

0.5-1 keVの帯域における X線背景放射の起源と性質に関する研究

菊地 貴大[†]・山本 亮^{††}・山崎 典子[†]・満田 和久[†]

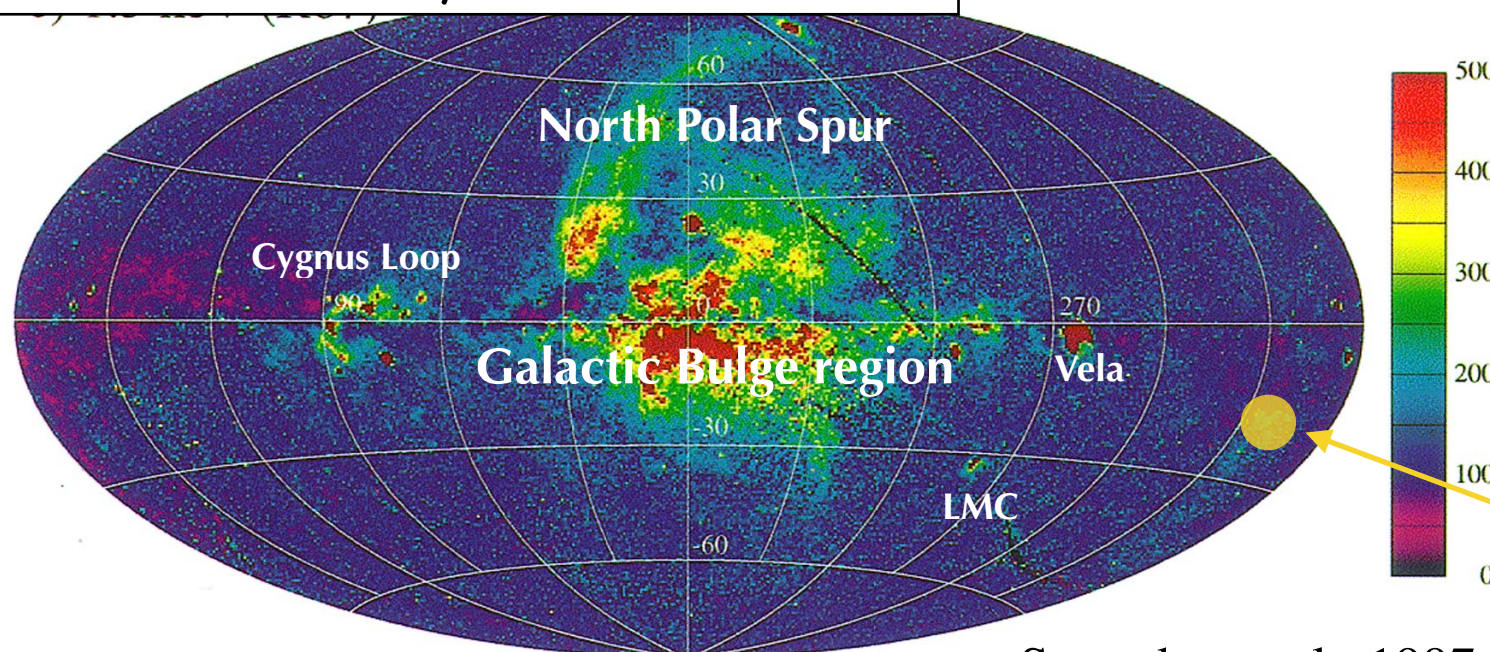
[†] JAXA/宇宙科学研究所

^{††} 産業技術総合研究所

X線背景放射とその重要性

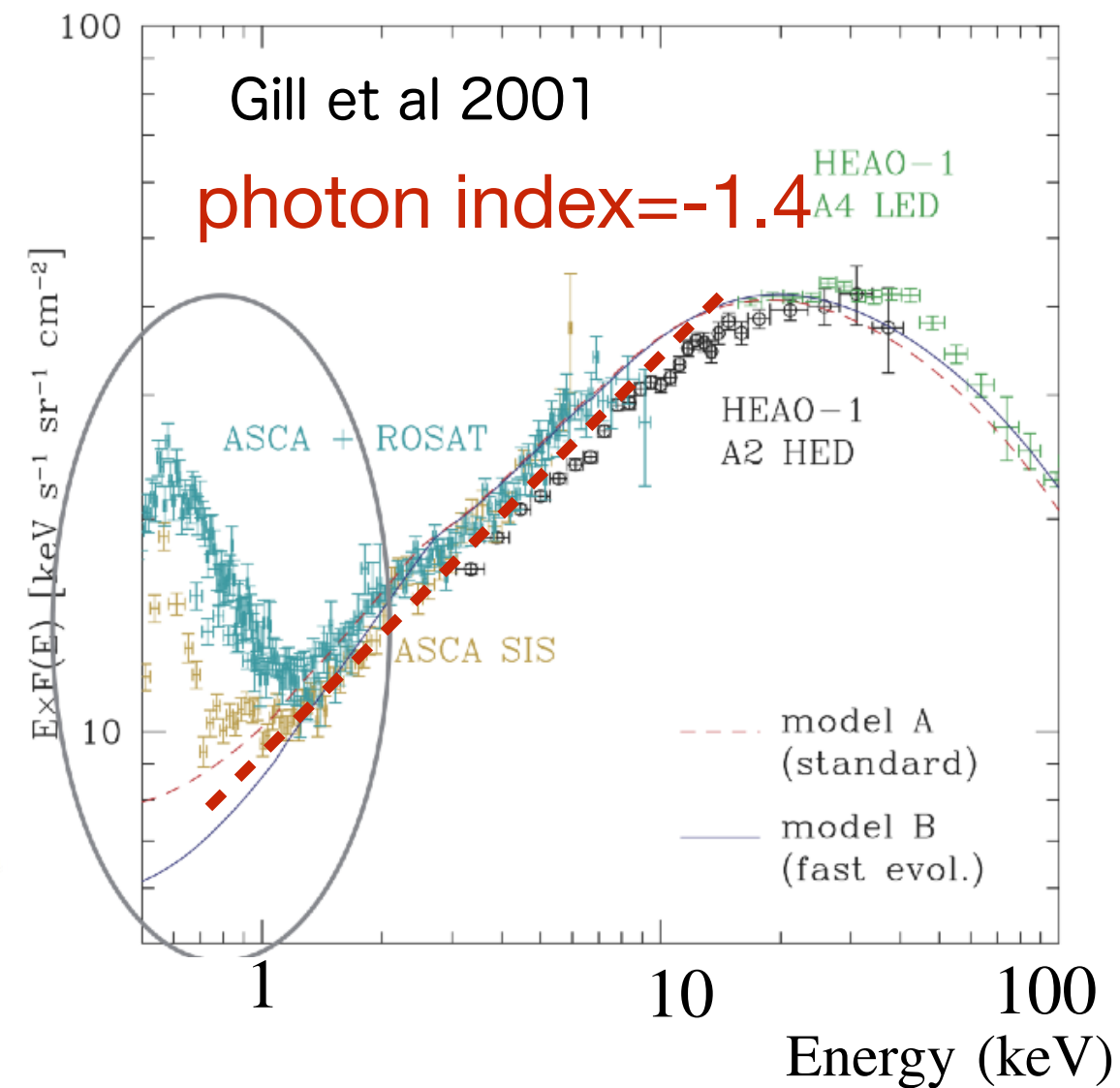
- ・ X線背景放射とは
 - ・ 個々のX線源に分解されたもの以外
 - ・ あらゆる方向から来る
- ・ 視線方向の様々な情報を届けてくれる
- ・ 2 keV以上のX線背景放射
 - ・ 2-20 keV: ベキ1.4のパワーローでよく表される
 - ・ 2-8 keV: 92.7 ± 13.3 %が空間的に点源分解 (Luo+ 2017)
 - ・ ほとんどが暗いAGN (Xue+ 2017)
- ・ 2 keV以下のX線背景放射はもっと複雑

