

「ひとみ」による大質量X線連星 IGR J16318-4848の観測

中 嶋 大

〈関東学院大学理工学部 〒236-8501 神奈川県横浜市金沢区六浦東 1-50-1〉

e-mail: hiroshi@kanto-gakuin.ac.jp



IGR J16318-4848はINTEGRAL衛星によって発見された大質量X線連星系(HMXB: high-mass X-ray binary)で、HMXBの中でも最も強い吸収、かつ強い鉄輝線が特徴である。「ひとみ」の姿勢制御パラメータを最適化する前の観測だったにも関わらず、当時立ち上がっていた全ての観測装置でX線スペクトルを得ることが出来た。そこからわかったのは、コンパクト天体をとりまく鉄元素の電離度が中性かごく低電離の状態であること、また鉄輝線源の視線方向速度分布が 160^{+300}_{-70} km/s程度と非常に小さいことだった。これはX線連星系としてこれまでで最も小さく、かつ最も精密な測定結果である。これらの観測事実から、鉄輝線源は、我々から見て狭い立体角の範囲に局在しているか、あるいは温度数eVの自由電子や中性水素によって散乱されたものと考えられる。

IGR J16318-4848(以下、IGR J16318)は、超巨星と(恐らく)中性子星からなる大質量X線連星(HMXB: High-mass X-ray Binary)である。恐らく、と書いたのは、過去のX線衛星によって得られたスペクトルが降着中性子星によく見られる典型的なものである一方、周期パルスが検出されておらず、誰しもが納得いく形では結論がついていないからだ。

このHMXBは2003年にINTEGRAL衛星がその初期観測中に発見した、初めてのIGRの名を冠した天体である¹⁾。その後のINTEGRALによる銀河面サーベイ観測の結果、非常に強い吸収を受けた多数のHMXBが銀河系内の星生成領域で発見された^{2,3)}が、その中でもIGR J16318は、連星周囲に分布する吸収体の水素柱密度が最も高いという特徴をもつ。そのため2 keV未満の軟X線帯域では吸収によって光子が我々に全く届かない。この発見後すぐに、可視光から中間赤外の帯域で多くの観測がなされた。その結果、鉄の禁制線が観測されたことから、B[e]型の超巨星が伴

星であることがわかった(スペクトル中に顕著な水素輝線が見られるのがBe星だが、その中でも同時に禁制線が見られるものを特にB[e]星と表す)。また、X線で際立っていた強い吸収量と比べると、可視近赤外で測定したそれは2桁も低かったため、X線吸収体はコンパクト天体の周辺に集中しているといえる。

一般にHMXBの伴星はBe星のものと、早期型(O型B型)超巨星のものとに分類される。前者の場合は周期的なアウトバーストを示す場合が多く、コンパクト星がBe星周囲のガス円盤と交差する際に起こる降着で明るく輝いていると考えられている。後者の場合は確率的(stochastic)な時間変動が特徴であり、コンパクト天体が伴星により食を受けることも多い。IGR J16318の場合、Swift衛星BAT検出器による硬X線の長期モニターで80日の周期的な変動が見つかったものの、アウトバーストの数と周期位相との相関はなく、食も観測されていない。つまり一般的な分類のいずれにも合致しておらず、吸収体の分布や見込み角

は全く分かっていない。また過去のX線観測^{4,5,6)}では、ベキ状の連続X線と、鉄とニッケルの特性X線が観測されているものの、鉄を含んだ吸収体の運動や電離状態などはよく分かっていなかった。そのため「ひとみ」の精密分光によってコンパクト天体周辺の物質降着の様子がつまびらかに調べられると期待されていた。

