

超高エネルギー宇宙線観測の現状

—Telescope Array 実験の最新結果と共に—

東京大学宇宙線研究所
多米田 裕一郎



宇宙線とは？



宇宙空間から地球に降り注ぐ放射線
電子や陽子などの高エネルギー粒子
もっとも身近な宇宙線の生みの親は太陽

宇宙線の発見

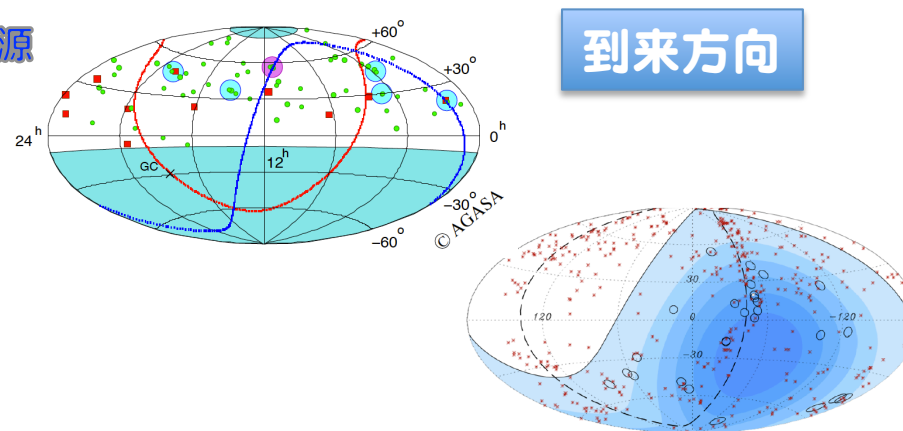
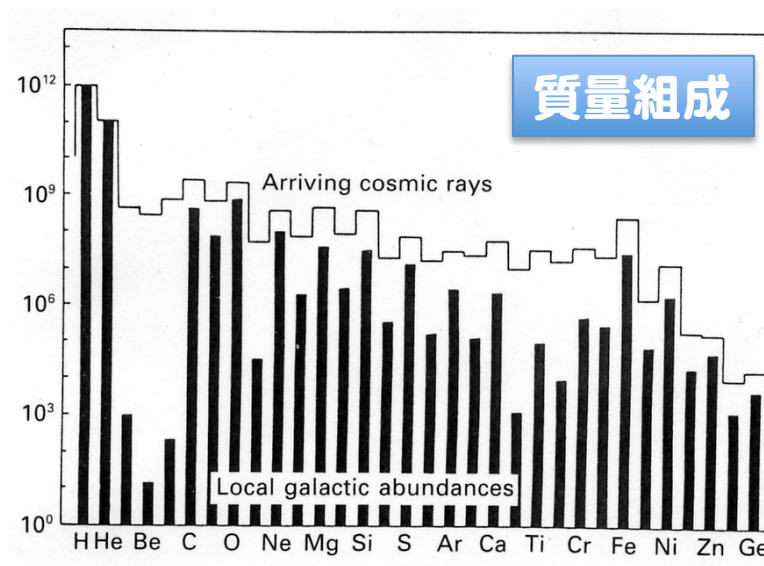
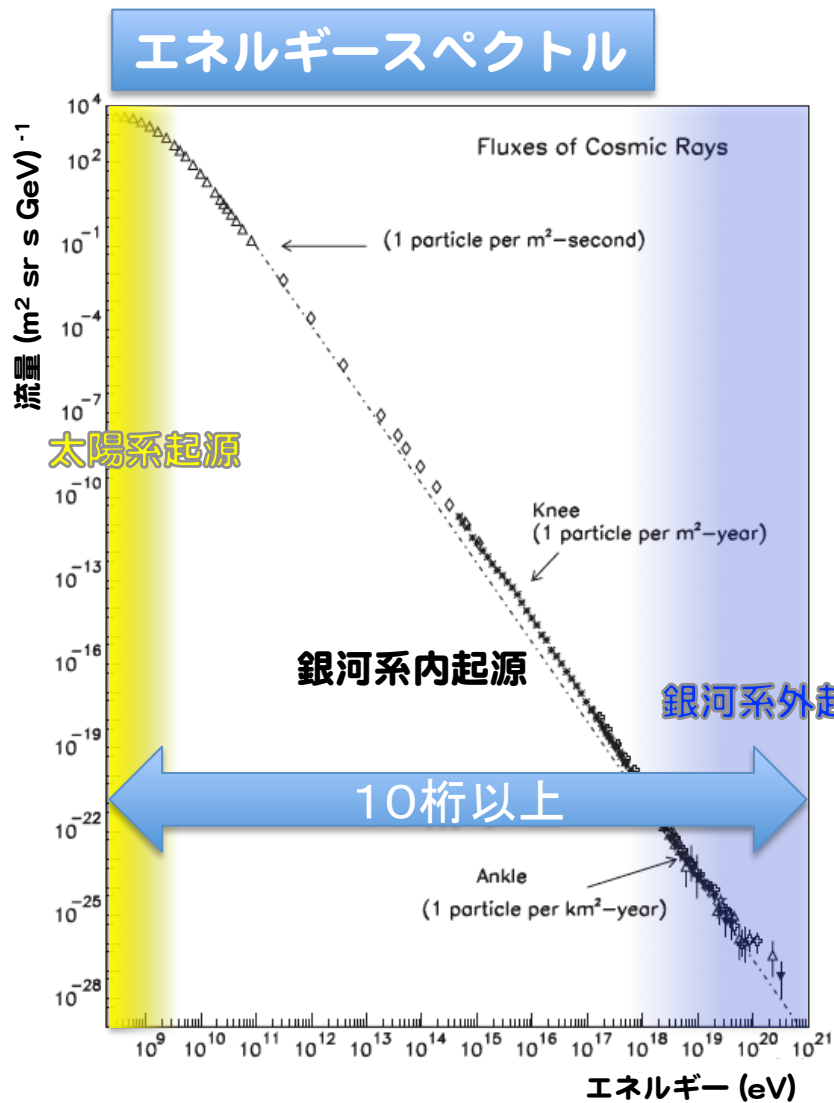


11.8.3



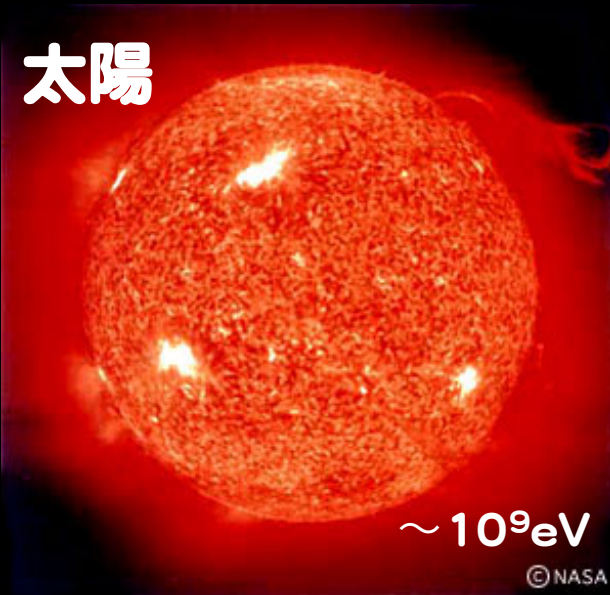
- ビクトール・フランツ・ヘス
 - オーストリア人
 - 1912年宇宙線を発見
 - 気球に乗って高度と放射線の強度を測定
 - 上空ほど強度が増加する事から、放射線が宇宙起源である事を示した
 - 1936年ノーベル賞受賞

宇宙線観測

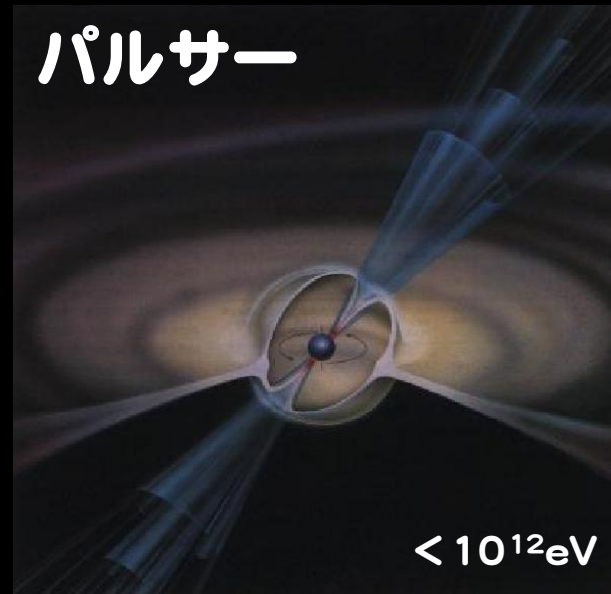


宇宙線起源候補

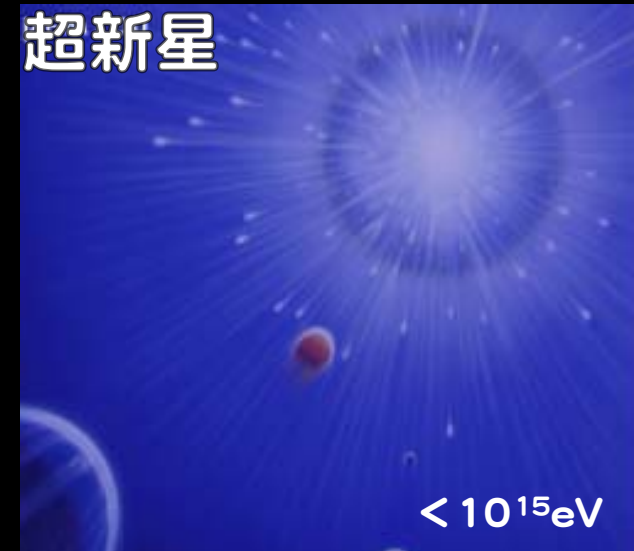
太陽



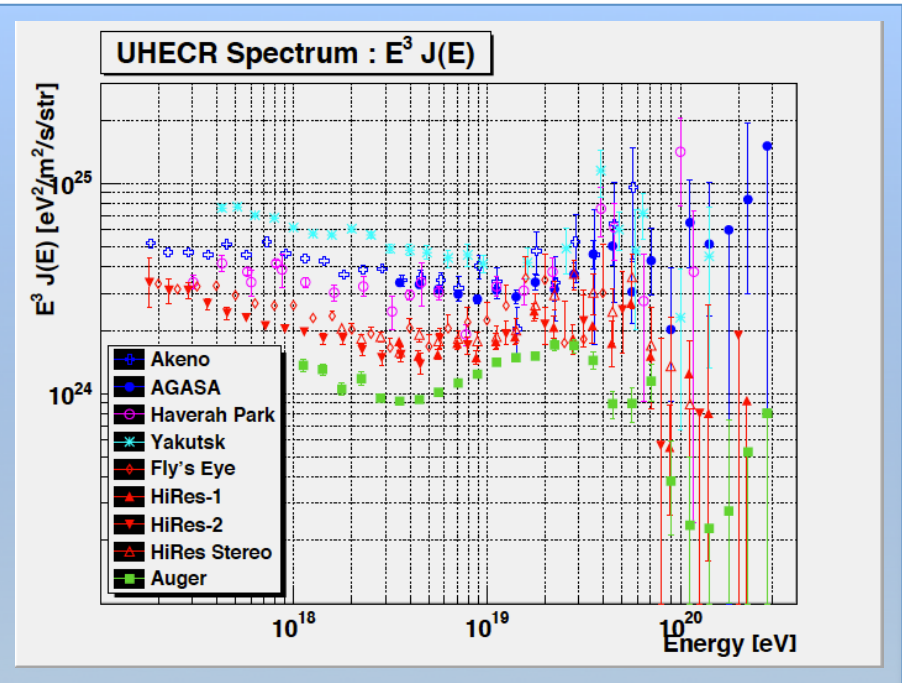
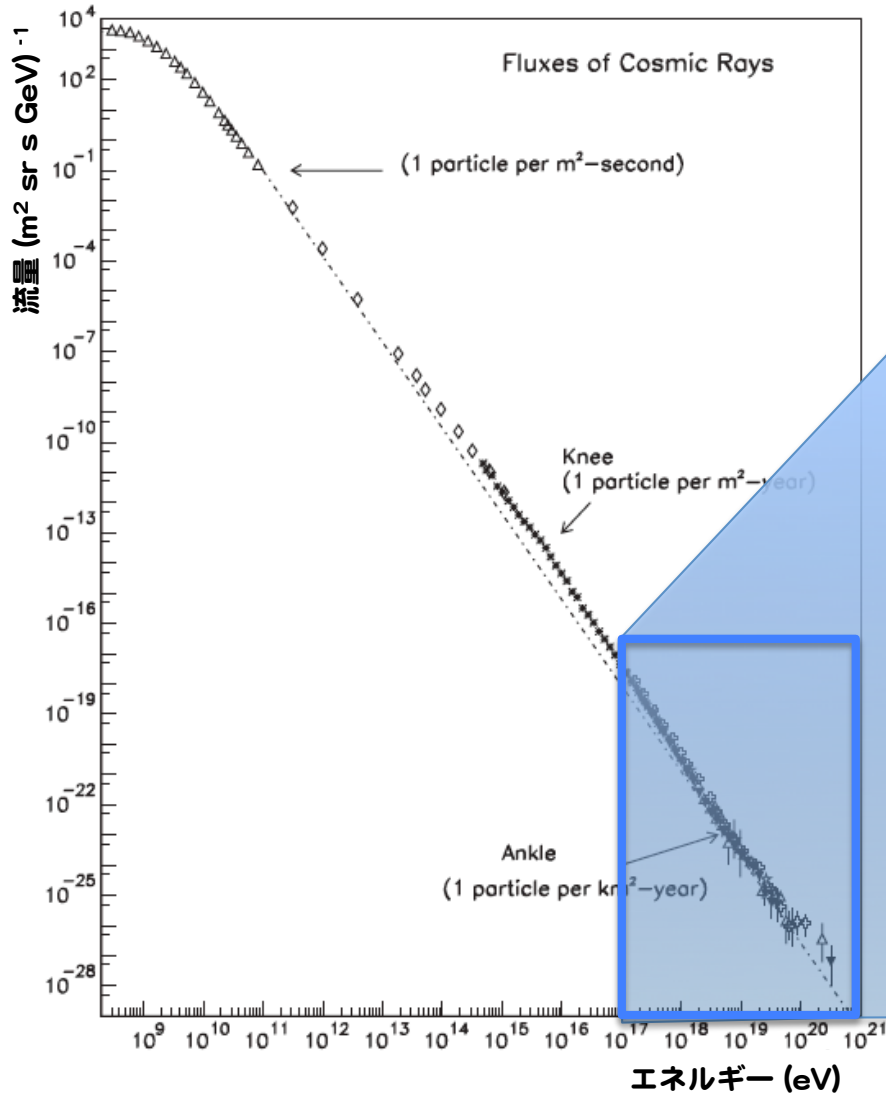
パルサー



超新星

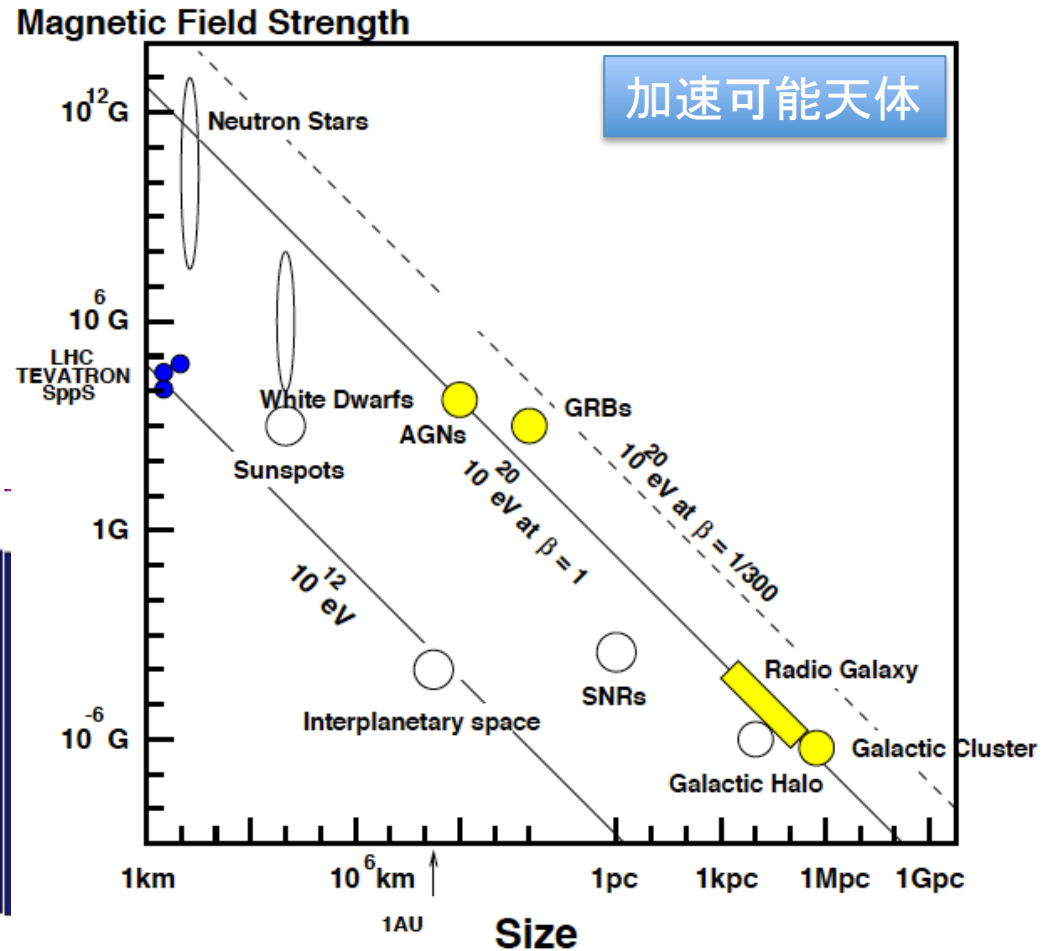
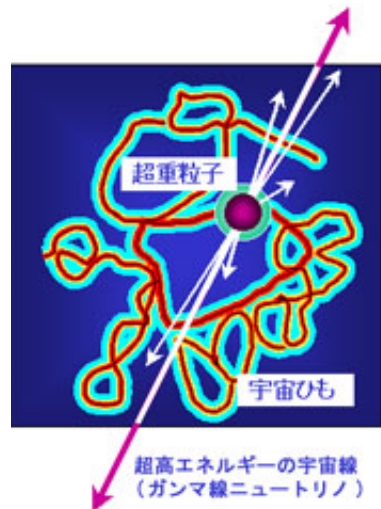
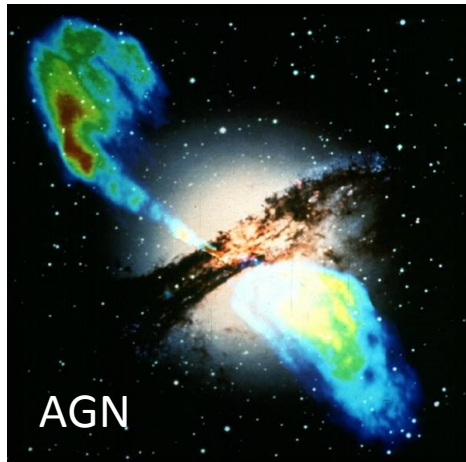


超高エネルギー宇宙線



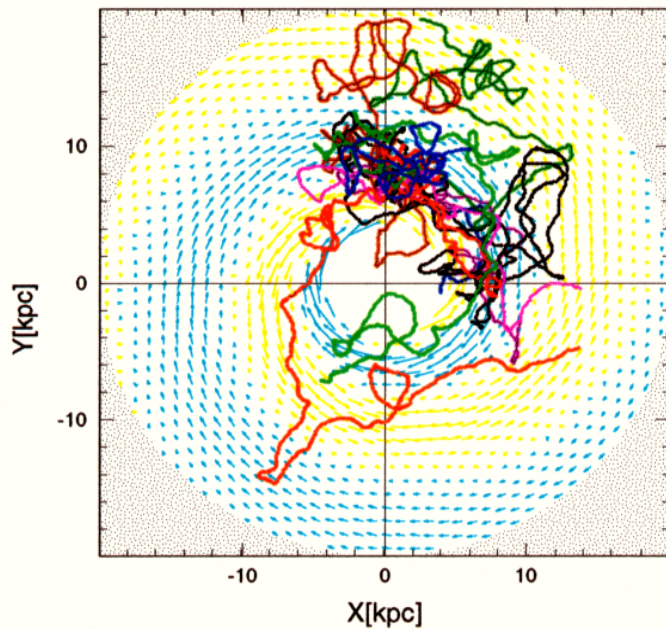
超高エネルギー宇宙線の起源候補

1. 天体起源
活動銀河核, 衝突銀河,
ガンマ線バースト, 強磁場中性子星 etc.
1次宇宙線種: 陽子や原子核 (He, ..., Fe)
2. トップダウンモデル
宇宙紐, 超重粒子 etc.
1次宇宙線種: ガンマ線, ニュートリノ

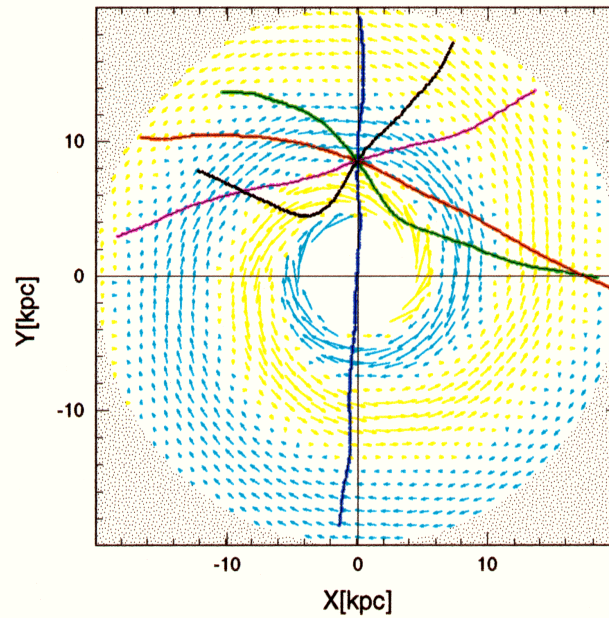


磁場中の伝播

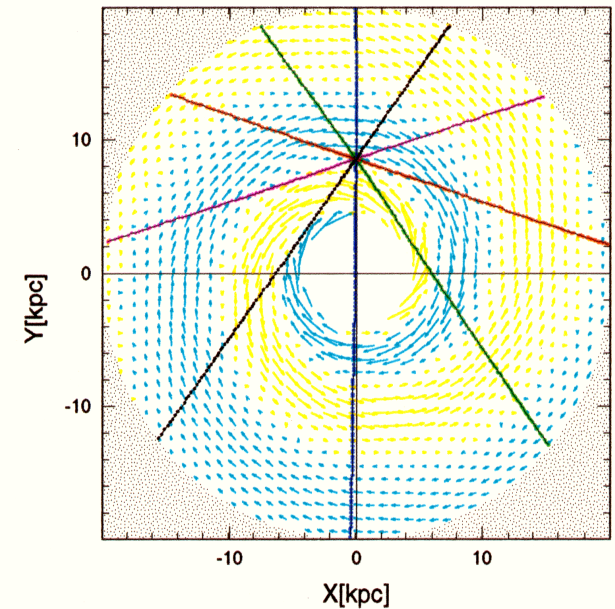
10^{18}eV



10^{19}eV



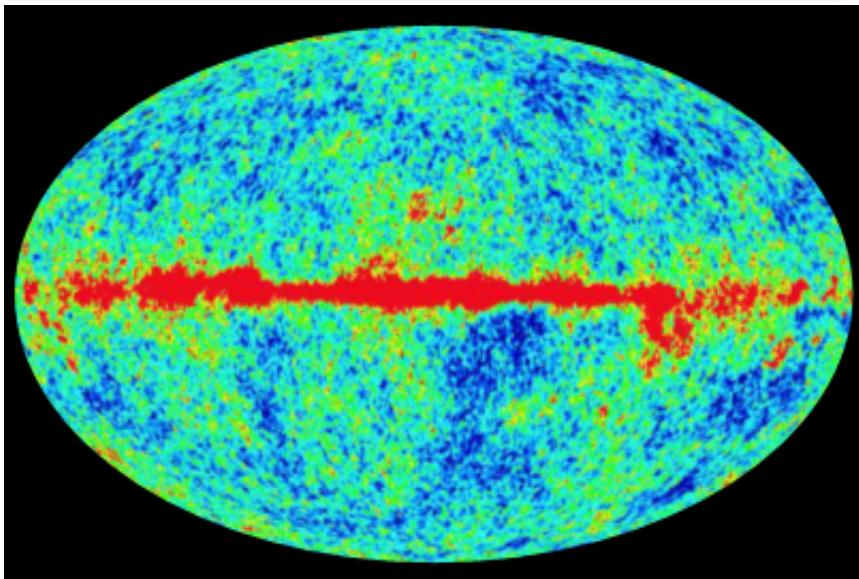
10^{20}eV



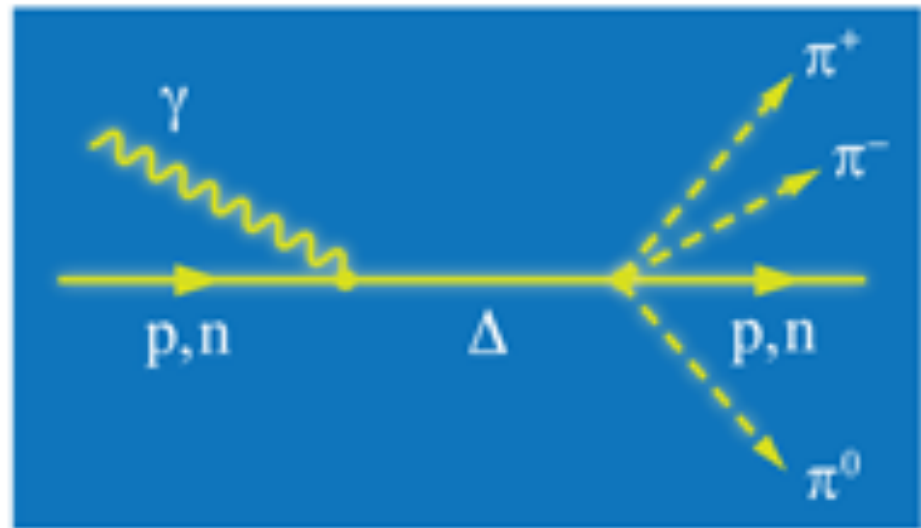
**超高エネルギー宇宙線は磁場中を直進する！
点源天体を同定できる？！
荷電粒子天文学が可能に**

超高エネルギー宇宙線の伝播

宇宙背景放射 (2.725K, 411 ph/cm^3)



CMBとの相互作用によるパイオン生成

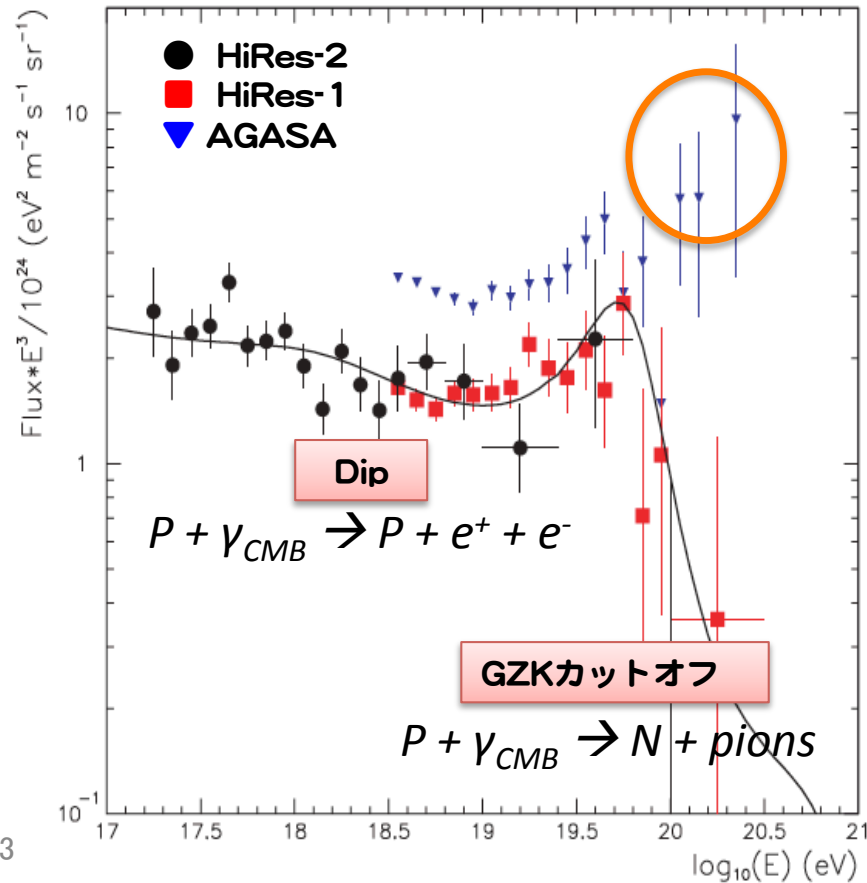


GZK 限界

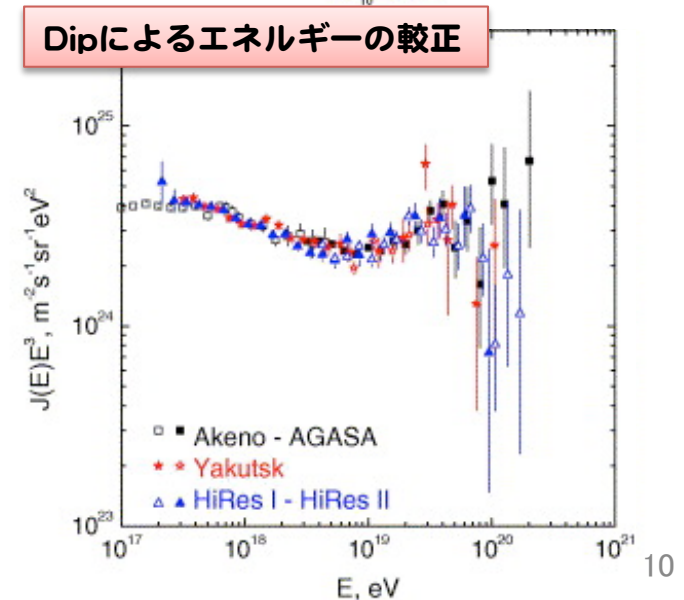
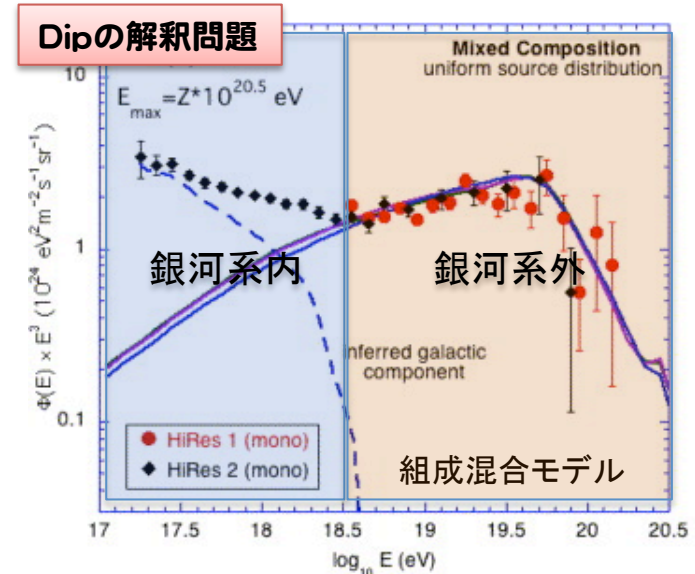
10^{20} eV を超えるような宇宙線は100Mpc以遠からは地球に到達できない!!

