

超高エネルギー宇宙線観測分野： 実験のレビュー

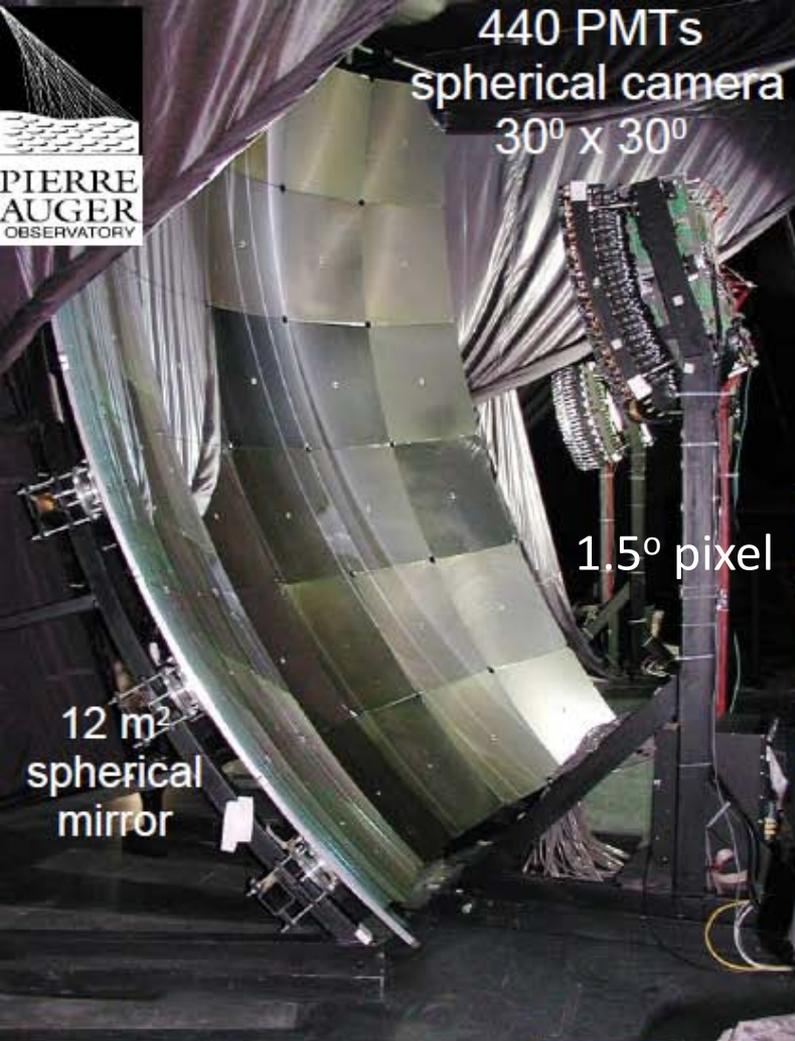
第3回 CRC town meeting

2012年6月30日
東工大 西3号館 W331室

東大宇宙線研・福島正己

内 容

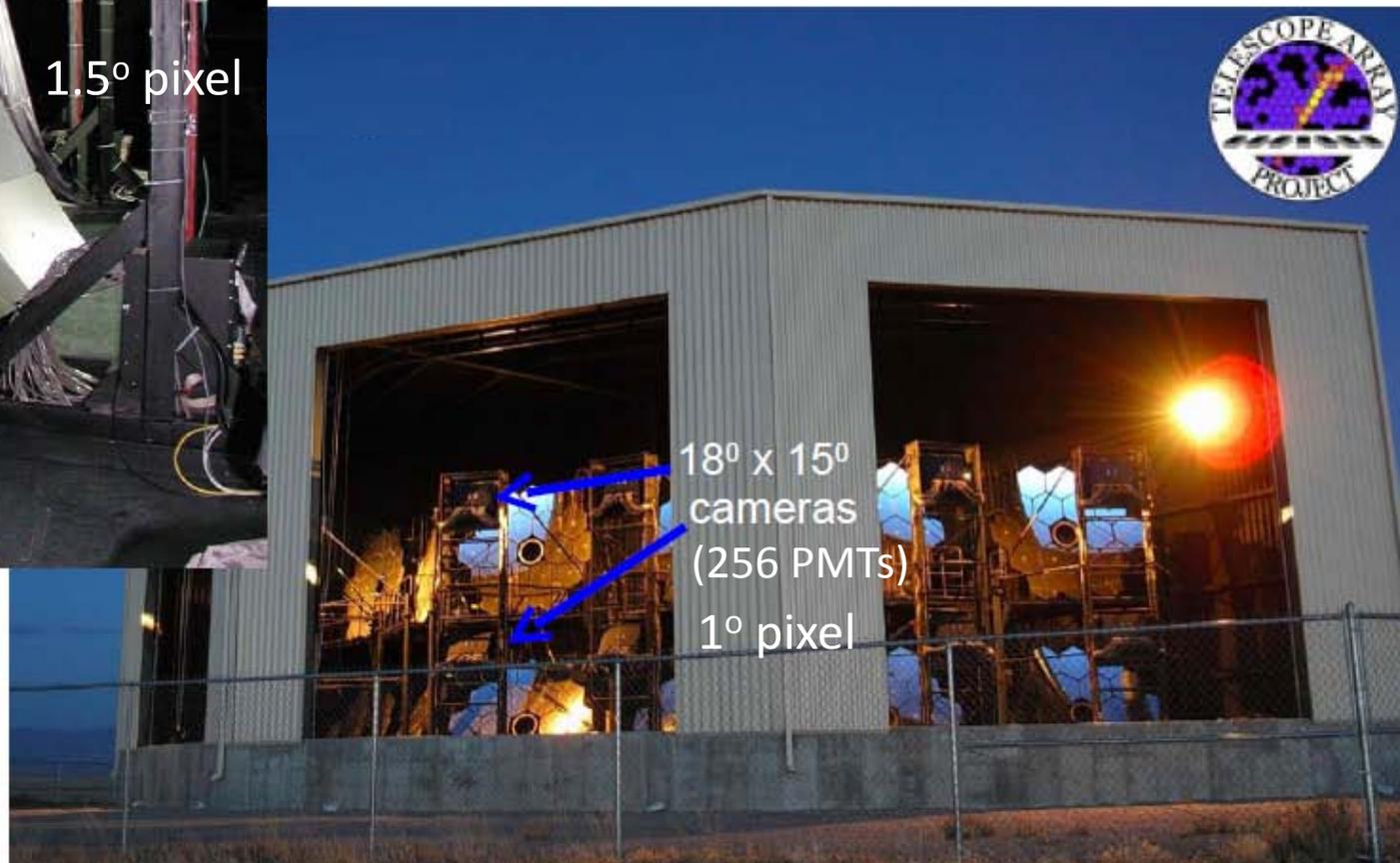
- 実験: TA and Auger (AGASA, HiRes, Yakutsk)
- スペクトラムの測定
- 質量組成
- 異方性
- 現状のまとめと課題
- 電波観測のR&D: MHz, GHz (山本常夏さん)
- 将来計画: Ground and Space



Beautiful Eyes

FD

Fluorescence
Detector



Auger

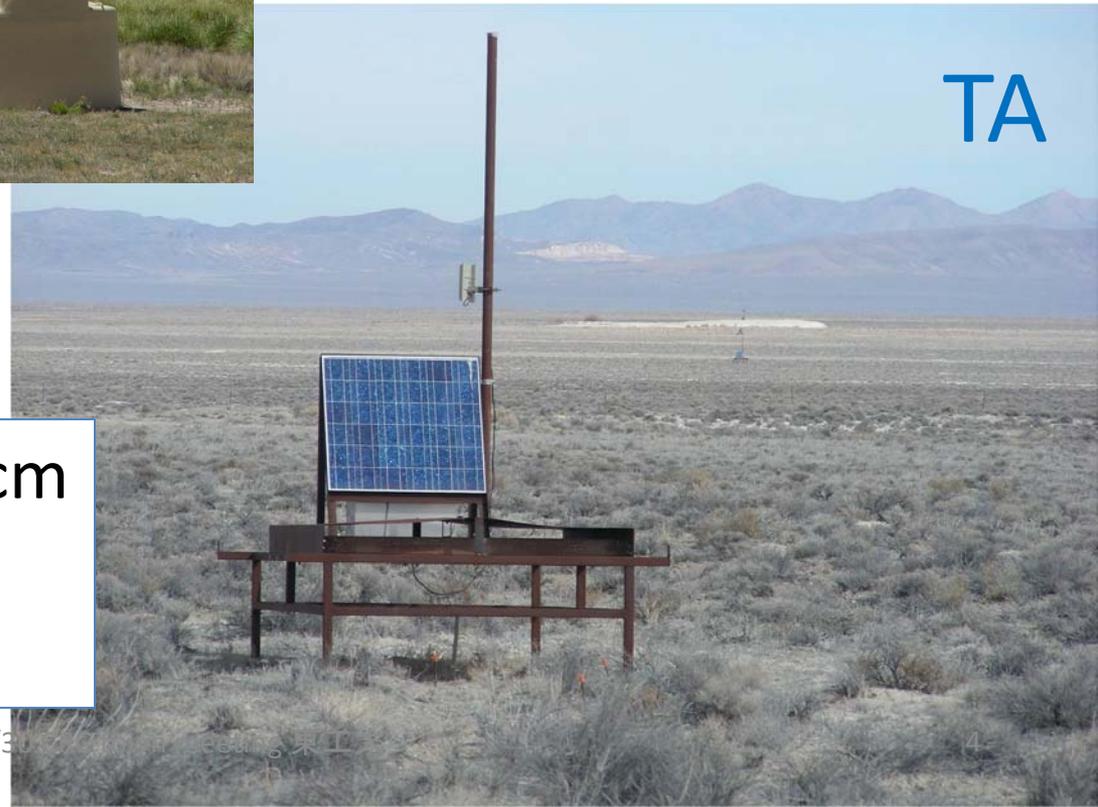


$S=10\text{m}^2$, $h=1.2\text{m}$
Water Tank

$S=3\text{m}^2$, $t=1.2\text{cm}$
Plastic Scint.
2-layer

SD

Surface
Detector



TA

‘Hybrid’ technique



FD

Fluorescence
Detector

- E + longitudinal development
- Time \approx direction
- \approx 10% duty cycle

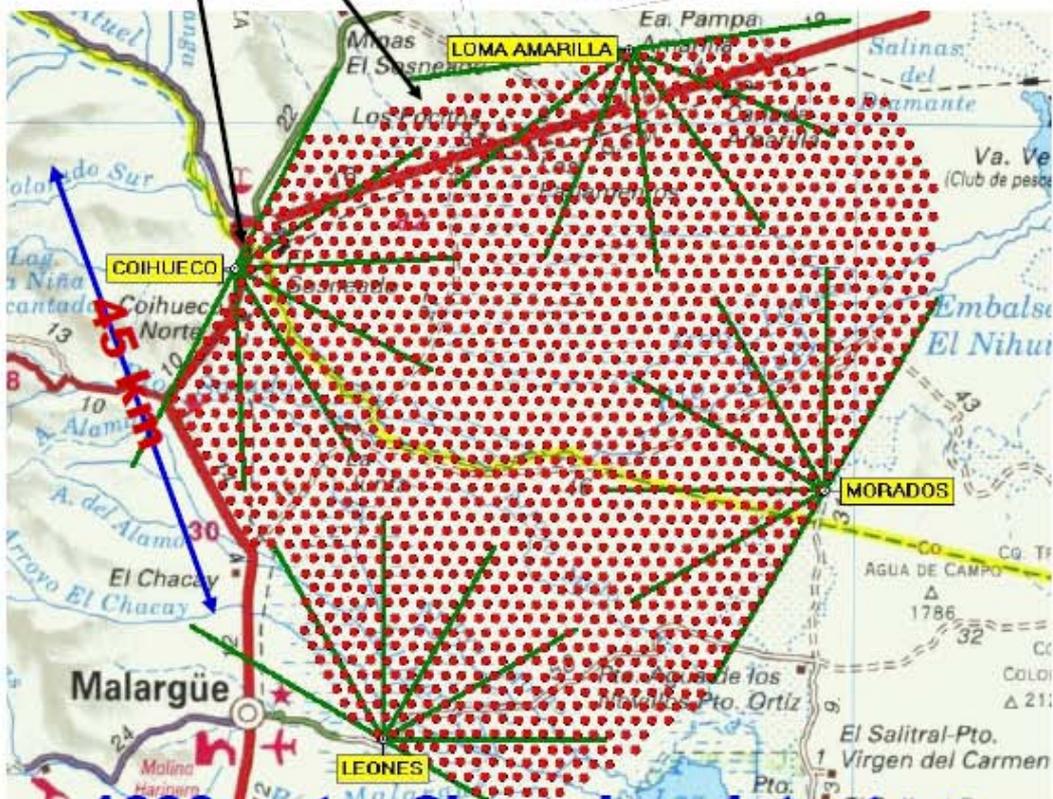
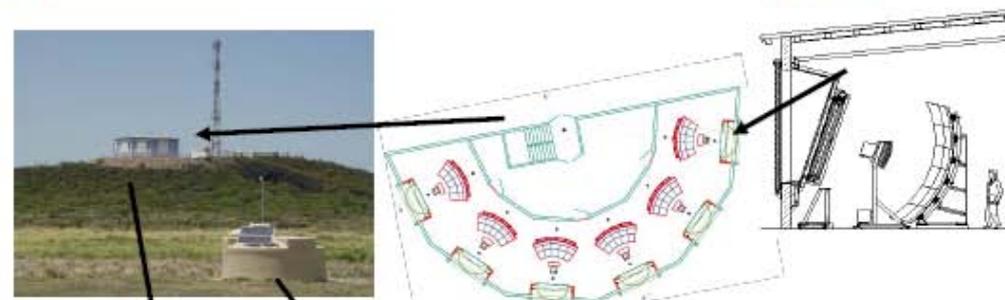
SD

Surface Detector

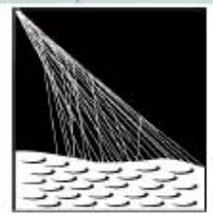
- Shower size \approx E
- Time \approx direction
- 100% duty cycle

The Pierre Auger Observatory

Argentina, Mendoza, Malargue
1.4 km altitude, 870 g/cm²



- Argentina
- Australia
- Bolivia
- Brazil
- Czech Republic
- France
- Germany
- Italy
- Mexico
- Netherlands
- Poland
- Slovenia
- Spain
- United Kingdom
- USA
- Vietnam



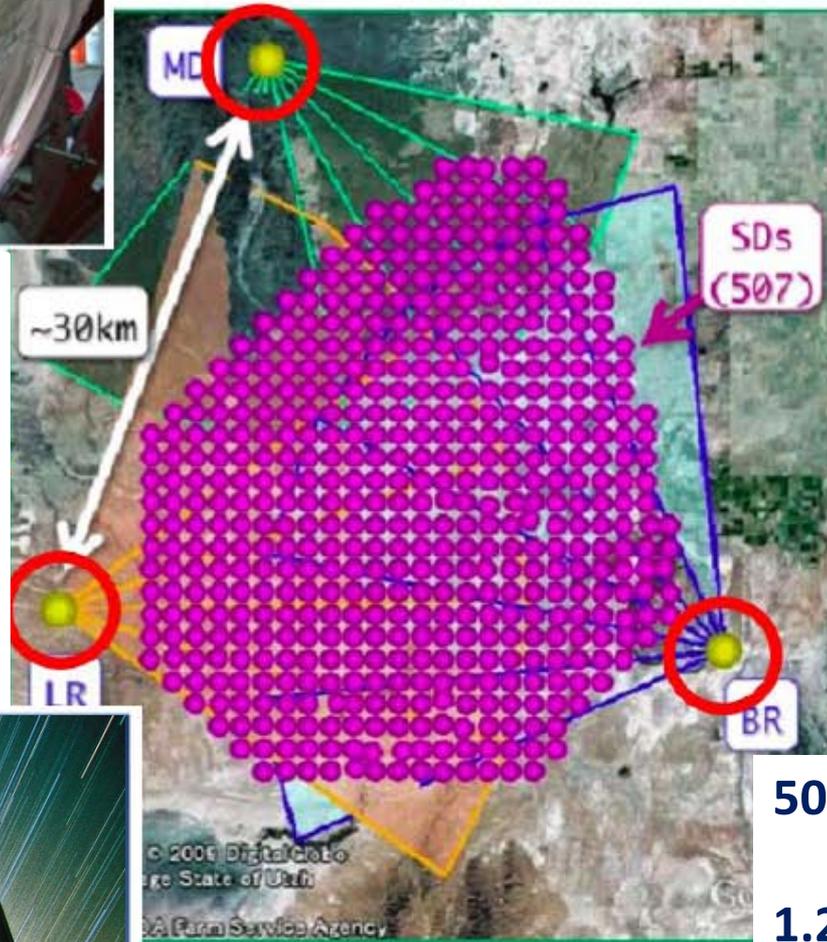
PIERRE AUGER OBSERVATORY

1600 water Cherenkov detectors,
(a la Haverah Park)

