



# 高エネルギー宇宙線

東京大学宇宙線研究所

森 正樹

日本天文学会平成17年春季年会

「世界物理年特別企画 アインシュタイン100年:相対論と天文学」

2005年3月30日 明星大学理工学部

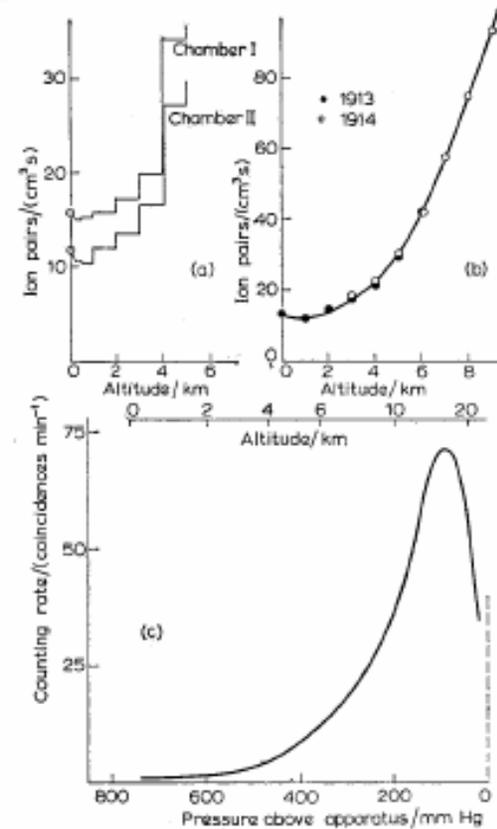
# Contents

- 宇宙線とは
- 最高エネルギー宇宙線
- TeVガンマ線
- Summary

# 宇宙線の発見：Victor Hess, 1912



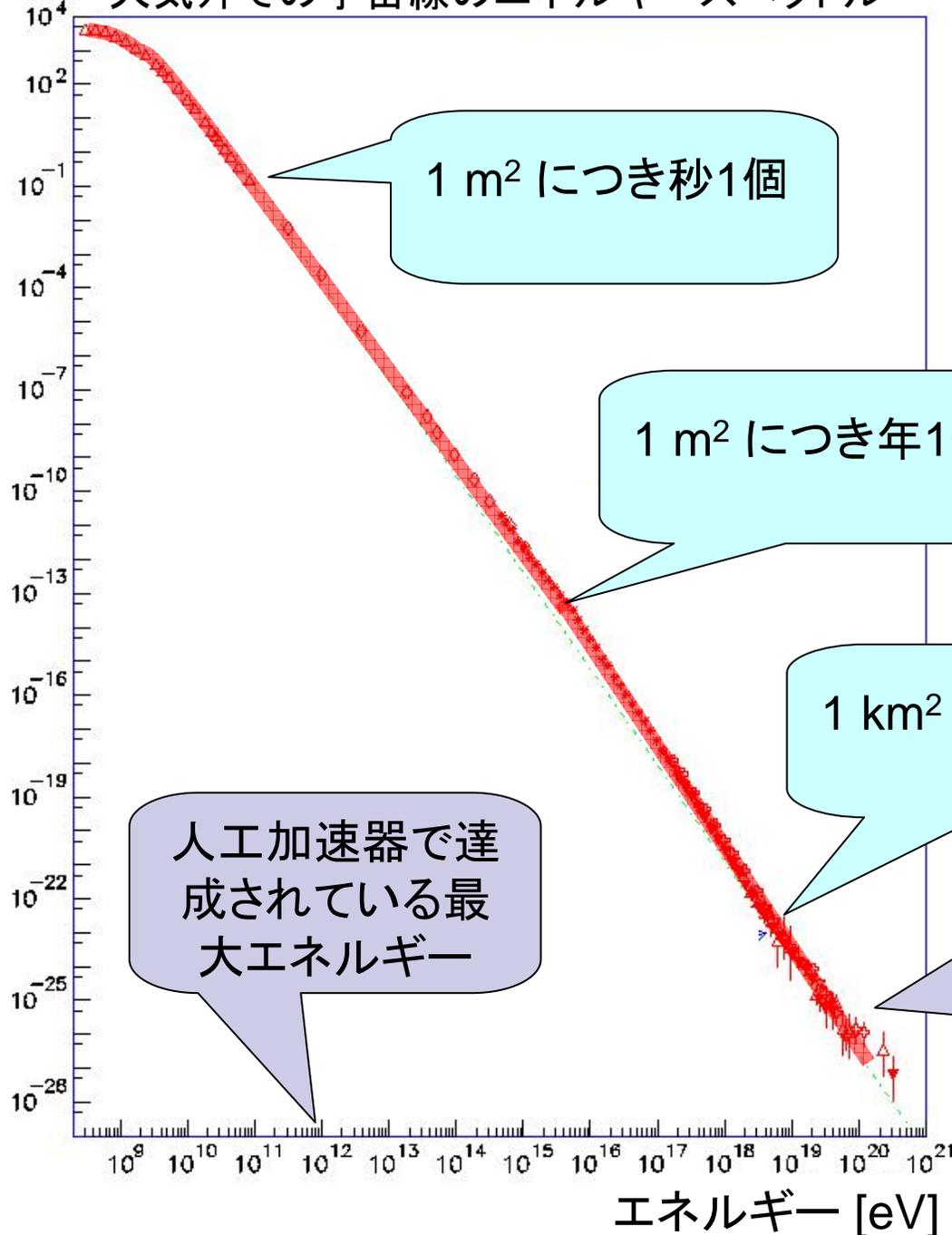
Hess bei Ballonlandung (1912).



(a) Altitude variation of ionization. (a) Balloon ascent by Hess (1912) carrying two ion chambers. (b) Ascents by Kolhörster (1913, 1914) using ion chambers. (c) Coincidence counter telescope flown by Pfitzer (1936).

# 大気外での宇宙線のエネルギースペクトル

粒子の流束



1 m<sup>2</sup> につき秒1個

1 m<sup>2</sup> につき年1個

1 km<sup>2</sup> につき年1個

人工加速器で達成されている最大エネルギー

# 宇宙線

- 主に陽子や原子核
- 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)
- べき乗型スペクトル ( $\propto E^{-\alpha}$ ,  $\alpha=2.7-3.0$ )

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。

# 宇宙線物理学の基本的問題

## ■ 素粒子相互作用

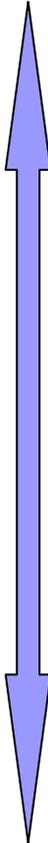
- 加速器を超える超高エネルギー素粒子の反応

## ■ 起源

- 宇宙線を加速している天体は何か？
  - エネルギー収支からは超新星が古くからの候補
- $10^{20}$ eVに至る非熱的べき乗スペクトルを生み出す加速機構は何か？
  - 衝撃波加速？ 重い素粒子の崩壊？

## ■ 伝播

- 宇宙線の拡散、銀河による閉じ込め
- 銀河内・銀河間空間の磁場・光子場との相互作用



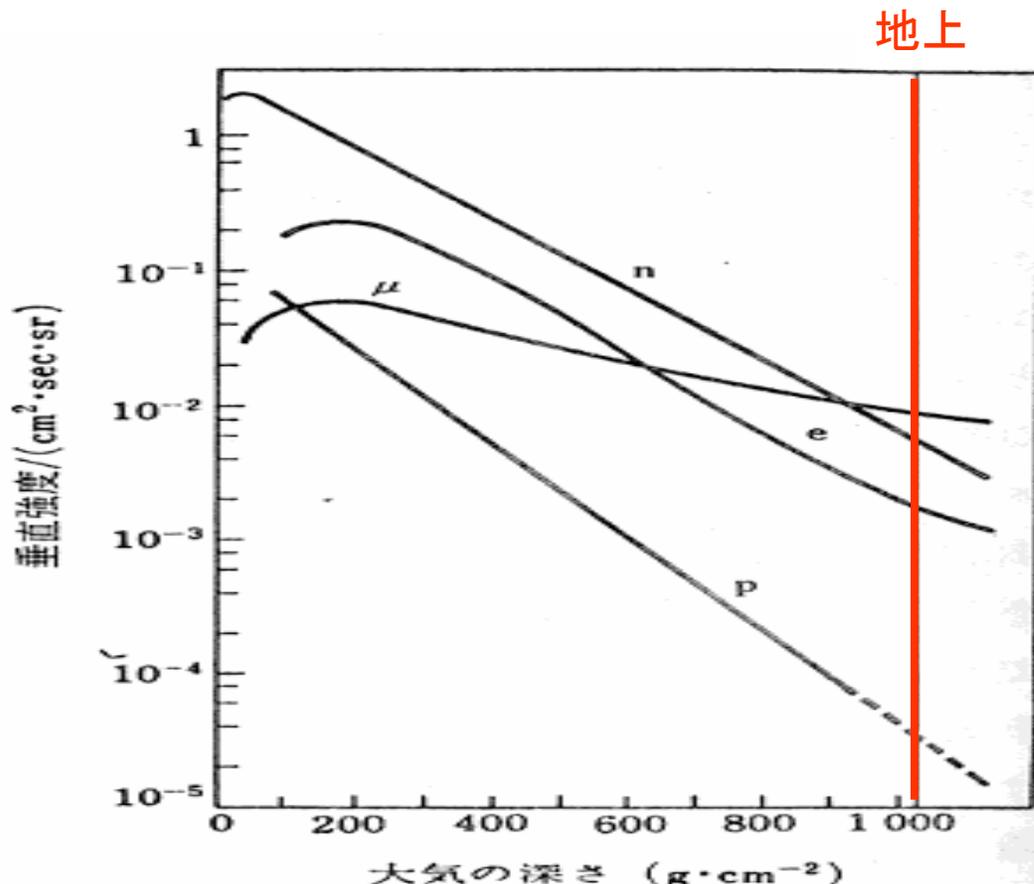
相互に関連のある「総合問題」

# ローレンツ変換

	宇宙線の大气との衝突	衝突型粒子加速器
粒子反応	$10^{20}\text{eV}$ 陽子 + 静止陽子	$10^{12}\text{eV}$ 陽子 + $10^{12}\text{eV}$ 陽子
ローレンツ因子	$10^{11}$	$10^3$
重心系エネルギー	$3 \times 10^{14}\text{eV}$	$2 \times 10^{12}\text{eV}$

- ・ 宇宙線現象の重心系エネルギーは人工加速器をまだ超えている
- ・ ローレンツ因子は大きく異なる

# 宇宙線強度の高度変化

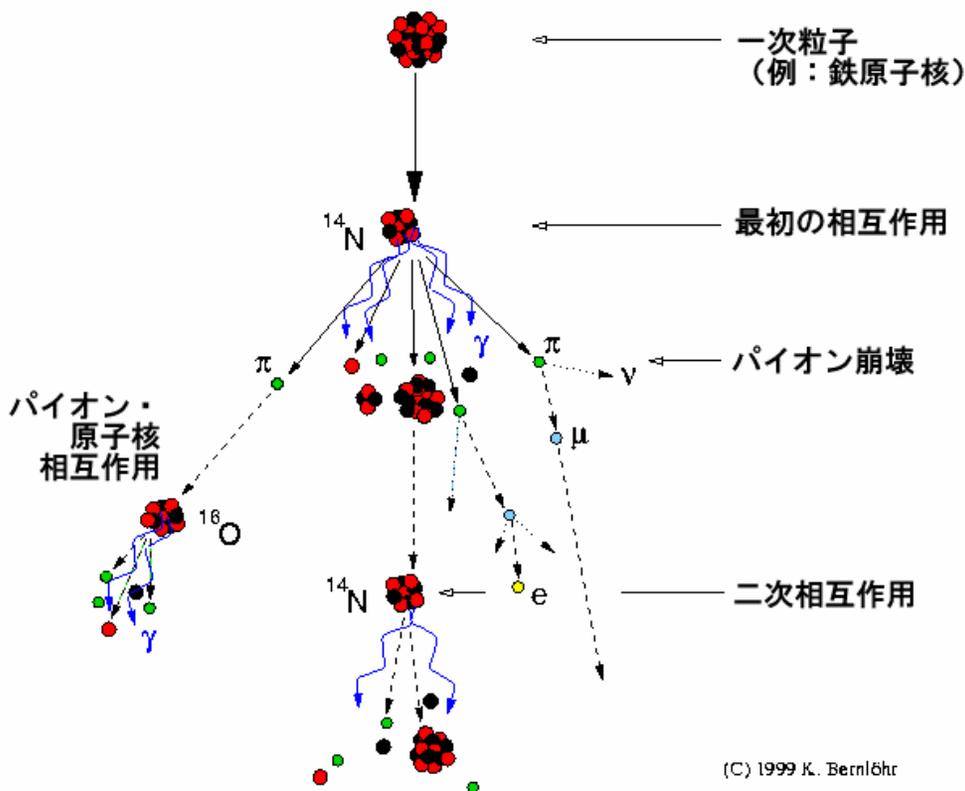


1030g/cm<sup>2</sup>の大気層のため、地上には高エネルギー宇宙線は直接到達できない！

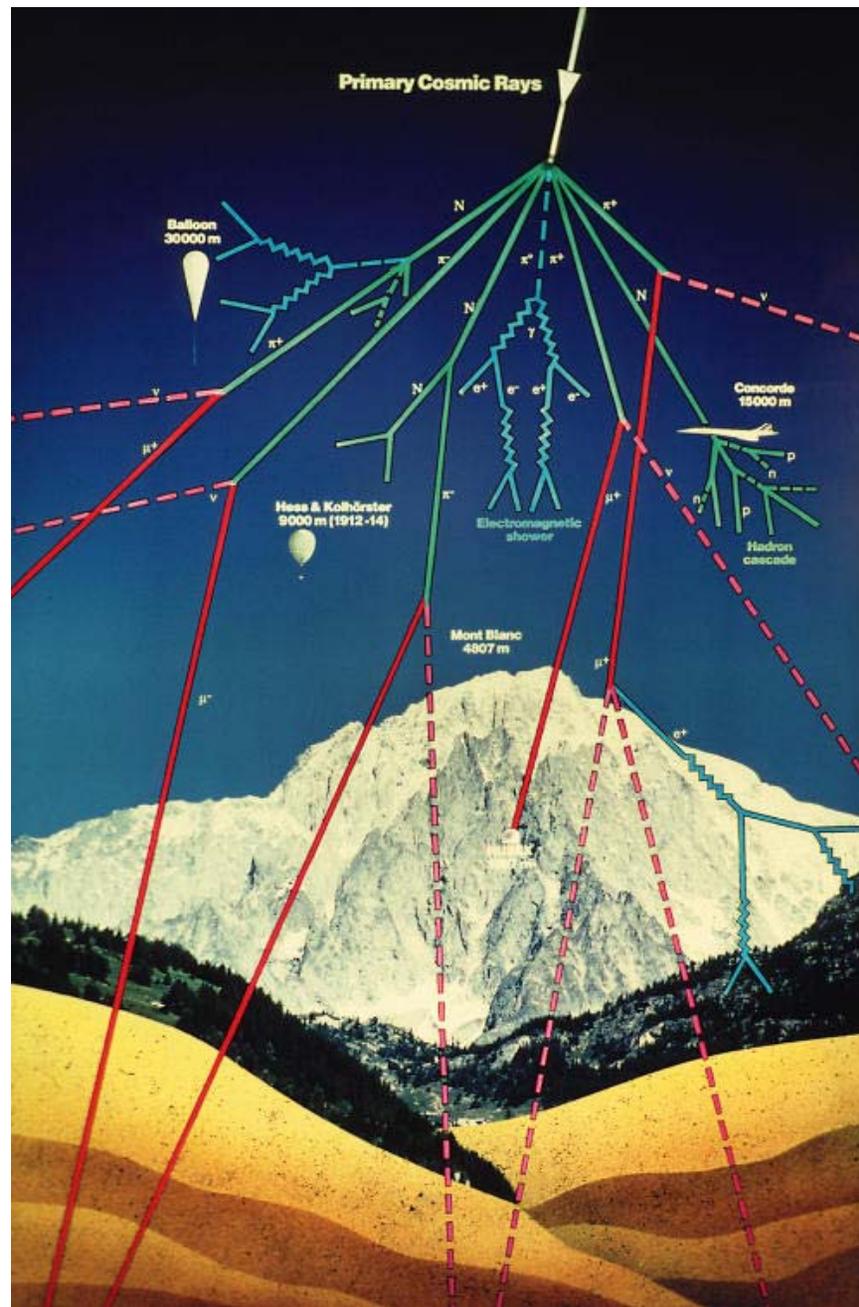
図 7.1.2 宇宙線諸成分強度の高度変化  
p: 陽子 (>400MeV),  $\mu$ :  $\mu$ 中間子,  
e: 電子 (>10MeV), n: 中性子

