

銀河系内超新星残骸の X線精密分光観測

勝田 哲

〈宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所
〒252-5210 神奈川県相模原市由野台3-1-1〉
e-mail: katsuda@astro.isas.jaxa.jp



勝田



常深

常深 博

〈大阪大学大学院理学研究科宇宙地球科学専攻
〒560-0043 大阪府豊中市待兼山町1-1〉
e-mail: tsunemi@ess.sci.osaka-u.ac.jp



森



内田

森 浩二

〈宮崎大学工学部電子物理工学科 〒889-2192 宮崎県宮崎市学園木花台西1-1〉
e-mail: mori@astro.miyazaki-u.ac.jp

内田 裕之

〈京都大学大学院理学系研究科 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町〉
e-mail: uchida@cr.scphys.kyoto-u.ac.jp

超新星残骸や銀河団などの拡散天体のX線精密分光学は、来年度に打ち上げが迫る日本の次期X線天文衛星「ASTRO-H」の到来で開花する。これが世界のX線天文学者の通常の認識だろう。ところがわれわれは、現行の「ニュートン」衛星の分散分光器RGSを用いることで、意外にも多数の銀河系内の超新星残骸について高分散スペクトルが得られることに気づいた。RGSはスリットを装備しないため、基本的に点源用であり拡散源には適さない。しかし、超新星残骸中の局所的に明るいコンパクトな構造は点源近似が可能であり、従来のX線CCDカメラより1桁以上も分光精度の高いスペクトルが得られる。そのアイデアは至ってシンプルだが、解析が比較的込み入っているためか、ほとんど手つかずの状態であった。われわれはそこに突破口を見だし、「ASTRO-H」衛星に先立って系内超新星残骸のX線精密分光学を開拓している。その初期成果を紹介する。

1. 銀河系内超新星残骸の魅力

超新星は、恒星の最期を華やかに飾る宇宙最大規模の大爆発である。宇宙の化学的・力学的進化を左右するこの天文現象は、現代天文学の諸問題

を理解するうえで欠かせない存在である。事実、2002年、2011年のノーベル物理学賞が、それぞれ超新星爆発に伴うニュートリノの検出、遠方の超新星の観測から宇宙の加速膨張を発見した業績に与えられたことは記憶に新しいし、近い将来、超

新星爆発に伴う重力波が検出される期待も高まりつつある。これほど重要でかつ、今や一日1回程度の高頻度で発見されている超新星であるが、さまざまな未解決の問題が残っている。例えば、超新星の起源（どんな星がどういう進化段階で爆発に至るのか?）、爆発の機構（どのように爆発するのか?）といった、非常に基本的な疑問への答えが得られていない。また超新星は、エネルギー収支の観点から、宇宙を飛び交う謎の高エネルギー粒子「宇宙線」の加速源と信じられているが、その加速機構もまだ十分には理解されていない。このような問題を解く最も有力な手段の一つは、詳細な情報を引き出せる、近傍超新星の観測である。

その意味で、われわれの銀河系内の超新星はもちろん別格の存在だ。しかし発生頻度があまりにも少ない。前回の目撃例は300-400年も前にさかのぼり、これでは、われわれの生きているうちに次の1回が出るかどうかさえ怪しい*1。一方、過去の超新星爆発の痕跡なら、高温の泡構造としてたくさん観測できる。これが超新星残骸と呼ばれる天体である。銀河系内には、若いもの（数百年）から年老いたもの（数万年）まで総計300個ほど発見されている。超新星残骸中には、爆発で飛散した恒星の破片（イジェクタ）と掃き集められた星周物質がプラズマ状態で存在する。外縁には無衝突衝撃波が形成され、宇宙線を加速している。その詳細が多波長で探査できる銀河系内の超新星残骸は、爆発から多少時間が経っているものの、超新星の諸問題の解明に打ってつけの天体である。

2. 銀河系内超新星残骸のX線精密分光観測に至った経緯

超新星残骸からの放射は多数の輝線を含む。輝線は、電波からガンマ線まで広い波長域にわたりさまざまに異なる過程を通じて放射されるが、比

較的若い、高温の超新星残骸に対しては、X線放射がとりわけ重要である。X線帯域では、高階電離した重元素イオンからのK殻およびL殻輝線が支配的であり、これらの輝線を解析することで、プラズマの元素組成比、存在量、温度、速度などの情報を引き出せる。ひいては、元素合成モデルの直接検証、爆発エネルギーの測定、地上では再現できないような非平衡プラズマの理解などさまざまな問題に迫ることができる。当然ながら、その前提条件は、林立する輝線を1本1本分離することである。

