

論文内容の要旨

Non-thermal Emission from Supernova Remnants Observed with Suzaku and Its Implications for Cosmic-ray Acceleration

すざく衛星による超新星残骸からの非熱的放射の研究と 宇宙線加速への示唆

田中 孝明

はじめに

宇宙線がどこで、どのように、どのエネルギーまで加速されているのか、という問題は、1912年のVictor F. Hessによる宇宙線発見以来、物理学の大きな問題とされてきた。超新星残骸において形成される強い衝撃波は、加速の現場としての有力な候補であると考えられてきた。近年のX線天文衛星の観測によるシェル型超新星残骸からの高エネルギー電子からのシンクロトロンX線放射の検出や、チェレンコフ望遠鏡を用いたTeVガンマ線の検出により、粒子が $\sim 10\text{--}100$ TeVという高いエネルギーにまで実際に加速されている証拠が得られるとともに、超新星残骸における粒子加速機構や放射機構の手がかりが明らかになりつつある。しかしながら、ガンマ線を放射している粒子が陽子なのか電子なのか、シンクロトロンX線を放射する電子とガンマ線を作り出す粒子とはどのような関係になっているか、粒子の正確な最高加速エネルギーはどこなのか、という問題は未だにわかっていない。

2005年7月に打ち上げられた日本のX線天文衛星「すざく」は、その広い観測帯域と高い感度で、超新星残骸からの非熱的放射を観測することで、加速された電子成分のエネルギー分布、最大エネルギーを正確に求め、宇宙線加速の謎を解く重要な手がかりを与えると期待されている。特に、そこに搭載されている硬X線検出器(HXD)は、未開であった10 keV以上のエネルギー帯域で過去最高の感度を誇り、今までほとんど観測されていなかった、超新星残骸からの10 keV以上の硬X線放射を正確に求めることを可能にした。私はHXDチームの一員として、その開発段階から貢献してきた。

本研究は、最大エネルギーにまで加速された電子からのシンクロトロン放射をこれまでに測られないことのない硬X線領域において高い精度で観測することで、超新星残骸における宇宙線加速機構の理解を進めることを目的とする。本研究では、HXDによる高感度観測の実現には不可欠な軌道上の較正作業と応答関数の構築を行った。さらに、すざく衛星によって超新星残骸からの ~ 50 keVにまで伸びるシンクロトロンX線の検出に成功、その結果に基づき、超新星残骸における粒子加速に関する議論を行う。

すざく衛星搭載 HXD-PIN 検出器の応答関数の構築

すざく衛星搭載の HXD は、深い井戸型のアクティブシールドの底に主検出器を配置し、徹底的にバックグラウンドを除去することで、過去最高の感度を目指した検出器である。本論文では、主検出器のうち低エネルギー帯域 (10–70 keV) をカバーし、超新星残骸からの非熱的放射を検出するために用いられる計 64 個のシリコン PIN ダイオード検出器の軌道上較正と、天体からの放射を評価する際に必須となる応答関数の構築を行う。

エネルギー較正のためには指標となる特徴的スペクトル構造が必要である。本研究で、イベント抽出を工夫することで HXD 内部で生成される蛍光 X 線を抜き出し、これにより較正を行う方法を確認した。応答関数構築においては、軌道上のデータとモンテカルロシミュレーションを物理的考察とともに比較しながら、検出器の空乏層厚などのパラメータを推定した。結果として、X 線観測の標準光源である「かに星雲」のスペクトルを他の硬 X 線観測衛星と矛盾のないスペクトルパラメータで再現することができた。本論文で構築した較正パラメータや応答関数は、すざく衛星のデータ解析用ソフトウェアとともに、世界中の研究者に公開され、用いられている。

すざく衛星による超新星残骸の観測と粒子加速への示唆

我々はすざく衛星を用いて、超新星残骸 RX J1713.7–3946 の約 3 分の 2 をカバーする全 11 観測を行った。この超新星残骸の X 線放射は、熱的成分が全く見えず、シンクロトロン放射と考えられる非熱的成分に支配されている。また、TeV ガンマ線でも非常に明るい天体であることから、現在、宇宙線加速研究という観点で、最も重要な天体の一つである。

我々は、すざく衛星による観測の結果、50 keV にまで伸びるシンクロトロン X 線の検出に成功した (Figure 1)。これは、100 μG という大きな磁場を仮定したとしても電子が 100 TeV を超える高いエネルギーにまで加速されていることを示す。さらに、我々は、Figure 1 にあるように、すざく衛星によって検出されたスペクトルにより、10 keV に明確なカットオフがあることを示した。このカットオフのエネルギーは、電子からのシンクロトロン放射のモデルを用いて、6.8 keV と求まる。電子加速の時間スケールとシンクロトロン冷却の時間スケールの釣り合いからを考えると、カットオフエネルギーから衝撃波速度を導出でき、その値は $v_s > 4000 \text{ km s}^{-1}$ となる。これは、RX J1713.7–3946 の年齢と大きさから非現実的な値であり、標準的な衝撃波加速理論で考えられているよりも早いタイムスケールで粒子を加速する枠組みが必要であることが示唆された。

