100 GeV 領域ガンマ線の地上観測

森 正樹*

東京大学宇宙線研究所

188-8502, 東京都田無市緑町 3-2-1

1 はじめに

大気は X 線以上の波長の短い光に対しては不透明だと思われているが、100 GeV 以上のエネルギーのガンマ線では再び「透明」になってくる。「」をつけたのはガンマ線そのものが地上に達するわけではなく、ガンマ線が大気の原子核と衝突して起こした粒子のシャワーから放出されるチェレンコフ光として、間接的に地上で観測可能になる、という意味である。大気の屈折率は地上付近で 1.0003 であり、したがって 20 MeV 以上の電子・陽電子から頂角 1° の円錐状にチェレンコフ光が放出されることになる。シャワーは地上 10 km 程度の上空で起こるため、チェレンコフ光特有の紫方で強いスペクトルは吸収を受けるなどして減衰するが、大口径の反射鏡を用いて集光し、光の継続時間が 1 億分の 1 秒程度であることを用いれば夜光と識別可能である。また、大気中でシャワーを起こすのはガンマ線よりも陽子などの原子核からなる宇宙線がほとんどであるが、宇宙線のシャワーは等方的に起こるのに対し、ガンマ線の起こすシャワーからのチェレンコフ光は源から約 1° 以内にあること、また原子核のシャワーは核相互作用から始まり、電磁相互作用と違って放出される粒子が元の方向と垂直な方向に持つ運動量 (横運動量) が一般に大きいため、ガンマ線の場合に比べて広がったでこぼこしたシャワーになるため、チェレンコフ光の広がりや角度分布に違いがあらわれること、によって識別ができる。実際には、後者のチェレンコフ光の像の違いに基づく「イメージング法」の手法が確立して超高エネルギーガンマ線放出天体の存在が広く認知されるに至ったのは 1980 年代の終わりのことである [1]。

2 CANGAROO

我々CANGAROO (Collaboration of Australia and Nippon for a GAmma Ray Observatory in the Outback) グループ [2] は、堂平観測所で月レーザ測距用に使われた 3.8m 口径の反射鏡を南オーストラリアの砂漠地帯 (Woomera, 136°47′E, 31°06′S, 160 m a.s.l.) に移設し、駆動系を一新して、チェレンコフ光のイメージング観測用に開発した光電子増倍管カメラを取り付け、1992 年から南天でガンマ線天体の探索を行なっている [3](図 1)。これまでの主な成果について簡単に紹介する [4]。

PSR1706-44 パルサー PSR1706-44 を超高エネルギーガンマ線天体として発見した [5]。信号にはパルス成分が見られず、また後に X 線で周囲にパルサー星雲が見つかったことから、ガンマ線放射はパルサー周囲の星雲で高エネルギーの電子が背景放射の光子を逆コンプトン散乱で叩き上げるメカニズムで起こっていると考えられる [6]。