超高エネルギー宇宙線観測

1. エネルギースペクトル
2. エネルギースペクトル
3. 到来方向

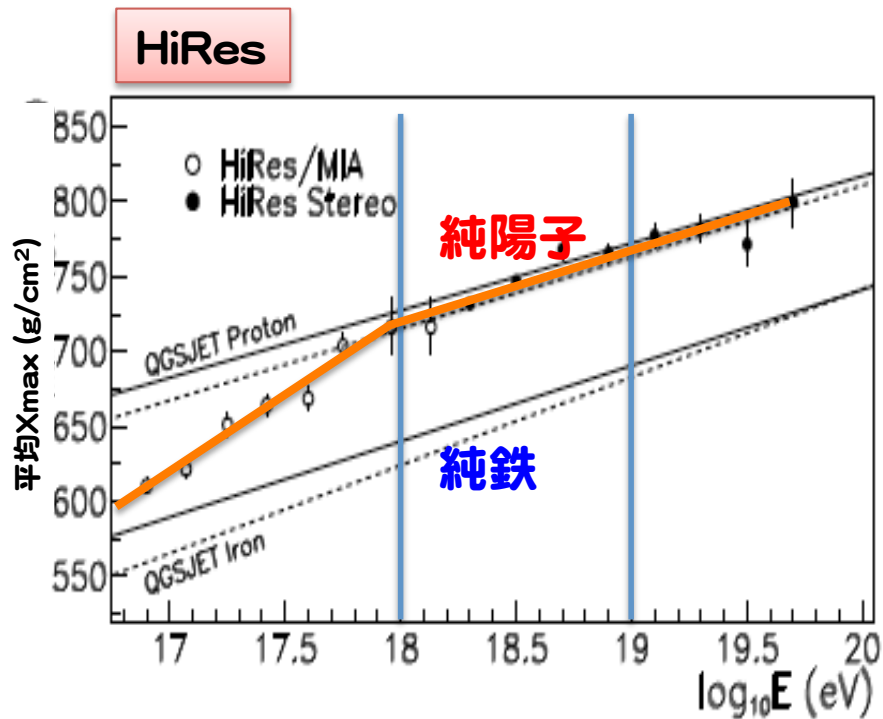


11.8.3

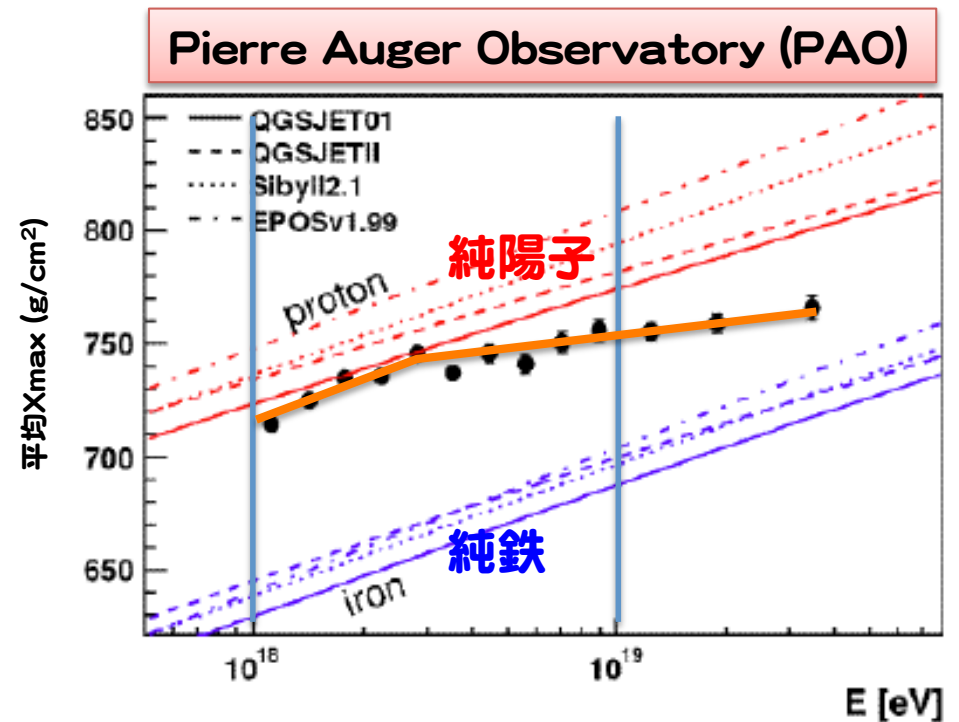


超高エネルギー宇宙線観測

1. エネルギースペクトル
2. 質量組成
3. 到来方向



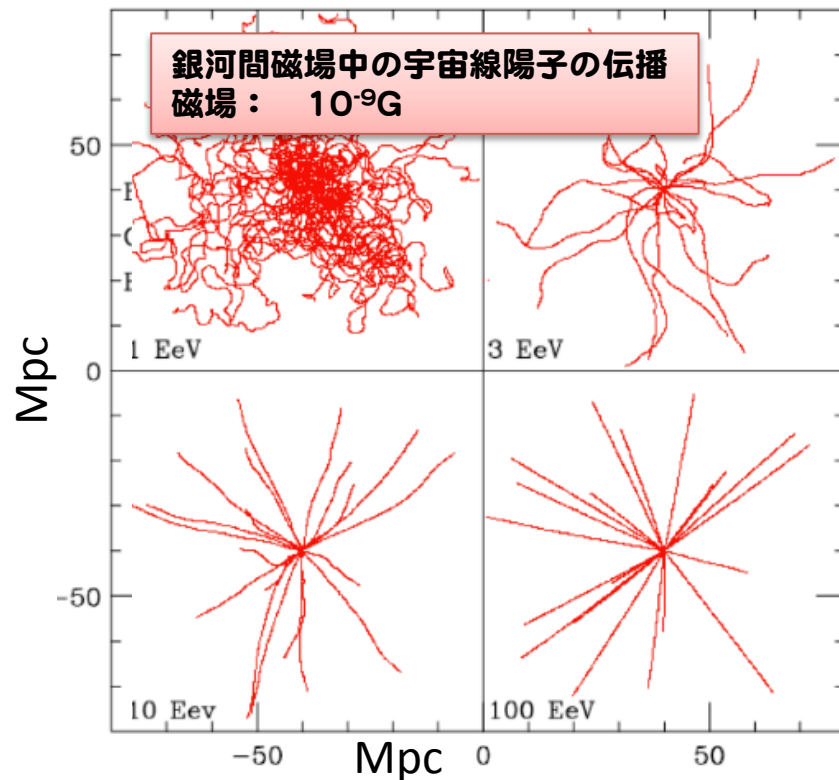
11.8.3



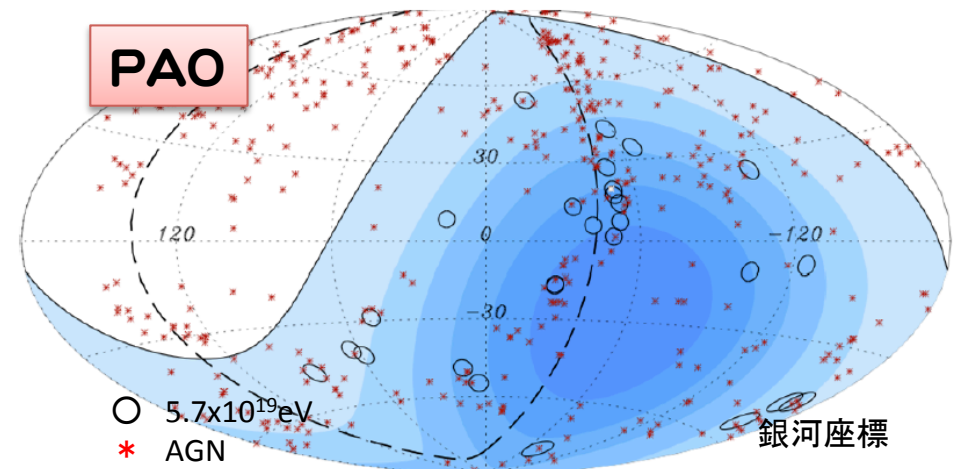
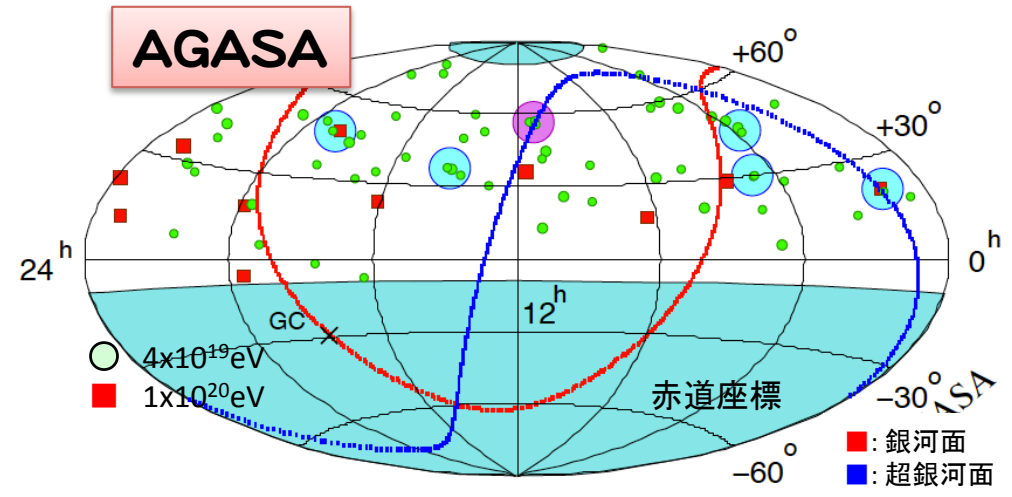
11

超高エネルギー宇宙線観測

1. エネルギースペクトル
2. 質量組成
3. 到来方向



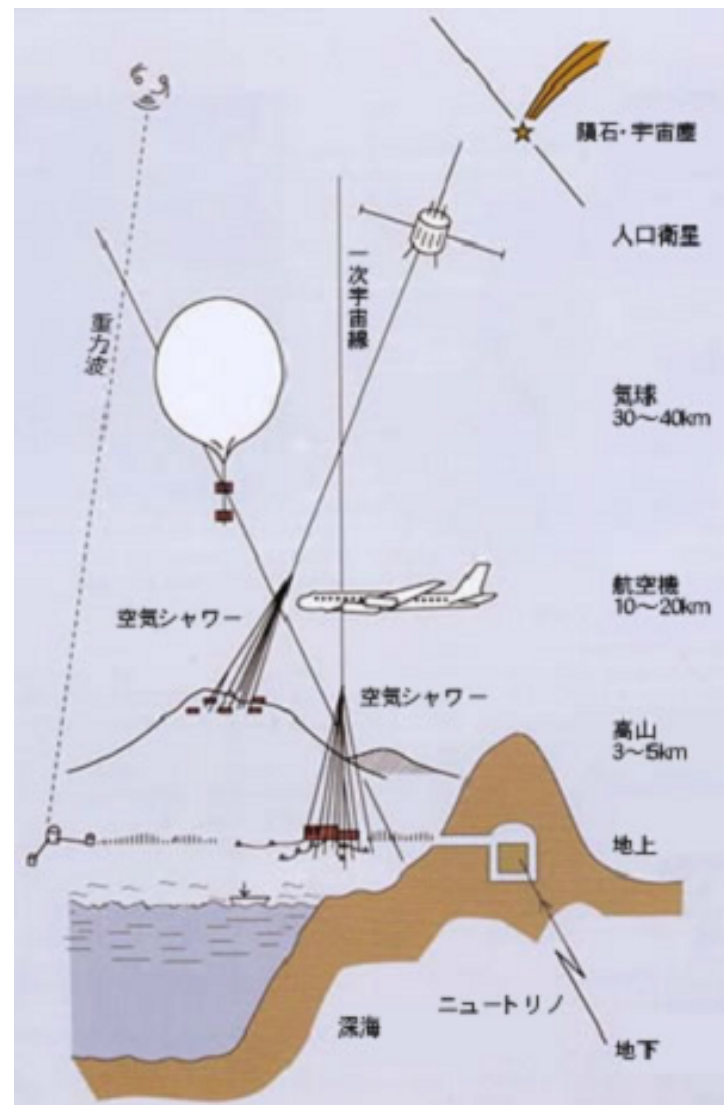
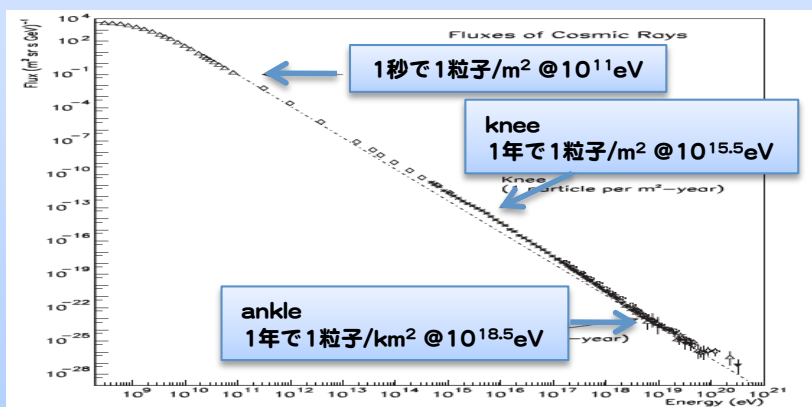
11.8.3



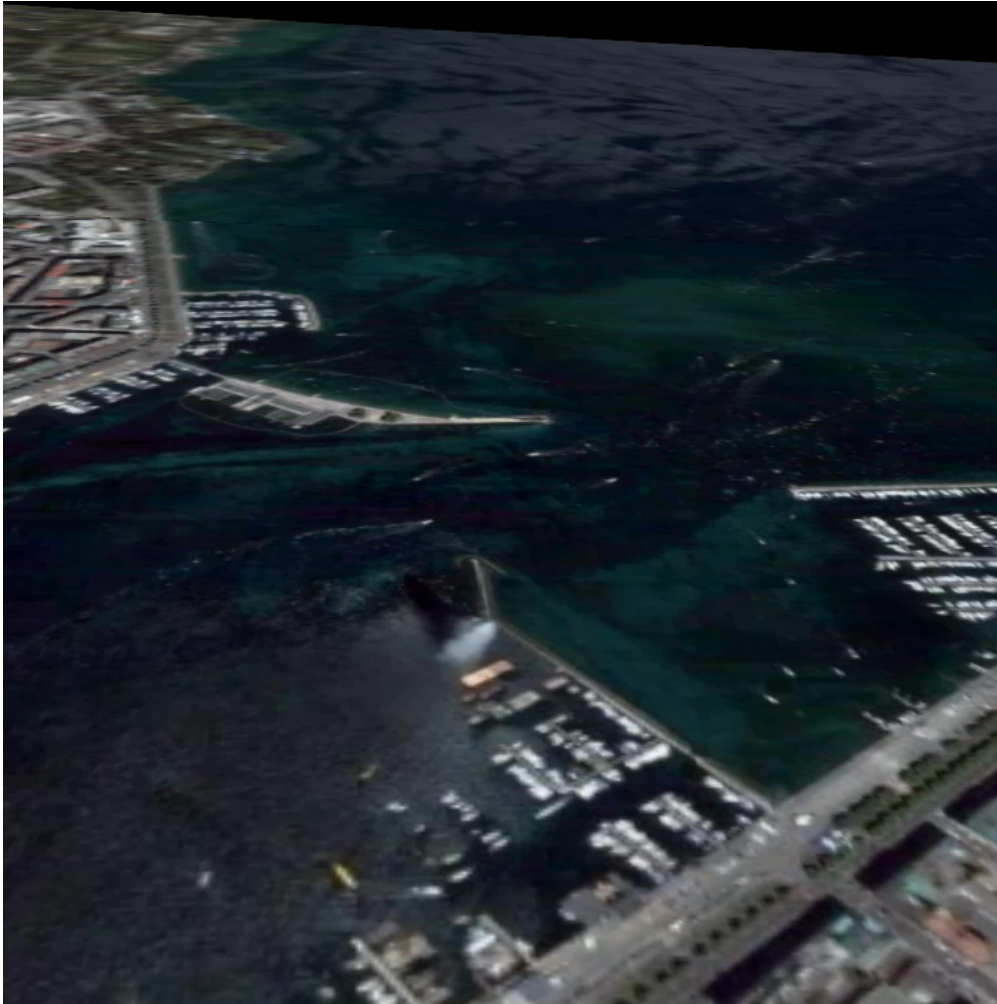
Solid line: 視野の境界
Dashed line: 超銀河面

宇宙線観測方法

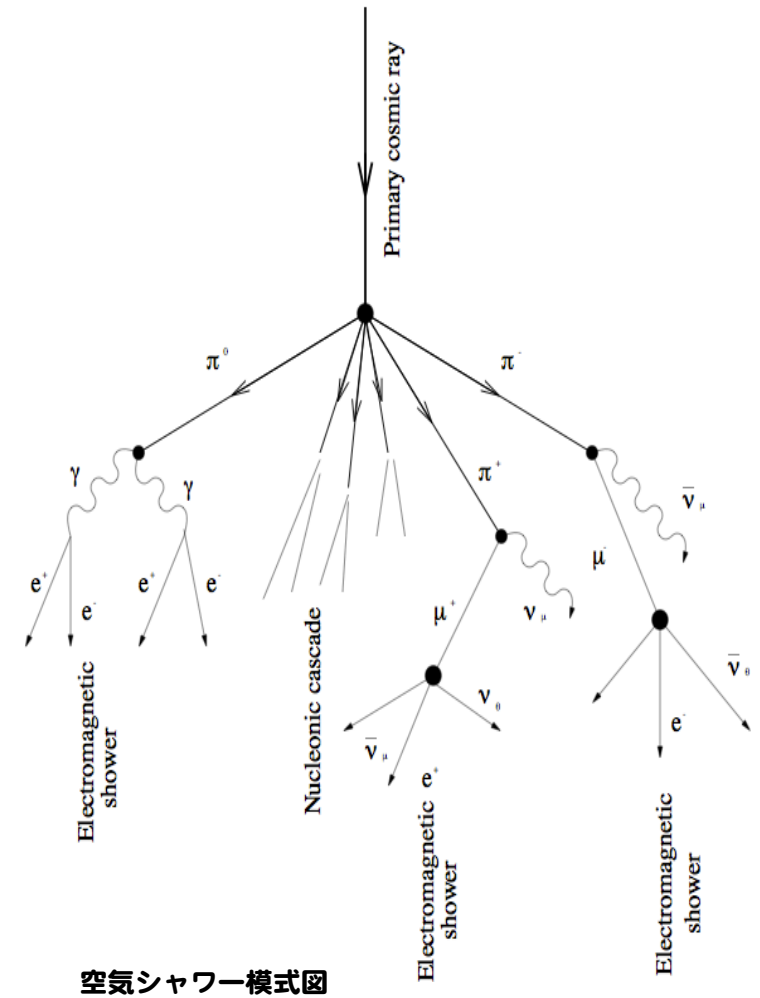
- 1次宇宙線直接測定
気球や人工衛星による観測
 10^{14} eV以下
- 空気シャワーによる間接測定
宇宙線が大気に入射した時に
生成する電子などの2次粒子
地表での粒子数を測定
大気中の蛍光を測定
大きな検出面積が必要



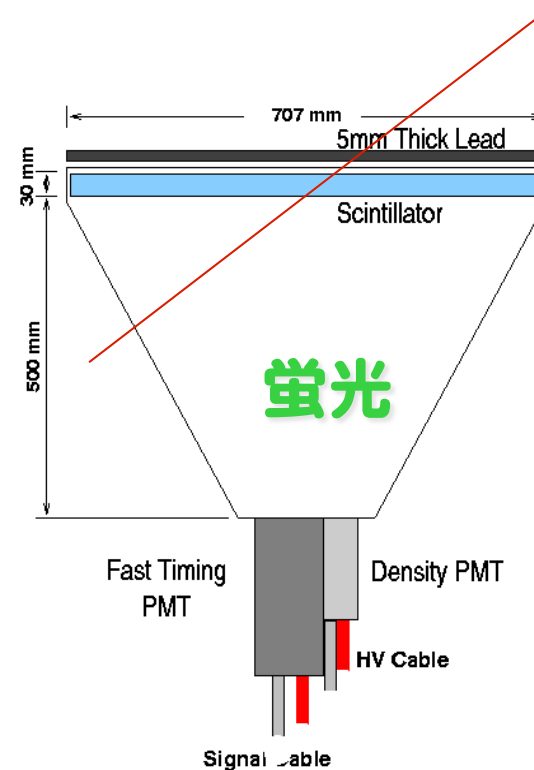
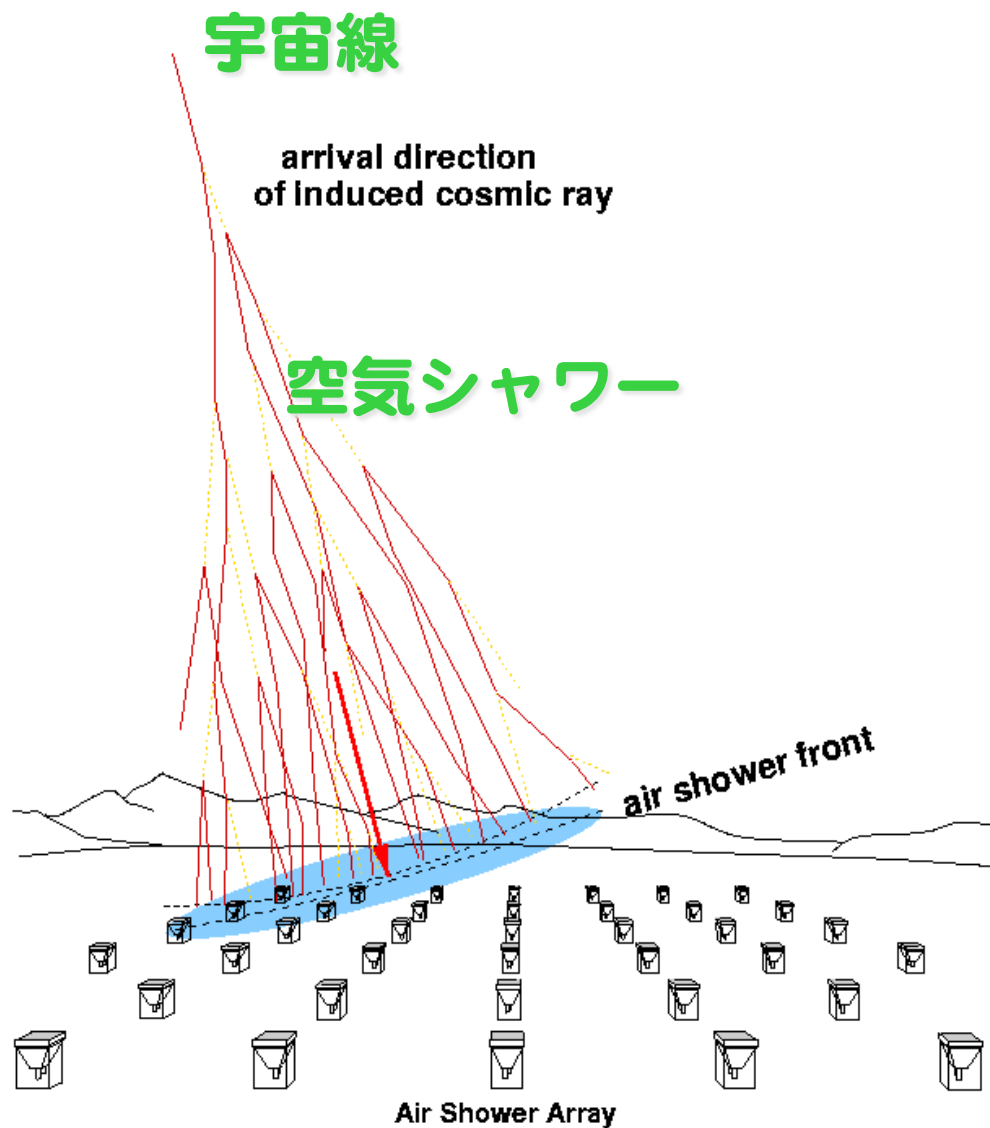
空気シャワー現象



<http://astro.uchicago.edu/cosmus/>



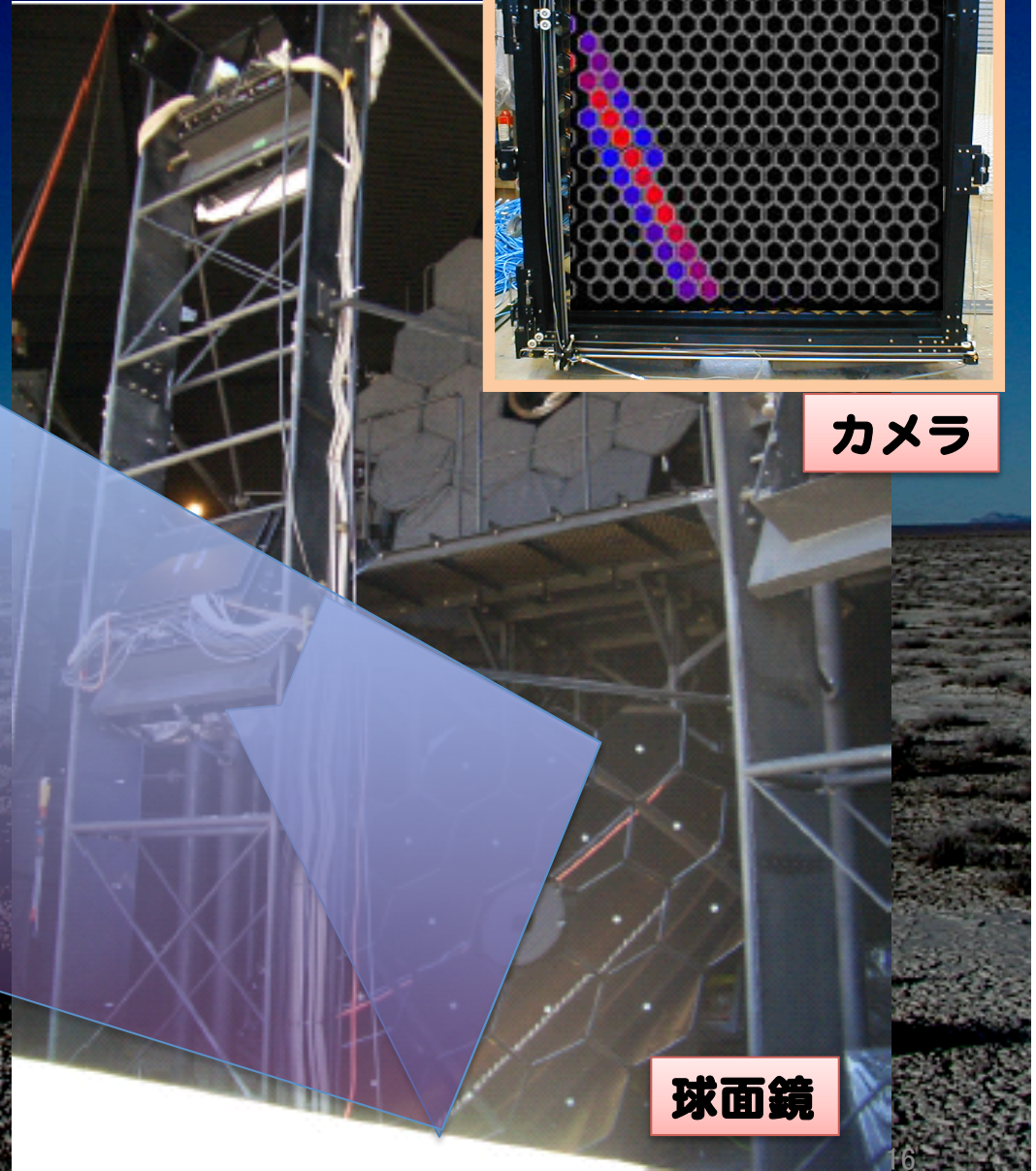
地表粒子検出



大気蛍光法

宇宙線

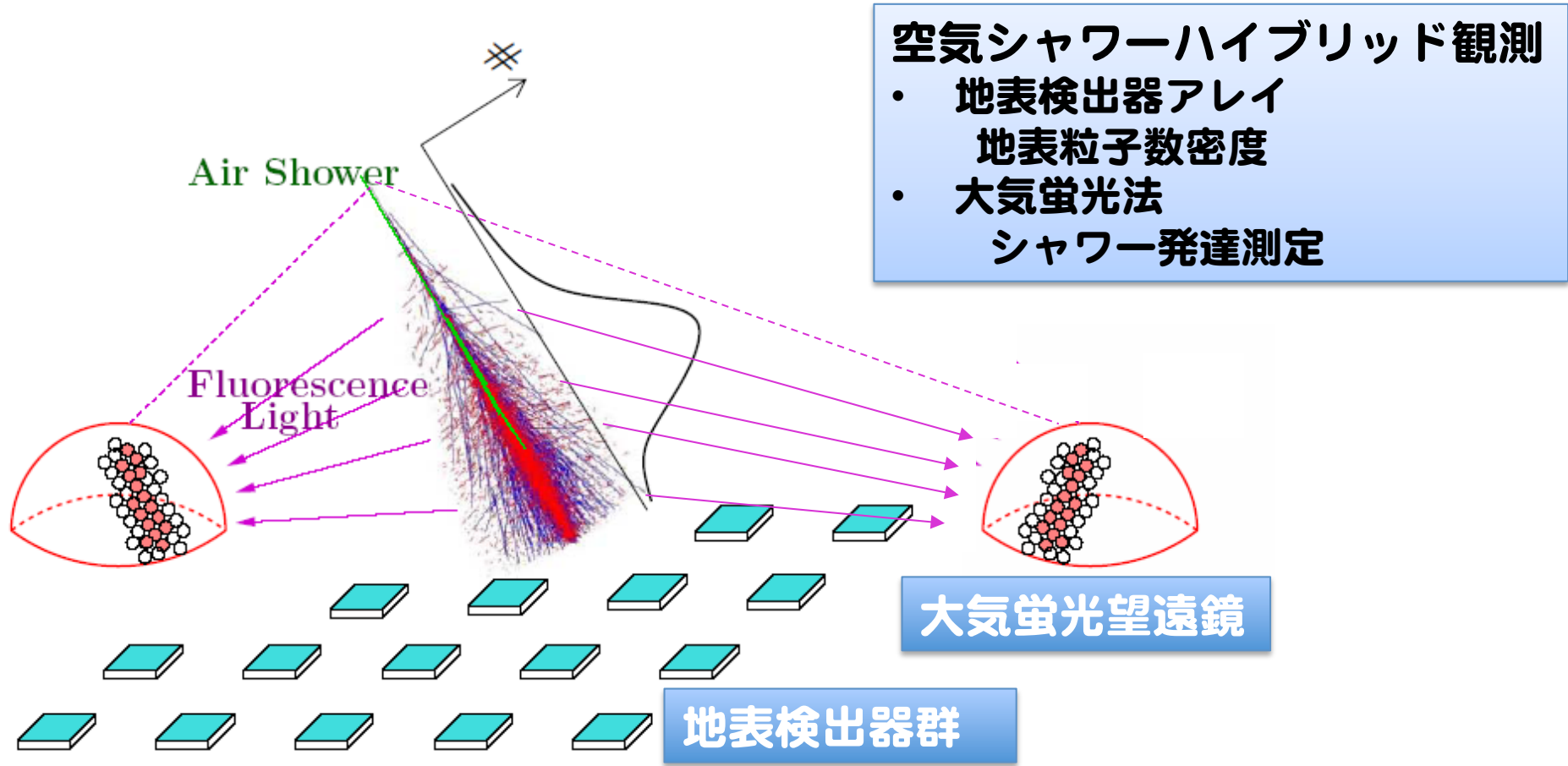
空気シャワー



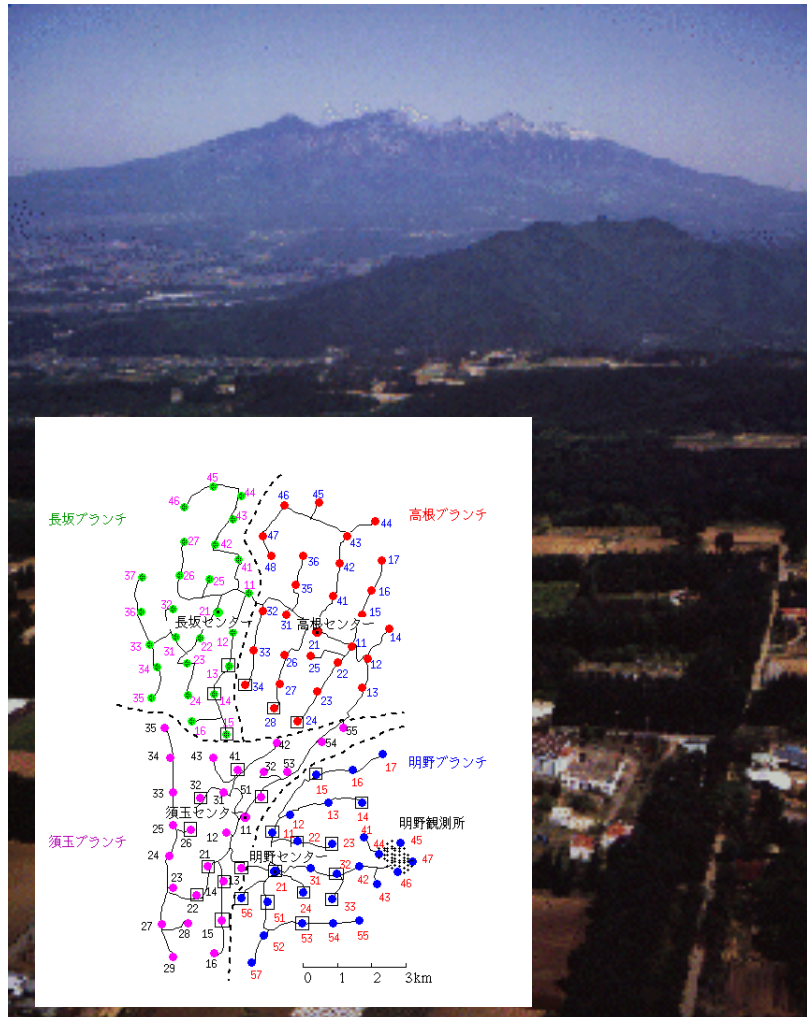
カメラ

球面鏡

超高エネルギー宇宙線観測



AGASA (the Akeno Giant Air Shower Array)



