

2. 研究系の研究活動

a. 高エネルギー天文学研究系

II-2-a-1

次期X線天文衛星「NeXT」の検討

教授	井上 一	教授	長瀬文昭	教授	國枝秀世
教授	満田和久	教授	高橋忠幸	教授	田島道夫
教授	山本善一	客員教授	村上敏夫	助教授	堂谷忠靖
助教授	山崎典子	助教授	橋本樹明	助教授	廣瀬和之
助教授	峯杉賢治	助教授	水野貴秀	助教授	山田隆弘
客員助教授	林田 清	主任研究員	澤井秀次郎	助手	藤本龍一
助手	上田佳宏	助手	尾崎正伸	助手	前田良知
助手	中澤知洋	助手	田村隆幸	金沢大・理	米徳大輔
東大・理	牧島一夫	東大・理	国分紀秀	都立大・理	大橋隆哉
都立大・理	石田 学	都立大・理	石崎欣尚	東工大・理工	河合誠之
東工大・理工	片岡 淳	立教大・理	北本俊二	青山大・理工	吉田篤正
青山大・理工	山岡和貴	埼玉大・理	田代 信	理 研	三原建弘
理 研	寺田幸功	名大・理	山下廣順	名大・理	田原 讓
名大・理	小賀坂康志	名大・理	田村啓輔	名大・理	古澤彰浩
京大・理	小山勝二	京大・理	鶴 剛	京大・理	松本浩典
阪大・理	常深 博	阪大・理	宮田恵美	広大・理	深沢泰司
		愛媛大・理	粟木久光		他「NeXT」チーム

次期X線天文衛星「NeXT」は、10キロ電子ボルト以上の硬X線領域で初の撮像分光観測を行なうとともに、軟X線領域での観測性能をも飛躍的に向上させたX線衛星である。従来、宇宙の高エネルギー現象の解明は軟X線での観測を中心に進められてきた。しかし、「あすか」等を用いた研究から、粒子加速などの非熱的過程が宇宙の高エネルギー現象解明の鍵を握っていることが、近年明らかになってきた。非熱的現象という、全く新しい視点から宇宙を探るのが「NeXT」である。この目的のため、(1) 80キロ電子ボルト近くの硬X線まで集光可能なスーパーミラー、(2) 12mの焦点距離の望遠鏡を実現する伸展式光学ベンチ、(3) 軟X線から硬X線までの撮像分光が可能なハイブリッドカメラ、(4) 軟X線領域で精密分光を行う撮像型マイクロカロリメータ、(5) 数十キロ電子ボルト以上で高精度の観測を行なう軟ガンマ線検出器、を搭載する予定である。2003年度は、(1) ミラー用フォイルの試作を行い、スーパーミラー製作の目処をつけた、(2) 伸展式光学ベンチの設計の検討および伸展部の試作、(3) 多ピクセルテルル化カドミウム検出器の開発、(4) TES型マイクロカロリメータと超伝導量子干渉素子(SQUID)によるその多重読み出しの開発、(5) コンプトンガンマ線カメラの開発、(6) 透過型CCDの試作、などの基礎研究・開発を行った。また、衛星全体の概念設計を進め、衛星重量1700kg、消費電力1070W程度で、M-Vロケットで打ち上げ可能な規模の衛星として実現の目処を付けることができた。この設計に基づき、理学委員会にミッション提案を行った。

II-2-a-2

「あすか」アーカイブの整備

助教授	堂谷忠靖	助手	上田佳宏	都立大・理	石田 学
都立大・理	石崎欣尚				NASAゴダード宇宙飛行センター

「あすか」アーカイブ整備の一環として、X線望遠鏡の較正情報の改訂と関連するソフトウェアの改版を行って

いる。「あすか」搭載のX線望遠鏡は、X線反射鏡（XRT）と2種類の焦点面検出器、位置検出型蛍光比例計数管（GIS）とX線CCDカメラ（SIS）、から構成されている。2003年度は、SISの較正情報の見直しを行なった。X線CCDは、宇宙環境では放射線損傷により特性が徐々に劣化していく。放射線損傷により生じた電荷転送損失のモデルの改良を行ない、SISの特性の再現精度の向上を計った。これにより、検出器の較正情報の改訂は、ほぼ完了した。改訂された較正情報は、今後様々な試験を経て、「あすか」解析ソフトに組み込まれ、全世界の研究者の利用に供される予定である。

II-2-a-3

「ぎんが」アーカイブの開発

助教授	堂谷忠靖	助手	上田佳宏	助手	田村隆幸
神奈川大・工	浅井和美		インテグラル科学データセンター		海老沢研

「ぎんが」は1987年から1991年に渡って活躍した我が国3番目のX線天文衛星であり、主検出器として大面積比例係数管（LAC）を搭載していた。LACは、その4000cm²という大有効面積、低バックグラウンド、2'60キロ電子ボルトに渡る広いエネルギーバンドを活かして、銀河系外・系内の多くのX線天体について重要な観測データを取得しており、そのデータは現在でもユニークで十分に利用価値があるものである。2003年度は、「ぎんが」アーカイブを完成させ、PLAINセンターのDARTSデータベースを通して一般に公開した。

