

ガンマ線で見える宇宙

森 正樹



攝影：
百海正明

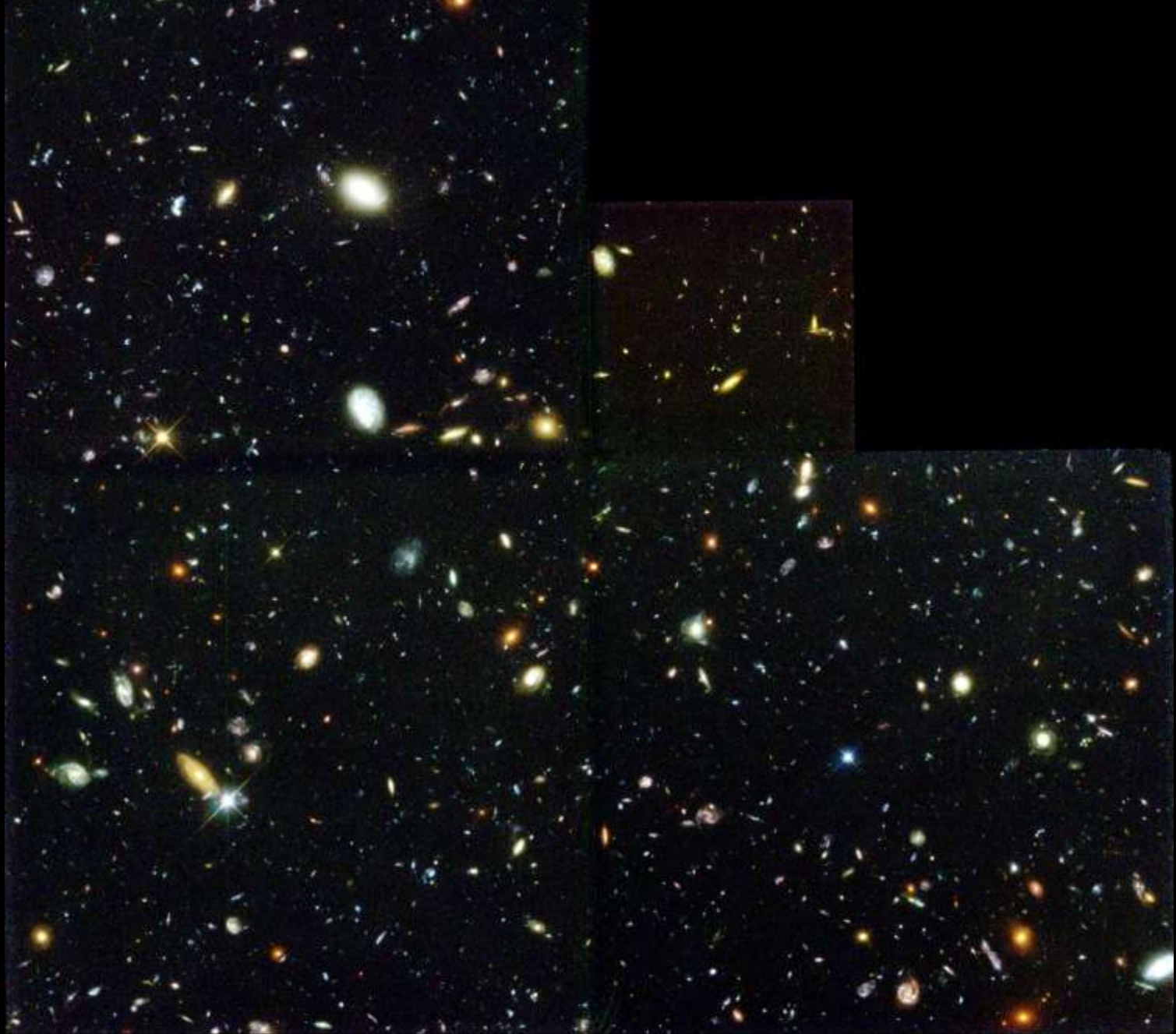


撮影：
福島英雄

Spiral Galaxy NGC 4414



Hubble
Heritage



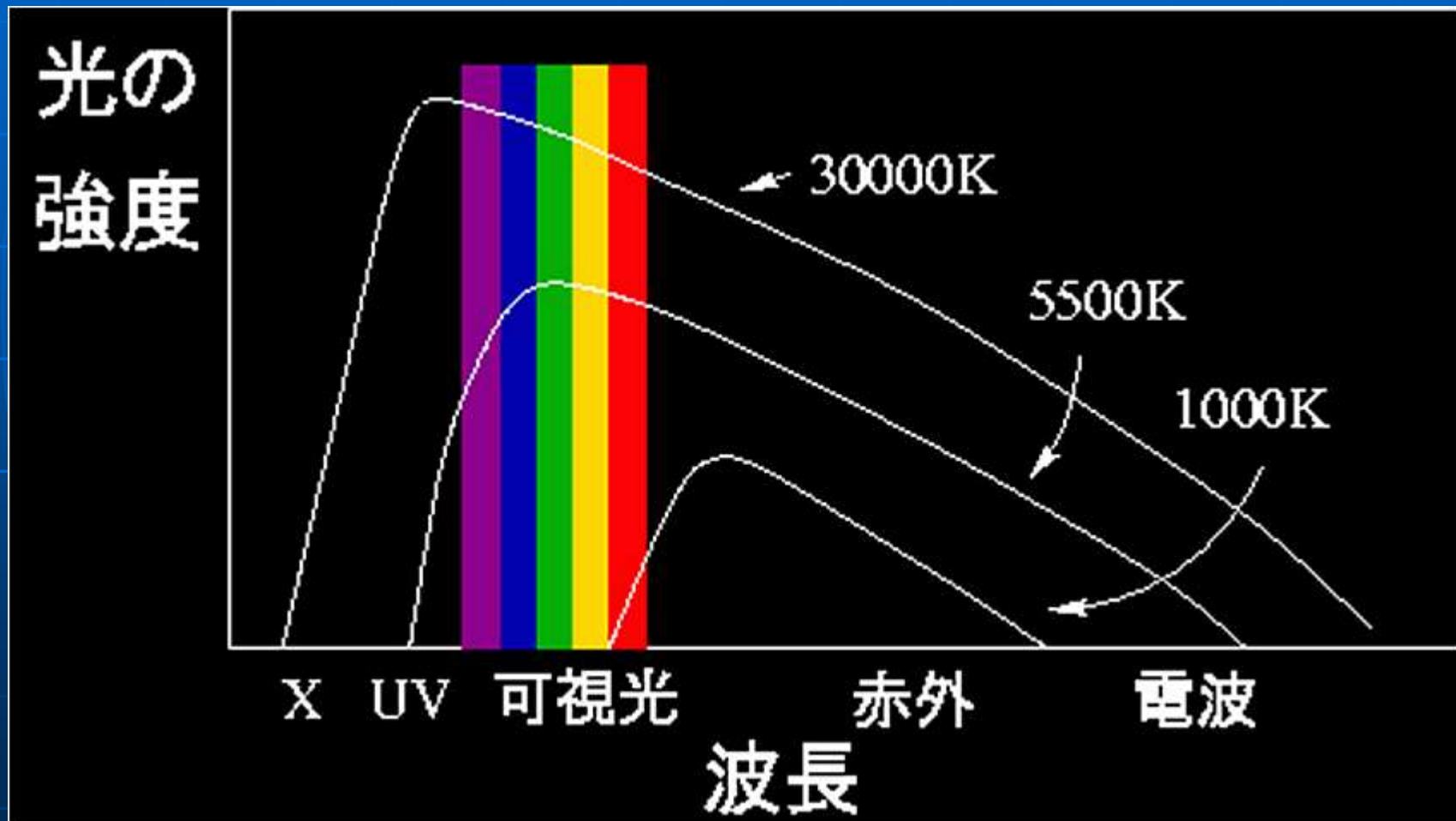
Hubble Deep Field

HST WFPC2

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

黒体放射の温度と光の波長分布

(プランク分布)



光の種類、波長、天体の温度



天体の温度スケール

ガンマ線

X線

紫外線

可視光

赤外線

マイクロ波

電波

$1/1,000,000,000,000$

$1/1,000,000$

1

波長(m)

光の種類と身近な例



ガンマ線

X線

紫外線

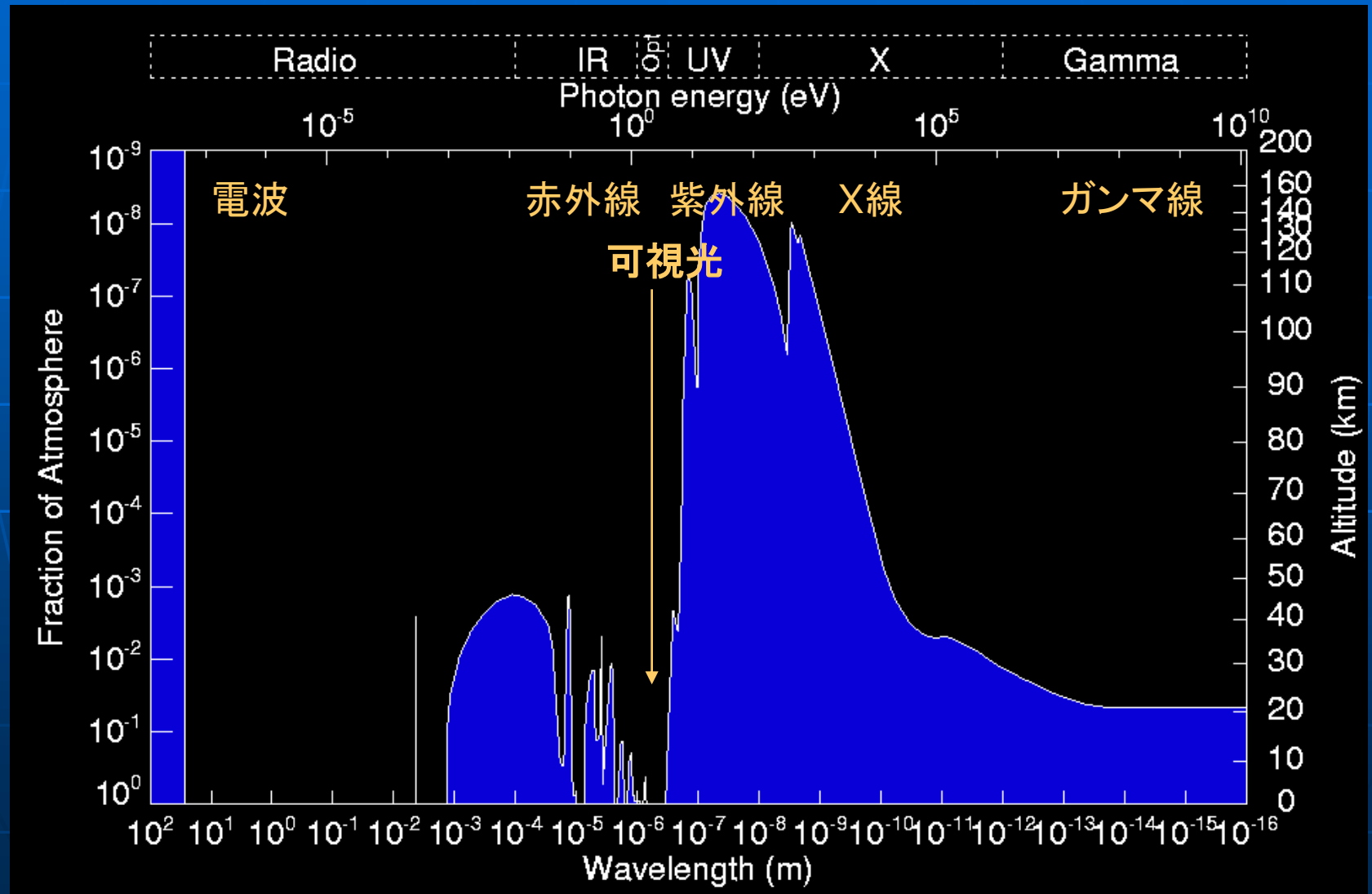
可視光

赤外線

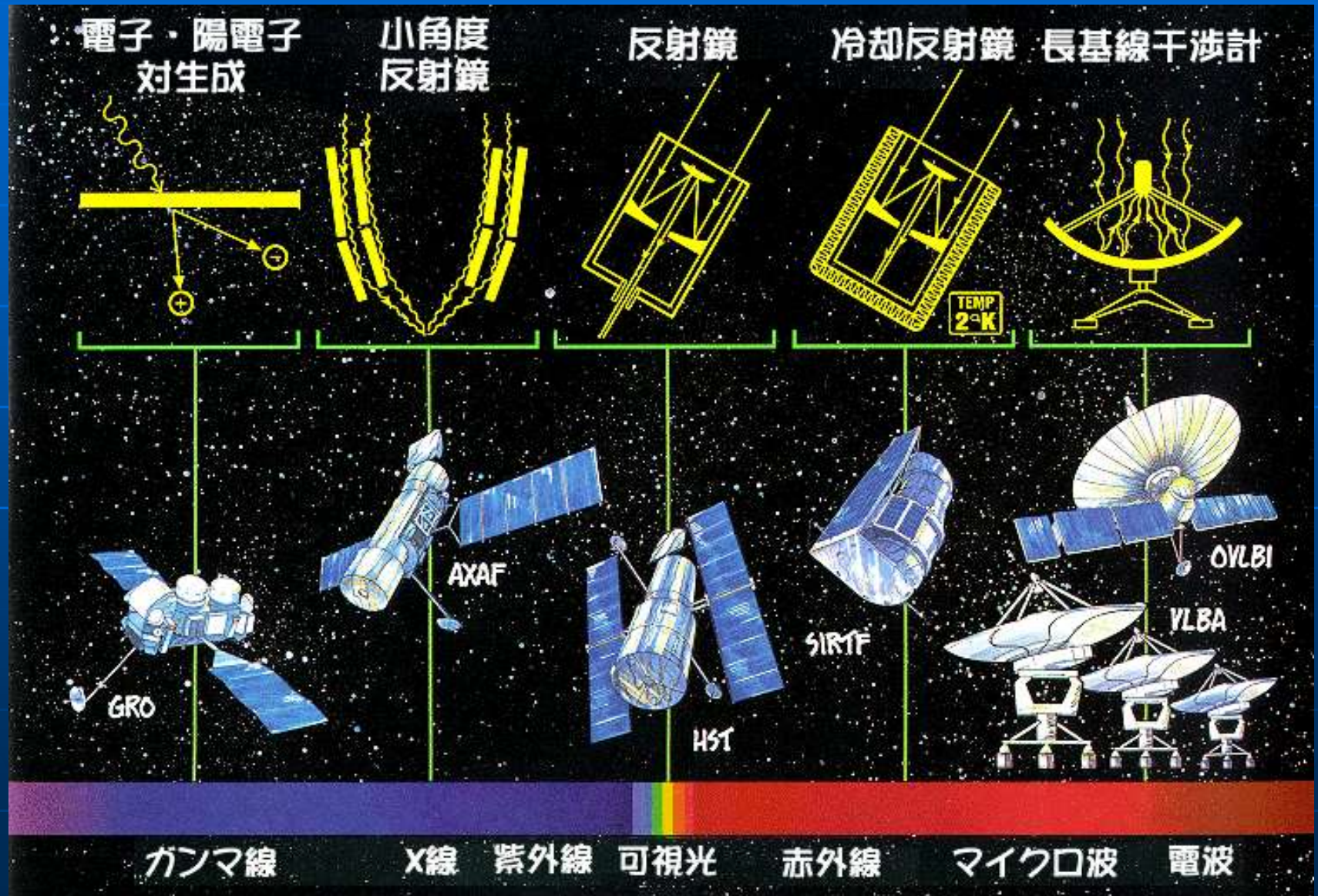
マイクロ波

電波

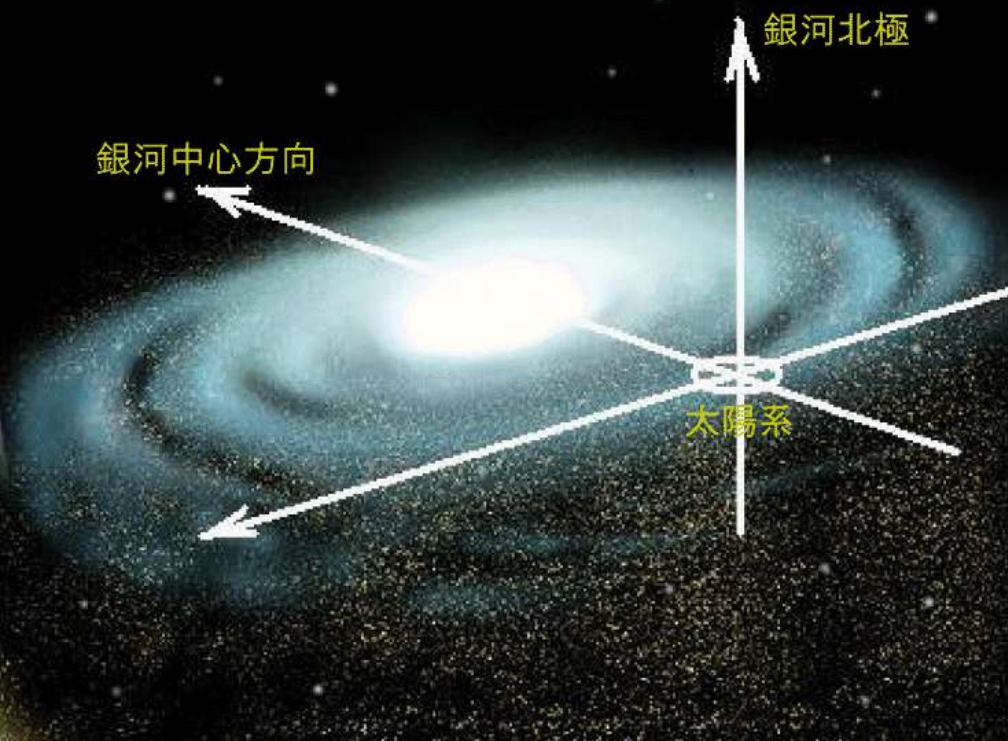
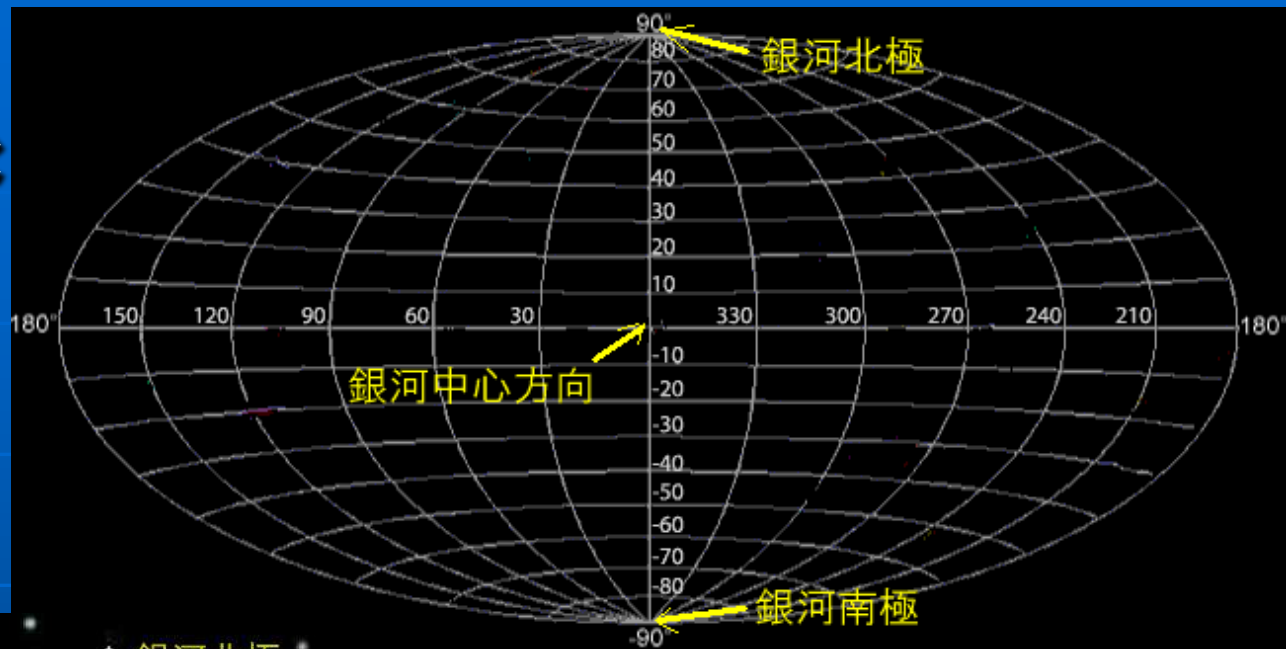
大気の透明度



