# 日本の X 線天文学の歩み

### 長瀬 文昭\*

## Progress of Japanese X-ray Astronomy

Fumiaki NAGASE\*

### 1. はじめに

20 世紀半ばまでは可視光の天体望遠鏡を用いるのが 遠方の宇宙・天体を観測する唯一の方法で、人類の遠方 の宇宙を見る目は電磁波の中でもごく狭い可視光の領域 に限られていた. ところが1930年代には電波望遠鏡が開 発され私たちは電波によって宇宙を見る新しい目を獲得 した. そして1960年代には赤外線検出器の発達で赤外線 望遠鏡による宇宙の探査が可能になった. 一方、X 線は 地球大気により吸収されるため本格的なX線観測は地球 大気が十分薄くなる高度300 km以上の大気圏外に出て行 う必要があり、人工衛星を科学観測に用いることが可能 となった1970年代まで待たねばならなかった. 現在では 光 (可視光)、電波、赤外線、X線の4つの電磁波領域が 天文観測の4つの支柱となっている. 特に X 線観測は高 温、高エネルギー、大重力場の極限状態で激しく活動す る現象を観測する上で重要な手段となった. そしてこれ らの全電磁波領域を駆使した観測を行うことで、冷たい 宇宙から熱い宇宙まで、星の誕生から終焉まで、宇宙の 進化の全過程を深く理解することができるようになっ

本稿ではX線天文学開闢以来、欧米に伍して研究の最前線を 走り続ける日本のX線天文学研究の発展を追い、各衛星の成果 を概観する.

### 2. X線天文学の幕開け

米国マサチュッセツ工科大学のロッシ、ジャッコーニらは 1962 年に別の観測目的でX線検出器を搭載したロケットを打ち上げ、そのロケットの姿勢制御の途上で偶然明るいX線天体を発見した (1). 幸運にもこのX線源

\*教授 物理学教室

Professor, Institute of Physics

は今でも全天で一番明るいX線源である、さそり座 X-1 であった.これがX線天文学の幕開けである.

当時X線用の結像望遠鏡はまだ開発されていなかった ので、日本の小田稔らはすだれコリメーターという特殊 な技術を用いて、気球観測によりこのX線天体の位置を 高精度で決定しました. しかしその方向には可視光望遠 鏡では暗く青白い際立った特徴のない星が見えるのみで あった (2). この不思議なX線星の発見は世界の天体物 理学者を沸き立たせた. これに刺激された実験家たちは 気球やロケットを用いて白鳥座 X-1 やおうし座のかに星 雲などからX線を放射する第2、第3のX線天体を次々 に発見した. 一方、理論家たちはこの予想もしなかった 強いX線放射を可能とする天体は中性子星やブラックホ ールを含む近接連星系(今ではこれをX線連星という) であることを明らかにした. ここに私たちは遂に、中性 子星やブラックホールという、当時は理論的な可能性と してのみ議論されていた相対論的高密度星の観測的研究 を可能としたのである.

ジャッコーニらはこのX線源発見の数年前(1957年)に成功していた人工衛星に注目し、いち早く衛星搭載用X線観測器を製作し、これを人工衛星に搭載して全天のX線天体を探査することを計画しました。この計画は1970年12月のウフル衛星の打ち上げとなって実現しました。31.そしてウフル衛星はその後数年にわたり全天を隈なく走査し、330個以上のX線源を観測し、初めてX線天体カタログを作成しました。ここにX線による宇宙・天体の観測的研究が天文学の一分野として本格的にスタートしたのでした。

### 3. 日本の X 線天文学

ちょうどこの頃名古屋大学の早川幸男は当時素粒子・宇宙線の理論的な研究の傍ら、新しい電磁波領域で天体

物理学の分野を開拓することを模索していた.この頃早 川はX線よりも宇宙線が銀河面物質との相互作用で生成 されるガンマ線の方が観測の可能性が高いと考え、名古 屋のグループでは宇宙ガンマ線の気球観測を始めていた. 一方当時宇宙線共同研究のためマサチュッセツ工科大学 に滞在していた小田稔は、最初に発見されたX線天体で あるさそり座 X-1 の発見の過程をつぶさに見聞していた. もともと友人であった二人はこのX線星の発見が新しい 天文学分野を開拓するものと予感し、直ちに日本で観測 的X線天文学の分野を開拓することを決意した. ちょう どその頃東京大学の附置研究所として宇宙航空研究所が 設立された直後であり、小田稔は帰国しその教授に着任 し、研究グループを立ち上げると共に、宇宙X線天体の 観測に着手した. ここに日本のX線研究グループが宇宙 研と名古屋大学において発足した. 当時両先生の周辺に は、以後の日本のX線天文衛星計画を先導しその製作・ 運用を支えた田中靖郎、宮本重徳、槙野文命、小川原嘉 明、松岡勝、山下公順ら、優秀な実験物理学者がメンバ ーとして参加していた. 筆者もこのグループに所属して いたが、現在日本のX線天文グループを主導している小 山勝二、井上一、牧島一夫、国枝英世、常深博、大橋隆 哉らは当時若手研究者、大学院生として実験研究に加わ っていた.

日本最初のX線天文衛星「はくちょう」は「ウフル」 に遅れること8年余の1979年2月に打ち上げられた(4). この間はX線天文衛星打ち上げラッシュに沸く欧米を横 目に、気球やロケットの観測で科学的な成果を出して対 抗していく苦しい時代が続いた.しかし、「はくちょう」 の打ち上げに成功して以降は1983年の「てんま」、1987 年の「ぎんが」、1993年の「あすか」、2005年の「すざく」 と継続的にX線天文衛星を打ち上げることが出来た. 日 本のX線天文グループは、「はくちょう」ではすだれコリ メーターを用いた中性子星X線連星/X線バースターの 研究、「てんま」では蛍光比例計数管によるX線天体から の鉄輝線の研究(5)、「ぎんが」では大面積低ノイズ比例計 数管による活動銀河核・銀河団の研究(6)、と衛星ごとに 特徴のある観測で成果を挙げてきた、そして「あすか」に より日本のX線天文学はまさに世界の最前線に躍り出た (7).この小型衛星ながらグループが自ら開発した新しい 検出器を搭載した、1台1台特徴のある衛星を継続的に 打ち上げていく日本の X 戦グループの方策は NAS や ESA からも称賛を受けた.ことに「ぎんが」、「あすか」衛星に よる観測が続いた、1980 年代後半から 1990 年代にかけ ては、欧米の衛星計画が停滞する中にあって、日本の衛 星による観測が世界のX線天文学を支えた時期でもあっ

た.

