

最高エネルギー 宇宙線観測の現在

*Current Status of Observational Astrophysics
of Ultra-High Energy Cosmic Rays*



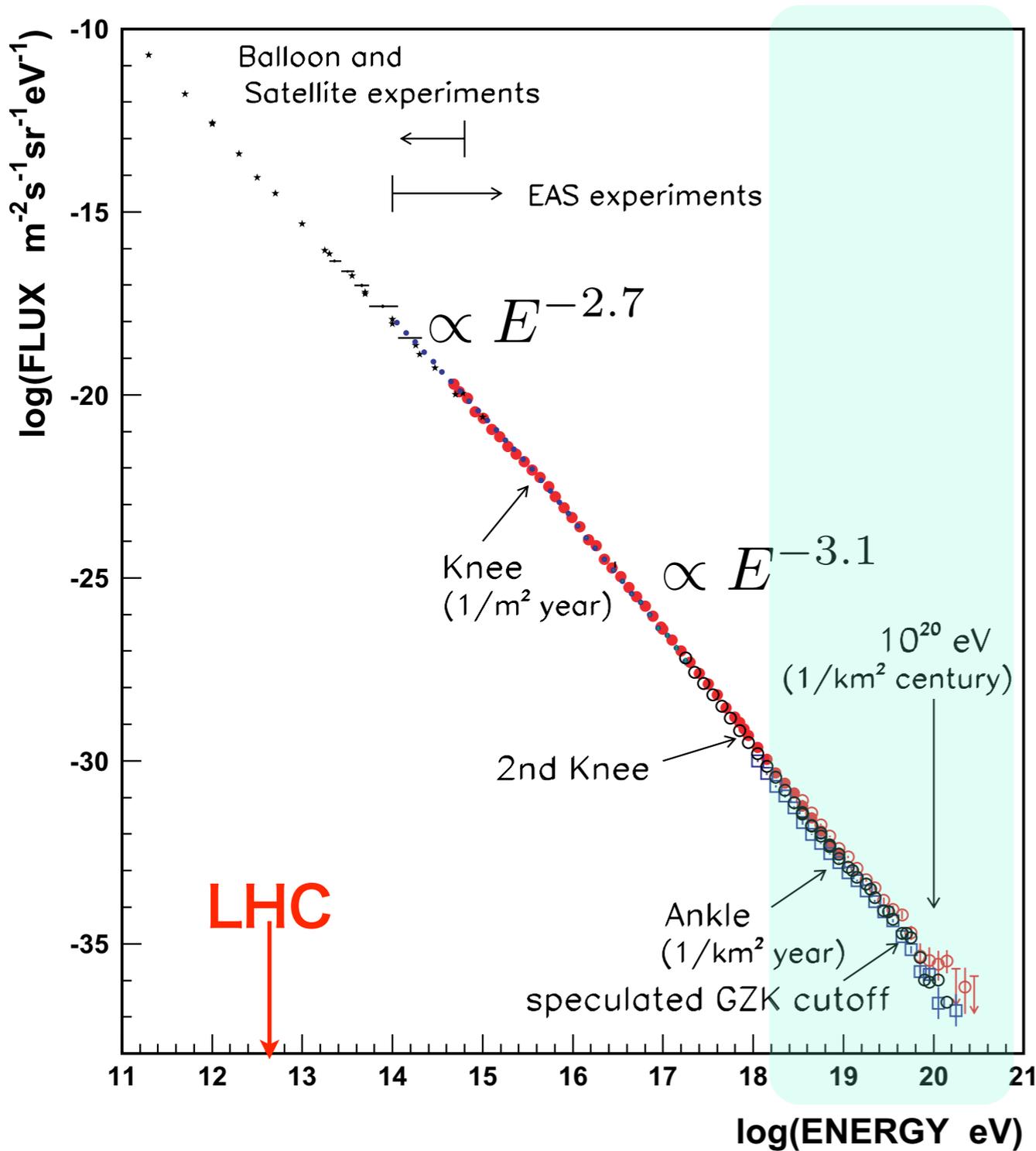
東京工業大学

常定 芳基

2010年11月16日 「ガンマ線天文学～日本の戦略～」 東京大学宇宙線研究所

「最高エネルギー宇宙線」

(最近は「超高エネルギー宇宙線」(UHECRs) という方が多い)



M. Nagano, New J. Phys., 11 065012 (2009)

• $E > 10^{18} \text{ eV}$

• 動機

• 存在そのものが謎、面白い

- 起源：加速？ (bottom-up) それとも？ (top-down)
- 伝播：なぜここまで到達して観測できる？ またはできない？ エネルギー損失、異方性？

• 「粒子線天文学」の可能性

• 観測的難しさ

• 到来頻度が小さい：大面積、長い観測時間

• 空気シャワー観測

- 超高エネルギー相互作用
- 大気等もろもろの影響

最高エネルギー宇宙線：一般的描像

銀河外起源？

- ★ $E > 10^{18}$ eV は μG 磁場では閉じ込められない
- ★ 銀河内では加速できそうな天体が見当たらない、考えつかない
- ★ 銀河面への大きな異方性はない

どこかで銀河系宇宙線から銀河外起源宇宙線への主成分遷移

地球まで到達できるもののエネルギーには限界？

- ★ CMBとの相互作用によるエネルギー損失 (GZK cut-off scenario)

陽子が主成分？

- ★ 中間質量・重原子核はCMB・赤外背景放射との相互作用で壊れる (photo-disintegration)

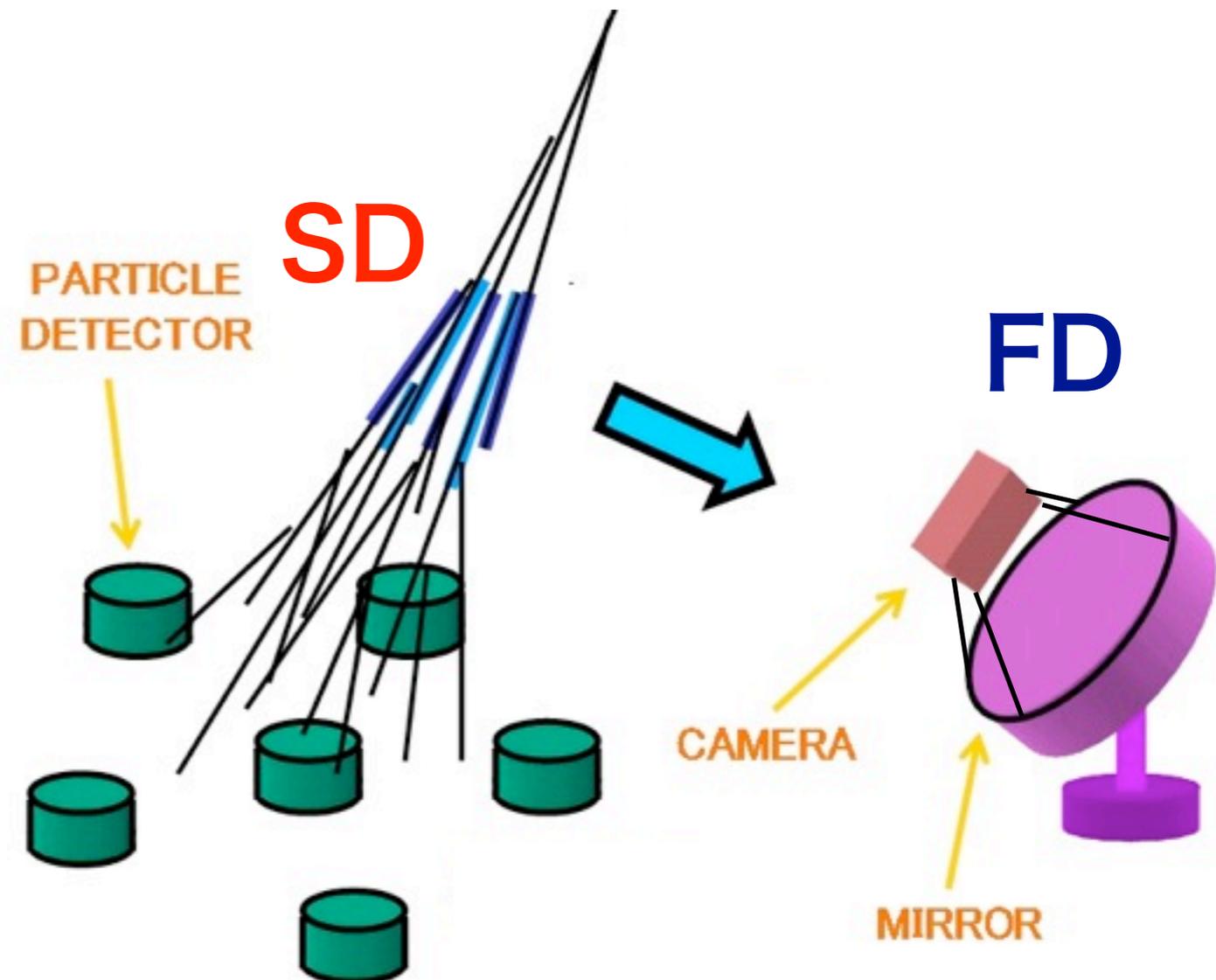
宇宙線観測：空気シャワー観測手法

・地表検出器アレイ (SD)

