

# Pierre Auger 観測所の拡張計画 - Beyond 2015 -



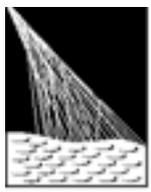
June, 2014 in Colorado, US



**Toshihiro Fujii for the Pierre Auger Collaboration**

シカゴ大学カブリ宇宙物理学研究所 日本学術振興会海外特別研究員

[fujii@kicp.uchicago.edu](mailto:fujii@kicp.uchicago.edu) 日本物理学会 2014年秋季大会 2014年9月21日 **1**



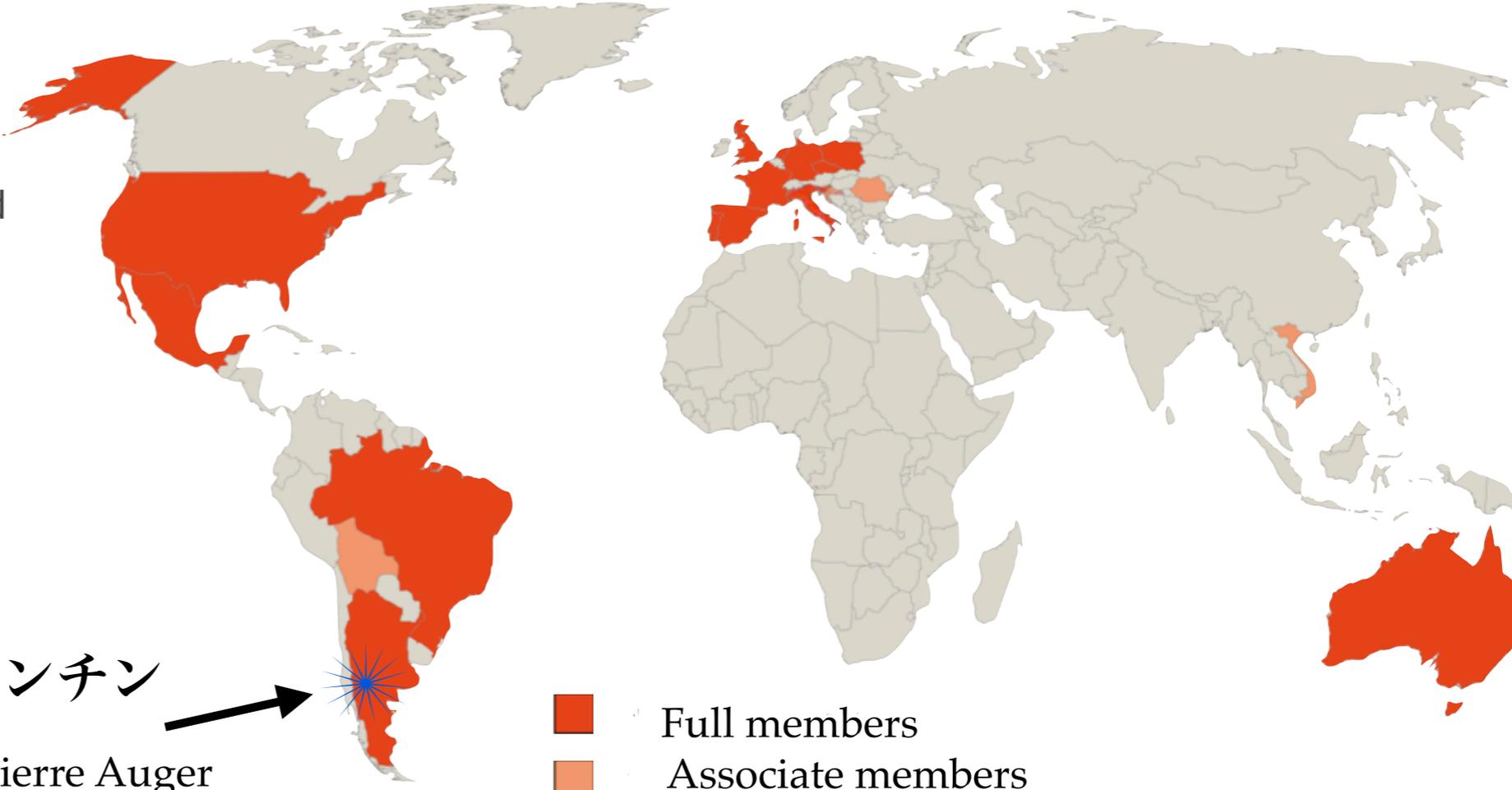
PIERRE AUGER OBSERVATORY

# 共同研究者：~500人、19カ国

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

- Bolivia\*
- Romania\*
- Vietnam\*
- \*Associated

アルゼンチン  
 →  
 Pierre Auger  
 Observatory





# Pierre Auger 観測所 (Auger)

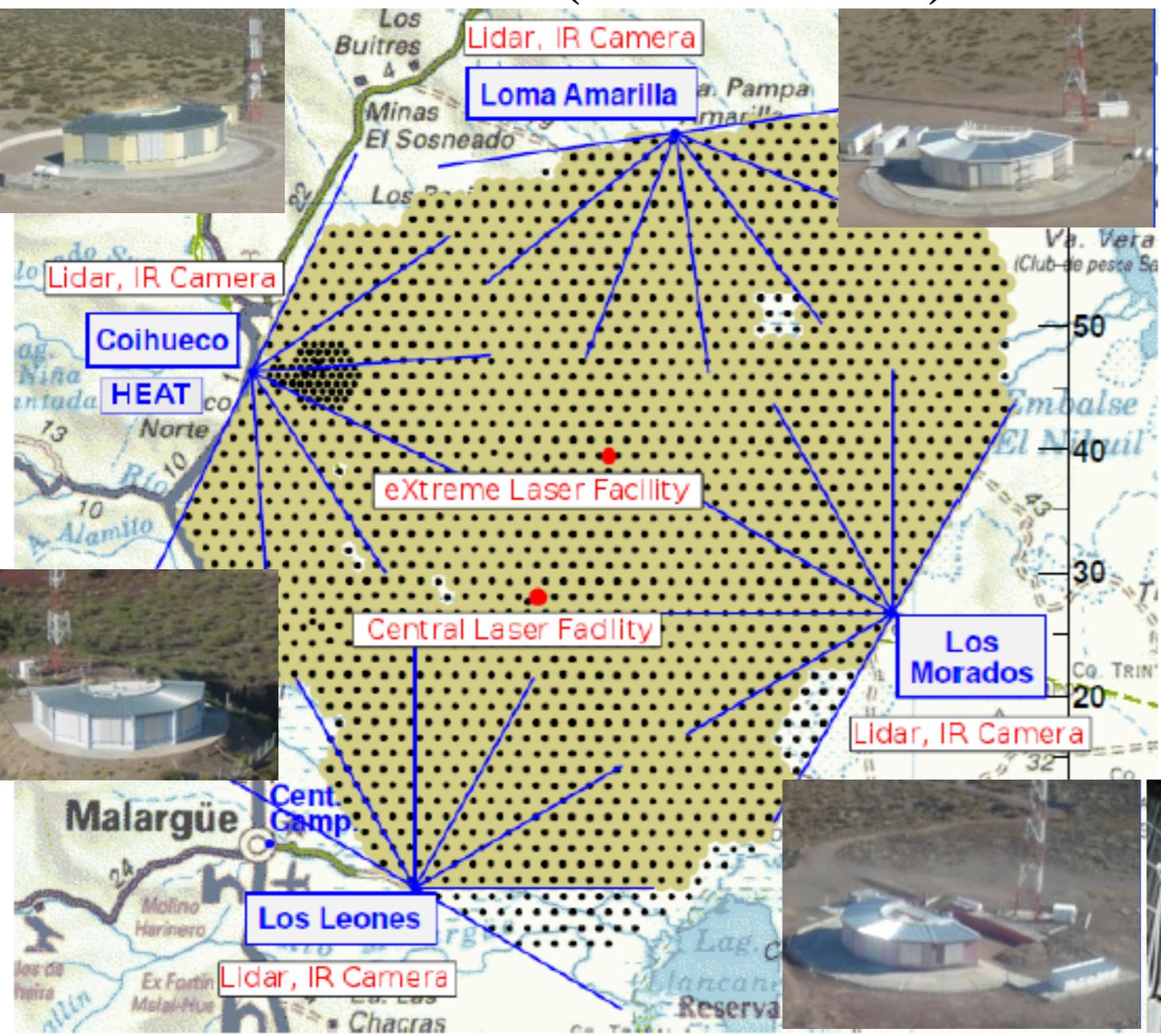
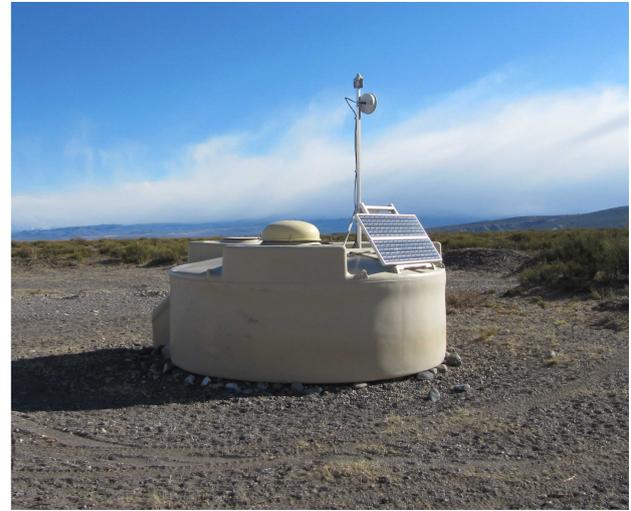
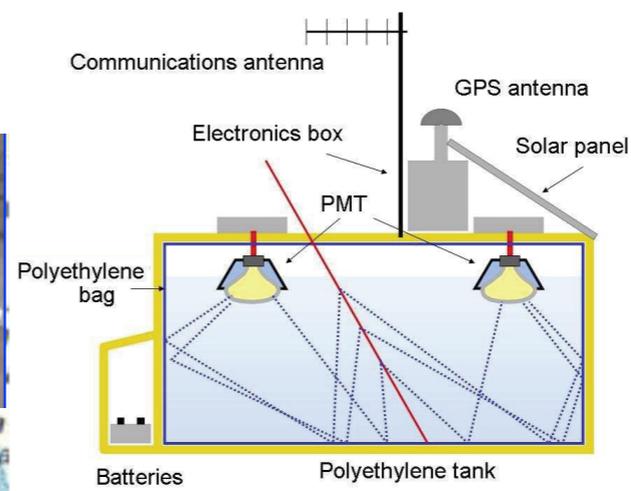
## 世界最大の極高エネルギー 宇宙線観測所 3000 km<sup>2</sup>

(2004 - ) completed in 2008

佐賀県 2439 km<sup>2</sup> (国土地理院HP)

### 地表検出器(Surface Detector, SD)

水チェレンコフ検出器、  
1.5 km間隔、1600検出器



### 大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD)

3.4 m 球面鏡、440 光電子増倍管(PMT), 視野角 30° × 30°  
4カ所 × 6 望遠鏡



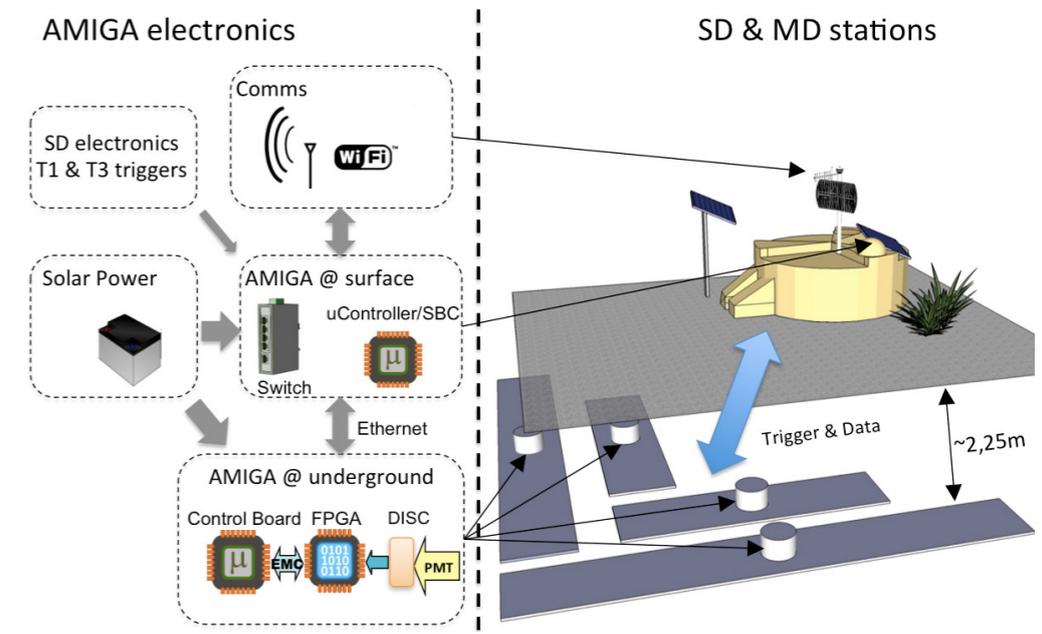
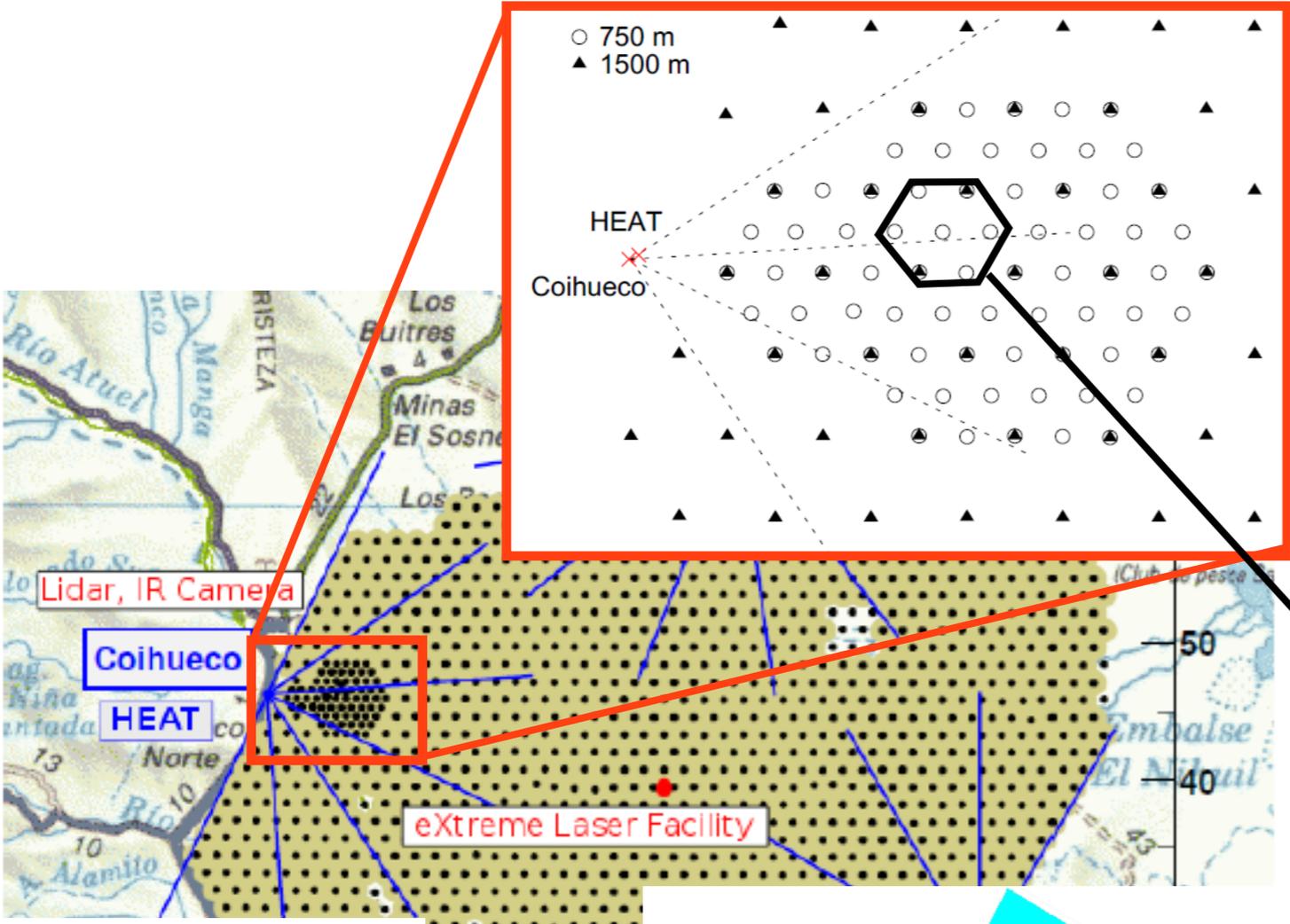


# Pierre Auger 観測所 (Auger)

## 低エネルギーへの感度向上

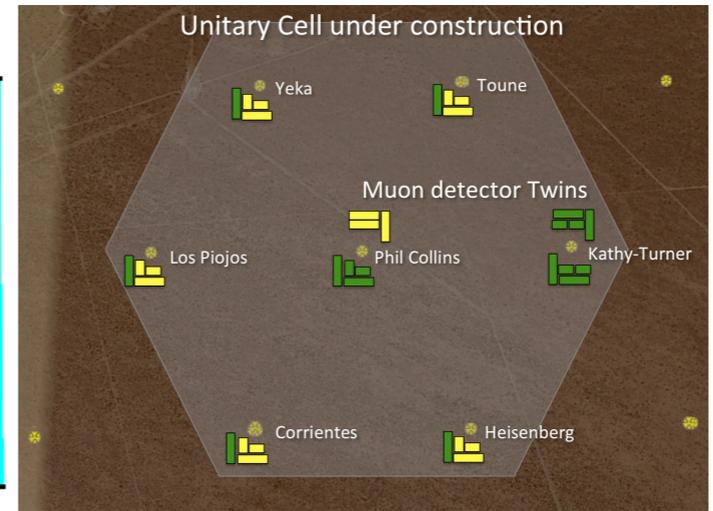
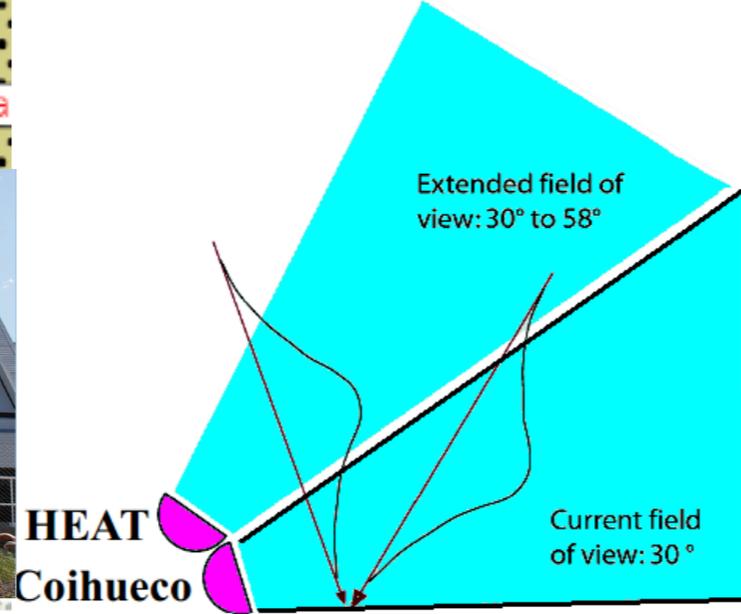
### Infill Array (2008-)

750 m 間隔、  
71 検出器、 27 km<sup>2</sup>



## AMIGA 地中に設置されたシンチレ ーター、建設中(80%完了)

### HEAT (2010-)





# Pierre Auger 観測所 (Auger)

## 電波観測

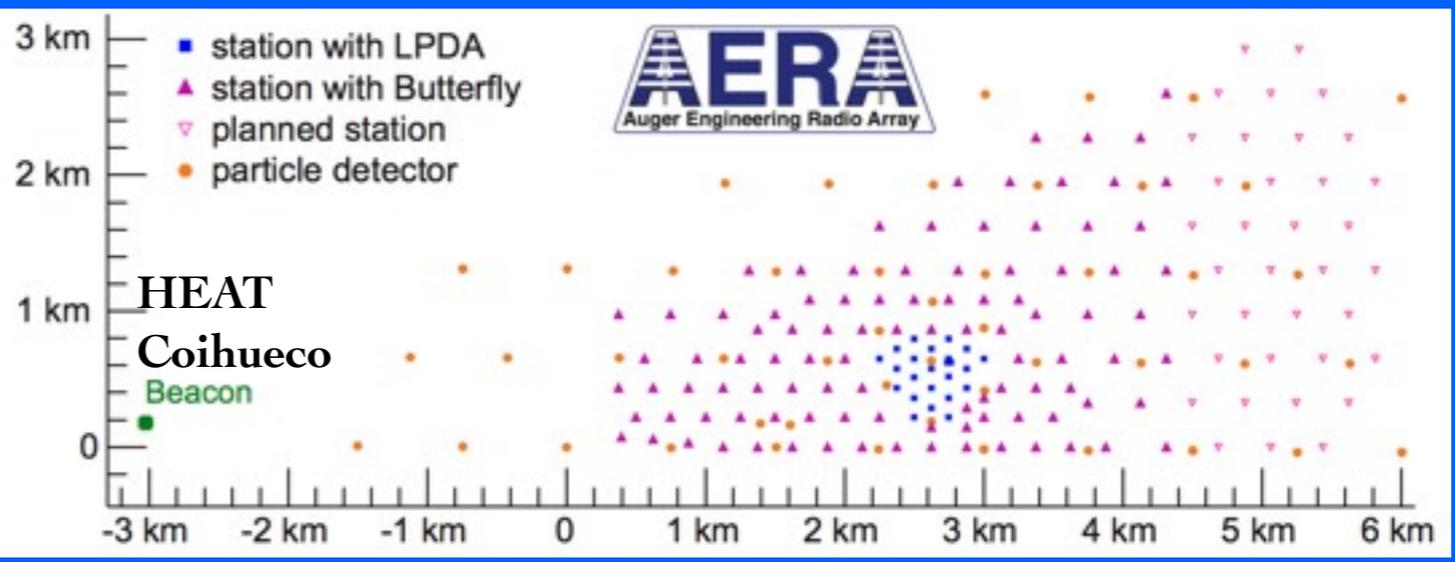
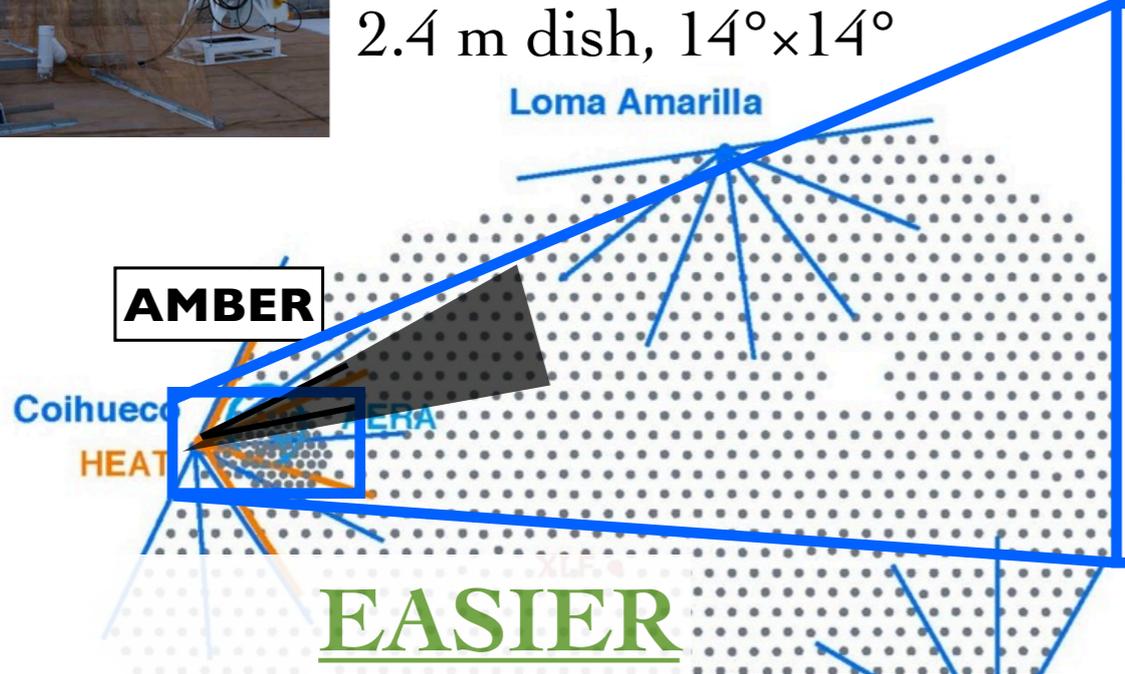
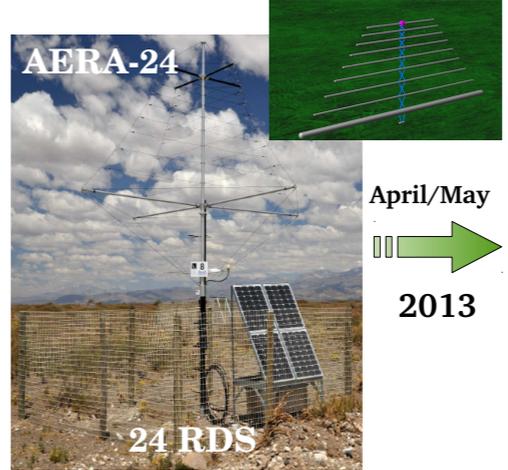
### AMBER

