

## 特集1

## 30分で分かる超新星残骸のX線精密分光

鈴木 寛大 (宮崎大学)

## 1. 「色」の識別に強いX線衛星XRISM

JAXA が率いる国際天文衛星プロジェクト XRISM (X-Ray Imaging and Spectroscopy Mission) は、X線「精密分光」、言い換えればX線の「色」の識別を得意とする衛星です。2023年9月に鹿児島県の種子島宇宙センターから無事に打ち上げられ、半年程度の立ち上げ運用を経て2024年2月から定常運用期に入りました。私自身は2021年からプロジェクトに加入した新参加者ですが、非常にたくさん学ばせていただいたので思い出があります。打ち上げ前の1年間ほどは衛星総合試験という、衛星がほぼ完成した状態で様々な検証を行う時期がありました。この頃は時折つくば宇宙センターを訪れては夜通し試験に張り付くということがありました。特に、「衛星熱真空試験」は大きな山場で、衛星を1ヶ月間もの間、真空チャンバーに入れて太陽光を模した光を当て、宇宙に近い環境での検証をしました(図1)。2023年9月の打ち上げはJAXAの管制室から見守りましたが、ものすごい音や振動、力強い加速で、装置が破壊しないか心配になったのをよく覚えています。



図1 XRISM衛星の衛星熱真空試験のため、直径13mの真空チャンバーに衛星を搬入する様子(クレジット: JAXA)。

図2は性能実証のために撮影した、西暦1006年に観測された超新星の残骸のX線画像(赤青緑の3色)に可視光画像(無数の点源)を重ねたものです[1]。暗い線がいくつか見えるのはカメラの仕様のためです。このデータを見たときには感動しました。想定よりも画質が良く、画面の端の方でもちゃんと撮影できていました。さて、XRISM衛星を使った初めての科学論文に向けた解析にかかったのは2024年1月でした。本番である宇宙空間での衛星運用の初期には、検出器の理解やデータ処理ソフトに未熟な部分が多々あり、通り一遍の手法を知っているだけではとても対処できません。国内外の専門家と協力した柔軟な対応が必要になり、ここでも多くのことを学びました。第一論文が形になり、日本天文学会が出版する科学誌に受理されたのは2024年8月でした[2]。コアメンバーに絞ってもJAXA、NASA、アムステルダム大学などに所属する20名程度が力を注いだ力作となりました。

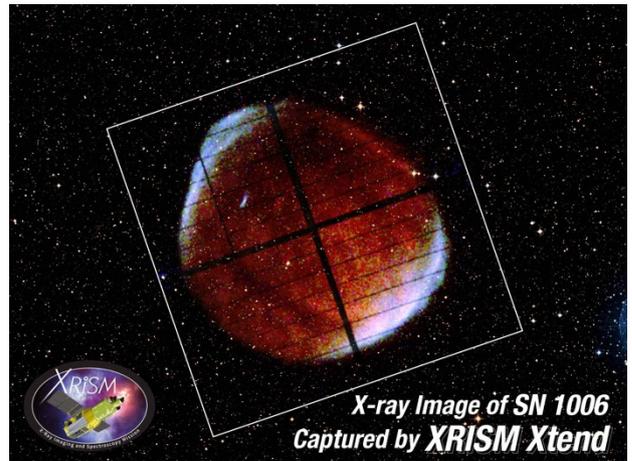


図2 XRISM衛星に搭載したX線CCDカメラが撮影した西暦1006年の超新星の残骸(クレジット: JAXA)。

## 2. X線精密分光データから理解する

### 超新星残骸

科学的には「非分散系によるX線精密分光」という新たな扉を開いたXRISMミッションですが、一般社会へのアピールにはいつも苦しんでいます。「分光」という技術と得られる成果は残念ながら直感的な魅力に乏しく、上手く補足説明をしないと、興味をもってもらえません。2024年10月にはXRISM一般講演会というものがあり[3]、私もそこで超新星残骸について講演をしました。大事な内容を削ぎ落とさず、なおかつなるべく噛み砕いて説明するよう試みたところ、ありがたいことに参加者の方々の現地での反応もなかなか良く、アンケートも驚くほど好評でした。そこで説明した内容の一部を以下で紹介します。

超新星残骸というのは星が死に際に起こす大爆発である超新星が巻き起こす爆風のようなものです。星間空間に衝撃波が生まれ、衝撃波は星間物質や爆発した星の残骸を熱いプラズマ状態に変えます。XRISM衛星で明らかにする超新星残骸のサイエンスは主に(1)爆発でばらまかれた元素の組成、(2)爆発の3次元構造、(3)プラズマの温度です。

