



# 最高エネルギー宇宙線観測の 現状と今後

東京大学宇宙線研究所  
木戸 英治

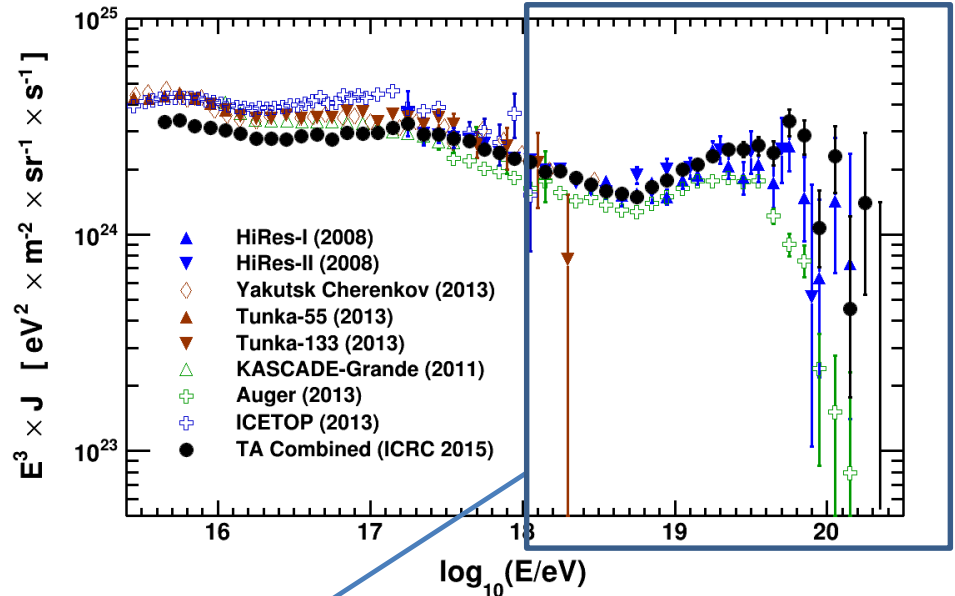
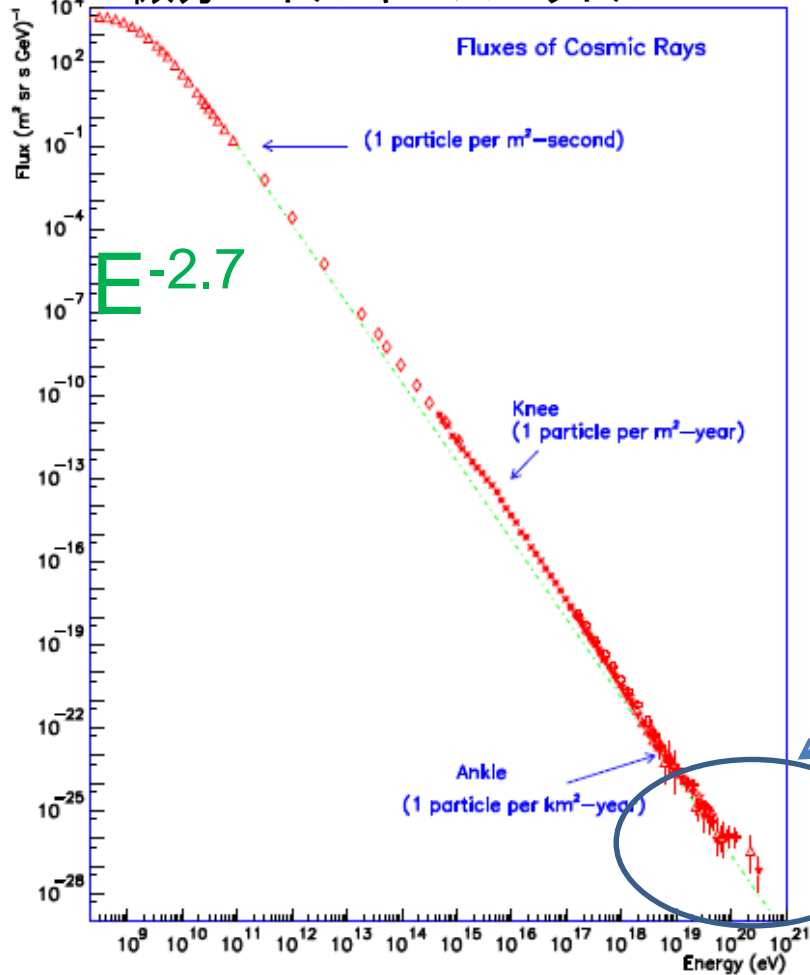