16 pixels antenna,  
C-band(3.4-4.2 GHz) +  
Ku-band(10.95-14.5 GHz)  
2.4 m dish, 14°×14°



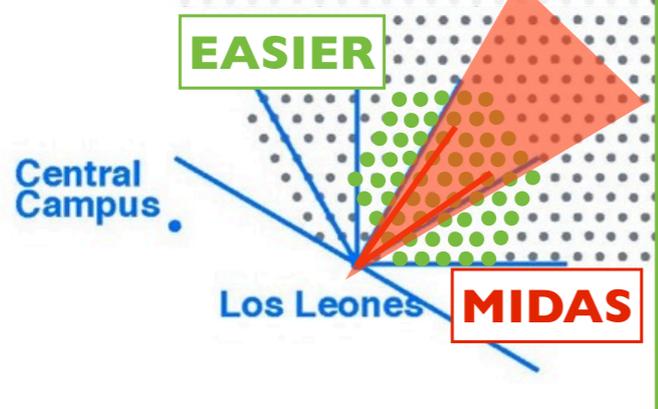
### AERA

124 antennas,  
30-80 MHz,  
6 km<sup>2</sup>



### EASIER

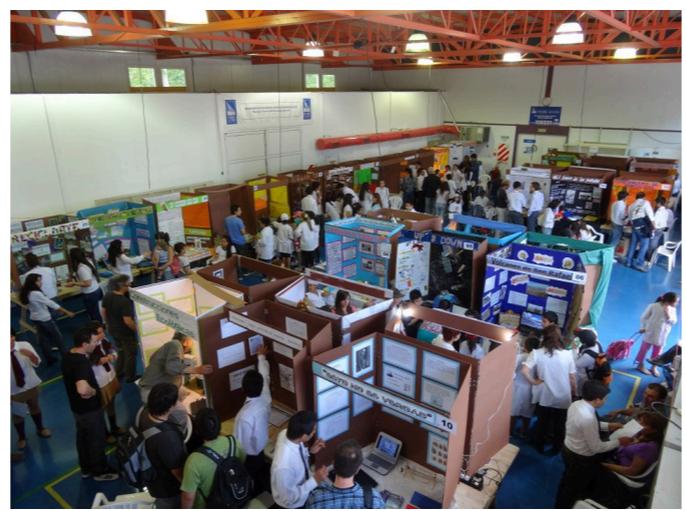
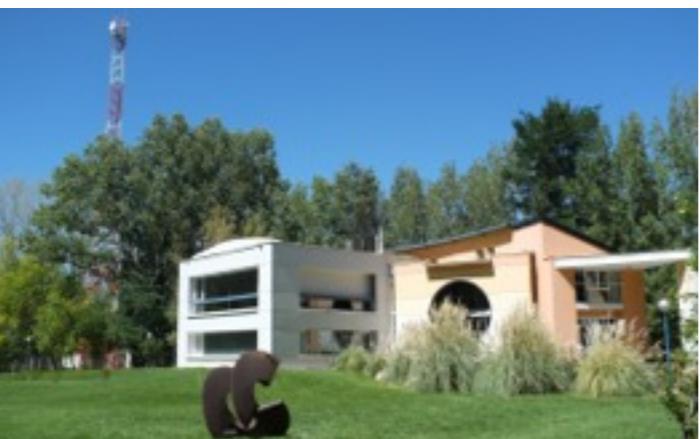
C-band horn antenna on SD,  
61 stations equipped, 94 km<sup>2</sup>



### MIDAS

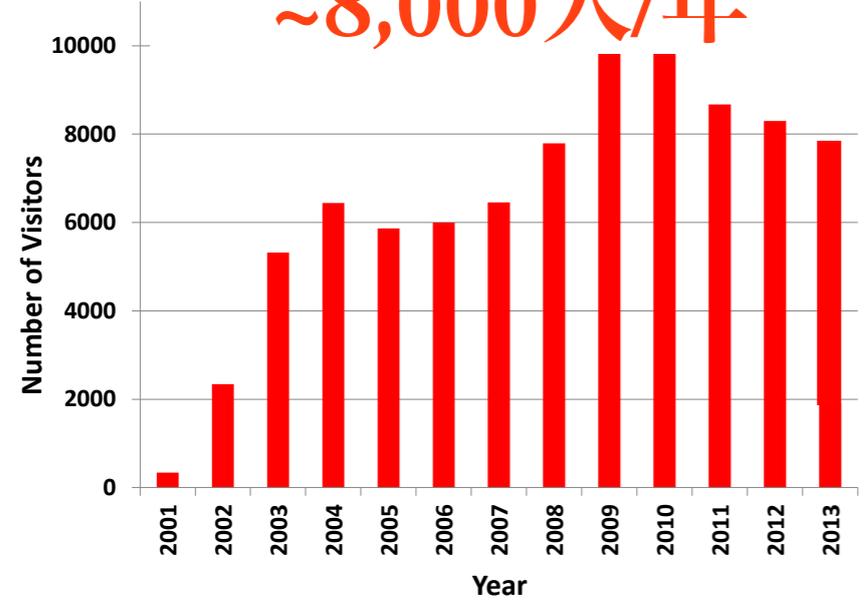
53 pixels  
C-band  
antennas,  
4.5 m<sup>2</sup> dish,  
20°×10°



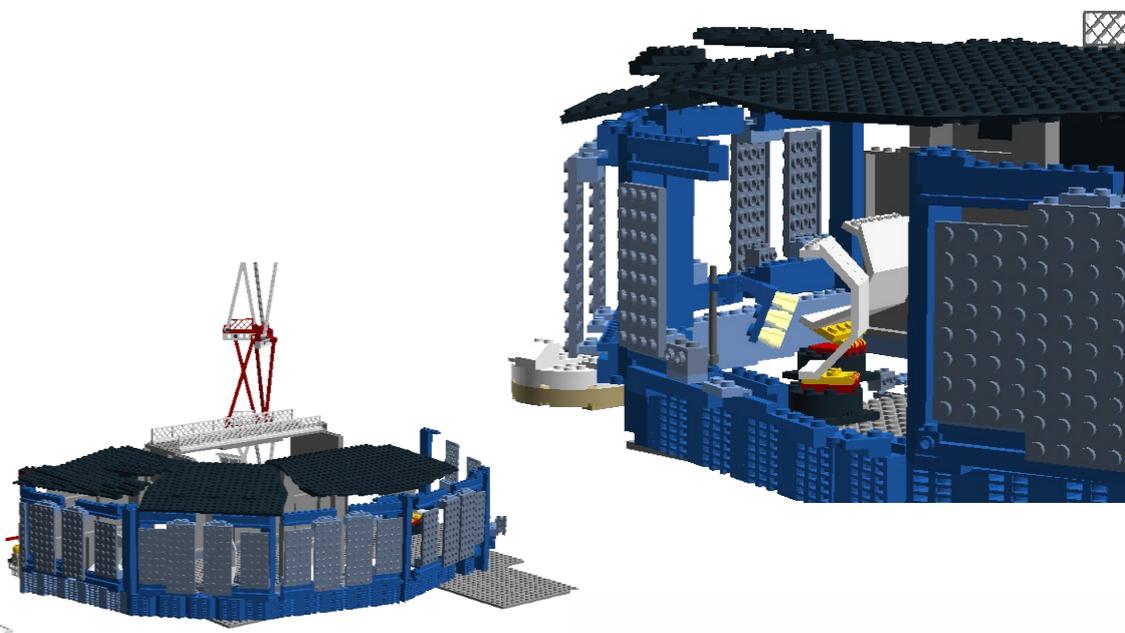
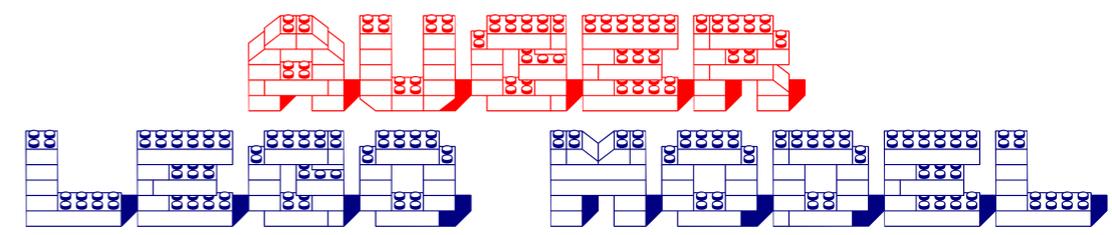


# アウトリーチ

~8,000人/年



8万人目の訪問者



毎年秋に開催されるパレード

**Pierre Auger Observatory**  
Mendoza, Argentina

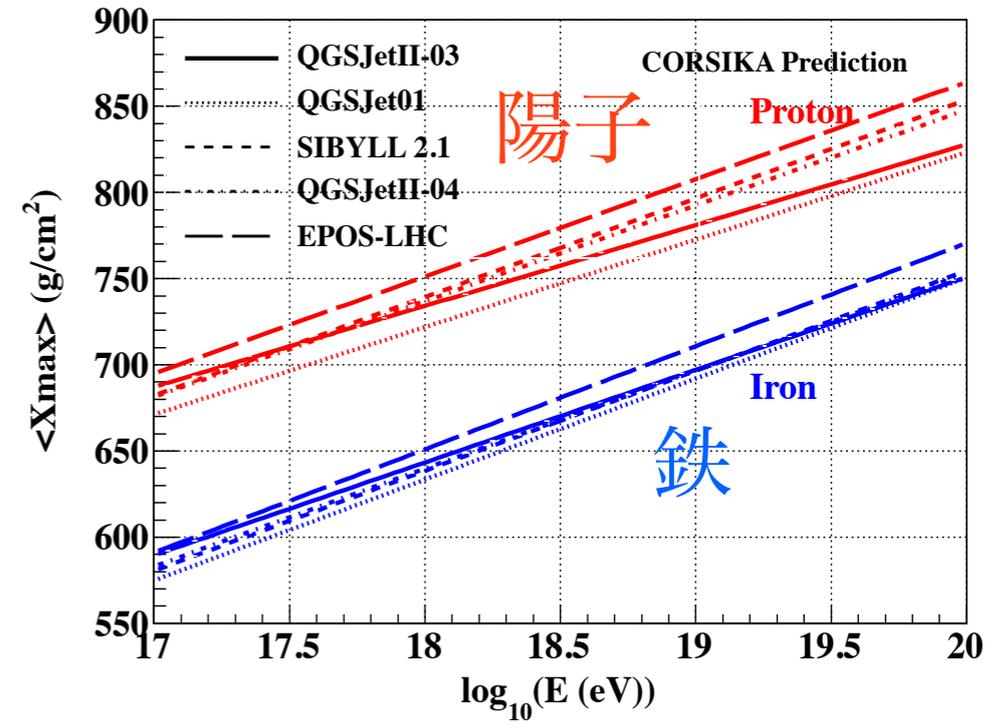
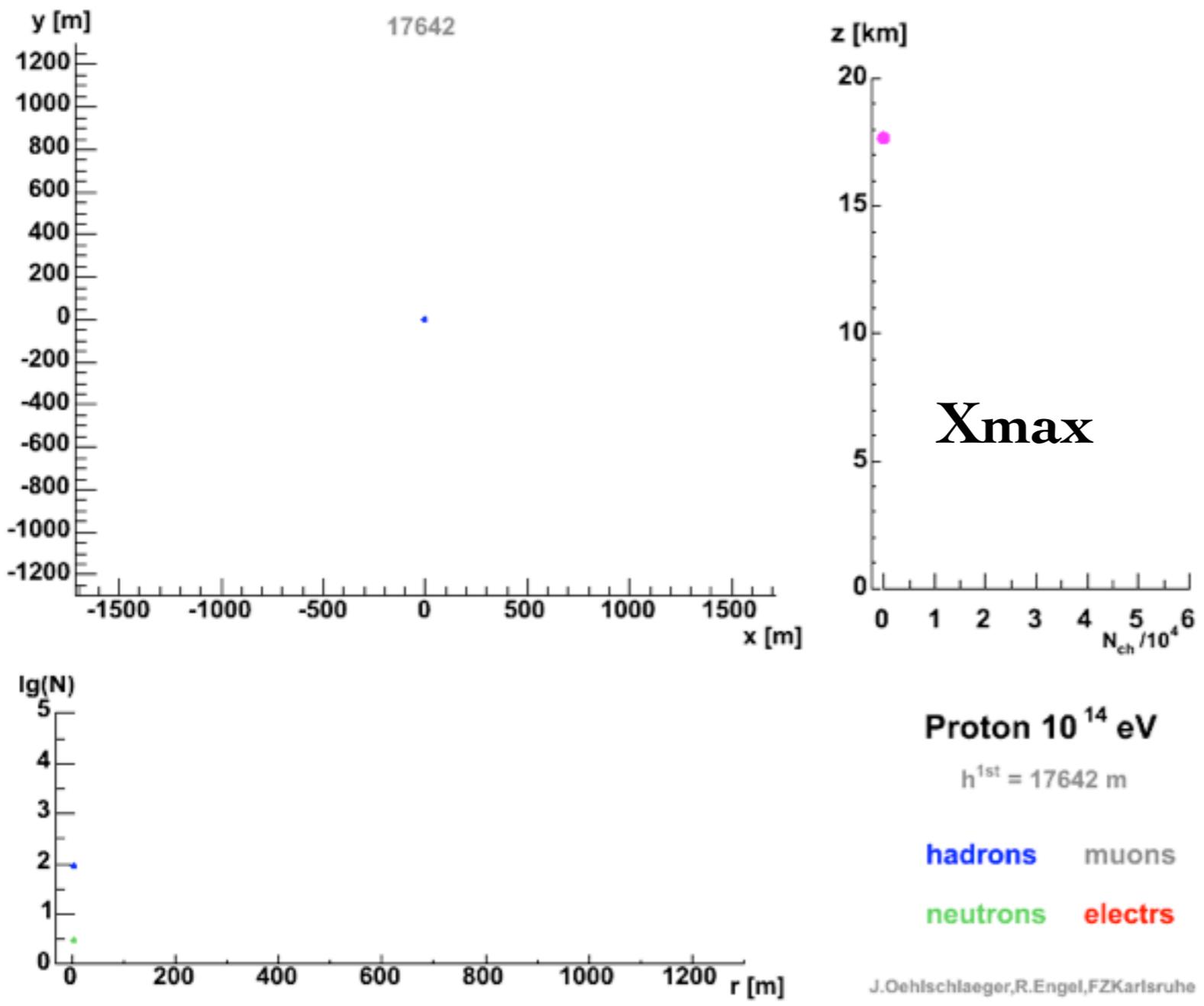




# 空気シャワー観測

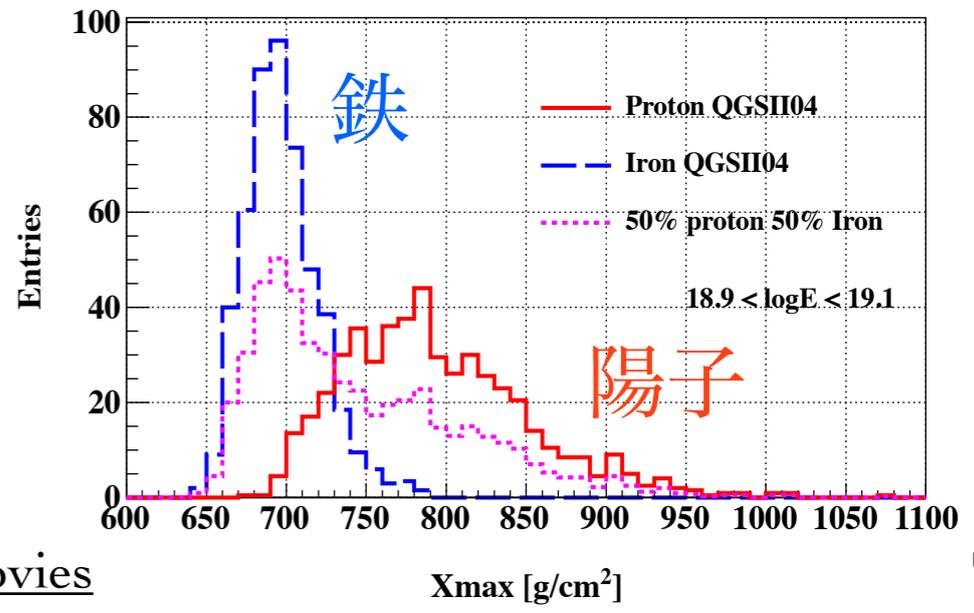
## 縦方向発達

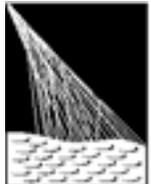
大気蛍光望遠鏡で月のない晴天夜のみ測定可能。  
~10%の年間観測効率。  
質量組成を測定できる。



## 横方向密度分布

地表検出器で24時間定常測定できる。

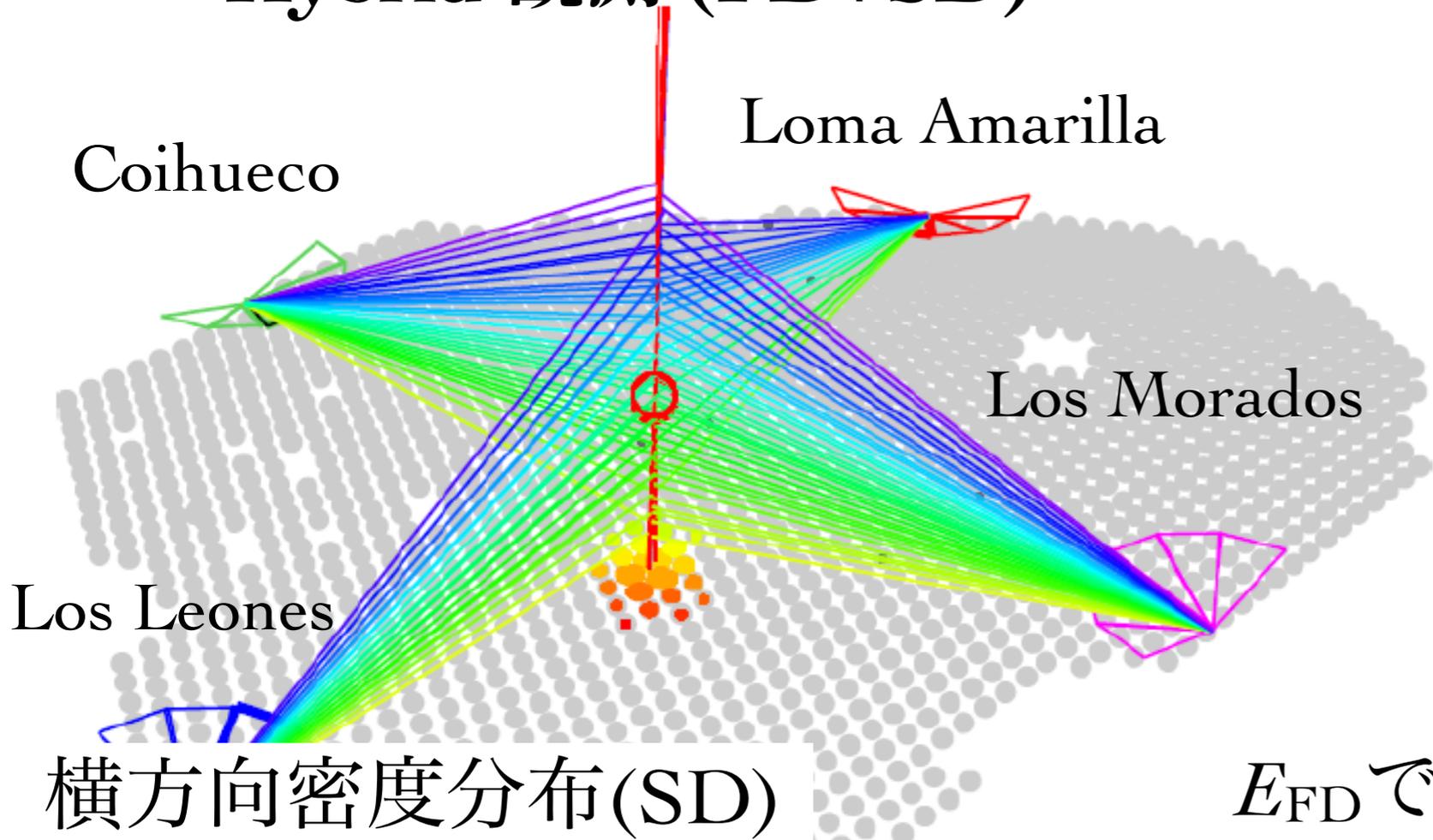




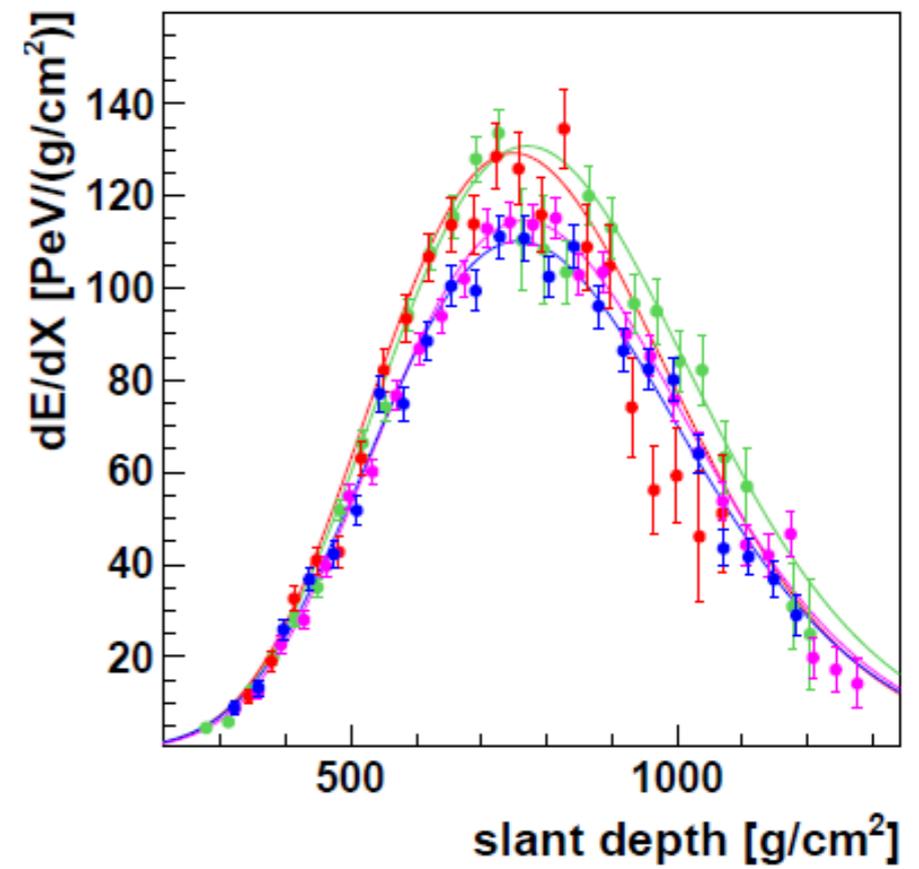
PIERRE AUGER OBSERVATORY

# Augerで観測された空気シャワー事象

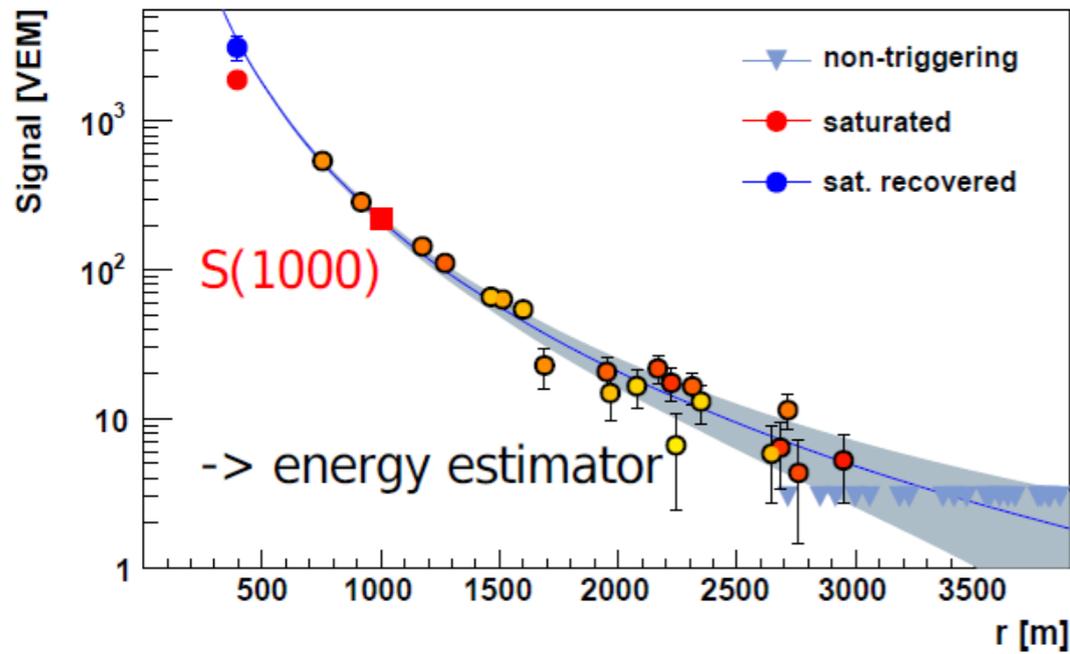
## Hybrid 観測 (FD+SD)