この20年間の超新星残骸のX線分光観測を牽引してきたのは、X線CCDカメラである。X線CCDは、エネルギー分解能 ($E/\Delta E \sim 20 @ \lambda = 12.4 \text{ \AA}$) と空間分解能を併せ持つ優れた撮像分光装置として、日本の4番目のX線天文衛星「あすか」(1993-2001) に搭載された。それ以来、世界のX線天文衛星の標準的な焦点面検出器として活躍している。これまでの観測により、異なる元素、異なる電離状態にあるイオンからの輝線を多数分離することに成功し、超新星残骸プラズマの組成比、非平衡電離状態、およびその空間分布を初めて明らかにするなど画期的な成果を上げた¹⁾⁻⁴⁾。

その成果の先に自然と要求された性能は、より高い分光力であった。というのも、X線CCDスペクトルであたかも1本の輝線のように見える構造はほぼすべて、数本の輝線から構成されていることがわかっていたからである。主要な輝線を1本1本分離し、各輝線の強度、中心値、幅を直接測定するには、分光精度をさらに1桁程度上げる ($E/\Delta E > 100$) 必要があった。これが実現して初めて、本格的な輝線解析が可能となり、輝線の微細構造やプラズマの運動速度などの新しい情報が得られる。そのような新知見を総動員すれば、既存の枠組みを超えた質的に新しい現象の発見も期待される。したがって、 $E/\Delta E > 100$ のX線精密分

*1 数十年に一度の頻度で発生しているが、ほとんどが銀河面の星間塵による強い吸収のため観測にかからない、と考えられている。

光こそが、現代X線天文学に革新をもたらす鍵と
考えられてきた。

恒星や高密度星など点にしか見えない天体につ
いては、米国の「チャンドラ」衛星（1999-）お
よび欧州の「ニュートン」衛星（1999-）に搭載
された分散分光器の登場により、X線の超精密分
光（ $E/\Delta E \sim$ 数百）が可能になった*²。しかし、
両衛星の分散分光器はスリットを装備しないた
め、超新星残骸や銀河団といった拡散天体には適
していない。

この状況を打開すると期待されているのが、拡
散源にも点源同様に力を発揮する非分散型のX線
精密分光器（マイクロカロリメーター）である。
その開発・研究が世界各地で進むなか、日本が
真っ先に、「あすか」衛星に次ぐ「ASTRO-E」衛
星に搭載した。しかし残念ながら、2000年の打
ち上げの際はロケットの不具合のため衛星を軌道
に投入できなかった。その後継機「ASTRO-EII
（すぎく）」は2005年に無事に打ち上がったもの
の、今度は観測装置側に不具合が発生し、いまだ
観測には至っていない。それでも、さらに性能を
向上させた検出器が日本の次期X線天文衛星
「ASTRO-H」に搭載されることが決定しており、
2015年度の打ち上げを目指し準備進行中である。
このように、拡散源のX線精密分光観測は、世界
の研究者が長年待ち焦がれるディスカバリー
スペース開拓の手段である。

ところがわれわれは、「ASTRO-H」衛星を待
たずして、この魅力的な世界に足を踏み入れる方
法に気づいた。これには、「ニュートン」衛星に
搭載された分散分光器「Reflection Grating Spec-
trometer; RGS⁵」を利用する。前述のとおり、ス
リットを装備しないRGSは、基本的には拡散源
には不向きであるが、分散角が大きいと、意外

と天体の拡がりに鈍感である。定量的に見ると、
光軸から角距離 $\theta=1'$ 離れた方向から入射するX
線は、光軸のX線が分散される波長位置から $\Delta\lambda=$
 0.138 \AA ずれる： $\Delta\lambda=0.138 \text{ m}^{-1} (\theta/\text{arcmin}) \text{ \AA}$ 、
 m は分散光の次数。したがって、1分角の拡がり
をもつ天体に対する実質的な分解能は、 $\lambda/\Delta\lambda=$
 $E/\Delta E=160$ （@ 22 \AA ＝ヘリウム様酸素の $K\alpha$ 線の
波長）になる。これはX線CCDカメラに比べて
1桁近く高い。つまり、「ニュートン」RGSは、
サイズが1分角程度の天体には十分有効なのであ
る。なお、「チャンドラ」の分散分光器は天体の
拡がりに対する分解能の劣化が「ニュートン」よ
り5倍ほど悪いので、ここでは注目しない（た
だし、「チャンドラ」は望遠鏡の空間分離能力に優
れるため、秒角スケールの微小構造の分散スペク
トルを取得できる利点がある）。

