

高エネルギーガンマ線天文学の現状

木 舟 正

〈東京大学宇宙線研究所 〒188 東京都田無市緑町 3-2-1〉

高エネルギーガンマ線 (100 MeV 以上) で明るい天体が 100 個以上発見されている。パルサー以外のほとんどの銀河系内点源の正体は依然不明であるが、数十個の活動銀河もガンマ線源であることが判明し、観測の地帯も赤方変位 $z \sim 3$ まで拡大された。超高エネルギーガンマ線 (100 GeV 以上) の検出も確実に。 (超)高エネルギーガンマ線の観測も一分野として確立し、電波、赤外線や X 線天文学との接点が今後大きく膨らみそうである。

1. はじめに

ガンマ線衛星 SAS II (1972-1973), COSB (1975-1982) によって、銀河系内のガンマ線分布が分かってきたが、Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) 衛星 (1991-) の EGRET (Energetic

Gamma Ray Experiment Telescope) 検出器により百個を越す高エネルギーガンマ線点源が発見された¹⁾(表 1)。図 1 は高エネルギーガンマ線の銀河座標系での分布である。銀河円盤に沿った強いガンマ線の放射の中にかにパルサーなどの点源が、高い銀河緯度にクエーサーが見える。

表 1 高エネルギーガンマ線源の数

統計的信頼度	パルサー	銀河緯度 <math>< 10^\circ</math>	普通の銀河	活動銀河	銀河緯度 >math>> 10^\circ</math>
> 6 σ	5	10	1 (大マゼラン星雲)	25	8
(5 - 6) σ		27		13	35

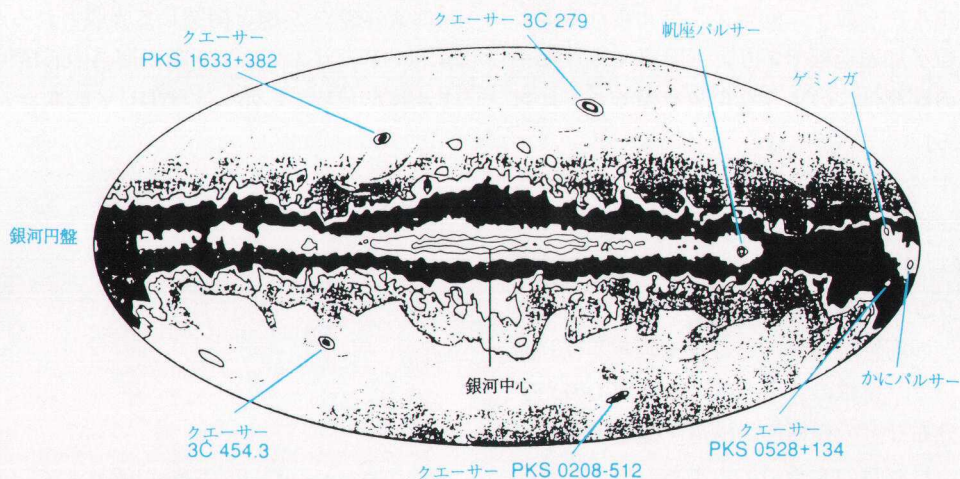


図 1 高エネルギーガンマ線の天球上の分布

宇宙には地上よりはるかにバラエティに富んだ物質の姿を見ることが出来る。高エネルギー素粒子反応で作られる 100 MeV 以上のガンマ線は電磁波というよりむしろ素粒子の一種として振る舞い、高エネルギー粒子の情報をもたらす。100 MeV 以上数 10 GeV までのガンマ線を高エネルギーガンマ線、100 GeV 程度以上を超高エネルギーガンマ線と呼び、これらに関する最近の結果を紹介する。