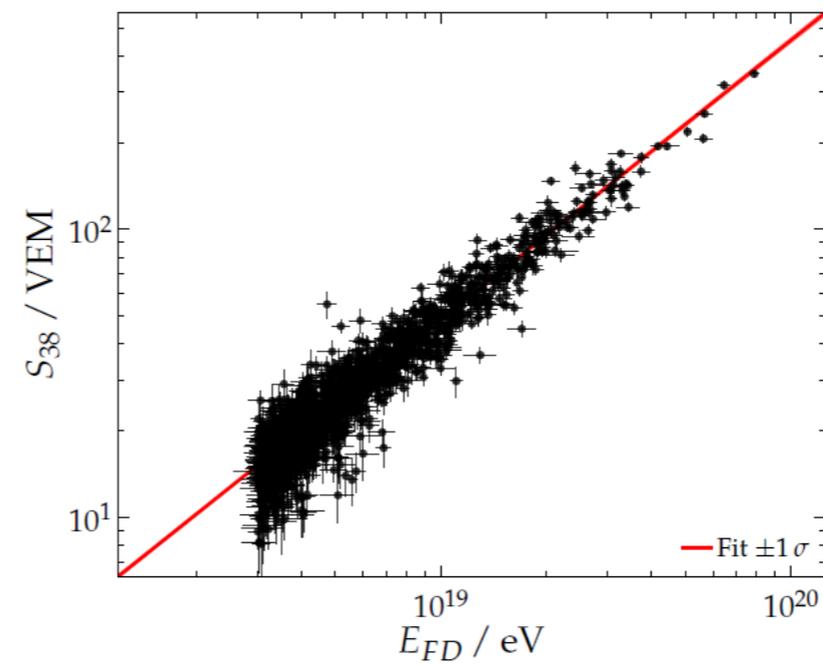
## 縦方向発達(FD)



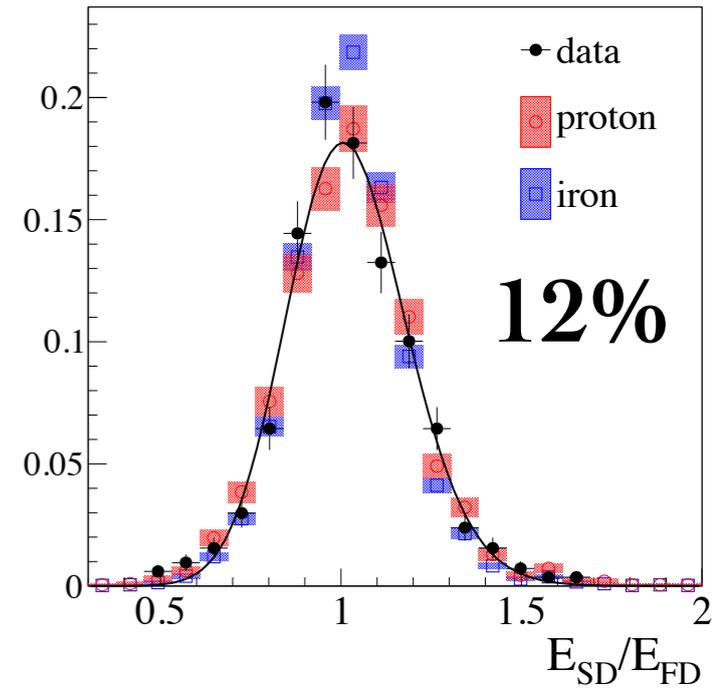
## 横方向密度分布(SD)



## $E_{FD}$ で校正

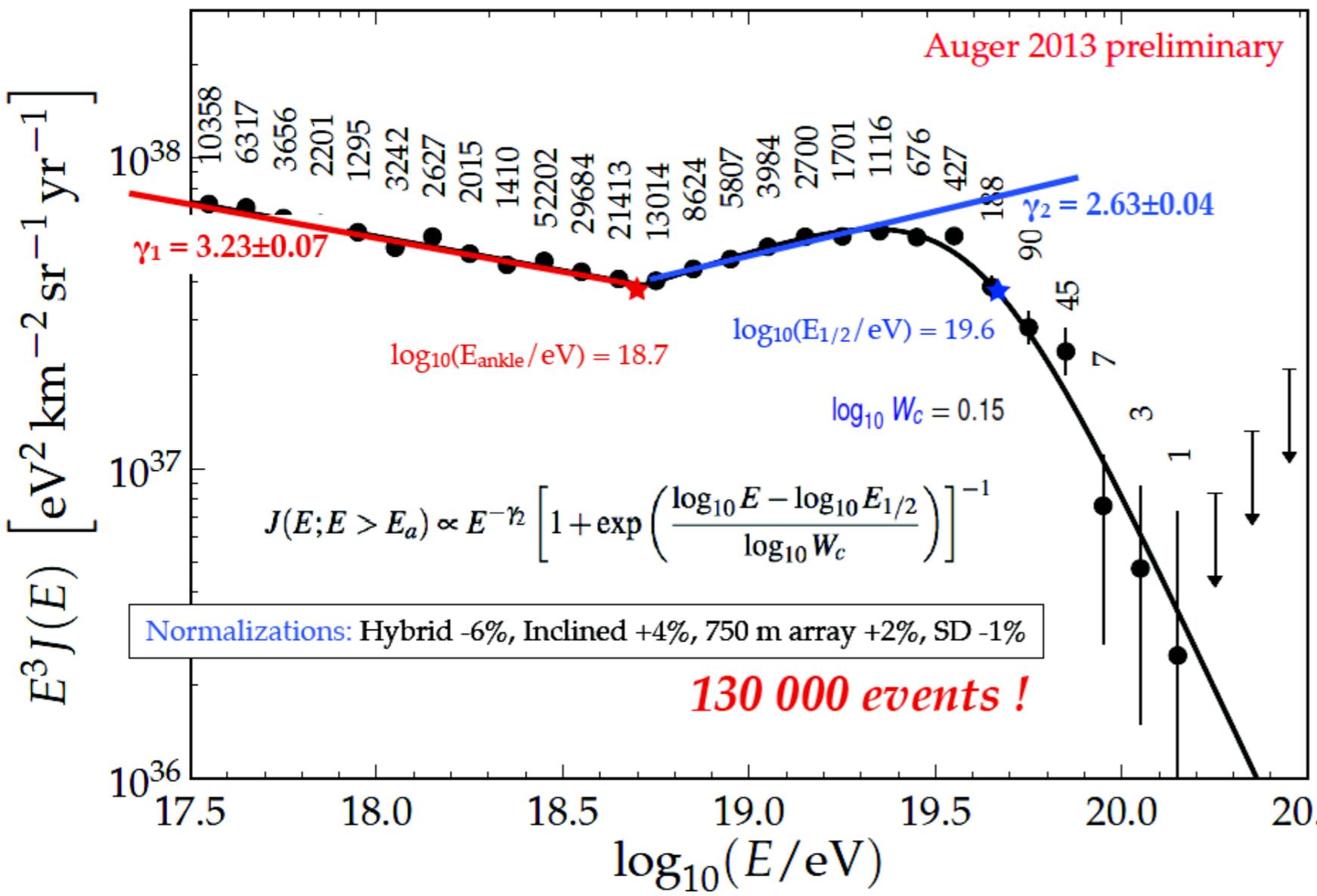


## $E_{SD}/E_{FD}$



# エネルギースペクトル

$$E^3 J(E)$$



ICRC 2013で発表された  
新エネルギースケール

+16% @  $10^{18}$  eV  
+10% @  $10^{19}$  eV

**Systematic uncertainties**

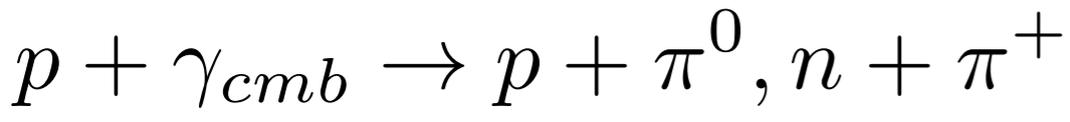
Fluorescence yield	3.6 %	14 %
Atmosphere	(3.4 – 6.2) %	8 %
FD calibration	9.9 %	10 %
FD profile rec.	(6.5 – 5.6) %	10 %
Invisible energy	(3 – 1.5) %	4 %
Time stability	5 %	
<b>Total</b>	<b>14 %</b>	22 %

系統誤差 14%  
(世界最高精度)

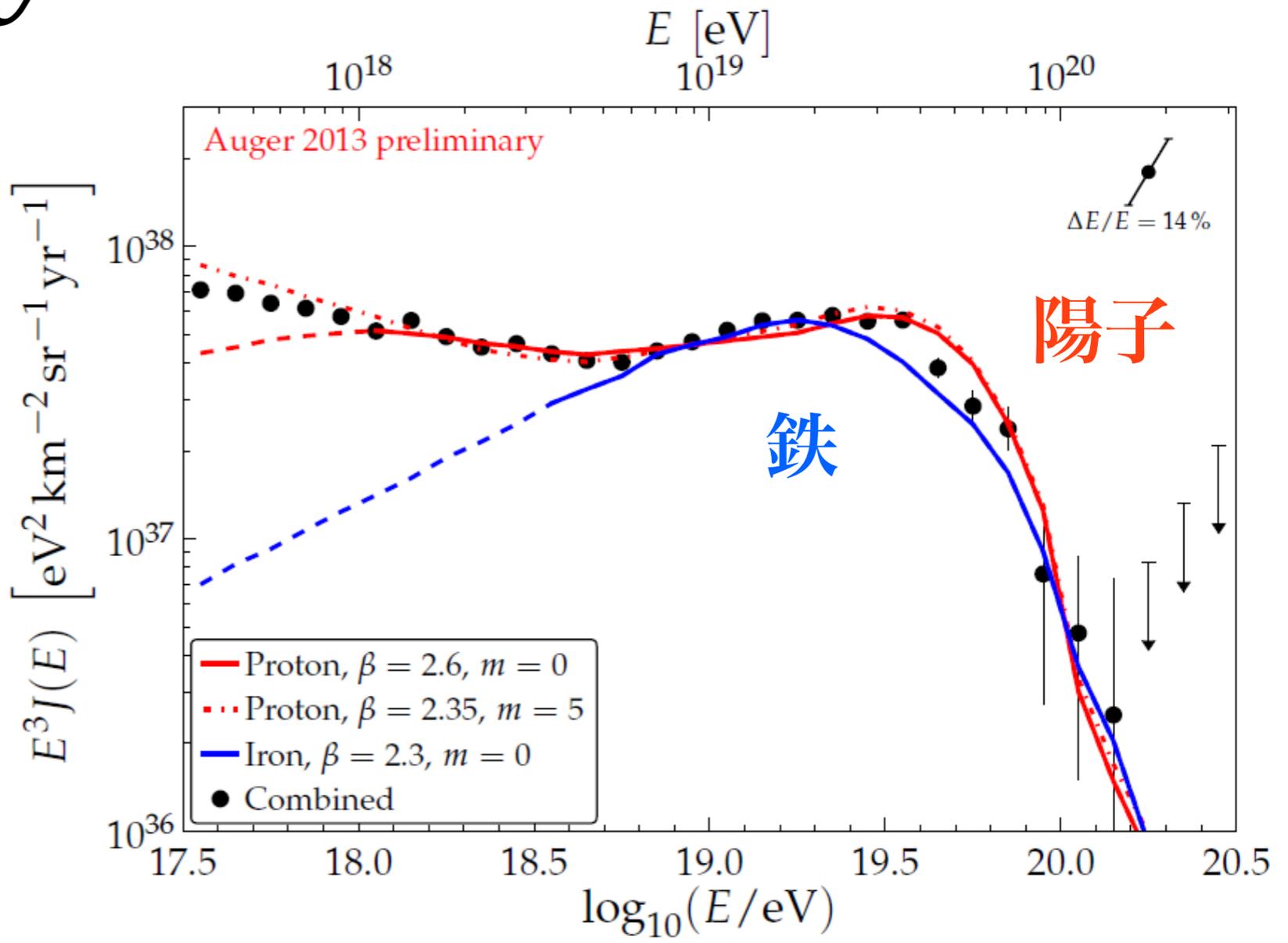
Parameter	Result ( $\pm \sigma_{\text{stat}} \pm \sigma_{\text{sys}}$ )
$\log_{10}(E_a/\text{eV})$	$18.72 \pm 0.01 \pm 0.02$
$\gamma_1$	$3.23 \pm 0.01 \pm 0.07$
$\gamma_2$	$2.63 \pm 0.02 \pm 0.04$
$\log_{10}(E_{1/2}/\text{eV})$	$19.63 \pm 0.01 \pm 0.01$
$\log_{10} W_c$	$0.15 \pm 0.01 \pm 0.02$

# Astrophysical Scenario

📌 GZK 機構：宇宙背景放射と極高エネルギー陽子が相互作用し  $10^{19.5}$  eV 以上の宇宙線はエネルギーを大きく失う。



📌 宇宙線源の加速限界：このエネルギー以上の宇宙線は存在しない。



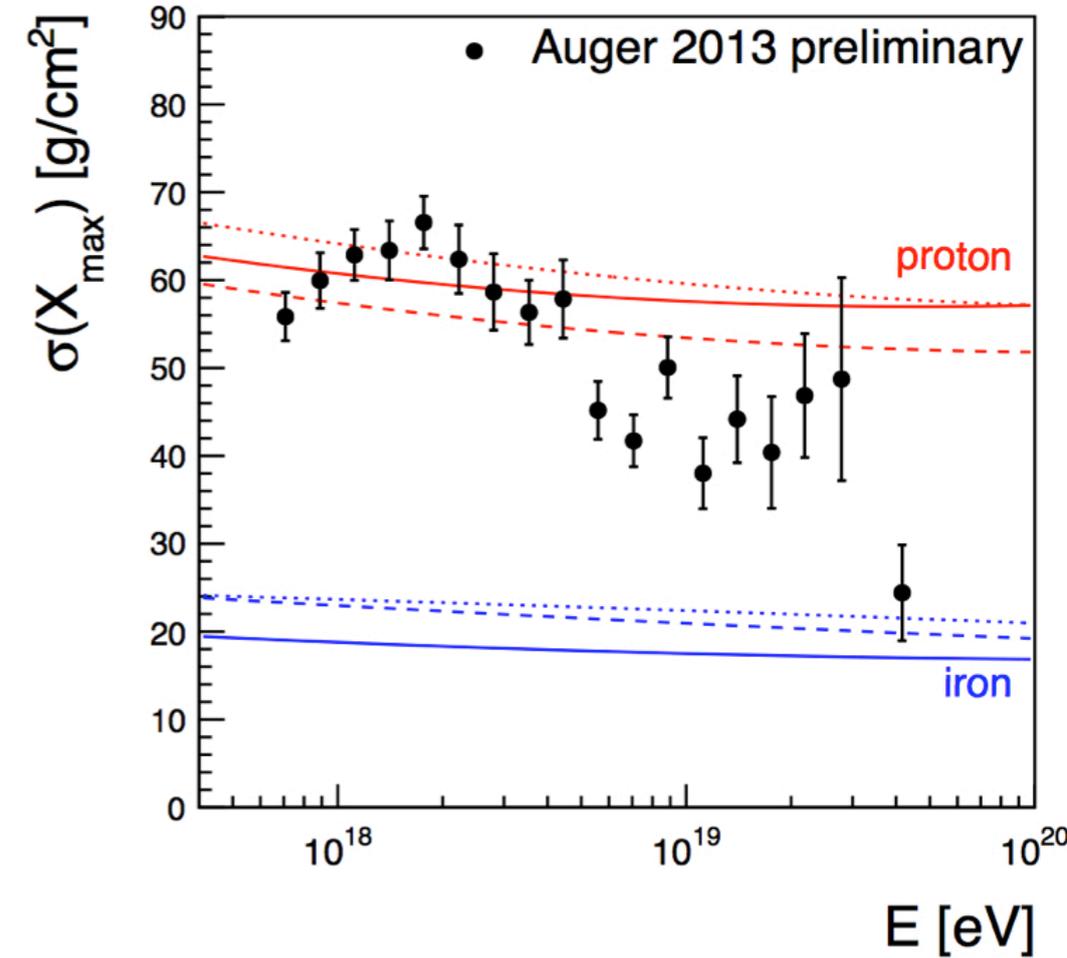
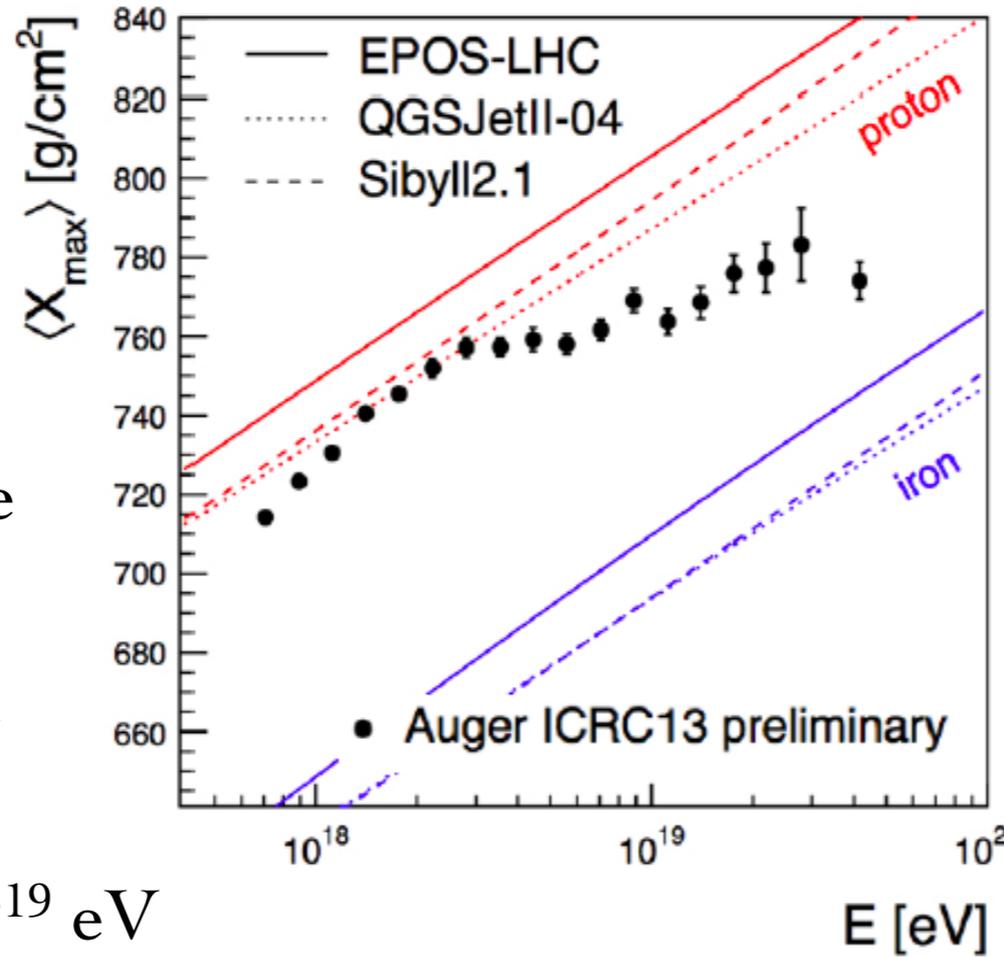
(cosmological evolution of source luminosity  $(1+z)^m$ , source spectrum  $E^{-\beta}$ .)