# Outline

- 最高エネルギー宇宙線観測の現状
  - Telescope Array (TA) 実験
  - Pierre Auger (Auger) 実験
- 最高エネルギー宇宙線観測の今後
  - 拡張Telescope Array (TAx4) 実験
  - Auger 実験のupgrade (AugerPrime)

# 最高エネルギー宇宙線

宇宙線の  
微分エネルギースペクトル

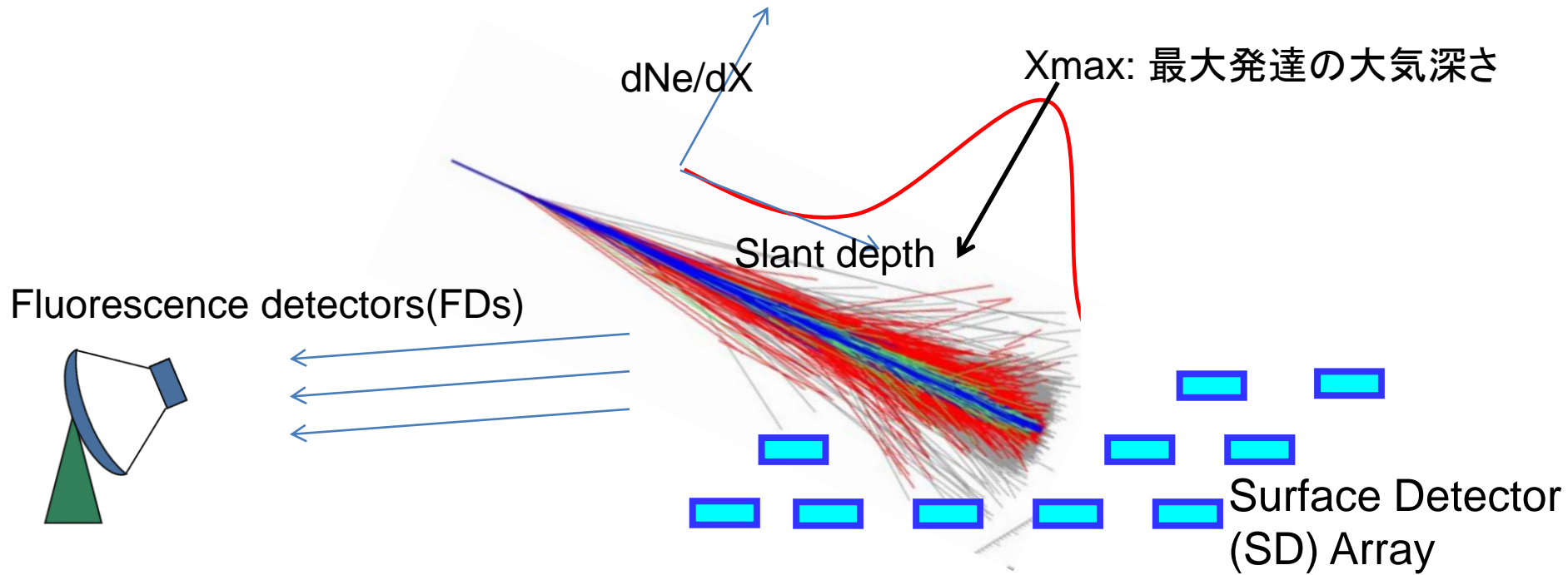


フラックス ( $E > 10^{20}$  eV):

$\sim 10^{-3} \text{ km}^{-2} \text{ sr}^{-1} \text{ yr}^{-1}$

→ 大きな検出面積が必要

# 最高エネルギー宇宙線の観測手法



地表検出器 (SD), 大気蛍光望遠鏡 (FD)

を大規模に展開し、空気シャワーを観測

→ 大きな検出面積( $\sim 1000 \text{ km}^2$ )を実現

SDの統計 $\sim 10 \times$  FDの統計 (FDは月のない夜のみ観測)



MDEF

FD station

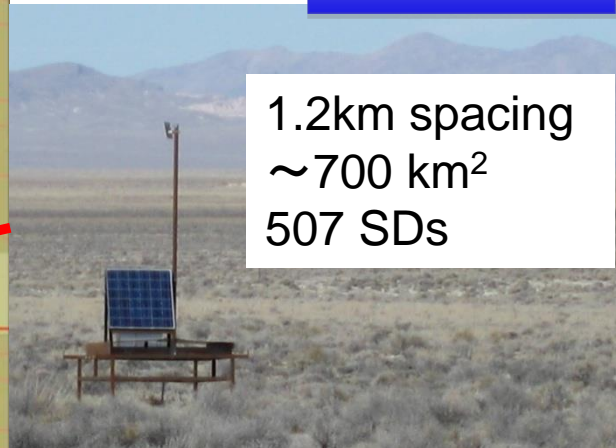
Utah, USA  
- lat. 39.30°N, long. 112.91°W

