

熱く激しい宇宙を観る



研究室紹介

松本浩典*

Observing the Hot and Energetic Universe

Key Words : X-ray Astronomy, X-ray detectors, X-ray optics

はじめに

現代の宇宙観測は、可視光のみならず、波長メートル程度の電波から、 10^{-8} Å 程度のガンマ線まで、様々な波長の電磁波を使用して行われている。近年では、電磁波以外の信号である、ニュートリノや重力波による観測も本格化しつつある。このような状況の中、当研究室が目指しているものは、波長で0.1～100 Å 程度、光子エネルギーにして0.1～100keV程度のX線の観測と、そのための技術開発である。

太陽の表面温度は約6000度であり、そのために赤外線から可視光の光子をメインに放出している。X線光子は赤外線や可視光光子の1000倍以上のエネルギーを持つ。つまり、もしX線天体が存在し、熱的にX線を発生しているとしたら、その温度は太陽の1000倍以上、つまり数千万度であることを意味している。通常の恒星の表面温度は、高々数万度なので、X線は発生しない。天体がX線を放つということは、何か特別な高エネルギー現象がその場で起こっていることを意味する。X線で宇宙を観測するということは、宇宙の高エネルギー現象だけをえぐり出して観測する、という意味を持つ。

X線で見える宇宙と、可視光で見える宇宙の違いの例を図1に示す。この図は、ペルセウス座の方角にある銀河の集合であるペルセウス座銀河団の可視光写真とX線写真である。銀河団は、人間の目には

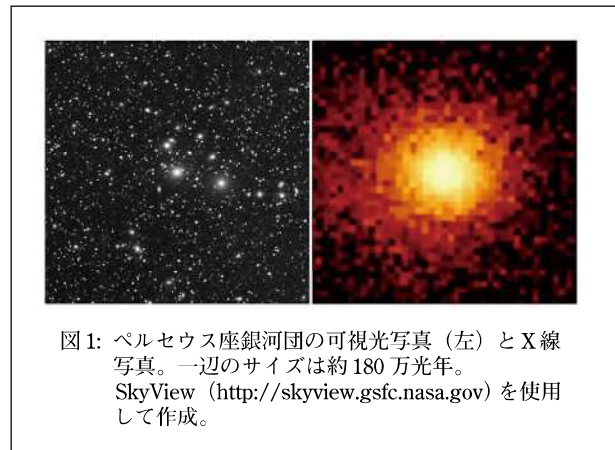


図1: ペルセウス座銀河団の可視光写真(左)とX線写真。一辺のサイズは約180万光年。SkyView (<http://skyview.gsfc.nasa.gov>) を使用して作成。

単なる銀河の集合に見える。しかしX線写真を見ると、銀河団全体がX線で輝いていることがわかり、個々の銀河はほとんど目立たない。これは、銀河と銀河の間の何もないように見える空間を、希薄な高温ガス(=銀河団ガス)が満たしているためである。銀河団ガスの温度は数千万度にも達しているため、強いX線を放っているのである。その密度は濃い所でも1ccあたり水素原子0.01個程度であり、温度にしても、密度にしても、地球上ではお目にかかれなような極限状態のプラズマである。銀河団ガスの総量は、中の銀河の総量よりも数倍多く、銀河団の主成分と言ってよい。銀河は銀河団ガスの大海に浮かぶ小島のような存在なのである。さらに、銀河団ガスが拡散せずにこの場所に留まっていることから、銀河団ガスは強い重力に捕らえられていることがわかる。ここから、目には見えないが重力を作り出すダークマター(暗黒物質)が、銀河団ガスや銀河といった目に見える物質の10倍以上存在しなければならないこともわかる。暗黒物質の正体はいまだに不明だが、未知の素粒子との関連も示唆されており、現代物理学の主要な問題として精力的に研究されている。このように、宇宙をX線で観測す



* Hironori MATSUMOTO

1970年8月生まれ
京都大学大学院・理学研究科・物理学宇宙物理学専攻(1998年)
現在、大阪大学大学院 理学研究科
宇宙地球科学専攻 教授 博士(理学)
X線天文学
TEL: 06-6850-5477
FAX: 06-6850-5480
E-mail: matumoto@ess.sci.osaka-u.ac.jp

