

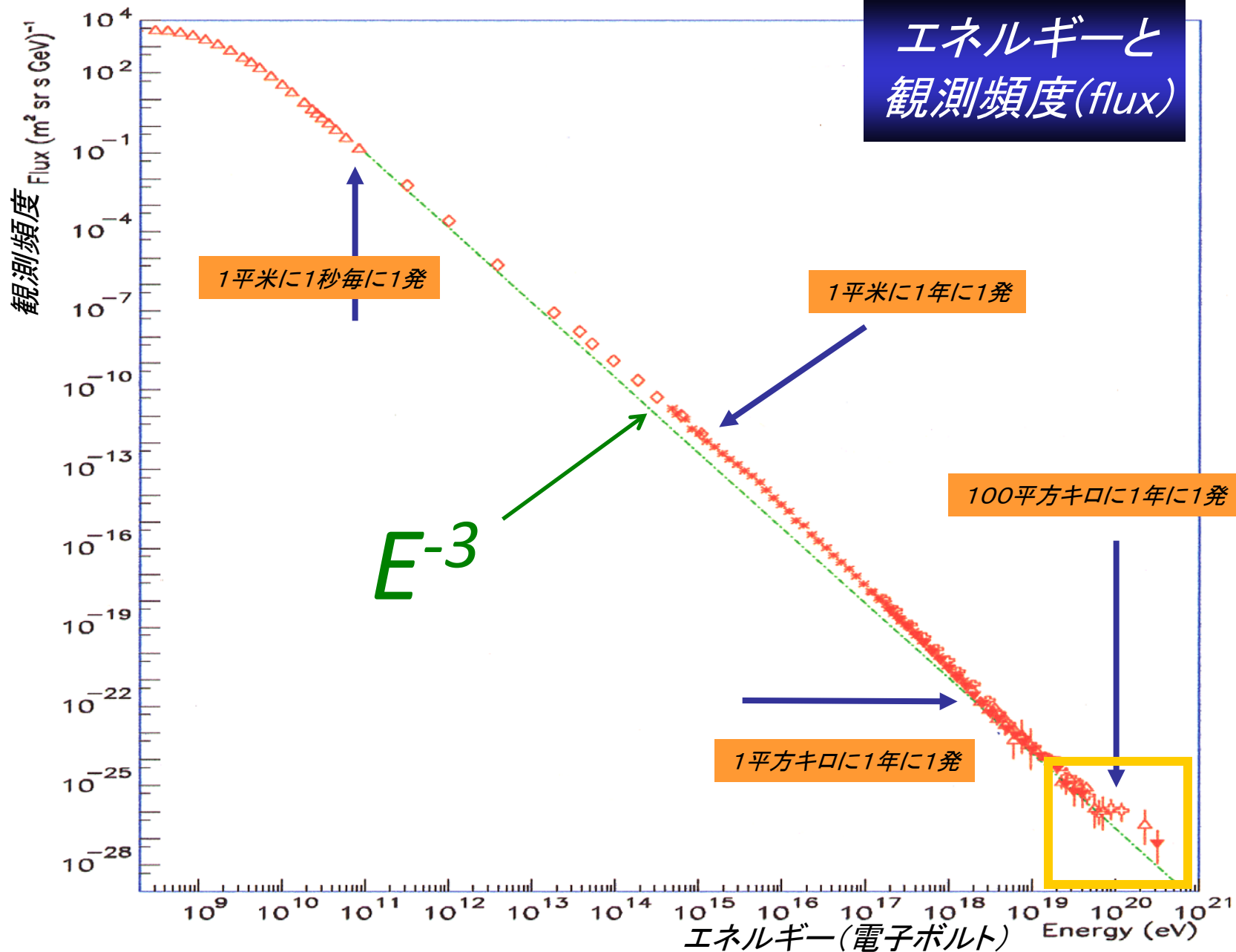
# 最高エネルギー宇宙線観測の進展

—  $10^{20}$ 電子ボルト宇宙粒子線の起源を探る—

2011年5月17日  
理研コロキウム

東京大学宇宙線研究所  
TAグループ・福島正己

# エネルギーと観測頻度(flux)



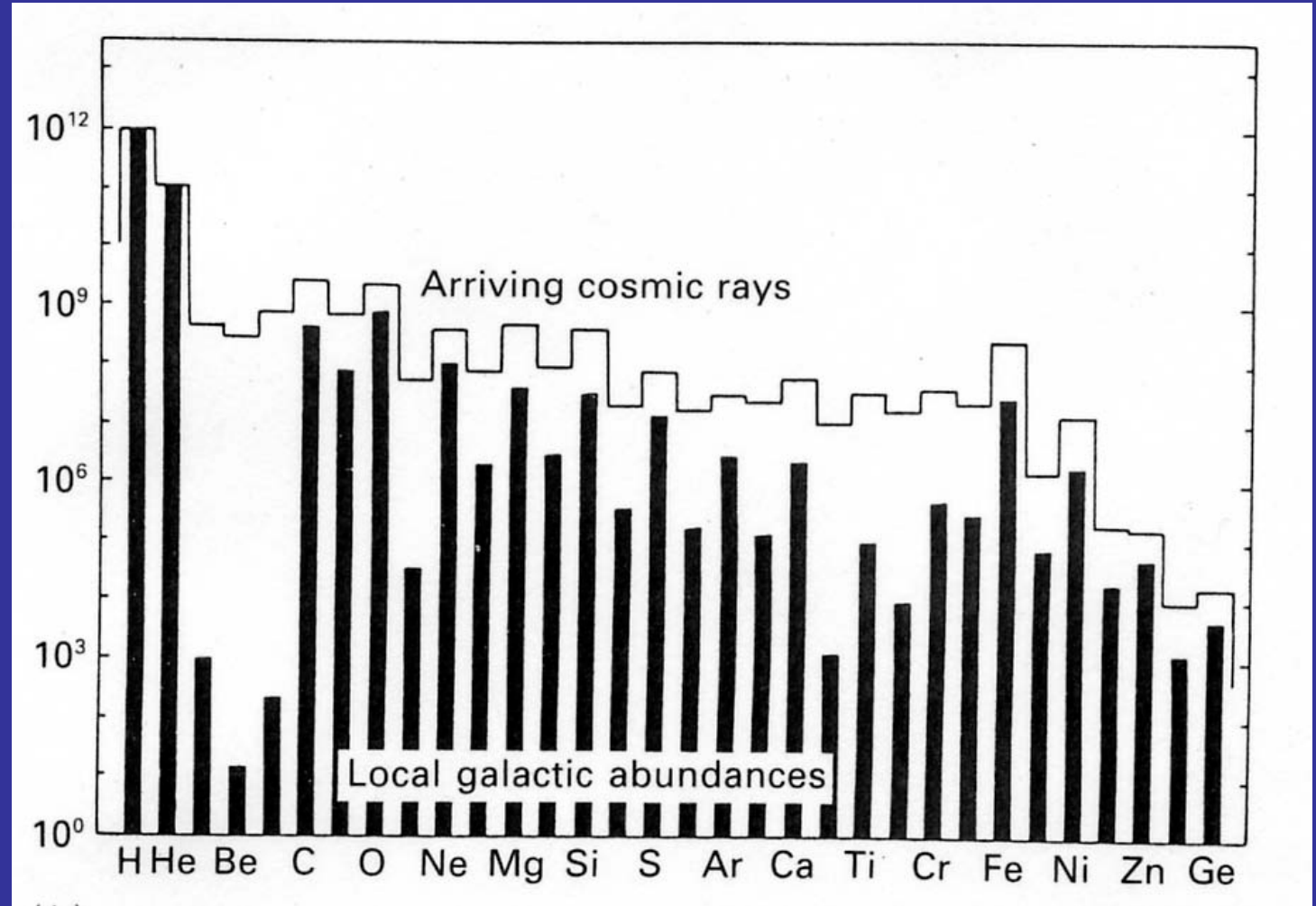
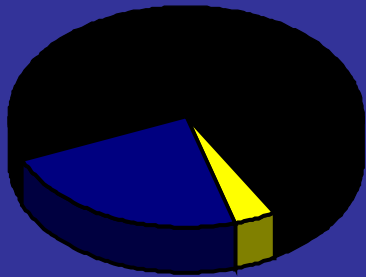
# 直接観測による宇宙線粒子種

～ Cosmic Abundance

暗黒エネルギー 72%

暗黒物質 23%

星を作る物質 5%



# 科学上の興味

極高エネルギー  $10^{20}$  eV で  
何が起きているのか？

UHE獲得の機構

# 測定対象のエネルギー

粒子種	エネルギー	
加速器電子ビーム LEP	100 GeV	$\gamma = 10^5$ $E_{CMS}=10^{11}$
加速器陽子ビーム LHC	10 TeV	$\gamma = 10^4$ $E_{CMS}=10^{13}$
最高エネルギーの宇宙線	$10^{20}$ eV	$\gamma = 10^{11}$ $E_{CMS}=10^{14.5}$
宇宙背景放射	$10^{-3}$ eV	

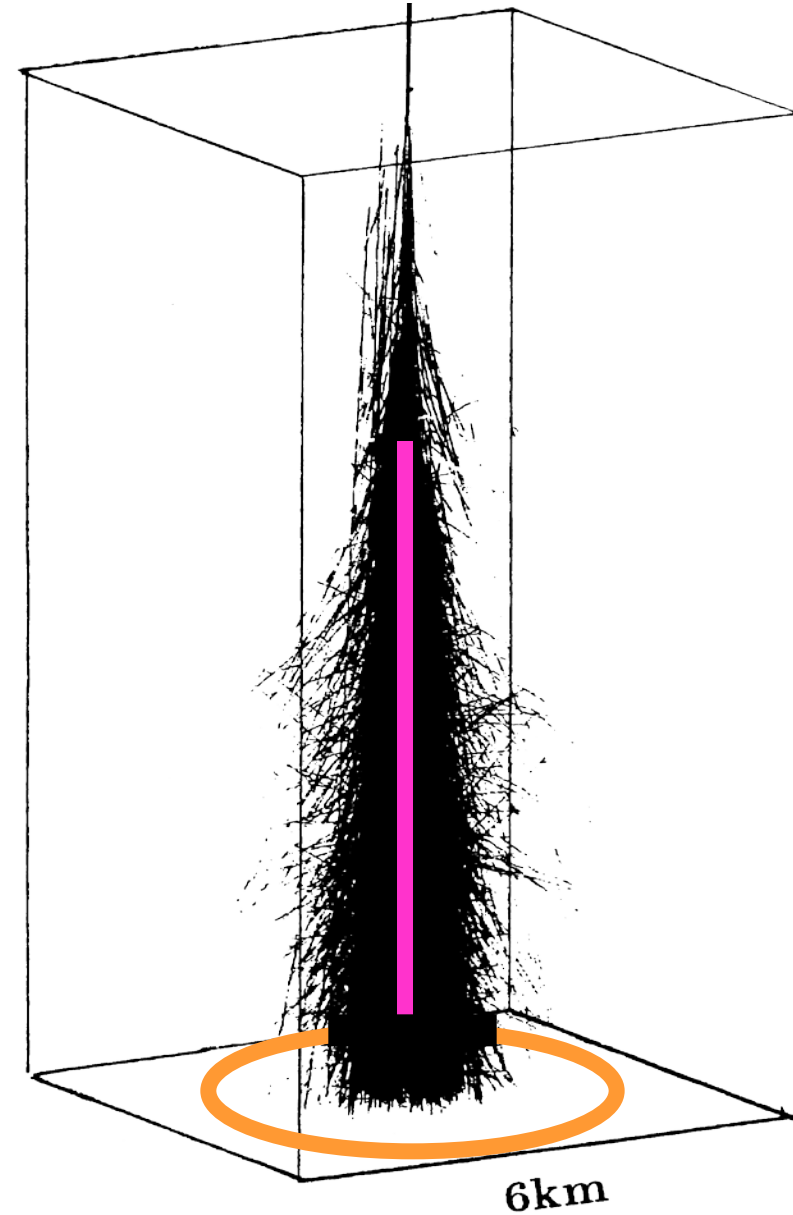
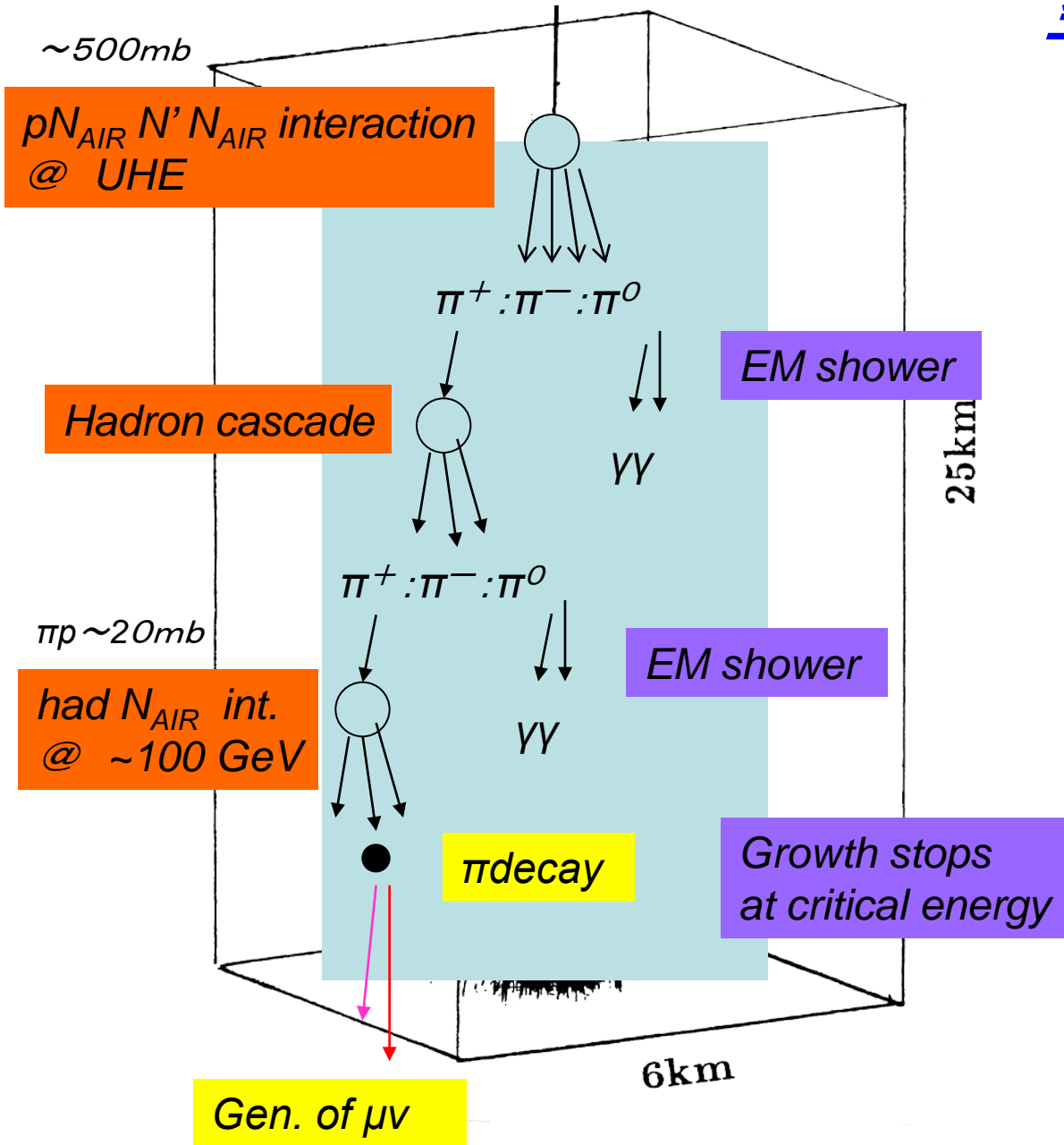
$$\gamma \sim 10^{11}$$

- 886秒は280万年
- 12,700kmは127um
- 137億年は50日

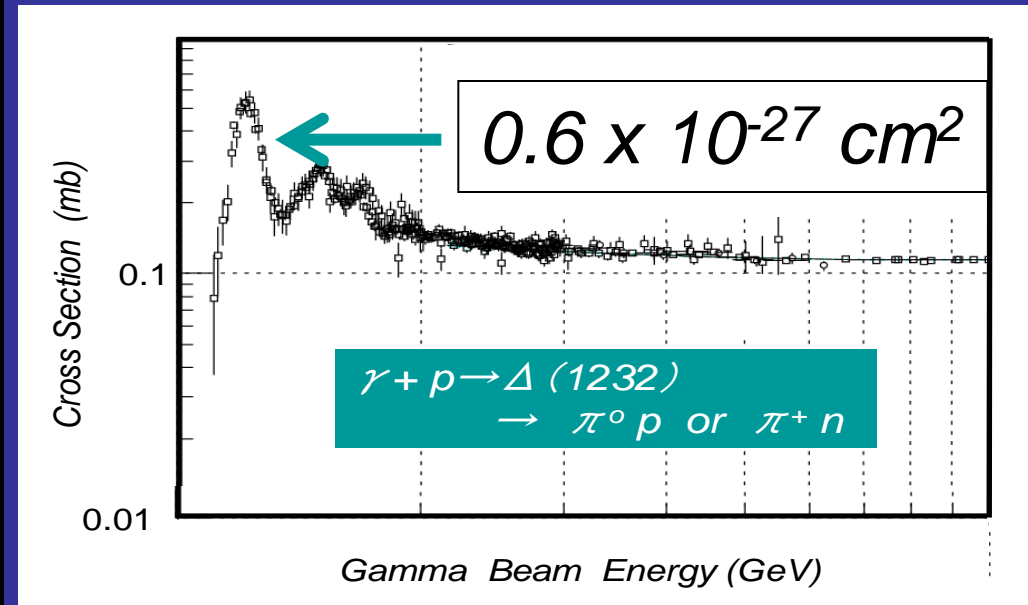
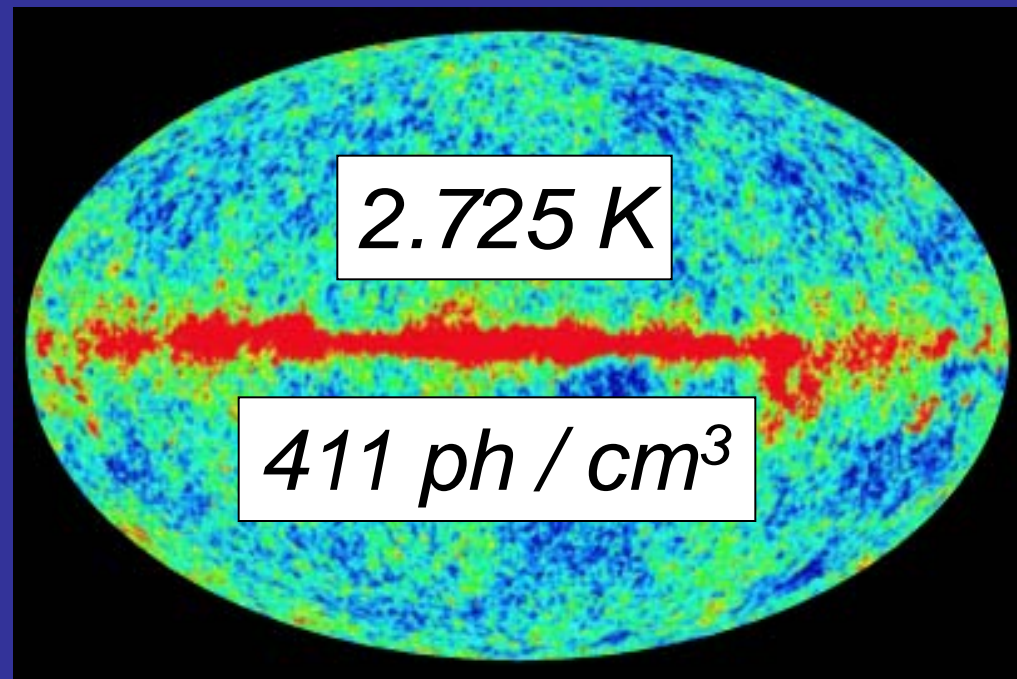
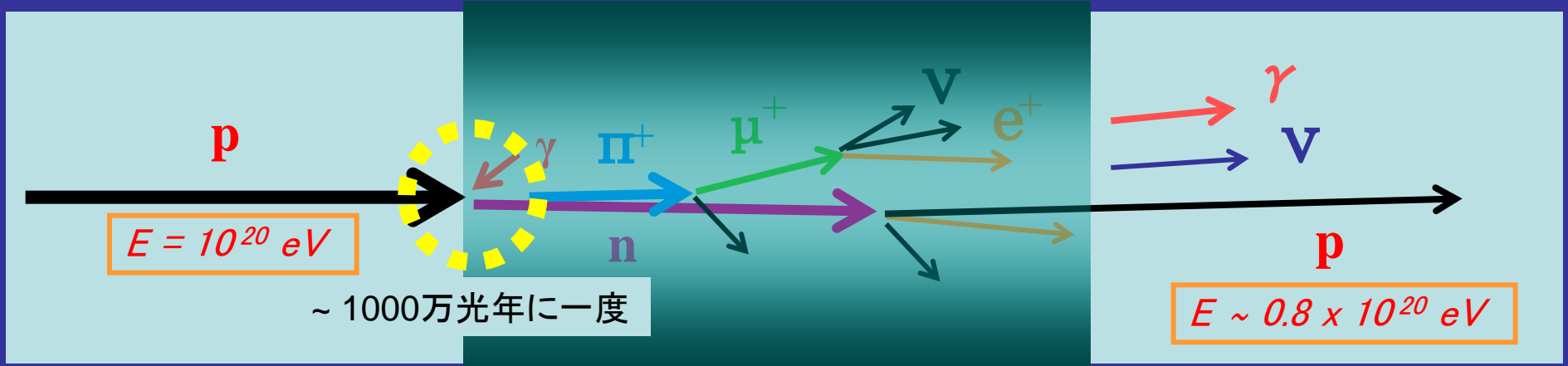
$$E_{CMS} = 10^{14.5} \text{ eV}$$

