

論文内容の要旨

Suzaku Investigation of Hard X-ray Emission Associated with the Galactic Center Region

(「すざく」衛星による銀河中心領域に付随した硬 X 線放射の研究)

田村 健一

我々の銀河の中心領域は、無数に存在する銀河の中で最も近い銀河の中心であり、個々の現象を区別して観測できる唯一の領域である。この領域からは、広がった強い X 線放射 (X 線拡散放射) が観測され、そのスペクトルの形から 1 億度に及ぶ高温プラズマの存在が示唆されている。一方で 10 keV 以上の硬 X 線帯域では、検出器性能の限界から、硬 X 線放射の観測は未だ実現していない。2005 年に打ち上げられた日本の「すざく」衛星は、高いエネルギー分解能を持つ X 線 CCD カメラ (XIS) と硬 X 線から数百 keV のガンマ線にかけて高い感度を持つ硬 X 線検出器 (HXD) を搭載している。非常に興味深いことに、「すざく」衛星の初期の観測による XIS データを用いた解析により、高温プラズマからの熱的放射に加えて、10 keV 以上まで伸びる非熱的放射の存在が示唆された (Koyama et al. 2007)。この非熱的放射が実在するものであれば、銀河中心領域において粒子加速を伴う高エネルギー現象が存在することとなり、そのスペクトルの形や分布を調べることで、銀河中心の高温プラズマの起源や粒子加速の源を探るうえで大きな手がかりとなる。

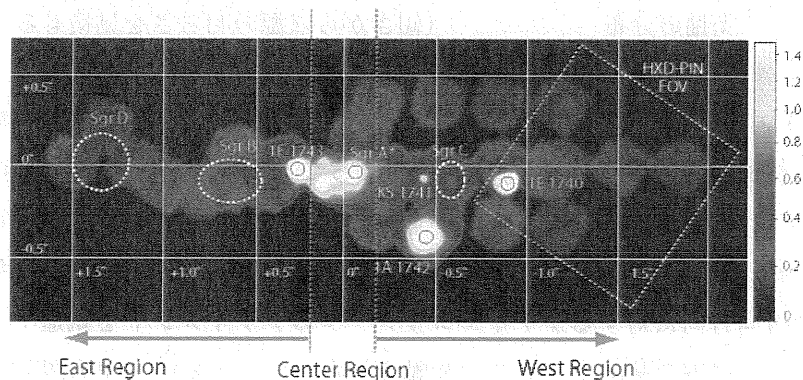


図 1 : XIS による銀河中心領域のイメージ (2-10 keV)

我々は、「すざく」衛星によって、銀経方向に ± 2 度、銀緯方向に ± 0.5 度の銀河中

心領域に対して、合計 1 Msec、35 ポインティングにも及ぶマッピング観測を実施した (図 1)。「すざく」衛星搭載の HXD の PIN 検出器 (HXD-PIN) は、10 keV 以上の硬 X 線領域において高い感度と絞られた視野 (0.5 度 \times 0.5 度、FWHM) を持ち、拡がった放射を調べる上で、インテグラル衛星やスイフト衛星などの符合化マスクを用いた衛星よりもはるかに適している。

しかし、0.5 度角という絞られた視野であっても、点源の密度の高い銀河中心領域では、視野内に混入する硬 X 線点源を完全に避けることは難しい。よって、銀河中心領域に付随する非熱的放射の存在を明らかにするためには、それらの点源が、得られたデータから NXB のみを差し引いたフラックスに対してどれだけ寄与するか、精度良く見積もることが重要である。そこで我々は、HXD-PIN の角度応答を軌道上で詳細に校正し、インテグラル衛星による硬 X 線領域のモニター観測のデータから 1 mCrab 以上の強度で混入する点源の寄与を全て評価して、視野内の硬 X 線源の差し引きを行った。