### 2.1 元素組成の測定

熱いプラズマは元素ごとに特有のX線放射をします。可視光に例えると、それぞれの元素が特有の色を持っているということです。図3(上)に花火と超新星残骸の比較を示しました。花火がカラフルなのは、様々な元素を使っていて、それぞれが異なる色で燃えるからです。いわゆる炎色反応ですね。これと似たようなことが超新星残骸でも起きています。ただし、花火の温度は数千度以下なのに対して、超新星残骸は一千万度に達します。つまり温度が一万倍くらい違います。これはちょうど、可視光とX線のエネルギー帯域の違いにだいたい対応しています。図3(下)

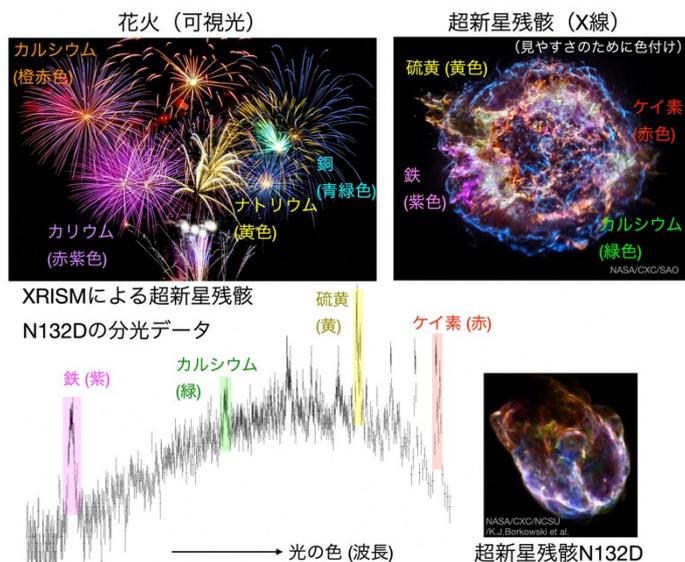


図3 (上) 可視光で見た花火とX線で見た超新星残骸「カシオペア座A」。(下) XRISM衛星に搭載したX線精密分光器で取得した分光データ。それぞれの元素に特有のX線の波長(色)をはっきり区別できている。

は実際に観測された「N132D」という超新星残骸の分光データです。鉄、カルシウム、硫黄、ケイ素に対応する鋭いピーク(特性X線)が確認できます。このように鋭いピークは従来の観測装置では見ることはできませんでした。ピークが鋭いので、光が弱くても、つまり元素の量が少なくても検出することができます。そうすると、今まで全く不明だったレアな元素の量を測ることができます。恒星の内部や超新星爆発の瞬間に元素の合成が起こり、鉄や酸素、ケイ素がたくさん作られますが、レアな元素というのは例えばリンやカリウムなどです。これらは宇宙での存在量は少ないですが、人体に不可欠な要素でもあり、その点でも重要です。ちなみに図3(下)の分光データをよく見るとケイ素や硫黄のピークが1本でなかったり、元素名を書いていないピークがあつたりしますが、これらは同じ元素からでも多数の異なる波長の特性X線が出るためです。全体としてどのようなX線放射になるかはプラズマの温度や密度などに依

存し、ちゃんと理解するには量子力学を学ぶ必要があります。

## 2.2 爆発の膨張速度の測定

ドップラー効果は専門用語かもしれませんが、有名ですね。救急車が近づいてくるときと離れていくときとでピーポの音程(波長)が変わるのが、ドップラー効果の代表例です。これと同様のことが音ではなく光でも起きます。光の場合、波長が変わるのは色が変わるということです。天文好きの方なら赤方偏移という言葉をご存知でしょう。我々から遠い銀河ほど速く遠ざかり、静止していれば特定の波長に現れるはずの光に着目すると、遠いほど赤みがかって見えるという現象です。光の赤さを観測すると、遠ざかる速度を知ることができます。超新星爆発ではものすごい速度で爆風が膨張します。日本列島を1秒以内に駆け抜ける猛スピードです。そうすると、爆風が我々に向かってるか離れていくかで色が変わります。XRISMはX線の「色」に非常に敏感なので、ちょっとした変化も捉えることができます。条件によりますが、速度でいうとざっと数10 km/sまで検出できます。地球が太陽の周りを回るスピードが30 km/sくらいなので、銀河系の星や惑星の動きを追えるレベルの良い感度があると言えます。図4は超新星残骸の膨張構造の違いが分光データにどう反映されるかを示しています。左上は爆風が我々の側にのみ飛んできている(変な)状況で、この場合は元の特性X線よりも青みがかった光だけ観測されます。右上のようにリング状のものが膨張していると、赤側と青側に变化した光、変化なしの光が重なった状態で観測され、結果的に分光データのピークが太く見えます。これらの理解をもとに得られた分光データを見ると、その超新星残骸が奥行き方向にどのような構造をしているかが推測できるというわけです。

