

# Gamma-ray Astrophysics: Future and Prospects

東京大学宇宙線研究所

森 正樹

## 1. はじめに

初期の試みは別として、ガンマ線天文学が本格的に始まったといえるのは SAS-2 衛星の打ち上げからであった[1]。1972 年の打ち上げから 7 ヶ月後の低圧電源故障まで 8000 個余りの天体ガンマ線をとらえ、銀河面からのディフューズ成分に加え、Crab、Vela、Geminga 及び Cyg X-3 と同定された 4 つの点源を検出した[2]。次に 1975 年に打ち上げられた COS B 衛星は、7 年近くに及ぶ観測により 22 個の点源を検出し、COS B カタログとして報告している[3]。ここで多くの未同定点源が報告されたことが大きな興味を呼ぶことになったといえる。その後、次の大型衛星として Compton ガンマ線天文台が打ち上げられた 1991 年までは(スペースシャトルの事故のためもあり)長い空白期間があった。しかし、Compton 衛星は現在に至るまで観測を続け、搭載した 4 つの検出器のうち最も角度決定精度に優れた EGRET によれば、点源の数は今や 200 個を超えるまでになった[4]。こうして、Whipple の高精度の Crab からの検出[5]をはじめとする TeV 領域の地上観測の急速な発展とともに、近年ガンマ線天文学は大きな飛躍を遂げたといえるが、次のガンマ線掃天衛星 GLAST[6]が打ち上げられるのは 2004 年以降であり、コンスタントな観測が続けられる地上観測の重要性はいよいよ増してくるのである[7]。

## 2. 観測技術

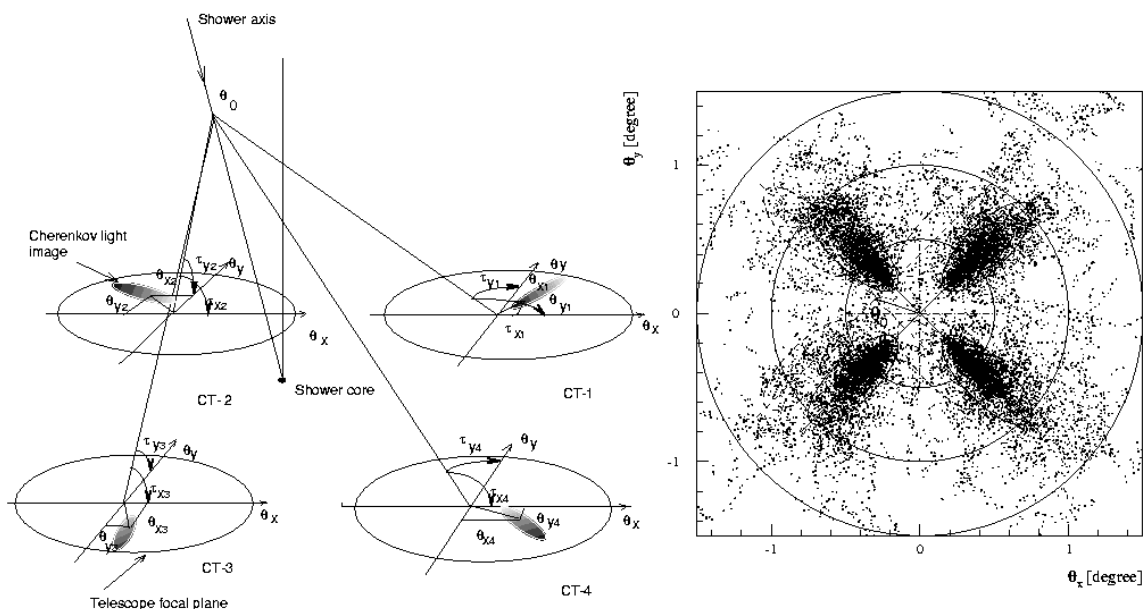


図 1 チェレンコフ光像のステレオ観測[9]。右は 4 台分のイメージを重ねたもの。

衛星観測で角度分解能の良い観測の可能な GeV 領域では、ガンマ線の物質との相互作用は電子陽電子対生成に限られるため、コンバータとトラッキングを兼ねた検出器としてスパークチェンバーが長らく用いられてきた。GLAST ではシリコンストリップ検出器でこれを置き換えようと試みているが、宇宙のような放射線の強い環境ではチャレンジングな面がある。地上観測では 1950 年代からガンマ線が大気中で起こすシャワー中の荷電粒子が放出するチェレンコフ光を用いる方法が試みられてきたが[8]、