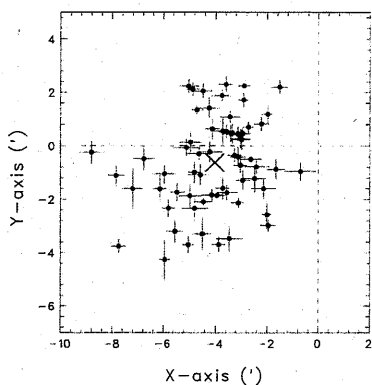


図 2: ファインコリメータの光軸の分布

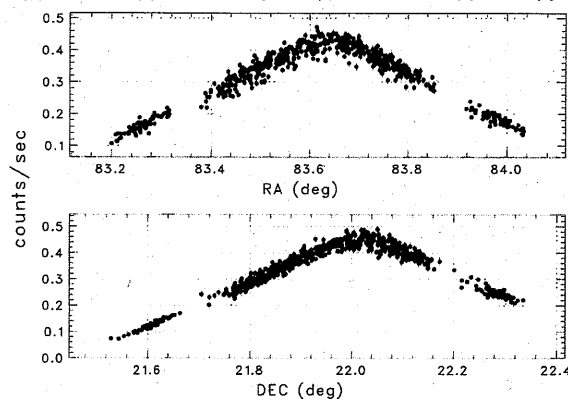


図 3: 「カニ星雲」による角度プロファイル。
(傾きから点源の明るさを見積もることが可能。)

HXD-PIN は 64 個の PIN 型半導体検出器で構成され、各 PIN 検出器の上に設置している計 64 本のファインコリメータによって、視野が 0.5 度角に絞られている。60 keV 以下ではコリメータは完全に不透明であるため、PIN の角度応答は、1 本 1 本の光軸の違いによって個性を持つ。我々は、「カニ星雲」に対するスキャン観測を実施し、衛星の指向方向に対するファインコリメータのアライメントを軌道上において直接測定し、1 分以内の精度で 64 本の光軸を決定した (図 2)。この結果は、HXD-PIN によるスペクトルの絶対強度を決定する基準となるもので、データベースとして全世界に公開されている。また、これらの光軸のばらつきを積極的に利用することで、我々は撮像能力を持たない HXD-PIN を用いて視野内に混入した点源の寄与を見積もる方法を新たに考案し、実際の観測にも適用した (図 3)。

我々は、まず XIS のデータを詳細に解析し、Koyama et al. (2007) によって示された、(銀径, 銀緯) = (0°, 0°) 付近の軟 X 線エネルギースペクトルが、6 keV 程度の高温プラズマからの熱的放射と、べき関数型の非熱的放射との足し合わせで説明できるという描像が、観測した全領域において、表面輝度の違いだけでどこでも成り立つことを確認した。さらに、軟 X 線スペクトルの連続成分の表面輝度分布を作成した。

次に、HXD-PIN の視野内に含まれる硬 X 線点源の個数によって観測データをクラス分けした。まず、既知の硬 X 線点源が視野内に 1 個も入らず、点源の見積もり系統誤差に影響されない銀径 = -1.8 度の観測をクラス A と定義した。この観測において、XIS と HXD-PIN の視野の違いを考慮して広帯域スペクトルを解析した結果、高温プラズマからの熱的放射に加えて、光子指数 2.3 ± 0.1 のべき関数で表される放射が銀河中心から 2 度も離れた領域においても確かに存在することを示した (図 4)。

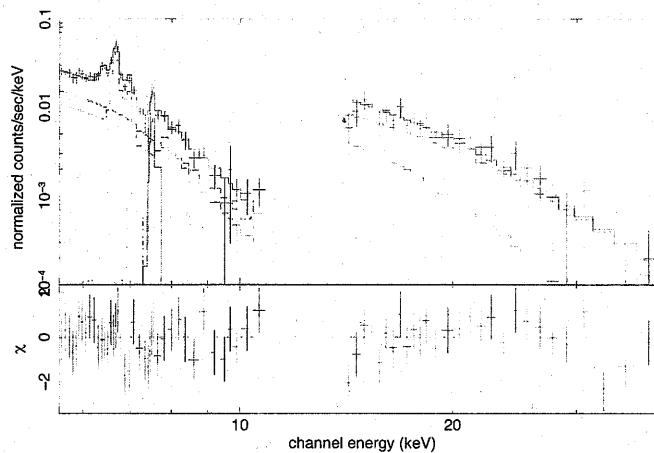


図 4 : XIS と HXD-PIN による広帯域スペクトル (クラス A の観測)