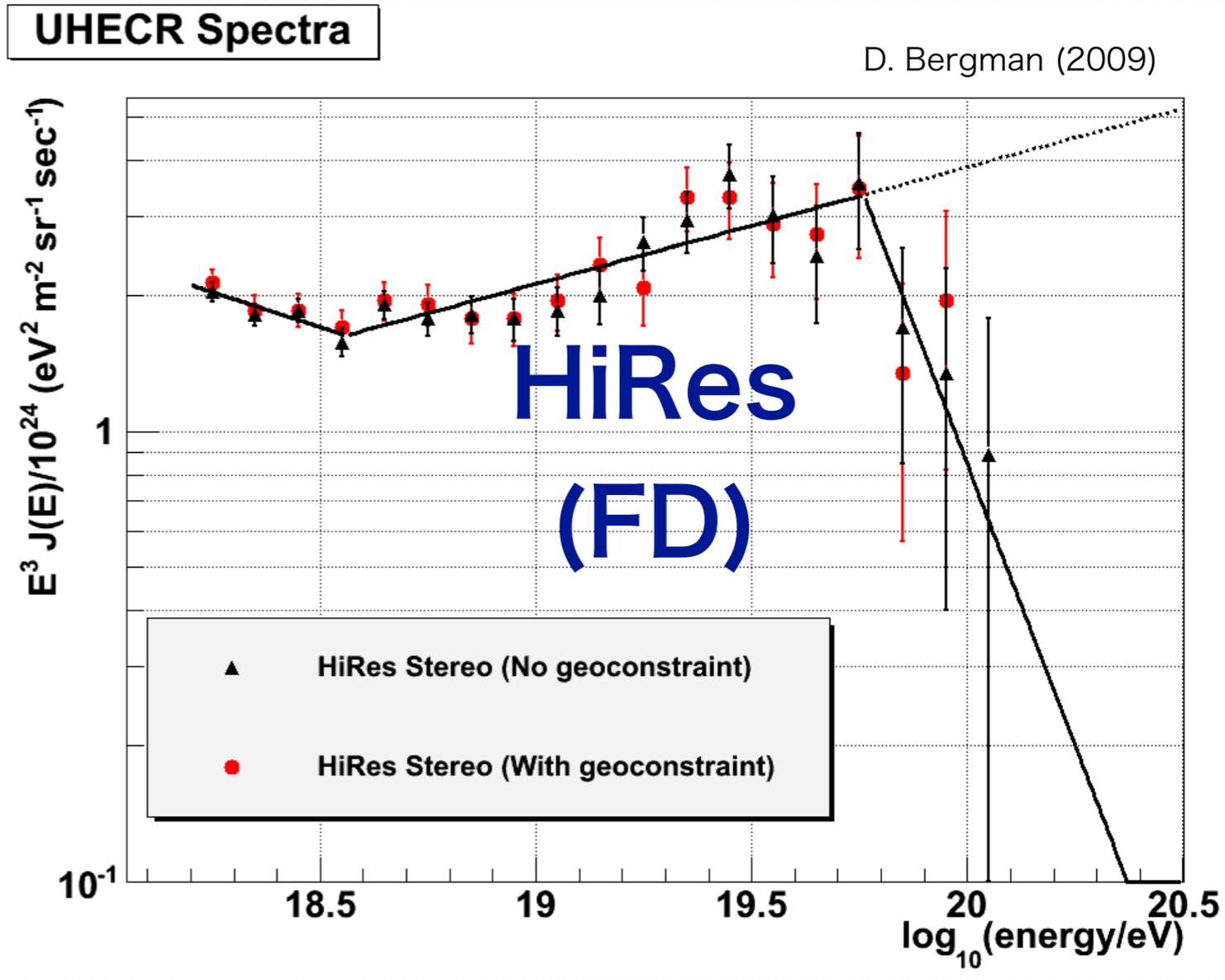
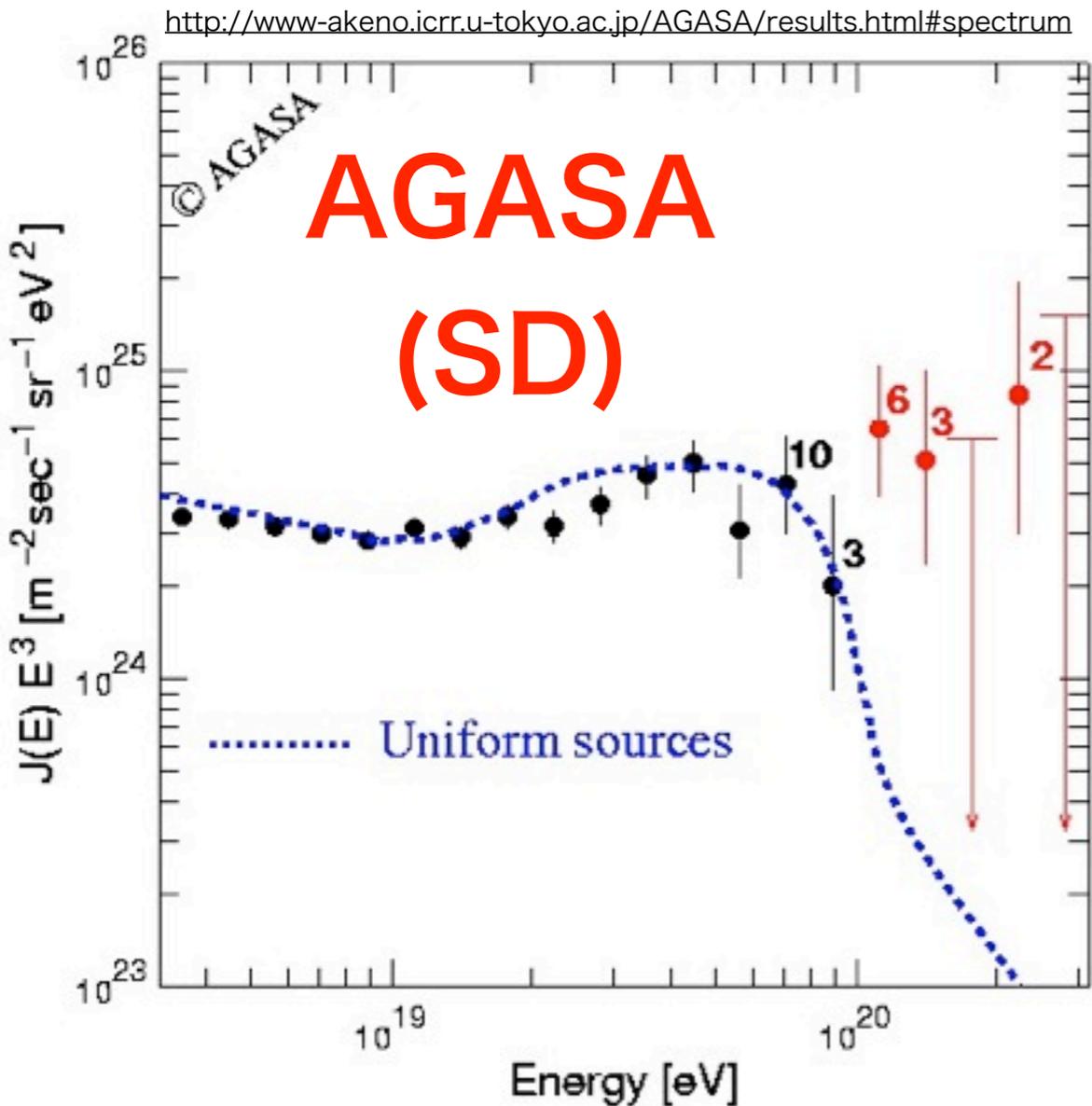
- Traditional：シャワー粒子をそのまま捕まえる
- ネット
 - ・相互作用が完全にはわかっていない：MC/モデル依存
- Linsleyグループ、Haverah Park, Yakutsk, AGASA

・大気蛍光望遠鏡 (FD)

- 空気シャワーの「写真撮影」
- 大気カロリメータ
- ネット
 - ・大気状態の影響
 - ・大気発光効率 (Fluorescence yield)
- Fly's Eye, HiRes



AGASA & HiRes



• スペクトルは一致しなかった

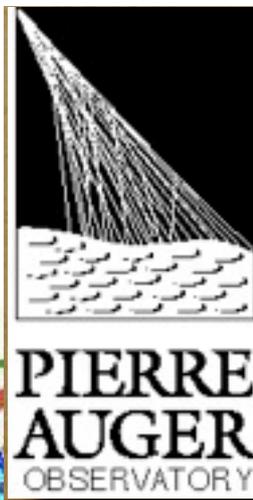
• エネルギースケール：AGASAは高め、HiResは低め (~15%)

• スペクトルの形 ($E > 10^{19.7}$ eV)

• 観測方法の違い (SD/FD)

---> 同時観測/ハイブリッド実験の必要性 ---> **Auger, TA**

Pierre Auger Observatory



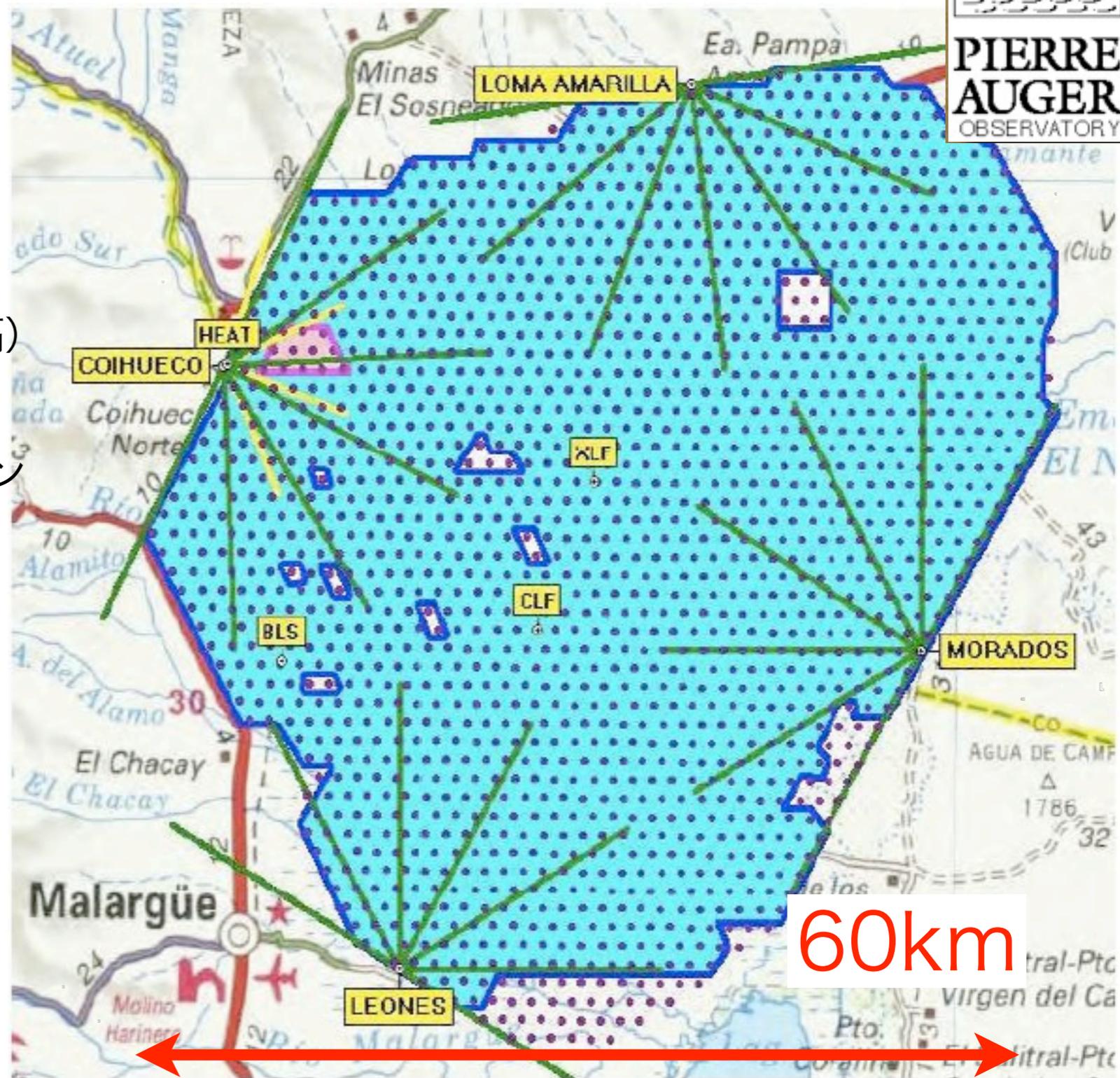
• アルゼンチン

• SD: 1,600

(水チェレンコフタンク, 1.5km間隔)

