

ガンマ線を可視光で見る

木 舟 正

Gamma-Rays Seen by Visible Lights

Tadashi KIFUNE

Window was recently opened to see the universe by the eyes of very high energy gamma-rays at about 10^{28} s^{-1} frequency which corresponds to photon energy of 10^{12} eV . Detection requires too large area to be available by satellite instrument. Ground-based telescope is used to observe visible light which is emitted in the upper atmosphere by gamma-rays as a result of their interactions with atmospheric nuclei.

Key words: very high energy gamma-rays, imaging air Cerenkov telescope, gamma-ray astronomy, high energy astrophysics, origin of cosmic rays

大気での発光現象を利用して超高エネルギー領域のガンマ線を検出することによって、1990 年以來の 10 年間で約 10 個のガンマ線源が発見された。天体からの超高エネルギーガンマ線（振動数 ν が $\sim 10^{28} \text{ s}^{-1}$ 、すなわち光子 1 個あたりのエネルギーが $1 \text{ erg} \approx 10^{12} \text{ eV} = 1 \text{ TeV}$ 程度に達する電磁波）が写真で示されるような望遠鏡によって検出されている（図 1）。日本グループがオーストラリアでの観測で用いている望遠鏡は 114 個の球面鏡から構成され直径 10 m の大集光面積をもつ。焦点面に集束する光を約 500 本の光電子増倍管カメラによって測定する。ガンマ線を可視光バンドで観測することは一見奇妙だが、地球大気が検出器の一部となっていると考えると納得がいく。高エネルギー粒子や X 線やガンマ線など放射線は物質中でさまざまな過程によりエネルギーを損失し、さまざまな検出方法を提供している。たとえば、損失エネルギーを光に変換するシンチレーターは放射線計測で広く使用される標準的な手段である。きわめて多数の可視光光子が生成・放出され、光子の数が多いほどその数の統計的ゆらぎから生じる誤差が小さくなってすぐれた観測精度を得ることができる。筆者らの場合には、超高エネルギーガンマ線が大気との相互作用

によって引き起こす発光現象を地上から望遠鏡で測定しているわけである。

超高エネルギーガンマ線の波長は $\lambda = c/\nu \approx 10^{-18} \text{ cm}$ 程度である。光の波長が原子のサイズ $\sim 10^{-8} \text{ cm}$ 程度より短くなると空気のような物質も光に対して透明でなくなる。このため紫外線より短い波長の電磁波は大気圏外の衛星などで観測する必要がある。超高エネルギーガンマ線の領域になって光子 1 個当たりのエネルギーが高くなるにつれ「測定器」を構成する物質中でのエネルギー損失量も大きくなる。このため、大気上空でエネルギーを散逸する様子を地上からでも測定できるようになる。超高エネルギーガンマ線の波長は陽子の空間的広がり $\sim 10^{-13} \text{ cm}$ より短く、そのふるまいと検出方法は素粒子の相互作用に支配される。ガンマ線は宇宙で素粒子のふるまいが果たす役割、宇宙の超高エネルギー現象、粒子加速の様子を直接的に知る有効な手段である。

1. 検出原理とこれまでのいきさつ

超高エネルギーのガンマ線や宇宙線（陽子を主成分としその他原子核や電子）が大気に突入すると、酸素や窒素の

東京大学宇宙線研究所（〒277-8582 柏市柏の葉 5-1-5）（現在は信州大学工学部 〒380-8553 長野市若里 4-17-1）
E-mail: tkifune@gipwc.shinshu-u.ac.jp