1.5 km spacing, 3000 km²,
4 x 6 fluorescence telescopes

The Telescope Array

Japan
US
Korea
Russia
Belgium



507 Plastic Scintillators,
(a la AGASA)
1.2 km spacing, **~700km²**
3 x 12 (or 14) telescopes

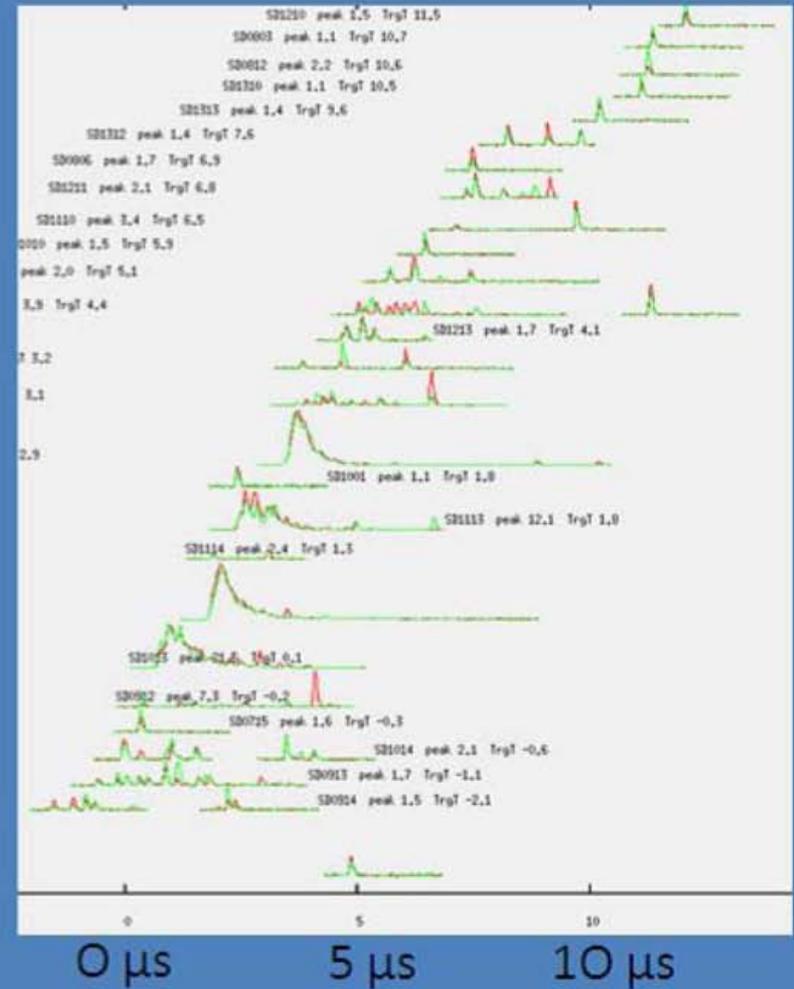
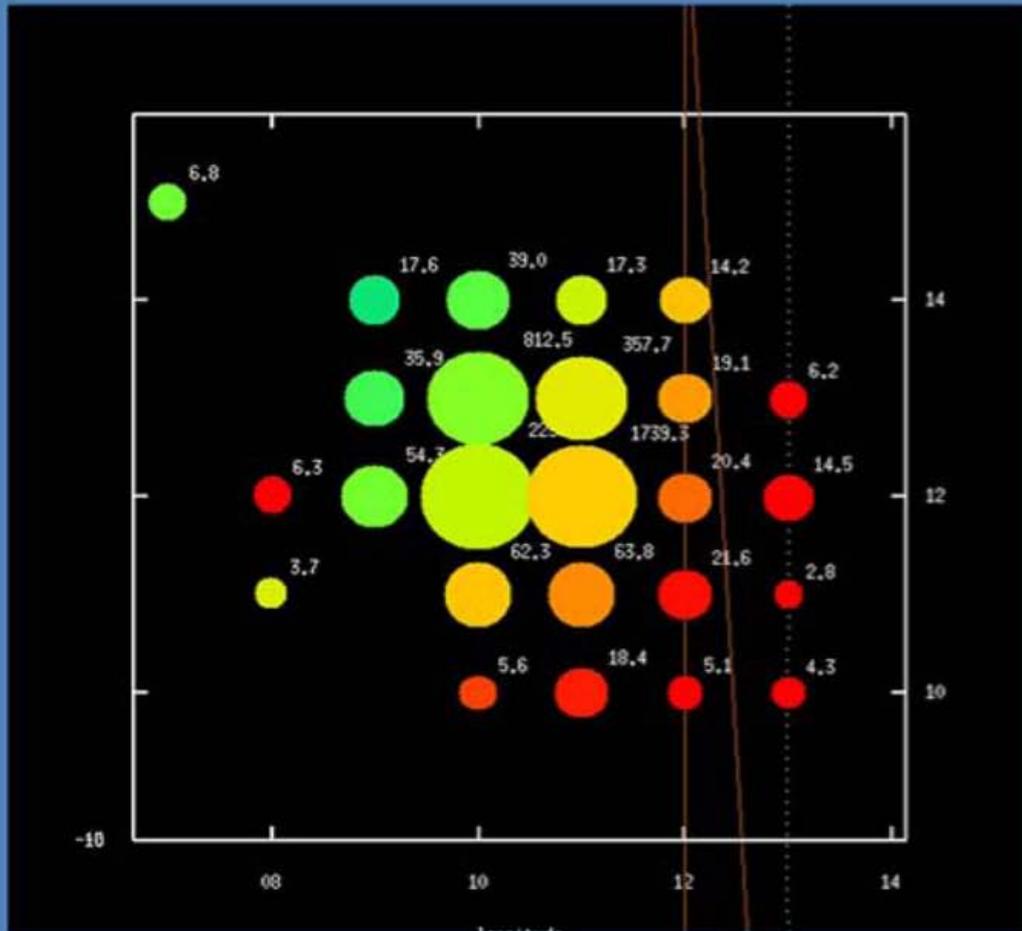
Located in Utah

1400 m altitude



Beautiful SD Event

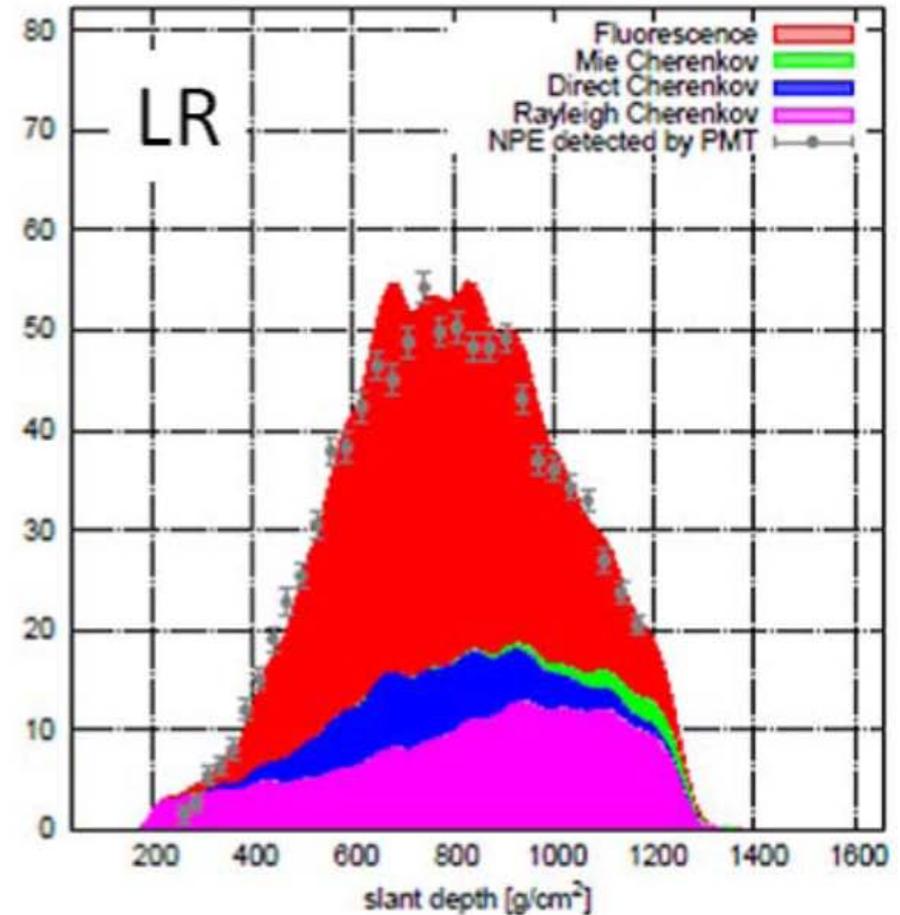
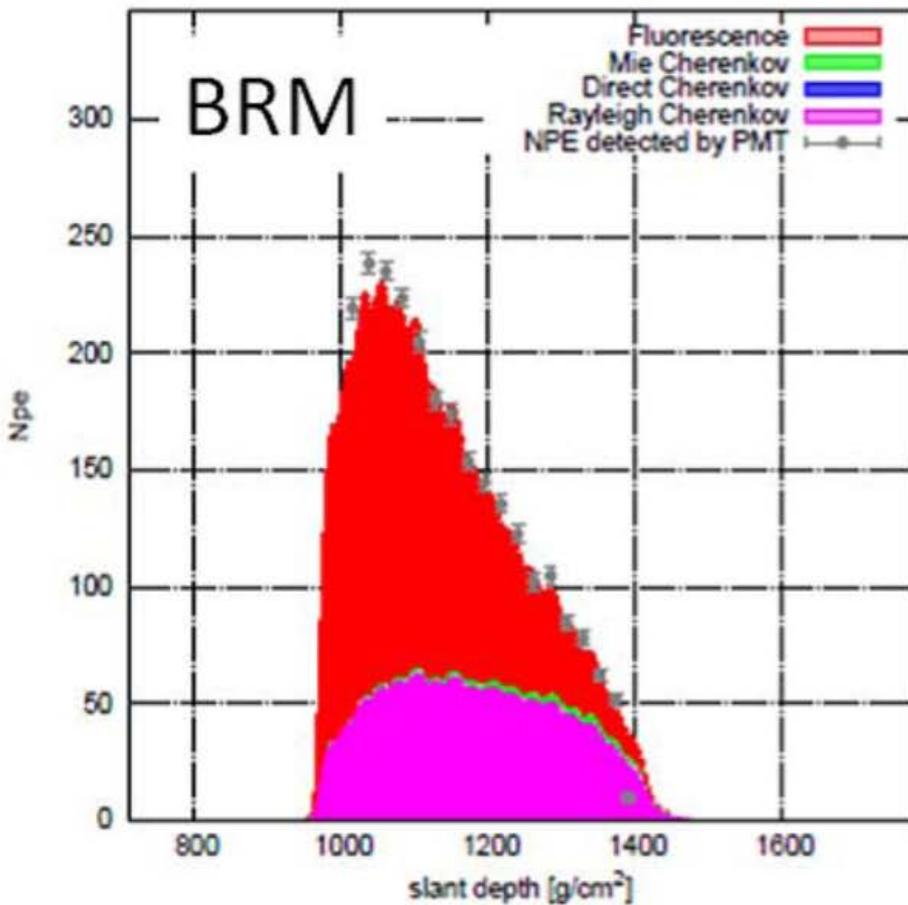
TA



Beautiful

FD Event

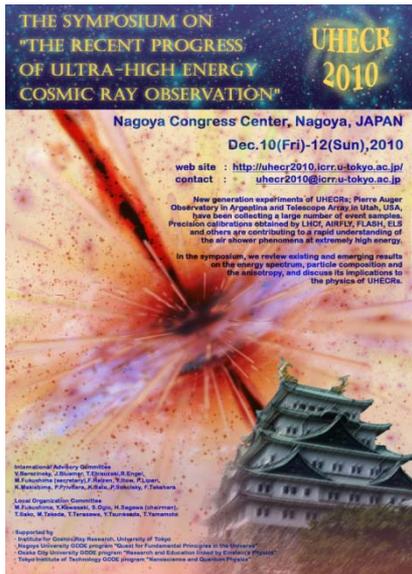
TA



UHECR 2012 at CERN, 2012/02/13-16



~230 participants



- UHECR 2010（名古屋）の follow-up
- UHECR で何が判ったのか？
- HiRes / Auger / TA 測定の現状と課題
- 将来計画
- 5 working groups formed from all expts.

以下の資料の多くは、このシンポによる。

<http://indico.cern.ch/conferenceDisplay.py?confId=152124>

① Energy Spectrum Working Group

Auger: B.R. Dawson, I.C. Mariş, M. Roth, F. Salamida,

Yakutsk: M. Pravdin, A. Sabourov

HiRes/TA: T. AbuZayyad, D. Ikeda, D. Ivanov, Y. Tsunesada

WG members

② 質量組成

HiRes/TA: Elliott Barcikowski, John W. Belz,
Yuichiro Tameda, Yoshiki Tsunesada

Yakutsk: Stanislav Knurenko, Yuri Egorov

Auger: Michael Unger, Vitor de Souza,
Jose Bellido

③ 異方性

O. Deligny, A. Ivanov, J. de Mello Neto, H. Sagawa,
P. Sommers, L. Timofeev, **P. Tinyakov**, I. Tkachev

④ ν, γ 検出

J. Alvarez-Muniz, G.I.Rubtsov, M.Risse, B.T.Stokes

⑤ MC: シャワーモデル

J.Allen, A. Castellina, R. Engel, K. Itakura, K. Kasahara, S. Knurenko,
S. Ostapchenko, T. Pierog, A. Sabourov, T. Sako, B. Stokes, R. Ulrich

⑥ Future Project wg:
シンポの後に結成。
JEM / EUSOも参加。
活動はこれから

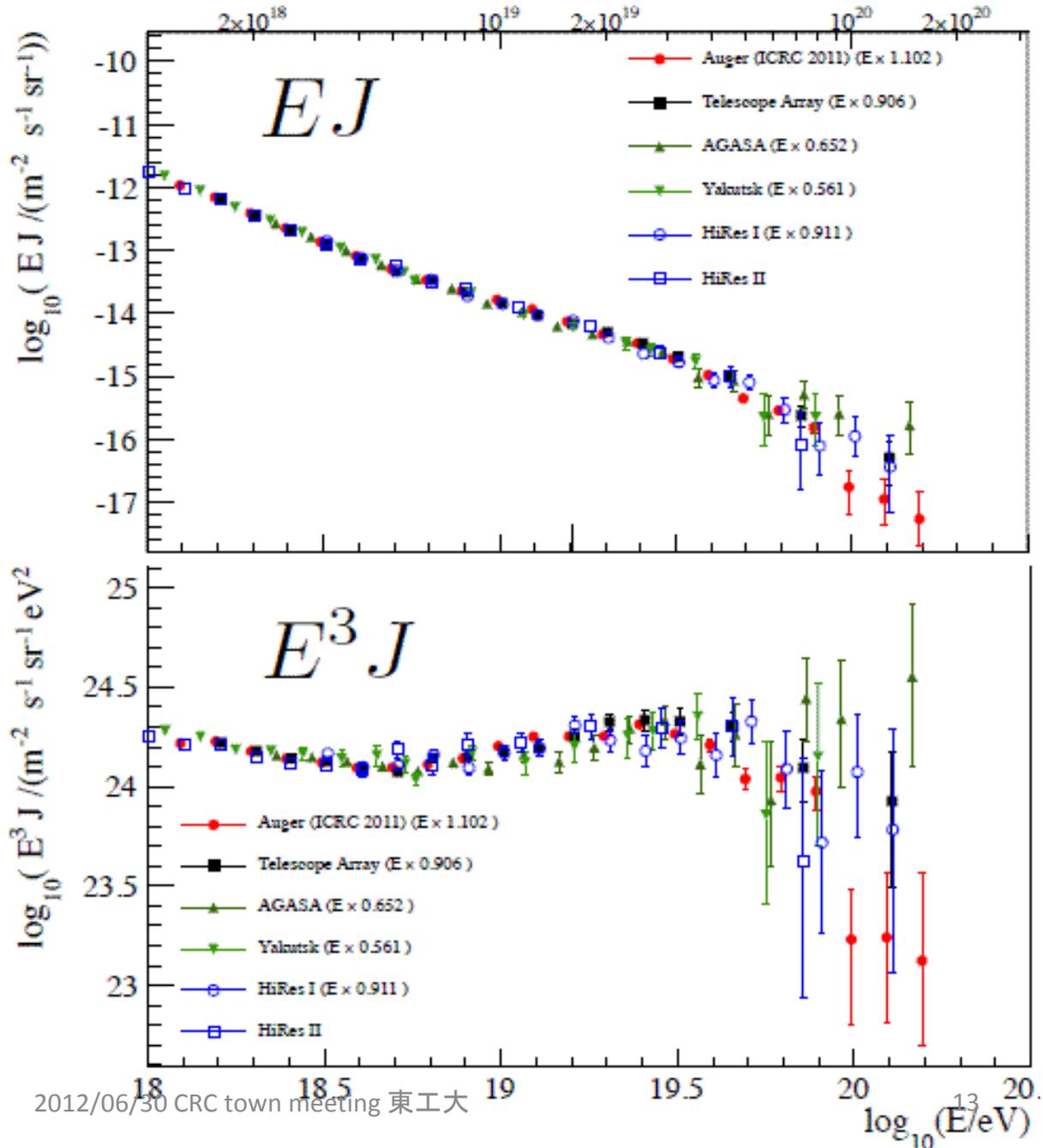
Energy Spectrum

wg report

Energy Spectra (after the scaling)

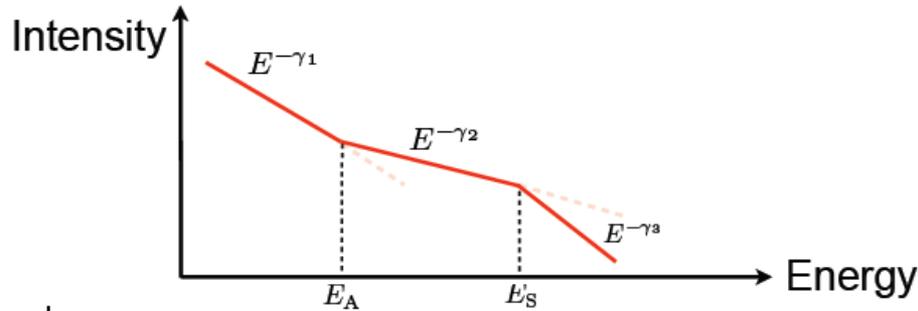
- We can find scaling factors to match the spectra: shape are similar (below $\log E=19.5$)

