HERSCHEL 2007
GLAST 2006
SOFIA 2004
SPIFFI 2004
INTEGRAL 2002
PKE Nefedov 2001
Bariumwolke 1966
CONICA auf dem VLT 2001
HEOS I 1968
Ionenwolken experiment 1970
CLUSTER II 2000
HELIOS I 1974
XMM 1999
40 JAHRE MPE
80 JAHRE REIMAR LÜST
COS-B 1975
CHANDRA 1999
Goldener Drache 1984
EQUATOR-S 1997
2003
AMPTE 1984
HASTA Teleskop 1998
ISO 1995
ROSAT 1990
COMPTON GRO 1991

MAX-PLANCK-INSTITUT FÜR EXTRATERRESTRISCHE PHYSIK

MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT

Impressum

Inhaltliche Verantwortung:	G. E. Morfill
Redaktion und Layout:	H. Scheingraber, R. Mayr-Ihbe
Druck:	MPE-Druckerei (R. Hauner, W. Karing)
Textbeiträge und Bildmaterial:	G. Morfill, R. Lüst, B. Bender, B. Klecker, MPE
Sonstige Unterstützung:	M. Abele, E. Chmielewski

1. Auflage März 2004 (800)

40 Jahre MPE – 80 Jahre Reimar Lüst

Vorwort

In diesem Jahr, 2003, feiern wir zwei wichtige Geburtstage, das 40jährige Bestehen des Max-Planck-Instituts für extraterrestrische Physik (MPE) – und den 80. Geburtstag des Gründungsdirektors, Reimar Lüst.

In den vergangenen 40 Jahren ist sehr viel geschehen. Das Institut, das am Anfang noch in einen einfachen PKW eines ausländischen Markenfabrikats (2CV) hineingepasst hatte, beschäftigt jetzt über 300 Mitarbeiter, setzt jährlich zwischen 25-30 Mio. € um, und wird weltweit wegen seiner Spitzenstellung in der Forschung anerkannt. Auch die Forschungsschwerpunkte haben sich im Laufe der Zeit gewandelt – eine notwendige Flexibilität, die dazu beiträgt die Spitzenstellung des Instituts zu erhalten.

Stand am Anfang noch die Erforschung des erdnahen Raums mit Höhenforschungsraketen im Vordergrund, so entwickelte sich die Erforschung der Erdmagnetosphäre mit Satelliten in den darauf folgenden Jahren immer deutlicher zu einem Schwerpunkt, der dann im Laufe der weiteren Entwicklung von der extraterrestrische Astronomie, insbesondere im Infrarot- Röntgen- und Gammastrahlenbereich, abgelöst wurde. In den letzten Jahren hat es dazu auch den Aufbau des komplementären Standbeins – das Engagement in der erdgebundenen Astronomie – gegeben, weil diese Ergänzung für ein Institut mit höchsten Ansprüchen in der Forschung wissenschaftlich notwendig ist. Auch die Erforschung physikalischer Prozesse im Weltraum unter Schwerelosigkeitsbedingungen wurde in letzter Zeit aufgegriffen – u. a. mit dem ersten naturwissenschaftlichen Experiment auf der Internationalen Raumstation (ISS).

So blicken wir jetzt zurück auf 40 Jahre MPE, und 80 Jahre Reimar Lüst. Unser Gründungsdirektor hat sich in dieser Zeit sicherlich ebenso flexibel gezeigt wie „sein“ Institut. Einige Jahre nach der Institutsgründung wurde er zum Präsidenten der Max-Planck-Gesellschaft erwählt. Nach acht erfolgreichen Jahren wurde er Generaldirektor der ESA, dann Präsident der Humboldt-

Gesellschaft und – als all diejenigen, die ihn nicht so gut kannten, glaubten er würde sich zur Ruhe setzen – half er mit, die International University Bremen zu gründen … und er marschiert weiter!

Mein Wunsch an dieser Stelle für die Zukunft ist, dass Reimar Lüst der Wissenschaft noch viele Jahre mit Rat und Tat zur Seite steht und dass das MPE seinen Höhenflug in den nächsten Jahrzehnten fortsetzt.

Die zwei Beiträge, die anlässlich des „Doppelgeburtstages“ in dieser Sonderausgabe des MPE zusammengefasst sind, erlauben einen faszinierenden Einblick in das Leben unseres Gründungsdirektors einerseits und in einen der derzeitigen Forschungsschwerpunkte unseres Instituts andererseits – zusammengefasst von unserem „jüngsten“ Wissenschaftlichen Mitglied und Direktor, Ralf Bender.
Ich möchte mich hier im Rahmen des Direktorenkollegiums des MPE bei allen bedanken, die uns auf unseren 40 Jahren der extraterrestrischen Forschung begleitet und unterstützt haben, zu allererst bei den Mitarbeitern, dann bei den verantwortlichen in der Max-Planck-Gesellschaft, den Kollegen an den Universitäten, dem DLR, Der ESA, der Industrie und den Vertretern des öffentlichen Lebens und der Politik – ganz besonders der Universitätsstadt Garching, die anlässlich dieses Festes von ihrem Bürgermeister, Herrn Solbrig, hier vertreten wurde.

Ich hoffe wir können Ihnen, lieber Leser, mit diesem Dokument und der beigefügten CD einen interessanten und etwas ungewöhnlichen Einblick in die menschliche Seite der Forschung und in die Faszination, Innovation und den Nutzen der Forschung vermitteln.

Gregor Morfill
Geschäftsführender Direktor

Vom Meeresboden zur Erdoberfläche in den Weltraum

Reimar Lüst

Vom Meeresboden zur Erdoberfläche in den Weltraum

Reimar Lüst

Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Ich danke denjenigen, die gemerkt haben, daß ich doppelt so alt bin wie dieses Institut. Der Aufbau dieses Instituts und die Arbeit in ihm sind ein ganz entscheidender Abschnitt meines Lebens. So läßt sich vielleicht rechtfertigten, diese beiden Geburtstage zusammen zu feiern, wobei das Institut im Vordergrund stehen sollte, denn an meinem Geburtstag hat man schon genügend über mich geredet.

Sicher ist es ungewöhnlich, wenn der alt gewordene Jubilar die Festrede auch noch selber hält, er sollte ja eigentlich eher schweigen und zuhören, was andere sagen. Bevor ich die Arbeit in diesem neuen Institut aufnahm, war ich in ganz unterschiedlichen wissenschaftlichen Bereichen zu Hause. Diese Aktivitäten gehören gewissermaßen mit zur Vorgeschichte des Instituts, zu der eine ganze Reihe von Personen mit beigetragen haben.

Abb. 1

Auch dieser Vortrag hat eine Vorgeschichte. Vor einem Jahr wurde ich von Herrn Fulde, Direktor am Max-Planck-Institut für Komplexe Systeme in Dresden gebeten, im Rahmen des Institutskolloquiums einen Vortrag zu halten. Als ich ihn fragte, was das Thema sein sollte, meinte er, ich sollte einfach über mein Leben erzählen, das sei schon komplex genug, wie er von verschiedenen Seiten gehört hätte.

In der Tat, mein Leben war reichlich komplex und turbulent. Sowohl im äußeren Ablauf, als auch in den physikalischen Problemen, die ich zu bearbeiten versucht habe. Davon möchte ich Ihnen im Folgenden berichten.

1. Marinezeit und Kriegsgefangenschaft

Schon im Jahre 1941 versuchte ich Verbindung mit einer wissenschaftlichen Institution aufzunehmen. Mit den Weihnachtsferien 1940 hatte meine Schulzeit ohne Abitur geendet. Das Abgangszeugnis der Schule enthielt nur einen Vermerk, indem mir wegen der Einberufung zur Marine mit siebzehn Jahren die Reife zuerkannt wurde.

Ich hatte mich freiwillig zur Marine gemeldet, weil ich Schiffsbauer werden sollte. Deshalb hatte ich mich - bevor ich am 10. Januar in eine Kaserne in Brake an der Weser als Rekrut zur Grundausbildung umzog - schriftlich als Student des Maschinenbaus an der Universität Dresden einschreiben lassen. Dresden hatte ich gewählt, weil nur an der TU Dresden eine solch schriftliche Immatrikulation möglich war. Aber als Student habe ich die TU nie von innen gesehen. Abb. 2

Die Marinezeit war eine Mischung zwischen Dienst an Bord eines Schiffes und Studium an der Marineschule in Kiel. Dort begann für mich nach der Rekrutenausbildung ein Werkstättenlehrgang, in dem ich Feilen und Fräsen, Drehen, Bohren und Schmieden lernte, sowie in vierteljährigen Abständen an Kursen in Physik, im Maschinenbau und in der Elektrotechnik teilnahm.

Das erste Schiff, auf dem ich Dienst zu tun hatte, war ein Fischdampfer Baujahr 1914 mit Kohlefeuerung und einer Dampfmaschine. Wir waren in der Ostsee stationiert, zunächst in Gotenhafen, jetzt Gedingen, und später, mit dem Fortschreiten des Rußlandfeldzuges in Helsinki mit dem Einsatz vor Leningrad. Für mich war dies eine schreckliche Zeit, denn ich mußte Kohle trimmen, eine Schwerarbeit, die ich als achtzehnjähriger Primaner gar nicht gewohnt war, und hinzu kam bei entsprechendem Seegang auch noch die Seekrankheit. Abb. 3

Nach einem Jahr Dienst auf diesem Fischdampfer wurde ich zur U-Boot-Waffe abkommandiert. Dort machte mir dann die Seekrankheit nicht mehr so zu schaffen, denn bei schlechtem Wetter wurde zum Essen nach Möglichkeit getaucht, unter Wasser machten sich die Wellen des Seegangs nicht mehr stark bemerkbar.

Nach entsprechender Ausbildung in der Ostsee ging es dann als Schiffsingenieur im Frühjahr 1943 auf Feindfahrt in den Atlantik. Nach zwei Geleitzugschlachten wurden wir durch den Bombenangriff eines englischen Flugzeuges so schwer beschädigt, daß wir den Heimweg zu unserem Stützpunkt in Lorient in der Bretagne antreten mußten. Zwei Tage vor dem geplanten Einlaufen wurden wir über Wasser wieder von einem englischen Flugzeug angegriffen. Dieses holte zwei englische Fregatten zu Hilfe. Nachdem wir zwanzig Stunden lang mit Wasserbomben beworfen worden waren, sackten wir schließlich auf 320 Meter Tiefe durch. Die Werftgarantie lag bei 100 Metern.

Abb. 4
Abb. 5
Abb. 6
Abb. 7

An Bord hatte jeder, auch ich, mit dem Leben abgeschlossen. Als es dann doch noch gelang, mit dem Boot an die Oberfläche zu kommen, eröffneten die beiden englischen Fregatten mit ihren Kanonen das Feuer auf uns, so daß der Kommandant das Boot versenkte. Wir schwammen zwei Stunden im Wasser. Ein Teil der Besatzung wurde schließlich von der Besatzung der englischen Fregatte aus dem Wasser gezogen. Das geschah am 11. Mai 1941, den ich seitdem als meinen zweiten Geburtstag feiere.

Die englische Fregatte hatte uns zunächst in Gibraltar abgesetzt. Nach einem dreiwöchigen Aufenthalt im dortigen Gefängnis wurden wir mit

Abb. 8

einem Flugzeugträger in ein Verhörlager nach England gebracht, immer in Sorge, daß ein deutsches U-Boot uns noch versenken ’könnte. Von dort brachte mich dann ein Truppentransporter über den Atlantik nach New York. Nach einer viertägigen Zugfahrt landete ich

schließlich in einem großen Gefangenenlager in Texas, südlich von Dallas. Dort waren tausend deutsche Offiziere, die in Afrika gefangen genommen worden waren, zusammen mit 3000 deutschen Mannschaftsdienstgraden eingesperrt.

Rückblickend war es ein doppelter Glücksfall, daß ich unter diesen Umständen aus dem Atlantik gerettet wurde. Denn es begann eine dreijährige Gefangenschaft, in der ich wie geplant studieren konnte, zwar nicht an der TU Dresden, sondern in einer Lageruniversität in Texas.

Als Offizier brauchte man entsprechend der Genfer Konvention nicht zu arbeiten. Stattdessen wurde eine eigene Universität gegründet und ich begann zunächst Maschinenbau zu studieren. Die Vorlesungen wurden von Professoren und Dozenten, die in Afrika als Reserveoffiziere gedient hatten, gehalten. Ingenieure gab es eine größere Zahl, aber auch zwei Mathematiker, die Assistenten an einer Universität in Deutschland waren, sowie zwei Physiker.

Nach einem halben Jahr merkte ich, daß mich die Mathematik und Physik sehr viel mehr interessierten als der Maschinenbau. Besondere Schwierigkeiten hatte ich mit dem technischen Zeichnen und der

darstellenden Geometrie. So konzentrierte ich mich ganz auf die Mathematik - und Physikvorlesungen. So viele Übungen wie dort habe ich auch bei meinem späteren Studium nicht mehr gelöst. Am Ende eines jeden Semesters mußte für jede Vorlesung eine Prüfung abgelegt werden, deren Ergebnis dann in einem Studienbuch eingetragen wurden.

Von dem kargen Wehrsold, den man als Offizier von den Amerikanern bekam - für einen Leutnant waren es monatlich $ 20 - kaufte ich mir die notwendigen Textbücher, nicht nur in Englisch, sondern auch zum Teil in Deutsch. Letztere waren als Raubdrucke während des Krieges in den USA gedruckt worden, so z.B. Kohlrausch "Praktische Physik", die beiden Bände von Courant - Hilbert sowie von Erwin Madelung die "Mathematischen Hilfsmittel des Physikers". Dieses Buch erwies sich nach meiner Rückkehr aus der Gefangenschaft in besonderer Weise als hilfreich für mich. Und selbst meine beiden Söhne haben die aus der Gefangenschaft mitgebrachten Bücher während ihres Physikstudiums an der TU München während der siebziger Jahre noch benutzt.

Abb. 9
Abb. 10

Endlich zu Beginn des Jahres 1946, nach drei Jahren Gefangenschaft in Lagern in Texas, Mississippi, Oklahoma und Arkansas - der Krieg war

schon vor einem Jahr zu Ende gegangen - war es soweit, daß ein Libertyschiff mich über den Atlantik nach Frankreich brachte. Weitere drei Monate nervenzermürbendes Warten in einem Gefangenenlager bei Le Havre vergingen, bevor ich am 25. März endlich wieder ein freier Mann wurde.

2. Studium an der Universität Frankfurt und Diplom-Arbeit

Zwei Tage, nachdem ich in meine Heimatstadt Kassel zurückgekehrt war, fuhr ich nach Göttingen - damals ein schwieriges Unternehmen, denn dazwischen lag die Grenze zwischen der amerikanischen und der britischen Zone, an der man den Zug zur Kontrolle verlassen mußte.

Wenn ich geglaubt hätte, man hätte an der Universität Göttingen nur auf mich gewartet, so wurde ich tief enttäuscht. Mit wurde eröffnet, die Einschreibefrist sei seit einer Woche abgelaufen und ich könnte mich nicht mehr für das schon begonnene Sommersemester immatrikulieren. Selbst der Hinweis, daß ich erst vor zwei Tagen aus einer dreijährigen Gefangenschaft zurückgekehrt sei, half nichts. Und auch der Dekan, der Physiko-Chemiker Arnold Eugen, mit dem ich sprechen konnte, ließ sich nicht erweichen. Einen Tag später ging es

mir an der Universität Marburg nicht besser. Der dortige Dekan war der Experimentalphysiker Professor Grüneisn.

Von Marburg fuhr ich gleich nach Frankfurt weiter. Der dortige Dekan war Prof. Erwin Madelung. Er hörte sich mein Anliegen sehr freundlich an. Ich zeigte ihm schließlich sein Buch, das ich in der Gefangenschaft erworben hatte. Damit war der Bann gebrochen. Aber noch war nicht sicher, ob ich das Studium beginnen durfte, denn im Grunde hätte ich zurück auf die Schule gemusst, ich hatte ja kein ordentliches Abiturzeugnis, sondern nur einen Reifevermerk. Aber immerhin gab es einen Ministeriumserlaß aus Wiesbaden, der besagte, daß diejenigen, die im Krieg drei Semester studiert hätten, auch jetzt weiter studieren dürften.

Prof. Madelung entschied aus eigener Machtvollkommenheit, ich dürfe mit dem Studium beginnen, müßte aber nach dem ersten Semester eine Prüfung ablegen. Falls ich die bestehen würde, würden mir zwei weitere Semester aus der Gefangenschaft anerkannt und damit wäre alles geregelt. In der Tat gelang mir das und so konnte ich in Frankfurt schon nach fünf Semestern meine Diplomprüfung ablegen. Als Diplomarbeit hatte ich von Madelung ein nicht ganz leichtes Thema bekommen, das, wie ich hörte, schon einige Diplomanden zurück

gegeben hatten. Als Aufgabe hatte man mir gestellt, die Kraft des an einer Kante gebeugten Lichts zu berechnen. Nach der Quantentheorie werden ja die Lichtquanten an der Kante abgelenkt und sollten so zu einer Kraft parallel zur Ebene führen.

Um dieses Problem anzugehen, studierte ich zuerst einmal Born's klassisches Buch "Optik". Dieses half mir einen Weg zu finden, die Kraft mit Hilfe der klassischen Maxwell'schen Theorie zu berechnen. Sommerfeld hat die exakte Lösung der Lichtbeugung an einer Kante vorgelegt, die ich dazu ausnutzen konnte. Das war für mich das erste komplexe Problem in der Physik, was ich zu behandeln hatte.

Abb. 11
Abb. 12

Anscheinend war Prof. Madelung mit meiner Diplom-Arbeit zufrieden und im Frühjahr 1949 konnte ich mein Studium an der Universität Frankfurt abschließen. Dort hatte ich die klassische Physik in idealer Weise gelernt. Wir waren meistens nur fünf oder sechs Studenten in einer Vorlesung über Theoretische Physik. Deshalb war sicher, daß man in jedem Seminar und bei jeder Übungsarbeit an die Tafel geholt wurde, um eine der gestellten Aufgaben vorzutragen.

3. Doktorand am Max-Planck-Institut für Physik

Nach meiner Diplom-Arbeit wollte ich mehr über die Quantentheorie und speziell über die Kernphysik lernen. Einer der besten Plätze dafür war das Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen. Zwei Tage nachdem ich meine Diplomprüfung in Frankfurt abgelegt hatte, klingelte ich am Eingang des Max-Planck-Instituts, um Carl-Friedrich von Weizsäcker zu fragen, ob er mich als Doktorand akzeptieren würde. Der Pförtner des Instituts, Herr Czierpa, wie ich später lernte durchaus eine wichtige Person am Institut, fragte mich, ob ich einen Termin bei Herrn von Weizsäcker hätte, was ich verneinte. Er rief bei ihm im Arbeitszimmer an und ich wurde dann sehr freundlich im zweiten Stock des Instituts bei ihm empfangen. Er erklärte mir, daß in fünf Minuten das Institutsseminar beginnen würde, ich solle doch mitkommen und nachher könnten wir dann die Möglichkeiten einer Doktorarbeit bei ihm diskutieren.

Der Seminarraum war ziemlich klein, nur 25 Personen fasste er, und wenige Minuten später betrat Werner Heisenberg, ein noch sehr jugendlich wirkender Herr, den Seminarraum und fragte: "Wer ist heute der Vortragende?" Dies war Arnulf Schlüter, der seine erste Arbeit zur

Plasmaphysik vortrug. Ein Bereich, der ja später auch für meine wissenschaftlichen Aktivitäten sehr bedeutungsvoll werden sollte. Heisenberg unterbrach Schlüter von Zeit zu Zeit, nicht professoral oder als Lehrer, sondern sehr freundlich um Punkte klar zu stellen, denn die Plasmaphysik war auch neu für ihn.

In diesem Seminar bin ich Heisenberg zum ersten Mal begegnet. Er und das Institut hatten einen entscheidenden Einfluß auf mein wissenschaftliches Leben. Die Atmosphäre am Institut war durch Heisenberg bestimmt. Alles wurde sehr einfach gehandhabt, ohne viel Bürokratie. Jeder konnte in großer Freiheit arbeiten, die Individualität eines jeden wurde respektiert, trotzdem konnte jedermann die leitende Hand von Heisenberg spüren.

Abb. 13
Abb. 14
Abb. 15

Wenn eine Arbeit für die Publikation fertig war, wurde man in sein Arbeitszimmer gerufen, er diskutierte mit einem die Arbeit, bevor er seine Zustimmung zur Veröffentlichung gab. Normalerweise wurden wir von Heisenbergs Sekretärin vorgewarnt, daß man wohl am nächsten Tag zu ihm gerufen würde und daß wir früher am Institut erscheinen sollten. Normalerweise waren wir nicht vor 10:00/11:00 Uhr am Platz und verließen das Institut üblicherweise erst nach Mitternacht.

Die Teestunden am Nachmittag und um Mitternacht waren sehr wichtig für das Leben am Institut. Nachmittags kam auch Heisenberg hin und wieder dazu, trank Tee und spielte Tischtennis mit uns. Dabei wollte er natürlich immer gewinnen. Den Tischtennisschläger hielt er wie einen Stift, so wie er es während seiner Zeit in Japan gelernt hatte, den sogenannten pen-holder Griff.

In dieser Zeit waren wir ungefähr sechs bis acht Doktoranden am Institut. Heisenberg hatte drei oder vier, Weizsäcker außer mir noch einen weiteren. In der Tat, Weizsäcker hatte mich als Doktorand akzeptiert, aber zuerst war ich doch sehr enttäuscht, da er mir erläuterte, daß er nicht länger an Kernphysik interessiert sei, sondern an Astrophysik. Er würde mich als Doktoranden wohl akzeptieren, aber dann müßte ich ein astrophysikalisches Problem bearbeiten. Astrophysik war für mich völlig neu. Ich hatte nie eine Vorlesung in Astronomie oder Astrophysik gehört und bis dahin war ich an Sternen auch nicht wirklich interessiert.

Von Weizsäcker hatte die Kant-Laplace Theorie über die Entstehung des Sonnensystems wieder aufgenommen. In dieser Theorie ist unser Sonnensystem ja aus einer rotierenden Gasscheibe entstanden, in der die Hauptmasse des Gases im Zentrum durch die Gravitationskräfte

konzentriert wird. Auf diese Weise formierte sich die Sonne, während die Planeten sich in den äußeren Teilen der Gaswolke kondensierten. Von Weizsäcker machte damals einen wirklichen Schritt vorwärts, indem er die hydrodynamischen Gleichungen mit Turbulenzen für dieses Problem formulierte.

Die Hauptschwierigkeit in dieser Theorie war die Tatsache, daß die Sonne heute ziemlich langsam rotiert, da der Hauptteil des Drehimpulses im Sonnensystem in der Bahnbewegung des Jupiter steckt, so daß die Sonne einen erheblichen Teil des Drehimpulses während der Kondensationsphase verliert. Von Weizsäcker stellte mir nun die Aufgabe zu untersuchen, in welcher Weise dieser Abbremsprozess in einer rotierenden Gasscheibe vonstatten gehen könnte.

