

# 「すざく」衛星で探る軟 X 線背景放射

吉野友崇

〈日本電気株式会社 〒183-0036 東京都府中市日新町 1-10〉

e-mail: yoshino@astro.isas.jaxa.jp



個々の天体に分離できない背景放射のうち、1 keV 以下の軟 X 線背景放射 (SXDB: Soft X-ray Diffuse Background) は 40 年以上前に発見されたが、その正体はいまだわかっていない。筆者らは「すざく」衛星を用いて軟 X 線背景放射から、酸素輝線を分離し、さまざまな視野からの強度を調べた。ほぼ一様な強度を示す太陽近傍からの放射と、方向依存性をもつ銀河ハロー起源と考えられる放射があることが明らかになった。銀河ハロー中の X 線放射をしている高温プラズマの温度は約 200-270 万度という狭い範囲にあることもわかった。

## 1. 軟 X 線背景放射とは？

宇宙にはマイクロ波からガンマ線に至るさまざまなエネルギーの背景放射が存在する。このうち、X 線のエネルギー帯 (0.1-100 keV) における背景放射が全天からほぼ一様に観測されることは、1960 年代の X 線天文学の幕開けから知られていた。その中で、2 keV から約 100 keV までのエネルギー帯の放射は、最近のチャンドラ衛星などの観測により、多数の系外天体からの X 線放射の重ね合わせであることが確実となってきた。一方、X 線エネルギーが 2 keV 以下の背景放射のスペクトルは、2 keV 以上のスペクトルを低エネルギー側に伸ばすだけでは説明がつかない。つまり、系外天体の重ね合わせでは説明できない放射成分が存在する。その放射の 0.4 から 1 keV への寄与は、高銀緯でも全強度の 60% 程度も占め、低銀緯ではさらに大きい。このような放射の存在は 1970 年代から知られていたが<sup>1)</sup>、その放射源はいまだに理解されていない。軟 X 線背景放射の起源を解明し、この放射を出すと考えられる銀河系の体積の 50% 以上を占める高温プラズマの物理状態を知ることができれば、銀河系の大規模な

物質循環の現場をとらえ、銀河系の形成史の理解に迫ることができる。

以下では、X 線背景放射の系外成分を CXB (Cosmic X-ray Background) と呼び、2 keV 以下の X 線背景放射を SXDB (Soft X-ray Diffuse Background) と呼ぶ。

## 2. 軟 X 線背景放射の特徴

SXDB の放射源の理解にとって重要な観測の一つが、マイクロカロリメーター検出器を搭載した 1999 年のロケット実験である。これは、エネルギー分解能 10 eV という超精密な分光観測であり、SXDB の中に高階電離した炭素 (C VI)、酸素 (O VII, O VIII)、ネオン (Ne IX) などの輝線を初めて明確に検出した<sup>2)</sup>。これにより SXDB 中の CXB 以外の成分が、輝線放射の集まりであることが確実となり、この輝線が 100 万度から 200 万度の温度の高温プラズマからの放射であることを示した。

また、ROSAT 衛星による観測で SXDB の全天図が作成され、SXDB の空間的な放射分布がわかってきた<sup>3)</sup>。図 1 は ROSAT の 3/4 keV バンド (約 0.4-1.2 keV) の背景放射の全天図である。銀

