

論文内容の要旨

Study of Non-thermal X-ray Emission Produced by Sub-relativistic and Ultra-relativistic Particles in Supernova Remnants

(超新星残骸における粒子加速と非熱的X線放射の研究)

内山 泰伸

はじめに

相対論的エネルギーにまで加速された高エネルギー荷電粒子が、大きなエネルギー密度を持って宇宙のあらゆる階層に存在していることが、荷電粒子が放射する電波・X線・ガンマ線を観測することにより明らかになってきた。高エネルギー粒子の加速は、超新星爆風から銀河系外ジェットに至るまで多様な環境で見られる宇宙における普遍的な現象である。そのような高エネルギー粒子の代表的なものが地球に降り注ぐ宇宙線であり、銀河系の星間空間に存在する宇宙線のエネルギー密度は、およそ 1 eV cm^{-3} ($1.6 \times 10^{-13} \text{ joule m}^{-3}$) と、ほぼ星間ガスの圧力に匹敵している。こうした宇宙線は、地上で観測される物理現象とは異なった様相を示す宇宙の高エネルギー現象のプロブとなるばかりではなく、銀河のエネルギー収支を理解する上で極めて重要である。そのため、その生成機構の解明と加速領域の特定は、高エネルギー天文学における中心課題である。

銀河系内の宇宙線の加速に関しては、超新星爆発によって星間空間に形成される強い衝撃波の関与が確実視されている。X線によるイメージとスペクトルの観測により、こうした衝撃波面の近傍で加速され、数 GeV から 100 TeV という高いエネルギーを持つ粒子を探索することが可能である。本論文では、このような観点から X線天文衛星による超新星残骸 (SNR) の観測を行ない、sub-GeV 領域のエネルギーを持つ電子と陽子、また multi-TeV 領域にまで加速された電子からの非熱的 X線放射から、粒子加速の機構と加速領域の議論を行う。

Sub-GeV 領域宇宙線の加速

sub-GeV 領域の宇宙線は、銀河内のエネルギー収支の多くを担うと考えられるにも関わらず、これまで、それを特徴づけるような観測は行われてこなかった。われわれは X 線天文衛星「ASCA」を用いて、超新星残骸 γ Cygni を観測し、 γ Cygni と高密度ガスの相互作用領域から、非常にハード（より高エネルギー側に多くの光子が分布）な X 線源（clump C1/C2）を発見した。さらに、その空間構造を明らかにし、X 線スペクトルの「信号雑音比」を上げるため、圧倒的に高い空間分解能を持つ X 線天文衛星「Chandra」による追加観測を行なった。その結果、Clump C1 は、およそ 1 分角（0.5pc に相当）の広がりを持ち、X 線スペクトルはベキ関数でモデル化すると光子指数 $\Gamma = 0.7 \pm 0.7$ となった。X 線フラックスは $0.7^{+0.3}_{-0.2} \times 10^{-12} \text{ ergs cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (2–10 keV) であった。また超新星残骸 RX J1713.7-3946 と相互作用している分子雲からも、非常にハードな X 線源（AX J1714.1-3912）を ASCA 衛星によって発見した（図 1）。その X 線スペクトルは光子指数 $\Gamma = 1.0 \pm 0.2$ の極めて平坦なベキ関数で記述される。

超新星残骸からはじめて発見された「平坦なベキ関数でスペクトルをもつ拡がった X 線源」は、非熱的な放射メカニズムによっていると考えられる。しかし、そのスペクトルの平坦さはシンクロトロン放射や逆コンプトン散乱では説明し難い。そこでわれわれは、sub-GeV 領域の電子や陽子による制動 X 線放射を検討し、その定式化を行った。高エネルギー粒子による X 線制動放射には、高エネルギー電子と静止原子核との間の電磁相互作用によるもの（電子制動放射）と、高エネルギー陽子と静止電子との間によるもの（陽子制動放射）とがある。高密度ガス中での加速の場合、イオン化損失によって、低エネルギー粒子の粒子密度が低い状態で平衡状態に達する。そのために、制動放射 X 線スペクトルでは、数 keV から数 10 keV というような低エネルギー粒子が寄与するのではなく、平衡によって決まる「分布の折れ曲がり」以上の粒子からの放射が主に寄与することになる。この場合の放射は、粒子分布の形にはほとんどよらずに、「折れ曲がり」に対応する「単色の」粒子エネルギー分布からの制動放射スペクトルすなわち光子指数 $\Gamma = 1$ のベキ関数になる ($1/\epsilon$ 制動放射)。これは観測された平坦な X 線スペクトルの形状と一致する。