山梨県明野村 (北緯 $35^{\circ} 47'$, 東経 $138^{\circ} 30'$)

地上検出器のアレイ

111台の地表検出器

27台のミュオン検出器

約1km間隔, 約100 km²

GZK限界を超える超高エネルギー事象を観測



<http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA>

High Resolution Fly's Eye



大気蛍光法のパイオニアであるFly's Eyeの後継実験
米国ユタ州
大気蛍光望遠鏡2カ所

HiRes-I

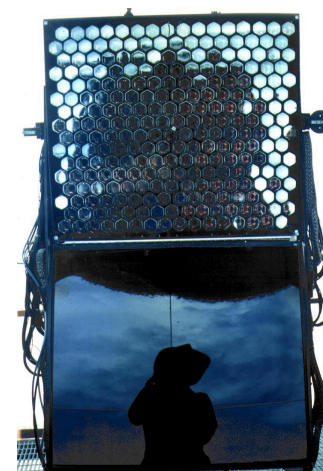
望遠鏡21台, 仰角: 3 - 17度

Readout pulse height and time

HiRes-II

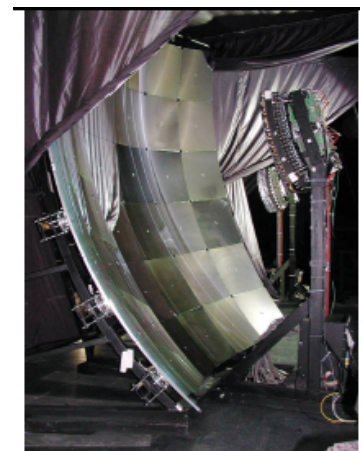
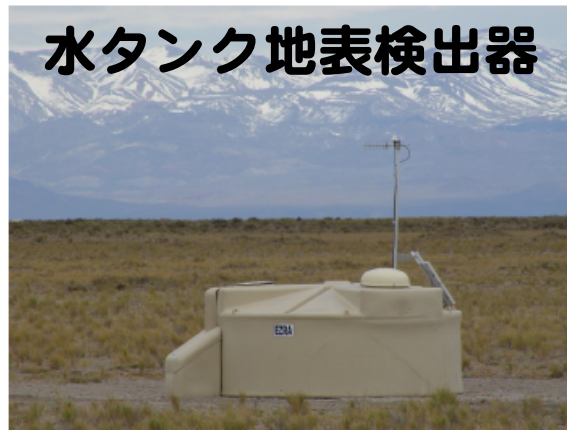
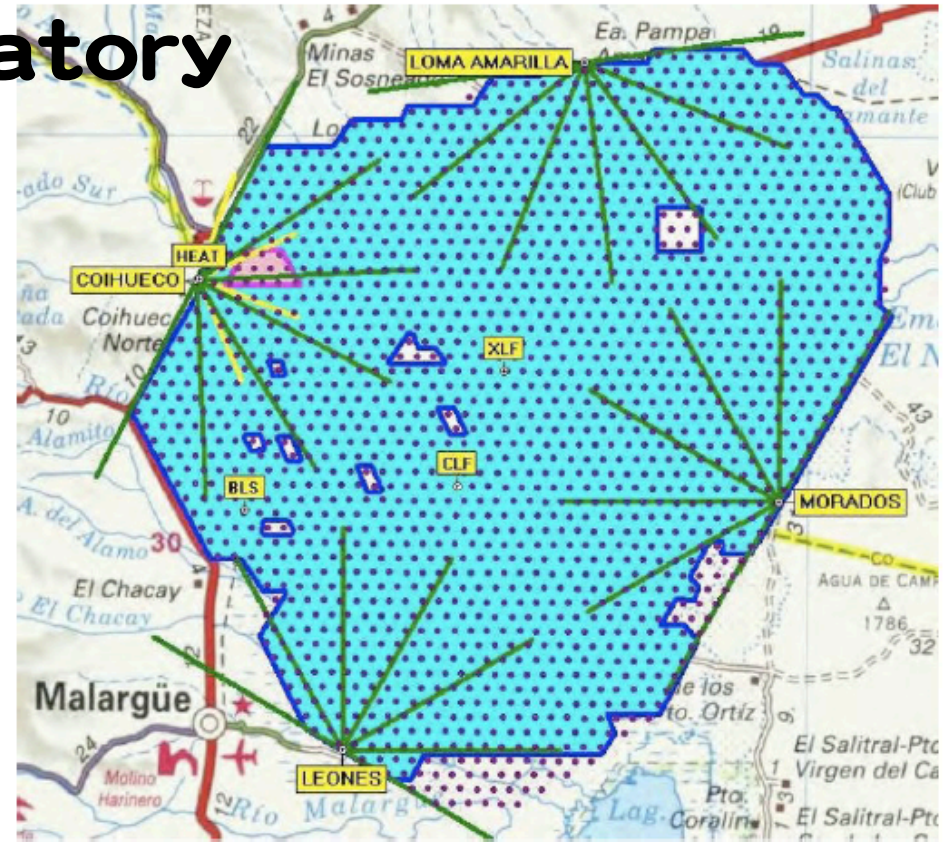
望遠鏡42台 (2段), 仰角: 3 - 31度

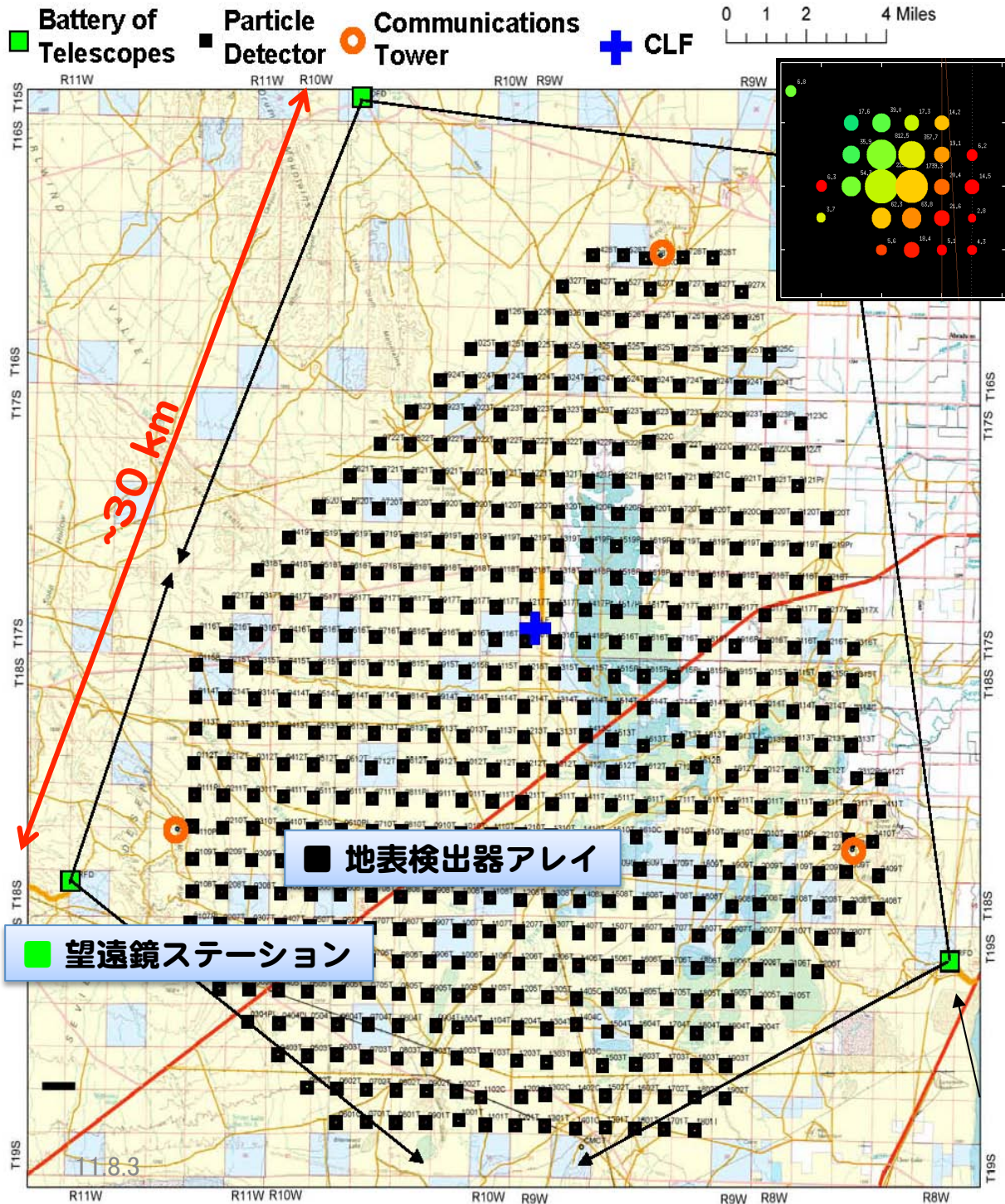
Electronics stores pulse shape vs. time
w/ 100 ns sampling



Pierre Auger Observatory

南米アルゼンチン
ハイブリッド検出器
地表検出器約1600台、3000km²
大気蛍光望遠鏡ステーション4カ所



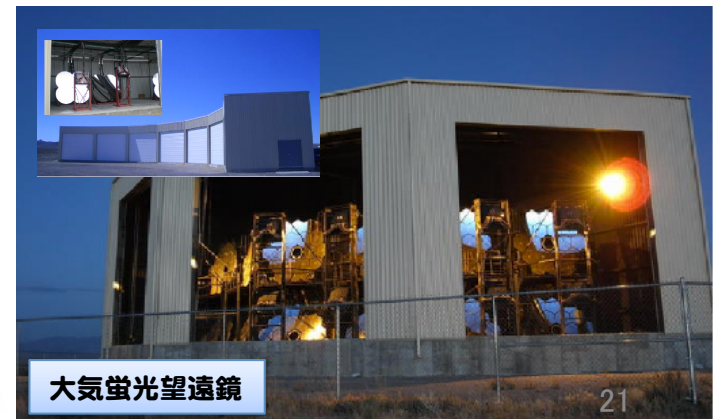


- 米国ユタ州
- 望遠鏡ステーション3カ所
一つはHiRes-I を移設
- 地表検出器アレイ
507台
1.2km間隔、678 km²



地表検出器

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



大気蛍光望遠鏡

Telescope Array



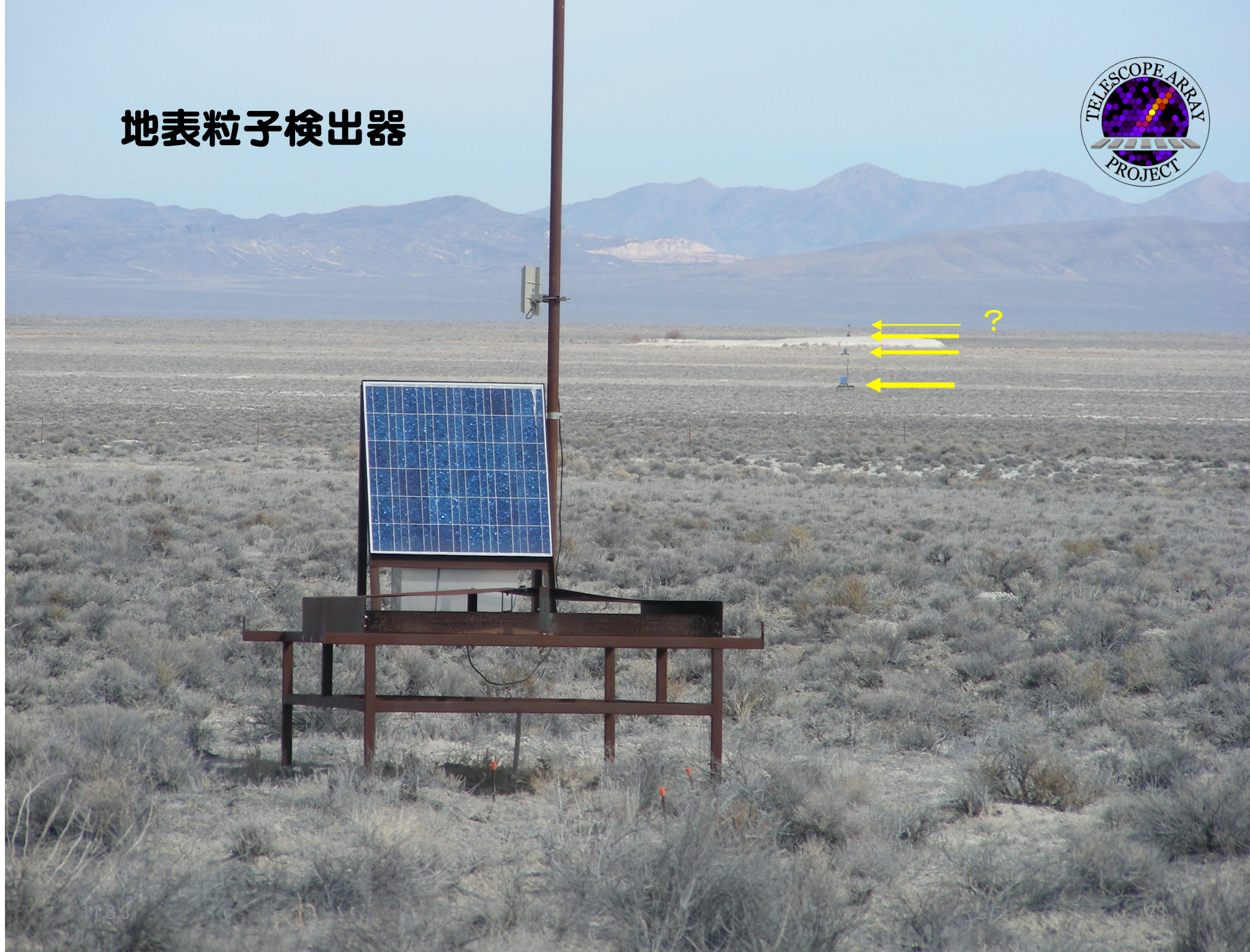
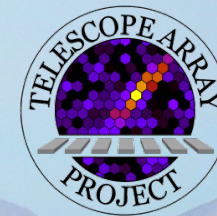
アメリカ合衆国，ユタ州
ミラード郡，デルタ市
ソルトレイクシティから，133マイル

11.8.3

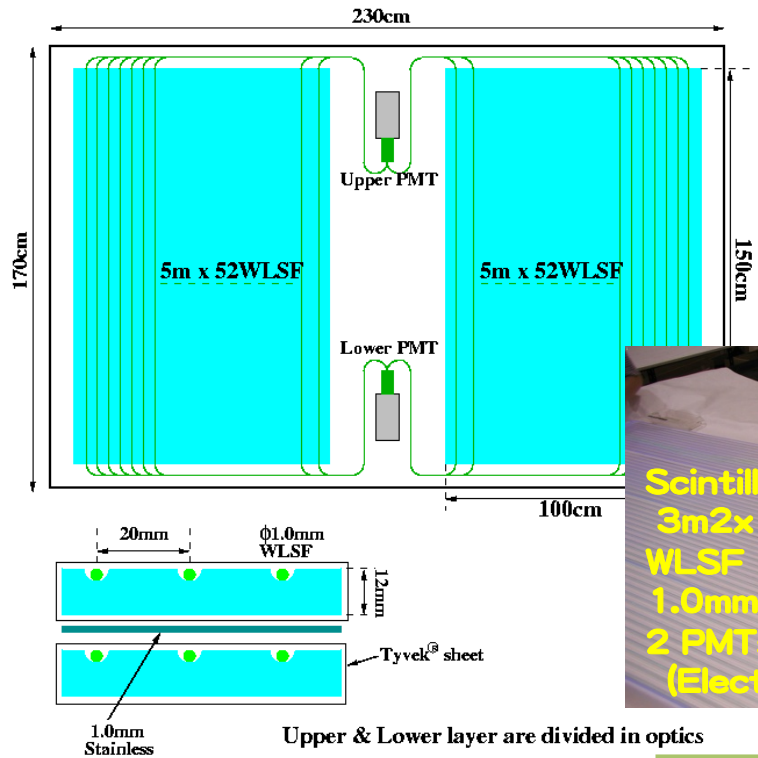


ラスベガス方面

地表粒子検出器

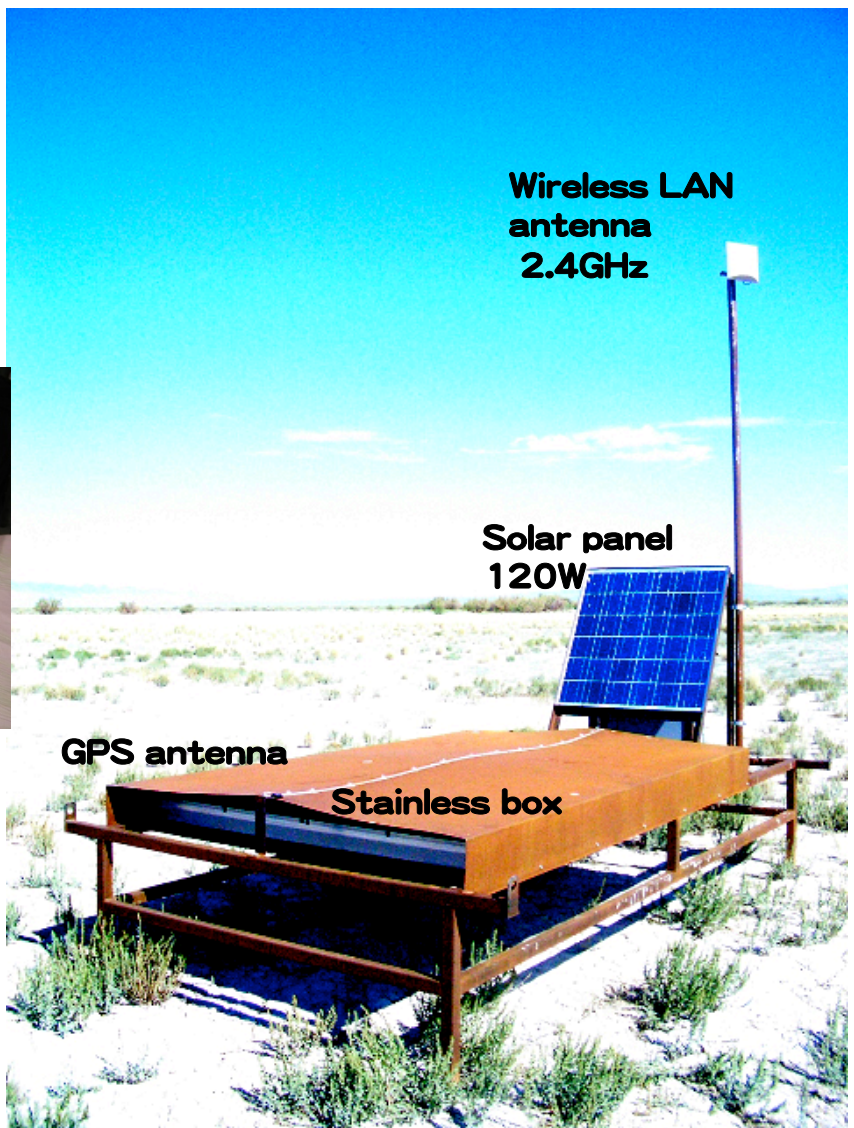
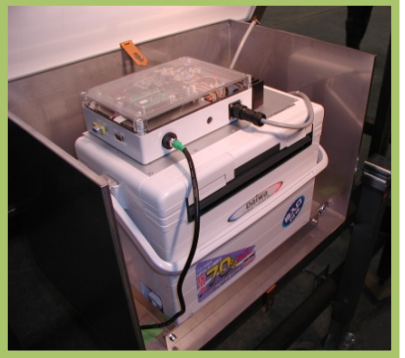
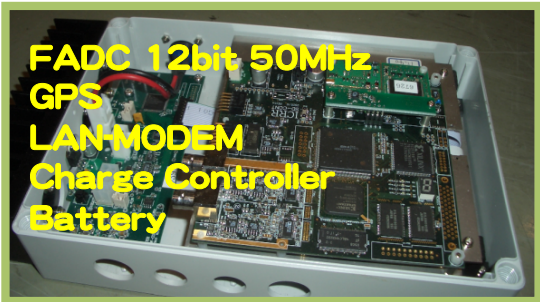


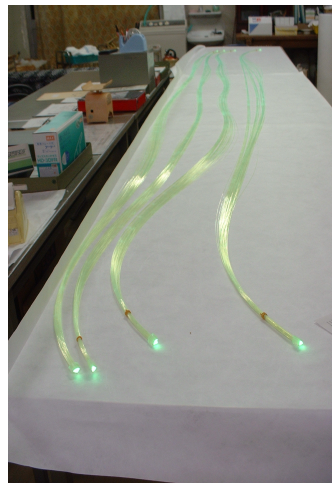
地表検出器 (Surface Detector, SD)



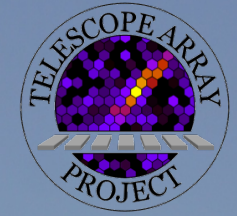
Scintillator
 3m² x 1.2cm x 2 layers
 WLSF
 1.0mmf 2cm spacing
 2 PMTs
 (Electrontubes 9124SA)

Upper & Lower layer are divided in optics





Plastic Scintillator
3 m², 12 mm
WLSF readout, 2 layers overlaid

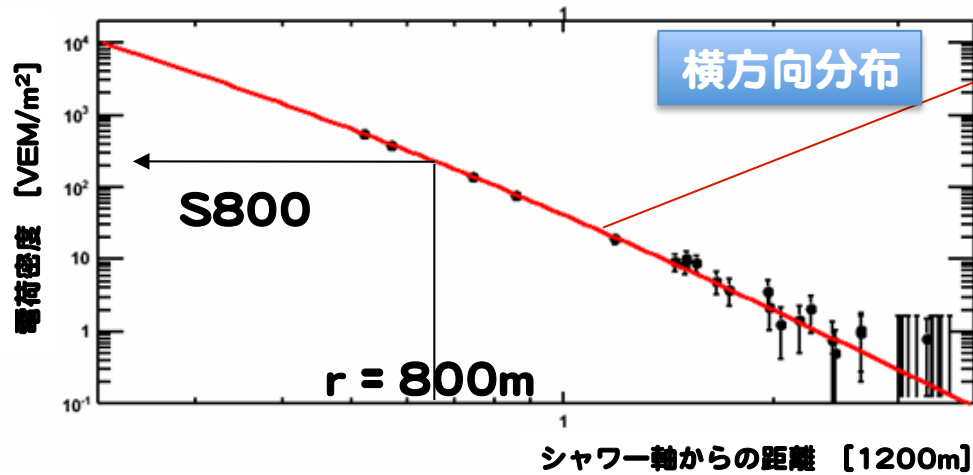
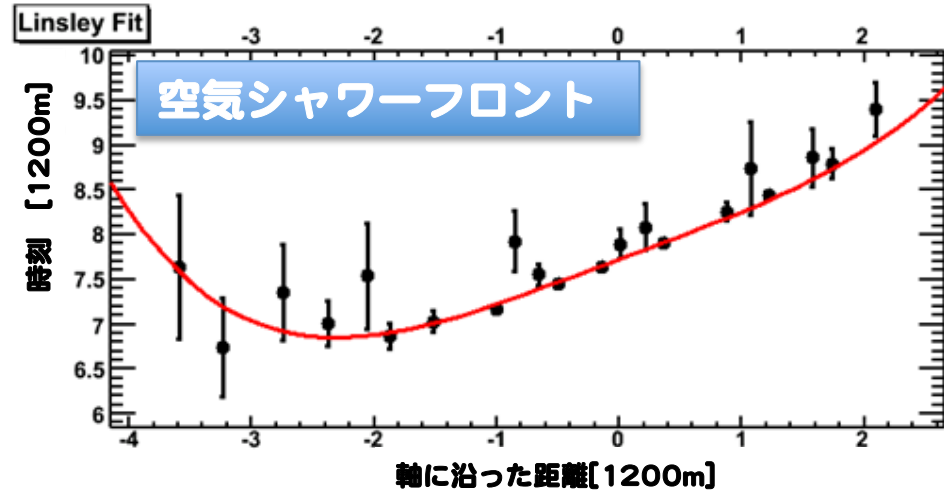
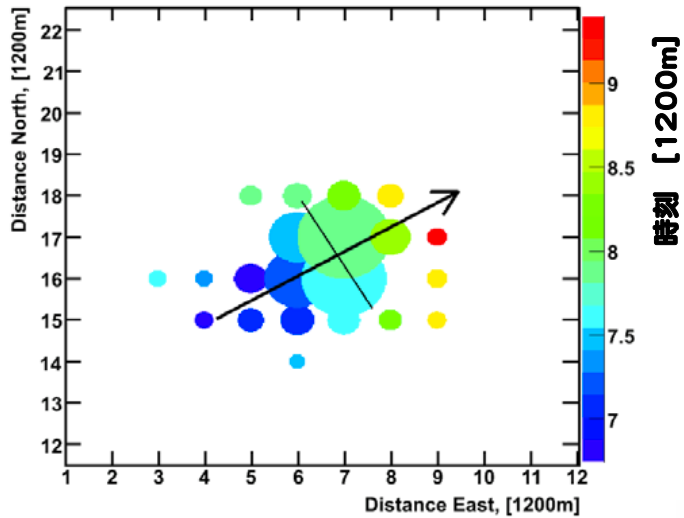


TA地表アレイは2008年3月から観測を始めた。



SD イベント

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



AGASA fitting function

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

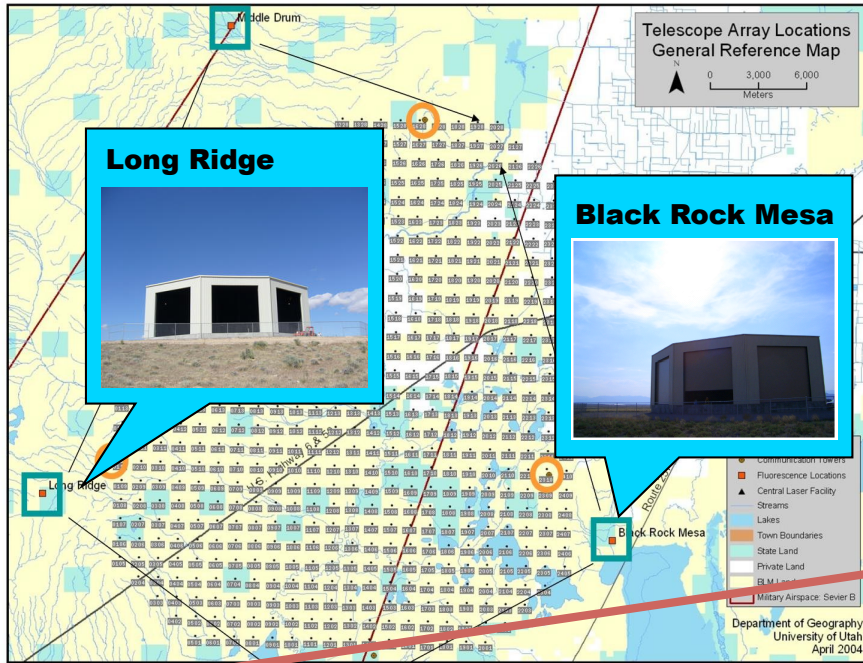
$$\eta = (3.97 \pm 0.13) - (1.79 \pm 0.62) (\sec \theta - 1)$$

