

2. Die Röntgenastronomie, ihre Geschichte und Ziele

2.1 Die Röntgenastronomie

Zu den fruchtbarsten der neuen Spektralbereiche gehört die Röntgenastronomie mit Photonenenergien von 0,1 – 500 keV. Vor allem Phänomene am Ende der Sternentwicklung, so z. B. Supernovaxplosionen, kompakte Objekte (Weiße Zwerge, Neutronensterne und Schwarze Löcher) sowie aus einem kompakten Objekt und einem Hauptreihen-Stern bestehende Doppelsternsysteme, zeigen sich am Röntgenhimmel. Im extragalaktischen Bereich dominieren einerseits aktive Galaxien wie Radiogalaxien, Seyfert-Galaxien und Quasare, andererseits Galaxienhaufen (Cluster) und Strings („Ketten“ von Galaxienhaufen), die größten physikalischen Formationen unseres Universums. Aber auch normale Sterne und Galaxien können mit modernen Röntgenteleskopen studiert werden, obwohl sie vergleichsweise schwache Röntgenstrahler sind. In neuester Zeit konnte man sogar von den als „schmutzige Schneebälle“ bekannten Kometen ausgehende Röntgenstrahlung detektieren.

Die Röntgenstrahlung kosmischer Quellen kann verschiedenen Ursprungs sein. Zum einen kann sie als thermische Strahlung bei sehr hohen Temperaturen im Bereich von Millionen bis Milliarden Grad entstehen, zum anderen wird sie durch hochenergetische Elektronen erzeugt, die in Magnetfeldern Synchrotronstrahlung im Röntgenbereich aussenden. Man sieht also, daß man aus Röntgenbeobachtungen hauptsächlich Wissen über das heiße Universum und Hochenergieprozesse erlangen kann.

2.2 Kurze Geschichte der Röntgenastronomie

Wie schon im Prolog angedeutet, ist es nicht möglich, Röntgenastronomie von der Erde aus zu betreiben, da die Röntgenstrahlen von unserer Atmosphäre abgehalten werden. Die Röntgenstrahlung wechselwirkt mit den Bestandteilen der Atmosphäre und wird hauptsächlich aufgrund des Photoeffekts absorbiert. Die energetisch schwächere UV-Strahlung wird überwiegend von der Ozonschicht abgehalten. Jene Schicht befindet sich in der Stratosphäre, eine maximale Konzentration wird zwischen 20 und 26 km über der Erdoberfläche erreicht. Das atmosphärische Ozon absorbiert nahezu die gesamte UV-Strahlung unterhalb von 295 nm, da es einen starken optischen Übergang bei 255 nm gibt, der bis in den mittleren UV-Bereich hineinragt. Daß das Ozon tatsächlich nur eine dünne Schutzschicht bildet, kann am besten durch die Tatsache verdeutlicht werden, daß das gesamte Ozon unter Standardbedingungen nur einer Schicht von 0,3 cm Dicke entspräche. Ozon selbst wird in der oberen Schicht unter Reaktion von atmosphärischem (O_2) mit atomarem (O) Sauerstoff erzeugt. Der atomare Sauerstoff entsteht durch die Photodissoziation von O_2 in einer Höhe von 100 km durch Licht einer Wellenlänge, die kürzer als 175 nm ist. Dieses Licht regt den elektronischen Übergang zwischen einem Triplett-Grundzustand und einem angeregten Zustand des Sauerstoffs an. Einmal angeregt kann das O_2 -Molekül in zwei Sauerstoffmoleküle dissoziieren. Dieser Effekt löscht das unterhalb von 175 nm liegende UV-Licht oberhalb der Stratosphäre vollkommen aus.² Was also auf der einen Seite schlecht für die

Astronomie ist, schützt auf der anderen Seite die Lebewesen unseres Planeten, deren DNS-Moleküle durch Einstrahlung von UV- und Röntgenstrahlung geschädigt würden.

Um Beobachtungen oberhalb des Frequenzbereichs des sichtbaren Lichts zu machen, war es notwendig, die Atmosphäre zu verlassen bzw. sich so weit vom Erdboden zu entfernen, daß man nur noch wenig störende Atmosphäre zwischen den Meßinstrumenten und dem freien Raum hatte.

