

TeV 線天文学の現状と将来

森 正樹[†]

東京大学宇宙線研究所

はじめに

高エネルギーのガンマ線は、地球大気に入射すると大気の原子核と衝突して電磁カスケードシャワーを起こす。このシャワー中の荷電粒子が大気中の光速より速く走るとチェレンコフ光が放出される。大気の屈折率が小さいためにチェレンコフ光は前方に集中して（約1度）放出されるため、元のガンマ線の方向を保っている。ここにチェレンコフ光の光のフラッシュを捕らえる地上ガンマ線天文学が成立する¹。

チェレンコフ光は半径約130m、厚さ数ナノ秒の光の円盤として地上に到達する。したがってチェレンコフ望遠鏡は広大な有効面積を稼ぐことができ、検出するガンマ線のエネルギーが高いことによるフラックスの減少を補うことができる。しかし、同様の光のフラッシュは一般の荷電宇宙線によっても引き起こされる。この圧倒的な雑音を克服するためには最初の試みから数十年を要したが、Whippleグループにより、シャワーのチェレンコフ光像を捕らえて、宇宙線とガンマ線をイメージ形状の違いから識別する方法が開発され、かに星雲がTeVガンマ線源²として確立されてからは、ガンマ線天文学は急速に進展を見せることとなった。

人工衛星と地上望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測とその得失について表1にまとめておく。両者は現在相補的ともいえるが、カバーするエネルギーにギャップ(30-300 GeV)がある。しかし、以下で見るように、どちらからもこのギャップを埋めようとする努力がなされている。

表1 人工衛星と地上望遠鏡による高エネルギーガンマ線観測

ベース	人工衛星	地上
ガンマ線検出方法	直接（対生成）	間接（大気チェレンコフ光）
エネルギー	< 30 GeV (100 GeV)	> 300 GeV (50 GeV)
利点	高 S/N 比 広視野	大面積 高角度分解能
欠点	小面積 高コスト	宇宙線雑音 ⁱ 狭視野

現状

現在稼働中のチェレンコフ望遠鏡の主なものを表2に記す。主流はシャワーからのチェレンコフ光のイメージを捕らえて宇宙線雑音を識別することのできる解像型である。また、一部でステレオ観測装置も稼働している。しかし、太陽光集光用のヘリオスタットを用い、

[†] E-mail: morim@icrr.u-tokyo.ac.jp

ⁱ イメージング法により低減可能

解像度はないが大面積を稼いでエネルギー閾値を下げる試みも結果を出しつつある。エネルギー閾値が下がると宇宙線シャワーの発光効率はガンマ線シャワーに比べ低下し、S/N比は自然に改善する利点がある。

表 2 主なチェレンコフ望遠鏡³ (*は既に終了したもの)

Group/ Countries	Location	Telescope(s)	Camera (pixels)	Threshold (TeV)
Whipple USA-Ireland-UK	Arizona	10m	490	0.25
Crimea Ukraine	Crimea	6× 2.4m	6× 37	1
SHALON Russia	Tien Shen	4m	244	1.0
CANGAROO-II Japan-Australia	Woomera	10m	552	0.5
HEGRA-CT Germany-Sp.-Ar.	La Palma	6× 3m	5× 271	0.5
CAT France	Pyrenées	4.5m	600	0.25
TACTIC India	Mt. Abu	10m	349	0.3
Durham* UK	Narrabri	3× 7m	1× 109	0.25
7TA* Japan	Utah	7× 2m	7× 256	0.5
STACEE Canada-USA	Albuquerque	32 heliostats	(non- imaging)	0.18
CELESTE France	Themis	40 heliostats	(non- imaging)	0.05

Trevor WeekesのまとめたTeVガンマ線天体のカタログを表 3と図1に示す。彼がGrade Aと呼ぶのは5以上の統計精度で検出され、複数のグループによって確認されているものであり、Grade Bは5以上だが確認を待つもの、Grade Cは留保つきのものである。合計16個はThird EGRET catalog⁴の300個近くと比べるべくもないが、両者の分布に違いが見られるようでもある。すなわち、AGNの割合が高くなく、銀河系内天体の割合が多い。TeV領域のガンマ線は、銀河間の赤外線放射と衝突して電子陽電子対生成を起こして失われるため、TeVガンマ線の「地平線」は遠くまで伸びていない(はずである)⁵ことと関連しているのであろう。(後述のMrk501の項参照)

