

氏 名	なか じま ひろし 中 嶋 大
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3122 号
学位授与の日付	平 成 19 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	Study on Energetics and Particle Acceleration on Superbubbles and Development of X-ray CCD Cameras onboard the <i>Suzaku</i> satellite (スーパーバブルのエネルギー収支と粒子加速の研究及びすざく衛星搭載 X 線 CCD カメラの開発)
論文調査委員	(主 査) 教 授 小 山 勝 二 教 授 笹 尾 登 助 教 授 鶴 剛

論 文 内 容 の 要 旨

スーパーバブル (SB) は大質量星からの強い星風及び連鎖的超新星爆発 (SNe) によって形成される, 半径 100~1000pc に及ぶ大規模シェル構造である。系内 SNe の大部分が SB 内で爆発するため, 銀河内の主要なエネルギー供給源である。また連鎖的 SNe により, 単一超新星残骸 (SNR) に比べ衝撃波における粒子加速が長時間持続すると考えられる。現在は銀河系内宇宙線の加速源として単一のシェル型 SNR での衝撃波加速が最有力候補であり, 実際これらの天体からシンクロトロン X 線が観測され, 10^{13-14} eV まで加速された電子が存在することが証明されている。しかし系内に起源を持つと考えられる宇宙線の最高エネルギーには及んでいないため, 申請者等は単一 SNR を凌ぐ加速源候補天体として SB に注目した。SB 内部の高温ガス及びシンクロトロン放射の観測には X 線が最適だが, 特に SB は低輝度の広がった放射を示すため, 有効面積が大きくバックグラウンドレベルの低いすざく衛星が最も有利である。また SB 内部のプラズマ状態を正しく決定できるかは検出器のゲイン・エネルギー分解能が左右するため, すざく衛星の上記パラメタを高精度構成する事が本研究の鍵となる。

そこで申請者はすざく搭載検出器中唯一撮像可能な主力検出器 X 線 CCD カメラ (XIS) の打ち上げ前地上較正実験及び打ち上げ後の軌道上較正実験を行った。X 線 CCD は, 入射 X 線の光電効果により生成された電荷を読み出し口まで転送し電圧変換する。読み出し口までに電荷を漏らさず転送出来れば入射 X 線のエネルギーを正しく決定できるが, 軌道上で受ける放射線損傷により転送効率が徐々に落ちていき, ゲイン及びエネルギー分解能が劣化していく。1ピクセルの転送で電荷を損失する割合を電荷転送非効率 (CTI) と呼ぶ。CTI の値は転送列毎に異なり, また時間的に単調増加するためこれを頻繁に測定し, 損失電荷量を補正する事が重要である。すざく以前の衛星では天体や較正線源の波高値から CTI を決めていた。しかしこの方法では統計が少なく, CTI 値を頻繁に決定するには転送列間で平均せざるを得ず, 転送列毎の CTI を求めるためには数ヶ月から数年の時間を費やしてしまう。そこで XIS では衛星搭載 X 線 CCD として世界初の機能である電荷注入 (CI) 機能を用いた電荷補正を行う。これは各転送列に人口電荷を注入して読み出す事で転送列毎の CTI を測定するものである。

実際に申請者は軌道上実験において初めて転送列毎の CTI 測定に成功した。また, 較正線源のスペクトルにおけるライン幅が, 従来の転送列間平均した CTI 値による電荷補正を行った場合 (193eV) に比べ, 173eV と大きく改善されることを証明した。

上記のように性能を引き出した XIS 及び他衛星を用いて SB の X 線観測を行った。観測対象は, 大マゼラン雲内の SB である 30 Dor C と N44, 及び銀河系内の SB 形成現場候補天体である, Sgr C と CTB37 A である。その結果, 30 Dor C からはシェル状の硬 X 線放射が見られた。他波長のイメージとの相関からシンクロトロン放射と考えられ, SB からは初めてとなる粒子加速の間接的証拠を得た。電波放射の強度・ベキと X 線放射の観測結果, 及び仮定した磁場強度から, 加速電子の最高エネルギーは約 90TeV と単一 SNR とほぼ変わらない値であるが, SB の年齢 (約 1Myr) から, 単一 SNR の場

