

論文の内容の要旨

論文題目: A Study of the Soft X-ray Diffuse Background in 0.2-2 keV
with the Suzaku Observatory

(すざく衛星を用いた0.2-2 keVにおける軟X線背景放射の研究)

Kenichiro Nagayoshi 永吉 賢一郎

1. 研究の背景

天空上のすべての方向から、個々のX線源には分離できないX線放射が観測されており、X線背景放射と呼ばれる。それは、太陽系外のX線放射天体を発見した1962年のロケット実験においても認識された。その後、現在までの観測で、2-8 keVのエネルギー範囲のX線背景放射についてはその約90 %が微弱な個々の天体に分解されている。これらの微弱な点源の多くは銀河系外の活動銀河核であり、今後より感度の高い観測装置が実現すれば、このエネルギーバンドのX線背景放射はすべて点源に分解されると予想されている。一方、2 keV以下のX線背景放射は、2 keV以上のスペクトルを外挿しただけでは説明できないことがすでに1970年代の薄膜X線窓を用いた比例計数管を搭載したロケット実験により指摘されていた。現在では、0.2から2 keVのX線背景放射には少なくとも以下の4つの放射成分が含まれていると考えられている：(1) 太陽風と惑星間空間中性物質との電荷効果反応による太陽圏からの放射(H-SWCX)、(2) Local bubble (LB)と呼ばれる太陽系を囲むcavityを満たす温度約100万度の高温プラズマからの放射(LB)、(3) 銀河ハローに存在する温度約200万度の高温プラズマからの放射、(4) 2-8keVで観測されている微弱な点源からの0.2-2keVバンドの放射の重ね合わせ (CXB)。これらの中で(1)-(3)は一樣ではないが、真に空間的に広がった放射であると考えられる。このため、0.2-2 keVバンドの(4)以外の放射を、Soft X-ray Diffuse Background (SXDB)と呼ぶことがある。SXDBの観測は、X線入射窓の透過特性と $E/\Delta E \sim 1$ 程度の比例計数管の分解能によるband spectrometryの観測により始まったが、2000年代になるとすざく衛星、XMM-Newton衛星によるX線CCDカメラによって $E/\Delta E \sim 10$ 程度の分光が可能になった。これによって、高電離酸素輝線(O_{VII} 0.57 keV, O_{VIII} 0.64 keV)を中心とする線スペクトルの観測が可能になり、(3)の理解が進んだ。

1970年にはすでに指摘されていたが、現在においてもSXDB研究における重要なテーマの一つとして、X線強度から推定されるLBの高温ガスは他の星間物質の圧力に比べるとfactor 8程度大きく、圧力平衡が成立しないという問題がある。一方で、1970年代のロケット実験や1990年代のROSAT衛星による0.2-0.3 keV(1/4keV bandと呼ぶ)の観測は、このバンドの放射強度が視線方向の中性水素柱密度と逆相関を示し、かつ、この逆相関は吸収ではないことから、(2) の存在は確実視されている。また、太陽系が中性星間物質の少ないcavity内に存在することは星のNaI吸収線からも示されている。この問題に対して、LBの圧力推定における(1)の寄与が十分に明らかではないことが原因の一つであると指摘されている。

2. 本研究の目的と手法

LBやSWCX放射の寄与やその性質を研究しSXDBの理解を深めるためには、これまで解析されてきた O_{VII} や O_{VIII} 輝線に加えて、それらの放射が卓越する1/4 keVバンドまでを含めたスペクトロスコピーを実現することが重要である。XMM-Newton衛星に搭載されているX線CCDカメラは、低エネルギー帯で大きなlow pulse-height tailを持つスペクトルレスポンスをもち、1/4 keV bandからの放射を扱うには原理的な困難があることから解決は難しい。一方すざくの場合は、CCDの

遮光フィルターについての衛星内のアウトガスによる汚染物質によるX線吸収の影響を定量化できないことが理由であり、この場合は、汚染物質の材質と厚み、その時間変化を正しく較正することができれば1/4 keV bandまでスペクトル解析の範囲を広げることができる可能性がある。すざく衛星は、このエネルギー範囲まで較正可能な天体を定期的に観測してきたが、これまでは1/4 keV bandを較正範囲とはしてこなかった。したがって、本研究ではまず、すざくCCDカメラの1/4 keV bandにおいて定量的な解析ができるように、検出器の較正を行う。