表 3 TeVガンマ線天体カタログ⁶

分類	天体名	グループ	備考
Grade A (>5 , multiple)	Crab PSR1706-44 Mrk421 Mrk501	多数 CANGAROO, Durham 多数 多数	Plerion Plerion AGN (BL Lac) AGN (BL Lac)

Grade B (>5)	SN1006 Vela RXJ1713.7-3946 PKS2155-304 1ES1959+650 BL Lac	CANGAROO CANGAROO CANGAROO Durham Utah7TA Crimea	SNR Plerion SNR AGN (BL Lac) AGN (BL Lac) AGN (BL Lac)
Grade C (strong but with some qualifications)	Cas A Cen X-3 1ES2344+514 3C66A Geminga B1509-58	HEGRA CT Durham Whipple Crimea Crimea CANGAROO	SNR X-ray binary AGN (BL Lac) AGN Pulsar Plerion

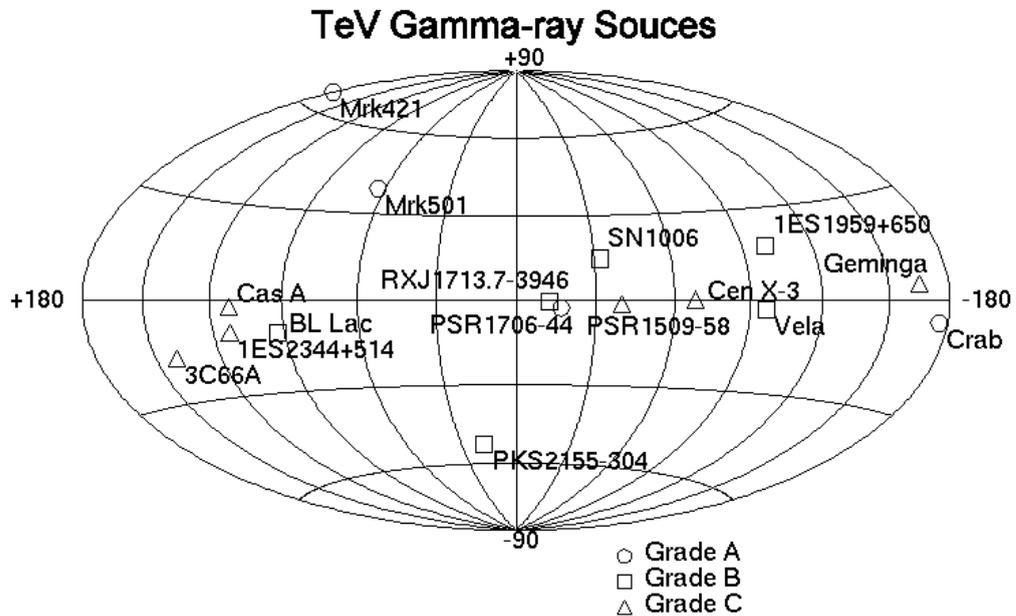


図 1 TeV ガンマ線天体の天球マップ

いくつかの天体について最近の結果を紹介する。

Crab STACEE、CELESTE という太陽光集光鏡を用いた実験の結果が報告された⁷。Flux は従来の Synchrotron Self Compton モデル⁸と大きく矛盾しない(図 2)。これらの報告でもパルス成分は見つからず、EGRET のエネルギー領域との間のどこかにカットオフがあることになり、パルサーにおける粒子加速モデルに制限がつく。

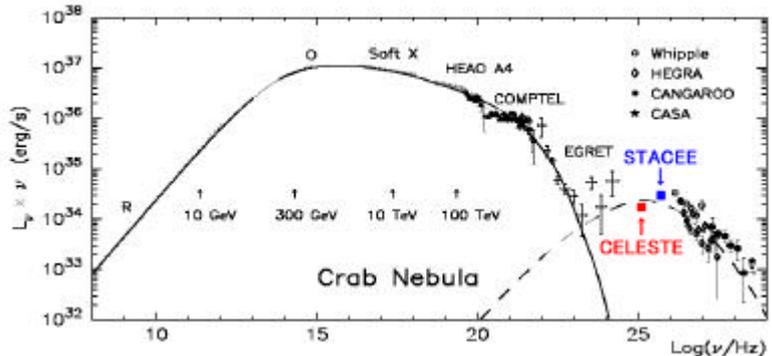


図 2 Crab の unpulsed スペクトル

SN1006 CANGAROO の Preliminary なスペクトルは Synchrotron + Inverse Compton モ

デルの予想と一致している
 ようであり、磁場の値数 μG
 を示唆する⁹ (図 3)。

RXJ1713.7-3946

CANGAROO 3.8m 望遠鏡
 の観測結果によれば、「あ
 すか」で観測された非熱的
 X線放射のピークの位置か
 ら TeV の信号が得られて
 いる¹⁰。これも電子加速の
 証拠の新たな例と考えられ
 る。