現在は「すざく」が日本の現役 X 線天文衛星として稼働中である<sup>(8)</sup>.この「すざく」衛星は 2000 年に米国の Chandra 衛星、ESA の XMM-Newton と並んで打ち上げられ 相補的な役割を果たすはずであったが、ロケットの打ち上げ失敗で5年の遅延を生じた.また、この衛星を特徴づける最重要検出器である X 線カロリメーターを冷却系の 故障で失ったことは痛手であった.しかし、Chandra、 XMM-Newton という欧米の強力なライバルが稼働している中で、残った検出器 (X 線 CCD カメラと高エネルギーX 線検出器)を使って懸命に観測を続け、新たな成果も多数生み続けている.

これら5代にわたる日本のX線天文衛星の構造、特徴、 主な成果を簡単に説明した後、特に最近の日本の衛星「あ すか」、「すざく」によって得られ、話題になっている成 果を2,3選んでやや詳しく紹介する.

### 3.1 初代 X 線天文衛星「はくちょう」

日本の最初の 人工衛星「おお すみ」は 1970 年2月11日に鹿 児島県内之浦町 の実験場から打 ち上げられた. その後「はくち ょう」の前身で ある CORSA-a は「しんせい」、 「でんぱ」、「た いよう」に続く 第4号科学衛星 として 1975 年 に打ち上げられ

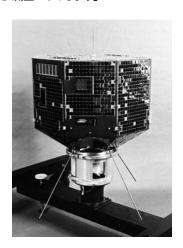


図 1 日本初の X 線天文衛星「は くちょう」の写真

た.この時打ち上げはロケット制御に関するトラブルで 衛星の打ち上げが失敗に終わり、急きょ衛星を CORSA-b として再製作して 1979 年 2 月 21 日に成功裏に打ち上げ られ、「はくちょう」と命名された.これが日本初の X 線 天文衛星の誕生である  $^{(4)}$ .

この衛星は直径 82 cm、総重量 96 kg と、最近の衛星に 比べれば大変小さな衛星であった.この衛星に搭載され た主要検出器は薄膜窓比例計数管の前面にモジュレーションコリメーターを取り付けたものであった.その考案 者である小田稔はすだれ越しに庭を眺めていてこのアイデアを思い至ったことから、日本ではすだれコリメータ ーと愛称で呼んだこのすだれコリメーターは米国の衛星でも適用されたが、その翌年 1980 年に米国 NASA で打ち上げられた本格的な反射集光系をもつX線望遠鏡に対して、より高エネルギーの X 線を広い視野で観測し、高い精度で X 線源の位置を決定できることであった。当時日本ではまだ3軸姿勢制御システムが衛星搭載用としては完成しておらず、スピン安定型の衛星であったが、「はくちょう」ではこれを逆に利用することにより、Rotational modulation Collimator を構成し、視野内の複数のX線点源の位置をフーリエ逆変換の手法で一義的に決定できる計測器となった。

「はくちょう」はその検出感度の限界から観測対象とした X線源は主に銀河系内の X線バースターや X線パルサーであった。ことに X線バースター(今では中性子星と低質量の伴星で構成される低質量 X線連星に分類される)の観測により、中性子星の特性とそこへ降着する物質の状態を解明に貢献した。

### 3.2 2代目衛星「てんま」衛星

「てんま」衛星は「はくちょう」の寿命が尽きる直前を狙って1983年2月20日に打ち上げられた(5).通常500~600 km の高度の低い軌道に打ち上げられる天文衛星は5~7年の間に大気摩擦により徐々に高度を下げ、高度が300 km を切ると急激に低下し地球大気に突入し、小型の衛星は大気中で燃え尽きる.衛星重量も216 kg と「はくちょう」に比べ倍以上大型となった.形状は対面寸法94 cm、高さ90 cm のほぼ立方体で太陽電池を張ったソーラーパドルを四方に広げる形状であった(図2).

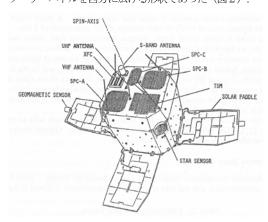
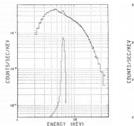


図 2 「てんま」衛星の構造モデル

この衛星には、それまでに田中靖郎らが開発し、ロケット実験で性能確認をしていた蛍光比例計数管 (Gas Scintillation Proportional Counter: GSPC) が主要検出器とし

て搭載された.この蛍光比例計数管はそれ以前に衛星による X線観測用として使われてきた通常の比例計数管に比べ、エネルギー分解能が 2 倍向上していた.「てんま」以前の衛星により観測から X線のスペクトルには連続成分のほかに鉄の輝線を発する X線源があることがわかっていた.エネルギー分解能のたかが 2 倍の改善と思われるかもしれないが、「てんま」 GSPC はこの鉄輝線を明確に観測できるがかりでなく、それが中性の鉄が高エネルギーの X線に照射されて放出する 6.4 keV の蛍光鉄輝線なのか、高温プラズマ中でヘリウム様に電離した鉄が放出する 6.7 keV 鉄輝線かを分離することが可能となった.



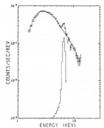


図 3 左はX線パルサーVela X-1 のスペクトルにみられる 6.4 keV 鉄輝線 $^{(1)}$  右は銀河中心方向の銀河面で発見された高温プラズマからの 6.7 keV 鉄輝線を伴うX線放射 $^{(11)}$ .

「てんま」により、①X線パルサーからの鉄輝線放射は低温ガス中の(つまり中性の)鉄が放射する 6.4 keV 蛍光鉄輝線であること<sup>®</sup>、②磁場の弱い中性子星が構成する低質量X線連星からのX線放射は中性子星表面と降着円盤の二つの領域から出ていること<sup>(10)</sup>、③わが銀河系の銀河中心方向では銀河面に沿って数千万度の高温プラズマがぞんざいすること<sup>(11)</sup>、などが発見されたこのうち②は満田和久が田中靖郎、井上一らの指導を受けて完成した学位論文で、その発表論文 Mitsuda et al. (10) は今でも日本天文学会欧文誌の中でも屈指の引用率を誇る.また、小山勝二らによる③の発見は、以後小山が中心となって、後続の衛星「ぎんが」、「あすか」、「すざく」で重点的に観測されることとなり、日本のX線天文学の象徴的研究課題となった.これに関しては別項で詳しく述べる.

