

# 超高エネルギーガンマ線 で見る宇宙

森 正樹

東京大学宇宙線研究所



攝影：  
百海正明



撮影:

福島英雄

Spiral Galaxy NGC 4414



Hubble  
Heritage



**Hubble Deep Field**

**HST WFPC2**

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

# 光の種類、波長、天体の温度



天体の温度スケール



# 光の種類と身近な例



ガンマ線

X線

紫外線

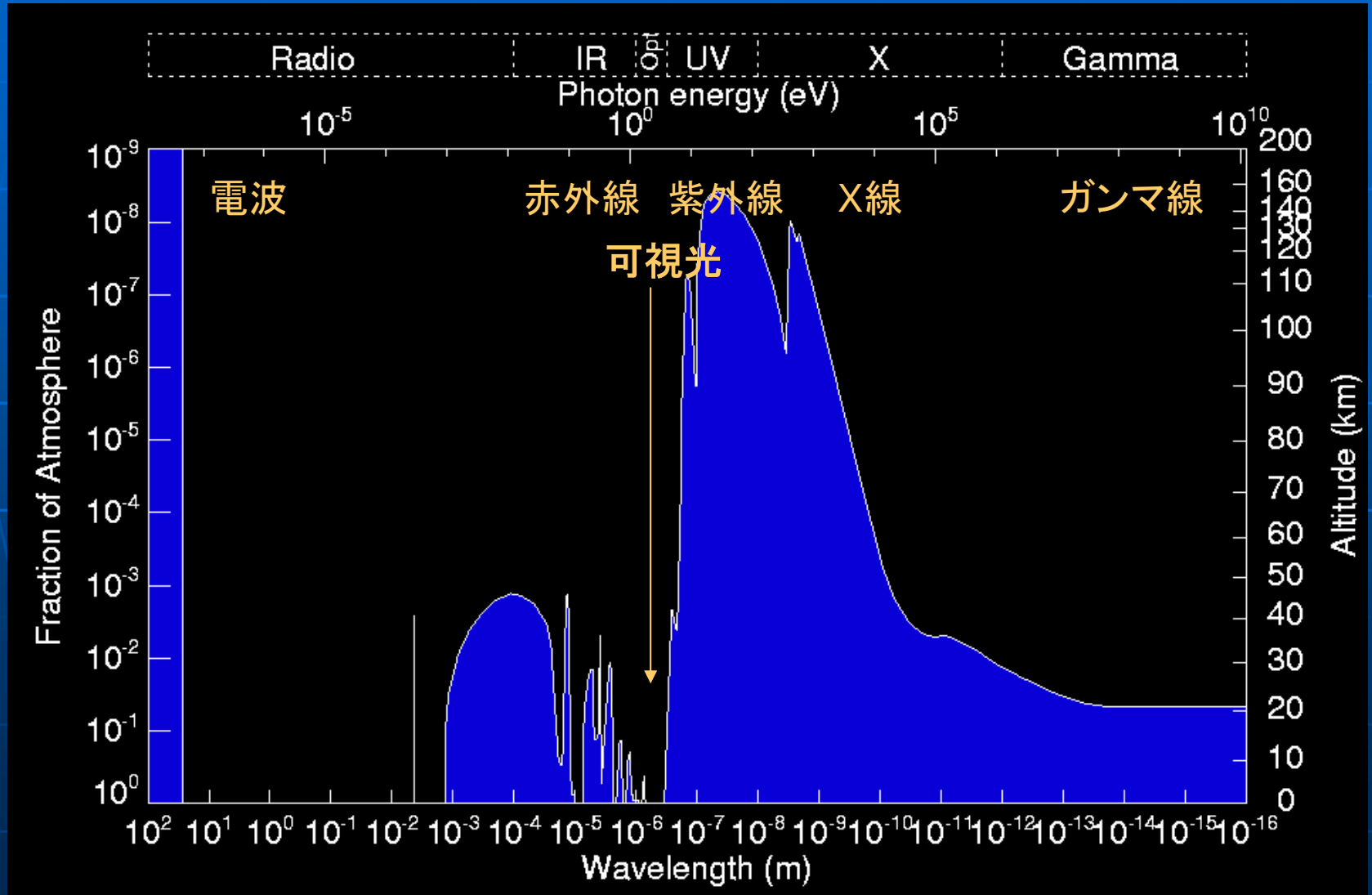
可視光

赤外線

マイクロ波

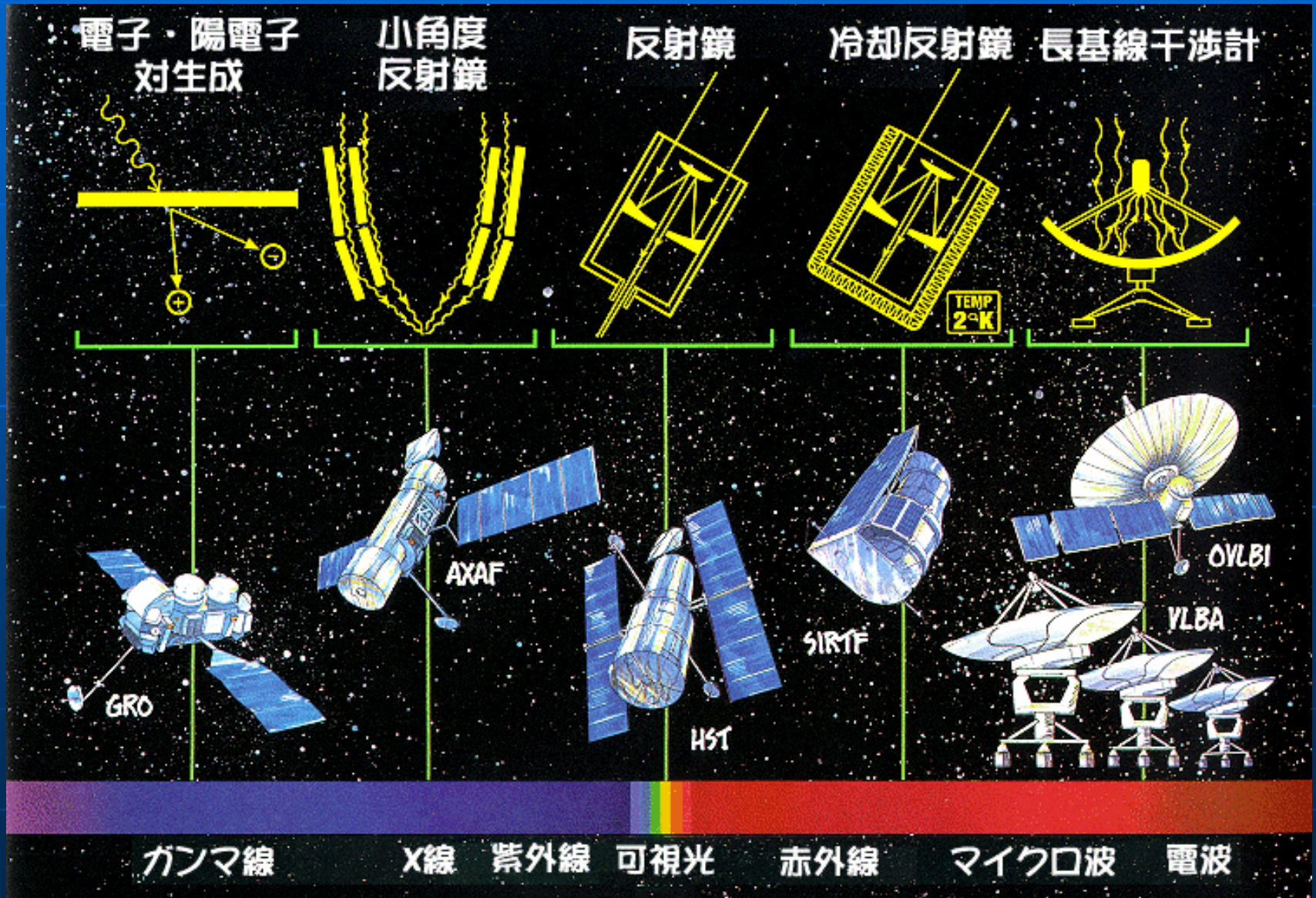
電波

# 大気の透明度

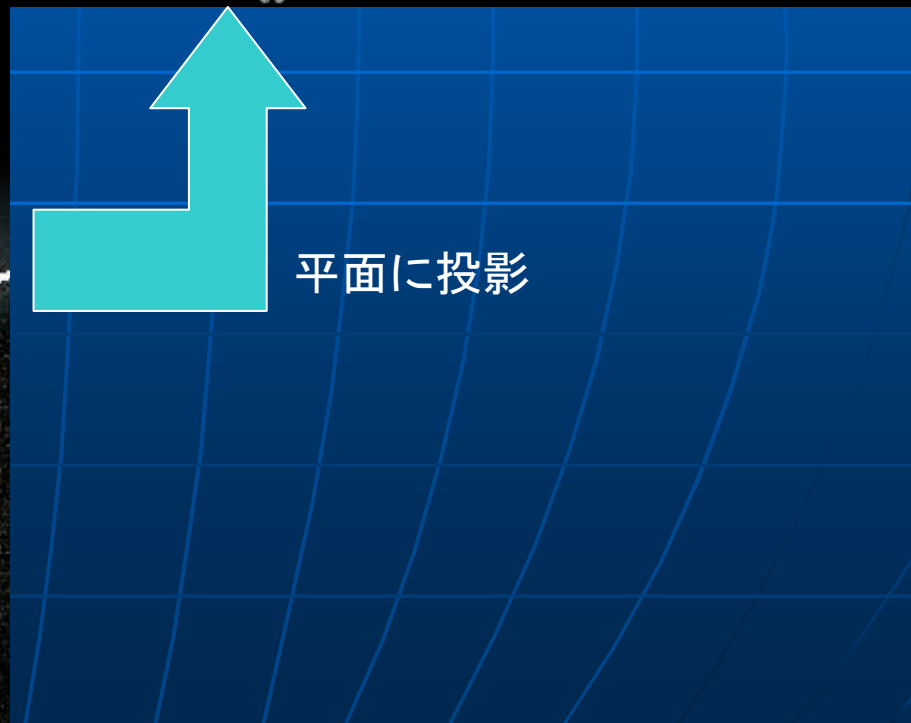
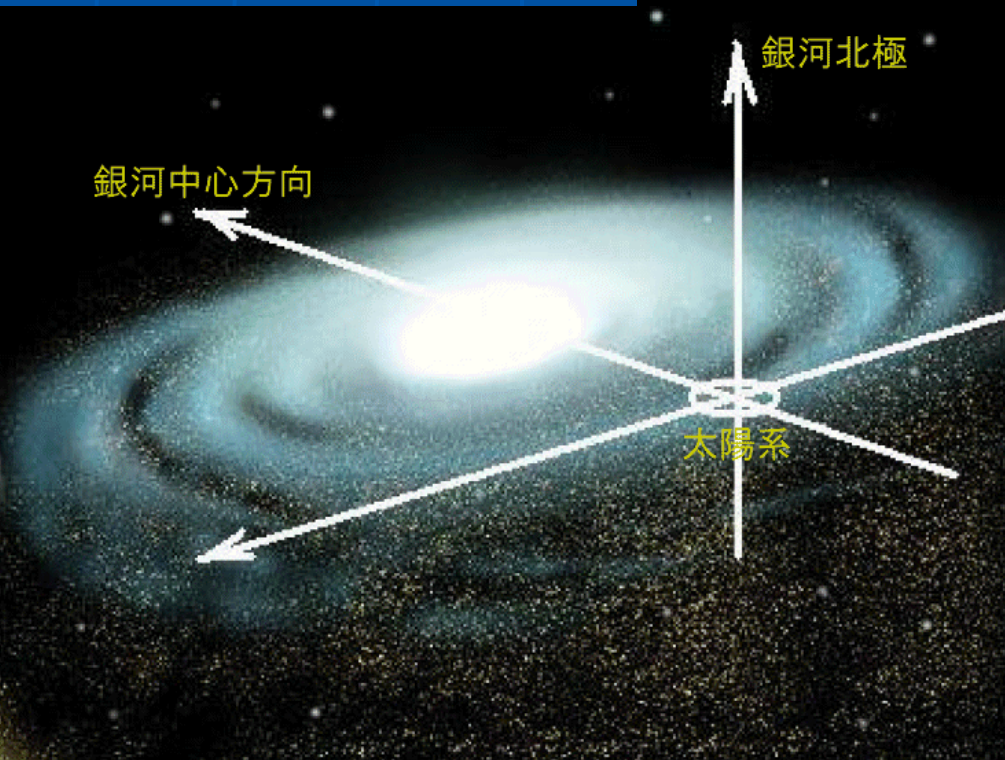
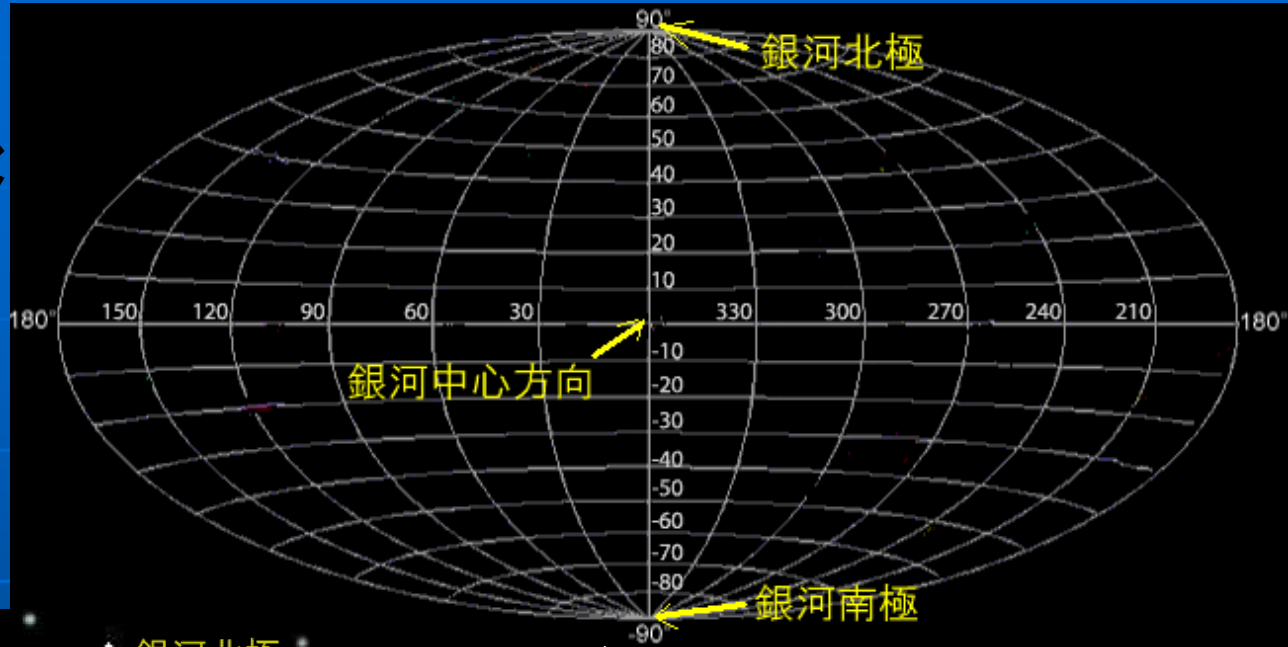




# 光の観測方法

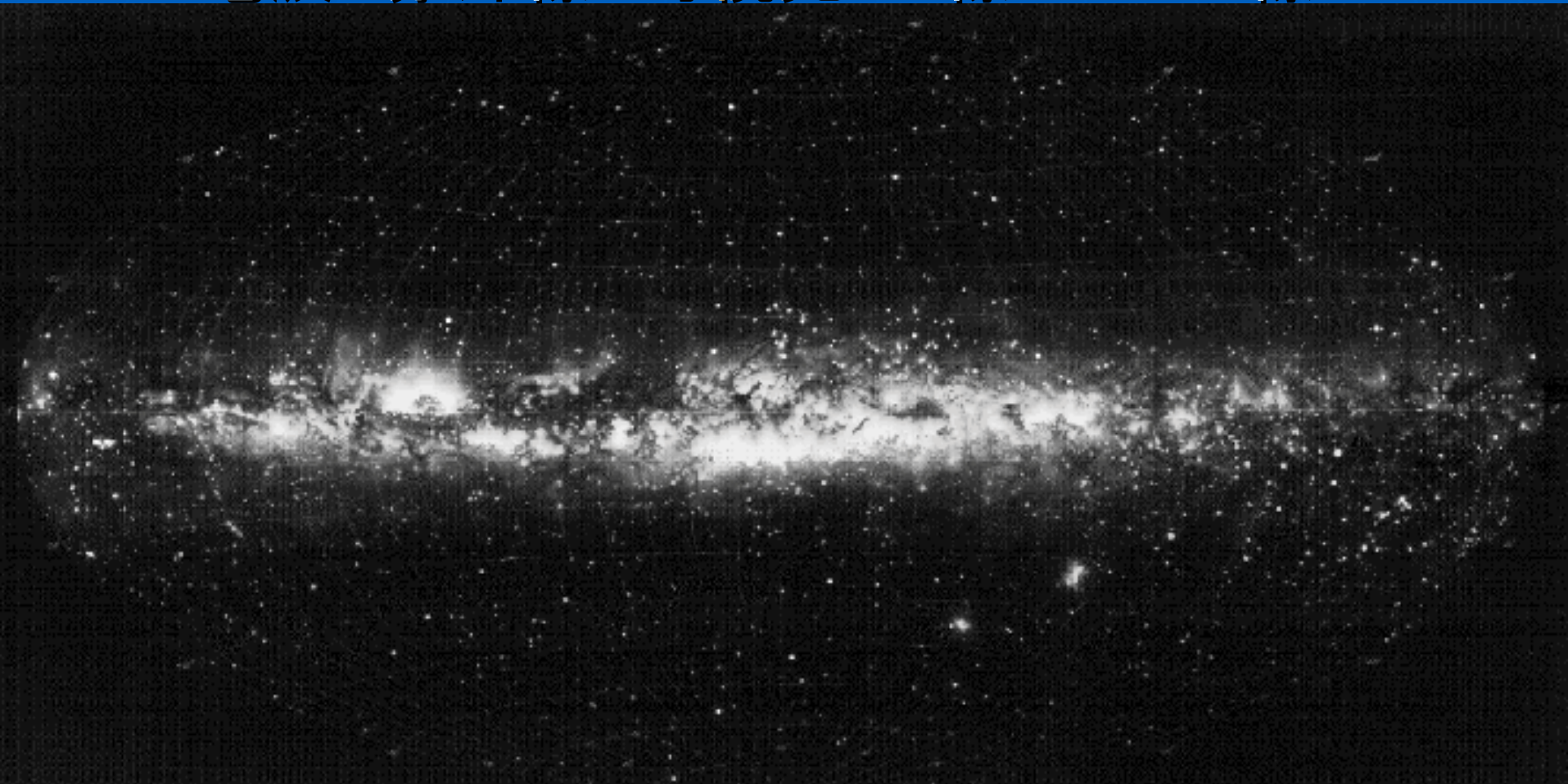


# 銀河座標系



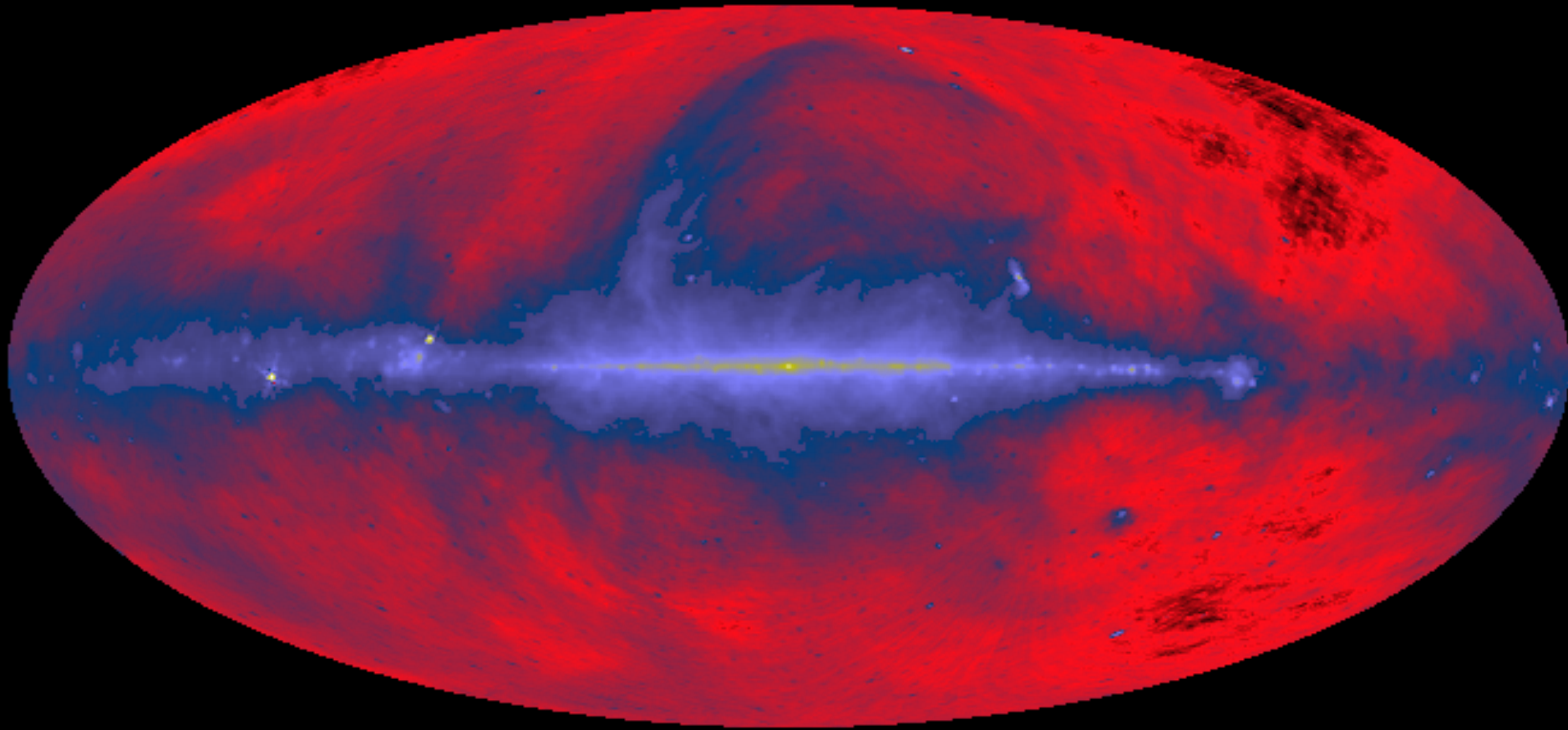
# 我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



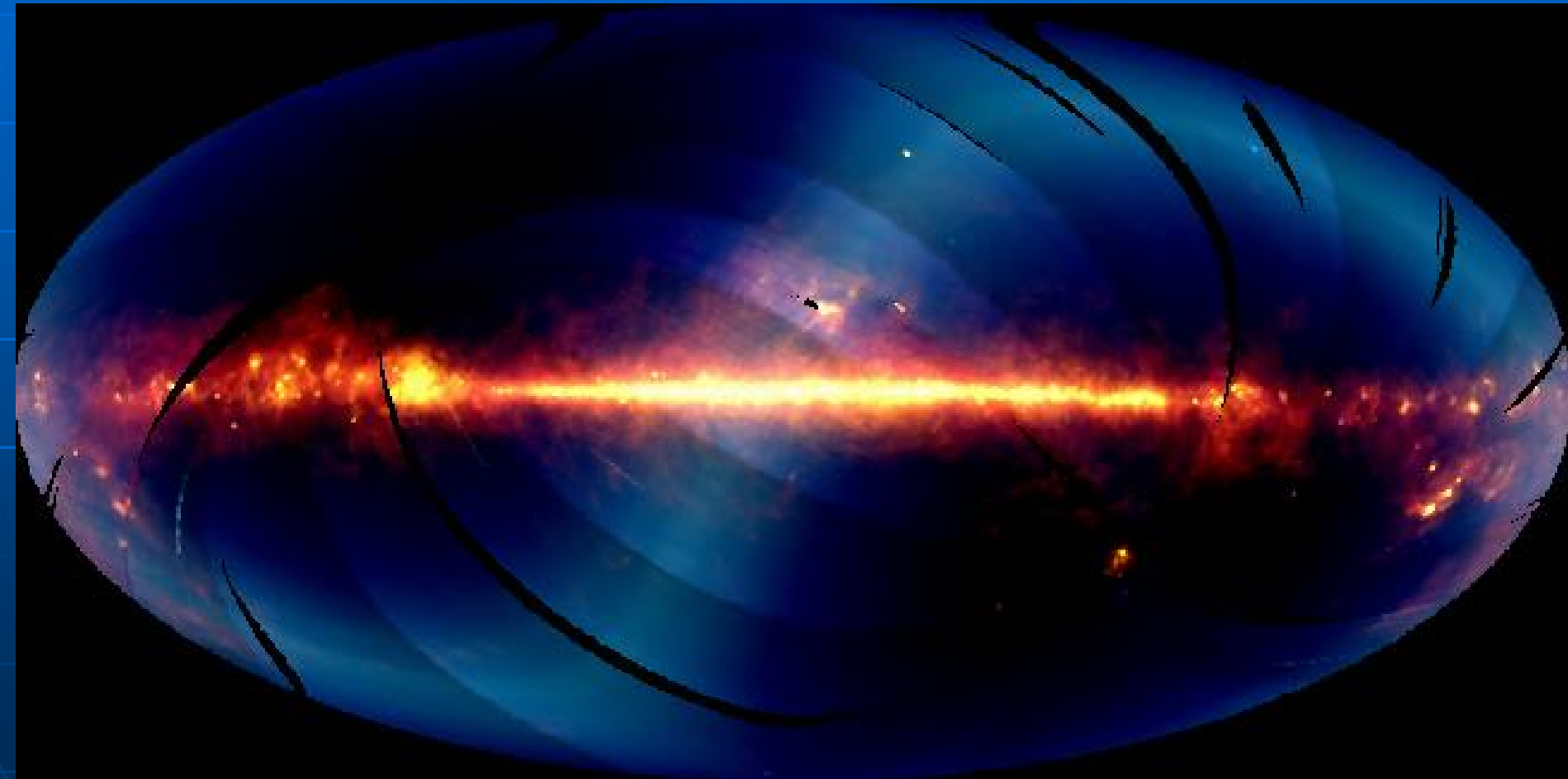
# 我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