II-2-a-4

ガンマ線バースト観測衛星「Swift」の開発

教授	高橋忠幸	助手	中澤知洋	大学院学生	佐藤悟朗
埼玉大・理	田代 信	埼玉大・理	鈴木雅也	東大・理	岡田 祐
		東大・理	高橋宏充		他Swiftチーム

「Swift」は、広い国際協力によって開発が行われているガンマ線バースト観測衛星である。ガンマ線バーストの発生位置をいち早く検出し、60秒以内に衛星をその方向に向けて、その位置をX線や紫外線の望遠鏡を用いて0.3秒角の精度で求めるとともにバースト後の減光現象を多波長で探ることを目的としている。われわれは、埼玉大学、東京大学とともに2001年よりこのプロジェクトに参加し、Swift衛星の鍵となりバースト位置を測定しトリガーを発生するためのBATガンマ線イメージング検出器の開発に参加している。われわれが持つテルル化カドミウム（CdTe）およびテルル化カドミウム亜鉛（CdZnTe）半導体検出器の技術の蓄積を生かし、BATの3万個以上ものCdZnTe検出器のキャリブレーションをGSFCのグループと共同で行う同時に、検出器の応答関数の構築、モンテカルロ計算コードの開発をおこなった。応答関数を求めるためのアルゴリズム等は、われわれが独自に考案したものである。「Swift」は2004年9月に打ち上げが予定され、年間に100を超えるガンマ線バーストの位置を同定し、その距離を測定することが期待されている。

II-2-a-5

大気球を用いたガンマ線観測

教授	高橋忠幸	助手	中澤知洋	助手	高島 健
大学院学生	小林謙仁	大学院学生	三谷烈史	大学院学生	井上北斗
大学院学生	田中孝明	大学院学生	大貫宏祐	大学院学生	田村健一
助教授	斉藤芳隆	教授	山上隆正	阪大・理	能町正治
阪大・理	中村秀仁		スタンフォード大学線形加速器センター		田島宏康
			山形大・理		郡司修一

次世代検出器を開発し、ガンマ線領域での偏光観測を行う事を目的にシリコン/テルル化カドミウム（Si/CdTe）コンプトンカメラの試作器を搭載し、大気球を用いてCyg X-1の観測実験を行った。検出器はB500（500,000立方メートル）という、直径115m、長さ160mにもおよぶ巨大な気球を使って打ち上げられた。検出器のほか、開発され

たコンパクトな高速データ処理システム、方向規正システムなどの正常動作を確認し、バックグラウンドスペクトルを取得して検出器の感度を測定するなど、大型化した検出器によるブラックホール候補星からの偏光観測へのめどをつけた。

II -2-a-6

多層膜反射鏡の開発

教授	國枝秀世	助手	前田良知	NASA/GSFC	見崎一民
特別共同研究員	幅 良統	特別共同研究員	伊藤 啓	大学院学生	森 英之
大学院学生	飯塚 亮	大学院学生	伊藤昭治	大学院学生	井上裕彦
大学院学生	岡田俊策	都立大・理	石田 学	都立大・理	早川 彰
		都立大・理	井上智暁	中央大・理	横山裕士

21世紀のX線天文学の発展の方向の一つは、10キロ電子ボルト以上の硬X線領域での撮像観測であり、これにより大幅な感度の向上と、空間情報を硬X線領域で得ることである。「あすか」、「Astro-E」の高効率X線望遠鏡をベースにしながら、多層膜スーパーミラーを成膜して硬X線の反射率を得るのが我々の戦略であり、「ASTRO-E II」に続く「NeXT」の主検出システムにこれを想定している。開発のポイントは、(1) 多層膜の界面粗さを減らし、反射率を高める。(2) 反射鏡の形状、位置決め精度を高め空間分解能を高める。(3) 1万枚を越える反射鏡の量産体制を確立する。宇宙研では、多層膜成膜法については白金/炭素 (Pt/C)、モリブデン/シリコン (Mo/Si) などで確立できている。レプリカ法も金の場合には100枚を越える試作により、ほぼ確立することができた。また、空間分解能の向上を目指し、基板を整形する方式、4段を一括支持する方式など、抜本的改良を進めている。「ASTRO-E II」の反射鏡を用いても1分角に近いレベルの高い性能を達成できて来た。

II -2-a-7

マイクロマシン技術を応用したX線マイクロカロリメータアレイの開発

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
NASA/GSFC	伊豫本直子	特別研究員	大島 泰	大学院学生	二元和朗
大学院学生	竹井 洋	大学院学生	市坪太郎	大学院学生	吉田清典
都立大・理	大橋隆哉	都立大・理	石崎欣尚	都立大・理	森田うめ代
都立大・理	古賀丈雄	都立大・理	佐藤浩介	早大・理工	庄子習一
早大・理工	逢坂哲彌	早大・理工	本間敬之	早大・理工	工藤寛之
早大・理工	荒川貴博	早大・理工	泉 俊光	早大・理工	大塚真一郎
早大・理工	佐藤裕崇	早大・理工	小林秀臣	早大・理工	森健太郎

