

UPPER LIMIT OF THE SPECTRUM OF COSMIC RAYs

服部研

M1

藤木 和城

今回のテーマ

- GZK限界(Greisen–Zatsepin–Kuzmin limit)

地球に届く50Mpc以上から来た 5×10^{19} eV以上の宇宙線は地球には届かないという理論的な予想

本論文について

- 1964年にアーノ・ペンジアスとロバート・W・ウィルソンにCMBが発見され、ビッグバン宇宙論が信じられ始めた。
- 当時、宇宙年齢がわからないため、50Mpcという距離が宇宙空間に存在するのかわからない。
- 宇宙線とCMB光子の反応時間とエネルギーの関係を導出しているし、試行錯誤している。

以後、最近の観測データなどを混じえつつ、話を進めていきます。当時論文も無駄でないところを取り込んでとますが、論文内容と逸脱しているところもあるかもしれないので、ご了承くださいと思います。

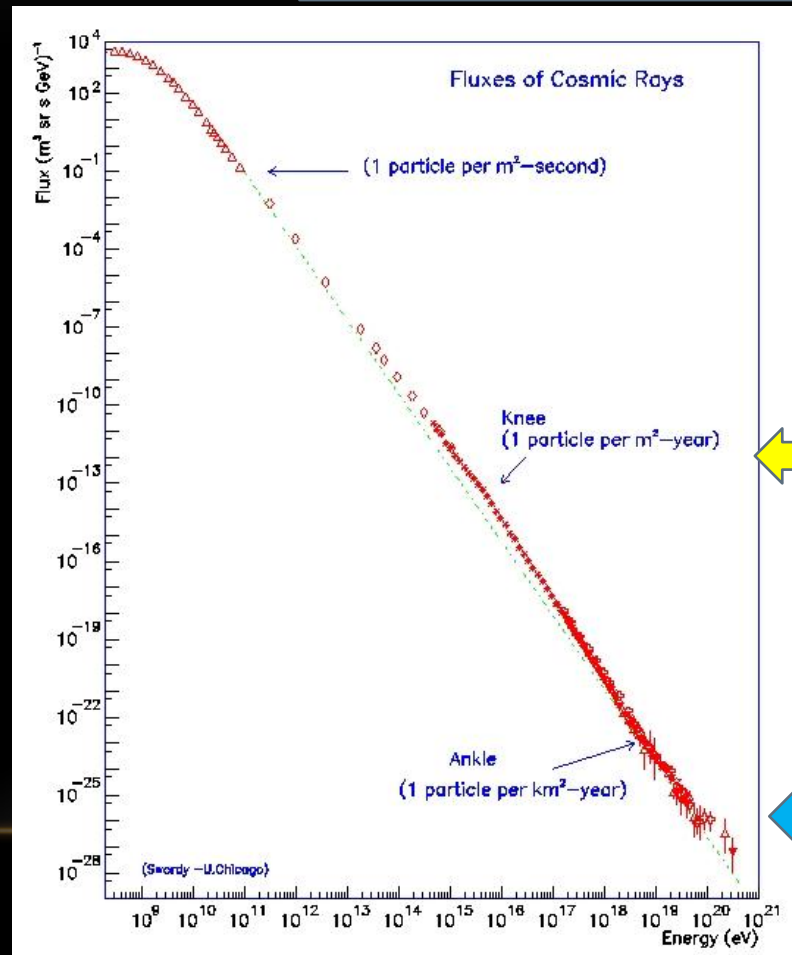
宇宙線スペクトル分布

$$I_N(E) \approx 1.8 \times E^{-\alpha} \text{ nucleons/cm}^2/\text{sec/str/GeV}$$

$\alpha = 2.7$ (below knee)

$\alpha = 3.0$ (from knee to ankle)

$\alpha = 2.8$ (above ankle)



SNR

UHECRs

- Our galaxyでブラックホールなどの高エネルギー天体が存在しない場合、高エネルギー宇宙線は磁場の加速によって生じる。

Our galaxyで宇宙線がいつまで、加速されるかは

ディスクの厚さ $\leq$ シンクロトロン半径

ディスクの厚さ $\sim 5\text{kpc}$

シンクロトロン半径 r_L

$$\begin{aligned}
 r_L &= \frac{c}{\omega} = c / \frac{eB}{\gamma m_p c} = \frac{\gamma m_p c^2}{eB} \\
 &= \frac{\gamma m_p c^2}{\omega_{ce} m_e c^2} c \sim 1.05 \times 10^{-6} \gamma (pc / \mu G) \\
 &\geq 5 \text{ kpc} (B / \mu G)^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\gamma \geq 5 \times 10^9$$

$$\gamma m_p c^2 \geq 4.5 \times 10^{18} (eV) \text{ 銀河系外起源}$$

電子のサイクロトロン周波数

$$\omega_{ce} \sim 17 (\text{Hz} / \mu G)$$

$$\begin{aligned}
 r_L &= \frac{c}{\omega} = c / \frac{eB}{\gamma m_p c} = \frac{\gamma m_p c^2}{eB} \\
 &= \frac{\gamma m_p c^2}{\omega_{ce} m_e c^2} c \sim 1.05 \times 10^{-6} \gamma (pc / \mu G) \\
 &\leq 1 pc (B / \mu G)^{-1}
 \end{aligned}$$