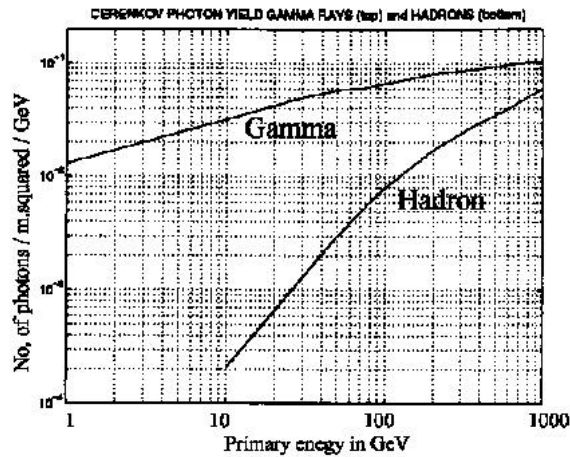


図 2 ガンマ線とハドロンによるシャワーのチェレンコフ光の発光効率 [12]

確かに天体ガンマ線を捕らえていると言えるようになったのは 1983 年のことで、チェレンコフ光のイメージング法を用いた Whipple グループによるかに星雲の検出であった。この成功から各地で大型のチェレンコフ望遠鏡計画が進められているが、これらの計画は大きく二つの方向に分けられる。

### 2.1 ステレオ観測

複数の望遠鏡によってチェレンコフ光のイメージをステレオ観測すれば、シャワーの到来方向が複数の像の軸の交点として精度よく決まるとともに、シャワーコアの位置も決定できるので、チェレンコフ光の発生高度についての情報が得られ、元のガンマ線のエネルギーの推定精度が向上する(図 1)。既に HEGRA グループは口径約 3m の望遠鏡 5 台によるステレオ観測を行っており、S/N の大幅な向上を報告している[10]。この方向を目指すプロジェクトとして、VERITAS [11]、HESS [12]、CANGAROO-III [13]が挙げられる。

### 2.2 大面積望遠鏡

低いエネルギーの宇宙線シャワーでは、核相互作用による(比較的)重いパイオン生成を経由するためにチェレンコフ光の発光効率が低下するが、ガンマ線シャワーではあまり変わらないため、信号/雑音比は向上する[12]。低いエネルギーのシャワーを検出するには大面積鏡を用

表 1 観測技術の比較 [11]

Criterion	Imaging Array	Solar Tower	Fixed Dish	Single Dish	Air Shower
Embodiment	VERITAS	STACBE CELESTE	-	MAGIC	MILAGRO
Technique	ACT-imaging	ACT-lateral	ACT-imaging	ACT-imaging	Water Cherenkov
Status	Proposed	Design, testing	Concept	R. and D	Construction
Threshold	50 GeV	25 GeV (?)	10 GeV (?)	30 GeV	300 GeV
Advantages	Sensitivity Energy resolution Angular resolution Dynamic range Versatility	Cost Threshold	Threshold	Simplicity	FOV High energies Bursts
Disadvantages	Cost	Location Limited energy range FOV	Cost Untried Energy resolution	Muons Inflexible Sky coverage	Threshold Sensitivity

表 2 各プロジェクトの比較 [11]

	EGRET	GLAST	Whipple	MAGIC	STACEE & CELESTE	VERITAS
$A_{\text{eff}}^a$	0.12m <sup>2</sup>	0.8m <sup>2</sup>	30,000m <sup>2</sup>	50,000m <sup>2</sup>	2,000-10,000m <sup>2</sup>	70,000m <sup>2</sup>
$A'_{\text{eff}}$ (large zenith $\angle$ )			150,000m <sup>2</sup>	250,000m <sup>2</sup>		350,000m <sup>2</sup>
$\Omega$ (FWHM)	0.47 sr	2.6 sr	0.001 sr	0.0007 sr?	$8.6 \times 10^{-5}$ sr	0.004 - 0.036 sr
$E_{\text{thr}}^b$	100 MeV	50 MeV	250 GeV	40 GeV	25-40 GeV <sup>c</sup>	50 GeV
$E_{\text{high}}^d$	1 GeV	100 GeV	5 TeV	5 TeV	600 GeV	50 TeV
Energy Res. ( $\sigma$ )	9%	4.4%	40%	25%?	30-40%	8%
Background $\gamma/h$ Sep.	Diffuse $\gamma$	Diffuse $\gamma$	$\mu, p$	$\mu, p, e^-$	$p, e^-$	$p, e^-$
$Q \equiv \epsilon_\gamma / \sqrt{\epsilon_{\text{had}}}$	$\sim \infty$	$\sim \infty$	9	?	2.7 <sup>e</sup>	3.9 (> 70GeV) (> 250GeV)
$Q$ Trigger <sup>e</sup>			2.2	$\sim 3.9$	6.8	3.9 (> 70GeV) 2.2 (> 250GeV)
$Q$ Total			19.8		18.4	15.2 - 53
Angular Res. (single $\gamma$ FWHM)	1.76° (1GeV)	0.49° (1GeV)	0.2° (>250GeV)	0.1°?	0.23°	0.03°-0.05° (300GeV)