われわれが本論文において提案した、特徴的な $1/\epsilon$ 制動放射 X 線スペクトルは、他の放射機構による X 線スペクトルから明確に弁別できるため、sub-GeV 領域の宇宙線成分を探索することに用いることができる。これは、どれだけのエネルギー量が爆風のエネルギーから加速された粒子に渡されるかを観測的に明らかにできるという点で重要である。さらに、ガンマ線領域までのスペクトルを取得できれば、陽子加速と電子加速を区別する事も可能であるため、将来の高感度の X 線ガンマ線観測によって、陽子加速を直接解明する方法を提示する。

“TeV SNR” のシンクロトロン X 線放射

X 線領域でのシンクロトロン放射は、加速された電子の上限部に対応しており、最高エネルギー領域の電子のエネルギー分布や空間分布を探ることができる。われわれは、Chandra 衛星により、2つのシェル型の超新星残骸 (SNR) RX J1713.7-3946 および SN 1006 のシンクロトロン X 線放射の研究を行なった。これらの SNR からは TeV ガンマ線が検出されている点で極めてユニークであり、宇宙線の起源を探る上で最も重要な天体である。シンクロトロン X 線を放射する高エネルギー TeV 電子は、放射損失により極めて寿命が短いため、現在、行われている粒子加速の現場を探索できる点が特徴になる。これは寿命の長い電子からのシンクロトロン電波が粒子加速の履歴を反映することと対照的である。

いずれの SNR の外殻のシンクロトロン X 線放射も顕著な微細構造（フィラメントとプラトー）を持つことが Chandra の優れた角度分解能 (0.5 秒角) により明らかになった。図 3 に RX J1713.7-3946