Cas A HEGRA-CT のグ
 ループは長時間観測を行い、
 Whipple や CAT の上限値

より低い Flux の有限値を報告している¹¹。X線では非熱的放射が観測されているが、磁場が強いと見られているため、Inverse Compton の能率は悪い。これが陽子加速の証拠になるかどうかはスペクトル観測を待つ必要がある。

Mrk421 「あすか」と TeV の同時観測の結果によれば、Synchrotron Self Compton モデルでスペクトルはうまく説明できるようであり、ジェットのパラメータが決まってくる¹²。フラックスの時間変動は TeV 領域が一番速く¹³、Central engine に最も近づくことができる。

Mrk501 1997 年のフレアにより複数の望遠鏡で統計の高い観測が行われ、詳細な検討が進んでいる。スペクトルには 10TeV 付近で急になっているようだが¹⁴、この折れ曲がりには銀河間赤外線と衝突して電子陽電子対生成を起こして失われる効果より緩やかなようである。元のスペクトルがフラットなのか、赤外線量の推測に問題があるのか、あるいは Lorentz 不変性が破れているのか議論になっている¹⁵。

次世代計画

次世代の大型チェレンコフ望遠鏡計画について表 4にまとめて示す。

MAGIC¹⁶ ドイツ・マックスプランク物理研究所(München)を中心としたグループは、HEGRA のサイト(カナリア諸島 La Palma, 28.75° N, 17.89° W, 2200 m a.s.l.)に 17m 口径の大望遠鏡を建設している。2001 年夏至に First light を目指している。

HESS¹⁷ ドイツ・マックスプランク天体物理研究所(Heidelberg)を中心としたグループは、アフリカのナミビアの高地(23°16'18" S, 16°30'00" E, 1800 m a.s.l.)に 12m 望遠鏡 4 台のアレイの建設を開始した。このアレイは後に 16 台に拡張されることになっている。

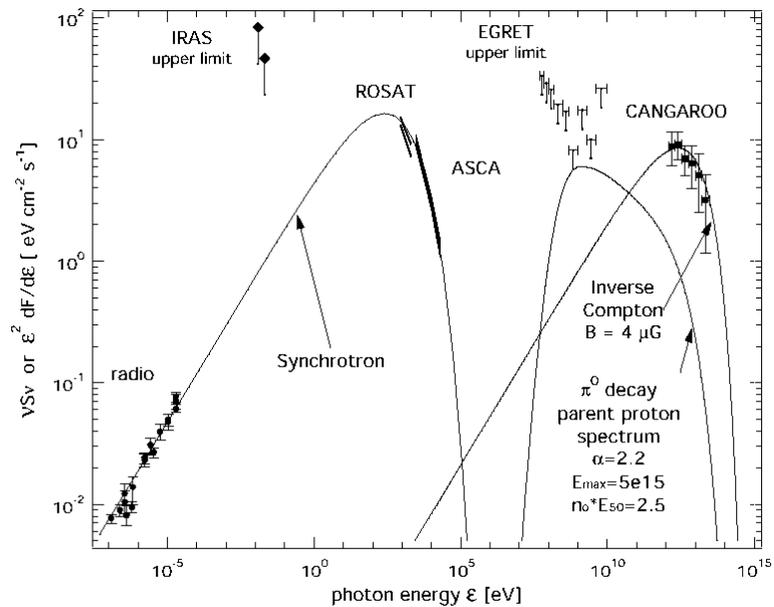


図 3 SN1006 の広域スペクトル

表 4 次世代チェレンコフ望遠鏡¹⁸

	MAGIC	HESS	VERITAS	CANGAROO-III
Base/	Münich	Heidelberg	Arizona	ICRR, Tokyo
Country	Germany	Germany	USA	Japan
Partners	Spain, Italy	France	UK, Ireland	Australia
Location	La Palma	Namibia	Arizona	Woomera
Elevation	2.3 km	1.8 km	1.4 km	160 m
Num. of Tel.	1	4 (16)	7	4
Pattern	-	Square	Hexagon	Diamond
Spacing	-	120 m	80 m	100 m
Design	Parabola	Davies-Cotton	Davies-Cotton	Parabola
Aperture	17m	12 m	10 m	10 m
Focal length	20m	15 m	12 m	8 m
Facets	60cm square	60cm circ.	60cm hex.	80cm circ.
Num. of pixels	>800	800 × 4	499 × 7	500 × 4
First light	2001	2002	2005	2004