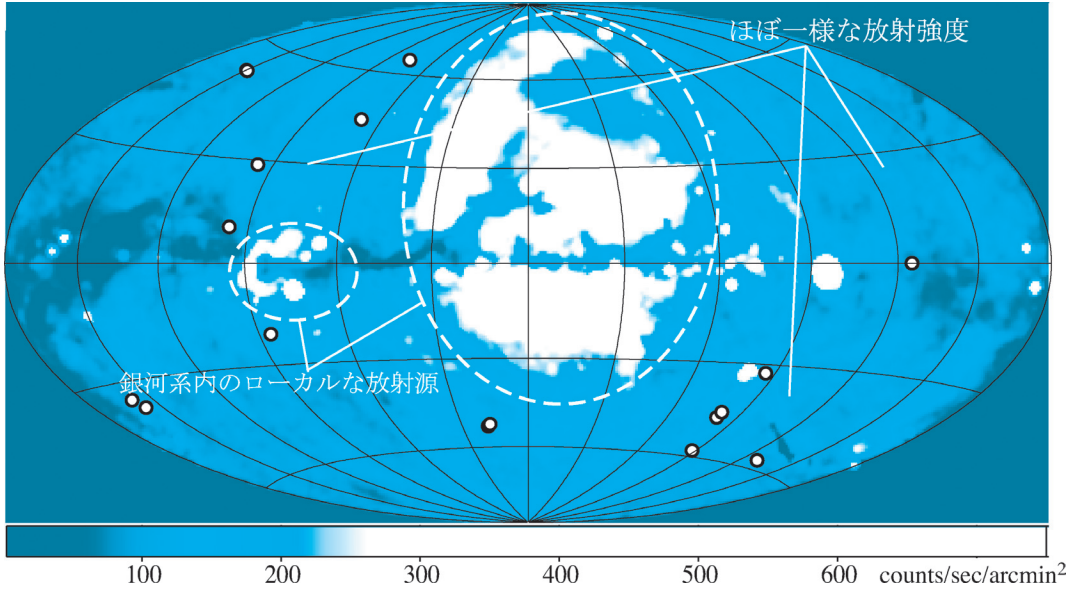


図1 ROSAT 衛星による約 0.4-1.2 keV の軟 X 線背景放射の全天図。|銀経|<60°に見られるローカルな放射以外はほぼ一様な放射に見える。白丸は本稿の研究で解析した「すざく」衛星の観測方向。

河系内のローカルな構造（主として銀経 60°より内側に存在）を除くと、放射強度は一樣に近いことがわかる。しかし、その X 線放射源が何であり視線上のどの距離にあるのか、あるいは、どの距離にある放射がどれだけ寄与しているのかなどの理解は進んでいない。

### 3. 軟 X 線背景放射の放射源と未解決問題

以下では、これまでの X 線観測により示唆されている SXDB の放射源を概観する。図2に 3/4 keV の SXDB の放射源の位置関係を示す。まず地球から約 100 pc 以内の近傍からは、Local Hot Bubble (LHB) の放射と惑星間空間での太陽風荷電交換反応 (Heliospheric Solar Wind Charge eXchange: H-SWCX) による X 線放射が存在する。これらは銀河面に沿って存在する中性物質の内側からの放射である。2000 年ごろまでは、X 線や紫外線の観測により、太陽系を約 100 pc のスケールで取り巻く温度が約 100 万度の高温ガスが存在

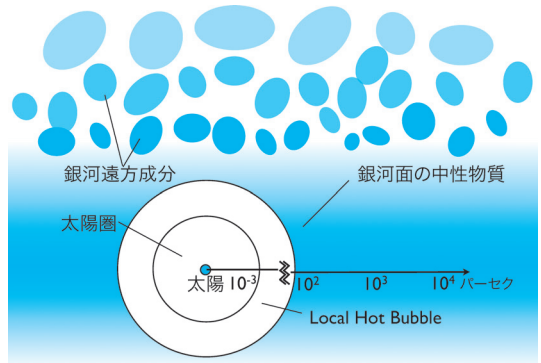


図2 3/4 keV バンドの SXDB の放射起源の位置関係。

し、このガス (Local Hot Bubble) が 1 keV 以下の放射に大きく寄与していると考えられていた<sup>4)</sup>。しかし、最近の極紫外線の観測との比較から LHB の 3/4 keV バンドの放射への寄与は 1 割程度に満たないことが示唆され<sup>5),6)</sup>、大部分は H-SWCX によるものと考えられている。太陽風荷電交換反応とは、太陽風に含まれる高階電離イオンと中性物質が衝突することにより、中性物質に含

