

---

## 超高エネルギーガンマ線による天体物理

---

森 正樹<sup>1</sup>

(1) 東京大学 宇宙線研究所

---

### はじめに

天体からのガンマ線は地上に直接到達できないため、観測は人工衛星を用いて始まった。ガンマ線が大気中で起こす粒子シャワーから放出されるチェレンコフ光を用いて間接的にガンマ線を捕らえる手法は、1960年代から試みられてきたものの、確実な信号が検出されるようになったのは1980年代の終わりごろ、イメージング法が開発されてからであった。この Whipple グループによるかに星雲からの TeV(=  $10^{12}$  eV) ガンマ線の検出が1989年に報告されてから、この分野は急激に発達を見せている。ここでは、TeV 領域の天体ガンマ線の観測により明らかにされてきた高エネルギー天体の観測結果の概略について、最近の成果を中心に解説する [1]。

### 1. 地上ガンマ線観測

TeV 領域天体ガンマ線の観測は、解像型チェレンコフ望遠鏡によるイメージング法の確立によってブレークスルーを迎えたと言える。Weekes と Turver は1977年、チェレンコフ光を二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 [2]。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 [3]、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 (2 インチ光電子増倍管 37 pixels) を設置して1982年から観測を始めた。Hillas は1983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 [4]。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  $9\sigma$  の統計的有意性でかに星雲の検出を報告した [5]。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 109 pixels (1988 年)、337 pixels (1996 年) と進化し、1999 年からは 490 pixels で観測が続けられている。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 [6]。1999 年には新規に建設した 7m 望遠鏡 (翌年 10m に拡張) が稼動を始め、いくつかの新 TeV 天体が発見されている [7]。

## 2. ステレオ観測

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 [8]。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 [9]。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 [10]。最近稼動を始めた CANGAROO-III や H.E.S.S.、建設中の VERITAS は第二世代のステレオ観測システムとなっている (後述)。

## 3. 観測の現状

表 1 に Trevor Weekes がまとめた TeV ガンマ線カタログを示す [11]。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

表 1. TeV ガンマ線天体カタログ 2003 (T.C. Weekes による)

Catalog Name	Source	Type	Date/Group	EGRET	Grade
TeV 0047–2518	NGC 253	Starburst	2003/CANG.	no	B
TeV 0219+4248	3C 66A	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	M 87	Radio Gal.	2003/HEGRA	no	C
TeV 1429+4240	H 1426+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	RX J1713-39	SNR	1999/CANG.	no	B+
TeV 2000+6509	1ES 1959+650	Blazar	1999/TA	no	A
TeV 2032+4131	Cyg OB2?	OB Assoc.	2002/HEGRA	yes?	C
TeV 2159–3014	PKS 2155-304	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	1ES 2344+514	Blazar	1997/Whipple	no	C

た天体を含まない。「EGRET」は EGRET による GeV 領域の検出の有無、「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。以下、個別の天体について簡単にコメントしていく。

### 3.1. パルサーとパルサー星雲

かに星雲

最初の TeV ガンマ線天体といえるかに星雲は、TeV ガンマ線天文学の標準光源として地位を獲得しており、エネルギースペクトルは、100 TeV 領域まで

延びていることが観測されている [12] [13]。この TeV 領域ガンマ線は、パルス成分が見つかっておらず、シンクロトロン放射を起こしている高エネルギー電子がそのシンクロトロン光子を逆コンプトン散乱して高エネルギーガンマ線を作り出すという Synchrotron-Self-Compton 機構で解釈されている [14]。しかし、このメカニズムでは数十 TeV 領域まで延びたガンマ線スペクトルの説明は困難であり、他の加速機構が関係している可能性もある [15]。

#### *PSR 1706-44*

EGRET により GeV 領域でパルスが観測されているが、TeV 領域では DC 成分のみが観測されている [6] [16]。周囲のパルサー星雲は貧弱で、逆コンプトン放射として解釈するのは困難である [17]。

### 3.2. 超新星残骸

高エネルギー宇宙線の起源を超新星残骸の衝撃波における粒子加速とする説は長い歴史を持つが [18]、宇宙線のエネルギー収支の問題と、地球近傍の粒子の衝撃波加速の観測から支持されていても、実際の超新星残骸における粒子加速の証拠は乏しかった。しかし、X 線・TeV ガンマ線の観測により状況が大きく変化してきている。

