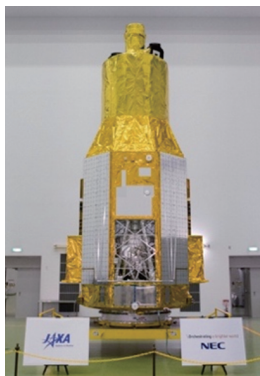
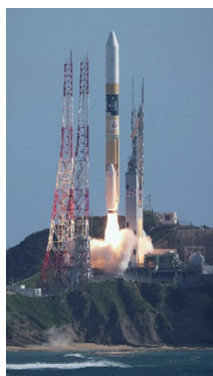


X線の観測が解き明かす宇宙像

東京理科大学 創域理工学部 先端物理学科 教授 こうむら 幸村 たかよし 孝由

1. はじめに

2023年9月7日9時42分11秒、眩い光を放ちながら轟音と共に JAXA 種子島宇宙センターから、HIIA ロケット 47 号機で X 線天文衛星「XRISM」が打ち上げられた【図 1 (左)】。XRISM は、2016 年に同じ HIIA で打ち上げられた後、運用上のトラブルで観測を断念した X 線天文衛星「Hitomi」の後継機として、JAXA が中心となり国内の大学研究機関やメーカーに加えて、米国航空宇宙局 (NASA) と欧州宇宙機関 (ESA) が参画して進めている国際共同プロジェクトである。日本のみならず世界中の宇宙物理学の研究者から、XRISM 衛星の打ち上げの成功と、観測から創生される科学成果が待ち望まれている。打ち上げ直後に太陽電池パドルの展開が無事完了し、9月11日には XRISM 衛星が地上に送信しているデータから、地上基地局との通信、太陽電池パドルの発電状況や衛星の姿勢制御が正常であるといったクリティカル運用期間が終わり、これから XRISM 衛星に搭載している各種機器が正常に動作するかチェックする初期機能確認運用期間に入る。また、年内には、天体の観測を開始し、ファーストライトが公開される予定である。ここでは、天体が放射する X 線の観測からどのようなことが解明されていて、また、打ち上げられたばかりの XRISM 衛星による観測で、これから天体のどのような謎の解明が期待されているか解説したい。



【図 1】(左) XRISM 衛星を載せた HIIA ロケット 47 号機の打ち上げ時の写真 (提供: 三菱重工 Credit: MHI) (右) XRISM 衛星の写真 (Credit: JAXA)。

2. X線天文学とは

今では、可視光線以外の、電波、赤外線、紫外線、X 線、 γ 線といったあらゆる波長の光 (電磁波) や、光速に近いスピードで宇宙空間を

飛び交う陽子や電子などの高エネルギー粒子、さらにニュートリノといった素粒子を天体が放出していることは広く知れ渡り、また、2016 年には 2 つのブラックホールが合体する際発生した重力波までも観測される時代になっている。このように天体からの電磁波、粒子、重力波の観測が当たり前のように可能になっている。ここでは、少々時計の針を遡ることになるが、まずは天体が放射する X 線の観測の歴史 (X 線天文学の歴史) から紹介したい。

X 線と言えば、多くの人が外科、歯科の検診などで大なり小なりの恩恵を受けている電磁波の 1 つであり、波長が可視光線の 1/100 より短い、おおよそ 1 nm~1 pm 程度の電磁波で、波長で表現するよりエネルギー (電子ボルト; eV) という単位を使う。エネルギーで言うならば、X 線は可視光線よりも何百から何千倍もエネルギーが高く、そんなエネルギーの高い電磁波を放射する天体には、そもそも何らかのエネルギーが高い環境があるということなので、X 線の観測は、宇宙の高エネルギー現象を研究するということになる。この X 線の発見は、1985 年に陰極管を用いた実験中に“特殊な光線”としてレントゲン (1901 年ノーベル物理学賞) によって発見され、その後も、ラウエやブラッグ親子によって研究がなされた X 線回折、パークラによる X 線散乱、シーグバーンによる X 線分光器は、いずれもノーベル物理学賞を受賞されるなど、X 線はその発見以降、物理分野と医療分野に大きな変革をもたらした。

