

X線による強磁場激変星の観測

和田 有希 Y. Wada
(東京都 文京区)

はじめに

現代の天文学は電波から赤外線、可視光線、紫外線、X線、ガンマ線（電磁波以外ではニュートリノと重力波など）と、様々な波長帯域で行われています。肉眼での観測が可能な可視光領域は馴染みが深く、大型望遠鏡での観測のみならず、本誌の読者の皆さまのように自前の望遠鏡で新星・矮新星の発見や、変光星の測光観測をなさっている方も多くいらっしゃると思います。一方で波長の違いは、放射の物理過程の違いやエネルギーの違いでもあり、天体で起きている物理現象を理解するためには適切な波長で観測する必要があります。本稿では私の専門であるX線天文学と、X線による強磁場激変星の観測について解説します。

X線天文学

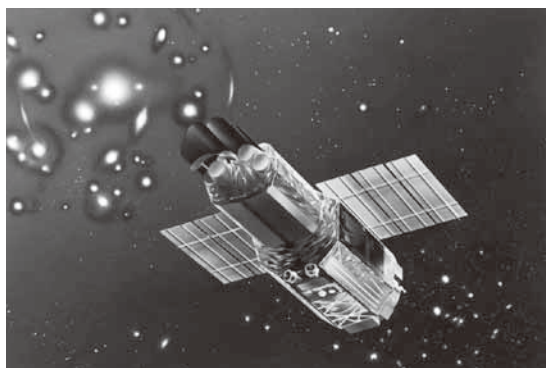
そもそもX線とは、紫外線よりもエネルギーの高い光子のことを指します。一般に原子における電子の軌道遷移に伴う特性X線や、電子の軌道を曲げることによって発生する制動X線などが知られており、放射性崩壊・原子核反応などで生じるガンマ線とは発生源の違いで区別されています。一方でX線・ガンマ線天文学の業界では、発生源を厳密に特定することが容易ではないため、光子のエネルギーによって呼称を変えています。

エネルギーの単位には電子ボルト (eV) がよく使われます。これは電子1つを1 Vの電位差で加速するのに必要なエネルギーとよく解説されますが、例えばUバンドの中心波長 365.2 nm の光子のエネルギーは 3.40 eV、Vバンドの中心波長 550.5 nm は

2.25 eV に対応します。X線は可視光よりも2桁から5桁ほどエネルギーが高く、おおよそ 0.1 keV から 100 keV に対応します (keV はキロ電子ボルトで、1 keV = 1000 eV)。特に 0.01-10 keV を軟X線、10-100 keV を硬X線と呼びます。胸部レントゲンなどの医療診断には100 keV近い硬X線が用いられます。

X線はレントゲン検査に用いられることから透過性が高いように思われますが、分厚い地球大気においては散乱・吸収を受け、透過することができません。すなわち、天体からのX線は地表に到達できないということです。他の多くの波長も同様に地球大気で散乱・吸収を受けますが、可視光と電波の一部帯域は例外で、大気での透過性が高く、地表まで到達することができます。近赤外線など高山に望遠鏡を設置することで観測可能になる波長もありますが、X線の場合は最低でも高度 40km 以上で観測しなければならないため、専用の天文衛星を用いた大気圏外からの観測が主流となっています。

世界初のX線天文衛星「ウフル」が1970年にNASAによって打ち上げられて以降、X線天文学は急速に発展しています。この過程で日本のX線天文衛星が大きく貢献して



X線天文衛星「すざく」(c) JAXA

おり、1979年に打ち上げられた「はくちょう」を皮切りに、「てんま」、「ぎんが」、「あすか」、「すざく」、「ひとみ」と、これまで6機の衛星が活躍してきました。2016年に打ち上げられた「ひとみ」衛星は、不具合により運用期間2ヶ月と短命に終わってしまいましたが、最新鋭の検出器による観測成果が、Nature誌に採択された2本の論文を始めとして、多くの学術誌に掲載されています。

X線天文衛星にはどんな観測機器が搭載されているか、「すざく」を例に紹介します。すざく衛星は日本で5番目のX線天文衛星で、宇宙科学研究所を中心とした国内外の研究機関との協力で開発され、2005年7月10日に鹿児島県の内之浦宇宙空間観測所よりM-Vロケットで打ち上げられました。2015年6月にバッテリーの劣化によって運用終了するまでの10年間、様々な科学成果を挙げた日本を代表する科学衛星です。