#### *SN1006*

1006 年に起きた歴史的超新星の残骸とされるこの天体のシェルからは、ASCA 衛星により非熱的な X 線放射が見つかり、シンクロトロン放射とすれば数十 TeV の高エネルギー電子が存在することを意味し、超新星残骸における高エネルギー粒子加速の証拠として注目された [19]。CANGAROO の 3.8m 望遠鏡による観測からは、この高エネルギー電子と宇宙背景放射光子の逆コンプトン散乱で生成されたと考えられる TeV 領域のガンマ線信号が検出され、より直接的な粒子加速の証拠となった [20]。2003 年の宇宙線国際会議で、カナリア諸島の HEGRA CT1 のグループが北天からの大天頂角観測でガンマ線信号を捕らえたと報告したが [21]、動き始めたばかりのナミビアの H.E.S.S. 望遠鏡の初期の観測では信号が得られなかった [22]。本格的な稼働後の結果が

注目される。

#### *Cas A*

電波源として見つかったこの超新星残骸は、歴史記録にはないが爆発後数百年と若い残骸と考えられ、粒子加速天体の候補と考えられた。HEGRA CT system による長時間の観測により、かに星雲の 3% 程度と小さなフラックスではあるが検出された [23]。

#### *RX J1713.7-3946*

非熱的放射を示すシェル型超新星残骸として X 線で見つかり、超新星残骸 1006 と似た性質を示すことから TeV 領域での検出が期待され、CANGAROO 3.8m 望遠鏡で検出された [24] 天体である。10m 望遠鏡の観測結果によるエネルギースペクトルは、400 GeV ~ 10 TeV の観測範囲で単一のべき乗で表され、高エネルギー電子からの放射では説明できない [25]。これを周囲の物質との相互作用で生じる  $\pi^0$  が崩壊して起こすガンマ線放射と解釈すれば、加速された陽子の存在を示唆するものであり、宇宙線の起源の問題の解明に大きな鍵を与え得る結果と言えよう。

#### 超新星残骸 *RX J0852.0-4622*

大きく広がった Vela 超新星残骸に隠されていたこの超新星残骸には、X 線領域で非熱的放射が見られ、超高エネルギー電子の逆コンプトン散乱による TeV 領域のガンマ線放射が予想された。CANGAROO 10m 望遠鏡 1 号機により 2001 年末から 2002 年にかけて計 70 時間の観測が行われ、ガンマ線信号が見つかった [26]。確認されれば TeV 領域で検出された超新星残骸として 4 例目となり、超新星残骸における高エネルギー粒子の加速の証拠を強化するものである。

### 3.3. そのほかの銀河系内天体

#### 銀河中心

我々の銀河中心は、強力な電波源 (Sgr A\*) であり、EGRET による GeV ガンマ線ではハードな放射が見つかったが、X 線強度は強くない。このような高エネルギー放射の機構についてはまだ定説はない。CANGAROO 10m 望遠鏡 1 号機の 2000 年と 2001 年の計 120 時間 (OFF 方向の観測は別) の観測データをイメージ解析することにより、ガンマ線信号が検出された [27]。ガンマ線のエネルギー閾値は約 250 GeV である。Whipple グループは最近、北半球から大天頂角 (平均  $61^\circ$ ) で 26 時間観測し、2.8 TeV 以上でかに星雲の 4 割ほどの強度のガンマ線信号を報告している [28]。

#### 未同定天体 *TeV J2032+4130*

HEGRA CT system の観測により、1980 年代に  $10^{15}$ eV ガンマ線の検出が報告された X 線連星 Cyg X-3 の約  $0.7^\circ$  北に未同定の TeV ガンマ線天体が見つかった [29]。他の波長ではめぼしい対応天体はなく、Cygnus OB association との関連も提案されている。ごく最近 Whipple も過去のデータからこの天体の位置に信号を報告している [30]。

### 3.4. 活動銀河核

EGRET 検出器で同定されたガンマ線天体のうちでは、活動銀河核、特に blazar と呼ばれるタイプが最も多い [31]。このタイプの活動銀河核では、巨大質量ブラックホール周囲から噴出す相対論的ジェットが視線方向を向いているとされ、相対論的ピーミングのために粒子のローレンツ因子が大きくなり、逆コンプトン散乱などで放出される光子のスペクトルがガンマ線領域まで伸びていると考えられている。また、1 時間を切る早いスケールに至るまでガンマ線強度が時間変動することが報告されており、ガンマ線放射はこのスケールに対応した狭い領域で起こっていることになり、ブラックホール近傍の現象を探る上で貴重な情報を提供している。また、TeV 領域のガンマ線は銀河間の背景赤外線と衝突して電子陽電子対を作って失われるため、遠方の天体ほどスペク