Crab nebula かに星雲は最初に確立した超高エネルギーガンマ線天体であるが、北天にあるため、オー

*E-mail: morim@icrr.u-tokyo.ac.jp

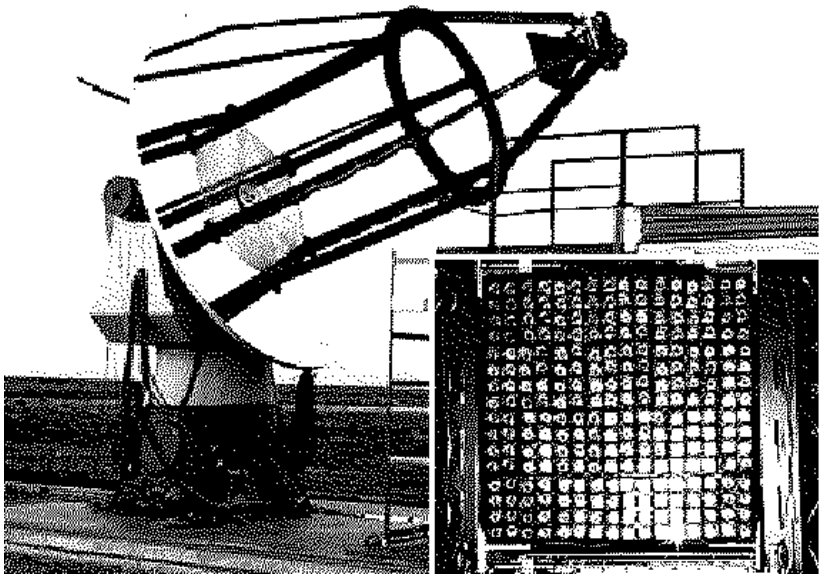

図 1: CANGAROO 3.8m チェレンコフ望遠鏡。右下は光電子増倍管カメラを鏡側から見たとろ。

ストラリアからは大天頂角での観測となる。この場合大気層が厚くなるため観測できるガンマ線のエネルギーは高くなるが、有効面積は増大するのでイベントレートはエネルギースペクトルの減少よりずっと遅くなり、チェレンコフ望遠鏡による観測が可能である [7]。我々の結果 [8, 9] はかに星雲からの最も高いエネルギー (約 50 TeV まで) のガンマ線の存在を示しており、高エネルギー電子によるシンクロトロン光子の逆コンプトン散乱により TeV 領域のガンマ線が放出するという単純なモデル (Synchrotron Self-Compton model [10]) による解釈は困難であり、修正を迫られている。

Vela pulsar 衛星で観測される GeV 領域では最も明るいパルサーであるが、周囲の星雲も複雑な構造を持っている。我々の観測では連続成分のみが発見された [11]。TeV ガンマ線のピークはパルサーから 0.13° 離れたところにあり、パルサーの誕生した場所に一致することがガンマ線の発生メカニズムに関係しているかもしれない。

SN1006 我々は 1006 年に爆発したこの超新星の殻型の残骸からの超高エネルギーガンマ線を初めて発見した [12]。パルサーが内部に発見されていない新しいタイプの超高エネルギーガンマ線源である。超新星残骸は宇宙線の源と古くから想定されてきた。我々の結果は、ASCA 衛星による X 線領域での非熱的放射の発見 [13] と合わせ、宇宙線の謎に新たな光を投げかけるものである。また、TeV ガンマ線は X 線領域でシンクロトロン放射している高エネルギー電子による背景放射光子の逆コンプトン散乱によってつくられていると解釈すれば、超新星残骸の磁場の値が数 μG と定まることも興味深い。

ここに挙げた以外にも活動銀河核などいくつかのガンマ線源候補天体の観測を行なっている [14]。

3 CANGAROO II

前節で紹介したような成果の元に、我々は現 3.8m 望遠鏡の隣に新たに 10m 口径の反射鏡を建設しており、今年から観測を開始する予定である [15]。経緯台式の架台に直径 80cm、焦点距離 16.4m の CFRP 製