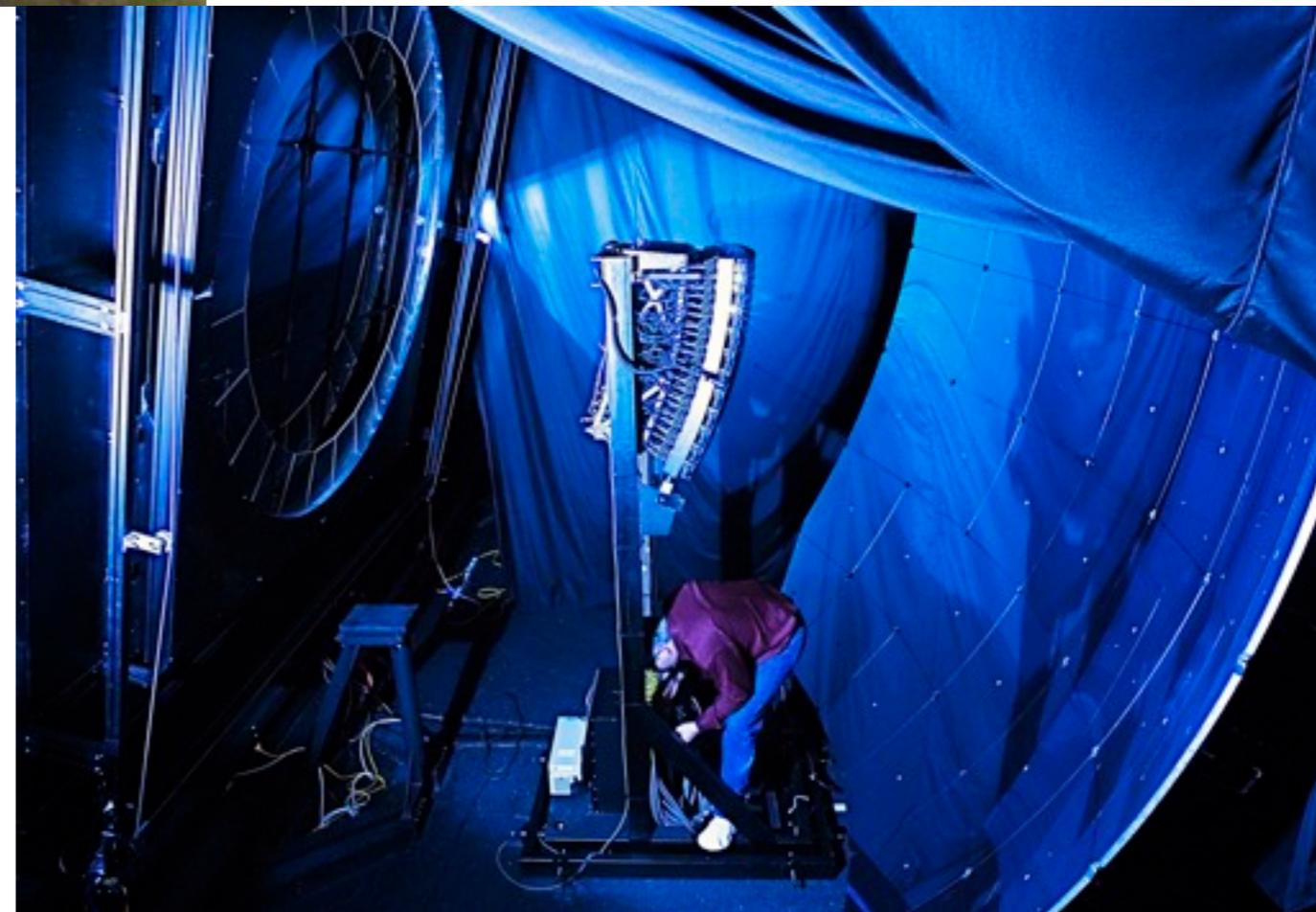
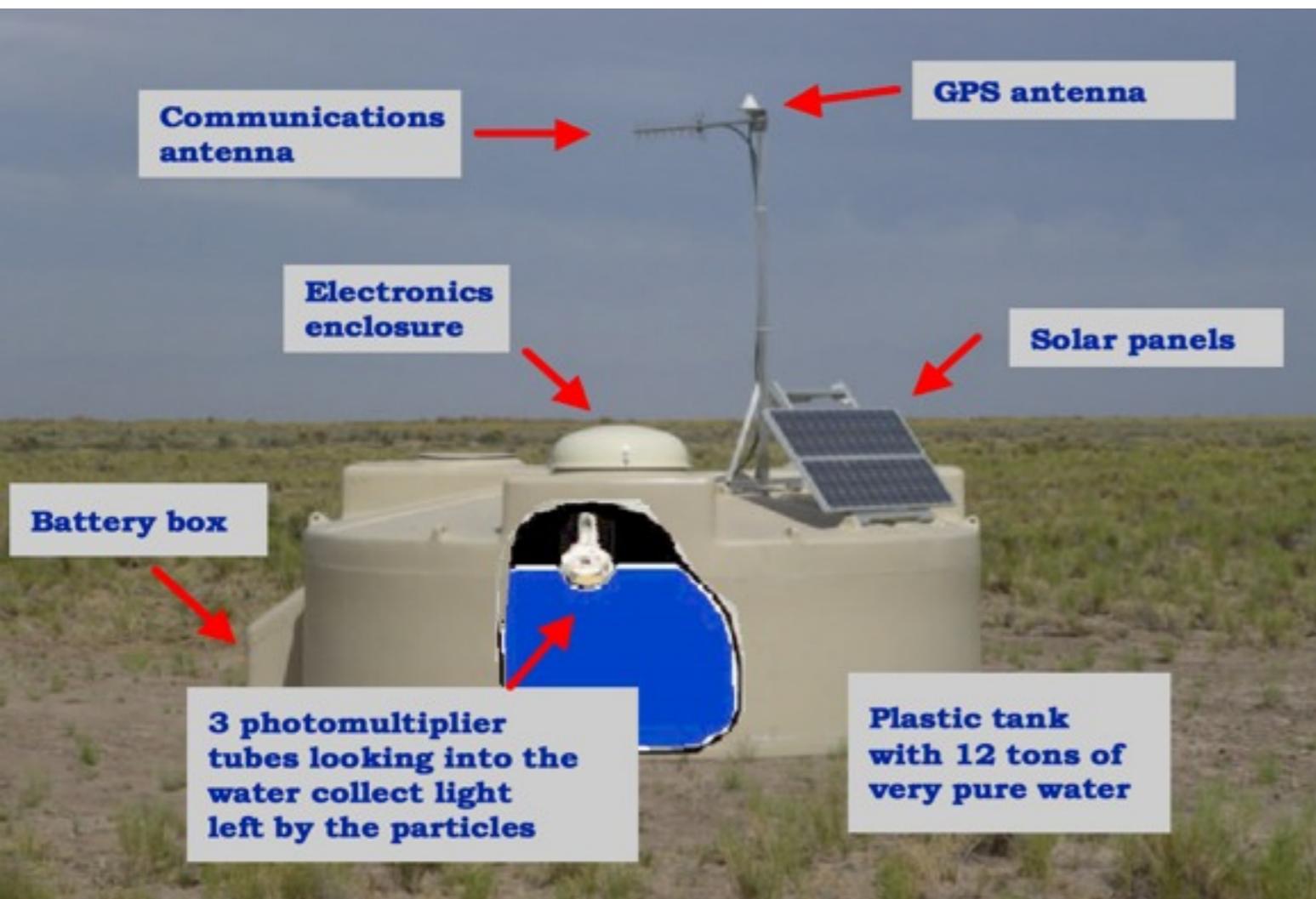
• FD: 24 台 in 4ステーション

• 2004~



• (北半球にも作る計画が、、、どうなる?)