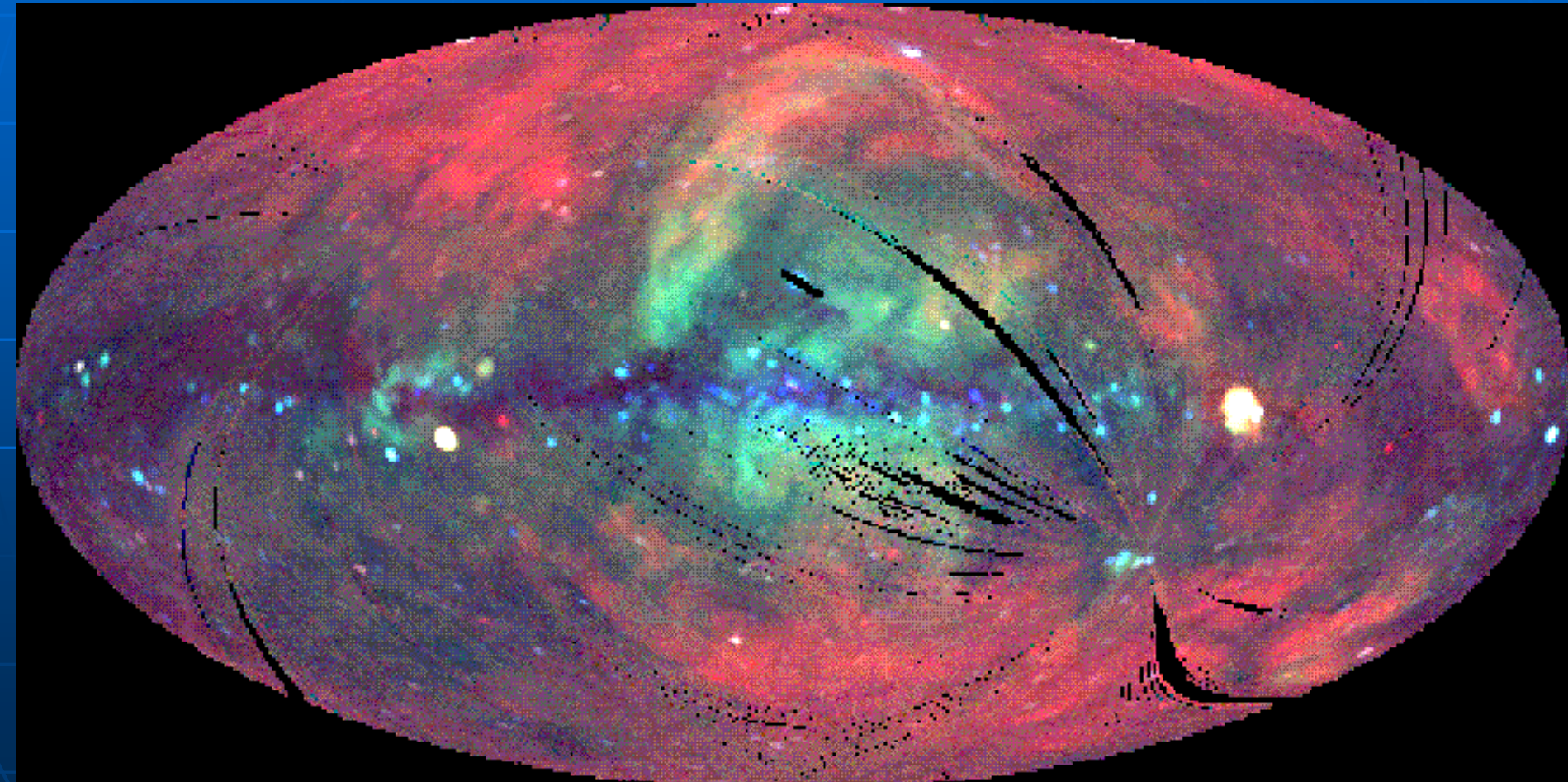
# 我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



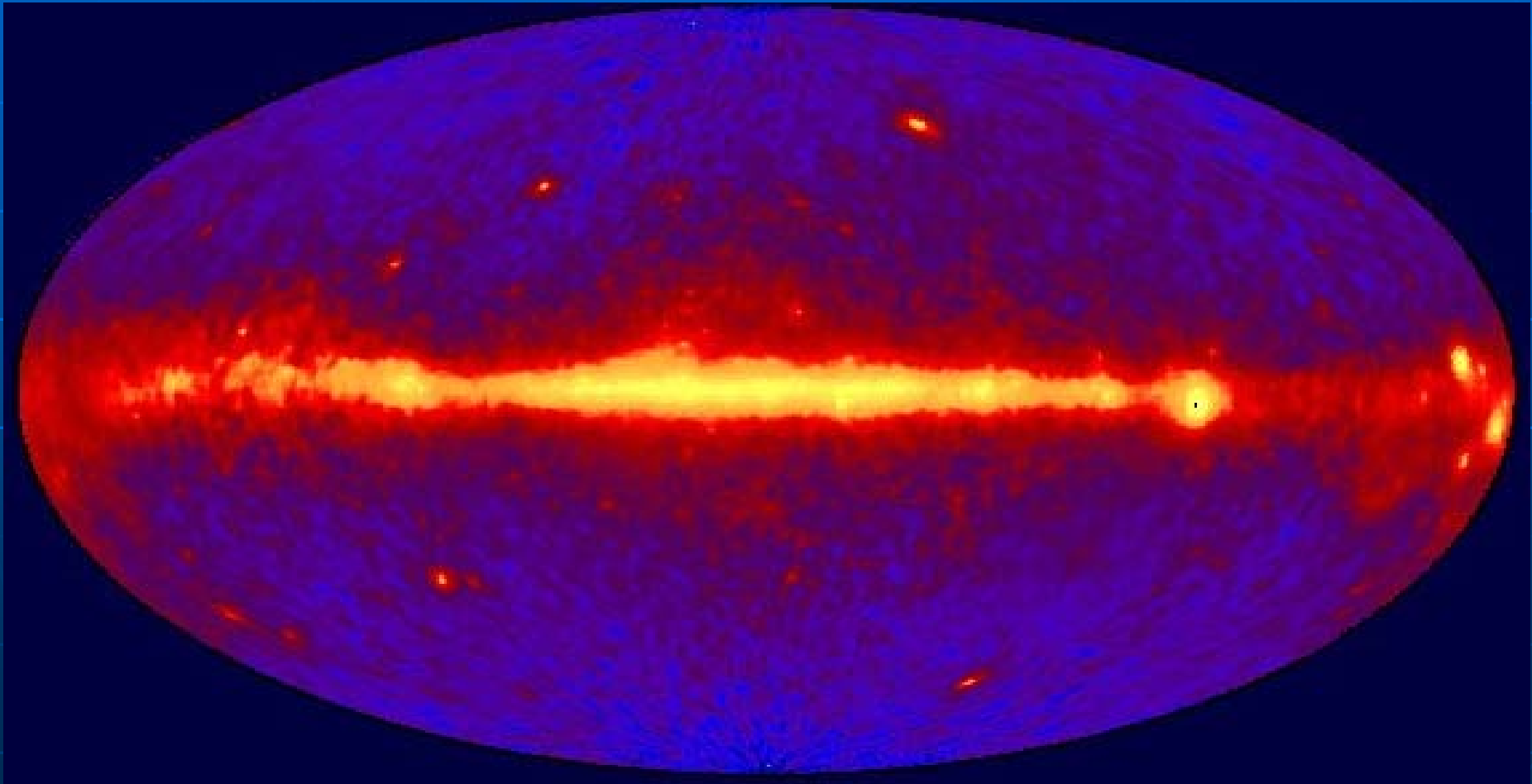
# 我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



# 我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線

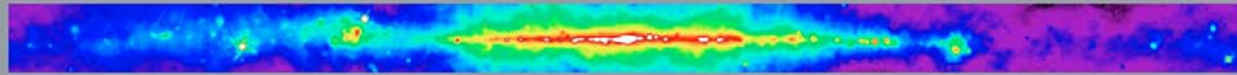


# さまざまな波長で見た銀河

## Multiwavelength Milky Way

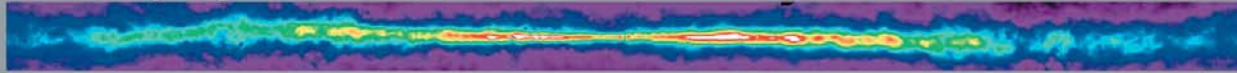
Radio Continuum

408 MHz Bonn, Jodrell Banks, & Parkes



Atomic Hydrogen

21 cm Leiden-Dwingeloo, Maryland-Parkes



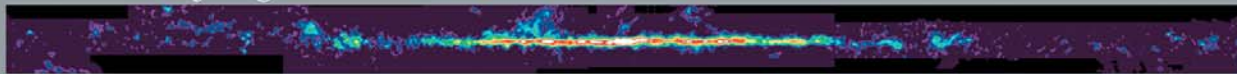
Radio Continuum

2.4-2.7 GHz Bonn & Parkes



Molecular Hydrogen

115 GHz Columbia-GISS



Infrared

12, 60, 100  $\mu\text{m}$  IRAS



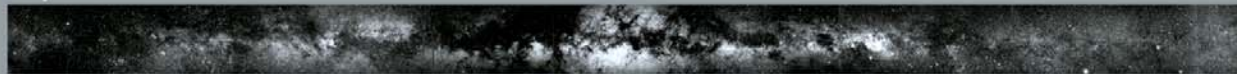
Near Infrared

1.25, 2.2, 3.5  $\mu\text{m}$  COBE/DIRBE



Optical

Laustsen et al. Photomosaic



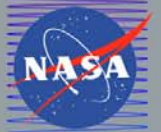
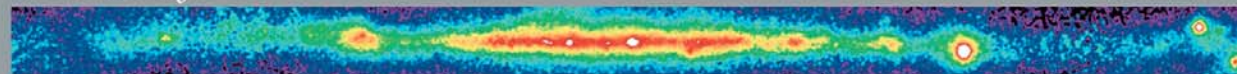
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC



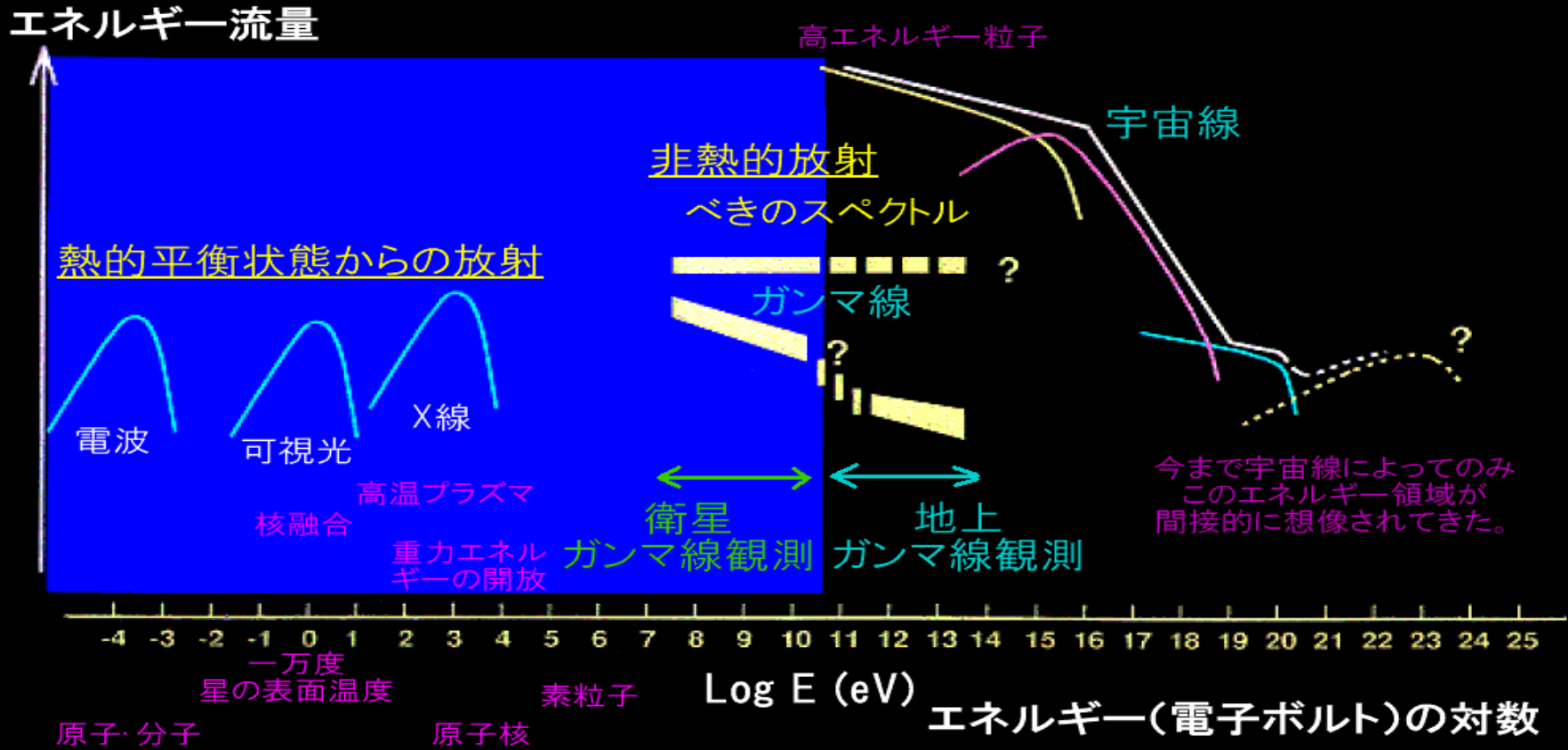
Gamma Ray

>100 MeV CGRO/EGRET



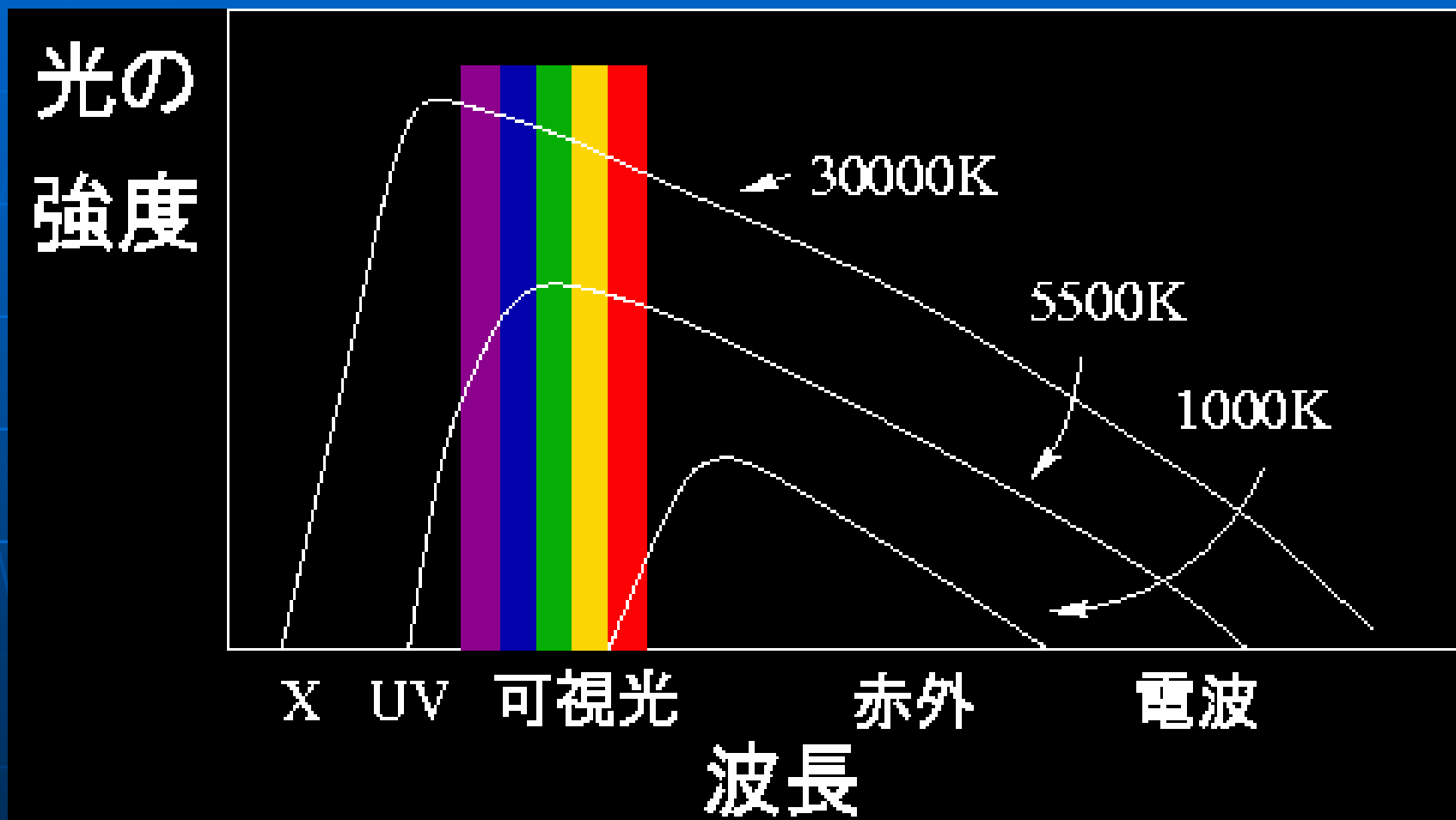


# 天体観測の新しい窓



今までの観測の窓 ⇔ ガンマ線の新しい観測の窓

# 熱的放射

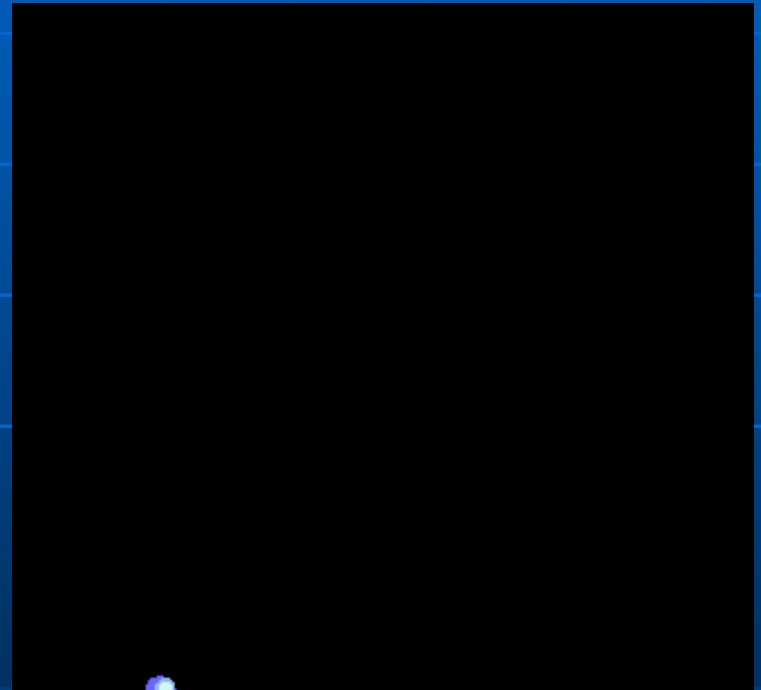
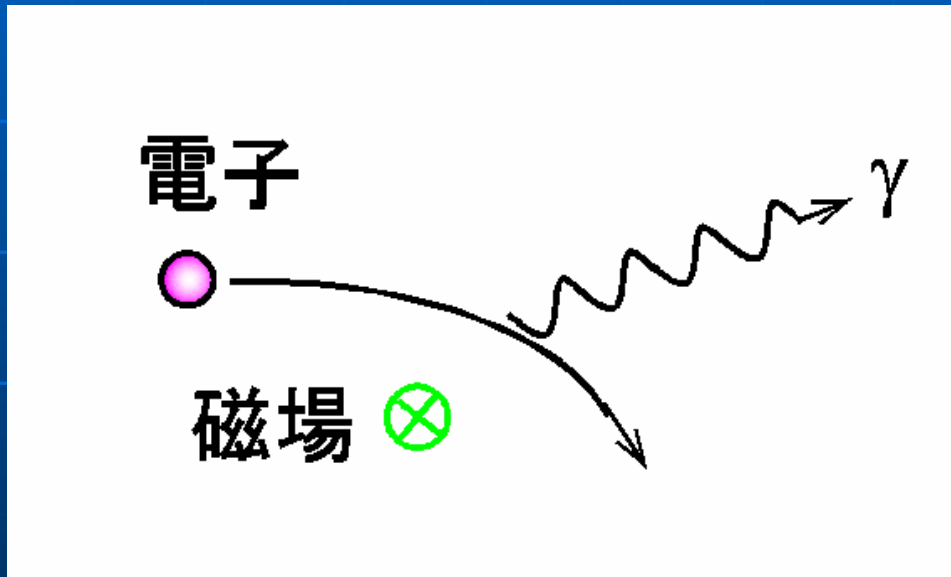


プランクの放射公式

$$dE = 8\pi hc / (\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)) d\lambda$$

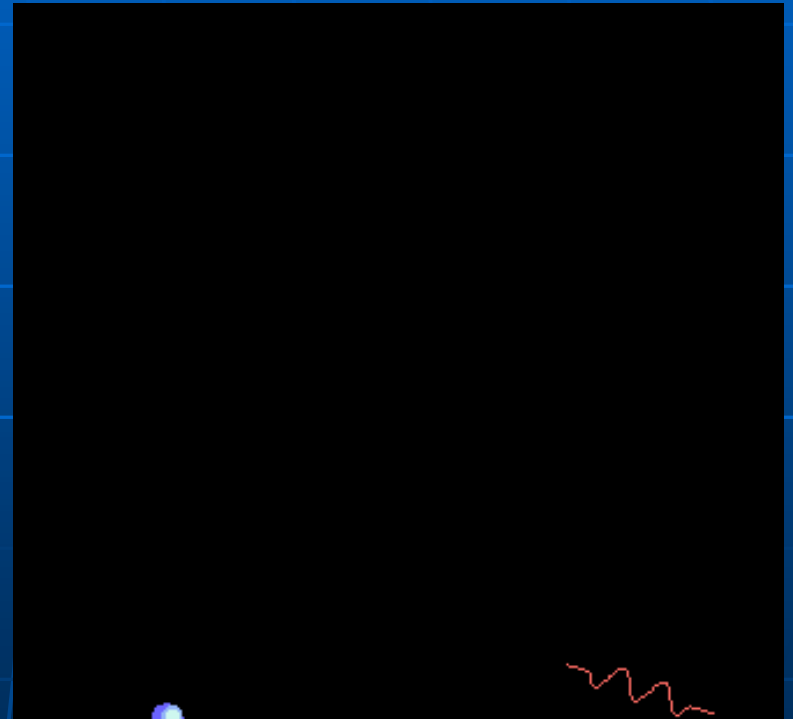
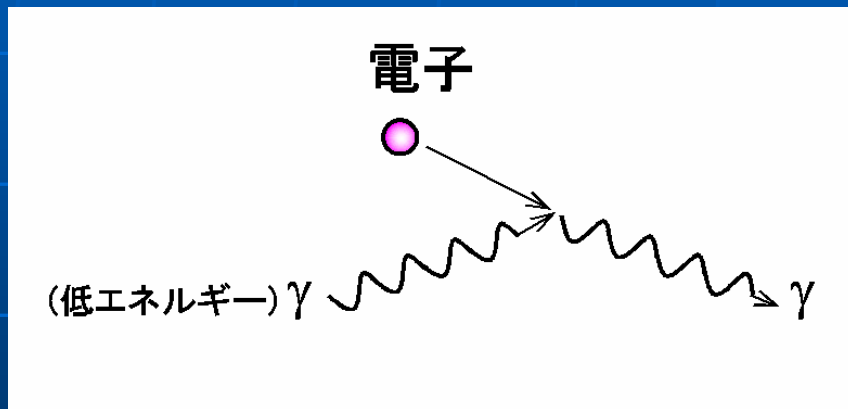
# ガンマ線の生成: シンクロトロン放射

