquellen mit unterschiedlichen Farben, d.h. Temperaturen, sind in beiden Aufnahmen zu erkennen, die insgesamt die Röntgenhintergrundstrahlung ergeben. Die Quellen sind aktive Galaxienkerne mit einem aktiven (Materie verschlingenden), massereichen Schwarzen Loch in ihrem Zentrum.



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.



RÖNTGENHINTERGRUND

➤ Der kosmische Röntgenhintergrund stammt aus vielen einzelnen Quellen, hauptsächlich den Materie verschlingenden Schwarzen Löchern in aktiven Galaxienkernen (AGN).



Feinabstimmung eines Lasergeräts um die Qualität der im MPE-Labor hergestellten Spiegel für eROSITA zu testen.



„eROSITA wird durch Gas und Staub hindurchblicken, um Millionen von wachsenden Schwarzen Löchern zu beobachten. Es könnte sogar die Geheimnisse der Dunklen Energie aufdecken, indem es die großräumige Struktur des Universums kartographiert.“
MPE-Direktor Kirpal Nandra, Leiter der Gruppe Hochenergie-Astrophysik.



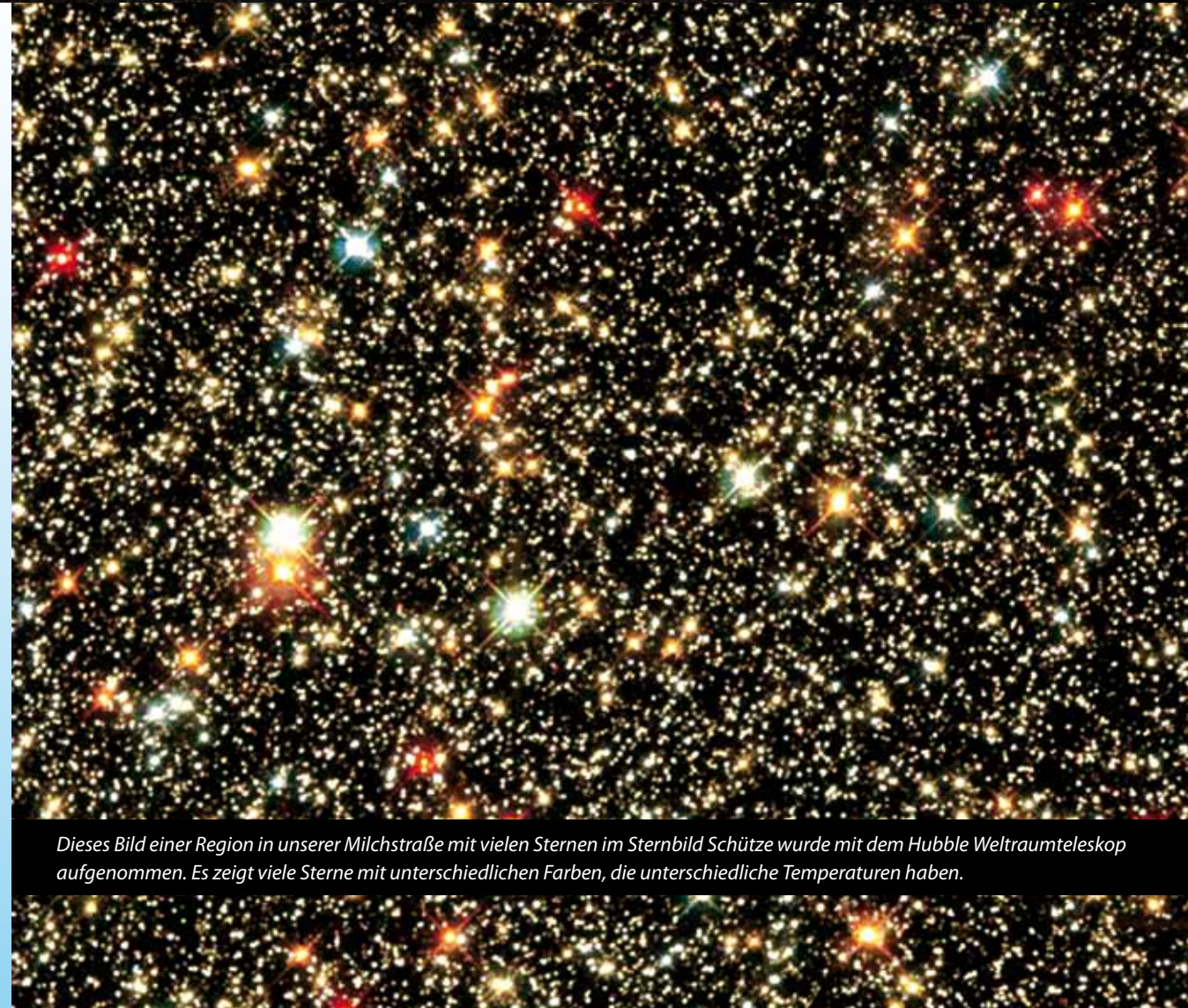
Im Bereich weicher Röntgenstrahlung haben die Observatorien Chandra und XMM-Newton mittlerweile fast 100 Prozent des Röntgenhintergrunds als einzelne Quellen nachgewiesen. Sie zeigten damit, dass diese universelle Strahlung die Summe aus fast unendlich vielen weit entfernten und schwach im Röntgenlicht strahlenden aktiven Galaxien ist. Bei höheren Energien ist die Situation allerdings nach wie vor unklar: bis zu Energien von etwa 10 keV konnten nur 50 Prozent des Hintergrunds in einzelne Quellen aufgelöst werden und bei höheren Energien konnte bisher sogar nur ein kleiner Anteil auf punktförmige Lichtquellen zurückgeführt werden. Das MPE nimmt daher eine führende Rolle bei der Entwicklung und dem Bau der geplanten, zukünftigen Röntgen-Missionen ein, wie bei eROSITA und dem Internationalen Röntgen-Observatorium (IXO). Es wird zudem eine Schlüsselrolle bei der „Ernte“ der wissenschaftlichen Entdeckungen spielen, sobald diese Teleskope in Betrieb gehen.

Das eROSITA-Instrument des MPE wird speziell dafür entwickelt, den gesamten Himmel mit seinen sieben Röntgenteleskopen abzurastern. Sein großes Gesichtsfeld in Verbindung mit seiner hohen Empfindlichkeit für Röntgenstrahlung wird die genaueste vollständige Himmelskarte im Röntgenbereich liefern.

