

超高エネルギーガンマ線天文学とCANGAROO実験

森 正樹

東京大学宇宙線研究所

東京大学物理教室談話会, 14 February, 2003

“CANGAROO”
= Collaboration of Australia and Nippon for a GAMMA Ray Observatory in the Outback

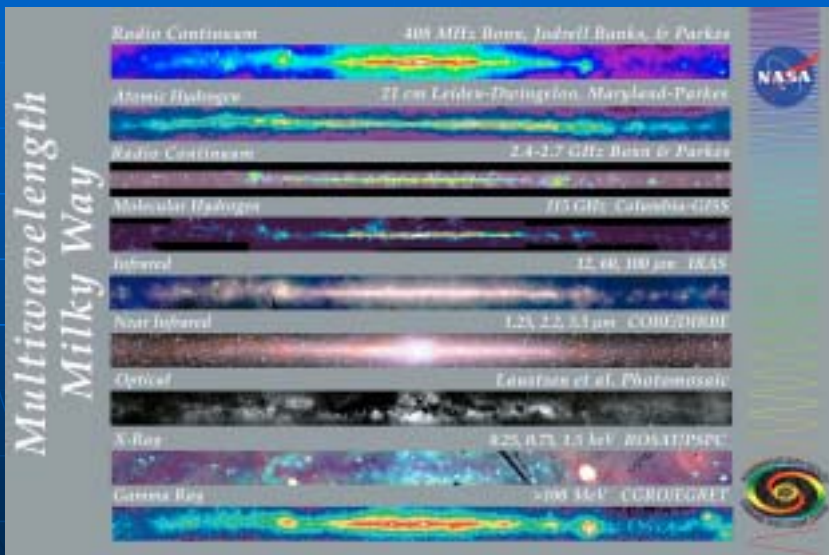
大気チェレンコフ望遠鏡による
TeV領域天体ガンマ線の
地上観測



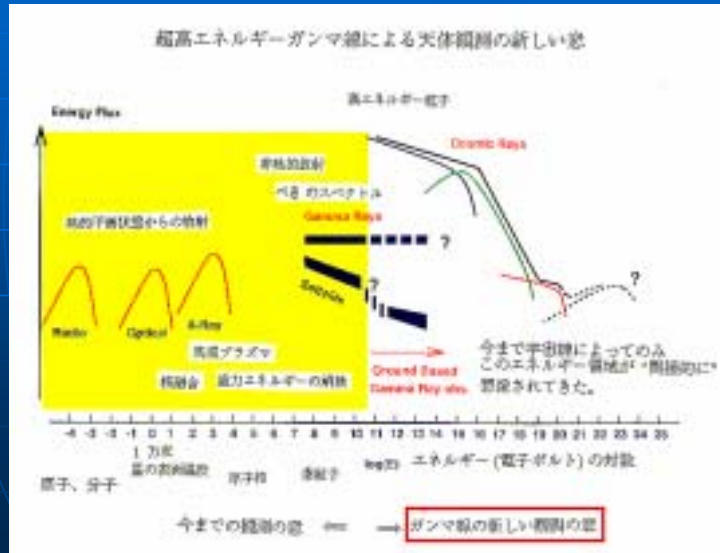
CANGAROOチーム(日豪共同)

- University of Adelaide 
- Australian National University 
- Ibaraki University 
- Ibaraki Prefectural University 
- Kanagawa University 
- Konan University 
- Kyoto University 
- Nagoya University 
- National Astronomical Observatory of Japan 
- Osaka city University 
- Institute of Physical and Chemical Research 
- Shinshu University 
- Institute for Space and Aeronautical Science 
- Tokai University 
- Tokyo Institute of Technology 
- Yamagata University 
- Yamanashi Gakuin University 

さまざまな波長で見た銀河



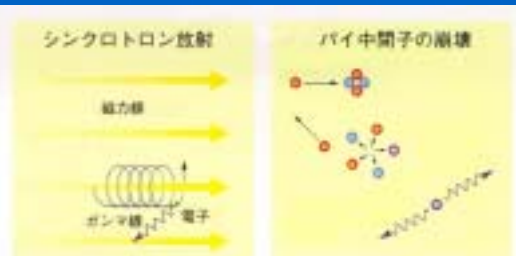
天体観測の新しい窓



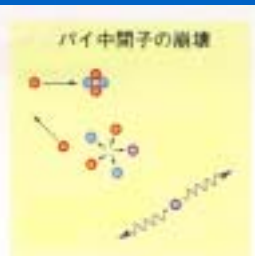
©木舟正

ガンマ線の放射機構: 非熱的

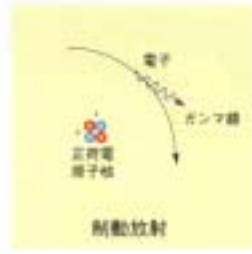
高エネルギー
電子 + 磁場



高エネルギー
陽子 + 物質



高エネルギー
電子 + 原子
の電場



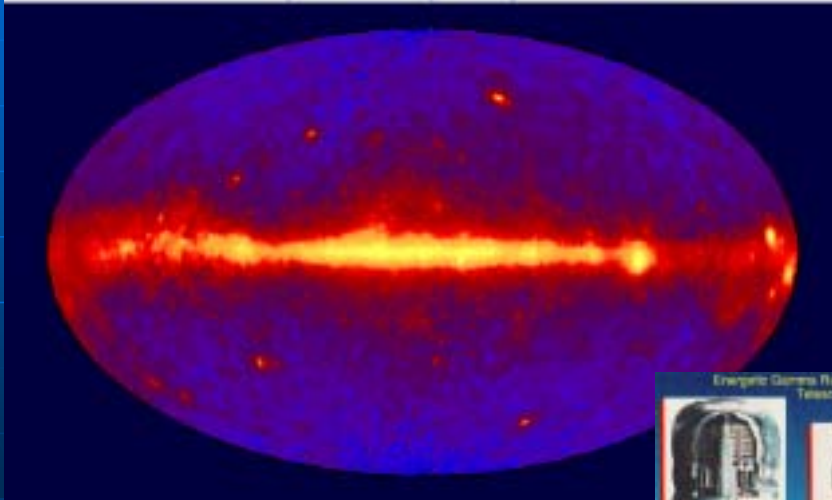
高エネルギー
電子 + 光子場



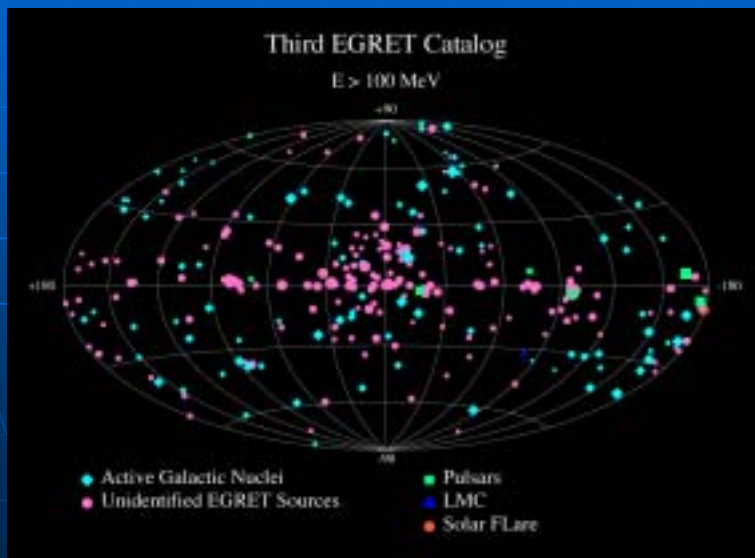
高エネルギー粒子の存在 ← 粒子加速過程

GeVガンマ線で見た宇宙(1)