X線の精密撮像分光は、高温ガスの存在やその動きを高感度に測定する極めてユニークな方法であり、宇宙の大規模構造の形成を理解する上で重要な観測である。現在開発を進めている「ASTRO-E II」には、世界で初めてX線マイクロカロリメータを搭載し、5.9キロ電子ボルトのX線に対してエネルギー分解能67電子ボルトを実現する。われわれはさらにその先のX線天文衛星に搭載することを目指して、「ASTRO-E II」のXRSを上回る数電子ボルトのエネルギー分解能と、1000画素程度の優れた撮像性能を持つ新しいX線マイクロカロリメータアレイの開発を進めている。我々が開発研究をすすめているマイクロカロリメータはTES型と呼ばれ、超伝導薄膜の超伝導遷移端の急激な抵抗の温度による変化を温度計として利用する。2003年度は開口効率の高い形状（いわゆるマッシュルーム型）のX線吸収体を持つ4×4アレイ型素子の製作と評価を進めるとともに、16×16アレイの試作を開始した。これまでに、X線吸収体のない素子で5.9キロ電子ボルトのX線に対して、半値幅6.3電子ボルトのエネルギー分解能を、開口効率の高いマッシュルーム型素子で20電子ボルトの分解能を達成している。

II -2-a-8

TES型X線マイクロカロリメータのエネルギー分解能の改良

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
NASA/GSFC	伊豫本直子	特別研究員	大島 泰	大学院学生	二元和朗
大学院学生	竹井 洋	大学院学生	市坪太郎	都立大・理	大橋隆哉
都立大・理	石崎欣尚	都立大・理	森田うめ代	都立大・理	古賀丈雄
			ローレンスリバーモア国立研究所 (LLNL)	Stephan Friedrich	
			LLNL	宮崎利行	LLNL
			Stephane Terracol		

我々の製作しているTES型マイクロカロリメータは、理想的には半値幅2電子ボルトのエネルギー分解能が達成できるはずである。しかし、現実には最高でも5電子ボルトに留まっている。これは、X線に対する応答と雑音にまだ理解できていない要素が残っているためである。これを理解することは、目標とする2電子ボルトの分解能を達成する鍵となる。我々は、我々の実験環境で応答と雑音原因の理解を進めるための実験をすすめるとともに、実験環境による違いを理解するために、ローレンスリバーモアグループと協力して異なる実験環境での評価も行っている。

II -2-a-9

TES型X線マイクロカロリメータアレイの信号多重化の研究

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
NASA/GSFC	伊豫本直子	特別研究員	大島 泰	大学院学生	二元和朗
大学院学生	竹井 洋	大学院学生	市坪太郎	大学院学生	吉田清典
都立大・理	大橋隆哉	都立大・理	石崎欣尚	都立大・理	森田うめ代
			都立大・理	古賀丈雄	都立大・理
			佐藤浩介		

X線マイクロカロリメータは絶対温度100ミリ度の極低温で動作するため、数100あるいは1000画素のアレイからの信号を独立に室温まで取り出すことは困難である。そのため、複数の画素からの信号を、単一のチャンネルに信号の独立性を保ち、かつ、雑音を加算することなく足し合わせる（あるいは多重化する）ことが必要になる。我々は、マイクロカロリメータからの信号に振幅変調を加える方法を世界に先駆けて提案し、それを実現するための研究をすすめている。今年度は、マイクロカロリメータを42kHzの交流でバイアスすることで信号を変調し、5.9キロ電子ボルトのX線に対し、24電子ボルトの分解能を得た。今後、交流バイアス時の雑音の低減を計るとともに、変調周波数を高くするための装置の改良を行う予定である。

II -2-a-10

X線マグネティックカロリメータの開発

助教授	山崎典子	特別研究員	大島 泰	都立大・理	大橋隆哉
都立大・理	石崎欣尚	都立大・理	石川 輝	都立大・理	佐藤浩介

X線の精密分光のための新たなセンサーとして、磁性体内でのスピン変化を温度計として用いる、マグネティックカロリメータというものが考案されている。われわれは将来のX線天文衛星への搭載を検討、評価することを目的として、素子の開発実験を行なっている。2003年度は冷凍器内に直流型超伝導量子干渉素子 (DC-SQUID) を用いた計測系を構築し、金を赤外線で加熱し、微量のエルビウムを熔融した素子を用いて、 α 線による放射線照射実験を行ない、信号の検出に成功した。引き続き、エネルギー分解能の向上を目指す。

II -2-a-11

次世代宇宙X線検出器用断熱磁気冷凍機の開発

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
NASA/GSFC	伊豫本直子	特別研究員	大島 泰	大学院学生	二元和朗
		大学院学生	竹井 洋	大学院学生	市坪太郎

TES型マイクロカロリメータは、熱浴の温度として「ASTRO-E II」搭載XRSよりも低い絶対温度50ミリ度以下の温度を必要としている。我々は、この温度を念頭に、次世代宇宙X線検出器用の断熱消磁冷凍機を用いた宇宙用冷凍機システムの開発研究を行っている。今年度は、マイクロカロリメータおよび信号の読み出しに用いる超伝導量子干渉素子 (SQUID) の磁気シールドを製作し、昨年までに製作した断熱冷凍機試作機にTESマイクロカロリメータを組み込み、動作実証実験を行った。その結果、5.9キロ電子ボルトのX線に対し、14電子ボルトの分解能が得られた。また、カロリメータ2素子を交流バイアスで駆動する実験等も行った。今後、断熱冷凍機の開発研究とともに、カロリメータアレイの研究にもこの試作機を用いる予定である。