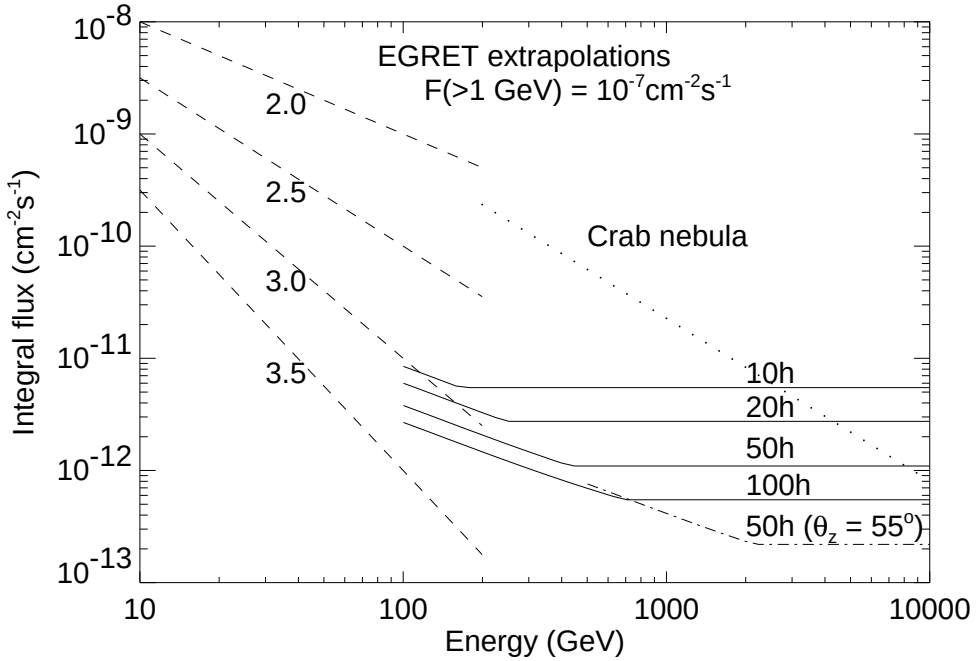

図 2: CANGAROO II 望遠鏡 (7m) で検出可能なガンマ線フラックスと観測時間の関係 (実線、天頂方向)。天頂角 55 度の場合を一点鎖線で示す。破線は EGRET の上限値を $E^{-\alpha+1}$ の形でべき α を変えて延長したフラックスを、点線はかに星雲の観測値を示している。

球面鏡を 60 枚放物面に並べた反射鏡を載せ、当初は有効口径 7m で稼働させるが、球面鏡の追加で容易に 10m に拡張可能である。チェレンコフ光観測用カメラは 1/2 インチ光電子増倍管 512 本からなり、視野約 3° をカバーする。フロントエンドの高速電子回路は我々が開発したもので、光電子増倍管の光量を信号の時間幅に変換し、CAMAC 規格の回路を用いて相対時間差とともに記録する。データは基本的には日本とオーストラリアの研究機関でオフライン処理され、バックグラウンドとなる宇宙線のシャワーをイメージパラメータの違いから識別し、ガンマ線候補が選び出される。GPS を用いてガンマ線の到来時刻も記録され、パルサー周期との同期を調べることができる。この望遠鏡で観測可能なガンマ線のエネルギーは約 200 GeV(口径 10m に拡張すれば 100 GeV) まで下げられるので、統計精度が上がり、感度が向上するとともに、強いガンマ線源に対しては短時間で結果を出せるようになることが期待できる (図 2)。

4 「すばる」を用いたガンマ線観測

チェレンコフ光は大気の上層部で発生し、拡がりをもって放出されるので、高山で観測する方が光の密度が高くなるため観測できるガンマ線のエネルギーはさらに下げられる。国立天文台がハワイ・マウナケア山に建設中の「すばる」望遠鏡は海抜 4200m に設置される大口径望遠鏡であり、チェレンコフ光望遠鏡として有利な条件を備えている。この主焦点にチェレンコフ光観測用カメラを設置し、より低エネルギーのガンマ線を観測しようという計画が進行中である [16]。主焦点の視野は 30 分程度で、チェレンコフのイメージング観測にはやや不足だが、カメラを焦点面から少し前に出して視野を広げ、光電子増倍管の前にライトガイドをつけるなどの工夫によって 30 GeV 領域のガンマ線観測が十分可能になると考えている。また、このエネルギーのガンマ線は衛星観測と接続する領域であり、かにパルサーなどのようにパルス成分が存在すれ