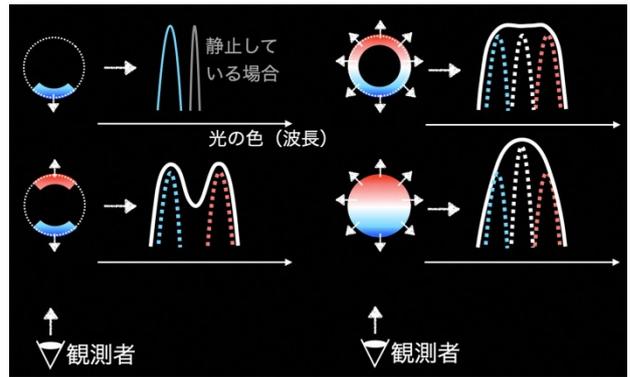


図4 超新星残骸の膨張のしかたと観測されるX線分光データの対応を模式的に示した。赤い部分は赤方偏移、青い部分は青方偏移している部分を示す。

## 2.3 温度の測定

上述のドップラー効果のお話は膨張速度に注目していました。ドップラー効果が関係する現象がもう一つあります。それがプラズマの熱運動です。熱運動というのは要するに温度のことなのですが、そもそも温度というのが何を意味するか、ご存知でしょうか。

例えばお湯が熱いと言ったときには、物理の言葉で言えば「水分子の平均的な運動エネルギーが大きい」ということになります。集団をなしている粒子たちのミクロな運動エネルギーを平均したものが、マクロな量である温度として認識されます。これと同じように、プラズマの温度というのも、個々の粒子たちがどれくらいの速度で飛び回っているかで決まります。ここで、ドップラー効果を思い出してください。光を出すのは粒子(原子)一つひとつですので、これらが運動していると、ドップラー効果で光が青くなったり赤くなったりします。プラズマ全体を見ると、無数の粒々がいろんな方向に動きながら光を出すので、それらが重なり、色がぼやけます。個々の粒子の速度が大きいほど強くぼやけることになりますので、この「ぼやけ」具合が温度と対応するわけです。このことを念頭に実際

のデータを見てみましょう。図5では2つの超新星残骸で観測された鉄の特性X線の分光データを示しています。上下の分光データを見比べると全然様相が違いますが、元々はある程度似たような形だったと思われます。元々というのは「個々の原子が光を発したときには」という意味で、これが熱運動によりぼやけると、熱運動の激しさ、つまり温度の違いによりこのような違いが生まれます。この2つで言えば「いて座Aイースト」は比較的低温で、「N132D」は非常に高温であることが推測できます。

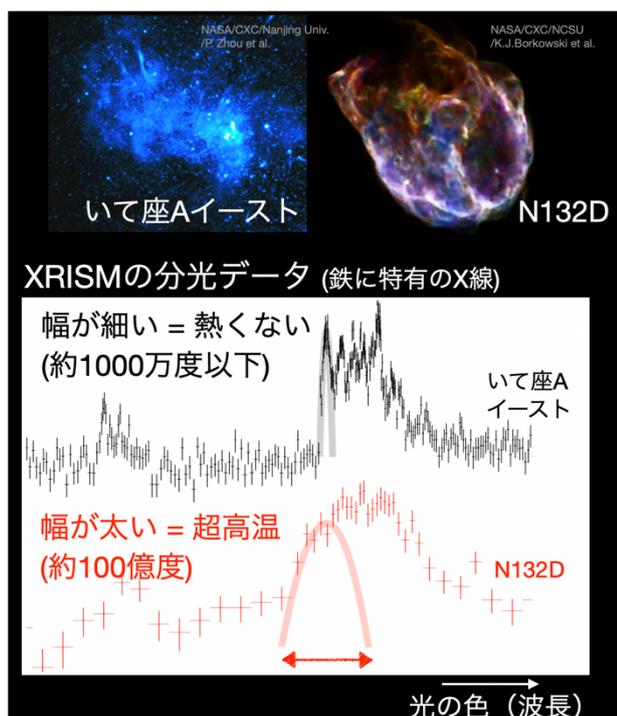


図5 超新星残骸「いて座Aイースト」と「N132D」のXRISMによる分光データの比較。元素特有のX線輝線の幅の太さは熱さを反映するため、「いて座Aイースト」は比較的低温、「N132D」は非常に高温であることが分かる。