太陽系近傍を起源とするH-SWCX放射は、太陽の11年周期活動の影響により、年単位で時間変動することが知られている。明るい点源がなく、SXDB観測に適したLockman Hole領域をすざくは定期的に観測しており、太陽活動極大期(2010, 2011年)には、極小期(2006-2009年)に比べてOVII輝線が増光していることが確認されている(Yoshitake et al. 2013)。本研究では、この領域に対して1/4 keVバンドを含む、0.2-2 keVの広帯域スペクトロスコピーを初めて行う。SWCXの時間変動性を利用してSXDB放射の起源を調べ、LBの圧力問題に対して制限を行う。

3. すざくXIS1カメラのコンタミネーション時間変動モデルの再構築 (4章)

コンタミネーションの時間変動モデル(以下コンタミ変動モデルとする)は、ある時点における検出器の有効面積を正しく計算するためには欠かせない。すざくでは、コンタミネーション物質を構成する元素として典型的なH, C, N, Oを仮定し、X線放射モデルが既知の天体を定期的に観測することによってそれらの変動量を追跡している。RXJ1856.5-3745という中性子星は、2温度の黒体放射で0.17-0.8 keVにおいてよく説明されることがわかっている。X線検出機器の低エネルギー側の校正用として代表的な天体であり、すざくにおいても2005年から2014年にかけて15回観測されている。本章ではこれらの観測データを0.17-0.8 keVまでを用いて再解析した。図1に解析結果の一例として、2009年10月に観測されたスペクトルを示す。データ点(黒点)に対し、従来のコンタミ変動モデルを用いた場合に予測される放射スペクトル(黒線)は、0.3 keV以下では明らかにデータと乖離している。この傾向は他の全ての観測で同じであった。本研究では、この乖離が硫黄(S)のL吸収端でよく説明できることを発見し、これまで考えられていなかった硫黄を新たな汚染物質として取り入れた、C, N, O, Sコンタミ変動モデルを構築した。図1の赤線が新たなコンタミモデルを適用した放射スペクトルである。0.17-0.8 keVにおいて観測データと放射スペクトルに矛盾はなく、放射モデルと観測データの差異は、2005年から2014年を通して1/4 keVバンドで10 %程度、他のエネルギー帯域でも同程度の精度を達成し、1/4 keVバンドまでを含めたスペクトル解析を可能にした。

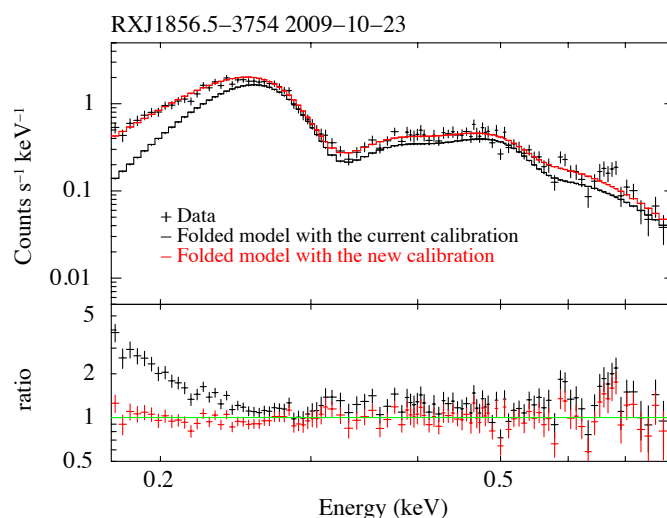


図1. RXJ1856-3745の観測データ(黒点)と、従来のコンタミモデルを用いた放射スペクトル(黒実線)、本論文のコンタミモデルを適用した放射モデル(赤線)の比較。

4. Lockman hole方向の0.2-2 keVにおけるSXDBのスペクトル解析 (5章)

図2上段に、Lockman hole方向の、太陽活動極小期（2006-2009年、黒点）、極大期（赤点）に対応する生の観測データ（0.17-2 keV）を示す。極大期と極小期のデータの単純比（図中段）は、極大期において0.57 keVのO_{VII}輝線だけでなく、1/4 keVバンドを含む1 keV以下で系統的に20-60 %の増光を示していることがわかった（黒点）。コンタミ変動による、CCDカメラの有効面積の経年変化は、極大期における減光として観測データに現れるはずであり（青線）、増光成分は検出器由来としては説明できない。図2下段の青線は、あるH-SWCXモデルが予想する輝線放射群（黒線）を、すざくCCDカメラのエネルギー分解能でなましたスペクトルを示している。特徴的なピークが増光成分と一致していることは、H-SWCX由来であることを強く示唆しており、特に0.5 keV以下においては時間変動成分として初めて、SXDBスペクトルへのH-SWCXの寄与を明らかにした。