300 TeV x 300 TeV  
pp collider

# 空気シャワーの発達



# Greisen - Zatsepin - Kuzmin (GZK) 限界

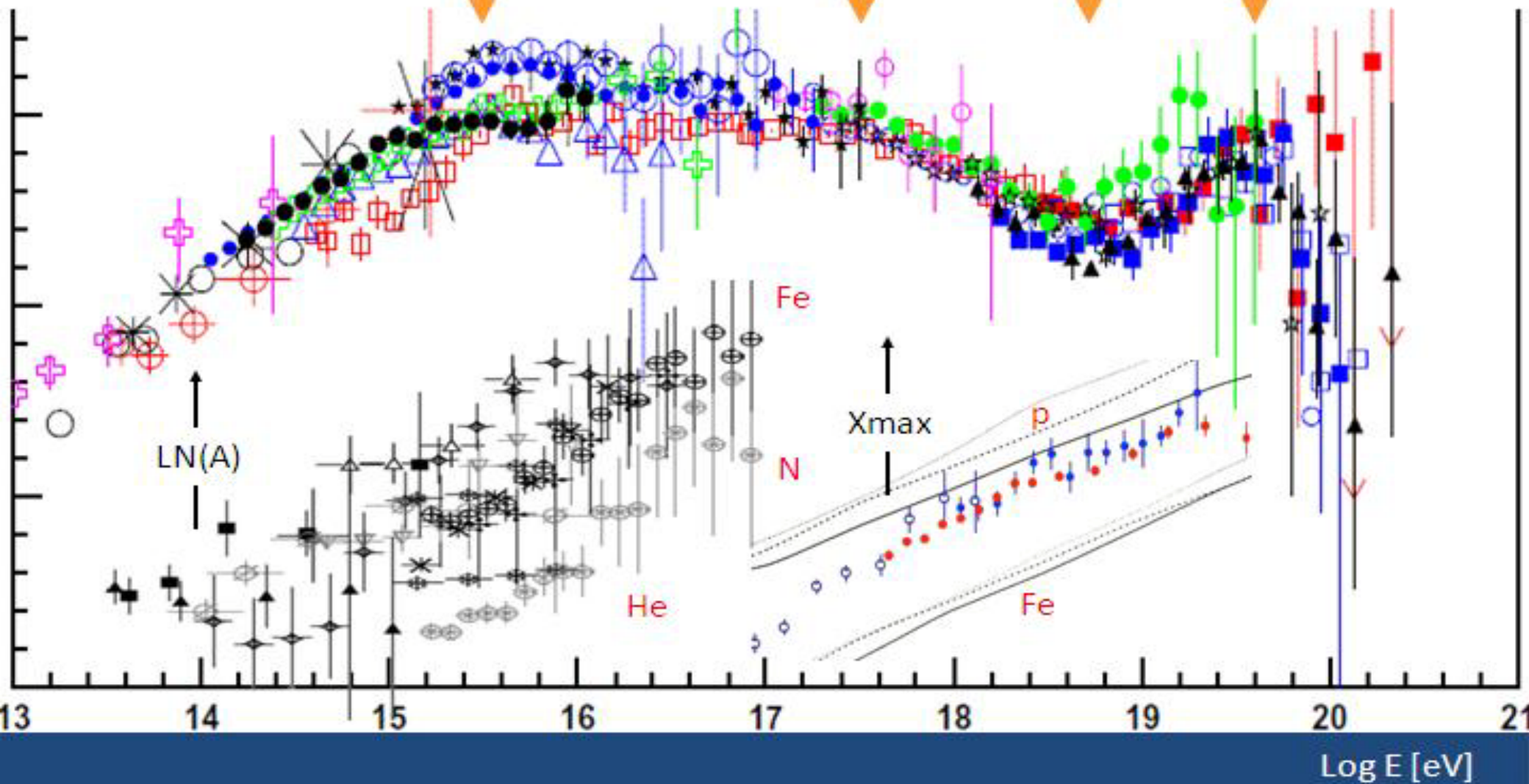


$\sim 10^{20} \text{ eV}$  を超える宇宙線の伝搬は 50Mpc (1.5億光年) が限界

# $x E^3$ スペクトル

Energy Scale (約25%)調整済

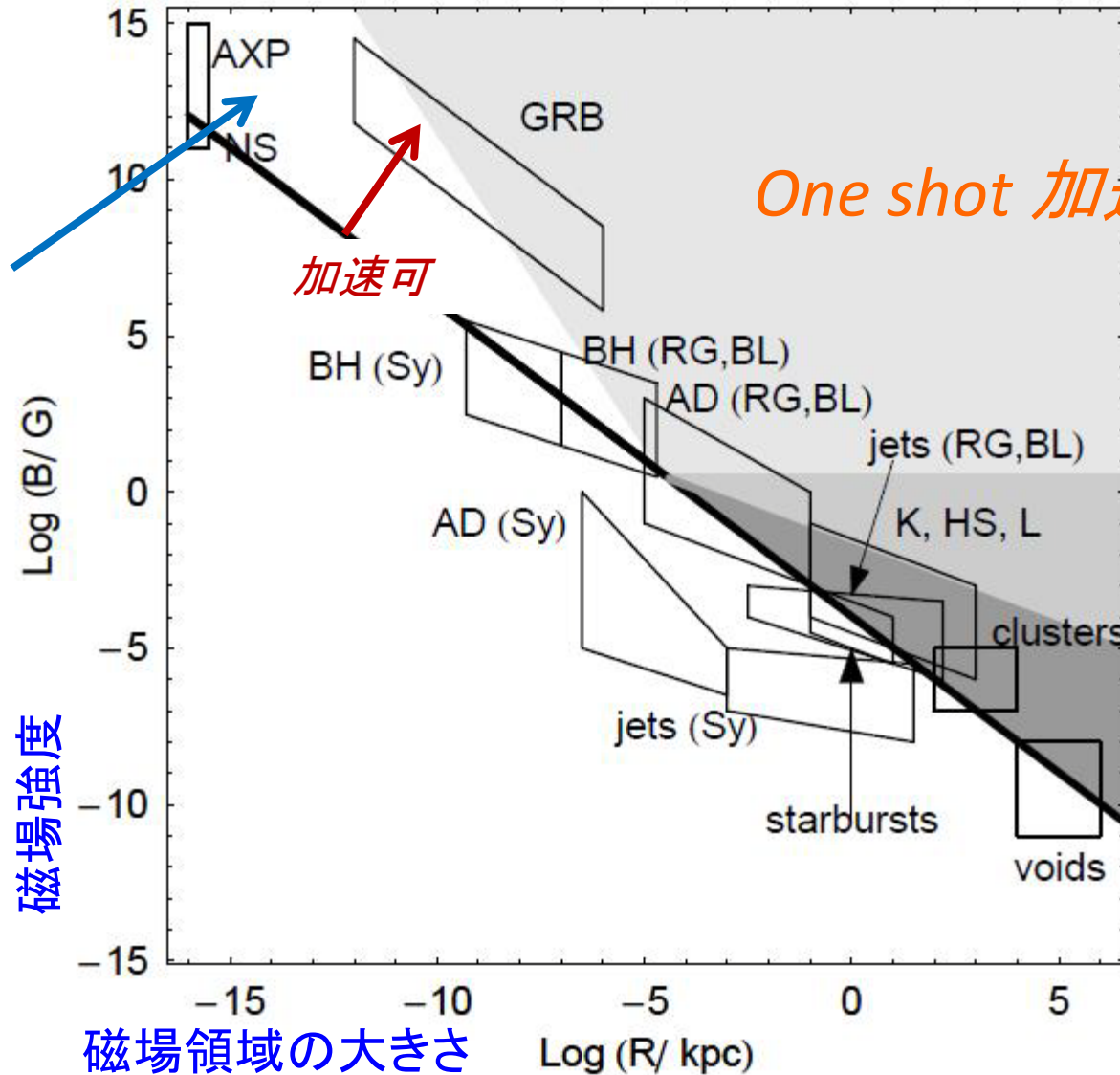
LOG J(E) E<sup>3</sup>





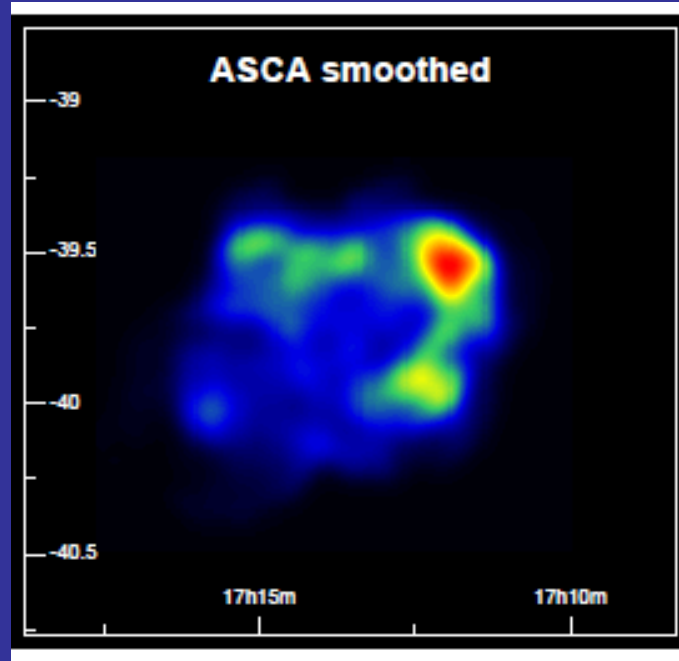
# $10^{20}eV$ 陽子を加速できる天体

Radiation loss

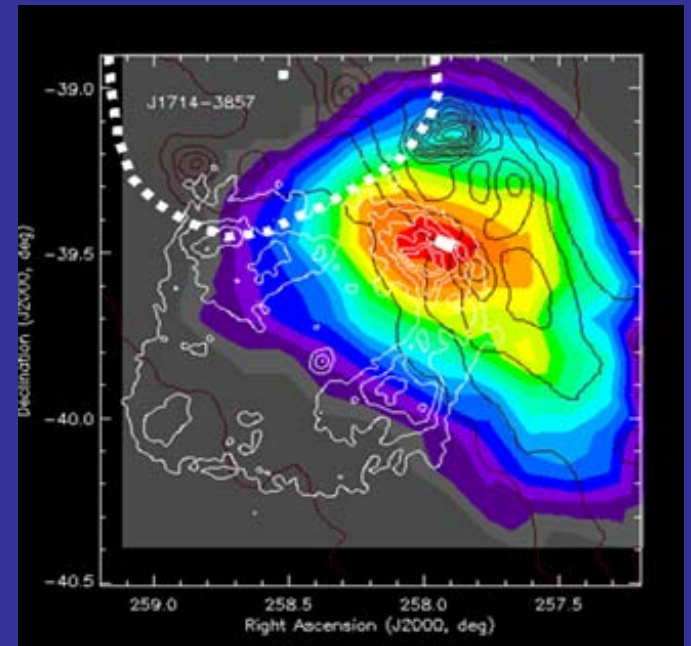


Diffusive  
Shock 加速

# ASCA X線衛星の画像



# CANGAROO 望遠鏡 2002 年

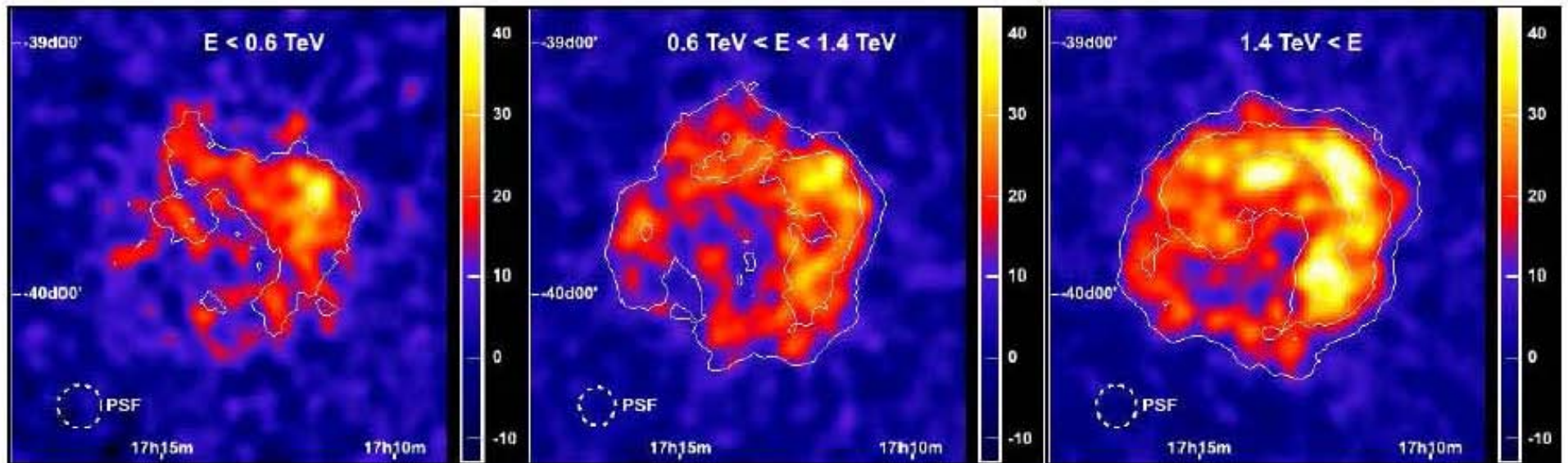


超新星残骸からの  
TeV ガンマ線観測

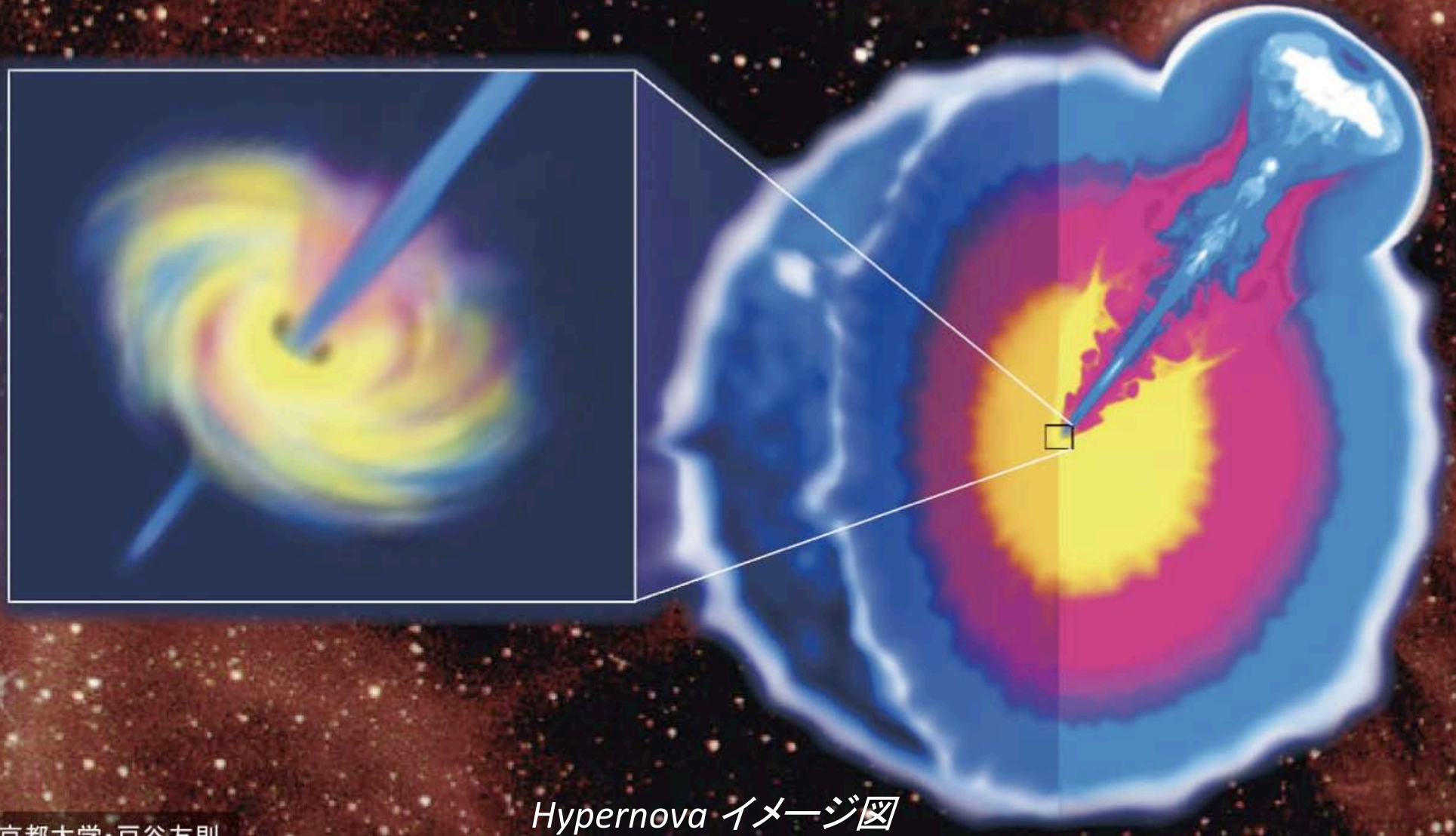
RX J1713.7-3946

HESS 望遠鏡 2004 年

F. Aharonian et al.: The  $\gamma$ -ray supernova remnant RX J1713.7-3946

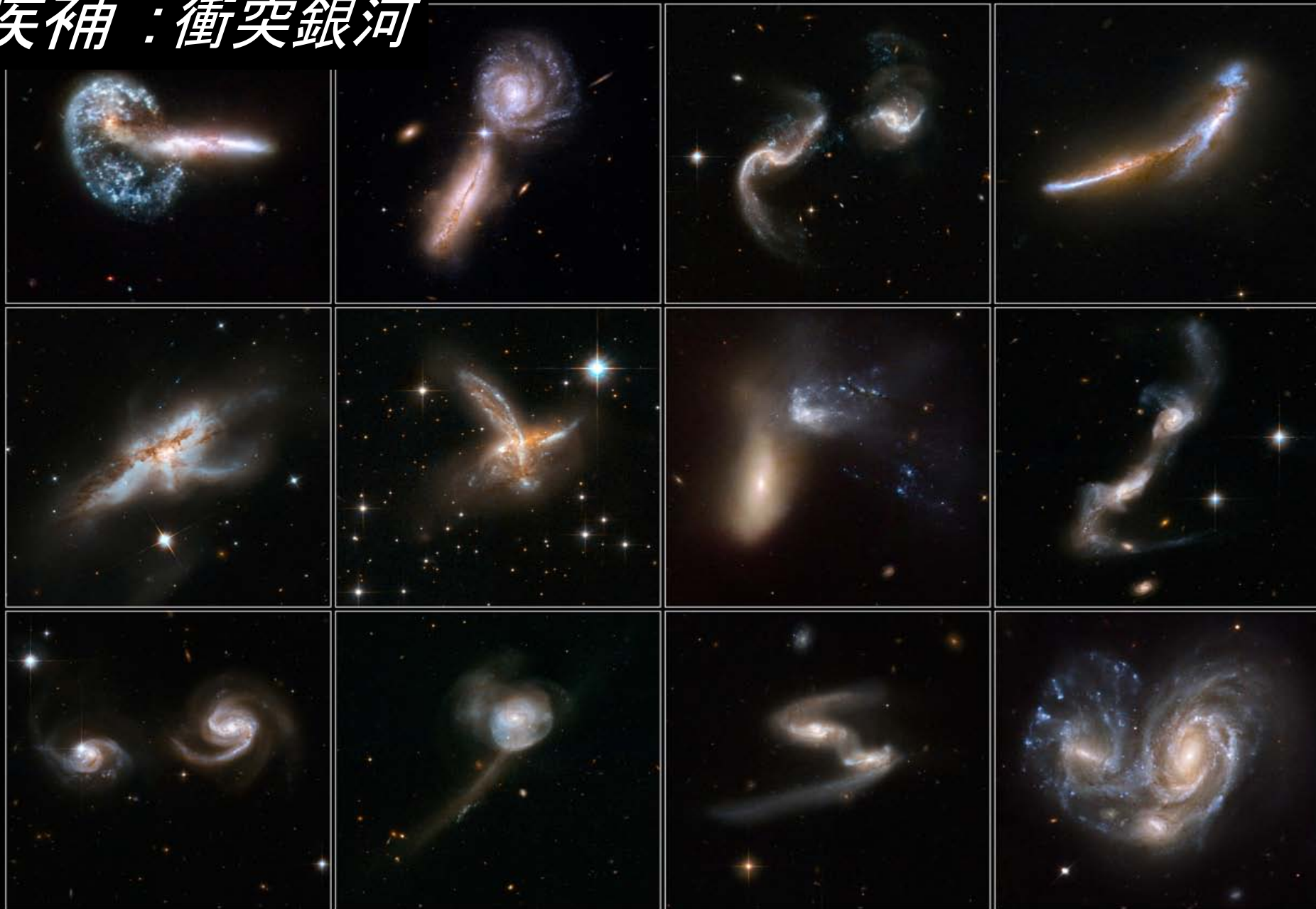


# 候補：ガンマ線バースト (GRB)

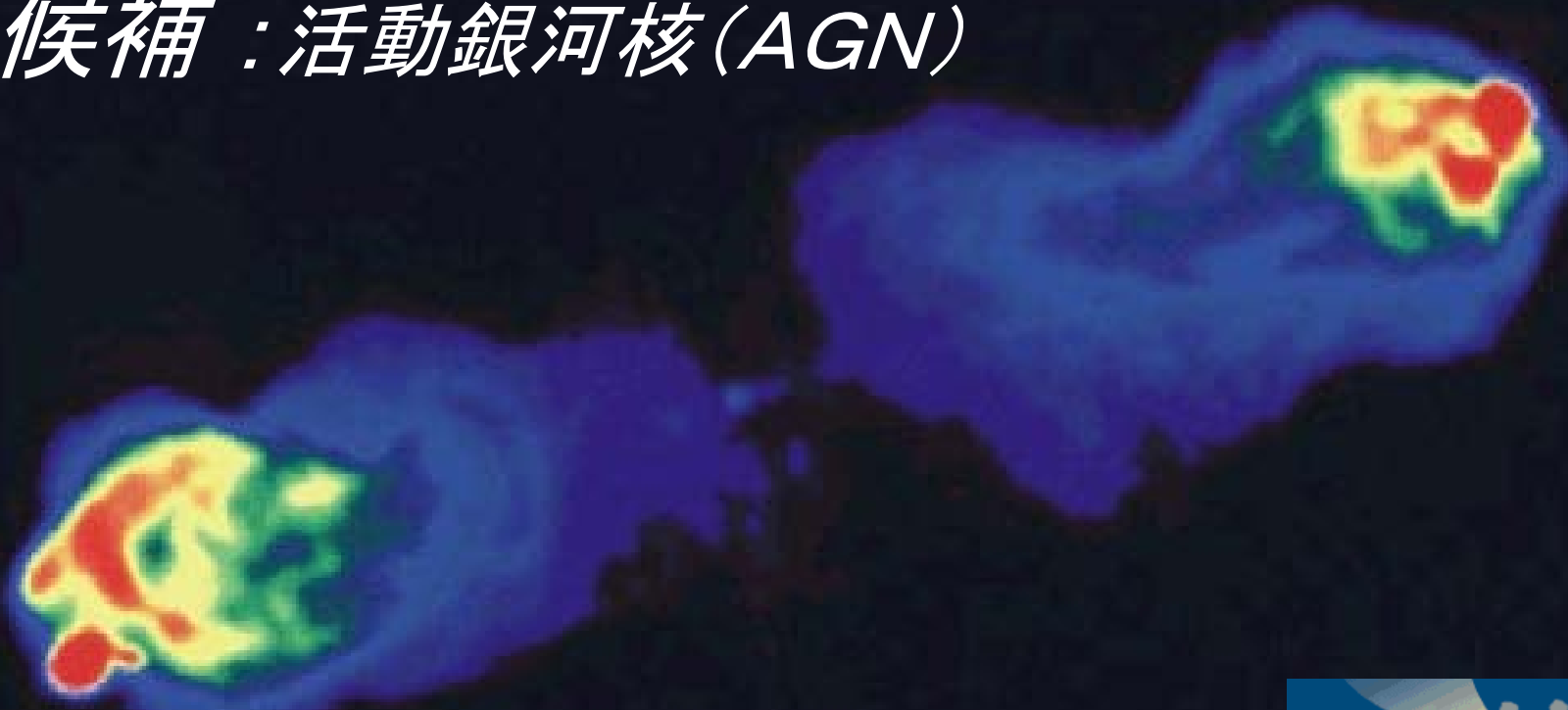


# 候補：衝突銀河

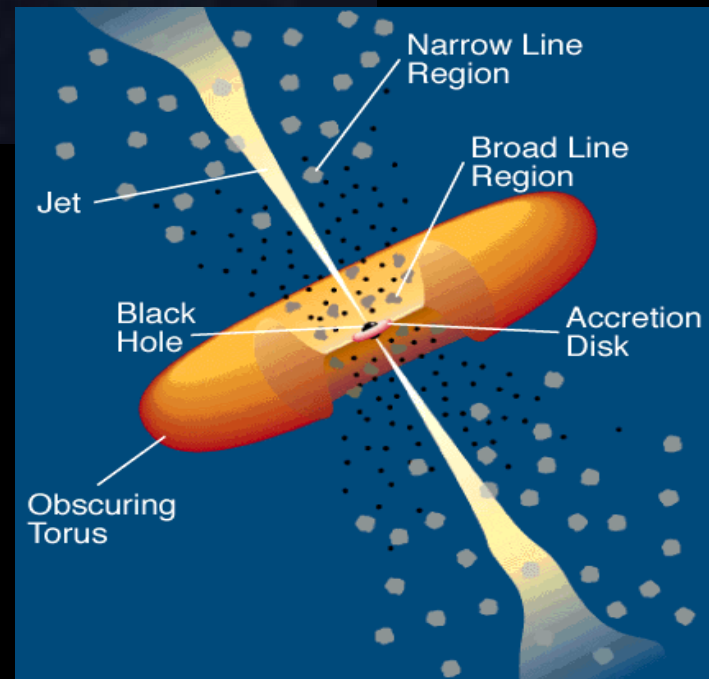
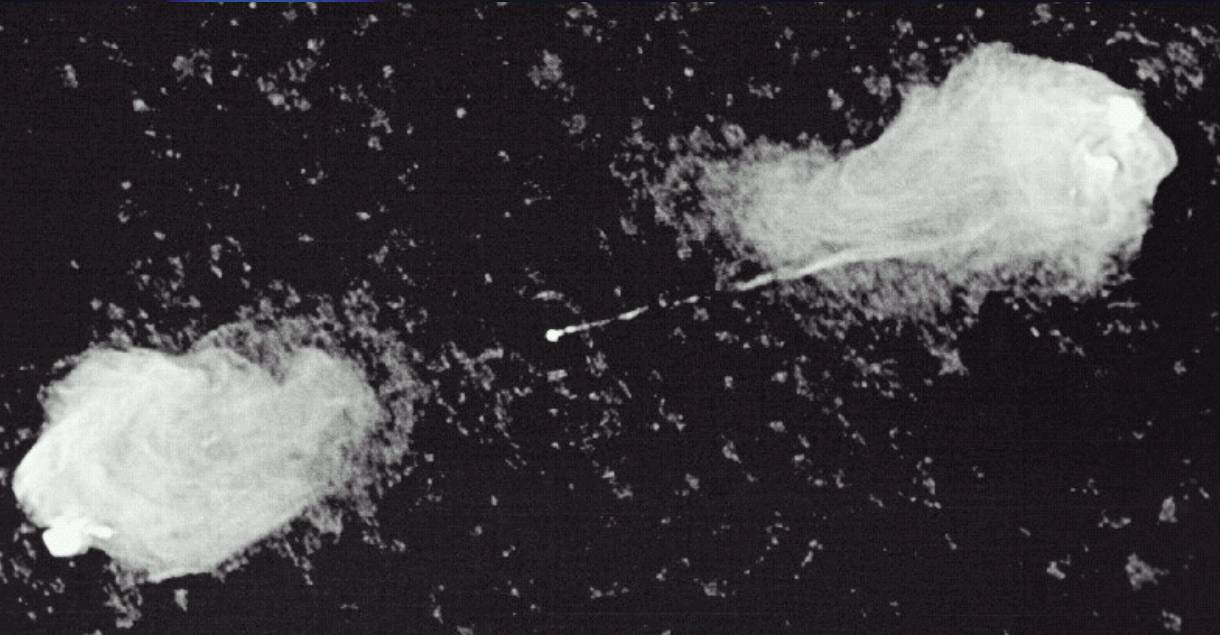
Hubble Space Telescope • ACS/WFC • WFPC2