光の観測方法



銀河座標系



平面に投影

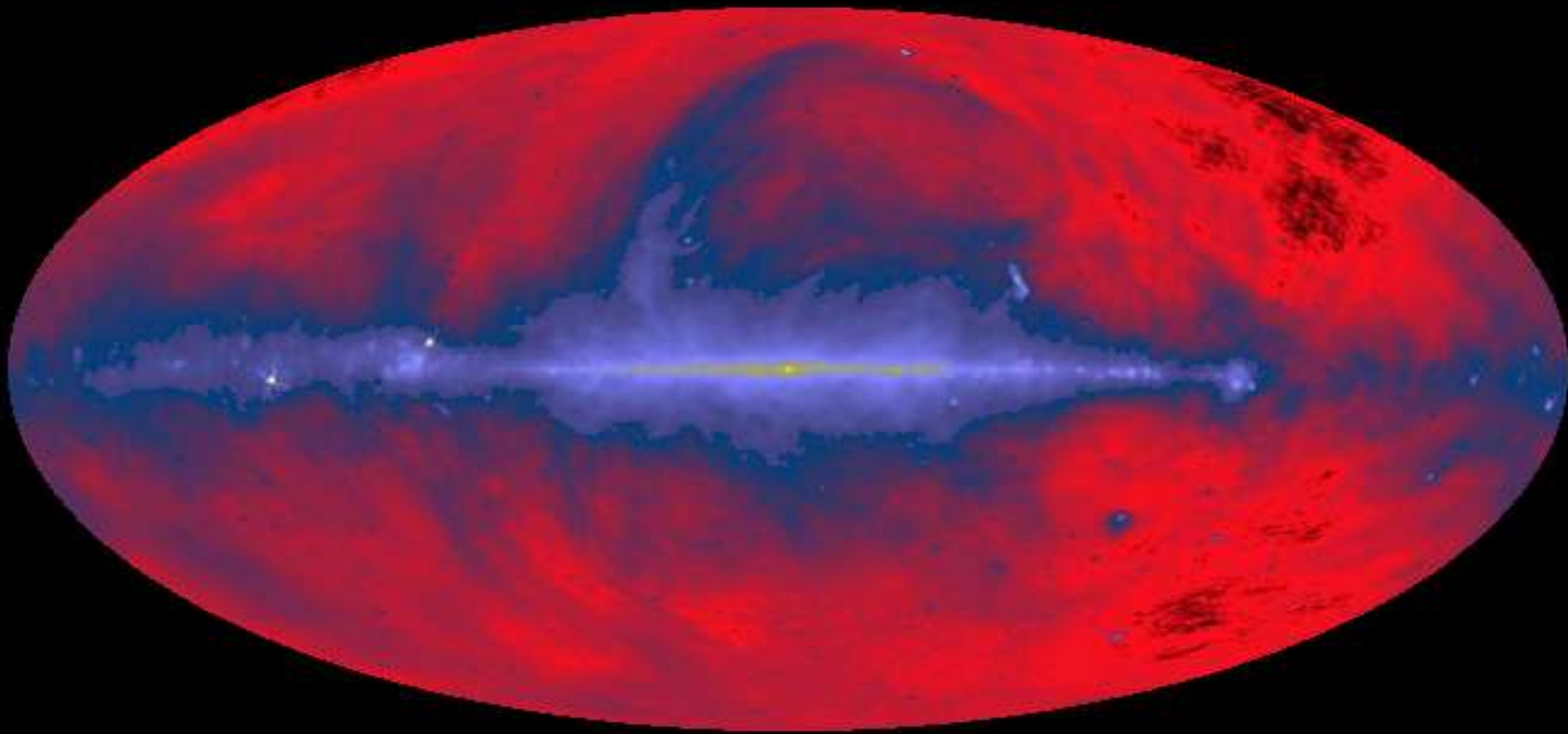
我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



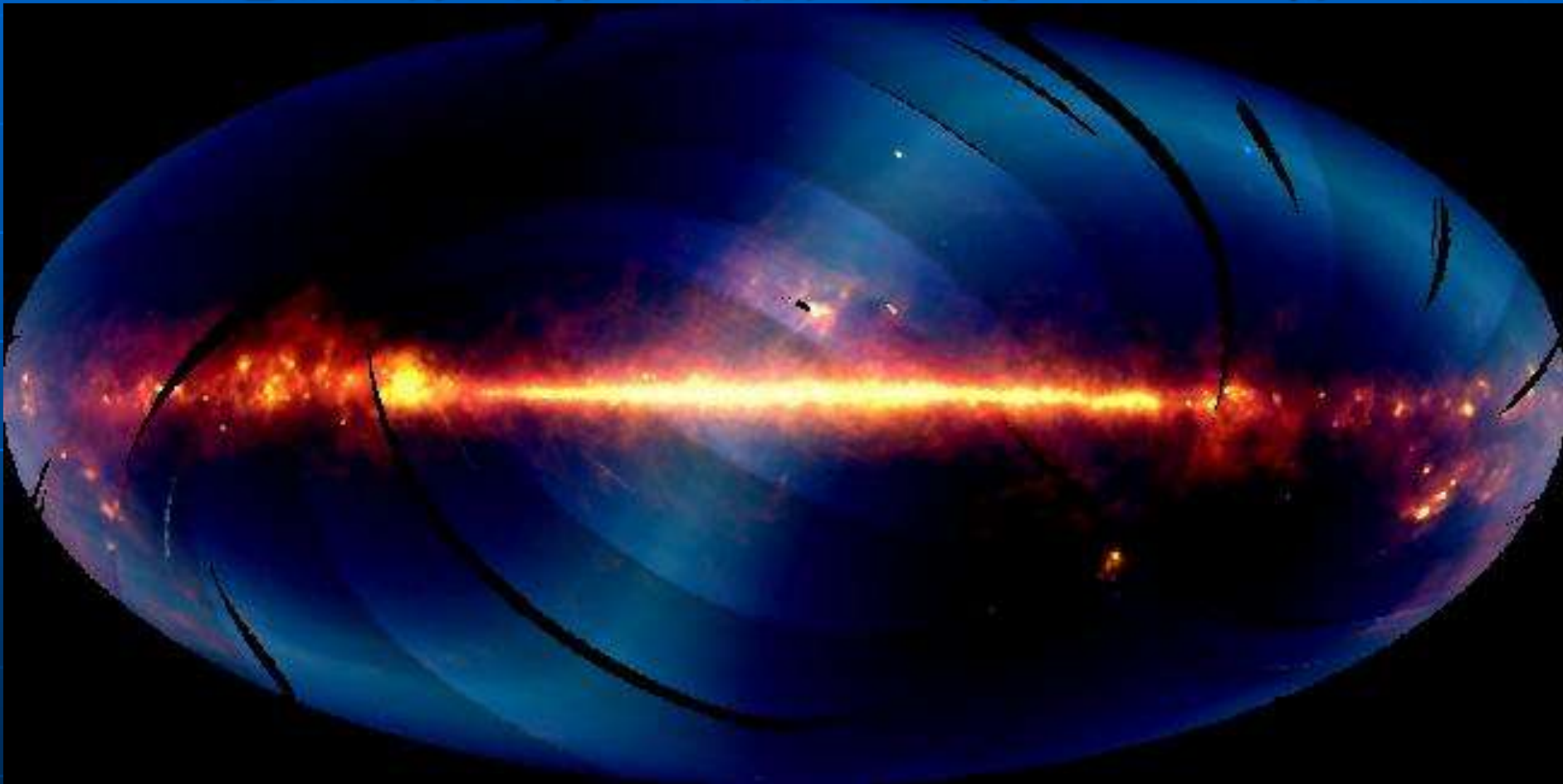
我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