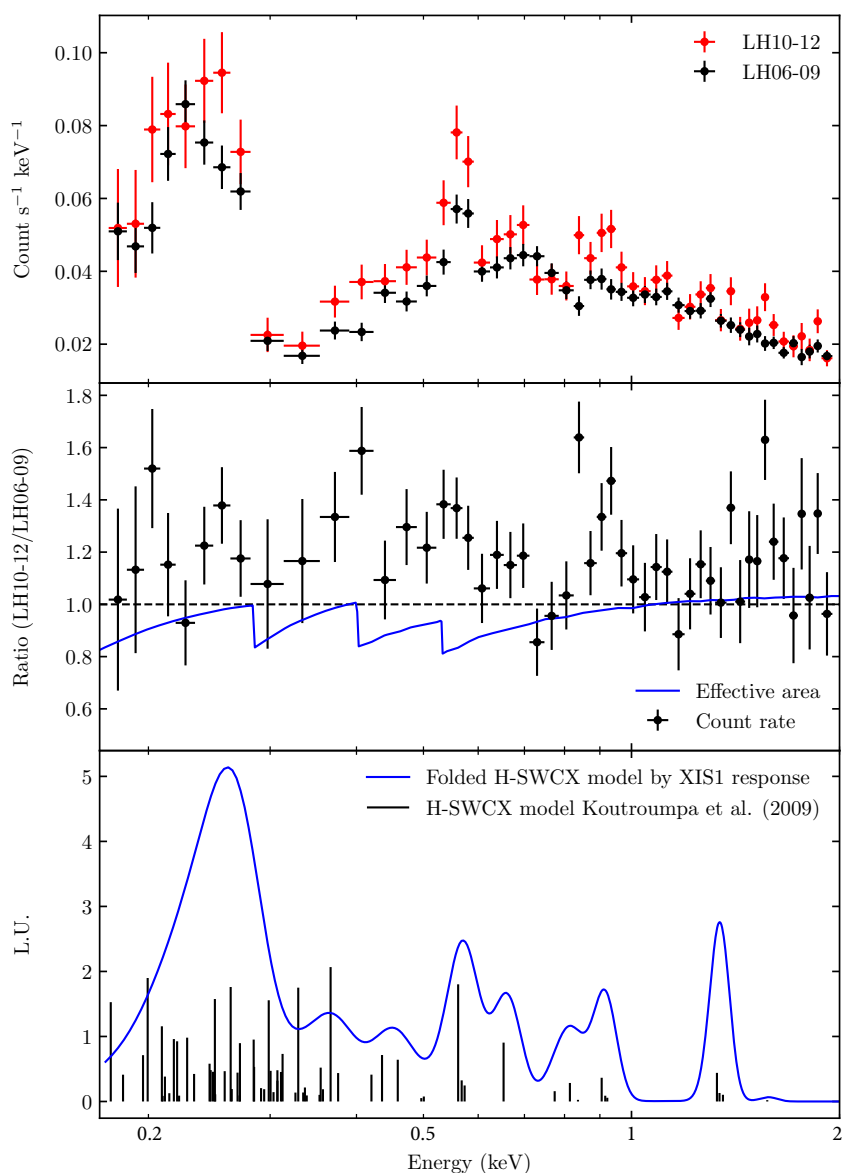


図2. Lockman hole方向の、太陽活動極小期（黒点）と極大期（赤点）に対応する生観測データ（上段）とその比（中段）。下段のプロットの青線は、あるH-SWCX輝線放射モデル（黒線）を、すざくCCDカメラの応答関数でなましたスペクトルを示している。