EGRET All-Sky Gamma Ray Survey Above 100 MeV



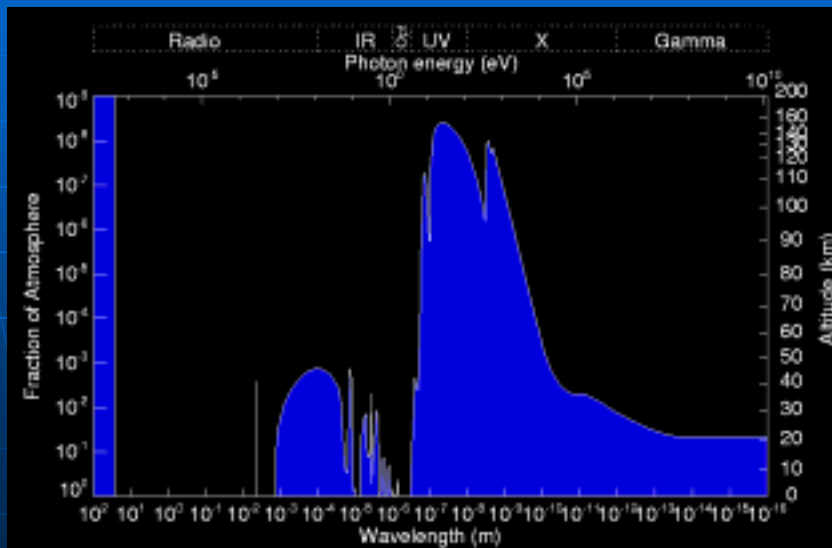
GeVガンマ線で見た宇宙(2)



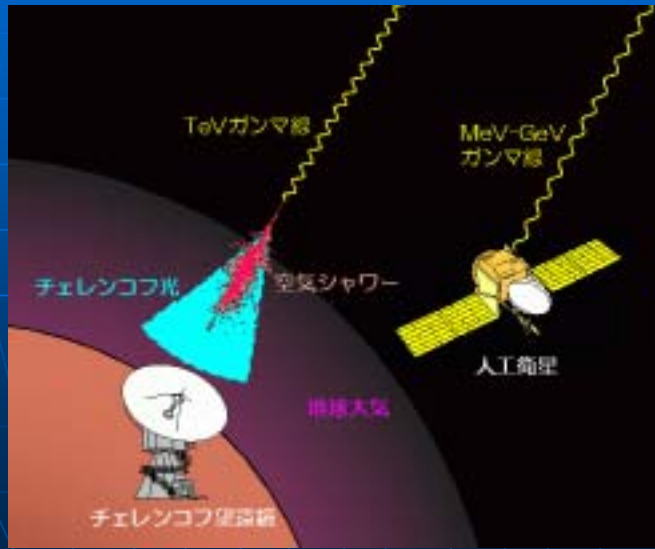
EGRETガンマ線源のまとめ

パルサー	5
AGN (主に blazars)	66
電波銀河 (Cen A)	27 (marginal)
	1 (marginal)
未同定 (いくつかは 超新星残骸)	170
大マゼラン雲	1
太陽フレア	1
合計	271

大気の透明度

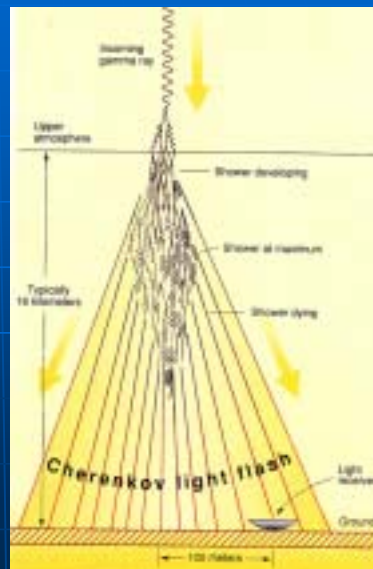
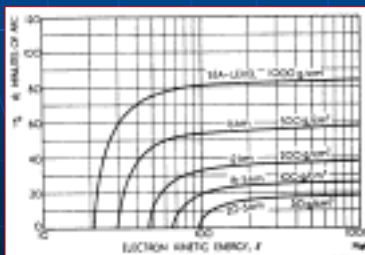


天体ガンマ線の検出

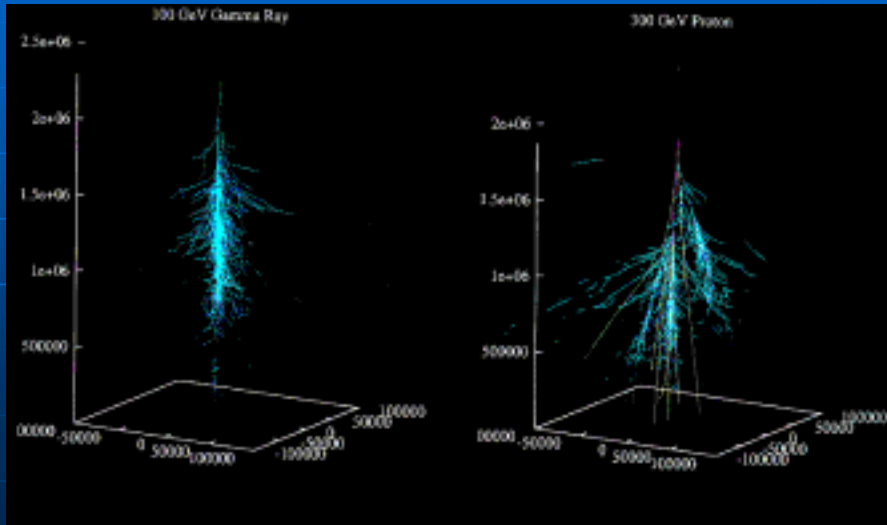


大気チェレンコフ望遠鏡

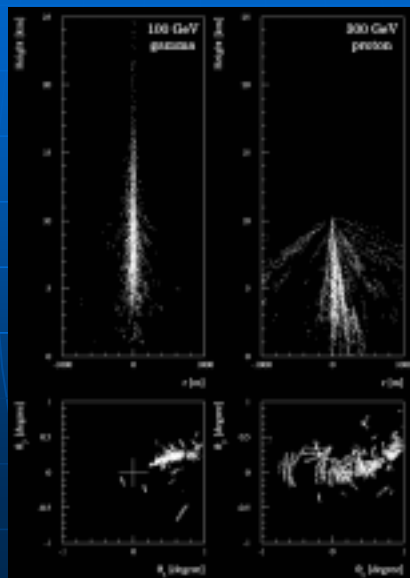
- チェレンコフ角
 $\cos \theta = 1/n\beta$
 $\beta = v/c$
 $n = 1.0003$ (1atm)
 $\Rightarrow \theta = 1.3^\circ$ (地上)