S800 : エネルギーエスチメーター
シャワーコアから800mでの粒子密度

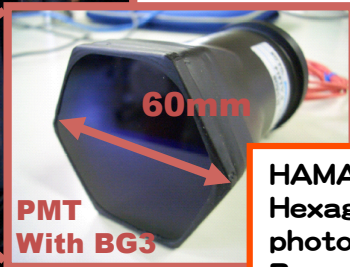
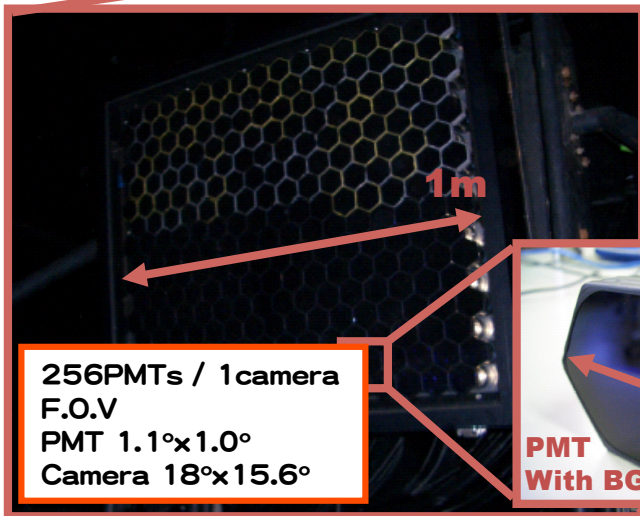
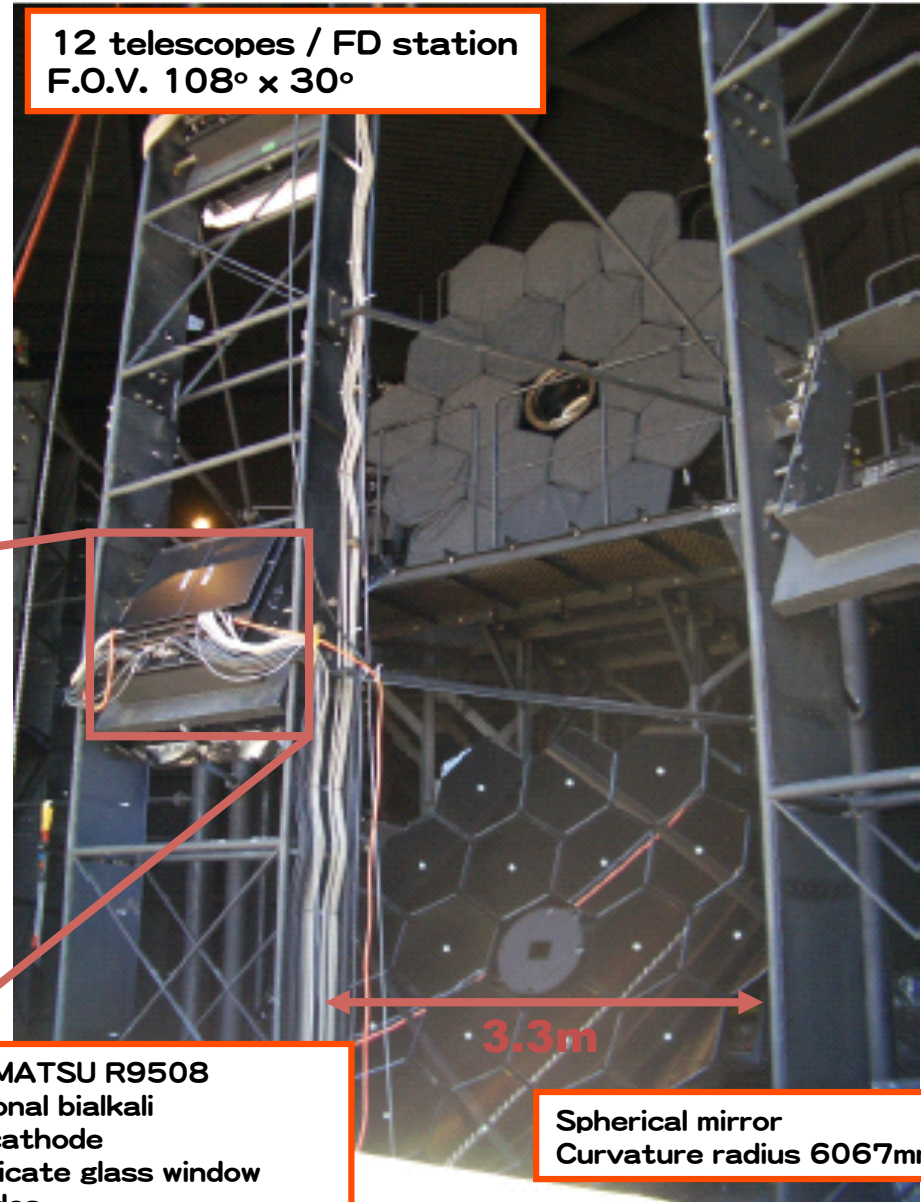
大氣螢光望遠鏡



Fluorescence Detector (FD)



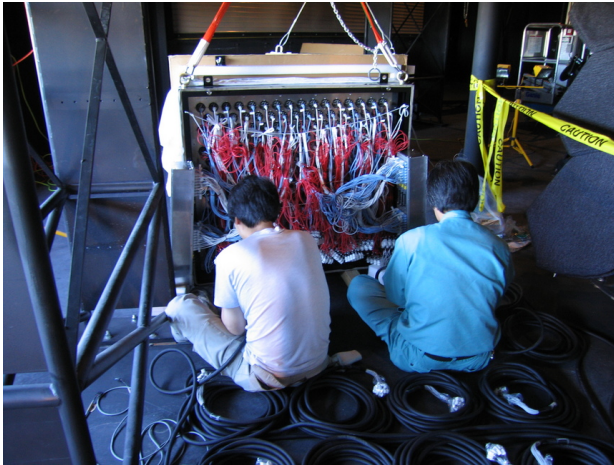
12 telescopes / FD station
F.O.V. 108° x 30°



HAMAMATSU R9508
Hexagonal bialkali
photocathode
Borosilicate glass window
8dynodes
Q.E.:30%(350nm)
Gain:8.0x10⁴(800V)

3.3m

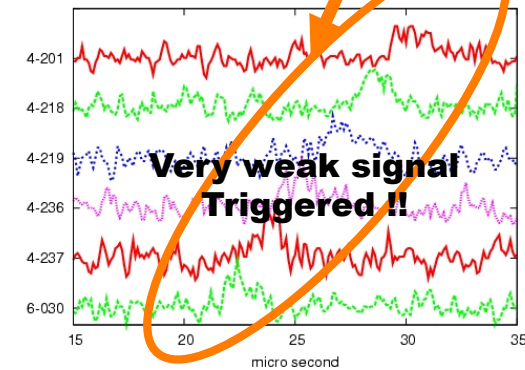
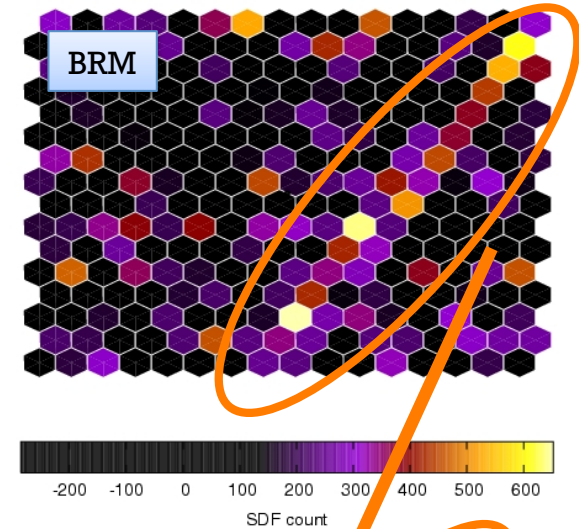
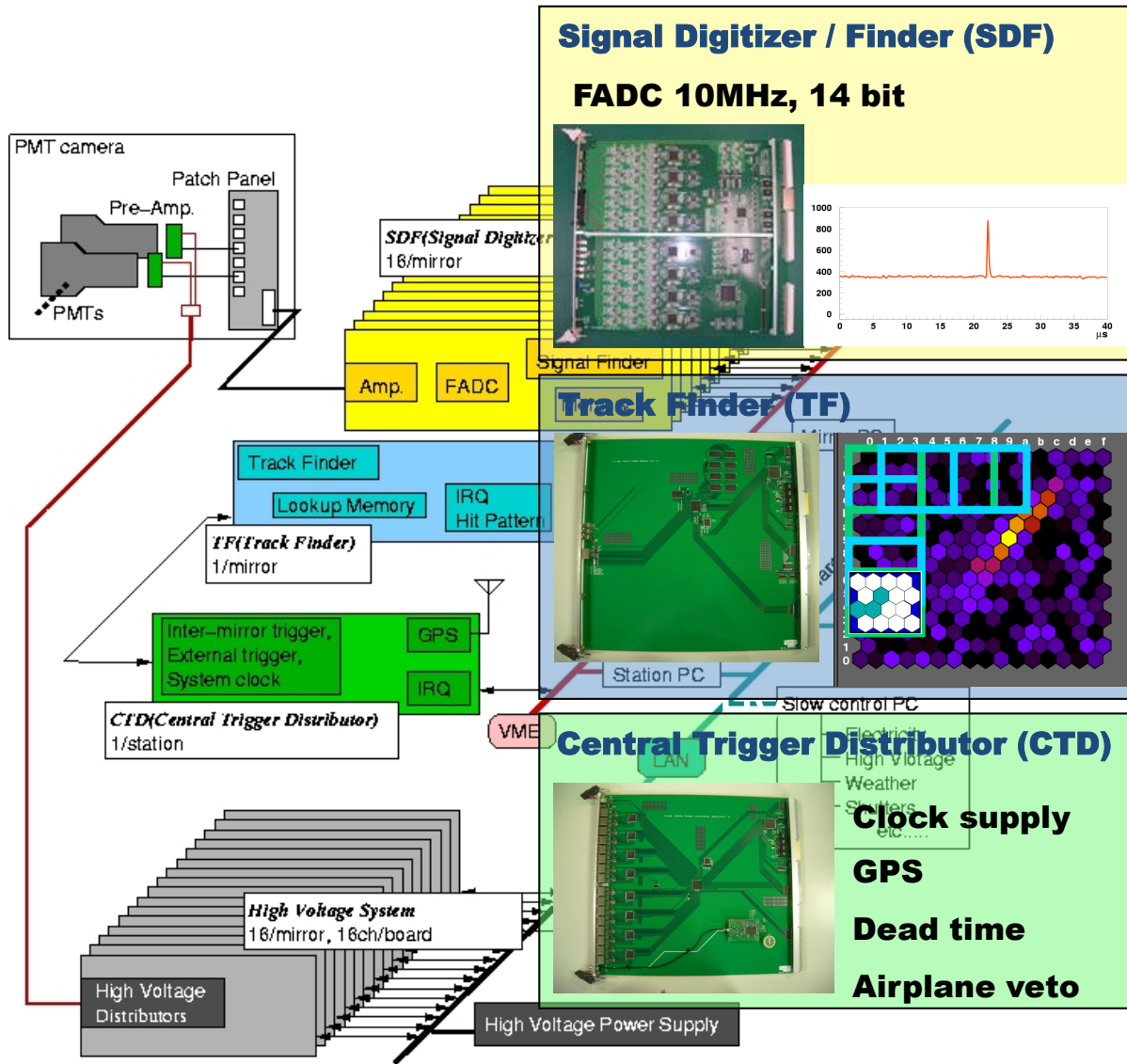
Spherical mirror
Curvature radius 6067mm



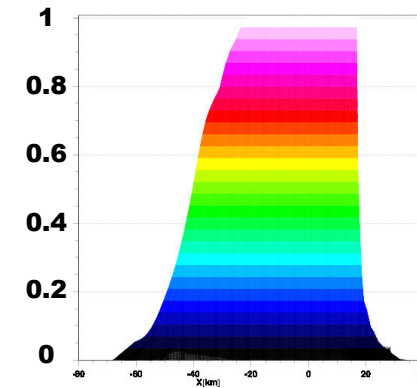
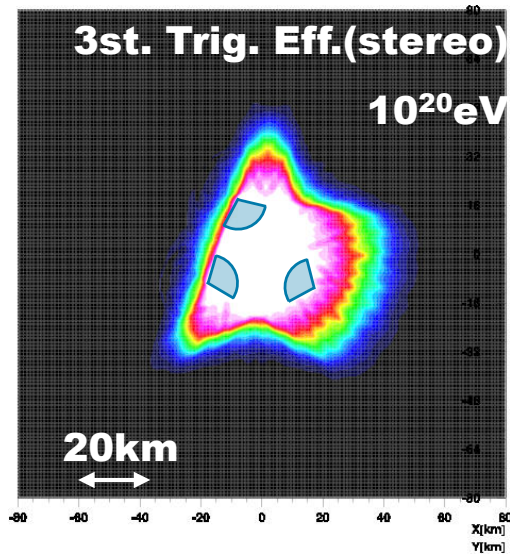
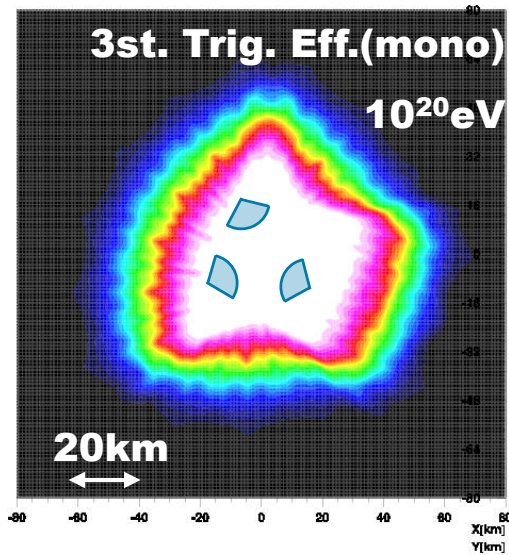
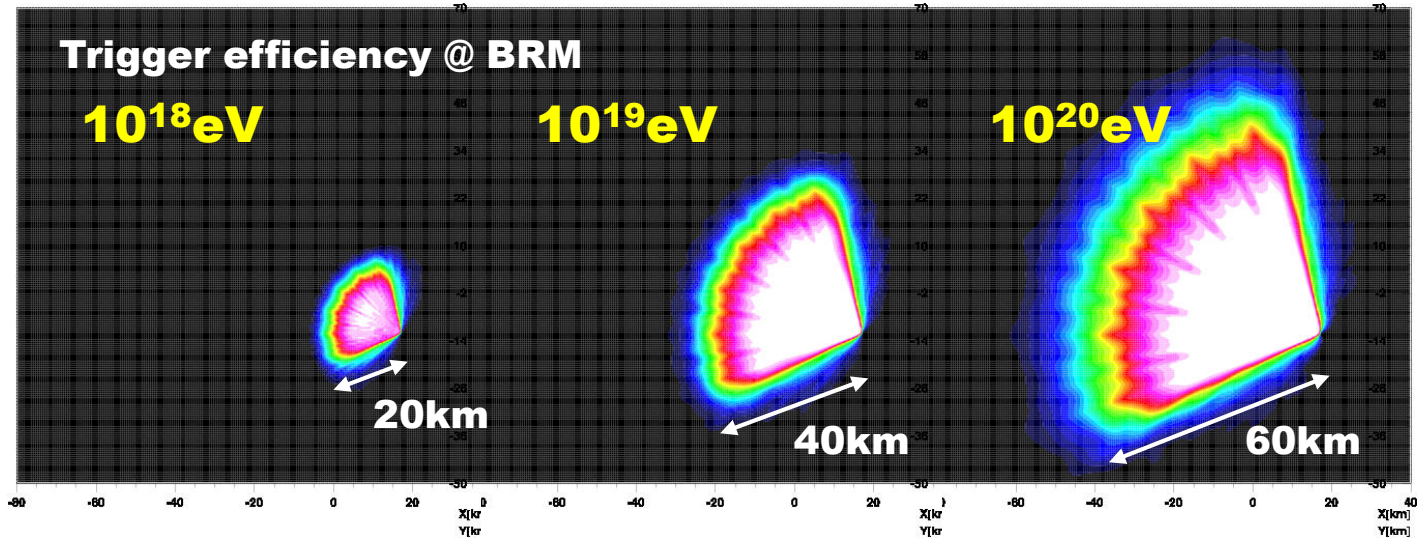
TA望遠鏡は 2007年 7月から試験観測を開始



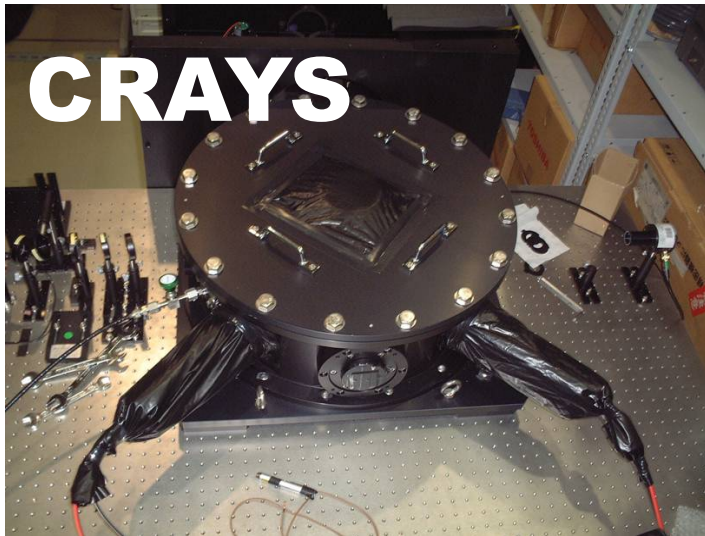
FD Trigger System



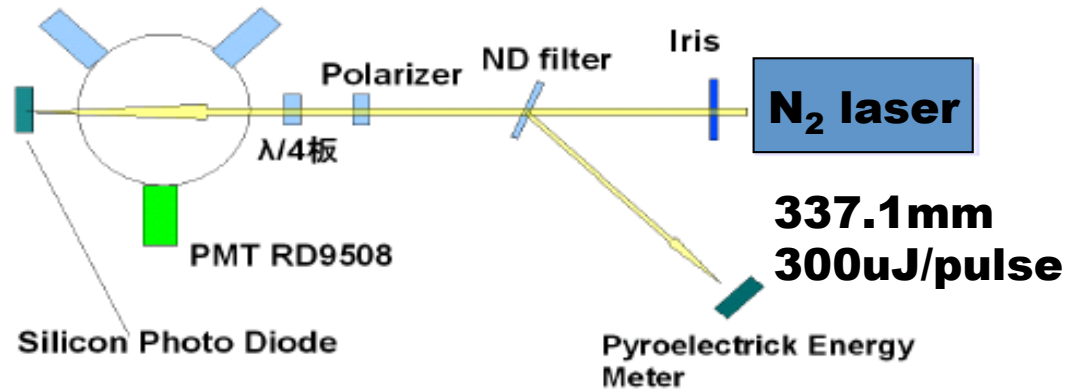
FD Trigger efficiency



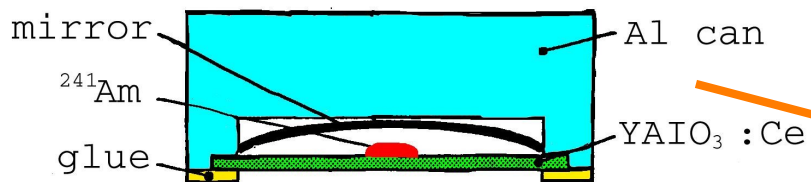
PMT calibration



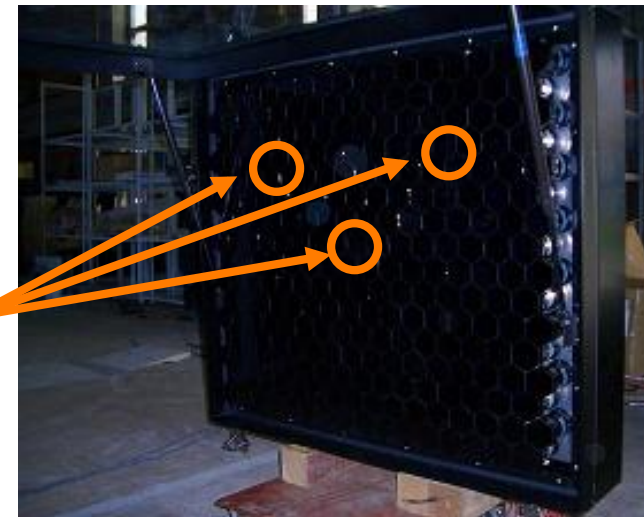
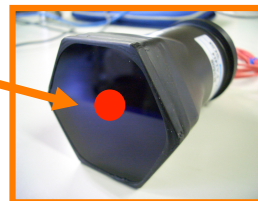
Absolute PMT gain measurement using N₂ laser Rayleigh scattering in N₂ gas



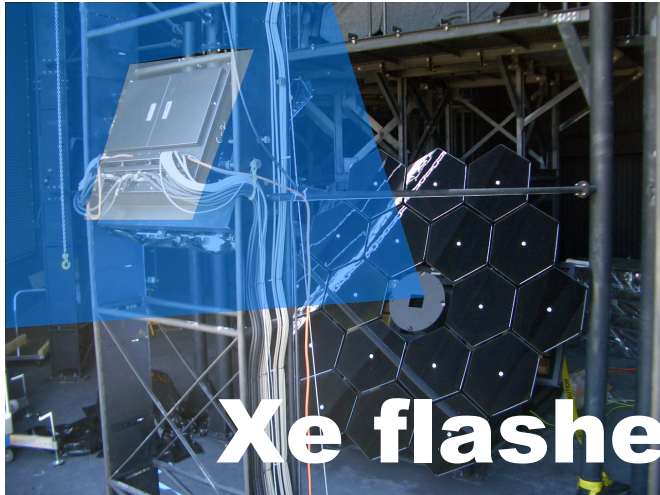
YAP pulsers are installed on the standard PMTs calibrated by CRAYS.
3 PMTs with YAP are installed in each camera.
YAP is stable light source for gain monitoring.



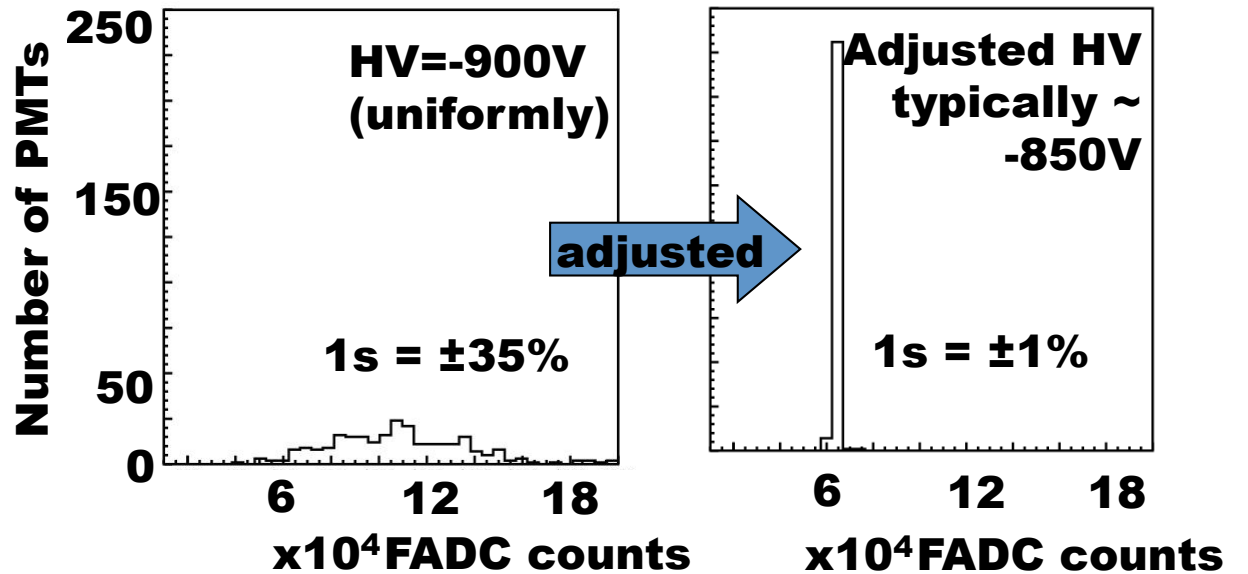
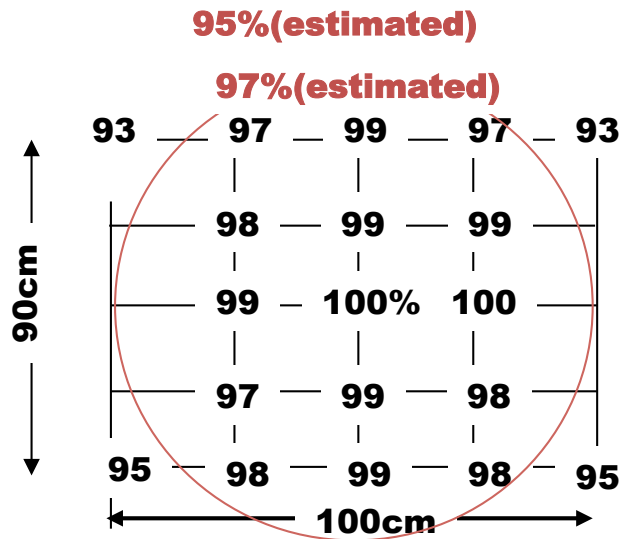
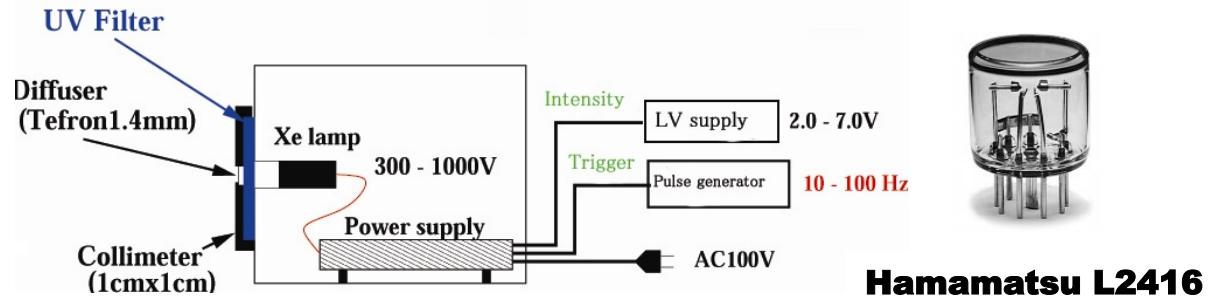
YAP (YAlO₃:Ce+²⁴¹Am) Peak 365nm
50Hz~100Hz



PMT camera Gain adjustment



Relative gain adjustment using Xe flasher as uniform light source.



Gain uniformity

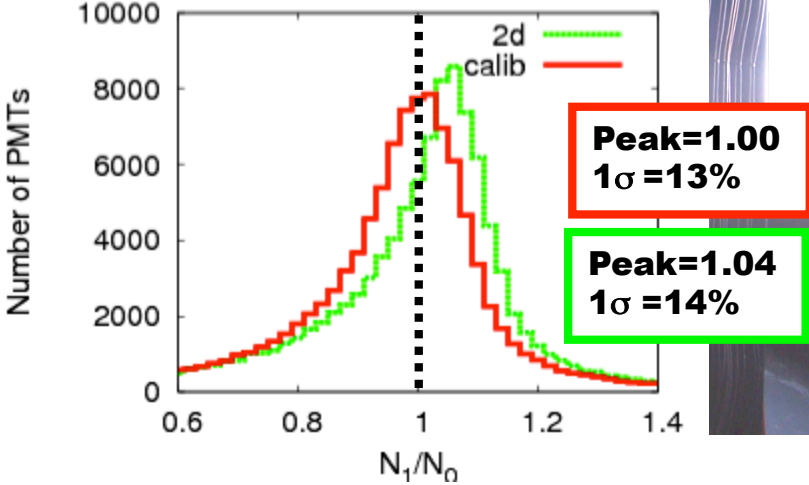
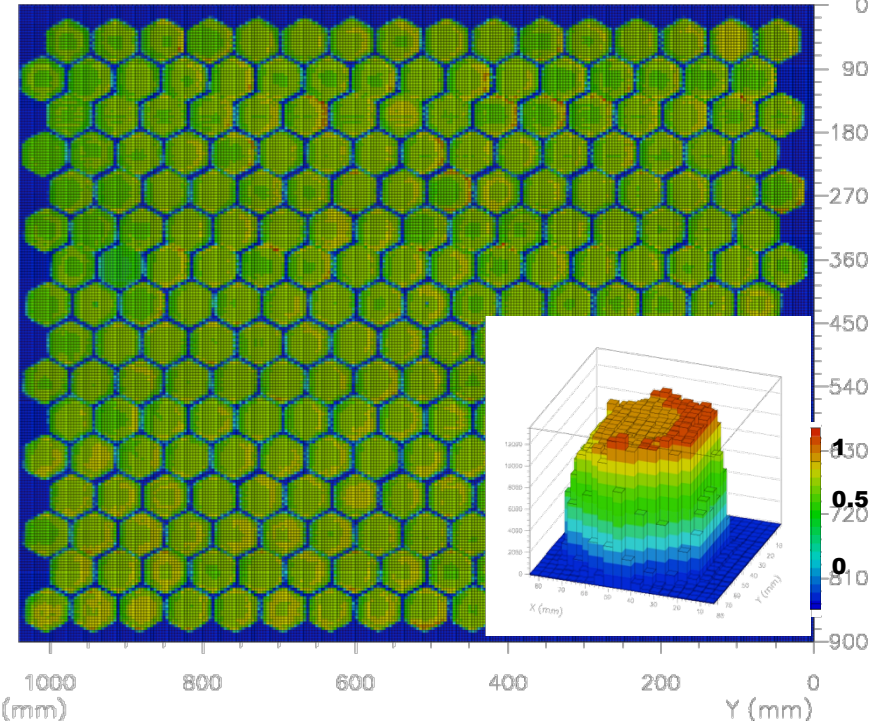
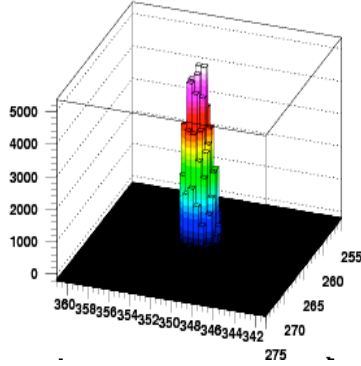
UV LED (365±10nm)