In meiner Doktorarbeit fand ich in der Tat eine Lösung für eine rotierende Gasmasse mit turbulenter Reibung, der den Drehimpuls nach außen transportierte. Nach zwei Jahren konnte ich meine Doktorarbeit abschließen und mit der Vorbereitung auf das Examen an der Universität Göttingen beginnen. Zwei Tage vor der Doktorprüfung wurde ich von Heisenberg in sein Arbeitszimmer gerufen und er fragte mich, ob ich mich wirklich gut auf die Prüfung in der Astrophysik

vorbereitet hätte. Er war sehr besorgt, daß sich möglicherweise ein schlechter Eindruck für das Institut ergeben könnte. Ludwig Biermann, der damalige Abteilungsleiter für die Astrophysik wurde beauftragt, meine Vorbereitungen zu überprüfen, bevor ich von dem Direktor der astronomischen Sternwarte der Universität Göttingen, Prof. ten Bruggencate, geprüft wurde. Dies geschah auf einem mehrstündigen Spaziergang auf dem Hainberg bei Göttingen. Glücklicherweise verlief die Prüfung sehr gut und ich wurde promoviert.

Abb. 16

Die Doktorarbeit wurde in der "Zeitschrift für Naturforschung" in einem besonderen Band zu Ehren von Heisenberg's 50. Geburtstag veröffentlicht. 1951 war es noch ganz normal, daß diese Arbeit in Deutsch veröffentlicht wurde, aber mit der Konsequenz, daß nur wenige Wissenschaftler außerhalb Deutschlands sie lesen konnten.

Abb. 17

Im Jahre 1968 veröffentlichte der englische Astrophysiker Lyndon Bell eine Arbeit in "Nature" mit fast dem gleichen Inhalt. Darin behandelte er allerdings nicht das Problem der Entstehung des Sonnensystems, sondern er befasste sich mit der Physik der accretion discs in Zusammenhang mit supermassiven black holes. Das Problem war nach der Entdeckung von Doppelsternen durch die Röntgen-Astronomen von besonderem Interesse. Biermann veranlasste eine

Übersetzung meiner alten Arbeit, damit sichergestellt wurde, daß Lyndon Bell sie auch lesen konnte, seitdem gibt man mir in Zusammenhang mit accretion discs auch Kredit für meine alte Arbeit.

Als Fortsetzung untersuchten Arnulf Schlüter und ich den Einfluß von Magnetfeldern in der Abbremsung von rotierenden Sternen. Aber ich will nicht weiter in die Details gehen, denn dieses war ein komplexes System der Plasmaphysik. Die Arbeit war der Beginn einer sehr engen und fruchtbaren Zusammenarbeit mit Arnulf Schlüter. Wir verfaßten zahlreiche Arbeiten zusammen in unserer Zeit in Göttingen, so daß Gerhard Lüders, ein Theoretiker bei Heisenberg, uns damals "Schlüster" taufte.

Abb. 18

4. Arbeiten zu kosmischen Strahlungen

Zu Beginn der fünfziger Jahre war eines der zentralen Probleme am Max-Planck-Institut für Physik die "Kosmische Strahlung". Während des Krieges hatte Heisenberg dieses Thema am Institut eingeführt. 1943 wurde auch ein Buch über Kosmische Strahlung, das Heisenberg herausgegeben hatte, veröffentlicht. Heisenberg wünschte eine zweite Ausgabe vorzubereiten. Fast zwei Jahre lang hatten alle Instituts-

Kolloquien, die an jedem Samstag vormittag stattfanden, dieses Thema.

Mein Beitrag zu diesem Buch war das erste Kapitel, in dem der Einfluß des Erdmagnetfelds auf die Kosmische Strahlung dargestellt wurde. Als ich begann, mich in das Problem zu vertiefen, lernte ich, daß schon in den dreißiger Jahren der norwegische Mathematiker Stoermer einzelne Bahnen von geladenen Teilchen im Erdmagnetfeld numerisch mit Handrechenmaschinen berechnet hatte. Er war damals an dem Phänomen der Nordlichter interessiert, die man ja hauptsächlich im Norden beobachten kann. Er hatte eine numerische Methode entwickelt, um die Differenzialgleichungen zu lösen, die die Bahnen geladener Teilchen im Erdmagnetfeld beschreiben. Die Berechnung einer einzelnen Bahn mit Handrechenmaschinen war damals sehr mühsam und nahm mehrere Tage in Anspruch, deshalb hatte er auch nur einige wenige Bahnen berechnet. Aber gerade als ich dieses Thema zugeteilt bekam, um meinen ersten Kolloquiumsvortrag darüber zu halten, war der erste elektronische Computer, der G1, den Heinz Billing am Max-Planck-Institut für Physik entwickelt hatte, fertig geworden. Arnulf Schlüter und ich entschieden, die G1 auszunutzen, um eine größere Anzahl von Bahnen zu berechnen und dabei die von Stoermer entwickelten Methoden anzuwenden. Damals mußte man

Abb. 19

Abb. 20

noch jeden einzelnen numerischen Schritt programmieren und dann ein entsprechendes Lochband vorbereiten. Die Berechnungen nahmen nur einige Stunden in Anspruch, in einigen Fällen auch länger, abhängig von der Komplikation der Bahn in Spiralen im Erdmagnetfeld.

1955 bekam ich eine Einladung von John Simpson, einem Cosmic Ray Physiker am Enrico Fermi Institut der Universität Chicago. Er hatte mich auf einer Konferenz über Kosmische Strahlung in Bagnères-de-Bigorre in den Pyrenäen kennengelernt, wo ich die Arbeit von Schlüter und mir vortrug. Die Reise nach Chicago machte ich als Fulbright Stipendiat, später konnte ich durch ein Grant der Air Force den Aufenthalt noch verlängern. In Chicago konnte ich einen viel schnelleren Computer benutzen, der von John von Neumann am Institut für Advanced Studies in Princeton entwickelt worden war. Eine Kopie dieses Computers, die sogenannte AVIDAC, war im Argonne National Laboratory außerhalb von Chicago installiert. Simpson's Gruppe maß die Kosmische Strahlung mit sogenannten Neutronenmonitoren in Chicago und auch an anderen Plätzen, die über den Globus verteilt waren. Simpson war speziell an der solaren Kosmischen Strahlungen interessiert. Gerade als ich in Chicago war am 23. Februar 1955, ereignete sich auf der Sonne ein beachtlicher Flare, der zu einem beträchtlichen Anstieg der Kosmischen Strahlung

Abb. 21
Abb. 22
Abb. 23
Abb. 24
Abb. 25

führten. Gerade für dieses Ereignis waren meine damaligen Berechnungen von Interesse.

Von Chicago ging ich nach Princeton, wo ich mit Martin Schwarzschild an der Sternwarte der Universität zusammenarbeiten konnte. Dort benutzte ich das Original des von Neumann Computers im Institut für Advanced Studies. Ich versuchte, damit die Ausbreitung hydromagnetischer Wellen in der Sonnenatmosphäre zu berechnen. Aber der Computer war dafür zu klein, so daß ich nicht wirklich zu Lösungen kam. Später hat Manfred Scholer in seiner Doktorarbeit dieses Problem aufgenommen.

5. Arbeiten zur thermonuklearen Fusion

Als ich Ende 1956 aus den USA zurückkehrte, hatte man am Max-Planck-Institut für Physik in Göttingen eine neue Aktivität gestartet, die Arbeiten zur thermonuklearen Fusion, sowohl in der Theorie, als auch in Experimenten. In der Theorie war das Institut wohl vorbereitet, während die experimentellen Arbeiten völlig neu aufgebaut werden mußten.

Erst seit 1955 war es in Deutschland erlaubt, Forschung im Bereich der Kernphysik und ihren Anwendungen - mit Ausnahme von Waffen - durchzuführen. Das Institut hatte schon im Krieg mit der Entwicklung eines Fission-Kern Reaktors begonnen und diese Arbeiten wurden 1955 wieder aufgenommen.

1955 wurde entschieden, das Institut von Göttingen nach München zu verlegen, so wie es sich Heisenberg immer gewünscht hatte, denn er war ja in München aufgewachsen. In der Zeit hatte Bundeskanzler Adenauer dem Land Baden-Württemberg ein neues Zentrum für Kernphysik versprochen, das in Karlsruhe installiert werden sollte. Aus diesem Grunde wurde die Abteilung für Reaktorphysik, die unter der Leitung von Karl Wirtz stand, nicht mit nach München verlegt, sondern nach Karlsruhe. Auf diese Weise beschäftigte sich das Institut von jetzt an nicht mehr mit der Fission, sondern mit der Fusion.

Für die nächsten drei Jahre war ich mit etlichen anderen sehr involviert in den Problemen der Einschließung von Plasma bei hohen Temperaturen durch Magnetfelder. Hierbei waren die Stabilitätsfragen von besonderem Interesse. Im Jahre 1959 war ich eingeladen, als Gastprofessor am Courant-Institut für Mathematik in New York ein Jahr zu verbringen, um mich mit diesem Problem zu beschäftigen. Dort

Abb. 26
Abb. 27

hatte ich die Chance, zum ersten Mal die ganz modernen IBM Computer auszunutzen.

Nach einem Jahr kam ich von New York an das Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik zurück, das jetzt in München lokalisiert ist. Nach meiner Habilitation entschied ich mich dann, in die Astrophysik zurück zu kehren. In der Zwischenzeit hatten die Russen und die Amerikaner ihre ersten künstlichen Erdsatelliten gestartet. Auch in der Max-Planck-Gesellschaft wurde die Frage diskutiert, ob man sich in der Weltraumforschung engagieren sollte.

6. Arbeiten zur extraterrestrischen Physik

Mein erstes Interesse an Problemen der Weltraumforschung wurde durch die Entdeckung der Strahlungsgürtel durch Jim van Allen ausgelöst. Die Strahlungsgürtel werden durch geladene Teilchen, die im Erdmagnetfeld eingefangen sind, gebildet. Schon in Göttingen hatten Schlüter und ich ja solche Bahnen berechnet und später auch im Zusammenhang mit der Fusion eine weitere Arbeit darüber verfasst.

Jedoch gab es noch ein anderes Interesse, sich in der Weltraumforschung zu engagieren. Dies geht zurück in die fünfziger

Jahre. 1950 hatte Ludwig Biermann eine Vorlesung über Kometen in der Universitätssternwarte in Göttingen gehalten. Zu der Zeit war ich ja Doktorand und hörte mir alle Vorlesungen von Biermann an. Biermann's Interesse galt damals besonders den Kometenschweifen mit ionisierten Molekülen, die alle von der Sonne weg gerichtet sind, während die Schweife von nicht ionisierten Molekülen und von Staubteilchen zwar auch von der Sonne weg gerichtet sind, aber doch gekrümmt waren, nicht direkt gradlinig. Kometenschweife aus Staub und nicht ionisierten Molekülen konnten durch den Lichtdruck der Sonne und die Bewegung der Kometen um die Sonne durchaus erklärt werden.

Jedoch alle Erklärungen, die den Lichtdruck auch für das Hinwegblasen der ionisierten Kometenschweife verantwortlich machten, waren um mehrere Größenordnungen fehlgeschlagen. Biermann entwickelte damals die Theorie, daß die von der Sonne ausgehende corpuscular Strahlung für die hohen Beschleunigungen, die man in ionisierten Kometenschweifen beobachtet, verantwortlich sein müßte. Daß die Sonne sporadisch corpuscular Strahlung imitiert, wußte man damals aus der Beobachtung der Störung im Erdmagnetfeld. Nicht bekannt war damals, daß die Sonne ständig eine corpuscular Strahlung imitiert. Dieses wurde zuerst mit Hilfe von russischen

Raumsonden und später mit Hilfe des Explorer X von den USA entdeckt und theoretisch durch Eugen Parker erklärt.

Ludwig Biermann und ich diskutierten 1960 die Möglichkeit, einen künstlichen Kometenschweif zu erzeugen und damit vielleicht das theoretische Konzept von Biermann in der Wechselwirkung zwischen Solar, Wind und Kometenschweifen besser zu verstehen. Natürlich wäre es besonders schön gewesen, wenn man die gleichen Moleküle für ein solches Experiment hätte nutzen können, die man auch auf Kometen beobachtet. Aber die Rechnungen zeigten recht bald, daß

Abb. 28

mindestens mehrere Tonnen von Kohlenmonoxid (CO) benötigt werden, um einen sichtbaren künstlichen Kometenschweif zu erzeugen. Deshalb mußten andere Elemente oder Moleküle herangezogen werden. Um die Kosten niedrig und ebenso die Nutzlast für eine Höhenforschungsrakete so niedrig als möglich zu halten, war uns von Beginn an klar, daß die beste Energie zur lonisierung und zur Anregung der Atome die Sonnenstrahlung sein müßte. Natürlich sollte die künstliche Wolke auch vom Erdboden aus zu beobachten sein. Diese Bedingungen führten zu einer Reihe von Erfordernissen bei der Auswahl der möglichen Elemente oder Moleküle: 1. Die Resonanzlinie der Ionen sollten im "optischen Fenster" der Erdatmosphäre liegen.

2. Die Zeitskala für die Anregung der erwarteten lonenlinien und 3. für die Photoionisation der neutralen Atome sollte möglichst kurz sein. 4. Da eine chemische Technik zur Erzeugung dieser Wolken benutzt werden sollte, war auch eine möglichst tiefe Verdampfungstemperatur sehr erwünschenswert.

Die vielversprechensten Elemente, die diese Bedingungen erfüllten, waren einige Erdalkalimetalle, speziell Barium und wahrscheinlich auch einige seltene Erdelemente, nämlich Europium und Ytterbium. Wir begannen damals mit Strontium und Barium und entdeckten dabei, daß durch Barium beobachtbare Wolken erzeugt werden konnten. Die notwendigen Mengen waren ziemlich niedrig, nämlich in der Ordnung von 10 bis 100 Gramm bei Barium Ionen.

1961 begann ich als ein Theoretiker eine experimentelle Gruppe in Garching aufzubauen, um die dafür notwendige Technik zur Erzeugung künstlicher lonenwolken in der oberen Erdatmosphäre mit Hilfe von Höhenstrahlungsraketen zu entwickeln. Aus dieser kleinen Gruppe entwickelte sich das neue Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik, dessen Gründung der Senat der MPG im Mai 1963 beschloss. Für mich war es damals ein Glücksfall, daß ich in dieser Periode erstmal Jaques Blamont aus Frankreich traf. Es war

Abb. 29
Abb. 30

eine Sitzung in der Royal Society, wo die ersten Pläne für die Gründung einer europäischen Organisation für Weltraumforschung, der European Space Research Organisation, (ESRO) diskutiert wurden. Ich erwähnte damals Jaques Blamont die Idee, einen künstlichen Kometenschweif zu erzeugen. Er hatte damals schon mehrere Experimente mit Forschungsraketen durchgeführt, um neutrale Natriumwolken zum Studium der oberen Atmosphäre zu erzeugen. Er lud mich ein, einen Container von Barium in einer seiner Höhenforschungsraketen, der Centaure Rakete, zu installieren.

Das Hauptproblem war damals, einen effektiven Weg zur Verdampfung des Bariums zu erfinden, dazu gehörten anfangs umfangreiche Laborexperimente, vor allem von Föppl durchgeführt. Die Verdampfung des Bariums wurde durch eine chemische Reaktion erreicht, eine ganze Reihe davon wurden versucht, es war Melzner, der die effektivste schließlich vorschlug, nämlich eine Mischung von Barium und Kupferoxiden. Bei dieser Reaktion wird ein Teil des Bariums verbrannt und liefert die notwendige Hitze zur Verdampfung des restlichen Bariums. Dabei konnte man eine Effektivität von 10-20% herausholen. Das bedeutete, daß von dem verfügbaren Barium ungefähr 10-20% als Barium Atome beobachtet werden können. Die Barium Ionen wurden durch Photoionisationen mit einer Zeitskala von

Abb. 31

ungefähr 30 Sekunden erzeugt. Dabei kam uns zur Hilfe, daß Barium einen mittelstabilen Zustand hat, aus dem die Ionisation sehr effektiv erfolgte.

Die Ionisation kann nicht nur spektroskopisch beobachtet werden, Abb. 32
sondern auch direkt mit dem bloßen Auge, da die Bariumwolken sowohl ihre Farbe wie ihre Form beim Übergang vom nicht ionisierten zum ionisierten Zustand ändern.

Während der Zeit von 1961-1972 konnte das Max-Planck-Institut für Abb. 33
extraterrestrische Physik 66 Höhenforschungsraketen starten, die Barium-Wolken Experimente enthielten. Sie benutzten die französische Centaure-Rakete, die Dragon und die Rubis, die englische Skylark-Rakete, die kanadische Black Brant und die US Javelin Nike Tomahawk und Nike Apache. Die Starts erfolgten in der algerischen Sahara, in Thumba (Indien), in Sardinien (Italien), in Kiruna (Schweden), in Andoya (Norwegen), in Fort Churchill (Kanada) und in Wallops Island (Virginia, USA).

Die Beobachtungen der Bewegungen dieser künstlichen Plasma-Wolken haben die Existenz von elektrischen Feldern in der Atmosphäre zum ersten Mal klar demonstriert.

Zwei Barium-Wolken konnten in der Magnetosphäre bis Ende 1971 erzeugt werden. 1969 war es möglich, eine Barium-Wolke von dem ESRO-Satelliten HEOS 1 im Abstand von 12,5 Erdradien in der Magnetosphäre zu erzeugen. Diese Wolke wurde von vielen Beobachtungsstationen, die über den ganzen amerikanischen Kontinent verteilt waren, beobachtet. Die Verdampfung von 100g Barium-Ionen formierten eine Wolke mit einer Länge von 5000 km und einer Weite von etwa 100 km, die für etwa 25 Minuten beobachtet werden konnte. Die zweite Erzeugung einer Barium-Wolke in der Magnetosphäre war ein gemeinsames Projekt NASA / Max-Planck-Institut, das mit einer Scout Rakete der NASA durchgeführt wurde. Diese Barium-Wolke wurde im September 1971 im Abstand von 5,6 Erdradien auf einer Magnetfeldlinie, die die Magnetischen Observatorien Great Whale (Kanada) und Byrd Station (Antarktika) verbinden, beobachtet, wobei eine Reihe von geophysikalischen Messungen simultan durchgeführt werden konnten. In diesem Fall konnten 1,5 kg Barium frei gesetzt werden. Die Wolke war über 1 1/2 Stunden zu beobachten.

Abb. 34
Abb. 35

Ich war ja leider nur bis 1972 aktiv in die Bariumwolken Experimente involviert, denn dann hatte ich das Max-Planck-Institut in Garching zu

verlassen, um die Präsidentschaft der Max-Planck-Gesellschaft zu übernehmen.

Aber Gerhard Haerendel hat es schließlich doch erreicht, das eigentliche Ziel der Barium-Wolken Experimente, wie die Erzeugung eines künstlichen Kometenschweifs außerhalb der Magnetosphäre, im solaren Wind durchzuführen. Dieses bemerkenswerte Ereignis gelang am 27. Dezember 1984. Abb. 36

Aber die Barium-Wolken Experimente waren nicht die einzige Aktivität in dem neuen Institut. Bald nach der offiziellen Gründung startete Dieter Hovestadt die Entwicklung von Teilchendetektoren für die Kosmische Strahlung, die zu allererst auf dem deutschen Satelliten AZUR geflogen wurde und später auf manch anderen Satelliten. Helmut Rosenbauer begann später eine Gruppe aufzubauen, um Detektoren zur Messung des solaren Windes zu entwickeln. Das erste Experimente dieser Art wurde auf der deutsch-amerikanischen Sonnensonde HELIOS geflogen.

Von besonderer Bedeutung für die Entwicklung des Instituts war, daß Klaus Pinkau sich entschloss, Wissenschaftliches Mitglied des Instituts zu werden und ein neues Feld der Astronomie, die Gamma-Strahlen-

Astronomie, am Institut einzuführen. Die erste Funkenkammer wurde noch auf dem ESRO Satelliten TDI installiert, aber eine sehr viel bessere ist später für den COS-B Satelliten in Zusammenarbeit mit der sogenannten Caravan - Kollaboration entwickelt worden, an der sich Gruppen aus Italien, Frankreich, Holland und der ESRO selbst beteiligten.

Zum Schluß möchte ich allen, die mir auf dem bisherigen Weg geholfen haben - viele sind heute hier - von Herzen danken.

Abbildungen

1. Wissenschaftliche Arbeitsgebiete
2. Matrose Lüst - 1941
3. Vorpostenboot in der Ostsee - 1941
4. Kriegstagebuch der U-Boot-Flotte – 1943
5. Kriegstagebuch der U-Boot-Flotte - 1943
6. Englische Fregatte, die U 528 versenkte - 1943
7. Rettungsboot mit Überlebenden von U-528 - Mai 1943
8. Als Kriegsgefangener in England - Mai 1943
9. Buch von E. Madelung
10. Buch von Courant und Hilbert
11. Diplomarbeit – 1948
12. Diplomarbeit - 1948
13. Prof. Heisenberg mit Frau v. Weizsäcker – 1949
14. Prof. Heisenberg beim Institutsausflug - 1949
15. Niels Bohr in Göttingen mit C.F. v. Weizsäcker -1951
16. Abholung nach der Promotionsprüfung in Göttingen – 1951
17. Doktorarbeit - 1951
18. Arbeit mit A. Schlüter - 1955
19. GI Rechenmaschine mit H. Billing - 1953
20. Bundespräsident Heuss mit A. Schlüter in Betrachtung eines Modells der Bahnen Kosmischer Strahlung - 1953
21. Ankunft in Chicago - 1955
22. Transport von Ü 505 vom Lake Michigan zum Museum in Chicago
23. U 505 in Front des Museums in Chicago
24. Zeitungsartikel über 505, RL im Torpedo-Raum
25. Wissenschaftliche Arbeit in Chicago – 1956
26. Fusions-Forschung – 1957
27. Fusions-Forschung – 1957
28. Barium-Wolken Arbeit – 1961
29. Anfang des IPE in Garching – 1963
30. Anfang des IPE in Garching – 1963
31. Verdampfungsformel von Barium
32. 1. Ergebnisse von Barium-Wolken Versuchen
33. Barium-Wolke über Fort Churchill – 1967
34. Scout-Wolke über Chile – 1971
35. Scout-Wolke über Arizona – 1971
36. Künstlicher Kometenschweif - 1984

Areas of. Scientific Work

1. Classical Optics

2. Hydrodynamics

3. Magnetohydrodynamics and Plasmaphysics in Astrophysics

4. Cosmic rays

5. Thermonuclear fusion

6. Extraterrestrical physics

3

Ferd. Urbahns

Datum und Uhrzeit	Angabe des Ortes, Wind, Wetter, Seegang, Beleuchtung, Sichtigkeit der Luft, Mondschein usw.	Vorkommnisse

Geheim!

K r i e g s t a g e b u c h

" U 5 2 8 "

Kommandant: Oblt.z.See v. R a b e n a u .

Angefangen: ~~28.12.~~ 16. 9 1942

abgeschlossen: 15.4.1943.

THE DOCUMENT
ADMIRALTY PROPERTY
AND IS RECEIVED ON THE ...
P 4/30566/1 ...
NO MARK ... ON IT, BUT ... SHOULD ... RECORD OR ... QUOTING ... NUMBER

Bd. ... 9.5357 ... 29.5

... 17200/43 ...