### 3.3 3代目衛星「ぎんが」衛星

日本の3代目 X 線天文衛星 Astro-C は 1987 年 2 月 5 日 鹿児島宇宙観測所 (内之浦) より打ち上げられ、「ぎんが」 と命名された $^{(0)}$ この衛星の特徴は打ち上げロケットの性能の向上に伴って、「はくちょう」、「てんま」に比べはるかに大型化された (構造は  $1m \times 1m \times 1.5m$  の直方体、重

量は 420kg) ことと、日本の X 線グループとしては初めて搭載検出器の開発・製作を欧米との共同実験として進めたことである.最初にこの衛星に搭載する検出器を国際協力による開発を提案されたとき、私を含め X 線グループ若手研究者の中には逡巡する空気があったが、小田、早川、田中の強力な指導力でこの国際協力が推進された.この国際協力の成功を契機に以後の日本の科学衛星の国際共同による製作・運用が、常態として定着していった.

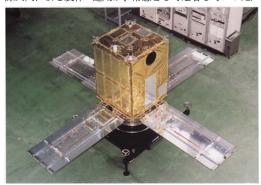


図 4 打ち上げ前に太陽パドルを展開した状態で撮 影された「ぎんが」衛星左側面に大面積比例計数管が8 台取り付けられた様子がわかる.

「ぎんが」衛星には主検出器として大面積比例計数管 (LAC)、副次的検出器として全天ガンマ線バースト検 出器 (GBD) が搭載されたが、LAC は英国レスター大学 と、GBDは」米国ロスアラモス大学との国際協力によっ て開発された.このうち大面積比例計数管は1本の有効 受光面積が 500 cm<sup>2</sup>、8本の合計が 4000 cm<sup>2</sup> と、当時の X 線天文台としては世界最大のものであった(12).この大 面積比例計数管の開発(12)には英国レスター大学の M.artin Turner の貢献が大きかった.実は同じようなミッ ションを打ち上げる計画は米国にもあったが、諸般の事 情で米国側の打ち上げは大幅に遅れ、1995年に打ち上げ られることになり (RXTE)、はからずもこの種の計器で の観測としては「ぎんが」の後を継ぐこととなった.さら にこの LAC では宇宙線などに起因する雑音(計数管の バックグラウンド)極力抑えて高いS/N比を取得する工 夫がなされていた.こうして「ぎんが」衛星は大面積、高 感度のX線天文台として、観測対象を銀河系内のX線天 体から一挙に遠方の活動的銀河核や銀河団にまで広がっ た.1年後の米国 NASA が打ち上げた X 線ミラーを搭載 した反射集光望遠鏡が2keV以下超軟X線領域の観測し かできないのに比べ、「ぎんが」画像の解像度はないもの の30 keV の高エネルギーまで広い帯域で X 線観測でき るのが特徴であった.

「ぎんが」が打ち上げられた直後にこれを祝うように 天の川銀河に近い小銀河である大マゼラン星雲において 超新星爆発 (SN1987A) が起こった.「ぎんが」はドイツ の ROSAT 衛星と共にその観測を精力的に行った.超新星 爆発に伴うX線放射をその発生直後から追跡したのはこ れが最初であった.銀河の観測対象は銀河系内で中性子 星やブラックホールを構成員とする X 線連星、超新星爆 発の残骸として広がる衝撃波面、銀河系中心部銀河面や 銀河バルジなど銀河系内のX線天体の精密観測にとどま らず、銀河系外遠方の銀河、銀河団やセイファート銀河、 クエーサーなどの活動銀河とほぼ宇宙の主要天体全般の 観測が可能になった.小山勝二らは銀河中心の銀河面の 高温プラズマからのX線放射を精力的に観測した(後述). 牧島和夫らはX線パルサースペクトルにみられる吸収線 様のサイクロトロン共鳴散乱構造 (CRSF) を高精度で観 測し、10個以上の中性子星の表面磁場を決定した.槙野文 命らは多数の活動的銀河核を観測し、その X 線強度の時 間変動とスペクトルから、その中心に太陽の数千万倍に も及ぶ巨大ブラックホールの存在を明確にし、またその 周辺を取り巻くガスの構造や状態を研究した.

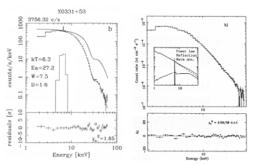


図 5 左は「ぎんが」が発見した X 線パルサーX0331+53 のスペクトル<sup>(13)</sup>.30 keV 付近に CRSF 吸収線構造が見られる.右はべき関数型で高エネルギーまで伸びるセイファート銀河の典型的なスペクトルを示す<sup>(14)</sup>.

### 3.4 4代目衛星「あすか」衛星

4代目 X線天文衛星 Astro-D は 1993 年 2 月 20 日に打ち上げられ、「あすか」と命名されたの。「あすか」衛星は、日本では始めて斜入射型の X線望遠鏡を採用した汎用 X線天文台である。この衛星では宇宙からの X線の画像を撮ると同時に、その画像中の個々の領域(または点源)のエネルギースペクトルを高い精度で測定する事が可能である。特に、世界ではじめて、宇宙の奥深くまでみることを可能にする高エネルギーの X線 (2~10 keV) で宇宙 X線源を撮像できる能力を実現したのが、「あすか」が従来得られなかった新しい成果を挙げた秘訣でもある。

「あすか」を特徴づけるのは、「多重薄膜鏡による、軽量でかつ大面積のX線鏡」と「高いエネルギー分解能を持つ焦点面検出器」である.「あすか」は4台のX線望遠鏡(XRT)を用い、その焦点面に2種類の異なったタイプの検出器、X線CCDカメラ(SIS)と撮像型蛍光比例計数管(GIS)が焦点面に配置されている.これら2つの検出器は、X線分光と撮像を相補的に行う撮像センサである.「あすか」の4つのX線望遠鏡のうち2つはSISと組み合わされ、他の2つは GIS と組み合わされている.SISとGIS はいつも同じ方向を向いているので、この二種類の検出器からのデータは組み合わせて使うことができる.

