

Ultra-high energy cosmic rays: status and prospects in 2015

ICRR seminar, Nov. 25, 2015

M. Fukushima, ICRR



Experiments

- Haverah Park, AGASA, FY/HiRes, Yakutsk
- Auger: Pierre Auger Observatory (PAO)
TA: Telescope Array experiment
- TAx4, Auger Prime, K-EUSO
- TALE, HEAT, Tunka/-REX, NICHE, LOFAR, AERA, ICETOP
- JEM/EUSO, super Ground Array

TA: construction (2003 -), taking data (2007 -), ~7 years of data



5 countries, 126 researchers



Telescope Array Collaboration

R.U. Abbasi¹, M. Abe¹³, T.Abu-Zayyad¹, M. Allen¹, R. Anderson¹, R. Azuma², E. Barcikowski¹, J.W. Belz¹, D.R. Bergman¹, S.A. Blake¹, R. Cady¹, M.J. Chae³, B.G. Cheon⁴, J. Chiba⁵, M. Chikawa⁶, W.R. Cho⁷, T. Fujii⁸, M. Fukushima^{8,9}, T. Goto¹⁰, W. Hanlon¹, Y. Hayashi¹⁰, N. Hayashida¹¹, K. Hibino¹¹, K. Honda¹², D. Ikeda⁸, N. Inoue¹³, T. Ishii¹², R. Ishimori², H. Ito¹⁴, D. Ivanov¹, C.C.H. Jui¹, K. Kadota¹⁶, F. Kakimoto², O. Kalashev¹⁷, K. Kasahara¹⁸, H. Kawai¹⁹, S. Kawakami¹⁰, S. Kawana¹³, K. Kawata⁸, E. Kido⁸, H.B. Kim⁴, J.H. Kim¹, J.H. Kim²⁵, S. Kitamura², Y. Kitamura², V. Kuzmin¹⁷, Y.J. Kwon⁷, J. Lan¹, S.I. Lim³, J.P. Lundquist¹, K. Machida¹², K. Martens⁹, T. Matsuda²⁰, T. Matsuyama¹⁰, J.N. Matthews¹, M. Minamino¹⁰, K. Mukai¹², I. Myers¹, K. Nagasawa¹³, S. Nagataki¹⁴, T. Nakamura²¹, T. Nonaka⁸, A. Nozato⁶, S. Ogio¹⁰, J. Ogura², M. Ohnishi⁸, H. Ohoka⁸, K. Oki⁸, T. Okuda²², M. Ono¹⁴, A. Oshima¹⁰, S. Ozawa¹⁸, I.H. Park²³, M.S. Pshirkov²⁴, D.C. Rodriguez¹, G. Rubtsov¹⁷, D. Ryu²⁵, H. Sagawa⁸, N. Sakurai¹⁰, A.L. Sampson¹, L.M. Scott¹⁵, P.D. Shah¹, F. Shibata¹², T. Shibata⁸, H. Shimodaira⁸, B.K. Shin⁴, J.D. Smith¹, P. Sokolsky¹, R.W. Springer¹, B.T. Stokes¹, S.R. Stratton^{1,15}, T.A. Stroman¹, T. Suzawa¹³, M. Takamura⁵, M. Takeda⁸, R. Takeishi⁸, A. Taketa²⁶, M. Takita⁸, Y. Tameda¹¹, H. Tanaka¹⁰, K. Tanaka²⁷, M. Tanaka²⁰, S.B. Thomas¹, G.B. Thomson¹, P. Tinyakov^{17,24}, I. Tkachev¹⁷, H. Tokuno², T. Tomida²⁸, S. Troitsky¹⁷, Y. Tsunesada², K. Tsutsumi², Y. Uchihori²⁹, S. Udo¹¹, F. Urban²⁴, G. Vasiloff¹, T. Wong¹, R. Yamane¹⁰, H. Yamaoka²⁰, K. Yamazaki¹⁰, J. Yang³, K. Yashiro⁵, Y. Yoneda¹⁰, S. Yoshida¹⁹, H. Yoshii³⁰, R. Zollinger¹, Z. Zundel¹

1 University of Utah 2 Tokyo Institute of Technology 3 Ewha Womans University 4 Hanyang University
5 Tokyo University of Science 6 Kinki University 7 Yonsei University 8 ICRR, University of Tokyo
9 IPMU, the University of Tokyo 10 Osaka City University 11 Kanagawa University 12 University of Yamanashi
13 Saitama University 14 Astrophysical Big Bang Laboratory RIKEN, Wako 15 Rutgers University
16 Tokyo City University 17 INR of the Russian Academy of Sciences 18 Waseda University
19 Chiba University 20 KEK 21 Kochi University 22 Ritsumeikan University 23 Sungkyunkwan University
24 Universite de Libre de Bruxelles 25 Ulsan National Institute of Science and Technology
26 ERI, University of Tokyo 27 Hiroshima City University 28 Advanced Science Institute, RIKEN
29 National Institute of Radiological Science 30 Ehime University

Auger: construction (2000 -), taking data (2004 -), ~10 years of data

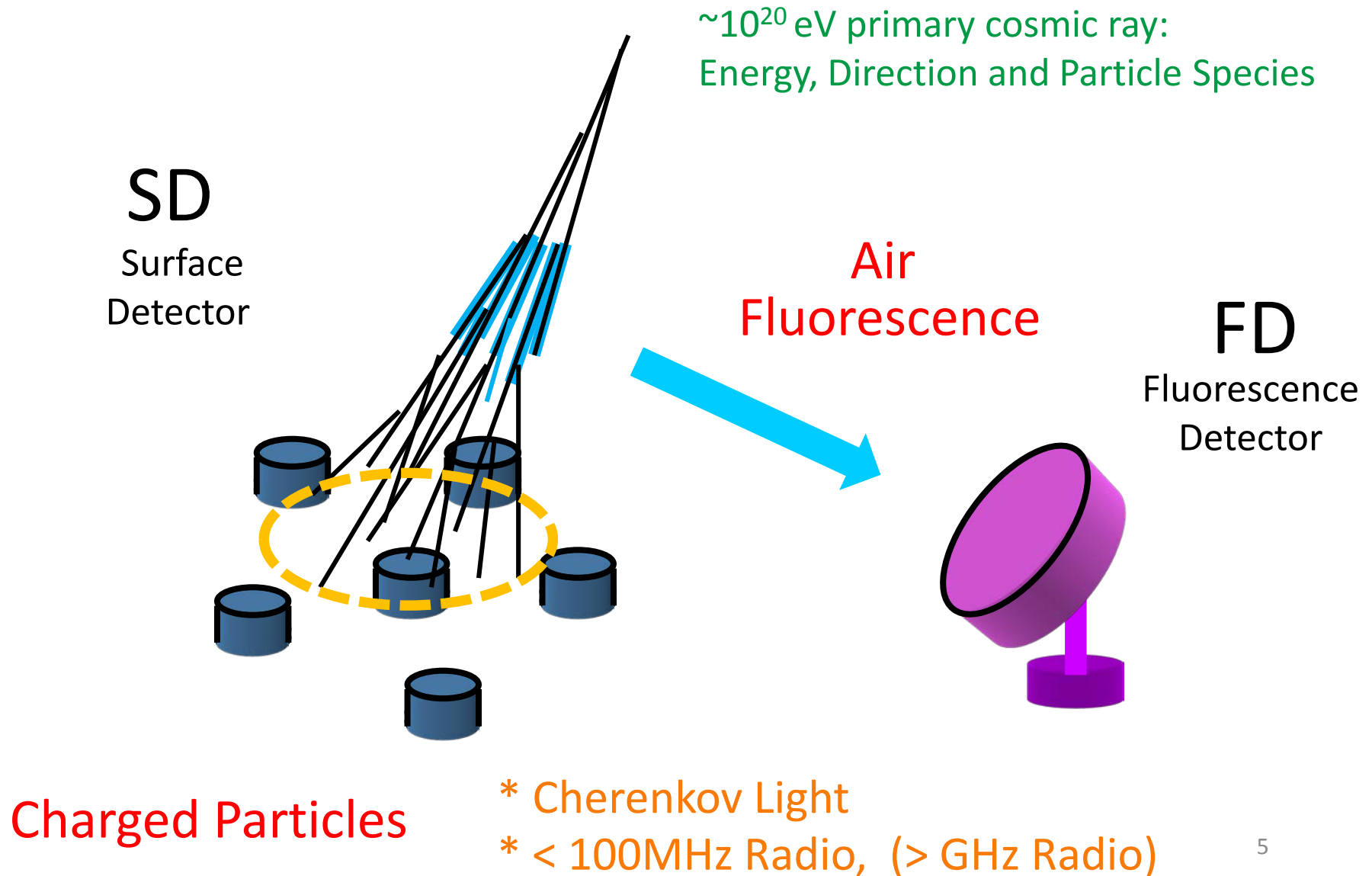
The Pierre Auger Collaboration

≈ 500 members, from 16 countries and 86 institutions

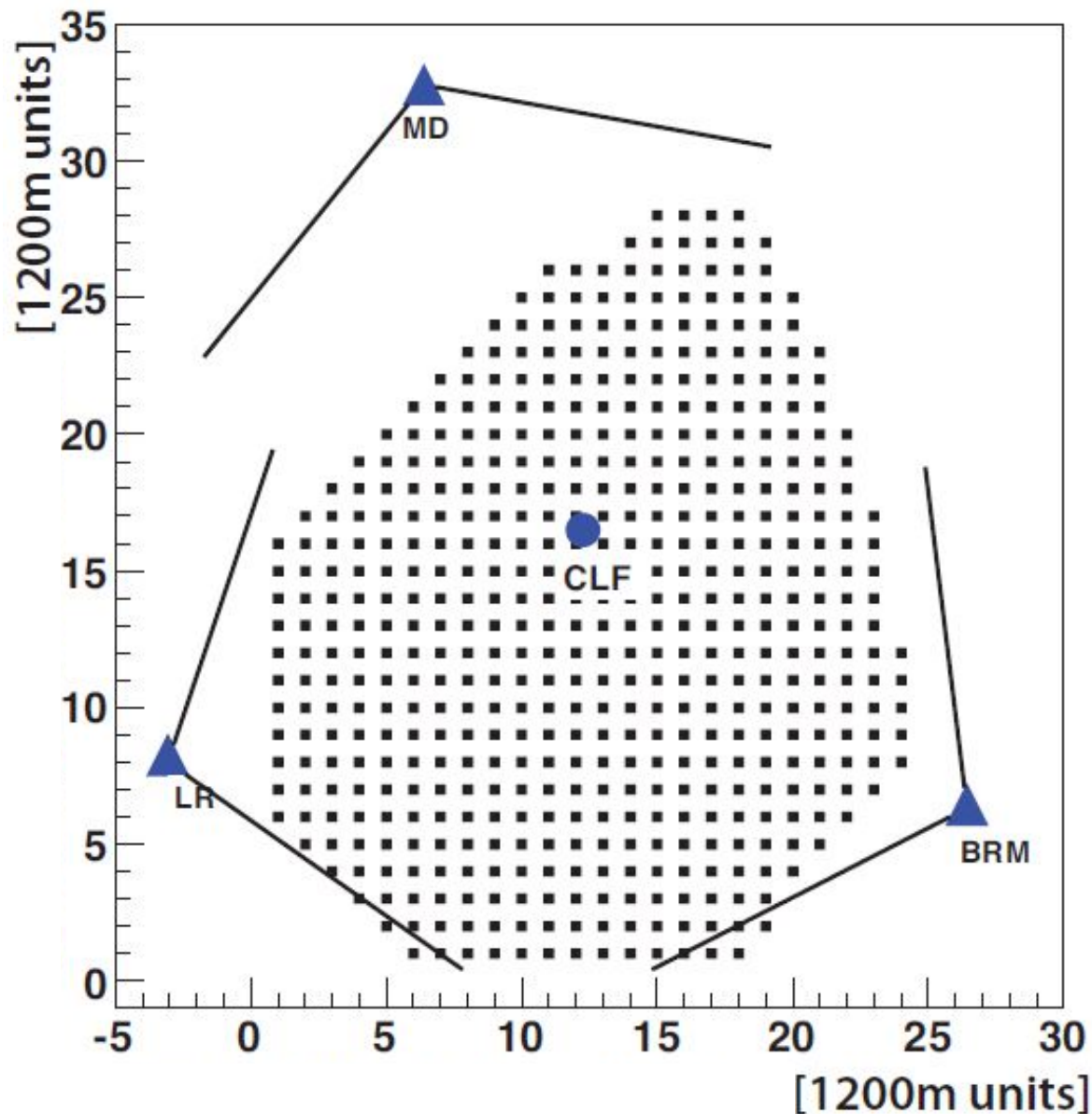


Without them, the construction and the smooth operation of the Observatory,
- and the harvest of results presented here - would not have been possible

Calorimetric Measurement of Air Shower



Telescope Array (TA)



~700 km² by 507
Plastic Scintillator SDs
and 3 FD stations

Utah, USA
39° N, 113° W
1400 m a.s.l.



Fluorescence Detector

FD@MD

TALE FD

FD@BRM

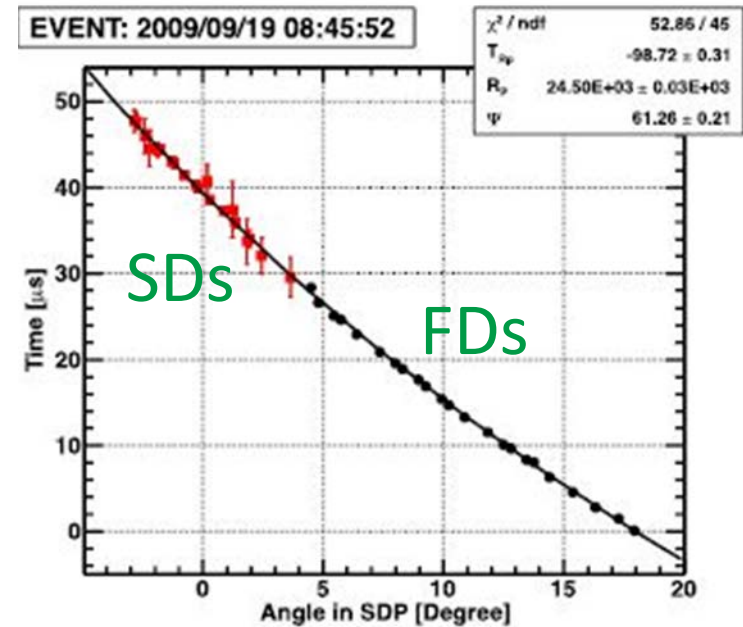
- -HV operation and DC coupled
- 12-bit 40 MHz FADC $\rightarrow$ 14-bit 10MHz
- Online night-sky BG subtraction
- $5-6 \sigma$ signal recognition @ each PMT
- 5 or more adjacent PMTs for trigger
- 30 ms readout dead time per trigger
- ~ 2 Hz trigger (~ 7 Hz by freq. airplanes)



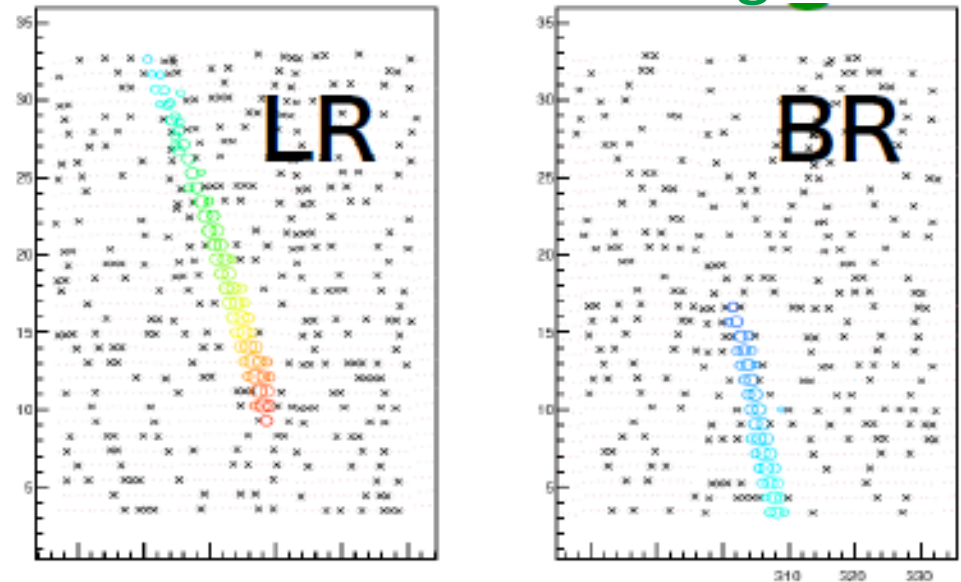


FD Event Reconstruction (monocular, hybrid, stereo)

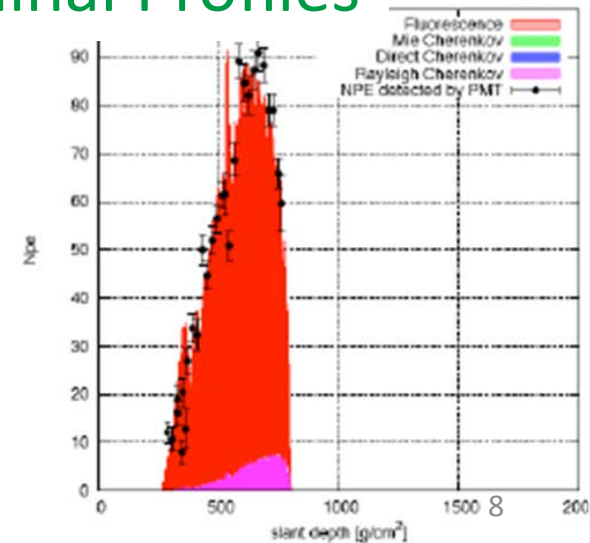
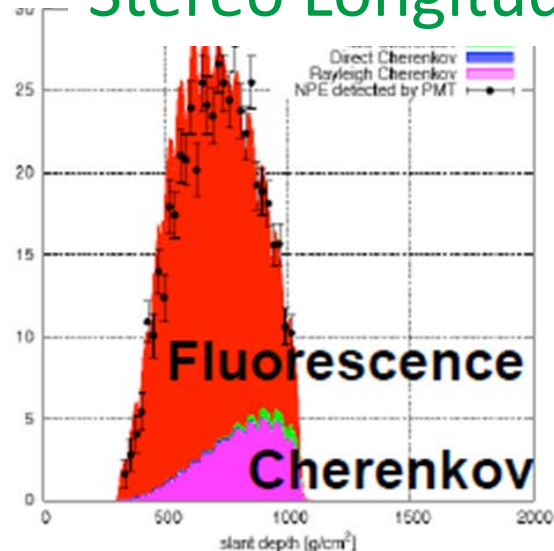
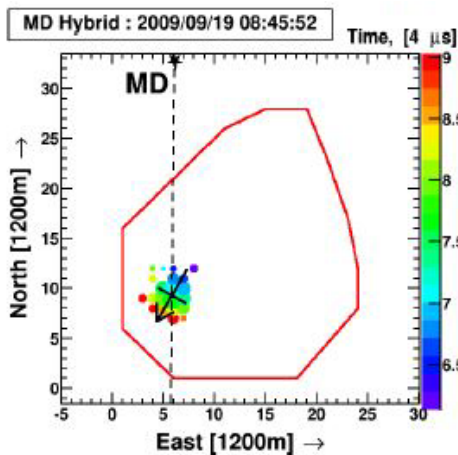
Hybrid Timings



Stereo Camera Images



Stereo Longitudinal Profiles



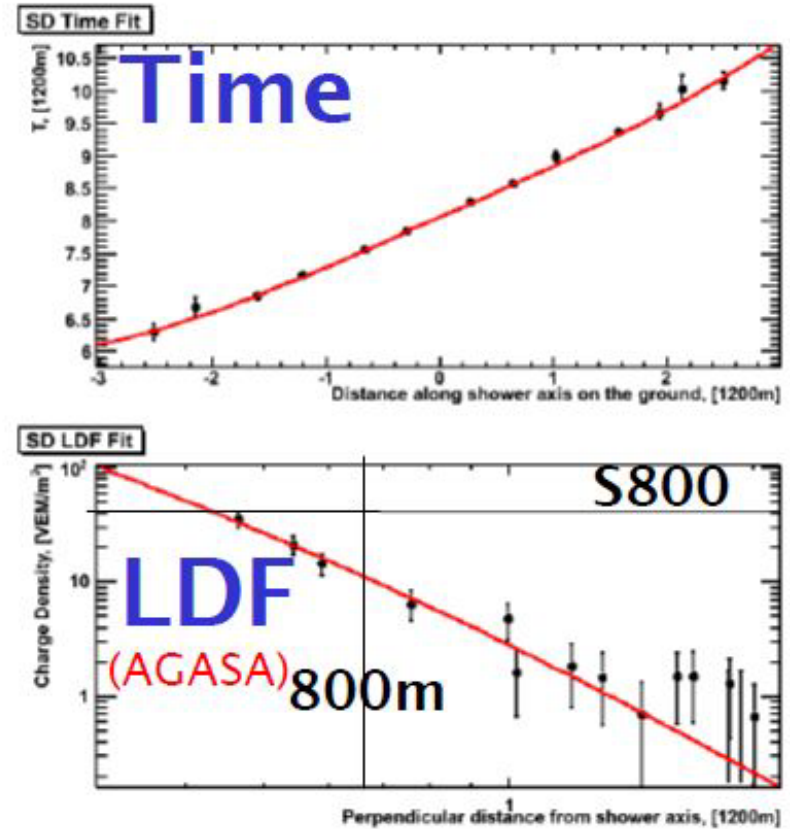
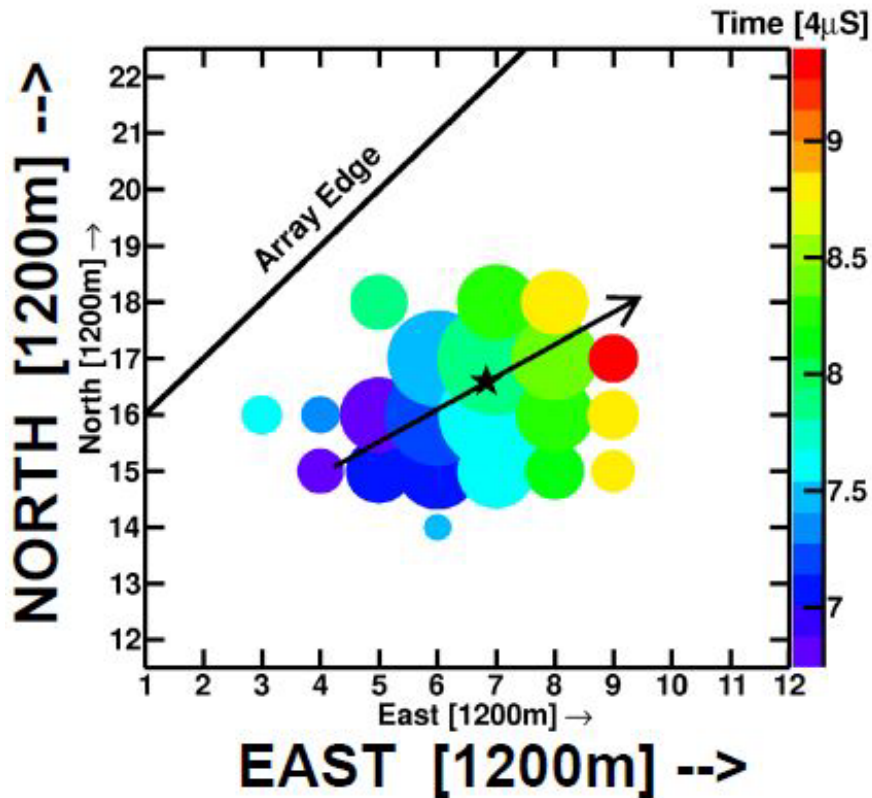


Surface Detector

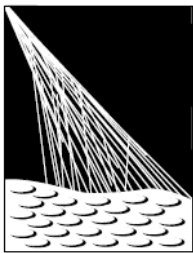


- 12-bit 50 MHz H/L FADC, 16-bit equiv.
- GPS time stamp (~ 10 ns)
- 0.3 MIP 2-fld (top x bottom) wf buff.
→ 700 Hz histo. for gain calibration
- Trigger by 3 MIP, 3 SDs in 8 μ s coincidence
→ All wf readout by 2.4 GHz radio LAN
- Pipelined (no dead time)
- Average 7 Watt by solar panel + battery

SD Event Reconstruction



- S(800m) $\rightarrow$ Energy by MC (QGSJET2-03)
- Zenith attenuation by MC (not by CIC)



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Pierre Auger Observatory

~3000 km² by ~1600 water tank SDs, 4 FD stations
Marlague, Argentina, 35° S 69° W, ~1300 m a.s.l.

THE NEW DETECTORS

WUNDHEILER #324



SD-750 m
61 WCD 750 M SPACING: 25 KM²
ENGINEERING ARRAY OF 7
BURIED MUON DETECTORS
COMPLETED FEBRUARY 2015

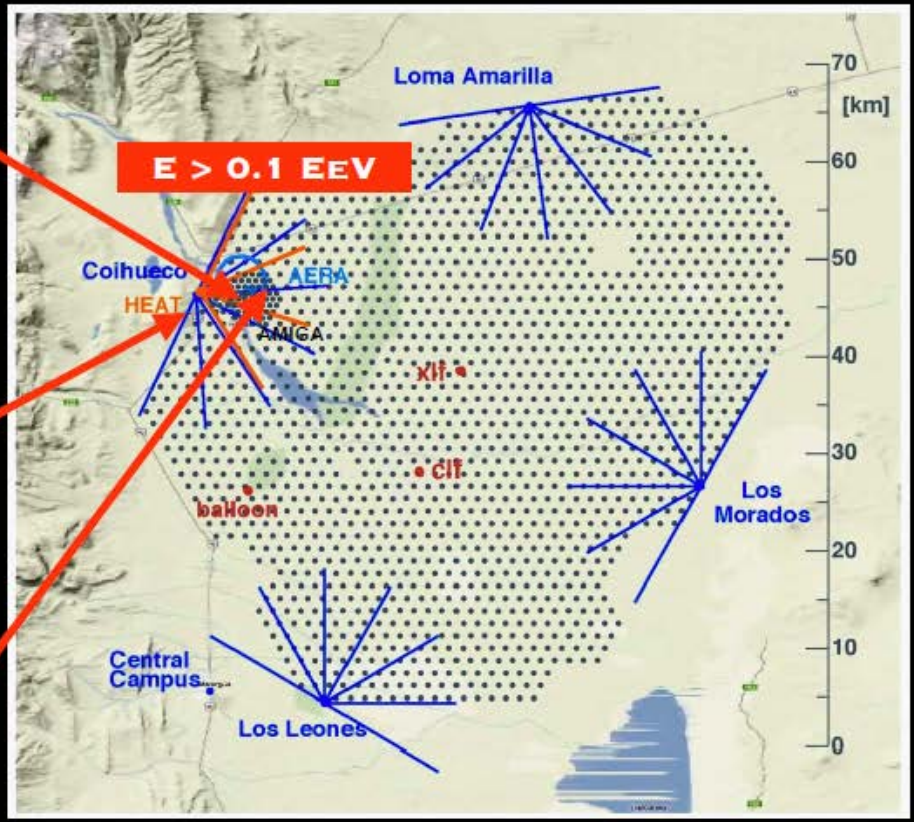


HEAT
153 RADIO ANTENNAS
GRADED 17 KM² ARRAY
COMPLETED APRIL 2015



AERA
SCHULZ #615

The Pierre Auger Observatory, Argentina



THE INITIAL DETECTORS



RPC
A VERY PRECISE
RPC MUON-ROSCOPES
Tank
RPC
ASSIS #620
A COMPLEX DATA-QUALITY
DATABASE FOR 22000 PMTs IN
10 YR OF OPERATION:
50 MILLIONS OF RECORDS



SALINA #594
UPGRADE OF THE LASER
FACILITY: RAMAN-LIDAR



MEDINA #624

Highlights of the Pierre Auger Observatory

after ≈ 10 years of operation (and ≈ 20 years from the conception)



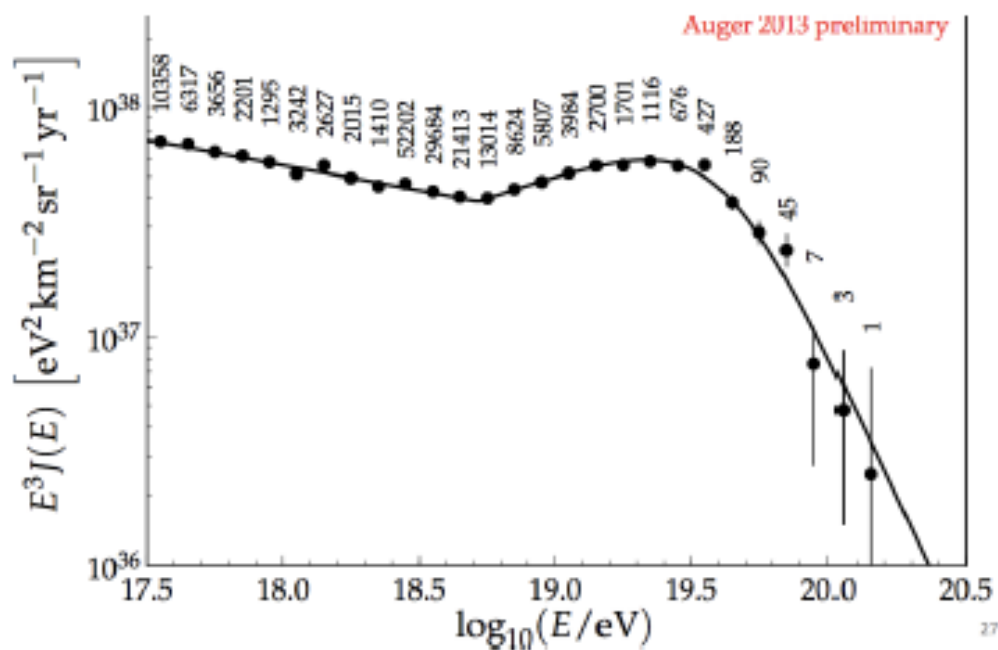
Energy Spectrum

Ankle and Cutoff

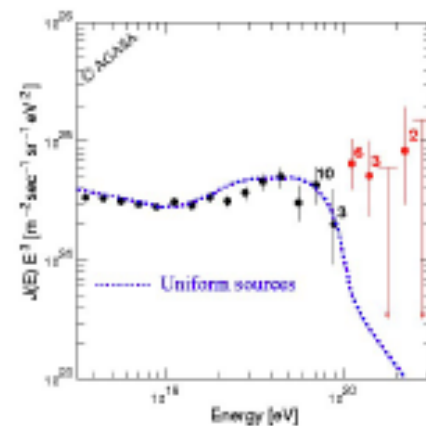
Cutoff Energy と形状の違い

Astrophysical Pictures?