$$\gamma \leq 1 \times 10^6$$

$$\gamma m_p c^2 \leq 9 \times 10^{14} (eV) \text{ SNR起源}$$

電子のサイクロトロン周波数

$$\omega_{ce} \sim 17 (Hz / \mu G)$$

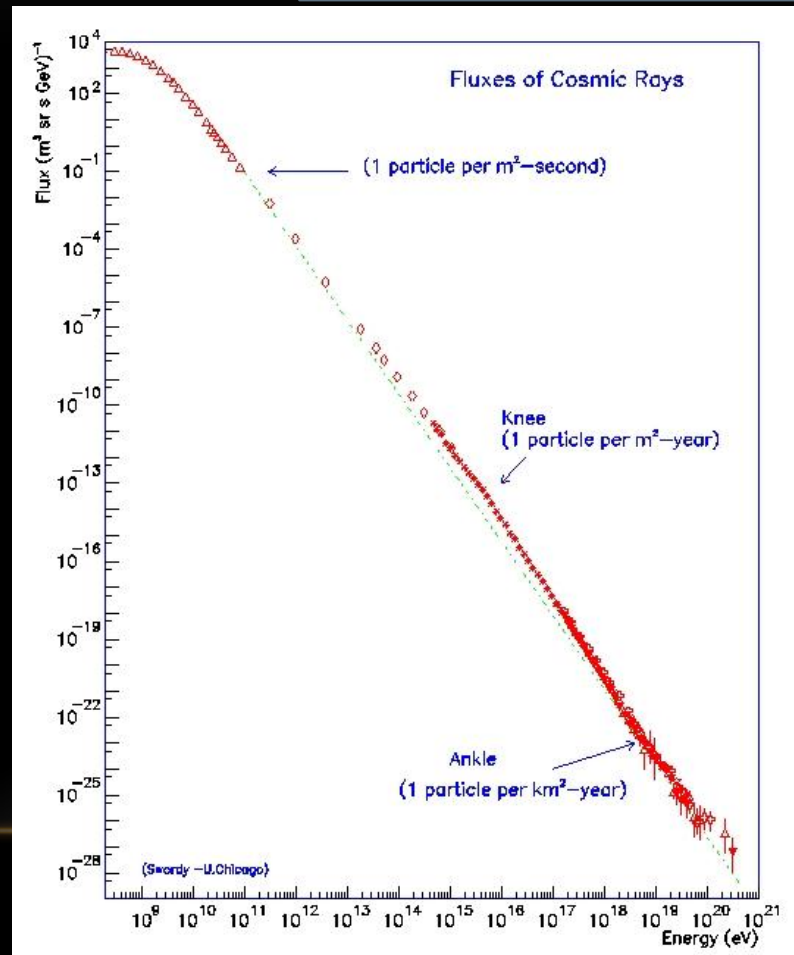
宇宙線スペクトル分布

$$I_N(E) \approx 1.8 \times E^{-\alpha} \text{ nucleons/cm}^2/\text{sec/str/GeV}$$

$\alpha = 2.7$ (below knee)

$\alpha = 3.0$ (from knee to ankle)

$\alpha = 2.8$ (above ankle)



UHECRs

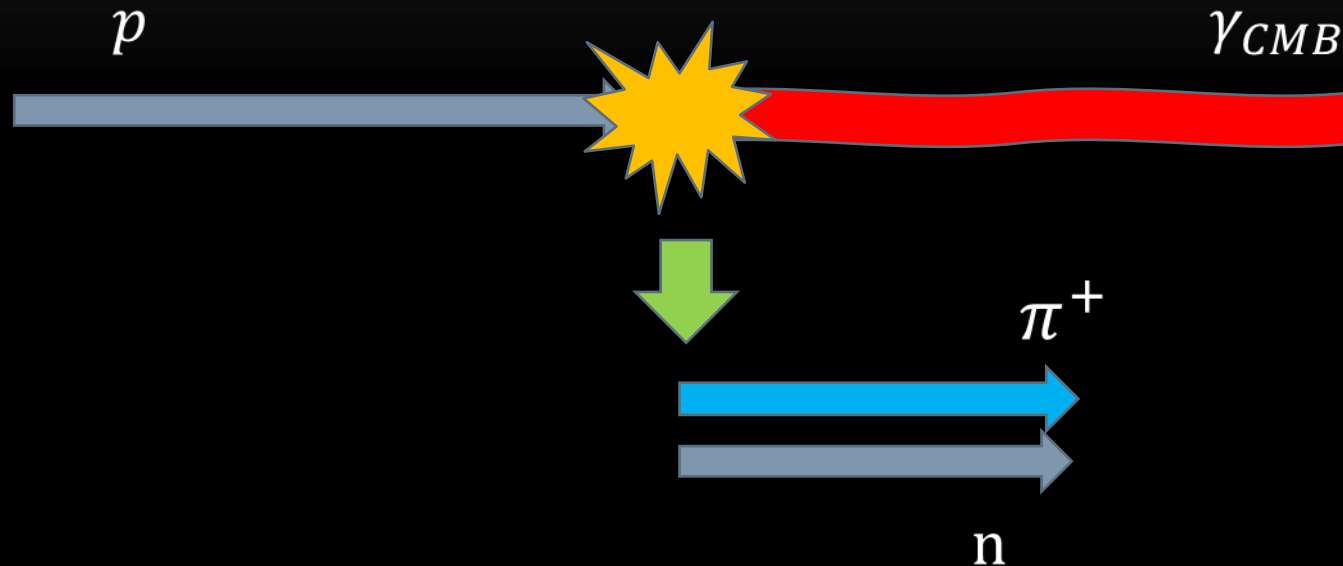
宇宙線とCMB光子との相互作用

宇宙線陽子静止系で観測したときCMBのエネルギーが π 中間子の静止質量エネルギーを超えていると、以下の反応が起きる。

$$\gamma_{CMB} + p \rightarrow p^* \rightarrow p + \pi^0$$

$$\gamma_{CMB} + p \rightarrow p^* \rightarrow n + \pi^+$$

宇宙線(陽子)とCMB光子との相互作用が起きるための宇宙線のエネルギー下限値



• ローレンツ変換し、陽子の静止系へ

$$m_p c^2 + \gamma E_{CMB} \geq m_n c^2 + m_\pi c^2$$

基本的な物理量

$$m_p c^2 \sim 938 (MeV)$$

$$E_{CMB} \sim 2.82 \times k_B \times 2.725 (K)$$

$$\sim 6.62 \times 10^{-4} (eV)$$

$$m_\pi c^2 \sim 139 (MeV)$$

最も多い
CMB粒子
のエネルギー

反応が起こるために陽子必要なエネルギー

$$\gamma \geq 2 \times 10^{11}$$

$$\gamma m_p c^2 \geq 2 \times 10^{20} (eV)$$

GZK CUT OFF

CMB光子中の宇宙線のMEAN FREE PATH

- $\sigma = 0.25(mb) = 2.5 \times 10^{-28}(cm^2)$

観測結果、素粒子物理学(武田 暁、宮沢弘成著)

1ccに含まれるCMB光子の数

$$n = 411(cm^{-3})$$

$$\lambda = \frac{1}{n\sigma} = 3.15(Mpc) \quad \text{実際は} 50(Mpc)$$

GZK限界のHIRES,AGASAにおける結果 (信頼度68%)

