

## 論文内容の要旨

### 論文題目

Detection of TeV gamma-rays from the Supernova Remnant RX J0852.0-4622

[超新星残骸 RX J0852.0-4622 からの TeV ガンマ線の検出]

氏名 片桐 秀明

1912年にV. Hessが宇宙線の存在を発見して以来、そのような高エネルギー粒子がどこで加速されるのか明らかでなかった。宇宙線のエネルギーは、最高 $10^{20}$  eVまでのべき型のエネルギースペクトルを示すが、 $10^{15}$  eV以下では銀河磁場により系内に閉じ込められる。そのような宇宙線のエネルギーは、 $1\text{eV/cc}$ と我々の銀河の大きさを考えると $10^{55}$  ergという莫大なものである。伝播する宇宙線の組成は第一近似では太陽系組成と非常によく似ている。スペクトル、エネルギー収支、組成を考えると超新星残骸(SNR)は最も有力な銀河系内の宇宙線起源であると考えられている。しかし、宇宙線は99%の原子核と1%の電子からなる荷電粒子であり、星間磁場によって軌道を曲げられてしまうため到来方向からは加速源は特定できない。加速源の情報は、加速源における宇宙線の相互作用で生ずる中性粒子である光子やニュートリノによって得ることができる。ニュートリノは相互作用の断面積が非常に小さいため、それを補うだけのフラックスがある天体現象しか捉えることができない。よって、光子が最も有力な宇宙線起源探査のプロブとなる。

10keV程度までの硬X線に至るまでスペクトル観測が可能な衛星が打ち上げられたことでブレークスルーが起こった。ASCAによってSNR SN1006のシェルから非熱的X線が検出された。それをシンクロトロン放射によるものと仮定すると、10-100TeVの高エネルギーまで加速された電子が存在することになる。そのような高エネルギーの電子は、2.7K宇宙背景放射と逆コンプトン散乱を起こしてTeVガンマ線を放射する。CANGAROOグループでは、高エネルギー電子の存在を確定するためにオーストラリアに建設した3.8mの反射鏡を持つ

解像型チェレンコフ望遠鏡 (CANGAROO-I) により、SN1006 を観測し TeV ガンマ線を検出した。これによって高エネルギー電子の加速現場が発見されたと考えられた。しかし、最近になって非線形な加速理論を用いると陽子でも説明可能であることが分かってきた。

RX J1713.3-3946 は SN1006 より X 線による非熱的成分が卓越した天体であるため、もし TeV ガンマ線が検出されれば加速現場の例証を示すことができる。TeV 付近のガンマ線は加速された陽子が付近の星間物質と相互作用した際に生じる  $\pi^0$  の崩壊によっても生ずる。このモデルを識別するにはより低エネルギー領域のガンマ線を測定する必要がある。CANGAROO では、10mの大口径の反射鏡 (CANGAROO-II) によって観測が行われ、400GeV 付近までのガンマ線のエネルギースペクトルを測定した。電波から X 線までの観測と合わせた多波長スペクトルを考慮すると、TeV 付近のガンマ線は高エネルギー電子からの放射では説明できないことが明らかになり陽子が加速されている可能性が示唆された。しかし、宇宙線の SNR 起源をいうには、まだ例数として足らず確立していない。