ここで鋭い読者はお気づきかもしれません。先ほど述べた膨張運動もこのような「ぼやけ」を作り出すことがあります。図4の右下のようなケースですね。そうすると、どうやって膨張運動なのか温度なのかを区別するのかと

いうことになってきますが、正直に言えば区別が難しい場合も多いです。たくさんの元素のピークが見えていれば、元素ごと、さらに同じ元素の異なる波長に現れる特性X線を比較することで、膨張と温度を区別することはできます。それでも、「現実は小説よりも奇なり」と言われるように、現実の超新星残骸の膨張構造は非常に複雑ですし、温度も場所によって異なりますので、必ず何らかの近似をして結果を出すことになってきます。これは宇宙物理学の宿命だと思いますが、単純に球形に膨張していると仮定するところだ、とか、温度はプラズマ全体で一定であるとすればところだ、というように議論することが多いです。こういう点では、研究には思い切りも大事だと言えますね。観測技術の発展というのは、ある面では「必要な仮定を減らすこと」だと言えらると思います。XRISMで言えば、分光データの細かい構造が見えるようになったことで、異なる速度や温度をもつプラズマの要素をある程度分離できるようになりました。従来は単一の温度を仮定して理解するしかなかった天体現象の、温度勾配だとか局所的な温度構造を見ることができるようになったわけです。

### 3. 今後の宇宙ミッションと社会

ここまで超新星残骸の「X線精密分光」というカタイ話を噛み砕いてご説明してみました。いかがでしたでしょうか。超新星残骸にはもっとマニアックな、つまり面白みがわからない人が多い側面もまだまだあります。例えば私自身、最も興味があるのは実は超新星爆発の衝撃波が天然の「粒子加速器」として働く側面だったりします[4]。このように研究分野は細分化されていきますし、そのためのマニアックな観測装置も欲しくなります。しかしミッションを実現するためには専門外の多くの人々の支持が必要です。そこで、いかに皆さんに面白いと思ってもらえるかが大

事になってくるわけですね。今後も研究成果や計画をいかに上手に伝えるか、もがきながら進んでいくのだらうと思います。辛くも楽しい時間です。余談ですが、研究者って研究に没頭している時間は案外、50%より少ないくらいなんですよね。残りはアウトプット作業、例えば論文やこのような記事を書いたり、講演をしたり、または予算獲得のための申請書を書いたり、ということをしています。研究に没頭するだけでは生きていけない、という意味では、ある程度大人にならないといけないとも言えますね。

2024 年度日本天文教育普及研究会中部支部会での講演と記事執筆の機会を下された皆様、特に内山秀樹さん（静岡大学）に御礼を申し上げます。内山さんには昨年、共著論文を出版した際のプレスリリース [5] でも、いかに皆さんに伝わる記事にするかという相談に乗っていただき非常に助かりました。今後ともお世話になります。

## 文 献

- [1] 定常運用移行および初期科学観測データ公開について  
<https://www.xrism.jaxa.jp/topics/news/987/>
- [2] XRISM Collaboration (2024), “The XRISM first-light observation: Velocity structure and thermal properties of the supernova remnant N 132D”, Publications of the Astronomical Society of Japan, 76: 6, 1186–1201
- [3] XRISM 一般講演会の録画の公開：  
[https://www.youtube.com/watch?v=FXP PvtufAJ0&ab\\_channel=JAXA%E5%AE%87%E5%AE%99%E8%88%AA%E7%A9%BA%E7%A0%94%E7%A9%B6%E9%96%8B%E7%99%BA%E6%A9%9F%E6%A7%8B](https://www.youtube.com/watch?v=FXP PvtufAJ0&ab_channel=JAXA%E5%AE%87%E5%AE%99%E8%88%AA%E7%A9%BA%E7%A0%94%E7%A9%B6%E9%96%8B%E7%99%BA%E6%A9%9F%E6%A7%8B)

A7%8B

- [4] 鈴木寛大 (2024) 『超新星残骸は銀河宇宙線の加速源か？ —最新の高エネルギー観測からの示唆—』, 天文月報, 117, 429  
[https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/117-8\\_489.pdf](https://www.asj.or.jp/jp/activities/geppou/item/117-8_489.pdf)
- [5] 宇宙科学研究所, 『「殻」を壊したのは誰か？ —XRISM が掴んだ、超新星残骸の鉄イオンに刻まれた急激な電離の証拠—』  
<https://www.isas.jaxa.jp/topics/003980.html>



鈴木 寛大