Tag Uhrzeit	Ort Wetter	Vorkommnisse
3.5. 22o1		Von B.d.U.: Gemäß Befehl soll Brennstoffabgabe in AK 8945 erfolgen. Dorthin gehen. Keine Eintreffmeldung. Rückmarsch mit 45 cbm.
5.5. o132		Von U 528: Wann, wo, an wen soll Brennstoffabgabe erfolgen. Habe 2. - 4. AK 82 gestanden. Seit 3o.4. "Irland" geschaltet. Setze Rückmarsch fort.
o92o		Von B.d.U.: U 528 soll gem. Befehl ab 2.5. o8oo Uhr auf "Diana"-Schaltung stehen. Sofort "Küste" schalten.
1746		Von B.d.U.: 24oo Uhr "Diana" schalten.
6.5.		Von U 528: Stehe nach gestrigem Besteck AK 8945. Schlechte Sicht. Erbitte Peilzeichen.
8.5.	BD 3185	Von U 528: Treibölabgabe durchgeführt. Rückmarsch Lorient 4o cbm.
214o		Von B.d.U.: Am 9.5. o8oo Uhr "Amerika II" schalten.
11.5. 1158	BE 652o	Von U 528: Bin vorläufig tauchunklar. Erbitte sofortige Flughilfe.
16o2		Von F.d.U.West: Zunächst nach Westen absetzen. Kurs und Fahrt melden. Lufthilfe nicht möglich. U 558 auf Rabenau operieren.
1653		Von F.d.U.West: Unterstützung durch eine BV 138 morgen früh beabsichtigt. Hieffür Standort für o7oo Uhr, Kurs Fahrt, Tauchklarzustand melden, sobald zu übersehen.
12.5. 1746		Von F.d.U.West: Rabenau sofort Standort und Absicht melden.

Es geht keine Antwort mehr ein.

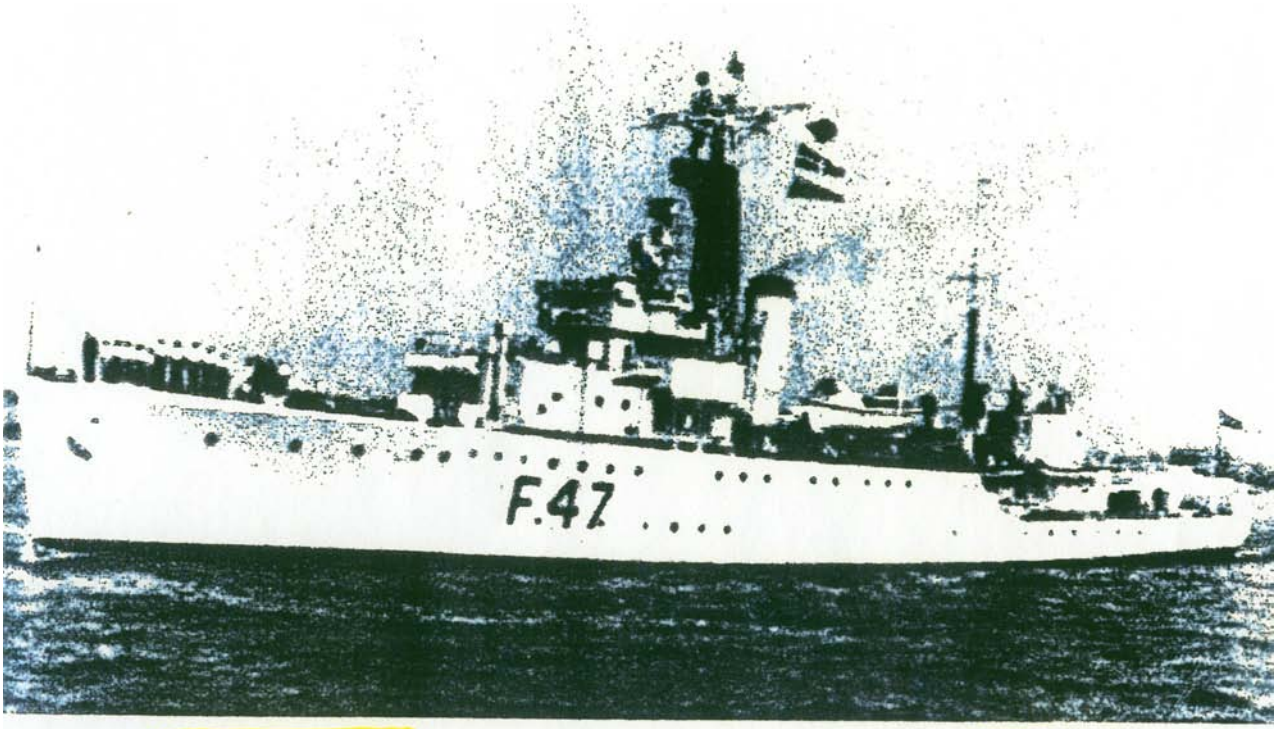
Nach einer von U 183 am 11.5. von 15o7 Uhr bis 1534 Uhr aufgenommenen Kriegsnotmeldung wurde U 528 von Überwasserstreitkräften angegriffen, die das Boot offensichtlich versenkt haben. 45 Mann ka der Besatzung, darunter der Kommandant gerieten in Gefangenschaft. 11 Soldaten sind geblieben.

U 528 wurde mit Wirkung vom 11. Mai 1943 am 24.5. für vermisst ein Stern, am 13.1.44 für vermisst zwei Stern erklärt.

Für den Befehlshaber der Unterseeboote
- Der Chef der Operationsabteilung -

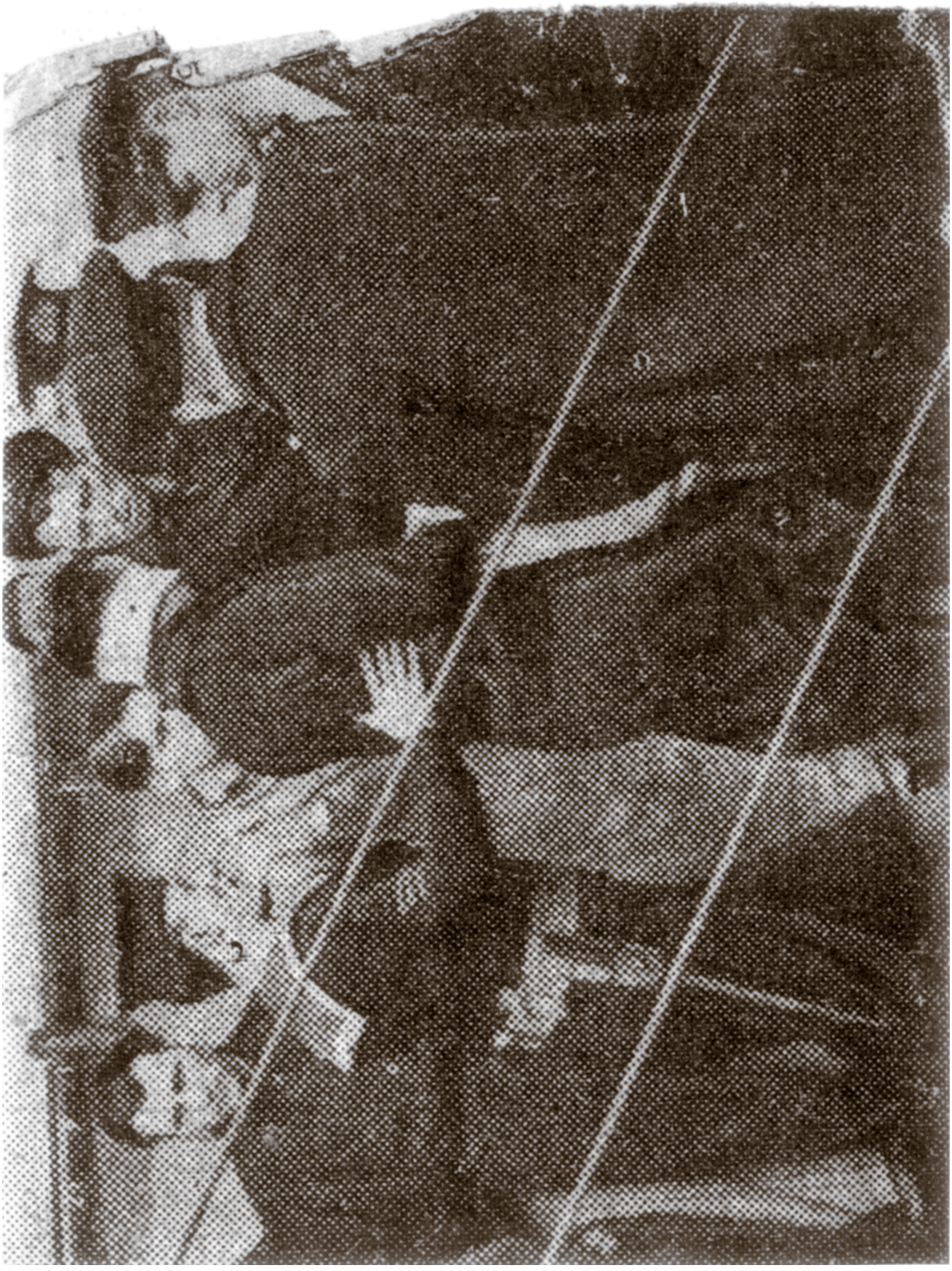
Heitrand

5



HMS *Fleetwood* a post-war picture of the frigate that helped sink U-528

U-528 survivors being picked up by a whaler from HMS *Fleetwood*



DIE MATHEMATISCHEN HILFSMITTEL DES PHYSIKERS

VON

DR. ERWIN MADELUNG
ORD. PROFESSOR DER THEORETISCHEN PHYSIK
AN DER UNIVERSITÄT FRANKFURT A. M.

SIEBENTE AUFLAGE

MIT 29 TEXTABBILDUNGEN

SPRINGER-VERLAG
BERLIN · GÖTTINGEN · HEIDELBERG
1964

(9)

METHODEN DER MATHEMATISCHEN PHYSIK

VON

R. COURANT UND D. HILBERT

ORD. PROFESSOR DER MATHEMATIK AN DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

ORD. PROFESSOR DER MATHEMATIK AN DER UNIVERSITÄT GÖTTINGEN

ERSTER BAND

ZWEITE VERBESSERTE AUFLAGE

MIT 26 ABBILDUNGEN

Published and Distributed in the Public Interest with the consent of the Alien Property Custodian under License No. A-82.

Photo-lithoprint Reproduction

Distributors: INTERSCIENCE PUBLISHERS, INC. New York

BERLIN
VERLAG VON JULIUS SPRINGER
1931

10

Kraft einer Welle auf die beugende Kante.

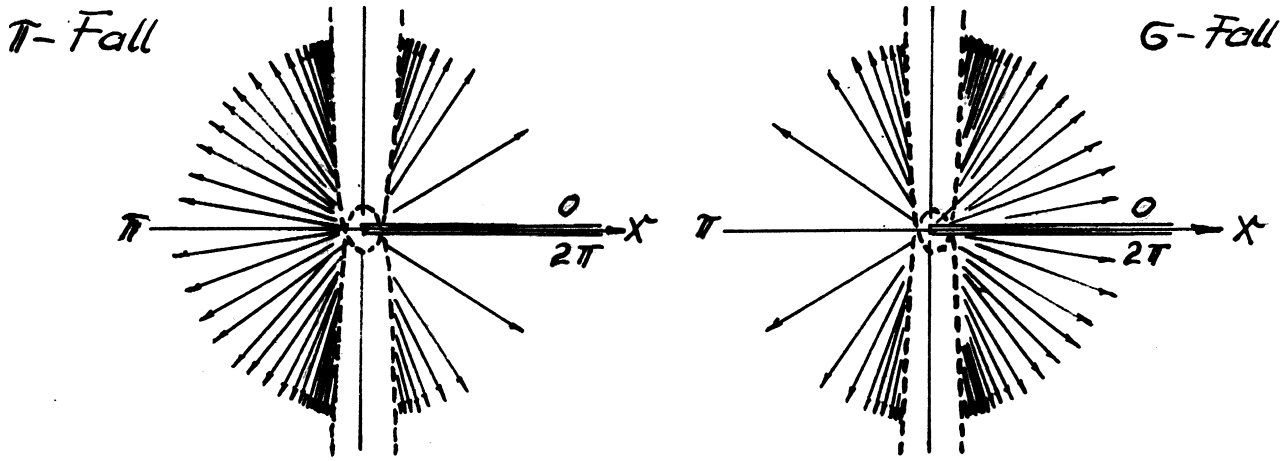
Diplomarbeit

vorgelegt

von

Reimar Lüst

Frankfurt/M. im Dezember 1948


π- Fall
π
0
2π
x
π
0
2π
x
G- Fall

(16)

Die Entwicklung einer um einen Zentralkörper rotierenden Gasmasse

I. Lösungen der hydrodynamischen Gleichungen mit turbulenter Reibung

Von REIMAR LÜST

Aus dem Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen

(Z. Naturforschg. 7a, 87–98 [1952]; eingegangen am 6. September 1951)

Herrn Professor Werner Heisenberg zum 50. Geburtstag

Es werden die hydrodynamischen Gleichungen mit turbulenter Reibung für eine um einen Zentralkörper rotierende Gasmasse gelöst unter der Voraussetzung, daß die radiale Geschwindigkeit klein gegenüber dem Absolutbetrag der Geschwindigkeit und daß das Gravitationspotential allein durch den Zentralkörper bestimmt ist. Für den Mischungsweg wird ein Potenzansatz zugrunde gelegt. Die Rechnungen werden für ein zwei- und ein dreidimensionales Modell durchgeführt. Es ergeben sich zwei verschiedene Lösungen: Entweder der Drehimpuls des Zentralkörpers bleibt erhalten und ein Teil der Gasmasse fällt auf den Zentralkörper, während der Rest ins Unendliche entweicht, oder der Zentralkörper gibt Drehimpuls an die Hülle ab, die dann vollständig ins Unendliche wegströmt. Lösungen für gewisse Exponenten des Mischungswegs und für bestimmte Anfangsverteilungen werden angegeben.

17

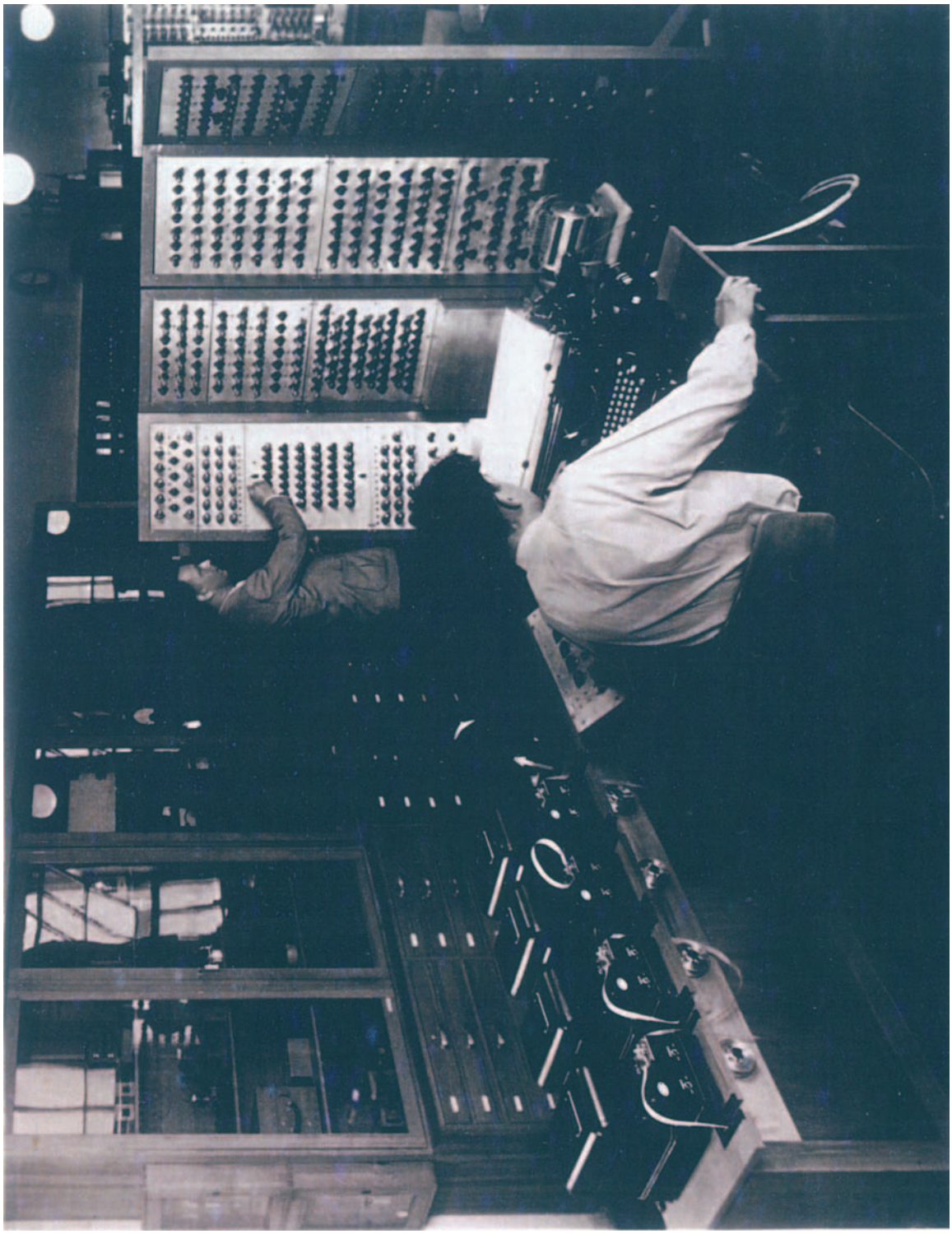
Drehimpulstransport durch Magnetfelder und die Abbremsung rotierender Sterne

Von **R. Lüst** und **A. Schlüter**
Aus dem Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen

Mit 4 Textabbildungen

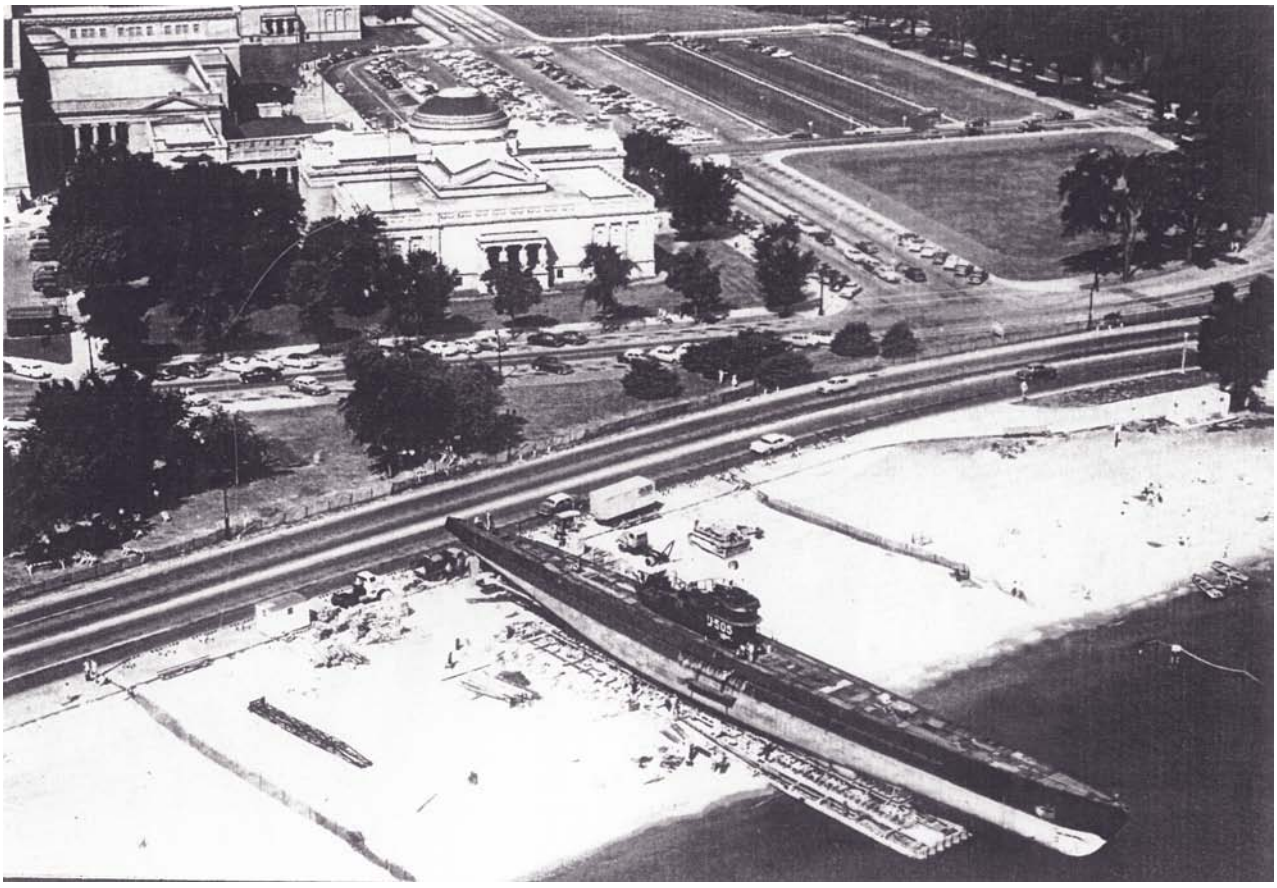
(Eingegangen am 25. August 1955)

18

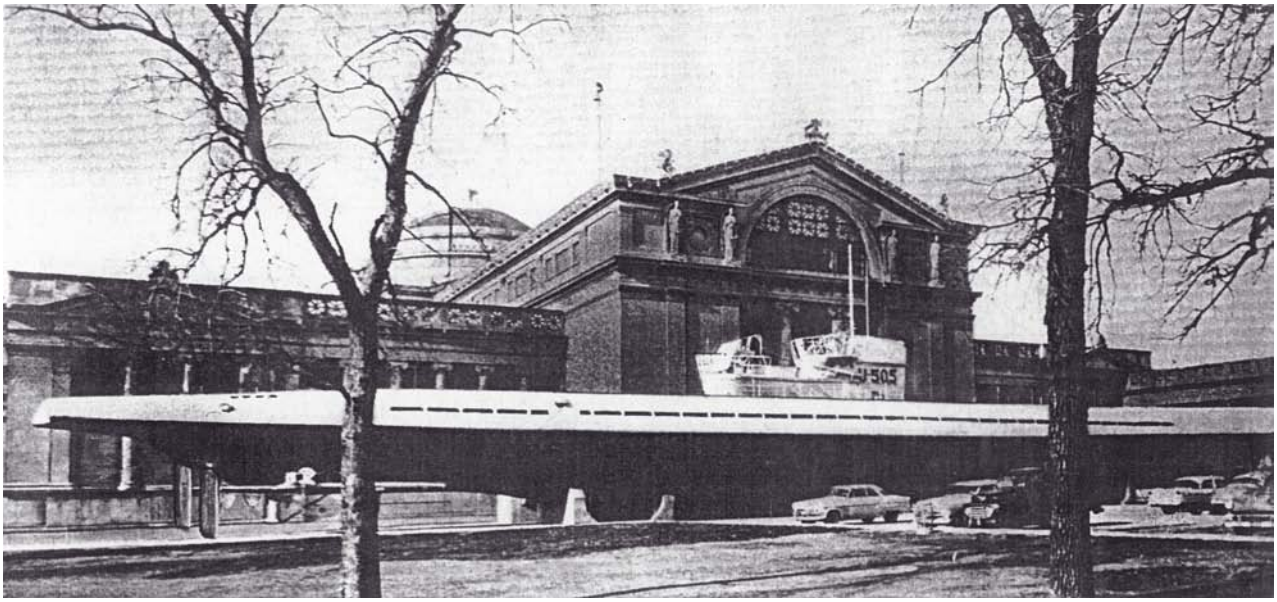


DRIVE CAREFULLY
SUBMARINE
CROSSING

Aerial view of U-505 on beach east of Museum building. Sub is 252 feet long, 22 feet wide amidships and conning tower rises to height of three-story building.