# 空気シャワー現象

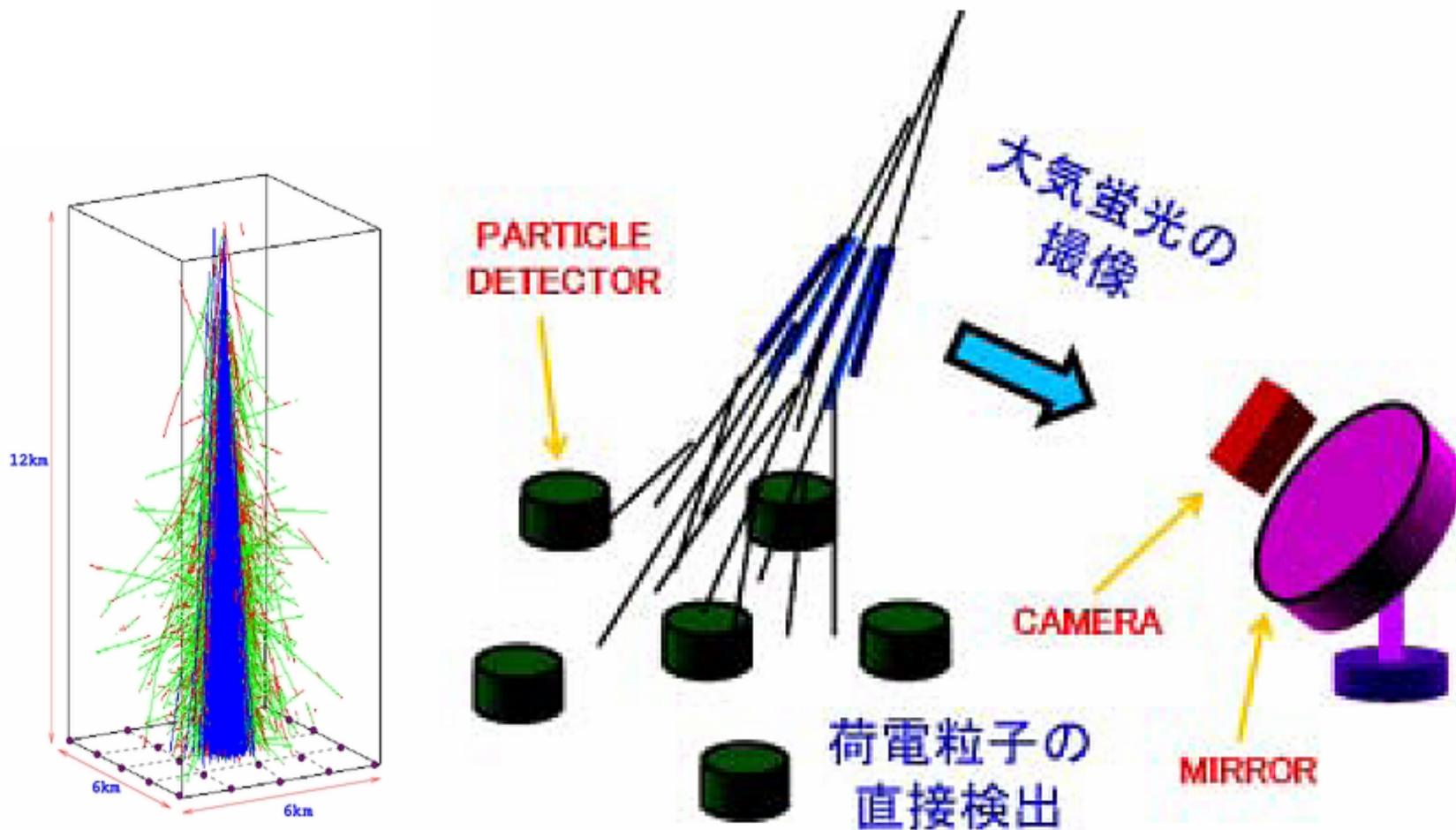
## 空気シャワー現象



(C) 1999 K. Bernlöhr



# 空気シャワー現象の観測



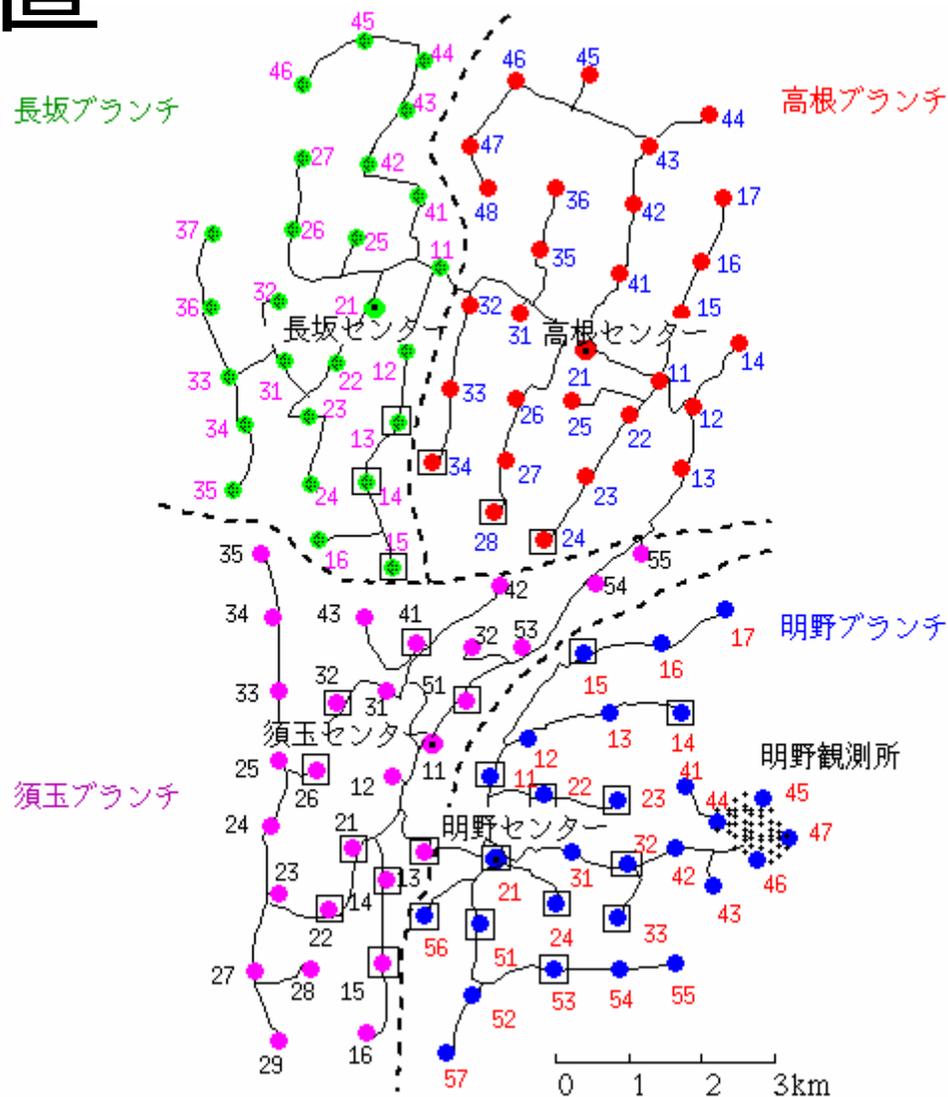
© M.Fukushima

# AGASA観測装置

Akeno Giant Air Shower Array



山梨県明野村(茅ヶ岳中腹)



# AGASA最高エネルギーイベント

December 3, 1993

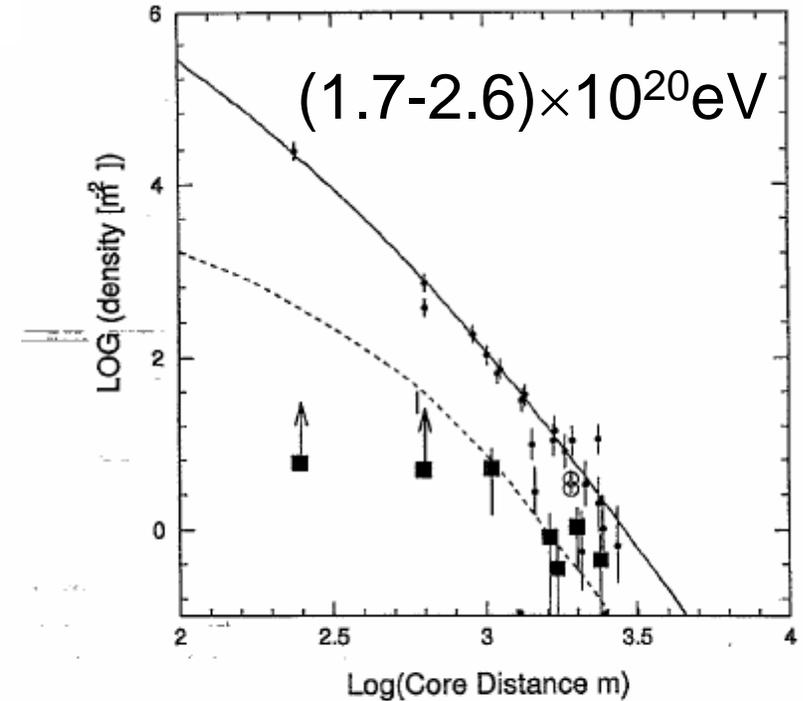
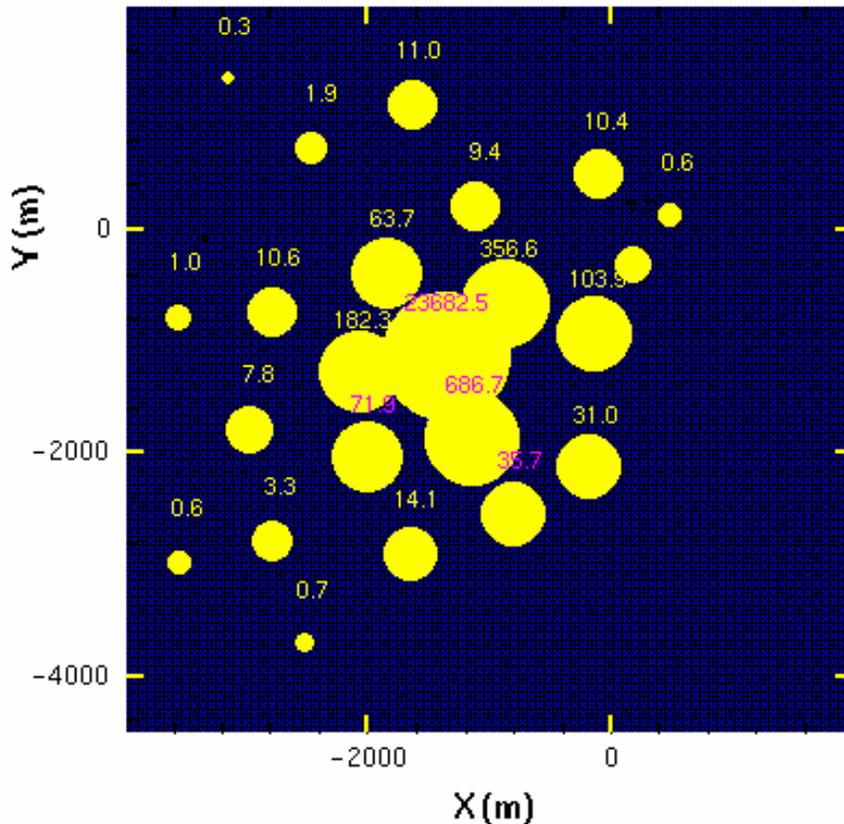
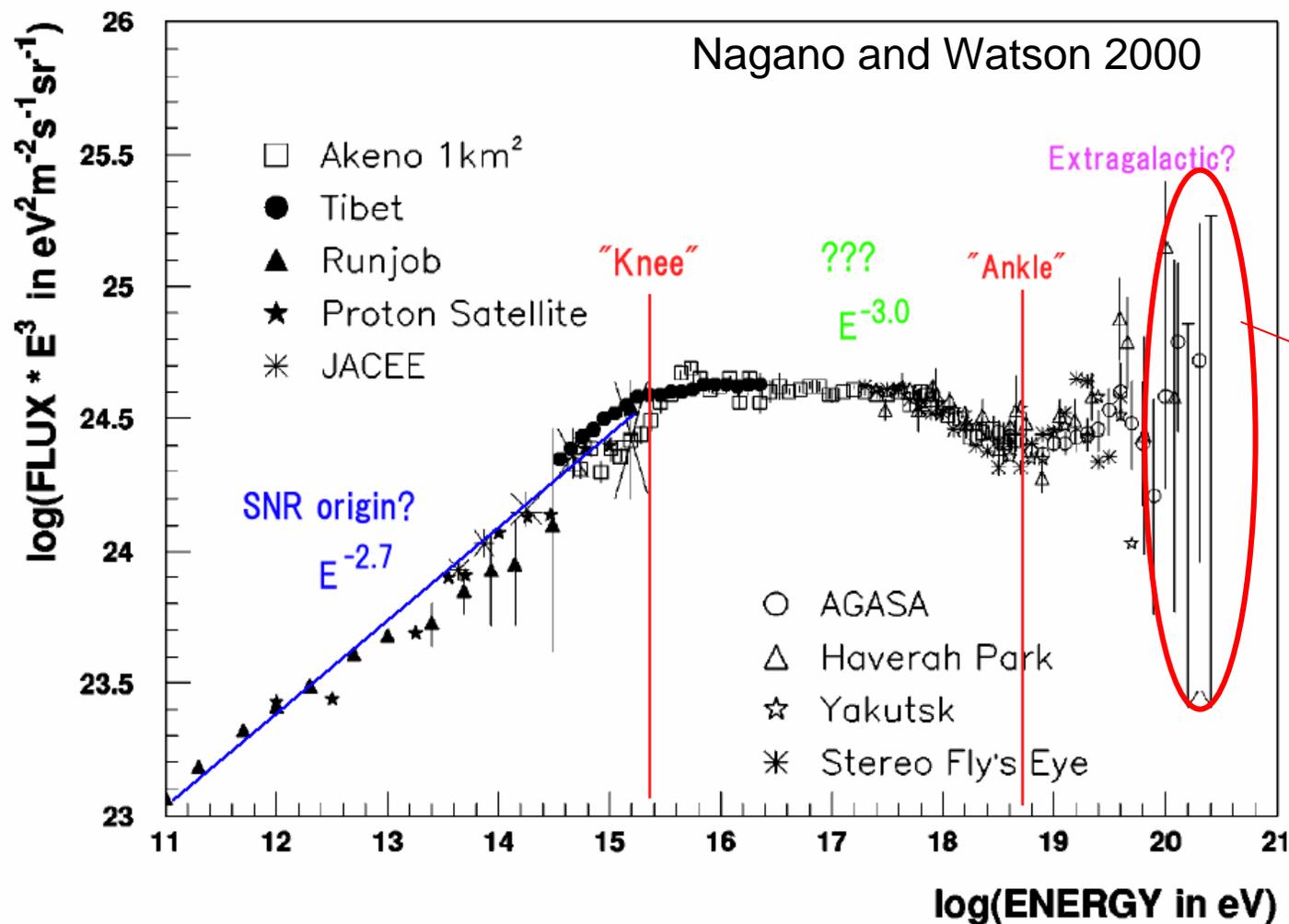


