

論文の内容の要旨

論文題目 : Study of the time and spatial variabilities of the
soft X-ray diffuse background

(軟 X 線背景放射の時間及び空間変動に関する研究)

Hiroshi Yoshitake 吉武 宏

1 研究の背景

ROSAT 衛星が観測した R45 帯 (0.4–1.2 keV) における全天図には、銀河中心や近傍の super bubble などのローカルな構造の他に、高銀緯や反銀河中心方向を網羅する広がった放射が存在している。我々から見て天空上に広がったこの放射は、軟 X 線背景放射 (Soft X-ray Diffuse Background : SXDB) と言われ、現在では以下の 4 成分が遠方から順に起源として考えられている。

1. 個々の天体には分解されない銀河系外の暗い天体 (主に活動銀河核) の放射の重ね合わせ (Cosmic X-ray Background : CXB)。比較的近傍の活動銀河核の放射は、冪型のスペクトルで近似でき、その冪の平均値は 1.9 である。遠方の活動銀河核では、スペクトルはよりフラットになると考えられている。
2. 銀河面内に広がる中性物質の向こう側からの放射。すなわち銀河系ハローあるいは幾何学的に厚い円盤状に分布する高温ガスからのプラズマ放射。高温ガスは銀河面から数 kpc のスケールハイトで広がり (e.g. Hagihara *et al.*, 2010)、平均的な温度は 0.2 keV 程度 (Yoshino *et al.*, 2009) と考えられている。
3. 太陽風プラズマ中の重イオンと惑星間空間物質に含まれる中性原子との電荷交換反応 (solar-wind charge exchange : SWCX) に伴う放射輝線群。
4. 太陽系を 100pc スケールで取り囲む高温ガスからのプラズマ放射。高温ガスの起源は単独あるいは複数の超新星爆発によると考えられる。3. と観測的に切り分けることが困難であるため、この放射の R45 帯への寄与についてはまだ論争が続いており、高温ガスの温度と密度も不確定性が大きい。

SXDB の放射源を研究する上で重要な結果が、Wisconsin Rocket に搭載された X 線マイクロカロリメータによる高銀緯方向 ($l, b \sim (90^\circ, 60^\circ)$) の観測である。エネルギー分解能 ~ 10 eV の精密分光により、 ~ 0.82 sr の広視野領域から高電離イオンの輝線放射を明確に検出した。OvII 輝線帯 (0.57 keV) に高エネルギー側から外挿した CXB の寄与は、銀河系内の星間物質による光電吸収が浅い高銀緯の方向ですら 40 % 程度しかない。SXDB に対する輝線放射の寄与が最も大きいことが明らかになった (McCammon *et al.*, 2002)。

輝線放射の起源には未だ謎が多い。そもそも我々は、SWCX から銀河系ハローに至る包含関係の中で最も内側に位置しており、どこを見てもこれらの成分が常に存在している点に切り分けの難しさがある。遠方と近傍の放射源の切り分けとして、軟 X 線の吸収が深い銀河系内の分子雲を利用して遠方成分を遮る shadowing 観測が有効である。太陽系から 100 pc 程度に位置する分子雲 MBM 12 と近傍 5° 方向の *Suzaku* 衛星による shadowing 観測によって、銀河系ハローに由来する OvII, OvIII 輝線の強度がそれぞれ 2.34 ± 0.33 LU, 0.77 ± 0.16 LU (Line Unit = photons $s^{-1} cm^{-2} sr^{-1}$, 90 % 統計誤差) と求められている (Smith *et al.* 2007)。だが SWCX による時間的、空間的な変動の寄与は shadowing 観測でも同定することが困難である。

SWCX はイオンの衝突相手となる中性物質の存在場所から、高層地球大気との反応：Geocoronal SWCX (G-SWCX) と太陽圏内 ~ 100 AU の惑星間空間に分布する中性物質との反応：Heliospheric SWCX (H-SWCX) の二者に分けて考えることができる。G-SWCX は寄与する視線距離が地球大気の広がり程度と短いため、突発的なフレア活動や太陽自転に強く依存して、数時間から 1 日程度の短い時間変動を生む。変動は太陽風観測衛星によるモニタ結果から予測できるため、SXDB に対してある程度切り分けが可能である。だが H-SWCX による輝線放射は 12 年周期の太陽活動に依存する緩やかな時間変動のみが示唆されており、数日程度の観測期間では同定が困難である。従って変動性はおろか、H-SWCX は未だその確たる観測的証拠が掴めずにいる。これに伴い、より遠方のプラズマ成分も SXDB への寄与が不透明な状態にある。