いるなどして集光力を高めることが必要である。この方向のプロジェクトとして、大面積の単一反射鏡を用いる MAGIC [14]や、既存の太陽光集光鏡アレイを用いる STACEE [15]、CELESTE [16]が挙げられる。

2.3 以上の観測技術についてまとめたのが表 1、各望遠鏡の性能について比較したのが表 2 である [10]。後者については VERITAS しか載っていないが、HESS と CANGAROO-III についてもほぼ VERITAS に比肩すると考えてよい。

### 3. ガンマ線検出感度

次世代の大型望遠鏡により達成される感度は、約  $10^{-12}$  erg s<sup>-1</sup>cm<sup>-2</sup>あるいは  $10^{11}$  JyHz と期待される。この感度が達成されたときにどのようなこ

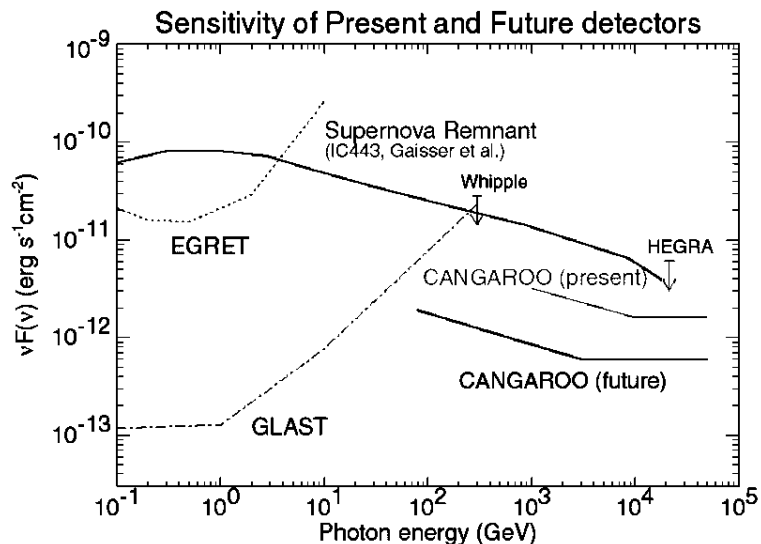


図 3 超新星残骸から期待されるガンマ線スペクトル[17]。CANGAROO の感度も示した。

とが見えてくるかについて考えてみる。

### 3.1 超新星残骸

現在までに TeV ガンマ線が見つかっているのは SN1006 のみであるが、この CANGAROO のデータは X 線の ASCA の結果と合わせて電子加速で説明が可能である。一方、超新星残骸は長い間高エネルギー宇宙線の源として想定されてきており、陽子加速によるガンマ線が期待されている。感度が上がるとともにいくつかの超新星残骸からの TeV ガンマ線が発見されれば、宇宙線起源の問題解明の糸口となるだろう(図 3)。

### 3.2 パルサー

かに星雲をはじめ今までにパルサーから見つかった TeV ガンマ線は DC 成分のみで、パルサー本体ではなくそれを取り巻くパルサー星雲からの放射であると考えられている。パルサーで TeV ガンマ線が作られても、パルサー近傍の強い磁場のため電子対生成を起し、外には出てこない。しかし 100GeV 領域までエネルギー領域が下がれば、この EGRET とのギャップを埋めるようなパルス成分が見つかり、パルサーにおける放射機構についての貴重な情報が得られるだろう(図 4)。