「ひとみ」によるIGR J16318の観測には大きな不運とわずかな幸運があった。衛星の姿勢制御系が最適化される前の観測であったため、観測時間の大部分は、IGR J16318が望遠鏡の視野中心から5分角ほどずれてしまい、マイクロカロリメータ(SXS)の有効視野(約3分角四方)から外れてしまった。このとき「ひとみ」は初期運用中であり、観測装置の立ち上げ確認を優先するため、視野中心へ調整することなく次の観測天体に指向せざるを得なかった。その後の事故により、IGR J16318の観測目的であった、SXSによる鉄輝線精密分光の機会は次の衛星計画に持ち越しとなってしまったかに思えた。しかし、ほとんどゼロに近かったSXSの観測データをかき集めたところ、衛星がIGR J16318を指向した直後に若干姿勢がふらついたことで、ごく短時間ではあるがIGR J16318からの光子が検出器の端にとどいていたことが分かった。

このデータを解析すると、中性あるいは低電離状態の鉄に由来する特性X線エネルギーである6.4 keV周辺から、19個のイベントが検出された。これらは、荷電粒子などの非X線によるバックグラウンドイベントである可能性が考えられたが、このエネルギー帯で我々の観測時間から期待されるバックグラウンドイベントの数は高々2である。つまりこのイベントの大部分は、IGR J16318由来の光子であり、降着中性子星からの連続X線による光電離が起源であると考えられる。あらためてスペクトルを見ると、 $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線に相当するエネルギーにイベントが集中している(図1上)。単結晶X線回折による分光分析によれば、鉄を含

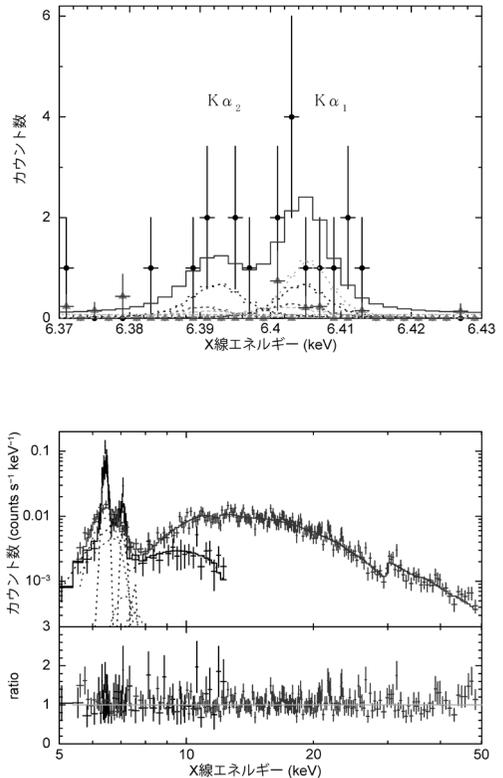


図1 (上) 6.4 keV付近を拡大したSXSのスペクトル(黒丸)。 $K\alpha_1$ 線と $K\alpha_2$ 線を複数のローレンツ関数の和(ヒストグラム)としてモデルフィットした結果。灰色三角印は非X線バックグラウンド。(下) SXI(黒)とHXI(灰色)による広帯域スペクトル。強い吸収による鉄吸収端構造が見られる。

む3d遷移金属の $K\alpha$ 輝線は著しく非対称で、自然幅を持つローレンツ関数を複数重ね合わせた形状をしている⁷⁾。地上で中性鉄に対して測定されたモデル関数を用いてスペクトルを再現したところ、自然幅だけではデータを説明できず、視線方向速度 $v=160^{+300}$ km/sに相当する幅を持つことが分かった。SXSの高いエネルギー分解能と低いバックグラウンドレベルにより、わずかな数の光子から大きな情報を引き出すことが出来たといえる。

一方広い視野を持つCCDカメラ(SXI)ではIGR J16318を十分な有効面積で捉えられており、

さらに硬X線撮像検出器 (HXI) も2台のセンサーのうち1台を立ち上げた直後であったため、5–50 keVの広帯域スペクトルを得ることが出来た (図1下)。こちらからは過去のX線観測と同様に強い鉄輝線とべき状連続X線が見られた。

