

# X線天文衛星「すざく」によるNGC 1316の観測

埼玉大学 田代研究室 学部4年 松田桂子

2008年4月15日

## 概要

宇宙には、銀河の中心に超巨大ブラックホールを有する活動銀河核 (Active Galactic Nucleus : AGN) が存在する。その中でも、電波銀河 Fornax A の母銀河である NGC1316 は、銀河同士の合体により形成され、過去の激しい活動の痕跡である巨大な電波ローブを持つ興味深い天体である。しかし、電波による観測では、電波ローブは観測されているが、そのローブにエネルギーを供給していたであろう AGN は観測されていない。X 線天文衛星 ASCA、ROSAT による観測では、NGC1316 の中心核の 2-10keV の光度の上限値は  $2 \times 10^{40}$  ergs/s と見積もられた。これは、一般的な AGN の光度  $10^{43-45}$  ergs/s に比べると 3 桁以上小さく、その中心核の活動はすでに終息しているとされた (Iyomoto et al.1998)。一方、Chandra による観測結果からは、中心核領域に 0.3-8keV の光度にして  $5 \times 10^{39}$  ergs/s と、非常に暗い AGN の存在が示唆された (Kim and Fabbiano 2003)。また、ローブの寿命の研究から、NGC1316 は最近終息した AGN である可能性が高い。AGN がはっきりと観測されないことから、ガスによる吸収を受けている可能性もある。そこで本研究では、高感度・広帯域・低バックグラウンドの検出器を搭載した X 線天文衛星「すざく」による観測で NGC1316 の中心領域を再度調べ、AGN の有無を検証した。

「すざく」に搭載されている X 線 CCD カメラ (X-ray Imaging SpectrometerB : XIS) と硬 X 線検出器 (Hard X-ray Detector : HXD) の観測データの解析結果を、AGN 成分を光子指数  $\Gamma=1.8$  のべき型スペクトルで評価した。中心核に固有の吸収体が存在しないと仮定すると、 $L_X=1.1 \times 10^{37}$  ergs/s と AGN としては非常に小さな上限値が見積もられた。さらに、10keV 以下がほとんど吸収されるような水素柱密度  $N_H \sim 10^{24}$  atm/cm<sup>2</sup> もの強い吸収を考えた場合では、高エネルギー側に感度のある HXD により、AGN の光度が  $L_X=4.5 \times 10^{40}$  ergs/s 以下という、AGN としては非常に小さな上限値が得られた。この結果から、AGN がいたとしてもその活動は非常に弱いことが確認された。

# 目次

第 1 章	活動銀河核とブラックホール	2
1.1	ブラックホール	2
1.2	活動銀河核	2
1.3	電波銀河	3
第 2 章	NGC1316 (Fornax A)	4
2.1	電波による観測	4
2.2	X 線による観測	4
第 3 章	X 線天文衛星 すざく	6
3.1	概要	6
3.2	XIS	7
3.3	HXD	7
第 4 章	すざく による NGC1316( Fornax A ) の観測	9
4.1	観測	9
4.2	データ解析	9
4.2.1	XIS	9
4.2.2	HXD	11
4.3	data analysis XIS	12
4.3.1	X 線画像	12
4.3.2	ライトカーブ	13
4.3.3	スペクトル解析	15
4.4	data analysis HXD	18
4.4.1	ライトカーブ	18
4.4.2	XIS との同時スペクトル解析	20
第 5 章	「すざく」と Chandra の比較	22
第 6 章	議論	24
6.1	熱制動放射と熱いプラズマ	24
6.2	AGN 成分	24
6.3	隠された AGN 成分	24
第 7 章	まとめ	25

# 第1章 活動銀河核とブラックホール

## 1.1 ブラックホール

アインシュタインの一般相対論を解き、ブラックホール理論のきっかけとなった「事象の地平線」の概念をカール・シュバルツシルトが発表したのが1916年である。実際に観測されたのは1970年初め、小田稔らによってはくちょう座 X-1 をブラックホール候補天体として見つけたのが初めてである。光が出られないブラックホールは直接観測できない。しかし、そばの星からガスや物質がブラックホールへと吸い込まれ、狭い領域に集められることで高温高密度になり、重力エネルギーの一部が光のエネルギーとして解放される。それにより、ブラックホールの近傍で非常に強い光が放出されるため、我々はその光を観測することでブラックホールの存在を認識することができる。

ブラックホールは、太陽質量の30~40倍の星が超新星爆発した後、自己重力によって極限まで収縮することで生成したり、巨大なガス雲が収縮することで生成すると考えられている。星の終末にできる典型的なブラックホールの質量は太陽質量の10倍程度といわれている。

## 1.2 活動銀河核

約1000億個の星の集合体である銀河は、星の明るさを合わせた程度の明るさで光り、明るさが急激に変化したりすることもない。一方、このような通常銀河に対して、中心核が極めて特異な活動をしている銀河を総称して活動銀河と呼び、その中心核を活動銀河核 (Active Galactic Nucleus: AGN) という。

また活動銀河核の主な特徴として以下のものが挙げられる。

- 通常銀河に比べてその中心核が100~1万倍明るい
- 電波からX線、 $\gamma$ 線領域にわたる広波長域(数m~0.01nm以上)でエネルギー放出する
- 数十~数百日のタイムスケールで急激に変光するものがある
- 中心核からジェットと呼ばれる高速のプラズマ流を噴き出すものがある

こうした莫大なエネルギーを出す活動銀河核の正体として、超巨大な星や物質と反物質の対消滅や星どうしの激しい衝突・合体などの説が唱えられた。しかし、1970年代の後半になると、活動銀河核は太陽質量の $10^6$ ~ $10^9$ 倍の大質量ブラックホールに周辺からガスが降着しているもの、という解釈が定着した。なぜ大質量が必要かという点、ブラックホールに物質を降着させて取り出せる放射光度には、ブラックホールの質量に比例した上限値(エディントン限界光度)があり、観測される光度 $10^{44}$ ergsを取り出すには、太陽質量の $10^6$ 倍以上の大質量が必要となるからである。

活動銀河は、その観測的特徴からセイファート銀河、電波銀河、クェーサー、ブレイザーなどに分けられる。次節ではこのうちの電波銀河について詳しく解説する。

### 1.3 電波銀河

電波銀河は、第二次世界大戦後、電波天文学の発展に伴って発見された、通常銀河に比べて非常に強い電波を放射している銀河のことである。

電波銀河ではコア、ジェット、ローブと呼ばれる構造が見られることが多い。可視光や紫外線で明るい AGN 中心部は、電波ではコアと呼ばれるほぼ点状の電波源として見えている。また、電波銀河における AGN からの X 線放射強度の典型値は  $10^{43-45}$  ergs/s である。このコアを根元にして直線状の構造が 10 kpc から数 Mpc も伸びている。これは電波ジェットと呼ばれ、電波銀河の AGN からほぼ光速で中心の銀河を挟んで双極的に放出されるプラズマの噴流である。特に電波で輝くことからこう呼ばれているが、実際には可視光、X線やガンマ線など高エネルギーの放出も検出されている。電波ジェットの先にはプラズマの流れが銀河間ガスでせき止められ、風船状にふくらんだ電波ローブと呼ばれる構造が存在している。この電波ローブや電波ジェットは、可視光観測で得られた銀河本体(楕円銀河であることが多い)のサイズ(～数万 pc)をはるかに超える大きさであることも特徴的である。

電波銀河は電離ガスの輝線スペクトルの特徴から 2 つに分けられる。ある種の電波銀河は、輝線スペクトルの半値幅が数千～1 万 km/s を超える非常に幅の広い輝線が見られるため、広輝線電波銀河と呼ばれる。一方、数百 km/s ほどの幅の狭い輝線しか見られないものは、狭輝線電波銀河と呼ばれる。

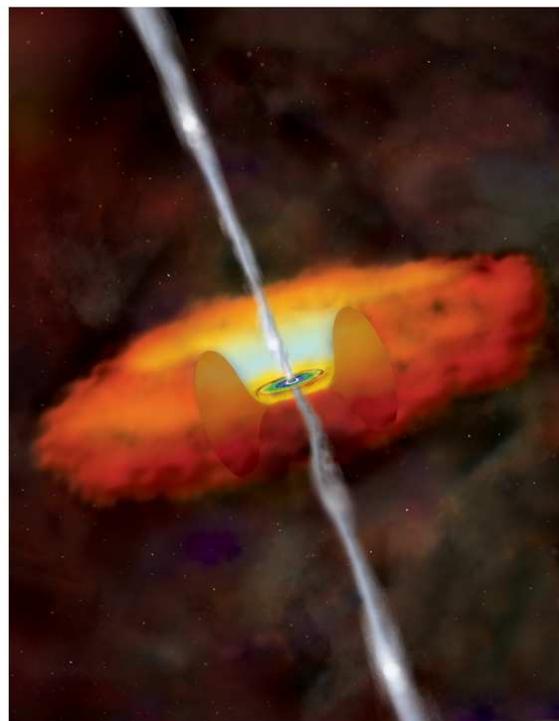


図 1.1: AGN の想像図。中心の大質量ブラックホールに降着円盤から質量が落ちこみ、高速のプラズマ流のジェットが噴出されている。

## 第2章 NGC1316 (Fornax A)

### 2.1 電波による観測

NGC1316(Fornax A) は南天のろ座(Fornax) 銀河団に属する楕円銀河である。地球から約 18.6Mpc (=6100 万光年、赤方偏移  $z=0.005871$ ) の距離にあり、南天で 4 番目に明るい電波源である。VLA(Very Large Array) による電波観測 (Fomalont 1989) により、銀河中心から点対称の位置に巨大な電波ローブが確認されており、非常に強い電波源として知られている。しかし、電波による観測では、電波ローブにエネルギーを供給していたであろう AGN、ジェットは観測されなかった。