高エネルギー 電子 + 磁場



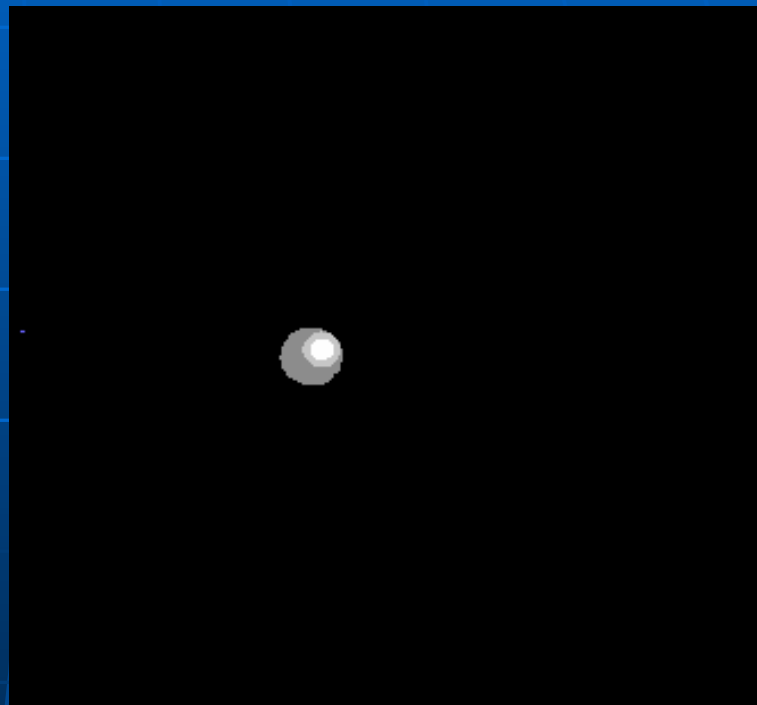
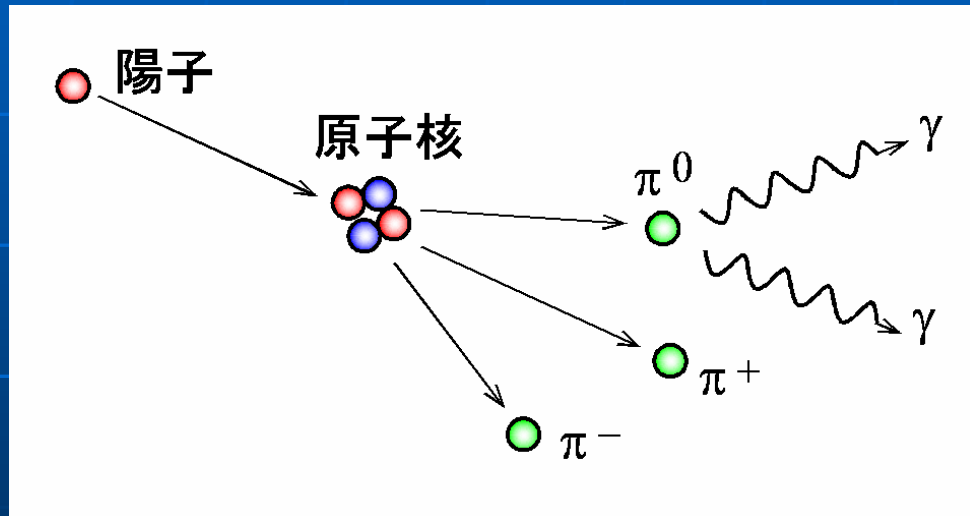
# ガンマ線の生成: 逆コンプトン放射

高エネルギー 電子 + 光子場



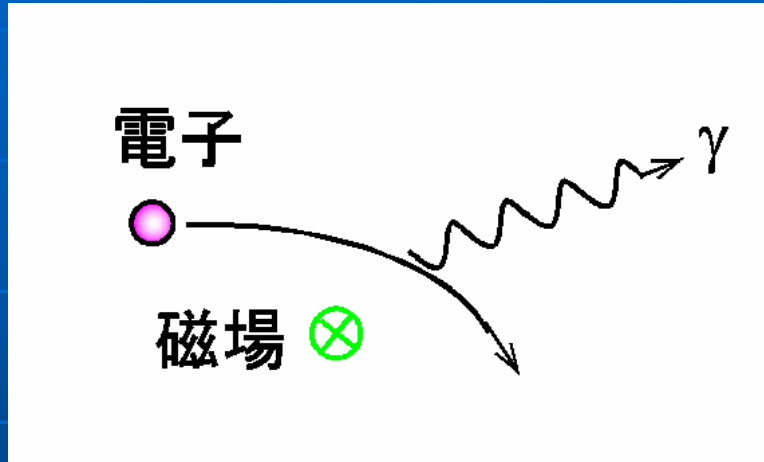
# ガンマ線の生成: 中性パイオンの崩壊

高エネルギー 陽子 + 物質

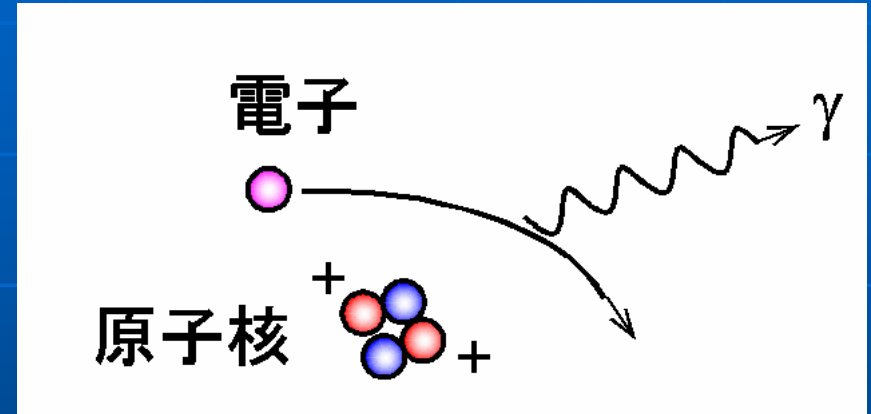


# ガンマ線の放射機構：非熱的

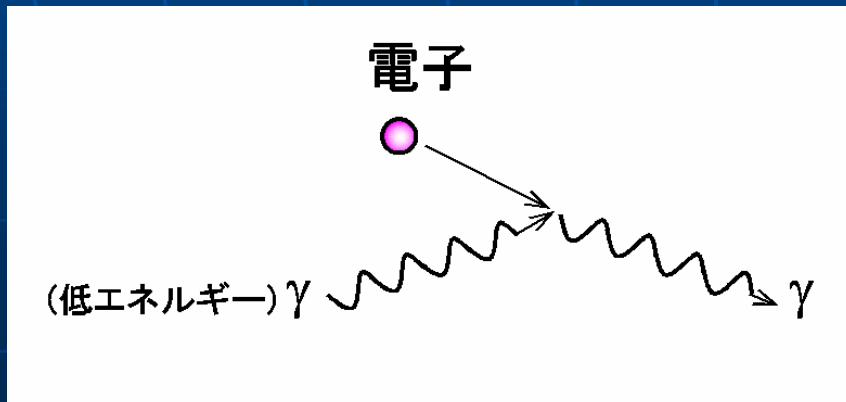
シンクロトン放射



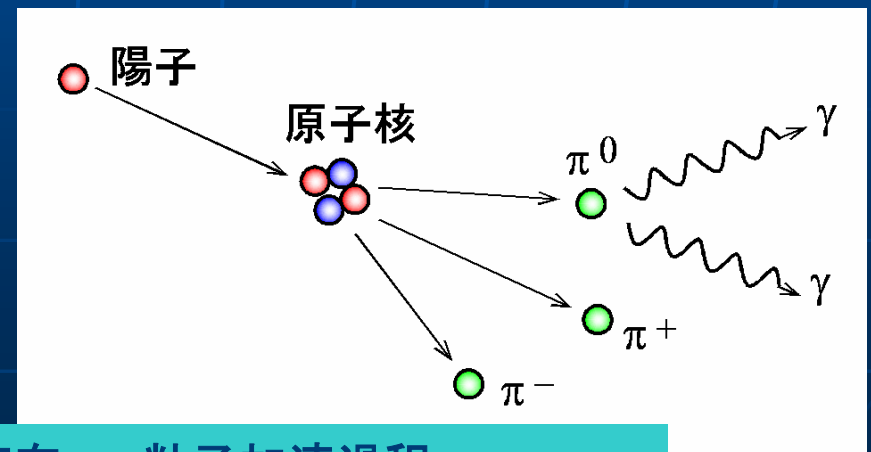
電子の制動放射



逆コンプトン放射

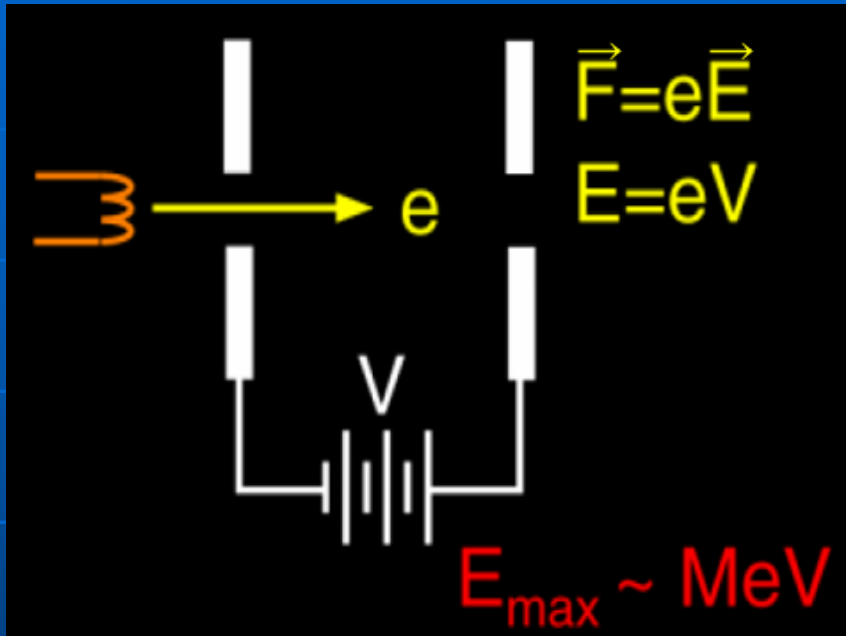


中性パイオンの崩壊



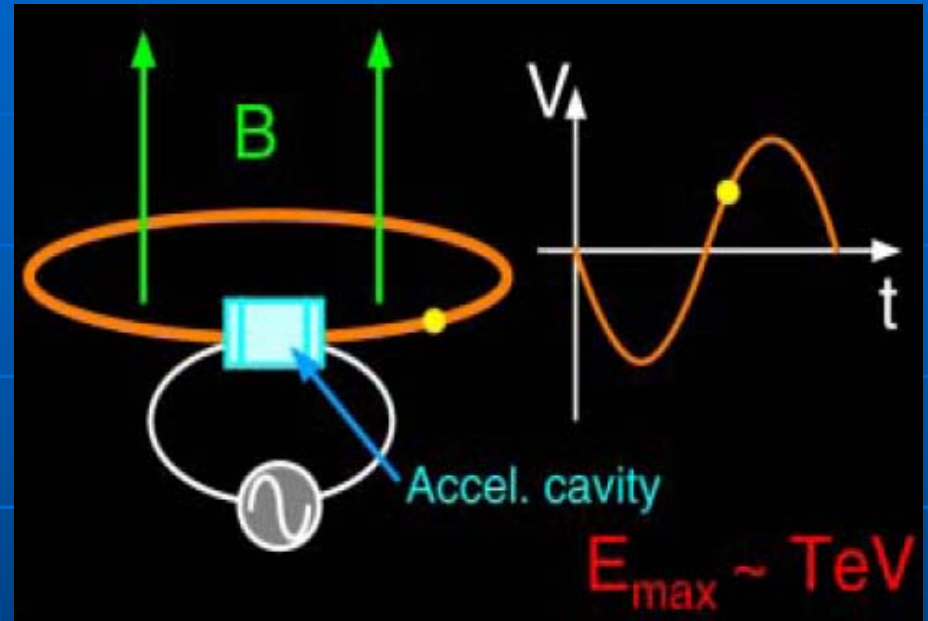
高エネルギー粒子の存在  $\Leftarrow$  粒子加速過程

# 粒子の加速



電場による加速

一回では得られるエネルギーに限界



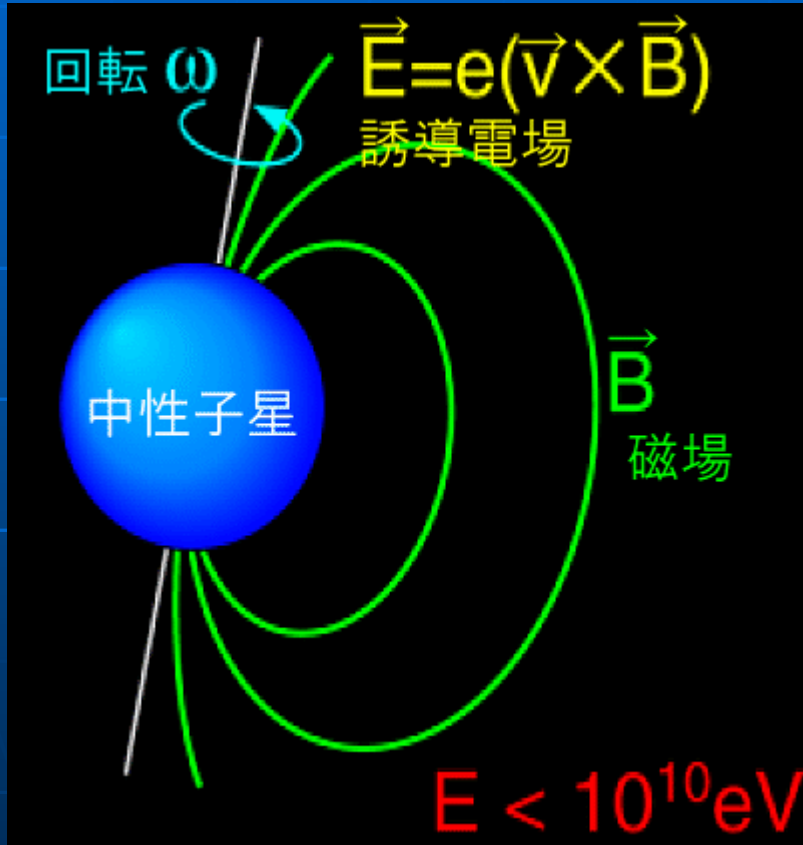
高周波電場による加速と磁場による偏向

繰り返し加速で高いエネルギーが可能

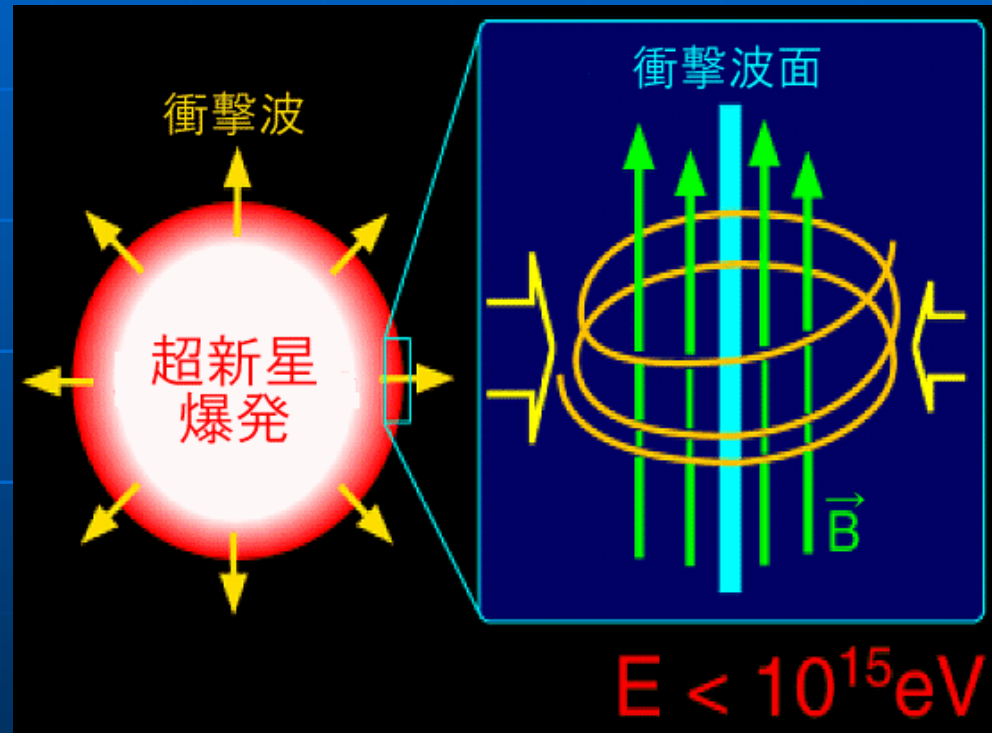


例: つくば高エネルギー加速器研究機構の陽子シンクロトン加速器

# 天体における粒子加速



回転中性子星(パルサー)に  
おける誘導電場

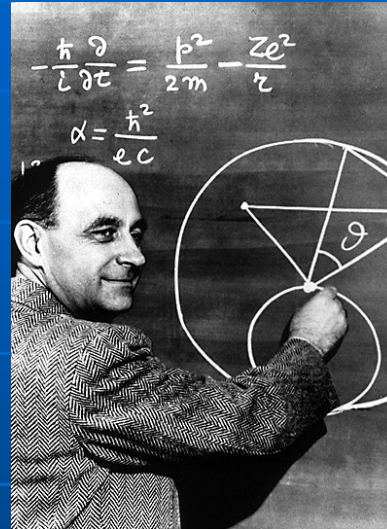
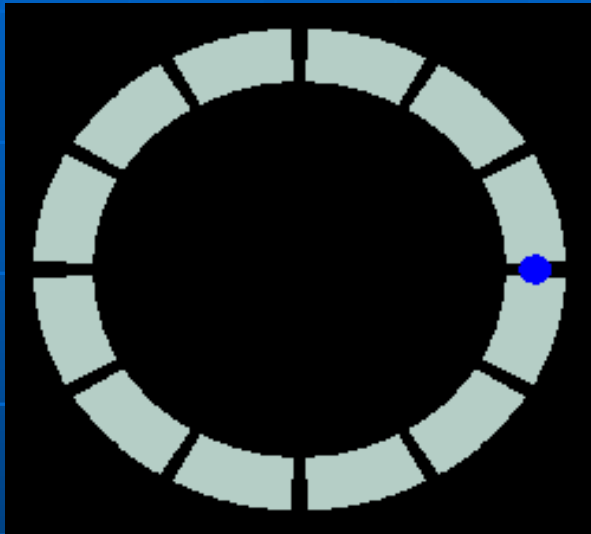


超新星残骸における  
衝撃波と磁場による統計的加速



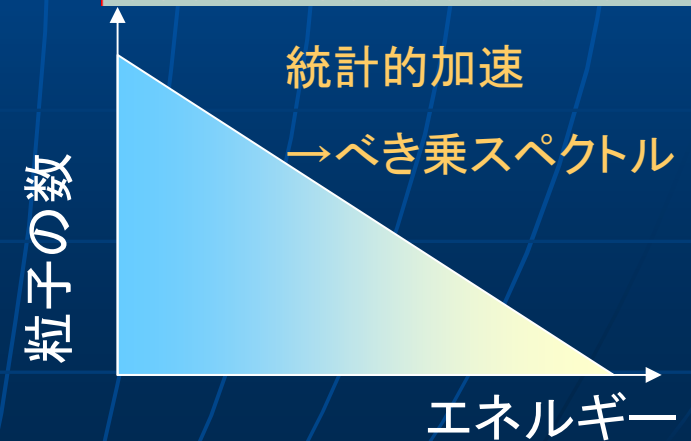
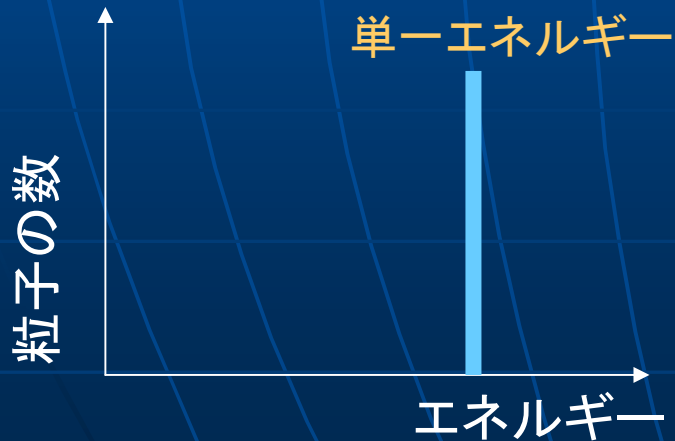
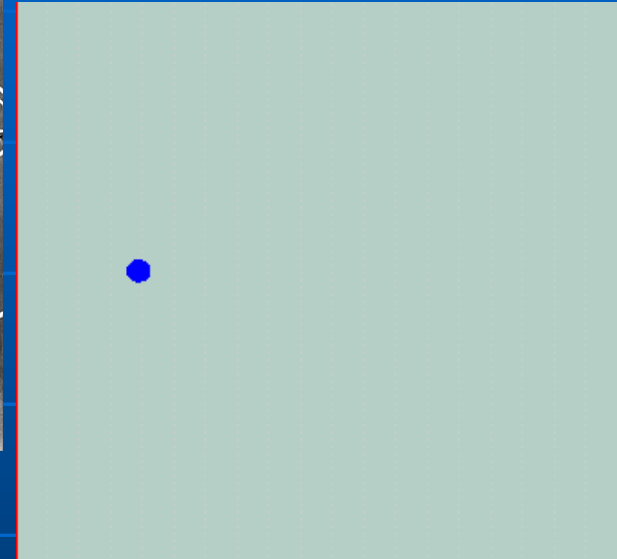
# 粒子加速の比較

人工粒子加速器

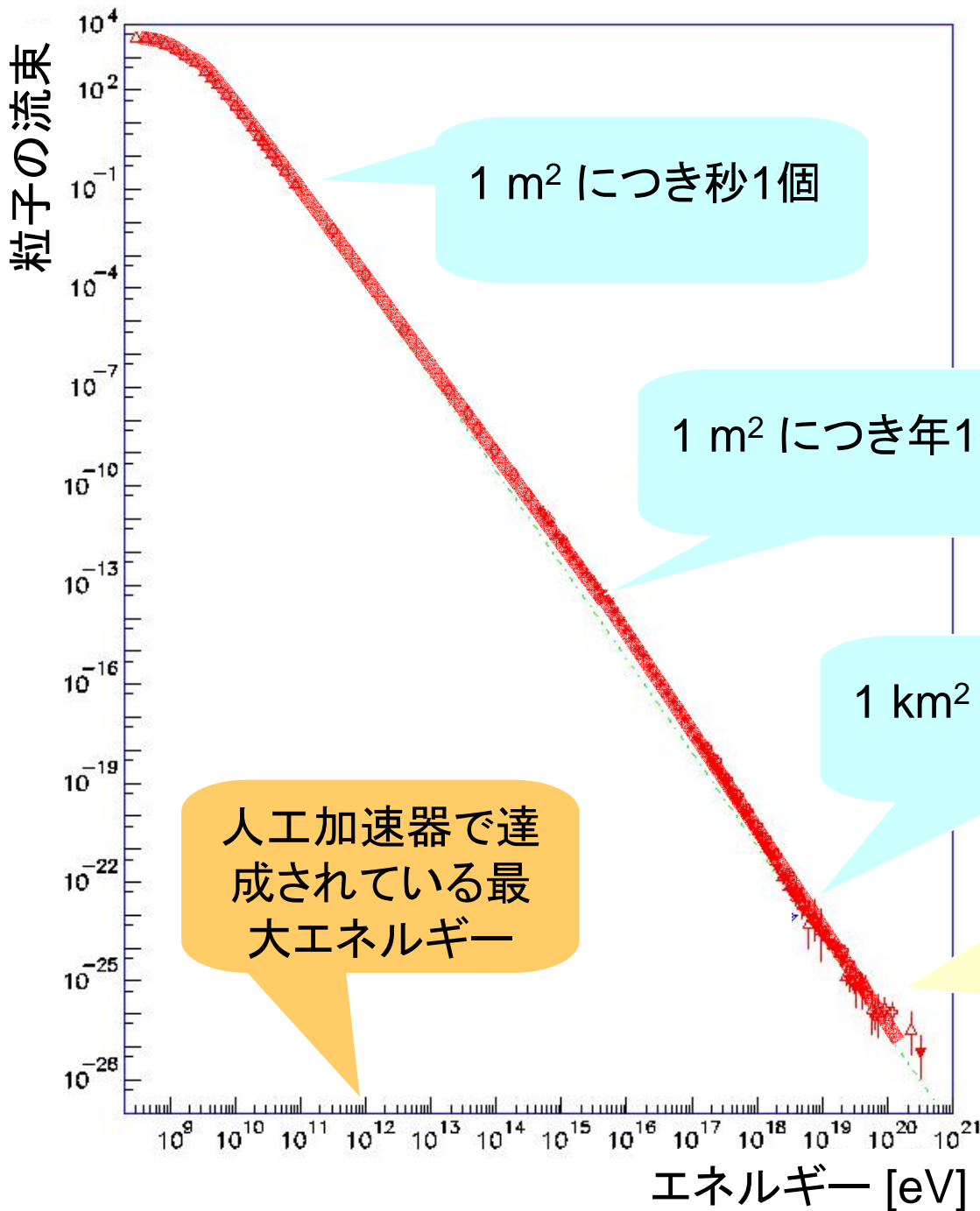


エンリコ・フェルミ

天体における粒子加速



# 宇宙線



- 陽子や原子核
- 10桁以上にわたる広いエネルギー範囲 (最高10<sup>20</sup>eVを超える)