TALE  
SD array

SD array

Surface Detector  
(SD)

1.2km spacing  
~700 km<sup>2</sup>  
507 SDs



GLF

Fluorescence Detector  
(FD) station

LRFD

28km

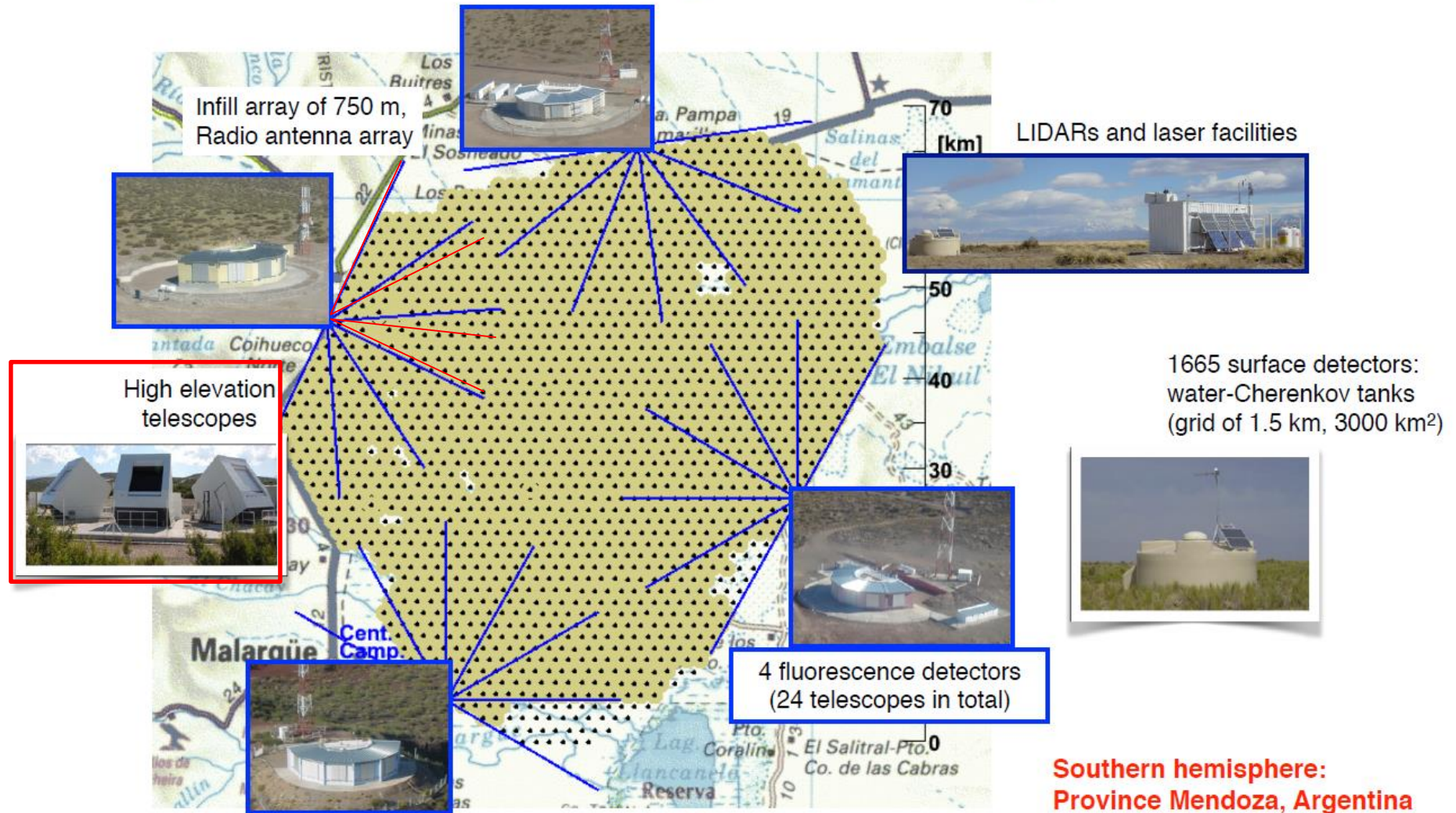
BRFD

12 telescopes



2008年5月から TA SD & FD Full operation : ~7年

# The Pierre Auger Observatory

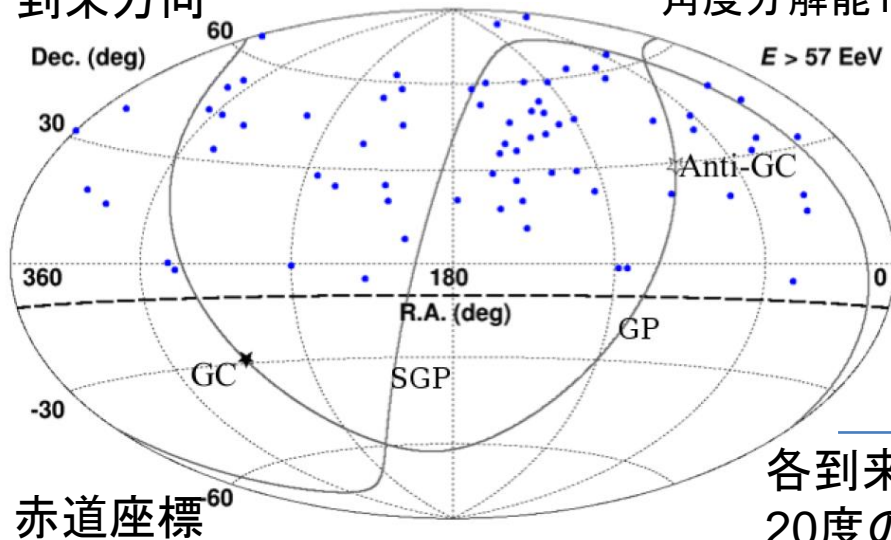