- Auger/HiRes/TA are in agreement well within the systematic uncertainties

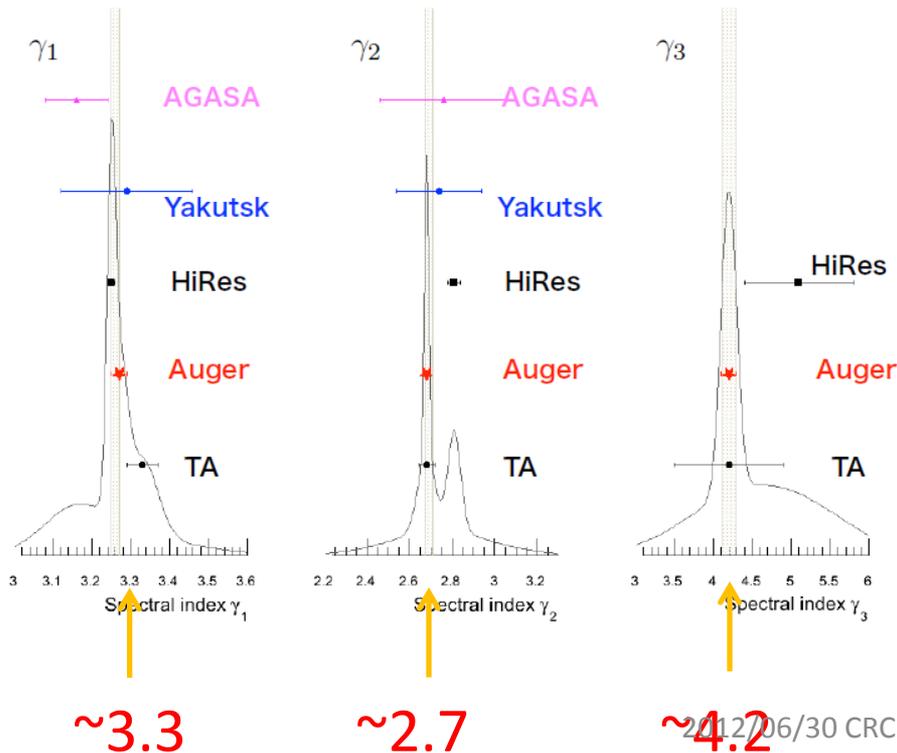


Break Point Energy and Power Index

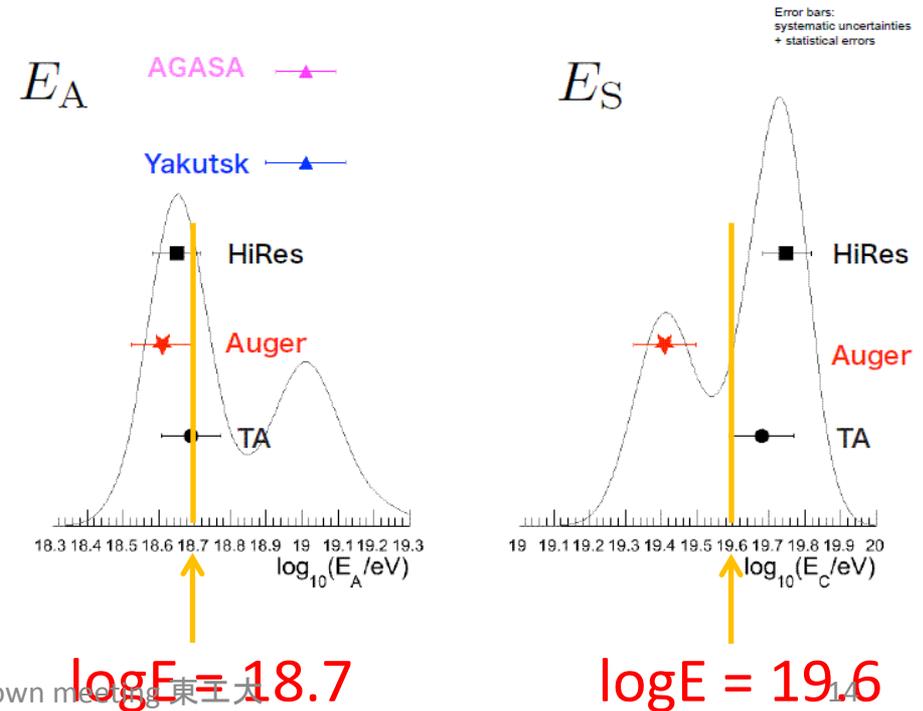
(Before energy rescaling)



Comparison of the parameters: $E^{-\gamma}$

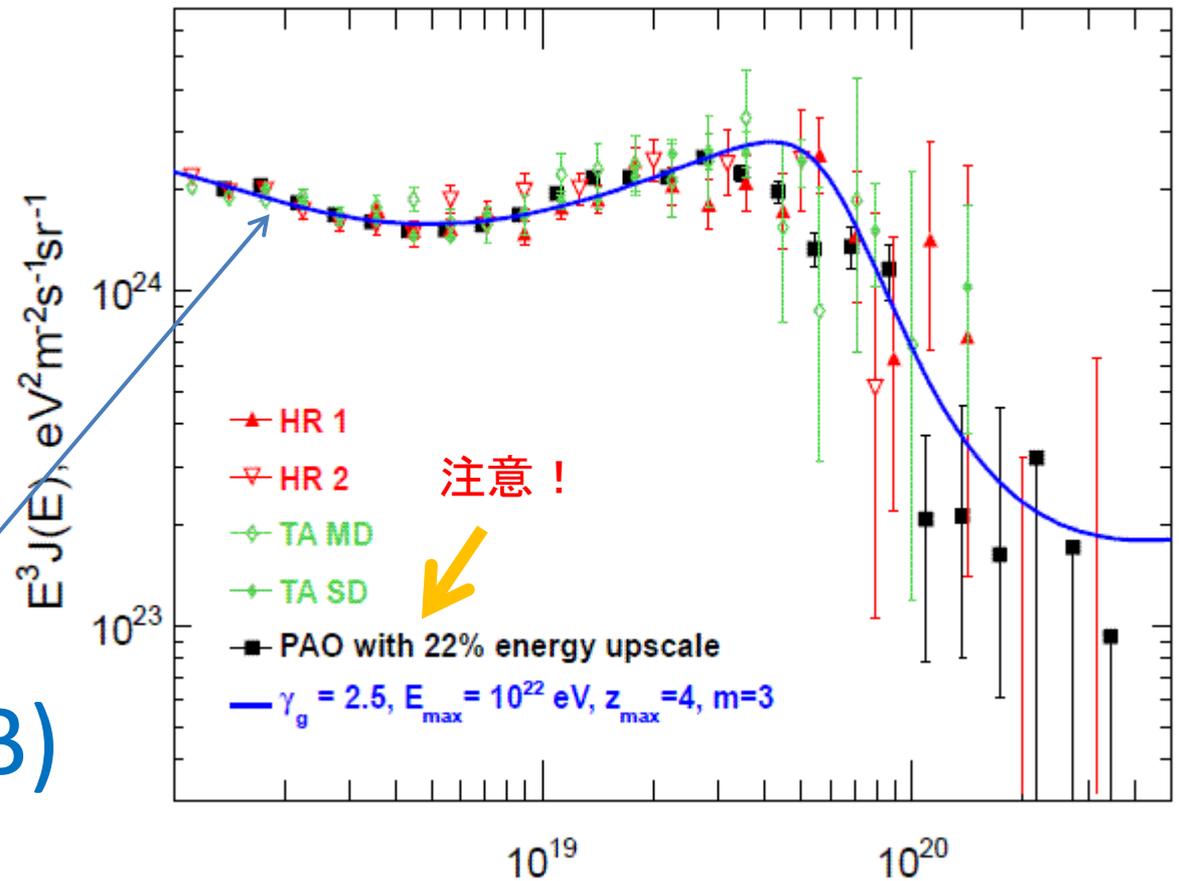


Ankle/Steepening Positions



GZK & Models

\sim GZK(p:CMB)

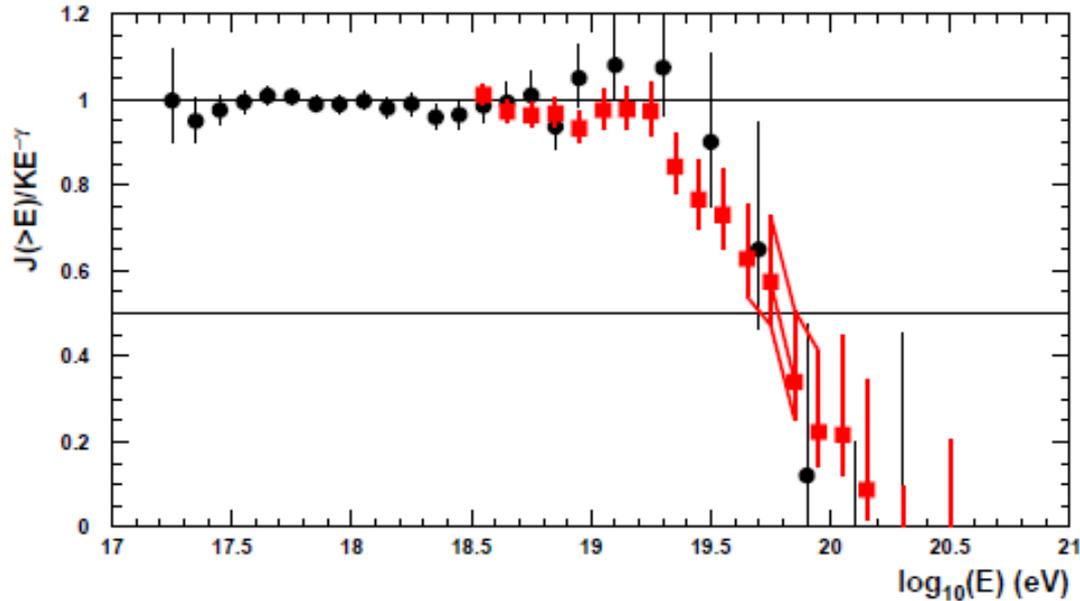


Many types of GZK (p...Fe : CMB & EBL, γ_g , E_{max} , m , z_{max} ,... Etr,...) and other models.

- **Dip model** (transition at the second knee $E_{\text{tr}} \sim (5 - 7) \times 10^{17} \text{ eV}$).
- **Ankle models** (transition at ankle $E_{\text{tr}} \sim (0.3 - 1.0) \times 10^{19} \text{ eV}$).
- **Mixed composition models** (arbitrary transition).
- **Models based on Auger mass composition.**

GZK CUTOFF IN HiRes INTEGRAL SPECTRUM

HiRes



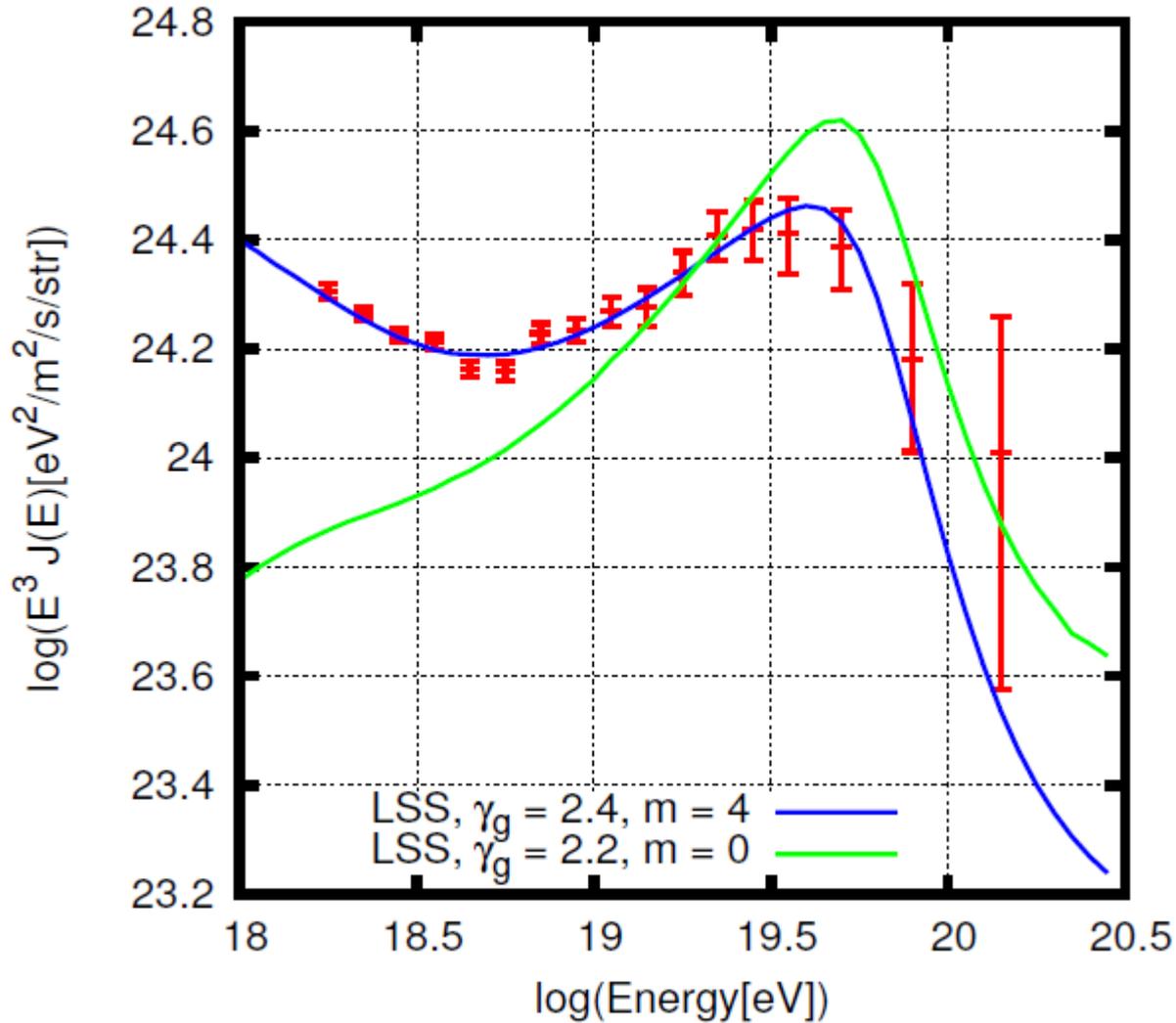
$E_{1/2}$ in HiRes **integral** spectrum confirms that steepening in the differential spectrum is the GZK cutoff:

$$E_{1/2}^{\text{meas}} = 10^{19.73 \pm 0.07} \text{ eV} \quad \text{cf} \quad E_{1/2}^{\text{theor}} = 10^{19.72} \text{ eV}$$

$E_{1/2}$ の値は、ソースでのベキ (γ) や、cosmological evol. (m) によらない (Berezinsky et al.)

TA

(proton)
Dip Model



$E_{\text{max}}^{\text{proton}}$

Galactic Iron ?

Extra-galactic Proton

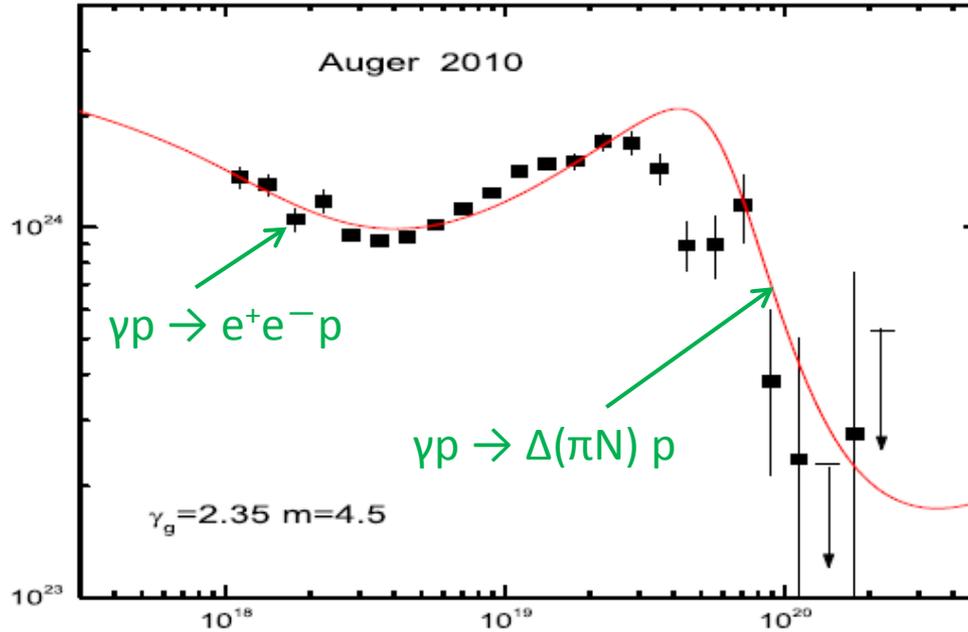
Extra-gal. Iron ??

Transition @2nd Knee?