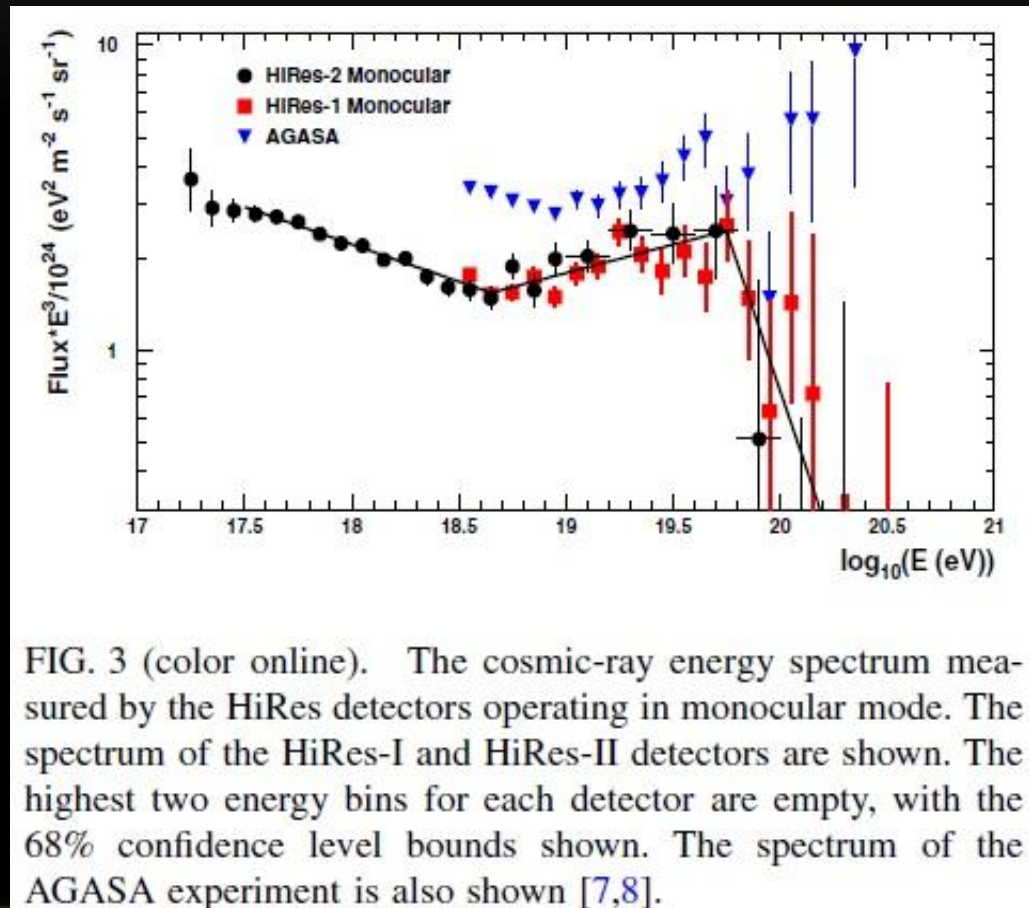
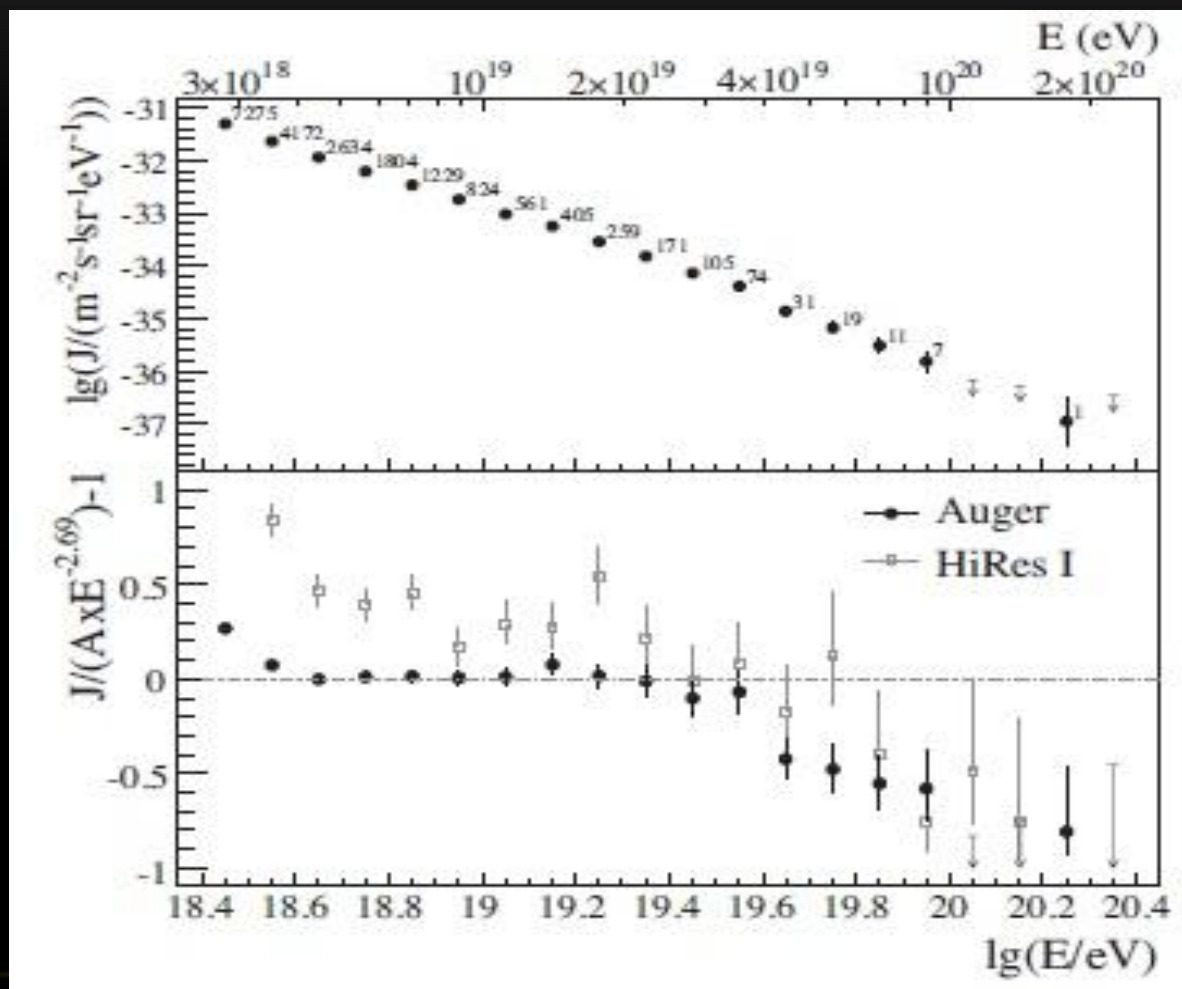


FIG. 3 (color online). The cosmic-ray energy spectrum measured by the HiRes detectors operating in monocular mode. The spectrum of the HiRes-I and HiRes-II detectors are shown. The highest two energy bins for each detector are empty, with the 68% confidence level bounds shown. The spectrum of the AGASA experiment is also shown [7,8].