まれる電子が高階電離イオンの励起準位に移動する反応である。この移動した電子がイオンの基底状態に遷移する際に電磁波を放射する。中性物質と太陽風イオンとの反応が **H-SWCX** と呼ばれる。例えば  $O^{+7}$  イオンが中性水素などと荷電交換すると **O VII** 輝線を放射する。太陽圏の中性水素密度などを仮定すると、不確定性は大きいが **O VII** 輝線強度は  $4 \text{ LU}$  ( $\text{LU: Line Unit} = \text{photons s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ str}^{-1}$ ) 程度とあって良いことになる(前述のロケット実験による結果の **O VII** 輝線強度  $4.8 \pm 0.8 \text{ LU}$  と比較して無視できない強度である)。しかし、その強度はモデルに大きく依存し、観測的に分離は困難なので、どのくらいの寄与があるかは明確にはわかっていない。

放射源までの距離は天文学において大きな問題である。**SXDB** の放射源までの距離を測る方法として **shadowing** 観測がある。分子雲 **MBM12** は約  $100 \text{ pc}$  の距離にあり、密度が大きく **O VII** 輝線を透過しない。つまり、**MBM12** 方向とそこからずれた方向を観測すれば、 $100 \text{ pc}$  以内とその向こう側からの放射の強度を見積もることができる。**Smith** らは、「すざく」衛星によって **MBM12** とそこから  $3$  度離れた方向を観測し、**O VII** 輝線強度が **MBM12** 方向より  $2 \text{ LU}$  程度高いことを明らかにした。**MBM12** は銀河面から離れ、銀河面の中性物質の端に位置していることから、銀河面の中性物質の外側(銀河系ハローの領域)にも放射源があることを示している。これをここでは銀河遠方成分と呼ぶ。この高温ガスの起源はもとより、放射の寄与や分布、また温度、密度などの基礎物理量さえもほとんど理解されていない。

以上より、**SXDB** の理解のうち、「**H-SWCX** と銀河遠方成分の放射の寄与」と「銀河遠方成分の物理状態」が、未解決の大きな課題として残されていると言える。

#### 4. すざく衛星で軟 X 線背景放射の起源に迫る

以上を踏まえ、本稿の研究では、1) **SXDB** の近傍の放射 (**H-SWCX**) と銀河遠方成分を切り分け、それぞれの寄与を明らかにし、2) 銀河遠方成分の物理状態に制限を与え、その起源を明らかにすることを目的とした。

$3/4 \text{ keV}$  バンドには、酸素 (**O VII**~ $570 \text{ eV}$ , **O VIII**~ $654 \text{ eV}$ )、ネオン (**Ne IX**) などの重要な輝線放射が存在する。特に、酸素は宇宙において水素、ヘリウムに次いで多く存在し、**O VII**, **O VIII** 輝線は温度が約  $100\text{--}300$  万度の高温ガスから強く放射されるため、精度良く強度を決めやすい。また、**O VII** は **O VIII** の輝線強度の比は温度に敏感なため、**O VII** と **O VIII** 輝線を分離し、強度を決定することで、高温ガスの温度を精密に求めることができる。したがって、酸素輝線は **SXDB** を調べるうえで、非常に有効な手段を与えると言える。これまで、**ROSAT** 衛星は高い空間分解能で **SXDB** のマップを作成したが、 $1/4 \text{ keV}$  バンド(約  $0.1\text{--}0.3 \text{ keV}$ ) と  $3/4 \text{ keV}$  バンドの二つを区別する程度のエネルギー分解能しかもっていなかった。また、**McCammon** らのロケット実験は、高いエネルギー分解能を実現したが、空間分解能が乏しく **SXDB** 以外の X 線を放射する天体も含まれてしまっている。これらに対して、「すざく」衛星に搭載されている X 線 CCD カメラは状況を一変させる。この X 線 CCD カメラは高い空間分解能と優れたエネルギー分解能を併せもつため、**SXDB** に含まれる **O VII**, **O VIII** 輝線を明確に分離し、強度を決定することができる。そこで本稿の研究では、銀河系内のローカルな放射構造とは離れており、明るい X 線源を含まない、さまざまな方向の **SXDB** をすざく衛星で観測し、**SXDB** に含まれる **O VII** と **O VIII** 輝線強度をかつてない高い精度で決定する。そして、酸素輝線強度の方向依存性を初めて明らかにすることで **SXDB** の放射起源に