# 候補：活動銀河核 (AGN)



*Cyg A*



# *UHECRの観測パラメータ*

*( Ultra-High Energy Cosmic Rays )*

*Energy*

*スペクトル、エネルギー限界？*

*Composition*

*UHECRは、何か？*

*Arrival direction*

*発生源・発生機構は？*

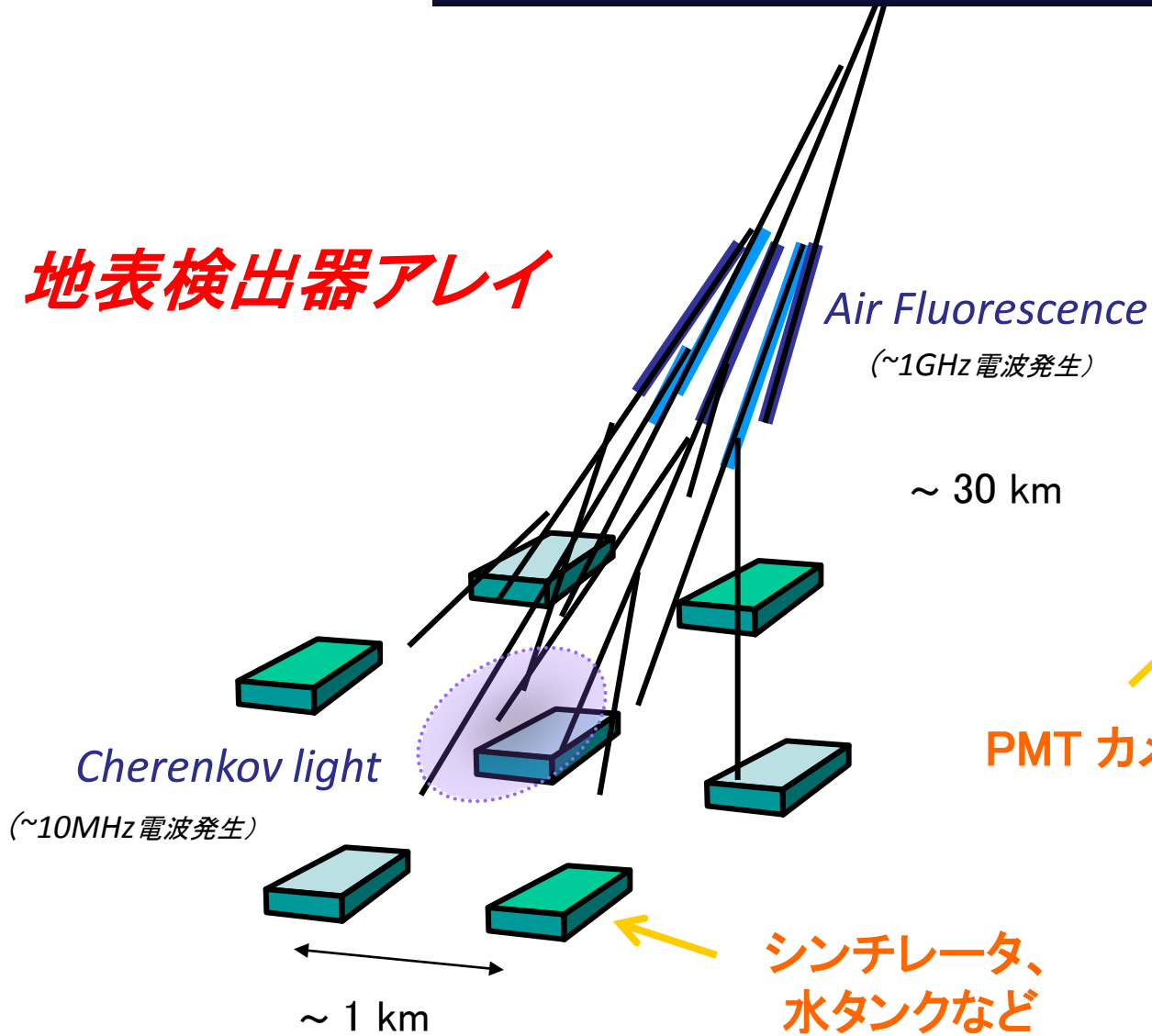
# 新世代検出器

- *AGASA: 明野 空気シャワーアレイ*
- *HiRes: High Resolution Fly's Eye* から
- *2004: Pierre Auger Observatory*
- *2007: Telescope Array (TA)* へ

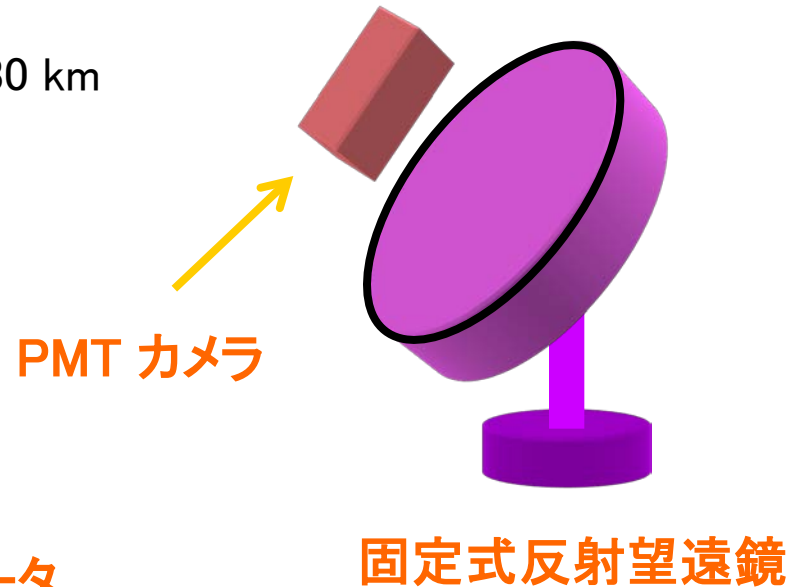
700 - 3000 km<sup>2</sup> の複合検出器  
南北半球

# 空気シャワーの測定

地表検出器アレイ



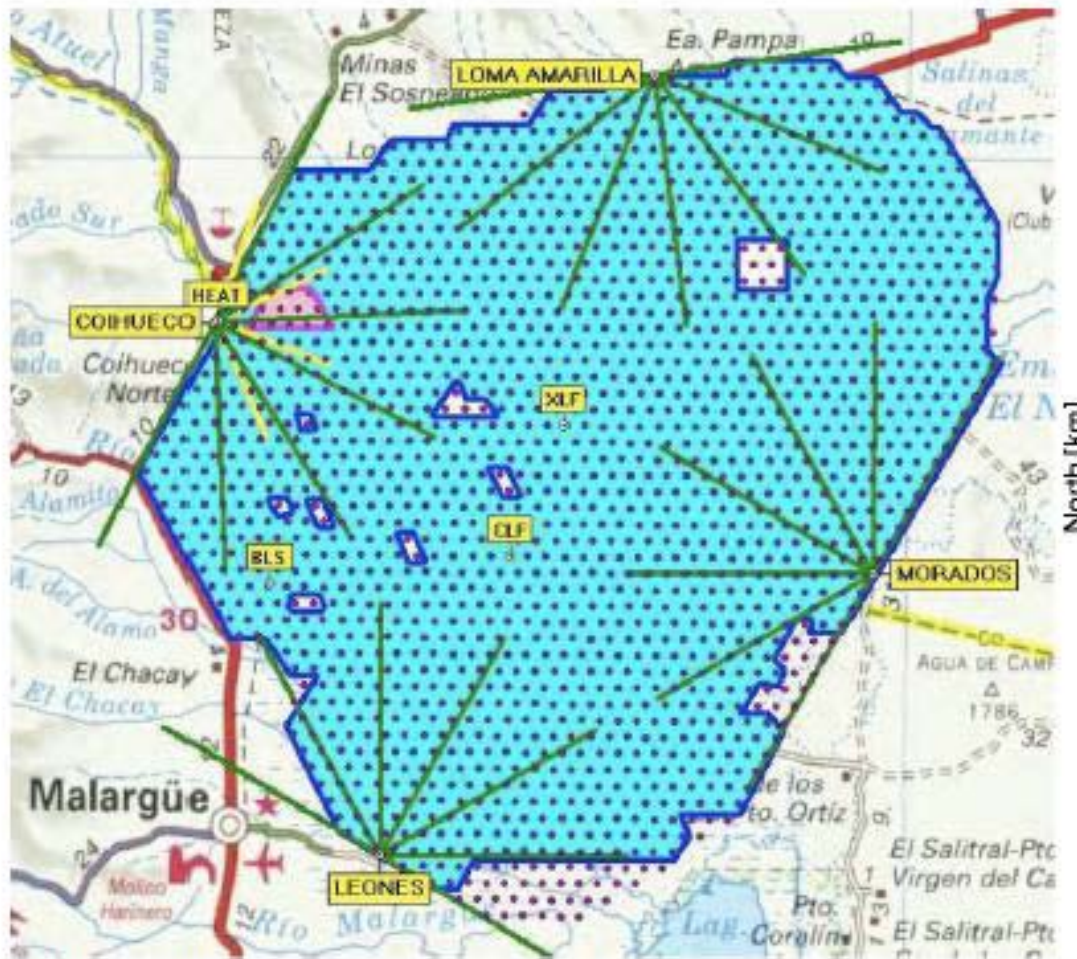
大気蛍光望遠鏡





# Pierre Auger Observatory

Over 1600 detectors in operation,  
covering 3000 square kilometres



July 2009

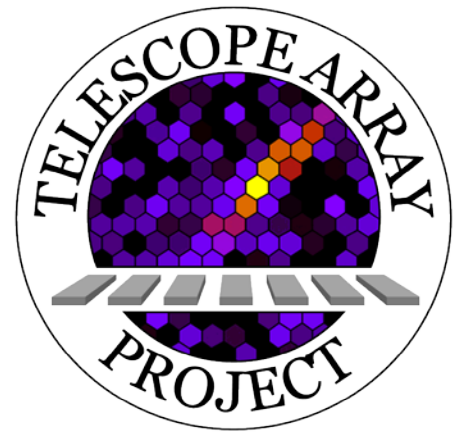
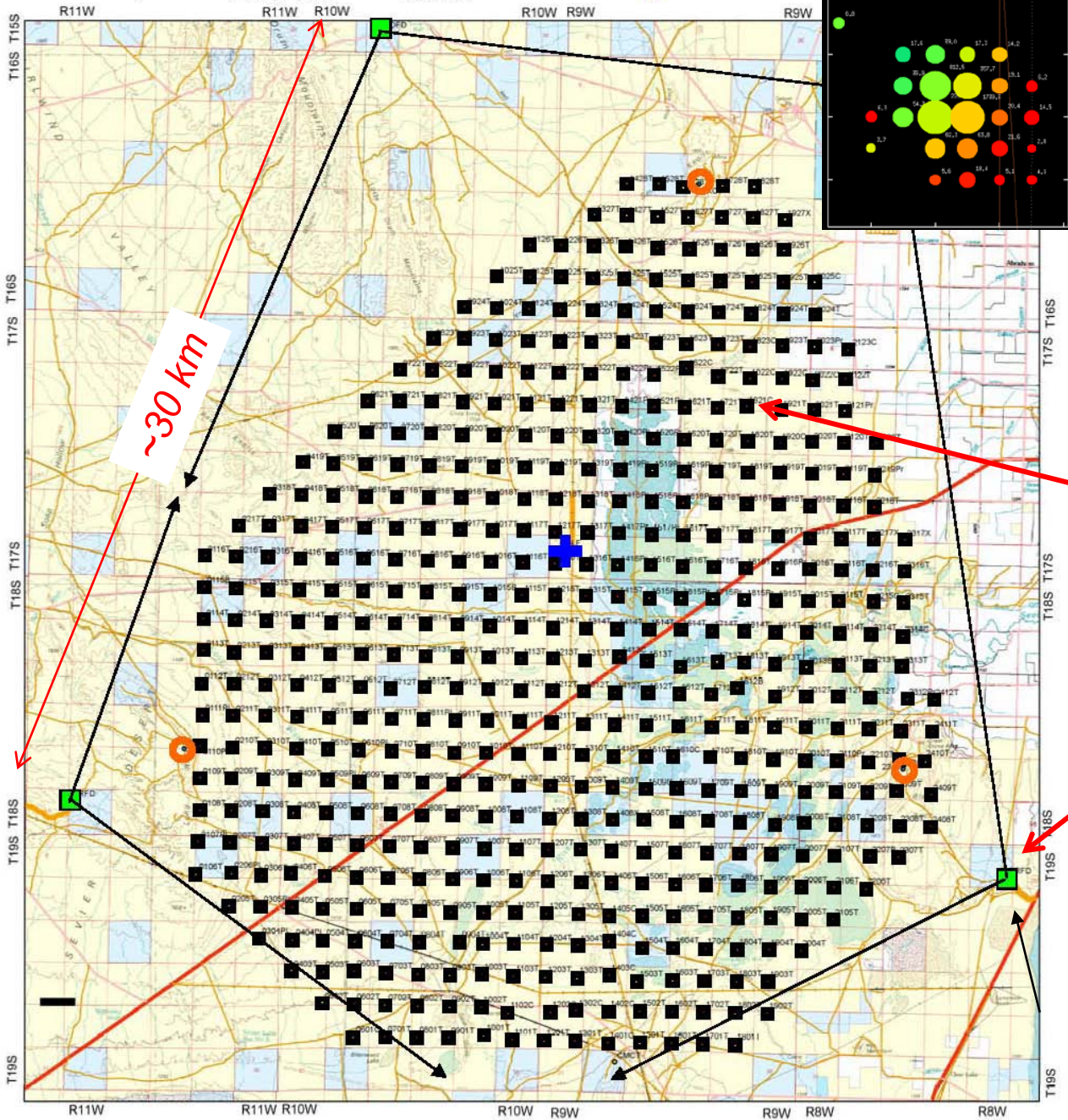


水タンク地表検出器



大気蛍光望遠鏡

■ Battery of Telescopes   
 ■ Particle Detector   
 ○ Communications Tower   
 + CLF   
 0 1 2 4 Miles



507 台の地表検出器アレイ (680 km<sup>2</sup>)

3基の大気蛍光望遠鏡.

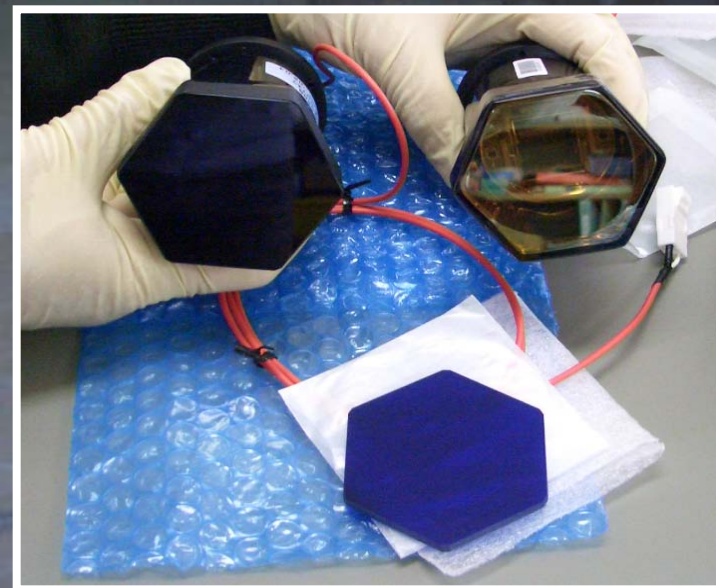
Utah, USA  
 39.3° N  
 112.9° W  
 Alt. 1400 m