さて、長年、可視光線に限られていた天文学の観測分野であるが、2 つの大きな世界大戦を挟み、無線技術の発展に伴い、まず電波天文学が勃興した。一方、X 線については、人体を透過する X 線でも地球の大気は透過できないため、天体が放射する X 線を地上で観測することができない。単位体積あたりの原子の個数は、人体に比べると、大気はずいぶん小さいので、大気を透過できないというのは、一見、矛盾しているように感じられるかもしれない。X 線は波長が短いことから物質を構成する原子と直接相互作用するため、X 線の透過性は、X 線源と観測者の間にどれくらいの

数の原子が存在するかということで決まる。実は、天体が放射したX線にとっては、人体よりも、大気の方が大量の原子があるため、透過することができない、つまり、地上ではX線の観測はできないのである。そこで、大戦後、ロケットを科学者も利用できるようになったことで、観測機器を大気圏外に持ち出す手段を得、1949年に米国のフリードマンらがV-2号ロケットに搭載したガイガー計数管による5分間の観測により、人類は初めて天体のX線を太陽から観測することができた。ただ、太陽が放射するX線は、黒体輻射から期待された通り、可視光線に比べると桁違いに暗いものであった。そのため、当時の観測技術では、太陽と同じような明るさの遠くの天体(恒星)が放射するX線を観測しようとする、明るさは天体までの距離が離れるほど暗くなるため、到底、観測できないようなものと考えられていた。

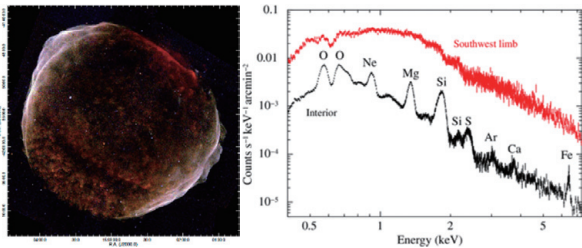
そのような常識に囚われず「自然は我々人間より、もっと空想に富んでいるかもしれない」と考えた米国のロッシやジャコーニらが、太陽が照らす月からの蛍光X線を観測する名目で、1962年にガイガー計数管を搭載したロケットを打ち上げ、偶然にも、太陽系以外の天体から強力なX線放射を発見した。その天体は、今ではさそり座X-1と呼ばれる全天で定常的に最も明るいX線天体で、この発見は、偶然、さそり座X-1と月が近くに位置していたという幸運の産物である。当初の目的であったはずの月からのX線は観測できなかったが、このさそり座X-1の発見から、X線天文学が劇的な誕生を迎えることとなった。当時の米国は、ケネディ大統領が「1960年代には人類を月に送る」と宣言をしたアポロ計画がスタートし、米国内が宇宙開発ブームの只中であつた状況であり、ロケットや人工衛星を必要とするX線天文学が発展する環境があつたのかと思われる。また、天文学の分野に限ると、この1960年代はX線天文学が誕生した以外にも、中性子星やクェーサー、宇宙マイクロ波背景輻射の発見など輝かしい発見が相次いだ時代でもある。話をX線観測に戻すと、ジャコーニは、その後も数多くのX線観測衛星の開発を主導し、また後述するようなX線天体の観測的研究でも数多くの研究業績を残し、2002年にノーベル物理学賞を受賞された。このようにX線天文学はアメリカで誕生した研究分野ではあるが、1960年代にロッシやジャコーニと共に米国でX線天文学の研究を行っていた日本の小田稔先生は帰国後、1978年に国産のX線天文衛星「はくちょう」の開発を主導し、その後の7機目とな

るXRISM衛星につながる日本でのX線天文学の礎を築かれた。このように日本は、X線天文学の黎明期より、この研究分野に参画し、欧米に加え、ロシア、インドに続いて中国が参入し、活況を迎えているX線天文学の研究分野を牽引している。

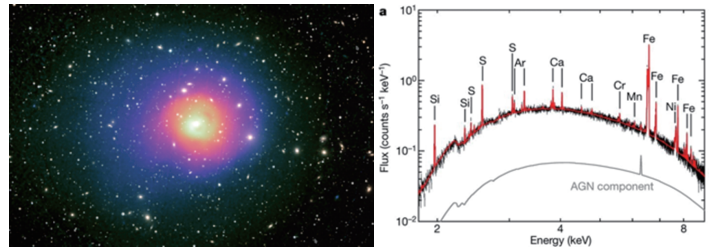
3. X線で観測する宇宙とは

天体が放射するX線を観測することで、天体についてどのようなことが分かってきているか、X線を放射する物理過程の熱的放射と非熱的放射を説明しつつ、いくつかの天体の観測例を紹介したい。