迫った。

### 5. 酸素輝線強度の相関の発見

観測した多方向の SXDB のスペクトルには O VII 輝線と O VIII 輝線の構造が明確に検出された。観測の時間帯によっては、3 節で挙げた SXDB の放射源以外にも酸素輝線を出す放射源として、地球大気による太陽 X 線の散乱、X 線点源、地球磁気圏での太陽風電荷交換反応が存在するが、本解析ではこれらを含む時間帯を精度良く取り除いてある。得られた SXDB のスペクトルは、例として図 3 に示したように、近傍の放射 (H-SWCX の放射)、銀河遠方成分、系外からの宇宙 X 線背景放射の 3 成分のモデルで表現できた。ここで、近傍の放射と銀河遠方成分は高温ガス (プラズマ) のモデルを用いている。このモデルから、近傍の放射と銀河遠方成分から放射される酸素輝線の強度の和を決定した。

図 4 は横軸に O VII の輝線強度、縦軸に O VIII の輝線強度をプロットしたものある。筆者らは、

ここに大きな二つの特徴があることを発見した。一つは O VII 輝線強度に  $\sim 2$  LU の下限値 (Floor と呼ぶ) が存在することである。図 4 には解析した観測点に加え、銀河面の方向の観測<sup>7)</sup>と分子雲 MBM12 の方向の観測<sup>6),7)</sup>のデータもプロットしてある。これら 2 方向と銀緯  $10^\circ$  方向とラベルした方向は水素柱密度が大きく星間吸収が大きいいため、O VII は、数百 pc 以内の近傍の放射を見ている。ゆえに、Floor 付近にある方向の O VII の放射は近傍の放射 (H-SWCX) のみを表しているといえる。

二つ目の特徴は、高銀緯方向の観測点の O VII 輝線強度が Floor を差し引いた O VII 輝線強度に、 $(O VII \text{ 輝線強度}) \sim 0.5 \times ((O VII \text{ 輝線強度}) - 2 \text{ LU})$  のように、強く相関していることである。ここで、2 LU は Floor の強度である。また、図 4 に示した理論直線は、ある温度の高温ガスから放射される O VII と O VIII の強度比を表している。これより、Floor を超えた分の放射が高温ガスからの放射であるとすれば、その視線方向に平均し

