

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik Garching



Jahresbericht 2006



Titelbild:

Die Farben des COSMOS: Die größte bisher durchgeführte, empfindliche Himmelsdurchmusterung bei vielen verschiedenen Wellenlängen rankt sich um Legacy-Surveys mit dem Hubble-Teleskop, mit XMM-Newton, Spitzer und Subaru. Das MPE leitet die Röntgenbeobachtungen im COSMOS-Feld mit XMM-Newton (Fotomontage). Das Bild zeigt Galaxien-Konzentrationen, wobei die Farben deren Rotverschiebung angeben: von blau (z=0.1) bis rot (z=1.2). Die Konturen zeigen die ausgedehnte Röntgenemission.



Jahresbericht 2006

MPE Report 294

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Impressum

Inhaltliche Verantwortung: Redaktion und Layout: Druck:	R. Genzel W. Collmar und J. Zanker-Smith MPE Druckerei (R. Hauner)
Text und Bildmaterial:	W. Becker, H. Böhringer, U. Briel, M. Brusa, W. Bunk, N. Cappelutti, W. Collmar, R. Davies, R. Diehl, A. Finoguenov, N. Förster Schreiber, R. Genzel, O. Gerhard, J. Greiner, S. Haaland, F. Haberl, G. Hasinger, H. Höfner, A. Ivlev, B. Klecker, C. Knapek, R. Koehler, R. Kompaneets, U. Konopka, D. Lutz, G. Lichti, N. Meidin- ger, G. Morfill, N. Nowak, G. Paschmann, W. Pietsch, R. Pompl, P. Predehl, C. Räth, R. Saglia, D. Samsonov, L. Strüder, L. Tacconi, K. Tarantik, M. Thiel, M. Thoma, H. Thomas, A. von Kienlin, S. Zhdanov
Sonstige Unterstützung:	R. Mayr-Ihbe, B. Mory, H. Steinle

1. Auflage Mai 2007

Inhaltsverzeichnis

VORWORT	
1 AUFGABEN UND ARBEITSWEISE DES INSTITUTS	
2 WISSENSCHAFTLICHE ERGEBNISSE	
2.1 Galaxienentwicklung, Großräumige Struktur and Kosmologie	
2.2 Galaxien, Galaxienkerne und massereiche schwarze Löcher	
2.3 Sternentwicklung und das interstellare Medium	
2.4 Physik des Sonnensystems	
2.5 Komplexe Plasmen	
3 EXPERIMENTELLE ENTWICKLUNG UND PROJEKTE	
3.1 Physik des erdnahen Weltraums	
3.2 Infrarot/Submillimeter Astronomie	
 3.3 Hochenergie-Astrophysik Projekte der Röntgenastronomie Projekte der Gamma-Astronomie Das MPI Halbleiterlabor – Silizium Detektoren für Hochgeschwindigkeitskameras 	
3.4 Komplexe Plasmen	71
3.5 Optische und Interpretative Astronomie	
3.6 Wissenstransfer	
4 DAS INSTITUT	
4.1 Allgemeine Bereiche	
4.2 Lehre und Ausbildung	
4.3 Öffentlichkeitsarbeit	
4.4 Institutsleben	
5 VERÖFFENTLICHUNGEN, LEHRVERANSTALTUNGEN	
6 PERSONAL, KOLLABORATIONEN	

VORWORT

Der vorliegende Jahresbericht 2006 des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (MPE) bietet einen Überblick über unsere laufenden wissenschaftlichen Arbeiten, über den Stand und Fortschritt unserer experimentellen Projekte sowie über die Entwicklung von neuer Hardware. Darüber hinaus gibt er einen allgemeinen Überblick über die wissenschaftliche und organisatorische Struktur des MPEs und seiner externen Einrichtungen, stellt unsere wissenschaftlichen Gruppen und ihr Arbeitsumfeld vor und berichtet auch über unsere Aktivitäten in Ausbildung und Sozialem.

Dieser Bericht wurde in erster Linie geschrieben für eine wissenschaftlich und astronomisch interessierte Leserschaft und für unsere Sponsoren. Er richtet sich aber auch an die allgemeine Öffentlichkeit und an Kollegen in Industrie, Bildung und Medien.

Der Bericht betont unsere neueren wissenschaftlichen Erkenntnisse und den Stand unsere Experimente, Projekte und instrumentellen Entwicklungen. Im Wissenschaftsteil (Kapitel 2) führen wir mit einem kurzen Überblick jeweils in unsere wichtigsten Forschungsfelder ein und fassen unsere Tätigkeiten dafür kurz zusammen. Danach berichten wir jeweils einige ausgewählte Forschungsergebnisse etwas ausführlicher. Die gleiche Darstellungsstruktur verwenden wir im Experiment- und Projektteil (Kapitel 3) dieses Berichts.

Das vergangene Jahr war wieder sehr erfolgreich für unser Institut. Es brachte aufregende neue wissenschaftliche Ergebnisse, aber auch deutliche Weiterentwicklungen bei unseren Projekten. Im folgenden sind einige unserer wichtigen wissenschaftlichen Ergebnisse und auch einige der erreichten wichtigen Ziele im Projektbereich gelistet:

- Entdeckung früher (3 Milliarden Jahre nach dem Urknall) schnell-formender großer rotierender proto-scheiben Galaxien, die ähnlich unserer Milchstrasse sind
- XMM-Newton findet den größten "Feuerball" in einem verschmelzenden Galaxienhaufen
- noch andauernde Verschmelzung im Coma Haufen
- erste direkte Bilder des Staubtorus um den Kern einer aktiven Galaxie (AGN)
- neue Einblicke in aktive Sternentstehungsgebiete und die Entwicklung von nahen Quasaren
- eine tiefe Röntgendurchmusterung des grossen "COSMOS" Feldes mit XMM-Newton liefert neue Erkenntnisse über die AGN Entwicklung im Universum
- neue Einsichten in die Heizmechanismen von Neutronensternoberflächen
- Entdeckung eines "taumelnden", präzedierenden Neutronensterns
- das erste bedeckende massereiche Röntgendoppelsternsystem mit einem Schwarzen Loch als kompaktem Objekt
- neue Einsichten in die Plasmakonvektion der Erdatmosphäre
- Hinweise zur Quelle der energiereichen Teilchen von der Sonne
- Physik der nicht-newtonischen komplexen Plasmaflüssigkeiten und Phasenübergänge bei Plasmakristallen
- erste Experimente mit "PK-3 Plus" auf der Internationalen Raumstation ISS
- Beginn der Phase A Studie für "GRAVITY", ein hochauflösendes (10 µ Bogensekunden) abbildendes nah-infrarot Instrument für das VLT Interferometer
- Abgabe des Flugmodells des "GLAST Burst Monitors" an den GLAST Satelliten
- Abschluss des "Preliminary Design Review" für KMOS, ein Multi-Objekt nah-infrarot Spektrograph für das VLT
- Fertigstellung der ersten MOS (multi object spectroscopy) Einheit für "LUCIFER" am LBT
- Unterzeichnung des PanSTARRS Vertrags
- erfolgreicher Start der NASA Mission "STEREO"
- erste Parabelflüge unter Schwerelosigkeit für das "PK-4" Experiment
- Inbetriebnahme der Laserleitstern-Anlage "PARSEC" am VLT
- Einrichtung von zwei Exzellenzclustern (mit MPE Beteiligung) an der Ludwig-Maximilians-Universität und der Technischen Universität München

Wir danken allen Kollegen, Freunden, Industriepartnern, Organisationen und Sponsoren für die exzellente Zusammenarbeit und die fortwährende Unterstützung.

Professor Reinhard Genzel Geschäftsführender Direktor

Aufgaben und Arbeitsur se des bis itut

1 AUFGABEN UND ARBEITSWEISE DES INSTITUTS

Unsere Forschung am Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE), das auf dem Forschungsgelände in Garching beheimatet ist (Abb. 1), beschäftigt sich mit Themen der Astro- und Plasmaphysik. Wir bringen Experimente und Instrumententwicklung mit Beobachtungen, Datenanalyse und theoretischen Arbeiten zusammen. Unsere wichtigsten Forschungsfelder sind derzeit:

- Galaxienentwicklung, großräumige Struktur und Kosmologie
- Galaxien, Galaxienkerne und massereiche Schwarze Löcher
- Sternentwicklung und das Interstellare Medium
- Physik des Sonnensystems
- Physik der komplexen Plasmen.

Das MPE kann stolz auf eine vierzigjährige Geschichte mit erfolgreichen Experimenten und Projekten im Bereich der Plasma- und Astrophysik zurück blicken. Zu Beginn wurden Teilchen und elektromagnetische Felder, speziell in ihrer gegenseitigen Wechselwirkung im erdnahen Weltraum (lonosphäre, Magnetosphäre, Sonnenwind) mittels in-situ Messungen untersucht. Heute beschäftigen sich unsere experimentellen Arbeiten überwiegend mit Astronomie, wobei mehr als zwölf Dekaden des elektromagnetischen Spektrums überdeckt werden, vom Millimeter/Submillimeter und Infrarot-Bereich bis hin zu den optischen, Röntgen- und Gamma-Bändern. Viele unserer Experimente benötigen Teleskope und Detektoren im All, um die Erdatmosphäre unter sich zu lassen, die wegen ihrer

Absorptionseigenschaften entsprechende Messungen vom Boden nicht zulässt. Im infraroten und optischen Bereich nutzen wir zusätzlich auch bodengebundene oder von Flugzeugen getragene Teleskope. Unsere Arbeiten werden durch Laborexperimente vervollständigt. Seit der Entdeckung eines neuen Plasmazustandes ("Plasmakristall") hat sich das junge Forschungsfeld "Komplexe Plasmen" aufgetan, das hauptsächlich mit Laborexperimenten betrieben und weiter entwickelt wird. Allerdings werden inzwischen auch Experimente auf der Internationalen Raumstation durchgeführt, um Gravitation zu vermeiden. Einige Forschungsgruppen beschäftigen sich bevorzugt mit der Interpretation von Beobachtungen und Daten, wobei alle Themen unserer experimentellen Forschung überdeckt werden. Die Zusammenarbeit und die starke Wechselwirkung von Theoretikern, Beobachtern und Experimentalphysikern ist ein Markenzeichen unseres Arbeitsstils.

Unsere wissenschaftlichen Aktivitäten sind organisatorisch in vier Arbeitsbereiche aufgeteilt, die jeweils von einem Direktor geleitet werden: (1) Optische und Interpretative Astronomie, (2) Infrarot- und Submillimeter/Millimeter Astronomie, (3) Röntgen- und Gamma-Astronomie und (4) Theorie und komplexe Plasmen. Eine kleinere Gruppe beschäftigt sich mit der Plasmaphysik des erdnahen Weltraums mittels in-situ Messungen. Innerhalb dieser grossen Bereiche wird die Forschung von einzelnen Projektgruppen betrieben, die aus Wissenschaftlern, Postdocs, Studenten und technischen Mitarbeiter der zentralen Service-Bereichen zusammengesetzt sind. Derzeit gibt es etwa 40 solcher unabhängigen Projektgruppen. Durch unsere Führungsrolle bei der Entwicklung von anspruchsvollen Weltraum- und bodengebundenen Instrumenten, Experimenten und Teleskopen



Abb. 1: Das Forschungsgelände in Garching mit Teilen der Technischen Universität München und mehreren Forschungsinstituten, darunter das MPE. Die Bauarbeiten zur Verlängerung der Müchner U-Bahn ins Zentrum des Geländes sind 2006 noch im Gange.

spielen auch unsere Technik- und Ingenieurbereiche, die eng mit den einzelnen Projektgruppen zusammenarbeiten, eine Schlüsselrolle. Über die Jahre hinweg hat sich der Schwerpunkt der Forschung auf die Analyse großer Mengen von Experimentdaten verlagert. Ein Team, bestehend aus Vertretern aller Bereiche, koordiniert diesbezüglich die Hard- und Software-Aktivitäten am MPE. Weitere wichtige Einrichtungen des Instituts sind die Röntgentestanlage "PANTER" in Neuried bei München (Abb. 2) und das Max-Planck-Institut Halbleiterlabor (HLL) auf dem Siemens Campus in München-Neuperlach (Abb. 3), das als eine gemeinsame Forschungseinrichtung des Max-Planck-Instituts für Physik in München und dem MPE betrieben wird. Zusätzlich zu den oben erwähnten zentralen technischen Gruppen, Mechanik und Elektronik, unterstützt unsere Verwaltung und Haustechnik unser Institut und auch das benachbarte Max-Planck-Institut für Astrophysik.



Abb. 2: Ein Luftbild der MPE Röntgentestanlage "PANTER" in Neuried bei München. Die Röntgenquelle und die Teleskop-Kammer sind durch eine 130 Meter lange Vakuumröhre von einander getrennt.

internationale Organisationen, wie der European Space Agency (ESA), der Europäischen Südsternwarte (ESO) und auch der Europäischen Gemeinschaft (EU) unterstützt. Dazu kommen noch finanzielle Beiträge von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), der Humboldt Gesellschaft und der Dr. Johannes Heidenhain-Stiftung.

Neben der Forschung nimmt unser Institut auch universitäre Ausbildungsaufgaben wahr. MPE Wissenschaftler lehren an mehreren Universitäten und betreuen studentische Forschungsprojekte (Diplom- und Doktorarbeiten). Die Mehrzahl davon an den beiden Münchner Universitäten, aber auch an anderen deutschen Universi-

Wissenstransfer aus unserer Forschung in industrielle Anwendungen ist besonders ausgeprägt in zwei unserer Forschungsfelder. Zum einen transferiert unsere Theoriegruppe "Know-How" aus dem Bereich der komplexen Plasmen in medizinische, technische und pharmazeutische Anwendungen, und zum anderen produziert unser Halbleiterlabor Röntgendetektoren, die auch von anderen Forschungsinstituten und der Industrie eingesetzt werden. Die meisten experimentellen Projekte können

nur in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, sowohl lokal im Münchner Raum angesiedelt als auch europa- und weltweit, umgesetzt werden. Unsere erfolgreiche Arbeit in experimenteller Astrophysik und Weltraumforschung verdeutlicht den Wert von industriellen Kooperationen, vor allem mit der Weltraumindustrie und Elektronikfirmen. Die hohen technologischen Anforderungen unserer Experimente führen oft einem Technologietransfer 711 auch hin zur Industrie.

Eine Grundfinanzierung durch die Max-Planck-Gesellschaft ist das wichtigste Element zur Finanzierung von Personal und Projekten. Zusätzlich werden wir durch staatliche Institutionen, wie dem Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), sowie durch täten und sogar weit entfernt, wie z.B. in der University of California (Berkeley). Darüber hinaus veranstalten wir Workshops, Seminare und Konferenzen zu unseren und angrenzenden Forschungsgebieten, häufig in Zusammenarbeit mit den Universitäten. Unsere sehr erfolgreiche "Internationale Max-Planck-Research School on Astrophysics" an der Ludwig-Maximilians-Universität München brachte eine wesentliche Intensivierung der Doktorandenausbildung im Raum Garching/München.



Abb. 3: Das MPI Halbleiterlabor auf dem Siemens Gelände in München-Neuperlach.

2 Wissenschaftliche Ergebnisse

2.1 GALAXIENENTWICKLUNG, GROSSRÄUMIGE STRUKTUR UND KOSMOLOGIE

Zwei der gegenwärtig wichtigsten Fragen der Kosmologie sind: "Wie entwickelte sich die heutige Struktur und das Erscheinungsbild unseres Universums?", und "Wie und wann haben sich Galaxien und die größeren Strukturen gebildet?" Was können wir über das globale kosmologische Modell lernen, das diese Entwicklung beschreibt und was sind die grundlegenden physikalischen Prozesse, die die kosmologische Entwicklung vorantreiben? Diese Fragen werden in den verschiedenen Forschungsgruppen des Instituts durch Beobachtungen in verschiedenen Wellenlängen untersucht.

Tiefe photometrische Himmelsdurchmusterungen im Optischen und Infraroten bieten uns eine Bestandsaufnahme der Galaxienpopulation bei verschiedenen Rotverschiebungen. Galaxienhelligkeiten im Roten und Infraroten geben ein Maß für die Dichte der Sternmasse und erlauben die Konstruktion von Massenfunktionen von Galaxien zu verschiedenen Epochen. Diese Beobachtungsdaten, zusammen mit Modellen der Sternpopulationsynthese, zeigen uns, wie sich die Galaxienpopulation mit der Zeit entwickelt hat. Das überraschende Ergebnis ist, dass die massiveren Galaxien bereits schon bei Rotverschiebungen um eins mit der gleichen Häufigkeit vorhanden waren wie heute. Es sind hauptsächlich die weniger leuchtkräftigen Galaxien, die sich in größerer Zahl erst spät entwickelten und heute die meiste Sternbildung zeigen.

Die Sternbildungsrate der Galaxien und die Aktivität ihrer zentralen schwarzen Löcher spiegelt sich in den blauen Farben des optischen Spektrums und bei langen Wellenlängen im Infrarot und Millimeterbereich wider, die mit dem Spitzer Satellitenobservatorium und dem IRAM Millimeterteleskop beobachtet werden können. Die aktivsten Objekte mit der höchsten Sternbildungsrate und den leuchtkräftigsten AGN lernt man bei hohen Rotverschiebungen. Dabei findet man, dass die Entwicklung der Sternbildungsrate und der abgeleitete Anstieg der Sternmasse näherungsweise konsistent sind.

Sehr tiefe Infrarotbeobachtungen entfernter Galaxien können wir nun mit einer Kombination aus adaptiver Optik und Integralfeld-Spektroskopie durchführen, mit dem am MPE gebauten SPIFFI Instrument am ESO VLT. Diese detaillierten Beobachtungen vermitteln ein Bild der internen Dynamik von Galaxien, wieder mit einer Überraschung: Spiralgalaxien mit der Masse unserer Milchstraße kann man schon bei Rotverschiebungen von 2 finden. Die frühe Bildung solch massereicher Galaxien stellt immer noch eine Herausforderung für die üblichen Modelle des hierarchischen Strukturwachstums im Universum dar. Diese spektakulären Ergebnisse zur Kinematik sehr entfernter Galaxien werden im ersten Artikel dieses Kapitels beschrieben.

Die gegenwärtig interessantesten Prozesse in Galaxienhaufen, die mit dem Strukturwachstum verknüpft sind, sind Haufenzusammenstöße. Ein besonders dramatisches Beispiel dieser Ereignisse wird im zweiten, folgenden Artikel dargestellt. Ebenso wichtig ist die Erforschung der dichten, kühlen Kerne in Galaxienhaufen, früher "cooling flows" genannt. Die immer detaillierteren Beobachtungen im Röntgenbereich und bei anderen Wellenlängen enthüllen die Prozesse, die ein massives Kühlen und Kondensieren von Haufenplasma in Galaxienhaufen mit dichten, kühlen Kernen verhindern (Abb. 1). Die mechanische Energie des Jets aus dem massereichen schwarzen Loch in M87 reicht aus, um das M87 umgebende Haufenplasma zu heizen. Eine präzise, räumlich aufgelöste spektrale Analyse der Beobachtungsdaten zeigt eine Region hoher Entropie und ist damit ein Nachweis für die Heizung jener Region, die durch die Radiokeulen des Jets mit Energie versorgt wird.

Galaxienhaufen zeigen auch die stärkste Wirkung gravitativer Lichtablenkung und wirken als Gravitationslinsen. Eine detaillierte Aufnahme mit dem Hubble Space Telescope des Haufens Abell 1689 mit 107 abgelenkten Abbildungen von 32 Hintergrundgalaxien bildete die Grundlage einer einzigartige Studie der Rekonstruktion der Linsenwirkung des Haufens in einer Doktorarbeit am MPE.



Abb. 1: Karte des Entropie-Überschusses im Röntgenhalo der elliptischen Galaxie M87 im Virgo Haufen. Eine Radiokarte ist über die Röntgendaten gezeichnet. Die rötliche Farbe des nördlichen Radiohalos deutet eine erhöhte Entropie an, ein klares Zeichen von Gasheizung durch den Radio-Jet.

Verschiedene große optische Himmelsdurchmusterungen werden in Kürze beginnen, wie ESO KIDS, PanSTARRS, und das HETDEX Projekt. Sie alle haben als wichtigstes Ziel, die großräumigen Strukturen des Universums zu erfassen. Mit den Ergebnissen können die Parameter des für unser Universum passenden kosmologischen Modells genauer bestimmet werden. Besonderes Augenmerk gilt dabei großräumigen Strukturmerkmalen, die im frühen Universum verursacht und als Baryonische Oszillationen bezeichnet werden. Der dritte der folgenden Artikel befasst sich mit diesem Thema.

Ferne Galaxie auf dem Seziertisch

Aus Beobachtungen und Simulationen haben die Astronomen ein Bild der Galaxienentstehung und -entwicklung im jungen Universum erarbeitet. Galaxien entstanden demnach als sich gasförmige baryonische Materie in den Zentren großer Halos aus dunkler Materie abkühlte. Danach führten Zusammenstöße und Fusionen zu einem weiteren hierarchischen Aufbau dieser Halos und damit auch von Galaxien. Unklar aber ist weiterhin, über welche Zeiträume sich Galaxien bildeten und wann und auf welche Weise "Bulges" in ihren Kernregionen und Scheiben - die hauptsächlichen Bestandteile heutiger Galaxien - entstanden sind. Unsere "SINS"-Studie weit entfernter, leuchtstarker Galaxien liefert nun neue Antworten auf diese Fragen durch die Entdeckung großer Scheibengalaxien, die sich in relativ kurzer Zeit, nur etwa 3 Milliarden Jahre nach dem Urknall ausgebildet haben müssen. Die Kombination von adaptiver Optik und Spektroskopie im neuen Instrument "SINFONI" am VLT brachte bei einem der beobachteten Systeme eine neue Rekordauflösung von 0.15 Bogensekunden, und lieferte damit detaillierteste Einblicke in eine Galaxie bei dieser Entfernung.

In den letzten Jahren hat sich unser Verständnis, zur Entstehung und Entwicklung von Galaxien entscheidend verbessert. Dies geht größtenteils auf die Erfolge einer Vielzahl von Studien und Himmeldurchmusterungen zurück, die, an modernen Großteleskopen und Satellitenobservatorien ausgeführt, nahezu das gesamte elektromagnetische Spektrum von Röntgenstrahlung bis hin zum Radiobereich umfassen. besitzen Mittlerweile wir dadurch ein relativ gesichertes Bild der Galaxienentwicklung, zurück bis zu einer Zeit etwa ein bis zwei Milliarden Jahre nach dem Urknall. Trotz dieses beeindruckenden Fortschritts istaberweiterhinunverstanden, genau Galaxien ihre wie Masse ansammelten und sich mit der Zeit entwickelten. Das Hauptproblem dabei ist unser nur lückenhaftes Wissen über relevante Mechanismen, die den Zustand. das Drehmoment, die Abkühlung und die Dynamik gewöhnlicher baryonischer Materie kontrollieren. Die Beschreibung Galaxienentstehung in der Modellen und Simulationen

bleibt unsicher, da die komplizierte Physik baryonischer Prozesse, die bestimmen, wie Galaxien wachsen, bislang nicht durch Beobachtungen untermauert ist.

Um hier weiterzukommen bedarf es detaillierte Informationen über die dynamischen und physikalischen Eigenschaften entfernter Galaxien in ihren frühen Entwicklungsstufen. Dies ist Ziel und Nutzen der groß angelegten "SINS" Studie (Spectroscopic Imaging survey in the Near-infrared with SINFONI). SINS beobachtet junge Galaxien bei einer kosmologischen Rotverschiebung z ~ 1 - 4. Das entspricht etwa 8 - 12 Milliarden Jahren vor unserer Zeit, einer kritischen Epoche, von der man denkt, dass in dieser ein Grossteil der Masse, die heute in Galaxien beobachtet werden kann, dort angesammelt wurde. SINS kann dabei auf neueste Beobachtungstechniken zurückgreifen, die mit dem SINFONI Spektrographen am VLT der ESO bereitgestellt werden. SINFONI wurde in Teilen von der Infrarot/ Submm Arbeitsgruppe am MPE entwickelt und gebaut. SINFONI besteht aus einem neuartigen feldabbildenden



Abb. 1: Emission von Wasserstoff Rekombinationslinie (H_{α}) der massereichen sternbildenden Galaxie BzK-15504 etwa elf Milliarden Lichtjahren entfernt. Die Farben zeigen, ob sich das ionisierte Gas von uns weg (rot), auf uns zu (blau) oder scheinbar gar nicht bewegt (grün), jeweils im Verhältnis zum Gesamtsystem bei kosmologische Rotverschiebung z = 2.38. Die Galaxie scheint eine Scheibe wie unsere Milchstraße zu sein, die mit einer maximalen Geschwindigkeit von 230 km/s um die gelbe Achse im Zentrum des galaktischen Kerns (weißes Kreuz) rotiert.

Nahinfrarot-Spektrometer, das, in Kombination mit einem adaptiven Optikmodul, gleichzeitig scharfe Bilder und hoch aufgelöste Spektren liefert. Gerade Beobachtungen im Wellenlängenbereich von 1 bis 2.5 µm eignen sich besonders, Galaxien bei z ~ 1 - 4 zu untersuchen. Viele der spektroskopisch wichtigen Linien und Charakteristika dieser Objekte sind vom optischen Spektralbereich ins Nahinfrarot rotverschoben. Darunter fallen wichtige Emissionslinien ionisierter Gase, deren räumliche Verteilung und relative Bewegung mit Hilfe von SINFONI über das gesamte Objekt aufgenommen werden können. Gasverteilung und Gasbewegung einer Galaxie in einer Entfernung von 11 Milliarden Lichtjahren der jemals erreicht wurde.

Die SINFONI Beobachtungen von BzK-15504 zielte auf die Balmerlinie H α des Wasserstoffs, die bei der Rekombination von Elektronen in jenem Gas entsteht, das durch das Licht von heißen, jungen Sternen in Sternentstehungsgebieten photoionisiert wird. Die Ergebnisse enthüllen eine große Galaxie, die etwa 53.000 Lichtjahre (16 kpc) im Durchmesser misst sowie mehrere auffällige helle Komplexen entsprechend



Abb. 2: Diese hoch aufgelösten Bilder von BzK-15504 zeigen, dass die Sternentstehung in dieser jungen Galaxie in spektakulären lichtstarken und massereichen Komplexen erfolgt und Gas mit hohen Geschwindigkeiten in die Kernregion strömt, um dort einen dichten stellaren "Bulge" und ein akkretierendes schwarzes Loch zu bilden. Mit der Zeit könnte sich dieses System in eine massereiche elliptische Galaxie verwandeln.

spektakulärsten SINS-Datensatz Den zur Zeit Beobachtung lieferte unsere der massereichen, stark sternbildenden Galaxie BzK-15504. Diese einer Rotverschiebung von befindet sich bei z = 2.38 (was einer Zeit entspricht, als das Universum etwa 20% seines derzeitigen Alters hatte). Nahe der Galaxie am Himmel befindet sich ein geeigneter Stern, der als natürlicher Referenz-Stern für die adaptive Optik genutzt werden kann, und somit den Einsatz von adaptiver Optik bei dieser Galaxie ermöglicht. Unsere durchgeführten SINFONI Beobachtungen erzielten eine Winkelauflösung von 0.15 Bogensekunden, was am Ort der Galaxie einer Strecke von 4000 Lichtjahre (1.2 kpc) entspricht. Dies ist damit der detaillierteste Blick auf die

den aktivsten Sternentstehungsgebieten aufweist (Abb. 1 und 2). Aus der relativen Bewegungen des Gases innerhalb der Galaxie erkennt man, dass das System mit einer Geschwindigkeit von bis zu 230 km/s in den Außenbereichen rotiert. Die große Oberflächendichte an Gas (~350 M_opc⁻²), die hohe Sternentstehungsrate (150 M_oyr⁻¹) und die relativ jungen Sternen (~500 Millionen Jahre alt) legen nahe, dass eine, ursprünglich sehr gasreiche, Protoscheibe in nur einigen hundert Millionen Jahren relativ schnell entstanden, fragmentiert und zu Sternen geworden ist. Morphologische und kinematische Details lassen weiter vermuten, dass diese schwere (1.1x10¹¹ M_o), rotierende Scheibe Gas

auf den wachsenden Bulge aus Sternen leitet, der ein akkretierendes Schwarzes Loch beherbergt. Es gibt keine Hinweise auf eine größere Galaxienverschmelzung - ein erstaunliches Ergebnis angesichts der großen Sternentstehungsrate und des schnellen Masseaufbaus. Vermutlich bedeutet das, dass BzK-15504 ihre Masse durch ruhiges Einströmen erhalten hat, wie es das Modell des "Kalten Massenzufluss" vorschlägt – oder durch eine schnelle Reihe kleinere Verschmelzungen.

Ergebnisse bestätigen unsere vorherigen Diese Erkenntnisse aus der Analyse von fast 30 leuchtstarken sternbildenden Galaxien bei ähnlichen Rotverschiebungen, die schon im Rahmen von SINS bereits beobachtet worden waren. Da diese Objekte jedoch keinen geeigneten Referenzstern für adaptiven Optik in der Nähe haben, wurden die SINFONI Beobachtungen unter typischen, natürlichen Seeing-Bedingungen gewonnen, was einer Auflösung von 0.5 bis 0.6 Bogensekunden entspricht. Die kinematischen Eigenschaften des ionisierten Gases der Mehrzahl der größeren Systeme scheinen meist regelmäßig zu sein und variieren monoton über die Galaxien, trotz einer unregelmäßigen räumlichen Gasverteilung – ein überzeugender Nachweis geordneter Rotation in einer Scheibe. BzK-15504 bietet einen bislang einmaligen Blick in ein solches System bei drei bis vierfach höherer Auflösung.

Die Entdeckung eine Reihe von massereichen rotierenden Scheibengalaxien im Rahmen von SINS war sehr überraschend. Angesichts der höheren Zahl großer Verschmelzungen bei hoher Rotverschiebung hatten wir erwartet, dass die meisten größeren Systeme eher irreguläre und komplexe Gasbewegungen zeigen würden. Die Eigenschaften dieser entfernten Scheibengalaxien bieten neue und quantitative Hinweise für theoretische Modelle. Für BzK-15504 und mehrere andere SINS Galaxien bei Rotverschiebungen zwischen 2 - 2.5 konnten wir spezifische Drehimpulswerte von ~1000 km/s kpc ableiten - beinahe so groß wie bei heutigen Spiralgalaxien. Außerdem könnten die Ergebnisse bedeuten, dass das Gas in diesen Galaxien einen Drehimpuls hat, der vergleichbar ist mit dem der unterliegenden Halos aus Dunkler Materie, aus denen es sich abgekühlt hat. Im Umkehrschluss bedeutet das, dass nur wenig Drehimpuls während des Kollapses der baryonischen Materie verloren gegangen ist – ein wichtiger empirischer Hinweis zu einer der seit langem offenen Fragen zur Galaxienentstehung. Für die höchstaufgelösten Galaxien konnten wir das Verhältnis von Rotationsgeschwindigkeit zu den Geschwindigkeiten ungeordneter Bewegungen ermitteln. Die Werte (~2 - 4) liegen zwischen denen für druckstabilisierte Systeme, wie heutige Elliptische Galaxien ($\sim 0.1 - 1$) und denen für rotationsstabilisierte Systeme (10 - 50), wie heutige Spiralgalaxien, zu denen auch die Milchstraße gehört. Dies bedeutet, dass die beobachteten Scheiben ziemlich turbulent, möglicherweise sehr gasreich, und wahrscheinlich instabil gegenüber Sternentstehung und Fragmentierung sind. Einige Simulationen der Entwicklung gasreicher galaktischer Scheiben deuten an, dass die sternbildenden Komplexe später, wegen der dynamischen Reibung an der Galaxienscheibe, zum Massenzentrum hin sinken, um dort einen zentralen Bulge innerhalb etwa einer Milliarden Jahre auszubilden. Dies könnte ein möglicher Weg sein, wie einige der in der SINS Studie entdeckten Galaxien sich zu Elliptischen oder Spiralgalaxien mit schwerem Bulge entwickeln, eben solche, die man im heutigen Universum beobachtet.

N. Förster Schreiber, R. Genzel



Ein rätselhafter Zusammenstoß in A3266: Das hydrodynamische Bild

Mit XMM-Newton beobachteten wir einen kometförmiger Gasball, der die milliardenfachen Masse unserer Sonne hat und der durch den Galaxienhaufen Abell 3266 rast. Dieser kollosale "Feuerball" ist bei weitem das größte Objekt dieser Art. Der Gasball hat einen Durchmesser von ungefähr drei Millionen Lichtjahren, was etwa der 5milliardenfachen Größe des Sonnensystems entspricht. Er erscheint uns als eine in Röntgenstrahlung glühende Kugel mit einem Schweif von der halben scheinbaren Größe des Mondes. Dieses Ereignis ist eine Folge eines Zusammenstoßes von Galaxienhaufen, was den Mechanismus widerspiegelt, mit dem die großräumige Struktur des Universums wächst.

Gegenwärtige Theorien der kosmischen Strukturbildung basieren auf hierarchischen Modellen, in denen zuerst kleine Strukturen gebildet werden, die dann durch Zusammenschluss die größeren Strukturen aufbauen. In diesem Bild spielen Zusammenstöße von Materiehalos eine wichtige Rolle, die nicht nur die Bildung von Galaxienhaufen vorantreiben, sondern auch für die Eigenschaften des Innerhaufenmediums verantwortlich sind, einschließlich der thermodynamischen Eigenschaften und der Metallhäufigkeiten. Ein Zusammenstoßprozess hat dramatische Konsequenzen für die Systeme die ihn erleiden. Durch die Freisetzung enormer Energiemengen wird das Innerhaufenmedium durcheinandergewirbelt, dabei entstehen Stoßwellen und Turbulenz. Die einfallenden Subsysteme werden durch Staudruckwechselwirkung von ihrem Gashalo getrennt. Dieser Vorgang kann den Haupthaufen mit Gas niederer Entropie versorgen, das auch eine hohe Metallhäufigkeit haben kann. Im Haufenzentrum kann ein kühlender Kern zerrissen werden und es können sich strake Gradienten bilden. Bisher hatte man Hinweise darauf nur post facto, d.h. man beobachtet in Nachzusammenstoßsystemen keine kühlen Gasreservoire und hohe Metallhäufigkeiten, aber man hat dies nie in einem intermediären System direkt beobachtet.

Der Galaxienhaufen Abell 3266 (A3266) bei einer Rotverschiebung von 0.059 wurde oft studiert, aber bisher kaum verstanden. Eine statistische Analyse der kinematischen Daten der Haufengalaxien weißt auf einen Haufenzusammenstoß hin. Sie zeigen eine Geschwindigkeitsdispersion von etwa 1300 km/s in Zentrum, höher als die globale Dispersion von etwa 1000 km/s. Dies wurde als recht lokaler Zusammenstoß im Zentralbereich des Haupthaufens gedeutet, die vor allem eine Erhöhung der zentralen Energiedichte zur Folge hat.

Mit XMM-Newtion wurde A3266 beobachtet, um die Struktur des Innerhaufengases zu untersuchen. Das hohe Signal-zu-Rausch-Verhältnis der Daten und neue Methoden der Datenanalyse erlauben es, statistische Karten der thermodynamischen Eigenschaften des Innerhaufenmediums zu erstellen. Während das bestehende Bild der Struktur der Haufenzusammenstoßes qualitativ bestätigt wird, erlauben die Karten einen viel detaillierteren Einblick in das Geschehen. Dies erlaubt es uns die Prozesse des Gasabstreifens besser zu verstehen. Insbesondere können wir Karten des Haufens erstellen, die möglichst gut angenährt die Druck- und Entropieverteilung im Haufen zeigen.

Abbildung 1 zeigt die Pseudo-Entropie- und Pseudo-Druckverteilung im Haufen, wie sie durch eine Waveletanalyse erhalten wurde. Die Pseudo-Entropiekarte zeigt eine riesige Wolke von Gas niedriger Entropie (LEG), die sich über eine Zone von 15 Bogenminuten vom Zentrum aus nach Norden erstreckt. Der einheitliche Entropiewert des LEG deutet auf einen gemeinsamen Ursprung hin. Die Hauptachse des LEG ist nach der Projektion der Achse des Haufenzusammenstoßes in die Himmelsfläche ausgerichtet, die mit der Hauptachse der Röntgenmorphologie des Haufens zusammenfällt. Dies deutete darauf hin, dass die LEG-Struktur durch den Zusammenstoß selbst erzeugt wurde. Nicht klar ist dagegen, ob das LEG aus dem ursprünglichen kühlen Kern des Haupthaufens oder aus dem Kern des einfallenden Systems gebildet wurde.

Auf kleiner Skala sieht man viele Unterstrukturen in der Entropiekarte des LEG. Vor allem sind lokale Entropieerhöhungen sichtbar: sie sind schon vorher existierende Kontaktdiskontinuitäten, die schlecht durchmischt wurden, oder sie wurden durch schwache Stoßwellen erzeugt. In der Tat sind alle 12 (in Abb. 1 grün markierte) Entropieerhöhungen mit Druckerhöhungen verbunden. Schließlich gibt es eine Reihe von Entropiedellen, die mit Galaxien oder Galaxiengruppen zusammenfallen.

Die Kernregion zeigt Fluktuationen in der Entropie von 14% und im Druck von 12% im Vergleich zu einer regulären Verteilung, wie im Mittel aus der Beobachtung von vielen Galaxienhaufen ermittelt. Die größeren Abweichungen über den gesamten Bereich des Galaxienhaufens von 24% für die Entropie und 30% für den Druck sind auf Asymmetrien in der azimutalen Gasverteilung zurückzuführen, vor allem nordöstlich des Kerns und der LEG Region, die eine ~20% niedrigere Entropie und ~30% höheren Druck aufweißt. Die thermodynamsichen Eigenschaften von A3266 liegen innerhalb einer Abweichung von 10% um das Mittel für Haufen dieser globalen Temperatur.

In der LEG Region nahe des Zentrums beträgt die totale Gasmasse 1.3×10^{13} M_{sun}. Dies entspricht der Masse des Haufenkerns für einen Haufen der Größe von A3266. Es ist auch vergleichbar der Gesamtgasmasse von massearmen Galaxienhaufen oder massereichen Galaxiengruppen. Deshalb kann man die LEG-Struktur entweder mit dem zerrissenen Kern des Haupthaufens oder mit dem abgestreiften Gas eines einfallenden zweiten Systems identifizieren, wobei das Massenverhältnis zwischen Haupthaufen und einfallendem System etwa 1:10 beträgt.

Hydrodynamische Simulationen zeigen, dass das Innerhaufengas eines einfallenden Sekundärsystems beim Durchgang durch den Kern des Haupthaufens abge-



streift werden kann. Im Rahmen dieses Bildes ist es verwunderlich, dass sich die cD (elliptische Riesen-) Galaxie und andere Galaxien auf der Vorderseite der LEG-Region befinden. Deshalb erscheint es möglich, dass wir den Einfall des System von vorn auf das Zentrum des Haupthaufens hin in Projektion betrachten. Der einfallende Haufen strebt dabei auf den Kern des Haupthaufens zu (was zu einer Superposition in der Sichtlinie führt). Damit erklärt sich auch die hohe Galaxiengeschwindigkeitsdispersion im Kern aus der Differenz zwischen den beiden Systemen. Diese Interpretation ist für ein Massenverhältnis von etwa 1:10 für die zusammenstoßenden Systeme konsistent. Abb. 1 Oben: Pseudo-Entropiekarte des Haufens A3266, die durch eine Waveletanalyse erstellt wurde. Röntgenpunktquellen wurden aus der Karte nicht entfernt. Blaue, grüne, gelbe, rote und weiße Regionen entsprechen Entropiewerten von niedrigem zu hohem Niveau.

Unten: Pseudo-Druckkarte des Haufens A3266, die durch eine Waveletanalyse erstellt wurde. Blaue, grüne, gelbe, rote und weiße Regionen entsprechen Druckwerten von niedrigem zu hohem Niveau. Ein Maßstab und ein Referenzpunkt (+) erlauben einen einfachen Vergleich der beiden Karten.

Dieses Verhältnis, das aus der Geschwindigkeitsverteilung der Galaxien ermittelt wurde, kann mit dem Verhältniss der Gasmassen verglichen werden. Dabei nehmen wir an, dass das abgestreifte Gas die Gasmasse des einfallenden Systems widerspiegelt. Aus der Temperatur von A3266, der Relation von Temperatur und Haufenmasse und einem Gasmasseanteil von 13% schließen wir auf eine Gesamtgasmasse von A3266 von etwa 1.2x1214 M_{sun}. Damit ist das Gasmasseverhältnis der beiden Systeme 1:9 in guter Übereinstimmung mit der dynamischen Schätzung. Die beiden Abschätzungen deuten deshalb auf einen Ursprung des LEG im einfallenden System hin. Die ursprüngliche Temperatur des einfallenden Systems wird auf 2 keV geschätzt und die frühere Größe des Systems auf 0.59 Mpc. Ein Kreis dieser Größe passt exakt auf die Länge des Schweifes der LEG Region.

Schließlich bleibt noch festzustellen, dass Abell 3266 vermutlich eine komplexere Vorgeschichte hat als ein Haufenzusammenstoß mit einem Masseverhältnis von 1:10 wie hier vorgeschlagen. Auf der westlichen Seite des Haufens findet man eine Materialansammlung niedriger Entropie. In dieser Region kann man mehrere Gebiete niedriger Entropie mit Galaxien identifizieren. Die Gasmassen, die mit diesen Gebieten assoziiert sind, sind den Gasmassen von Galaxiengruppen vergleichbar. Diese zweite Region niedriger Entropie deutet daher auf weiteren Materieeinfall in

den Galaxienhaufen A3266 hin, einen Haufen, der auch das prominenteste Mitglied des Superhaufens im Sternbild Horologium darstellt.

A. Finoguenov, H. Böhringer, U. Briel



Baryonische Oszillationen

Ahnlich den Fluktuationen im kosmischen Mikrowellenhintergrund, gibt es bestimmte Längenskalen in der Verteilung der Masse im Universum. Diese Skalen können in den Oszillationen des Leistungsspektrums der Galaxien gefunden werden. Indem man die beobachteten Phasen mit den berechneten Längen aus verschiedenen kosmologischen Modellen vergleicht, sind wir in der Lage, kosmologische Parameter einzugrenzen. Wir passen eine glatte Funktion an das Leistungsspektrum an, um die Phaseninformation von der Amplitudeninformation der Oszillationen zu trennen. Daraus kann man kosmologische Parameter, wie die Zustandsgleichung der Dunklen Materie, bestimmen.

Nach den neusten Ergebnissen von WMAP, der "Wilkinson Microwave Anistropy Probe" Raumsonde, besteht unser heutiges Universum zu 3/4 aus der mysteriösen Dunklen Energie. Obwohl diese den größten Anteil an unserem Universum ausmacht, wissen wir noch weniger über

deren Eigenschaften und Physik als über die ebenso "berüchtigte" Dunkle Materie, die etwa 20% der Masse unseres Universums stellt. Die baryonische Masse, die wir aus dem Alltag kennen, kann mit 5% Anteil am Universum im Vergleich zum Rest von 95% fast vernachlässigt werden. Diesen Rest beginnen wir gerade erst zu verstehen. Für die Dunkle Materie gibt es eine Reihe von Kandidaten. Elementarteilchen, und begehen Teilchenphysiker verschiedene Wege diese zu finden.

Die Eigenschaften von Dunkler Energie zu bestimmen ist noch deutlich schwieriger als bei der Dunklen Materie. Entsprechend modernen Feldtheorien müsste es z.B. um einen Faktor 10120 mehr Dunkle Energie geben, als beobachtet wird. Das ist aber nicht das einzige Merkwürdige

wahrscheinlicher 10 Mal hintereinander den Jackpot im Lotto zu gewinnen, als dass Dunkle Energie genau die Dichte hat, die wir beobachten. Quintessenz löst das Problem indem angenommen wird, dass die Energiedichte der Entwicklung des Universums folgt, und deshalb nicht genau angepasst werden muss. Schließlich könnte sich Dunkle Energie auch noch als die berühmte "kosmologische Konstante" herausstellen, die Einstein seinen Feldgleichungen hinzugefügt hat, um ein stabiles und unendlich altes Universum möglich zu machen. Alle drei Modelle können durch die Zustandsgleichung der Dunklen Energie, die das Verhältnis zwischen Energie und Druck bestimmt und " ω " genannt wird, dargestellt werden. "Normale" Masse und Energie besitzen positive ω-Werte, was zur bekannten anziehenden Gravitation führt. Quintessenz hat einen ω -Wert von -1/3 bis fast -1, das ω der kosmologischen Konstante ist exakt -1 und "Phantom Energie" wird alles genannt, was einen ω -Wert



Abb. 1: Ein simuliertes (entsprechend den Hubble Raum Simulationen für z = 2.3) Leistungsspektrum der Materieverteilung, das "Klumpigkeit" pro inverser Entfernung zeigt. Es enthält den nicht-schwingenden Anteil der Dunklen Materie, dem die baryonischen akustischen Oszillationen überlagert sind.

an Dunkler Energie. Im Gegensatz zu normaler Masse und Energie, bewirkt Dunkle Energie eine Beschleunigung der Expansion des Universums. Dunkle Energie wirkt "antigravitativ" und lässt das Universum schneller und schneller expandieren. In einigen Modellen für Dunkle Energie, der sogenannten "Phantom-Energie", wird das Universum so schnell beschleunigt, dass der Raum selbst in einem "Big Rip" auseinander gerissen wird. Andere Modelle wie Quintessenz erlauben die Frage zu klären, warum Dunkle Energie genau die geringe und sehr unwahrscheinliche Dichte hat, die wir beobachten. Tatsächlich ist es viel kleiner als -1 besitzt. Natürlich schlagen theoretische Physiker auch noch kompliziertere Modelle vor, deren ω -Werte mit der Zeit und sogar mit dem Raum variieren können. Da wir in der Astronomie die Auswirkungen der Dunklen Energie messen können, bietet sich uns die einzigartige Möglichkeit, mehr über Dunkle Energie zu lernen. Die Kombination aus aktuellen astronomischen Messungen deutet auf einen ω -Wert von etwa -1 hin. Dieser Wert ist allerdings mit einer Unsicherheit von etwa 20% behaftet, wodurch sich keines der drei Modelle ausschließen lässt.

20 Wissenschaftliche Ergebnisse

Aus astronomischer Sicht gibt es zwei mögliche Wege um die Zustandsgleichung von Dunkler Energie, und damit den ω -Parameter, zu messen: 1) die Geschichte des Strukturwachstums und 2) die Geometrie des Universums zu untersuchen. Das Wachsen von Strukturen im Universum ist hauptsächlich von zwei Faktoren abhängig, nämlich dem Masseinhalt und der Expansionsrate des Universums. Je mehr Masse verschiedene Längen bekannter Größe zu verschiedenen Altern des Universums misst.

Das MPE ist an verschiedenen großen Durchmusterungen beteiligt, die Daten für kosmologische Tests bereitstellen werden. In naher Zukunft wird "KIDS" (Kilo Degree Survey), 1500 Quadratgrad mit 9 verschiedenen Filtern abdecken und hochqualitative photometrische



Abb. 2: Das Verhalten der extrahierten baryonischen akustischen Oszillationen im Vergleich zu unterschiedlichen kosmologischen Modellen. Die Kurven (rot, grün) werden gestaucht im Vergleich zum Referenzmodell (schwarz), wenn die Zustandsgleichung der Dunklen Energie (ω) kleiner wird, und werden gedehnt, wenn ein grösserer Wert von ω angenommen wird.

vorhanden ist, desto schneller wird sie "klumpen" und die verschiedenen großräumigen Strukturen ausbilden. Dies bedeutet, dass eine hohe Massendichte schon früh ausgeprägte Strukturen begünstigt, während eine geringe Massedichte zu weniger ausgeprägten Strukturen zu späteren Zeiten führt. Die Expansion des Universums wirkt genau umgekehrt. Je schneller die Expansion ist, desto weniger Zeit ist vorhanden um Strukturen zu bilden. Der
w-Parameter nun beeinflusst das Strukturwachstum, indem er die Expansionsrate verändert. Je kleiner ω ist, desto schneller expandiert das Universum. Die Zustandsgleichung von Dunkler Energie kann nun bestimmt werden, indem man die Wachstumsgeschichte des Universums beobachtet. Andererseits ist die Geometrie der Raumzeit direkt von kosmologischen Parametern abhängig. Der Massen- und Energieinhalt des Universums bestimmt seine Form in Raum und Zeit. Da der
o-Parameter diese Geometrie beeinflusst, kann er bestimmt werden, indem man

Rotverschiebungsdaten liefern. PanSTARRS (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System) wird den gesamten Himmel beobachten um photometrische Rotverschiebungen für Milliarden von Galaxien zu liefern. Und schließlich wird HETDEX (Hobby Eberly Telescope Dark Energy eXperiment) eine Fläche von 300 Quadratgrad spektroskopisch beobachten, um exakte Positionsdaten für Galaxien bis zu einer Rotverschiebung von z=4 zu bestimmen. Mit seinen 145 Integralfeld-Spektroskopieeinheiten mit jeweils 246 Lichtleitern wird HETDEX in der Lage sein, über 35.000 Spektren pro Aufnahme zu messen.

Beide Wege um ω besser einzugrenzen werden derzeit oder in naher Zukunft mit verschiedenen Methoden begangen. Das Strukturwachstum wird bestimmt, indem Galaxienhaufen bei verschiedenen Rotverschiebungen gezählt werden und ihre Verteilung verglichen wird. Die Geometrie des Universums wird bestimmt, indem man Supernovaexplosionen vom Typ Ia als Standardkerzen betrachtet und ihre relative Helligkeit misst. Beide Eigenschaften, Strukturwachstum und Geometrie, können auch erarbeitet werden, indem man die Verformung von Galaxienbildern, die durch den schwachen Gravitationslinseneffekt, den so genannten "Cosmic Shear" zustande kommt, misst.

Eine weitere Methode um der Dunklen Energie näher zu kommen ist die, der "baryonischen akustischen Oszillationen", welche (unter anderem) auf Daten von KIDS, PanSTARRS und HETDEX angewandt werden kann. Während des größten Teils seiner ersten 300.000 Jahre, war das Universum mit einem Plasma aus ionisierten Baryonen, Elektronen und Photonen gefüllt. Wegen kleiner Störungen, die durch die inflationäre Phase in den ersten 10-32 Sekunden hervorgerufen wurden, oszillierte dieses Plasma auf verschiedenen Skalen. Diese Schwingungen lassen sich als Fluktuationen im kosmischen Mikrowellenhintergrund beobachten, welcher aus Photonen besteht, die vor 13.4 Milliarden Jahren vom Plasma freigesetzt wurden, als das Universum genügend kalt und damit durchsichtig wurde. Allerdings tragen nicht nur die Photonen, sondern auch die Baryonen (schwere Elementarteilchen wie z.B. Protonen und Neutronen) den Fingerabdruck dieser Oszillationen. Sie werden akustisch genannt werden, da sie hauptsächlich von der Schallgeschwindigkeit im Plasma bestimmt werden. Nach dem Freisetzen der Photonen bewegten sich die Baryonen entsprechend der Oszillationen, zogen die Dunkle Materie mittels gravitativer Wechselwirkung mit sich, und wurden so auf verschiedenen Skalen ausgelenkt. Indem wir diese charakteristischen Längenskalen berechnen, als Maßstab nutzten, und mit gemessenen Werten (bei verschiedenen Rotverschiebungen) vergleichen, können wir kosmologische Parameter, wie z.B. die Zustandsgleichung der Dunklen Energie ω, bestimmen. Die charakteristischen Längenskalen werden aus den Beobachtungen gewonnen, indem man das so genannte Leistungsspektrum der Materieverteilung berechnet, welches die "Klumpung" der Verteilung auf verschiedenen Skalen misst. Die, durch das Baryonen-Photonen-Plasma hervorgerufenen Störungen erscheinen als Schwingungen, überlagert einem "glatten" Beitrag der Dunklen Materie (Abb. 1). Allerdings kann das Leistungsspektrum der gesamten Materieverteilung nicht direkt gemessen werden. Es ist nur indirekt über die sichtbaren Objekte zu erschließen, welche insgesamt nur etwa 1% der Masse des Universums ausmachen. Man muss die Annahme machen, dass die "sichtbare", d.h. die messbare Masse dieselbe Verteilung hat, wie die "unsichtbare". Diese Annahme führt jedoch zu systematischen Fehlern, da Galaxien bevorzugt in sehr dichten Bereichen wie Filamenten entstehen und Regionen geringer Dichte meiden, was die Klumpung der Verteilung stark erhöht. Weitere Komplikationen erschweren die Bestimmung des Leistungsspektrums, nämlich 1) das unzureichendem Wissen über Dunkle Materie, 2) nicht lineare Effekte im Strukturwachstum und 3) Rotverschiebungsmessungen von Galaxien sind durch deren Eigenbewegung fehlerbehaftet.