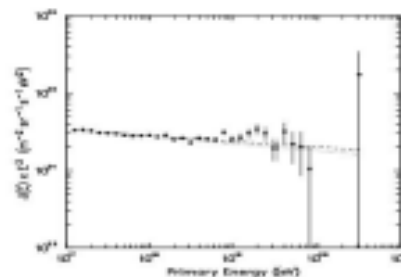
Energy Spectrum: Fly's Eye (1993), AGASA(1998) and PAO (2013)



Big Progress!

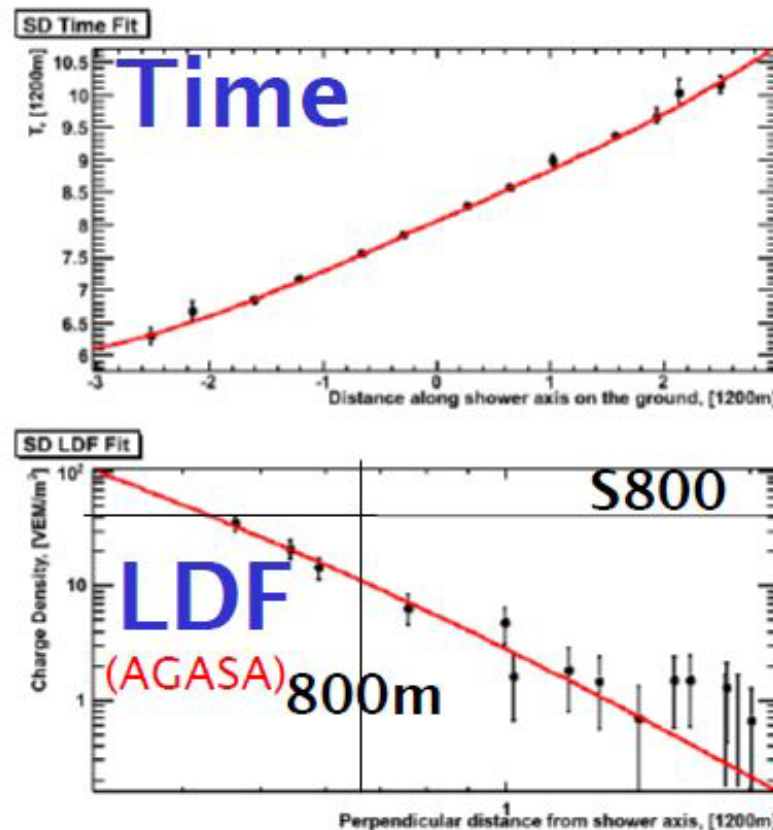
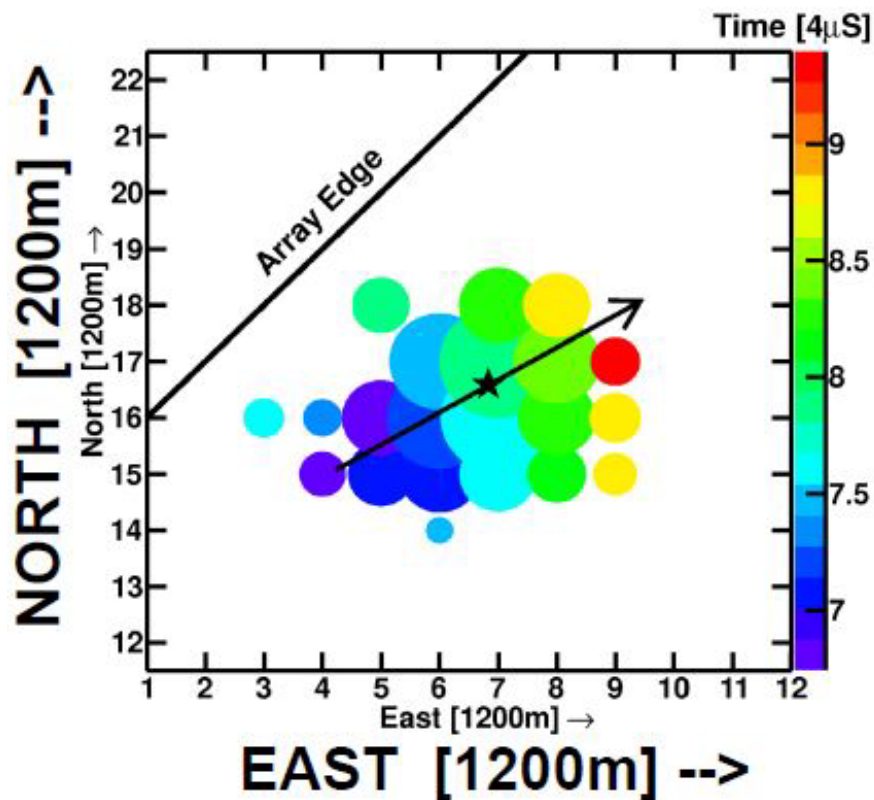


AGASA



Fly's Eye Mono

SD Event Reconstruction

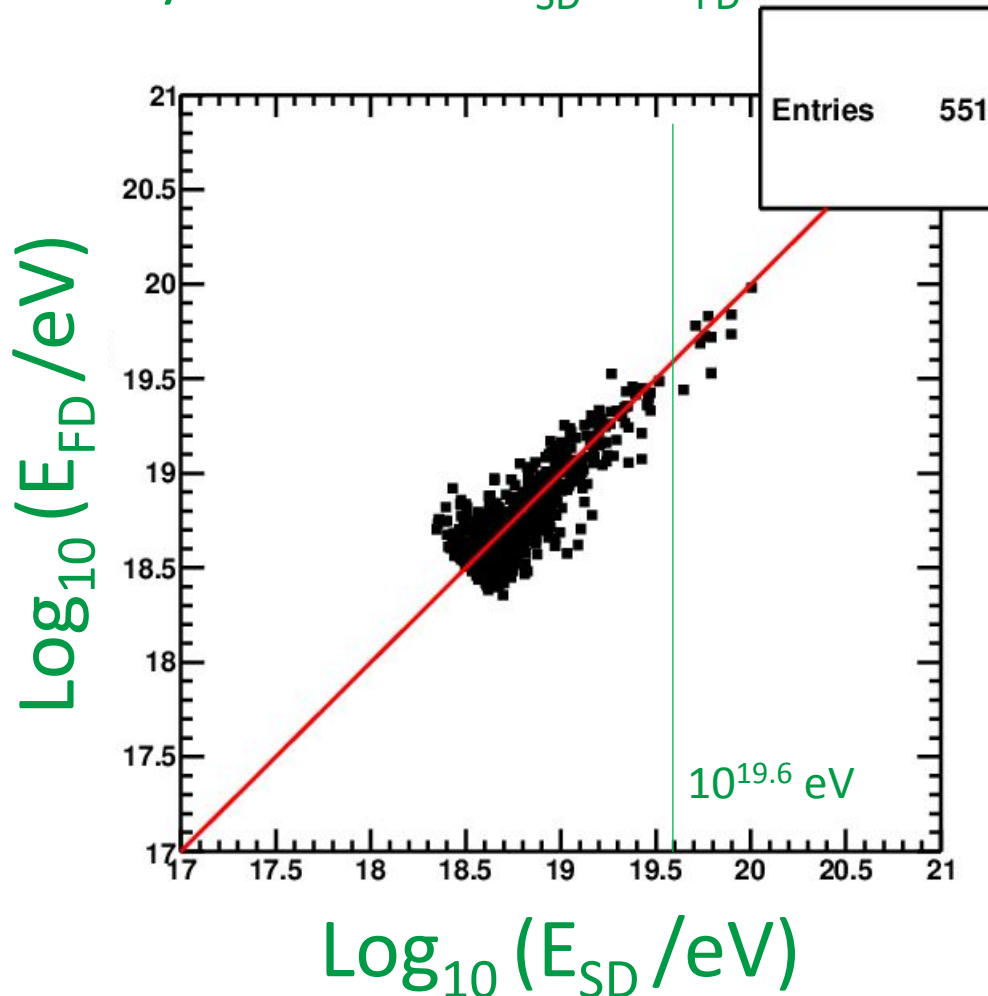


- S(800m) $\rightarrow$ Energy by MC (QGSJET2-03)
- Zenith attenuation by MC (not by CIC)



SD Energy Rescaling

551 Hybrid Events: E_{SD} vs E_{FD}



We rescale MC-S(800m) based SD energy by FD energy:

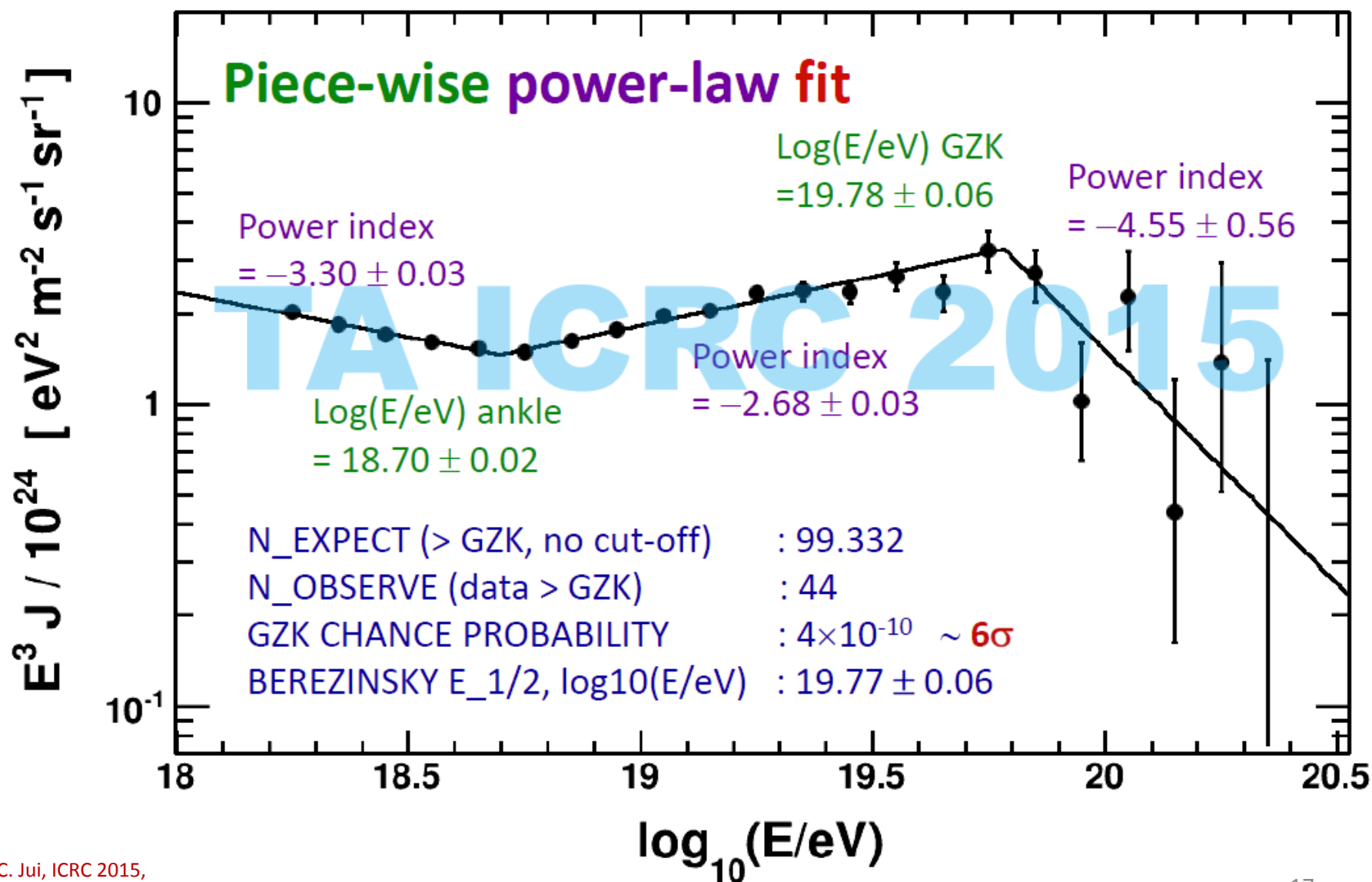
$$E_{SD} = E_{SD}^{MC-S(800)} / 1.27$$

21% energy scale error

- Telescope Parameters
- Fluorescence Yield
- Atmospheric Attenuation
- Missing Energy

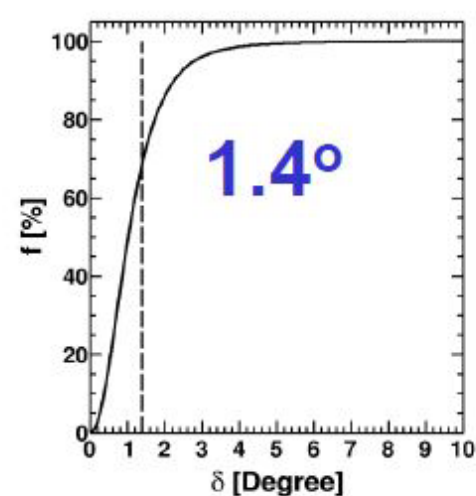
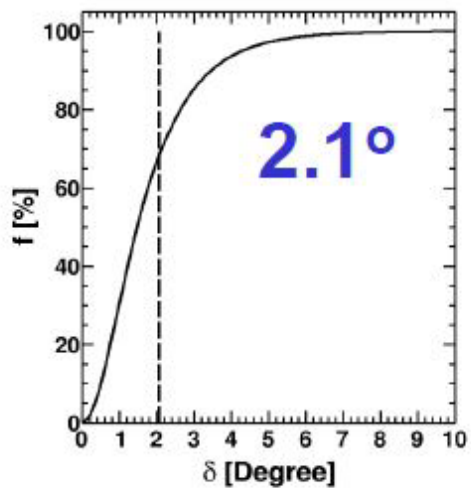
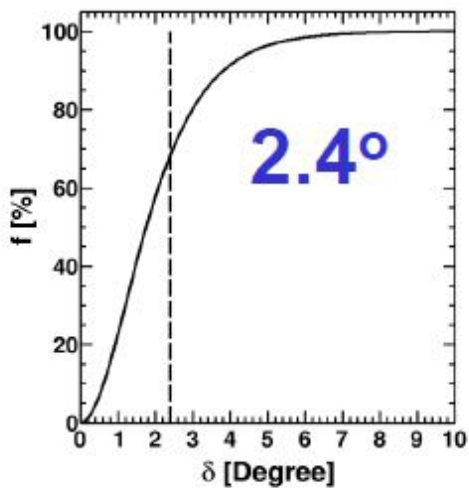
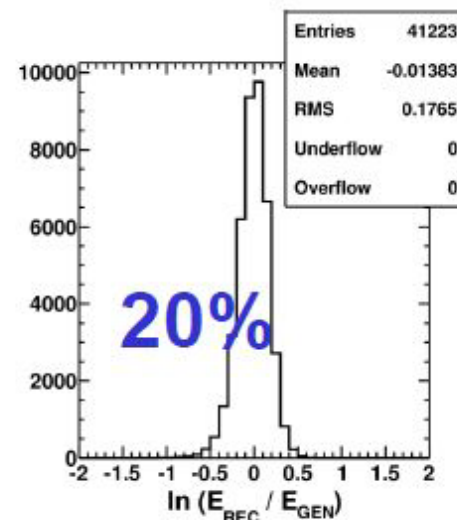
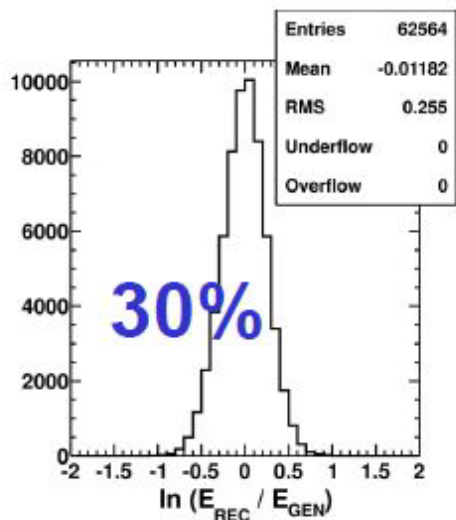
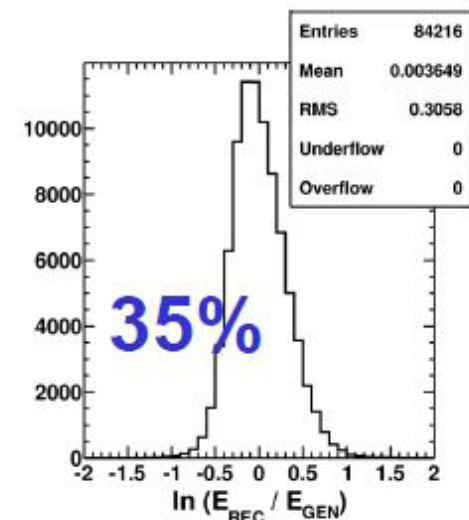


SD 7-year Spectrum ($E^3 \times \text{Diff. Flux}$)





SD Energy and Angular Resolution



$10^{18} - 10^{18.5}$ eV

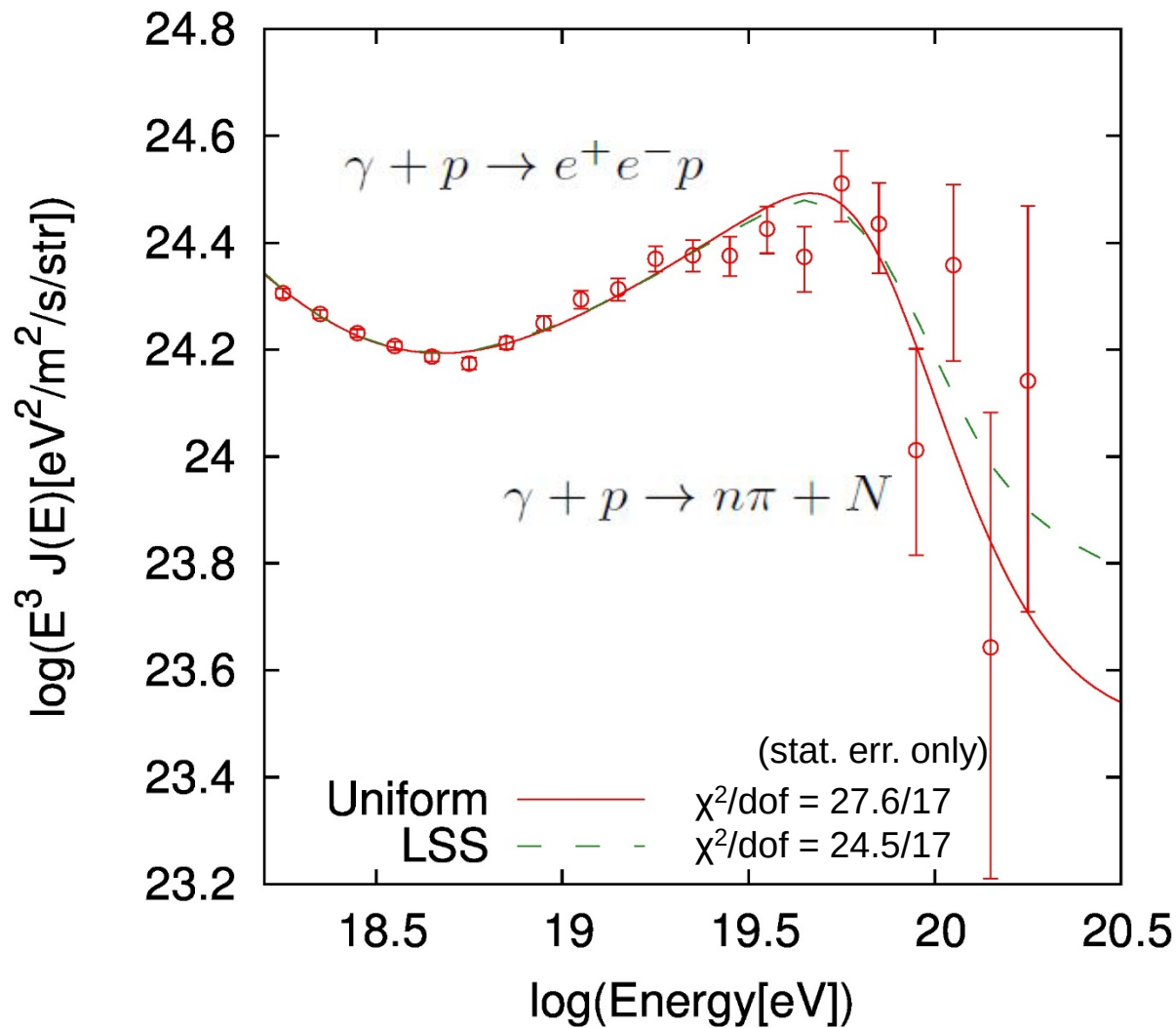
$10^{18.5} - 10^{19.0}$ eV

$10^{19.0} - 10^{20.5}$ eV

CORSIKA / QGSJET2-03 used



SD 7-year Spectrum fitted with extra-Galactic Proton



Cosmic Ray Generation

$$E^{-p} (1+z)^{(3+m)}$$

$$E_{\text{max}} = 10^{21} \text{eV}$$

CR Propagation and E-Loss

Photon Targets:

CMB + IR

Interactions:

Photoprod. + Pair Creation

No B field (Gal. or ex-Gal.)

4-parameter fit

1. X: **Energy** and 2. Y: **Flux**
3. Power index: **p**
4. Cosmological evolution: **m**

E. Kido, ICRC 2015, Den Haag, #258

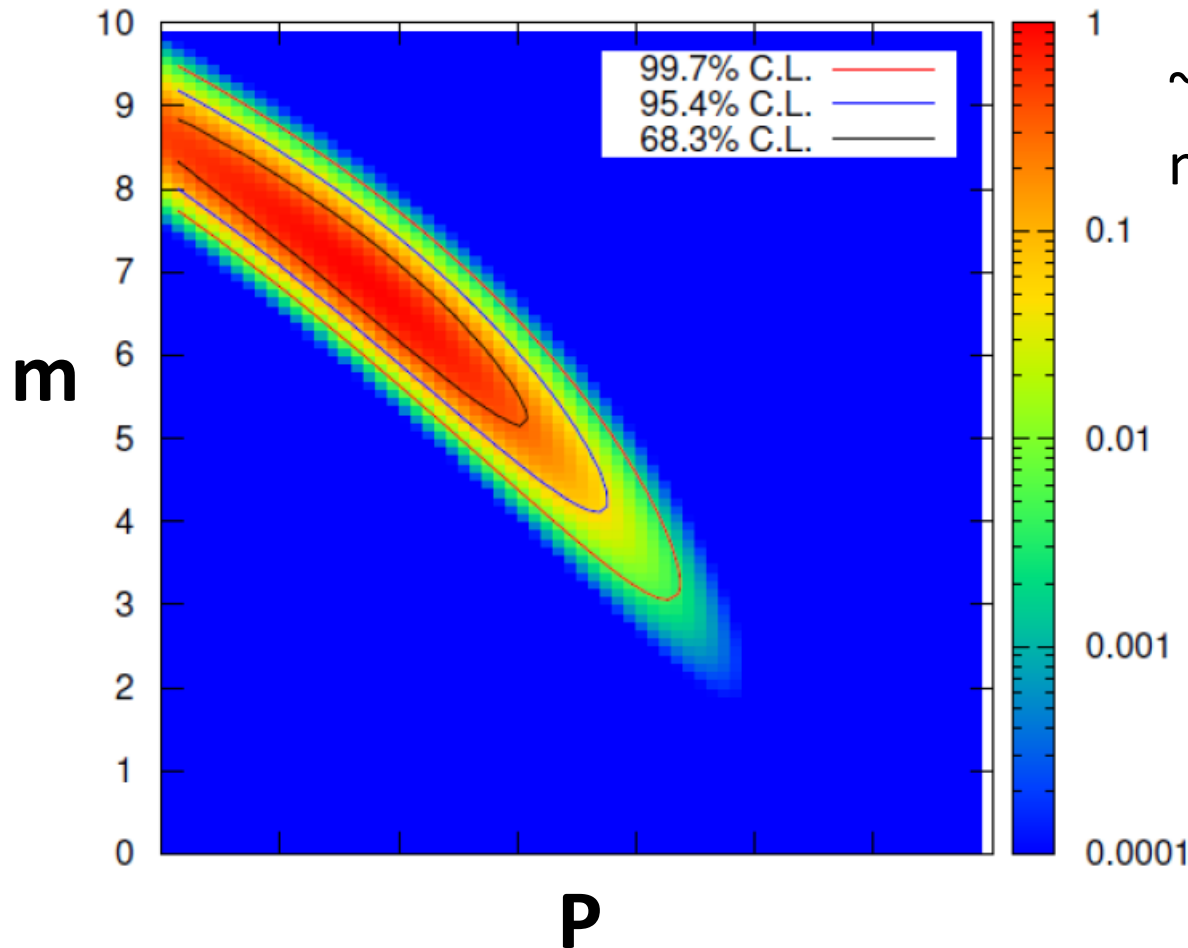
V. Berezhinsky, A. Gazizov and S. Grigorieva, PRD 74, 043005(2006)

TransportCR by O. E. Kalashev and E. Kido, JETP 147 (2015) 917 and

CRPropa by K.-H. Kampert et al., ApJ 766 (2013) 41



Allowed Region of (p, m) for uniform source



~3% sys. err. added in flux,
mainly from acceptance.