VERITAS¹⁹ Whipple 10m 望遠鏡の次期計画として、アメリカ・ハーバードスミソニアン天文台を中心としたグループがアリゾナのホプキンス山(23° N, 111° W, >2000 m a.s.l.)に 10m 望遠鏡 7 台のアレイを建設しようとしている。

CANGAROO-III²⁰ 東京大学宇宙線研究所を中心としたグループは、南オーストラリアの砂漠地帯 Woomera に 10m 望遠鏡 4 台のアレイを建設中である。1 台目の望遠鏡は 2000 年から観測に供されている(図 4)²¹。

チェレンコフ望遠鏡の感度は、高エネルギー側では実質上統計のみで決まるが、低エネルギー側では宇宙線の雑音で制限される。特にイメージング法では除去できない電子のバックグラウンドが問題になる。また、複数の望遠鏡を用いてステレオ観測を行うと、シャワーイメージを再構成することによって到来方向の角度分解能が向上し、点源に対する S/N 比が向上するだけでなく、シャワーの発生高度の推定ができるためにエネルギー分解能が向上する。(唯一望遠鏡 1 台の計画となっている MAGIC も、次期は複数台を目指している。) 図 5 はこれらを考慮に入れた VERITAS グループによる予想感度である²²。W は現在の Whipple 10m 望遠鏡の感度であり、Crab の unpulsed スペクトルと比較している。



図 3 CANGAROO 10m 望遠鏡

次世代チェレンコフ望遠鏡およびガンマ線衛星の感度を図 6 に比較する。AGILE²³, GLAST²⁴は打ち上げ予定の衛星、ここでは触れなかったARGO(-YBJ)²⁵, MILAGRO²⁶はシャワー粒子を直接捕まえる地上検出器アレイである。また、チェレンコフ望遠鏡を用いた大天頂角の観測では、エネルギー閾値が上がるものの検出面積が増え、感度は上昇する。サイエンス

次世代望遠鏡群の狙う天体は、今までに見つかっているタイプはもちろんのこと、感度が上がればこそ見えてくると期待されるものがあるだろう：

AGN 今まで TeV 領域で検出された天体は赤方偏移が 0.1 以下に限られている。検出エネルギーが下がれば赤方偏移の大きなブレーザーも検出可能になる。また、本当に電子加速だけで説明できるのだろうか？強度が大きく変動するにもかかわらずスペクトルの形があまり変わらない観測結果は、陽子加速のほうがうまく説明できるとする説もある²⁷。

SNR 今まで見えている天体は電子加速で説明できそうである。では、長らく考えられてきたように超新星残骸は宇宙線の起源でありうるのか？陽子を加速している確実な証拠を得るには、⁰由来の 70 MeV のバンプを含む広域のエネルギースペクトルを測る必要がある