The U-505 in place on the east side of the Museum.



Captured U-505 Fully Restored Here; Engines Run Again

When the captured German submarine, the U-505, arrived in Chicago in 1954 as a memorial to Americans lost at sea in two world wars, it was only a hulk.

Souvenir hunters who had visited it on an exhibition tour, and the U.S. Navy which expected to sink it at sea had virtually stripped the craft down to its hull.

The radio room was empty. So was the "sound" room. Instruments, piping, equipment, furnishings were missing, and nothing "worked."

Lenox R. Lohr, head of the Museum of Science and Industry, took one look. Then he announced the vessel had to be completely refitted and put into perfect working order.

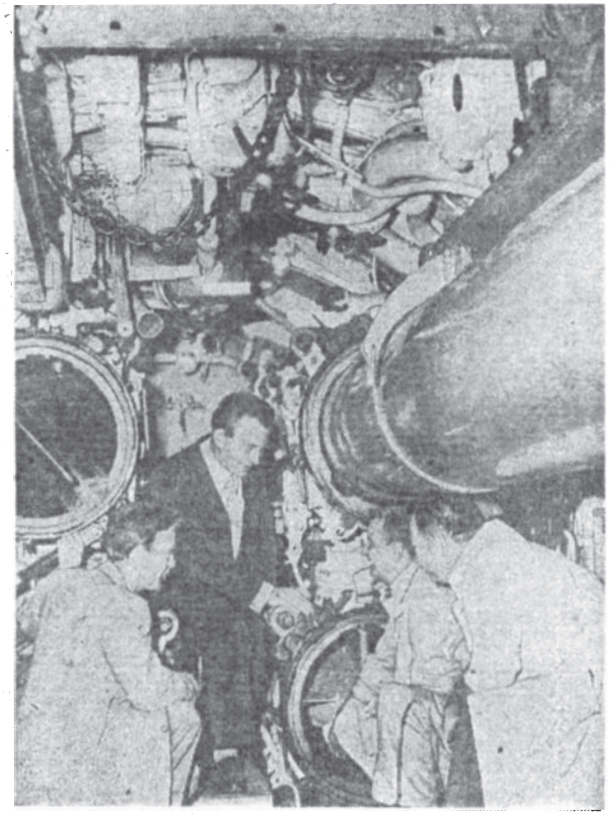
Where To Get Parts?

Only one thing was wrong with his proposal: Where could he get German submarine parts? Germany was no longer making submersibles. Germany's factories had been bombed out or dismantled.

Lohr sent out more than 100 letters to American and German navy men asking if they could put him on the track of anything. For the most part he drew a blank.

At this point a visitor, who, like thousands of others, had paid 25 cents and gone through the U-505, stopped in Lohr's office. He told the museum director that he had done a lot of the stripping of the German underwater boat. As he could not bring himself to throw out the fine instruments, he had stored them in his basement. Would the museum like to have them?

The visitor was Earl Milner, a research engineer at the Navy Underwater Research Laboratory at Groton, Conn. He shipped the museum 1,800 pounds of irreplaceable equipment for the radio and sound rooms. Later, he rounded up another 3,000 pounds of U-505 parts around the Groton laboratory.



In a familiar setting—the forward torpedo room of the U-505 at Museum of Science and Industry—former German submariners Reimar Luest (left) and Juergen Niemann (dark suit) discuss the problems encountered in refitting the vessel with Sterling Ruston (right), museum registrar, and Richard R. Freitag, museum's chief submarine demonstrator. (Sun-Times Photo)

Former Sub Man

News of the U-505 installation in Chicago was followed with keen interest in Germany. Instead of resentment, Lohr said the Germans seemed to feel that it was a memorial to their men, too. MAN, the German Diesel works, sent the museum parts for putting the big engines in running order. Other contributions ranged from a submariner's cap to hang in the lockers to a bell.

Another interested visitor who paid his 25 cents to see the U-505 was Juergen Niemann, who now lives at 245 Roosevelt Rd., Elmhurst. During the war, he served on German submarines, though not on the U-505. He asked if he could be of help. Niemann was a godsend, said Lohr.

Diesels Purr Again

Niemann, and 10 other former German U-boat men who now live in the Chicago area worked night after night with the museum staff getting the U-505 put together again.

Last week, after weeks of work on the engines, Lohr pulled a switch. Instantly the big Diesels purred into quiet powerful operation.

As visitors go through, guides ring the bell that once signaled submersion, and the vibrant klaxon that warned "crash dive." Nights of work went into restoring them to order.

The U-505 will never again be in shape to slide under the waves and launch its long torpedoes. Holes have been cut into one side to let visitors in. But aside from such impediments she is already a live boat, and in time will work almost as well as on the day, Aug. 26, 1941, when she was launched at Kiel and set out on her deadly war work.

Impact Zones for Solar Cosmic-Ray Particles*

R. Lüst†
The Enrico Fermi Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois
(Received December 10, 1956)

Orbits for cosmic-ray particles starting from the vicinity of the sun and passing through the geomagnetic dipole field were integrated by using the AVIDAC computer at the Argonne National Laboratory. The methods for integration used in Chicago and Göttingen were compared. Counting rates at the top of the atmosphere were calculated from the integrated orbits in order to make possible the analysis of cosmic-ray intensity increases during solar flares. Different source widths and declinations were assumed. The calculated counting rates are based on a flat rigidity spectrum at the source. This investigation shows that: (a) distinctive impact zones exist even for large source widths; (b) the position of these zones and the counting rates within these zones depend strongly upon the declination of the source; (c) the earth's magnetic field produces a focusing effect especially at higher latitudes.

25

Some Theoretical Aspects of Magneto-Hydrodynamics and Thermonuclear Fusion.

R. LÜST

Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik - München

26

Die Bewegung geladener Teilchen in rotations-symmetrischen Magnetfeldern

Von R. Lüst und A. Schlüter

Aus dem Max-Planck-Institut für Physik, Göttingen

(Z. Naturforschg. **12 a**, 841—843 [1957]; eingegangen am 11. Juni 1957)

Die Bewegung geladener Teilchen in rotations-symmetrischen Magnetfeldern wird untersucht. In diesem Fall kann man aus einer Verallgemeinerung des Drehimpulserhaltungssatzes bestimmte Bedingungen ableiten, unter welchen die Teilchen in einem endlichen Volumen für unbegrenzte Zeit festgehalten werden.

The motion of a charged particle in a magnetic field of rotational symmetry allows for a generalization of the law of conservation of angular momentum. From this conditions are derived, under which a particle will always stay within a finite volume.

27

Aus dem Max Planck-Institut für Physik und Astrophysik, München

Zur Untersuchung des interplanetaren Mediums mit Hilfe künstlich eingebrachter Ionenwolken

Von

L. Biermann, R. Lüst, Rh. Lüst und H. U. Schmidt

(Eingegangen am 3. Juli 1961)

28

Der Anfang 1963

$$(n + 1)\mathrm{Ba} + \mathrm{CuO} \rightarrow \mathrm{BaO} + \mathrm{Cu} + n\,\mathrm{Ba}\ (\mathrm{vapour})$$

Planet. Space Sci. 1967, Vol. 15, pp. 1 to 18. Pergamon Press Ltd. Printed in Northern Ireland

MOTION OF ARTIFICIAL ION CLOUDS IN THE UPPER ATMOSPHERE

G. HAERENDEL, R. LÜST and E. RIEGER
Max-Planck Institut für Physik und Astrophysik, Institut für extraterrestrische Physik, Garching bei München

(*Received* 10 *June* 1966)

Abstract—The paper sets out to solve the equations of motion for an ionized irregularity of finite length, and to apply it to the behaviour of a Ba^+ cloud. After a number of simplifying assumptions, an expression for the ionospheric electric field is derived in terms of (1) the magnetic field, (2) the velocities of the neutral and ionized clouds, (3) λ^* (the ratio of the integrated Pedersen conductivities in the cloud and in the atmosphere), (4) κ_i (= gyrofrequency for Ba^+/collision frequency). The magnitude and orientation of the electric field is evaluated from the observation of six barium and strontium clouds. λ^* is assumed to be unity. The derived field strengths lie between 1 and $3 \cdot 10^{-3}$ V/in. In the evening the fields are pointing southward and in the early morning release northward.

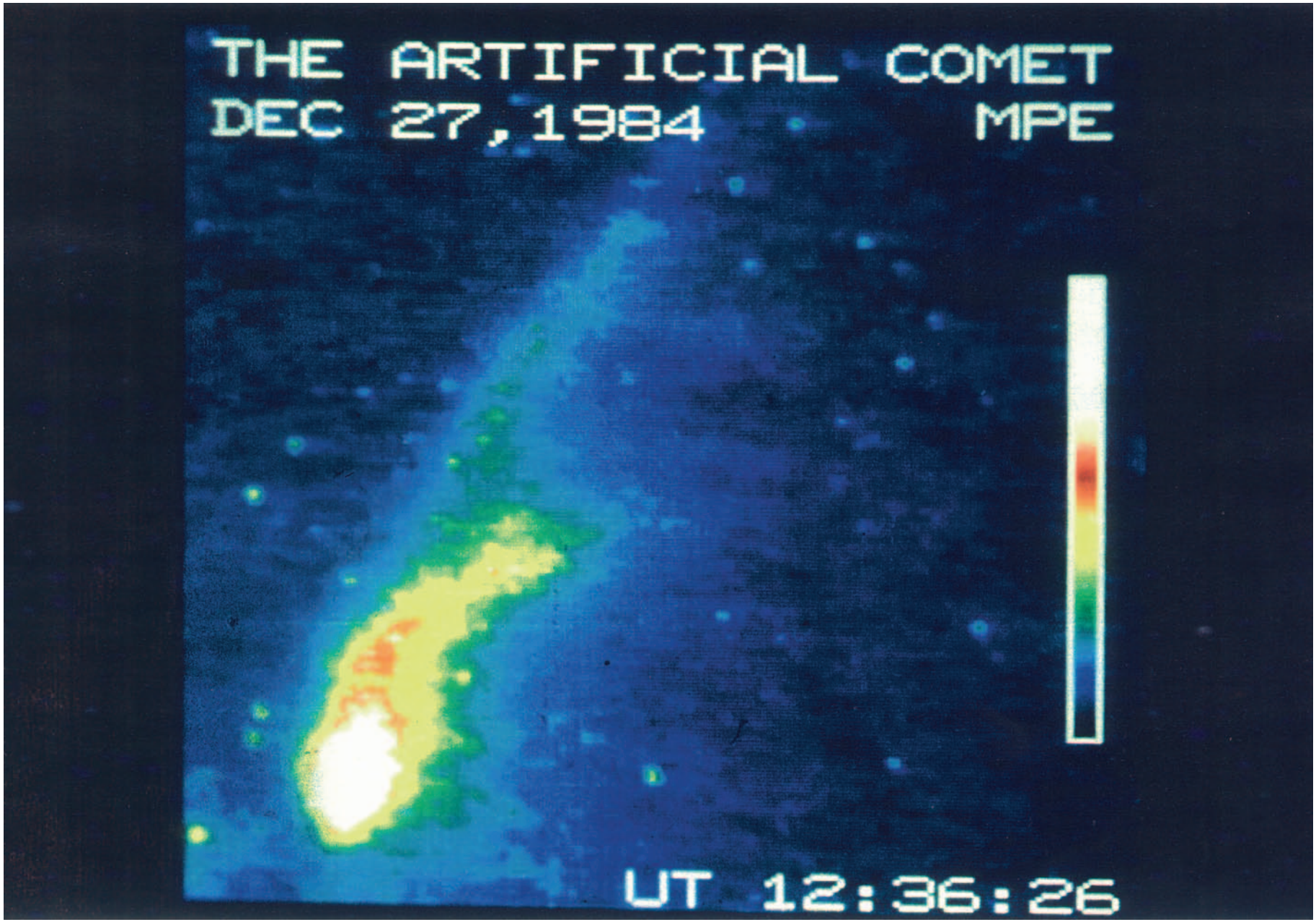
32

Barium Clouds and Aurora over Ft. Churchill

Aug. 1967

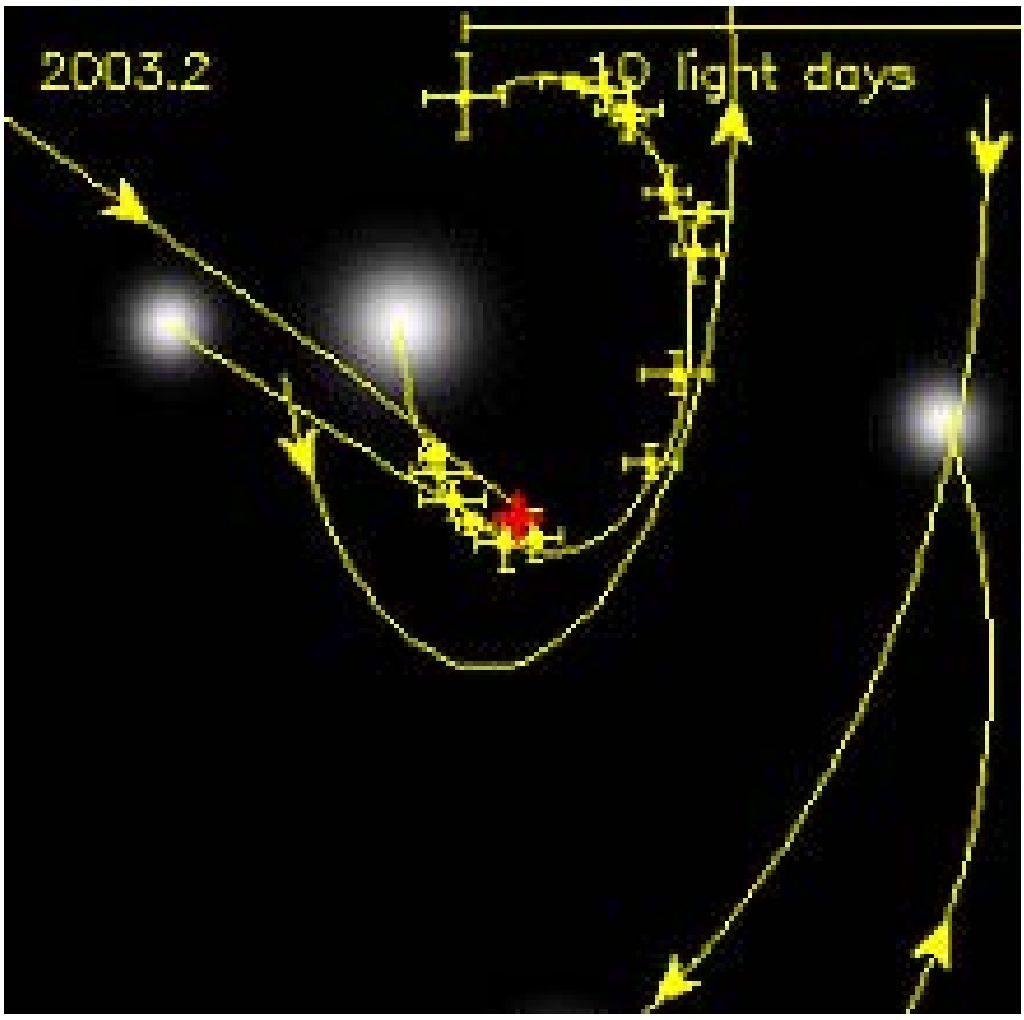
scout_wolke_chile_h50_sw.jpg

scout_wolke_arizona_sw.jpg


THE ARTIFICIAL COMET
DEC 27,1984
MPE
UT 12:36:26

Schwarze Löcher am MPE

Ralf Bender



Schwarze Löcher am MPE*

Ralf Bender
Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik

Einleitung: Vierzig Jahre MPE

Das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik (MPE) wurde im Jahre 1963 gegründet um der astronomischen Forschung außerhalb der Erdatmosphäre einen adäquaten institutionellen Rahmen zu geben. Die Gründung des MPE erfolgte hauptsächlich auf Betreiben Prof. Reimar Lüsts, der die Bedeutung der satellitengestützten Beobachtungen für die Astrophysik früh erkannte. Die wichtigsten Argumente lassen sich in seinem Artikel *‚Extraterrestrische Forschung'* in den *Mitteilungen der astronomischen Gesellschaft No. 16* von 1963 nachlesen (ich zitiere nur ausschnittweise):

Es ist hier wohl unnötig, noch einmal im Detail auf die vielen Vorzüge einzugehen, die sich astronomische Beobachtungen in größerem Abstand vom Erdboden bzw. außerhalb der Erdatmosphäre bieten.

- *Die Ausdehnung des Spektralbereichs ...*
- *Die Unterdrückung des hellen Vordergrundes des Himmels ...*
- *Die Verbesserung der Auflösung ...*

... Welches sind nun die hervorstechenden astronomischen Aufgaben, die wir bei der Verwendung extraterrestrischer Hilfsmittel angreifen können ... :

- *Gamma-Strahlen-Astronomie*
- *Röntgen-Strahlen-Astronomie*
- *Ultraviolett-Strahlung*
- *Infrarot-Strahlung*
- *Interplanetarisches Medium*
- *Andere Probleme (Radiowellen, hohe Auflösung)*

---

* Prof. Reimar Lüst zum 80. Geburtstag gewidmet.

Das MPE hat in den 40 Jahren seiner bisherigen Existenz fast alle diese Felder erfolgreich bearbeitet und war und ist an Satellitenmissionen vom Gamma-Bereich bis zu infraroten Wellenlängen, sowie an der Erforschung des erdnahen Weltraums beteiligt. Auch wenn sich viele der sehr optimistischen Erwartungen und Ideen, die man Anfang der 60er Jahre hatte (z.B. jährlich zwei große Satelliten mit einigen Tonnen Nutzlast in den Orbit zu bringen) nicht voll haben umsetzen lassen, so besteht doch nicht der geringste Zweifel, dass satellitengestützte Beobachtungen die Astrophysik durchgreifend revolutioniert haben. Insbesondere die ROSAT Mission hatte einen wissenschaftlichen ‚Impact', der weltweit nur noch mit dem des Hubble Space Telescope vergleichbar ist.

Die hervorragende Stellung, die Deutschland heute in der Weltraumastronomie einnimmt, ruht auf zwei tragenden Säulen. Zum einen braucht es starke wissenschaftliche Institutionen wie das MPE um große Satellitenprojekte zu initiieren, zu managen und wissenschaftlich zum Erfolg zu führen. Zum anderen müssen natürlich auch ausreichend große nationale und europäische Raumfahrt-Etats den Löwenanteil der Kosten dieser Missionen übernehmen können. Reimar Lüst schreibt im oben genannten Artikel hierzu:

In diese Beiträge [Deutschlands zur europäischen Raumfahrtagentur] *sind aber nicht die reinen Kosten für die wissenschaftlichen Instrumente eingeschlossen, …die an Universitäten und Forschungsinstituten der einzelnen Mitgliedstaaten entwickelt werden müssen. Diese Kosten müssen von jedem Land selbst aufgebracht werden. Deshalb ist eine Beteiligung an der europäischen Organisation nur dann sinnvoll, wenn auch innerhalb Deutschlands Mittel in mindestens gleicher Höhe … zur Verfügung stehen.*

Die Bundesrepublik Deutschland hat sich über mehr als drei Jahrzehnte an diese ‚goldenen Regeln' gehalten. Erst in jüngerer Zeit ist die Balance zwischen nationalen und europäischen Fördermitteln gestört worden. Wir können nur hoffen und wünschen, dass die Bedeutung der Weltraum-Astronomie für die Wissenschaft, die Technologieentwicklung und das Verständnis der Welt, in der wir leben, erneut erkannt und in Zukunft wieder verstärkt gefördert werden wird.

Aktive Kerne und schwarze Löcher

In das Jahr 1963 fällt nicht nur die Gründung des MPE, sondern es wurden damals auch wichtige astronomische Entdeckungen gemacht, die in engem Zusammenhang mit einer zentralen aktuellen Forschungsrichtung des MPE stehen. Maarten Schmidt, der heute dem MPE eng verbunden ist, und andere Wissenschaftler entdeckten die Quasare. Dies sind extrem helle Objekte, deren Leuchtkräfte (von bis zu hunderten von Galaxienleuchtkräften) in sehr kleinen Volumina von nur wenigen Lichtjahren Ausdehnung erzeugt werden. Schon bald nach der Entdeckung der Quasare wurde von Zel'dovich die Vermutung geäußert, dass dieses Phänomen nur durch die Akkretion von großen Mengen Gas auf massereiche schwarze Löcher erklärt werden kann.

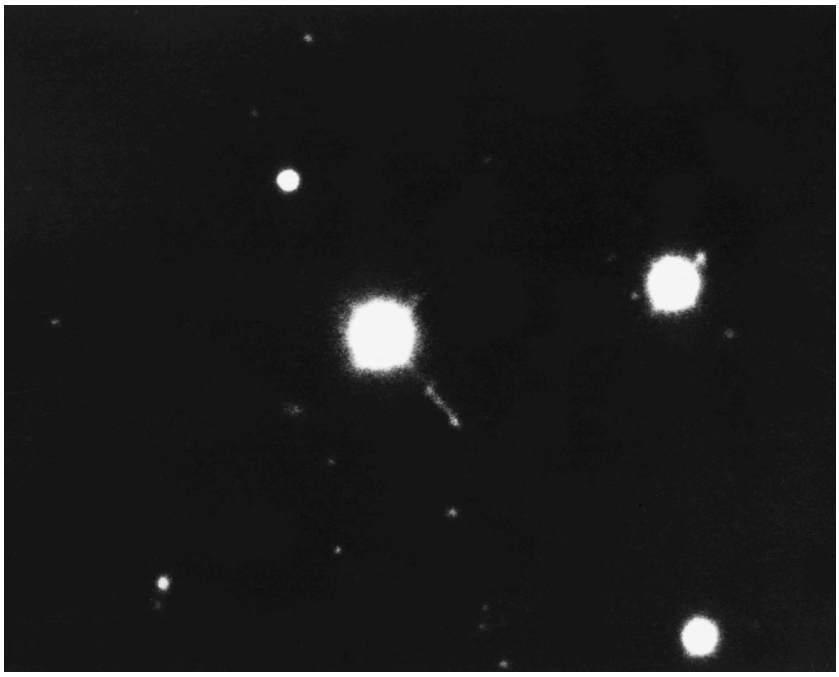


Abb. 1: Der Quasar 3C 273, eines der ersten Objekte aus der Klasse quasi-stellarer Radioquellen für das die Entfernung bestimmt werden konnte (M. Schmidt 1963). Aus scheinbarer Helligkeit und Entfernung folgt, dass 3C 273 über 100 Mal leuchtkräftiger ist als eine normale Galaxie. Das energieerzeugende Gebiet in 3C 273 ist dagegen mindestens 10000 Mal kleiner als der typische Durchmesser einer Galaxie.

