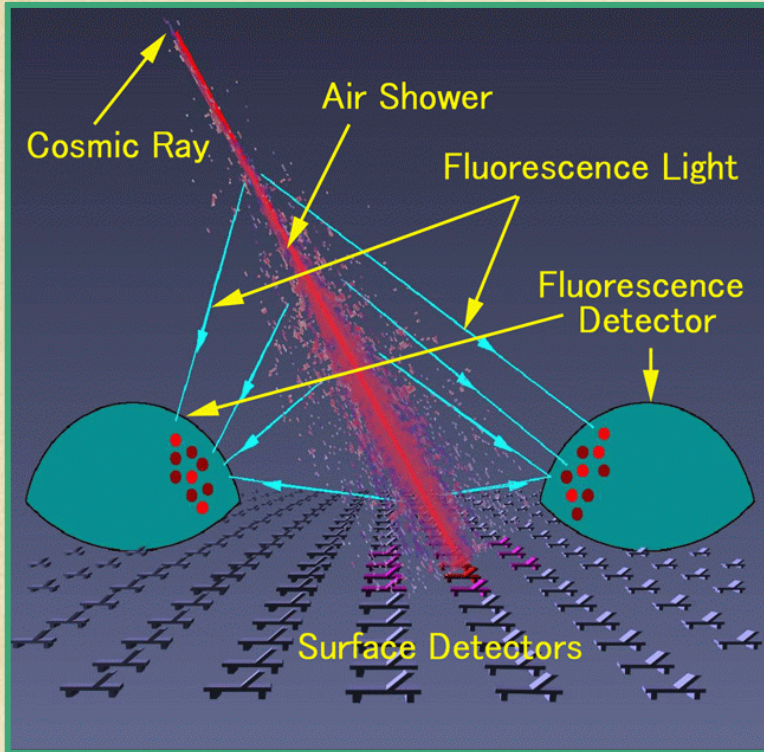


TA実験と空気シャワーMC

IKEDA Daisuke
ICRR, University of Tokyo
for the Telescope Array Collaboration

Contents

2



SDの特徴:

- 空気シャワーを構成する粒子を直接測定
- 24時間天候に寄らず観測可能
- 空気シャワーMCに依存したエネルギー

FDの特徴:

- 空気シャワーが大気を通過した際に発光(大気蛍光)した物を望遠鏡で観測
- 空気シャワーの縦発達を直接観測
 - 粒子識別が可能
- 月のない晴れた夜のみ観測できる
 - 年間の10%以下: 事象数が少ない
- Calorimetricにエネルギーを測定

実際に空気シャワーMCがどのように使われているのか

- Telescope Array実験
- 空気シャワーモンテカルロ
- 地表検出器解析
- 大気蛍光望遠鏡解析
- その他空気シャワーMCに関連する話題

Telescope Array 実験

The Telescope Array Collaboration

International collaboration that consists of about 140 researchers,
26 institutions from **Japan/US/Korea/Russia/Belgium**

T Abu-Zayyad¹, R Aida², M Allen¹, R Azuma³, E Barcikowski¹, JW Belz¹, T Benno⁴, DR Bergman¹, SA Blake¹, O Brusova¹, R Cady¹, BG Cheon⁶, J Chiba⁷, M Chikawa⁴, EJ Cho⁶, LS Cho⁸, WR Cho⁸, F Cohen⁹, K Doura⁴, C Ebeling¹, H Fujii¹⁰, T Fujii¹¹, T Fukuda³, M Fukushima^{9,22}, D Gorbunov¹², W Hanlon¹, K Hayashi³, Y Hayashi¹¹, N Hayashida⁹, K Hibino¹³, K Hiyama⁹, K Honda², G Hughes⁵, T Iguchi³, D Ikeda⁹, K Ikuta², SJJ Innemee⁵, N Inoue¹⁴, T Ishii², R Ishimori³, D Ivanov⁵, S Iwamoto², CCH Jui¹, K Kadota¹⁵, F Kakimoto³, O Kalashev¹², T Kanbe², H Kang¹⁶, K Kasahara¹⁷, H Kawai¹⁸, S Kawakami¹¹, S Kawana¹⁴, E Kido⁹, BG Kim¹⁹, HB Kim⁶, JH Kim⁶, JH Kim²⁰, A Kitsugi⁹, K Kobayashi⁷, H Koers²¹, Y Kondo⁹, V Kuzmin¹², YJ Kwon⁸, JH Lim¹⁶, SI Lim¹⁹, S Machida³, K Martens²², J Martineau¹, T Matsuda¹⁰, T Matsuyama¹¹, JN Matthews¹, M Minamino¹¹, K Miyata⁷, H Miyauchi¹¹, Y Murano³, T Nakamura²³, SW Nam¹⁹, T Nonaka⁹, S Ogio¹¹, M Ohnishi⁹, H Ohoka⁹, T Okuda¹¹, A Oshima¹¹, S Ozawa¹⁷, IH Park¹⁹, D Rodriguez¹, SY Roh²⁰, G Rubtsov¹², D Ryu²⁰, H Sagawa⁹, N Sakurai⁹, LM Scott⁵, PD Shah¹, T Shibata⁹, H Shimodaira⁹, BK Shin⁶, JD Smith¹, P Sokolsky¹, TJ Sonley¹, RW Springer¹, BT Stokes¹, TA Stroman¹, SR Stratton⁵, S Suzuki¹⁰, Y Takahashi⁹, M Takeda⁹, A Taketa⁹, M Takita⁹, Y Tameda³, H Tanaka¹¹, K Tanaka²⁴, M Tanaka¹⁰, JR Thomas¹, SB Thomas¹, GB Thomson¹, P Tinyakov^{12,21}, I Tkachev¹², H Tokuno⁹, T Tomida², R Torii⁹, S Troitsky¹², Y Tsunesada³, Y Tsuyuguchi², Y Uchihori²⁵, S Udo¹³, H Ukai², B Van Klaveren¹, Y Wada¹⁴, M Wood¹, T Yamakawa⁹, Y Yamakawa⁹, H Yamaoka¹⁰, J Yang¹⁹, S Yoshida¹⁸, H Yoshii²⁶, Z Zundel¹

1University of Utah, High Energy Astrophysics Institute, Salt Lake City, Utah, USA

2University of Yamanashi, Interdisciplinary Graduate School of Medicine and Engineering, Kofu, Yamanashi, Japan

3Tokyo Institute of Technology, Meguro, Tokyo, Japan

4Kinki University, Higashi Osaka, Osaka, Japan

5Rutgers University, Piscataway, USA

6Hanyang University, Seongdong-gu, Seoul, Korea

7Tokyo University of Science, Noda, Chiba, Japan

8Yonsei University, Seodaemun-gu, Seoul, Korea

9Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo, Kashiwa, Chiba, Japan

10Institute of Particle and Nuclear Studies, KEK, Tsukuba, Ibaraki, Japan

11Osaka City University, Osaka, Osaka, Japan

12Institute for Nuclear Research of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

13Kanagawa University, Yokohama, Kanagawa, Japan

14Saitama University, Saitama, Saitama, Japan

15Tokyo City University, Setagaya-ku, Tokyo, Japan

16Pusan National University, GeumJeong-gu, Busan, Korea

17Waseda University, Advanced Research Institute for Science and Engineering, Shinjuku-ku, Tokyo, Japan

18Chiba University, Chiba, Chiba, Japan

19Ewha Womans University, Seodaemun-gu, Seoul, Korea

20Chungnam National University, Yuseong-gu, Daejeon, Korea

21University Libre de Bruxelles, Brussels, Belgium

22University of Tokyo, Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, Kashiwa, Chiba, Japan

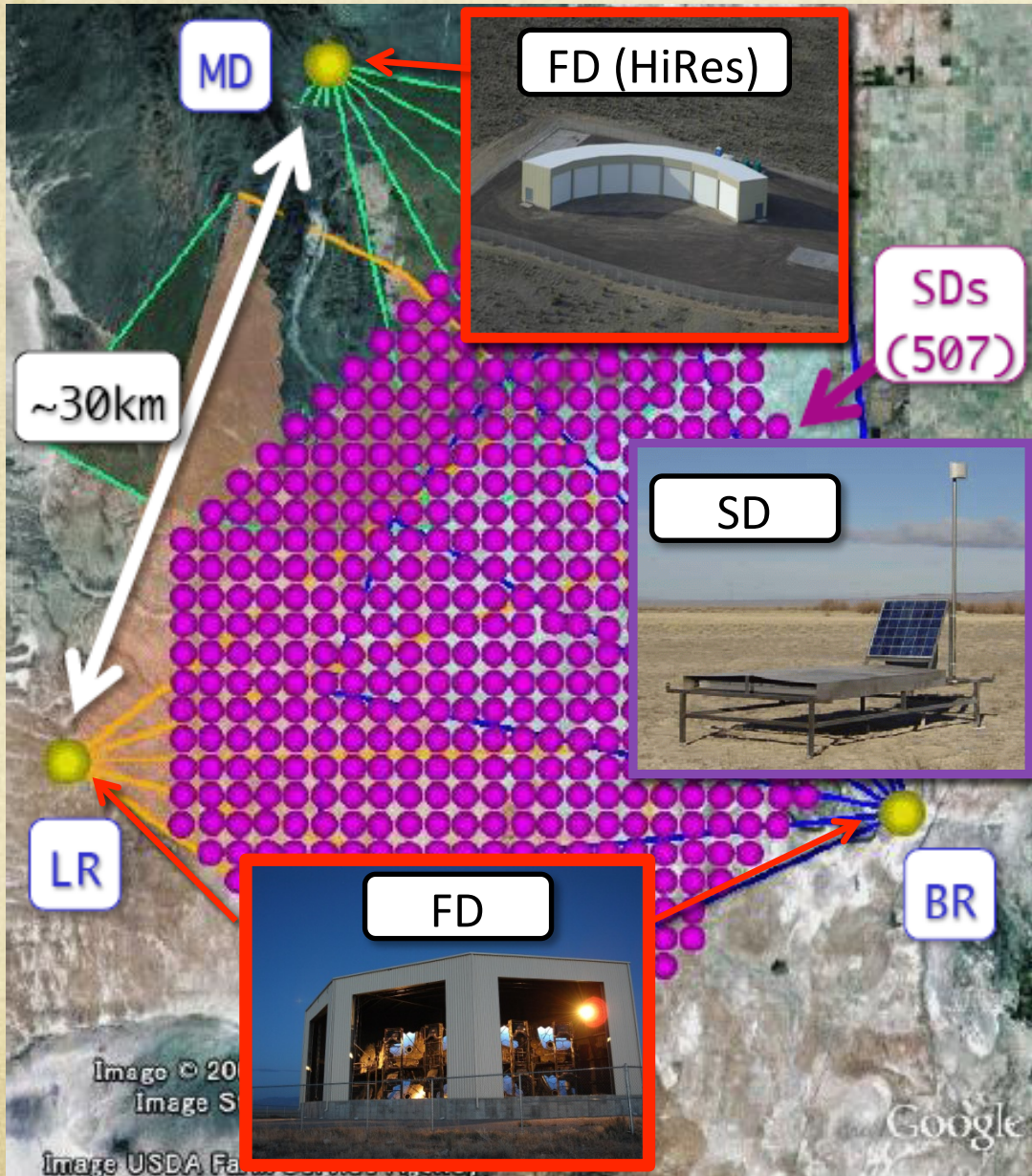
23Kochi University, Kochi, Kochi, Japan

24Hiroshima City University, Hiroshima, Hiroshima, Japan

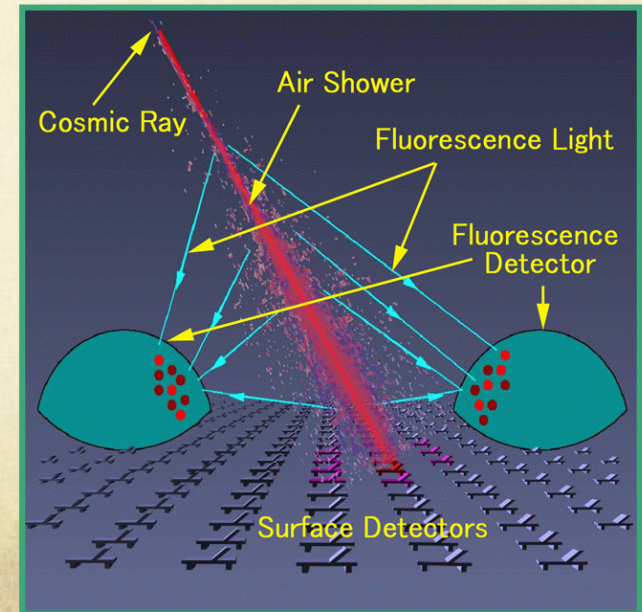
25National Institute of Radiological Science, Chiba, Chiba, Japan

26Ehime University, Matsuyama, Ehime, Japan

Telescope Array Experiment



- Desert in Utah, US (1400m a.s.l.)
- 507 Surface Detectors (SDs)
 - 1.2km spacing
 - Two layer of plastic scintillator, 3m², 1.2cm thickness
- 3 Fluorescence Detectors (FDs)
 - Middle Drum (MD) station is transferred from HiRes.
 - Black Rock (BR) and Long Ridge (LR) stations are newly built.
- FD observation : from Nov/2007
- SD observation : from Mar/2008