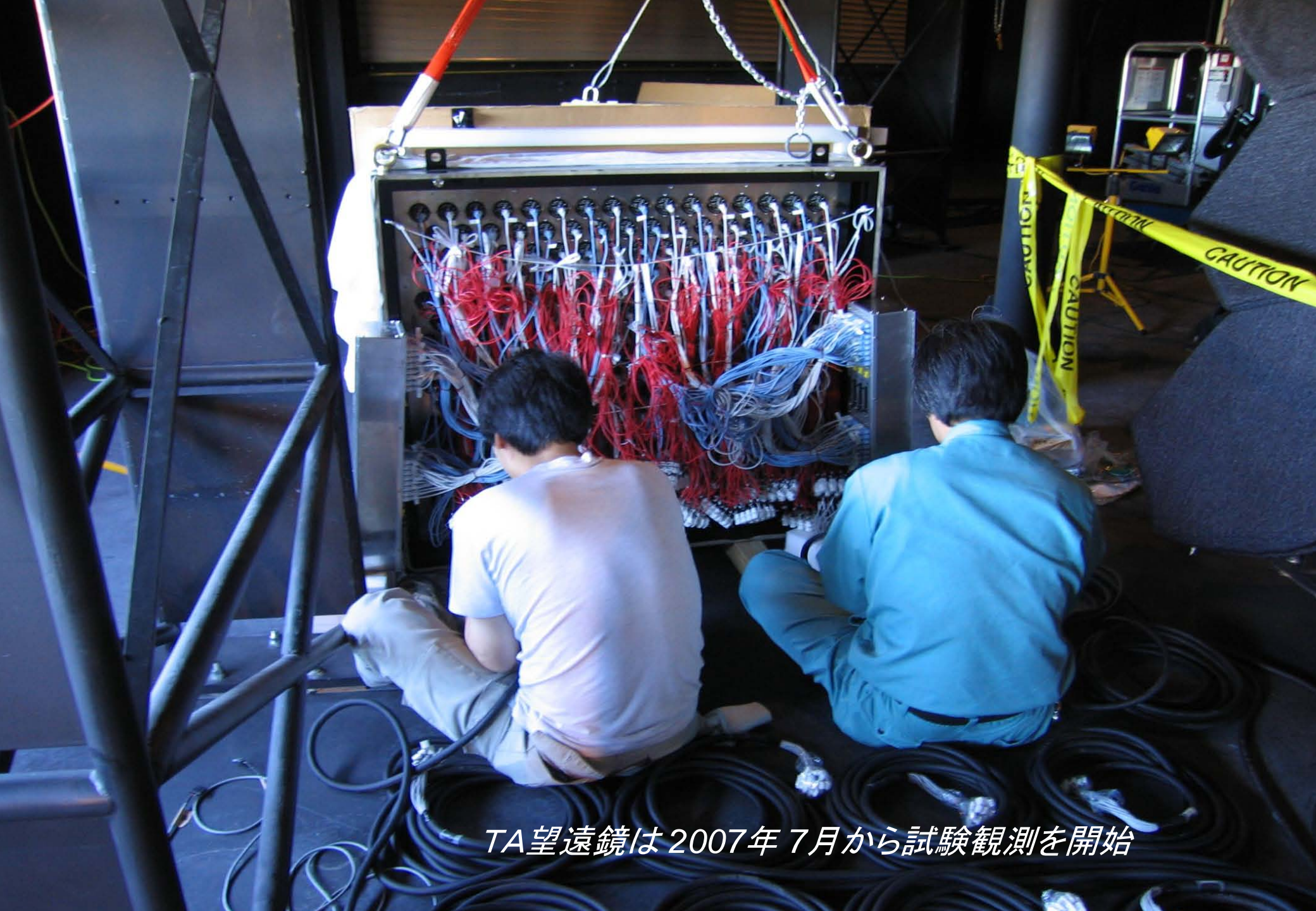
# 大氣螢光望遠鏡





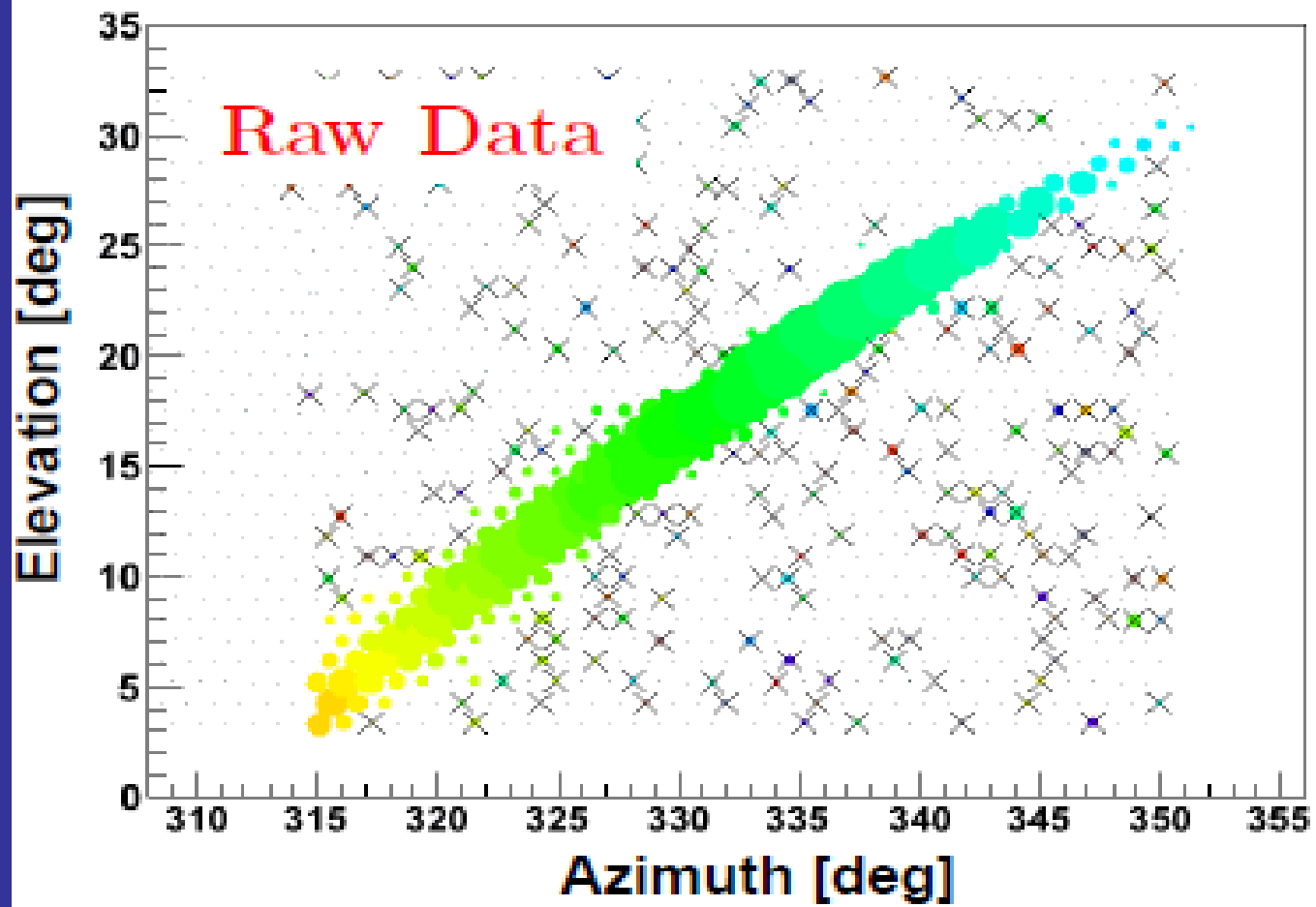
16X16 PMTカメラ、  
紫外透過フィルター付き





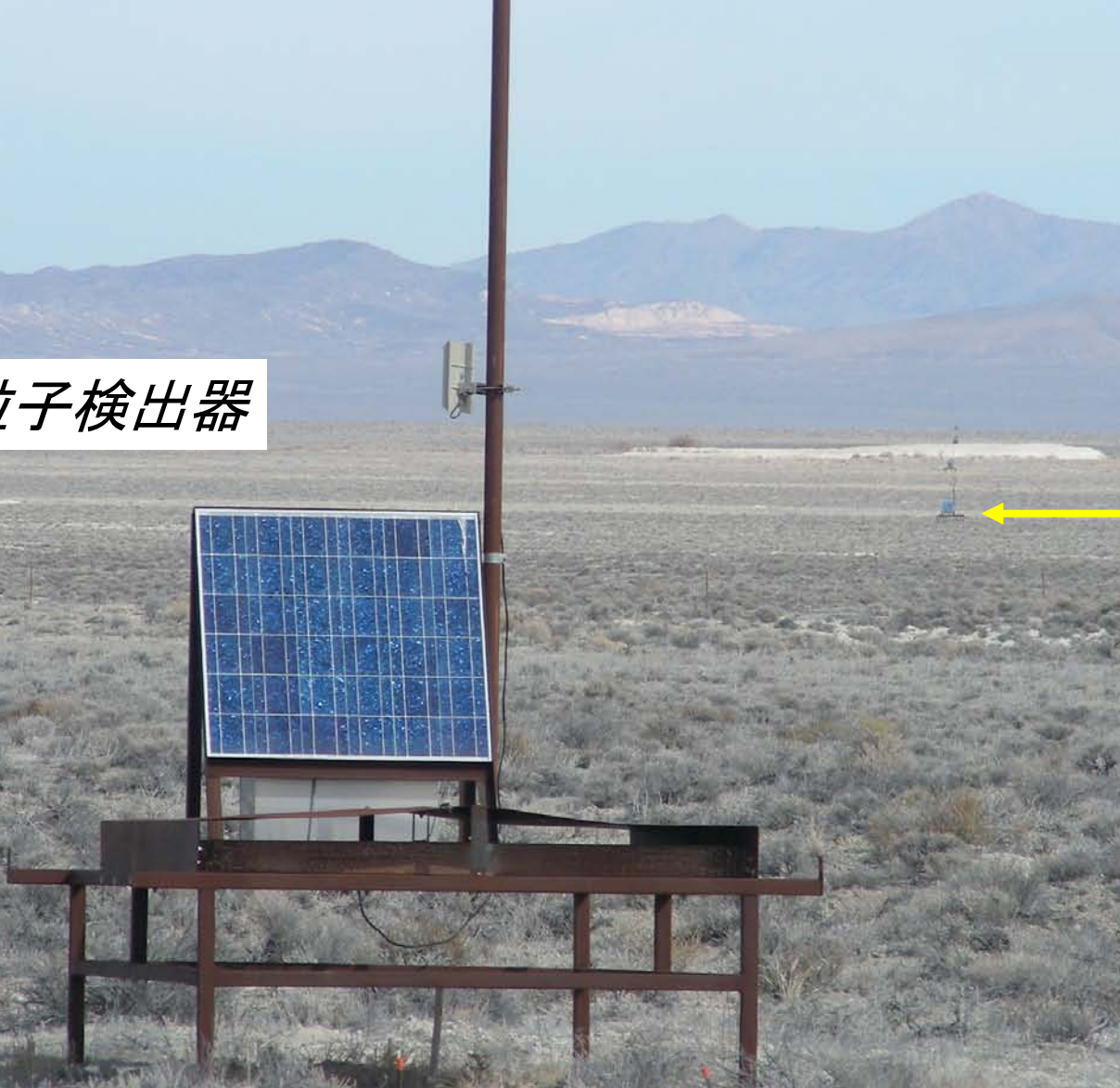
TA望遠鏡は2007年7月から試験観測を開始

# 観測されたシャワーの例

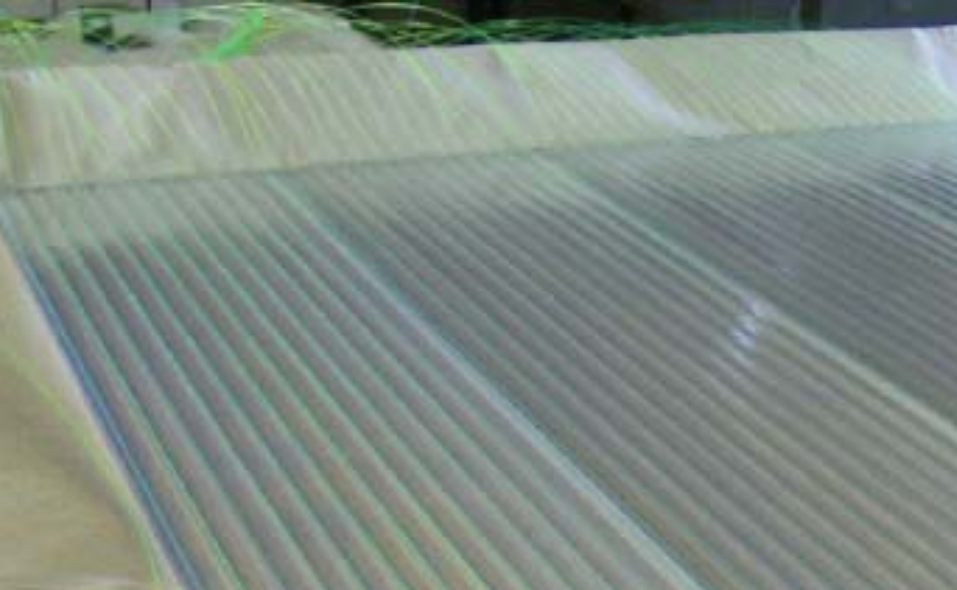




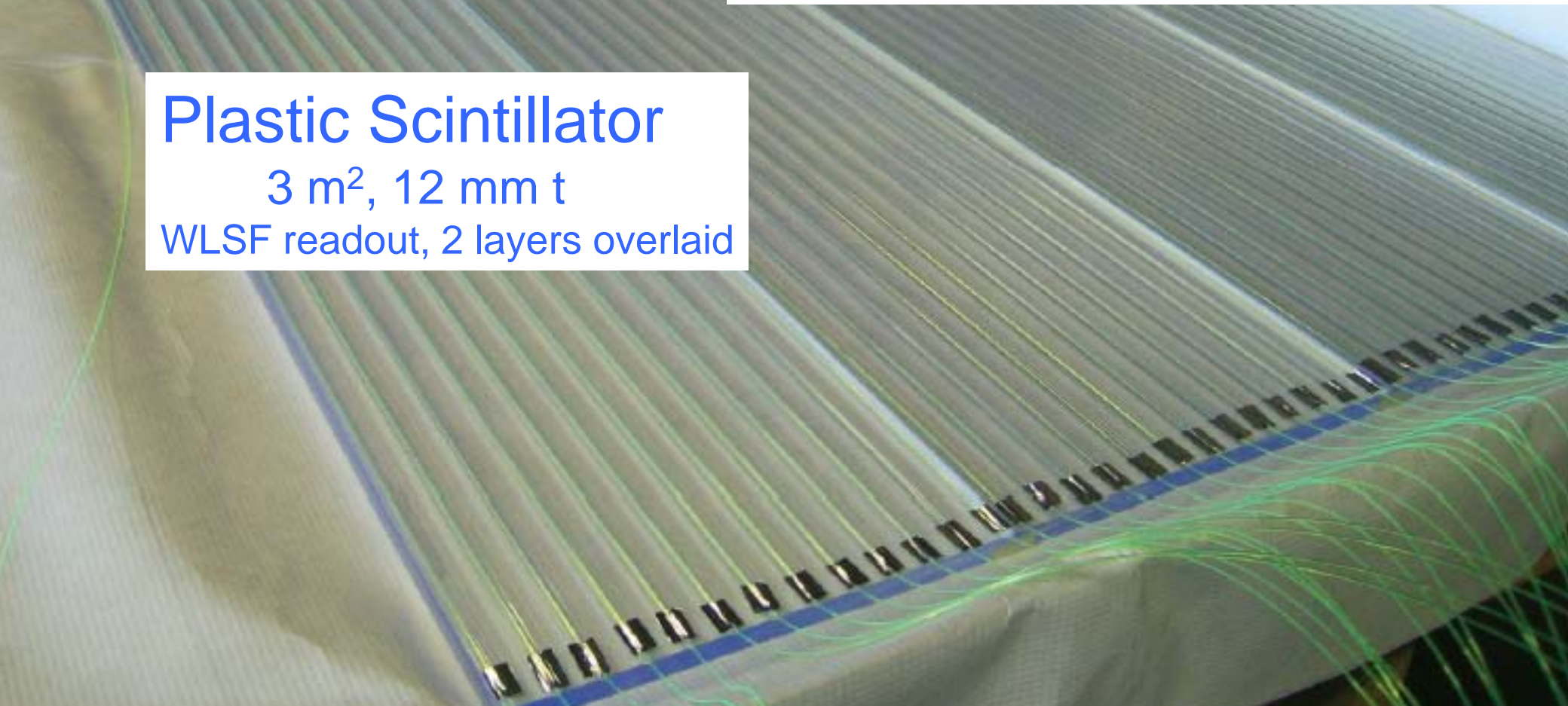
地表粒子検出器

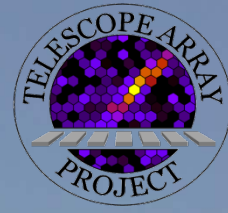






**Plastic Scintillator**  
3 m<sup>2</sup>, 12 mm t  
WLSF readout, 2 layers overlaid

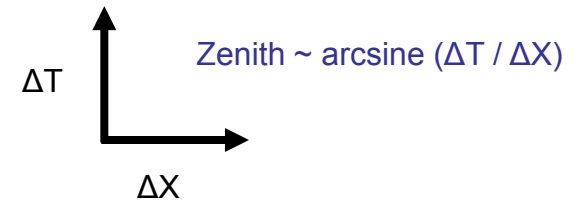




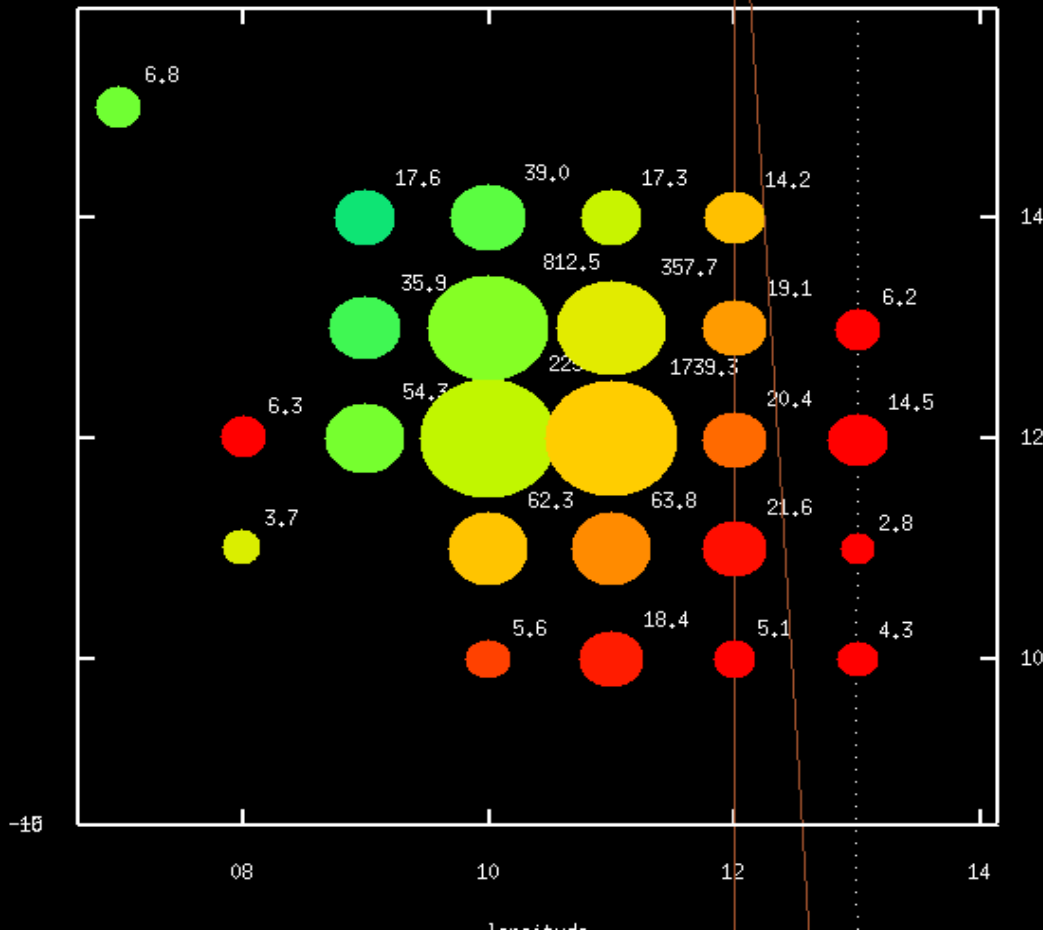
TA地表アレイは2008年3月から観測を始めた。



090122-225422  
TH~38°

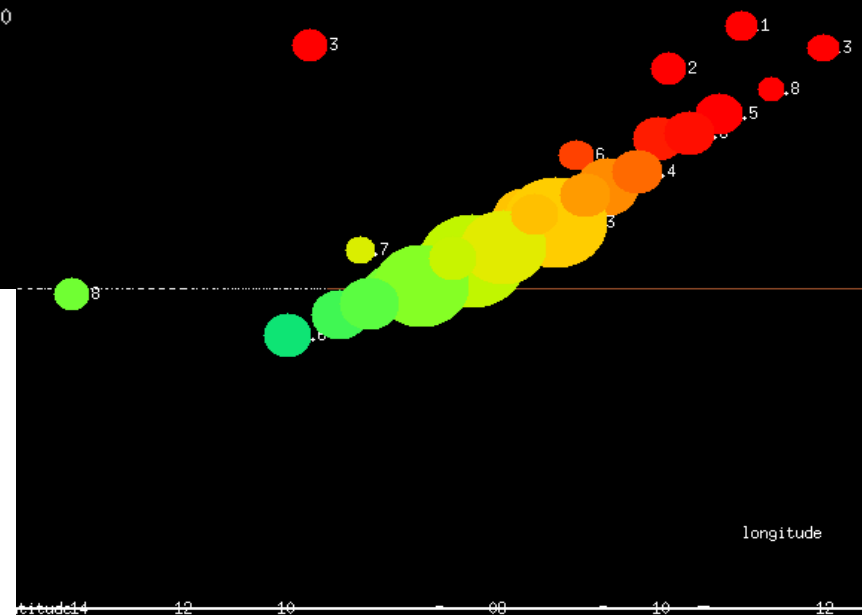


Event "Side" View



Event Top View

X,Y = counter #  
number = MeV energy deposit (av U+D)  
~ 2.5 MeV for vertical mu



# 波形記録

上のシンチレータ波形  
下のシンチレータ波形

周辺部のμ粒子

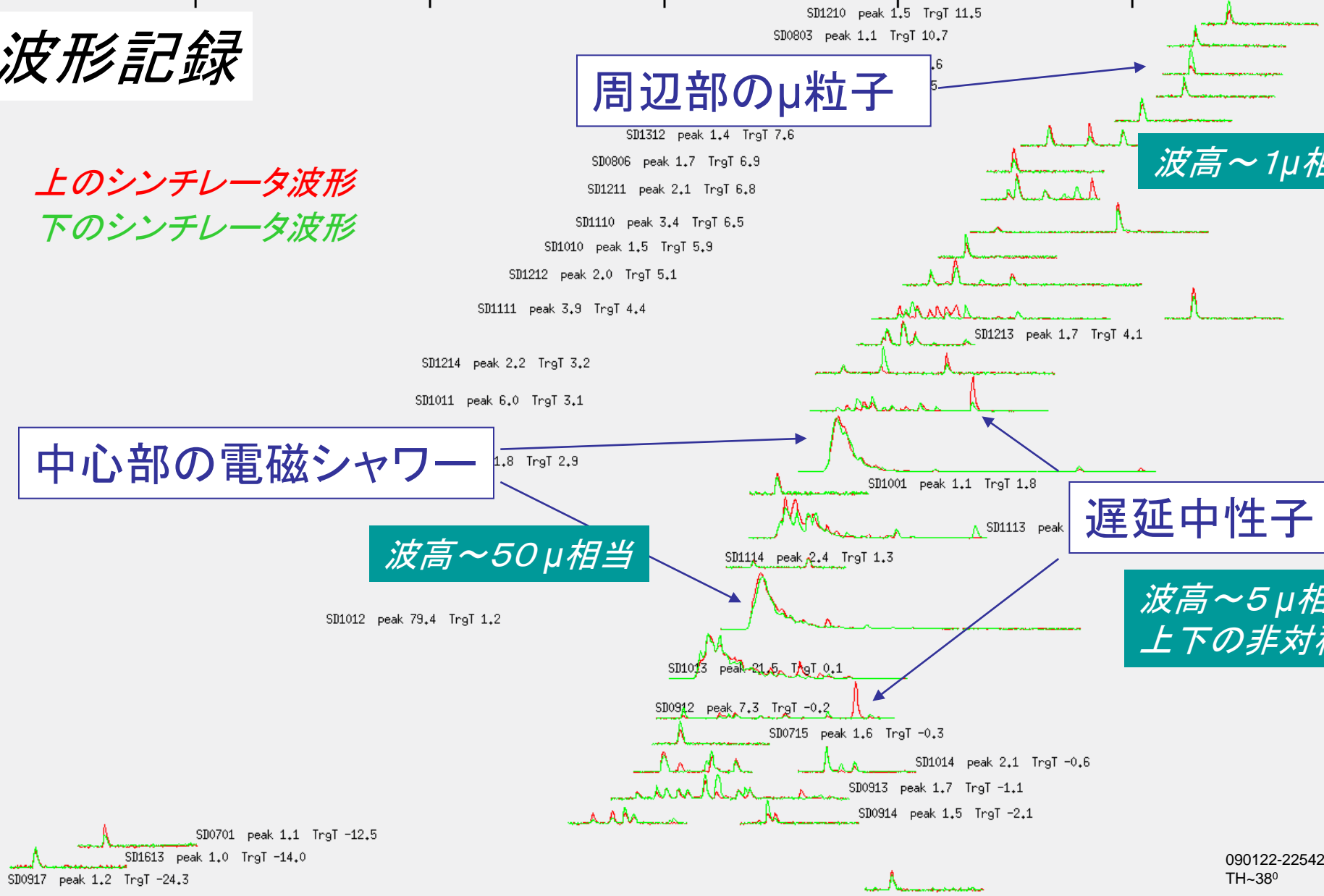
波高~1μ相当

中心部の電磁シャワー

波高~50μ相当

遅延中性子

波高~5μ相当  
上下の非対称



# エネルギースペクトルの測定

# Data set

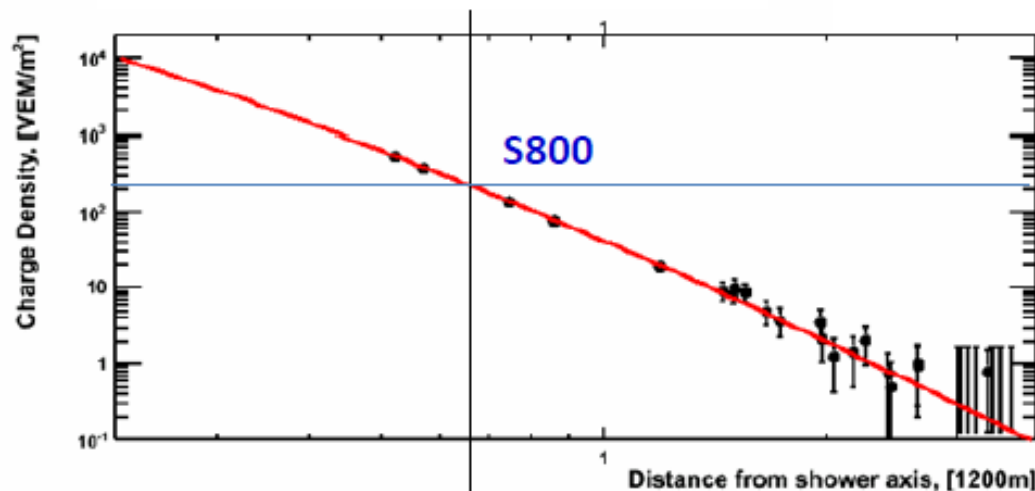
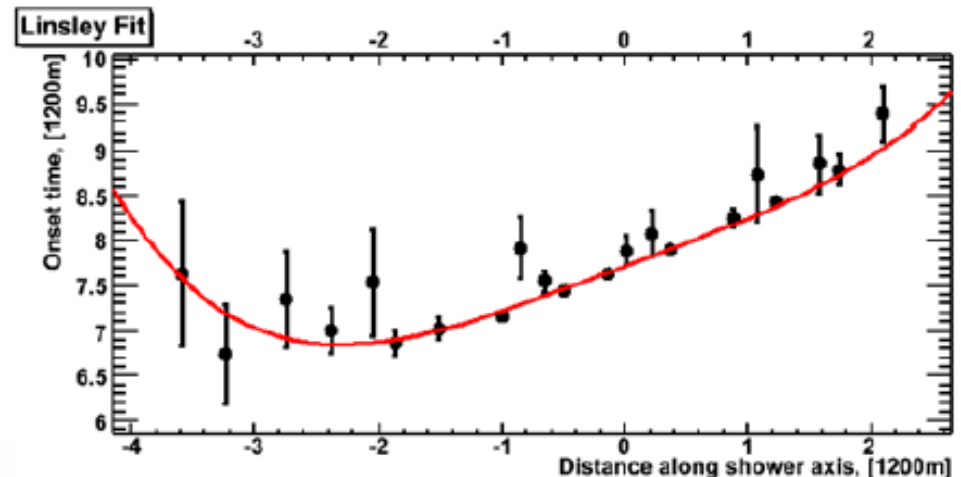
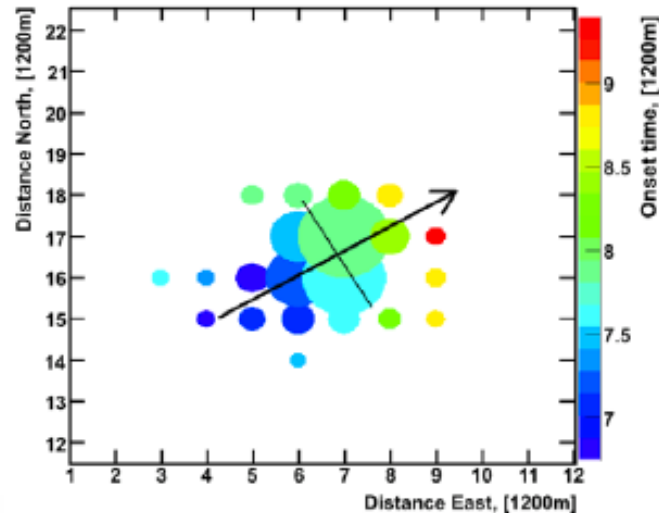
- May/2008 – Feb/2010 (1.75 years)
- Exposure  $\sim 1500 \text{ km}^2 \text{ sr yr}$  ( $\sim$ AGASA 13 years)
- Cuts:
  - LDF  $\chi^2/\text{ndf} < 4.0$
  - Border Cut  $> 1.2 \text{ km}$
  - Zenith Angle  $< 45$  degrees
  - Pointing direction uncertainty  $< 5$  degrees
  - Fractional S800 uncertainty  $< 0.25$

→ 6264 events

# SD event reconstruction

2008/Jun/25 - 19:45:52.588670 UTC

Time fit to determine geometry  
(modified Linsley)



Lateral Density Distribution Fit  
to determine **S800** (charge density  
800m from the shower axis)

