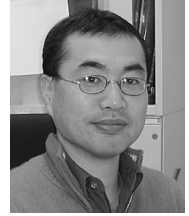


●●●●あの論争は…いま？ (11) ●●●●

銀河面リッジからの X 線放射は拡散成分か、 点源の重ね合わせか？



海老沢 研

〈宇宙科学研究開発機構宇宙科学研究本部 〒229-8510 神奈川県相模原市由野台 3-1-1〉

e-mail: ebisawa@isas.jaxa.jp

論争の種：われわれの銀河面からの X 線放射の起源

論争の期間：1980 年代前半から現在まで

対立説：(1) X 線放射の大部分は真に拡がったプラズマ成分である，(2) いや，そうではなくて，たくさんの暗い X 線点源の集まりである。

現在有力な説：(1) で決着がついたと思いきや，(2) が盛り返してきている。

これほど単純で、長く続いている現代天文学の論争も珍しいと思う。筆者自身そのプレーヤーの一人であり、われわれのライバルが非常に強力であることに興奮を感じている。たとえば、私たちが間違っていたとしても、

私たちは、2000 年、2005 年に出版した、過去最高感度の X 線データを精密に解析した論文で上記の (1) を主張し、これで長年続いていた論争に決着をつけた、と信じていたのである^{1),2)}。しかし、その後ロシアの高名なライバルたちが驚くべき論文をたてづづけに出版し³⁾⁻⁵⁾、(2) を主張して真っ向からわれわれの結論を否定した。いったい何が起きているのか？ それに対してわれわれはどう考えているのか？ この小論文で紹介しよう。

われわれの銀河面、“尾根”（リッジ）の部分から高エネルギーの X 線が放出されていることは、1980 年代前半から知られていた⁶⁾。全銀河面で積分した強度は約 10^{38} ergs/s (2-10 keV)、銀河系内の明るい X 線連星一つくらいに対応する。当時の X 線天文衛星は位置分解能が悪く、この銀河面リッジ放射が数多くの点源の集まりであるのか、あるいは拡がったプラズマ起源なのか、全く

区別がつかず、その起源を探る鍵となりうる精密なデータも得られなかった。

1980 年代後半になると、EXOSAT、「てんま」、「ぎんが」などによる、より詳細な観測から、銀河面リッジ X 線放射の大局的な空間分布やエネルギースペクトルの理解が進んできた⁷⁾⁻⁹⁾。リッジ X 線放射は、銀河面に沿って約 1 度の厚みを持ち、銀経約 -30 度から +30 度の範囲に分布している。銀河中心でその強度はピークをもち、銀緯方向に約 ± 5 度の範囲に拡がったバルジ成分も存在する（この大局的な空間分布が後に大きな鍵となる）。熱的なエネルギースペクトルをもち、それに付随して高度に電離したヘリウム様、または水素様鉄イオンからの輝線が見られる。スペクトルを熱的プラズマからのものだと考えると、その温度は $\sim 5-9$ keV 程度、エネルギー密度は ~ 10 eV/cm³ 程度。それほど高温の電子は銀河の重力では束縛できないし、平均エネルギー密度は宇宙線のエネルギー密度の約 10 倍にも達する。異常なほど高温、高エネルギーをもつ未知のプラズマ成分が銀河面を満しているのだろうか？

あるいは、そのようなエネルギースペクトルを

もった暗い X 線点源が銀河面を埋め尽くし、個々の点源を分解できない X 線天文衛星で見ると、あたかも広がったプラズマ成分のように見えるのかもしれない。まるで点描派の絵画のように、しかし、それほど高温スペクトルをもち大量に存在する X 線源は、容易には見つからない。ブラックホールや中性子星では明るすぎるし、超新星残骸や通常の星では温度が低すぎる。一方、白色矮星を含む連星系である“激変星”は比較的豊富に存在し、静穏状態で高温のエネルギースペクトルをもつので、もし点源起源であるとしたら激変星が有力候補ではないか、と考えられていた¹⁰⁾。

