超高エネルギーガンマ線による残光探査

森 正樹*
東京大学宇宙線研究所

1 はじめに

コンプトンガンマ線天文台衛星の EGRET 検出器では、GeV 領域で 5 個のガンマ線バーストを検出しているが [1]、これらの平均スペクトルはフラットであり、超高エネルギーガンマ線領域までスペクトルが伸びている可能性がある (図 1)。また、これらの一つ GRB940217 では、一時間半遅れてバースト中の最高エネルギーである 18 GeV のガンマ線が観測されており [2]、ガンマ線のエネルギーが高いほど加速の遅れなどの原因で遅れて到来するのかもしれない。さらに、BeppoSAX による X 線領域での残光現象の発見と、それに続く可視光や電波での対応天体の観測からは、「火の玉」モデルが有力なモデルの一つと考えられているが、この超高エネルギー輻射領域で陽子が 10^{20} eV のエネルギーまで加速されていれば、ガンマ線バースト程度のタイムスケールで TeV 領域に至るまでのシンクロトロン輻射を出しているかもしれない [3]。これらの陽子が最高エネルギー領域の宇宙線の源となっているのかもしれない [3]。

可視光での吸収線の観測から示唆されるように、ガンマ線バーストが宇宙論的な起源を持つとすれば、TeV 領域では銀河間赤外線によるガンマ線の吸収が問題になる [4]。図 2 に示すように $z > 0.1$ では TeV 領域のガンマ線は到来しない。このような超高エネルギーでバーストが観測されるには、非常に大きなエネルギーが必要である [3]。逆に、もし観測されれば通常のシナリオのどこかがおかしいことになり、大発見につながるかもしれない。また、ある種の量子重力理論によれば、光子の Lorentz 不変性が破れていて、光の速さが

$$v = c(1 - E/E_{\rm QG}),\ \ E_{\rm QG} \geq 10^{16}{\rm GeV}$$

のように高エネルギーほど遅くなり (ここで $E_{\rm QG}$ は量子重力のエネルギースケール)、かつ赤外線との衝突による電子陽電子対生成エネルギー閾値が上がるので、TeV 領域のガンマ線は赤外線による吸収を受けないかもしれない [5, 6]。

このように、ガンマ線バーストが TeV 領域で観測された場合の衝撃は大きい。視野の狭いチェレンコフ望遠鏡では、ガンマ線バーストをリアルタイムにモニターすることは難しいが、X 線などの残光現象の観測によれば、光度の減衰は時間に反比例する程度で比較的ゆっくりであるので、ガンマ線バースト方向を TeV 領域で追観測して残光をとらえる可能性も十分あると考えられる。

2 これまでの観測

広い視野を持つ地上空気シャワーアレイによるバースト現象の探査は以前より行われているが、強い証拠はまだない。Tibet グループは BATSE の観測したバーストのうち 2 年間あまりで視野内に発生した 57 個に対しバーストを探した。個々では有意なものはなかったが、57 個の重ね合わせは平均より 6σ の有意性で Excess を示した。平均エネルギーは ~ 10 TeV であり、これがガンマ線