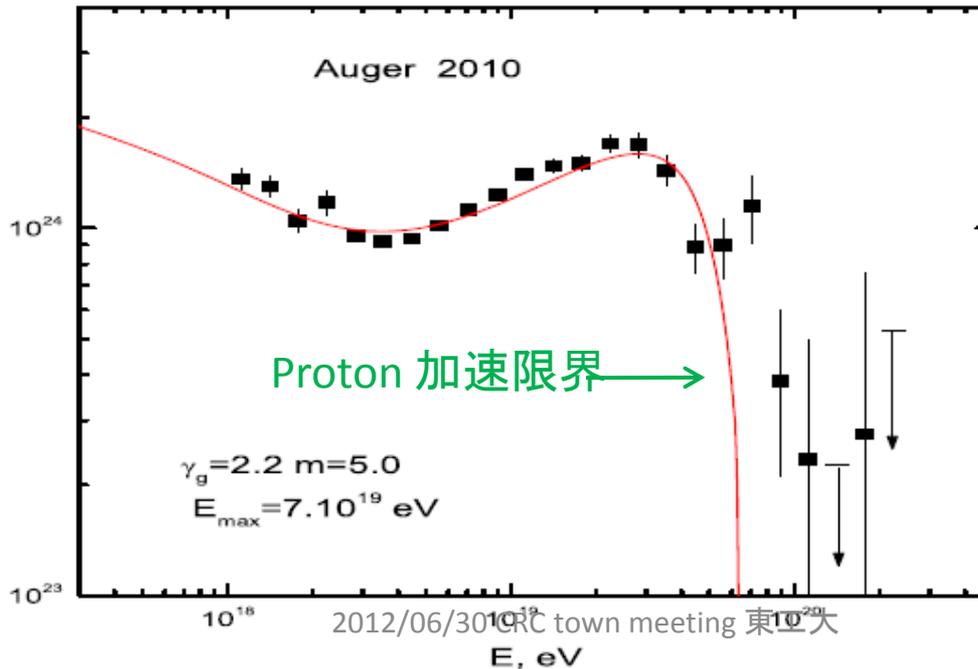
Auger

(All Proton)

注意！



GZK(p:CMB)

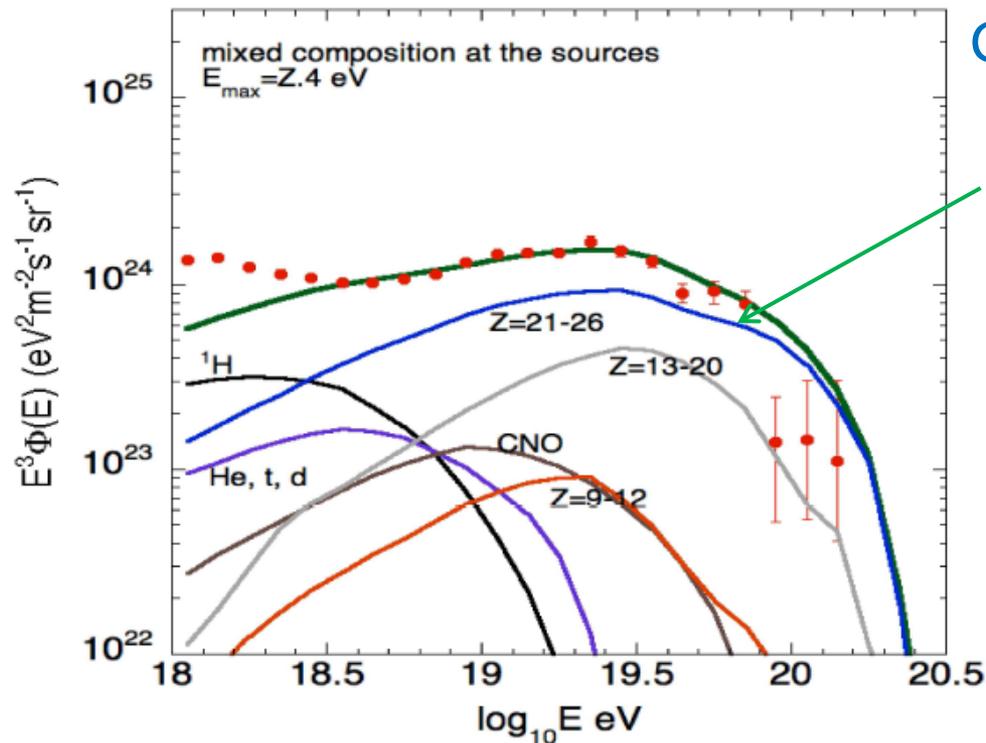


加速限界
 $E_{\max} = 7 \times 10^{19} \text{ eV}$

Mixed Composition Model

(Low Energy “CR” composition at the source)

Auger



Mixed composition with heavy component over-weight (Allard, 2011)

スペクトルのまとめ

- 1) 全ての実験のスペクトルは $10^{19.5}$ eV 以下で良く合う。(E-scale を合わせたあと)
- 2) Dip and Suppression(cutoff) が HiRes, Auger and TA で確認された。
- 3) カットオフは、陽子あるいは鉄の CMB との反応(GZK)として矛盾はない。
- 3) AGASA の 延伸スペクトル(super GZK)は再現しなかった。
- *1) カットオフの値と形状は、Auger と TA/HiRes で異なる。(ただし系統誤差内)
- *2) 背後にある物理過程(GZK-p, GZK-Fe, 加速限界... など)を突きとめるために、エネルギー尺度、線型性、質量組成の理解が重要。

注意 : 以上、各実験の公式見解(publication)とは、異なるかも知れない。

Determination of Energy

データ解析の違い

Spectrum
and
Anisotropy

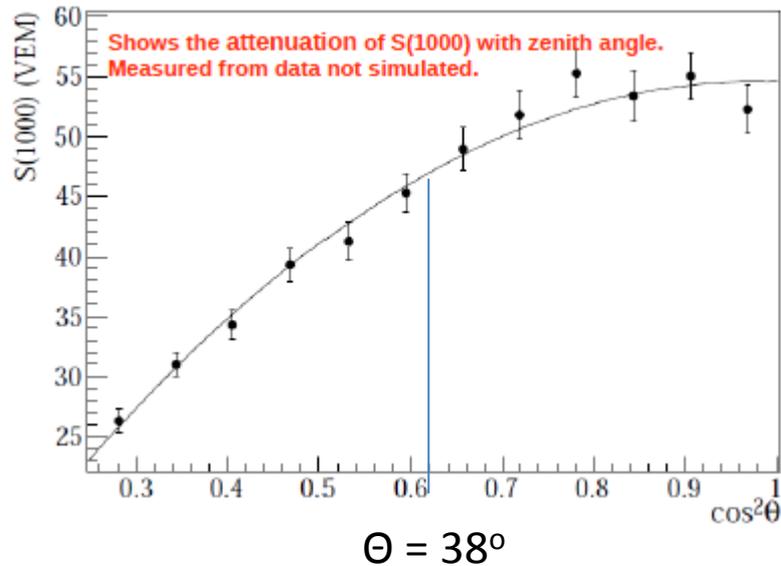
- 地表アレイ (SD) のデータを使う。
Auger : S(1000m) + CIC >>> S_{38}
TA : S(800m) + AirShower MC >>> E_{SD}
- エネルギーは、望遠鏡 (FD) に合うように補正。
補正には hybrid data (SD + FD) を使う。
 S_{38} vs E_{FD} , E_{SD} vs E_{FD} scatter plot を使って補正。

Composition

- 望遠鏡 (FD) データを使う。
Auger : Hybrid Data
Strong Acceptance Cut
HiRes, TA : Stereo FD Data
Weak Acceptance Cut

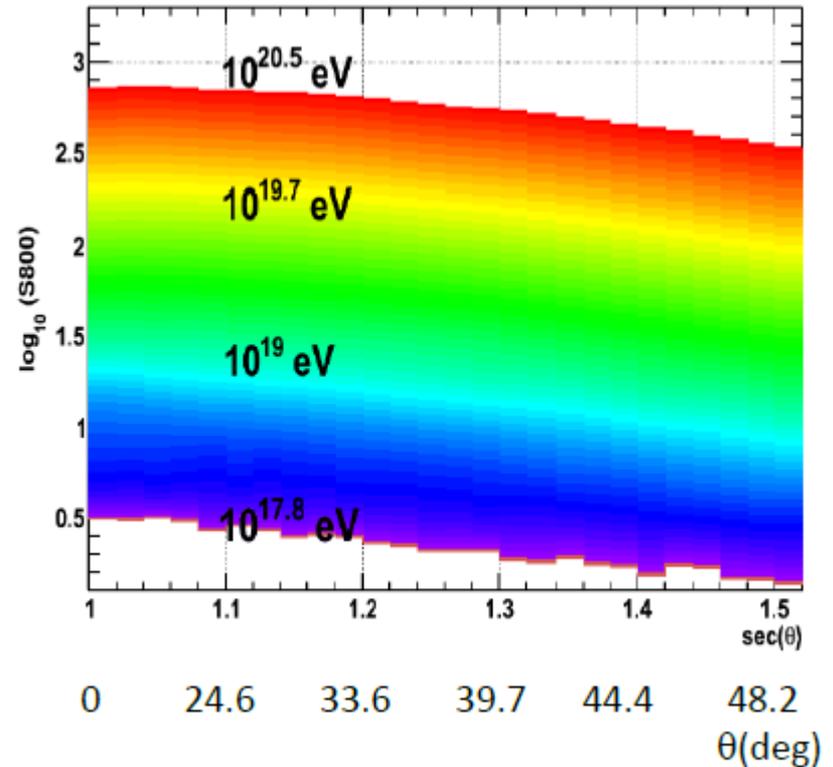
天頂角依存性の補正

Auger



天頂角依存性を
Constant Integral Intensity Cut (CIC)
で補正

TA



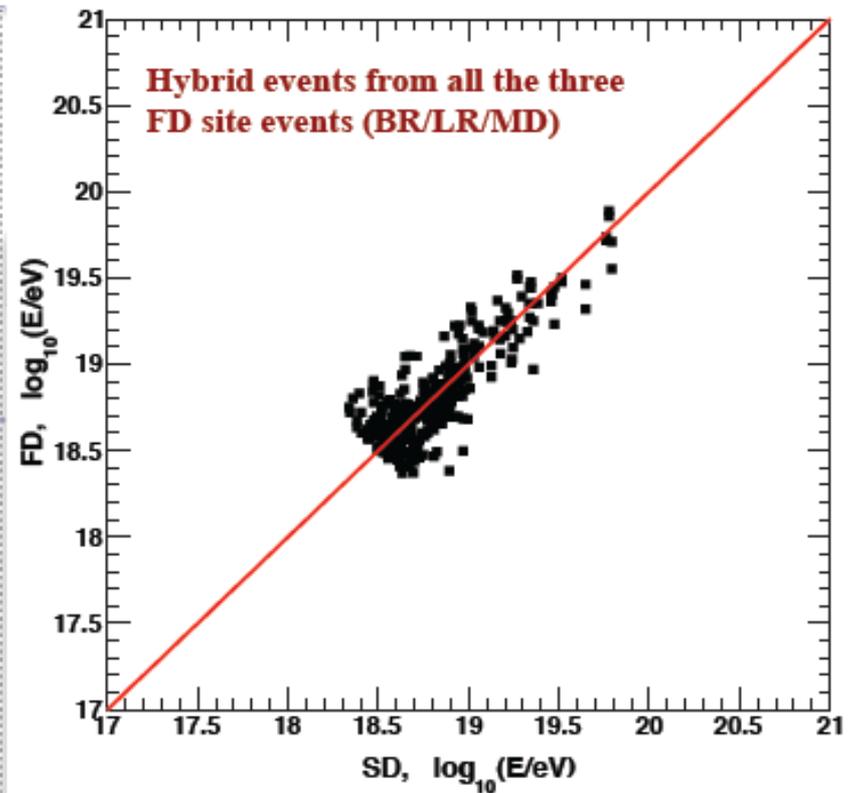
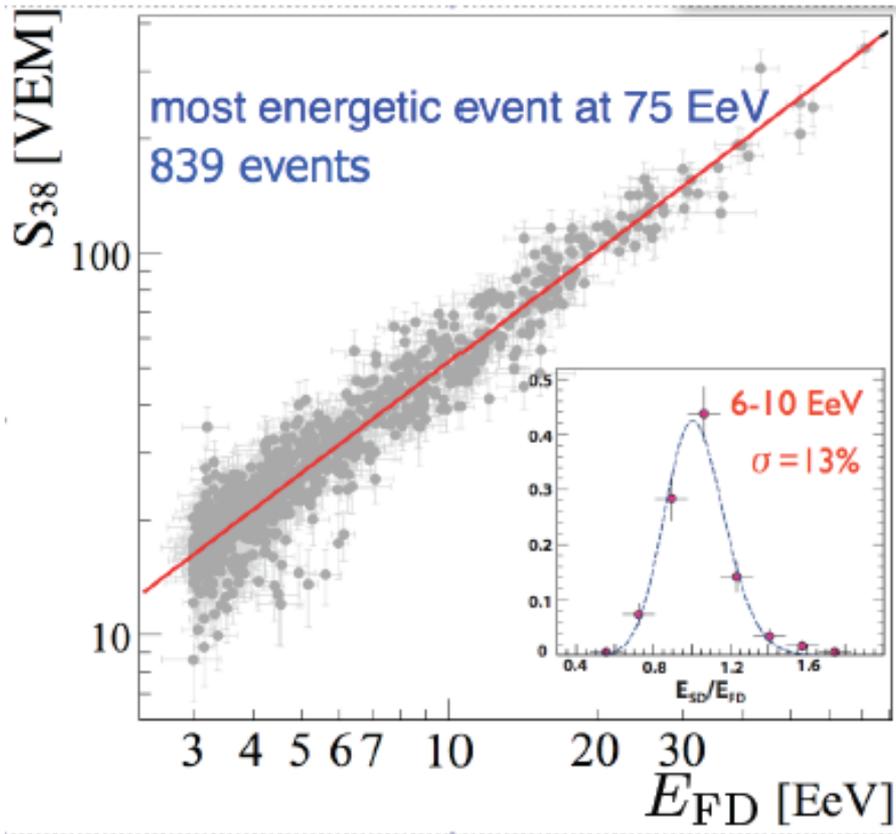
天頂角とエネルギーに対する依存性を
空気シャワーMCで補正

アレイ・エネルギーの較正

(ハイブリッド・イベント(SD・FD 同時観測)を使う)

Auger

TA



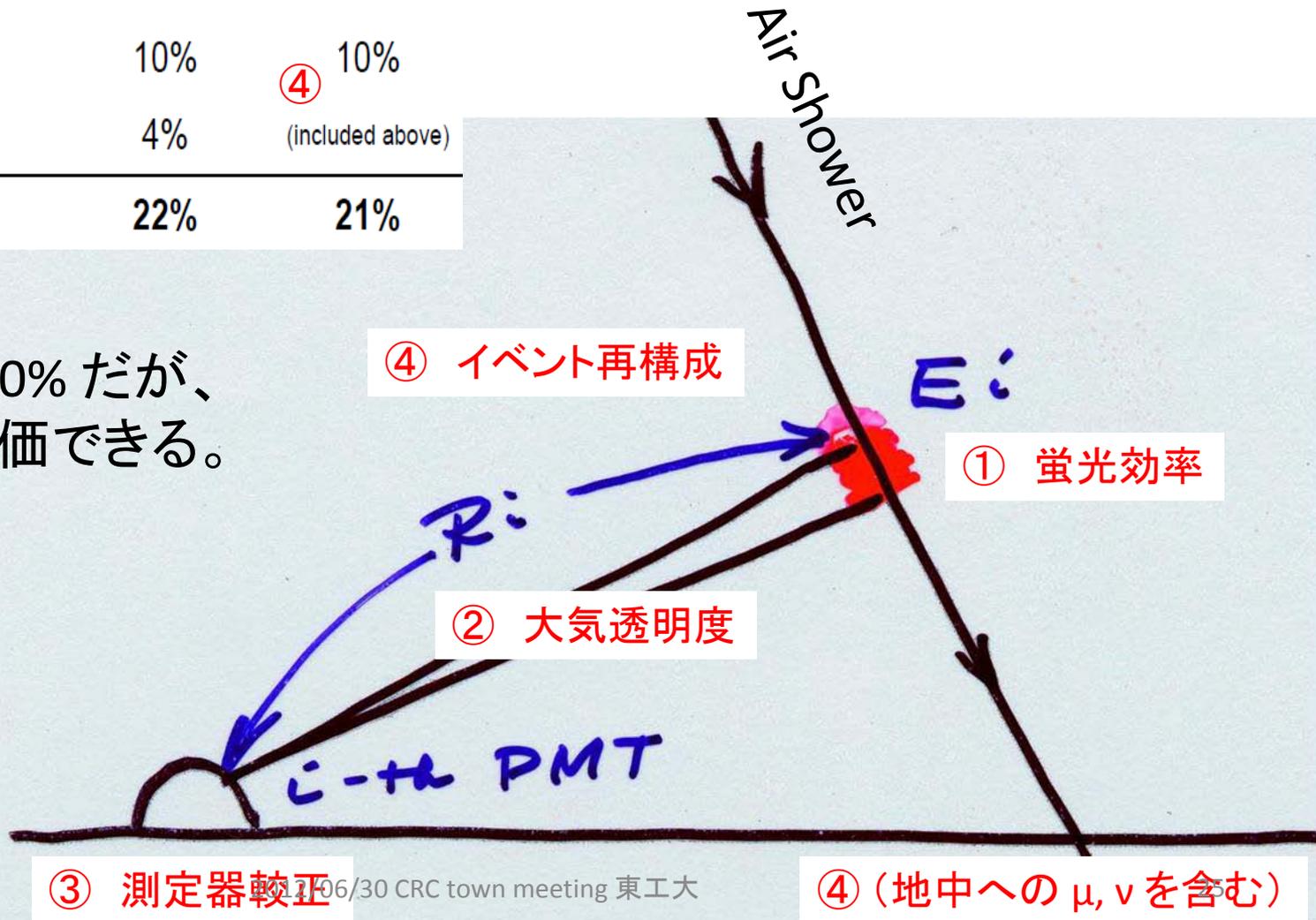
$$E_{FD} = a \times S_{38}^{1.08}$$

$$E_{FD} = E_{SD} / 1.27$$

FD Energy Scale の系統誤差

	HiRes	Auger	TA
Calibration	10%	9.5%	③ 10%
Fluorescence yield	6%	14%	① 11%
Atmosphere	5%	8%	② 11%
Reconstruction	10%	10%	④ 10%
Invisible energy	5%	4%	(included above)
Total	17%	22%	21%

各誤差は~10%だが、
実験的に評価できる。



③ 測定器校正

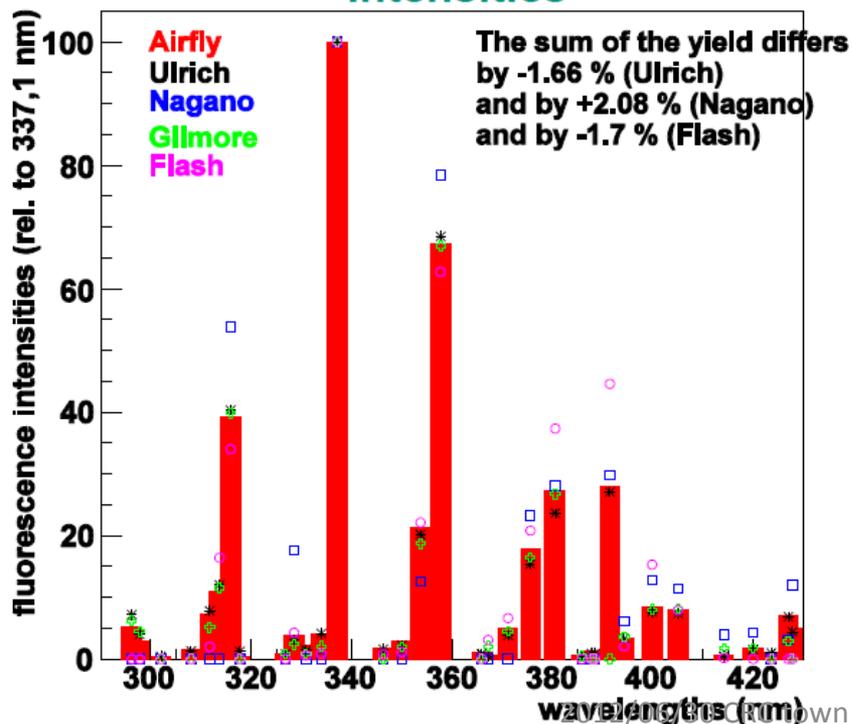
2017/06/30 CRC town meeting 東工大

④ (地中への μ, ν を含む)