全長6.5m、総重量1.7tのすざく衛星にはX線CCDカメラ(X-ray Imaging Spectrometer: XIS)と硬X線検出器(Hard X-ray Detector: HXD)が搭載されています。XISは0.2-12 keVの軟X線帯域に感度があり、X線望遠鏡との組み合わせで集光撮像を行います。このためブラックホールや中性子星のような点光源のみならず、銀河団や超新星残骸といった広がった天体も高感度で撮像観測することができます。他国のX線天文衛星と比較して、X線CCDカメラとしては高いエネルギー分解能(分光性能; 130 eV @ 6 keV)を持つことも特徴です。

HXDは10-600 keVの硬X線・軟ガンマ線帯域に感度をもつ検出器です。天体を撮像することはできませんが、コリメータを用いて特定の天体を観測することができ、またアクティブシールドと呼ばれる技法でバックグラウンドを徹底的に除去したことで、硬X線帯域の非撮像検出器として極め

て高い感度を達成しました。さらに時間分解能が61 μ sと速く、時間変動の速い天体を観測するのにも向いています。

可視光観測とX線観測の大きな違いは、X線では分光と測光の両方を同時に行うことです。基本的に市販されているデジタルカメラのCCDセンサーとX線CCDセンサーの原理は同じであり、有感領域の厚みが異なるのみです。しかし可視光の光子1つがCCDに入射した際はそのエネルギーによらず電子正孔対が1対だけ生成されるのに対し、X線光子はエネルギーが高いため、そのエネルギーに比例した数の電子正孔対が生成されます。次のX線が同じピクセルに到達する前に読み出しを行うことで、X線光子のエネルギー、到来時間を同時に測定することができます。

多くのX線天文衛星は打ち上げ後、開発に携わったワーキンググループメンバーで選定した天体を観測します。その後、世界中から観測提案を受け付け、優れた提案を選定して観測を行います。データは観測から1年間は提案者が独占的に使用することができますが、公開天文台という性格から、1年後には一般に公開されます。すざくは運用停止から1年以上が経過していますので、すべての観測データが宇宙科学研究所とNASAゴダード宇宙飛行センターのウェブサイトより入手可能です。また解析に必要な較正情報、解析ソフトウェアもすべて無償で提供されています。すざくの場合は日本語での解析マニュアルも充実しており、これまで多くの大学院生がすざくでデータ解析の基礎を学び、その一方ですざくの高品質なデータによって、64本の博士論文が発表されるに至っています。

強磁場激変星のX線観測

X線で観測される天体はブラックホール、中性子星、白色矮星、恒星といった点光源

から、銀河団、超新星残骸といった広がった天体まで様々です。ここでは私が専門とする強磁場激変星のX線観測について解説します。

激変星は白色矮星と恒星の近接連星系で、ロッシュローブを満たした恒星のガスが白色矮星に降着していると考えられています。激変星の中には、白色矮星表面の降着ガスが核融合を起こして明るくなる新星や、降着円盤の不安定性により一時的に明るくなる矮新星も含まれ、また多くの天体が可視光での光度変動を起こすことから、AAVSOやVSOLJなどに参画している有志のアマチュア観測者によって測光観測されています。

激変星の中でも、白色矮星が105ガウス以上の表面地場をもつ系を強磁場激変星と呼びます。特に表面磁場が105-107ガウス程度のものはIntermediate Polarと呼ばれています。Intermediate Polarも場合も他の激変星と同じく、白色矮星が恒星からの降着ガスによって質量を獲得しています。ガスは白色矮星の周りで降着円盤を形成します。しかし、強い磁場のもとでは降着ガスは磁場に巻き付き、磁力線方向にしか運動できなくなります。そこで降着円盤の内側は、ガスが内側に降着する圧力よりも白色矮星の磁場が卓越する場所で削られてしまい、ガスは白色矮星の磁力線に捉えられ、磁極付近へ降着します。

ガスが降着円盤から離れて磁力線に捕われてしまうと、降着円盤のように摩擦で速度を落とすことなく、自由落下運動で磁極めがけて降着します。磁極へ到達する直前

には2000-3000km/sという速度まで重力で加速されます。この速度になると白色矮星の表面に到達する直前で衝撃波が発生し、ガスがX線を出せるほどの高エネルギーまで加熱されます。X線でIntermediate Polarを観測するという事は、白色矮星表面へ到達寸前の、衝撃波によって加熱されたガスから放射されるX線を見ていることとなります。