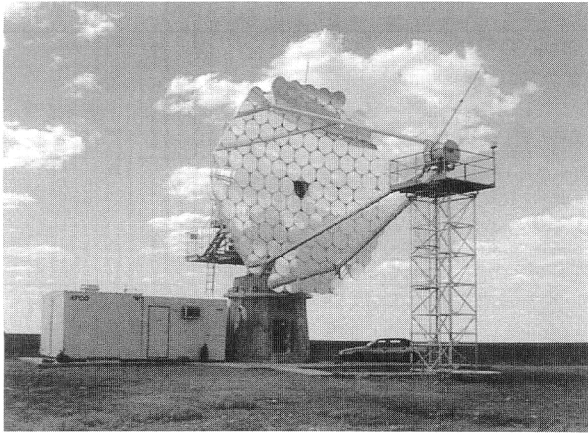


図1 2001年3月に完成した10 m口径望遠鏡。114枚の直径80 cmの球面鏡から作られる焦点距離8 mの放物面鏡で大気チェレンコフ光を集光する。焦点面に設置された552本の光電子増倍管(直径1/2インチ)からなるカメラは直径約3°の視野をもっている。CANGAROO IIIとよばれる計画により同様の10 m口径望遠鏡をさらに3台建設し、総計4台の望遠鏡により超高エネルギーガンマ線を観測する。

原子核に衝突して高エネルギー粒子を生成する。つぎつぎと繰り返される衝突で粒子数が増殖する現象は空気シャワーとよばれる。ほぼ光速で飛来する多数の電子・陽電子はチェレンコフ放射により紫外から可視部にかけての光を放出する。空気の屈折率は非常に1に近い($n \approx 1.0003$), チェレンコフ光は最初のガンマ線の飛来方向のまわり1°程度の前方に集中する。電子・陽電子群は約10 kmの高度で作られるので、チェレンコフ光は直径300 m程度にわたって地上を照らすことになる。チェレンコフ光の全強度は電子・陽電子の総数すなわちガンマ線光子のエネルギーにほぼ比例し、チェレンコフ光の密度は $\sim 10^4 \text{ m}^2$ の面積にわたってほぼ一様に分布するように薄められる。望遠鏡がこの広がりの中のどこにあってもガンマ線から発信された光を受けられることができるから、検出有効面積として $\sim 10^4 \text{ m}^2$ の広い値が得られる。ごくまれにしか到来しない超高エネルギーガンマ線を大面積で待ち受けて十分な数を検出できるようになるわけである。しかし、信号として認識するためには望遠鏡によって数十個以上の光電子を集めることが必要である。ガンマ線のエネルギーが十分高く1 TeV = 10^{12} eV程度であることが必要で、望遠鏡が数メートル以上の大きな口径をもたねばならないことになる。

地球大気を利用することには使い勝手の悪い点がある。衛星搭載のガンマ線検出器では最上段に粒子検出器においてガンマ線の1万倍以上の頻度をもつ宇宙線荷電粒子を識別・排除できる。大気からのチェレンコフ光を検出する方法では荷電粒子入射の排除が非常に困難である。宇宙線荷電粒子もチェレンコフ光を放射しガンマ線信号の検出を阻

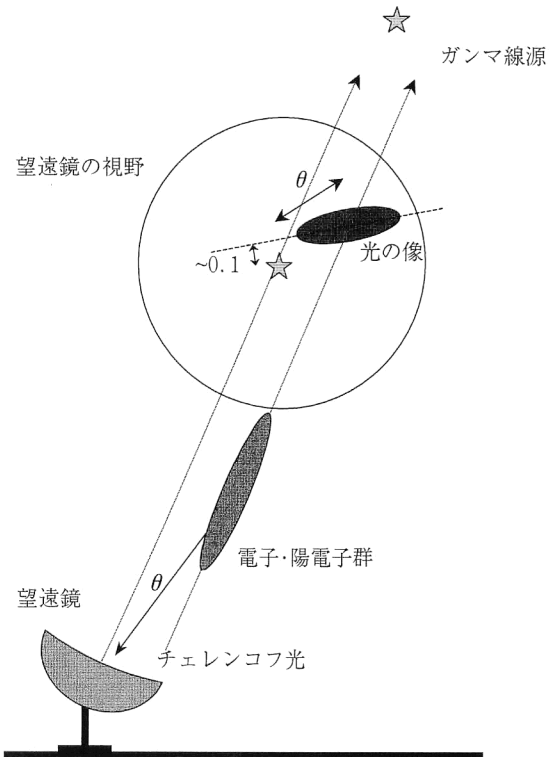


図2 超高エネルギーガンマ線からの大気チェレンコフ光を望遠鏡で観測したときの光の像の模式図。チェレンコフ光は有限の高さから放射されるため、光の像は望遠鏡の視野の中心にあるガンマ線源の方向から視差 θ だけずれた方向にある。像は細長く楕円状に伸び楕円の長軸はほぼガンマ線の到来方向に向く。長軸に垂直なずれの大きさは約 0.1° でこれがガンマ線源の方向の決定精度を与える。