### 2.2 X 線による観測

NGC1316 は、「あすか」(ASCA)、ROSAT、Chandra、Newton といった歴代の X 線天文衛星すべてが観測している天体である。ROSAT による観測では、不規則な分布をした、太陽質量の  $10^9$  倍の熱い星間物質 (ISM: Interstellar medium) の存在が明らかになり、その後、Chandra の観測によって ISM の基礎が確立された (Kim & Fabbiano 2003)。しかし、X 線による観測でも AGN は観測されず、もし AGN があったとしても非常に暗い、 $L_X = 5 \times 10^{39}$  ergs/s (in 0.3-8 keV) 程度の AGN であるといわれている (Kim & Fabbiano 2003)。

ただ、電波ローブの観測からローブ年齢が見積もられており、AGN はわりと最近終息した可能性が高い (伊藤 2005)。ASCA GIS(Gas Imaging Spectrometer: 位置検出型ガス蛍光比例計数管)、SIS(Solid-state Imaging Spectrometer: X 線 CCD カメラ) による観測より、楕円銀河の特徴的な放射である熱い星間物質からの熱的放射の存在を示すコンプトン放射と、高エネルギーの連続成分が検出された (Forman, Jones & Tucker 1985 他)。中心核は非活動的であり、強い吸収  $N_H \sim 10^{24}$  atm/cm<sup>2</sup> を受けた中心核の光度は  $L_X < 2 \times 10^{40}$  ergs/s と見積もられた (Iyomoto et al. 1998)。このように、2 つの X 線天文衛星による観測から、NGC1316 の AGN の有無について異なった結論が出ている。もし、AGN がガスによる吸収を受けていたとしても、透過力の高い硬 X 線が放射されていれば、ガスに吸収されずに検出することが出来る。そこで、NGC1316 の AGN の有無の検証には、高感度・広帯域・低バックグラウンドの X 線天文衛星「すざく」による観測が重要となってくる。

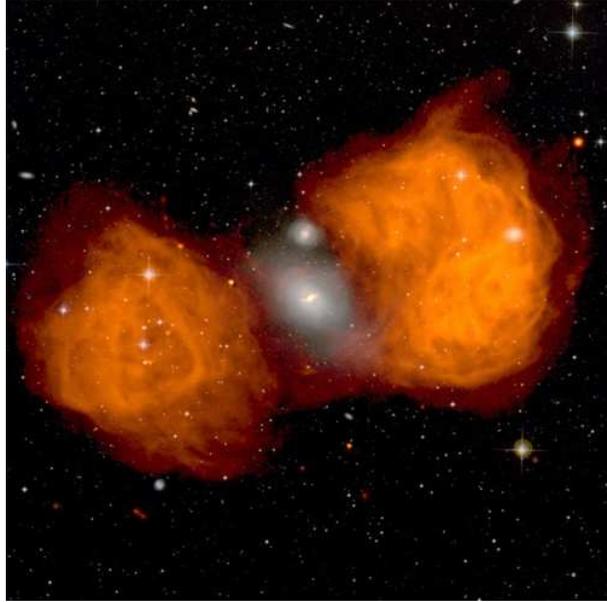


図 2.1: VLA の電波観測で得られた NGC1316 画像 (1.4GHz)。背景には HST(Hubble Space Telescope) の可視光画像が重ねられている。中心領域から点対称に大きく広がったローブが見られる。

## 第3章 X線天文衛星 すざく

### 3.1 概要

X線天文衛星「すざく」(Astro-E2)は、「はくちょう(1979年)」「てんま(1983年)」、「ぎんが(1987年)」、「あすか(1993年)」に続く、日本の第5番目のX線天文衛星として、2005年7月10日に内之浦宇宙空間観測所よりM-Vロケット6号機に搭載され打ち上げられた。衛星は近地点高度250 km、遠地点高度550 kmの楕円軌道に投入され、搭載二次推進系により、高度約570 km、周期96分の略円軌道へ修正された。

「すざく」は直径2.1 m、全長6.5 m(軌道上で鏡筒を伸ばした際)の大きさを持ち、太陽電池パネルを広げると幅5.4 mになる。衛星の重量は1700 kgにもなり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星となった。「すざく」には、5つの撮像X線検出器と1つの非撮像硬X線望遠鏡が搭載されている。前者は、5つのX線反射鏡(X-ray telescope: XRT)と5つの焦点面検出器(4つのXIS検出器と1つのXRS検出器)からなる。XRTは「あすか」衛星搭載のX線反射鏡に比べると、より精密な撮像能力(空間分解能1分角)とより広い有効面積を持ち、口径40cm、焦点距離4.5-4.75mである。X線CCDカメラ(X-ray Imaging Spectrometer: XIS)は、0.4-10 keVのエネルギー帯域をカバーし、典型的なエネルギー分解能は130 eV(FWHM)である。高分解能X線分光器(X線マイクロカロリメータ)(X-ray Spectrometer: XRS)は、エネルギー帯域はXISと同程度で、典型的なエネルギー分解能は6 eVである。しかしながら、2005年8月にXRSで使用している液体ヘリウムが消失するという事故が発生し、XRSによる観測は不可能になった。さらに高いエネルギー(10-700 keV)のX線を観測するために開発されたのが硬X線検出器(Hard X-ray Detector: HXD)である。「すざく」では、XIS4台とHXDで同じ天体を同時に観測することができ、広いエネルギー帯で高感度のX線分光が可能である。

本論文で観測に用いたXISとHXDについては、以下の説で詳細を記述する。

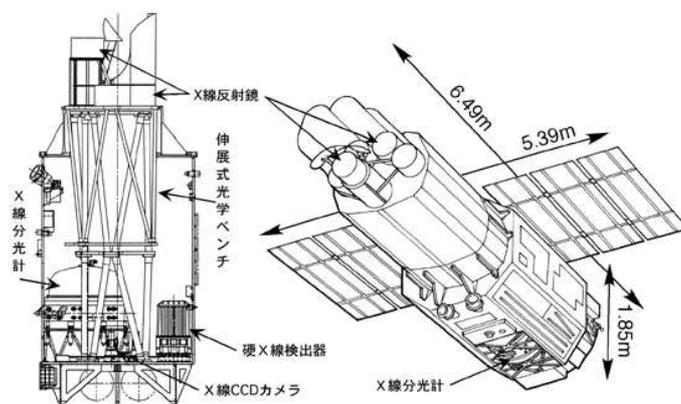


図 3.1: X線天文衛星「すざく」の全体像

## 3.2 XIS

XIS(X-ray Imaging Spectrometer) は4台の X 線 CCD カメラから構成され、天体の撮像と X 線スペクトルの取得を目的としている。視野は 18 分角×18 分角、エネルギー帯域は 0.4-10 keV である。

XIS の4台のセンサーをそれぞれ XIS0、XIS1、XIS2、XIS3 とよぶ。そのうち XIS0、2、3 は表面照射型 (Frontside Illuminated ; FI)、XIS1 は裏面照射型 (Backside illuminated ; BI) である。表面照射型 CCD では、X 線が電極側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極や絶縁層で吸収されてしまう。これに対し、裏面照射型 CCD では X 線が電極の逆側から入射するため、低エネルギーの X 線は電極や絶縁層で吸収されない。これにより、表面照射型 CCD は高エネルギー帯域に、裏面照射型は低エネルギー帯域に感度がよい。

また XIS では軌道上でのエネルギーの絶対較正の測定のために、カメラごとに較正線源が取り付けられている。線源はいずれも  $^{55}\text{Fe}$ (半減期 2.7 年) で、Mn K $\alpha$  (5.9 keV) Mn K $\beta$  (6.5 keV) の特性 X 線を出す。

2006 年 11 月に、XIS2 に不具合が生じたため、XIS2 のみ現在観測を停止している。

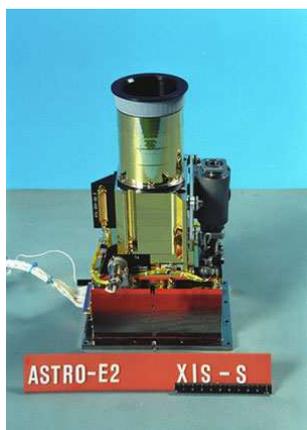


図 3.2: XIS の概観

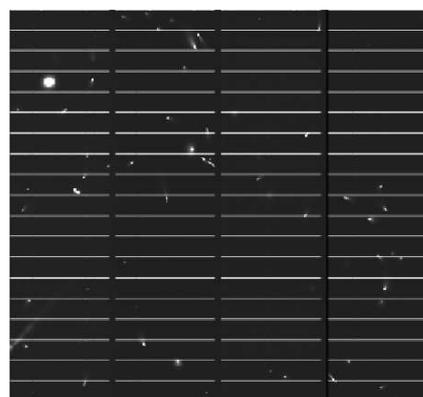


図 3.3: SCI のライン。

## 3.3 HXD

HXD(Hard X-ray Detector) は、高エネルギー (10-700 keV) の X 線を今までにない高い感度で観測することを目的としている硬 X 線検出器である。硬 X 線領域では、多くの天体からの光子数はエネルギーに対してべき関数的に減少し、バックグラウンドに対して信号が微弱となる。つまり、高いエネルギーほど検出器におけるバックグラウンドの低減が精度のよい観測には不可欠である。そこで、あらゆる方向からのバックグラウンドを低減するために、井戸型のガードカウンターに守られた底に検出器を置く硬 X 線検出システムが使われている。