2.2.1 Raketen und Ballons

Vor 49 Jahren zeigte ein Experiment an Bord einer Rakete mit Hilfe eines Geigerzählers zum ersten Mal, daß von unserer Sonne Röntgenstrahlen ausgehen (Friedman et al. 1951). 13 Jahre später wurde ebenfalls mit Hilfe eines Raketenexperiments die erste Quelle am Röntgenhimmel, SCO X-1, entdeckt (Giacconi et al. 1962). Damit war der Startschuß für die Röntgenastronomie gegeben; man blickte durch ein völlig neues spektrales Fenster in den Kosmos. Die damals verfügbaren Raketen erreichten eine Höhe von 100 km und gaben den Astronomen dieser Zeit den ersten flüchtigen Schimmer des Röntgenhimmels. Das Standardinstrument zu jener Zeit war der Proportionalzähler, empfindlich für relativ niederenergetische Röntgenstrahlen im Bereich zwischen 1 - 10 keV. Die spektrale Auflösung war mäßig mit 20% Full Width Half Maximum (FWHM) bei 6 keV. In der Winkelauflösung erreichte man mit Hilfe mechanischer Kollimatoren, verwirklicht durch Bündel von Röhren ein kreisförmiges „field of view“ von $\sim 1^\circ$, bzw. mit Hilfe modulierter Kollimatoren eine Auflösung von $\sim 1'$. Ein typischer Raketen-Flug dauerte nur wenige Minuten, und Nutzlasten wurden meistens mit Fallschirmen geborgen, um sie später wiederverwenden zu können.

Eine andere Möglichkeit, insbesondere für längere Beobachtungen, war der Einsatz von Ballons, die in große Höhen aufsteigen konnten und auch schwere Nutzlasten transportierten. Auf diese Weise war man in der Lage, größere Apparaturen, typischerweise Kristallszintillatoren, für die Dauer von einigen zig Stunden in Höhen von etwa 40 km zu bringen. Hier konnte man jedoch nur Röntgenphotonen mit einer Energie, die 20 keV überschritt, detektieren, da die niederenergetischeren Photonen absorbiert werden, bevor sie diesen Bereich der Atmosphäre erreichen.³

Der amerikanische Wissenschaftler Clark machte ausgehend vom MIT (Massachusetts Institut of Technology) 1964 die ersten Ballonexperimente. Es folgten weitere Experimente im Rahmen des Goddard Programms der NASA, die von New Mexico bzw. von Australien aus geflogen wurden. Die Entdeckung der Hochenergie-Röntgenstrahlung des Crab-Nebels, 1965 von Clark, war ein erstes wichtiges Ergebnis dieser Ballonexperimente.⁴

2.2.2 Satelliten

Die erste Satellitenmission, die ausschließlich der Beobachtung des Röntgenhimmels diene, wurde 1970 mit dem Röntgensatelliten UHURU gestartet. Der Detektor von UHURU war einfach, aber wirksam: ein großer Bereich ($0,084\text{m}^2$) von Proportionalzählern, empfindlich im Energiebereich von 2 - 10 keV mit einem Gesichtsfeld von $1^\circ \times 10^\circ$ (FWHM). UHURU erbrachte die erste Himmelsdurchmusterung im Röntgenbereich mit einem Resultat von 339 Röntgenquellen, von denen die meisten Doppelsternsysteme (wie z. B. Cen X-3, Her X-1), Supernovaüberreste, wenige Aktive Galaxien und Galaxien-Haufen waren.⁵

In den Jahren 1971 – 1996 folgten weitere Satellitenmissionen. Einen Überblick gibt Abbildung 2-1.