Lynden-Bell (1968) hat einige Jahre später die einsichtigste Argumentation dafür geliefert, warum die Kernfusion von Wasserstoff, die auch unsere Sonne leuchten lässt, nicht die richtige Erklärung für das Phänomen der Quasare liefern kann:

- Die totale Energieproduktion eines Quasars, die beispielsweise in seinen Radiohalos gespeichert ist, beträgt ca. 10^{54} Joule.
- Dies erfordert die komplette Umwandlung von ca. 10 Millionen Sonnenmassen in Energie nach Einsteins bekannter Formel: $E=mc^2$.
- Mit dem ergiebigsten Kernfusionsprozess (Wasserstoffbrennen) kann man nur knapp 1% der Masse in Energie umwandeln, d.h. man bräuchte ca. 1 Milliarde Sonnenmassen an Wasserstoff um die Energieproduktion eines Quasars zu erklären.

- Da die Beobachtungen zeigen, dass diese Energie in einem sehr kleinen Volumen von weit weniger als einem Lichtjahr freigesetzt werden muss, bedeutet das eine sehr hohe Konzentration dieser Masse. Die Gravitations- oder Bindungsenergie dieser Masse beträgt 10^{55} Joule und ist daher ein vielfaches der Energie, die durch Kernfusion frei gesetzt werden kann. Konzentriert man die Masse in einem schwarzen Loch, können effektiv mehr als 10% der Masse in Energie umgewandelt werden.

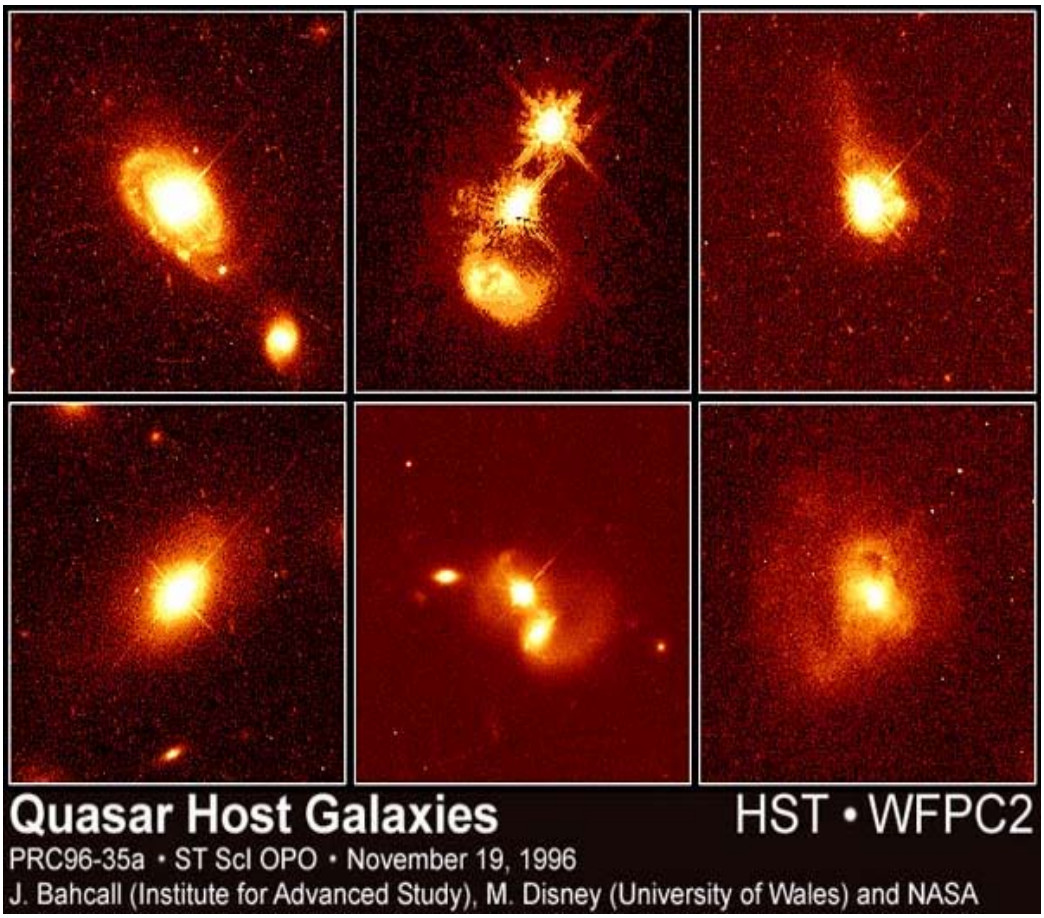


Abb. 2: Bilder, die mit dem Hubble Space Telescope gewonnen wurden und gleichzeitig hohe Auflösung und sehr guten Kontrast aufweisen, zeigen, dass Quasare in den Kernen von Galaxien sitzen. Häufig zeigen die Galaxien Anzeichen für Wechselwirkungen mit anderen Galaxien (Mitte und rechts).

Quasare sind nur *eine* Klasse der sogenannten Aktiven Galaktischen Kerne. Andere heißen Radiogalaxien, Seyfertgalaxien, QSOs, Blazare etc. Alle zeichnen sich durch gewaltige Energieerzeugungsprozesse aus, die nicht durch Sterne erklärt werden können und die immer auf ein sehr kompaktes Gebiet im Zentrum einer Galaxie zurückzuführen sind. Ein Beispiel für eine Radiogalaxie zeigt Abb. 3 (Radiobild).

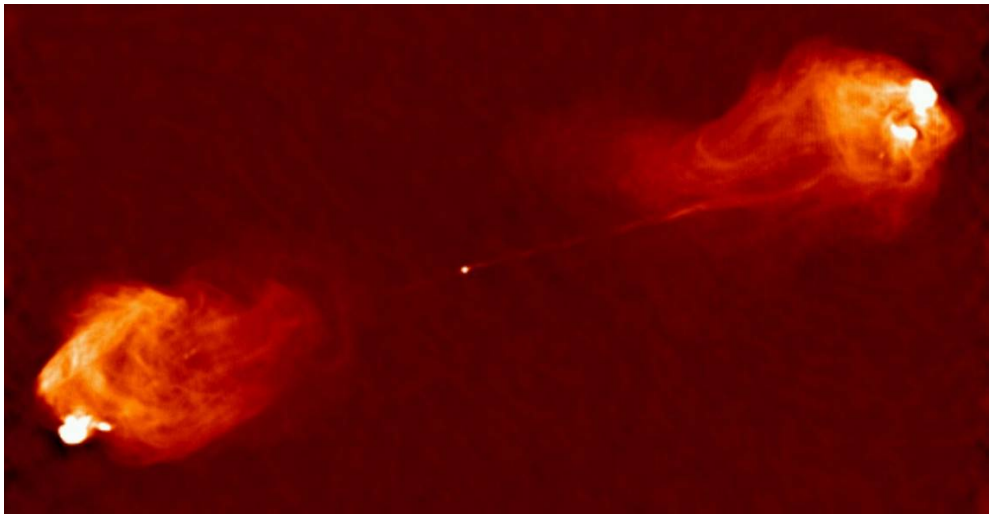


Abb. 3: Der Radiojet (sehr dünn vom Zentrum ausgehender Strahl) und die Radiohalos der Galaxie Cygnus A. Die Gesamtlänge beträgt ca. 160000 Lichtjahre. Die weißen Flecken an den Enden der Radiohalos zeigen die Stellen an, an denen der dünne Jet sich mit fast Lichtgeschwindigkeit in das intergalaktische Gas bohrt. Die Galaxie selbst ist nicht wesentlich größer als der kleine Punkt in der Mitte des Bildes. Die gesamte Energieerzeugung und die Beschleunigung des Jetmaterials finden ausschließlich dort statt. (Copyright NRAO, Perley & Dreher). Die stabile Ausrichtung des Jets bedeutet, dass die zentrale Maschine eine große Richtungsstabilität aufweisen muss. Dies kann am besten durch ein kreiselähnliches sehr massereiches System erreicht werden, also z.B. durch ein rotierendes schwarzes Loch.

In den letzten 30 Jahren haben zahlreiche Beobachtungen bei allen Wellenlängen, vom Radio- bis in den Gammabereich, die Hypothese gestützt, dass Aktive Kerne ihre Energie aus der Akkretion von Gas und Sternen auf schwarze Löcher beziehen. Letztenendes wird dabei Gravitationsenergie durch Reibung in Strahlung umgewandelt (ein Alltags-Beispiel für dieses Phänomen ist das langsame Hinuntergleiten an einer Kletterstange: der Sportler kommt der Erde näher und verringert dadurch seine Gravitationsenergie, die in Reibungshitze an den Händen umgesetzt wird).

Wie lässt sich aber zeigen, dass in den Kernen von Galaxien tatsächlich schwarze Löcher existieren und, vor allem, existieren diese Exoten nur in Aktiven Galaxien, oder vielleicht auch in normalen Galaxien? Die letzte Frage stellt sich insbesondere deshalb, weil in der Frühzeit unseres Universums ein erheblich größerer Anteil von Galaxien Aktive Kerne enthalten hat als heute.
Eine Auswahl von Schlüsselfragen, mit denen sich die Astrophysiker heute beschäftigen, ist die folgende:

- Wo finden sich tote Quasare in unserer Umgebung?
- Wie sicher sind wir, dass es sich wirklich um schwarze Löcher handelt? (oder z.B. nur sehr kompakte Haufen aus Neutronensternen oder weißen Zwergen?)
- Wie viele und insbesondere welche Galaxien enthalten einen toten Quasar bzw. ein massereiches schwarzes Loch?
- Wie stark rotieren die schwarzen Löcher?
- Wann und wie wurden die ersten schwarzen Löcher gebildet? Wie wächst ihre Masse?
- Wie beeinflussen schwarze Löcher die Entstehung und Entwicklung von Galaxien (und umgekehrt)?

Schwarze Löcher am MPE

Am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik hat sich die Erforschung der Quasare, Aktive Kernen und schwarzen Löcher in den letzten Jahren zunehmend intensiviert. Wissenschaftler des MPE waren und sind maßgeblich an der Bearbeitung der genannten Schlüsselfragen beteiligt und haben einige der wichtigsten Ergebnisse auf diesem Gebiet erzielt.

Die nachfolgenden Abschnitte zeigen drei *Highlights* der letzten beiden Jahre:

Der tote Quasar im Zentrum der Milchstrasse

Der nächste tote Quasar befindet sich im Zentrum unserer Milchstrasse. Mit Infrarotmessungen konnten Reinhard Genzel und seinen Kollegen über mehr als ein Jahrzehnt die Bewegungen der Sterne im galaktischen Zentrum analysieren. Es zeigt sich, dass die Sterne um eine schwache Radioquelle (Sagittarius A* oder Sgr A*) rotieren, mit Geschwindigkeiten von mehr als 5000km/s! Die Analyse der Sternbahnen erlaubt die Bestimmung der Masse von Sgr A* (ähnlich wie man aus den Bahnen der Planeten um die Masse der Sonne bestimmen kann). Man erhält die gewaltige Masse von 3 Millionen Sonnenmassen, die in einem Gebiet von nur wenigen Lichtstunden Durchmesser, d.h. weniger als der Größe des Sonnensystems, zusammengequetscht ist. Damit ist es praktisch gesichert, dass es sich um ein schwarzes Loch handeln muss; es gibt hierzu keine plausiblen Alternativen. Das schwache Leuchten von Sgr A* (im Radiobereich, im Röntgenbereich und seit neuestem auch im Infraroten gefunden) wird durch eine Akkretionsscheibe verursacht, in der langsam Gas in das schwarze Loch hineinspiralt. Aus der Variation dieses Leuchtens haben die Wissenschaftler des MPE kürzlich Hinweise über die Rotation des schwarzen Loches ableiten können. Diese spektakulären Ergebnisse haben viel Aufsehen in der Fachwelt und der breiten Öffentlichkeit erregt.

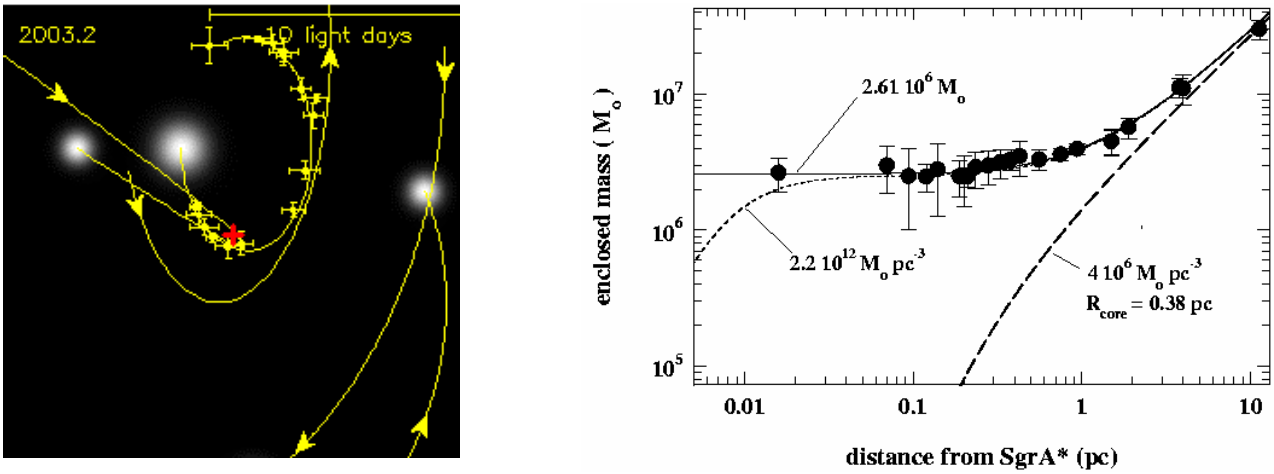


Abb. 4 links: Die Sternbahnen im Galaktischen Zentrum, wie sie von Reinhard Genzel und Kollegen gemessen wurden. Das schwarze Loch befindet sich an der Stelle des roten Kreuzes. Rechts: Eingeschlossene Masse als Funktion des Abstands vom Galaktischen Zentrum Sgr A. Wenn nur die sichtbaren Sterne zur Masse beitragen würden, müssten die Datenpunkte entlang der gestrichelten Linie verlaufen. Tatsächlich zeigen die Messungen, dass die Masse innerhalb von 1pc (d.h. 3 Lichtjahren) von einem äußerst kompakten und unsichtbaren Objekt von ca. 3 Millionen Sonnenmassen dominiert wird.*

Schwarze Löcher in nahen Galaxien

Vor allem Beobachtungen mit dem Hubble Space Telescope haben gezeigt, dass schwarze Löcher in Galaxienkerne wohl eher die Regel als die Ausnahme sind. Ein internationales Team von Wissenschaftlern (das ‚Nuker'-Team, zu dem auch der Autor gehört) hat frühere Vermutungen bestätigt, dass eine enge Beziehung zwischen der alten sphärischen Sternkomponente von Galaxien und der Masse der zentralen schwarzen Löcher besteht. Das Verhältnis von Masse des schwarzen Loches zur Masse des Sphäroids beträgt ca. 0.2% (Abb.6 links, es ist der Vergleich mit der Leuchtkraft gezeigt, da Masse und Leuchtkraft des Sphäroids proportional sind). Auch unsere Milchstrasse mit ihrem schwarzen Loch folgt dieser Beziehung. Interessanterweise ist es bisher noch nicht gelungen, massereiche schwarze Löcher in reinen Spiralgalaxien, d.h. solchen die *keine* alte sphärische Komponente zeigen, nachzuweisen (Abb.6 rechts). Somit scheint die Gesamtmasse einer Galaxie für die Existenz eines massereichen zentralen schwarzen Loches unerheblich zu sein; ein überraschendes Ergebnis, das einen engen Zusammenhang zwischen der Bildung der ältesten Sternkomponente der Galaxien und der Entstehung der schwarzen Löcher andeutet. Abb. 5 illustriert dieses Verhalten: von Abb. 5a nach 5c nimmt die Masse der sphärischen Komponente ab; parallel dazu verringert sich auch die Masse des schwarzen Loches. Die Galaxie M33 in Abb. 5d ist eine reine Scheibengalaxie; sie enthält kein massereiches schwarzes Loch.

Abb. 5a M87, $M_{S.L.} \sim 2\ 10^9\ M_{Sonne}$

Abb. 5b M104, $M_{S.L.} \sim 5\ 10^8\ M_{Sonne}$

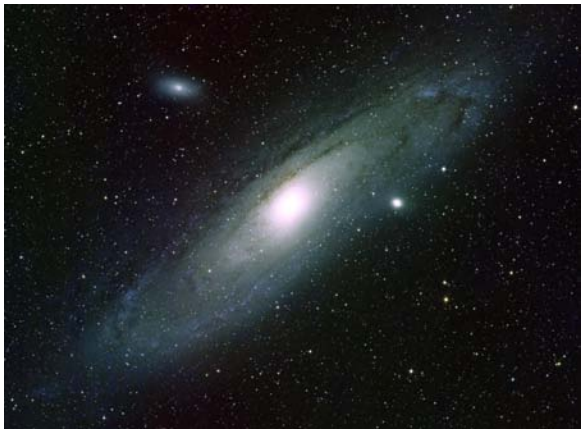


Abb. 5c M31, $M_{S.L.} \sim 4\ 10^7\ M_{Sonne}$

Abb. 5d M104, $M_{S.L.} < 1500\ M_{Sonne}$

(Copyright der Abbildungen: NOAO, AAO, ESO)

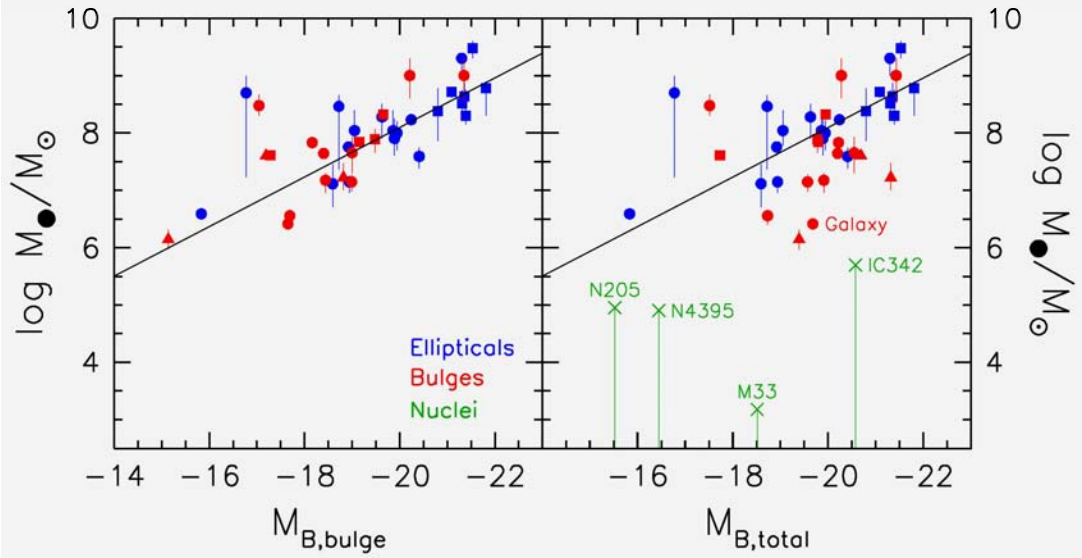


Abb. 6:Die Masse von schwarzen Löchern in Sonnenmassen über der Leuchtkraft der alten Sphäroide (‚Bulge') $M_{B,Bulge}$ (links) und der Gesamtleuchtkraft der Galaxien $M_{B,total}$ (rechts); -15 (-22) entspricht etwa 10^8 (10^{11}) Sonnenleuchtkräften.

Wie wachsen schwarzer Löcher?

Nach unseren heutigen Erkenntnissen wachsen schwarze Löcher vor allem während Verschmelzungsprozessen von Galaxien; und zwar nicht nur weil dabei zwei kleinere schwarze Löcher zu einem größeren verschmolzen werden können, sondern auch, weil unter diesen Bedingungen besonders viel Gas und Sterne von den schwarzen Löchern verschluckt werden können. Stefanie Komossa, Günther Hasinger und Kollegen haben kürzlich ein spektakuläres Beispiel von zwei verschmelzenden schwarzen Löchern mit dem Röntgensatelliten Chandra beobachtet (Abb.7).

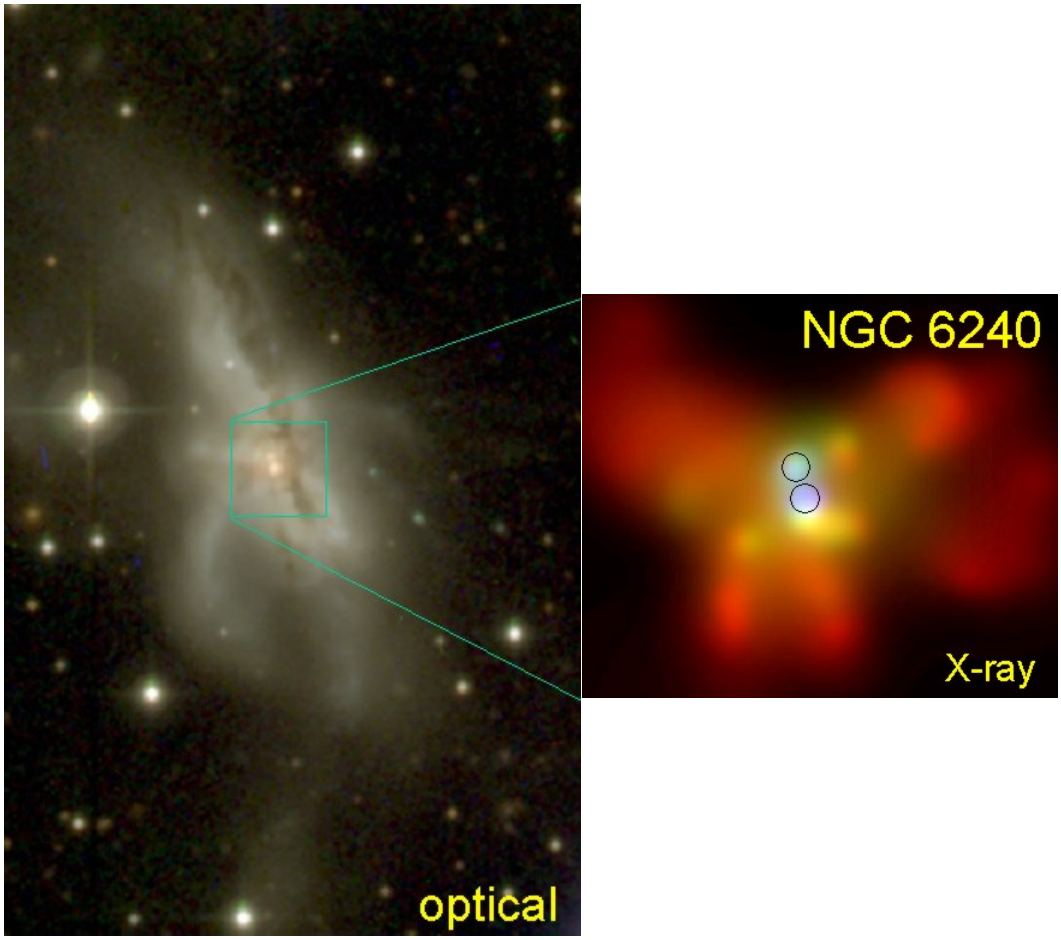


Abb. 7 links: Ein optisches Bild der verschmelzenden Galaxie NGC 6240. Die beiden alten Sphäroide der Vorgängergalaxien sind noch als rötliche Punkte im Zentrum zu erkennen. Rechts: Ein Chandra Röntgenbild des inneren Teils von NGC6240. Es sind zwei kompakte Röntgenquellen (hier weißlich) auszumachen. Die Röntgenemission entsteht in den Akkretionsscheiben um die beiden schwarzen Löcher.