RX J0852.0-4622 は、Vela SNR と視線方向で重なっている SNR である。ASCA により非熱的な放射が検出されており、粒子加速によって TeV ガンマ線が検出される可能性がある。2002 年、2003 年の 2 年間に渡って CANGAROO-II 10-m 望遠鏡により sub-TeV のエネルギー閾値での観測を行った。合計で 187 時間の観測データが得られた。TeV 領域の宇宙線やガンマ線は、地球の大気との相互作用により空気シャワーを生ずる。この空気シャワーから発生するチェレンコフ光を大口径の反射鏡で集光し、焦点面にあるカメラでそのイメージを捉えることで検出する。カメラは、多数の光電子増倍管で構成されている。これにより微弱な光を高速なデータ収集システムを用いて 100nsec の時間幅のシャッターで撮ることができる。こうすることで夜光の影響を最小にし、空気シャワーに対し高い感度のカメラとなる。ただし、空気シャワーは 99%以上宇宙線によるものなので、ガンマ線に対して検出感度を高めるには、カメラで捉えたイメージを用いた宇宙線イベントの除去が必須である。シャワーイメージは、近似的には楕円形であり短軸、長軸方向の長さなどをパラメータとして用いることができる (イメージング法)。このパラメータを用い、ガンマ線らしさを定量的に判断する likelihood 法を用い宇宙線を除去する。さらにイメージの方向の角度を示す  $\alpha$  というパラメータ (別名 イメージ・オリエンテーション・アングル) を用いる (図 1)。観測する天体から到来するガンマ線は、望遠鏡を向けている軸に水平に空気シャワーを生成するので、 $\alpha$  がほとんどカメラの中心方向を向いている ( $\alpha=0$ )。しかし、宇宙線はあらゆる方向からシャワーを形成するので  $\alpha$  は 0-90 度にランダムに分布する。この  $\alpha=0$  付近のイメージを選ぶことでガンマ線の候補を選び出すことができる。ただし、選んだあとでも宇宙線イベントはガンマ線の数に比べて卓越しているのでバックグラウンド (OFF) の観測を行い、天体の観測 (ON) の  $\alpha$  と比較することで到来したガンマ線の数を見積もる。そのような解析で得られた  $\alpha$  分布を図 2 に示す。プロットが ON であり、斜線が OFF を示している。左から 2002 年、2003 年、合わせたデータをそれぞれ示している。

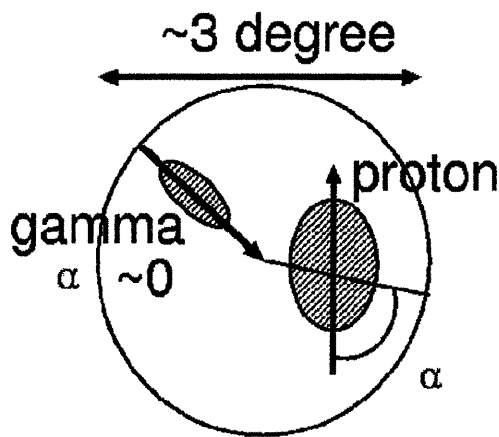


図1.  $\alpha$ の定義

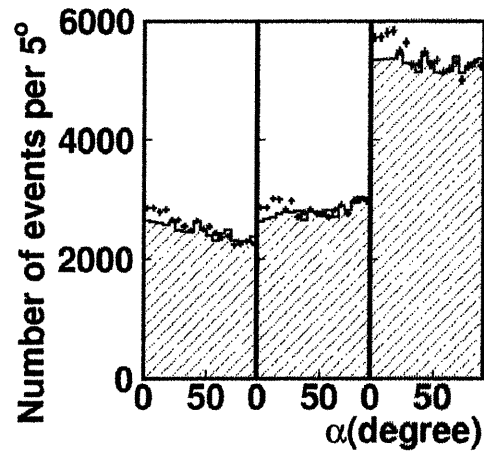


図2.  $\alpha$ 分布。左から 2002 年、2003 年、ALL。

$8\sigma$ の有意な信号が検出されている。さらに得られた信号の数からフラックスを求めると、べき指数が $-4.2 \pm 0.5$ のべき型のスペクトルで強度が1TeVで標準的なガンマ線源であるかに星雲に比べて $0.16 \pm 0.03$ 倍程度であることが分かった。 $\alpha$ 分布から少し広がった天体であることが示唆されるが、エラーの範囲ではポイントソースとも一致している。また、放射分布を調べるために各天球座標における有意度を示したのが図3である。