Fit results

$$p = 2.18 \quad +0.08 \quad -0.14$$

$$m = 6.8 \quad +1.6 \quad -1.1$$

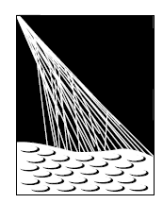
$$\Delta \log E =$$

$$-0.04 \quad +0.04 \quad -0.03$$

(-9%)

$$\chi^2_{\min}/\text{NDF} = 18.0 / 17$$

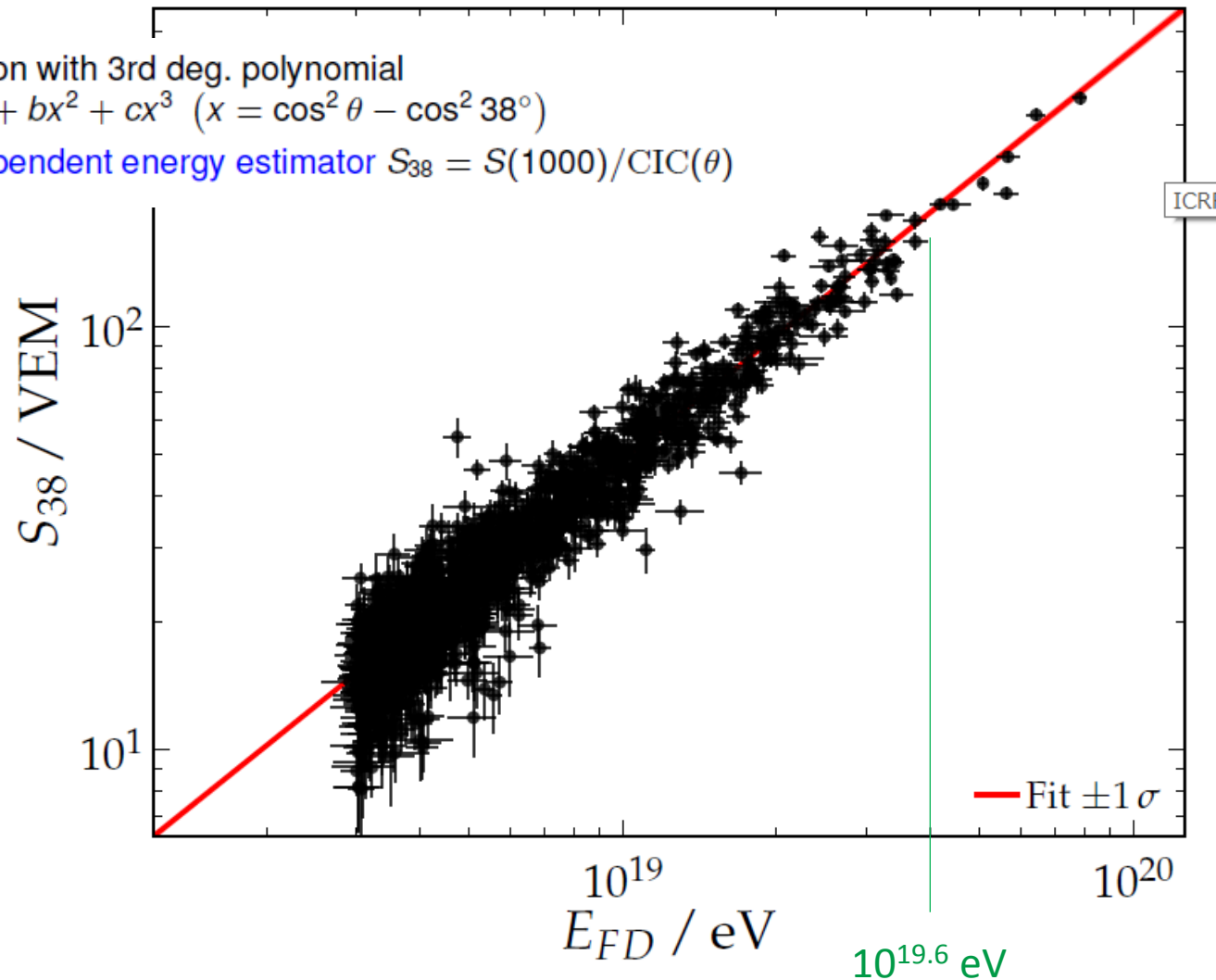
- * Acc. power index
~ Fermi 1st order (DSA)
- * Strong evolution

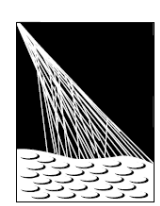


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

S38 Energy Estimator vs FD energy

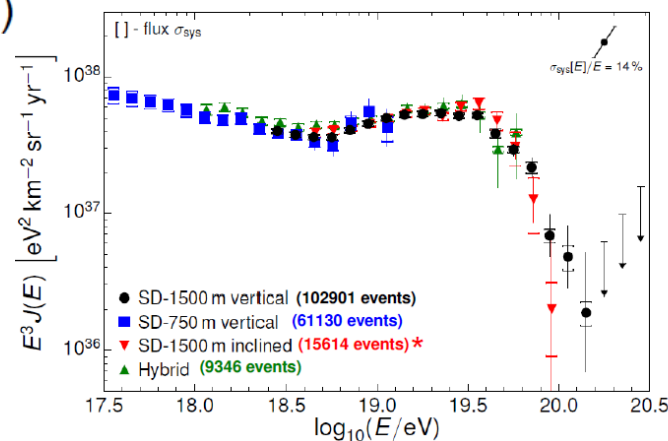
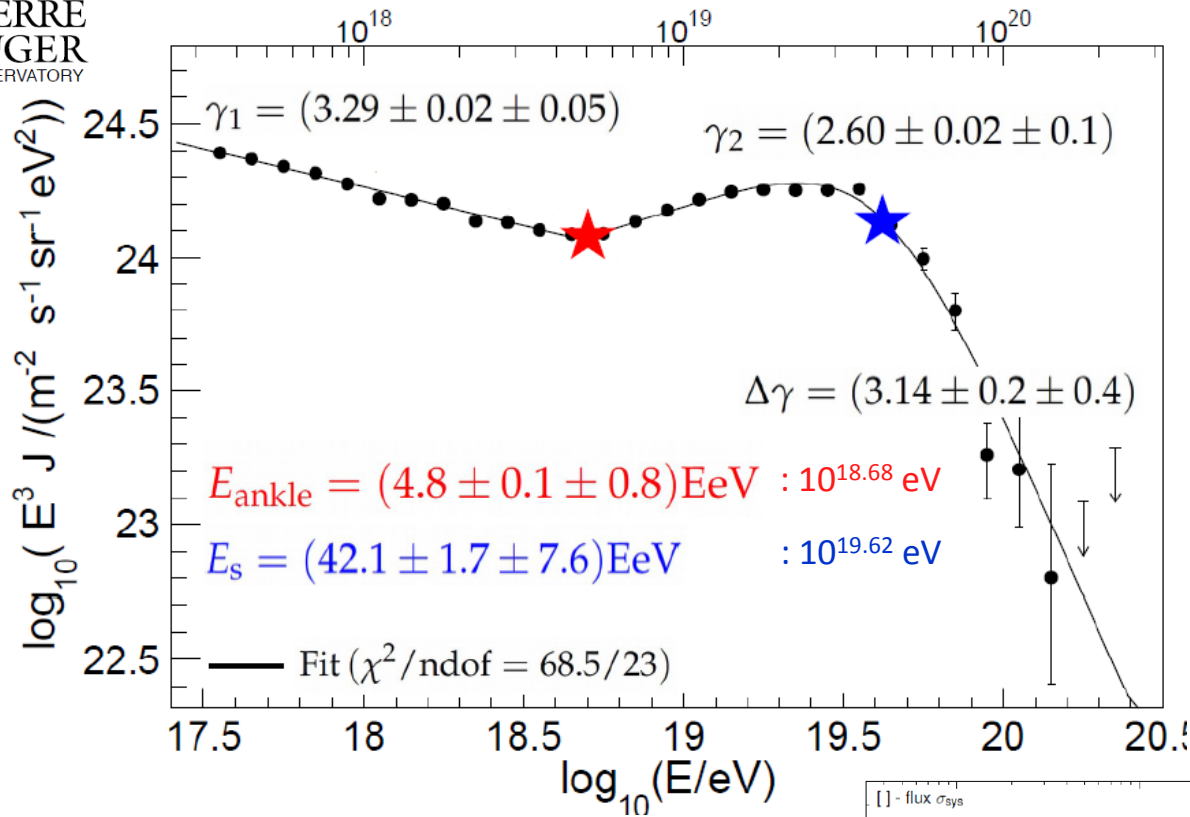
- Empirical correction with 3rd deg. polynomial
 $CIC(\theta) = 1 + ax + bx^2 + cx^3$ ($x = \cos^2 \theta - \cos^2 38^\circ$)
- Zenith angle independent energy estimator $S_{38} = S(1000)/CIC(\theta)$





PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Auger SD Energy Spectrum, 2015



Flux systematic uncertainties

SD-1500 m $\theta < 60^\circ$: 5.8%

SD-1500 m $\theta > 60^\circ$: 5%

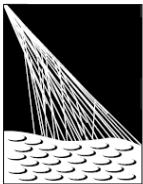
SD-750 m: 14% (<7%) at 0.3(3) EeV

Hybrid: 10%(6%) at 1(10) EeV

Energy systematic uncertainties

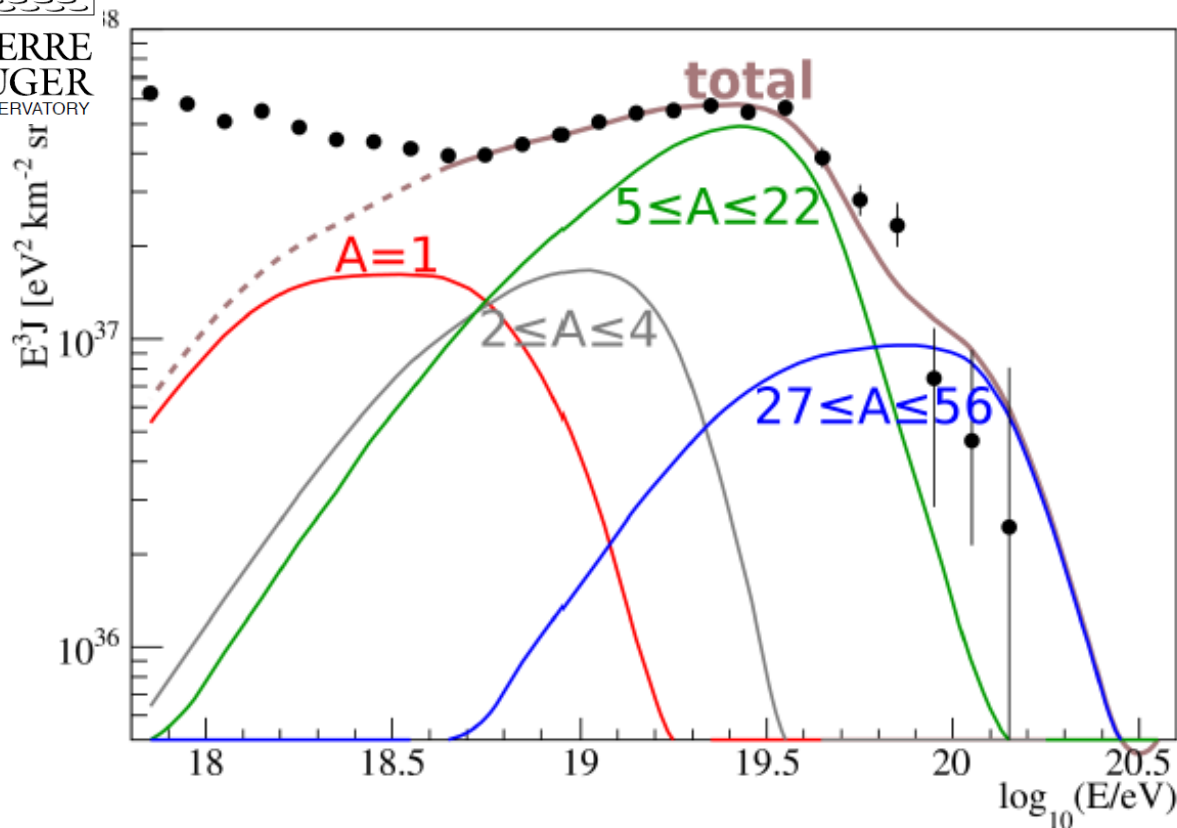
FD energy scale: 14%

Spectra corrected for finite energy resolution, responsible for event-to-event bin migration (<15% SD, <3% Hybrid)



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Auger Spectrum and Xmax fitted with p, He, N & Fe



Cosmic Ray Generation

E^-p with exp. cutoff

$$\exp(1-E/Z_i R_{\text{cut}})$$

Z_i : p, He, N & Fe

No evol. (fit only $E > 10^{18.7} \text{ eV}$)

Propagation and E-Loss

Photon: CMB, EBL

Interactions: + photonucl.

No B field

Parameter Fit

inc. Hadronic Int. Model

Best fit with

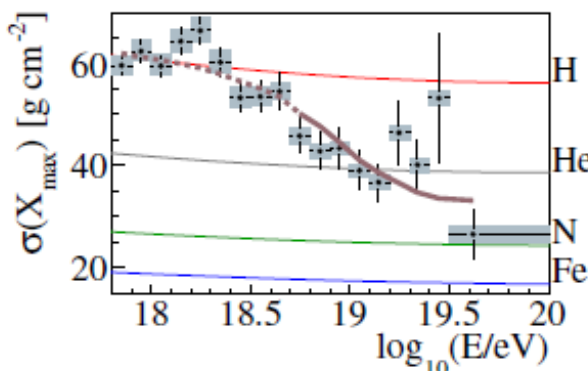
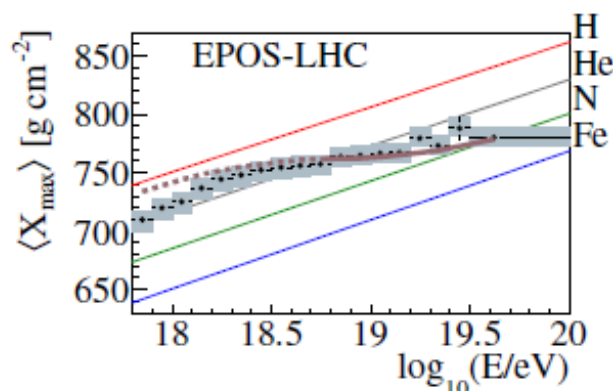
$$p = 0.94 + 0.09 - 0.10$$

$$R_{\text{cut}} = 10^{18.67 \pm 0.03} \text{ eV}$$

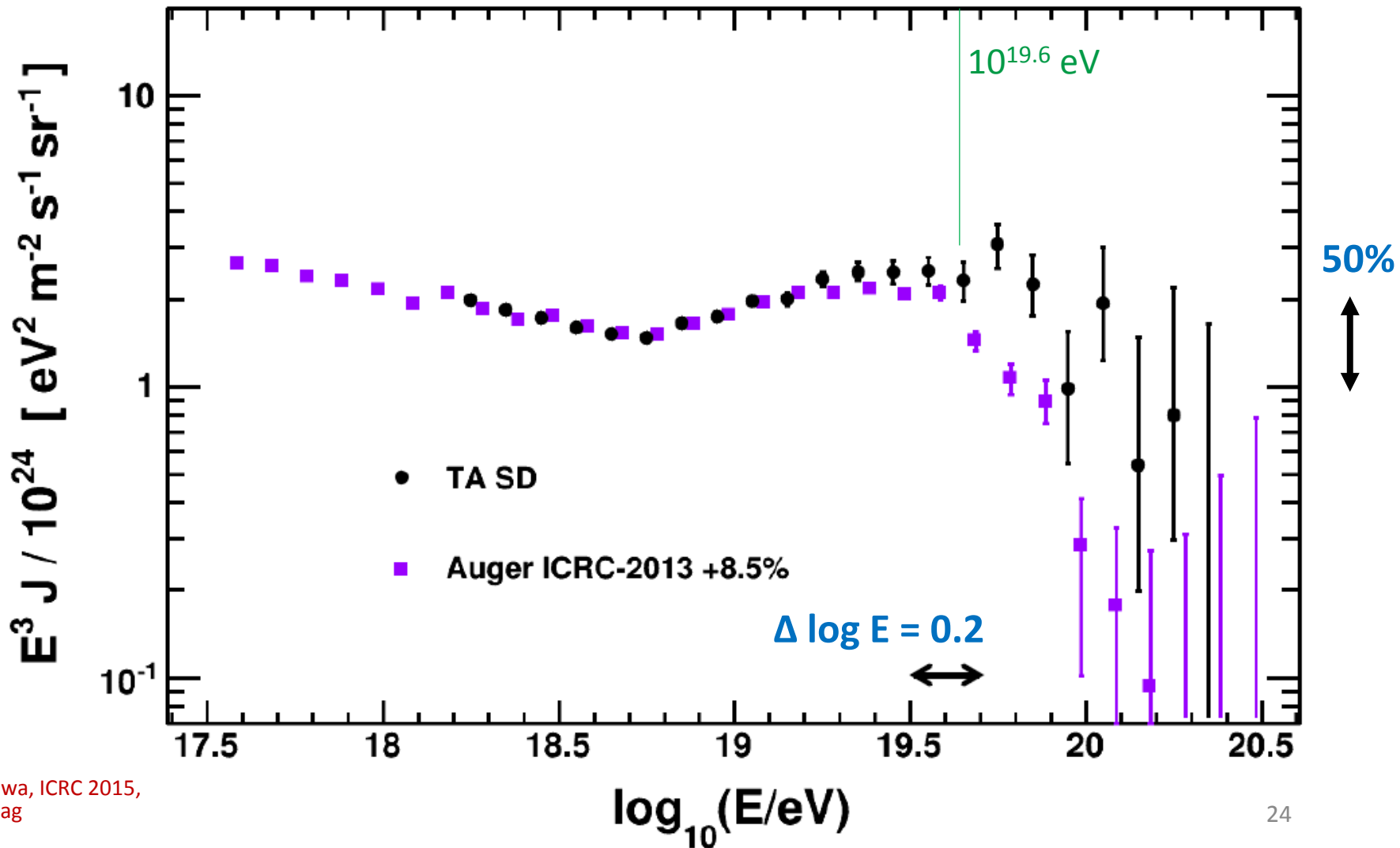
$$p/\text{He}/\text{N}/\text{Fe} =$$

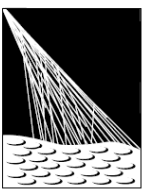
$$0, 62, 37, 1\% \text{ at } 10^{18} \text{ eV}$$

Best MC: EPOS-LHC



TA-SD (7-year) compared with Auger ICRC 2013 +8.5% in energy scale

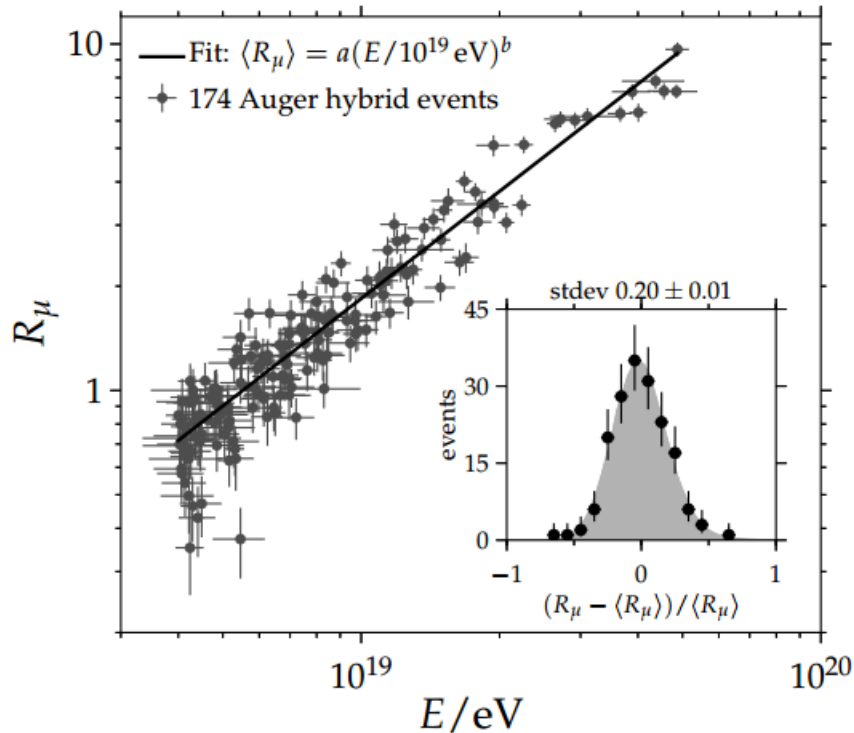




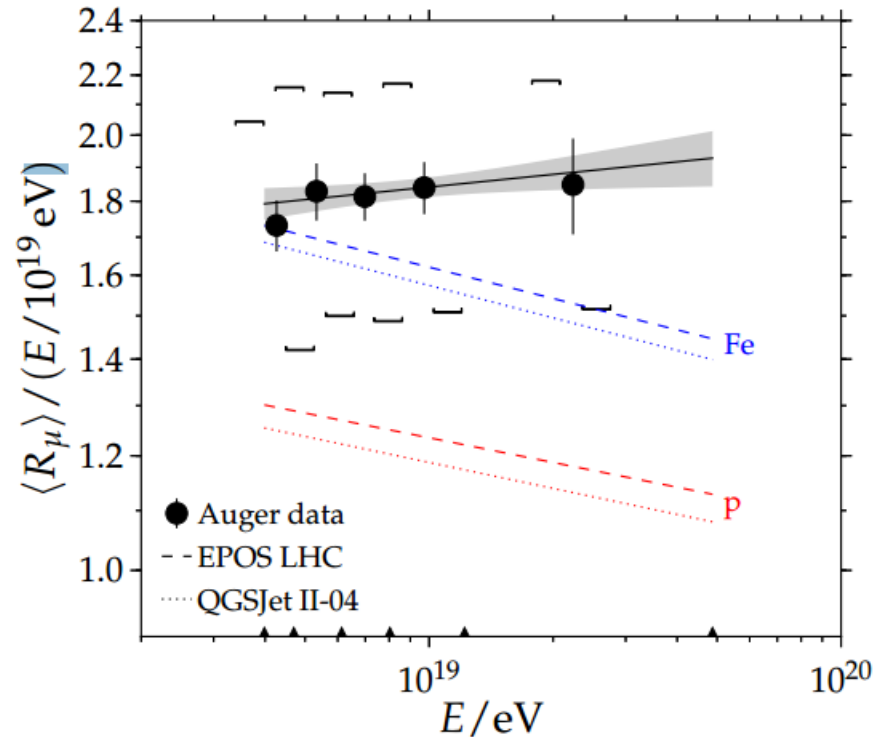
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

More Muons counted than AS simulation expects

Very inclined HE hybrid events: $E > 10^{18.6}$ eV, $62^\circ < \theta < 80^\circ$



(a) Relative muon number vs. primary energy.



(b) Comparison to air shower simulations

Composition

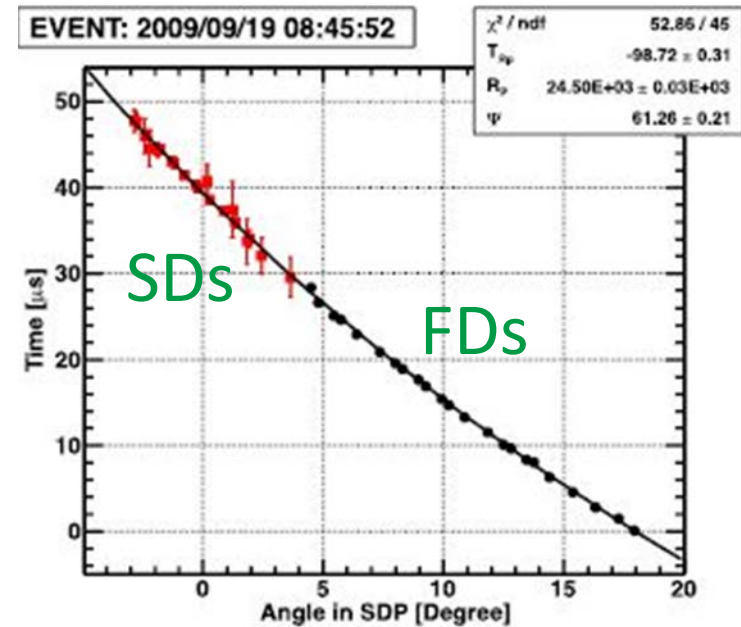
Auger: $p > \text{He} > \text{N}$, transition?

TA: p and / or He , static?