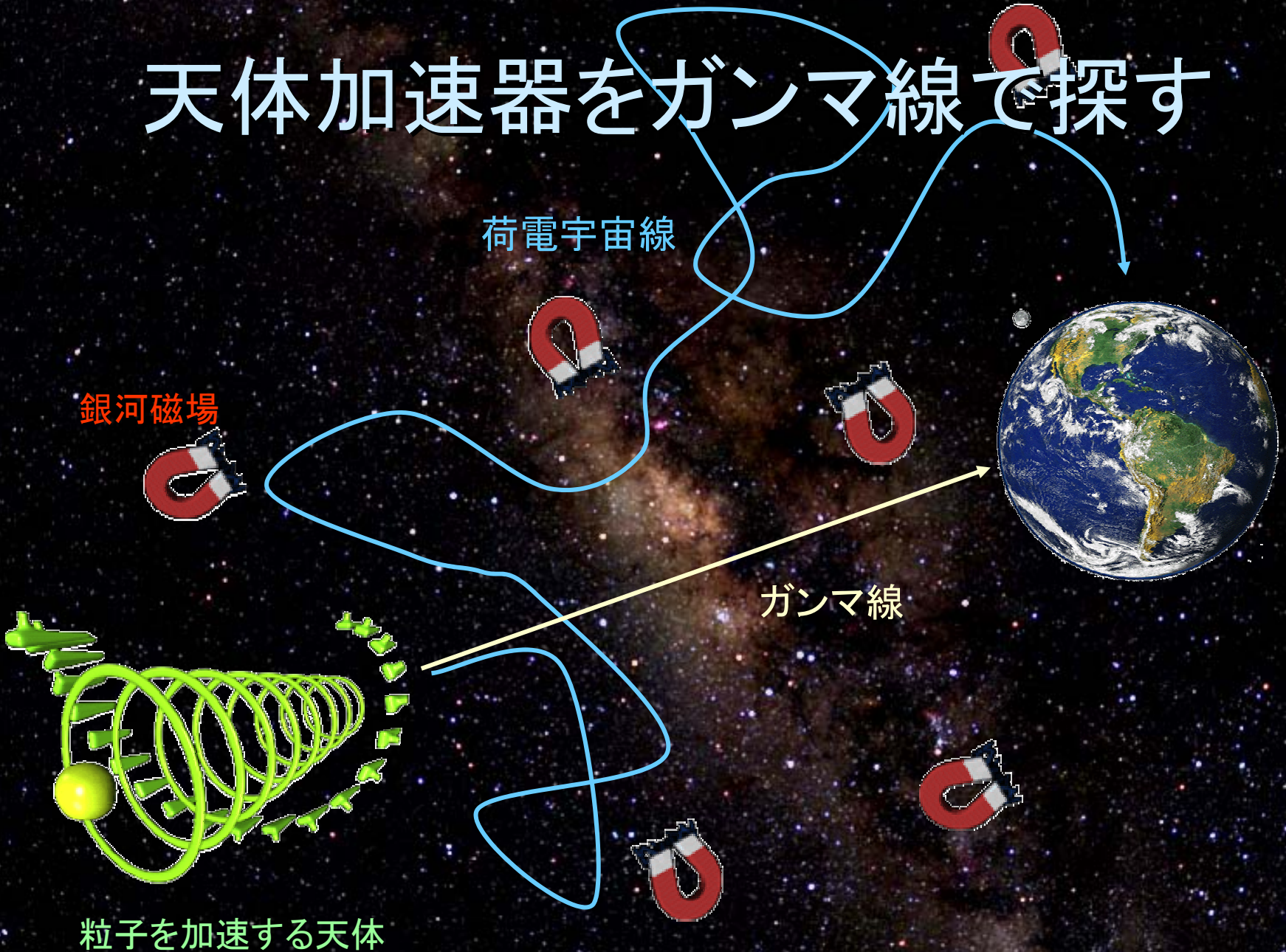
# 天体加速器をガンマ線で探す

荷電宇宙線

銀河磁場

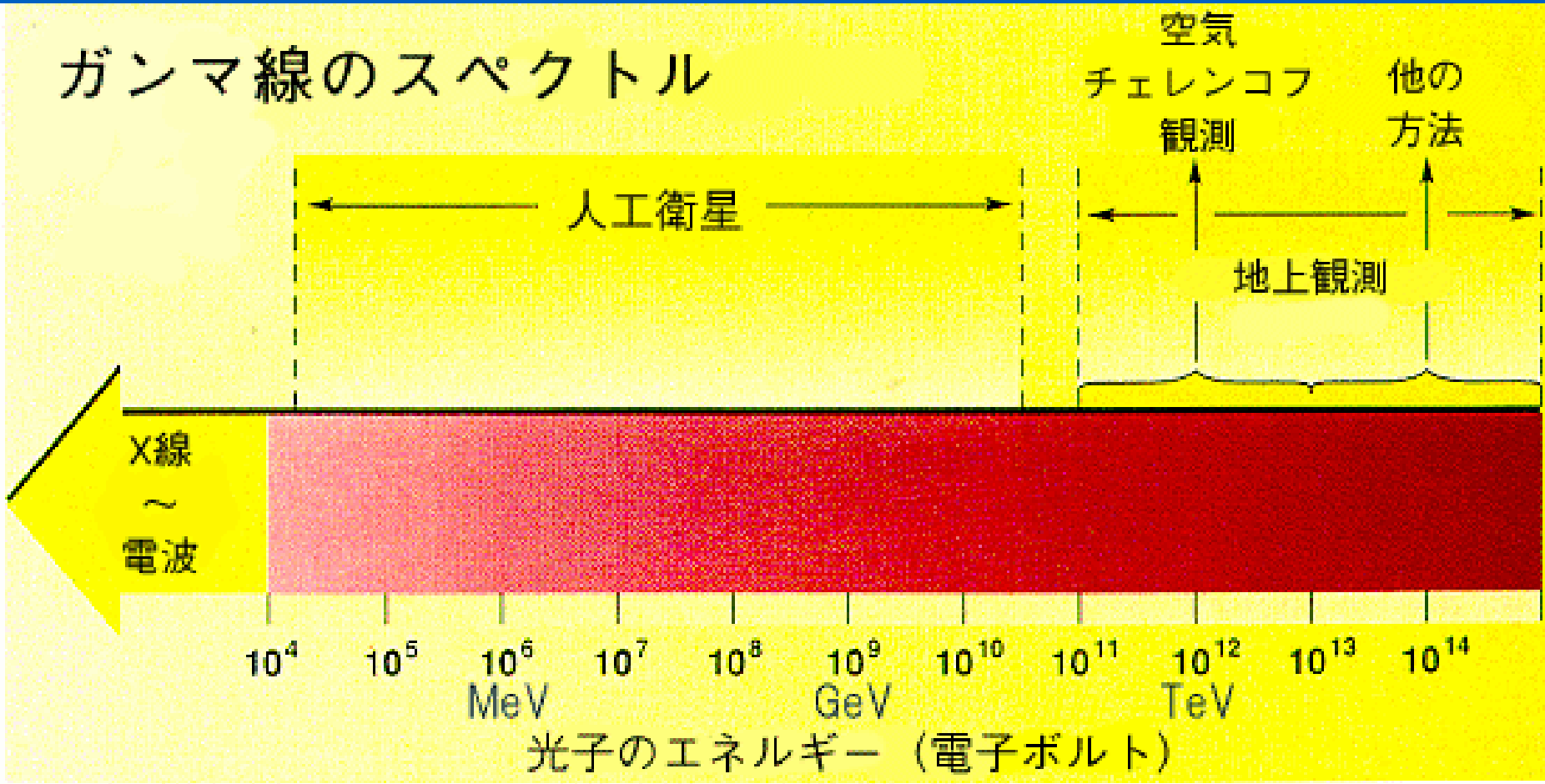
ガンマ線

粒子を加速する天体



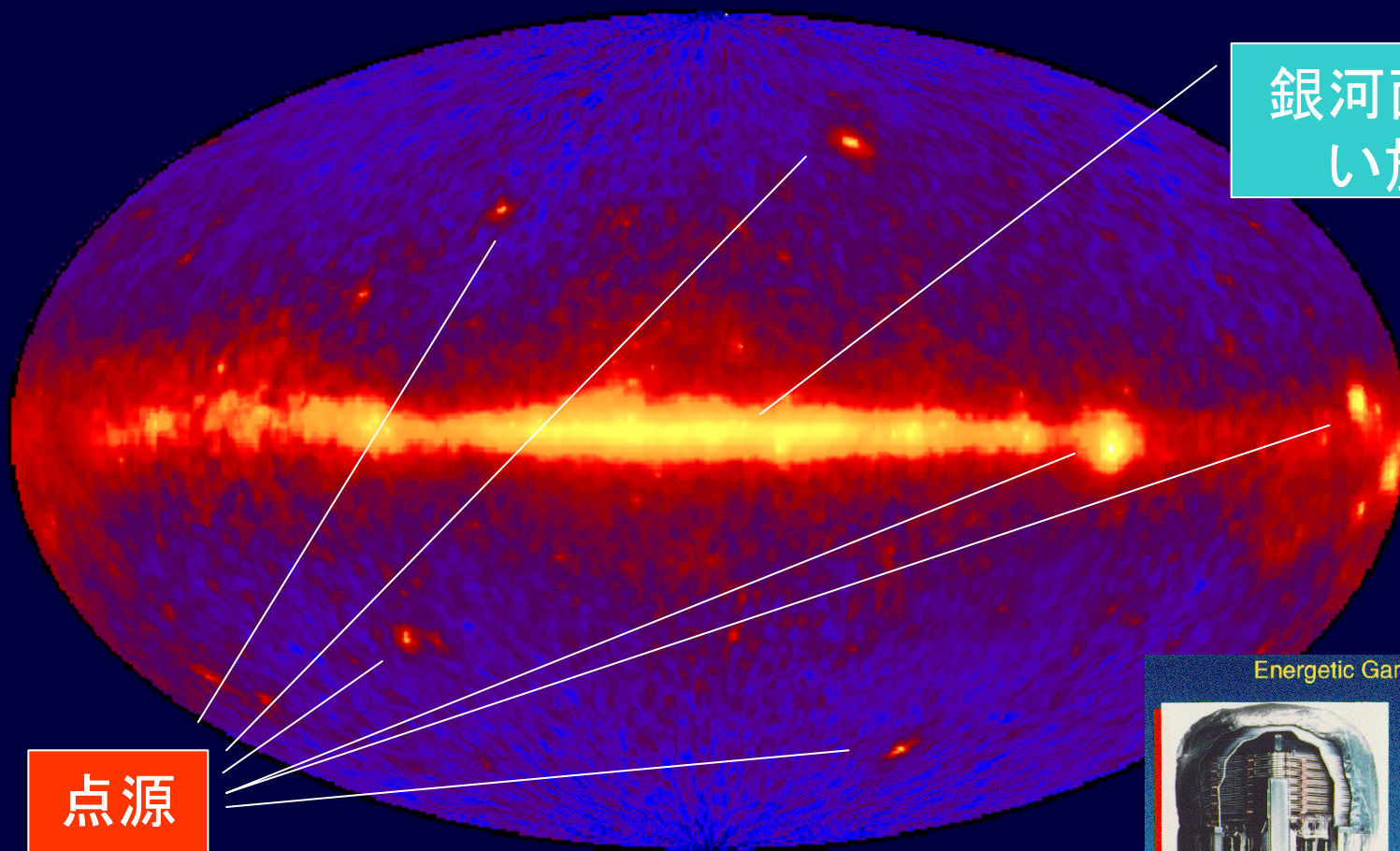
# ガンマ線のエネルギー領域

## ガンマ線のスペクトル



# GeVガンマ線で見た宇宙(1)

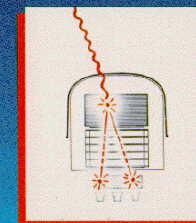
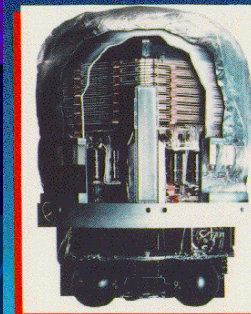
EGRET All-Sky Gamma Ray Survey Above 100 MeV



銀河面に強い放射

点源

Energetic Gamma Ray Experiment Telescope (EGRET)

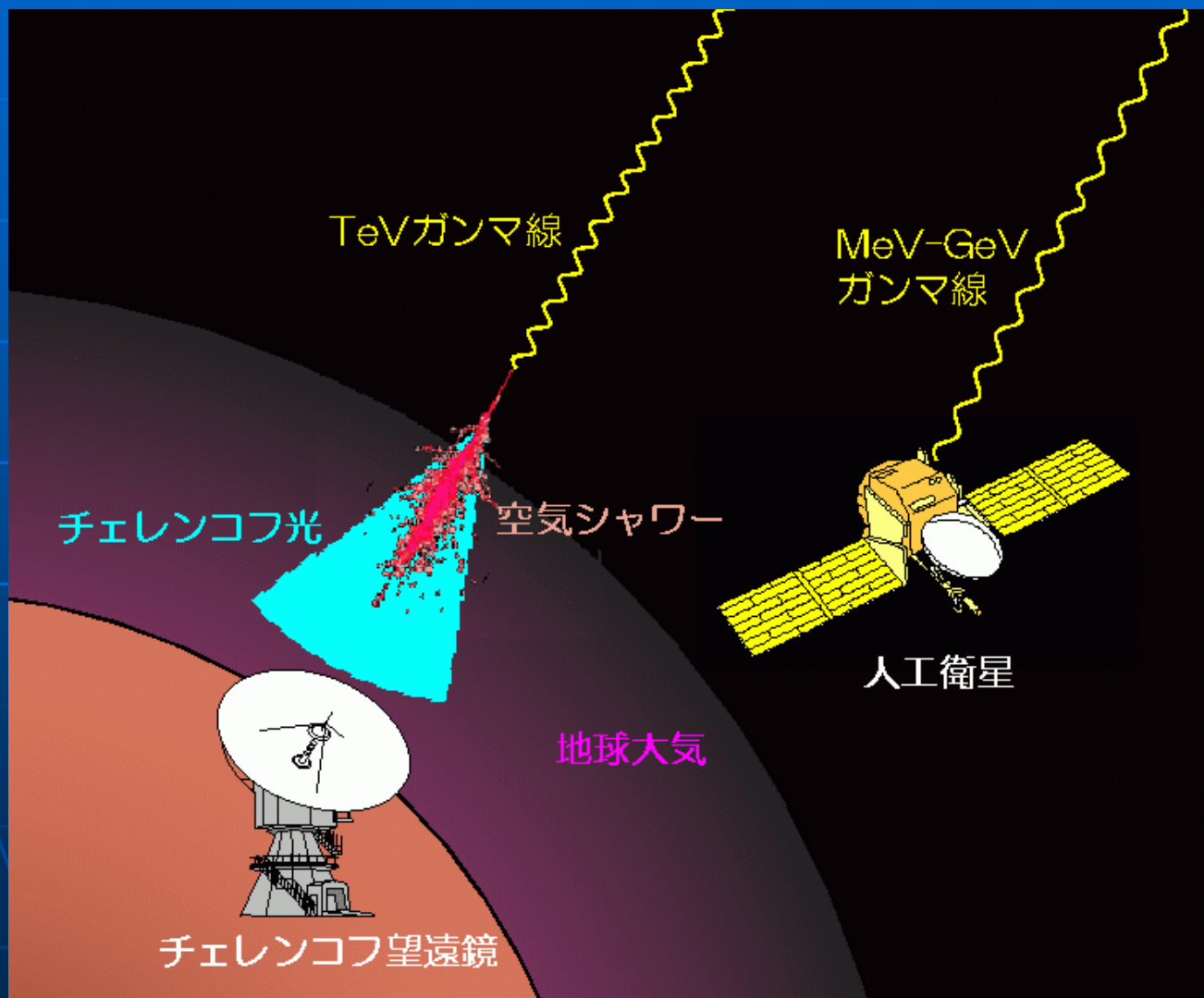




# EGRETガンマ線点源のまとめ

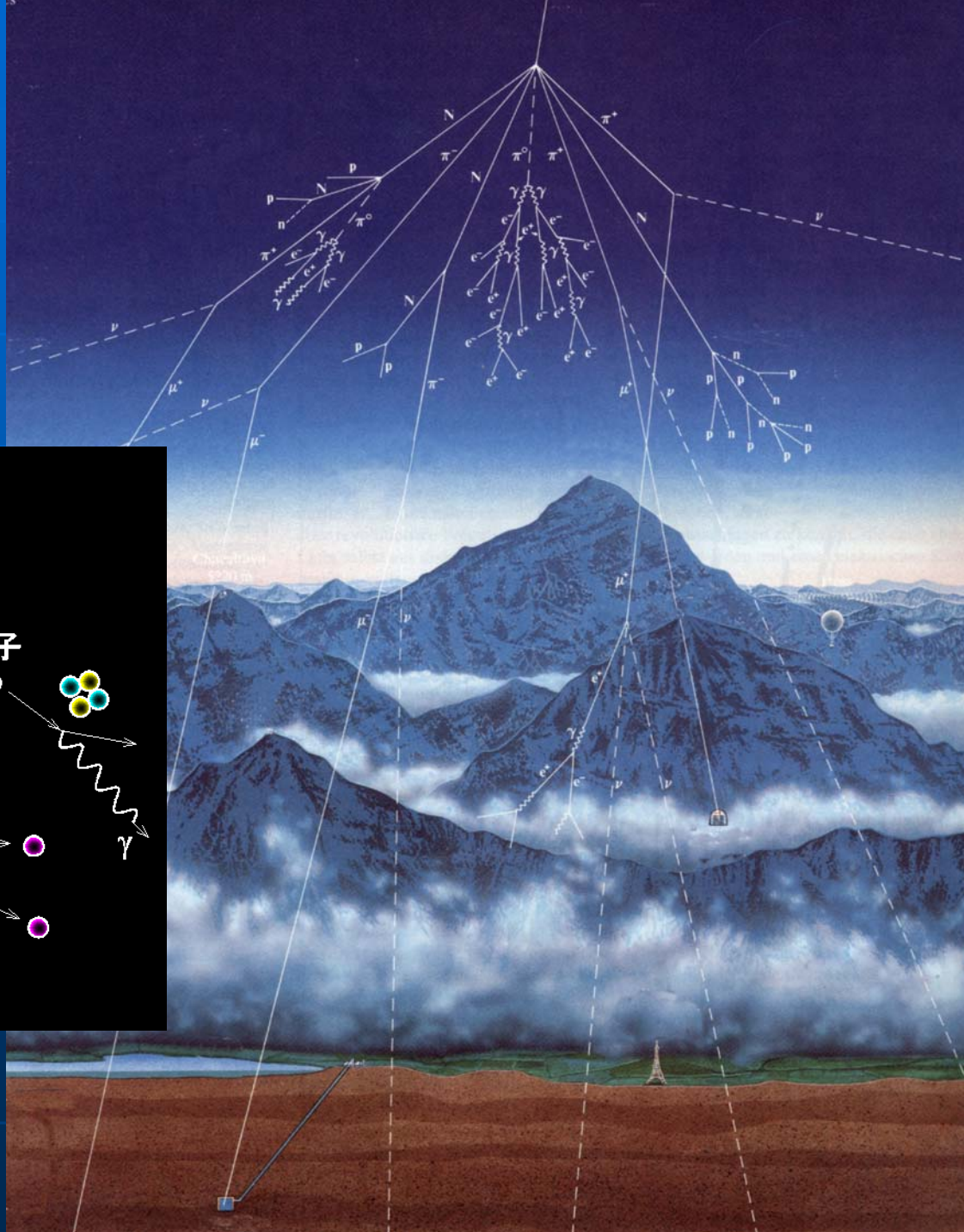
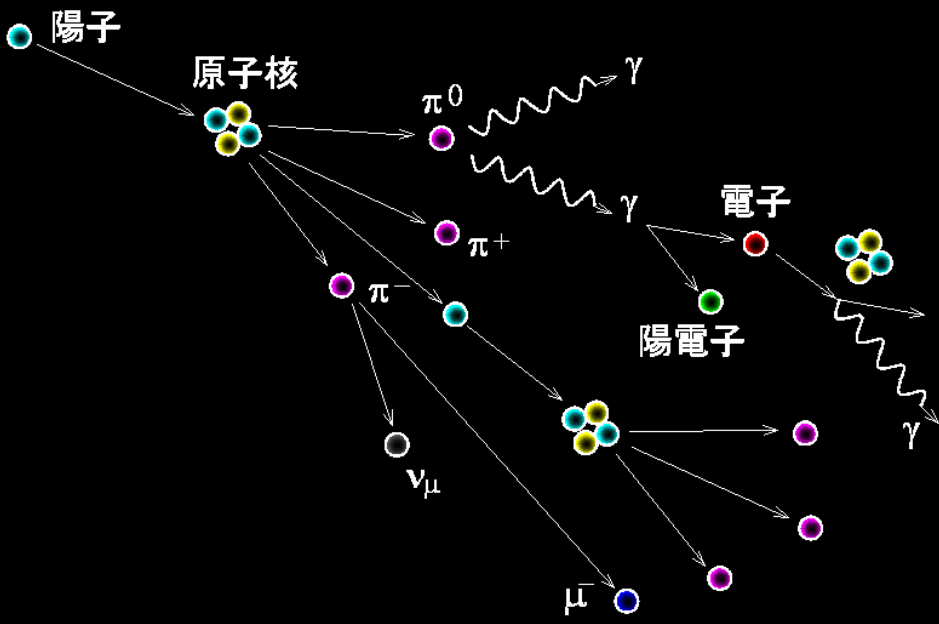
|                      |               |
|----------------------|---------------|
| パルサー                 | 5             |
| AGN (主に blazars)     | 66            |
|                      | 27 (marginal) |
| 電波銀河 (Cen A)         | 1 (marginal)  |
| 未同定<br>(いくつかは 超新星残骸) | 170           |
| 大マゼラン雲     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