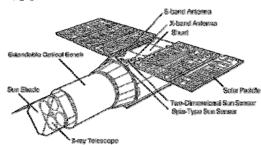


図 6 「あすか」衛星の構造モデル左端に4台の XRT が見られる.検出器は右端内部に収められている.望遠鏡を搭載した光学台は衛星打ち上げ後伸展される.

「あすか」のX線望遠鏡 (XRT) は、0.5 から 12 キロ電 子ボルトまでの広いエネルギー範囲のX線を効率よく集 光する工夫がされていた.これまでのX線衛星では、搭載 されたX線望遠鏡の撮像能力がほぼ4keV以下のX線に 限られていた.従って、「あすか」では多くの天体から始 めて高エネルギー領域のX線像が得られることになった. また、「あすか」によって初めて画像を得ることができる ようになった4keV以上のX線は非常に透過力が強いの が特徴で、これまでは厚いガスに遮られて観測すること ができなかった天体も、「あすか」を使えば精密に観測す ることが可能となった.高エネルギーのX線を全反射さ せるためには鏡面に対してきわめて斜め(1°以下)X 線を入射させなければならないといった技術的困難がX 線反射集光鏡にはあるが、その困難を克服してかつ衛星 搭載可能な軽量を確保するのがこの「あすか」のX線望 遠鏡の特徴である.「あすか」では非常に薄いアルミニウ ムの板を特別なめらかな面に成型し金を精密にコーティ ングした反射鏡を沢山集積したものが使用された.この 「多重薄板鏡」は、NASA/GSFC の Peter Serlemitsos のグ ループと名古屋大学の山下廣順、国枝英世らとの共同開 発で行われたが、これは画像解像度は Einstein や ROSAT

衛星に劣るものの、高エネルギーまで適用でき、また望遠鏡の大きさに比べ有効面積の割合が大きいことが特徴である<sup>(15)</sup>.

「あすか」の焦点面検出器の1つであるX線CCDカメ

ラは、X線源の画像とエネルギーを同時に高分解能で撮 像観測のできる優れた検出器である.このX線CCDカメ ラを人工衛星に搭載したのは「あすか」が始めてであっ た.X線CCDカメラを用いることで、SIS検出器は5.9 keV のX線に対して半値幅 (FWHM) が約 2%という優れた エネルギー分解能(波長分解能)を実現した.この「あす か」の成功によりX線 CCD カメラは以後のX線天文衛 星では基本検出器として使用されるようになりました. もう一方の焦点面検出器である撮像型蛍光比例計数管 (GIS) は、SIS に比べて、広い視野を一度にカバーし、 かつ高い時間分解能で観測をするために搭載されたもの である.これは「てんま」衛星に搭載された蛍光比例計数 管を位置検出型に改良したもので、銀河団などの広がっ た天体を観測するのに欠かせない大きな検出面積を持つ のが特徴で、特に10keV以上の高いエネルギーでも十分 な検出能力を持っていた.この GIS 検出器はX線 CCD に はない高い時間分解能をもっており、その周期の下限は 数 10 ミリ秒に及ぶX線パルサーの観測には欠かせない ものであった.このように X 線観測において GIS は SIS と相補的な役割を果たした.

### 3.5 現在稼働中の「すざく」衛星

2005年7月10日に打ち上げられた5代目 X 線天文衛星 Astro-E2 は「すざく」と命名され、現在稼働中である. その開発コード名で予想されるように、これは2000年に打ち上げに失敗した Astrio-E の後継機として急遽製作・打ち上げが行われたものである. 「すざく」衛星では X 線望遠鏡システムの基本構造は、「あすか」衛星のシステムを継承している.異なる点は焦点面検出器として撮像型蛍光比例計数管 (GIS) の代わりに現在の技術の極限と考えられるエネルギー分解能を得られる X 線カロリメーター (XRS)を搭載したこと、X 線反射集光鏡では 10 keV以上の X 線を観測できないので、それを補うために硬 X 線検出器 (HXD)を合わせて搭載したことである.

この 2005 年7 月に打ち上げられた「すざく」衛星は地上からの高度約 550 km の略円軌道を運行している。その大きさは直径 2.1 m全長 6.5 m(軌道上で鏡筒伸展後)で、太陽パドルを広げると 5.4 m の幅になる.衛星の重量は1.7 トンであり、日本の科学衛星としては、これまでにない大型衛星といえる。そして「すざく」は今日現在も国際的に公募され採択された天体・研究対象の観測を続けて

いる(6).

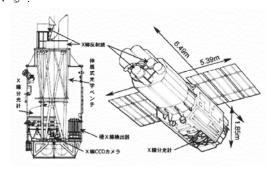


図 7 「すざく」衛星の構造モデル.左は打ち上げ時にロケット頭胴部に収められている姿.右は打ち上げ後太陽パドルを展開し、XRT を搭載した光学ベンチを伸展した姿を示す.

「すざく」のX線望遠鏡(XRT)は「あすか」のX線望遠鏡の有効面積と、結像性能をどちらも倍近く改善した、新しいX線望遠鏡(口径40 cm、焦点距離4.5-4.75 m)で伸展式光学台(伸展長 1.4 m)に 5 台搭載している5台の望遠鏡のうちの1台は高分解能 X線分光器(XRS)がその焦点面に備えられ、残りの4台の焦点面にはX線CCD カメラ(XIS)が搭載されました.硬X線検出器(HXD)はガドリニウム・シリケート結晶を用いた無機シンチレータ(GSO)とシリコン検出器を組み合わせた、硬X線からガンマ線の領域の観測の可能な検出器です.

4 台のX線望遠鏡の焦点面上に配置されたX線 CCD (XIS) カメラは「あすか」の CCD カメラをさらに改良、発展させたもので、0.5 キロ電子ボルトから12 キロ電子ボルトのX線領域で、広い視野での撮像を行いながら精度の高い分光を連続的に行うことが可能である.4 台の望遠鏡を合わせると、6 keV 以上の高エネルギー領域のX線に対して、現在も世界最大の有効面積を持つことになる.