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

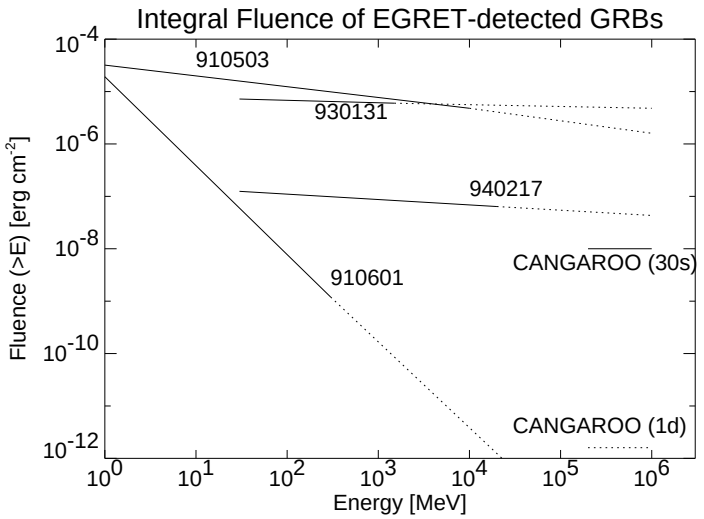

Figure 1: EGRET の検出したガンマ線バーストのスペクトル [1] と CANGAROO の感度 (数値は観測時間)。

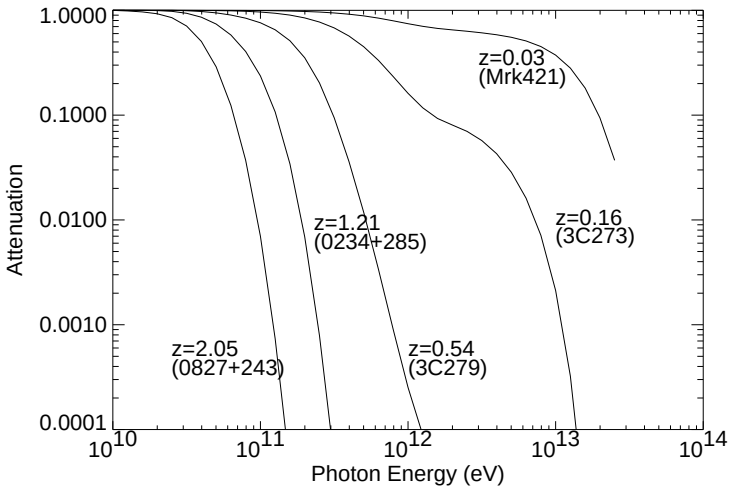

Figure 2: 銀河間赤外線によるガンマ線の吸収。Opacity は戸谷氏の計算 [7] による。

バーストによるものであるなら宇宙論的起源とは相容れない [8]。AIROBICC グループも同様の探査を行ったが、最大の有意性を示したものでも 2.7σ であった [9]。

チェレンコフ望遠鏡では、Whipple グループが BATSE の誤差円を覆うように複数の方向を観測し、9 個のバーストについて上限値を報告している [10]。CANGAROO グループは 3.8m 望遠鏡による観測で、GRB970402 についての予備的結果を 1998 年春の天文学会で発表した。投稿論文を準備中である [11]。

1999 年夏の GeV-TeV Gamma-ray Astrophysics Workshop (Snowbird, Utah) において、Los Alamos の人工プールを用いた空気シャワー検出器 Milagrito のグループは、BATSE バーストのうち 54 個についてバーストを探し、GRB970417a について有意な結果を得たと報告した [12]。偶然で起こる確率は 1.5×10^{-3} とあまり高くはないが、感度を高めた Milagro 検出器の運転が始まっており、今後が注目される。

3 チェレンコフ望遠鏡による観測

チェレンコフ望遠鏡でガンマ線バーストを観測できる条件について考えてみる。まず、月のない晴夜を想定すると (最近は月明下でも観測が試みられているが) 一ヶ月に観測できるのは $80 \sim 100$ 時間で、晴天率が $70 \sim 80\%$とすれば "duty factor"は $8 \sim 11\%$程度である。視野が 3 度程度であり、また解析には角度分解能程度 $(0.1 \sim 0.2^\circ)$ で天体の方向を仮定する必要があるので、ガンマ線バーストの位置がこの程度の精度で通報されている必要がある。