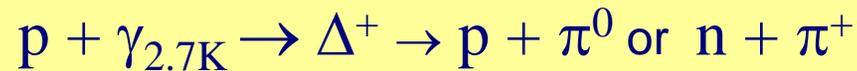
FIG. 2. The lateral distribution of charged particle (closed circles) and muons (shadowed squares). The large open circle is that measured by a detector for arrival time distribution. The expected lateral distribution of charged particles is shown by a solid line and that of muons by a dotted line.

# 宇宙線のエネルギースペクトル

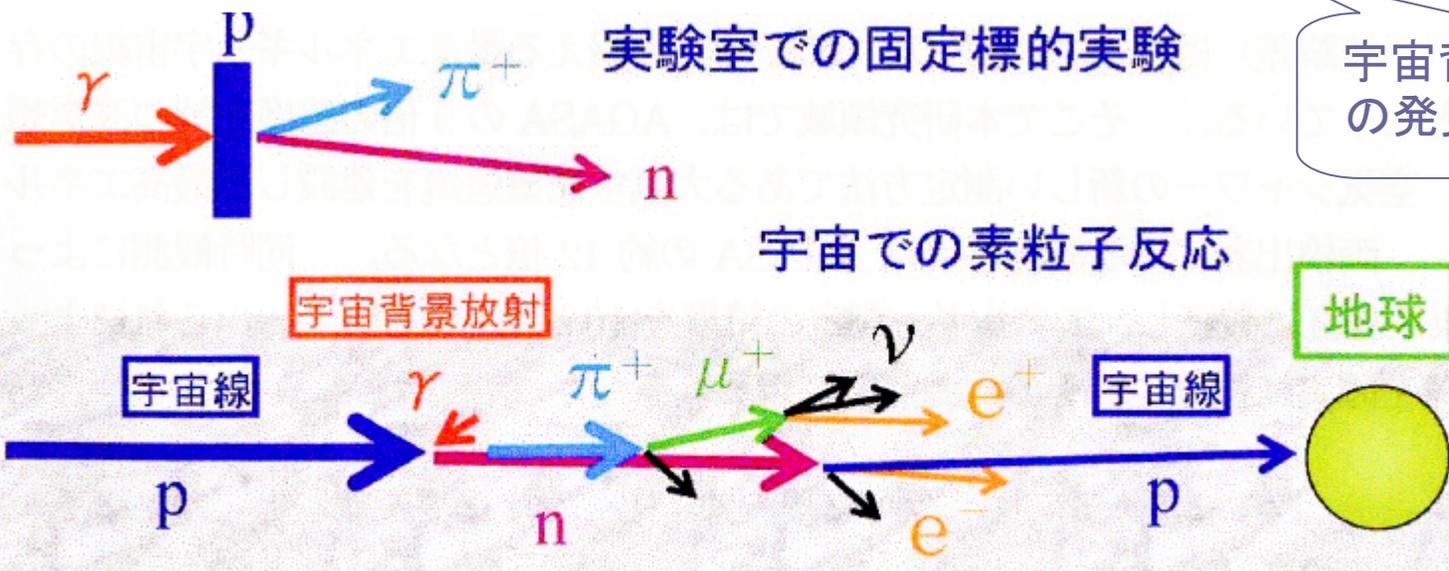


10<sup>20</sup>eV  
を超える  
宇宙  
線

# Greisen-Zatsepin-Kuzmin効果



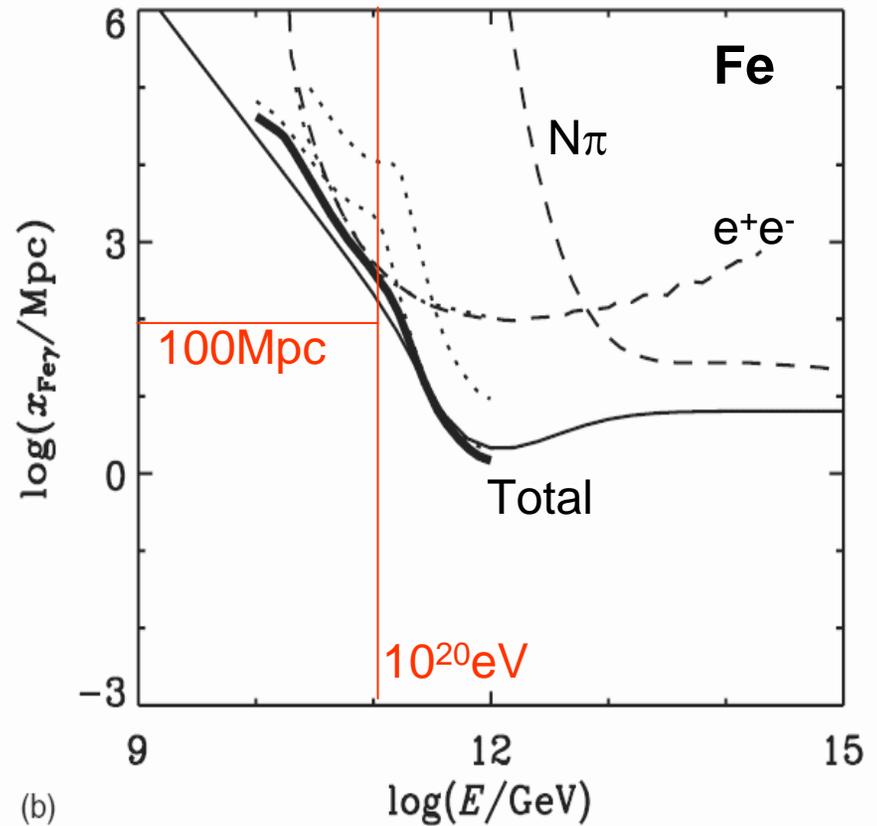
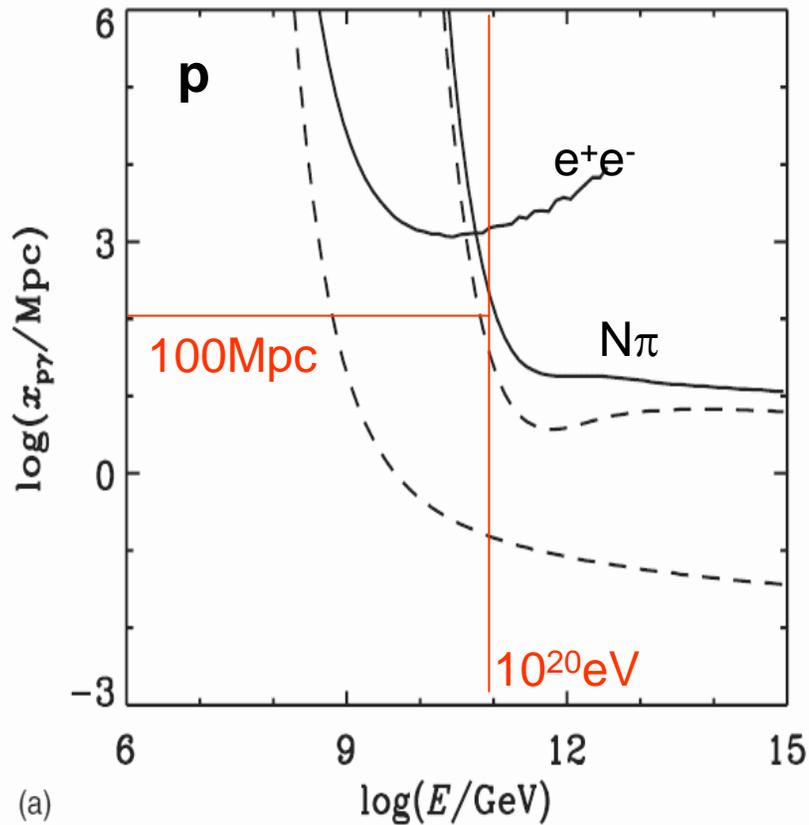
- 宇宙背景放射の光子との反応のため、 $10^{20}\text{eV}$ の陽子は50Mpc以遠から到達できない (1966年)



宇宙背景放射  
の発見(1965)

図3 GZK 限界の起源 (宇宙線と宇宙背景放射の反応)

# 陽子・鉄のエネルギー損失距離



破線: 平均相互作用距離

実線: エネルギー損失距離

# 超高エネルギー宇宙線のスペクトル

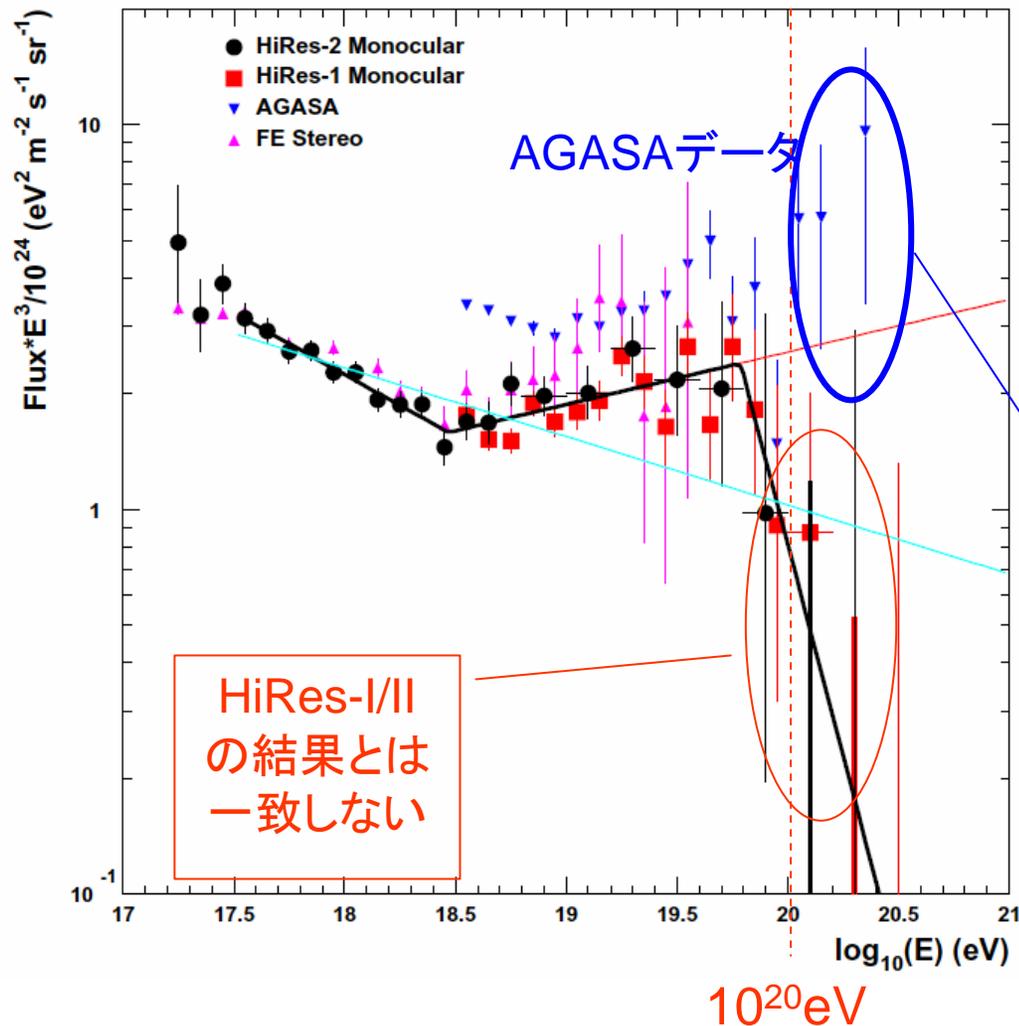


Fig. 7.  $E^3$  times the UHECR Flux. Results from the HiRes-I (red squares) and HiRes-II (black circles) detectors, the AGASA experiment (blue down-triangles) and the Fly's Eye experiment (in stereo mode; magenta up-triangles) are shown. Also shown are two spectral law fits to the HiRes-I and HiRes-II spectra as described in the text. The  $1\sigma$  upper limits for two empty bins of each HiRes spectra are also shown.