宇宙線シャワーとの識別(1)



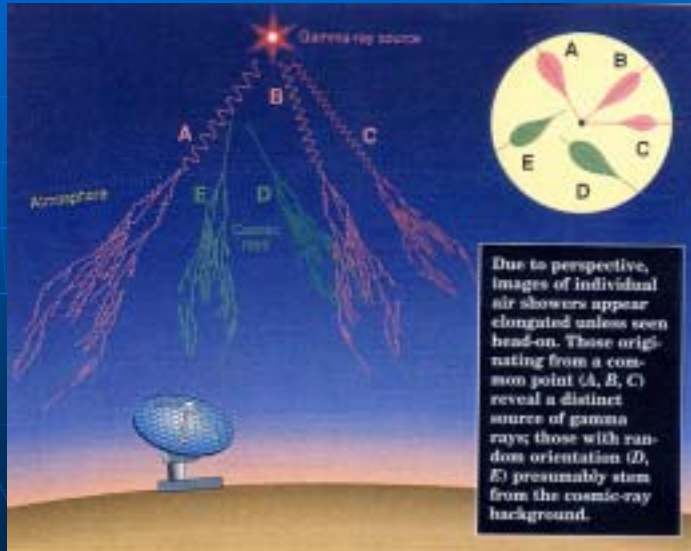
宇宙線シャワーとの識別(2)



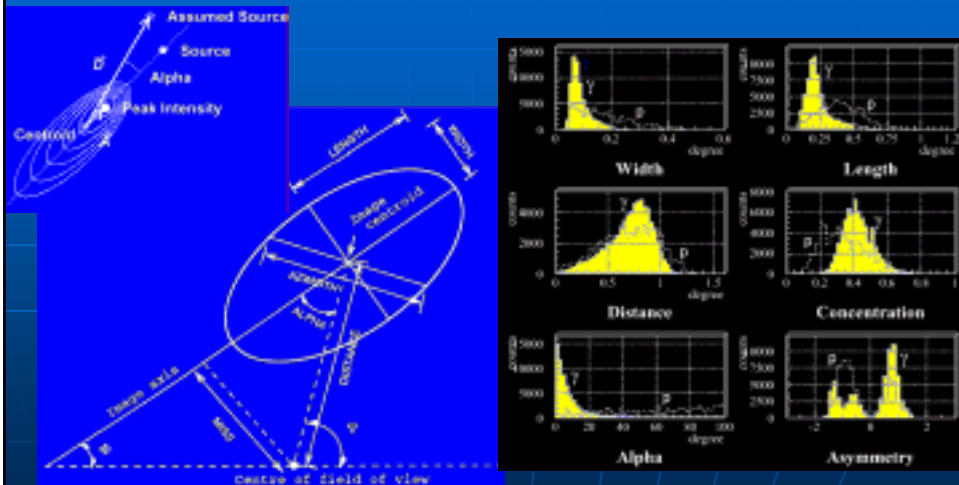
ガンマ線:
電磁シャワー
⇒ シャープなイメージ

陽子:
核シャワー
⇒ 拡散したイメージ

宇宙線シャワーとの識別(3)



宇宙線シャワーとの識別(4)



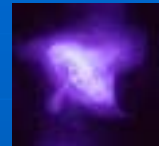
D.J. Fegan, J.Phys.G, 1997

(Simulation)

TeVガンマ線天体カタログ2002

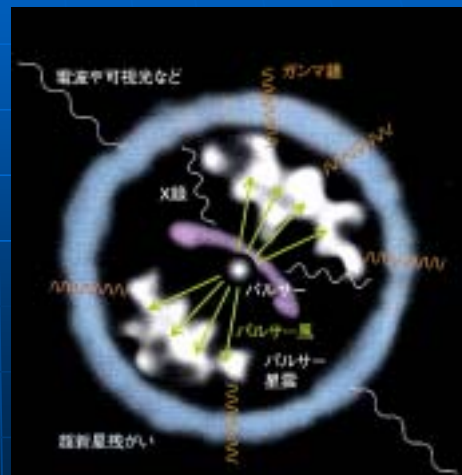
4 パルサー星雲	Crab Vela PSR 1706-44 PSR1509-58
8 ブレーザー	Mrk 421 Mrk501 1ES2344+514 PKS2155-304 3C66A BL Lac 1H1426+428 1ES1959+65
3 超新星残骸	SN1006 Cas A RX J1713.7-3946
1 X線連星	Cen X-3
1 爆発的星生成銀河	NGC253

パルサー星雲

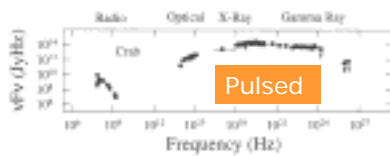
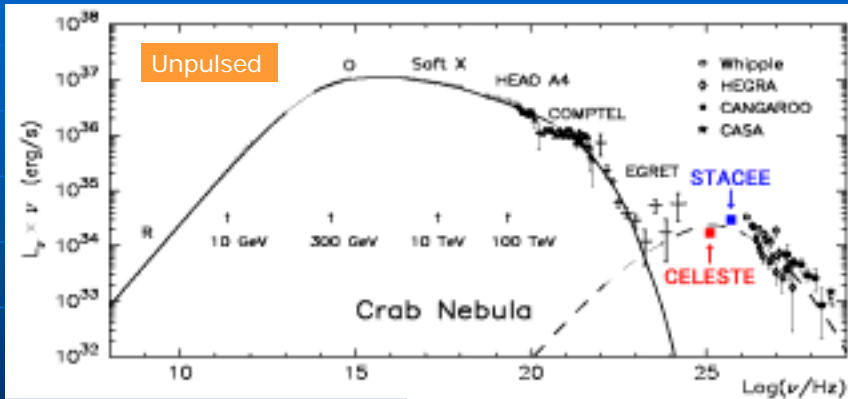


かに星雲 (X線画像)

- 高速回転する磁化したパルサー
= 「発電機」
- 電磁エネルギー
⇒ 光円錐の外ではパルサー風
- 周囲の物質と衝突して衝撃波を形成
⇒ 粒子加速
- 逆コンプトン機構によるガンマ線放射



