

論文内容の要旨

論文題目 Very High Energy Gamma-ray Observations of the Galactic Center
with the CANGAROO-II telescope

(和訳) (CANGAROO-II 望遠鏡による銀河中心の超高エネルギーガンマ線観測)

氏名 土屋 兼一

天体からの超高エネルギーガンマ線観測の目的は、宇宙線の加速現場の発見と加速機構の解明である。星間磁場により、電荷を持った宇宙線の加速された場所の特定は困難であるのに対し、宇宙線との相互作用によって生成されたガンマ線は、磁場の影響を受けず直接地球に届く。また、ガンマ線のスペクトルは、宇宙線の最大加速エネルギーやべき乗のスペクトルを反映しているため加速機構を知る重要な手がかりとなる。

CANGAROO グループは超新星残骸 SN1006 の観測により、電子の逆コンプトン散乱による TeV ガンマ線を発見した。X 線観測衛星 ASCA で観測されていたシンクロトロン放射とあわせて超新星残骸における衝撃波での電子宇宙線の存在を示した。一方、CANGAROO-II 望遠鏡による超新星残骸 RXJ1713.7-3946 の観測では中性パイオンの崩壊によるガンマ線を発見し、陽子宇宙線の加速の証拠を得た。

銀河中心は巨大ブラックホール (Sgr A*)、進化した星のクラスター、若い星の星団、分子雲、そして超新星残骸 (Sgr A East) からなる非常に複雑な領域である。電波からガンマ線まで広く観測が行われ、電波、サブミリ波でのフレア (時間変動) や X 線での超新星残骸の観測がなされている。ガンマ線観測衛星 CGRO に搭載された EGRET 検出器は銀河中心から 1.5 度以内に 100MeV から 10GeV のガンマ線を発見した。スペクトルは他の天体に比べて非常にハードなべきを持ち、宇宙線を加速する高エネルギーの活動性を示唆している。しかし、その放射機構はいまだ未解決であり、分解能が特に低エネルギーでは 6 度@100MeV と悪いため、未同定な天体とされている (3EG J1746-2851)。仮に TeV 領域までスペクトルが伸びていた場合、放射機構解明に重要な手がかりを与えることになる。

CANGAROO-II 望遠鏡はオーストラリアにある口径 10m の大型反射鏡と 552 本の光電子増倍管からなるカメラを備えた解像型大気チェレンコフ望遠鏡である。天体からの超高エネルギーガンマ線は、地球に入射すると大気上層で空気シャワーを生成し、チェレンコフ効果で微弱な青い光を放出する。この光を反射鏡で集光して焦点面で結像させ、シャワーイメージを捉える。我々の望遠鏡は南半球にあるため、銀河中心をほぼ天頂で観測可能となり、べき-2.5 のスペクトルを持つ天体の場合、そのエネルギー閾値は 400GeV まで下がる。

我々は CANGAROO-II 望遠鏡を用いて 2 年間にわたって銀河中心の観測を行った。宇宙線シャワーレートの変動を用いて雲の通過による悪条件のデータを取り除き、解析に用いた観測時間は 2001 年、2002 年あわせて ON ソース（銀河中心）66 時間、OFF ソース（バックグラウンド）57 時間となった。はじめに、データのキャリブレーション、チェレンコフ光の到達時間情報とイメージのクラスタリングによる夜光のカット、イメージをゆがめているチャンネルの除去を行った。チェレンコフ光は大気に入射する 1 次宇宙線によっても放出され、ガンマ線観測における大きな雑音となるため、ガンマ線と宇宙線のシャワーを識別するイメージング法により雑音を取り除かなければならない。我々は 2 次元 Likelihood 法を用いたイメージング解析を行った。モンテカルロシミュレーションと実データを用いてガンマ線と宇宙線のチェレンコフ光イメージのパラメータ分布を求め、確率密度関数に置き換え、分布の差異を数値化してバックグラウンドとなる宇宙線イベントを排除する。