ROSAT による3/2 keV帯域マップ



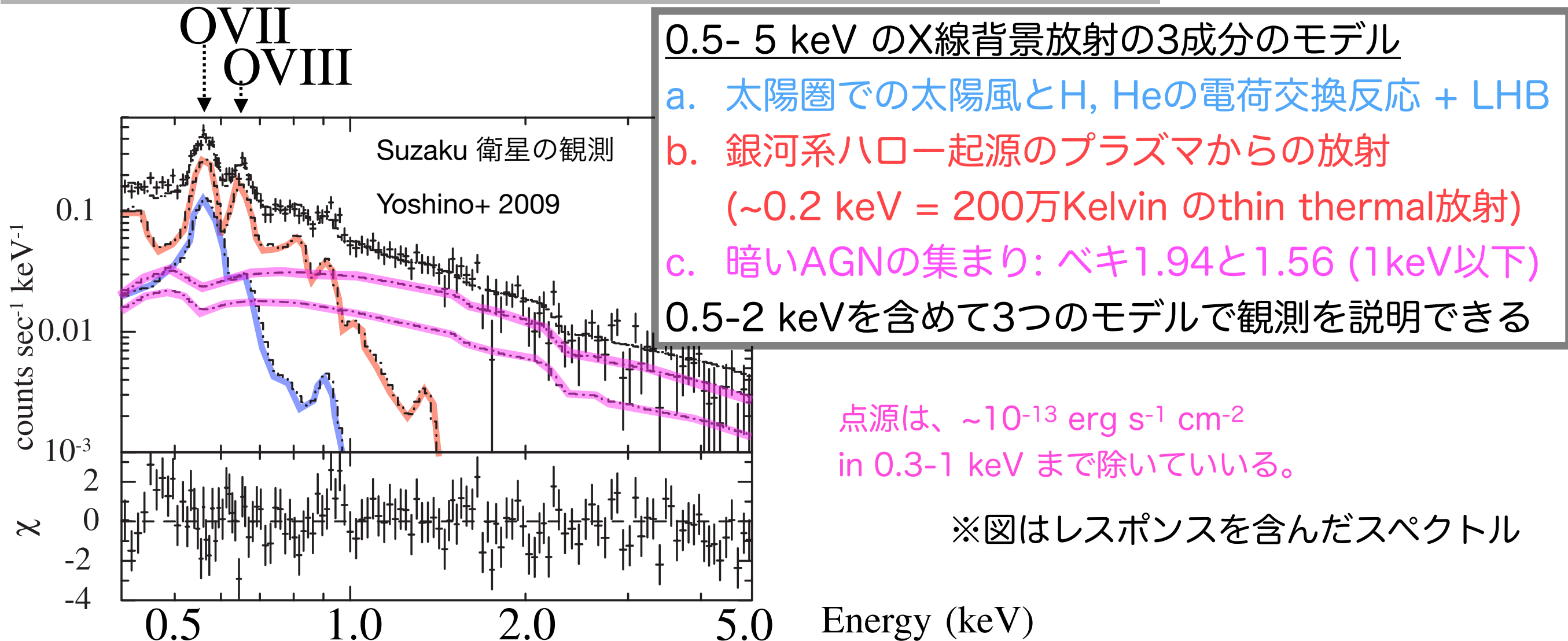
Snowden et al., 1997

X線背景放射の観測スペクトル



Chandra Deep Field South
(l, b) = (161.26 deg, -22.81 deg)

典型的な2 keV以下のX線背景放射のスペクトル



- これら以外にも、0.5-1 keVには、宇宙論を起源とするWHIMなどの放射があるはずである
 - Warm-Hot ($\sim 100 \text{ 万 Kelvin}$) Intergalactic Medium は $z < 0.3$ から形成され、0.5-1 keVのX線背景放射の約20%程度に寄与するはずである (Takei+ 2011, Capelluti+ 2012, Fang+ 2018)
- 3成分のうち、暗いAGNの集まりのモデルが最も不定性が大きいため、3成分以外の放射がマスクされている可能性がある。