リッジ X 線放射は真に広がった X 線成分なのか、あるいはたくさんの暗い点源からなるものなのか？ その決着をつけるには、星間吸収の影響が少ない約 2 keV より高エネルギー側で撮像観測を行い、リッジ成分を個々の点源に分解することが必要である。しかし、～2 keV より高エネルギーの X 線結像は技術的に困難で、1993 年に打ち上げられた「あすか」衛星で初めて可能になった。「あすか」は精力的に広い範囲の銀河面を観測し、当時では最も高精度な銀河系内天体の $\log N - \log S$ プロットを作成した¹¹⁾。「あすか」の限界感度は 2–10 keV で約 2×10^{-13} ergs/s/cm²。当時では最高のこの感度レベルでも、リッジ X 線成分を点源に分解するには程遠かった。さらに XMM-Newton 衛星は $\log N - \log S$ を暗い方に 1 桁伸ばしたが¹²⁾、それをさらに外挿していてもリッジ X 線成分の 100% を点源では説明できないだろう、というのが当時の標準的な理解であった。

「あすか」の限界感度はその位置精度（～1 分角）で制限されている。日本の小型衛星に高エネルギーまで結像できる X 線ミラーを載せるため、短焦点、軽量にせざるをえず、結像性能が犠牲になったのである。一方、1999 年に打ち上げられたアメリカのチャンドラ衛星は、ガラスを磨き上げ

たほぼ完璧なミラー（焦点距離は 10 m、ミラーだけで 1.5 トン！）を塔載し、～0.5 秒角の位置分解能を誇る。点源からの X 線は CCD の 1 ピクセルよりも小さな領域に集光され、そこからの非 X 線バックグラウンドはほぼ無視できるので、数個の X 線光子が受かっただけで点源と認識できる。チャンドラの限界感度は天体からの光子数だけでほぼ決まり、観測時間を稼げば稼ぐほど暗い天体を検出できる。

ところで、銀河系外、全天に広がる「宇宙背景 X 線放射」の起源も長い間 X 線天文学の謎であったが、チャンドラ衛星による長時間、高感度の観測により、そのほぼすべてが X 線点源、活動的銀河中心核 (AGN) に分解されることがわかってきた¹³⁾。宇宙背景 X 線放射の単位面積あたりの強度は空の場所による多少のムラもあるが、約 2×10^{-11} ergs/s/cm²/deg² (2–10 keV)、その約 90% が、～ 2.1×10^{-16} ergs/s/cm² (2–10 keV) より明るい AGN の総和として説明できる。さらに暗い AGN もたくさん存在するわけだが、積分強度にはあまり影響がない。

私たちは「あすか」が観測した銀河面上、銀緯 28.5 度の「空白領域」（ただしリッジ X 線は強い）を、2000 年、2001 年にチャンドラ衛星を用いて計 200 ksec 観測し、「あすか」より約 2 桁低い、～ 3×10^{-15} ergs/s/cm² (2–10 keV) の感度を達成した¹⁴⁾²⁾。私たちがチャンドラ衛星による長時間観測から発見した事実は以下の二つである。(1) 限界感度～ 3×10^{-15} ergs/s/cm² (2–10 keV) より明るい銀河系内天体、系外天体（両者は区別できない）を合わせた表面密度は～500個/deg²で、これは高銀緯領域における観測から推定される背景の AGN の数と比べて“格段に多くはない”。(2) 視野から限界感度より明るい点源を除いても、高銀緯領域に比べて、はるかに強い X 線フラックスが観測される。

