

論文内容の要旨

論文題目

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

from the Geocorona to the Galactic Halo

(すざく衛星による軟 X 線背景放射の研究:

ジオコロナから銀河系ハローまで)

氏名 吉野友崇

1 研究の背景

宇宙はマイクロ波からガンマ線に至る様々な波長の電磁波でほぼ一様に輝いている。その中で、2keV から約 100keV までのエネルギー帯の放射は宇宙 X 線背景放射 (CXB) とよばれる。これは、最近のチャンドラ衛星等の観測により多数の活動銀河核からの X 線放射の重ね合わせであることが確実となっている。ところが、2keV 以下の軟 X 線背景放射 (SXDB) には、活動銀河核の重ね合わせでは説明できない放射成分が存在し、0.4 から 1keV の範囲では、高銀緯方向でも、それが全 X 線強度の 60%程度を占める。このような放射の存在は 1970 年代から知られていたが (e.g. Tanaka & Bleeker 1977)、その放射源は未だに理解されていない。1999 年のマイクロカロリメータ検出器を搭載したロケット実験により炭素から酸素の輝線が初めて明確に検出され (McCammon et al. 2002)、これが 100 万度から 200 万度の高温物質からの放射を示唆する輝線放射の集まりであることは揺るぎないものとなった。しかし、その X 線放射源は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等の理解は進んでいない。SXDB の様相は炭素の K エッジエネルギーの上側と下側で大きく異なる。炭素の K エッジの下側 (約 0.15 から約 0.4keV のエネルギー帯を 1/4keV バンド又は ROSAT のエネルギーバンド名を使って R12 バンドと呼ぶ) は、中性物質の柱密度の低い特定の方向を除いて、星間吸収により高々 100pc 程度の距離しか見通す事ができない。一方、炭素 K エッジの上側では、銀緯 (b) 10° 以上であれば銀河系外まで見通す事が可能である。図 1 は ROSAT の 3/4 keV バンド (ほぼ、0.4-1.2 keV、R45 バンドとも呼ばれる) の点源を取り除いた全天図である。主として銀経 ($|\ell| \leq 60^\circ$) に存在する銀河系内のローカルな構造を除くと、放射は一様に近い。このエネルギー帯には、酸素 (O VII, O VIII)、ネオン (Ne IX, Ne X) の K 輝線や、鉄 (Fe XVII など) の L 輝線など、重要な輝線放射が存在する。ROSAT は 12 分角の空間分布で全天マップを作ったが、R12 と R45 バンドを区別する程度のエネルギー分解能しか持たなかった。McCammon et al. 2002 のロケット実験は、10 eV の高いエネルギー分解能を実現したが、空間分解能はなく 1 str の広い視野からの X 線を分光した。これに対して、すざく衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ、その中でも背面照射型 CCD を用いた XIS1 は、18 分角の視野と 2 分角程度の空間分解能、3/4 keV band における高い感度と、優れたエネルギー分解能を持つ。これによって、OVII, OVIII, NeIX などの主要な輝線強度を、放射モデルの仮定にほとんど依存せず決定する事が初めて可能になった¹

2 本研究の目的

本研究では、銀河内の local な強い放射構造とは離れた方向で明るい X 線源を含まない様々な銀緯を含む 16 方向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と信頼性で

¹米国のチャンドラ衛星や欧州の XMM-Newton 衛星の CCD カメラは荷電粒子バックグラウンドが高い、エネルギー応答関数が低パルス高側に大きな裾を引いている、などの問題があり、輝線強度はモデル依存性が強い。

決定する。これらの観測によって輝線強度の方向依存性を初めて明らかにし、SXDB の放射起源に対して強い制限を得る。さらに、過去の特に ROSAT 全天マップと比較することによって、時間変動すると考えられる太陽圏からの太陽風電荷交換反応 (Heliospheric SWCX) による X 線放射に対する制限を得る。

観測データ中の 2 方向は論文申請者が Principal Investigator としてすざく衛星の国際公募観測による観測時間を得た観測である。他の 3 方向についても論文申請者は Co Investigator として観測提案に加わっている。残る観測は、サイエンスワーキンググループの観測、あるいは、公開された公募観測データでを用いた。