かに星雲のエネルギースペクトル



Aharonian & Atoyan, astro-ph/9803091 / Heidelberg WS, 2000

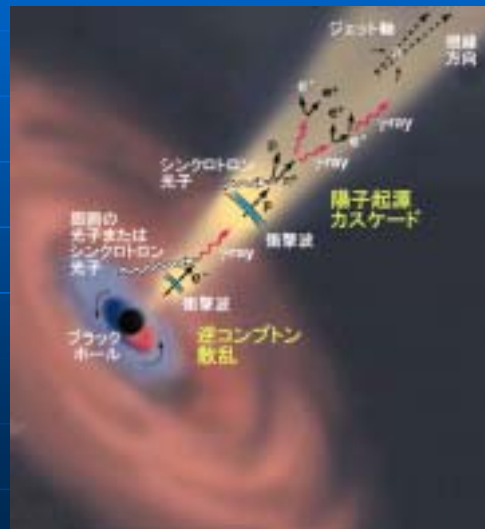
D. Thompson, 4th Compton Symp. 1997

ブレーザー



Mrk501 (光学画像)

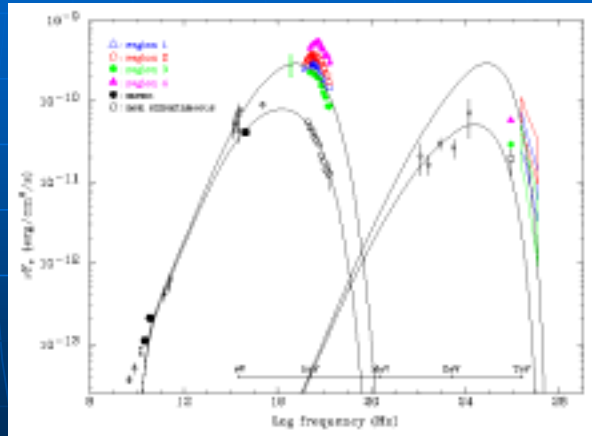
- 中心核の巨大ブラックホールへの質量降着
⇒ 重力エネルギーの解放
- ブラックホールからの高速ジェットの出射
- ジェットによる衝撃波
⇒ 粒子加速
- 逆コンプトン機構あるいは陽子カスケードによるガンマ線放射



ブレイザーのエネルギースペクトル

- ダブルピーク構造
= シンクロトロン + 逆コンプトン
(Synchrotron Self Compton model)

Mrk421



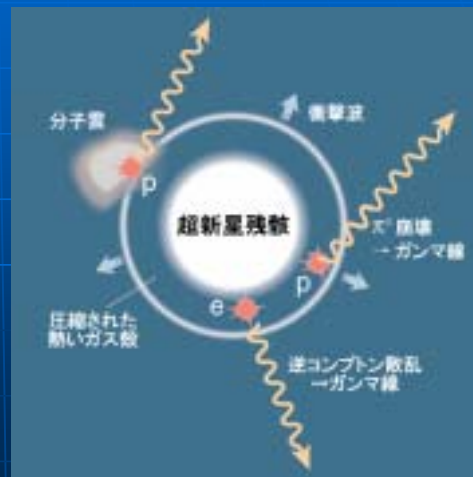
Takahashi et al. ApJL 2000

超新星残骸



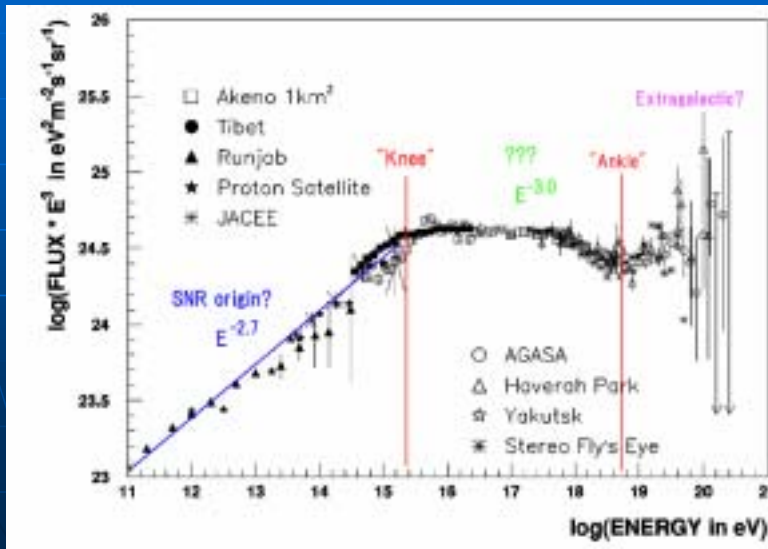
Cas A (X線画像)

- 超新星爆発による拡大する爆風 ⇒ 衝撃波
- 衝撃波による粒子加速
- 周囲の物質との相互作用
 - $e + B$ (シンクロトロン)
 - $e + \text{光子}$ (IC)
 - $p + \text{物質}$ (π^0) ⇒ ガンマ線放射
- 宇宙線の起源? (エネルギー学に基づく古くからの議論)



宇宙線のスペクトル

Nagano & Watson 2000



CANGAROOの歴史

- 1987: 超新星1987A
- 1990: 3.8m 望遠鏡
- 1990: 宇宙線研・Adelaide Physics 部局間協定
- 1992: 3.8m 望遠鏡の観測開始
- 1994: パルサー1706-44からのガンマ線検出
- 1998: 超新星残骸1006からのガンマ線検出
- 1999: 7m望遠鏡完成
- 2000: 7m望遠鏡を10mに拡大
- 2001: U.Tokyo-U.Adelaide 大学間協定
- 2002: 10m望遠鏡第2号機、第3号機建設

ニュージーランドでのJANZOS実験

Japan Australia New Zealand
Observation of Supernova 1987A



空気シャワー検出器アレイ

+

固定型チェレンコフ望遠鏡3台



なぜWoomeraを選んだか？

- ニュージーランド: 湿潤、晴天率低
- Woomera:
 - かつてのロケット発射場、立ち入り禁止区域: インフラ整備、サポートセンター
 - アデレード大学による BIGRAT望遠鏡が稼動



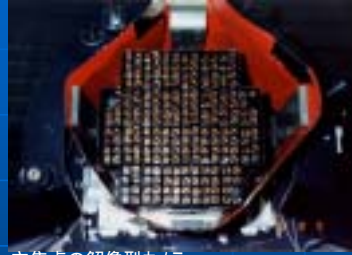
ELDO rocket Launch site in '60s



BIGRAT

(Bicentennial Gamma Ray Telescope)

3.8m望遠鏡(元:月レーザ測距儀)



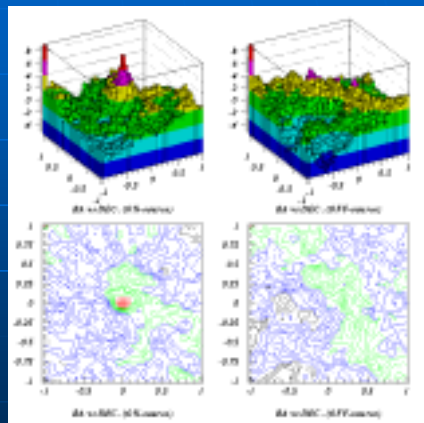
主焦点の解像型カメラ



木舟正 & John Patterson

PSR1706-44: 南天最初のTeV天体

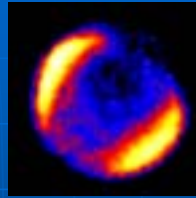
- 102ms pulsar
- Age: 17,000 yr
- GeV ガンマ線天体 (pulsed)
- Durhamグループと CANGAROO 7/10m によりTeV放射の確認
- 放出機構: よく理解されていない(ICでは無理)