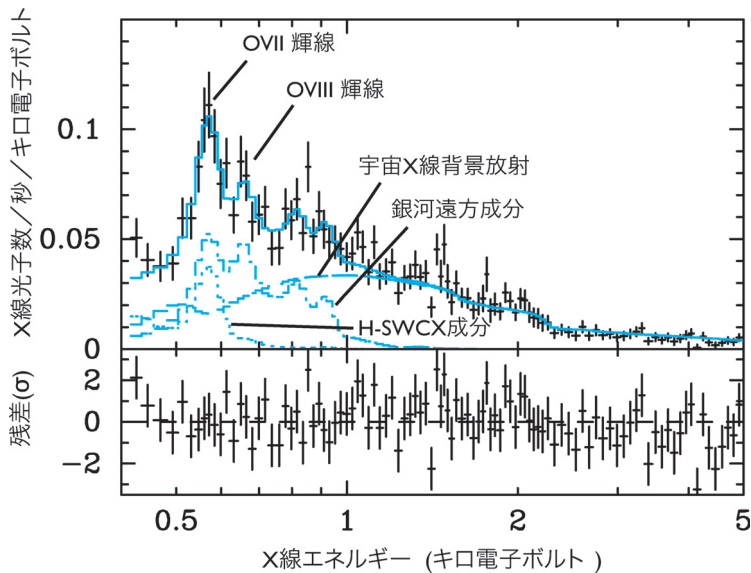


図 3 本研究で得られた「すざく」衛星搭載 X 線 CCD カメラによる典型的な軟 X 線背景放射のスペクトル ((銀経, 銀緯) = (86°, -21°) 方向)。O VII と O VIII 輝線が明確に分離されている。スペクトルは近傍の放射 (H-SWCX 成分)、銀河遠方成分の放射、宇宙 X 線背景放射の 3 成分のモデルで表される。



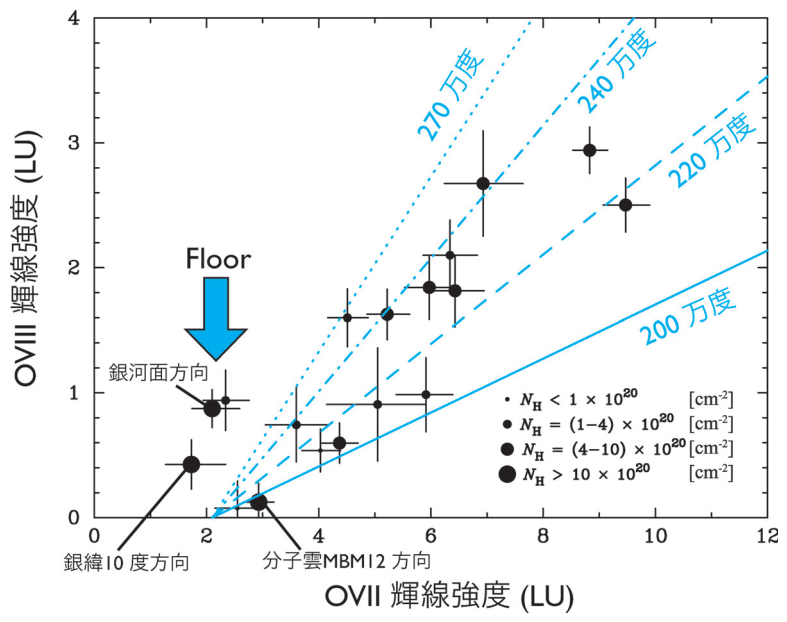


図4 本研究と銀河面方向，分子雲 MBM12 方向の観測で得られた O VII と O VIII 輝線強度の関係．両者の間には基本的に比例関係があるが，O VII 輝線強度は，～2 LU 付近で下げ止まり Floor が存在する．Floor 付近にある分子雲 MBM12 方向，銀緯 10° 方向，銀河面方向とラベルした観測方向は銀河系内の中性物質による吸収が大きく，O VII は，近傍の放射 (H-SWCX 成分) のみを見ていると考えられる．Floor から上の O VII 輝線は O VIII 輝線と強く相関し，両者の強度比から決まる温度は約 220–270 万度という狭い範囲に制限されていることがわかる．

た温度は 220 万度から 270 万度という非常に狭い範囲にあることがわかる．Floor を超えた分の放射は，100pc よりも遠方の放射であると考えられ，銀緯が 20° 以上の高銀緯方向については，銀河面にある中性ガスを超えてきたハローからの放射であると言ってよい．

以上から，近傍の放射の成分の O VII 輝線強度は，どの方向についても ～2 LU 程度で，そこからの増分は 0–7 LU の大きな強度の変化を示すにもかかわらず，O VII と O VIII の強度比で決まる温度は，250 万度付近の驚くほど狭い範囲に分布している，と結論することができる．