Von der Geburt bis zum Tod – Sternentwicklung und das interstellare Medium

Die Entwicklung der Sterne und ihr Schicksal, sowohl einzeln als auch als Gruppe, hängt stark von ihrer Wechselwirkung mit dem umliegenden interstellaren Medium ab. Sterne entstehen, wenn dichte Klumpen der interstellaren Gaswolken durch ihre Schwerkraft kollabieren. Wenn sich diese Gasklumpen zusammenziehen, steigt ihre Dichte und Temperatur bis zum Erreichen eines kritischen Punktes, an dem das nukleare Feuer zündet und Wasserstoff zu Helium fusioniert: ein neuer Stern ist geboren. Dieser Stern strahlt den Großteil seiner Lebenszeit mit einer annähernd konstanten Rate, bis der atomare 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 Elemente schwerer als Helium 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 als auch in späteren Phasen der Sternentwicklung. Wie die neu erzeugten Elemente in Sternwinden und -explosionen mit dem umgebenden Gas vermischt und in die nächsten Generation von Sternen eingebaut werden, ist immer noch weitgehend unverstanden.



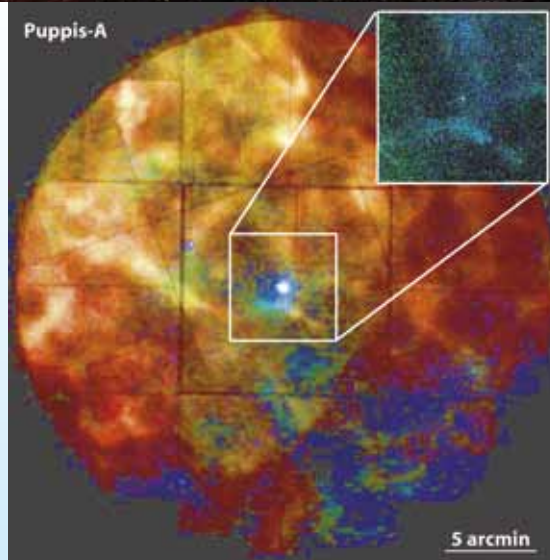
Dieses Bild einer Region in unserer Milchstraße mit vielen Sternen im Sternbild Schütze wurde mit dem Hubble Weltraumteleskop aufgenommen. Es zeigt viele Sterne mit unterschiedlichen Farben, die unterschiedliche Temperaturen haben.

STERNE



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

Der Supernovaüberrest Puppis-A, wie er von den Röntgensatelliten XMM-Newton und Chandra (kleines Bild) beobachtet wurde. Vor etwa 3200 Jahren kollabierte ein massereicher Stern, explodierte als Supernova und hinterließ eine Gaswolke und ein kompaktes Objekt im Zentrum, wahrscheinlich einen Neutronenstern.



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.



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



Dieses Bild zeigt in einer künstlerischen Darstellung, wie ein kompaktes Objekt Materie von einem nahen Begleiter ansaugt. Die Materie sammelt sich in einer hellen Scheibe, bevor sie die Oberfläche eines Neutronensterns erreicht oder von einem Schwarzen Loch „verschluckt“ wird.



Junge Sterne – Ein Blick in die Kinderstube

Wie entstehen Sterne im interstellaren Medium? Dieser Vorgang ist im Einzelnen nach wie vor unklar. Die Entstehung von Sternen spielt sich gewöhnlich in dichten Wolken aus Gas und Staub ab und ist deshalb vor den Augen optischer Teleskope verborgen. Oft sind junge Sterne noch von Gas- und Staubscheiben umgeben, aus denen Planeten, wie beispielsweise unsere Erde, entstehen können. 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 deren Folgen für die Entwicklung von Galaxien.

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.



Infrarot-Blick mit Herschel/PACS auf „Sternfabriken“ in einer kalten Gaswolke in unserer Milchstraße. Die Aufnahme enthüllt unerwartet große Sternentstehungsaktivitäten. Die dunkle, kühle Wolke ist gespickt mit Sternentstehungsgebieten, die sich wie Perlen an einer kosmischen Kette aufreihen.



Die rötlichen Objekte in diesem Bild sind neugeborene Sterne. Sie sind eingebettet in eine kosmische Wolke aus Gas und Staub, aber sichtbar gemacht durch die Infrarot-Augen des Spitzer Weltraumteleskops. Eine staubige Scheibe umgibt die jungen Sterne, in der sich Planeten bilden könnten.



Künstlerische Darstellung einer protoplanetaren Scheibe um einen jungen Stern, aus der möglicherweise ein Planetensystem entsteht.



Sternentod – Die extremen Überreste

Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher, so genannte „kompakte“ Objekte, haben eine riesige 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 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.

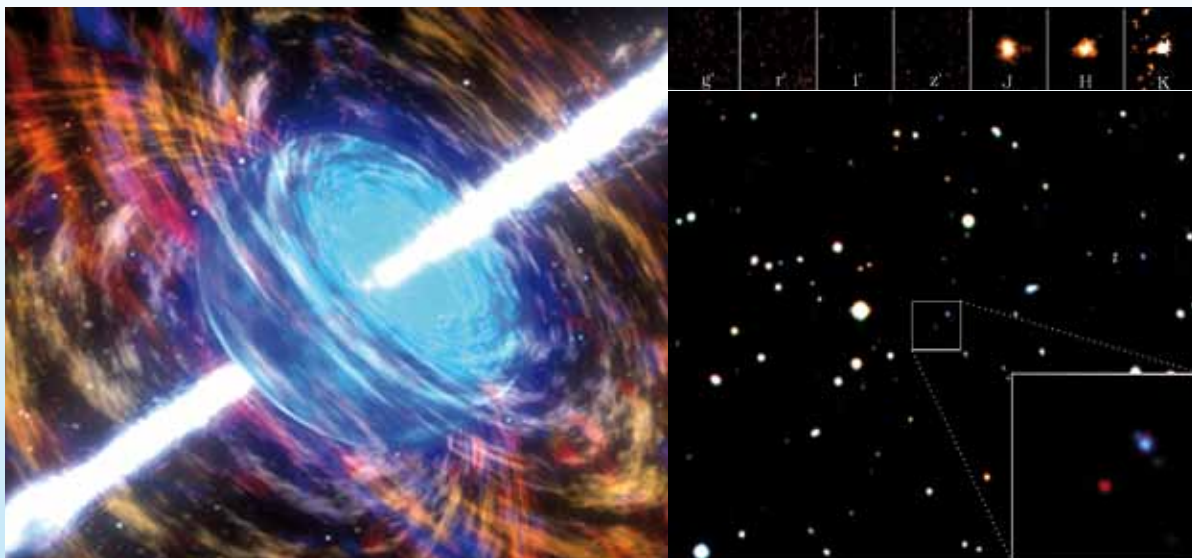
Die Analyse der hochenergetischen Emission kompakter Sterne erlaubt es uns, ihre physikalischen Eigenschaften, wie Typ, Masse und für magnetische Neutronensterne auch Rotationsgeschwindigkeit und Magnetfeldstärke, zu bestimmen. Durch Untersuchung ihrer unmittelbaren Umgebung können wir wissenschaftliche Daten über die Akkretionsscheibe, den Plasma-Jet und eventuell auch einen Supernova-Überrest sammeln, wie Form, chemische Zusammensetzung, Temperatur, Dichte und Geschwindigkeit des sich bewegenden Plasmas. Diese Erkenntnisse helfen uns die eigentümliche Physik, die die Akkretion und die Teilchenbeschleunigung rund um die 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 Neutronestern, 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, Neutronestern oder Schwarzes Loch.