Auger SD/FD



Telescope Array



• 米国ユタ州

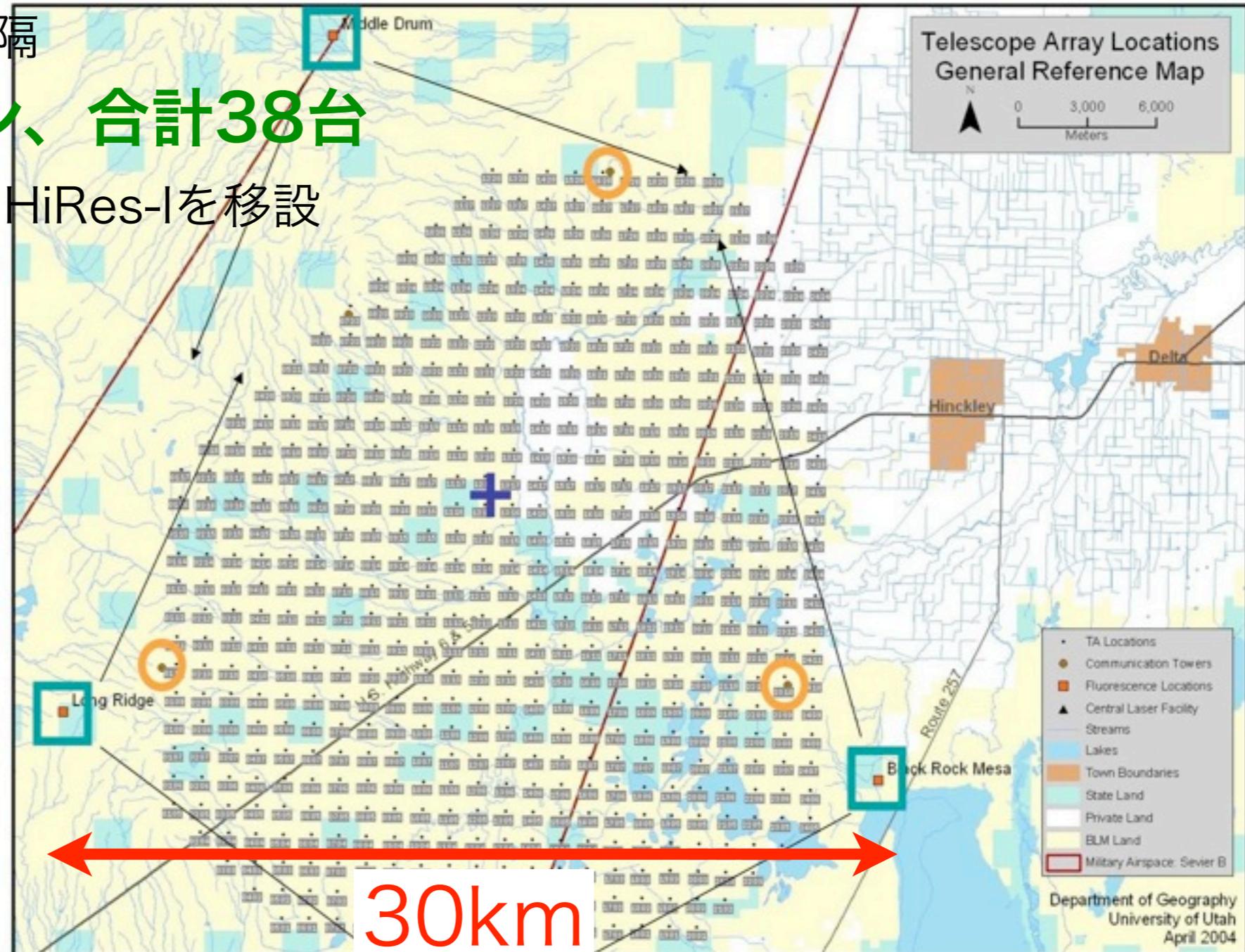
• SD: シンチレーション検出器507台

• AGASA型、1.2km間隔

• FD: 3ステーション、合計38台

• うち1ステーションはHiRes-Iを移設

• 観測：2008~

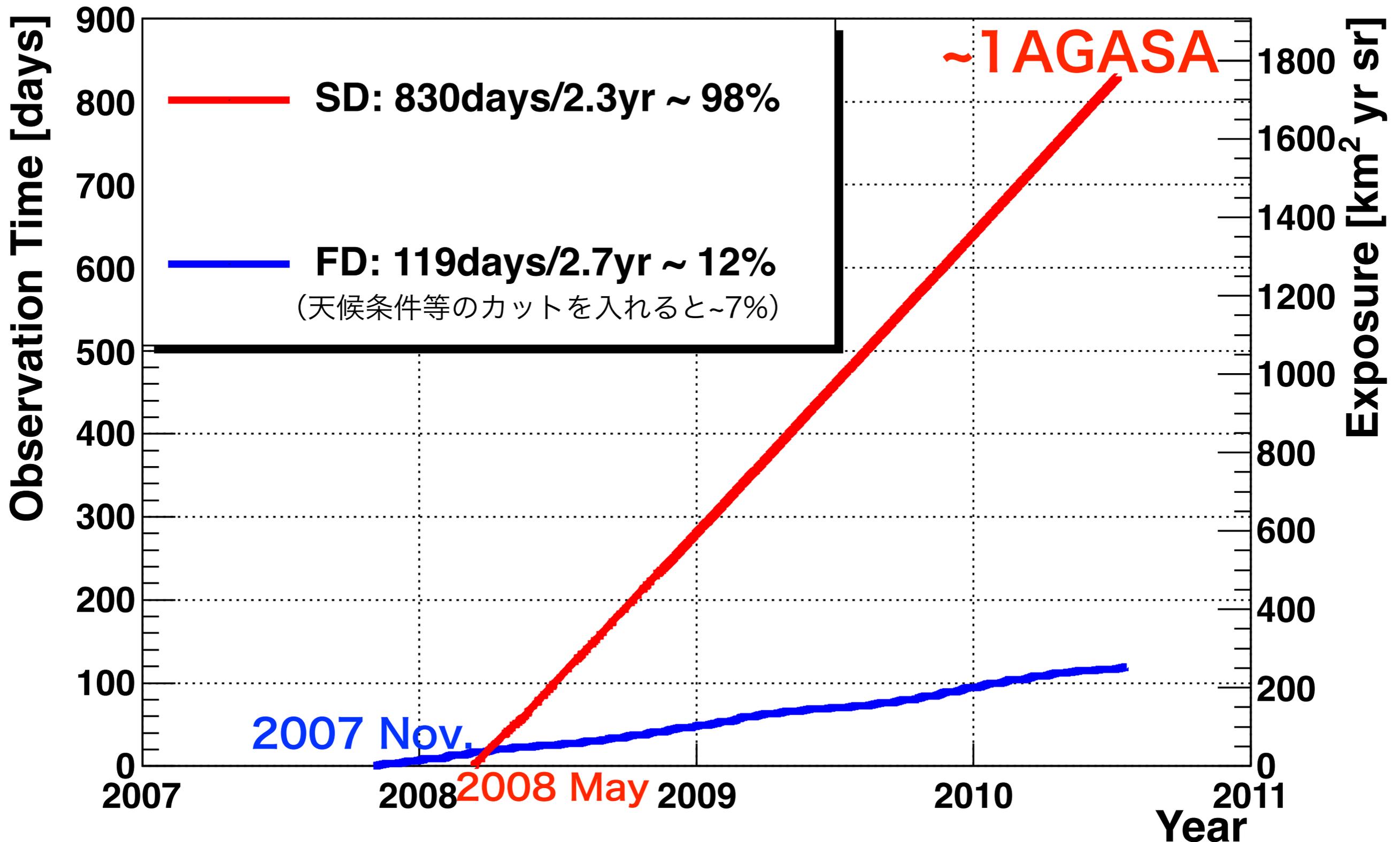


TA SD/FD



TA観測/Exposure

2007年11月 ~ 2010年前半まで



最近の観測結果 Auger/TA

エネルギースペクトル

原子核組成

- 空気シャワーの縦方向発達から
- イベントごとの核種判別ではなく、統計的に「重いか軽いか」

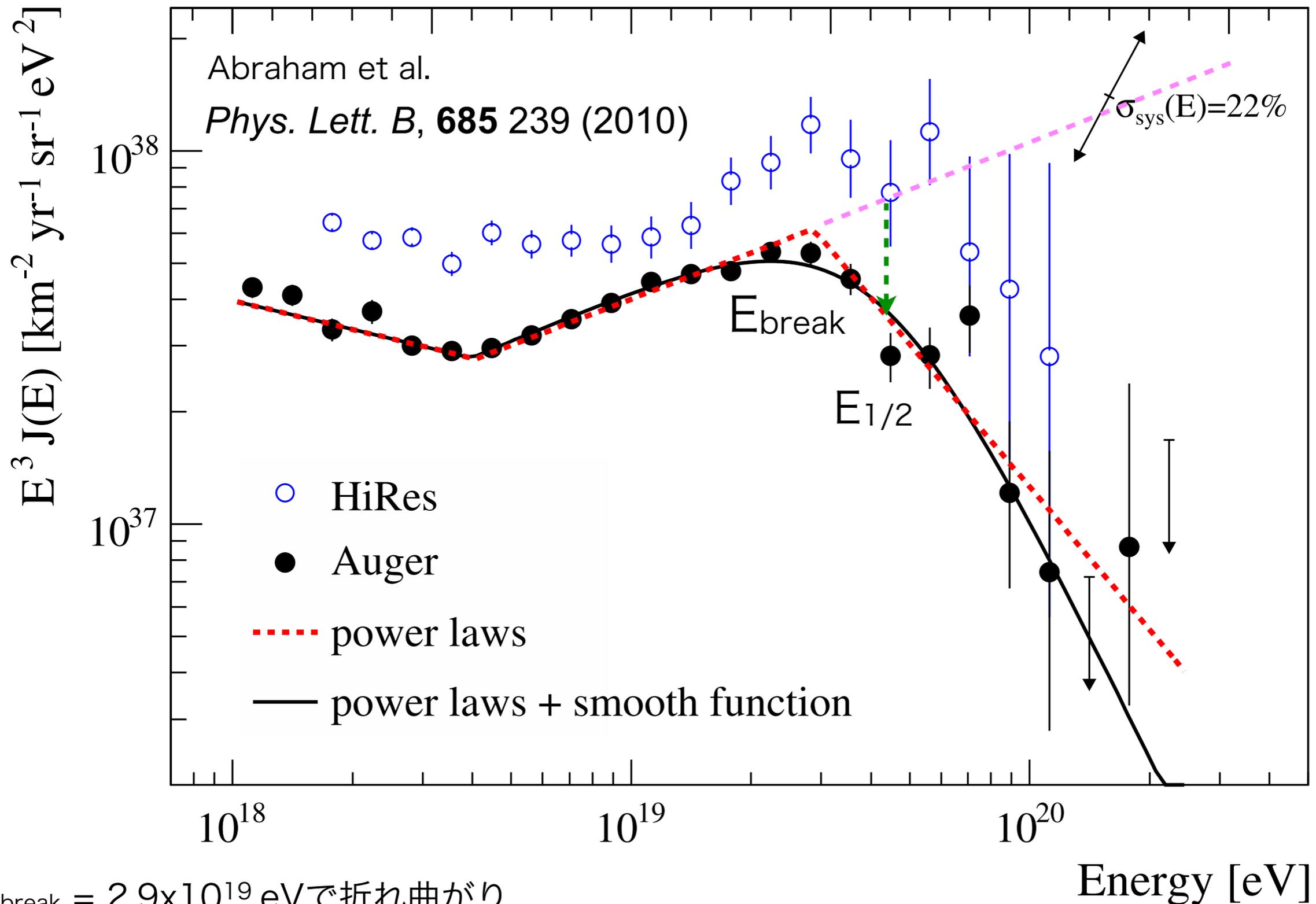
到来方向分布の異方性

- カタログ天体との相関？
- 特定方向、天体付近の集中？
- イベントクラスタリング？