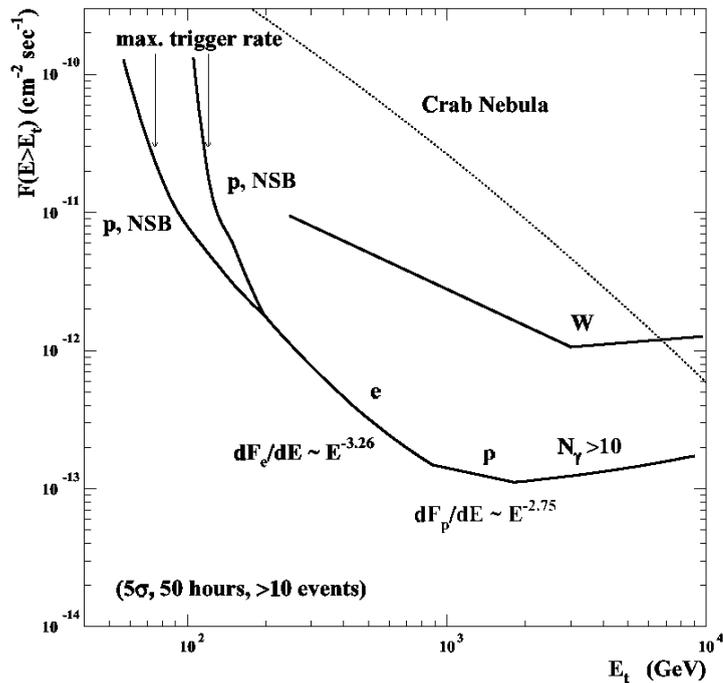


図 5 チェレンコフ望遠鏡の感度

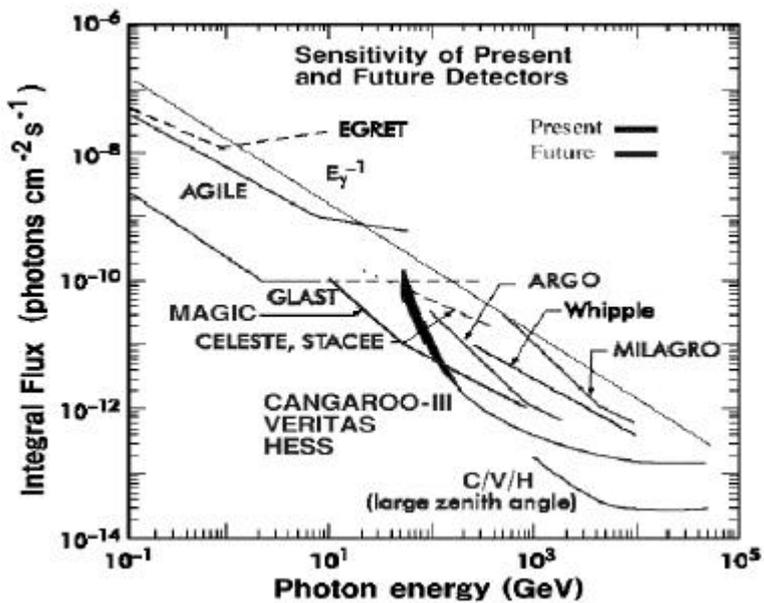


図 6 ガンマ線望遠鏡の感度の比較

る。

Pulsar/Plerion パルス成分のカットオフはどこのエネルギーにあるのか？パルサー本体からパルサー星雲に加速が切り替わるこのエネルギーは、パルサーにおける粒子加速の問題にとって重要な鍵である。

Diffuse ガンマ線 宇宙線が銀河に普遍的に存在すれば、物質がある限り銀河面からは確実に²⁸由来のガンマ線が来ているはずである。GeV 領域では宇宙由来のガンマ線の大半を占めており、通常の宇宙線スペクトルから予想されるよりハードなスペクトルを示していることから、EGRET より高いエネルギー領域での観測が望まれる²⁸。TeV 領域での問題は、広がったガンマ線源の検出方法である。

他にもガンマ線バースト、EGRET 未同定天体、ダークマター消滅ガンマ線、巨大分子雲、スターバースト銀河などまだまだ候補天体は数多くある²⁹。

将来に向けて

さらに次々期世代の地上ガンマ線観測の模索も始まっている。一つの方向は望遠鏡を高山に設置し、チェレンコフ光の発生高度に近づくために光の密度が上がり、同じ面積の反射鏡でもエネルギー閾値を下げて、人工衛星検出器とオーバーラップするエネルギー領域を目指すものである。チリのアタカマ高地にサブミリ波電波望遠鏡アレイを建設しようとする計画がアメリカ、ヨーロッパおよび日本で進められようとしているが、このような海拔 5000m の高地に 10m クラスのチェレンコフ望遠鏡を設置すれば、チェレンコフ光の発生高度に近づくため光の密度が上がり、5 GeV までの観測が可能になるという³⁰。これが実現すれば、GLAST 衛星のサーベイ観測をより深くフォローすることも可能になり、観測できる天体の数は飛躍的に増えるだろう。

もう一つの方向は視野を増やし、TeV ガンマ線の Allsky モニターを考えようとするものである³¹。OWL/Airwatch や EUSO など、衛星から大気中で起こる超高エネルギー宇宙線のシャワーから放出されるシンチレーション光を観測する計画が進められているが、ここで開発されている広視野望遠鏡³²は、フレネルレンズを利用して 60 度程度の視野と 0.1 度程度の角度分解能を持ち、地上に上を向けて設置すればチェレンコフ望遠鏡として用いることができる。もちろん、シンチレーション光に比べ短いチェレンコフ光の継続時間に合うような高速カメラは開発しなければならないし、宇宙線バックグラウンドも視野に比例して増えるので、高速の前段処理が必要であるほか、夜光が避けられないためエネルギー閾値はあまり下げられない。しかし、現在のポインティング観測による限界を破り、サーベイ観測を行えば、ガンマ線バーストを視野中に捕らえる可能性や、AGN からのフレアをモニターできることなどを含め、大変面白い発展が見られるかもしれない。