X線望遠鏡でカバーされるX線領域は10 keV 以下であるが、その何10倍ものエネルギーを持つ硬X線からガンマ線の領域を観測するため、硬X線検出器(HXD)が搭載されている。このように高いエネルギーまで良い検出感度(S/N 比)で観測できる装置が衛星に搭載されるのは日本では初めてです。この検出器はガドリニウム・シリケート結晶を用いた無機シンチレータ(GSO)とシリコン検出器を組み合わせたものです。筒状に伸びた井戸型シンチレーターによって周りからの雑音ガンマ線を低減するなど様々な工夫により、このエネルギー領域ではこれまでに例のない高感度の観測が可能になった。

この「すざく」衛星の1台のX線望遠鏡の焦点面には、

これまでのX線検出器に比べて一桁もエネルギー分解能 の高い高分解能X線分光器、またはX線カロリメーター (XRS) が搭載された、この検出器の原理は、絶対温度約 0.06 度の極低温に検出素子を冷し、X線入射に伴う素子 の微弱な温度の上昇から入射X線のエネルギーを精度良 く決めるものである.まさに1個1個のX線光子(フォト ン) の温度を測るX線温度計といえる.このような検出器 を衛星に搭載したの「すざく」が初めてである.動作に必 要な極低温を軌道上で実現するため、断熱消磁冷凍機と 液体ヘリウム容器(絶対温度1.2度)と固体ネオン容器 (絶対温度 17 度) を組み合わせた宇宙空間で使用可能 な3段式冷却システムが新たに開発された.測定は、0.5 キロ電子ボルトから12キロ電子ボルトの範囲で行われ、 エネルギー分解能は6-7 keVの鉄輝線領域で約10 eVとX 線 CCD カメラの 10 倍も優れたものである. この X線カ ロリメーター (XRS) は衛星打ち上げ後初期の試験運用 時には、宇宙での運用においても地上試験で得られた所 期のエネルギー分解能を達成していた.しかし残念なが ら、試験運用中に機器冷却用の寒剤が容器から漏れる事 故が生じ、実運用での天体観測にこれを供することがで きなくなり、この究極的な分解能をもつ検出器による X 線天体の観測は次世代の衛星に託すこととなった.

### 4. 天の川銀河中心からの X 線放射

我が銀河系(天の川銀河)は約2千億個の星の集まりで、その中に私たち太陽系がある.この銀河系には他にも星形成の原料となる冷たいガス(暗黒星雲といわれる)があり、また私たちの知らない未知の暗黒物質がこの銀河系を取り巻いていることも知られている.この銀河系の中心に太陽の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ことが、最近電波や赤外線を使った銀河中心の観測から明らかになってきた.前章で述べたように小山らは「てんま」の観測からこの銀河中心方向銀河面に沿って6.7 keV の鉄輝線を放射する高温のプラズマが広がっていることを発見した.「ぎんが」衛星でこの銀河中心から銀河面に沿ったスキャン観測を行った結果、6.7 keV 鉄輝線は銀河バルジ領域で特に強く、さらに銀河面に沿って銀経が±60 度まで広がっていることを明らかにした(図8参照).

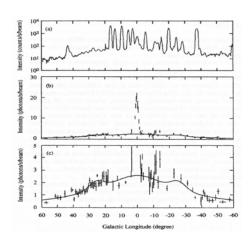


図 8 「ぎんが」で観測された銀河面に沿った X 線強度の分布.(a)は連続成分の分布で強い X 線点源の影響が顕著である.(b)は 6.7 keV 鉄輝線の分布で、銀河中心のバルジ領域で特に強いことがわかる.(c)は(b)の縦軸を拡大したもので、銀系±30 度で特に強く、さらに銀系±60 度まで広がっていることを示す (Yamauchi & Koyama 1993<sup>(18)</sup>).

この銀河中心核付近に広がって見える X 線放射のスペクトルを「あすか」で調べると、電離が大きく進んだシリコン、硫黄、鉄からの輝線が見つかった。この事実は、中心核の周りが1千万度にも達するが希薄な超高温の電離プラズマ雲に覆われていることを示唆します。しかも、このプラズマのエネルギーは超新星爆発に換算すると約千発分にも及ぶとても大きなものだとわかった。その起源は今もって謎に包まれている。

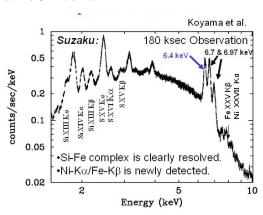


図 9 銀河中心方向に広がって存在する高温プラズマからの熱的 X 線放射 (Koyama et a. 2007) <sup>(17)</sup>.

もう一つ不思議なことに、この高温プラズマから左上

方に離れたところ (Sgr B2 領域) からは、電離のほとんど進んでいない低温のガス雲からの蛍光鉄輝線も同時に見つかった (図9に両者が同程度の強度で混在するスペクトルを示す). 蛍光鉄輝線は、低温ガス雲中の鉄原子が強いX線源からの照射を受けて放射する蛍光X線を出したものと結論づけられる. しかし、「あすか」の像からはそのような強い放射場を作るX線源はこの蛍光鉄輝線放射領域の近傍には見当たらなかった.

蛍光鉄輝線を放射する低温ガス雲から銀河中心にある 巨大ブラックホールまでの距離は約300光年です.一方、 超高温プラズマを膨張速度で逆に300年前の過去にさか のぼっていくと、そのときのX線強度は蛍光X線を生成 するに足るほど明るくなります. すなわち、ごく最近(300 年前)には中心にある巨大ブラックホールに大量のガス が吸い込まれ、重力加速に伴う膨大なエネルギーがX線 として放射され、そのなごりが超高温プラズマや蛍光輝 線として「あすか」にとらえられた可能性が高いようで す. つまり最新の宇宙技術を搭載した「あすか」により、 X線の光路差を利用することで、銀河系の中心核ブラッ クホールの歴史を、300年(つまり江戸時代まで)遡っ てひも解くことができたのです. その後観測が続けられ たChandra, XMM-Newton,「すざく」衛星の結果はこの推 論を検証すると共に、その 6.4 keV 蛍光鉄輝線の強度の 中心がその 10 年間に変動していることを明らかにしま した. これは被照射体である低温の分子雲Sgr Bの形状に よるものと思われる.