そこでまず思い当たる観測対象は、隣のマゼラ
ン銀河の超新星残骸だろう*³。実際、「ニュート
ン」RGSはいくつかのマゼラン銀河の超新星残
骸について高分散スペクトルの取得に成功してい
る⁶。しかし、そのスペクトルは超新星残骸全体
に対するもので、組成や温度、速度などさまざ
まに異なるプラズマからの放射の重ね合わせであ
る。このため、スペクトルの解析・解釈は、とて
も複雑になる。

物事を単純化するため、場所ごとにスペクトル
を切り出したい。これは見かけの小さいマゼラ
ン銀河の超新星残骸では難しい作業である。見
かけの大きい系内超新星残骸を狙うしかない。し
かし、系内超新星残骸はその拡がりのため、RGS
の実質的な分光能力が著しく低下してしまう。こ
のジレンマを解消する唯一の方法は、系内超新星
残骸中の局所的に明るいコンパクトな構造（輝
点）に着目することであった。

*² 日本は、これまで分散分光器をX線衛星に搭載していない。その理由は、分散系に必須の望遠鏡の角度分解能の向上を断念し、代わりに有効面積を増大させつつ、検出器のエネルギー分解能を向上させる戦略を取ったためである。

*³ 視直径30 pcの中年超新星残骸（年齢数千年）を、距離50-60 kpcのマゼラン銀河に置くと、見かけの大きさは2分角程度になる。

3. 「ニュートン」RGSによる系内 超新星残骸のX線精密分光観測

われわれの目的にピッタリと当てはまったターゲットは、輝点構造を多数もつパピスA超新星残骸であった。この残骸は、4,500年ほど前⁷⁾に距離約2 kpc⁸⁾の位置で起こった超新星爆発の痕跡である。図1に示すとおり、X線強度分布にはかなりムラがあり、多数のコンパクトな(1-2分角)輝点を形成している。そのX線スペクトルは輝線放射が支配的であるため¹¹⁾、「ニュートン」RGSの絶好の観測対象である。

3.1 イジェクタの運動と立体構造

パピスAは中性子星を伴う⁹⁾、重力崩壊型の超新星残骸である(図1)。可視光観測により、超新星爆発時に撒き散らされた高速酸素塊が多数見つまっているが、興味深いことにすべて北東領域に集中している¹²⁾。一方、最近のX線観測により、中性子星が南西方向に高速で運動することが判明し⁷⁾、爆発時にイジェクタと中性子星が反跳したことが明白である。このような反跳現象は、他の超新星残骸でも示唆されるため、超新星爆発を引き起こす重要な効果かもしれない。したがって、反跳現象が顕著なパピスAのイジェクタ構

造を解明することは、重力崩壊型の超新星爆発を解明するうえで極めて重要である。

可視光観測ではイジェクタのごく一部しか見えないため、全貌を解明するにはX線観測が必要不可欠だ。そこでわれわれは、「ニュートン」および「チャンドラ」衛星の公開データ(X線CCDによる撮像分光観測データ)を利用し、イジェクタ探索を進めてきた。その結果、3カ所に星間物質に埋もれたイジェクタを発見した¹³⁾⁻¹⁵⁾。そのうち2カ所はイジェクタの輝度が周辺に比べて高く、図1に示すようにX線画像からもその存在がわかる(イジェクタA, Bと呼ぶ)。もう1カ所はノッペリと広がっており、図1では確認できないが、イジェクタAの北東数分角の所に位置する。つまり、X線を放射するイジェクタも北東領域に偏在しており、反跳説を後押ししている。

イジェクタの2次元マップは大体描けたので、次は立体構造を解明したい。その最も確かな方法は、輝線のドップラーシフトから、奥行きを推定することだろう。その観点で、イジェクタAは、 $\Delta E \sim 5$ eVのドップラーシフトの兆候があったため、とても興味深かった。しかし、この程度のドップラーシフトは、X線CCDのエネルギー分解能 $\Delta E \sim 50$ eV@1 keVとキャリブレーションの