Das Leistungsspektrum der Materieverteilung besteht aus zwei Komponenten, entsprechend der Dunklen und der baryonischen Materie. Während die erste auf den relevanten Skalen gleichmäßig abfällt, oszilliert die letztere um diese monotonen abfallende Funktion. Indem wir also eine glatte Funktion an die Form des Leistungsspektrums anpassen und davon abziehen, erhalten wir den gesuchten oszillierenden Teil. Die Phasen der Oszillation ist der oben erwähnte Maßstab. Störungen, wie die statistische Verzerrung, Rotverschiebungseffekte oder nichtlineares Strukturwachstum, verstärken nur die Amplitude der Oszillationen, nicht aber deren Phase, da beide orthogonal zueinander sind. Wir können nun die Galaxienverteilung dadurch messen, dass wir z.B. iunge. Lyman-Alpha-Strahlung emittierende Galaxien bei verschiedenen Rotverschiebungen beobachten, die baryonischen akustischen Oszillationen extrahieren und deren Phasenlänge mit kosmologischen Modellen, die verschiedene ∞-Werte vorhersagen, vergleichen. Da 🛛 die Geometrie des Universums verändert, erscheinen die Oszillationen im Vergleich zu theoretischen Vorhersagen entweder gedehnt oder gestaucht, wenn ein falscher ω-Wert angenommen wurde. Mit dieser Vorgehensweise können die oben genannten Unsicherheiten umgangen werden.

Im nächsten Schritt können wir nun die erarbeiteten Amplituden der Oszillationen nutzen, um den ω-Parameter weiter einzuschränken. Dazu müssen wir noch die Geschichte des Strukturwachstums erforschen. Da die Amplitude direkt von der "Klumpigkeit" der Galaxienverteilung bestimmt wird, zeigt sie uns, wie ausgeprägt Strukturen bei bestimmten Rotverschiebungen sind. Diese Methode ist allerdings komplizierter, da alle oben genannten Effekte mit großer Genauigkeit bekannt sein und korrigiert werden müssen. Allerdings stehen die Amplitudendaten nach der Extraktion der Oszillationen zur Verfügung und können dafür genutzt werden.

Die große Menge an Daten, die in Durchmusterungen mit MPE Beteiligung (z.B. KIDS, PanSTARRS oder HETDEX) produziert werden, wird es uns ermöglichen, Eigenschaften von Dunkler Materie und Dunkler Energie zu bestimmen. Beide gehören zu den größten Mysterien in der heutigen Physik.

R. Koehler, P. Schuecker



2.2 GALAXIEN, GALAXIENKERNE UND MASSEREICHE SCHWARZE LÖCHER

Normale Galaxien im nahen Universum, sternbildende (Starburst) und aktive Galaxien (AGN) sind perfekte Laboratorien um Galaxienentwicklung im Detail zu untersuchen. Durch unser wissenschaftliches Fachwissen, das sich nahezu über das gesamte elektromagnetische Spektrum erstreckt – von Gamma- und Röntgenstrahlen über das nahe Infrarot bis zum Millimeter-Bereich – sind wir am MPE in der einmaligen Lage, solche Galaxien in einer weiten Spanne von Größenordnungen, morphologischen Typen und Aktivitätsleveln zu untersuchen. Dafür nutzen wir meist selbstentwickelte und gebaute Instrumente, die wir durch Daten von weiteren Einrichtungen ergänzen, um bahnbrechende Astrophysik zu betreiben.

Das galaktische Zentrum, der am nächsten zur Erde gelegene Galaxienkern, bringt weiterhin viele überraschenden Erkenntnisse. Mit den VLT-Instrumenten NACO und SINFONI beobachteten wir dieses Jahr bei einem Strahlungsausbruch eine Änderungen seines Nahinfrarotspektrums und eine Änderung der Polarisationsrichtung des Lichts. Sowohl in unserer kosmischen Nachbarschaft als auch bei höheren Rotverschiebungen untersuchten wir mit Chandra und XMM-Newton die Regionen in unmittelbarer Nähe von schwarzen Löchern in aktiven Galaxienkernen. Eine XMM-Newton Beobachtung lieferte die Erstentdeckung von gravitations-rotverschobenen weichen Röntgenlinien im AGN "Mrk 110". Die Daten stimmen hervorragend mit Modellen überein, die genau solche Emissionslinien von der "broad-line" Region eines AGN voraussagen. Diese rotverschobenen Linien können zur Massen- und Spinbestimmung des jeweiligen schwarzen Lochs dienen, aber auch um Akkretionscheibenparameter einzuschränken.

Auf der Größenordnung von gesamten Galaxien untersuchten wir die Unterschiede zwischen klassischen und Pseudo-Bulges (zentrale Haufen) in Spiralgalaxien, die Entstehung und Entwicklung von Balken und ihre Beziehung zu den zentralen superschweren schwarzen Löchern. Dabei interessierte uns, ob die schwarzen Löcher in Pseudo-Bulges der gleichen Beziehung folgen, die man für klassische Bulges findet. Zusätzlich analysierten wir

die Dynamik von frühen Galaxientypen, deren Gehalt an Dunkler Materie und die Verteilung von Sternumlaufbahnen.

Auf noch größeren Skalen arbeiteten wir an der Dynamik von Galaxienhaufen (z.B. Coma), indem wir Intrahaufensterne, Sterne die von Galaxien losgelöst wurden, nachwiesen, widmeten uns der Galaxienentwicklung mit tiefen Belichtungen in verschiedenen Wellenlängen, sowohl mit abbildenden als auch mit spektroskopischen Instrumenten.

Der Rest dieses Kapitels konzentriert sich auf drei ausgewählte Ergebnisse unserer Galaxien- und AGN-Forschung: 1) eine umfassende Untersuchung der Kinematik von alten Zwischenhaufensternen im Coma Galaxienhaufen, um die Geschichte der Dynamik des Haufens zu verstehen; 2) eine Studie, in der mit hoher Auflösung

die Kerne benachbarter Galaxien und AGN beobachtet wurden, um einerseits die Massen der zentralen schwarzen Löcher zu messen und andererseits die Sternentstehungsgeschichte im innersten Bereich dieser Systeme zu untersuchen; und 3) eine groß angelegte Röntgendurchmusterung mit XMM-Newton im Rahmen der großen internationalen "Cosmic Evolution Survey" Kampagne, kurz **COSMOS** genannt. Sie deckt rund 2 Quadratgrad am Himmel mit abbildenden Aufnahmen vom Radio- bis zum Röntgenbereich ab und wird durch ein spektroskopisches Programm in verschiedenen Wellenlängen ergänzt.



Abb. 1: K-Band Bild bei 2.3 Mikrometern eines Nahinfrarot-Strahlungsausbruchs von Sagittarius A*, aufgenommen mit SINFONI während einer hellen (links) und dunklen (rechts) Phase.

In benachbarten Galaxien erlauben unsere hochauflösenden, spektroskopischen Untersuchungen, die Kinematik und Energiebilanz in der Nähe superschwerer schwarzer Löcher mit bislang unerreichter Genauigkeit zu bestimmen. Wie im ersten ausgewählten Artikel dieses Kapitels beschrieben, können wir nun mit SINFONI und adaptiver Optik die Massen von schwarzen Löchern in nahegelegenen galaktischen Kernen messen. Darüberhinaus waren wir in der Lage, die Verteilung von jungen Sternen um diese schwarzen Löcher mit einer Auflösung von weniger als 10 pc kartieren. Mittels XMM-Newton Röntgenbeobachtungen wurde der heiße Gasausfluss in nahen Starburst Galaxien, wie etwa in NGC 253, abgebildet. Dies ist das erste Mal überhaupt, dass die heiße Gasströmung (heißer Wind) direkt beobachtet wurde.

Die Kinematik der Intrahaufensterne und die Entwicklungsgeschichte des Coma Galaxienhaufens

Der Comahaufen ist der reichste und kompakteste der nahen Galaxienhaufen, und dennoch deutet immer mehr darauf hin, dass seine Entstehung immer noch anhält. Eine empfindliche Probe für die Haufenentwicklung ist die Dynamik der Intrahaufensterne, die, kosmologischen Simulationen folgend, von Galaxien abgelöst werden, während sich der Haufen bildet. Mit einer neuen Multi-Spalt-Spektroskopie-Technik gelang es uns, die Sichtlinien-Geschwindigkeiten von 37 planetarischen Nebelsternen zu messen, die zur Intrahaufen-Sternpopulation im Kern des Coma-Haufens gehören. Diese 100 Mpc entfernten Sterne sind wohl die schwächsten jemals beobachteten Sterne, und die entferntesten nach den hochrotverschobenen Supernovae. In Kombination mit Galaxienrotverschiebungen und Röntgendaten sprechen die gemessenen Geschwindigkeiten dafür, dass der Coma-Haufen sich zur Zeit mitten in einer Phase befindet, in der zwei Unterhaufen etwa in der Himmelsebene miteinander verschmelzen. Die Zentren der beiden Unterhaufen haben derzeit ihre zweite enge Begegnung hinter sich, während derer die elongierte Verteilung des diffusen Lichts entstand.



Abb. 1: Tiefe Aufnahme vom Zentrum des Virgohaufens, erhalten mit dem Case-Western-Schmidt Teleskop von amerikanischen Kollegen um C. Mihos.

Erst seit einigen Jahren wissen wir, dass Galaxienhaufen eine diffuse Population von Sternen zwischen den Galaxien enthalten. Etwa 10% aller Sterne in typischen Haufen gehören zu dieser diffusen Population. Abbildung 1 gibt eine spektakuläre Illustration der diffusen Sternkomponente im Virgohaufen; das Bild stammt von C. Mihos und Kollegen. Während in typischen Himmelsbildern die grossen Virgogalaxien M87 (in der unteren linken Ecke des Bildes), M86 und M84 (beide im oberen rechten Teil) weit auseinander zu stehen scheinen, wirkt es in dieser tiefen Aufnahme, als ob sie sich berühren oder gar überlappen. Zusätzlich zeigt dieses tiefe Bild eine Vielzahl von kleineren Strukturen und Strömen. Man glaubt, dass dieses diffuse Licht von Sternen stammt, die einst in Galaxien geboren wurden, die aber später von ihnen durch eine Reihe dynamischer Prozesse losgelöst wurden, als diese Galaxien in den Galaxienhaufen fielen. Tatsächlich sagen kosmologische Simulationen voraus, dass Galaxien sich durch die Wechselwirkungen während der Entstehung der Galaxienhaufen dramatisch verändern. Um diese Vorraussagen zu verifizieren, müssen wir nicht nur die Verteilung der Sterne im diffusen Licht messen, sondern auch ihre Bewegungen – ihre Geschwindigkeitsverteilung enthält entscheidende Information darüber, wie und wann diese Komponente entstand.

Die einzigen Objekte, die uns derzeit erlauben, die Bewegungen der diffusen Sternkomponente zu messen, sind die Planetarischen Nebel (PN). Diese sterbenden Sterne strahlen 10% ihrer Leuchtkraft in einer einzigen Emissionslinie ab, der [OIII] λ 5007Å Linie, die relativ zur Ruhewellenlänge entsprechend der Radialgeschwindigkeit des PN rotverschoben ist. Leider ist die PN Phase im Leben eines Sterns kurz, und die PN sind somit selten. Auf je 100 Mio. Sterne kommt nur etwa ein PN.

Im Coma-Haufen in 100 Mpc Entfernung sind PN darüber hinaus extrem schwach. Der [OIII] Linienfluss der hellsten PN bei dieser Entfernung ist äquivalent zu ~20 Photonen pro Minute durch die Apertur eines 8m Teleskops, von denen bei einer typischen Systemeffizienz von ~10% nur ~2 den Detektor erreichen. Solch schwache Objekte kann man nicht mehr mit Schmalbandfilter-Photometrie finden ihre Emission würde im Himmelsrauschen untergehen. Um PN bei diesen Distanzen zu finden, benötigt man eine spektroskopische, blinde Suchtechnik, bei der nur das Himmelsrauschen innerhalb einer schmalen Bandbreite von das PN Signal überlagert, und bei der die Position dieser schwachen PN vorher nicht bekannt zu sein braucht.

In unserer Pilotstudie kombinierten wir eine Parallelspaltmaske wie in Abbildung 2 mit einem Schmalbandfilter, das um die entsprechend der Entweichgeschwin-

digkeit des Coma-Haufens rotverschobene Wellenlänge der [Oll]] λ 5007Å Emissionslinie zentriert war. In dieser Multi-Spalt-Abbildungs-Spektroskopie (MSIS) Technik erhält man Spektra aller PN, die zufällig hinter den Spalten stehen. Das Schmalbandfilter begrenzt die Länge der Spektra auf dem CCD, so dass viele Spalte gleichzeitig belichtet werden können. Für jede Spaltmaske bildet man nur ~10% des Himmelsfelds ab; um die abgebildete Fläche zu vergrößern, wird die Maske schrittweise am Himmel verschoben. Das dispergierte Bild einer solchen Maskenaufnahme auf dem CCD ähnelt einer Ziegelwand, bestehend aus 60 Å weiten, zwei-dimensionalen Spektren. Im rechten Teil von Abb. 2



Abb. 2: Links: Die in den Beobachtungen des Comahaufens benutzte Multispaltmaske, über dem untersuchten Himmelsfeld im Zentrum des Haufens. Oben rechts: Verteilung der PN im Feld. Unten rechts: Zweidimensionale Spektren einiger Emissionsobjekte im Feld. Die vier Objekte links sind monochromatische, punktförmige Quellen gefaltet mit der räumlichen und spektralen Auflösung, und das Objekt rechts ist eine schwache Hintergrundgalaxie. Die beiden Objekte ganz links weisen die erwarteten Linienflüsse der hellsten PN im Comahaufen auf. Objekt Nummer vier ist eines der schwächsten mit nur 70 Photonen in drei Stunden Beobachtungszeit mit dem 8m Subaru Teleskop; diese Quelle ist mit 95% Wahrscheinlichkeit real.

sieht man die extrahierten Spektren einiger PN Kandidaten; in diesen Spektren verläuft die Wellenlängenrichtung entlang der vertikalen Achse und die Richtung parallel zu den Spalten entlang der horizontalen Achse. Eine genauere Analyse überzeugte uns, dass die große Mehrzahl der gefundenen PN Kandidaten tatsächlich PN sind.

Wir hatten ein Himmelsfeld ausgewählt, von dem bekannt war, dass es diffuses Licht enthält. Die Verteilung der PN in Abb. 2 zeigt, dass die meisten tatsächlich von der diffusen Sternpopulation stammen; nur drei von 40 sind räumlich und in ihren Geschwindigkeiten nahe genug bei einer der Galaxien im Feld, dass sie zu diesen gehören könnten.

Abbildung 3 zeigt die Verteilung der Geschwindigkeiten, die wir aus den rotverschobenen Emissionslinien dieser PN messen konnten. Sie ist mehr oder weniger um die mittlere Geschwindigkeit des Coma-Haufens zentriert, scheint aber aus zwei hauptsächlichen Komponenten zu bestehen. Das blauere (linke) Maximum stammt wahrscheinlich von diffusem Licht, das mit einer Gruppe von Galaxien assoziiert ist; diese haben geringere Fluchtgeschwindigkeiten als das Haufenmittel und fallen derzeit von hinten durch das Haufenzentrum. Solche Ereignisse findet man relativ häufig in kosmologischen Simulationen, in denen Galaxienhaufen dauernd durch die Akkretion von kleineren Einheiten wachsen.

Das überraschendere Ergebnis unserer Beobachtungen aber ist, dass das Hauptmaximum der Geschwindigkeitsverteilung in diesem Himmelsfeld, 150 kpc südlich der elliptischen Riesengalaxie NGC 4874, um 700 km/s von der Radialgeschwindigkeit dieser Galaxie abweicht, und dass diese PN daher nicht an NGC 4874 gebunden sein können. Andererseits liegt dieses Maximum sehr nahe bei der Radialgeschwindigkeit der anderen elliptischen Riesengalaxie, NGC 4889, die etwa 7' östlich von NGC 4874 steht. Unsere kinematische Messung zusammen mit der starken Elongation der diffusen Lichtverteilung zeigen, dass die diffuse stellare Population im Zentrum des Coma-Haufens weit vom dynamischen Gleichgewicht entfernt ist.

Frühere Arbeiten über Galaxiengeschwindigkeiten, Röntgenemission, und Radiohalo im Coma-Haufen hatten bereits nahegelegt, dass dieser sich derzeit in einem Verschmelzungsprozess befindet. Die Strukturen in der Verteilung der Galaxiengeschwindigkeiten zusammen mit den gemessenen Geschwindigkeiten der Intrahaufensterne machen es nun wahrscheinlich, dass derzeit eine Verschmelzung zwischen zwei größeren Unterhaufen etwa in der Himmelsebene stattfindet, wobei der NGC 4889 Unterhaufen aus ONO in Richtung des A2199 Haufens kam (etwa von links in Abb. 3), während der NGC 4874 Unterhaufen aus der Richtung von A1367 oder A779 aus westlicher Richtung einfiel (etwa von rechts in Abb. 3). Im kosmischen Strukturnetz findet man oft, dass Galaxienhaufen durch Filamente verbunden sind, entlang derer aussenliegende Galaxiengruppen in die dichten Haufen einfallen. Das skizzierte Verschmelzungsszenario scheint auch konsistent mit neueren Röntgendaten zu sein, die Kollegen vom MPE und in Paris gewonnen haben.

In den kosmologischen Simulationen finden Verschmelzungen von Unterhaufen oft entlang nahezu radialer Bahnen statt. In diesen Fällen verschmelzen die äußeren Hüllen der Haufen in einer langsamen Oszillation entlang einer im wesentlichen unveränderlichen Bahnrichtung. Im Gegensatz



Abb. 3: Das Zentrum des Coma-Galaxienhaufens, mit dem MSIS Feld als roter Kreis gezeigt, und den Isodichtekonturen des diffusen Lichts in schwarz. Das MSIS Feld liegt 5' südlich von NGC 4874; die zweite elliptische Riesengalaxie NGC 4889 steht 7' ostwärts (links) von NGC 4874. Das helle Objekt nördlich von NGC 4874 ist ein Stern. Eingesetztes Diagramm: Die Verteilung der gemessenen Radialgeschwindigkeiten der Intrahaufen PN im MSIS Feld. Das Hauptmaximum der Verteilung liegt ungefähr bei der Radialgeschwindigkeit der entfernteren Galaxie NGC 4889, aber weicht ~700 km/s von der Geschwindigkeit der näheren Galaxie NGC 4874 gebunden, sondern folgen wahrscheinlich NGC 4889 auf ihrer Bahn, nachdem sie dem Halo dieser Galaxie durch die Gezeitenkraft während der Wechselwirkung mit NGC 4874 verloren gegangen sind. Die vermutlichen Bahnen von NGC 4889 und NGC 4874 bis zur derzeitigen Position sind durch die gelbe und hellblaue Linie im grossen Bild skizziert. Das kleinere Maximum in der Geschwindigkeitsverteilung, blauverschoben relativ zum Haufenmittel, ist vermutlich mit einer Galaxiengruppe verbunden, die von hinten durch das Haufenzentrum fällt. Die rote Linie zeigt den vom Schmalbandfilter durchgelassenen Wellenlängenbereich.

dazu ist die Wechselwirkung zwischen den Zentren der Haufen wesentlich schneller und heftiger. Wenn man annimmt, dass die beiden zentral dominierenden Galaxien der beiden Coma-Unterhaufen, NGC 4874 und NGC 4889, sich entlang einer Bahn wie in Abb. 3 skizziert befinden, und inzwischen ihre zweite Perizenterbegegnung hinter sich haben, lassen sich die elongierte Verteilung des diffusen Lichts und die Kinematik der PN Sterne in unserem MSIS Feld natürlich erklären. Diese Sterne, die wir jetzt hinter NGC 4889 auf ihrer Bahn sehen, wurden vermutlich kurz nach der ersten engen Begegnung der beiden Galaxien aus dem Halo von NGC 4889 abgelöst.

Nach ein oder zwei weiteren Bahnen werden die beiden Riesengalaxien und die Zentren ihrer Unterhaufen verschmolzen sein. Da jedoch jetzt schon der nächste Unterhaufen um NGC 4839 einfällt, wird der Coma-Haufen noch länger nicht zur Ruhe kommen. Es ist nicht übertrieben zu sagen, dass dieser große Galaxienhaufen sich gerade erst bildet! Wie diese Pilotstudie gezeigt hat, können wir viel über die Entwicklungsgeschichte von Galaxienhaufen aus der Dynamik ihrer Intrahaufensterne lernen. Nachdem wir deren Geschwindigkeiten nun bis 100 Mpc Entfernung messen können, ist damit die Untersuchung einer repräsentativen Stichprobe von Galaxienhaufen möglich geworden.

Herzlicher Dank gebührt meinen Kollegen und Mitautoren Magda Arnaboldi (ESO), Ken Freeman (Mount Stromlo Observatory, Australia), Nobunari Kasakawa, Sadanori Okamura, and Naoki Yasuda (NOAJ and University of Tokyo, Japan).





Aktive Galaktische Kerne aus der Nähe betrachtet

Die einzigartigen Möglichkeiten von SINFONI, das mit einer adaptiven Optik ausgestatteten bildgebenden Spektrometers, wurden bisher mit grossem Erfolg bei der Erforschung naher Galaxienkerne ausgenutzt. Hier beschreiben wir einige der erzielten Ergebnisse, wie zum Beispiel die Bestimmung der Masse schwarzer Löcher mit Hilfe von stellarer Kinematik, die ersten direkten Bilder eines Staubtorus sowie neue Erkenntnisse über die Bildung von Sternen in der Nähe aktiver schwarzer Löcher.

Die Masse von schwarzen Löchern

Eine wichtige Erkenntnis der bisherigen Forschung ist, dass jede Galaxie mit einem sogenannten "Bulge", d.h. einem zentralen Sphäroid, auch ein zentrales supermassives schwarzes Loch (SMSL) beherbergt. Die Masse dieses SMSLs korreliert dabei sowohl mit der Masse des Bulges als auch mit der Geschwindigkeitsdispersion im Zentrum der Galaxie. Ob diese Beziehungen auch dann noch gültig sind, bzw. inwieweit sie sich verändern, wenn man Galaxien ohne oder mit nur ganz kleinem Bulge betrachtet, hat eine entscheidende Bedeutung, um die Verbindung zwischen dem Wachstum der einstigen Keime der heutigen gigantischen SMSL, und der Entstehung und Entwicklung der sie umgebenden Bulges zu verstehen. In inaktiven Galaxien macht sich ein SMSL ausschließlich durch seine Gravitatieine Untersuchung dieser Galaxien nur mit hochauflösenden und mit einer adaptiven Optik ausgestatteten, im nahen Infrarot arbeitenden Instrumenten wie SINFONI möglich ist.

Die lichtschwache elliptische Galaxie NGC 4486a befindet sich in einer Entfernung von 16 Mpc im Virgo-Galaxienhaufen. In ihrem Zentrum sieht man eine Scheibe bestehend aus Sternen und Staub unter einer Inklination von fast 90°. Ein sehr heller Stern in nur ~2.5 Bogensekunden Entfernung vom Zentrum der Galaxie macht sie zu einem der sehr seltenen Fälle von leuchtschwachen, inaktiven Galaxien, wo adaptive Optik zur Beobachtung verwendet werden kann. Eine räumliche Auflösung von ~0.1 Bogensekunden, nahe an der Auflösungsgrenze des Teleskops, wurde unter durchschnittlichen Seeing-Bedingungen erreicht.

Die Bewegungen der Sterne in NGC 4486a wurden anhand der Form der tiefen CO Absorptionsbanden im K-Band bei Wellenlängen >2.29 µm gemessen. Wie in Abb. 1 gezeigt, bestätigen sie die Existenz einer kalten rotierenden Scheibe (Geschwindigkeitsdispersion ca. 100 - 120 km/s), welche eingebettet in einem dynamisch heisseren Bulge (Geschwindigkeitsdispersion ca. 120 - 130 km/s) ist. Um die Masse des zentralen SMSLs zu bestimmen ist es nicht nur notwendig zu wissen, wie die Sterne sich bewegen, sondern auch, welches Gravitationspotential sie erzeugen. Dieses Potential wurde durch eine detaillierte Analyse eines Bildes



Abb. 1: Zweidimensionale Karte der Geschwindigkeit (links) und der Geschwindigkeitsdispersion (rechts). Die überlagerten Konturen sind die Isophoten des Zentrums von NGC 4486a.

onswirkung auf die Bewegung der Sterne innerhalb eines bestimmten Einflussbereichs bemerkbar. Da der Winkeldurchmesser dieses Bereichs sowohl mit der Entfernung als auch mit abnehmender Masse des schwarzen Lochs kleiner wird, konnten bislang nur sehr wenige Massen von SMSL in massearmen Bulges gemessen werden. Zudem befindet sich in den Zentren vieler dieser Galaxien Staub, weshalb von den Hubble Space Telescope (HST) bestimmt. Die Masse des SMSLs kann dann durch die Berechnung einer grossen Zahl von Modellgalaxien mit Hilfe der sogenannten "Schwarzschildmethode" abgeleitet werden: In dem durch Sterne und SMSL erzeugten Potential werden die Bahnen tausender Sterne so überlagert, dass die Lichtverteilung der Galaxie reproduziert wird. Jede Modellgalaxie wurde mit einer anderen Masse des schwarzen Lochs und einem anderen Masse-Leuchtkraft-Verhältnis von Scheibe und Bulge berechnet. Die Masse des schwarzen Lochs ergibt sich dann aus demjenigen Modell, das die beste Anpassung an die gemessene Kinematik erzeugt. Die beobachtete Kinematik und Photometrie von NGC 4486a wird am besten von einem Modell mit einem schwarzen Loch der Masse 1.25×10^7 Sonnenmassen und Masse-Leuchtkraft-Verhältnissen von 3.6 bzw. 4.0 für Bulge bzw. Scheibe reproduziert. Modelle ohne ein zentrales SMSL können mit einer Wahrscheinlichkeit von 99.999% ausgeschlossen werden. Dieses Ergebnis stimmt sehr gut mit der Vorhersage der Korrelation zwischen der



Abb. 2: Beziehung zwischen der Masse des Supermassiven Schwarzen Lochs (blau: stellare Dynamik, grün: Gasdynamik, magenta: Maserdynamik) und der Geschwindigkeitsdispersion σ des Bulges. NGC 4486a ist durch einen großen roten Punkt gekennzeichnet.

Masse von schwarzen Löchern und der zentralen Geschwindigkeitsdisperson der Wirtsgalaxien (die sogenannte M- σ Relation) überein (Abb. 2) und bekräftigt ihre Gültigkeit am massearmen Ende. Die dynamischen Masse-Leuchtkraft-Verhältnisse von Bulge und Scheibe stimmen zudem gut mit denen von alten, metallreichen stellaren Populationen überein.

NGC 4486a ist die erste massearme Galaxie, die untersucht wurde. Der Laser-Leitstern, der für die Beobachtung lichtschwacher Objekte mit adaptiver Optik notwendig ist, wurde kürzlich am VLT installiert und ermöglicht von nun an Beobachtungen einer grossen Anzahl von Galaxien mit massearmen Bulges.

Um die Wechselwirkung zwischen SMSL und dem umgebenden Bulge weiter zu erforschen ist es notwendig, schwarze Löcher in ihrer aktiven Phase (AGN), während Material akkretiert wird, zu untersuchen. Durch die Messung der Masse des SMSLs mit Hilfe der Sternbewegungen kann man nachvollziehen, wie schwarze Löcher wachsen und wie dieser Prozess die Entwicklung der Galaxie beeinflusst. Die Galaxie NGC 3227 in 17 Mpc Entfernung beherbergt einen solchen aktiven Kern. Durch die Analyse der SINFONI-Beobachtungen war es möglich, ein schwarzes Loch von 7×10^6 - 2×10^7 Sonnenmassen zu identifizieren. Diese Masse ist kleiner als ältere Messungen, die auf indirekten Methoden basieren - was wiederum bedeutet, dass diese möglicherweise die tatsächliche Masse überschätzen. Sie ist ebenso kleiner als man es aus der M- σ Beziehung zwischen der Masse des schwarzen Lochs und der Geschwindigkeitsdispersion der Umgebungssterne erwarten würde.

Der einzige andere AGN, der mit Hilfe stellarer Dynamik untersucht worden ist, hat ein SMSL, das einige Male schwerer ist als vorhergesagt. Dies legt nahe, dass die Beziehung für AGN weniger streng gilt als für inaktive Galaxien.

Der Staubtorus

Der Eckpfeiler der AGN-Vereinheitlichung ist der dichte Staubtorus, der die zentrale Region entlang mancher Sichtlinien abhängig vom Blickwinkel verdunkelt. Bisher wurde dieser Torus noch nie direkt beobachtet. Die SINFONI-Daten von NGC 1068 enthüllen einen kompakten Gasball um die zentrale Energiequelle herum (Abb. 3). NGC 1068 ist eine nahegelegene Galaxie (1" = 70pc) vom Typ Seyfert 2. Sie ist diejenige Galaxie, für die die Torushypothese zuerst aufgestellt wurde, um Messungen von polarisierten, verbreiterten Emissionslinien zu erklären. Nun, mehr als zwei Jahrzehnte später, ist es endlich zum ersten Mal gelungen, das Gas zu sehen, das die Entstehungsregion der unpolarisierten, verbreiterten Linienemission verdeckt.

Es ist nun möglich, ein genaues Bild der inneren Regionen von NGC 1068 zu bekommen. Auf einer Skala < 1pc wurde durch Beobachtungen im Radiobereich eine dünne Scheibe entdeckt, deren schnelle Rotation durch Maseremission bestimmt werden kann. Diese Scheibe hat eine Inklination von fast 90° und ist in Ost-West-Richtung orientiert, in Übereinstimmung mit der Richtung, in die sich der Jet ausbreitet. Die Modellierung von Interferometrie-Daten auf Skalen von nur wenigen parsec ergibt sich aus dem Vorhandensein von Staub innerhalb des Torus.

Unsere Daten zeigen nun, dass die gesamte Ausdehnung des Gases im Torus 15 pc beträgt und eine ähnliche Orientierung wie die zentrale Scheibe hat. Bemerkenswert ist, dass moderne Torus-Modelle, die speziell entwickelt wurden, um die Größe der Emissionsregion des heissen Staubs zu erklären, auch vorhersagen, dass sich das Gas über eine Region vergleichbar mit der von uns beobachteten, erstrecken sollte. Es ist äußerst spannend, dass nun endlich eine solche Übereinstimmung zwischen Modellen und Beobachungen dieses Staubtorus beobachtet werden kann.

Sternentstehung

Während der letzten Jahre ist das Interesse an der Verbindung zwischen AGNs und Sternentstehung in der Umgebung eines zentralen schwarzen Lochs deutlich gewachsen, was hauptsächlich auf die Erkenntnis zurückzuführen ist, dass dies eine zentrale Rolle in der Entwicklung von Galaxien spielt. Mit SINFONI haben wir die Verteilung und Kinematik von neun nahen AGN mit hoher räumlicher Auflösung vermessen. Eines der wichtigsten Ziele hierbei war, die Ausdehnung und Entwicklung der Sternentstehung in der unmittelbaren Umgebung des AGN und ihrer Beziehung zum AGN zu bestimmen.

28 Wissenschaftliche Ergebnisse

In zwei bestimmten Fällen gibt es eindeutige Beweise für eine zentrale Scheibe bestehend aus einer anderen Sternenpopulation. Bei Radien von mehreren Bogensekunden vom Zentrum kann das Oberflächenhelligkeitsprofil gut durch ein einfaches r^{1/4}-Gesetz beschrieben werden. Wenn dieses jedoch zu kleinen Radien hin extrapoliert wird, finden wir eine deutlich höhere tatsächliche Oberflächenhelligkeit in den inneren 0.5 - 1". Gleichsam ist die Geschwindigkeitsdispersion bei größeren Radien etwa 120 - 150 km/s, sie sinkt aber in Richtung des zentralen Nukleus und erreicht ganz im Zentrum nur 70 - 100 km/s. Eine solche Abnahme der Geschwindigkeitsdispersion kann durch die Akkretion von Gas ins Zentrum und darauf folgender Sternentstehung erklärt werden. Da das Gas dynamisch kalt ist, sind dies stehungsausbrüche, da ihre bolometrische Leuchtkraft pro Einheitsmasse in etwa den 500 L_{sur}/M_{sun} entspricht, die ausreichen, damit der Strahlungsdruck die Akkretion von weiterem Material stoppen kann. Innerhalb der innersten paar Dutzend Parsec befinden sich die AGNs, die wir mit SINFONI beobachtet haben, alle etwa eine Größenordung unterhalb dieser Grenze. Verblüffenderweise bedeuten die typisch niedrigen Brackett γ -Flüsse, dass, obwohl die Sternentstehung jung ist, sie nicht mehr aktiv stattfindet. Dies ist wichtig, da kurzlebige Sternentstehungsausbrüche schnell abklingen. Daher konnten diese nuklearen stellaren Populationen in der jüngeren Vergangenheit leicht 10mal so leuchtstark sein wie in der Gegenwart. Zu dieser Zeit hätten sie an der Eddington-Grenze für Sternentstehungsausbrüche gestrahlt.



Abb. 3: SINFONI-Karte von NGC1068 im Licht von molekularem Wasserstoff, gemessen durch die 2.12 µm 1-0S(1) Emissionslinie. Die x- und y-Achsenbezeichnungen sind in Bogensekunden gegeben. In der Entfernung von NGC 1068 (14 Mpc) entspricht 1 Bogensekunde 70 pc. Die Adaptive Optik liefert eine eindrucksvolle Auflösung von 0.085 Bogensekunden. Im rechten Bild sieht man deutliche Anzeichen von Gas, das sich um das aktive schwarze Loch herum befindet (⊕).

auch die aus ihm geformten Sterne. Sie sind daher eher scheibenartig verteilt, im Gegensatz zu den Sternen im eher kugelförmigen Bulge. Wir können diese jüngere Population bis hin zu Radien von etwa 50 pc aufspüren und ihre Masse auf etwa 10⁸ Sonnenmassen abschätzen. Unter der Annahme, dass die Sterne selbstgravitierend sind, bedeutet dies eine senkrechte Skalenhöhe von 5 - 10 pc, was darauf hinweist, dass diese nuklearen Scheiben tatsächlich relativ dick sind und dass ungeordnete Bewegungen dies massgeblich unterstützen.

Durch die sorgfältige Korrektur des Beitrags vom AGN und den damit verbundenen Phänomenen, konnten wir das charakteristische Alter der nuklearen Sternentstehung auf einen Bereich von 10 - 300 Myr einschränken. Außerdem haben wir herausgefunden, dass die stellare Oberflächenhelligkeit bei kleinen Radien zunimmt und $10^{13} L_{surr}/kpc^2$ erreicht, vergleichbar mit derjenigen, die für optisch dichte Sternentstehungsscheiben in ultraleuchtstarken Infrarotgalaxien (ULIRGs) vorhergesagt wird. Der einzige Unterschied ist, dass das Gebiet der Sternentstehungsaktivität in ULIRGs eine Ausdehnung von etwa 1 kpc hat, in den untersuchten AGNs aber auf ein zentrales Gebiet von einigen wenigen paar Parsec begrenzt ist.

ULIRGs sind im Wesentlichen Eddington-begrenzte Sternent-

Und um so hell zu strahlen, muss das Gas sehr schnell in Sterne umgewandelt worden sein. Wir sind auf dasselbe Ergebnis gekommen, indem wir die Oberflächendichte der Masse in Betracht gezogen haben, die $10^4 \, M_{sur}/pc^2$ in den zentralen Regionen übersteigt. Das Schmidt-Gesetz setzt diese Größe in Beziehung zur Sternentstehungsrate und sagt aus, dass weil die Oberflächendichte des Gases steigt, dies auch die Sternentstehungseffizienz tut. Die natürliche Konsequenz der hohen gefundenen Oberflächendichten ist daher eine hohe Sternentstehungsrate und Effizienz. Aufgrund dieser Beobachtungen wäre eine plausible Hypothese zur Erklärung episodischer Sternentstehung um AGNs herum, dass die hohe Gasdichte zu einem extrem heftigen Sternentstehungsausbruch führt. Da die Effizienz hoch ist, kann der Sternentstehungsausbruch nur für kurze Zeit aktiv sein, bevor er anfängt abzuklingen. Daraufhin erwartet man, dass die Sternentstehung ruht, bis der Gasvorrat wieder aufgefüllt ist.





Die XMM-Newton Durchmusterung im COSMOS Feld (XMM-COSMOS)

Wir präsentieren den ersten Satz von EPIC-Beobachtungen mit XMM-Newton in dem 2 Quadratgrad umfassenden COSMOS-Feld. Die Stärke des COSMOS-Projektes liegt in seiner bisher unerreichten Kombination aus Raumwinkel und Empfindlichkeit über das gesamte elektromagnetische Spektrum. Mit Hilfe der XMM-Newton Beobachtungen können dabei sehr effizient Aktive Galaktische Kerne (AGN) und Haufen, bzw. Gruppen von Galaxien lokalisiert und identifiziert werden. Eines der primären Ziele der XMM-Newton COSMOS Durchmusterung ist das Studium der gemeinsamen Evolution von Galaxien und AGN in Abhängigkeit von ihrem Umfeld des kosmischen Netzes der großräumigen Struktur. Hier diskutieren wir wissenschaftliche Ergebnisse aus dem ersten Raster von 25 XMM-Newton Beobachtungen. Im existierenden Datensatz haben wir 1390 neue Röntgenquellen entdeckt.

Tiefe Durchmusterungen im Röntgenlicht zeigen, dass die kosmische Röntgenhintergrundstrahlung (Cosmic X-ray Background - CXB) hauptsächlich durch Akkretion auf supermassereiche Schwarze Löcher verursacht ist, integriert über die kosmische Zeit. In den letzten Jahren haben tiefe Durchmusterungen, ursprünglich mit ROSAT und später mit Chandra und XMM-Newton, einen Großteil des CXB in diskrete Quellen aufgelöst und dabei den Hauptbeitrag durch absorbierte und un-absorbierte AGN bestätigt. In letzter Zeit fokussiert sich das Interesse auf ein Verständnis der physikalischen Natur der Quellen, auf die kosmologische Evolution ihrer Eigenschaften und ihre Rolle in der Entwicklung von Galaxien.

Die Röntgengruppe am MPE ist zum Teil federführend an drei der größten, derzeit laufenden Durchmusterungsprojekte beteiligt: am XMM-COSMOS Survey, am "Lockman Hole" und am "Extended Chandra Deep Field South". Im Jahre 2006 haben wir uns auf das COSMOS-Projekt konzentriert. Der "Cosmic Evolution Survey" (COSMOS) ist ein internatioRektaszension von ca. $10^{\rm h}$ und der Deklination von etwa 2° $15^{\rm min}$ beobachtet wurde.

Ein umfangreiches Multi-Wellenlängen Programm ist im Gange, um das COSMOS-Feld mit allen modernen, großen Teleskopen vom Radio- bis in den Röntgenbereich zu beobachten, insbesondere mit dem VLA (Very Large Array), mit Spitzer, Subaru, Galex, XMM-Newton und Chandra, später hoffentlich auch mit ALMA. Die Beobachtungen werden durch zugehörige optische Rotverschiebungs-Durchmusterungen ergänzt. Die Stärke des COSMOS-Feldes ist die bisher unerreichte Kombination aus Himmelsfläche und exzellenter Empfindlichkeit über einen breiten Spektralbereich. Insbesondere erlauben die hoch aufgelösten HST-Bilder die Bestimmung der Galaxienmorphologie, während die substanzielle Spektroskopie es ermöglicht, diese Untersuchungen in Beziehung zur großräumigen Struktur zu setzen und auf diese



Abb. 1: Falschfarbenbild des XMM-COSMOS Feldes. Die Röntgenphotonen wurden in drei verschiedenen Energiebändern gesammelt: 0.5 - 2 keV (rot), 2 - 4.5 keV (grün) und 5 - 10 keV (blau). Die Bilder jedes Bandes wurden mit einer Pixelgröße von 4" erzeugt, Hintergrund-subtrahiert, entsprechend der Belichtungszeit korrigiert und mit einer Gaussfunktion geglättet. Punktquellen (meist AGN) können leicht von diffusen Galaxienhaufen unterschieden werden.

nales Projekt, das auf einem "Treasury"-Programm mit dem Hubble Space Telescope (HST) beruht, im Rahmen dessen ein komplettes Feld von 2 Quadratgrad bei der Weise die kosmologische Evolution der Galaxien Hand in Hand mit der von AGN zu untersuchen. Nach ihrer Fertigstellung wird die COSMOS-Datenbasis in der beobachtenden Kosmologie einzigartig sein und das Studium der Entwicklung des Universums bis zu Rotverschiebungen von z=5 ermöglichen.

Die XMM-Newton Weitwinkeldurchmusterung im COSMOS-Feld (XMM-COSMOS) deckt den Spektralbereich 0.5-10 keV ab (Abb. 1). Die hoch-empfindlichen Röntgenbeobachtungen sind ein wesentliches Element des COSMOS Surveys zur Lokalisierung und Identifikation von AGN und weit entfernten Galaxienhaufen. Insgesamt wurden diesem Survey 1.4 Ms XMM-Newton-Beobachtungszeit zugesprochen – das größte jemals genehmigte XMM-Newton Projekt. 53 Beobachtungen von jeweils ~30 ks wurden zwischen November 2003 und Juni 2006 durchgeführt, um ein Mosaik von 25 Pointierungen mit einer Maschenweite von 10 Bogenminuten zweifach abzudecken. Das Überlappungs-Muster der Beobachtungen wurde entwickelt um sowohl die Empfindlichkeit, als auch die Homogenität des endgültigen Mosaiks zu optimieren.

Die Analyse des gesamten Satzes von 53 Beobachtungen ist noch im Gange. Im Jahr 2006 konzentrierten wir uns auf die Analyse des ersten Satzes von XMM-Newton-Beobachtungen über 23 Felder. Die große von COSMOS abgedeckte Himmelsfläche erlaubt viele neue Untersu-

Wir analysierten die 23 Felder mit Hilfe eines Maximum-Likelihood Algorithmus zur Quellenentdeckung, unabhängig voneinander im weichen (0.5 - 2 keV), mittleren (2 - 4.5 keV) und harten (4.5 - 10 keV) Röntgenband. Wir entdeckten insgesamt 1390 Röntgen-Punktquellen in mindestens einem Band. Diese große Zahl von Objekten ermöglichte die Bestimmung der bisher genauesten Quellzählung (logN-logS Beziehung) über einen weiten Bereich von Quellflüssen, der von den bisherigen Durchmusterungen nur sehr rudimentär abgedeckt wurde, insbesondere im harten 5 - 10 keV Bereich (Abb. 2). Ein Vergleich mit früheren Ergebnissen zeigt in den überlappenden Flussbereichen eine sehr gute Übereinstimmung in allen Energiebändern und die beobachteten log(N>S) - log(S) Relationen stimmen mit unseren jüngsten Populationssynthese-Modellen für den Röntgenhintergrund überein.

Mit Hilfe optischer Kataloge konnten wir ~90% der entdeckten Röntgenquellen verlässlich identifizieren. Die typischen Fehlerkreise der XMM-Positionen (einige Bogensekunden im Radius) enthalten oft mehr als ein Objekt in den tiefen, uns zur Verfügung stehenden optischen/nahinfrarot-Bildern. Deshalb wandten wir eine "Likelihood Ratio" Technik an, um die optischen Gegenstücke der Rönt-



Abb. 2: Die "log(N>S)·log(S)"-Beziehung (Anzahl der Quellen, die einen Fluss größer als S haben) der Röntgenquellen (Aktive Galaxien) im XMM-Newton COSMOS Feld. Wir vergleichen unsere Ergebnisse mit denen der "Chandra Deep Field South (CDFS)" Durchmusterung und dem jüngsten Populationssynthese-Modell für den Röntgenhintergrund.

chungen. Wir konzentrierten uns zunächst darauf 1) die Röntgenquellen in diesem Himmelsgebiet zu entdecken und zu identifizieren, 2) eine detaillierte Spektralanalyse der helleren Quellen durchzuführen, und 3) nach speziellen und seltenen Objekten zu suchen. oder als normale Galaxien identifiziert wurden, ausgedehnte optische Morphologie, haben signifikant rötere optische/NIR-Farben und spannen einen weiten Bereich von Flussverhältnissen auf. Etwa 20% der Quellen zeigen augenscheinlich Diskrepanzen zwischen ihrer morphologischen und spektroskopischen Klassifikation. Die

genquellen statistisch korrekt zu identifizieren. Nur ein sehr kleiner Teil (~10%) der Quellen konnten nicht eindeutig zugeordnet werden: entweder sind die Fehlerkreise bis zur Grenze der optischen/NIR-Beobachtungen leer (6%), oder sie enthalten mehrere, gleich wahrscheinliche Kandidaten (4%).

Ungefähr 80% der spektroidentifizierten skopisch Kandidaten zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der optischen Spektroskopie, der optischen Morphologie und den optischen/Nahinfrarot-Farben. Die überwiegende Mehrheit der spektroskopisch identifizierten AGN mit breiten Emissionslinien (Typ 1) zeigen eine punktförmige Morphologie auf den HST-Bildern, blaue Farben in optischen Farb-Farb-Diagrammen und ein für Quasare typisches Flußverhältnis zwischen dem optischen und dem Röntgenbereich. Umgekehrt zeigen Röntgenquellen, die optisch als AGN mit schma-len Emissionslinien

einfachste Erklärung dafür ist, dass die Kern-Emission in diesen Objekten nicht gegenüber der optischen Strahlung der Muttergalaxie dominiert.

Für 135 spektroskopisch identifizierte Objekte konnten wir eine detaillierte Spektralanalyse im Röntgenbereich



Abb. 3: Leuchtkraftfunktion der Galaxienhaufen im COSMOS-Feld. Die Ergebnisse sind als Funktion der Leuchtkraft für drei verschiedene Entfernungsbereiche (blau: z = 0-0.6; grün: z = 0-1.3, rot: z = 0.6-1.3) aufgetragen. Die durchgezogene Kurve gibt die beste Anpassung an die Messdaten. Die beiden anderen Kurven zeigen Ergebnisse früherer Galaxienhaufen Durchmusterungen: der "ROSAT-ESO Flux-limited X-Ray (REFLEX)" Durchmusterung (0<z<0.3; gepunktete Linie) und der "Bright ClusterSample (BCS)" Durchmusterung (gestrichelte Linie). Diese beiden Linien zeigen die Unsicherheit in der Leuchtkraftfunktion für z<0.3.

durchführen. Die Mehrzahl der Quellen (76%) kann durch ein einfaches Potenzgesetz ohne intrinsische Absorption beschrieben werden. 30% zeigen demgegenüber intrinsische Absorption. Die restlichen 4% der Quellen erfordern eine komplexere Beschreibung mit zusätzlichen Emissionskomponenten. Der mittlere Spektralindex von 82 Quellen aus einer hellen Stichprobe ist $<\Gamma>=2.06\pm0.08$ mit einer intrinsischen Dispersion von ~0.24. Wie erwartet, unterscheidet sich die beobachtete Verteilung der intrinsischen Absorptions-Säulendichten deutlich zwischen AGN mit und ohne breiten Emissionslinien. In unserer Stichprobe fanden wir vier der seltenen, sogenannten Typ-2 QSOs mit Leuchtkräften L_x>10⁴⁴ erg s⁻¹ und Säulendichten N_{μ} >10²² cm⁻², deren spektrale Energieverteilung sehr gut zu dem mittleren Seyfert-2 Spektrum aus der Literatur passt. Dies beweist, dass eine derartig große Durchmusterung tatsächlich seltene und unterrepräsentierte Objekte entdecken kann. Die Kombination der Spektralanalyse im optischen und im Röntgenbereich läßt darauf schließen, dass das Verhältnis zwischen Typ-2 und Typ-1 AGN mit höherer Leuchtkraft geringer wird, wie es sich auch aus der jüngsten Modellierung der Entwicklung der AGN-Leuchtkraftfunktion ergibt.

Zur statistischen Beschreibung der Röntgenspektren wenden wir eine Farb-Farb-Analyse aus unseren drei

spektralen Bändern an. In einem derartigen Zweifarbendiagramm konnten wir eine Population sehr stark absorbierter, teilweise reflektierender Quellen identifizieren, sehr wahrscheinlich relativ nahe sogenannte "Comptonthick" AGN. Ein Beispiel ist die Quelle mit dem größten

> Flußverhältnis zwischen hartem und mittlerem Röntgenband. Deren Spektrum können wir mit einem reinen Compton-Reflektionsmodell und einer starken neutralen Eisenlinie bei 6.4 keV modellieren. Die starke Eisenlinie ist ein deutliches Indiz für die starke Absorption der Zentralquelle. Ein optisches Spektrum aus dem Sloan Digital Sky Survey ergibt eine Rotverschiebung von 0.125 und Linienverhältnisse normaler Seyfert-2 Galaxien.

> Die Kombination aus Tiefe und Fläche der Durchmusterung erlaubt auch eine effiziente Suche nach Galaxienhaufen. Mit den ersten 36 Pointierungen erreichen wir eine Empfindlichkeit von 3x10⁻¹⁵ erg cm⁻² s⁻¹ für den gesamten 0.5-2 keV Fluss des Haufens. Kandidaten für Galaxienhaufen werden mittels einer Wavelet-Detektionsmethode für ausgedehnte Röntgenemission gefunden. Die Verifikation der Galaxienhaufen geschieht mit Hilfe eines Vergleichs mit der Galaxienkonzentration in Rotverschiebungsintervallen von $\Delta z=0.1-0.2$ Dicke, mit Hilde des Multi-Band photometrischen Kataloges des COSMOS-Feldes (siehe Ti-

telseite). Bei Rotverschiebungen z<1.3 und optischen Helligkeiten m<25 fanden wir 72 Galaxienhaufen und konnten ihre Eigenschaften mit Hilfe Skalierungsrelationen für Galaxienhafen ableiten. Eine statistische Beschreibung des Surveys mit Hilfe der log(N>S) - log(S) Relation für Galaxienhaufen passt gut mit früheren Beobachtungen überein, allerdings finden wir bei gleichen Flüssen im Rahmen der Fehlerbalken eine leicht höhere Flächendichte von Galaxienhaufen. Die abgeleitete Röntgen-Leuchtkraftfunktion der Galaxienhaufen passt gut zu den Ergebnissen aus der näheren kosmischen Umgebung und erlaubt eine deutlich genauere Bestimmung der Steigung am schwachen Ende, von $\alpha = 1.93 \pm 0.04$ (Abb. 3). Für den abgedeckten Leuchtkraftbereich von 0.08 – 2x10⁴⁴ erg s⁻¹ passt unser Survey zu den existierenden Messungen der Leuchtkraftfunktion und ergibt eine signifikante Verbesserung der Genauigkeit bei hohen Rotverschiebungen. Das impliziert, dass bis z=1.3 keine signifikante Evolution der Leuchtkraftfunktion beobachtbar ist.