1.5 km間隔 1665台 SD: カバーする領域 ~ 3000 km<sup>2</sup>

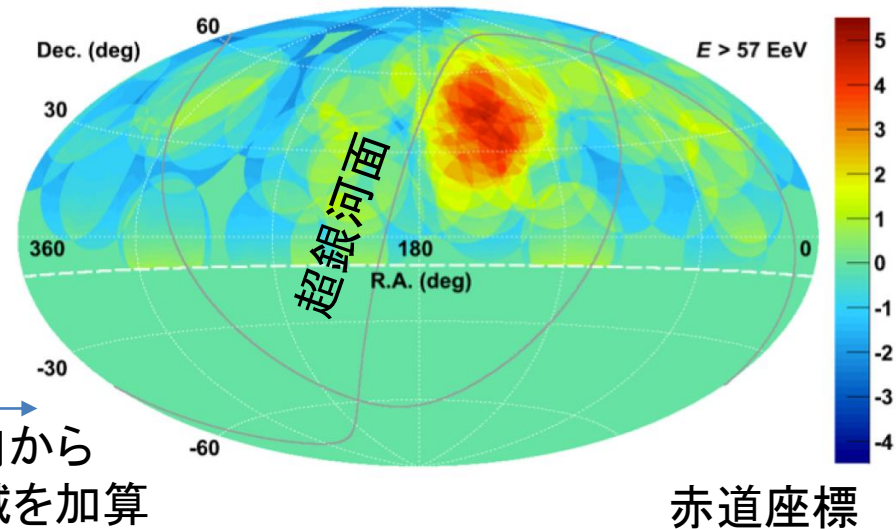
4 FD sites

# TA実験:宇宙線の到来方向における異方性 異方性の兆候の発見

$E > 57 \text{ EeV}$  (1 EeV:  $10^{18} \text{ eV}$ ) 宇宙線の  
到来方向 角度分解能1.5度



一様な到来方向からの有意度マップ



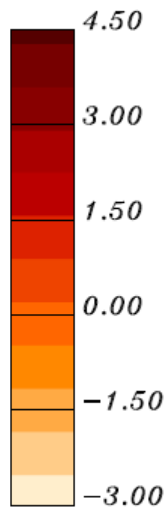
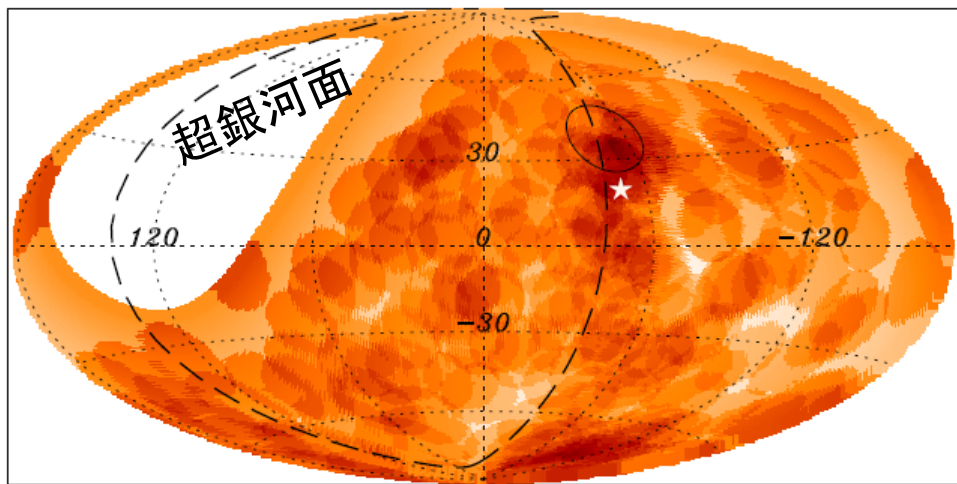
各到来方向から  
20度の領域を加算