害する雑音となる。また、夜空全体がぼうっと光っている自然現象、夜光雑音もチェレンコフ光の観測の限界を決める要因となっている。実際、超高エネルギーガンマ線を大気チェレンコフ光によって検出する試みは1950年代の終わりごろから試みられてきたが、はっきりとガンマ線を検出できるようになったのはつい10年ほど前からである。チェレンコフ光の光量だけでなくその空間的な広がり、すなわち光の像の構造を測定するようになってガンマ線信号の存在を宇宙線や夜光から区別してはっきりと識別できるようになった。図2で説明されるように像はガンマ線の到来方向に向かって細長く伸びている。このことを利用して 0.1° 程度の精度でガンマ線源の方向を知ることができるようになったので、あらゆる方向から飛来する宇宙線雑音を格段に減らせるようになった。このように、チェレンコフ光の像の形状を測定する望遠鏡は解像型大気チェレンコフ望遠鏡とよばれる。

ものごとがうまくいくかげには偶然の助けがある。超高エネルギーガンマ線の観測が現実味をもつためには有効検出面積 $\sim 10^8 \text{ cm}^2$ で10時間すなわち 4×10^4 秒程度の間

表1 テラエレクトロンボルトガンマ線源.

天体の名前	天体の種別	検出したグループ	備考
かに星雲	パルサー星雲	米国 Whipple グループ	多数のグループが追証 英国ダラムグループが追証
PSR B 1706-44	パルサー星雲	CANGAROO	
ほ座パルサー	パルサー星雲	CANGAROO	
SN 1006	超新星残骸	CANGAROO	多数のグループが追証
RXJ 1713 73946	超新星残骸	CANGAROO	
Cas A	超新星残骸	ドイツ HEGRA グループ	
Cen X-3	X線パルサー	英国ダラムグループ	
Mrk 421	活動銀河	米国 Whipple グループ	多数のグループが追証
Mrk 501	活動銀河	米国 Whipple グループ	多数のグループが追証
1 ES2344+514	活動銀河	米国 Whipple グループ	
PKS 2155-304	活動銀河	英国ダラムグループ	

表2 テラエレクトロンボルトガンマ線源とギガエレクトロンボルトガンマ線源との比較.

	100 MeV~10 GeV	100 GeV~10 TeV
パルサー	磁気圏からの放射 6個 (周期変化)	パルサー星雲からの放射 3個 (周期変化せず)
超新星残骸(シェル型)	数個が未同定源に付随	3個
X線連星	1(時間変動)	1?
未同定源	165個	0個(探索がされていない)
活動銀河	75個	近傍の2~6個?
ふつうの銀河	1個	0個
ガンマ線バースト	5個	1個?
点源の特徴的な強度	$\sim 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$	$\sim 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
銀河円盤	$6 \times 10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	検出が困難
銀河系外一様成分	$\sim 1 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1}$	検出がきわめて困難

100 個程度のガンマ線が入射することが必要である。このためには強度 $\sim 10^{-11} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ 程度のガンマ線源が存在していなければならない。かに星雲など明るい1 TeV程度のガンマ線源からの強度がちょうど大気チェレンコフ望遠鏡の感度にふさわしい値となっている。また、大マゼラン雲で1987年に超新星が爆発した。その誕生直後の時期に放出されているかもしれないテラエレクトロンボルトガンマ線をチェレンコフ光による方法で追い求めていたが、これを契機として国立天文台堂平観測所の3.8 m口径望遠鏡を譲ってもらうことができた¹⁾。日本のグループがテラエレクトロンボルト領域のガンマ線観測の分野に参入することができたのは、チェレンコフ光の像を測定するのに理想的な鏡面精度をもつ「堂平望遠鏡」にめぐりあうことができたおかげである。

2. 現状と観測結果

日本とオーストラリアの国際共同実験であるCANGAROO (Collaboration between Australia and Nippon for a Gamma Ray Observatory in the Outback)の頭文字を綴った略称)プロジェクトが観測を開始したのは1992年