トルが吸収を受け、宇宙論的情報も与えてくれる [32]。

以下の天体名の後に示す  $z$  の値は赤方偏移であり、 $z$  が小さいとき天体までの距離はおよそ  $cz/H_0$  となる。(ただし  $H_0 \approx 71$  km/s/Mpc はハッブル定数である。)

*Mrk421* ( $z = 0.031$ )

Whipple グループにより検出された TeV 領域最初の銀河系外天体であり [33]、X 線強度と関連したフレア現象がたびたび観測されてきた。このような相関は、高エネルギーに加速された電子からのシンクロトロン放射として X 線を、背景放射光子との逆コンプトン放射としてガンマ線を説明するという Synchrotron Self-Compton モデルで説明されている [34]。CANGAROO では 2001 年 2 月から 3 月に HEGRA グループなどにより TeV ガンマ線のフレアが観測された速報を受けて、大天頂角ではあるが 10m 望遠鏡による観測を試みた。天頂角は 70 度ほどになるのでエネルギー閾値は 10 TeV 程度となってしまう、銀河間の背景赤外線により吸収を受け、大きく減衰しているはずである。ところが、ガンマ線の信号が有意度  $5\sigma$  程度で見つかった [35]。これは背景赤外線の量についての見積もりの見直しが迫られることなどを意味している。

*Mrk501* ( $z = 0.034$ )

Whipple グループが 1996 年に最初に報告しているが [36]、1997 年に強いフレアを起こし、各地の望遠鏡で観測されてもっとも良い統計のガンマ線イベントサンプルを提供してきた天体である [37]。スペクトルはハードで、赤外線による吸収を補正すると源でのスペクトルはさらにハードになり、背景赤外線の量が少ないことを示唆しているのかもしれない。

*1H 1426+428* ( $z = 0.0129$ )

Whipple グループにより 2001 年に報告され [38]、HEGRA グループ [39] と CAT グループ [40] によっても確認されたこの天体は、赤方偏移が 0.129 と最遠の TeV ガンマ線天体として、背景赤外線量の推定に重要であり、フレア

時のスペクトルの詳細な検討が行われている [41]。

*1ES 1959+650* ( $z = 0.048$ )

1999年 Uta 7TA グループにより最初に報告されたが有意度は高くなかった [42]。2002年に HEGRA グループ [43] や Whipple グループ [44] により TeV ガンマ線フレアが観測され、ガンマ線 blazar として確立した。

*PKS 2155-304* ( $z = 0.117$ )

ダラム大学グループによって 1997年の観測から検出が報告されていた [45]。CANGAROO の観測では上限値のみが得られていた [46]。H.E.S.S. の最初の 2 台による 2002年の観測でガンマ線信号が報告された [47]。

*1ES 2344+514* ( $z = 0.044$ )

Whipple グループにより最初に検出され [48]、HEGRA グループによって CT system で確認されたが [49]、両者とも有意度はあまり高いとはいえない。

### 3.5. そのほかの銀河系外天体

*NGC253* (距離  $2.5 \text{ Mpc}$ )

CANGAROO グループは今まであまり注目されていなかった新しいタイプの高エネルギーガンマ線天体として、超新星爆発の頻度が高い爆発的星形成銀河 NGC253 を 10m 望遠鏡により観測し、予想を超える強度のガンマ線信号を見つけた [50]。これは通常銀河として初めてのガンマ線天体となる。また、このガンマ線信号は空間的に点源より広がった様相を示しており、EGRET 検出器によって GeV 領域では上限のみが得られている [51] ことと合わせ、その起源について興味を持たれる。

*M87* ( $z = 0.00436$ )

Vir A としても知られる巨大電波銀河で、中心には  $\sim 10^9 M_{\odot}$  のブラックホールがあるとされており、ジェットも観測されているが、blazar の場合と

異なり視線方向から外れている。2003年 HEGRA CT system の観測により TeV ガンマ線の信号が報告された [52]。

#### 4. 世界の状況

Fig.1 に以上述べた天体の天球上の分布を示す。地上望遠鏡では天球のすべてをカバーすることができず、北半球と南半球にそれぞれ装置が必要である。また、活動銀河核のように変動の激しい天体では、経度の異なる位置にある望遠鏡で切れ目のないデータを取ることも重要である。

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いたが、2003 年度末に 4 台目の調整も終了し、フル観測を開始した [53]。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、観測を始めている [54]。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、観測を開始した [55]。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 [56]。これらの望遠鏡により天球が TeV 領域で広くカバーされることになり、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。

#### 5. 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・エネルギー決定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、銀河中心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