Fit with AGASA LDF

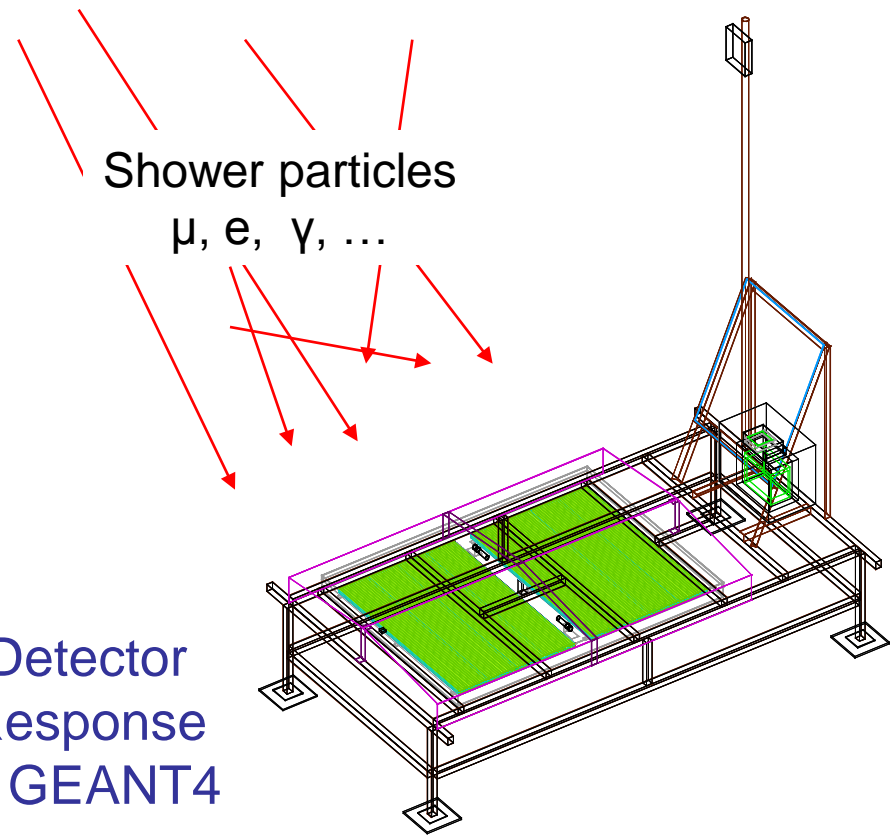
$$\rho(r) \propto \left(\frac{r}{R_M}\right)^{-1.2} \left(1 + \frac{r}{R_M}\right)^{-(\eta-1.2)} \left\{1 + \left(\frac{r}{1000}\right)^2\right\}^{-0.6}$$

$$\eta = (3.97 \pm 0.13) - (1.79 \pm 0.62) (\sec \theta - 1)$$

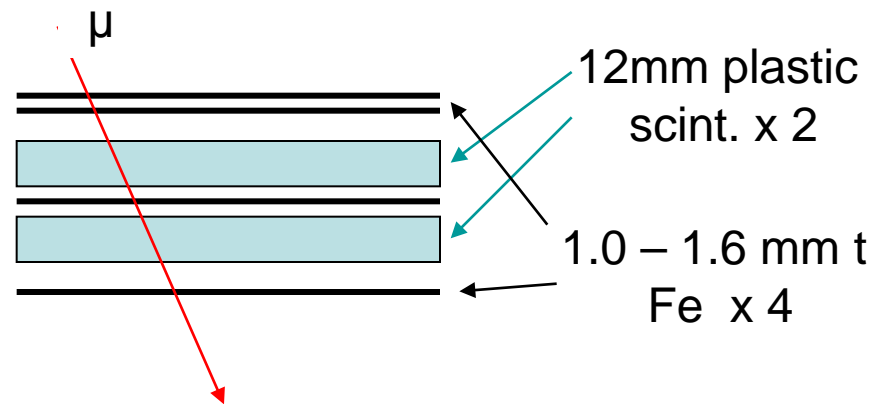
- S(800) → Primary Energy



# 空気シャワーsimulation

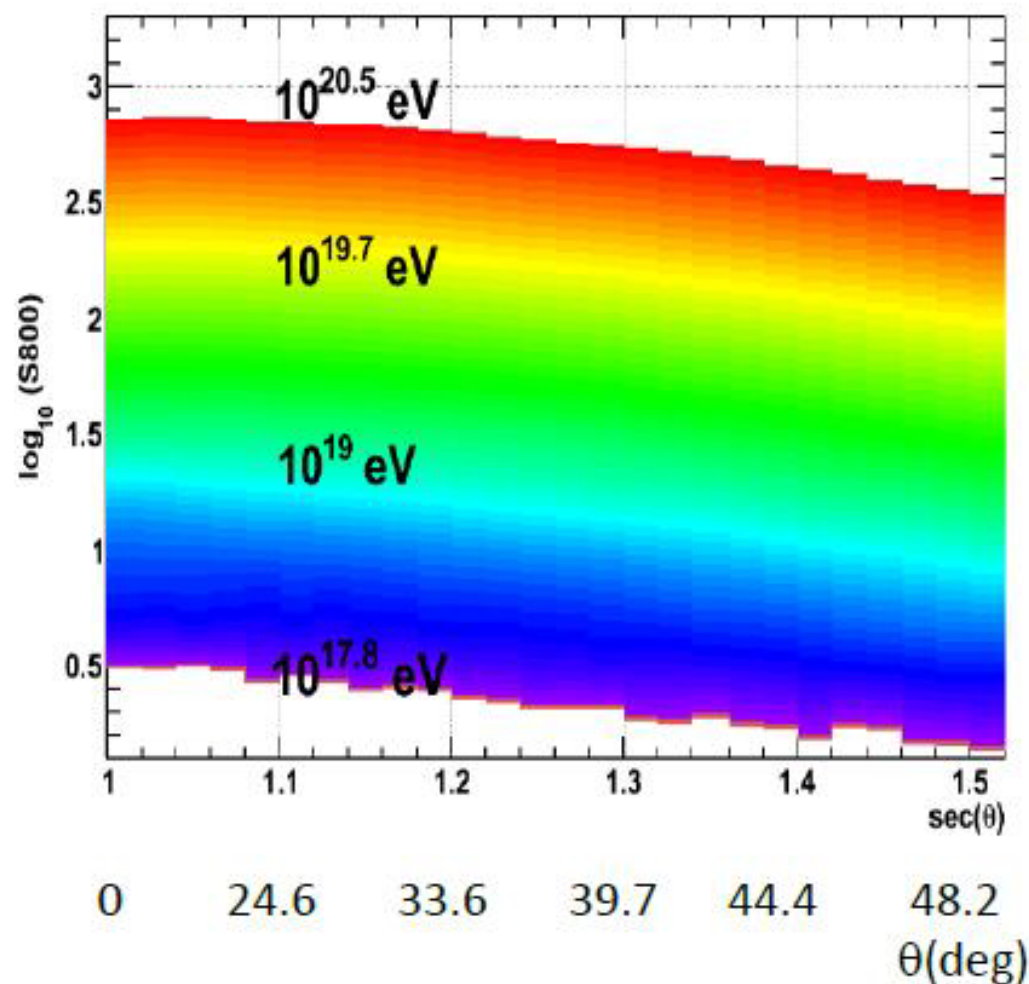


Detector  
Response  
by GEANT4



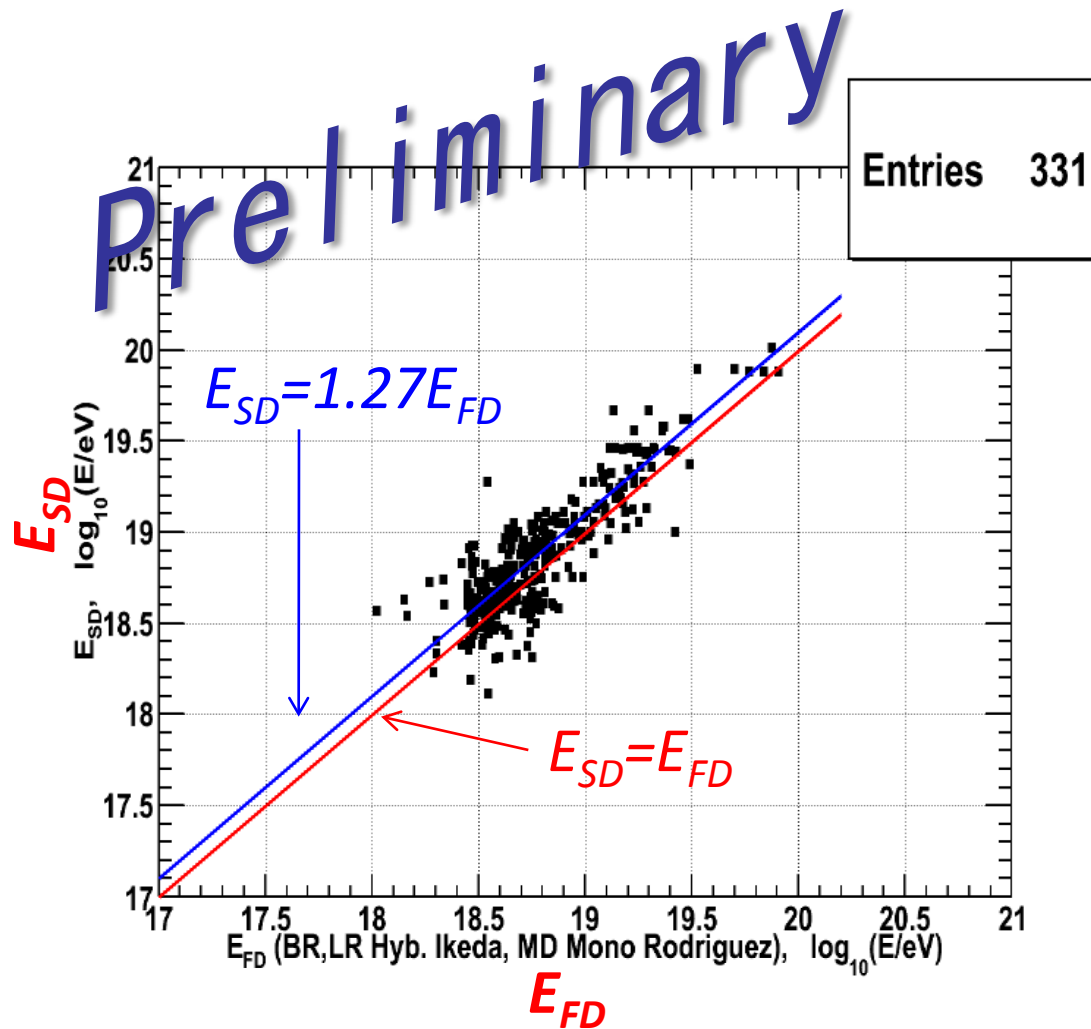
Self Calibration by cosmic " $\mu$ " @ 700Hz

# First Estimate of Energy



- Energy table is constructed from the MC
- First estimation of the **event energy** is done by interpolating between **S800** vs **sec( $\theta$ )** lines

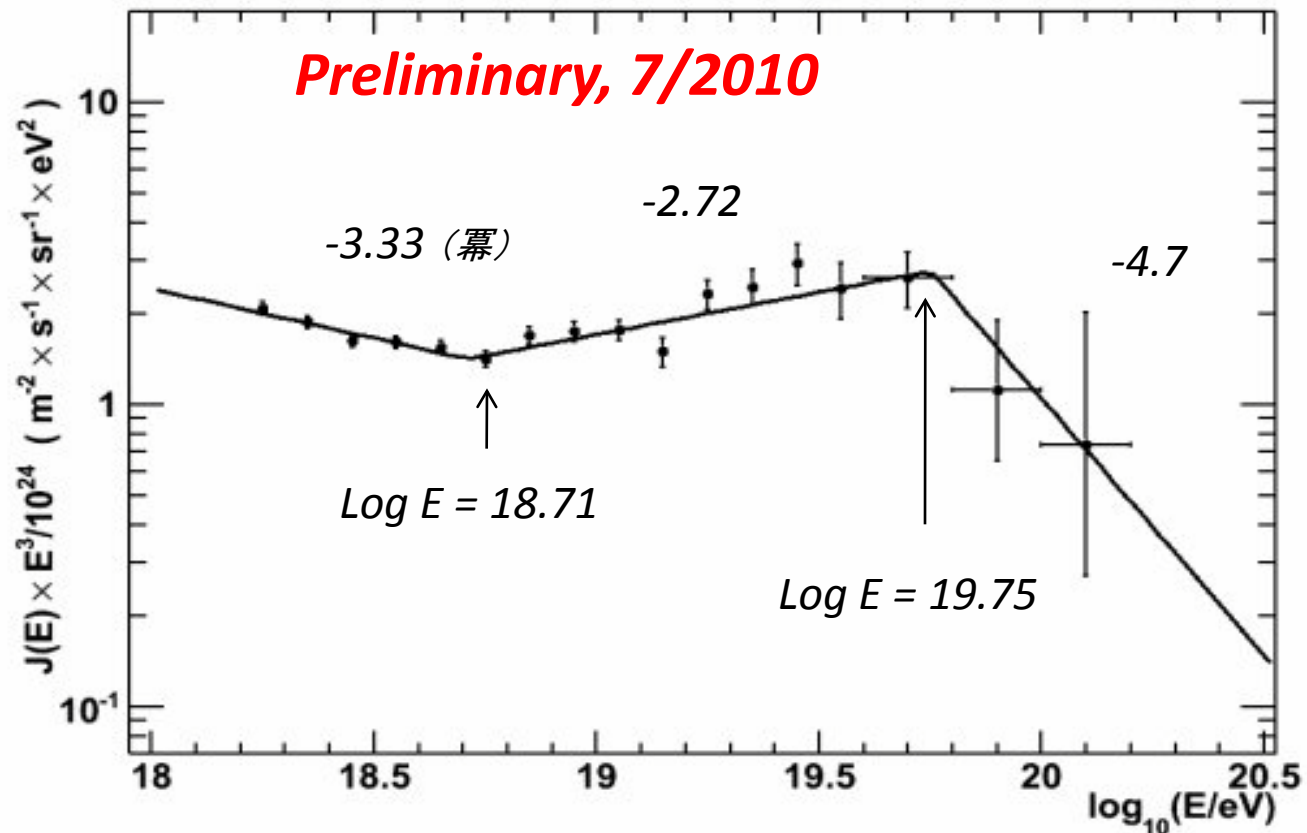
# アレイと望遠鏡(エネルギー)の比較

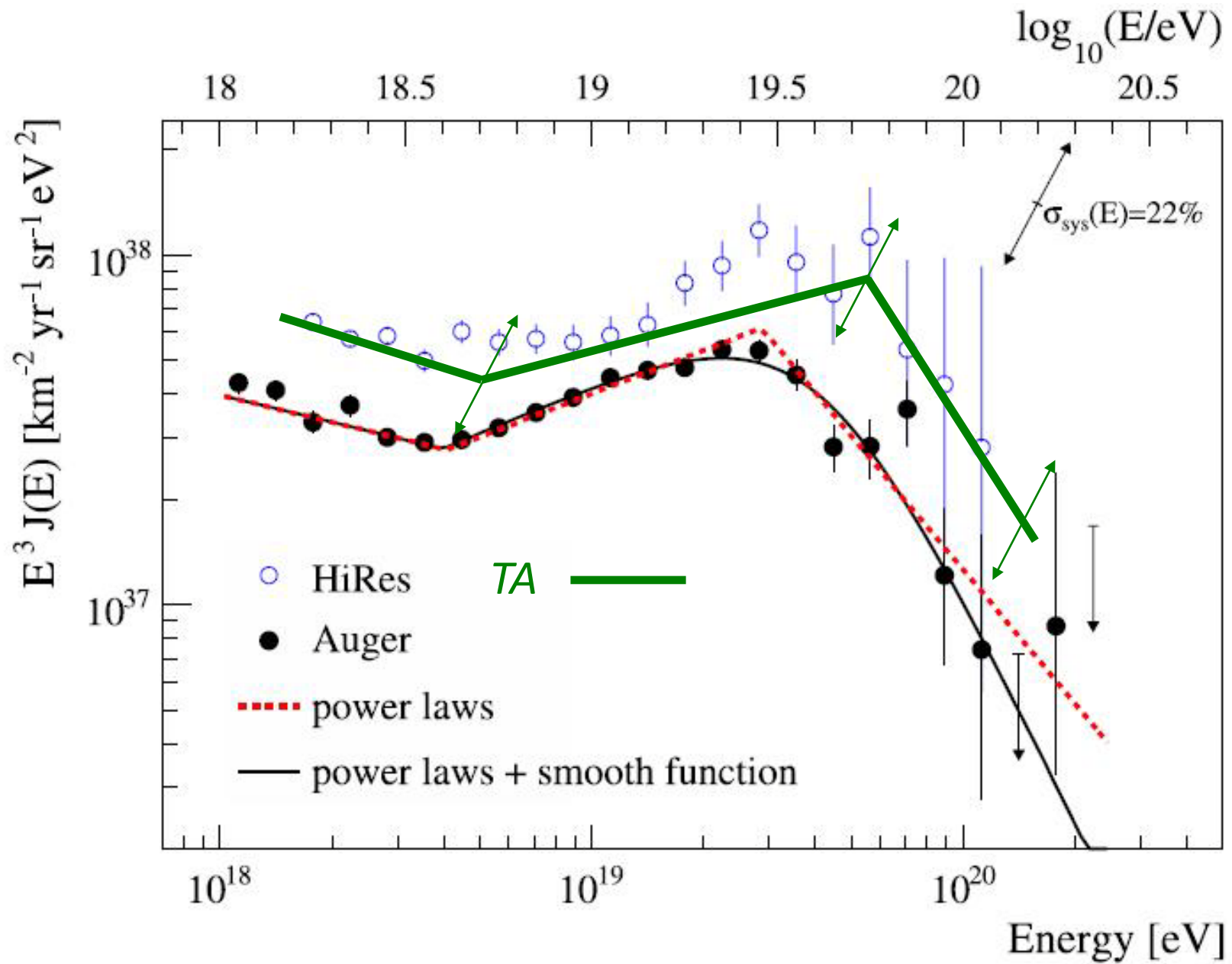


- Energy scale is determined experimentally by FD without referring to MC
- Set SD energy scale to FD energy scale using well-reconstructed events seen by both detectors:
  - **27% renormalization.**
    - Systematic error 19%  
(from systematic error of energy by hybrid analysis)

# 地表アレイによるスペクトル (TA)

エネルギーはスケールダウン(1/1.27)



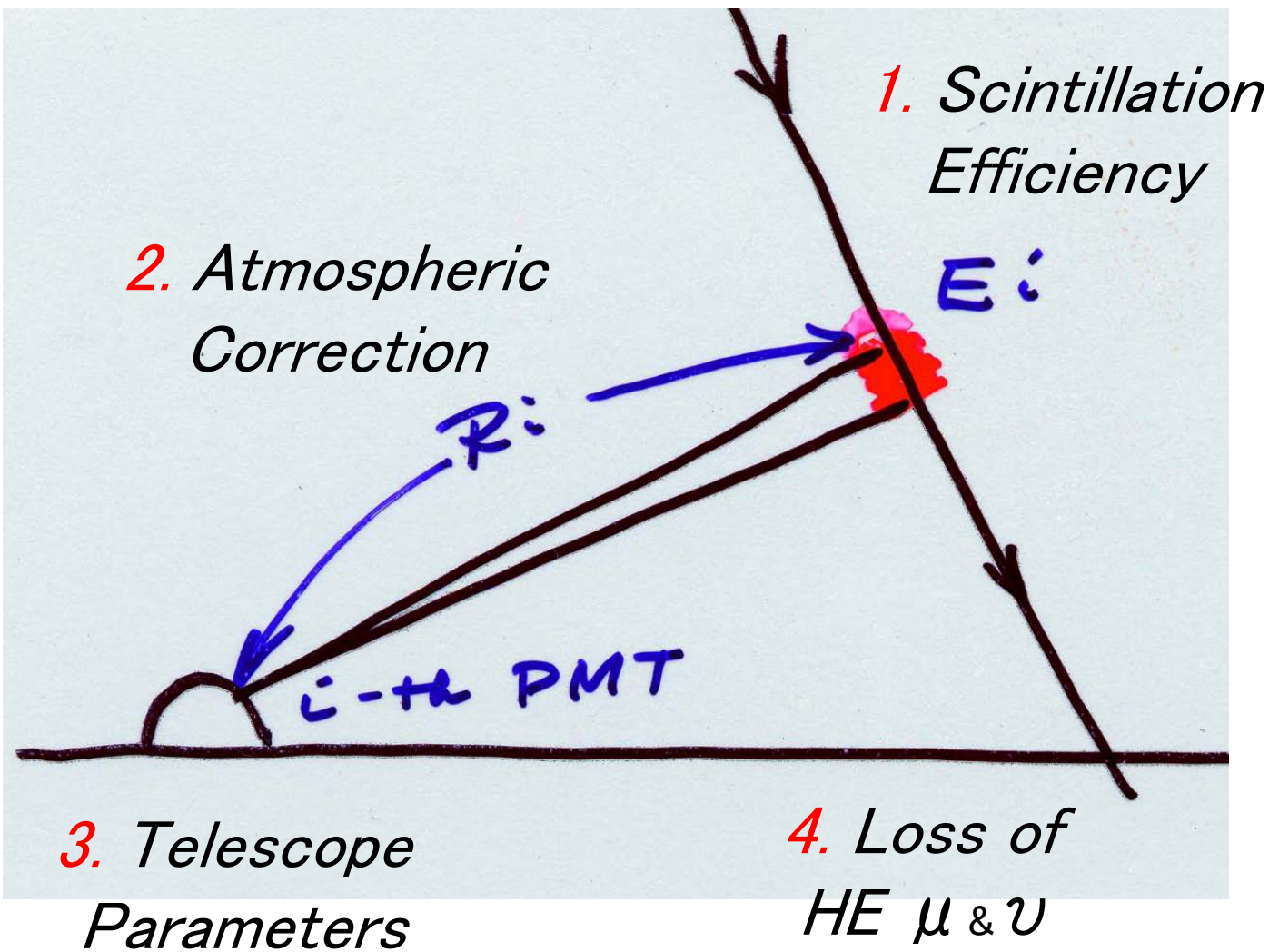


# Cutoff Energy

	Power $E_{\text{break}}^{\text{前}}$	$E_{\text{break}}$ (eV)	Power $E_{\text{break}}^{\text{後}}$	$E^{1/2}$ (eV)	$E^{1/2}$ (ratio)
HiRes	-2.81	$10^{19.75}$	-5.1	$10^{19.77}$	1.12
Auger	-2.59	$10^{19.46}$	-4.3	$10^{19.52}$	0.63
TA	-2.72	$10^{19.75}$	-4.7	$10^{19.78}$	1.15
<b>GZK 計算</b> (Berezinsky 1988)				$10^{19.72}$	1.00

$$\Delta E_{\text{SYS}} = 22\%(\text{Auger}), 19\%(\text{TA})$$

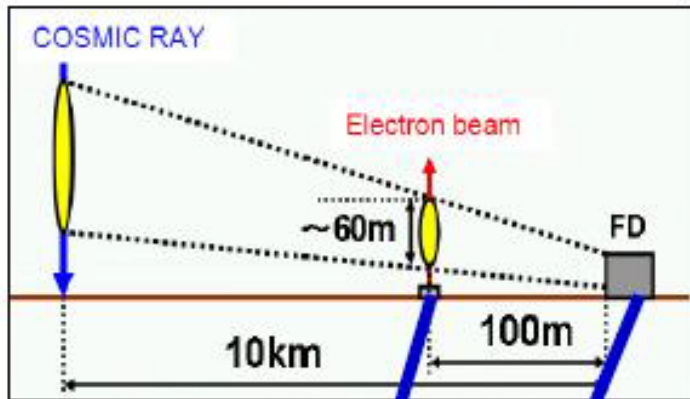
# エネルギー決定の精度



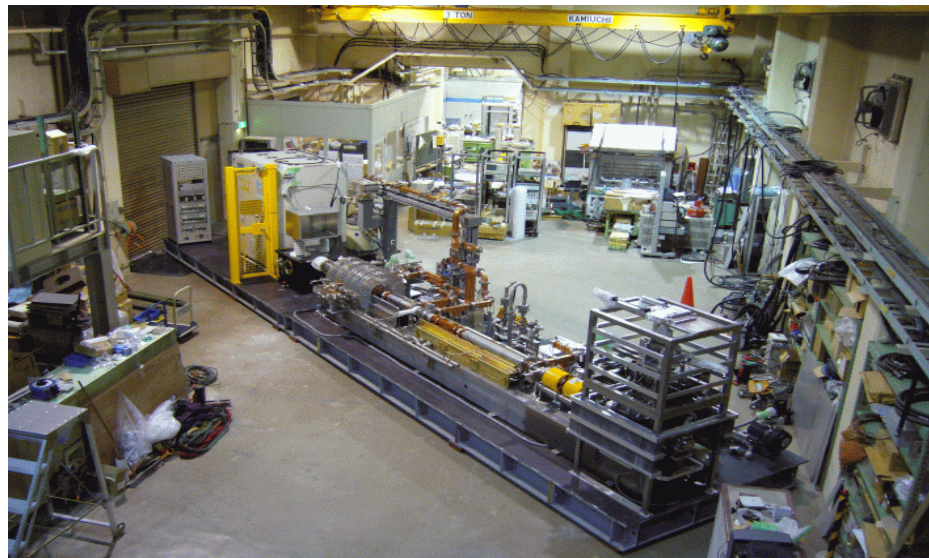
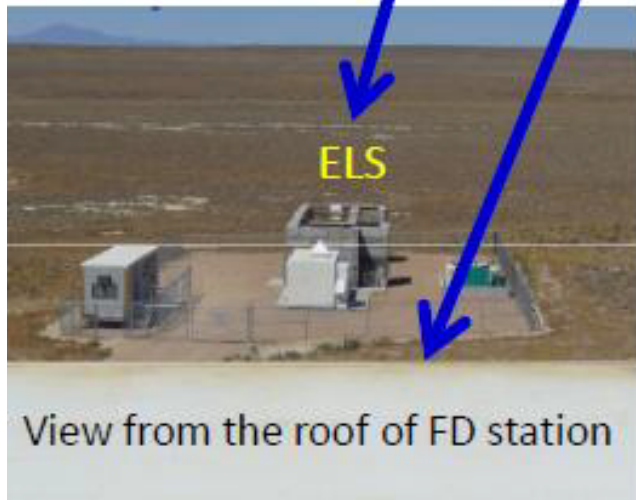
## Systematic errors

Item	Systematic error
Fluorescence yield	12%
Detector	10%
Atmosphere	11%
Primary particle mass	5%
MC correction	3%
Total	19%

# Electron Light Source in Utah Desert



- ## Specification
- . electron energy: **40 MeV** (max)
  - . current:  **$10^9$**  electrons/pulse
  - . pulse width: **1  $\mu$ sec**