本研究の目的・手法・結論

本研究の目的

- 暗いAGNの集まりのモデルが最も不定性があるので、できるだけモデルの不定性を排除して、X線背景放射のスペクトルを議論する

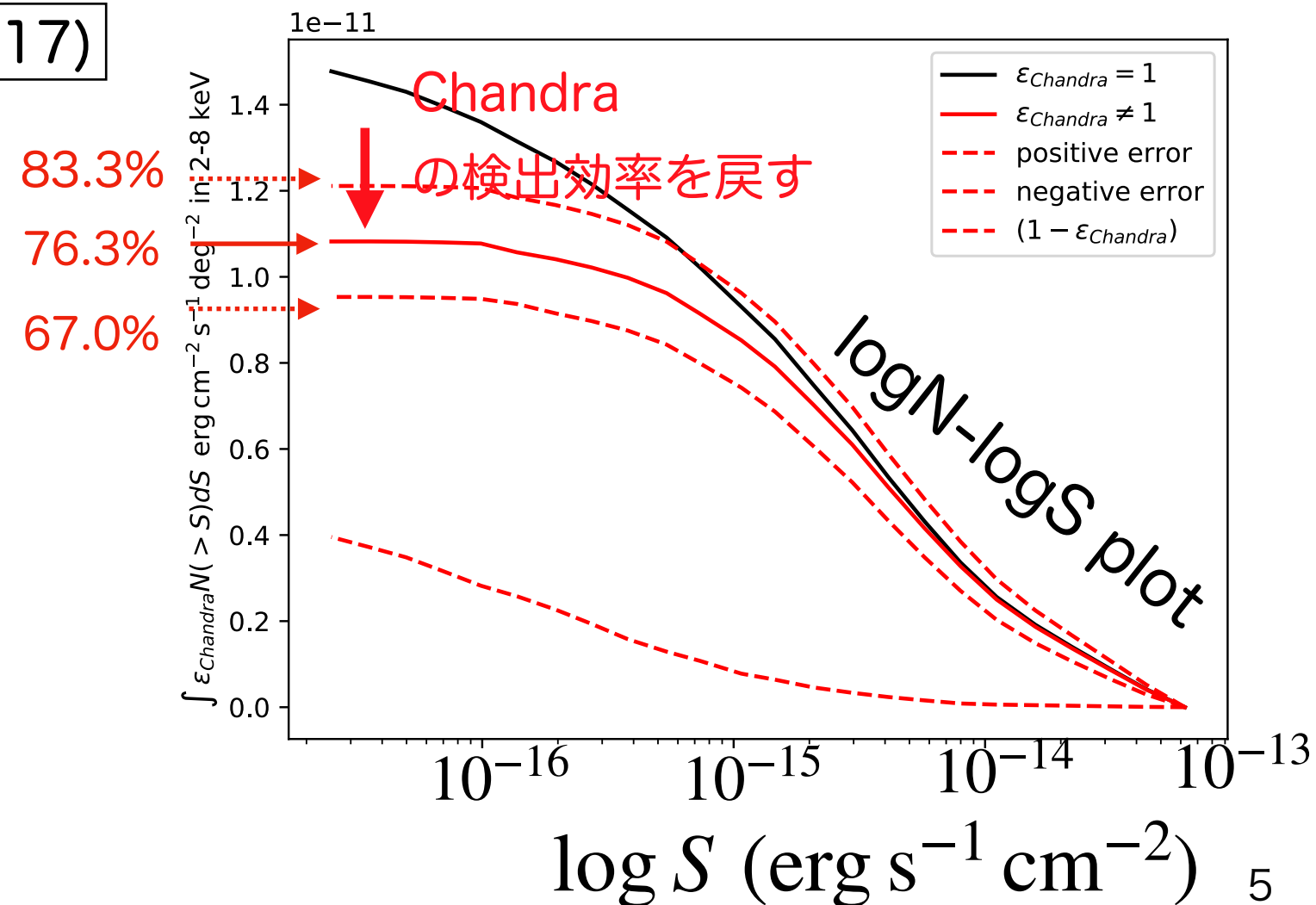
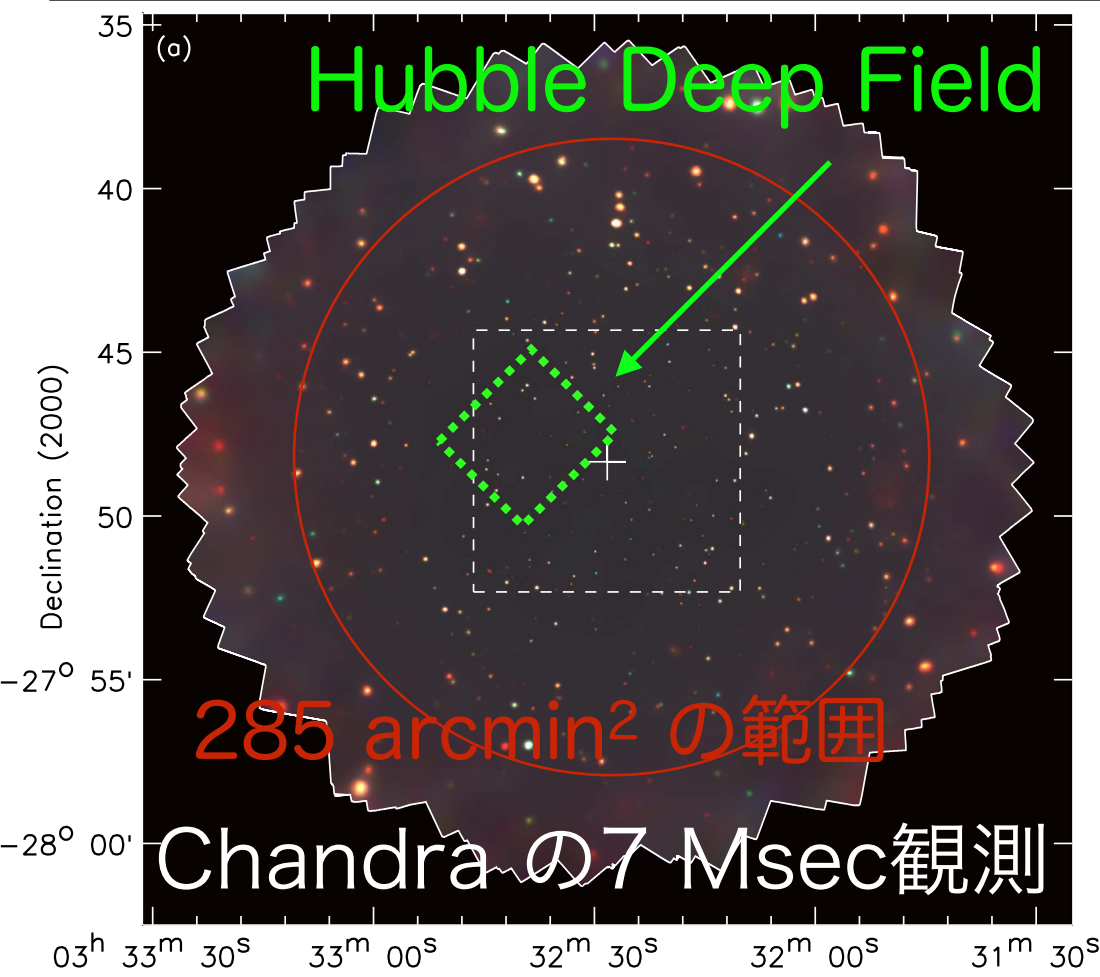
これからの発表内容（手法・結論）

- できるだけ点源を分解し、取り除いた背景放射のスペクトルを解析する
 - 空間分解能が最も良い Chandra が 7 Msec (約80日) をかけて点源を分解したChandra Deep Field South がある。また、1 keV以下で有効面積の広いXMM-Newton も同方向を長期間 (3.6 Msec) 観測している
 - 点源リストは Chandra を用いて、diffuse の解析には XMM-Newton を用いる
- XMM-Newton を用いた背景放射の解析で遭遇した困難
 - 点源の除去における、望遠鏡Point Spread Function の裾の広がり（この後で詳しく説明）
 - XMM-Newton の非X線バックグラウンド (NXB) のレベルが非常に高く、推定も難しい（詳細は省略）
 - 望遠鏡により集光された 100 keV程度の低エネルギー陽子
 - 新しいやり方を開発して除去し、引き残りの上限を評価し系統誤差に取り込んだ
 - 上記以外のNXBの推定
 - 視野外から見積もる標準的な方法に加え、視野内外のカウントレート比のエネルギー依存性を補正し、有効面積のない 10-11 keVで視野内外のカウントレートの比が1となるように調整した。10-11 keVの比率の統計誤差 ± 2 シグマをNXBの系統誤差に取り込んだ
- 3成分以外の放射成分についての上限値を求めた

XMM-Newton 衛星と Chandra の結合解析

- Chandra Deep Field (左下図) には 約1000個の分解済みの点源 (主に暗いAGN) がある
- Chandra の観測によって、2-8 keVのX線背景放射の $92.7 \pm 13.3\%$ が点源分解されている
- Chandra の検出効率を戻すと、CDFsにおいて、2-8 keVのX線背景放射は約76%が点源に分解される。この約76%の点源を XMM-Newton の視野から除き、背景放射のスペクトルを解析する