STERNE



Bildliche Darstellung eines GRB-Szenarios: 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 Objekte, das bisher beobachtet wurde. 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. 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.

Das MPE ist seit mehr als zwanzig Jahren in der GRB-Forschung tätig und nutzt derzeit hauptsächlich zwei vom MPE gebaute Instrumente. Dies ist zum einen der „Fermi Gamma-Ray Burst Monitor“ (GBM), der eigens entwickelt wurde um GRBs aufzufinden, ihre Position genau zu bestimmen und die Eigenschaften der harten Röntgen- und Gammastrahlung zeitnah zu untersuchen. Das andere Instrument ist GROND. Es kann das optische oder nah-infrarote Nachleuchten eines GRB bis zu einer Woche in sieben Wellenlängenbändern verfolgen, wenn es – beispielsweise vom Fermi GBM – in Alarmbereitschaft versetzt wurde.

Am 23. April 2009 entdeckte GROND den bisher entferntesten und deshalb auch den frühesten GRB. Mit einer Rotverschiebung von über 8 ist dieser GRB das am weitesten entfernte Objekt, das bisher beobachtet wurde. Das kurze Aufleuchten stammt von einer Sternexplosion vor etwa 13,1 Milliarden Jahren. Diese Beobachtung beweist, dass Sterne schon wenige Hundert Millionen Jahre nach dem Urknall existierten.

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

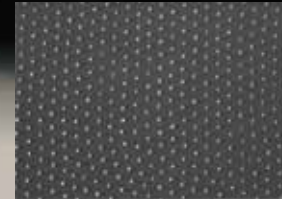


Komplexe Plasmen - Ein neuer Materiezustand

Die drei bekannten Materiezustände sind fest, flüssig und gasförmig. Die sichtbare Materie im Universum liegt aber zu 99 Prozent in Form eines vierten Materiezustands vor: als Plasma. Dieses entsteht, wenn Gas so stark erhitzt wird, dass es sich in Ionen und freie Elektronen aufspaltet. Die vier Materiezustände kann man analog zu den altertümlichen vier Elementen Erde, Wasser, Luft und Feuer sehen.

Plasma gibt es überall, auch wenn es oft unerkannt bleibt. Ein gigantischer Blitzeinschlag und die winzigen Funken der statischen Elektrizität sind beides Beispiele für Plasmen. Die Sonne ist ein riesiger Plasmaball – generell sind Plasmen im All weit verbreitet. Auf der Erde werden Plasmen in vielen industriellen Anwendungen verwendet, von Lichtquellen bis zu Plasma-Bildschirmen. Ein Plasma wird als der am wenigsten geordnete Materiezustand betrachtet. Deshalb war die Überraschung groß, als MPE-Wissenschaftler 1994 herausfanden, dass Plasmen unter bestimmten Bedingungen flüssig werden und sogar spontan auskristallisieren können, womit sie zu „komplexen Plasmen“ werden.

Ein komplexes Plasma hat im Vergleich zu einem normalen Plasma eine zusätzliche Komponente: geladene supra-molekulare Mikroteilchen. Obwohl diese Mikroteilchen bis zu einem Tausendstel Millimeter klein sein können, sind sie im Vergleich zu den Plasmateilchen extrem schwer – viele Milliarden Mal schwerer als ein Atom – und tragen Tausende Elektronenladungen. Sind genügend viele dieser Teilchen vorhanden, werden sie zur dominanten dynamischen Komponente und können sogar die Struktur des Plasmas bestimmen.



Blick auf einen zweidimensionalen Plasmakristall in unseren MPE-Labors. Die geladenen Mikroteilchen werden durch einen grünen Laser angestrahlt. Aufgrund ihrer starken Wechselwirkung bilden sie regelmäßige Strukturen, wie zum Beispiel ein Gitter. Das kleine Bild zeigt den Blick von oben auf einen Plasmakristall.

*„Grundlagenforschung ist faszinierend. Sie bereichert unser Wissen darüber, wie alles in der Physik, Medizin, Biologie etc. funktioniert und stellt die Grundlage für alle Anwendungen und Innovationen dar. Ich kann mir keine lohnendere Beschäftigung vorstellen.“
MPE-Direktor Gregor Morfill, Leiter der Gruppe Theorie- und Komplexe Plasmen.*



KOMPLEXE PLASMEN



MPE-Mitarbeiter genießen die Schwerelosigkeit bei einem Parabelflug für die Plasmaforschung ohne Gravitationseinfluss. Der Spezial-Airbus ZERO-G fliegt auf extremen Bahnen und erreicht dabei mehrere etwa 20-sekündige Intervalle der Schwerelosigkeit.

Wegen der „riesigen“ Masse der Mikroteilchen sind die physikalischen Prozesse in einem komplexen Plasma verlangsamt und können wie in Zeitlupe beobachtet werden. Damit geht für die Physiker ein Traum in Erfüllung: sie können diese Prozesse anhand der Bewegungen von einzelnen Mikroteilchen untersuchen! Komplexe Plasmen bieten die einzigartige Möglichkeit, eine Vielzahl an fundamentalen Prozessen in Flüssigkeiten und Festkörpern zu erforschen, und diese Studien können quasi mit einzelnen „Atomen“ durchgeführt werden. Alltägliche Beispiele derartiger Prozesse sind das Gefrieren und Tauen von Wasser (ein fest-flüssig Phasenübergang), Rauch in der Luft (ein Übergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung) oder die Entmischung von Öl und Wasser (eine Phasentrennung in einem Zweikomponentensystem).