一般にX線連星の鉄輝線は、その輝線形状に、鉄の電離状態や運動に関する情報を含む。また輝線強度や等価幅からは、鉄の存在量や分布が得られる。例えば連続X線を放射する点状天体を中心として、球状で様な中性ガス中での蛍光X線放射を考えた場合、輝線の等価幅はおよそ水素柱密度 (N_H) に比例する。ただしこれは $N_H < 1.5 \times 10^{24} \text{ cm}^{-2}$ までであり、それ以上になるとトムソン散乱に対して光学的に厚くなり、等価幅は頭打ちになる。IGR J16318もそのケースだ。しかし我々のデータは、光子統計が限られていて輝線強度や等価幅の議論はできない。それでも我々は鉄輝線の発生場所を探るため、輝線中心と吸収端エネルギーに注目した。

図2は、鉄の電離状態に対する輝線中心エネルギー (E_{line})、吸収端エネルギー (E_{edge})、さらにエネルギー較正の不定性に影響されにくい量として両者の差 ($E_{\text{edge}} - E_{\text{line}}$) について、計算からの予想^{8–11)}と実測値を示したものである。典型的な早期型星の星風速度 ($r=2R_*$ において $v_w \sim 1,000 \text{ km/s}^{12)$) の分だけドップラーシフトしている可能性を考えても、高々3階電離 ($\text{Fe}_{\text{I-IV}}$) であることが分かった。これはイオン化パラメータ $\log(\xi) \sim -2$ に相当する。イオン化パラメータは $\xi = L/nR^2$ であり¹³⁾、 L はX線源の光度、 n は鉄輝線を放射している物質の密度、 R はX線源から物質までの距離を示す。過去のXMM衛星による観測で、鉄輝線と連続X線の強度変動の時間差から、 $R \sim 10^{13} \text{ cm}$ であることが分かっている¹⁴⁾。よって今回観測したX線光度から鉄を放射するガスの密度を求めると $n \geq 3 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ 、さらにガスの視線方向の厚みは $l = N_H/n \leq 7 \times 10^{13} \text{ cm}$ と見積もられる。一方で、80日の連星周期¹⁵⁾と伴星およ

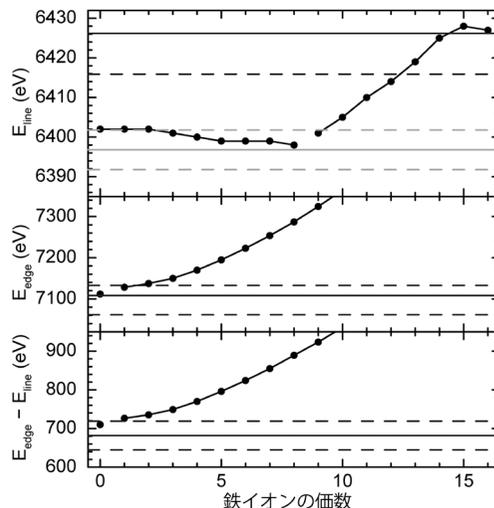


図2 鉄の電離状態に対する $K\alpha$ 輝線中心エネルギー (E_{line} , 上段), 吸収端エネルギー (E_{edge} , 中段), 両者の差 ($E_{\text{edge}} - E_{\text{line}}$, 下段). 黒点が計算による予測, 実線が測定値, 破線が統計誤差範囲. 上段は灰色がSXS, 黒がSXI+HXIによるもの.

びコンパクト天体の質量から、このHMXBをなす星の間隔は $2 \times 10^{13} \text{ cm}$ と求められる。このことから、鉄輝線源の最大サイズと R は、連星系自体のサイズに匹敵することが分かる。

そうすると鉄輝線源として可能性が高いのが伴星からの冷たい星風であるが、星風の速度 ($v_w \sim 1,000 \text{ km/s}$) に対して観測された速度幅は非常に小さい。つまり、輝線の発生場所は星風の全領域ではなく比較的小さな領域であると考えられるが、さらなる議論のためには v_w の正確な測定が求められる。もう一つSXI, HXIのスペクトルの特徴として、鉄輝線にコンプトンショルダー (輝線の低エネルギー側に伸びる構造で、輝線の一部がコンプトン散乱してエネルギーを損失したものの。散乱角が大きいほど、エネルギー損失が顕著。) が全く見られない。X線吸収の非常に強いもう一つのHMXBであるGX 301-2¹⁶⁾とは対照的だ。これは、連続X線源と我々との間に存在する鉄輝線源の分布が我々から見て狭い立体角の範囲に局在している可能性を示唆している。あるいは