II -2-a-12

次世代X線CCDカメラの開発

助教授	堂谷忠靖	助手	尾崎正伸	特別研究員	村上弘志
大学院学生	穴吹直久	特別共同利用研究員	森尾一徹	大学院学生	市川喜徳
				大学院学生	狐塚正樹

X線CCDカメラは、「あすか」に初めて使われて以来、X線反射鏡の焦点面検出器として標準的に使われるようになってきている。次期X線天文衛星「NeXT」にもX線CCDカメラの搭載が予定されており、「NeXT」にも応用可能な次世代のX線CCDカメラの開発を行っている。X線CCDカメラに要求される性能のうち、昨年度までは高速読み出しに必要な基礎技術の開発を行った。2003年度は、低バックグラウンド化を目指した研究を行なった。「NeXT」では、X線CCDが受け持つエネルギー範囲を、より高エネルギー側まで伸ばすことが想定されている。高エネルギー側では、荷電粒子等によるバックグラウンドが相対的に高くなるので、高感度の観測には低バックグラウンド化が不可欠である。「あすか」のデータとモンテカルロシミュレーションを用いた解析から、CCDのハウジングに入射した宇宙線（おもに陽子）が2次粒子として電子をたたき出し、その電子が生み出す制動放射によるX線がおもなバックグラウンド源になっていることを明らかにした。また、直接CCDに入射する低エネルギー電子も大量にあり、バックグラウンドにかなり寄与している可能性が出て来た。このように、X線CCDカメラでバックグラウンドが作られる過程が明らかになって来たので、今後はそれを抑制する方法の開発に取り組む予定である。

II -2-a-13

次世代硬X線、ガンマ線検出器の開発

教授	高橋忠幸	助手	中澤知洋	大学院学生	渡辺 伸
大学院学生	佐藤悟朗	大学院学生	小林謙仁	大学院学生	三谷烈史
大学院学生	井上北斗	大学院学生	田中孝明	大学院学生	大貫宏祐
大学院学生	田村健一	スタンフォード大学線形加速器センター			田島宏康
		阪大・理	能町正治	広大・理	深沢泰司

テルル化カドミウム半導体 (CdTe, CdZnTe) は、NaI (TI) シンチレータと同等のガンマ線阻止能力を持つ、新しい半導体検出器である。これらの半導体は、素子内で発生した電子・正孔対をもれなく集めるのが難しく、高いエネルギー分解能をもった検出器の実現は困難とされてきた。本研究室は、数10キロ電子ボルトのエネルギーのガンマ線に対して、1キロ電子ボルト (半値全幅) 以下というようなエネルギー分解能の極めて高いCdTe半導体素子の開発を行ってきた。現在では、それを発展させた硬X線撮像検出器や新しい概念にもとづいたガンマ線検出器の開発を行っている。そのために、CdTe半導体ばかりではなく、検出器を作る上で基礎となる実装技術 (特許申請済み) や読み出し用のアナログVLSIの開発を進めている。本年度は (1) 独自開発の2次元ASICやカリフォルニア

ア工科大学のASICを用いた250ミクロン角、および500ミクロン角のピクセルを持つCdTeピクセル検出器の試作。(2) 高いエネルギー分解能を持つシリコン両面検出器と2mm角のピクセルを64個持つCdTeピクセル検出器を組み合わせた世界で初めてのSi/CdTe半導体コンプトンガンマ線望遠鏡の実証と大型放射光施設(Spring-8)のシンクロトロンビームによる偏光測定実験をおこなった。(1)の検出器は現在提案中の「NeXT」のハイブリッドカメラを構成する硬X線撮像検出器HXIに、また(2)の検出器は狭視野コンプトン望遠鏡という新しい概念にもとづく軟ガンマ線検出器SGDに発展するものである。

II-2-a-14

アナログVLSIの開発

教授	高橋忠幸	客員助教授	池田博一	助手	高島 健
助手	中澤知洋	大学院学生	小林謙仁	大学院学生	井上北斗
大学院学生	田村健一	スタンフォード大学線形加速器センター			田島宏康

将来のX線観測用の硬X線撮像素子、あるいは、惑星ミッションにおける粒子検出器など、高位置分解能を持つ半導体検出器の読み出しを目的として、サブミクロンCMOSプロセスを利用したセンサー用アナログVLSIの開発を行っている。現在、われわれは、200ミクロンから500ミクロン角のピクセル検出器に直接バンプ接合することにより、撮像と分光の両方を実現する2次元のLSIの開発を進めており、段階を経ながら様々なアーキテクチャの独自のLSI(ASIC)の試作を行っている。また、シリコンストリップ検出器などに使用するための32から64チャンネルの低雑音の1次元のASICの開発をノルウェーのIDEAS社と進めている。こうしたASICは0.35ミクロンCMOSプロセスを用い、放射線計測回路を内蔵したものである。また、チャンネルあたり100マイクロから300マイクロワットというような低消費電力ながら、0ピコファラッドで数10電子(RMS)というような低雑音化をはかったもので、宇宙観測ばかりではなく、医療や非破壊検査などに広く用いられることが期待される。本年度は3種類のASICの設計、開発、試験を行い動作に成功するとともに、6種類のASICの設計、開発をおこなった。今後、規模を拡大し数千ピクセルに対応した2次元ASICが完成すれば、世界にさきがけて高いエネルギー分解能と位置分解能とを合わせ持つガンマ線撮像分光素子を実用化できる。