Mission	Zeitraum	Instrumente	Wissenschaft (Bsp)
UHURU	1970 - 1973	M	Binaries, Clusters
OSO-7	1971 - 1973	M,H	4-color Katalog
Copernicus	1972 - 1981	M,C	SNR mapping
ANS	1974 - 1976	L,M,C,B	X-ray burst
Salyut-4	1974 - 1975	L,M	Cyg X-1, Her X-1
Ariel-5	1974 - 1980	M,B,Pol,SM,MC	AGN, transients
Apollo-Soyuz	1975 - 1975	L,M	SMC X-1 pulsing
SAS-3	1975 - 1979	L,M,MC,C	Bursts, Positions
OSO-8	1975 - 1978	L,M,MC,B,Pol	Fe- line-emission
HEAO-1	1977 - 1979	L,M,H,MC	All-Sky catalog
Einstein	1978 - 1981	F,IPC,HRI,B,SS,M,TG	Clusters, QSOs, SNR
Ariel-6	1979 - 1981	L,M,C	GX 1+ 4
Hakucho	1979 - 1984	L,M,MC,SM	Bursts
Astron	1983 - 1988	M	Her X-1 low state
Tenma	1983 - 1984	L,M,G,C,SM,MC	Fe Lines
EXOSAT	1983 - 1986	L,M,GF,TG	QPOs
Ginga	1987 - 1991	M,SM,	SN 1987A, AGN
Kvant/Mir	1987 -	M,H,CM,G	SN 1987A
Granat	1989 -	M,H,CM	Gal. Ctr. Imaging
ROSAT	1990 -	F,IPC,HRI	Soft Survey
Astro-1	1990 -	CF,SS	Spectra
ASCA	1993 -	CCD	
SAX	1994 -	CF,G(L,M),H,CM	Spectra, Timing
XTE	1996 -	M,H,SM	Spectra, Timing
B: Bragg crystal spectroscopy, CCD: Charge Coupled Device, C: collector (reflecting), CF: conical approx. Focussing, CM: coded-mask imaging, F: fokussing optics, G: gas scintillation prop. counter, H: high energy (0-200 keV) cristal scintillator, HRI: high res. Imager,		IPC: imaging prop. Ctr., L: low energy (0,1-1 keV) prop. counter , M: medium energy (1-20 keV) prop. ctr. , MC: modulation collimator, Pol: polarimetry, RG: reflection grating, SM: sky monitor, SS: solid-state spectrometer, TG: transmission gratings,	

Abbildung 2-1: Die wichtigsten Röntgenmissionen

2.2.3 Die deutsche Röntgenastronomie

Als UHURU startete, existierte eine von Deutschland aus betriebene Röntgenastronomie noch nicht. In Tübingen war der Lehrstuhl für Astronomie nach dem Tod von Prof. Siedentopf acht

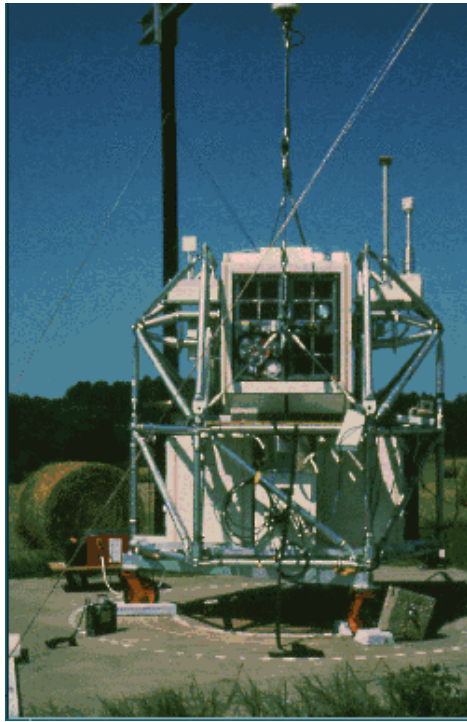


Abbildung 2-2: Ballon-HEXE

Jahre lang verwaist. Als Prof. Joachim Trümper im Oktober 1971 den Ruf ans Astronomische Institut Tübingen AIT annahm, war dies die Geburtsstunde der deutschen Röntgenastronomie. Trümper hatte sich in Kiel zuvor mit kosmischer Strahlung befaßt und war kein eigentlicher Astronom. Die kosmische Strahlung untersuchte man mit Ballonexperimenten, mit denen sich auch Rüdiger Staubert, ein ehemaliger Doktorand Trümpers, bei der NASA in Houston/Texas beschäftigte. Staubert hatte während dieser Zeit die ersten Kontakte zu einer amerikanischen „Röntgengruppe“. Als Trümper nach Tübingen kam, brachte er als Mitarbeiter Staubert und Eckhard Kendziorra mit, und man entschloß sich, die Kenntnisse aus den Ballonexperimenten zu nutzen, um nun Röntgenastronomie damit zu betreiben. Hinzu kamen drei Diplomanden und ein Elektroniker. Schon nach nicht einmal zwei Jahren, im Sommer 1973 flog dieses kleine Team das erste Ballonexperiment von Texas aus. Man beobachtete die Röntgenstrahlung des Crab-Nebels. Nie wieder wurde eine Röntgenmission von einer so kleinen Mannschaft in so kurzer Zeit durchgeführt. Im

Vergleich zur „Man Power“, die heutige Röntgensatelliten-Missionen erfordern, ist es also nicht übertrieben, hier von einer Pionierleistung zu sprechen.