- 📌 宇宙線源でのスペクトルのベキの値 ( $\beta$ -injection index)、宇宙線源の密度分布の進化係数 ( $m$ -source evolution)
- 📌 エネルギースペクトルの測定結果だけではこの2つのシナリオを十分に区別できない。
- 📌 質量組成の測定が鍵となる。



# Xmaxによる質量組成測定

$\langle X_{\max} \rangle$  and  $\sigma(X_{\max})$  data



ICRC 2013でupdate

$\langle X_{\max} \rangle$

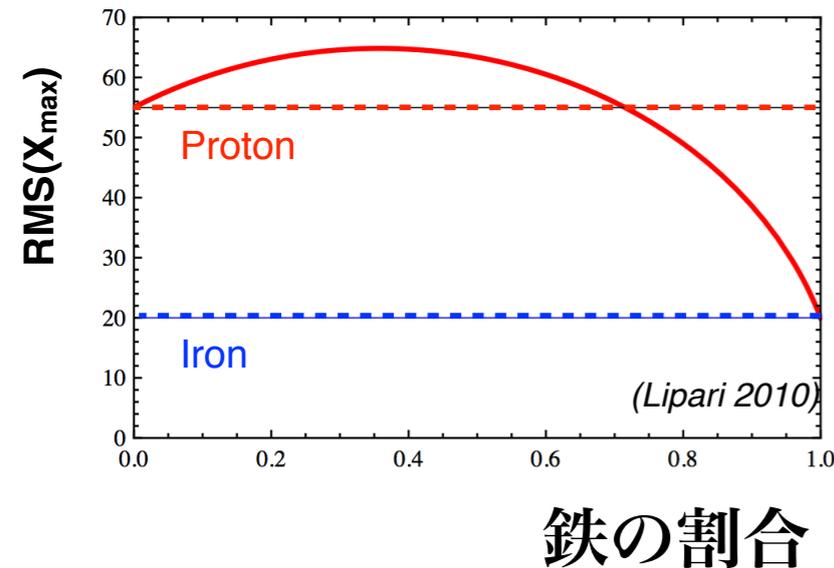
+13 g/cm<sup>2</sup> @ 10<sup>18</sup> eV

+6 g/cm<sup>2</sup> @ 10<sup>19.5</sup> eV

$\sigma(X_{\max})$

< +10 g/cm<sup>2</sup> for 10<sup>18-19</sup> eV

Example: proton-iron mixture

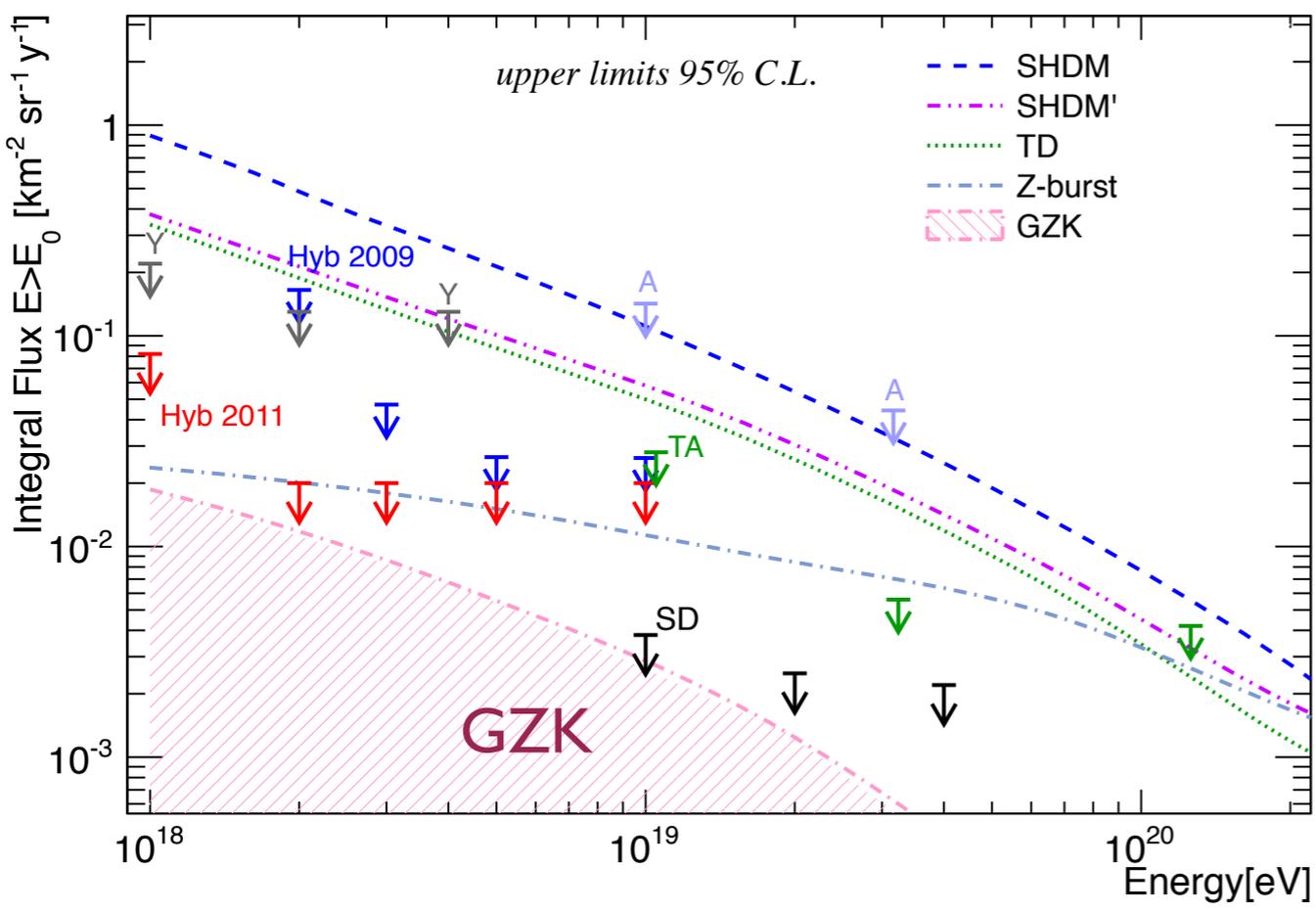


- 10<sup>18.3</sup> eV 付近では陽子が主である。
- 10<sup>19</sup> eVで、Xmaxの分布の幅は純陽子の値よりも小さい。
- 10<sup>18.5</sup> eV 以上でゆっくりとした質量数の増加が見られ、混ざり具合が小さい(一種類の質量組成)。

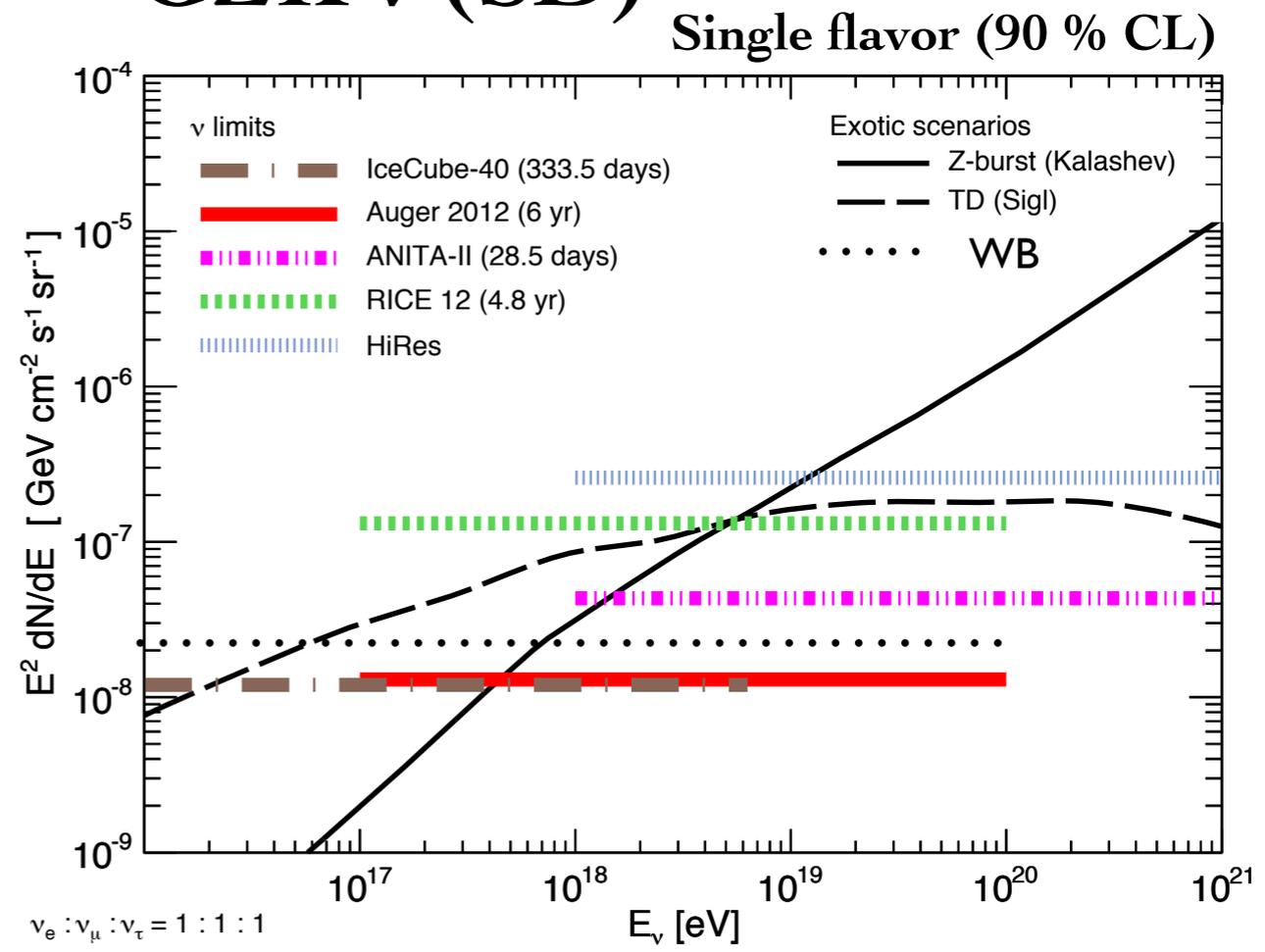


# 極高エネルギーガンマ線とニュートリノ フラックスへの上限値

## GZK $\gamma$ (FD)



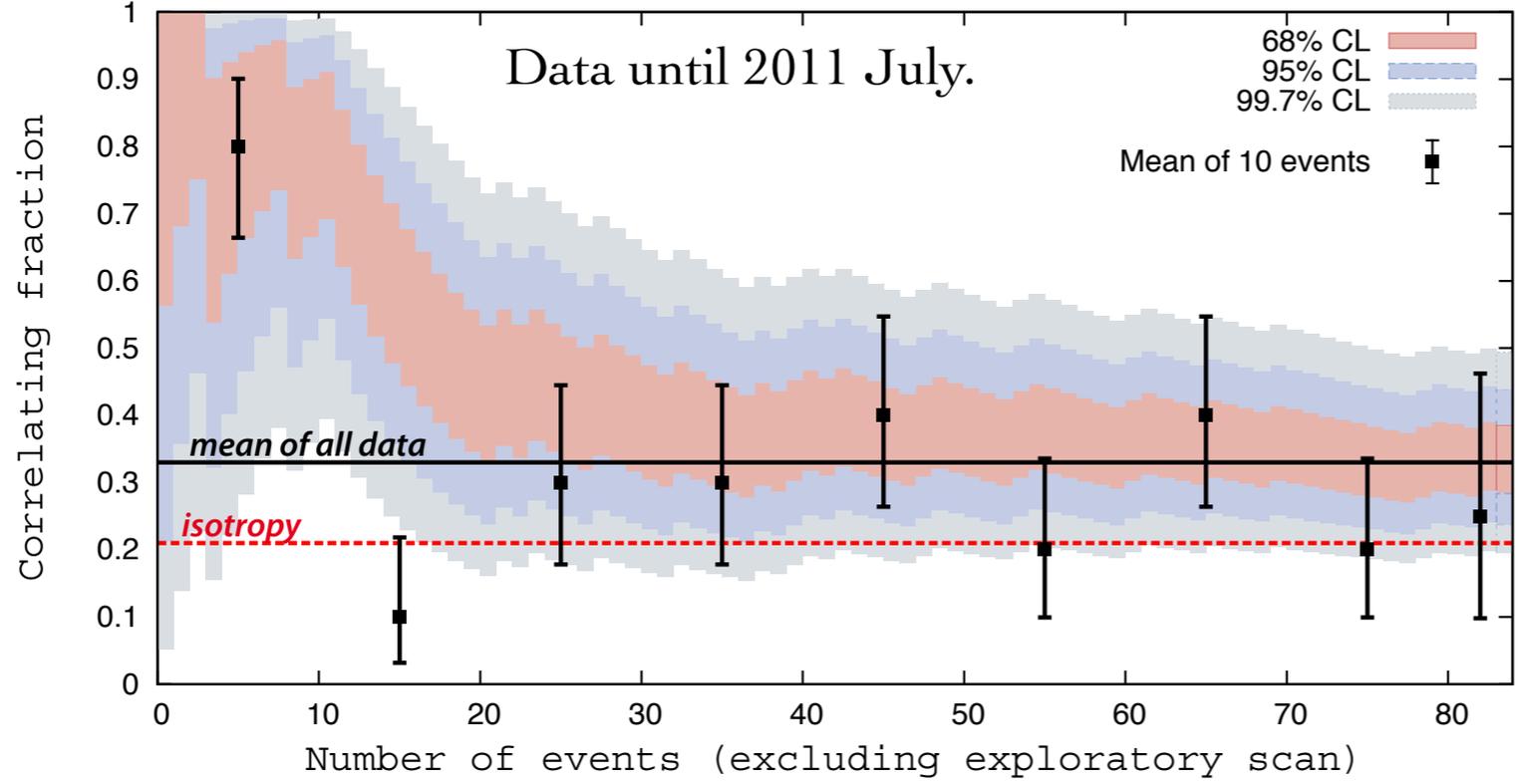
## GZK $\nu$ (SD)



- 📌 トップダウンモデルが棄却されている。
- 📌 GZK機構によって生成されるニュートリノ、ガンマ線の感度に近づきつつある。

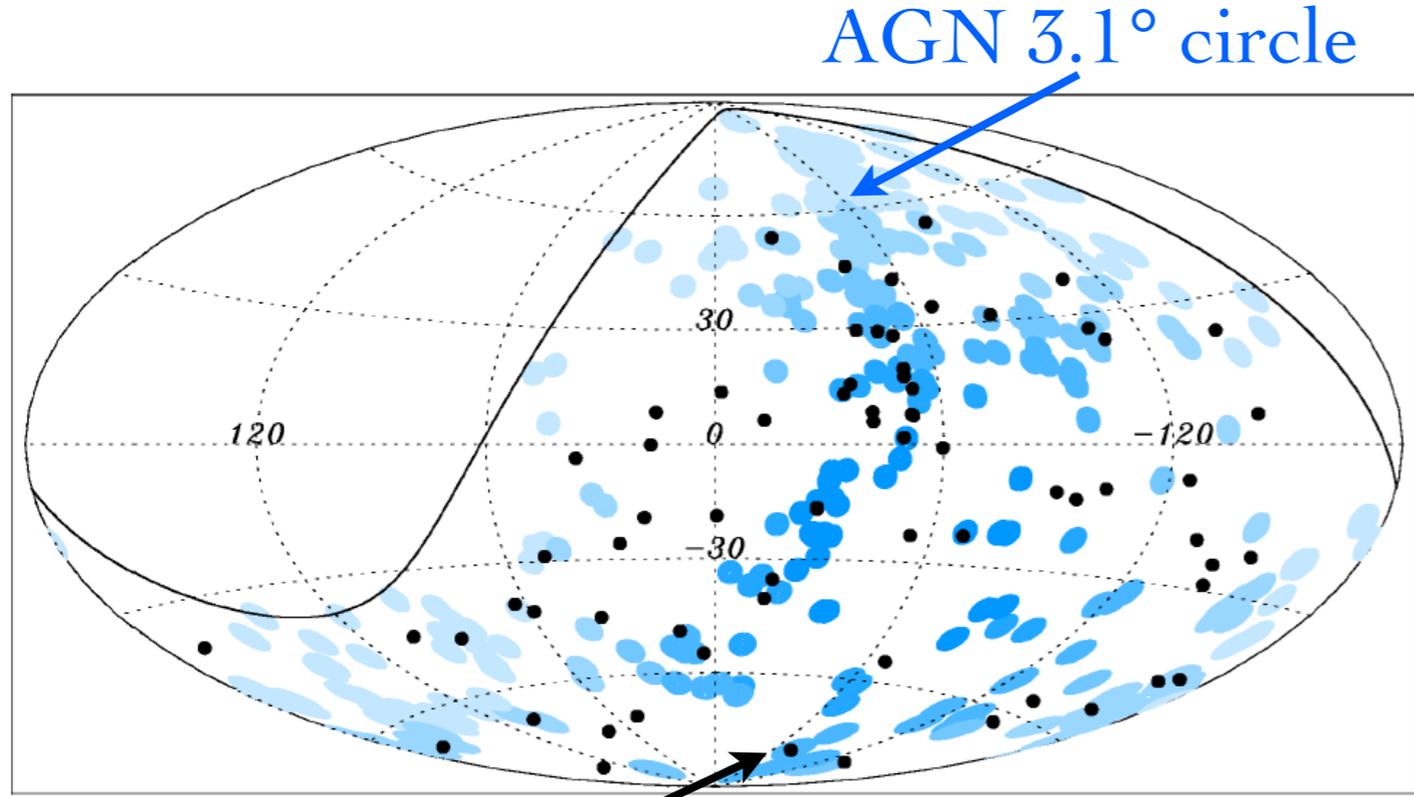


# 近傍活動銀河核 (AGN) との相関解析



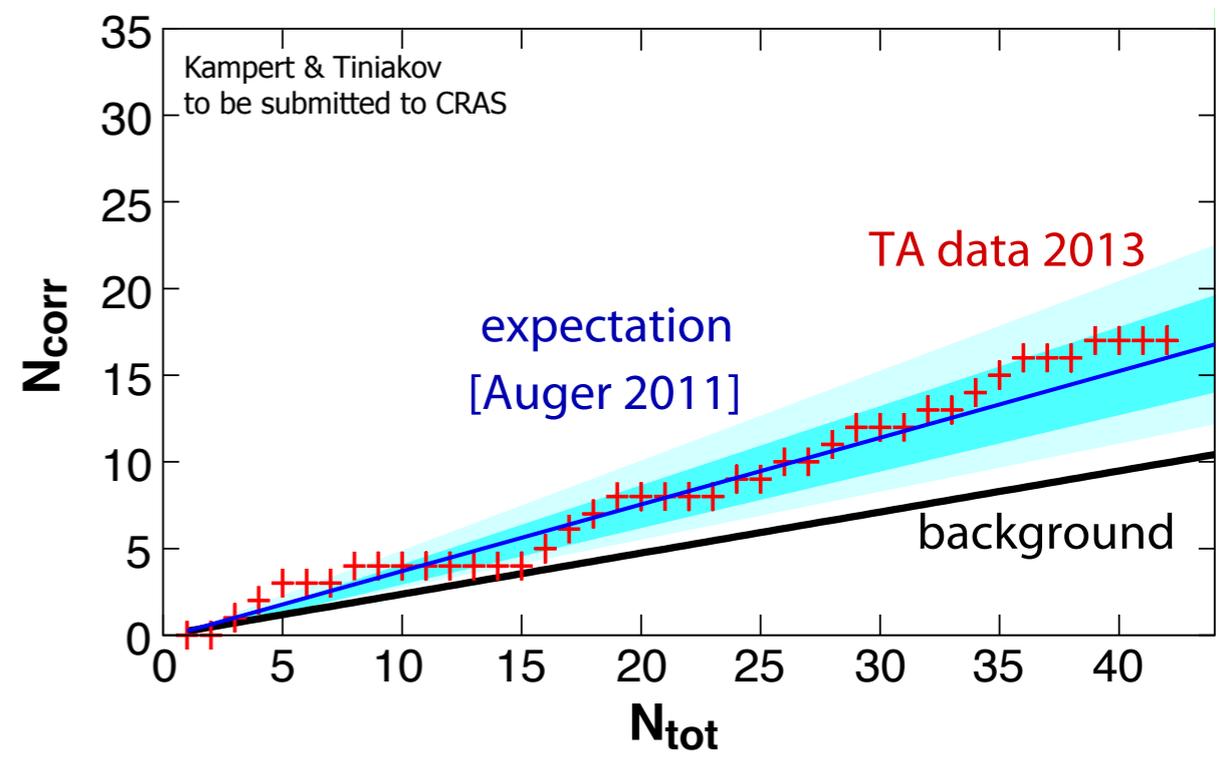
3.1 degree circle  
 VCV catalog  $z < 0.018$   
 $E > 5.7 \times 10^{19}$  eV  
 in 2011 E-scale,

**84 事象中 28 事象が相関  
 (33%, 偶然確率 0.006)**

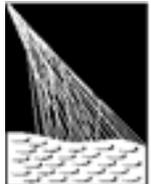


宇宙線の到来方向

Astropart. Phys. **24**, 314 (2010)



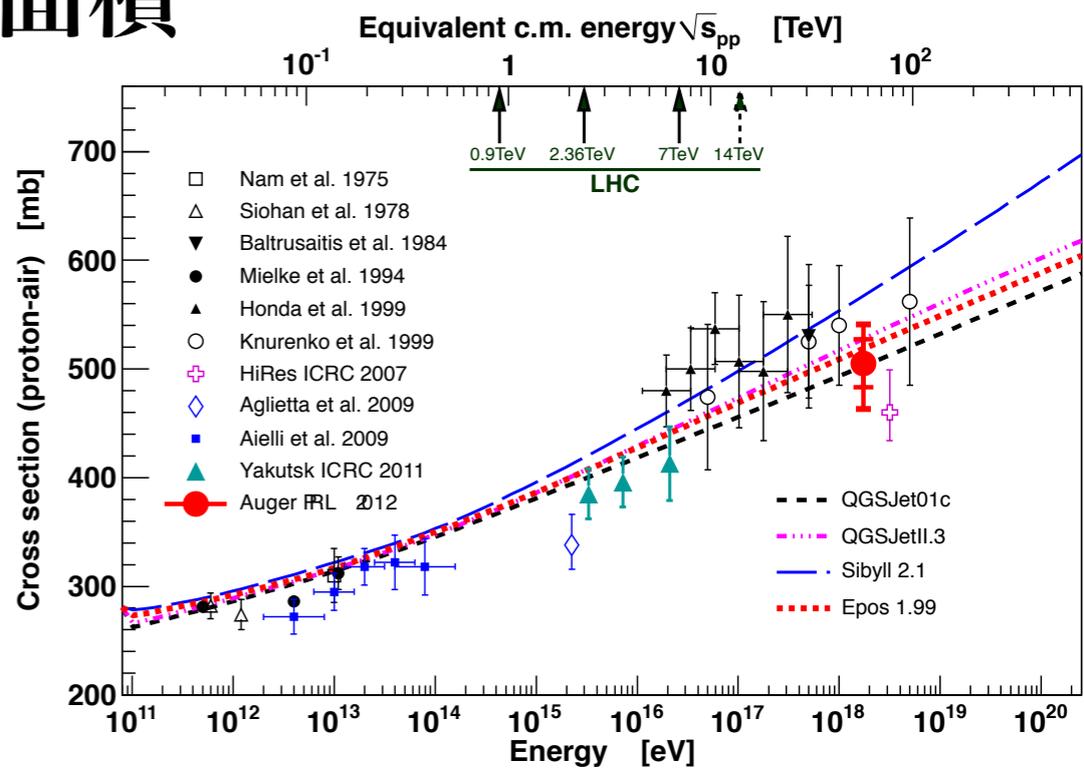
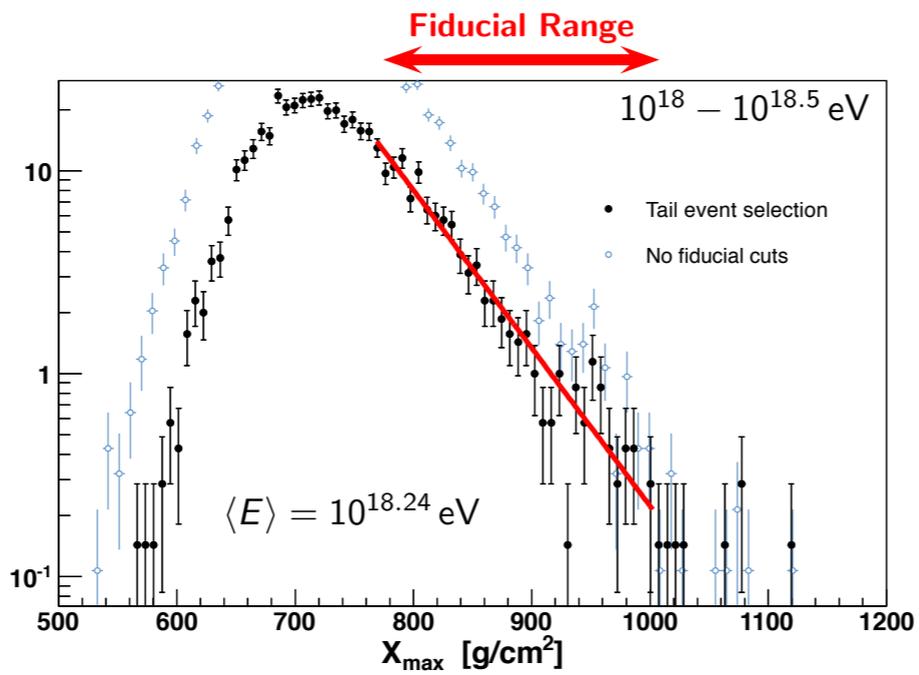
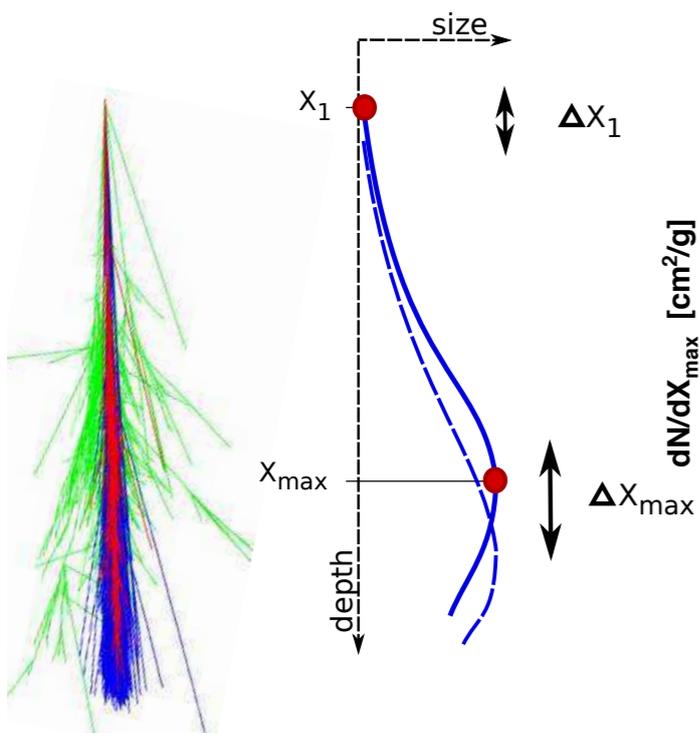
TAの結果と一致している。