10<sup>20</sup>eVを超える宇宙線

HiResFE, astro-ph/0501317

# 10<sup>20</sup>eVを超える宇宙線が存在！

- GZK限界が観測されていない!?
  - 統計的にはまだ十分有意ではないが...
- 10<sup>20</sup>eV宇宙線の加速天体は50Mpc以内？
  - 銀河磁場にほとんど影響されずに天体から直進するが、到来方向に特異な天体はない！
- 実験のエネルギー推定の誤り？
  - 考えにくい！
- 10<sup>20</sup>eV宇宙線は陽子でなく新種粒子？
  - 種々の可能性が提案されている。
- Lorentz不変性の限界？
  - $\gamma(=10^{20}\text{eV}/m_p c^2) = 10^{11}$ では検証されていない！

# Lorentz不変性の破れでGZKカットオフをなくす

- カットオフ運動量が有限ならGZKカットオフは起こらない ( $p_c/m < 10^{12}$ )
  - H. Sato & Tati, Prog. Theor. Phys. 47, 1788 (1972)
- Lorentz不変性が破れた場合に存在する“Most Massive Particles”が $10^{20}$ eV宇宙線の正体?
  - Chrisholm & Kolb, Phys. Rev. D69, 85001 (2004)

# Lorentz不変性の破りかた(1a)

## ■ 光速度のずれ

- $c_m$ : 物質速度の最大値
- $c_{em}$ : 電磁波の伝播速度

$$I = \int dt \left[ -mc \left( 1 - \frac{v^2}{c_m^2} \right)^{1/2} + \frac{e}{c_m} A_\mu v^\mu \right] + \frac{1}{8\pi} \int d^3x dt \left[ E^2 - \left( \frac{c_{em}}{c_m} \right)^2 B^2 \right]$$

$$\frac{1}{8\pi} \left[ E^2 - \left( \frac{c_{em}}{c_m} \right)^2 B^2 \right] = \frac{1}{8\pi} [E^2 - B^2] + \varepsilon \frac{1}{8\pi} B^2$$

$$\varepsilon \equiv 1 - \left( \frac{c_{em}}{c_m} \right)^2 \quad : \text{ Lorentz不変性の破れ: 実験的には } < 3 \times 10^{-22}$$

# Lorentz不変性の破りかた(1b)

- $c_m \neq c_{em} \Rightarrow$  「禁じられた過程」が開く
  - $c_m < c_{em}$ : 光子の崩壊  $\gamma \rightarrow e^+e^-$
  - $c_m > c_{em}$ : 荷電粒子の真空中でのチェレンコフ放射
  - 質量ゼロ粒子の固有状態の速度が  $c_m$  と異なることも可能
  - ニュートリノのフレーバー固有状態と速度固有状態が異なることも可能  $\Rightarrow$  ニュートリノ振動

「パンドラの箱」が開く！？

# Lorentz不変性の破りかた(2)

## ■ 光速のエネルギー依存

$$c_0 p^2 = E^2 \quad \Rightarrow \quad c_0 p^2 \approx E^2 [1 + f(E)]$$

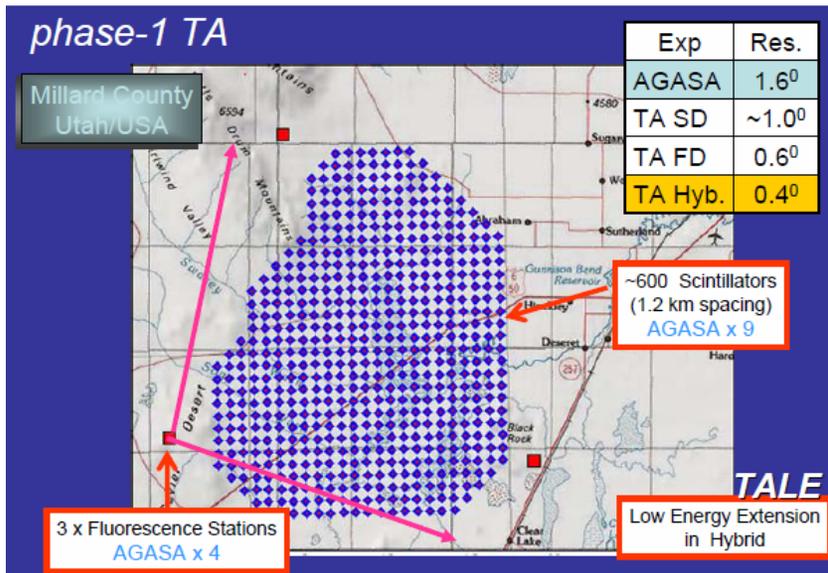
## □ 量子重力の場合

$$c = \frac{\partial E}{\partial p} \approx c_0 \left( 1 - \xi \frac{E}{E_{\text{Pl}}} \right)$$

$$E_{\text{Pl}} = \sqrt{\hbar c / G} = 10^{19} \text{ GeV} : \text{プランク質量}$$

$\xi = \pm 1$  : モデルによる不定性

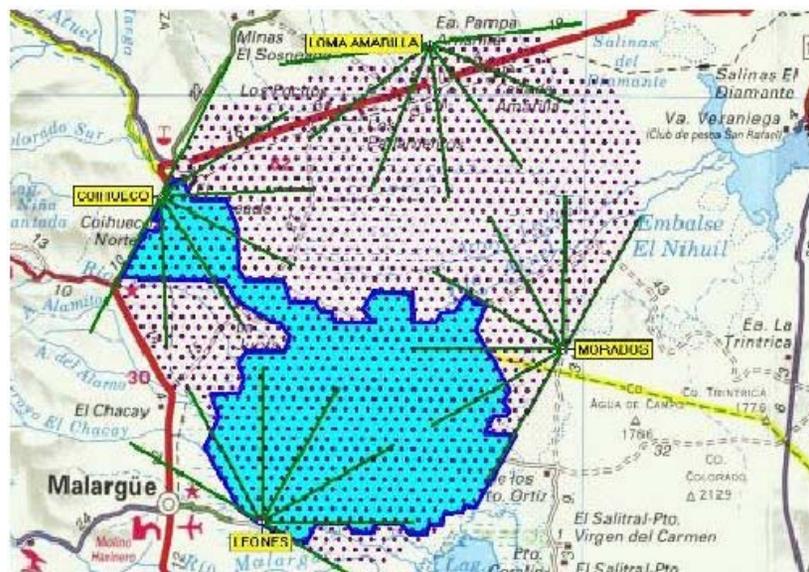
# 次世代大型空気シャワー観測装置



## Telescope Array

(Japan/US)

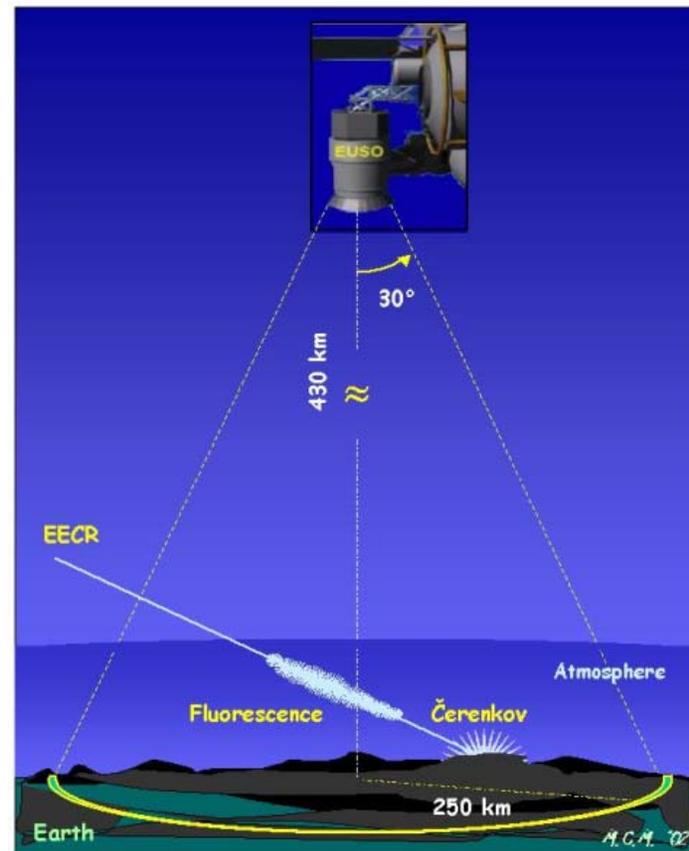
Utah, 2006



## Pierre Auger

(US/many)

Argentina, 2006?



## EUSO

(Europe/Brazil/Japan/US)

Space, 2010?

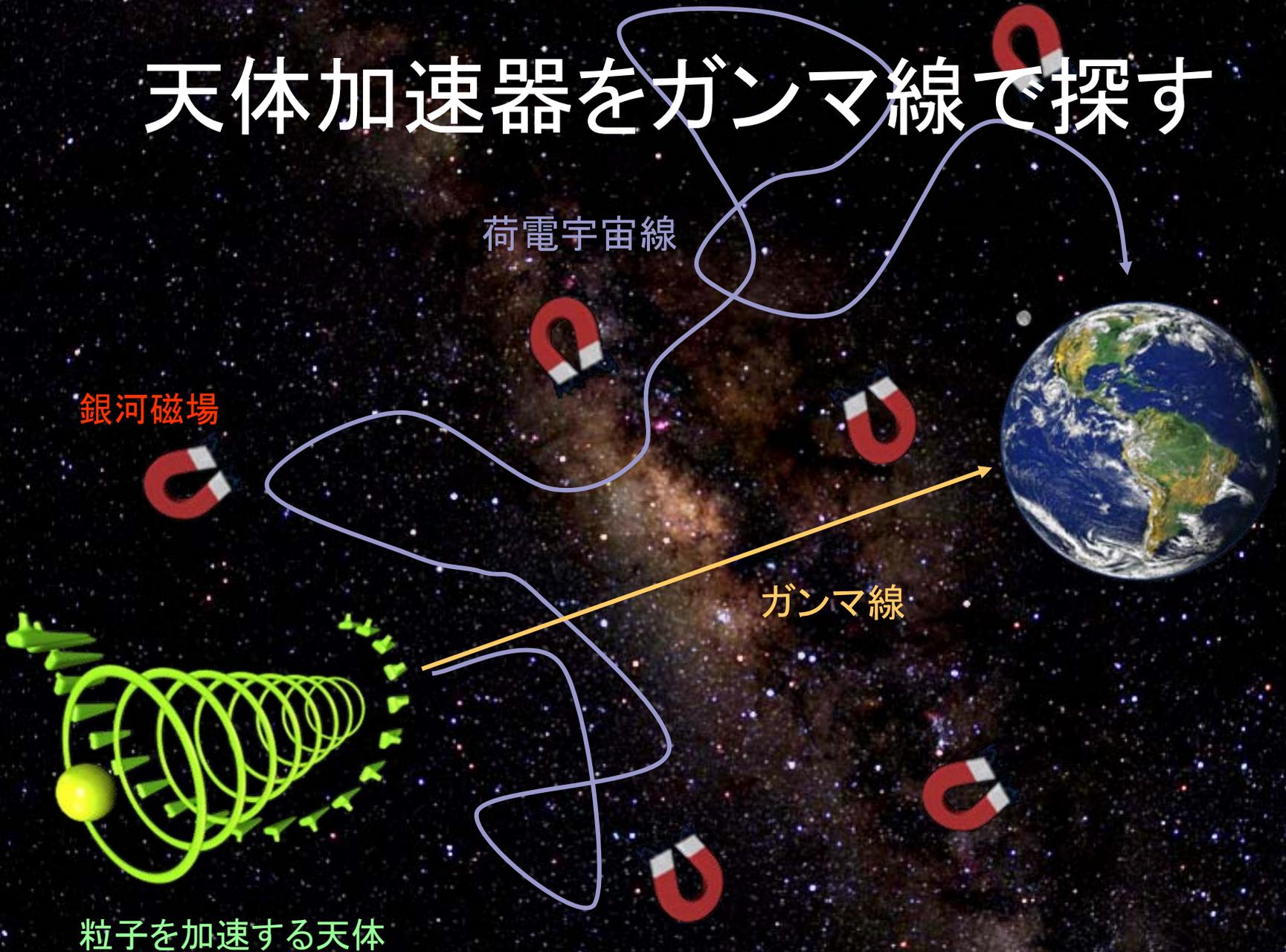
# 天体加速器をガンマ線で探す

荷電宇宙線

銀河磁場

ガンマ線

粒子を加速する天体



# TeV( $=10^{12}$ eV)領域ガンマ線の地上観測

大気の光に対する透明度



ロケット、人工衛星

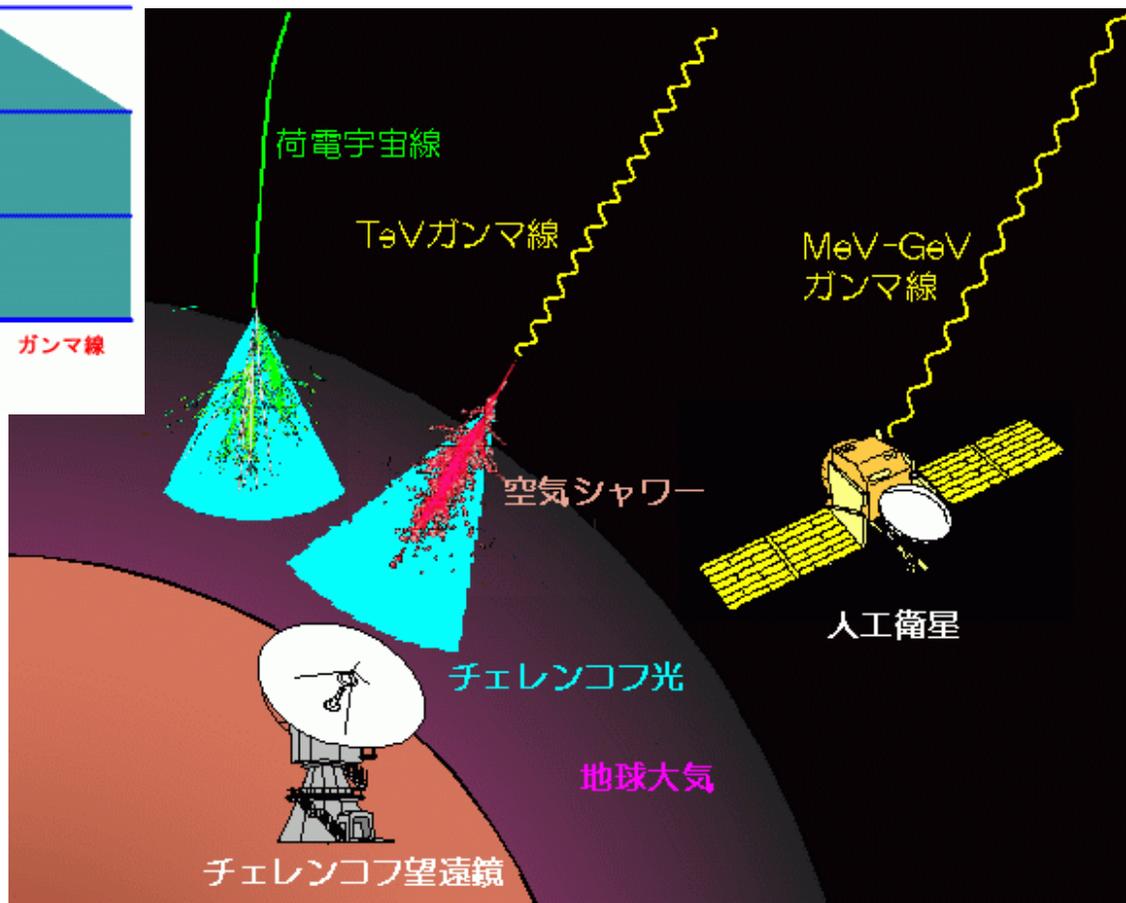
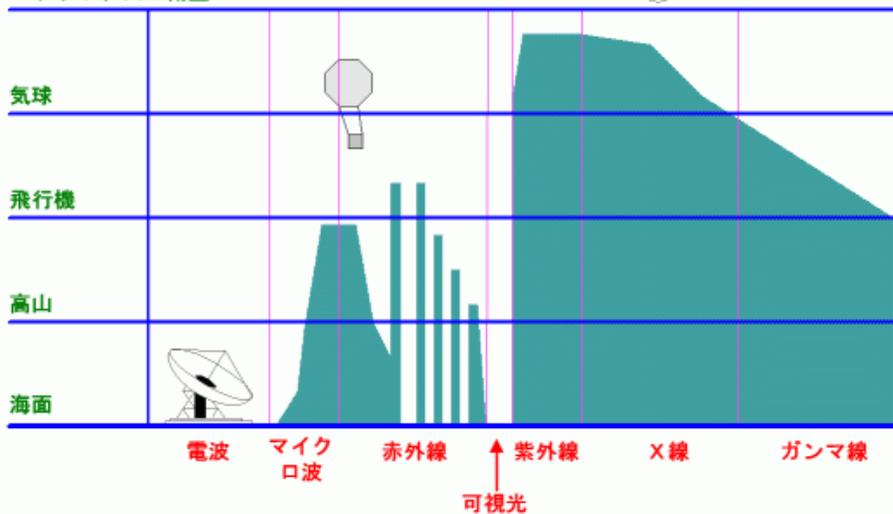
気球