空気シャワーモンテカルロ

空気シャワーMC: CORSIKA dethinning

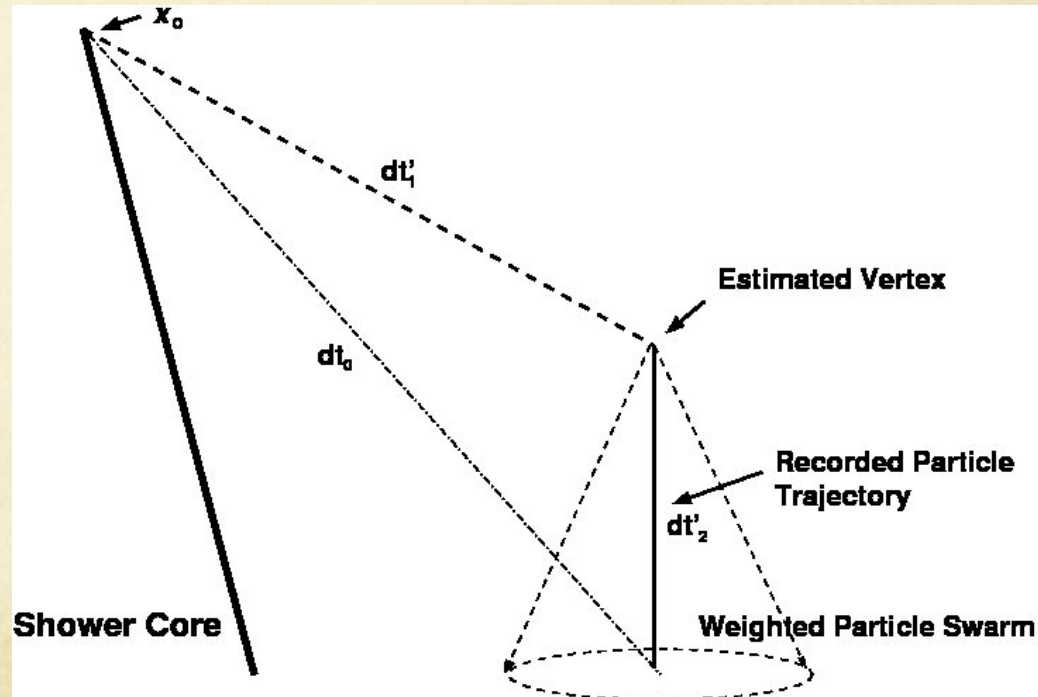
現在、TA実験で使用している空気シャワーMCはCORSIKAを使用して生成している

詳細はB.Stokes et al., 10.1016/j.astropartphys.2012.03.004

- CORSIKA 6.960
- QGSJET-II/FLUKA
- Dethinning technique
- CORSIKA itself left untouched

○ Dethinning

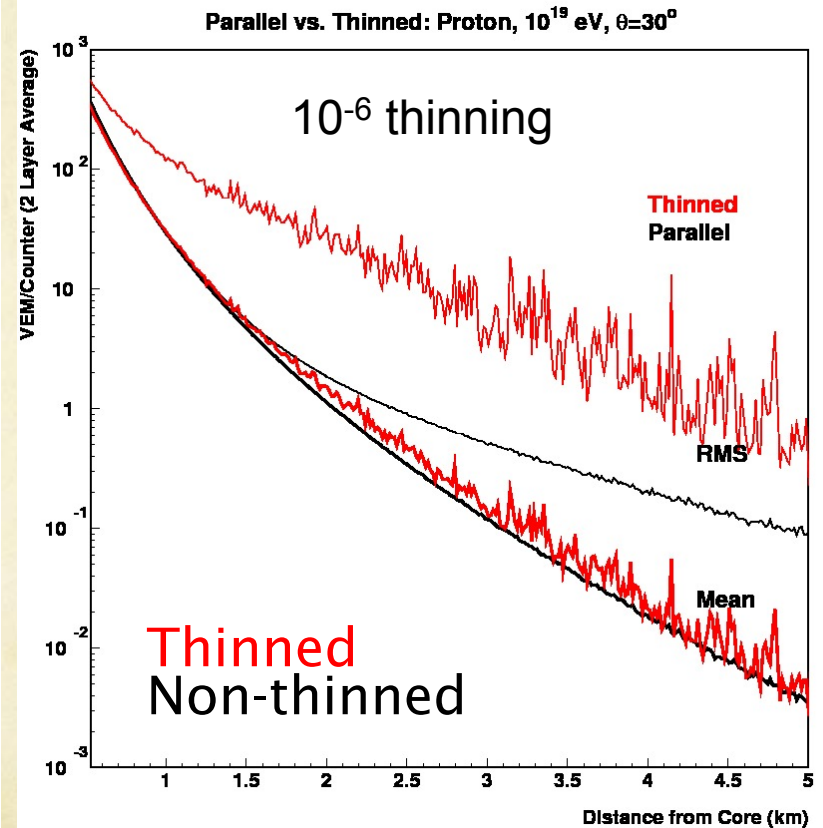
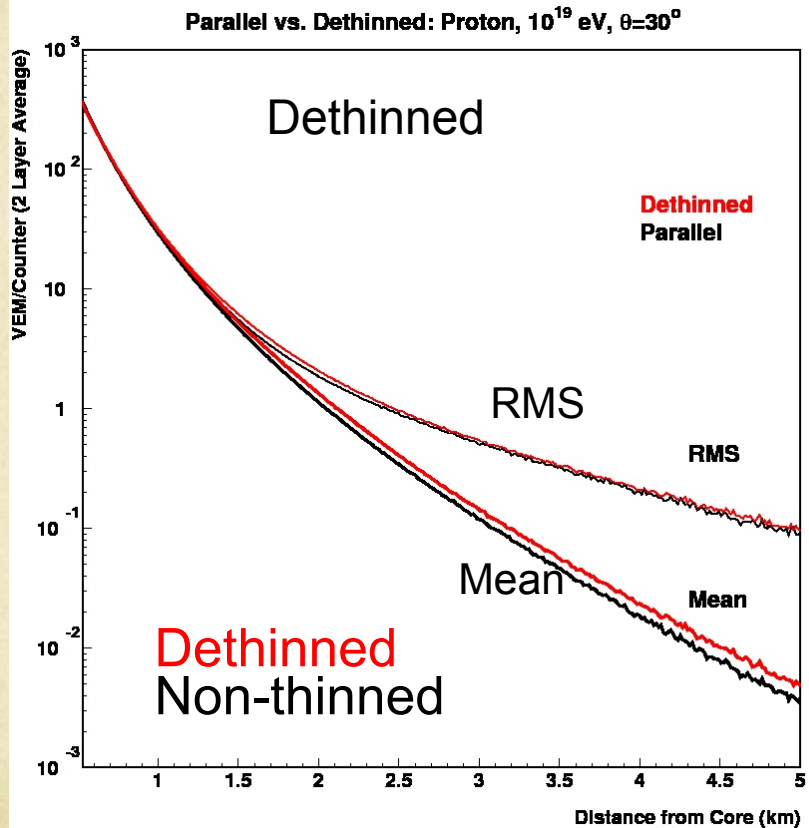
- Change each CORSIKA output particle of weight w to w particles with **similar** characteristics to the original particle
- Adjust dethinning parameters to agree with full CORSIKA generated via parallelization



Verifying Dethinning: Lateral Profile

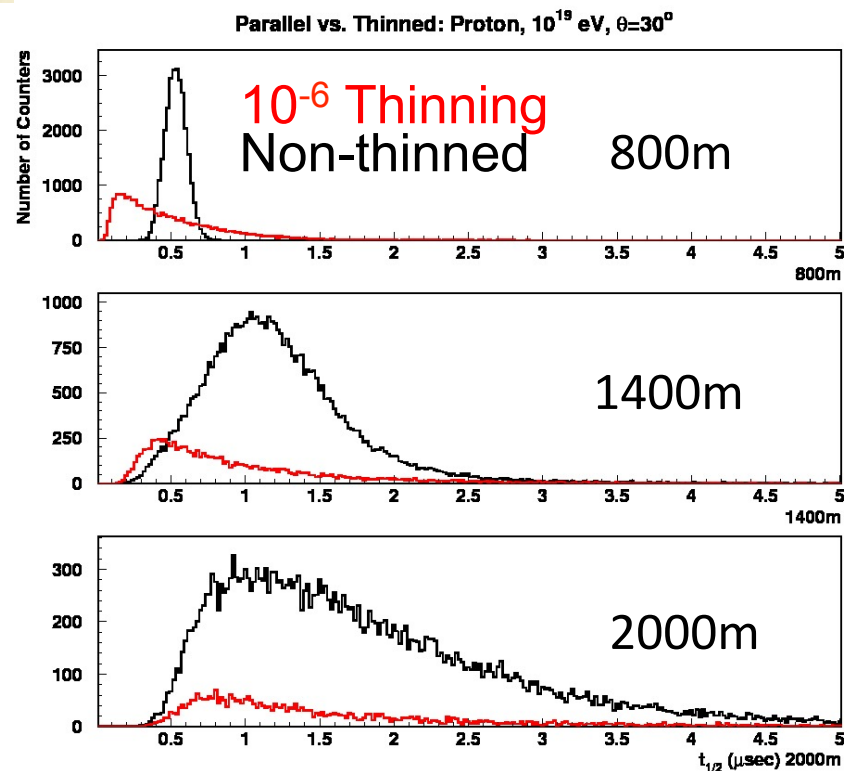
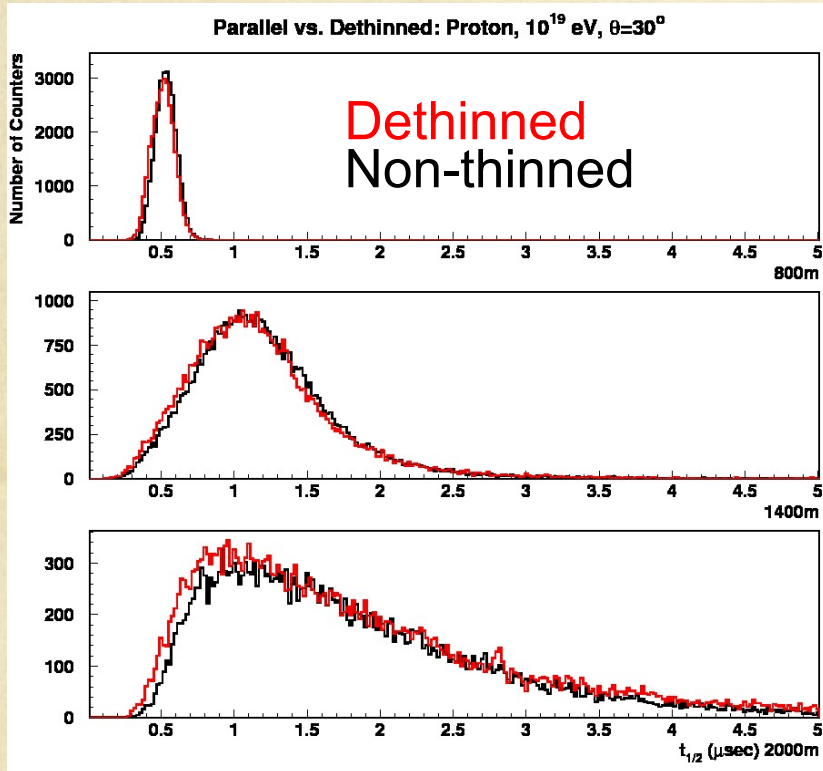
Proton, 10^{19} eV, 30° zenith angle

VEM / Counter



Distance from Core, [km]