1. ガンマ線バーストが起きている最中に望遠鏡を向けられる割合
   天頂角 30(50) 度まで観測できるとして、全天の 7(18)%になる。観測中の望遠鏡をバーストの通報後すぐに向きを変えるとして、30 秒程度を要する。(CANAGROO-II では 0.5°/degree であるが、3 倍程度速くできる) BATSE のイベントのうち 30 秒以上継続するものは約 30%であるから、先ほどの duty factor をかけると結局全バーストのうち $0.2 \sim 0.7\%$のイベントしか観測できない。(図 1「30s」)

2. ガンマ線バーストの残光を狙う場合
   一日以内に月のない晴夜がある確率は 1/3 くらいだが、即時の場合に比べて数時間待てば天頂角が観測可能になる場合があるので見える空の割合は増加する。全バーストのうち $6 \sim 9\%$ほどが残光探査の対象になりうる。(図 1「1d」)

4 CANGAROO による観測

CANGAROO 3.8m 望遠鏡では BeppoSAX からの通報のあったガンマ線バーストの残光探査を試みてきた。表 1 に観測の概要と予備的結果を示す [11]。観測時間が短いこともあり (CANGAROO でガンマ線天体を検出するには 50 時間程度が実際必要であった)、上限値を与えるにとどまっているが、今年より観測の始まった CANGAROO-II 7m 望遠鏡 [13] が活躍し、さらに本年度よりスタートした CANGAROO-III 計画[1][14] が 2004 年に完成すれば、短時間でも感度が上がるために検出可能性が増すことが期待される。しかし、0.1 度程度の位置精度で南半球[2]から見えるガンマ線バーストが検出されていることが前提である。

[1] http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/c-iii.html
[2] CANGAROO のある南オーストラリア・ウーメラは南緯 31 度

Table 1: CANGAROO 3.8m 望遠鏡によるガンマ線バースト残光探査 (preliminary)

GRB	CANGAROO observation			
	Date	Observation time	Zenith angle	Upper limit (3σ)
970402	Apr 4–10	14h30m ON, No OFF	38–50°	5.6×10^{-12} cm^{-2}s^{-1} (> 2.3 TeV)
980326	Mar 30–Apr 1	4h30m ON, 4h46m OFF	15–35°	9.6×10^{-12} cm^{-2}s^{-1} (> 2.4 TeV)
980425	Apr 29–May 3	5h40m ON, 5h10m OFF	22–30°	7.8×10^{-12} cm^{-2}s^{-1} (> 2.4 TeV)

References

[1] Brenda L. Dingus, Astrophys. Sp. Sci., 231, 187 (1995).

[2] K. Hurley et al., Nature, 372, 652 (1994).

[3] Tomonori Totani, Astrophys. J. Lett. 502, L13 (1998); *ibid.* 509, L81 (1998).

[4] K. Mannheim et al., Astrophys. J., 467, 532 (1996).

[5] Tadashi Kifune, Astrophys. J. Lett. 512, L21 (1999).

[6] W. Kluźniak, astro-ph/9905308 (1999).

[7] Tomonori Totani, private communication.

[8] M. Amenomori et al., Astron. Astrophys., 311, 919 (1996).

[9] L. Padilla et al., Astron. Astrophys., 337, 43 (1998).

[10] V. Connaughton et al., Astrophys. J., 479, 859 (1997).

[11] A. Kawachi et al., in preparation.

[12] J.E. McEnery et al., Proc. GeV-TeV Gamma-ray Astrophysics Workshop (Snowbird, Utah, USA), to be published (1999) (astro-ph/9910549).

[13] T. Tanimori et al., Proc. 26th ICRC (Salt Lake City, USA), OG.4.3.04 (1999) (astro-ph/9906078); A. Kawachi et al., *ibid.* OG.4.3.05 (1999) (astro-ph/9906075); M. Mori et al., *ibid.* OG.4.3.31 (1999) (astro-ph/9906076).

[14] M. Mori et al., Proc. GeV-TeV Gamma-ray Astrophysics Workshop (Snowbird, Utah, USA), to be published (1999) (available at `http://icrhp9/publications.html#proceedings`).