

論文の内容の要旨

論文題目：A Search for a keV Signature of Dark Matter with Suzaku Observations of the X-ray Diffuse Background

(「すざく」衛星による X 線背景放射の観測を用いた keV 領域における暗黒物質からの信号の探索)

Norio Sekiya 関谷 典央

1 本研究の背景と目的

宇宙の観測からは暗黒物質の存在が要求され、その量や分布については明確な制限が得られている。一方で、その候補となる物質としては素粒子標準模型を超えた WIMP や Sterile neutrino 等が挙げられているが、決定的なものは未だない。そのため、暗黒物質の検出は宇宙物理、素粒子物理にまたがる重要な課題である。暗黒物質候補は様々に提案されているが、それらの中には崩壊等により X 線領域で輝線放射をするものもありうる。これを探索すべく、これまで銀河団等の重力源をターゲットにして X 線天文衛星による観測・解析が行われてきた。2014 年、銀河団や近傍銀河方向の探索によって 3.5 keV の輝線を検出したとの報告があったが (Bulbul et al. 2014、Boyarsky et al. 2014 など)、それを否定する論文も出ており (Tamura et al. 2014 など)、状況は混沌としている。このような探索の確度と精度を上げるためには、

- ① 暗黒物質起源の輝線放射の計数 (輝線強度 \times 観測時間) が大きくなるようにすること
- ② 輝線放射に対するバックグラウンド放射の輝度が小さくなるようにすること
- ③ バックグラウンド放射の正確なモデル化
- ④ 衛星の望遠鏡から検出器までの系による X 線信号に対するレスポンス (検出器レスポンス) の再現性

が重要になる。①と②に関しては相反する関係となっている。例えば、巨大重力源の最たるものである銀河団をターゲットとする場合、①の観点では最良の条件となるが、②の観点ではバックグラウンドとなるバリオン物質起源の放射が強くなるので不利になる。本研究では、これまでで最も確度と精度の高い暗黒物質起源の輝線探索を目指し、最適な観測ターゲットを選定するために①と②のトレードオフスタディを行い、③と④の追求を行った。

2 本研究の手法

広がった X 線放射源の観測から弱い輝線を検出する場合、現在最もよい感度を有するのは X 線望遠鏡と CCD カメラを組み合わせた撮像分光観測である。CCD カメラのエネルギー分解能は 100 eV 程度であり、銀河団等をターゲットとした場合には連続 X 線成分や重元素からの X 線輝線が暗黒物質起源の輝線検出の妨げとなる。そのため本研究では、バリオン物質起源の X 線放射輝度が最も低く、物質の質量分布が推定されているターゲットとして、銀河系に付随する暗黒物質に着目した。これに由来した X 線輝線を探索するためには、銀河系の高温度星間物質と系外銀河起源の「X 線背景放射」のみが観測されている「バックグラウンド観測」を用いればよい。暗黒物質の柱密度 (輝線強度) は銀河団等と比べると小さくなるが、バリオン物質起源の X 線放射輝度を考慮に加えると、この方法が最も有利になることが示される。また、この探索に用いることができるバックグラウンド観測データは衛星のデータアーカイブに多数存在し、それらを集積することで観測時間

を稼ぎ、輝線放射の計数を大きくすることができる。この観測に最適な衛星・検出器は、「すざく」衛星搭載の X 線 CCD 検出器「XIS」となる。「すざく」は非 X 線バックグラウンドがこれまでの X 線天文衛星の中で最も低く安定である。さらに、「すざく」のデータアーカイブには約 10 年分のバックグラウンド観測データが存在し、その間の検出器レスポンスの変化についてはキャリブレーションが継続的に行われている。以上より、本研究では、「すざく/XIS」のバックグラウンド観測データを集積して用いることで、これまでで最も感度が高い keV 領域の輝線探索を行った。

3 全天 187 方向における X 線背景放射の解析

本研究では、まず、「すざく/XIS」のデータアーカイブ (2005 – 2013 年) から「銀河中心や銀河面から離れた方向の観測データ」、「視野内に明るい点源や広がった X 線源が存在しない観測データ」を選定することで、余計な放射成分をできる限り排除して、純粋な X 線背景放射のみを抽出できるようにした。選定の結果、全天 187 方向の観測データを集めることができた (図 1)。これらのデータには、さらに暗い点源の寄与や標準プロセッシングでは考慮していない短期のバックグラウンド変動があるため、「視野内の暗い点源の除去」、「太陽風と地球高層大気との電荷交換反応による X 線放射が大きくなる時間帯の排除」、「荷電粒子による非 X 線バックグラウンドが大きくなる時間帯の排除」のような厳しいデータスクリーニングを行い、データを絞り込んだ。以上が完了した後の合計観測時間は 31.5 Msec (約 1 年間分) となり、これまでで最も深い X 線背景放射の解析を行う準備を整えた。