Die Erdanziehung erlaubt es den Wissenschaftlern, komplexe Plasmen bestehend aus einer dünnen, horizontalen Schicht aus frei schwebenden Mikroteilchen, oder auch dreidimensionale, allerdings gravitativ gestauchte Strukturen zu untersuchen. Diese Experimente sind für viele Bereiche von großem Interesse, wie beispielsweise für Studien der Oberflächenphysik, von Membranen und der Stabilitätsprinzipien kondensierter Materie.

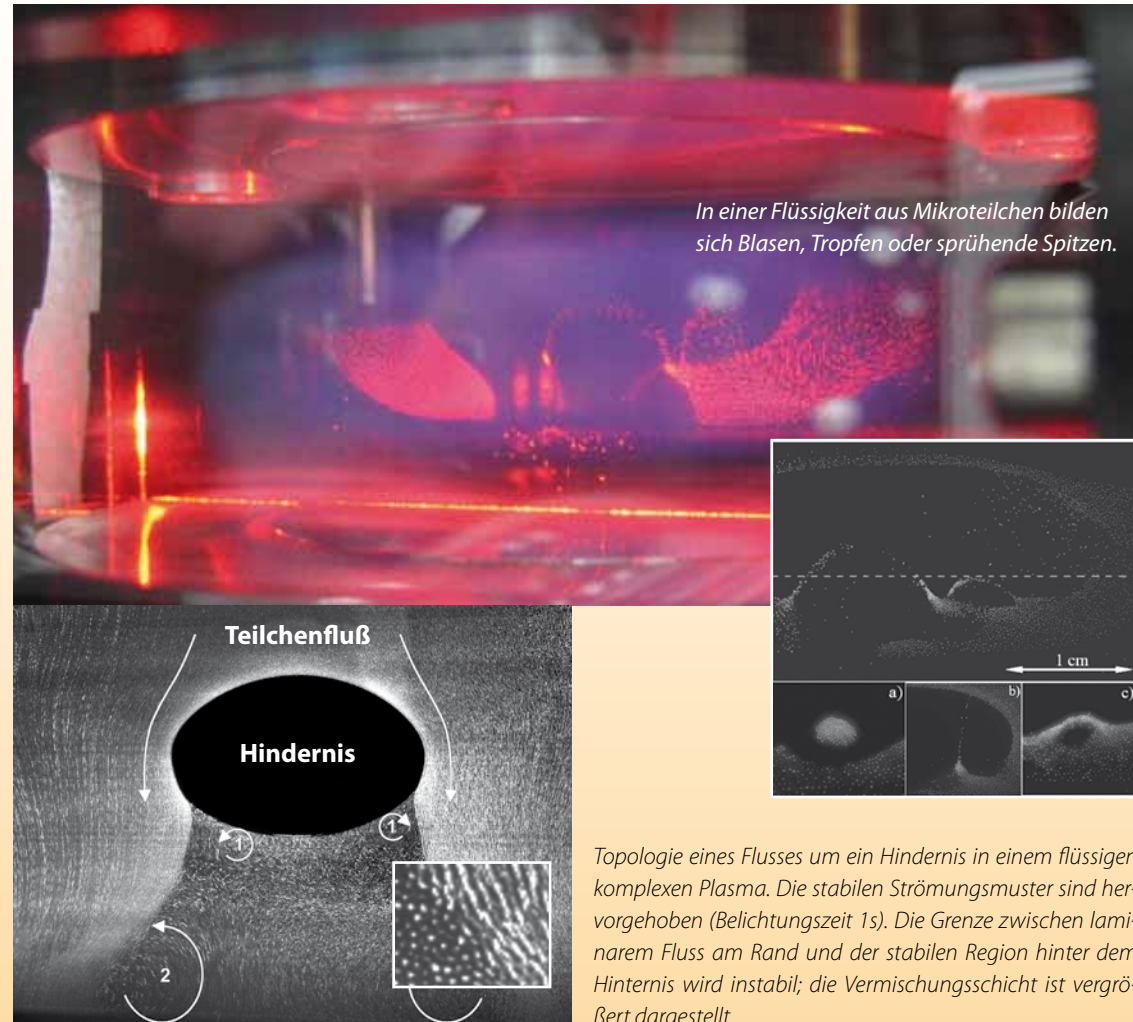
Die Physik der zweidimensionalen Flüssigkeiten und Kristallite ist reich an interessanten Phänomenen und wird in vielen verschiedenen Systemen erforscht. Besonders interessant sind die Studien der Phasenübergänge, deren Physik allgemeingültig zu sein scheint. An komplexen Plasmen kann diese Physik im Detail untersucht und verstanden werden.

KOMPLEXE PLASMEN

Große dreidimensionale Systeme kann man auf der Erde nur unter Verformung erzeugen, da man starke Kräfte braucht um die Schwerkraft zu kompensieren. Studien dieser Systeme bringen Erkenntnisse über Phänomene wie Strömungsdynamik und Scherströmungen. Mithilfe von einfachen Skalentransformationen kann man die Messungen an flüssigen Plasmen mit klassischen Strömungen vergleichen und so Nanofluidik und andere nichtlineare Prozesse auf dieser Ebene besser verstehen. Das Entstehen von Blasen und der Übergang zu turbulenten Strömungen sind nur zwei dieser allgemeinen und skaleninvarianten Phänomene.

Wenn die Schwerkraft in einem sehr dichten komplexen Plasma kompensiert wird, kann eine aus der Schwerelosigkeit bekannte Struktur, nämlich ein Teilchen-leerer Raum in der Mitte, beobachtet werden. Die Schwerelosigkeit im All führt zu einer stabilen Struktur, wohingegen sich in den Schwerkraft-kompensierten Experimenten ein starker zirkularer Fluss bildet, bei dem ein Phasenübergang von einer laminaren zu einer turbulenten Strömung auftreten kann. Dies erlaubt es uns, ein noch ungelöstes Physikproblem, den Übergang zur Turbulenz, auf der grundlegendsten, dem kinematischen Niveau zu erforschen.