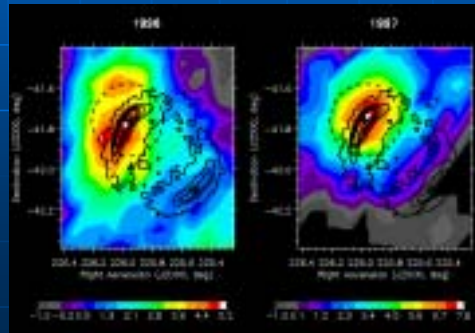
パルサー近傍の有意度マップ:
(左: ON, 右: OFF)

超新星残骸1006(1)

- 1006年に記録のある超新星残骸
- ASCAによる非熱的X線の検出
(Koyama et al. 1995)
⇒ 高エネルギー電子によるシンクロトン放射
- 逆コンプトン放射によるTeVガンマ線の予想⇒ CANGAROOによる検出!



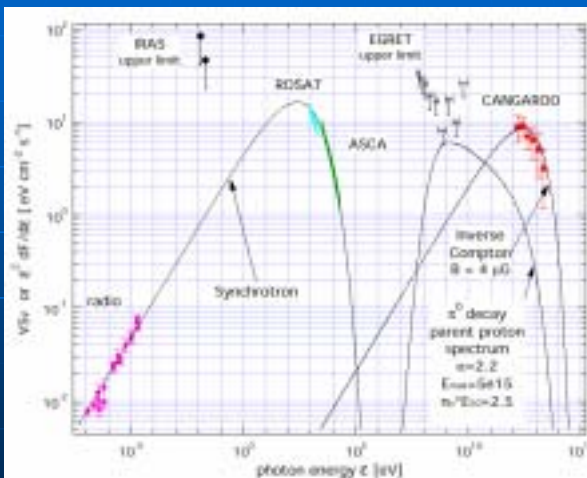
ASCA X線画像



CANGAROO 有意度マップ

Tanimori et al. ApJL 1998

超新星残骸1006(2)



高エネルギー電子による逆コンプトン放射としてうまく説明できる

⇒ 超新星残骸で高エネルギーまで粒子が加速されていることの証拠!

CANGAROO 7m望遠鏡

- 1999年3月完成
- 60 x 80cm CFRP主材の小型球面鏡
- 焦点距離8m
- 経緯台式架台
- 552ch解像型カメラ
- 電荷および時間情報を記録する電子回路



(March 1999)

CANGAROO 10m望遠鏡

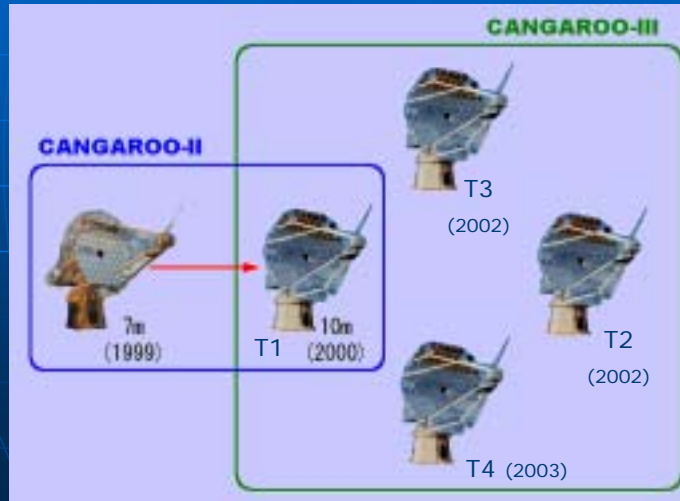
- 2000年3月に拡張
- 114 x 80cm CFRP主材の小型球面鏡x 80cm
- 552ch 解像型カメラ
- 電荷測定回路(ADC)追加



(March 2000)

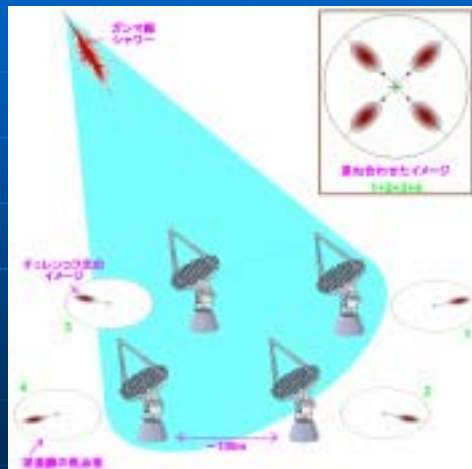
CANGAROO-IIIプロジェクト

- 10m 望遠鏡4台のアレイ (2003年完成予定)



チェレンコフ光のステレオ観測

- チェレンコフ光の「円盤」: 直径~300m、厚さ~1m
- ステレオ観測 ⇒ シャワーまでの距離の情報
- 角度分解能の向上
- エネルギー分解能の向上



第2号機の建設(2002年)



現在の状態: 10m望遠鏡3台



T2

T3

T1

Dec. 2002

観測開始

Dec. 2002

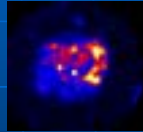
建設完了

2000年より

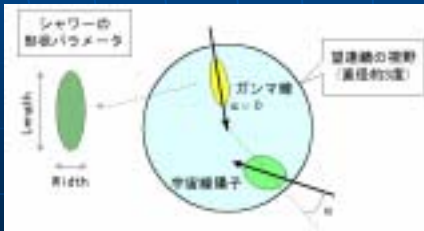
稼動中

超新星残骸 RX J1713.7-3946

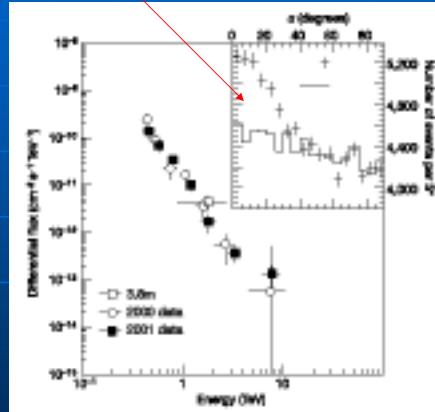
- X線衛星で非熱的X線が観測されたSNR



X線画像



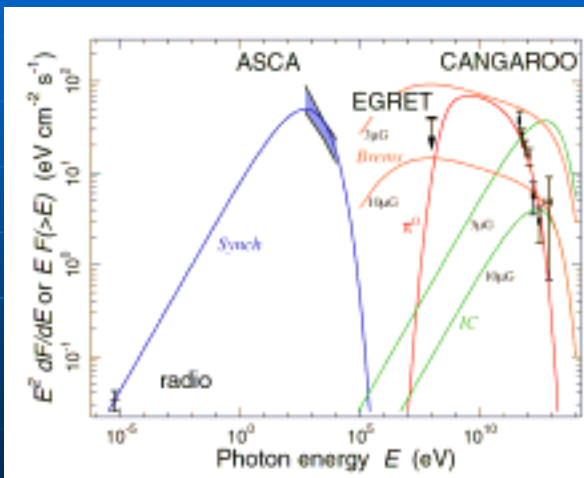
ガンマ線の信号 = (ON) - (OFF)



エネルギースペクトル

Enomoto et al. Nature 2002

超新星残骸RX J1713.7-3946:陽子加速?