次に、0.5 – 7.0 keV のエネルギーバンドにおいて、X 線背景放射のモデル × 検出器レスポンスでスペクトルをシミュレートし、187 セットそれぞれの実スペクトルと比較 (スペクトル解析) することで、X 線背景放射を系統的に研究した。これだけ多領域にわたって X 線背景放射を解析した例はこれまでにない。解析の結果、全てのスペクトルにおいて、

- 太陽風と太陽圏中性物質との電荷交換反応による X 線放射
- 太陽系を取り巻く局所的な高温プラズマバブル ($kT = 0.1$ keV)
- 銀河系を取り巻く高温プラズマハロー ($kT = 0.1 - 0.4$ keV)
- 系外の活動銀河核からの X 線放射

で説明ができるような成分が見られ、これらは先行研究 (例えば、Yoshino et al. 2008) と矛盾しないものであった。また、約 3 割の領域 (55/187) では、これらに加えてより高温のプラズマ ($kT = 0.4 - 1.0$ keV) からの X 線放射が見られるという知見を得た。

次に、これら 187 セットのデータを合算して、統計揺らぎの小さいデータとしてまとめ、スペクトル解析を行った。合算データのスペクトルは 3 温度の銀河系内高温プラズマの放射モデルと系外の活動銀河核の放射モデル (光子指数 = 1.4 – 1.5 のべき関数) の組み合わせでよく表されており、精度の高い輝線探索のための X 線背景放射モデルの決定が完了した。

さらに、確度を高くするためには、検出器レスポンスの高い再現性や衛星を構成する物質からの蛍光輝線の完全除去が必要となる。本研究では、レスポンスの再現精度を評価するために、スペクトルがシンクロトロン放射の単純なモデル (光子指数 = 2.1 のべき関数) で説明できる、明るい「かに星雲 (M1)」の中心部のキャリブレーション観測データを集積してスペクトル解析を行った。べき関数に検出器レスポンスを加味したスペクトルをシミュレートして、かに星雲の合算データのスペクトルとの比較を行ったところ、レスポンス関数が複雑になる 1.5 – 3.5 keV バンドで最大約 10 % の差が見られた。これをレスポンスの誤再現と見なし、補正を行った。衛星を構成する物質からの蛍光輝線については、標準的な方法として、衛星が夜地球を観測しているときのデータから再現して除去することができる。しかし、この方法による輝線強度の再現精度は数%であり、除去の過不足によって信号の誤検出を生じうる。本研究では、0.5 – 7.0 keV バンドに現れる 5 本の蛍光輝線に対してガウシアンモデルによるスペクトルフィットを行い、蛍光輝線成分を精度よく

再現して完全除去を試みた。これらの系統的逸脱を補正した後の合算データのスペクトル解析結果を図 2 に示す。

4 keV 領域の輝線探索

先述の X 線背景放射のモデルに非バリオン物質起源の輝線放射モデル (元の幅 0 eV、検出器レスポンスでガウシアン的に広がると仮定) を加えて、上記と同様のスペクトル解析を行った。そして、輝線のエネルギーを 0.5 keV から 7.0 keV まで掃引して、輝線強度とその統計誤差を決定し、輝線の存在有意度や輝線強度の上限値を得た。本研究では、輝線がどのエネルギーに現れるか知らないという条件 (Look Elsewhere Effect: LEE) を課して、検出や上限値の有意度を評価した。また、上記の系統的逸脱の補正の精度を評価し、系統誤差として輝線強度の上限値に加算した。