# 天体ガンマ線の検出方法



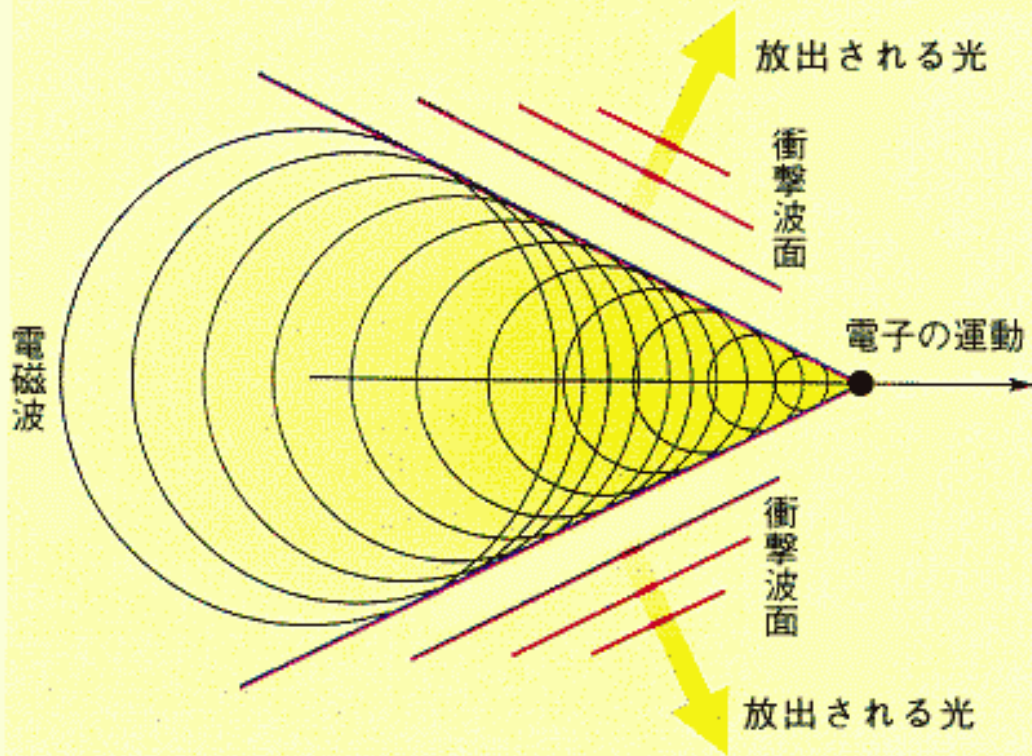


# 空気シャワー現象



# チェレンコフ光

## チェレンコフ放射



- 荷電粒子の速度が、空気中での光速を超えるとき生じる「衝撃波」
- 空気中での光速：真空中での1/1.0003倍

# 大気チェレンコフ望遠鏡

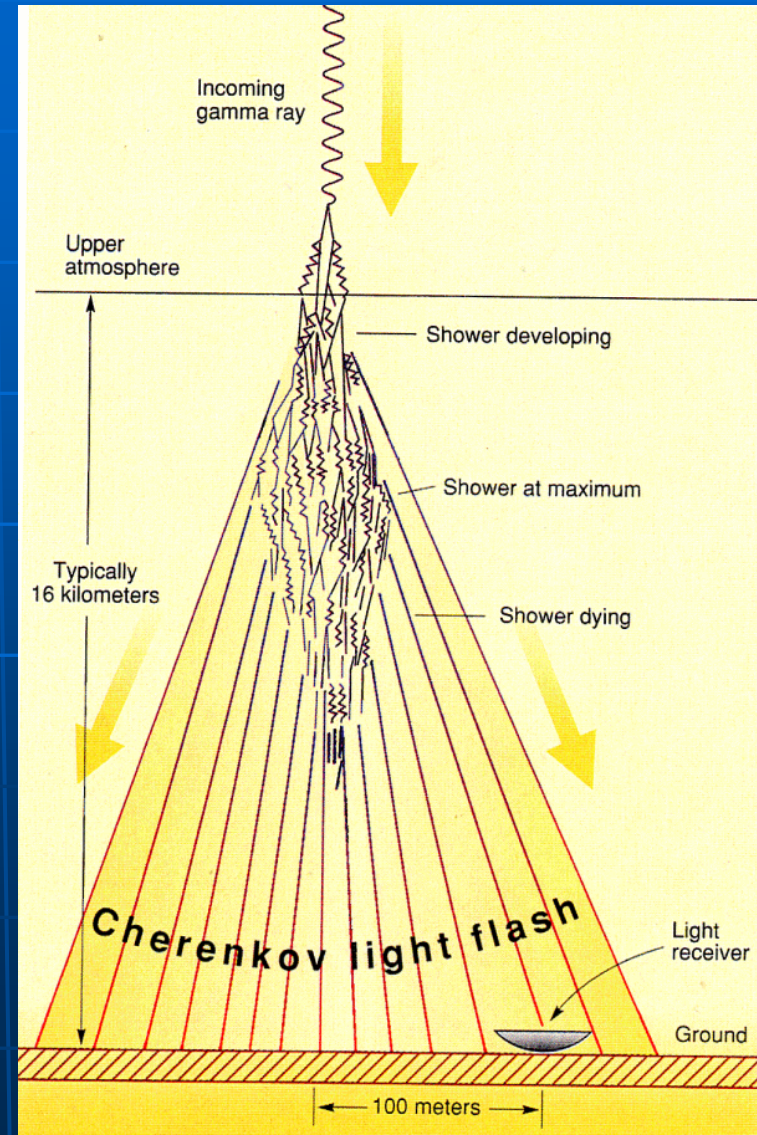
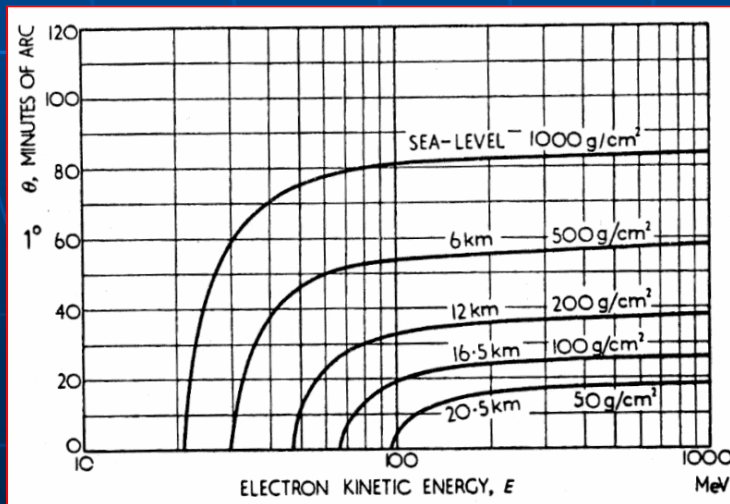
## ■ チェレンコフ角

$$\cos \theta = 1/n\beta$$

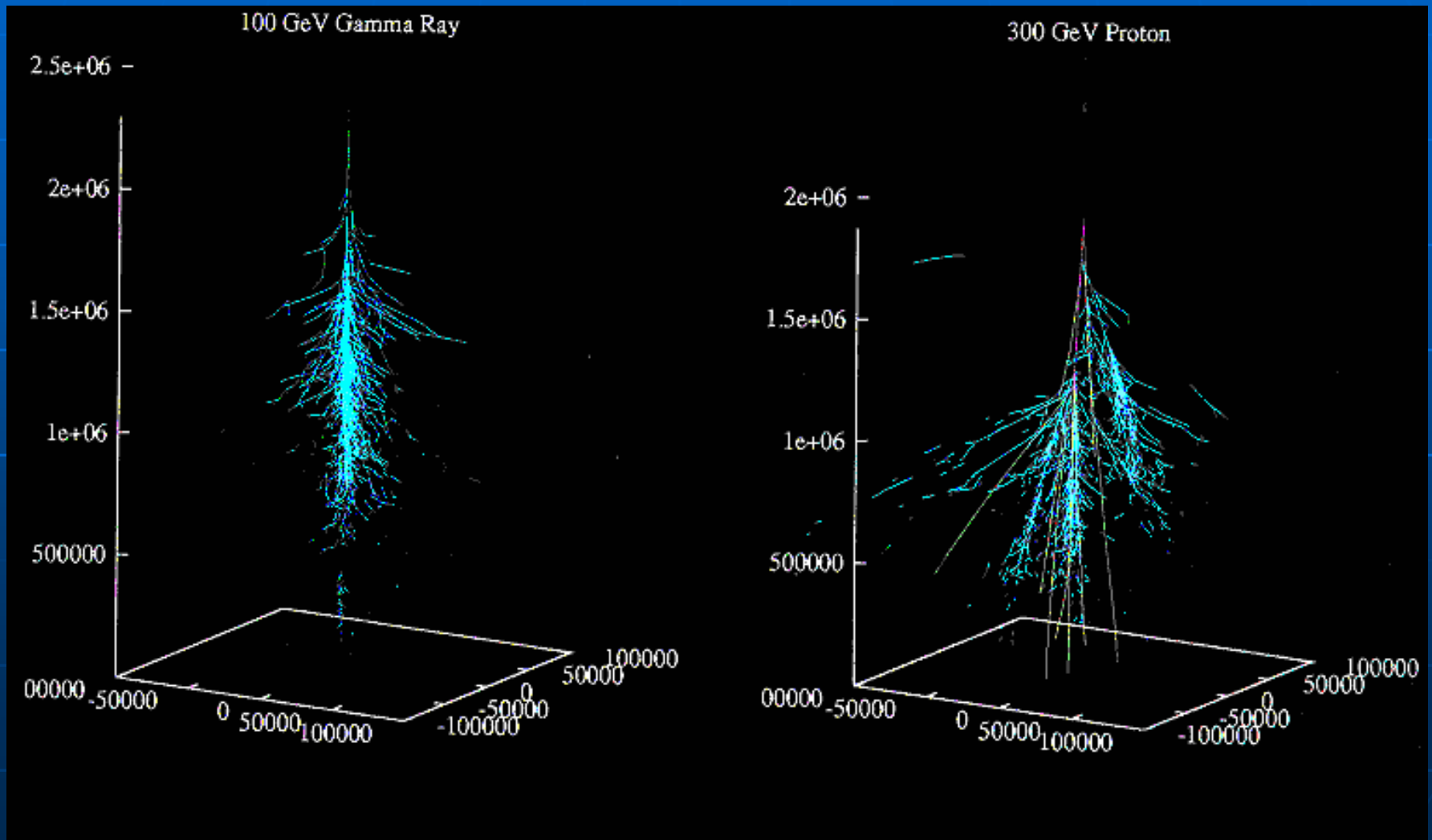
$$\beta = v/c$$

$$n = 1.0003 \text{ (1atm)}$$

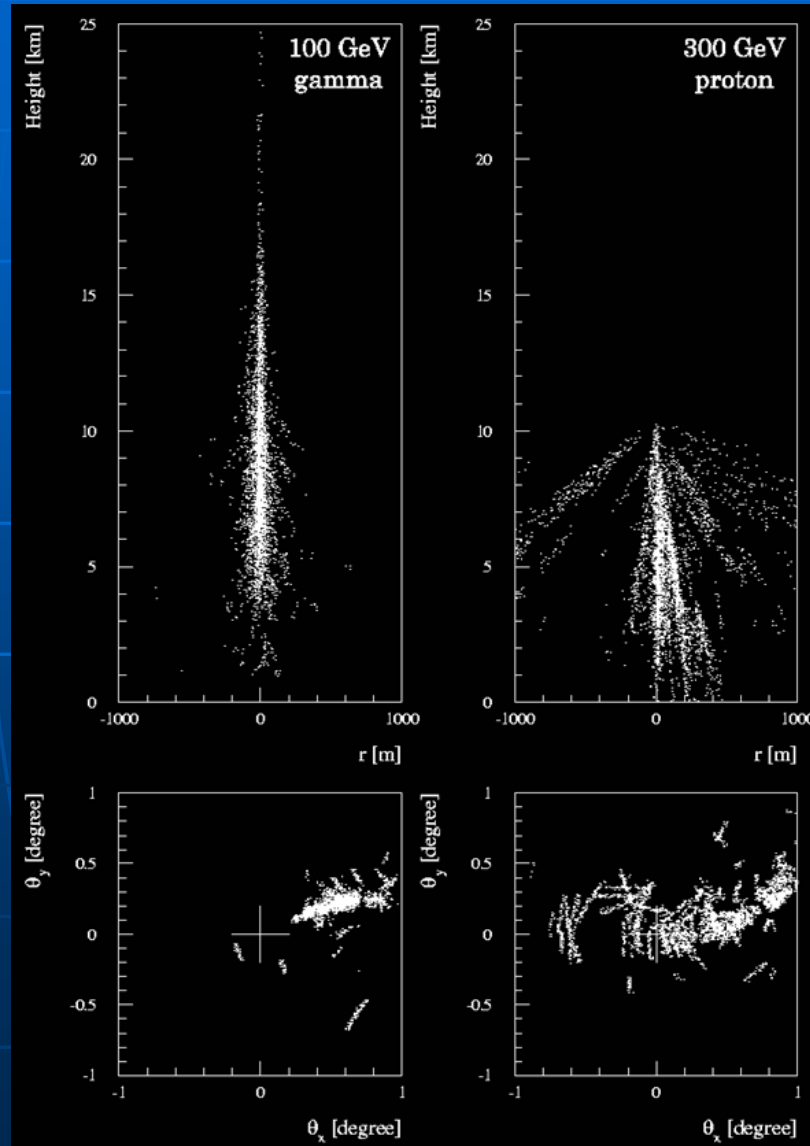
$$\Rightarrow \theta = 1.3^\circ \text{ (地上)}$$



# 宇宙線シャワーとの識別(1)



# 宇宙線シャワーとの識別(2)



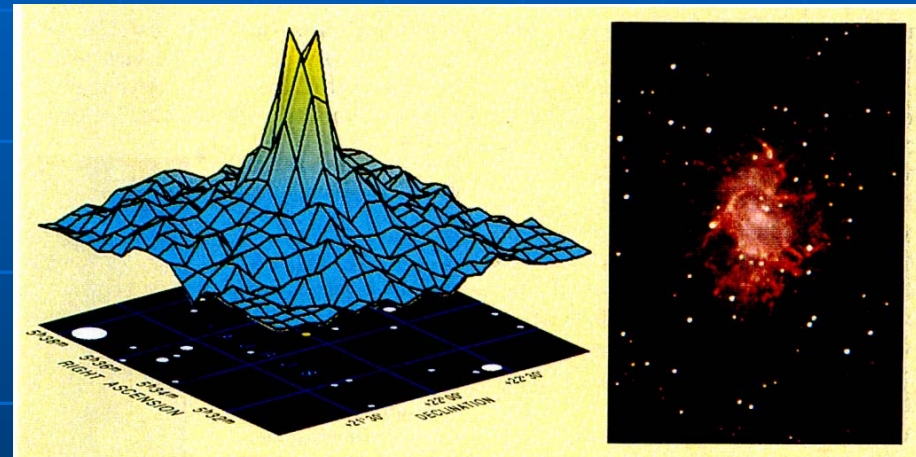
ガンマ線:  
電磁シャワー  
⇒ シャープなイメージ

陽子:  
核シャワー  
⇒ 拡散したイメージ

# 最初のTeVガンマ線源：かに星雲



Whipple 10m telescope  
(Arizona, USA)



In 1986 the familiar Crab Nebula provided Whipple Observatory astronomers with their first point-source TeV detection. Each count in this Whipple TeV “image” of the Crab represents the intersection of coincident, elliptical images like those depicted on page 24. The image’s large angular extent is an artifact of the telescope’s limited resolution. Courtesy John Quinn. *Inset:* This three-color visible-light composite of the Crab was obtained on California’s Mount Pinos by Bill and Sally Fletcher.

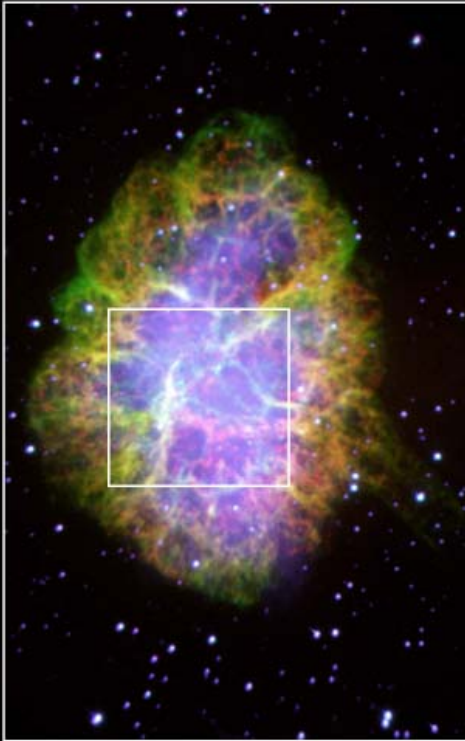
*Weekes et al. ApJ 1989*

# TeVガンマ線天体カタログ2002

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

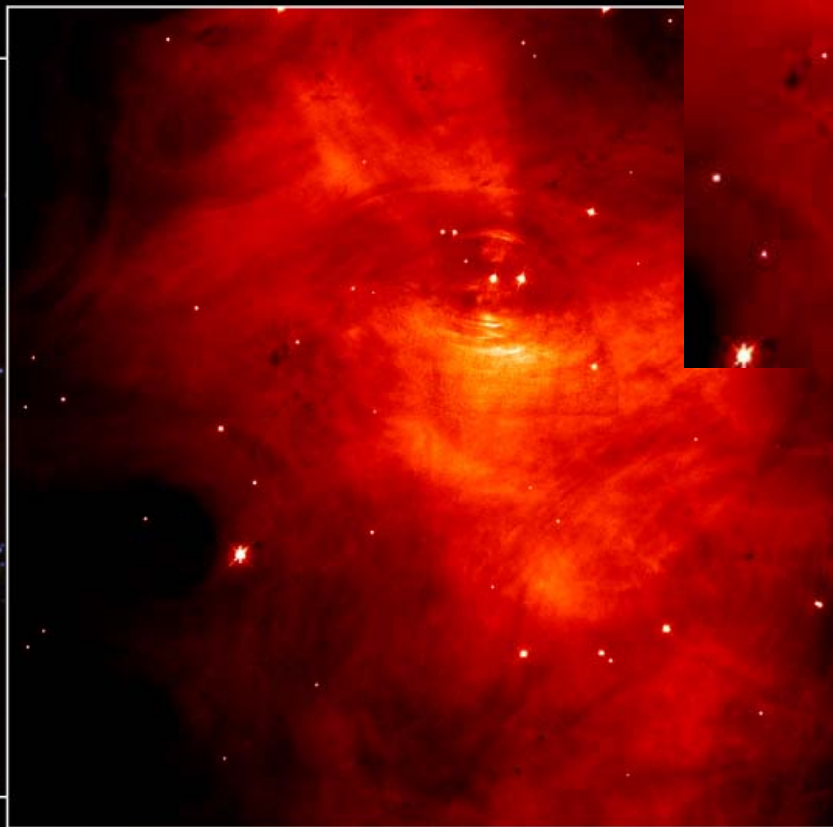
# パルサー星雲の例

Crab Nebula

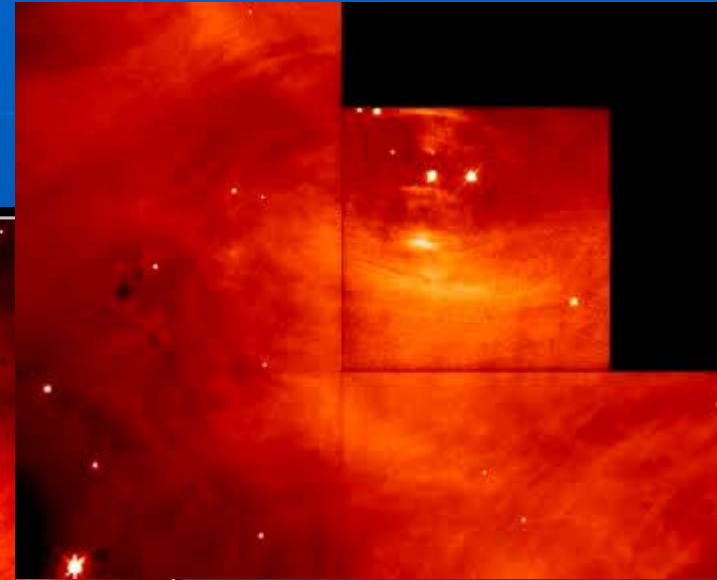


Palomar

PRC96-22a · ST Scl OPO · May 30, 1996  
J. Hester and P. Scowen (AZ State Univ.) and NASA



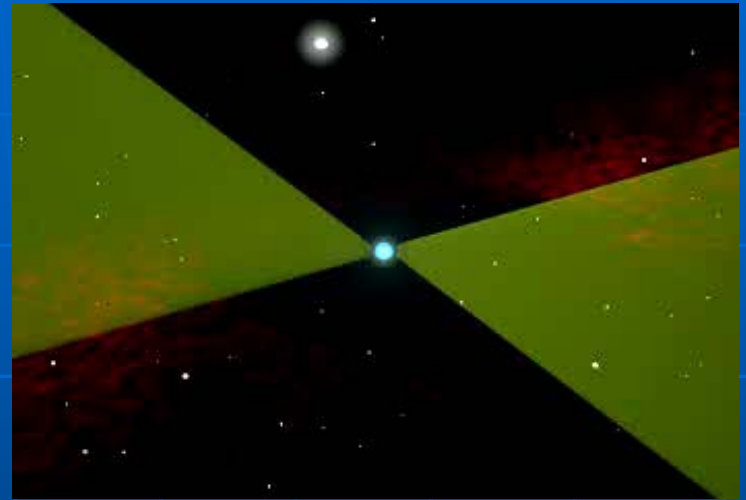
HST · WFPC2





# パルサー星雲

- 磁場を持った高速回転中性子星...「発電機」
- パルサー風が吹き出し、周囲の物質と衝突してガンマ線を放出

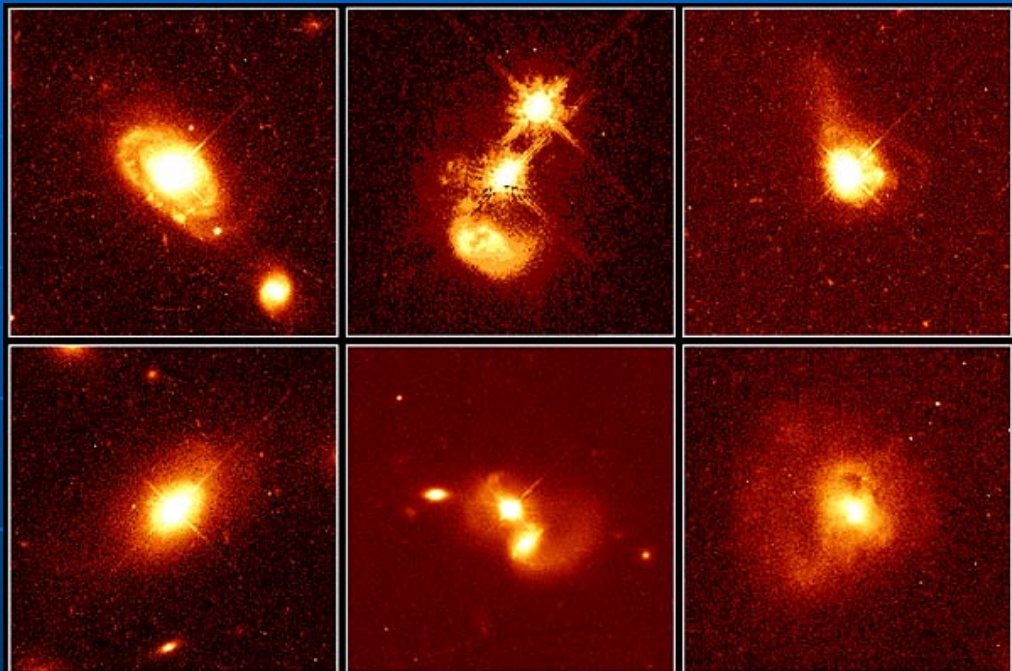


©NASA



©NHK

# 活動銀河核の例



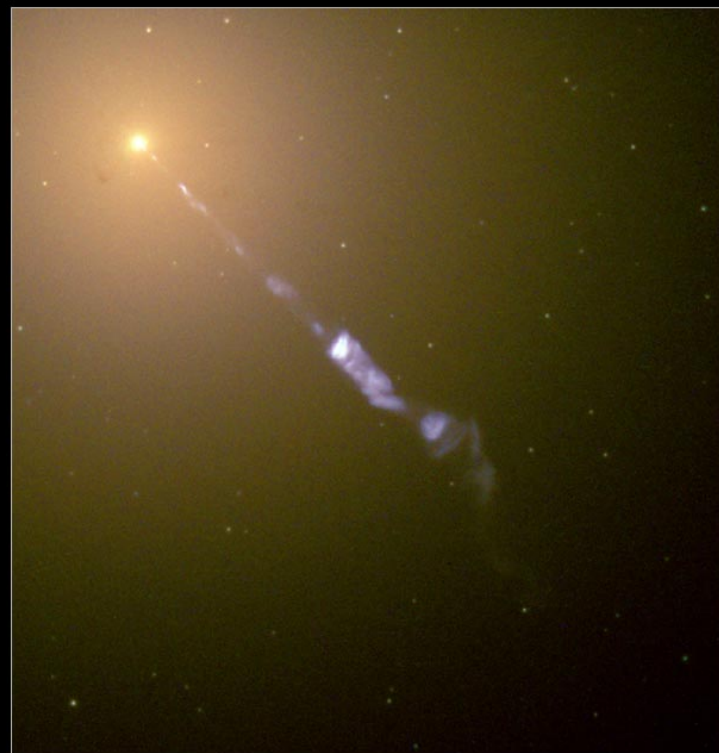
**Quasar Host Galaxies**

PRC96-35a • ST ScI OPO • November 19, 1996

J. Bahcall (Institute for Advanced Study), M. Disney (University of Wales) and NASA

HST • WFPC2

The M87 Jet



Hubble  
Heritage

PRC00-20 • Space Telescope Science Institute • NASA and The Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

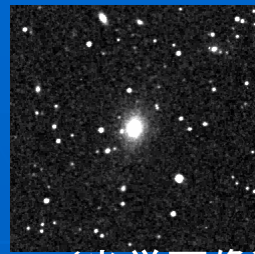
©STScI

# 活動銀河核

- 中心に巨大なブラックホールを持つ銀河の中心部
- ブラックホールに物質が降着円盤を作りながら落下
- 光速ジェットの噴射
- 粒子が加速され、周囲の物質と衝突してガンマ線を放射