### 5. 活動的銀河中心核近傍から放射される鉄輝線

3章で述べたように「ぎんが」衛星は大面積検出器を 有し、計測X線の統計制度も向上したので、遠方の活動 的銀河核からのX線強度が非常に早い変動を示すことを 明らかにした. 10 分間程度の間にX線強度が2倍も変化 する活動銀河核も発見した. このことは、活動銀河核のX 線を出している領域は光の速度で走って10分程度以下、 つまり、太陽と地球の距離より小さいことになる. X線 放射領域がそれより大きければ、たとえ放射源に早い時 間変動があっても、各領域のX線が地球に到達するまで の時間差でなまされるので、そのような早い変動は見ら れなくなる.こんな小さな1AU程度(太陽-地球間距離) の領域から太陽の100億倍もの強度のエネルギーをX線 領域で出しうる天体は、巨大ブラックホール以外には考 えにくいので、銀河系内で降着円盤を持つブラックホー ルX線連星の類推から、その活動的銀河核中心には太陽 質量の1億倍もの超巨大ブラックホールが存在すると類 推される.

活動銀河核のX線スペクトルは一般に冪関数型の連続 関数で表せる形をしている(図5参照).しかし、「あす か」や「すざく」のような高精度のX線検出器で観測す ると、連続スペクトルの上にさまざまな輝線や吸収端が 見られる. これらは、中心のブラックホールからのX線が 周囲の物質によって散乱吸収されたり、その物質が特性 X線を再放出したりする結果生じた、いわば巨大ブラッ クホールを取り巻く周辺物質による刻印である. 例えば 宇宙に存在する割合の比較的大きい「鉄」元素の場合、 それがあまり高温でなければ、そのX線照射によるK-設 電離に伴って 6.4 keV (キロ電子ボルト) の蛍光X線を 効率よく放出することわかっています。先代のX線天文 衛星「ぎんが」は、多くの活動銀河で 6.4keV の輝線を 観測し、活動銀河の周りに鉄が分布していることを明ら かにしましが、「ぎんが」では輝線の形まで調べることは できなかった.

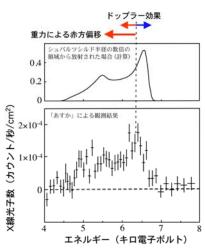


図 10 「あすか」が活動銀河 MCG-6-30-15 のスペクトル解析から発見した低エネルギー側に広がった 6.4 keV 鉄輝線 (下; Tanaka et al. 1995) <sup>(18)</sup>とその解釈モデル 図 (上).

輝線の形は、輝線を出している物質の運動についての情報を与える. 例えば運動している物質から出される輝線はドップラー効果により、近づいてくる場合には波長が短く(エネルギーが高く)なったように、遠ざかる場合には波長が長く(エネルギーが低く)なったように観測される. 前者を青方偏移、後者を赤方偏移といい、波長(エネルギー)の変化は、物質が速く動いているほど大きくなる. 田中靖男、井上一、A. Fabian らは「あすか」で観測した活動銀河 MCG-6-30-15 のスペクトルを解析し、そのX線スペクトルに奇妙な鉄輝線構造を発見した

(図 10) (18). 低エネルギー側に偏って広がった 6.4 keV 鉄輝線構造の解釈は次のようなものである. 高速回転し ている降着円盤が中心核の光に照らされて鉄輝線が出て くると、降着円盤中のガスの回転運動により青方偏移と 赤方偏移をうけた鉄輝線が重なり合い 6.4 keV を中心に 左右に対照的に広がった鉄輝線分布が見えるはずである. 加えて、ブラックホール近傍の強い重力場から出てくる 時に光はその重力効果でエネルギーが低い(波長が長い) 方にずれることが期待される(重力赤方偏移).実際には これらの効果が重畳した鉄輝線分布が観測されたわけで ある(図10).このようなドップラー効果と重力赤方偏 移の影響を考慮に入れて鉄輝線の形状をモデル計算して、 データと比べることにより、「あすか」は活動的銀河核の 中心に巨大ブラックホールが存在することを説得力のあ る形で実証し、その巨大ブラックホールと周辺空間の物 理的特性を明らかにした.

「すざく」では他にも多くの銀河がその中心に巨大ブラックホールをもつことを明らかにした。そしてその近傍から放射される 6.4 keV 鉄輝線の重力赤方偏移の形状には様々な種類があり、これを調べることにより中心の巨大ブラックホールが高速で回転しているか否かを判別できると期待できるようになってきた。

### 6. 超新星残骸は宇宙線加速工場

銀河系では非常にエネルギーの高い荷電粒子(宇宙線)が生成され、ほとんど光速に近い速さで飛び交っている。その粒子強度はエネルギーの増加とともに冪関数形で減少しますが、現在では最高エネルギーが 10<sup>20</sup> eV の宇宙線が観測されている。この1次宇宙線の起源、つまりどこでどのように加速されているのかは長年の謎となっていた。ただし理論家の間では宇宙線の起源は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸ではないか、つまり宇宙線は超新星残骸の外縁部で加速生成されているのではないかとの推論はあった。しかし宇宙線は、光やX線などの電磁波と異なり、荷電粒子であるため銀河系内を伝搬して地球に到達するまでに銀河系内磁場で曲げられてしまうため、その加速源を観測的に確定することができなかった。この宇宙線起源の謎に答えたのが、意外にもX線天文衛星「あすか」であった。

もともと超新星残骸は電波望遠鏡の観測によって発見されてきた。そして「あすか」以前の衛星(Einstein 衛星、ROSAT 衛星など)で超新星残骸のX線像が観測されるようになった。そのX線像は大質量星がその進化の終焉で大爆発(これを超新星爆発という)を起こし、その際莫大なエネルギーをもって放出される高速物質が星間ガスと衝突し、このとき発生する衝撃波で星間ガスが加

熱され、超新星爆発残骸が伝搬する前面に高温ガスが蓄積され、その希薄高温プラズマから X線が放射されている (これを熱的 X線放射という) ものと考えられていた。 実際エネルギー分解能の高い「あすか」による観測から、 希薄高温プラズマからの熱的 X線放射の特徴である高電離した重元素からの輝線が観測され、「あすか」は上記の解釈の妥当性を証明しました。

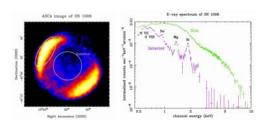


図 11 「あすか」が観測した超新星残骸 SN1006 の X線画像(左)と X線スペクトル(右).超新星の中心部からは熱放射、外縁部(つまり衝撃波面)では非熱的放射が見られる(Koyama et al. 1995)(19).