であった。当時は、米国のスミソニアン研究所の10 m望遠鏡だけが唯一の解像型大気チェレンコフ望遠鏡であった。われわれCANGAROOグループの望遠鏡が南半球に設置されて銀河中心付近の観測が可能になった。その後ドイツやフランスのグループも参入して「可視光による超高エネルギーガンマ線の観測」は今めざましい発展の途上にある²⁾。

これまでに10個を超える超高エネルギーガンマ線源の検出が報告されている。その主なものを表1に示す。ガンマ線源を天体の種類別に分けると、活動銀河が4個程度、パルサー星雲、超新星残骸も3個ずつ、X線連星が1個である。一方、1991年に打ち上げられたコンプトンガンマ線衛星の100 MeV~10 GeVに感度のあるEGRET検出器での観測では200個を超えるガンマ線源が発見された(表2)³⁾。これらの天体からのガンマ線放射には衛星観測のエネルギー領域との間に共通した特徴もあるが重要な相違点がある。

2.1 パルサー

誕生以来1万年程度までの若いパルサーがギガエレクトロンボルト($=1 \times 10^9 \text{ eV}$)領域のガンマ線源となっている

ことが衛星観測で発見された。パルサーの活動のエネルギー源となっているのは中性子星の回転エネルギーである。誕生後まもない若い活発なパルサー、中性子星の回転エネルギー損失の大きなパルサーがガンマ線を放出している。中性子星とともに回転するパルサー磁気圏からギガエレクトロンボルトガンマ線が放射されている。損失エネルギーの大部分はパルサー磁気圏から吹き出す電子・陽電子のプラズマの流れ、パルサー風に与えられている。パルサー風によって中性子星から1光年程度離れたところにパルサー星雲が形成され、そこからテラエレクトロンボルトガンマ線が放射されている。

2.2 超新星残骸

大きな質量をもった星の燃焼が進むと超新星爆発が起き、中心部に中性子星あるいはブラックホールが作られる。もとの星の外側は爆風となって吹きとばされる。星間物質と衝突して温度や密度、流れの速度が急激に変化する衝撃波が形成され、明るく輝いてシェル状の超新星残骸として観測される。衝撃波によって宇宙線が加速されガンマ線源となっていると考えられている。正体不明の未同定ギガエレクトロンボルトガンマ線源の中には超新星残骸を付随しているらしいものが数個ある。

衝撃波加速から理論的に予測されるガンマ線のエネルギースペクトルを用いて、ギガエレクトロンボルト領域のガンマ線強度からテラエレクトロンボルトガンマ線強度を推定できる。検出に十分なテラエレクトロンボルトガンマ線が期待されるにもかかわらず、超新星残骸を伴う未同定ギガエレクトロンボルトガンマ線源からのテラエレクトロンボルトガンマ線の検出にはこれまで成功していない。一方、電波よりもX線で明るい超新星残骸が見つかり始めてきた。このような特徴をもつ超新星残骸でギガエレクトロンボルトガンマ線は検出されていないSN1006など3つの天体についてテラエレクトロンボルトガンマ線放出を放出する証拠が発見された。

2.3 活動銀河

活動銀河の中心には巨大ブラックホールがあると考えられており、そこからプラズマがジェット状に光速に近い速度で吹き出している。これまで発見された数十個の活動銀河がギガエレクトロンボルトガンマ線源となっているのはジェットがわれわれ観測者の方向に向いているからである。ジェットの進行方向では光子のエネルギーや強度がジェットの運動の相対論的効果のため増幅されて見え、強いガンマ線が放出されているのだと考えられる。放射強度の比較的暗い活動銀河のほうが、放射強度のピークとなる光子のエネルギーがより高くなる傾向があり、テラエレクト

ロンボルト領域まで伸びるガンマ線源となっている。

超高エネルギーガンマ線を放出している活動銀河は赤方偏移が0.1より小さく比較的近傍にある。銀河系外空間を満たしている赤外線背景放射の光子にテラエレクトロンボルトガンマ線が衝突したとき、ガンマ線が伝搬の途中で消滅・吸収される。このためテラエレクトロンボルトガンマ線は遠方に到達できないので遠方の銀河からは検出されていないと考えられる。