ApJ 790, L21 (2014)

- TA実験5年間の観測 72イベント (天頂角55度以下)
- 有意度最大の方向: 赤経 146.7度 赤緯 43.2度 (“ホットスポット”)
- 観測: 19イベント, 一様分布: 4.5イベント → 有意度:  $5.1\sigma$  (Li-Ma)
- 有意度の最大が $5.1\sigma$ を超える偶然確率:  $3.4\sigma$  (0.037%)  
(15, 20, 25, 30, 35 度のサーチを含めて計算)

最高エネルギーで初めて高い有意度で異方性が観測された

# Auger 実験:宇宙線の到来方向における異方性

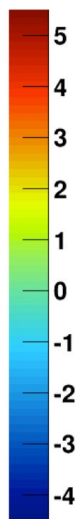
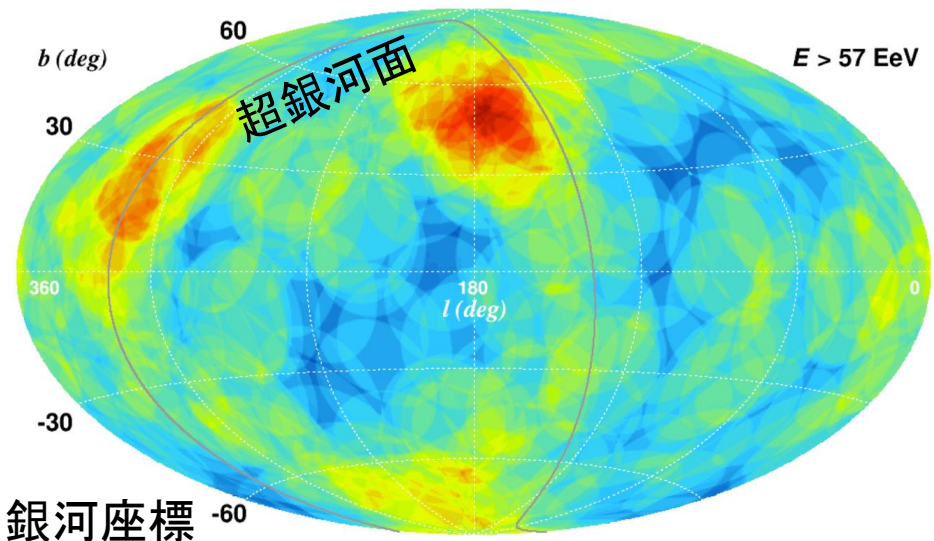


$E > 54 \text{ EeV}$   
(40-80 EeV 1 EeV step)  
各到来方向から12度  
(1-30度 search 1度 step)

有意度: 最大 $\sim 4.3\sigma$  pretrial  
方向: 赤経 198度 赤緯 -25度  
Post trial probability: 69%  
No significance