II-2-a-15

高角度分解能を用いたX線による星の生成・進化の研究

助手	前田良知	中央大・理工	坪井陽子	京大・理	小山勝二
----	------	--------	------	------	------

原始星とは星間ガスの動的降着期にある中心天体で、星の芯が急激に成長しつつある星誕生の動乱期である。分子雲コアと降着ガスは遠赤外からミリ波の波長域で観測される。しかしこれらは原始星そのものを厚く包み、可視光ではもちろん近赤外でも本体を透かして見ることはできない。この結果、原始星の赤外スペクトルはあくまで原始星の周辺物質のスペクトルで原始星そのものではない。「あすか」は硬X線での撮像分光能力を活かして、暗黒星雲深くに埋もれ、どの波長でも検出できなかった原始星本体からのX線放射を初めて検出した。星生成研究にX線で直接切り込むことができることを明らかにした重要な発見である。一般に星は星形成領域として集団で誕生するので、多くの場合「チャンドラ」の高空間分解能力を利用して一つ一つ分離することで、星形成領域の研究を大きく発展させることができる。質量の小さな褐色矮星、さらには惑星の原始星段階にまで踏み込んで、X線放射の有無と放射機構を解明し、星生成・進化を包括的に解明する手がかりを与えることを目指している。

II-2-a-16

超新星残骸プラズマの電離状態の研究

教授	長瀬文昭	助手	尾崎正伸
----	------	----	------

超新星残骸では、衝撃波によって周囲の星間物質が急激に加熱され、数千万度の高温プラズマが形成されている。この、半径10光年以上の領域にまで広がるプラズマの最大の特徴は、地上の実験室で作られるプラズマよりもはるかに希薄(約1個/立方センチメートル)な事である。星間物質の加熱はまずプラズマ粒子の運動エネルギーの急

激な増大という形で起こり、加熱されたプラズマからはX線放射が観測される。ところが、プラズマ中のイオンの電離状態がその温度に追い付く（平衡状態に至る）には、超低密度環境下においては非常に長い時間（約1万年）がかかる。一般に、この過渡的状态を電離非平衡状態と呼び、その進化を探ることで特に若い超新星残骸の進化の研究が可能となる。これに対し、年をとった超新星残骸と思われるIC443やW49Bその他を「あすか」を用いて観測したところ、そのプラズマが逆傾向（ガスの温度よりイオンの電離温度の方が高い）の過電離状態になっていることを発見した。これは、従来からの超新星残骸の進化理論では考慮されてこなかった内部熱伝導の影響を観測面から示唆する重要な結果である。

II-2-a-17

超新星残骸における粒子加速の観測的研究

教授 高橋忠幸 エール大学 内山泰伸 特別研究員 平賀純子

超新星爆発によって星間空間に形成される強い衝撃波は、銀河系内宇宙線の加速の最も有力な現場と考えられている。X線による良質なイメージとスペクトルの観測により、衝撃波面の近傍で加速された高エネルギー粒子を探索することが可能である。われわれは、J1713.7-3946において「チャンドラ」や「ニュートン」の高い角度分解能のX線データの解析を行い、エネルギースペクトルの詳細な解析から、顕著な微細構造（フィラメントとプラトー）を持つことを発見するとともに元のシンクロトロン電子の分布を導いた。RX J1713.7-3946では、X線のエネルギー範囲で電子分布のブレークに対応するような折れ曲がり観測されず電子の最高エネルギーが冷却から制限されるよりも高くまで伸びていることが示唆される。そのため衝撃波加速の機構によって直接加速された電子からの放射では、観測されているX線放射の説明が困難であることを指摘し、加速された陽子とこの超新星残骸に付随する分子雲との相互作用に起因する可能性を提示した。

II-2-a-18

X線による銀河系中心の研究

助手 前田良知 特別研究員 村上弘志 京大・理 小山勝二

我々の銀河系の中心には、太陽の300万倍もの質量を持つ巨大ブラックホールが潜んでいると考えられている。「チャンドラ」搭載のX線CCDカメラで銀河系中心の観測を行なったところ、銀河系中心核に一致する方向に世界で初めてX線天体を検出することができた。この天体は約3時間の間に45倍以上増光するという激しい強度変動を示しており、ブラックホールの特徴をもつと考えられる。さらに増光の時間変化を詳細に調べたところ、約10分程度の間隔で小刻みに変動を繰り返していることが明らかになった。このような短時間の変動は、天体の大きさが約1.5億キロメートルより小さいことを強く示唆する。これは、太陽から地球までの距離より小さく、太陽の300万倍の質量を持つブラックホールの半径のせいぜい十倍程度しか離れていない所から放射が出ていることを意味し、ブラックホールを探るのに重要な手がかりとなる。この「チャンドラ」による観測で、我々の銀河系の中心に巨大ブラックホールが存在することがほぼ確実になったが、そのX線強度は活動的なブラックホールに比べて7桁以上も低い。一方、このブラックホールの周囲100光年ほどを見渡すと、活発な星生成活動が見られるものの、若い超新星残骸やパルサーなどは存在しないようである。この一見すると相矛盾するような観測事実は、銀河系中心付近の進化の歴史を反映している可能性があり、この観点に沿った研究を進めている。