First Observation of the Greisen-Zatsepin-Kuzmin Suppression
arXiv:astro-ph/0703099v2 15 Feb 2008

フラックス微分とエネルギーの関係



arXiv:0806.4302v1 [astro-ph] 26 Jun 2008

Observation of the suppression of the flux of cosmic rays above 4×10^{19} eV

HIRESの捉えたUHECRSの分布と AGNとの比較

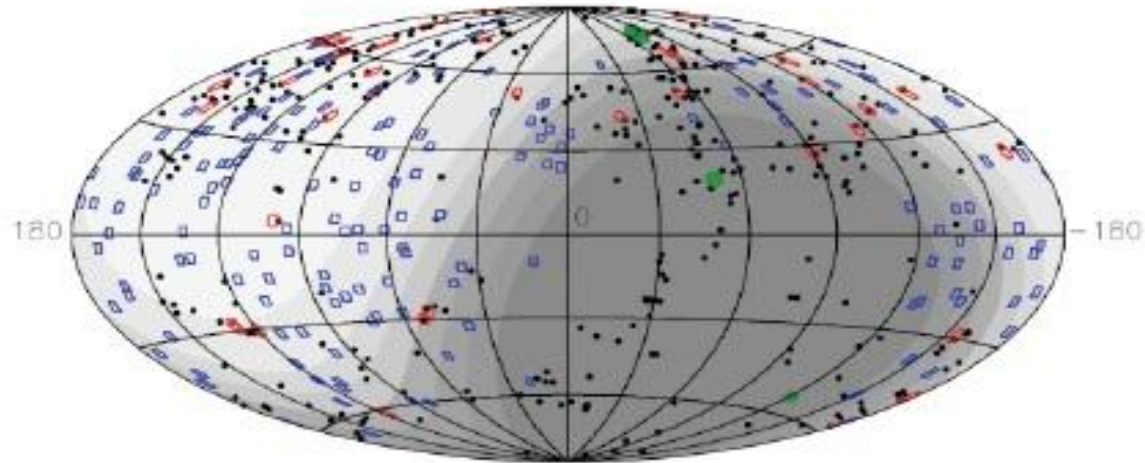


Figure 5: Distribution of arrival direction of stereo HiRes events versus nearby galaxies in the Veron catalogue. Black: AGN's, Blue: HiRes data, Red: Correlated data.

Final Results from the High Resolution Fly's Eye (HiRes) Experiment
P. Sokolsky for the HiRes Collaboration
University of Utah, Salt Lake City, Utah, 84112, USA

観測的にGZK CUT OFFは本当に存在するのか？

• $3 \times 10^{19} (eV)$ 付近でHiResの結果はGZKに従っているが、AGASAの結果にはCUT OFFが見られない。



どちらが、正しいのか。

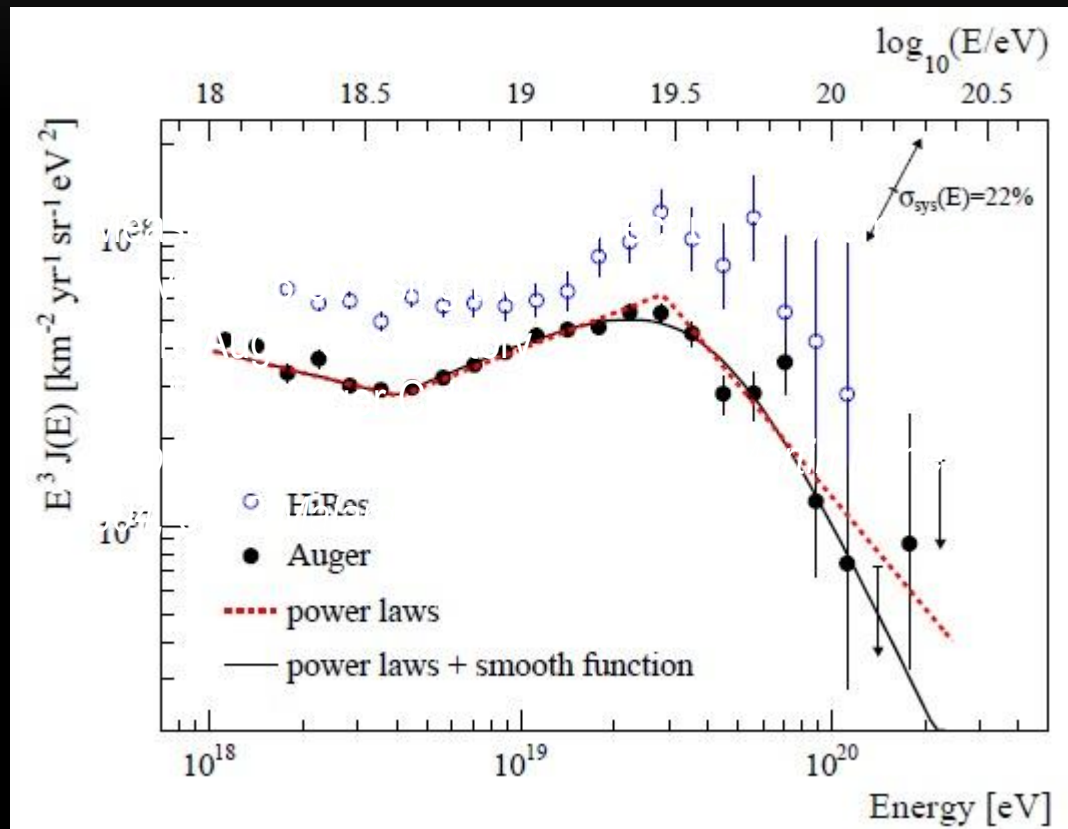
テレスコープアレイ(TA)の結果待ち。

(2008~)