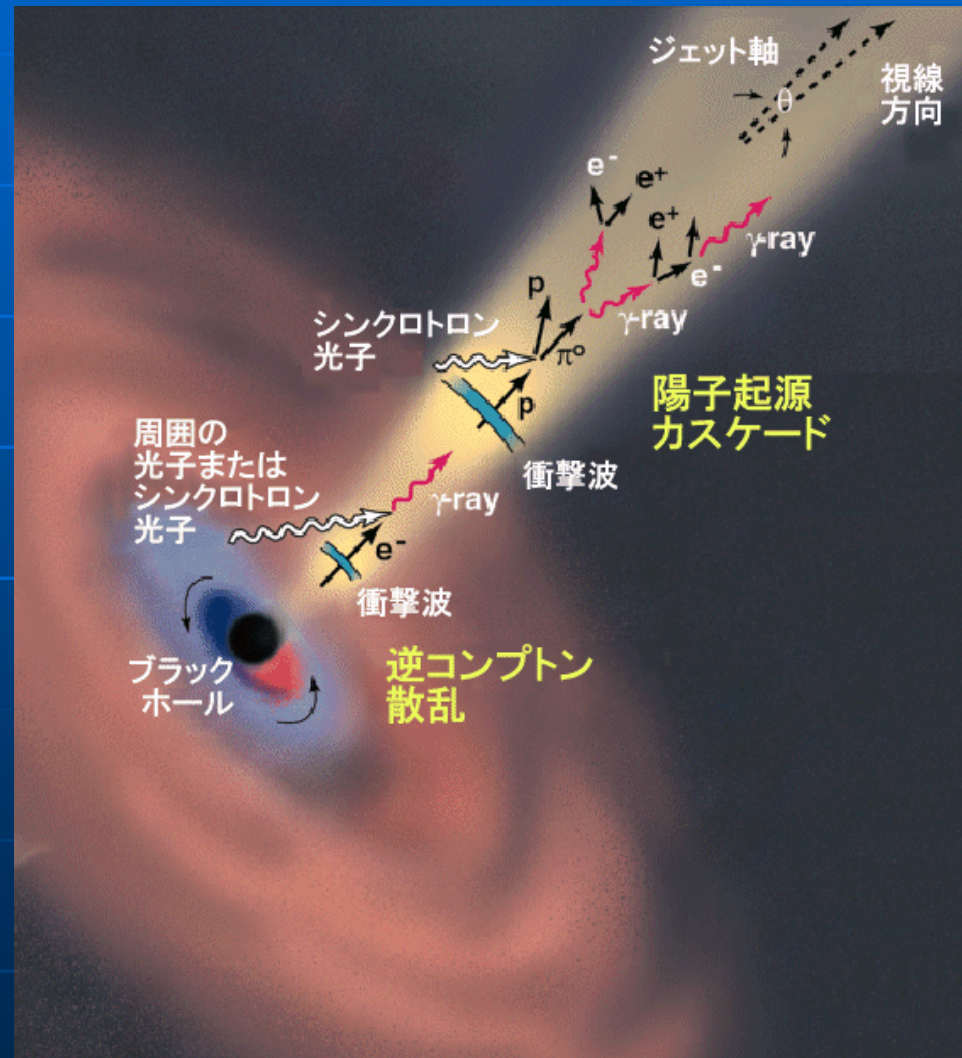


# ブレーザー



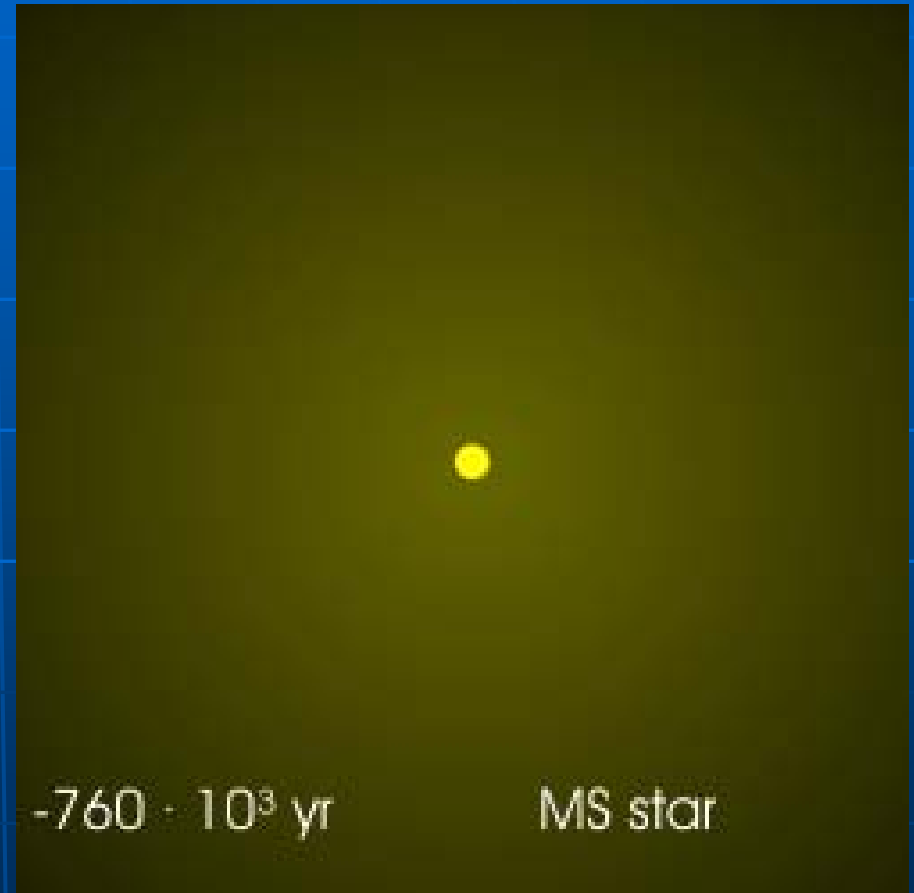
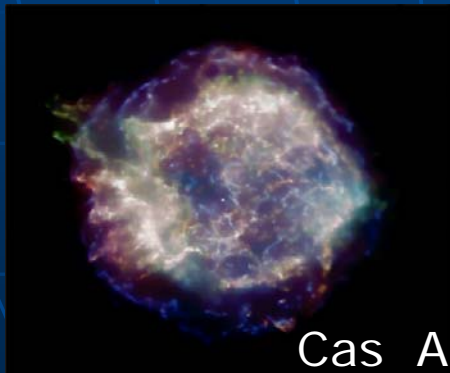
Mrk501 (光学画像)

- 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
- 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



# 超新星残骸

- 重い星は燃え尽きる最後に大爆発を起こす  
＝「超新星」
- 超新星で周囲の物質が吹き飛ばされ、広がる衝撃波面ができる  
＝「超新星残骸」



©W.Hofmann

# 超新星の例：かに星雲



藤原定家の明月記

後冷泉院・天喜二年四「五」月中旬（1054年5月20日〜29日）「6月19日〜28日」以後の丑の時、**客星**觜・参の度に出づ。東方に見（あら）わる。天関星に亭（はい）す。大きき歳星の如し。

# 超新星の例:SN1987A

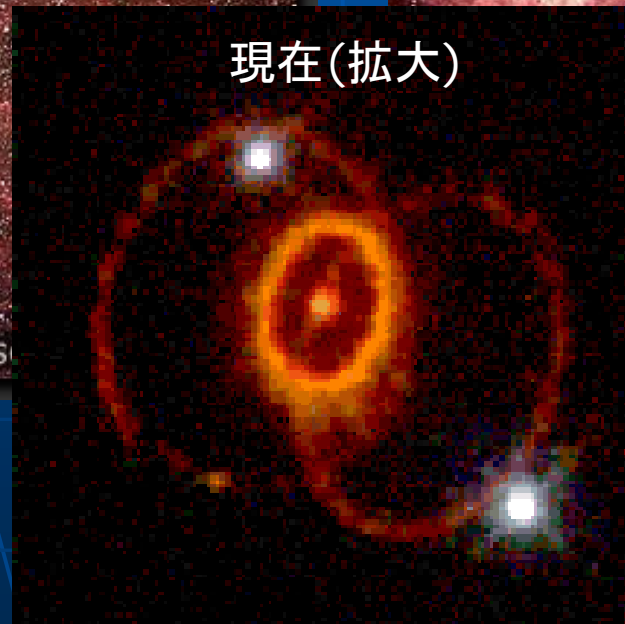
1987年2月23日 ニュートリノバーストの検出



爆発前

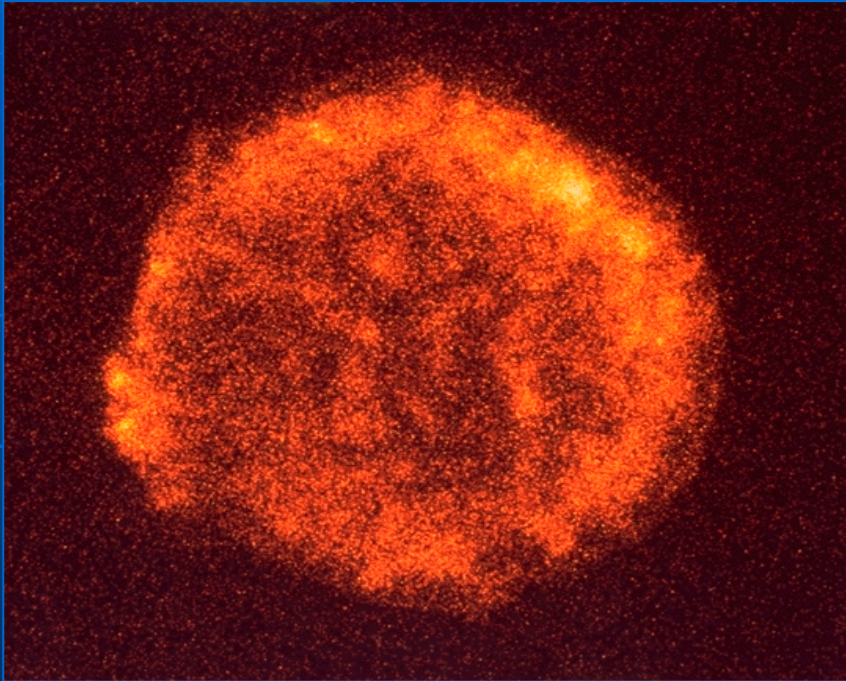


爆発後

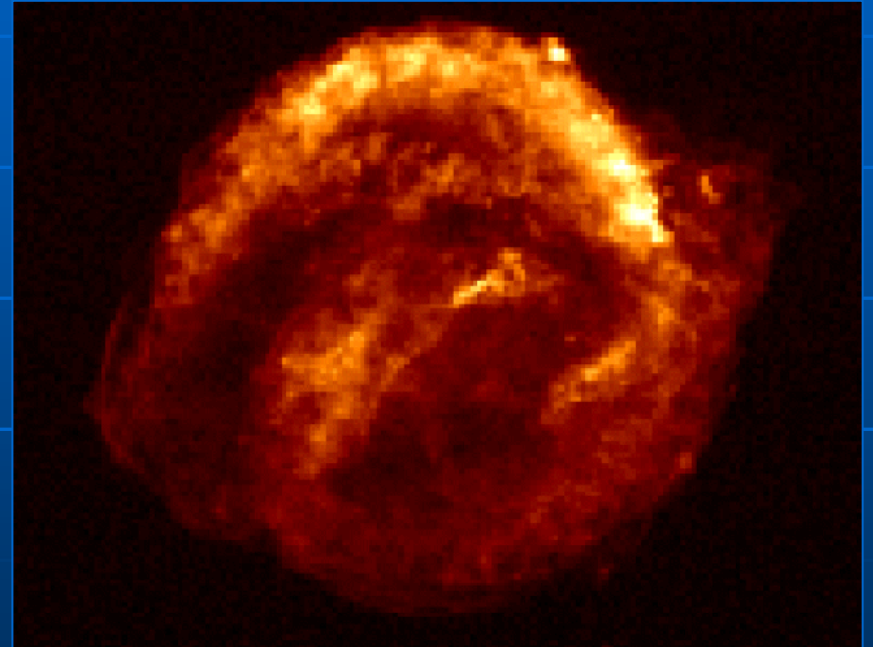


現在(拡大)

# 超新星残骸の例



ティコの超新星(1572)



ケプラーの超新星(1604)



# “CANGAROO”

=

Collaboration of **Australia** and **Nippon** for a  
**G**amma **R**ay **O**bservatory in the **O**utback

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



# CANGAROOチーム(日豪共同)

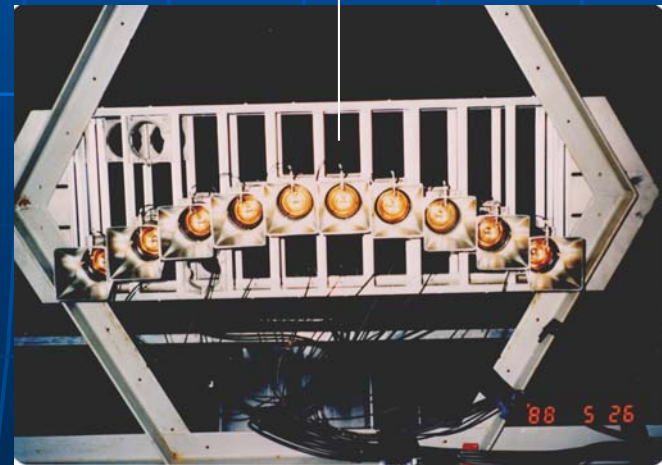
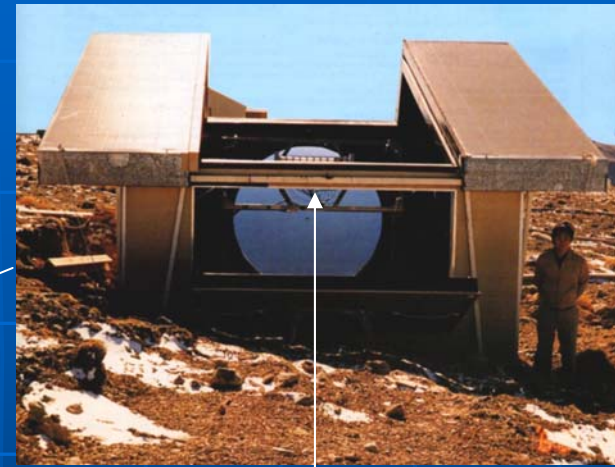
- University of Adelaide 
- Australian National University 
- **Ibaraki University** 
- Ibaraki Prefectural University 
- Kitasato University 
- Konan University 
- Kyoto University 
- Nagoya University 
- National Astronomical Observatory of Japan 
- Osaka city University 
- Shinshu University 
- Institute for Space and Aeronautical Science 
- Tokai University 
- ICRR, University of Tokyo 
- Tokyo Institute of Technology 
- Yamagata University 
- Yamanashi Gakuin University 

# 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

+

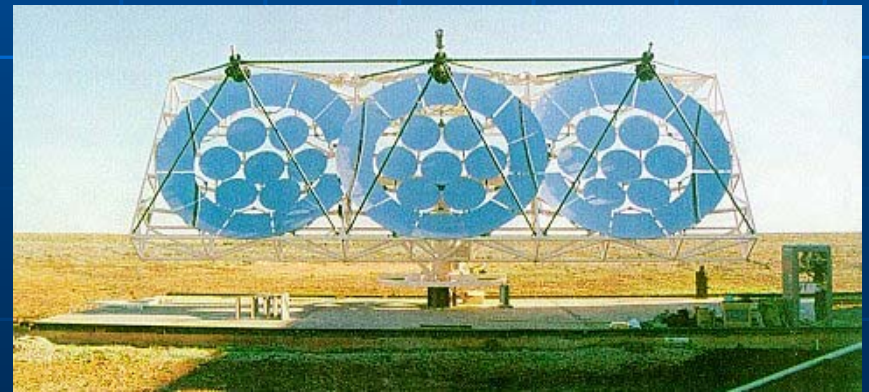
固定型チェレンコフ望遠鏡3台

# 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



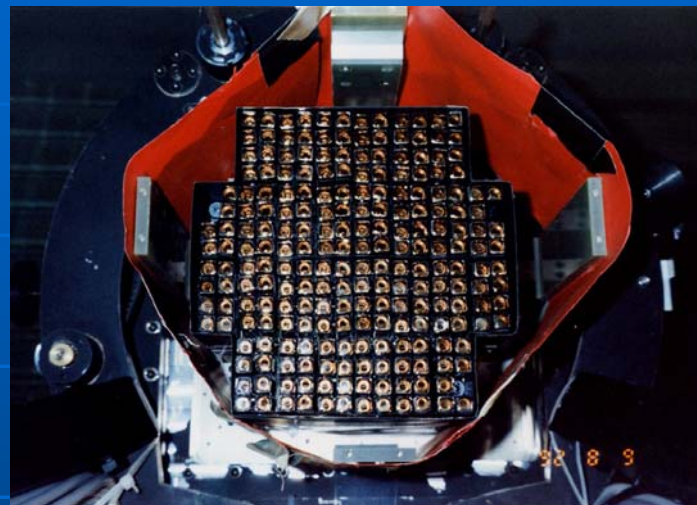
BIGRAT

(Bicentennial Gamma Ray Telescope)

# Woomera



# 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

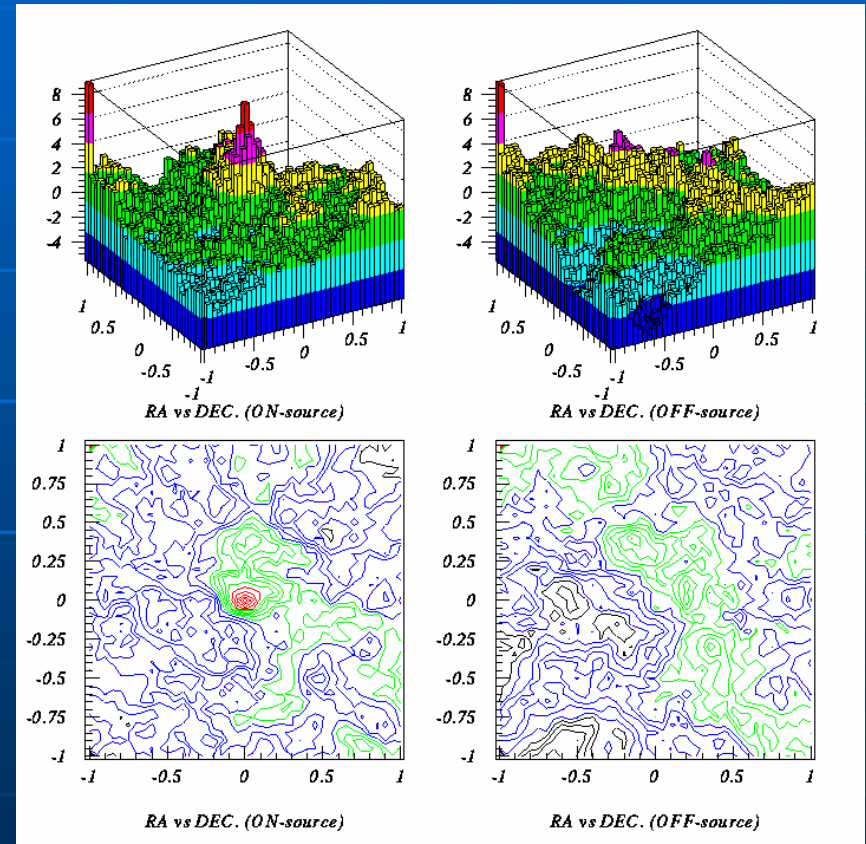


# 3.8m望遠鏡で検出した天体

- かに星雲 (1994年発表)
- パルサーPSR 1706-44 (1995年)
- ほ座パルサー (1997年)
- 超新星残骸SN1006 (1998年)
- 超新星残骸RX J1713.7-3946 (2000年)

# PSR1706-44: 南天最初のTeV天体

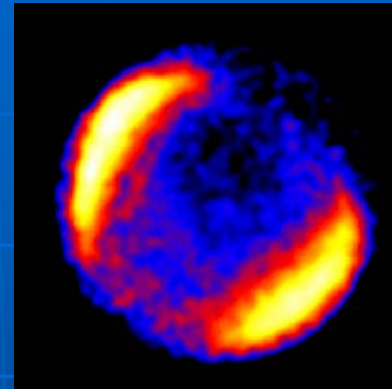
- 102ms pulsar
- Age: 17,000 yr
- GeV ガンマ線天体 (pulsed)
- DurhamグループとCANGAROO 7/10mによりTeV放射の確認
- 放出機構: よく理解されていない(ICでは無理)



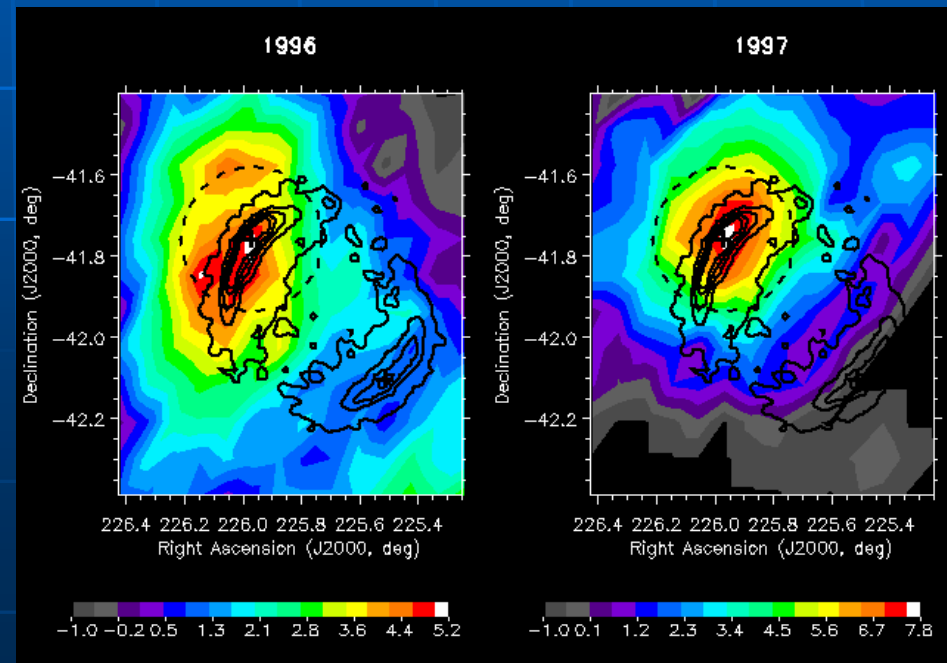
パルサー近傍の有意度マップ:  
(左: ON, 右: OFF)

# 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!



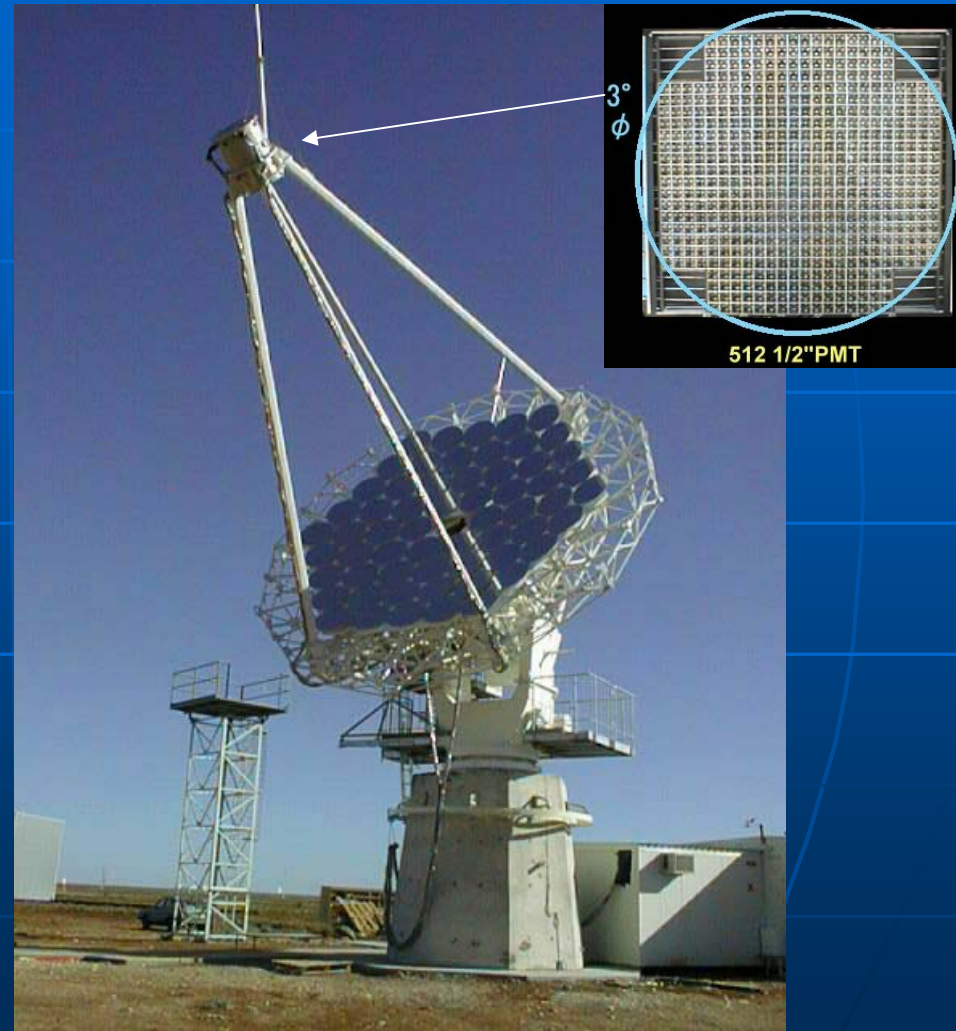
ASCA X線画像



CANGAROO 有意度マップ

# 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 10m望遠鏡

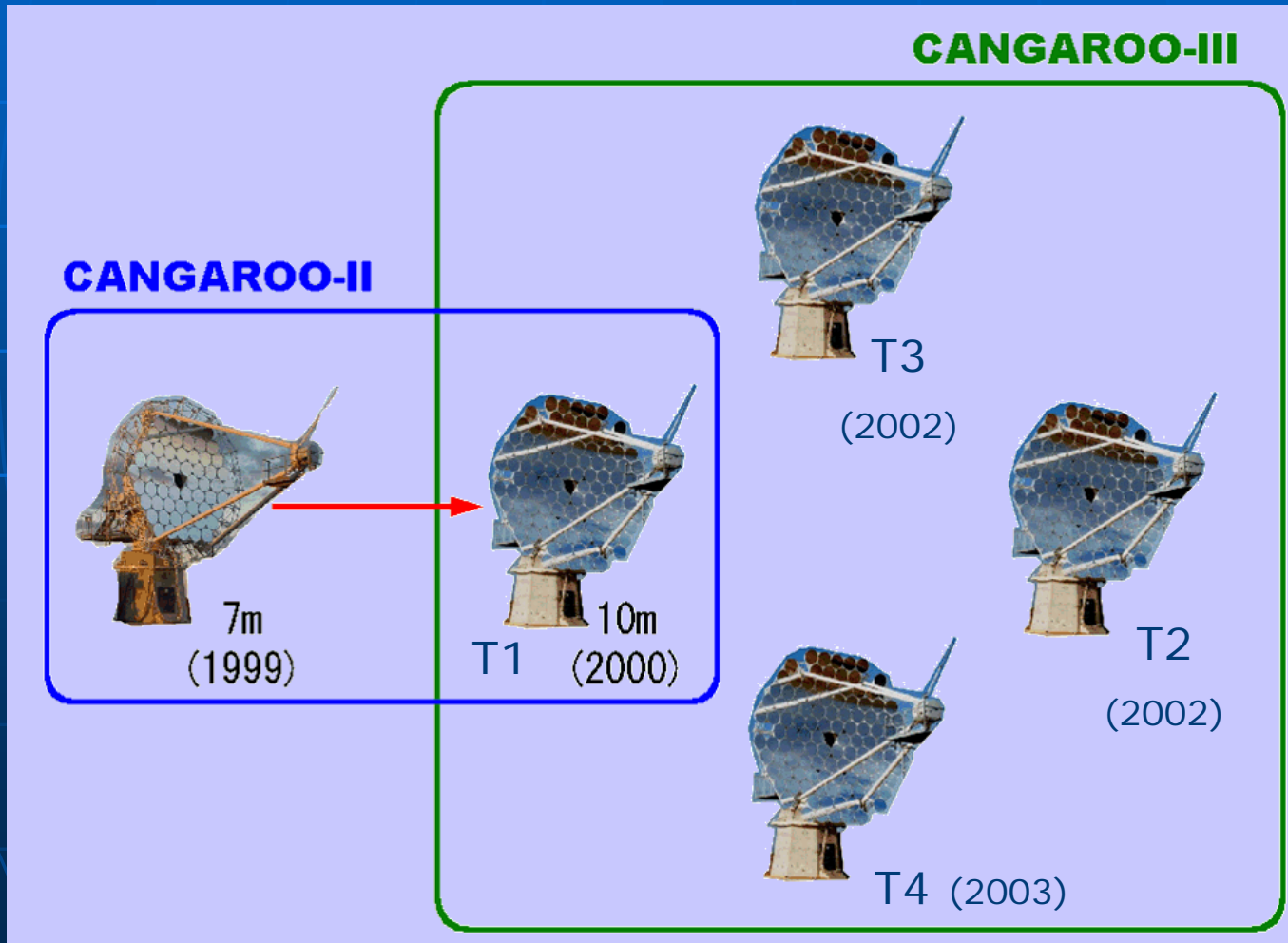


# CANGAROO 10m望遠鏡で検出した天体

- かに星雲
- パルサー PSR1706-44
- 超新星残骸 SN1006
- 超新星残骸 RX J1713.7-3946
- 活動銀河核(ブレーザー) Mrk421
- 爆発的星形成銀河 NGC253
- 銀河中心 (予備的)
- 超新星残骸 RX J0852.0-4622 (予備的)