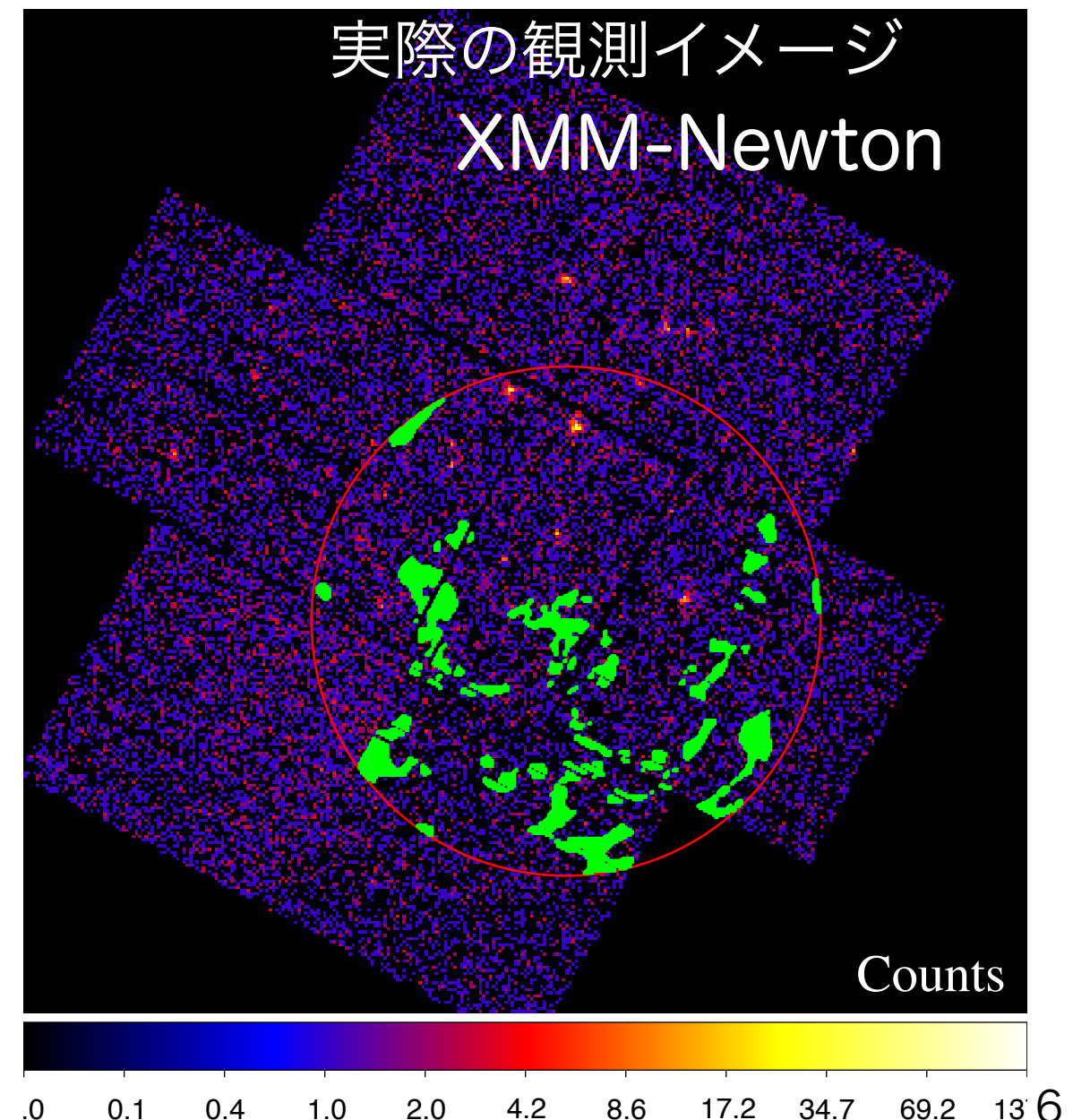
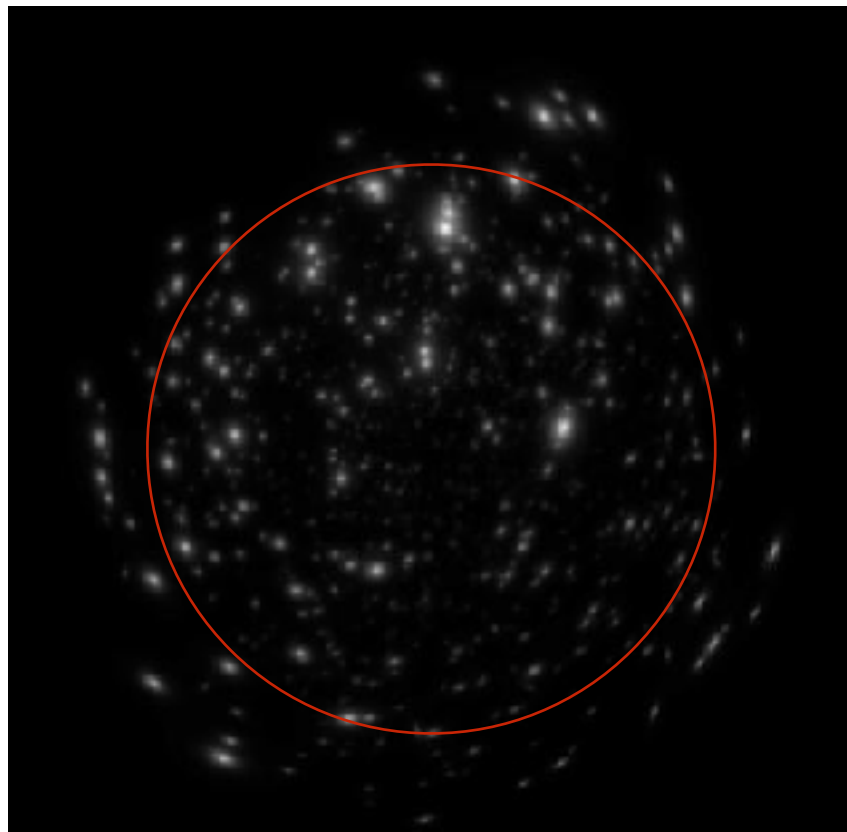
Chandra Deep Field South (Luo+ 2017)