結果はあるがここでは触れない

- 光子成分
- ニュートリノ

Auger エネルギースペクトル

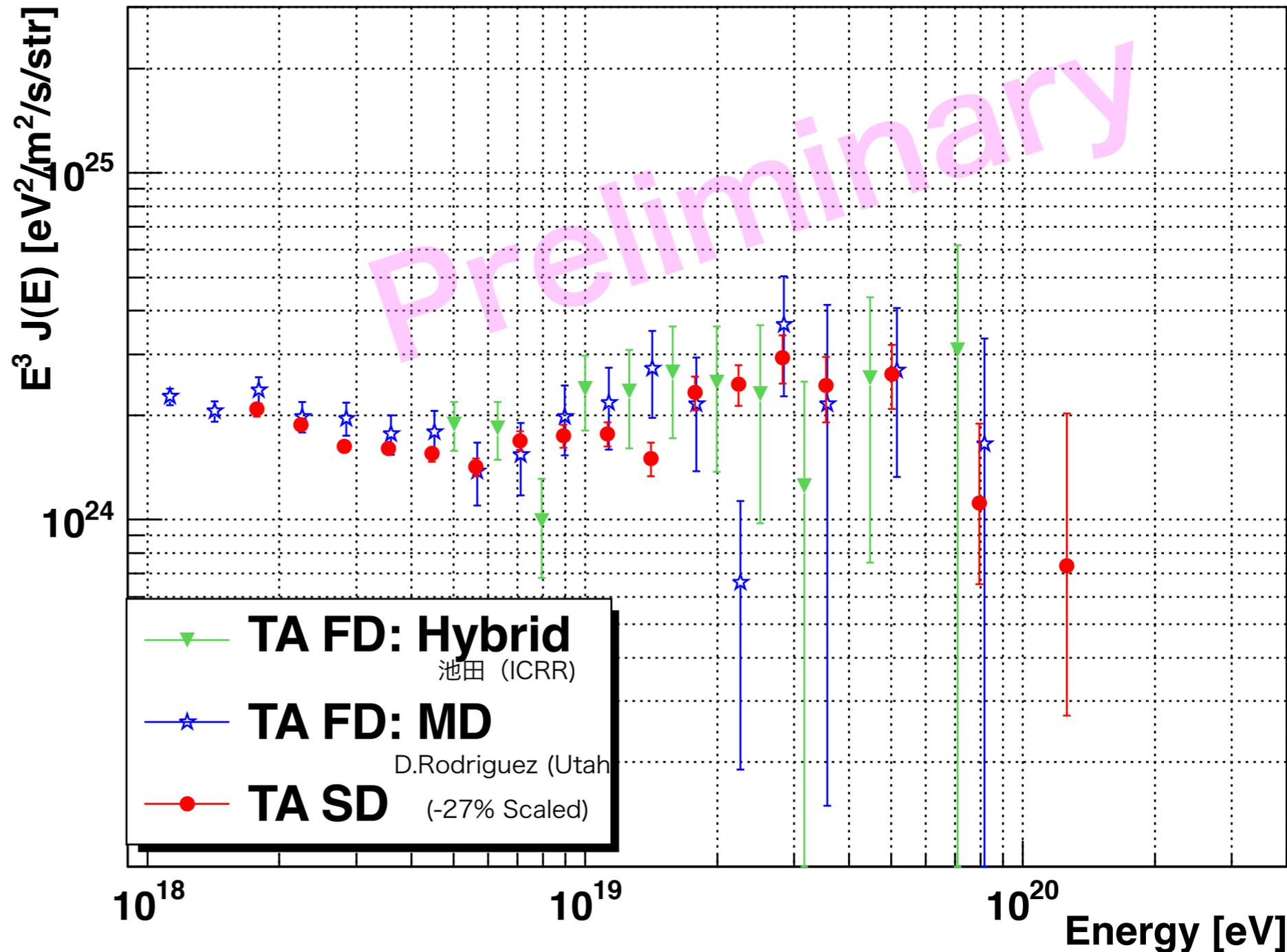


- $E_{\text{break}} = 2.9 \times 10^{19}$ eV で折れ曲がり
- $E_{1/2} = 4 \times 10^{19}$ eV : Power-law をそのまま延ばしたときの期待値の半分の数になるエネルギー
- HiRes とのエネルギーの違いは ~20% : 系統誤差の範囲ではある

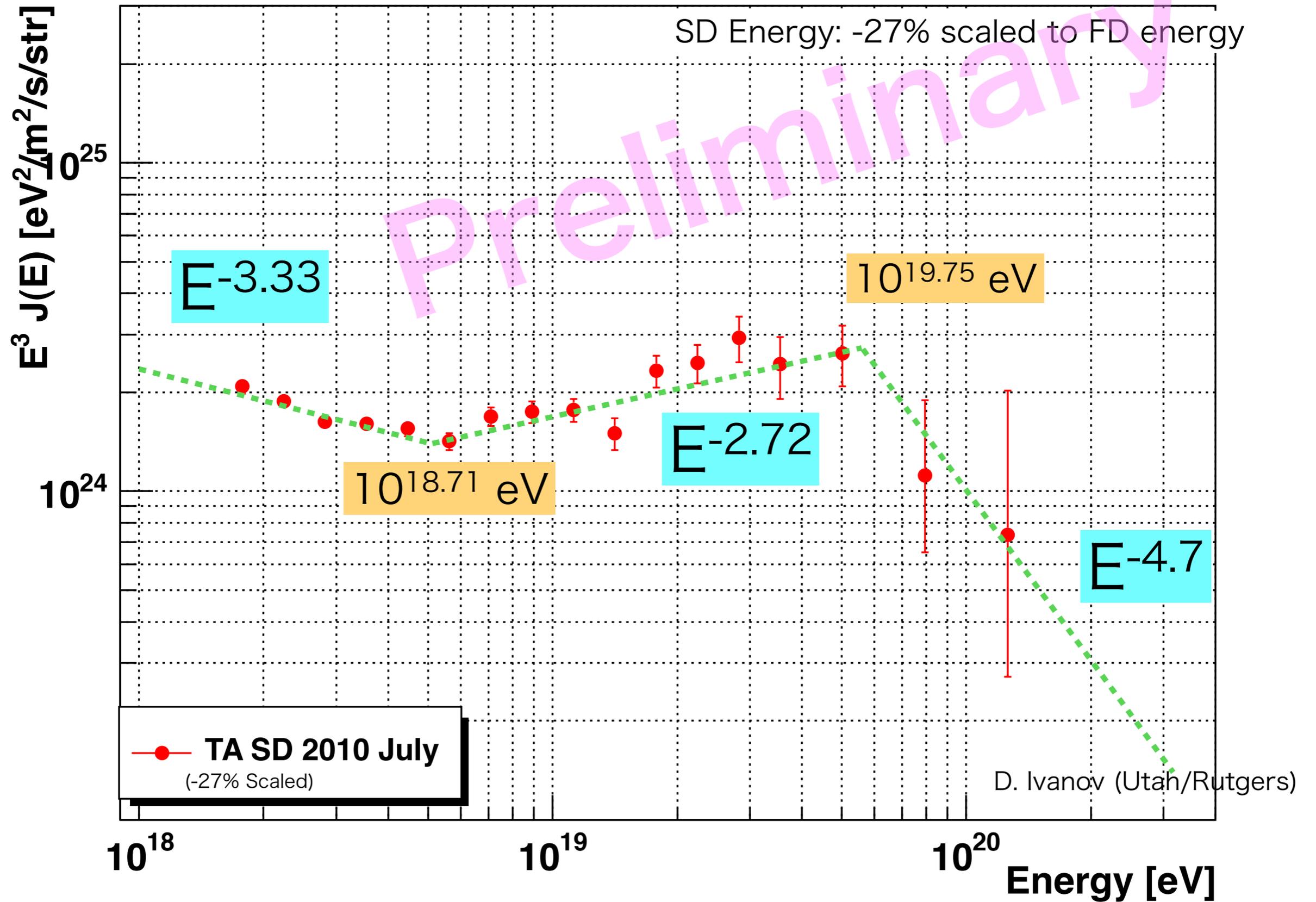
TAエネルギースペクトル

- TA-MD: HiRes-Iと同じ検出器、同じ解析プログラム HiRes/TAは再現性があり、比較可能な実験である
- TA Hybrid: SD/FD (TA検出器) 両方でトリガーされたイベント。SD+FDでシャワー軸をよい精度で決定し、FDでエネルギー推定