M. Brusa, N. Cappelutti, A. Finoguenov, G. Hasinger



2.3 STERNENTWICKLUNG UND DAS INTERSTELLARE MEDIUM

Entwicklung und Schicksal der Sterne, einzeln oder in Gruppen, ist eng verwoben mit der des umgebenden interstellaren Mediums. Eine Vielfalt astronomischer "Fenster", die sich über das gesamte elektromagnetische Spektrum erstrecken, erschließt uns Sterne und ihre Wechselwirkung mit der interstellaren Umgebung in den unterschiedlichen Entwicklungsphasen. Ziel unserer Messungen ist die Vervollständigung unseres Bildes der astrophysikalischen Prozesse, die Sterne von ihrer Entstehung bis zu ihrem Vergehen bestimmen. An unserem Institut sind wir in erster Linie an extremen Entwicklungsstadien interessiert, speziell an den Bedingungen unter denen sich Sterne bilden, und an den späten Stadien sowie den Stern-Überresten.

Sterne kontrahieren aus Verdichtungen interstellarer Gaswolken aufgrund der Massenanziehung. Aber wie solche Gasverdichtungen ihre turbulente Bewegungsenergie loswerden, so dass sie sich weiter verdichten und sogar sehr massive Sterne bilden, das ist nur ungenau verstanden. Infrarot- und sub-mm Messungen dringen tief in solche Sternentstehungsgebiete vor, und zeigen uns Objekte im Vorstadium eines Sterns und junge Sterne. Unser Institut nimmt Schlüsselpositionen ein bei Beobachtungsprogrammen zu jungen Sternen und Planetensuche mit Teleskopen der 8 - 10 m Klasse.



Abb. 1: Röntgenansicht von Binärsystemen mit Masseaustausch in der nahegelegenen Galaxie M31. Strahlungsausbrüche und auffallend helle Phasen sind charakteristisch für Materieströme auf kompakte Sterne.

Dabei wird die Technologie adaptiver Optik angewandt.

Sternentwicklung findet ihr Ende in gewaltigen Ausbrüchen wie Novae und Supernovae. Dies geschieht insbesondere bei massereicheren Sternen, die ihren Brennstoffvorrat zur Kernfusion rasch verbrauchen. Letzendlich bilden sich so kompakte Sternformen, also Weiße Zwerge, Neutronensterne, und stellare schwarze Löcher. In der Nähe solcher Objekte werden neue und wenig vertraute physikalische Prozesse bedeutsam. Die beim Einströmen von Gas auf einen kompakten Stern freiwerdende Schwerkraftenergie wird in Strahlung verwandelt, die uns insbesondere im Bereich der Röntgenund Gammastrahlung hilft diese Objekte zu verstehen. Der Materiestrom heizt die Sternoberfläche in der Region seines Auftreffens auf, sekundär erzeugte Jets stoßen Plasma mit hoher Energie aus. Solche Jets bilden sich insbesondere beim Einfall auf schwarze Löcher aus, und erlauben so deren Studium in Doppelsternsystemen. Eine Unterklasse von Gammastrahlen-Bursts wird mit der Bildung stellarer schwarzer Löcher in Verbindung gebracht, und Doppelsternsysteme helfen uns die Prozesse in der Nähe des Ereignishorizontes eines schwarzen Loches zu studieren. Vereinzelte und oft stark magnetisierte rotierende Neutronensterne zeigen sich als Pulsare in ihrer Hochenergie-Emission.

Das interstellare Medium hat eine Schlüsselstellung bei der Sternentstehung und den Phänomenen am Ende der Sternentwicklung. Noch ungenau bekannt sind die Prozesse, die frisch erzeugte Elemente aus Sternexplosionen schließlich in kontrahierendes Gas neuer Sterne einbringen. Gegen Ende der Sternentwicklung treten starke Sternwinde auf, die zusammen mit den

> Explosionen das umgebende Medium turbulent machen, und so vorhandenes mit frisch angereichertem Gas zu neuer Sternmaterie mischen. Radioaktive Beimischungen helfen uns den Strom frisch erzeugter Elemente durch ihre Zerfälle, verbunden mit Gammastrahlung, zu studieren.

> Das Verstehen dieses Kreislaufs von Materie über kosmische Zeitskalen erfordert die Zusammenarbeit verschiedenster Zweige der Astrophysik. Unser Institut prägt wesentlich die Messprogramme der XMM-Newton und INTEGRAL Observatorien, mit denen heisses Plasma, Radioaktivität, und Prozesse im Zusammenhang mit kosmischer Strahlung untersucht Die räumlichen Skalen werden. Studien erstrecken sich solcher vom Horizont schwarzer Löcher und Neutronensternoberflächen über die lokale Blase im interstellaren Medium

der Sonnenumgebung bis hin zu Galaxien als Ganzes; sogar intergalaktische Räume sind angesprochen, und werden im "Kosmologie"-Teil dieses Berichts dargestellt. Die Entstehung von Sternen ist ein wesentlicher Energielieferant aktiver Galaxienkerne, und wird daher im dortigen Teil dieses Berichts diskutiert. In diesem Teil konzentrieren wir uns in den folgenden drei Artikeln auf Messungen aus der Nähe kompakter Sterne.

Heiße Polkappen – Fehlanzeige!

Pulsare gleichen Leuchttürmen, die über komplexe Prozesse elektromagnetische Strahlung erzeugen. Wie aber funktionieren diese kosmischen Kraftwerke? Darüber rätseln die Astronomen seit der Entdeckung dieser Objekte vor fast 40 Jahren. Dank der hohen Empfindlichkeit des europäischen Röntgenobservatoriums XMM-Newton wurde jetzt eine Teilantwort gefunden: Danach scheint ein signifikanter Teil der Energie, die für die Entstehung der bei jüngeren Pulsaren häufig beobachteten Millionen Grad heißen Polkappen, überwiegend aus dem Innern der Sterne stammt und nicht von außen, wie bisher allgemein angenommen. Den Schlüssel zu dieser Erkenntnis lieferte die Beobachtung von fünf, mehrere Millionen Jahre alten Pulsaren.

Die sehr hohe Empfindlichkeit des ESA Röntgenobservatoriums XMM-Newton hat zum ersten Mal Beobachtungen ermöglicht, die darauf hin deuten, dass die Theorie über die Entstehung von Röntgenstrahlen bei Pulsaren einer teilweisen Revision bedarf.

Pulsare wurden im Jahr 1967 von den beiden Astronomen Jocelyn Bell-Burnell und Anthony Hewish an der englischen Universität Cambridge entdeckt. Hinter diesen Objekten verbergen sich sogenannte Neutronensterne: schnell rotierende und stark magnetisierte Überreste kollabierter massereicher Sterne, die ihr Leben in einer Supernova-Explosion beenden. Dabei erreichen die Sternleichen eine so hohe Dichte (1,4 Sonnenmassen konzentrieren sich in einem Raumbereich von nur etwa 20 Kilometer Durchmesser), dass Elektronen in die Atomkerne dringen und dort zur Entstehung von Neutronen führen. In Neutronensternen und deren Magnetosphären spielen sich sehr komplexe und bis heute nur im Ansatz verstandene Prozesse ab. Neutronensterne entstehen mit Temperaturen von Billionen Grad während des Gravitationskollapses massereicher Sterne, die ihren nuklearen Brennstoffvorrat verbraucht haben und unter ihrer eigenen Last in sich zusammenstürzen. Nach dieser spektakulären Geburt kühlen die heißen Sternleichen stetig ab. Das geschieht während der ersten 100,000 Jahre hauptsächlich durch die Emission von Neutrinos, die den Neutronenstern ungehindert verlassen und dabei Energie mitnehmen. Später überwiegt die Abkühlung durch Abstrahlung thermischer Photonen von der heißen Sternoberfläche.

Beobachtungen mit früheren Röntgensatelliten haben gezeigt, dass die Röntgenstrahlung der Neutronensterne aus drei verschiedenen Gebieten stammt (Abb. 1): Zum einen glüht die gesamte, Millionen Grad heiße Oberfläche; zweitens strahlen elektrisch geladene Teilchen bei ihrer Bewegung entlang gekrümmter Magnetfeldlinien beim Verlassen der Magnetosphäre sehr intensiv; zum Dritten emittieren junge Pulsare häufig Röntgenstrahlung, die von heißen Polkappen mit mehreren Millionen Grad stammt.

Bisher hatte man angenommen, dass diese heißen Flecken ausschließlich durch ein Bombardement hochenergetischer geladener Teilchen entstehen, die aus der Magnetosphäre zur Oberfläche zurückfliegen und die Polkappenbereiche aufheizen. Beobachtungen mit XMM-Newton lassen an diesem Bild jedoch Zweifel aufkommen. Mittels seiner überragenden Empfindlichkeit erlaubte der Satellit so detaillierte Untersuchungen, wie sie vorher nicht möglich waren.

Bei unseren Beobachtungen zeigte sich erstmals, dass es bei den untersuchten Millionen Jahre alten Pulsaren weder einen Hinweis auf thermische Röntgenstrahlung von der gesamten Neutronensternoberfläche gibt,



Abb. 1: Die Emissionseigenschaften rotationsgetriebener Pulsare ändern sich mit deren Alter. Röntgenstrahlung aus der Pulsarmagnetosphäre überwiegt bei jungen und alten Pulsaren, thermische Röntgenstrahlung dagegen bei mittelalten (sogenannten kühlenden) Neutronensternen. Obwohl junge Pulsare noch sehr heiß sind, überdeckt die noch intensivere nicht-thermische Röntgenstrahlung die thermische Komponente.

34 Wissenschaftliche Ergebnisse

noch auf heiße Polkappen – obwohl sehr intensive Röntgenstrahlung von geladenen Teilchen aus der Magnetosphäre gemessen wurde.

Das Fehlen der Röntgenstrahlung von der gesamten Sternoberfläche überraschte dabei nicht: In den zu den Polen geleitet wird, die dadurch Temperaturen von Millionen Grad besitzen. Das ist möglich, weil die Wärmeleitung in Neutronensternen durch Elektronen geschieht. Da diese eine elektrische Ladung tragen, ist ihre Bewegungsrichtung durch die Richtung des Magnetfelds vorgegeben.



Abb. 2: Der leuchtschwache Pulsar PSR B1929+10, hier beobachtet von XMM-Newton, bewegt sich mit einer projizierten Geschwindigkeit von 177 Kilometer pro Sekunde durch den interstellaren Raum. Dabei hinterlässt der Neutronenstern einen Schweif von Röntgenstrahlen emittierendem Elektronenplasma.

vielen Millionen Jahren seit ihrer Entstehung ist die Neutronensternoberfläche bereits soweit abgekühlt, dass ihre Temperatur weit unterhalb von 500,000 Grad Celsius liegt und sich ihr Glühen daher nicht mehr im Röntgenbereich beobachten lässt. Zur Überraschung emittierten aber auch die heißen Polkappen keine Röntgenstrahlung, was bedeutet, dass die Heizung der Polkappen durch hochenergetische Teilchen bei alten Pulsaren nicht mehr wirksam funktioniert. Im Fall des drei Millionen Jahre alten Pulsars mit der Katalogbezeichnung PSR B1929+10 (Abb. 2), des Prototyps eines alten Pulsars, ist jegliche thermische Komponente in der beobachteten Röntgenstrahlung sogar kleiner als sieben Prozent.

Unsere Beobachtungen zeigen, dass die konventionelle Sichtweise für die Entstehung der heißen Polkappen bei jüngeren Pulsaren nicht die einzig mögliche ist. Eine mögliche Alternative ist, dass die im Neutronenstern gespeicherte Wärmeenergie durch das starke Magnetfeld Entsprechend könnten die mehrere Millionen Grad heißen Flecken bei jüngeren Pulsaren hauptsächlich durch die Hitze aus dem Innern des Neutronensterns entstehen, und nicht nur durch das Bombardement der zur Oberfläche zurückfliegenden hochenergetischen Teilchen. Die heißen Flecken verschwinden dann mit dem Abkühlen der Neutronensterne und sind entsprechend bei den Millionen Jahre alten Pulsaren nicht mehr zu beobachten. Die Gültigkeit dieser Sichtweise wird zurzeit in der Fachwelt noch diskutiert, jedoch machen unsere neuen, mit XMM-Newton durchgeführten Beobachtungen eine solche Interpretation sehr wahrscheinlich.

W. Becker


Entdeckung eines präzedierenden Neutronensterns im Röntgenlicht

Neutronensterne bilden eines der Endstadien in der Entwicklung massereicher Sterne. Beobachtungen mit dem Röntgenobservatorium XMM-Newton erbrachten eine überraschende Entdeckung: das Röntgenspektrum von RX J0720.4-3125 änderte sich im Laufe weniger Jahre. Diese Veränderungen ergeben sich, wenn die Temperatur auf der Oberfläche des Neutronensterns zu- und abnimmt. Man schließt daraus, dass der Pulsar (RX J0720.4-3125 dreht sich in 8.4 Sekunden einmal um sich selbst) ähnlich einem Spielzeugkreisel präzediert. Dadurch wendet er uns mal heißere und mal kühlere Flecken seiner Oberfläche zu. RX J0720.4-3125 bietet die beste Gelegenheit um die Präzession eines Neutronensterns über seine Röntgenstrahlung von der Sternoberfläche zu studieren. Präzession erlaubt uns möglicherweise die innere Struktur von Neutronensternen zu untersuchen und mehr über den Zustand der Materie in ihrem Inneren zu erfahren

Neutronensterne als Endstadien der Entwicklung massereicher Sterne präsentieren sich als Himmelskörper der Extreme: Die Masse der Sonne konzentrieren sie in einer Kugel, de-Durchmesser ren nicht größer als der einer mittle-Großstadt ren ist. Ihre Dichte ist mit rund einer Milliar-Tonnen de pro Kubikzentimeter etwas größer als die eines Atomkerns. Auf ihrer Oberfläche herrschen Temperaturen von rund einer Million Grad, ihr Magnetfeld ist mehrere 1012 mal stärker als das der Erde und bei ihrer Geburt drehen sie sich rund 100 Mal pro Sekunde um sich selbst. Das Magnetfeld bremst die Sterne nur sehr langsam ab. Isolierte Neutronensterne

können durch ihre thermische Emission im Röntgenlicht beobachtet werden, solange ihre Temperatur noch nicht wesentlich unter eine Million Grad gesunken ist. Nach theoretischen Rechnungen dauert dies typisch einige Millionen Jahre. Das Magnetfeld kann so stark sein, dass es den Hitzetranport aus dem Sterninneren durch die Neutronensternkruste beeinflusst. Dadurch entstehen heiße Flecken um die Magnetpole auf der Sternoberfläche. Es ist die Strahlung dieser heißen polaren Kappen, die das Röntgenspektrum dominiert.

Aus beobachteten Supernova-Explosionsraten, dem Anteil schwerer Elemente (die im Inneren der Sterne entstehen und bei der Supernova-Explosion freigesetzt werden) in der interstellaren Materie und aus den Eigenschaften der Radiopulsar-Population schätzt man die Gesamtzahl der Neutronensterne in unserer Milchstraße auf etwa 100 Millionen bis eine Milliarde. Nur wenige isolierte Neutronensterne sind jedoch im Röntgenbereich sichtbar. Sie sollten ein sehr "weiches" Röntgenspektrum zeigen, d.h. hauptsächlich bei niedrigen Röntgenenergien emittieren, und bei optischen Wellenlängen äußerst lichtschwach sein. Trotz intensiver Suche nach noch unbekannten Objekten in den ROSAT Daten wurden nur sieben Neutronensterne mit den erwarteten Eigenschaften entdeckt.

Der Vergleich der aus den Spektren abgeleiteten Temperaturen mit theoretisch berechneten Erwartungswerten lässt auf ein Alter von typisch einer Million Jahre schließen. Die sieben von RO-SAT entdeckten Neutronensterne (oft "Die Glorreichen Sieben" genannt) deshalb sind so interessant. weil sie zu den wenigen gehören, von denen wir direkt die thermische Emission von der Sternoberfläche beobachten können.

> Abb. 1: Die Röntgen-Aufnahme von XMM-Newton zeigt die Himmelsregion um RX J0720.4-3125. Die Energie der Röntgenphotonen ist farblich kodiert: weiche Röntgenstrahlung rot und energiereichere Strahlung blau. Der Neutronenstern erscheint als helles rötliches Objekt in der Bildmitte.

Die "Glorreichen Sieben" wurden mit den äußerst empfindlichen Messinstrumenten von XMM-Newton (siehe Projektteil Röntgenastronomie) untersucht. Einer davon ist der Pulsar RX J0720.4-3125, der mit einer Umdrehungsperiode von 8.4 Sekunden rotiert und rund 1000 Lichtjahre von uns entfernt ist. Sein optisches Licht ist so schwach, dass es nur mit den stärksten Teleskopen zu beobachten ist. Als Röntgenquelle strahlt RX J0720.4-3125 allerdings recht kräftig (Abb. 1).

Bei der genauen Untersuchung der Röntgenspektren aus verschiedenen Jahren haben wir überraschenderweise festgestellt, dass sich die Spektren des Neutronensterns im Laufe weniger Jahre veränderten: Zwischen Mai 2000

und Mai 2004 wuchs der Anteil härteren Röntgenlichts in den spektralen Messungen. Das heißt der Pulsar strahlte im Mittel Röntgenlicht von höherer Energie aus. Anschlie-Bend sank dieser Anteil energiereicher Strahlung wieder (Abb. 2). Das könnte bedeuten, dass auch die Oberflächentemperatur von RX J0720.4-3125 schwankt – und zwar fast um 100000 Grad. Es ist jedoch sehr unwahrscheinlich, dass sich die globale Oberflächentemperatur des Neutronensterns in wenigen Jahren so stark ändert, da die Zeitskala für die Abkühlung sehr viel länger ist.

Die scheinbare Temperaturänderung rührt eher daher, dass die Rotationsachse von RX J0720.4-3125 nicht stabil im Raum ruht sondern auf einem Kegel umläuft. Durch diese Präzession rückt mal der eine Pol und mal der andere stärker ins Blickfeld von XMM-Newton. Sind die Pole unterschiedlich heiß und unterschiedlich groß, so strahlen sie auch verschieden hohe Anteile an hartem Röntgenlicht ab. Für eine Präzession des Neutronensterns spricht auch eine Zeitanalyse seiner

Röntgenpulse, welche Abweichungen von seiner gleichmäßigen Abbremsung der Rotation zeigt. Beide Analysen deuten auf zyklische Änderungen mit einer Periode von 7 - 8 Jahren, was natürlicherweise als die Präzessionsperiode gedeutet wird. Während der ersten XMM-Newton Beobachtung im Mai 2004 war die Temperatur im Minimum und der kühlere, größere Fleck war hauptsächlich sichtbar. Vier Jahre später, im Mai 2004, wurde durch die Präzession der heißere, kleinere Fleck besser sichtbar, was die beobachtete Temperatur erhöhte. Das Präzessions-Modell kann die beobachteten Variationen in der Temperatur und der Größe des Emissionsgebietes und ihre Antikorrelation erklären.

Dass der eine Pol deutlich heißer ist als der andere, liegt möglicherweise am starken Magnetfeld von RX J0720.4-3125. Die Magnetfeldstärke eines Pulsars lässt sich sowohl aus dem Grad der Abbremsung seiner Rotation, als auch über die Energie von Absorptionslinien (soweit vorhanden) im Röntgenspektrum abschätzen. Kann man eine Absorptionslinie eindeutig als Zyklotronresonanzlinie identifizieren, so erlaubt dies die direkteste Bestimmung der Magnetfeldstärke. RX J0720.4-3125 ist einer der wenigen Neutronensterne, bei dem beide Methoden anwendbar sind und übereinstimmend auf ein Magnetfeld von einigen 10¹³ Gauß schließen lassen. Abweichungen vom reinen, symmetrischen Dipolfeld, insbesondere nahe der Neutronensternoberfläche, führen dann zu einer asymmetrischen Temperaturverteilung. Unterschiedlich heiße Polregionen wurden auch von RBS 1223 gemessen, einem der anderen Neutronensterne aus der Gruppe der "Glorreichen Sieben". Hier, wie auch bei RX J0720.4-3125, zeigt sich dies durch periodische Schwankungen der Spektren im Takt der Rotationsperiode. Im Gegensatz zu RX J0720.4-3125 zeigt RBS 1223 jedoch bisher keine Anzeichen für Präzession.



Abb. 2: Temperaturvariationen über einen Zeitraum von sechs Jahren, abgeleitet aus den Röntgenspektren, die mit dem EPIC-pn Instrument auf XMM-Newton aufgezeichnet wurden.

Darüber, wie der kosmische Kreisel RX J0720.4-3125 ins Taumeln geraten ist, kann man bislang nur spekulieren. Aus dem Verhältnis von Rotationsperiode zu Präzessionsperiode können wir die Abweichung des Neutronensterns von der Kugelform abschätzen. Bei einem Wert von einigen 10⁻⁸ bedeutet dies eine Abweichung von weniger als einem Millimeter bei einem Radius von 20 km. Diese "Unwucht" könnte bei einem Sternbeben entstanden sein, wie sie bei sehr jungen Pulsaren häufiger beobachtet werden. Theoretische Betrachtungen deuten jedoch darauf hin, dass Präzession stark gedämpft wird mit Zeitskalen von typisch hundert Präzessionsperioden. Danach dürfte das Sternbeben nicht viel länger als 1000 Jahre zurückliegen.

All dies hängt jedoch sehr vom inneren Aufbau des Neutronensterns ab, ob er z.B. einen superfluiden Kern besitzt. Die Untersuchung der Präzession von Neutronensternen könnte daher helfen, die innere Struktur von Neutronensternen zu untersuchen und mehr über den Zustand der Materie in ihrem Inneren zu erfahren.





M 33 X-7: Der erste massereiche Röntgen-Bedeckungsveränderliche mit einem Schwarzen Loch

Die Chandra Röntgendurchmusterung der Galaxie M33 aus der Lokalen Gruppe überdeckte einen Grossteil der 3.45 Tage Umlaufperiode des Röntgen-Bedeckungsveränderlichen M33 X-7 und löste erstmals den Eintritt und Austritt der Bedeckung auf. Dadurch konnten wir verbesserte Ephemeriden für die Bedeckungsmitte und die Umlaufperiode bestimmen und die Bedeckungsdauer besser eingegrenzen. Das Röntgen-Spektrum lässt sich durch ein Scheiben-Schwarz-Körper Modell beschreiben, wie man es von Röntgen-Doppelsternen mit Schwarzen Löchern in der Milchstrasse kennt. Bilder des Hubble Space Telescope (HST) zeigen einen O6 III Stern als optischen Begleiter. Die optische Lichtkurve deutet darauf hin, dass die Masse des kompakten Objekts im System größer als 9 Sonnenmassen ist. Diese Masse, die Form des Röntgen-Spektrums und die Kurzzeitveränderlichkeit identifizieren M33 X-7 als den ersten bedeckenden massereichen Röntgen-Doppelstern mit einem Schwarzen Loch als kompaktes Objekt.

Messier 33 (M33) ist mit einer Entfernung von 2.6 Millionen Lichtjahren eine herausragende Spiralgalaxie der Lokalen Gruppe. Bereits vor circa 30 Jahren zeigte das Einstein Observatorium 11 helle Röntgen-Quellen in M33. M33 X-7 (X-7) wurde schon da als variabel erkannt. Die maximale Röntgen-Leuchtkraft übertraf 10³⁸ erg/s und X-7 blieb auch in allen nachfolgenden Beobachtungen aktiv. Die Veränderlichkeit wurde durch einen bedeckenden Röntgen-Doppelstern (XRB) erklärt, der eine Umlaufperiode von 3.45 Tagen und eine Bedeckungsdauer von 0.4 Tagen hat. Zusätzlich gab es Hinweise auf eine Pulsperiode von 0.31 s. Damit war X-7 dem prominenten XRB in der Kleinen Magellanschen Wolke, SMC X-1, sehr ähnlich. Da die Position von X-7 mit der dichten OB Stern-Assoziation HS13 übereinstimmt, konnte X-7 damals mittels Lokalisierung nicht eindeutig identifiziert werden.

Bei unserer M33 Durchmusterung mit XMM-Newton von August 2000 bis Februar 2003 war X-7 bei einigen Beobachtungen im Gesichtsfeld. Diese werteten wir, gemeinsam mit einer Chandra Beobachtung aus dem Archiv, aus. Wir entdeckten Rest-Strahlung von X-7 während der Bedeckung, ein Phänomen, das die meisten bedeckenden XRBs zeigen. Das weiche Röntgen-Spektrum außerhalb der Bedeckung lässt sich am besten durch Bremsstrahlungs- oder Scheiben-Schwarz-Körper-Modelle beschrieben. Eine Suche nach regulären Pulsationen im Bereich 0.25 - 1000 s verlief erfolglos. In optischen Beobachtungen des DIRECT Projekts, bei dem Entfernungen zu nahen Galaxien, z.B. M31, genau bestimmt werden sollen, identifizierten wir X-7 mit einem BOI bis O7I Stern, der die elliptische Heizlichtkurve eines massereichen XRB mit der X-7 Bahnperiode zeigte. Die Bahnparameter, die Masse des optischen Begleiters, das Fehlen von Röntgen-Pulsationen und das Röntgen-Spektrum sprachen für eine Schwarzes Loch als kompaktes Objekt im System. X-7 wäre der erste massereiche bedeckende XRB mit einem Schwarzen Loch als kompaktem Objekt.

Im September 2005 begann ein Beobachtungsprogramm mit dem Chandra Röntgen-Observatorium, bei dem in sieben 200 ks Beobachtungen M33 kartiert werden sollte. Die Beobachtungen wurden geteilt und mit einem halben Jahr Abstand durchgeführt, um Langzeitveränderlichkeit der gefundenen Quellen untersuchen zu können. Während mehrerer Beobachtungen war X-7 im Gesichtsfeld von Chandra. Wir analysierten Beobachtungen von X-7, die über zwei Monate verteilt waren.



Abb. 1: Chandra Lichtkurve des Röntgen-Doppelsterns M33 X-7 um die Bedeckung. Individuelle Beobachtungen sind farblich gekennzeichnet und markiert.

In einigen Beobachtungen konnte zum ersten Mal der Übergang in die bzw. aus der Bedeckung aufgelöst werden. Während X-7 ziemlich schnell aus der Bedeckung austritt, dauert der Eintritt deutlich länger (Abb. 1). Wie in vielen anderen massereichen XRBs zeigt X-7 mehr Variabilität vor als nach der Bedeckung. Dies kann man dadurch erklären, dass vor dem Bedeckungseintritt die Strahlung des kompakten Objekts im innersten Bereich des Sternwindes des Begleiters und von dichtem Material, das dem kompakten Objekt in der Bahn nachfolgt, absorbiert wird. Unsere Suche in den Chandra Daten nach Pulsationen im Bereich 6 - 10000 Sekunden blieb auch erfolglos. Aus Bedeckungseintritt- und -austrittzeiten, die zwei Bahnperioden auseinander lagen, bestimmten wir die Zeit der Bedeckungsmitte auf 0.005 Tage genau. Die Bedeckungsdauer ist kürzer als 0.147 in Phase und entspricht einem Bedeckungshalbwinkel von 26.5 Grad. Mit Hilfe dieser, nun besser bestimmten, Bedeckungs-

austrittzeiten und neu ausgewerteten Einstein und ROSAT Daten, erarbeiteten wir eine verbesserte Bahnperiode, und suchten auch nach Perioden-Anderungen. Aus allen Daten finden wir eine Abnahme der X-7 Bahnperiode (Perioden-Anderung dividiert durch Periode) von -4x10⁻⁶ pro Jahr, vergleichbar den bei anderen massereichen XRBs (z.B. SMC X-1) gefundenen Werten. Solche schnell abnehmenden Perioden in massereichen XRBs können Gezeitenwechselwirkungen durch zwischen dem kompakten Objekt und dem massereichen Begleiter erklärt werden. Wenn die Bahnperiode abnimmt, wird die Roche Äguipotentialfläche, die die beiden Sterne "schwerkraftmässig" trennt, in die Atmosphäre des Begleiters sinken, und der Massentransfer in relativ kurzer Zeit auf Super-Eddington Werte ansteigen. Schließlich sollte das kompakte Objekt sich in die Hülle des Begleiters hineinschrauben und so die Entwicklungsphase des Systems als massereicher XRB beenden.

Die Energiespektren, gewonnen an Beobachtungen außerhalb der Bedeckung, können mit einem Schei-

ben-Schwarz-Körper-Modell beschrieben werden (innere Scheibentemperatur kT ~ 0.99 keV) und einer Absorptionssäule, die X-7 auf die uns zugewandte Seite von M33 rückt. Die gemessenen Flüsse entsprechen unabsorbierten Leuchtkräften zwischen 5 und 11×10^{37} erg/s. Aus der Röntgen-Absorption konnten wir, die erwartete optische Extinktion und Farbkorrekturen, bestimmen.

Mit der einzigartigen Chandra-Punktbildfunktion wurde die Position von X-7 auf 0.5" genau bestimmt. HST Bilder in verschiedenen Filtern aus dem Archiv lösen die Assoziation HS13 in Einzelsterne auf. X-7 wird mit einem Stern aus einem Paar mit ähnlicher Leuchtkraft identifiziert, die 0.9" auseinander liegen (Abb. 2). Nach Extinktionsund Farbkorrektur deuten seine Helligkeiten auf einen O6 III Stern in M33 hin, der eine Temperatur von 39,000 K, einen Radius von 17 Sonnenradien und eine Masse von über 20 Sonnenmassen hat.

Mit dem neu bestimmten Typ des Begleitsterns und der nun besser bekannten Bedeckungsdauer konnten wir, mittels Modellierung der optischen Lichtkurven, die Massenabschätzung für das kompakte Objekt deutlich verbessern. Der Neigungswinkel der Bahn kann nicht kleiner als 75° sein. Jedoch sind Neigungen größer 80° wahrscheinlicher. Für eine solche Bahn sollte das kompakte Objekt schwerer als 9 Sonnenmassen sein. Somit bestimmten die neuen Röntgen-Daten, verbunden mit der optischen Auswertung, das kompakte Objekt in X-7 als



Abb. 2: Hubble Space Telescope (HST) 10"x10" Bild der OB Stern Assoziation HS13. Die Chandra Positionen sind markiert als Kreise. Der optische Begleiter ist die Quelle zwischen den Kreisen.

Schwarzes Loch. Diese Ergebnisse führten dann noch zu weiteren Auswertungen und Beobachtungen.

Eine Analyse von öffentlich zugänglichen optischen Daten der M33 Zeitvariabilitäts-Durchmusterung mit dem 3.6m CFHT (Canada-France-Hawaii-Telescope) von 2003 und 2004 bestätigte, die früher gefundene optische Modulation. Optische Spektroskopie von X-7 zeigte zwei kräftige He II Absorptionslinien des Begleiters. Die Anpassung einer Sinus-Kurve an die, aus den Linien abgeleiteten, Radialgeschwindigkeiten ergaben eine Amplitude von 109 km/s und eine Phasenlage, mit der die Röntgen-Phase übereinstimmt. Die daraus abgeleitete optische Massenfunktion von 0.46 unterstützt zusätzlich die Erklärung, dass das kompakte Objekt ein Schwarzes Loch ist.

W. Pietsch, F. Haberl



2.4 PHYSIK DES SONNENSYSTEMS

Das Sonnensystem umfasst Sonne, Planeten, deren Atmosphären und Plasmaumgebungen, die kleinen Körper, z.B. Kometen, interstellaren Staub, interstellare Teilchen von außerhalb der Heliosphäre und die kosmische Strahlung. Am MPE werden vor allem plasmaphysikalische Phänomene an der Sonne, in der Erdmagnetosphäre und in ihren Grenzschichten, sowie im interplanetaren Raum und bei Planeten untersucht.



Abb. 1. Das von der Sonne wegströmende Plasma hat einen unmittelbaren Einfluss auf die Erde und das gesamte Sonnensystem. Die Illustration zeigt einen koronalen Massenauswurf (links im Bild), der sich in Richtung Erde und ihrer Magnetosphäre bewegt. Die Magnetsphäre ist schematisch rechts gezeigt. (Größen und Entfernungen sind nicht maßstabsgetreu dargestellt, Abb. ESA).

Wir sind insbesondere an der Wechselwirkung aktiver Phänomene der Sonne mit der näheren Erdumgebung interessiert, wie es in Abb. 1 schematisch dargestellt ist: der kontinuierlich von der Sonne abströmende Solare Wind und das mitgeführte Magnetfeld formen die Magnetosphäre der Erde und bestimmen dynamische Prozesse, wie z.B. Rekonnexion und Konvektion. Darüber hinaus treiben koronale Massenauswürfe (CME), die mit Geschwindigkeiten bis zu ~2500 km/s von der Sonne weglaufen (links in der Abbildung ist ein mit SOHO gemessener CME dargestellt) interplanetare Stosswellen. die ihrerseits Teilchen auf hohe Energien beschleunigen können. Einige Tage später treffen diese Stosswellen auf die Magnetosphäre der Erde, schematisch rechts im Bild dargestellt, und erzeugen dabei magnetische Stürme, und führen zu Teilchenbeschleunigung in der Magnetosphäre und zu Polarlichtern.

Zur Erforschung der Magnetosphäre der Erde, ihrer Grenzschichten und der Wechselwirkung mit dem solaren Wind, sowie von Beschleunigungsprozessen an der Sonne, im interplanetaren Raum, und in der Magnetosphäre der Erde wurden über mehrere Jahrzehnte am MPE Weltraumgestützte Instrumente zur Diagnostik von Plasma und elektrischer Felder, sowie zur Bestimmung von Masse, Energie und Ionenladung energetischer Teilchen entwickelt. Gegenwärtig sind wir an mehreren aktiven Instrumenten an Bord der Erdsatelliten SAMPEX (Solar, Anomalous and Magnetopsheric Particle Explorer), FAST (Fast Auroral Snapshot Explorer), Cluster und Double Star, sowie an den interplanetaren Observatorien SOHO (Solar and Heliospheric Observatory), ACE (Advanced Composition Explorer) und STEREO (Solar Terrestrial Relations Observatory) beteiligt.

> Mit den vier Satelliten der Cluster Mission, sowie den zwei Double Star Satelliten sind wir, nach 5 Jahren erfolgreichem Cluster Betrieb, in einer neuen Ära von Multi-Satellitenmissionen der Magnetosphärenphysik. in Die Cluster Satelliten sind mit identischer Instrumentierung ausgestattet und fliegen in einer Tetraeder – Konfiguration mit variablem Abstand (~100 bis >10.000 km) durch verschiedene Regionen der Magnetosphäre. Mit der gleichzeitigen Messung auf vier Satelliten ist es erstmals möglich, zeitliche und räumliche Variationen zu unterscheiden, und die Struktur und Dynamik von Grenzschichten,

wie z.B. der Magnetopause und der Bugstosswelle der Erde, detailliert zu untersuchen.

Im Jahre 2006 untersuchten wir insbesondere Plasma Konvektion und ausströmende lonen in der polaren Magnetosphäre, die Struktur und Dynamik der Magnetopause, sowie lonen Beams in der Region vor der Bugstosswelle der Erde ("lonen-Foreshock Region"), und Kopplungsprozesse zwischen dem solaren Wind, der Magnetosphäre und der lonosphäre.

Energetische lonen solaren Ursprungs werden mit den Experimenten auf SOHO und ACE gemessen. Die Analyse der lonenladung liefert dabei wichtige Hinweise über den Ursprung der lonen und über die Beschleunigungsregion an der Sonne und im interplanetaren Raum.

Neben den in-situ Messungen erhalten wir Informationen über die Wechselwirkung des solaren Windes mit Kometen oder Planeten aus Röntgenmessungen. Diese Messungen sind im allgemeinen passiv. Mit der gezieltem Kollision des 364 kg "Impactors" der Deep Impact Mission der NASA mit dem Kometen 9P/Tempel 1 am 4. Juli 2006 wurde erstmals ein aktives Experiment dieser Art durchgeführt. Der Einschlag mit einer relativen Geschwindigkeit von 10.2 km/s erzeugte 10⁶ bis 10⁷ kg frisches, neutrales Kometen - Material in dessen ausgedehnter Atmosphäre. Dies führte zu einer Erhöhung der gemessenen Röntgenstrahlung, in Übereinstimmung mit der erwarteten Masse des beim Aufschlag erzeugten Auswurfs.

In den nächsten beiden Beiträgen berichten wir im Einzelnen von zwei Arbeiten, die aus den Untersuchungen zur Magnetosphäre der Erde und zur Beschleunigung von Teilchen an der Sonne und im interplanetaren Raum ausgewählt wurden.

Plasma Konvektion in der Erdmagnetosphäre

Wir analysierten Messungen mit dem Electron Drift Instrument an Bord der Cluster Satelliten in der Magnetosphäre um detaillierte Karten der Plasmakonvektion in der Ionosphäre zu erstellen. Die Resultate entsprechen exakt den Erwartungen für magnetische Rekonnexion zwischen interplanetarem und terrestrischem Magnetfeld, leicht modifiziert durch die Ionosphäre selbst.

Die Sonne emittiert ständig einen Plasmastrom, den Sonnenwind, der durchdrungen ist von einem Magnetfeld unterschiedlicher Richtung, dem interplanetaren Magnetfeld (IMF). Wenn dieses magnetisierte Plasma auf das Erdmagnetfeld trifft, wird es abgelenkt und hinterlässt einen Hohlraum, die Magnetosphäre, die vom Sonnenwind durch eine Grenzfläche, die Magnetpause, getrennt ist. Wenn das IMF eine südliche Richtung hat, kann es sich an der Frontseite der Magnetopause mit dem nördlich gerichteten Erdmagnetfeld verbinden, mittels einem als "magnetische Rekonnexion" bezeichneten universellen Plasmaprozess. Diese magnetische Verbindung erlaubt das Eindringen von Sonnenwindplasma in die Magnetosphäre. Einmal mit dem IMF verbunden, werden die terrestrischen Feldlinien, und das an Ihnen klebende Plasma, durch den Sonnenwind stromabwärts über die Pole der Erde gezogen. Dabei dringen sie tiefer und tiefer in den Magnetosphärenschweif ein, wo sie schließlich auf das Neue rekonnektieren und anschließend an der Erde vorbei in Richtung Sonne transportiert werden, bis sie wieder auf das IMF treffen, und der ganze Prozess von vorne beginnt. Diese großräumige Zirkulation reicht bis in die lonosphäre, dem ionisierten Teil der Erdatmosphäre. Das Resultat ist ein zweikreisiges Muster, mit von der Sonne weggerichteter

Strömung über den beiden Polkappen, und Rückströmung bei niedrigeren Breiten. Bei nördlich gerichtetem IMF wandert der Ort magnetischer Rekonnexion von der Frontseite der Magnetosphäre dorthin, wo die in den Magnetosphärenschweif gerichteten Feldlinien ihrerseits dem IMF entgegengerichtet sind. Als Resultat erwartet man eine schwache sonnenwärts gerichtete Strömung.

Statistische Karten der magnetosphärischen Konvektion haben wir aus Messungen der Plasmageschwindigkeit mit dem Electron Drift Instrument (EDI) auf Cluster zwischen Februar 2001 und März 2006 erstellt. EDI ist eine Kollaboration mit mehreren Gruppen in den USA, unter Führung des MPE. EDI misst direkt die zweidimensionale Strömungsgeschwindigkeit senkrecht zum Magnetfeld mit bisher unerreichter Genauigkeit. Die Grundlage der Elektronendrift-Technik ist die Injektion zweier schwacher Elektronenstrahlen mit Energien von 1 keV und deren Registrierung nach einem vollständigem Umlauf im umgebenden Magnetfeld. Wegen ihrer zykloidalen Bahn können die Elektronen nur dann zu den zugehörigen Detektoren zurückkehren, wenn sie in exakt in die durch die Plasmadriftgeschwindigkeit festgelegten Richtungen geschossen werden. Der erfolgreiche Betrieb verlangt deshalb eine kontinuierliche Verfolgung dieser Richtungen. Die Elektronenstrahlen werden amplitudenmoduliert um ihre Flugzeit messen zu können. Die Driftgeschwindigkeit wird dann entweder aus den Schussrichtungen oder aus den Flugzeiten berechnet.

Die Cluster Satelliten, mit ihren polaren Bahnen, überdecken die Polregionen zweimal pro Jahr vollständig. Die



Messungen werden allerdings in grossen Höhen durchgeführt, und zwar zwischen 3 und 19 Erdradien. Der Vergleich mit ionosphärischen Messungen erfordert deshalb die Projektion der Messungen entlang der Magnetfeldlinien bis in die lonosphäre.

Um den Einfluss der Richtung des IMF auf die Konvektion zu bestimmen, verwendeten wir Messungen des ACE Satelliten. Da ACE auf dem Librationspunkt L1 in einer Entfernung von 1.5 Millionen km positioniert ist, dauert es etwa eine Stunde bis dieses Magnetfeld an der Erde ankommt. Um diese Zeitverschiebung zu bestimmen, wurde bislang einfach die "Erde-ACE" Distanz durch die Sonnenwindgeschwindigkeit geteilt. Das kann jedoch zu Ungenauigkeiten grossen führen, weil die Variationen

Abb. 1: Illustration der Abhängigkeit der Transportzeit des Sonnenwindes und des in ihm verankerten IMF vom Monitor-Satelliten ACE bis zur Erdmagnetosphäre von der (durch den Normalenvektor n gekennzeichneten) Orientierung der Fronten in denen sich die Variationen des IMF abspielen. V_{sw} bezeichnet die Richtung des Sonnenwindes. ACE bewegt sich auf einer Bahn um den Librationspunkt L1.



Abb. 2: Höhenlinien der elektrischen Spannung über der nördlichen Polkappe, für 8 Richtungen des IMF, von nordwärts (Sektor 0) weiter im Uhrzeigersinne nach südwärts (Sektor 4) und zurück bis nordwärts. Erarbeitet wurden diese Karten durch Projektion der Messungen mit dem EDI Instrument auf Cluster in die Ionosphäre. Die Hintergrundfarbe zeigt die Größe der Spannung, entsprechend dem Farbbalken in der Mitte. Die Linien entsprechen festen Spannungswerten im Abstand von 3 kV. Die minimalen bzw. maximalen Spannungswerte sind jeweils unten gezeigt, und der gesamte Spannungsabfall oben rechts. Wegen der Äquivalenz von Konvektion und elektrischen Spannungen geben die Linien auch die Richtung der Strömung an, wobei ein geringerer Abstand eine höhere Geschwindigkeit bedeutet.

des IMF auf Flächen erfolgt, die sehr stark gegenüber der Richtung des Sonnenwindes gedreht sein können. Abbildung 1 erläutert schematisch, welch grossen Einfluss solche Drehungen auf die Zeitverschiebung haben kann, falls der ACE Satellit und die Frontseite der Magnetosphäre nicht entlang der Sonnenwindströmung liegen. Für unsere Studie wurde zum ersten Mal die Orientierung der Feldvariationen berücksichtigt. Dabei wurde ausgenutzt, dass das Magnetfeld eine minimale Varianz entlang der Richtung zeigt, die senkrecht zu den gesuchten Fronten gerichtet ist.

Die Richtung des IMF wird am einfachsten durch dessen Uhrenwinkel charakterisiert, d.h. durch den Winkel, den

42 Wissenschaftliche Ergebnisse

seine Projektion auf die Ebenen senkrecht zur Erde-Sonne Linie mit der Nordrichtung bildet. Mit einer Methode, wie sie in der Meteorologie für die Bestimmung durchschnittlicher Windrichtungen benutzt wird, wurde dieser Winkel aus 30-Minuten Mittelwerten des gemessenen IMF errechnet, wobei variable Feldrichtungen ausgeschlossen wurden. Die EDI Messungen werden schließlich in die Ionosphäre projiziert, unter Verwendung eines empirischen Modells des Erdmagnetfeldes. Diese Abbildung erfolgt unter der Annahme, dass die Magnetfeldlinien im Plasma eingefroren sind. Da Plasmaströmungen im Magnetfeld elektrische Feder senkrecht zur Bewegung des Plasmas (und des Magnetfeldes) erzeugen, ist die ionosphärische Plasmakonvektion äquivalent einer elektrischen Spannungsdifferenz. Um dafür absolute Werte zu erhalten haben wir angenommen, dass das Potential am Rande der Zone auf Null abfällt.

Abb. 2 zeigt die so ermittelten Potentialkarten für 8 verschiedene Richtungen des IMF. Für stark südliches IMF (Sektor 4), ergibt sich das vertraute Bild mit starker, von der Sonne weggerichteter Konvektion über den Polkappen und deren Umkehr bei niedrigen Breiten. Wenn die Richtung des IMF sich der Ekliptik nähert (Sektoren 3 und 5), und schließlich in der Ebene der Ekliptik liegt (Sektoren 2 und 6), werden die Konvektionszellen gedreht und sind auch verschieden groß. Das liegt an den magnetischen Spannungen bei magnetischer Rekonnexion, wenn das IMF nicht länger anti-parallel zum Erdfeld gerichtet ist. Allerdings

sind die Drehungen nicht spiegelsymmetrisch, was durch den Einfluss des Tag-Nacht Gefälles der ionosphärischen Leitfähigkeit erklärt werden kann.

Bei nördlich gerichtetem IMF (Sektor 0) ist die Konvektion schwach, wie sich aus dem größeren Abstand der Äquipotentiallinien ergibt. Auf der Nachtseite zeigt sich immer noch die von der Sonne weggerichtete Konvektion. Auf der Tagseite kommt es allerdings bei sehr hohen Breiten (83 Grad) zur Ausbildung von zwei gegenläufigen Zellen, mit sonnwärtiger Konvektion dazwischen. Die Bildung dieser Zellen wird bei streng nördlichem IMF erwartet, ist aber bisher nie so deutlich gesehen worden. Die übrigen Resultate stimmen in wesentlichen Punkten mit früheren statistischen Untersuchungen überein, die mittels bodengestützter Radarmessungen bzw. in niedrigen Höhen fliegenden polaren Satelliten gewonnen wurden. Diese gute Übereinstimmung bestätigt die Richtigkeit der Annahme eingefrorener Magnetfeldlinien.

Götz Paschmann und Stein Haaland, in Zusammenarbeit mit Matthias Förster (jetzt GFZ Potsdam) und dem gesamten EDI Team.



Die Bestimmung der Ionenladung solarer energetischer Teilchen: ein Schlüssel zum Verständnis der Beschleunigungsregion

Die Bestimmung der Energieabhängigkeit der Ionenladung solarer energetischer Teilchen liefert entscheidende Informationen zur Bestimmung der Quellregion dieser Ionen. In impulsiven Ereignissen, die direkt mit solaren Flares zusammen hängen, findet die Beschleunigung in der unteren Korona statt, in Höhen von <0.3 solar Radien (R_s). In graduellen Ereignissen werden die Teilchen von koronalen oder interplanetaren Stosswellen beschleunigt. Hohe Ladungszustände bei hohen Energien legen nahe, dass ein Teil dieser Ionen auch nahe der Sonne beschleunigt wird.

Rückblick

Die lonenladung solarer energetischer Teilchen (SEP) ist ein wichtiger Parameter zur Diagnostik der Plasmaparameter in der Quellregion. Darüber hinaus hängen im Allgemeinen sowohl Beschleunigungs- und Ausbreitungsprozesse an der Sonne und im interplanetaren Raum von Geschwindigkeit und magnetischer Steifigkeit (Impuls pro Ladung), also von Masse und Ionenladung ab. In den letzten ~25 Jahren wurde die großen Unterschiede in der Element- und Isotopenzusammensetzung, sowie der Ionenladung bei Energien von ~1 MeV/amu (atomic mass unit) verwendet, um die SEP Ereignisse in zwei Klassen einzuteilen, nämlich in impulsive und graduelle Ereignisse. Dabei folgte man einer Klassifizierung von Flares entsprechend der Emissionsdauer weicher Röntgenstrahlung: (1) Graduelle Ereignisse zeigen hohe Intensität von lonen im interplanetaren Raum, ein kleines Elektronen zu Protonen Verhältnis, mittlere Elementhäufigkeiten ähnlich zu koronalen Elementhäufigkeiten, sowie mittlere lonenladungen, die mit Temperaturen von 1 - 2 x 10⁶ K kompatibel sind, wie sie auch für die Korona und den solaren Wind charakteristisch sind. Diese Ereignisse zeigen weiche Röntgenemission auf einer Zeitskala von Stunden, und sind mit interplanetaren Stosswellen korreliert, die ihrerseits von koronalen Massenauswürfen angetrieben werden. Teilchen werden an der Stosswelle über einen weiten Bereich solarer Länge beschleunigt, breiten sich entlang des interplanetaren Magnetfeldes aus, bis sie schließlich die Umlaufbahn der Erde in einem weiten Bereich solarer Länge erreichen. Dies ist schematisch in Abb. 1 dargestellt. (2) Impulsive Ereignisse zeigen niedrige lonenflüsse im interplanetaren Raum, hohe Elektronen zu Protonen Verhältnisse, erhöhte Häufigkeiten schwerer Ionen (für Eisen z.B. um einen Faktor ~10 relativ zu Sauerstoff), und um einen Faktor bis zu 10⁴ erhöhte Häufigkeiten von ³He relativ zu ⁴He. Außerdem wurden in diesen Ereignissen höhere Ladungszustände beobachtet, z.B. ~14 für Silizium und ~20 für Eisen, die als Indiz für hohe Temperaturen von 107 K in der Quellregion angesehen wurden. Diese Ereignisse sind mit kurzer Emission weicher Röntgenstrahlung korreliert und der Beschleunigungsprozess hängt eng mit dem Flare zusammen. Diese "Flare - Teilchen" können einen Satelliten nahe der Erdumlaufbahn nur in einem kleinen Bereich solarer Länge erreichen, der mit

dem Beschleunigungsgebiet magnetisch verbunden ist (s.a. schematische Darstellung in Abb. 1).

Messtechnik

In den letzten ~30 Jahren war die Abteilung Weltraumplasmen an der Entwicklung mehrerer Techniken zur Bestimmung der lonenladung solarer energetischer Teilchen maßgeblich beteiligt. Im Energiebereich von ~0.01 - 3 MeV/amu lieferten Techniken mit elektrostatischer Ablenkung die ersten direkten Messungen der lonenladung. Bei höheren Energien wurde erstmals mit dem Erdsatelliten SAMPEX (Solar, Anomalous and Magnetospheric Particle Explorer, Start 1992) die Bestimmung der Ionenladung für die Elemente C – Fe und im weiten Energiebereich von 0.3 – 70 MeV/amu möglich, wobei das Magnetfeld der Erde in der niedrigen polaren Umlaufbahn von SAMPEX als magnetisches Spektrometer genutzt wurde. Verbesserte Experimente auf SOHO (Solar and Heliospheric Observatory, Start 1995) und ACE (Advanced Composition Explorer, Start 1997) ermöglichten in den letzten ~10 Jahren insbesondere die Analyse von vielen SEP Ereignissen niedriger Intensität, also insbesondere von impulsiven Ereignissen.

Neue Ergebnisse in Graduellen SEP Ereignissen

Ein überraschendes Ergebnis der SAMPEX Messungen, mit denen erstmals die Bestimmung der lonenladung in graduellen Ereignissen in einem großen Energiebereich möglich wurde, war ein Anstieg der mittleren Ionenladung von Eisenionen (Q_{r_0}) von ~10 bei 0.3 MeV/amu auf ~18 - 20 bei ~40 MeV/amu. Neuere Messungen mit SOHO und ACE zeigten, dass in diesen Ereignissen die mittlere Ladung schwerer lonen bei suprathermischen Energien (<200 keV/amu) im allgemeinen kompatibel mit der entsprechenden lonenladung im solaren Wind ist (für Fe ~10). Bei etwas höheren Energien (~0.2 – 0.6 MeV/amu) variiert die mittlere lonenladung von Ereignis zu Ereignis stark. Die Ionenladung ist entweder in etwa konstant oder steigt mit Energie um maximal ~2 Ladungen an. Bei Energien >10 MeV/amu ist die mittlere lonenladung jedoch oft signifikant höher, für Eisen ~20. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Ionenladung nicht ausschließlich durch die Temperatur bestimmt wird, wie früher angenommen.