φ:4mm

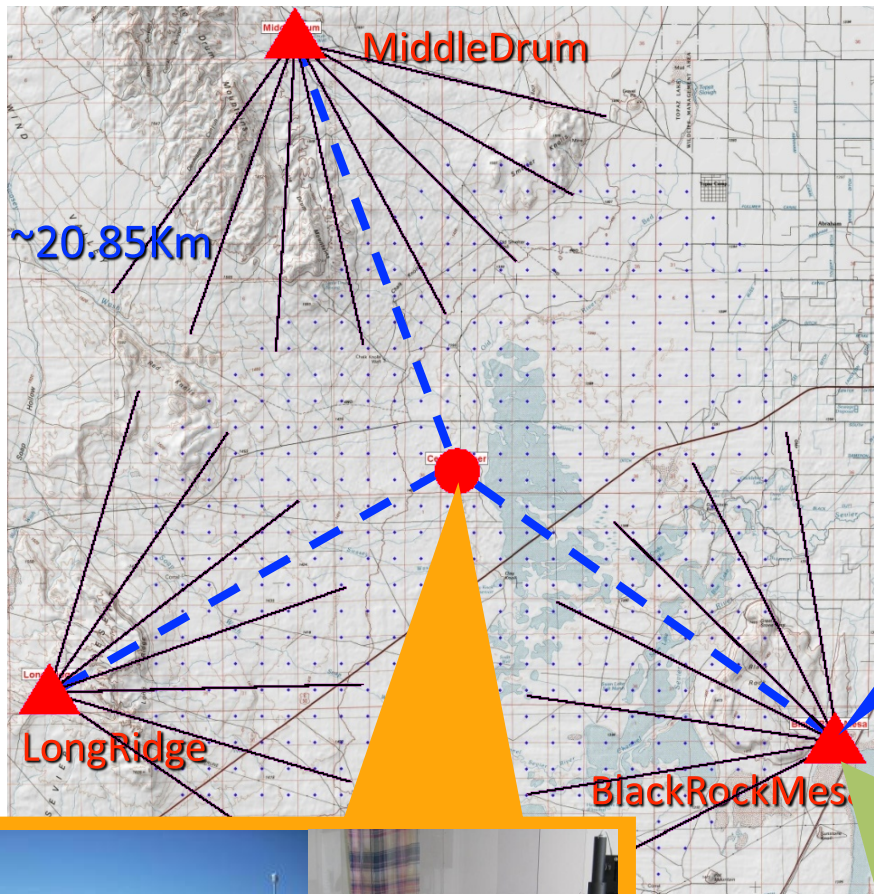
4kHz, pulse width 400ns

10⁶ photons/1 pulse

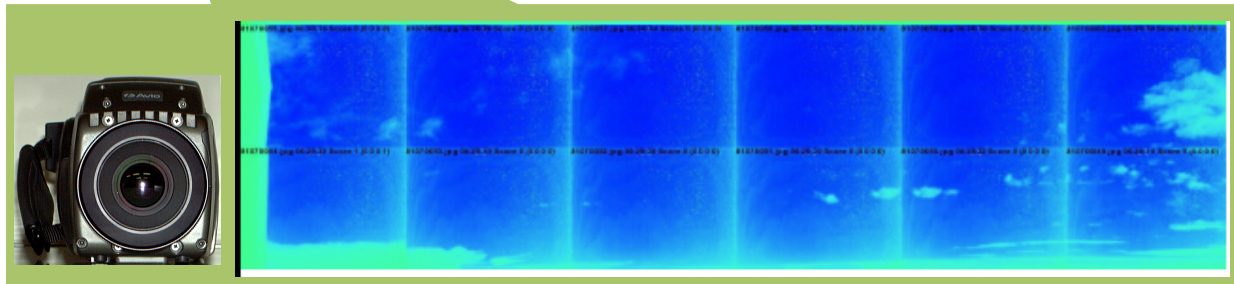
Stability: 2%/5hour



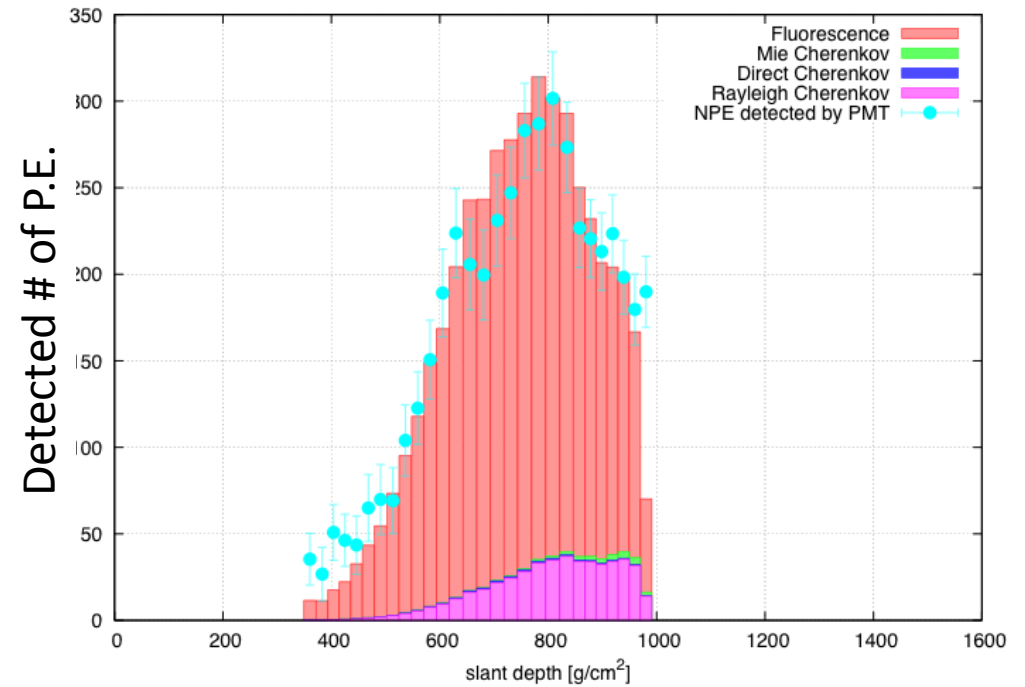
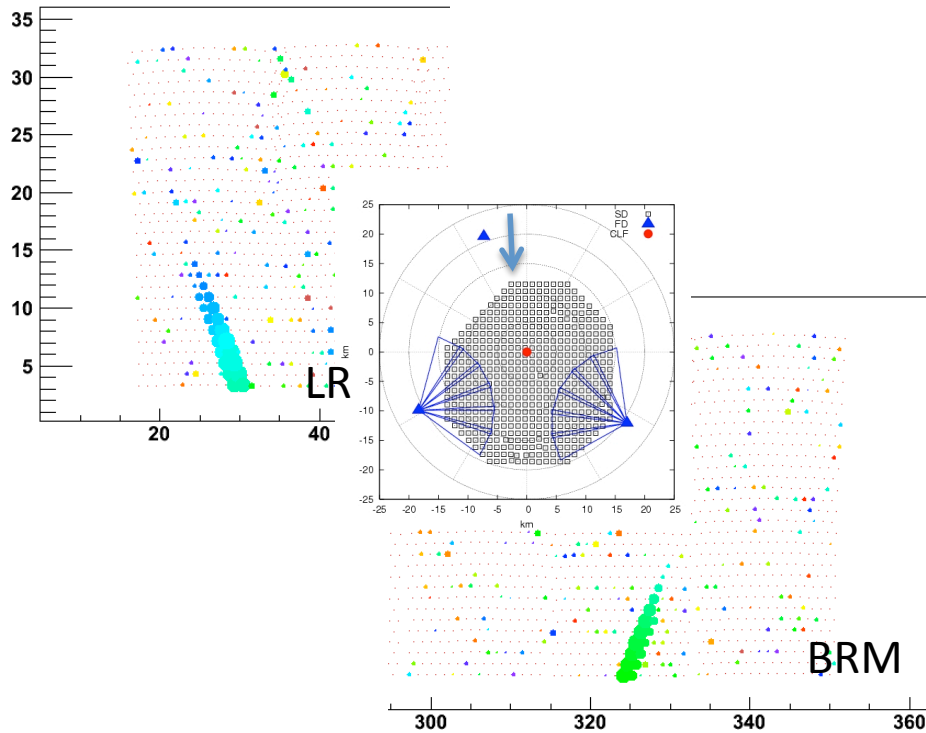
Atmospheric Monitor



- LIDAR :
measuring the back scatter light
by own steerable system
- IR camera :
take a Infra-Red picture to check
the cloud covering
- CLF :
measuring the side scatter light
through FD telescopes



FD ステレオイベント

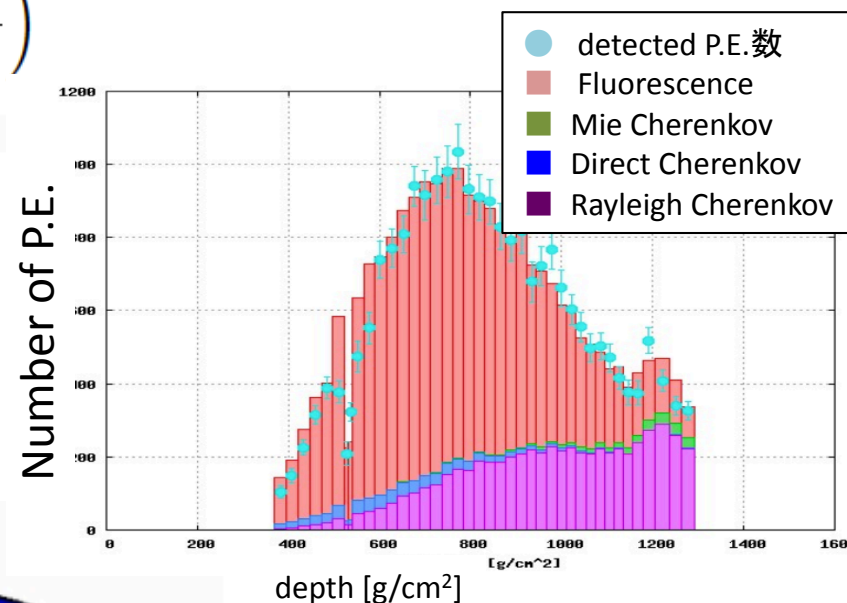
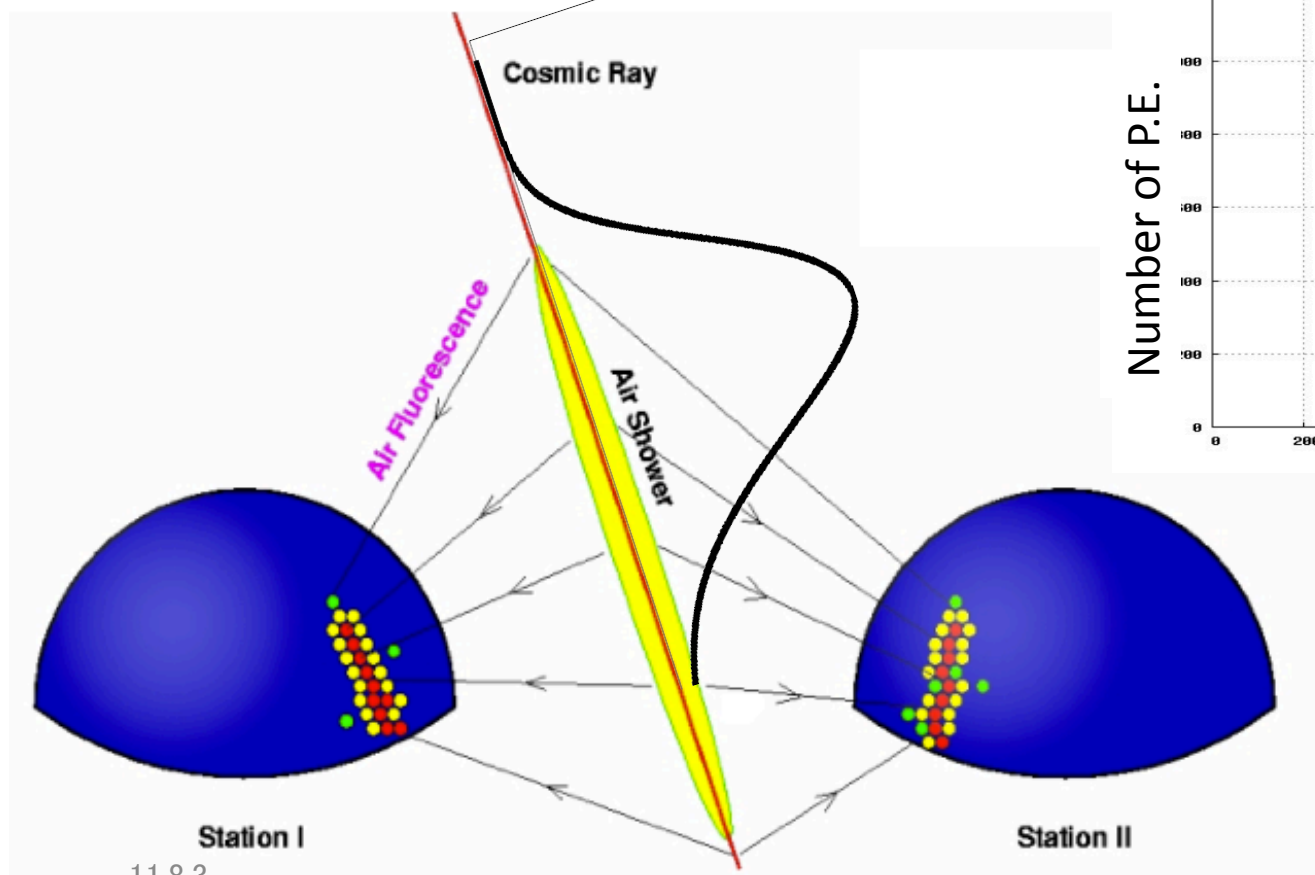


Date	$\log(E/eV)$	Xmax	zenith	azimuth	Xcore	Ycore
2008/09/04	19.71	890 g/cm ²	44.3°	-3.0°	-3.1	14.2

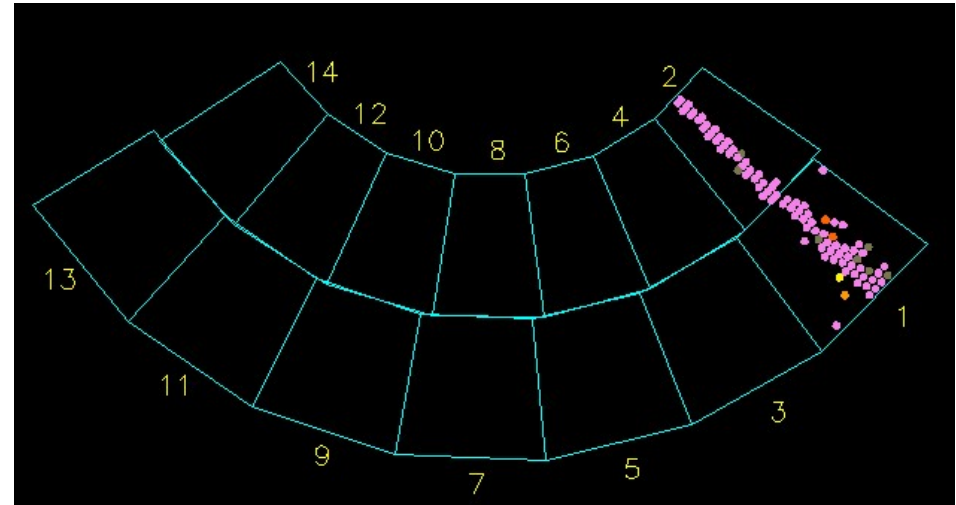
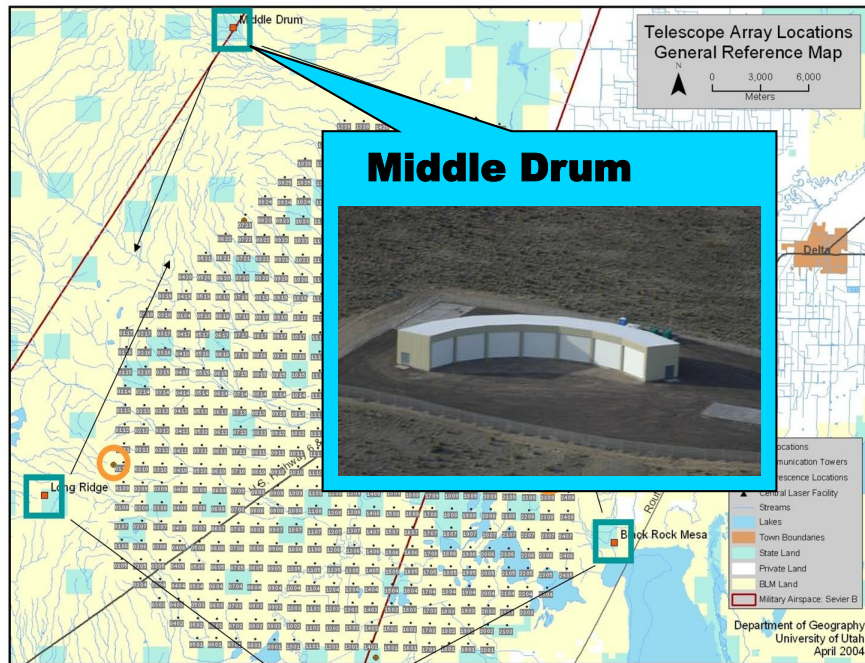
シャワー発達再構成

Gaisser-Hillas function

$$N(X) = N_{\max} \left(\frac{X - X_0}{X_{\max} - X_0} \right)^{\frac{X_{\max} - X_0}{X}} \exp \left(\frac{X_{\max} - X}{\lambda} \right)$$

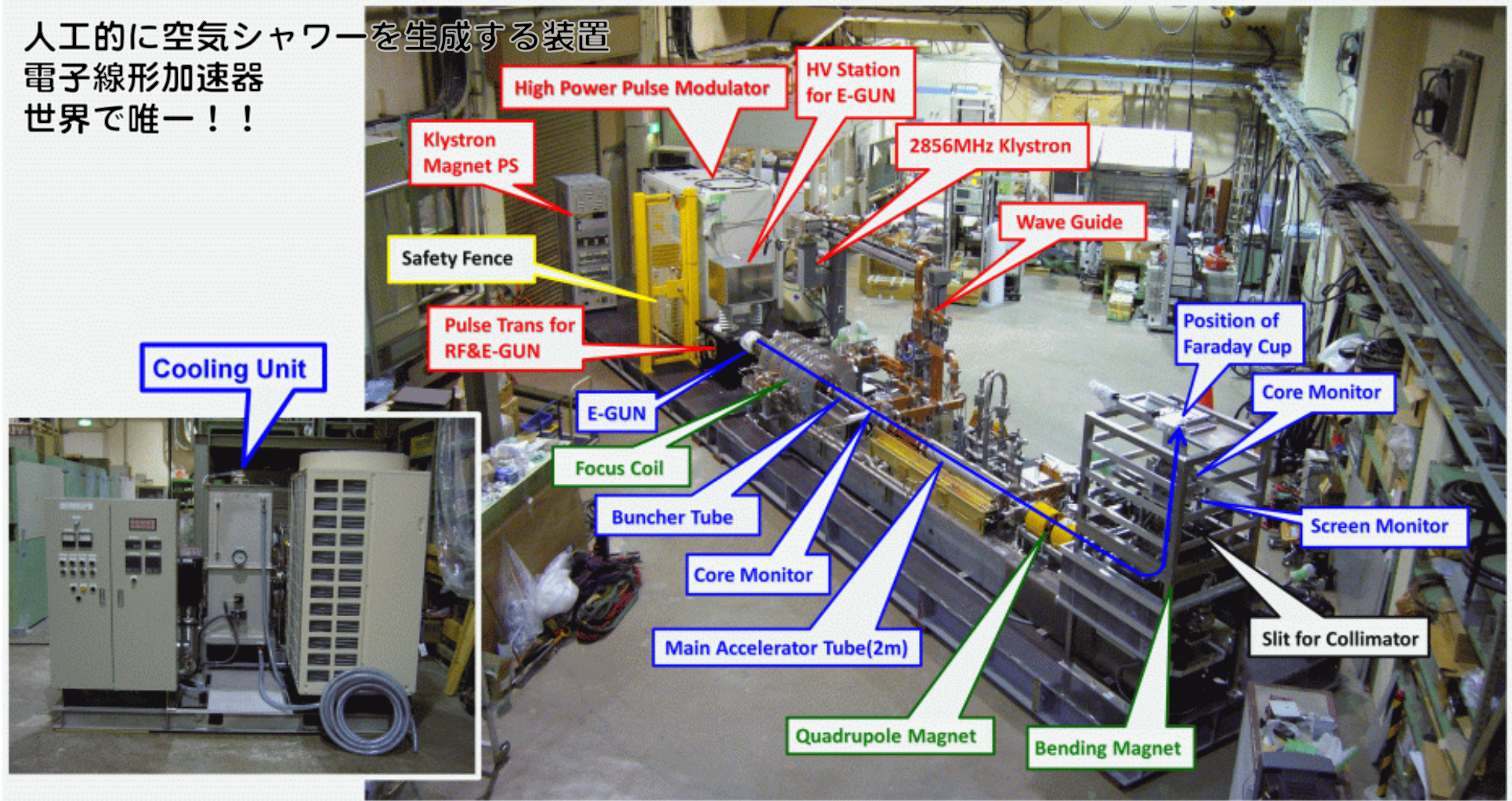


HiRes-I の移設 (Middle Drum, MD)

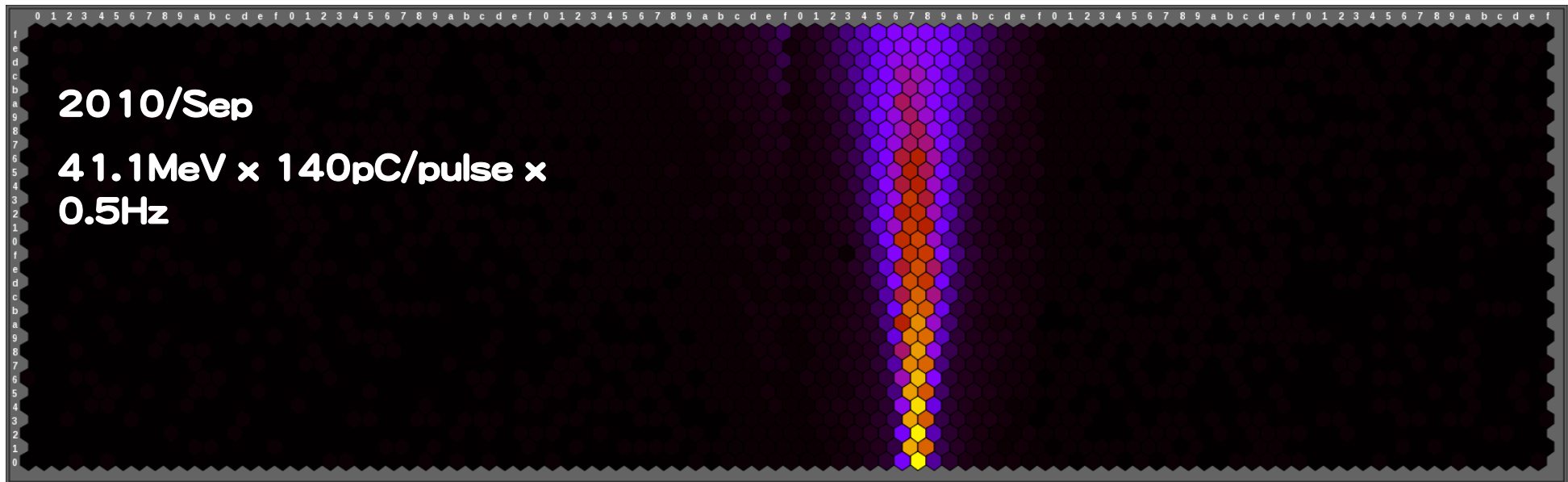


Electron Light Source (ELS)

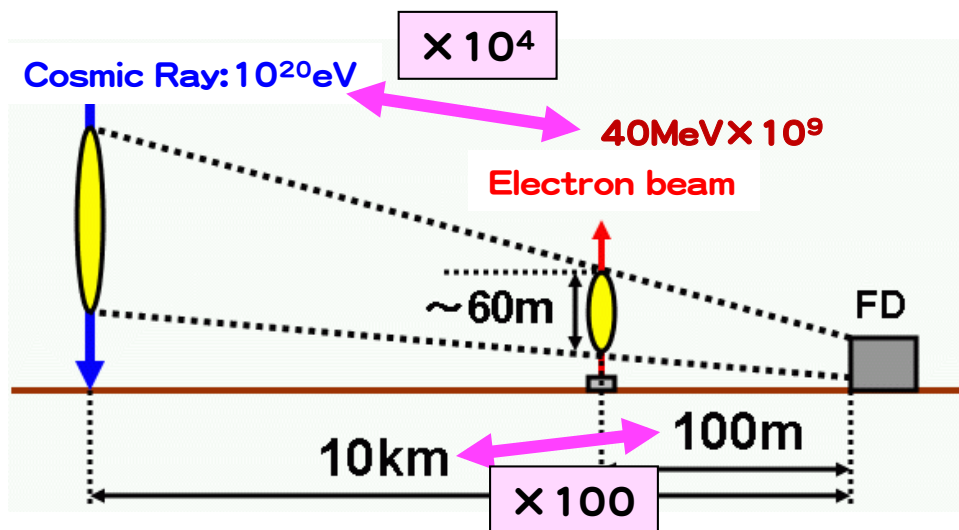
人工的に空気シャワーを生成する装置
電子線形加速器
世界で唯一！！



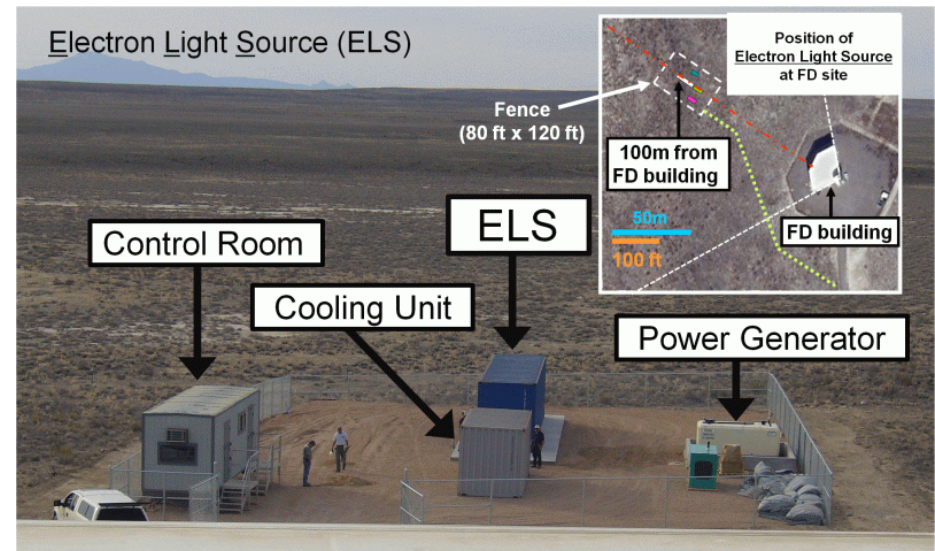
TA-FDによる観測に成功



Run# 10090405 Event# 1280
Voltage 155296



11.8.3

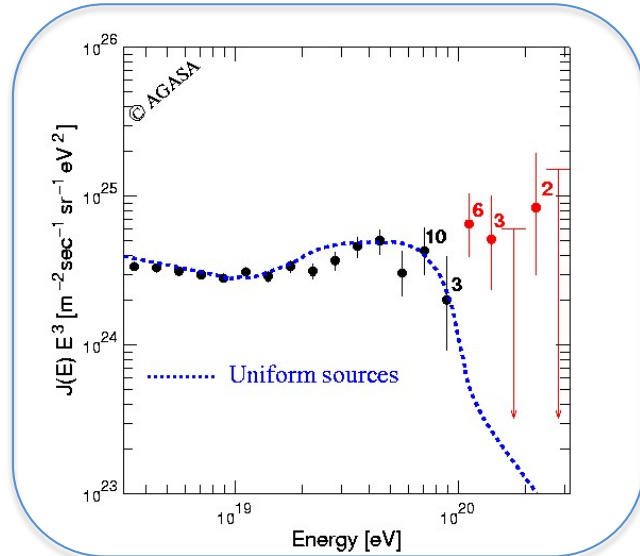


43

Telescope Array 最新結果

エネルギースペクトル

様々な実験によるエネルギースペクトル



AGASA : 地表検出器

統計は高いが，モンテカルロによる系統誤差が

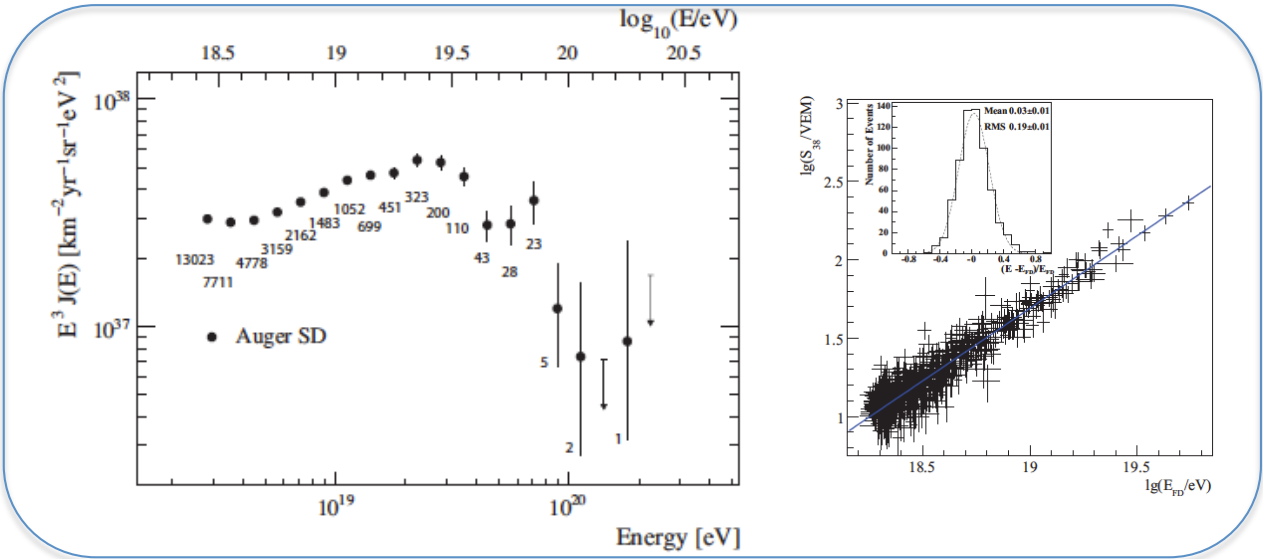
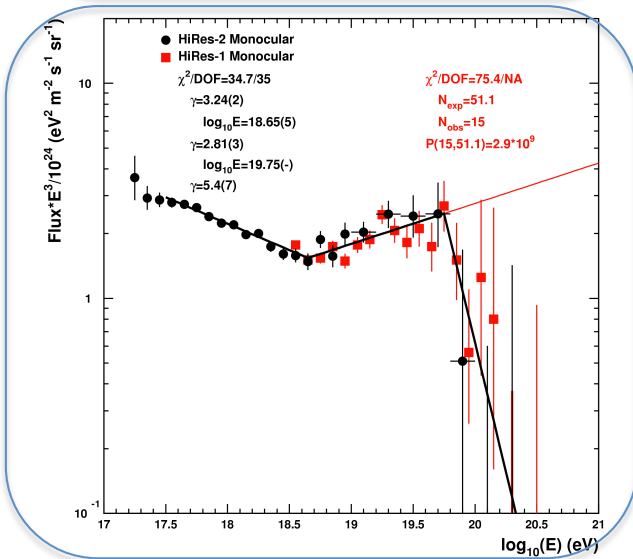
HiREs : 大気蛍光望遠鏡

カロリメトリックにエネルギーを測定

Auger : ハイブリッド観測

統計の高い地表検出器

エネルギーは大気蛍光法の力を借りる



TA-FD & SD ハイブリッド解析

ハイブリッド解析

- FDとSDの信号到来時間からジオメトリ決定
- 角度分解能 ~ 1.1度 (単眼解析: ~4.7度)

SDよりアパーチャーを求める

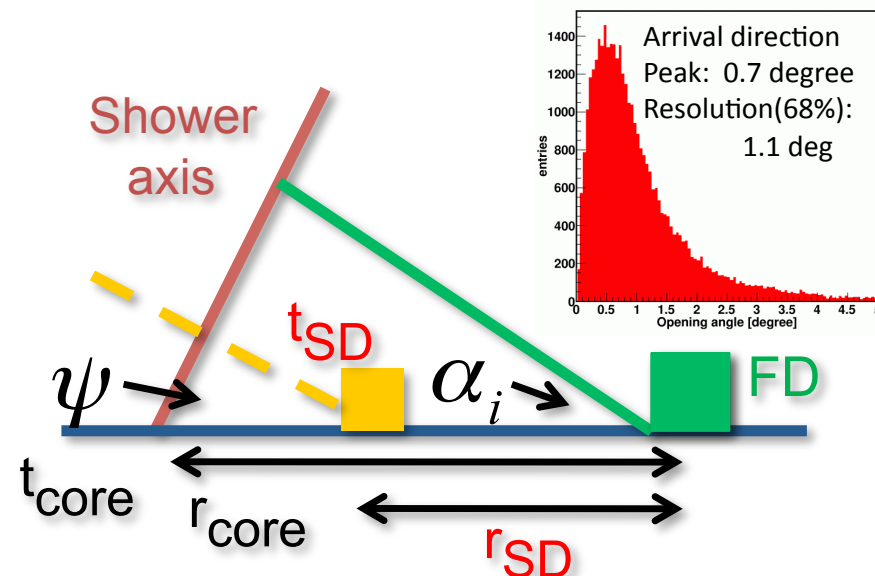
10^{19} eV以上で一定

データ

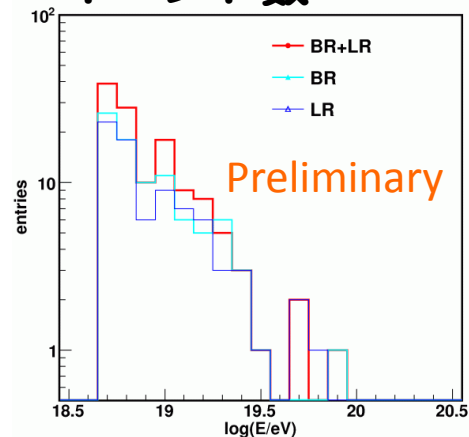
May/27/2008 - Sep/28/2009 (~1.5年)