基礎となる井戸型フォスウィッチカウンターは 16 本あり (Well ユニット)、その周りを BGO 結晶 ( $\text{Bi}_4\text{Ge}_3\text{O}_{12}$ ) のアンチカウンター 20 本が取り囲む (Anti ユニット)。Well ユニットの主検出部は PIN 型半導体検出器 (厚さ 2 mm) と GSO シンチレータ ( $\text{Gd}_2\text{SiO}_5$ , Ce 0.5%mol、厚さ 5mm) を上下に重ねた形で構成され、10-700 keV という広帯域を実現する。さらに、主検出部と BGO の反同時計測 (同時に検出したものを除外) により、効率よくバックグラウンドを除外することができる。



図 3.4: HXD の概観

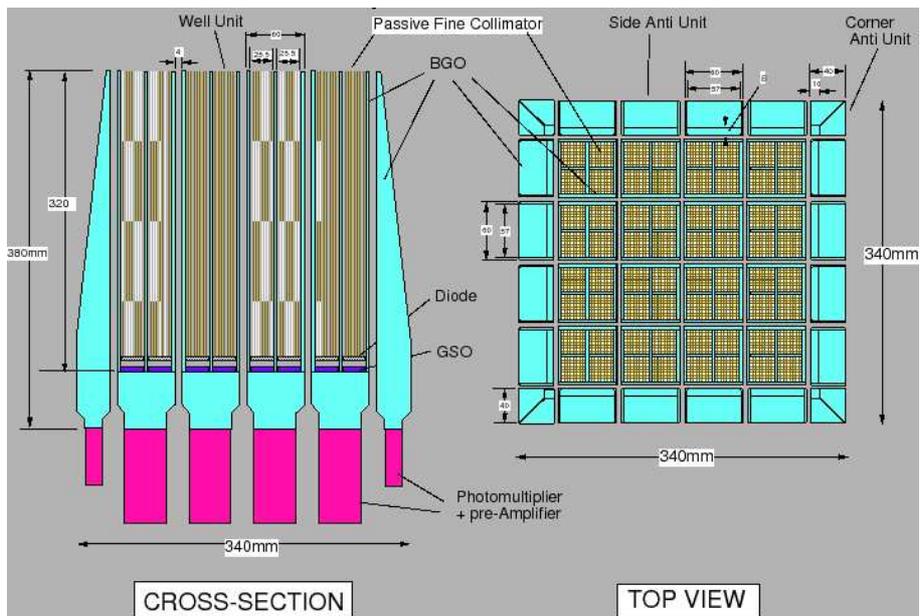


図 3.5: HXD の断面図 (左) と真上から見た構造 (右)

# 第4章 すざく による NGC1316( Fornax A ) の観測

## 4.1 観測

X線天文衛星「すざく」のX線 CCD カメラ XIS0,1,3、および HXD の Well ユニットによって NGC1316 からのシグナルを検出した。

観測日 : 2006/12/22 14:49:55 - 2006/12/23 20:51:19

観測時間 : 109339 s

## 4.2 データ解析

### 解析方法

「すざく」衛星の観測データは、FITS(Flexible Image Transport System)形式に変換され、保存されている。FITS形式では、jpegなどの画像データの圧縮形式とは異なり、画像上の天体の位置や明るさ、温度といった物理量や衛星の位置情報などの「光子情報」を保存することができる。こういったデータは、ISAS/JAXAのDARTS(Data Archives and Transmission System)や協同研究機関であるNASA/GSFCのHEASARC(High Energy Astrophysics Science Archive Research Center)グループによって管理されている。解析ソフトとして、解析に必要なソフトがまとめられたHEASOFT(ver6.3.2)を用いた。また今回の解析に用いたデータは、XIS、HXDともにプロセスver2.0.6.13のものである。

### 衛星データ

配付される観測データには、衛星から出力されるデータ全てを含むall eventと、天体を見ていない時間帯などの不要なデータがあらかじめ取り除かれたcleaned eventがある。不要なデータがどのように取り除かれるかは、検出器の較正がどこまで進んだかに大きく依存している。そのため、最新の較正情報(caldb)と較正ツールを用いて再処理する必要がある。

### 4.2.1 XIS

#### unscreened event の再プロセス

XIS観測データのうち、/xis/event-cl/ディレクトリ以下のunscreened event file、ae801015010xi0\_0\_3x3n066a\_cl.evt.gz、ae801015010xi0\_0\_5x5n066a\_cl.evt.gz (XIS0)、ae801015010xi1\_0\_3x3n069b\_cl.evt.gz、ae801015010xi1\_0\_5x5n069b\_cl.evt.gz (XIS1)、ae801015010xi3\_0\_3x3n066a\_cl.evt.gz、ae801015010xi3\_0\_5x5n066a\_cl.evt.gz (XIS3)を、衛星の状態を知るためのデータ /auxil/ae801015010.mkfを用いて、 $ELV > 5$ 、 $DYE\_ELV > 25$ 、 $SAA=0$ 、 $T\_SAA > 436$ 、 $COR > 6$ として、スクリーニングした。

- ELV (Earth elevation angle) : 受信衛星の仰角 (度)。仰角とは、水平からその角度分だけ上に向けた角度である。ELV > 5 は地球が衛星の視野に含まれるのを避けるため、仰角 5 度未満のデータは除外するコマンドであり、同様に、DYE\_ELV > 20 は昼間の明るい地球が視野に入るのを避けるため、仰角 20 度未満のデータは除外するコマンドである。
- SAA (South Atlantic Anomaly) : 南緯約 31° のブラジルから大西洋上空にある、磁場にトラップされた荷電粒子 (主に陽子と電子) が異常に多いエリア (南大西洋磁気異常帯)。SAA=0 は SAA を通過する時間帯のデータは除外すること、T\_SAA > 436 は SAA 通過後 436 秒経過後のデータから利用する、というコマンド。
- COR (Cut Off Rigidity) : 鉛直方向から飛来した粒子が地表に到達するために必要な最低限の硬度 (単位は GeV)。COR > 6 は、地磁気の影響を受ける 6 GeV 以下の粒子のイベントは除外する、というコマンド。

## SCI 補正

XIS は放射線のダメージに常にさらされているため、放射線損傷により CCD 内の Si 結晶中に格子欠陥が生じる。それが電荷トラップとして働き、電荷転送効率が低下を引き起こし、XIS のエネルギー分解能が徐々に低下する。そこで、XIS の特徴の 1 つである電荷注入機能を用いて、2006 年 10 月より、CCD に定期的に電荷を注入する Spaced-row Charge Injection (SCI) を行なっている。これにより、電荷トラップは埋められ、X 線のイベントはスムーズに転送できるようになり、エネルギー分解能は回復している。

しかし、注入した電荷は実際のイベントとは別なので、これを取り除くため、SCI の補正を行った。衛星の状態を知るためのデータである hk ファイルと zero-CTI CALDB ファイルを使い、電荷注入した場所にフィルターをかけ、電荷を取り除いたイベントファイルを得た。

## 応答関数作成

検出器は、入射光子による入力パルスとその波高値に対するチャンネルに選別し、チャンネルごとの計数を求めてパルス波高分布を出している。しかし、スペクトル解析では入射光子のエネルギーとエネルギーごとの計数で表わされたスペクトルを求めることが必要である。このパルス波高分布をエネルギースペクトルに変換するためには、検出器に依存した応答関数を用いればよい。そこで、SCI 補正したデータに対応した応答関数である RMF (Redistribution Matrix File)、ARF (Auxiliary Response File) ファイルを作成した。RMF は XIS に入射した X 線に対する量子効率とスペクトルの形を記述するファイルであり、ARF は XIS に入射する直前の入射 X 線エネルギーごとの有効面積を記述するファイルである。

## 4.2.2 HXD

### unscreened event の再プロセス

HXD データのうち、

unscreened event file /hxd /event\_uf/ae801015010hxd\_0\_wel\_uf.evt を  
[http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/caldb/hxd/ae\\_hxd\\_\\*\\*.fits](http://www.astro.isas.jaxa.jp/suzaku/caldb/hxd/ae_hxd_**.fits) を用い  
時刻づけ、PI づけし、イベント選別用のカラム GRADE/DET\_TYPE をうめ、スクリーニングした。

さらに、event file は検出器の不感時間 (dead time) を補正し、PIN\_bgd file は積分時間を補正した。

### 地没データの抽出

衛星が地球を公転しながら観測している間に、視野を地球がおおう時間帯があり、その時間帯のデータを地没データという。このとき、衛星には天体からのシグナルや宇宙背景 X 線放射 (Cosmic X-ray Background : CXB) ではなく、非 X 線バックグラウンド (Non X-ray Background : NXB) が検出される。NXB は、宇宙線 (荷電粒子) が検出器に入射して発生した信号や、荷電粒子と衛星を構成する物質が相互作用することで生じた X 線を検出器が検出したものである。

