

# 論文の内容の要旨

## 論文題目

### A Study of Nature and Origins of the X-ray Background below about 2 keV

(2 keV 以下の帯域における X 線背景放射の性質と起源に関する研究)

菊地 貴大

## 1 本研究の背景と目的

X 線背景放射は 1960 年代に初めて確認され、今もなお、X 線背景放射の性質と起源について活発に研究が行われている。まず、2–8 keV の比較的硬 X 線帯域の背景放射のスペクトルは光子指数  $1.42 \pm 0.02$  のべき型関数 ( $dN/dE \propto E^{-(1.42 \pm 0.02)}$ ) で表現される (Revnivtsev et al. 2003)。この帯域では空間分解能をあげると X 線背景放射は点源に分解され、*Chandra* 衛星による最も深い観測により、その  $92.7 \pm 13.3\%$  が主に銀河系外の活動銀河核に分解されている (Luo et al. 2017)。また、吸収の異なる活動銀河核からの放射を合成したスペクトルで 2 keV 以上の X 線背景放射の観測結果をよく再現する (Gill et al., 2001)。そのため、感度をあげることで将来的にほぼ全てが銀河系外の活動銀河核に分解されると考えられている。

一方で、2 keV 以下の X 線背景放射は様々な階層を起源とする X 線放射で構成されると考えられている。X 線背景放射の起源の一つと考えられている中高温銀河間物質 (Warm-Hot Intergalactic Medium: WHIM) は、宇宙大規模構造のフィラメントに沿って形成する。WHIM からの放射は 2 keV 以下で特に 0.5–1 keV の X 線背景放射の表面輝度の約 20% に寄与すると考えられている (Takei et al., 2011)。

本論文では、2 keV 以下の X 線背景放射のスペクトルの成分分解を試みる。X 線背景放射の成分分解において重要な問題は、2–8 keV で未分解の点源が 2 keV 以下の X 線背景放射にどのように寄与するかを推定することである。しかし、2–8 keV で未分解の点源の 2 keV 以下のスペクトルの形は分からない。そのため、推定に際する不確定性を小さくする為にはできるだけ多くの分解済みの点源を X 線背景放射の中から除く必要がある。2–8 keV の X 線背景放射の点源分解率がもっとも大きい *Chandra Deep Field - South* (CDF-S) 領域が本目的に適したベストな観測領域である。

## 2 本論文の戦略と手法

*XMM-Newton* 衛星は 1 keV 以下で非常に広い有効面積をもつため、点源を除くことで減った検出器面積でも X 線背景放射の統計数を稼ぐことができる。空間分解能では若干 *Chandra* よりも劣るものの (HPD で) 15 秒角を有し点源を除くには十分である。*Chandra* の有効面積は 1 keV 以下で急激に落ちる為、1 keV 以下の X 線背景放射の観測には適していない。よって、*XMM-Newton* の CDF-S 方向の X 線背景放射の観測データは 0.5–1 keV の X 線背景放射の観測に最も適していると考えられる。しかし、*XMM-Newton* を用いて *Chandra* が分解した点源を除いた X 線背景放射の解析を行うために、以下に示すように多くの困難があり、その都度解決をして信頼できるスペクトルを得た。

### 1. 観測中の 100 keV 程度の宇宙線によるコンタミ (Soft Propton Contamination: SPC) の影響

観測中の宇宙線 ( $\sim 100$  keV) によるコンタミ (Soft Propton Contamination: SPC) が 2 keV 以下でどのような影響を及ぼすかは、現在でも調査中であり、よく分かっていない。それにも関わらず、*XMM-Newton* を用いた X 線背景放射の先行研究では観測した 2 keV 以下の X 線背景放射の大半が SPC だと考えられている (Henly & Shelton 2013)。その為、我々は SPC の影響を受けた時間帯を注意深く確認し解析に用いないことにした。SPC の時間変動には、短期変動 ( $\sim 100$  sec) と長期変動 ( $\sim 10$  ksec) がある (Salvetti et al. 2017)。明らかに時間変動が大きい時間帯と、SPC の短期と長期の時間変動の両方の時間帯を除いたことで観測時間は 3.6 Msec から 1.6 Msec まで減少した。

## 2. 分解済みの点源に対するマスクの決定

本論文では、*Chandra* の 7 Msec の点源リストカタログ (Luo et al., 2017) を用いた。*Chandra* 点源リストの点源を除くために点源を除く領域を大きくすれば PSF による漏れ込みを小さくできる。しかし、背景放射の統計数を稼ぐことができない。そこで、本論文では *Chandra* 点源リストの点源が *XMM-Newton* でどの様に見えるかシミュレーションイメージを作成し、実測した X 線背景放射の統計数に対する点源の漏れ込みが実測した X 線背景放射の統計誤差 (5%) と同程度となる様にマスクを作成した。