Verifying Dethinning: Temporal Distribution

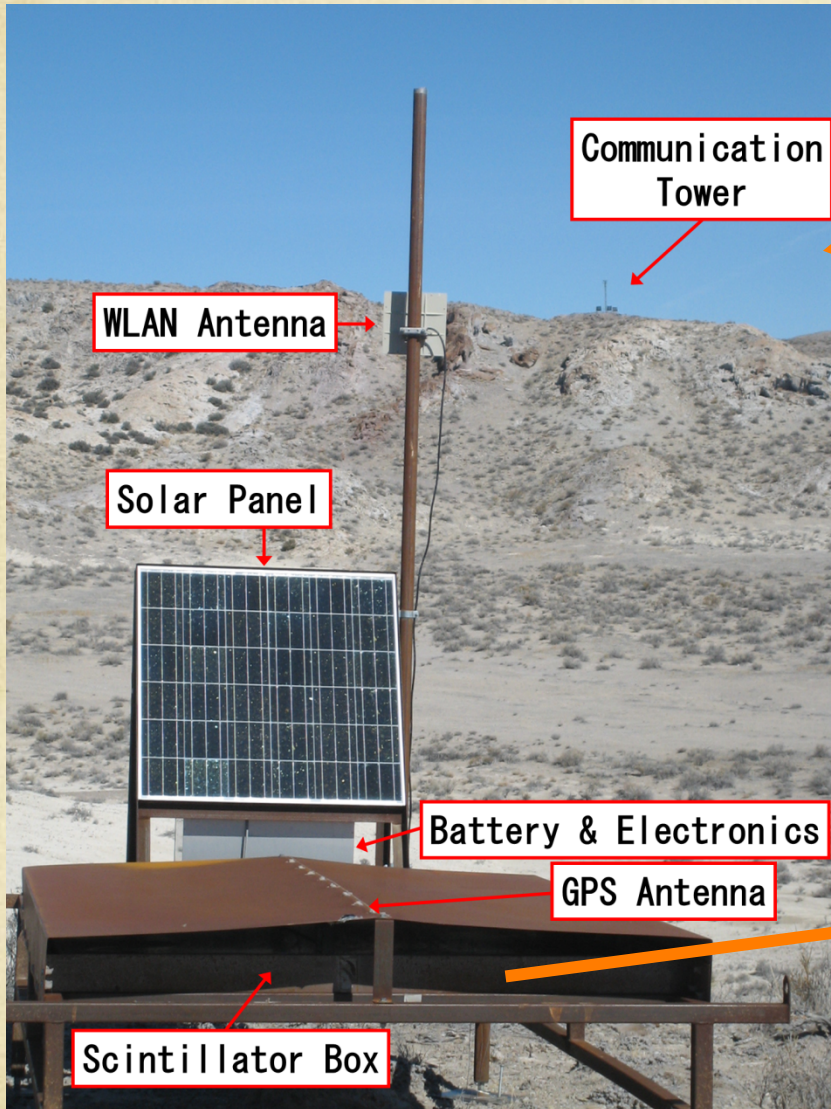


Lateral Distance

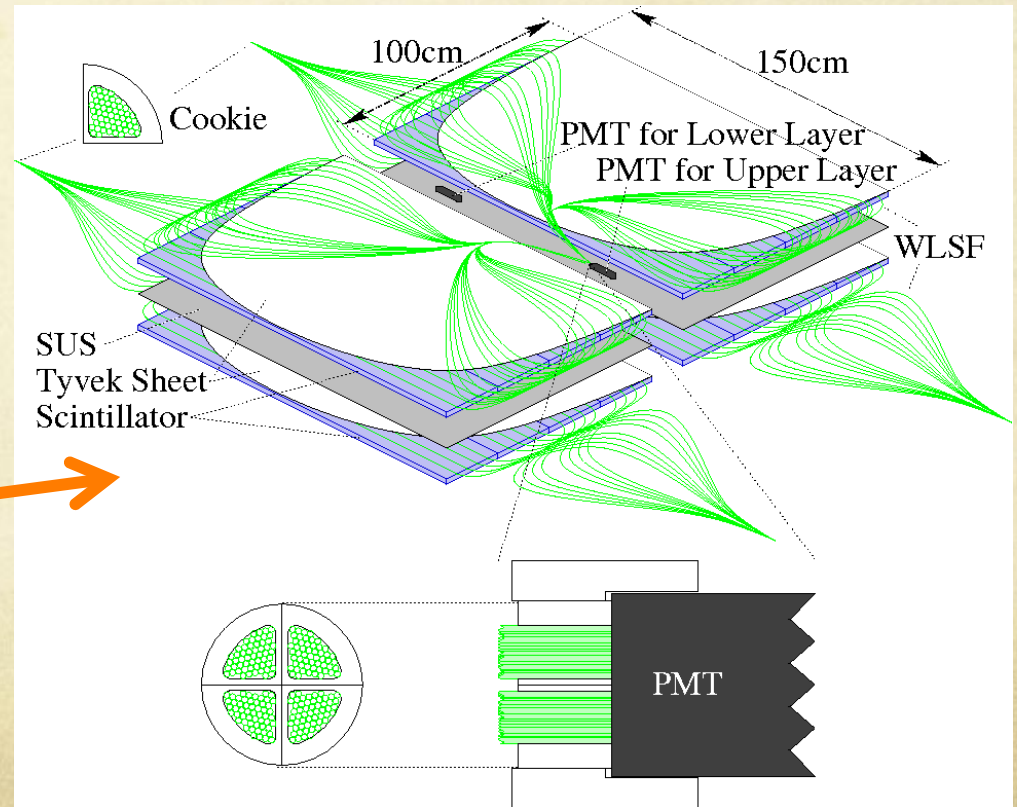
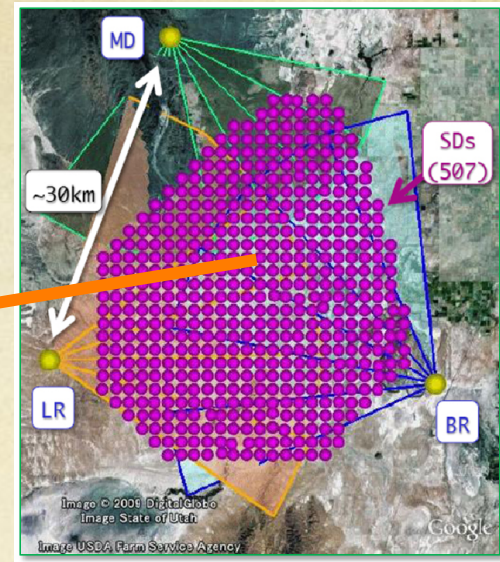
t_{50} (μsec normal to shower front)

地表検出器

Surface Detector array



- Two layers of the 3m² plastic scintillators



波形記録

上のシンチレータ波形
下のシンチレータ波形

周辺部のμ粒子

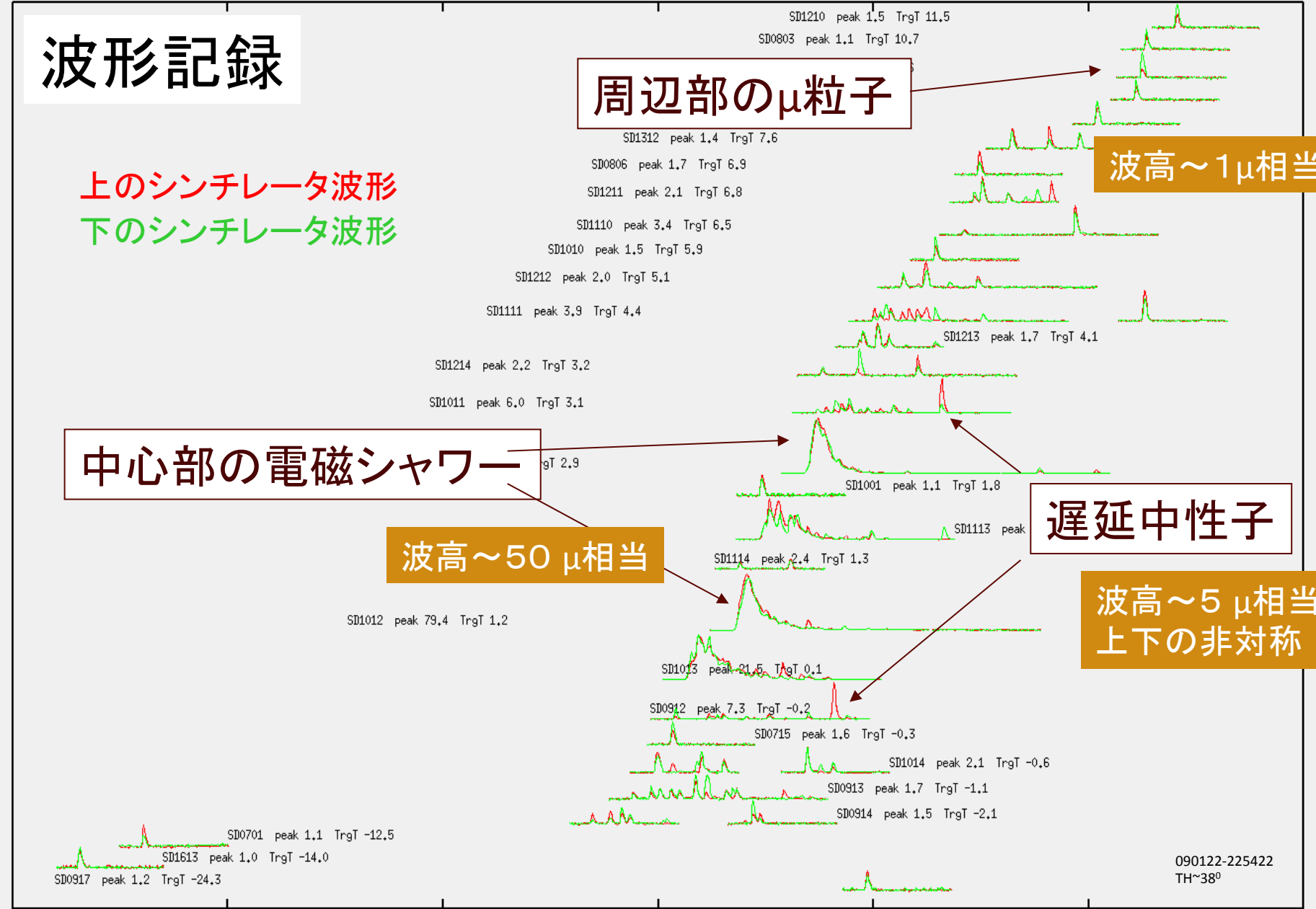
波高~1μ相当

中心部の電磁シャワー

波高~50μ相当

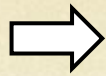
遅延中性子

波高~5μ相当
上下の非対称

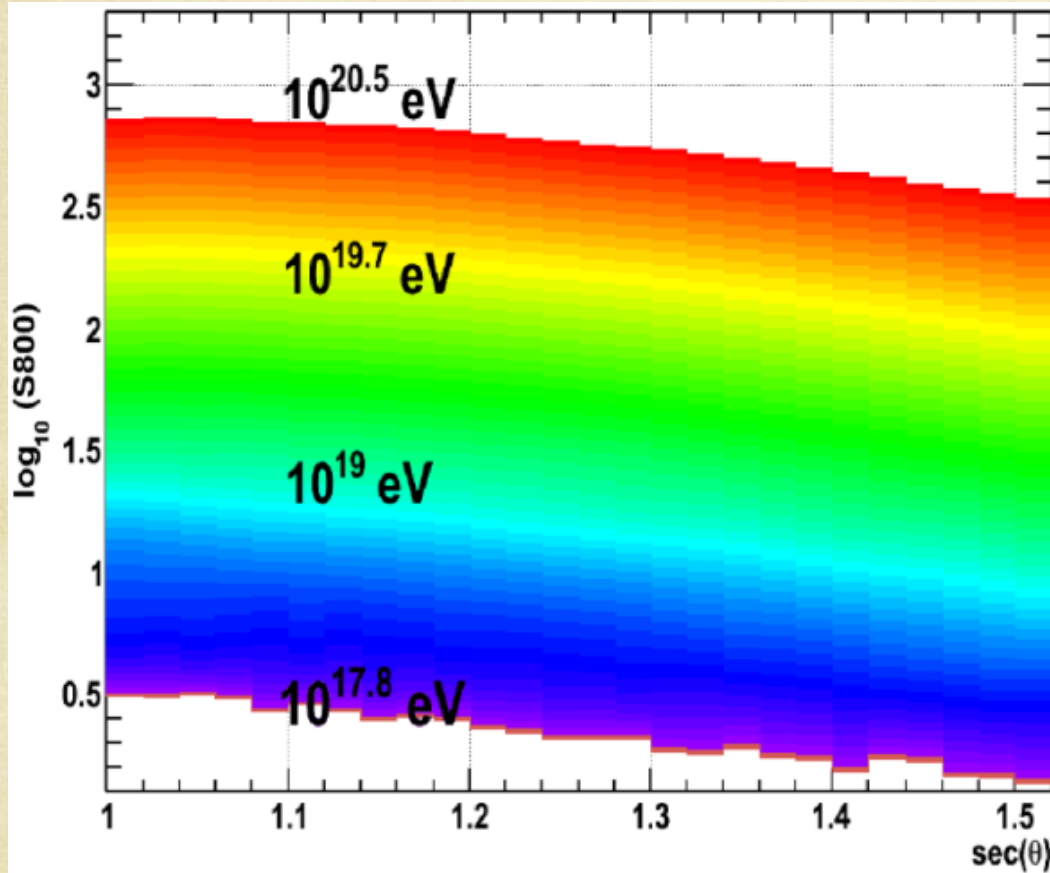


空気シャワーMCとSD解析

CIC approach



Air shower MC



- Energy table is constructed from the Monte Carlo
- First estimation of the **event energy** is done by interpolating between **S800** vs **sec(θ)** lines.