Mit Röntgen-Surveys (allen voran ROSAT) wurde in den vergangenen Jahren aber auch intensiv nach Aktiven Kernen im frühen Universum gefahndet. Damit war es möglich, die kosmologische Entwicklung dieser Objekte zu untersuchen. Dabei gelang Günther Hasinger und seinen Kollegen der Nachweis, dass der kosmologische Röntgenhintergrund praktisch vollständig durch Aktive Galaktische Kerne unterschiedlichster Helligkeiten erzeugt wird.

Ausblick

Mit diesen Ergebnissen sind wir der Beantwortung einiger der oben genannten Schlüsselfragen schon wesentlich näher gekommen. Die Existenz eines supermassereichen schwarzen Loches im Zentrum unserer Milchstrasse wurde praktisch zweifelsfrei nachgewiesen. Wir haben gefunden, dass vermutlich fast alle normalen Galaxien schwarze Löcher beherbergen, wobei deren Masse ca. 0.2% der Masse der alten sphärischen Sternkomponente entspricht. Mit Röntgenmessungen konnten wir verschmelzende schwarze Löcher in Galaxienkernen finden und untersuchen, wie sich Aktive Galaxien entwickeln und wann die schwarzen Löcher in den Galaxienzentren in den letzten 12 Milliarden Jahren am aktivsten waren.

Die vom MPE entwickelten Instrumente für das VLT (z.B. CONICA, SINFONI, PARSEC), zukünftige Instrumente für das LBT, die Beteiligung an Röntgensatelliten (z.B. XMM, DUO) und Infrarot-Satelliten (z.B. Herschel) werden unsere Forschungsintensität auf diesem spannenden Gebiet der Astrophysik weiter verstärken und die Zusammenarbeit der Gruppen untereinander intensivieren.

Das Institut heute

Das Institut

Das Max-Planck-Institut für extraterrestrische Physik entwickelte sich aus einer 1961 von Professor Reimar Lüst gegründeten Arbeitsgruppe am Max-Planck-Institut für Physik und Astrophysik. Heute hat das Institut annähernd 400 Mitarbeiter, wovon etwa die Hälfte Wissenschaftler sind. Das Institut beschäftigt sich mit Themen der modernen Astrophysik und Weltraumplasmaphysik, die sich fünf großen Bereichen zuordnen lassen:

- Physik des Sonnensystems
- Lebenszyklen der Sterne und Interstellares Medium
- Galaxien und Galaxienkerne
- Großräumige Strukturen und Kosmologie
- Laborphysik komplexer Plasmen

Seinen Namen hat das Institut einerseits vom Gegenstand der Forschung, nämlich der Physik des Weltraums, andererseits von der Forschungsmethode: viele unserer Experimente müssen wegen der dichten absorbierenden Erdatmosphäre mit Flugzeugen, Ballonen, Raketen, Satelliten und Raumsonden durchgeführt werden. In zunehmendem Maße setzen wir aber vor allem im Infrarotbereich auch Instrumente an erdgebundenen Teleskopen ein.

Die Arbeitsgebiete des Instituts gliedern sich im Einzelnen in folgende Bereiche:

Weltraumplasmaphysik

Dieser Bereich beschäftigt sich mit Teilchen und elektromagnetischen Feldern, sowie ihren Wechselwirkungen im erdnahen Raum, d.h. in der Ionosphäre, Magnetosphäre und im Sonnenwind. Dabei werden in erdnaher Umgebung (einige 100 - 100000 km) und im inneren Sonnensystem diagnostische „in-situ“ Messungen durchgeführt, um z.B. die Wechselwirkung des Sonnenwindes mit der Magnetosphäre der Erde, sowie Grenzschichten und dynamische Veränderungen der Magnetosphäre zu studieren.

Astronomische Beobachtungen im Infrarot-, Optischen, Röntgen- und Gammabereich

Am Institut gibt es vier Arbeitsgruppen, die Beobachtungen in diesen Wellenlängenbereichen durchführen. Der überwiegende Teil der elektromagnetischen Strahlung von kosmischen Objekten in diesen Spektralbereichen wird in der Erdatmosphäre absorbiert. Daher müssen die Beobachtungsinstrumente mit Hilfe von Ballonen, Raketen und Satelliten aus der dichten Erdatmosphäre gebracht werden. In einigen Bändern des Infrarotbereiches, sowie im optischen Bereich ist die Atmosphäre durchsichtig, was Beobachtungen vom Flugzeug aus und von bodengebundenen Teleskopen erlaubt.

Theorie und Komplexe Plasmen

Die Theoriegruppe arbeitet eng mit den experimentellen Gruppen zusammen. In diesem Zusammenhang sind vor allem die Untersuchungen am Plasmakristall zu nennen. Es werden aber auch von Experimenten losgelöste fundamentale physikalische Prozesse untersucht. Eine recht anwendungsbezogene Entwicklung aus dem Bereich der Theorie ist der Einsatz neuartiger Analyseverfahren in der Medizin (von der EKG-Analyse bis zur Tumordiagnostik). Diese Verfahren - ursprünglich zur Verbesserung astronomischer und astrophysikalischer Untersuchungen entwickelt - haben hier in sehr "irdischen" Anwendungen einen breiten Einsatz und Nutzen gefunden.

Technischer Bereich

Da am Institut viele Beobachtungsinstrumente und ganze Nutzlasten neu entwickelt und gebaut werden, gibt es neben dem wissenschaftlichen Bereich einen leistungsfähigen technischen Bereich. Dieser besteht aus Konstruktion, mechanischer und elektronischer Werkstatt, sowie einer mechanischen Lehrwerkstatt. In einem Testlabor werden die Instrumente auf Weltraumtauglichkeit geprüft. Größere Experimente werden überwiegend in Zusammenarbeit mit anderen Institutionen des In- und Auslandes gefertigt. Von den verschiedenen Experimenten sind oft große Datenmengen zu verarbeiten, die mehrere hundert Megabit pro Tag betragen können. Diese werden mit Hilfe von Rechenanlagen ausgewertet, um daraus wissenschaftliche Informationen zu gewinnen.

Wechselwirkung mit anderen Forschungseinrichtungen

Das Institut pflegt die enge Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen im In- und Ausland. Wissenschaftler unseres Instituts halten Vorlesungen an den Münchner Universitäten sowie an den Universitäten in Frankfurt, Giessen, Heidelberg, Münster, Siegen, und Ulm. Studenten von verschiedenen Universitäten arbeiten hier als Diplomanden und Doktoranden. Mit der „International Max-Planck Research School on Astrophysics“ wird seit dem Jahre 2001 in Zusammenarbeit mit der Ludwig-Maximilans-Universität München eine weitere Intensivierung der Doktorandenausbildung im Raum Garching / München verfolgt. Ständig weilen auch wissenschaftliche Gäste, insbesondere aus dem Ausland, am Institut, während umgekehrt einzelne Mitarbeiter im Rahmen der internationalen Projekte an anderen Forschungsstätten arbeiten.

Weltraumplasmen

Wie durch ausreichende Energiezufuhr der feste in den flüssigen und dieser in den gasförmigen Aggregatzustand überführt werden kann, geht jedes Gas bei weiterer Energiezufuhr in den Plasmazustand über. Während im gasförmigen Zustand die Elektronen noch fest an die Atome gebunden sind, bewegen sie sich im Plasmazustand frei und relativ unabhängig von den verschiedenen positiv geladenen Atomrümpfen, den Ionen. Wegen der Wechselwirkung der freien Ladungen mit dem elektromagnetischen Feld wird der Plasmazustand häufig auch als der vierte Aggregatszustand bezeichnet. Auf der Erde sind natürliche Plasmen sehr selten, aber im Kosmos befindet sich der Großteil der Materie in diesem Zustand.

Neben dem Licht und anderer Strahlung sendet unsere Sonne ununterbrochen einen Strom von Plasma aus, der das solare Magnetfeld mitträgt und als Sonnenwind bezeichnet wird. Auch in der Umgebung der meisten Planeten befindet sich ein im Magnetfeld eingefangenes Plasma. Dieser Bereich wird als Magnetosphäre bezeichnet. Die Wechselwirkung des Sonnenwindplasmas und -magnetfeldes mit dem Magnetosphärenplasma und -magnetfeld ist ein Untersuchungsgegenstand der Weltraumplasmaphysik. Diese sehr komplizierten und dynamischen Prozesse des Energieaustausches haben zum Teil auch Auswirkungen in den oberen Schichten der Atmosphäre, wo sie zum Beispiel in Form von Leuchterscheinungen (Polarlichter) vom Boden aus beobachtet werden können. Im Allgemeinen können diese Prozesse aber nur „vor Ort“, d.h. mit Hilfe von Satelliten untersucht werden.

Ein weiteres interessantes Forschungsgebiet ist die Beschleunigung der Teilchen des Sonnenwindplasmas zu hohen Energien in der Sonnenkorona und im erdnahen interplanetaren Raum. Hierbei können Prozesse ebenfalls „vor Ort“ studiert werden, die überall im Universum ablaufen, aber einer direkten Untersuchung nur in unserem Sonnensystem zugänglich sind. Die Messung der Element-, Isotopen- und Ionenzusammensetzung dieser Teilchen als Funktion der Energie gibt uns die Möglichkeit, Quellen und Beschleunigungsprozesse im „Weltraumlabor“ zu untersuchen.

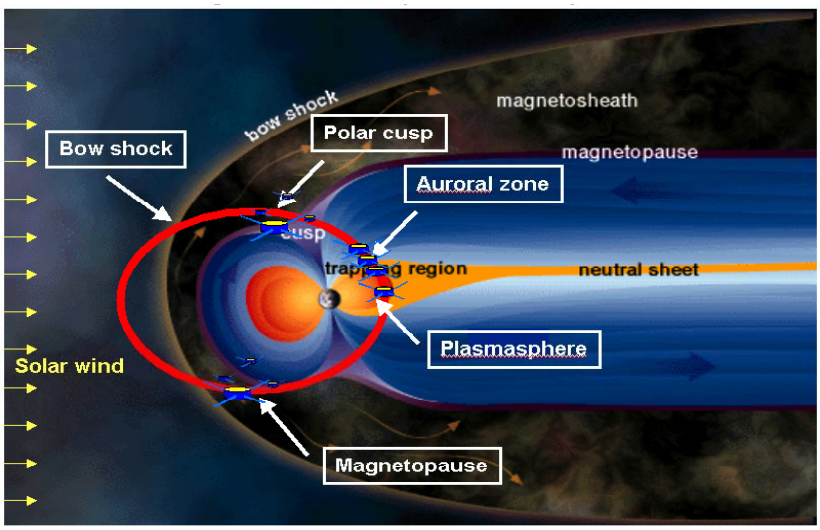
Seit einigen Jahren beschäftigt sich das MPE auch mit Messungen und der Analyse von kleinsten Staubpartikeln im interplanetaren Raum und der Umgebung von Kometen. Hierbei stehen das Staubexperiment *COSIMA* für die Rosetta Mission und der *Rosettalander*, das Landemodul der Rosetta-Mission, im Vordergrund.

Der wesentliche Teil der Arbeit im Bereich Weltraumplasmen besteht zur Zeit in der Auswertung der Messungen einer Reihe von Experimenten, die in den letzten Jahren zur Untersuchung von Teilchen und Feldern in der Erdmagnetosphäre und im Interplanetaren Raum entwickelt wurden und nun auf den Satelliten CLUSTER, FAST, SAMPEX, SOHO, und ACE im Einsatz sind.

Die Mission CLUSTER

Die CLUSTER Mission gehört zu den “Cornerstone 2000” Missionen der ESA und dient der Erforschung des dynamischen Verhaltens des energiereichen Plasmas der irdischen Magnetosphäre. Um eine räumliche und zeitliche Trennung der Phänomene zu ermöglichen, besteht die Mission aus vier identischen Satelliten, die im Formationsflug mit variierbarem Abstand (zwischen ~100 und 10000 km) die Erde umlaufen. Nachdem die CLUSTER Mission beim ersten Versuch 1996 durch die Explosion der Ariane-5 Trägerrakete scheiterte, wurde im Sommer 2000 die Nachfolgemission mit zwei russischen Soyuz-Raketen von Baikonur erfolgreich gestartet. Nach einer umfangreichen Testphase wurde am 1. Februar 2001 der Routinebetrieb aufgenommen.

Zur wissenschaftlichen Nutzlast der Satelliten mit je 11 Experimenten hat das MPE einen großen Beitrag geleistet, und zwar beim Elektronendrift Instrument EDI und beim CLUSTER-Ionen-Spektrometer CIS.



Die Umlaufbahn der CLUSTER Satelliten im Februar

Die CLUSTER Konfiguration

Die Experimente EDI und CIS

Das Hauptziel des Elektronendrift - Instruments (*EDI*) ist die Messung der elektrischen Felder, die das Verhalten der Plasmen im CLUSTER Orbit wesentlich bestimmen. Die Messung basiert auf der vom elektrischen Feld hervorgerufenen Versetzung der Elektronenbahn nach einem Umlauf im Magnetfeld. Das Ziel des Cluster Ionen Spektrometer Experimentes (*CIS)* ist die gleichzeitige Aufnahme dreidimensionaler Verteilungsfunktionen magnetosphärischer Ionen im Energiebereich ~ 5 eV/e bis 40 keV/e. Dabei gestattet der Sensor erstmals eine Trennung der in der Erdmagneto-sphäre am häufigsten auftretenden Ionenarten (H^+, He^{2+}, He^+, O^+) im gesamten Energiebereich. Beide Instrumente wurde auch bereits auf dem Satelliten Equator-S eingesetzt, der vom Dezember 1997 bis April 1998 Daten lieferte.

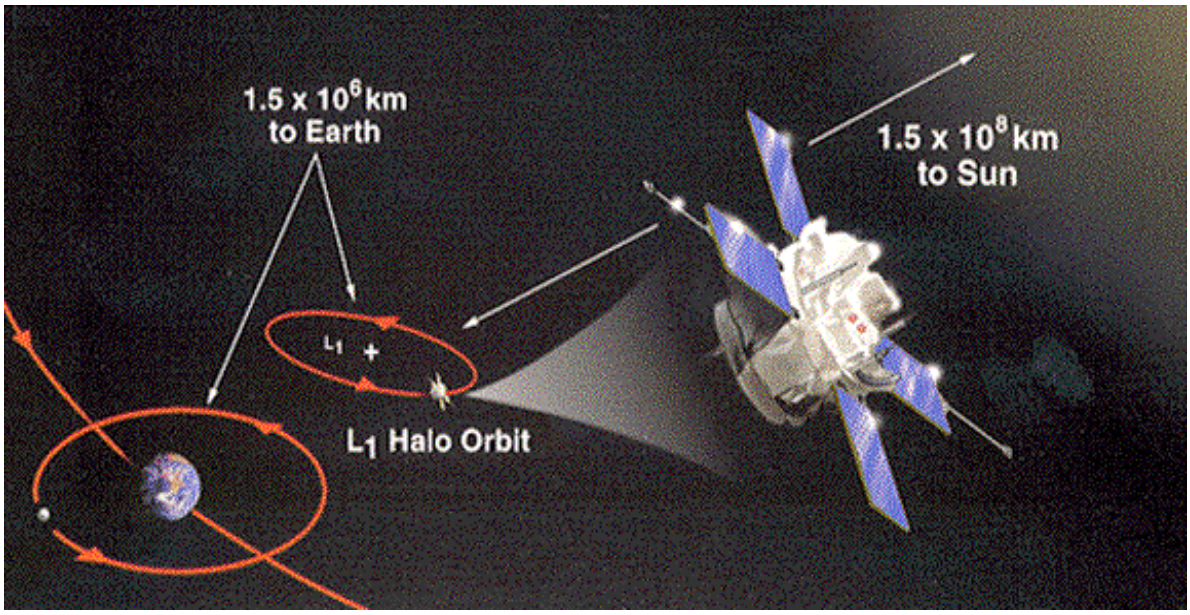
CELIAS und CDS auf SOHO

Das **C**harge **El**ement and **I**sotope **A**nalyzer **S**ystem (*CELIAS*) wurde unter Leitung des MPE in Kooperation mit mehreren Instituten im In- und Ausland für die SOHO Sonde der ESA/NASA entwickelt. SOHO gehört ebenfalls zu den "Cornerstone 2000" Missionen der ESA und dient der Erforschung der Sonne. SOHO wurde am 2. Dezember 1995 gestartet und in eine Bahn um den Librationspunkt L1 zwischen Erde und Sonne gebracht. Der mittlere Abstand von der Erde ist ca. 230 Erdradien, d.h. SOHO befindet sich wie ACE (s. unten) im interplanetaren Raum, weit außerhalb der Magnetosphäre der Erde. CELIAS gehört zu der Gruppe von Experimenten an Bord von SOHO, die der Untersuchung des solarer Windes und solarer energetischer Ionen dienen. Das MPE ist ebenfalls an dem **C**oronal **D**iagnostic **S**pectrograph (*CDS*) beteiligt, einem von mehreren Teleskopen zur Beobachtung der Sonne in einem weiten Wellenlängenbereich.

Durch den gleichzeitigen Betrieb einer Reihe von abbildenden Spektrometern auf SOHO wird eine Korrelation von Teilchen- und optischen Beobachtungen der Sonne ermöglicht, die über dynamische Vorgänge in der Sonnenatmosphäre und im interplanetaren Raum Aufschluss geben.

SEPICA auf ACE

Das **S**olar **E**nergetic **P**article and **I**onic **C**harge **A**nalyzer (*SEPICA*) Experiment auf dem Advanced Composition Explorer (*ACE*) der NASA dient der Messung von Ionenladungszuständen der solaren kosmischen Strahlung im Energiebereich zwischen 0.1 und 15 MeV/Nukleon Das Experiment wurde unter Leitung der University of New Hampshire durchgeführt. Das MPE stellte dabei einige aus der HILT/SAMPEX und CELIAS/SOHO Sensorentwicklung hervorgegangene Komponenten zur Verfügung. SEPICA ist eines von insgesamt 9 Experimenten an Bord von ACE zur Messung des Solaren Windes und energetischer Ionen und Elektronen in einem Energiebereich, der von den niedrigen Energien des Solaren Windes (~1 keV/Nukleon) bis zu den Energien der galaktischen Kosmischen Strahlung im Energiebereich von mehreren GeV/Nukleon reicht. ACE wurde am 25.08.97 erfolgreich gestartet und ist, ähnlich wie SOHO, in einer Bahn um den Librationspunkt L1 positioniert, etwa 1.5 Millionen Kilometer von der Erde entfernt.

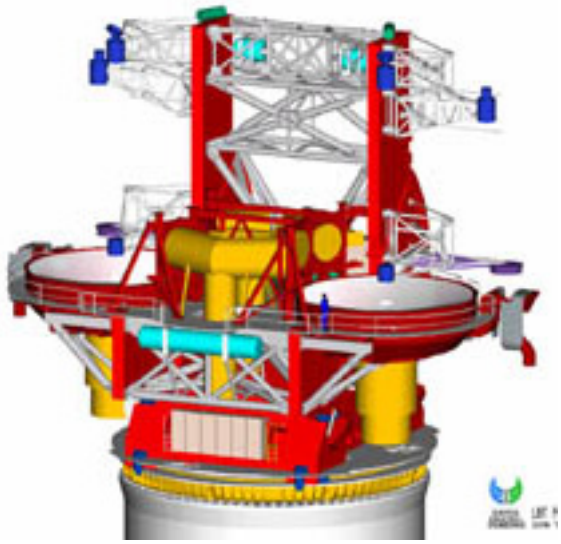


Die Bahn von SOHO und ACE um den Librationspunkt L1 (schematisch)

Infrarot- und Submillimeter-Astronomie

Infrarotstrahlung bietet eine Fülle von Möglichkeiten, um physikalische und chemische Prozesse im Universum zu untersuchen. Alle Gegenstände und Objekte im Universum haben eine von Null verschiedene Temperatur und senden daher elektromagnetische Strahlung aus. Heiße Objekte, wie unsere Sonne, strahlen im sichtbaren Bereich, kühlere Objekte strahlen dagegen im Infraroten. Für das menschliche Auge sind diese Infrarot- (oder Wärme-) Strahlen zwischen sichtbarem Licht und Radiowellen unsichtbar. Viele Objekte im Universum strahlen aber fast ausschließlich im Infrarotbereich, so dass wir sie nur mit entsprechenden Detektoren beobachten können. Zu diesen Objekten gehören z.B. kühle Sterne, braune Zwerge, Planeten (außerhalb unseres Sonnensystems), interstellare Moleküle, Sternentstehungsgebiete, oder Infrarotgalaxien. Weite Bereiche des Weltalls enthalten außerdem riesige Wolken aus „Staub“, die sichtbares Licht verschlucken aber Infrarotstrahlen weitgehend passieren lassen. Dazu zählen beispielsweise die Zentralbereiche vieler Galaxien, die von staubhaltiger Materie verdeckt werden. Die superschweren Schwarzen Löcher, die sich oftmals (z.B. auch in unserem eigenem Milchstraßenzentrum) dahinter verbergen, lassen sich daher idealerweise im Infraroten studieren. Auch viele der entferntesten Objekte im Universum werden im Infraroten untersucht. Durch die Ausdehnung des Weltalls wird das von ihnen ausgesandte sichtbare Licht so weit ins Rote verschoben dass es auf der Erde als Infrarotstrahlung beobachtet wird.

Aber selbst mit speziellen Infrarot-Kameras an großen Teleskopen lässt sich kosmische Infrarotstrahlung nur schwer messen, denn die Erdatmosphäre verschluckt den größten Teil davon. Deshalb müssen Teleskope zur Detektion dieser elektromagnetischen Strahlen in große Höhen gebracht werden, sei es mit Ballons, Flugzeugen oder Satelliten. In bestimmten, engen Spektralbereichen kann auch vom Boden aus beobachtet werden, am besten auf hohen Bergen in trockenen Regionen. Unsere Gruppe ist zur Zeit in einer sehr aktiven Phase der Entwicklung von Schlüsselinstrumenten für große erdgebundene, luftgestützte und Weltraum-Observatorien der nächsten Generation. Die hochauflösende Nahinfrarotkamera NACO und das abbildende Nahinfrarot-Spektrometer SPIFFI für das Very Large Telescope (VLT) sind bereits in Betrieb gegangen. Weitere Instrumente sind für das VLT und das Large Binocular Telescope (LBT) in Entwicklung, und die Laserleitstern-Technologie wird mit PARSEC auf das VLT übertragen.