### 3.3 活動銀河核

EGRET で見つかった天体のうち同定されているものの半分はジェットが視線方向を向いた活動銀河核(Blazer)である。このうち、XBL(X-ray-selected BL Lac)と呼ばれる天体はでは、シンクロトロン X 線が高エネルギーに加速された電子で逆コンプトン散乱され、TeV 領域までのガンマ線が放射されることが十分期待される[19](図 5)。しかし、銀河間空間の赤外線と衝突して電子対生成を起して失われるため、遠い XBL を観測するのは困難であるとされている[20] (図 6)。逆に、100GeV ~ 1TeV 領域のエネルギースペクトルを測ることにより、このような赤外線密度についての情報が得られ、宇宙論への寄与も期待できる。

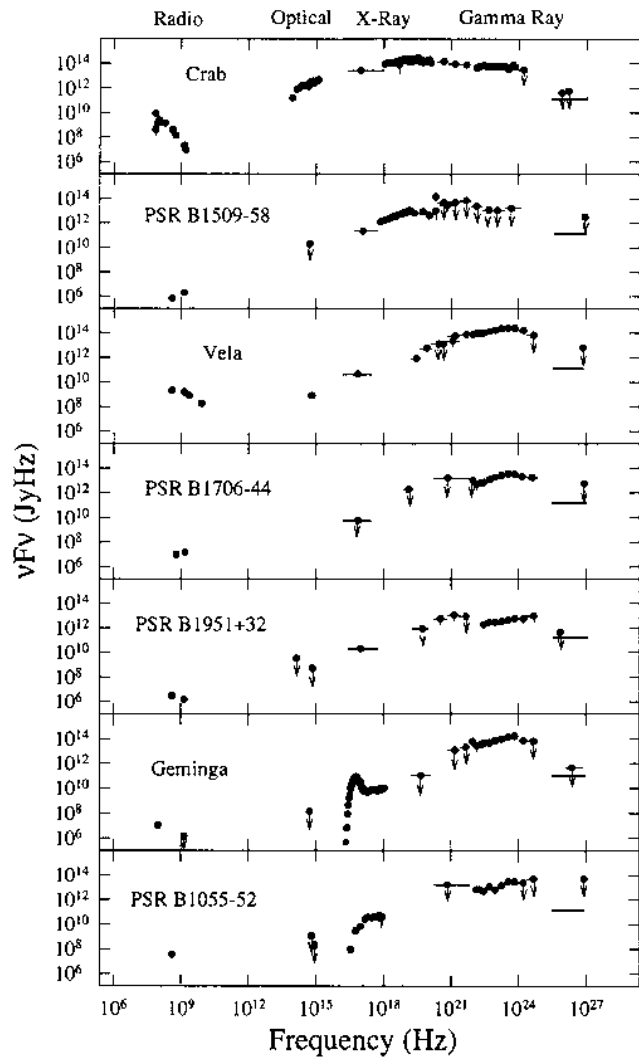
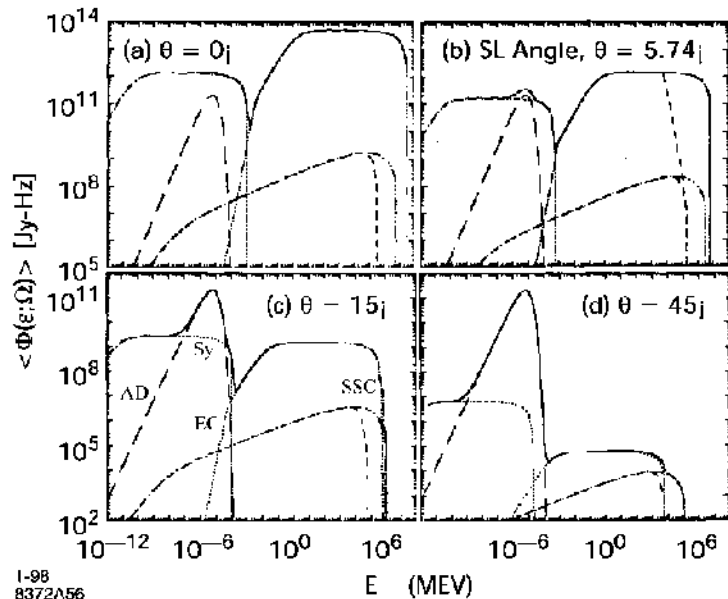


図 4 EGRET で検出されたガンマ線パルサーの広波長エネルギースペクトル[18]。10<sup>26</sup>Hz 付近の横線が将来のチェレンコフ望遠鏡の感度。

3.4 ディフューズガンマ線、巨大分子雲、通常銀河、ガンマ線バースト他  
 感度が上がるとガンマ線で見えてくる可能性を持つ天体はまだまだあるが、ここでは文献[21]を挙げるにとどめる。