Neue Ergebnisse in Impulsiven Ereignissen

Die hohe Empfindlichkeit des SEPICA (Solar Energetic Particle Ionic Charge Analyzer) Experimentes an Bord des Satelliten ACE erlaubte die Bestimmung der Ionenladung schwerer Ionen für eine große Zahl an graduellen und impulsiven SEP Ereignissen. Die Verteilungen der mittleren Ladung von Eisen Ionen im Bereich 0.18 - 0.25 MeV/amu für ~40 graduelle und ~40 impulsive Ereignisse zeigen ein völlig unterschiedliches verhalten: die mit interplanetaren Stosswellen korrelierten graduellen Ereignisse zeigen ein Maximum bei $Q_{Fe} \sim 10$, während die entsprechende Verteilung für impulsive Ereignisse wesentlich breiter ist und den Bereich $Q_{\rm Fe} \sim \! 14 - 18$ überdeckt. Darüber hinaus zeigen alle impulsiven Ereignisse, bisher ohne Ausnahme, einen Anstieg der mittleren Ladung von Eisen von $Q_{\rm Fe} \sim \! 12 - 15$ bei $\sim \! 0.1$ MeV/amu auf $Q_{\rm Fe} \sim \! 18 - 20$ bei $\sim \! 0.5$ MeV/amu.

Die Energieabhängigkeit der lonenladung

Ein starker Anstieg der Ionenladung in einem engen Energiebereich <1 MeV/amu, wie er systematisch in impulsiven Ereignissen beobachtet wird, kann nur durch zusätzliche Ionisierung der Ionen bei hoher Dichte des Gleichgewichtsladung bei Energien >0.2 MeV/amu monoton als Funktion von N• τ_A ansteigt, wobei N die Elektronendichte und τ_A die Beschleunigungszeitskala sind. Die Ionenladung erreicht als Funktion von N• τ_A asymptotisch einen Maximalwert, die Gleichgewichtsladung Q_{eq} , wobei (N• τ_A)_{eq} für Eisen Ionen im Energiebereich ~0.2 – 1.0 MeV/amu ~10¹⁰ - 10¹¹ s cm⁻³, und Q_{eq} ~22 bei 1MeV/amu sind. Diese neuen Messungen zeigen auch, dass die früheren Messungen hoher Ladungszustände von Fe Ionen in impulsiven Ereignissen Teil einer stark energieabhängigen Verteilung waren. Es ist auch



Abb. 1: Schematische Darstellung der Beschleunigung solarer energetischer Teilchen durch eine interplanetare Stosswelle und durch den Flare an der Sonne.

Umgebungsplasmas erklärt werden. Wenn sich energetische lonen während oder nach der Beschleunigung in einem hinreichend dichtem Plasma in der unteren Korona bewegen, so steigt die mittlere Ladung notwendigerweise wegen der im Energiebereich ~0.2 – 1 MeV/amu stark ansteigenden Wirkungsquerschnitte für lonisierung durch Elektronen oder Ionen des Umgebungsplasmas stark an. Die Berechnung der Gleichgewichtsladung schwerer Ionen als Funktion ihrer Geschwindigkeit, unter Berücksichtigung von Strahlungs- und dielektronischer Rekombination und Ionisierung durch thermische Elektronen und Ionen des koronalen Plasmas zeigt, dass die offensichtlich, dass die neuen Messungen mit $Q_{\rm Fe}$ ~12 - 14 bei niedrigen Energien nicht mit der früheren Interpretation einer hohen Temperatur im Quellgebiet verträglich sind.

Ein Modell für Beschleunigung und Ausbreitung

Der Anstieg der Ionenladung mit Energie wird typischerweise bei einer um einen Faktor ~2 niedrigeren Energie beobachtet, als mit dem Gleichgewichtsmodell berechnet. Es konnte vor kurzem gezeigt werden, dass dieser Unterschied zwischen beobachteten und berechneten Ladungsspektren durch die interplanetare Ausbreitung erklärt werden kann: auf dem Weg vom Beschleunigungsgebiet an der Sonne bis zur Erde bei 1 AE (Astronomische Einheit) können Ionen niedriger Energie einen signifikanten Teil ihrer Energie verlieren, bei Energien <1 MeV/amu einen Faktor zwei oder mehr. Dies resultiert bei einer mittleren Ladung Q(E) an der Sonne in der gleichen Ladung bei einer kleineren Energie E'. Für einen quantitativen Vergleich der beobachteten Ladungen mit Modellrechnungen sind daher realistische Modelle notwendig, die neben der Beschleunigung, Ionisierung

und Ausbreitung an der Sonne auch den interplanetaren Transport beinhalten. In diesen Modellen werden die als Funktion der Zeit gemessenen Intensitäten und Anisotropien von lonen verschiedener Masse und Ladung (z.B. Elektronen, Protonen, Helium) mit Modellen der interplanetaren Ausbreitung verglichen, um daraus die Injektions-Zeit Profile an der Sonne und die Parameter der interplanetaren Ausbreitung abzuleiten. Dann werden die Energie- und Ladungsspektren an der Sonne mit dem Beschleunigungsmodell berechnet, und daraus mit den zuvor ermittelten Ausbreitungsparametern die entsprechenden Spektren bei 1 AE berechnet. Die Modellparameter sind dabei N• τ_A , τ_A/τ_D und T_e, wobei N and T_e Plasma Dichte und Temperatur, und $\tau_{_{A}}$ und $\tau_{_{D}}$ die Zeitskalen für Beschleunigung und diffusive Ausbreitung in der Quellregion an der Sonne sind. Die Modellrechnungen zeigen auch, dass der sehr starke Anstieg der Ladung um 4 - 8 Ladungseinheiten, wie er für Eisen lonen mehrfach beobachtet wurde, nur durch Beiträge

~10 bis 100 s annehmen, so entspricht N• $\tau_{\rm A}$ ~ 10¹¹ s cm⁻³ einer Plasmadichte von ~10⁹ - 10¹⁰ cm⁻³, d.h. die lonisierung und wahrscheinlich auch die Beschleunigung der Ionen findet in der unteren Korona der Sonne statt, in Höhen von <0.3 R_s über der Photosphäre. Die beobachtete große Variabilität der Energieabhängigkeit kann durch unterschiedliche Beschleunigungsraten und Nichtgleichgewichtszustände für die Ionisation erklärt werden.

ESCAPING PARTICLES



Abb. 2: Vereinfachte Darstellung einer Beschleunigungsregion mit zwei Magnetfeldbögen mit unterschiedlichen Plasmaparametern.

von zwei Regionen unterschiedlicher Temperatur reproduziert werden kann. Diese zwei Regionen könnten z.B. zwei Magnetfeldbögen mit unterschiedlichen Plasmaparametern sein, wie in Abb. 2 schematisch dargestellt.

Für ein solares Ereignis am 9. September 1998 ergab der Vergleich der Messungen mit den Modellrechnungen z.B. $\tau_A/\tau_D = 0.1$, $T_e = 1.58 \times 10^7$ K, und $N \bullet \tau_A = 5 \times 10^{11}$ s cm⁻³ für Region 1 und $T_e = 10^6$ K, $N \bullet \tau_A = 10^{11}$ s cm⁻³ für Region 2. Mit diesen Modellparametern konnten wir sowohl die Energiespektren als auch die Abhängigkeit der Ionenladung von Energie reproduzieren.

Implikationen für die Beschleunigungsregion

Die Modellrechnungen zeigen, dass der starke Anstieg der Ionenladung von Eisen Ionen im Energiebereich <1 MeV/amu, wie er in *impulsiven* Ereignissen beobachtet wird, Werte des Modellparameters N• $\tau_A \sim 10^{11}$ s cm⁻³ erfordert. Wenn wir, in Übereinstimmung mit der Beobachtung von Röntgenstrahlung und Elektronen in solaren Flares, für die Beschleunigung eine Zeitskala von Die mittlere Ladung schwerer Ionen in graduellen Ereignissen, insbesondere für die Teilchen bei <0.3 MeV/amu in der Nähe der interplanetaren Stosswelle, ist kompatibel mit der im Sonnenwind und bei suprathermischen Teilchen beobachteten Ionenladung. Dies legt eine Iokale Beschleunigung durch die interplanetare Stosswelle nahe. Der Anstieg der Ionenladung bei hohen Energien kann durch die Injektion von Flare Teilchen (mit hoher Ladung) erklärt werden, die nahe der Sonne durch die Stosswelle weiter beschleunigt werden.

B. Klecker, in enger Zusammenarbeit mit E. Möbius und M.A. Popecki, UNH.



2.5 KOMPLEXE PLASMEN

Komplexe oder staubige Plasmen sind Plasmen, d.h. ionisierte Gase, die Mikropartikel, z.B. Staubkörner enthalten. In Niedertemperatur-Entladungsplasmen sammeln die Mikropartikel hauptsächlich Elektronen auf ihrer Oberfläche auf. Die Ladung der Mikropartikel beträgt typischerweise zwischen 1000 und 100.000 Elementarladungen. Der typische Abstand zwischen den Partikeln ist von der Größenordnung 100 µm. Die Mikropartikel stellen ein stark gekoppeltes System dar, d.h. die Wechselwirkungsenergie ist größer als die thermische Energie der Partikel. Aufgrund von Abschirmung der Partikelladung im Plasma ist das Wechselwirkungspotential durch ein Yukawa-Potential (abgeschirmtes Coulomb-Potential) gegeben.

1986 wurde vorhergesagt, dass die Mikropartikel in einem komplexen Plasma sich aufgrund ihrer starken Wechselwirkung in regulären Strukturen anordnen können, dem so genannten Plasmakristall. 1994 wurde der Plasmakristall in einer Zusammenarbeit zwischen dem MPE und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) zum ersten Mal hergestellt und beobachtet. Dazu wird eine Hochfrequenzentladung in einer kleinen



Abb. 1: Mikroteilchen (weiße Punkte), die durch Laserbeleuchtung sichtbar werden, bilden in einem starken Magnetfeld eine komplexe Anordnung.

Plasmakammer benutzt, um das Hintergrundsplasma in einem Edelgas, z.B. Argon, bei Druckwerten zwischen 0.1 und 1.0 mbar zu erzeugen. Anschließend werden monodisperse Plastikkügelchen mit Durchmessern von typischerweise 1 und 10 µm injiziert. Die geladenen Mikropartikel werden durch das, das Plasma umgebende, elektrische Feld oberhalb der unteren Elektrode in der Schwebe und zusammen gehalten. Durch einen aufgefächerten Laser beleuchtet, lassen sich die Mikropartikel mit einer Kamera beobachten. Auf diese Weise können wir komplexe Plasmen, z.B. in der kristallinen Phase oder in starken Magnetfeldern (Abb. 1), direkt untersuchen. Zum Beispiel kann die Entstehung und das Schmelzen von Plasmakristallen, ihre Struktur, Phononenspektra, usw. auf dem mikroskopischen und kinetischem Niveau beobachtet werden. Auch die flüssige Phase ist von großem Interesse, in der zum Beispiel Scherfluss und Turbulenz studiert werden können. Deshalb sind komplexe Plasmen ideale Modelle für Kristallisation und andere dynamische Prozesse (Phasenübergänge, Instabilitäten, Dispersionsrelationen, etc.) auf dem mikroskopischen Niveau in der Festkörper-, Flüssigkeits- und Plasmaphysik.

Andere Anwendungen komplexer Plasmen finden sich in der Astrophysik und der Plasmatechnologie. Es gibt viele Orte im Weltall, an denen staubige Plasmen vorkommen. Dazu gehören Kometen, Planetenringe, Akkretionsscheiben, interstellare Wolken und anderes. Plasmaätzen und –beschichten, auf der anderen Seite, ist eine weit verbreitete Technologie, z.B. zur Herstellung von Mikrochips. In solchen Plasmareaktoren entsteht und wächst Staub, was zu Kontaminationsproblemen führen kann. Deswegen ist ein detailliertes Verständnis der Entstehung und

> des Wachstums von Staub und seiner Wechselwirkung mit dem Plasma wünschenswert. Des Weiteren spielt Staub in Fusionsreaktoren eine Rolle. Aufgrund dieser Vielfalt von Anwendungen ist die Physik komplexer Plasmen ein schnell wachsendes Gebiet.

> Im Labor auf der Erde werden viele Experimente durch Gravitationseffekte, die das System auf die Plasmarandschicht beschränken, behindert. Deshalb können oft nur kleine, quasi-zweidimensionale Systeme produziert werden. Die Schwerkraft beeinflusst auch die Struktur und Dynamik der Mikropartikelsysteme. Außerdem ist das Hintergrundsplasma in der Plasmarandschicht ziemlich kompliziert (nicht-neutral und anisotrop), was eine Interpretation der Experimente erschwert. Aus diesem Grund führen wir seit 1996 auch Mikrogravitationsexperimente in ballistischen Raketen und Parabelflügen durch. Seit 2001 untersuchen wir komplexe Plasmen auch an Bord der Internationalen Raumstation ISS (s. Kap. 3) in einer Kooperation zwischen dem MPE und dem Institute for High Energy Densities in Moskau.

Am MPE werden komplexe Plasmen sowohl experimentell als auch theoretisch untersucht. Laborexperimente, z.B. Eigenschaften und Verhalten komplexer Plasmen in starken Magnetfeldern (Abb. 1) oder in einer Gleichspannungsentladung und Mikrogravitationsexperimente (Parabelflugkampagnen, ISS) werden aufgebaut und durchgeführt. Dazu entwickeln wir analytische Modelle und numerische Simulationen zum Verständnis der physikalischen Prozesse.

Nicht-Newtonsche und String-Flüssigkeiten in Komplexen Plasmen

Wir untersuchten rheologische und strukturelle Eigenschaften komplexer Plasmaflüssigkeiten. Zuerst wurde die Scherviskosität mit dem PK-4 Aufbau gemessen. Der Scherfluss wurde entweder durch einen inhomogenen Gasfluss oder durch Laserstrahlung induziert. Komplexe Plasmen zeigen eine deutliche Scherverdünnung und Scherverdickung in einem weiten Bereich von Scherraten. Des weiteren untersuchten wir die Bildung einer String-Flüssigkeitsphase in elektrorheologischen komplexen Plasmen durch Anlegen eines externen elektrischen Wechselfeldes und Messen der induzierten strukturellen Anisotropie. Der beobachtete Übergang von der isotropen Phase zur String-Phase sollte von zweiter Ordnung sein und ist deshalb ein guter Kandidat für das Studium der Kinetik von kritischen Phänomenen.

Eine der bemerkenswerten Eigenschaften komplexer Plasmen ist die Tatsache, dass die Rate für den Impulsaustausch durch Kollisionen zwischen den geladenen Mikropartikeln die Kopplung zum Hintergrundsneutralgas deutlich übertreffen kann, obwohl sie intrinsisch Multiphasensysteme sind. Deswegen können sich flüssige komplexe Plasmen im Wesentlichen wie Einflüssigkeitssysteme verhalten. Dies eröffnet eine einzigartige Gelegenheit, allgemeine Phänomene in stark gekoppelten Medien auf dem kinetischen Niveau zu untersuchen und Einblicke in die mikroskopischen Eigenschaften sowohl der Hydrodynamik als auch der Thermodynamik von Flüssigkeiten zu erhalten, was als eines der ausstehenden Probleme in der Grundlagenphysik gilt.

Flüssigkeiten zeigen eine reiche Vielfalt an rheologischen Eigenschaften. Neben den konventionellen Newtonschen Flüssigkeiten (z.B. Luft, Wasser, Benzin), welche eine konstante Viskosität besitzen, existiert eine weite Klasse von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten, bei denen die Rheologie stark von den Strömungsbedingungen (z.B. Flüssigkeiten mit Scherverdünnung und -verdickung, viskoelastische Flüssigkeiten) abhängt. Zu den klassischen Beispielen aus dem täglichen Leben gehören zum Beispiel Farbe, Ketchup und Gelatine. Auch andere Flüssigkeiten wie geschmolzene Polymere oder Schlämme sind von beträchtlicher technologischer Bedeutung.

Eine weitere bemerkenswerte Klasse von nicht-Newtonschen Flüssigkeiten sind die sogenannten elektro- und magnetorheologischen (ER/MR) Flüssigkeiten. Die Wechselwirkung zwischen den Teilchen in solchen Flüssigkeiten, und deswegen ihre Rheologie, wird durch externe elektromagnetische Felder bestimmt: Bei schwachen Feldern verhalten sie sich wie "normale" Flüssigkeiten, jedoch oberhalb eines kritischen Feldes und bei kleinen Scherspannungen wie Festkörper und bei Scherspannungen größer als der "Ausbeutespannung" fließen sie mit erhöhter Viskosität. ER/MR Flüssigkeiten besitzen potentielle Anwendung in der industriellen Fertigung z.B. von hydraulischen Ventilen, Kupplungen und Bremsen. Zusätzlich besteht im Falle von kolloidalen ER/MR Flüssigkeiten die Möglichkeit, die Kristallstruktur dieser Suspensionen einzustellen. Dies ist von Interesse für die Produktion von Displays und photonischen Anwendungen.

Unsere neusten Experimente ergaben, dass komplexe Plasmen sehr gut geeignet sind, um die Kinetik von "mikroskopischen" Prozessen, welche das nicht-Newtonsche Verhalten bestimmen, zu studieren. Wir untersuchten Scherflüsse in komplexen Plasmaflüssigkeiten (durch Anlegen von Scherspannungen verschiedener Stärke und Messen der Abhängigkeit der Viskosität von der lokalen Scherrate) und studierten die Bildung der Stringfluid-Phase in ER komplexen Plasmen (durch Anlegen eines externen Wechselfeldes und Messen der induzierten strukturellen Anisotropie).



Abb. 1: Qualitative Abhängigkeit der Viskosität v und der Scherspannung $\sigma = v\gamma$ von der Geschwindigkeitsscherrate γ . Drei Bereiche von γ sind dargestellt, entsprechend dem Newtonschen (konstante Viskosität, I), dem Scherverdünnungs- (II) und Scherverdickungs- (III) Bereich. Die $v(\gamma)$ Abhängigkeit kann ein anomales N-förmiges Profil aufweisen (gestrichelte Kurve).

Wir entwickelten ein theoretisches Modell für die nicht-Newtonsche Viskosität komplexer Plasmen. Das Modell basiert auf der Annahme eines lokalen Gleichgewichts zwischen der Deposition der viskosen Wärme und Absorption durch Reibung am Neutralgas, welches eine lokale Relation zwischen der Scherrate y und der kinetischen Temperatur T der Mikropartikel ergibt. Zusammen mit der bekannten Abhängigkeit der kinematischen Viskosität v von T erhält man eine parametrische Abhängigkeit für v(y). Nach diesem Modell gibt es drei unterschiedliche Bereiche wie in Abb. 1 schematisch dargestellt: Falls γ klein genug ist, bleibt die Temperatur konstant und die Viskosität hängt nicht von γ ab; die Scherspannung $\sigma = v\gamma$ zeigt ein lineares Skalierungsverhalten (Regime I). Bei größerem γ beginnt die Temperatur zu steigen und das Verhalten wird nicht-Newtonsch: $v(\gamma)$ nimmt einer Scherverdünnung entsprechend ab (Regime II). In manchen Fällen kann das Verhalten anomal werden, $d\sigma/d\gamma < 0$ (gestrichelte Kurve). Während y weiter anwächst, nimmt v(y) und damit

 $\sigma(\gamma)$ wieder zu (Scherverdickung, Regime III). Der Übergang von Regime II nach III beruht auf dem Zwischenspiel zwischen den so genannten "potentiellen" und "kinetischen" Anteilen in der v(T)-Abhängigkeit, welche die Viskosität bei niedrigen bzw. hohen Temperaturen bestimmt.

Wir führten eine Reihe von Scherflussexperimenten mit dem PK-4 Prototypaufbau durch (Abb. 2). Die Teilchen bildeten eine sehr längliche 3D-Wolke (Länge 3 - 10 cm und Durchmesser von 4 - 6 mm), die sich entlang der Achse der Entladungsröhre orientierte. Der Scherfluss (entlang der Achse) wurde auf zwei verschiedene Weisen induziert: (i) Wir benutzten einen Gasfluss in der Röhre (die Geschwindigkeit des Gases hat ein parabolisches Profil und übt deshalb eine Scherspannung aus aufgrund der Kopplung an die Mikropartikel), oder (ii) wandten Laserbestrahlung (entlang der Röhrenachse) an. Es stellte sich heraus, dass der gasinduzierte Fluss einer eindimensionalen ebenen Topologie mit einem verschwindenden Nettofluss entspricht (ähnlich dem Couette-Fluss zwischen zwei parallelen Platten), der laserinduzierte Fluss besitzt dagegen eine zylindrische Symmetrie (ähnlich dem Poiseuille-Fluss in einer Röhre).



Abb. 2: Der PK-4 Prototyp-Aufbau. Eine Kamera (links) nimmt die Plasmakinetik auf.



Abb. 3: Experimentelle Geschwindigkeitsprofile (Symbole) des gemessenen laserinduzierten Scherflusses für verschiedene Laserleistungen P. Die Profile sind normiert auf die Maximalgeschwindigkeit v_{max} im Zentrum des Strahls. Die Stahlbegrenzungen sind durch die vertikalen gestrichelten Linien markiert. Die durchgezogene Kurve entspricht dem besten theoretischen Fit (für P =16.5 W) mit konstanter Viskosität. Der Einschub rechts oben zeigt die Abhängigkeit von v_{max} von P.

Wir legten einen zwei-parametrigen Fit an das gemessene Geschwindigkeitsprofil mittels einer Lösung der Navier-Stokes-Gleichung für (i) unser nicht-Newtonsches Viskositätsmodell und (ii) für den konventionellen Fall konstanter Viskosität. Die nicht-Newtonsche Viskosität ist in Übereinstimmung mit den Messdaten, während das Modell einer konstanten Viskosität deutlich davon abweicht. Der theoretische Fit erlaubt uns eine explizite Abhängigkeit der Viskosität von γ abzuleiten, mit klar erkennbarer Scherverdünnung und Scherverdickung.

Für laserinduzierte Flüsse wurde das zylindersymmetrische Geschwindigkeitsprofil für verschiedene Werte der Laserleistung P gemessen und auf die maximale Geschwindigkeit v_{max} , wie in Abb. 3 gezeigt, normiert. Qualitativ sieht man, dass die normierten Profile für verschiedene P ähnlich zu sein scheinen und dass v_{max} linear mit P anwächst. Zusammen mit der Annahme, dass die Laserkraft auf den Partikeln proportional zu P ist, legt dies nahe, dass - falls Hydrodynamik noch gilt - die effektive Viskosität konstant sein sollte. Eine solche Hypothese wird durch den entsprechenden Fit in Abb. 3 gut bestätigt.

Der Bereich von Scherraten, der in unseren Experimenten mit gasinduziertem Fluss erreicht wird, war breit genug, um ein nicht-Newtonsches Verhalten 3D komplexer Plasmen, begleitet von substantiellem Scherverdünnungsund Scherverdickungseffekten, aufzudecken. Gleichzeitig war die Scherkraft klein genug, um eine Anwendung der Hydrodynamik erwarten zu lassen. Dagegen war die durch den Laser induzierte Inhomogenität des Flusses sehr groß – die Geschwindigkeit änderte sich signifikant auf der Skala des Abstands zwischen den Teilchen. Deshalb ermöglicht eine Kombination der beiden Methoden zur Flusserzeugung den gesamten Der abgeleitete Wert für die kinematische Viskosität im Newtonschen Bereich von ~ 100 mm²/s entspricht ungefähr der Viskosität z.B. von Glyzerin. Die beobachtete Scherverdünnung jedoch verringert die Viskosität um einen Faktor 10, so dass sie nahe bei der Viskosität von Luft bei Atmosphärendruck liegt. Daher sind flüssige komplexe Plasmen in Bezug auf ihre Viskosität sehr ähnlich zu normalen klassischen Flüssigkeiten.

des Mechanismus, der den Impulsaustausch in solchen

Flüssen bestimmt, wären sehr wünschenswert.

Elektrorheologische komplexe Plasmen wurden mit dem Plasmakristallexperiment "PK-3 Plus" unter Mikrogravitationsbedingungen an Bord der ISS untersucht. Wir modulierten dazu ein externes elektrisches Feld mit einer Frequenz von 100 Hz (deutlich oberhalb der Eigenfrequenz der Mikropartikel), welche eine periodische Polarisation der Plasmawolke um jedes Mikropartikel verursacht, so dass die resultierende Wechselwirkung zwischen den Partikeln identisch zu der in konventionellen dipolaren (Stockmayer) Flüssigkeiten war. Solche elektrorheologischen Flüssigkeiten sind berühmt für ihr außerordentlich vielseitiges Phasendiagramm, welches eine Anzahl von strukturellen Phasenübergängen zweiter Ordnung einschließt. Deshalb erlauben uns elektrorheologische komplexe Plasmen möglicherweise kritische Phänomene, die solche Phasenübergänge begleiten, auf dem kinetischen Niveau zu untersuchen.

Die "String"-Bildung in gasförmigen ER komplexen Plasmen ist ein Kandidat für einen Phasenübergang zweiter Ordnung: Die Theorie sagt vorher, dass für einen gegebenen thermodynamischen Zustand eine kritische Amplitude des elektrischen Feldes existiert, oberhalb derer die isotrope Gasphase ihre thermo-dynamische Stabilität verliert und die Partikel entlang des Feldes ausgerichtete Ketten bilden. Die Experimente scheinen die Theorie zu bestätigen: Bei schwachen Feldern bilden die Mikropartikel eine isotrope gasähnliche Phase, wie in Abb. 4a gezeigt, jedoch tritt oberhalb einer bestimmten Schwelle eine Anordnung der Partikel entlang des Feldes auf. Bei ausreichend starken Feldern kann die String-Flüssigkeit mit dem bloßen Auge beobachtet werden - vertikal bilden die Partikel deutliche Strings (Abb. 4b), aber horizontal gibt es keine offensichtliche Ordnung. Die Größe des kritischen Feldes für den Übergang stimmt gut mit der theoretischen Vorhersage überein.

Weitere kinetische Untersuchungen von dreidimensionalen flüssigen komplexen Plasmen erfordern die Entwicklung einer geeigneten Methode zur Verfolgung einzelner Partikel. Eine solche Methode istessentiell für zuverlässige Temperaturmessungen in der flüssigen Phase. Deren Entwicklung ist eine der Hauptherausforderungen für unsere zukünftigen Arbeiten.



Abb. 4: Beobachtung eines Isotropie-zu-String-Übergangs in Experimenten mit elektrorheologischen komplexen Plasmen. Die dipolare Wechselwirkung zwischen den Mikropartikeln wird durch ein externes, vertikales elektrisches Wechselfeld mit einer einstellbaren Amplitude und einer Frequenz von 100 Hz induziert. Die Partikel werden durch einen vertikal aufgefächerten Laser mit einer Strahldicke von ungefähr 200 μm sichtbar gemacht. Bei schwachen Feldern bilden die Partikel eine isotrope gasähnliche Phase (a), bei größeren Feldern tritt die "string-flüssige" Phase mit vertikaler Ordnung auf (b).

A. Ivlev, R. Kompaneets, H. Höfner, H. Thomas, C. Räth, G. Morfill







Rekristallisation eines 2D Plasmakristalls

Ein einlagiger Plasmakristall bestehend aus Mikrometer großen Teilchen, die in der Randschicht einer radiofrequenz Entladung schweben, wurde durch das Anlegeneines kurzen elektrischen Pulses an zwei parallel, auf Höhe der Teilchen, verlaufende Drähte geschmolzen. Wir untersuchten die strukturellen Eigenschaften und die Teilchentemperatur während des Rekristallisierungsvorgangs. Auf eine flüssigkeitsähnliche Phase folgte ein Übergangszustand, der durch das Freisetzen von Energie und der teilweisen Wiederherstellung der langreichweitigen Ordnung charakterisiert wurde. In numerischen Simulationen ergaben sich dieselben Stadien der Rekristallisation, die im Experiment beobachtet wurden.

Phasenübergänge, fest nach flüssig und zurück, zweidimensionaler Systeme sind von großem Interesse. In der Theorie wird ein kontinuierlicher Schmelzübergang mit dem Auftreten einer sogenannten "hexatischen" Phase, ein Zustand ohne langreichweitige eines solchen Kristalls ist in Abbildung 1 zu sehen. Der Kristall kann durch einen starken negativen elektrischen Puls geschmolzen und in einen gasförmigen Zustand gebracht werden. Die Beobachtung des darauf folgenden Übergangs vom geschmolzenen, ungeordneten Zustand zurück zu einem geordneten Kristall gibt nun Aufschluss über die Prozesse, die auf der Ebene der Teilchenbewegung selbst ablaufen.

Ein Argonplasma wurde in einer Vakuumkammer durch das Anlegen einer Radiofrequenz-Leistung zwischen einer horizontalen Elektrode und den geerdeten Kammerwänden gezündet. Staubteilchen (Melamin-Formaldehyd Kugeln mit einem Durchmesser von 9,19 μ m) wurden injiziert. Die Teilchen schweben in einer Ebene über der horizontalen Elektrode, in der sich die nach unten gerichtete Gravitationskraft und die aufwärts gerichtete elektrische Kraft ausgleichen. Aufgrund der gegenseitigen Wechselwirkung und den



Abb. 1: Ein zweidimensionaler Plasmakristall, bestehend aus geladenen Mikroteilchen, wird mit einem grünen Laser beleuchtet. Durch ein elektrisches Feld schwebt er über einer kreisförmigen Elektrode.

Positionsordnung jedoch langreichweitiger mit Orientierungsordnung, zwischen festem und flüssigem Zustand beschrieben. Plasmakristalle bieten eine ideale Möglichkeit. Phasenübergänge zweidimensionaler Systeme auf kinetischer Ebene zu beobachten, da die einzelnen Teilchen direkt sichtbar sind und nach einer Störung schnell ins Gleichgewicht zurückkehren. Eine einzelne Lage kugelförmiger Teilchen, mit einer Größe im Mikrometerbereich, die sich in einer hexagonalen Kristallstruktur anordnen, kann leicht in einer Plasmarandschicht erzeugt werden. Ein Beispiel

radial einschließenden Kräften, die durch die Form der unteren Elektrode gegeben sind, ordnen sich die Teilchen in einem 2D Kristall mit hexagonaler Struktur an. Zwei parallele Drähte waren in der Kristallebene längs zweier Seiten des Kristalls befestigt. An diese wurde für 0.2 s ein elektrischer Puls von -253 V angelegt, der die Teilchen von beiden Drähten in Richtung der Kammermitte stieß und somit den Kristall schmolz. Die Teilchen wurden von einer Seite mit einem horizontal aufgefächerten Laserstrahl beleuchtet. Eine digitale Hochgeschwindigkeitskamera nahm den gesamten Vorgang des Schmelzens und Rekristallisierens mit einer Bildrate von 500 Bildern pro Sekunde von oben auf.

Aus den Bildern wurden die Teilchenkoordinaten extrahiert, indem zusammenhängende Regionen einiger Pixel mit Helligkeitswerten über einem gegebenen Schwellwert gesucht und als Teilchen identifiziert



Abb. 2: Teilchentemperatur während der Rekristallisation aufgetragen gegen die Zeit. Senkrechte gestrichelte Linien markieren die Stadien I-IV des unterschiedlichen Temperaturabfalls. Im kleinen Bild ist der Temperaturverlauf der Computersimulation zu sehen. Die roten Linien repräsentieren Fits von Exponentialfunktionen.

wurden. Die Teilchen wurden dann von Bild zu Bild verfolgt um deren Geschwindigkeiten zu erhalten. Für die Analyse verwendeten wir 2300 Teilchen innerhalb eines ausgewählten Bereiches des Sichtfeldes.

Die mittlere Teilchentemperatur T kann für ieden Zeitpunkt aus den Geschwindigkeitsverteilungen berechnet werden. Im Folgenden wird der Zustand vor dem Schmelzen als Anfangszustand bezeichnet. Die Temperatur (Abb. 2) ist am höchsten im geschmolzenen System. Es folgt ein Bereich (I) in dem die Staubteilchen hauptsächlich durch Kollisionen mit neutralen Gasatomen im Plasma abgebremst werden. Dieser Vorgang wird Epstein-Dämpfung genannt und bewirkt einen exponentiellen Abfall von T mit der Zeit, dessen Steigung durch die Plasmabedingungen gegeben ist. Dieser Zustand hält 1 s an, dann folgen zwei Bereiche (II, III), in denen T zwar immer noch exponentiell, aber mit verminderter Steigung abfällt. Es wird also Energie freigesetzt, die die Teilchen aufheizt und die effektive Abkühlungsrate vermindert. Die Temperatur erreicht ihren Anfangswert nach ca. 4.5 s im Bereich IV. Dieselben Bereiche unterschiedlichen Temperaturabfalls wurden in einer Computersimulation eines Systems von Teilchen gefunden (oben rechts in Abb. 2), das denselben Bedingungen unterlag wie die Teilchen im Experiment.

Das Ziel ist nun, das kinetische Verhalten des Systems zu jedem Zeitpunkt mit seinen strukturellen Eigenschaften als Maß für die Ordnung in Verbindung zu setzen. Der Grad der Ordnung hängt von den Positionen der Teilchen zueinander ab. Wir können hier unterscheiden zwischen der lokalen Struktur in unmittelbarer Nähe eines Teilchens, und der globalen Erscheinung – der Kontinuität dieser Struktur über größere Distanzen hinweg. In einer Flüssigkeit z.B. sind Teilchen zufällig im System verteilt, während sie auf einer lokalen Skala ihrer gegenseitigen Wechselwirkung unterliegen, was einen

> bestimmten Teilchenabstand impliziert. In einem 2D Plasmakristall hingegen ordnen sich die Teilchen in einem kontinuierlichen hexagonalen Gitter mit konstantem Teilchenabstand und 60° Winkeln zwischen den Verbindungslinien der nächsten Nachbarn an.

> Die Reichweite der Ordnung wird durch die Paar- und Bindungskorrelationsfunktionen beschrieben. Die Paarkorrelationsfunktion gibt an, wie wahrscheinlich es ist, ein Teilchen im Abstand r von einem anderen Teilchen zu finden. Durch das Anpassen einer theoretischen Funktion an diese erhalten wir die Translationskorrelationslänge für jedes Bild. Je größer sie wird, desto größer ist die Entfernung bis zu der das System als geordnet angesehen werden kann. Auf ähnliche Weise erfasst die Bindungskorrelationsfunktion die langreichweitige Orientierungsordnung. Sie mißt die durchschnittliche Orientierung der Bindungen zweier nächster Nachbarn,

relativ zu den in der Entfernung r liegenden Bindungen. Im Anfangszustand fiel die Bindungskorrelationsfunktion entsprechend einem Potenzgesetz, in allen anderen Fällen entsprechend einem Exponentialgesetz ab. Letzteres legt eine Bindungskorrelationslänge, vergleichbar zur Translationskorrelationslänge, fest.

Lokal kann die Ordnung durch Defekte zerstört werden. Hierunter verstehen wir Teilchen mit einer, von den für ein hexagonales Gitter üblichen sechs, abweichenden Anzahl nächster Nachbarn. Am häufigsten kommen Defekte mit fünf oder sieben nächsten Nachbarn vor, die darüber hinaus meistens in Paaren auftreten. Der Bruchteil an fünf- und siebenzähligen Defekten wurde für jedes Bild berechnet.

Wir fanden, dass sich sowohl Defektbruchteile als auch Korrelationslängen entsprechend Potenzgesetzen proportional zu $(T-T_c)^{\alpha}$ entwickeln. T_c entspricht hier einer kritischen Temperatur. Darüber hinaus ergaben sich ähnliche Werte für den Exponenten α , die im Bereich 0.25 - 0.35 lagen. Dieses Verhalten gilt für alle Bereiche unterschiedlichen Temperaturabfalls.

Während die Bruchteile von Defekten und die Translationskorrelationslänge innerhalb der Messzeit Anfangswerten zurückkehren, zu ihren die Orientierungsordnung legt nach dem Schmelzvorgang ein anderes Verhalten an den Tag. Die Bindungskorrelationsfunktion fällt bis zum Ende exponentiell mit wachsender Korrelationslänge ab, im Gegensatz zu dem anfänglichen Potenzgesetz vor dem



Abb. 3: Farbkodierte Karten des Kristalls für verschiedene Bereiche während der Rekristallisierung. Die Hintergrundfarbe entspricht dem Wert des Betrags des Bond-Order-Parameters Ψ (siehe Farbverlauf oben). Die Pfeile repräsentieren das Vektorfeld von arg(Ψ). Defekte sind mit roten (fünfzählig) und blauen (siebenzählig) Punkten markiert. a) Kristallstruktur vor dem Schmelzen; b) flüssigkeitsähnlicher Zustand unmittelbar nach dem Schmelzen (Bereich I); c),d) aufeinander folgende Bereiche II, III der Kristallisation; e) Metastabiler Bereich IV; f) simulierte Kristallit-Struktur.

Schmelzen. Laut der Theorie würde dieses Verhalten auf einen flüssigen Zustand hinweisen, was jedoch dem äußeren Erscheinungsbild des Systems, das auch auf größeren Distanzen stark geordnet ist, widerspricht (Abb. 3).

Mit Hilfe des lokalen Bond-Order-Parameters wird die Orientierungsordnung näher untersucht. Diese Größe wird aus den Winkeln zwischen den Bindungen eines zentralen Teilchens zu all seinen nächsten Nachbarn berechnet, wobei die Bindungen eine Einheitszelle um das zentrale Teilchen definieren. Dieser Parameter gibt Aufschluss darüber, wie nahe eine Einheitszelle an ein ideales Sechseck herankommt, und über die Orientierung der Zelle in bezug auf eine gewählte, feststehende Achse. Abbildung 3 zeigt farbkodierte Karten für einige ausgewählte Bilder wobei hellere Farben hochwertigeren Sechsecken entsprechen. Die Pfeile repräsentieren die Orientierung der Einheitszellen. Weiterhin sind Positionen von Defekten mit roten (fünf

Nachbarn) und blauen (sieben Nachbarn) Punkten markiert. Nach einem ungeordneten Zustand (Abb. 3b) schreitet die Kristallisation zunächst fort zu einem System von kleinen geordneten "Kristalliten" mit zufälliger Orientierung, die durch Defekt-Ketten voneinander getrennt sind. Die Kristallite wachsen, während das System weiter abkühlt, und verschmelzen mit benachbarten Regionen (Abb. 3c-d). Ein metastabiler Zustand entsteht, gekennzeichnet durch hoch geordnete, aneinander angrenzende kristalline Domänen (Abb. 3e). Da sich die Orientierung der Einheitszellen über die Domänengrenzen hinweg abrupt ändert, bis hin zu entgegen gesetztem Vorzeichen für aneinander angrenzende Domänen, kann im Endzustand des Systems keine langreichweitige Orientierungsordnung gefunden werden - im Gegensatz zum Anfangszustand (Abb. 3a). Auch in der Abkühlphase der Simulation wurde die Bildung eines Kristallits beobachtet (Abb. 3f).

Als Fazit wurde der Übergang von einem flüssigkeitsähnlichen Zustand einer Monolage von Teilchen zu einem Zustand, charakterisiert durch hohe Translationsordnung und niedrige Anzahl an Defekten, untersucht. Der exponentielle Temperaturabfall geht von reiner Epstein-Dämpfung über zu einer langsameren Abklingrate, bis die Temperatur des Anfangszustandes erreicht wird. Die ursprünglichen Werte von Defektbruchteilen und Translationsordnung ebenfalls wiederhergestellt. werden Fine langreichweitige Orientierungsordnung ist nicht vorhanden, wegen der über den Kristall verteilten Domänen mit unterschiedlicher Orientierung der Einheitszellen. Allerdings kehrt der Kristall nach genügend langer Zeit (ca. 30 Minuten) in seinen Anfangszustand zurück. Der Bereich langsameren Temperaturabfalls (II und III in Abb. 2 und 3) verlangt besondere Aufmerksamkeit. Das auftretende "Aufheizen" könnte zwei Ursachen haben: Entweder wird durch die Dissoziation

von Gitterdefekten und das Kippen der Richtung von nächste-Nachbar-Bindungen in den (hexagonalen) Grundzustand latente Wärme freigesetzt oder die starke Kopplung zwischen den Teilchen spielt eine Rolle, indem sie sukzessive größere (und schwerere) "Einheitszellen" bzw. "effektive" Teilchen vortäuscht. Letztendlich ist eine eindeutige Zuordnung der gefundenen Stadien im Hinblick auf die bestehende Theorie – im besonderen bezüglich der hexagonalen Phase – nicht möglich, da nicht alle, die strukturellen Eigenschaften beschreibenden, Größen das vorausgesagte Verhalten an den Tag legen.

C.A. Knapek, D. Samsonov, S. Zhdanov, U. Konopka, G.E. Morfill





3 Experimente und Projekte

3.1 PHYSIK DES ERDNAHEN WELTRAUMS

In diesem Arbeitsbereich des Instituts untersuchen wir plasmaphysikalische Vorgänge im Sonnensystem. Für diese Untersuchungen werden Experimente entwickelt, die das Studium solcher Vorgänge in-situ gestatten, z.B. in der Magnetosphäre der Erde und im interplanetaren Raum.

Zur Zeit sind wir an mehreren Experimenten zur Bestimmung der Plasmaparameter im erdnahen Weltraum, sowie zur Bestimmung der Energie-, Massenund Ladungszusammensetzung im Sonnenwind, und von suprathermischen und energetischen Ionen im interplanetaren Raum beteiligt. Diese Experimente befinden sich an Bord der Erdsatelliten SAMPEX, FAST, Cluster und Double Star, sowie an Bord der interplanetaren Observatorien SOHO, ACE und STEREO. Dabei ist die Cluster Mission, zusammen mit SOHO, der erste Eckpfeiler des wissenschaftlichen Programms "Horizon 2000" der ESA.

Cluster Mission: Das wissenschaftliche Ziel der Cluster Mission ist die Identifizierung und detaillierte Untersuchung von Plasmaprozessen an den Grenzschichten der Erdmagnetosphäre. Die vier Cluster Satelliten mit identischer Instrumentierung sind dabei in einer Tetraederkonfiguration angeordnet, wenn die zu untersuchenden Gebiete durchflogen werden. Dadurch ist es zum ersten mal möglich, die Dynamik der Grenzschichten (z. B. Bugstosswelle und Magnetopause der Erde) zu untersuchen, da mit der gleichzeitigen Messung mit vier Satelliten erstmals räumliche und zeitliche Variationen unterschieden werden können. Der Abstand der vier Cluster Satelliten wird während der Mission variiert, um plasmaphysikalische Prozesse auf verschiedenen Skalenlängen in den verschieden Regionen der Magnetosphäre untersuchen zu können. Im Jahre 2006 wurde erstmals eine Konfiguration mit 10.000 km Skalenlänge verwendet, und zwar sowohl für die Cusp Region als auch für den mittleren Schweif der Magnetosphäre der Erde. Im Jahre 2005 wurde die Cluster Mission bis 2009 verlängert. Die Verlängerung wird (1) weitere Messungen bei den bisher noch nicht ausreichend abgedeckten großen Skalenlängen von ≥10.000 km gestatten, sowie (2) im Jahre 2008 und 2009 Messungen in Gebieten ermöglichen, die bisher noch nicht erreichbar waren, wie z.B. in der sub-solaren Magnetopause und den auroralen Beschleunigungsregionen. Die endgültige Entscheidung über die Verlängerung bis 2009 wird nach einer weiteren Evaluierung im Jahre 2007 getroffen werden.

Double Star: Mit der Mission Double Star wurde die Cluster Flotte in den Jahren 2003 und 2004 im Rahmen eines Kooperationsvertrages zwischen ESA und CNSA (Chinese National Space Administration) um zwei weitere Satelliten (TC-1, TC-2) erweitert. Mit den vier Cluster Satelliten und den zwei Double Star Satelliten können nun erstmals koordinierte Messungen in der Magnetosphäre mit bis zu 6 Satelliten durchgeführt werden. Der Betrieb der beiden Double Star Satelliten wurde in diesem Jahr bis 30. September 2007 verlängert, d.h. Double Star wird bis zum für den 10. Oktober 2007 vorhergesagten Wiedereintritt des Satelliten TC-1 in die Erdatmosphäre unterstützt. Das MPE ist an zwei wissenschaftlichen Experimenten der Cluster Satelliten maßgeblich beteiligt: am Elektronen – Drift Experiment (*EDI*), und am Cluster Ionen Spektrometer (*CIS*). Einer der beiden CIS Sensoren (HIA), ist auch Teil der wissenschaftlichen Nutzlast von Double Star TC-1 (s.a. Jahresbericht 2004).

Cluster Active Archive (CAA): Dieses Cluster Langzeit-Archiv wird von ESA im Rahmen des *International Living with a Star (ILWS)* Programms unterstützt. Ziel ist, alle relevanten Cluster Daten, insbesondere zur Untersuchung von Sonne-Erde Wechselwirkungen, einer möglichst großen internationalen wissenschaftlichen Gemeinde zur Verfügung zu stellen. In diesem Jahr wurde die Archivierung der EDI Daten fortgesetzt; bisher wurden alle EDI Daten für die Jahre 2001 bis 2004 verarbeitet und am CAA implementiert.

German Cluster Data Center (GCDC): Das Deutsche Cluster Science Data Center (GCDC) am MPE ist eines der acht europäischen Datenzentren des Cluster Science Data Systems (CSDS). Das GCDC verarbeitet die wissenschaftlichen Daten für die beiden in Deutschland beheimateten Instrumente, RAPID (Research with Adaptive Particle Imaging Detectors) des MPS (Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung) und EDI des MPE. Die resultierenden Datensätze werden mit den anderen Datenzentren ausgetauscht, so dass jedes der Zentren im Besitz der Daten aller Cluster Instrumente ist. Diese Daten im Umfang von zur Zeit ~60 GByte können dann von allen an der Cluster Mission beteiligten Wissenschaftlern in Deutschland über eine Internet-Schnittstelle abgerufen werden. Im Jahre 2006 verzeichnete das GCDC durchschnittlich 1200 Zugriffe pro Monat mit einem Datentransfer von insgesamt ~1 GByte. Das GCDC stellt außerdem Übersichtsplots der Daten aller Cluster Instrumente her, die an die anderen Zentren verteilt werden.

SOHO: Die Mission *SOHO* (*Solar and Heliospheric Observatory*) ist nun bereits im 11. Jahr eines sehr erfolgreichen Betriebs und wurde vorerst bis Ende 2007 verlängert. Das MPE ist maßgeblich am Instrument *CELIAS* (Charge, Element, and Isotope Analysis System) beteiligt. Die Aufgabe von CELIAS ist die Bestimmung der Plasmaparameter und Isotopenhäufigkeiten des solaren Windes, sowie die Bestimmung der Elementhäufigkeiten und Ladungszusammensetzung suprathermischer Ionen, die in solaren Flares oder durch koronale und interplanetare Stosswellen beschleunigt werden.

Das Instrument "PLASTIC" an Bord von "STEREO"

Die beiden Raumsonden der STEREO (**S**olar **TE**rrestrial **RE**lations **O**bservatory) Mission werden zum ersten mal stereoskopische Aufnahmen der Sonne und von koronalen Massenauswürfen (CME: Coronal Mass Ejection) ermöglichen. Das MPE ist an dem Experiment *PLASTIC* (Plasma and Suprathermal Ion Composition) beteiligt. Wissenschaftliches Ziel von PLASTIC ist die Bestimmung der Plasma Parameter des solaren Windes, sowie der Element- und Ladungszusammensetzung schwerer Ionen zur Charakterisierung des koronalen Plasmas und von CMEs.

STEREO: Das wichtigste wissenschaftliche Ziel der NASA Mission STEREO ist es, den Ursprung und die Auswirkungen von koronalen Massenauswürfen zu verstehen. Diese CMEs sind die energiereichsten Ausbrüche der Sonne. Sie verursachen die intensivsten Flüsse solarer energetischer Teilchen im interplanetaren Raum, sie sind die wesentliche Ursache für magnetische Stürme und sie spielen im Laufe eines Sonnenzyklus auch eine wesentliche Rolle bei der Änderung des solaren Magnetfeldes.



Abb. 1: Heliozentrische Umlaufbahn der beiden STEREO Raumsonden, projiziert in die Ekliptik, wobei die Erde – Sonne Linie fest gehalten ist. Der Abstand der beiden Raumsonden vergrößert sich in solarer Länge um 45° pro Jahr, wodurch 3D stereoskopische Aufnahmen der Sonne und von CMEs möglich werden.

STEREO Umlaufbahn: Die beiden STEREO Raumsonden mit identischer Instrumentierung ermöglichen die Untersuchung der Sonne, des solaren Windes, sowie energetischer Teilchen von zwei Positionen unterschiedlicher solarer Länge, wodurch erstmals stereoskopische Bilder der Sonne und von solaren Massenauswürfen möglich werden. STEREO wurde am 26. Oktober 2006 von Cape Canaveral mit einer Delta II Rakete erfolgreich gestartet. Die Testphase, zunächst in einer Umlaufbahn um das System Erde – Mond, wird bis Ende Januar 2007 dauern. Bis Ende Januar 2007 ist auch die Injektion in die heliozentrische Umlaufbahn abgeschlossen, auf der sich die beiden Raumsonden in solarer Länge um 45° pro Jahr von einander entfernen werden. Die nominelle Missionsdauer beträgt 2 Jahre, mit der Möglichkeit zur Verlängerung.

STEREO Instrumente: Die wissenschaftliche Nutzlast ist auf den beiden STEREO Raumsonden gleich und besteht aus je 13 Instrumenten zur Beobachtung der Sonne (Abbildung im EUV Bereich, Koronograph), der inneren Heliosphäre (Heliospheric Imager), zur Messung von Radiowellen, und zur in-situ Bestimmung des interplanetaren Magnetfeldes, von thermischen und suprathermischen Ionen und Elektronen und von energetischen Ionen und Elektronen bis zu Energien von ~40 MeV/amu.



Abb. 2: Querschnitt der Flugzeitsektion (unten) und der Eintrittsapertur (oben) des PLASTIC Instrumentes an Bord von STEREO. Die zwei Pfeile kennzeichnen die unterschiedlichen Eintrittsöffnungen für Protonen und Alpha-Teilchen (oben) und schwere Ionen (unten) des solaren Windes.

PLASTIC: Das primäre wissenschaftliche Ziel des PLA-STIC (Plasma and Supra-Thermal Ion Composition) Experimentes an Bord von STEREO ist die Untersuchung des solaren Windes und suprathermischer Ionen. PLA-STIC liefert die Dichte, Geschwindigkeit und thermische Geschwindigkeit des solaren Windes, sowie die Elementund Ladungszusammensetzung schwerer lonen zur Diagnostik des koronalen Plasmas und von CMEs. PLASTIC basiert auf dem Experimentkonzept des CODIF Sensors an Bord der Cluster Satelliten, mit entscheidenden Verbesserungen zur Bestimmung von Masse, Ionenladung und Energie des solaren Windes und suprathermischer Teilchen im Energiebereich 0.2 – 80 keV/e. Abbildung 2 zeigt einen Schnitt durch das Experiment. Der Sensor kombiniert die Bestimmung von Energie pro Ladung in einem elektrostatischen Viertelkugel-Analysator mit unterschiedlichen Eintrittsöffnungen für Protonen und Alpha-Teilchen des solaren Windes (oberer Pfeil), und für schwere lonen im Massenbereich C - Fe (unterer Pfeil), mit der Messung von Flugzeit und Energie der Ionen (unterer Abschnitt in Abb. 2).