ると可視光観測だけでは想像できなかったような姿が見えてくる。

X線天文学の歴史と阪大X線天文学グループ

地球の大気は分厚いため、宇宙X線は大気によって完全に光電吸収されてしまう。そのため、宇宙X線を観測するには、ロケットや人工衛星を使った、大気圏の外からの観測が必要である。1962年のロケット実験により、太陽系以外の天体からのX線が初めて検出された¹⁾。この実験では、現在ではさそり座X-1という名前で知られるX線天体と、宇宙の全方向からやってくる宇宙X線背景放射が発見された。この実験以前は、X線天体としては太陽のみが知られていた。しかしその強度は弱く、もし太陽が地球から何光年も離れていたら、とても観測出来ないレベルである。太陽は典型的な恒星なので、太陽系外のX線星を観測できるとは誰も考えていなかった。それだけにこの発見が世界に与えた衝撃は大きく、Giacconi氏は2002年にノーベル物理学賞を受賞した（ニュートリノ天文学を開拓した日本の小柴昌俊教授、米国のRaymond Davis氏と共同受賞）。1970年には世界初のX線天文衛星Uhuruが打ち上げられ、宇宙には数多くのX線天体が存在することが明らかになる。さらに1978年には初めてX線望遠鏡を搭載したX線天文衛星Einsteinが打ち上げられ、X線天体の鮮明なX線写真を得ることが出来るようになる。以降もX線天文学は発展をとげ、現在では彗星のような太陽系天体から宇宙最大の重力束縛構造物である銀河団（図1）まで、ほぼ全ての天体が大なり小なりX線を出していることがわかっている。

欧米が端緒を切り拓いたX線天文学であるが、宇宙線研究に携わっていた名古屋大学早川幸男教授、田中靖郎教授（当時助教授）、東京大学小田稔教授らは、早くからこの分野を日本で牽引し、1965年にはロケットによる宇宙X線観測を行っている。1979年には日本初のX線天文衛星はくちょうが打ち上げられ、以降でんま衛星（1983年）、ぎんが衛星（1987年）、あすか衛星（1993年）、すざく衛星（2005年）、ひとみ衛星（2016年）が続き、約40年の間に6台ものX線天文衛星が打ち上げられている。先程述べたように、宇宙X線の観測には、飛翔体観測が不可欠である。欧米が約20年に一度巨大な

X線天文衛星を打ち上げる間に、日本は先鋭的だが中小規模のX線天文衛星を迅速かつタイムリーに打ち上げることにより、世界のX線天文学の中での存在感を高めてきた。

飛翔体を使ったスペースサイエンスを確実に実行するには、日本の研究者コミュニティの拡充と共同作業が必要である。大阪大学には、1977年の宮本重徳教授の着任と共に、X線天文学の研究室が開かれた。このあたりの経緯は、文献2に詳しい。その後、1995年からは常深博教授がグループを率いられ、上記の全ての日本のX線天文衛星において、観測機器開発・観測成果創出の中心的な役割を果たしてきた。2017年以降は私がグループの主査を務めている。

XRISM衛星計画

さて、日本のX線天文衛星は平均すると5～6年に1台打ち上がっているのだが、あすか衛星とすざく衛星の間には、12年もの開きがある。実は、2002年にASTRO-E衛星を打ち上げたのだが、ロケットの不具合によって、軌道投入に失敗しており、そのために空白期間が長く続いてしまったのである。ASTRO-Eには、目玉の観測機器としてX線マイクロカロリメーター（以降カロリメーター）が搭載されていた。この観測機器の特徴は、高感度の高精度光子エネルギー測定（エネルギー分解能約10eV）である。あすか衛星のエネルギー分解能は約100eVであったから、およそ10倍の改善である。これにより、特性X線のドップラー幅や微細構造が観測可能になり、宇宙プラズマの物理量の高精度測定が可能になるはずであった。ASTRO-Eは打ち上げ失敗に終わったが、幸運なことに再挑戦の機会が与えられた。それがすざく衛星である。