Large Binocular Telescope (LBT)

Im mittleren und fernen Infrarot stehen mehrere Projekte in unterschiedlichen Stadien der Verwirklichung. SOFIA (das „Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy“) und das Herschel Space Observatory, die beiden zukünftigen Beobachtungsplattformen für Ferninfrarot-Astronomie, sind in fortgeschrittenen Entwicklungsphasen. SOFIA ist eine Zusammenarbeit der deutschen und US-amerikanischen Weltraumbehörden DLR und NASA. In ein Flugzeug des Typs Boeing 747-SP wird ein 2.5 m Spiegelteleskop eingebaut, das ab 2005 im Flug betrieben werden soll. SOFIA wird damit das größte fliegende Teleskop der Welt sein. Herschel ist die vierte „Cornerstone“ (Grundstein) Mission der europäischen Raumfahrtbehörde ESA. Es soll ab 2007 von einer Umlaufbahn um die Sonne aus Photometrie und Spektroskopie im Ferninfrarotbereich betreiben und dabei unter anderem die Galaxienentstehung im frühen Universum sowie die Sternentstehung und die inter-stellare Materie in der Milchstraße erforschen. An beiden Großprojekten ist unsere Infrarot-Gruppe auf dem Gebiet der Detektorentwicklung, des Instrumentenbaus und der wissenschaftlichen Auswertung maßgeblich beteiligt.

Oben: SOFIA bei einem Testflug vor Einbau des Teleskops. Unten: Herschel

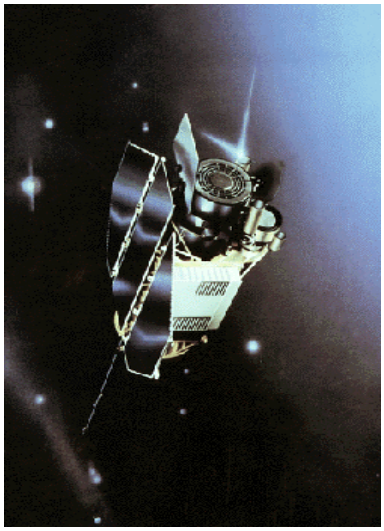
Röntgenastronomie

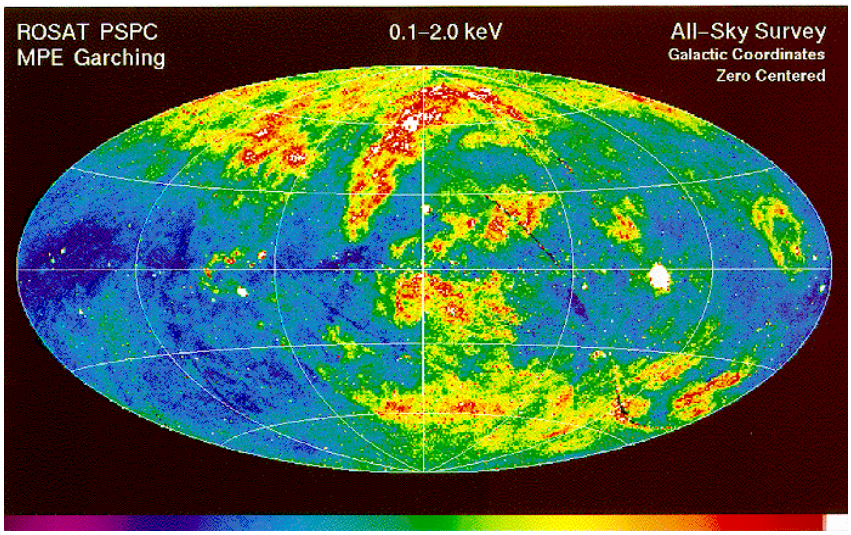
Röntgenstrahlung wird vor allem von Plasmen mit extrem hohen Temperaturen (Millionen Grad) ausgestrahlt, sie weist daher auf hochenergetische Vorgänge im Kosmos hin. Da die kosmische Röntgenstrahlung die irdische Atmosphäre nicht durchdringen kann, ist sie nicht vom Erdboden aus beobachtbar. Deshalb ist die Röntgenastronomie erst durch die Weltraumfahrt möglich geworden, da ihre Messinstrumente, - Röntgenzähler, Bildumwandler und Teleskope -, mit Stratosphärenballonen, Raketen oder Satelliten in die Hochatmosphäre oder in eine Erdumlaufbahn gebracht werden müssen. 1949 wurde in den USA mit einer photographischen Emulsion als Nutzlast einer Beute-V2/A4-Rakete die Sonne als Röntgenstrahler entdeckt. 1962 erfolgte die Entdeckung des ersten Röntgensterns im Sternbild Skorpion mit einem Röntgenzähler an Bord einer Höhenforschungsrakete. 1970 wurde der erste Satellit gestartet, der den Himmel erfolgreich nach Röntgenquellen durchmusterte. Aufgrund dieser und vieler nachfolgender Raketen- und Satellitenexperimente weiß man heute, dass nahezu alle astronomischen Objekte im Kosmos auch hoch-energetische Röntgenstrahlung aussenden. Dazu gehören normale Sterne, Doppelsternsysteme, in denen einer der Partnersterne ein Weißer Zwerg oder ein Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch ist, Supernova-Explosionswolken, Galaxien, Haufen von Galaxien und auch die entferntesten Objekte in unserem Universum, die Quasare. Heute wissen wir von mehr als 200.000 Himmelskörpern, die Röntgenstrahlung aussenden. Für die 1962 gemachte Entdeckung des ersten Röntgensterns erhielt Riccardo Giacconi 2002 den Nobelpreis für Physik.

ROSAT

Im Juni 1990 wurde der deutsche Röntgensatellit ROSAT mit einer Delta-II-Rakete vom Cape Canaveral, Florida, aus in eine 580 km hohe Erdumlaufbahn geschossen. ROSAT, an dem auch die USA und Großbritannien beteiligt waren, wurde unter der wissenschaftlichen Federführung des MPE von der deutschen Raumfahrtindustrie gebaut. Er war 2.4 Tonnen schwer, 4.5 m lang und hatte 2.4 m im Durchmesser. ROSAT trug an Bord ein Röntgen-Teleskop, das eine Brennweite von 2.4 m, eine Auflösung von 3.5 Bogensekunden und eine Öffnung von 84 cm hatte. Solche Röntgen-Teleskope werden am MPE in Zusammenarbeit mit der Firma Carl Zeiss, Oberkochen, seit den siebziger Jahren entwickelt und gebaut. Auch einer der beiden Detektortypen im Fokus des Teleskops, der sog. PSPC, wurde vom MPE entwickelt und gebaut. Die registrierten Röntgenphotonen des Himmels wurden elektronisch verarbeitet und über einen Sender zur Bodenstation übertragen. Seit dem Start lieferte ROSAT eine tägliche Datenmenge von etwa 700 Mbit, die im deutschen Bodenkontrollzentrum GSOC, Oberpfaffenhofen, empfangen und aufbereitet wurde. Von dort wurde auch der Betrieb des Satelliten kommandiert. Die wissenschaftliche Auswertung der Röntgenbilder erfolgte dann im wissenschaftlichen ROSAT-Datenzentrum am MPE, wo die Bildsignale von einem Computer wieder zu Bildern des Röntgenhimmels zusammengesetzt wurden.

Hauptaufgabe von ROSAT war die Erstellung der ersten vollständig abgebildeten Himmelskarte im Licht weicher Röntgenstrahlung (0.1 bis 2.4 keV Photonenenergie). Durch Vergleich der gefundenen Röntgenquellen mit schon bekannten, katalogisierten Objekten konnte man schließen, dass die Mehrzahl der von ROSAT entdeckten Röntgenquellen Sterne in unserer Milchstraße und die hell strahlenden Kerngebiete anderer Galaxien und Quasare sind.



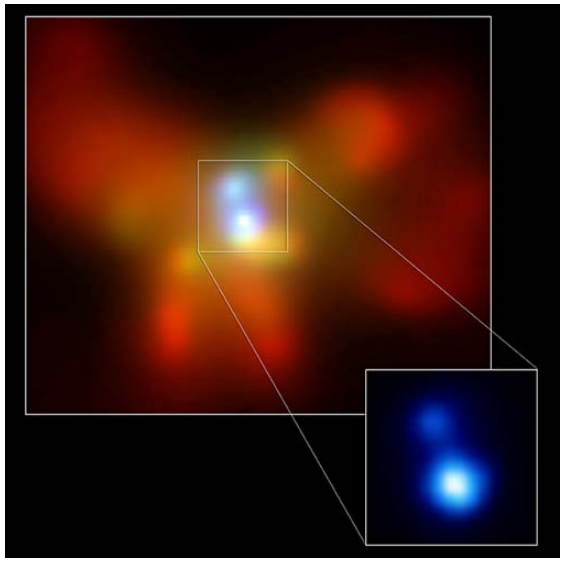


Der ROSAT Satellit *Eine Röntgenkarte des Sternhimmels*

Die zweite, 8 Jahre dauernde Phase der Mission war dem tieferen Studium von Einzelquellen in Hinsicht auf ihre zeitlichen, räumlichen und spektralen Eigenschaften gewidmet. Diese Messungen wurden ausschließlich im Rahmen eines Gastbeobachterprogramms durchgeführt, zu dem Wissenschaftler aus aller Welt Zugang hatten. Es sind etwa 8.000 solcher Einzelbeobachtungen durchgeführt worden. Insgesamt sind bisher über 5.000 Artikel in wissenschaftlichen Zeitschriften erschienen, die auf ROSAT-Ergebnissen beruhen. An der wissenschaftlichen Ernte sind zusammen mit dem MPE über 1.000 Wissenschaftler in aller Welt beteiligt. Über 150.000 neue Röntgenquellen hat ROSAT entdeckt. Vorher waren lediglich 5.000 bekannt.

CHANDRA

Am 23. Juli 1999 wurde der Röntgenastronomie-Satelliten CHANDRA von der amerikanischen Weltraumorganisation NASA mit einem Space-Shuttle in eine Erdumlaufbahn gebracht. Chandra, nach dem indischen Astrophysiker Chandrasekhar benannt, trägt ein hoch auflösendes Röntgenteleskop vom Woltertyp mit einer Brennweite von 10 m bei einem Winkelauflösungsvermögen von 0.5 Bogensekunden! Zusätzlich zu einem Channel-Plate-Bildwandler, wie er auch beim ROSAT-Teleskop Verwendung fand, befindet sich in der Fokalebene des CHANDRA-Teleskops eine CCD-Kamera. Neben der hoch aufgelösten Abbildung im Photonen-Energieband von 0.1 bis 10 keV wird auch Spektroskopie mit hoher spektraler Auflösung mit CHANDRA betrieben. Hierzu dienen Objektiv-Transmissionsgitter, die sich im konvergenten Strahlengang hinter dem Wolter-Spiegelsystem befinden. Eine solche Gitteranordnung ist vom MPE in Kollaboration mit Wissenschaftlern aus Utrecht, Niederlande, und in Zusammenarbeit mit der Firma Heidenhain, Traunreut, gebaut und getestet worden. Die wissenschaftlichen Daten, die es seit Mitte August 1999 gibt, sind von überragender Qualität und haben viele neue Entdeckungen gebracht.



Das Röntgenobservatorium CHANDRA *2 Schwarze Löcher in der Galaxis NGC 6240*

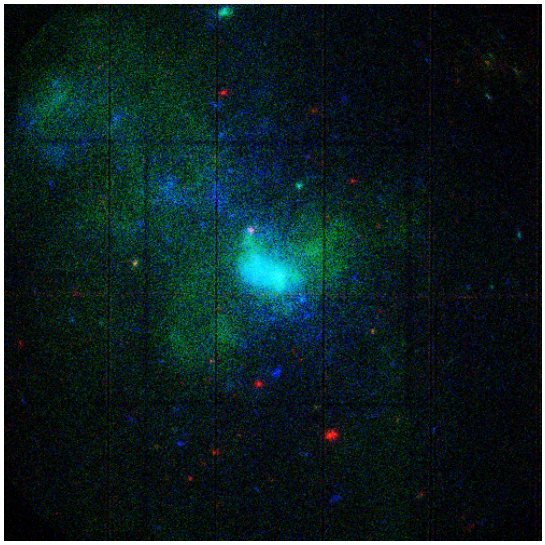
Die Abbildungen zeigen den Röntgensatelliten Chandra (links) sowie die kürzlich mit diesem Satelliten beobachtete Galaxie mit der Katalogbezeichnung NGC 6240. Die Galaxie ist etwa 400 Millionen Lichtjahre von der Erde entfernt. Das besondere in dieser Beobachtung ist die Entdeckung von einem Paar von Schwarzen Löchern im Kernbereich der Galaxie. Beide Schwarzen Löcher werden in einigen hundert Millionen Jahren miteinander verschmelzen und ein noch massiveres schwarzes Loch bilden – ein Ereignis, das mit einem gigantischen Ausbruch von Gravitationswellen einhergehen sollte.

XMM-Newton

Die europäische Weltraumorganisation ESA hat im Dezember 1999 einen großen Röntgensatelliten mit einer Ariane-V in die Erdumlaufbahn geschickt. Der XMM-Newton (**X**-Ray **M**ulti-Mirror **M**ission) genannte Satellit hat drei außerordentlich lichtstarke Teleskope vom Woltertyp mit je 58 ineinander gesetzten Spiegelschalen an Bord, denen als Bilddetektoren jeweils CCD-Kameras zugeordnet sind. Zwei der Teleskope sind mit Reflexionsgittern ausgestattet, die eine hoch aufgelöste Spektroskopie bei weichen Röntgenstrahlen erlauben. Die Teleskope arbeiten im Bereich von 0.1 bis 10 keV Photonenenergie.

Im Vergleich zum CHANDRA-Teleskop sind die XMM-Newton-Teleskope auf eine möglichst große Sammelfläche bei mäßigem räumlichem Auflösungsvermögen (ca. 15 Bogensekunden) ausgelegt. Entwurf, Bau und Tests der Spiegelsysteme von XMM-Newton wurden vom MPE koordiniert. Die Teleskope sind in unserer Röntgentestanlage PANTER in Neuried, die die größte ihrer Art außerhalb der USA ist, vermessen worden. Die Leistungsfähigkeit der Teleskope entspricht in vollem Umfang den an sie gestellten Anforderungen. Eine wesentliche Beteiligung des Instituts an diesem Projekt ist auch die Entwicklung einer neuartigen Röntgen-CCD-Kamera (EPIC), die im Halbleiterlabor, das die Max-Planck-Institute für extraterrestrische Physik und für Physik gemeinsam betreiben, entwickelt wurde. Der Detektor befindet sich seit nunmehr 3 Jahren im Orbit und funktioniert ohne wesentliche Degradation.

Der Röntgensatellit XMM-Newton



Das Zentrum der Milchstraße im Röntgenlicht

Die Abbildungen zeigen den Röntgensatelliten XMM-Newton (links) mit einer Aufnahme vom Zentrum der Milchstraße (rechts) bei der die Farben des Bildes mit der Energie der nachgewiesenen Photonen in Verbindung stehen.

Es handelt sich um den größten Röntgen-CCD-Detektor (6x6 cm), der je hergestellt wurde. Die Größe eines Bildelements beträgt 0.15 mm und ist damit dem Auflösungsvermögen des Teleskops angepasst. Bei einer Betriebstemperatur von etwa -90^0C wird ein Energieauflösungsvermögen von etwa 130 eV bei einer Photonenenergie von 6 keV erreicht.

ROSITA

Die Himmelsdurchmusterung von ROSAT hat ein völlig neues Bild vom Himmel im weichen Röntgenbereich ergeben - mit über 100000 Röntgenquellen und einer detaillierten Kartierung der diffusen Strahlung aus unserer Milchstraße. Allerdings waren einige Bereiche des Himmels, nämlich die galaktische Ebene und insbesondere das galaktische Zentrum für ROSAT nicht oder kaum sichtbar, da im weichen Röntgenbereich (0.1-2.4 keV) die Kaltgasabsorption den Blick verstellte. Aus denselben Gründen waren Seyfert-2 Galaxien, bei denen man durch eine dieser Materiescheiben auf den aktiven Kern blickte, für ROSAT unsichtbar.

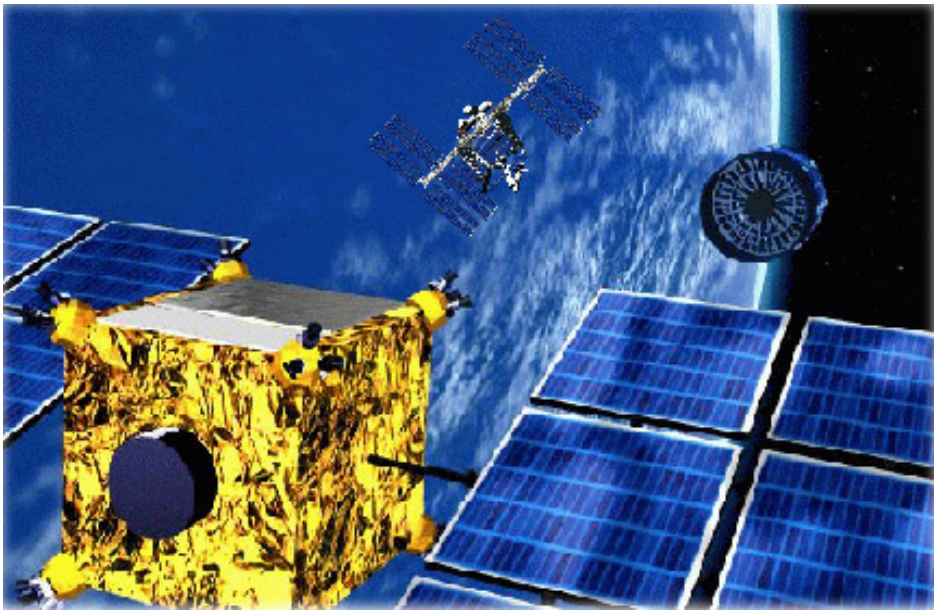
Das ROSITA-Teleskop besteht aus 7 Spiegelsystemen mit jeweils 27 ineinander geschachtelten Röntgenspiegeln, die den Himmel auf eine CCD-Kamera abbilden. Dieses Instrument ist eine Weiterentwicklung der erfolgreichen XMM-Newton-Kamera. ROSITA soll die erste vollständige Himmelsdurchmusterung mit abbildenden Teleskopen im mittleren Röntgenbereich (0.5-15 keV) durchführen.

Das ROSITA Teleskop

Aus diesen Gründen bemühen wir uns derzeit, die interessanten wissenschaftlichen Ziele mit einem Instrument ROSITA (Röntgen Survey with an Imaging Array) auf der internationalen Raumstation ISS zu erreichen.

XEUS

Als Nachfolger des derzeit erfolgreich arbeitenden Röntgenobservatoriums XMM-Newton plant die ESA für das nächste Jahrzehnt ein Röntgenteleskop mit einem Durchmesser von 10 Metern, einer Brennweite von 50 Metern und einem Auflösungsvermögen von mindestens 5 Bogensekunden. Die Empfindlichkeit dieses Instruments wird die von XMM-Newton um zwei Größenordungen übertreffen und es ermöglichen, Objekte aus der Frühphase des Universums zu untersuchen, in der sich die Galaxien bildeten. Zu den Beobachtungszielen zählen deshalb u.a. die ersten massiven Schwarzen Löcher und die im frühen Universum entstehenden Galaxienhaufen.



Die Mission XEUS

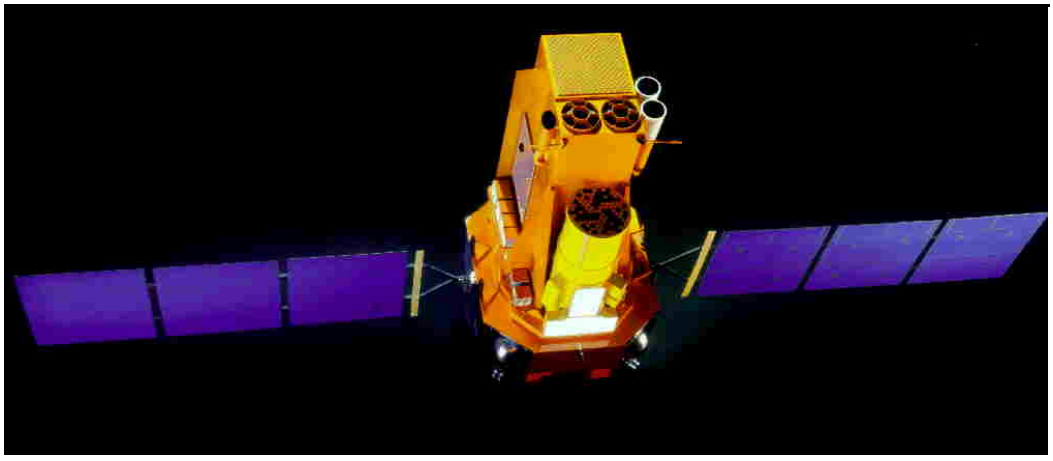
Der Bau dieses Teleskops, das den Namen XEUS (X-ray Evolving Universe Spectrometer) trägt, stellt in verschiedener Hinsicht eine technologische Herausforderung dar: Es wird aus zwei Satelliten – einer trägt das Spiegelsystem, der andere die Detektoren – bestehen, die im exakten Formationsflug auf die jeweiligen Beobachtungsobjekte ausgerichtet werden. Darüber hinaus sind neuartige Röntgendetektoren in der Entwicklung, an denen auch unser Halbleiterlabor arbeitet. Wir arbeiten derzeit außerdem an der Entwicklung von Röntgenspiegeln, die die extremen Anforderungen von hohem Auflösungsvermögen, großer Sammelfläche und Leichtbauweise erfüllen, und erproben dazu mit Industriepartnern neue Materialien und Fertigungstechniken. Nach dem derzeitigen Plan soll XEUS in zwei Phasen mit Unterstützung durch die Internationale Raumstation (ISS) in der Erdumlaufbahn aufgebaut werden.

Gamma-Astronomie

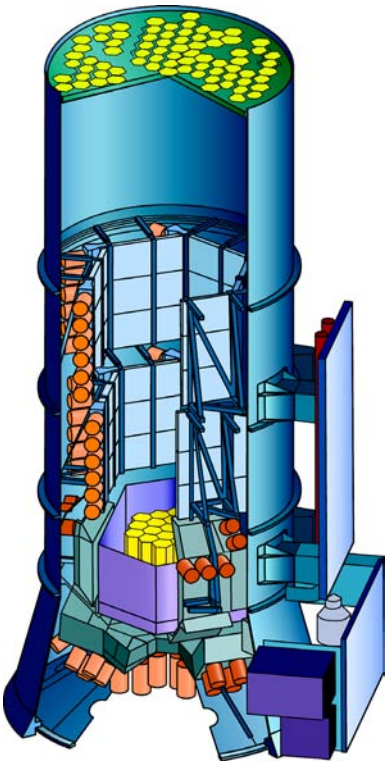
Gammastrahlung stellt den höchstenergetischen Teil des elektromagnetischen Spektrums dar. Durch die Messung kosmischer Gammastrahlung kann man deshalb etwas über Prozesse mit den höchsten Energien im Universum erfahren. Die ersten kosmischen Gammaquanten wurden vor etwa 35 Jahren gemessen.