II-2-a-19

低質量X線連星系の輻射機構の研究

助教授 堂谷忠靖 神奈川大・工 浅井和美

低質量X線連星は、磁場の弱い中性子星もしくはブラックホールと、晩期型星（低質量星）との近接連星系である。伴星からの質量降着によってX線を放射しており、銀河系内では、最も明るい部類のX線天体である。低質量X線連星では、降着流が磁場等に影響されることがないので、降着円盤の構造や物理状態を探るのに適している。特に、降着円盤外縁の構造は、ディップと呼ばれるX線光度の減少の様子から探ることができる。X線連星EXO

0748–673のデータを解析したところ、ディップの形成には降着円盤の光電離が強く影響していることが明らかになった。従来、異なる吸収を受けたスペクトルの重ね合せや部分吸収で説明されて来たディップ中のエネルギースペクトルが、実は光電離したプラズマによる吸収だった可能性が高い。一般に低質量X線連星では、系の大きさが小さいため光電離が効き易いと考えられることから、これは妥当な結論であろう。今後、低質量X線連星からのX線放射の解析には、光電離の影響を考慮することが不可欠と考えられる。

II -2-a-20

吸収線を用いたX線連星の降着円盤の研究

助教授 堂谷忠靖 助手 上田佳宏 特別研究員 村上弘志

X線連星からの高電離イオンによる吸収線の観測は、降着円盤の構造の理解に重要な手がかりを与える。鉄K吸収線は最初、マイクロクエーサーと呼ばれるブラックホール連星から検出されたが、最近になって中性子星連星からも検出され、中心天体の性質によらない降着円盤の普遍的な性質であることがわかってきた。我々は「チャンドラ」の透過型回折格子（HETGS）を用いて低質量X線連星GX 13+1の高分解能分光観測を行ない、鉄、マンガン、クロム、カルシウム、アルゴン、硫黄、珪素、マグネシウムの高電離イオンからの共鳴吸収線を、過去最高の精度で検出することに成功した。その結果、高電離ガスが400km/s程度のアウトフローを示していること、その質量流出率が質量降着率に匹敵することがわかった。これは、質量降着率の高い系においてこのようなアウトフローが降着円盤全体の力学を決める上で重要な役割を決めることを明確に示したもので、降着円盤の構造の理解に大きな前進をもたらすものである。

II -2-a-21

ブラックホール候補星における降着円盤の観測的研究

特別研究員 久保田あや 教授 高橋忠幸 大学院学生 田中孝明
東大・理 牧島一夫

「チャンドラ」、「XMM-ニュートン」、「RXTE」、「あすか」など、X線衛星の観測データを用いて、銀河系内、系外のブラックホールからのX線放射の研究を行っている。2003年度は系外銀河NGC253に存在する、エディントン限界を超えるような高輝度X線源（ULX）のひとつを、「XMM-ニュートン」と「チャンドラ」を用いて解析を行った。そのスペクトルの時間変動を詳細に調べることによって、銀河系外の天体で初めて、その放射がブラックホールの標準降着円盤のモデルでよく説明できることがわかった。これは、これまで長く謎とされていたULXの正体が、ブラックホールであるということを裏付ける重要な結果である。

II -2-a-22

X線分光観測による中性子星からのX線と相互作用する星風の研究

教授 高橋忠幸 教授 長瀬文昭 大学院学生 渡辺 伸
都立大・理 石田 学 都立大・理 石崎欣尚 都立大・理 森田うめ代
工学院大・理 幸村孝由 スタンフォード大学線形加速器センター 迫 昌男

X線と物質との相互作用の際に、放出される二次X線は、その場の物理状態を反映し、観測されるX線スペクトル中に様々な輝線など特徴的な構造を作る。我々は中性子星と大質量の連星系内部の物質の電離構造、分布、星風のダイナミクスを「チャンドラ」による分光観測結果を元に研究した。X線連星GX301-2の観測からは、初めて鉄の蛍光輝線に伴うコンプトンショルダーを発見した。このコンプトンショルダーはX線光子と物質との間の相互作用を直接反映すると考えられ、理論的に予言されていたが、実際に観測されたのははじめてである。また、Vela X-1では光電離プラズマからの様々な電離度の輝線を観測するとともに、ドップラーシフトを検出した。こうした観測結果を定量的に探るために、モンテカルロ法に基づいた新しい解析手法を開発した。この手法は、非対称な物質分布、連続的に変化する密度、電離状態を扱い、モンテカルロ法でX線光子の輸送過程を一つ一つ追い、そこからのX線スペクトルを再現するものである。このコードをVela X-1とGX301-2に適用することで、ライン比、ドップラー

シフトの他、コンプトンショルダーなどの研究を行った。

II-2-a-23

X線吸収による低温星間物質の研究

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	上田佳宏
助手	藤本龍一	大学院学生	竹井 洋	大学院学生	二元和朗
				東大・理	尾中 敬

「チャンドラ」に搭載された低エネルギー透過型回折格子（LETG, およびHETG）を用いた低質量X線連星により、星間空間の元素の化学状態と存在比の研究を進めている。X線吸収により、X線星までの視線方向に沿って様々な元素の存在形態を分離しつつ、平均的な存在量を測定することが可能である。これは他の波長にはない特徴であるが、「チャンドラ」および「XMM-ニュートン」の回折格子により初めて観測が可能になったものである。2002年は、中性あるいは低電離の酸素とネオンの吸収端を中心に研究を行い、酸素の存在量に制限をつけるなどその有効性を実証した。2003年度は、ケイ素、マグネシウムなどのより重たい元素の吸収端の研究をすすめた。その結果、X線吸収端の微細構造（XANES, EXAFS）から、ケイ素の大半が固体（あるいは分子）状態であることを示し、その化学組成についても制限を得ることができた。さらに酸素などの軽元素に対する存在量を求めた。