飛行機

高山

海面



# 大気チェレンコフ望遠鏡

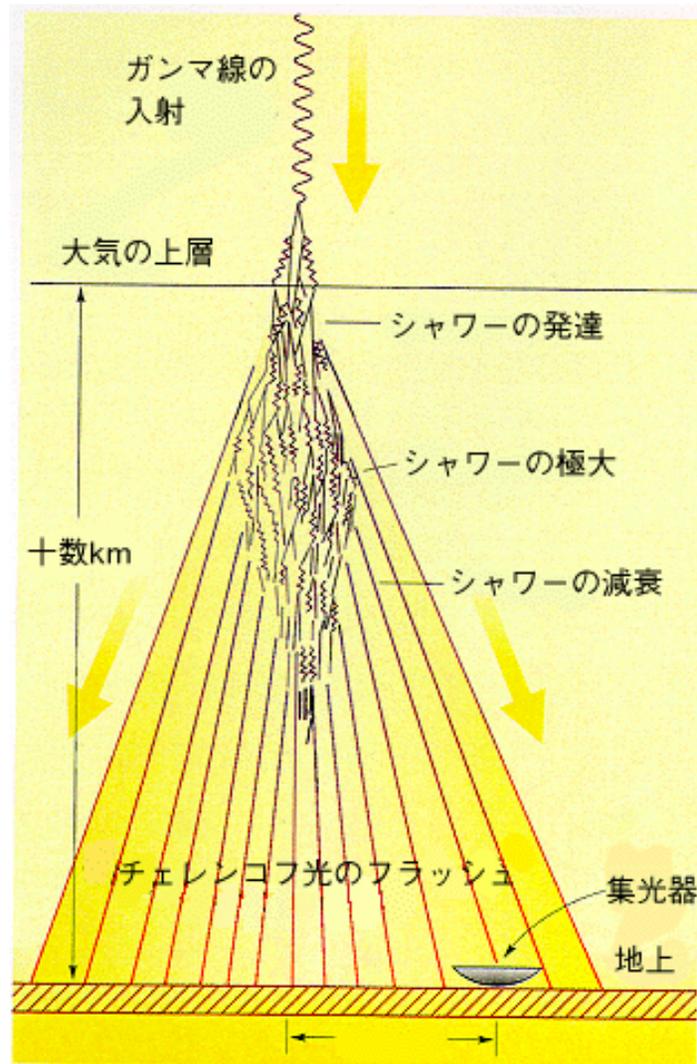
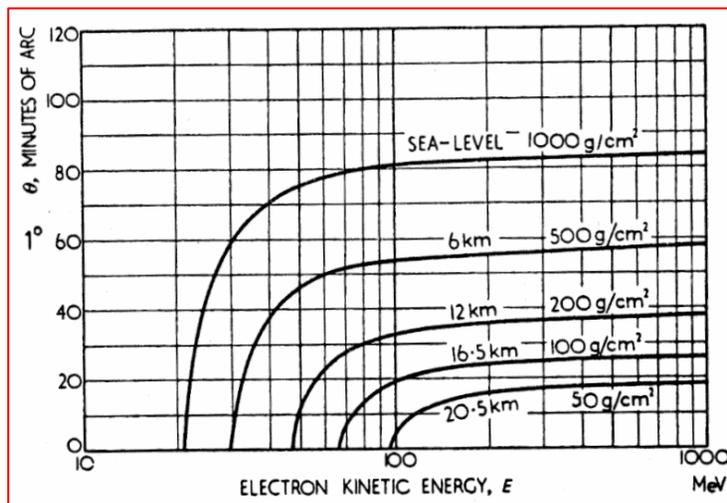
## ■ チェレンコフ角

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

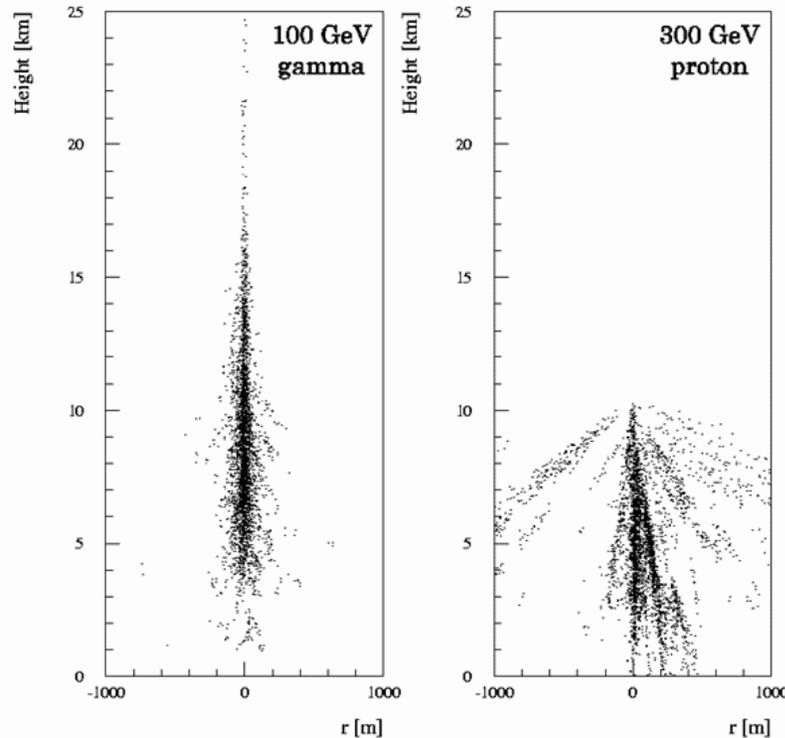
$$\beta = v/c$$

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

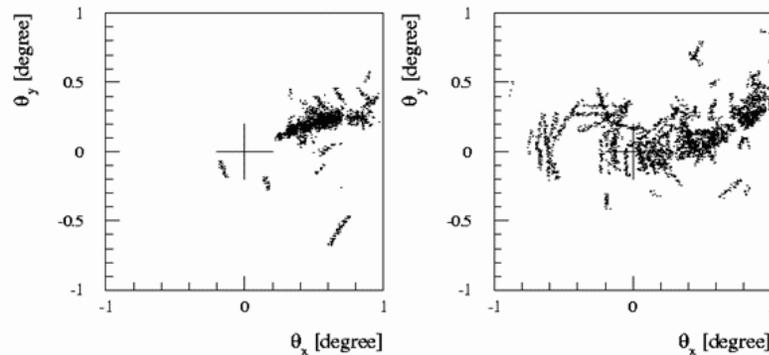
$$\Rightarrow \theta = 1.3^\circ \text{ (地上)}$$