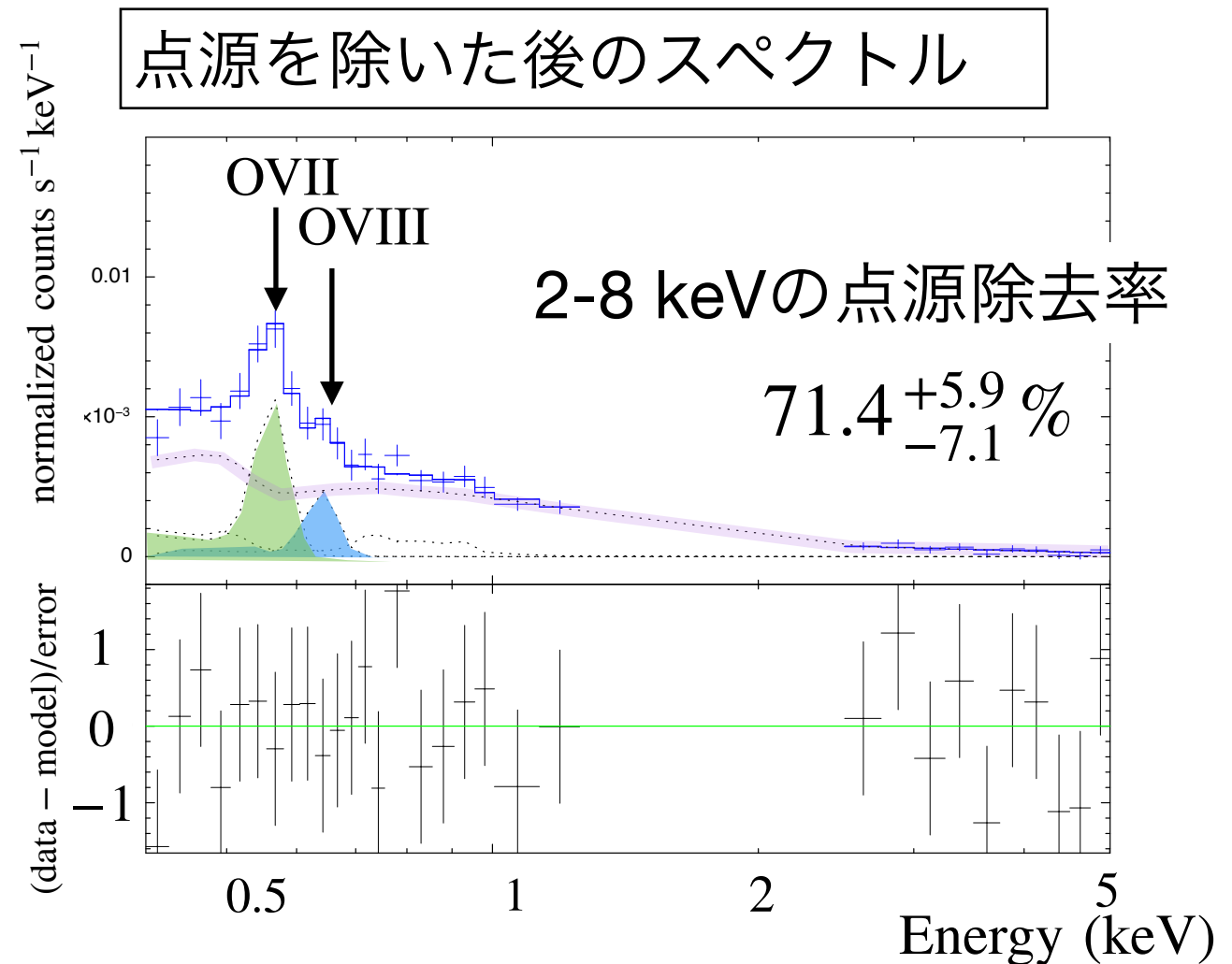
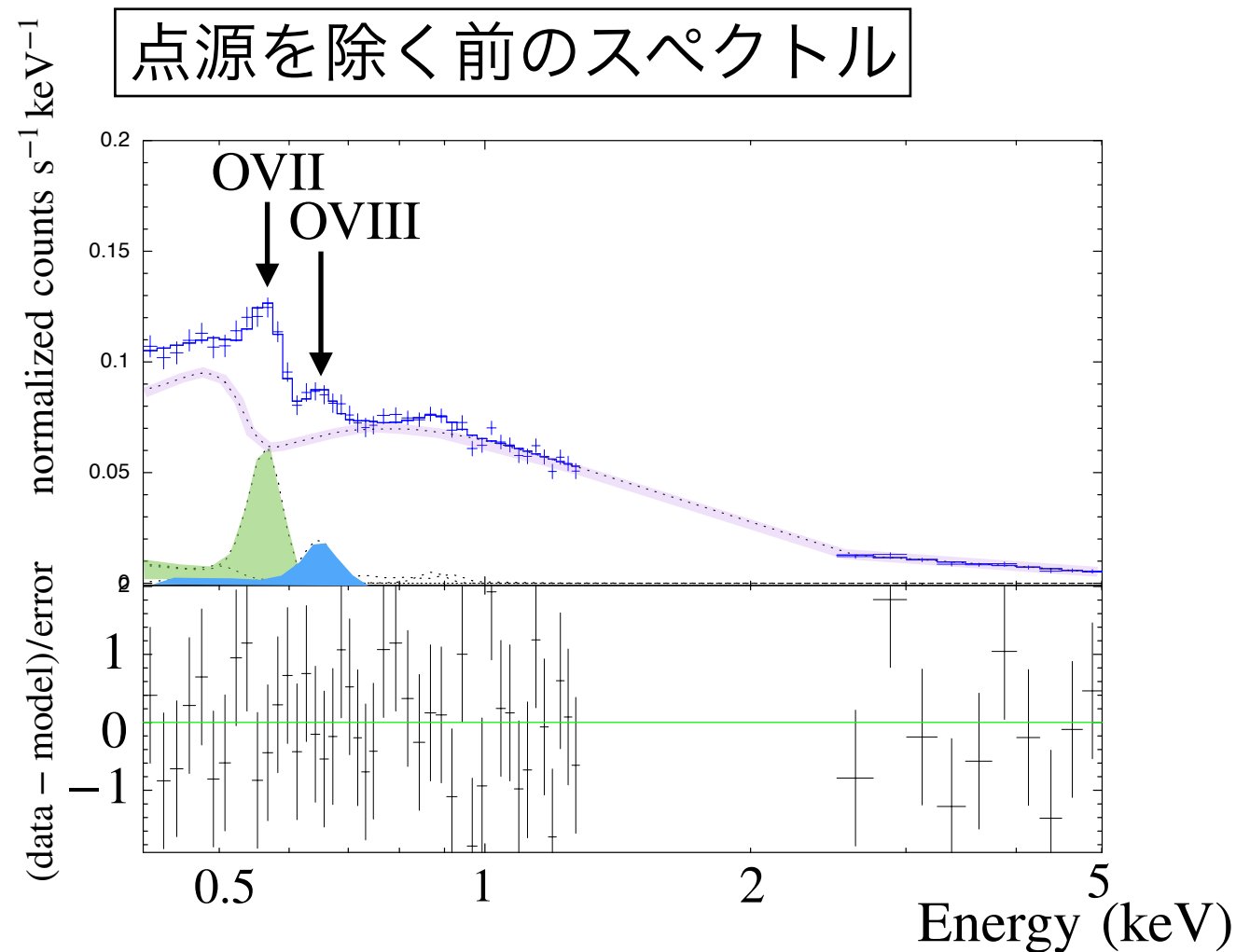
イメージ上での分解済み点源の除去

- Chandraの7 Msecの分解済み点源のリスト (Luo et al. 2017) のシミュレーションイメージの作成
- XMM-Newton の実測したイメージ上の緑領域が、分解済み点源の漏れこみが0.4-1 keVの背景放射の統計誤差程度の領域
- 点源の漏れこみを考慮すると、2-8 keV のX線背景放射の約71.6%が点源に分解されるはず