そこで、配付されているモデルバックグラウンドの精度を見積もるために、地没の時間帯のスペクトルを抽出した。

### CXB ファイル作成

配付されている HXD/PIN bgd event file は、NXB を含んでいるが、CXB の成分は含まれていない。そこで [http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/caldb/hxd/cpf/ae\\_hxd\\_pinflate3\\_20070914.rsp](http://www.astro.isas.ac.jp/suzaku/caldb/hxd/cpf/ae_hxd_pinflate3_20070914.rsp) を使い、宇宙 X 線背景放射のモデル (powerlaw×highcut) から CXB の寄与をシミュレートした fake file を作った。ここで、モデルの式は以下の通り。

- powerlaw =  $K E^{-par1}$  (keV)
  - par1 = 光子指数 (photon index of power law)
  - K = 1keV あたりの光子数 (photons/keV/cm<sup>2</sup>/sec)
- highcut =  $\exp(par1-E)/par2$ 
  - par1 = cutoff energy (keV)
  - par2 = e-folding energy (keV)

表 4.1: XIS nominal での CXB fake file のパラメータのまとめ。

models <sup>a</sup>			
powerlaw		highcut	
Photon Index	Flux (erg/cm <sup>2</sup> /s)	cutoff E (keV)	fold E (keV)
1.29 (fixed)	$(8.72 \pm 0.13) \times 10^{-4}$	$1.0 \times 10^{-4}$ (fixed)	40.0 (fixed)

a : powerlaw×highcut によるフィット。Flux 以外を一定とした。

## 4.3 data analysis XIS

### 4.3.1 X線画像

§4.2.1 で述べたデータ選択を行なったのちに得られた XIS0、1、3 の画像を重ねて図 4.1 に示す。図 4.1 左に SCI の機能により、X 線画像には電荷が注入された場所が赤いすじとなって表れている。電荷を注入した場所にフィルターをかけることで、注入された電荷が取り除かれた X 線画像が得られた (図 4.1 右)。

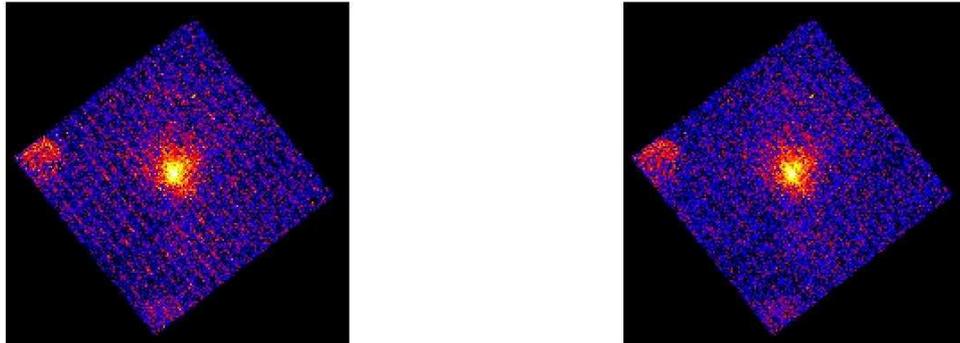


図 4.1: SCI 補正前後の xis1 イメージ。すべてのピクセルを 8 秒周期で読み出している。イメージは天球座標で表わされている。左が補正前、右が補正後。左端にあるのは 較正線源。

### 積分領域

検出器座標 (1024×1024pixel : pixel はデジタル画像を構成する単位) において、source 領域をカバーできる範囲を半径 3 分角の円、CXB の影響と source 領域の広がりを考え、background の領域を 5.5-7.5 分角の円でとった。source 領域は実距離にしては 0.28kpc 相当し、NGC1316 の全体を含む。中心座標はいずれも (755,765) とした。

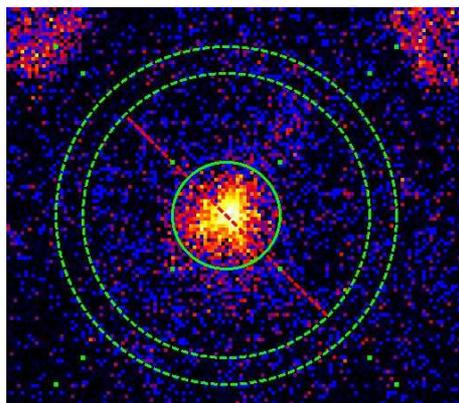


図 4.2: source,bgd 領域をとった様子。画像は XIS0。イメージは検出器座標で表わされている。左端にあるのは較正線源。

### 4.3.2 ライトカーブ

§4.3.1 で定められた積分領域 (source 領域、background の領域) から得られたライトカーブを示す。5760s (地球1周 = 96分) で bin まとめし、DYE-ELV > 25、COR > 6 でデータをスクリーニングした。source (=back ground + signal)、back ground、signal のライトカーブを図 4.3 に示す。荷電粒子帯などによる急激なカウントレートの上昇などがなく、データスクリーニングが正しく行なわれたことがわかる。検出器ごとの  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  (残差二乗和/自由度) と RMS (Root Mean Square : 平均二乗偏差) を表 4.2 にまとめる。この結果から、天体の明るさの有意な時間変動は見られなかったことがわかる。

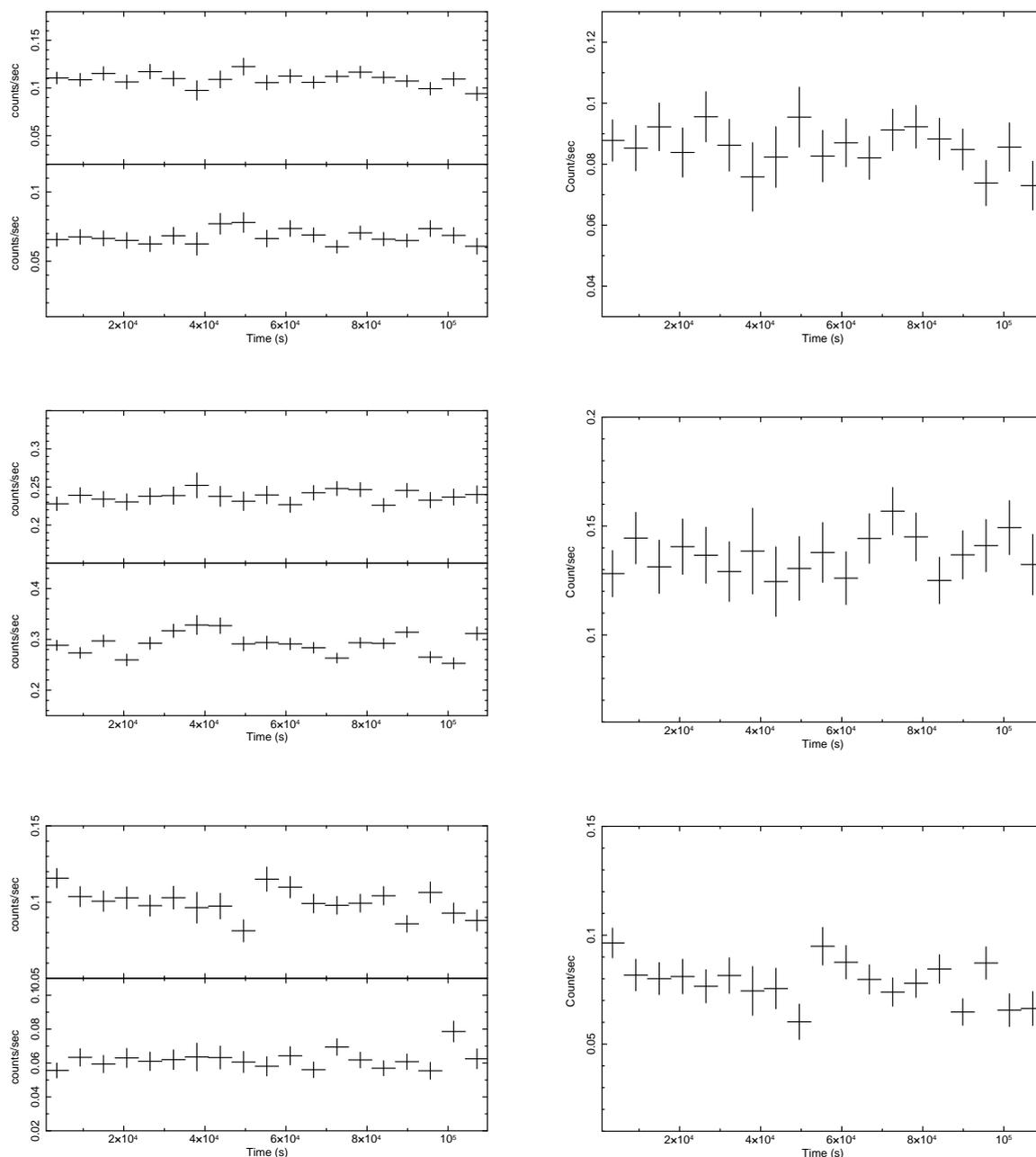


図 4.3: XIS の検出器ごとのライトカーブ。上から XIS0、XIS1、XIS3。左側:(上)source、(下)background。右側:天体からの signal。

表 4.2: source、background、signal のライトカーブの検出器ごとの  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  と RMS。

	source			background			signal		
	XIS0	XIS1	XIS3	XIS0	XIS1	XIS3	XIS0	XIS1	XIS3
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	12.0/18	9.56/18	30.2/18	10.9/18	49.4/18	19.3/18	9.86/18	10.7/18	30.1/18
RMS	0.081	0.062	0.061	0.108	0.060	0.107	0.123	0.130	0.088