## 3. Non X-ray Background (NXB) の時間変動と空間的な非一様性の影響

NXB には時間的な変動があるために、観測中の同じ時間で望遠鏡の視野外の (すなわち X 線が集光されていない領域の) データを用いた。さらに、視野内外の空間的な非一様性の影響を見積もるために、望遠鏡で集光した X 線が検出器まで届かない状態 (ドアクローズド状態) の 1.9 Msec のデータを用いて補正を行なった。実際の観測中の 10-11 keV の望遠鏡の有効面積のないエネルギー帯域で、観測した全イベントのカウントレートが推定した NXB のカウントレートに対して差が  $4 \pm 1\%$  (誤差は統計誤差の  $1\sigma$ ) しかなく殆ど一致していることで確かめた。この 4% の差分がなくなる (0% となる) ように補正して、さらに  $\pm 2\sigma$  の誤差範囲を NXB の推定の系統誤差として取り込んだ。

## 3 点源を除く前後の X 線背景放射のスペクトル解析

本論文のデータ解析では点源を除く前後で 0.5-1 keV における X 線背景放射の表面輝度がどの様に変化するかを確認した。なお、1.3-2.4 keV は検出器由来のライン (Al, Si, Au) の空間的な非一様性までは推定することができなかったため使用していない。X 線背景放射の 0.5-1 keV の表面輝度を推定するために、(1) 2 photons/cm<sup>2</sup>/s/str (Line Unit: LU) 分の OVII(0.56 keV) のガウシアンと、(2) 銀河系吸収付きの  $\sim 0.2$  keV のサーマルプラズマと、(3) 銀河系吸収付きの折れ曲がりを持ったパワーローモデルを用いてアクセプタブルなフィット結果を得た。モデルの (3) については、未分解点源の寄与を表すと考えられている。折れ曲がりのエネルギーは 1-2 keV で議論があるが検出器由来のラインの影響で決定できないため 1.3 keV で固定した。モデル (3) のパワーローの 1.3 keV 以下のベキについては、点源を除く前で  $2.06 \pm 0.06$  で、点源を除いた後で  $2.31^{+0.26}_{-0.30}$  と統計誤差の範囲で有意に高エネルギー側の 1.4 より急峻となっていた。

点源を除く前後で観測した X 線背景放射のトータルと OVII、OVIII の表面輝度は以下の様に変化していた。

(A) *Chandra* が分解した点源を除く前の背景放射と OVII と OVIII の表面輝度について:

- (a) トータルの表面輝度:  $(5.74 \pm 0.04^{+0.08}_{-1.02}) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup> in 0.5-1 keV
- (b) OVII の表面輝度:  $(0.95 \pm 0.07^{+0.07}_{-0.09}) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup>
- (c) OVIII の表面輝度:  $(0.22 \pm 0.05 \pm 0.02) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup>

(B) *Chandra* が分解した点源を除いた後の背景放射と OVII と OVIII の表面輝度について:

- (a) トータルの表面輝度:  $(3.19 \pm 0.10^{+0.25}_{-0.61}) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup> in 0.5-1 keV
- (b) OVII の表面輝度:  $(0.98 \pm 0.17^{+0.07}_{-0.09}) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup>
- (c) OVIII の表面輝度:  $(0.28 \pm 0.10 \pm 0.02) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup>

なお、誤差は  $1.6\sigma$  の統計誤差と系統誤差である。本論文では *Chandra* が分解した点源を除いた後の背景放射において初めて OVII と OVIII の輝線を分離することができた。OVIII の有意度は  $3.4 (= 0.28 / (0.10 / 1.6 + 0.02))\sigma$  である。図 3.1 は *Chandra* の X 線背景放射の先行研究と本研究で得たスペクトルの比較である。我々のスペクトルでは OVII と OVIII が明確に分離できている。

## 4 議論: 1 keV 以下の X 線背景放射の起源

*Chandra* が分解した点源を除いた後の X 線背景放射の表面輝度  $(3.19 \pm 0.10^{+0.25}_{-0.61}) \times 10^{-12}$  erg cm<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> deg<sup>-2</sup> in 0.5-1 keV について成分分解を行う。本論文ではトータルの表面輝度の成分として以下のように、OVII・OVIII・サーマルプラズマエミッションの OVII と OVIII 以外の放射・2-8 keV で *Chandra* でも分解できていない未分解の点源の寄与だと考えた。