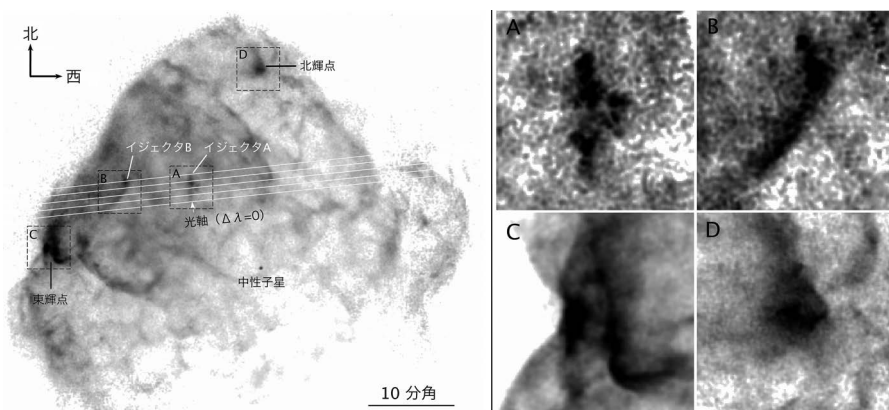


図1 左) X線天文衛星「ローサット」によるパピスA超新星残骸の全貌⁹⁾。東西方向の白線は、イジェクタA, Bを観測した際に設定したRGS分散軸の方向。白線で囲まれた四つの領域からRGSスペクトルを抽出した。右) 左図点線枠で囲まれた領域の「チャンドラ」衛星による、酸素輝線バンド(0.5-0.7 keV)の拡大図^{10), 15)}。各図の色の濃い領域は、イジェクタ構造(A, B)もしくは衝撃波に取り込まれた星間雲(C, D)を示す。

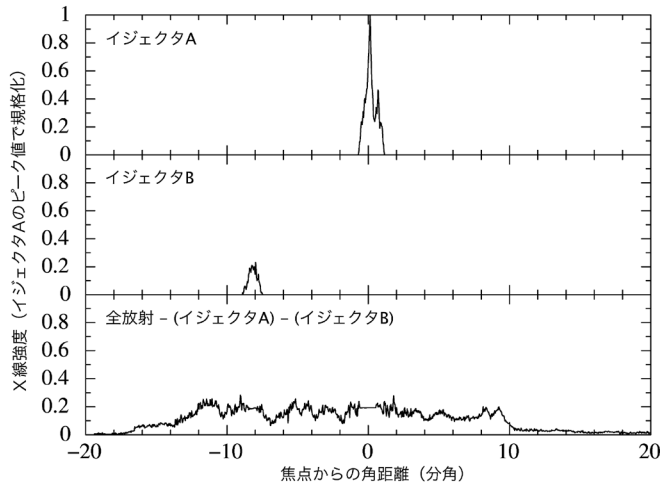


図2 北から2番目のRGS領域(図1)に対するX線(0.6-0.7 keV)強度プロファイル. 上中下それぞれイジェクタA, B, 周辺の実質的なバックグラウンド放射に対応する¹⁹⁾.

不定性を考慮に入れると、自信をもって測定できたとは言い難い。実際、われわれがドップラー速度の測定を主張した最大の根拠は、空間的に一致する可視光酸素塊のドップラー速度1,560 (1,540-1,580) km/s¹⁶⁾と一致したためであった。やはり、X線CCDでドップラーシフトを測定するのは容易ではない。ほかにも、われわれのX線CCD解析から、イジェクタAの北部と南部で速度差が見られたのだが(北: 3,400 (2,600-4,400) km/s, 南: 1,700 (900-2,400) km/s), その有意度は低かった。X線による確実なドップラー速度の測定やそれに基づく踏み込んだ議論は「AS-TRO-H」に譲らざるをえないように思われた。

ところがしばらくして、われわれはこの輝点のサイズ(1-2分角)なら「ニュートン」RGSで質の高いスペクトルを取得できることに気づいた。早速、「ニュートン」衛星に観測を提案したところ、すんなり採択となり、2012年の秋に観測が実施された。分散軸の方向は図1に示したように、イジェクタAとB両方入れられるよう、観測のタイミングを指定した。「ニュートン」RGSの視野(分散軸に垂直な方向の幅)は5分角弱あり、この方向に領域を分割するのは簡単である。

そこでわれわれは、視野を四つの領域に分割することにした(図1中の白線がその4領域を示す; 各領域の幅は0.8分角)。これにより、輝点の北と南のスペクトルの違いを調べることができる。