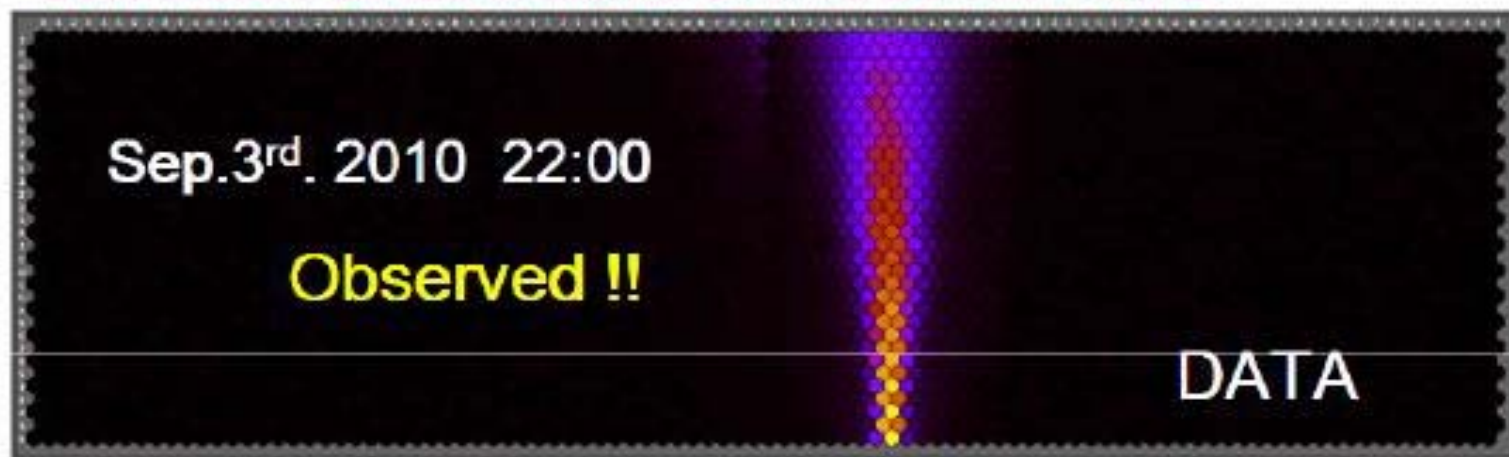




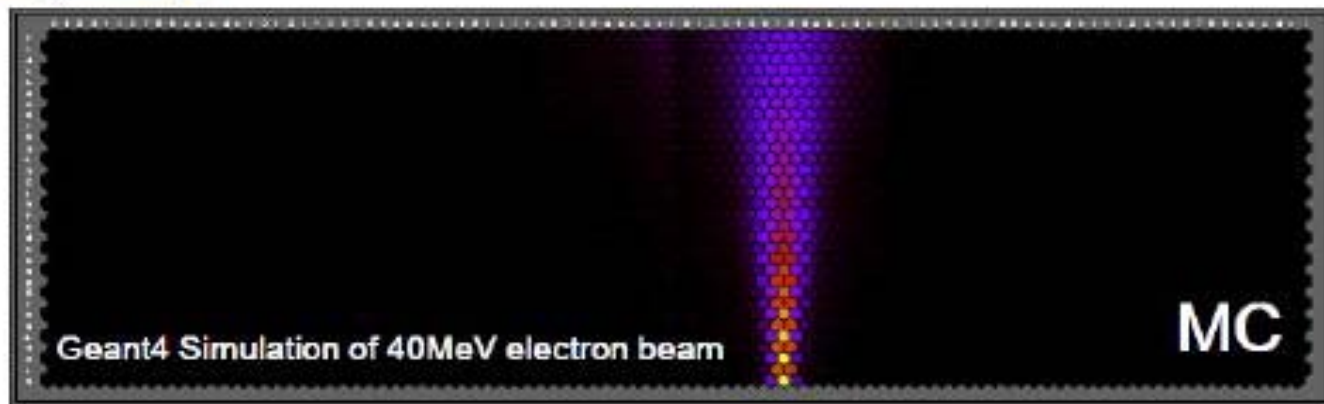
# First light from ELS

## FD Observation

Sep.3<sup>rd</sup>.2010 Beam Shot into the Sky, and Observed by FD



Scale 1000000 Events / 200



● UHECR の到来は  $\sim 10^{19.7}$  eV から、急激に減少  
宇宙背景放射との反応 (GZKカットオフ) と矛盾しない。

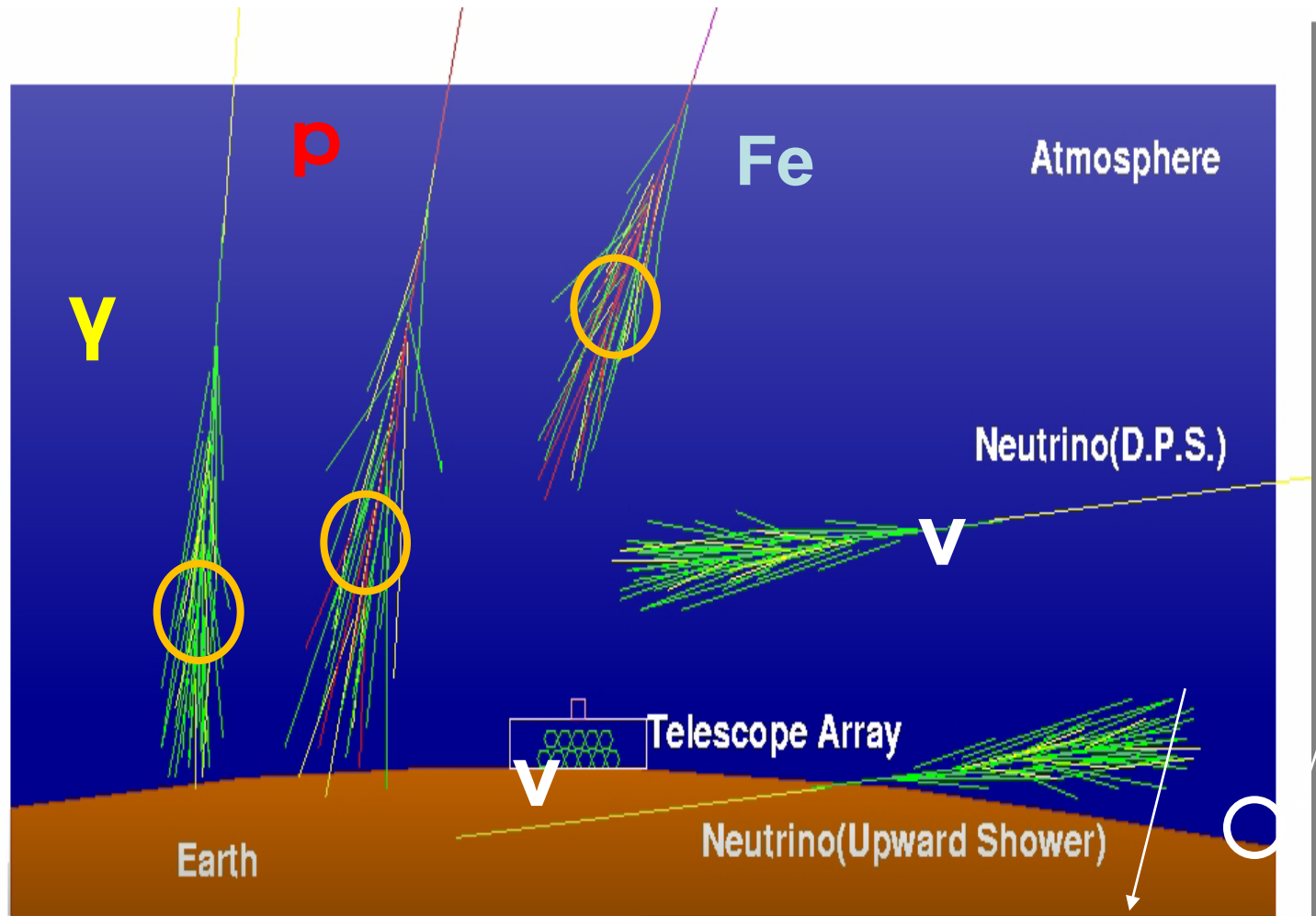
○ Auger実験(南半球)では、カットオフのエネルギーが  
小さい。鉄核と赤外背景放射の反応、(鉄核)の加速  
限界でも説明できる。

● Electron Light Source (@TA site) による較正を  
計画している。

○  $E_{\text{地表検出器}} \sim 1.3 \times E_{\text{望遠鏡}}$

# 粒子種の測定

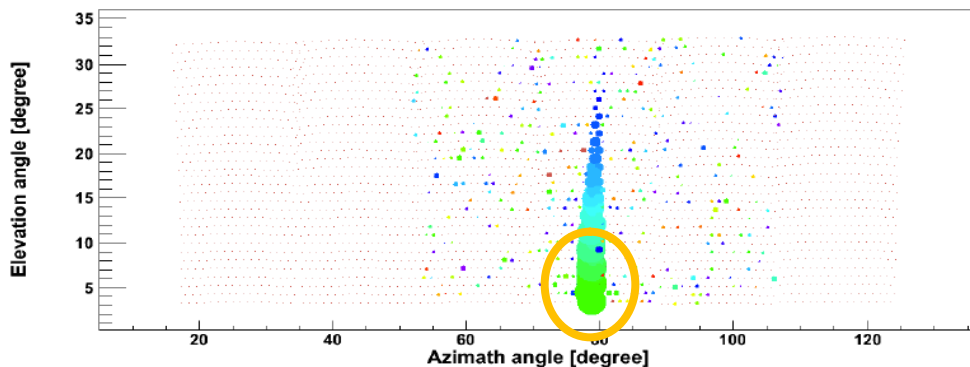
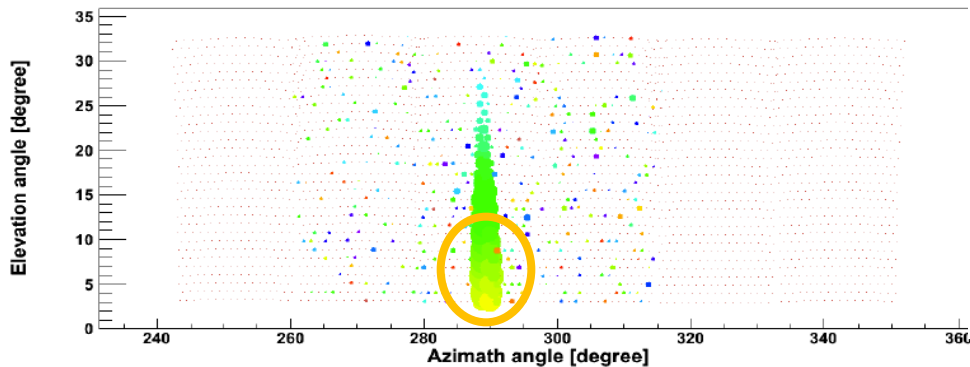
# 粒子種による空気シャワー発達 ( $X_{max}$ ) の違い



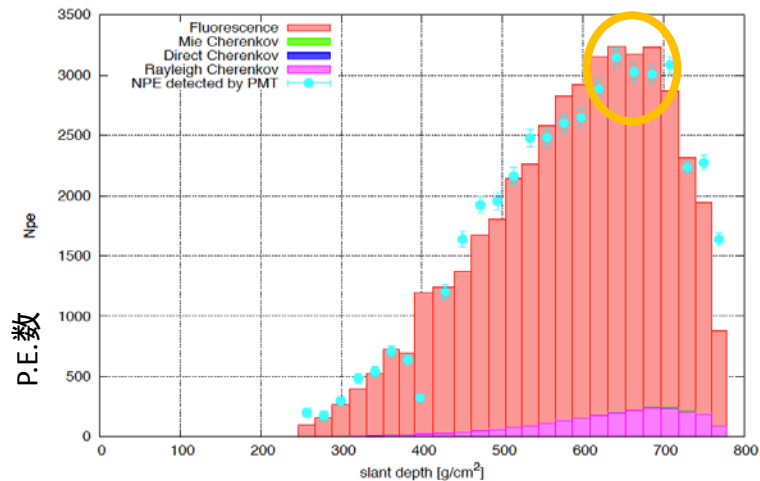
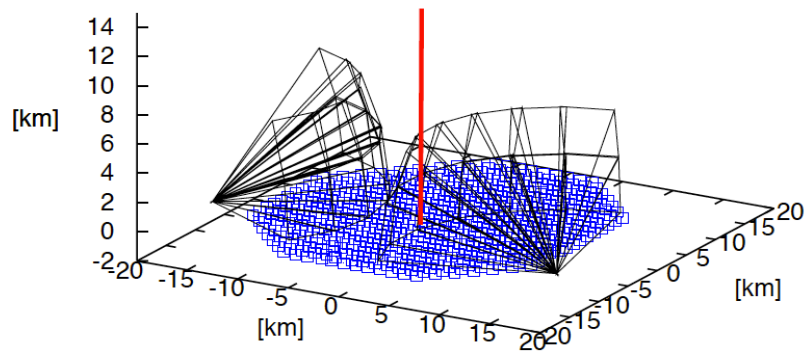
# Example of Stereo Event

SD □  
 FD FOV —  
 Shower axis —

Elevation angle (degrees)



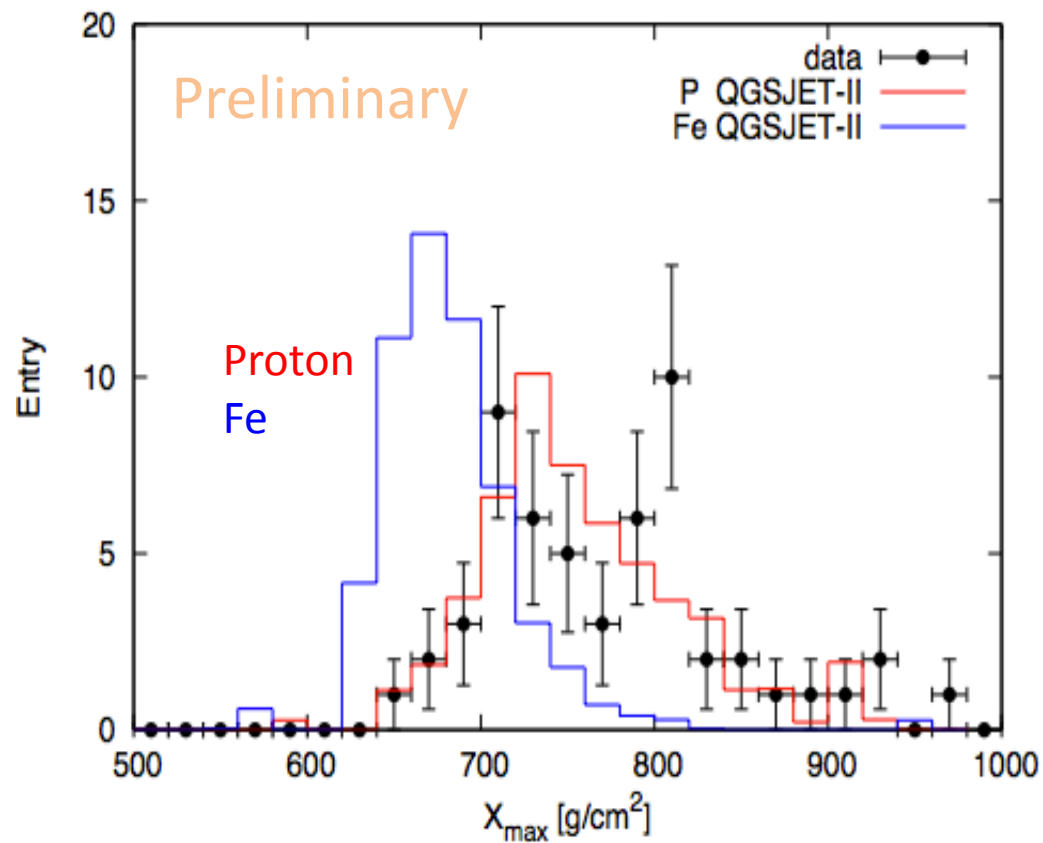
Azimuthal angle (degrees)



Slant Depth

zenith	azimuth	core [km]	energy	Xmax
3.23°	145.9°	0.09, -6.10	7.94 x 10 <sup>19</sup> eV	757.0 g/cm <sup>2</sup>

# 測定したXmax 分布 (データ対MC)



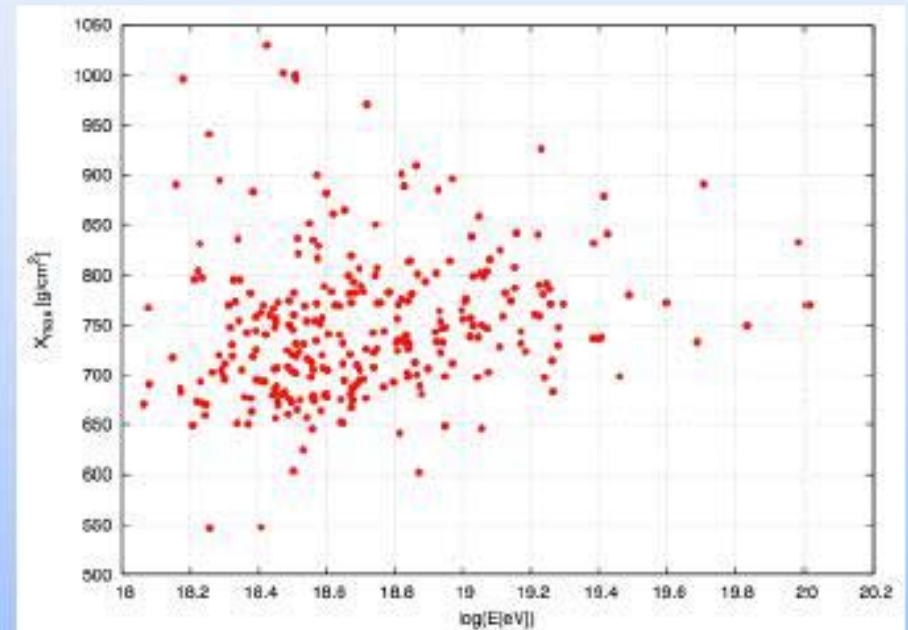
$$E = 10^{18.6-19.3} \text{ eV}$$

Chi<sup>2</sup> / dof

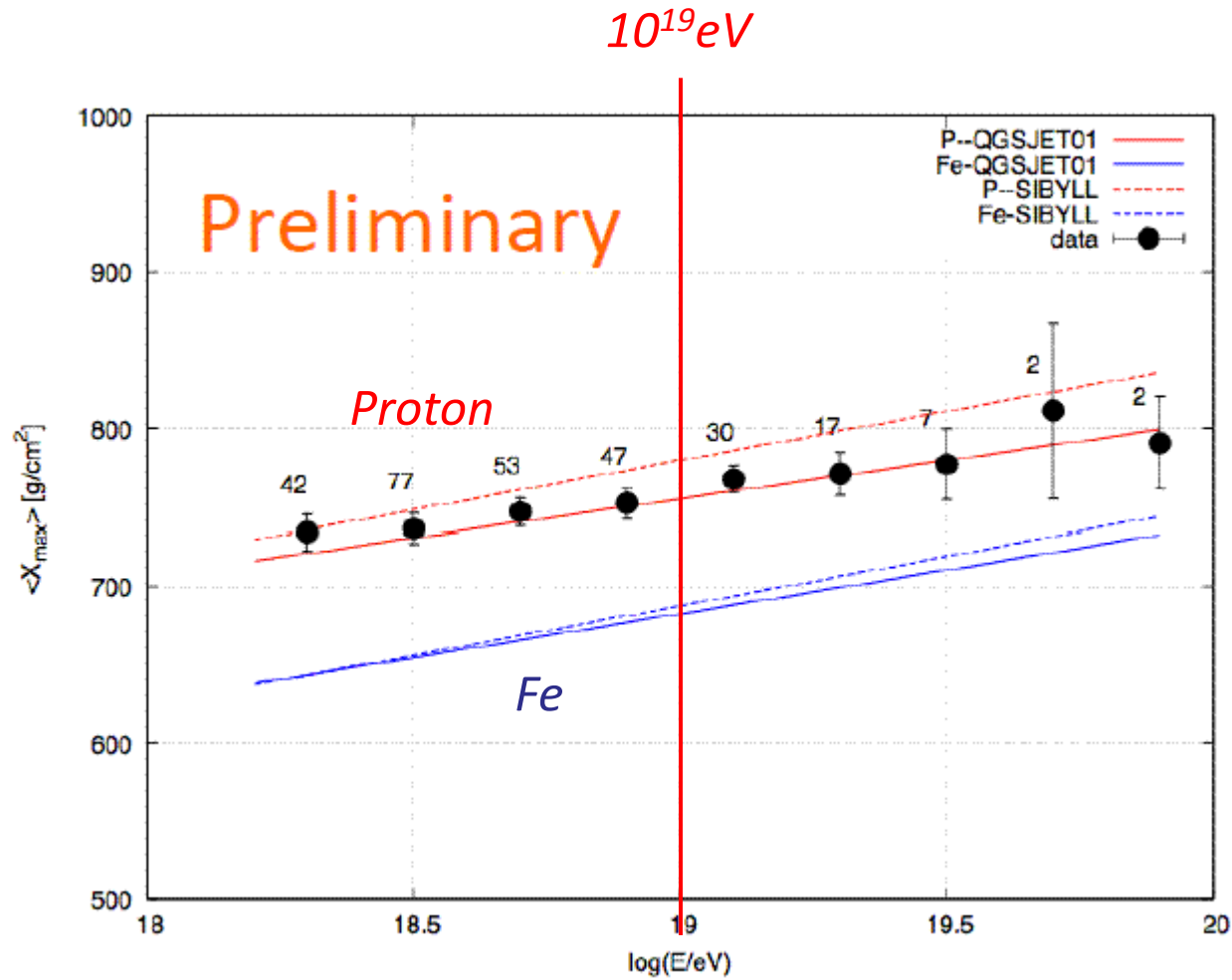
	QGSJET-II	QGSJET-01	SIBYLL
P	1.44	1.046	1.63
Fe	55.54	56.67	85.71

# MC/Data Comparison

- Data set: 2007/Nov – 2010/Sep
- FD Stereo events
- Comparison with MC
- Quality Cut
  - Xmax observed
  - Zenith < 60°
  - Core within 19.6km circle
  - Energy > 10<sup>18.0</sup>eV
  - $\chi^2$  cut

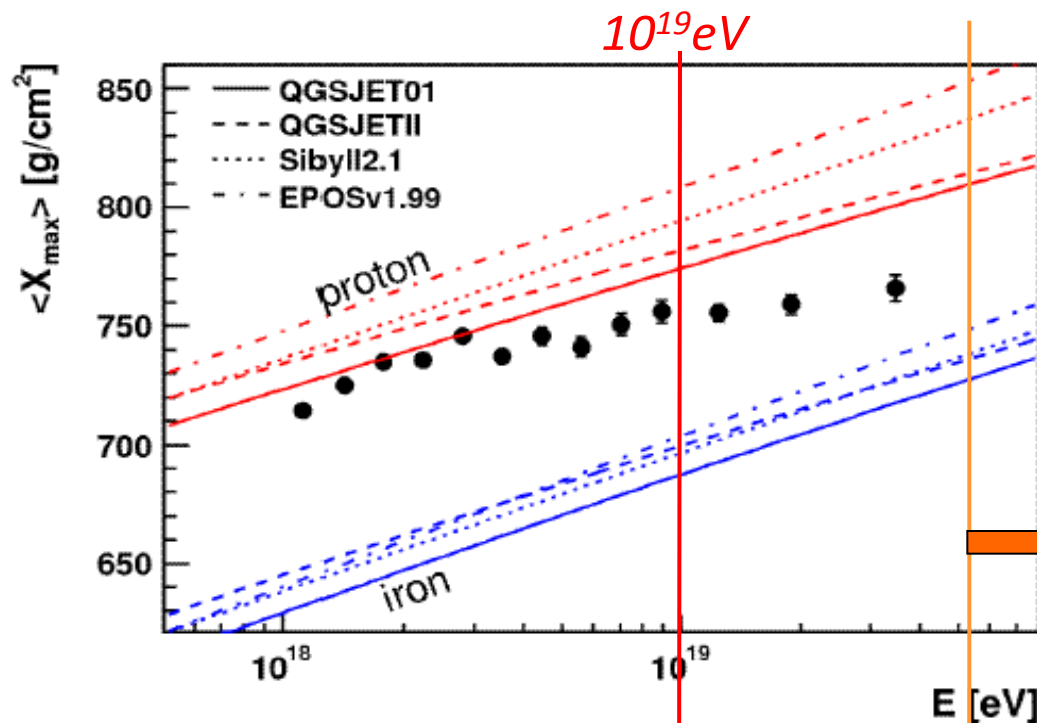


# <Reconstructed Xmax> vs. E

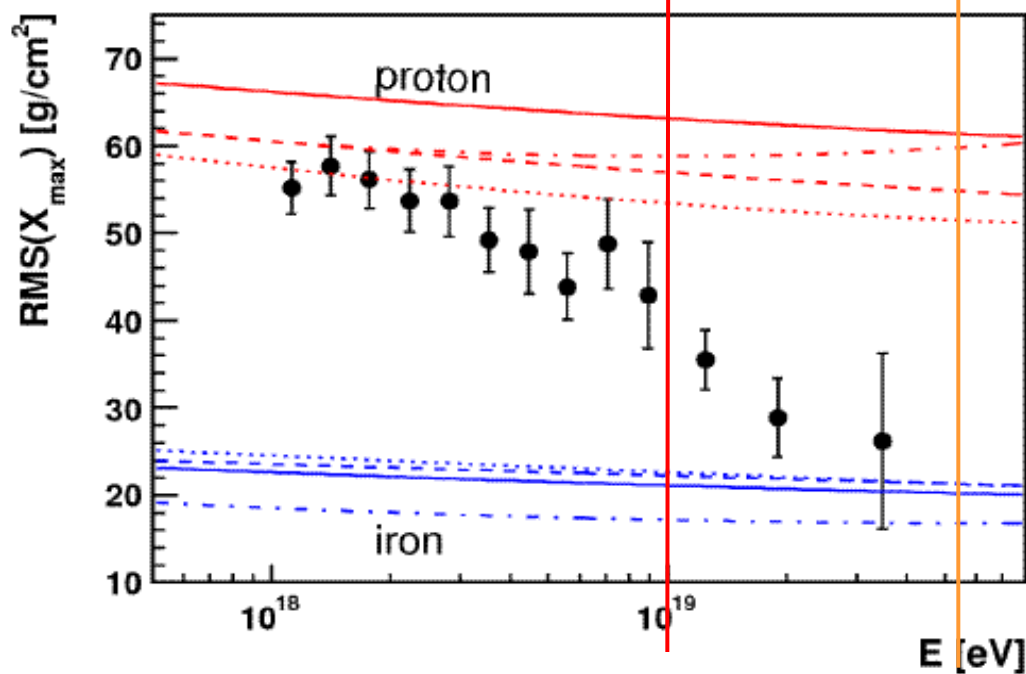




# Auger の結果



Auger の  
AGN 相関



●  $10^{18.2} - 10^{20.0}$  eV で陽子。変化していない。

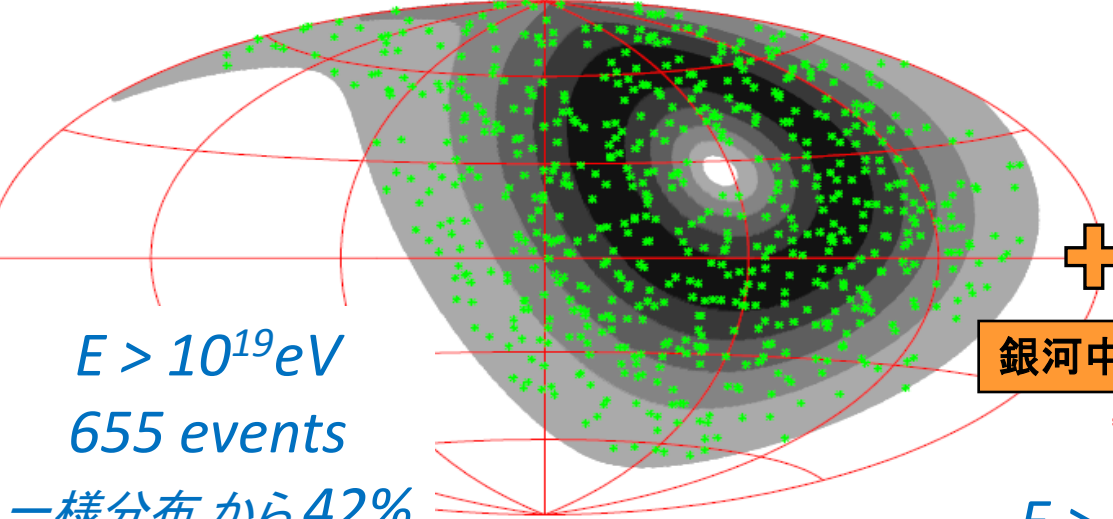
○ Auger 実験 (南半球) では、 $\sim 10^{18.5}$  eV 以上で中重核に変わりつつある。

●  $\sim 10^{19.4}$  eV 以上では、陽子・鉄を見分ける十分な統計がない。

○ 極高エネルギーで、新たなハドロン現象？  
(カラーグラス凝縮、QGP、anything new...)