検出器の性能

Experiment	status	km ² sr yr @ 50 EeV	# events	
			> 10 EeV	> 50 EeV
Haverah Park	1962-1987	~ 245	106	10
Yakutsk	1974-present	~ 900	171	6
AGASA	1993-2005	1620	886	46
HiRes-I mono	1997-2006	~ 4500	561	31
HiRes-II mono	1999-2006	~ 1500	179	12
HiRes stereo	1999-2006	~ 2400	270	11
Auger	2004-present	~ 7000	1644	38
TA	2007-present	860×yrs		

ここから先はAPPENDIX

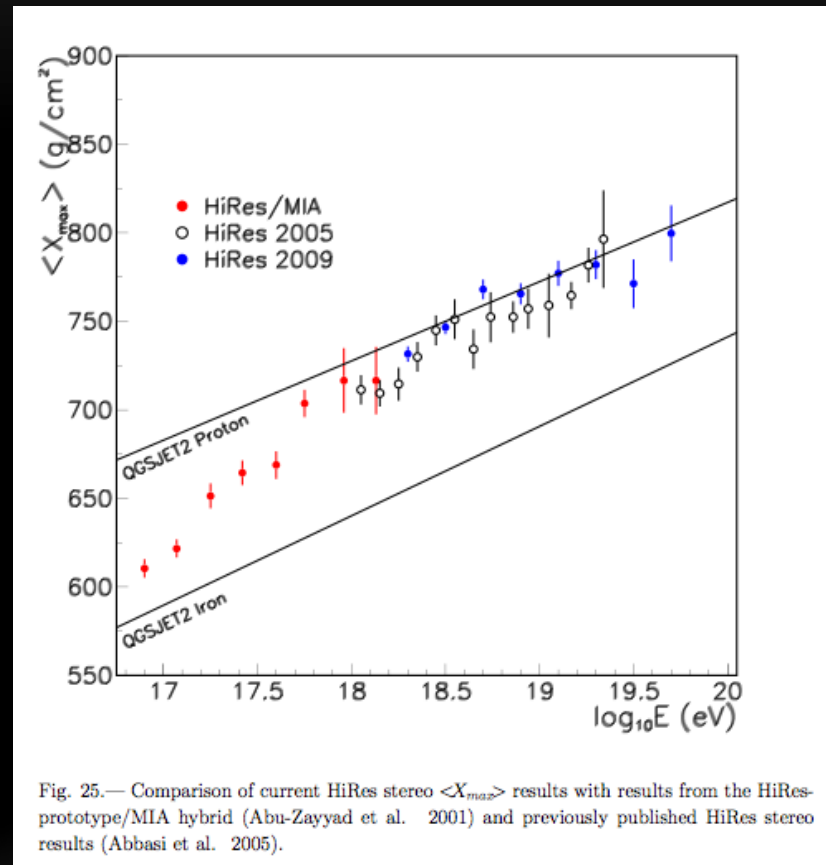


Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 1018 eV using the Pierre Auger Observatory

The Pierre Auger Collaboration^a

^aObservatorio Pierre Auger, Av. San Martín Norte 304, 5613 Malargüe, Argentina

DISTRIBUTION OF SHOWER MAXIMA, XMAX



$$\langle X_{\max} \rangle = \alpha (\ln E - \langle \ln A \rangle) + \beta,$$

- nuclear primaries of mass
the number of primary nucleons A
- The coefficients α and β depend
on the
nature of hadronic interactions, most
notably on the multiplicity,
elasticity and cross-section in ultra-
high energy
collisions of hadrons with air

SHOWER IN X (G/CM²)

- Make quality cuts

⇒ well defined showers

- Standard spectrum cuts
- Track length > 200g/cm²
- $\psi < 110^\circ$
- Extra Bracketing -50g/cm²
- Cerenkov Fraction < 0.35

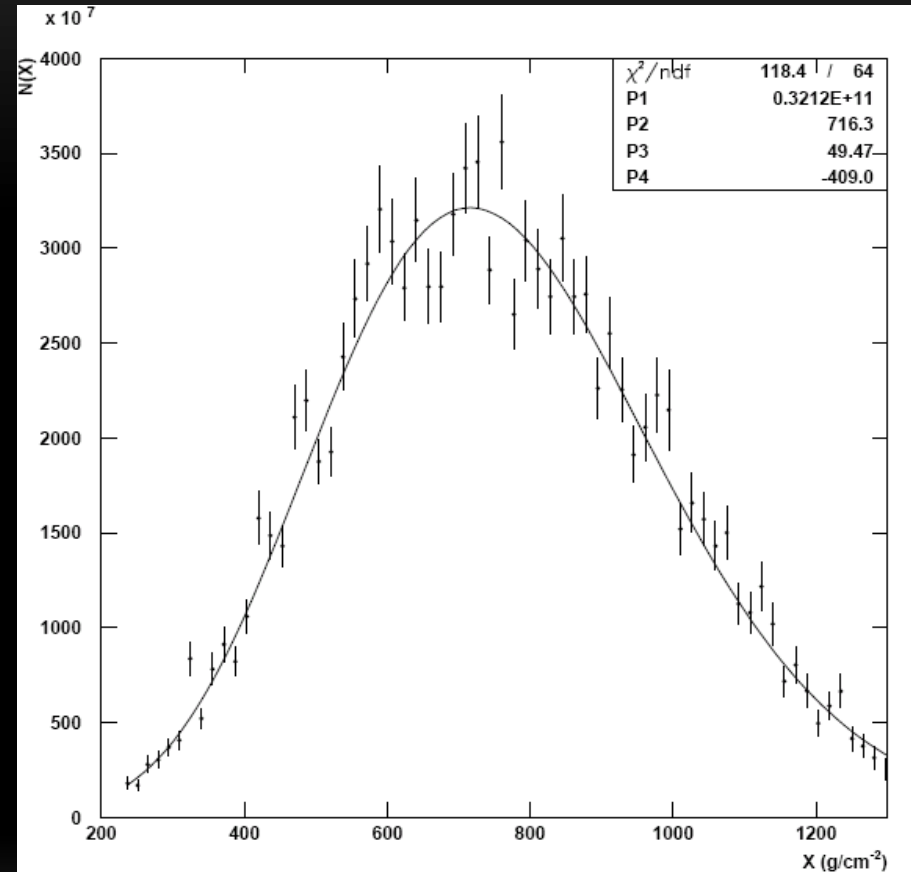
- Locally Fit Shower Profiles Near N_{max}