2 本研究の目的と手法

本研究では SXDB に含まれる OvII 輝線に着目し、H-SWCX による X 線放射の観測的な同定と OvII 輝線の大局的な空間変動を明らかにすることにある。H-SWCX は天空のどこを見ても存在すると考えられているため、同定する上で次の変動を捉えることが重要である。

1. H-SWCX には 11 年周期の太陽活動に依存した時間変動性が示唆されている。惑星間空間において、太陽風に含まれる荷電粒子の分布は長期の太陽活動と密接している。これは太陽活動に伴い、イオン組成が異なる高速太陽風と低速太陽風の分布が変化することに起因する。高黄緯の方向では、太陽活動の極大期において H-SWCX による輝線放射の増光が期待される。
2. 太陽圏内の不均一な星間物質の分布によって、H-SWCX の定常的な異方性が考えられている。太陽系は近傍の星間物質と $\sim 20 \text{ km s}^{-1}$ の相対運動をしており、我々は星間物質を一定方向からの「流れ」として感じる。太陽圏に飛来する星間物質 (主に H 原子と He 原子) は太陽の重力場と輻射圧を受けて、非一様な分布を形成する。水素原子は輻射圧とイオン化の効果が大きく、太陽近傍 5 AU では 0.02 cm^{-3} 以下に減少するが、He 原子は重力が優勢に働き、太陽から見た「流れ」の下流で $\sim 0.1 \text{ cm}^{-3}$ の高密度領域を形成する。この Helium Focusing Cone (HeFC) と呼ばれる領域は、中性物質が増量することで H-SWCX による X 線放射も増加すると予想される。

H-SWCX による強度の時間・空間変動を観測的に同定した後、反銀河方向を中心に OvII 輝線強度を 52 領域について系統的に解析し、大局的な OvII 輝線の空間変動とその起源について考察を行う。本研究では一貫して 1 keV 以下のエネルギー帯で S/N 比の高い CCD カメラ XIS1 を搭載した日本の X 線天文衛星 *Suzaku* の観測データを利用し、スペクトル解析から酸素輝線 OvII の強度を評価した。

3 11 年周期の太陽活動に伴う OvII 輝線強度の時間変動 (5 章)

Suzaku 衛星による黄緯が比較的高い Lockman Hole 方向 $(\lambda, \beta) = (137^\circ.13, 45^\circ.11)$ の毎年同時期に行われる観測を利用し、2006 年から 2011 年における OvII 輝線の長期変動性を調査した。スペクトル解析から得られた OvII 輝線は、2006 年から 2009 年にかけてそれぞれ 2.55 ± 0.74 、 3.68 ± 0.72 、 3.03 ± 0.77 、 2.69 ± 0.80 LU となり、統計エラーの範囲に収まる強度変動となった。一方、2010 年、2011 年の観測では 6.06 ± 1.07 、 5.28 ± 1.60 LU となり、前 4 年に比べて 2–3 LU の増光を検出した。これは前 4 年の平均 OvII 輝線強度 2.99 ± 0.38 LU に対して 4.5σ (2010)、 2.3σ (2011) の有意性である。同一方向の観測で年単位の変動を与えるのは H-SWCX の存在を示唆する重要な結果である。黒点数の変化から見積もられる 11 年周期の太陽活動は 2009 年初頭に極小期を迎え、これ以降は極大へと向かう過渡期にある。OvII 輝線の増光が 2010 年の観測から顕著である結果を踏まえると、この強度変動は 12 年周期の太陽活動に依存した H-SWCX 起源の現象であることを支持する (図 1)。