分散スペクトルを見る前に、分散軸方向のX線強度分布をチェックしておこう。図2は、北から二番目の領域に対する0.6-0.7 keV(水素様酸素のK α 輝線が支配的)の輝度分布である。上, 中, 下のパネルは、それぞれイジェクタA, B, それらを除いた周辺の拡散源に対応している。この図から、イジェクタ構造(特にイジェクタA)の輝度が周辺に比べ相対的に明るく、輝度プロファイルも十分細かい(FWHM \sim 1')ことがわかる。質の高いスペクトルが取れそうである。なお、 $x=0$ はRGSの焦点位置で、この方向からくるX線は、(ドップラーシフトがなければ)期待された波長位置に分散される。そこから θ (arcmin) 外れると、 $\Delta\lambda=0.138 \text{ m}^{-1} (\theta/\text{arcmin}) \text{ \AA}$ に従って分散位置がシフトする。要するに、このプロファイルそのものがRGSの応答関数であり、横軸(arcmin)に 0.138 m^{-1} を掛ければ、単位を \AA に変換できる(図2は、水素様酸素K α 輝線の応答関数を与える)。われわれは、主要輝線を含むエ

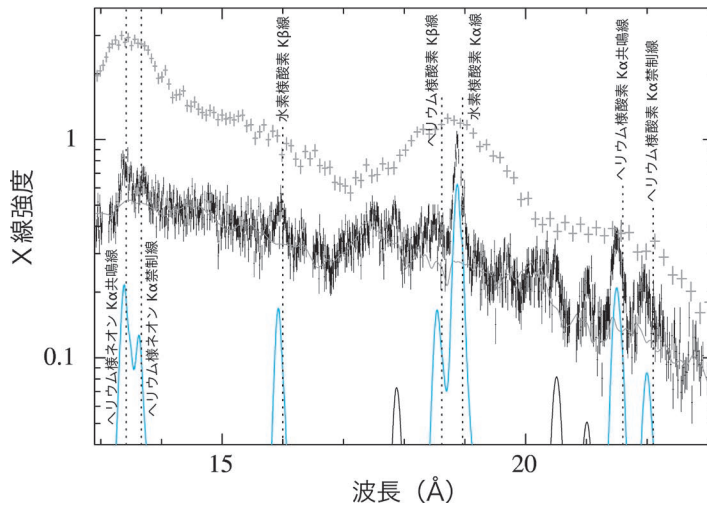


図3 北から2番目の領域のRGSスペクトル(黒)およびその領域を含む「すぎく」XISスペクトル(灰色). イジェクタA, B, バックグラウンドの放射モデルをそれぞれ青, 黒, 灰の曲線で示す. 点線は, 静止系で期待される各輝線の波長位置を示す. イジェクタAの輝線は系統的に青方偏移している. 一方, イジェクタBの青方偏移は, 焦点から外れていることに起因しており, その補正をすると赤方偏移を示す. なお, RGSとXISの強度は酸素輝線のピーク値で規格化してある¹⁹⁾.

エネルギーバンドごとに輝度プロファイルを作成し, それらを組み合わせ, 全エネルギーバンドに対するRGS応答関数を構築した.

図3に, 北から二番目の領域のRGSスペクトルを示す. いくつかのピーク構造が, イジェクタAとBからの輝線に対応し, それ以外の(ほとんどの)X線は, ターゲット周辺領域からの酸素やネオンのK殻輝線が, おおのこの輝度プロファイル(水素様酸素K α 線の場合は図2下)に従って折り重なった実質的なバックグラウンドである*4. 図中に示す青, 黒, 灰色の曲線は, それぞれイジェクタA, B, バックグラウンドのモデルであり, 各成分の寄与がわかる. RGSは, イジェクタからの酸素とネオンのK殻輝線を1本1本, 見事に分離している. 比較のため, 「すぎく」搭載のX線CCD X-ray Imaging Spectrometer (XIS) のスペクトルを灰色の十字で示したが, こちらはヘリウム様酸素のK α 線群と水素様酸素K α 線を分離す

るのがやっつであり, RGSとの違いは歴然としている.