まずは熱的放射から始めたい。統計力学では、ある温度の粒子(例えば、原子や気体分子)は、その温度に応じた速度で不規則な運動(熱運動)をすることが分かっており、熱運動の速度は、高温であるほど速くなる。十分に高温な環境下で、高速の原子同士が衝突すると、原子から電子が剥がされ、剥がされた電子は別の原子に衝突し、さらに電子を剥ぎ取るといった過程(衝突電離)を経て、電子とイオンからなるプラズマが生成する。そのようなプラズマがあると、その中を飛び交う電子が、イオンの近傍を通過する際にクーロン力を受け、運動方向が変えられ(電子が制動されるとも呼ぶ)、そのような物理過程で電子が電磁波を放射する。これを熱制動放射と呼ぶ。温度が数百万度から数億度に達しているようなプラズマが存在すると、そのような超高温環境下の電子が制動放射する電磁波が高エネルギーのX線となる。また、高速に運動する電子がイオンに衝突すると、イオンに残されている内殻の電子が剥ぎ取られる。この内殻にできた電子の空席に、再度電子が取り込まれる際に、電子が決まったエネルギー(波長)の特性X線と呼ぶX線を放射する。制動放射は、熱運動する電子の運動エネルギーに応じて、様々なエネルギーのX線が放射されるため、天体が放射するX線を分光して得られるスペクトルは、エネルギーによって切れ目のない連続的なものとなる。一方、特性X線は、イオン(元素)の種類と、電離状態によって固有の値のエネルギーのX線となる。プラズマの密度が低い場合は、制動放射と特性X線の両方が観測される。一方、プラズマの密度が高くなると、制動放射や特性X線として放射したX線光子は、プラズマ中の電子やイオンと衝突し、また、再放出するような過程をくり返し、やがてプラズマの外に出てくる。このような過程で放射するX線は、制動放射や特性X線といった元の放射とは異なり、黒体輻射と呼ぶ放射として観測されることになる。これらの3



【図2】藤原定家の「明月記」にも記録されている西暦1006年に爆発した超新星残骸のX線の画像(左)とスペクトル(右)。地球からの見かけの大きさは満月と同程度の大きさで、実際は太陽系よりも100万倍も大きく広がった天体である。右図の横軸が測定したX線のエネルギー、縦軸が測定したX線光子数(明るさ)に相当する。黒色と赤色の2つのスペクトルが描かれていて、黒色は超新星残骸の画像の真ん中あたり、赤色は右下あたりの領域から得られたスペクトル。(Katsuda et al. 2009, Winkler et al. 2014)



【図3】(左)ペルセウス座銀河団の可視光線とX線の画像。漆黒の宇宙空間の数多く確認できる白点1つ1つが銀河。中央のオレンジ色、赤色、紫色に着色しているのがX線を放射する高温ガス(Sanders, et al. 2019)。(右)Hitomi衛星で観測したX線のスペクトル(Hitomi Collaboration. 2019)。

つの代表的なX線の放射過程は、いずれも熱運動する電子がX線放射の起源となっているため熱的放射と呼ぶ。【図2】と【図3】に熱的放射のX線で輝いている観測例として、超新星残骸と銀河団のX線の画像とスペクトルを示す。