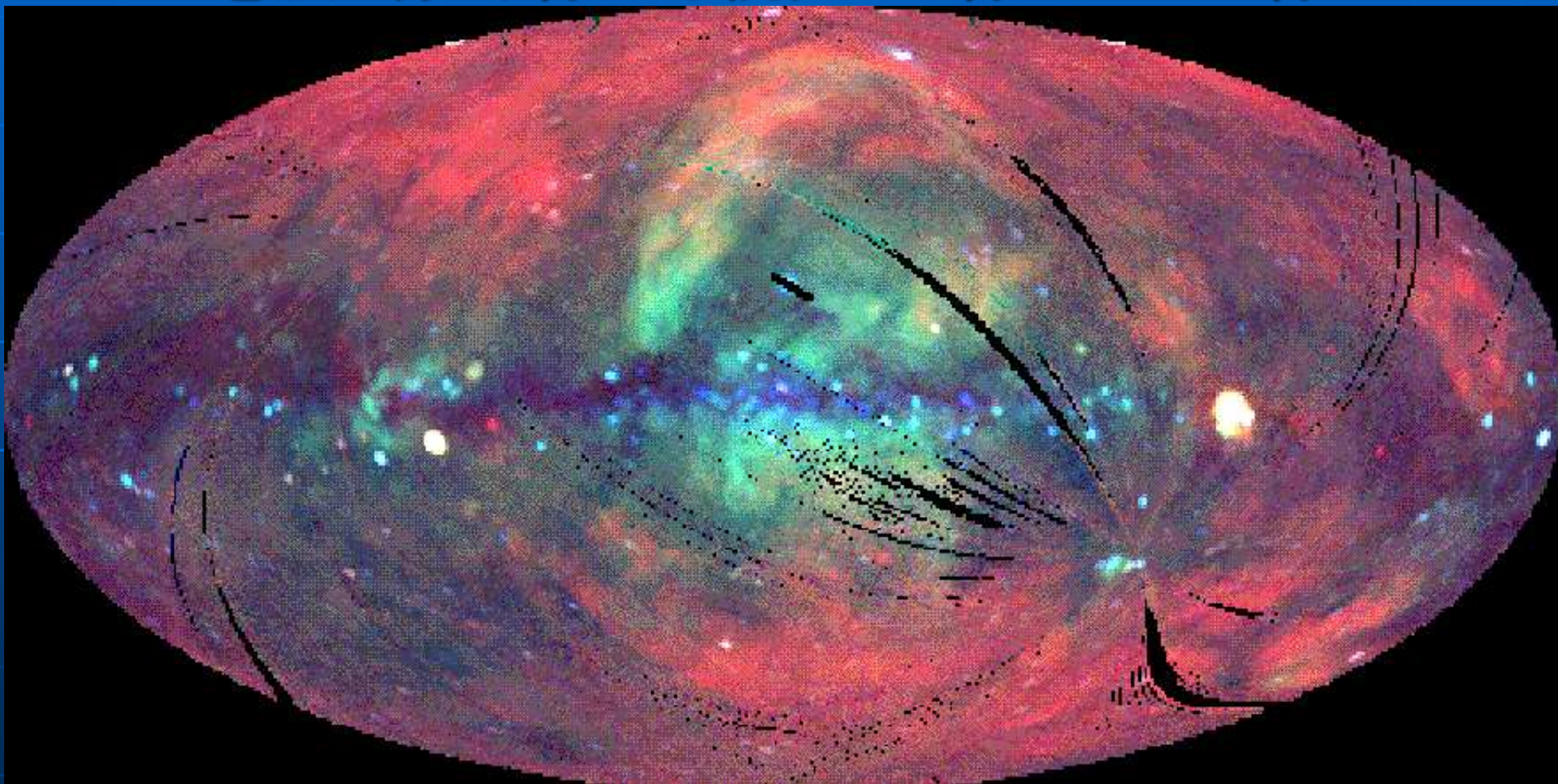
我々の銀河の姿

電波 赤外線 可視光 X線 ガンマ線



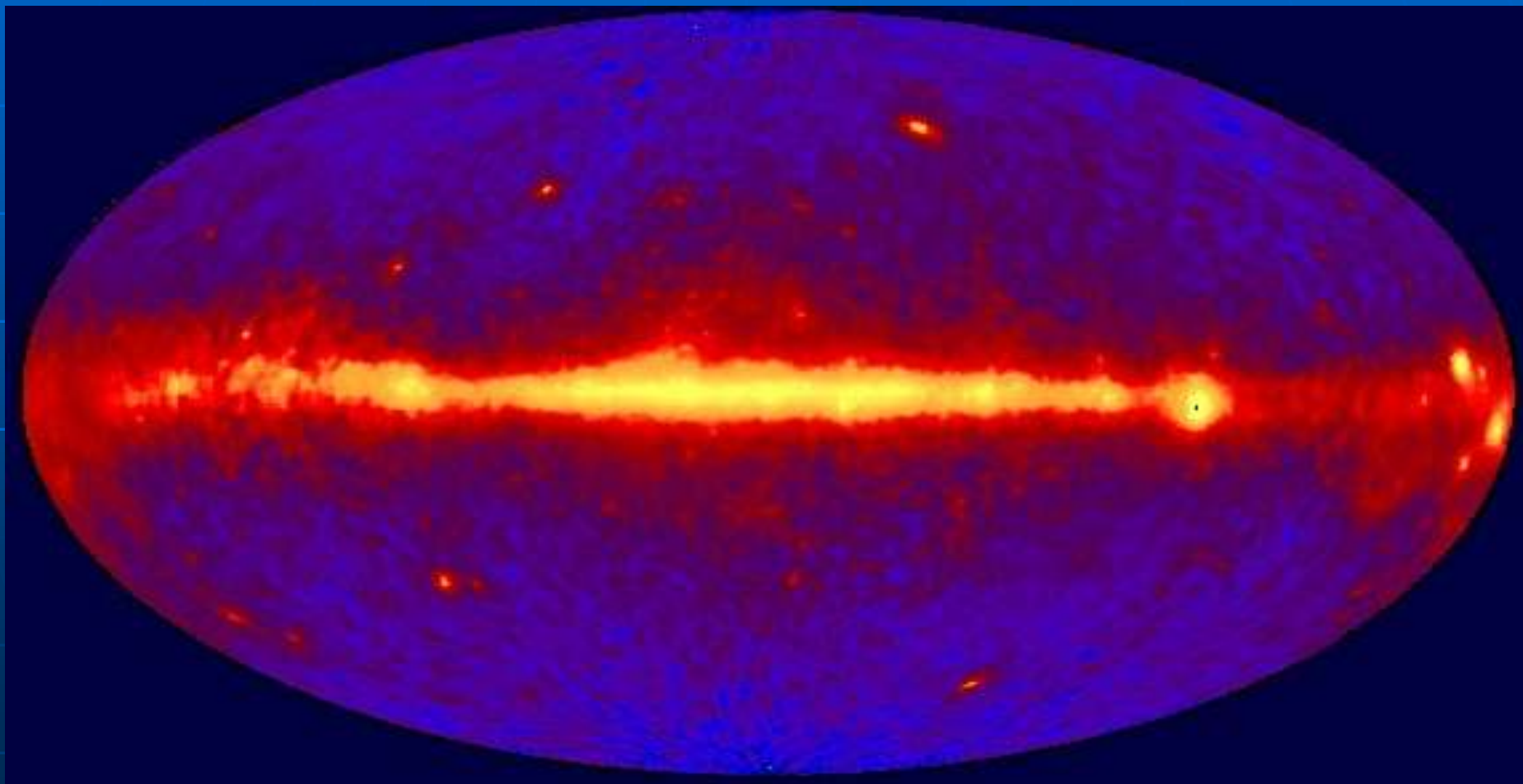
我々の銀河の姿

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**

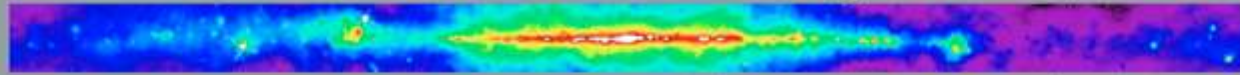


さまざまな波長で見た銀河

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 μm IRAS



Near Infrared

1.25, 2.2, 3.5 μm COBE/DIRBE



Optical

Laustsen et al. Photomosaic



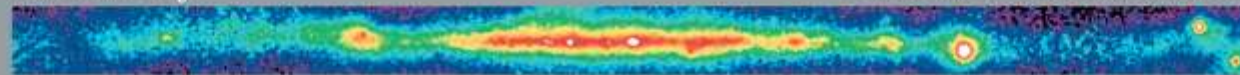
X-Ray

0.25, 0.75, 1.5 keV ROSAT/PSPC

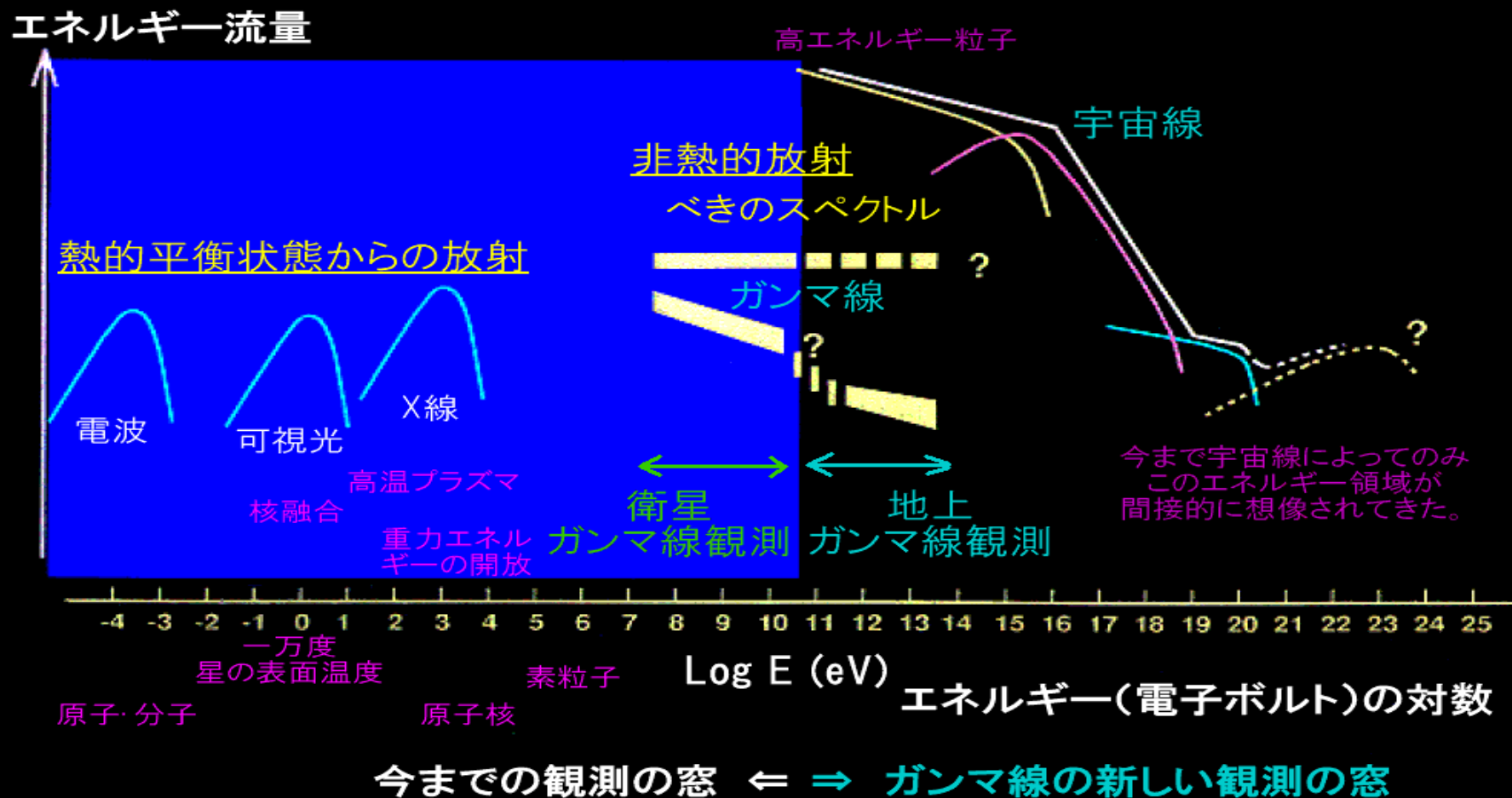


Gamma Ray

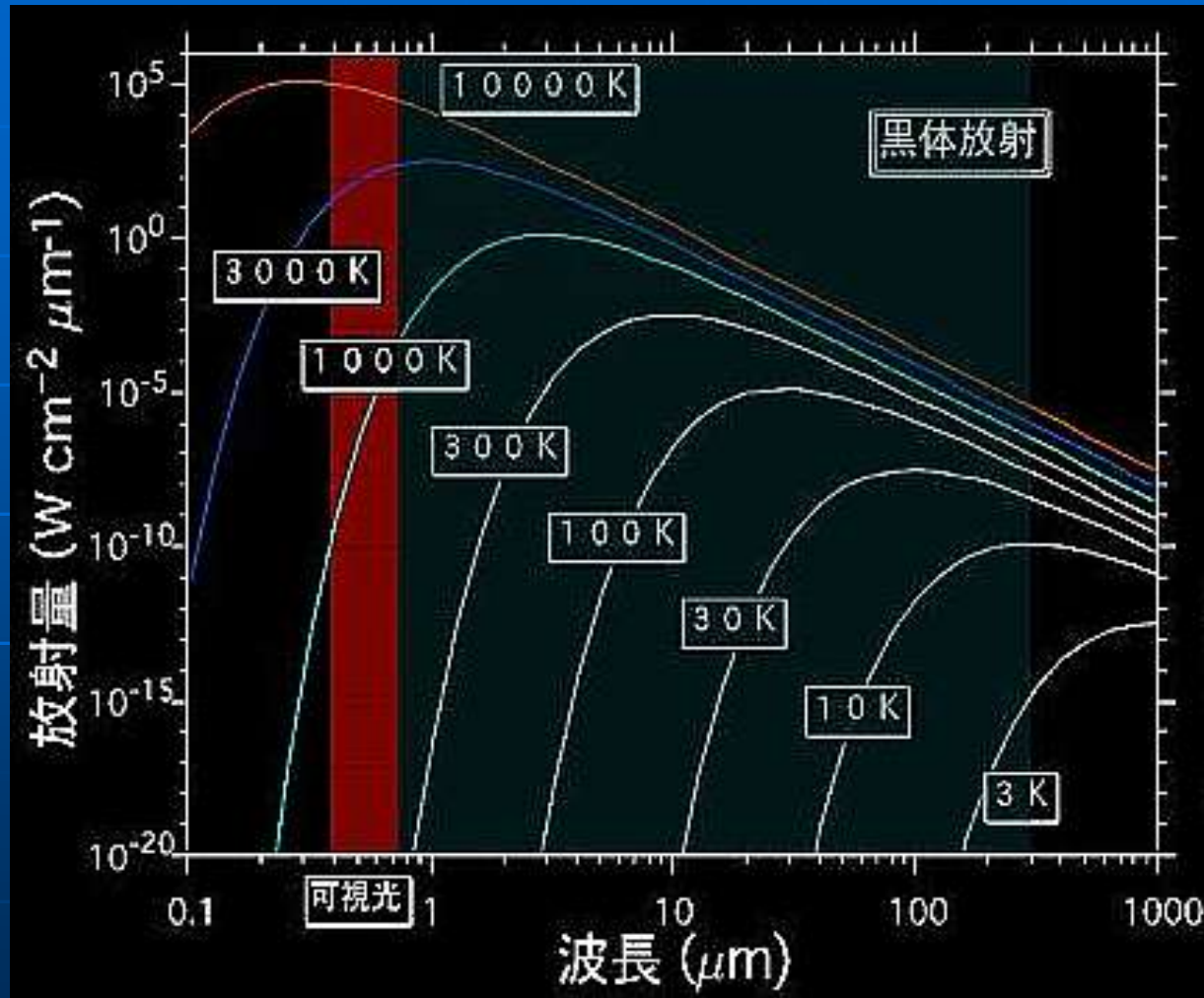
>100 MeV CGRO/EGRET



天体観測の新しい窓



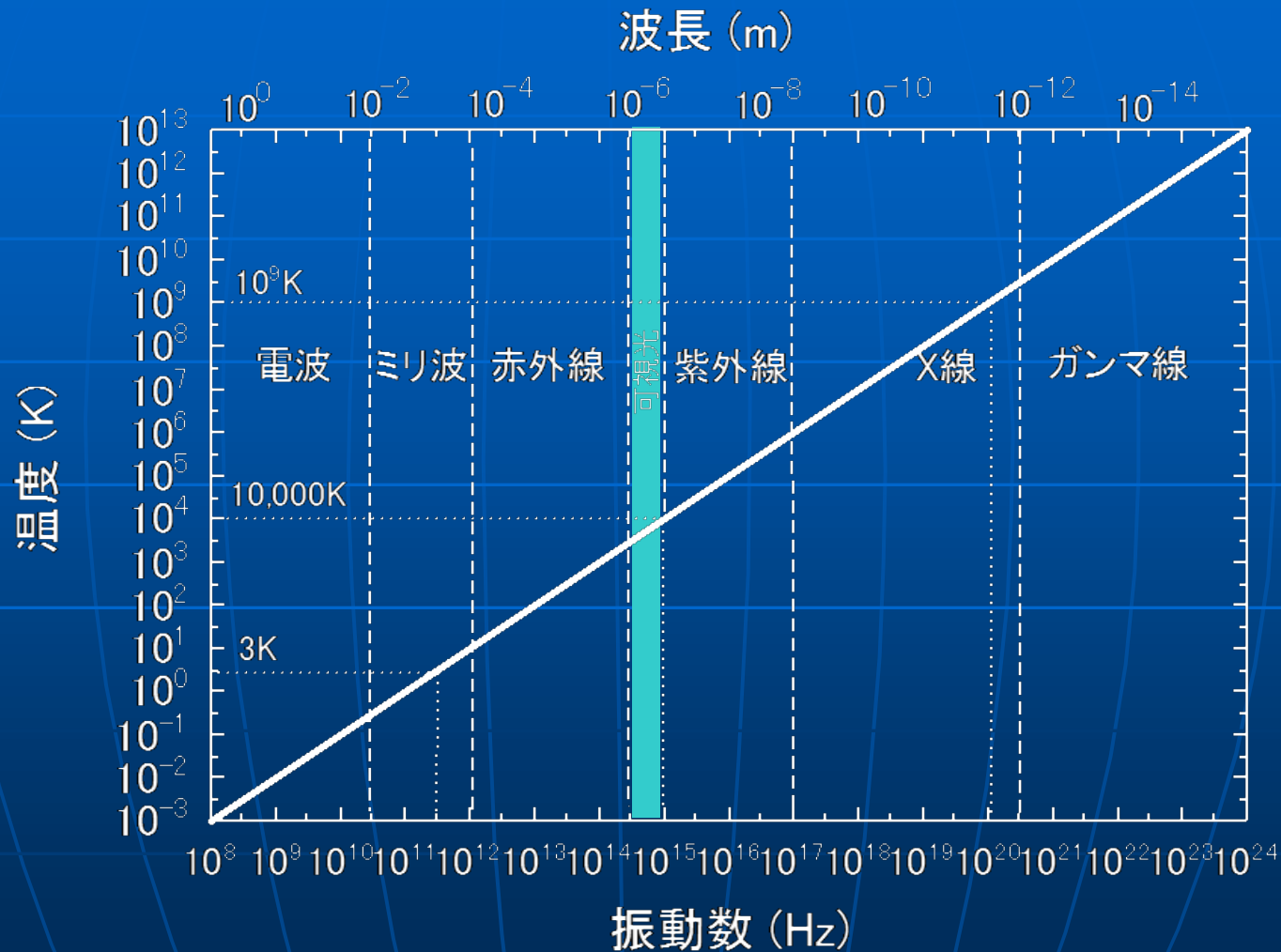
熱的放射



プランクの放射公式

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

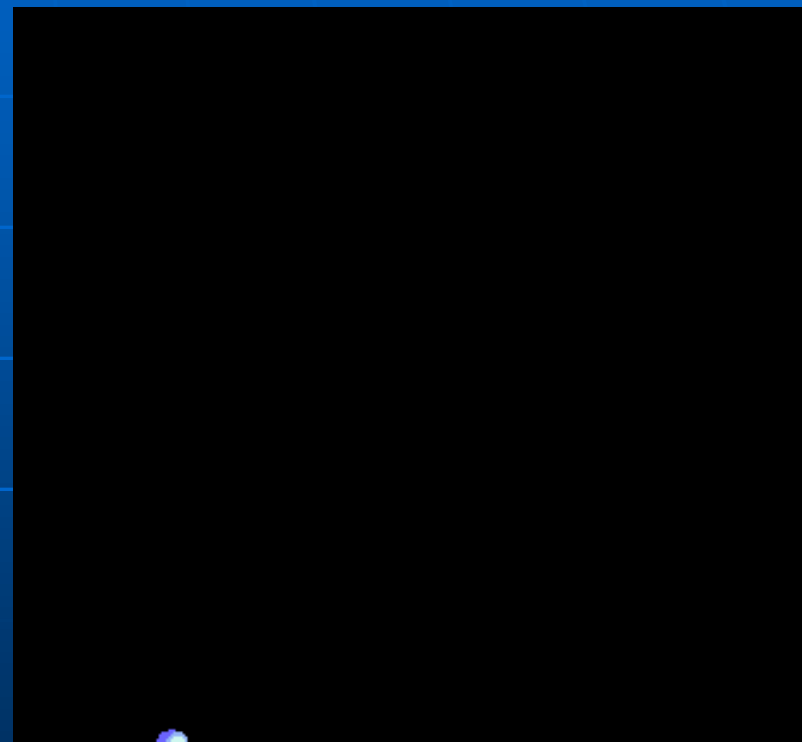
ウィーンの変位則



ウィーンの変位則 $\lambda(\mu\text{m}) = 2897 / T(\text{K})$

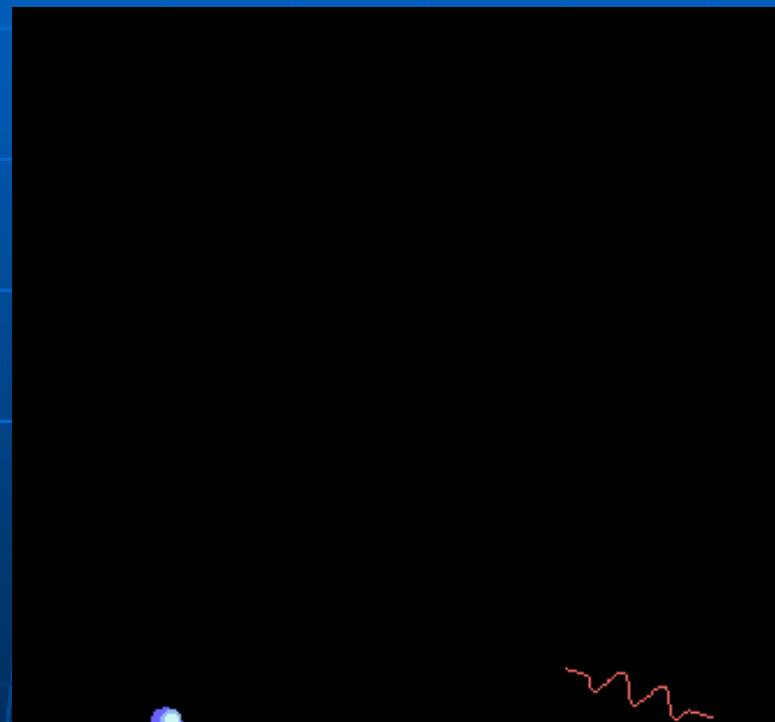
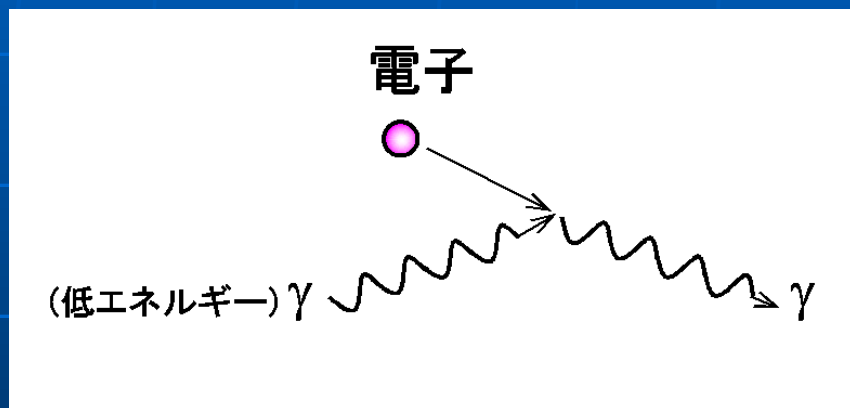
ガンマ線の生成: シンクロトロン放射

高エネルギー 電子 + 磁場



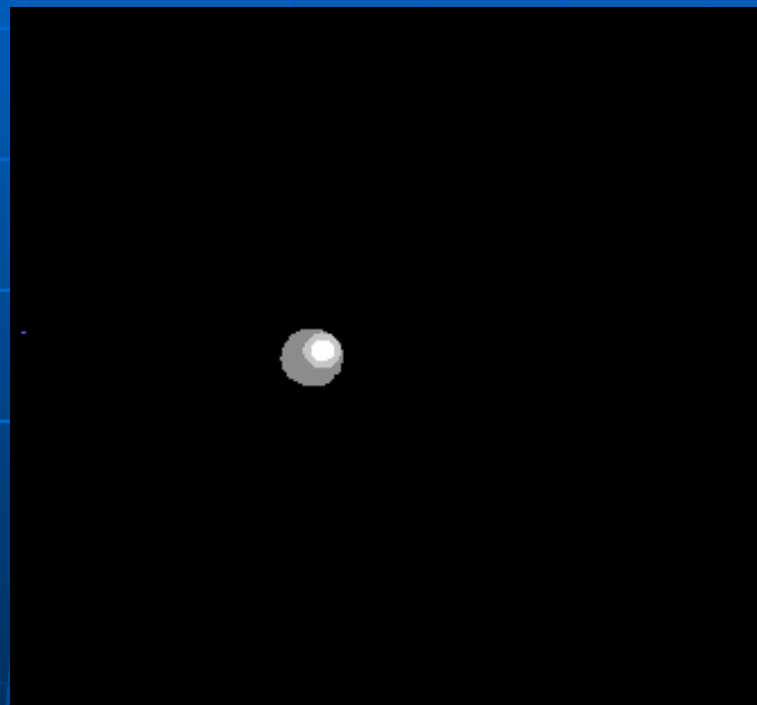
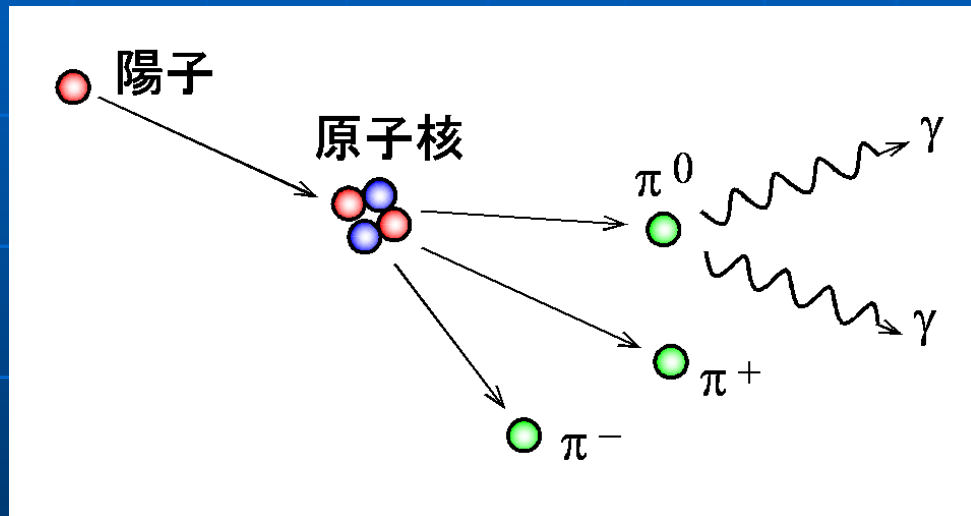
ガンマ線の生成: 逆コンプトン放射