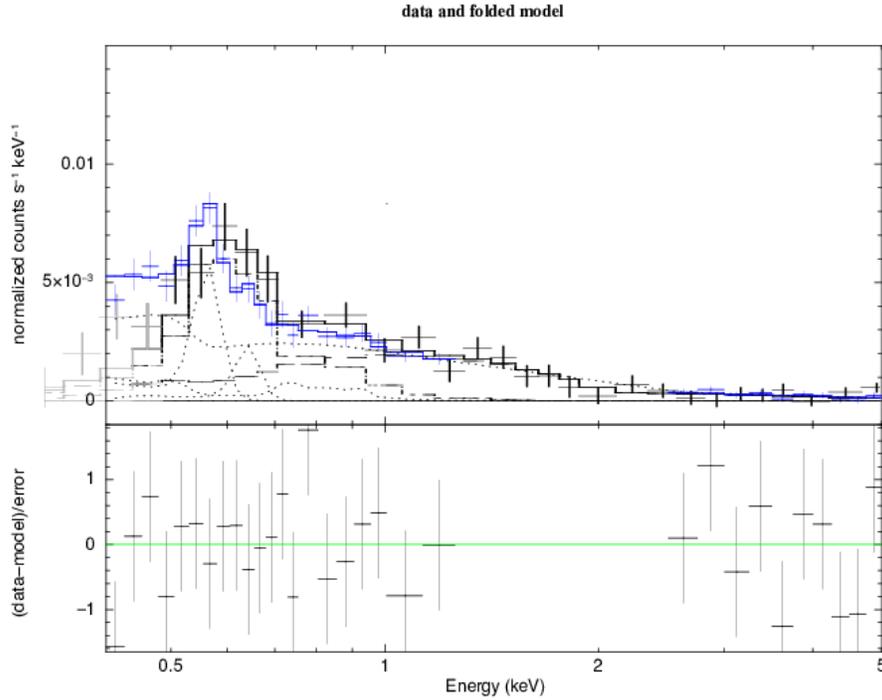


図 3.1: 1 keV 以下における X 線背景放射のスペクトルの比較。青の十字のデータ ( $1\sigma$  の誤差付き) が本論文で得た X 線背景放射のカウントレートで黒のデータが *Chandra* の先行研究が得た X 線背景放射のカウントレートである。本論文の青のデータでは、OVII と OVIII が明確に分離できている。

(I) *Chandra* が分解した点源を除いた後の 0.5-1 keV における X 線背景放射の成分分解

- (a) サーマルプラズマエミッションの OVII と OVIII 以外の放射
  - i.  $(0.4 \pm 0.4 \pm 0.02) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$
- (b) 2-8 keV で *Chandra* でも分解できていない未分解の点源の寄与
  - i.  $(0.20 \pm 0.01^{+0.24}_{-0.05}) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 92.7% を仮定した場合)
  - ii.  $(0.66 \pm 0.03^{+0.78}_{-0.16}) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 79.4% を仮定した場合)
  - iii.  $0.00 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 100% を仮定した場合)
- (c) 未知の成分 (トータル - OVII - OVIII - サーマルプラズマエミッションの OVII と OVIII 以外の放射 - 2-8 keV で *Chandra* でも分解できていない未分解の点源の寄与);
  - i.  $(1.33 \pm 0.46^{+0.35}_{-0.62}) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 92.7% に対応)
  - ii.  $(0.87 \pm 0.46^{+0.82}_{-0.70}) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 79.4% に対応)
  - iii.  $(1.53 \pm 0.46^{+0.26}_{-0.68}) \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  (2-8 keV の点源分解率で 100% に対応)

これは、0.5-1 keV における系統誤差を考慮した初めての定量的な X 線背景放射の成分分解である。本論文では、未知の成分について有意な信号は得られなかったため、90%( $1.6\sigma$ ) 信頼度の統計誤差と系統誤差を合わせた上限値として、 $2.3 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ deg}^{-2}$  という値を得た。この上限値は X 線背景放射のトータルの表面輝度の約 70% であり、宇宙論的なシミュレーション結果から期待される WHIM の表面輝度と比較して矛盾はなかった。

本論文では、2-8 keV で *Chandra* でも分解できていない未分解の点源の寄与を見積もる際に大きな系統誤差があり、未知の成分に対する有意な検出結果とは言えなかった。未知の成分の推定に際して、系統誤差をより小さくするため

には、未分解の点源に対してより詳しく知る必要がある。現在でもチャンドラによって未分解の点源の観測は続いている。しかし、我々としては *Chandra* より空間分解能があり *XMM-Newton* より 1 keV 以下で大きな有効面積がある X 線観測衛星が欲しい。20 年間のタイムスケールにおいて、残念ながら、その様な X 線観測衛星は計画されていない。一方で、本論文では OVII と OVIII のラインを分離することに成功した。しかし、CCD のエネルギー分解能 (125 eV@0.56keV) では、2 つのラインの赤方偏移までは確認することが出来なかった。そのため、将来的に WHIM のフィラメントの構造を明らかにするためには、数 eV のエネルギー分解能をもつイメージングカメラで OVII と OVIII の赤方偏移を検出する必要がある。