観測した領域で銀河系内の水素柱密度は～ 6×10^{22} cm⁻² であり、銀河面の裏側にある AGN は

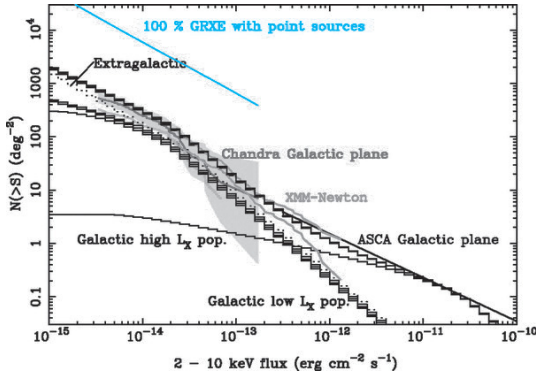


図1 Chandraが観測した銀河面上、銀緯28.5度の領域における $\log N - \log S$ カーブと、そのモデリング。XMM-Newton, ASCA も含め、明るい銀河系内 X 線源（中性子星またはブラックホール）、暗い銀河系内 X 線源（白色矮星）、銀河系外天体（背景の AGN）の和でうまく説明できる。もし青の線まで $\log N - \log S$ が到達していれば、100%のリッジ X 線放射を点源で説明できるはずが、まだまだ足りない (Ebisawa K., et al., 2005, ApJ 635, 214 より)。

景の AGN で、この感度に達すると、銀河系内 X 線点源はもうあまり存在しないことを示唆している。(2) は、まさに宇宙背景 X 線放射に加えて銀河面リッジ X 線成分の存在を示している。(1) と (2) を合わせて、われわれは銀河面リッジ成分の起源は、銀河面上で真に拡がった（未知の）放射成分だと結論した。

実際、チャンドラによる $2-10 \text{ keV } \log N - \log S$ カーブは、(a) 背景の AGN, (b) 中性子星またはブラックホールを含む明るい連星系, (c) 白色矮星を含む暗い連星系（激変星）、の和でうまく説明できる(図1)。また、銀河系内の白色矮星連星系の数には不定性があるが、私たちは、暗い ($\leq 10^{30} \text{ ergs/s}$) ほうの点源の数が「多少」変わっても、観測された全リッジ X 線フラックスに対する点源の割合は「あまり影響を受けない」ことを示した。よって、リッジ X 線放射の大部分は拡散成分であるという結論は、チャンドラの検出限界以下の暗い X 線源の光度関数には依存しない、というのがわれわれの主張である。

約 20% (2-10 keV) の減光を受けるが、ほとんどすべてが銀河面を貫いて観測される。(1) は、チャンドラで分解された X 線点源の大部分は背

図1を積分形にするとわかりやすい(図2)。銀河面上で観測された単位平方度あたりの全 X 線強度、期待される宇宙背景 X 線放射の強度、(銀

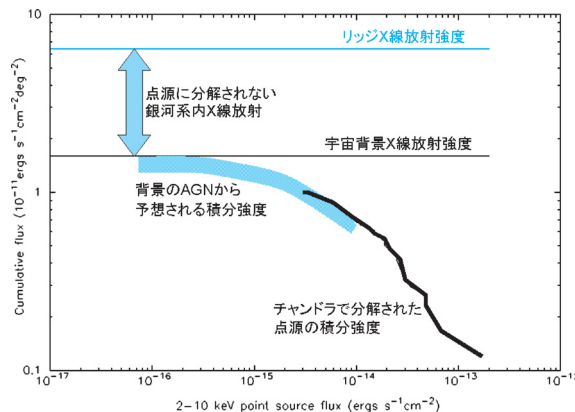


図2 銀河面上で観測される単位平方度あたりの全 X 線強度（青横線）と期待される宇宙背景 X 線放射の強度（黒横線）、および与えられたフラックス以上のチャンドラ点源の積分強度（黒太線）と銀河面上で期待される背景の AGN の積分強度（青太線）。限界感度においてチャンドラ点源の大部分が背景の AGN であり、リッジ X 線放射の大部分は銀河面内の点源には分解されないことがわかる。

河面吸収によって約 20% のフラックス減少を考慮済み), チャンドラの限界感度以上の点源をすべて重ね合わせた強度を示した. 検出限界近くの点源のほとんどが背景の AGN と考えられ, その重ね合わせで宇宙背景 X 線放射の大部分を説明できること, それと比較して数倍強い X 線が銀河面から観測されていることがわかる. 図中, 矢印で示したギャップが, 真に広がった (と考えられる) 銀河面リッジ X 線強度である.