# 到来方向の測定

# UHECR到来方向の分布 (一様等方か)



$E > 10^{19} \text{ eV}$   
655 events

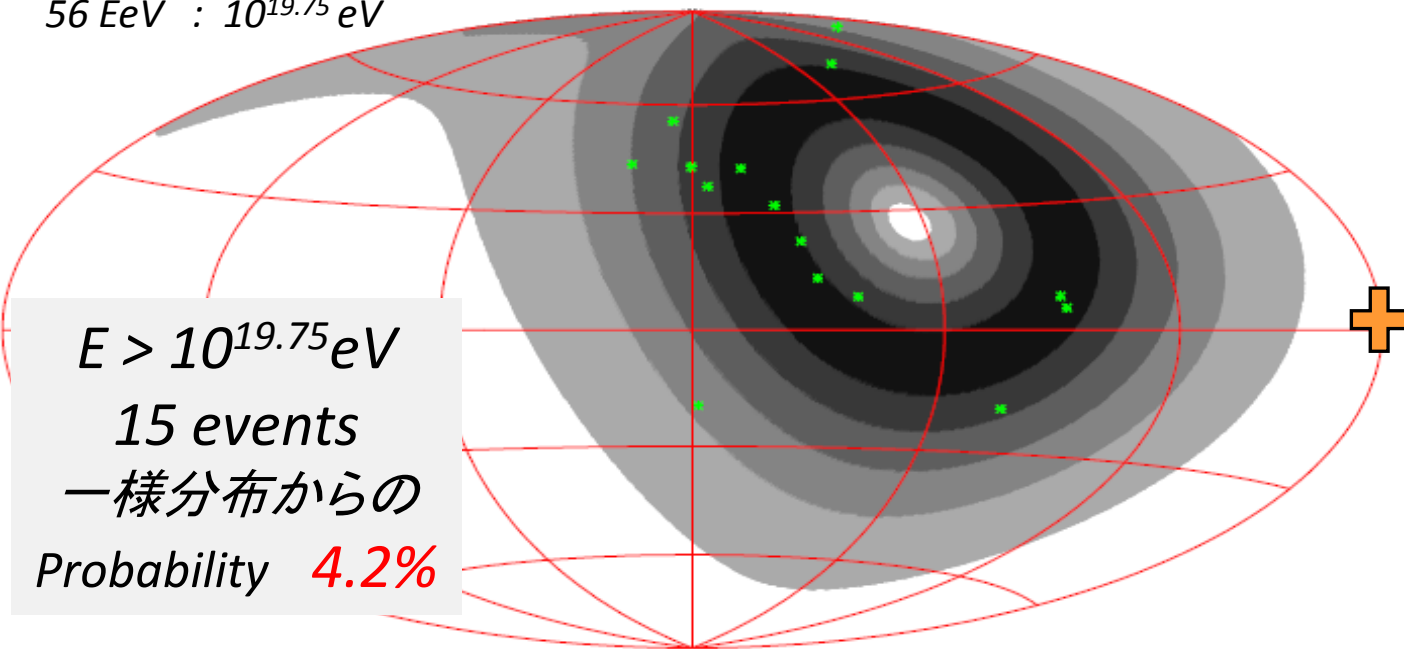
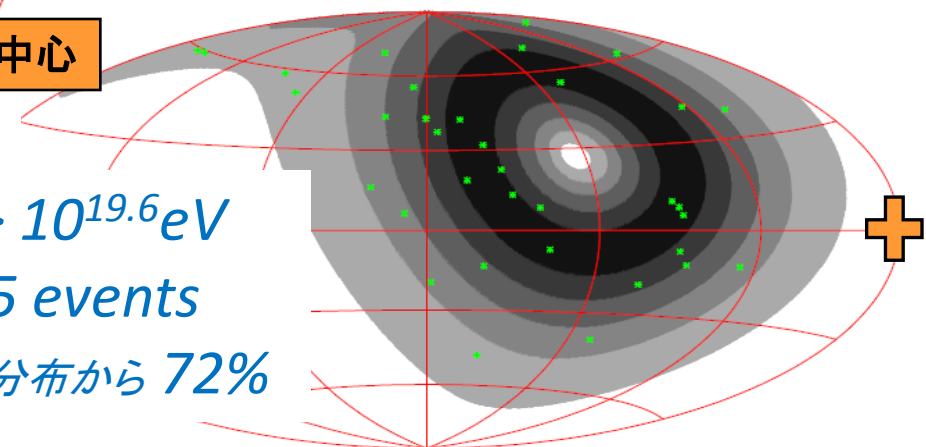
一様分布から 42%

10 EeV :  $10^{19} \text{ eV}$   
40 EeV :  $10^{19.6} \text{ eV}$   
56 EeV :  $10^{19.75} \text{ eV}$

銀河中心

$E > 10^{19.6} \text{ eV}$   
35 events

一様分布から 72%



$E > 10^{19.75} \text{ eV}$   
15 events

一様分布からの  
Probability 4.2%

● UHECR event

5段階の等頻度期待バンド



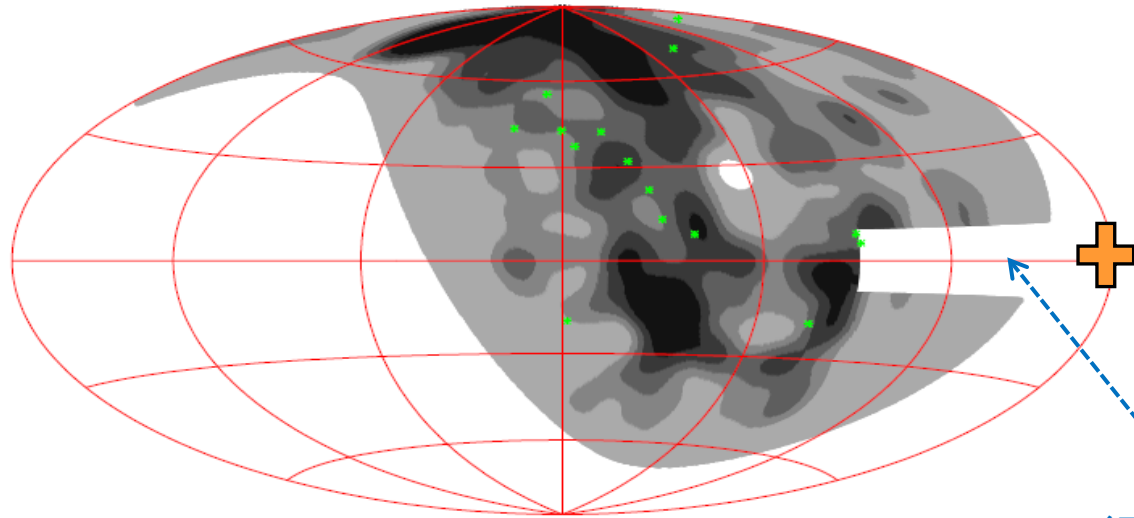
一様等方の到来方向分布に  
EXPOSURE の重みをつけ  
5分の1の等しい確率で分配

# 大規模構造から期待される分布

- XSCz 銀河カタログ
- 250Mpc 以遠は 等方分布
- すべての銀河は等光度 ( $D^{-2}$ )
- 銀河中心付近、 $D < 5\text{Mpc}$  を除外
  
- 陽子の発生と伝搬:  $E^{-2.7}$ , GZK effect etc.
- 方向の smearing with  $\Theta_{\text{SMEAR}}$
  
- 銀河磁場: 反陽子で back tracking

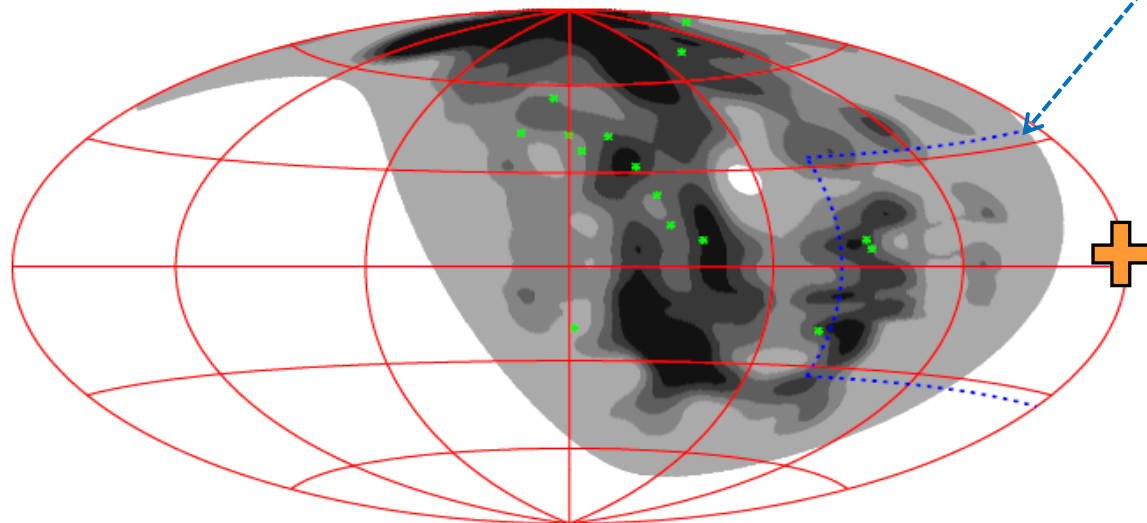
# 大規模構造で発生した陽子からの分布 $(\theta_{SMEAR} = 6^\circ)$

$E > 10^{19.75}$  eV, 15 events



銀河磁場による偏向なし  
 $P = 20\%$

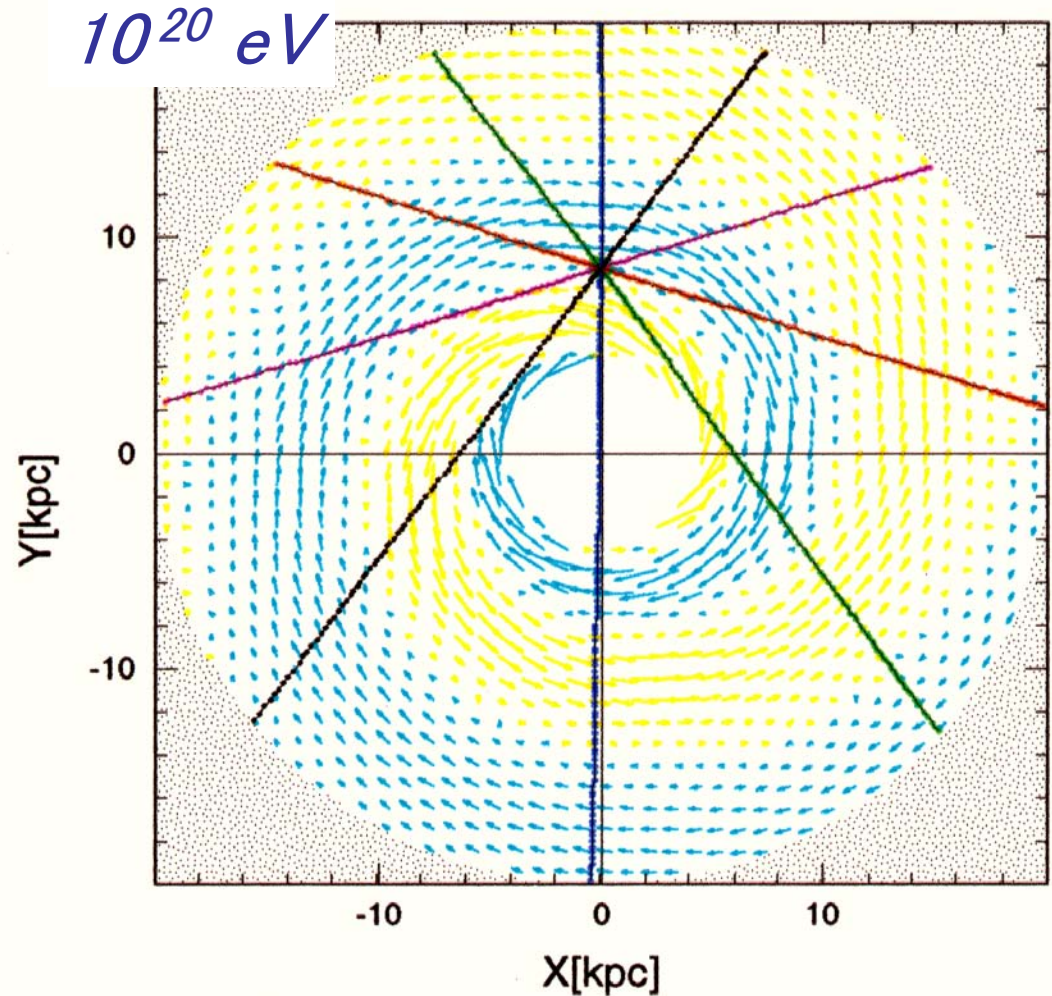
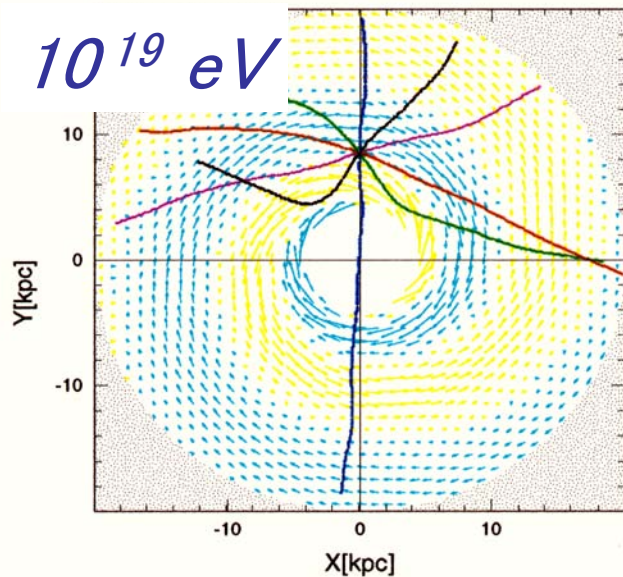
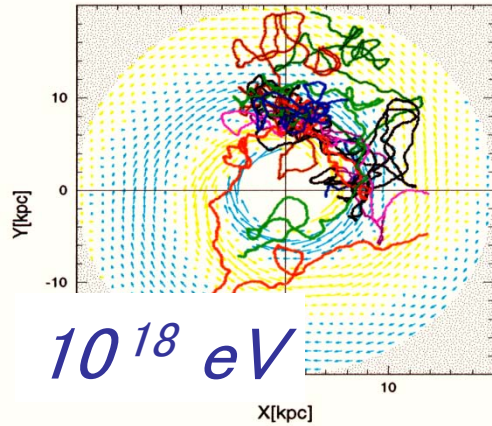
銀河中心付近の除外領域



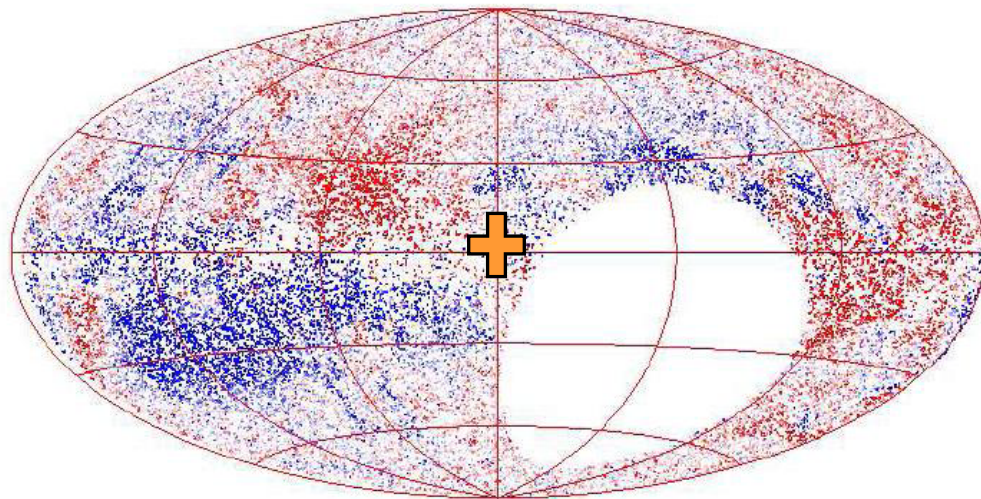
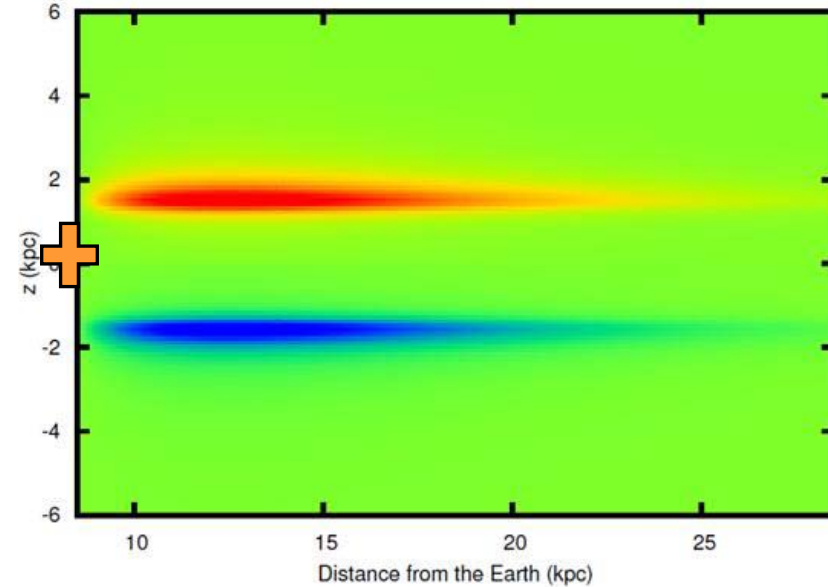
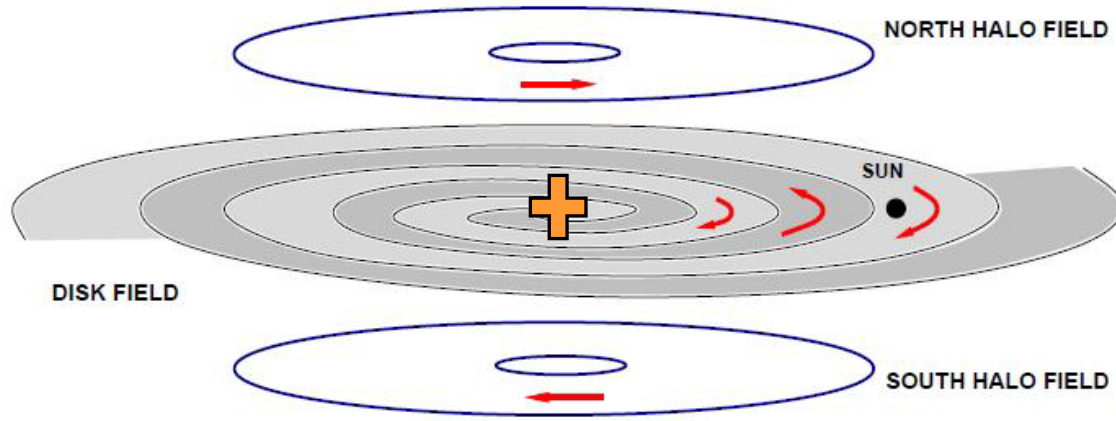
銀河磁場による偏向あり  
GMF model by Sun(2008)  
 $P = 39\%$

# 銀河磁場によるUHECRの偏向 (銀河面近傍)

反陽子で back tracking



# 銀河磁場モデル by Sun et al.(2008)



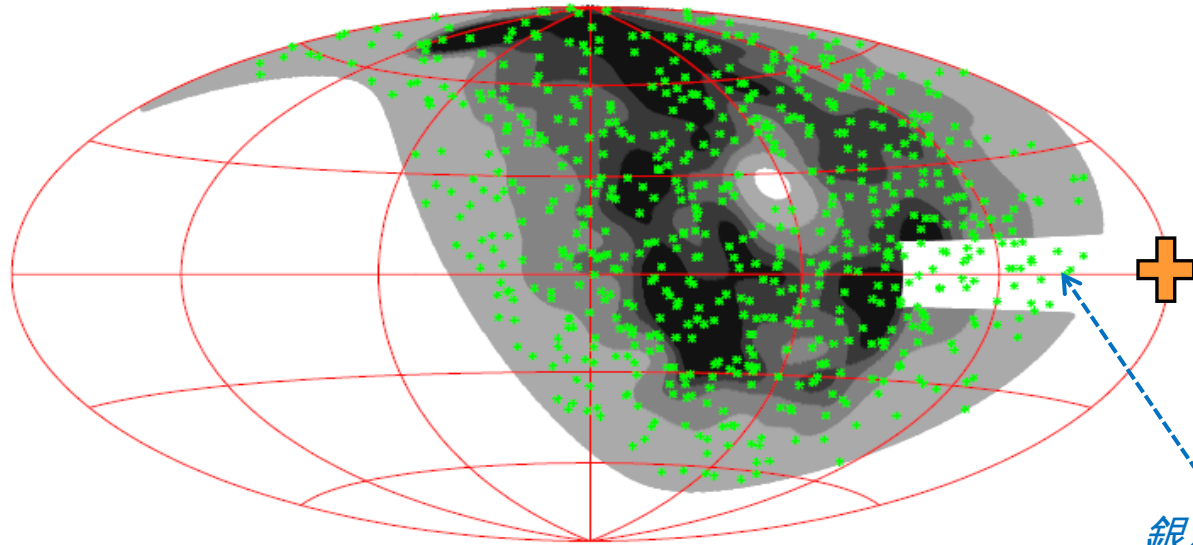
*M.S.Pshirkov et al. (2011);  
Disk field (ASS, BSS) + Halo で  
Faraday RMをフィット*

$$B_{\theta}^H(r, z) = B_0^H \frac{1}{1 + \left(\frac{|z| - z_0^H}{z_1^H}\right)^2} \frac{r}{R_0^H} \exp\left(-\frac{r - R_0^H}{R_0^H}\right)$$