Blasenbildung wird durch eine so genannte Rayleigh-Taylor-Instabilität bei sehr geringen Plasmadichten ausgelöst. Es ist ein dynamisches Phänomen, bei dem Mikroteilchen aus dem Bereich unterhalb der teilchenfreien Zone nach oben transportiert werden. Dieser Transport ist nicht stetig sondern geschieht in großen Klumpen, in Blasen, Tropfen oder Beulen. In einem komplexen Plasma kann man diesen Prozess auf „atomarem“ Niveau beobachten.



Topologie eines Flusses um ein Hindernis in einem flüssigen komplexen Plasma. Die stabilen Strömungsmuster sind hervorgehoben (Belichtungszeit 1s). Die Grenze zwischen laminarem Fluss am Rand und der stabilen Region hinter dem Hindernis wird instabil; die Vermischungsschicht ist vergrößert dargestellt.

KOMPLEXE PLASMEN



Die internationale Raumstation ISS umkreist die Erde in 350 Kilometern Höhe. Sie dient als Forschungslabor in der Schwerelosigkeit und führt unter anderem das Plasmakristallexperiment PK-3 Plus des MPE mit sich.

Thomas Reiter, der deutsche Wissenschaftsastronaut, experimentiert mit dem PK-3 Plus Labor des MPE. Er untersucht komplexe Plasmen auf der internationalen Raumstation in Schwerelosigkeit.



Ohne Einwirkung der Schwerkraft können sich die Mikroteilchen im gesamten Plasma verteilen. Damit werden experimentelle Bedingungen geschaffen, in denen das System isotrop und homogen ist und nicht durch die Schwerkraft oder kompensierende Kräfte verformt wird. Nur mit Experimenten in Schwerelosigkeit erreicht man Messungen, die präzise genug sind, um dreidimensionale und kräftefreie Prozesse zu untersuchen – sie ergänzen zudem die erdgebundene Forschung.

Wir führen Experimente in Schwerelosigkeit auf Parabelflügen, Höhenforschungsraketen und auf der internationalen Raumstation ISS durch. Das erste ISS-Labor überhaupt war unser deutsch-russisches Plasmakristallexperiment PKE-Nefedov, das von 2001 bis 2005 in Betrieb war und bis heute das erfolgreichste Experiment auf der ISS ist. Unser verbessertes Labor, PK-3 Plus, haben wir 2005 auf die ISS gebracht. Es arbeitet nach dem gleichen Funktionsprinzip wie sein Vorgänger, allerdings mit erweiterten Möglichkeiten, beispielsweise zur Teilchen- und Plasmadiagnose. Das wissenschaftliche Programm auf der ISS umfasst die besten Experimente aus unterschiedlichen Lebens- und Naturwissenschaften. Sie werden von einem Wissenschaftlergremium ausgesucht – die komplexen Plasmen sind mit bisher 25 Experimentierphasen vorne mit dabei.



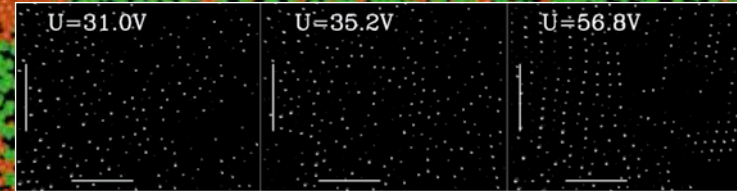
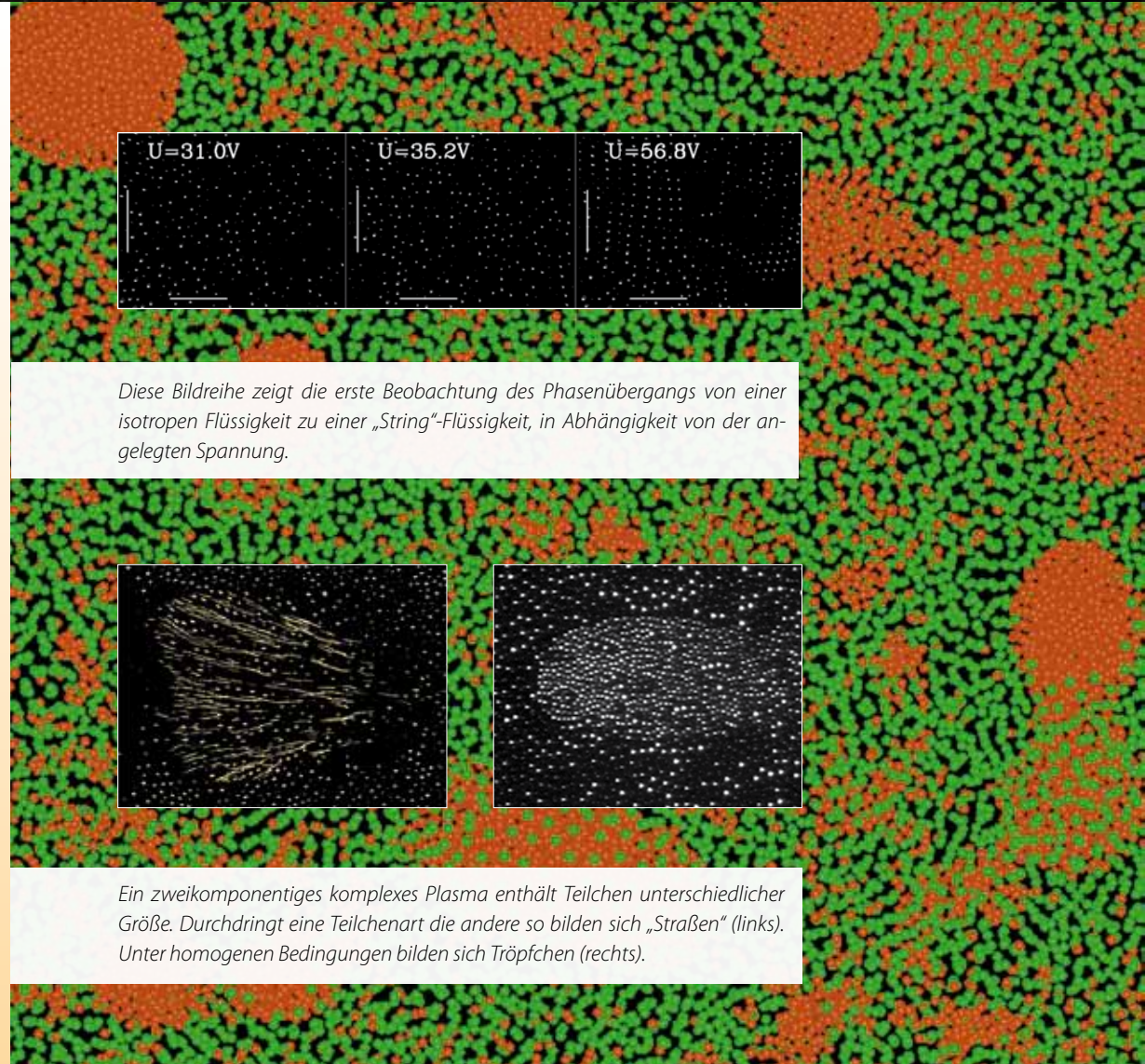
KOMPLEXE PLASMEN

Unsere neuesten Entdeckungen mit dem PK-3 Plus-Labor im All beziehen sich auf Phasenübergänge in komplexen Plasmen mit einer oder zwei Teilchenkomponenten.

