

TeVガンマ線観測の過去・現在・将来*

東京大学宇宙線研究所 森 正樹

TeV 領域の天体ガンマ線の検出が確実にになったのは 1989 年のことであり、まだ歴史は浅いといえるが、その前には 30 年以上の前史がある。そのあたりから近い将来の見込みまで簡潔に紹介する。

1. 「過去」: 初期の大気チェレンコフ望遠鏡

宇宙線が大気中で起こす空気シャワーからのチェレンコフ光の夜光への寄与については Blackett が 1948 年に指摘していたが[1]、実験的に空気シャワーからのチェレンコフ光の検出に成功したのは Jelley と Galbraith であった。彼らは直径 25cm で F 値 0.46 の放物面鏡の焦点面に直径 5cm の光電子増倍管を置き、市販のごみ缶の底に固定し、その装置をイギリス・ハーウェルにあるガイガー検出器 16 台からなる空気シャワー粒子検出器アレイの中央に天頂に向けて設置し、1953 年の晴れた月のない夜に初めての観測を試みた。彼らは宇宙線シャワーには光のフラッシュが伴うことをオシロスコープの管面写真として示した[2]。

1959 年にモスクワで行われた宇宙線国際会議において Coconi は、かに星雲からの TeV 領域のガンマ線が検出可能かもしれないことを指摘した[3]。彼は超新星爆発で陽子が高エネルギーに加速されて星雲内に閉じ込められており、周囲の物質と衝突して荷電パイオンがつくられ、崩壊して高エネルギー電子となって、星雲の磁場中で観測されているようなシンクロトロン放射を出していると考えた。すでに Jelley は 6 インチ屈折望遠鏡によるかに星雲の観測を 1954 年に試みていたが、本格的なガンマ線検出の試みは Chudakov, Zatsepin らによるクリミアの実験であった。1960 年から 1964 年にかけて、1.55m 口径の反射鏡を 12 台、3 台ずつ線路上の貨車に固定した経緯台に載せ、平行に向けて観測を行った。天体通過前後の計数率の変化を見るドリフトスキャン法を用い、ガンマ線のエネルギーにして 5 TeV 程度が検出可能と推定され、Tau A (かに星雲)、Cas A (超新星残骸)、Cyg A (電波銀河 3C405)、Vir A (電波銀河 M87)、Per A (電波銀河 NGC1275)、Sgr A (銀河中心)といった電波源や、いくつかの銀河団の観測が行われたが、有意な信号は見つからなかった[4]。かに星雲については Coconi の予言したほどの強いガンマ線フラックスは否定されることになった。

1965 年 Gould は、かに星雲からの電波から X 線にいたる放射が高エネルギー電子のシンクロトロン放射によるならば、同じ電子の逆コンプトン散乱で 100-1000 GeV のガンマ線が放出されることを指摘した[5]。Fazio らはこの予言を受けて、Mt. Hopkins に経緯台式架台に載せて天体を追尾可能な 10m ϕ 反射鏡 (Whipple 望遠鏡) を建設し、より低いエネルギーまで検出を可能にして 1968 年から観測を行った。3 年間の観測でガンマ線信号の有意性は 3 であったが、彼らはこれを上限値として報告した[6]。

2. 「現在」: 解像型チェレンコフ望遠鏡

Weekes と Turver は 1977 年、チェレンコフ光を 2 次元で観測することの利点を指摘しているが、これは主に角度分解能の向上についてであった[7]。翌年にはガンマ線と陽子のイメージによる識別可能性を指摘し[8]、これを受けて Weekes らは Whipple 10m 望遠鏡に最初のイメージングカメラ(37ch)を設置して 1982 年から観測を始めた。Hillas は 1985 年、モンテカルロ計算に基づき像のモーメントとして「イメージパラメータ」を定義し、イメージによる識別の定量的方法を提案した[9]。解像型チェレンコフ望遠鏡の解析には、このイメージング法が改良されながら用いられている。

Weekes et al. は 1989 年、このイメージパラメータ分布を用いて 9 の有意性でかに星雲の検出を報告した[10]。これが最初の確実な TeV ガンマ線源の検出といえるものである。その後 Whipple のイメージングカメラは 109ch (1988 年)、337ch (1996 年) と進化し、1999 年からは 490ch で観測が続