輝線探索の結果 (図 3)、0.5 – 7.0 keV の領域には 5 つの輝線様兆候が確認されたが、低有意度 (LEE 補正前の有意度で 2.2 – 2.8 σ 、LEE 補正後の有意度で $< 1\sigma$) のために、本研究では、これらに対して暗黒物質起源の輝線を検出したとは主張しない。輝線強度の上限値については、1.0 – 7.0 keV バンドにおいて $\sim 2 \times 10^{-3}$ LU (LU = photons cm $^{-2}$ s $^{-1}$ sr $^{-1}$) となり、X 線背景放射輝度の 1 – 10 % に相当するほど小さくなった。この上限値は観測ターゲットの暗黒物質の柱密度によって重みが変わるため、異なるターゲットで得られた解析結果の比較のためには、これらを柱密度で規格化する必要がある。銀河系の暗黒物質の質量分布を銀河回転曲線 (電波 21 cm 線観測) から求め、本研究で解析した方向の平均柱密度を算出すると、 ~ 50 太陽質量 pc $^{-2}$ となった。柱密度で規格化した輝線強度の上限値を求めると、1.0 – 7.0 keV バンドでは $\sim 5 \times 10^{-4}$ LU / (太陽質量 pc $^{-2}$) となり、どの先行研究よりも小さくなった。

5 暗黒物質探索における本研究の意義

本研究において暗黒物質起源の X 線輝線を探索した結果、以下のような新たな知見、および制限が得られた。

1. 本研究では、0.5 – 7.0 keV の領域において、これまで検出報告がある 3.5 keV の輝線を含め、暗黒物質起源の輝線の有意な検出はなかった (図 3 左)。
2. 本研究で与えた暗黒物質の輝線強度の上限値は先行研究よりも小さくなり、銀河系に付随する暗黒物質起源の制限としては現在のところ最も厳しいものとなった (図 3 右)。
3. 暗黒物質の正体として Sterile neutrino を仮定すると、本研究で得られた輝線強度の上限値からその質量や混合角に制限をつけることができ、それはこれまでで最も厳しいものとなった (図 4)。

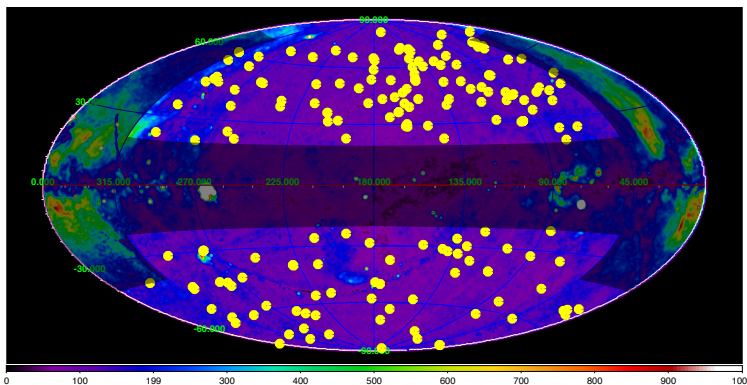


図 1: 本研究で暗黒物質探索を行った全天 187 方向 (黄丸)。これらを ROSAT 衛星による X 線の全天サーベイマップ (銀河系座標、マップ中心は銀河反中心) に投影した。

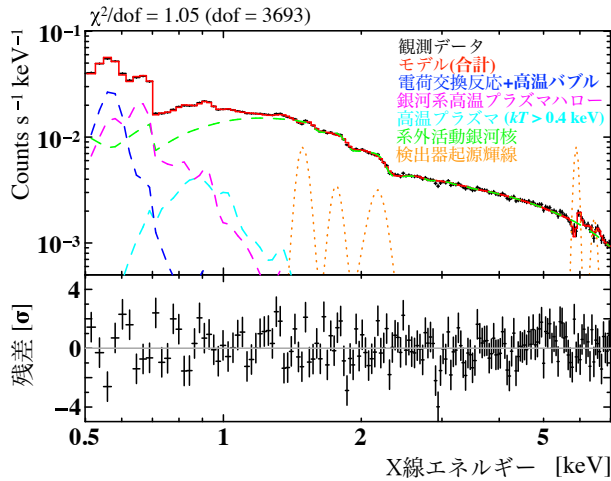


図 2: X線背景放射の8年分(2005 – 2013年)、全XISの合算観測データ(合計観測時間: 31.5 Msec)と検出器のレスポンスを加味したベストフィットモデルの比較。色の違いによりモデルの各成分を表す。残差はモデルとデータの差をLEE補正前の 1σ 統計誤差で割った値。