### 6. 銀河遠方成分の分布と起源

Yao らは，LMC 内の X 線源 LMC-X3 の X 線スペクトルに観測された吸収線と，LMC-X3 から 30' 離れた方向を観測したすぐくの輝線スペクトルは，1 温度のプラズマでは同時に説明できないことを示し，LMC-X3 方向の銀河遠方成分の温度と密度が，銀河面から減衰するような分布である可能性を示唆した<sup>8)</sup>．これに対し，本稿で得られた銀河遠方成分はどの方向を見ても同じ温度であった．これらの観測を同時に説明するには，プラズマの空間分布が大局的には平行平板的であれば良い．しかし，本稿で得られた銀河遠方成分に含まれる O VII 強度は，0–7 LU の範囲で大きく変動する．なかには互いに 0.42° しか離れていない (距離 1 kpc にあると仮定すると互いに約 10 pc の距離) にもかかわらず，O VII 強度に統計的に有意な 1.6 LU の違いがある方向もあった．これより，銀河遠方成分のプラズマは，より小さな構造ではまだらな分布をしている可能性を示唆している．

銀河遠方成分の高温ガスが，半径 10 kpc，銀河

面から 1 kpc 程度の高さの円柱状に分布していると仮定すると、その全光度は  $10^{39}$  erg s<sup>-1</sup> 程度と見積もられる。これは、高温のハローが観測されている銀河系外の普通の銀河の光度と同等である<sup>9)</sup>。温度が数百万度程度的高温ガスは主に輝線を放射することでエネルギーを失い冷却される。銀河遠方成分の高温ガスの冷却時間は 5 億年程度と計算され、この時間より速く高温ガスにエネルギーが供給されている必要がある。高温ガスの加熱源の候補として超新星爆発を考えると、加熱効率は説明できる。では、銀河遠方成分の高温ハローがなぜ 0.2 keV の温度を好むのであろうか？その理由として、これが銀河系のビリアル温度に近いことが注目される。例えば、超新星爆発で放出されたガスの中でビリアル温度を越えたガスは、銀河系の重力から銀河系の外へ逃げていくことができ、温度が 250 万度程度のガスが残るといふシナリオが考えられる。

謝 辞

本稿で紹介した筆者らの研究は、宇宙科学研究本部の満田和久先生、山崎典子先生、竹井 洋氏、萩原利士成氏、金沢大学の藤本龍一先生、Max Planck 研究所の Michael Bauer 氏、Wisconsin 大学の Dan McCammon 先生、Massachusetts 大学の Daniel Wang 先生、Colorado 大学の Yangsen Yao 氏との共同研究によるものです。本稿の内容は筆者の博士論文にまとめられておりますが、その執筆の際には、指導教官であった満田和久先生に本当にお世話になりました。この場を借りてお礼申し上げます。また、本稿の執筆を勧めてくださった竹井 洋氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Tanaka Y., Bleeker J. A. M., 1977, Space Sci. Rev. 20, 815
- 2) McCammon D., et al., 2002, ApJ 578, 188
- 3) Snowden S. L., et al., 1997, ApJ 485, 125
- 4) McCammon D., Sanders W., 1990, ARA & A 28, 657
- 5) Hurwitz M., et al., 2005, ApJ 623, 911
- 6) Smith R. K., et al., 2007, PASJ 59, S141
- 7) Masui K., et al., 2009, PASJ 61, S115
- 8) Yao Y., et al., 2009, ApJ 690, 143
- 9) Strickland D. K., et al., 2004, ApJS 151, 193

**A Study of Soft X-ray Diffuse Background with Suzaku**

**Tomotaka YOSHINO**

*NEC Corporation, Nisshincho 1-10, Fuchu, Tokyo 183-0036, Japan*

Abstract: The soft X-ray sky below 1 keV contains diffuse background emission (SXDB: Soft X-ray Diffuse Emission) which can not be resolved into individual objects. The origin of the SXDB were not fully understood for these 40 years. We investigated the oxygen emission line intensities in the SXDB in the several sky fields with Suzaku. A spatially uniform component which comes from the solar neighborhood is discovered. The remaining component whose intensities shows direction dependence can be considered to come from the galactic halo, which is filled with hot plasma with a narrow temperature range between 2.0 and 2.7 million degree.