2. ガンマ線で天体を見ることの特徴

陽子が星間物質や光と衝突して生成する π^0 中間子の崩壊や、電子が電磁波に衝突し高いエネルギーへ跳ね上げる逆コンプトン効果によってガンマ線は生成される。高エネルギーガンマ線の強度は $E^{-\beta}$ に比例するスペクトルを持っている。親粒子が大体同じ“べき” β のエネルギースペクトルを持つためである。べきのエネルギースペクトルをもつ熱平衡分布に従わない高エネルギー粒子によって高エネルギーガンマ線は放射される。活発な高エネルギー反応を示している天体のエネルギー源は一般的に天体の重力エネルギーや集団的機械的エネルギーの解放に求められる。このマクロのエネルギーがミクロの粒子に均一に細分化されると熱的平衡状態となるが、エネルギーの一部が少数の高エネルギー粒子に効率よく与えられることがある。粒子加速過程であり、(超)高エネルギーガンマ線の観測はこのような現象を探ることに対応している。

高エネルギー陽子が星間物質に衝突し銀河円盤からのガンマ線が生成される。一方、パルサーや活動銀河の中心核などでは電波から X 線の強い放射がありガンマ線や電子、陽子とこれらの長波長の光子との衝突が頻繁に起こっている。(超)高エネルギーガンマ線のスペクトルから源での光子の密度や分布などの幾何学的構造を推定できる。ガンマ線、長波長の光子のエネルギーをそれぞれ k, ϵ とすると重心系のエネルギーは

$\sqrt{2k\epsilon(1+\cos\theta)}$ である(ただし、 θ は重心系での二つの光子の運動量の間の角度)。これが 1 MeV を越えると、電子陽電子対を生成し、ガンマ線の吸収を引き起こす。数 100 GeV のガンマ線に対しては赤外線がこの過程に寄与する。

3. 衛星観測による高エネルギーガンマ線天体

電波パルサー(約 300 個以上)、超新星残骸(150 個程度)に比較すると、銀河系内ガンマ線源の数(約 50 個)はまだ少ないが無視できる数ではなくなってきた。また、活動銀河が高エネルギーガンマ線源であることが分かり、ガンマ線天文学の範囲が銀河系外に拡大した。

3.1 銀河系外天体

激しい時間変動をし、電波スペクトルが硬く、あるいはまた光速に近いジェットを持つなどの特徴を持つ活動銀河から、高エネルギーガンマ線が放射されている。赤方変位 z の値は 2 以上のものがある¹⁾(表 2)、他波長の観測と同定できず正体不明のものも多い。活動銀河中心核付近は光子密度が高いので高エネルギー電子や陽子は光子と衝突し、諸反応のカスケード過程を起こす。エネルギーが細分化されるので高エネルギーガンマ線の生成は容易ではない。また、1-10 GeV のガンマ線は紫外線や X 線と衝突して吸収されるから、高エネルギーガンマ線は活動銀河の中心核付近で生成されたとしても外へ逃げ出して観測にかかるこ

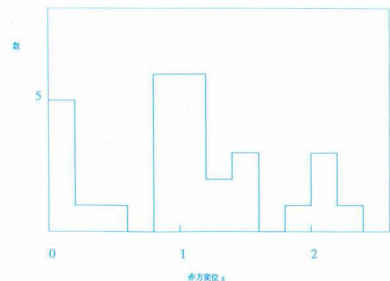


図2 高エネルギーガンマ線源活動銀河の赤方変位分布

とは困難であると考えられてきた。しかし、観測されたエネルギースペクトルは $-1.5 \sim -2.5$ の“べき”で近似でき、ガンマ線エネルギーの上限を示唆する“べき”の折れ曲がりには 10 GeV 程度までは観測されていない。 100 MeV 以上のガンマ線の積分強度は $10^{-7} \sim 10^{-6} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ の程度であり、 1 Gpc の距離に対して、この強度は $10^{46} \sim 10^{47} \text{ erg s}^{-1}$ のエネルギー放出量に対応する（全方向に様に放出されるとして）。いくつかの活動銀河については 100 MeV 以上のガンマ線の波長領域でエネルギー放出量が最大となっている。