表 1. TeV ガンマ線天体カタログ

Catalog Name	Source	Type	Date/Group	EGRET	Grade
TeV 0047-2518	NGC 253	Starburst	2003/CANG.	no	B
TeV 0219+4248	3C66A	Blazar	1998/Crimea	yes	C-
TeV 0535+2200	Crab Nebula	SNR	1989/Whipple	yes	A
TeV 0834-4500	Vela	SNR	1997/CANG.	yes	C
TeV 1121-6037	Cen X-3	Binary	1999/Durham	yes	C
TeV 1104+3813	Mrk 421	Blazar	1992/Whipple	yes	A
TeV 1231+1224	M87	Radio Gal.	2003/HEGRA	no	C
TeV 1429+4240	H1426+428	Blazar	2002/Whipple	no	A
TeV 1503-4157	SN1006	SNR	1997/CANG.	no	B
TeV 1654+3946	Mrk 501	Blazar	1995/Whipple	no	A
TeV 1710-2229	PSR 1706-44	SNR	1995/CANG.	no	A
TeV 1712-3932	RXJ1713-39	SNR	1999/CANG.	no	B+
TeV 2000+6509	1ES1959+650	Blazar	1999/TA	no	A
TeV 2032+4131	CygOB2?	OB Assoc.	2002/HEGRA	yes?	C
TeV 2159-3014	PKS2155-304	Blazar	1999/Durham	yes	A
TeV 2203+4217	BL Lacertae	Blazar	2001/Crimea	yes	C
TeV 2323+5849	Cas A	SNR	1999/HEGRA	no	B
TeV 2347+5142	1ES2344+514	Blazar	1997/Whipple	no	C

けられている。

南半球では、日豪共同の CANGAROO グループが東京天文台（当時）堂平観測所で役目を終えた月測距儀 3.8m を改造し、224ch の高解像度イメージングカメラを主焦点に置いて南オーストラリア州ウーメラで 1992 年から観測を開始した。Compton ガンマ線天文台衛星の EGRET 検出器で検出された GeV ガンマ線天体などをターゲットとして観測を進め、南天最初の TeV ガンマ線天体としてパルサー PSR 1706-44 を検出した[11]。

チェレンコフ光は、直径~300m、厚さ~1m の「円盤」として地上に到達する。この円盤を 100m 程度離れた 2ヶ所で同時に検出することにより、「三角測量」としてシャワーまでの距離の情報を得て、シャワーの到来方向をより正確に求めようというのがステレオ観測法である。角度分解能の向上のみならず、シャワーから検出器までの距離がわかることにより、シャワーの発達高度のばらつきが補正されて、エネルギー分解能も向上する。ドイツなどの HEGRA グループはカナリア諸島ラパルマに 3m 口径のチェレンコフ望遠鏡 5 台を設置し、イメージングカメラを装備して解像型チェレンコフ望遠鏡によるステレオ観測を開始した。このような観測により、かに星雲の TeV ガンマ線放射領域は 1.5' 以下であることが示され、ステレオ観測により角度分解能を向上できることが示された[12]。

現在の各種天体の観測状況については報告が多数ある[13, 14, 15]なのでここでは詳説せず、表 1 に Trevor Weekes がまとめた TeV ガンマ線カタログのみを示す[14]。これは 2003 年宇宙線国際会議で彼が示したもので、この会議で検出が報告された天体を含まない。「Grade」というのは彼の与えた評価で、A は複数のグループが高い有意度で検出した天体、B は高い有意度で検出されているが一つのグループのみによるもの、C はまだ有意度が十分高いといえないものである。この会議で報告された天体も含めた TeV ガンマ線天体の天球図を図 1 に示す[15]。