ところがすざく衛星のカロリメーターもうまく動かなかった。冷却系に不具合が見つかり、所定の性能を発揮することが出来なかったのである。しかしすざく衛星には、硬X線検出器や、当研究室が開発に深く関わったX線CCDも搭載されており、低バックグラウンドによるワイドバンド高感度観測という特徴を生かして、新しいタイプのブラックホールの発見³⁾や、銀河団外縁部の観測⁴⁾などで、数々の成果をあげることに成功している。

カロリメーターの三度目の挑戦が、ひとみ衛星で

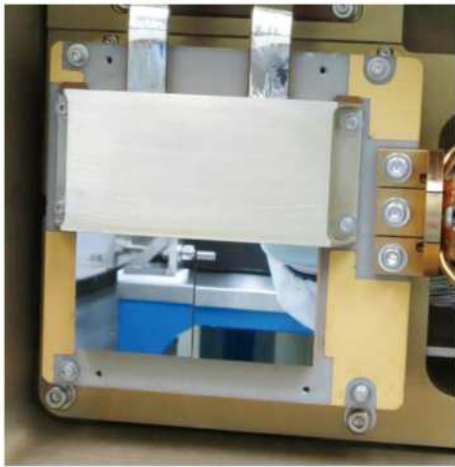


図2: 開発中の XRISM 衛星用 X 線 CCD

ある。ひとみ衛星は、カロリメーター、開発において当研究室が主導的役割を果たした X 線 CCD の他に、硬 X 線望遠鏡、軟ガンマ線検出器を搭載し、総重量 2.7 トンであった。日本の科学衛星としては最大級である。ひとみ衛星は 2016 年 2 月に無事打ち上げられ、今回はカロリメーターも無事稼働した。打ち上げ直後にペルセウス座銀河団の観測を行い、銀河団ガスの乱流が予想より小さいこと、元素組成がなぜか太陽系組成と似ていることを発見し、この成果は 2 本の Nature 論文となった^{5, 6)}。また他にもいくつかの科学成果をあげることができた。ところがまたしても悲劇に見舞われる。打ち上げ後、わずか 2 ヶ月で通信不能になり、運用不可能になってしまったのである。ひとみ衛星損失の原因は、人為的と言えるものであり⁷⁾、我々開発者にも責任はあった。それにも関わらず、わずかの観測期間で上げた成果の重要性、そして X 線カロリメーター観測の可能性を認めていただき、幸運なことにもう一度挑戦するチャンスを頂けることになった。それが XRISM (X-Ray Imaging Spectroscopy Mission) 衛星計画である。

XRISM では、観測機器をカロリメーターと X 線 CCD に絞り、ひとみ衛星をスリム化したものになっている。2021 年度に予定されている打ち上げに向けて、現在急ピッチで開発が進められている。カロリメーターは、光子のエネルギー測定は得意だが、画像を撮ることはあまり得意ではない。その点、X 線 CCD は画像を撮ることに長けており、またほど

ほどのエネルギー分解能も持っている。カロリメーターと相補的な検出器である。当研究室の林田清准教授が X 線 CCD の Principal Investigator となり、ひとみ衛星に続いて当研究室が X 線 CCD 開発をリードすることになった⁸⁾。これまでの経緯からも、万が一にも XRISM 衛星を失敗させることはできない。当研究室の当面の最大の目標は、まずは XRISM 衛星用 CCD の開発を完遂し、そして XRISM 衛星を成功へと導くことである。

将来観測のための機器開発

XRISM 衛星用 CCD の開発が当研究室にとり直近の最重要事項であるが、XRISM の先の将来観測を見据えて、我々は様々な機器開発を行っている。そのうちの 하나가、X 線偏光観測気球実験 XL-Calibur 用の X 線望遠鏡の開発である (図 3)。X 線天文学では、まだ偏光観測は本格化されていない。XL-Calibur は、大気球による上空からの長時間観測で、天体 X 線の偏光を検出しようという野心的な計画である。この望遠鏡は Wolter-I 型の斜入射光学系であり、プラチナと炭素の多層膜によるブラッグ反射で硬 X 線を反射する。現在、SPring-8 BL20B2 を用いた X 線照射実験を行い、光学調整、性能評価を行う準備を進めている。