SD shower geometry fitting

Geometry fitting

AGASA Modified function

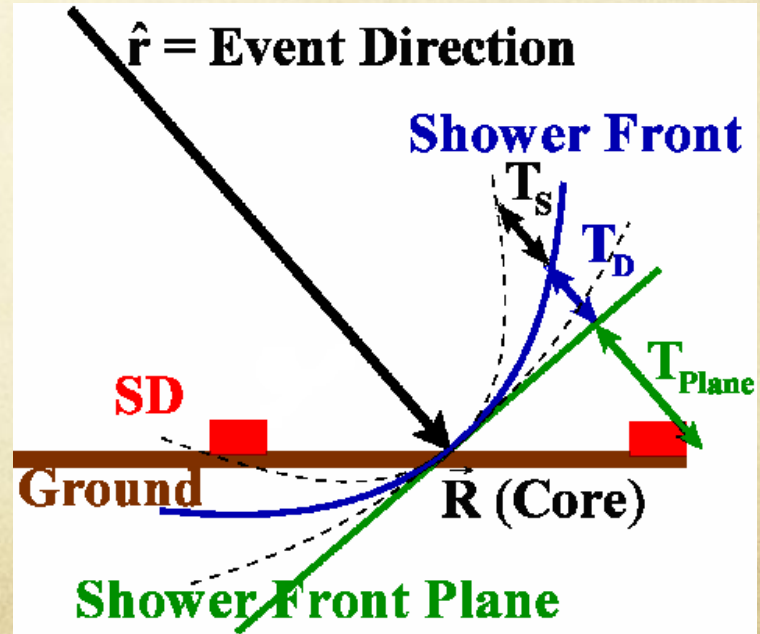
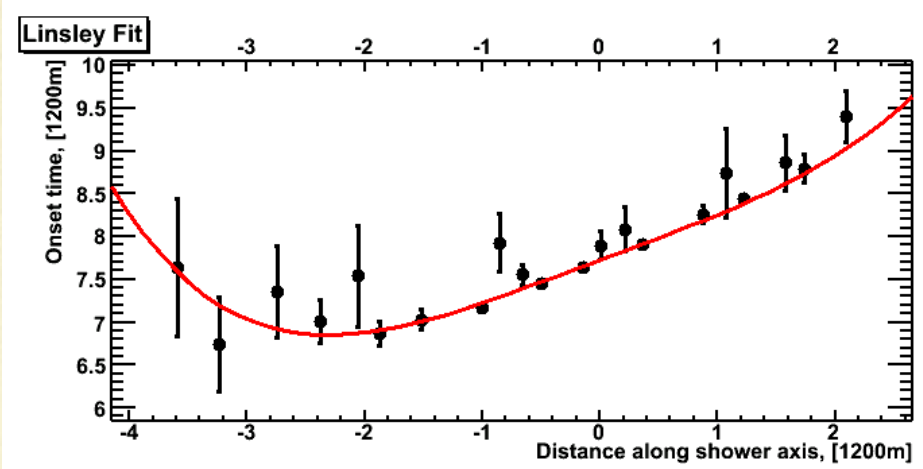
Minimize:

$$\chi^2 = \sum \left(\frac{\Delta T_i}{\sigma_{T_i}} \right)^2 + \frac{(\vec{R} - \vec{R}_0)^2}{\sigma_{\vec{R}}^2}$$

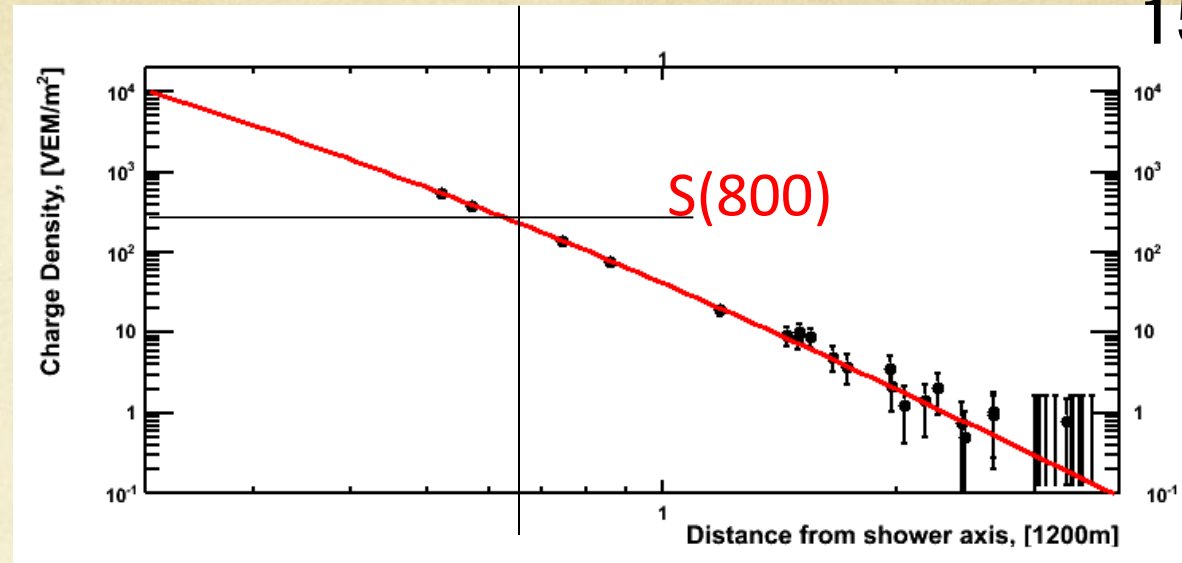
$$\Delta T_i = t_i - T_0 - T_P - T_D$$

$$T_D = \left(1 - \frac{l}{12 \times 10^3 \text{m}} \right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30 \text{m}} \right)^{1.35} \rho^{-0.5}$$

$$T_S = 1.56 \times 10^{-3} \left(1.0 - \frac{l}{12 \times 10^3 \text{m}} \right)^{1.05} \left(1.0 + \frac{s}{30 \text{m}} \right)^{1.5} \rho^{-0.3}$$



Lateral Distribution Function (LDF) Fitting



Fit with AGASA LDF

R=800m

$$\rho = A \left(\frac{s}{91.6\text{m}} \right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6\text{m}} \right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1 + \left[\frac{s}{1000\text{m}} \right]^2 \right)^{-0.6}$$

AGASAの実験式

$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79 [\sec(\theta) - 1]$$

$$\sigma_\rho = \sqrt{0.56 \rho + 6.3 \times 10^{-3} \rho^2}$$

TAの実験式

$$\chi_{\text{LDF}}^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(\rho_i - \rho_i^{\text{FIT}})^2}{\sigma_{\rho_i}^2} + \frac{(R - R_{\text{core}})^2}{\sigma_R^2}$$

Secθ, S(800)

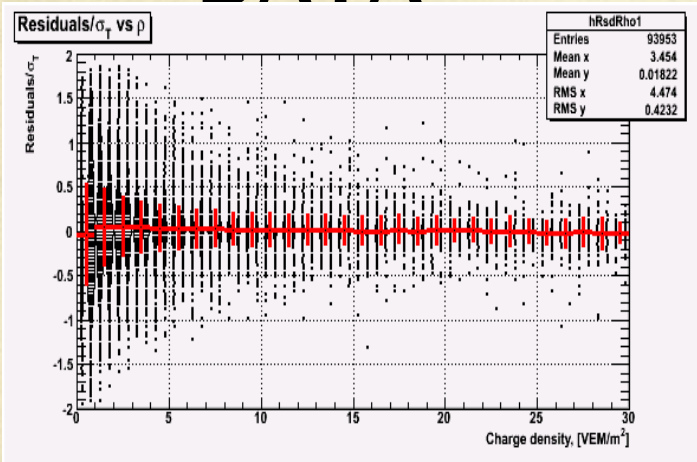


Energy

これはSD単独で見積もる事ができるが、MCに依存したエネルギー
TA実験では大気蛍光望遠鏡で得られたエネルギーにリスケールしている(後述)

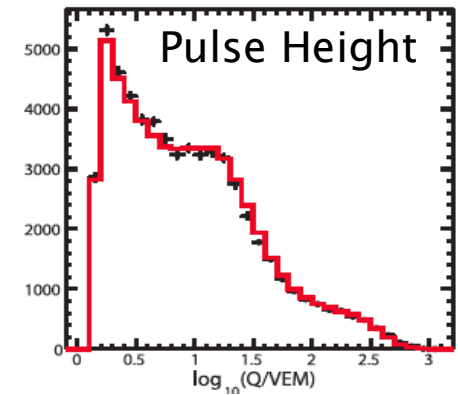
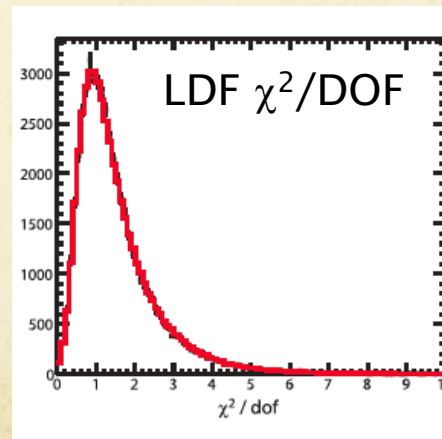
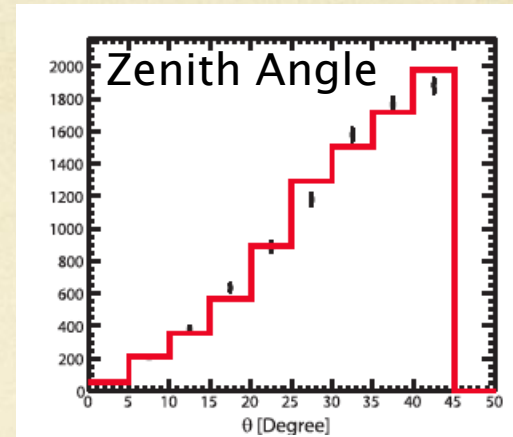
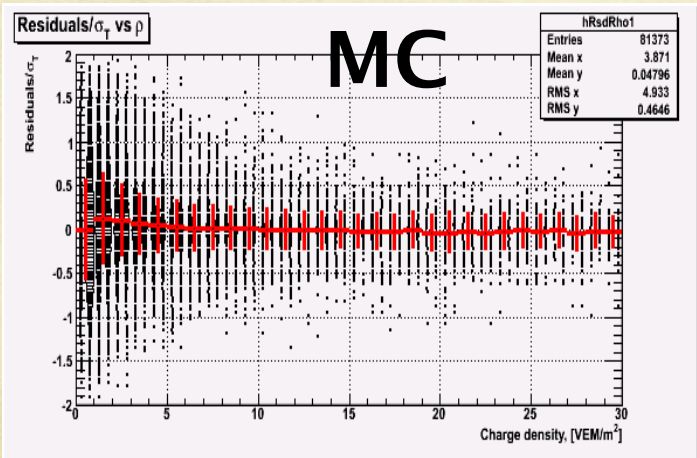
Consistency check : Data/MC comparison

DATA



実データと同期間、同較正值を使ったMC事象
を生成し、実データと比較する
(QGSJET-II-03 proton)

MC

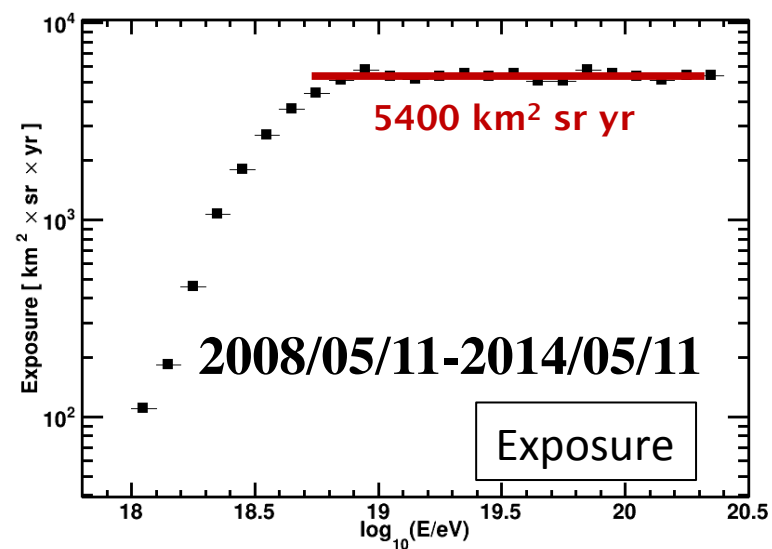


Counter signal, [VEM/m²]

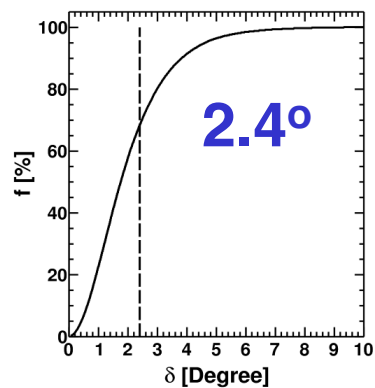
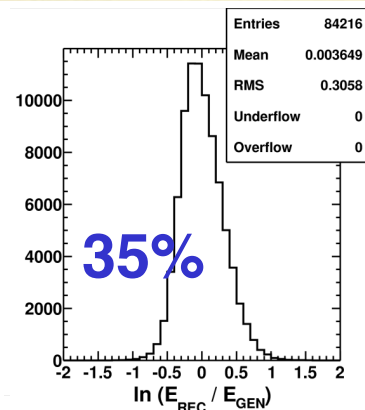
Vertical Equivalent Muon (VEM)

Time fit residual over sigma

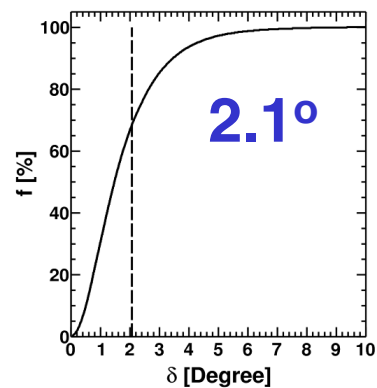
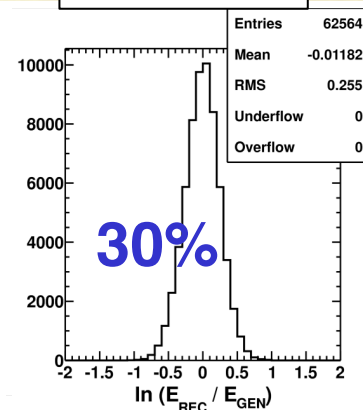
Information from MC study