PIERRE AUGER OBSERVATORY

# 極高エネルギーでの粒子相互作用

## 陽子-空気の散乱断面積

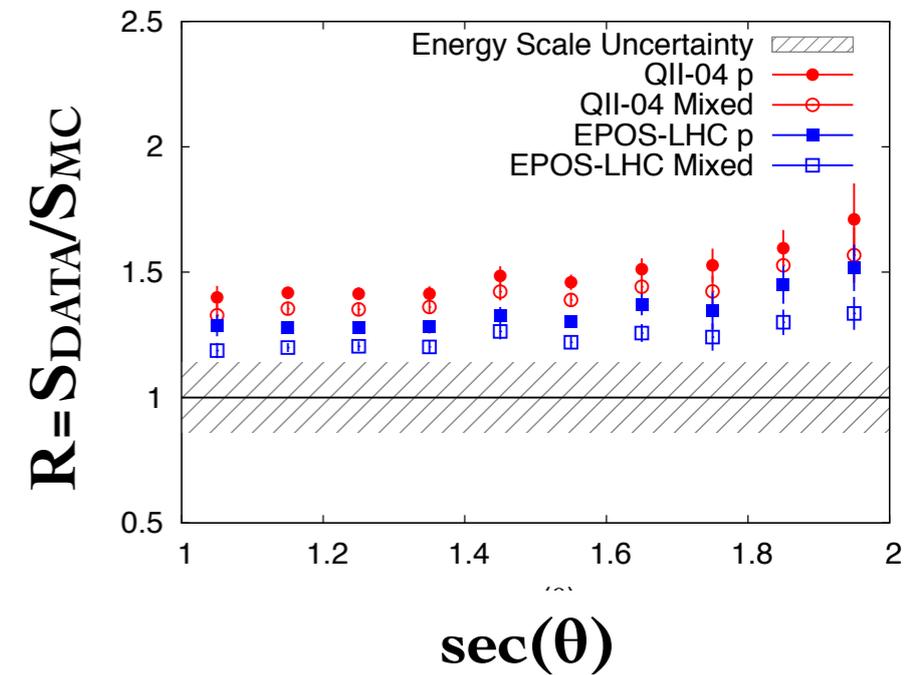
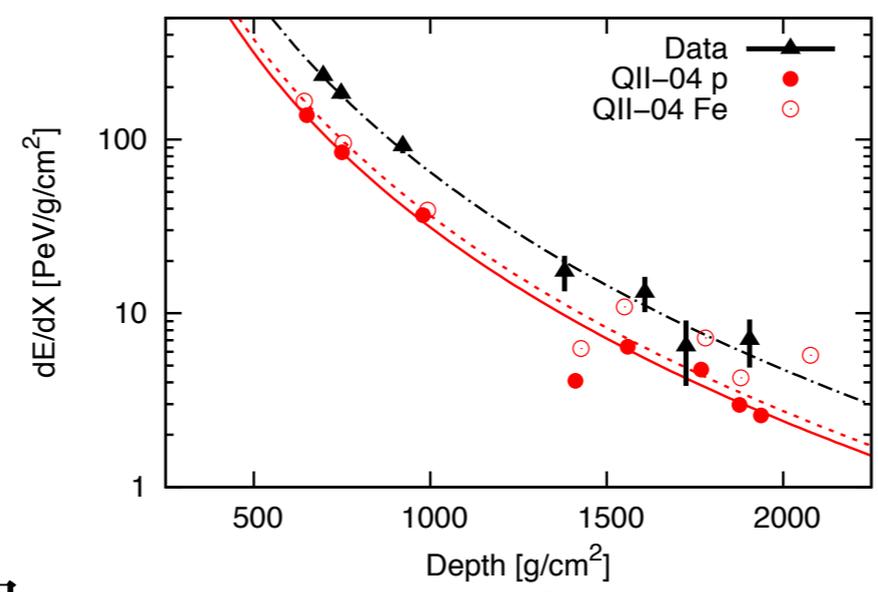
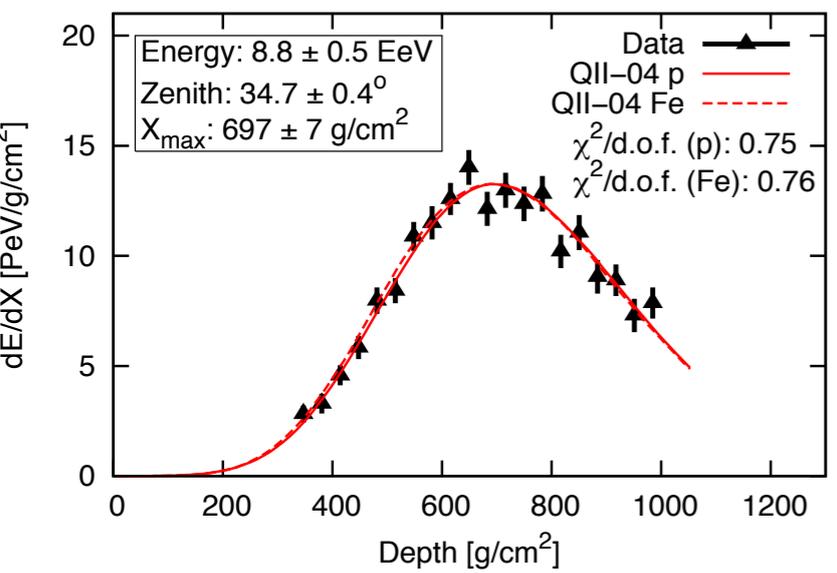


$$\frac{dP}{dX_1} = \frac{1}{\lambda_{int}} e^{-X_1/\lambda_{int}}$$

$$\Lambda_\eta = [55.8 \pm 2.3_{stat} \pm 1.6_{sys}] \text{ g/cm}^2$$

R. Ulrich in SVHECRI 2012  
Phys Rev Lett. 2012 Aug 10;109(6):062002

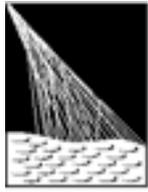
## ミューオン数の不足



FDで測定された縦方向  
発達に合うように、陽子  
と鉄のSimulation生成

SDで期待される  
横方向分布を比較  
G. Farrar, ICRC 2013.

30%~50%モデルの  
ミューオン数が不足



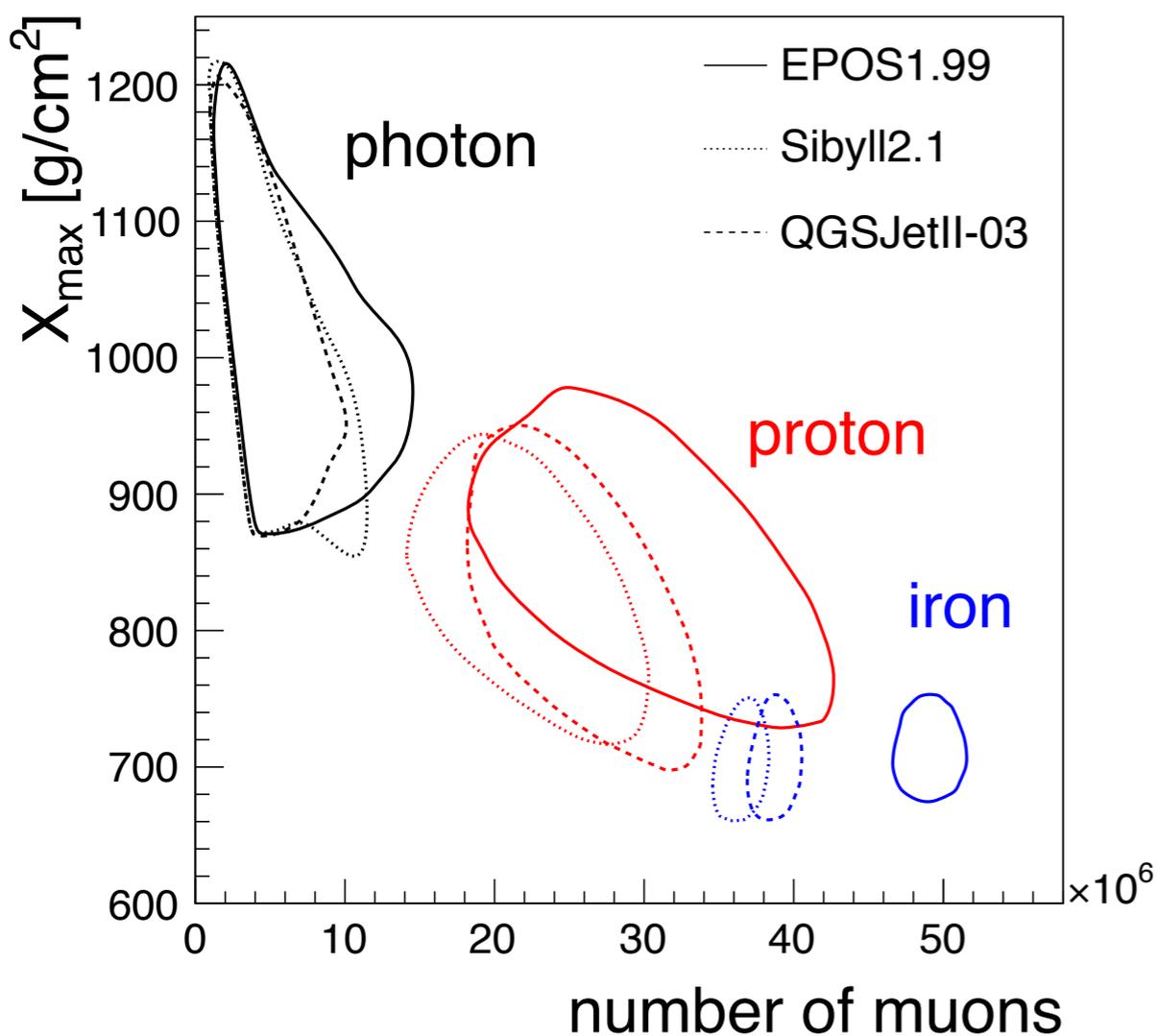
PIERRE  
AUGER  
OBSERVATORY

# Augerの測定結果と説明すべき物理

- 📍 スペクトルのカットオフの精密測定（世界最大統計、最高精度）
- 📍 極高エネルギーニュートリノとガンマ線のフラックス強い上限値、トップダウンモデルを棄却。
- 📍 近傍天体と極高エネルギー宇宙線到来方向との弱い相関。
- 📍  $10^{18.5}$  eV 以上でのゆっくりとした宇宙線の質量数の増加。
- 📍 LHCで達成可能なエネルギーよりも一桁高いエネルギー領域での粒子相互作用、ミューオン数の不足。
- 🌍 スペクトルのカットオフがGZK機構か、宇宙線源の加速限界か？
- 🌍 ゆっくりとした質量数の増加の精密測定。陽子の割合はどれくらいか？  $10^{19.7}$  eV 以上の質量組成測定。
- 🌍 近傍天体との弱い相関の理由は？
- 🌍 極高エネルギー領域へ外挿された粒子相互作用は正しいのか？

# Augerの拡張計画 - Beyond 2015 -

空気シャワー中の電磁相互作用粒子成分( $e^+, e^-, \gamma$ )と  
ミューオン粒子成分( $\mu^+, \mu^-$ )を別々にSDで測定する。



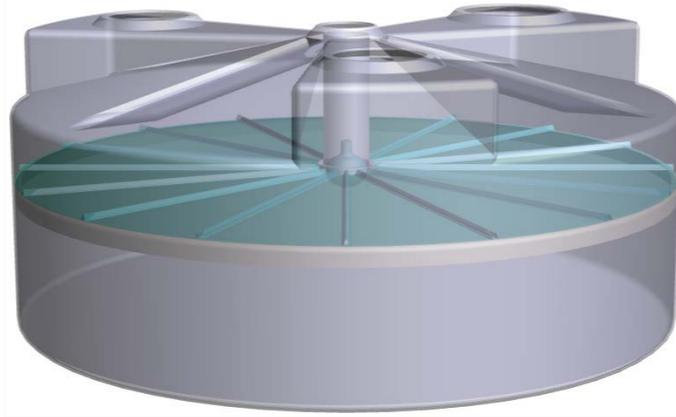
- この2成分を分けて測定することで各イベントの質量組成測定を達成する。
- SDは24時間定常観測可能なため統計量が10倍に増加する。
- 陽子成分を10%の精度で測定する。
- モデルによりミューオン数が異なることを使った粒子相互作用の理解。
- 質量組成ごとに高統計での天源探査。

# 地表検出器(SD)のUpgrade

Auger SD

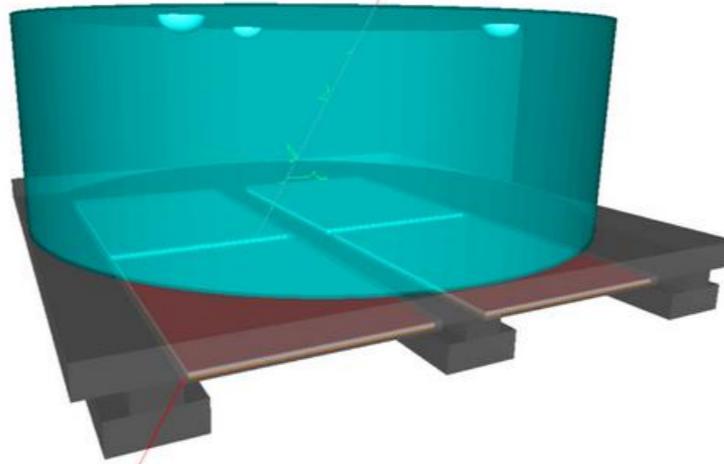


**ASCII**  
(Auger Scintillators  
for Composition - II)

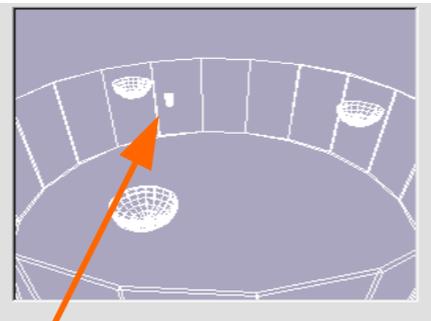
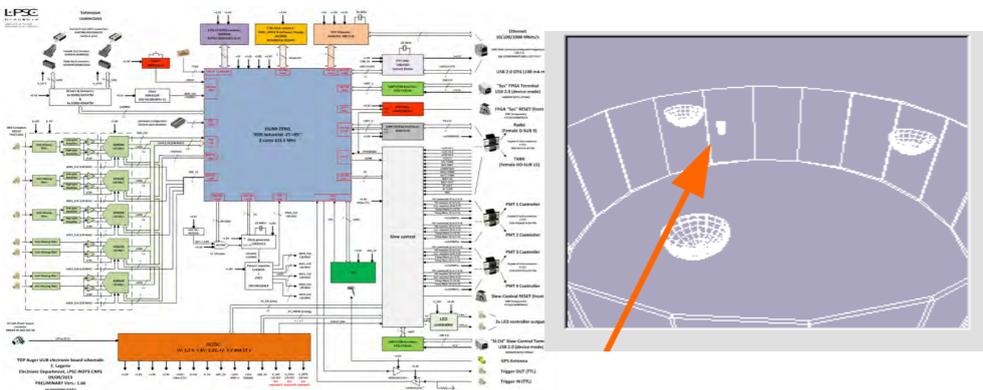


**LSD**  
(Layered Surface  
Detector)  
NIM-A 767 (2014) 41-49

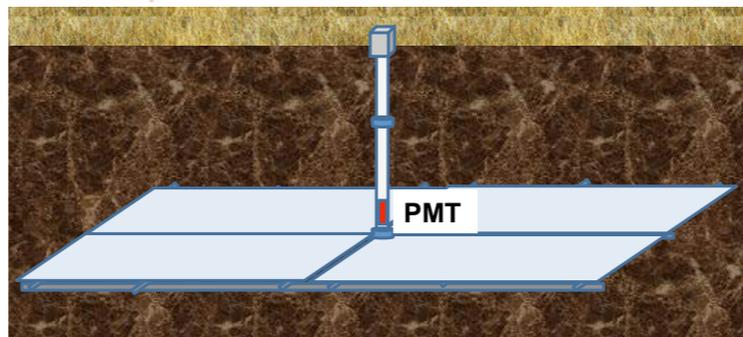
**SDE+ Small PMT**  
(SD Electronics upgrade)



**MARTA**  
(Muon Auger RPC Tank  
Array)



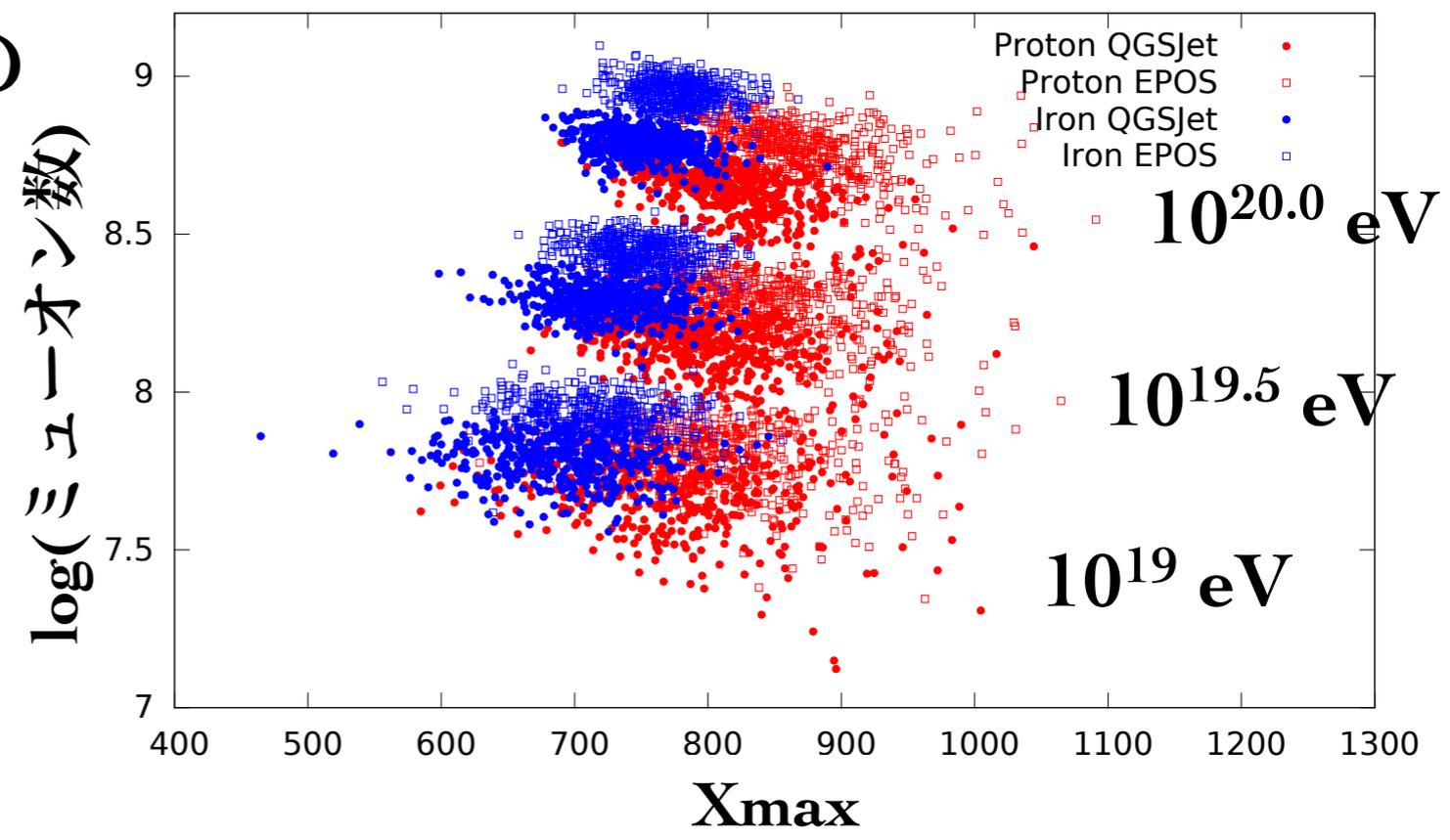
Small PMT



**TOSCA**  
**AMIGA-Grande**  
地中にシンチレーター

# ASCCII (Auger Scintillators for Composition-II)

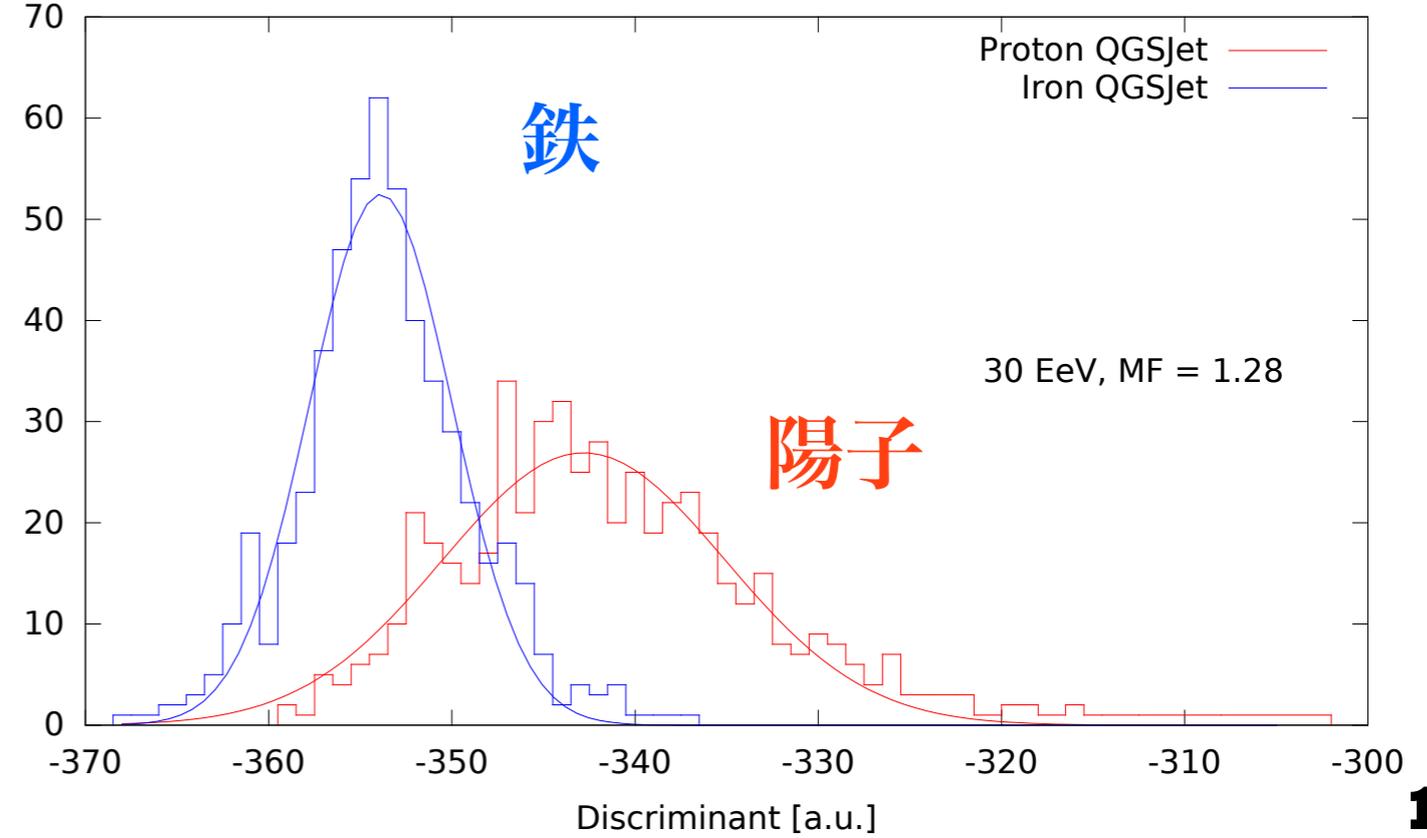
2 m<sup>2</sup> シンチレーターをSDの上に置いて、E.M./ Muon成分を分ける