3 地球近傍の太陽風電荷交換反応による X 線放射の除去

太陽風の高電離イオンと中性物質との電荷交換反応による X 線放射 (SWCX) が SXDB に無視できない寄与を持つことが認識されたのは比較的最近である。SWCX は、地球磁気圏の水素原子を主とする中性物質からの放射 (Geocoronal SWCX) と惑星間空間の中性物質からの放射 (Heliospheric SWCX) の 2 成分からなると考えられている。Geocoronal SWCX 強度は地球周辺の太陽風強度と、観測方向と地球磁場の関係に強く依存する。そこで、本論文では、これらを利用する事で SXDB に比べて Geocoronal SWCX が無視できない強度となる時間帯を極力除去する工夫を行った。具体的には、(1) 地球近傍 (L1 点など) で太陽風をモニタしている ACE 衛星や WIND 衛星のデータを用いて、太陽風 flux によってデータをソートして、太陽風 flux に関連したスペクトルの変化が見られないかを調べる、(2) 惑星間空間磁場を考慮した地球磁場シミュレーションを行い、観測視線上で太陽風が入り込み得る高さが最も低い位置を計算し、その地球中心から距離を用いてデータをソートし、その距離に相関したスペクトルの変化がないかを調べる、(3) これらの結果、スペクトルに変化が見られた場合は、X 線強度の増加したデータを除去する、というデータ処理方法を確立した。この結果、全てのデータについて、本論文の SXDB の解析に影響を与えるような Geocoronal SWCX は取り除く事ができた。

一方、Heliospheric SWCX も数日 (太陽風の惑星間空間内の伝搬に起因) から数年 (太陽活動に依存) の時間変動を持つと考えられ、本論文の 1-2 日単位の観測で時間変動を検出する事は不可能である。したがって、Heliospheric SWCX は SXDB の主要な成分の一つと認識される。本論文の観測は太陽活動が極端に低い時期に行われている。これは本観測結果を解釈する上で重要である。

SXDB の研究では、SWCX に加えて太陽 X 線の地球大気による散乱と中性酸素による再放出も問題になる。本論文では、太陽活動による大気の膨張を考慮した大気モデルを用いて、太陽 X 線に照らされた視線方向の酸素柱密度を計算し、0.4-0.7 keV の count rate との相関を調べ、すざく衛星のデータ解析の標準的な基準で data screening を行ったデータで強度変動は無く散乱の影響は無いことを確認した。

4 酸素輝線強度

16 方向のスペクトルには O VII 輝線 (0.56 keV) や O VIII 輝線 (0.65 keV) の構造が明確に検出された (図 2)。これらの輝線強度を決定する事を目的として、系外からの cosmic X-ray background 放射 (CXB) と、異なる温度を持つ二つの熱的放射からなるモデルを仮定し X 線スペクトルのフィッティングを行った。これを model 1 と呼ぶ。model 1 の 2 つ熱的放射成分は、それぞれ 太陽系内と Local Hot Bubble と呼ばれる太陽系を取り囲む半径 100pc 程度の領域からの放射の和 (SWCX+LHB)、および、LHB よりも遠方に存在する高温星間物質からの放射である可能性を念頭においている。このため前者は星間吸収の影響は受けないのに対して、後者は 21cm 電波観測から決定されたその方向の全中性ガスの吸収の影響を受けると仮定した。後者は、Kuntz & Snowden 2000 が、TransAbsorption Emission (TAE) と呼んだ放射に相当する。model 1 は統計の範囲でよく観測スペクトルを再現することができ、SWCX+LHB の温度は 0.1-0.15 keV、TAE の温度は 0.2 - 0.5 keV の範囲であった。次に、SWCX+LHB と TAE の温度を best fit の値に固定して酸素のアバンドランスを 0 に設定し、そのかわりに O VII 輝線、O VIII 輝線に対応する輝線を Gaussian 関数で加えたモデルで fit し、best fit の Gaussian 関数の normalization から O VII、O VIII 輝線の強度を決定した。

O VII と O VIII 輝線強度決定に対するシステムティック誤差としては、XIS の CCD の上部にある optical blocking filter に付着した不純物の厚みと荷電粒子バックグラウンドの不確定性、2 keV 以下の CXB 放射の形の不確定性、検出器のエネルギー分解能の calibration の不定性が挙げられるが、これらすべてを考慮した結果、O VII、O VIII 輝線強度は全ての観測で統計誤差の範囲内にあることを確認した。

図 3 に示す O VII と O VIII 輝線強度の関係には大きな 2 つの特徴が見てとれる。1 つは O VII 輝線強度に ~ 2 LU の “floor” が存在することである。図には解析した観測点に加え、銀河面の観測である MP235 (Masui et. al. 2009) と分子雲 MBM12 (Smith et. al. 2007, Masui et. al. 2009) の方向の観測である M12on のデータも plot してある。これら 2 方向と LL10 とラベルした方向は水素柱密度が大きく、O VII は、数 100pc 以内からの放射である。ゆえに、これらの方向の O VII の放射は近傍の SWCX+LHB 成分のみを表しているといえる。