• TA-SD: AGASAと同程度の統計量。ハイブリッドイベントを用いて得たSDとFDの平均的エネルギー差を使い、FDのエネルギーにスケール。

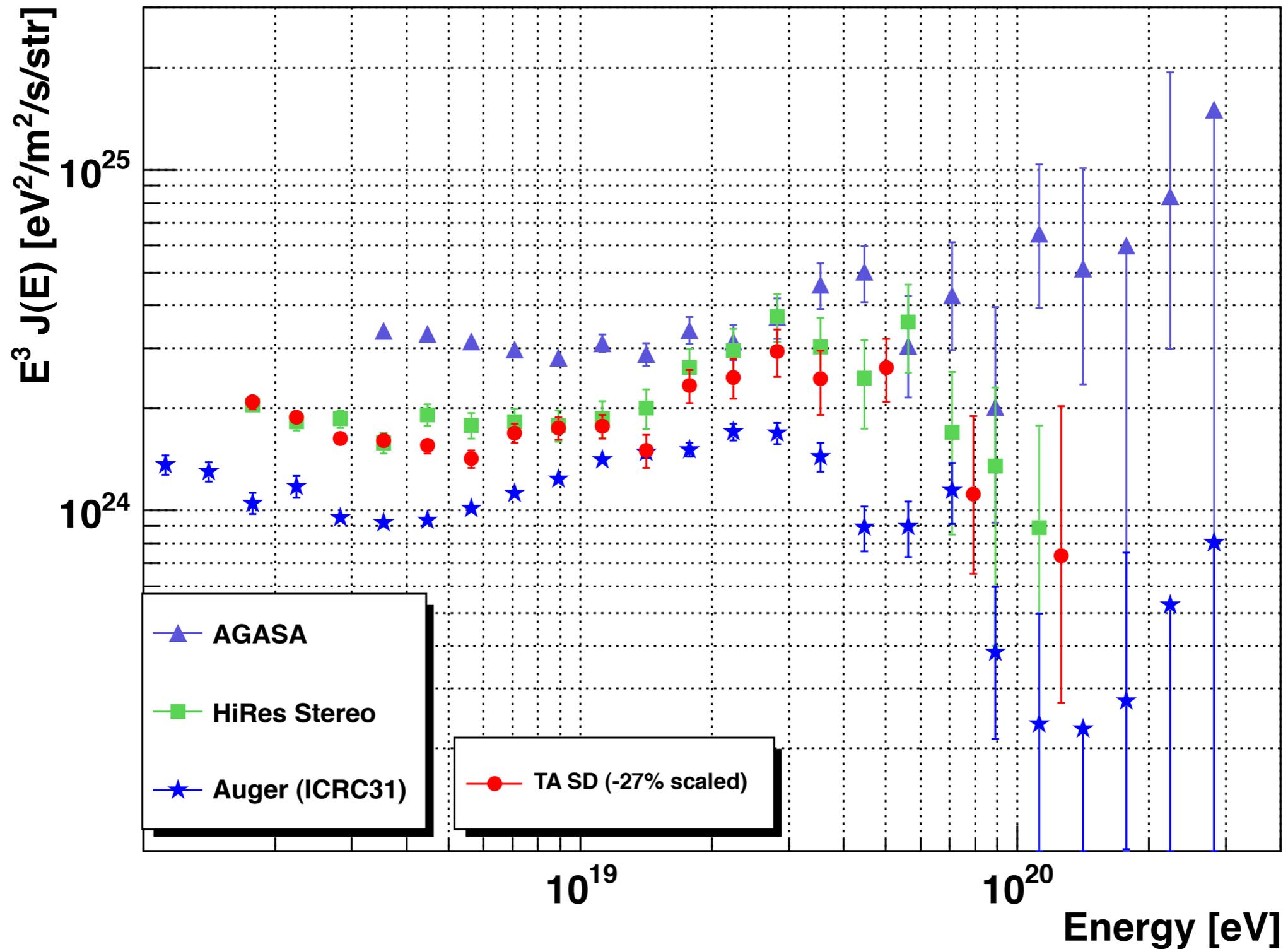


TA-SD スペクトル



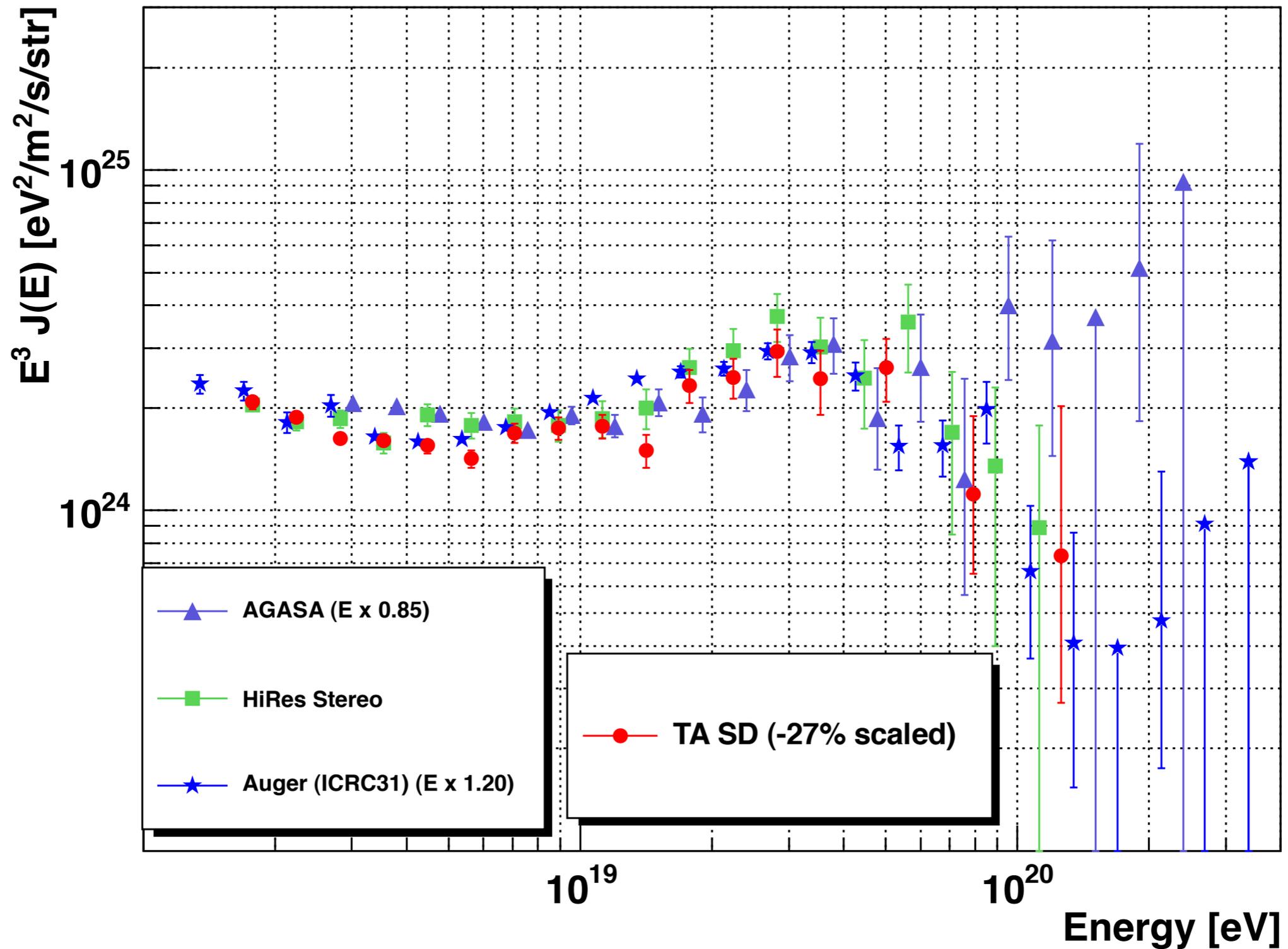
AGASA/HiRes/Auger/TA

UHECR Spectra : $E^3 J(E)$



AGASA/HiRes/Auger/TA

UHECR Spectra : $E^3 J(E)$



UHECRの“組成”

シャワーの最大発達点 X_{max} から

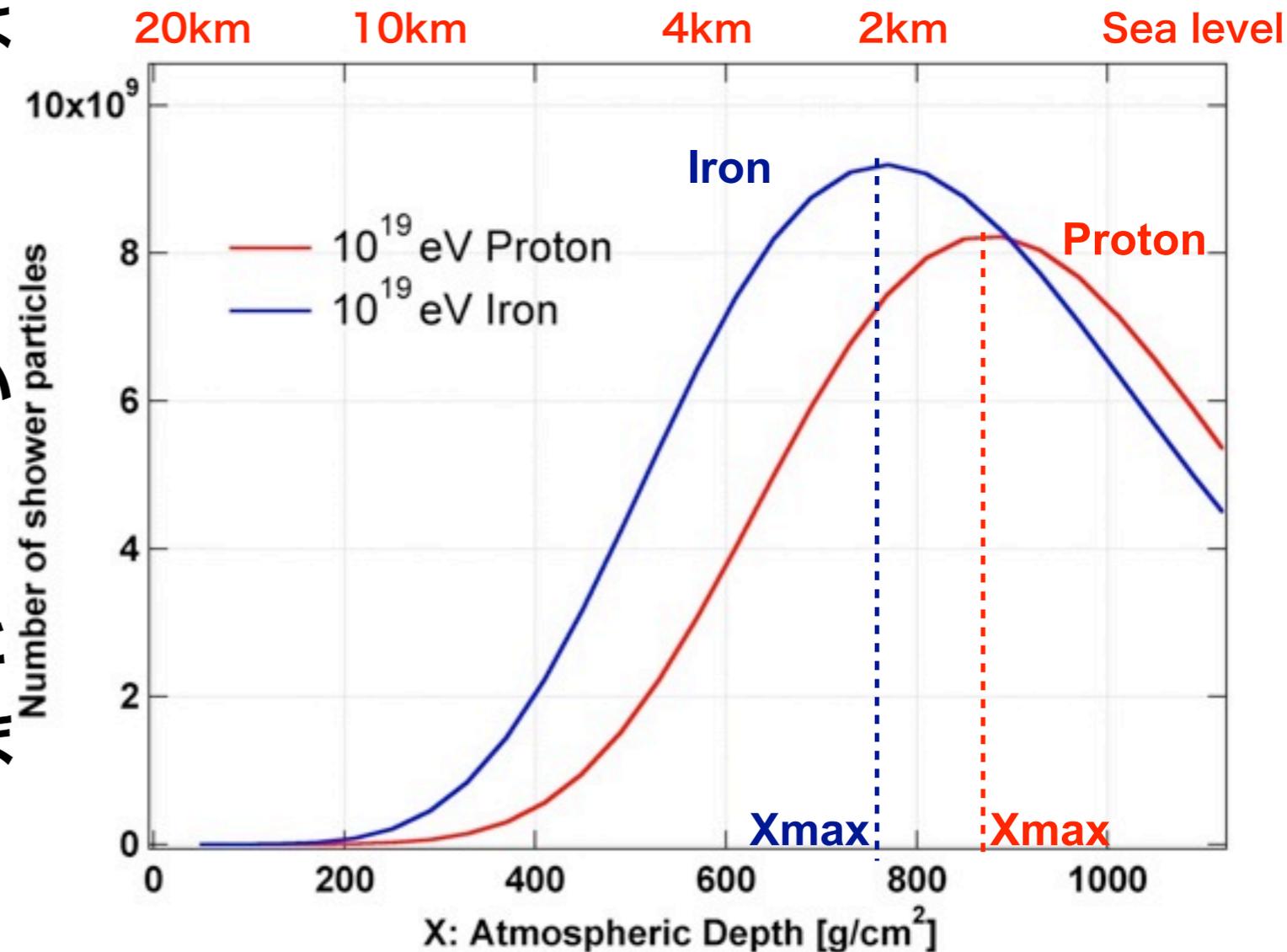
・ 重い原子核

- 相互作用断面積が大きい
- 核子当たりのエネルギーが小さい

・ 重い原子核によるシャワーは「早い」発達と減衰

・ 最大発達点 X_{max} は陽子のほうが大きい（深い）、重い原子核では小さい（浅い）

・ 観測データでのエネルギーと X_{max} の関係から「組成」または主成分を推定



UHECRの“組成”