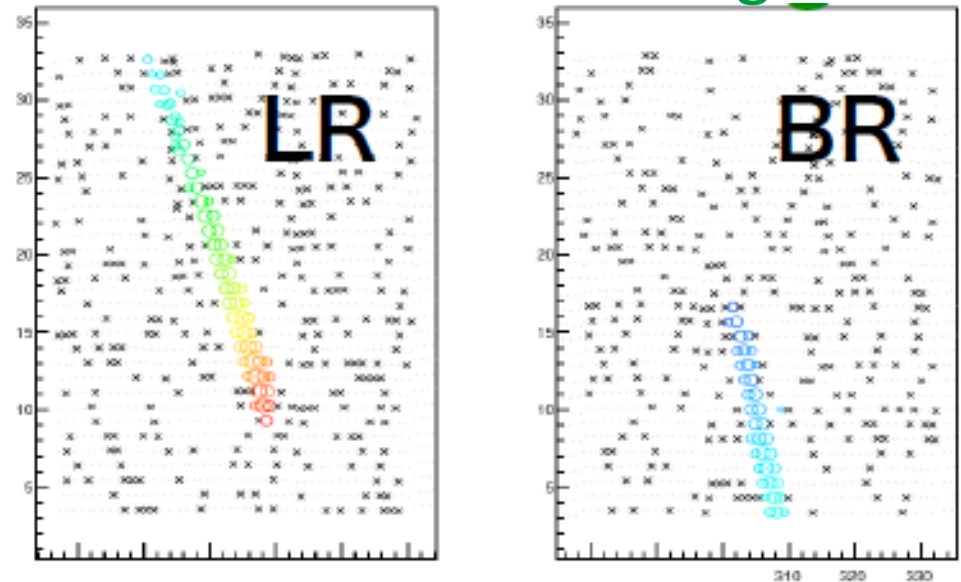


FD Event Reconstruction (monocular, hybrid, stereo)

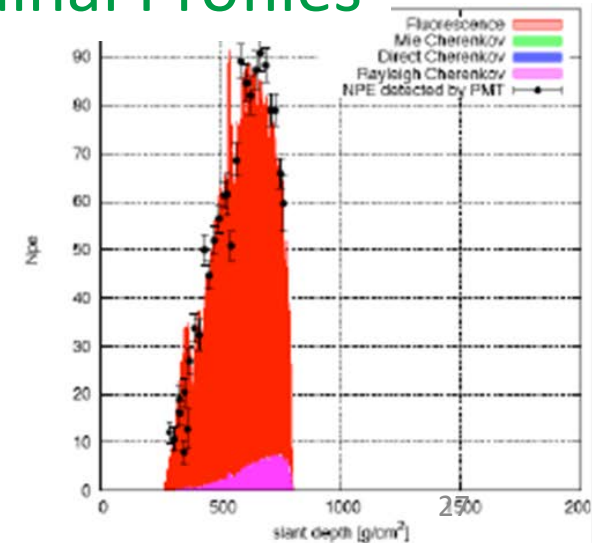
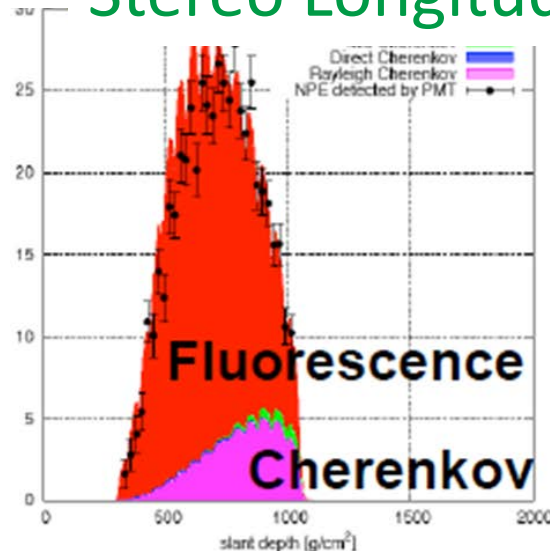
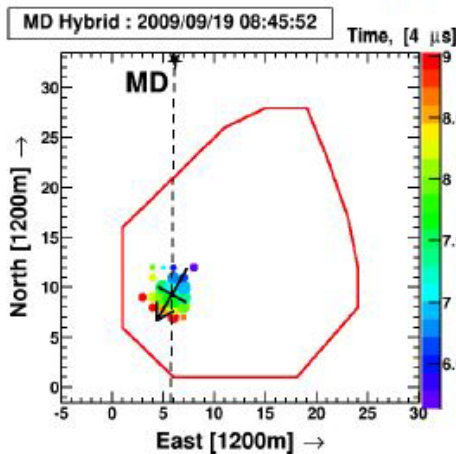
Hybrid Timings



Stereo Camera Images

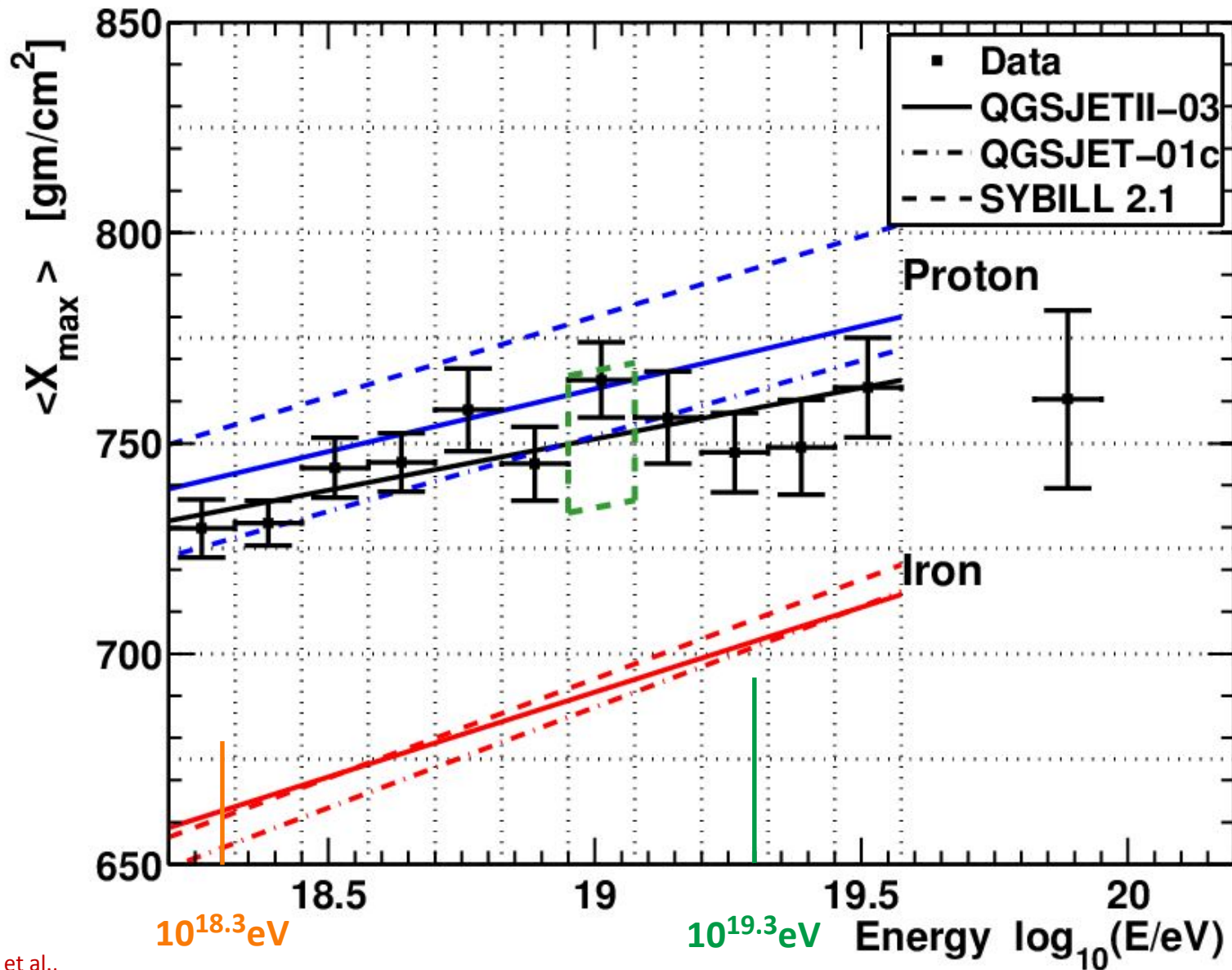


Stereo Longitudinal Profiles





$\langle X_{\max} \rangle$ and MC Predictions



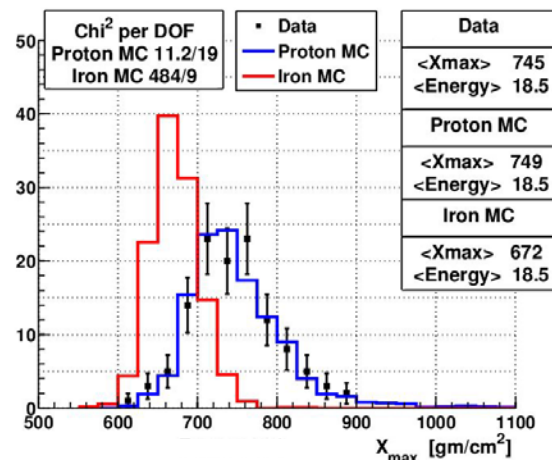
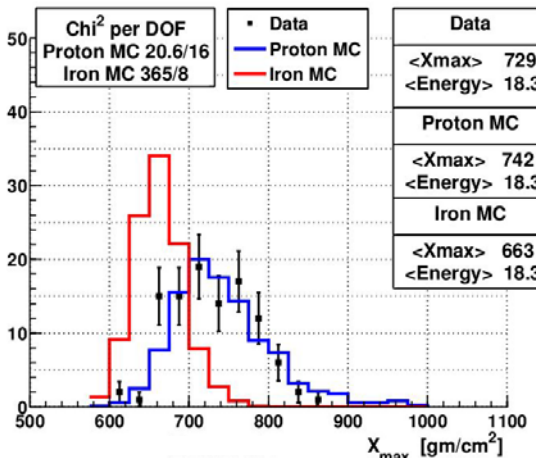
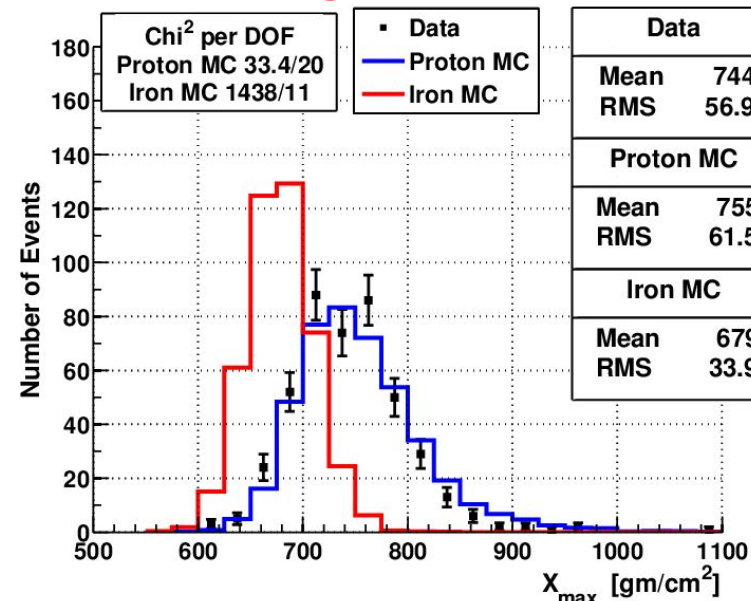


Xmax Distribution (Data vs p/Fe MC: QGSJET2-03)

Log E > 18.2

Log E: 18.2 - 18.4

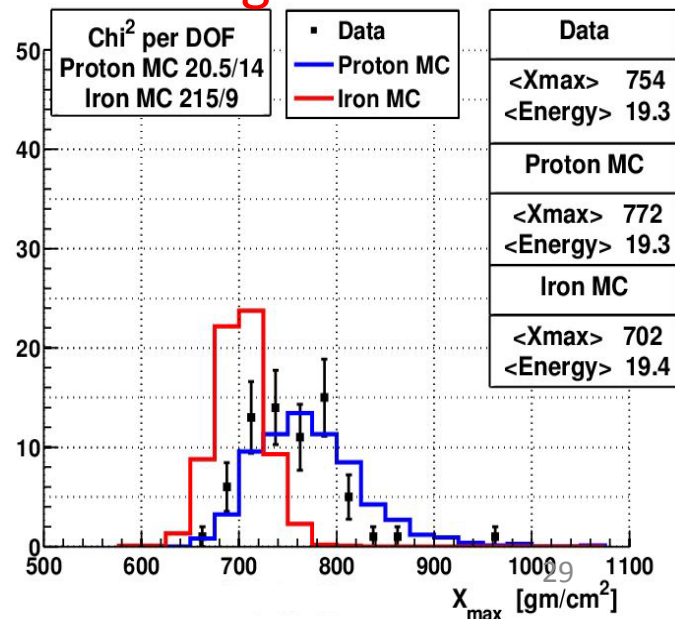
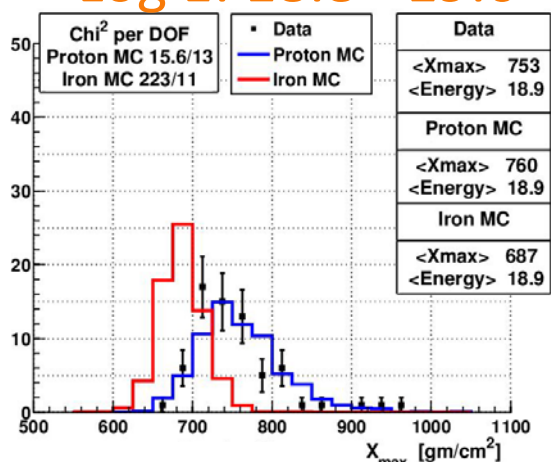
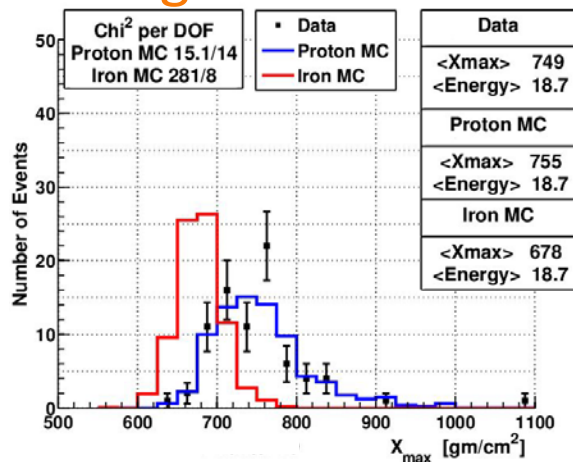
Log E: 18.4 - 18.6



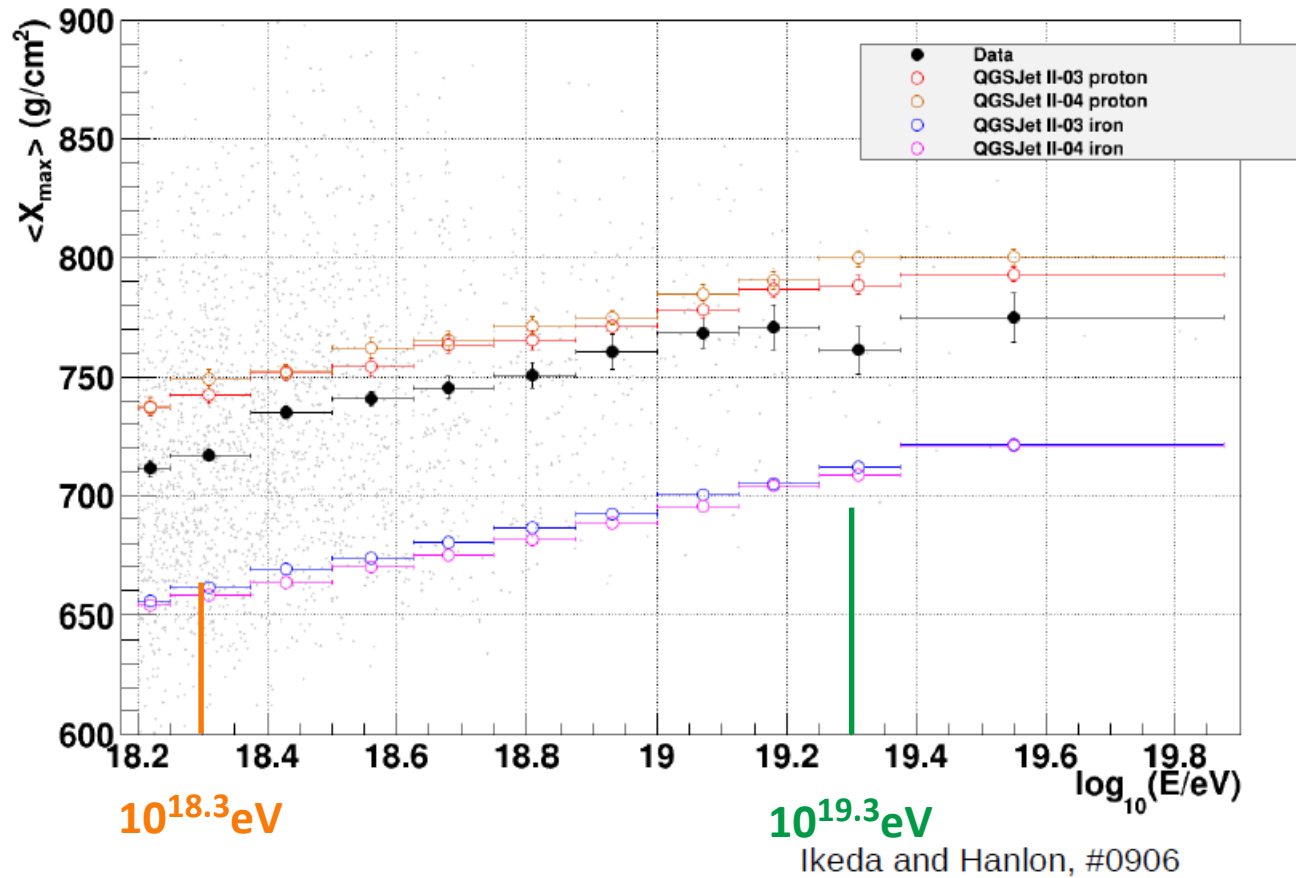
Log E > 19.0

Log E: 18.6 - 18.8

Log E: 18.8 - 19.0

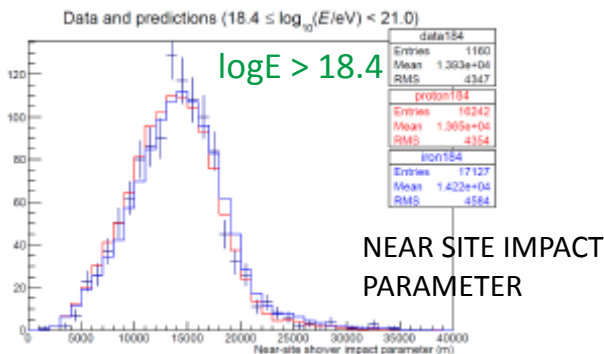
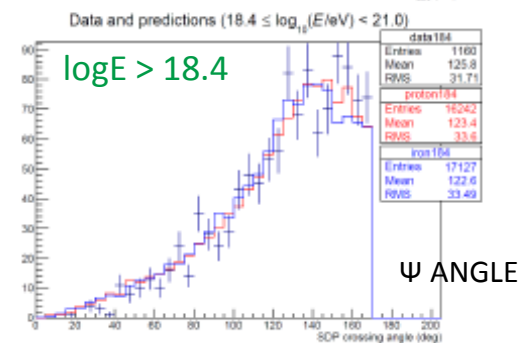
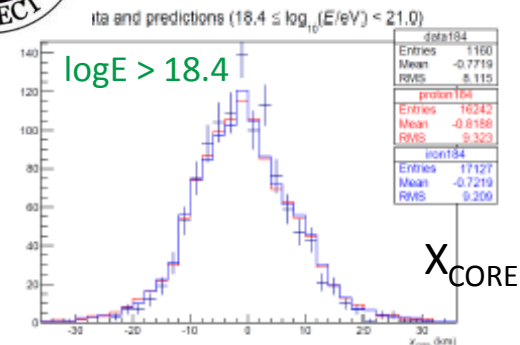


Hybrid (BR/LR w/ SD)

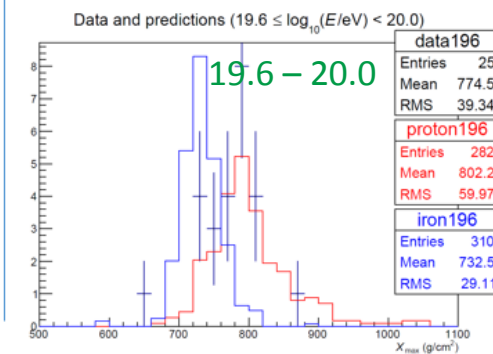
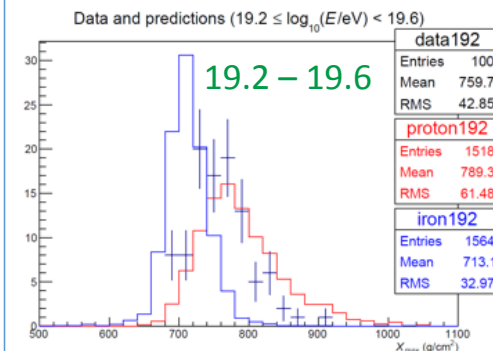
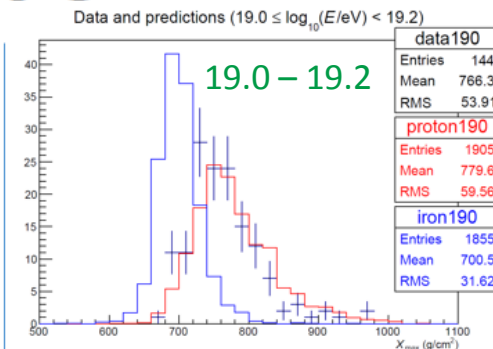
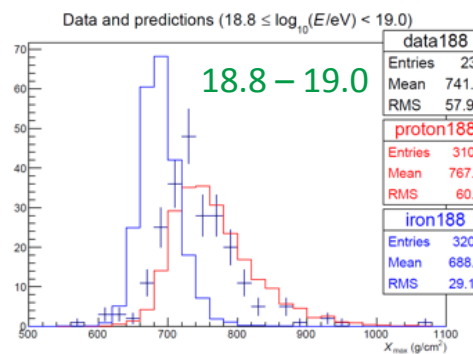
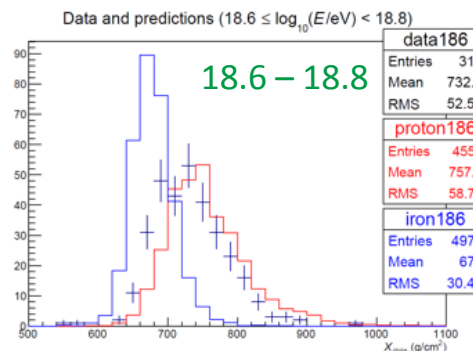
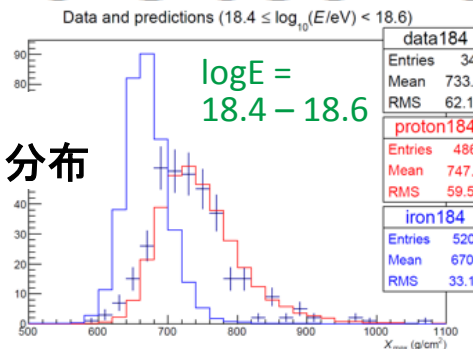




Stereoscopic Observation



X_{MAX} 分布

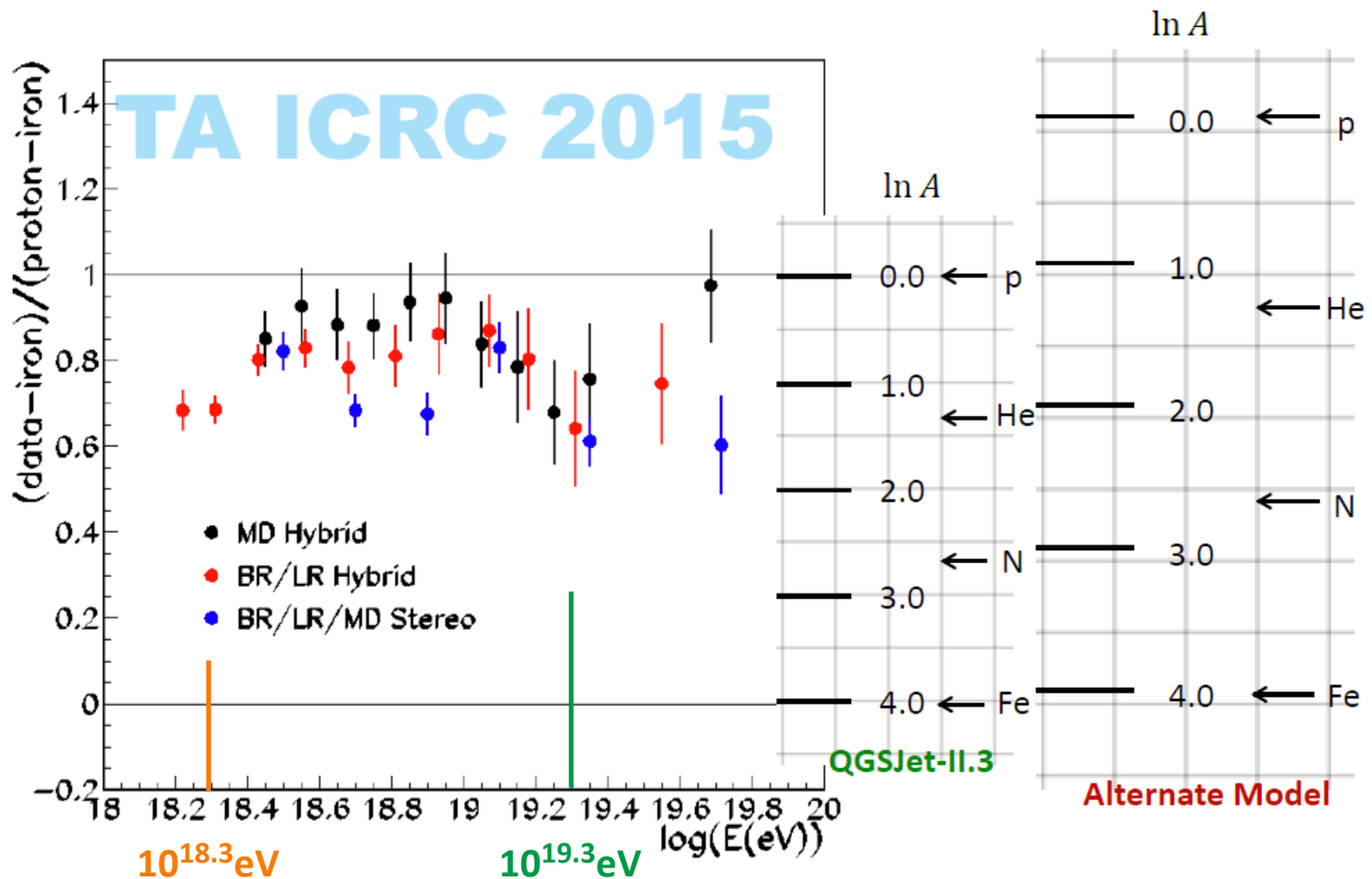


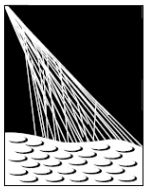
Geometry checks, data and
Monte Carlo

X_{max} compared with QGSJETII-03
proton and iron simulation

7 yr; 1,160 data events above 18.4

TA data compared to QGSJet-II.3



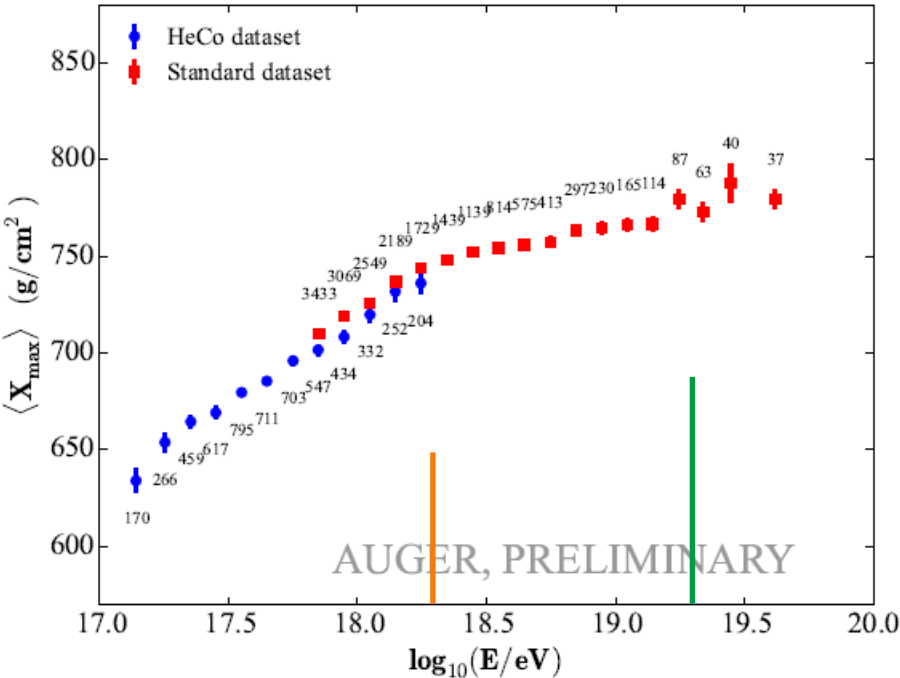


PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

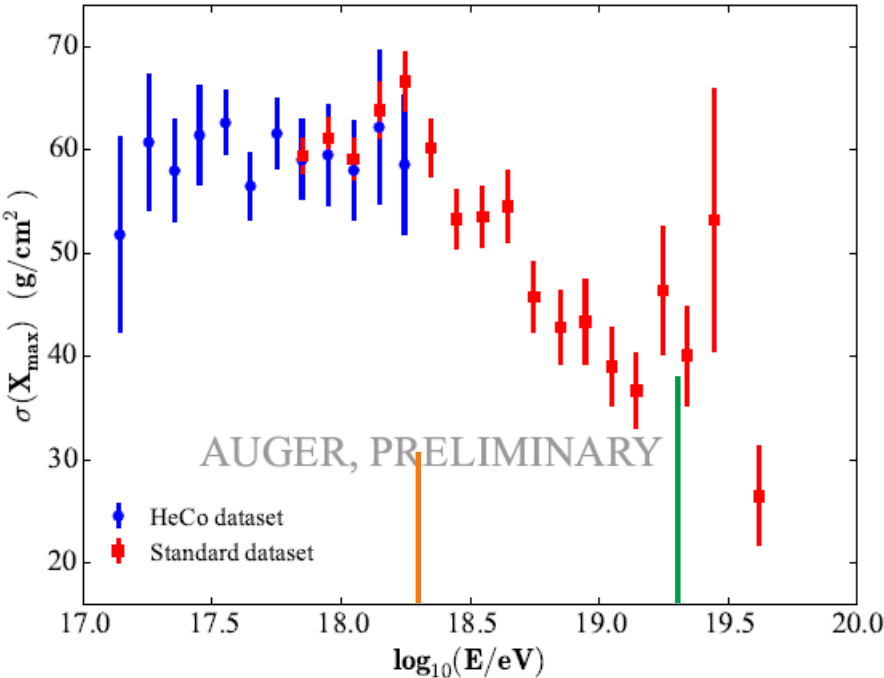
Auger $\langle X_{\max} \rangle$ & $\sigma(X_{\max})$ with LE extension by HEAT