2 つ目の特徴は、高銀緯方向の観測点の O VIII 輝線強度が floor を差し引いた O VII 輝線強度に、(O VIII intensity) $\sim 0.5 \times$ (O VII intensity) - 2 LU) のように、強く相関していることである。ここで、2LU は “floor” の強度である。図 3 に書き加えたモデルの線から、“floor” を超えた分の放射の視線方向に平均した温度は $kT = 0.19$ から 0.23 keV の狭い範囲にあることを示している。

以上から、SWCX+LHB 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 (上記モデルでは TAE の放射に相当する) は 0-7 LU の大きな強度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、 0.2 keV 付近の狭い範囲に分布している、と結論することができる。

しかし、model 1 のフィット結果は、SWCX+LHB 成分の強度は一定でなく、TAE 成分の温度も大きくばらばらしている。これは Fe-L および Ne-K の放射影響であると考え、SWCX+LHB のパラメータを固定し、TAE の Fe, Ne 存在比を free parameter にする (model 2)、または TAE の重元素比は固定したまま、より高温の成分を加える (model 3) ことでフィットを行った。この結果、これらのモデルで観測スペクトルの形と酸素輝線の性質をよく再現できることがわかった。

図 3 において、NEP1、NEP2 とラベルした点は観測時期が異なる同じ North Ecliptic Pole 方向の観測であるが、その O VII 輝線強度は ~ 1 LU 異なっている。これは、Heliospheric SWCX による O VII 輝線強度には ~ 1 LU の時間変動があることを示唆する。また、floor の値は $\sim 2-3$ LU に分布しており、やはり 1LU 程度の方向依存性あるいは時間変動があることを示唆する。これを考慮すると、TAE の平均温度には ± 0.04 keV のシステムティック誤差が含まれることになる。

5 ROSAT 衛星との比較

各観測方向について、ROSAT all sky survey の R45 band の count rate と本観測ですごくで得られたモデルからの予想カウントを比較した。その結果、点源の除去感度の違いを考慮すると両者は統計誤差の範囲で一致した。ROSAT の観測は、solar maximum で行われたことを考えると、太陽活動によって、Heliospheric SWCX の O VII 強度は高々 2LU 程度しかかわらないことが示唆される。

6 遠方成分 (TAE)

遠方の放射成分に含まれる O VII 強度は、0-7LU の範囲で大きく変動する。特に二つの Lockman hole 方向の観測は 0.42° しか離れていないにもかかわらず、統計的に有意な 1.6 LU の違いがあった。これに対して、O VII と O VIII 比で決まる温度は、1 観測方向を除いて、 0.19 から 0.23 keV の狭い範囲に分布していた。Yao et al. (2009) は、Chandra 衛星により LMC の連星 X 線源、LMC X-3、の X 線スペクトル中に観測された O VII と O VIII の吸収線と、すざく衛星が観測した LMC X-3 から $30'$ 離れた方向からの O VII、O VIII 輝線放射は、等温の高温ガスでは同時に説明できないことを示した。O VII 強度の強い方向依存性が示唆する patchy な空間分布、少なくとも見かけ上方向依存性の小さな温度、さらに視線に沿っては温度は一定ではありえない、

という観測結果はどのようにすれば両立するのであろうか？ Yao et al. (2009) は 1.4ξ kpc および 2.8ξ kpc のスケール高で密度と温度が exponential に減少する thick disk model を提案した (ξ は体積 filling factor)。このような plane parallel な configuration であれば、視線方向に温度勾配があっても、方向依存性の小さな状況を再現できる。TAE 成分の emission measure は、明確な $1/\sin b$ 依存性を示さないが、これは patchy な分布によるばらつきの可能性もあるであろう。これを検証するには、さらにデータ点を増やす必要がある。

Patchy thick hot disk model を簡略化して、TAE の全光度を見積もると 1×10^{39} ergs $^{-1}$ と見積もられ、hot halo が観測されている系外銀河の通常銀河の luminosity と consistent である。この高温ガスの放射冷却時間は 0.5G 年程度と見積もられ、高温プラズマにエネルギーがこの時間尺度で供給されている必要がある。このプラズマ加熱源の候補として Supernovae が考えられる。TAE 放射の平均温度は、我々の銀河系のビリアル温度に近いことから、Supernovae で加熱されたビリアル温度以上のプラズマは銀河の重力ポテンシャルから銀河間空間へ逃げてゆくことで、温度が $kT = 0.2$ keV 程度に制御されているというシナリオが考えられる。