Die Gamma-Astronomie hat eine lange und erfolgreiche Tradition am MPE. Die Teleskope COMPTEL und EGRET auf dem Compton Gammastrahlen-Observatoriums GRO haben von 1991 bis 2000 erstmals eine vollständige systematische Durchmusterung des Himmels im Gammalicht durchgeführt und dabei eine Fülle aufregender Entdeckungen gemacht, die die Astrophysiker noch lange beschäftigen werden. Wir haben gelernt, dass der Himmel reich an Hochenergie-Phänomenen ist. Vor allem die kompaktesten Objekte im Universum und das von energetischer Teilchenstrahlung durchströmte interstellare Medium sind hell leuchtende Quellen von Gammastrahlung. In der Milchstraße sind das insbesondere Neutronensterne, die uns als Pulsare erscheinen, Doppelsternsysteme, die einen Neutronenstern oder ein Schwarzes Loch enthalten und eine Vielzahl von bis jetzt unidentifizierten Quellen. Supernova-Überreste, die Überbleibsel von Sternexplosionen, und Ansammlungen von massereichen Sternen sind Orte in denen neue chemische Elemente erzeugt werden, die wir durch ihre Radioaktivität im Gammalicht beobachten können. Im extra-galaktischen Raum findet man Blasare (eine energiereiche Unterklasse von Quasaren) in deren Zentren sich massereiche Schwarze Löcher befinden. Auch die geheimnisvollen Gamma-Burst-Quellen haben wahrscheinlich etwas mit kollidierenden Neutronensternen oder neu entstehenden Schwarzen Löchern zu tun. Sie sind Milliarden von Lichtjahren von uns entfernt und müssen deshalb extrem leuchtkräftig sein. Einige dieser Objekte (wie Blasare und Pulsare) haben ihr Leuchtkraftmaximum im Gammabereich. Es ist praktisch unmöglich, solche Objekte zu verstehen, ohne ihre Gamma-Eigenschaften zu kennen.

Mit dem Start des ESA-Satelliten INTEGRAL im Oktober 2002 ist die Gamma-Astronomie in eine neue Phase eingetreten. Das Institut ist maßgeblich an INTEGRAL, speziell am Spektrometer *SPI*, beteiligt. SPI wird den mit COMPTEL erstmals intensiv erforschten Bereich der Gammalinienspektroskopie weiter vertiefen. Insbesondere gibt SPI uns die Möglichkeit, die Orte der chemischen Elemententstehung im Universum direkt zu beobachten. Weitere Instrumente auf INTEGRAL (IBIS und JEM-X) werden die Milchstraße und weit entfernte Galaxien ebenfalls nach Hochenergiequellen durchsuchen.



Der INTEGRAL Satellit



Das Gamma Spektrometer SPI auf INTEGRAL

Die Erforschung der kosmischen Gammastrahlen-Bursts (GRBs) soll künftig ein Schwerpunkt für unser Institut sein. Ein Gammastrahlen-Monitor zur Messung solcher Ereignisse wird gegenwärtig entwickelt und soll im Jahr 2006 auf dem NASA-Satelliten GLAST zum Einsatz kommen. Das Nachleuchten von GRB-Explosionen im optischen und infraroten Spektralband kann von irdischen Sternwarten aus beobachtet werden. Dazu werden neue Kameras (GROND, OPTIMA) entwickelt. Sie sollen erstmals 2004 eingesetzt werden.

Darüber hinaus wird am Institut an der Entwicklung neuer Technologien zur Messung von Gammastrahlen gearbeitet. Diese Untersuchungen, eine Weiterentwicklung von Compton-Teleskopen unter dem Projektnamen MEGA, sollen die Grundlagen für mögliche künftige Gammastrahlen-Teleskope im Weltraum bilden.

Optische und interpretative Astronomie

Wie entstand das Universum? Was ist der Ursprung der Galaxien? Warum gibt es unterschiedliche Galaxienformen und wie entwickeln sie sich? Wie sind die Galaxien großräumig im Universum verteilt? Gibt es uns unbekannte Materieformen im Universum?

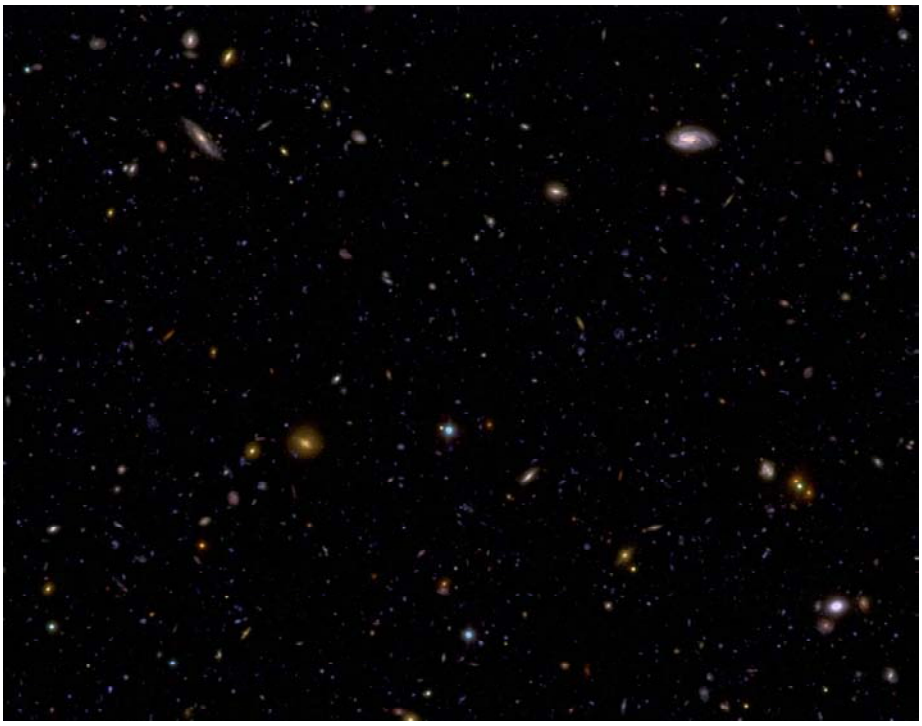
Dies ist eine Auswahl der wichtigsten Fragen, mit denen sich die moderne extragalaktische Astrophysik beschäftigt. Sie spielen auch eine wichtige Rolle in den Forschungsprojekten der Gruppe Optischer und interpretativer Astronomie. In unserer Arbeitsgruppe arbeiten Wissenschaftler am MPE und am Institut für Astronomie und Astrophysik der Ludwig-Maximilians Universität sehr eng zusammen. Ziel dieser exemplarischen Zusammenarbeit zwischen einem Max-Planck-Institut und einer Universität ist es, gemeinsam die Forschungsleistung zu steigern und die Möglichkeit für eine hervorragende Ausbildung des wissenschaftlichen Nachwuchs zu schaffen.

Wie unser Gruppenname schon sagt, untersuchen wir z.B. Galaxien mit den Mitteln der „klassischen“ Astronomie: wir beobachten das Licht, das wir von Galaxien im optischen und nahinfraroten Spektralbereich empfangen können. Unter optischer Strahlung versteht man das Licht, das unsere Augen sehen können, die Nahinfrarotstrahlung schließt im Spektrum zum Bereich des Roten an. Infrarotstrahlung ist auch als Wärmestrahlung bekannt. Diese Strahlung empfangen wir oft an normalen Teleskopen, die in klassischen Sternwarten auf der Erdoberfläche installiert sind. Kommt es allerdings auf besondere Detailschärfe der Bilder an, der Astronom nennt dies Auflösung, dann verwenden wir besonders gerne das Hubble Weltraumteleskop. Mit den so gewonnenen Bildern können wir bereits erste physikalische Aussagen gewinnen. Diese Aussagen können wir noch verfeinern, wenn wir das Licht ähnlich wie im Regenbogen in seine Farbbestandteile zerlegen. Der Physiker nennt dies Spektroskopie.

Bilder und Spektren der Galaxien erlauben uns, wichtige physikalische Eigenschaften der Objekte zu messen. So bestimmen wir die Entfernung der Galaxien durch die sogenannte „Doppler-Verschiebung“ ihrer Spektren. Durch die systematische Durchmusterung mit verschiedenen Filtern sind wir in der Lage, die Leuchtkraft, die Farben, und die Form dieser Objekte zu messen und ihre Entwicklung als Funktion des Alters des Universums zu bestimmen. Ein Beispiel dafür ist das FORS-Deep-Field. Es zeigt einerseits alte, massereiche Objekte (orange), andererseits aber auch viele junge, (blaue) Galaxien, die gerade sehr viele Sterne bilden. In diesem Feld können wir in die ferne Vergangenheit des Universums zurücksehen: Die „jungen“ blauen Galaxien waren schon entstanden, als das Universum selbst erst etwa eine Milliarde Jahre existierte!

Mit unserem Bild-Datenmaterial können wir zum Beispiel klären, ob entfernte Galaxien sogenannte Elliptische Galaxien sind oder aber ihre Sterne in Spiral-Scheiben angeordnet sind, wie es auch in unserer Milchstraße der Fall ist. Mit Hilfe der Spektren messen wir, mit welchen Geschwindigkeiten sich Sterne und Gas innerhalb der Galaxie bewegen. Diese Geschwindigkeiten können sehr groß werden: unsere Sonne bewegt sich z.B. mit 220 km/s um das Zentrum der Milchstraße! Aus diesen Geschwindigkeitsmessungen lässt sich mit den grundlegenden Gesetzen der Mechanik ausrechnen, wie viel Masse nötig ist, um diese internen Bewegungen durch die Gravitationskraft zu erzeugen. Die Analyse der Bilder lehrt uns, wie viel Masse in Form von Sternen und Gas in den Galaxien enthalten ist. Gewöhnlich übersteigt die aus der Geschwindigkeitsmessung gefolgerte Masse diejenige in Sternen und Gas deutlich! Man kann diese Beobachtungen nur erklären, wenn es eine unbekannte, „dunkle Materiekomponente“ im Universum gibt. Der Inhalt an dunkler Materie und deren Verteilung wird durch unsere

Beobachtungen in den Galaxien vermessen. Außerdem können wir noch das Alter und die chemische Zusammensetzung der Sterne in den entfernten Galaxien bestimmen. Es zeigt sich z.B., dass Elliptische Galaxien nur sehr alte Sterne beinhalten, und dass diese alten Sterne schon aus vorangegangenen noch früheren Sterngenerationen recycelt wurden.

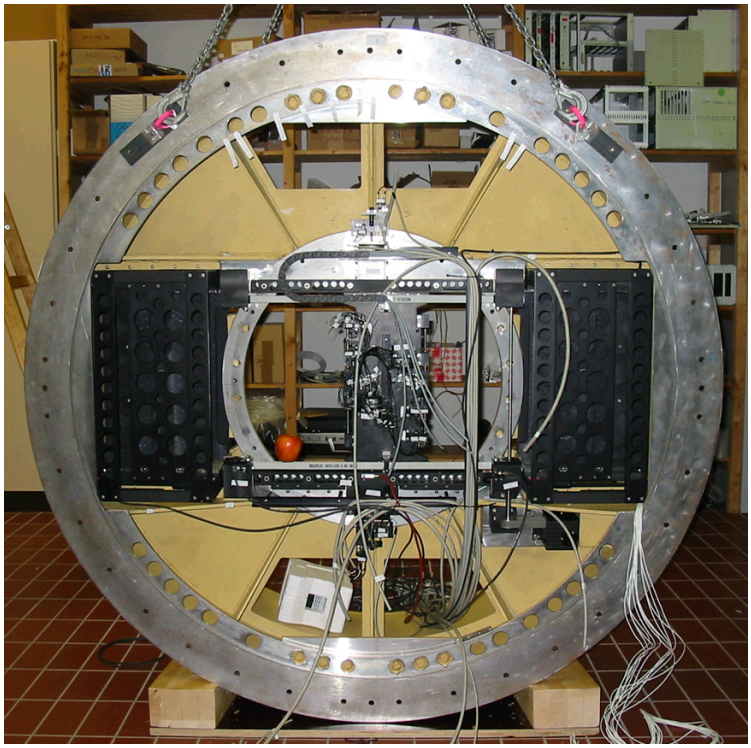


Das FORS-Deep-Field

Die Fülle unserer Daten erlaubt es, die Voraussagen der Modelle der Entstehung und Entwicklung der Struktur im Universum auf den Prüfstand zu stellen. Diese Modelle basieren auf dem sogenannten „Cold-Dark-Matter“ Paradigma und nehmen an, dass die ersten Galaxien als Gas-Scheiben in Halos aus dunkler Materie entstehen. Das Model kann durch die Verschmelzung dieser Urscheiben elliptische Galaxien entstehen lassen. Deshalb hätte man erwartet, dass elliptische Galaxien relativ jung sind. Unsere Beobachtungen zeigen aber, dass dieses Szenario so nicht stimmen kann, unter anderem, weil die Sterne in den von uns beobachteten elliptischen Galaxien deutlich älter sind als in den Modellen vorausgesagt.

Weil die meisten der von uns beobachteten Galaxien sehr fern und damit sehr leuchtschwach sind, brauchen wir zu ihrer Untersuchung Teleskope mit großen Spiegeln als Lichtsammelflächen. Unsere Lieblingsinstrumente sind daher die vier VLT Teleskope (mit 8m Spiegel) der ESO am Südhimmel und das Hobby-Eberly Teleskop (HET) mit 11m Spiegeldurchmesser am Nordhimmel. Für diese Teleskope bauen wir selbst die Beobachtungs-Geräte, die uns erlauben, die Daten, die wir oben diskutiert haben, optimal zu sammeln. Wir haben in den vergangenen Jahren in Zusammenarbeit mit den Sternwarten in Heidelberg und Göttingen die zwei Spektrographen FORS1 und FORS2 für das VLT und den „Low-Resolution“-Spektrograph für das HET gebaut. Alle drei Geräte sind effizient und wartungsfrei fast jede Nacht auf dem Paranal in Chile beziehungsweise auf dem Mount Locke in Texas im Einsatz. Im Moment bauen wir mit den Sternwarten Groningen, Leiden, Göttingen und Padova die Weitwinkel-Kamera „OmegaCam“. Dieses riesige Abbildungsgerät wird am VST (das „VLT Survey Teleskop“ ist auf dem Paranal gerade im Bau) angebracht. Mit jeder Belichtung wird ein Quadratgrad (das ist viermal so groß

wie die Fläche des Vollmondes) des Himmels durchmustert. Jede der kommenden OmegaCam Aufnahmen liefert mit rund 250 Millionen Datenpunkten (Pixel) eine so gewaltige Datenmenge, das diese nur mit Hilfe von modernsten Rechnern und spezieller Informatik-Technologie zu bewältigen ist. Für diesen Zweck braucht man eine ausgeklügelte Strategie der Archivierung, die wir im Rahmen des europäischen Projektes „Astro-Wise“ im Zusammenarbeit mit den Sternwarten Groningen, Leiden, Paris, Neapel und ESO vorbereiten. Das „erste Licht“ von OmegaCam ist für das Ende 2004 vorgesehen.



Die OmegaCam Kamera für das VST

Theorie und Komplexe Plasmen

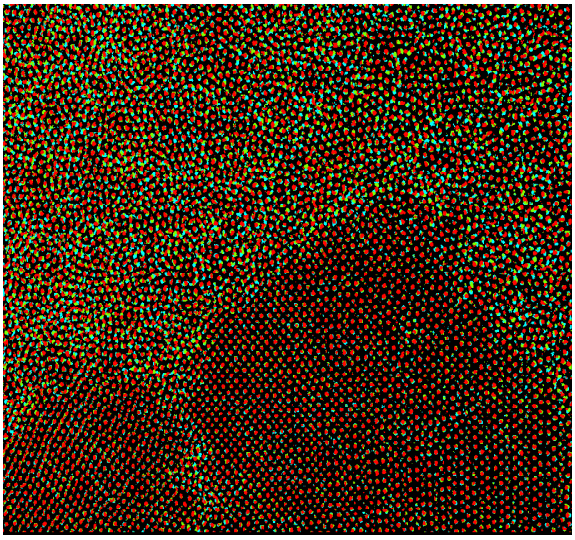
Komplexe Plasmen

Die komplexe Plasma Gruppe beschäftigt sich mit einem neuen, schnell wachsendem Wissenschaftszweig, der es durch seine besonderen Untersuchungseigenschaften ermöglicht, die Physik fundamentaler Prozesse, wie z.B. das Schmelzen eines Kristalls, auf dem fundamentalsten, dem kinetischen Level zu studieren. Die Gruppe arbeitet experimentell in mehreren Labors und einem Experiment unter Schwerelosigkeitsbedingungen auf der Internationalen Raumstation (ISS). Theoretisch und numerisch werden die Experimente durch mehrere Mitarbeiter begleitet.

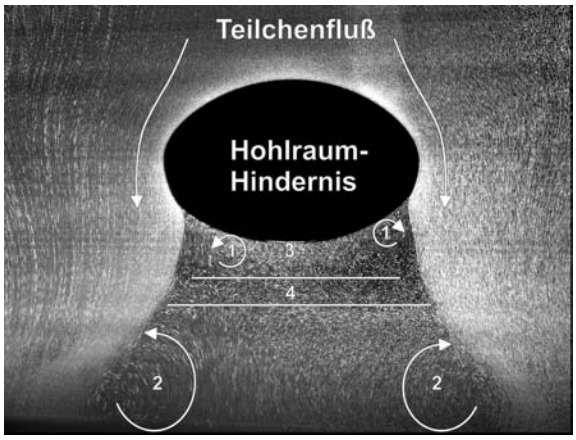
Kosmonaut Sergey Krikalev mit unserem PKE-Nefedov Experiment auf der Internationalen Raumstation ISS.

Plasmen werden häufig als 4. Materiezustand bezeichnet. Ein Plasma ist ein ionisiertes Gas, bestehend aus Elektronen und Ionen und gleichzeitig der am wenigsten geordnete Zustand der Materie. Ein komplexes Plasma ist ein mit Mikropartikeln durchsetztes Plasma. Es kann, entgegen einem normalen Plasma, auch in kondensiertem Zustand – als Flüssigkeit und sogar als Kristall – existieren. Dies wird durch die Mikropartikelkomponente ermöglicht.

Die Mikropartikel, Teilchen von 1/1000 mm Durchmesser, werden von Elektronen und Ionen im Plasma negativ aufgeladen, in unserem Fall auf einige 1000-10000 Elektronenladungen. Diese Ladung wird im Plasma durch die positiven Ionen abgeschirmt. Bei hoher Dichte der Mikropartikel beginnen sie miteinander über die abstoßende Coulomb-Kraft zu wechselwirken. Dies kann zu einer starken Kopplung (Flüssigkeit) führen, bis hin zur Kristallisation der Partikel in typischen Abständen von 1/10 mm – dem „Plasmakristall“. Über diesen neuen Plasmazustand wird weltweit in vielen Labors intensiv geforscht und es wurden interessante Experimente durchgeführt, die z.B. den Kristallisationsprozess oder den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung in komplexen Plasmen betreffen. Die experimentellen Möglichkeiten erstrecken sich von Experimenten mit einzelnen Partikeln, über Stöße von zwei Partikeln, Aufbau von Molekülen in zwei Dimensionen, bis hin zu großen Monolagen und sogar drei-dimensionalen Strukturen.



Momentaufnahme der Kristallisation eines komplexen Plasmas. Klar erkennbar sind hier Kristallisationsfront und flüssige Korngrenze zwischen den unterschiedlich orientierten kristallinen Strukturen.



Strömung eines komplexen Plasmas um ein Hindernis im Zentrum des Bildes. Man erkennt, wie die laminare Strömung unterhalb des Hindernisses aufreißt und in eine turbulente Durchmischung der Strömungs- und Strömungsschattenregion führt.

Komplexe Plasmen bieten eine einzigartige Gelegenheit zum Studium von z.B. Selbstorganisations-Prozessen in flüssigen und kristallen Systemen, nichtlinearer Dynamik von Vielteilchensystemen, starken Koppelungs-Phänomenen in Systemen mit Rotations- sowie Translations - Freiheitsgraden, kritischer Phänomene, Phasenübergänge, Übergang zur Turbulenz. Unter kontrollierten Bedingungen im Labor lassen sich die Eigenschaften dieses neuen Plasmazustandes auf dem fundamentalsten Niveau, dem kinetischen Niveau, experimentell untersuchen, d.h. jedes einzelne Teilchen kann sichtbar gemacht, seine Bewegung optisch aufgezeichnet und gemessen werden. Gleichzeitig bewirken die Mikroteilchen, dass die charakteristischen Zeitskalen, welche die Dynamik des Plasmas bestimmen, von üblicherweise Mikrosekunden auf Zehntelsekunden verlangsamt werden - die Plasmaphysik ist praktisch in Zeitlupe erforschbar.

Untersuchungen unter Schwerelosigkeit erlauben die Erforschung dieses neuen Plasmazustandes in Parameterbereichen, die bis zu fünf Größenordnungen von denen auf der Erde erreichbaren abweichen, so dass im Prinzip auch schwache Wechselwirkungen (z.B. Oberflächen- und Grenzflächenphänomene) direkt messbar werden.

Natürlich erwartet man von diesen Forschungen neue fundamentale Erkenntnisse z.B. über die Selbstorganisation der Materie bei Phasenübergängen (Verflüssigung, Kristallbildung), über die Physik stark-gekoppelter Plasmen, über die mikroskopischen Prozesse in stark gekoppelten magnetisierten Plasmen, über anisotrope Systeme, Oberflächendynamik und vieles mehr.

Numerische Astrophysik

Viele astrophysikalischen Vorgänge sind extrem komplex und hängen oft von mehreren, nur grob verstandenen Parametern ab. Um sie besser zu verstehen, versucht man, sie mit dem Computer zu simulieren und dann die Ergebnisse mit den Beobachtungen zu vergleichen mit dem Ziel, die physikalisch relevanten Parameter zu bestimmen. In den letzten Jahren sind Computer so „mächtig“ geworden, dass auch zeitabhängige, dreidimensionale Rechnungen von hochenergetischen Prozessen wie Supernova - Explosionen und die Ausbreitung von astrophysikalischen „Jets“, das sind gerichtete Materieströmungen aus den Kernen aktiver Galaxien, durchgeführt werden können. Dabei ergeben sich allerdings erhebliche Probleme, die anfallenden Datenmengen verständlich darzustellen.

Nichtlineare Dynamik

In den letzten 25 Jahren haben die Physiker begonnen, sich mit komplexen Systemen zu befassen. Unter einem komplexen System versteht man ein System, dessen Verhalten nicht aus dem Verständnis seiner Teile erklärt werden kann (aber natürlich auch nicht ohne dieses Verständnis). Die theoretische Grundlage für die physikalische Beschreibung komplexer Systeme liefert die nichtlineare Dynamik, im Volksmund oft als "Chaostheorie" bezeichnet. Am MPE beschäftigt sich eine kleine Gruppe sowohl mit den Grundlagen der nichtlinearen Dynamik, als auch mit der praktischen Anwendung einiger ihrer Methoden auf die Analyse von Messsignalen und Strukturen. Der Bereich der Anwendungen umfasst dabei die verschiedensten Gebiete und reicht von der Astrophysik bis hin zur Medizin. Dabei zeigt sich, dass mit diesen Verfahren aus gegebenen Messungen meist erheblich mehr Information über das untersuchte System gewonnen werden kann, als dies mit herkömmlichen Verfahren möglich ist. An einigen, teils interaktiven Beispielen werden solche Analysen demonstriert.

Max-Planck-Institut
für extraterrestrische Physik

Giessenbachstraße
85748 Garching
Telefon: (089) 30000-0
Telefax: (089) 30000-3569
email: mpe@mpe.mpg.de
http://www.mpe.mpg.de

Alle Rechte vorbehalten:
Dokumentationsstelle des MPE

ISBN 3-00-013753-X

Mai 2004