衝撃波によって加熱されたガスの温度は数十keVに達しますが、この温度は加熱直前のガスの速度の二乗に比例します。ところで、ガスは白色矮星の重力による自由落下で加速されたのですから、速度の情報、すなわちガスの温度は白色矮星の重力ポテンシャル（白色矮星の質量に比例し、半径に反比例する物理量）に比例します。正確には降着円盤の内縁から白色矮星表面までの重力ポテンシャルですが、白色矮星表面から十分に遠いところで円盤の内側が削られていれば、ガスは無限遠から自由落下していると近似することができます。さらに白色矮星の質量-半径の関係式は理論的に計算されており、ガスの温度から推測される重力ポテンシャルを組み合わせることで、白色矮星の質量と半径を推定することができます。

加熱されたガスは熱的制動放射によりX線を放射しながら徐々に冷却され、白色矮星表面に降着します。冷却されている途中のガスもX線を放射するため、観測されるX線は衝撃波による加熱直後を最高温度とする、様々な温度のガスから放出された多温度の放射となります。加熱直後の最高温度を測定するために、X線スペクトルモデルがこれまでいくつか考えられてきましたが、現在では加熱から冷却までの物理過程を取り込んだ「多温度放射モデル」が受け入れられています。このモデルを実際に観測されたX線スペクトルに適用することで



Intermediate Polar における
白色矮星への質量降着の断面図

ガスの最高温度を測定し、その情報から白色矮星の質量推定が行われてきました。

激変星を構成する白色矮星の質量の測定は、実は超新星の発生メカニズムの推定に大きく紐付いています。Ia型超新星は鉄より重い元素の合成現場であり、また天体によらず絶対光度が同じと考えられているため、発生した銀河系の距離を測定するのに用いられる、重要な天文現象です。一方でその起源は、白色矮星がガス降着によって質量を獲得することでチャンドラセカール質量を超えて爆発する降着説と、白色矮星連星が角運動量を失って合体する合体説の2つが考えられており、未だ決着がついていません。多くの激変星で白色矮星の質量を推定し、その分布を調べることで、この論争に決着がつけられるのではないかと考えられています。

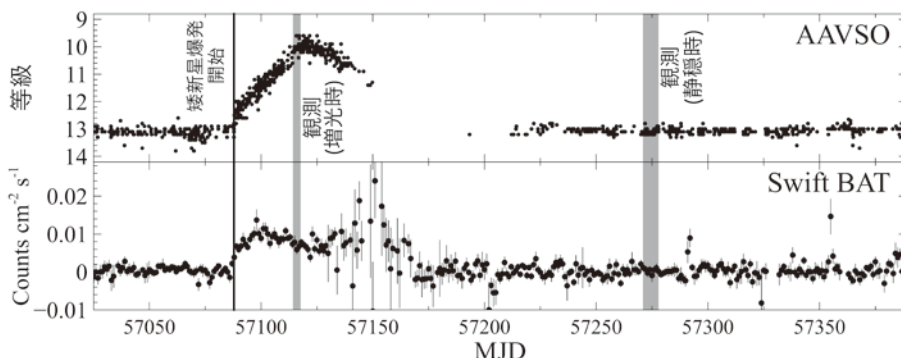
連星系における白色矮星の質量は可視光観測でも推定することができます。水素やヘリウムの輝線のドップラーシフトを測定することにより、伴星の視線方向の速度を推定ことができ、公転周期も加味することによって白色矮星と伴星の質量を推定することができます。ただし視線方向の速度を連星系の動径方向の速度へ変換するためには、連星系の軌道傾斜角を知る必要があります。軌道傾斜角が90度に近い場合には、食が観測されるために精密に測定する

ことができますが、一般に軌道傾斜角を測定することは困難です。したがって軌道傾斜角の不定性が白色矮星の質量推定にそのまま不定性を残すこととなります。その点、X線観測による手法はX線スペクトルの解析から質量を導けるという点で単純であり、より正確なスペクトルモデルの開発も試みられていることから、多数の激変星を系統的に調査するという目的に適しています。

矮新星を起こす Intermediate Polar の観測

これまで述べてきた質量推定の手法を、我々はGK Perseiという天体に適用しました。GK Perseiは激変星の中では変わった経歴の持ち主です。1901年に新星爆発を起こし、Nova Persei 1901として知られました。その後、GK Perseiは今日まで2-3年の周期で2ヶ月にわたる矮新星爆発を起こすようになります。また1985年には欧州宇宙機関のEXOSAT衛星によって、自転に伴うX線帯域のパルスが発見されたことから、GK Perseiは強磁場白色矮星をもつIntermediate Polarであることも示されました。