Parallel zu den Ballonexperimenten arbeitete man am Astronomischen Institut in Tübingen an der Vorbereitung von Raketenflügen für die Solare Röntgenastronomie auf der Grundlage von Zonenplatten. Auch interessierten sich die Tübinger Astronomen für die Spiegelung von Röntgenlicht an polierten Oberflächen; ein wichtiger Gesichtspunkt in bezug auf die zukünftige Herstellung von Wolterteleskopen.

1975 wurde Trümper Direktor am Max-Planck-Institut für Extraterrestrische Physik MPE in Garching. Staubert und Kendziorra blieben in Tübingen, doch die Verbindung zueinander brach nicht ab: Es war der Anfang einer jahrelangen Zusammenarbeit zwischen dem MPE und dem Astronomischen Institut in Tübingen. Die wichtigsten Früchte dieser Kooperation waren ein von 1973 bis 1981 andauerndes Ballonprogramm mit 12 Starts in den USA, Australien und Brasilien, die Mitarbeit beim ersten europäischen Röntgensatelliten EXOSAT und das auf der russischen Raumstation MIR stattfindende Hochenergieexperiment HEXE. Eine sehr wichtige Erkenntnis, die

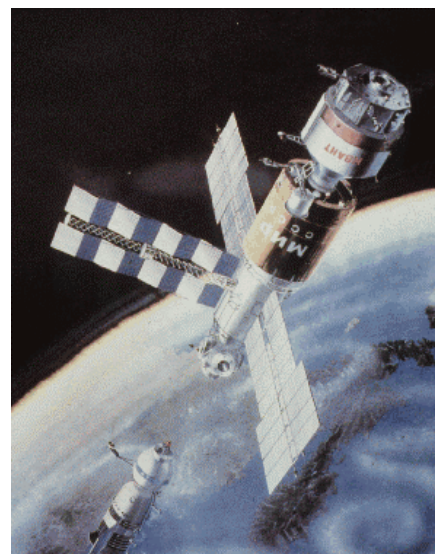


Abbildung 2-3: Mir Raum-Station

man mit Hilfe der Ballonexperimente herausgefunden hatte, war die erste Entdeckung einer Zyklotronlinie im Röntgenspektrum eines Sterns (Her X-1) im Jahr 1975. Es handelt sich hierbei um eine Absorptionslinie durch gequantelte Absorption von Strahlung durch Elektronen, die sich in einem starken Magnetfeld befinden. Aus diesem Effekt resultiert die Möglichkeit, das Magnetfeld von Neutronensternen zu bestimmen, da die Energie der Zyklotronlinie mit dem Magnetfeld des Neutronensterns korreliert ist. So konnte man zum ersten Mal das Magnetfeld eines Neutronensterns mit einigen 10^{12} Gaus bestimmen. Diese Beobachtung wurde später auch mit der MIR-HEXE bestätigt. Inzwischen sind 10 - 12 solcher Objekte bekannt.