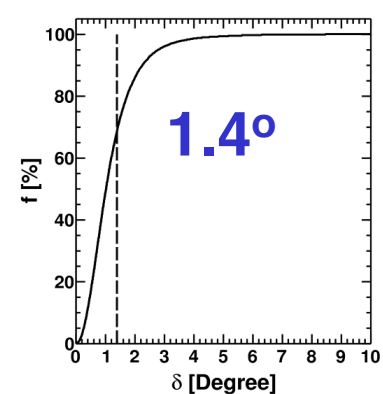
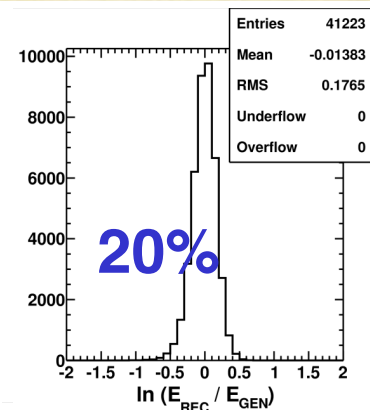
Resolution



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



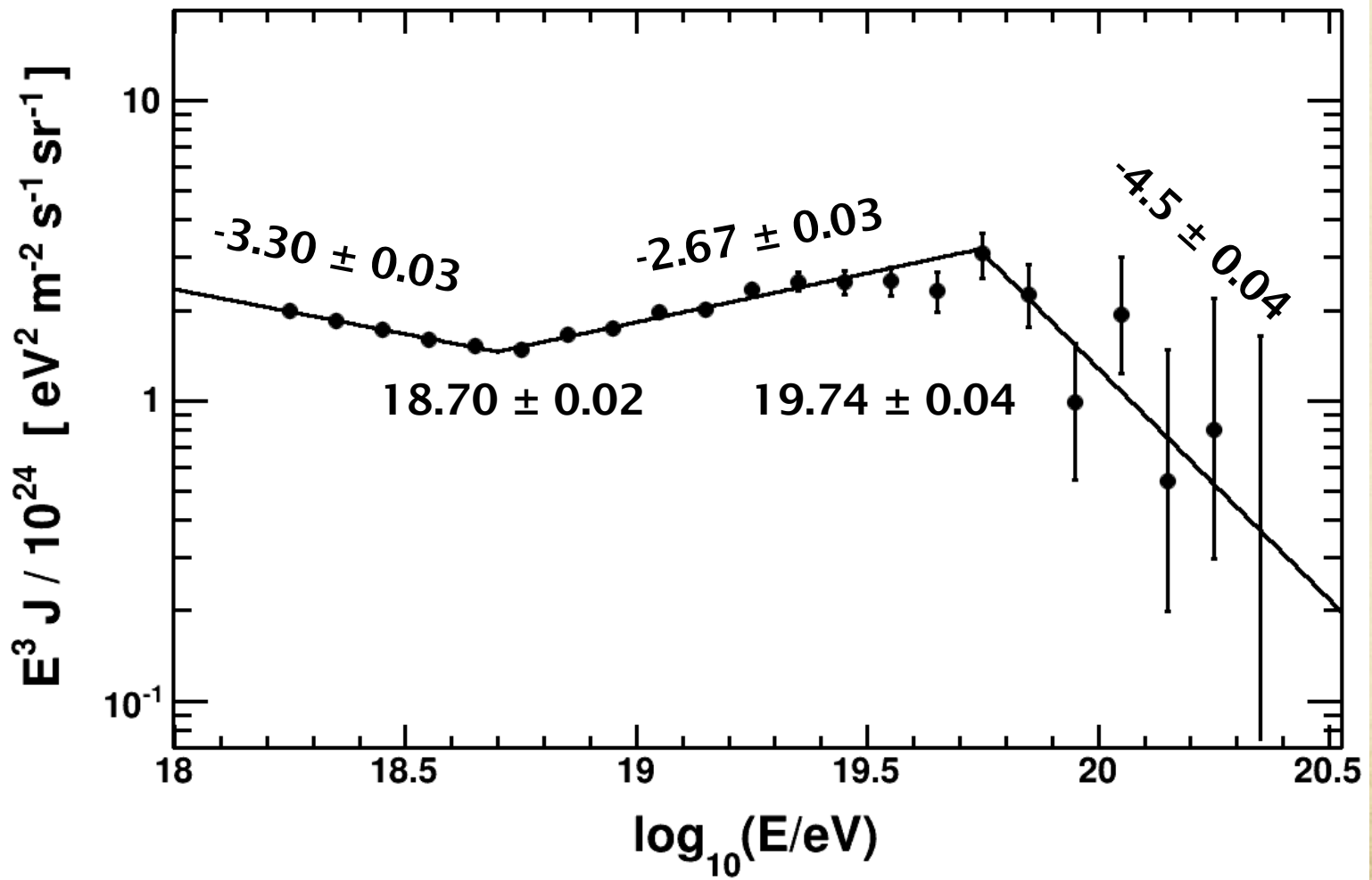
$10^{18.5} - 10^{19.0} \text{ eV}$



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

SD spectrum

2008/05/11-2014/05/11



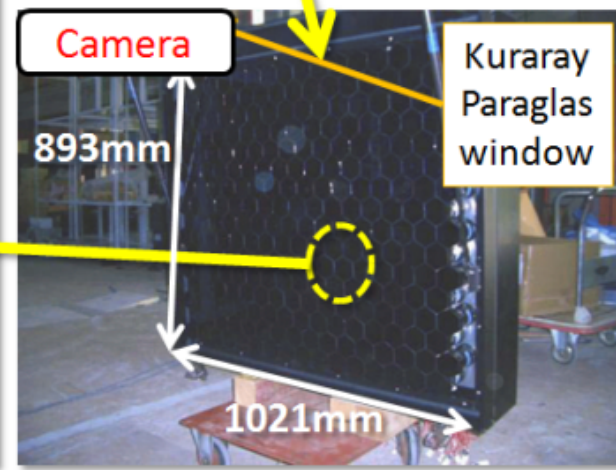
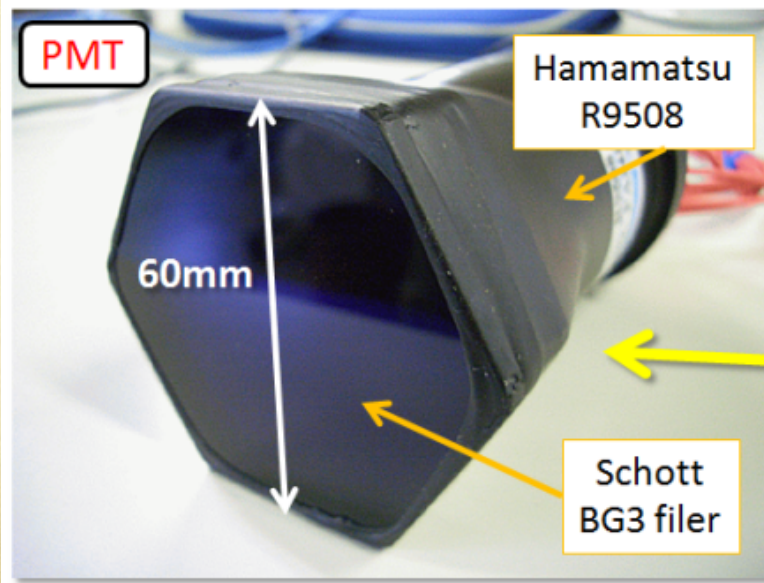
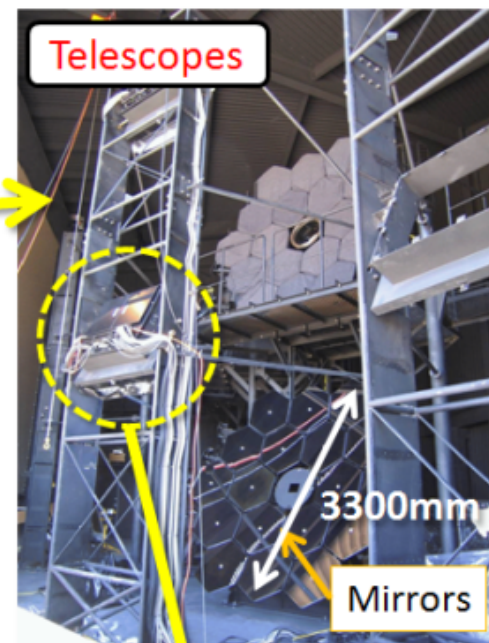
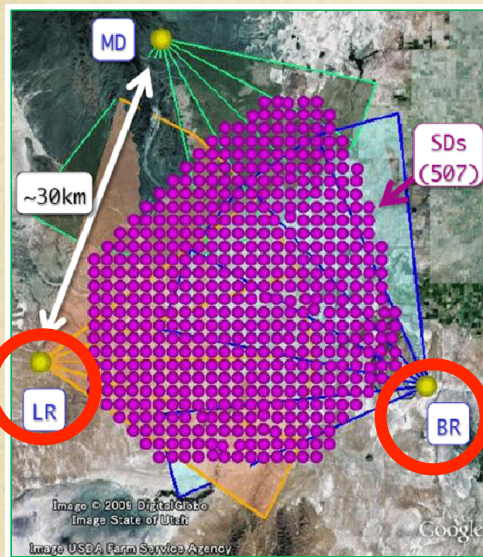
他解析とモンテカルロ

- 異方性解析
 - 高エネルギー($\log E > 19$)ではResolutionの見積もり程度
 - 低エネルギーでは地表検出器のトリガー効率が100%ではなく、またpoorな事象が増えるため、検出器の感度の見積もりや解析のバイアス見積もりにMCが必須
 - TA実験のMC事象は同期間、同較正值を使い、実データ相当の物を用意しているため、これをそのまま使う
- 光子探索
 - 空気シャワーフロントの曲率を用いた解析
 - 光子と他のシャワーの違い、解析手法のチューニングは空気シャワーMCを用いて取得

大氣螢光望遠鏡

Fluorescence Detector station at BR/LR site

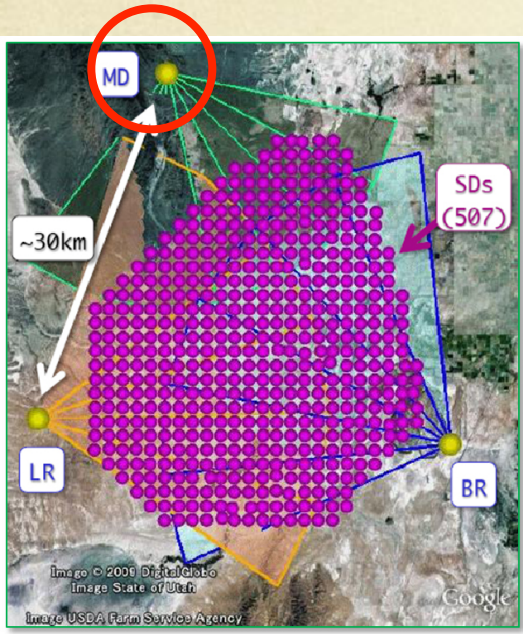
BR/LR site: **new** telescopes for TA



F.O.V of station:

- Elevation: $3 \sim 33^\circ$
- Azimuth: 108°

Fluorescence Detector station at MD site

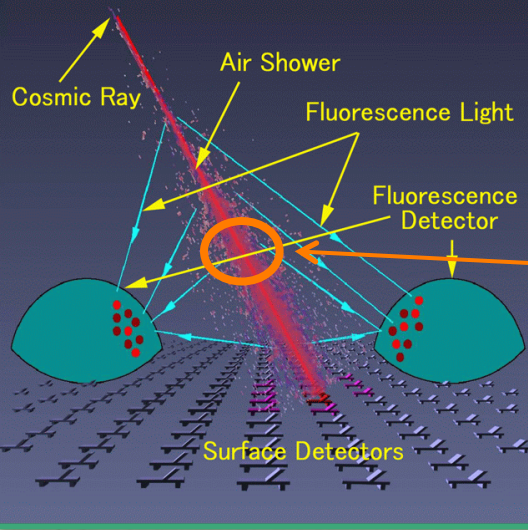


Transferred from **HiRes**

- 14 cameras/station
- 256 PMTs/camera
- 3°-31° elevation with 1° pixel
- 114° in azimuth
- 5.2m² mirror
- S/H electronics