光速に近い速さでプラズマが放出される“ジェット”が活動銀河に付随していることがある。その放出方向がわれわれの視線方向の 10° 程度以内にあるとき、ジェットの見かけの速度が光速を越え“超光速ジェット”として見える。ジェット中の高エネルギー電子が降着円盤などからの長波長の光子を逆コンプトン効果でガンマ線へはね上げる過程が高エネルギーガンマ線生成を説明できそうだ²⁾。ローレンツ変換の効果で、高エネルギーガンマ線はジェットの方向 10° 程度以内に放出される。“超光速ジェット”を観測できる視線方向と高エネルギーガンマ線の放出される方向がほとんど一致するから、“超光速ジェット”を伴っている高エネルギーガンマ線源活動銀河が多い観測事実を説明できる。

3.2 ガンマ線パルサー

高エネルギーガンマ線源のうち5つは周期が 200 ms 程度以下の若いパルサーである。パルサーの強い磁場の速い回転が誘導する電圧によ

って粒子加速が期待される。このような加速が実際に起きていることを高エネルギーガンマ線の検出は立証している。表2に示されるように、回転エネルギーの単位時間あたりの損失量に対するガンマ線の明るさの割合 η は周期の長いほど大きくなっている。パルス成分の放出領域が周期の増大と共に中性子星から遠ざかり、高エネルギーガンマ線の発生源が光円柱半径の近くで考えると η と周期との関係は、説明できそうである。パルサー磁気圏の構造や電子加速の機構とパルサーの進化の関係が分かりかけてきた。周期がさらに長くなってもガンマ線へのエネルギーは回転損失の全エネルギーを越えられないから、高エネルギーガンマ線で一段と明るく輝いた後、ガンマ線パルサーとしては死んでしまうらしい。

3.3 同定されていない銀河系内ガンマ線源

銀河系を充たす高エネルギーの陽子や電子により銀河円盤からの高エネルギーガンマ線が放出される。その広がった分布の上に銀河系内ガンマ線点源が見い出される。5つのガンマ線パルサー以外にも、(未知の)パルサーがパルサー周期を知られる事なく埋もれている可能性がある。正体不明のガンマ線源の数は約40個あり(表1)、検出誤差半径の中にパルサーや超新星残骸を探索する努力が続けられている。パルサーや超新星残骸の共存する天体系は10個程度見つけられている。

パルサーからのガンマ線の親粒子は高エネルギー電子/陽電子らしい。高エネルギー陽子の加速源候補としては超新星残骸近傍の衝撃波が有力である。電子がシンクロトロン放射でエネルギーの

表2 ガンマ線パルサー

パルサー	周期 (ms)	回転エネルギー損失 (erg s^{-1})	年令 (年)	ガンマ線の明るさ (erg s^{-1})	η
PSR0531+21	33	4.5×10^{38}	1300	4.0×10^{34}	0.00009
PSR0833-45	89	7.0×10^{36}	1.1×10^4	2.1×10^{34}	0.0031
PSR1706-44	102	3.4×10^{36}	1.7×10^4	2.6×10^{34}	0.0076
PSR1055-52	197	3.0×10^{34}	5.3×10^5	9.4×10^{33}	0.31
1E0630+178	237	3.5×10^{34}	3.4×10^5	2.5×10^{33}	0.076

減衰を受けるのに比べ高エネルギー宇宙線陽子は加速源から遠い領域まで拡散できる。実際、ガンマ線源のいくつかは広がっているらしい。分子雲など陽子陽子散乱の標的陽子が多い領域では強いガンマ線の放射が期待され、オリオン座の分子雲 ρ Ophiuchus はガンマ線源になっている。

未だ同定されていないガンマ線源の、円盤からの高さの分布の平均値を 40 pc と仮定し銀河緯度の観測値の平均値を使ってガンマ線源までの距離を推測すると ≤ 2 kpc となる。高エネルギーガンマ線の絶対的明るさ $(0.4-40) \times 10^{35} \text{ergs}^{-1}$ を得る。銀河円盤の半径を 15 kpc とすると銀河系全体では、このようなガンマ線源が 300 個程度はあるこ