– N_{max} and X_0

$$n(X) = \frac{N}{N_{max}}$$

- Normalize:

$$s = \frac{3X}{X + 2X_{max}}$$



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

SHOWER IN S (AGE)

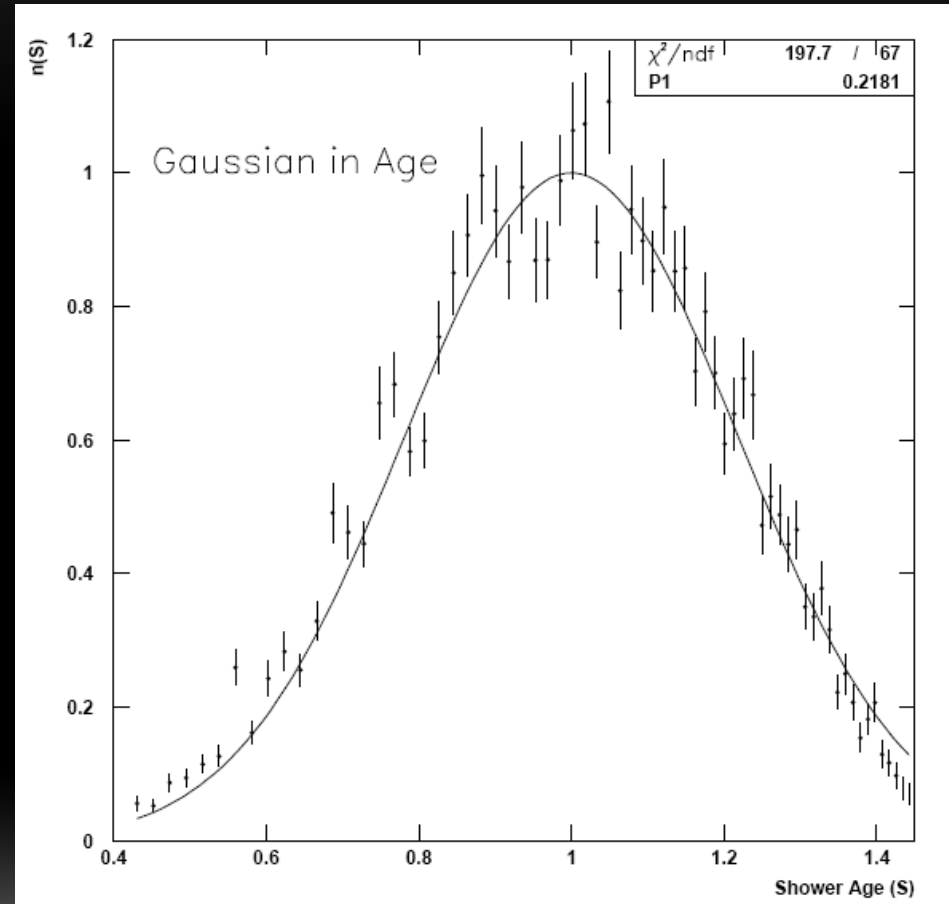
- Gaisser-Hillas:

$$n(s) = \left(1 - \frac{(1-s)}{(3-s)} \frac{3T_{max}}{(T_{max} - T_o)} \right)^{T_{max} - T_o} e^{(3T_{max} \frac{1-s}{3-s})}$$