は別の可能性として、温度数eVの自由電子、さらには中性水素による散乱でコンプトンシヨルダーがなまされることも計算で示されている¹⁷⁾。実際、中間赤外線観測で温度35,000–40,000 Kのスペクトル成分が見つかった¹⁸⁾。これらについてより詳細に調べるためには、2021年度打ち上げのXRISMによる、光子統計に優れたカロリメータスペクトルが待たれることは言うまでもない。「ひとみ」の特長は、X線マイクロカロリメータによる軟X線帯域の精密分光と、軟X線から軟ガンマ線までの広帯域撮像分光であった。本研究はその2つの武器を最大限に生かした数少ない成果となったことも付け加えたい。

謝 辞

本研究は、Hitomi Collaborationの成果です。詳しくは本論文¹⁹⁾をご覧ください。IGR J16318を観測している時、筆者は宇宙科学研究所の運用室におり、ほぼリアルタイムでSXIのイメージをチェックしていました。そのデータをまとめて論文にする機会を頂いたことに深く感謝します。また「ひとみ」開発に携われた皆様、中でも観測にいたるまでに苦楽をともにした、大学院生を含むSXIチームの方々全員にこの場をお借りして感謝申し上げます。

参考文献

- 1) Courvoisier, T.J.-L., et al., 2003, IAU Circ., 8063
- 2) Bodaghee, A., et al., 2012, ApJ, 744, 108
- 3) Coleiro, A., & Chaty, S., 2013, ApJ, 764, 185
- 4) Murakami, H., et al., 2003, IAU Circ., 8070
- 5) Matt, G., & Guainazzi, M., 2003, MNRAS, 341, L13

- 6) Barragán, L., et al., 2009, A&A, 508, 1275
- 7) Hölzer, G., et al., 1997, Phys. Rev. A, 56, 4554
- 8) Yamaguchi, H., et al., 2014, ApJ, 780, 136
- 9) Palmeri, P., et al., 2003, A&A, 410, 359
- 10) Mendoza, C., et al., 2004, A&A, 414, 377
- 11) Kallman, T.R., et al., 2004, ApJS, 155, 675
- 12) Abbott, D.C., 1978, ApJ, 225, 893
- 13) Tarter, C.B., et al., 1969, ApJ, 156, 943
- 14) Walter, R., et al., 2003, A&A, 411, L427
- 15) Iyer, N., & Paul, B., 2017, MNRAS, 471, 355
- 16) Watanabe, S., et al., 2003, ApJ, 597, L37
- 17) Sunyaev, R.A., & Churazov, E.M., 1996, Astron. Lett., 22, 648
- 18) Chaty, S., & Rahoui, F., 2012, ApJ, 751, 150
- 19) Hitomi Collaboration, 2018, PASJ, 70, 17

Hitomi observation of high-mass X-ray binary IGR J16318–4848

Hiroshi NAKAJIMA

College of Science and Engineering, Kanto-Gakuin University, 1–50–1 Mutsuurahigashi, Kanazawa-ku, Yokohama, Kanagawa 236–8501, Japan

Abstract: IGR J16318–4848 is a high-mass X-ray binary discovered by INTEGRAL satellite. Its spectrum is dominated by strong fluorescence lines of Fe as well as continuum emission with an extremely strong absorption. With Hitomi spectra, we found that the ionization state of Fe is neutral or low ionized and that the Fe line width corresponds to a velocity of 160 km/s, which is the smallest line width measured most accurately so far from any X-ray binaries. These characteristics suggest reprocessing materials that are distributed in a narrow solid angle, or scattered primarily by warm free electrons or neutral hydrogen.