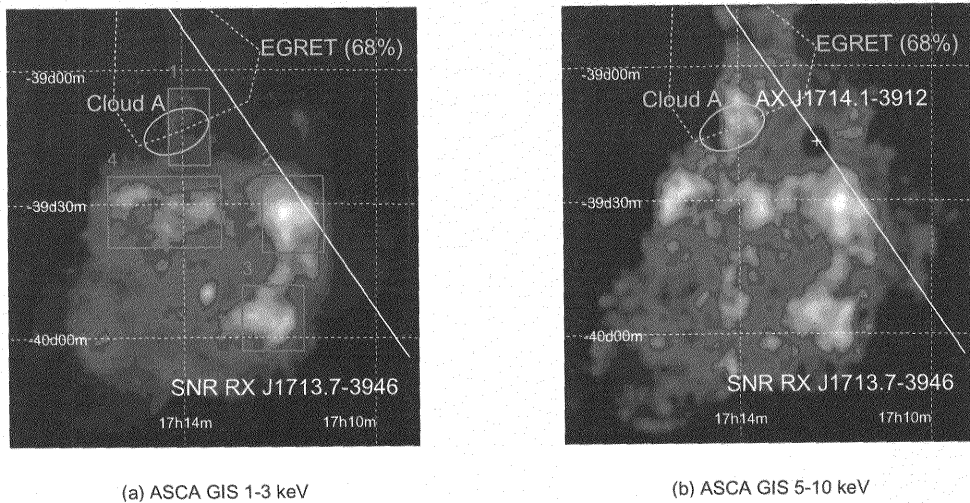


図 1: ASCA 衛星による AX J1714.1-3912 の X 線イメージ

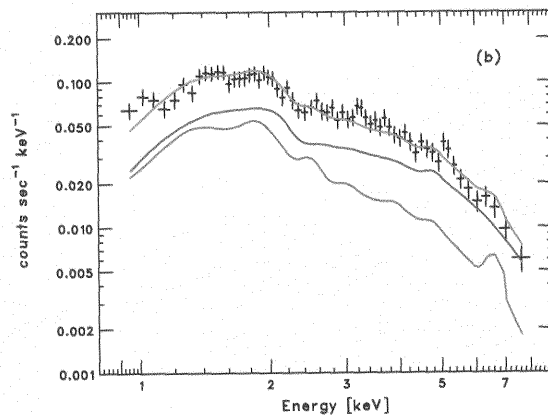


図 2: ASCA 衛星による AX J1714.1-3912 の X 線スペクトル。(青線) AX J1714.1-3912 成分 (緑線) 銀河リッジ成分。

の Chandra による X 線イメージを示す。フィラメントは RX J1713.7-3946、SN 1006 それぞれ 20 秒角、5 秒角の極めて薄い構造を持つものが見い出され、表面輝度は周囲よりも典型的には数倍高い。しかしどちらの場合も積分放射強度はプラトー領域が支配的である。

フィラメントを加速領域だと考えると、われわれの結果は SNR 衝撃波での「加速領域」と「放射領域」を分離することにはじめて成功したと解釈できる。詳細なスペクトル解析を行った結果、RX J1713.7-3946 の場合、シンクロトロン X 線放射は比較的ハード ($\Gamma \simeq 2.2$) であり、最高加速エネルギーに対応する電子のカットオフエネルギーは 10 keV 以上にも達していると推定できる。この結果は標準的な衝撃波統計加速よりも速い加速のタイムスケールを要求している。また SN 1006 の「フィラメント/プラトー」構造もまた衝撃波統計加速の枠組みでは簡単には説明できない。したがってこれら TeV SNR の X 線観測の結果は SNR 衝撃波での加速の標準的パラダイムを転換する必要性を示唆するものである。

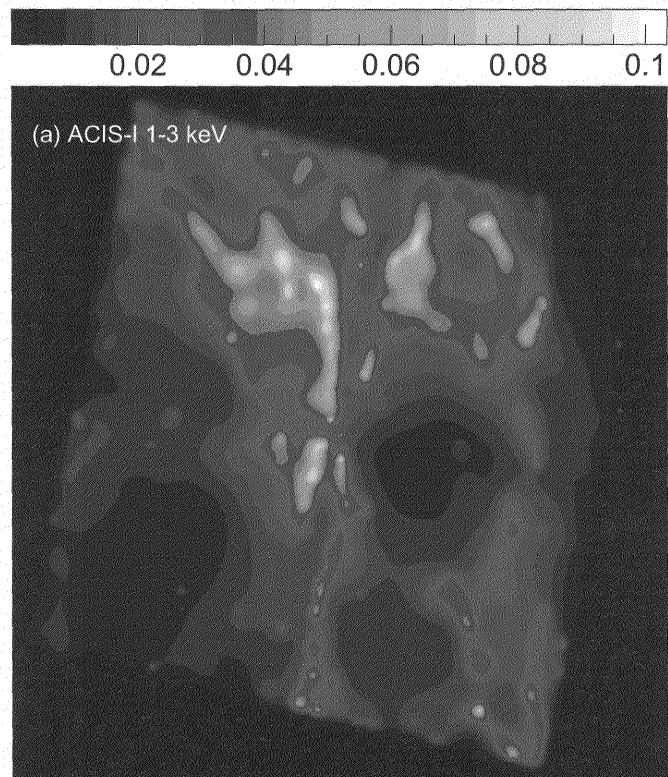


図 3: Chandra 衛星による RX J1713.7-3946 の北西外殻の X 線イメージ。赤・黄がフィラメントでその周りの青がプラトー。