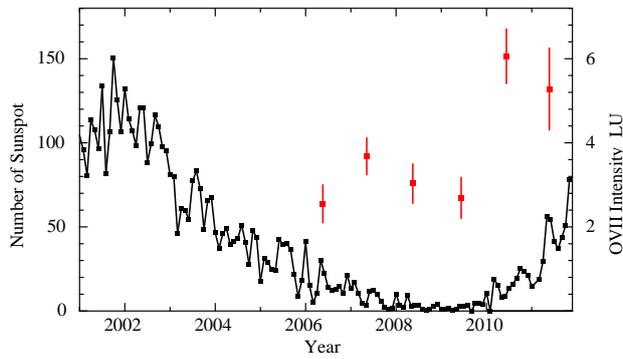


図 1: 太陽黒点数 (黒) と *Suzaku* 衛星により観測された OVII 輝線強度 (赤) の時間変動。

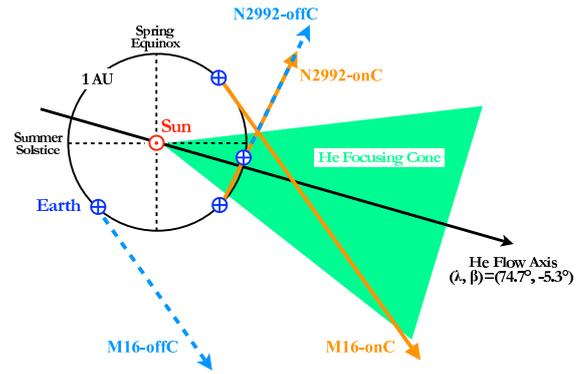


図 2: 公転面における観測方向と HeFC の位置関係。

4 He Focusing Cone おける OVII 輝線の増光 (6 章)

地球の公転で生じる同一方向の視差から、*Suzaku* 衛星の視線が HeFC を含む場合と外れる場合の OVII 輝線強度を比較した (図 2)。遠方成分の寄与をなるべく小さくするため、私は太陽系から ~ 100 pc に位置する分子雲 MBM 16 を用いた shadowing 観測を提案した。更に *Suzaku* のアーカイブデータで、HeFC と衛星の視差が上記の位置関係を満足する NGC 2992 周辺の星間空間を利用した。スペクトル解析から得られた OVII 輝線強度は、HeFC を視線に含む場合に MBM 16 で 3.9 ± 1.3 LU、NGC 2992 で 4.6 ± 0.7 LU となった。一方、HeFC を視線に含まない場合には MBM 16 で < 1.9 LU (upper limit)、NGC 2992 で 3.2 ± 0.6 LU となり、共に HeFC を含む観測に対して減光する結果を示した。Poisson 統計によりこの強度差が生じる偶然確率は 0.3 % 程度と計算され、同一方向の観測で生じた OVII 輝線の変動は、HeFC による H-SWCX の増加を捉えたものだと考えられる。

H-SWCX による OVII 輝線を定量的に扱うため、観測から得られた強度と Koutroumpa *et al.* (2006) で考案された H-SWCX の放射モデルから予測される強度を比較した (図 3)。観測期間で太陽活動は極小期から極大期に至る過渡的な状態であったため、モデルは太陽極小期、極大期をそれぞれ仮定して計算した。MBM 16 方向の場合、極小期の H-SWCX モデルは観測値の絶対量にほぼ相当し、観測値を補う為にモデルに必要なオフセット成分の OVII 強度の上限値は ~ 0.1 LU、また極大期のモデルでも上限値として ~ 1.3 LU となった。MBM 16 は分子雲での X 線吸収により LB より遠方からの OVII 輝線が遮られるため、オフセット強度は LB の寄与を表している。一方、NGC 2992 方向は仮定する太陽活動期によらず、観測された OVII 強度がモデルに対して ~ 2 LU 高かった。比較的吸収の浅い NGC 2992 方向では、LB に加えて Galactic halo に由来する OVII 放射が存在していることを示唆している。

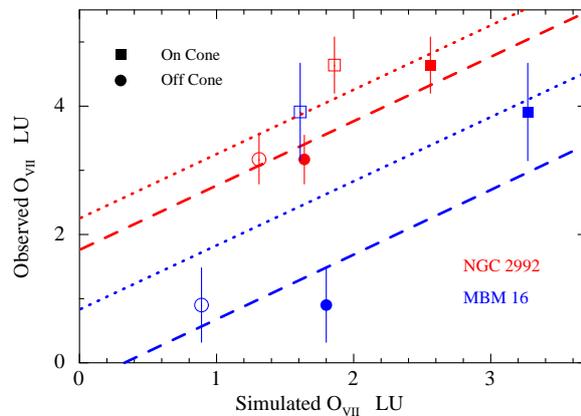


図 3: 観測された輝線強度とモデル計算による H-SWCX の比較。太陽極小期 (塗りつぶし点&破線)、太陽極大期 (中抜き点&点線) のモデルを仮定してそれぞれ計算。直線はそれぞれの観測点を (Observed OVII) = (Simulated OVII) + (Offset) として fit した時の offset の best fit で表した直線。