- [5] T.C. Weekes et al., 1989, *Astrophys. J.* 342, 379
- [6] T. Kifune et al., 1995, *Astrophys. J.* 438, L91
- [7] M. Mori, 2003, *Prog. Theor. Phys. Suppl.*, 151, 85
- [8] F.A. Aharonian et al., 1993, *Experimental Astronomy*, 2, 331
- [9] A. Daum et al., 1997, *Astroparticle Physics*, 8, 1
- [10] F.A. Aharonian et al. 2000, *Astron. Astrophys.* 361, 1073
- [11] T.C. Weekes, T. Kifune and H.Völk, in “Frontiers of Cosmic Ray Science” (Eds. T. Kajita et al., Universal Academy Press, Tokyo, 2004)
- [12] T. Tanimori et al., 1998, *Astrophys. J.* 492, L33
- [13] D. Horns et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 4, p.2373
- [14] O.C. de Jager and A.K. Harding, 1992, *Astrophys. J.* 396, 161
- [15] A.M. Atoyan and F.A. Aharonian, 1996, *MNRAS*, 278, 575
- [16] P.M. Chadwick et al, 1998, *Astroparticle Phys.* 9, 131
- [17] J. Kushida et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 4, p.2493
- [18] S. Hayakawa, K. Ito and Y. Terashima, 1958, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 6, 1 and references therein
- [19] K. Koyama et al., 1995, *Nature*, 378, 255
- [20] T. Tanimori et al., 1998, *Astrophys. J.* 497, L25
- [21] V. Vitale et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 4, p.2389
- [22] C. Masterson et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 4, p.2323
- [23] F.A. Aharonian et al. 2001, *Astron. Astrophys.* 370, 112
- [24] H. Muraishi et al., 2000, *Astron. Astrophys.*, 354, L57
- [25] R. Enomoto et al., 2002, *Nature*, 416, 823
- [26] H. Katagiri, 2004, Ph.D. thesis, University of Tokyo; H. Katagiri et al., in preparation
- [27] K. Tsuchiya et al., 2004, *Astrophys. J.* 606, L115
- [28] K. Kosack et al., 2004, *Astrophys. J.* 608, L97
- [29] F.A. Aharonian et al., 2002, *Astron. Astrophys.* 393, L37
- [30] M.J. Lang et al., 2004, *Astron. Astrophys.*, in press
- [31] R.C. Hartman et al., 1999, *Astrophys. J. Suppl.* 123, 79

- [32] F.W.. Stecker, O.C. de Jager and M.H. Salamon, 1992, *Astrophys. J.* 390, 49
- [33] M. Punch et al., 1992, *Nature*, 358, 477
- [34] T. Takahashi et al., 2000, *Astrophys. J.* 542, L105
- [35] K. Okumura et al., 2002, *Astrophys. J.* 579, L9
- [36] J. Quinn et al., 1996, *Astrophys. J.* 456, L83
- [37] R.J. Protheroe et al., 1998, *Proc. 25th ICRC*, Vol. 8, p.317
- [38] D. Horan et al., 2002, *Astrophys. J.* 571, 753
- [39] F. Aharonian et al., 2002, *Astron. Astrophys.* 384, 23
- [40] A. Djannati-Atai et al., 2002, *Astron. Astrophys.* 391, 25
- [41] D. Petry et al., 2002, *Astrophys. J.* 580, 104
- [42] T. Nishiyama et al., 1999, *Proc. 26th ICRC*, OG2.1.21
- [43] F. Aharonian et al., 2003, *Astron. Astrophys.* 406, L9
- [44] J. Holder et al., 2003, *Astrophys. J.* 583, L9
- [45] P.M. Chadwick et al., 1999, *Astrophys. J.* 513, 161
- [46] T. Nakase et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 5, p.2587
- [47] A. Djannati-Atai et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 5, p.2575
- [48] M. Catanese et al., 1998, *Astrophys. J.* 501, 606
- [49] M. Thuczykont et al., 2003, *Proc. 28th ICRC*, Vol. 5, p.2547
- [50] C. Itoh, et al., 2002, *Astron. Astrophys.* 396, L1; C. Itoh et al., 2003, *Astron. Astrophys.* 402, 443
- [51] J.J. Blom et al., 1999, *Astrophys. J.* 516, 744
- [52] F.A. Aharonian et al., 2003, *Astron. Astrophys.* 403, L1
- [53] <http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/c-experiments.html>
- [54] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/HESS.html>
- [55] <http://hegra1.mppmu.mpg.de/MAGICWeb/>
- [56] <http://veritas.sao.arizona.edu/>