シミュレーションイメージ



観測したX線背景放射のスペクトルと表面輝度の見積もり

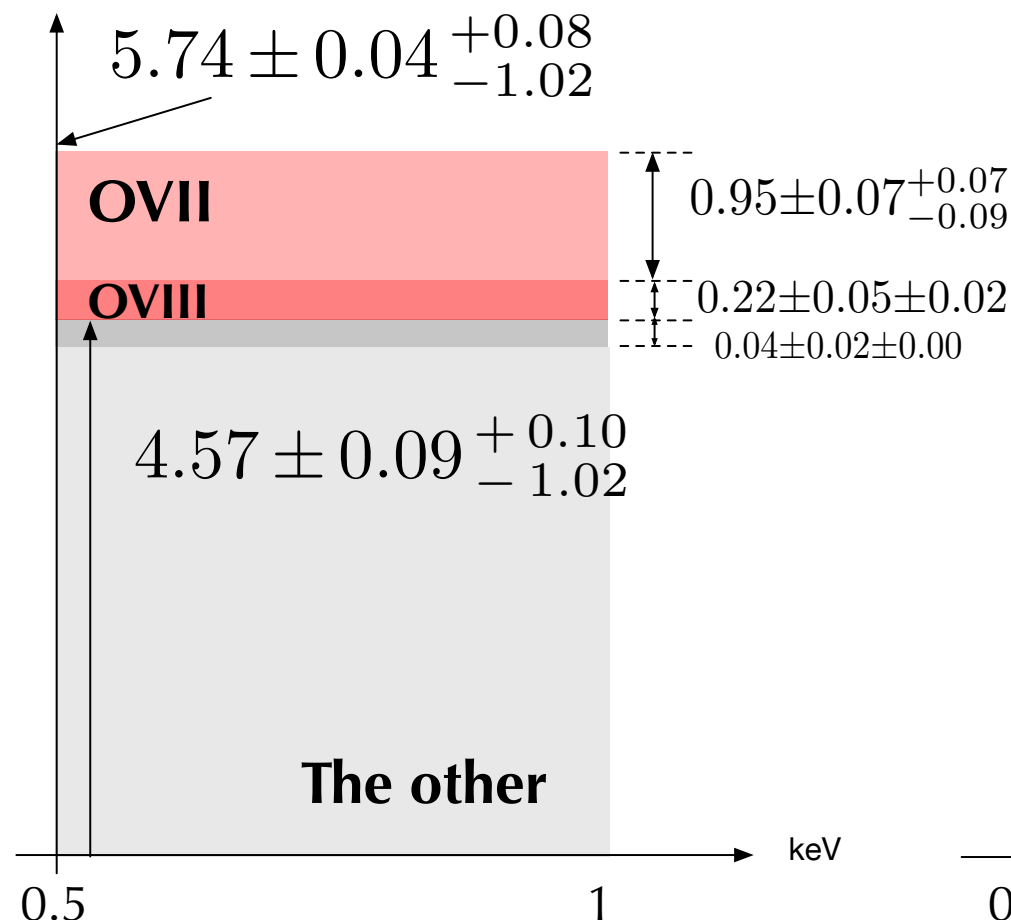


- 分解済み点源を除くと、OVIIに対する連続的に見える成分（図紫）が減少
- XMM-Newton の観測の2-8 keVの点源除去率は誤差範囲でChandraの結果と一致
 - XMM-Newton の除去率の誤差範囲はNXBの系統誤差を考慮したため、大きかったが、Chandra の点源リストの除去率とXMM-Newtonでの漏れ込みを考慮し、誤差範囲を設定

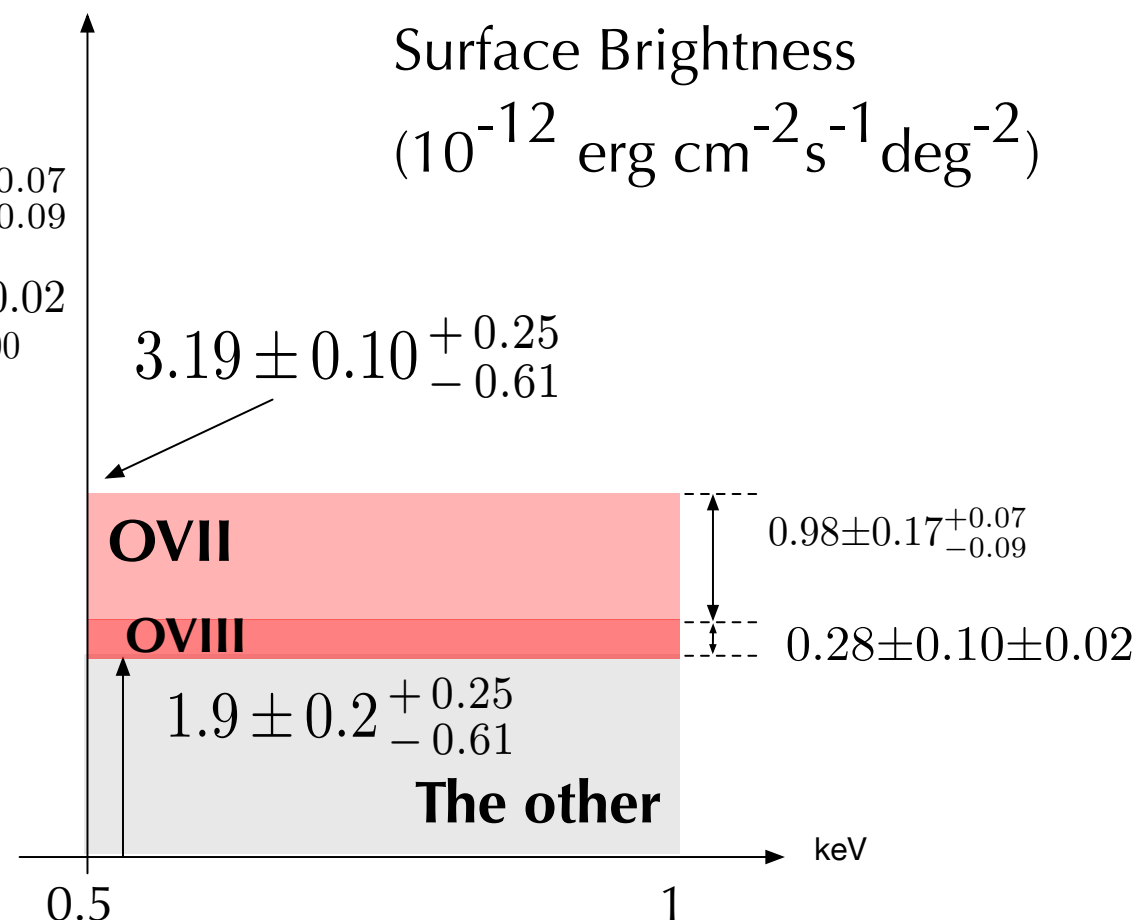
点源を抜く前後の表面輝度の比較 in 0.5-1 keV

- 0.5-1 keV 帯域の表面輝度は、Chandraカタログ点源を除くと約45%減少していた
- 点源を除く前と後のOVIIとOVIII の表面輝度は統計誤差の範囲で一致
- 酸素輝線が点源とは無相関で、これまで考えられている空間的に広がっている酸素輝線の起源の考え方とも矛盾しない