**Merit Factor**  
(陽子と鉄をどれくらい区別できるか?)

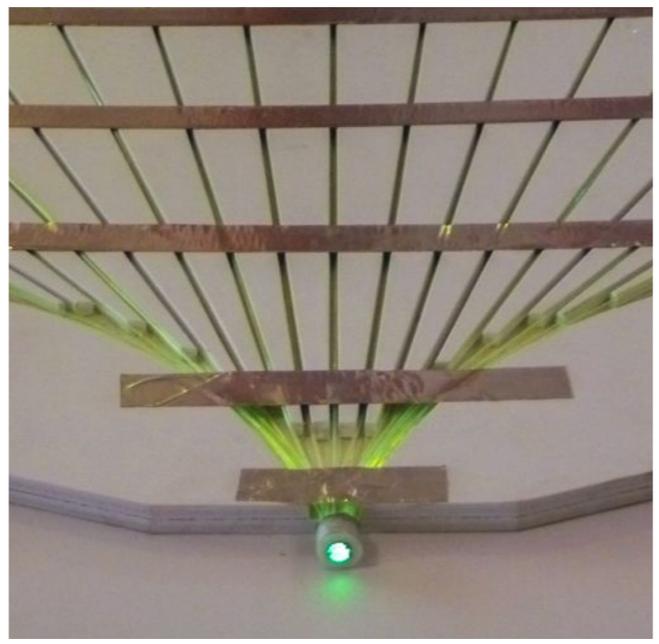
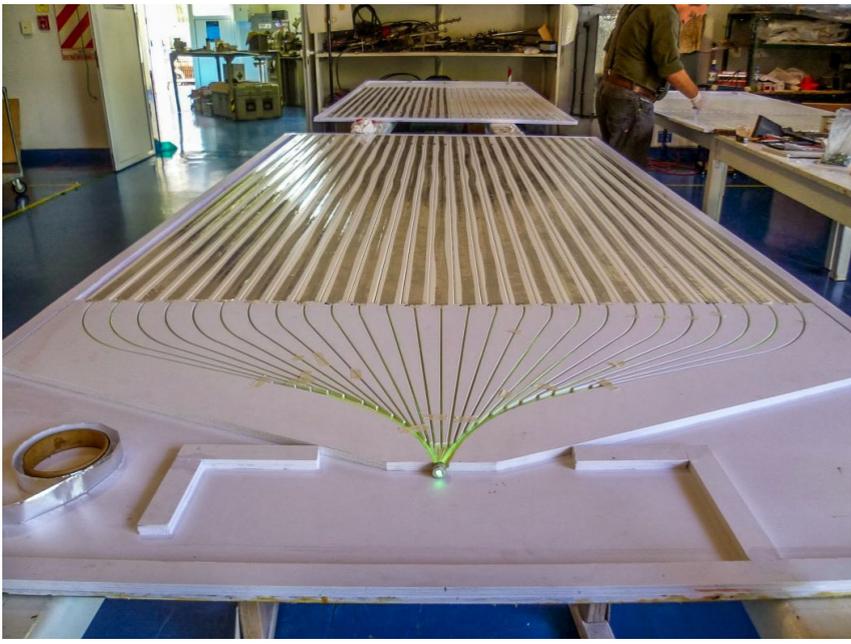
$$f_{p,Fe} = \frac{|m_P - m_{Fe}|}{\sqrt{\sigma_P^2 + \sigma_{Fe}^2}}$$

$m$  : mean  
 $\sigma$  : standard deviation  
*FD Xmax : 1.4*

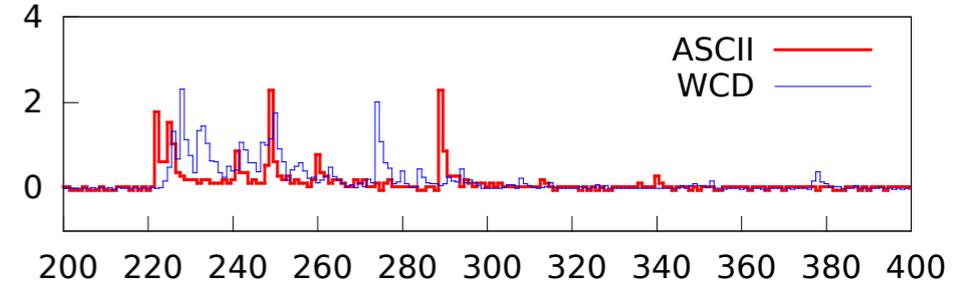
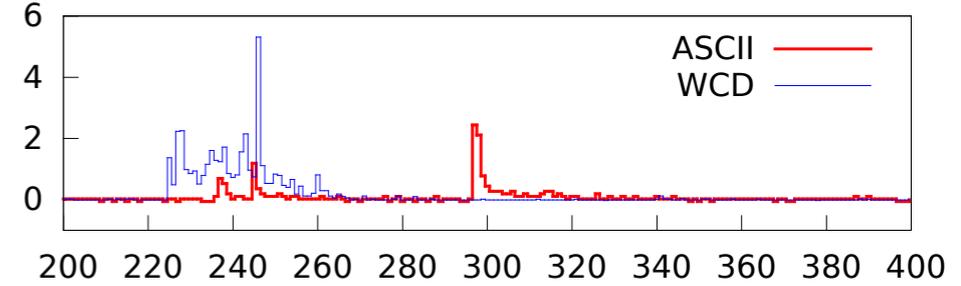
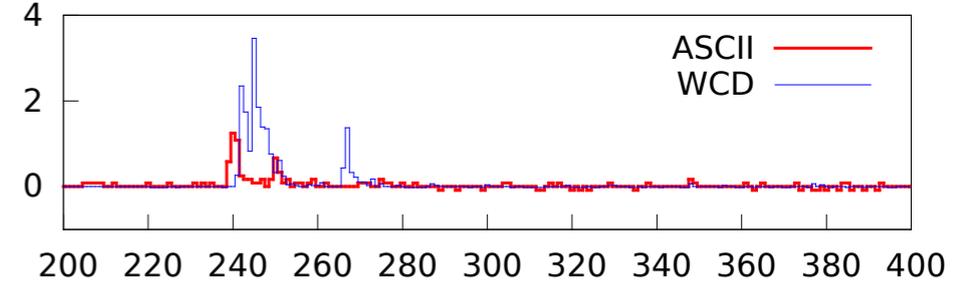


# テスト観測 (ASCII)

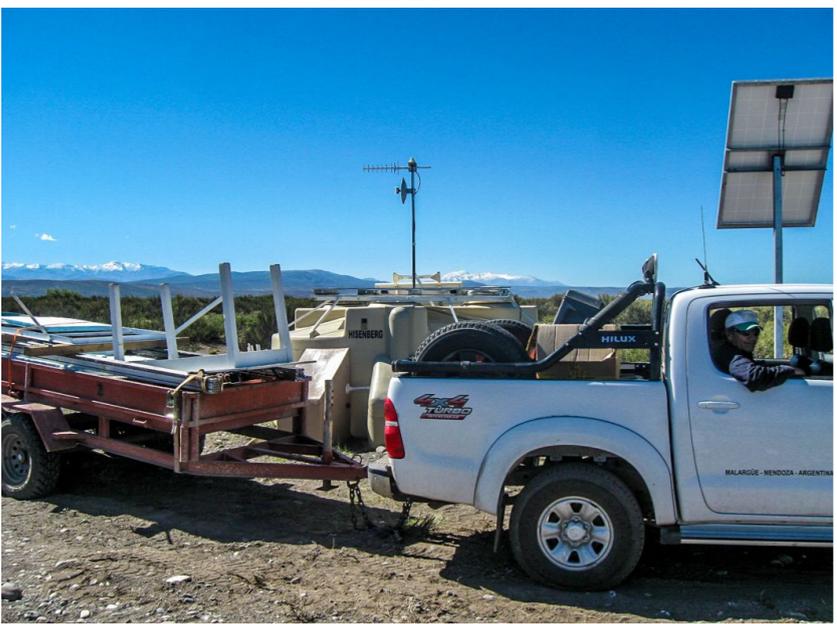
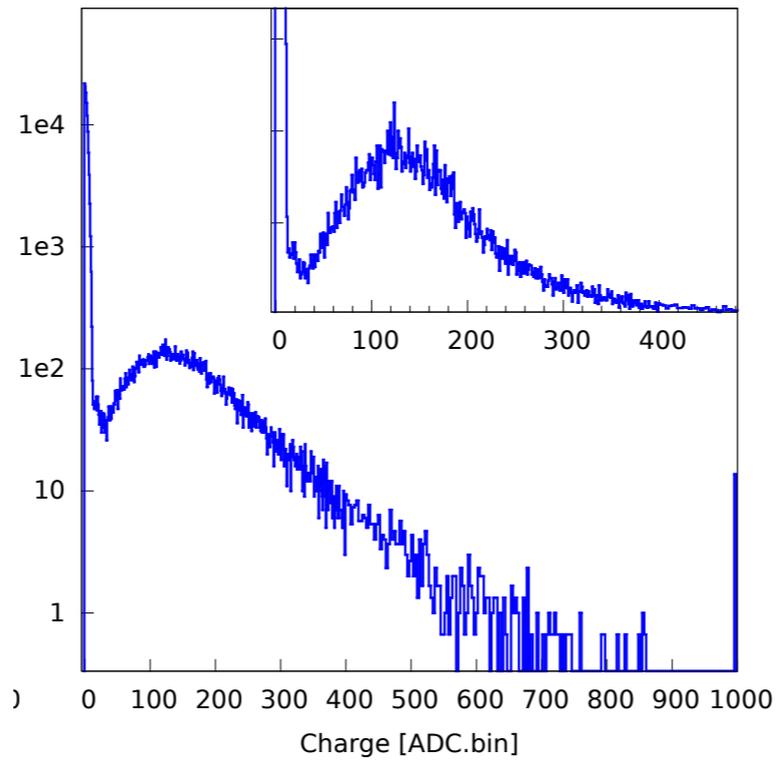
📍 実験サイトに7検出器設置。



SD(WCD) + ASCII data

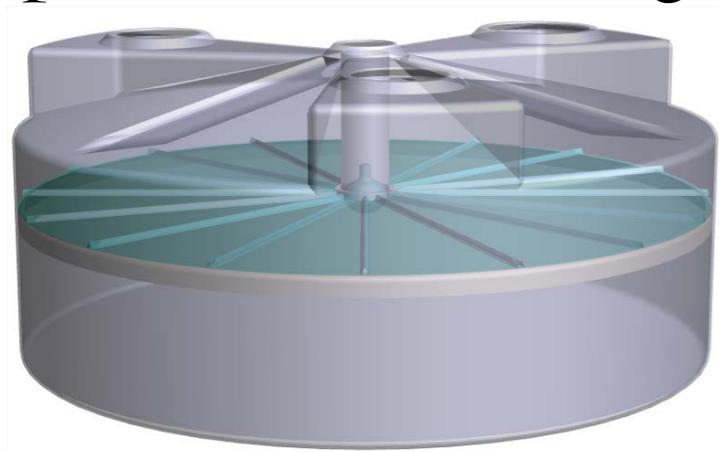


1 MIP calibration

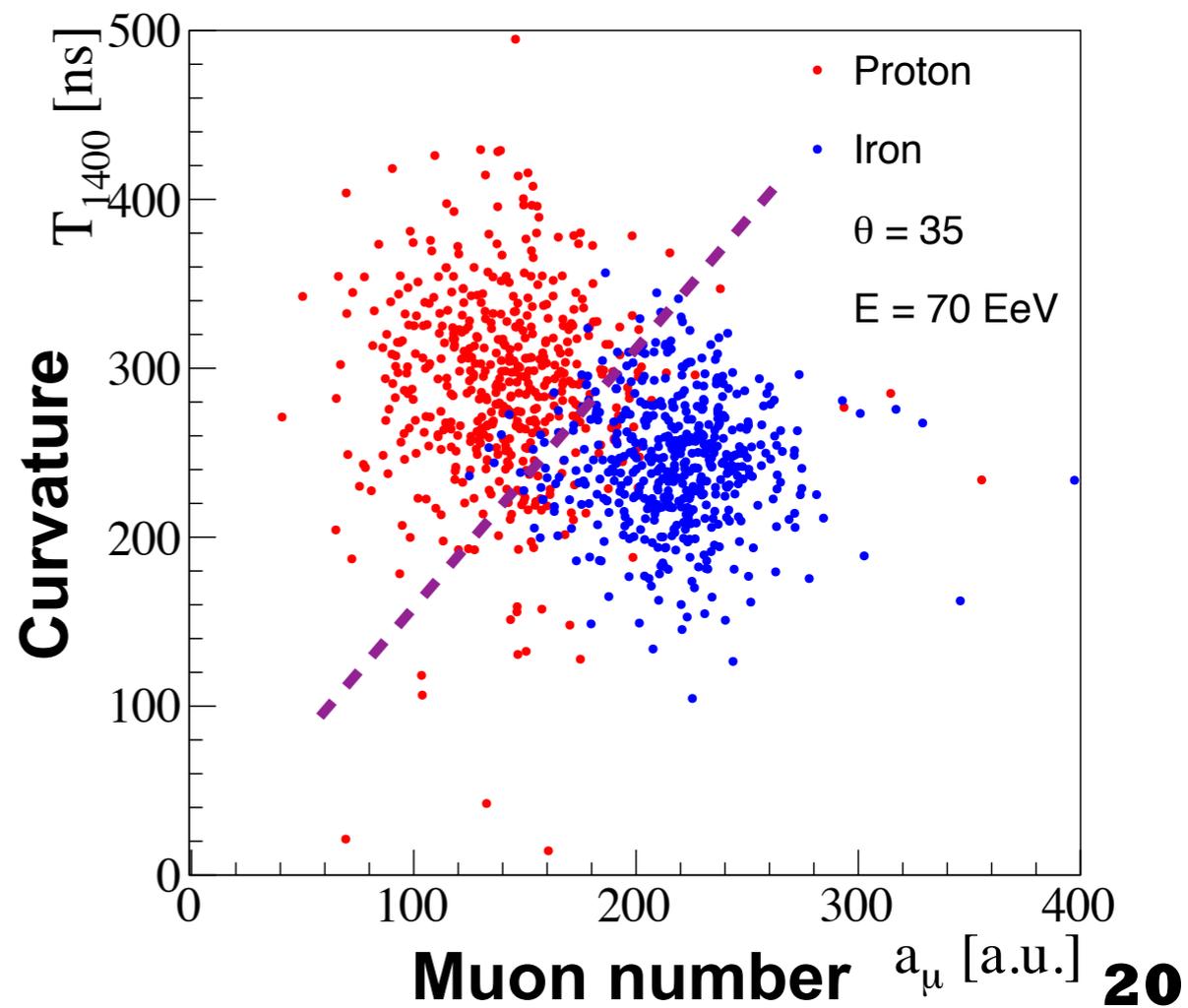
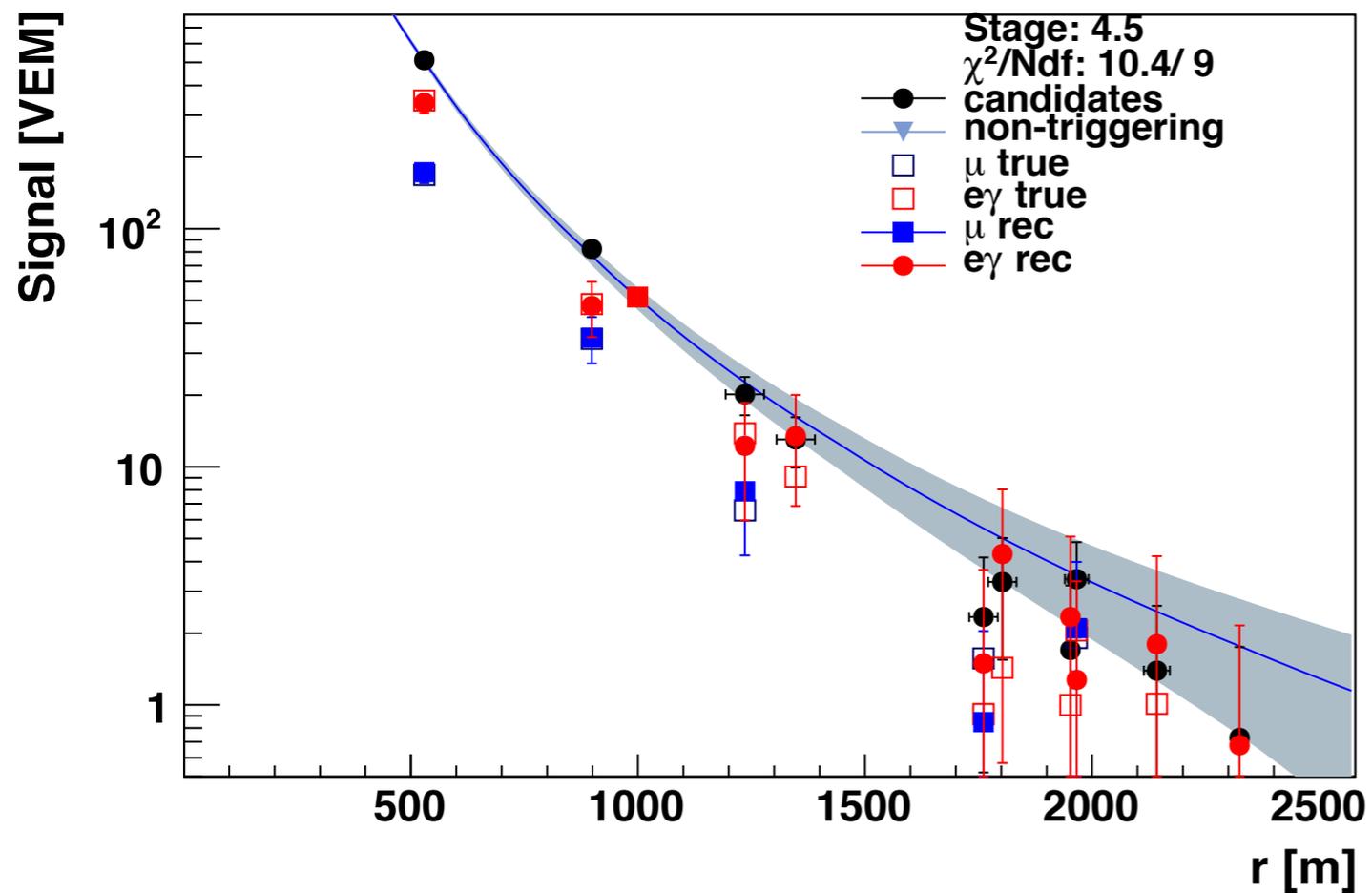
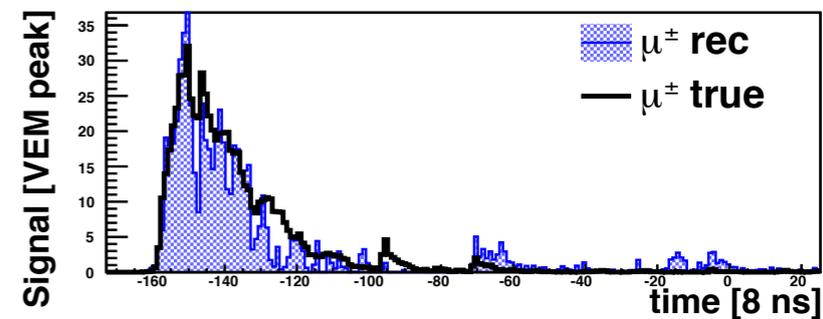
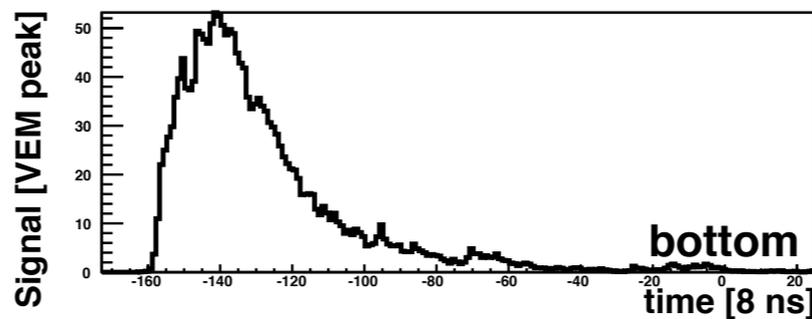
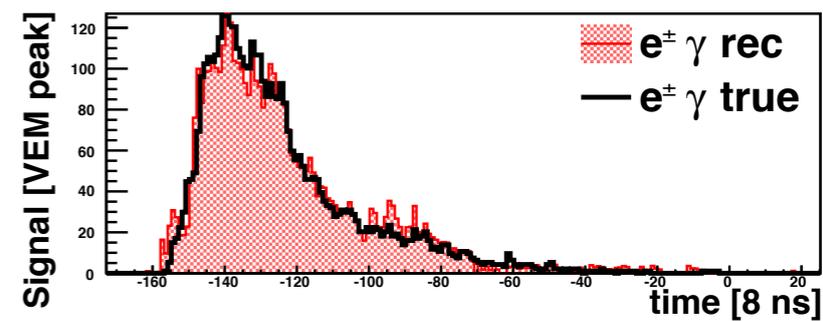
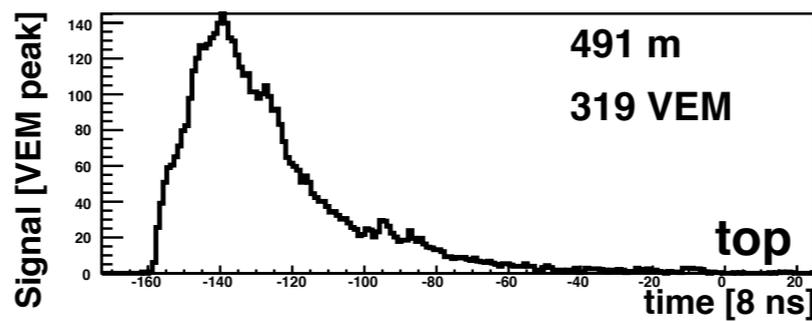


# LSD (Layered Surface Detector)

Top: E.M.+Muonic signal



Bottom: Muonic signal

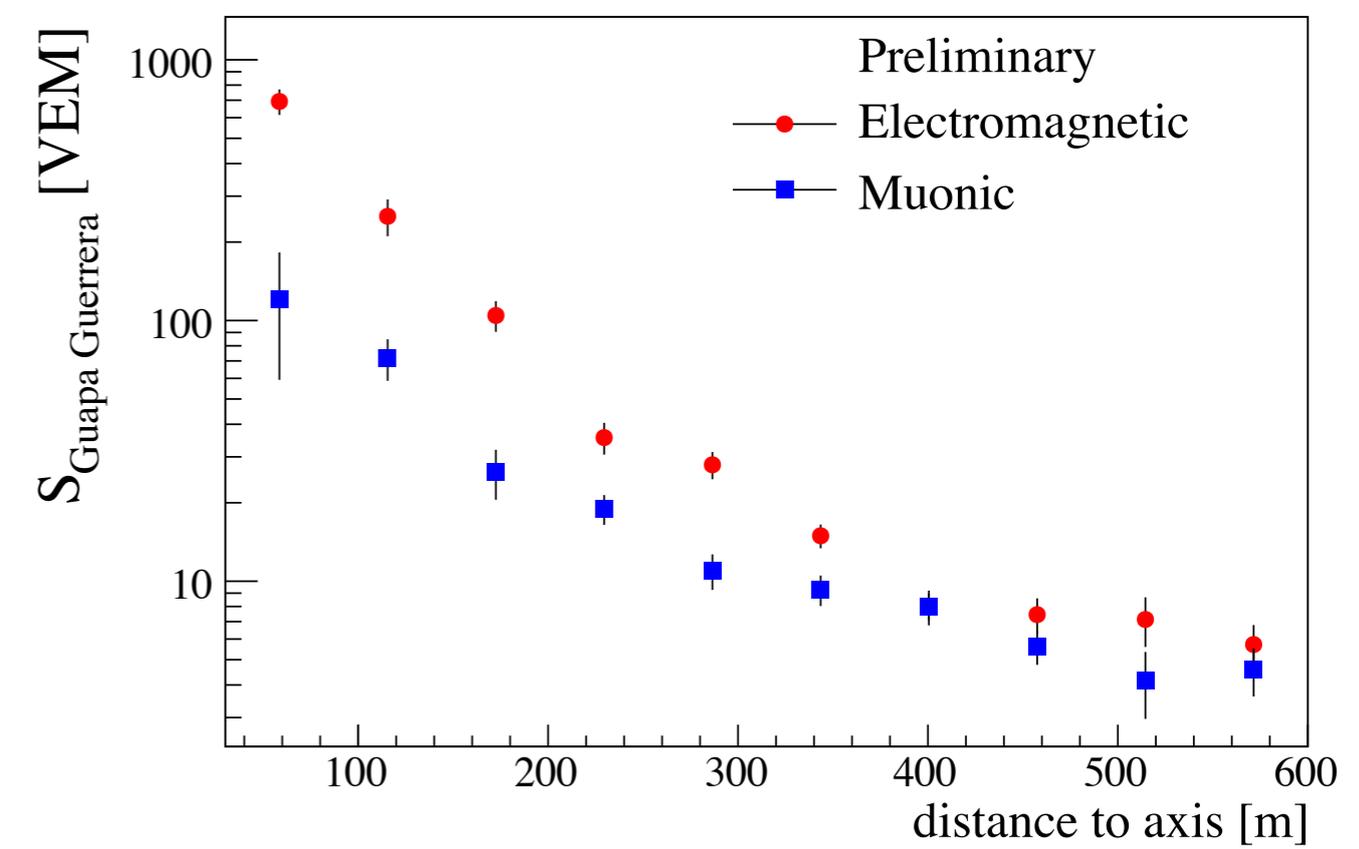
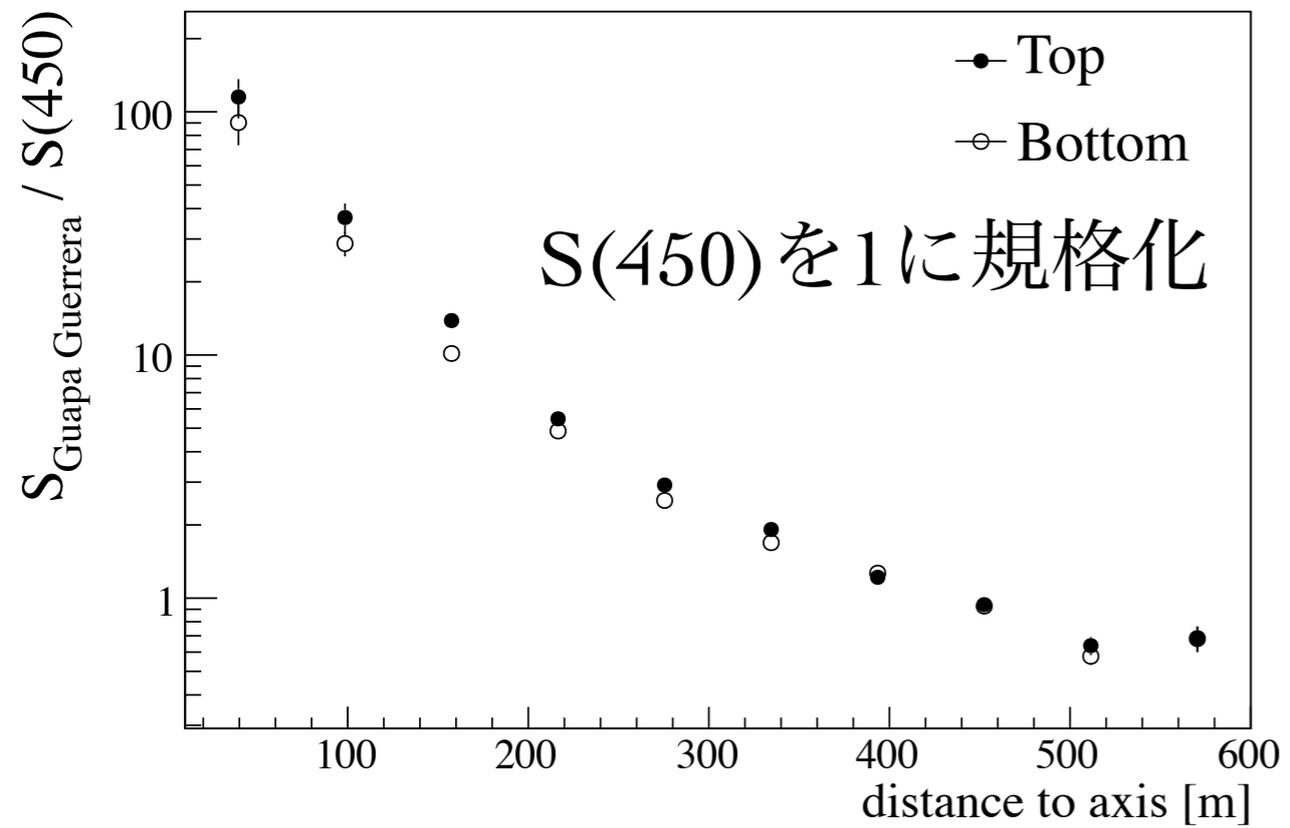