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

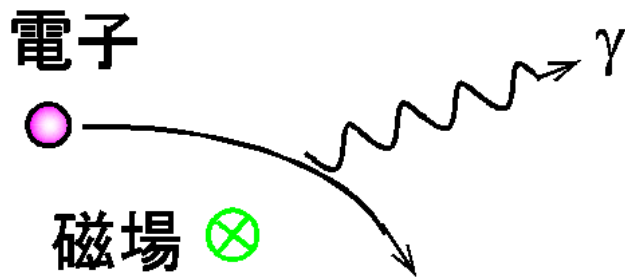
高エネルギー 陽子 + 物質



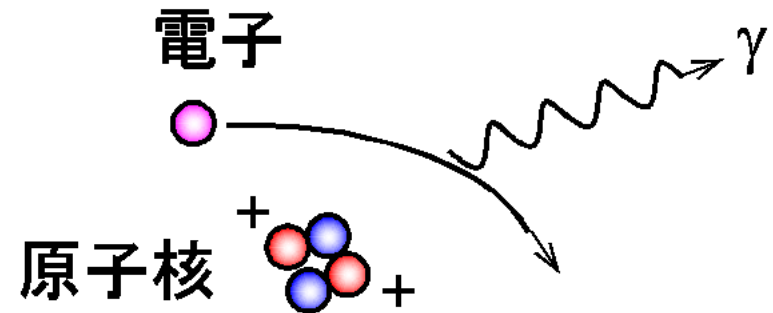
©W.Hofmann

ガンマ線の放射機構：非熱的

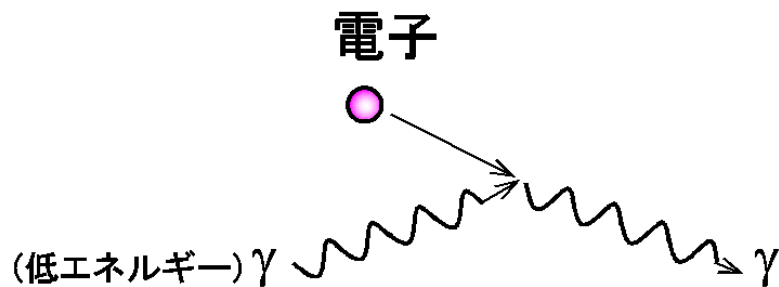
シンクロトン放射



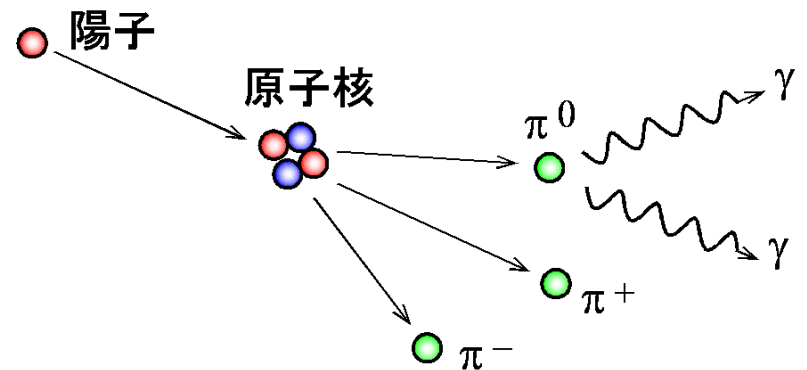
電子の制動放射



逆コンプトン放射

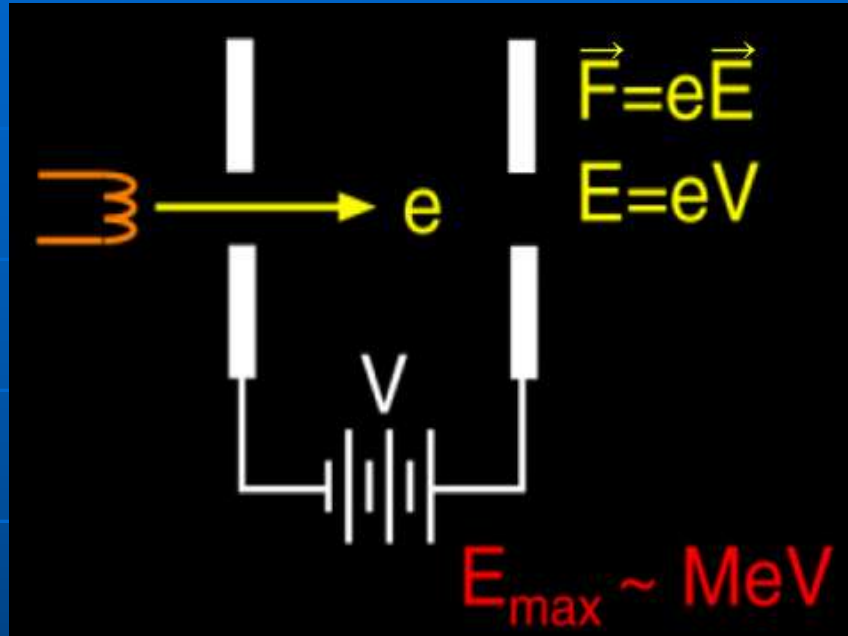


中性パイオンの崩壊



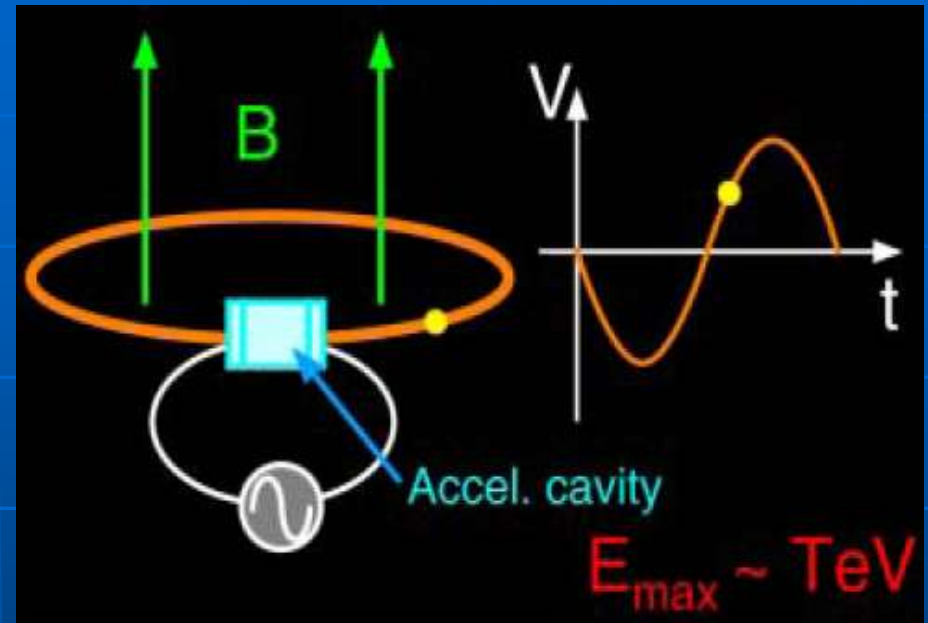
高エネルギー粒子の存在 $\Leftarrow$ 粒子加速過程

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



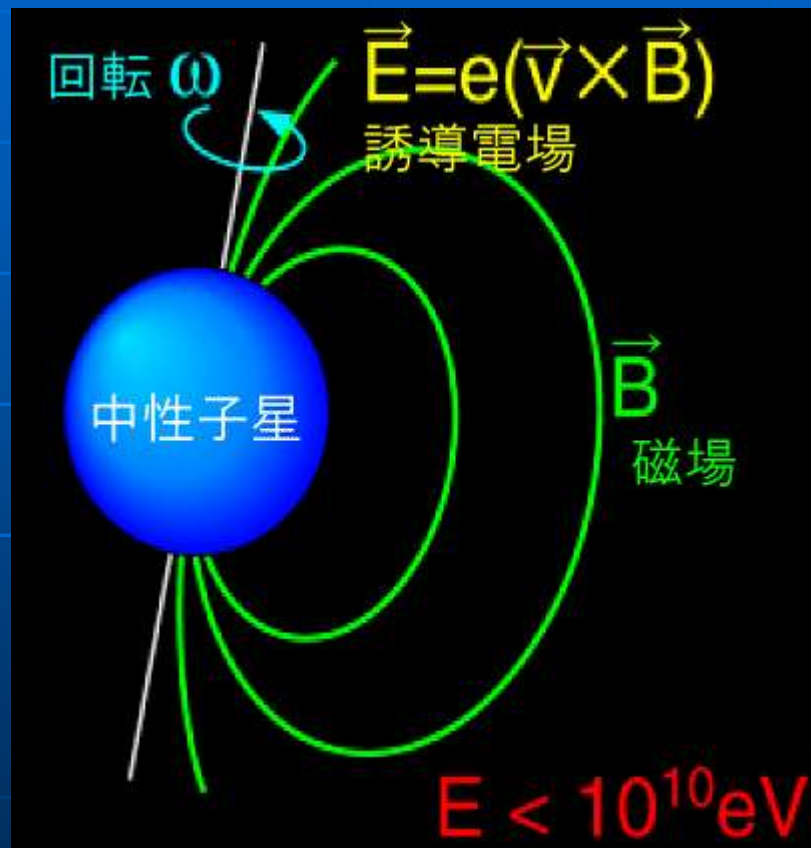
高周波電場による加速と磁場による偏向

繰り返し加速で高いエネルギーが可能

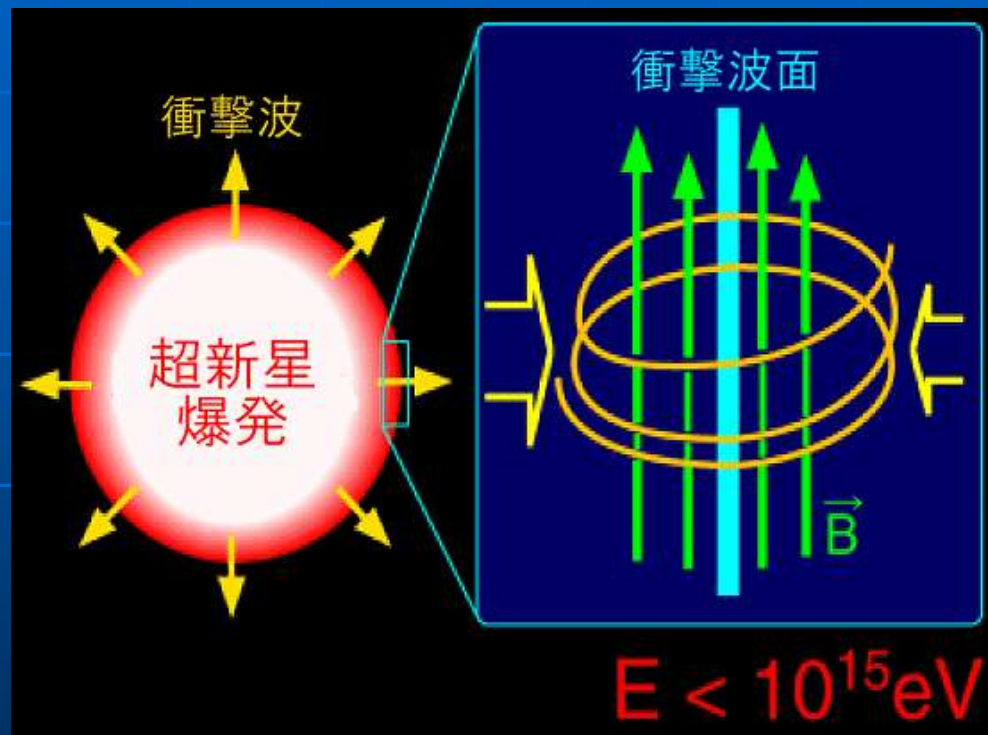


例： つくば高エネルギー加速器研究
機構の陽子シンクロトン加速器

天体における粒子加速



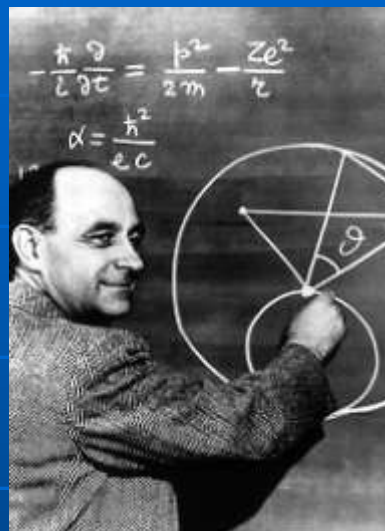
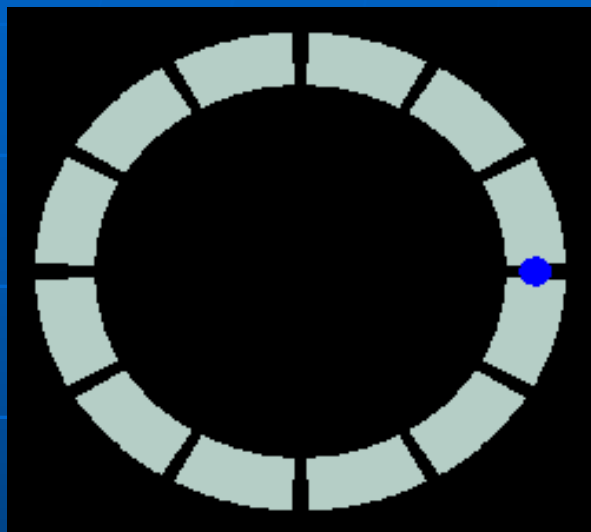
回転中性子星(パルサー)に
おける誘導電場



超新星残骸における
衝撃波と磁場による統計的加速

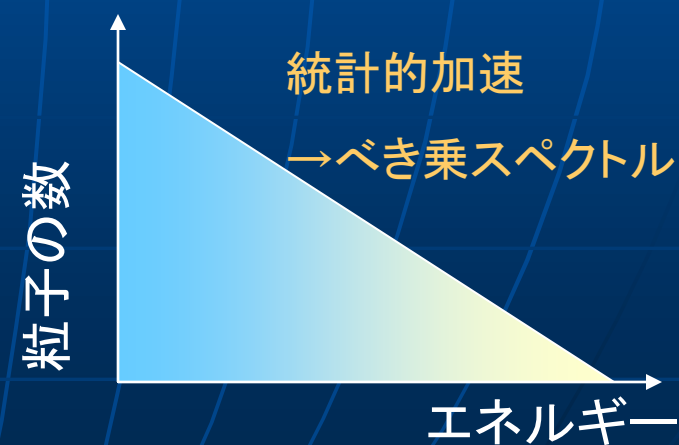
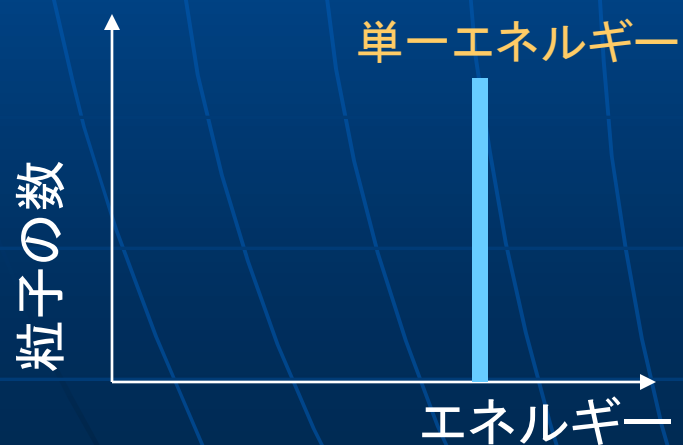
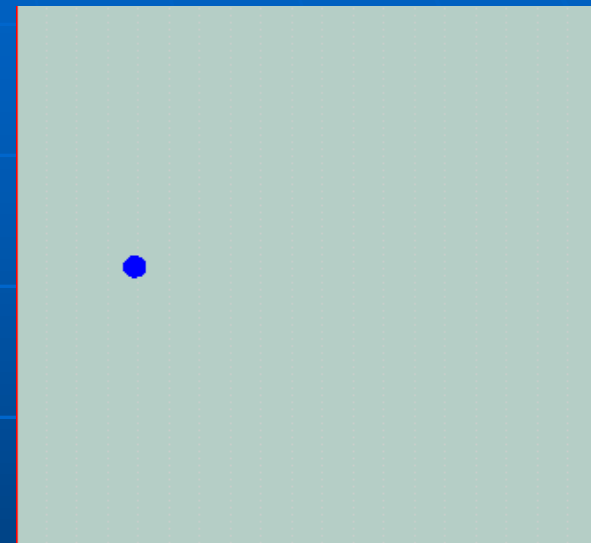
粒子加速の比較

人工粒子加速器

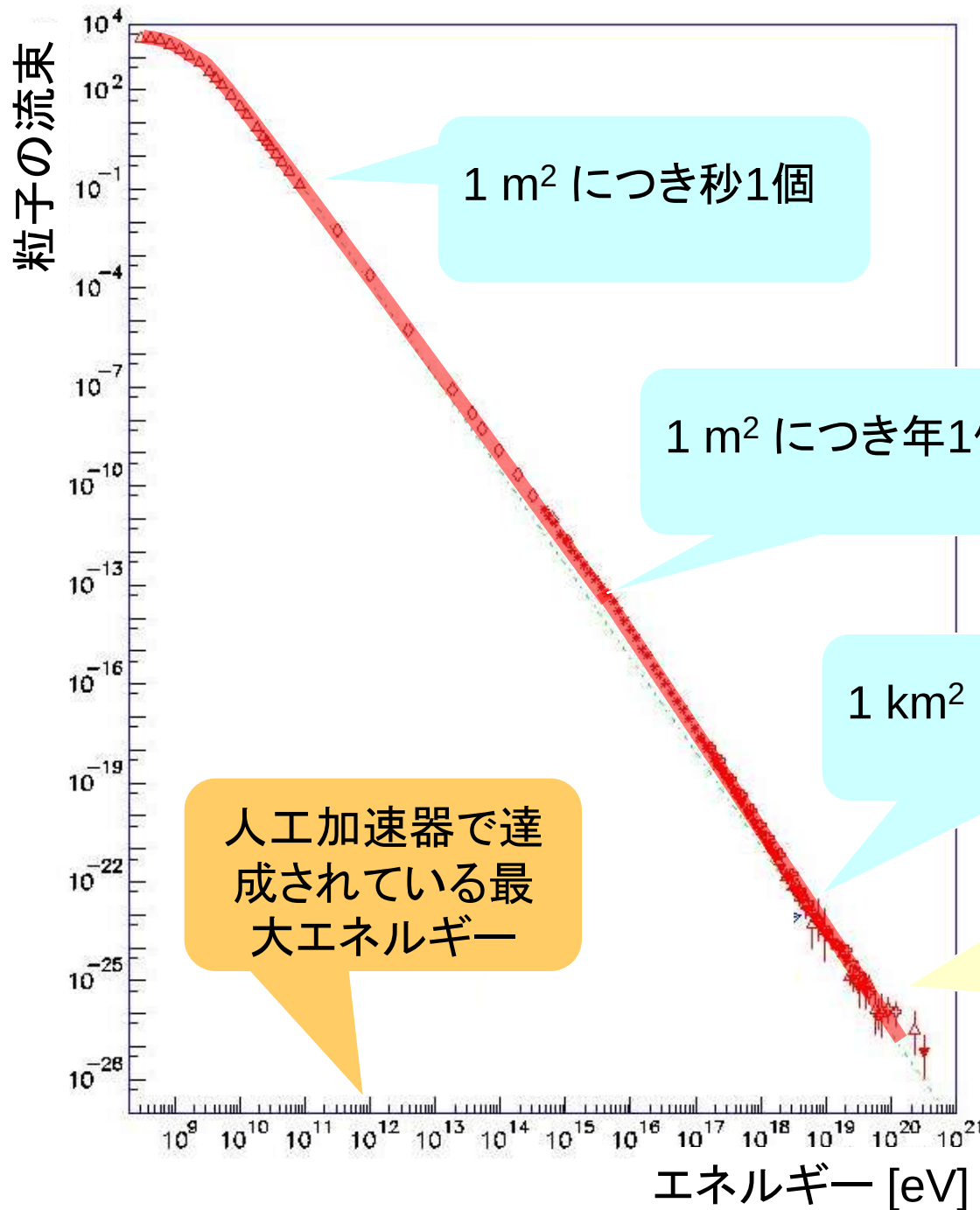


エンリコ・フェルミ

天体における粒子加速



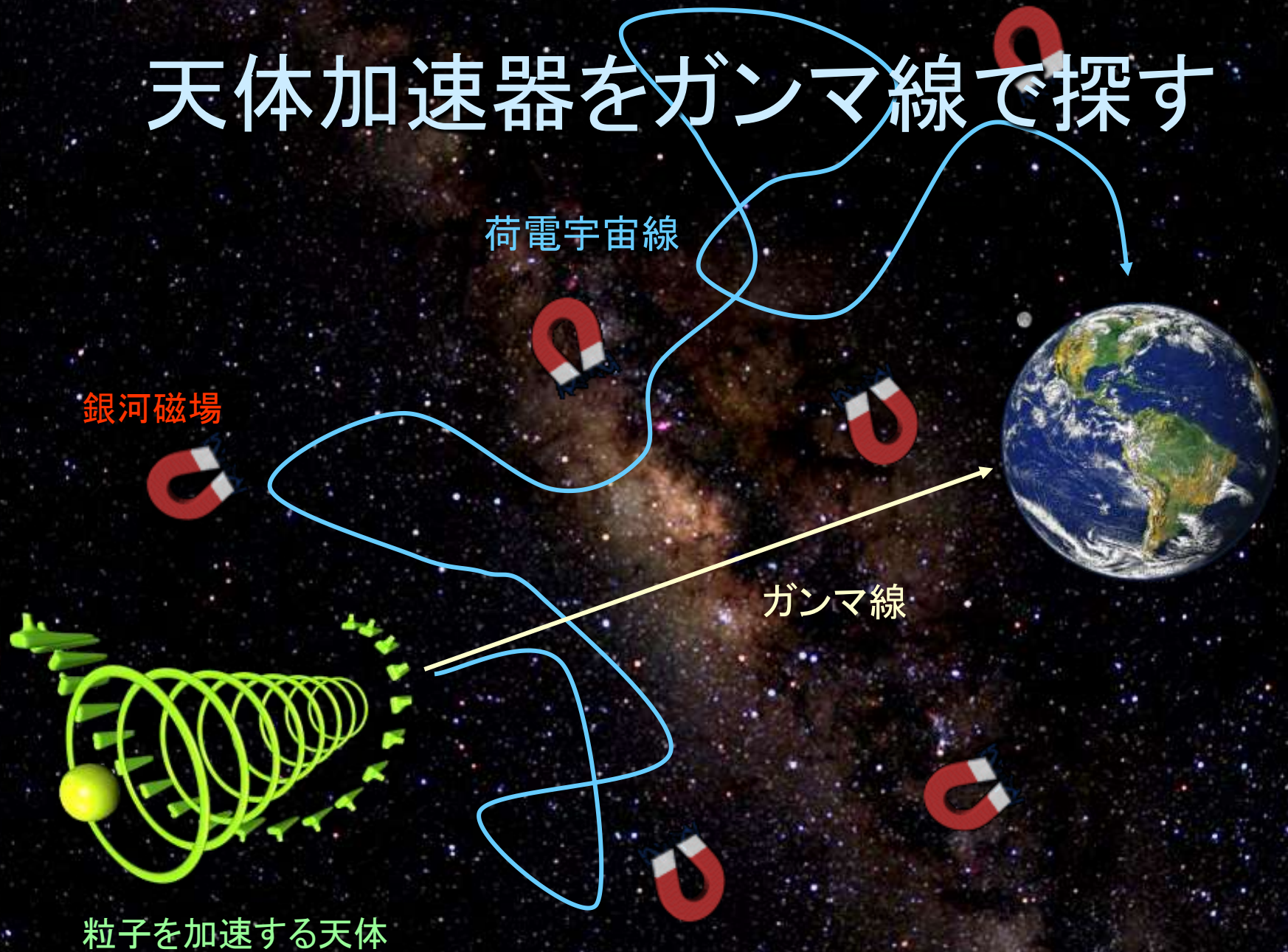
宇宙線



- 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10²⁰eVを超える)

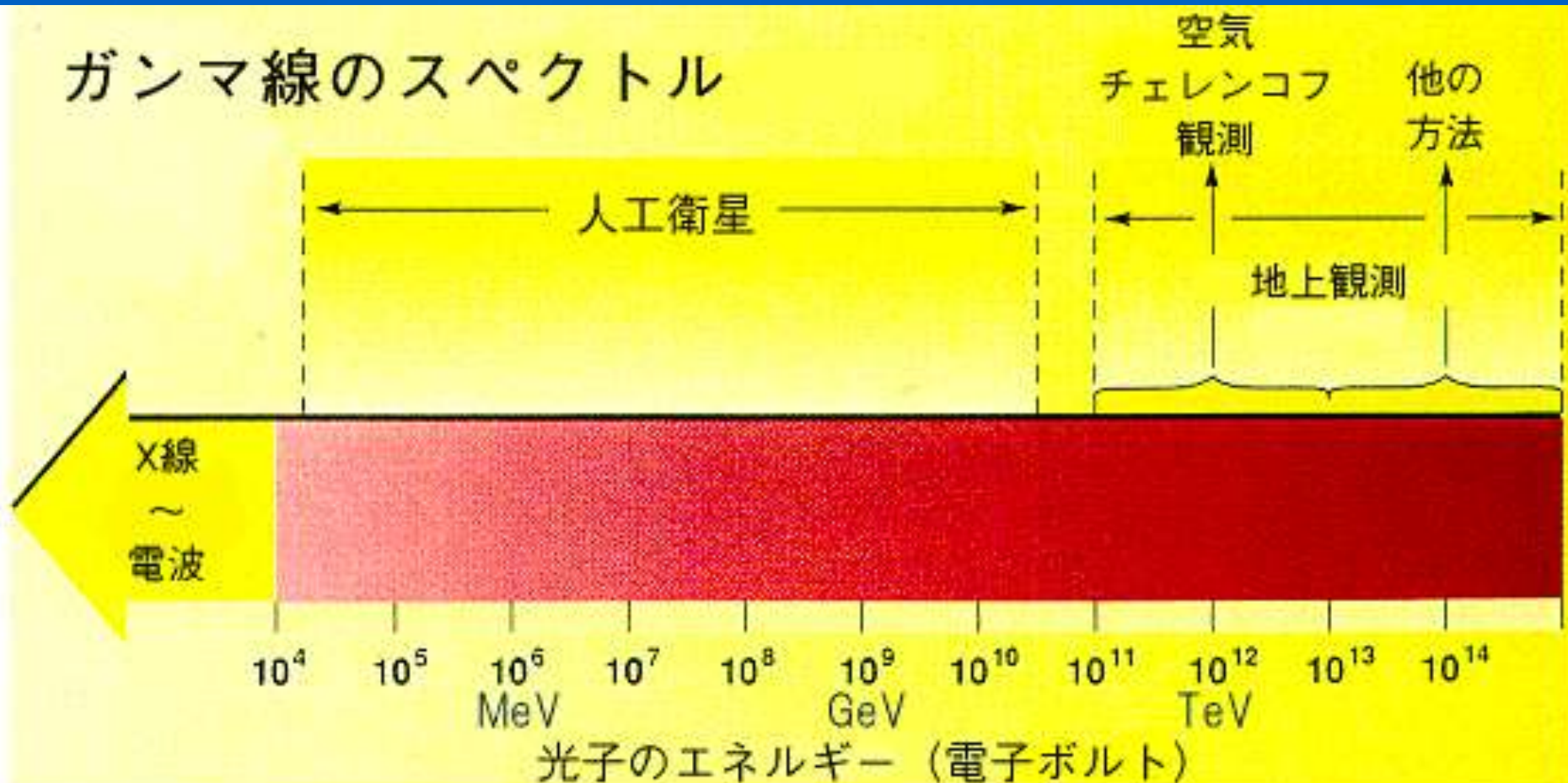
もしこのエネルギーの粒子が1グラムあれば、世界のエネルギーを1000年分供給できる。