A. Aab et al.,  
ApJ, 804, 15 (2015)

TA 6年間 87イベント  
Auger 10年間 158イベント  
 $E > 57 \text{ EeV}$

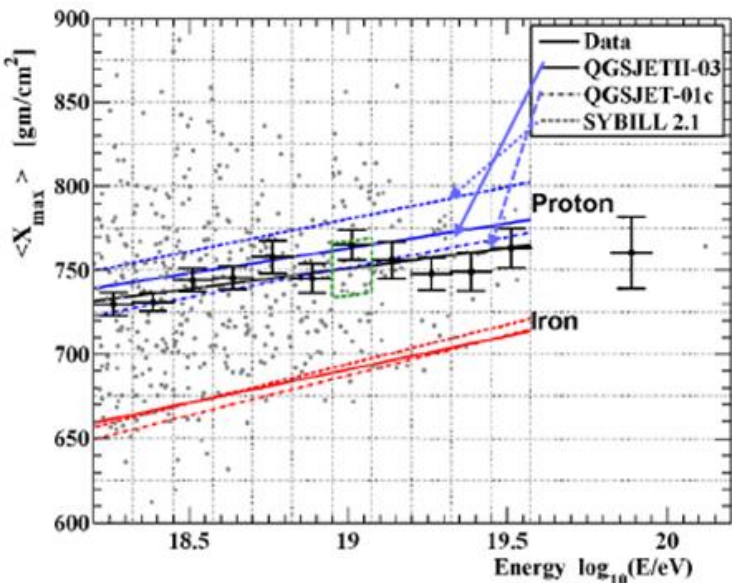


銀河座標



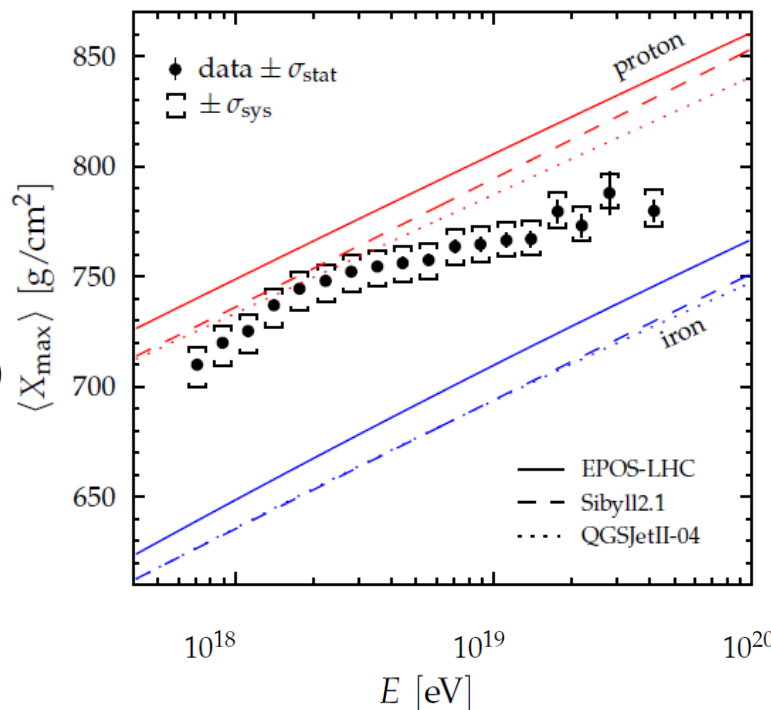
# Xmaxを用いた宇宙線の組成解析

TA実験: 平均Xmax



APP  
64 (2015)  
49-62

Auger実験: 平均Xmax



PRD 90  
(2014)  
122005

Consistent with light composition

Poor statistics beyond  $10^{19.5}$  eV

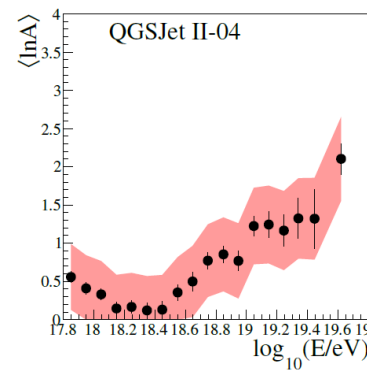
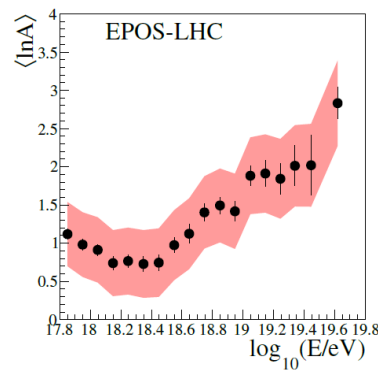
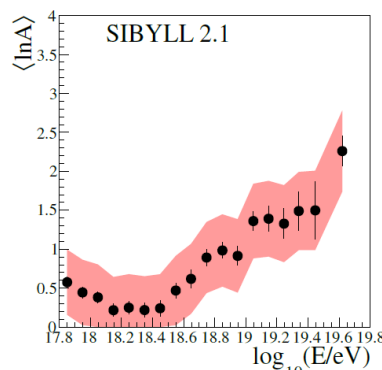
Auger実験:  
平均Xmax:

+13 g/cm<sup>2</sup> at  $10^{18}$  eV ~

+6 g/cm<sup>2</sup> at  $10^{19.5}$  eV

Updated at ICRC2013

高エネルギーで重くなる傾向

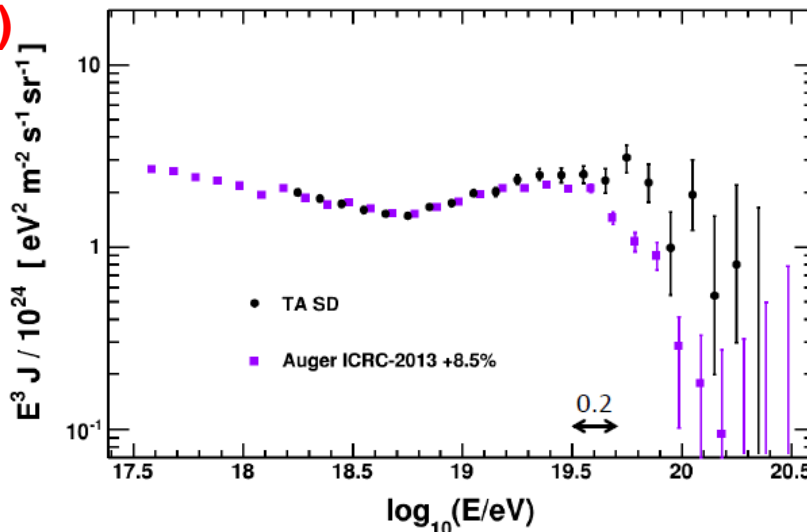
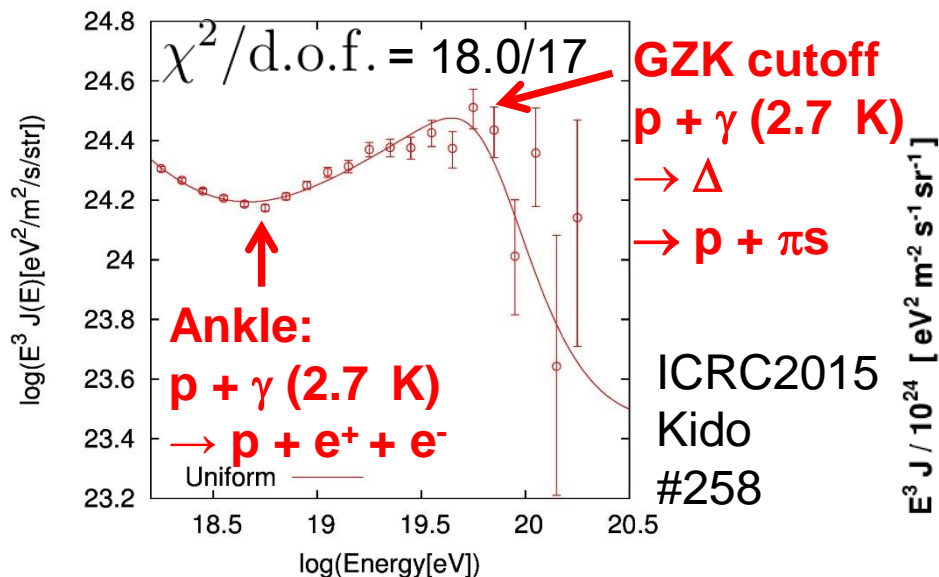