これらの XIS0,1,3 のデータにずれはないので、足し合わせたライトカーブを作成した。これらからも、 $\chi^2/\text{d.o.f.}$  と RMS から明るさの有意な時間変動は見られなかった (図 4.4、表 4.3)。

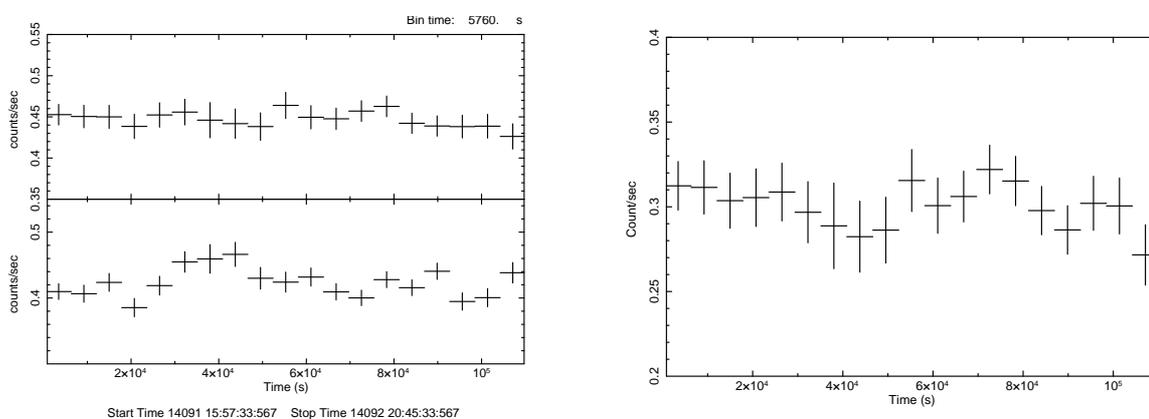


図 4.4: XIS0,1,3 のデータを足し合わせたときのライトカーブ。上から source、bgd、signal。

表 4.3: XIS0,1,3 のデータをを足し合わせた source、background、signal のライトカーブの  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  と RMS。

	source	bgd	signal
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	8.16/18	31.9/18	10.3/18
RMS	0.046	0.016	0.076

### 4.3.3 スペクトル解析

次に、検出器 XIS0、1、3 ごとにスペクトルをつくり、Chandra での観測データ解析 (伊藤 2005) で使用された以下のモデルを使用してモデルフィットした (図 4.5)。このとき、mekal が 1 成分のときと 2 成分の場合で比較した。

- XIS のモデル
  - 中性子連星のスペクトルの模擬のモデル (bremss)
  - 銀河中の 2 温度プラズマのモデル (mekal)
  - 銀河系による星間吸収を補正するモデル (wabs)、 $wabs=2.0 \times 10^{20} \text{ atm/cm}^2$  で値を固定。

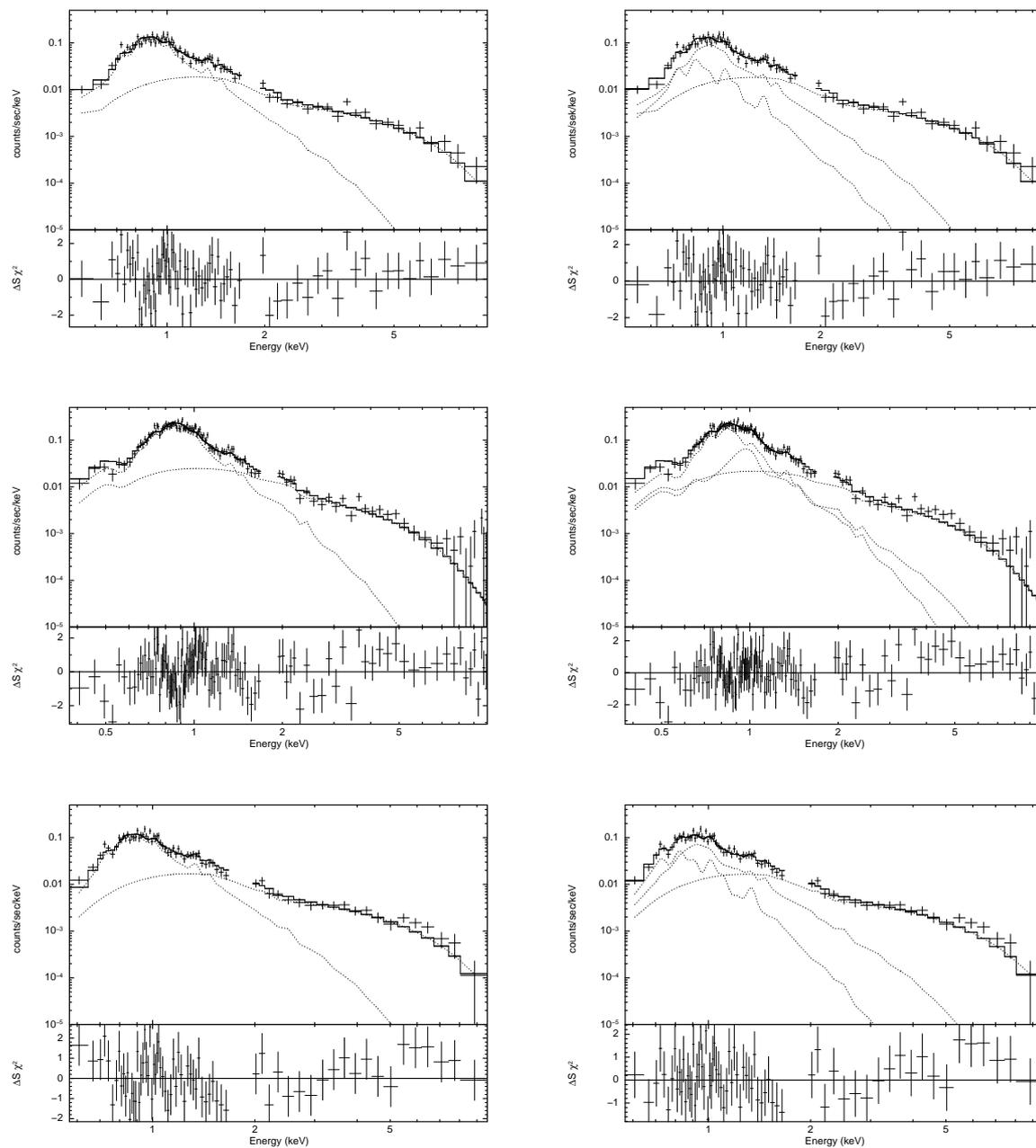


図 4.5: モデルフィット。上から XIS0、XIS1、XIS3。左側が  $(bremss+mekal) \times wabs$ 、右側が  $(bremss+mekal+mekal) \times wabs$ 。

表 4.4: makal 1 成分のときの XIS0、1、3 のスペクトルのモデルフィッティングのまとめ。

models <sup>a</sup>					
mekal			bremss		$\chi^2/\text{d.o.f.}$
kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)		kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)	
XIS0	0.64±0.01	(1.38 ±0.08)×10 <sup>-12</sup>	5.0(fixed)	(2.50 ±0.26)×10 <sup>-13</sup>	95.9/74
XIS1	0.63±0.01	(1.45 ±0.06)×10 <sup>-12</sup>	5.0(fixed)	(2.54 ±0.24)×10 <sup>-13</sup>	149.1/118
XIS3	0.63±0.01	(1.55 ±0.09)×10 <sup>-12</sup>	5.0(fixed)	(2.43±0.26)×10 <sup>-13</sup>	79.6/68

a : (mekal(高温成分)+bremss)×wabs によるフィット。Abundance(重元素比)、bremss kT(keV) と wabs nH は一定とした。

表 4.5: makal 2 成分のときの XIS0、1、3 のスペクトルのモデルフィッティングのまとめ。

models <sup>a</sup>					
mekal			bremss		$\chi^2/\text{d.o.f.}$
kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)		kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)	
XIS0	0.44±0.20	(5.20 ±16.5)×10 <sup>-13</sup>	5.0(fixed)	(2.46±0.25)×10 <sup>-13</sup>	90.2/72
	0.70±0.15	(9.94 ±16.5)×10 <sup>-13</sup>			
XIS1	0.56±0.17	(1.10 ±2.16)×10 <sup>-12</sup>	5.0(fixed)	(2.22±0.37)×10 <sup>-13</sup>	135.3/116
	0.94±0.54	(4.74 ±21.8)×10 <sup>-13</sup>			
XIS3	0.35±0.04	(1.03 ±0.33)×10 <sup>-12</sup>	5.0(fixed)	(2.38±0.259)×10 <sup>-13</sup>	62.9/66
	0.75±0.04	(9.23 ±1.98)×10 <sup>-13</sup>			

a : (mekal(高温成分)+mekal(低温成分)+bremss)×wabs によるフィット。Abundance、bremss kT(keV) と wabs nH は一定とした。

- bremss のパラメータ

- par1 = プラズマの温度 (keV)
- $K = (3.02e^{-15}/4\pi D^2) \int n_e n_I dV$  : D = 天体までの距離 (cm)、 $n_e$  = 電子密度 (cm<sup>-3</sup>)、 $n_I$  = イオン密度 (cm<sup>-3</sup>)

• mekal のパラメータ

- par1 = プラズマの温度 (keV)
- par2 = 水素密度 ( $\text{cm}^{-3}$ )
- par3 = 重元素比
- par4 = 赤方偏移 ( $z$ )
- par5 = 重元素比
- $K = (10^{-14}/4\pi D_A(1+z)^2) \int n_e n_I dV$  :  $D_A$  = 天体までの角距離 (cm)