次に、SXDBの放射起源をさらに調べるため、H-SWCXによる汚染が少ない、太陽活動極小期の観測データに対して、LB、銀河ハロー、CXBからなる放射モデルを仮定し、スペクトルフィットを行った。図3にベストフィットの結果を示す。1/4 keVバンドで卓越する青線がLB、O_{VII}輝線の一部とO_{VIII}輝線を担う緑線が銀河ハロー、1 keV以上で卓越する赤線がCXBの放射を示しており、LB、銀河ハローの温度と放射強度、CXBの放射強度がフリーパラメータである。スペクトルフィット結果は観測データを十分に説明し、LBと銀河ハローの温度はそれぞれ90 %エラー範囲で0.09 (0.06-0.11) keV、0.18 (0.15-0.21) keVであった。これらの値は先行研究とコンシステントであり、SXDBの歴史的描像と矛盾しない。LBの圧力は、高温ガスの密度が一定であるとすれば、Lockman hole方向のLBのサイズが約230 pcであること（星のNa吸収線の観測より）、LBの温度と放射強度から推定可能である。本研究では、LBの圧力として $p/k = 8.1 (5.9 - 9.1) \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ を得た。これはTanaka & Bleeker (1977)で指摘された圧力 $p/k = 1.7 \times 10^4 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ の約半分であり、より厳しい制限を得ることができた。

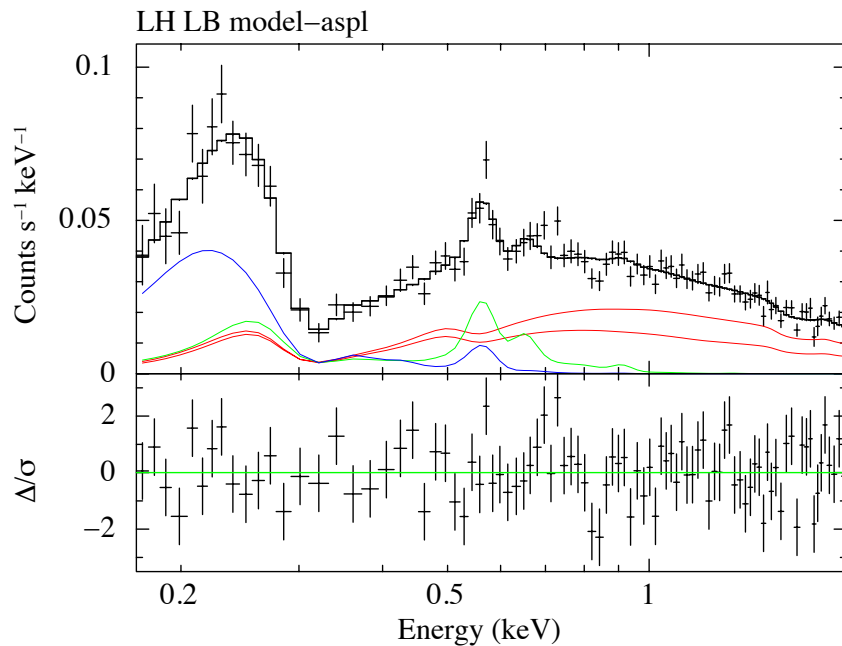


図3. Lockman hole方向の、太陽活動極小期に対応するSXDB放射のスペクトルフィット結果。青線がLB、緑線が銀河ハロー、赤線がCXBからの放射を表す。

本研究結果のLB圧力は、星間物質の圧力推定値 $p/k = 2 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ よりは大きい。しかし、星間磁場の圧力推定値 $p/k = 8 \times 10^3 \text{ cm}^{-3} \text{ K}$ も足し合わせた圧力とはコンシステントである。すなわち、LBが比較的磁場フリーな状態にあるとするならば、LBは周囲の圧力環境と平衡に達することができるであろうことを示している。LBは複数の超新星爆発の結果としてできたと考えられているが、この爆発により、磁場が吹き飛ばされたのかもしれない。一方で、太陽活動極小期においてもH-SWCXがSXDBスペクトルをかなり汚染している、という可能性も否定はできない。

H-SWCXの輝線スペクトルモデリングは、漸進的な進歩はしているものの、太陽風自体の観測データ不足が決定的なボトルネックとなっており、スペクトル解析に耐えうるモデルを構築するまで至っていないのが現状である。現存するモデルでは、図2に示した太陽極大期の増光分のスペクトルを満足に説明することはできなかった。特にO_{VII}輝線に対して、シリコンや硫黄、マグネシウムや鉄などの高階電離イオンから予想される、1/4 keVバンドの多数の輝線の強度が、1.5-2倍ほど過大評価されているようである。逆にいえば、本研究で得られた増光分のスペクトルは、これから提唱されるであろうH-SWCXモデルを評価するためのリファレンスとして使用することもできるであろう。