とになる。

4. 地上からの観測による >100 GeV 領域

超高エネルギーガンマ線は大気中で電子陽電子群のカスケードシャワーを生成し、ガンマ線の方角のまわり約 1° にチェレンコフ光を放射する。約 1万 m^2 の広い検出面積を有するため、頻度の低い超高エネルギーガンマ線を検出できる。点源からのガンマ線によるチェレンコフ光は点源の方向を向いた細長い像として観測され 0.1° の角度分解能がえられる。米国スニソニアン研究所の解像型チェレンコフ望遠鏡によって、かにパルサー/星

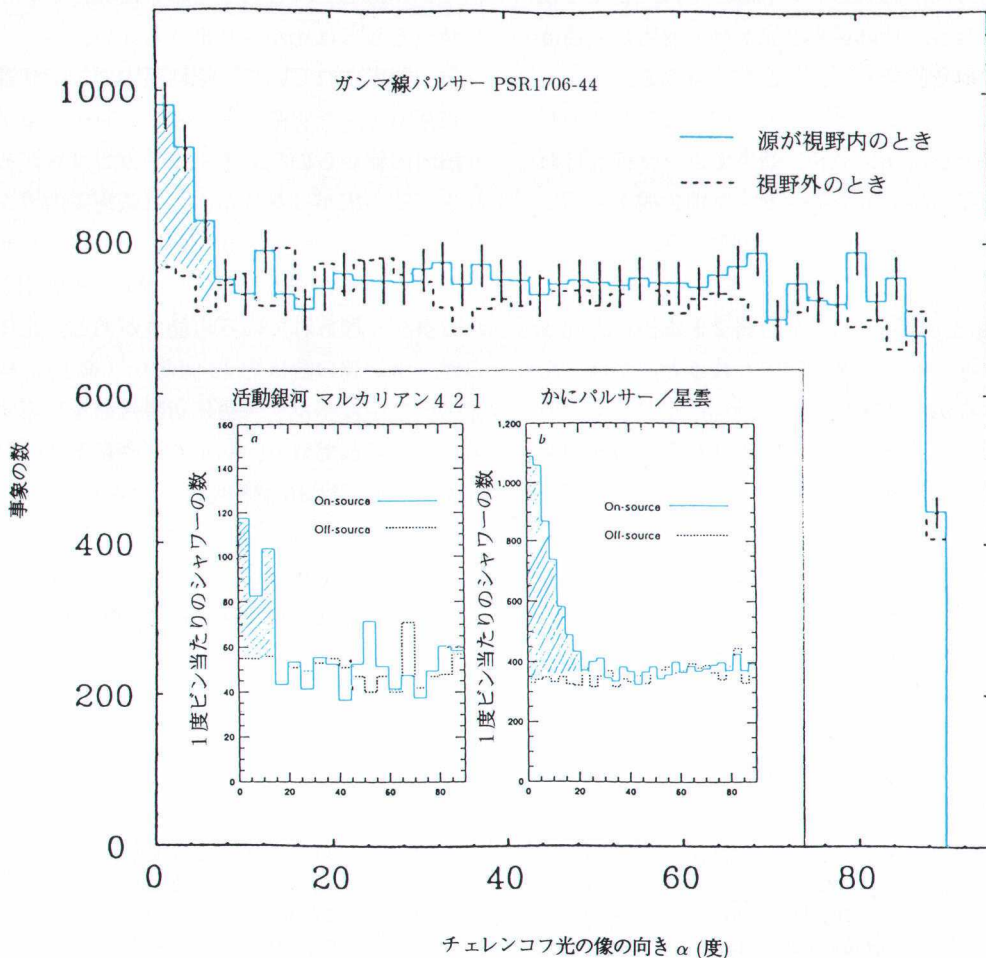


図3 超高エネルギーガンマ線の信号の検出

雲³⁾及び活動銀河 Markarian 421⁴⁾からの信号が、われわれの日本のグループ (CANGAROO) の望遠鏡によってガンマ線パルサー PSR 1706-44⁵⁾の超高エネルギーガンマ線信号が観測された。図3は PSR 1706-44 と Markarian 421 及びかににパルサー/星雲の観測結果である。横軸はチェレンコフ像の向きのガンマ線源からのずれの角 α であり、 $\alpha=0$ の事象数のピークがそれぞれの天体からのガンマ線信号を示唆している。