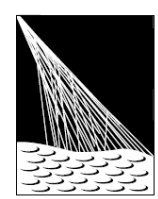
Standard VS HeCo dataset

Average of $X_{\max}$



Std. deviation of $X_{\max}$

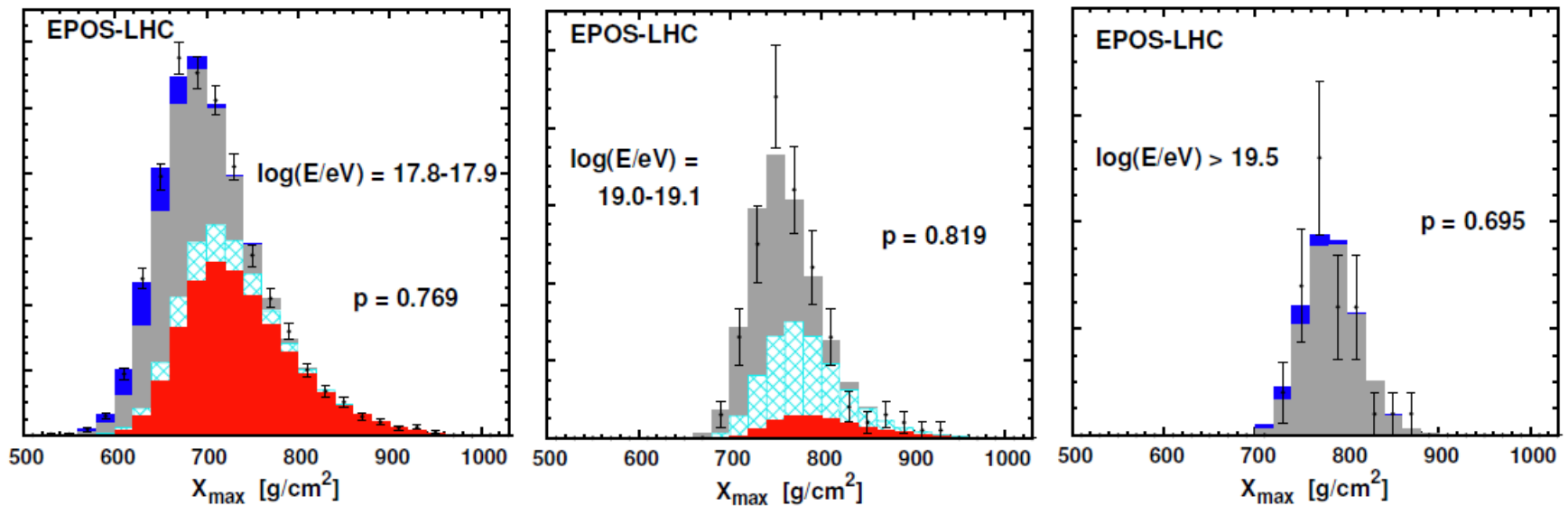




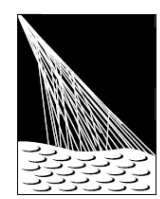
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Auger Xmax Distribution fitted with p, He, N and Fe

proton, helium, nitrogen, iron



Pierre Auger Collaboration, PRD 90 (2014) 12, 122006



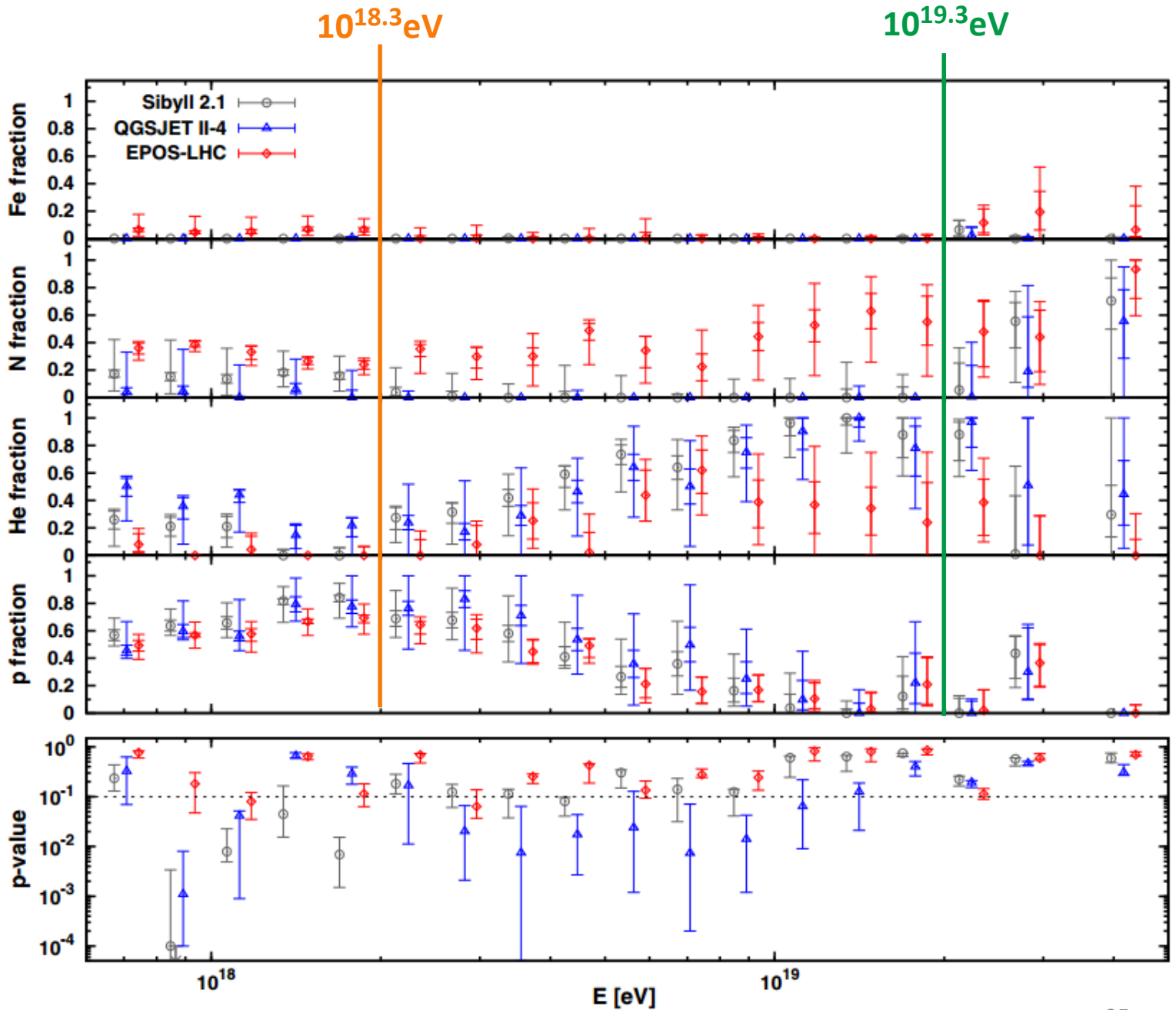
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

Fe

N

He

P



まとめ-1: わかったこと

■ 新世代の検出器 TA と Auger は、地表粒子アレイ(SD)と大気蛍光望遠鏡(FD)を使って UHECR ($E > 10^{18}$ eV) の観測を行っている。SDの観測感度(面積)は前世代より一桁大きい。FDに必要な大気蛍光の理解(発光効率の測定など)も、大きく進んだ。

■ SDによるエネルギー決定精度は、同時観測するFDによる較正で $< \sim 20\%$ (=FDの E 系統誤差) になった。FDによる $X_{\max}$ の測定で、平均的な粒子種 (p,...Fe) がわかるようになった。ただし、 $E > \sim 10^{19.6}$ eV の領域では、いずれも統計が不十分である。

■ TAとAugerで新しく得られた知見:

1. **スペクトル**: $\sim 10^{18}$ eV 以上の領域で、切断(cutoff)と窪み(ankle)の2つの構造が明らかになった。Augerの E_{CUTOFF} は、TAより $\sim 40\%$ 小さい。
2. **粒子種**: $10^{19.3}$ eV までの領域は、陽子 and/or ヘリウム。p / He の差は $X_{\max}$ の系統誤差より小さい。Augerでは、p > He への遷移に続いて、 $10^{19.3}$ eV 以上で、中重核(N)に遷移する兆候がある。粒子種決定においては相互作用モデルからの不定性が大きい。
3. **異方性と発生源天体**: カットオフを超えたエネルギーで、中規模角度スケールの異方性の兆候が見える。北半球のTAでは、おおぐま座方向に半径 20° のホットスポット (3.4σ の有意度)。南半球のAugerでは、Cen A から 15° 以内に過剰がある (ただし $p=1.4\%$)。
4. **GZK - ν , - γ** : ニュートリノ、ガンマのリミット。GZK (by proton) まで、あと ~ 1 桁。

■ 以上の観測結果は、 E_{CUTOFF} の違いをのぞくと、統計的/系統的不定性の範囲内で、TA と Auger で一致する。 E_{CUTOFF} の違いが物理なのか、測定の系統誤差なのか、理解できていない。

Anisotropy & Source

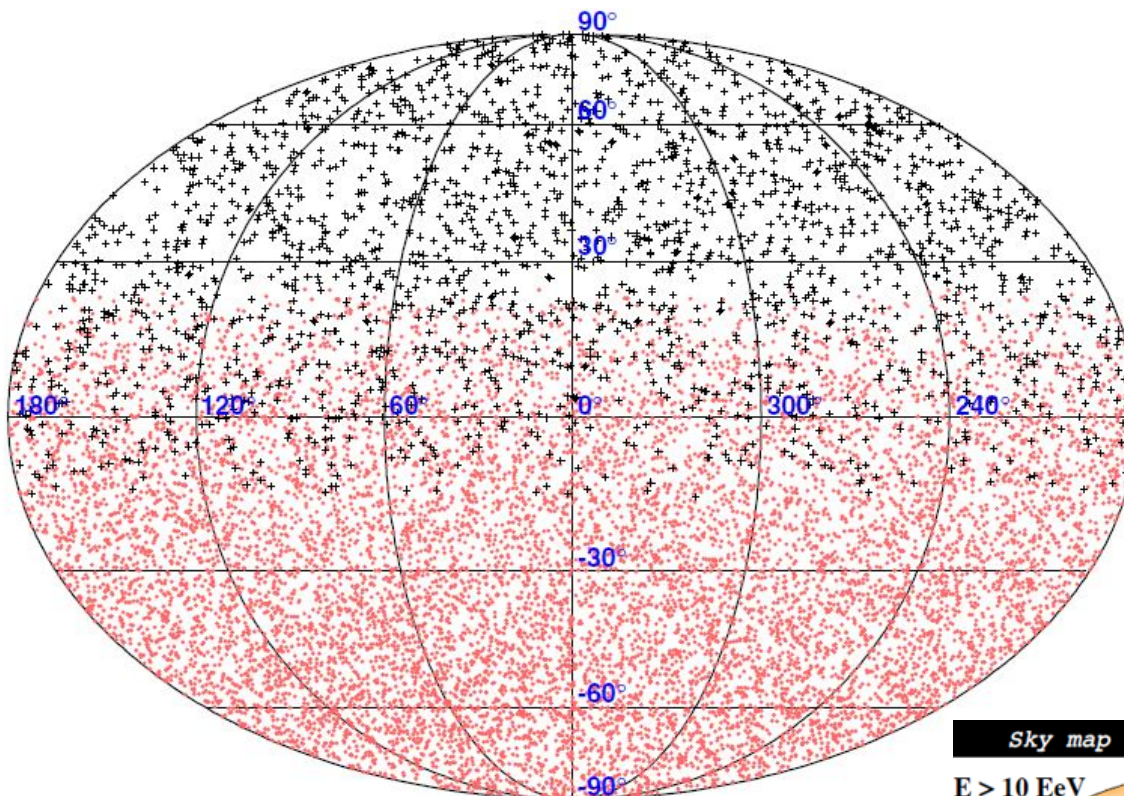
$E > 10^{19}$ eV : dipole?

$E > 58$ EeV : Cen A?

$E > 57$ EeV : hot spot

Anisotropy in Spectrum?

Anisotropy for $E > 10^{19}$ eV (Auger + TA)



Equatorial
coordinate

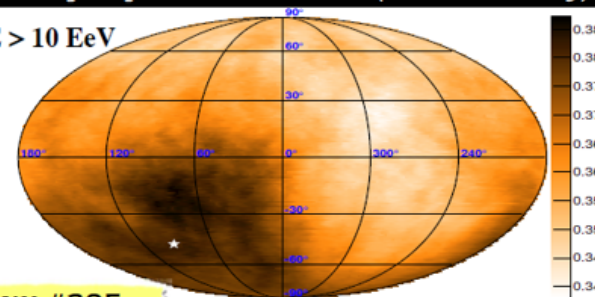
99% C.L. upper limit

Dipole amplitude : 7 – 13%

Quadrupole : 7 – 10%

Sky map of the CR flux (60° smoothing)

$E > 10$ EeV



GNY #395

Dipole Amplitude: $6.5 \pm 1.9\%$ ($p=5 \times 10^{-3}$)

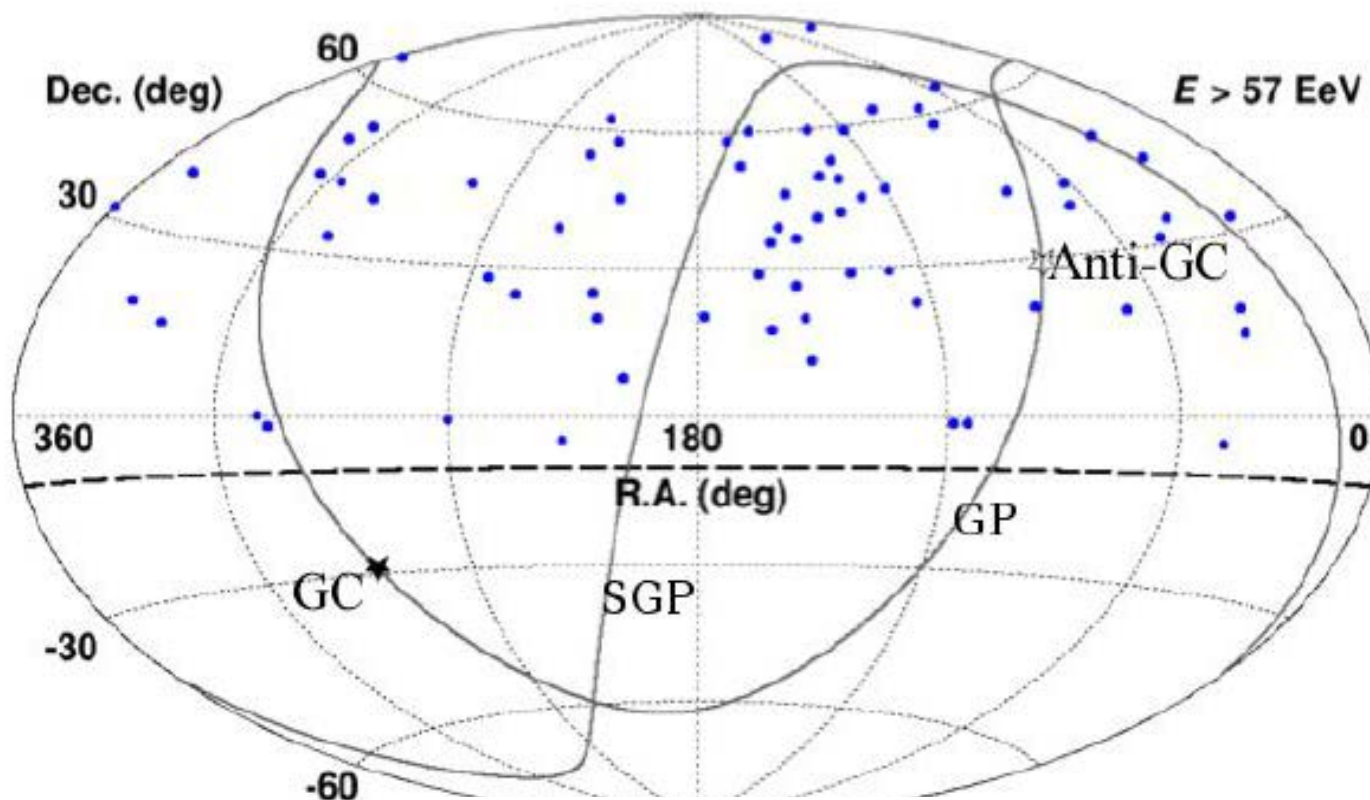
Pointing to $(a, d) = (93^\circ \pm 24^\circ, -46^\circ \pm 18^\circ)$



$10^{19.76} \text{ eV}$

Sky Plot of SD 5-year Data ($E > 57 \text{ EeV}$, $\theta < 55^\circ$)

- 72 events without array border cut ($\Delta E/E \sim 20\%$, ang. res. $\sim 1.7^\circ$)

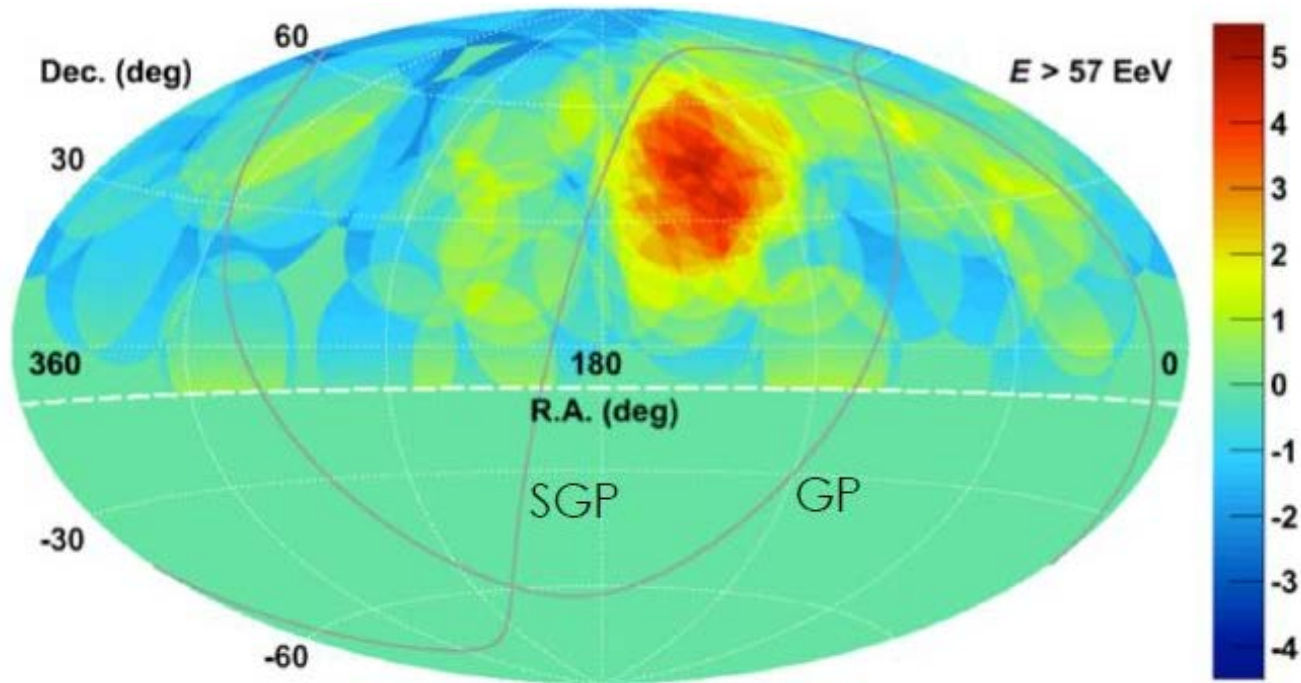


→ Make over-sampling with 20° radius circle



Significance Map of Hotspot ($r=20^\circ$)

- 19 events found with isotropic BG of 4.5 events (5.1σ by Li-Ma statistics) at R.A.= 146.7° , Dec. = 43.2°



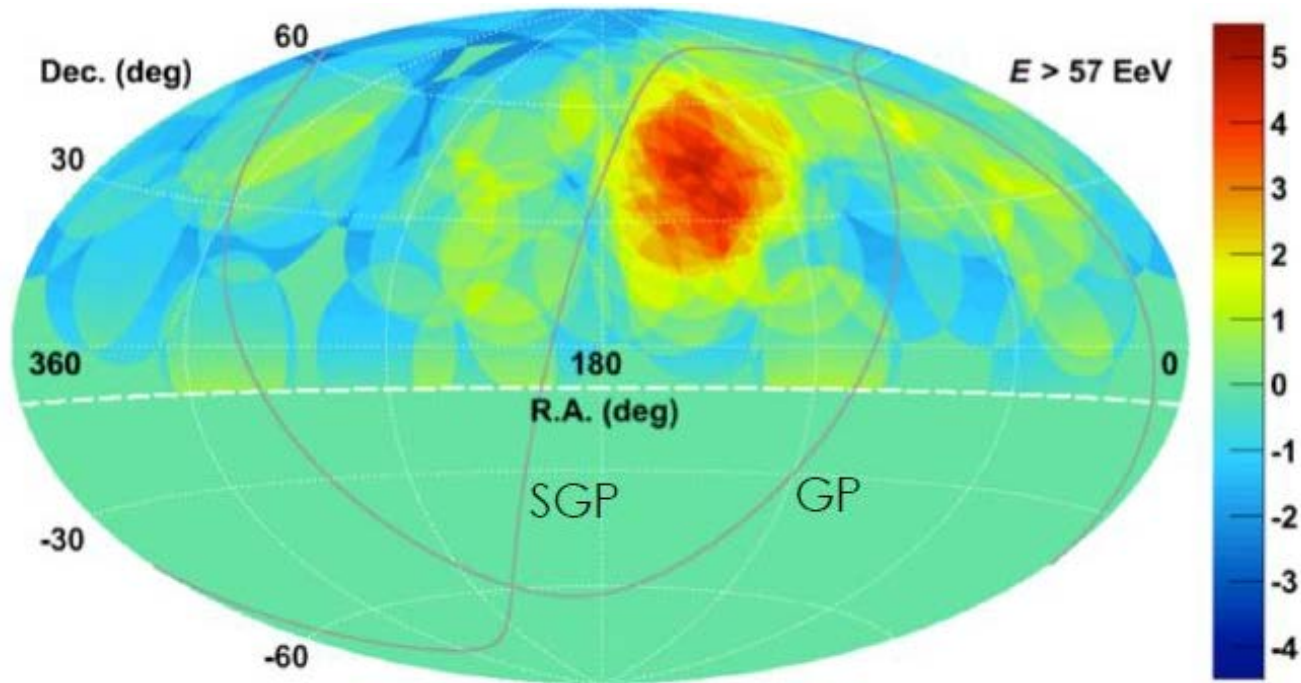
- Chance probability from Isotropic sky is 3.7×10^{-4} (3.4σ)

We generated 100k sets of isotropic 72 events, analyzed the same way as the data, and counted how often we have 5.1σ or more enhancement, anywhere in TA's FoV with any angular size of $r=15, 20, \dots 35^\circ$. We had 37 such sets out of 100k sets in total.



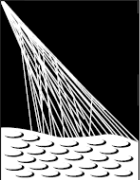
Significance Map of Hotspot ($r=20^\circ$)

- 19 events found with isotropic BG of 4.5 events (5.1σ by Li-Ma statistics) at R.A.= 146.7° , Dec. = 43.2°



- Chance probability from Isotropic sky is 3.7×10^{-4} (3.4σ)

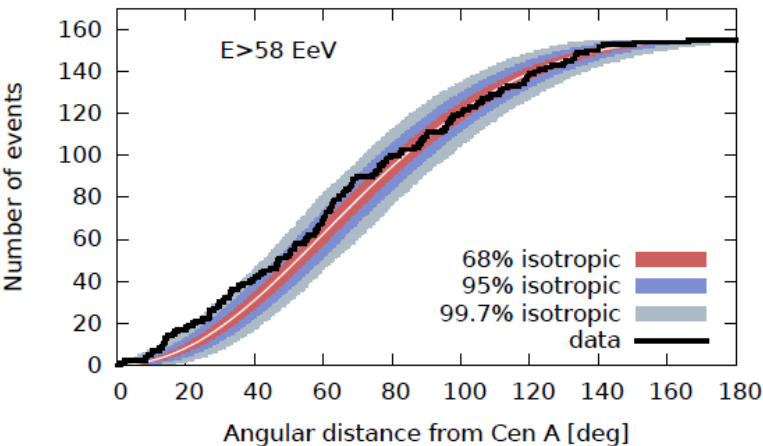
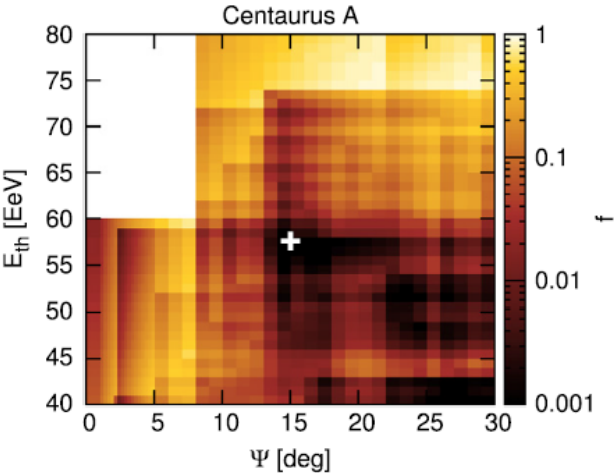
We generated 100k sets of isotropic 72 events, analyzed the same way as the data, and counted how often we have 5.1σ or more enhancement, anywhere in TA's FoV with any angular size of $r=15, 20, \dots 35^\circ$. We had 37 such sets out of 100k sets in total.



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

The Cen A region

- ▶ Count the number of events n_{data} with $E > E_{\text{th}}$ that fall within Ψ of Cen A direction.