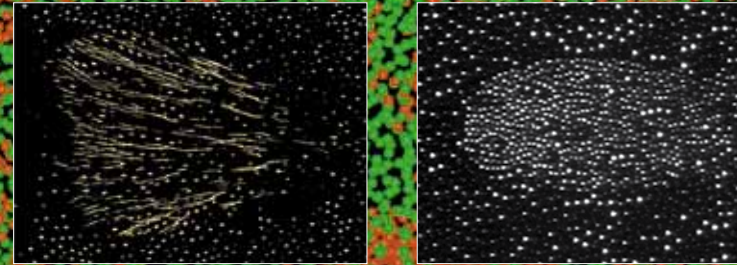
In einem einkomponentigen komplexen Plasma führt das Anlegen eines elektrischen Feldes zu einer zusätzlichen Wechselwirkung zwischen benachbarten Mikroteilchen, wodurch die isotrope Flüssigkeit in eine so genannte „String“-Flüssigkeit übergeht, bei der die Teilchen sich entlang der Feldlinien anordnen. Dies haben wir zum ersten Mal auf der ISS beobachtet und es hat viele interessante Folgen: Wir können die Wechselwirkung zwischen den Teilchen gezielt steuern – von isotrop bis anisotrop – und damit allgemeingültige Prozesse in stark gekoppelten Systemen untersuchen.

Wenn kleine Teilchen durch eine ruhende Wolke aus größeren Teilchen in einem zweikomponentigen komplexen Plasma fließen, kann es unter bestimmten Bedingungen zur Ausbildung von „Straßen“ kommen. Die gegenseitige Beeinträchtigung und damit auch der Energieverlust werden so minimiert. Unter homogenen, gleich bleibenden Bedingungen trennen sich die Teilchen unterschiedlicher Größe und bilden Tropfen.

Diese und andere Merkmale in komplexen Plasmen zu beobachten, erlaubt es uns, eine enorm große Vielfalt an klassischen Phasenzuständen und -übergängen zu untersuchen. Diese kritischen Phänomene existieren in vielen unterschiedlichen atomaren, molekularen, kolloidalen, granularen und anderen Systemen und umfassen grundlegende Physik wie den Einsatz kooperativer Prozesse, Stabilitätsprinzipien und die Allgemeingültigkeit am kritischen Punkt.



Diese Bildreihe zeigt die erste Beobachtung des Phasenübergangs von einer isotropen Flüssigkeit zu einer „String“-Flüssigkeit, in Abhängigkeit von der angelegten Spannung.



Ein zweikomponentiges komplexes Plasma enthält Teilchen unterschiedlicher Größe. Durchdringt eine Teilchenart die andere so bilden sich „Straßen“ (links). Unter homogenen Bedingungen bilden sich Tröpfchen (rechts).



KOMPLEXE PLASMEN

➔ Komplexe Plasmen erlauben die Untersuchung allgemeiner, grundlegender physikalischer Vorgänge, wie Selbstorganisation, Musterbildung, Phasenübergänge und Skalierung.

Durch die große Vielfalt und die grundlegende Natur der untersuchten Phänomene baut unsere Forschung viele Brücken in benachbarte Forschungsfelder. Das MPE vereint ein ausgewogenes theoretisches und experimentelles Programm, auch mit Experimenten im All, was für die weitere Entwicklung der interdisziplinären Forschung im Bereich der komplexen Plasmen unabdingbar ist.



Die Ringe des Saturn, fotografiert von der Voyager-Raumsonde. Die dunklen Bereiche, die so genannten Speichen, entstehen durch geladene Staubteilchen und sind damit Beispiele für staubige (komplexe) Plasmen im All.

Von der Grundlagenforschung zur Industrie – Forschung für alle

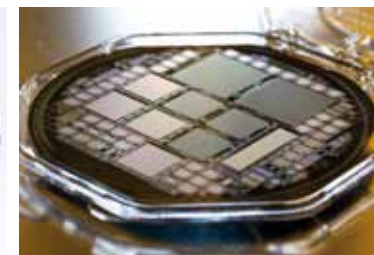
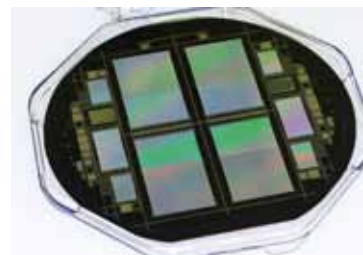
Obwohl das MPE ein Institut der Grundlagenforschung ist, führt unser Bestreben unseren Erkenntnishorizont zu erweitern, immer wieder auch zu nutzbringenden Anwendungen auf anderen Gebieten. Aus neuen Methoden und Technologien, die für bahnbrechende astronomische Instrumente entwickelt werden, können sinnvolle und innovative Anwendungen in der Industrie entstehen. Unsere physikalische Grundlagenforschung kann zu unerwarteten Ergebnissen in anderen Bereichen führen, wie beispielsweise der Medizin.

Das Max-Planck-Institut Halbleiterlabor, das seit 1992 gemeinsam vom MPE und dem Max-Planck-Institut für Physik betrieben wird, hat eigene Labore im Süden von München. Mit einem großen Reinraum der Spitzenklasse bietet es hervorragende Bedingungen, um Halbleiterdetektoren für die Astro- und Hochenergiephysik zu entwickeln und herzustellen. Die Hauptprojekte für die Röntgenastronomie sind eROSITA und IXO, für deren Kameras hohe Auflösung, niedriges Rauschen und hohe Auslesegeschwindigkeit kombiniert werden müssen. Weitere Detektoren für Röntgen-, optische, Infrarot- und Mikrometer-Wellenlängen werden in mehreren anderen Projekten entwickelt.