# イメージング法による宇宙線雑音の除去



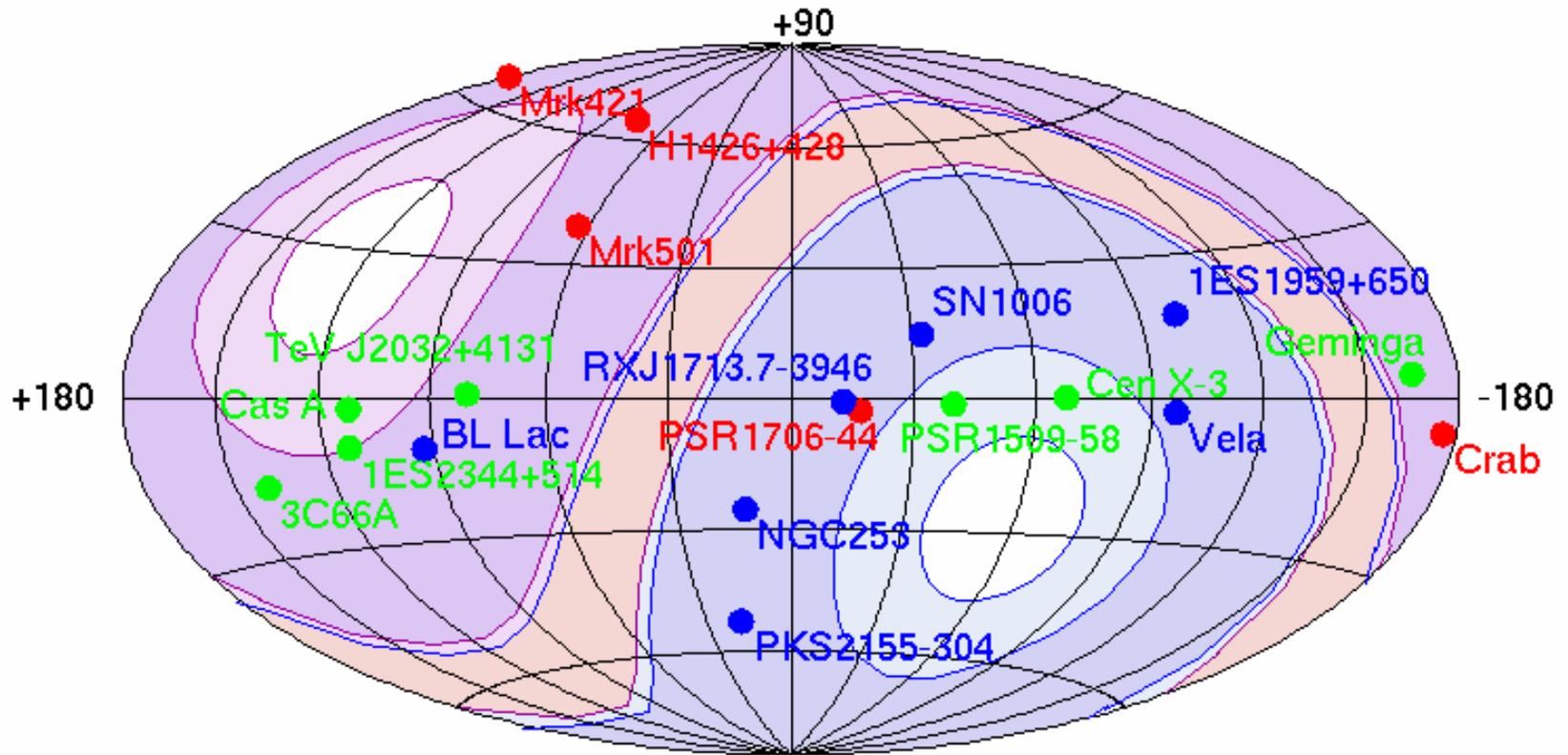
ガンマ線:  
電磁シャワー  
⇒ シャープなイメージ



陽子:  
核シャワー  
⇒ 拡散したイメージ

# TeVガンマ線天体

## TeV Gamma-ray Sources



Purple shade: field-of-view of Whipple  
Blue shade: field-of-view of CANGAROO

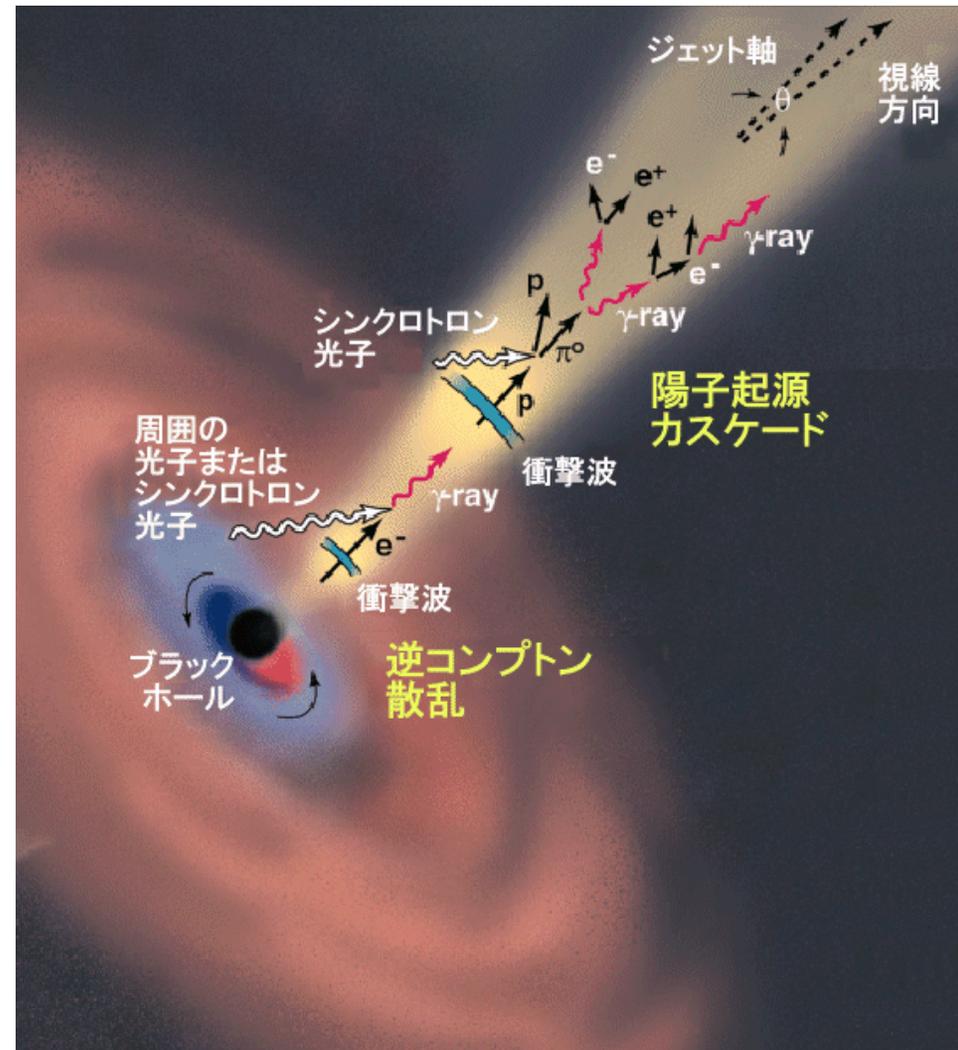
- Grade A
- Grade B
- Grade C

# ブレーザー

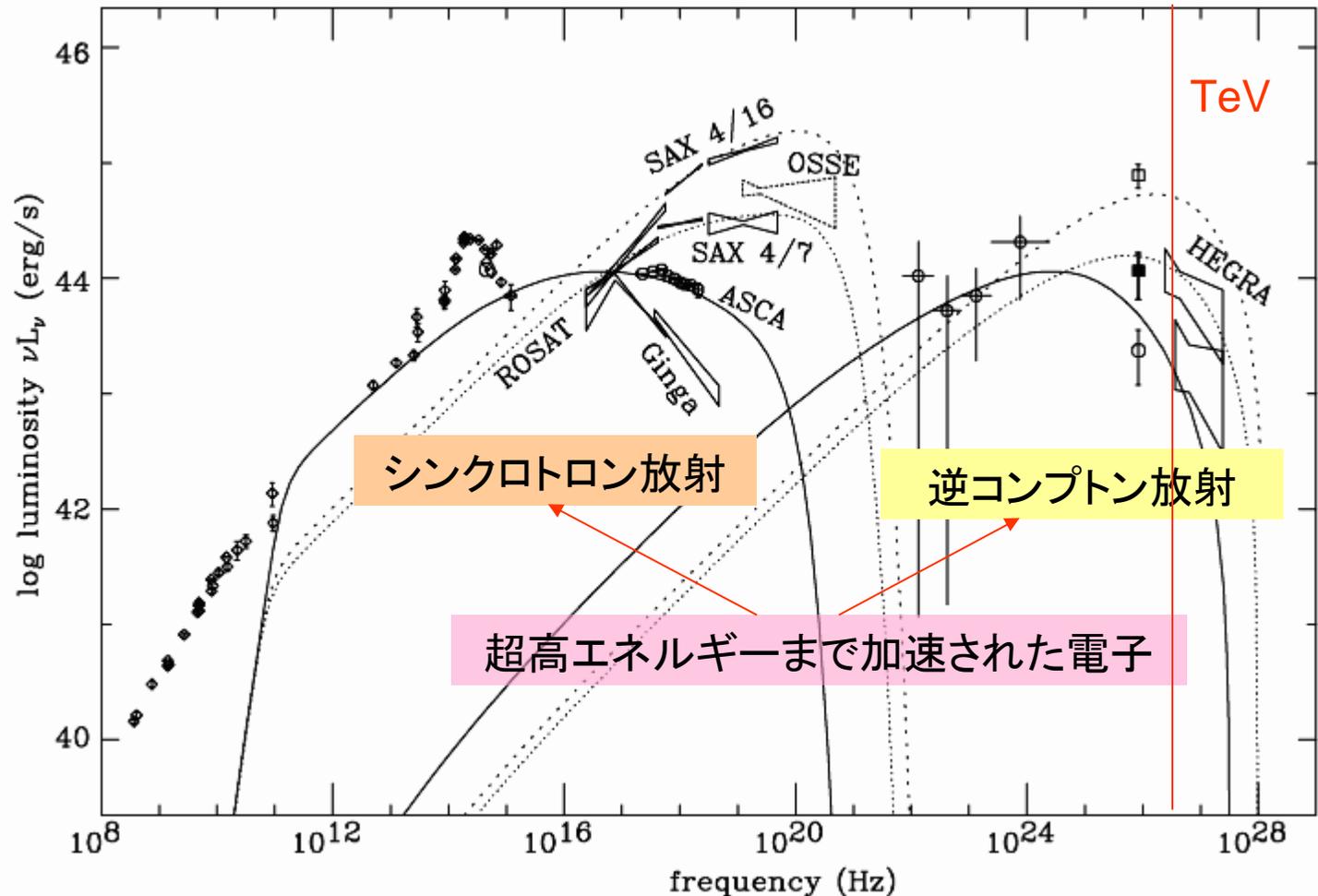


Mrk501 (光学画像)

- ジェットが我々の方を向いた活動銀河核
- 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噴出
- 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



# Mrk 501 多波長スペクトル

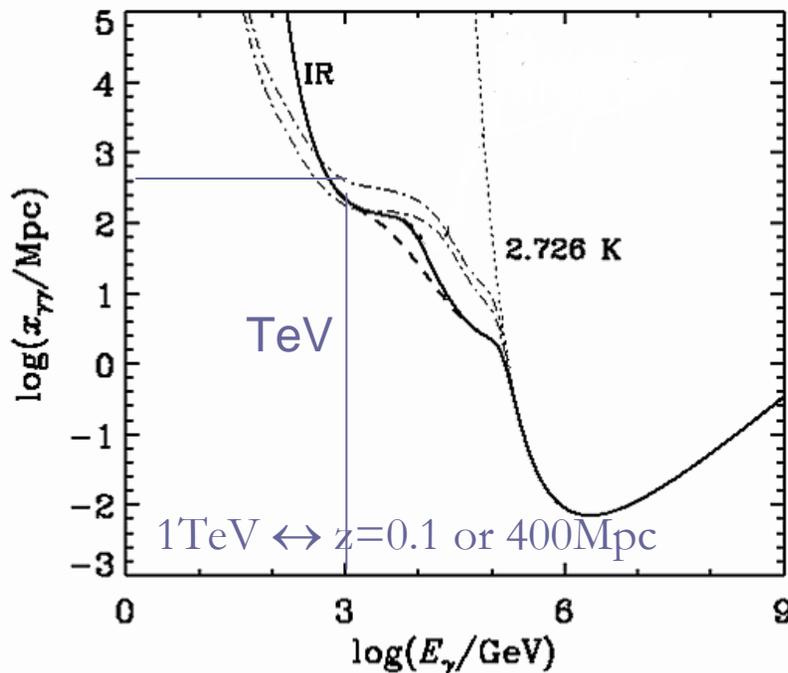


Kataoka et al., ApJ, 514, 138 (1999)

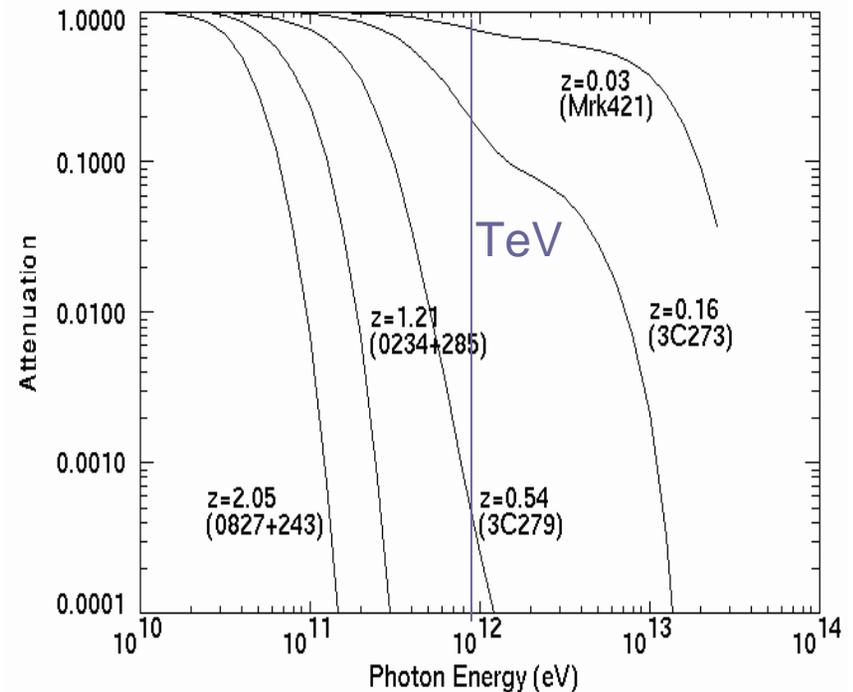
# 宇宙はTeVガンマ線に対し不透明

$$\gamma_{\text{TeV}} + \gamma_{\text{IR}} \rightarrow e^+ + e^-$$

$e^+e^-$  対生成の平均自由行程



$e^+e^-$  対生成による減衰



# 発生源でのMrk501スペクトル

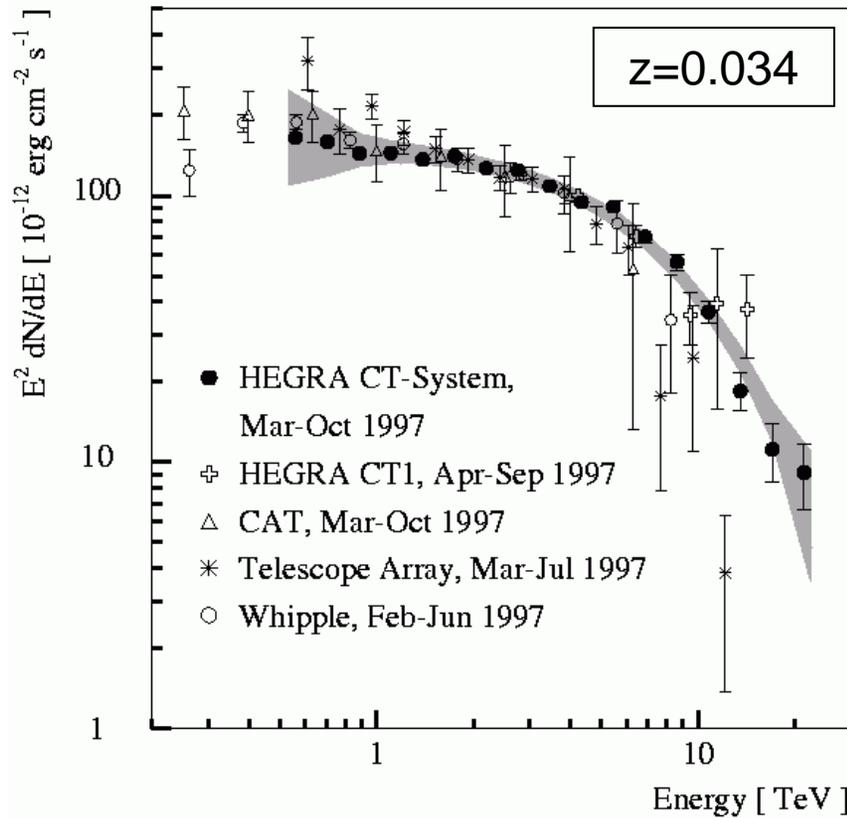


Fig. 12. The Time-averaged spectrum of Mrk 501 during 1997,

Aharonian et al. A&Ap 349, 1999

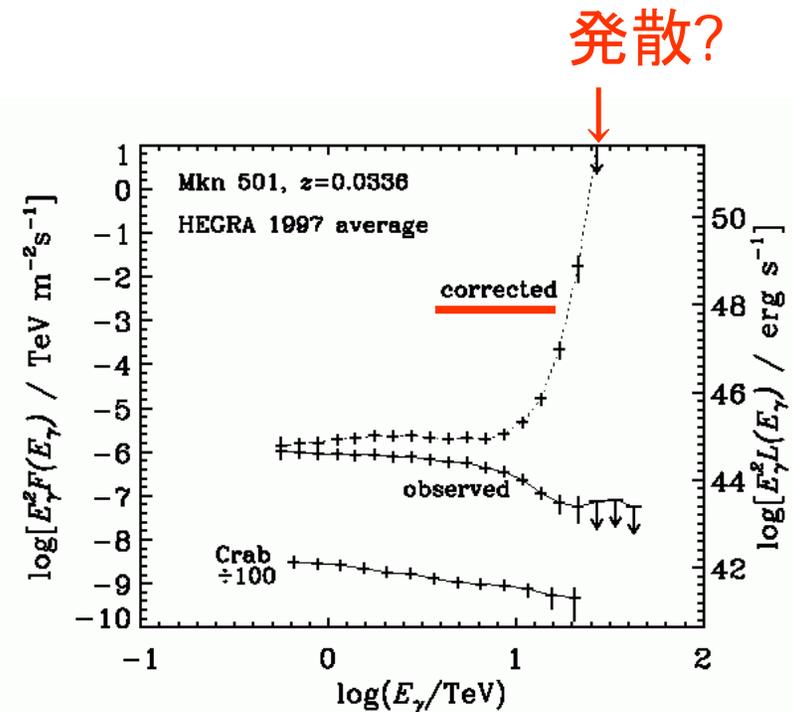
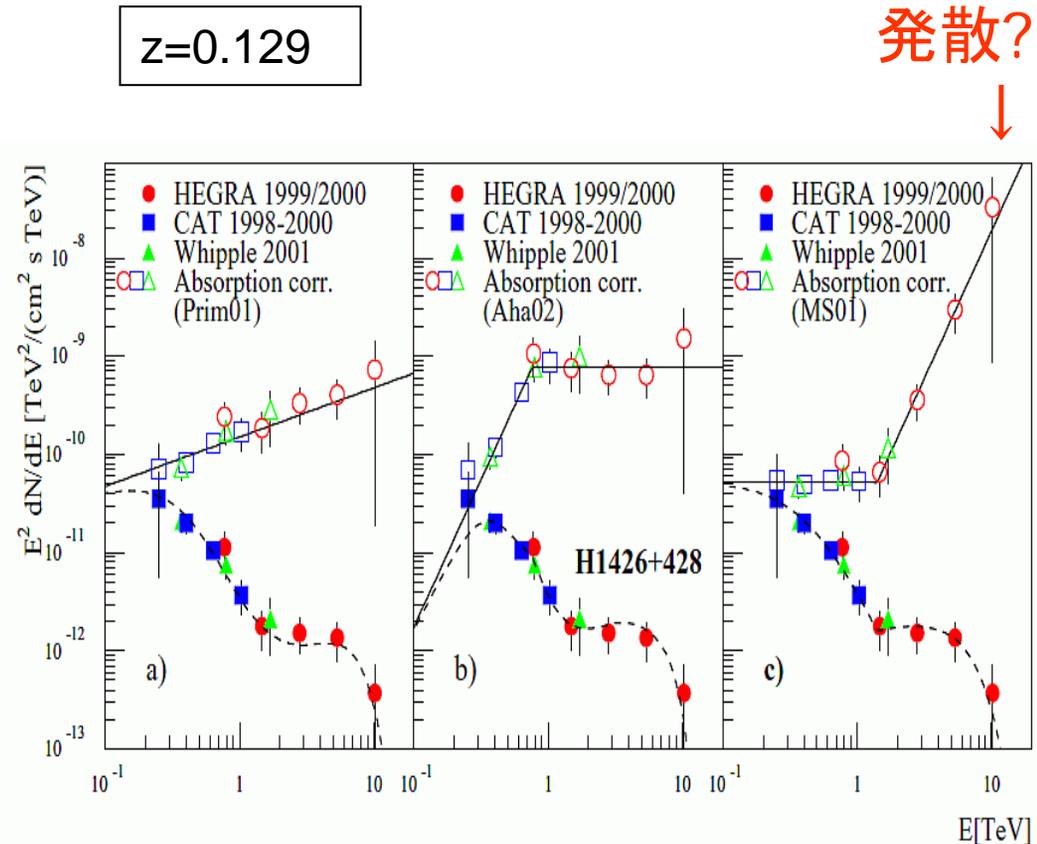
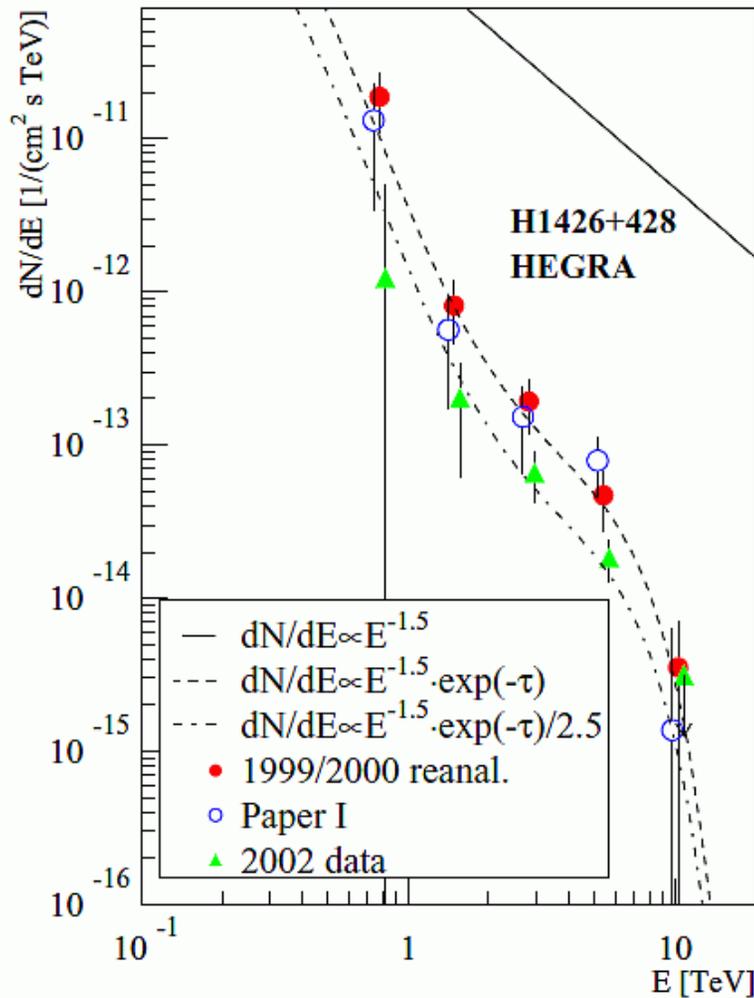