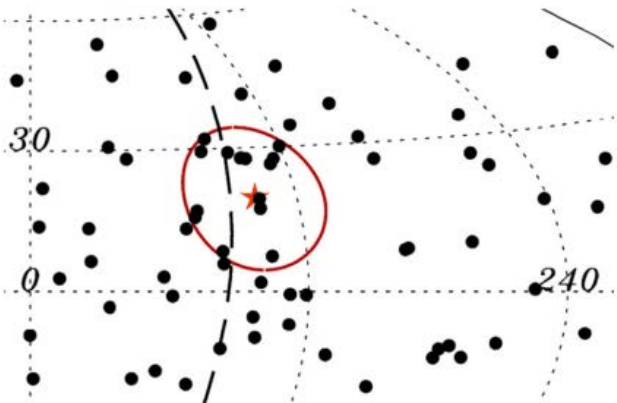
- ▶ Scan on parameters: for each value of E_{th} , Ψ , compute the fraction f of isotropic simulations that have $n_{\text{iso}} \geq n_{\text{data}}$

- ▶ Minimum found for:

$f = 2.10^{-4}$ with $E_{\text{th}} = 58$ EeV, $\Psi = 15^\circ$

- ▶ Post-trial probability: $P = 1.4\%$

(fraction of isotropic simulations that lead to a $f \leq f_{\text{data}}$ under the same scan.)



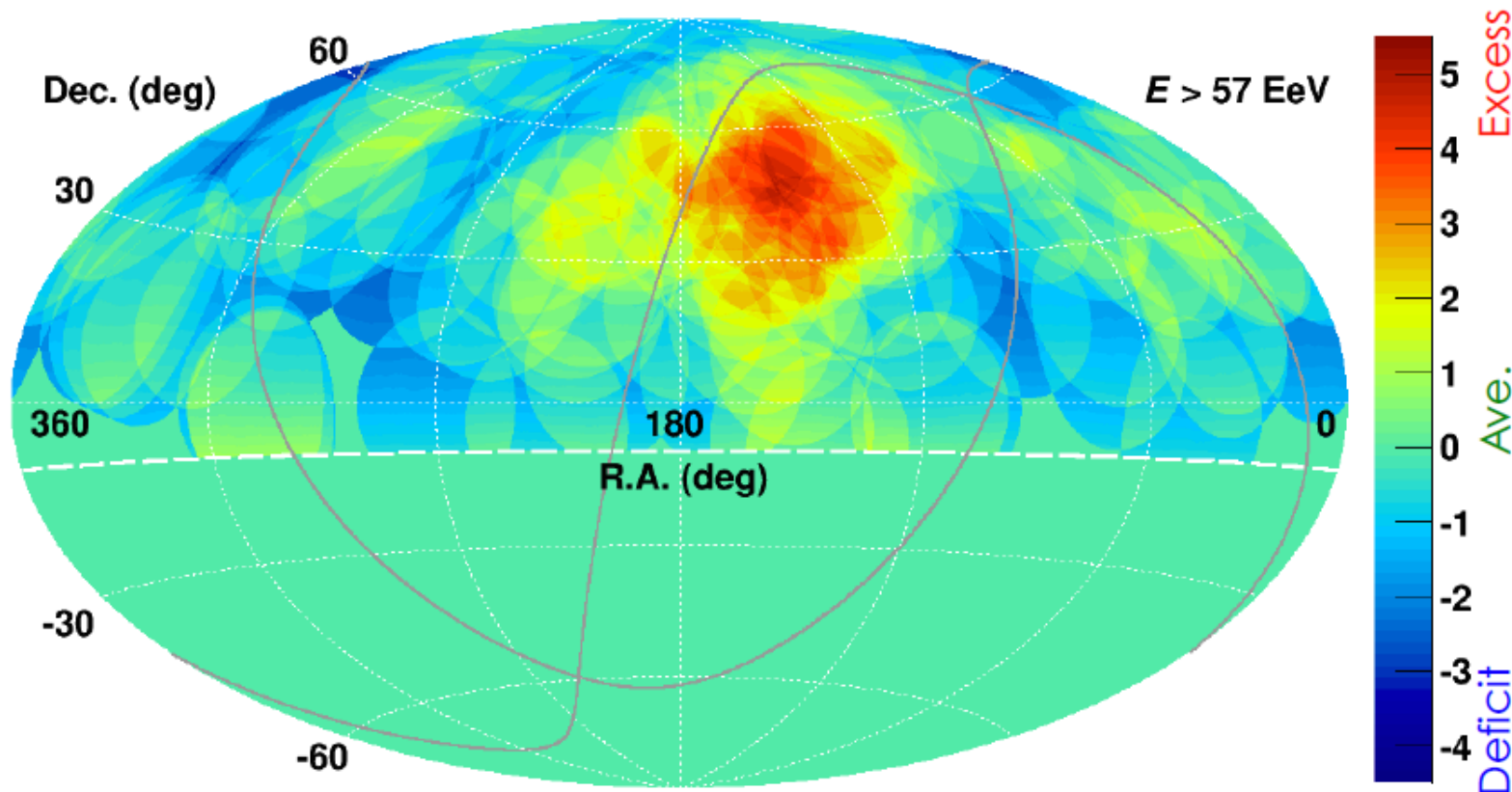
Original AGN correlation (Science 2007): "The VCV test no longer provides a significant indication of anisotropy."
75Mpc, 3.1° , 53EeV, now $\sim 1.9\sigma$



Significance Map 7 years



Oversampling with 20°-radius circle



Max significance **5.1 σ** ($N_{\text{on}} = 24$, $N_{\text{bg}} = 6.88$) for 7 years
Centered at R.A.=148.4°, Dec.=44.5° (shifted from SGP by 17°)

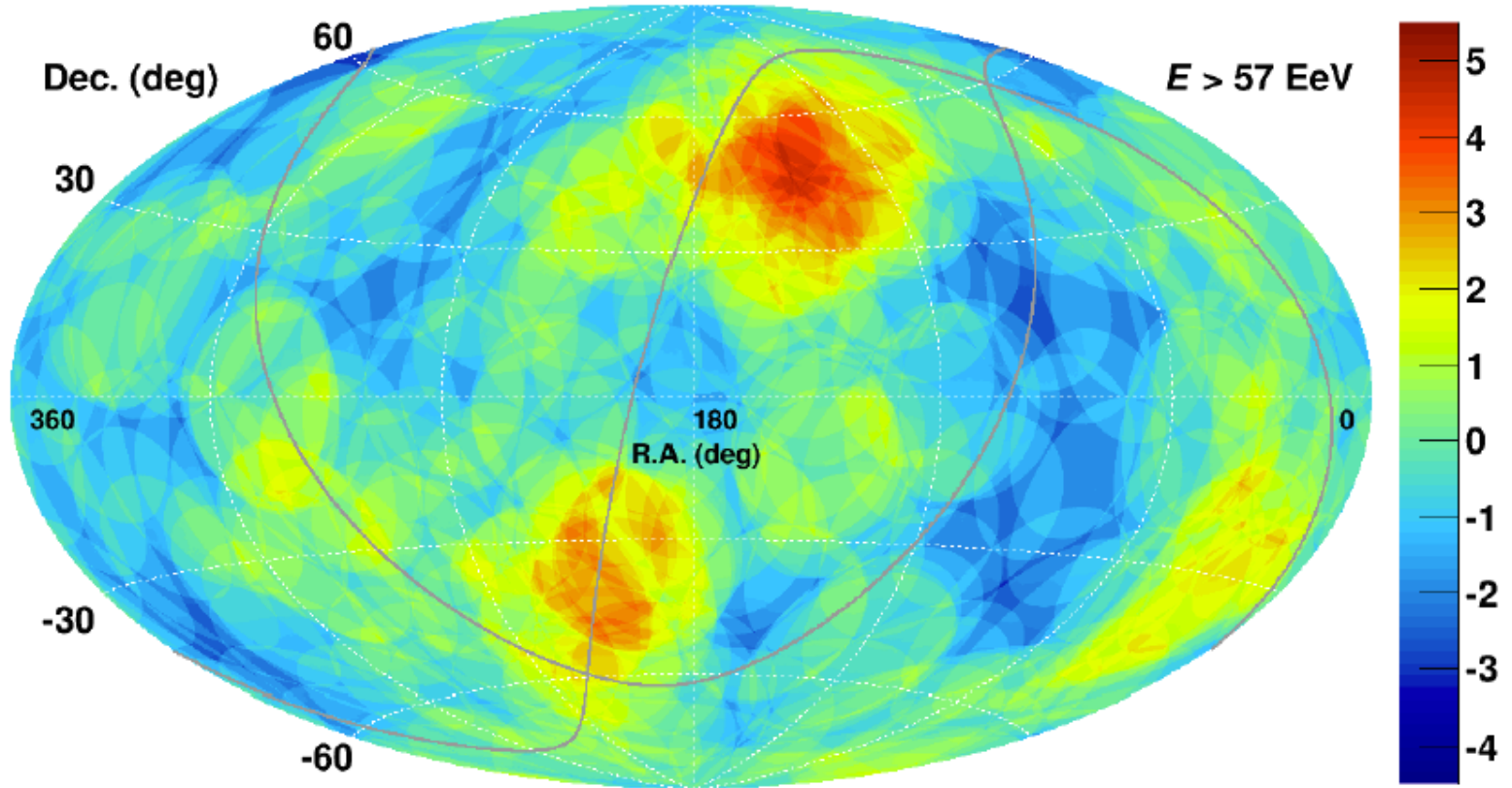
8

$$P = 367 / 1,000,000 \text{ trials} \\ = \underline{3.7 \times 10^{-4} (3.4\sigma)}$$



All Sky Survey with TA&PAO

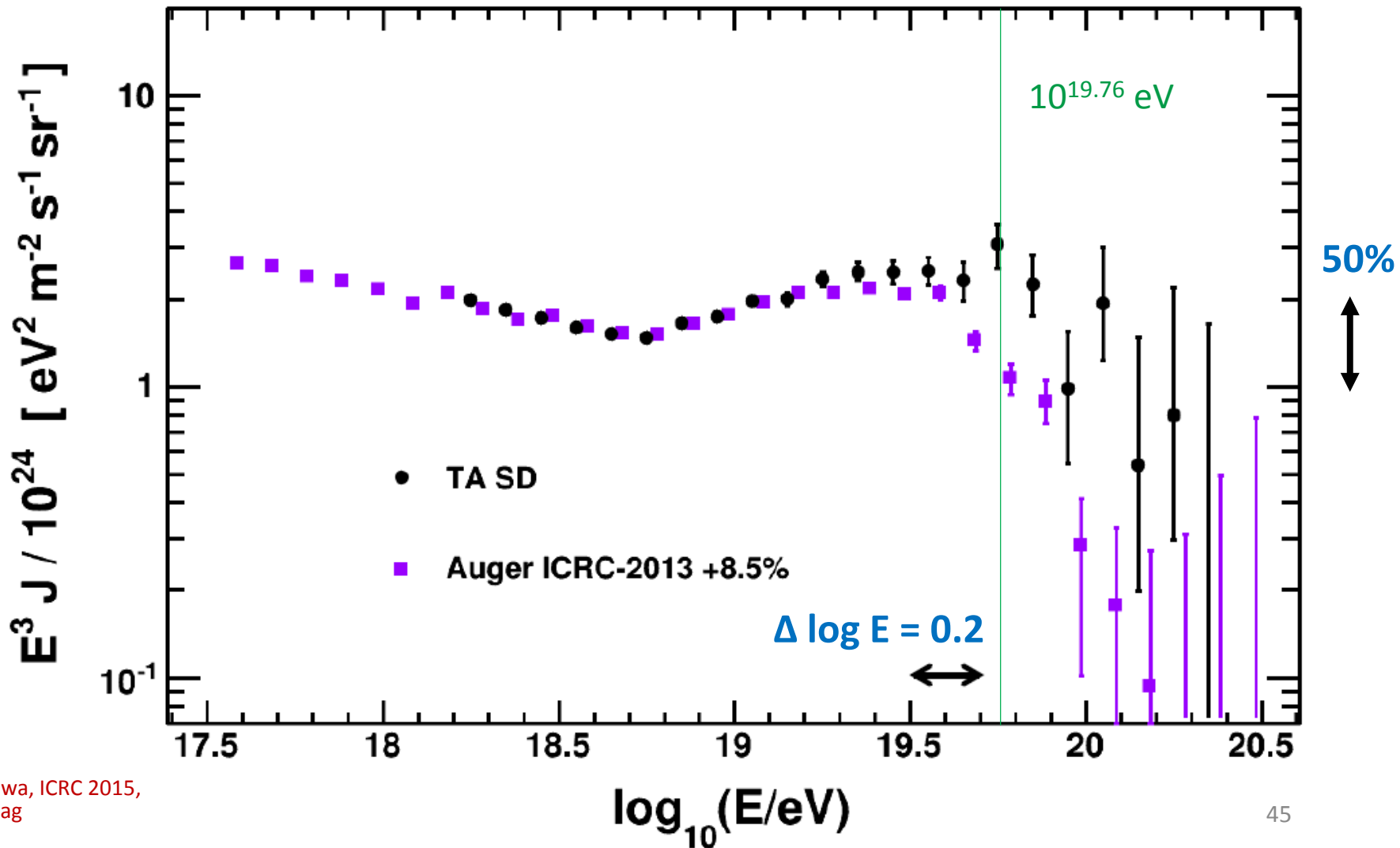
Oversampling with 20° -radius circle



No correction for
E scale difference
b/w TA and PAO !!

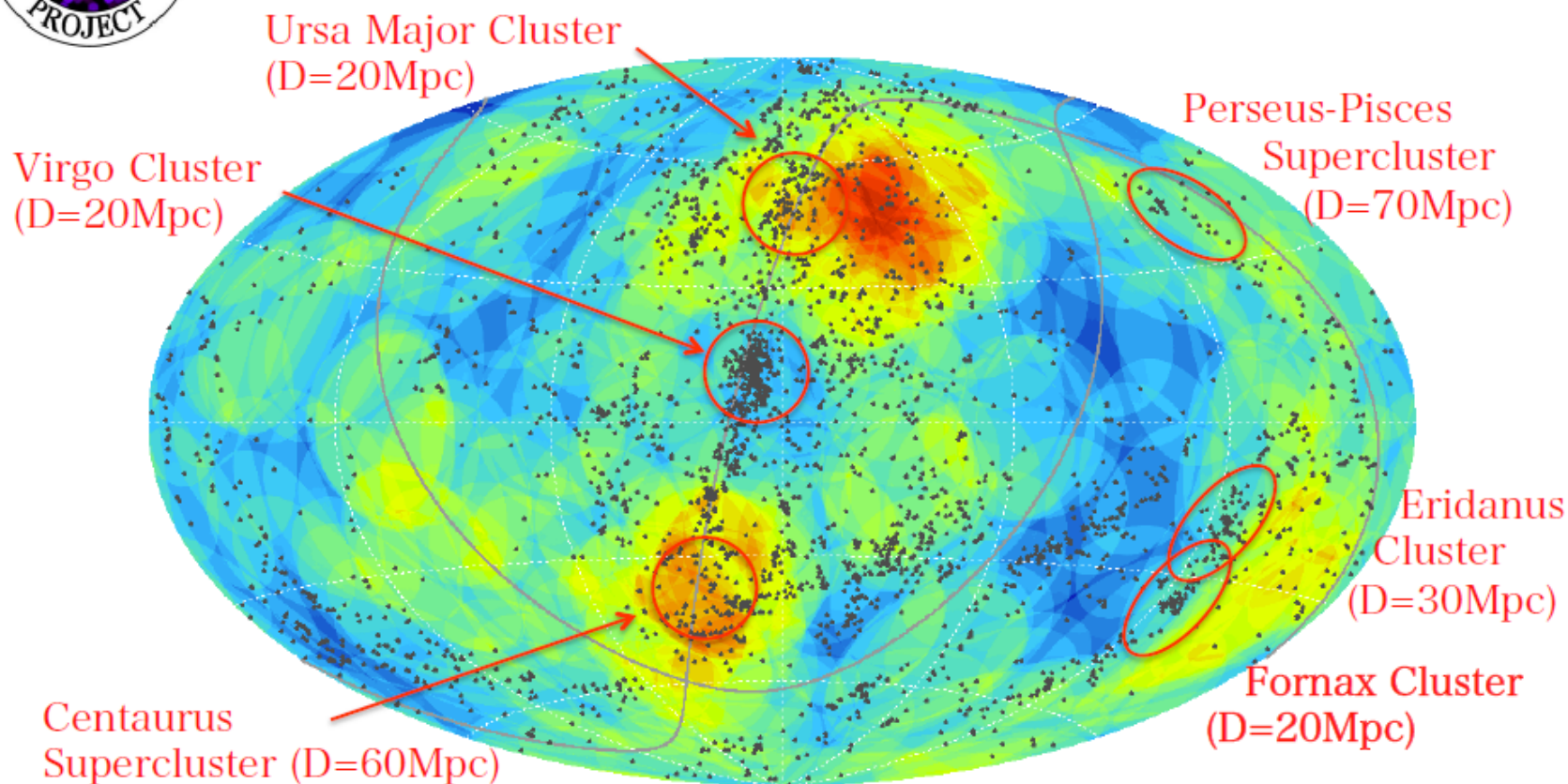
Northern TA : 7 years 109 events ($>57\text{EeV}$)
Southern Auger : 10 years 157 events ($>57\text{EeV}$)
Southern hotspot is seen at Cen A (Pre-trial $\sim 3.6\sigma$)

TA-SD (7-year) compared with Auger ICRC 2013 +8.5% in energy scale





Nearby Galaxy Clusters



Huchra, et al, ApJ, (2012)

Dots : 2MASS catalog Heliocentric velocity < 3000 km/s ($D < \sim 45 \text{ Mpc}$)

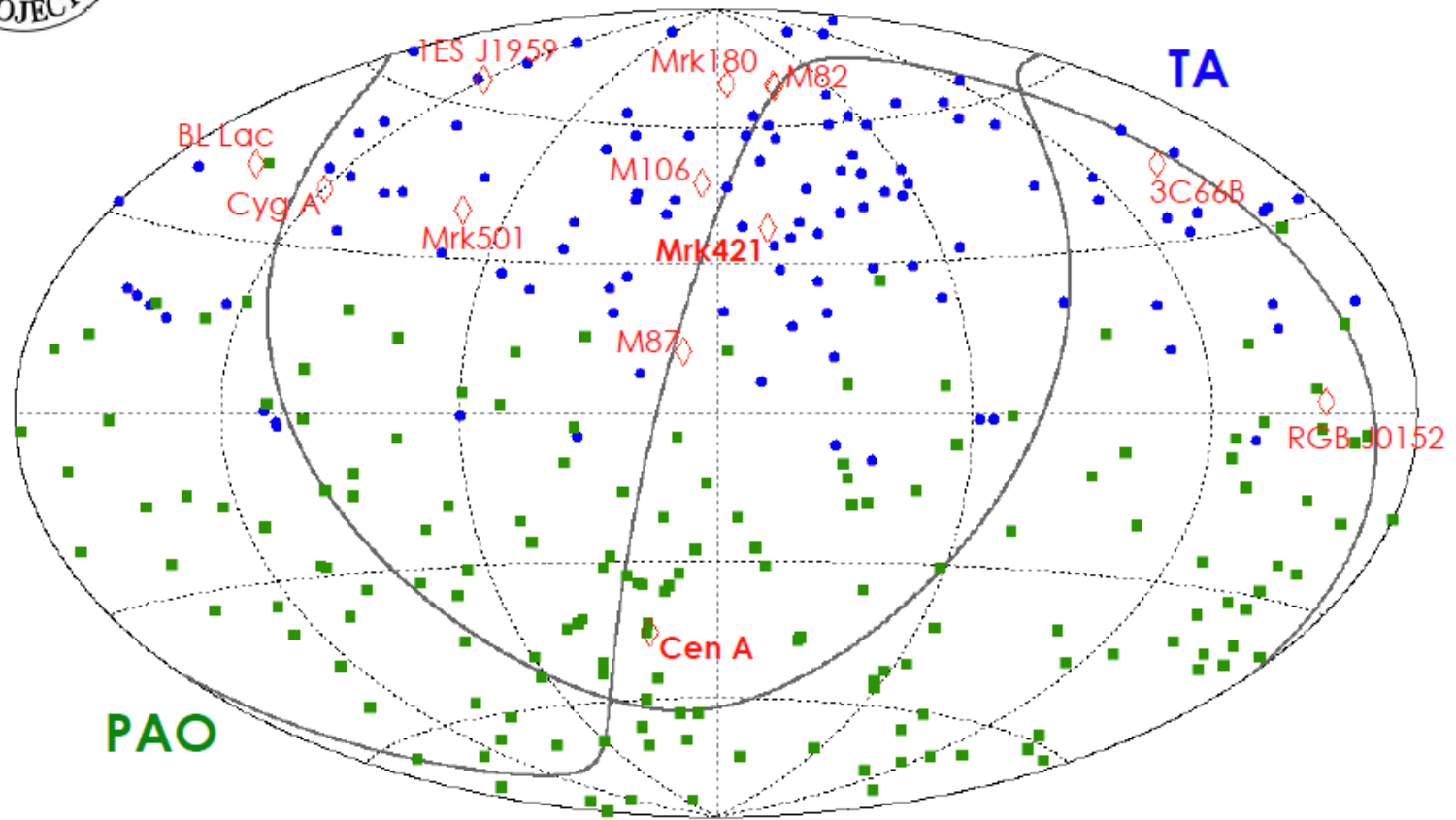
TA hotspot is found near the Ursa Major Cluster
TA & PAO found no excess in the direction of Virgo.

12



Nearby Prominent Sources

Dermer, et al, New J. Phys., (2007)



The blazar Mrk421, Mrk180 and starburst galaxy M82 are candidates?

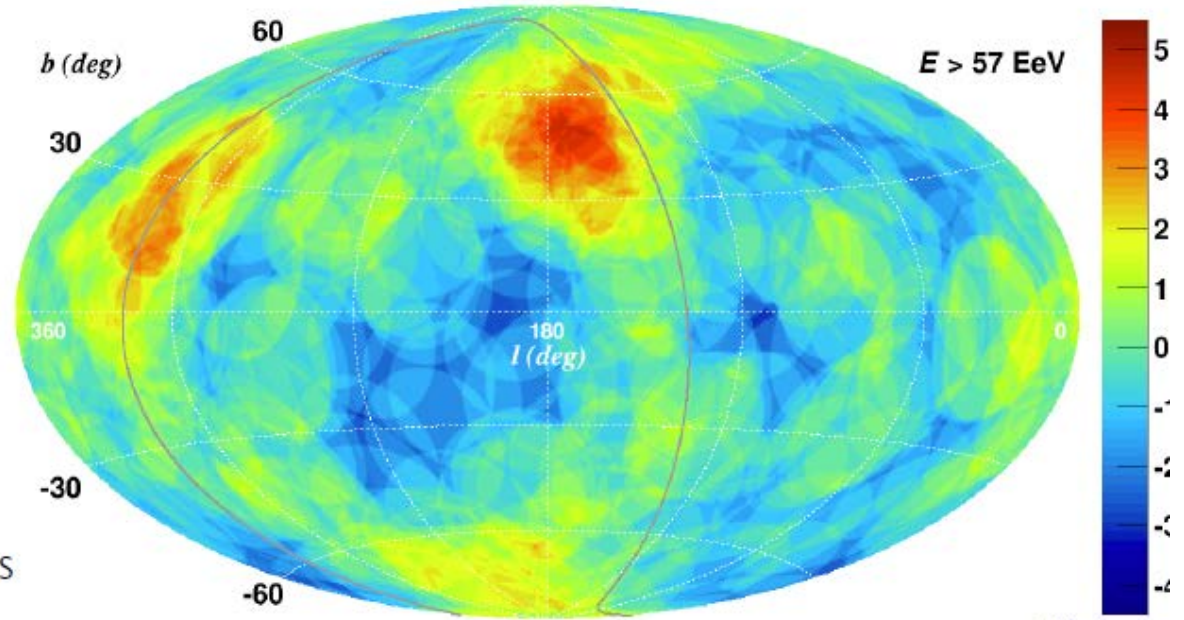
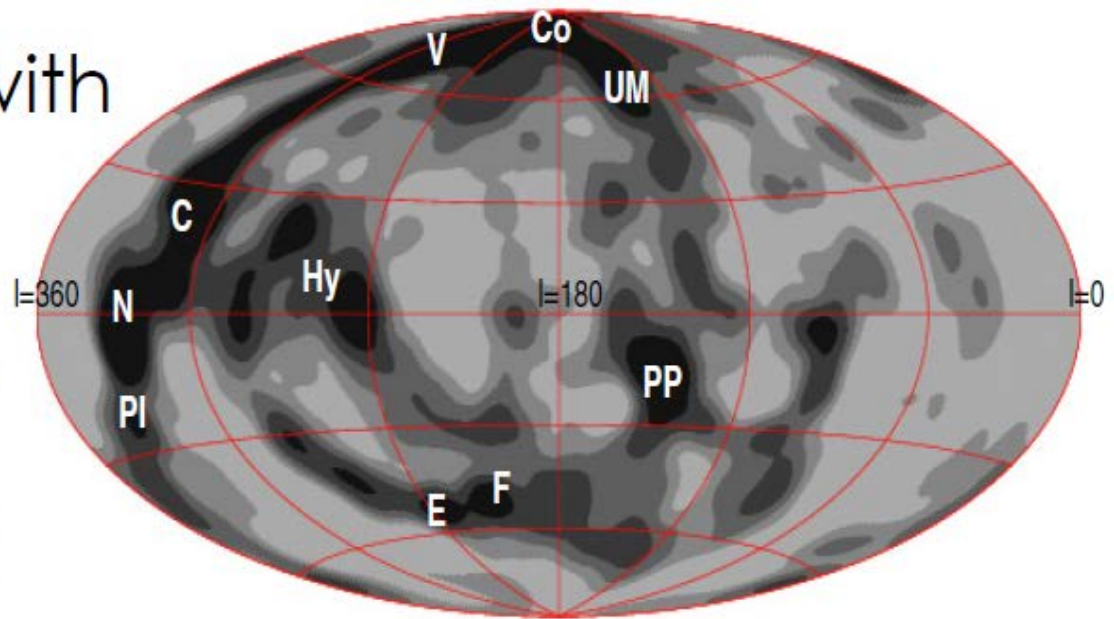
K. Fang, et al., ApJ, 794, 126 (2014)

H.-N. He, et al., arXiv:1411.5273 (2014)

14

Comparison with Large-Scale Structure

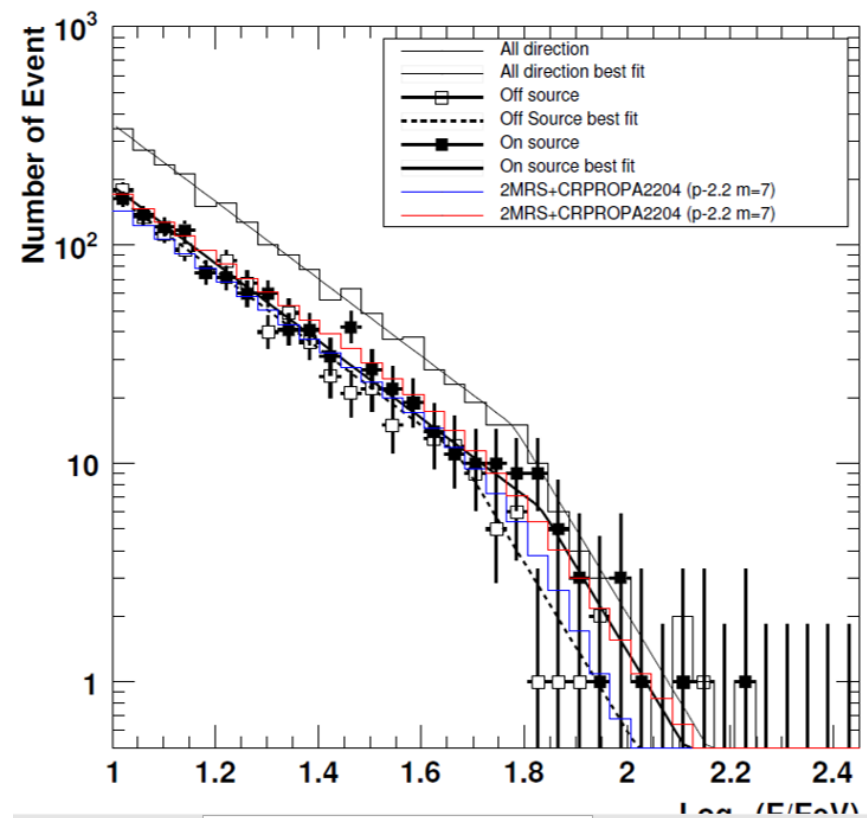
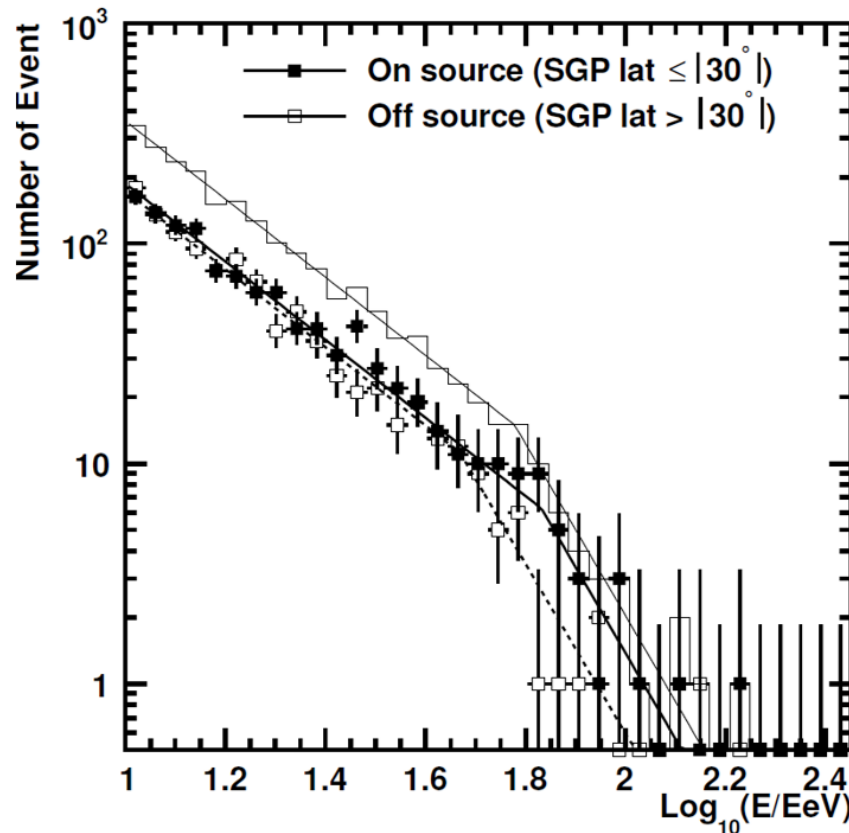
Sky map of expected flux at $E > 57$ EeV (Galactic coordinates). The smearing angle is 6° . The letters indicate the nearby structures as follows: C: Centaurus supercluster (60 Mpc); Co: Coma cluster (90 Mpc); E: Eridanus cluster (30 Mpc); F: Fornax cluster (20 Mpc); Hy: Hydra supercluster (50 Mpc); N: Norma supercluster (65 Mpc); PI: Pavo-Indus supercluster (70 Mpc); PP: Perseus-Pisces supercluster (70 Mpc); UM: Ursa Major (20 Mpc); and V: Virgo cluster (20 Mpc).