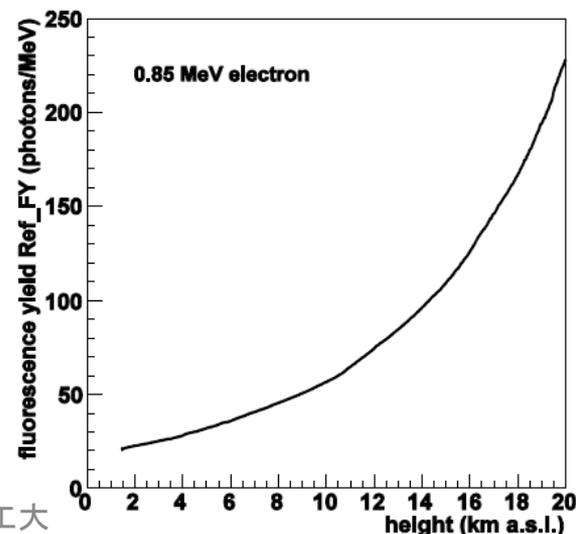
8th Air Fluorescence Workshop Karlsruhe, 12 – 14 September 2011

- ・ 発光効率 (@ 337nm)
- ・ スペクトル
- ・ 圧力・温湿度依存性, などの標準化を目指している。

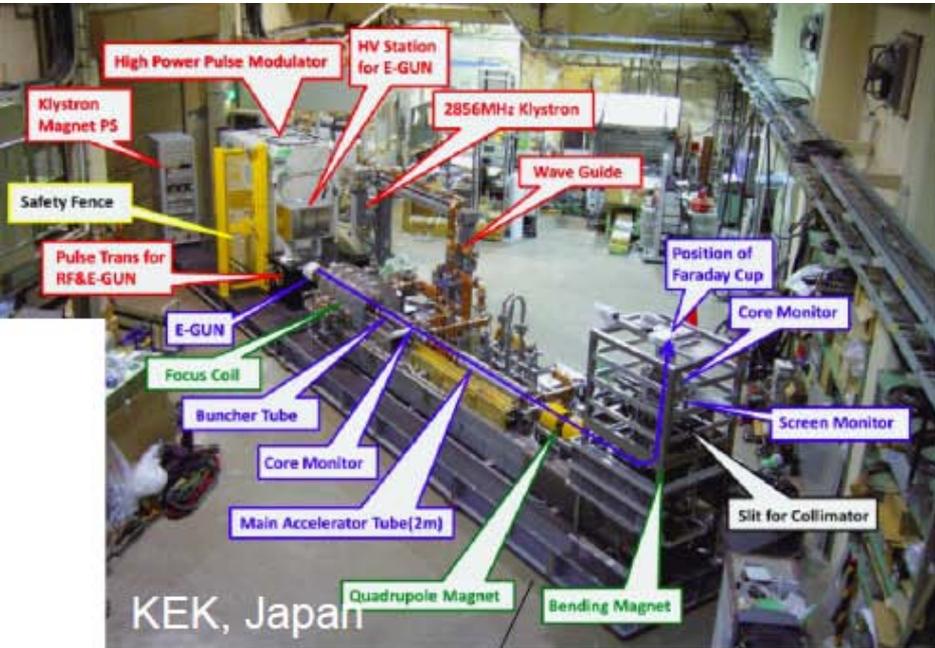
Intensities



„academic“ fluorescence yield
- scaling according Nagano et al. (2004) -



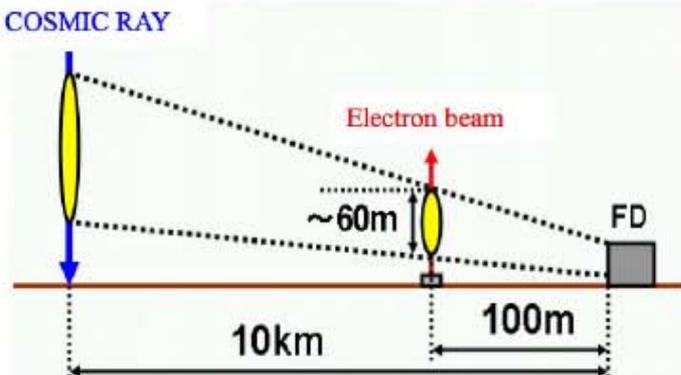
The TA "test beam"



The TA "test beam"



①蛍光効率と③測定器の一括絶対較正



Event Display of ELS Shower

Data : Sep.5th .2010. AM04:30(UTC)

Energy : 41.1MeV

Charge : 50pC/pulse

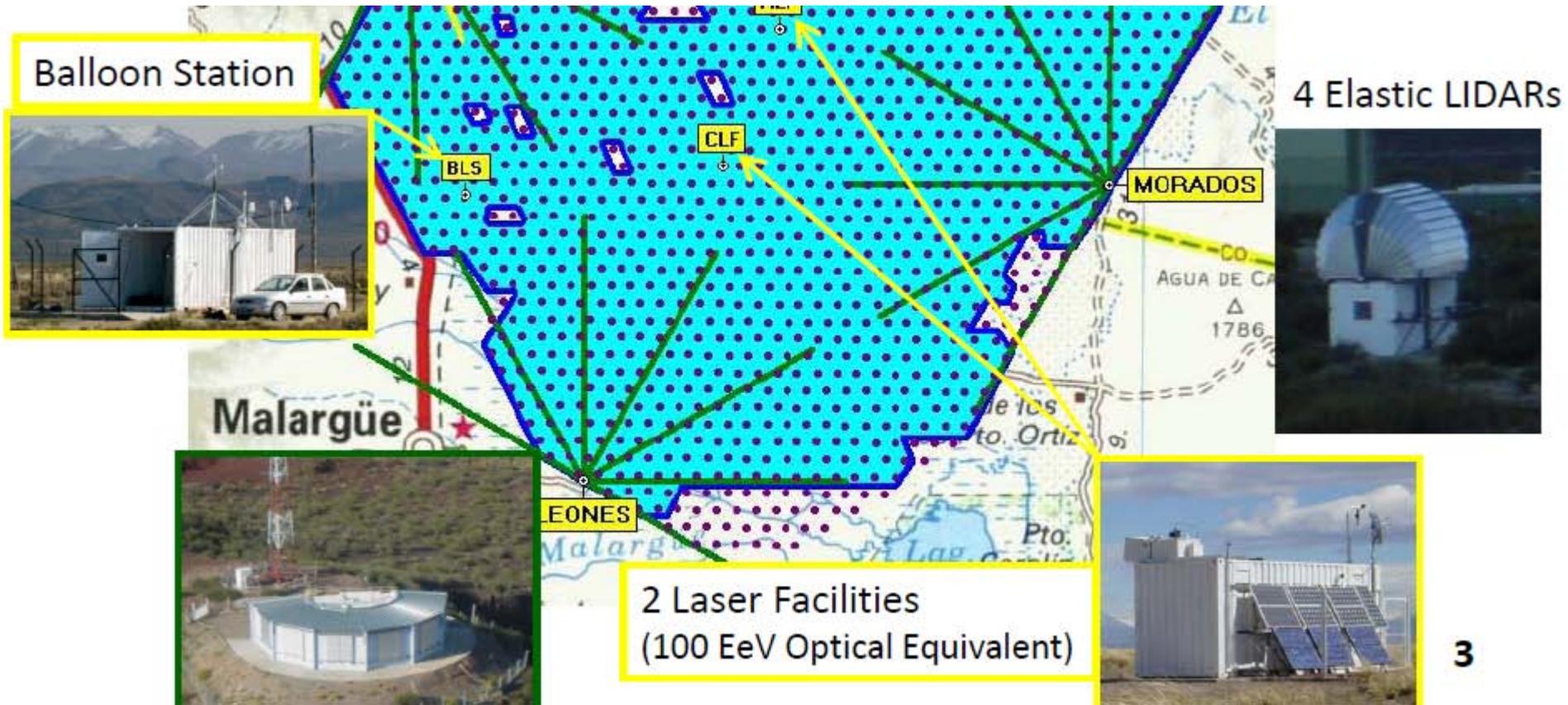
First Shot!!!

DATA

2012/06/30 CRC town meeting 東工大

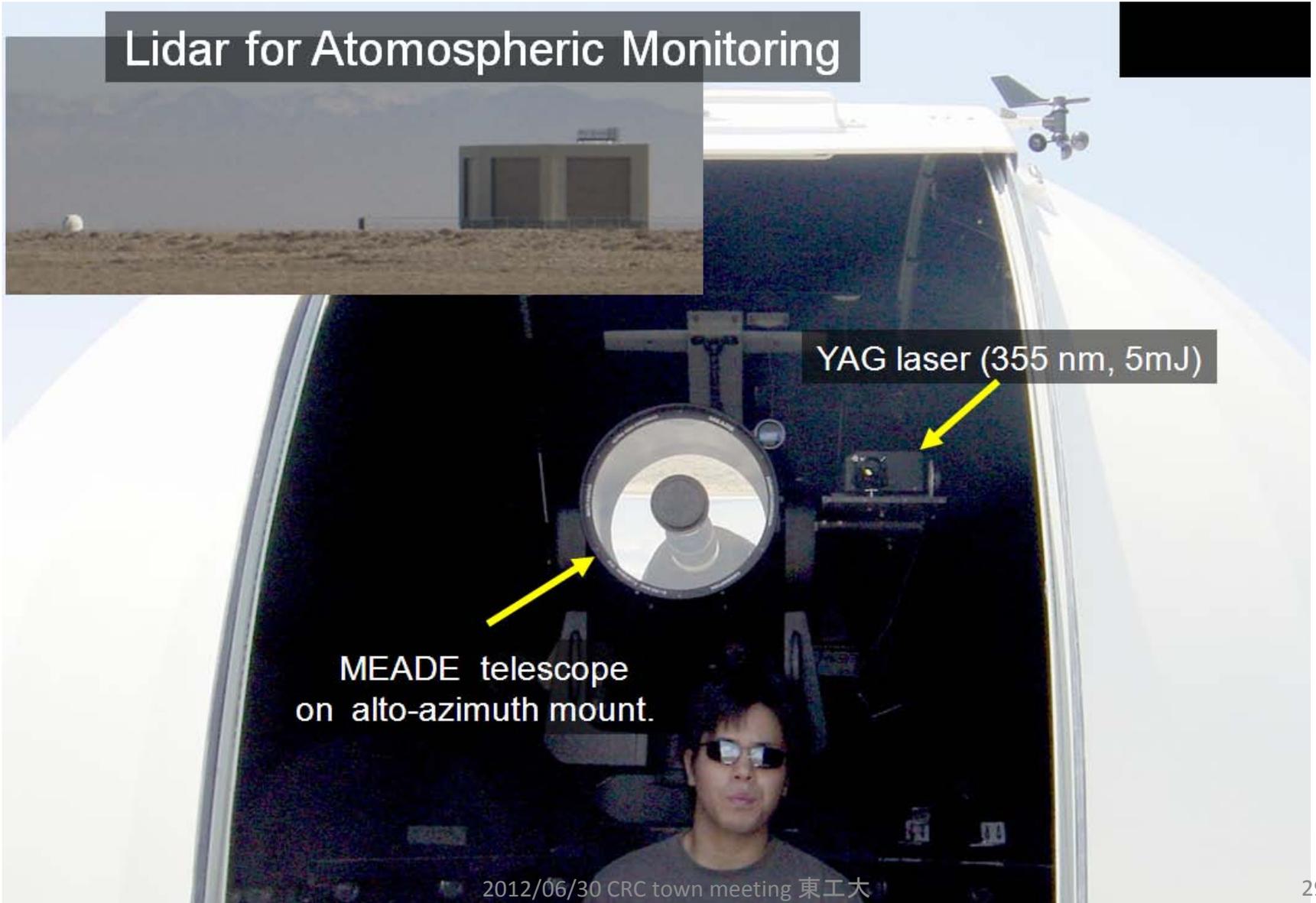
27

Auger Atmospheric Monitoring



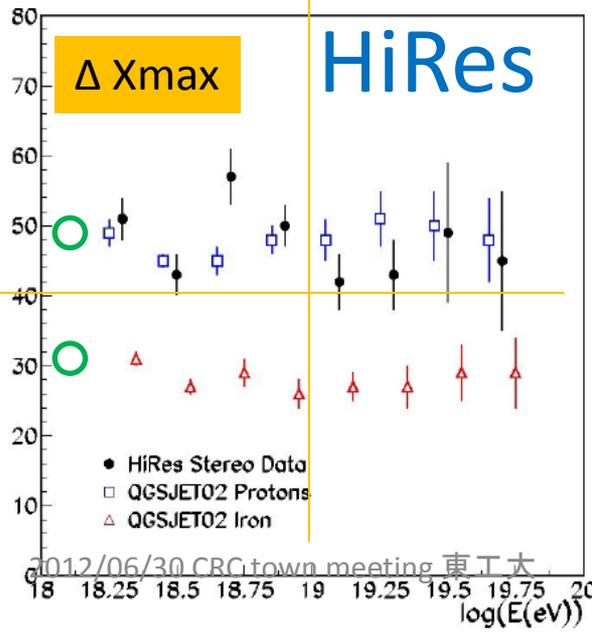
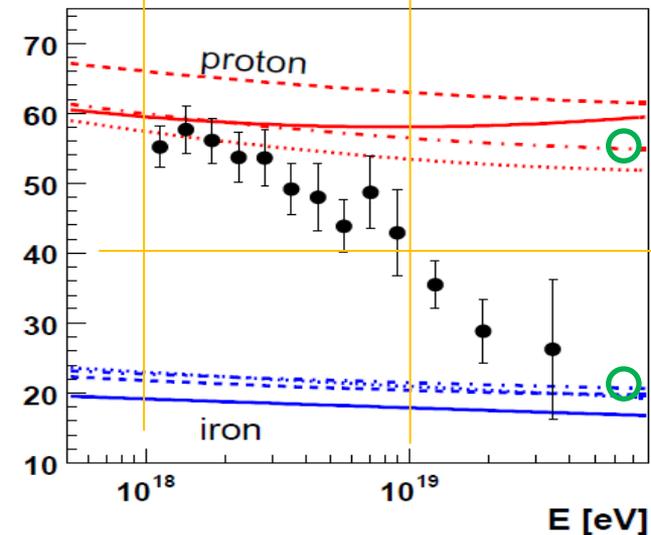
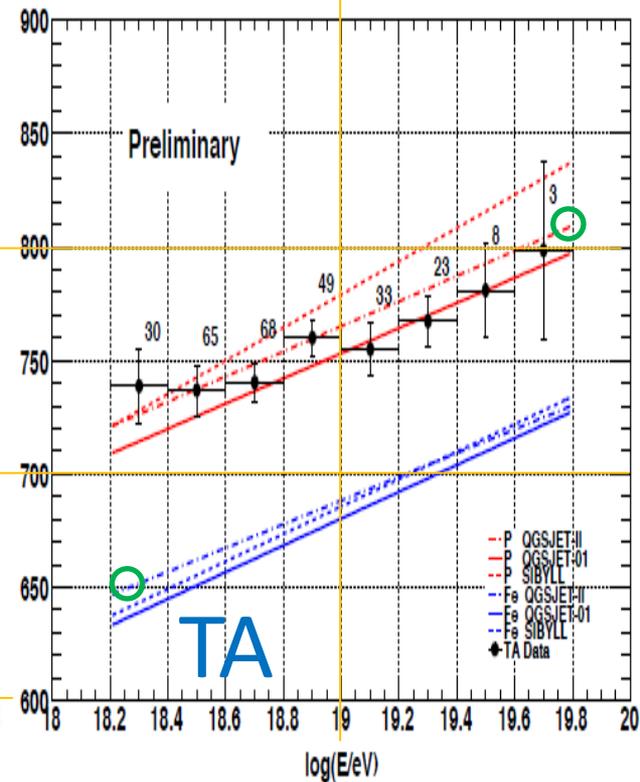
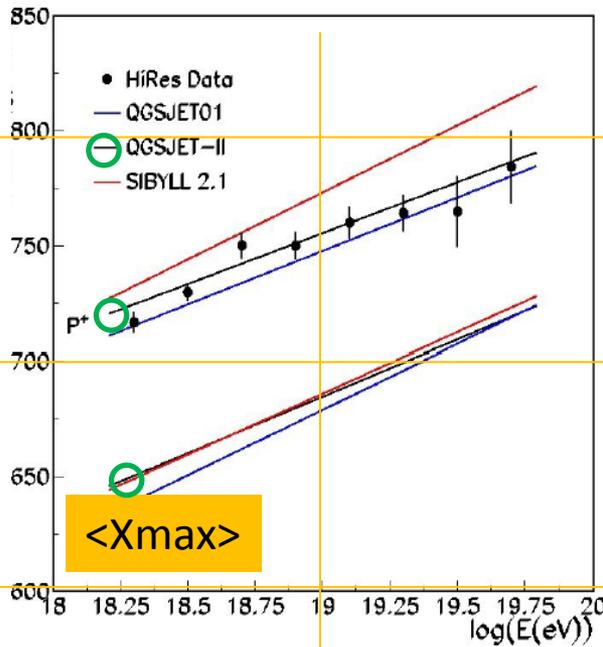
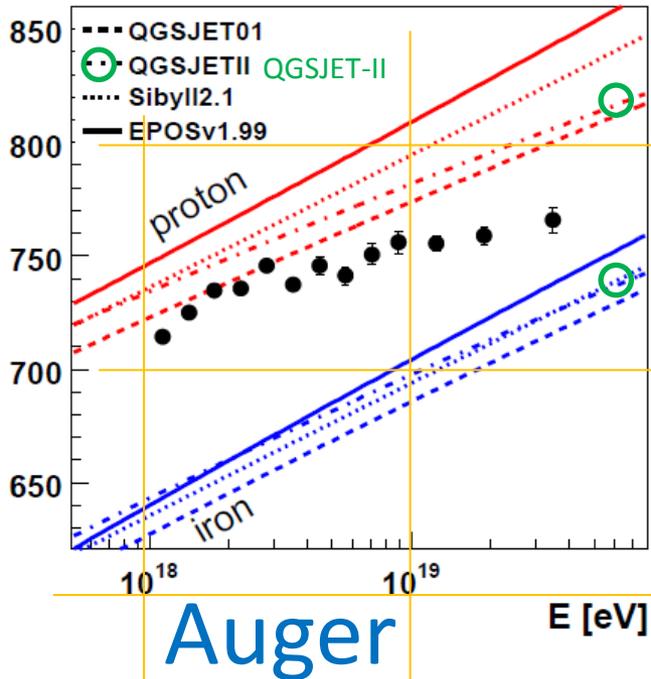
TA LIDAR

Lidar for Atmospheric Monitoring



Particle Composition

Composition



(Data の直接比較は不可)

リンゴと蜜柑の比較:
<Xmax>

Auger (hybrid):
Reconst. bias is corrected.
"no" acceptance bias.