Figure 3: The time-averaged spectrum of gamma-rays from Markarian 501 observed in 1997[18] is compared with the spectrum of the Crab Nebula observed in 1997–8[21, 22]. The spectrum of Markarian 501 after correction for absorption in the infrared background is also shown assuming  $H_0 = 65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . The right hand scale shows the luminosity for Markarian 501.

Protheroe & Meyer, Phys.Lett. B493 (2000) 1

# H1426+428 TeV領域スペクトル



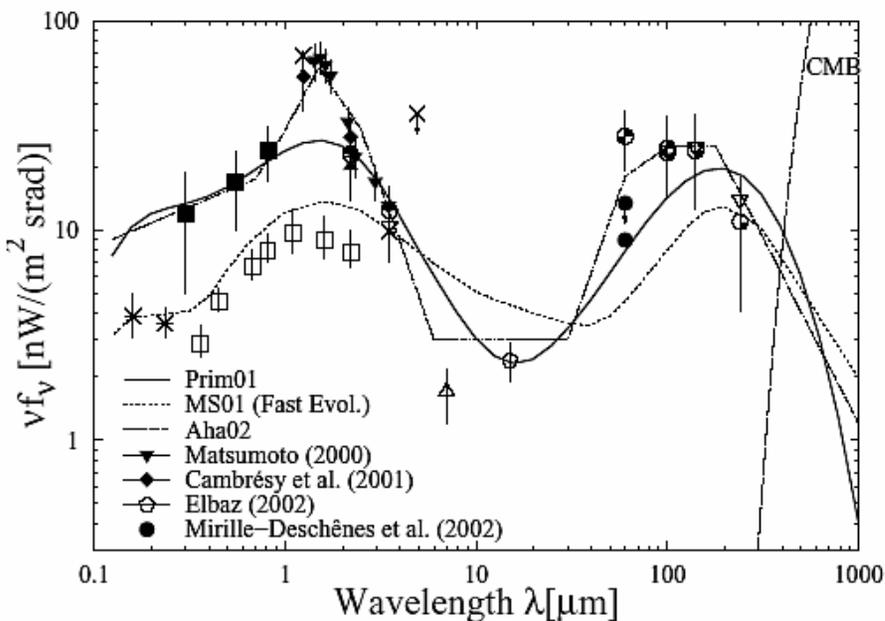
Aharonian et al. A&Ap 403, 523 (2003)

# ブレーザー・スペクトルの発散？

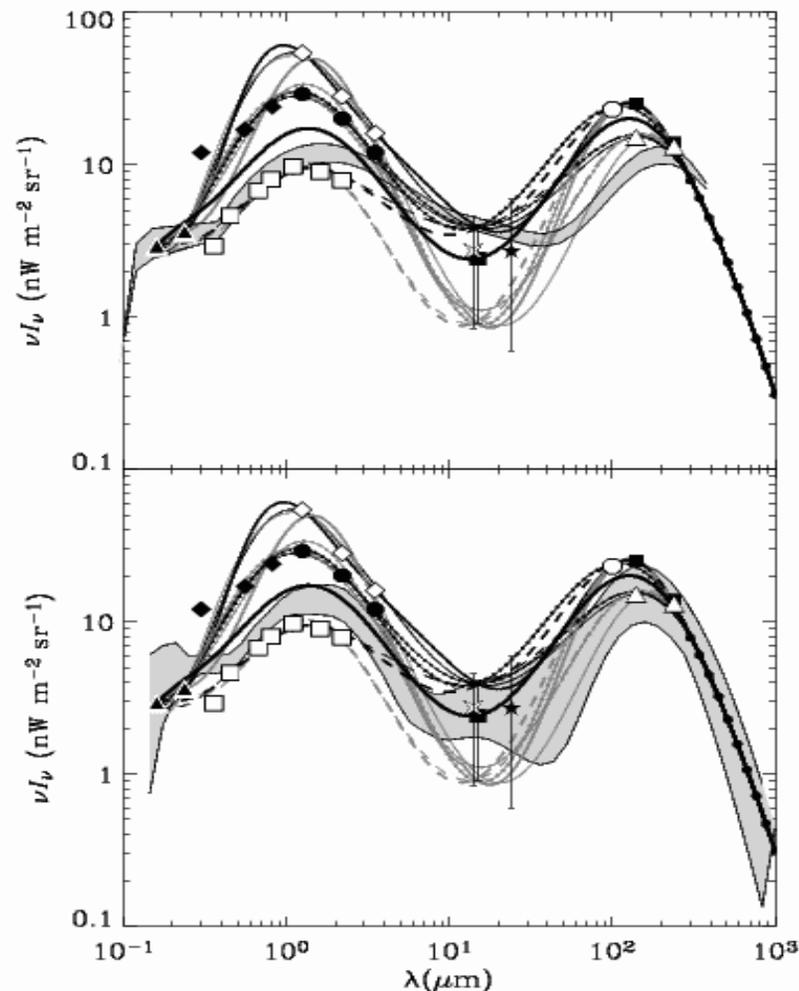
- 発生源でのスペクトルの不定性
  - $F(E) \sim E^{-a} \exp(-E/E_{\text{cut}})$ 、 $a$  &  $E_{\text{cut}}$  unknown
- 背景赤外線量の不定性
  - 測定が困難

# 背景赤外線量の不定性

$E(\text{TeV}) / \lambda(\mu\text{m}) \sim 1$ で減衰大



Aharonian et al. A&Ap 403, 523 (2003)

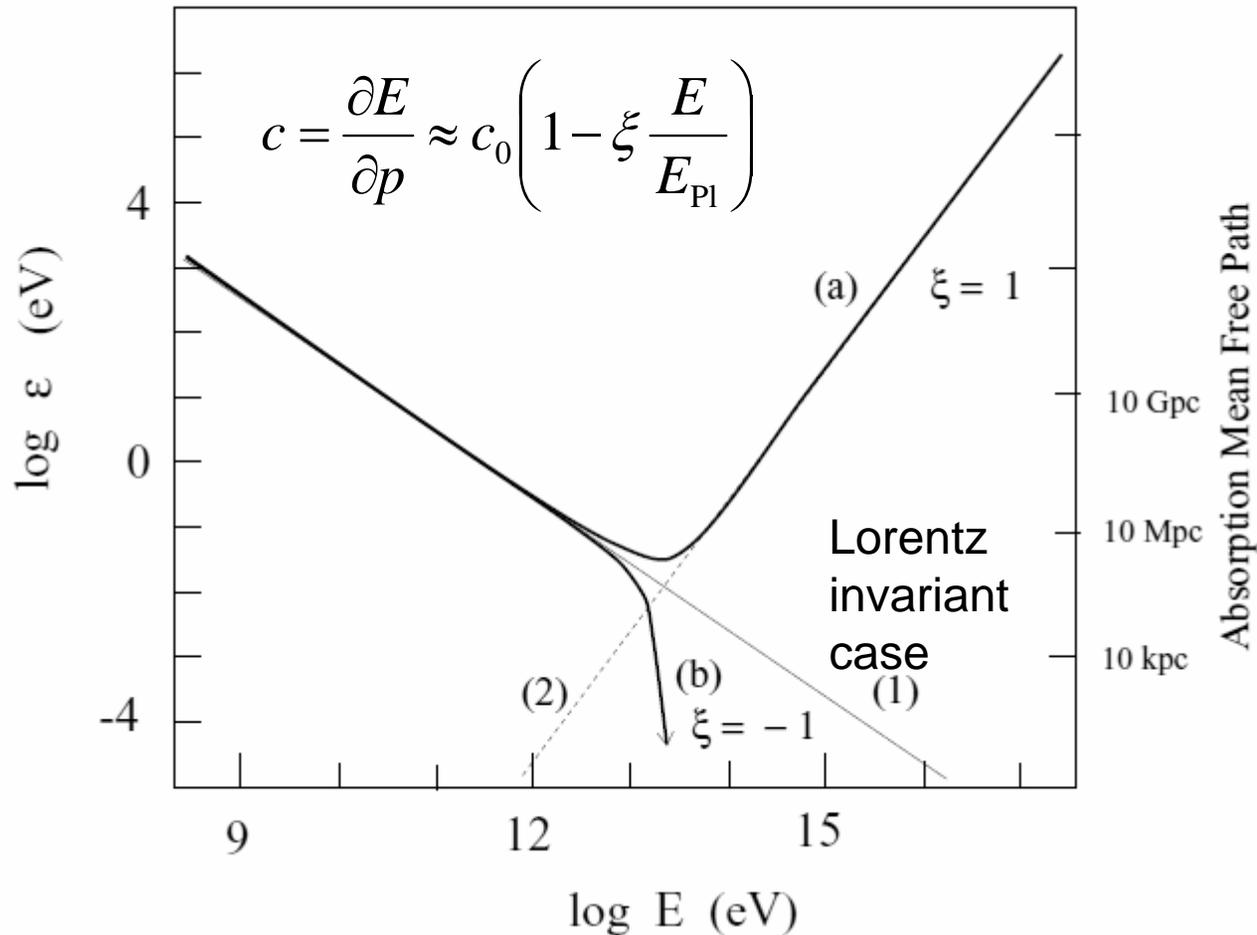


Dwek and Krennrich, ApJ 618, 657 (2004)

# ブレーザースペクトルの発散？

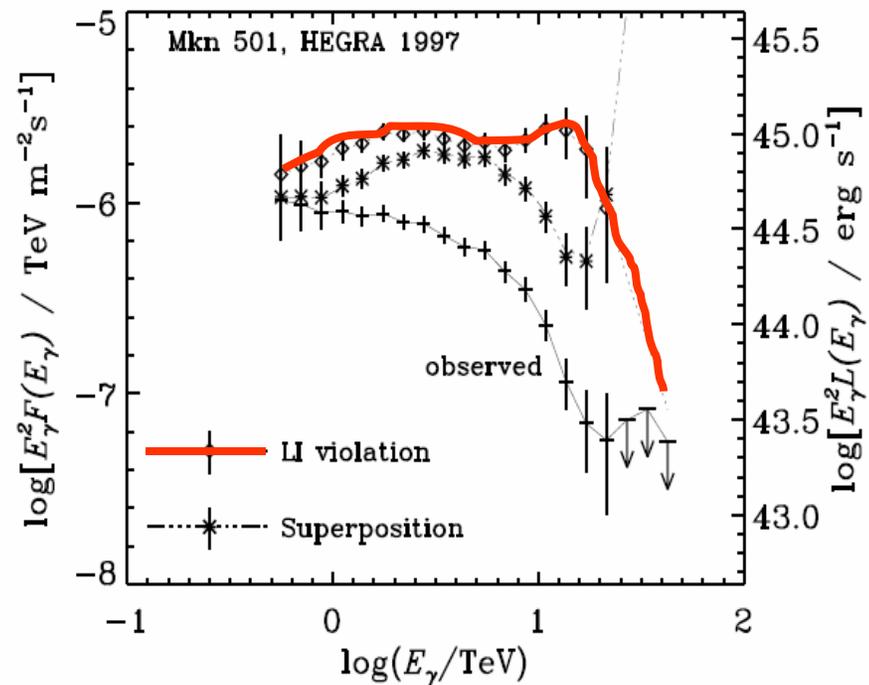
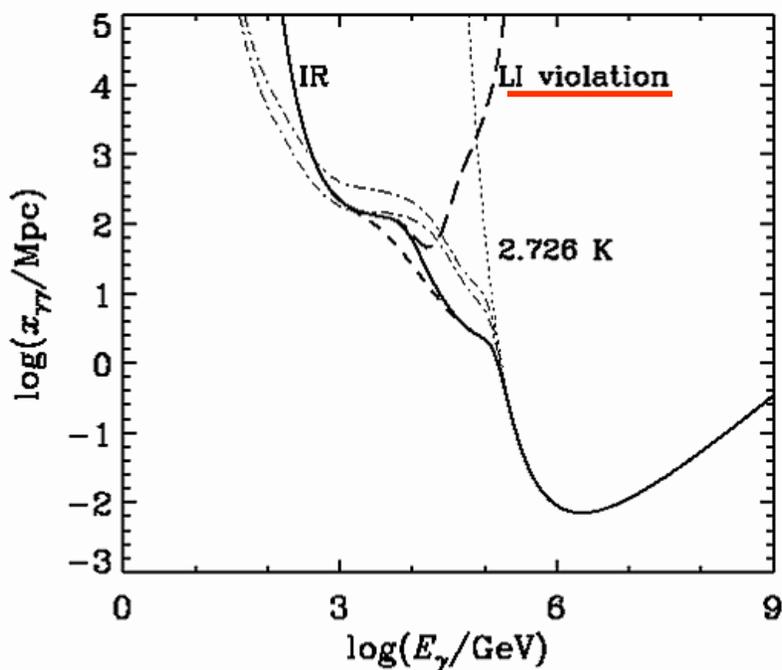
- 背景赤外線量の不定性
  - 測定が困難
- 発生源でのスペクトルの不定性
  - $F(E) \sim E^{-a} \exp(-E/E_{\text{cut}})$ 、 $a$  &  $E_{\text{cut}}$  unknown
- ローレンツ不変性の破れ？