#### 4.終わりに

高エネルギーの宇宙線が観測されている以上、これらを加速している天体がどこかに存在しなければならないが、天体における粒子加速の証拠が確固としているのは電子についてだけである。さらに宇宙線のスペクトルは  $10^{20}\text{eV}$  を超えて伸びており、謎は大きい。加速天体を特定できる高い角度分解能と高い感度を持ったガンマ線観測こそがこの問題に対する鍵を握っていると信じるものである。



1-98  
8372A56

図5 AGNで放射されるスペクトル。ジェットとの角度毎に示されている。AD: ディスク、Sy: シンクロトロン、EC: 外部コンプトン、SSC: シンクロトロン自己コンプトン [18]

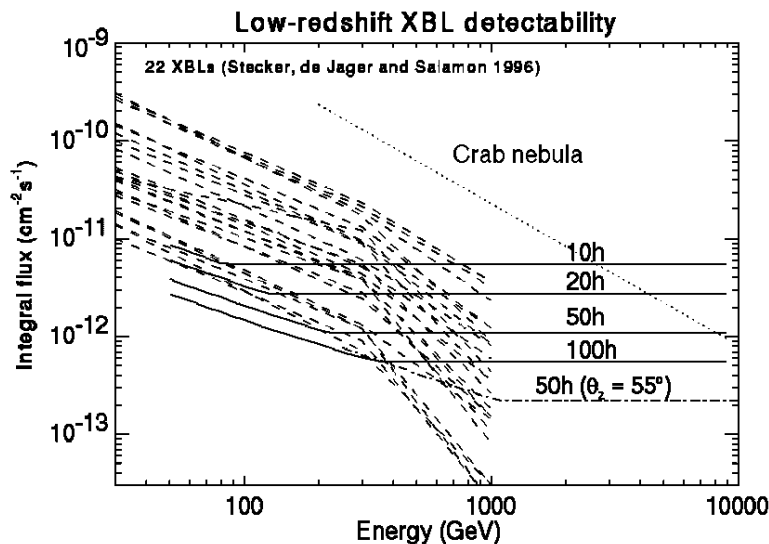


図6 近いXBLから期待されるガンマ線フラックス[19]と将来のチェレンコフ望遠鏡で期待される感度。

## 参考文献

- [1] C.E. Fichtel et al. 1975, ApJ 198, 163.
- [2] R.C. Hartman et al., 1979, ApJ 230, 597.
- [3] B.N. Swanenberg et al. 1981, ApJ 243, L69
- [4] C.E. Fichtel et al., ApJ Suppl.; D.J.Thompson et al., ApJ Suppl.; R.C.Hartman et al., to be appeared.
- [5] T.C. Weekes et al. 1989, ApJ 342, 379
- [6] GLAST Homepage: <http://www-glast.stanford.edu/>
- [7] T.C. Weekes, F. Aharonian, D.J. Fegan and T. Kifune 1997, Proc. 4<sup>th</sup> Compton Symp, AIP Conf. Proc. 410, p.361
- [8] 森正樹 1998、パリティ 8月号(丸善)の引用文献
- [9] F.A. Aharonian and A.K. Konopelko 1997, in "Towards a major Atmospheric Cherenkov Detector V", Potchefstroom University for CHE, p.263
- [10] A. Daum 1997, *ibid.* p.178
- [11] VERITAS Homepage: <http://egret.sao.arizona.edu/vhegra/vhegra.html>
- [12] HESS Homepage: <http://eu6.mpi-hd.mpg.de/HESS/hess.html>
- [13] CANGAROO Homepage: <http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp>
- [14] MAGIC Homepage: <http://hegra1.mppmu.mpg.de:8000/>
- [15] CELESTE Homepage: <http://wwwcenbg.in2p3.fr/Astroparticule/celeste/e-celest.html>
- [16] STACEE Homepage: <http://hep.uchicago.edu/~stacee/>
- [17] T.K. Gaisser, R.J. Protheroe and T. Stanev 1998, ApJ 492, 219
- [18] D.J. Thompson et al. 1997, Proc. 4<sup>th</sup> Compton Symp, AIP Conf. Proc. 410, p.39
- [19] C.D. Dermer, preprint
- [20] F.W. Stecker, O.C. de Jager and M.H. Salamon 1996, ApJ 473, L75
- [21] F.A. Aharonian 1997, Talk at Proc. XVIII Int. Symp. On Lepton-Photon Interactions (astro-ph 9712089)