GK Perseiは2015年3月から4月にかけて矮新星爆発を起こしました。このときにアメリカのX線天文衛星NuSTARによって臨時観測が行われました。その増光が落ち着いた2015年9月には、我々の研究チームが提案していた静穏時の観測も実行され、

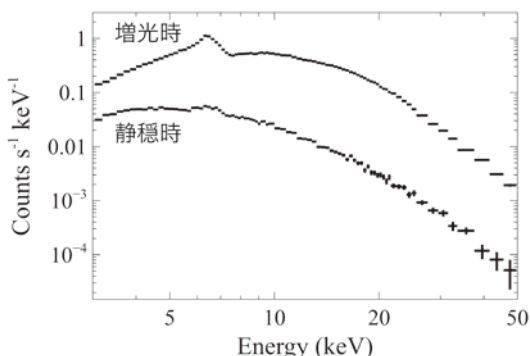


GK Persei の2015年におけるAAVSOによる可視光（フィルターなし）でのライトカーブ（上段）とSwift衛星バーストモニター（BAT）による15-150 keVのX線ライトカーブ（下段）

増光時と静穏時の両方のデータを得ることができました。

NuSTARで観測された増光時の3-50 keVのカウントレートは、静穏時と比べて17.5倍になっていました。増光時と静穏時の平均スペクトルはいずれも50 keVまで伸びる連続成分を示しており、総じて増光時には高いカウントレートを示しています。このことから、増光時には白色矮星へ降着するガスの量が増加したことが示唆されます。

このとき、スペクトルモデルより得られたガスの最高温度は増光時で19.7 keV、静穏時で36.2 keVと明確な違いが現れました。この最高温度の違いは降着円盤の内縁半径の違いで説明できます。すでにIntermediate Polarでは降着円盤の内側が白色矮星の磁場によって削られることを説明しました。どこで削られるかは磁場の強さと降着円盤のガスが内側へ向かう圧力の釣り合いで決まります。静穏時はガスの降着量がそれほど多くないため内側へ向かう圧力が小さく、白色矮星表面から離れたところで内側が削られていたと考えられます。しかし矮新星爆発によって圧力が増大するとガスが内側まで押され、降着円盤の内縁は白色矮星表面に接近します。このような状況ではガスが無限大から降着するという近似が成り立たなくなってしまう、衝撃波付近の最高温度は低くなると考えられます。



NuSTARで観測されたGK Perseiの増光時と静穏時のX線スペクトル

スペクトル解析で得られた、増光時と静穏時のガスの最高温度とガスの降着量を用いることにより、静穏時には7.4白色矮星半径に位置していた降着円盤の内縁が、増光時には1.9白色矮星半径まで接近していたことが明らかになりました。さらにGK Perseiの白色矮星質量を 0.87 ± 0.08 太陽質量と推定しました。これは同一天体の異なる降着量の観測データを用いて、降着円盤の内縁半径と白色矮星質量を同時に推定した初めての例となりました。

これまでもX線を用いてGK Perseiの質量を推定した例はいくつか報告されています。しかしGK Perseiは矮新星爆発時には容易に観測なもの、静穏時はX線で暗く、特に硬X線帯域での観測が難しかった天体です。増光時は降着円盤の内縁が白色矮星表面に近づくため、ガスが無限大から降着するという仮定が成り立たず、白色矮星の質量を過小評価してしまうこととなります。今回の観測例では硬X線帯域で高い感度をもつNuSTARを用いたことに加え、増光時と静穏時の両方のデータを用いることでより正確な質量推定が可能となりました。今後はこの手法を矮新星爆発を起こす他のIntermediate Polarにも適用し、降着円盤の内縁半径が推定質量にどのように影響するのかを調べたいと考えています。

最後に

X線天文学は地球大気の吸収に阻まれながらも、観測機器を人工衛星に搭載して大気圏外へ持っていくことで、大きな発展と科学的成果を挙げてきました。本稿ではその極々一部を紹介いたしました。読者の皆さまがX線天文学に、また天体で起きている高エネルギー現象に興味をもつ一助となりましたら幸いです。

(東京大学 大学院理学系研究科 / 理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)