$$T_m = \frac{X_{max}}{\lambda}$$

$$T_o = \frac{X_o}{\lambda}$$

$$f(s) = \exp \left(\frac{-1}{2\sigma^2} (s - 1)^2 \right)$$

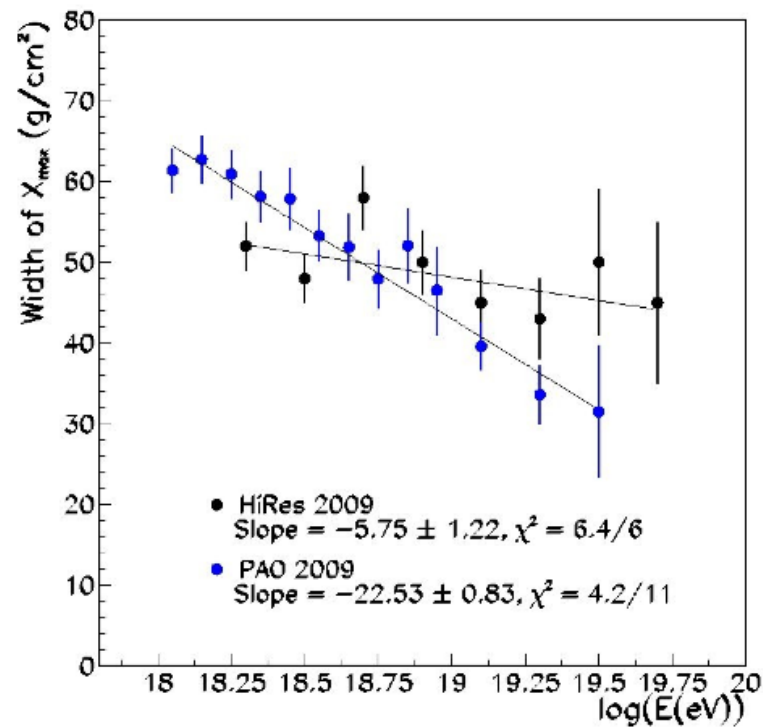


- σ Shower Width
- Symmetric about $s=1$

XMAXの幅

Compare X_{max} fluctuations with PAO

HiRes and PAO, 2009



HIRESのアパーチャーとエネルギーの関係

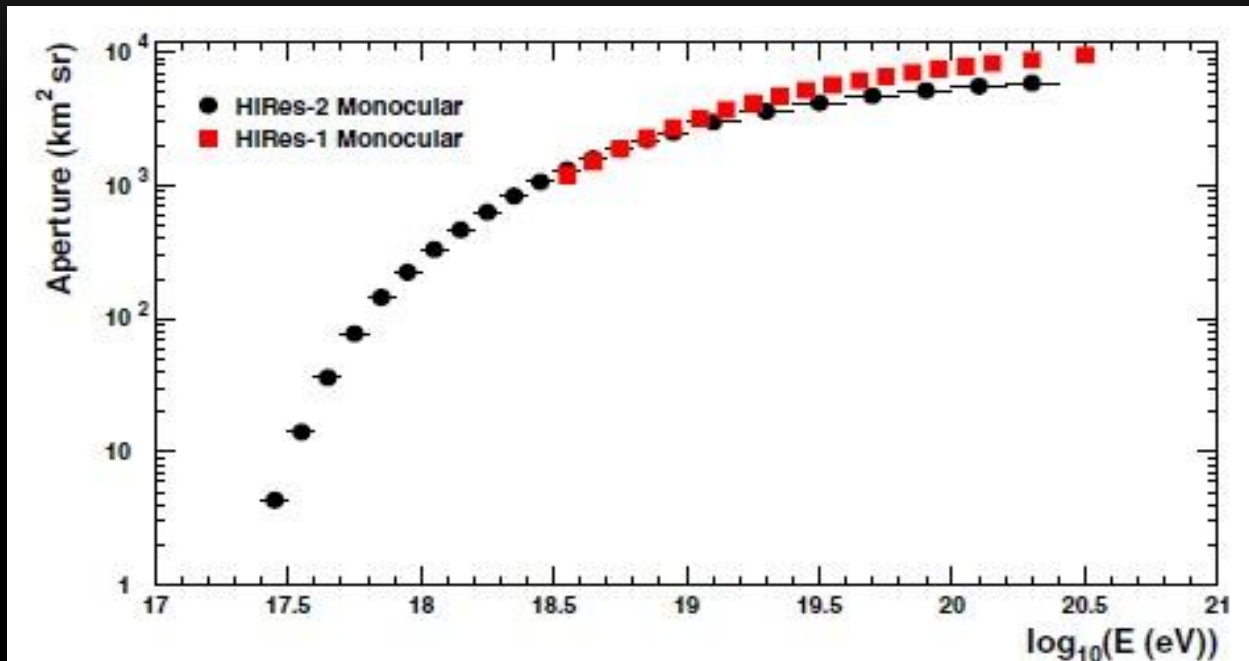
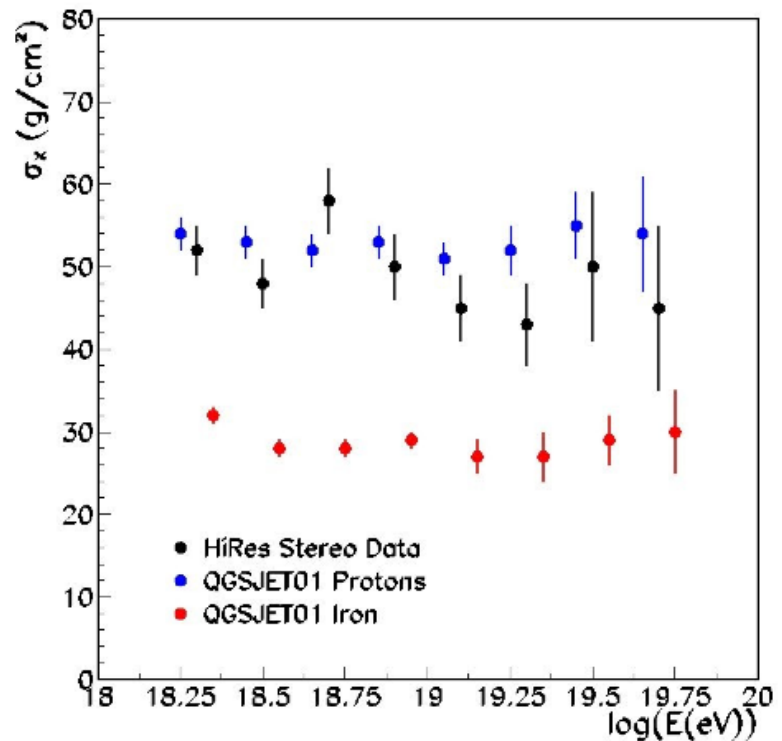
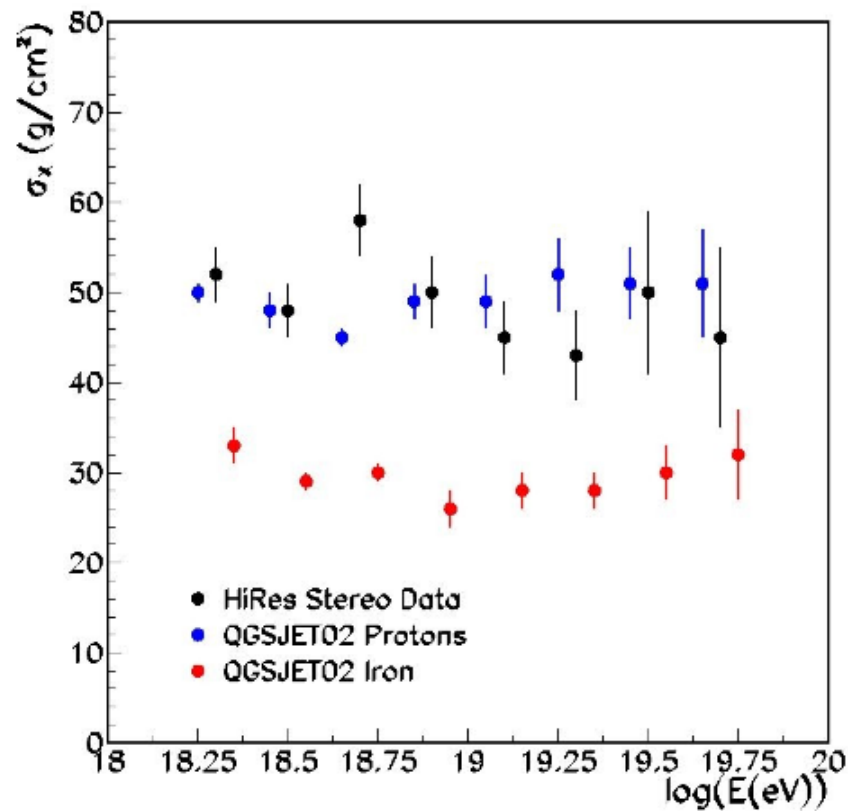


FIG. 2 (color online). The apertures (defined as the product of collection area and solid angle) of the HiRes-I and HiRes-II detectors operating in monocular mode.