天体加速器をガンマ線で探す



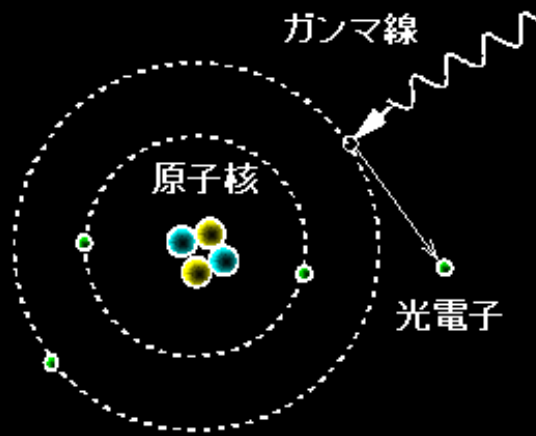
ガンマ線のエネルギー領域

ガンマ線のスペクトル

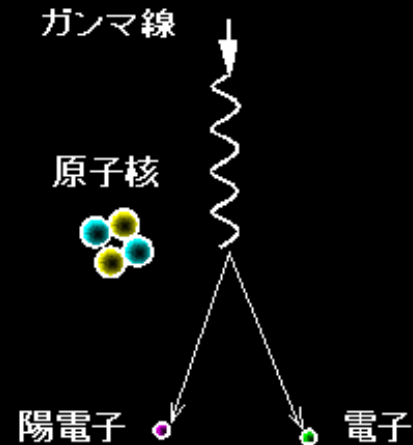


ガンマ線の検出

光電効果



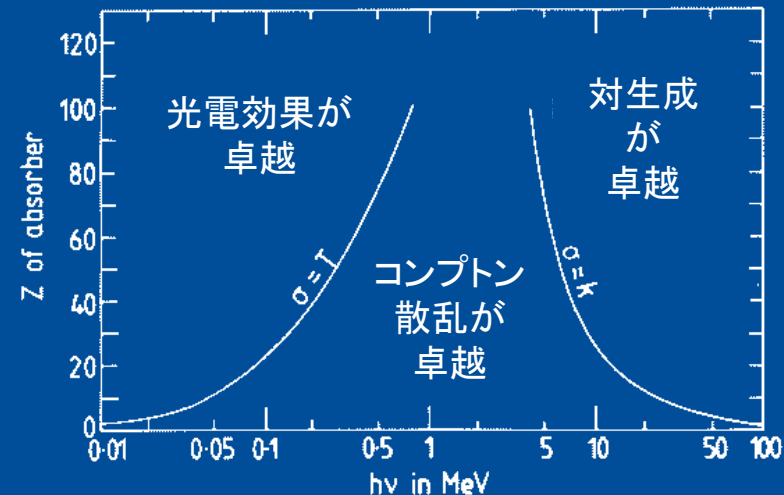
対生成



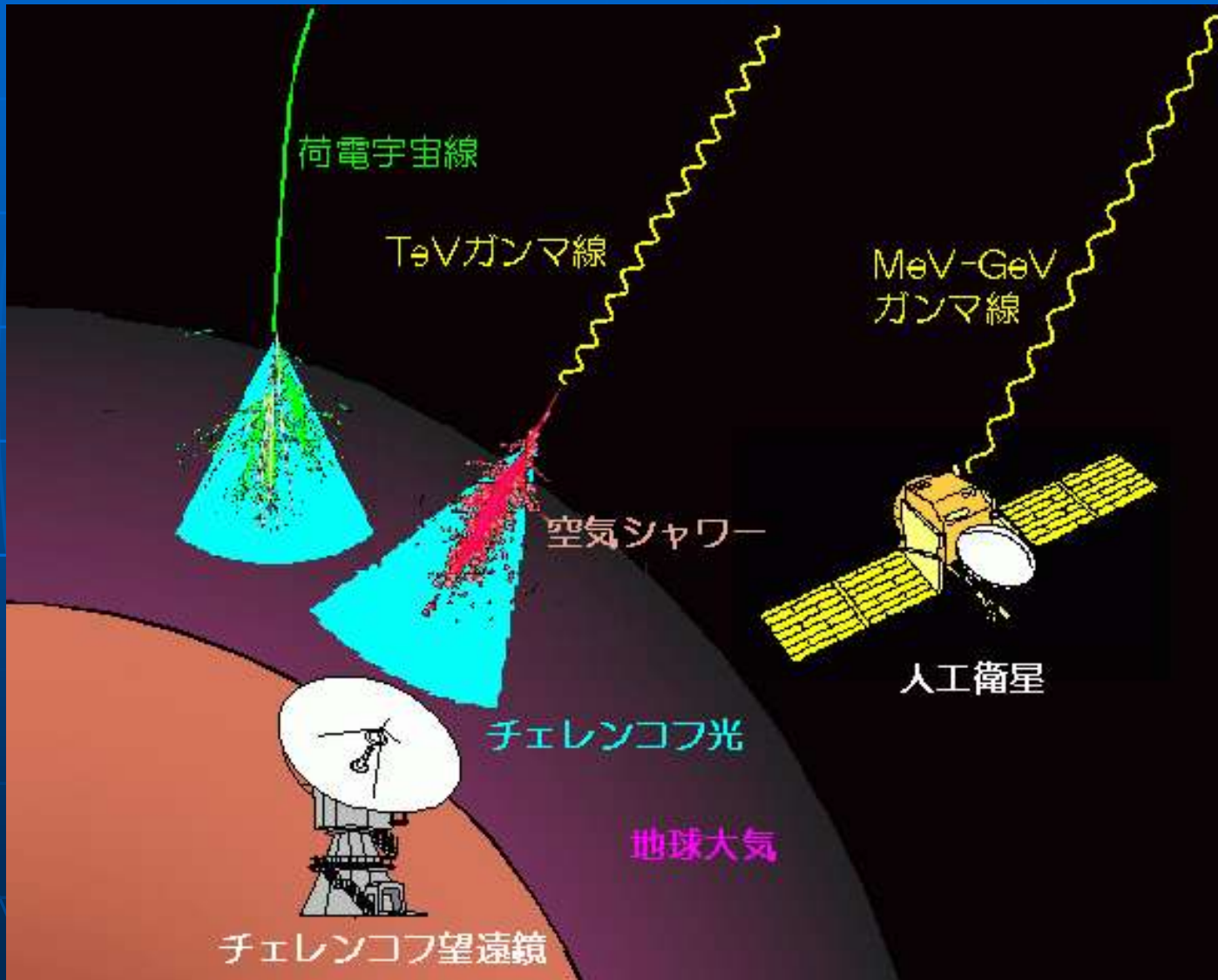
コンプトン散乱



Evans 1955

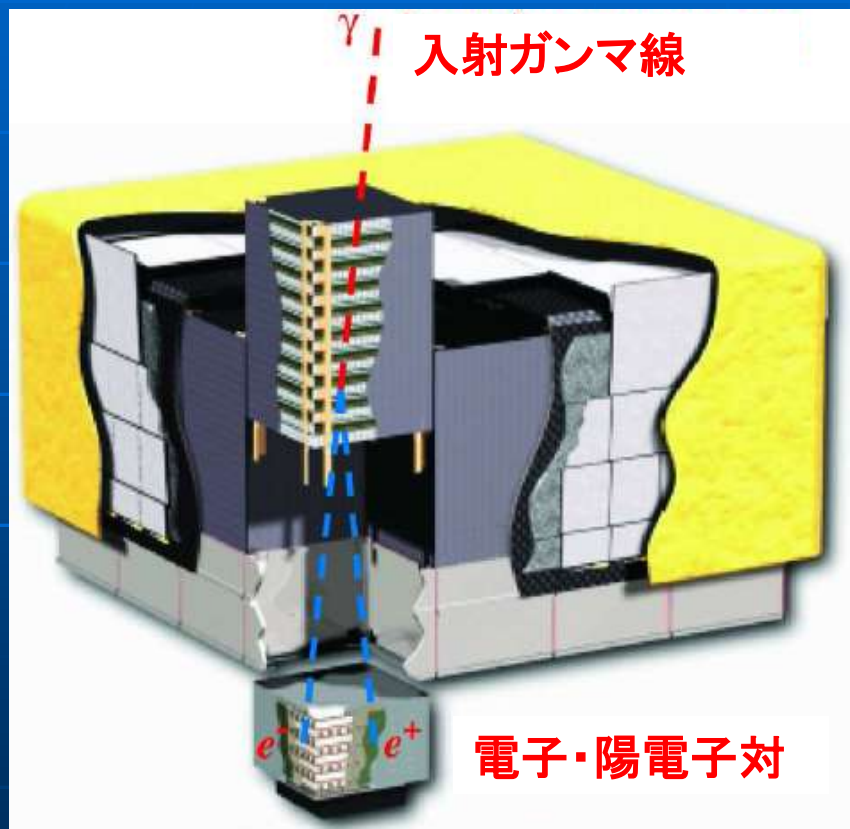


天体ガンマ線の検出方法



Fermiガンマ線宇宙望遠鏡

2008年6月打ち上げ

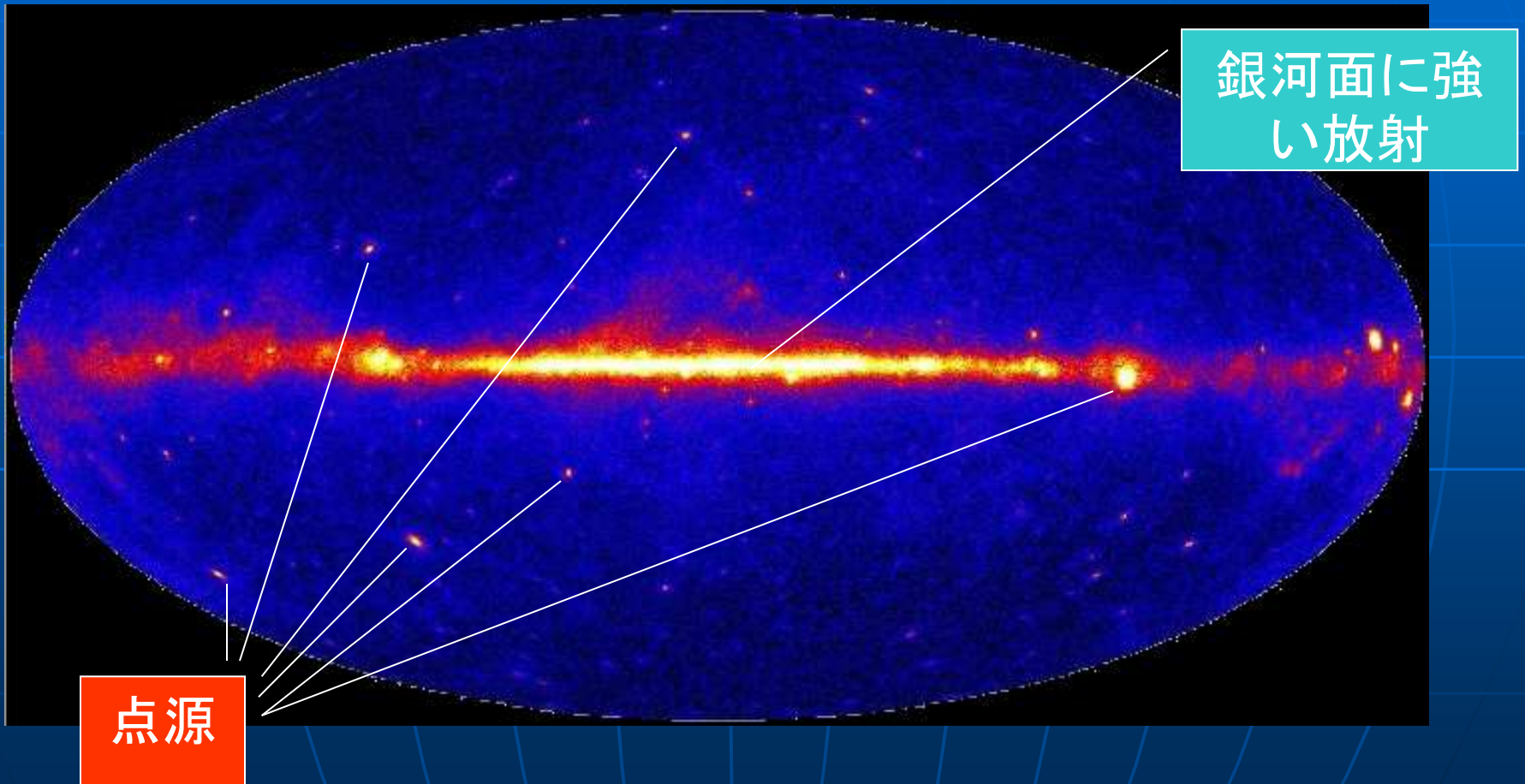


イベント例



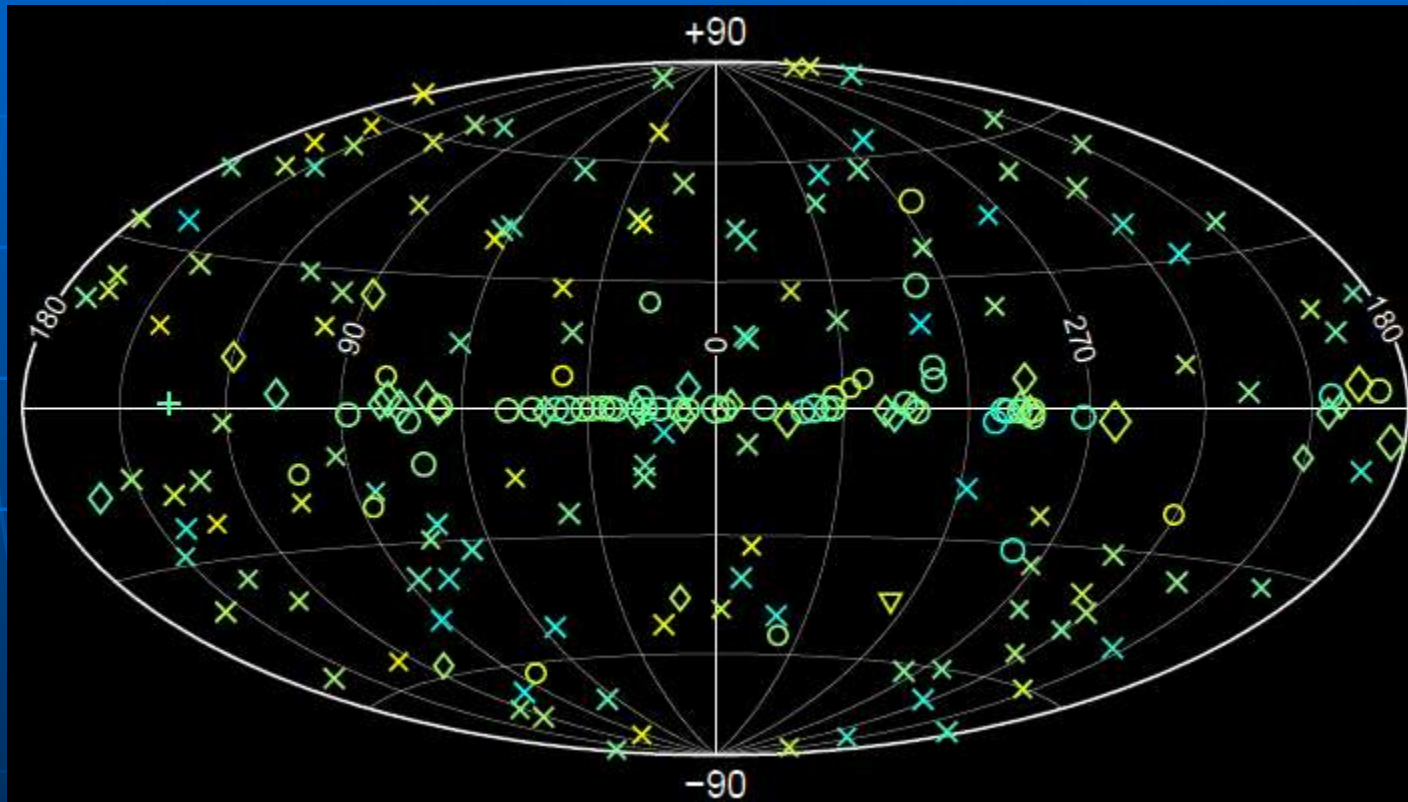
GeVガンマ線で見た宇宙(1)

Fermi宇宙ガンマ線衛星First Lightデータ



GeVガンマ線で見た宇宙(2)

Fermi衛星による明るいガンマ線天体リスト(2009年2月)



○ Unassociated	× AGN	◇ Pulsar
+ X-ray binary	▽ Globular cluster	

205個

Fermiガンマ線点源のまとめ

種別	例数
既知のパルサー	15
新発見のパルサー	14
大質量X線連星	2
活動銀河核:ブレーザー	46
活動銀河核:FSRQ	62
活動銀河核:その他	11
電波銀河	2
球状星団	1
大マゼラン雲	1
超新星残骸・パルサー星雲?	13
対応天体が見つからないもの	38

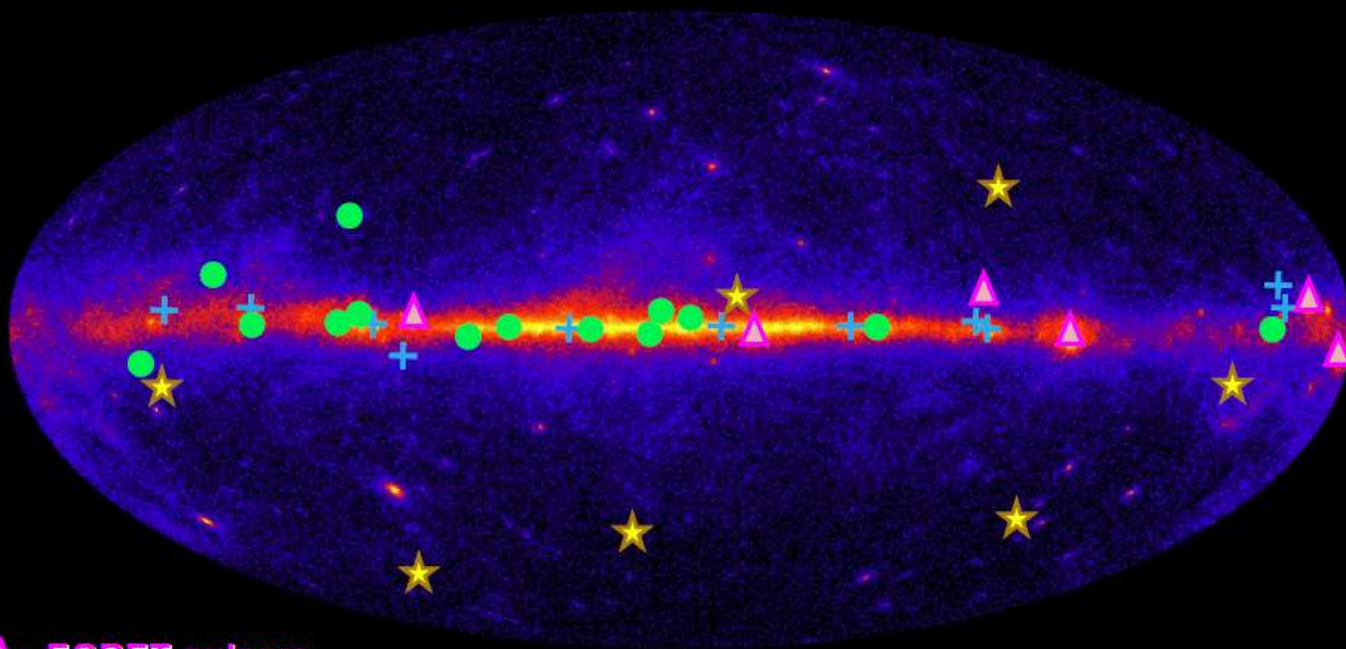
Fermiによるパルサーの検出

FERMI - LAT

Fermi Pulsars

25 gamma-ray and radio pulsars (including 7 ms psrs)

13 gamma-ray only pulsars



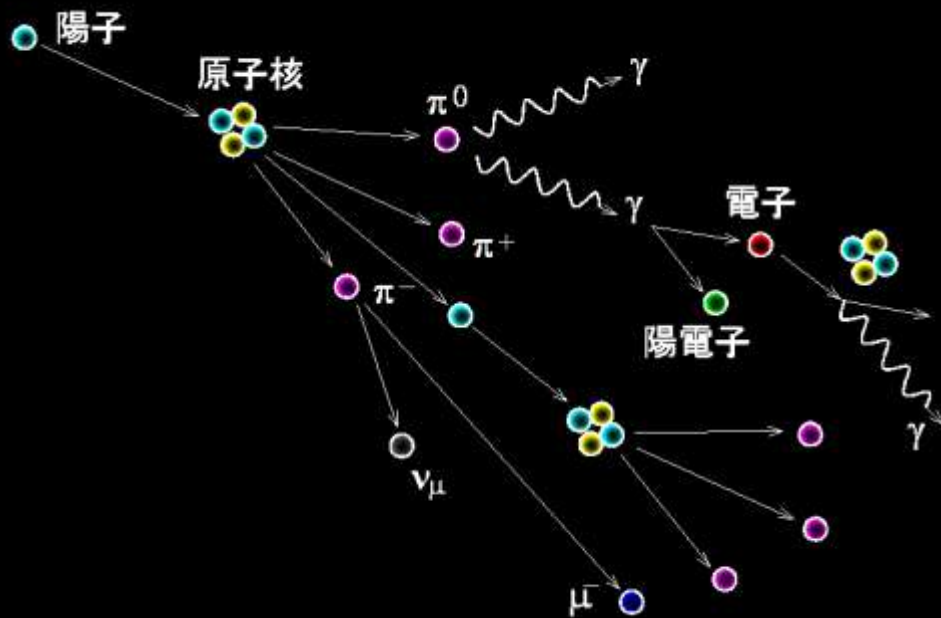
▲ EGRET pulsars

+ young pulsars discovered using radio ephemeris

● pulsars discovered in blind search

★ millisecond pulsars discovered using radio ephemeris

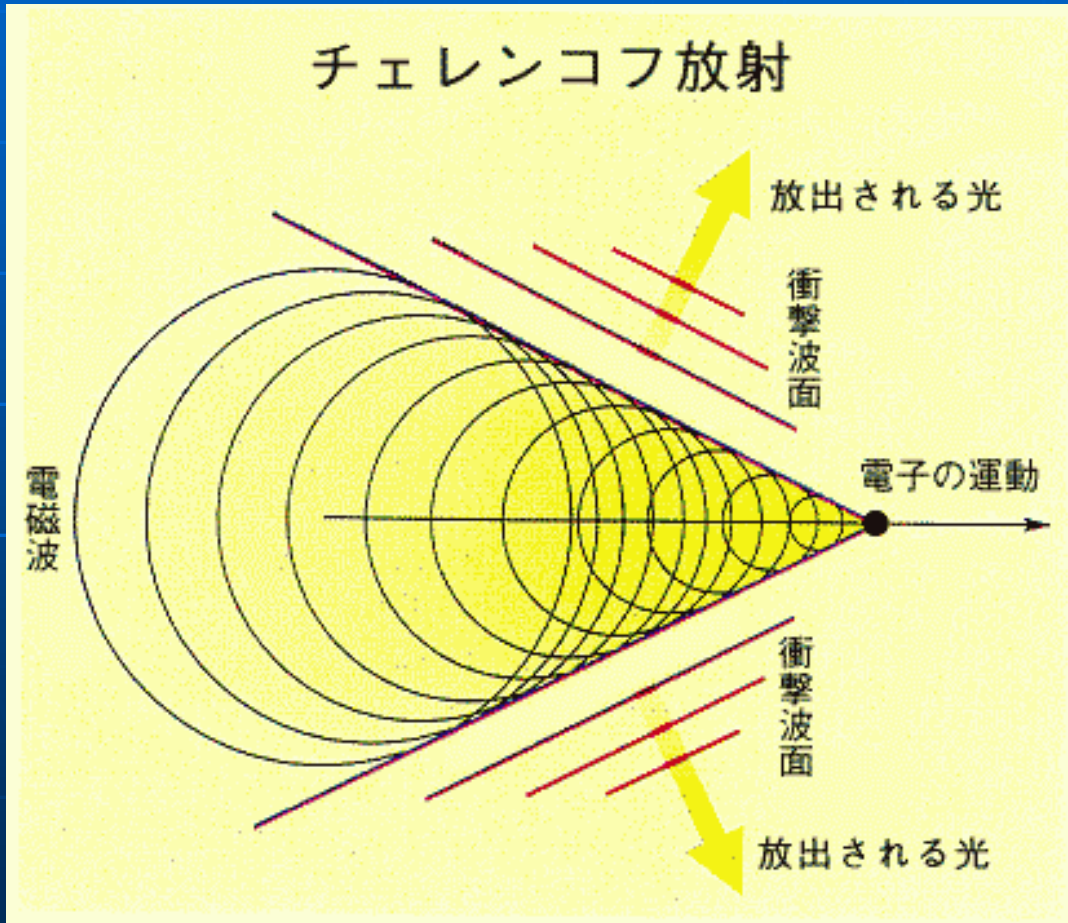
空気シャワー現象



高エネルギー宇宙線が地球大気に入射すると、原子核との衝突により二次粒子を放出する。さらにこれらが衝突を繰り返し、また中性パイ粒子がガンマ線に崩壊し、電磁シャワーを起こす。