# テスト観測 (LSD)

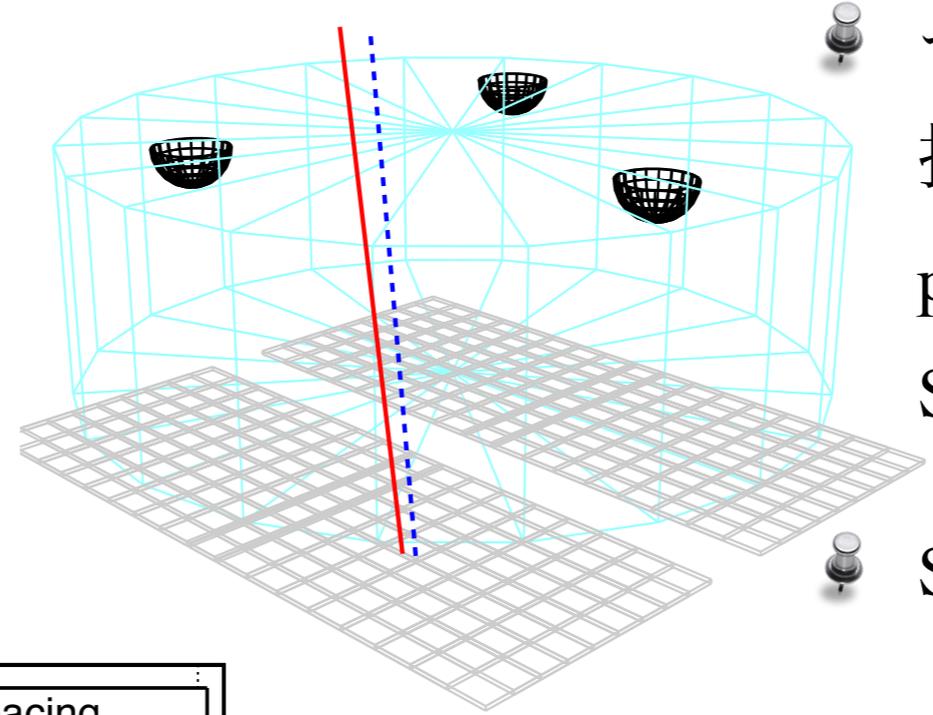
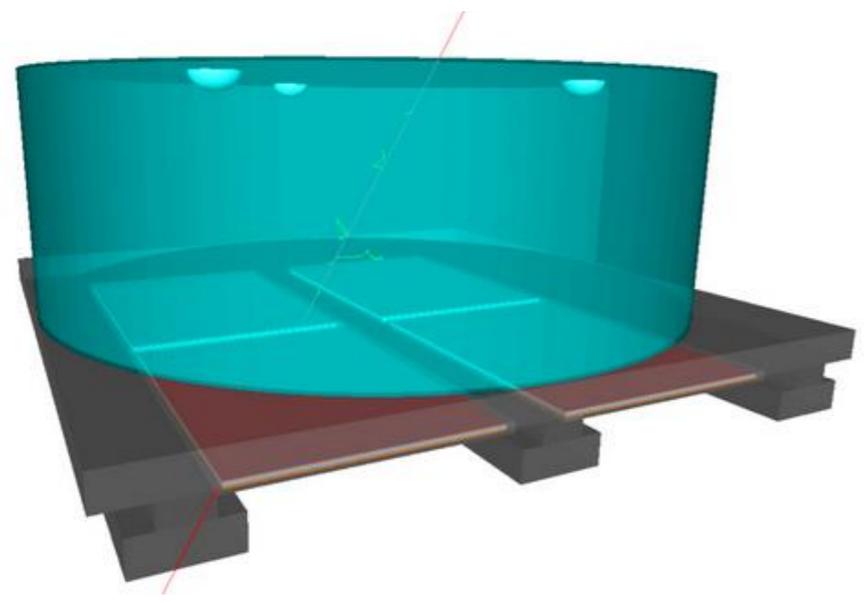
📍 サイトに2検出器設置。



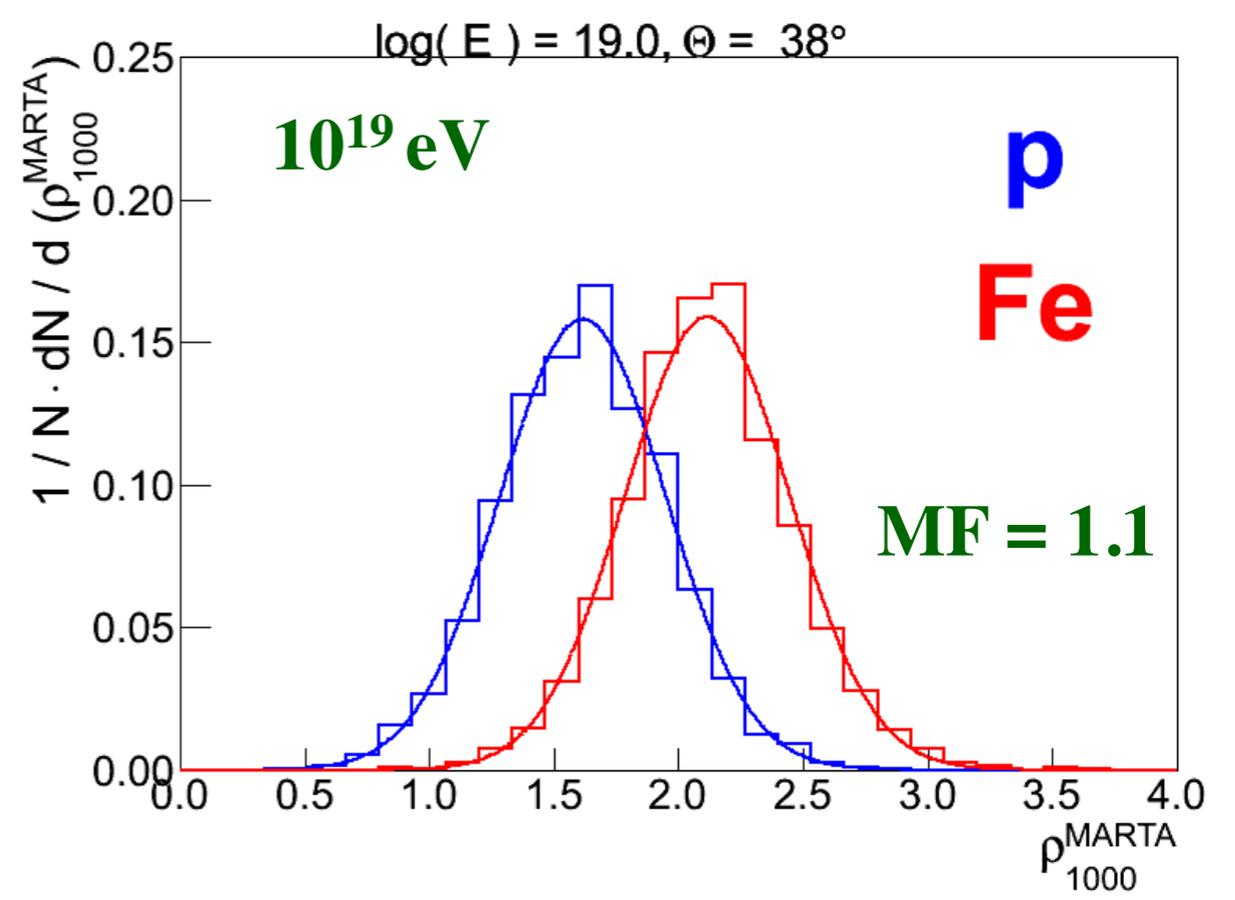
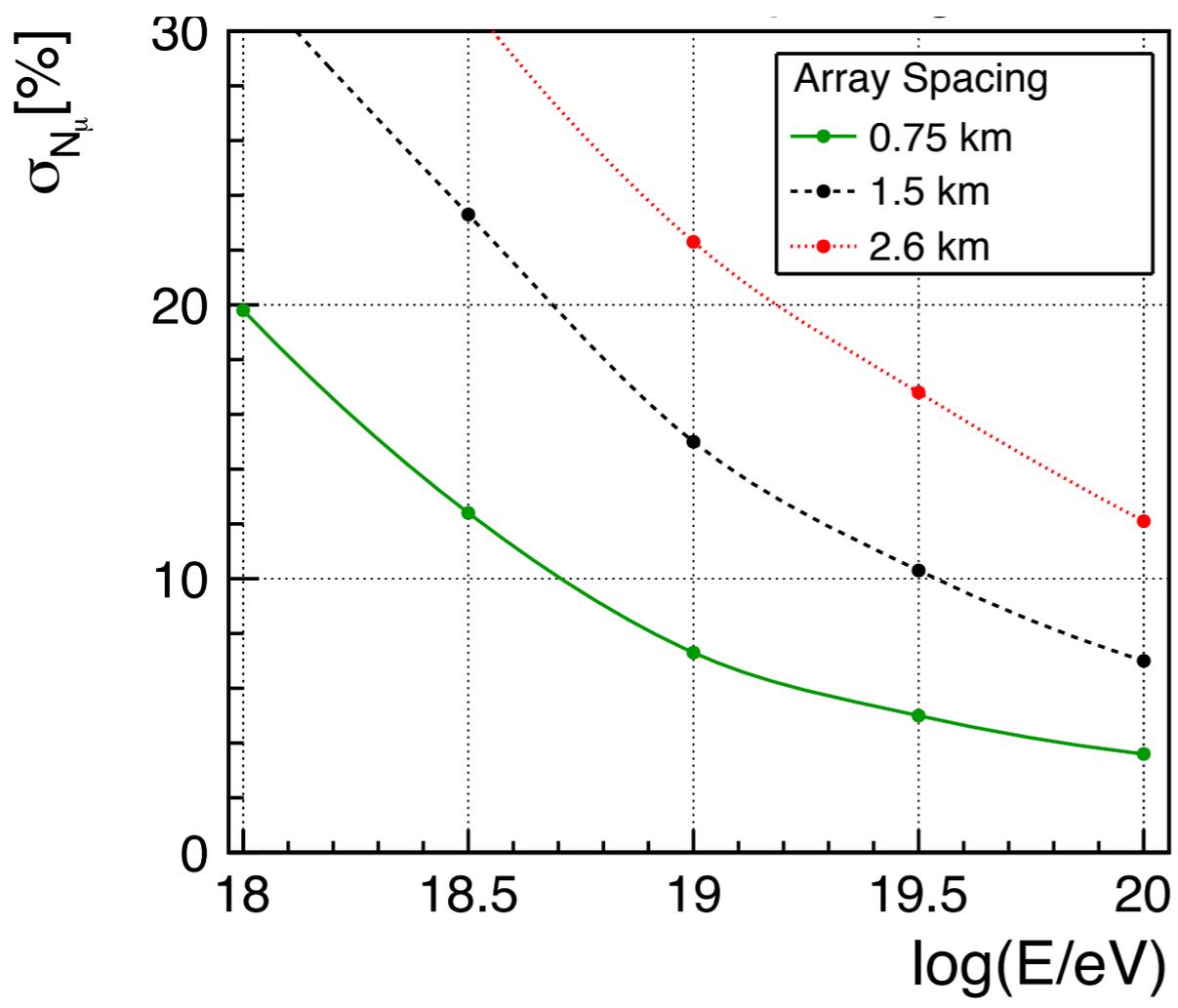
553 events reconstructed ( $E > 0.03 \text{ EeV}$ ,  $\theta < 45^\circ$ )



# MARTA (Muon Auger RPC Tank Array)

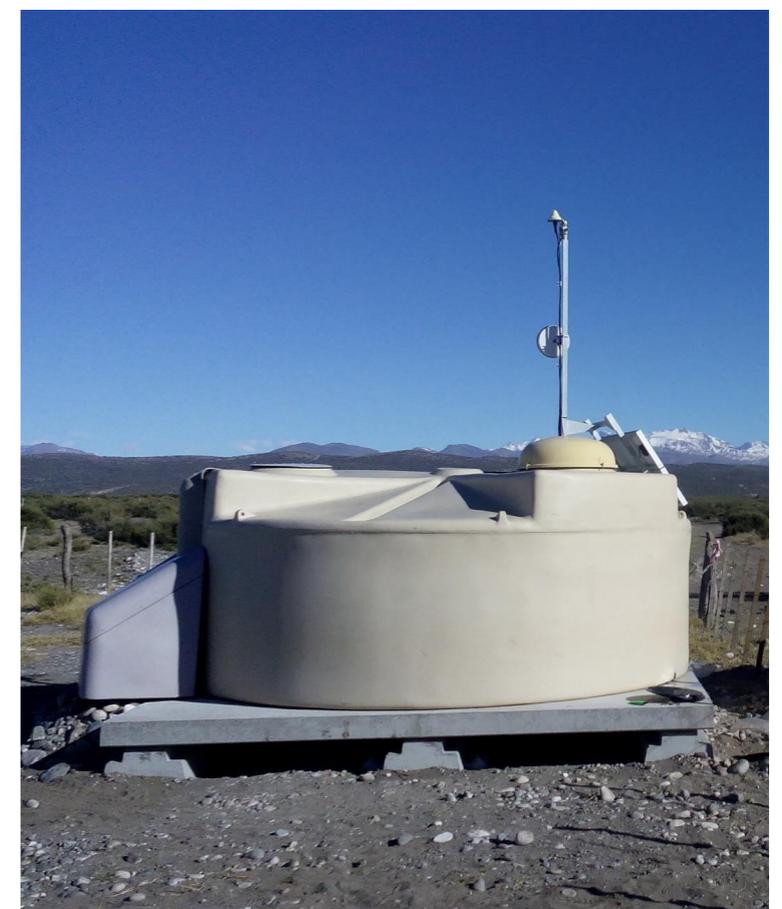
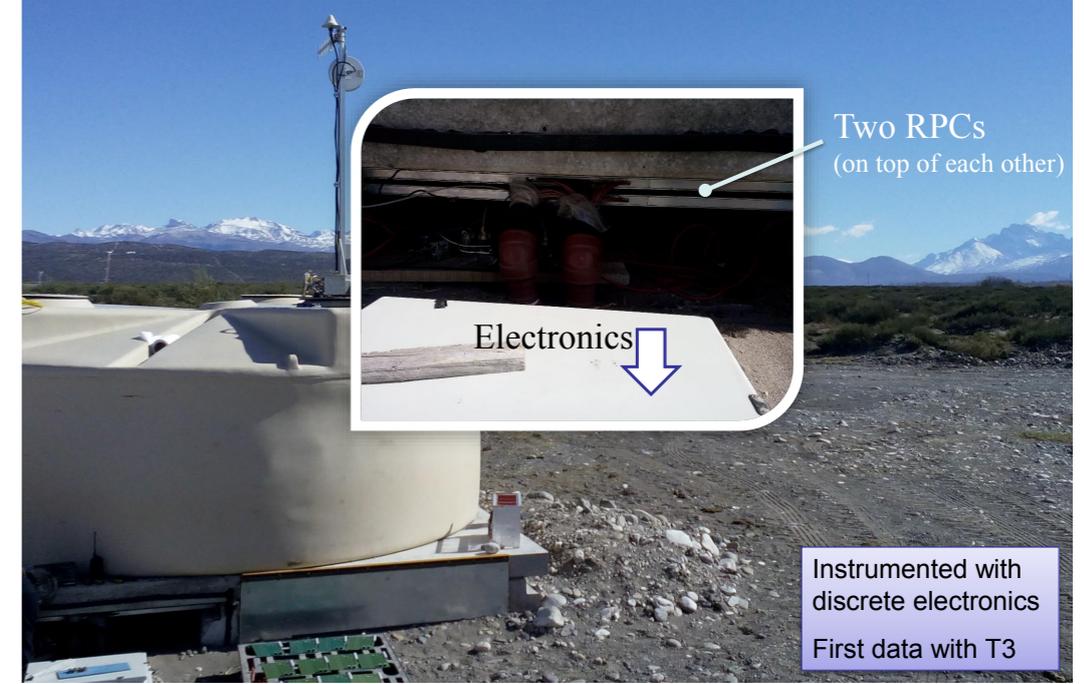


- 📌 セグメント化された高抵抗板チェンバー (resistive plate chamber, RPC) を SD の下に設置。
- 📌 SD は電磁成分の遮蔽として使う。