TA 7 years + PAO 10 years

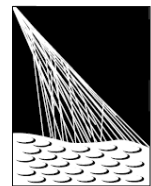


Anisotropy in Energy Spectrum; on/off SGP



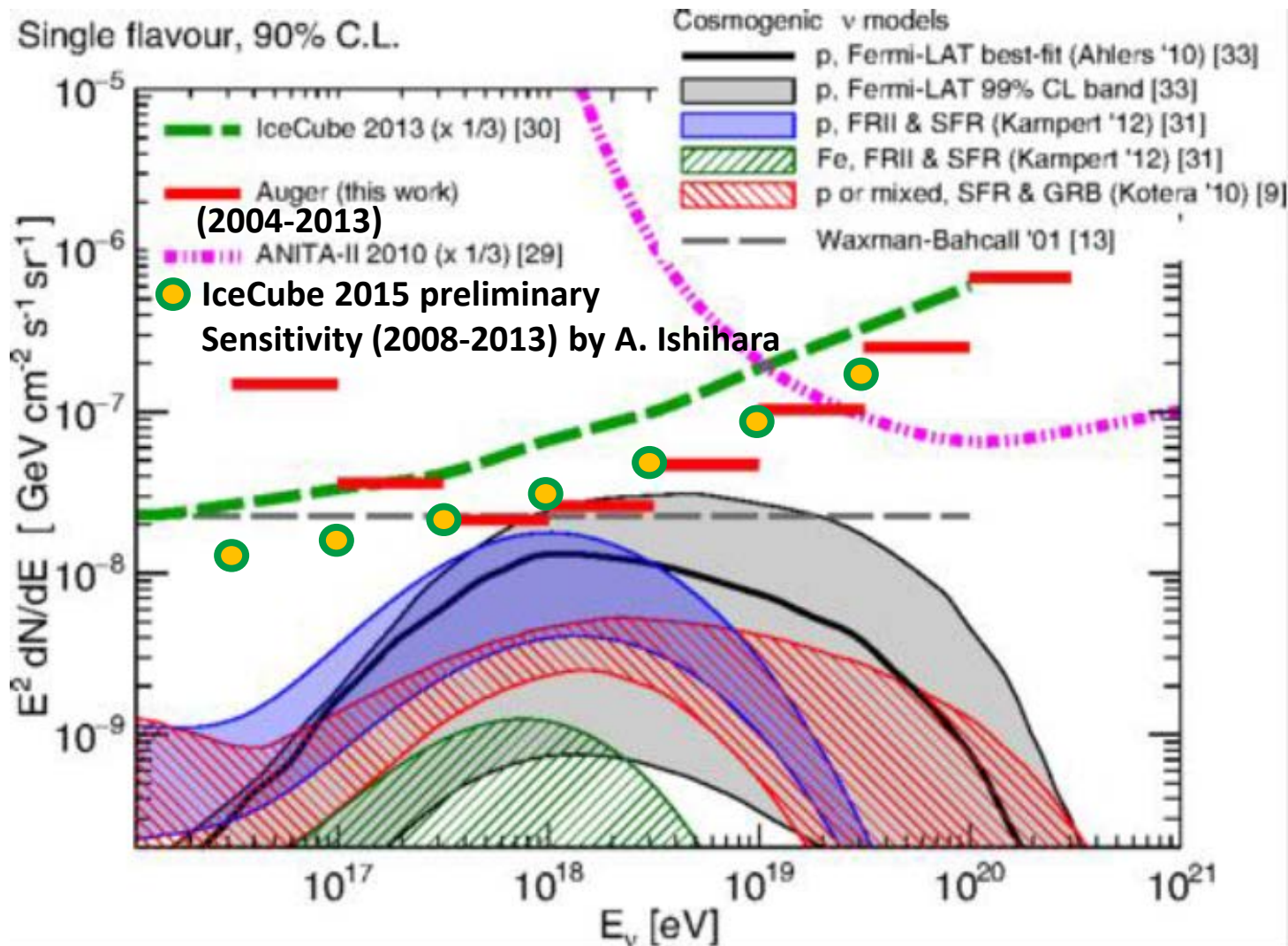
□ Energy distributions within 30° from SGP and out of this were compared.
 → Chance probability to obtain the observed difference is 6.2×10^{-4} (3.2σ).

UHE Neutrinos & Gammas



PIERRE
AUGER
OBSERVATORY

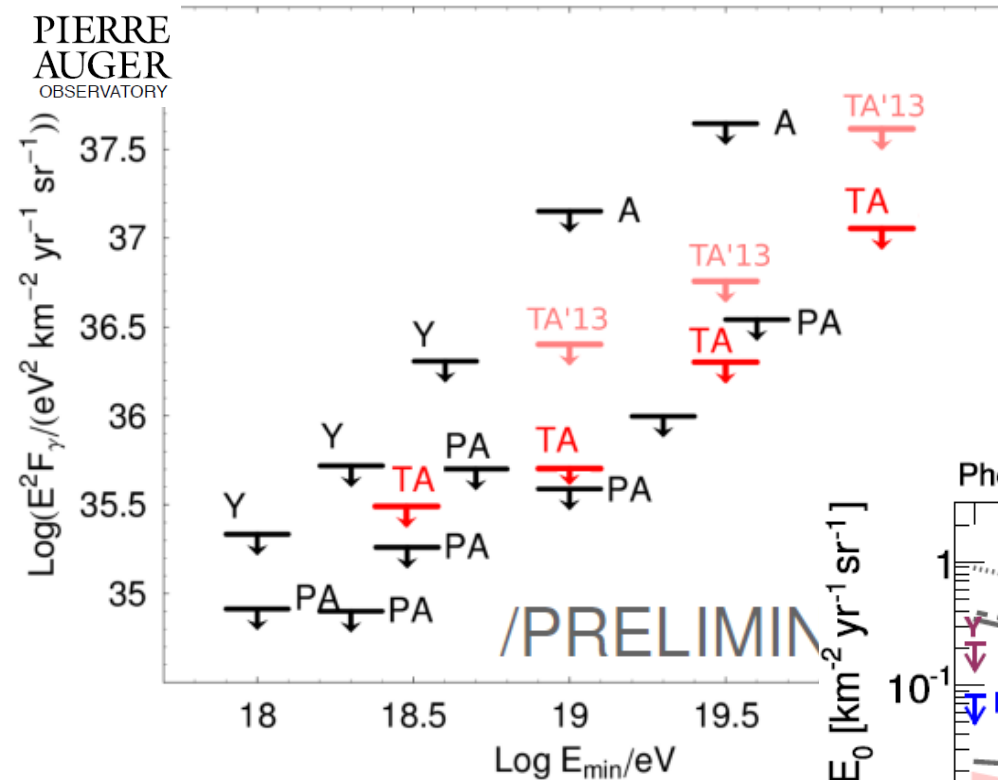
GZK Neutrino, Search and Limit



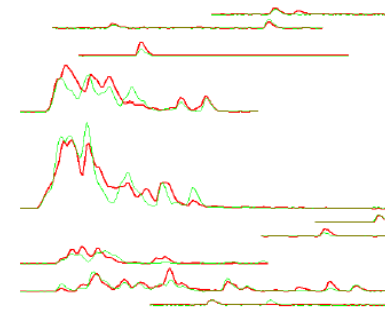
GZK Gamma, Search and Limit



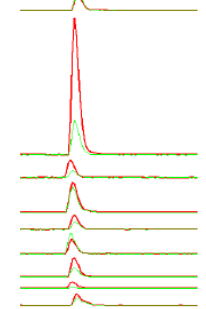
PIERRE
AUGER
OBSERVATORY



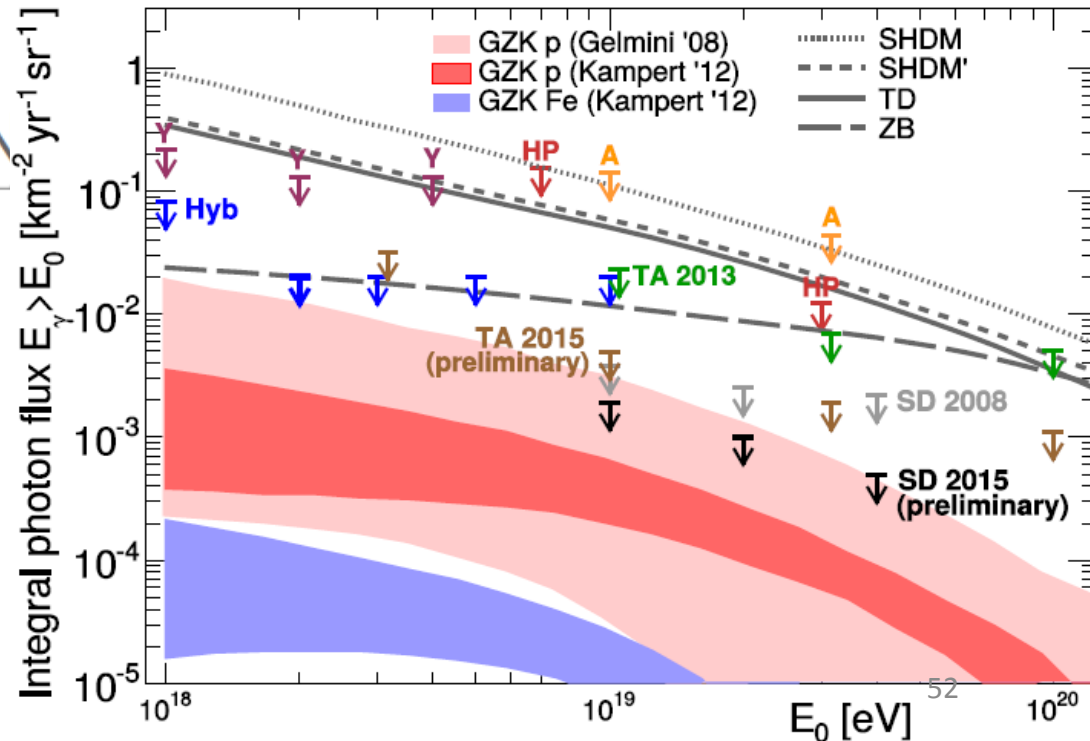
young shower, $\theta = 19.5^\circ$



old shower, 78.3°



Photon limits 95% C.L.



UHE Gamma: Select
 * young shower
 * containing less muons

まとめ-1: わかったこと

■ 新世代の検出器 TA と Auger は、地表粒子アレイ(SD)と大気蛍光望遠鏡(FD)を使って UHECR ($E > 10^{18}$ eV) の観測を行っている。SDの観測感度(面積)は前世代より一桁大きい。FDに必要な大気蛍光の理解(発光効率の測定など)も、大きく進んだ。

■ SDによるエネルギー決定精度は、同時観測するFDによる較正で $< \sim 20\%$ (=FDのE 系統誤差) になった。FDによる $X_{\max}$ の測定で、平均的な粒子種 (p,...Fe) がわかるようになった。ただし、 $E > \sim 10^{19.6}$ eV の領域では、いずれも統計が不十分である。

■ TAとAugerで新しく得られた知見:

1. **スペクトル**: $\sim 10^{18}$ eV 以上の領域で、切断(cutoff)と窪み (ankle) の2つの構造が明らかになった。Augerの E_{CUTOFF} は、TAより $\sim 40\%$ 小さい。
2. **粒子種**: $10^{19.3}$ eV までの領域は、陽子 and/or ヘリウム。p / He の差は $X_{\max}$ の系統誤差より小さい。Augerでは、p > He への遷移に続いて、 $10^{19.3}$ eV 以上で、中重核 (N) に遷移する兆候がある。粒子種決定においては相互作用モデルからの不定性が大きい。
3. **異方性と発生源天体**: カットオフを超えたエネルギーで、中規模角度スケールの異方性の兆候が見える。北半球のTAでは、おおぐま座方向に半径 20° のホットスポット (3.4σ の有意度)。南半球のAugerでは、Cen A から 15° 以内に過剰がある (ただし $p=1.4\%$)。
4. **GZK - ν , - γ** : ニュートリノ、ガンマのリミット。GZK (by proton) まで、あと ~ 1 桁。

■ 以上の観測結果は、 E_{CUTOFF} の違いをのぞくと、統計的/系統的不定性の範囲内で、TA と Auger で一致する。 E_{CUTOFF} の違いが物理なのか、測定の系統誤差なのか、理解できていない。⁵³

Next Step

- TAx4
- Auger prime
- TALE and other LE detectors
- K-EUSO

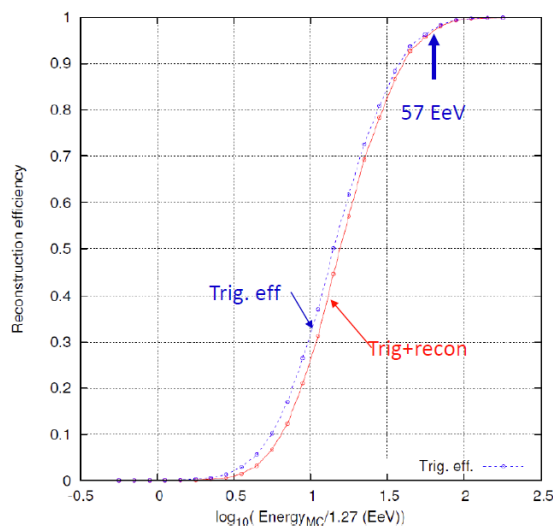
まとめ-2: 物理的描像と、これから

- TAデータはGZKモデルで、Auger データは加速限界モデルで説明できる。
 - A. GZKモデル: 発生源の特定が期待できる(TAx4:ホットスポットの確定と精査)。実験的には、カットオフ領域で陽子であることの確認が必要。陽子を 10^{21}eV まで加速できる発生源が必要。 $P \sim 2.2$ はフェルミ1次加速と良い一致。
 - B. (Rigidity 依存の)加速限界モデル: 発生源の特定は期待できない(源で鉄)。実験的には、カットオフ領域で中重核が多いこと・異方性のないことの確認が必要。Ankleを作る、 $10^{18.7}\text{eV}$ までの銀河系内(or外)の陽子源が必要。陽子を加速せず、He/CNO を選択的に加速する、非常にハード($P \sim 1$)な発生源が必要。
- 物理モデルの成否を見分ける多くの実験が始動しつつある(大発展期)。
 - TAx4 (TAの4倍拡張): カットオフ領域のスペクトル・粒子種・異方性
 - Auger Prime(水タンクにシンチ増設): 発生源探索、(E_{CUTOFF} 問題の理解)
 - TALE・HEAT・Tunka/Rex・NICHE・LOFAR・AERA・ICETOP: 10^{16}eV (Knee)まで探索。発生源の銀河系内外遷移・窪み構造の理解。電波とチェレンコフ光も参加。
 - K-EUSO (宇宙からの観測): スペクトルとFLUXは、南北で等方か?
 - IceCube・KM3net(氷床・深海): GZK Neutrino($\sim 10^{18}\text{eV}$)の検出
 - TAx4, Auger prime: GZK γ ($\sim 10^{18}\text{eV}$)の検出

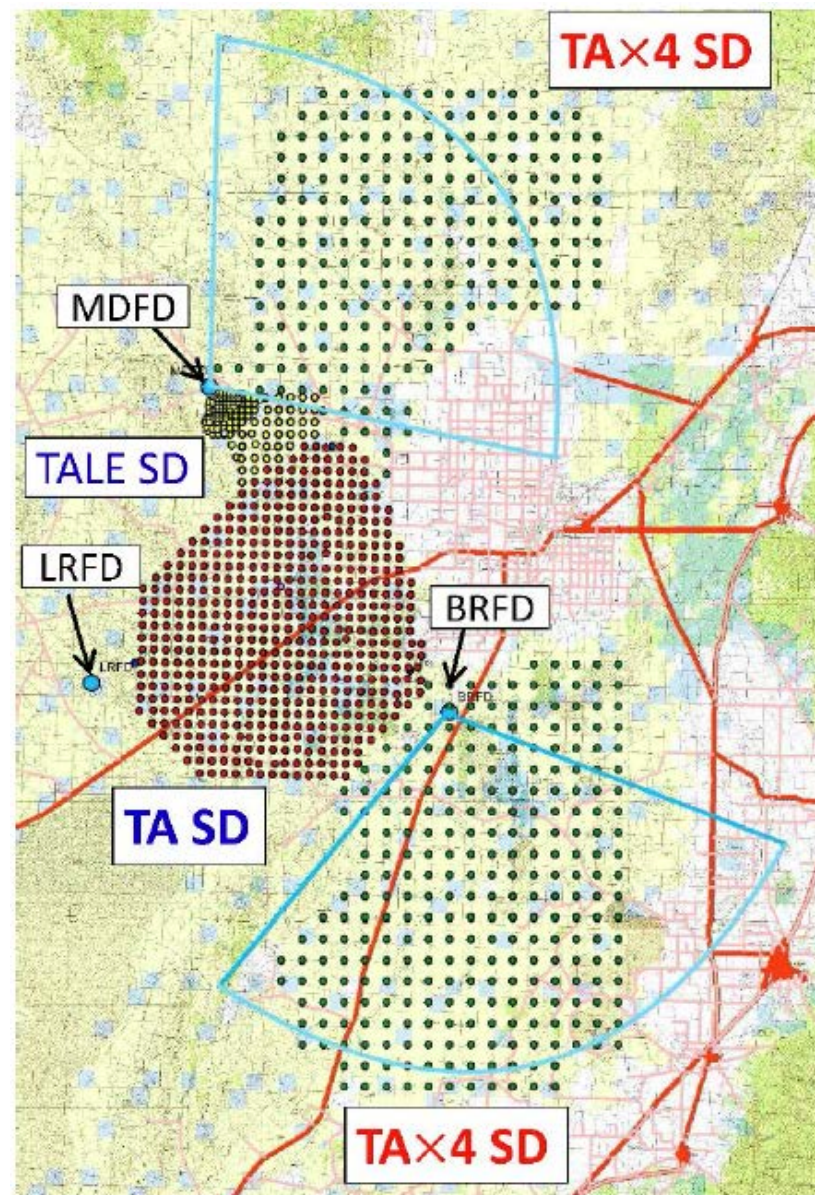


TAx4 to study cut-off region

- Quadrupole TA SD ($\sim 3000 \text{ km}^2$)
 - 500 scintillator SDs
 - 2.08 km spacing
- 2 FD stations



- Get 19 TA years of SD data by 2010
- Get 16.3 TA years of hybrid data





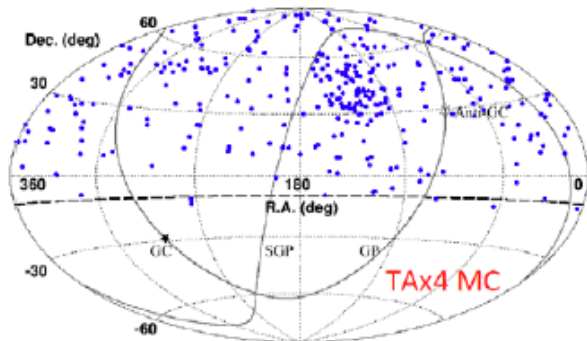
TAx4: projected results by simulation

1. ホットスポットを5 σ 以上で確認

(1) One Hotspot

Hotspot Signal

80-18.9=61events
(RA, Dec)=(145°, 45°)
Gaussian $\sigma=10^\circ$

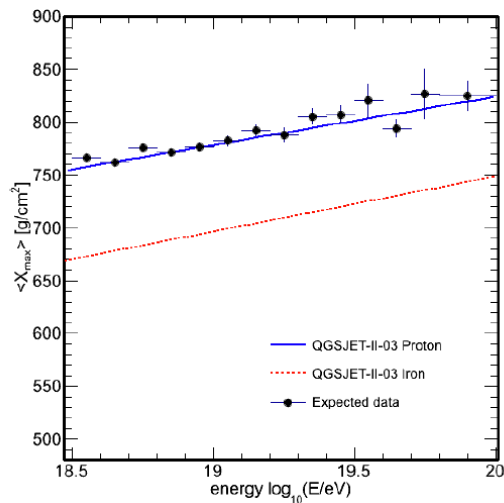
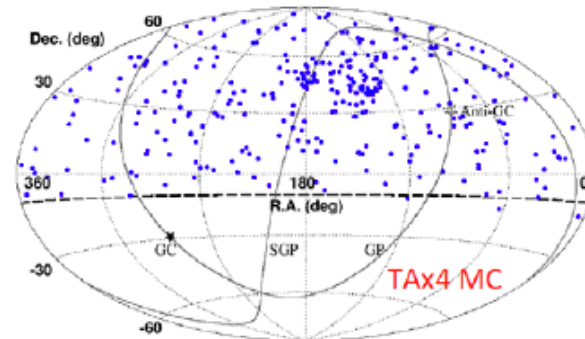


(2) Double Hotspot

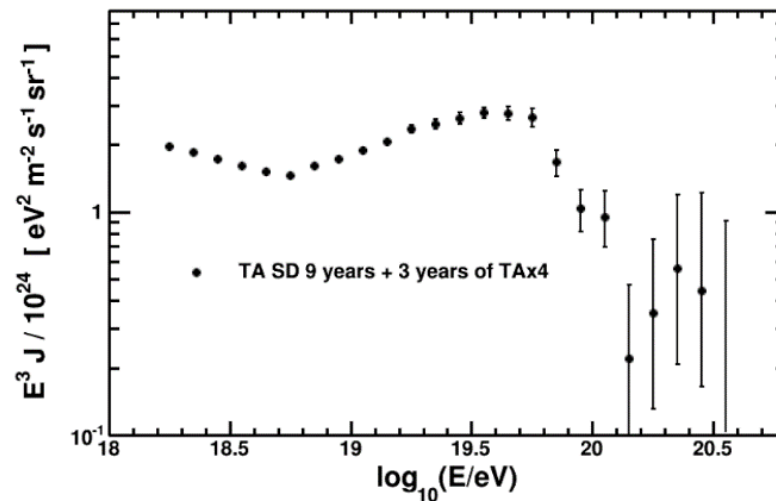
Hotspot Signal

Total 61 events

1. 41events
(RA, Dec)=(145°, 40°)
Gaussian $\sigma=10^\circ$
2. 20events
(RA, Dec)=(175°, 40°)
Gaussian $\sigma=5^\circ$



2. ホットスポット領域の粒子成分



3. 近傍の10²⁰eV超のイベント

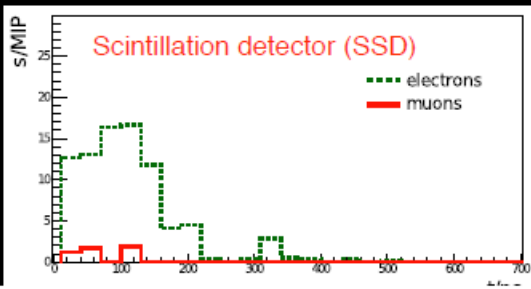
Auger prime for ev-by-ev composition tag. Scintillator spectrum in south.