HiRes, TA (stereo FD):
Both biases are included.

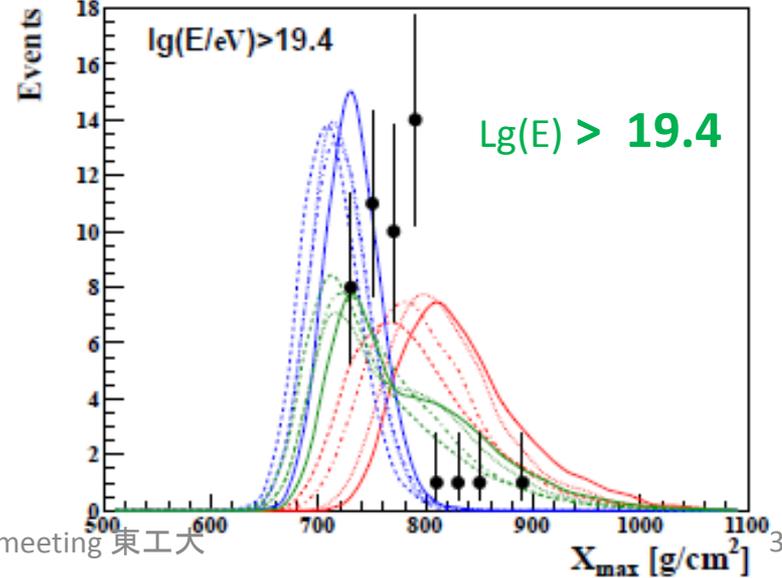
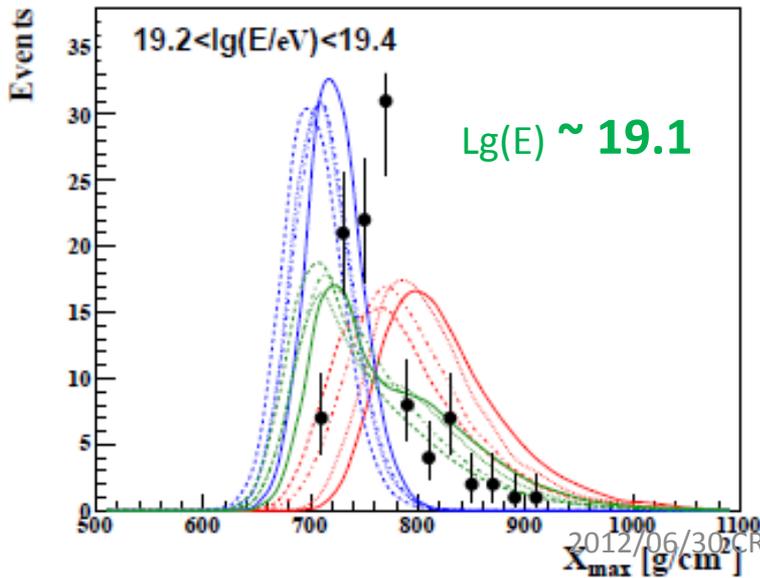
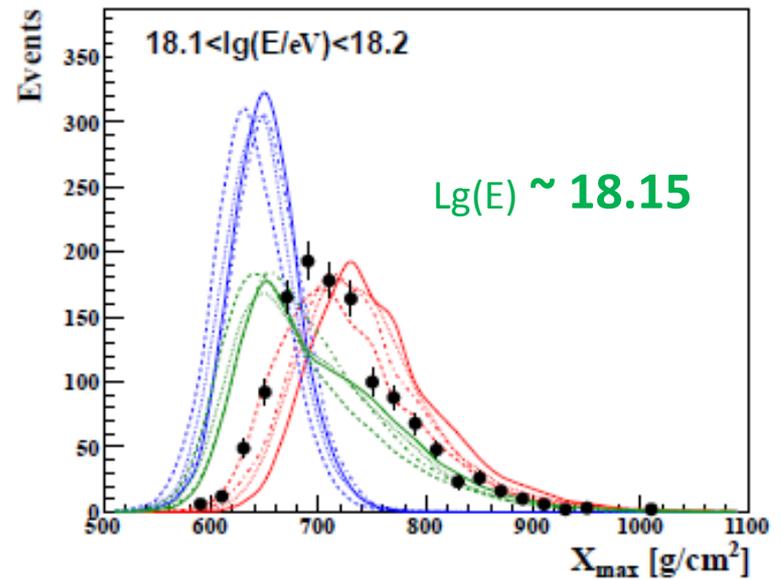
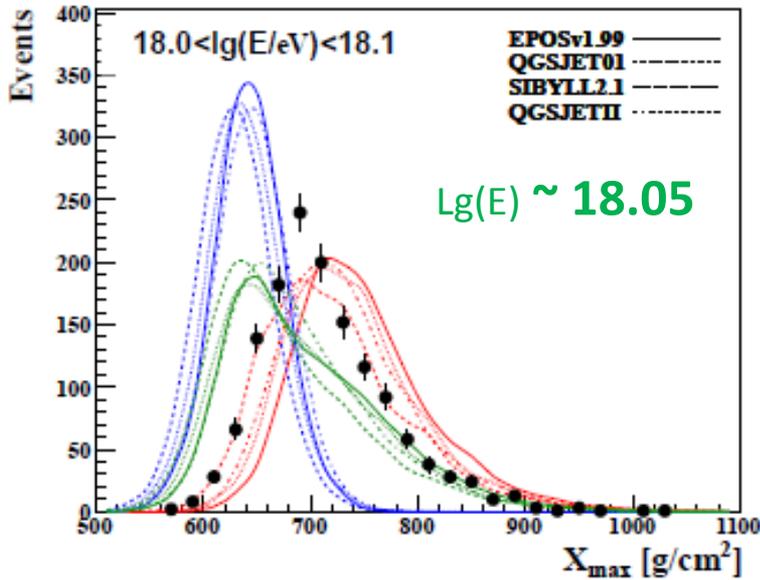
ΔXmax

Auger:
RMS, det. resol. subtracted.

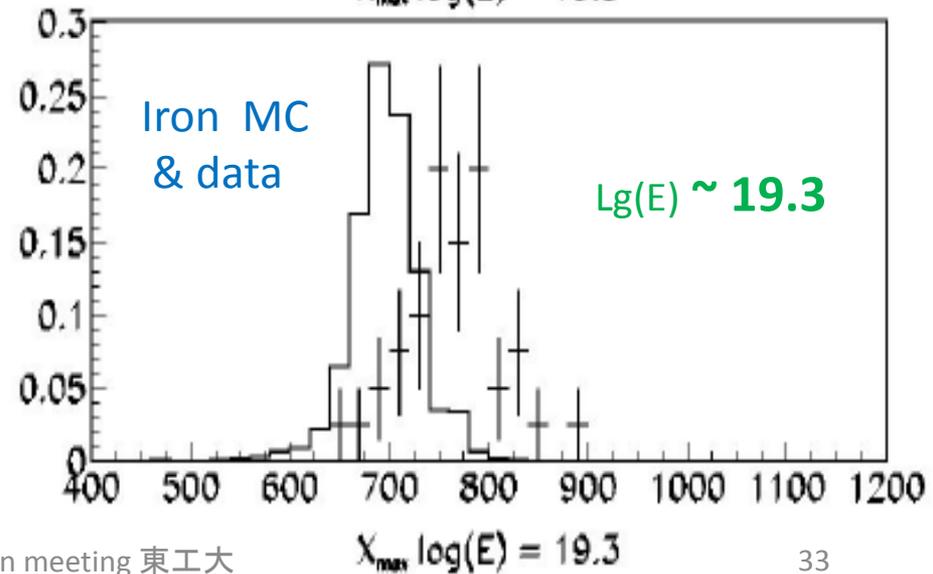
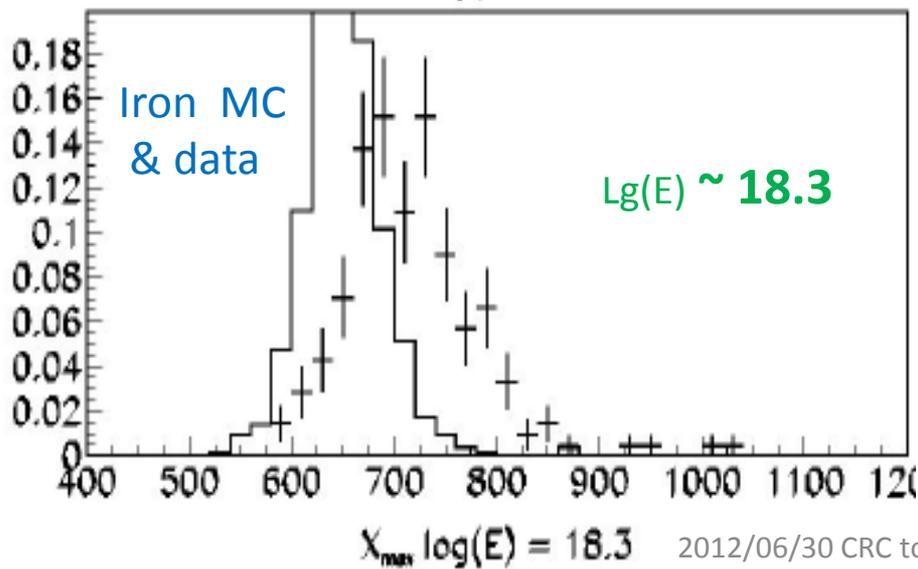
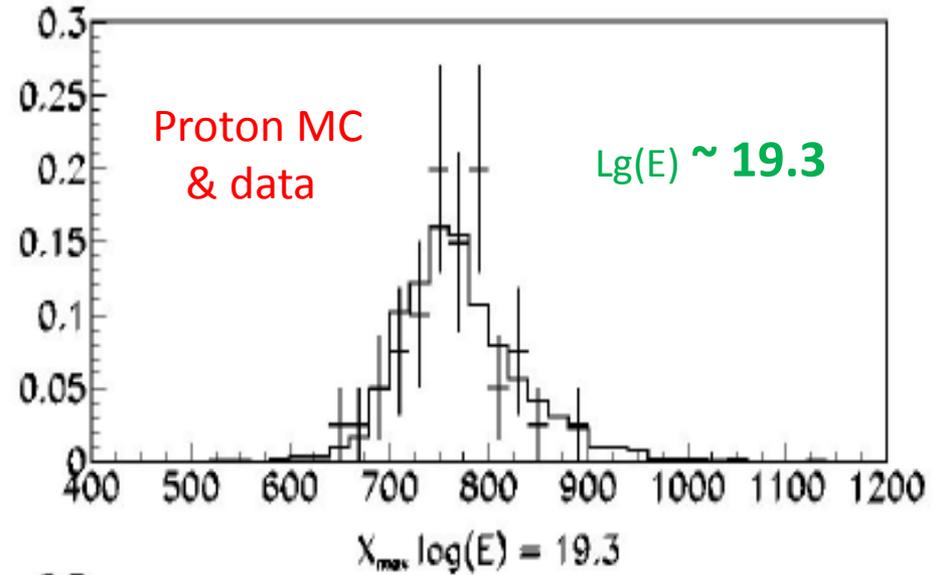
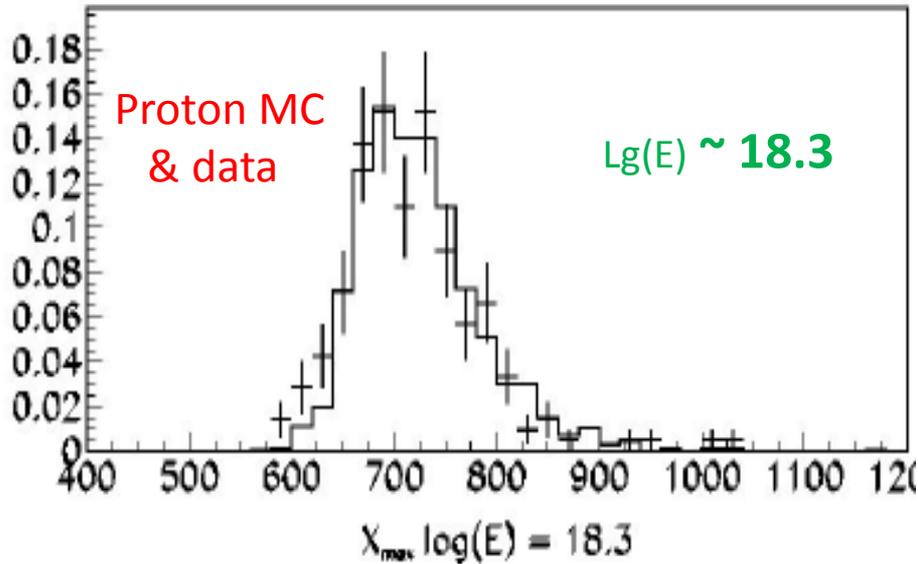
HiRes:
Trunc. Gauss fit, resol. incl..

Xmax Distributions (Auger)

p, Fe, 50:50



Xmax Distributions (HiRes)



質量組成wgのチェック

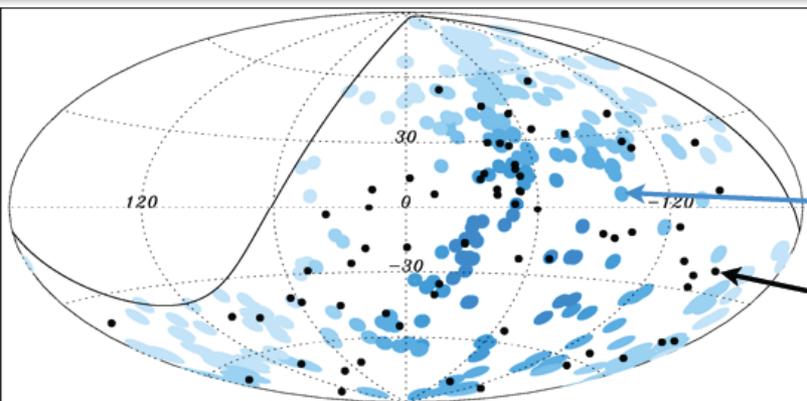
- HiRes, Auger, TA のXmax データとデータ解析をチェックした。
 1. 時間変動があるか
 2. シャワーの傾き (vertical or inclined) に依存するか、
 3. アクセプタンス・カットの強弱によるか
 4. データとMCの一致は良いか
 5. Energy scale の違いを補正して見る 等々。
- 違いは、データ解析法にはよらない。
- 違いは、Xmax 測定 of 系統誤差 (quoted sys. error) では説明できない。
- 質量組成の確認には、 $\langle X_{\max} \rangle$ と Δx_{\max} が重要 (他のparameterは二義的)
- 北半球と南半球の組成が異なるのか？

現在のデータから決定的な事は言えない。北半球は統計不足。

* シンポジウムの後、Auger・TA 間で、大気データの交換、データ解析プログラムの公開・交換、MCイベントの交換、などの検討が始まっている。

Anisotropy

Update of Correlation with VCV-AGN



Astropart. Phys. 34 (2010) 314

①

AGN position
(3.1° circle)

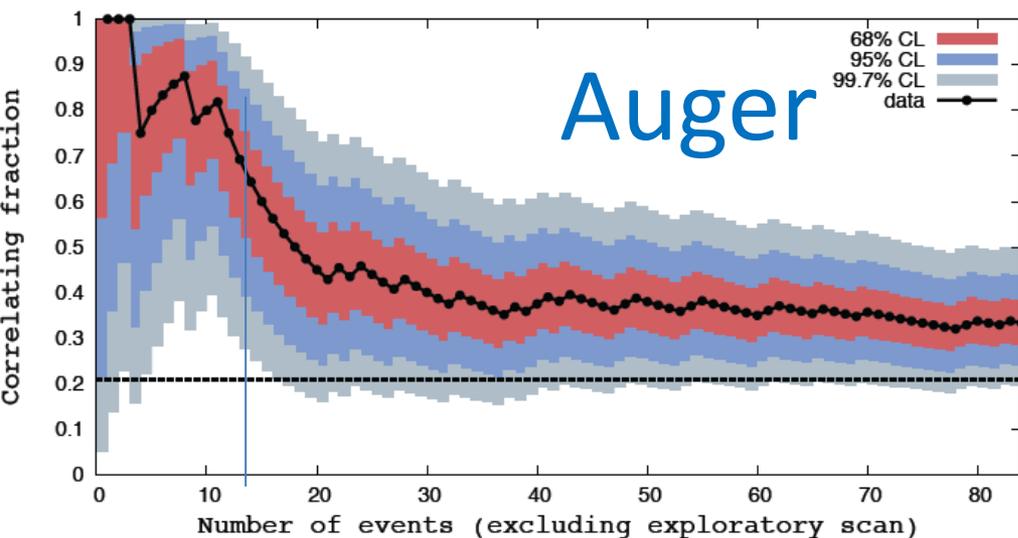
②

$z < 0.018$
(75 Mpc)