縦の点線は, 各輝線の静止系の波長位置を示すが, これに対してイジェクタAの輝線位置が系統的に青方偏移していることがハッキリと見て取れる. 解析の結果, どの輝線も同程度のドップラー速度 $V=1,500\pm 200$ km/sをもつことが判明した(誤差はRGSの波長決定精度の系統誤差を含んだ値). X線CCDでは到底達成できない高精度の測定である. さらに, ドップラー速度は4領域とも誤差の範囲で一致しており, X線CCD解析に見られた北部と南部の速度差はなかったことが判明した. RGSの威力を端的に示す結果である. また, RGSで測定したドップラー速度が可視光酸素塊のドップラー速度($1,560\pm 40$ km/s)とよく一致していることは, 単にX線観測の妥当性を示すのではなく, X線を放射する極高温ガスと可視光を放射する温かいガスが, 隣接もしくは混在す

*4 原理的には, 周辺構造のスペクトル情報を引出すことも可能ではある.

ることを物語っている。

イジェクタBの放射は、図1からは見分けにくいですが、モデルフィットすると数本の輝線が要求される。図中黒線で示すヘリウム様・水素様酸素K α 線である。これらの輝線が（見かけ上）大きく短波長側にシフト ($\Delta\lambda\sim 1.1 \text{ \AA}$) している理由は、この構造の配置がRGSの焦点から8分角ほど離れているためである。これを考慮してドップラー速度を見積もると、 $V=650\pm 130 \text{ km/s}$ の赤方偏移を得た。こちらは、イジェクタAとは違いわれわれから遠ざかっていたようだ。

測定したドップラー速度を基に、両イジェクタ構造の奥行きを求めてみよう。等速運動を仮定すれば、ドップラー速度と超新星残骸の年齢の掛け算が奥行きとなる。計算すると、イジェクタA,Bそれぞれ6.8 pc（こちら向き）、2.9 pc（あちら向き）となる。視線に垂直な平面上の距離（それぞれ4.1 pcと7.6 pc@2 kpc）と合わせると、どちらのイジェクタも爆発点から距離 $\sim 8 \text{ pc}$ に位置することになる。つまり、見かけ上はBのほうが遠くまで飛んでいるが、視線方向の飛び出しはAのほうが大きいので、実際の距離は同じ程度だったわけである。北からこの残骸を観測すれば、図4

のように見えるはずだ。このようにして、イジェクタの立体構造を調べることができる。

輝線中心値に加え、輝線幅も非常に興味深い。輝線幅はイオンのランダムな運動（乱流や熱運動）を押し量る唯一の手がかりである（にもかかわらず、X線CCDではほとんど観測例がない）。今回の観測では、イジェクタAについてのみ高精度の測定ができた。その大きなバルク速度 ($> 1,500 \text{ km/s}$) から判断して、ランダム運動も大きいのかと思いきや、現実はそうはなっておらず、輝線幅が1 eV以下と狭いことが判明した。そこから、酸素イオンの温度に $kT=30 \text{ keV}$ の上限が付く。これほど低い温度は、フォーワード衝撃波 ($V> 2,000 \text{ km/s}=4/3\times 1,500 \text{ km/s}$) による加熱では説明できない。より速度の遅い衝撃波 ($V\sim 500\text{--}1,000 \text{ km/s}$) によって加熱されたと考えれば、イオン温度、電子温度、電離状態を同時に説明できる。このような衝撃波はリバース衝撃波以外考えられない。さらに、観測しているプラズマがイジェクタ起源であることも、リバース衝撃波加熱説を支持している。このように、今回の観測により、直接観測することが難しい、リバース衝撃波の裏づけに成功したのである。

3.2 見落としていたX線放射過程

東と北の輝点（図1）についても、「ニュートン」RGSで高分散スペクトルを取得したので簡単に紹介したい。この領域が際立って明るい理由は、先のイジェクタ構造とは違い、超新星衝撃波が星間雲に激しく衝突したためである。特に、東の輝点では、衝撃波が星間雲を飲み込み、その周辺に回り込んでいる様子が鮮明である（図1右C）。

両輝点のRGSスペクトルを図5に示す。各輝線の上に元素名を添えたように、実にたくさんの輝線をきちんと分離しており、その中には「すごく」XIS（灰色）が分離できなかった輝線も複数含まれる。このスペクトルを見たわれわれは、ヘリウム様酸素K α 輝線における禁制線と共鳴線の