II-2-a-24

X線吸収による高温星間物質の研究

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
		大学院学生	二元和朗	大学院学生	竹井 洋

全天に広がる軟X線放射の研究から、銀河系の銀河面およびハローには100万度程度の高温ガスが存在し、それが体積では星間空間の過半を占めると考えられている。一方、軟X線放射の一部は我々の銀河系の外の銀河間空間に存在する高温物質から来ている可能性があり、これは“ミッシングバリオン”あるいは“ダークバリオン”の候補である銀河間高温物質（Warm/hot inter-galactic medium, WHIM）との関係で注目される。最近、明るい銀河中心核のスペクトル中に高電離酸素吸収線が発見され、WHIMによる可能性が示唆されている。そこで、我々は銀河系内の天体のX線スペクトル中の高電離した酸素とネオンの吸収線を探査した。その結果世界で初めて銀河系内のX線源スペクトル中に高電離酸素とネオンの吸収線を発見し、その性質から、星間空間の高温物質の温度、速度分散、密度に対する強い制限を得た。この結果は、明るい銀河中心核の高電離酸素吸収線に寄与する高温物質の大半が銀河間空間ではなく、我々の銀河系内にあることを示唆しており、星間空間だけでなく“ミッシングバリオン”の研究にも大きな影響を与える。ただし、その天体（球状星団NGC6624中のX線源）は、いわゆる銀河バルジの方向にあり、特殊な方向である可能性が残る。今後、他の方向にあるX線源のスペクトル中の吸収線を探す予定である。

II-2-a-25

“ダークバリオン”としての銀河間高温物質探査の研究

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
助手	田村隆幸	特別研究員	古庄多恵	都立大・理	大橋隆哉
都立大・理	石田 学	都立大・理	石崎欣尚	都立大・理	佐々木伸
名大・理	田原 譲	名大・理	古澤彰浩	東大・理	須藤 靖
				東大・理	吉川耕司

近年の宇宙論研究により、宇宙の大部分は未知の暗黒物質と暗黒エネルギーによって占められ、核子などの普通の物質（＝バリオン）は全体の4%程度であることがわかってきた。ところが現在の宇宙の星や銀河団高温ガスを集めても存在するはずのバリオンの半分にも達しない。つまり、宇宙の約3%を占めるはずのバリオンは、ミッシングバリオンあるいはダークバリオンとなっている。宇宙論シミュレーションからは、それらが温度10万度から100万度の高温物質として銀河間空間に存在することが予測されている。これらの銀河間高温物質（WHIM）は、

暗黒物質の分布に良く追従しており，バリオンの中で宇宙の大規模構造をもっとも強く反映すると予想される．我々は，酸素の輝線観測により全天の広い範囲から銀河間物質高温を検出し，さらに，赤方偏移を利用して $z=0.1$ から 0.3 の宇宙に存在する高温銀河間物質の分布を3次元的に明らかにする観測の可能性を，理論的および観測的な見地から検討している．このような観測は，400kg程度の衛星で実現できる可能性が高く，我々はこれをDIOS (Diffuse Intergalactic Oxygen Surveyor) と名付け，計画の検討を行っている．

II -2-a-26

酸素の吸収線による高温銀河間物質の探査

教授	満田和久	助教授	山崎典子	助手	藤本龍一
助手	田村隆幸	大学院学生	竹井 洋	都立大・理	大橋隆哉
		都立大・理	太田直美	名大・理	柴田 亮

最近，明るい銀河中心核のスペクトル中に高電離酸素吸収線が発見され，それが“ダークバリオン”の候補である銀河間高温物質 (WHIM) による可能性が示唆されている．しかし，吸収線の赤方偏移がないものとして矛盾がなく，我々の銀河系内の高温物質による可能性が否定できない．そこで，我々は近傍の銀河団の外側の銀河間高温物質を検出する目的で，その背景にあるクエーサーを観測する研究を進めている．その一つとして，おとめ座銀河団の向こう側にあるクエーサーのX線スペクトルの精密観測を「XMMニュートン」に搭載されている回折格子を用いて行なった．その結果，観測時間が要求の1/2でしかなかったこともあり有意性は低いものの，これまでに見つかっていなかった数百万度の高温ガスが大量に存在する兆候が見い出された．吸収線の赤方偏移はゼロから有意にずれている．この結果は，銀河間高温物質が実際にこれまでに見えていなかったバリオンの大部分を占めている可能性を示しており，宇宙の大規模構造形成を理解する上で重要な手がかりになると期待される．今後，観測サンプルを増やしてゆく予定である．