# CANGAROO-IIIプロジェクト

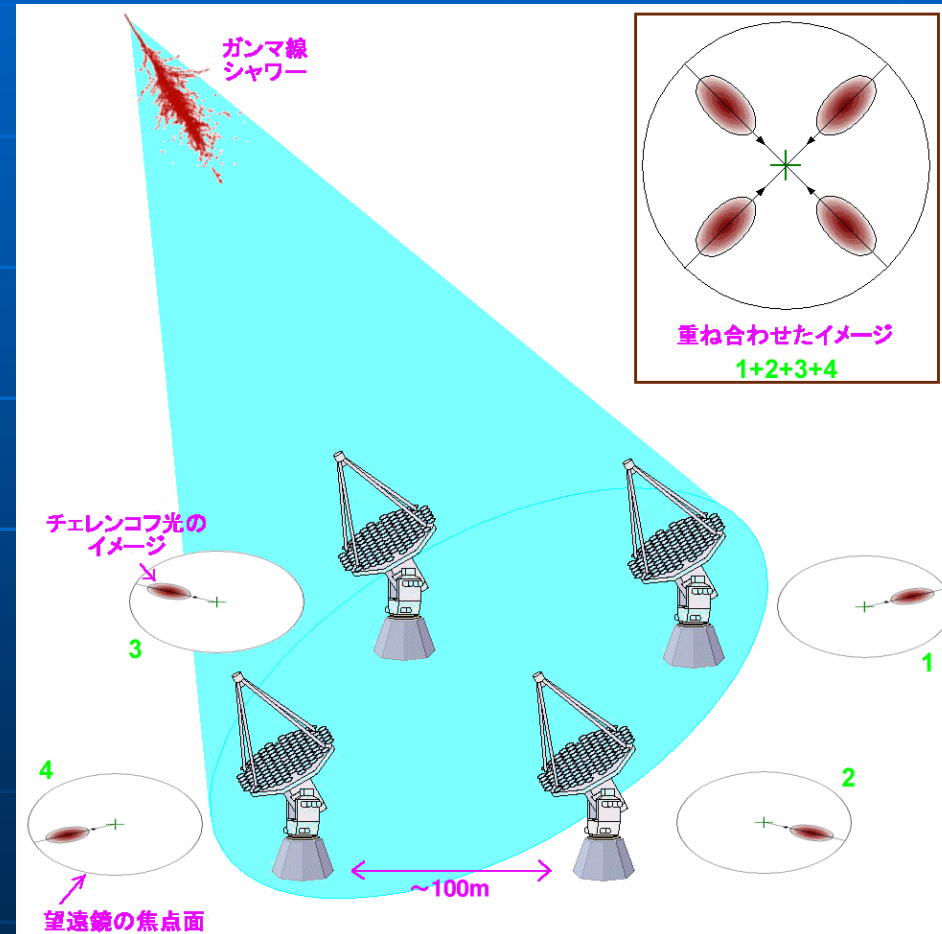
- 10m 望遠鏡4台のアレイ (2003年完成予定)





# 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

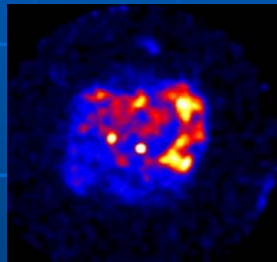


# 第2号機の建設(2002年)

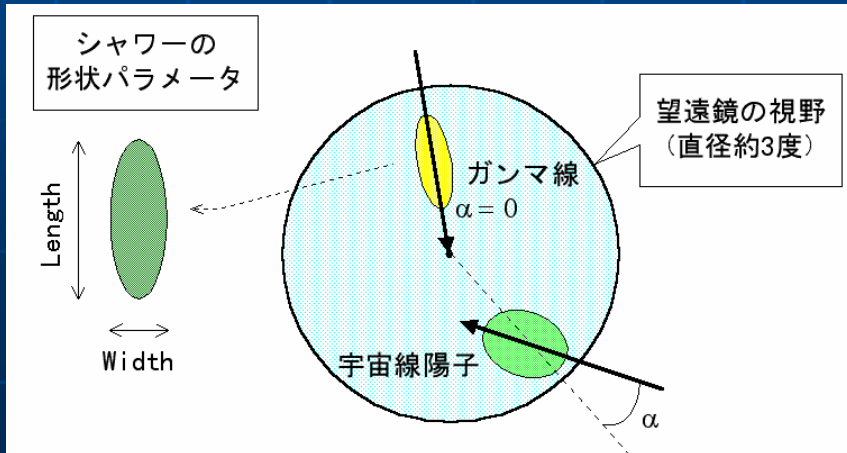


# 超新星残骸 RX J1713.7-3946

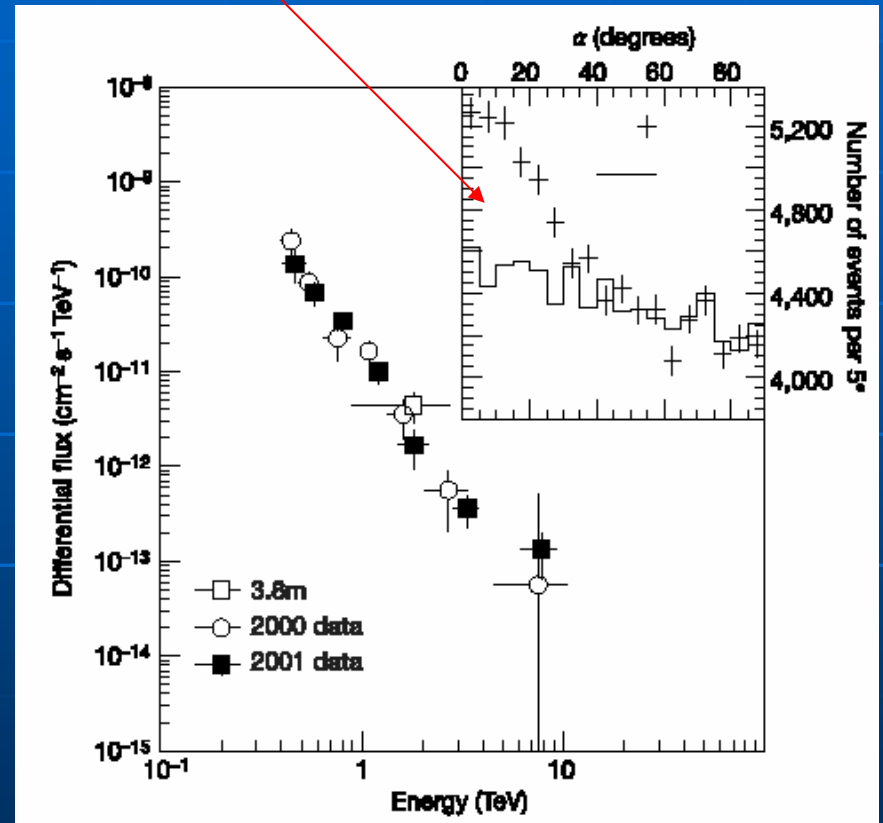
- X線衛星で非熱的X線が観測されたSNR



X線画像



ガンマ線の信号 = (ON) - (OFF)



エネルギースペクトル

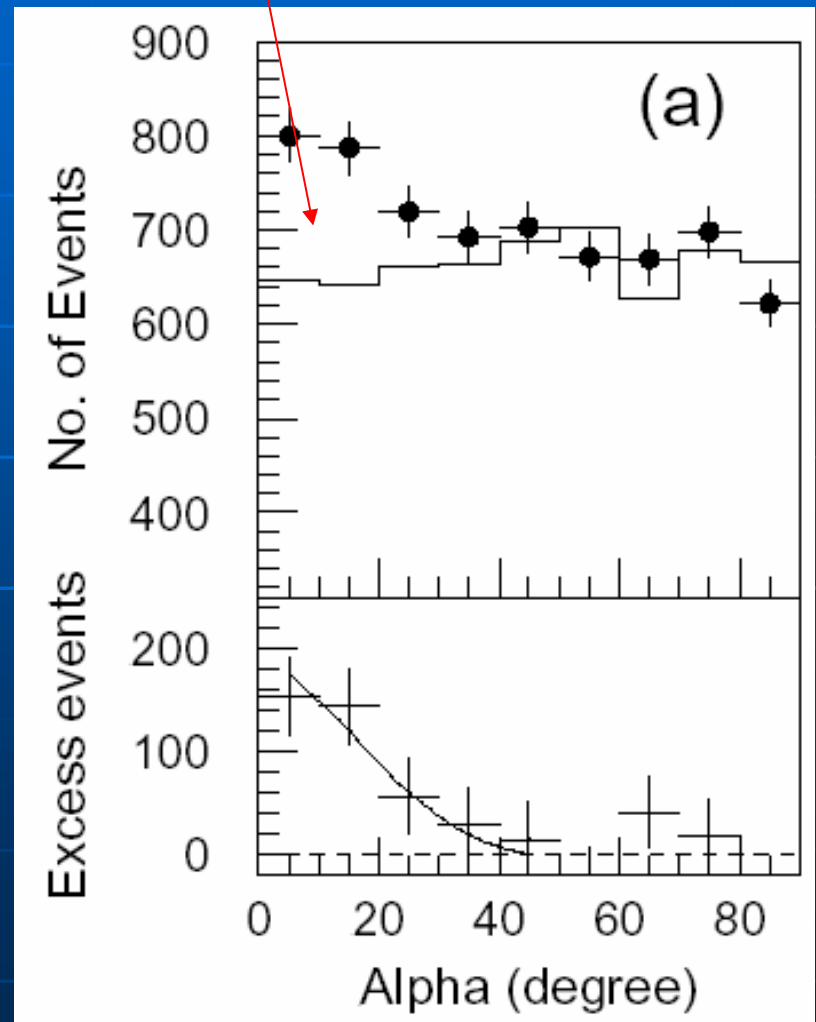
# ブレーザー Mrk421

- 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)



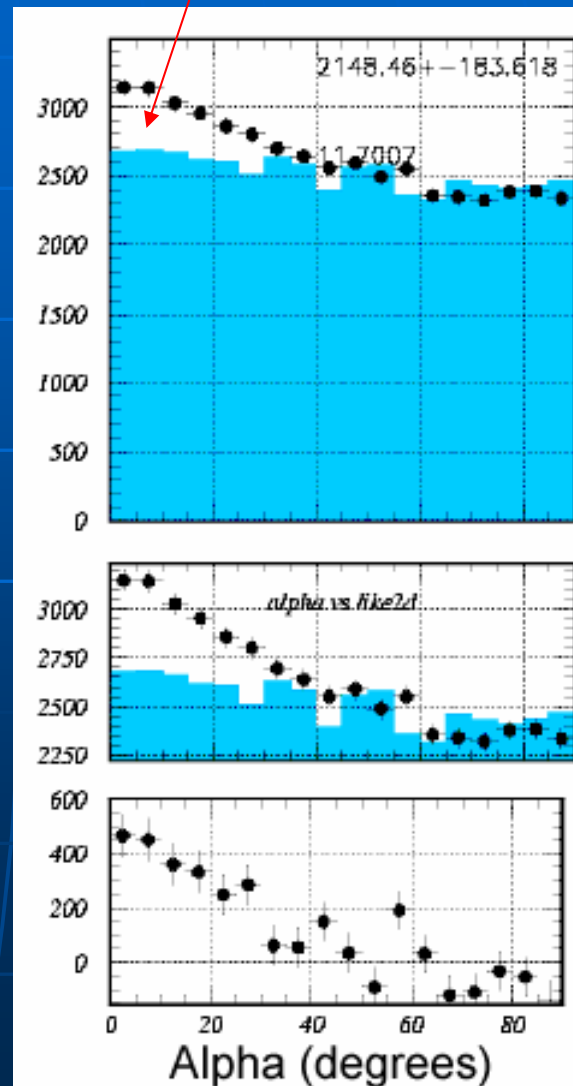
# 爆発的星形成銀河NGC253

- 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

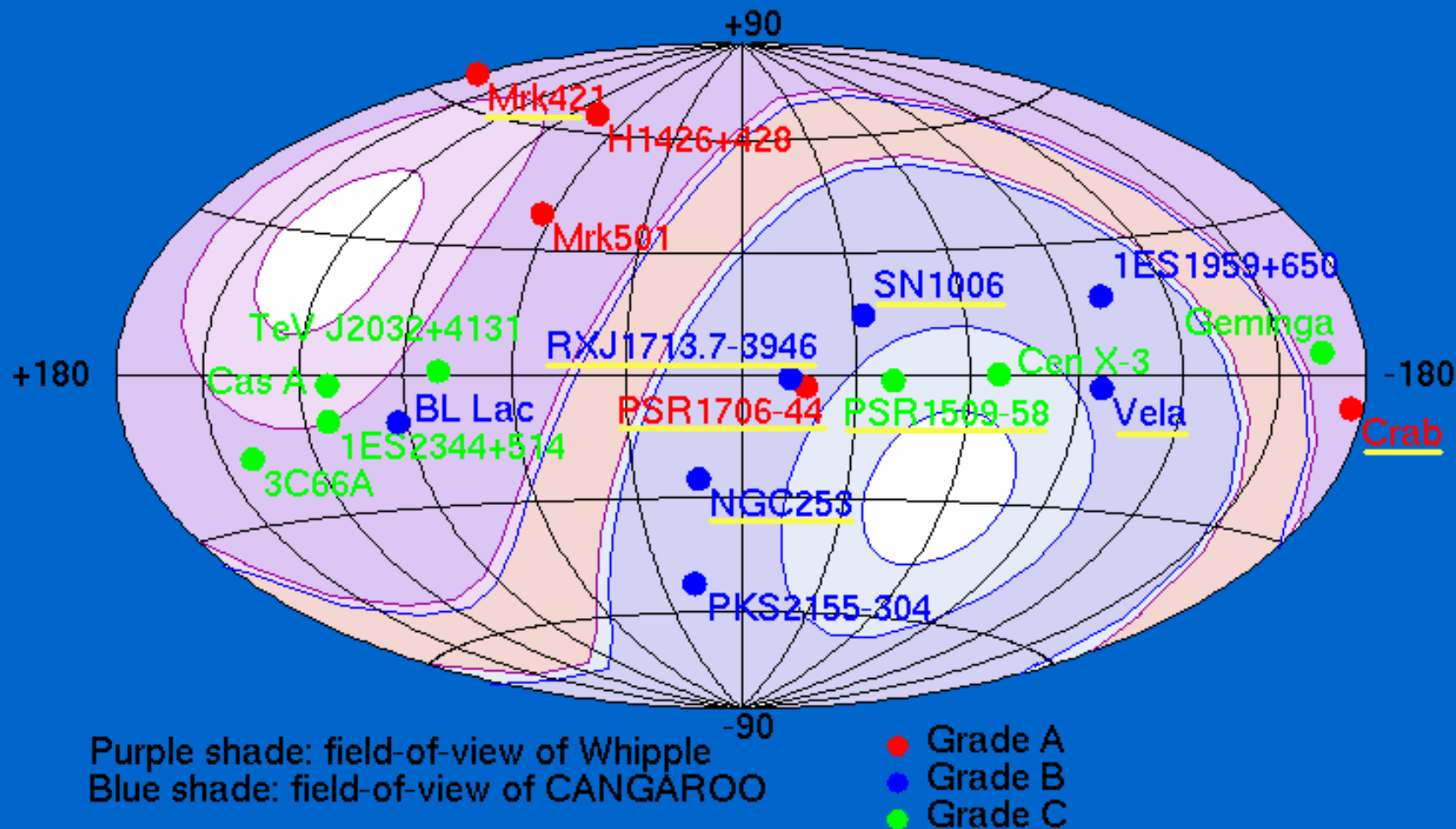
ガンマ線の信号 = (ON) - (OFF)