After 10 years of operation: AugerPrime science case

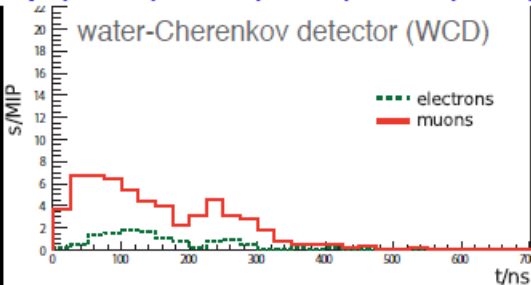
- Understand the origin of the flux suppression
- Do composition enhanced anisotropy studies
- Study UHE EAS properties and hadronic interactions

Composition measurements up to 10^{20} eV by Surface Detector array

Complementarity of response
to EAS em and μ components



$$S_{\mu}(\text{WCD}) = a S(\text{WCD}) + b S(\text{SSD})$$



a and b from simulations
Weak dependence on mass and
models

Scintillator (SSD) on top of a WCD



ALSO

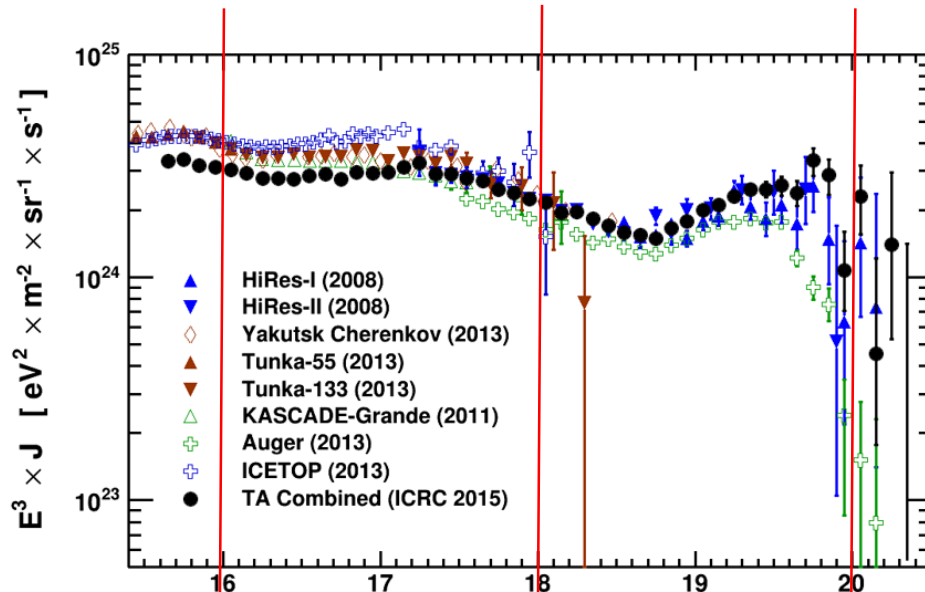
New electronics: faster
sampling of ADC traces,
better timing accuracy,
increased dynamic range

Underground muon
detectors in the 750 m array
for cross-checks based on
direct muon measurements

Extension of the FD duty
cycle from $\approx 15\%$ to $\approx 20\%$

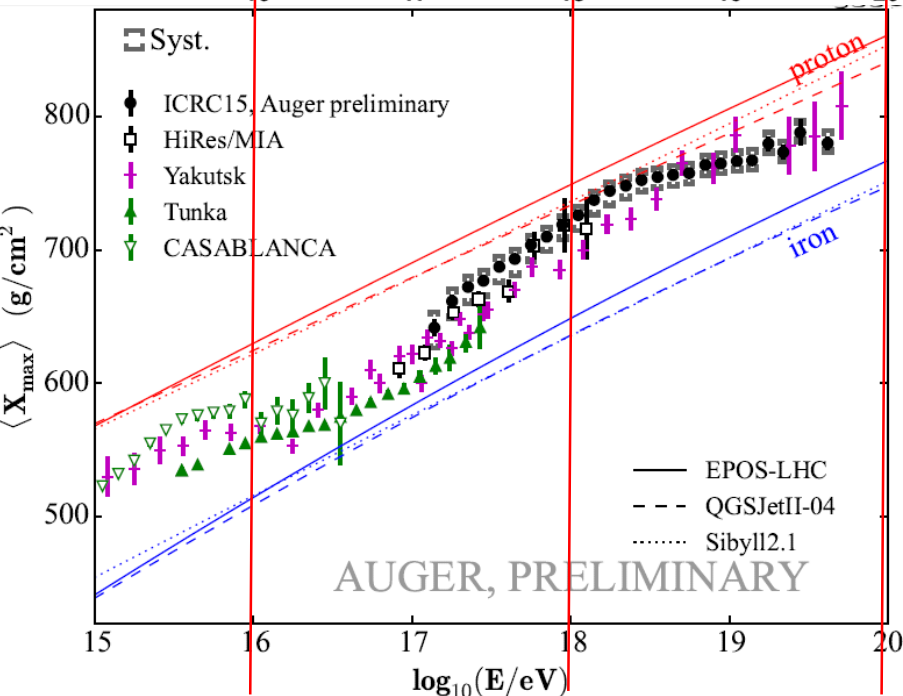
[see talk by Ralph Engel on August 5th]

Wide Range Measurement of Spectrum & Xmax

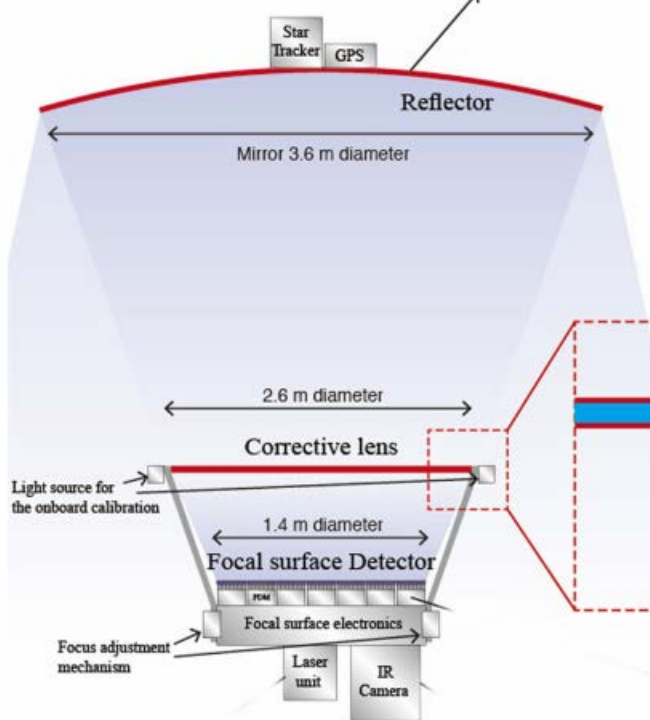


SD/FD SD/FD Cherenkov
by TALE, HEAT, NICHE,
Tunka, Tunka-REX,
LOFAR, AERA, IceTOP.
Radio ice tank SD

to study from Galactic to
extra-Galactic Transition



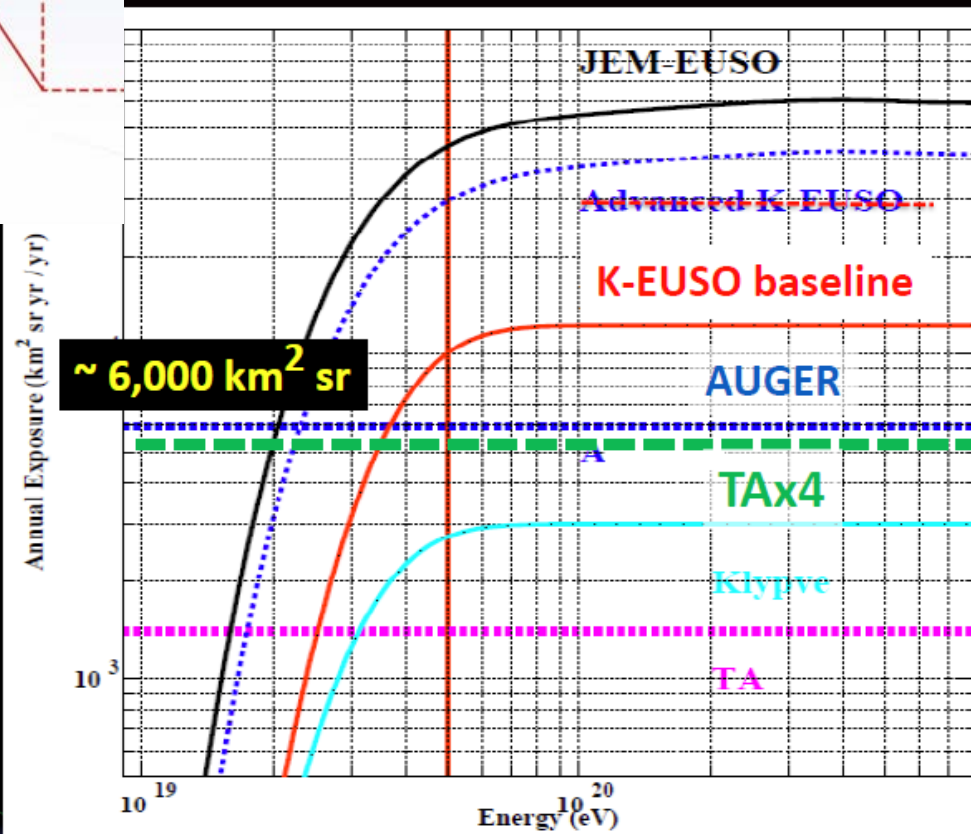
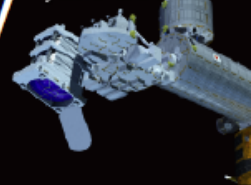
Several distinct features are
becoming clear in Spectrum &
Xmax for $10^{16} - 10^{18}$ eV.



K-EUSO to study North-South
Universality of UHECR.

Annual Exposure vs Energy

JEM-EUSO



~ 12,000 km² sr

JEM-EUSO perform.:
 $\Delta E/E < 30\%$
 $\Delta \text{angle} \sim 2.0^\circ$
 $\Delta X_{\text{max}} \sim 120 \text{ g/cm}^2$
 @ 10^{20} eV , $\theta = 60^\circ$
 Total exp. eff $\sim 13\%$
 Expos. unif. $\sim \pm 10\%$

By T. Ebisuzaki
for K-EUSO design

M. Casolino and T. Ebisuzaki,
UHECR2014, Springdale

JEM-EUSO collaboration 15 Countries, 85 Institutes as of December, 2013



まとめ-3: 何かおかしい！

■ ...にもかかわらず、UHECRのつくる空気シャワーはよく理解できていない。

- ・ TA: $E_{SD} \sim E_{FD} \times 1.27$ (エネルギー再校正で~1.5倍まで?)
- ・ Auger: 測定された μ 粒子密度が、MC予想の 1.3 - 1.8 倍 (by P.Ghia)

シャワー粒子(電磁成分、ハドロン/ μ 成分とも)が、MC予想より広がっている。加速器データによるモデル・MCの改善が進んでいるが、現状では限定的な改善。極高エネルギーでのハドロン・原子核相互作用で、見逃していることがあるのか？

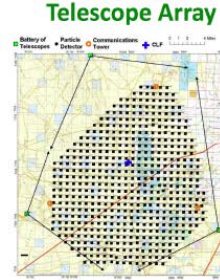
■ 見えてきた中・大規模の異方性は、大規模構造 LSS とは少し違う(離れている)ように見える。なぜVIRGOから来ないのか？

■ GZKカットオフのエネルギーは、なぜ加速限界エネルギーと一致するのか？ 窪みのエネルギーが、なぜ系内から系外への遷移エネルギーと一致するのか？

■ 実験装置(カロリメトリ)・データ解析の技術的な点では、水タンクとシンチが、カットオフ以上のエネルギー測定で、なぜこんなに異なる値(linearity)を与えるのか？

■■■ 解答を与える次世代検出器には、大規模(acceptance)・高機能・低 Systematics が必要。UHEニュートリノ・ガンマ線を測定したい。雷成因や大気科学などの環境科学に貢献したい。JEM/EUSO / EUSO-next, super Ground Array (world-TA2)。Multi-Messenger 観測の重要な一員となる。宇宙における、極高エネルギー粒子・核物理の理解。粒子線天文学のはじまり...

Charles Jui Telescope Array Highlight



Mazda 2



TA×4



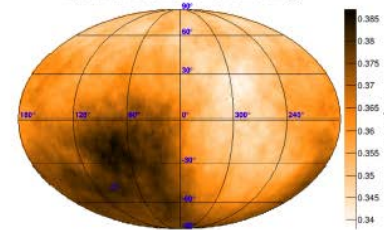
Mazda Rx8

ICRC 2015 Den Haag CR Air Shower Rapporteur's Summary by Valerio Verzi

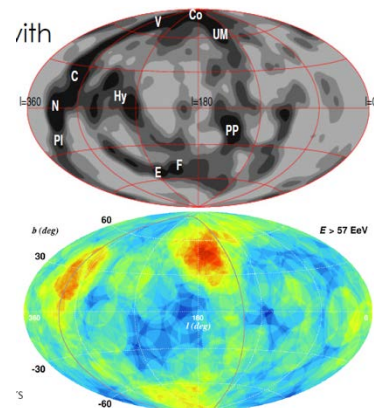
57

- ▶ Spectrum (TA+Auger)
 - ▶ Anisotropy (TA+Auger), → ICRC #607, Astrophys.J. 794 (201)
 - ▶ Composition (TA+Auger) → this presentation
 - ▶ Hadronic Interactions (IC+TA+Auger)
 - ▶ Multi-Messenger (IC+Auger+TA)
 - ▶ Anisotropy (IC+Auger+TA) → ICRC #346
- FAST *T.Fujii*, 323

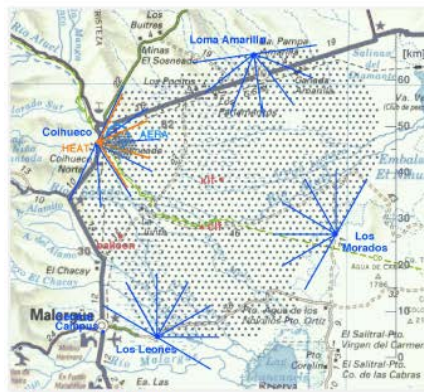
Equatorial Coordinates - 60° smoothing



$$3000 \text{ km}^2 + 3000 \text{ km}^2 =$$

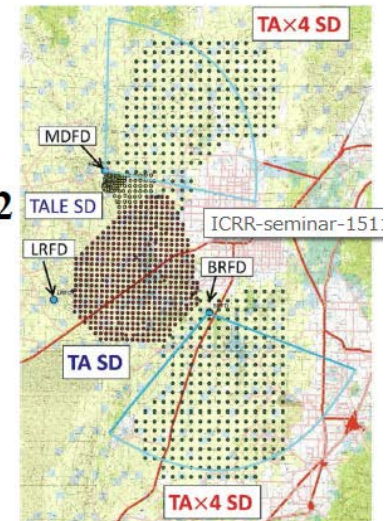


K. Kawata, ICRC2015,
Den Haag



AugerPrime

V. Verzi, ICRC2015,
Den Haag Rapporteur Talk



58

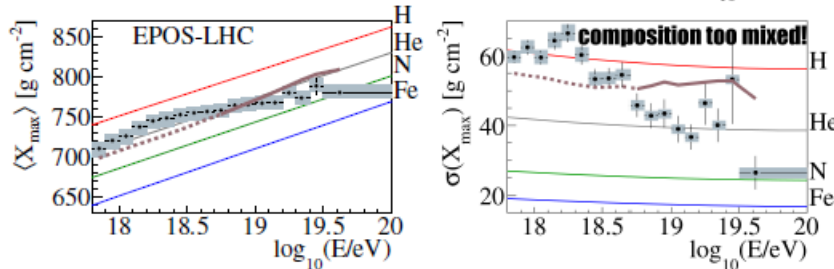
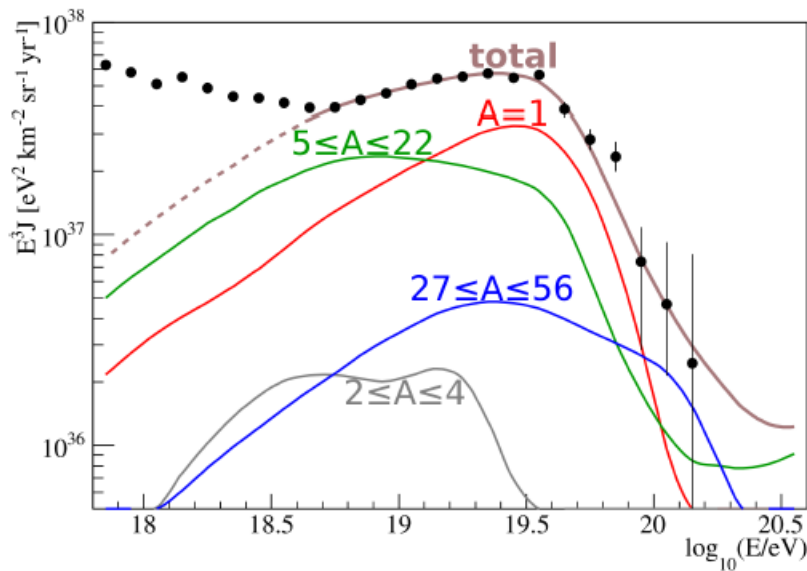
ご清聴ありがとうございました。

最高エネルギー宇宙線、TA への
研究所と宇宙線研究分野の皆さまの
あついご支援、ありがとうございます。
TAの研究者は、応援に支えられて、
これからも頑張って研究を続けます。

PAO Spectrum and Xmax, 2nd best solution

Cutoff created by “GZK”, but this is disfavored by 7.5 σ

2nd local minimum (SPG propagation, EPOS-LHC air interactions)



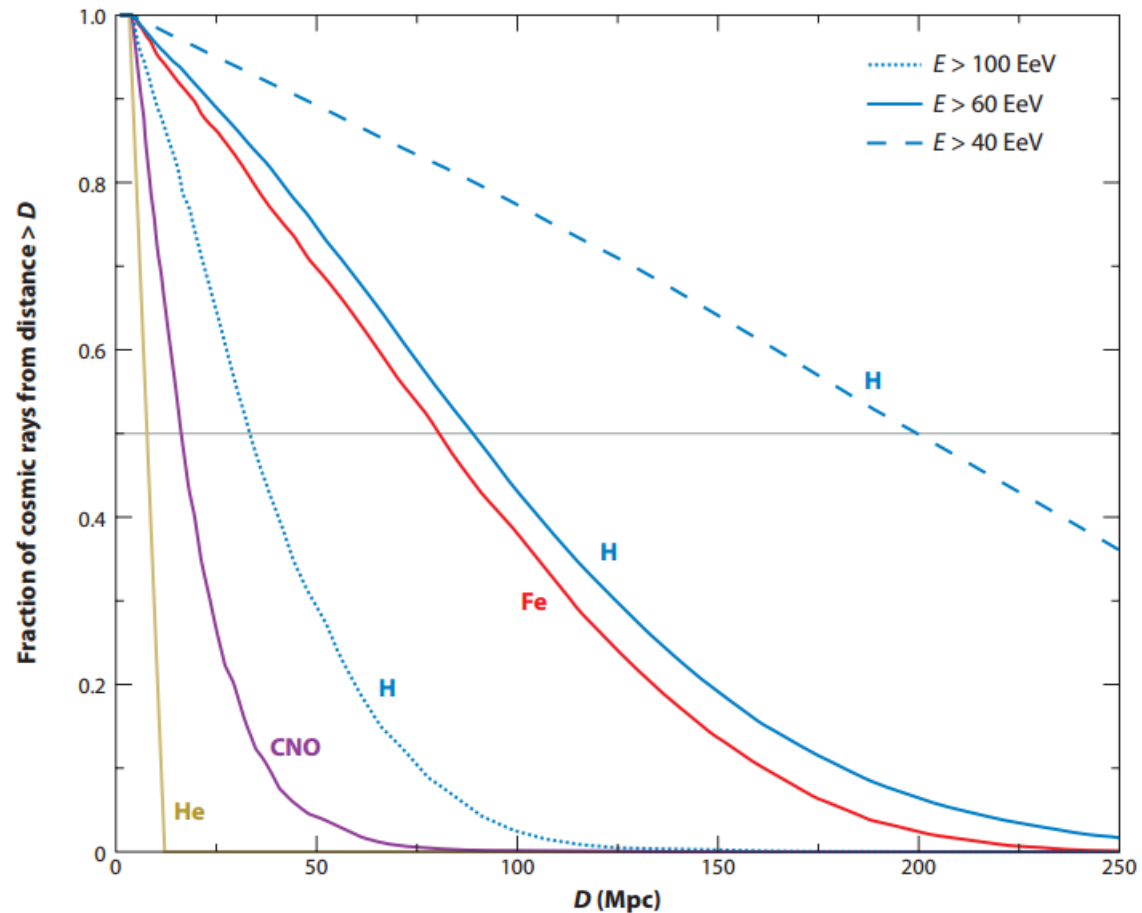
- $J_0 = 4.53 \times 10^{19} \text{ eV}^{-1} \text{ Mpc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$ (at 10^{18} eV)
- $\gamma = 2.03$
- $R_{\text{cut}} = 10^{19.84} \text{ V}$
- 0.0% H, 0.0% He, 94.2% N, 5.8% Fe (at 10^{18} eV)
- $D/n = 235.0/119$ ($D_J = 14.5$, $D_{X_{\text{max}}} = 220.5$)
- $p = 5 \times 10^{-4}$

disfavoured at the 7.5 σ level

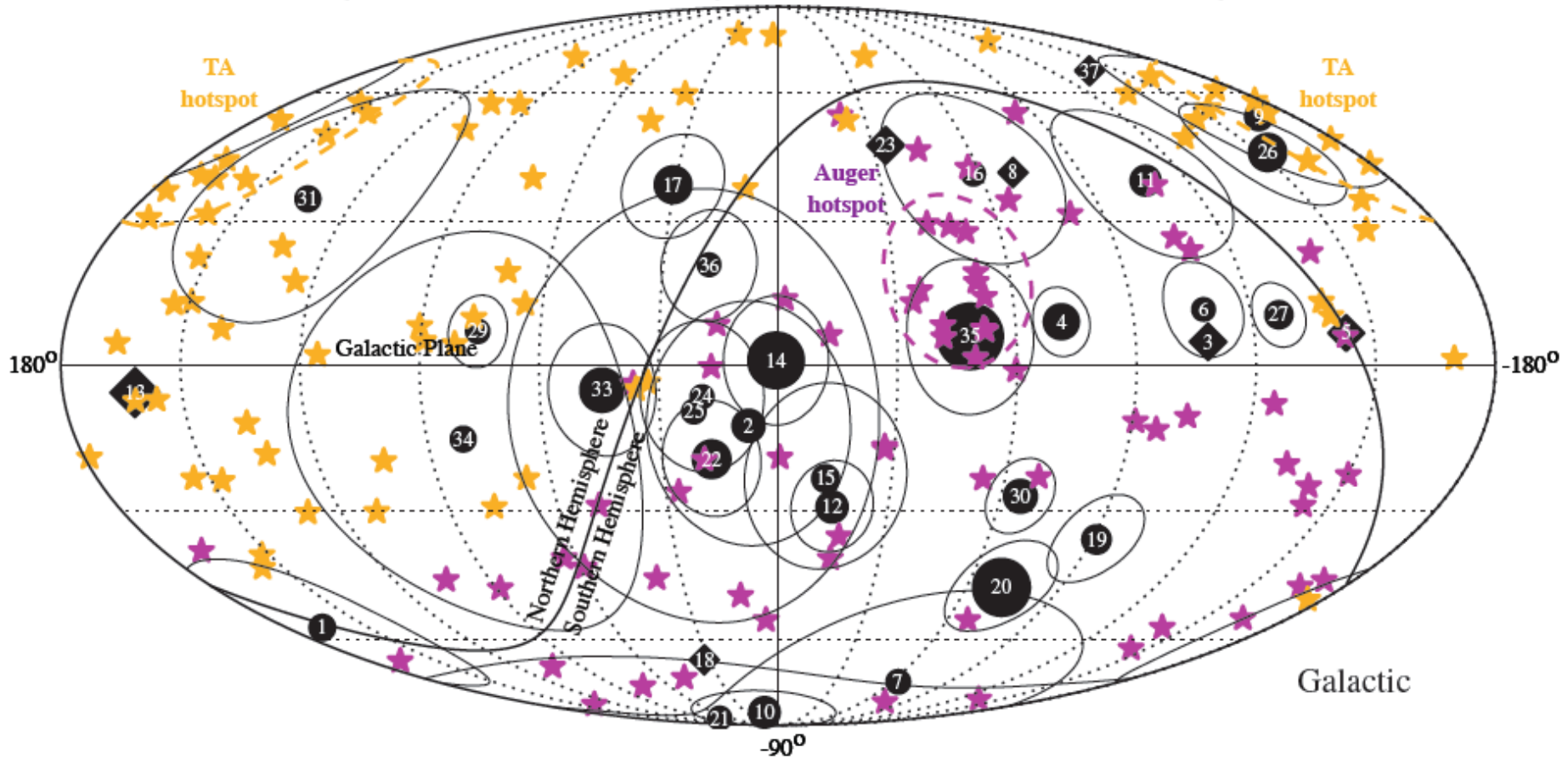
ソースでE-2の窒素核なら、カットオフが“GZK(核の光分解)”効果で説明できるが、 $\langle X_{\text{max}} \rangle$, $\sigma(X_{\text{max}})$ を説明できない。

Figure 3

Fraction of cosmic rays that survives propagation over a distance $> D$, for protons above 40, 60, and 100 EeV and for He, CNO, and Fe above 60 EeV. The gray solid line shows where 50% of a given species can originate for a given atomic mass and energy. At trans-GZK energies ($E \gtrsim 60$ EeV), only protons and iron survive the propagation over $D \gtrsim 50$ Mpc.



Auger 2010 $E > 55$ EeV (magenta) / TA 2014 $E > 57$ EeV (orange)



まとめ-1: わかったこと

■ 新世代の検出器 TA と Auger は、地表粒子アレイ(SD)と大気蛍光望遠鏡(FD)を使って UHECR ($E > 10^{18}$ eV) の観測を行っている。SDの観測感度(面積)は前世代より一桁大きい。FDに必要な大気蛍光の理解(発光効率の測定など)も、大きく進んだ。

■ SDによるエネルギー決定精度は、同時観測するFDによる較正で $< \sim 20\%$ (=FDの E 系統誤差) になった。FDによる $X_{\max}$ の測定で、平均的な粒子種 (p,...Fe) がわかるようになった。ただし、 $E > \sim 10^{19.6}$ eV の領域では、いずれも統計が不十分である。

■ TAとAugerで新しく得られた知見:

1. **スペクトル**: $\sim 10^{18}$ eV 以上の領域で、切断(cutoff)と窪み(ankle)の2つの構造が明らかになった。Augerの E_{CUTOFF} は、TAより $\sim 40\%$ 小さい。
2. **粒子種**: $10^{19.3}$ eV までの領域は、陽子 and/or ヘリウム。p / He の差は $X_{\max}$ の系統誤差より小さい。Augerでは、p > He への遷移に続いて、 $10^{19.3}$ eV 以上で、中重核(N)に遷移する兆候がある。粒子種決定においては相互作用モデルからの不定性が大きい。
3. **異方性と発生源天体**: カットオフを超えたエネルギーで、中規模角度スケールの異方性の兆候が見える。北半球のTAでは、おおぐま座方向に半径 20° のホットスポット (3.4σ の有意度)。南半球のAugerでは、Cen A から 15° 以内に過剰がある (ただし $p=1.4\%$)。
4. **GZK - ν , - γ** : ニュートリノ、ガンマのリミット。GZK (by proton) まで、あと ~ 1 桁。

■ 以上の観測結果は、 E_{CUTOFF} の違いをのぞくと、統計的/系統的不定性の範囲内で、TA と Auger で一致する。 E_{CUTOFF} の違いが物理なのか、測定の系統誤差なのか、理解できていない。

まとめ-2: 物理的描像と、これから

- TAデータはGZKモデルで、Auger データは加速限界モデルで説明できる。
 - A. GZKモデル: 発生源の特定が期待できる(TAx4:ホットスポットの確定と精査)。実験的には、カットオフ領域で陽子であることの確認が必要。陽子を 10^{21}eV まで加速できる発生源が必要。P~2.2 はフェルミ1次加速と良い一致。
 - B. (Rigidity 依存の)加速限界モデル: 発生源の特定は期待できない(源で鉄)。実験的には、カットオフ領域で中重核が多いこと・異方性のないことの確認が必要。Ankleを作る、 $10^{18.7}\text{eV}$ までの銀河系内(or外)の陽子源が必要。陽子を加速せず、He/CNOを選択的に加速する、非常にハード(P~1)な発生源が必要。
- 物理モデルの成否を見分ける多くの実験が始動しつつある(大発展期)。
 - TAx4 (TAの4倍拡張): カットオフ領域のスペクトル・粒子種・異方性
 - Auger Prime(水タンクにシンチ増設): 発生源探査、(E_{CUTOFF} 問題の理解)
 - TALE・HEAT・Tunka/Rex・NICHE・LOFAR・AERA・ICETOP: 10^{16}eV (Knee)まで探査。発生源の銀河系内外遷移・窪み構造の理解。電波とチェレンコフ光も参加。
 - K-EUSO (宇宙からの観測): スペクトルとFlux は、南北で等方か?
 - IceCube・KM3net(氷床・深海): GZK Neutrino($\sim 10^{18}\text{eV}$)の検出
 - TAx4, Auger prime: GZK γ ($\sim 10^{18}\text{eV}$)の検出