4.1 活動銀河の中心核からのガンマ線

活動銀河 Markarian 421 では少なくとも数千 GeV まではガンマ線が生成され放出されている。他の活動銀河については、まだ探索が充分でない。超高エネルギーガンマ線は銀河間空間を飛来する際、銀河系外赤外線による吸収を受ける。赤外線の強度や波長分布は実は良く分かっていないが、Markarian 421 は EGRET ガンマ線源の活動銀河の中で最も近距離で (赤方変位 $z=0.031$) ある。

この距離について推定される光学的厚さは 1000 GeV ガンマ線について 0.3-1 程度であり⁶⁾、吸収の効果は強くないと思われる。

銀河系外赤外線強度には過去の銀河の活動度が寄与し、すなわち銀河形成の時期に依存し、後者にはさらに宇宙暗黒物質の存在なども関係している。多くの活動銀河からの超高エネルギーガンマ線のエネルギースペクトルを知り距離の関数として整理することにより銀河系外赤外線強度を比較的直接的に知ることができるかもしれない。ただし、ガンマ線の吸収長はエネルギーとともに短くなるので (約 1.5 乗に反比例)、赤方変位 $z=1$ 程度までの活動銀河を観測するためには 100 GeV 近辺でのガンマ線を測定する必要がある。

4.2 ガンマ線パルサー

1 GeV 程度のガンマ線ではパルサー周期に同期して変動するパルス成分が非パルス成分 (時間変動をしない成分) より強いが、一方、“かに”か

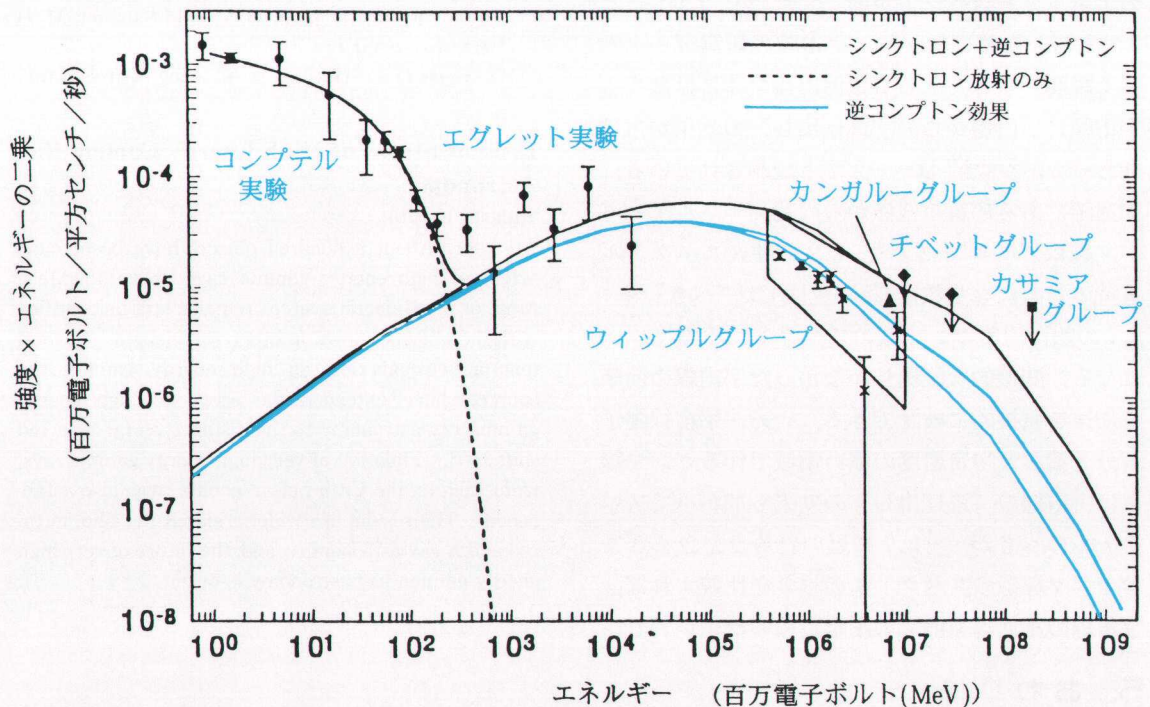


図4 かにに星雲からのガンマ線強度：理論値と観測値の比較

らの 300 GeV 以上のガンマ線は非パルス成分である。PSR 1706-44 の 1000 GeV ガンマ線も少なくとも非パルス成分が主であるようである。高エネルギー電子を含むプラズマが光円柱の外側へ吹き出し(“パルサー風”), 星間物質に衝突して閉じ込められ星雲を形成していることが“かに”星雲について知られている。かにパルサー/星雲からの非パルス成分についてのガンマ線の観測データは星雲内の高エネルギー電子の逆コンプトン効果によるモデル⁷⁾で比較的良く説明できる(図4)。PSR 1706-44 についてはこのような星雲の存在は不明である。

はっきりしたことはまだ分からず今後の観測を待たねばならないが、超高エネルギーガンマ線の情報はパルサー磁気圏とパルサー風、そしてまわりの空間の相互作用が決める空間構造や高エネルギー過程を知る鍵を与えてくれるだろう。

4.3 超新星残骸などその他の天体

衝撃波による粒子加速理論から加速源での粒子のエネルギースペクトルの“べき”が $-2.0 \sim -2.2$ であると自然に導かれ、宇宙線の観測データを良く説明できる。そして銀河円盤全体に拡散する宇宙線には円盤からの“逃げ出し”の効果が付け加わって、“べき”は ~ -2.7 と観測されている。加速源である超新星残骸からの超高エネルギーガンマ線は“べき” $-2.0 \sim -2.2$ の硬いスペクトルを持つことになり数百 GeV 程度では“べき” ~ -2.7 の銀河円盤ガンマ線のスペクトルの強度以上になる。間接的な証拠しかなかった宇宙線の衝撃波加速を直接的に検証できる。一方、宇宙線陽子が分子雲など物質密度の濃い領域で作るガンマ線には宇宙線の“逃げ出し”の効果も加わってスペクトルのべきが ~ -2.7 に近いだろう。さまざまなガンマ線源のスペクトルのべきを比較すれば、宇宙線の銀河円盤内での閉じ込めの様相が判る。