大気蛍光望遠鏡 23

FDは空気シャワー縦発達におけるEnergy Depositを観測する

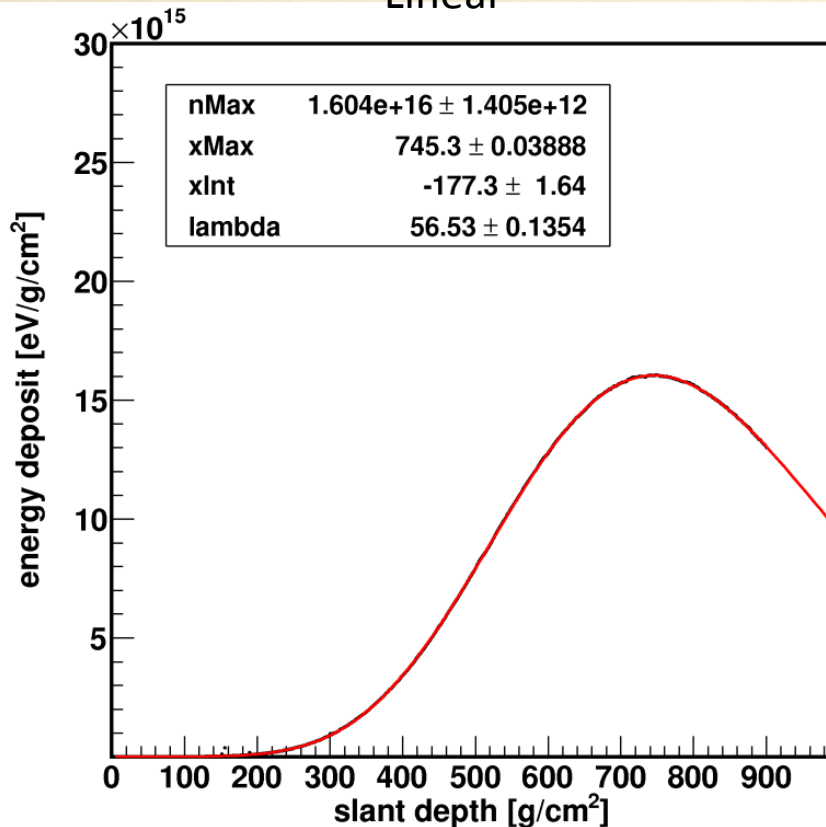


大気蛍光発光量 $Y(p,t,h,\Delta E)$

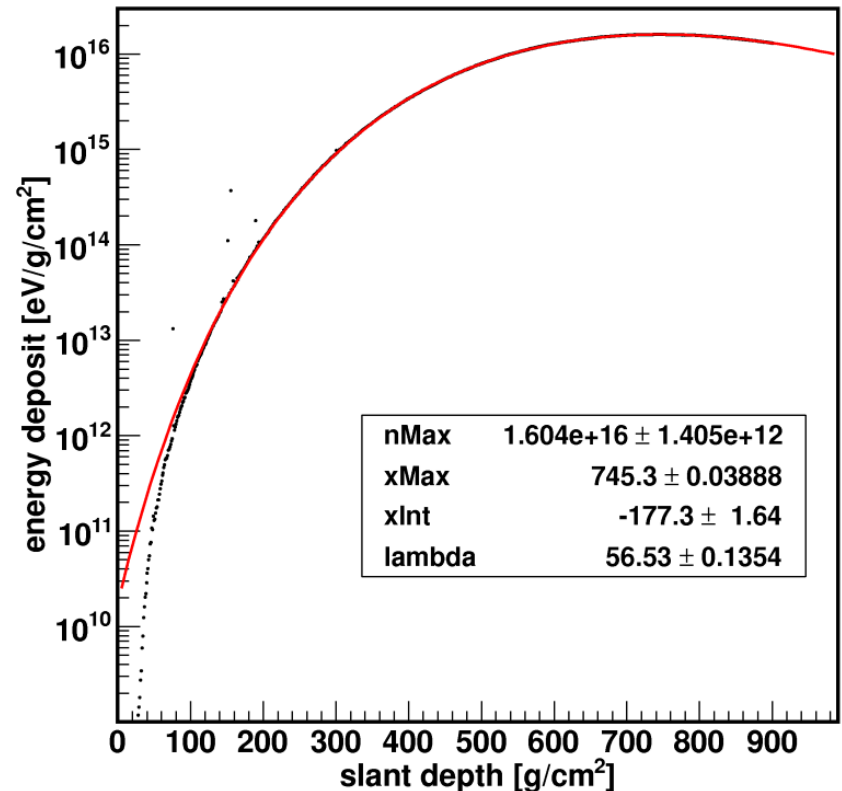
Gaisser-Hillas function

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

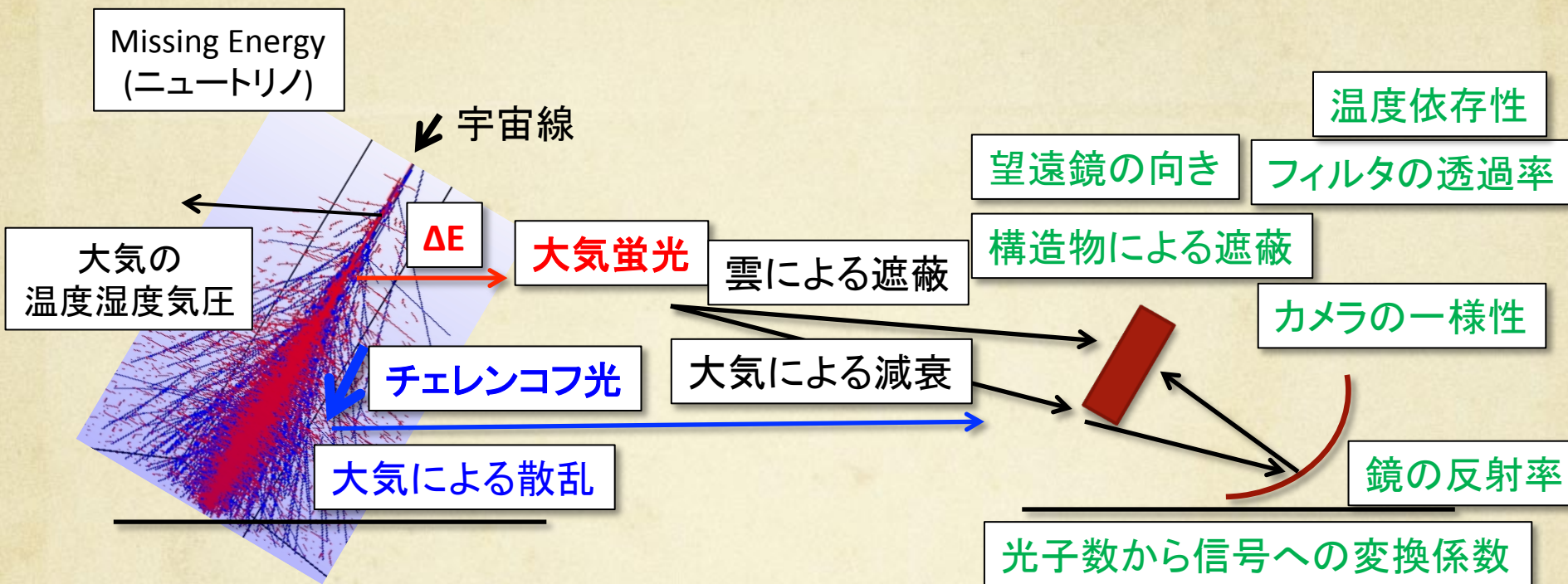
Linear



Logarithm



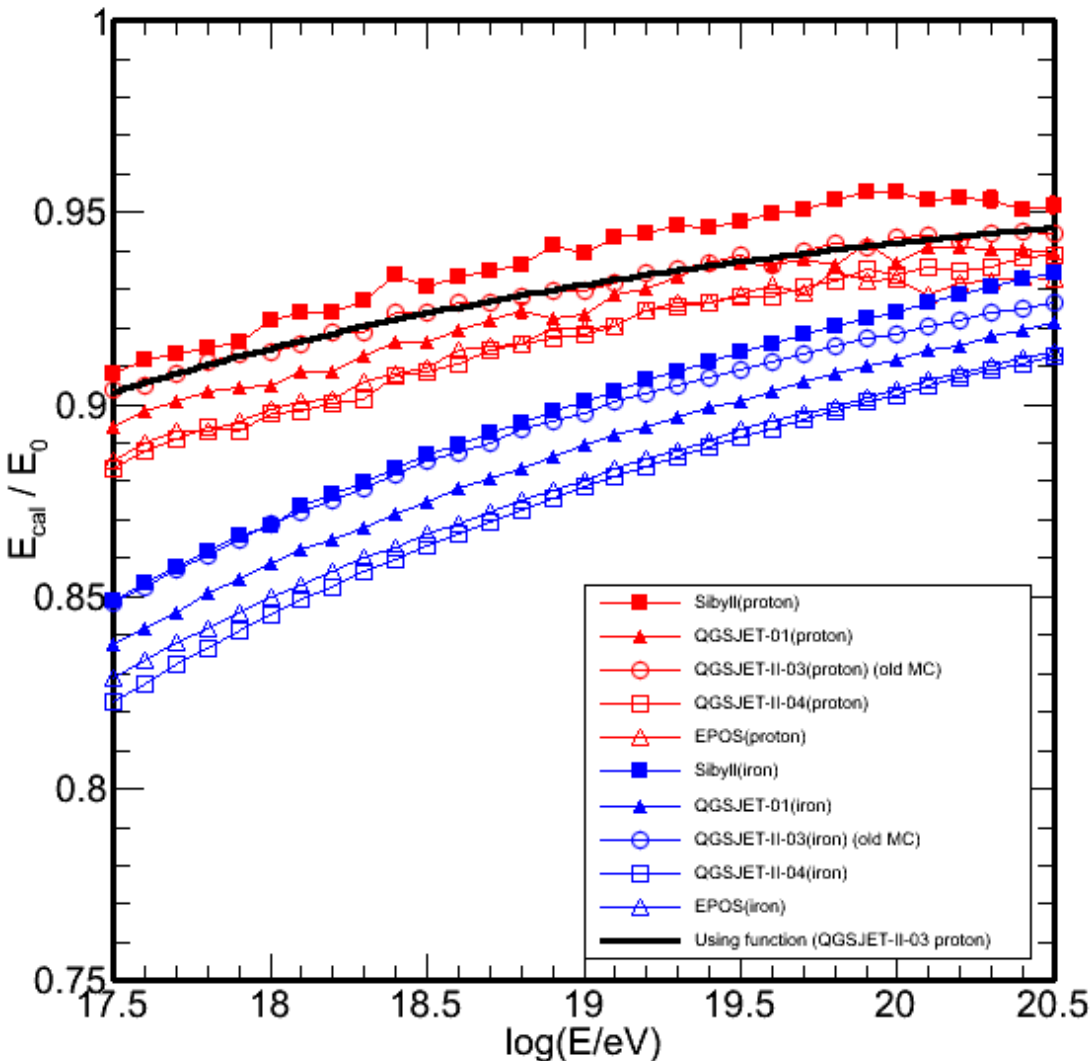
空気シャワー再構成：縦方向発達



- これらを全て逆に解けば、元の縦方向発達、エネルギーが分かる
- が、逆に解けない物もあり、正確な値を見積もるのは難しい
(PMTの一様性やスポットサイズによる効果等)
- SDと違いFDは空気シャワーMCへの依存性は少ないが、Missing Energyは空気シャワーMCで見積もる必要がある

- 空気シャワーMCによるMissing Energyの見積もり
- Inverse Monte Carloによる再構成

Missing Energy



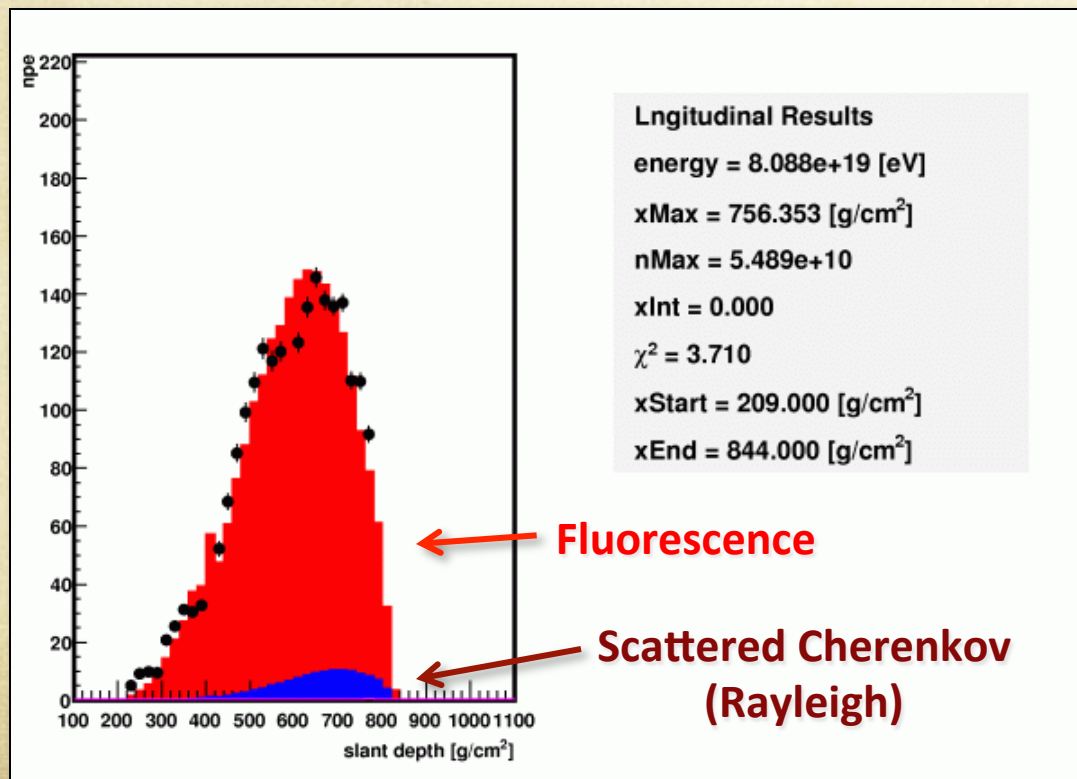
- 空気シャワーMCで得られた energy depositをGH関数でFitし、積分してCalorimetric energyを見積もる
- 使用するMCはSD解析で用いた物と同じ
- Modelによる差は3%程度
- Compositionによる差は5%程度
- FD解析ではSDと同様、QGSJET-II-03 protonの値を用いる