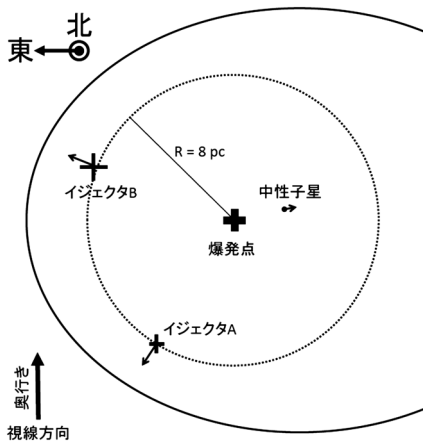


図4 パピスAを北から観測したときの予想概念図。黒の曲線は、SNRを縁取るフォーワード衝撃波の位置を示す。イジェクタA,Bが爆発点から同じ距離に位置している。

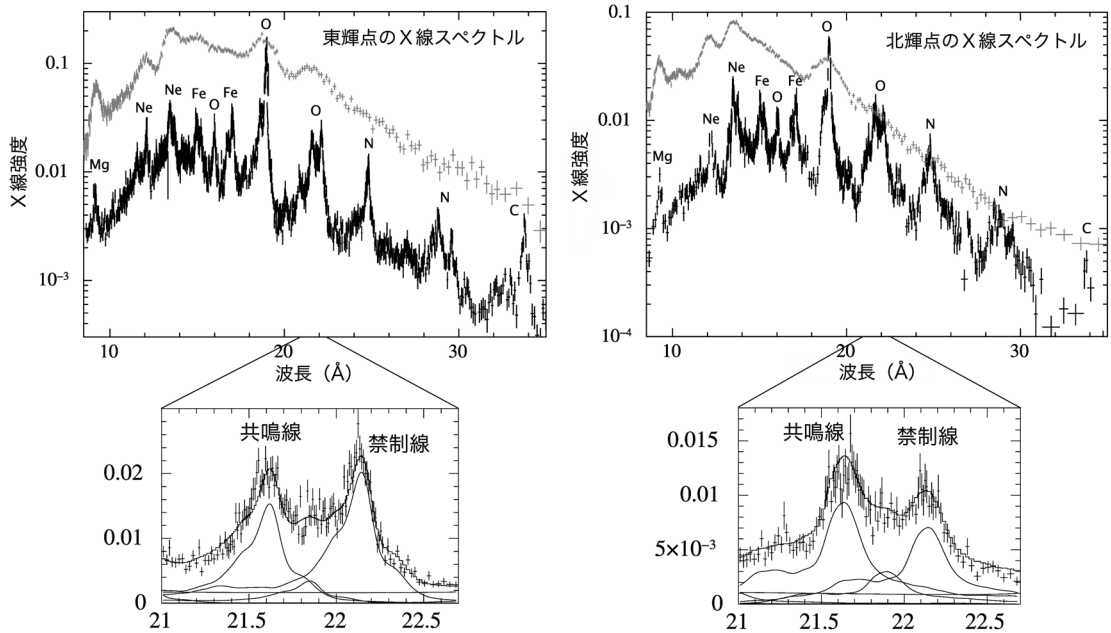


図5 東輝点と北輝点(図1)のRGSスペクトル(黒)と「すざく」XISスペクトル(灰). RGSはXISで分離できなかった輝線を多数分離している. 下のパネルは、ヘリウム様酸素K α 輝線の拡大図. 東輝点では禁制線が共鳴線より強い²⁰⁾.

強度比に驚いた. 東輝点では、禁制線のほうが共鳴線より強いのである(禁制線:共鳴線=3:2). このような強度比は、従来の衝突電離プラズマの放射モデルでは説明できない. さまざまな観点から検討した結果、電荷交換反応という、SNRからのX線放射としてはこれまでほとんど無視されてきた放射過程の重要性を指摘するに至った. この説が本当に正しいかどうかは、今後の研究で突き詰める余地があるが、いずれにせよ「ニュートン」RGSのスペクトルが、通り一遍なプラズマ放射モデルの枠組みを抜け出す必要性を突きつけた意義は大きい.

4. 今後の展望

「ニュートン」RGSによる系内超新星残骸の精密分光観測は、パピスAにとどまらない. われわれは、既に他の天体の公開データから面白い結果をいくつか得ているし、新たな観測も計画している. 今後、続々と興味深い成果を発表するつもり

である.