3.2 INFRAROT/SUBMILLIMETER ASTRONOMIE

Unsere Gruppe entwickelt hochauflösende Nahinfrarot-Instrumente für Teleskope der 8m-Klasse sowie weltraum- und flugzeuggestützte Experimente. Unser Ansatz ist, einige wissenschaftliche Schlüsselfragen gleichzeitig über einen großen Wellenlängenbereich und mit vielfältigen Methoden anzugehen.

Die Inbetriebnahme der Laserleitsterneinrichtung, einschließlich unseres PARSEC-Lasers am Very Large Telescope (VLT) in 2006, erweitert die Leistungsfähigkeit unserer Entwicklungen von VLT-Instrumenten mit adaptiver Optik (siehe ausgewählten Artikel). Das gilt sowohl für die NACO Nahinfrarotkamera mit Spektrometer (Inbetriebnahme 2002) als auch für das feldabbildende Nahinfrarotspektrometer SINFONI (Inbetriebnahme 2004).

Das MPE und andere deutsche Institute halten einen 25%-AnteilamLargeBinocularTelescope(LBT)aufMountGraham in Arizona. Das LBT besteht aus zwei 8m-Teleskopen mit 16m Abstand auf einer gemeinsamen Montierung. Unser erster großer Instrumentierungsbeitrag zu diesem Projekt ist die kryogene Multiobjektspektroskopieeinheit, die Teil des Nahinfrarotinstruments LUCIFER ist, das Kamera und Spektrograph umfaßt. Zwei vollständige LUCIFER-Instrumente werden für die beiden "Augen" des LBT gebaut. Der erste Multiobjektspektrograph einschließlich gekühlter Masken- und Magazinwechselmechanismen wurde 2006 fertiggestellt und wird im Labor getestet. Am LBT selbst fanden 2006 umfangreiche Test- und Inbetriebnahmeaktivitäten statt. Die wissenschaftliche Demonstrationsphase mit der optischen Primärfokuskamera beginnt im Januar 2007. Wir versuchen das wissenschaftliche Potential des LBT durch eine Laserleitsterneinrichtung zu erhöhen. Die leistungsfähige Multiobjektspektroskopie mit LUCIFER könnte besonders von einer Schärfung der Punktquellenverbreiterungsfunktion (PSF) durch ein auf die niedrigen Schichten der Atmosphäre ausgelegtes System adaptiver Optik profitieren. Zusätzlich untersuchen wir in einem Prototypexperiment fortgeschrittene phasenverschiebende Laserleitsternkonzepte. Die Studie für eine feldabbildende Spektroskopieeinheit für den interferometrischen Fokus des LBT, in Zusammenarbeit mit der Universität Köln, wurde fortgesetzt mit Schwerpunkt auf der theoretischen Untersuchung von Mikrolinsen/Faserkonzepten für doppelte Strahlbündel.

2006 begann die Phase-A-Studie für GRAVITY, ein Instrument der zweiten Generation für das VLT-Interferometer, das für hochauflösende Astrometrie (10µBogensekunden) im nahinfraroten K-Band optimiert ist. Untersuchungen der Physik nahe dem Schwarzen Loch im Zentrum der Milchstraße ist eines der wichtigsten Ziele dieses, in Zusammenarbeit mit dem Pariser Observatorium, dem MPIA und der Universität Köln, entwickelten Instruments. In Zusammenarbeit mit der ESO richteten wir am MPE ein Laborexperiment ein, um die PRIMA-Astrometrieeinrichtung für das VLT-Interferometer zu integrieren und zu testen.

Wir entwickeln die Auswertesoftware für den Nahinfrarotmultifeldabbildenden Spektrographen KMOS, der von einem internationalen Konsortium unter Beteiligung des MPE für das VLT gebaut wird. Die abschließende Entwurfsprüfung ist für 2007 geplant.

Die erfolgreiche ISO-Mission (Infrared Space Observatory) wurde mit dem Ende der aktiven Archivphase und der Schließung unseres ISO-Spektrometerdatenzentrums Ende 2006 abgeschlossen. Die letzten Aktivitäten befaßten sich mit der Vorbereitung des endgültigen Datenarchivs. Während seiner Mission von 1995 - 1998 hat ISO viele aufregende Ergebnisse für unsere Gruppe und die astronomische Gemeinschaft erbracht.

Tests des Flugmodells der Ferninfrarotkamera mit Spektrometer "PACS" für das ESA Herschel Space Observatory, zur Zeit unser größtes Instrumentierungsprojekt, haben im Herbst 2006 begonnen (siehe ausgewählten Artikel).

Die Entwicklung von Ferninfrarot-Photoleitern aus GaAs, in Zusammenarbeit mit University of California Berkeley, Lawrence Berkeley National Laboratory und Naval Postgraduate School in Monterey kam zu einem vorläufigen Abschluß. Die geforderte Materialreinheit konnte mit dem Flüssigphasenepitaxie-Zentrifugensystem erreicht werden. Jüngste Fortschritte mit chemischer Abscheidung aus Dampf legen einen Wechsel zu dieser Technologie nahe. Sie ermöglicht größere Substrate mit geringer Konzentration von Minderheitsladungsträgern zu produzieren.

Das feldabbildende Ferninfrarotspektrometer FIFI-LS für das amerikanisch/deutsche Flugzeugobservatorium SOFIA hatte "erstes Licht" im Labor für seinen langwelligen Teil. Tests ergeben die erwartete Empfindlichkeit. Nach einer Periode intensiver Finanzierungsdiskussionen in den USA tritt das SOFIA-Projekt nun in seine Testphase mit der Erwartung des wissenschaftlichen Betriebs für 2009.

Wir untersuchen Spektrometerkonzepte, Kryomechanismen, Detektoren und wissenschaftliche Ziele für ein Ferninfrarotinstrument der nächsten Generation. Dieses "European Science Instrument" ESI könnte von einem europäischen Konsortium zu dem vollständig gekühlten Weltrauminfrarotobservatorium SPICA, das von der japanischen Weltraumagentur untersucht wird, beitragen. SPICA soll einen Spiegel mit 3 m Durchmesser haben.

Neuer Stern über dem VLT

2006 haben wir unseren PARSEC Laserleitstern am ESO Very Large Telescope (VLT) in Betrieb genommen. Mit dem Laserleitstern und adaptiver Optik werden für viele wichtige Himmelsobjekte erstmals räumlich hochaufgelöste Beobachtungen im nahen Infrarot möglich.

Adaptive Optik (AO) ist eine leistungsfähige Methode, die Bildverschmierung durch atmosphärische Turbulenz zu korrigieren und ergibt damit extrem hohe räumliche Auflösung. So wird das volle Potential moderner Großteleskope genutzt. AO hat bereits großen Einfluß auf viele Gebiete der Infrarotastronomie, vom Zentrum unserer Milchstraße über nahe aktive galaktische Kerne bis zu Galaxien bei hoher Rotverschiebung. Ihre größte Einschränkung ist die Notwendigkeit eines hellen Sterns sehr nahe am Zielobjekt, die nur selten erfüllt ist. Die Leistung von mindestens 10 W zu erzeugen, dessen Wellenlänge exakt abgestimmt werden muß um die Natriumschicht der Atmosphäre in 90 km Höhe fluoreszieren zu lassen. Das System muß sehr stabil sein und eine ganze Nacht mit wenig Nachjustierung zu arbeiten. Ein hoher Grad von Fernbedienbarkeit und Automation ist nötig um den Betrieb vom Kontrollraum des VLT aus, auch durch Personal mit wenig Lasererfahrung, zu steuern.

Wir begannen das Projekt im Herbst 2000. 18 Monate später wurde der Entwurf in einem Laserauswahltest des Prototyps angenommen. Im März 2004 erhielt PARSEC die vorläufige "europäische" Abnahme durch ESO. Nach Beendigung der Tests für die gesamte Laserleitsterneinrichtung wurde das Gesamtsystem zum Paranal-Observatorium in Chile transportiert und installiert. Das System wurde 2006 in Betrieb genommen, Servicebeobach-



Abb. 1: Der PARSEC-Laser im Laserreinraum unter der Nasmyth-Plattform des UT4 am VLT.

Laserleitsterneinrichtung am 8m Yepun-Teleskop des ESO Very Large Teleskop löst dieses Problem, indem ein künstlicher Stern bei Bedarf an beliebiger Himmelsposition erzeugt werden kann. Der an unserem Institut entworfene und gebaute PARSEC-Laser ist das Herzstück dieses, jetzt am Paranal-Observatorium betriebenen, Systems.

Von Beginn an stellte das PARSEC-Projekt große Herausforderungen. Der Laser hat einen Strahl mit einer tungen für VLT-Nutzer beginnen Anfang 2007.

Um das Entwicklungsrisiko zu minimieren, baut unser Entwurf auf einem neuartigen Gebrauch bewährter Farbstofflasertechnologie auf. Ein käuflicher Ringlaser dient als Masterlaser und erzeugt einen Strahl mit niedriger Leistung von 2 W und einer einzigen Frequenz und Lasermode. Das verstärkende Medium für den Laser ist eine Farbstofflösung, die mit einem Druck von 27 Bar durch einen 200 µm dünnen Kanal in einer Saphirdüse gepumpt wird. Die Farbstoffmoleküle im entstehenden Strahl werden von einem grünen 10W-Festkörperlaser angeregt. Die Wellenlänge der emittierten Strahlung kann

durch Anpassung der Länge des Resonanzhohlraums verändert werden. Diese Wellenlänge wird an eine Natriumzelle gekoppelt. Ein Fluoreszenzsignal von dieser Zelle garantiert, dass auch das atmosphärische Natrium fluoreszieren wird und so den Laserleitstern erzeugen kann.

Der Strahl des Masterlasers versorgt einen Leistungsverstärker. Der Verstärker hat einen neuen symmetrischen dreidimensionalen Entwurf mit zwei Farbstoffstrahlen. Dieses Konzept eliminiert automatisch astigmatisch bedingte Abbildungsfehler. Außerdem wird keine frequenzselektive Optik benötigt, der Hohlraum ist damit extrem effizient. Die höchste gemessene Ausgangsleistung ist 24 W, und die Wellenlänge wird mit einer Genauigkeit besser als 1 nm eingehalten.

Durch aktive Spiegel wird die Lage des Laserstrahls auf wenige µm genau stabilisiert. Zusätzliche Regelschleifen halten die Ausrichtung von Masterlaser und Verstärker aufrecht. Vielfältige Kontrollen überwachen die Leistung, Qualität und Polarisation des Strahls.

Ein weiteres neues Element des Lasers ist sein LIDAR-Modus, mit dem Höhe und Dichteprofil der Natriumschicht gemessen werden können. Änderungen dieser Schicht, in der, der Laserstern erzeugt wird, haben zentrale Auswirkungen auf den Fokus des Wellenfrontsensors und die Genauigkeit seiner Regelung. Außerdem können sie die Größe des Lasersterns bedie AO-Systeme von NACO und SINFONI nötigen hellen künstlichen Stern zu erzeugen.



Abb. 2: Von PARSEC erzeugter Laserstrahl, der vom Projektionsteleskop hinter dem Sekundärspiegel des 8m-Teleskops Yepun an den Himmel geworfen wird.

einflussen – eine engere Schicht bedeutet einen schärferen Stern. Davon ist widerum die Qualität der Korrektur durch die adaptive Optik betroffen.

PARSEC ist jetzt am Paranal-Observatorium in einem eigenen Laserreinraum in Betrieb. Der erzeugte Strahl wird in eine nach dem Prinzip des photonischen Kristalls aufgebaute Monomode-Lichtleitfaser eingespeist, die ihn zum 50cm-Projektionsteleskop hinter dem Sekundärspiegel des 8m-Teleskops befördert. Damit kann er an jede Stelle des Himmels projiziert werden um den für Die Möglichkeiten der Laserleitsterneinrichtung haben große Begeisterung in der astronomischen Gemeinschaft ausgelöst, mit überwältigendem Echo auf den ersten Aufruf zu Beobachtungsanträgen. Die Hoffnung ist, dass die Nahinfrarotastronomie vor einer Revolution steht. Die Zukunft ist hell. Die Zukunft ist orange.

Zur Zeit am MPE tätige Kernmitglieder des PARSEC-Projekts sind: R. Davies (Projektmanager), S. Rabien (Laserphysik), T. Ott (Software), S. Kellner (Elektronik), S. Huber (Mechanik).

Vorbereitung auf L2 – Intergration und Tests von Herschel-PACS

Abschließende Labortests für unser PACS-Instrument sind weit fortgeschritten. PACS soll 2008 mit dem Herschel Space Telescope der ESA gestartet und zum Lagrangepunkt L2 des Sonne-Erde-Systems geschickt werden. PACS wird nie dagewesene Fähigkeiten für Abbildung und Spektroskopie im fernen Infrarot bieten, mit vielfältigen Anwendungen von der Suche nach entstehenden Sternen bis zur Auflösung des kosmischen Infrarot-Hintergrunds.

Die Photodetector Array Camera & Spectrometer (PACS) für die Cornerstone-Mission "Herschel" der ESA ist das umfangreichste Projekt, das wir am MPE derzeit betreiben. Die Motivation, einen wesentlichen Teil der Institutsressourcen in dieses Unternehmen zu investieren, kann leicht mit einem kurzen Blick auf das Spektrum des kosmischen Infarothintergrunds nachvollzogen werden (Abb. 1). Im fernen Infrarot hat der kosmische Hintergrund ein Maximum bei etwa 150 µm. Hier erreicht uns so viel Energie wie in der Summe aus UV, sichtbarem Licht und nahem Infrarot, d.h. viele Quellen tragen zu dieser Emis3,5m-Teleskop und den großen Detektoranordnungen unseres Instruments wird erstmals die notwendige Kartierungsgeschwindigkeit und Auflösung bieten um dieses Ziel zu erreichen. Wir erwarten von photometrischen Durchmusterungen bei diesen Wellenlängen und ergänzenden spektroskopischen Untersuchungen wesentlich verbesserte Einsichten in die Sternentstehungsgeschichte und Entwicklung von Galaxien. Im fernen Infrarot finden sich viele diagnostisch bedeutsame Spektrallinien, die mit keiner oder geringer Schwächung durch interstellaren Staub zugänglich sind.

Mit dieser starken wissenschaftlichen Begründung hat das MPE die Führung in einem großen europäischen Konsortium aus 15 Partnerinstituten und ihren Industriekontraktoren übernommen, um mit PACS eines der drei Fokalebeneninstrumente von Herschel zu bauen und zu betreiben. Das Instrument erfaßt zwei leicht gegeneinander versetzte Gesichtsfelder in der Fokalebene des Teleskops, ein größeres für abbildende Photometrie in 3 Bändern um 70 µm, 110 µm und 170 µm und ein kleineres



Abb. 1: Spektrum des kosmischen Hintergrunds vom mm-Band bis zum Ultravioletten. Der mit PACS beobachtbare Wellenlängenbereich ist angedeutet. Er überdeckt das spektrale Maximum das kosmischen Hintergrunds.

sion bei. Eine zentrale Aufgabe für PACS auf HERSCHEL wird sein, die Beiträge verschiedener Quellenarten zu dieser Emission zu bestimmen. Vermutlich besteht sie hauptsächlich aus reprozessiertem Licht von Sternen und/oder aktiven Galaxienkernen in staubverdunkelten Galaxien. Herschel (Abb. 2), mit seinem passiv gekühlten

für abbildende Spektroskopie zwischen 57 und 210 µm.

Das Spektrometergesichtsfeld wird in eine feldabbildende Einheit eingespeist, die es in einen Langspalt am Eingang eines Gitterspektrometers umordnet. Die resultierenden Spektren werden nach Gitterordnung ge-



Abb. 2: Künstlerische Darstellung des Herschel-Weltraumobservatoriums.

trennt und mit zwei 25x16-elementigen Germaniumphotoleiterarrays registriert. Das photometrische Gesichtsfeld wird auf zwei gefüllte Bolometerarrays abgebildet,

eins für das 170 µm-Band mit 32x16 Elementen und eins für die 70 µm und 110 µm-Bänder mit 64x32 Elementen – klein, verglichen mit heutigen optischen oder Nahinfrarotdetektoren, aber die größten, jemals für das ferne Infrarot gebauten Bolometerarrays.

Detektoren und die komplexe Optik dieser Kombination aus Kamera und Spektrometer sind Teil der Fokalebeneneinheit, die auch Eichquellen, Filterwechsler, das Gitter mit seinem Antrieb und einen beweglichen Umlenkspiegel enthält.

Nach acht Jahren Instrumententwicklung ist das PACS-Team am MPE in die abschließende Phase von Zusammenbau und Test des Flugmodells eingetreten. Was als sorgfältig koordinierte Zusammenarbeit der Partner begann, erforderte viele lokale Änderungen der ursprünglichen Planung um vielfältige Schwierigkeiten umzugehen, wie man sie bei einem solch komplexen System erwarten kann. Ein wichtiger Schritt war der kalte Schütteltest im Juli/August. Nach einer genauer Untersuchung und einem Filterwechsel in letzter Minute waren wir froh, den Deckel der Fokalebeneneinheit am 29. August 2006 schließen zu können. Nach Zusammenbau der Fokalebeneneinheit mit der Testoptik im Testkryostaten und Verbindung zur warmen Elektronik – zum Teil von unseren Partnern zur Verfügung gestellt – begannen wir mit den Instrumententests. Diese werden bis zur Ablieferung von PACS an ESA im Frühjahr 2007 fortgesetzt.

Das Testlabor am MPE mit seinem großen Testkryostaten (Abb. 3) erlaubt uns den Betrieb des Instruments in einer dem Satelliten entsprechenden Umgebung zu verifizieren und die wichtigen Leistungsparameter wie Bildqualität, spektrale Auflösung und Systemrauschen zu bestimmen. Bis jetzt haben die Tests gezeigt, dass PACS wie entworfen und vorhergesagt betrieben werden kann. Die Punktquellenprofile der beugungsbegrenzten Optik sind wie berechnet, die mit einem Ferninfrarotlaser an mehreren Wellenlängen gemessene spektrale Auflösung ist nominell und das Detektorrauschen des Systems ist wie vorhergesagt. Einige Probleme mit der instrumentinternen Software und dem Instrument selbst sind jedoch noch zu lösen, bevor PACS an Bord von Herschel an seinen Bestimmungsort reisen kann - den Lagrangepunkt 2 (L2) des Sonne-Erde-Systems in einer Entfernung von etwa 1.5 Millionen km von der Erde.



Abb. 3: Für Labortests wird PACS zusammen mit Kalibrationseinrichtungen im großen zylindrischen Kryostaten in der Bildmitte montiert. Zusätzliche Eichsignale, hier Emission eines Ferninfrarotlasers, können auch von außen in den Kryostaten eingespeist werden.

3.3 HOCHENERGIE-ASTROPHYSIK

Projekte der Röntgenastronomie

Die Röntgengruppe am MPE befasst sich einerseits mit der Entwicklung von Röntgeninstrumenten für zukünftige Astronomieprojekte und andererseits mit der wissenschaftlichen Auswertung der Röntgendaten. Dieses Jahr unternahmen wir wesentliche Schritte im Design neuer Teleskope und der Entwicklung von CCDs für eROSITA (siehe ausgewählten Artikel). Studien zu Simbol-X und der ESA-Mission XEUS (siehe unten) laufen weiter. Gegenwärtig werden neue wissenschaftliche Daten hauptsächlich von den zwei großen Observatorien im Erdumlauf geliefert: XMM-Newton und Chandra. Wir waren wesentlich an der Entwicklung, Funktionstests und Eichung von Instrumentierung auf beiden Satelliten beteiligt und führen weiterhin die "In-Orbit" Kalibration der EPIC-pn Kamera auf XMM-Newton durch.

Alle öffentlichen Daten unseres Chandra "Low-Energy Transmission Grating Spectrograph" (LETGS) Archivs wurden neu prozessiert und mit besseren Übersichtsbildern erweitert. Die noch andauernde Eichung des Niederenergiebereichs des LETGS mit Hilfe der Spektren des Weißen Zwergs HZ43, Sirius B und

dem isolierten Neutronenstern RX J1856.5-3754 erbrachten eine verbesserte effektive Fläche für das Instrument.

Um astronomische Datenbanken und den allgemeinen Zugriff auf deren Daten zu entwickeln, sind wir an den GAVO (German Astrophysical Observatory) und AstroGrid Proiekten beteiligt. Wir haben an der Implementation von Datenzugriffsprotokollen für Datensätze am MPE gearbeitet. Die Beiträge zum AstroGrid-D Projekt konzentrierten sich auf Clusterfinder, einem Algorithmus zur Identifizierung von Galaxienhaufen, der die Informationen von optischen und **ROSAT-Durchmusterungen** kombiniert.

Die Röntgengruppe betreibt die Röntgentestanlagen PUMA und PANTER, die benutzt werden um neue Detektoren und Röntgenoptiken für astronomische Anwendungen zu vermessen. Zum ersten Mal wurden 2006 Tandems von Porenoptiken vermessen, welche z.B. in der XEUS Mission zum Einsatz kommen könnten. Diese sind aus Silizium-Platten aufgebaut und zeichnen sich durch niedriges Flächengewicht aus. Außerdem wurden erste Proben einer noch leichteren Glas-Porenoptik

in der PANTER-Anlage untersucht. Schließlich wurden 'multilayer' Spiegelschalen geeicht, welche sich durch hohe Reflektivitäten im harten Röntgenband auszeichnen und damit für die Simbol-X Mission in Frage kommen.

Da Spiegelsystemen für große Röntgenteleskope zukünftig leicht und segmentierten sein werden, haben wir unsere Studien zur Glas 'slumping' Technik durch eigene experimentelle Arbeiten erweitert. In einem speziellen Schmelzofen stellten wir dünnwandige Wolter-I Spiegelsegmente aus Glas her und dokumentierten erstmalig den Fortschritt des 'slumping' Prozesses bildlich. Das Ziel ist, Abhängigkeiten der Prozessparameter mit den Abbildungseigenschaften der gefertigten Spiegel zu finden, um den Prozess optimieren zu können.

Hochenergie-Röntgensatellit Der Simbol-X, eine Kollaboration (Frankreich/Italien/ europäische Deutschland), befindet sich derzeit in der Phase A Studie. Das Projekt hat zwei Ziele: die Erprobung des Formationsfluges zweier Satelliten und die Beobachtung von Himmelsobjekten bis zu einer Energie von etwa 100 keV mit einer bisher unerreichten Empfindlichkeit. Dazu sind zwei Satelliten geplant: ein Spiegel-Satellit mit einem 100-fach genesteten Wolterteleskop und ein Detektor-Satellit mit einem Sandwich-Detektor für den Energiebereich von 0.5 bis 100 keV. Unser Beitrag wird, außer der Vermessung des Spiegelsystems in der PANTER-Anlage, die Entwicklung und das Austesten des Niederenergie-Pixeldetektors sein.



Abb. 1: Die PANTER Testanalage ist bestückt mit einem neuen abbildenden Detektor, einer 2cm x 2cm pnCCD-Kamera, die eine Pixelgröße von 75 µm hat. Der Blick ins Kameragehäuse zeigt die CCD, die auf eine Keramikplatte montiert ist.

Am CERN ist das Axion-Helioskop CAST (CERN Axion Solar Telescope) noch in Betrieb. Es versucht sogenannte solare Axionen nachzuweisen, die im Kern der Sonne erzeugt werden könnten. 2006 wurde das Experiment umgebaut, um den Empfindlichkeitsbereichs von $m_a < 0.02$ eV auf $m_a < 0.3$ eV zu erweitern. Ein positives Axionensignal konnte bisher nicht detektiert werden.

Das Röntgenobservatorium XMM-Newton

Sieben Jahre nach dem Start liefert XMM-Newton weiterhin eine Fülle von wissenschaftlichen Daten. Die Röntgengruppe ist wesentlich an der "in-Orbit" Kalibration der EPIC-pn Kamera beteiligt und entwickelte neue Methoden um die Daten Qualität zu verbessern.

XMM-Newton, der Europäische Röntgensatellit, ist nun seit mehr als sieben Jahre im Orbit. XMM-Newton ist ein Meilenstein-Projekt im ESA Horizon 2000 Programm und ist der größte wissenschaftliche Satellit, der jemals in Europa gebaut wurde. Abbildende Kameras (EPIC) und hochauflösende Spektrographen hinter den drei Röntgenteleskopen beobachten den Röntgenhimmel gleichzeitig. Das Spiegelsystem wurde auf eine große Sammelfläche ausgelegt, um viele der offenen Fragen bei den energiereichsten Prozessen im Universum anzugehen.

drei XMM-EPIC CCD Chips (den pn-CCDs). Seit dem Start von XMM-Newton im Dezember 1999 sind wir für die Erhaltung und die "in-Orbit" Kalibration der pn-Kamera sowie für einige Aufgaben innerhalb des XMM-Newton "Survey Science Center" verantwortlich.

Als ein Beispiel unserer Arbeit an der Effizienz der pn-CCD zeigen wir in Abb. 1 das Resultat einer neuentwickelten Methode zur Verbesserung der Datengualität. Diese Methode stellt die spektrale Information in spezifischen Pixeln wieder her, welche durch den Durchgang von energetischen Teilchen gestört wurden und unterdrückt Detektor-Rauschen auf statistischer Basis, wobei ein empirisches Model für die räumlichen und spektralen Eigenschaften des Rauschens angewandt wird. Im Beispiel in Abb. 1 wurden zwei Drittel der ursprünglichen

Abb. 1: XMM EPIC-pn Bilder eines Ausschnitts des Vela Supernovaüberrests, vor (links) und nach (rechts) den Korrekturen. Für diese Bilder wurden nur die niedrigsten Energiekanäle verwendet, die das instrumentelle Energieband von 120 - 200 eV überdecken. Die Korrektur zeigt die Existenz von diffuser weicher Röntgenemission, welche vorher im Detektorrauschen versteckt war.

Die hohe Empfindlichkeit erlaubt uns die Frühgeschichte des Universums, sowie die Entstehung von Galaxien und aktiven galaktischen Kernen, welche durch supermassereiche schwarze Löcher vorangetrieben wurden. zu erforschen. Mit XMM-Newton können wir die extremen Verhältnisse in der Umgebung von schwarzen Löchern und Neutronensternen, Endpunkte der Sternentwicklung, sondieren. XMM-Newton ist eine der erfolgreichsten wissenschaftlichen Satellitenmissionen. Bis jetzt wurden mehr als 1300 referierte wissenschaftliche Papiere veröffentlicht. Unser Institut war an etwa 25% davon beteiligt.

Wir am MPE waren, und sind noch, wesentlich an diesem Projekt beteiligt: Entwicklung, Tests und Eichung der drei Röntgenspiegel-Module und der Entwicklung der

Ereignisse bei 120 - 200 eV als Detektorrauschen unterdrückt. Während sich diese Korrekturen am besten in Bildern bei niedrigen Energien auswirken, verbessert sich die spektrale Qualität über das gesamte Spektralband.

Nach sieben Jahren problemlosen Betriebs der EPICpn Kamera erreichte die "in-Orbit" Kalibration des spektralen Detektoransprechverhaltens ein hohes Genauigkeitsniveau. Die Hauptarbeit der Kalibration konzentriert sich nun auf den Vergleich zwischen den verschiedenen Instrumenten auf XMM-Newton, welche simultan das gleiche Gebiet am Himmel beobachten. Diese Kreuz-Kalibration von Hochenergie-Instrumenten wird nun auch auf andere Hochenergie-Satelliten, wie z.B. INTEGRAL, ausgedehnt.



Das zukünftige Röntgenteleskop "eROSITA"

Im letzten Jahr hat eROSITA auf dem Weg zu seiner Finanzierung eine Reihe von Hürden erfolgreich überwunden. Der Start auf dem russischen Satelliten "Spektrum-Röntgen-Gamma" ist für das Jahr 2011 vorgesehen. Wir erwarten, während der für vier Jahre geplanten Himmelsdurchmusterung etwa 100.000 Galaxienhaufen zu entdecken. Das Studium ihrer großräumigen Verteilung wird uns mehr über Ursprung, Geometrie und Entwicklung des Universums lehren.

Russland plant für 2011 den Start eines mittelgroßen Satelliten mit dem Namen "Spektrum-Röntgen-Gamma" (Spektrum-RG oder SRG, Abb. 1). Eine Rakete vom Typ Sojus-2 soll SRG von Baikonur in Kasachstan in eine Erdumlaufbahn mit 600 km Höhe und 30° Bahnneigung bringen. Neben eROSITA ("extended ROentgen Survey with an Imaging Telescope Array") werden das britische Röntgeninstrument "LOBSTER", das russische Teleskop "ART" und ein ebenfalls aus Russland kommender Gammastrahlen-Burstmonitor mit an Bord sein.

Mit eROSITA wollen wir kosmologische Modelle testen, um den Ursprung, die Geometrie, die Dynamik und das Wachstum unseres Universums besser einschätzen zu können. Dazu untersuchen wir die großräumige Struktur der Materieverteilung. Galaxienhaufen sind ideale Markierungen dieser Masseverteilung. Die Amplitude und Form des Leistungsdichtespektrums sowie dessen zeitliche Änderung hängt empfindlich vom Beitrag der Dunklen Materie und der Dunklen Energie ab. Während der vier Jahre dauernden Himmelsdurchmusterung wird eROSITA etwa 100.000 Galaxienhaufen entdecken. Diese große Zahl ist notwendig, um damit die Massenfunktion der Haufen zu bestimmen, aber auch das Leistungsspektrum bei zehn verschiedenen Rotverschiebungen, um zeitliche Veränderungen messen zu können. Das Leistungsspektrum enthält auch so genannte baryonische Fluktuationen, deren Ursprung in akustischen Oszillationen zur Zeit der Entstehung der Mikrowellenhintergrundstrahlung liegt. Daraus ergeben sich feste Bedingungen für die Raum-



Abb. 1: Dieses vorläufige Design von "Spektrum-Röntgen-Gamma" zeigt die verschiedenen Instrumente, inklusive "eROSITA".

Auf seinem Weg zu einer Genehmigung und Finanzierung durch das Deutsche Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) hat eROSITA im letzten Jahr eine Reihe wichtiger Meilensteine passiert, wodurch die Verwirklichung der Mission mittlerweile höchstwahrscheinlich ist. Wir selbst konzentrierten uns auf das Design einer Teleskopstruktur, welche in der Lage ist, die Anforderungen hinsichtlich Steifigkeit, Stabilität und Gewicht zu erfüllen. Außerdem haben wir uns intensiv mit dem Problem der Kühlung der CCDs auf -80°C beschäftigt; dies stellt sich in einem erdnahen Orbit als äußerst anspruchsvoll heraus, wenn man weitgehend nur auf passive Mittel angewiesen ist. krümmung zu verschiedenen Epochen. Auch zur Bestimmung dieser Oszillationen im Leistungsdichtespektrum sind 50.000 bis 100.000 Galaxienhaufen notwendig.

Die eROSITA Empfindlichkeit im Energieband 0.5 bis 2 keV ist eine Größenordnung ($\sim 4 \times 10^{-14}$ erg/s/cm²) besser als die ROSAT Himmelsdurchmusterung und an den Polen der Durchmusterung sogar noch mal um etwa einen Faktor 10 höher. Bei diesen niedrigen Flüssen wird der Röntgenhimmel durch Galaxienhaufen und Aktive Galaktische Kerne (AGN) dominiert, die aber mit der eROSITA Winkelauflösung von 25 Bogensekunden noch getrennt wer-



Abb. 2: Galaktischer Äquator und galaktische Pole (rote Linie und Kreise), Äquator und Pole der Ekliptik (grüne Linie und Kreise) mit der angestrebten Durchmusterungsgeometrie (gelb).

den können. Die Entdeckung von AGN (aktive galaktische Kerne) im lokalen Universum ist ein weiteres Hauptziel der eROSITA Mission. Viele aktive Schwarze Löcher sollten in nahen Galaxien bisher unentdeckt geblieben sein, da sie von großen Mengen Staub und Gas verdeckt sind. Wir erwarten, mehr als drei Millionen AGN zu finden.

Aber auch viele andere wissenschaftliche Ziele werden wir mit eROSITA verfolgen. Ein Beispiel dazu sind Gammastrahlen-Ausbrüche, welche für etwa zwei Tage nach einem Ausbruch im Röntgenbereich beobachtbar sind. Etwa 600 dieser "nachleuchtenden" Objekte sollten während der vierjährigen Himmelsdurchmusterung zu sehen sein.

Die wissenschaftliche Zielsetzung erfordert mehrere Missionsphasen bzw. Beobachtungsmoden: (1) die vollständige Himmelsdurchmusterung, d.h. eine Umdrehung des Satelliten per Umlauf um die Erde, (2) eine extragalaktische Durchmusterung (20.000 Quadratgrad au-Berhalb der Milchstraße), (3) eine tiefe Durchmusterung an den galaktischen Polen, wo unsere Milchstraße am durchsichtigsten ist und (4) pointierte Beobachtungen auf einzelne ausgewählte Objekte. Um aber den Betrieb des Satelliten möglichst einfach zu gestalten, wollen wir die drei Durchmusterungen zu einer einzigen kombinieren. Dazu nutzen wir aus, dass sich alle bei der Rotation des Satelliten bildenden Großkreise der jeweiligen Blickrichtung in zwei Punkten schneiden und dort automatisch eine tiefere Belichtung erzeugen. Durch Verkippung der Rotationsachse um bis zu 30° weg von der Sonne, verschieben wir diese Gebiete in Richtung der galaktischen Pole, halten aber andere Randbedingungen wie z.B. den minimalen Winkel zwischen Teleskop und Sonne ein (Abb. 2).

Das Wolter-Spiegelsystem von eROSITA besteht aus sieben Modulen mit jeweils 54 Schalen und einem Durchmesser von 360 mm. Die sieben optischen Achsen sind parallel ausgerichtet und die Brennweite beträgt 1600 mm. Da das gesamte Gesichtsfeld (1° Durchmesser) für die Durchmusterung benutzt werden kann, ergibt sich die Empfindlichkeit aus dem Produkt "Sammelfläche × Gesichtsfeld".

Jedes der sieben Spiegelmodule hat seine eigene CCD-Kamera im Brennpunkt. Diese CCDs sind Weiterentwicklungen der pn-CCD Kamera auf XMM-Newton. Die Pixelgröße ist auf 75 µm reduziert, die empfindliche Fläche beträgt 3cm × 3cm (bzw. 384 × 384 Pixel). Die CCDs sind mit einem Speicherbereich ausgestattet, in den die Information aus dem Bildbereich sehr schnell verschoben werden kann. Damit wird die Zahl der Photonen, die während des Schiebevorgangs das CCD treffen, drastisch reduziert. Durch die Verwendung von 6-Zoll Siliziumwafern mit 450 µm Dicke sind die CCDs empfindlicher bei hohen Energien. Durch die Modifikation des Herstellungsprozesses ist auch die Niederenergieempfindlichkeit und die Energieauflösung deutlich verbessert.

Projekte der Gamma-Astronomie

Die Arbeitsgruppe für Gammastrahlen-Astronomie am MPE befasst sich hauptsächlich mit der Auswertung von Daten der ESA Satellitenmission INTEGRAL. Unsere Hauptinteressen gelten dabei der Analyse von kosmischer Kernlinienstrahlung (radioaktive Isotope von Al, Fe und Ti), der diffusen Gammastrahlung unserer Galaxie, Emissionen von aktiven galaktischen Kernen und Gammastrahlenausbrüchen (Gamma Ray Bursts, GRB). Die beiden Hauptinstrumente auf INTEGRAL (IBIS und SPI) haben bereits sehr interessante Ergebnisse geliefert (siehe ausgewählter Bericht zum INTEGRAL Projekt).

Im Rahmen der Kollaboration zum Gamma-Ray Burst Monitor (GBM), der auf dem NASA Projekt GLAST zum Einsatz kommt, hat das MPE, zusammen mit den Firmen Jena-Optronik GmbH und Astrium, 12 Nal-Detektoren, 2 BGO-Detektoren und die komplette Stromversorgung fertiggestellt und ausgeliefert. Die Messgeräte wurden im Berichtsjahr umfassend auf ihre Flugtauglichkeit getestet (Thermal-Vakuum Tests und Messungen zur elektromagnetischen Empfindlichkeit). Im August 2006 wurde GBM zum Einbau auf dem GLAST Satelliten an die Firma Spectrum Astro Space Systems (Phoenix, Arizona) übergeben. Das GBM Instrument wird im Zusammenwirken mit dem GLAST Hauptteleskop LAT (Large Area Telescope, >20 MeV) die Spektren von Gammastrahlenausbrüchen (Bursts) über 6 Dekaden des Energiespektrums vermessen. Wir erwarten uns von diesen Messungen neue und tiefe Einsichten in die komplexen physikalischen Prozesse, die zur Entstehung eines GRBs führen.

Die NASA Mission SWIFT, die seit November 2004 erfolgreich die Messung von GRBs im niederen Energiebereich durchführt, hat schon mehr als 200 solche Ereignisse detektiert. Das MPE hat sich an dieser Mission mit der Eichung des Röntgenteleskopes (XRT) beteiligt. Jetzt unterstützen wir den Missionsbetrieb durch unsere Beteiligung mit "Burst-Advokaten", d.h. MPE Wissenschaftler im Schichtdienst zusammen mit der Gruppe in Leicester/UK. Unsere wissenschaftliche Beteiligung besteht außerdem in der Nachbeobachtung von SWIFT-GRBs mit optischen Teleskopen und in der Analyse einer Himmelsdurchmusterung mit dem Burst Alert Telescope im Energiebereich 14-170 keV.

Das MPE Projekt GROND (Gamma-Ray Burst Optical and Near-Infrared Detektor) ist eine abbildende Kamera mit sieben Spektralbereichen für die Nachbeobachtung von GRBs. GROND steht kurz vor der Fertigstellung im Labor des MPE und wurde nach der Ausrichtung aller optischen Komponenten und Detektoren einer Reihe von Systemtests unterzogen. Daneben wurden umfangreiche Vorbereitungen am 2.2m Teleskop des ESO Observatoriums La Silla/Chile für den Einsatz von GROND im Jahr 2007 durchgeführt. Die wichtigste Zielsetzung von GROND ist die schnelle Bestimmung der Rotverschiebung (Entfernung) von GRB Ereignissen um die gezielte Spektroskopie dieser Objekte mit den grossen VLT Teleskopen noch in derselben Nacht zu ermöglichen.

OPTIMA ist ein Photo-Polarimeter, das den Zeitverlauf der linearen Polarisation von kurzzeitig variablen optischen Quellen mit hoher Zeitauflösung messen kann. Polarisation ist ein Indikator für die Präsenz von hochenergetischen Teilchen und Magnetfeldern in kosmischen Quellen. Das wichtigste wissenschaftliche Ziel ist die Messung der Polarisation im frühen optischen Nachleuchten eines Gamma Bursts. Wir haben das neue integrierte System aus Messgerät und halbautomatischer Teleskopsteuerung ("OPTIMA-Burst") am Skinakas Observatorium (Kreta, Griechenland) vom 25. Juni bis 28. September 2006 eingesetzt. Obwohl wir keinen geeigneten Trigger durch den SWIFT Satelliten erhielten (2-3 Ereignisse wurden erwartet), konnten doch ausführliche photo-polarimetrische Messungen an kataklysmischen Variablen und koordinierte Messungen zwischen OPTIMA und den TeV Teleskopen HESS und MAGIC an BL Lac Objekten durchgeführt werden.

Im Jahr 2005 haben wir (MPE und HLL) begonnen einen neuen, sehr effizienten pnCCD Detektor zur Abbildung einzelner Photonen im Wellenlängenbereich 350-1100 nm zu entwickeln. Die wesentliche Modifikationen, um aus dem "klassischen" Röntgen pnCCD mit paralleler Ausleseelektronik einen schnellen optischen Detektor für Einzelphotonen zu machen, bestehen in der Entwicklung einer breitbandigen optischen Vergütung des Siliziumdetektors (optisches Fenster) und im Einsatz von linearen Avalanche Verstärkern direkt auf dem Detektor. Die Ausleserate sollte bis zu 1000 Bilder/Sekunde betragen und damit eine Zeitauflösung im Millisekundenbereich ermöglichen. Die ersten Produktionen von Komponenten im Halbleiterlabor sind fertig und erbrachten die erwarteten guten Ergebnisse.



Abb. 1: Der GLAST Burst Monitor (GBM) wurde auf dem GLAST Satelliten integriert. Sechs zylindrische Natriumjodid Detektoren (rote Kennzeichnung auf den Detektorkappen) und die Stromversorgung (schwarze Elektronikeinheit) sind sichtbar.

Die INTEGRAL Mission

INTEGRAL ist eine der mittelgrossen ESA Missionen. Sie ermöglicht Messungen nicht-thermischer, hochenergetischer Strahlung im Energiebereich 15 - 8000 keV. INTEGRAL wurde im Oktober 2002 für eine nominelle Missionsdauer von 3 Jahren gestartet. Aufgrund der exzellenten Funktionsweise aller Komponenten und der wissenschaftlichen Erfolge entschied sich ESA schnell, den Betrieb zu verlängern. Die derzeitige Finanzierungssicherung endet 2010.

INTEGRAL besitzt Haupt-Teleskope: IBIS zwei ist optimiert zu bisher in diesem Energiebereich unerreichter hochauflösender Abbildung (Bogenminuten), SPI ist optimiert zu bisher unerreichter Spektroskopie von Linien aus atomaren Kernen. Hilfssteleskope für Röntgen- und optische Emission aus den beobachteten Richtungen sowie ein Instrument zur Überwachung der Hintergrundstrahlung ergänzen diese Hauptinstrumente. Die INTEGRAL Umlaufbahn ist exzentrisch und erreicht bis zu 150000 km Erdentfernung. Dadurch wurde die instrumentelle Hintergrundstrahlung minimiert. Das Durchqueren erdnaher Strahlungsgürtel, aber noch

gutem Erfolg wiederholt worden. Die Spektralauflösung des SPI Spektrometers wird so auf dem für atomare Kernspektroskopie erforderlichen Niveau gehalten.

In seinen ersten Missionsjahren eröffnete INTEGRAL neuartige Einblicke in unsere Galaxis und ihre Objekte: Da Gammastrahlung Materie sehr gut durchdringt, entdeckte man so Doppelsternsysteme mit Materieströmen, die in dichten interstellaren Wolken eingebettet sind, sowie junge Neutronensterne mit starken Magnetfeldern und entsprechend intensiver Strahlung bei hohen Energien. Der zentrale Hauptrücken der galaktischen Ebene scheint eine noch unbekannte Art von Quellobjekten mit intensiver Hochenergie-Emission zu enthalten. Emission aus der Zerstrahlung von Anti-Elektronen wurde mit dem Spektrometer aus einer ausgedehnten und überraschend hellen Zentralregion in der Galaxie geortet. Mit seinen abbildenden Fähigkeiten konnte das Spektrometer unterschiedliche Dopplerverschiebungen der ²⁶Al Gammalinie (Abb. 1), die von der großräumigen galaktischen Rotationsbewegung verursacht werden, sowie Emission radioaktiven 60Fe Zerfalls aus der inneren Galaxie und



Abb. 1: SPI Messung des Linienprofils radioaktiven ²⁶Al. Dopplerverbreiterung durch die Bewegungen interstellaren Gases ist auf maximal ~1 keV entsprechend ~130 km/s beschränkt (siehe eingefügte Grafik).

mehr Ströme hochenergetischer Teilchenstrahlung von der Sonne und der weiträumigeren Sonnenumgebung in der Milchstrasse sind die Hauptursachen des alle Gammateleskope begrenzenden instrumentellen Hintergrunds. Kosmische Strahlen zerstören die Ladungssammlung in den Germanium Halbleiterdetektoren, die das Spektrometer nutzt. Erstmalig wurde hier im Weltraum eine Reparaturprozedur angewandt, die diese Kristalldefekte durch mehrtägiges Aufheizen auf ~100°C behebt. Dieses "Annealing" ist bisher 8-fach mit sehr ⁴⁴Ti Zerfalls vom Supernova-Überrest Cas A messen. Aus diesen Resultaten ergeben sich deutliche Konflikte mit den üblichen Theorien zum Aufbau massereicher Sterne und zum Verlauf ihrer Explosion als Supernova. Zudem tragen INTEGRAL Messungen der hochenergetischen Emission aktiver Galaxienkerne zum Verständnis dieser Objekte und ihres Beitrags zur diffusen kosmischen Hintergrundstrahlung bei. Das MPE leitet gemeinsam mit dem CESR in Toulouse den Spektrometer-Teil (SPI) des INTEGRAL Projekts.

Das MPI Halbleiterlabor – Silizium Detektoren für Hochgeschwindigkeitskameras

Das MPI Halbleiterlabor (MPI-HLL) wurde 1992 gegründet, in einem gemeinsamen Bestreben des MPE und des Max-Planck-Institutes für Physik. Es ist das Ziel des MPI-HLL für die Experimente der Institute neuartige Halbleiterdetektoren zu entwickeln, die auf dem Weltmarkt nicht verfügbar sind.

Für die astrophysikalische Mission eROSITA des MPE konzentrierten sich unsere Aktivitäten auf das Design, die Fertigung und das Testen der pnCCD Kamera. Die Arbeiten sind in vollem Gange und in Einklang mit dem Zeitplan des Proiektes. Die zweite Priorität hat die Entwicklung der Makropixel "aktiven Pixelsensoren" (APS), basierend auf den DEPFETs (Depletierte P-Kanal Feldeffekttransistoren) für das Röntgenspektrometer auf der ESA Mission BepiColombo sowie für den Niederenergiedetektor (0.5 keV bis 20 keV) auf der französisch-italienischen Mission SIMBOL-X. Beide Teleskope stützen sich auf die Technologie der XEUS Detektoren und stellen einen hilfreichen Zwischenschritt zur erwarteten ESA Mission XEUS dar. Eine neue Fertigung von DEPFET Matrizen, 16 mal größer als die früheren Detektoren, wird uns helfen kontinuierlich den XEUS Flugtyp-Bauelementen näher zu kommen, die mehr als 10⁶ Pixel aufweisen sollen.

Da die optischen Eigenschaften von pnCCDs herausragend sind (z.B. hohe Quanteneffizienz von 300 nm bis 1150 nm, keine Interferenzeffekte, hohe Geschwindigkeit, einen neuen Weltrekord bei rauscharmen linearen Verstärkersystemen aufstellt.

Nach dem unglaublichen Erfolg der Mars Rover "Spirit" und "Opportunity" (NASA), die mit Siliziumdriftdetektoren (SDDs) aus dem MPI-HLL ausgerüstet waren, beabsichtigt die Nachfolgemission EXOMars (ESA) ebenfalls ein Mössbauer-Spektrometer mit SDDs auszustatten. Das MPI für Chemie und die Universität Mainz sind dabei die wichtigsten Partner. Die SDDs werden zunehmend beliebter für alle Arten von spektroskopischen Anwendungen im wissenschaftlichen und industriellen Bereich.

Das pnCCD Testsystem hat gleichermaßen im Jahr 2006 seine Beliebtheit in der wissenschaftlichen Gemeinde bewiesen: als 2D-spektroskopische Kamera beim BESSY Synchrotron und beim HASYLAB, als Niederenergieröntgen-Kamera beim MPI für Quantenoptik, als Elektronenbildsensor in der Transmissionselektronenmikroskopie beim MPI für Biochemie in Martinsried und als Elektronendetektor in Channeling-Experimenten an der Universität Göttingen.

Im Jahr 2006 nahm die neue MPG Initiative "Center for Free Electron Laser studies" (CFEL) konkretere Gestalt an. Innerhalb CFEL wird das MPI-HLL seine Rolle einnehmen bei der Entwicklung neuer Instrumente für 2-dimensionale Intensitätsmessungen von gestreuter monochromatischer Röntgenstrahlung von 0.3 keV bis zu 25 keV.

niedriges Rauschen) werden sie nun, in Zusammenarbeit mit der ESO, als Wellenfrontsensoren für adaptive Optik-Systeme erprobt. Für zeitlich hochaufgelöste Astrophysik-Experimente entwickeln wir derzeit einen Avalanche-Verstärker, der monolithisch auf dem Siliziumchip an einen MOSFET (Metall Oxid Silizium Feldeffekttransistor) gekoppelt ist. Bei Betrieb im linearen Modus ermöglicht dieses Konzept den Nachweis von einzelnen optischen Photonen. Alle Kanäle des pnCCDs sind mit einem Avalanche-Verstärker abgeschlossen, wodurch die hohe Auslesegeschwindigkeit aufrechterhalten werden kann. Eine andere Technik sehr niedriges Rauschen zu erreichen, ist die wiederholte Auslese derselben Signalladung. Bei Temperaturen um -40°C liegt das geringste gemessene Rauschen bereits unter 0.2 Elektronen (rms), was



Abb. 1: Montage und elektrische Kontaktierung von Bauelementen im MPI Halbleiterlabor.

pnCCD Detektorentwicklung für eROSITA

Im Jahr 2006 führte das MPI Halbleiterlabor (MPI-HLL) ausführliche Tests mit den aktuellen pnCCDs, den Prototyp-Detektoren für die eROSITA Mission, durch, bevor die Fertigung der Flug-pnCCDs begonnen wurde. Das pnCCD und sein analoger Signalprozessor CAMEX basieren auf dem Konzept des überaus erfolgreichen XMM-Newton pnCCD Detektors, der seit dem Jahr 2000 Spektren und Bilder des Röntgenhimmels aufnimmt. Das eROSITA-Instrument wird schließlich mit sieben identischen und unabhängigen pnCCD-Kameras ausgerüstet.

Der neueste pnCCD ist ein 3-Phasen, rückseitenbeleuchtetes CCD, dessen gesamte Chipdicke von 450 μ m vollständig an Ladungsträgern verarmt ist. Die Schieberegister und das Photoneintrittsfenster sind als Bor-Implantationen in höchst reinem JFET (Sperrschicht-Feldeffekttransistor) ausgestattet, zur Verstärkung schon auf dem CCD und einer schnellen parallelen Auslese der Röntgensignale. Ein Bonddraht verbindet die Kathode des Transistors mit dem Eingang eines Kanals des analogen Signalprozessors CAMEX. Der programmierbare CAMEX (CMOS Verstärker und Multiplexer) erlaubt Verstärkung und Signalformung in 128 Kanälen gleichzeitig.

Die Prototyp-pnCCDs wurden hergestellt auf beidseitig polierten Wafern mit 150 mm Durchmesser und <100>Kristallorientierung. Sie haben eine 2cm x 2cm große Bildfläche, die aus 256 x 256 Pixeln aufgebaut ist. Für das eROSITA Flug-pnCCD wird eine größere Bildfläche von 3cm x 3cm gefordert, um die Effizienz des Instruments noch zu erhöhen. Diese neue Bildfläche, vergrößert auf 384 x 384 Pixel, bietet ein Gesichtsfeld



Abb. 1: Das Bild zeigt einen pnCCD Detektor, wie er in den Labormessungen verwendet wurde, zur Qualifizierung sowohl des pnCCDs als auch des Gesamtdetektorsystems. Links im Bild ist die Vorderseite des großen pnCCD Chips zu erkennen, während rechts die beiden benachbarten CAMEX Chips zu sehen sind. Röntgenphotonen fallen von der gegenüberliegenden Seite auf den rückseiten-beleuchteten Detektor ein.

n-Typ Silizium ausgeführt. Sie müssen im Falle des Strahlungseintrittsfensters (Rückseite) extrem flach und gleichmäßig über die gesamte Bildfläche ausgeführt werden. Dadurch wird eine Quanteneffizienz über 90% von 0.3 keV bis 11 keV erreicht. Die Ladung wird in einer Tiefe von etwa 7 µm unter der Vorderseite transportiert. Alle CCD Transferkanäle sind mit einer Anode und einem

von 1° Durchmesser. Da im Wesentlichen nur die Anzahl der Pixel geändert wird, aber nicht ihre Größe von 75µm x 75µm, ihre Struktur oder das Photoneintrittsfenster, sollten die mit den Prototyp-pnCCDs gemessenen Ergebnisse auch später auch für die Flug-CCDs zutreffen. Layout, Fertigung und Tests der Bauelemente werden in unserem Halbleiterlabor (MPI-HLL) durchgeführt. Der Zweck der Tests mit Prototyp-pnCCDs den war, hinreichend viele Informationen über die Detektoreigenschaften zu gewinnen, um ein Redesign der eROSITA Flug-pnCCDs durchführen Flug-CCDund die Fertigung noch in 2006 beginnen zu können.