太陽の質量よりも8倍以上重たい恒星が、その寿命が尽きる時に引き起こす大爆発、あるいは、普通の恒星と連星をなす白色矮星に対し相手の恒星のガスが降り積もり、一定量のガスが降り積もると白色矮星自身が爆発する現象は、いずれも宇宙最大の爆発現象で超新星爆発と呼ぶ。また、爆発後、宇宙空間に残される残骸のことを超新星残骸と呼ぶ。この爆発は宇宙最大の爆発現象であり、 $\sim 10^{46}$ ジュールもの膨大なエネルギーが一気に解放され、そのうち99%はニュートリノが超新星残骸の外に運び出し、わずか1%程度であるが 10^{44} ジュールもの巨大なエネルギーがニュートリノ以外の恒星のガスに受け渡され、恒星のガスは秒速1,000 kmを超える速さで撒き散らされ、恒星の周囲にもともと存在した塵(星間ガス)と衝突し、熱運動のエネルギーとなり、結果として、超新星残骸は数百万度から数千万度もの超高温のプラズマとなり熱的放射としてX線で輝く。また、恒星はその一生の間に内部で炭素、窒素、酸素など様々な元素を核融合で生成するが、超新星残骸のスペクトルを分析すると、それらの元素特有の特性X線が観測される。【図2(右)】の黒色のスペクトルのうち、右肩下りの大きな山のようなものが制動放射を起源とするX線、小さいコブ状のものが特性X線を起源とするX線である。この特性X線を分析することで、酸素、マグネシウム、シリコン、鉄といった様々な元素が、星の内部で生成されていることが分かる。

【図3】に銀河団の写真(左)とX線のスペクトル(右)を示す。銀河団の写真は、漆黒の宇宙空間と多くの白点が写されている可視光線の画像と、擬似カラ

ーをつけたX線の画像を重ねたものである。可視光線の画像だけだと、銀河団は、数百から数千個もの無数の銀河が局所的に集まった宇宙最大規模の天体であることが分かる。一方、X線の画像から、銀河団の空間は、漆黒の空間が支配しているのではなく、実は数千万度から数億度もの超高温のガスに満たされていることが分かったのである。さらに、X線のスペクトルから、X線を放射している高温ガスの総質量が、可視光線で観える数百から数千個もの各銀河の質量を足し合わせたものよりも大きいことが分かり、銀河団は、X線を放射する超高温ガスの中に、各銀河が浮かんでいる、というのが真の姿ということが分かったのである。さらに、冷静に考えると、銀河団の中に見出された超高温のガスは、100億年以上の宇宙の歴史の間、銀河団から飛散せず、銀河団の中に留まり続けていることはなぜだろうか。その理由としてパッと思いつくのは、銀河団の中にある数多くの銀河による万有引力が、高温ガスを引き留めているというものであろう。しかし、万有引力だけでは、高温ガスを銀河団の中に閉じ込めておくには十分ではなく、さらなる重力源、つまり可視光線でもX線でも直接観測することができないダークマターによる万有引力が高温ガスを閉じ込める役割を担っているのである。このように、X線の観測から、長年人類がその直接観測を目指しているダークマターについて、間接的ではあるが、その存在を示唆しているのである。

次に非熱的放射について少し触れておこう。熱的放射は、高速の電子がイオンによって運動の方向を曲げられる際に、電子がX線を放射するものであるのに対し、高速の電子が磁場の中を運動する場合、磁場からローレンツ力を受け、電子は磁力線に巻き付くようにらせん運動をする。この物理過程で連続的に運動の方向を変える電子が電磁波を放射する。これをシンクロトロン放射と呼び、プラズマの温度によらない放射ということで非熱的放射の1つに挙げられる。【図3(右)】の赤色のスペクトルを見てみよう。この赤色のスペクトルは、【図3(左)】の画像の右下のシェルと

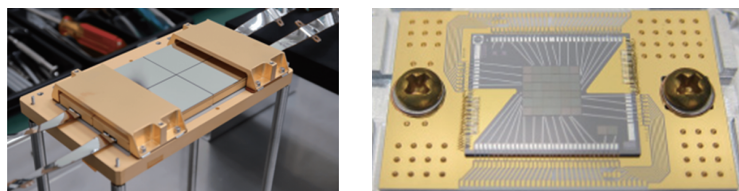
呼ばれる領域から得たもので、黒色の熱的放射のスペクトルとは異なり、特性X線がない、のっぺりとしたスペクトルで、超新星爆発で得た速度よりも、さらに高速になった電子が、数十マイクロガウスという微弱な磁場によってシンクロトロン放射によって放射したX線である。この超新星残骸のシェルの部分において、(詳細は省略させて頂く) 衝撃波の影響をうけ、高速電子がX線を放射できるまで、さらに高速になっている、つまり加速しているのである。人類は新粒子を探索するために、素粒子実験において、荷電粒子を加速し衝突させる実験を行なってきているが、その素粒子実験でも生み出すことができない高速の電子が、超新星残骸で作られていることがX線の観測から分かるのである。この結果は、100年以上前にヘスによって発見され、長年謎に包まれていた宇宙空間を飛び交う高エネルギー粒子(高エネルギー宇宙線と呼ぶ)が、超新星残骸によって生み出されている、つまり、超新星残骸が高エネルギー宇宙線を加速している現場であることを突き止めた大発見なのである。