# テスト観測 (MARTA)

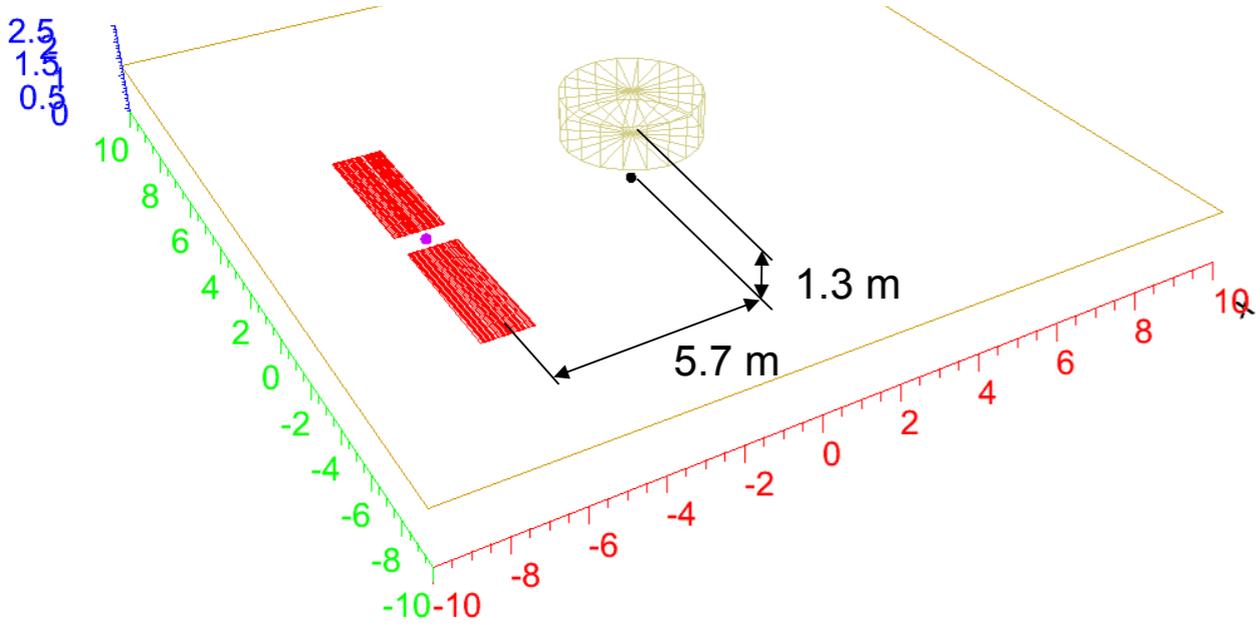
📌 最初の検出器が設置、DAQ開始。



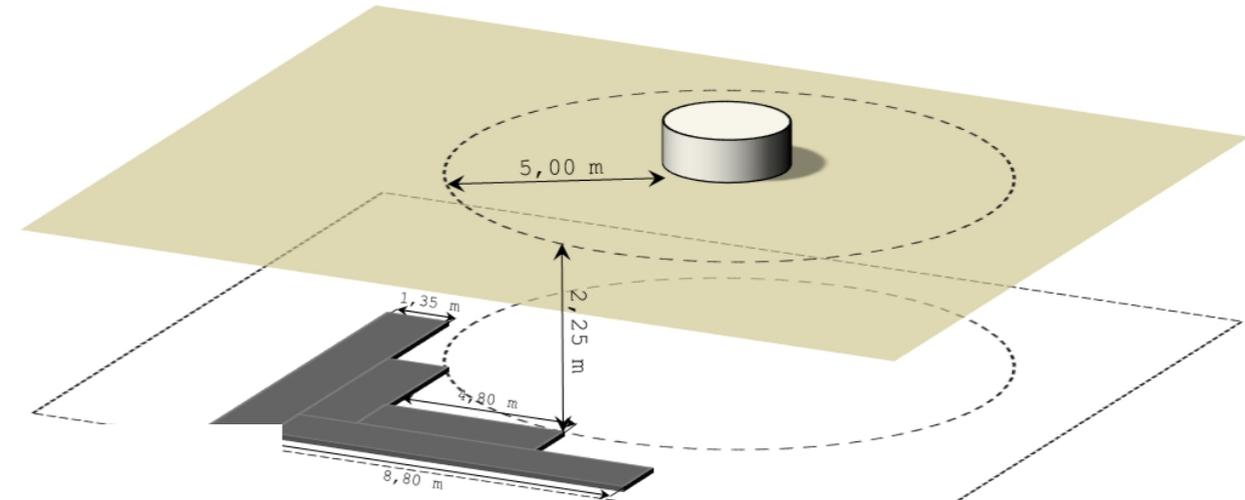


# 地中にシンチレーターを設置

## TOSCA



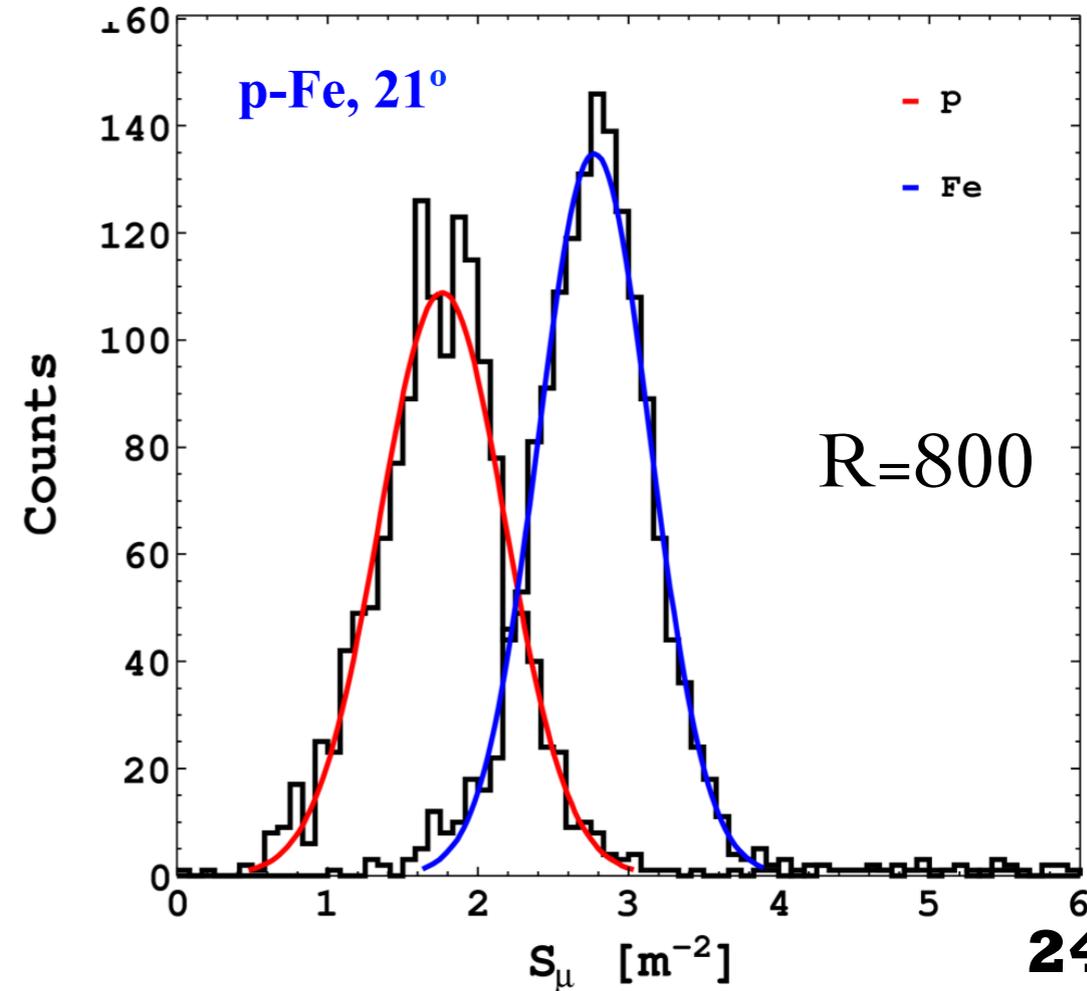
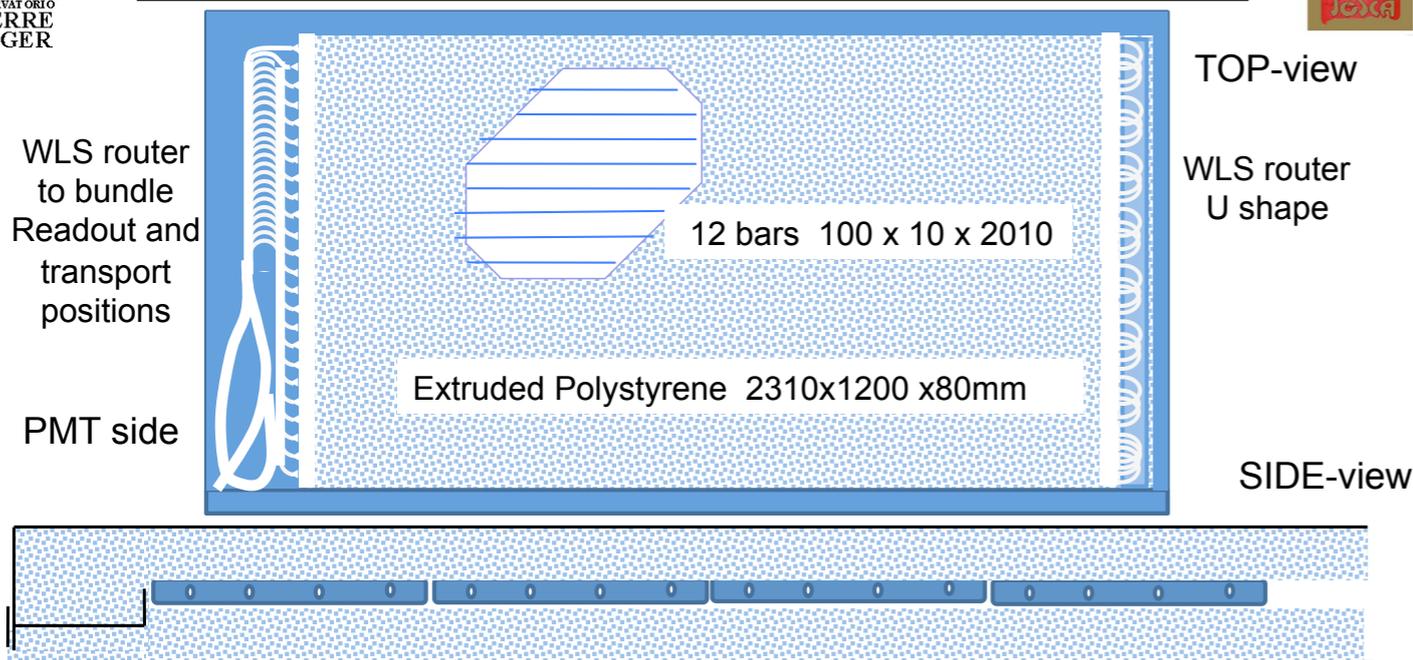
## AMIGA-Grande



ミューオン数を精密測定する



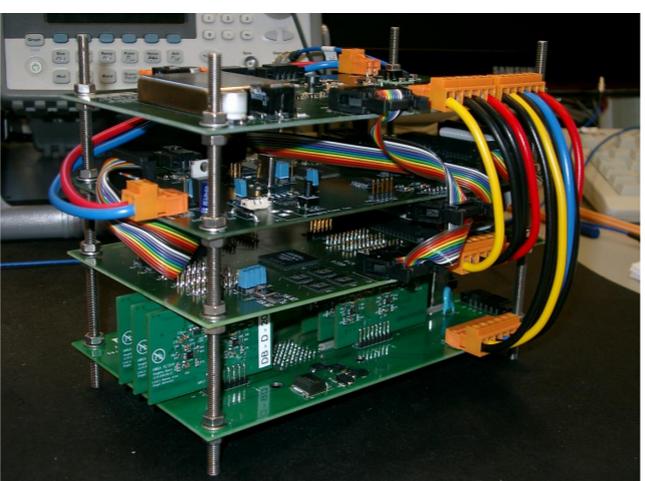
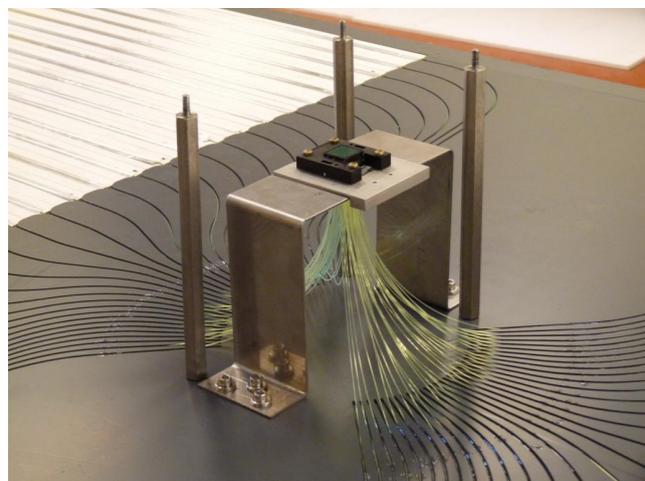
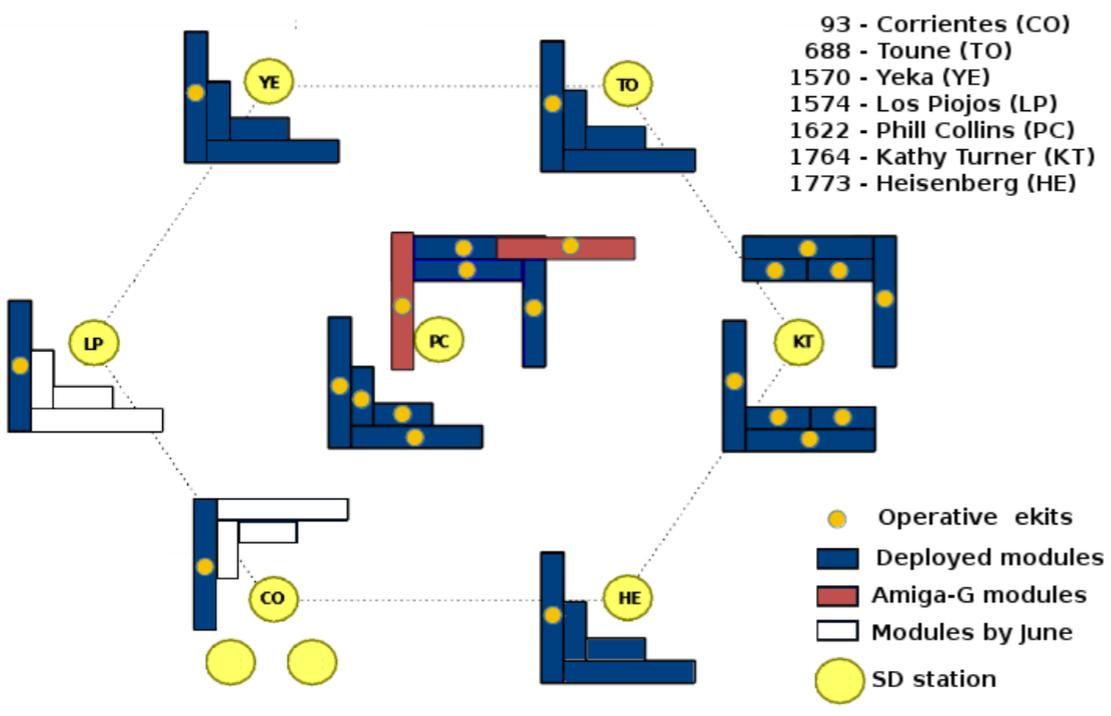
## Basic module mechanics



# AMIGAとしてのテスト観測

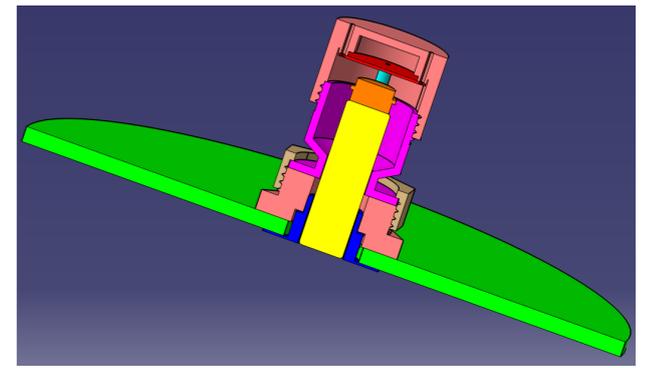
📍 AMIGAとしてのテスト検出器設置が順調に進んでいる。

📍 残り 6 検出器を今設置中。

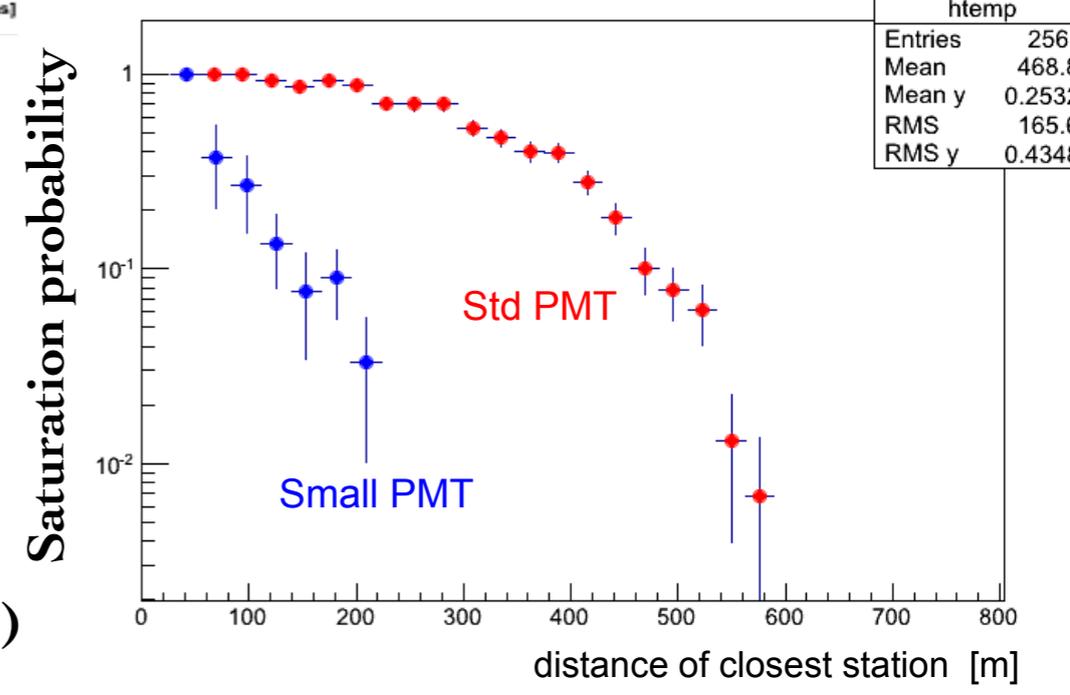
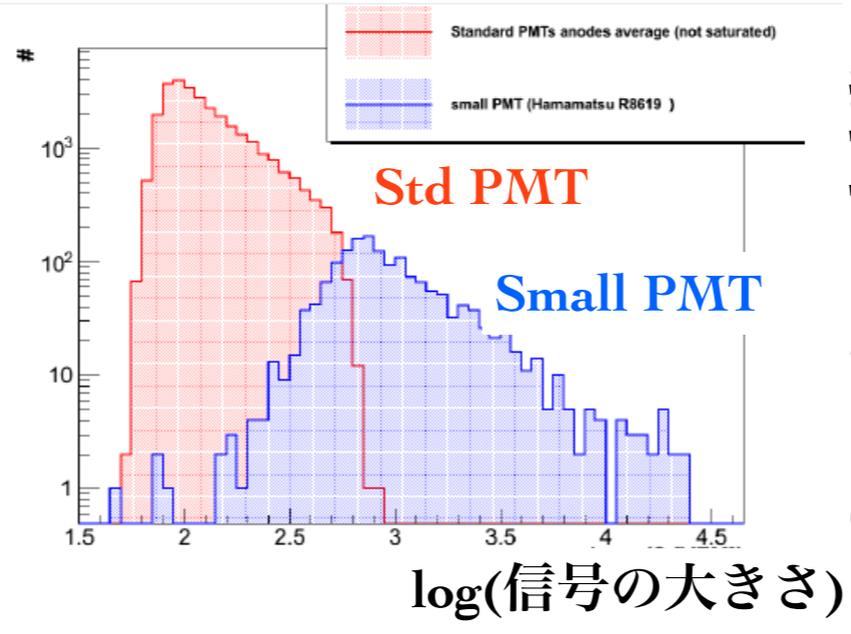
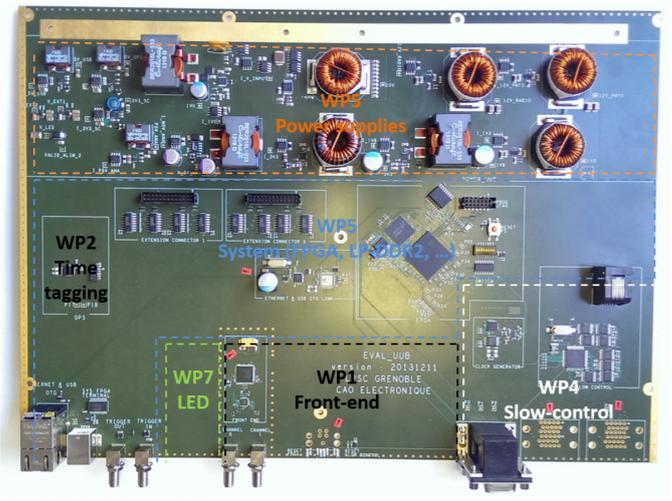
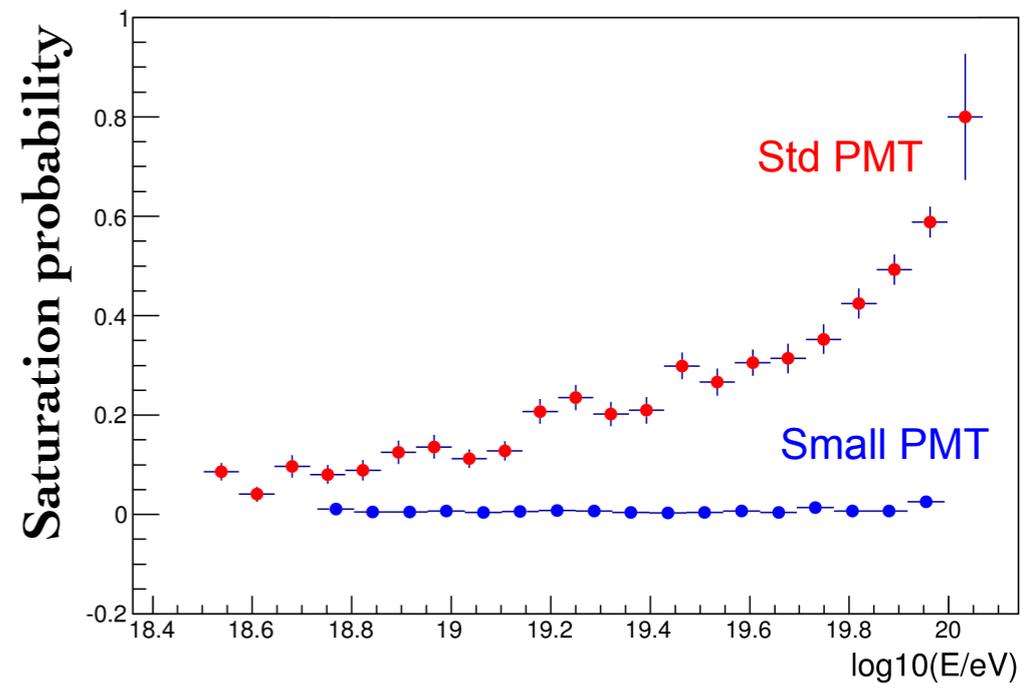
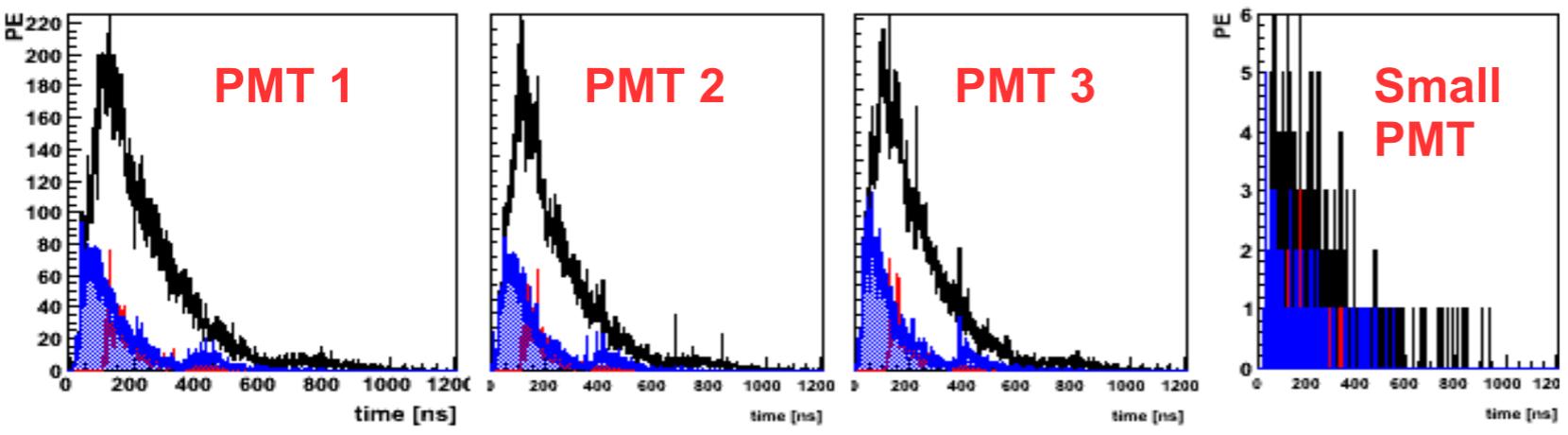


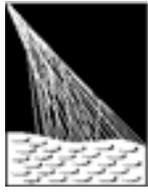
# SDE + Small PMT

- 高サンプリングレート : 40 MHz -> 120 MHz
- ミュオン識別能力を向上させ、加えて信号のダイナミックを広げる。



$10^{19}$  eVでシャワーコアから400 m





# まとめ

📌 **世界最高統計、世界最高精度での極高エネルギー宇宙線観測**

📌 スペクトルの減少、ニュートリノ、ガンマ線への強い上限値、質量数の増加、弱い近傍天体との相関、陽子-空気の散乱断面積、ミュオン数の不足。

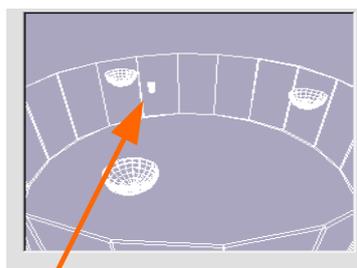
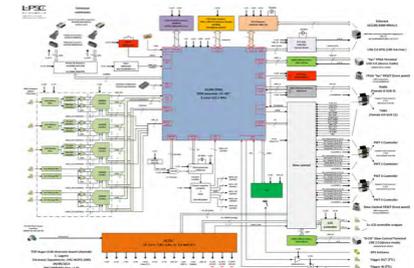
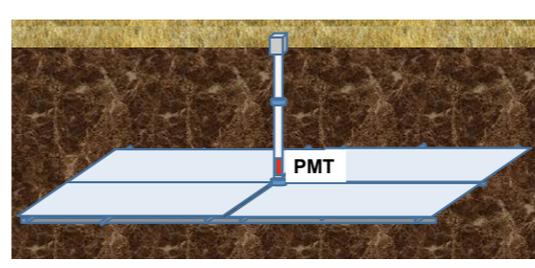
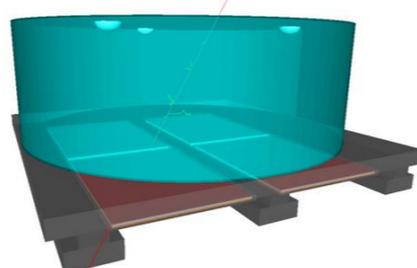
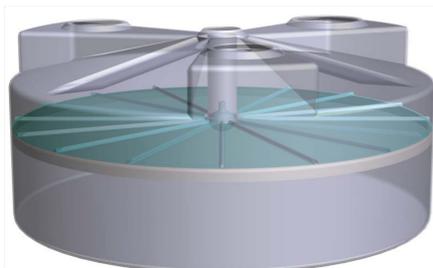
📌 **解明すべき物理**

📌 GZK機構か加速限界か、陽子の割合の精密測定、 $10^{19.7}$  eV 以上の質量組成、天体との弱い相関の原因、粒子相互作用。

📌 **Pierre Auger 拡張計画 -Beyond 2015-**

📌 空気シャワー中の電磁相互作用粒子成分とミュオン粒子成分を別々にSDで測定する。

📌 どの計画を選ぶかは2014年末までに決定予定。



# Auger 拡張計画の位置づけと今後の展望

## 極高エネルギー宇宙線の起源と性質

最も高いエネルギー領域での粒子相互作用

5 - 10年

### 地上と宇宙からの全天観測

TA×4 + Auger

**JEM-EUSO** : 宇宙から観測手法の確立、検出面積の飛躍的向上

### 検出手法のR&D

電波観測、SiPMを使った観測、簡素化FDアレイ

### 空気シャワーの精密測定

**Auger Upgrade -beyond 2015-**  
低エネルギーへの拡張  
(**TALE**、Auger infill + AMIGA)

10 - 20年

### 次世代の宇宙線観測実験

宇宙から100倍の検出面積  
地上から10倍の検出面積+精密測定