チェレンコフ光



- 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

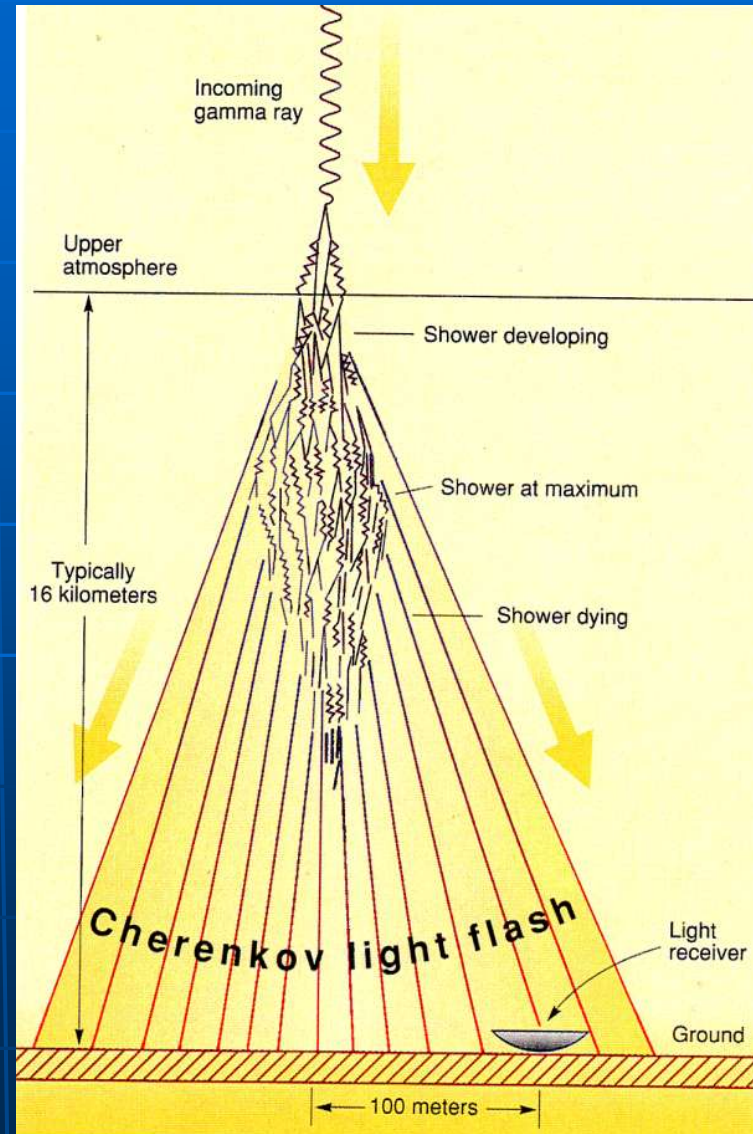
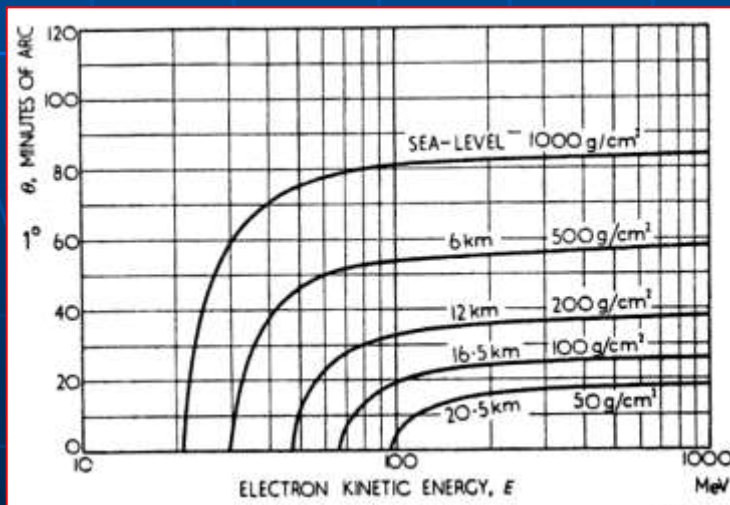
■ チェレンコフ角

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

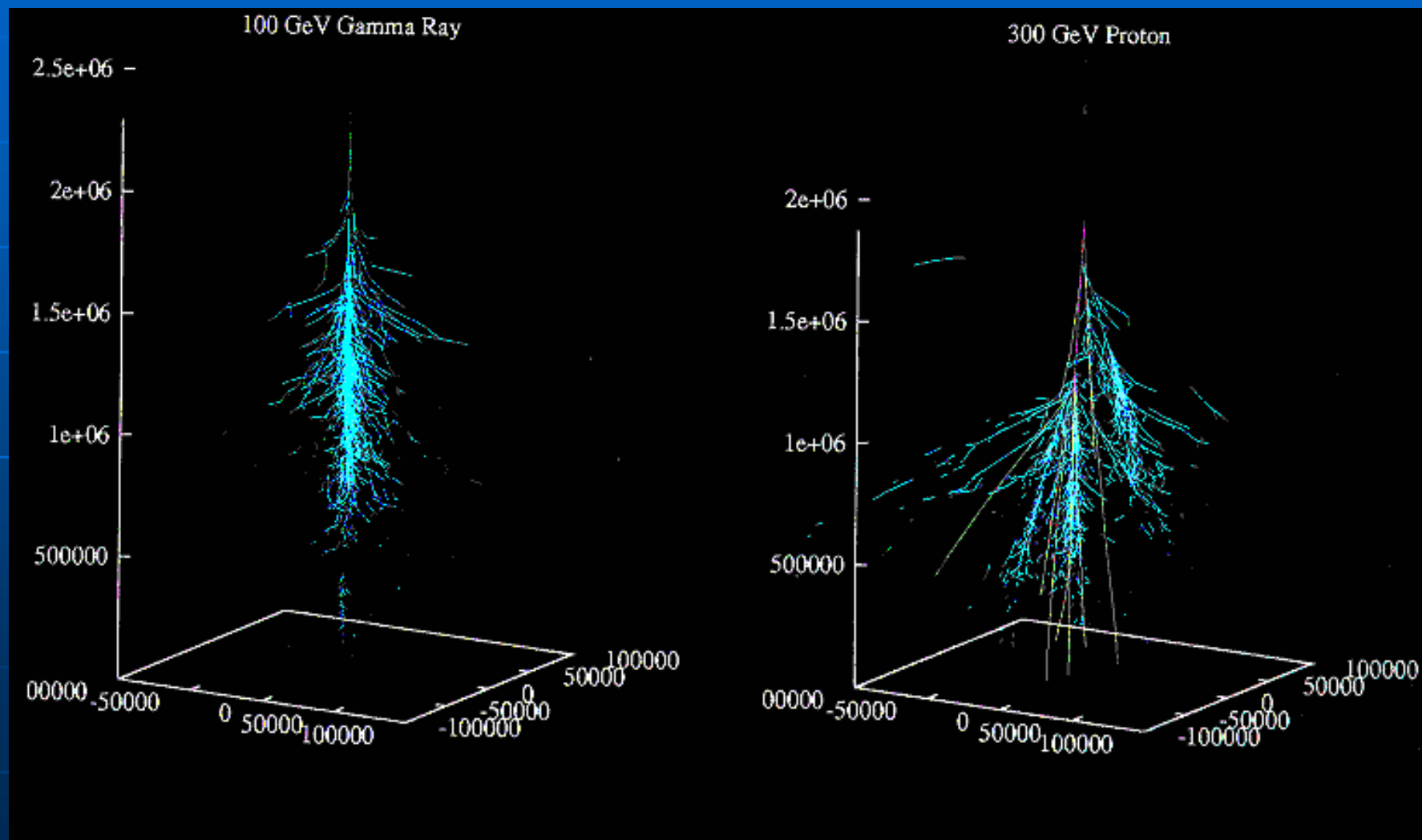
$$\beta = v/c$$

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

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

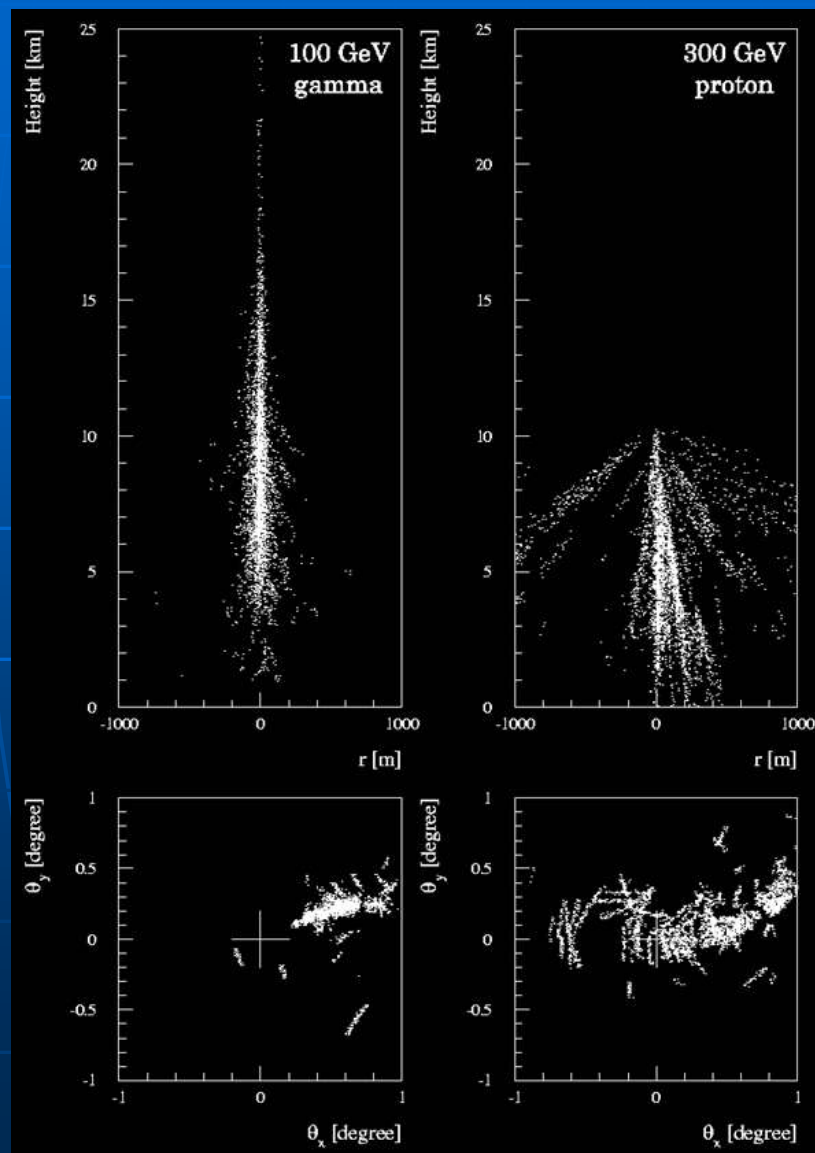


宇宙線シャワーとの識別(1)



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

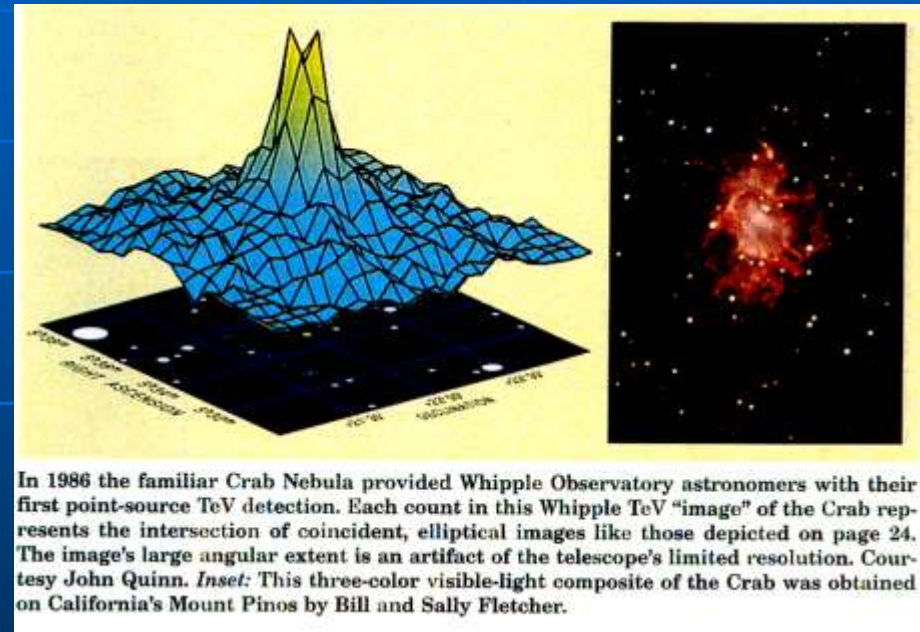


陽子：
核シャワー
⇒ 拡散したイメージ

最初のTeVガンマ線源：かに星雲



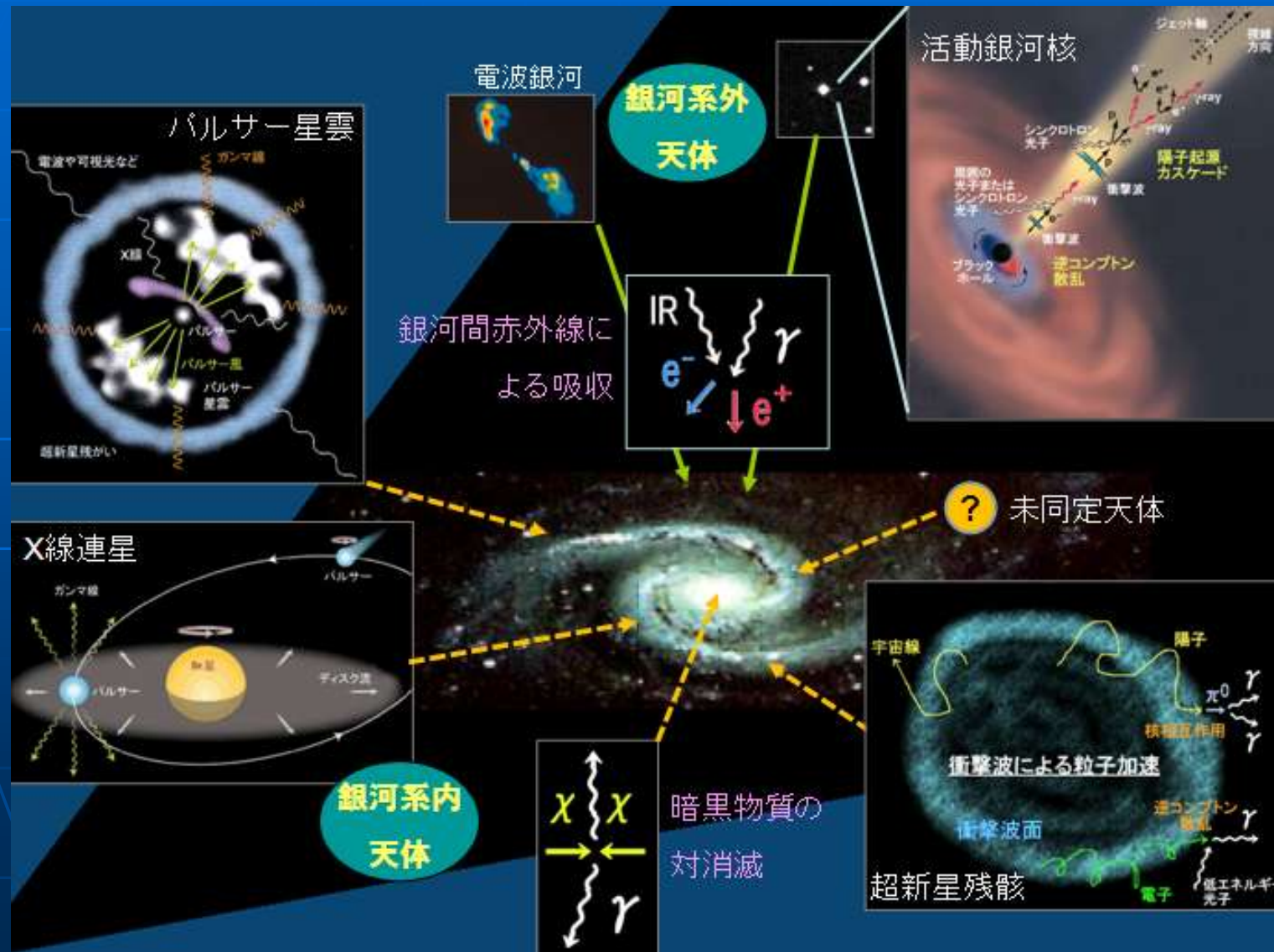
Whipple 10m telescope
(Arizona, USA)



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.