ところが、小山勝二、尾崎正伸らは超新星 SN1006 のスペクトルを解析して、この超新星残骸には場所によって他の超新星残骸同様に熱的 X線放射を示す場所の他に、輝線を伴わず高いエネルギーまで冪関数型で伸びる、つまり非熱的 X線放射のエネルギースペクトルを示す場所があることを発見した(19). この非熱的な X線スペクトルはエネルギーが数兆電子ボルトにも及ぶ高エネルギー電子がシンクロトロン放射で放出する電磁波と考えられる. つまりこの超新星残骸は荷電粒子をそのような高エネルギーまで加速する工場であることが証明された. 馬場彩らはさらに「あすか」や Chandra, 「すざく」衛星の超新星の残骸を解析し、①加速源の加速機構の考察とその物理量の推定、②他の超新星残骸からの非熱的 X線放射の検証など、研究を発展させている.

内山泰伸らは ROSAT 衛星により軟X線領域で発見された超新星残骸であり、その方向からは1兆電子ボルトに及ぶ超高エネルギーガンマ線放出が観測されている、さそり座にあるX線天体、RX J1713.7-3946を Chandra と「すざく」衛星で数年にわたり精力的に観測した(29).その結果、この超新星残骸の「すざく」領域でのスペクトルは確かに非熱的なシンクロトロン放射であるが、20 keV あたりに折れ曲がりがあること、X線強度の強い場所が1年程度の時間尺度で変動していることを発見した。これらの結果はこの超新星残骸中で宇宙線が生成されているが、その衝撃波加速に寄与している磁場の強さは従来の予想よりはるかに強いこと、超高エネルギーガンマ

線は宇宙線陽子成分による中性π中間子の生成とその崩壊によるものであることなどがわかった.

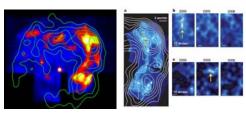


図 12 超新星残骸 RX J1713.7-3946 の「すざく」による 撮像画像 (左) とその西側 (図の右側) 外縁中の局所的 なホットスポットの年単位の変動 (右) を示す (Uchiyama et al. 2007) <sup>(19)</sup>.

#### 7. 原始星や惑星状星雲も X 線を放射する

星間ガスの濃い場所(暗黒星雲とか分子雲)で原始星 の形成が始まる.この原始星は自己重力で収縮し中心の 密度と温度が次第に上昇する.クラス0、クラス1、クラ スⅡ、クラスⅢ原始星と進化につれて原始星の中心の圧 力と温度が上昇し、ついに水素の核融合反応の臨界温度 に達し、水素の核融合でヘリウムを形成する原子核反応 (以後水素燃焼と呼びます) が始まる.そこで生成される エネルギーは星の外部に伝わり、表面から星間空間に放 射され、星は明るく輝き始め、主系列星の仲間入りをす る.星の質量が太陽程度の場合は水素燃焼を継続しなが ら、更に重力収縮が進み、ついに中心に溜まったヘリウ ム芯が核融合反応を始め、このヘリウム燃焼の生成物と して、炭素、酸素が星の中心に堆積し始める.水素燃焼が 次第に星の外部に移行し、燃料が乏しくなると星の外縁 部が大きく膨らみ始め、星は赤色巨星となる.そしてつい に星の外縁部はリング状、放射状、網目状等さまざまな 形状をなして宇宙空間に広がっていく(惑星状星雲とい われる).一方燃えカスとして中心に残ったヘリウム、炭 素、酸素は小さく萎縮した、暗い星として残ります.これ が白色矮星で、親の星の質量によってヘリウムが主成分 の白色矮星と炭素、酸素が主成分の白色矮星とがある.

このように太陽程度の質量の星の一生の内、近傍にある主系列星の X 線放射は Einstein や ROSAT のような高感度の撮像型 X 線望遠鏡では観測されるようになっていた.しかしまだ冷たいはずのクラス I 原始星や燃え尽きて終焉を迎えた惑星状星雲/白色矮星系からの X 線放射は想像し難いことであった.ところが、濃い分子雲の中で成長中のクラス I 原始星がむしろ高エネルギーの X 線を放射することを「あすか」が発見しました<sup>(21)</sup>.一方、現在稼働中の米国の X 線天文衛星 Chandra では明るい惑星状星雲約 10 個程度から X 線が放射されていることを突き

止めた.このうち可視光で1番明るい惑星状星雲、BD+30°3639が「すざく」でも観測され、この惑星状星雲の中心部からX線が放射されていることを確認した.さらに、「すざく」は0.5 keV以下の超軟X線領域まで高い検出感度を持つためそのX線エネルギースペクトルに水素様に電離した炭素原子に起因する輝線を観測することができた<sup>(22)</sup>.

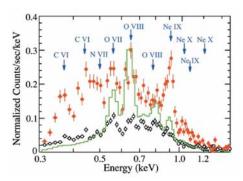


図 13 「すざく」が観測した惑星状星雲 BD +30° 3639 のX線 CCD によるスペクトル.通常の宇宙組成で期待されるものに比べ非常に強い炭素輝線が見られることが特徴 (Murashima et al. 2006) (22).

この結果は、可視光領域で一番明るくガス温度が比較的低いと思われる惑星状星雲で、どのようにしてこのような強いX線を放射するのかを問うものです.現在、この系の中心部から高速星風が放出され、それが周りの惑星状星雲に衝突して衝撃波を形成し、そこでガスの温度がX線放射の可能な高温プラズマにまで加熱され、そこからX線が放射されるとの仮説が提案されています.この惑星状星雲、BD+30°3639の中心部はいずれ白色矮星として残るものと思われますが、「すざく」の観測によりこの惑星上星雲の中心部に炭素元素が豊富に存在することを検証したことは、宇宙における元素合成の理論的仮説を検証する上で大変重要な結果です.

### 8. 太陽風と地球磁気圏の相互作用で放射される X線

「すざく」はX線天文衛星、つまり太陽系外遠方 no X線天体を観測するのが主目的の軌道天文台である.すなわち、ブラックホール、超新星残骸、活動銀河核、銀河団などの研究が主流ですが、時には偶然とらえた現象が思いがけない発見につながることがあります.本項では、太陽風を起源とする地球近傍でのX線放射という、「すざく」が他の目的の観測中に偶然とらえた現象を紹介する.そして、このX線放射が太陽風中の高速粒子が地球周辺の中性元素と衝突する際に起こす「電荷交換」言

われる原子の相互作用に起因することを明かす.