XIS0、1、3 それぞれの fit 結果が一致することが確認できたので、次に XIS0,1,3 のスペクトルを brems、mekal、wabs モデルを使い、同時フィットした。このとき、mekal が 1 成分のときとも比較したが 2 成分の方がよくフィットした。

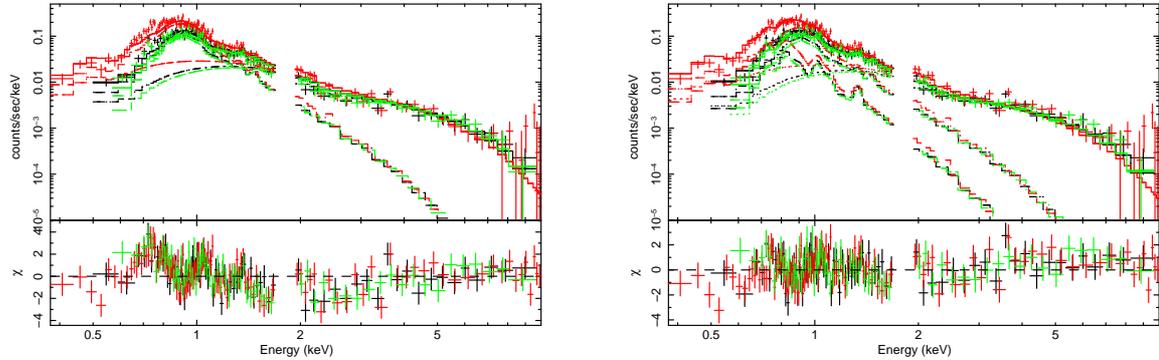


図 4.6: XIS0,1,3 で同時フィット。緑:XIS0、黒:XIS1、赤:XIS3。左が mekal1 成分、右が mekal2 成分。

表 4.6: XIS による X 線スペクトルのモデルフィッティングのまとめ。

model	mekal		brems		$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	kT (keV)	Flux ( $\text{ergs}/\text{cm}^2/\text{s}$ )	kT (keV)	Flux ( $\text{ergs}/\text{cm}^2/\text{s}$ )	
I <sup>a</sup>	$0.70 \pm 0.08$	$(1.24 \pm 1.55) \times 10^{-12}$	5.0(fixed)	$(2.96 \pm 0.26) \times 10^{-13}$	518.8/266
II <sup>b</sup>	(高温成分) $0.44 \pm 0.03$	$(5.42 \pm 0.72) \times 10^{-13}$	5.0(fixed)	$(2.40 \pm 0.27) \times 10^{-13}$	312.2/264
	(低温成分) $0.70 \pm 0.13$	$(1.01 \pm 1.73) \times 10^{-12}$			

a : (mekal(高温成分)+brems)×wabs によるフィット

b : (mekal(高温成分)+mekal(低温成分)+brems)×wabs によるフィット

a、b 共に Abundance = 0.3、brems kT(keV) と wabs nH は一定とした。

## 4.4 data analysis HXD

### 4.4.1 ライトカーブ

event file から得た地没のライトカーブ、配付されている PIN\_bgd file から得たライトカーブ、再プロセスした event file から抜きだした pseudo event のライトカーブを以下に示す (5760s で bin まとめ)。

HXD のエネルギー帯域では、多くの場合、観測された信号中におけるバックグラウンドの寄与が無視できない。バックグラウンドの大部分を占める検出器由来のバックグラウンド、すなわち Non X-ray background(NXB) を観測ごとにモデル化し、

ftp://legacy.gsfc.nasa.gov/suzaku/data/background/にて公開している。pseudo event とは、0.25Hz で Well ユニットから出されている疑似信号で、実際の Dead time の影響を反映して処理されるレートが変化する。このライトカーブの比較から、model bgd/地没データの平均値の比は 1.02 となり、model bgd は地没データより 2% 多く見積もられた。

表 4.7: 地没データ、model bgd のライトカーブのまとめ。

	model bgd	地没データ	model bgd/地没データ
Average	0.2434	0.2386	1.02
標準偏差	$0.6341 \times 10^{-1}$	$0.5509 \times 10^{-1}$	

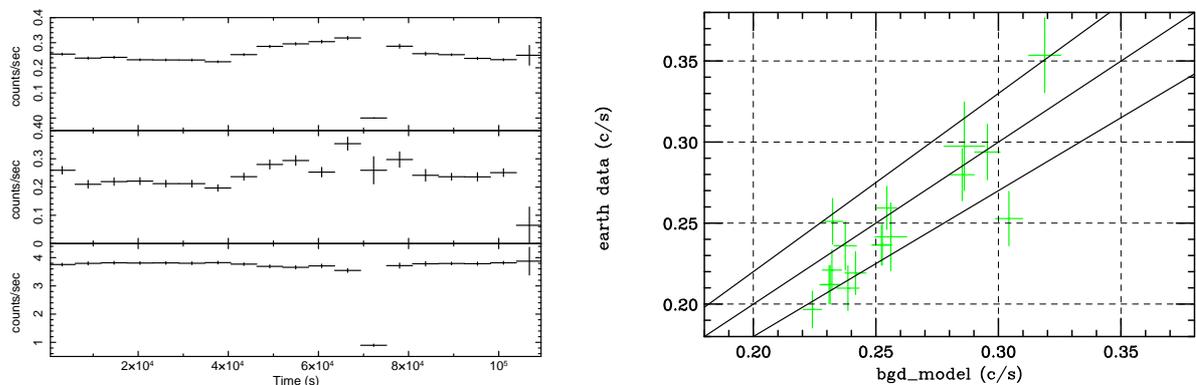


図 4.7: HXD のライトカーブ。左図: 上から model bgd、地没データ、pseudo event。右図: model bgd と地没データの比較。横軸が model bgd、縦軸が地没データ。

図 4.7 の地没データ、pseudo event のライトカーブから、明らかに動作に異常がある 2bin が見られる。この動作の異常は、データレートが変わる直前であったことや、積分時間が足りなかったことが原因であると考えられる。そこで、この 2bin の時間帯 (UT 2006/12/23 11:20-11:45、20:45-20:52) を取り除いた地没データのライトカーブ、model bgd のライトカーブ、model bgd/地没データのライトカーブを以下に示す (5760s で bin まとめ)。このライトカーブの比較から、model bgd、地没データの平均値の比は 1.04 となり、model bgd が地没データより 4% 多く見積もられた。”SUZAKU-MEMO-2007-09”より、model bgd には  $\pm 5\%$  の不定性があることがわかっているので、model bgd が地没データより 4% 多く見積もられとことは model bgd の不定性によるものだと言える。

表 4.8: 2bin 取り除いて作成したライトカーブのまとめ。

	地没データ	model bgd	model bgd/地没データ
Average	0.247	0.257	$1.041 \pm 0.018$
標準偏差	$0.388 \times 10^{-1}$	$0.284 \times 10^{-1}$	

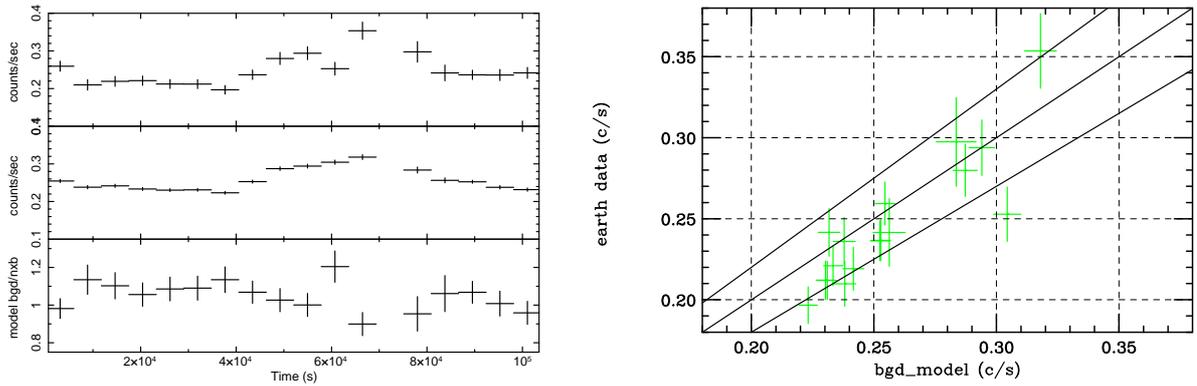


図 4.8: 2bin 取り除いて作成したライトカーブ。左図：上から model bgd、地没データ、pseudo event。右図：model bgd と地没データの比較。横軸が model bgd、縦軸が地没データ。斜線は上から model bgd が地没データに対して 10% 増、1 : 1、10% 減のライン。

続いて、衛星が天体を見ている時間帯 (on-source) の source、model bgd、source/bgd のライトカーブを作成した。図 4.9 のライトカーブから、source の方が bgd よりも約 10% カウントレートが高いことがわかる。

また、on-source の時間帯の signal のライトカーブを作成した。平均カウントレートは 0.030 counts/sec となった。ここで、4.2.2 で作成した CXB の寄与をシミュレートした fake file の平均カウントレートは 0.025 counts/sec であり、signal の平均カウントレートは CXB の平均カウントレートとほぼ等しいことがわかった。