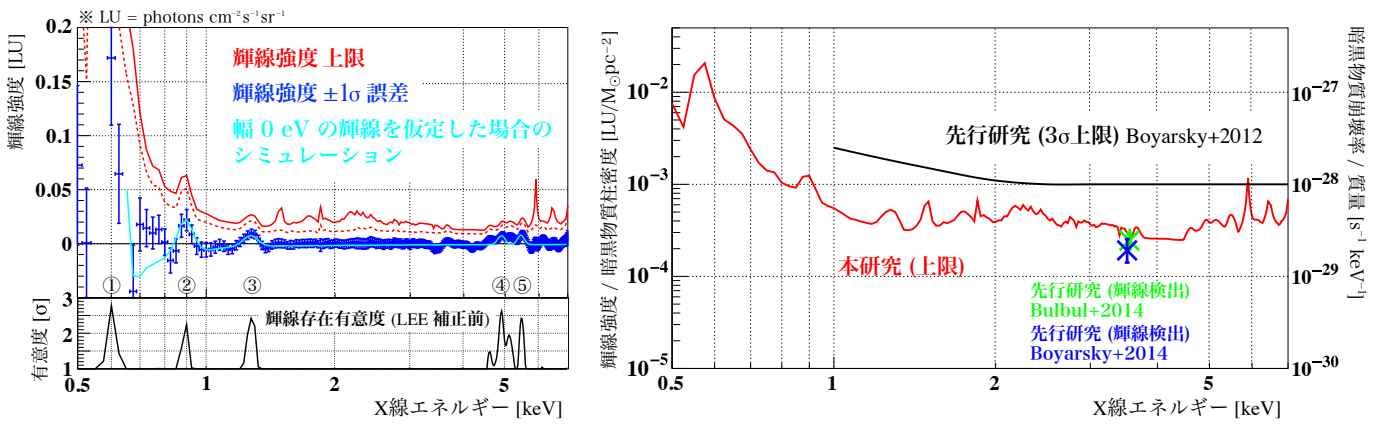


図 3: 左: 本研究で得られた輝線強度とその 1σ 統計誤差(青)、輝線強度の上限値(赤点線: LEE補正前の 3σ 統計誤差、赤実線: LEE補正後の 3σ 統計誤差 + 系統誤差、シアン実線: 幅0 eVの輝線が0.900、1.275、4.975、5.425 keVに存在すると仮定し、それを検出した場合のシミュレーション)。有意度は輝線強度をLEE補正前の 1σ 統計誤差で割った値(黒線)。右: 暗黒物質の柱密度で規格化した輝線強度(暗黒物質の崩壊率と質量の比に対応する)の上限値(赤線: 左上段図中の赤実線の値から導出)で、先行研究による上限値(黒線)よりも厳しい制限がついた。緑と青は3.5 keV輝線の検出報告をしている先行研究。

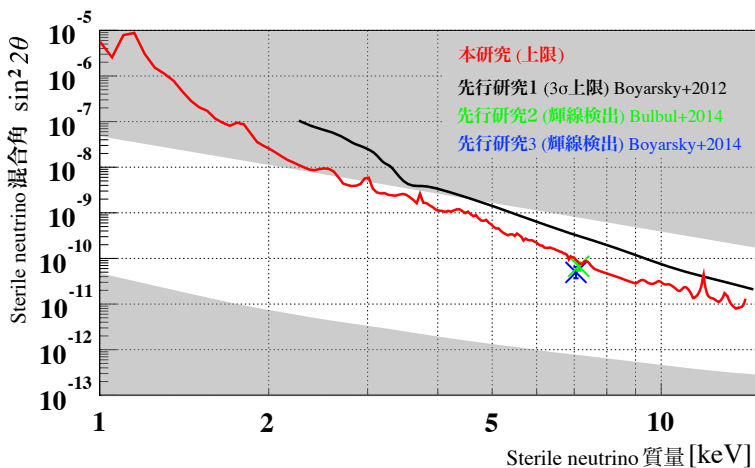


図 4: 暗黒物質の正体として Sterile neutrino を仮定したときに、本研究から得られる質量と混合角の制限(赤線: 本研究において図3左上段図中の赤実線の値から導出、黒線: 先行研究における 3σ 上限)。線の上側が排除領域。灰色で塗られた領域は Sterile neutrino 生成モデルやレプトン非対称による制限から排除される領域。本研究では先行研究と比べて新たに広い領域が否定された。緑と青は3.5 keV輝線の検出報告をしている先行研究。