また、高角度分解能での硬 X 線を観測する FORCE (Focusing On Relativistic universe and Cosmic Evolution) 衛星計画⁹⁾のために、当研究室は NASA Goddard Space Flight Center と協力し、角度分解能 15 秒角を切る高角度分解能硬 X 線望遠鏡の開発を進めている。シリコン結晶を切り出した高精度形状シリコン薄板を使用するユニークな光学系であり、現在はモジュールを用いた基礎開発の段階にある (図 3)。他には、炭素繊維強化プラスチック



図3: XL-Calibur 用硬 X 線望遠鏡 (左) と、FORCE 用 X 線望遠鏡モジュール (右)

ックを用いた X 線望遠鏡の開発にも取り組みつつある¹⁰⁾。

X 線撮像観測を行う際には、通常図 3 のような X 線望遠鏡を用いる。しかしこの方式だと、限られた重量と焦点距離で、1 秒角を切る角度分解能を得ることは極めて困難である。そこで、回折格子と微小ピクセル半導体検出器を組み合わせ、0.1 秒角を切る角度分解能での撮像を目指した MIXIM (Multi-Image X-ray Interferometer Module) 実験を行っている (図 4)。これは、タルボ干渉を利用した、マルチピンホールカメラとでもいうべきもので¹⁰⁾、集光能力は持たないものの、SPring-8 BL20B2 での最新の基礎実験では、0.1 秒角を切る角度分解能を達成している。

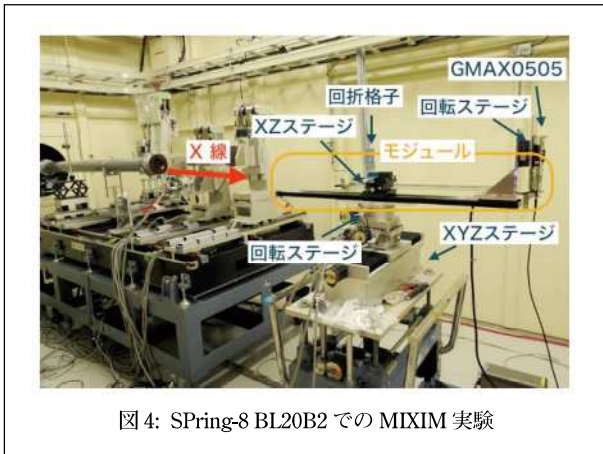


図 4: SPring-8 BL20B2 での MIXIM 実験

宇宙 X 線観測

長々と観測機器開発に関する話をつづってきたが、それは全て、ユニークな宇宙 X 線の観測を行うためのものである。現在日本は独自の X 線天文衛星を持っていないので、我々は世界中の X 線天文衛星のアーカイブデータを用いた観測的研究を進めている。活動銀河核、中性子星、銀河・銀河団など、様々な天体のデータ解析に取り組んでいる。ブラックホールや中性子星が X 線天文学の対象であることは割と有名であるし、また一般向けの解説書のようなものも多数出ているので (例えば文献 12)、ここでは少し毛色の変った研究を紹介しよう。それは超高エネルギーガンマ線天体の X 線観測である。

我々の住む天の川銀河面には、1 TeV 以上のエネルギーの超高エネルギーガンマ線で光っている天体が 100 個近く見つかった¹³⁾。これは、その天

体の内部で粒子が TeV 以上のエネルギーへと加速されていることを物語っている。人類最強の加速器 Large Hadron Collider (LHC) の最大エネルギーが約 10 TeV であるから、それと同程度の「天然の」加速器が銀河面にはずらっと並んでいるわけである。半数は、高速回転する中性子星の周囲のパルサー風星雲や超新星残骸だと考えているが、残りの約半数は、その正体がよくわかっておらず、TeV ガンマ線未同定天体と呼ばれている。そこで我々は、すざく衛星を使って TeV ガンマ線未同定天体の X 線観測を進めている。すざく衛星は、 $E > 2 \text{ keV}$ の X 線に対して、バックグラウンドが最も低く安定しているので、感度が高い。我々はすざく衛星のこの特性を生かして、いくつかの TeV ガンマ線未同定天体から、中性鉄の特性 X 線を発見した。図 5 は、そのような例の一つである、HESS J1858+020 の中性鉄特性 X 線の分布である。特性 X 線が出ているということは、鉄がなんらかの原因で電離されたことを意味する。電離源としては、電子、陽子、X 線が考えられる。中性鉄特性 X 線の、連続 X 線に対する強度比を精密測定すれば、電離源を特定できる。残念ながらすざく衛星の X 線スペクトルは十分な精度がなく、決定的なことは言えなかったが、電離源がエネルギー 10 MeV 程度の陽子である可能性を指摘した。もしこの仮説が事実なら、HESS J1858+020 で TeV エネルギーまで加速されている途中の粒子、あるいは一度 TeV まで加速されたが 10 MeV までエネルギー