電子からの放射
(Brems, IC)としては説明が難しい

⇒陽子からの放射 (π^0)?

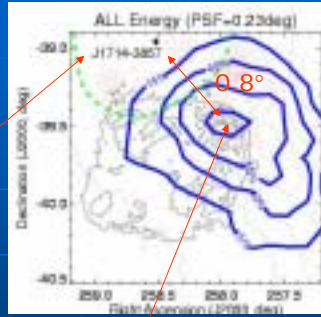
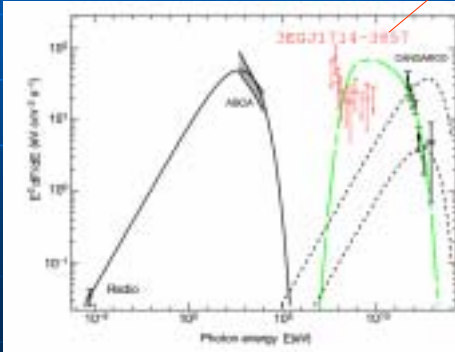
⇒宇宙線の起源?

Enomoto et al. Nature 2002

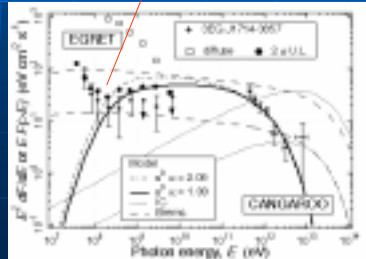
超新星残骸RX J1713.7-3946:陽子加速??

Counterarguments

- Reimer&Pohl, A&A 390, L43 (2002)
- Butt et al., Nature 418, 489 (2002)



$\Delta\theta = 0.24^\circ$



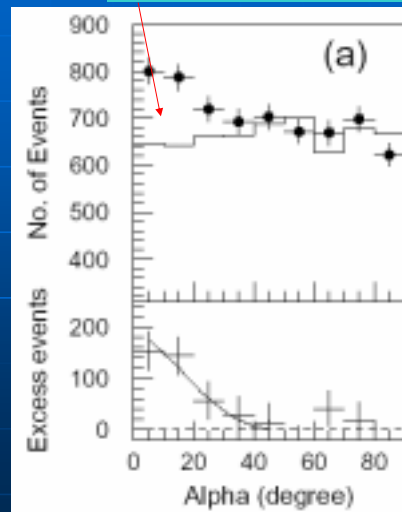
ブレーザー Mrk421

- 北天で最初の TeV AGN
- $z=0.031$ ($\sim 130\text{Mpc}$)
- 2001年にフレア活動
- Woomeraから大天頂角での観測 (エネルギー閾値は高くなる)
- 銀河間赤外線線の吸収: 10TeV以上のガンマ線は地球に届かない?



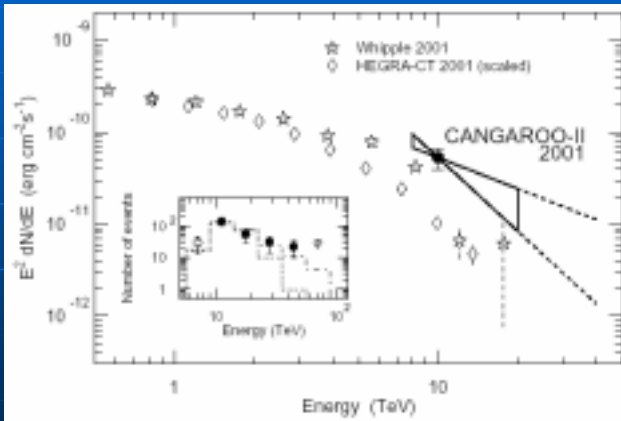
光学画像

ガンマ線の信号 = (ON) - (OFF)



Okumura et al. ApJL 2002

Mrk421: 宇宙論へのヒント?



- 10 TeVを超える
ガンマ線を検出
- ⇒ 背景赤外線量は
これまで考えられて
いたより少ない?
- ⇒ 銀河形成論に関連

Okumura et al. ApJL 2002

赤外線によるTeVガンマ線の吸収



赤外線背景放射観測のまとめ

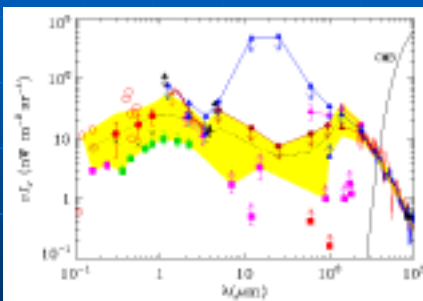


Figure 5. Summary of extragalactic background light (EBL) constraints and limits. Lower limit for observations are (a). Square symbols show lower limits obtained by integrating the light of detected sources. Δ 's show 2 σ lower limits on integrated resolved sources from Derstis (1999). Hexagons show upper limits from β radiation measurements. All other symbols show absolute background measurements (2 σ error bars) or limits (2 σ). The shaded region represents current observational limits for the EBL spectrum, and the dotted line shows optical values (see § 3.1.3 for discussion). The black line [ZMR] shows the cosmic microwave background radiation.

e^+e^- 対生成の平均自由行程

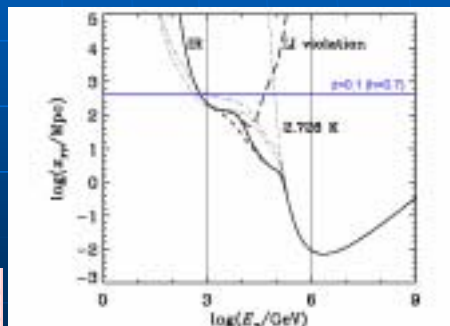


Figure 6. Mean free path for photon-photon pair production in the infrared-excess background radiation. The curves correspond to those in Fig. 3 except that the effect of gamma-gamma absorption (discussed in Section 4) is shown by the long dashed curve.