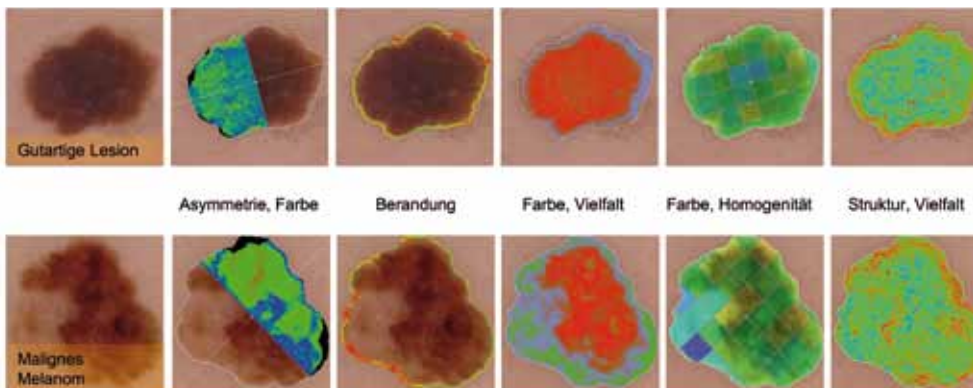
Viele der High-End-Lösungen, die für die sehr hohen Anforderungen der Physik und Astrophysik entwickelt werden, finden auch in anderen Instituten oder in der Industrie Anwendung. Die im Jahre 2002 gegründete Firma PNSensor ist für die kommerzielle Verwertung der Detektoren verantwortlich. Bedeutende industrielle Anwendungen sind unter anderem der Einsatz von Silikon-Drift-Detektoren in Röntgenspektrometern und in Instrumenten für Materialforschung und Qualitätskontrolle.



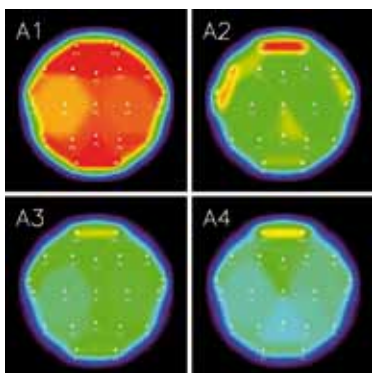
Mitarbeiter des MPI Halbleiterlabors führen optische Qualitätsprüfungen im Reinraum durch. Die gelbliche Beleuchtung beeinträchtigt die lichtempfindlichen Wafer nicht.



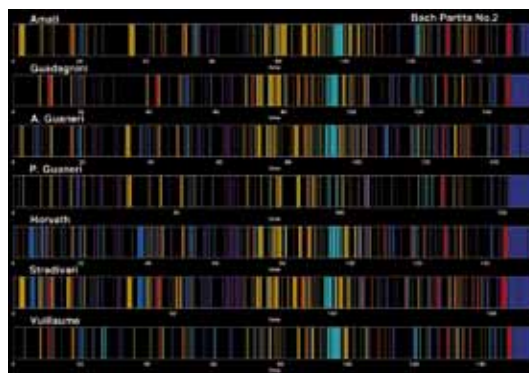
Neu entwickelte Halbleiterdetektoren für die geplanten Röntgensatelliten eROSITA (links) und IXO (rechts). Im Vergleich zu früheren Detektoren sind sie wesentlich empfindlicher.



Eine verdächtige Hautveränderung wird gescannt. Rechts: Ein bösartiges Melanom unterscheidet sich von einer gutartigen Veränderung in mehrerer Hinsicht: Symmetrie, Struktur, Farbe, Berandung. All diese Eigenschaften können mit Bildanalyseverfahren bewertet werden, die ursprünglich für die Auswertung astronomischer Aufnahmen entwickelt wurden.



Bei Epilepsie feuern die Nervenzellen in weiten Bereichen gleichzeitig (rot). Im Lauf der Behandlung nimmt diese erhöhte Synchronisation deutlich ab. Mustererkennungsalgorithmen vom MPE können verdächtige Muster in den Hirnstromwellen nachweisen.



Die charakteristischen Klangmuster unterschiedlicher Geigen können analysiert und als farbcodierte Muster dargestellt werden. Damit ergibt sich ein akustischer Fingerabdruck für jedes Instrument.

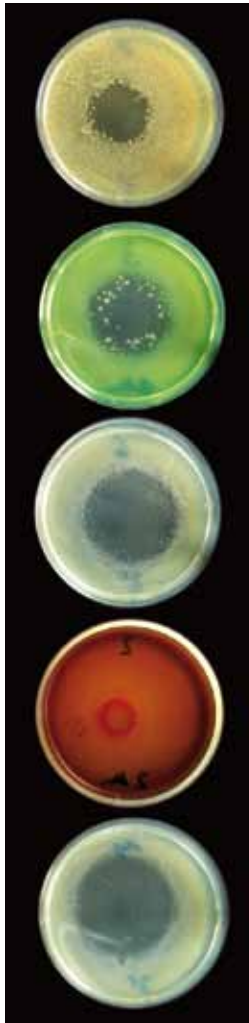
Am MPE selbst ist die Theorie-Abteilung beim Wissenstransfer sehr aktiv. Das aus der Analyse komplexer Systeme und den Untersuchungen an komplexen Plasmen erworbene Know-How findet dabei Anwendungen zum Beispiel im Ingenieurwesen, der Biologie und der Medizin.

Die Mustererkennung spielt in der Astronomie eine zentrale Rolle, zum Beispiel bei der Charakterisierung der inhomogenen Materieverteilung im Universum mit Daten aus Beobachtungen oder Simulationen. Methoden aus verschiedenen mathematischen Disziplinen werden eingesetzt, um spezifische Merkmale aus riesigen Datenmengen zu extrahieren. Die verschiedenen am MPE entwickelten Verfahren – wie die patentierte Scaling-Index-Methode – werden auch auf anderen Gebieten zur Diagnose oder Klassifizierung angewandt. Körperschall oder gewöhnliche Klangspektren können mit Techniken analysiert werden, die quasi einen Audio-Fingerabdruck erzeugen, um so wichtige Merkmale von technischen und biologischen Systemen oder auch Musikstücken aufzudecken. In der Medizin verschaffen Bildanalyseverfahren aus der Astronomie bereits seit vielen Jahre greifbare Vorteile: Die Mustererkennung aus Garching hilft Dermatologen schnell bösartige Melanome zu erkennen. Andere viel versprechende Entwicklungen sind beispielsweise die Untersuchung der Gehirnströme von Epilepsie- und Autismus-Patienten oder die Analyse der Knochenfestigkeit bei Osteoporose mit Techniken, die die Knochenstruktur quantitativ bewerten.