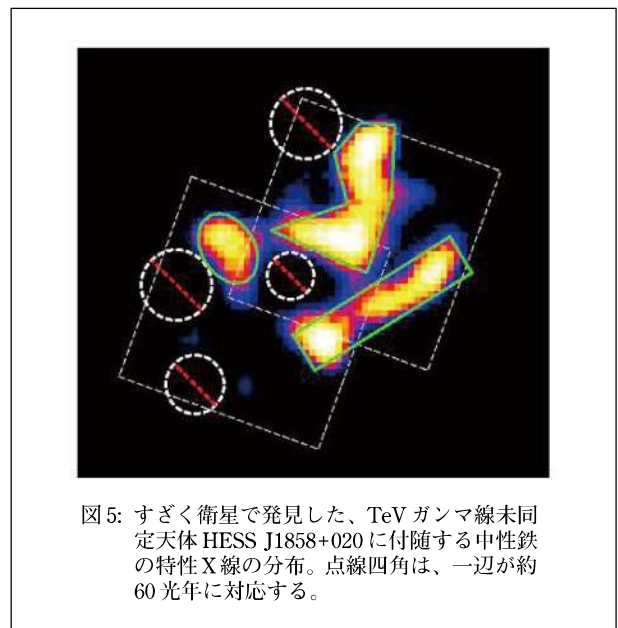


図 5: すざく衛星で発見した、TeV ガンマ線未同定天体 HESS J1858+020 に付随する中性鉄の特性 X 線の分布。点線四角は、一辺が約 60 光年に対応する。

を失った粒子を見ていることになる。宇宙空間には宇宙線と呼ばれる高エネルギー粒子が飛び交っていることが知られているが、1 GeV 以上の宇宙線は詳細に研究されている一方で、10 MeV 程度の宇宙線は観測が難しく、どの程度存在しているのかよくわかっていない。我々の研究は、10 MeV 程度の宇宙線を観測する新しい手段を提供しているのかもしれない。

まとめ

我々は、宇宙 X 線の観測と、そのための装置開発を手掛けている。直近の最大の目標は XRISM 衛星の完成と、それを生かした新しい宇宙物理の開拓である。さらに XRISM 衛星の先を見据え、さまざまな機器開発を行っている。いつの日か機会があれば、改めて今後の成果を紹介したい。

参考文献

- 1) Giacconi, R., Gursky, H., Paolini, F. R., Rossi, B. B. 1962, Physical Review Letters, vol. 9, Issue 11, pp. 439-443
- 2) Tanaka, Y., Annu. Rev. Astron. Astrophys. 2013. 51:1-20
- 3) Ueda, Y. et al. 2007, The Astrophysical Journal, Volume 664, Issue 2, pp. L79-L82
- 4) Werner, N., Urban, O., Simionescu, A., Allen, S. W., 2013, Nature, 502, 656
- 5) Hitomi Collaboration, 2016, Nature, 535, 117
- 6) Hitomi Collaboration, 2017, Nature, 551, 478
- 7) http://www.jaxa.jp/press/2016/06/20160608_hitomi_j.html
- 8) Hayashida, K., Tomida, H., Mori, K., et al. 2018, Proc. SPIE, 1069923
- 9) Nakazawa, K., Mori, K., Tsuru, T. G., et al. 2018, Proc. SPIE, 106992D
- 10) Matsumoto, H., Iwase, T., Maejima, M., et al. 2015, Proc. SPIE, 96030Y
- 11) Hayashida, K., Kawabata, T., Hanasaka, T., et al. 2018, Proc. SPIE, 106990U
- 12) 嶺重慎, 「ブラックホールを見る！」岩波科学ライブラリー 144, ISBN 9784000074841
- 13) H. E. S. S. Collaboration, 2018, Astronomy & Astrophysics, 612, A1