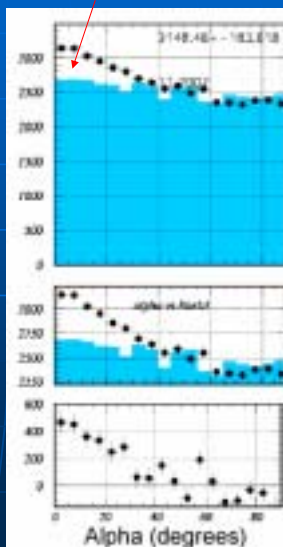
爆発的星形成銀河NGC253

- 近傍の渦状銀河 (2.4Mpc)
- 爆発的星形成活動
⇔ 超新星頻度が高い



光学画像

ガンマ線の信号 = (ON) - (OFF)



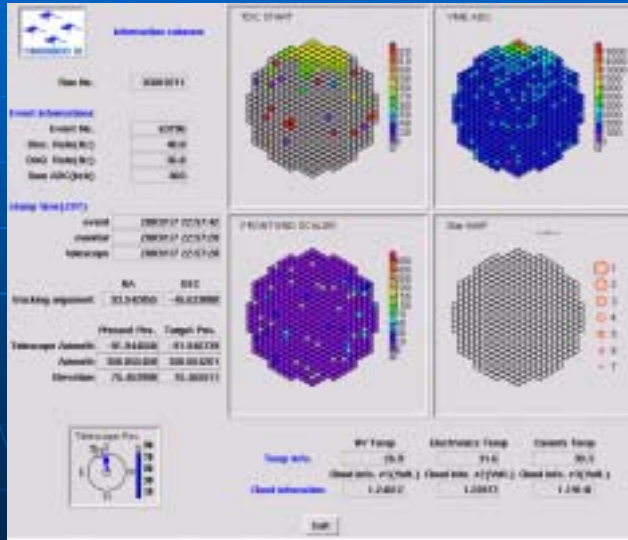
Itoh et al.
A&AL 2002

10m望遠鏡2号機

- 2002年完成、12月
から稼動開始
- 改良型小型球面鏡
- 427ch解像型カメラ
- 高速型電荷および時
間情報回路



T2で観測したイベント例



TDC — ADC

Scaler Star

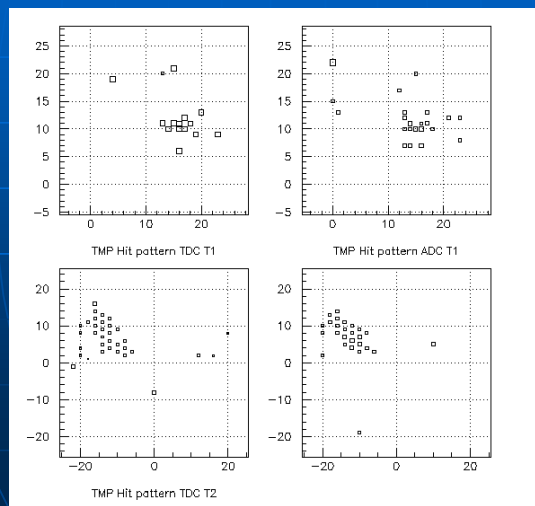
ステレオイベント例

T1 TDC

T1 ADC

T2 TDC

T2 ADC



2003年予定の完成形



世界で建設中のチェレンコフ望遠鏡



H.E.S.S.



ドイツ・マックスプランク核物理研究所ほか 12m望遠鏡4台(2004完成)
アフリカ・ナミビア

MAGIC



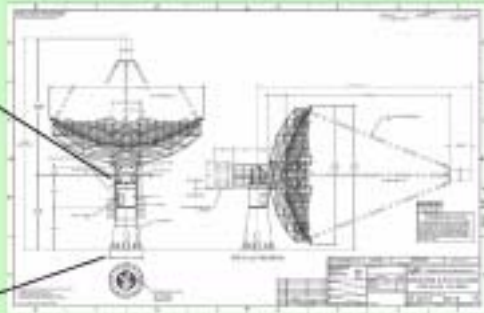
ドイツ・マックスプランク物理研究所ほか 17m望遠鏡1台
カナリア諸島

VERITAS

TELESCOPE



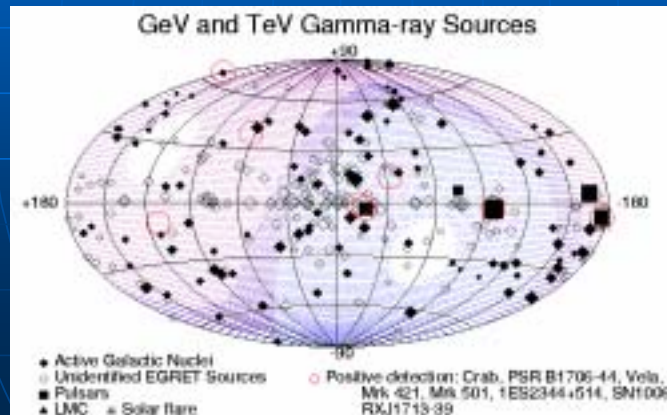
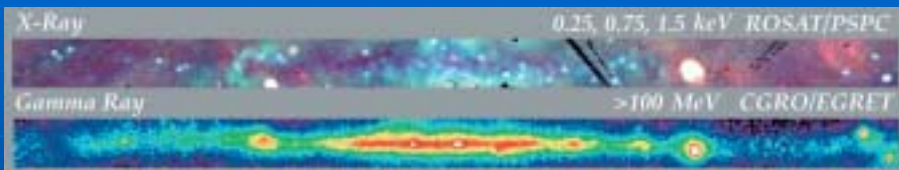
Pedestal



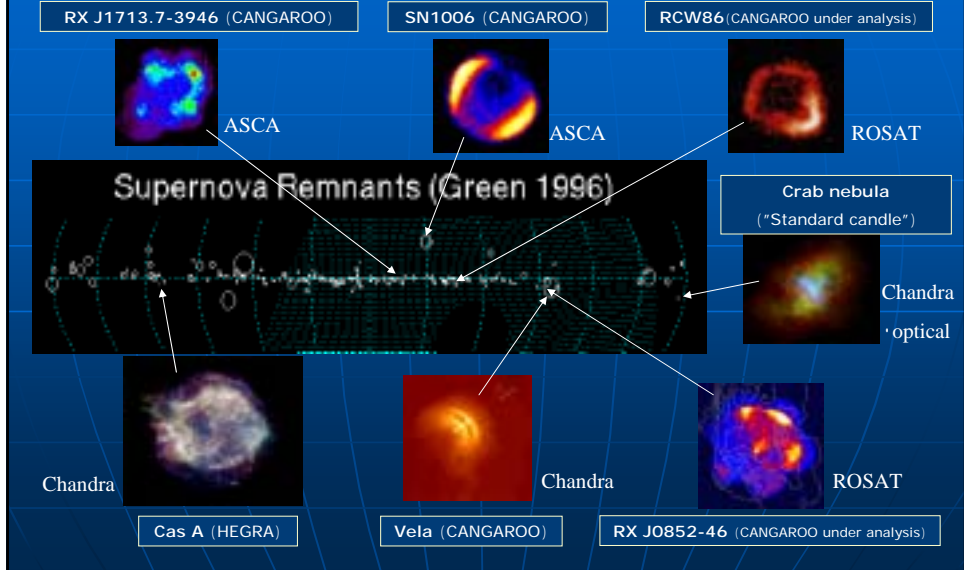
Overall Optical Support Structure
Accommodates 12m mirror