XMAXの分散 最大値は 5σ

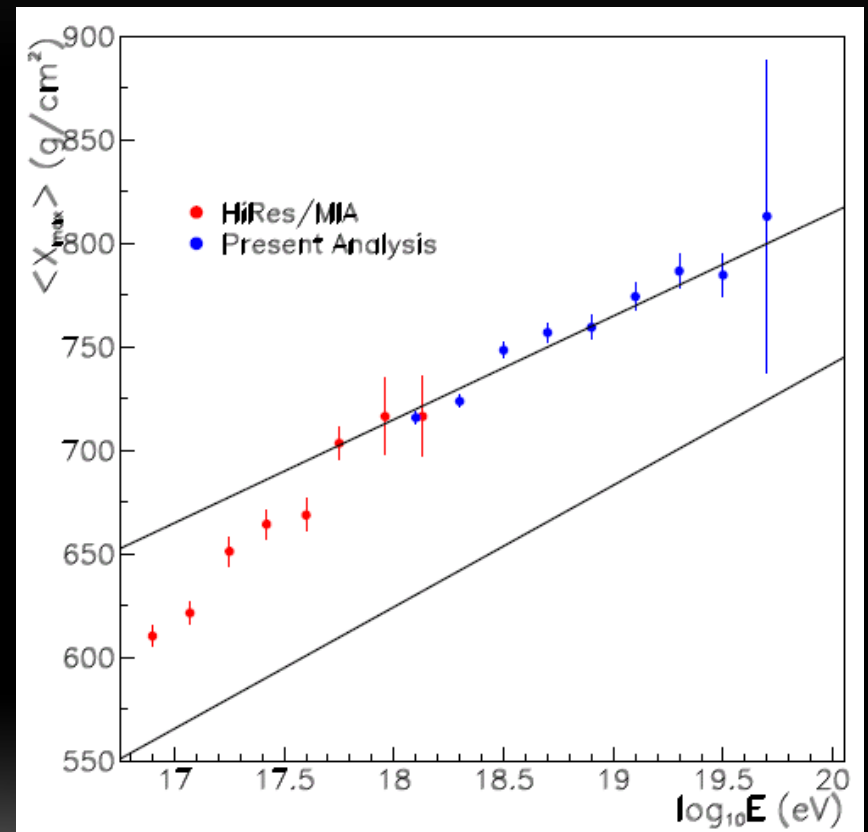


COMPOSITION

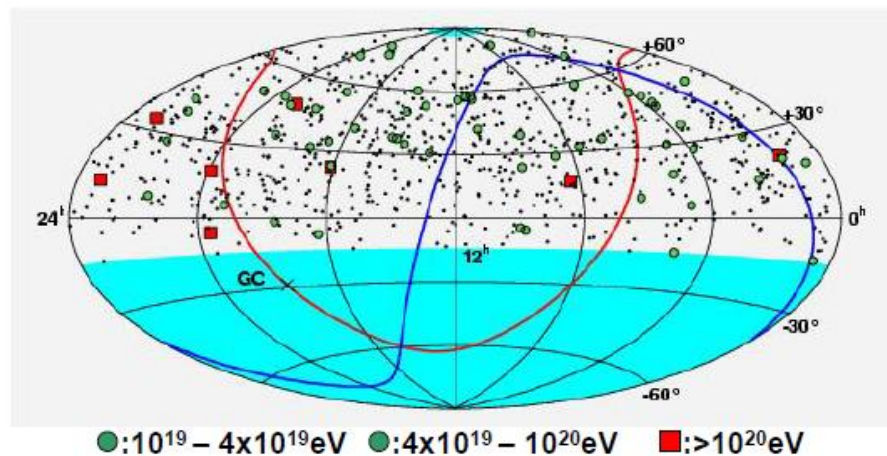
- Elongation rate used to measure composition

$$X_{max} = \lambda \frac{\log(E_0/E_C)}{\log 2} \propto \log(E_0)$$

- Compare to pure Monte Carlo
 - Proton and Iron
 - Analyzed using full detector simulation and reconstruction
- Consistent with light composition
 - MIA result shows changing composition

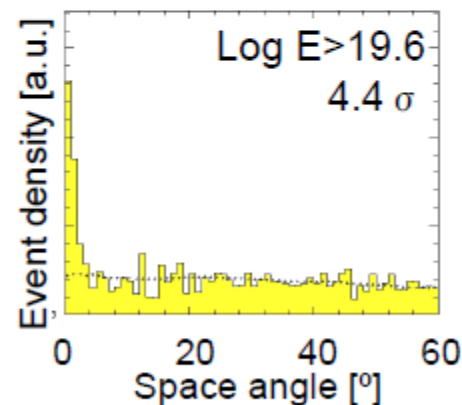
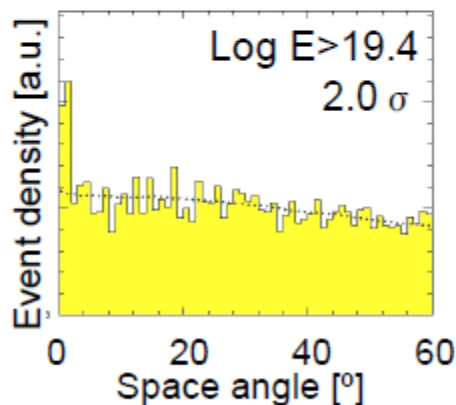
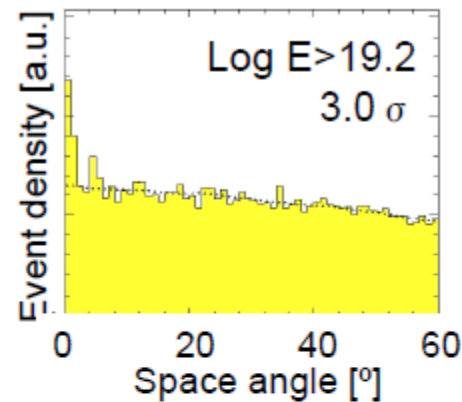
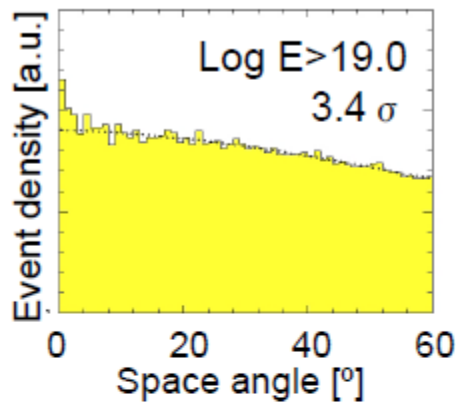


Arrival direction distribution ($>10^{19}\text{eV}$; $\theta < 50^\circ$)



- No large scale anisotropy

Space angle distribution of events



- **Significant peak @ 0 degree**
 - implying presence of compact EHECR sources