# 量子重力によるLorentz不変性の破れ



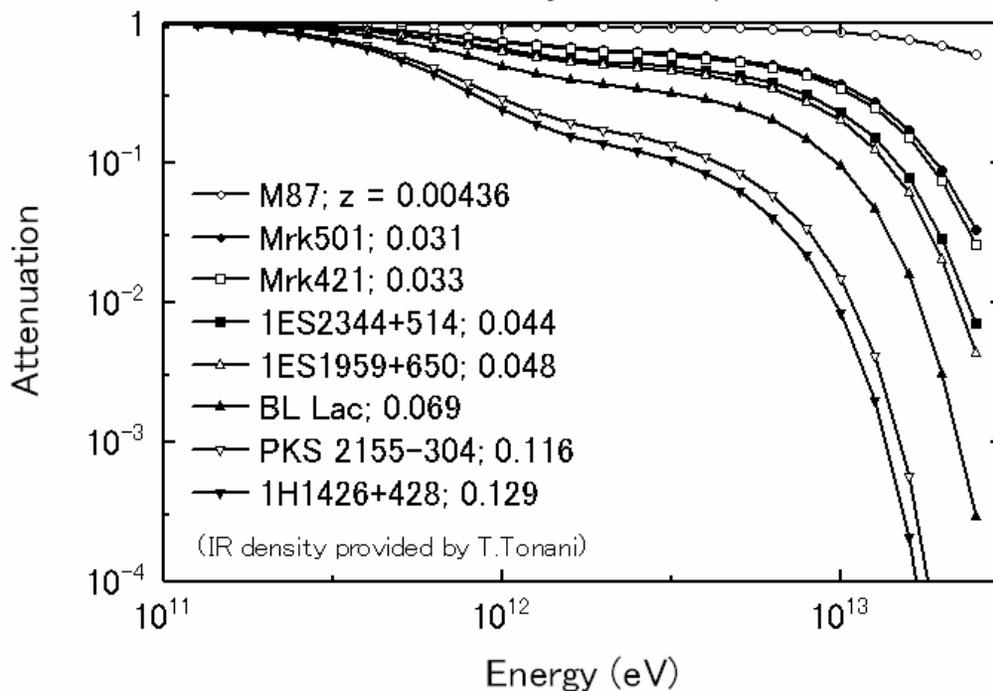
平均自由行程が延びる可能性！

# Mrk501のTeVスペクトルへの影響



# 銀河間赤外線による吸収

Attenuation by infrared photons



TeVで検出されているBlazarに対する計算値

Intrinsicなスペクトルと吸収の関係を解くには $z$ の異なる多数のサンプルが必要！

M 87

Mrk-501

Mrk-421

1ES 2344+514

1ES 1959+650

BL-Lacertae

PKS2155-304

H 1426+428

Redshift  $z$

# 光子の到達時間差

Large extra dimension models

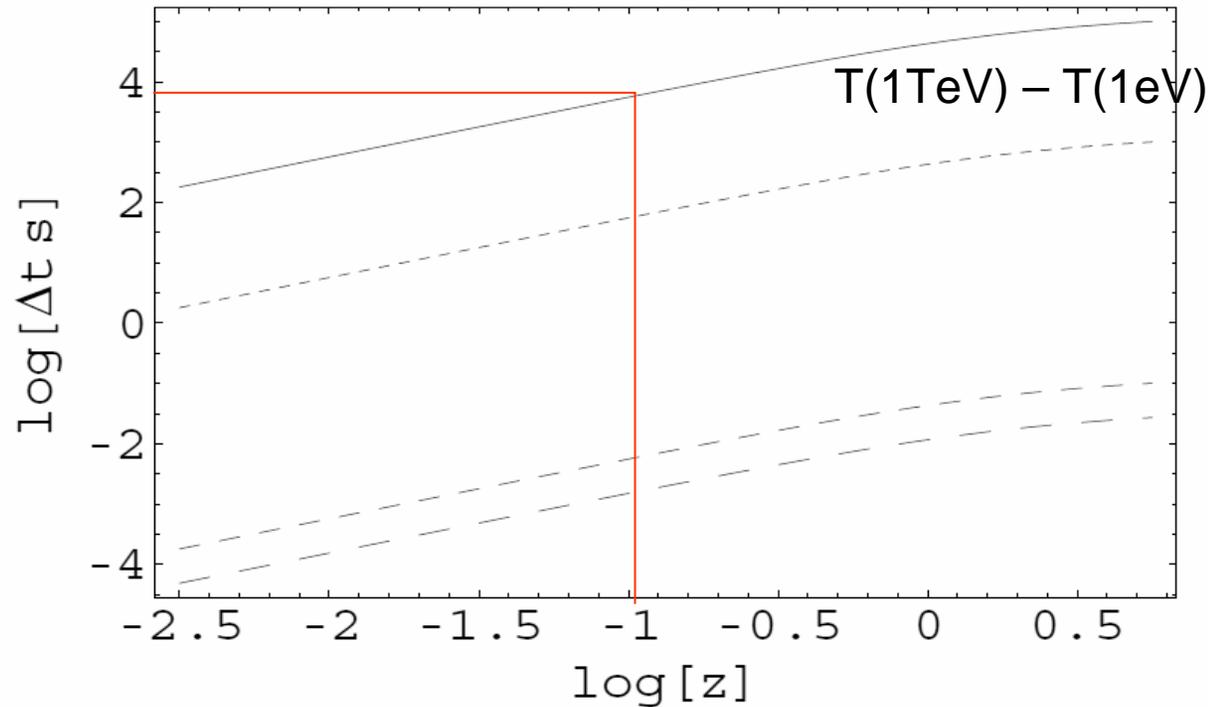


Fig. 3.— Variation of the photon time delay as a function of the redshift  $z$  (in a logarithmic scale) in cosmological models with large extra-dimensions for a fundamental energy scale  $E_F = 7 \times 10^{15}$  GeV and for different photon energy values:  $E_1 = 1$  TeV,  $E_2 = 1$  eV (solid curve),  $E_1 = 10$  GeV,  $E_2 = 1$  MeV (dotted curve),  $E_1 = 1$  MeV,  $E_2 = 1$  eV (short dashed curve) and  $E_1 = 300$  keV,  $E_2 = 30$  keV (long dashed curve). For the mass, dark energy and dark radiation parameters we have used the values  $\Omega_M = 0.3$ ,  $\Omega_\Lambda = 0.68$  and  $\Omega_U = 0.02$ , respectively.

# ブレーザーの重レンズによる光度変動

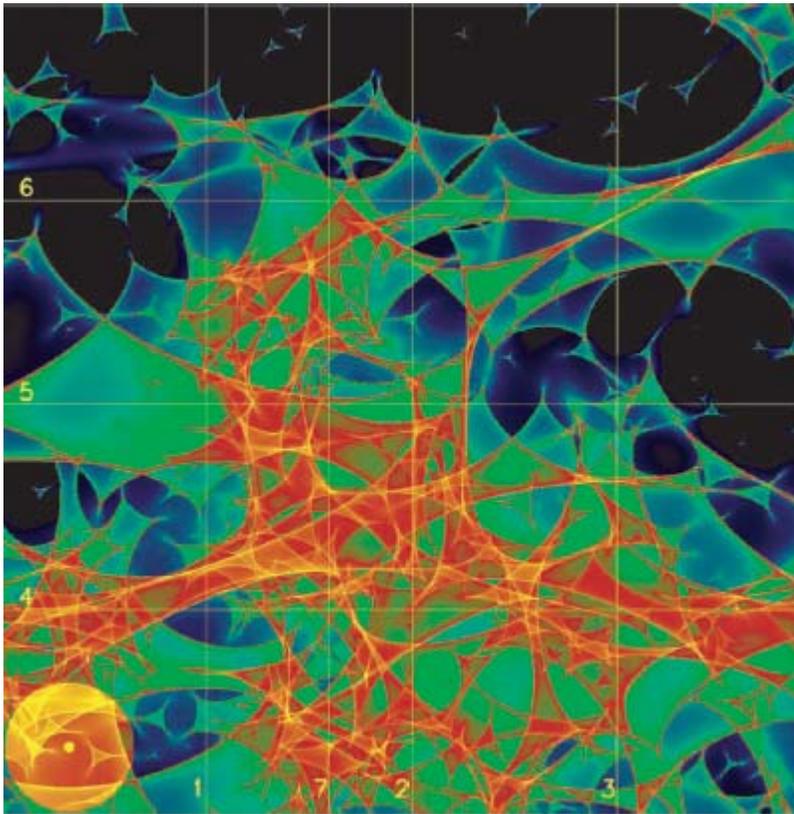


Figure 14. Magnification map for lensing with parameters  $\kappa = 0.9$  and  $\gamma = 0.4$  (for details see the text).

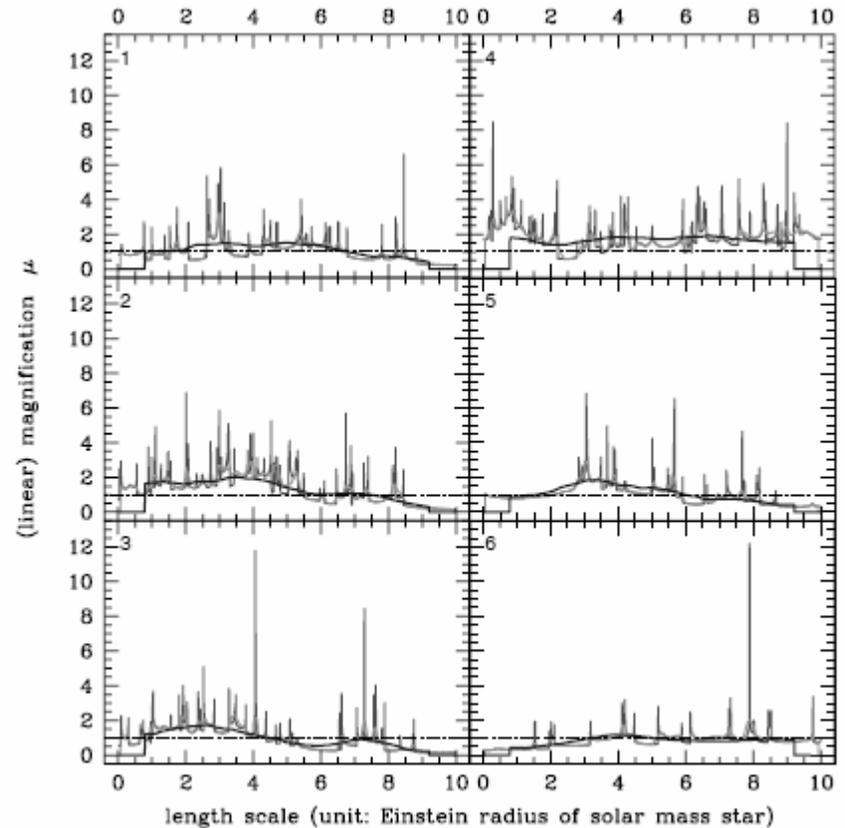


Figure 15. Light curves for different source trajectories. Numbers corresponds to those given in Fig. 14. The line coding is as in Fig. 9. This figure can be seen in colour in the online version of the journal on Synergy.

# 大型チェレンコフ望遠鏡システム群: "The Big Four"

(2004 Feb-)



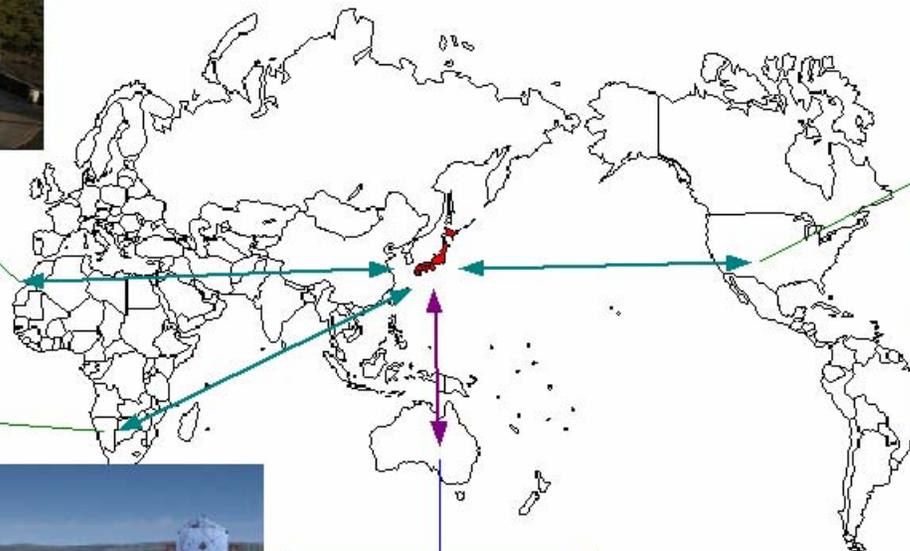
MAGIC

(Germany/Spain etc)

(Germany etc) HESS



(2003 Dec-)



(US/UK etc)  
VERITAS



(one prototype now)

CANGAROO-III

(Japan/Australia)



(2004 Mar-)

# Summary

- 宇宙線は人工加速器を超えた超高エネルギー（高Lorentz因子）現象の探針である。
- $10^{20}$ eVを超えるような超高エネルギー宇宙線の存在は新しい物理のヒントなのかも知れない。
- 様々な距離にあるTeVガンマ線ブレイザーの観測から、背景赤外線量がわかるが、新しい物理の可能性も示唆されている。
- 次世代大型装置によるより高精度のデータが待望される。



End