われわれは, チャンドラ衛星を使って, 銀河面リッジ X 線成分を最大限点源に分解し (=100% 点源に分解しきれないことを示し), ついにリッジ成分は真に広がった放射であることを示した, と考えていた. 一方, Revnivtsev らロシアのチームは, 全く違ったアプローチでリッジ X 線の起源に迫り, われわれに真っ向から反対する, 「銀河面リッジ X 線成分の大部分は点源である」, という結論を導きだした³⁾⁻⁵⁾. 彼らの主張には二つの根拠がある. (1) リッジ X 線成分と近赤外線放射の大局的な分布の一致. (2) 太陽系近傍の暗い X 線天体の光度関数. (1) も (2) も, 主に RXTE 衛星を用いた結果である. RXTE 衛星搭載は結像は不可能であり, 感度もチャンドラに比べてはるかに劣るが, 広い領域を観測できる, という利点がある. RXTE 衛星の約 10 年の観測は全天をほぼくまなくカバーし, 比較的明るい X 線天体の天球上の分布, 太陽系近傍の X 線天体の光度関数, リッジ X 線放射の大局的な空間分布を明らかにした. 特筆すべき発見は, リッジ X 線放射の空間分布が, 3.5 μm の近赤外線放射の空間分布とほぼ完全に一致していることである⁴⁾ (図 3). 近赤外線表面輝度とリッジ X 線表面輝度と間に 1 対 1 の関係があるので, 前者から後者を推定し, 観測された全天マップから引くと, きれいにリッジ X 線放射は消えて明るい点源だけが残る. われわれも両者がよく似ていることには以前から気づいていたが, これほど定量的に一致していることは驚きであった.

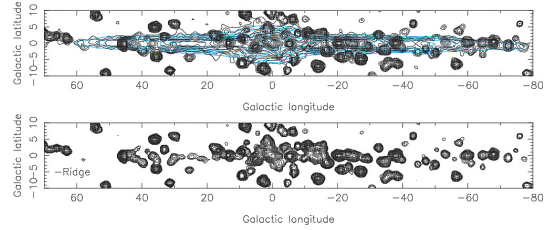


図 3 上: 黒が RXTE 衛星による X 線強度の等高線図. 青は COBE 衛星による 3.5 μm 放射強度の等高線図. 下: 比例関係を仮定して近赤外線放射強度から X 線強度を見積もり, 上の X 線放射強度図から引いたもの. リッジ X 線成分がきれいに消えて, 点源だけが残ることがわかる (Revnivtsev M., et al., 2006, A&A 452, 169 より).

また, 3.5 μm の放射は通常の星 (大部分が晩期型主系列星) の分布を表していると考えられている. 星があるところにリッジ X 線放射ありき, ということで, 「星の質量あたりのリッジ X 線放射率」というものを求めると $1 M_{\odot}$ の星あたりリッジ X 線光度 $\sim 3.5 \times 10^{27}$ ergs/s (3–20 keV) という値が得られる. リッジ X 線放射を主に担っている白色矮星 (激変星) など, X 線で光っている星の数が, 近赤外線で見えている通常の星 (晩期型星) の数と比例している, という解釈である. RXTE の感度では $\sim 10^{30-32}$ ergs/s 程度の暗い X 線天体は, 太陽のごく近傍でしか観測できないが, 全天では ~ 30 個観測されている³⁾. 特に, 激変星 (白色矮星) だけでなく, RS CVn のように磁気的にアクティブな晩期型星同士の連星系や, 高温コロナをもつ早期型星も検出されていることが注目になる. RXTE の観測から太陽系近傍における暗い X 線天体の空間密度が求められ, 主系列星の空間密度と組み合わせると, 「太陽系近傍における $1 M_{\odot}$ の星あたりの X 線天体の放射率」がわかることになる. その値が, 上で大局的な空間分布から求めたリッジ X 線放射率と, ほぼ一致している. つまり, 太陽系近傍の暗い X 線星の分布を銀河面全体に当てはめれば, リッジ X 線