Unsere jüngsten Entwicklungen im Bereich kalter Plasmen werden inzwischen für die bakterielle Sterilisation lebender Gewebe unter atmosphärischem Druck verwendet. Eine Reihe vorklinischer Studien haben im Rahmen unserer interdisziplinären Kooperation nachgewiesen, dass kaltes Plasma erfolgreich und ohne Nebenwirkungen für die Behandlung von Infektionen eingesetzt werden kann. Die gewünschte keimtötende und bakterizide Wirkung stammt hauptsächlich von reaktionsfreudigen, chemischen Molekülen wie Ozon, geladenen Teilchen, UV-Licht und damit zusammenhängenden komplexen Prozessen.

Man weiß, dass der Keimbefall von Wunden oft mit Entzündungen einhergeht, die weitere Komplikationen nach sich ziehen und damit die Wundheilung verhindern. Um lebendes Gewebe zu behandeln, entwickelten wir spezielle Plasmageräte, die den Kontakt mit der Hautoberfläche, Hitzeschäden und andere schmerzhaft empfindungen vermeiden. In Zusammenarbeit mit einer japanischen Firma haben wir eine neuartige, atmosphärische Plasmaquelle entwickelt, die auf Mikrowellentechnologie basiert und für die klinische Behandlung chronischer Wunden eingesetzt wird. In der vom MPE initiierten weltweit ersten klinischen Studie wird ein solches Gerät derzeit getestet und konnte bereits eine bessere Heilung von venösen und arteriellen „Geschwüren“ unter Beweis stellen.

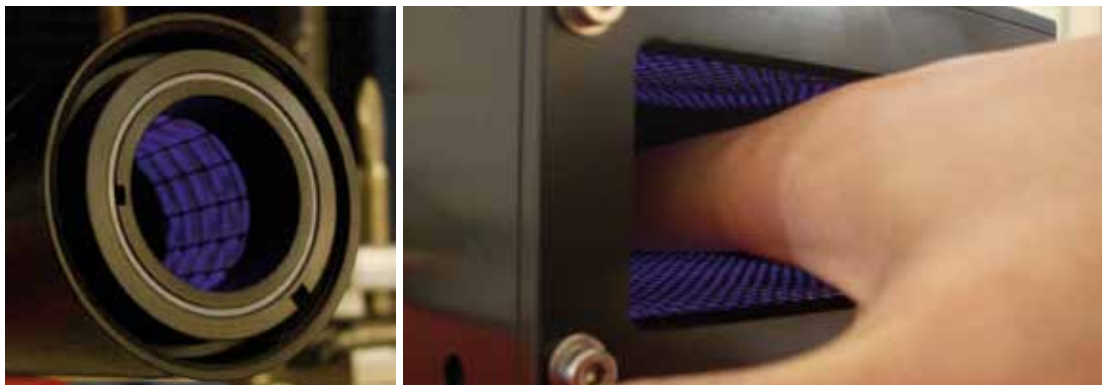
Mit Plasma behandelte Bakterienkulturen in der Petrischale: die dunklen Bereiche (Hemmhöfe) in der Mitte der Schalen verdeutlichen den bakteriziden Effekt des Plasma auf unterschiedliche Arten von Bakterien.



Die beiden Bilder in der Mitte zeigen ein klinisches Plasmagerät für die Behandlung chronischer Wunden. Das linke Bild stellt vergrößert die Halterung der Plasmafackel dar. Der Ring aus Bildern zeigt die Zündung des atmosphärischen Plasmas (im Uhrzeigersinn, von oben), aufgenommen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera mit 1000 Bildern pro Sekunde.



Bei der „Surface Micro-Discharge“-Technologie wird ein Plasma durch viele winzige Entladungen auf einer skalierbaren, ebenen Elektrodenoberfläche erzeugt (oben). Prototyp eines Gerätes zur Handdesinfektion (Bild unten rechts) und eine Plasmaquelle in einer zylindrischen Anordnung für unterschiedliche Spezialanwendungen (unten links).



Darüber hinaus entwickelten wir eine Reihe anderer atmosphärischer Niedertemperatur-Plasmageräte, die – je nach gedachter Anwendung – ganz unterschiedliche Techniken zur Plasmaerzeugung einsetzen. Bei all diesen Entwicklungen wurden die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Plasmas untersucht. Aus dieser Diagnostik entstanden Ideen für innovative Anwendungen in der Medizin, Kosmetik, Zahnpflege und Hygiene, sowohl im privaten als auch im professionellen Umfeld. Der wichtigste Plasmaeffekt bei der professionellen Hygiene ist die Sterilisation und Desinfizierung. Man schätzt, dass jedes Jahr allein in den USA und Europa mehr als zwei Millionen Menschen im Krankenhaus mit Keimen infiziert werden, die zu jährlich mehr als 100 000 Todesfällen führen. Das Verhindern von Infektionen, oder wenigstens deren Einschränkung, ist deshalb ein wichtiger Bestandteil der Prophylaxe. Für den privaten Gebrauch könnte die Plasma-Desinfektion bei Haushaltsgeräten, bei der Vorbeugung oder Behandlung von Pilzkrankheiten, Parodontose und Tetanus, oder zur Reduzierung der für Schweißgeruch verantwortlichen Bakterien („Plasma-Deodorant“) eine Rolle spielen.

Erste experimentelle Ergebnisse, die wir in Zusammenarbeit mit unseren medizinischen und wissenschaftlichen Partnern erzielten, zeigen, dass diese Plasmen in wenigen Sekunden oder Minuten tatsächlich alle bisher untersuchten grampositiven und gramnegativen Bakterien abtöten – einschließlich der multiresistenten Bakterien, wie beispielsweise MRSA – und ebenso Pilze und Viren.



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:

Alle Bilder MPE mit Ergänzungen von
ESO, NASA, dem Space Telescope Science Institute,
dem Chandra X-ray Center und Peter Seiler

Design:

Peter Seiler

Druck:

Humbach & Nemazal Offsetdruck GmbH

Dezember 2010