シャワーシミュレーション: COSMOS

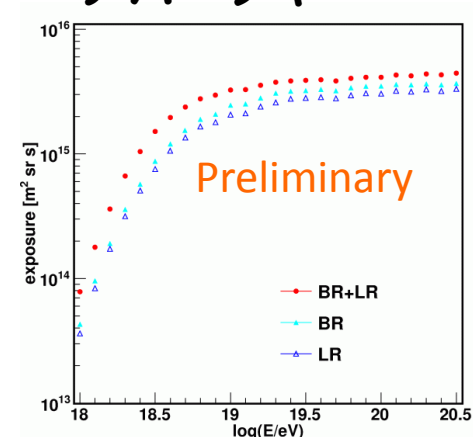
SD検出器応答: GEANT4



イベント数

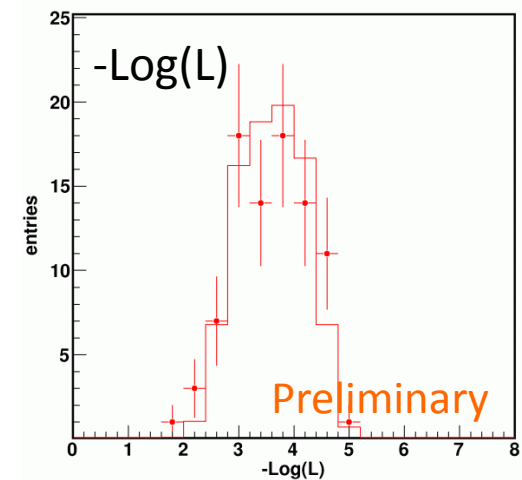
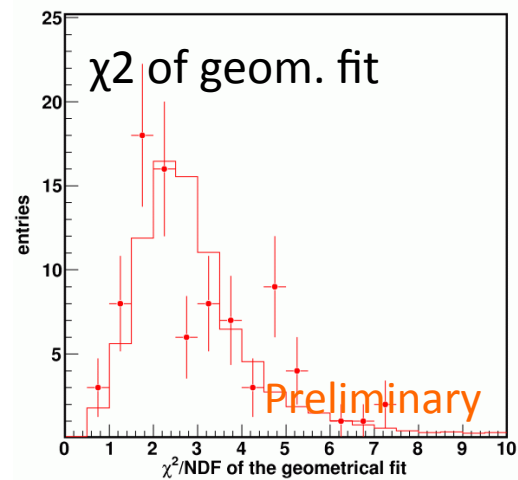
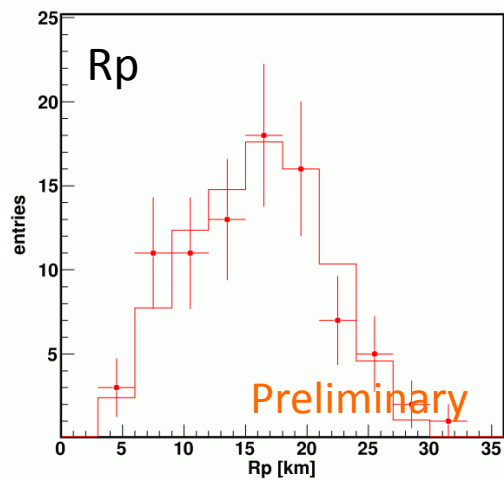
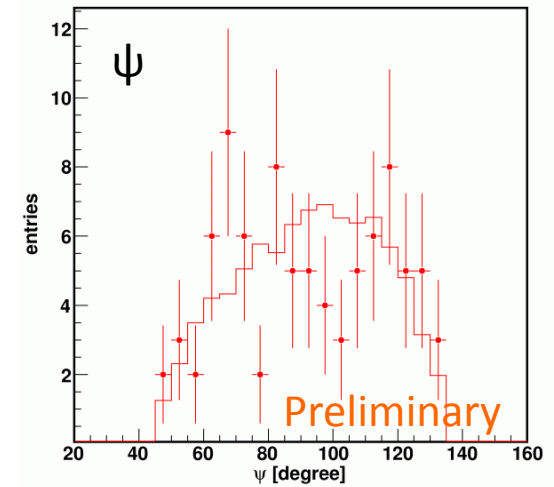
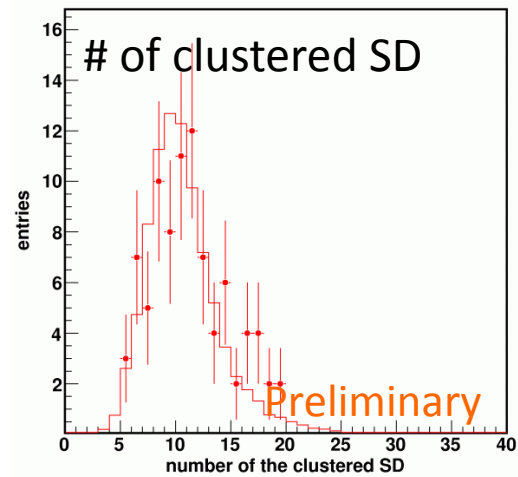
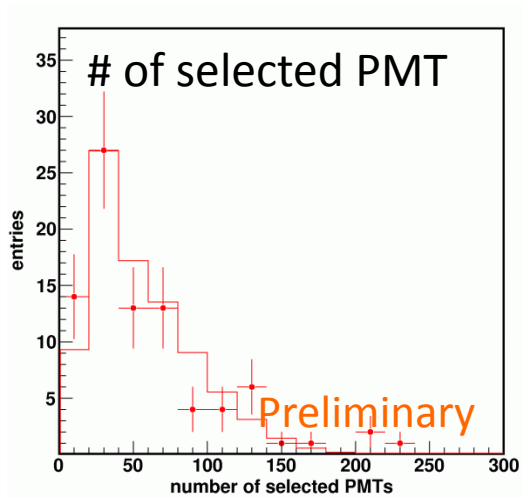


アパーチャー

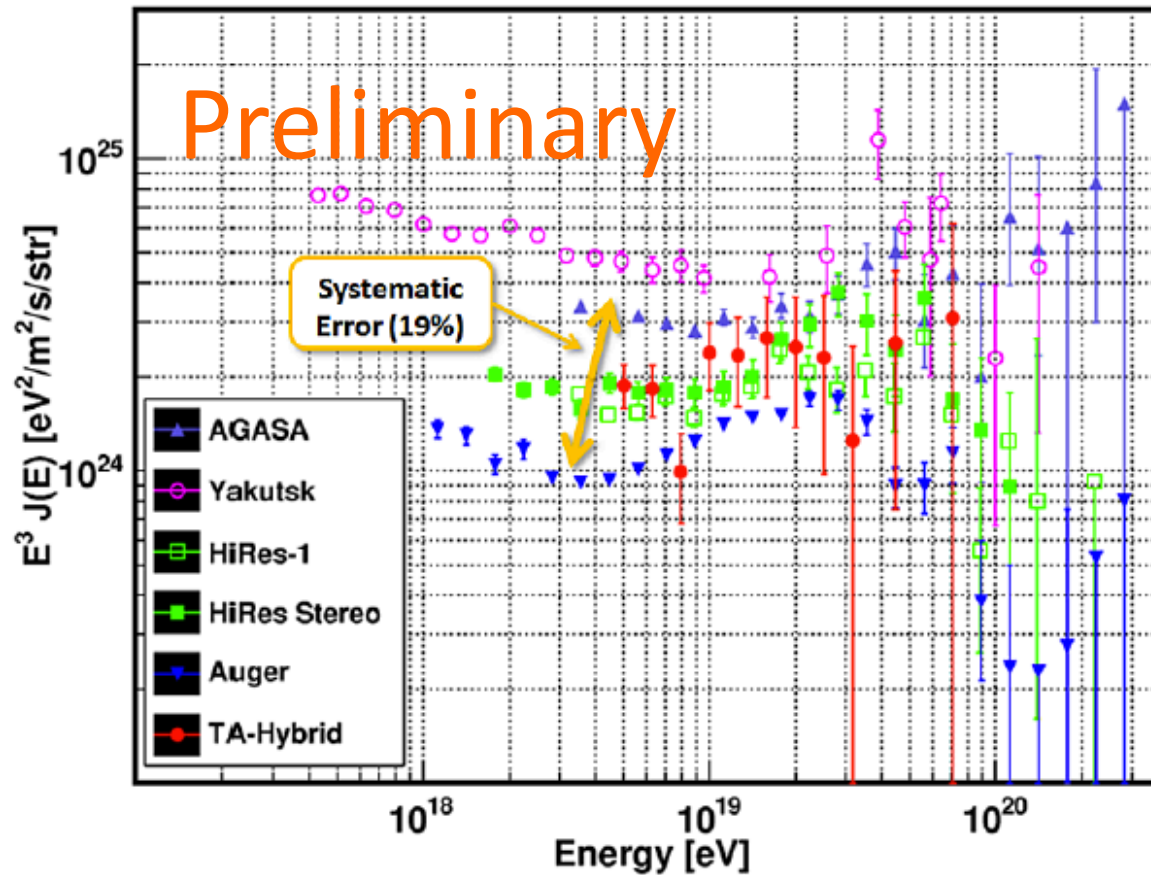


Primary energy	10^{18} eV ~ $10^{20.5}$ eV with $E^{-3.1}$
Zenith angle	$\cos\theta=0.65$ ($\simeq 50$ degree) ~ 1
Primary particle	Proton
Thinning ratio	10^{-4} ($\leq 10^{20}$ eV), 10^{-5} ($> 10^{20}$ eV)
Interaction model	QGSJET II (> 80GeV) DPMJET III (<80GeV)
Cut threshold	100keV

TAハイブリッド: Data/MCの比較



TAハイブリッド：エネルギースペクトル



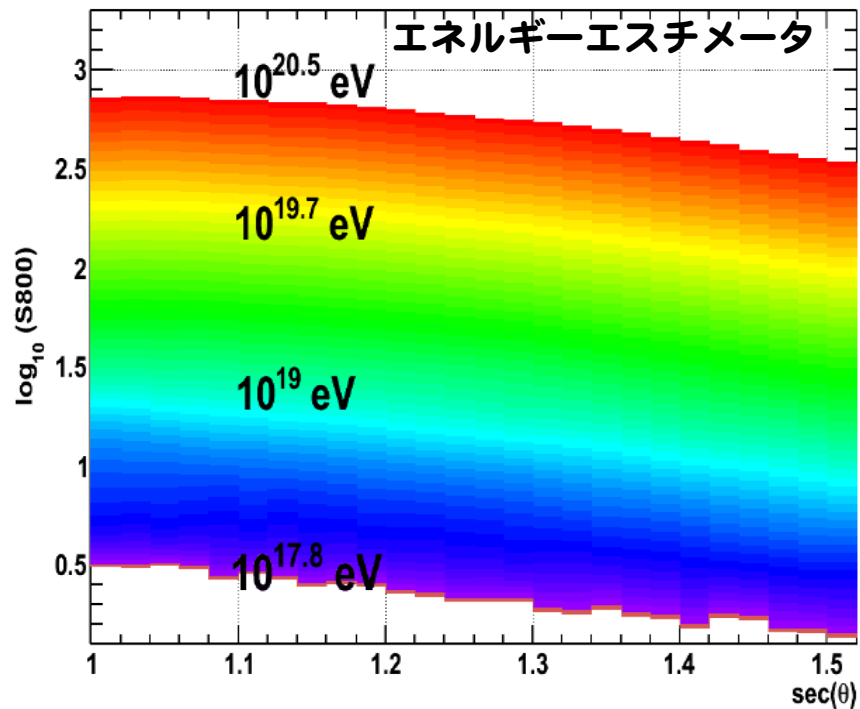
Systematic errors

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

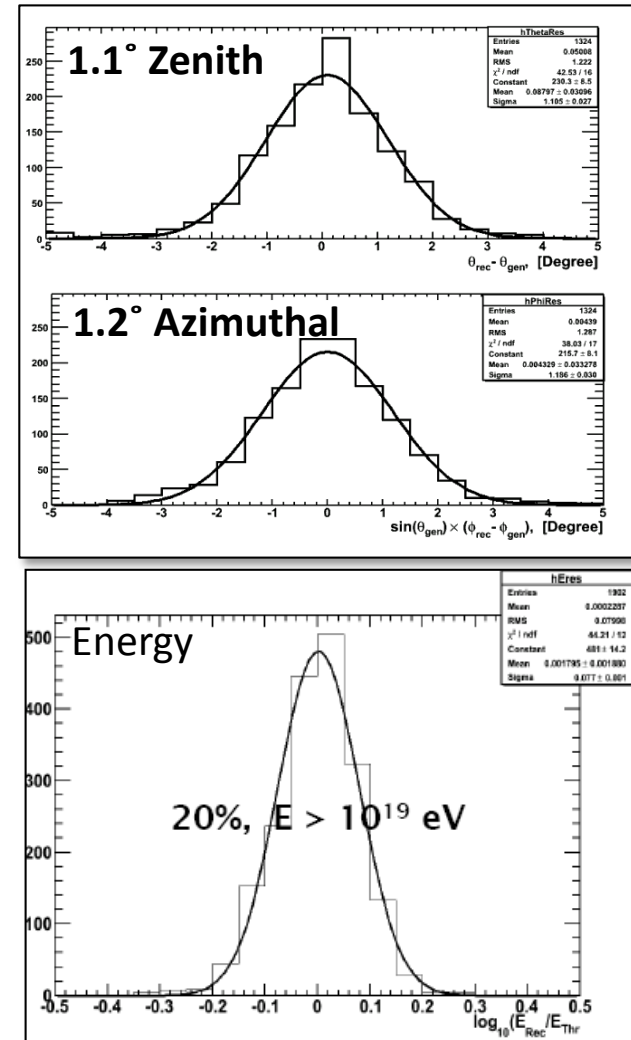
TA-SD

データ：2008/May - 2010/Feb
 Exposure = 1500 km² · sr · yr
 ~ AGASA 13yr

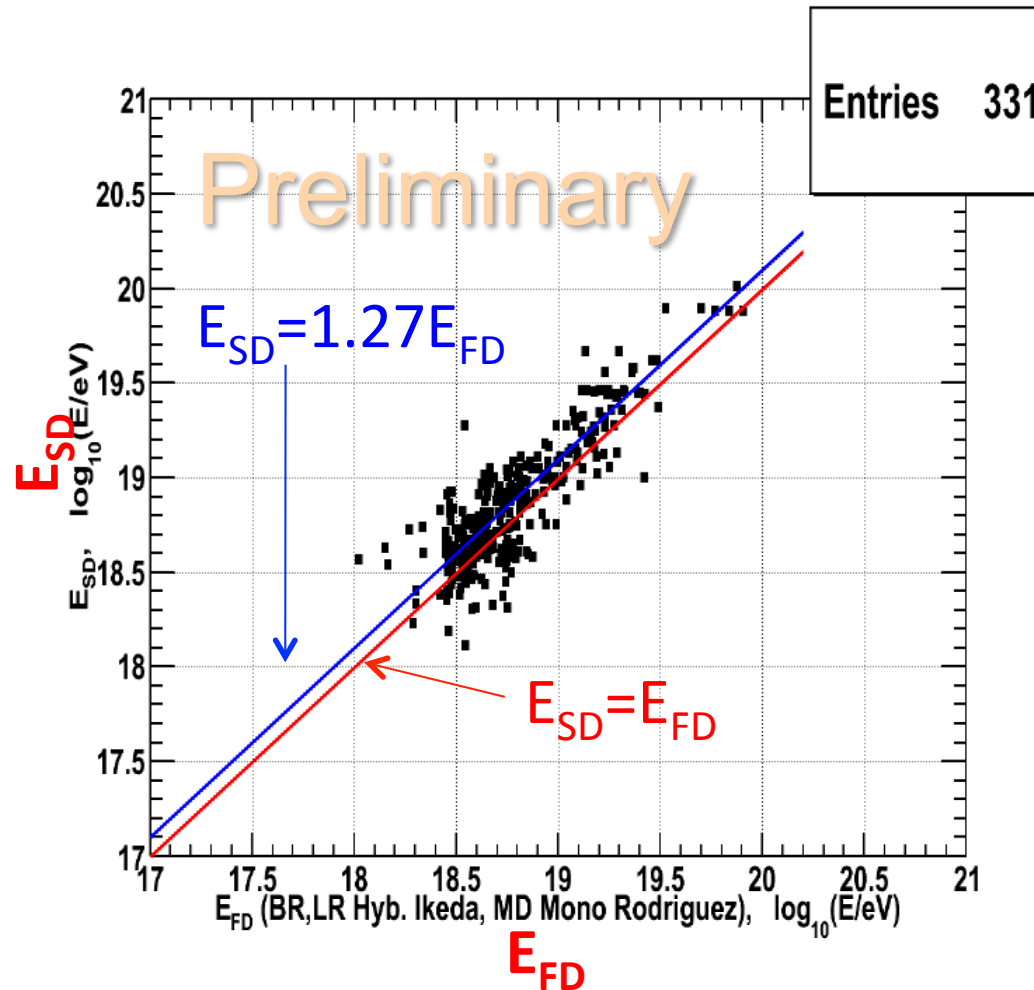
カット条件：
 zenith < 45°
 $\chi^2/\text{ndf} < 4.0$
 boulder cut > 1.2 km
 etc.
 ⇒6264 イベント



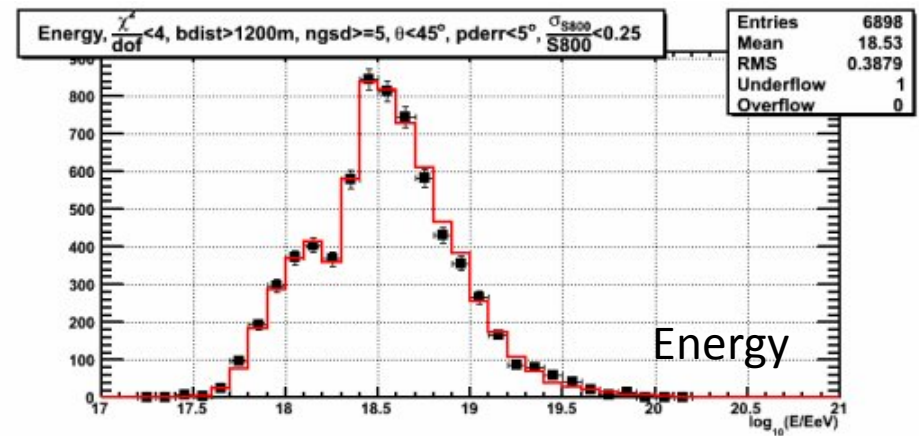
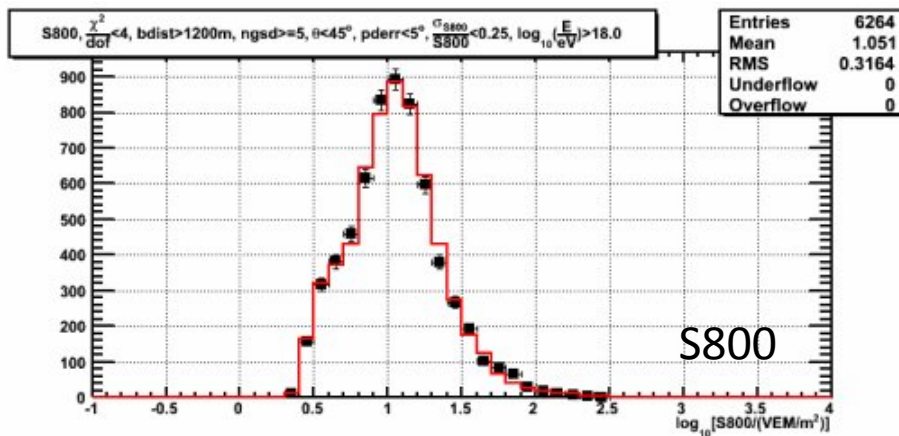
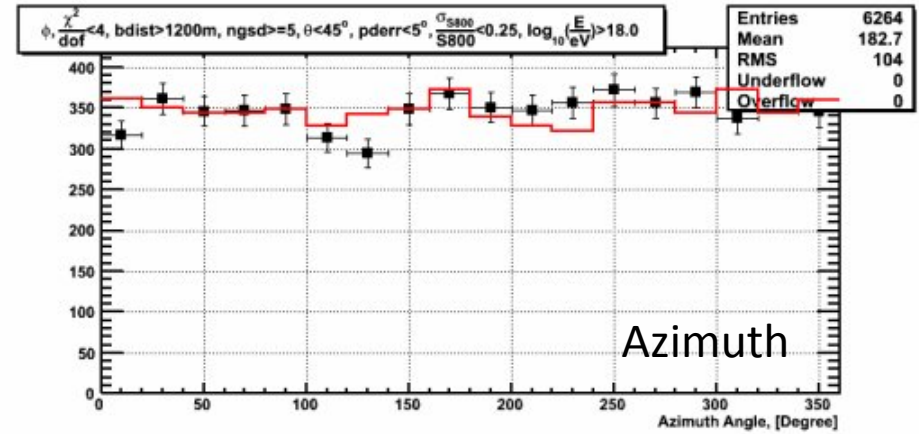
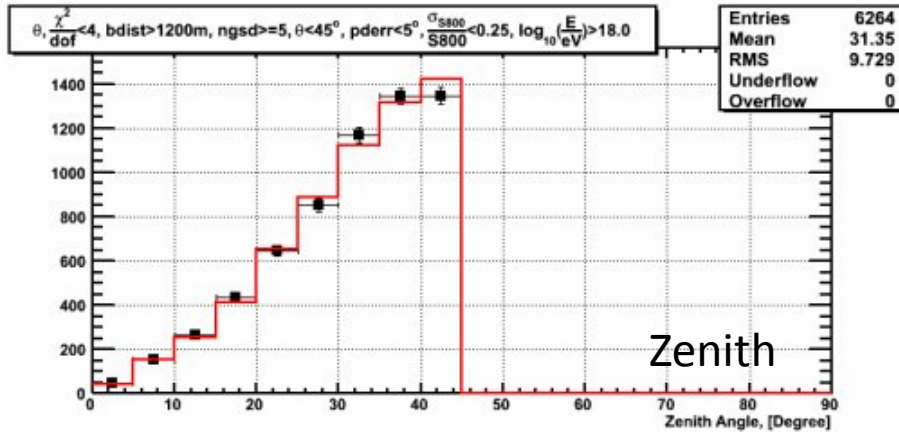
分解能



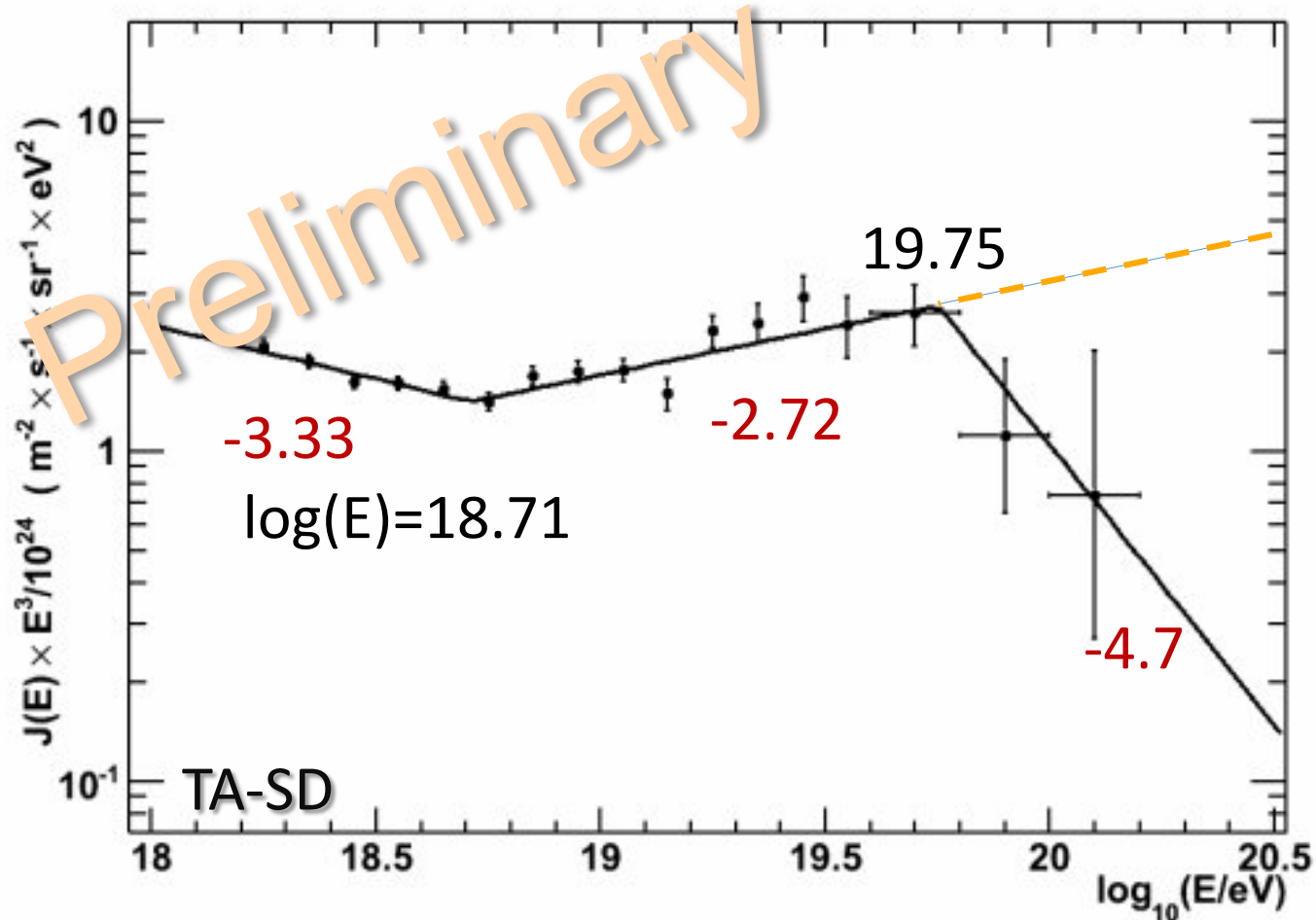
TA-SD : エネルギースケール



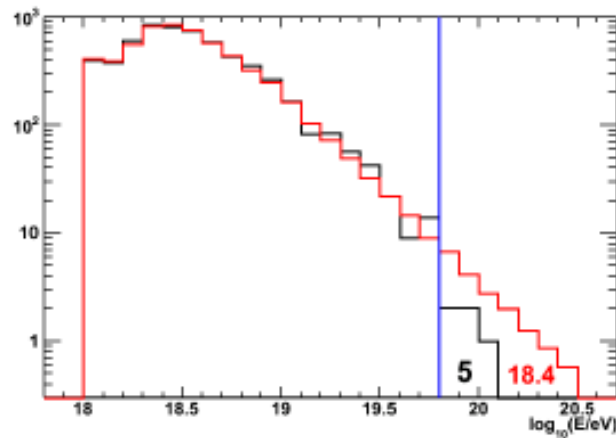
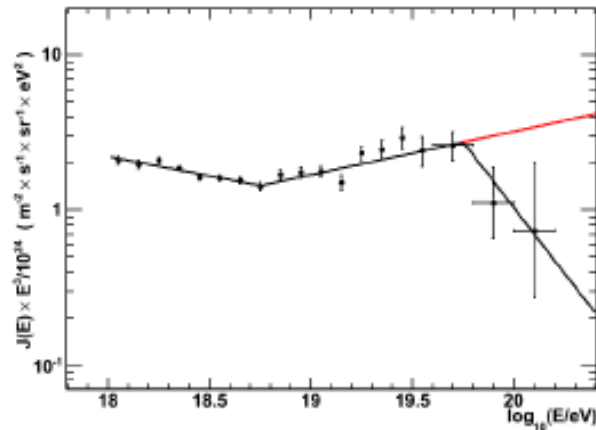
TA-SD : Data/MC 比較



TA-SD : エネルギースペクトル



TA-DS : Significance of the Suppression



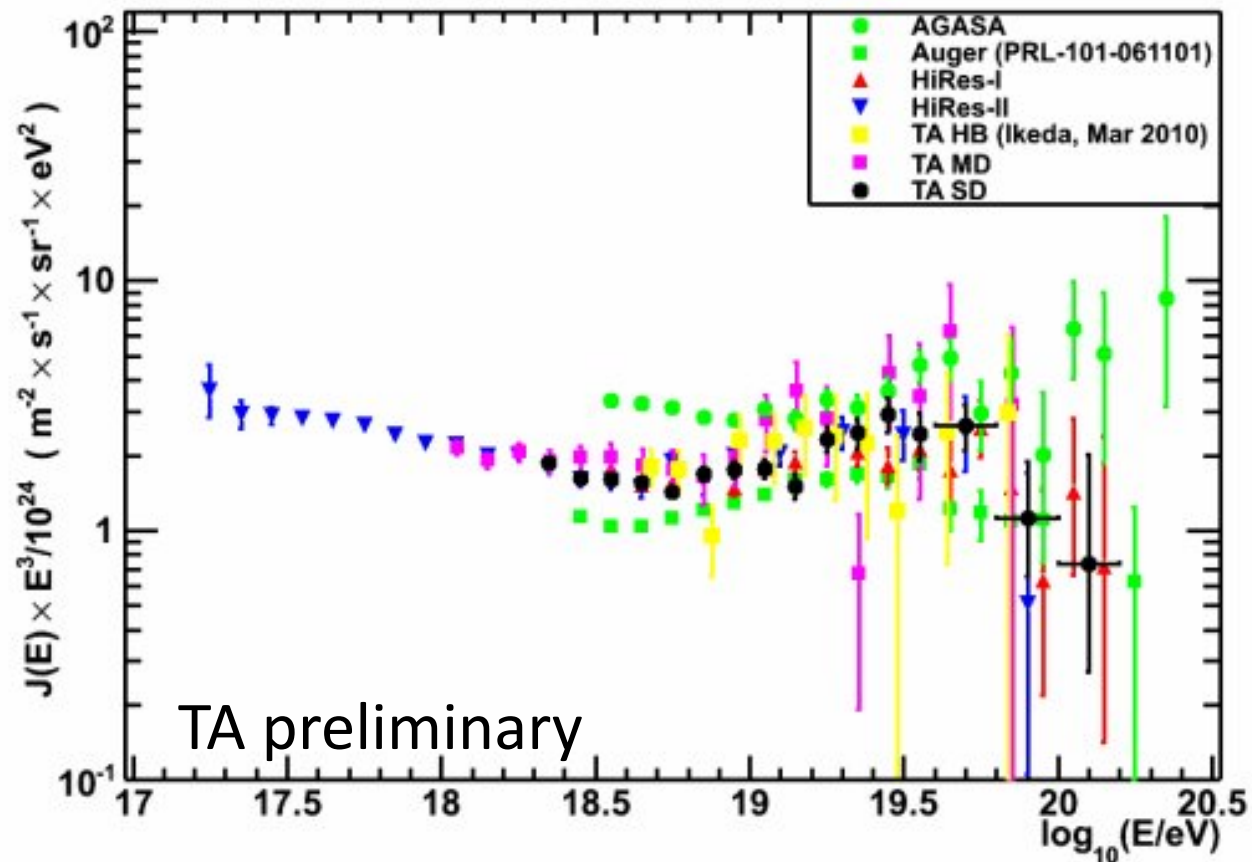
- Assume no GZK cutoff and extend the broken power law fit beyond the break
- Apply this extended flux formula to the actual T ASD exposure, find the number of expected events and compare it to the number of events observed in $\log_{10}E$ bins after $10^{19.8}eV$ bin:

$$- N_{\text{EXPECT}} = 18.4$$

$$- N_{\text{OBSERVE}} = 5$$

$$\text{PROB} = \sum_{i=0}^5 \text{Poisson}(\mu = 18.4; i) = 2.41 \times 10^{-4} \quad (3.5\sigma)$$