以上の結果から、配付されている bgd に対して source のカウントレートが約 10% 高いのは、source に CXB の寄与が含まれているためだと考えられる。

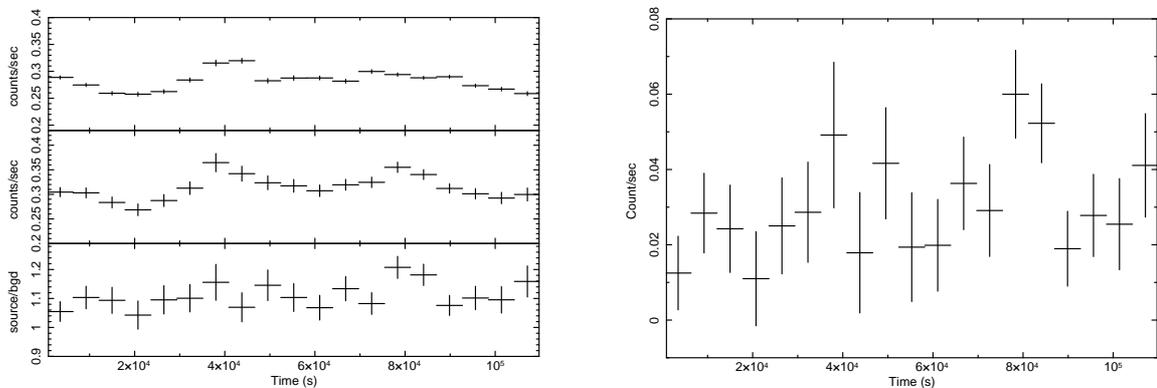


図 4.9: on-source の時間帯のライトカーブ。左図：上から bgd、source、source/bgd。右図：天体からの signal。カウントレートは 0.030 counts/sec。

## 4.4.2 XIS との同時スペクトル解析

### スペクトルの比較

配付されている model bgd と、event file から得た地没データの比較を行なった。これより、model bgd は実際の event で検出される bgd と大きなズレはないことがわかった。前節のライトカーブの bgd の比較と総合して考えると、HXD のスペクトル解析では、配付されている bgd に加えて、宇宙 X 線背景放射の寄与も含めて解析していくことが適切である。

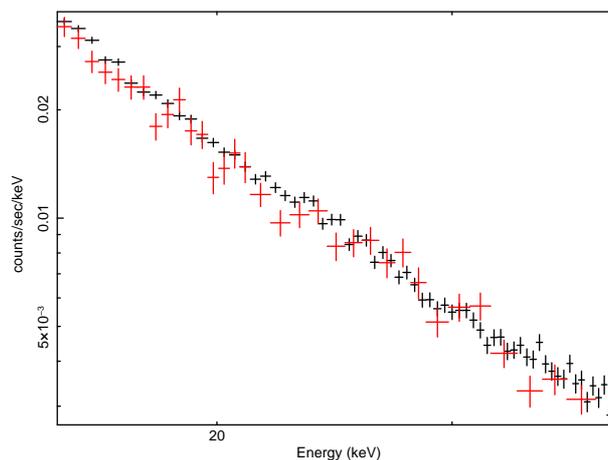


図 4.10: model bgd と地没 bgd のスペクトル。黒：model bgd、赤：地没 bgd

### モデルフィット

XIS と HXD のデータ解析によって得られたスペクトルを同時フィットした。使用したモデルは以下のとおりである。

- §4.3.3 で用いた NGC1316 銀河の X 線スペクトルモデル
  - 中性子連星のスペクトルの模擬のモデル (bremss)
  - 銀河中の 2 温度プラズマのモデル (makal) を 2 つ
  - 銀河系による星間吸収を補正するモデル (wabs)

に HXD には差し引いていない宇宙 X 線背景放射のモデル (powerlaw×highcut) とローブ成分の混入を模擬するモデルを加えてスペクトルを記述する。

さらに、隠れているかもしれない AGN 放射を評価するために、XIS、HXD のデータ両方に、天の川銀河の吸収を受けたシンクロトロンによる非熱的放射のモデル (pegpowerlaw×wabs) を加えてモデルフィットした。また、AGN の周りのガスによる固有の吸収を考えた場合でもモデルフィットした。

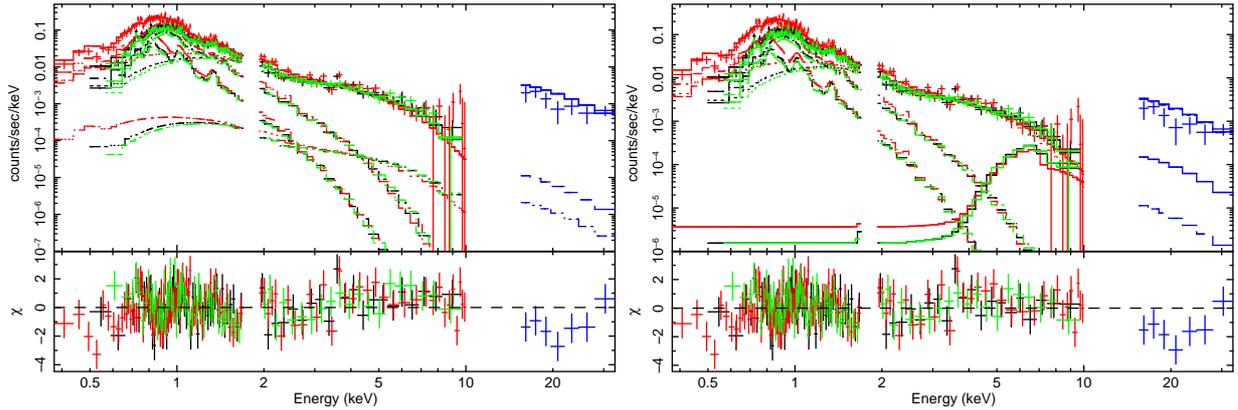


図 4.11: XIS と HXD のスペクトルを同時フィット。緑: XIS0、黒: XIS1、赤: XIS3、青: HXD。左図は天の川銀河の吸収を考慮した場合のスペクトル。右図は NGC1316 自身の銀河吸収を考慮した場合のスペクトル。

表 4.9: ローブの混入成分の模擬モデルのパラメータ。

HXD models		
pegpowerlaw		
Photon Index	Flux density (micro-Jy)	min energy = max energy (keV)
1.83	$1.35 \times 10^{-3}$	10

表 4.10: XIS と HXD による X 線スペクトルの同時フィッティングのまとめ。

pegpowerlaw		HXD models				
Photon Index	Flux (erg/cm <sup>2</sup> /s)	wabs nH	Upper limit	$\chi^2$ /d.o.f.	luminosity (erg/s)	
I <sup>a</sup> 1.80 (fixed)	$8.26 \times 10^{-15}$	$2.0 \times 10^{20}$	$2.56 \times 10^{-2}$	329.1/275	$1.06 \times 10^{39}$	
II <sup>b</sup> 1.80 (fixed)	$7.52 \times 10^{-13}$	$10^{24}$	1.09	322.8/275	$4.52 \times 10^{40}$	

XIS の値はベストフィット時の値で固定した。

a: 天の川銀河の吸収のみを考慮した場合のモデルフィット。

b: NGC1316 自身の銀河吸収を考慮した場合のモデルフィット。

ここで、光度 (Luminosity) は、星の表面の微小面積  $dS$  が放射している全輻射流束  $F$  (ergs/sec/cm<sup>2</sup>) を、星の表面全体について積分したものであり、 $L = \int F dS = 4\pi R^2 F$  で求められる。

また、"SUZAKU-MEMO-2007-09" より model bgd には  $\pm 5\%$  の不定性があり、 $1\sigma$  あたりの系統誤差は約 3.2% 含まれている。XSPEC を用いて error を求めると  $2.706\sigma$  なので、model bgd に含まれる系統誤差は約 8.66% となる。この系統誤差を考慮して求めた Flux の上限値が表 4.10 の Upper limit であり、Flux の上限値を用いて luminosity を求めた。

## 第5章 「すぎく」と Chandra の比較

X線天文衛星 Chandra による観測データのスペクトル解析で用いられたモデルは、  
diffuse(gas) = mekal (kT~0.5-0.6keV、abundance = 1.0 fix)

diffuse(LMXB) = brems (kT~3-5keV)

である。今回の「すぎく」データ解析で用いたモデルと比較すると、2温度のガスが0.6keVにまとめられ、brems の best fit 値が、5keV より低めの3keV程度で best fit を採用しているため、AGNの見積もりを大きくしている可能性がある。そこで、Chandraのデータ解析で用いられたモデルで「すぎく」のデータが説明できるかどうかを、以下の2つの場合で確認した。

(I) mekal (kT=0.5-0.6) + brems (kT=3-5keV)

(II) mekal (kT=0.5-0.6) + brems (kT=3-5keV) + powerLaw (Photo Index = 1.70 fix)