Shower profile reconstruction

シャワープロファイルの再構成:

Inverse Monte Carlo (IMC)

1. **GH関数**で空気シャワーを作り、検出器シミュレーションを通して各PMTに入射する光量を求め、データと比較する
2. 1を X_{max} を変えながら繰り返し、最も良く合う X_{max} をGH関数を探す (X_{max} 決定)
3. 2で得たGH関数を積分して、カロリメトリックエネルギーを求める
4. 3で得たエネルギーにMissing energyの補正を加え、宇宙線のエネルギーを得る (Energy決定)



Quality Cut

- X_{max} が視野内
- Zenith angle < 55 degree
- PMTの数 > 20
- シャワーコアがSD領域内
- Minimum Viewing Angle < 20度

Consistency check : Data/MC comparison

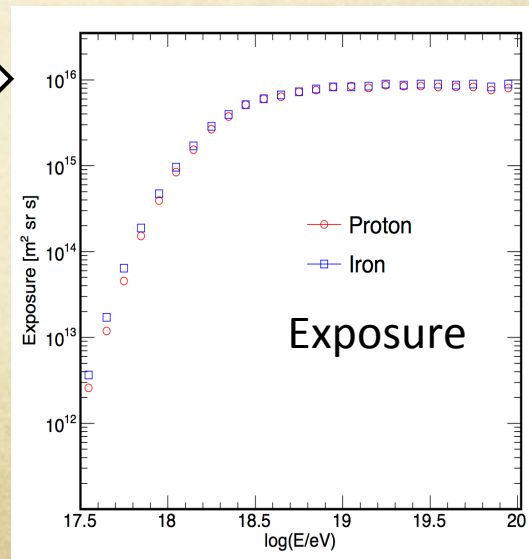
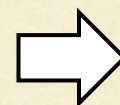
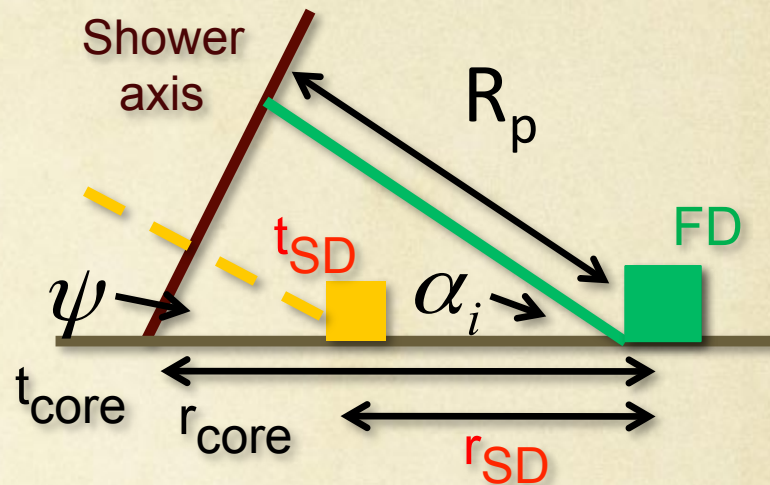
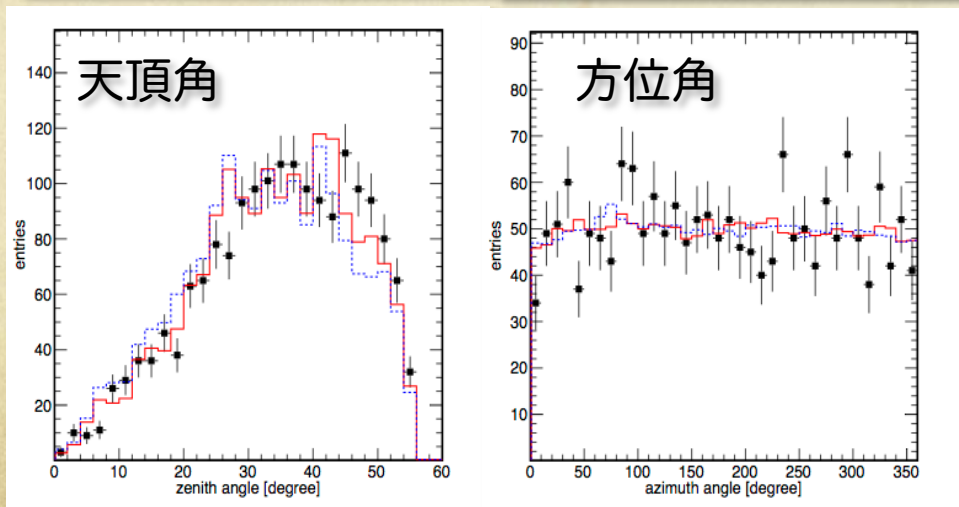
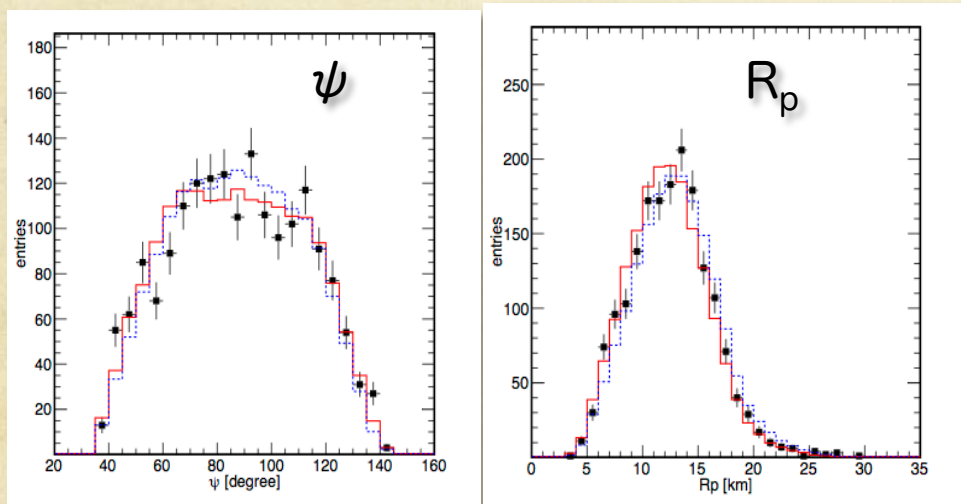
27

実データと同期間、同較正值を用いてMC事象を生成し、実データと比較する

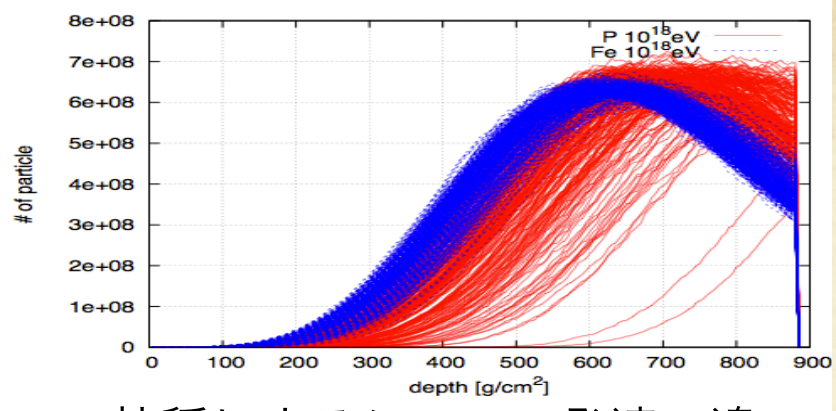
黒点: 実データ

赤: Proton

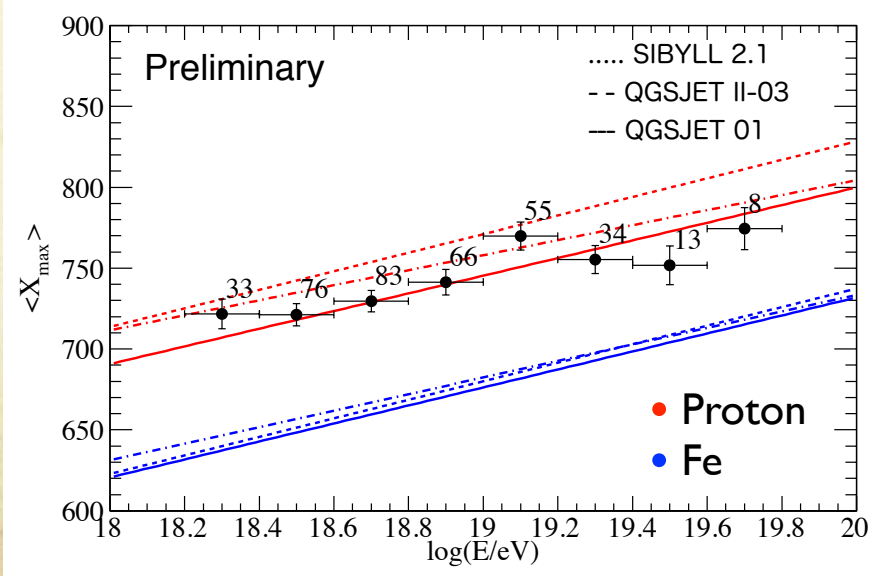
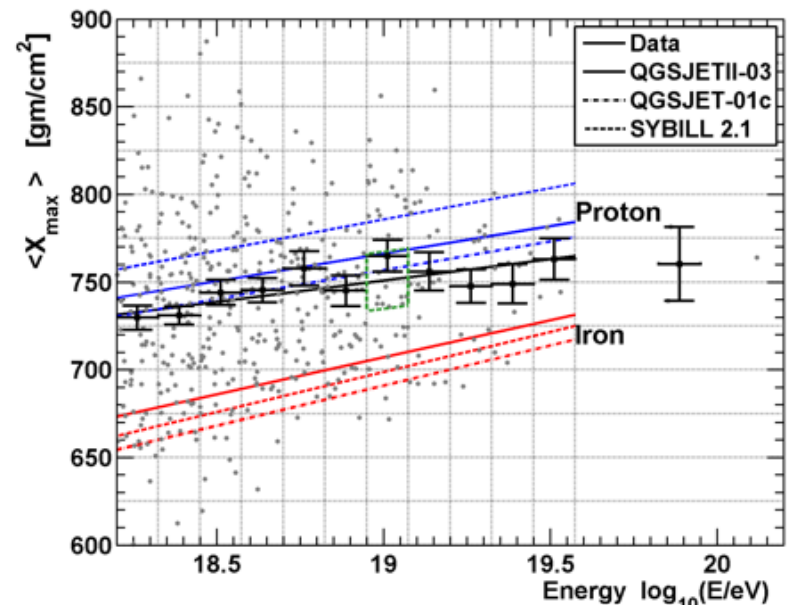
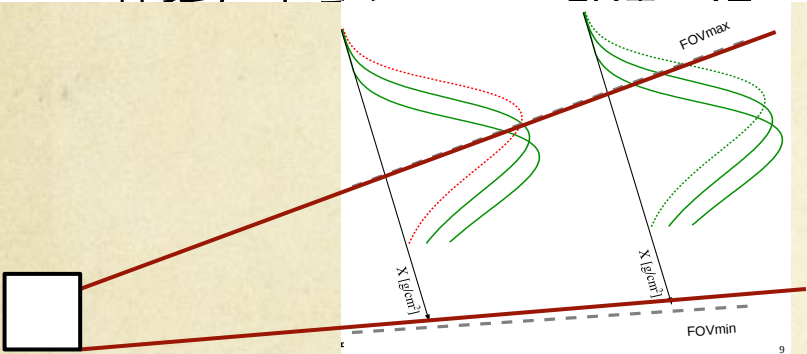
青: Iron