点源を除く前の表面輝度

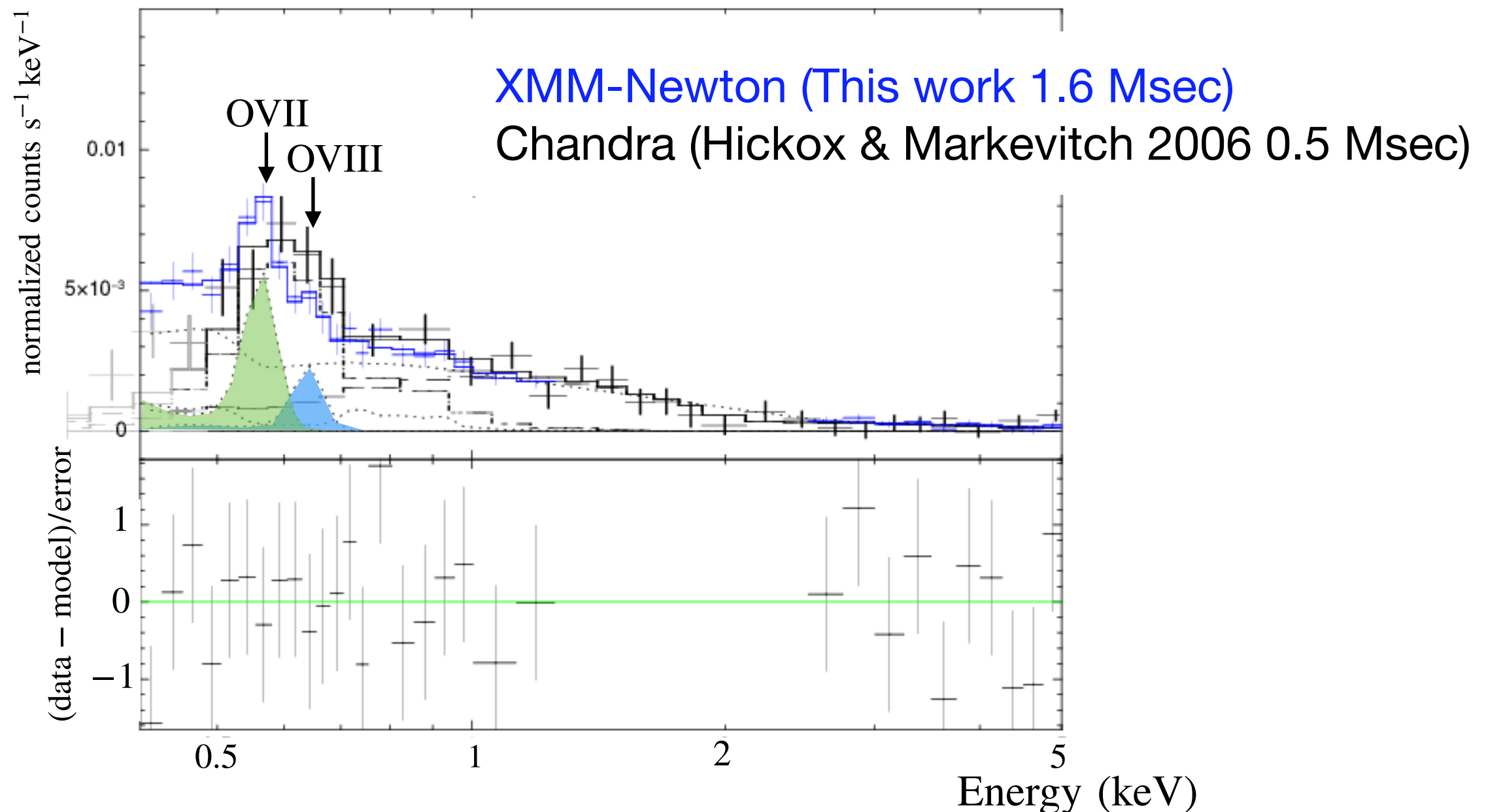


点源を除いた後の表面輝度



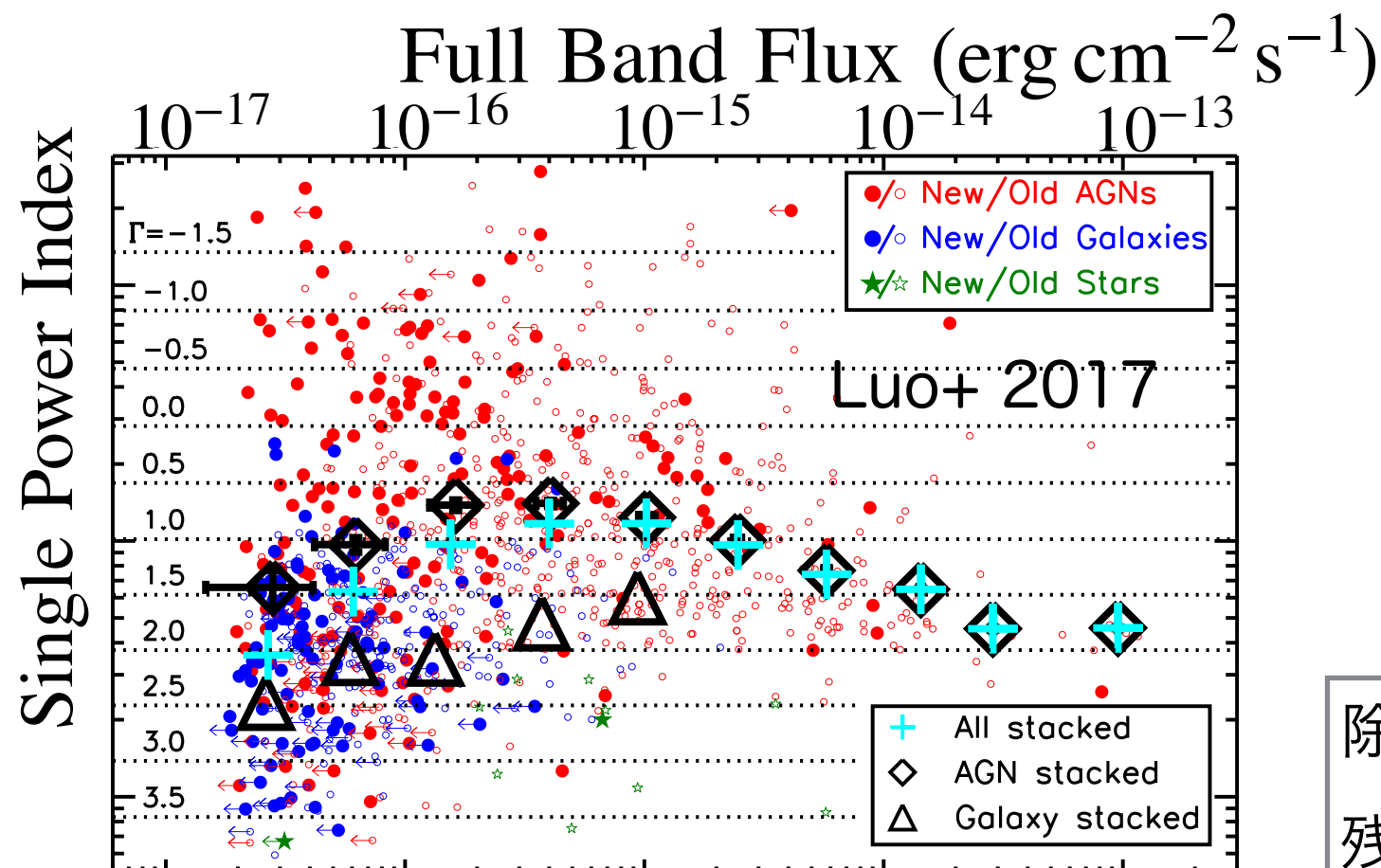
点源除去後のChandra(先行研究)との比較

- ・ XMM-Newtonの解析により得られたスペクトルとChandraのスペクトルの比較
 - ・ トータルの表面輝度 in 0.5-1 keVは、太陽活動時期の違いを考慮し、誤差の範囲で一致
 - ・ OVIIとOVIIIが明確に分かれている (比較の図)