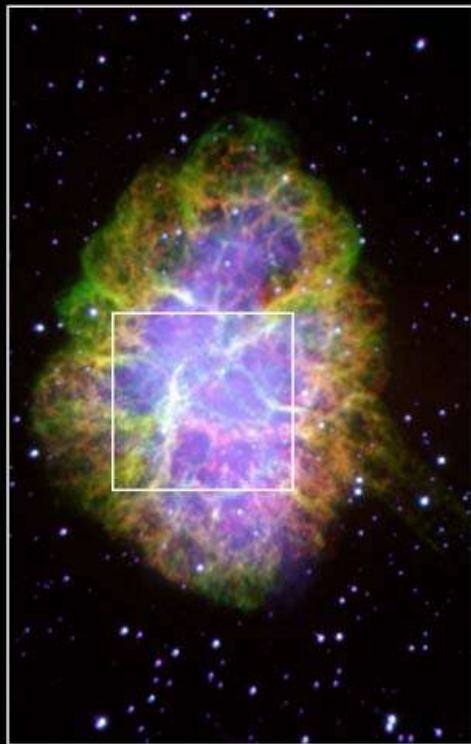
Weekes et al. ApJ 1989

高エネルギーガンマ線天体



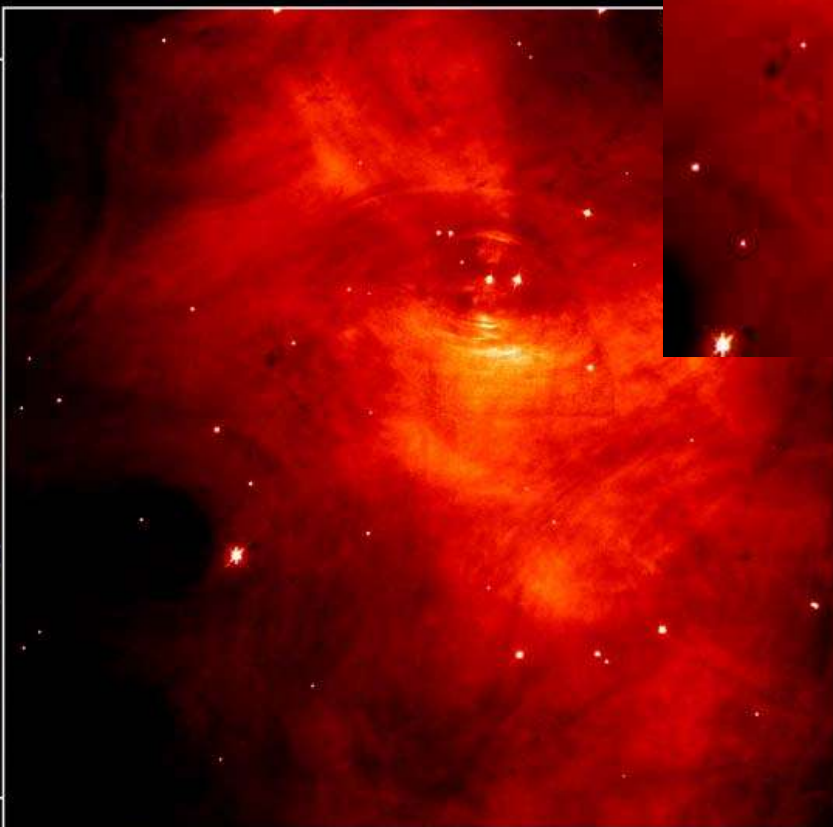
パルサー星雲の例

Crab Nebula

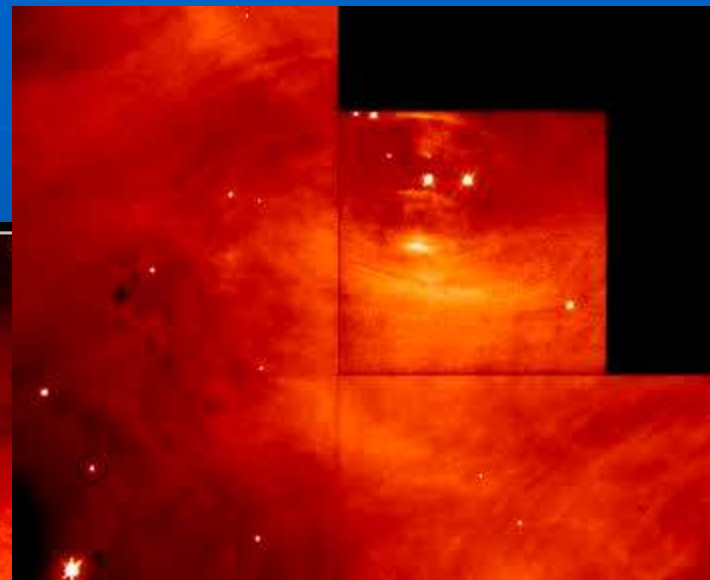


Palomar

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

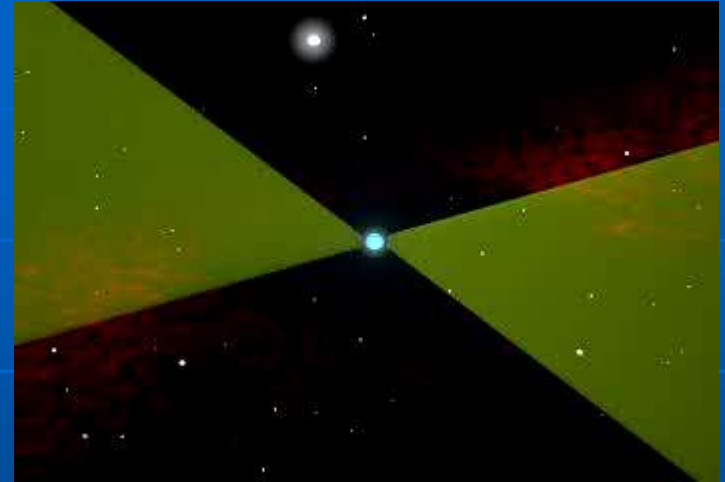


HST · WFPC2

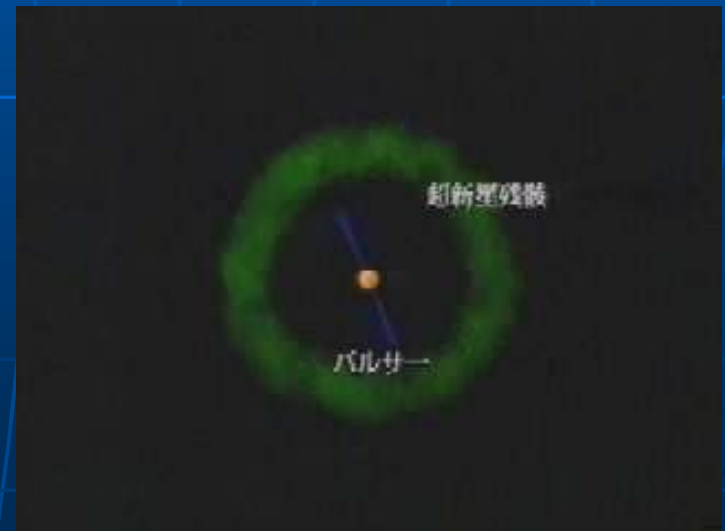


パルサー星雲

- パルサー: 磁場を持った高速回転中性子星
...「発電機」
- パルサーから粒子の
「風」が吹き出し、周囲
の物質と衝突してガン
マ線を放出

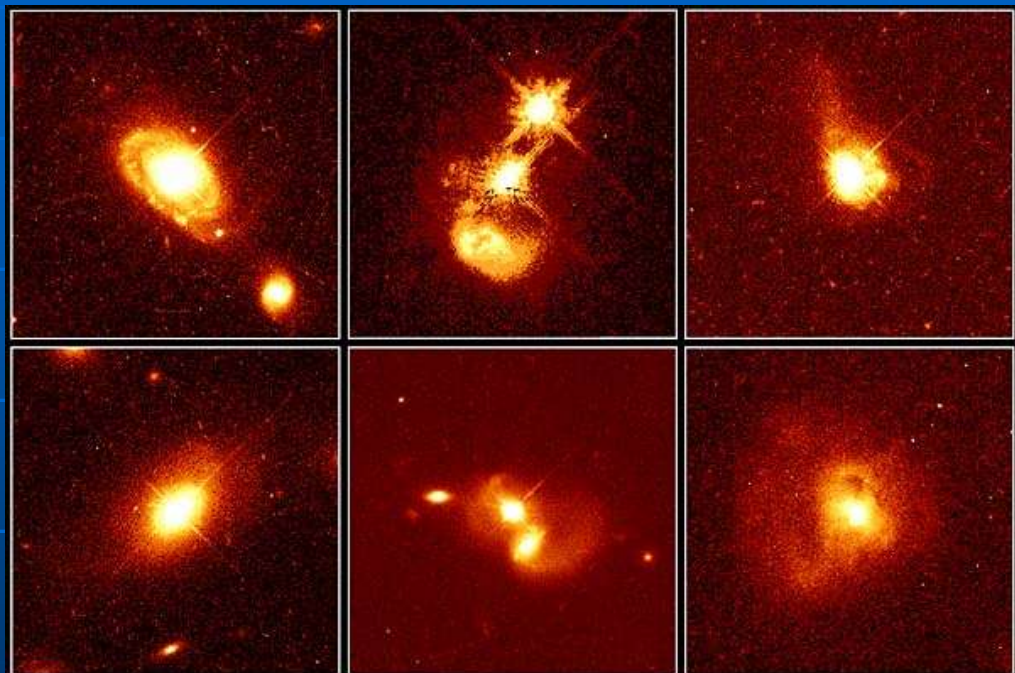


©NASA



©NHK

活動銀河核の例



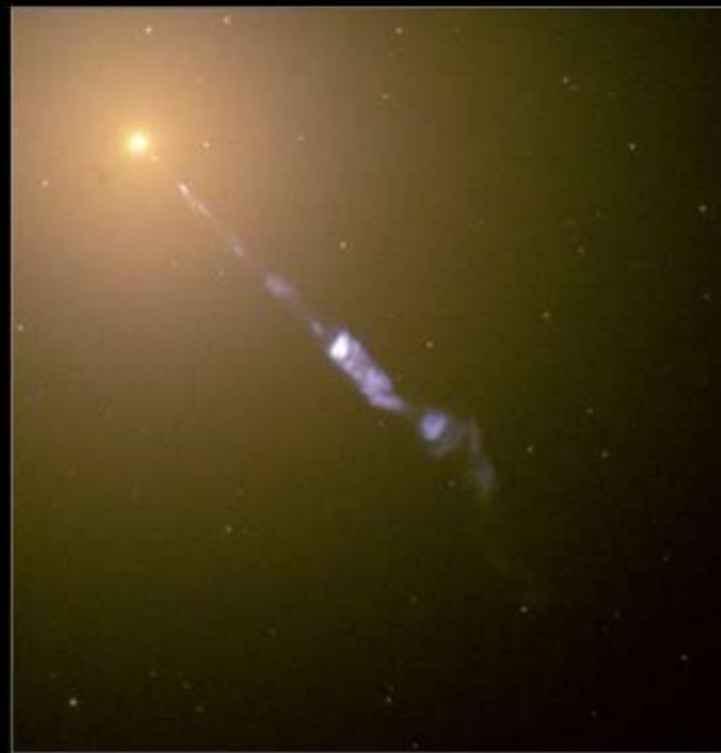
Quasar Host Galaxies

HST • WFPC2

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

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

The M87 Jet



Hubble
Heritage

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

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



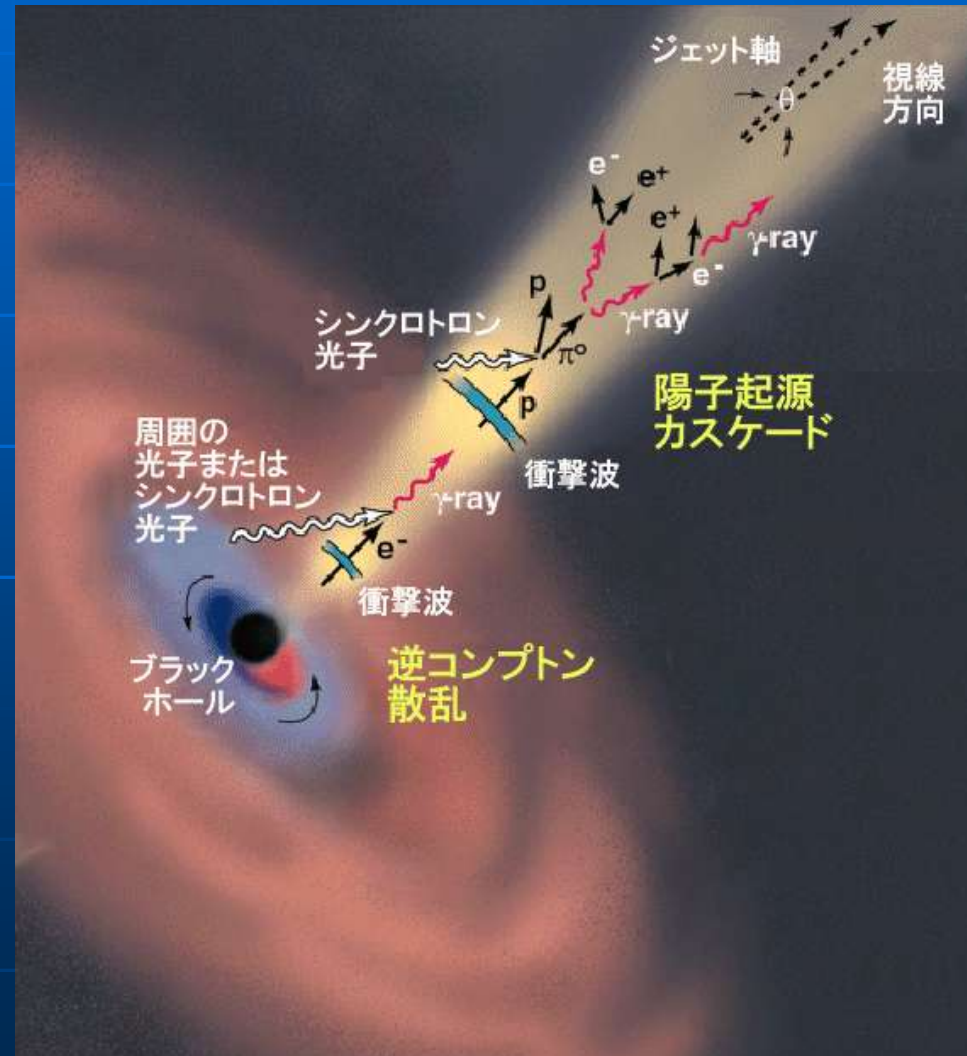
©NASA

ブレーザー



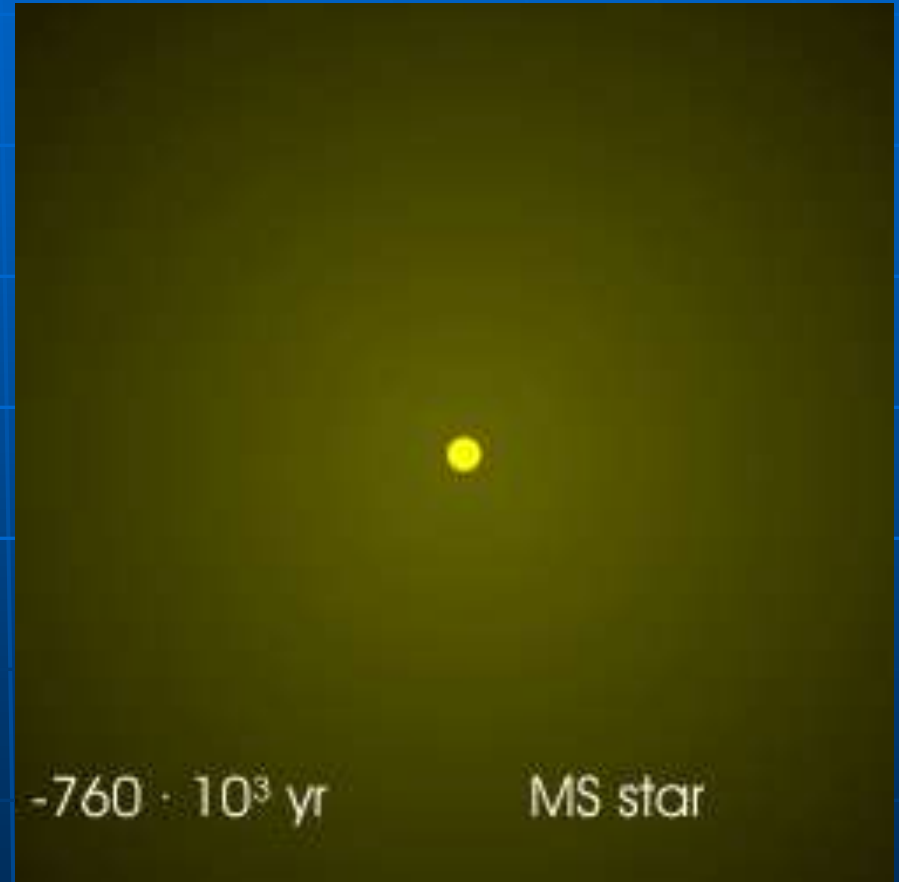
Mrk501 (光学画像)

- 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。

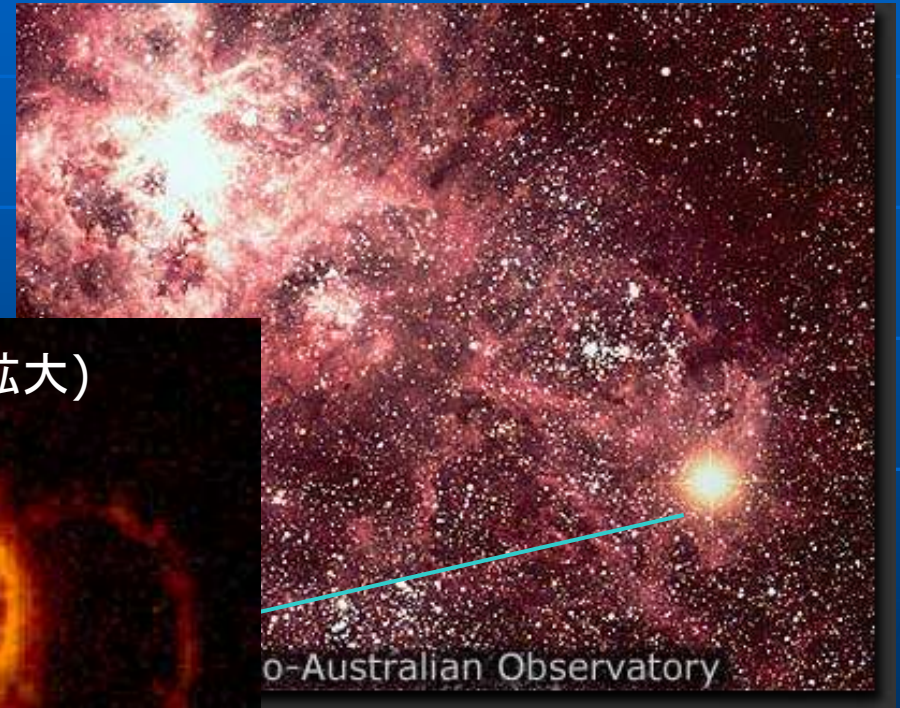


超新星の例:SN1987A

1987年2月23日 ニュートリノバーストの検出

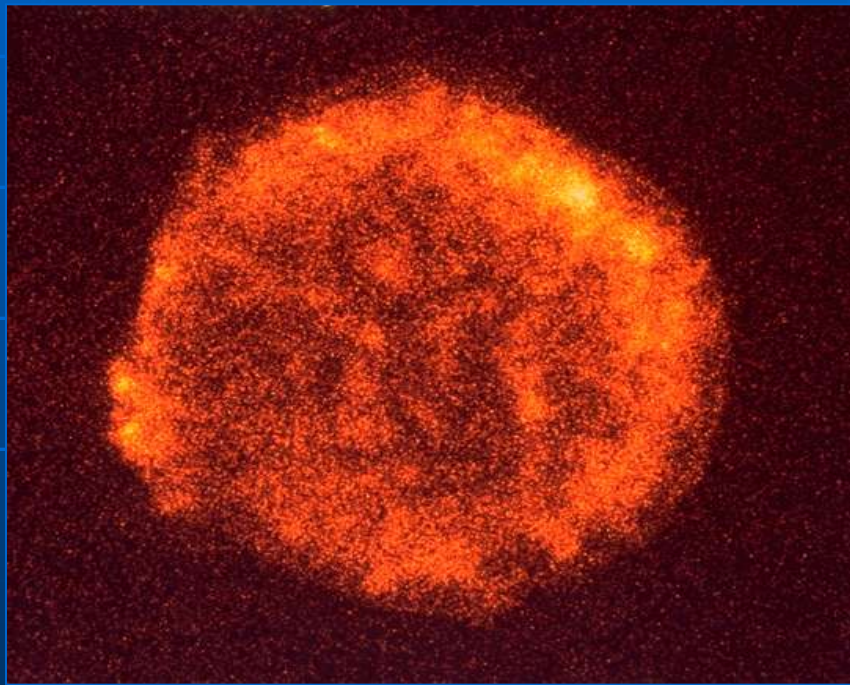


爆発前

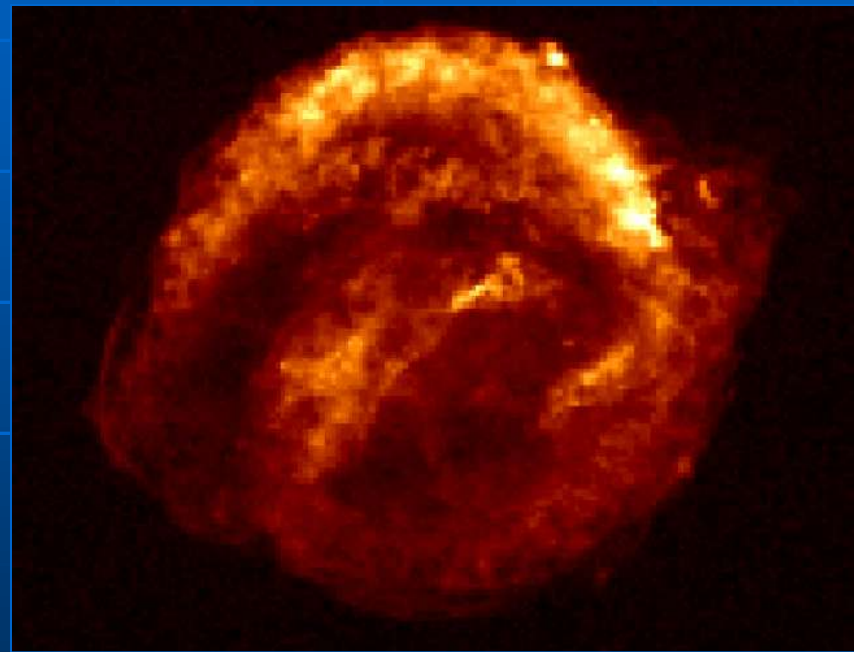


爆発後

超新星残骸の例



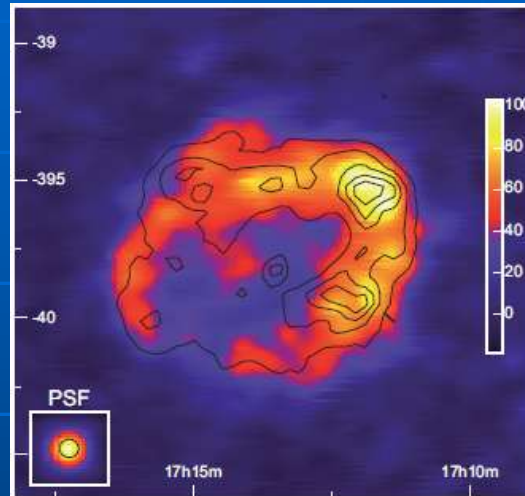
ティコの超新星(1572)



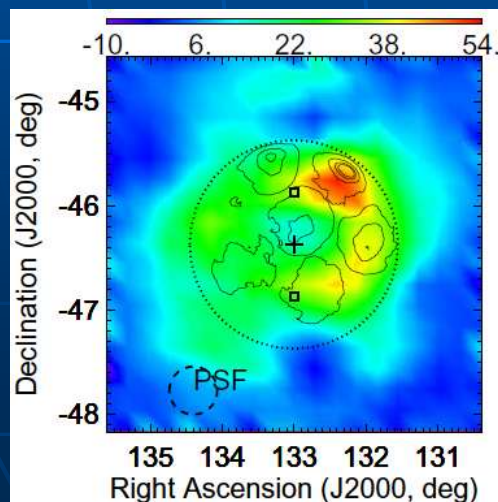
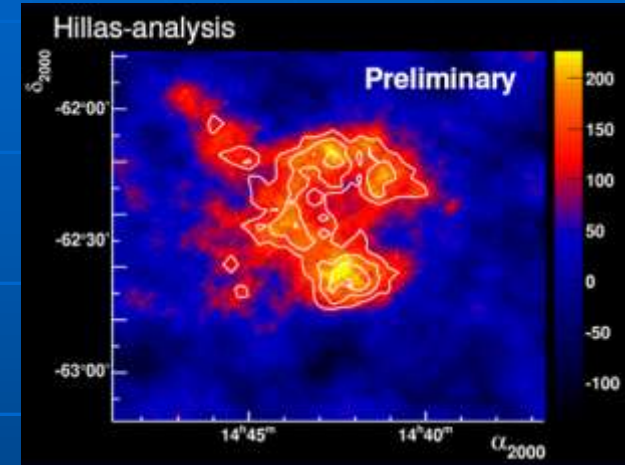
ケプラーの超新星(1604)

TeVガンマ線で見た超新星残骸

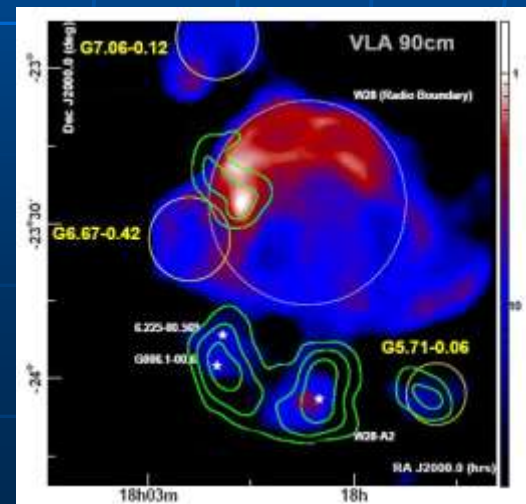
RXJ 1713.7-
3946
[H.E.S.S.,
Aharonian et
al. 2006]



RCW86
[H.E.S.S.,
ICRC200
7]