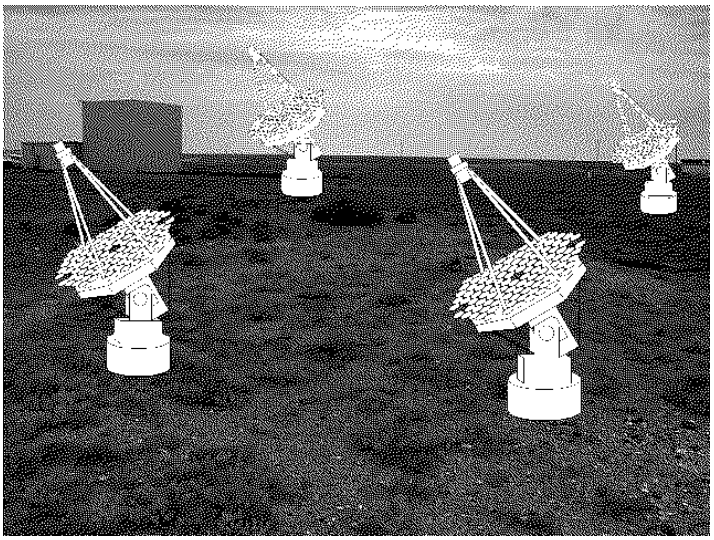

図 3: CANGAROO III チェレンコフ望遠鏡アレイの想像図。

ば信号雑音比は大きく改善される。逆に、パルス成分がカットオフを受けるエネルギーを決定することは、パルサーにおける放射の理論的モデルにとって決定的な情報を与えることになる [17]。

5 CANGAROO III

かに星雲の高精度観測に初めて成功したアメリカのホイップル天文台の 10m 反射鏡は 1960 年代に建設されたものであり、我々の CANGAROO II は反射鏡の大きさとしてはようやくこのクラスにたどりつくにすぎない。世界各地では地上チェレンコフ観測の大型計画が計画中・一部進行中であり、我々としてもさらに大型装置の建設を目指して対抗していく必要がある。次のステップとして計画中の CANGAROO III では、10m 望遠鏡 4 台によるアレイを建設することを構想している (図 3)。4 台の望遠鏡は、独立に運転して複数のガンマ線天体を同時に観測して観測時間を稼ぐことができるだけでなく、2 台 (または 4 台) 組のステレオで同一天体に向け、精密観測を可能とする。すなわち、チェレンコフ光を離れた 2 台以上の望遠鏡で同時に観測すると、像の長軸の交点からガンマ線の到来方向が定まり、また、視野中心との角度距離からシャワーの発生した高さがある程度推定できるため、ガンマ線のエネルギーの決定精度が向上する。また、現在ほぼ寿命の尽きかけている Compton ガンマ線天文台衛星の EGRET 検出器及び 2004 年の打ち上げを目指して計画が進められている GLAST 計画、および他の地上ガンマ線望遠鏡 (現存および計画中のもの) との感度の比較を図 4 に示す。この感度をエネルギー流量 (νF_ν) 単位に直すと、100 GeV で 3×10^{-13} erg cm^{-2}s^{-1} となり、X 線衛星の感度に迫るものであることがわかる。

地上の実験室では達成できない極限状態での物理現象の探求には、電波から X 線までの領域とともにガンマ線領域の観測が不可欠であり、天文学の大型装置を生かすためにも中小の装置が相補的な役割を担う必要があると信じるものである。

参考文献

[1] 最近の review として次の文献を挙げておく: F. A. Aharonian, Proc. XVIII Int. Symp. on Lepton-Photon Interactions, (July 28–August 1, 1997, Hamburg, Germany) (preprint astro-ph/9712089)