合（約 1000yr）よりも非常に長い期間粒子加速が継続していることを証明した。一方、N44 や系内のサンプルからは非熱的 X 線は検出されなかった。N44 については、SB 内部の大質量星メンバーから予想した、星風と SN によるエネルギー注入量が、ほぼ全て高温ガスの熱的エネルギーに変換されていることが分かった。非熱的 X 線放射の有無を決める条件を調べるためさらに系統的研究が望まれる。

論文審査の結果の要旨

銀河を満たす宇宙線のエネルギー密度は宇宙背景放射、磁場、星間ガスのエネルギー密度に匹敵し、宇宙の主要な構成要素であるにも関わらず、その加速源は宇宙線の発見以来100年以上に渡り謎となっている。近年複数のシェル型超新星残骸（SNR）からシンクロトロン X 線放射が発見され、衝撃波加速が最有力候補と考えられている。しかし観測された加速エネルギーは系内最高エネルギーに 1～2 桁及ばない。したがって系内最高エネルギー宇宙線を説明するためには別種の加速源天体が必要となる。申請者らはその有力候補としてスーパーバブル（SB）を考えた。SB は多重超新星爆発（SN）と大質量星からの星風の混合作用で形成される巨大なシェル構造であり、多重 SN によって衝撃波加速が単一 SN に比べて長時間持続するため、宇宙線の到達最高エネルギーも単一 SN に比べ高くなると予想できるからである。

SB の X 線観測において大有効面積・低バックグラウンドのすざく衛星搭載 XIS 検出器は最も適した検出器である。しかし打ち上げ後1年が経ち、放射線損傷を受け続けている XIS はゲイン及びエネルギー分解能が徐々に劣化している。これによりすざくの分光能力が落ち、粒子加速に代表される非熱的放射を熱的放射成分と分離することが困難になれば、SB 内の高温プラズマや非熱的 X 線の探査に影響するのみでなく、すざく衛星の存在価値に関わる重要な問題であり、すざくを用いる世界中の X 線天文学者にとって打撃となる。

そこで申請者は衛星搭載 X 線 CCD としては初めての機能である電荷注入機能の有効性を地上実験で実証し、新たな電荷補正方法を確立した後、これを軌道上に応用する事でエネルギー分解能を有意に改善させ、世界最高の分光能力を維持させた。さらにゲインについても他衛星を凌ぐ高精度で決定することに成功した。この申請者の較正結果は自身の研究成果に直結するのみならず、すざくがあげた様々な科学的成果の原動力となっている。これに代表されるように、申請者は XIS の地上及び軌道上較正実験において常に主導的役割を担い、XIS の世界最高の分光能力を証明してきた。

上記のように自ら性能を最大限引き出した XIS 等を用いて申請者は SB の X 線観測を行い、30 Dor C のシェルからの非熱的 X 線を発見した。電波放射の強度及び放射スペクトルのベキ、さらに磁場強度を仮定する事で求めた電子の加速最高エネルギーは単一 SNR の場合とほぼ一致する程度であったが、これは SB 内部において単一 SNR よりも非常に長い期間粒子加速が継続している事を実証する重要な観測的証拠である。この非熱的 X 線放射は 30 Dor C からのみ見られ、N44, Sgr C, CTB37 A など他の SB にまで共通するものではなかった。非熱的 X 線放射の有無を決定づける条件はまだ不明であるが、今後 SB のサンプルを増やし、各天体の特徴を比較する事で系統的に明らかにすることが望まれる。

申請者は以上の研究成果の一部を論文としてまとめ既に公表をしており、また現在投稿中の論文もある。学位申請論文に関する研究は共同研究であるが、申請者の貢献は多大であることを確認した。共著者の承諾が得られている。よって、本論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。