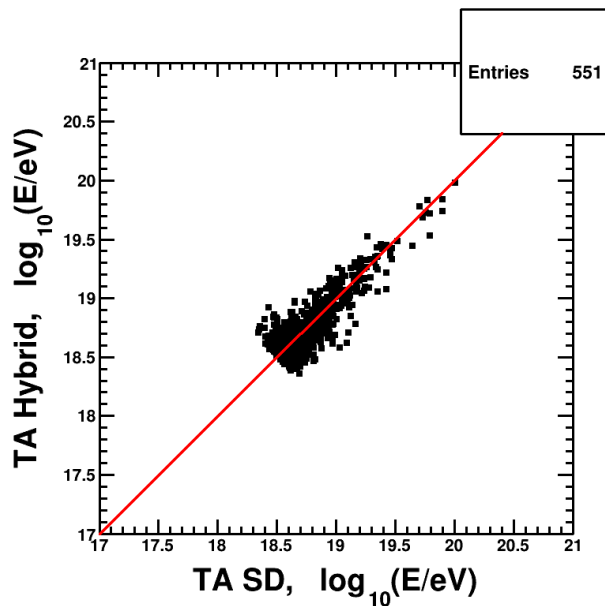
Composition



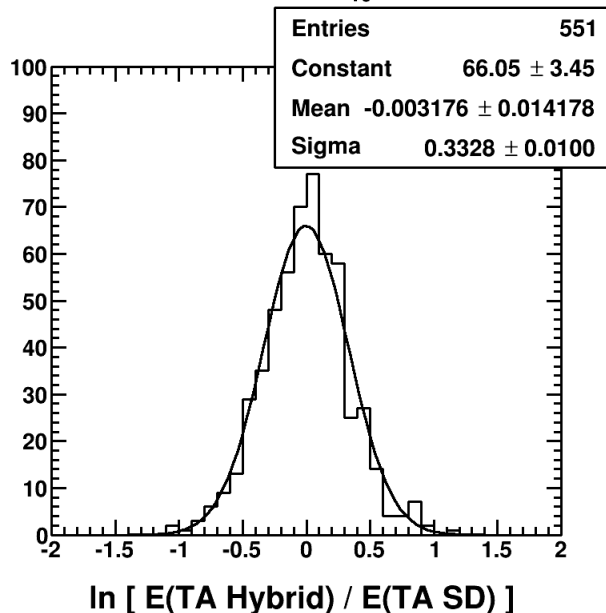
- 核種による縦発達が違う
- 最大発達深さ(Xmax)により判別
- 比較すべき陽子、鉄の期待値はMCIによって求める
 - シャワーの発達
 - 検出器や解析が持つバイアスの見積もり



FD-SD energy difference



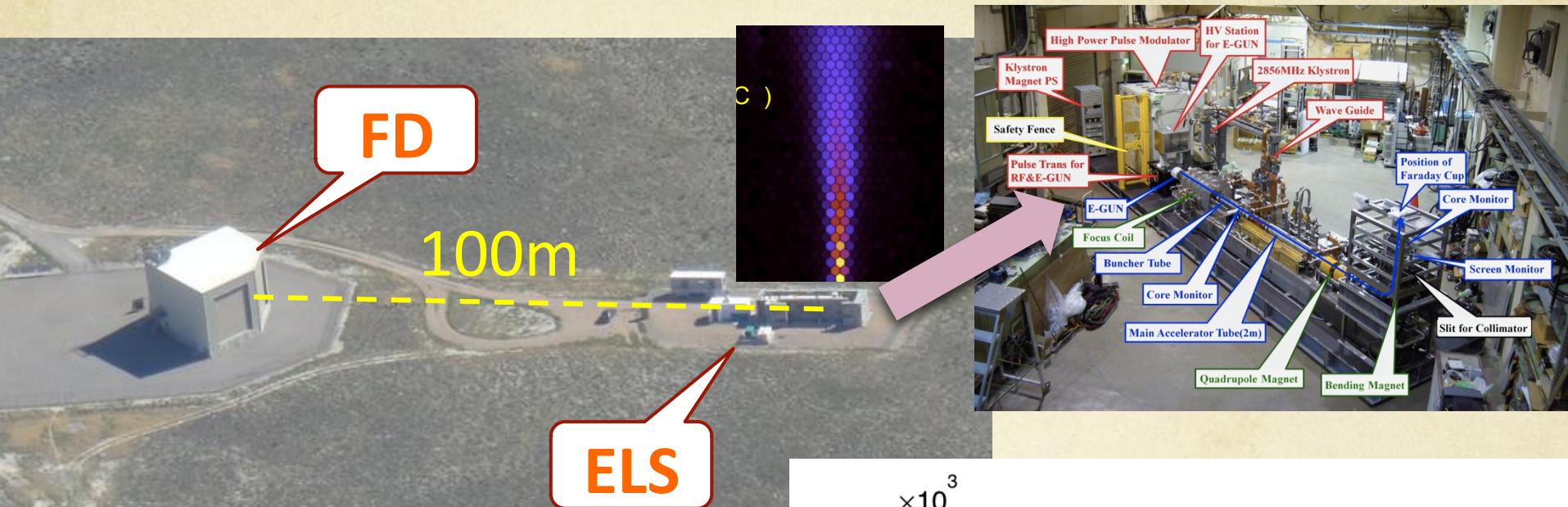
- TA実験において、SD,FD両検出器で同時に検出された事象 (Hybrid事象) を用いてFD, SDエネルギーの違いを調べた
- 左の絵のSD energyは $1/1.27$ 倍された物
- SD energyはFD energyの1.27倍
- SD energyはFD energyに合わせる為、 $1/1.27$ の補正を掛けている



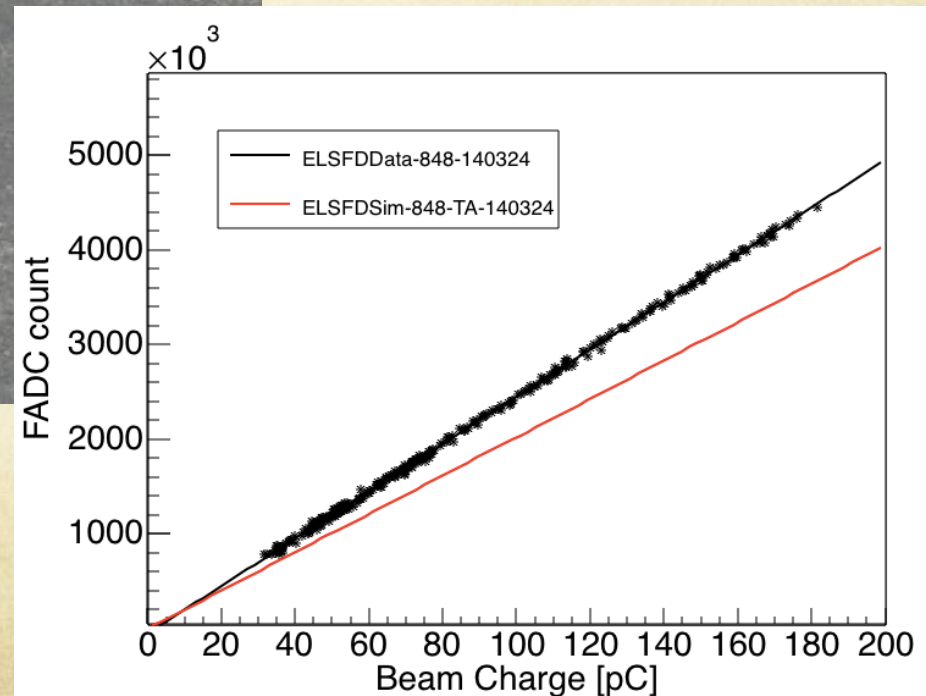
- SD energyはMC依存
- FD energyのsystematic errorは21%
- FD,SD共に基本的にはEM componentを見ているはずなのに両者のエネルギーがずれる
- 電子成分の横広がり正しい？

Electron Light Source: ELS

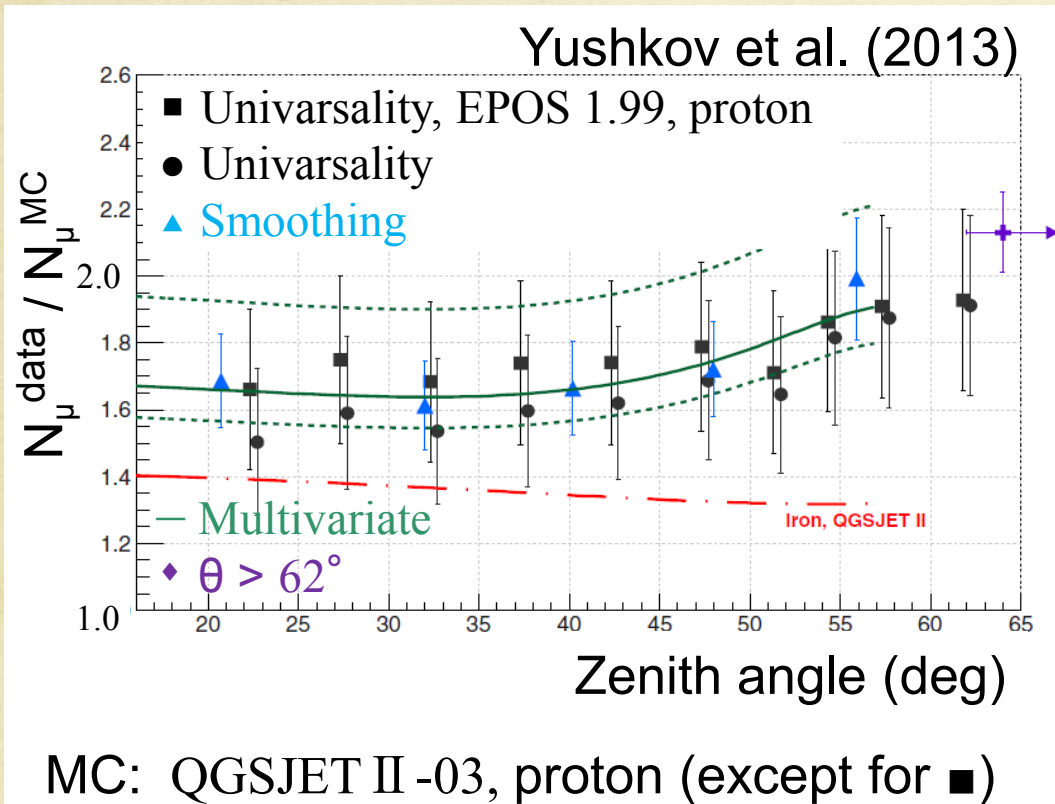
30



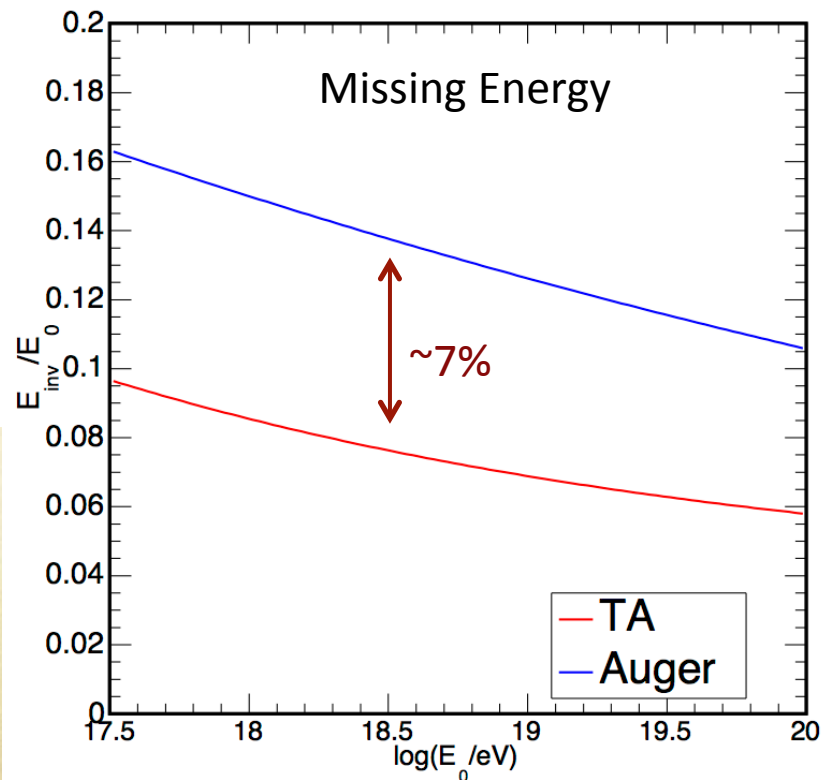
- FDから100m離れた地点から既知のエネルギー、電荷量の電子ビームを打ち上げ、FDを較正する
- ELSビームによる受光量を既存のFD解析で用いている全ての較正值を用いて計算した値と、実データには1.25倍程度の差がある(詳細は次のJPSにて報告)
- これはFD-SDエネルギー差を**広げる**方向



ミューオン過剰？ (Auger)



- Auger実験はミューオン過剰 (Data/MC = ~ 1.8)を報告している
- ミューオンが多いということはニュートリノが多いはずで、Missing Energyも大きくなる
TA実験とは約7%差



TAでもミューオン測定実験が始まっている

まとめ

- Telescope Array実験における空気シャワーMCの使われ方
 - 全ての解析は、現在CORSIKAを用いた空気シャワーMCを使用している
 - どの解析でも、実データ相当になるように生成したMCとデータを比較することでConsistencyの確認をしている
 - 地表検出器によるエネルギー再構成は空気シャワーMCに依存
 - ただしTA実験では大気蛍光望遠鏡のエネルギーにリスケールしている
 - 大気蛍光望遠鏡はCalorimetricにエネルギーを測定できる
 - Missing Energyは空気シャワーで見積もっている
- 空気シャワーMCと実データとのずれとして、FD-SDエネルギー差やミュオン過剰がある