「ASTRO-H」が軌道に乗るのは、RGSによる観測を堪能し尽くした頃かもしれない. 成すべきことはもうないだろうか? いや、実際は恐らくその反対で、むしろ「ASTRO-H」で解くべき課題が、より具体的な形で山積みしているように思う. 「ASTRO-H」が実現する、空間的に分離したX線精密分光の威力はやはり絶大である. 加えて、観測帯域が0.2-10 keVに広がり、6 keV付近の鉄のK殻輝線の診断や鉄族元素の微弱な輝線の検出も期待される. 「ASTRO-H」に向けて、今からしっかり観測のアイデアを練っておかねばならない. 「ASTRO-H」を自ら利用したいとお考えの読者には、最近公開された観測検討集^{17), 18)}が参考になるだろう.

5. ま と め

「ニュートン」RGSによる、系内超新星残骸のX線精密分光観測の結果を紹介した。これは、「ASTRO-H」待ちと思われていた、拡散源に対するX線精密分光観測を先取りする成果である。その研究手法には、多くの研究者が気づいていたかもしれないが、複雑な解析と限られた観測対象のため費用対効果が悪そうに見え、なかなか手が出なかったのではないかと想像する。しかし実際に解析を進めてみると、思った以上にたくさんの観測対象が思い当たるもので、興味深い成果が続出しそうな気配である。RGSを最大限に活用し、超新星残骸のX線精密分光学を深く掘り下げたい。

近い将来、「ASTRO-H」衛星が打ち上がると、世界の研究者がいよいよ拡散源のX線精密分光学に本腰を入れてくるだろう。そのとき、われわれの「ニュートン」RGSによる先行研究が広く役に立つことを願っている。もちろん、われわれ自身もこの研究を通じてX線精密分光の感覚を研ぎ澄まし、「ASTRO-H」時代が到来するやいなや好発進したい。

謝 辞

本稿の内容は、2編の論文^{19), 20)}として公表しています。共著者の皆様に深く感謝いたします。また、本稿の執筆を進めていただき、有意義なご意見をくださった馬場 彩准教授（青山学院大学）、本稿へのご意見だけでなく普段の研究活動でもたいへんお世話になっている堂谷忠靖教授（JAXA 宇宙科学研究所）に御礼申し上げます。本研究を遂行するうえで、理化学研究所、日本学術振興会、宇宙航空研究開発機構からご支援いただきました。

参考文献

- 1) 山口弘悦, 2010, 天文月報 103, 43
- 2) 小澤 碧, 山口弘悦, 2011, 天文月報 103, 438
- 3) 内田裕之, 2013, 天文月報 106, 604
- 4) 森 浩二, 2014, 天文月報 107, 326
- 5) den Herder J. W., et al., 2001, A&A 365, L7
- 6) Rasmussen A. P., et al., 2001, A&A 365, L231
- 7) Becker W., et al., 2012, ApJ 755, 141
- 8) Reynoso E. M., et al., 2003, MNRAS 345, 671
- 9) Petre R., et al., 1996, ApJ 465, L43
- 10) Hwang U., et al., 2005, ApJ 635, 355
- 11) 田村啓輔, 博士論文（大阪大学）1994年
- 12) Winkler P. F., et al., 1988, IAU Colloq. 101, 65
- 13) Hwang U., et al., 2008, ApJ 676, 378
- 14) Katsuda S., et al., 2008, ApJ 678, 297
- 15) Katsuda S., et al., 2010, ApJ 714, 1725
- 16) Winkler P. F., et al., 1985, ApJ 299, 981
- 17) Hughes J. P., et al., 2014, ASTRO-H white paper (arXiv: 1412.1169)
- 18) Long K. S., et al., 2014, ASTRO-H white paper (arXiv: 1412.1166)
- 19) Katsuda S., et al., 2013, ApJ 768, 182
- 20) Katsuda S., et al., 2012, ApJ 756, 49

High-Resolution X-Ray Spectroscopy of Galactic Supernova Remnants

Satoru KATSUDA, Hiroshi TSUNEMI,
Koji MORI, and Hiroyuki UCHIDA

JAXA ISAS, Osaka University, University of
Miyazaki, Kyoto University

Abstract: Most X-ray astronomers would believe that high-resolution X-ray spectroscopy of diffuse sources will be opened with the advent of the upcoming ASTRO-H satellite. However, we noticed that high-quality spectra can be already obtained for many Galactic supernova remnants (SNRs) by using the XMM-Newton's reflection grating spectrometer. While it is designed for point-like sources, it can also produce high-quality spectra for bright, compact features in SNRs. We present our cutting-edge research on high-resolution X-ray spectroscopy of Galactic SNRs prior to the ASTRO-H era.