← Fe  
← N  
← He  
← P

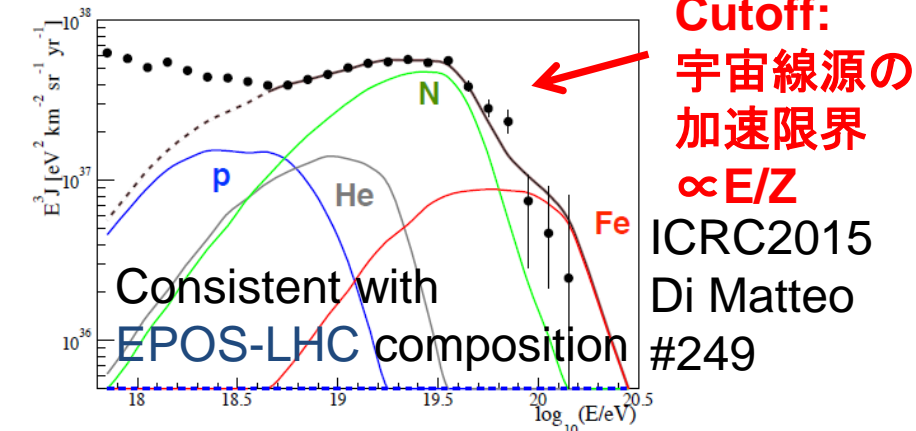
# エネルギースペクトル

TA実験: エネルギースペクトル  
銀河系外陽子起源モデルとの比較

Comparison of TA and Auger (+8.5%) spectra

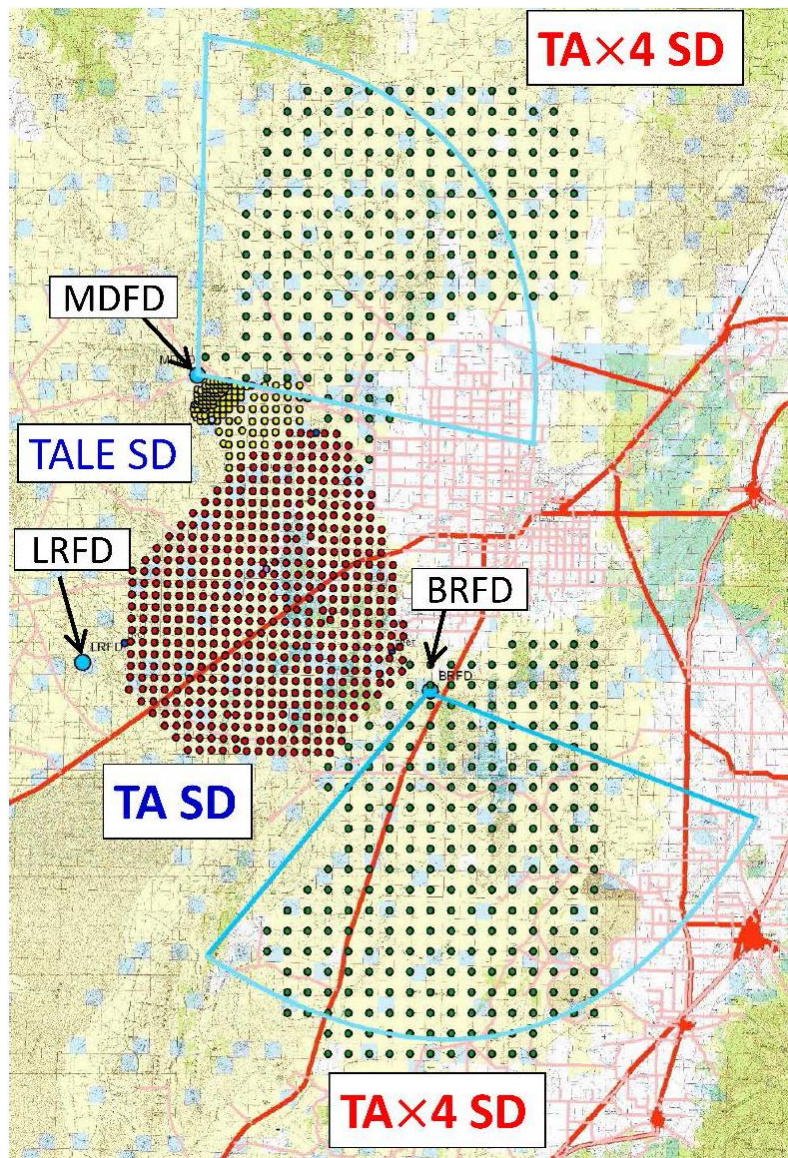


Auger実験: エネルギースペクトル



最高エネルギー ( $E > 10^{19.5} \text{ eV}$ )  
のsuppressionの特徴は一致していない  
**Suppressionの特徴を除いて一致**  
(エネルギースケールの系統誤差:  
TA実験: 21%, Auger実験: 14%)

# TAx4実験



ホットスポット(TA実験 5年  
:3.4 $\sigma$ )の**確証** → **5 $\sigma$  以上**  
→ TA実験 約20年分の統計

500台、2.08 kmのspacingで  
TA SDの**約3倍**(約2100 km<sup>2</sup>)を  
カバーする拡張SDアレイ  
TA SDと合わせて約**3000 km<sup>2</sup>**を  
カバー(full operation:2017年12月-)  
→**2020年度**までに

**TA SD 19年分のデータ取得**  
**2015年4月 科研費獲得**

# Auger実験のupgrade (AugerPrime)



4 m<sup>2</sup> 厚み1cm  
プラスチックシンチレータ

Auger 水タンク

ICRC 2015  
Engel #686

SDの統計～10×FDの統計

水タンクSDにプラスチックシンチの追加:

空気シャワー中の電磁成分、ミュオン成分を分ける

→SDのみを用いて、Xmax、ミュオン数などを測定

宇宙線の組成を区別する方法を研究開発

→ 高統計で最高エネルギーの宇宙線組成 (観測: 2018年-)

# まとめ

- TA実験: 宇宙線の到来方向に異方性の兆候の観測 ( $3.4\sigma$ ) (赤経 146.7度 赤緯 43.2度)  
→異方性の起源を探るためにTAx4の建設  
2015年4月に科研費が認められ、  
今年度中に建設開始
- Auger実験:  
最高エネルギーの組成が、重い原子核になる傾向  
→ 水タンクSDにプラスチックシンチレータを乗せて、  
SDによる宇宙線組成の測定の研究  
→最高エネルギーの宇宙線の組成を観測