シャワーの最大発達点 X_{\max} から

・ 重い原子核

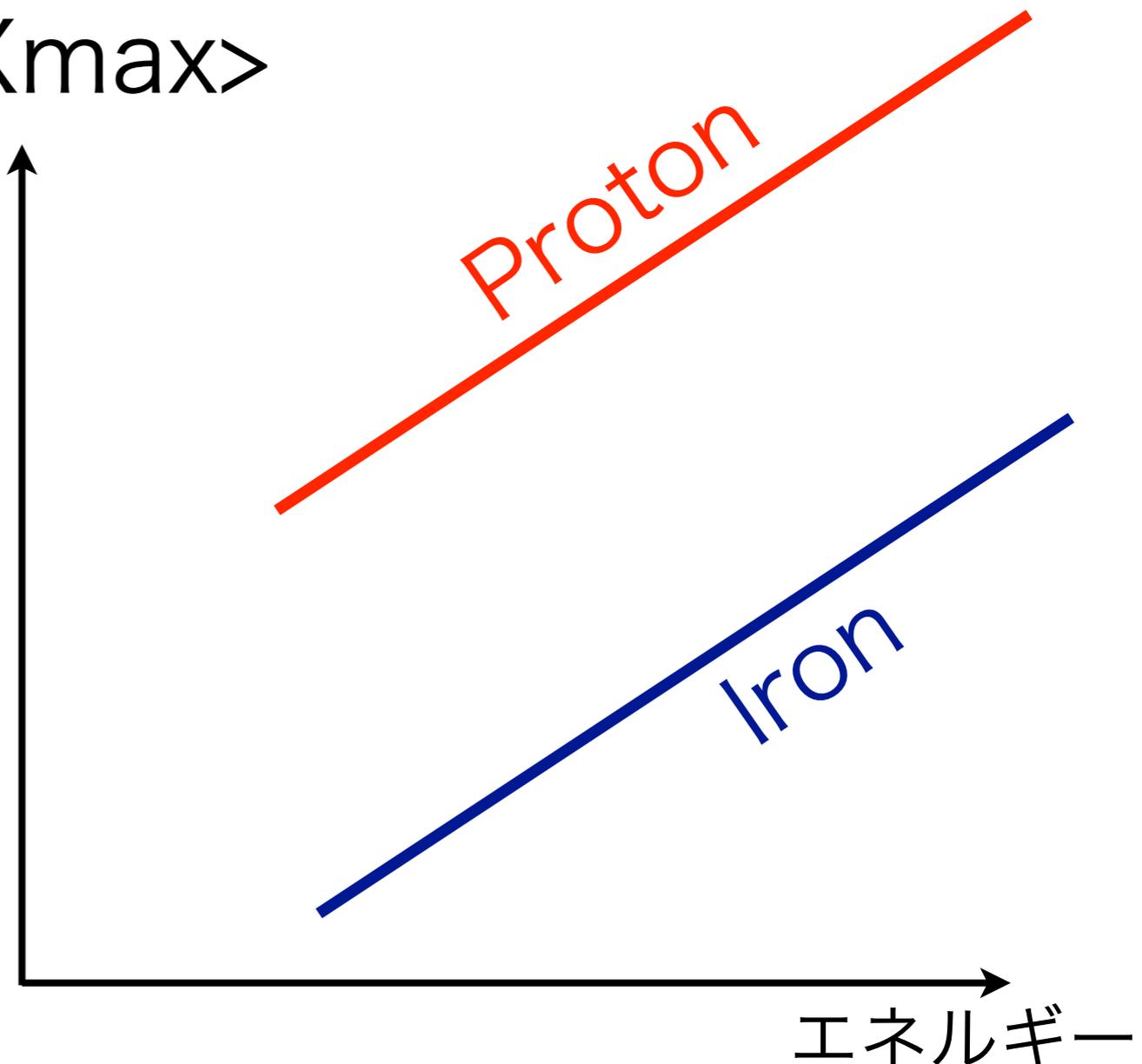
- 相互作用断面積が大きい
- 核子当たりのエネルギーが小さい

・ 重い原子核によるシャワーは「早い」発達と減衰

・ 最大発達点 X_{\max} は陽子のほうが大きい（深い）、重い原子核では小さい（浅い）

・ 観測データでのエネルギーと X_{\max} の関係から「組成」または主成分を推定

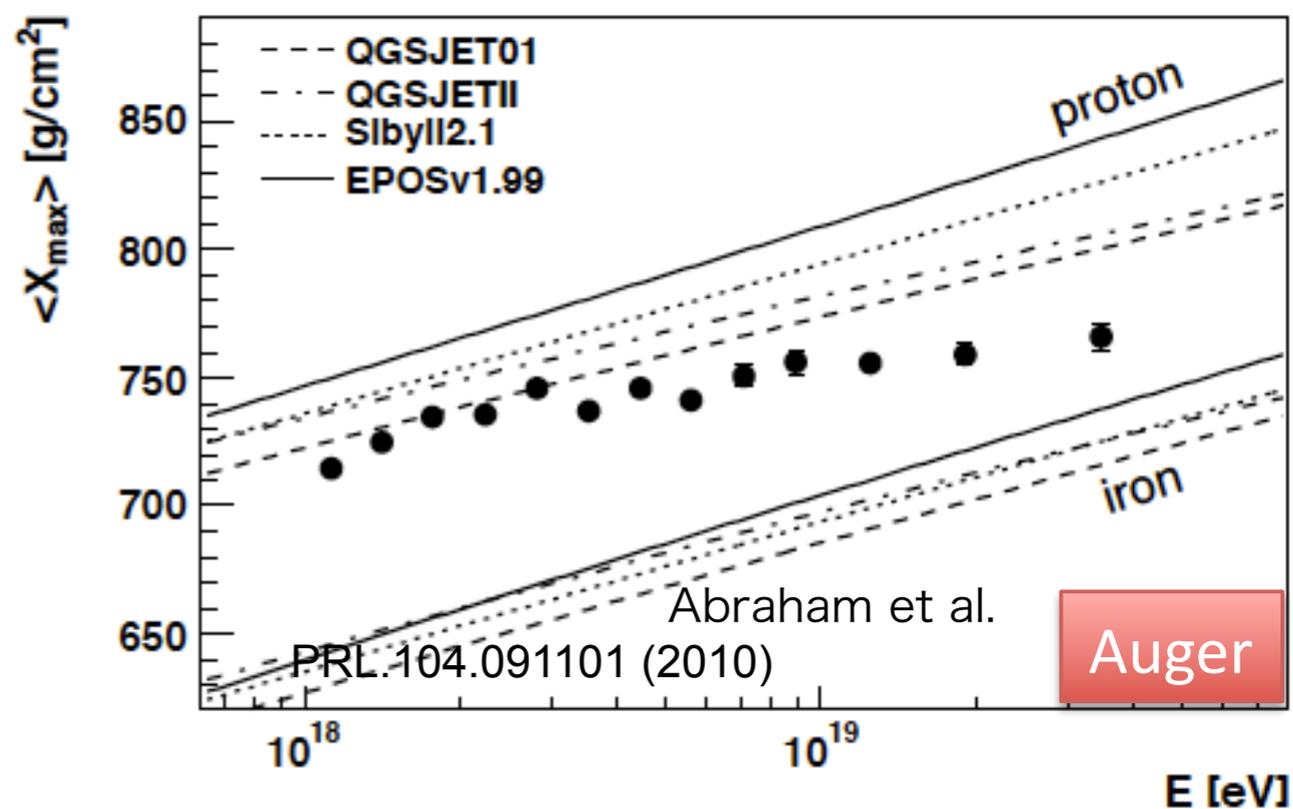
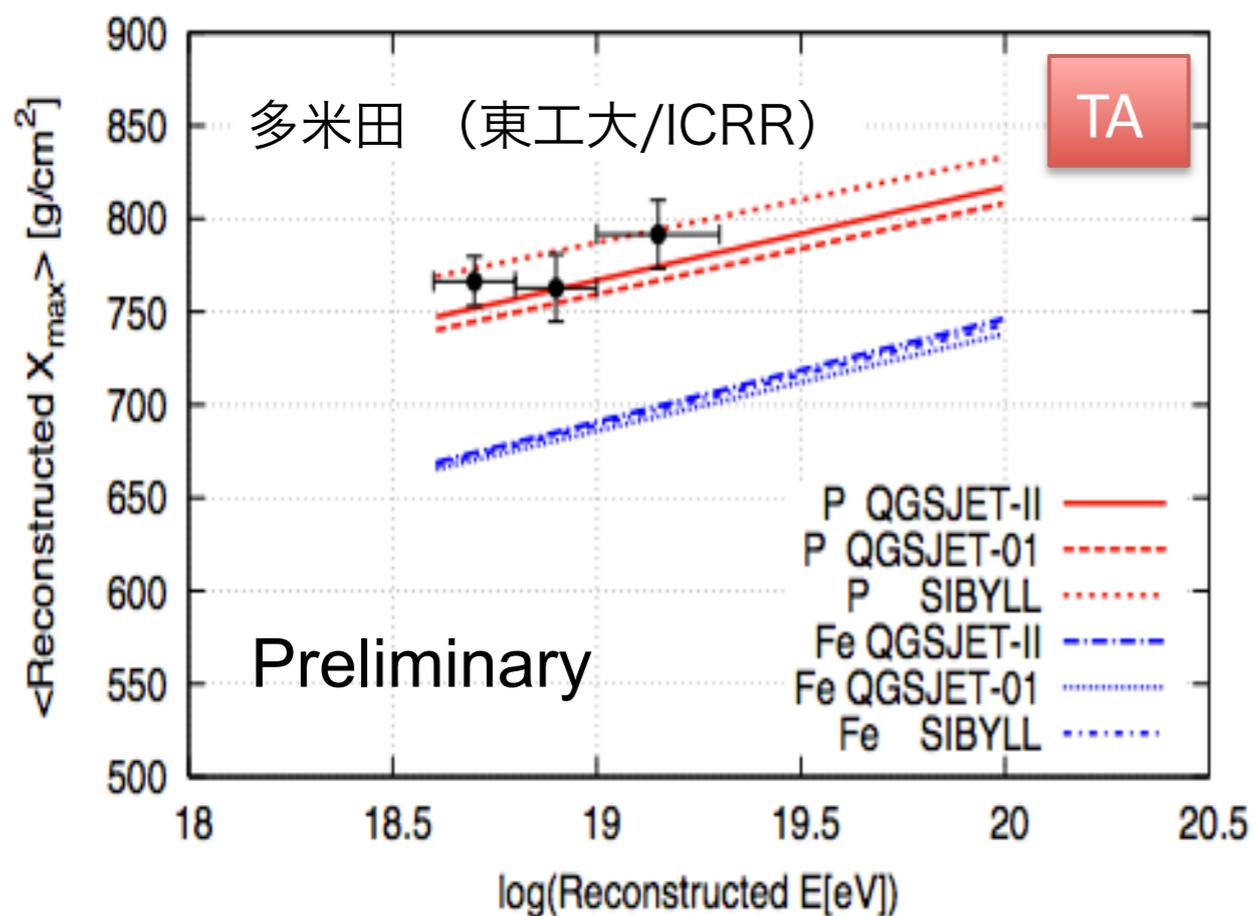
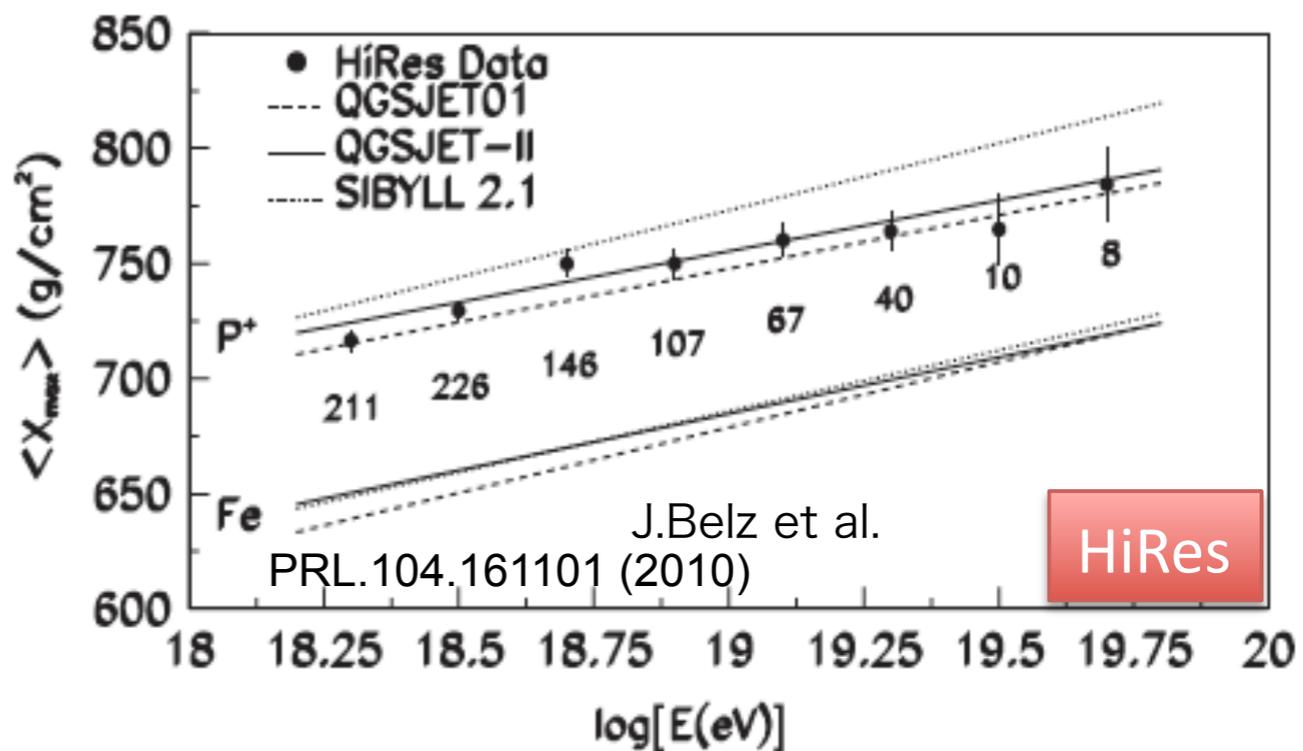
$\langle X_{\max} \rangle$