5. おわりに

EGRET により 100 個以上の高エネルギーガン

マ線源が発見され、観測の地平は赤方変位 $z \sim 3$ まで拡大された。超高エネルギーガンマ線観測も、検出感度が実際のガンマ線強度に相当したものとなった。

(超)高エネルギーガンマ線の観測は天文の分野というより、むしろ宇宙線研究に関連して観測の努力が行われてきた。ガンマ線(点)源が明らかになるにつれて、電波や X 線天文学との接点が広がってきたし、銀河系外赤外線との関係も大きく膨らみそうである。陽子からのガンマ線発生は必然的にニュートリノ発生を伴う。ニュートリノ天文学など“素粒子天文学”とも深く関係している。

参考文献

- 1) Fichtel C. E., et al., 1994, ApJ Suppl. 94, 551
- 2) Dermer C. D., Schlickeiser R., and Mastichiadis A., 1992, A & A 256, L27
- 3) Vacanti G., 1991, ApJ 377, 467
- 4) Punch M., et al., 1991, Nat. 358, 477.
- 5) Kifune T., et al., 1995, ApJ 438, L91
- 6) Stecker F. W., De Jager O. C., and Salamon M. H., 1992, ApJ 390, L49
- 7) De Jager O. C., Harding A. K., 1992, ApJ 396, 161

Present Status of High Energy Gamma Ray Astronomy

Tadashi KIFUNE

Abstract: About a hundred objects have been found bright at high energy gamma rays above 100 MeV. Most of the Galactic sources remains still unidentified with the objects known in other wavelength. Several tens active galaxies, as high energy gamma ray sources, have extended the scope of high energy gamma ray astronomy to the distance as far as a red shift $z=3$. Emission of very high energy gamma rays, from such as the Crab pulsar/nebula, was also established. The results are widely related to radio, infrared and X-ray astronomies, and, the future of very high energy gamma ray astronomy is bright.