のほぼすべてが点源で説明できる、というのが彼らの主張である。

上記のわれわれの主張と対比して書くと、Revnitsev らの主張は、われわれのチャンドラの観測では受からなかった暗い点源が、銀河系内には「非常にたくさん」あり、それが観測された全リッジ X 線フラックスに対する点源の割合に「決定的な影響を与える」。感度を下げて暗い X 線点源を分解していけば、いずれ ~100% のリッジ X 線は点源に分解できるはずだ、と言うのである。点源説によると、リッジ X 線の特徴的なエネルギースペクトルは 1 種類の天体では説明できない。~5 keV より低エネルギー側では、RS CVn のようなアクティブな晩期型連星系、それより高エネルギー側では複数のタイプの激変星が支配的になり、それらの異なったエネルギースペクトルを重ね合わせると、ちょうど観測されたリッジ X 線のエネルギースペクトルを説明できる、という。

しかし、私たちに、Revnitsev らの主張には無理があるように思える。リッジ X 線放射と近赤外線放射の「大局的」な一致は確かに驚くべきものだが、それから直ちにリッジ X 線の起源が点源だと結論づけるのは拙速ではないか？ 太陽系近傍のわずか 30 個足らずの天体から求めた X 線天体の空間密度を、いきなり全銀河面に適用するのは乱暴ではないだろうか？ 実際、「局所的」にはいまだ個々の X 線源は分解できず、それらの対応天体も見つかっていない。1980 年代から現在まで、少しずつ検出器の感度が向上し、銀河系内の暗い X 線天体のかなりのものが分解できるようになってきたのにもかかわらず、リッジ X 線放射の大部分を説明するほどの大量な点源は見つかっていない。Revnitsev らは、私たちが使ったチャンドラのデータを再解析し、私たちが余裕をもって設定した限界感度 ($\sim 3 \times 10^{-15}$ ergs/cm²; 2-10 keV) より明るいところでは一致した結果を得ているが、それ以下で $\log N - \log S$ が上昇

している徴候を見いだしたと主張している。点源の数を過剰に見積もっているようにも思われるが、それでも ~25% 程度のリッジ X 線成分しか分解しきれていない¹⁴⁾。彼らは、まだまだ暗いところに驚くほどたくさん X 線天体が存在するはずだ、と主張しているわけだが、見えないところに難題を押しつけているような印象を受ける。

では、われわれが主張するように、リッジ X 線の起源が真に拡がったものとしたら、X 線と近赤外線の分布のきれいな相関はどう説明したら良いのだろうか？ 仮に恒星の分布とリッジ X 線を担っているガスの分布が相関していれば、リッジ拡散成分説と、X 線と近赤外線との空間分布の一致は両立する。例えば、弱い磁場をもった星の固有運動が星間磁場と相互作用し、X 線を放出するほど星間ガスを高エネルギーまで加熱している、という可能性はないだろうか？

銀河面上の天体は強く吸収を受けて可視光では観測が困難なため、リッジ X 線成分の一部（あるいは大部分）を担っている点源の起源を探るためには、透過力の強い近赤外線観測が必要である。われわれが ESO/NTT の 4 m 鏡でいくつかのチャンドラ天体を分光観測した結果、2 keV 以上で検出された点源の多くは、確かに激変星のようであった²⁾。さらに、私たちは ESO/NTT では暗くて見えなかったチャンドラ天体の同定観測、分光観測を「すばる」の MOIRCS を用いて行う予定である (PI はペンシルバニア州立大学の辻本匡弘氏)。これにより、個々の暗い X 線天体の性質を明らかにし、リッジ X 線放射の起源に迫るための足掛かりとしたい。

究極的にリッジ X 線放射の起源に決着をつけるには、さらに $\log N - \log S$ を暗いほうまで伸ばして行って、リッジ X 線放射のフラックスが本当に点源の総和で説明できるのか、あるいはそこに至る前に点源の数は飽和するのかを明らかにする以外にない。先に述べたように、チャンドラの究極的な感度は観測時間で決まる。私たちは、す