2.4 その他の天体

EGRETにより発見されたギガエレクトロンボルトガンマ線源の3分の2程度は電波・X線や可視光などの対応天体が確定していない未同定天体である。これらの中には周期が知られていないため未発見となっているパルサーや未知の超新星残骸などがある程度含まれていると考えられる。さらに、既知のガンマ線源とは異なる種類の天体も隠されているだろう。EGRETの未同定ガンマ線源の中にはパルサーや超新星残骸からのガンマ線データの特徴とは明らかに異なり時間変動を示すものがいくつか発見されている。EGRETの探索ではX線連星からのガンマ線を検出できなかったが、唯一Cen X-3から一時的に増大する信号が検出された。硬X線からメガエレクトロンボルトのガンマ線を突発的に放出するガンマ線バーストの中にはギガエレクトロンボルト領域のガンマ線を放射するものがある。テラエレクトロンボルト領域の放射については水タンクの検出器を用いた米国のMilagritto装置による検出の報告があるが、解像型大気チェレンコフ望遠鏡による信号はまだ見いだされていない。

2.5 広がったガンマ線源

解像型大気チェレンコフ望遠鏡の視野は直径3~5°である。このため、広がった方向分布をもつガンマ線源を宇宙線の雑音から識別するのは容易でない。広がったガンマ線源の検出は今後に残された課題となっている。宇宙線陽子が銀河に閉じ込められ星間物質と衝突して π^0 中間子を生成しその崩壊からガンマ線が放射される。銀河円盤からのガンマ線はこの過程によって説明でき、その全強度はギガエレクトロンボルト領域では点源からの総和より明るく全天で最も強いガンマ線源である。宇宙線はもつとはるかに高いエネルギー領域まで存在しているから、テラエレクトロンボルトガンマ領域においても銀河円盤に沿ってガンマ線が放射されていることは確実である。テラエレクトロンボルト領域のガンマ線を、天の川に沿った銀河緯度の低い方向と、高い方向との信号の頻度の比較によって検出しようと試みられているがまだ成功していない。解像型大気チェレンコフ望遠鏡による検出は非常に難しいが、重要な物

理的意義がある。まず、銀河系外からの広がったガンマ線は宇宙全体の超高エネルギー現象を反映している。また、赤外線背景放射の強度は銀河や星が宇宙進化の過程のいつごろからどのようなメカニズムで形成されたかに関係している。赤外線による吸収のためエネルギースペクトルが急激に減少するカットオフがテラエレクトロンボルト近辺にあると想像され、その観測から赤外線強度を決定できる。

3. 観測結果の意味とガンマ線観測の意義

これまでに検出された天体からの超高エネルギーガンマ線は電子による放射で説明できる。高エネルギー電子の諸エネルギー損失過程の中で、磁場中でのシンクロトロン放射と放射場の長い波長の光子を散乱させてガンマ線などの短波長に叩き上げる逆コンプトン散乱が重要となることが多い。概して、シンクロトロン放射は電波から X 線にかけて、逆コンプトン散乱は X 線からガンマ線への光子を放射する。電波から超高エネルギーガンマ線にわたるあらゆる波長帯についてのエネルギースペクトルはこれら 2 つの過程による 2 山の特徴を示し電子・陽電子の放射によって説明できる。パルサー風、活動銀河のジェット、銀河円盤内の宇宙線からのガンマ線などにおいて、高エネルギー電子・陽電子が予想以上に活発な現象を担っていることがわかりかけてきた。

しかしながら、宇宙線の主成分である陽子がどこかで加速されているはずである。銀河系内の超高エネルギー陽子が全体として担っているエネルギーがおおざっぱには超新星爆発で解放されるエネルギーとつじつまが合うことが宇宙線の超新星爆発起源説の強い根拠である。超新星残骸からのガンマ線の観測結果はこの考え方がすんなりと受け入れられるものでなく単純なモデルでは説明しにくい点があることを示した。超新星爆発がバラエティーに富んだものであり、超新星残骸の年齢や環境条件などによって加速粒子のエネルギーの上限や加速効率、陽子と電子成分のガンマ線放射への寄与の割合などが個別の天体ごとに異なるらしい。