Total - Lines に寄与する暗いAGNの推定方法

- XMM-Newton で決めた2-8 keVの点源除去率の下側誤差範囲と、Chandra の2-8 keVの背景放射の点源分解率の誤差範囲である100%までを考慮する
- Chandra により、分解済みの暗いAGNのシングルパワーローのベキが決定されている
- 2-8 keVの 点源除去率 (ξ) と、暗い AGN のベキで決まる η という2パラメータで暗いAGNの表面輝度を推定する
- 暗いAGNのベキは、Chandra が分解した最も暗い点源のベキ (2.0) と2 keV以上の背景放射のベキ (1.4) を2 keV以下に外挿した場合を想定



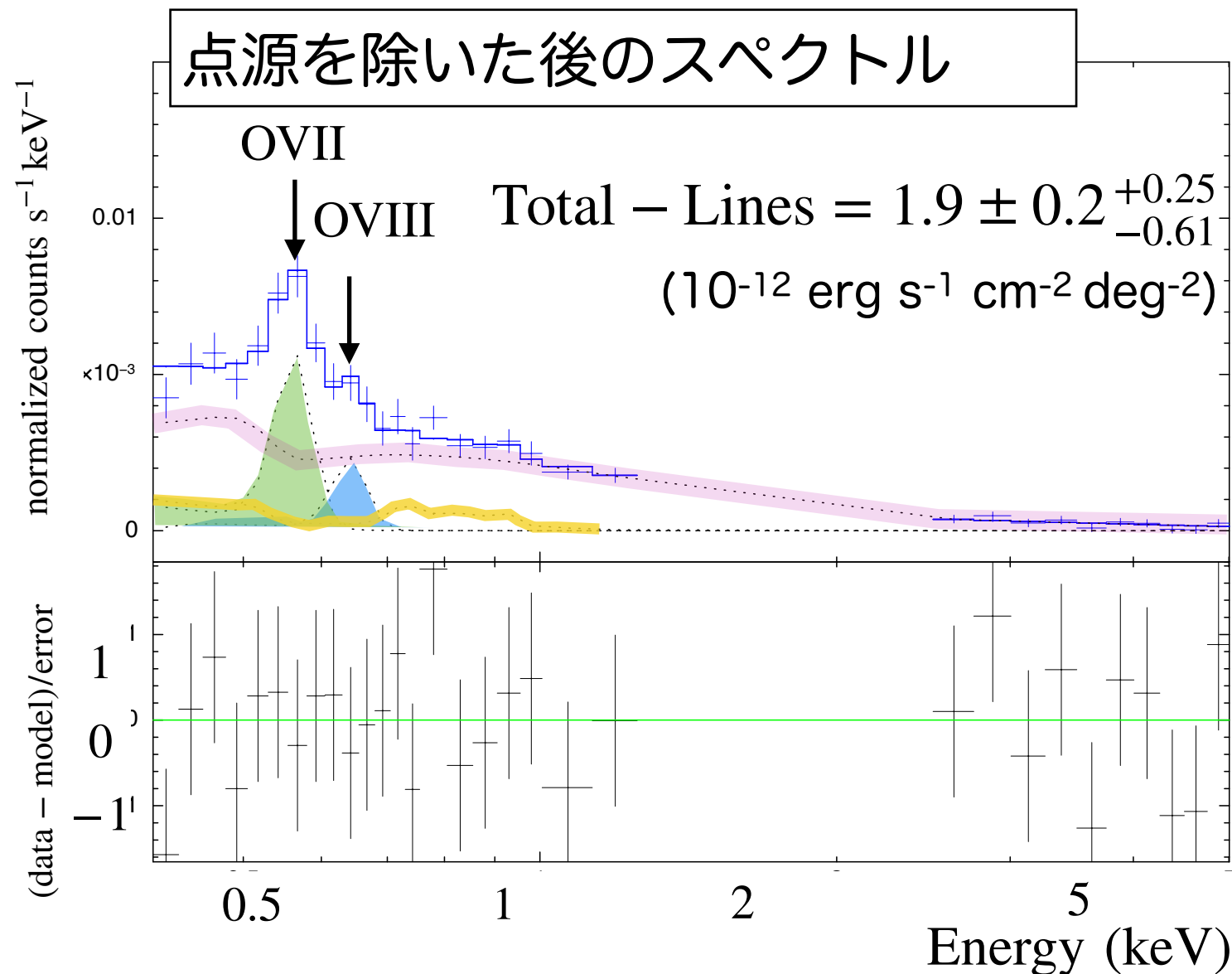
$$\frac{1 - \xi}{\xi} = \frac{S_{2-8}}{\Delta S_{2-8}} = \eta \frac{S_{0.5-1}}{\Delta S_{0.5-1}}$$

$$\eta = \frac{\Delta S_{0.5-1} / \Delta S_{2-8}}{S_{0.5-1} / S_{2-8}}$$

除いた暗いAGNのフラックス (ΔS)

残った暗いAGNのフラックス (S)

0.5-1 keVのOVIIとOVIII以外の表面輝度の内訳



- 銀河系ハロー起源のホットプラズマ（酸素以外: 図内黄色）
 - 酸素以外のアバundanceは、0.3-1 太陽組成比とし、thin thermal 放射で見積もった
 $0.4 \pm 0.4 \pm 0.02$
- 暗いAGNの集まり
 - 2-8 keVの点源分解率とスペクトルの形を仮定（ベキ1.4-2.0）
 $0.77^{+0.03}_{-0.03} {}^{+0.86}_{-0.77}$

上記起源以外の放射の上限値(1.6 σ 統計誤差 + 系統誤差) $2.3 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$ を得た

上記以外の放射の上限値は、WHIMなどの宇宙論起源の合計($\sim 0.8 \times 10^{-12} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ deg}^{-2}$) と矛盾ない

本研究のまとめ（発表内容）

- 暗いAGNの集まりのモデルに最も不定性があるので、できるだけ点源を取り除いた X線背景放射のスペクトルを解析した
 - Chandra Deep Field - South の 7 Msec (約80日) に基づく点源リストを同方向の XMM-Newton の長期間 (3.6 Msec) に適用し、点源を除いた
- XMM-Newton を用いた背景放射の解析で遭遇した様々な困難 → 新しい手法を導入し解決した
- 以下の結果を得た
 - 点源を除く前後で、OVIIとOVIIIの表面輝度は誤差の範囲で一致していた
 - 従って、OVIIとOVIII は真に広がった放射である。
 - 3成分以外の成分についての上限値を求めた (右図)
 - 宇宙論起源の約20%と比較して矛盾ない結果であった

X線背景放射 (0.5-1 keV) の内訳