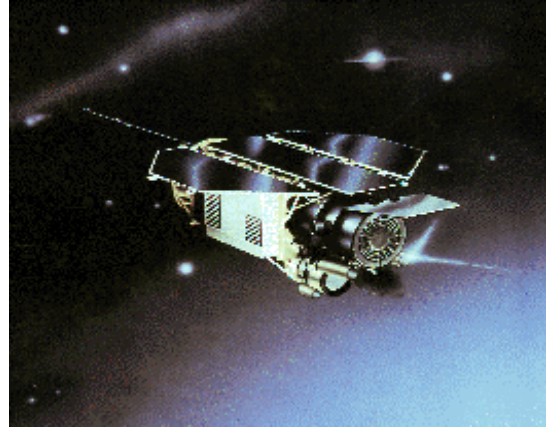


Abbildung 2-4: ROSAT

Als Meilenstein in der Geschichte der deutschen Röntgenastronomie gilt der 1990 gestartete Röntgensatellit ROSAT. Die Ideen für diesen Satelliten reichen weit in die Tübinger Anfangszeit zurück, und wiederum war bei seiner Realisierung unter Federführung des MPEs das AIT beteiligt. ROSAT steigerte mit seiner Himmelsdurchmusterung im Bereich von 0,1 – 2,4 keV die Zahl der bekannten Röntgenquellen von 5000 auf 120.000. Dies war nach UHURU und HEAO1 weltweit die dritte Himmelsdurchmusterung im Röntgenbereich. Abbildung 2-5 zeigt den von ROSAT abgescannten Röntgen-Himmel.

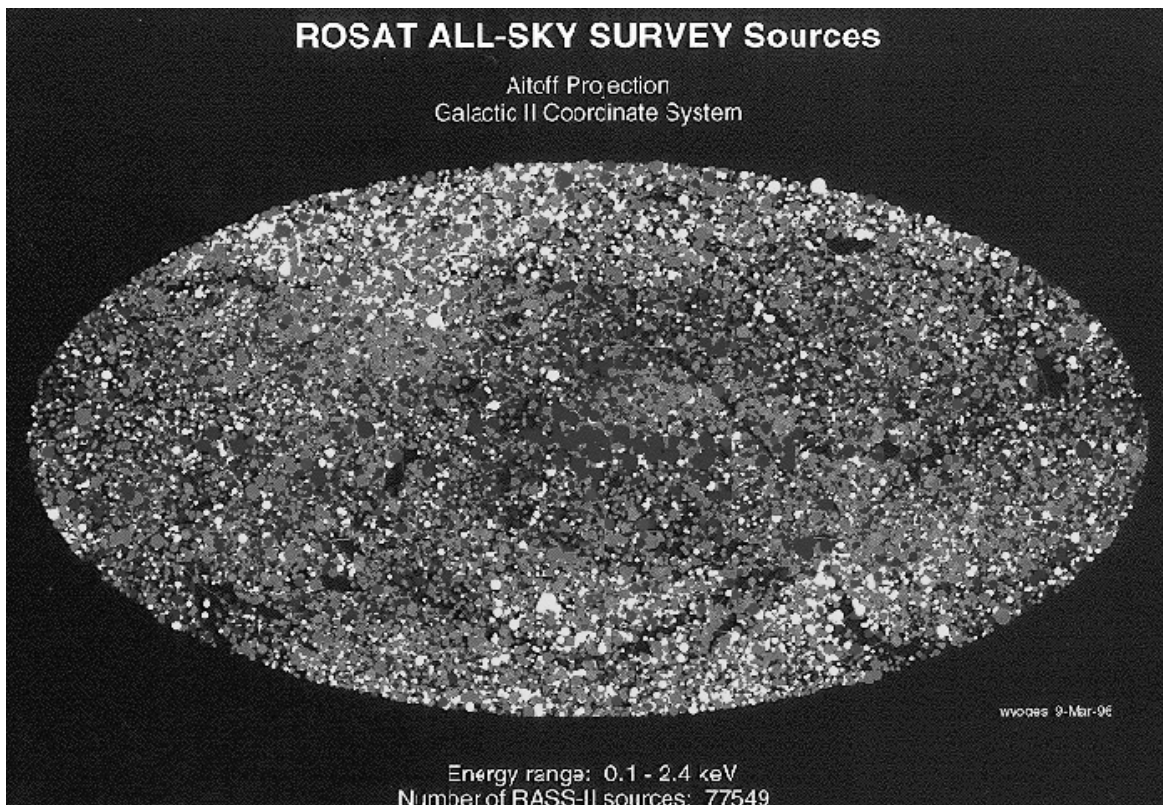


Abbildung 2-5: ROSAT All Sky Survey

Gegenwärtig gibt es in Deutschland drei Institute, die experimentell auf dem Bereich der Röntgenastronomie arbeiten: Das seit 1996 umbenannte Institut für Astronomie und Astrophysik Tübingen IAAT, das MPE in Garching bei München und das Astronomische Institut in Potsdam AIP.

Die aktuellen Missionen, an denen besagte Institute mitarbeiten, heißen XMM und ABRIXAS.