Itoh et al.  
A&AL 2002

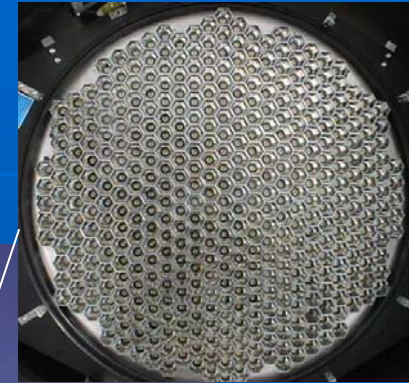
# TeVガンマ線天体地図2002

## TeV Gamma-ray Sources

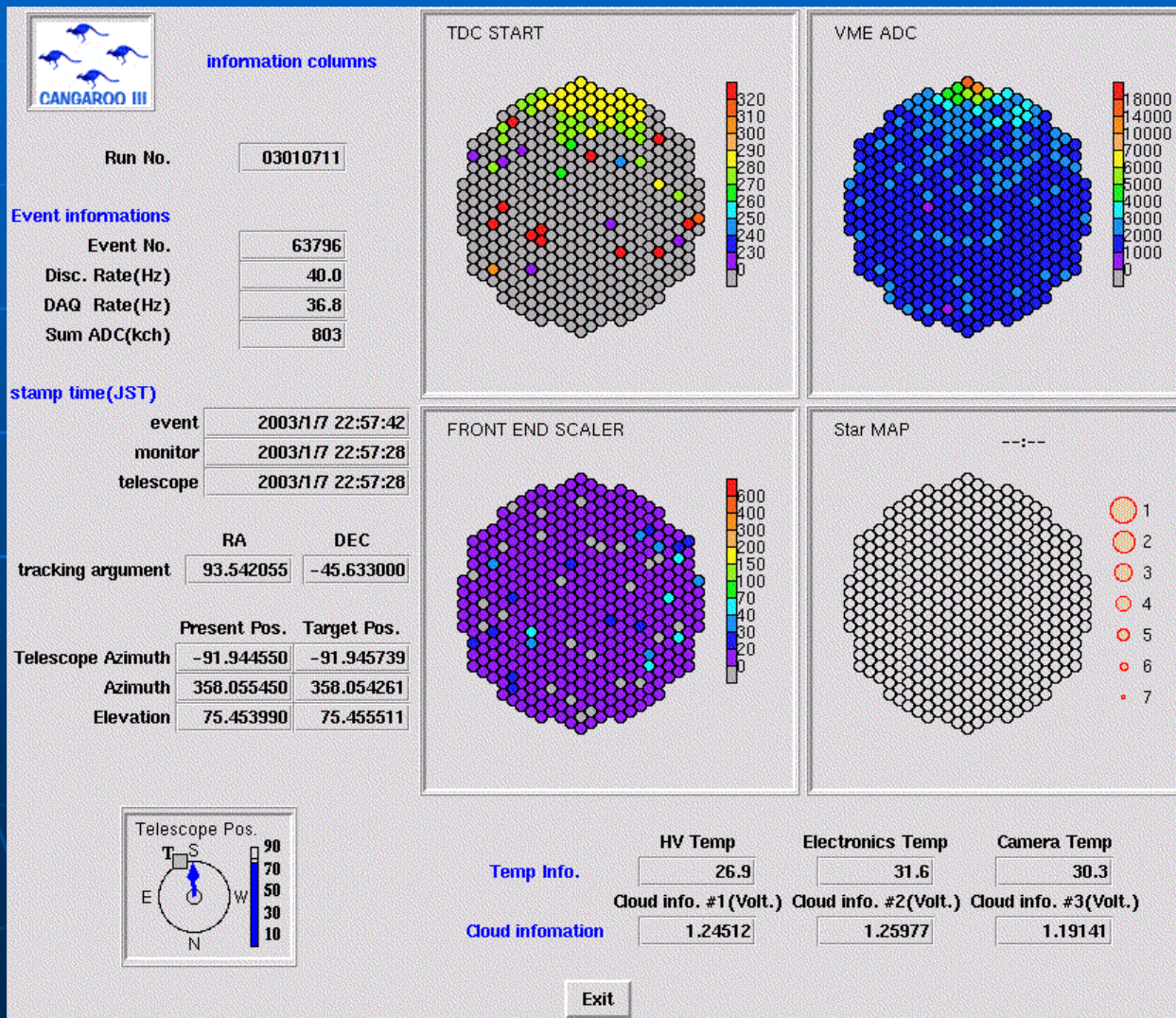


# 10m望遠鏡2号機

- 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



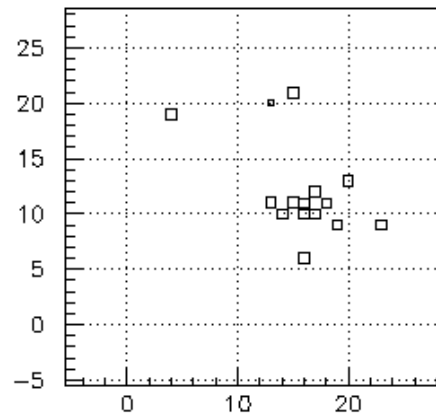
TDC ADC

Scaler Star



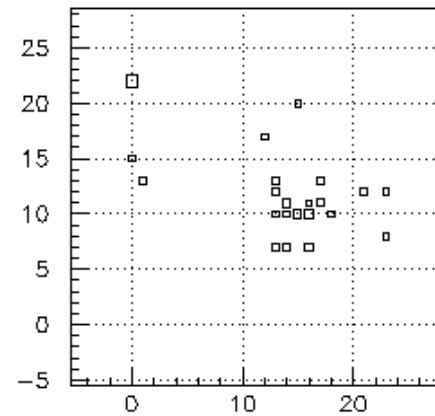
# ステレオイベント例

T1 TDC



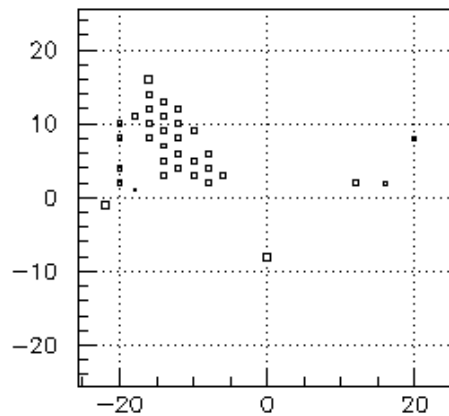
TMP Hit pattern TDC T1

T1 ADC



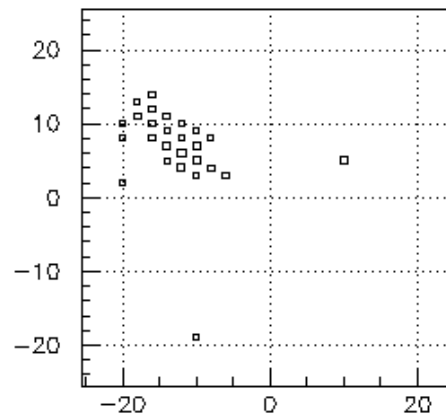
TMP Hit pattern ADC T1

T2 TDC



TMP Hit pattern TDC T2

T2 ADC



# 現在の姿



T3

Jul. 2003観測開始

T2

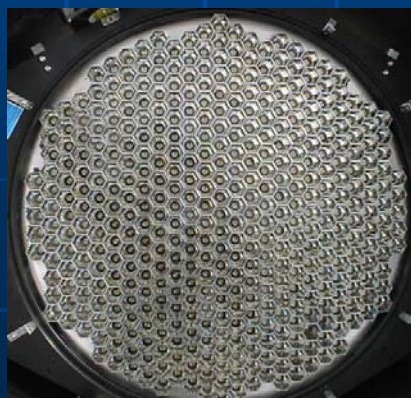
Dec. 2002観測開始

T1

2000年より稼動中

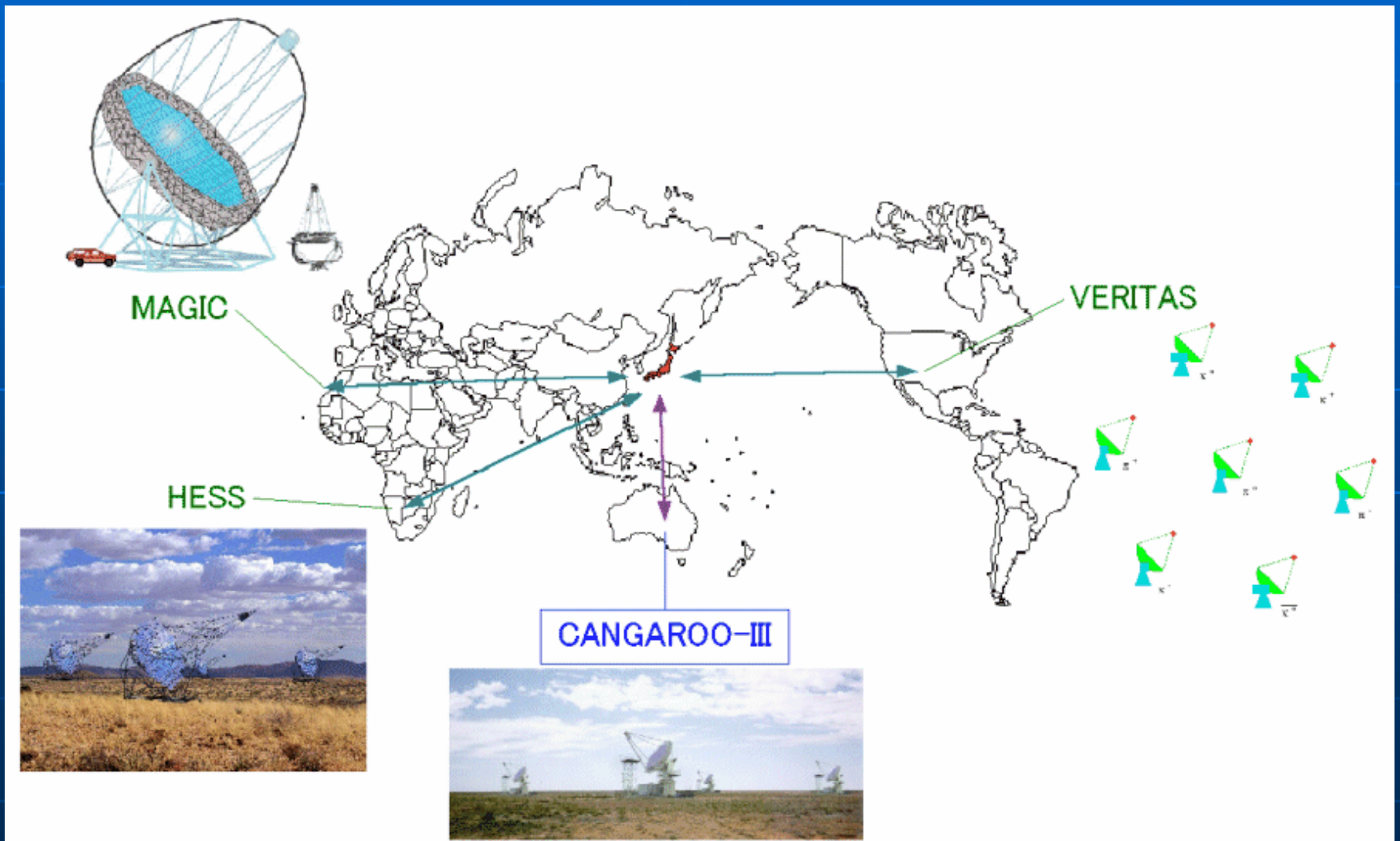
T4

Jul. 2003  
建設完了



2,3,4号機の解像型カメラ

# 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

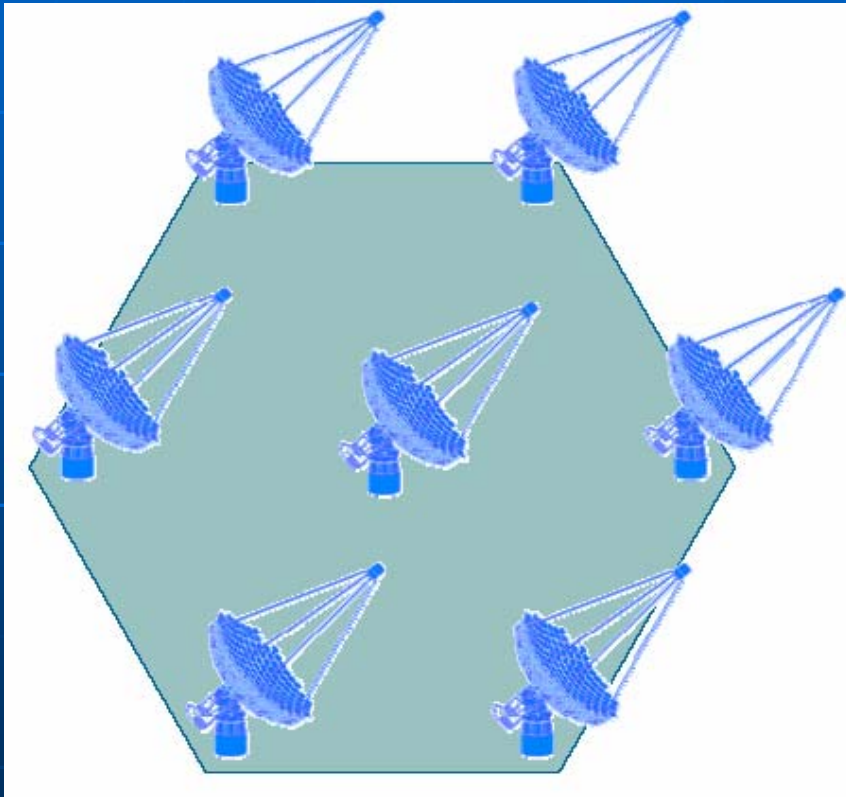
# MAGIC



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



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・キットピーク

# 銀河面のサーベイ

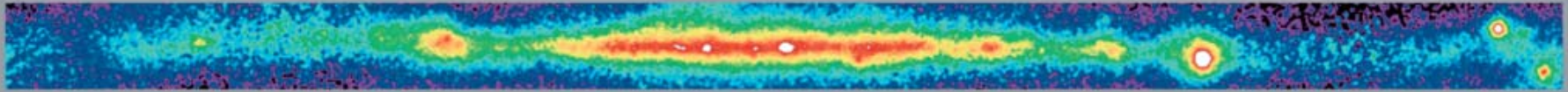
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC

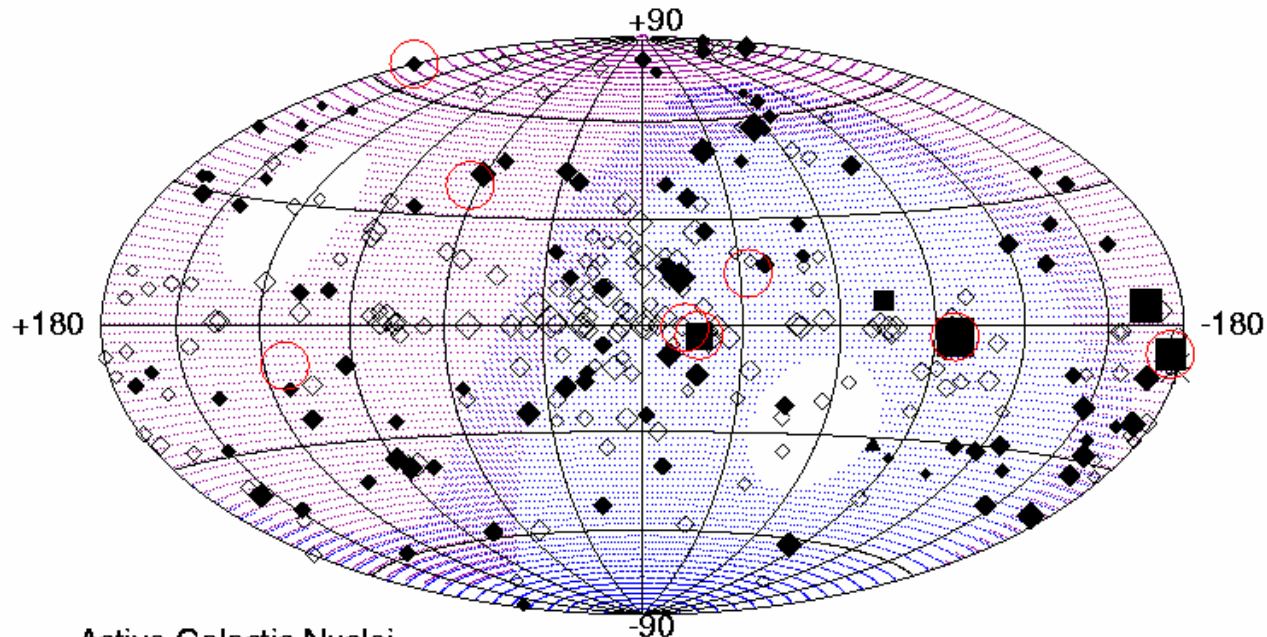


Gamma Ray

>100 MeV CGRO/EGRET



## GeV and TeV Gamma-ray Sources

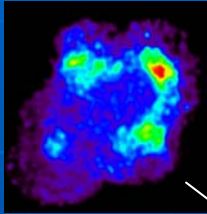


- ◆ Active Galactic Nuclei
- ◇ Unidentified EGRET Sources
- Pulsars
- ▲ LMC \* Solar flare

- Positive detection: Crab, PSR B1706-44, Vela, Mrk 421, Mrk 501, 1ES2344+514, SN1006, RXJ1713-39

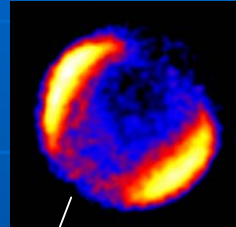
# 超新星の系統的観測

RX J1713.7-3946 (CANGAROO)



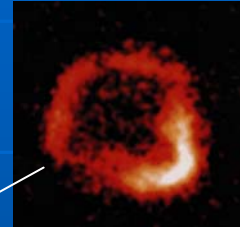
ASCA

SN1006 (CANGAROO)



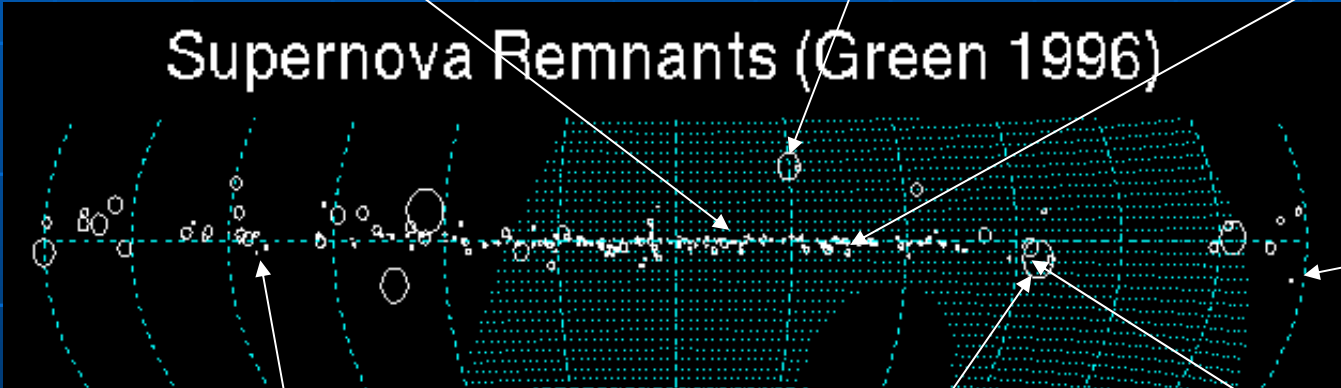
ASCA

RCW86 (CANGAROO under analysis)



ROSAT

## Supernova Remnants (Green 1996)

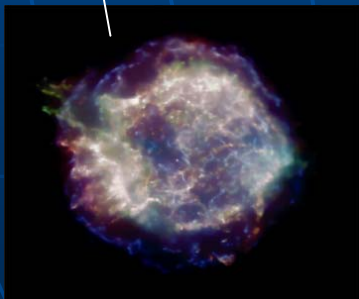


Crab nebula  
("Standard candle")

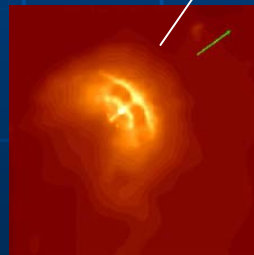


Chandra  
optical

Chandra

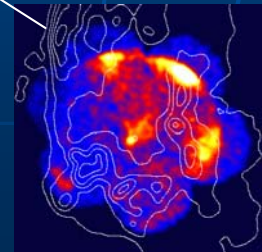


Cas A (HEGRA)



Chandra

Vela (CANGAROO)



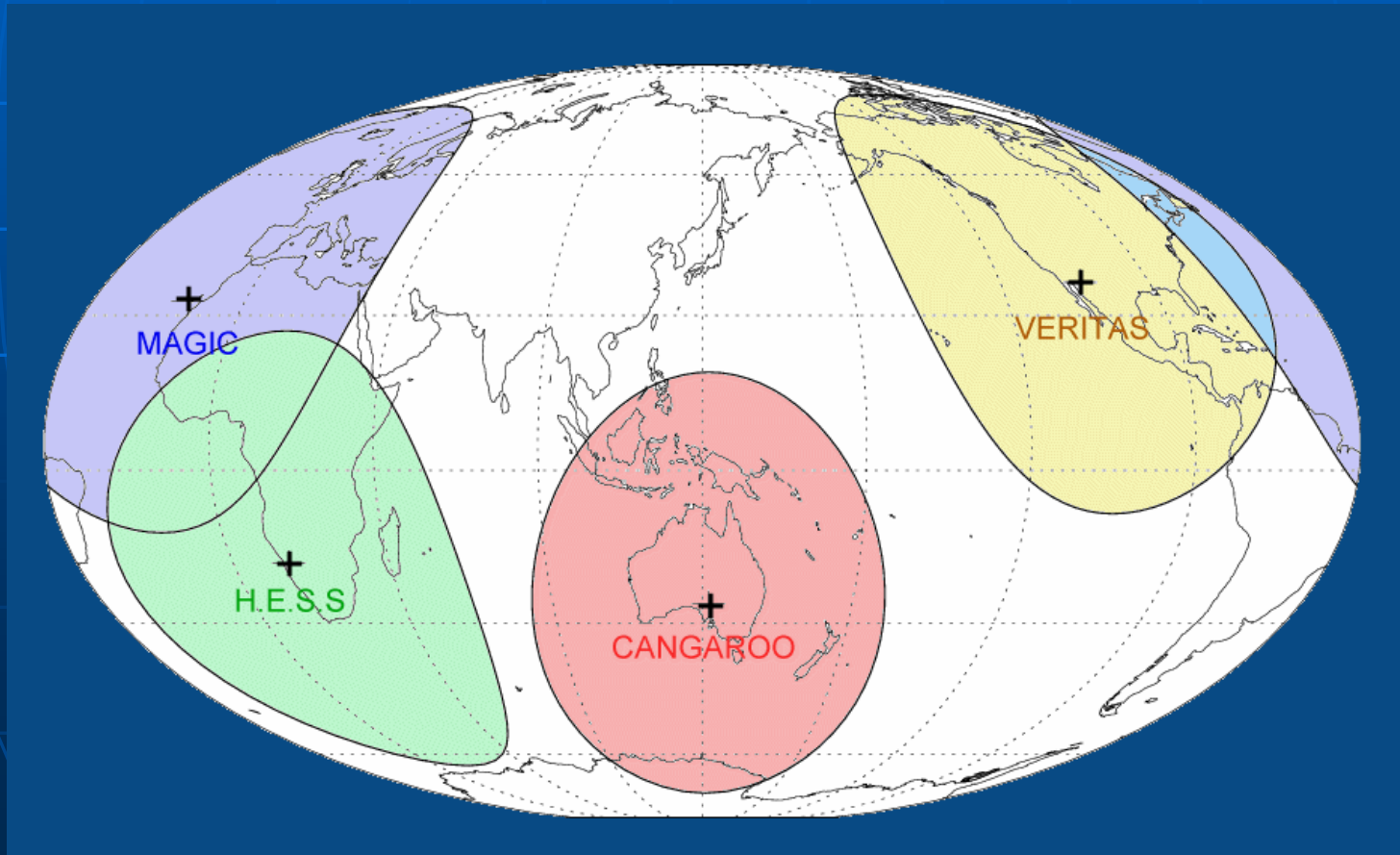
ROSAT

RX J0852-46 (CANGAROO under analysis)



# 国際協力観測

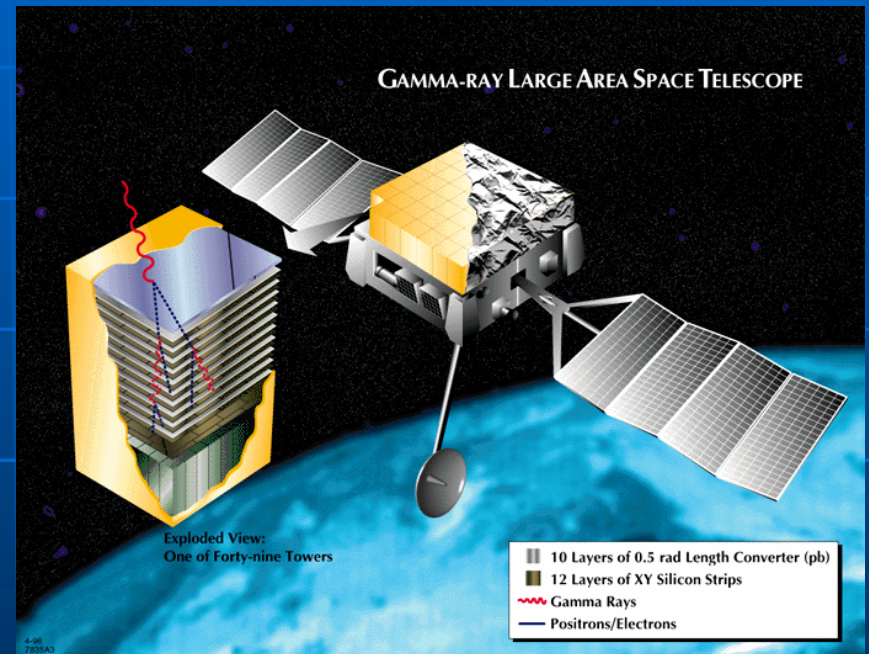
- 時間変動天体の連続観測 (ブレーザーなど)
- 多波長同時観測キャンペーン



# 打ち上げ予定のガンマ線衛星



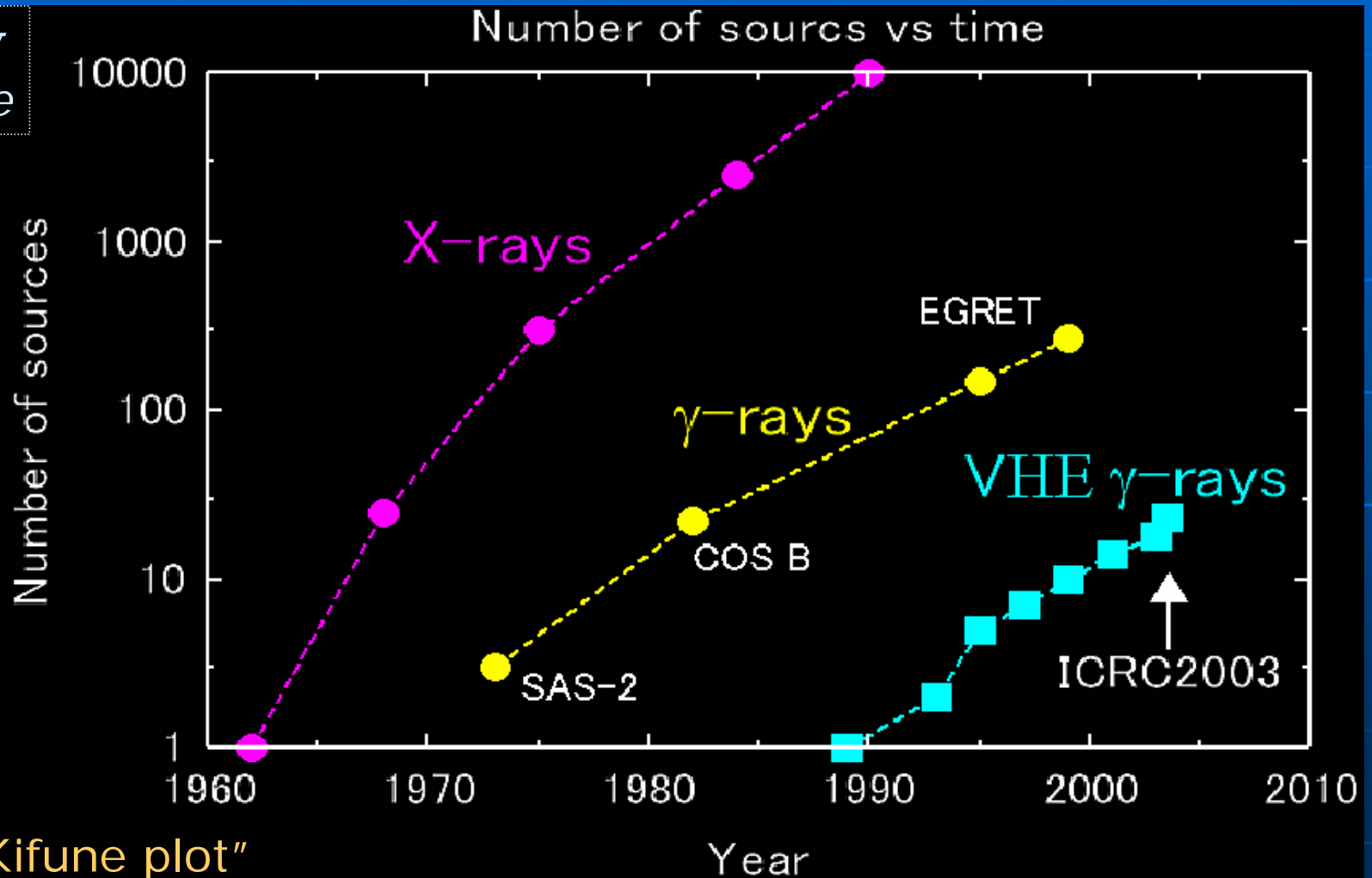
AGILE (ASI [Italy] 2003)



GLAST (NASA, 2006)

# 天体数の年次増加

対数  
scale



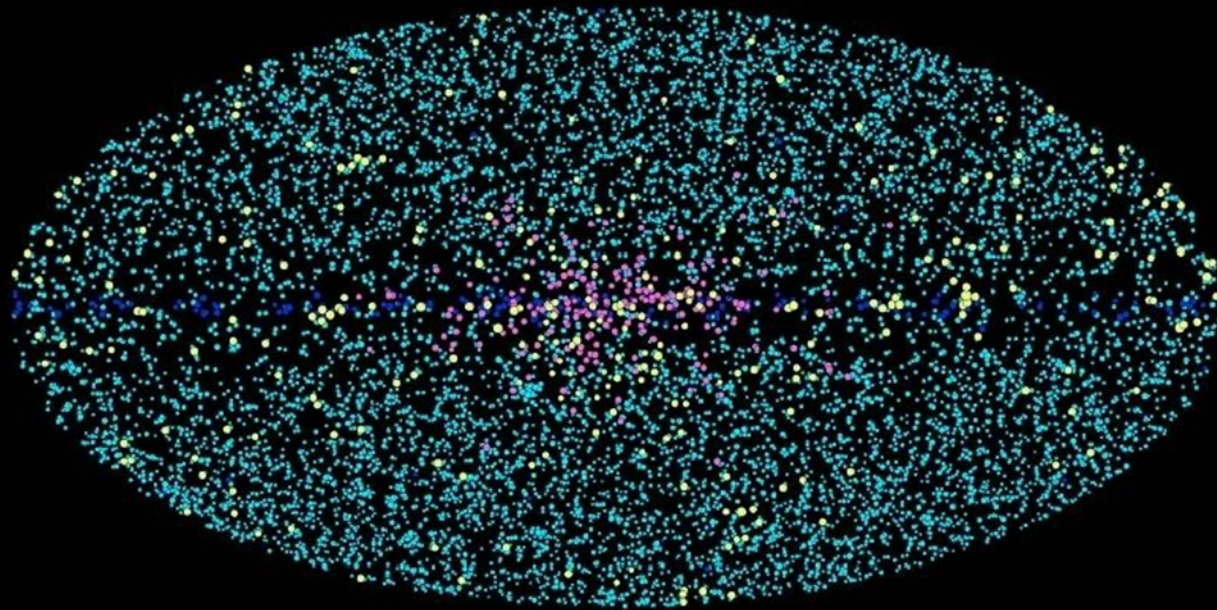
"Kifune plot"

©Rene Ong 2002

# 2007年のガンマ線天球図?

5 $\sigma$  Sources from Simulated  
One Year All-sky Survey

LAT 1<sup>st</sup> Catalog:  
>9000 sources  
possible



Results of one-year  
all-sky survey.  
(Total: 9900 sources)

● AGN  
● 3EG Catalog

● Galactic Halo  
● Galactic Plane

# 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。