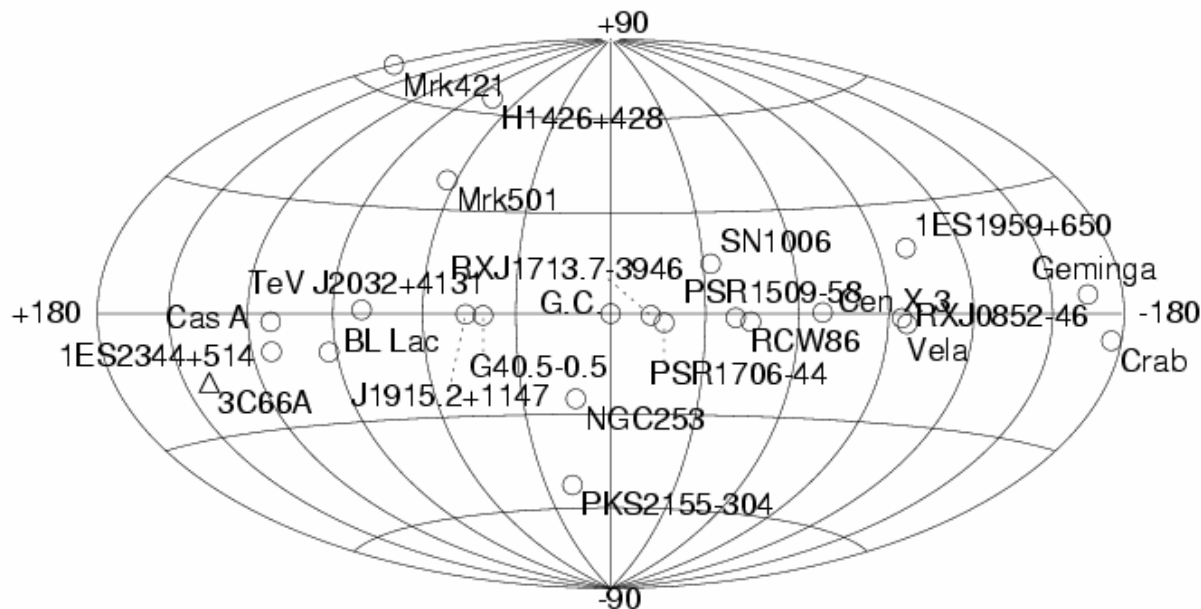


図 1. TeV ガンマ線天体の天球分布。

3. 「未来」: 第 3 世代チェレンコフ望遠鏡プロジェクト

イメージング法が使われる前を第 1 世代、以後を第 2 世代として、現在は世界各所で第 3 世代とも言うべき望遠鏡群が完成し始めている。

我々は日豪共同の CANGAROO-III プロジェクトとして、10m 口径望遠鏡 4 台によるステレオ観測装置の建設を進めてきており、今年度中には 4 台目の調整も終了して完成させる予定である[16]。同じ南半球では、ドイツなどの H.E.S.S.グループがアフリカ・ナミビアに 12m 口径望遠鏡 4 台の装置を完成しようとしている[17]。北半球では別のドイツなどの MAGIC グループがカナリア諸島ラパルマに 17m 望遠鏡の設置を完了した[18]。Whipple グループは 7 台の 12m 望遠鏡 7 台による VERITAS を計画していたが、まず 4 台分の予算が認められ、最初の 1 台となるプロトタイプが完成するところである[19]。種々のプロジェクトで予想されガンマ線フラックスに対する感度曲線を図 2 に示す。これらの望遠鏡による観測結果が出てくるここ数年は、TeV ガンマ線天文学にとって新たな時代の始まりとなることであろう。

さらに次の世代の地上観測装置の検討もすでに始められている。次の目標の一つは衛星観測とオーバーラップする 10GeV 領域であり、口径 30m クラスのチェレンコフ望遠鏡を高地に設置する構想の議論が始まっている。別の方向は、エネルギーは多少高くとも広視野を目指す掃天型望遠鏡であろう。

4. まとめ

TeV ガンマ線観測は、チェレンコフ光のイメージング法を用いた宇宙線シャワーとガンマ線シャワーの識別の成功というブレークスルーと共に、過去十数年で急速な進展を見せている。ステレオ法の有効性も証明され、チェレンコフ光観測による角度分解能・エネルギー精度も向上している。TeV ガンマ線天体はパルサー星雲、ブレイザー、超新星に加えて、爆発的星形成銀河、電波銀河などその範囲を拡大している。いくつかの超新星残骸から TeV ガンマ線が観測されたことは高エネルギー粒子加速の証明ではあるが、宇宙線の起源として陽子が加速されている証拠はまだ十分とはいえない。大型計画が各地で進行中であり、これから本格的な観測データが蓄積されることにより衛星観測とのエネルギーギャップは縮まっていく。さらなる次期大型計画も構想されており、エネルギー領域が衛星観測とオーバーラップしていくにつれ、より相補的で相互に較正された多数の天体の高エネルギースペクトルが精密に測定できるようになり、放射機構の解明が進むであろう。