超新星残骸における粒子加速プロセスを多波長スペクトルから研究するため、すざく衛星によるスペクトルを、TeV ガンマ線データおよび電波のデータとともにモデル化することを試みた (Figure 2)。ガンマ線の放射機構としては高エネルギー電子が宇宙背景放射を逆コンプトン散乱によって叩き上げることによる放射と加速された陽子から生じた π^0 が崩壊することによる放射の 2 つが考えられている。すざく衛星の結果により、2 つのシナリオのいずれかを棄却することはできないが、すざく衛星の 2 桁にわたる高い精度のスペクトルは、それぞれの場合について、磁場の大きさや、加速粒子のスペクトル指数、粒子の注入量などのパラメータをはじめ厳しく制限した。

HXD とともにすざく衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ、XIS は、低いバックグラウンドと高い検出効率を持つため、空間的に広がった暗い放射に関しても、X 線輝度分布を正確に調べることができる。我々はその利点を活かして XIS による X 線画像 (Figure 3; 左図) と *H.E.S.S.* 望遠鏡による TeV ガンマ線画像 (Figure 3; 右図) の詳細な比較を行った。Figure 3 は、RX J1713.7–3946 の領域毎の X 線フラックスとガンマ線フラックスの関係を示したものである。この図にあるように、両者には非常に強い相関があることがわかった。TeV ガンマ線放射機構が逆コンプトン散乱であれば、X 線とガンマ線は同一の粒子からの放射を見ていることになるので、この強い相関は、磁場が一様であれば、自然に説明される。一方、ガンマ線が π^0 崩壊による放射であるとすれば、ガンマ線の放射源である陽子が加速される量と X 線の放射源の電子が加速される量が比例関係になければならないことを示唆する。また、Figure 3 により、放射の強い場所では、X 線/ガンマ線の比が大きくなることが明らかになった。

HXD は、コリメータによってその視野が $35' \times 35'$ と狭く制限されているため、10 keV 以上の硬 X 線領域でも RX J1713.7–3946 からの放射の空間分布を探ることを可能にした。HXD の角度応答を考慮しながら、データを検証したところ、硬 X 線の輝度分布は 10 keV 以下の輝度分布と大きく矛盾しな

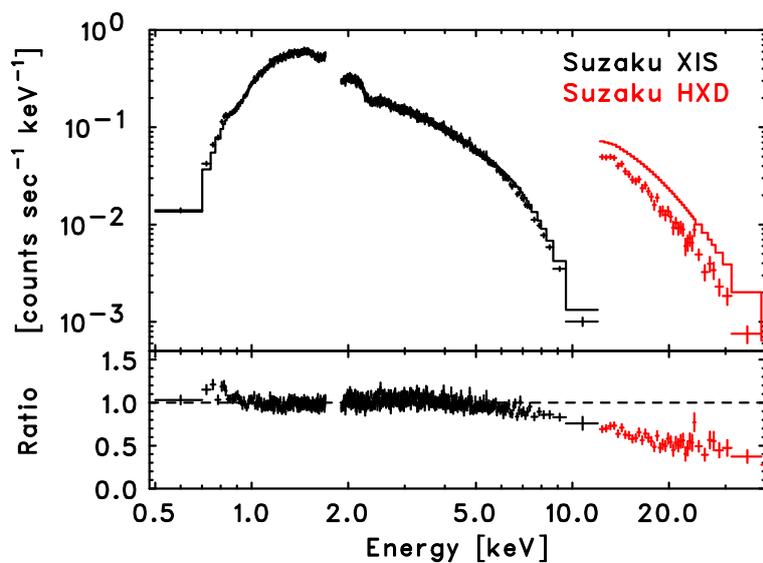


Figure 1: すざく衛星により検出されたRX J1713.7-3946からのシンクロトロン X 線スペクトルと単純なベキ関数を検出器の応答のかかった状態で表示したもの。下は観測データとベキ関数モデルの比を表す。黒は X 線 CCD カメラ、XIS のデータ、赤は HXD のデータを表す。

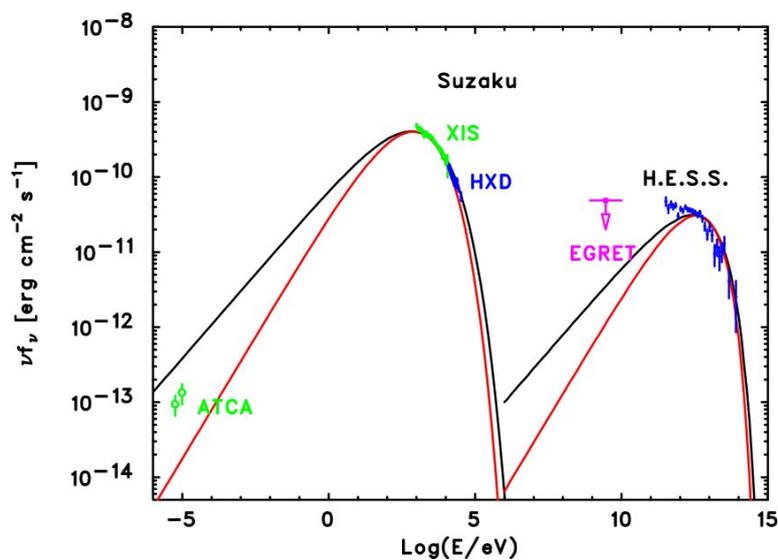


Figure 2: RX J1713.7-3946 の電波から TeV ガンマ線までの多波長スペクトル。曲線は加速された電子からのシンクロトロン放射と逆コンプトン散乱による放射を計算したモデル。