AGASA, Auger, HiRes, TAスペクトル

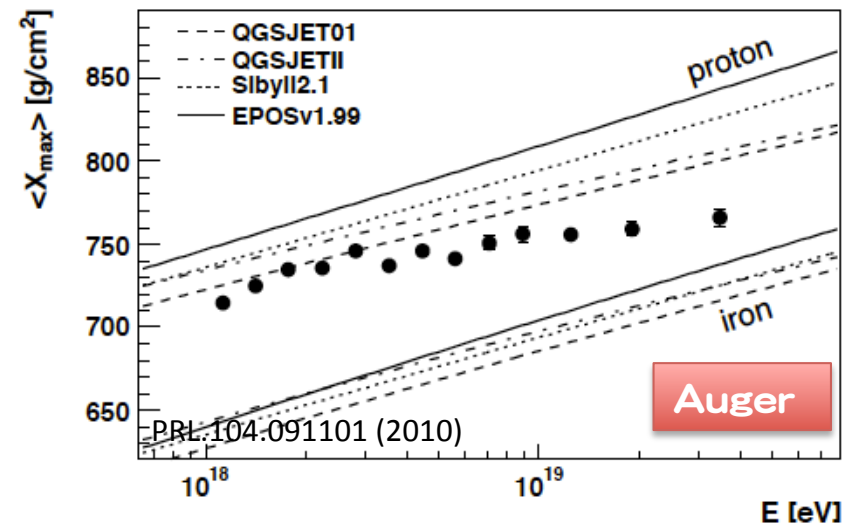
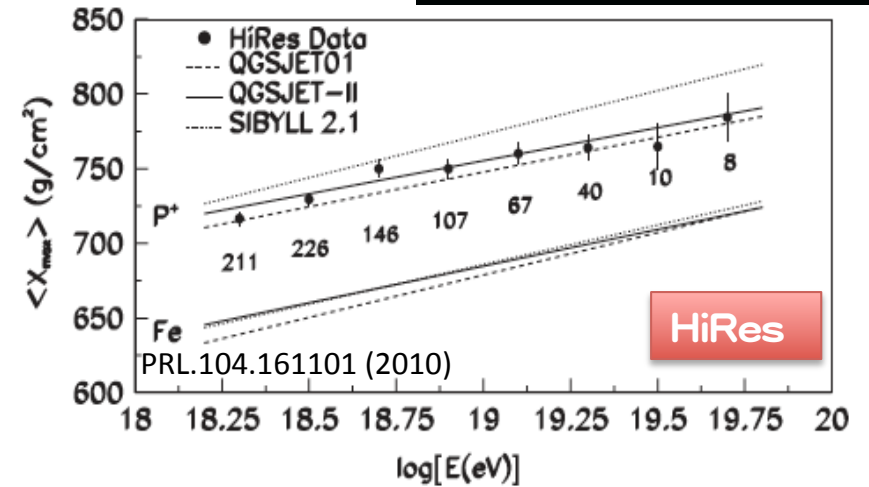
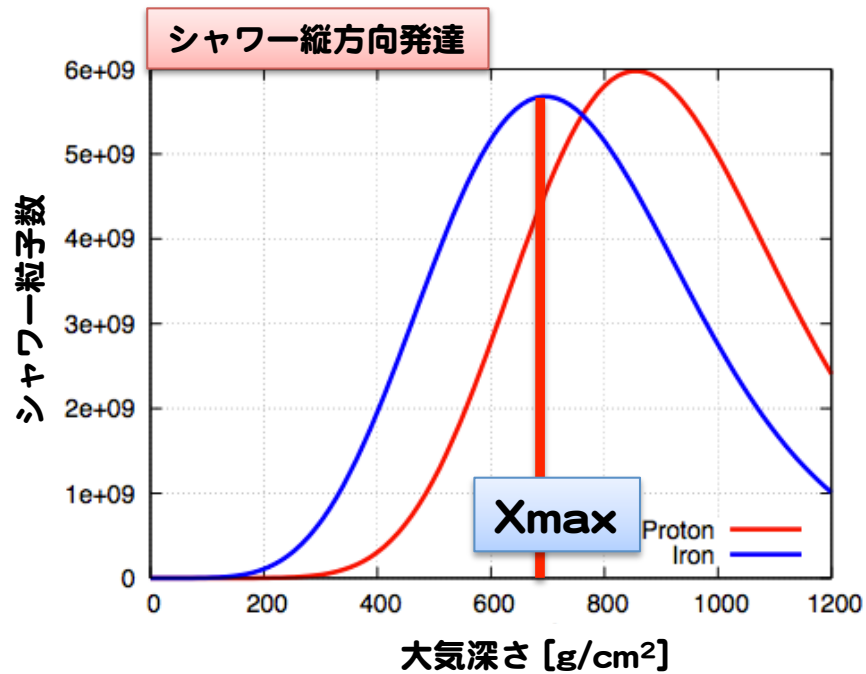


質量組成

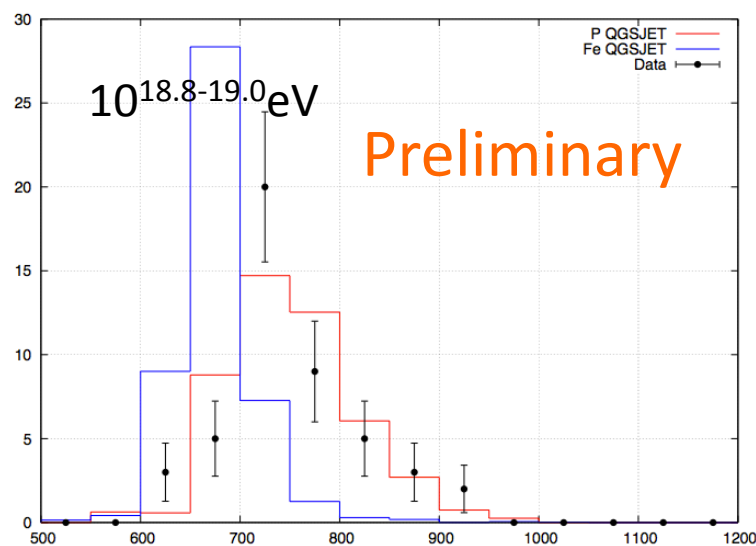
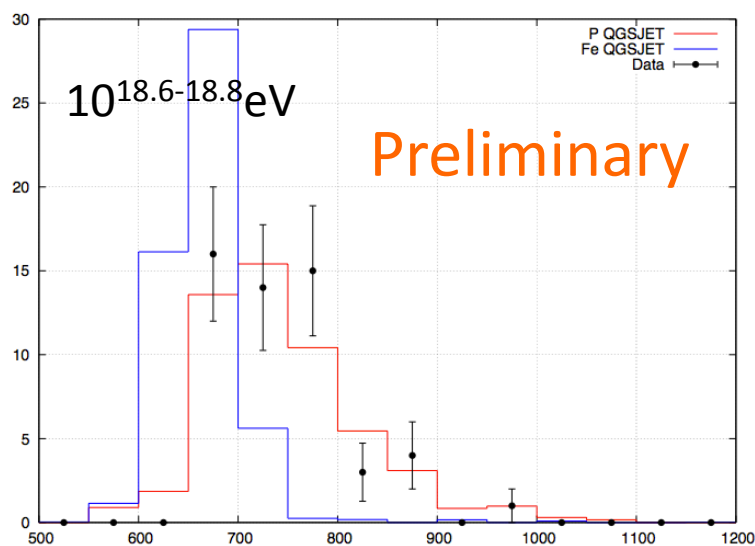
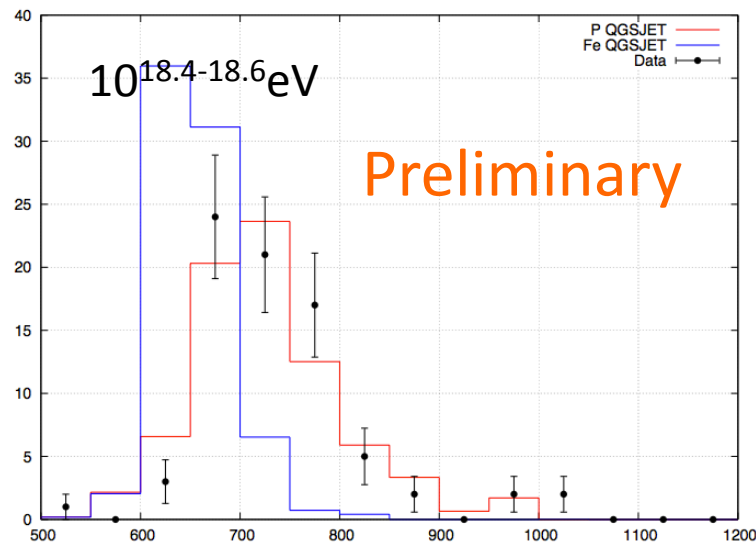
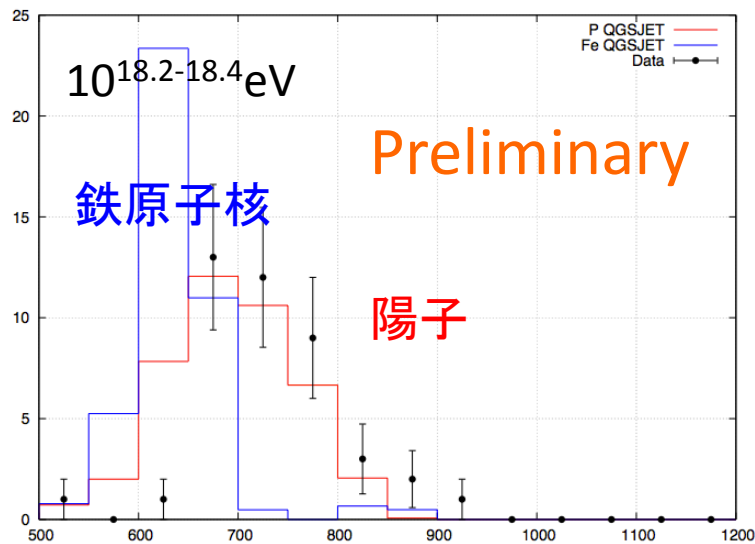
Xmax テクニク



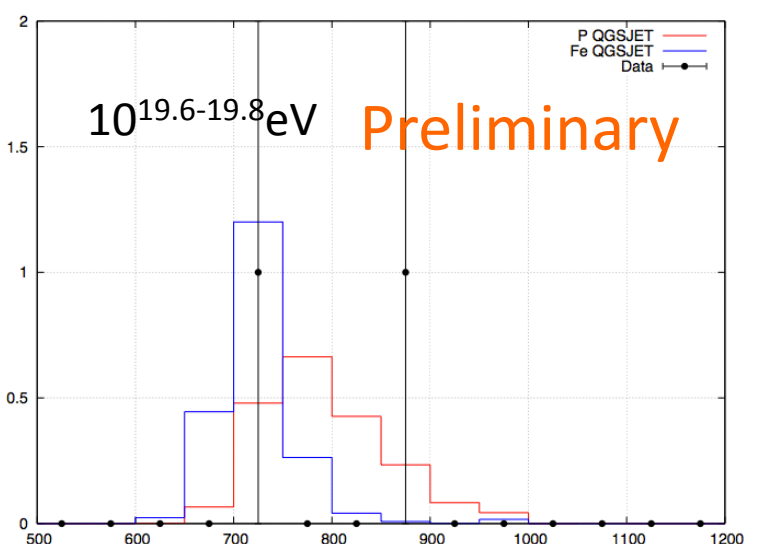
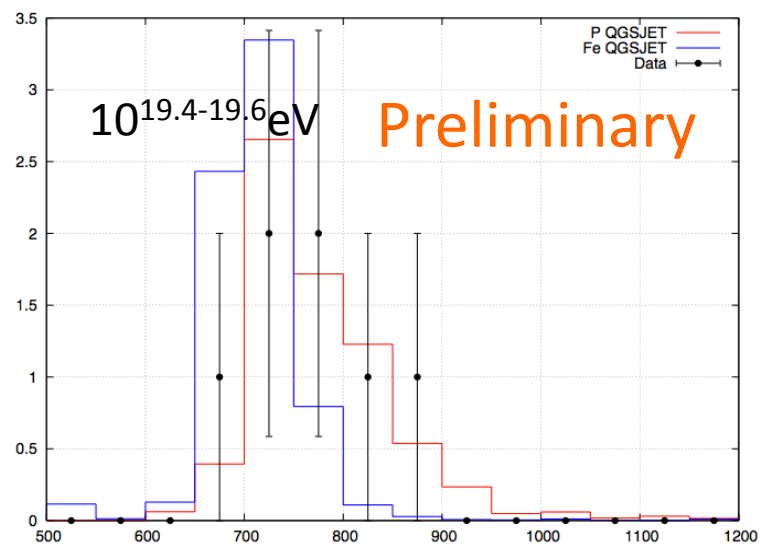
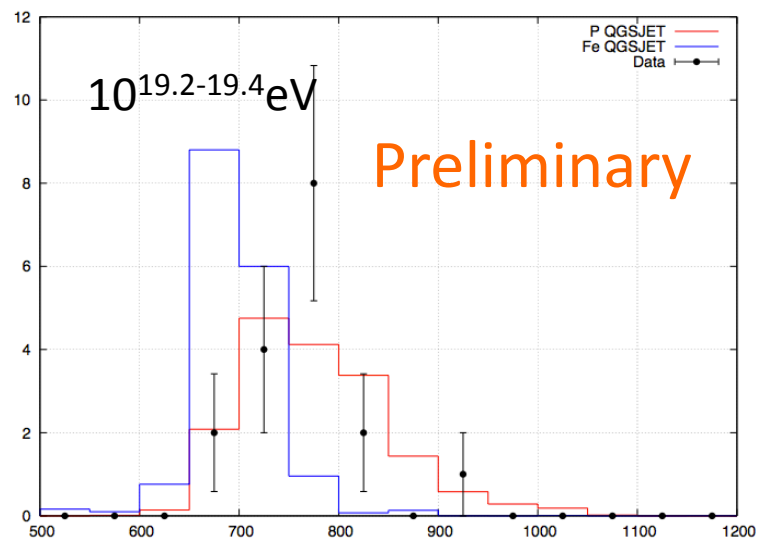
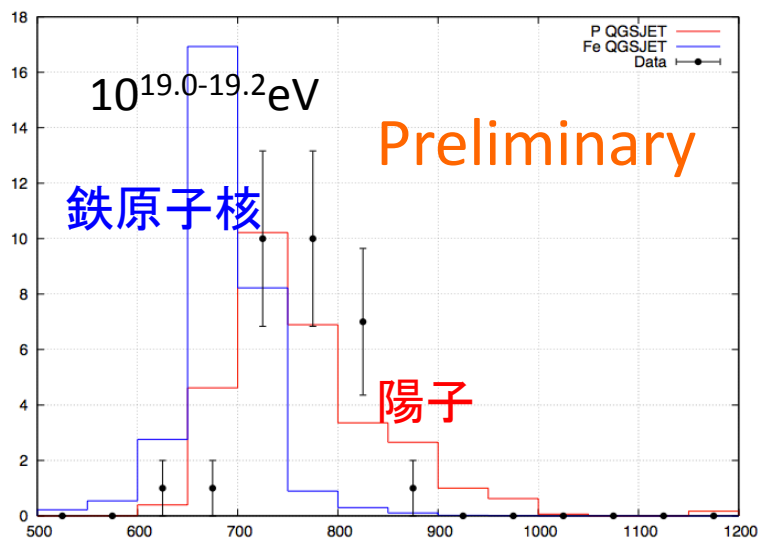
- 空気シャワー縦方向発達は1次宇宙線の核種で異なる
- FDは縦方向発達を直接観測している
- Xmax
シャワー最大発達の大気深さ
1次宇宙線種を求める最も良いパラメータ



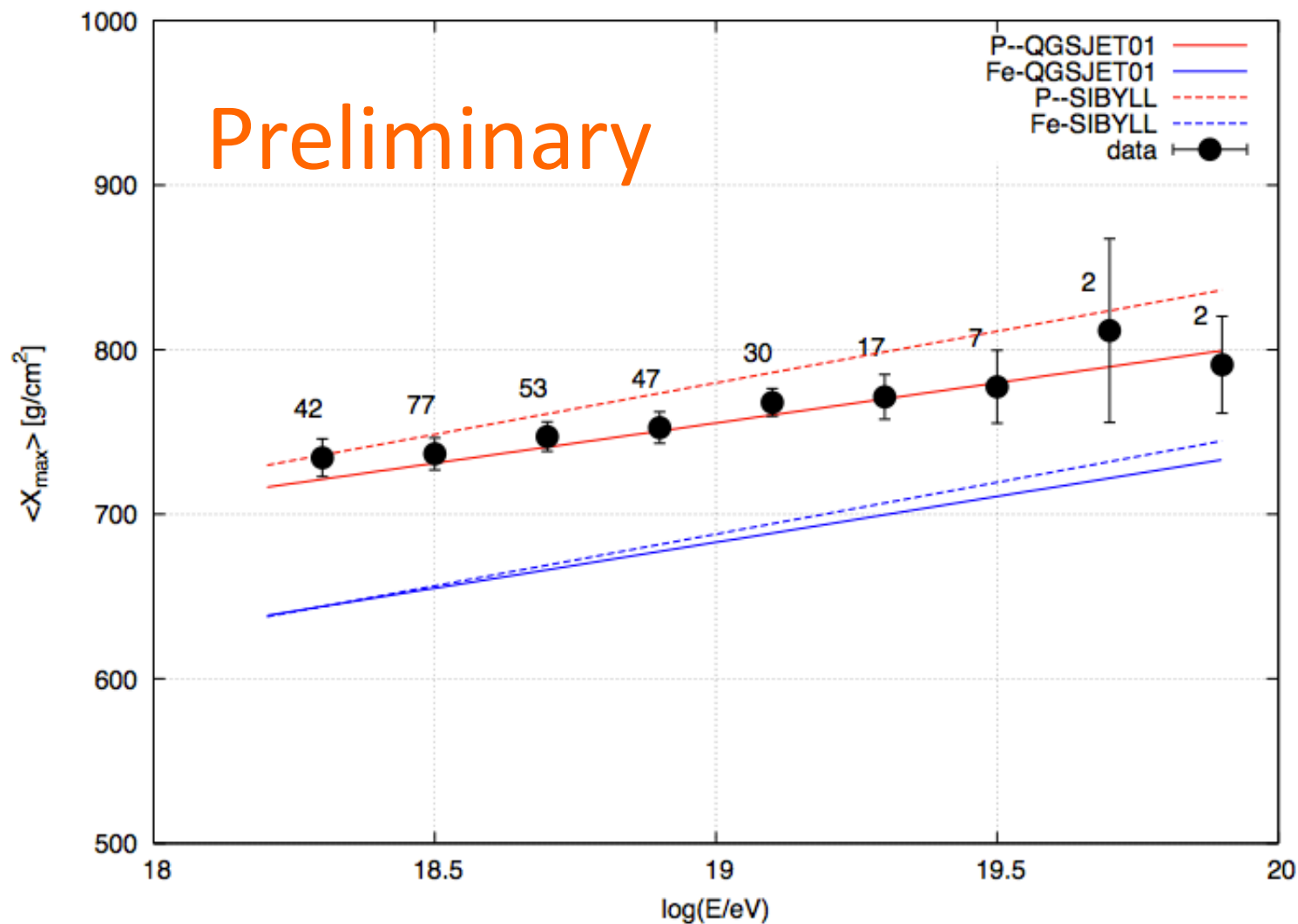
FD-Stereo : Xmax 分布



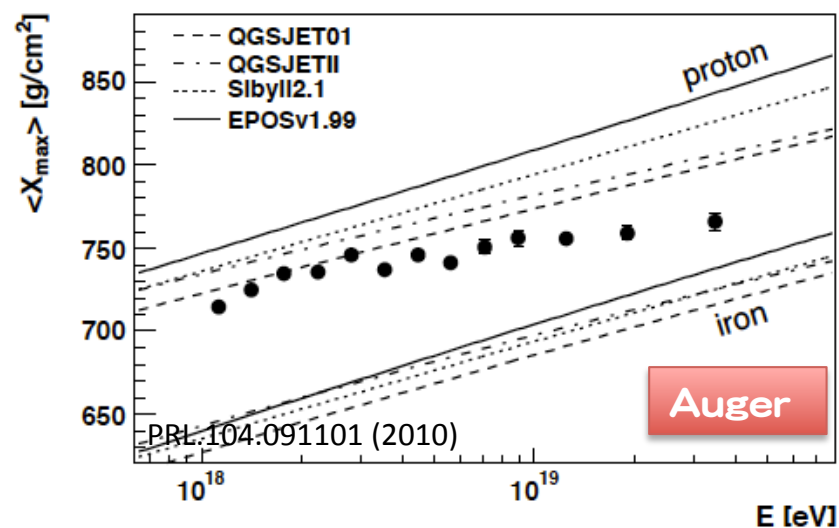
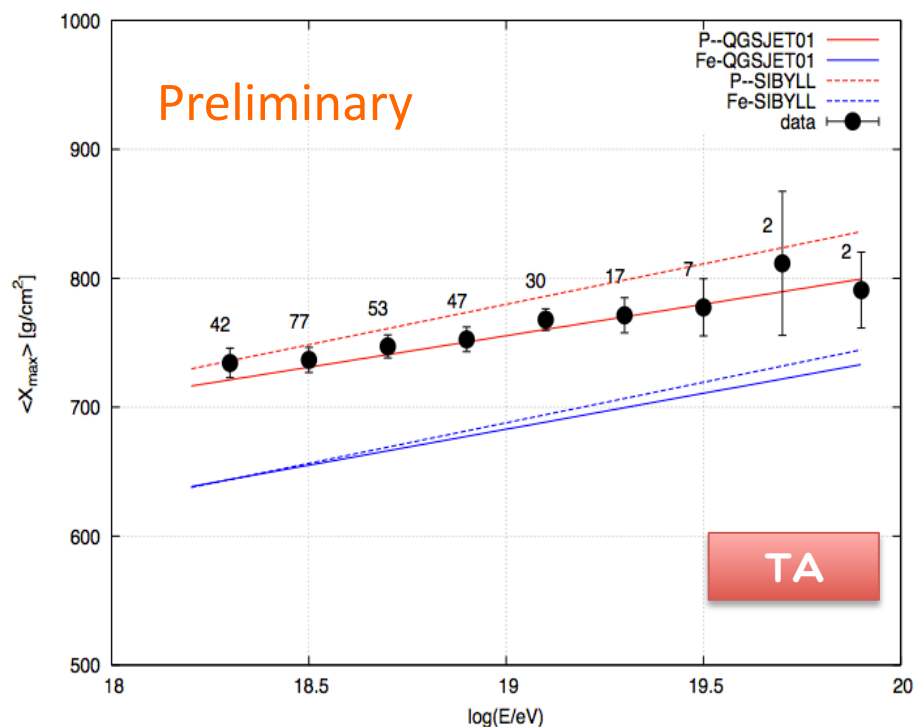
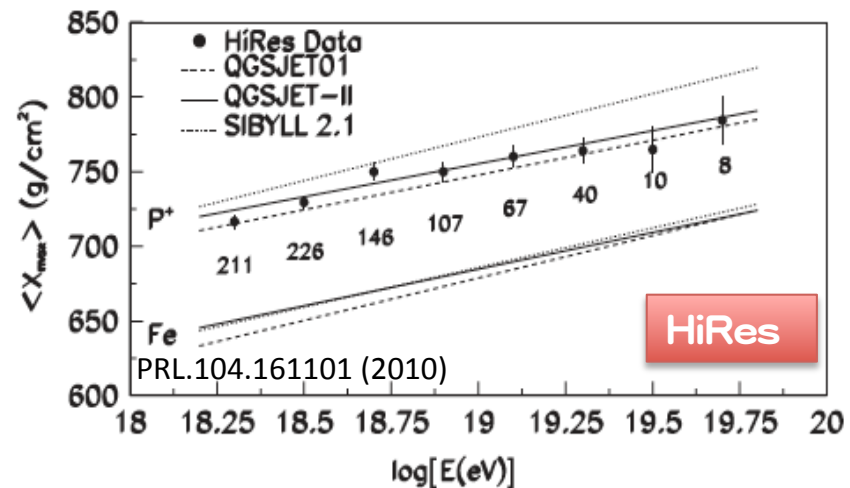
FD-Stereo : Xmax 分布



FD-Stereo : 平均 Xmax



平均 Xmaxの他実験との比較

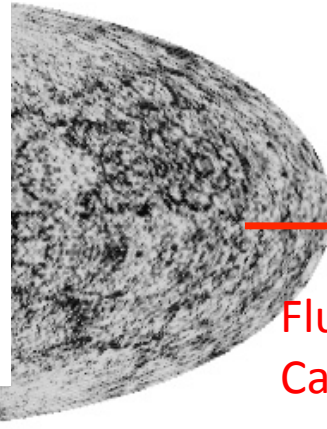


到来方向

TA-SD: Correlation with Large Scale Structure

Catalogue: 2Mass Extended
Source Catalogue (XSCz)
($m < 12.5$,
 $5\text{Mpc} < D < 250\text{Mpc}$)
Weight:
Sliding Box Scheme
arXiv:0907.0121

Number Density of Galaxies



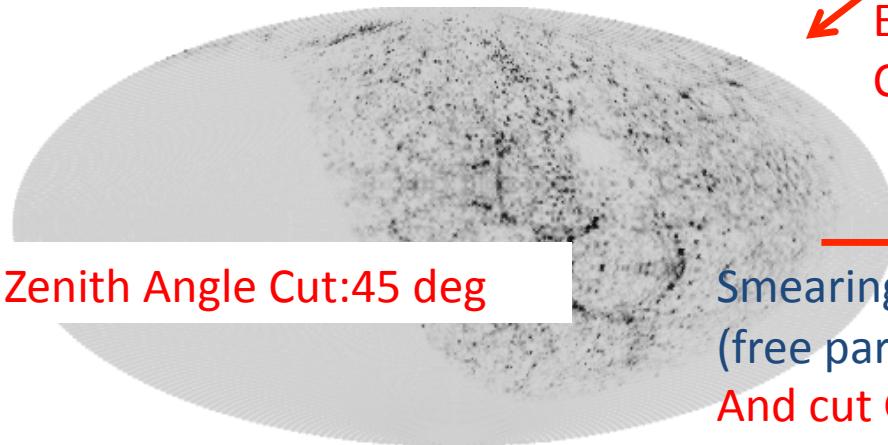
Flux
Calculation

A-priori Energy Threshold:
10EeV, 40EeV, 57EeV
Same luminosity from all
galaxies
Injection spectrum index: -2.2
Primary Proton
Propagation:
Interaction with CMB photon &
 D^{-2} loss

Exp

Exposure
Calculation

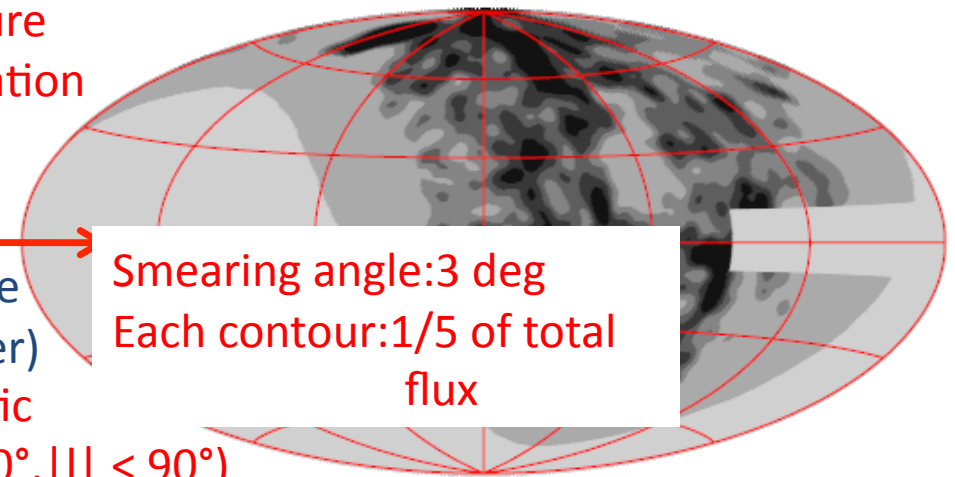
Zenith Angle Cut: 45 deg



Expected Flux Map \times Exposure

Smearing Angle
(free parameter)
And cut Galactic
Center ($|b| < 10^\circ$, $|l| < 90^\circ$)

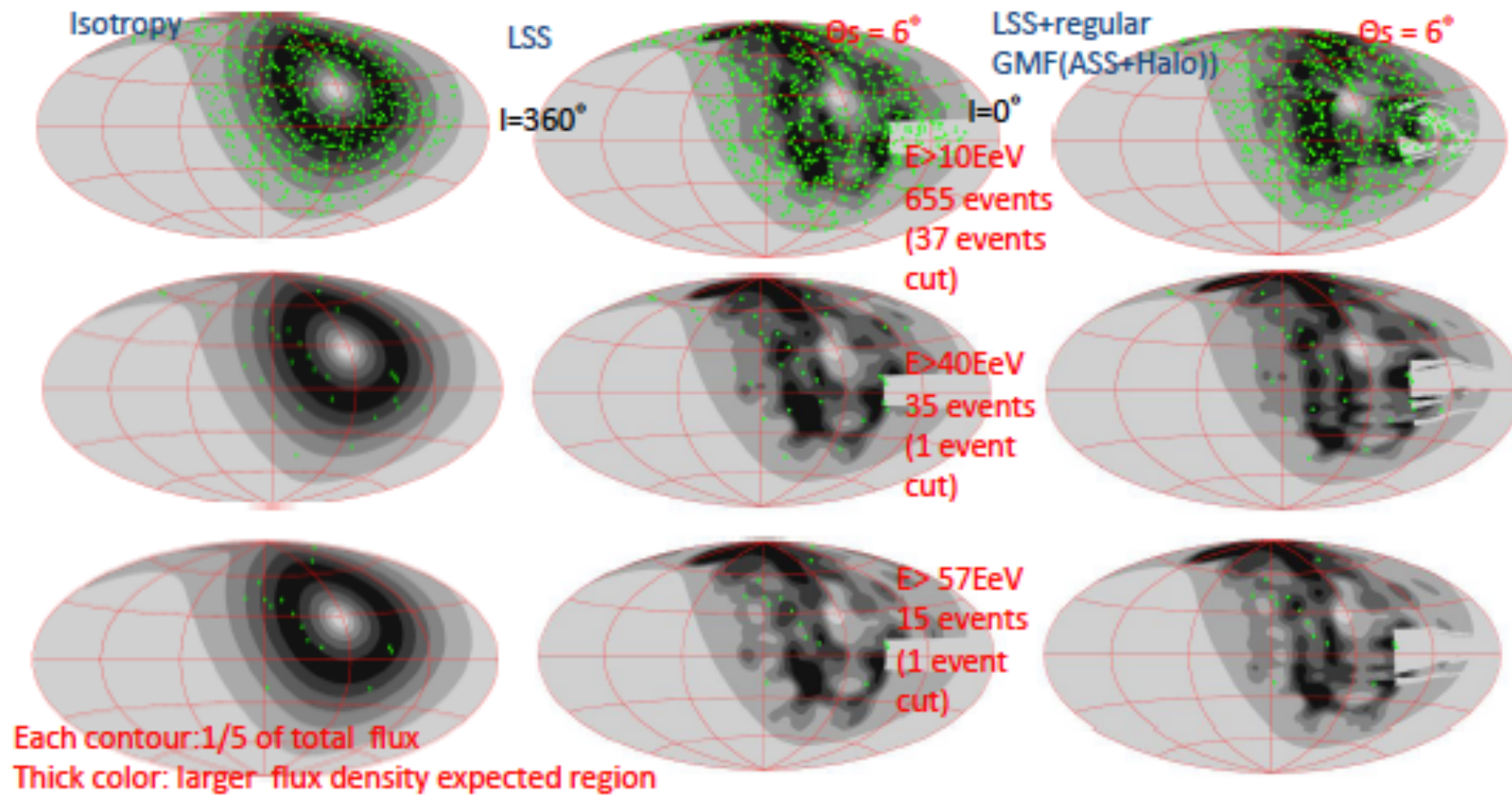
Smearing angle: 3 deg
Each contour: 1/5 of total
flux