「すざく」は 2005年9月に、銀河系内に広がって存在する数百万度の温度を持つ高温プラズマハーローから放射される超軟 X線背景放射の観測をするために、望遠鏡視野を黄道北極領域に向けていた。この観測中約10時間にわたって X線強度が起源不明の謎の増光を示した。この増光は特定の点源ではなく検出器の視野全体に広がっており、そのうえ短い時間で変動をしていた。調査の結果この増光の変化の様子は磁気圏観測衛星によって得られた太陽風陽子の強度変化に比例しており、「すざく」が偶然観測した「謎の X線増光」は太陽風と強く関連していることが判明した(23)。

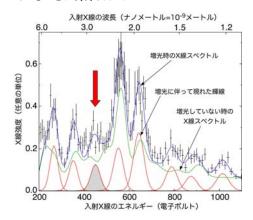


図 14 「すざく」は黄道北極方向の時間変動するはずのない広がった領域のX線放射を観測中に急激なX線増光を観測した。それから静穏成分を差し引いたものは高階電離したイオンから発せられる輝線群であった (Fujimoto et al. 2007) <sup>(23)</sup>.

この増光時のX線スペクトルから静穏時のそれを差し引くとX線の増光分は高階電離した炭素、酸素、ネオン、マグネシウム等のイオンが放射する輝線であることがわかりました。しかもその輝線(特に炭素輝線)の強度は数百万度で熱平衡にある高温プラズマから予想される強度をはるかに超えていた。この強烈な輝線強度を説明するには、高速で飛来した太陽風炭素イオンが水素原子と衝突して起こす電荷交換と呼ばれる相互作用によるものとすると説明できます。つまり水素原子に付随していた束縛電子が衝突時に完全電離炭素イオンに乗り移るのです。そしてこの電子が炭素原子束縛エネルギーの基底状態まで落ち込む時に495 eV の超軟X線輝線を放出するのです。その増光の時間変動の解析からこの電荷交換は地球磁気軸方向で高度が6000 kmのごく地球近傍で起こっていることが判明した。この電荷交換過程そのものは磁気

圏プラズマ観測衛星の研究などでも知られていましたが、 X線天文衛星でこの電荷交換過程の結果放射される X線 を捉えたのは「すざく」が初めてである.

#### 9. むすび

日本の X 線グループは現在「すざく」の運用と基礎の観測データ解析、論文の作成を進めると同時に、5年ほど前から次の衛星の開発計画と基礎実験を続けている。この次世代 X 線望遠鏡計画 (通称 NeXT) は現在 JAXA の衛星プロジェクトとして認められるための審査が行われており、予定通り進めば 2013 年の打ち上げを目指して衛星製作が開始される。この衛星の検出器の1つは高分散 X 線分光系/X 線マイクロカロリメータである。これは「すざく」で実観測に供することができなかった観測機器リベンジである.他は80 keV までの硬 X 線の反射結像を可能とするスーパーミラーと硬 X 線領域で高エネルギー分解能での撮像を可能とする CdTe 撮像素子を組み合わせた望遠鏡システムである。2010 年代半ばは世界の X 線天文台打ち上げ計画が途絶える時期になるため、このNeXT 衛星に対する世界の期待は大きい.

本稿では銀河、銀河団の研究に関するトピックスを取り上げなかったが、もちろんこの分野でも「ぎんが」、「あすか」、「すざく」による観測が多数行われ、多くの研究成果を挙げている。しかし、NeXT衛星ではこの分野、特に宇宙における銀河の大構造分布、宇宙の質量の圧倒的割合を占める未知の暗黒物質(ダークマター)など、宇宙の形成と進化にかかわる研究が主要テーマとなるであろう。特に、高エネルギー分解能を有するマイクロカロリメータによる銀河団内高温ガスの運動の測定が、ダークマターの解明につながると期待される。

## 参考文献

- R., Giacconi , H. Gursky, ,F.R. Paolini & B.B. Rossi, Phys. Rev. Lett. 9, 439 (1962).
- K. Ichimura, G. Ishida, J. Jyugaku, M. Oda, K. Osawa & M. Shimizu, Publ. Astron. Soc. Japan, 18, 469 (1966).
- (3) R. Giacconi, E. Kellogg, P. Gorenstein, H. Gursky, H. Tananbaum, Astrophys. J. Lett., 165, L27 (1971).
- (4) I. Kondo, et al., Space Sci. Instr., 5, 211 (1981)
- (5) Y. Tanaka, et al. Publ. Astron. Soc. Japan, 36, 641 (1984)
- (6) F. Makino, et al. Astron. Lett. Commun., 25, 223 (1987)
- (7) Y. Tanaka, H. Inoue & S.S. Holt, Publ. Astron. Soc. Japan, 46 L37 (1994)
- (8) K. Mitsuda, et al., Publ. Astron. Soc. Japan 59, S1

- (2007).
- (9) T. Ohashi, et al., Publ. Astron. Soc. Japan 36, 699 (1984).
- (10) K. Mitsuda, et al., Publ. Astron. Soc. Japan 36, 741 (1984).
- (11) K. Koyama, K. Makishima, Y. Tanaka & H. Tsunemi, Publ. Astron. Soc. Japan 38, 121 (1986).
- (12) M.J.L. Turner, et al., Pub. Astron. Soc. Japan 41, 345 (1989).
- (13) K. Makishima, T. Mihara, F. Nagase & Y. Tanaka, Astrophys. J. 525, 978 (1999).
- (14) K. Nandra & K.A. Pounds, Mon. Not. R. Astron. Soc. 268, 405 (1994).
- (15) P. Serlemitsos, et al., Publ. Astron. Soc. Japan, 47, 105 (1995).
- (16) S. Yamauchi & K. Koyama, Astrophys. J. 404, 620 (1993)
- (17) K. Koyama, et al., Publ. Astron. Soc. Japan 59, S245 (2007).
- (18) Y. Tanaka, et al., Nature 375, 659 (1995).
- (19) K. Koyama, et al., Nature 378, 255 (1995).
- (20) Y. Uchiyama, F.A. Aharonian, T. Tanaka, T. Takahashi & Y. Maeda, Nature 449, 576 (2007).
- (21) Y. Kamata, K. Koyama, Y. Tsuboi & S. Yamauchi, Publ. Astron. Soc. Japan 49, 85 (1997).
- (22) M. Murashima, M. Kokubun, K. Makishima, *et al.*, Astrophys. J. 647, L131 (2006).
- (23) R. Fujimoto et al. Publ. Astron. Soc. Japan 59S, 133 (2007).