次に、視野内の点源の個数が 1 個しかない、計 8 観測をクラス B と定義した。これらの点源の明るさを、XIS による直接観測結果、インテグラル衛星のライトカーブからの内挿 (IBIS 法)、および視野が隣接する観測データを用いた見積もり法の 3 つの評価法によって見積もった。3 つの見積もり法による点源からの寄与は誤差の範囲内で一致した。その寄与を HXD-PIN のスペクトルから差し引き、クラス A と同様に広帯域スペクトルを解析した結果、クラス B の全ての領域にもべき関数型の放射が存在し、その光子指数が 1.8 - 2.5 の間に含まれることを示した。さらに、少なくとも 30 keV までは、それらのスペクトルに折れ曲がりがないことが分かった。

最後に、クラス A, B 以外の観測の点源の寄与を IBIS 法によって見積もり、差し引いた後の 14-40 keV のフラックスを銀径に対してプロットすることで、銀径 ± 2 度の硬 X 線表面輝度分布を作成した。系統誤差が大きく、軟 X 線の分布と同じであるかどうか

かを有意に評価することはできないが、両者の分布は良く似ているようである。もし、両者の分布が一致すると仮定すると、銀径 ± 2 度、銀緯 ± 0.5 度の領域で14–40 keVにおける、べき型関数の放射の総放射量は、 $4 \pm 0.4 \times 10^{36}$ erg/sec と求まる。

我々は、検出した硬 X 線拡散放射が暗い点源の重ね合わせで説明が可能であるか検討した。HXD-PIN で得られた硬 X 線スペクトルの形から、暗い点源の候補は Intermediate Polar (IP) と呼ばれる激変星に限定される。そこで、銀河中心領域のほぼ全ての IP を検出していると考えられる、チャンドラ衛星による観測結果と比較したところ、暗い点源の重ね合わせでは検出フラックスの10–30%しか説明できず、銀河中心領域全体に拡がった非熱的放射が確かに存在することを示した。

本研究で示唆されたように、もし熱的成分と非熱的成分が相関するならば、2つの放射メカニズムが全く異なる成分が、同一の起源において発生していることを示唆する。すなわち、高温プラズマの加熱と、非熱的高エネルギー粒子の加速を同時に起こすような物理現象が、銀河中心領域の広がったスケールにおいて起きているか、あるいは、空間分解できないほどに暗い個々の未知の天体で普遍的に起きているかであると考えられる。

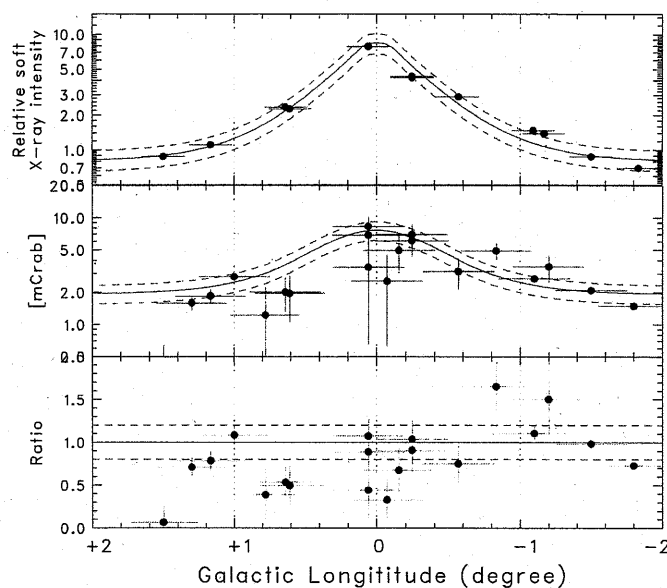


図5：(上) 軟 X 線表面輝度分布。赤がデータ点、青線は分布モデルを XIS の視野で丸めた形を示す。(中) 硬 X 線表面輝度分布。赤がデータ点、青が分布モデルを HXD-PIN の視野で丸めた形を示す。(下) 硬 X 線のデータ点と青線の比。破線は、XIS 分布から分布モデルを求めた際のフィッティングエラー20%を示す。