チェレンコフ望遠鏡でイメージング法が成功し、TeV 領域観測が急速に展開したのはこの 10 年のことに過ぎない。次の 10 年でどう発展するのか楽しみである。

¹ Ong, R.A., Physics Reports; 森正樹、パリティ Vol.13, No.8, 14-20 (1998)

² Weekes, T.C. et al., Astrophys. J., 342, 379-395 (1989)

-
- ³ Weekes, T.C., in Proc. Gamma-ray Astrophysics 2000 Workshop, Heidelberg, 26-30 June 2000 (astro-ph/0010431, to be published) (表の一部を修正した)
- ⁴ Hartman, R.C. et al., ApJ Suppl. 123, 79-202 (1998)
- ⁵ Stecker, F.W., de Jager, O.C. and Salamon M.H., Astrophys. J. Lett. 390, L49-52 (1992)
- ⁶ Weekes, T.C., *ibid.* (表の一部を修正した)
- ⁷ STACEE Collaboration, astro-ph/0006304; CELESTE Collaboration, astro-ph/0010265
- ⁸ Aharonian, F.A. and Atoyan, A.M., astro-ph/9803091
- ⁹ Naito, T. et al., Astron. Nach. 320, 205-206 (1999)
- ¹⁰ Muraishi, H., et al., Astron. Astrophys. 354, L57-L61 (2000)
- ¹¹ HEGRA Collaboration, in Proc. Gamma-ray Astrophysics 2000 Workshop, Heidelberg, 26-30 June 2000 (to be published)
- ¹² Takahashi, T. et al., astro-ph/0008505
- ¹³ Maraschi et al. Astrophys. J. Lett. 526, L81-L84 (1999)
- ¹⁴ Aharonian, F.A. et al. Astron. Astrophys. 349, 29-49 (1999)
- ¹⁵ Protheroe, R.J. et al., astro-ph/0005369
- ¹⁶ MAGIC homepage: <http://hegra1.mppmu.mpg.de/>
- ¹⁷ HESS homepage: <http://www-hfm.mpi-hd.mpg.de/HESS/HESS.html>
- ¹⁸ Weekes, T.C., *ibid.* (表の一部を修正した)
- ¹⁹ VERITAS homepage: <http://veritas.sao.arizona.edu/>
- ²⁰ CANGAROO homepage: <http://icrhp9.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
- ²¹ Mori, M., in Proc. Gamma-ray Astrophysics 2000 Workshop, Heidelberg, 26-30 June 2000 (to be published)
- ²² Vasiliev, V.V., in Proc. 26th ICRC (Salt Lake City), Vol.5, pp.299-303 (1999)
- ²³ AGILE homepage: <http://www.ifctr.mi.cnr.it/Agile/>
- ²⁴ GLAST homepage: <http://www-glast.stanford.edu/>; Fukazawa, Y., in these proceedings
- ²⁵ ARGO-YBJ homepage: <http://www1.na.infn.it/wsubnucl/cosm/argo/argo.html>
- ²⁶ MILAGRO homepage: <http://www.lanl.gov/milagro/>
- ²⁷ Rachen, J.P., astro-ph/0003282; Aharonian, F.A., astro-ph/0003159
- ²⁸ Hunter, S.D. et al., Astrophys. J., 481, 205-240 (1997); Mori, M., Astrophys. J. 478, 225-232 (1997)
- ²⁹ Aharonian, F.A., in Proc. 18th International Symposium on Lepton - Photon Interactions (LP 97), Hamburg, Germany, 28 Jul - 1 Aug 1997 (World Scientific); astro-ph/9712089
- ³⁰ Aharonian, F.A. et al., astro-ph/0006163
- ³¹ Kifune, T. and Takahashi, Y., in Proc. Of "Towards a Major Atmospheric Cherenkov Detectors V" (eds. De Jager, O.C.), Potchefstroom Univ., pp.315-322 (1997); Kifune, T., in Proc. Gamma-ray Astrophysics 2000 Workshop, Heidelberg, 26-30 June 2000 (to be published)
- ³² OWL/Airwatch homepage at Univ. Alabama, Huntsville: <http://owl.uah.edu/>