Der eROSITA Prototyp-CAMEX wurde zuerst nach seiner Fertigung auf dem Wafer und dann als Teil des pnCCD Detektorsystems untersucht. Die Resultate wawichtig abermals ren für das Design der Flugtyp ASICs (anwendungsspezifische integrierte Halbleiterschaltkreise), vor allem Zwecke zum Optimierung der des **Betriebes** und der Leistungsmerkmale.



 Abb. 2: C-K (277 eV) sowie O-K (525 eV) Spektrum gemessen mit einem eROSITA PrototyppnCCD im Standard Bildspeichermodus. Das Photoneintrittsfenster ist mit einem optischen und UV-Filter ausgestattet, welches für den Betrieb im Weltraum benötigt wird. Als Betriebstemperatur verwendeten wir -60°C (also 20°C höher als für eROSITA geplant); als Bilddauer wurden 50 ms gewählt. Die Spektrallinien wurden mit einer Röntgenröhre erzeugt, wodurch zusätzlich ein Bremsstrahlungskontinuum angeregt wurde, vor allem bei höheren Energien.

Die Detektoreinheit besteht im Wesentlichen aus einer Mehrlagen-Leiterplatte, zwei CAMEX Chips (bzw. schließlich drei CAMEX Chips für die größeren eROSITA Flug-CCDs) und dem pnCCD (Abb. 1).

Ein Datennahme-System (DAQ) wurde zusammen mit Analyseprogrammen entwickelt für die experimentellen Tests des CCDDetektorsmit CAMEXAnalog signalprozessor. Der gesamte Aufbau war geeignet für die Tests im Labor, aber nicht qualifiziert für den Flug- oder Weltraumeinsatz. Dafür bot er die, während der Entwicklungsphase, notwendige Flexibilität.

Das mittlere Ausleserauschen des pnCCDs, gemessen eROSITA relevanten Betriebsbedingungen unter Temperatur (-80°C) hinsichtlich und Bildrate (20 Bilder/s), beträgt 2.2 Elektronen Effektivwert. Das bedeutet eine Rauschabsenkung auf die Hälfte des pnCCD Detektors vom XMM-Newton Typ. Die Zahl der Pixeldefekte konnte weiter minimiert werden; mehrere pnCCDs wiesen sogar keinen einzigen Pixeldefekt auf. Die Messungen zeigten eine kleine Nichtlinearität des CAMEX Verstärkers, die im Redesign des Chips behoben wurde. Ein CCD-Pixel ist viermal kleiner als der XMM-Newton pnCCD. Dardurch erhält man hauptsächlich Splitereignisse, d.h. die von einem Röntgenphoton

erzeugten Signalelektronen verteilen sich auf bis zu vier Pixel. Das richtige Zusammenführen der Splitereignisse ist daher notwendig für die Analyse der Energieauflösung.

Bei sehr niedrigen Röntgenenergien (<0.5 keV) konnten wir im Gegensatz zu den XMM-Newton pnCCDs eine hervorragende Energieauflösung messen, beispielsweise eine Halbwertsbreite von nur 50 eV für die Kohlenstofflinie bei 277 eV (Abb. 2).

Die neuen pnCCDs ermöglichen im Unterschied zu den XMM-Newton-Typ pnCCDs einen Betrieb im Bildtransfer- oder Bildspeichermodus. Das bedeutet, das vorangegangene Bild wird während der Auslese in einen Speicherbereich auf dem CCD temporär abgelegt. Durch diesen Betriebsmodus wird eine Verschmierung des Bildes entlang der Schieberichtung vermieden.

Das pnCCD und der dazugehörige analoge Signalprozessor CAMEX zeigten ausgezeichnete Leistungsmerkmale in den Untersuchungen; noch bessere als alle vorangegangenen pnCCD Detektoren einschließlich des XMM-Newton pnCCDs. Gleichwohl erkannten wir kleine Probleme, mit denen wir uns im Redesign der beiden Bauelemente befassten. Die eROSITA Flug-pnCCDs und CAMEX Chips werden derzeit gefertigt. Einer der bereits getesteten pnCCD-Detektoren wird in der PANTER-Testanlage ab 2007 dazu dienen, verschiedenartige Röntgenteleskope zu kalibrieren.
3.4 KOMPLEXE PLASMEN

Die Erforschung von komplexen Plasmen ist ein schnell wachsendes Feld in der physikalischen Grundlagenforschung mit Anwendungen in vielen anderen Gebieten, so z. B. in der Festkörper- und Flüssigkeitsphysik. Der Grund dafür liegt darin, dass Phänomene in komplexen Plasmen, wie z.B. das Schmelzen, auf dem fundamentalsten, dem kinetischen Level, untersucht werden können. Kristalle oder Flüssigkeit sind aus Teilchen von Mikrometergröße gebildet, die – wegen ihrer elektrostatischen Wechselwirkung - in Abständen von Millimetern angeordnet sind. Diese sogenannten Mikropartikel werden mit einem Laserstrahl beleuchtet und dann einfach mit CCD Kameras aufgenommen. Dies ermöglicht eine Verfolgung der Teilchen über lange Zeiten und mit höchster Genauigkeit. Die oben erwähnten Eigenschaften erlauben uns, das komplexe Plasma als Modellsystem für Festkörper und Flüssigkeiten anzusehen. Zusätzlich ergeben sich durch Ladungsfluktuationen und -kannibalismus, sogenannte Nicht-Hamiltonische Effekte, neue physikalische Bedingungen, die das komplexe Plasma als solches interessant machen.

Um einen großen Phasenraum der komplexen Plasmen abzudecken, sind Untersuchungen mit unterschiedlichsten Aufbauten notwendig, jede davon mit einzigartigen und speziellen Eigenschaften. In den letzten 9 Jahren,

seit Gründung dieser experimentellen Gruppe am MPE, wurden deshalb mehrere Labore eingerichtet. Speziell während der fünfjährigen Laufzeit unserer Kooperation CIPS (Centre for Interdisciplinary Plasma Science) mit dem Max-Planck-Institut für Plasmaphysik (IPP), gesondert finanziert durch die MPG, wurden neue Labore eingerichtet. Zum Beispiel das starke Magnetlabor (4 Tesla), das erstmals die Untersuchung stark gekoppelter, stark magnetisierter komplexer Plasmen erlaubt, oder das PAGE (PArticle Growth Experiment, in Kooperation mit IPP) Labor, ein Partikelwachstumsexperiment mit dem Ziel, Diamanten höchster Qualität zu erzeugen. CIPS wird in kleinerem Rahmen mit der Gründung MPG-Forschungsgruppe "Experimentelle der komplexe Plasmen" weitergeführt. Andere Labore wurden teilweise über Drittmittel vom DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) finanziert, wie das für adaptive Elektroden und Kryoplasmen und natürlich auch die wissenschaftlichen Labore für die Experimente in Schwerelosigkeit "PK-3 Plus" und "PK-4".

Schwerelosigkeit ist zwingend erforderlich in der Erforschung komplexer Plasmen. Die Mikroteilchen sind etwa 10⁹ mal schwerer als Atome, haben die Größen von Staubteilchen, weshalb die Schwerkraft eine sehr wichtige Rolle spielt und zu einer Belastung und Inhomogenität des Systems führt. Das MPE ist deshalb die Untersuchung komplexer Plasmen unter Schwerelosigkeit sehr früh in der Historie dieses neuen Forschungszweiges angegangen; eigentlich war die Idee der Kristallisation eines komplexen Plasmas in Abwesenheit von Schwerkraft der Beginn der Arbeiten am Institut. 1996 begann dann mit Parabelflügen die eigentliche Ära der Schwerelosigkeitsexperimente, gefolgt von einer Kampagne mit Höhenforschungsraketen. Seit 2001 hat das Institut ein permanentes Labor auf der Internationalen Raumstation ISS, das in enger Kooperation mit dem russischen Akademieinstitut IHED (Institute for High Energy Densities) in Moskau betrieben wird. PKE-Nefedov war das erste Langzeit-Experiment für komplexe Plasmen auf der ISS und war 4½ Jahre in Betrieb. Seit Januar 2006 wird mit dem Nachfolgelabor "PK-3 Plus" auf der ISS gearbeitet (siehe ausgewähltes Projekt).

Derzeit wird das Labor "PK-4" entwickelt; eine Phase A/B Studie, finanziert durch die ESA, wurde Anfang des Jahres begonnen. "PK-4" ist, verglichen zu seinen Vorgängern, ein vollkommen neu entwickelter Apparat. Das wissenschaftliche Hauptziel ist die Untersuchung der flüssigen Eigenschaften komplexer Plasmen, wie z.B. der Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung, superkritische Flüssigkeiten und der kritische Punkt. Das Projekt basiert auf Laborentwicklungen seit 2002 und erfolgreichen Parabelflügen. 2006 fanden dazu viele wissenschaftliche und projektbezogene Treffen



Abb. 1: Messungen mit dem "PK-4" Experiment während Schwerelosigkeit auf einen Parabelflug in Bordeaux.

statt, um die wissenschaftlichen Anforderungen und Ziele zu definieren und die technischen Möglichkeiten zu diskutieren. Parallel dazu wurde der Versuchsaufbau auf Parabelflügen geflogen, mit dem Ziel, die technischen Entwicklungen in Kurzzeit-Schwerelosigkeit (jede der 93 Parabeln bietet etwa 20 Sekunden Schwerelosigkeit) zu testen. Neben den rein technologischen Erkenntnissen, ergaben sich aber auch interessante wissenschaftliche Ergebnisse.

"PK-3 Plus" – Komplexe Plasmen auf der ISS

Anfang 2006 hat die operationelle Phase unseres "PK-3 Plus" Labors auf der Internationalen Raumstation ISS erfolgreich begonnen. "PK-3 Plus" wurde hauptsächlich am MPE entwickelt und gebaut, mit Unterstützung der deutschen Weltraumfirma "Kayser-Threde" und finanziert durch das DLR. Das PK-Programm (Plasma-Kristall) beruht auf einer Kooperation zwischen unserem Institut und dem Russischen Akademieinstitut für High Energy Densities (IHED) in Moskau. Diese Partnerschaft ermöglicht uns den freien Zugang zur ISS.

Die International Raumstation ISS ist eine ideale Plattform für die Forschung unter Schwerelosigkeit. Das MPE nutzt dies schon seit Beginn der Besiedelung unseres "Außenpostens" im Weltraum im Jahre 2001, zusammen mit unserem Russischen Partner IHED. "PKE-Nefedov", naturwissenschaftliche das erste Langzeitexperiment, war mehr als vier Jahre auf der ISS in Betrieb, mit einem wissenschaftlichen Erfolg, der sich in mehr als 30 referierten Veröffentlichungen zeigte. Wegen des Wissensgewinns durch diese Experimente auf der ISS, konnten wir ein neues, deutlich verbessertes Nachfolgelabor entwickeln und bauen. Dieses sogenannte "PK-3 Plus" Labor wurde im Dezember 2005 von Baikonur mit einer Progress-Rakete zur ISS gebracht und ist seit Januar 2006 in Betrieb.

Bisher wurden vier Experimentserien durchgeführt. Die speziellen Eigenschaften von "PK-3 Plus" erlauben die detaillierte Erforschung komplexer Plasmen unter Schwerelosigkeit. Verglichen zum Vorläufer-Experiment "PKE-Nefedov", bietet das System eine deutlich bessere Homogenität und Symmetrie des komplexen Plasmas, dazu stark verbesserte Diagnostikmöglichkeiten. Damit können wir genaue Experimente, z.B. zur Bildung von Plasmakristallen durchführen.

Die erste Experiment-Mission wurde von Kosmonaut Valerie Tokarev vom 10. bis 16. Januar durchgeführt. Schon das erste zum Kontrollzentrum übertragene



Abb. 1: Wissenschaftler verfolgen im Kontrollzentrum Korolov das erste Experiment, das auf der ISS von Kosmonaut Valerie Tokarev im Januar 2006 durchgeführt wird.



Abb. 2: Homogene Verteilung des komplexen Plasmas unter Schwerelosigkeit.

Live-Video vom Experiment zeigte die verbesserten Eigenschaften der Apparatur, besonders bezüglich

Homogenität und Isotropie des komplexen Plasmas. Abbildung 2 zeigt dies vom dynamischen Standpunkt aus. Die Gruppe der Wissenschaftler, Ingenieure und Offiziellen der deutschen und russischen Seite verfolgten diese Experimente leidenschaftlich und begeistert vom Kontrollzentrum in Korolov nahe Moskau (Abb. 1). Die Wissenschaftler erhielten die experimentellen Daten im April. nach deren Transport mit einer Sojus Rakete im Handgepäck des Kosmonauten. Dies war gerade noch rechtzeitig für die Planung der nächsten Experimentserie im August.

Im August wurde dann eine Doppelmission mit insgesamt 6 Experimenten durchgeführt. Die Crewzeit wurde aufgeteilt zwischen dem russischen Kosmonauten Pavel Vinogradov



Abb. 3: Der deutsche ESA Astronaut Thomas Reiter an Bord der ISS mit dem "PK-3 Plus" Labor. Der Experiment-Behälter ist im Service Modul installiert. (Bild: NASA)

Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen bei München, Studenten von europäischen Partneruniversitäten via Internet. Prof. G. Morfill war der Vortragende am Boden.

Die russische Kosmonauten und Helden Yuri Baturin, Yuri Gidzenko, Sergey Krikalev und Valerie Tokarev nahmen Anfang Oktober am ersten wissenschaftlichen "PK-3 Plus" Symposium am MPE teil. Zusätzlich wurde eine große Delegation unserer russischen Partner eingeladen, darunter Wissenschaftler, Ingenieure von RKK-Energia und Offizielle vom Yuri Gagarin Kosmonauten-Trainingszentrum. Zu Beginn des Symposiums wurde die Delegation in alte bayrische Traditionen auf dem Oktoberfest eingeweiht. Nach der Feier traf sich die gesamte zwei Delegation aufeinander an folgenden Tagen am Institut zur Diskussion der Vergangenheit,

und dem deutschen ESA Astronauten Thomas Reiter. Für Thomas Reiters Astrolab Mission wurde "PK-3 Plus" für ESA Wissenschaftler auf der Basis einer wissenschaftlichen Kooperation geöffnet. Dieses, eigentlich rein russischdeutsche Projekt, profitierte auch von diesem Abkommen, da es mit neuen wissenschaftlichen Themen bereichert wurde, die dann auch in zusätzlichen Experimenten bearbeitet wurden. Speziell die Suche nach dem kritischen Punkt beim Übergang von flüssig nach gasförmigen in komplexen Plasmen war eines dieser Themen. Neben den, im Prinzip rein automatisch ablaufenden sogenannten Basisexperimenten, haben Pavel Vinogradov und Thomas Reiter auch manuelle Experimente erfolgreich durchgeführt. Dabei waren Astronaut und Kosmonaut der direkte, verlängerte Arm der Wissenschaft. Letztere Experimente benötigten spezielles Training an der Apparatur, aber auch wissenschaftliches Verständnis. Die Wissenschaftler

im Kontrollzentrum folgten den Experimenten und waren ständig mit dem Astronaut/Kosmonaut via Sprechverbindung zur ISS in Kontakt.

Thomas Reiter hat im Oktober noch eine zweite Serie von Experimenten gemacht, die auch wieder von der ESA finanziert wurden. Zusätzlich hielt Thomas Reiter von der ISS aus eine Vorlesung über das "PK-3 Plus" Labor und dessen Wissenschaft für eine Gruppe von Studenten, die am "EuMAS Masters Programme in Aeronautics and Space Technology" teilnehmen. Die Studenten der Technischen Universität München hörten diese Vorlesung im Columbus



Abb. 4: Sergey Krikalev, Kosmonaut, russischer Held, Weltrekordhalter vom Aufenthalt im Weltraum und Vize-Präsident der russischen Raumfahrtfirma RKK-Energia bei seinem ersten Versuch ein Bierfass anzuzapfen (kleines Bild) und mit dem Projektleiter von "PK-3 Plus" Gregor Morfill während einer Feier am Institut.

Gegenwart und Zukunft unserer gemeinsamen Forschung auf der ISS. Neben den neuesten wissenschaftlichen Ergebnissen der Experimente vom August, präsentiert von den Wissenschaftlern, berichteten die anwesenden Kosmonauten detailliert ihre Erfahrungen beim Experimentieren mit "PK-3 Plus" im All, speziell bezüglich der Experimentdurchführung sowie der Hard- und Software. Diese Erfahrungen können positiv in zukünftige Experimentserien eingebracht werden.

3.5 OPTISCHE UND INTERPRETATIVE ASTRONOMIE (OPINAS)

Während des letzten Jahres war die OPINAS Gruppe am Bau verschiedener Instrumente, der Entwicklung von entsprechender Software und der Planung wissenschaftlicher Projekte beteiligt. Dazu gehören der Nahinfrarot-Spektrograph KMOS für das VLT, die Erweiterung des Wendelstein Observatoriums, HETDEX für das HET Teleskop, die ESO Public Survey Programme KIDS und VIKING an VST und VISTA, das AstroWise Software Paket zur Reduktion von Weitfeld-Kamera Daten, und PanSTARRS.

Die Mitarbeit am Bau von KMOS verlief erfolgreich und wie geplant. KMOS ist eines der Instrumente zweiter Generation für das VLT. Es handelt sich um einen Infrarot-Spektrographen mit ausschwenkbaren feldabbildenden Einheiten (IFUs), von denen jede in der Lage ist, 196 Spektren in einem Feld von 2.8"x 2.8" und einer Auflösung von 0.2"x 0.2" Pixel (R~4000) aufzunehmen. Der Wellenlängenbereich erstreckt sich von I bis zum K-Band. Das am Bau von KMOS beteiligte Konsortium setzt sich zusammen aus dem UK Astronomy Technology Center, den Universitäten von Durham und Oxford, dem MPE sowie der Universitätssternwarte der Ludwig-Maximilians-Universität (LMU) in Zusammenarbeit mit der ESO. Ein wichtiger Meilenstein wurde erreicht, als im Preliminary Design Review (Juni-September 2006) ein 24armiger Prototyp vorgestellt wurde, der unter kryogenen Bedingungen funktionierte. Das Projekt liegt im Zeitplan und KMOS wird 2010 in Betrieb gehen.

Der LMU-Teil der OPINAS Gruppe betreibt 60 Kilometer südlich von München das Wendelstein Observatorium. Bezüglich des dortigen 80cm Teleskop gab es 2006 drei bedeutende Entwicklungen: Zunächst ist der Bau einer Zweikanal-Kamera fast fertig, welche simultane Beobachtungen in B, V, R, und I Filtern zulässt und dabei Bilder von 12' x 12' mit einer Pixelskala von 0.35" liefert. Die Kamera wird eine ältere Kamera ersetzen und am neuen 2 m Roboterteleskop zum Einsatz kommen. Dieses soll seinerseits das 80cm Teleskop ersetzen. Die Inbetriebnahme ist für 2010 geplant. Außerdem ist die OPINAS Gruppe am Exzellenz Cluster "Fundamentale Physik" der LMU zusammen mit der Max-Planck-Gesellschaft, der Technischen Universität München und der ESO beteiligt. Dabei sind 1,7 Millionen Euro für Entwicklung und Bau (gemeinsam mit der Röntgengruppe des MPE) einer neuen optischen und Nahinfrarotkamera für das neue Wendelsteinteleskop vorgesehen.

Die OPINAS Gruppe ist am Hobby-Eberly Teleskop (HET) beteiligt und hat daher Anrecht auf 7% der Beobachtungszeit. HET ist das 10m Teleskop mit fester Elevation des McDonald Observatoriums in Texas. Zusammen mit Astronomen der Texas University in Austin hat die OPINAS Gruppe eine Studie begonnen, um das nächste Instrument für HET zu entwickeln, den Visible IFU Replicable Ultracheap Spectrograph (VIRUS) für das HET Dark Energy eXperiment (HETDEX). VIRUS wird aus 145 Kopien eines 147fasrigen IFUs bestehen.

Jede, der in rechteckigen Blöcken angeordneten Einheiten, wird einen Durchmesser von 1 Bogensekunde haben. VIRUS wird gleichzeitig Spektren über ~7,8 Quadratbogenminuten liefern können (3300 - 5700 Å). Die wissenschaftliche Motivation für das Projekt ist die Bestimmung der Zustandsgleichung der Dunklen Energie bei einer Rotverschiebung von 1,8 bis 3,7. Dazu wird das Leistungsspektrum von Ly-α emittierenden Objekten über eine Fläche von 500 Quadratgrad gemessen. Die Finanzierung des Baus von HETDEX ist zu ~50% gesichert. Weitere Finanzierungsanträge zur Abdeckung der verbleibenden Hälfte sind gestellt. VIRUS-P, ein Prototyp des Spektrographen, wurde fertiggestellt und am 2,7 m McDonald Teleskop getestet. Wegen der unterschiedlichen Skala überdeckt das Faserbündel ~0.86 Quadratbogenminuten und ist nur 4.5 m lang (zum Vergleich: die HETDEX-Fasern werden 11 m lang sein). Der Beitrag der OPINAS Gruppe zum Prototyp besteht im Kauf der Optik und der Entwicklung von Software für die Aufnahme und Reduktion der Daten. In den nächsten sechs Monaten wird das Instrument getestet, um zu überprüfen, ob die Empfindlichkeit, die für HETDEX angestrebt wird, erreicht werden kann, und ob die Oberflächendichte von Ly-a emittierenden Objekten der Erwartung entspricht.



Abb. 1: Künstlerisch Darstellung des VIRUS Spektrographen am Hobby-Eberly Teleskop (HET).

Weiterhin war die Gruppe an der Planung von KIDS (mit OmegaCam am VST) und VIKING mit dem VISTA-Teleskop, sowie der 3π Durchmusterung mit dem PanSTARRS1-Teleskop beteiligt, welche Vielfarbenphotometrie (in infraroten und optischen Filtern) großer Flächen am Himmel zum Ziel haben. Damit wird die Bestimmung von photometrischen Rotverschiebungen von Millionen von Galaxien und die Untersuchung der Zustandsgleichung der rätselhaften Dunklen Energie ermöglicht, die 70% der gesamten Energiedichte des Universums ausmacht. Die nächsten beiden Beiträge beschreiben diese Projekte im Detail, und gehen dabei auch auf die Software ein, die zur Bewältigung des erwarteten riesigen Datenflusses vorgesehen ist.

OmegaCam und die KIDS und VIKING Durchmusterungen

In den nächsten vier Jahren werden die ESO Public Surveys "KIDS" und "VIKING" etwa 1500 Quadratgrad des Himmels in verschiedenen optischen und infraroten Filtern beobachten. Dazu wird OmegaCam am VST und das VISTA-Teleskop benutzt. Diese Durchmusterungen werden etwa 2 Magnituden empfindlicher als SLOAN sein. Um den zu erwartenden großen Datenfluss bearbeiten zu können, wurde das Software Paket AstroWise entwickelt.

Die "1-Quadratgrad"-Kamera OmegaCam für das VLT wurde von der OPINAS-Gruppe in Zusammenarbeit mit einem holländisch-italienischen Konsortium gebaut. Wegen Verzögerungen beim Bau des Teleskops (Abb. 1) konnte sie bisher noch nicht abgegeben werden. In der Zwischenzeit hat die OPINAS-Gruppe die Konzeption zweier ESO Public Surveys endgültig festgelegt. Unser großen Anteil an der Beobachtungszeit am VST und am VISTA Teleskop (dem nahinfraroten Gegenstück zum VST) wird dabei von Nutzen sein. Der Kilo Degree Survey (KIDS) ist eine deutsch-holländisch-italienisch-britische Kollaboration, deren Ziel es ist, 1500 Quadratgrad in den optischen Bändern u,g,r,i bis zu etwa 2 Magnituden tiefer als der SLOAN Survey und mit sehr viel besserem Seeing (im Besonderen mit einer Halbwertsbreite von 0.7" im r Filter) zu beobachten. Die wissenschaftliche Motivation ist dabei 1) die Einschränkung der Zustandsgleichung der dunklen Energie mit Hilfe der baryonischen akustischen Oszillationen (BAO) in der räumlichen Verteilung von etwa 50 Millionen Galaxien bei z~1, die als fester Maßstab verwendet werden, 2) die Messung der im kosmologischen Gravitationslinseneffekts auftretenden Scherung und der statistischen Eigenschaften der dunklen Halos aus dem Gravitationslinseneffekt einzelner Galaxien, 3) die Entdeckung von seltenen hellen, hochrotverschobenen Quasaren und Galaxien und 4) eine Zählung der unübertroffenen Menge massereicher Galaxienhaufen bei hoher Rotverschiebung. Das nahinfrarote Gegenstück zu KIDS ist der VISTA Kilo-degree INfrared Galaxy survey (VIKING). Diese Durchmusterung wird die gleiche Fläche wie KIDS überdecken und soll in den Filtern z,Y,J,H, und K 1,5 Magnituden tiefer sein als die im Moment bereits laufende UKIDSS-Durchmusterung. Zusammen mit KIDS liefert VIKING photometrische Rotverschiebungen mit einer Genauigkeit von 2% für alle Galaxien mit R-Helligkeiten größer als 23.5, und damit einen optimalen Datensatz zur Durchführung des oben beschriebenen BAO-Experiments. Daneben wird die Entdeckung von vielen ultra-kalten weißen und braunen Zwergen möglich. KIDS und VISTA sind vom ESO Observing Programs Committee befürwortet worden, und werden hoffentlich in der zweiten Hälfte des Jahres 2007 begonnen und innerhalb von 3 bis 4 Jahren fertiggestellt werden.

Tatsächlich durchführbar werden diese Projekte erst durch das AstroWise Software Paket. Das KIDS-Konsortium ist verpflichtet, der europäischen astronomischen Gemeinde die astrometrisch und photometrisch kalibrierten, vollständig reduzierten u,g,r,i Aufnahmen innerhalb von 6 Monaten nach der Beobachtung am Teleskop zur Verfügung zu stellen. Der erwartete Datenfluss ist beträchtlich und kann nur mit Hilfe von AstroWise bewältigt werden. Das Programmpaket wurde im Rahmen einer von der EU finanzierten Kollaboration entwickelt, die die sich aus unserer OPINAS-Gruppe, den Universitäten von Leiden, Groningen und Paris sowie dem Neapolitanischen Capodimonte Observatorium zusammensetzt. Das Projekt endete im November 2006 mit der Ablieferung der Software und der entsprechenden Dokumentation. Das Paket realisiert einen innovativen Ansatz, astronomische Daten zu reduzieren: Dem Benutzer ist es möglich, gewünschte Daten aus dem System "herauszuziehen" (zum Beispiel indem nach allen für bestimmte Koordinaten am Himmel verfügbaren Daten gesucht wird), im Gegensatz zu der klassischen Vorgehensweise, die Rohdaten durch das System zu "schieben", um zu festen Zeiten einen reduzierten Datensatz zu erhalten. Das Hauptmerkmal des Systems, welches uns erlauben wird, die Durchführung der Projekte KIDS und VISTA auf verschiedene Knotenpunkte zu verteilen, ist die Möglichkeit, eine Datenbank mit anderen, über die ganze Welt verteilen Datenbanken zu verbinden. Dies eröffnet die Möglichkeit, Kalibrations-Dateien und Kontroll-Software Versionen zu teilen und einen homogenen Qualitätsstandard zu erreichen.



Abb. 1: Die Kuppel des ESO VLT Survey Teleskops (VST) auf dem Berg "Cerro Paranal" in Chile.

Das PanSTARRS1 Projekt

In den nächsten vier Jahren wird PanSTARRS1 ³/₄ des Himmels in fünf Filtern (g,r,i,z,y) beobachten. Die Durchmusterung wird mindestens eine Magnitude tiefer sein als bei der SLOAN Durchmusterung.

PanSTARRS1 (Panoramic Survey Telescope & Rapid Response System) wurde an der Universtät von Hawaii geplant und entwickelt. Das MPE trat dem Konsortium gemeinsam mit dem Max-Planck-Institut für Astronomie in Heidelberg (MPIA), dem Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics und der Johns-Hopkins University in Amerika, sowie den Universtäten von Durham, Edinburgh und Belfast in Großbritannien im September 2006 bei.

Das 1.8 m Teleskop, das auf Haleakala, Maui errichtet wurde, wird mit der bislang weltweit größten CCD-Kamera ausgestattet sein: In einer Belichtung können 7 Quadratgrad des Himmels mit einer Auflösung von 0.3" abgebildet werden. PS1 ist das Pilotprojekt für PanSTARRS4, vier Teleskop-Kamera-Einheiten der Größe und des Typs von PS1. Mit ihren 1.4 Gigapixeln (zusammengesetzt aus 64 x 64 rot-empfindlichen CCDs zu je 600x600 Pixeln) ist die Kamera der innovativste Teil des Systems. Sie erlaubt orthogonalen Ladungstransport und damit tiptilt-Korrektur auf dem Chip, was eine drastische Verbesserung der Bildqualität bedeutet. Die Filter überdecken den Wellenlängenbereich vom Grünen bis zum Nahinfraroten (g, r, i, z und y). Das Teleskop (Abb. 1) hatte im Juni 2006 erstes Licht. Der Bau der verschiedenen Teile (Kuppel, Teleskop, Kamera, Filter, Dewar, Hard- und Software zur Datenverarbeitung) gehen plangemäß voran und mit regulären Beobachtungen soll im Frühling 2007 begonnen werden. Das wichtigste wissenschaftliche Projekt ist die " 3π "-Durchmusterung. Dabei soll während der Gesamtlaufzeit der Durchmusterung (3¹/₂ Jahre) der gesamte, von Hawaii aus, sichtbare Himmel in allen Filtern 14 Mal beobachtet werden, wobei die addierten Bilder bis zu 1.7 mal empfindlicher als bei SLOAN sein sollen. Die 14 Einzelaufnahmen erlauben auch Variabilitätsstudien und den Test von Asteroiden-Suchprogrammen. Das Hauptinteresse der OPINAS Gruppe erwächst aus der Möglichkeit, über eine riesige Fläche am Himmel für eine große Zahl sogenannter "Heller Roter Galaxien" genaue photometrische Rotverschiebungen zu bestimmen, um dann das Leistungsspektrum und damit die Zustandsgleichung der Dunklen Energie messen zu können. Weitere 82 Quadratgrad werden zu noch viel tieferen Grenzhelligkeiten beobachtet (~26 mag). Hier können dank der tiefen Belichtung interessante Aspekte der Galaxienentwicklung (Leuchtkraftfunktionen, Sternentstehungsraten usw.) untersucht werden. Schließlich regte die OPINAS Gruppe gemeinsam mit dem MPIA zwei weitere, auf Variabilitätsstudien beruhende, Projekte an. Das erste, PAndromeda, wird M31 überwachen, um mit Hilfe des Pixel-lensing Effekts nach sogenannten MACHOs (massive

compact halo objects) zu suchen und damit den baryonischen Anteil des dunklen Halos von M31 bestimmen zu können. Wenn ein MACHO die Sichtlinie zu einem Stern (in M31) durchquert, dann wird das Licht des Sterns durch seine gravitative Anziehungskraft gebündelt, und das entsprechende Pixel erscheint heller. Der zeitliche Verlauf eines solchen Ereignisses ist sehr genau definiert, so dass eine detaillierte Analyse der Lichtkurven eine statistische Bestimmung der Eigenschaften der MA-CHOs, wie z.B. Massenspektrum und -verteilung, zulässt. Im zweiten Variabilitätsprojekt, PanPlanets, wird mit Hilfe der Transit-Methode nach extrasolaren Planeten gesucht. Dabei werden Lichtkurven von Millionen von Sternen in dichten Galaktischen Feldern gemessen, die auf die Signatur (Abschwächung der Helligkeit um 1-2% während einer 2-3 stündigen Bedeckung) eines sie umkreisenden jupiterähnlichen Riesenplaneten untersucht werden.



Abb. 1: Das PanSTARRS1 Teleskop auf dem Gipfel von Haleakala, Maui (Hawaii).

Neben der finanziellen Unterstützung wissenschaftlicher Projekte hat die MPG auch Mittel für Computer bereitgestellt, um den zu erwartenden riesigen Datenstrom (12 TBytes pro Monat) auswerten zu können.

3.6 WISSENSTRANSFER

Die Arbeitsgruppe "Komplexe Systeme" ist Teil der Theorieabteilung und beschäftigt sich vornehmlich mit der Entwicklung und der Anwendung komplexer wissenschaftlicher Datenanalyse-Methoden. Die vielfältigen Techniken leiten sich insbesondere aus Konzepten der nichtlinearen Datenanalyse, Elementen der Graphentheorie und Grundüberlegungen der Informationstheorie ab.

Auf der Basis dieser Konzepte beschäftigen wir uns z.B. mit der geeigneten Einbettung von Daten in mehr dimensionalen Zustandsräumen sowie der quantitativen Beschreibung der resultierenden Punktverteilungen im Hinblick auf ihre Skalierungs- oder Attraktoreigenschaften. Besonderes Interesse gilt dabei der Untersuchung von Ähnlichkeiten und Synchronisationsphänomenen mit Hilfe informationstheoretischer Maße, die sensitiv nicht nur für lineare, sondern auch nichtlineare Korrelationen sind.



Abb. 1: Darstellung einer osteoporotischen (links) und einer gesunden (rechts) Knochenstruktur mittels Skalierungs-Index-Methode. Die μ-ct Aufnahmen haben jeweils einen Durchmesser von etwa 6 mm. Die errechneten Skalierungsindizes jedes Voxels erlauben die Unterscheidung punktförmiger (blau), stäbchenförmiger (grün) und flächiger (gelb bis rot) Strukturelemente und helfen schließlich, Patienten mit hohem Knochenbruch-Risiko zu erkennen.

Relationen zwischen Objekten werden mit Distanzmaßen untersucht, die von grundlegenden Informationsmaßen abgeleitet sind (z.B. der Mutuelle Information oder Kullback-Leibler-Entropie), und mittels hierarchischer Bäume dargestellt. Die Daten können dabei von sehr unterschiedlicher Modalität sein und umfassen Bilder, mathematische Abbildungen oder Spektren in verschiedenen Wellenlängenbereichen.

In Zuge einer quantitativen Beschreibung komplexer Systeme sind statistische Methoden und neuentwickelte Surrogat-Daten-Techniken ganz wesentlich. Deshalb beschäftigen wir uns auch mit der Entwicklung und der Beurteilung von Techniken zur Erzeugung von Surrogat-Daten, die definierte Eigenschaften der Originaldaten erhalten und schließlich zur Durchführung von Teststatistiken herangezogen werden können.

Datenanalyse-Probleme werden dabei unter theoretischen und grundlagenorientierten Aspekten untersucht, z.B. beim Studium (nichtlinearer) Modellsysteme wie dem Rössler- oder Lorenz-System. Methoden, die zum Verständnis solcher Systeme entwickelt werden, finden anschließend Anwendung in natürlichen oder realen Systemen. Diese Anwendungen erfolgen sehr oft in interdisziplinären Projekten und reichen von der Untersuchung der Synchronisation in der Hirnaktivität, der Stimmerkennung bis zum Text-Mining in umfangreichen, unstrukturierten Datenbanken. Eine Auswahl dieser Projekte wird im folgenden kurz skizziert – zwei andere

Projekte werden in den ausgewählten Artikeln etwas ausführlicher dargestellt.

In einer Kooperation mit dem Klinikum rechts d. Isar (Technische Universität München) untersuchen wir die Eignung von Strukturparametern für die guantitative Diagnose von Osteoporose auf der Grundlage nicht-invasiver bildgebender Verfahren. Hochaufgelöste µ-ct Aufnahmen eine weitere Verbesserung sollen unserer Methodik ermöglichen, die auf einer Bestimmung der Verteilung der punktweisen Dimensionen basiert. Die mit der sogenannten Skalierungs-Index-Methode errechneten Indizes liefern ein Maß für die mechanische Belastbarkeit von Knochen und helfen, Patienten mit hohem Knochenbruch-Risiko zu identifizieren.

In einer Serie von Experimenten (zusammen mit der LMU München) untersuchen wir die Dynamik des Rasterkraftmikroskops (AFM), welches modellhaft als Stoßoszillator angesehen werden kann. Systeme dieser Art stellen eine spezielle Klasse zeitkontinuierlichen dynamischen von Systemen dar, die sporadisch Kollisionen ausführen. lhre Trajektorien sind stückweise kontinuierlich, wegen der Stöße der Abtastspitze mit der Objektoberfläche

jedoch von Diskontinuitäten in ihrer Geschwindigkeit unterbrochen. Wenngleich sich das System außerhalb dieser Stöße - als frei schwingender AFM-Ausleger linear verhält, weist die gesamte Dynamik aufgrund der durch die intermittierenden Stöße induzierten Nichtlinearitäten ein vielfältiges Verhalten auf, mit zum Teil bisher hier nicht gesehenen chaotischen Moden. Ein tieferes Verständnis der Systemdynamik sollte zukünftig die Abbildungseigenschaften und damit die Qualität der rasterkraftmikroskopischen Bilder verbessern.

Test auf "nicht-Gaußsche" Signaturen im CMB mit Hilfe neuer Surrogat-Techniken

Wir haben eine neue Methode zur Erzeugung von Surrogat-Daten entwickelt, die explizit die Zufälligkeit der Fourier-Phasen kontrolliert. Diese Methode wird derzeit an simulierten Karten des kosmischen Mikrowellenhintergrundes (CMB) erprobt, um zukünftige, modellunabhängige Tests auf "nicht-Gaußsche" Signaturen im CMB zu entwickeln.

Eine der grundlegenden Fragen in der Kosmologie ist es, ob die beobachteten Fluktuationen im Mikrowellenhintergrund Gaußscher Natur sind und wie diese entstanden sind. Mit der Beantwortung dieser Frage erhofft man sich letztendlich tiefere Einsichten in die Prozesse, die das frühe Universum bestimmt haben. Um auf eine nicht-Gaußsche Verteilung zu testen, vergleicht man üblicherweise die Beobachtung mit Simulationen, die das Leistungsspektrum reproduzieren, deren Fourierphasen aber unkorreliert sind. Für solche Tests ist ein detailliertes kosmologisches Modell eine notwendige Voraussetzung.

aufweisen, während alle - eventuell existierenden - räumlichen Korrelationen höherer Ordnung ausgelöscht sein sollen. Der hierfür vielfach benutzte Algorithmus - die "iterative amplitude adjusted Fourier transform" (IAAFT) - legt insbesondere Wert auf die Reproduktion des Leistungsspektrums und nimmt dabei an, dass die anfangs zufällig ausgespielten Phasen unkorreliert bleiben. In Analysen mittels "phase mapping"-Techniken konnten wir jedoch zeigen, dass viele der so generierten Surrogate Phasenkorrelationen, also Korrelationen höherer Ordnung, aufweisen. Dieses Ergebnis stellt die Brauchbarkeit des IAAFT-Algorithmus sehr in Frage. Wir haben deshalb das Iterationsschema in der Weise modifiziert, dass die Zufälligkeit der Phasenanordnung explizit kontrolliert wird (iterated phase adjusted Fourier transform = IPAFT). Wenngleich das Leistungsspektrum, diesem Schema folgend, nicht mehr exakt erhalten wird, kann es doch mit genügender Genauigkeit reproduziert werden (Abb. 1, Reihe u.l.). Mit Hilfe dieser IPAFT-Surrogate sind



Abb. 1: Obere Reihe (v.I.n.r): Simulierte CMB Karten mit nicht-Gaußschem Muster, welches von topologischen Defekten herrührt (Butterfly-Muster) und überlagertem Rauschen, IAAFT-Surrogat und IPAFT-Surrogat. Untere Reihe, links: Leistungsspektren für die Originaldaten (schwarz), IAAFT (blau) und IPAFT-Surrogates (rot). Die unerwünschten Phasenkorrelationen im IAAFT-Surrogat (Mitte) sind offensichtlich, während der neuentwickelte Algorithmus nun auch die Korrelationsfreiheit der Phasen sicherstellt (rechts).

Alternative Zugänge aus dem Bereich der nichtlinearen Datenanalyse bieten die Möglichkeit, modell-unabhängige Tests auf Korrelationen höherer Ordnung durchzuführen. In diesen Testverfahren bedient man sich sogenannter Surrogat-Daten, die definierte Eigenschaften der Originaldaten möglichst exakt wiedergeben, während alle anderen Merkmale randomisiert sind. In unserem Fall sollen die Surrogate das Leistungsspektrum der Originaldaten zuverlässige Tests des CMB auf "nicht-Gaußsche" Signaturen in Projektionen von Ausschnitten der WMAP-Daten möglich. Generell finden wir, dass bei der Erzeugung und Verwendung solcher Surrogate nicht nur auf die Erhaltung der linearen Eigenschaften geachtet, sondern insbesondere der Ausschluß von Korrelationen höherer Ordnung garantiert, werden muß.

Plasma Medizin

Im Projekt "Plasma-Medizin" untersuchen wir die Eignung atmosphärischer Niedertemperatur-Plasmen für die Behandlung chronischer Wunden in Zusammenarbeit mit LMU/Klinikum Schwabing und ADTEC Plasma Technology Co., Ltd. (Japan). Eigene Entwicklungen und umfangreiche Untersuchungen zur medizinischen Verträglichkeit haben die Durchführung der weltweit ersten klinischen Studie im Bereich Wundheilung mit Plasmen ermöglicht.

Die bakterizide Wirkung von Plasmen ist allgemein bekannt und wird für die Oberflächensterilisation z.B. von medizinischen Instrumenten eingesetzt. Eigenschaften wie berührungsfreie Behandlung oder Wirksamkeit auch in kleinen Hohlräumen lassen diese Technologie höchst attraktiv für medizinische in-vivo Anwendungen wie die Behandlung von Fuß- und Beinulzera erscheinen.

Man geht davon aus, dass der Wundheilungsprozeß durch bakterielle Kolonisation verlängert oder sogar verhindert wird. Erschwerend kommt hinzu, dass viele Keime gegen verschiedene Antibiotika resistent geworden sind. Ein signifikanter Rückgang der Keimzahl durch Plasma-Behandlung sollte zu einem besseren Heilungsprozeß führen. Ein weiterer Vorteil wird durch die Vermeidung unerwünschter Nebenwirkungen etablierter Methoden erwartet: da sich der Sterilisationsmechanismus von dem der Antibiotika unterscheidet. können Bakterien keine Resistenzen entwickeln. Unsere ex-vivo-Studien haben gezeigt, daß mit dieser Technik auch multi-resistente Bakterienstämme erfolgreich abgetötet werden können.

Unsere Gruppe entwickelte für den klinischen Einsatz einen neuer Plasmagenerator (atmosphärische Niedertemperatur-Mikrowellen-Plasmaquelle) und testete seine medizinische Verträglichkeit. Insbesondere beträgt die Plasmatemperatur im An-

wendungsbereich nur etwa 37 °C und ist damit geeignet für in-vivo Anwendungen. Die Ergebnisse der umfangreichen präklinischen ex-vivo-Tests an humanen Blut-, Haut- und Zellproben zeigten keine medizinischen Unverträglichkeiten. Inzwischen führen wir die weltweit erste klinische Studie zur Wundheilung mit atmosphärischen Plasmen durch. Die bislang vorliegenden Studienergebnisse belegen eine Reduktion der Keimlast auf der Wunde. Auch beobachten wir keine unerwünschten Nebenwirkungen und die Patienten empfinden keine Schmerzen während oder nach der Behandlung.

Ziel unserer Studien ist jedoch nicht nur der Wirkungsnachweis der Behandlung sondern auch das Verständnis des zugrundeliegenden biophysikalischen Mechanismus. Die sterilisierende Wirkung des Plasmas kann auf mehrere (sich möglicherweise überlagernde) Ursachen wie UV-Strahlung, geladene Partikel oder erzeugte Radikale



Abb. 1: AFM-Aufnahmen zweier E.coli-Bakterien (Bildausschnitt: ~5 μm). Die Bilder zeigen zwei E.coli-Bakterien vor (oberes Bild) und dieselben Bakterien nach dreiminütiger Plasmabehandlung (unteres Bild).

zurückgeführt werden. Neben physikalischen Messungen setzen wir zur Beantwortung dieser Frage verschiedene mikroskopische Abbildungstechniken wie optische, Fluoreszenz-, Raman- und Rasterkraft (AF) –Mikroskopie ein. Abbildung 1 zeigt hochaufgelöste AFM-Bilder zweier E.coli-Bakterien vor und nach einer dreiminütigen Plasmabehandlung. Die Bakterien sind nach der Behandlung stark beschädigt (Riß der Zellwände).



4.1 ALLGEMEINE BEREICHE Ingenieurbereich Elektronik

Die Elektronikabteilung gehört neben den Bereichen mechanische Entwicklung, mechanischer Fertigung und der Datenverarbeitung zu den zentralen technischen Einrichtungen am MPE. Die Elektronikabteilung setzt sich aus den Mitarbeitern der Elektronikentwicklung und der elektrischen Werkstatt zusammen. Die Abteilung hat zur Zeit 27 Mitarbeiter, welche am Standort Garching und im Halbleiterlabor in Neuperlach tätig sind. Das Aufgabengebiet der Elektronikabteilung ist sehr vielseitig und erstreckt sich von der Konzepterstellung über den Bau bis zur Inbetriebnahme von Instrumenten für terrestrische und extraterrestrische Beobachtungen sowie wissenLeiterplatten bis hin zur weltraumgerechten Verdrahtung von Experimenten konfrontiert.

Das zum MPE gehörige Halbleiterlabor in Neuperlach befasste sich hautsächlich mit der Entwicklung von neuen Detektoren für zukünftige Satellitenprojekte. Neben der reinen Entwicklung von CCD's und deren Ausleseelektronikbausteine werden dort auch noch die dazugehörigen Testeinrichtungen und Datenaquisitationssysteme entwickelt und gebaut. 2006 entwickelten sie zum Beispiel das Datenaquisitionssystem für den 64 x 64 Pixel DE-PFET Detektor und ein Auslese-ASIC (Application Speci-



Abb. 1: Ein kompletter DEPFET (Depleted P-channel Field Effect Transistor) Datenaquisitationssystemaufbau im Labor.

schaftlicher Experimentaufbauten für die ISS. Unsere Gruppe leistet technische Unterstützung bei Missionen und Beobachtungen. Fundierte Kenntnisse der Elektrotechnik, die Handhabung moderner Entwicklungs- und Simulationswerkzeugen und der Überblick über den aktuellen Stand der elektronischen Bauteile werden von unseren Mitarbeitern erwartet. Daneben sind ebenso Erfahrungen auf den Gebieten Vakuumtechnik, Kryotechnik, Lasertechnik und verschiedener anderer Bereiche notwendig, um die wissenschaftlichen Visionen effizient in reale Projekte umsetzen zu können.

Die Elektrowerkstatt wird mit Arbeiten von der einfachen Kabel-Konfektionierung, der Bestückung von komplexen fic Integrated Circuit) in 0.35 μ m AMS (Austria Microsystems) Technologie für DEPFETs (Depleted P-channel Field Effect Transistor).

2006 arbeitete unsere Gruppe unter anderem an folgenden wissenschaftlichen Projekten mit.

Für das neu gestartete eROSITA Projekt wurden eine Reihe von Untersuchungen und Tests für die Entwicklung der späteren eROSITA-Kameras an der PUMA-Testanlage in Garching und der PANTER-Testanlage in Neuried durchgeführt. Für die Ansteuerung der eROSITA-Kameras wurde die dazugehörige Anschaltelektronik entwickelt und aufgebaut. Ein Prototyp der später eingesetzten eRO- SITA–Kamera mit einem 256x256 CCD Chip und zweier CAMEX Bausteinen wurden von den Mitarbeitern der Elektronikgruppe in enger Zusammenarbeit mit den Mitarbeitern des Halbleiterlabors in Neuperlach entwickelt, gebaut und getestet. Neben den umfangreichen Entwicklungsarbeiten wurden Konzepte, Dokumentationen und Thermalstudien der Kameras für den Einsatz im Satelliten erstellt. An Diskussionen über die Satellitenplattform, den Spiegel, Orbit und Mission des späteren Satelliten mit nationalen und internationalen Firmen und Institutionen waren die Mitarbeiter ebenfalls beteiligt.

Am Instrument HERSCHEL-PACS, das sich derzeit in der Fertigstellungsphase befindet, führten wir im Laufe des Jahres vielfältige optische Justierungen, Kalibrationen und Tests durch. Diese Arbeiten mussten alle sehr sorgfältig geplant und vorbereitet werden, da das Öffnen des Instrumentes sehr arbeitsintensiv ist und nur unter Reinraumbedingungen ausgeführt werden kann. Ein weiterer Schwerpunkt der Arbeiten war die Durchführung der notwendigen Schütteltests des Instrumentes bei extrem niedrigen Temperaturen. Die Charakterisierung und Eichung der Detektoren des PACS Flugmodells konnte nur bei Temperaturen nahe des absoluten Nullpunktes erfolgen, bei 2 Grad Kelvin (-271°C). Viele der Tests und Eichungen wurden auf Test- und Prüfständen in Belgien durchgeführt.

Das Plasma-Kristall Experiment PK-4 befindet sich zur Zeit in der Konzeptionierungsphase. Dafür wurden, zusammen mit den Wissenschaftlern, alle relevanten physikalischen Parameter und Rahmenbedingungen ermittelt. Umfangreiche Untersuchungen und Experimente im Labor und bei Parabelflügen (Versuche unter Schwerelosigkeit) waren dazu notwendig. Die beteiligten Mitarbeiter unserer Gruppe entwickelten dafür verschiedene Laboraufbauten und modifizierten den Parabelflugexperimentaufbau. Darüber hinaus beteiligten sie sich an der Durchführung der Experimente. Nach Abschluss dieser Untersuchungen wurde begonnen, ein Konzept für die Steuerungshardware und -software zu entwickeln. Gleichzeitig wurden verschiedene elektronische und mechanische Komponenten wie Partikel-Dispenser, Hochspannungs- und RF-Generatoransteuerungseinheiten entwickelt, gebaut und getestet.

Im Bereich der Plasma Medizin wurde die von uns entwickelte Niederenergie-Plasmaquelle (6-Elektroden) zu einer klinischen Studie im Krankenhaus München-Schwabing aufgebaut, um ihre in-vivo Anwendung am Patienten zu testen. Parallel dazu untersuchten wir in unserem Labor weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Effizienz und der praxisgerechten Handhabung. Dafür wurden neue Elektrodentypen und -materialien getestet, neue Wege zur Verringerung der Leitungsverluste und Phasenanpassung untersucht, ein Gas-Mix-Verfahren erprobt und die Integration eines Schutzgitters zur Patientensicherheit ermöglicht. Darüberhinaus ermittelten wir mit massenspektroskopischen Untersuchungen und elektrochemischen Messungen die bei atmosphärischen Plasmen auftretenden toxischen Stoffe. Optische Spektroskopie wurde zur Ermittlung der Plasma-Emission eingesetzt.

Eine zusätzliche Aktivität lag in der Konzipierung und im Aufbau eines "Laser-Streuexperiments", bei dem das Reflexionsverhalten von dotierten Lackoberflächen ermittelt wird. Dabei haben wir die Winkelabhängigkeiten bei verschiedenen Laserwellenlängen gemessen.



Abb. 2: Das PACS Flugmodell (FM) und Herschel Teleskop-SimulatorOptik, integriert im Kryostaten für den Instrument Level Test (ILT) am MPE.