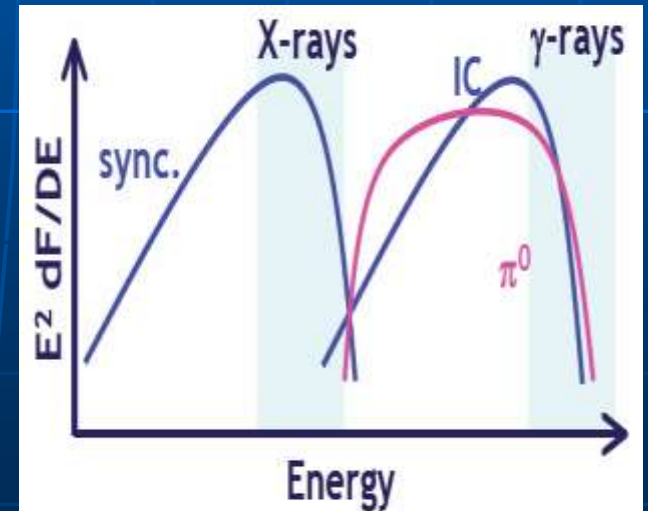
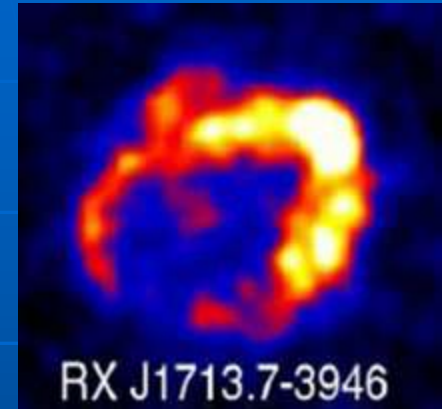
RXJ 0852-
04622
[CANGAROO-III,
Enomoto et al.
2006]



W28
[H.E.S.S.,
ICRC200
7]

超新星残骸と宇宙線

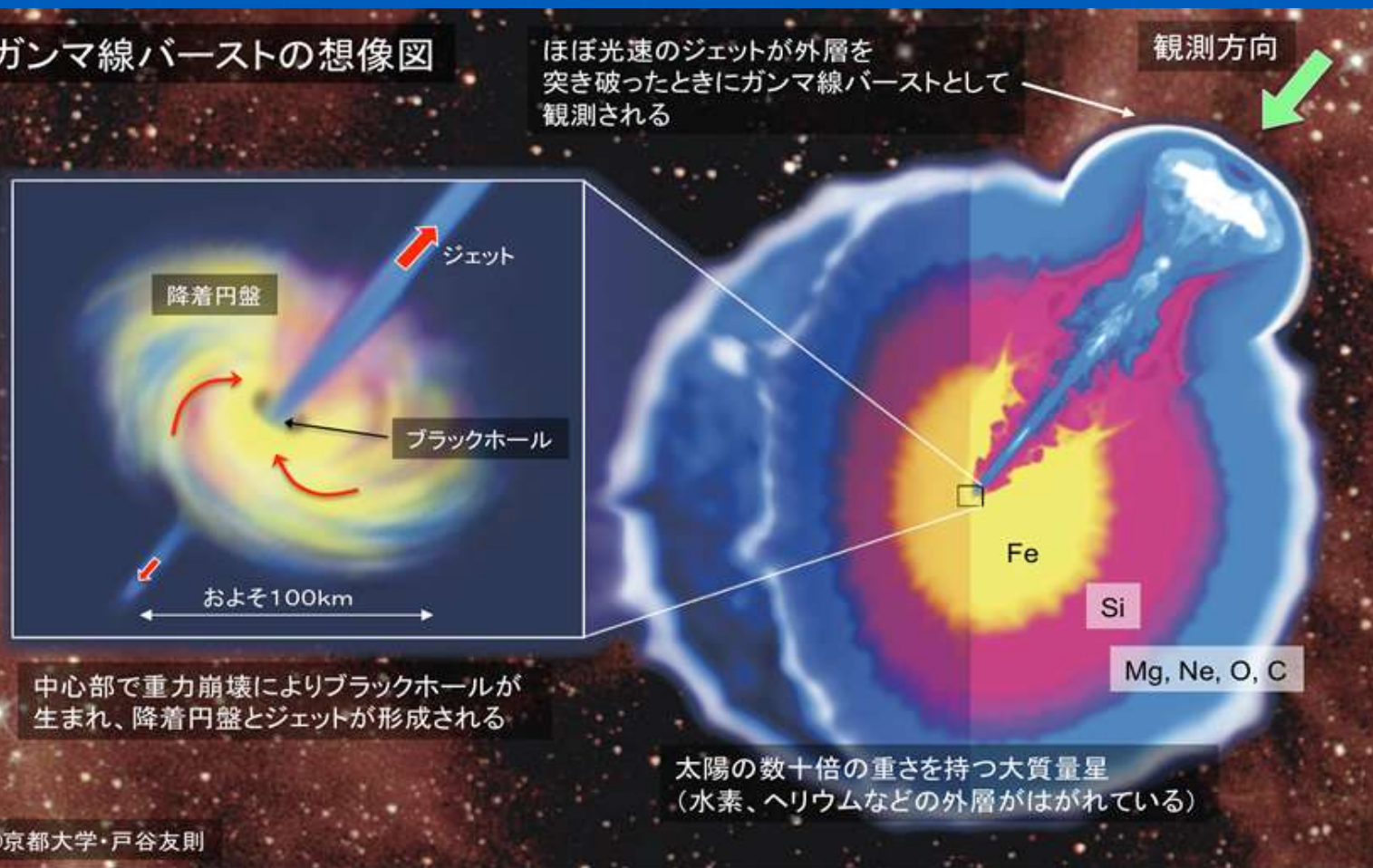
- 宇宙線のエネルギー収支を考えて、超新星残骸は宇宙線の起源天体の候補として古くから有力視されてきた。
- GeV/TeVガンマ線ではいくつかの超新星残骸が検出されている。
- 超新星残骸の広域スペクトルからは、加速されている粒子が陽子(→宇宙線)か電子かは決着がついていない。



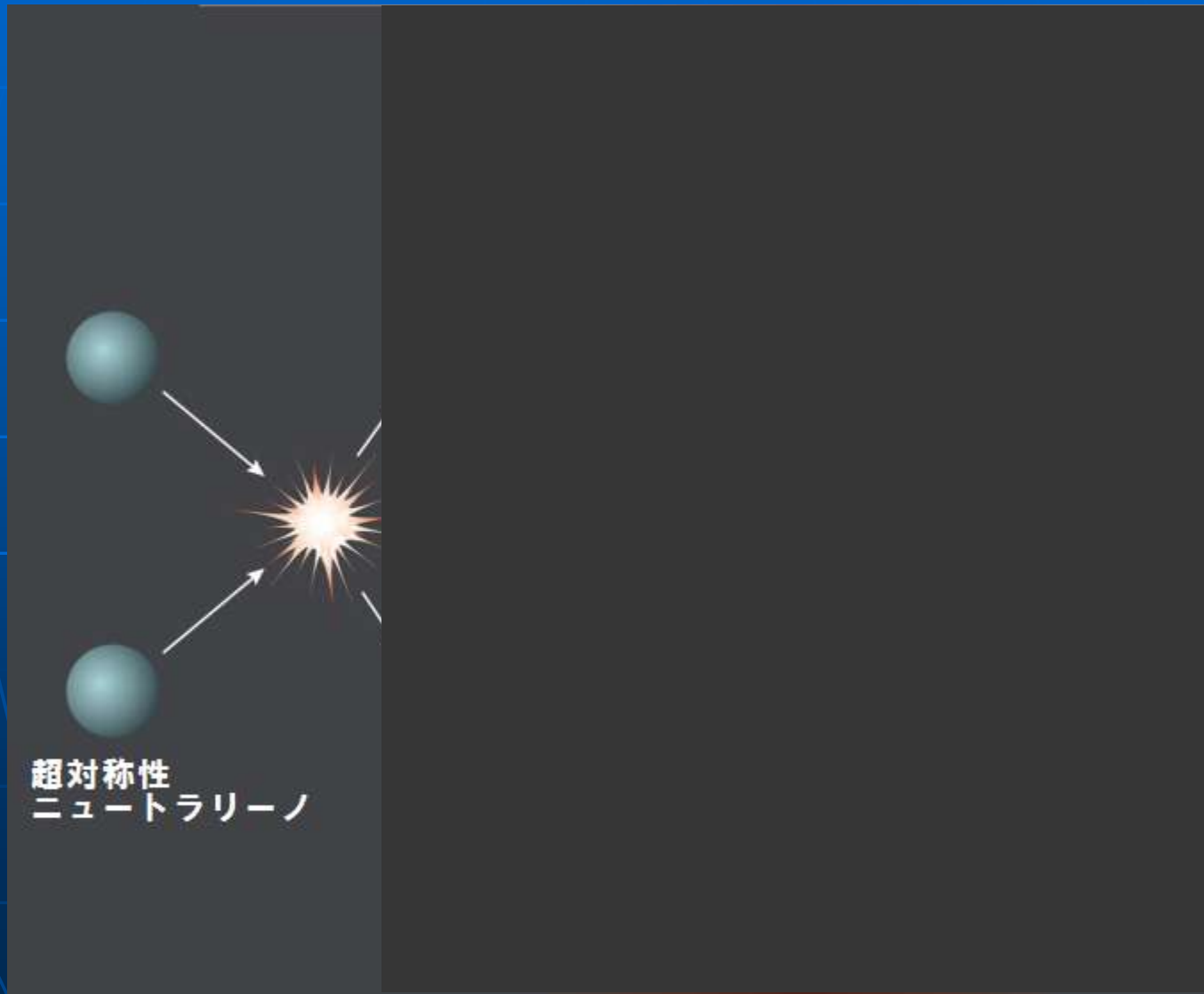
ガンマ線バースト

一日に一回程度の頻度で、数秒から数十秒程度の間、空のある方向が突然ガンマ線で明るく輝く現象。宇宙最大の爆発とも言われる巨大で激しい爆発現象で、はる宇宙論的な遠方で起こっている。

ガンマ線バーストの想像図



暗黒物質の対消滅



“CANGAROO”

=

Collaboration of **A**ustralia and **N**ippon for a
Gamma **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-III



2,3,4号機の解像型カメラ



T2

Dec. 2002

観測開始

T4

Mar. 2004

観測開始

T3

Sep. 2003

観測開始

T1

2000年より

稼動中

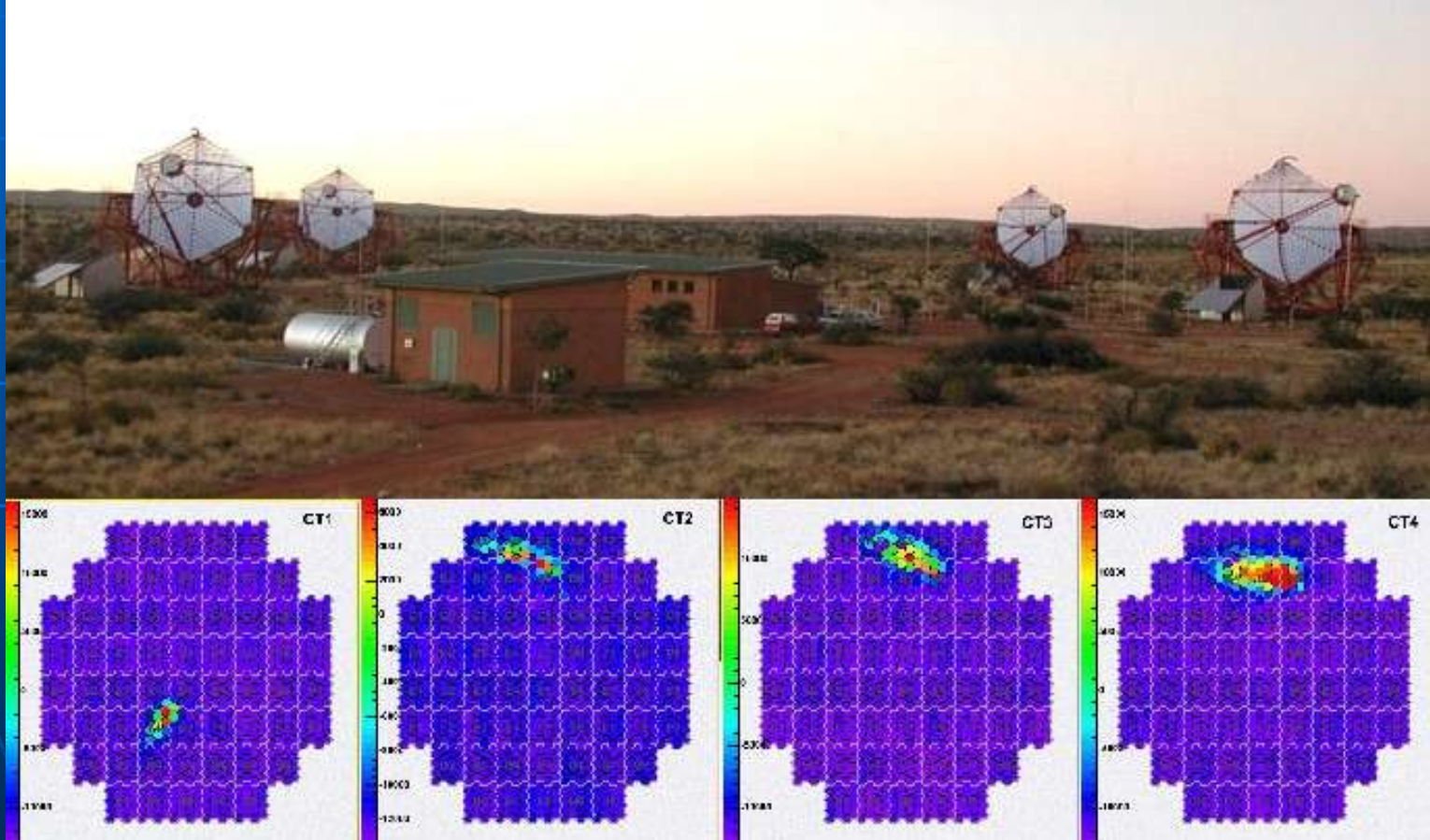
日豪 10m望遠鏡4台
オーストラリア・ウーメラ

世界で稼働中のチェレンコフ望遠鏡



H.E.S.S.

Dec. 10: All four H.E.S.S. telescopes operational !



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2台

カナリア諸島

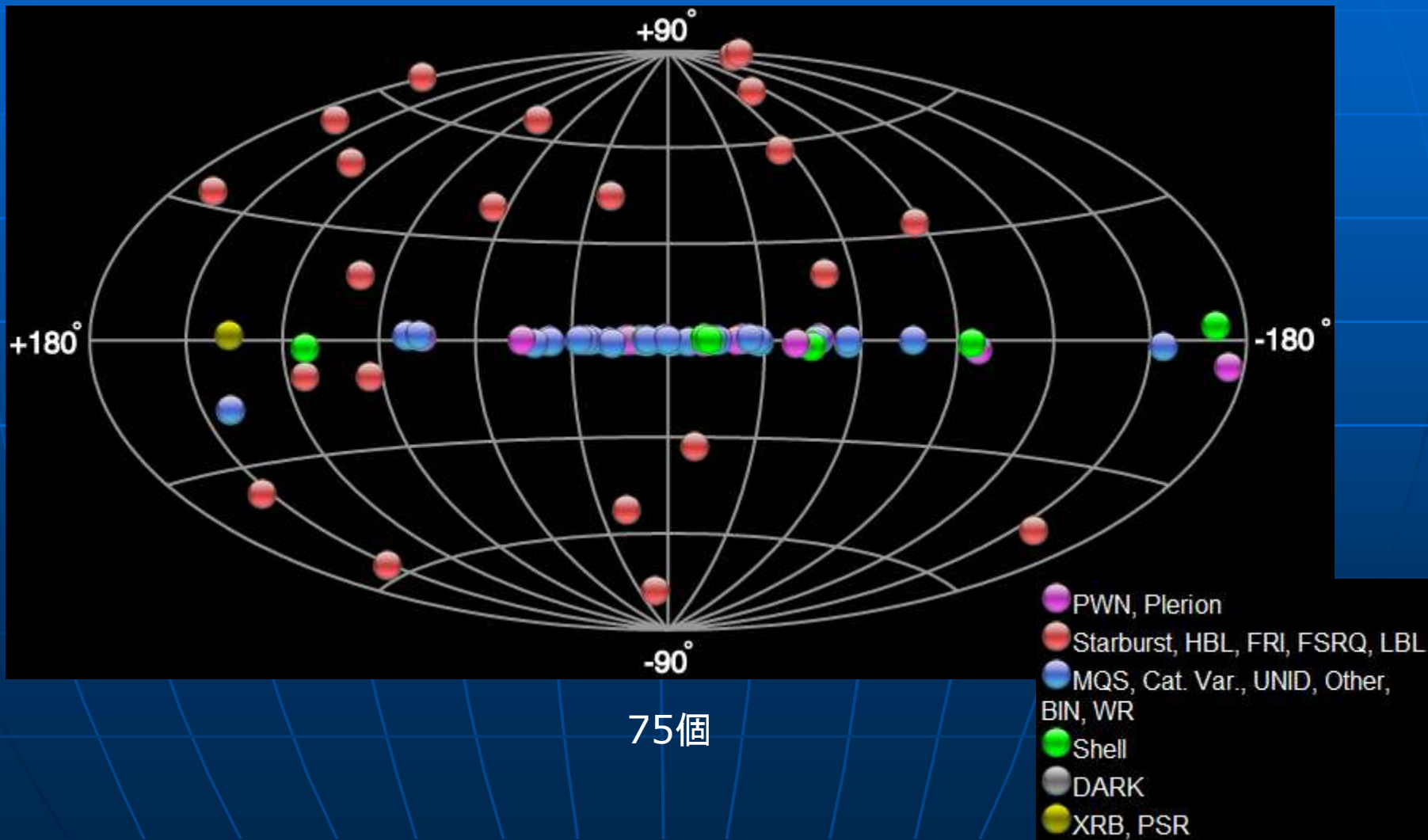
VERITAS



USA・スミソニアン天文台ほか 12m望遠鏡4台
アリゾナ・ホプキンス山

TeVガンマ線天体地図2009

<http://tevcat.uchicago.edu/>

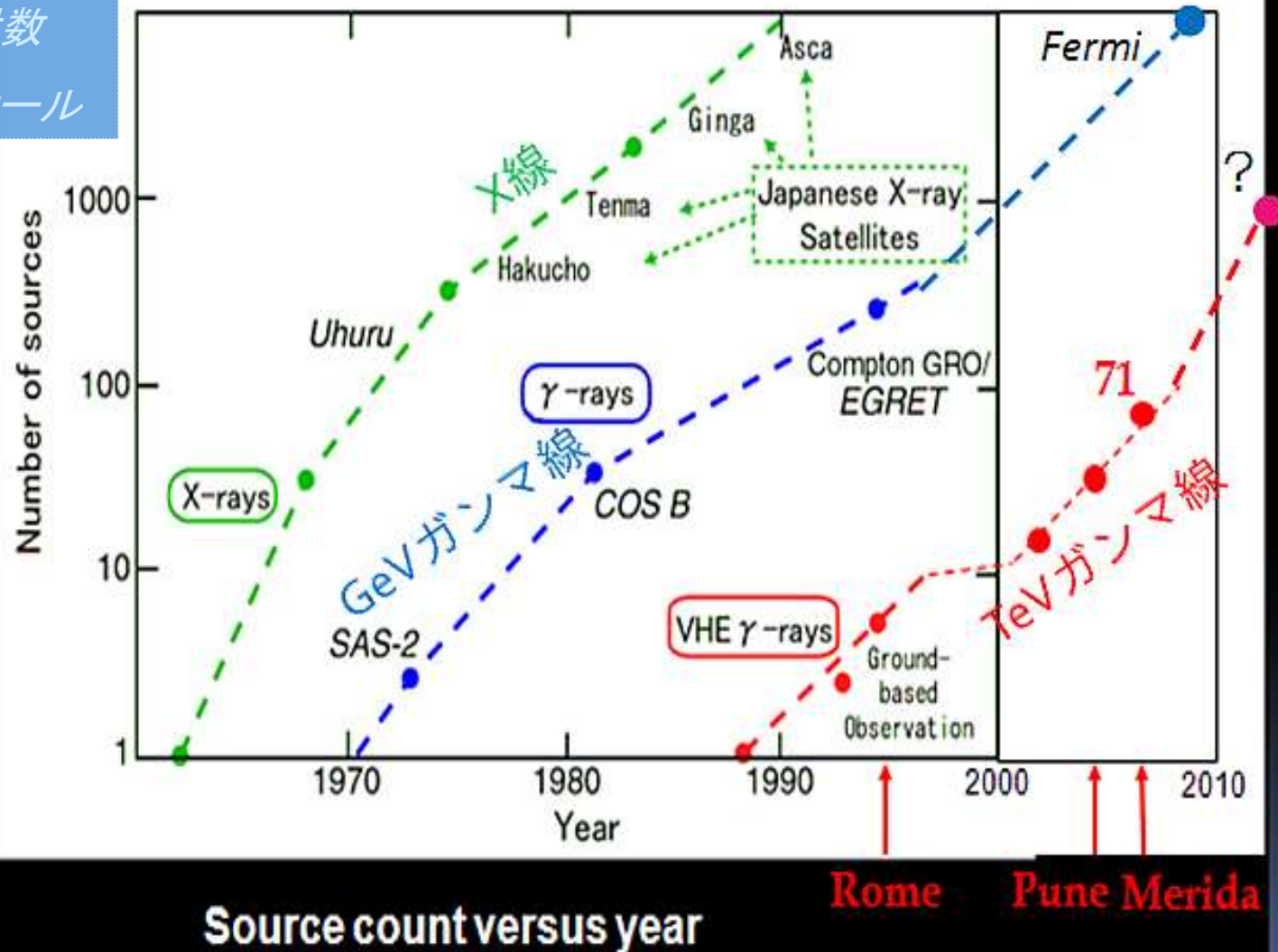


天体数の年次増加

"Kifune plot"

©Rene Ong 2002

対数
スケール



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天体高エネルギー現象の研究に最適な探針。
- GeVガンマ線天文学は1990年代から急速に進展し、Fermiの登場でさらに発展が期待される。
- TeVガンマ線天文学は1980年代末になって登場したが、急速に発展している。
- 長年の謎である宇宙線の起源問題には大きな進展が見られたが、本質的な理解はまだまだこれから。