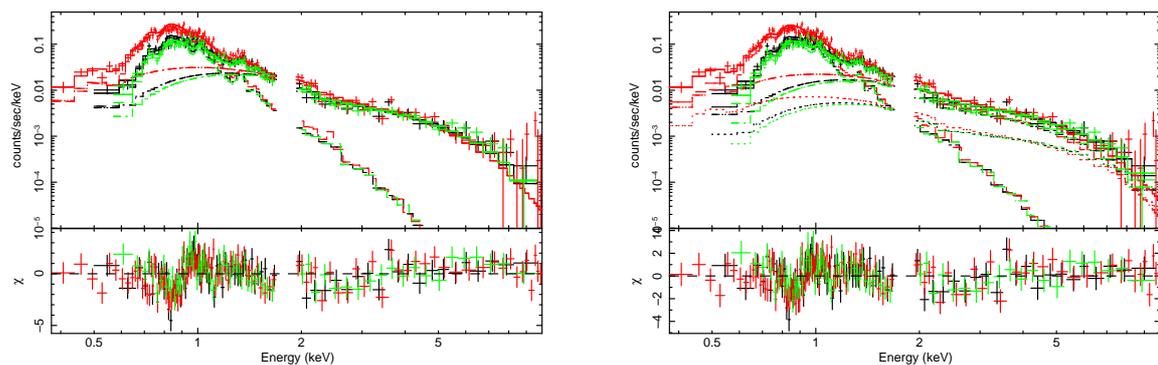


図 5.1: Chandra のモデルを用いた、XIS0,1,3 で同時フィット。緑:XIS0、黒: XIS1、赤:XIS3。左が mekal+brems。右が mekal+brems+powerlaw。

表 5.1: Chandra のモデルを用いたモデルフィッティングのまとめ。

model	models				
	mekal		brems		$\chi^2/\text{d.o.f.}$
	kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)	kT (keV)	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)	
I <sup>a</sup>	0.60±0.11	(8.10-8.62)×10 <sup>-13</sup>	4.00±0.29	(7.26-7.89)×10 <sup>-13</sup>	396.8/265
II <sup>b</sup>	0.60±0.13	(7.89-8.40)×10 <sup>-13</sup>	4.00±1.18	(5.21-5.66)×10 <sup>-13</sup>	353.4/264

models			
powerlaw			
model	Photo Index	Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)	Total Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s)
I <sup>a</sup>	-	-	(15.4-16.5)×10 <sup>-13</sup>
II <sup>b</sup>	1.70 (fixed)	(2.01-22.0)×10 <sup>-13</sup>	(15.1-16.3)×10 <sup>-13</sup>

a : (mekal+bremss)×wabs によるフィット

b : (mekal+bremss+powerlaw)×wabs によるフィット

a、b 共に Abundance = 0.1、wabs = 2.0 × 10<sup>20</sup> nH で一定とした。

以上の結果と比較するため、「すぎく」のデータ解析から得られた各コンポーネントの Flux を以下にまとめる。この Flux は、AGN の固有の吸収がある場合の XIS・HXD 同時フィットで得られた結果と同じものである (4.4.2)。

表 5.2: 「すぎく」による XIS・HXD 同時フィットのまとめ。

Flux (ergs/cm <sup>2</sup> /s) <sup>a</sup>			
mekal	bremss	pegpowerlaw	Total Flux
10.1×10 <sup>-13</sup>	6.43×10 <sup>-13</sup>	(0.12-0.15)×10 <sup>-13</sup>	(16.61-16.64)×10 <sup>-13</sup>

a : 求めたエネルギー帯域は 0.3-8.0 keV

表 5.1、5.2 を比較すると、両者の Total Flux はほぼ一致し、各コンポーネントの Flux においても、仮に、AGN 成分が LMXB(Bremss) に含まれると考えれば、Chandra の結果は「すぎく」の結果で矛盾なく説明できることがわかる。

## 第6章 議論

### 6.1 熱制動放射と熱いプラズマ

一般に銀河からの X 線放射は、中心部 AGN からの非熱的放射と銀河内に広がっているガスからの熱的放射、そして中性子連星系などからの個々の X 線源からの放射がみられる。「すざく」搭載の XIS の観測データのスペクトル解析では、Chandra による観測データのスペクトル解析 (伊藤 2005) で用いられたモデル、mekal モデルと bremsstrahlung モデルを用いてフィットした。その結果、mekal モデル 1 つより 2 つ使用した場合の方がよくフィットした。つまり、XIS の観測データから、高温のプラズマが 2 成分観測されたと解釈できる。Chandra の解析結果では、NGC1316 銀河とその東、南の領域に  $kT = 0.5\text{keV}$  のプラズマ、銀河周辺領域には広がった  $kT = 0.3\text{keV}$  のプラズマが存在することがわかっている。つまり、「すざく」の観測データの解析から、Chandra の観測と一致する結果が得られた。

### 6.2 AGN 成分

AGN からの放射は、電子と磁場の相互作用から発生するシンクロトロン放射 (Synchrotron Radiation) による放射と電子と光子の相互作用から発生する逆コンプトン散乱 (Inverse Compton Scattering) による放射である。スペクトルはエネルギーのべき型関数 (power law)  $E^{-\alpha}$  で表わされる。

今回の「すざく」による観測の XIS、HXD データのスペクトル解析結果を、AGN 成分を光子指数  $\Gamma=1.8$  のべき型スペクトルで評価した。中心核に固有の吸収体がないと仮定した場合、中心領域の光度の上限値は  $1.1 \times 10^{39}\text{ergs/s}$  となった。これは、Chandra による観測 (Kim & Fabbiano 2003) で検出された AGN の光度  $L_X=5 \times 10^{39}\text{ergs/s}$  よりも小さな上限値が見積もられた。太陽質量程度の星のエディントン限界光度は  $L \sim 10^{38}\text{ergs/s}$  であり、エディントン光度は質量に比例する。よって、この光度は「ULX」、あるいはブラックホール連星系程度のものであり、この解析結果から得られた光度の上限値からは NGC1316 の AGN が現在も活動しているとは考えにくい。

### 6.3 隠された AGN 成分

中心核の周りに固有の吸収体が存在する場合、つまり、 $10\text{keV}$  以下がほとんど吸収されるような水素柱密度  $N_H \sim 10^{24}\text{atm/cm}^2$  もの強い吸収がある場合を考える。このとき、中心領域の光度は  $L_X \sim 4.5 \times 10^{40}\text{ergs/s}$  以下と、AGN としては非常に小さな上限値が得られた。ASCA、ROSAT による観測 (Iyomoto et al. 1998) では、 $N_H \sim 10^{24}\text{atm/cm}^2$  の吸収を受けた AGN の光度の上限値は  $L_X=2 \times 10^{40}\text{ergs/s}$  と見積もられている。つまり、「すざく」による観測で、ASCA、ROSAT による観測と矛盾しない結果が得られたといえ、強い吸収を受けた AGN が隠れていたとしても、その活動は非常に弱い。

## 第7章 まとめ

本研究では、電波銀河 NGC1316 について、X 線天文衛星「すざく」による観測データの解析結果から AGN の有無を検証した。XIS による観測データの解析の結果から、AGN の特徴である顕著な時間変動は見られず、銀河中には 2 温度プラズマが存在することが確認された。HXD による観測データの解析の結果から、中心核に固有の吸収体がないと仮定した場合、中心領域の光度の上限値は  $L_X < 1.1 \times 10^{39} \text{ ergs/s}$  が得られた。また、中心核の周りに 10keV 以下がほとんど吸収されるような固有の吸収体が存在すると仮定した場合、中心領域の光度の上限値は  $L_X < 4.5 \times 10^{40} \text{ ergs/s}$  が得られ、AGN としては非常に小さな上限値が見積もられた。以上の結果から NGC1316 の AGN はいたとしても活動は非常に弱いと考えられる。よって、「すざく」の観測結果から AGN が終息していることが推定することができ、これは NGC1316 の AGN の活動の歴史を調べる上で重要な要素の一つとなる結果となった。

## 参考文献

- [1] 伊東 光一 「X 線観測による電波銀河 Fornax A の中心核活動の研究」  
埼玉大学 修士論文 2005
- [2] Iyomoto et al. , 1998 ,ApJ 503
- [3] Kim and Fabbiano , 2003 , ApJ 586
- [4] Suzaku First Step Guide Version 3.00
- [5] 小山 勝二、嶺重 慎、” シリーズ現代の天文学8 ブラックホールと高エネルギー現象”、日本評論社
- [6] 高原 文郎 ” 岩波講座 物理の世界 天体高エネルギー現象”、岩波書店
- [7] 中本 創 「X 線観測衛星 『すぎく』搭載 XIS 検出器のバックグラウンドの研究」  
広島大学 卒業論文 2006
- [8] *Chandra* , [http://chandra.harvard.edu/photo/2007/agns/more.html#accretiondisk\\_torus](http://chandra.harvard.edu/photo/2007/agns/more.html#accretiondisk_torus)
- [9] *NRAO* , <http://www.nrao.edu/imagegallery/php/level3.php?id=501>

# 謝辞

本研究を行なうにあたり、指導教官の田代先生には大変お世話になりました。勉強不足の私に、本研究の意義から解析方法、宇宙物理にいたるまで、懇切丁寧に教えていただき、非常に感謝しております。

また、解析をするにあたって、同研究室の瀬田さんには何度も相談にのっていただきました。行き詰まったときにはすぐに、自分の仕事を中断してまで助けていただくことが幾度とあり、迷惑をかけてばかりの1年でした。同じく AGN チームの矢治さんには、テクニカルな面で助けていただくことが多々ありました。修論でお忙しい中、時間をさいて多くのアドバイスをしていただきました。理化学研究所の磯部さんには、解析をするにあたっての基礎知識や宇宙物理を教えていただいたり、解析方法のアドバイスをたくさんしていただきました。本当にありがとうございました。

そして、研究室の先輩方、4年生の皆さんに支えられ、本当に恵まれた環境で卒業研究をすることが出来たことに感謝しています。皆さん、本当にありがとうございました。