データ解析の結果、我々は、銀河中心からの 250GeV 以上のガンマ線を検出することに世界で初めて成功した。図 1 に得られたアルファ分布（イメージオリエンテーションアングル）を示す。アルファ 15 度以内の ON と OFF の差がガンマ線の信号を表す。2001 年、2002 年、2 年分の合計によるアルファ 15 度以内の超過イベントはそれぞれ、 797 ± 103 (7.7σ)、 862 ± 138 (6.3σ)、 1663 ± 171 (9.8σ) となる。図 2 に示すように 2 次元有意度分布からガンマ線の放射源が統計の範囲内で銀河中心にあることが確認された。これは EGRET の未同定天体 3EG J1746-2851 と誤差の範囲内で一致している。図 3 に微分フラックスを示す。得られた微分 FLUX は、べき -4.3 ± 0.5 と急な傾きをもつことがわかった。

我々は得られた微分フラックスと多波長スペクトルから放射機構について 3 つの視点で考察を行った。

1) 中性パイオンの崩壊によるガンマ線

EGRET の 100MeV から 10GeV のデータと CANGAROO で得られた 250GeV 以上のデータから高エネルギー陽子宇宙線のべきを仮定し、中性パイオンの崩壊によるガンマ線を計算した（図 4）。宇宙線の最大加速エネルギーは 1~3TeV、宇宙線の全エネルギーは星間物質を $1000 \text{ 個}/\text{cm}^3$ と仮定すると 10^{50} erg となる。もし、超新星爆発の典型的なエネルギーの 10% が宇宙線に用いられる場合、銀河中心領域の星間物質が $100 \sim 1000 \text{ 個}/\text{cm}^3$ と仮定すると超新星爆発 1~10 個に相当するエネルギーとなる。

2) Sgr A* および Sgr A East からの逆コンプトン散乱によるガンマ線

Sgr A* や Sgr A East の電波のデータをシンクロトロン放射と考えると、同じ高エネルギー電子によって宇宙背景放射 (CMB) や赤外線たたき上げた逆コンプトン散乱が予想される。われわれは CANGAROO で得られた 250GeV 以上のガンマ線を説明する放射モデルを試した。これにより放射領域の磁場、電子の最大加速エネルギーが求まる。またシンクロトロンの放射領域と逆コンプトン散乱の放射領域が異なる場合のモデルを考えた。その結果、赤外線をターゲットとした逆コンプトン散乱で説明できるパラメータは存在することがわかった。しかし、いくつかのパラメータは不自然な値にフ

イットされる。また、陽子宇宙線が同時に加速されている場合、陽子宇宙線起源のガンマ線が電子起源のガンマ線を卓越するため、電子起源のガンマ線とするのは困難である。

3) Cold Dark Matter からのガンマ線

最近の N 体数値シミュレーションにより、Cold Dark Matter (CDM) の銀河ハロー分布は、銀河中心領域で非常に密度の高いカスプ状の構造を持つことが予想されている。これにより CDM の対消滅によるガンマ線が示唆される。ガンマ線のエネルギーは CDM の質量を反映し、チェレンコフ望遠鏡で観測可能なエネルギー領域と一致している。われわれは Navaro-Frenk-White による密度分布を仮定して銀河中心と地球近傍の CDM 密度に制限を与えた。fragmentation による連続のガンマ線 $\chi\chi \rightarrow q\bar{q} \rightarrow X\gamma$ と対消滅による $\chi\chi \rightarrow \gamma\gamma$ のラインガンマ線において、400GeV から 40TeV、500GeV から 3TeV の範囲でそれぞれ CDM の密度に上限値を与えた (5000GeV/cm³)。仮に CDM がカスプの構造をもつと仮定すると地球近傍の CDM 密度に 4 GeV/cm³ の上限値を与えることとなる。予測されている 0.3GeV/cm³ と比較するとまだ一桁大きな制限であるが、他の直接探索と比較しても厳しい制限である。

以上の考察の結果、CANGAROO-II 望遠鏡により検出された 250GeV 以上のガンマ線は、銀河中心に存在する超新星残骸の陽子宇宙線起源であることが示唆される。