5 反銀河方向を対象にした OVII 輝線強度の全天空間変動 (7 章)

本章ではこれまで他の論文で報告されている 18 領域の OVII 強度と、新たに $120^\circ \lesssim \ell \lesssim 240^\circ$ に位置する 33 方向の *Suzaku* 衛星のアーカイブデータの解析結果を合わせ、その空間変動を系統的に調査した。ただし太陽活動がある程度一様と見なせる状態で比較を行うため、使用するデータは Lockman Hole 方向で優位な OVII 強度が確認された 2010 年中期以前に観測期間を制限している。

OVII 輝線の強度分布に対して H-SWCX の寄与が大きければ、太陽極小期に低黄緯の方向で X 線放射の増加が期待できるが、OVII 強度の黄緯依存性は存在しなかった。一方、銀河北半球では OVII 輝線強度は銀緯に対して反相関を示す結果を得た。銀河面上では星間物質の柱密度が大きく、X 線の光電吸収も大きくなる。これらの結果は、大局的な OVII 輝線の強度分布には銀河面の星間吸収を受ける放射成分が寄与することを示唆している。

前章で用いた太陽極小期を仮定した H-SWCX モデルとの強度比較では、観測から得られた OVII 輝線が多くの領域でモデルよりも強く出ている (図 4)。更にこのモデル計算が観測結果に含まれる H-SWCX を再現していると仮定して、観測結果からモデルを引いた強度は、図 5 の様な中性水素柱密度に対する依存性を示す。最も単純な場合として、星間吸収を受ける一定強度の放射モデルでプロットを fit する。また同一方向の観測から見積もられた H-SWCX のモデルと実観測の不定性 (± 1.5 LU) も考慮する。反銀河方向 $120^\circ \lesssim \ell \lesssim 240^\circ$ で観測された多くの OVII 強度は、この放射成分とその不定性に含まれる結果が得られた。だが一方で、このモデルに対して有意に暗い方向と明るい方向が存在する。明るい方向 (赤、ピンク) は、反銀河中心に対して 90° の大円に沿って分布しているのに対し、暗い方向 (水色) は、 $(\ell, b) \simeq (180^\circ, -60^\circ)$ の方向へ局在する傾向を得た。

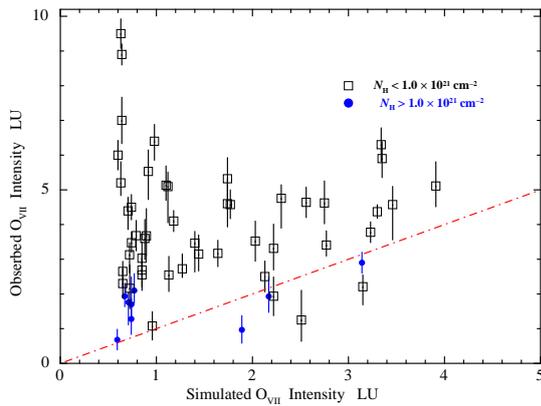


図 4: 57 領域における観測された OVII 輝線強度と H-SWCX モデル強度の比較。赤破線は両者の 1:1 関係を示す。

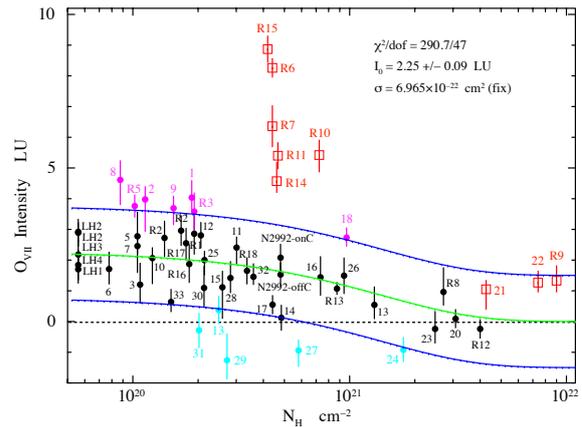


図 5: H-SWCX モデルを引いた OVII 輝線強度と、中性水素柱密度の関係。赤は他の放射成分が示唆される観測点。緑の曲線は赤を除いた場合の観測点に対する星間吸収を受ける一定放射モデルの best fit を表す。緑の曲線は同一方向の観測で生じる強度差から見積もった H-SWCX モデルと実観測の不定性を表す。ピンク (水色) は nominal の強度が不定性より高い (低い) 観測点を示す。