II -2-a-27

X線による大光度赤外線銀河の観測的研究

教授	中川貴雄	助手	藤本龍一	大学院学生	穴吹直久
----	------	----	------	-------	------

大光度赤外線銀河はクエーサーに匹敵するエネルギーを遠赤外線の波長域で放射している銀河である．我々は可視光で1型の特徴を持つ大光度赤外線銀河に特に注目し，その性質を調べた．その結果，これらの1型の大光度赤外線銀河中の活動銀河核は非常に大きな質量降着率を持つことを示す結果を得た．これらの大光度赤外線銀河では，銀河衝突によって中心に落ち込んだガスが中心核に大量に落ち込み，中心ブラックホールの質量が急激に増加していることが示唆される．

II -2-a-28

活動的銀河核の研究

教授	國枝秀世	教授	井上 一	NASA/GSFC	見崎一民
特別研究員	寺島雄一	特別共同研究員	幅 良統	大学院学生	穴吹直久
		特別共同研究員	伊藤 啓	大学院学生	森 英之

銀河の中の1割程度には大変明るい活動的中心核を持つものがある．その起源は，太陽の百万倍から十億倍の質量のブラックホールに流れ込む物質の重力エネルギーが，X線で放射されているものと考えられている．ブラックホールの半径の数倍以内の時空，降着流の物理はX線で観測するのが最適であると考えられる．これまでも「あすか」を用いて強い重力場を示唆するものと考えられる鉄輝線構造などが見つまっている．最近では「XMMニュートン」，「チャンドラ」の観測データ等の解析から，いくつかの新しい知見が得られている．その一つが，狭輝線セイファート銀河と呼ばれる，比較的軽く（太陽質量の百万倍から一千万倍），エディントン光度に近い活動的銀河核である．その観測スペクトルから降着流の温度と明るさの関係をしてみると，標準円盤モデルではなくエディントン光度を大きく越える，移流優勢降着流になっていると説明が付け易いことが分かって来た．二つ目は赤外線の特

別明るい銀河であり、これは宇宙初期の活発な星生成期にあるものと考えられている。その一部の銀河に、星の放射では説明のつかないX線で明るい中心核を見つけた。その性質は上記の狭輝線セイファートに似ており、中心核のブラックホールが急速に物質を取込み、大質量に成長している途上にあることを示しているかもしれない。

II -2-a-29

活動銀河核ジェットの観測的研究

教授 高橋忠幸 東工大・理 片岡 淳

「あすか」によって行った、1週間から10日という、これまでに例のない長期にわたるブレーザー天体の観測データを用い、その強度変動を定量的に解析することで、ジェット内の加速の研究を行った。ブレーザー天体に特徴的な激しい時間変動は、ジェット内の加速機構と密接に関係しており、ジェット内部で起きている現象を直接反映すると考えられる。内部ショックの考え方に基づいて、光度曲線を定量的に再現するようなコンピュータコードを開発し、その結果を構造関数などの手法を用いて観測結果と比較することで、衝突が起きている位置、あるいは、そのエネルギーが加速や放射に転換される効率などを求めた。さらに、ブレーザーMrk421の多波長スペクトルが、フレアの間にもどのように変化していくかについて研究を行い、活動銀河核ジェットにおける粒子加速の機構や到達最大エネルギーに関して考察を行った。

II -2-a-30

X線背景放射と活動銀河の宇宙論的進化の研究

助手 上田佳宏 国立天文台 秋山正幸 京大・理 太田耕司

X線背景放射の起源の解明は、X線天文学最大の課題の一つであり、銀河中心に存在する巨大ブラックホールの成長過程を知る上で鍵となる研究である。我々は、これまでの研究の総まとめとして、「あすか」によるサーベイと他衛星のサーベイ結果を合わせた非常に同定完全性の高い硬X線選択サンプルを作成した。それを用いて系統的な解析を行ない、「隠された」活動銀河を含む全活動銀河の宇宙論的進化を解明することに初めて成功した。この結果は同時にX線背景放射の起源の大部分を定量的に解決したものである。また国立天文台のグループやレスター大学と協力して「すばるXMMディープサーベイ」プロジェクトを推進し、X線源の空間分布、可視で暗い活動銀河の研究などを行なった。

II -2-a-31

ガンマ線バーストの起源と初期宇宙の研究

客員教授 村上敏夫

ガンマ線バーストは最も遠方の宇宙で発生し、初期宇宙の様子を強く反映した現象と考えられている。従来は中性子星を残す超新星爆発が、宇宙で一番エネルギーの大きな現象と考えられていたが、最近ではブラックホールを生成するガンマ線バーストが、宇宙で一番激しい爆発現象であると理解されている。このエネルギーの大きさが、最も初期の宇宙にあっても結果として観測が可能な理由である。しかし、なぜガンマ線バーストではガンマ線が効率的に放射されるのか、本当にブラックホール生成と関係しているのか、などいまだに未知な点が多い。昨年、最も遠方の天体を定量的に扱った論文を発表したが、これは世界で一番遠い天体を扱う論文となっている。現在、金沢大学に所属しつつ、宇宙科学研究本部との関係で以下の三つの方面から研究を展開している。

- (1) 宇宙科学研究本部が2005年に打ち上げる衛星、「ASTRO-E II」の検出器の一部を担当し、ガンマ線バーストの観測にいとむ。
- (2) 宇宙科学研究本部の屋上にある1.3mの赤外線望遠鏡を共同利用し、宇宙で最も遠い天体の同定をガンマ線バーストのフラッシュの観測から試みる。
- (3) 宇宙科学研究本部の将来衛星に搭載するガンマ線バースト検出器を提案し、その基礎開発を行う。