ガンマ線バーストは活動銀河のジェットよりももっと高速の「火の玉」で引き起こされるらしいことがわかりかけてきた。超新星爆発によって、コンパクト星の生成と爆発的な放出物質による残骸が形成されるだけでなく、相対論的速度のジェットの噴出を伴うことがあるらしい。ガンマ線バーストが超高エネルギー宇宙線の源となっているという主張がある。そうだとすると、ガンマ線バーストからはテラエレクトロンボルト領域のガンマ線が放出されているだろう。銀河系内ジェット天体や X 線連星として観測さ

れている系内ブラックホール候補天体など時間的激変天体が超高エネルギーガンマ線源となっている可能性も興味深い。

解像型大気チェレンコフ望遠鏡によって超高エネルギーガンマ線観測の窓が開かれ、宇宙の高エネルギー現象の理解が一段と進みつつある⁴⁾。ギガエレクトロンボルト領域の EGRET によるガンマ線源がテラエレクトロンボルトガンマ線源を探索する案内役を務めたが、これらの 2 つの波長領域でのガンマ線源には互いに異なる特徴があることがわかりかけてきた。望遠鏡の比較的狭い視野のために、これまで観測がなされたのは全天のごく一部分に限られている。観測ターゲットをいかに選択するかが非常に重要になっている。広がったガンマ線源やガンマ線バーストなど時間的激変天体の観測はまだほとんど手がつけられていない。超高エネルギーガンマ線で見た宇宙の全体像はいまだおおい隠されたままである。

パルサーや超新星残骸は超新星爆発の産物である。ガンマ線バーストもまた超新星爆発に関係しているらしいことがわかりかけてきた。超新星爆発が中性子星やブラックホールの生成など多様な天体現象を引き起こし種々のガンマ線源の原因となっているらしい。質量のスケールは異なっているが、活発な高エネルギー活動のメカニズムは活動銀河の巨大ブラックホールとも共通している可能性がある。ガンマ線放射の観測はこのように爆発やジェット、中性子星・ブラックホールの引き起こす現象に深くかかわっているらしい。

オーストラリアで実施中の CANGAROO 計画では 2004 年に 4 台の 10 m 口径の解像型大気チェレンコフ望遠鏡システムが稼働を開始する。ほぼ同じころ、同程度の規模の複数台の望遠鏡による観測が米国のグループ（究極的には 7 台の望遠鏡）がアリゾナで、ドイツを中心とするグループ（16 台の建設を目標としている）はアフリカのナミビアで観測を開始する予定である。

より広い検出面積を得ることができればさらに精度を上げた観測が可能になる。大気に対して透明である可視光を地球規模の大きさを目指してさらに開発・利用することが将来起きるかも知れない。

文 献

- 1) 菊池 仙, 木舟 正: “可視光でみるガンマ線? 一堂平山からオーストラリアへ”, 天文月報, **91** (1998) 390-397.
- 2) T. C. Weekes, F. A. Aharonian, D. J. Fegan and T. Kifune: “VHE and UHE gamma-ray astronomy in the EGRET era,” *The Proceedings of 4th CGRO Symposium*, Part 1

(The Am. Inst. of Phys., eds. C. D. Dermer, M. S. Strickman and I. D. Kurfess; AIP Conference Proceedings), **410** (1997) 361-383.

- 3) R. C. Hartman, D. L. Bertsch, S. D. Bloom, A. W. Chen, P. Deines-Jones, J. A. Esposito, C. E. Fichtel, D. P. Friendlander, S. D. Hunter, L. M. McDonald, P. Sreekumar, D. J. Thompson, B. B. Jones, Y. C. Lin, P. F. Michelson, P. L. Nolan, W. F. Tompkins, G. Kanbach, H. A. Mayer-Hassel-

wander, A. Mücke, M. Pohl, O. Reimer, D. A. Kniffen, E. J. Schneid, C. von Montigny, R. Mukherjee and B. L. Dingus: "The third EGRET catalog of high-energy gamma-ray sources," *Astrophys. J. Suppl.*, **123** (1999) 79-202.

- 4) 木舟 正: "宇宙はなぜ粒子を加速するのか", *科学*, **69** (1999) 855-857.

(2001年3月19日受理)