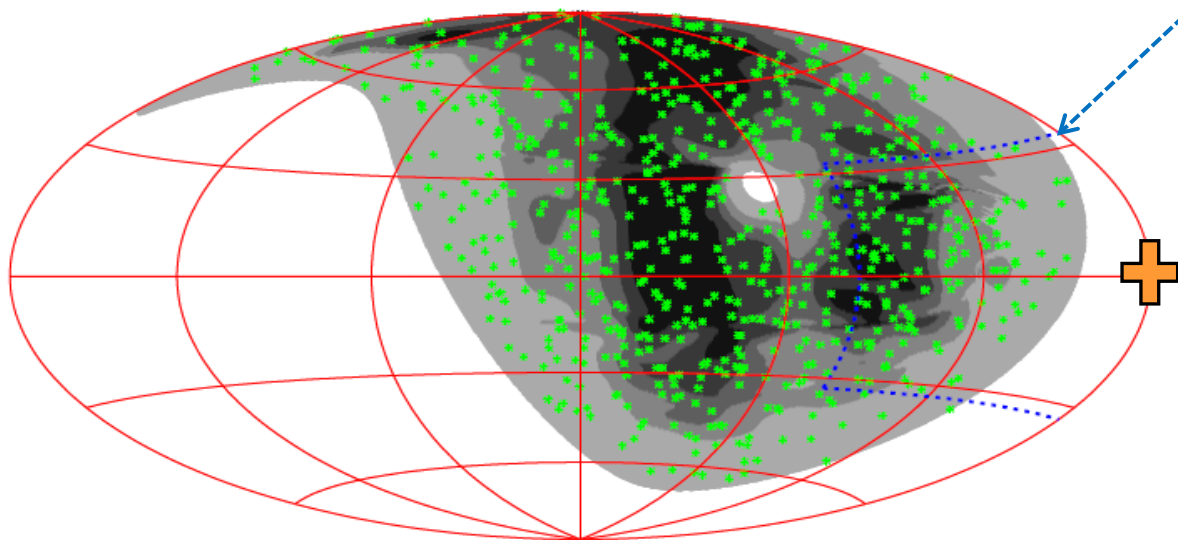
# 大規模構造で発生した陽子からの分布 $(\Theta_{SMEAR} = 6^\circ)$

$E > 10^{19}$  eV, 655 events



銀河磁場による偏向なし  
 $P = 0.0007\%$

銀河中心付近の除外領域



銀河磁場による偏向あり  
GMF model by Sun(2008)  
 $P = 2.9\%$

# UHECRで銀河の大規模構造が見えるか

(到来方向分布仮説の検証)

分布仮説		$E > 10^{19}\text{eV}$	$E > 10^{19.6}\text{eV}$	$E > 10^{19.75}\text{eV}$
一様等方		OK (compatible)	OK	矛盾 (incompatible) ただし $2\sigma$ の効果
大規模構造 起源の陽子	銀河磁場なし	$\Theta_{\text{SMEAR}} > 25^\circ$ ならば compatible	OK	OK
	銀河磁場あり	“strong” Toroidal Halo があれば compatible	OK	OK



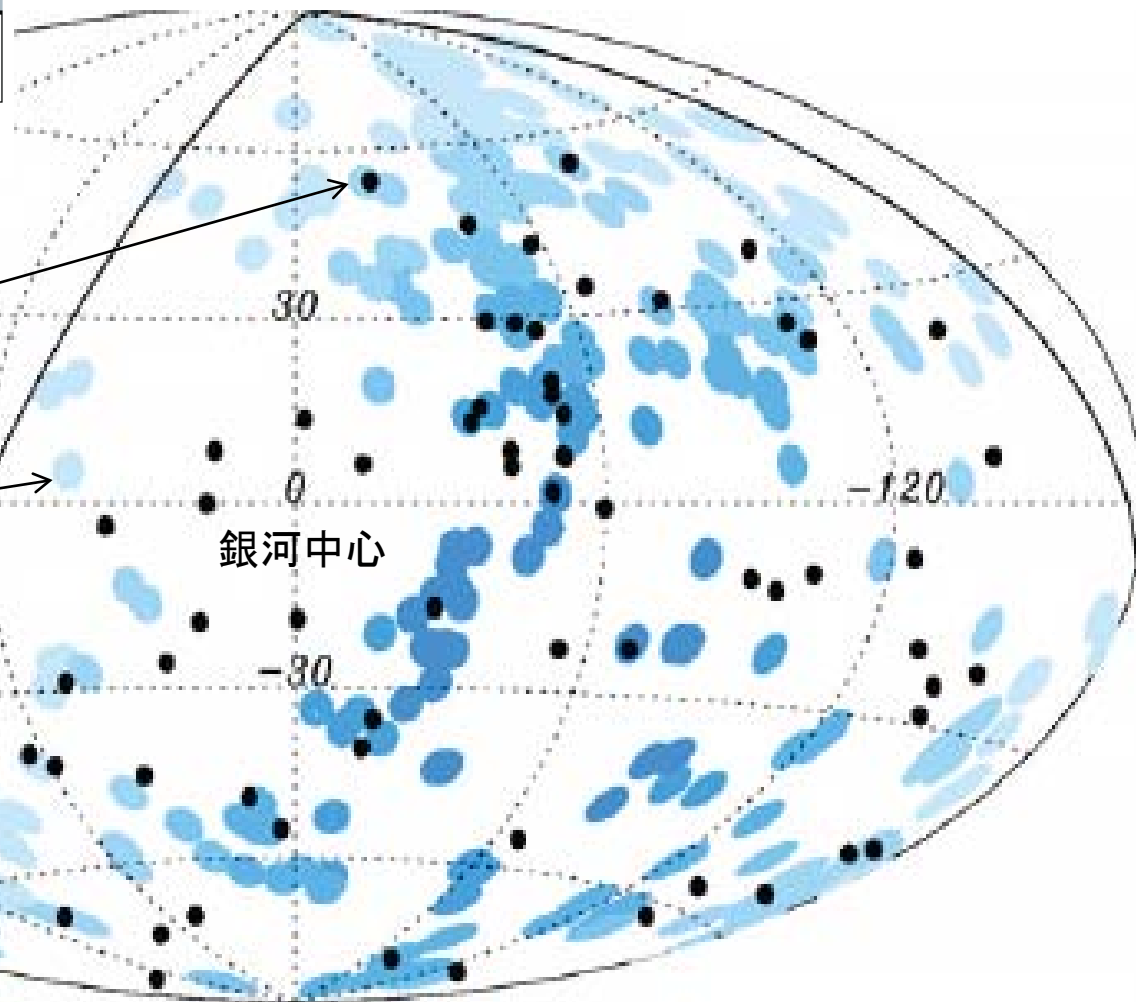
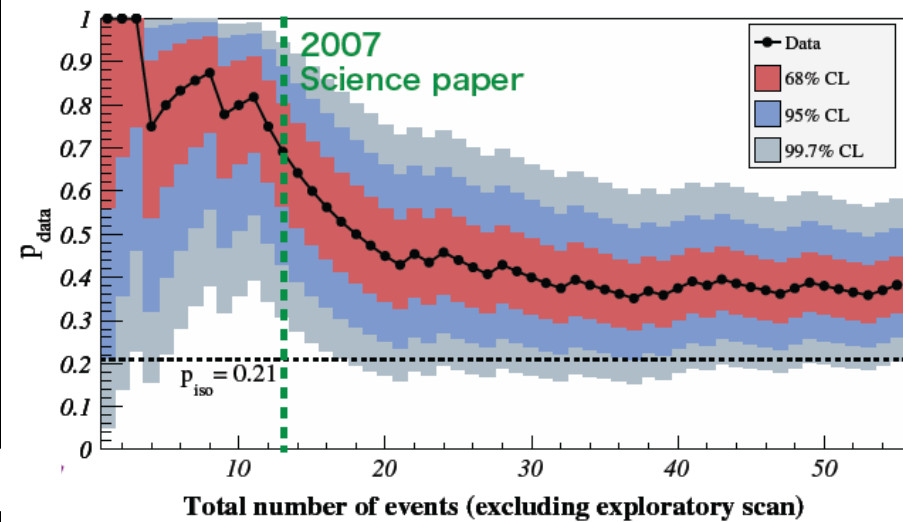
銀河磁場の情報



LSS相関が見える？

# 活動銀河核との相関

## Pierre Auger 実験



宇宙線 event  $E > 10^{19.75} \text{eV}$

AGNs ( $z < 0.018$ )  
半径  $3.1^\circ$  サークル

候補: AGN



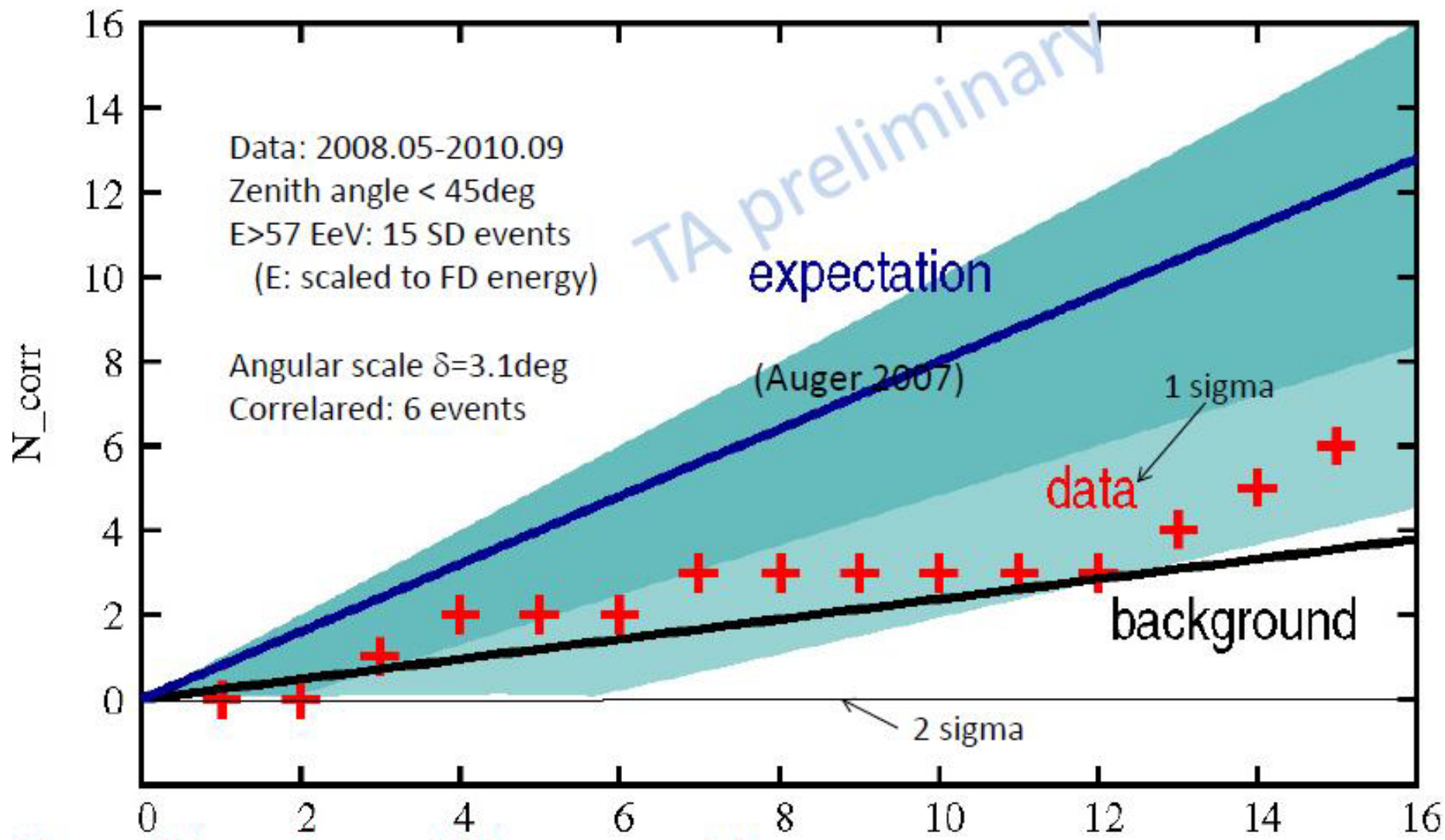
*Cen A*  
 $\sim 4 \text{ Mpc}$

*Xray picture*

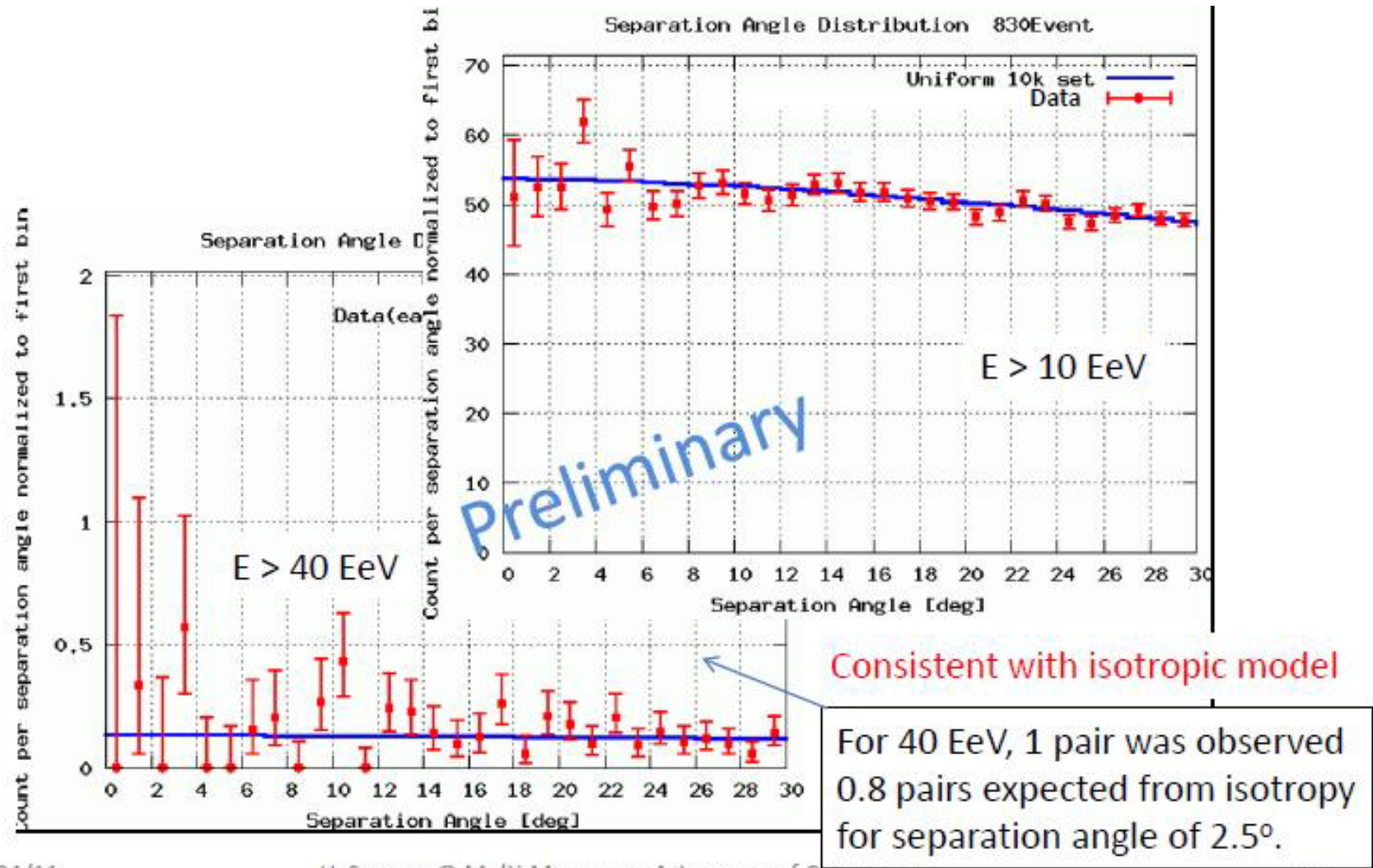


*Optical picture*

# TAのAGN相関



# Event Cluster (点源・自己相関)



- 到来方向は、 $10^{19}$  eV 以上で ほぼ一様等方
- 宇宙の物質分布 (LSS) と相関の可能性  
AGN (Cen A) と相関の可能性
- 点源・クラスターは未だ見えず
- 統計精度？ カタログ選択バイアス？

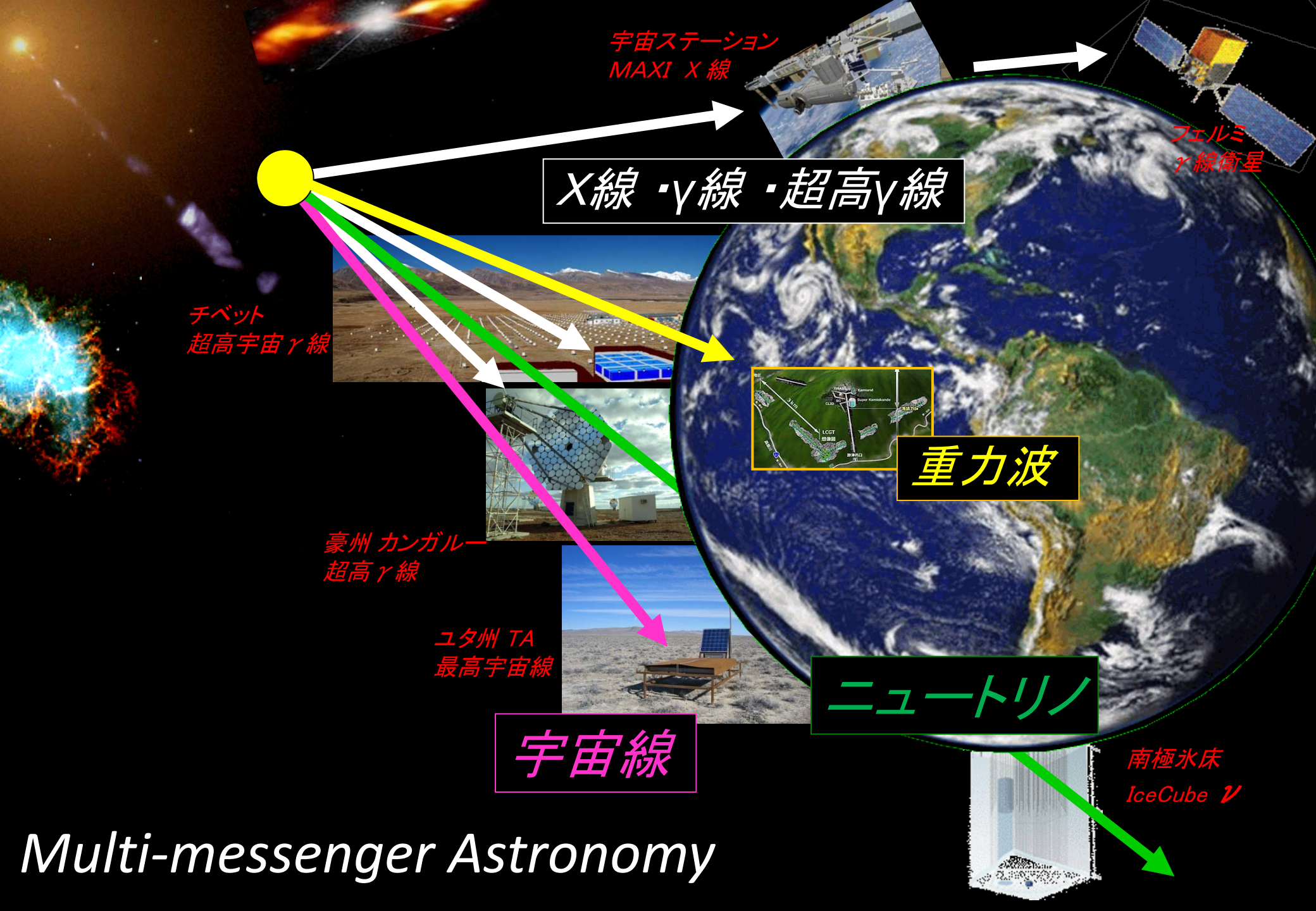
# まとめ

## 新世代実験 Auger & TA : 大規模・ハイブリッド・南北・新校正

観測量	分解能	絶対スケール	
エネルギー	±15%	±20%	望遠鏡による
到来方向	~1°	~5° (p@10 <sup>19.6</sup> eV, 銀河磁場)	地表アレイによる
Xmax (粒子種)	~20 g/cm <sup>2</sup>	~60 g/cm <sup>2</sup> (p@10 <sup>19</sup> eV, fluct.)	P-Feの差 < ~100 g/cm <sup>2</sup>

- スペクトルに Cutoff あり。成因は GZK(?)
- 発生源の示唆。宇宙の物質分布に従う？  
銀河磁場の効果。点源天体 (Cen A) ?
- 到来粒子種は、p - Fe. 北と南で違う??
- 新しいハドロン現象??  
 $E_{\text{地表アレイ}} = 1.3 \times E_{\text{望遠鏡}}$  ・  $\mu$ 粒子の超過 など
- 起源・加速機構は、未だ不明





宇宙ステーション  
MAXI X線

フェルミ  
γ線衛星

X線・γ線・超高γ線

チベット  
超高宇宙γ線

重力波

豪州 カンガルー  
超高γ線

ユタ州 TA  
最高宇宙線

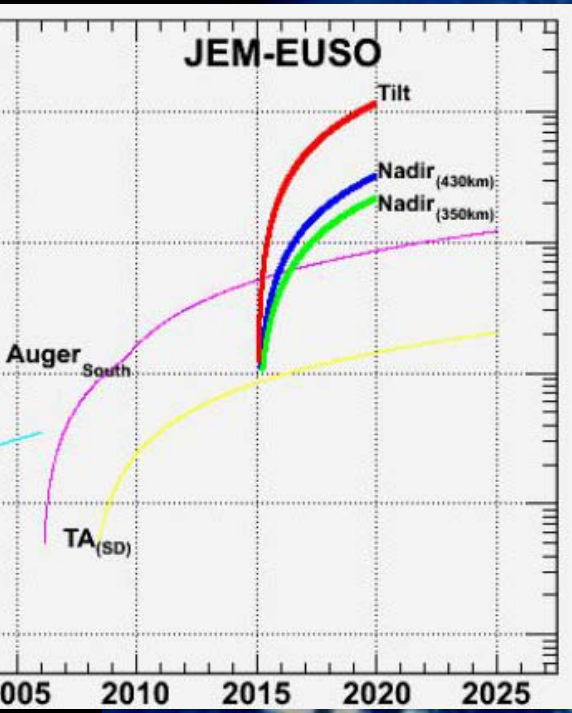
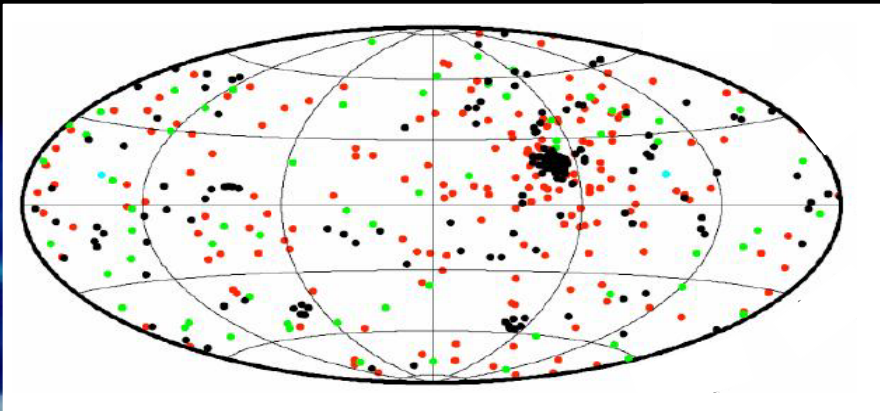
宇宙線

ニュートリノ

南極氷床  
IceCube ν

# Multi-messenger Astronomy

# Extreme Universe Space Observatory



## JEM-EUSO Mission

**Toshikazu Ebisuzaki**  
**RIKEN**

*for the JEM-EUSO Collaboration*

**The Symposium on the Recent Progress of UHECR Observation**  
**Dec. 12, 2010, Nagoya Congress Center, Nagoya**

# Microwave Detection of UHECR: R&D efforts

Paolo Privitera

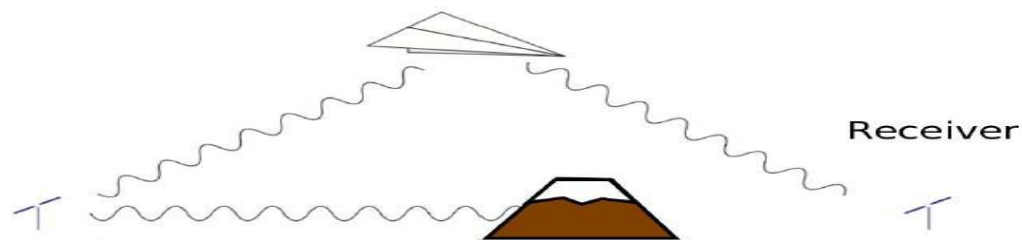
THE UNIVERSITY OF  
**CHICAGO**  
PHYSICAL SCIENCES  
The Enrico Fermi Institute  
The Kavli Institute for Cosmological Physics



## 将来

1. スーパー  
地上検出器:  
(アレイ+望遠鏡)

2. シャワー  
の電波観測



(a) *Molecular Bremsstrahlung*

(b) *Radio radar*