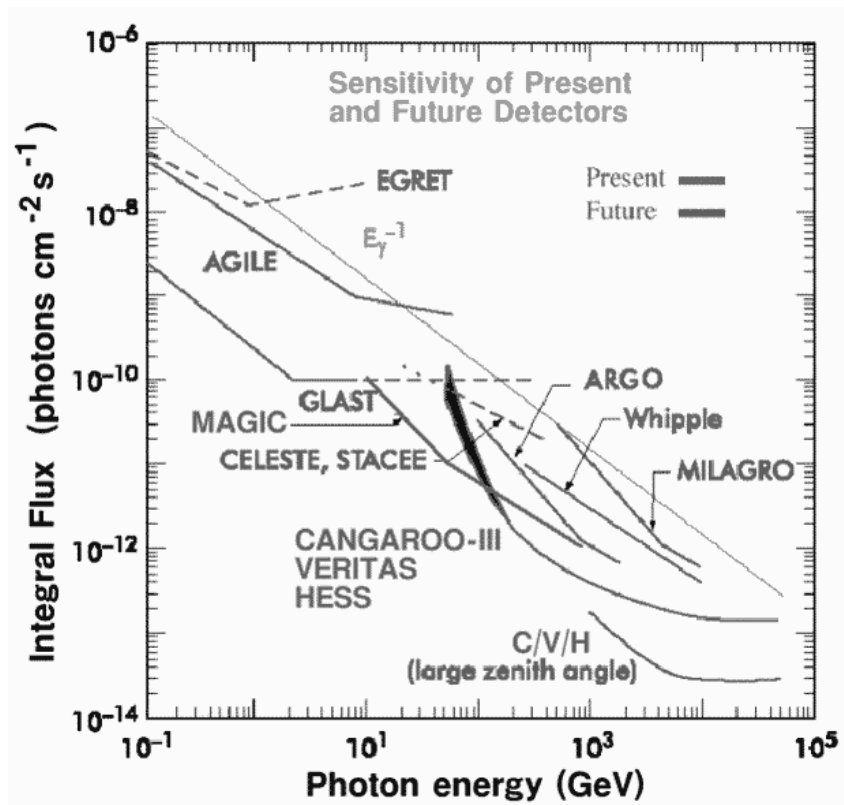


図 2. ガンマ線望遠鏡の予想感度

参考文献

- [1] P.M.S. Blackett, *Phys. Soc. of London Gassiot Committee Report* 34 (1948)
- [2] W. Galbraith and J.V. Jelly, *Nature* **171** (1953) 349
- [3] G. Cocconi, *Proc. of the 7th Int. Cosmic Ray Conf.* (Moscow, 1959) Vol.2, p.309
- [4] A.E. Chudakov et al., *Transl. Consultants Bureau, P.N. Lebedev Phys. Inst.* **26** (1965) 99
- [5] R.J. Gould, *Phys. Rev. Lett.* **15**, 511 (1965)
- [6] G.G. Fazio et al., *Astrophys. J.* **175** (1972) L117
- [7] T.C. Weekes and K.E. Turver, *Proc. of the 12th Eslab Symp.* (Frascati, 1977) ESA SP-124, p.279
- [8] T.C. Weekes and K.E. Turver, *Nuovo Cim.* **45B**, 99 (1978)
- [9] A.M. Hillas, *Proc. 19th ICRC*, Vol.3, p.445 (1983)
- [10] T.C. Weekes et al., *Astrophys. J.* **342**, 379 (1989)
- [11] T. Kifune et al., *Astrophys. J.* **438**, L91 (1995)
- [12] F.A. Aharonian et al. *A&Ap* **361** (2000) 1073
- [13] T.C. Weekes, "Very High Energy Gamma-ray Astronomy" (Inst. of Physics Publishing, 2003)
- [14] T.C. Weekes, T. Kifune and H.Voelk, Highlight talk at 28th ICRC (2003), to be published
- [15] M. Mori, Rapporteur talk at 28th ICRC (2003), to be published
- [16] <http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/c-experiments.html>
- [17] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>
- [18] <http://hegra1.mppmu.mpg.de/MAGICWeb/>
- [19] <http://veritas.sao.arizona.edu/>

* Talkで使用したPresentationは、<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/~morim/presentation.html> に置いてあります。