いことがわかった。このような結果ははじめてである。また、超新星残骸の中心領域では、スペクトルが外側の領域と比較してハードなことが示唆された。これは、加速された電子のエネルギー分布が、その最高エネルギー付近で場所ごとに異なることを反映していることを示唆する。

本研究により、すざく衛星搭載のHXDは超新星残骸からの非熱的硬X線放射の測定を初めて可能にすることを示し、シンクロトロンカットオフなど今まで見られなかった放射の特徴を明らかにした。また、多波長でのスペクトルスタディや放射の空間分布から、磁場、高エネルギー粒子の生成量などのパラメータに制限をつけたり、それらの間の相関を示すことができた。

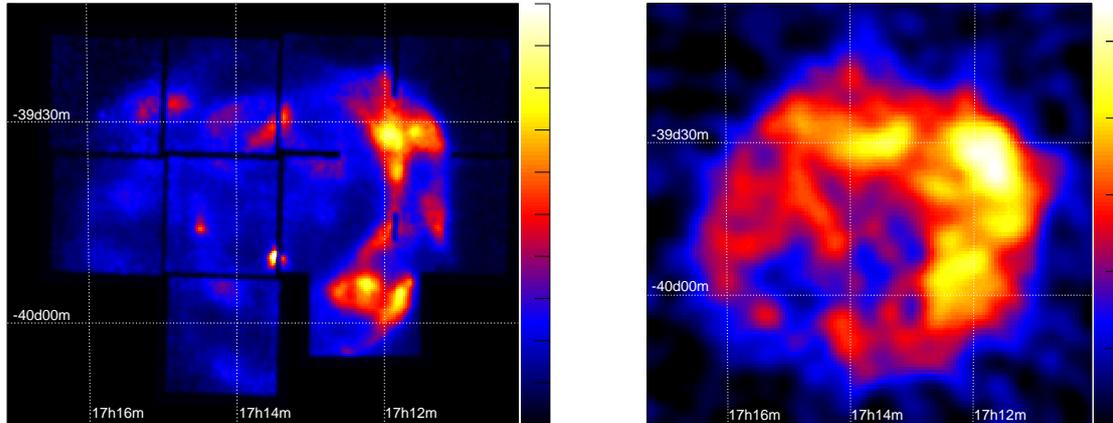


Figure 3: すざく衛星に搭載されている X 線 CCD カメラ、XIS で得られた X 線画像（左）と *H.E.S.S.* 望遠鏡による TeV ガンマ線画像（右）。

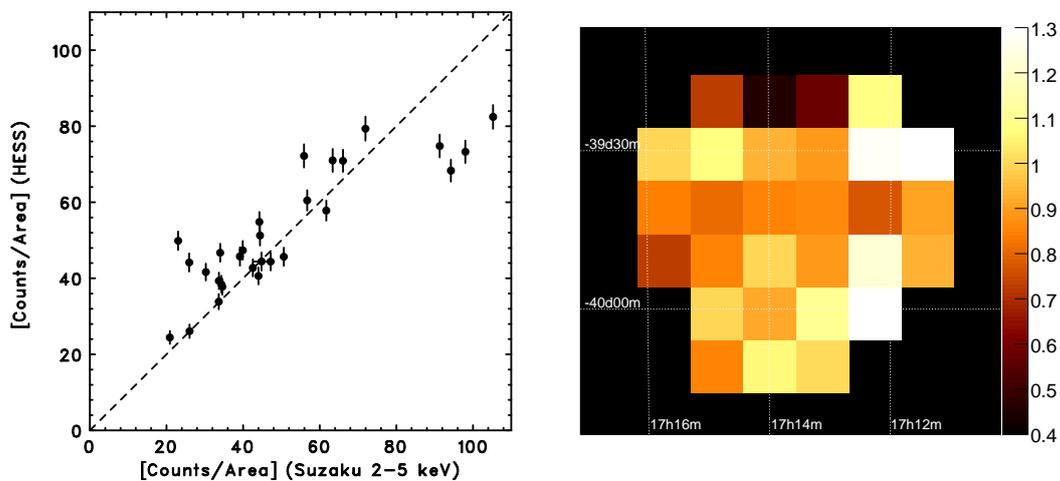


Figure 4: XIS と *H.E.S.S.* 望遠鏡の場所ごとのフラックスの比較（左）と X 線フラックス/TeV ガンマ線フラックス比のマップ。