Neben den genannten Schlüsselprojekten wurden von unseren Mitarbeitern der Elektronikabteilung noch folgende Projekte unterstützt:

- GROND (Gamma-Ray Burst Optical and Near-infrared Detector)
- XEUS Optik (X-ray Evolving-Universe Spectroscopy Mission)
- OPTIMA (Optical Pulsar TIMing Analyzer)
- FIFI-LS (Field-Imaging Far-Infrared Line Spectrometer)
- PK-3 Plus (siehe 3.4)

Ingenieurbereich Mechanik

Zum Ingenieurbereich Mechanik gehören

- die mechanische Entwicklung / Konstruktion,
- das Testlabor für Umweltsimulationstests,
- die feinmechanische Werkstatt mit Kunststofflabor, Schlosserei, Schreinerei und
- die Ausbildungswerkstatt.

In enger Zusammenarbeit mit den wissenschaftlichen Projektgruppen, dem Bereich Elektronik und Partnern aus Industrie und anderen Instituten werden hier hauptsächlich Instrumente für die am MPE betriebene experimentelle Astrophysik entwickelt und größtenteils auch gebaut. Aus den vielseitigen wissenschaftlichen Vorhaben ergibt sich ein breites Aufgabenspektrum vom Feingerätebau über den Sondermaschinenbau bis zum extremen Leichtbau. Typische Beispiele sind Infrarot- und Röntgen-Detektoren bzw. -Kameras, Spektrometer, integrierte Instrumente für bodengebundene Teleskope, Nutzlasten für Raketenexperimente oder Satelliten, aber auch Laborgeräte. Besondere Herausforderungen bei der Entwicklung stellen die oft extremen Anforderungen wie Reinheit, Vibrationsbelastungen beim Raketenstart oder der Betrieb der Instrumente unter Vakuum bei kryogenen Temperaturen (bis in die Nähe des absoluten Nullpunkts) dar.



Abb. 1: Ablauf der CNC-Fertigung am Fünfachs-Bearbeitungszentrum: Bearbeitungsplanung am CAM-Arbeitsplatz und anschließendes Fräsen eines Bauteils für den Fokusiermechanismus eines Spektrographen.

Zum Aufgabenbereich der mechanischen Entwicklung (neun Mitarbeiter/innen) gehören nicht nur die Konzeptentwicklung und Erstellung von Werkstattzeichnungen mithilfe von 2D/3D-CAD, sondern auch Eigenfrequenz-, Festigkeits- und Thermalanalysen mit Finite Elemente (FE) -Programmen. Hinzu kommen Aufgaben der Produktsicherung und die Verifikation durch Tests.

Für Umweltsimulationstests stehen im Testlabor eine Vibrationstestanlage, zwei Thermalvakuum-Kammern und eine Klimakammer zur Verfügung. In der feinmechanischen Werkstatt sind derzeit zwölf Mitarbeiter/innen tätig, angeschlossen sind das Kunststofflabor, die Schlosserei und die Schreinerei (je zwei Mitarbeiter). Die Werkstatt ist überwiegend mit CNC-Fräsmaschinen ausgestattet, der Maschinenpark besteht gegenwärtig aus insgesamt neun Fräs- und sechs Drehmaschinen. CAD-Daten können direkt in die CAM-



Abb. 2: Integration der PACS Ge:Ga Detektormodule im MPE-Reinraum.

Software übernommen werden, ein modernes Bearbeitungszentrum ermöglicht die Fünfachs-Simultanbearbeitung komplexer Teile. Ein weiterer Aufgabenbereich der mechanischen Werkstatt und des Kunststofflabors ist die Montage und Integration der wissenschaftlichen Geräte am Institut sowie bei externen Partnern.

Im Jahr 2006 lag der Schwerpunkt der Aktivitäten bei den Projekten HERSCHEL-PACS (IR) und GROND (X-Ray/ Gamma), die zum Jahresende beide kurz vor der Fertigstellung stehen.

Für das Ferninfrarot-Instrument PACS wurden mehrere Test- und Montagevorrichtungen wie z.B. externe Kalibrationsquellen für den Testkryostaten und verschiedene Kryo-Testaufbauten entwickelt und gefertigt.

Zudem wurden die am Institut entwickelten Ge:Ga-Detektoren des Flugmodells integriert und das komplette Instrument zusammen mit dem Industriepartner Kayser-Threde fertiggestellt. Zur Abstützung der 1,5-Kelvin Kühlanbindungen wurden Stützstrukturen aus CFK und Titan entwickelt, gefertigt und qualifiziert. Auch an der Planung und Durchführung der Akzeptanztests mit dem PACS-Flugmodell (Thermal-Vakuumtests, Kryo-Vibrationstest) war der Bereich Mechanik maßgeblich beteiligt. Die IR-Projekte LUCIFER und FIFI-LS wurden insbesondere von den Werkstätten tatkräftig unterstützt.

Die mechanische Entwicklung arbeitete zudem auf der Systemebene an der Phase A-Studie für das geplante Interferometrie-Instrument GRAVITY für das ESO VLT mit, hierfür wurden auch ein Laboraufbau für die Metrologie sowie ein Kryo-Testaufbau zur Charakterisierung von Lichtleitern entwickelt. In Zusammenarbeit mit der ESO wurde ein optischer Testaufbau zur Erprobung des PRI-MA Instruments installiert.

Für das Teleskopinstrument GROND wurde ein Titan-Leichtbaugehäuse entwickelt, die Fertigung erfolgt beim Industriepartner EADS. Für die optische Struktur wurde eine FE-Verformungsanalyse in Abhängigkeit von

Temperaturdifferenzen durchgeführt. Zur Justage der optischen Komponenten wurde eine Vorrichtung entwickelt und gebaut. Die Integration der optischen Komponenten



Abb. 3: Verkleben einer CFK/Titan-Stützstruktur für 1,5-Kelvin Kühlleitungen im Kunststofflabor.

und der Detektoreinheiten konnte zum Jahresende annähernd abgeschlossen werden. Zur Anbringung des Instruments am Rahmen des 2,2m Teleskops in La Silla wurde eine CFK-Interfacestruktur entwickelt und gefertigt.

Auch für die zukünftigen Projekte in der Röntgenastronomie wurden bereits grundlegende Entwicklungsarbeiten geleistet. Für die LE-Detektoreinheit von SIMBOL-X wurden erste Konstruktionsstudien im Haus durchgeführt bzw. bei externen Partnern in Auftrag gegeben und betreut. Im Projekt eROSITA war die mechanische Entwicklung an der Konstruktion und thermischen Optimierung der Röntgenkamera beteiligt, Konzeptstudien zur Entwicklung und Auswahl einer geeigneten Teleskopstruktur wurden begonnen. Ferner wurden die Röntgentestanlagen und das Halbleiterlabor mit diversen Konstruktionsund Fertigungsarbeiten unterstützt.

Im Forschungsbereich Komplexe Plasmen war der Bereich Mechanik an den Projekten PK-4 (Konstruktionsarbeiten für Laboraufbau und Parabelflugeinheit, Teilnahme



Abb. 4: Montagearbeiten am Teleskopinstrument GROND in der MPE-Integrationshalle.

am Parabelflug) und PK-4-ISS (Konstruktionskonzepte für den Experimentaufbau im Labor und in der internationalen Raumstation) beteiligt. Zudem wurde ein Testmodell eines plasmamedizinischen Miniaturgeräts konstruiert und gefertigt.

Die mechanische Entwicklung und die Fertigung wurden auch im Jahr 2006 von externen Ingenieurbüros und Werkstätten unterstützt, die in den meisten Fällen direkt von den Ingenieuren am MPE betreut wurden.

Die Ausbildungswerkstatt mit acht Ausbildungsplätzen zum Industriemechaniker ist der feinmechanischen Werkstatt angeschlossen. Die Auszubildenden waren in erheblichem Umfang auch direkt für die wissenschaftlichen Projekte tätig.

Im Testlabor fanden auch im Jahr 2006 wieder zahlreiche Umweltsimulationstests statt. Insgesamt wurden für die Projekte PACS, PRIMA, PK-4 sowie für externe Partner zwölf zum Teil sehr umfangreiche Vibrationstests und 22 Thermalvakuum-Tests durchgeführt.



Abb. 5: Vibrationstest mit einer 1,5-Kelvin Kühlleitung und CFK/Titan-Stützstruktur (PACS).

Verwaltung

Das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) und das Max-Planck-Institut für Astrophysik (MPA) haben eine gemeinsame Verwaltung, die auch räumlich auf beide Institute verteilt ist. Die Betreuung umfasst neben den Instituten auch zwei Außenstellen des MPE: die PANTER-Testanlage in Neuried und das Halbleiterlabor in München-Neuperlach, wobei das Halbleiterlabor zusammen mit dem Max-Planck-Institut für Physik geführt wird. Darüber hinaus wird noch ein Gästehaus in Berkeley, Kalifornien von uns bewirtschaftet.

Der Verwaltungsaufbau ist klassisch, das heißt, er ist in die Bereiche Finanzen, Personal, Einkauf und Sonstige Dienste aufgeteilt. Die Arbeitsschwerpunkte liegen in der Betreuung der fest angestellten Mitarbeiter, des wissenschaftlichen Nachwuchses sowie in der Unterstützung von internationalen Gastwissenschaftlern. Ein weiterer Bereich umfasst die Beschaffung wissenschaftlicher Gerätschaften und sonstiger Ausstattungsgegenstände sowie die Bewirtschaftung, Organisation und Pflege der Infrastruktur unserer Institute.

Die Planung und Bewirtschaftung der Mittel aus der

institutionellen Förderung und der Drittmittelförderung sowie die ordnungsgemäße buchhalterische Abwicklung aller Einnahmen und Ausgaben verbunden mit dem rechnungstechnischen Nachweis über die zutreffende Verwendung der Mittel bilden zusätzliche Aufgabengebiete. Dabei hat die Verwaltung auf die Einhaltung der für die Max-Planck-Gesellschaft und ihre Institute geltenden Gesetze, Rechtsverordnungen, Vorschriften und Richtlinien zu achten und die Direktoren bei deren Umsetzung zu beraten.

Zunehmende internationale Projekte und Kooperationen allgemeine Internationalisierung sowie die des Wissenschaftsbetriebes im Zuge der weltweiten Mobilität von Wissenschaftlern, Doktoranden und Stipendiaten haben die Aufgaben in der Verwaltung dahingehend verändert, dass man diesem Personenkreis beratend, aber auch mit konkreten Hilfsmaßnahmen (Wohnungssuche, Behördengänge, Krankenversicherung, Sprachkurse usw.) zur Seite steht. Eine besondere Rolle in diesem Zusammenhang nimmt unsere Max Planck Research School ein, die fast ausschließlich von jungen ausländischen Nachwuchswissenschaftlern besucht wird

Publikationsunterstützung und Druckerei

Bibliothek

Der hauseigene Copyshop stellt im Wesentlichen (Jahres-)Berichte, Broschüren sowie Formulare, Briefbögen und Briefumschläge für das MPE, in begrenztem Umfang aber auch für andere, im Norden von München angesiedelte Max-Planck-Institute und für

für Veröffentlichungen, auch für Broschüren, Poster und Webseiten, herzustellen.

Die "Astrobibliothek" ist eine gemeinsame Einrichtung des Max-Planck-Instituts für Astrophysik (MPA) und des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (MPE). Die Tatsache, daß die Bibliothek für zwei Institute mit verschiedenen Forschungsschwerpunkten tätig ist - vorwiegend theoretische Astrophysik am MPA und beobachtende und instrumentelle Astrophysik am MPE - erklärt ihre Größe. Heute verfügt die Bibliothek über einen Bestand von über 44.600 Exemplaren, darunter ca. 22.000 Bücher, ca. 22.000 Zeitschriftenbände und eine Mediensammlung von 300 CD-ROMs, Filmen und Videos, sowie ca. 6.500 Reports und Publikationen von Observatorien und Astronomischen Instituten. Neben 240 laufenden Print-Abonnements für Zeitschriften und Reihen verwalten wir über eine Site Licence der Generalverwaltung auch noch ungefähr 400 elektronische Zeitschriften und Reihen. Die Bibliothek zählt auch Exemplare von Palomar Observatory Sky Survey (Fotografie) und ESO/SERC Sky Survey (Film) zu ihrem Bestand.

Die Bestände der "Astrobibliothek" sind elektronisch in unserem Katalog (http://libero.ipp.mpg.de/liberoa) voll erschlossen. Der Katalog enthält die bibliographischen Angaben zu den Büchern, Zeitschriften, Dissertationen, Diplomarbeiten, Habilitationen, Reports und Veröffentlichungen von Observatorien und Links zu Online-Publikationen.

die Generalverwaltung her. Eingesetzt werden dabei

ausschließlich Digitaldruckverfahren (schwarzweiß und

Farbe). Unsere Grafikgruppe ist in der Lage, alle Grafiken

Um die Arbeit in der Bibliothek zu erleichtern, und damit die Institutsmitglieder die Angebote nutzen können, besteht Zugriff auf verschiedene Kopierer. Die Bibliothek ist ausgestattet mit einem Microfiche Reader/ Printer, einem Buch-Scanner, mehreren PCs, Terminals, Laserdruckern und einem Faxgerät.

Zusätzlich unterhält die Bibliothek noch ein geschlossenes Archiv für alle MPA- und MPE-Veröffentlichungen seit der Gründung der Institute.

Seit dem Start des Edoc-Systems durch die Generalverwaltung 2003 werden die Publikationsdaten aller Veröffentlichungen in dieses System eingegeben. Soweit wie möglich werden die Publikationen dort auch elektronisch archiviert (ungefähr 900 Veröffentlichungen, Stand 2006). Der Zugriff darauf ist nur den Administratoren vorbehalten.

Die Bibliothek ist auch in der VLib (Max-Planck Virtual Library) vertreten. Dies ist ein Portal für den Zugang zu den Informationsangeboten der MPG.

Datenverarbeitung

Durch die Vorgaben der einzelnen Experimente und durch nationale und internationalen Kooperationen sind die Anforderungen an die Datenverarbeitung (DV) bezüglich der Hard- und Software sehr vielfältig. Deshalb erfolgt die Softwareentwicklung und die Aufbereitung der Experimentdaten in den wissenschaftlichen Arbeitsgruppen.

Die Koordination der Datenverarbeitung am MPE übernimmt der DV-Ausschuss, der aus Vertretern aller wissenschaftlichen Bereiche zusammengesetzt ist. Ihm ist die zentrale DV-Gruppe zugeordnet. Die Hauptaufgabe des DV-Ausschusses besteht in der Koordination und Beurteilung von Hard- und Softwarebeschaffungen sowie in der Konzeption und Kontrolle der zentralen, gruppenübergreifenden DV-Infrastruktur (Netzwerk, Drucker, zentrale Server und Dienste). Außerdem koordiniert der DV-Ausschuss die Zusammenarbeit mit dem Rechenzentrum Garching und die DV-Schulung der Mitarbeiter des MPE. Die zentrale DV-Gruppe ist für die Beschaffung und den Betrieb der zentralen DV-Infrastruktur (Netzwerk, Drucker, Server) und die Betreuung der zentralen Dienste (WWW, FTP, Mail etc) zuständig. Des weiteren werden von ihr auch, in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern aus dem wissenschaftlichen Gruppen, die Inhalte der WWW-Seiten des MPE gepflegt. Aufgabe der DV-Gruppe ist auch die Beschaffung und Verteilung von Software und Lizenzen, und die Konfiguration von Servern, Workstations und Laptops, soweit dies nicht innerhalb der wissenschaftlichen Gruppen erfolgt. Zudem betreut und berät sie die Mitarbeiter und Gäste des MPE bei Softwareinstallationen und Programmierung. Etwa die Hälfte der Mitarbeiter der DV-Gruppe sind zu einem grossen Teil ihrer Arbeitszeit als Systembetreuer und Softwareentwickler in die Großprojekte XMM-Newton, INTEGRAL, Cluster, Herschel, PanSTARRS und komplexe Plasmen eingebunden.

4.2 LEHRE UND AUSBILDUNG

Die Internationale Max-Planck Research School (IMPRS) für Astrophysik

Die Max-Planck Gesellschaft zur Förderung der Wissenschaften hat die große Bedeutung des wissenschaftlichen Nachwuchses für die Zukunft von Wissenschaft und Forschung erkannt. Entsprechend hat sie im Jahr 2000, gemeinsam mit verschiedenen deutschen Universitäten, unter dem Namen "International Max Planck Research Schools", ein Ausbildungsprogramm ins Leben gerufen, das sowohl deutschen als auch ausländischen Studenten exzellente Ausbildungs- und Lernmöglichkeiten auf höchstem wissenschaftlichem Niveau bieten soll. Max-Planck-Gesellschaft ist die internationale Ausrichtung der Ausbildung von zentraler Bedeutung, denn sie soll den Grundstein für eine zukünftige Zusammenarbeit über nationale Grenzen hinweg ermöglichen, denn Studenten, die sich hier kennen lernen, werden mit großer Wahrscheinlichkeit auch zukünftig miteinander arbeiten. Im Rahmen des IMPRS Projekts halten an den jeweiligen Instituten renommierte Professoren, Privatdozenten und Wissenschaftler die Vorlesungen. Doktoranden erfahren aktuelle Erkenntnisse aus neuesten Beobachtungen und Experimenten: Beste Ausbildungsvoraussetzungen für



die Wissenschaftler von Morgen.

An der IMPRS für Astrophysik in

Garching werden beispielsweise aus den mehr als 130 Bewerbern jährlich nur ca. 20 - 25 Hochschulabsolventen aufgenommen. Steigende Bewerberzahlen spiegeln dabei das große internationale Interesse an der IMPRS und den Erfolg des Programms wieder. Abb. 1 zeigt eine Übersicht über die seit September 2001 erhaltene, jährlich steigende Anzahl an Bewerbungen sowie die jeweils akzeptierten Studenten. Im akademischen Jahr 2006 nahmen insgesamt 55 Studenten an dem Programm teil, für das sich seit seiner Gründung insgesamt 684 Studenten aus dem In- und Ausland beworben haben. Etwa 21% der akzeptierten Bewerber kommen aus Deutschland, etwa 50% aus dem europäischen Ausland. Der Frauenanteil liegt bei etwa 40%. Um dem großen Inte-

Abb. 1: Zusammenfassung der jährlichen Bewerbungen für das IMPRS Programm in Garching. Seit dem Start 2001 haben sich insgesamt 648 Studenten dafür beworben.

Im Rahmen dieses IMPRS-Projekts haben sich in Garching zwei Institute der Max-Planck-Gesellschaft, das MPE und das Max-Planck-Institut für Astrophysik sowie die Sternwarte der Ludwig-Maximilians-Universität München und das European Southern Observatory zusammengeschlossen: Ein Verbund sich optimal ergänzender wissenschaftlicher Institute für Doktoranden der Astrophysik.

Die IMPRS für Astrophysik in Garching wurde gegründet, um die wissenschaftliche Ausbildung der Doktoranden weiter zu optimieren. Eines der Ziele dieser Einrichtung ist es, den internationalen Studenten die Möglichkeit zu geben an einem der führenden Zentren für Astrophysik ihre Promotion vorzubereiten und so ihr Interesse für eine spätere Kooperation mit internationalen Wissenschaftsorganisationen zu fördern. Wer an der IMPRS für Astrophysik in Garching promoviert hat, hat beste Chancen für eine internationale Forscherkarriere. Für die resse an Studienplätzen Rechnung zu tragen, wurden für die IMPRS in Garching zusätzliche finanzielle Mittel der Europäischen Gemeinschaft bewilligt. Seit Juni 2004 ist die IMPRS für Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität in München ein Marie-Curie Trainingszentrum der EU für Doktoranden der Astrophysik.

Etwa 40 Studenten der IMPRS haben bisher erfolgreich ihre Doktorprüfung an einer der beiden Münchner Universitäten abgelegt. Etwa 85% der Studenten reichten ihre Promotion an der Ludwig-Maximilians-Universität ein, 15% dagegen an der Technischen Universität. Welche Universität den Doktortitel verleiht hängt dabei im Allgemeinen nur von der Zugehörigkeit des die Doktorarbeit betreuenden Professors ab.

Anfänglich nur für einen Zeitraum von sechs Jahren bewilligt, wurden die finanziellen Mittel zur Fortführung die

90 Das Institut

IMPRS für Astrophysik vom Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft für weitere sechs Jahre, d.h. bis zum Jahr 2013, genehmigt.



Abb. 2: IMPRS Studenten, die ihre Doktorarbeit in Garching im September 2006 begonnen haben.

Studenten Experiment "Plasmakristall"

Im Rahmen des Fortgeschrittenen Praktikums an der Technischen Universität München und der Universität Ulm bieten wir seit 2003 den Versuch "Plasmakristall" an. Das Ziel des Versuchs ist es, dass die Studenten einen Plasmakristall in einem Hochfrequenz-Entladungsplasma herstellen und seine Struktur, Dynamik und Korrelationen zu untersuchen. Dazu haben wir einen kompletten Versuchsaufbau basierend auf der "PKE-Nefedov" Kammer (s. Abschnitt 3.4) zur Verfügung gestellt. Jedes Semester nehmen etwa 15 Gruppen bestehend aus 2 - 3 Studenten unter Betreuung von Wissenschaftlern aus der Gruppe Komplexe Plasmen am MPE teil. Zusätzlich findet jedes Jahr ein einwöchiger Praktikumskurs für Studenten der Universität Ulm statt.



Abb. 1: Das Studenten Experiment "Plasmakristall".

Lehrausbildung

Ausbildung ist eine gesellschaftspolitische Aufgabe, der sich das MPI für extraterrestrische Physik als ein öffentlich gefördertes Forschungsinstitut verpflichtet sieht. Zusätzlich zum wissenschaftlichen Nachwuchs wird auch die berufliche Ausbildung junger Menschen in unserem Institut gefördert.



Abb. 1: Bohrschraubstock und Ständerdampfmaschine – Projekte für das 1. und 2. Lehrjahr.

In der Ausbildungswerkstatt des Instituts wurden im vergangenen Jahr acht Auszubildende - je 2 pro Lehrjahr zum Industriemechaniker im Einsatzgebiet Feingerätebau ausgebildet. Zudem absolvierten 12 Schüler ein einwöchiges Orientierungspraktikum, sowie vier Praktikanten ein etwa sechswöchiges Fertigungspraktikum. Zwei Auszubildende beendeten im Februar 2006 ihre Ausbildung sehr erfolgreich und konnten in unser Werkstatt-Team übernommen werden.



Abb. 2: Montage eines optischen Versuchsaufbaus zum Test des PRIMA-Instruments durch die Auszubildenden des 3. Lehrjahrs.

In den ersten beiden Lehrjahren wird unseren Azubis hauptsächlich eine berufsfeldbreite Grundbildung vermittelt. Der Schwerpunkt liegt in der Bearbeitung verschiedener Projekte zur Vermittlung der Grundqualifikationen. Besonders gefördert werden selbständiges und team-orientiertes Arbeiten sowie die Beachtung der Arbeitsicherheitsvorschriften. Ab Mitte des 2. Ausbildungsjahres unterstützen unsere Auszubildenden die feinmechanische Werkstatt bereits mit einfachen Dreh-, Fräs- und Montagearbeiten. Im dritten Lehrjahr sind die Azubis dreieinhalb Monate in der feinmechanischen Werkstatt tätig, wo sie weitere Fachqualifikationen vermittelt bekommen. Dabei leisten sie bereits wesentliche produktive Beiträge für das Institut.

Die Azubis absolvierten verschiedene Fachlehrgänge im Bereich Pneumatik-Grundlagen und E-Pneumatik bei den Stadtwerken München und besuchten prüfungsvorbereitende Seminare bei Siemens-Education. Zur Ausbildung gehören auch Informationsveranstaltungen wie der Besuch der METAV, der internationalen Messe für Fertigungstechnik und Automatisierung.

Ein besonderes "Highlight" war die Teilnahme an der Sonderschau Talente 2006 der Internationalen Handwerksmesse München mit einem in der Lehrwerkstatt gebauten Spaltspektrographen.



Abb. 3: Verschiedene Entwicklungsstufen des Spaltspektrographen.

Ein weiterer Höhepunkt war der Tag der offenen Tür mit seinem Kinderprogramm, am dem sich die Jugendlichen mit viel Elan beteiligten.

Das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik bildet in seiner Verwaltung regelmäßig Auszubildende nach dem Berufsbild Bürokaufmann -bzw. Bürokauffrau aus. In diesem nach dem Berufsbildungsgesetz anerkannten Ausbildungsberuf werden insbesondere Kenntnisse in den Bereichen Personalverwaltung und Entgeltabrechung, Buchführung und Kostenrechnung sowie Auftragsund Rechnungsbearbeitung vermittelt.

Mit der Durchführung von Schülerpraktika bietet das Institut darüber hinaus interessierten jungen Leuten die Möglichkeit, einen Einblick in die Aufgabenstellung und den Ausbildungsablauf zu gewinnen.

4.3 ÖFFENTLICHKEITSARBEIT



Abb. 1: Wie baut man eine Rakete zusammen?

Astrophysikalische Fragen erfreuen sich eines steigenden Interesses in der Öffentlichkeit und in den Medien. Als öffentlich finanzierte Einrichtung sieht sich das MPE in der Pflicht, diesem Interesse Rechnung zu tragen und bietet deshalb Institutsführungen und Schülerpraktika an, neben öffentlichen Vorträgen von Institutsmitgliedern auf verschiedensten gesellschaftlichen Ebenen. Darüber hinaus sind die Projekte und wissenschaftlichen Veröffentlichungen aller Abteilungen des Instituts allgemein zugänglich über die Internetseite des MPE (http://www.mpe.mpg.de).

Im Jahre 2006 fanden insgesamt 23 Institutsführungen statt mit Gruppen bis zu 30 Personen. In der Mehrzahl handelte es sich dabei um Schüler und Lehrer von naturwissenschaftlich orientierten Schulen, jedoch fanden sich auch Vereine und Berufsgruppen unter den Besuchern. Angeboten wurden neben Übersichtsvorträgen aus den einzelnen Fachgebieten die Besichtigung von Experimentaufbauten im Labor und Hardware Exponate der verschiedenen Projekte.



Abb. 2: Die intergalaktische Eisdiele.

Höhepunkt dieser Aktivitäten war der Tag der offenen Tür am Sonntag, den 15. Oktober, der institutsübergreifend stattfand um die Eröffnung der U-Bahn Station auf dem Forschungsgelände zu feiern.

Die gesamte Breite unserer Forschungsaktivitäten wurde den Besuchern "zum Anfassen" angeboten. Im einstündigen Rhythmus gab es allgemein verständliche Vorträge, die außergewöhnlich gut besucht waren. Insgesamt zeigten die mehr als 1500 Besucher ein enormes Interesse an der modernen astrophysikalischen Forschung.



Abb. 3: Der Haupteingang am Tag der offenen Tür.

Ein besonderes "Highlight" unseres Instituts war dabei das Kinderprogramm, das auch schon bei den Kleinsten die Begeisterung für extraterrestrische Forschung weckte. Das Programm umspannte einen weiten Bogen von astronomisch motivierten Bastelarbeiten und Versuchen für die Jüngsten, über Massenstarts selbstgebauter Raketen, bis zu einer Instituts-Ralley der Älteren, die dabei ihr astronomisches Wissen erweitern konnten. Die mehr als 400 begeisterten Kinder, die das Institut "überschwemmten" waren ein eindrucksvoller Dank an die vielen freiwilligen Mitarbeiter dieser Veranstaltung.

4.4 INSTITUTSLEBEN



Abb. 1: Eine Gruppe von MPE Skifahrern in den Tiroler Bergen.

Einen wichtigen Anteil an einem "funktionierenden" Institut haben gemeinsame soziale Aktivitäten, die allgemein das tägliche Zusammenleben im Institut, die Kommunikation innerhalb Gruppen und über Gruppengrenzen hinweg und auch die Integration neuer Mitarbeiter fördern. Die sozialen Aktivitäten am MPE reichen von gruppeninternen Feiern zu besonderen Anlässen, z.B. erfolgreicher Abschluss eines größeren Projekts, einer Promotion oder auch das Feiern von "runden" Geburtstagen, über MPE-weite Veranstaltungen, wie die gemeinsame jährliche Weihnachtsfeier, bis hin zu den drei alljährlich stattfindenden Institutsausflügen.

Beim Skiausflug im Februar ging es diesmal mit einer "bunt gemischten" Truppe aus verschiedenen Nationalitäten nach Ellmau am Wilden Kaiser in Tirol. Obwohl die Schneeverhältnisse sehr gut waren, nahmen einige der Teilnehmer den "Skiausflug" nicht allzu wörtlich und beschränkten sich aufs Rodeln und Wandern. Die Skifahrer strömen entsprechend ihrer Fahrkünste dann schnell auseinander. Erfreulicherweise und ohne größere Blessuren kamen dann alle beim abschließenden gemeinsamen Abendessen wieder zusammen, und konnten am nächsten Tag "arbeitsfähig" ihre Aufgaben am MPE wahrnehmen.



Abb. 3: Oktoberfest

Beim Betriebsausflug im Sommer ging es diesmal in die Barock- und Bischofsstadt Eichstätt im Altmühltal. Nach einer Stadtführung über barocke Plätze und durch den Eichstätter Dom am Vormittag, stand der Nachmittag zur freien Verfügung. Von den möglichen Freizeitaktivitäten (Radfahren, Fossilien suchen, paddeln) war das Kanufahren auf der Altmühl für die meisten Teilnehmer am attraktivsten. Allerdings ging es bei diesen, im allgemeinen ganz ruhigen und gemütlichen Fahrten bei manchen Gruppen nicht immer friedlich zu. Einige "Hahnenkämpfe" endeten mit Havarie und einer beträchtlichen Abkühlung einiger hitziger Bootsbesatzungen. Die bei den sportlichen Aktivitäten verbrauchten Kalorien konnten dann am Abend bei einem deftigen Ritteressen auf der Eichstätter Burg in überreicher Fülle wieder aufgefrischt werden.



Abb. 2:

Links: Einer der vielen barocken Plätze Eichstätts.

Unten: Kanufahren auf der Altmühl.



Höhepunkt im Herbst ist der alljährliche Besuch des Münchner Oktoberfests. Nicht zuletzt durch den Anreiz einer "verbilligten" Verpflegung mit flüssiger und fester Nahrung wird diese Angebot jedes Jahr wieder von einheimischen wie auch ausländischen Mitarbeitern zahlreich angenommen. Wenn im Laufe des Nachmittags und frühen Abends die Stimmung dann stetig steigt, wird bei den meisten MPElern der "Dienstschluss" bis weit in die Nacht hinein verschoben.

5 Veröffentlichungen Lehrveranstaltungen



5 VERÖFFENTLICHUNGEN, LEHRVERANSTALTUNGEN

Hier präsentieren wir eine tabularische und graphische Zusammenfassung unserer Veröffentlichungen aus 2006. Die Veröffentlichungen werden nach wissenschaftlicher Arbeitsgruppe und Publikationstyp gezählt. Die Gesamtliste der einzelnen Referenzen aus den verschiedenen Kategorien sind auf der beigelegten CD zu finden. Sie können auch auf unseren MPE Internetseite http://www.mpe.mpg.de/popus.html nachgelesen oder heruntergeladen werden.

Wissenschaftl. Arbeitsgruppe	referierte Publikationen	referierte Proceedings	Instrument. Publikationen	nicht-referierte Publikationen	Telegramme/ Circulare	Vorträge	Poster
Erdn.							_
Weltraum	39 (12)	10 (5)	0	21 (7)	0	26 (10)	1
IR	43 <mark>(12)</mark>	3 <mark>(0)</mark>	14 <mark>(7)</mark>	21 <mark>(12)</mark>	0	67 <mark>(48)</mark>	7
Röntgen	110 <mark>(44)</mark>	6 <mark>(2)</mark>	39 <mark>(11</mark>)	46 <mark>(26)</mark>	11 (6)	159 <mark>(101)</mark>	7
Gamma	31 <mark>(11)</mark>	5 <mark>(3)</mark>	0	11 <mark>(6)</mark>	32 <mark>(14)</mark>	26 <mark>(17)</mark>	10
Theorie	52 <mark>(31)</mark>	4 <mark>(</mark> 3)	1 (1)	17 <mark>(11)</mark>	0	74 <mark>(32</mark>)	18
Opinas	31 <mark>(6)</mark>	1 (0)	3 (1)	15 <mark>(6)</mark>	12 <mark>(0)</mark>	19 <mark>(16)</mark>	3
Insgesamt	306 (127)	29 <mark>(13)</mark>	57 <mark>(20)</mark>	131 <mark>(68)</mark>	54 <mark>(20)</mark>	371 <mark>(225)</mark>	52

Summe der MPE Veröffentlichungen in 2006

Die roten Zahlen in den Klammern geben die Anzahl der Veröffentlichungen mit einem ersten Autor aus dem MPE an, bzw. eingeladene Vorträge. Veröffentlichungen mit Beteiligung aus mehreren Arbeitsgruppen sind bei der Gruppe des führenden Autors gezählt.

Publikationen insgesamt in 2006 (nach Typ)





Referierte Publikationen in 2006 (nach wissenschaftlicher Arbeitsgruppe)

Zeitliche Entwicklung der referierten Publikationen (nach wissenschaftlicher Arbeitsgruppe)



Lehrveranstaltungen

IMPRS Garching

<u>Bender</u>

Introductory Course Astrophysics (WS 06/07) <u>Gerhard</u>

IMPRS Advanced Course II: Stellar dynamics, galaxy structure, simulation of galaxies and the intergalactic medium. Part 2 on Structure of the Milky Way (WS 06/07) <u>Schuecker</u>

Cosmology, Large-Scale Structure, and Stellar Structure (SS 06)

Cosmology, Large-Scale Structure, and Stellar Structure (SS 06)

International University Bremen Haerendel

Dynamo Theory, in High Energy Astrophysics (Astrophysics III) (April 06)

Discontinuities and Shocks, in Space Physics II: Space Plasma Physics (April 06)

Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main

<u>Boller</u>

Einführung in die Astronomie II (SS 06)

Astrophysikalisches Praktikum (SS 06)

Einführung in die Astronomie I (WS 06)

Astrophysik III (WS 06)

Ludwig-Maximilians-Universität München Annaratone

Introduction to Complex Plasma (WS 06/07)

Low Temperature Plasma Physics (SS 06)

<u>Becker</u>

Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher (WS 06/07)

Doktorandenseminar über Aktuelle Themen aus der Astrophysik (WS 06/07)

Gravitationswellen und ihr Nachweis (SS 06)

Doktorandenseminar über aktuelle Themen aus der Astrophysik (SS 06)

<u>Bender</u>

Astronomisches Hauptseminar zur Astrophysik: Schwarze Löcher in Theorie und Praxis, Teil 2 (SS 06)

Astrophysikalisches Praktikum "B" und Übungen (SS 06) Astronomisches Kolloquium (SS 06)

Extragalactic Journal Club (E) (SS 06)

Extragalactic Group Seminar (E) (SS 06)

Gravitational Lensing (E) (WS 06/07)

Astronomisches Hauptseminar zur Astrophysik: "Tools in Modern Astrophysics" (WS 06/07)

Astrophysikalisches Praktikum "A" und Übungen (WS 06/07)

Astrophysikalisches Praktikum "B" und Übungen (WS 06/07)

Astronomisches Kolloquium (WS 06/07)

Extragalactic Journal Club (E) (WS 06/07)

Extragalactic Group Seminar (E) (WS 06/07)

<u>Böhringer</u>

Inflation und dunkle Energie in der Kosmologie (WS 06/07)

<u>Jamitzky</u>

Java Programmierkurs (WS 06/07)

Java Programmierkurs (SS 06)

Grenzflächen und weiche Materie (SS 06)

Grenzflächen und weiche Materie (WS 06/07) <u>Schuecker</u>

Beobachtende Kosmologie (SS 06), mit Böhringer

Kosmologie der Inflation und Dunklen Energie (WS 06/07)

<u>Trippe</u>

Seminar "Schwarze Löcher" (SS 06), mit Gillessen Seminar "Tools in modern astrophysics" (WS 06/07), mit Gillessen

Technische Universität München

<u>Diehl</u>

Advanced Astrophysics Seminar: "The Dark Universe" (WS 05/06), mit Hasinger, Hillebrandt, Müller

Advanced Astrophysics Seminar: "Astrophysical and Astronomical Measurements: Exploiting Observations" (WS 05/06)

Advanced Astrophysics Seminar: "The Dark Universe" (SS 06), mit Hasinger, Hillebrandt, Müller

Advanced Astrophysics Seminar: "Spectroscopy of Cosmic Light: Elements throughout the Universe" (WS 06/07), mit Hasinger, Hillebrandt, Müller

Cosmic Nuclear Reactions: Nucleosynthesis (WS 05/06)

<u>Hasinger</u>

Einführung in die Astrophysik (SS 06)

Einführung in die Astrophysik (WS 06)

<u>Thoma</u>

Betreuung Fortgeschrittenen Praktikum "Plasmakristall" (SS 06), mit Kretschmer

Betreuung Fortgeschrittenen Praktikum "Plasmakristall" (WS 06/07), mit M. Kretschmer

Universität Gießen

<u>Thoma</u> Quantenfeldtheorie (SS 06) Theoretische Kernphysik II: Kernreaktionen (WS 05/06) Hadronen, Quarks und Symmetrien (WS 06/07)

Universidad Nacional de La Plata (Argentina) Monetti

Aplicaciones de la Teoria de Caos en Medicina (April 06)

University of Padova

Boller High Energy Astrophysics (SS 06)



6 PERSONAL, KOLLABORATIONEN

Direktoren

Prof. Dr. R. Bender, Optische und Interpretative Astronomie, gleichzeitig Lehrstuhl für Astronomie/ Astrophysik an der Ludwig-Maximilians-Universität München

Prof. Dr. R. Genzel, Infrarot- und Submillimeter-Astronomie, gleichzeitig Prof. of Physics, University of California, Berkeley, USA (Geschäftsführung)

Prof. Dr. G. Hasinger, Röntgen- und Gamma-Astronomie Prof. Dr. G. Morfill, Theorie, Nichtlineare Dynamik, Komplexe Plasmen

Prof. Dr. G. Haerendel (emeritiertes wiss. Mitglied) Prof. Dr. R. Lüst (emeritiertes wiss. Mitglied)

Prof. Dr. J. Trümper (emeritiertes wiss. Mitglied)

Direktionsassistent

Dr. H. Scheingraber

Wissenschaftlicher Sekretär

Dr. W. Brinkmann (bis 31.10.2006) Dr. W. Collmar (seit 1.11.2006)

Auswärtige wissenschaftliche Mitglieder

Prof. Dr. V. Fortov, IHED, Moscow (Russland) Prof. Dr. R. Z. Sagdeev, University of Maryland (USA) Prof. Dr. M. Schmidt, CALTECH, Pasadena (USA) Prof. Dr. Y. Tanaka, JSPS, Bonn; MPE (Deutschland) Prof. Dr. C.H. Townes, University of California, Berkeley (USA)

Kuratorium (gemeinsam mit dem MPI für Astrophysik)

Dr. L. Baumgarten, Vorstandsmitglied DLR
Prof. Dr. A. Bode, TU München
W.-M. Catenhusen, Staatssekretät im BMBF, Berlin
H.-J. Dürrmeier, Süddeutscher Verlag, München
Prof. Dr. W. Glatthaar, DG Bank (Vorsitzender des Kuratoriums), Frankfurt
Dr. G. Gruppe, Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft, Verkehr und Technologie, München
Prof. Dr. B. Huber, Rektor der LMU München
Dipl.-Ing. R. Klett, Kayser-Threde GmbH, München
Dr. M. Mayer, Mitglied des Bundestages, Höhenkirchen
Prof. Dr. E. Rohkamm, Thyssen Krupp AG, Düsseldorf

Fachbeirat

Prof. Dr. R. Davies, Oxford University (UK)

Prof. Dr. R. Ellis, CALTECH (USA)

Prof. Dr. N. Gehrels, NASA/GSC (USA)

Prof. Dr. F. Harrison, CALTECH (USA)

Prof. Dr. O. Havnes, University of Trømsø (Norwegen)

Prof. Dr. P. Léna, Université Paris VII (Frankreich)

Prof. Dr. R. McCray, University of Colorado (USA)

Prof. Dr. M. Salvati, Osservatorio Astrofisico di Arcetri (Italien)

Externe / Interdisziplinäre wissenschaftliche Mitglieder

Prof. Dr. H. Gleiter, Forschungszentrum Karlsruhe Prof. Dr. R. Sauerbrey, Forschungszentrum Rossendorf, Dresden

Humboldt-Forschungspreisträger

Prof. Dr. P. Henry, University of Hawaii (USA) Prof. Dr. B. Sonnerup, Dartmouth College (USA) Prof. Dr. V. Tsytovich, Russian Academy of Sciences, Moscow (Russland) Prof. Dr. H. Netzer, Tel Aviv University (Israel)

Friedrich Wilhelm Bessel - Forschungspreis der A. von Humboldt Stiftung

Dr. A. Cimatti, Instituto Nazionale de Astrifisica (INAF), Arcetri (Italien)

A. v. Humboldt-Stipendiaten

Prof. Dr. D. Jaffe, University of Texas (USA) Dr. F. Martins, Observatoire Midi-Pyrénées (Frankreich)/ Geneva Observatory (Schweiz) Dr. V. Yaroschenko, Universiteit Gent (Belgien)

MPE Senior Research Fellow

Dr. D. Porquet (bis 30.9.2006) Dr. K. Iwasawa (seit 1.10.2006)

Wissenschaftliche Auszeichnungen, Berufungen

Genzel, R.: Celsius Lecture, Uppsala University, Schweden, Februar 2006. **Trümper, J.:** Marcel Grossmann Award, Juli 2006.

Wissenschaftliche Arbeitsgruppen

Mitarbeiter nach Wissenschaftlichen Arbeitsgruppen



Erdnaher Weltraum Infrarot Röntgen Gamma Theorie Opinas

Physik des erdnahen Weltraums

Teamassistentin: Zanker-Smith, J.

Georgescu, Dipl.-Phys. E.; Haaland, Dr. S.; Kis, Dr. A. (bis 30.6.); Klecker, Dr. B.; Leistner, Dipl.-Phys. G.; Marghitu, Dr. O. (bis 30.4., 12.-19.6., seit 1.11.); Pitout, Dr. F.; Volwerk, Dr. M.

Gäste

Bunescu, Dr. C. (1.11.-31.12); Comisel, Dr. H. (2.6.-31.7., 1.10.-31.12); Dröge, Dr. W. (7.2.-6.3.); Kartavykh, Dr. J. (6.2.-5.3.)

Doktoranden / Diplomanden

Blagau, A. (Klecker); Ilie, D., (bis 30.4.);

Infrarot- und Submillimeter-Astronomie

Sekretariat: Harai-Stroebl, S.

Abuter, Dr. R. (bis 15.1.); Agudo Berbel, A. (seit 23.10.); Bauer, Dipl.-Phys. O.; Bouche, Dr. N.; Contursi, Dr. A.; Cresci, Dipl.-Phys. G. (seit 1.9.); Davies, Dr. R.; Eisenhauer, Dr. F.; Feuchtgruber, Dipl.-Phys. H.; Fridjof, A. (1.2.-31.7.); Friedl, A.; Geis, Dr. N.; Gemperlein, H.; Gillessen, Dr. S.; Gräter, A. (seit 1.8.); Hamaus, N. (28.6.-30.9.); Hartinger, Dr. C.; Hicks, Dr. E. (seit 1.10.); Hofmann, Dr. R.; Katterloher, Dr. R.; Kleiser, A.; Kornberg, Dr. M.; Krombach, H.; Lehnert, Dr. M. (bis 15.11.); Lutz, Dr. D.; Müller, Dr. T.; Osterhage, S.; Paumard, Dr. T. (bis 30.9.); Poglitsch, Dr. A.; Raab, Dr. W.; Rabien, Dr. S.; Schmid, Dr. W.; Schreiber, Dr. N.; Seidenschwang, K. (bis 30.4.); Sturm, Dr. E.; Tacconi, Dr. L.; Verma, Dr. A. (bis 31.8.); Wetzstein, Dr. M.; Wildgruber, G.

Gäste

Jaffe, Prof. D. (1.-30.6.); Cimatti, Dr. A. (3.4.-20.7.); Netzer, Prof. H. (bis 31.1.)

Doktoranden / Diplomanden

Buschkamp, P. (Hofmann); Dasyra, Dipl-Phys. K. (bis 20.8., Tacconi); Genel, S. (seit 1.9., Genzel); Gobat, R. (bis 31.3., Lehnert); Harayama, Dipl.-Phys. Y. (bis 31.1., seit 1.8., Eisenhauer); Hönle, Dipl.-Phys. R. (bis 31.7., Poglitsch); Ihle, S. (bis 31.10., Eisenhauer); Müller-Sanchez, F. (Davies); Nesvadba, Dipl.-Phys. N. (bis 30.9., Lehnert); Schropp, M. (seit 9.10., Rabien); Schweitzer, Dipl.-Phys. M. (Poglitsch/Sturm); Trippe, Dipl.-Phys. S.

(Genzel); Valiante, Dipl.-Phys. E. (Lutz/Sturm); Viehhauser, Dipl.-Phys. W. (bis 30.8., Poglitsch)

Röntgen-Astronomie

Sekretariat: Boller, B. / Jakobs, I. (bis 31.1.) Andritschke, Dipl.-Phys. R.; Aschenbach, Dr. B.; Becker, Prof. Dr. W.; Boller, Prof. Dr. T.; Böse, Dr G. (bis 30.9.); Braig, Dipl.Phys. C. (bis 30.4.); Bräuninger, Dr. H.; Briel, Dr. U.; Brunner, Dr. H.; Brusa, Dr. M.; Burkert, Dr. W.; Burwitz, Dr. V.; Carlson, Dr. A. (seit 9.1.); Dennerl, Dr. K.; Donnert, J. (6.6.-31.7.); Finoguenov, Dr. A.; Frankenhuizen, W.; Freyberg, Dr. M.; Friedrich, Dr. P.; Fürmetz, M. (6.3.-31.7.); Gallo, Dr. L. (bis 30.11.); Geppert, Dr. U. (bis 31.3.); Gruber, Dr. R. (bis 30.4.); Haberl, Dr. F.; Hambaryan, V. (1.3.-31.8.); Hartner, Dipl.-Math. G.; Hirschinger, M.; Iwasawa, Dr. K.; Kahabka, Dr. P.; Kim, Dr. J.W. (bis 31.1.); Kimmel, Dipl.-Phys. N. (bis 15.9.); Komossa, Dr. S.; Lange, R. (bis 31.10.); Lemson, Dr. G.; Mainieri, Dr. V. (bis 31.7.); Meidinger, Dr. N.; Mießner, D.; Misaki, K.; Misanovic, Z. (bis 31.1.); Müller, Dr. A.; Naumann, A. (15.2.-15.3.); Nosenko, V. (seit 4.9.); Pfeffermann, Dipl.-Phys. E.; Pietsch, Dr. W.; Porquet, Dr. D. (bis 31.10.); Porro, Dr. M.; Predehl, Dr. P.; Ramirez, J.M.; Schaller, G.; Schopper, Dr. F.; Shen, Dr. S.; Silverman, Dr. J.; Stojetz, W. (4.9.-6.10.); Strateva, Dr. I. (seit 1.3.); Strüder, Prof. Dr. L.; Szokoly, Dr. G.P.; Treis, Dr. J.; Trill, M. (3.-17.8.); Voges, Dr. W.; Vongehr, M.; Wöhrl, S. (6.-16.6., 31.7.-25.8.)

Gäste

Carrera, J. (26.9.-19.11.); Filipovic, M. (8.9.-4.10.); Giodini, S. (1.10.-30.11.); Griffiths, R. (11.7.-15.8.); Henry, Prof. Dr. P. (15.6.-14.8.); Miyaji, T. (27.8.-1.10.); Schmidt, M. (26.10.-15.11.); Tanaka, Prof. Dr. J.P., Trichieri, Dr. G.; Xu, Dr. D. (8.8.-22.9.)

Doktoranden / Diplomanden

Balestra, Dipl.-Phys. I. (Boller); Bauer, Dipl.-Phys. M. (Pietsch); Cappelluti, Dipl.-Phys. N. (Hasinger); Fan, Dipl.-Phys. Y. (bis 31.8., Komossa); Huang, Dipl.-Phys. H.-H. (Becker); Hui, D. (Becker); Hyde, E. (Meidinger); Mühlegger, Dipl.-Phys. M. (seit 1.9, Hasinger); Posselt, Dipl.-Phys. B. (Haberl/Voges); Stiele, H. (seit 1.5., Pietsch/Hasinger); Wölfel, Dipl.-Phys. S. (Strüder); Zhang, C. (bis 31.10., Strüder); Deresch, A. (bis 31.5., Pfeffermann/Predehl); Trepl, L. (seit 1.4., Becker); Trill, M. (bis 18.5., Burwitz)

Gamma-Astronomie

Teamassistentin: Frankenhuizen, W.

Brunschweiger, J. (20.2.-15.7.); Diehl, Dr. R.; Falke, L. (bis 31.1.); Greiner, Dr. J.; Halloin, H. (bis 30.8.); Kanbach, Dr. G.; Kienlin von, Dr. A.; Lichti, Dr. G.; McBreen, Dr. S. (seit 1.4.); Mühlegger, Dipl.-Phys. M. (1.5.-16.6.); Petry, Dr. D. (seit 1.9.); Rehm, D.; Sala, Dr. G. (seit 1.5.); Savaglio, Dr. S. (seit 1.3.); Strong, Dr. A.; Willis, Dr. D. (bis 31.8.); Yoldas, A.; Zhang, Dr. X.-L. (seit 15.9.)

Dogiel, Prof. V. (1.-31.8.); Harris, Dr. M. (1.10.-31.12.); Hartmann, Prof. D. (3.-28.7.); lyudin, Dr. A., Longo, F. (1.-28.2.); Slowikowska, A. (bis 1.9.); Zeh, A. (1.6.-31.8.)

Doktoranden / Diplomanden

Ajello, Dipl.Phys. M. (bis 30.9., Kanbach); Andritschke, Dipl.-Phys. R. (bis 5.12.); Bissaldi, E. (seit 1.9., Lichti); Bottacini, E. (Collmar); Brunschweiger, J. (seit 13.11., Greiner); Clemens, C. (Greiner); Duscha, S. (Kanbach); Huber, B. (seit 1.4., Kanbach); Kretschmer, Dipl.-Phys. K. (bis 31.8., Diehl); Krühler, T. (seit 1.11., Greiner); Küpcü Yoldas, Dipl.-Phys. A. (bis 31.7.); Lang, M. (seit 17.7., Diehl); Mühlegger, M. (bis 31.3., Kanbach); Orlando, E. (Strong); Prymak, N. (Greiner); Schächner, G. (Kanbach); Stefanescu, Dipl.-Phys. A. (Kanbach); Wang, W. (Diehl)

Theorie und Komplexe Plasmen

Sekretariat: Langer, A. / Collmar, E.

Andreani, P. (bis 31.5.); Annaratone, Dr. B.M. (bis 31.12.); Aschenbrenner, Dr. T.; Böhringer, Dr. H.; Brinkmann, Dr. W. (bis 30.11.); Broeg, C. (seit 1.8.); Bunk, Dr. W.; Höfner, Dipl-Phys. H.; Ivlev, Dr. A.; Jamitzky, Dr. F.; Kluge, M. (27.3.-13.4., 27.6.-31.8.); Klumov, Dr. B.; Konopka, Dr. U.; Khrapak, Dr. S.; Kretschmer, Dr. M.; Li, Dr. Y. (seit 1.11.); Martin, Dr. J. (bis 31.10); Monetti, Dr. R.; Nosenko, Dr. V. (seit 4.9.); Pierini, Dr. D.; Pompl, Dr. R.; Pratt, Dr. G.; Pustylnik, M. (seit 9.10.); Räth, Dr. C.; Ratynskaia, Dr. S. (bis 30.9.); Rohr, S. (13.2.-3-3.); Rubin-Zuzic, Dr. M.; Samsonov, Dr. D. (bis 15.3.); Sato, T. (bis 31.1.); Schachenmayer, J. (13.3.-21.4.); Scheingraber, Dr. H.; Schwabe, M. (1.6.-10.7.); Shimizu, Dr. T.; Shimizu, Dr. S.; Shukla, N. (1.9.-31.10.); Sidorenko, Dr. I.; Thoma, Dr. M.; Thomas, Dr. H.; Yaroshenko, Dr. V.; Zhdanov, Dr. S.; Fell, J. (seit 18.9.)