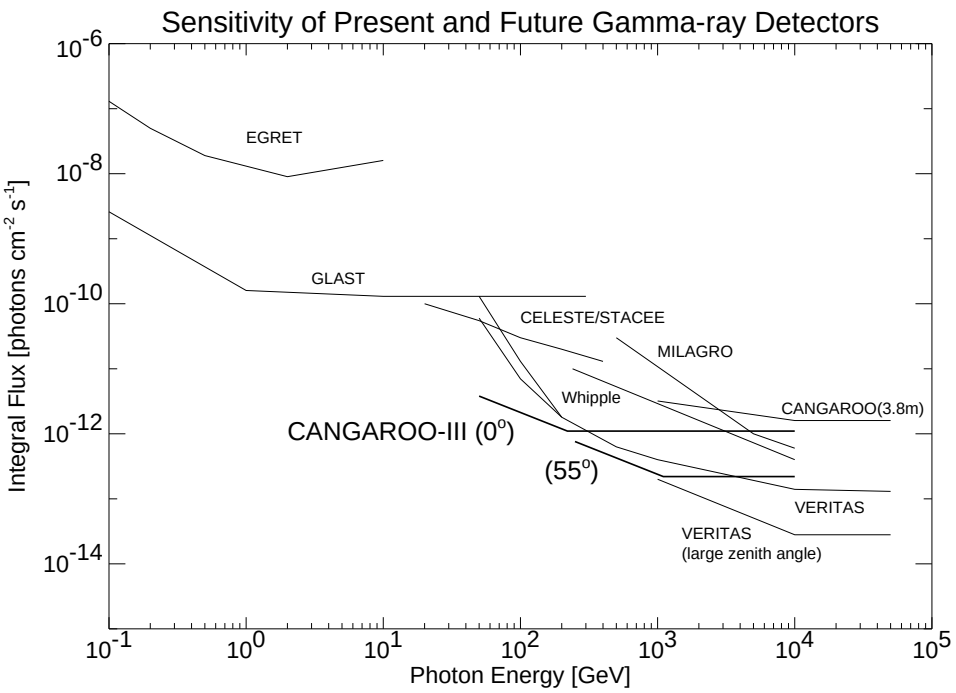

図 4: ガンマ線望遠鏡で検出可能なガンマ線フラックスの比較。人工衛星は 1 年間、チェレンコフ望遠鏡は 50 時間の観測を仮定している。

[2] J. R. Patterson and T. Kifune 1992, Australian and New Zealand Physicist, 29, 58

[3] T. Hara et al. 1993, Nucl. Instr. Meth., A332, 300

[4] T. Kifune et al., in Proc. of the Fourth Compton Symposium (eds. C. D. Dermer et al., 1997, AIP Conf. Proc. 410) p. 1507: see also the CANGAROO Website: `http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp`

[5] T. Kifune et al. 1995, Astrophys. J. Lett., 438, L91

[6] F. A. Aharonian, A. M. Atoyan and T. Kifune 1997, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., 291, 162

[7] P. Sommers and J. W. Elbert 1987, J. Phys. G: Nucl. Phys. 13, 553

[8] T. Tanimori et al. 1994, Astrophys. J. Lett., 429, L61

[9] T. Tanimori et al. 1998, Astrophys. J. Lett., 492, L33

[10] O. C. De Jager and A. K. Harding 1992, Astrophys. J., 396, 161; O. C. De Jager et al. 1996, Astrophys. J., 457, 253

[11] T. Yoshikoshi et al. 1997, Astrophys. J. Lett., 487, L65

[12] T. Tanimori et al. 1997, IAUC 6706, 2; 1998, Astrophys. J. Lett.(in press)

[13] K. Koyama et al. 1995, Nature, 378, 255

[14] A. Kawachi 1997, Proc. 'Neutron Stars and Pulsars' (Rikkyo University, Nov. 17–20, 1997, in press) and references therein

[15] Y. Matsubara 1997, in "Towards a Major Atmospheric Cherenkov Detector V" (Kruger, South Africa, to be published)

[16] T. Tanimori et al. 1994, in "Towards a Major Atmospheric Cherenkov Detector III" (ed. T. Kifune, Universal Academy Press), p. 311; 原 敏、東京工業大学修士論文 (1997)

[17] D. J. Thompson et al., in Proc. of the Fourth Compton Symposium (eds. C. D. Dermer et al., 1997, AIP Conf. Proc. 410) p. 39