③

$E > 57 \text{ EeV}$
($10^{19.76} \text{ eV}$)

event position



Auger

Update including June 2011

Isotropy からの
偶然相関の確率

$33 \pm 5\%$

Total: 28/84

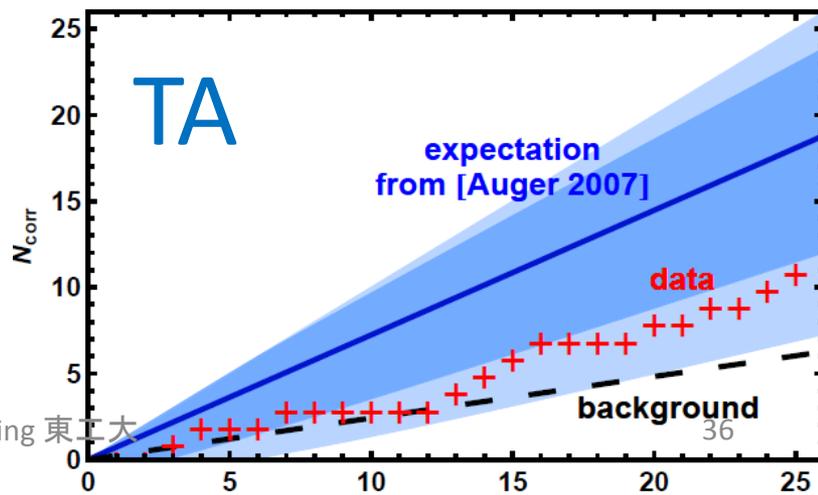
$P=0.006$

44%

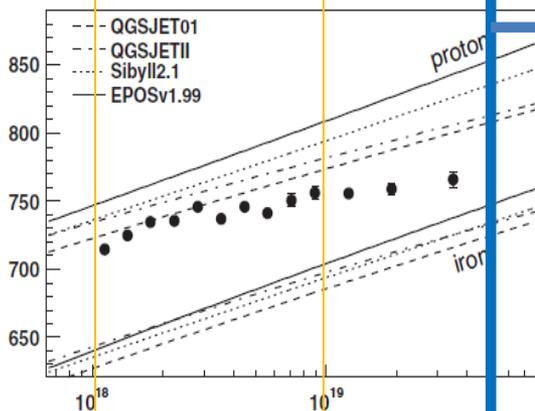
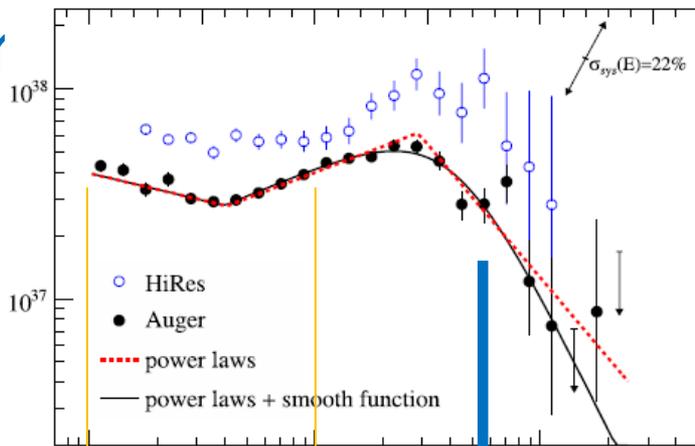
Corr. 11/25

$P=0.02$

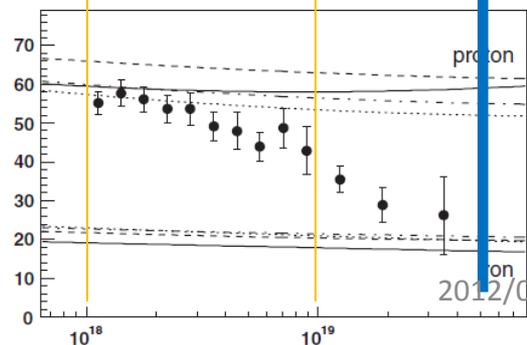
Science publication
以降は、完全にランダム
と一致する。



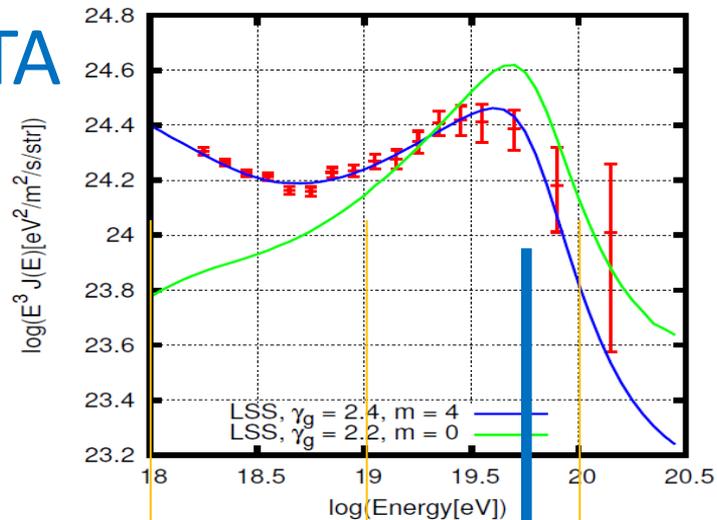
Auger



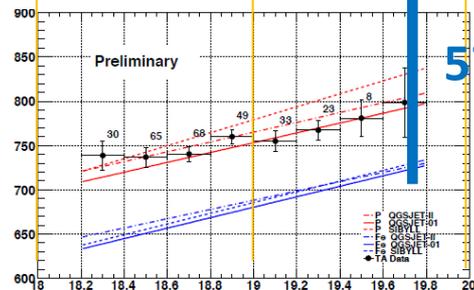
57EeV 以上



TA



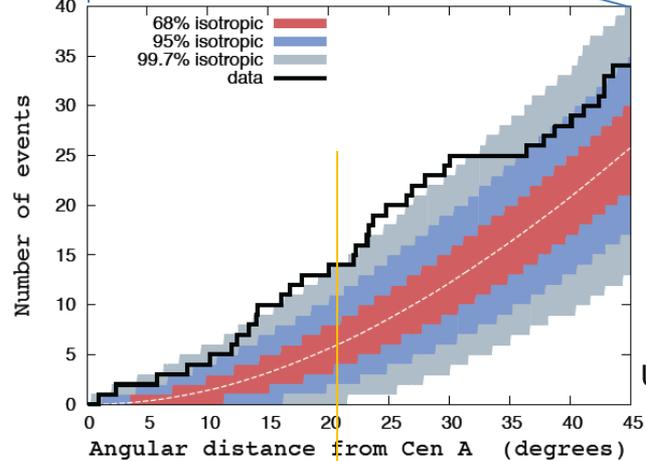
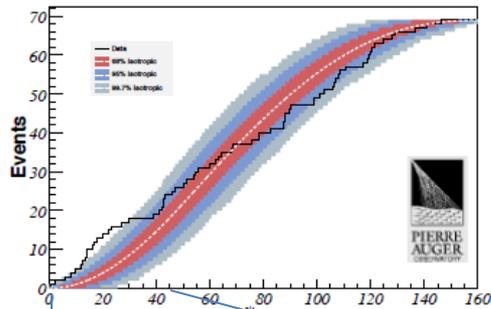
57EeV 以上



AGN 相関の エネルギー領域

Update on Cen A

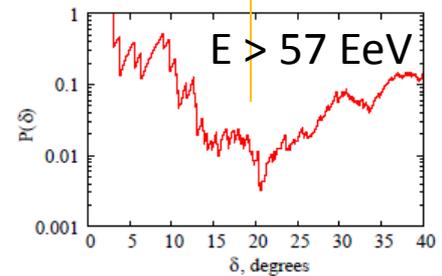
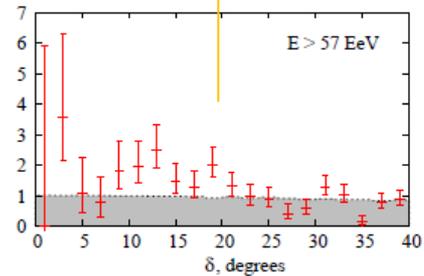
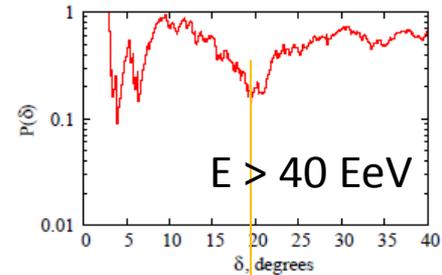
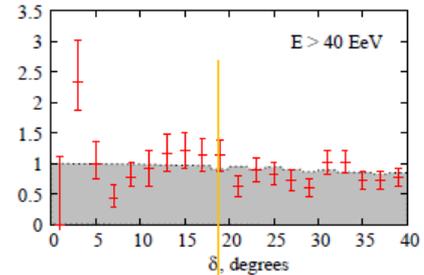
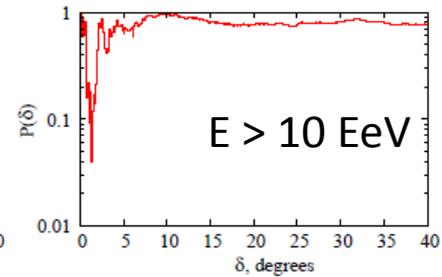
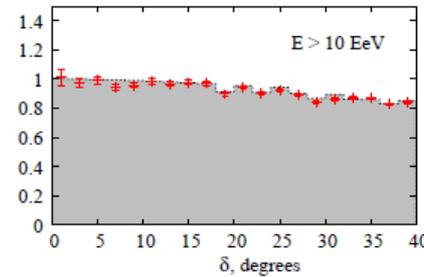
Auger: Cen A からの離角分布



Update including June 2011

KS test yields 4% isotropic probability
Largest departure now at 24°: 19 observed / 7.6 expected

TA: 自己相関の離角分布



Summary and Prospects

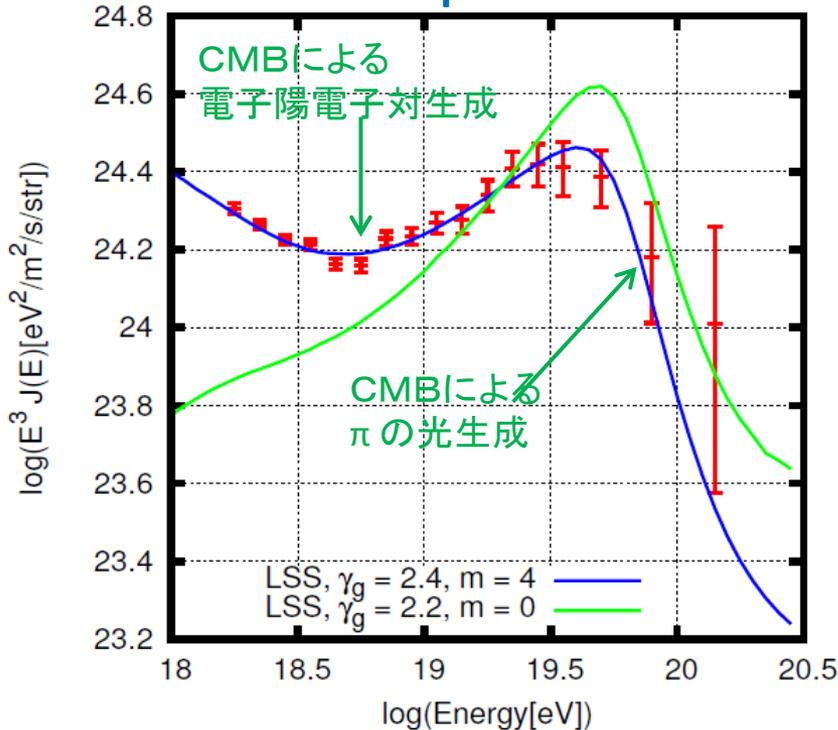
最高エネルギー宇宙線観測: 何が判ったか

- Auger, TA のハイブリッド観測で、観測情報が大きく向上し、測定信頼度があがった。統計は、1桁ふえた。
- エネルギー測定基準は望遠鏡。
- エネルギー・スペクトルに dip and cutoff の構造を確認した。観測方法によらない。
- Cutoff は、極高宇宙線と CMB の相互作用で生じた、と考える矛盾なし (p or Fe)。
- $10^{18} - 10^{20}$ eV の質量組成を測定した。HiRes (proton) と Auger (p \rightarrow Fe) で異なる。TA の予備的データは proton。
- 質量組成のデータ、データ解析法に明らかな問題は見られない。質量組成が、北半球と南半球で異なるのか。
- 異方性 (large or small scale)、天体との相関について、確立したものはない。Auger の AGN 相関は、ランダムから $\sim 3\sigma$ の有意度となった (南半球)。北半球では $\sim 2\sigma$ 以下。
- 空気シャワー生成の理解が不十分 ($E_{FD} = E_{SD}/1.27$, muon 数 $\times \sim 2$ excess, ...)。

物理のモデル -1

Dip Model

TA spectrum

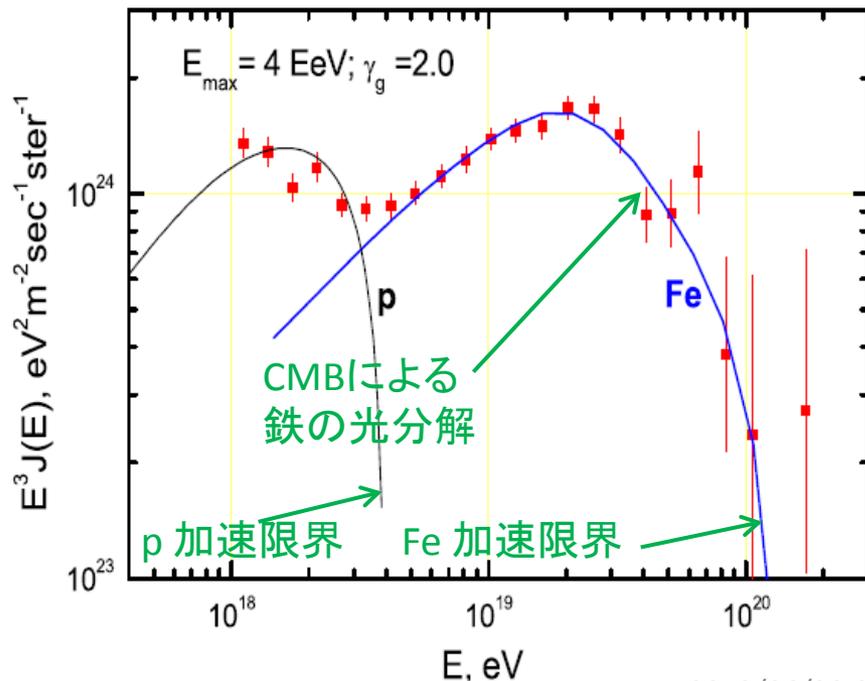


- $10^{18} - 10^{20}$ eV は系外からの陽子
- GZK(p) Cutoff + Pair Production Dip
- GZK 内の発生源が見えるはず。
- 加速源のベキ、cosmological evol. (m), 銀河系内外磁場などの情報が得られる。相対論の検証、さらに「粒子線天文学」の可能性?
- GZK neutrino が検出可能レベル
- Proton 加速限界 $> \sim 10^{20}$ eV

物理のモデル - 2

“Auger based” Model

Auger spectrum



- 銀河系外の陽子 $E_{\max} \sim 4 \times 10^{18} \text{ eV}$
鉄 $E_{\max} \sim 10^{20} \text{ eV}$
- GZK(Fe) Cutoff + proton E_{\max} Dip
- 発生源は見えないだろう。
- GZK neutrino なし (EBL neutrino ?)
- Titled as “disappointing model”
in Brezinsky, Aloisio & Gazizov paper.

見通し

Dip model できれいに説明できるから正しいとは、言えない。
もちろん disappointing だから正しくないとは、言えない。
何が正しいかは、観測が決めるべき。

北半球と南半球で、underlying physics が違うのは困る。しかし、
解決の手がかりは沢山ある。

- 10^{19} eV 領域の質量組成 ($\langle X_{\max} \rangle, \Delta X_{\max}$)
- カットオフのエネルギー、カットオフの形
- 異方性、天体や大規模構造との相関
- 遷移エネルギー(系内 → 系外)の決定 (10^{17} eV 領域の測定)
- GZKニュートリノの検出 (IceCube)
- 実験間の協力と競争、問題解決への意気込み など。

正しい答えは、まもなく見つかるはず。 **Be patient, be prepared.**

Where are we now?

1. What is UHECRs?
2. Where are they born and how?
3. How do they arrive on Earth?
4. How are they observed?
5. Underlying Basic Physics.
6. Discovery of unknown Nature?

- Remarkable advances in last 10 years.
- We are about to answer Questions.
- Better and Larger detector wanted.