Gäste

De Angelis, Prof. U.; Fortov, Prof. V.; Horanyi, Prof. M. (1.9.-31.10.); Khrapak, Prof. A.; Martin, Dr. J. (bis 31.10.); Steinberg, Prof. V. (bis 30.4.); Takahashi, Dr.

K. (bis 31.3.); Tsytovitch, Prof. V. (bis 30.4., 3.-29.7.); Vladimirov, Prof. S. (1.-31.5.)

Doktoranden / Diplomanden

Antonova, Dipl.-Phys. T. (Annaratone); Braglia, F. (Böhringer); Chaudhuri, M. (Morfill); Elsäßer, A. (bis 31.10.); Faßbender, Dipl.-Phys. R. (Böhringer); Fink, Dipl.-Phys. M. (Morfill); Gonzalez Tapia, Dipl.-Phys. E. (bis 27.11., Morfill); Heidemann, R. (seit 1.7., Thomas); Huber, Dipl.-Phys. P. (Morfill); Knapek, Dipl.-Phys. C. (Morfill); Kompaneets, Dipl.-Phys. R. (Morfill); Mitic, S. (seit 1.11., Morfill); Mokler, Dipl.-Phys. F. (bis 31.10., Morfill); Santos, J. (Böhringer); Schwabe, M. (seit 1.8., Konopka); Simionescu, A. (Böhringer); Sütterlin, Dipl.-Phys. R. (Morfill); Zhang, Y.-Y. (Böhringer);

Optische und Interpretative Astronomie

Sekretariat: Rieperdinger, M.

Burkert, Prof. Dr. A. (seit 1.10.) MPE Fellow; Drory, Dr. N. (seit 1.9.); Feulner, G. (bis 30.4.); Gabasch, Dr. A.; Gebhardt, Dr. K.-H. (bis 31.7.); Gerhard, Prof. Dr. O.; Hopp, Dr. U.; Milvang-Jensen, Dr. B. (bis 31.3.); Muschielok, Dr. B.; Noyola y Loya, Dr. E. (seit 1.9.); Phleps, Dr. S.; Riffeser, Dr. A. (bis 28.2.); Saglia, Dr. R.; Schücker, Dr. P. (bis 30.11.); Snigula, Dr. J.; Wilman, Dr. D.; Zibetti, Dr. S.

Gäste

Bauer, A. (1.9.-15.12.); Coccato, L. (9.11.-10.12.); Kormendy, Dr. J. (24.5.-27.12.)

Doktoranden / Diplomanden

Balaguera Antolinez, A. (seit 28.8., Schücker/Bender); Das, P. (seit 15.9., Gerhard); De Lorenzi, Dipl.-Phys. F. (Gerhard); Hirschmann, M. (seit 15.10.); Köhler, R. (Bender); Köppenhöfer, Dipl.-Phys. J. (bis 31.1., Saglia); Nieves, Dipl.-Phys. L.A. (Bender); Nowak, Dipl.-Phys. N. (Saglia); Pannella, Dipl.-Phys. M. (seit 1.2., Bender); Riffeser, Dipl.-Phys. A. (bis 28.2., Bender); Ulubay Siddiki, Dipl.-Phys. A. (Gerhard); Ventimiglia, G. (seit 1.9., Gerhard); Walch, Dipl.-Phys. S. (Burkert)

Ingenieurbereich und Werkstätten

Elektronik

Hippmann, Dipl.-Ing. H. (bis 31.8 Leitung Elektronik) Tarantik, Dipl.-Ing. K. (seit 1.9. Leitung Elektronik) Albrecht, Dipl-Ing. S. (seit 1.6.); Albrecht, F. (seit 1.12.); Barl, Dipl.-Ing (FH) L.; Bornemann, Dipl.-Ing (FH) W.; Burghardt, Dipl.-Ing (FH) T.; Cibooglu, H.; Deuter, M.; Emslander, A.; Fumi, Dr. F.; Gressmann, R.; Hagl, Dipl.-Ing (FH) T.; Hälker, Dipl.-Ing (FH) O.; Hans, O., Hengmith, M.; Herrmann, Dipl.-Ing (FH) S.-C.; Jakob, Dipl.-Ing (FH) G.; Karing, W. (bis 30.6.); Kellner, Dipl.-Ing (FH) S.; Kink, Dipl.-Ing (FH) W.; Lange, R. (bis 31.10.); Langer, P.; Lederer, R.; Lieb, W.; Müller, Dipl.-Ing (FH) S.; Oberauer, F.; Rau, Dipl.-Ing (FH) C. (seit 1.2.); Reiss, P.; Rothermel, Dr. H.; Rupprecht, T.; Schneider, M.; Schrey, F.; Steffes, B.; Tarantik, Dipl.-Ing. K. (bis 31.8.); Yaroshenko, V.; Zanker-Smith, J. (seit 1.9.)





Diplomanden

Ziegleder, J. (seit 1.9.)

Mechanik

Thiel, Dipl.-Ing. M. (Leitung Mechanik)

Bayer, R.; Blasi, T. (seit 1.3.); Brandstetter; J., Brara, A.; Budau, B.; Czempiel, S.; Deuschle, G. (bis 31.10.); Deysenroth, C.; Deysenroth, M. (seit 1.10.); Dietrich, G.; Dittrich, Dipl.-Ing (FH); K.; Eibl, J.; Feldmeier, P.; Gahl, J.; Goldbrunner, A.; Haug, Dipl.-Ing. (FH) M.; Heidelberg, T. (bis 28.2.); Honsberg, M.; Huber, N.; Huber, S.; Huber, F.-X.; Huber, Dipl.-Ing (FH) H.; Kestler, H.-J.; Kettenring, Dipl.-Ing. G. (bis 30.6.); Liebhardt, J. (seit 1.3.); Mayr, R.; Mayr-Ihbe, R.; Mican, Dipl.-Ing. B.; Plangger, M.; Rohe, C.; Sandmair, R.; Schnell, P.; Schunn, W.; Soller, F.; Straube, P.; Wildmoser, T. (30.10.-8.12.); Zaglauer, Dipl.-Ing. (FH) W. (bis 24.5.)

Datenverarbeitung DV-Ausschuß

Bauer, Dipl.-Phys. O.H. (Vorsitzender)

Bohnet, Dipl.-Phys. A.; Brinkmann, Dr. W. (bis 30.11.); Burwitz, Dr. V.; Collmar, Dr. W. (bis 31.10.); Haberl, Dr. F. (Stellevertreter); Jamitzky, Dr. F.; Leistner, G.; Lutz, Dr. D.; Müller, Dipl.-Ing. (FH) S.; Ott, Dr. T.; Petry, Dr. D. (seit 1.11.); Rubin-Zuzic, Dr. M. (seit 1.12.)

Zentrale DV-Gruppe

Bauer, Dipl.-Phys. O.H. (Leitung)

(Netzwerk, Systemsupport); Baumgartner, Η. Bohnet, Dipl.-Phys. A. (Systemsupport Optische und Interpretative Astronomie); Collmar, Dr. W. (GRO, INTEGRAL, IMPF); Kleiser, A. (Druckerbetreuung); Klose, L. (Netzwerk, Systemsupport); Oberauer, A. (Software, PC Betreuung); Ott, Dr. T. (Systemsupport Infrarot); Paul, J. (Röntgen, Datenschutzbeauftragter); Post, C. (Netzwerk, Systemsupport PC und Linux); Sigl, Dipl.-Ing. (FH) R. (Netzwerkmanagement); Steinle, Dr. H. (Datenbanken, Archivsysteme, WWW); Vaith, Dipl.-Phys. H. (seit 1.7., Systemsupport Optische und Interpretative Astronomie); Voges, M. (Programmierung; Wieprecht, Dipl.-Ing. E. (Herschel-PACS); Wiezorrek, Dipl.-Ing. (FH) E. (Herschel-PACS)

Auszubildende

Arzt, S.; Bibracher, M.; Blasi, T. (bis 28.2.); El-Masry, J.; Hartwig, J.; Liebhardt, J. (bis 28.2); Niemetz, E. (seit 1.9.); Schindlmeier, M.; Schneider, A.; Urban, T. (seit 1.9.)

Schülerpraktikum (Haupt- und Realschulen)

Anzer, G. (29.5.-2.6.); Bieringer, M. (20.-24.2.); Cavdar, C. (8.-12.5.); Cziasto, D. (15.-19.5.); Maßmann, F. (3.-7.4.); May, J. (17.-21.7.); Ostwald, R. (26.-30.6.); Paulini, R. (10.-14.7.); Plattner, M. (30.10.-3.11.); Preisler, C. (10.-13.4.); Sigl-Beck, C. (18.-21.4.)

Hochschulpraktikum

Hüsson, P. (19.6.-28.7.); Prunkl, E. (6.-31.3.); Stäbler, D. (28.2.-3.3.); Steinberger, B. (28.8.-13.10.)

Zentrale Bereiche

Publikationsunterstützung

Hauner, R.; Karing, W.; Mayr-Ihbe, R.; Mory, B.

Bibliothek

Chmielewski, E. (Leitung) Hardt, C., Schurkus, R.

Verwaltung

Ihle, M. (Leitung VAD) Sekretariat: Kliem, V.

Apold, G.; Arturo, A.; Bauernfeind, M.; Bidell, M.; Bitzer, U.; Blaschek, M.; Cziasto, U.; Cziasto, S. (17.5.-31.7.); Doll, E.; Ertl, M.; Gleixner, W. (bis 31.7.); Goldbrunner, S.; Grasemann, M.; Gschnell, H.-P.; Hübner, R. (3.-5.1., 2.-23.6., 3.8.-8.9.); Inhofer, I.; Jäkel, T.; Karing, W. (seit 1.7.); Keil, M.; Kestler, L.; Kürzinger, T.; Kus, H. (bis 5.9.); Lochner, C.; Mazur, A. (seit 2.10.); Nagy, A.; Neun, A.; Peischl, M.; Preisler, C.; Reither, A.; Rochner, R.; Rossa, E.; Sandtner, P.; Scheiner, B.; Schneider, D.; Sedlmeir, G. (1.-30.6., 31.7.-15.9.); Seeger, Dipl.-Ökonom G., Steinle, R.; Strecker, R. (6.-23.6., 7.8.-1.9.); Strecker, R.; Thiess, L.; Troll, P.


Projekt-Gruppen

(Projektleiter unterstrichen)

Physik des Erdnahen Weltraums

ACE / SEPICA <u>Klecker</u>, Zanker-Smith

CLUSTER / CIS <u>Klecker</u>, Marghitu, Paschmann, Pitout, Scholer.

CLUSTER / Data Center Georgescu, <u>Klecke</u>r, <u>Leistner</u>, Volwerk.

CLUSTER / EDI Georgescu, Haaland, <u>Paschmann</u>, Treumann, Vaith.

Double Star Georgescu, Haaland, <u>Klecker</u>, Paschmann, Pitout.

ROSETTA-Lander <u>Haerendel</u> (IUB), Thiel.

SAMPEX / HILT <u>Klecker</u>, Scholer.

SOHO / CELIAS Klecker, Scholer, Zanker-Smith.

STEREO / PLASTIC <u>Klecker</u>, Zanker-Smith.

Infrarot- und Submillimeter-Astronomie

Deputies to the Director of the Group Lutz, Tacconi.

GRAVITY Abuter, <u>Eisenhauer</u>, Gillessen, Gräter, Haug, Hofmann, Ihle S., Kellner, Paumard, Rabien, Thiel, Ziegleder.

Herschel-PACS Barl, <u>Bauer</u>, Berg v., Bickert Cesarsky, Contursi, Eibl, Feuchtgruber, Friedl, Geis, Hartinger, Igl, Jakob, Katterloher, Kleiser, Kornberg, Krombach, Lutz, Müller T., Osterhage, <u>Poglitsch</u>, Schmid, Schubert, Seidenschwang, Sturm, Thiel, Wetzstein, Wieprecht, Wiezorrek, Wildgruber, Yaroshenko.

ISO Spectrometer <u>Bauer</u>, Feuchtgruber, Lutz, Müller T., Sturm, <u>Verma</u>, Wieprecht.

KMOS Agudo Berbel, <u>Davies</u>, Förster-Schreiber, Hofmann, Lehnert.

LBT, Lucifer Buschkamp, Eisenhauer, Gemperlein, Gillessen, Gräter, <u>Hofmann</u>, Lederer, <u>Lehnert</u>, Straube. LBT IFU <u>Eisenhauer</u>, Haug, Müller-Sanchez.

PARSEC <u>Davies</u>, Huber S, Kellner, Ott, Rabien, Schropp, Ziegleder.

PRIMA testbed Abuter, <u>Eisenhauer</u>, Gräter, Haug, Kellner, Rabien, Thiel.

Sofia-FIFI-LS Fumi, Geis, Hönle, Klein, Oberauer, <u>Poglitsch</u>, Raab, Schweitzer, Viehhauser.

GaAs-Detektoren Jakob, <u>Katterloher</u>.

Galaktisches Zentrum Abuter, Eisenhauer, Genzel, Gillessen, Maness, Martins, Ott, Paumard, Trippe.

Galaxienkerne Contursi, Dasyra, Davies, Friedrich S., Genzel, Gilbert, Hicks, Hamaus, Lutz, Müller-Sanchez, Netzer, Schweitzer, Sturm, Tacconi, Verma.

Galaxien bei hoher Rotverschiebung Abuter, Bouché, Buschkamp, Cresci, Eisenhauer, Förster-Schreiber, Genel, Genzel, Gobat, Lehnert, Lutz, Nesvadba, Sturm, Tacconi, Valiante, Verma, Viehhauser.

Röntgen-Astronomie

Astrogrid-D Carlson, <u>Voges</u>.

CAST <u>Bräuninger</u>, Strüder.

Chandra Burwitz, <u>Predehl</u>.

Euro-VO_DCA Lemson, Voges<u>.</u>

GAVO Kim, Lemson, <u>Voges</u>.

ROSAT Boese, Gruber, <u>Haberl</u>, Voges.

eROSITA

Andritschke, Aschenbach, Bornemann, Bräuninger, Briel, Brunner, Burkert, Eder, Freyberg, Friedrich, Hälker, Hartmann, Hartner, Hasinger, Hengmith, Hermann, Hippmann, Hirschinger, F. Huber, H. Huber, Kettenring, Kink, Meidinger, Müller, Pfeffermann, <u>Predehl</u>, Rohe, Strüder, Vongehr.

SDSS

Böhringer, Boller, Gallo, Hasinger, Huber M., König, Voges.

SIMBOL-X

<u>Briel</u>, Hälker, Hasinger, Herrmann, Hippmann, Huber, Lechner, Pietsch, Strüder, Treis.

Skinakas Observatorium Bauer, <u>Hasinger</u>, Lieb.

SWIFT

Ajello, Brunschweiger, <u>Greiner</u>, Hartner, Hasinger, Strong, Voges.

XEUS

Aschenbach, Boller, Bräuninger, Braig, Burkert, Friedrich, <u>Hasinger</u>, Meidinger, Schaller, Strüder, Trümper, Vongehr.

XEUS-WFI

Andritschke, Hälker, Herrmann, Meidinger, Mießner, Schopper, <u>Strüder</u>, Treis.

XMM-Newton

Aschenbach, Bohnet, Boller, Bornemann, <u>Briel</u>, Brunner, Burkert, Dennerl, Freyberg, Gallo, Gruber, Haberl, Hartner, Hengmith, Hippmann, Hirschinger, Huber, Kettenring, Kink, Lange, Meidinger, Müller, Pfeffermann, Pietsch, Predehl, Strüder, Trümper.

Gamma-Astronomie

COMPTEL Collmar, Diehl, Strong.

EGRET <u>Kanbach</u>.

GLAST Collmar, Diehl, Greiner, Kanbach, Kienlin v., <u>Lichti</u>, Steinle, Strong.

GROND Bornemann, Clemens, Fueger, <u>Greiner</u>, Hasinger, Huber H., Schrey, Szokoly, Thoene, Wölfl, Yoldas, Zaglauer.

INTEGRAL Diehl, Kienlin v., Kretschmar, Kretschmer, Lerusse, Lichti, Pottschmidt, Strong.

MEGA Andritschke, <u>Kanbach</u>, Schönfelder, Schrey, Zoglauer.

OPTIMA <u>Kanbach</u>, Schrey, Steinle H., Stefanescu.

Jet-Quellen Ajello, Bottacini, Collmar, <u>Greiner</u>, Kanbach, Pottschmidt, Sala, Willis, Zhang. Nukleare Astrophysik Ciemniak, <u>Diehl</u>, Kienlin, Kretschmar, Kretschmer, Lang, Lichti, Strong.

Relativistischer Teilchenbeschleuniger Ajello, Collmar, Diehl, Duscha, <u>Kanbach</u>, Mühlegger, Orlando, Slowikowska, Stefanescu, Strong.

Gamma-Ray Bursts

Clemens, <u>Greiner</u>, Huber B., Kanbach, Krauss, Krühler, Küpcü-Yoldas, Prymak, Stein, Steiner, Thöne, Willis, Yoldas.

Theorie und Komplexe Plasmen IMPF

Annaratone, Hagl, Höfner, Huber, Ivlev, Konopka, <u>Morfil</u>l, Rothermel, Sütterlin, Tarantik, Thoma, Thomas, Rubin-Zuzic.

PK-3 Plus

Annaratone, Bigelmayr, Hagl, Huber, Ivlev, Konopka, Morfill<u>, Rothermel</u>, Stöcker, Sütterlin, Tarantik, Thomas, Rubin-Zuzic.

PK-4

Deysenroth, Fink, <u>Höfner</u>, Kretschmer, Morfill, Ratynskaia, Tarantik, <u>Thoma</u>.

PKE-Nefedov

Annaratone, Hagl, Huber, Ivlev, Khrapak, Klumov, Konopka, Kretschmer, Mokler, <u>Morfill</u>, Rothermel, Rubin-Zuzic, Samsonov, Sütterlin, Thomas, Zhdanov.

Praktikumsversuch "Plasmakristall" Kretschmer, Morfill, Rothermel, <u>Thoma</u>.

Streifenelectrode <u>Annaratone</u>, Deysenroth, <u>Höfner</u>, Konopka, Morfill, Steffes.

Adaptive Electrode <u>Annaratone</u>, Chauduri, Huber, Morfill, Steffes, Thomas.

Diamant-Labor Dose, <u>Jakob</u>, Morfill, Rothermel, Shimizu, Thomas.

3-D-Diagnostik <u>Antonova</u>, Chauduri.

Hochenergie Astrophysik Arevalo, Braglia, <u>Böhringer</u>, <u>Brinkmann</u>, Faßbender, Pierini, Pratt, Santos, Simionescu, Zhang, Zimer.

GEC-Labor Knapek, Konopka, Morfill, Samsonov, Sütterlin, <u>Thomas</u>, Rubin-Zuzic.

Hochfeld Labor Deysenroth, <u>Konopka</u>, Kretschmer, Morfill, Schwabe, Steffes, Tarantik, Tichmann. Nicht-lineare Dynamik, Komplexe Systeme Aschenbrenner, Böhm, <u>Bunk</u>, Jamitzky, Monetti, Müller, Pompl, Räth, <u>Scheingraber</u>.

Paramagnet-Labor Huber, Knapek, Morfill, <u>Samsonov</u>, Steffes, Zhdanov.

Plasmaphysik <u>Scholer</u>, Sidorenko, <u>Treumann</u>.

Plasma Torch Bunk, Morfill, Sato, <u>Shimizu</u>, Steffes.

Optische und Interpretative Astronomie

ASTRO-WISE Bender, Saglia, Wilman.

Galaxy Dynamics

Bender, Gerhard, Saglia, Thomas.

KMOS <u>Bender</u>, Saglia.

Large Scale Structure Bender, Phleps, Schücker, Saglia, Wilman.

MUNICS Bender, Hopp, Drory

OmegaCAM <u>Bender</u>, Hopp.

PanSTARRS Bender, Hopp, Phleps, Saglia, Wilman.

Stellare Populationen und Galaxienentstehung Bender, Hopp, Pierini.

Wissenschaftliche Kollaborationen in Projekten

Argentinien

Observatorio Astronomico Felix Aguilar (OAFA), Universität San Juan, and Instituto de Astronomia y Fisica del Espacio (IAFE), CONICET, Buenos Aires: H-alpha Solar Telescope for Argentina (HASTA).

Australien

Australian National University: Galaxienentstehung.

Melbourne University: Astro-Plasmaphysik.

Swinburne University of Technology, Victoria: Millisecond Pulsars.

Belgien

CSL Liège, Katholieke Universiteit Leuven: Herschel-PACS, INTEGRAL-Spectrometer SPI,

Europäische Kommission, Joint Research Centre (JRC-IRMM), Geel: Entwicklung von großflächigen Röntgenfiltern für eROSITA.

Brasilien

Universidad de Sao Paulo: Galaxienentstehung.

Chile

Universidad de Concepcion: Röntgen-Doppelsternsysteme. Universidad Catolica Santiago: Röntgen-Doppelsternsysteme.

China

Institute for High-Energy Physics (IHEP), Peking: AGN und unidentifizierte Gammaquellen von COMPTEL und INTE-GRAL.

University of Hongkong: Strahlungsmechanismen von Pulsaren vom Röntgen bis zum Gammabereich.

Deutschland

Astrophysikalisches Institut Potsdam: eROSITA; XMM-Newton; GAVO; OPTIMA, GROND. Christian-Albrechts-Universität, Kiel: IMPF; komplexe Plasmen; STEREO.

DLR Berlin: SOFIA.

DLR-Köln Porz: Plasmakristall Experiment; Rosetta Lander (ROLAND); PKE-Nefedov.

European Southern Observatory (ESO), Garching: KMOS Multiobjekt-Spectrograph für VLT; GRAVITY; PARSEC für die VLT Laser Guide Star Facility; ISO (extragalaktisches Programm); ROSAT (MIDAS); Galaxienentstehung; ASTRO-WISE; OmegaCAM, PRIMA testbed.

Fraunhofer Institut für Festkörpertechnologie, München: XEUS; eROSITA.

Fraunhofer Institut für Mikroelektronische Schaltungen und Systeme, Duisburg: Mikroelektronikentwicklungen; CAMEX 64B; JFET-CMOS Prozessor; XEUS; eROSITA.

International University Bremen: Astro-Plasmaphysik, CLU-STER

Institut für Festkörperphysik und Werkstoff-Forschung, Dresden: Entwicklung weichmagnetischer Werkstoffe.

Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen (IAAT): XMM-Newton; eROSITA.

Klinik für Dermatologie, Allergologie und Umweltmedizin, Krankenhaus München Schwabing: Plasmamedizin.

Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl: Nahinfrarotspektrograph LUCIFER für LBT; Galaxienentstehung.

Ludwig-Maximilians-Universität, München: OmegaCAM; AS-TRO-WISE; KMOS.

Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung, Katlenburg-Lindau: Experiment CELIAS auf SOHO; Experiment CIS auf CLUSTER; Rosetta Lander (ROLAND); Multi-Ionen Plasmatheorie.

Max-Planck-Institut für Astronomie, Heidelberg: GRAVITY; PARSEC; Herschel-PACS; PanSTARRS, SDSS.

Max-Planck-Institut für Astrophysik, Garching: GAVO; SDSS; OPTIMA.

Max-Planck-Institut für Physik, Werner Heisenberg Institut,

110 Personal, Kollaborationen

München: Entwicklung von CCDs; Active Pixeldetektoren (APS); JFET-Elektronik und Driftdetektoren für den Röntgenbereich; CAST.

Thüringer Landessternwarte Tautenberg: GROND; Gamma-Ray Bursts.

Technische Universität Braunschweig, Institut für Geophysik und Meteorologie: Hybridcode-Simulationen; Mirror-Moden. Technische Universität Darmstadt: CAST.

Universität Bochum: Komplexe Plasmen.

Universität Bonn: Test von Pixeldetektoren für XEUS; OmegaCAM; ASTRO-WISE.

Universität der Bundeswehr München: Venus Express.

Universität Greifswald: Komplexe Plasmen.

Universität Köln: Galaktisches Zentrum; GRAVITY.

Universitätssternwarte Göttingen: OmegaCAM.

Universität Siegen; Compton Kamera.

Frankreich

CEA, Saclay: INTEGRAL-Spektrometer SPI; Herschel-PACS; CAST; SIMBOL-X.

Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (UPS), Toulouse: INTEGRAL-Spektrometer SPI; CIS/Cluster; Double Star.

Centre d'Etudes des Environnements Terrestres et Planétaires (CNRS), St Maur des Fossés: FAST - Auroraphysik; IMPF.

GREMI-Lab, Orleans: Komplexe Plasmen; Plasmakristall Experiment auf der ISS.

IGRP Marseille: Herschel-PACS.

Observatoire de Meudon: ASTRO-WISE.

Observatoire de Paris / LESIA: GRAVITY

Université d'Orléans CNRS: PKE-Nefedov.

Großbritannien

BRUNEL University: XEUS.

John Moores University, Liverpool: Himmelsdurchmusterung Galaxienhaufen.

Rutherford Appleton Laboratory, Council for the Central Laboratory of the Research Councils: SIS-Junctions; Komplexe Plasmen; Rosetta Lander (ROLAND); JSOC für CLU-STER.

University of Birmingham: INTEGRAL-Spektrometer SPI; XMM-Newton.

University of Bristol: KMOS.

University of Durham: KMOS, PanSTARRS.

University of Edinburgh: KMOS, PanSTARRS.

University of Leicester: XMM-Newton Datenanalyse; XEUS; Swift.

University of Liverpool: Komplexe Plasmen.

University of Wales, Cardiff: Filter für Herschel-PACS und SOFIA.

University Oxford: Komplexe Plasmen; IMPF, KMOS.

University of Sheffield: Astro-Plasmaphysik.

Griechenland

University of Crete and Foundation for Research and Technology Hellas (FORTH), Heraklion: Ausbau und Betrieb der Skinakas Sternwarte; Untersuchung von windakkretierenden Röntgendoppelsternsystemen; Entwicklung und Einsatz des OPTIMA Photometers; optische Identifikation und Monitoring von Röntgen-AGN.

Israel

Ber Sheva University: Astro-Plasmaphysik.

School of Physics and Astronomy, Wise Observatory, Tel Aviv: Aktive Galaxien; Interstellares Medium; ISO extragalaktisches Programm.

Weizmann Institut, Rehovot: Komplexe Plasmen; Galaktisches Zentrum.

Italien

Brera Astronomical Observatory: Jet-X; Himmelsdurchmusterung Galaxienhaufen; XEUS.

IFCAI-CNR Palermo: XMM-Newton Beobachtungen von Neutronensternen und Pulsaren.

INAF Trieste: Gamma-Ray Bursts.

INFR Frascati: SIDDHARTA

Istituto di Fisica Cosmica e Tecnologia, Mailand: INTEGRAL-Spektrometer SPI.

Istituto di Fisica dello Spazio Interplanetario (CNR), Frascati: ESIC; Herschel-PACS; CLUSTER/CIS; Double Star.

OAA/LENS Firenze: Herschel-PACS.

OAP Padua: Herschel-PACS; OmegaCAM.

Osservatorio Astrofisico di Arcetri, Florenz: Hardpoints für den LBT-Primärspiegel.

Osservatorio di Capodimonte, Napoli: OmegaCAM; ASTRO-WISE.

Osservatorio di Padova: OmegaCAM.

Politecnico di Milano: rauscharme Elektronik; Röntgendetektorenentwicklung.

Universität Neapel: Komplexe Plasmen.

Japan

Tokio Institute of Technology (TITECH), Ookayama: ASCA/ XMM-Newton Beobachtungen von AGN.

Institute of Space and Astronautical Science, Yoshinodai: Suzaku; Astro-F Solar System Observations; Astro-Plasmaphysik.

Kyushu University: IMPF.

Tohuko University: Komplexe Plasmen; IMPF.

University of Tokyo: Astro-F Solar System Observations; Astro-Plasmaphysik.

Kroatien

Ministry of Science and Technology, Zagreb: CAST.

Niederlande

ESTEC, Noordwijk: XMM-Newton-TS-Spiegelkalibration; CCD Entwicklung; Radiation Performance Instrument; INTE-GRAL.

SRON, Utrecht: COMPTEL; Chandra-LETG.

Sterrewacht Leiden: SPIFFI/SINFONI; ASTRO-WISE; Omega-CAM.

TU Delft: Reflexions Messungen an schwarzen Farben.

University Eindhoven: Komplexe Plasmen; IMPF.

University of Groningen, Kapteyn Institute: Rekonstruktion der Dichteverteilung im Universum; OmegaCAM; ASTRO-WISE.

Norwegen

Universität Trømsø: Komplexe Plasmen; IMPF.

Österreich

Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Graz: CIS; EDI auf CLUSTER; Geomagnetischer Schweif.

Universität und TU Wien: Herschel-PACS.

Portugal

Universität Lissabon: Komplexe Plasmen.

Rumänien

Institute for Space Sciences, Bukarest: Plasmaphysik; FAST; CLUSTER.

Russland

Institute for High Energy Densities of the Russian Academy of Science, Moscow: Plasmakristall Experiment (PKE); IMPF.

Institute Physics of Earth, Moscow: Plasmaphysik; Astro-Plasmaphysik.

Space Research Institute (IKI) of the Russian Academy of Science, Moscow: Kalibration des Experiments JET-X, eRO-SITA.

IHED Moscow: PKE-Nefedov; PK-3 Plus; PK-4.

Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Moscow: Nukleare Astrophysik und Gamma-Ray Bursts.

Schweiz

CERN, Geneva: CAST.

International Space Science Institute, Bern: Plasmaphysik; Astro-Plasmaphysik.

Observatoire de Genève Sauverny, Geneva: ISDC.

Universität Bern: SOHO/CELIAS; STEREO/PLASTIC.

Spanien

Instituto de Astrofisica de Canarias (IAC), Laguna: Herschel-PACS.

Universität Valencia, Department de Astronomia, Valencia: INTEGRAL-Spektrometer SPI.

Universidad de Zaragoza: CAST.

Taiwan

National Central University, Chungli: IMPF.

Türkei

Bogazici University, Istanbul: IMPF; CAST.

USA

Brookhaven National Laboratory: strahlenharte JFET-Elektronik; strahlenharte Detektoren.

California Inst. of Technology, Pasadena: SAMPEX; ACE; X-ray survey, STEREO.

Clemson University: Gamma-Ray Bursts; Nukleare Astrophysik.

Dartmouth College, Hanover, NH: Weltraum-Plasmaphysik, CLUSTER.

Harvard University: PanSTARRS.

Institute for Astronomy, Hawaii, Honolulu: Galaxienentstehung, PanSTARRS.

Johns Hopkins University: PanSTARRS.

Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley: Herstellung der Ge:Ga Detektorenelemente für Herschel-PACS und SOFIA; Charakterisierung von GaAs-Detektorenmaterial.

Marshall Space Flight Center, Huntsville: GLAST Gamma-Ray Burst Monitor; XMM-Newton und Chandra Beobachtungen von Neutronensternen, Pulsaren und Supernovaüberresten.

NASA/Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD: INTE-GRAL-Spektrometer SPI; ACE; STEREO; Swift.

Naval Postgraduate School, Monterey: Modellierung der Halbleitereigenschaften von Galliumarsenidematerial für Infrarotdetektoren.

Pacific Northwest National Laboratory (PNNL), Richland: CAST.

Smithsonian Astrophysical Observatory, Cambridge: Chandra-LETGS; Röntgendoppelsterne in M31.

Space Telescope Science Institute, Baltimore: Galaxienentstehung.

University of Arizona, Tucson: Kosmische Strahlung; SOHO/ CELIAS; Planetenentstehung; LBT.

University of California, Berkeley: MPG/UCB-Kollaboration; Fern-Infrarot-Detektoren; Galliumarsenide-Zentrifuge; Polarlichtbeobachtungen; FAST; INTEGRAL-Spektrometer SPI; CLUSTER/CIS; STEREO.

University of California, San Diego: CLUSTER/EDI; INTE-GRAL-Spektrometer SPI; IMPF.

University of Colorado, Boulder: SAMPEX.

University of Iowa, Iowa City: Komplexe Plasmen; CLU-STER/EDI; IMPF; PKE-Nefedov.

University of Illinois at Urbana-Champaign: FIFI-LS.

University of Maryland, College Park, MD: SOHO; ACE.

University of New Hampshire, Durham: SEPICA/ACE; CLU-STER; SOHO; FAST; STEREO.

University of Pittsburgh: Galaxienentstehung.

University of Southern California, Los Angeles: SEM/CELI-AS Experiment auf SOHO.

University of Texas, Austin: Galaxienentstehung

University of Toledo: Galaxienentstehung.

University of Washington, Seattle: CLUSTER/CIS.

University Space Research Association, Moffett Field: SO-FIA.

Multinationale Kollaborationen

ASPI, The International Wave Consortium: CNR-IFSI Frascati, Italy; LPCE/CNRS Orleans, France; Dept. of Automatic Control and Systems University of Sheffield, UK.

ASTRO-WISE: LMU München, Universität Bonn, Germany; Sterrewacht Leiden, University of Groningen, The Netherlands; Osservatorio di Capodimonte, Napoli, Italy; Observatoire de Meudon, Paris, France.

CAST: CERN Geneva Switzerland; TU Darmstadt, MPI für Physik (WHI) München, Germany; Universidad de Zaragoza, Spain; Bogazici University Istanbul, Turkey; Ministry of Science and Technology Zagreb, Croatia; CEA/Sacklay DAPNIA/-SED, France; Pacific Northwest National Laboratory, Richland, USA.

CDFS, The Chandra Deep Field South: ESO Garching, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Germany; IAP Paris, France; Osservatorio Astronomico Trieste; Instituto Nazionale di Fisica Nucleare Trieste, Italy; Associated Universities Washington, Johns Hopkins University Baltimore, Space Telescope Science Institute Baltimore, USA; Center for Astrophysics Hefei, China.

CDS – Coronal Diagnostic Spectrometer for the Solar and Heliospheric Observatory: Rutherford Appleton Laboratory Chilton, Mullard Space Science Laboratory London, University College London, Oxford University, UK; LPSP Verrieres-le-Buisson, Nice Observatory, France; Oslo University, Norway; ETH Zürich, Switzerland; GSFC Greenbelt, NRL Washington, HCO Cambridge, Stanford University, USA; Padova University, Turin University, Italy; MPAe Lindau, Germany.

CELIAS – Experiment for SOHO: MPS Katlenburg-Lindau, TU Braunschweig, Germany; Universität Bern, Switzerland; IKI Moskow, Russia; University of Maryland College Park, University of New Hampshire Durham, University of Southern California Los Angeles, USA.

Chandra: Marshall Space Flight Center Huntsville, Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Smithsonian Astrophysical Observatory Cambridge, USA; Space Research Institute Utrecht, The Netherlands; Universität Hamburg, Germany.

CIS-Experiment for CLUSTER: MPS Katlenburg-Lindau Germany; Universität Bern, Switzerland; CESR Toulouse, France; IFSI-CRR Frascati, Italy; Universität Heraklion, Greece; Lockheed Palo Alto Res. Lab., Space Science Lab., Univ. of California Berkeley, Univ. of New Hampshire Durham, Univ. of. Washington Seattle, USA.

COSMOS: INAF-Osservatorio Astronomico di Bologna, INAF-Osservatorio Astronomico di Roma, INAF-Osservatorio Astrofisico di Arcetri, INAF/IASF-CNR, Sezione di Milano, IRA-INAF, Bologna, Dipartimento di Astronomia, Universita Padova, Dipartimento di Fisica, Universita degli Studi Roma Tre, Italy; Harvard-Smithsonian Centre for Astrophysics, Cambridge, Department of Physics, Carnegie Mellon University, Pittsburg, Institute for Astronomy, University of Hawaii, California Institute of Technology, Pasadena, Department of Astronomy, Yale University, USA; INTEGRAL Science Data Centre, Versoix, Switzerland; Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, France.

DOUBLE STAR: MPS Katlenburg-Lindau, Germany; IFSI-CRR Frascati, Italy; CESR Toulouse, France; Space Science Lab., University of California, Berkeley, University of New Hampshire, Durham NH, USA.

EDI-Experiment for CLUSTER: University of New Hampshire Durham, University of California San Diego, USA.

eROSITA: Universität Tübingen, AIP Potsdam, Universität Hamburg, Remeis-Sternwarte Bamberg, MPA Garching, Germany; IKI Moskau, Russia.

EURO3D Research Training Network for promoting 3D spectroscopy in Europe: Astrophysikalisches Institut Potsdam, ESO Garching, Germany; Institute of Astronomy Cambridge, University of Durham, UK; Sterrewacht Leiden, The Netherlands; CRAL Observatoire de Lyon, Laboratoire d'Astrophysique Marseille, Observatoire de Paris Section de Meudon, France; IFCTR-CNR Milano, Italy; IAC La Laguna, Spain.

FAST: SSL-UCB Berkeley, USA; CETP St.Maur, France.

GLAST – Gamma-Ray Burst Monitor: Marshall Space Flight Center Huntsville, University of Huntsville, USA.

GLAST – Gamma-Ray Large Area Space Telescope: Stanford University Palo Alto, Naval Research Laboratory Washington DC, Sonoma State University Rohnert Park, Lockheed Martin Corporation Palo Alto, University of California Santa Cruz, University of Chicago, University of Maryland Greenbelt, NASA Ames Research Center Moffett Field, NASA Goddard Space Flight Center for High Energy Astrophysics Greenbelt, Boston University, University of Utah Salt Lake City, University of Washington Seattle, SLAC Particle Astrophysics Group Palo Alto, USA; ICTP and INFN Trieste, Istituto Nacionale di Fisica Nucleare Trieste, Italy; University of Tokyo, Japan; CEA Saclay, France.

GRAVITY – Instrument for VLT Interferometry: MPIA Heidelberg, Germany; Observatoire de Paris / LESIA, France; Universität zu Köln, Germany; European Southern Observatory, Garching, Germany.

Herschel – PACS (Photodetector Array Camera and Spectrometer): CSL Liège, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium; MPIA Heidelberg, Universität Jena, Germany; OAA/LENS Firenze, IFSI Roma, OAP Padova, Italy; IAC La Laguna, Spain; Universität und TU Wien, Austria; IGRAP Marseilles, CEA Saclay, France. IMPF – International Microgravity Plasma Facility / IMPACT – International Microgravity Plasma, Aerosol and Cosmic Dust Twin Laboratory: Oxford University, UK; Université d'Orléans CNRS, France; Institute for High Energy Densities Moscow, Russia; University of Iowa, USA; University of Tromsø, Norway; National Central University Chungli, Taiwan; Eindhoven University of Technology, The Netherlands; University of California, San Diego, USA; Tohoku University, Kyushu University, Japan; Christian-Albrechts-Universität Kiel, Germany.

INTAS – Cooperation of Western and Eastern European Scientist: France, Germany, Norway, Russia.

ISDC – INTEGRAL Science Data Centre: Observatoire de Geneva Sauverny, Switzerland; Service d'Astro-physique Centre d'Etudes de Saclay, France; Rutherford Appleton Laboratory Oxon Dept. of Physics University Southhampton, UK; Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen, Germany; Danish Space Research Institute Lyngby, Denmark; University College Dublin, Ireland; Istituto di Fisica Milano, Istituto die Astrofisica Spatiale Frascati, Italy; N. Copernikus Astronomical Center Warsaw, Poland; Space Research Institute of the Russian Academy of Sciences Moscow, Russia; Laboratory for High Energy Astrophysics GSFC Greenbelt, USA.

INTEGRAL-Spectrometer SPI: Centre d'Etude Spatiale des Rayonnements (CESR) Toulouse, CEA Saclay Gif-sur-Yvette, France; Institute de Physique Nucleaire Université de Louvain, Belgium; Istituto di Fisica Cosmica e Tecnologia del CNR Milano, Italy; University de Valencia Burjassot, Spain; University of Birmingham, UK; NASA/ GSFC Greenbelt, University of California Berkeley, University of California, San Diego, USA.

ISO-SWS Software and Calibration: SRON Groningen, The Netherlands; KU Leuven, Belgium; ESA Villafranca Spain.

KMOS Study for a VLT multi-IFU near-infrared spectrograph: Universitätssternwarte München, Germany; University of Durham, ATC Edinburgh, University of Oxford, Bristol University, UK.

LBT, Large Binocular Telescope Project: MPIA Heidelberg, MPIfR Bonn, Landessternwarte Heidelberg Königstuhl, Astrophysikalisches Institut Potsdam, Germany; University of Arizona Tucson, USA; Osservatorio Astrofisico di Arcetri Firenze, Italy.

Lockman Hole, optical/NIR identifications: Astrophysikalisches Institut Potsdam, ESO Garching, Germany; Istituto di Radioastronomia del CNR Bologna, Italien; Associated Universities Washington, California Institute of Technology Pasadena, Institute for Astronomy Honolulu, Princeton University Observatory, Pennsylvania State University Park, USA; Subaru Telescope NAO Hilo, Japan.

OmegaCAM: ESO Garching, LMU München, Universität Bonn, Universitätssternwarte Göttingen, Germany; Sterrewacht Leiden, University of Groningen, The Netherlands; Osservatorio di Capodimonte, Napoli, OAP Padua, Italy.

PanSTARRS: MPIA Heidelberg, Germany, University of Hawaii, Harvard University, USA, Johns Hopkins Univ. Baltimore, MD, USA, Universities of Durham, Edinburgh, Belfast, UK.

Plasma-crystal experiment PKE-Nefedov: IHED Moscow, Russia; University of Iowa City, USA; DLR-Köln, Germany; Université d'Orléans CNRS, France.

PK-3 Plus (Plasma-crystal experiment): IHED Moscow, Russia.

PK-4 (Plasma-crystal experiment): IHED Moscow, Russia.

Plasma Physics, Astro-Plasmaphysics: International Space Science Institute Bern, Switzerland; Institute Physics of Earth Moscow, Russia; University of Sheffield, UK.

PLASTIC experiment for STEREO: University of New Hampshire Durham, NASA/GSFC Greenbelt, USA; Universität Bern, Switzerland; Universität Kiel, Germany.

SDSS (Sloan Digital Sky Survey): MPA Garching, MPIA Heidelberg, Germany; Univ. of Washington, Seattle, Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Carnegie Mellon Univ., Pittsburgh, Penn State Univ., University Park, Princeton Univ. Observatory, Princeton, The Institute of Advanced Study Princeton, Space Telescope Science Institute, Baltimore, Johns Hopkins Univ. Baltimore, USA.

SIMBOL-X: Osservatorio Astronomico di Brera, Italy; CEA Saclay, France.

Swift: NASA/GSFC Greenbelt, Penn State University, USA; University of Leicester, Mullard Space Science Laboratory London, UK; Osservatorio Astronomico Brera, Italy.

XEUS: University of Leicester, UK; SRON Utrecht, The Netherlands; Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen, Germany; CESR Toulouse, France; Institute of Space and Astronautical Science (ISAS), Japan.

XMM-Newton/SSC: Astrophysikalisches Institut Potsdam, Germany; SAP Saclay, CDS Strasbourg, CESR Toulouse, France; University of Leicester, Institute of Astronomy Cambridge, MSSL London, UK.

XMM-Newton/TS: ESTEC Noordwijk, The Netherlands.

XMM-Newton/EPIC: SAP Saclay, IAS Orsay, CESR Toulouse, France; University of Leicester, University Birmingham, UK; CNR Mailand-Palermo-Bologna-Frascati, Osservatorio Astronomico Mailand, Italy; Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen, Germany.

Industrielle Kollaborationen

ADTEC Plasma Technology Co. Ltd., Hiroshima: Entwicklung eines Niedertemperatur-Plasma-Gerätes zur in-vivo Sterilisation für Medizinanwendungen.

Albedo GmbH, Neubiberg: Beratung bei der Entwicklung der Elektronik für das Antikoinzidenzsystem des INTE-GRAL-Spektrometers SPI; Soft- and Hardware Entwicklung für PKE-Nevedov und PK-3 Plus.

ASTEQ GmbH, Kelkheim: Fertigung von Detektorarrays aus gedrücktem Ge:Ga und Bearbeitung von Detektorproben aus Galliumarsenid.

BASF Coatings AG, Münster: Untersuchung der Streueigenschaften von Mikropartikeln.

Berliner Glas, Berlin: Politur des GROND-M3 Spiegelrohlings.

Bonerz engineering, Weiler-Simmerberg: Platinumentwicklung, Elektronikentwicklung.

Buchberger GmbH, Tuchenbach: Fertigung Strukturteile für PANTER-Manipulatore und OPTIMA; FIFI-LS; Strukturteile CAST und SWIFT, Lucifer.

CarlZeiss, Jena: eROSITA Spiegel und Mandrels

Cryovac Tieftemperaturtechnik, Troisdorf: Konstruktion und Bau des Testkryostaten für Herschel-PACS.

Drollinger, Birkenfeld: Vergoldung von Detektorteilen für FIFI-LS.

ECM, Moosinning: Fertigung des GROND-M3 Spiegelrohlings.

ESS, Landsberg: Wartung der Elektroinstallation; Ergänzung der Ansteuerungseinheit für das Vakuumpumpsystem; Fertigung von elektrischen Ansteuerungen für die Testanlagen PANTER, CALIFA und PUMA.

FEE, Idar-Oberstein: Züchtung von VAG-Rohlingen für GROND-Linsen.

Guido Lex Werkzeugbau GmbH, Miesbach: Strukturteile für FIFI-LS.

Hans Englett OHG, Berlin: Fertigung von Frontplatten und Meßvorrichtungen.

ESL GmbH, Berlin: Fertigung von Leiterplatten.

Freyer GmbH, Tuningen: Fertigung von Strukturteilen für LUCIFER; PANTER.

GEWO, Wörth/Hörlkofen: Strukturteile für FIFI-LS.

IMEC, Leuven, Belgium: Herstellung von kryogenen Aus-

leseelektronik-Schaltkreisen in neuer CMOS Technologie für IR-Detektoren auf Herschel-PACS; FIFI-LS.

Ingenieurbüro Buttler, Essen: Front-End Elektronikentwicklung für XEUS und eROSITA.

Ingenieurbüro Dohnalek, München: Entwurf FIFI-LS und Unterstützung beim Entwurf gedrückter Ge:Ga-Arrays.

Ingenieurbüro pfma, Haar-Salmdorf: Design und Konstruktion von GROND-Komponenten.

Ingenieurbüro Steinbach, Jena: Design, Konstruktion und Fertigung von GROND-M3-Kippspiegel-Einheit.

Ingenieurbüro Weisz, München: Design und Konstruktion für LUCIFER; PACS Testoptik; XEUS-Spiegeltechnologie.

Kayser-Threde GmbH, München: Hauptkontraktor für Herschel-PACS; Halbleiter-Detektoren Gamma-Astronomie; Plasmakristall-Experiment auf der Internationalen Raumstation; IMPF/IMPACT; eROSITA.

Korth GmbH, Altenholz: Fertigung GROND-Linsen.

Kugler GmbH., Salem: Spiegel für OPTIMA, FIFI-LS.

Pantolsky GmbH, Neuried: Betreuung der Testanlage PANTER.

PNSensor, München: Entwicklung und Fertigung von Halbleiterdetektoren.

Pribil D., Unterhaching: Fertigung von Strukturteilen für OPTIMA; LUCIFER.

Sagem, Paris: Fertigung von Filtern für OmegaCAM.

SCHOTT GLAS, Mainz: Machbarkeitsstudie zur Spiegelfertigung; XEUS.

Siemens AG, München: Fertigung von Masken für pn-CCDs.

Siegert Electronics GmbH, Cadolzburg: Ausleseelektronik- Platinen für FIFI-LS.

Tafelmaier Dünnschichttechnik, Rosenheim: Beschichtung von optischen Komponenten für GROND.

Technotron, Lindau: Entwicklung und Fertigung der Platinen Layouts für eROSITA; Fertigung Koinizidenzplatine MEGA.

Thomas Markl GmbH, Deisenhofen: Fertigung von Strukturteilen für PACS und FIFI-LS.

Zeiss, Oberkochen: Politur der Spiegel für SPIFFI;

Aktivitäten im Wissenstransfer

Durch unsere vielen Kooperationen mit anderen Forschungseinrichtungen und der Industrie ergibt sich ein natürlicher Wissenstransfer. Dies gilt auch bei der Vergabe von Aufträgen an die Industrie. Im Gegensatz dazu sind im Folgenden industriefinanzierte Forschungskooperationen bzw. Beratungstätigkeiten sowie erteilte Patente und vergebene Lizenzen aufgeführt.

A) Industriefinanzierte Forschungskooperationen

Dr. Johannes Heidenhain-Stiftung, Traunreut: Technologische Entwicklung auf dem Gebiet der Röntgenoptik und Röntgenspektroskopie; Absolutkalibrierung eines Röntgen-CCD Systems.

Knoll AG, Ludwigshafen: Analysen von Langzeitkardiogrammen.

Linos AG / Rodenstock Präzisionsoptik, München: Melanomerkennung.

MAHLE GmbH, Stuttgart: Bildanalyse zur zerstörungsfreien Werkstoffprüfung.

OHB-System GmbH, Bremen: Voruntersuchung für einen flexiblen S/W Simulator für Kleinsatelliten.

PROTEOSYS AG, Mainz: Datenanalyse in Biotechnologie.

B 1) Lizenzen

Ganimed AG, Freiburg: EKG-Analysen.

Knoll AG, Ludwigshafen: Pharmakologie.

Linos AG / Rodenstock Präzisionsoptik, München: Melanomerkennung.

B 2) Lizenzverhandlungen

Kayser-Threde GmbH, München: komplexe Plasmen.

C) Kooperationen mit Universitäten (vertraglich)

Anästhesiologie / anaesthesiology: Klinik für Anästhesiologie, Klinikum Rechts der Isar, TU München.

Rastersonden-Mikroskopie:

Institut für Kristallographie und Angewandte Mineralogie, Ludwig-Maximilians-Universität, München.

Radio diagnostics:

Institut für med. Statistik und Epidemilogie, TU München; Institut für Röntgendiagnostik, TU München.

D) Patente

Verfahren und Einrichtung zur Raumfilterung (D, Eu, USA, J); Pat. 700 544.

Verfahren und Vorrichtung zur Mustererfassung (D, Eu, USA, J); Pat. 825 543.

Teilchenmanipulierung (D, Eu, USA, Japan, Russia); Pat.-Anm. 197 13 637.0.

Melanomerkennung (D); Pat.-Anm. 197 54 909.

Streifendetektor (Eu, USA, Japan); Pat.-Anm. PCT/DE 97/01015.

Verfahren und Vorrichtung zur Segmentierung einer Punkteverteilung (D); Anmeldung: # 199 28 231-5.

Silicon Strip Detector (USA, Pat.No.: VS6,184,562 B1).

Controlled Drift Detector, EP Appl. No. 988 300 89.3.

Leitungsüberführung (D, Eu) PCT/EP 03/03209. Eintrittsfenster (D) DE 102 60 229.8.

Halbleiterdetektoren: Patenterteilung Deutschland: DE 10 2004 022 948 Patentanmeldung USA: US 11/127,660

Lage und Anfahrt



Bild Rückseite:

Der deutsche Astronaut Thomas Reiter arbeitet mit dem MPE Plasmakristallexperiment "PK-3 Plus" an Bord der Internationalen Raumstation ISS. PK-3 Plus wurde Ende 2005 vom russischen Weltraumbahnhof Baikonur mit einer Progress Rakete zur ISS gebracht.