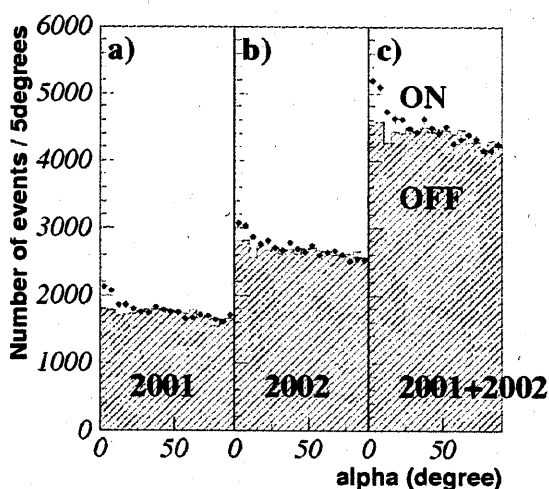


図 1 Likelihood 解析で得られたアルファ分布。

a) 2001 年データ b) 2002 年データ
c) 2001 年、2002 年あわせた結果をそれぞれあらわす。

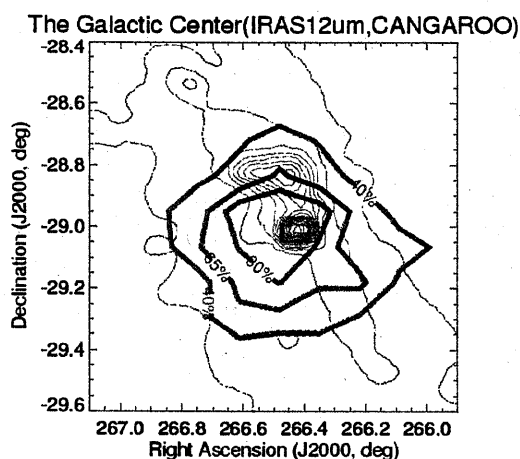


図 2 銀河中心領域の 2 次元有意度分布。

IRAS による 12 μ m もあわせて PLOT している。

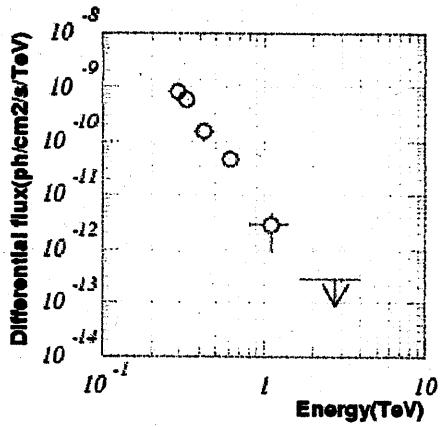


図3 CANGAROO-II 望遠鏡で得られた微分フラックス。
べき乗のスペクトルを仮定するとべき -4.3 ± 0.5 となる。

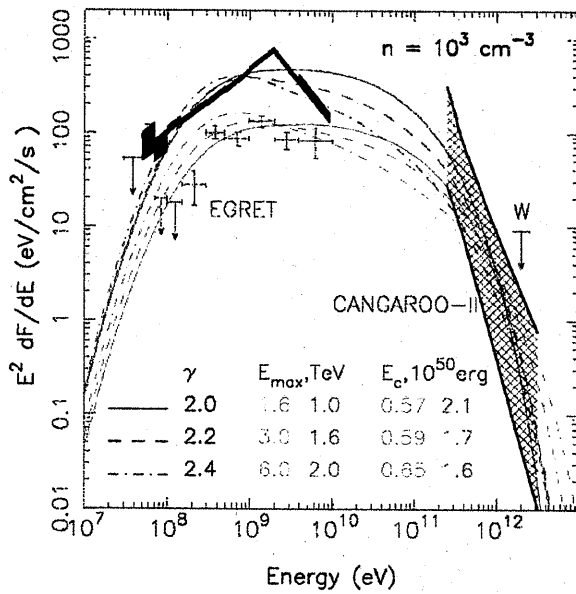


図4 EGRET と CANGAROO-II のデータから得られた中性パイオンの崩壊によるガンマ線。宇宙線の最大加速エネルギーが1~3TeV、宇宙線の全エネルギーは星間物質 $1000 \text{ 個}/\text{cm}^3$ を仮定すると 10^{50} erg となる。