USA・スミソニアン天文台ほか 12m望遠鏡7台(初期4台)
アリゾナ・ホプキンス山

銀河面のサーベイ

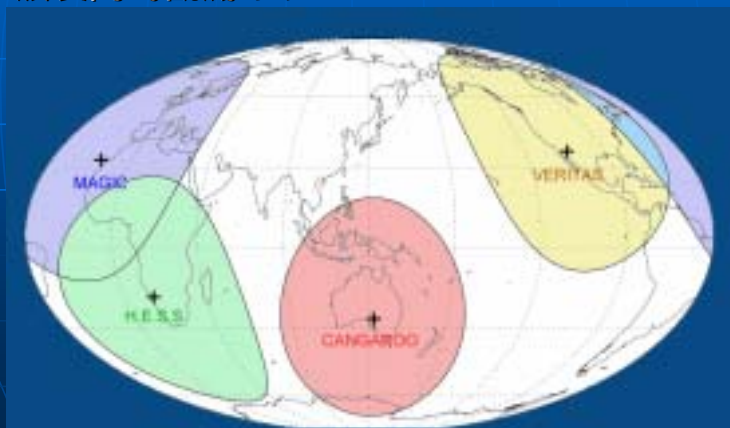


超新星の系統的観測



国際協力観測

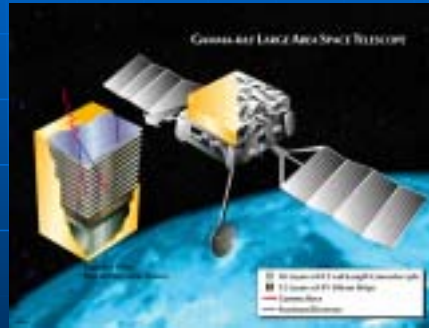
- 時間変動天体の連続観測(ブレイザーなど)
- 多波長同時観測キャンペーン



打ち上げ予定のガンマ線衛星

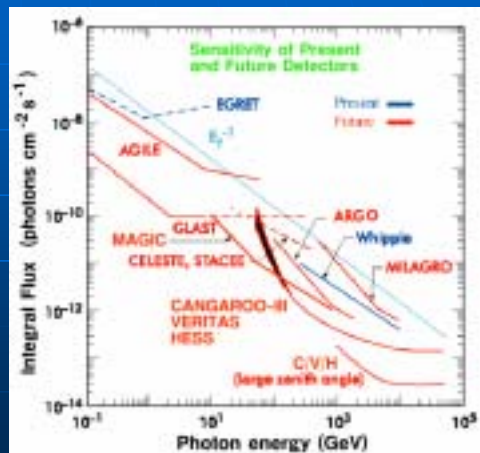
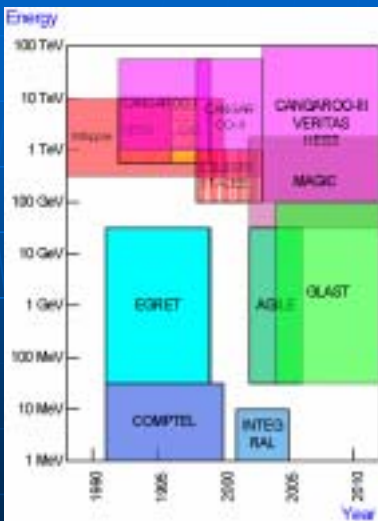


AGILE (ASI [Italy] 2003)

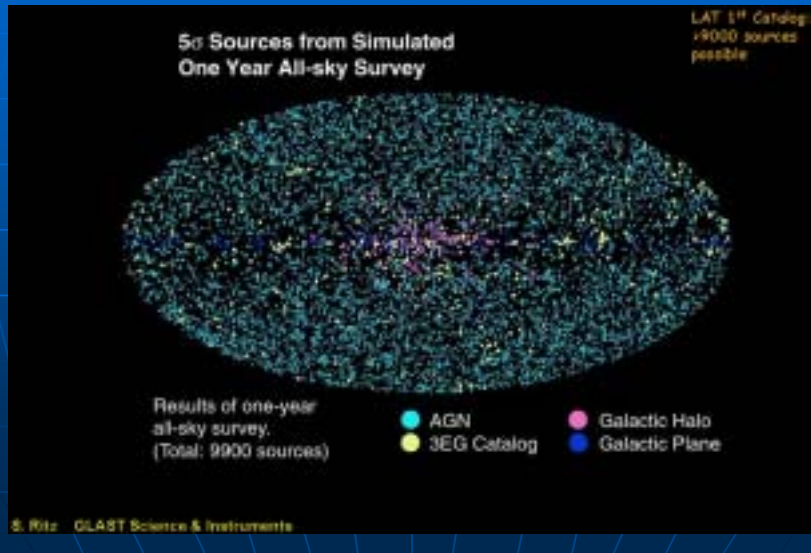


GLAST (NASA, 2006)

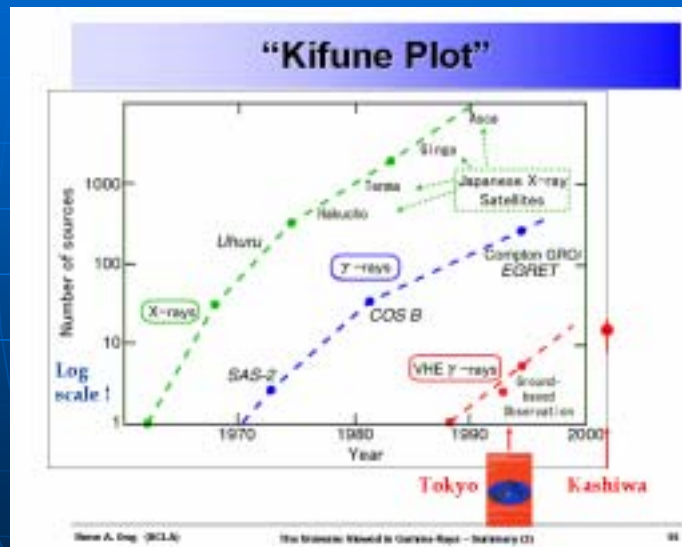
今後のガンマ線観測



2007年のガンマ線天球図?



天体数の年次増加



まとめ

- ガンマ線天文学：天文学の最後のフロンティア。
- ガンマ線は非熱的な加速された粒子から放射され、熱的な過程ではない高エネルギー現象の探針といえる。
- TeVガンマ線天文学は1980年代末に登場し、急速に発展している。
- CANGAROOは南天の解像型チェレンコフ望遠鏡によるTeVガンマ線観測のパイオニア。
- 非熱的な宇宙の探索はまだまだこれから。