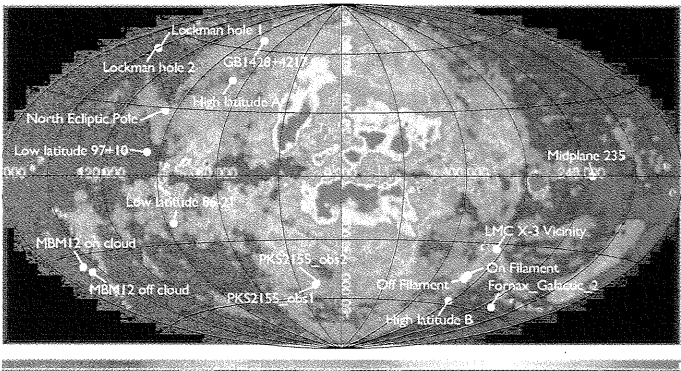


図 1: ROSAT All Sky Survey の全天マップ。点源は取り除いてあり ~ 0.4 - 1.2 keV の軟 X 線背景放射を表している。白丸は本論文で解析したすざくの観測方向。

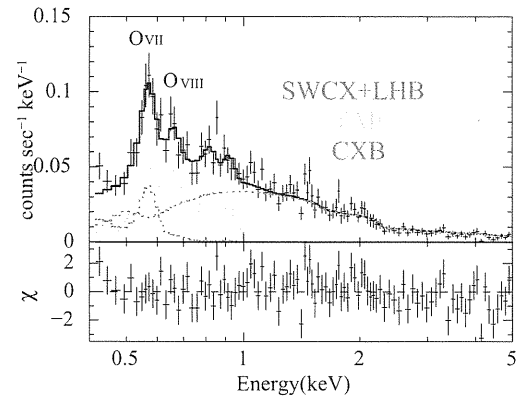


図 2: 本研究で得られたすざく XIS1 による典型的な軟 X 線背景放射のスペクトル ($(l, b) = (86^\circ, -21^\circ)$ 方向)。O VII と O VIII 輝線が明確に分離されている。

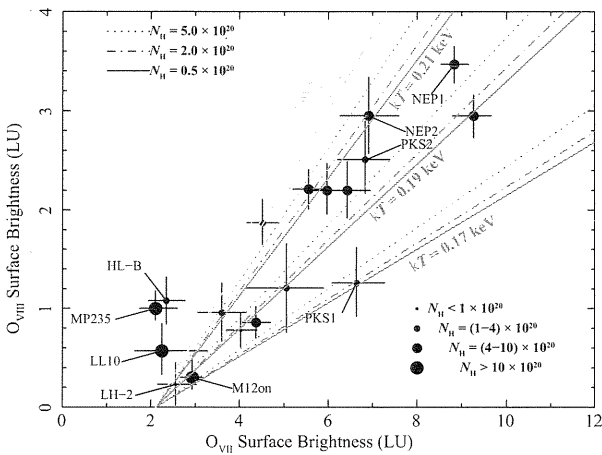


図 3: 本研究の 16 方向+銀河面方向と分子雲 MBM12 方向の観測で得られた O VII と O VIII 輝線強度の関係。両者の間には基本的に比例関係があるが、O VII 輝線強度は、 ~ 2 LU 付近で下げ止まり “floor” が存在する。

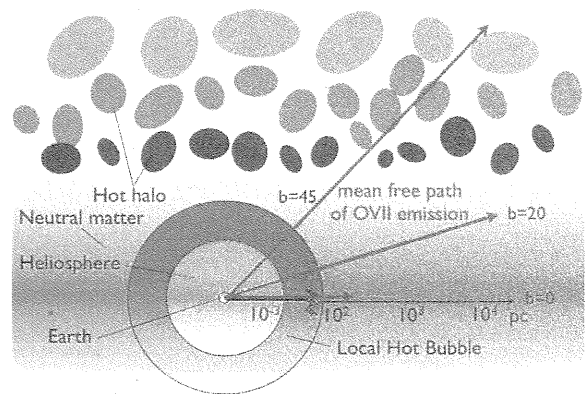


図 4: 3/4 keV バンドの SXDB の放射起源の位置関係。