Problem #1: 起源の問題

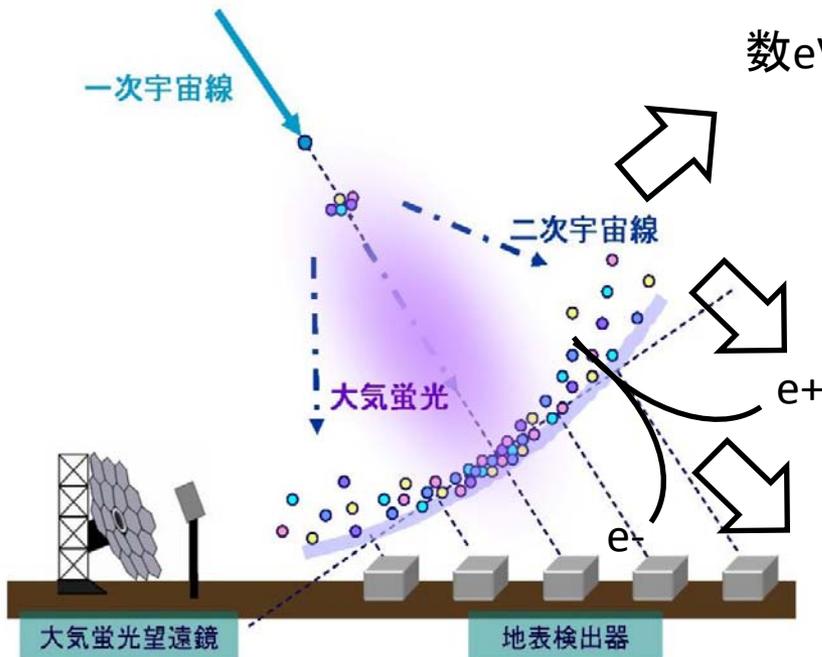
なぜ、ソースが見えないのか、
なぜ、これほど uniform / isotropic なのか、
わからない。

南北問題を超えて、この素朴な疑問にチャレンジしたい。

Detection of Radio Signal from UHECR, R&D

マイクロ波による超高エネルギー宇宙線観測

1. 通信機器の普及によって、比較的安価で高性能化ができる。
2. 空気シャワー全体からの放射を測定でき、化学組成を含めた測定も可能か？
3. 歴史的にいろいろな測定方法が提案され、研究されてきた。現在もっとも活発に研究は下の5つ。
4. ここ数年で急速に発達している。



①大気分子制動放射

②チェレンコフ放射(電波領域までスペクトルが伸びているかもしれない)

③地球磁場によるシンクロトロン放射

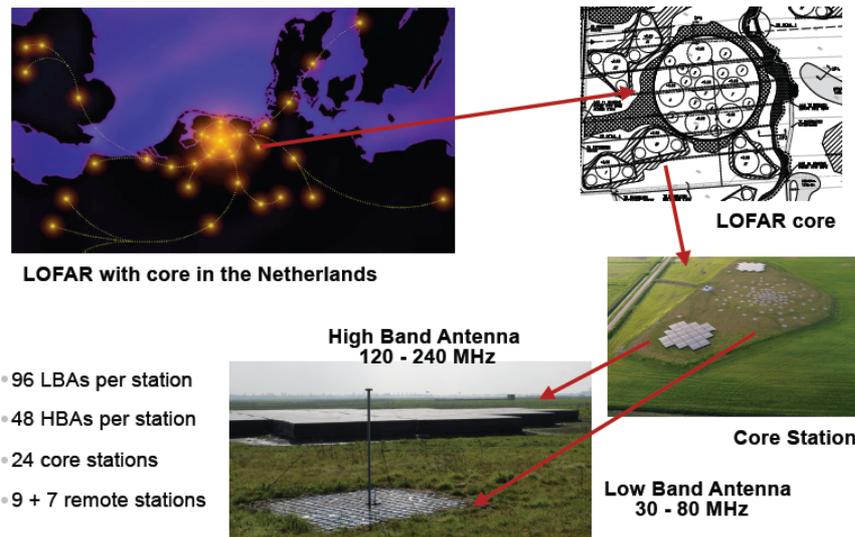
④ Askaryan 効果による高エネルギーニュートリノ検出

⑤前方散乱レーダーでのエコー検出

Geo-Synchrotron放射によるMHz帯マイクロ波検出

歴史的に東工大で詳細な研究がされている

LOFAR - Low Frequency Array



LOFAR with core in the Netherlands

- 96 LBAs per station
- 48 HBAs per station
- 24 core stations
- 9 + 7 remote stations

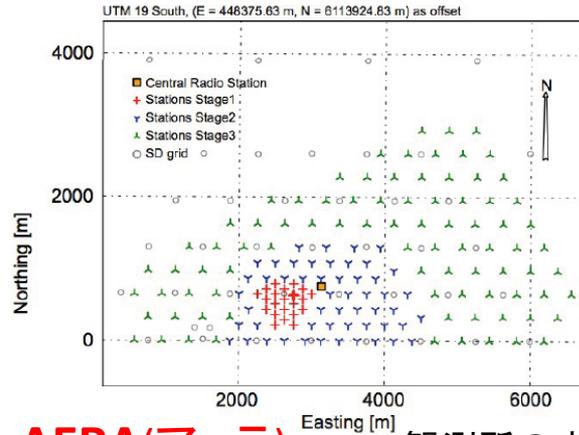
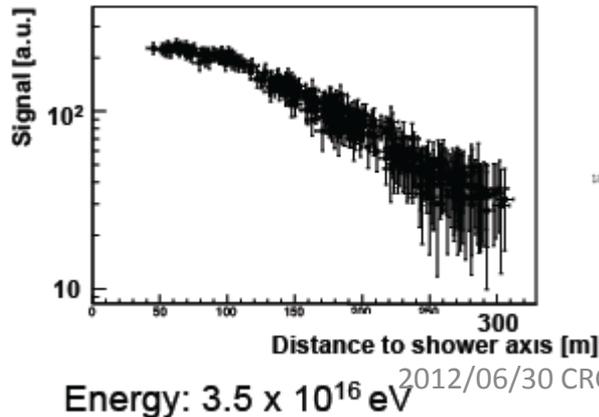
High Band Antenna
120 - 240 MHz

Core Station

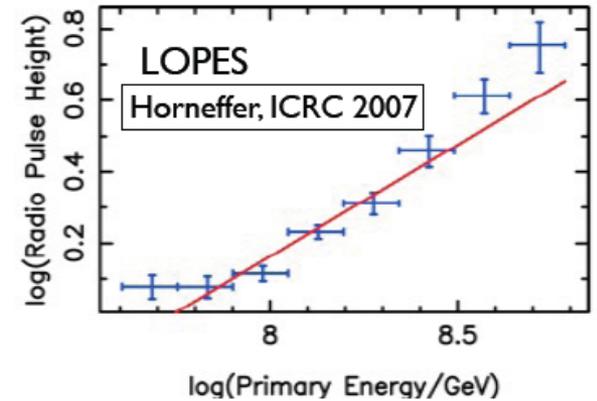
Low Band Antenna
30 - 80 MHz

LOFAR:30-240MHzのアンテナを高密度で並べたStationを複数の国に配置している。

電波強度の詳細な横方向分布を測定。この分布はシャワー全体の放射。



AERA(アエラ): Auger観測所の中にアンテナを設置し、スーパーハイブリット観測を実施

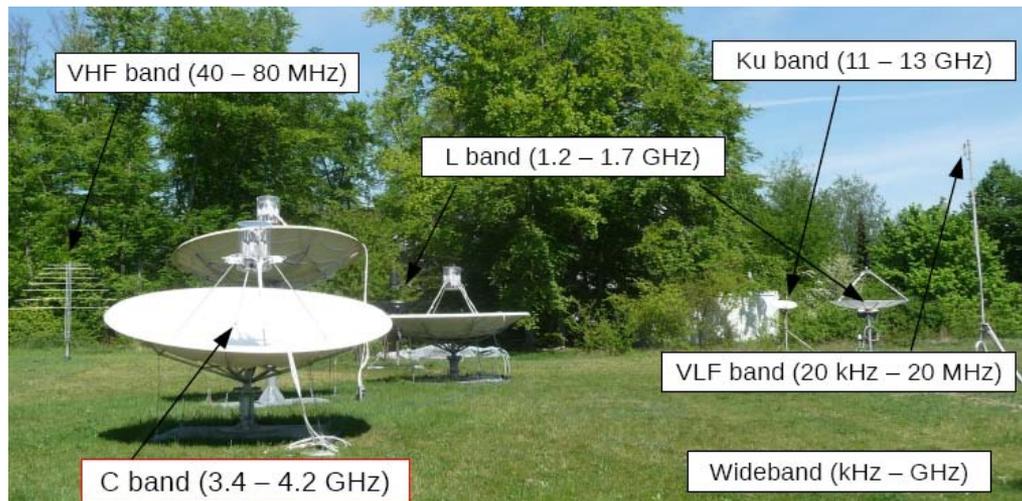


LOPES: KASCADEの中にアンテナを展開。電波観測で「エネルギーを測定できる」ことを証明した。

大気分子制動輻射 (MBR, GHz)の検出①

100% duty cycleの大気蛍光観測の可能性

CROME: KASKADEの中にBSアンテナを設置



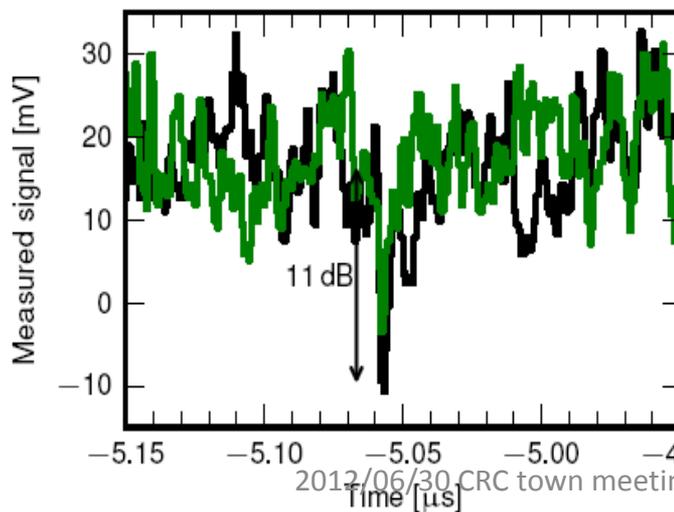
$$E_0 = 5 \times 10^{17} \text{ eV}, R_c = 150 \text{ m}, \theta = 18^\circ$$

- パラボラによりシャワーイメージを撮像しようとしている

- 1年間の観測で20eventsの信号を検出

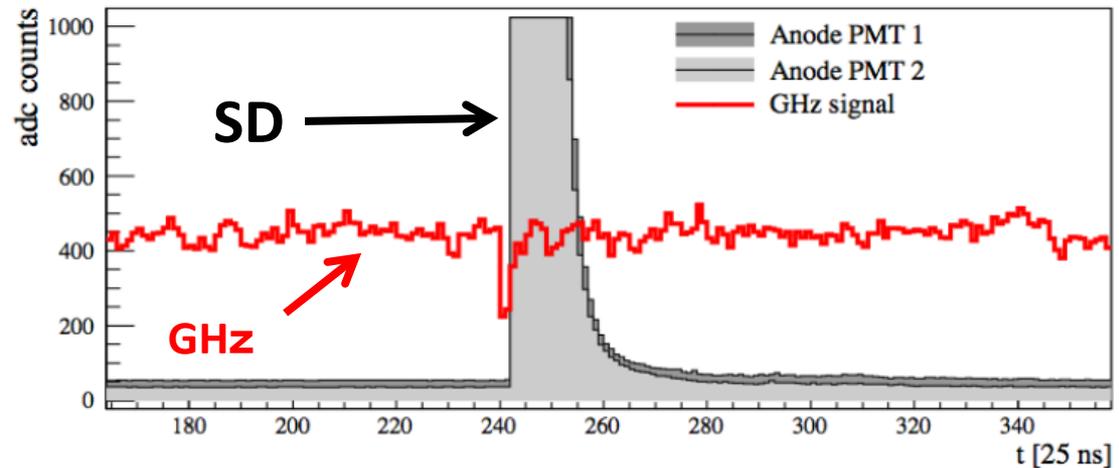
- 全て前方放射のみで、等方的な放射は検出できていない。

- チェレンコフ放射を検出している可能性。

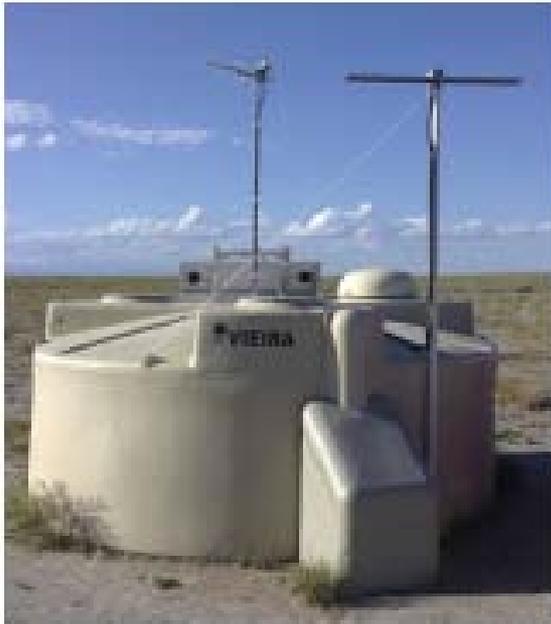


大気分子制動輻射の検出②

EASIER: AugerのSD水タンクにアンテナを取り付けている。3つあるPMTのうち1つのHigh Gainチャンネルに信号を入れている。これにより、少なくとも検出器のダイナミックレンジを上げることができる。



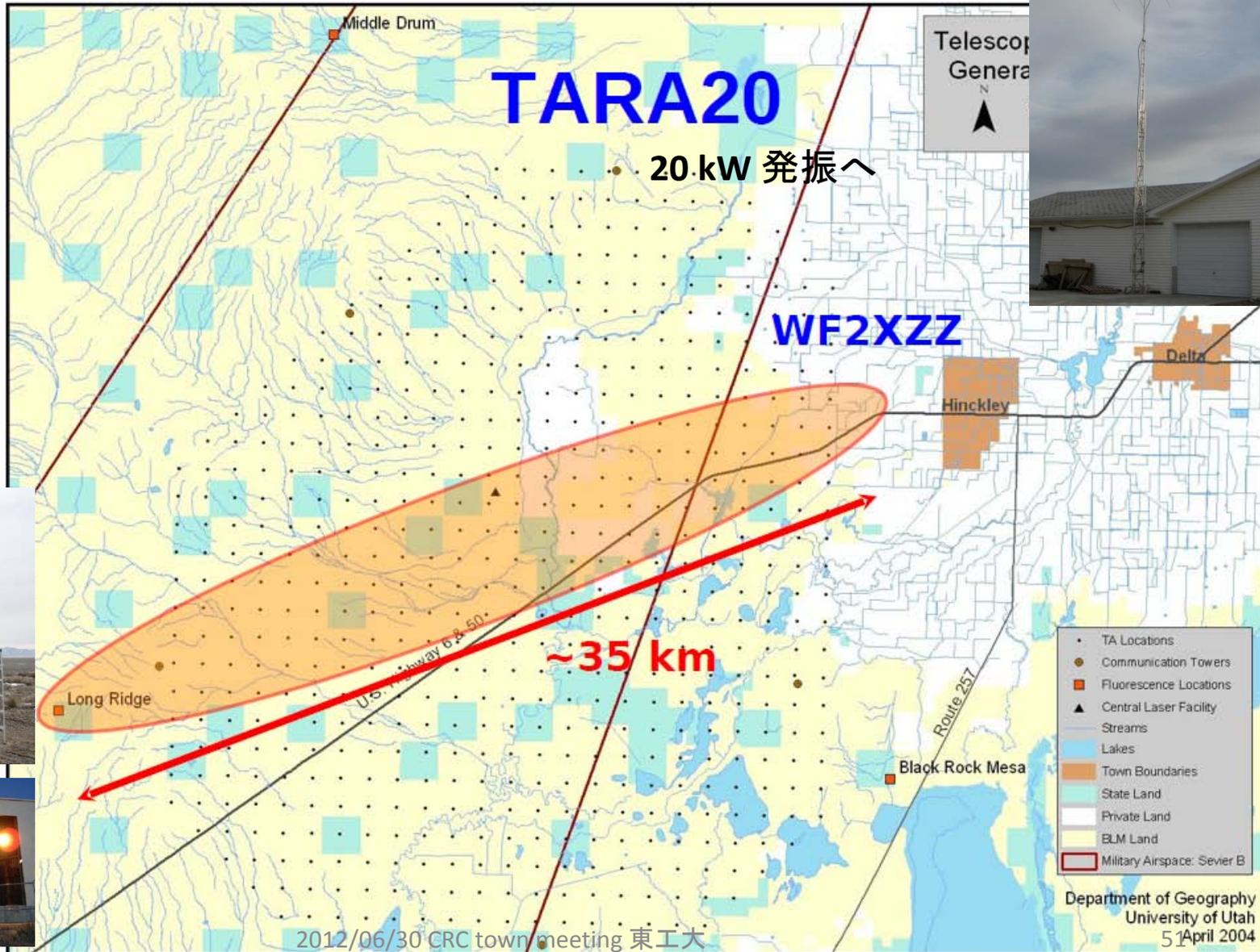
- 14EeV, 天頂角30度, Core Distance 140m
- coreに近いアンテナのみ上の信号を検出。
- 等方放射は検出されなかった。



電子ビームを使った実験ではMBR等方放射が確認されている。空気シャワーからの放射が検出可能なレベルかどうかはまだ結論が出ていない。

TARA: forward RADAR in Utah

54.1 MHz sine wave at 1.5 kW



Future Plans

将来計画

Ground and Space

1. $\sim 1,000$ events, $E > 10^{19.8}$ eV,
2. $30 \sim 40 \times 10^3$ km²
3. 国際協力

Next Generation G. Detector

地表アレイ
with “ μ ” -ID

×
hybrid

蛍光望遠鏡
and/or
「電波」観測

JEM/EUSO

宇宙からの蛍光観測

- max. info. from UHE event
- \sim 北半球
- “Particle Physics” capability
- ~ 100 M Euro (欧・日・米)

- max. coverage at UHE
- 南北 uniform sampling
- “Astrophysics”
- space funding

空気シャワー観測の歴史

- 1912 Cosmic Ray (V.Hess)
- 1938 Air Shower (P.Auger)
- 1956 核研ASアレイ (小田)
- 1961 Extra-galactic CR (B.Rossi)
- 1962 10^{20} eV CR (J.Linsley)
蛍光観測の提案 (菅, A.Chudakov)
- 1966 GZK prediction
蛍光検出器 (K.Greisen@Cornel)
- 1968 蛍光イベント初観測 (棚橋@堂平)
- 1976 Fly's Eye proto (Utah group)
- 1979 Satellite Observ. Idea (J.Linsley)
- 1994 GZK cutoff? by FE-1
- 1995 "EUSO" concept (高橋)
- 1998 Extended spectrum (AGASA)
- 2008 GZK cutoff by HiRes
cutoff by PAO
- 2010 Proton composition (HiRes)
composition going heavy (PAO)
- 2012 cutoff の確認 (TA)