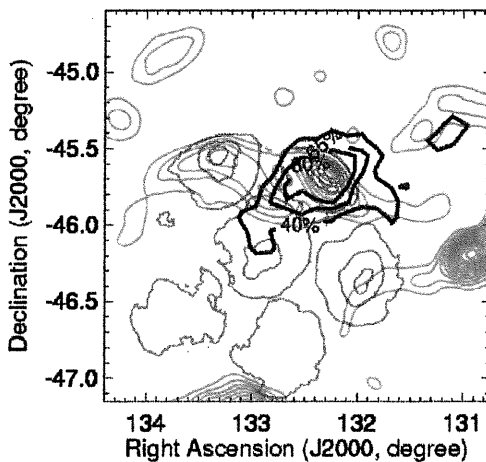


図3. 有意度分布。青、赤、緑が、我々のデータ、ASCAのX線、4.85GHzの電波をそれぞれ示す。

我々のデータと電波及びX線のデータのピークがよく一致している。放射の有意な広がりを仮定すると、この分布から0.14度程度の広がりを持つことが見積もられたが、これは望遠鏡の角分解能0.24度よりも小さくステレオシステムの地上チェレンコフ望遠鏡による解析結果が待たれる。

得られたエネルギースペクトルと他の波長のデータをもとに放射機構を評価した。まず、

高エネルギー電子によるシンクロトロン放射、および逆コンプトン散乱による放射を見積もった (図 4)。図 4 に示すように単純なモデルではうまくデータを説明するこ

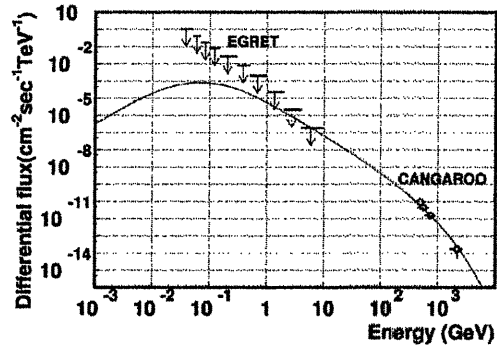
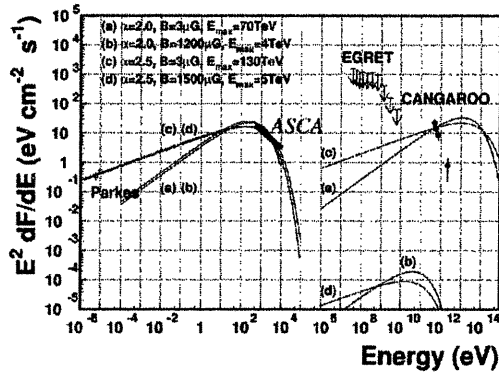


図 4. シンクロトロン/逆コンプトンモデル。 図 5.  $\pi^0$  の崩壊モデル。

とができない。ただし、TeV の放射領域と X 線の放射領域が異なると仮定するとうまくデータをフィットできる (two-zone model)。しかし、多くの未知のパラメータを持ち観測的に決定することが現時点では困難である。次に、 $\pi^0$  の崩壊による放射を見積もった (図 5)。単純なモデルによりデータとよく合うスペクトルが得られる。このモデルを仮定するとこの SNR の宇宙線のエネルギーが  $10^{48} - 10^{50}$  erg、すなわち超新星爆発のエネルギーの 0.1-10% が宇宙線の加速に用いられたとすると、距離 0.5 kpc の仮定のもとで相互作用する分子雲の密度が 5000-50 個/cc となり一般的な分子雲密度となる。

よって現時点では我々のデータは、 $\pi^0$  の崩壊による放射の可能性が高く、逆コンプトン散乱による放射は低いと考えられる。最近 Chandra や XMM-Newton のような高分解能の X 線衛星による観測が行われている。また、世界で次世代のチェレンコフ望遠鏡が建設されていて CANGAROO でも 4 台の望遠鏡を用いたステレオ観測 (CANGAROO-III) が 2004 年には始まる。Sub-TeV 領域のエネルギーにおいても 0.05 度の高分解能での観測が可能となり、X 線との観測と合わせてより詳細な加速現場の環境を知ることができるようになり、上記の two-zone model に対し強い示唆を与えることが可能となる。RX J0852.0-4622 は TeV ガンマ線で検出された SNR の中で最も大きいので精密な空間構造の研究に有利である。また、NANTEN の観測により、もし TeV の放射の付近に分子雲が存在していれば、 $\pi^0$  の崩壊によるガンマ線であることを強く示唆できる。今後これらの新しい検出器によって多くの SNR について放射機構が決定されれば、SNR が銀河内宇宙線の加速源であることを立証できるであろう。