4. XRISM衛星とは

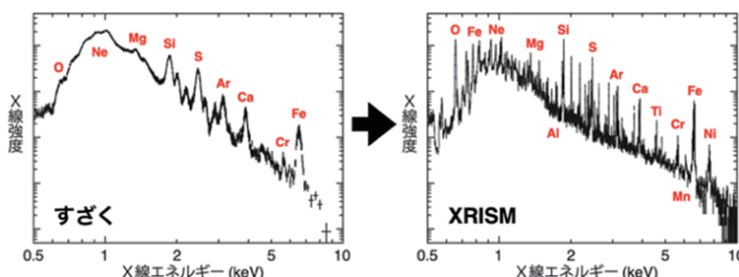
ここではXRISM衛星と、観測から期待されているサイエンス結果について少し紹介しておきたい。XRISM衛星は、X線反射鏡を2台搭載し、それぞれの焦点面には、【図4】に示したX線撮像器「SXI」とX線分光装置「Resolve」が設置されている。理科大では、筆者と理学部第一部物理学科の小林講師がSXIの開発を、筆者の研究室の内田助教がResolveの開発を担当している。また、理学部第一部物理学科の松下教授がプロジェクトサイエンティストとして参画している。

SXIはX線用のCCDであり、透過力の高いX線を捉えるために可視光用のCCDに比べ、100倍厚い空乏層を持つことが特徴である。【図4(左)】に示すように4枚のCCDをモザイク状に配置し、面積を広くすることで、これまでのX線天文衛星の中で、最大の視野を持ち、満月を一度に視野に収められる。Resolveは、X線マイクロカロリメータで、水銀テルル製のX線吸収体とシリコン半導体温度計からなり、常に絶対温度0.05度に冷却し、X線光子が入射することによる微小な温度上昇を検出し、入射したX線のエネルギーを計測する。その最大の特徴は、【図5】に示すスペクトルから分かるように、X線に対する分光性能が極めて高いことである。

最後に、XRISM衛星で期待されている数多くのサ



【図4】(左) X線撮像器「SXI」を構成する4枚のX線CCD、(右) X線分光装置「Resolve」用の6x6画素のX線マイクロカロリメータアレイ (Credit: JAXA)



【図5】典型的な超新星残骸のX線スペクトル。(左) 2005年-2015年に活躍した「すざく」の観測の実データ。(右) 「Resolve」の観測で予想されるスペクトル。優れた分光能力により、様々な元素の特性X線を検出することが期待されている (Credit: JAXA)。

イエンスの結果のうち1例だけ紹介させて頂く。XRISMは優れたX線の分光性能を活かし、超新星残骸、銀河団といった様々な天体の高温プラズマを観測する予定である。熱運動しているプラズマが放射されるX線は、静止しているプラズマに比べ、ドップラー効果の影響を受け、観測されるX線のエネルギー(波長)が変わる。そのエネルギーの変化を測定することで、高温プラズマの熱運動の様子(熱運動の速度)を測定できる。銀河団中の高温プラズマは、エネルギーの高いX線を放射し続けているということは、エネルギーを失い続けているということであり、高温の熱運動を維持できないはずである。それが100億年もの間、高温であり続けているのは、熱運動を維持するために、エネルギーを注入する何かがあるからである。その何かの候補が、銀河団中の銀河の中心に潜むブラックホールと考えている。ブラックホールは、ものを吸い込むだけではなく、ジェットと呼ぶ高速のプラズマを吹き出しており、このジェットが銀河団のガスをかき混ぜ、高温の熱運動を維持させていると考えられており、XRISMによって、その描像が明らかになると期待されている。ただし、これまでのX線天文学の歴史は、さそり座X-1の発見、ブラックホールの発見、銀河団の高温ガスの発見など、良い意味で期待や予想を裏切り続けた発見の歴史でもある。XRISMによる様々な天体の観測も、これらの予想を大きく裏切る、ワクワクする結果が得られることを期待して頂きたい。