でにチャンドラで 100 ks 観測した銀経 28.5 度の領域をさらに 1 Ms 観測する, Very Large Project (VLP) を提案している (採択されれば, 観測効率を考慮すると衛星を約 20 日間占有することになる!). これにより, 約 1桁低い, $\sim 3 \times 10^{-16}$ ergs/cm² (2–10 keV) という観測が達成されるはずだが, それでもリッジ成分を完全に点源に分解する, あるいは銀河系内 X 線点源の数が飽和することを示すには不十分かもしれない.

Revnitvsev らは, $\sim 3 \times 10^{-17} \sim 10^{-16}$ ergs/cm² (2–10 keV) で, リッジ成分のほぼ 100% が点源に分解されると予想している⁴⁾. $\sim 3 \times 10^{-16}$ ergs/cm² (2–10 keV) の典型的な X 線源をチャンドラで観測すると, 期待されるカウントレートは $\sim 3 \times 10^{-6}$ カウント毎秒. 1 Ms 観測しても, ~ 3 個の X 線光子しか掴まえない! 仮に 3 Ms 観測したら ~ 9 個の X 線光子を掴まえることができ, 約 3 シグマで検出可能である. 実は, チャンドラには, 特に天文学的に重要な問題のため 3 Ms 以上, 5 Ms の巨大プロジェクトを 3 年間に一つだけ行う, “Exterme Large Project (ELP)” の計画があり, それに相応しい科学的テーマについての「ELP 白書 (white paper)」を募集している. 私たちもリッジ X 線放射について, ちょうどそれを提出したところである (PI は NASA/GSFC の Elihu Boldt 氏). 3 Ms の露出時間を稼ぐためには衛星を約 2 カ月占有する必要がある, 実現すれば, それこそ歴史に残る超巨大プロジェクトになる.

リッジ X 線の起源は X 線天文学に残された大

問題であるが, 十分チャンドラの観測時間を割り当てれば (それが非常に難しいのだが) 決着がつくことが予想される問題でもある. チャンドラの VLP, 願わくは ELP が採択され, 数年後にはこの問題に決着がついていることを願いたい, そのとき私はどんな気持で, 「天文月報」のバックナンバー中のこの記事を読んでいるだろうか? 「やはりわれわれが正しかった!」, とニンマリしているだろうか, あるいはポリポリと頭を掻いているだろうか?

参考文献

- 1) Ebisawa K., Maeda Y., Kaneda H., Yamauchi S., 2005, *Science* 293, 1633
- 2) Ebisawa K., et al., 2005, *ApJ* 635, 214
- 3) Sazonov S., Revnivitsev M., Gilfanov M., Churazov E., Sunyaev R., 2006, *A&A* 450, 117
- 4) Revnivitsev M., Sazoov S., Gilvanov M., Churazov E., Sunyaev R., 2006, *A&A* 452, 169
- 5) Revnivitsev M., Molkov S., Sazonov S., 2006, *MNRAS* 373, L11
- 6) Worrall D. M., et al., 1982, *ApJ* 255, 111
- 7) Warwick R. S., et al., 1985, *Nature* 317, 218
- 8) Koyama K., Makishima K., Tanaka Y., Tsunemi H., 1986, *PASJ* 38, 121
- 9) Yamauchi K., Koyama K., 1993, *ApJ* 404, 620
- 10) Mukai K., Shiokawa K., 1993, *ApJ* 418, 863
- 11) Sugizaki M., Mitsuda K., Kaneda H., Matsuzaki K., Yamauchi S., Koyama K., 2001, *ApJS* 134, 77
- 12) Hands A. D. P., Warwick R. S., Watson M. G., Heldfand D. J., 2004, *MNRAS* 351, 31
- 13) たとえば, Moretti A., Campana S., Lazzati D., Tagliaferri G., 2003, *ApJ* 588, 696
- 14) Revnivitsev M., Sazonov S., astro-ph/0702640