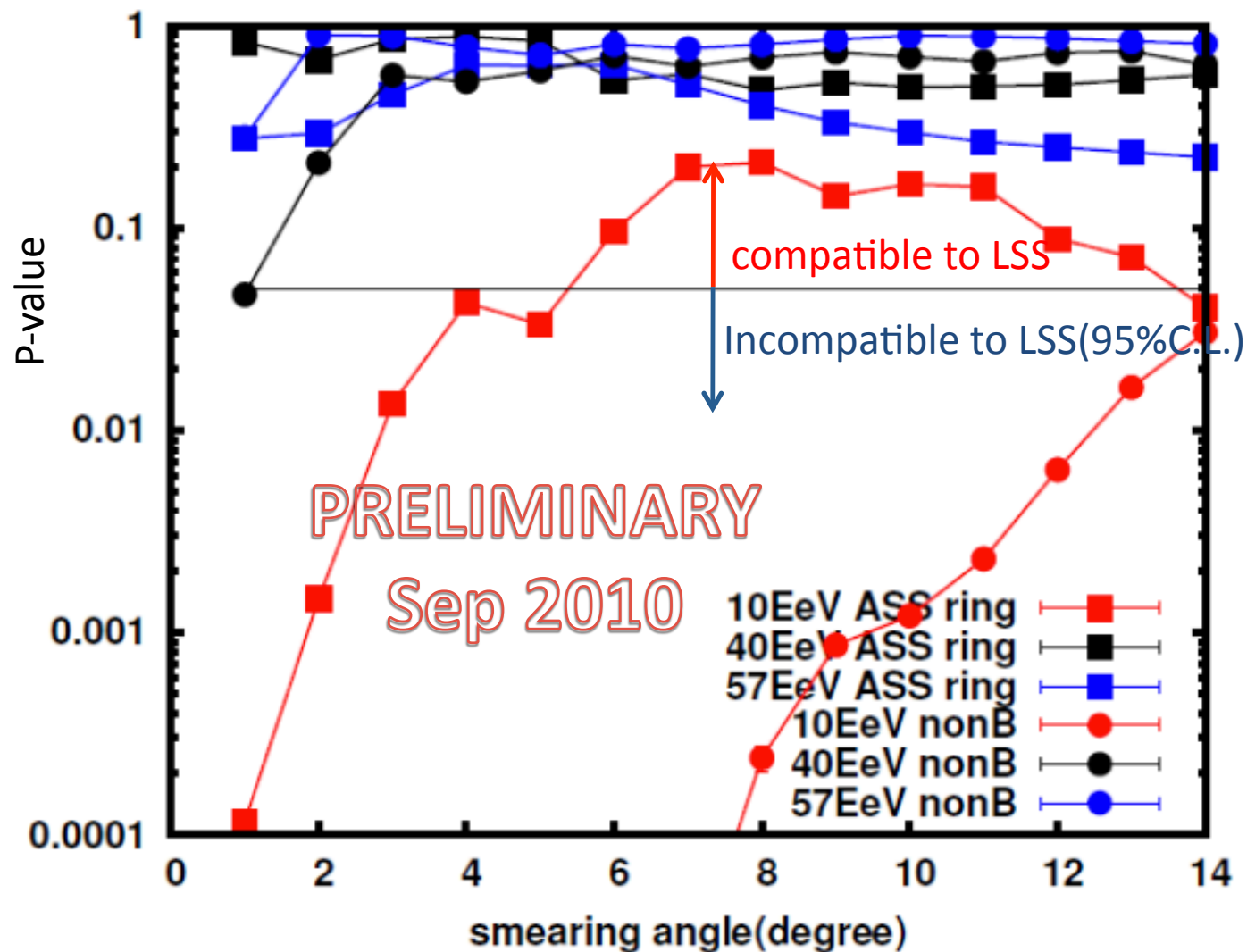
Expected Flux Map \times Exposure

Koers & Tinyakov (2009)

Flux Map Overlaid with Data



Compatibility with LSS by KS test

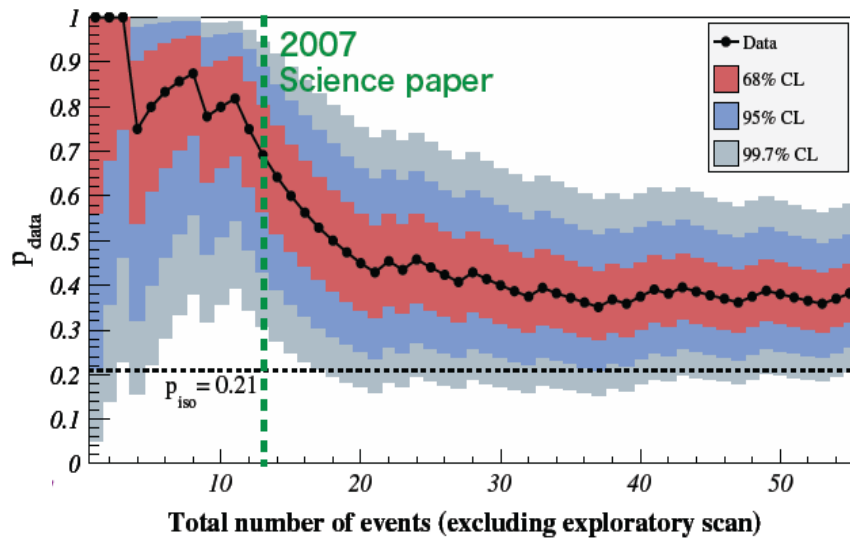


Compatibility w isotropy

- Eth = 57EeV p = 0.10
- Eth = 40EeV p = 0.51
- Eth = 10EeV p = 0.24

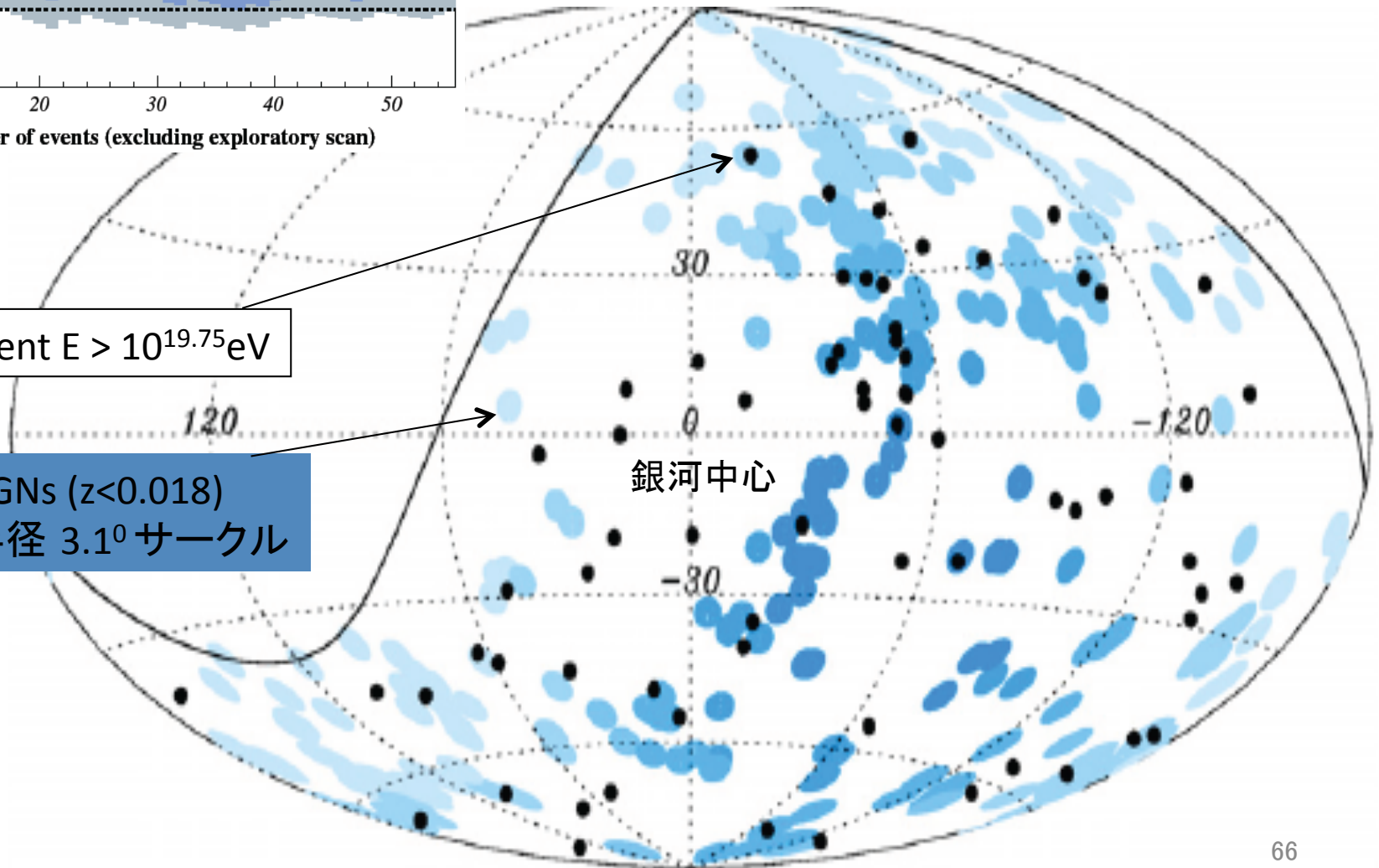
活動銀河核との相関

Pierre Auger実験

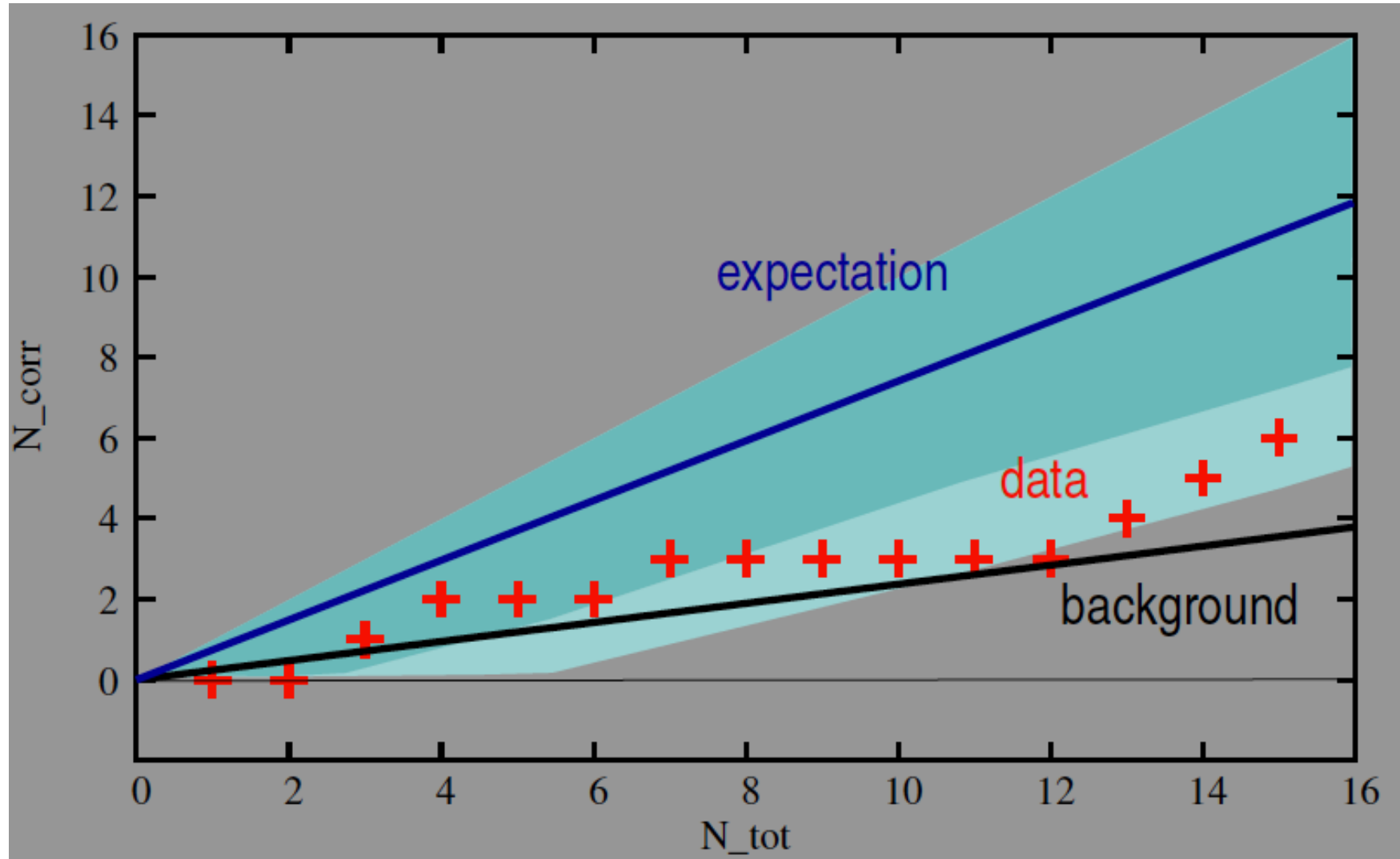


宇宙線 event $E > 10^{19.75} \text{eV}$

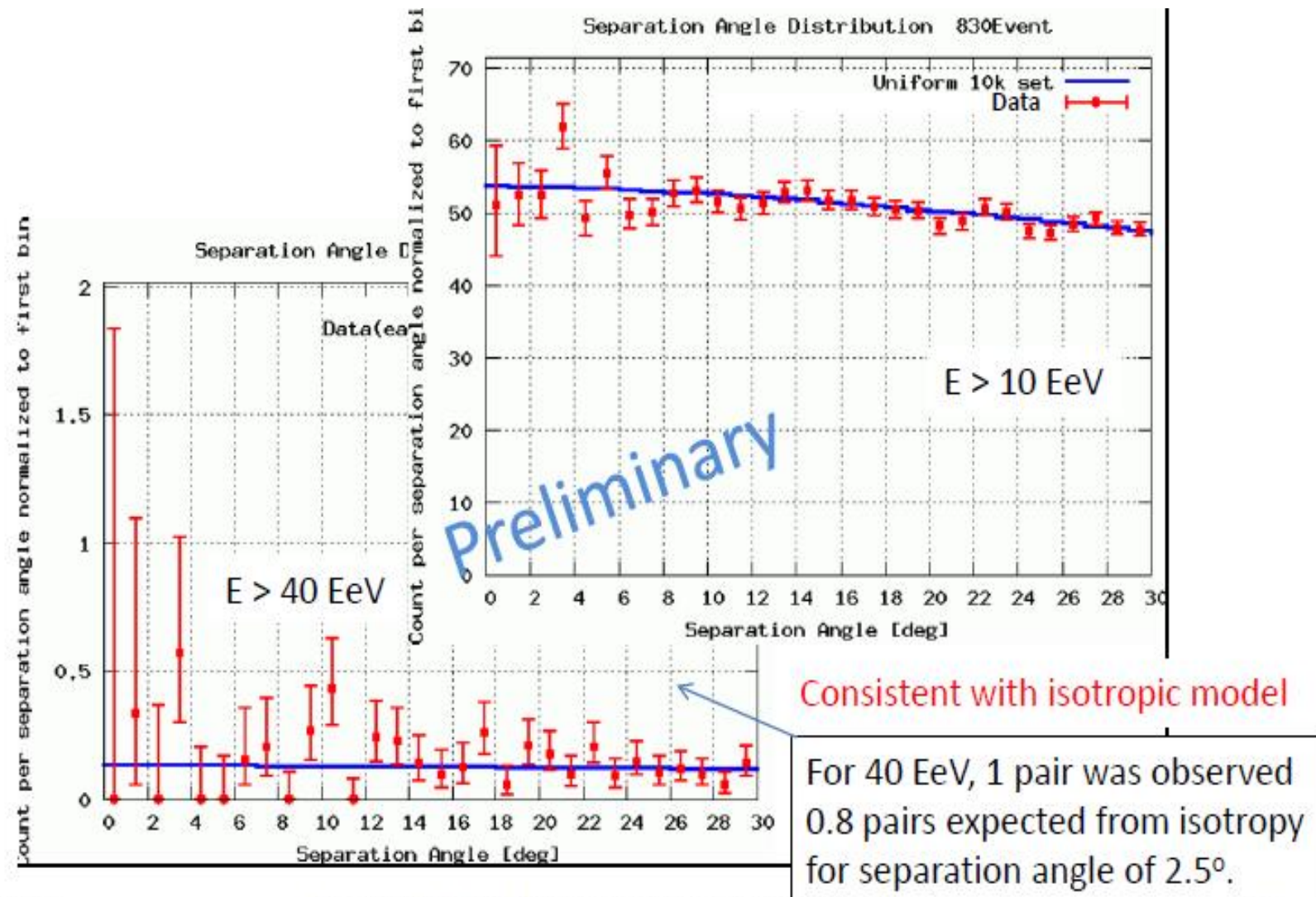
AGNs ($z < 0.018$)
半径 3.1° サークル



TA-SD AGN 相関



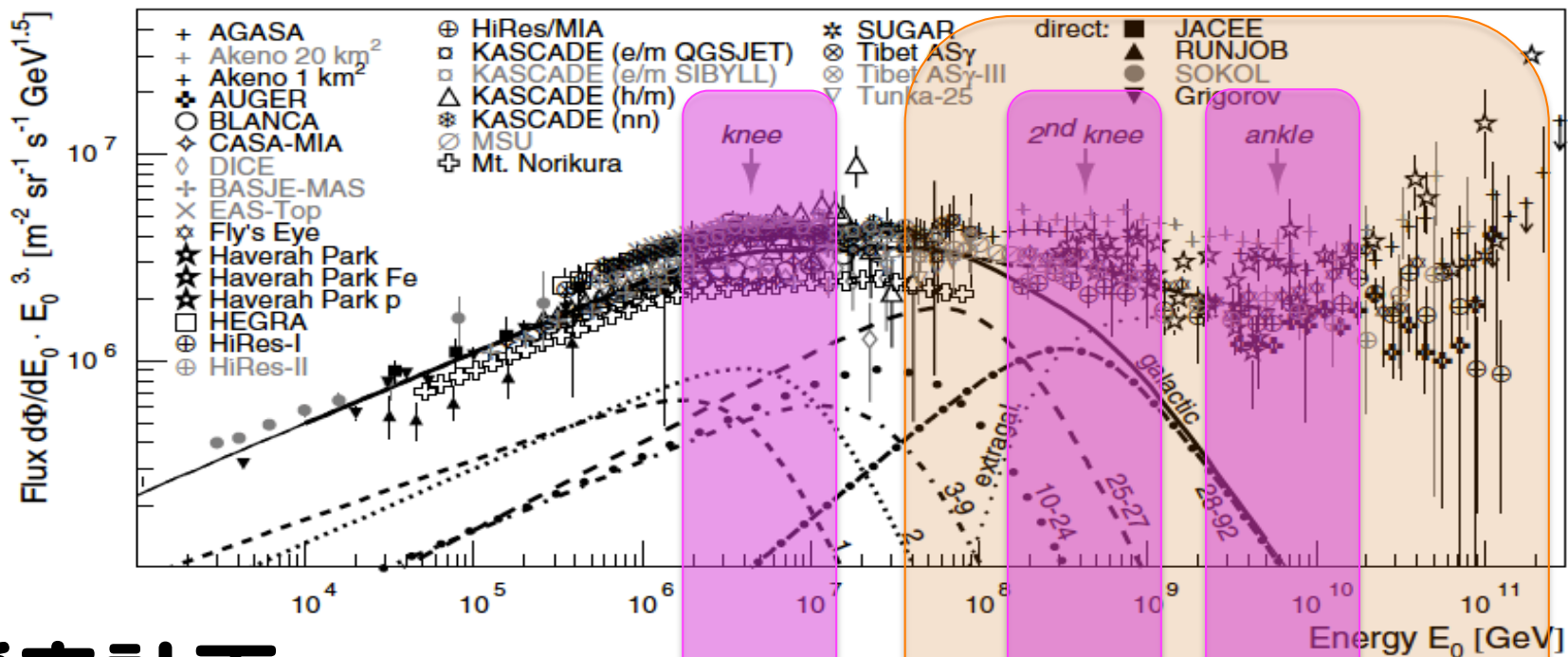
Event Cluster (点源・自己相関)



TAの結果のまとめ

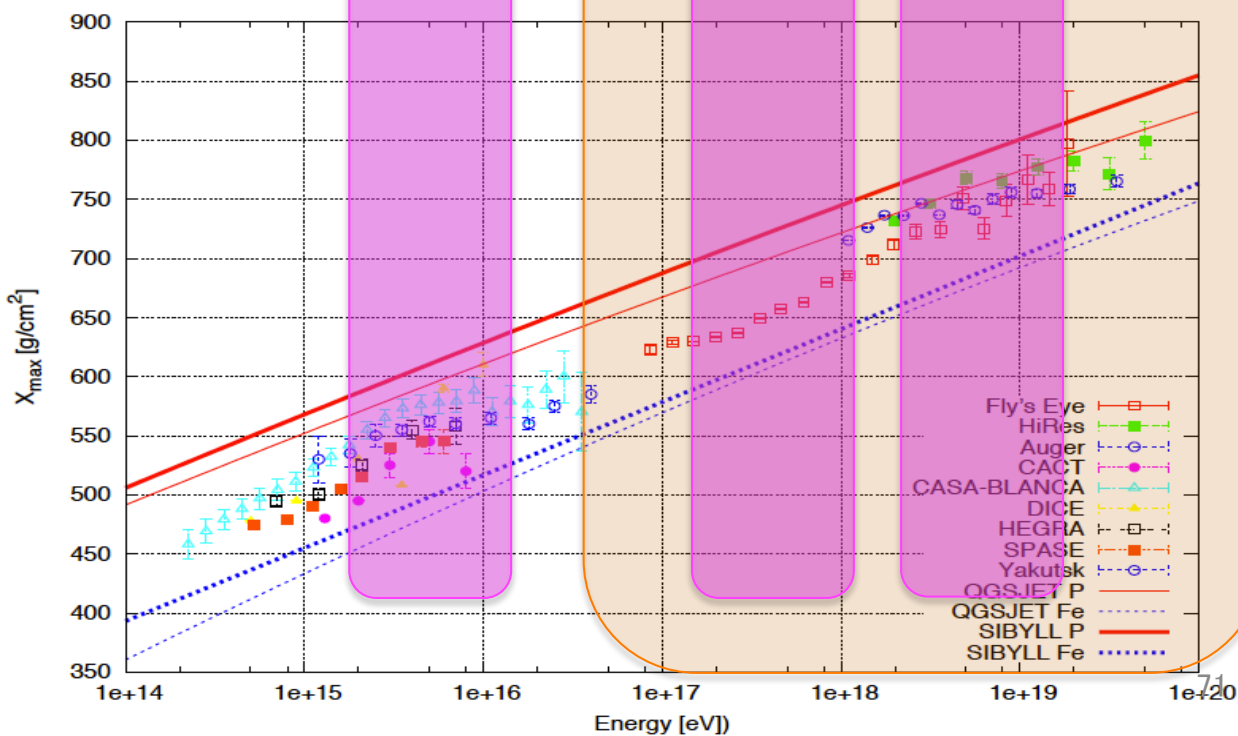
- エネルギースペクトル
 - GZKカットオフと無矛盾なスペクトル
 - HiResとコンシステント
- 質量組成
 - $10^{18.2}$ eV以上で純陽子モデルとコンシステント
 - HiResとコンシステント
 - Augerと矛盾
- 到来方向
 - 10^{19} eV以上で一様等方
 - LSS, AGNと相関？
 - 点源天体やクラスターは未確認

将来計画



TA 将来計画

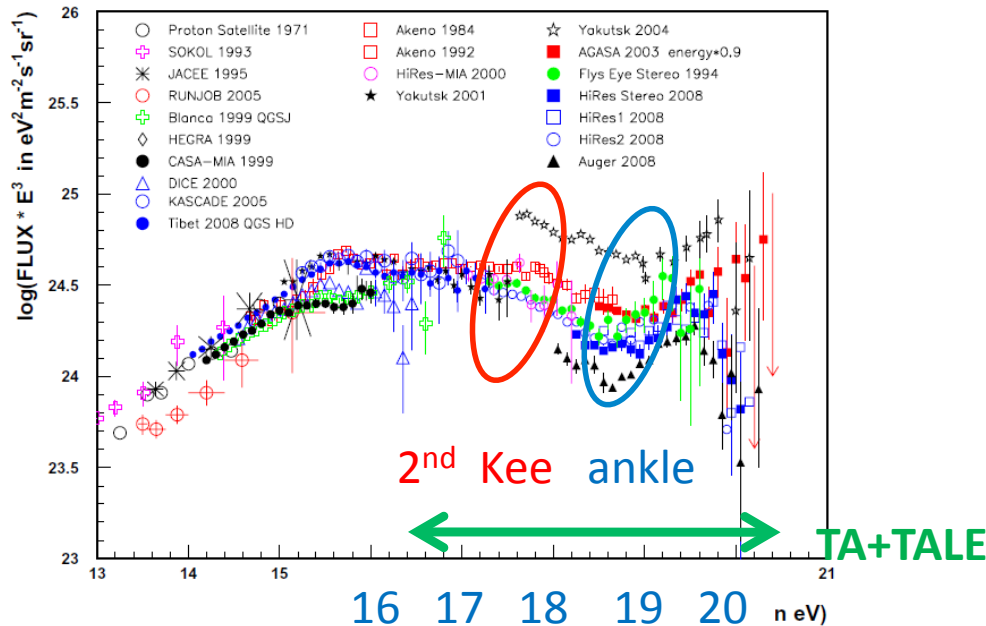
10^{16.5}eV以上のエネルギー領域を
単一の実験でカバー
エネルギースペクトルと
質量組成から起源を解明する



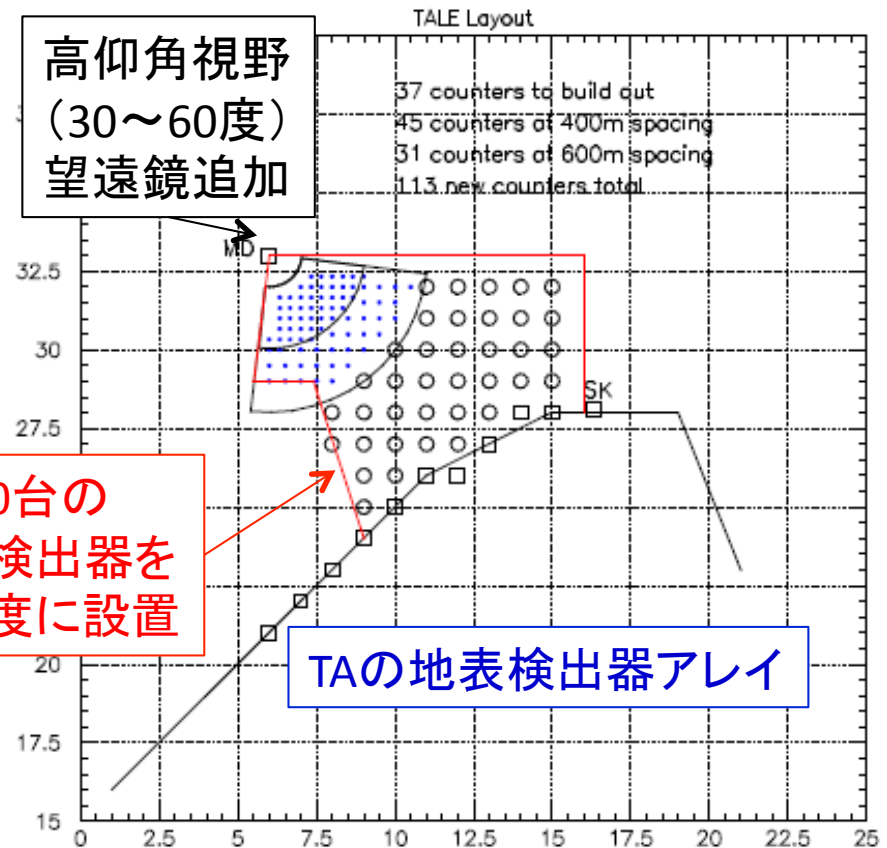
将来に向けて

- **規模の拡張** (最高エネルギー宇宙線の観測数の増加→詳細研究)
 - 既存の検出器による拡張
 - R&DのためにTAサイトを世界に解放
 - 超高エネルギー宇宙線の電波的観測
 - 電波エコー観測
 - 空気シャワーからの制動放射による電波観測 (秋?)
 - » 日本、ヨーロッパ、米国から
 - JEM-EUSO (国際宇宙ステーションに搭載計画の超広角望遠鏡) のプロトタイプ試験 (来年度試験?)
- **低エネルギー領域への拡張 (TALE)**
 - $10^{16.5}$ eV以上の宇宙線をTAと合わせて1つの実験で一括研究

低エネルギーへの拡張計画(TALE)

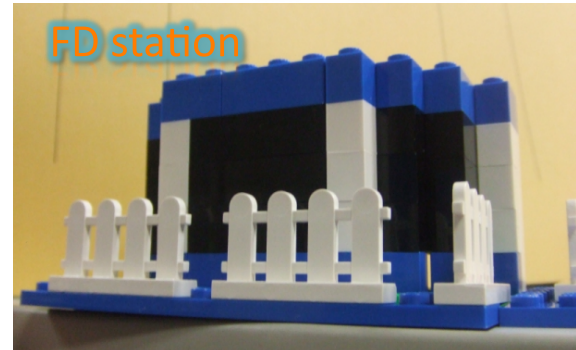


10^{16.5}eV~



- 銀河から銀河系外への遷移？
そのエネルギーは？
- 陽子+CMB光子反応によるe⁺e⁻生成？
- 宇宙線の組成の遷移は？
- 宇宙線の到来方向は？
● 均一？不均一？

Future of TA



Information

- Telescope Array ホームページ

<http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp>

福島正己

http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/adm/adm_fukushima.html

佐川宏行

<http://taws100.icrr.u-tokyo.ac.jp/hsagawa/>