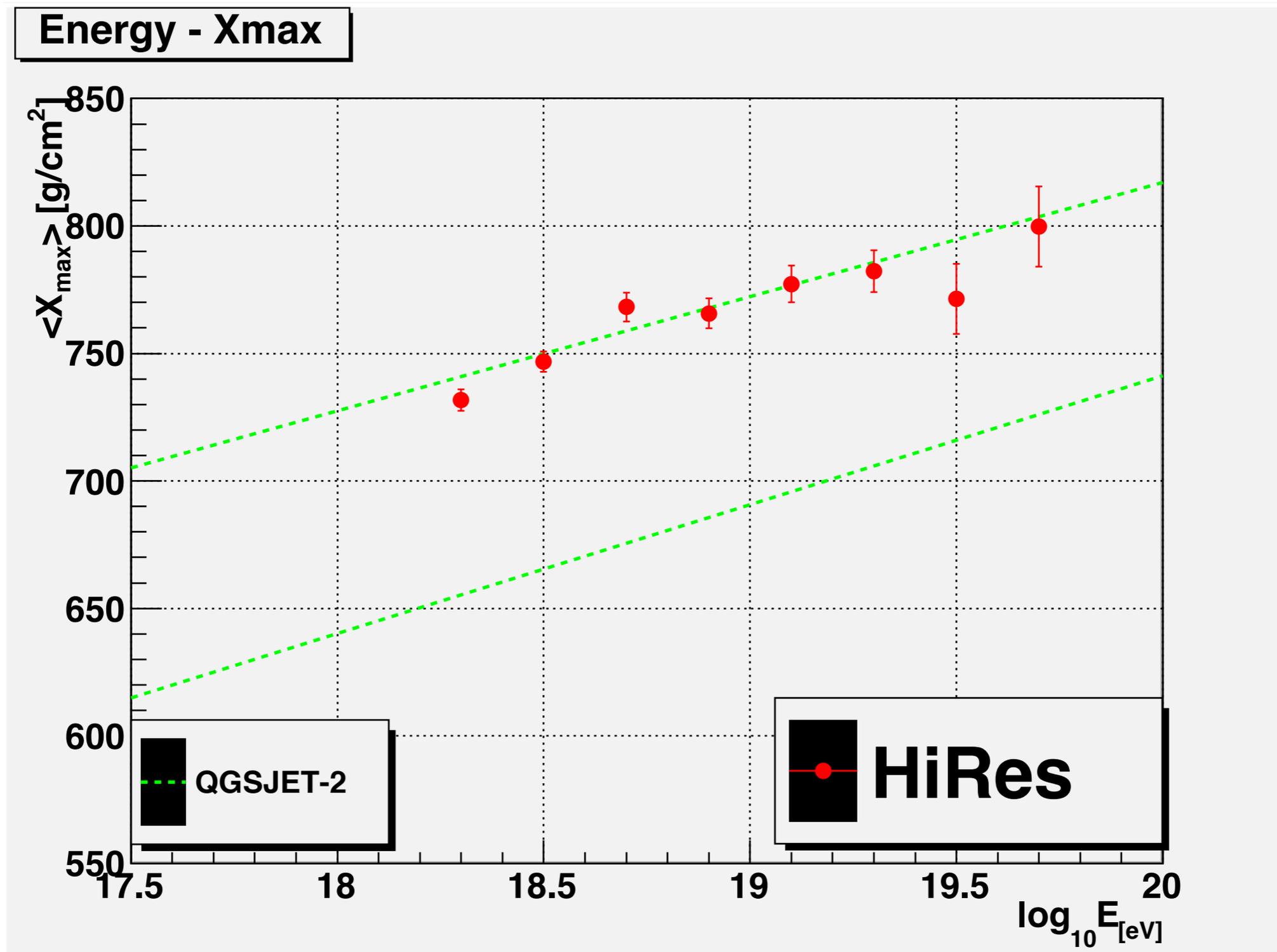
Xmax解析

見た目だけでいくと

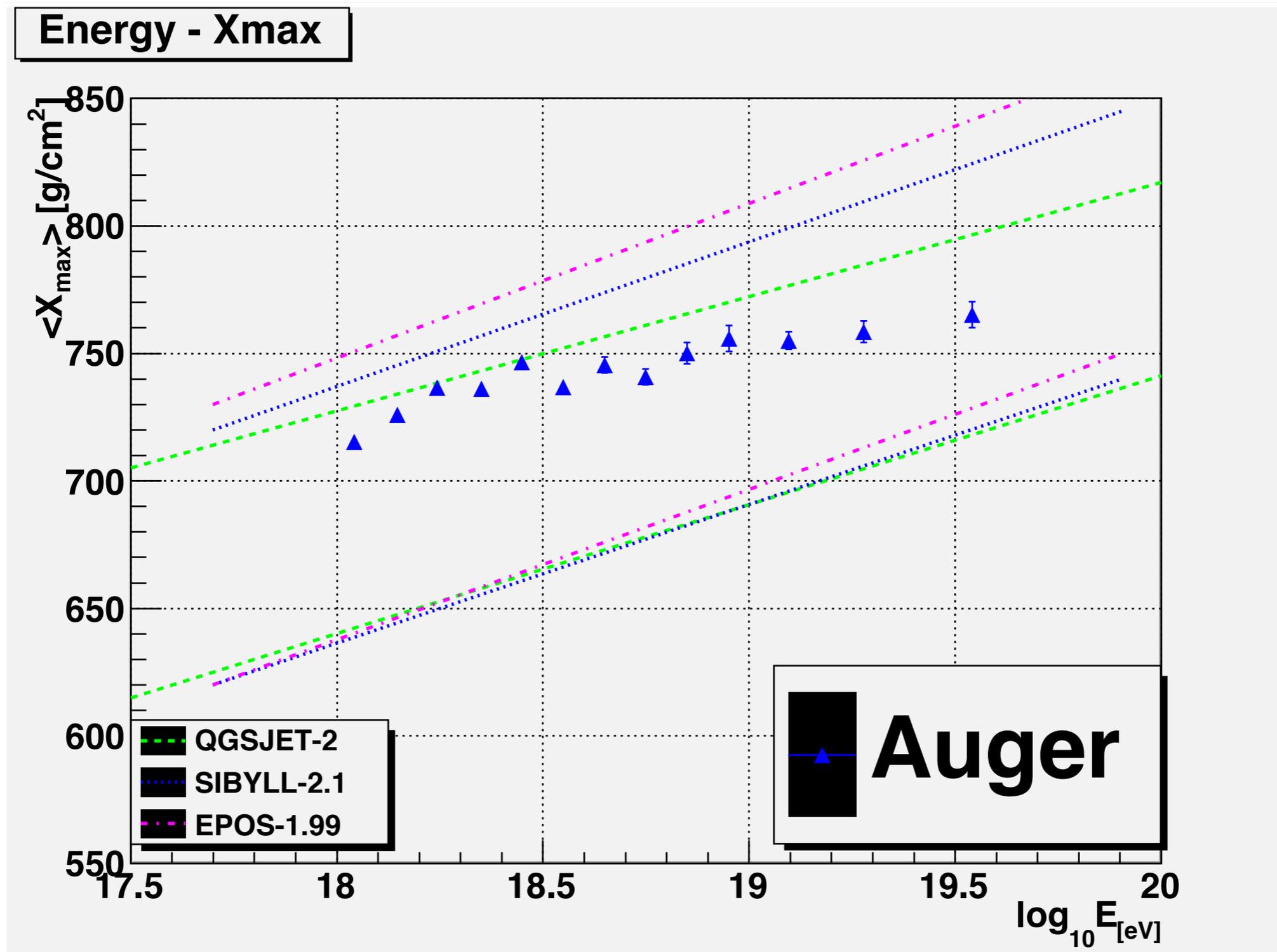
- HiRes, TAは陽子
- Augerは重い ~ Fe?



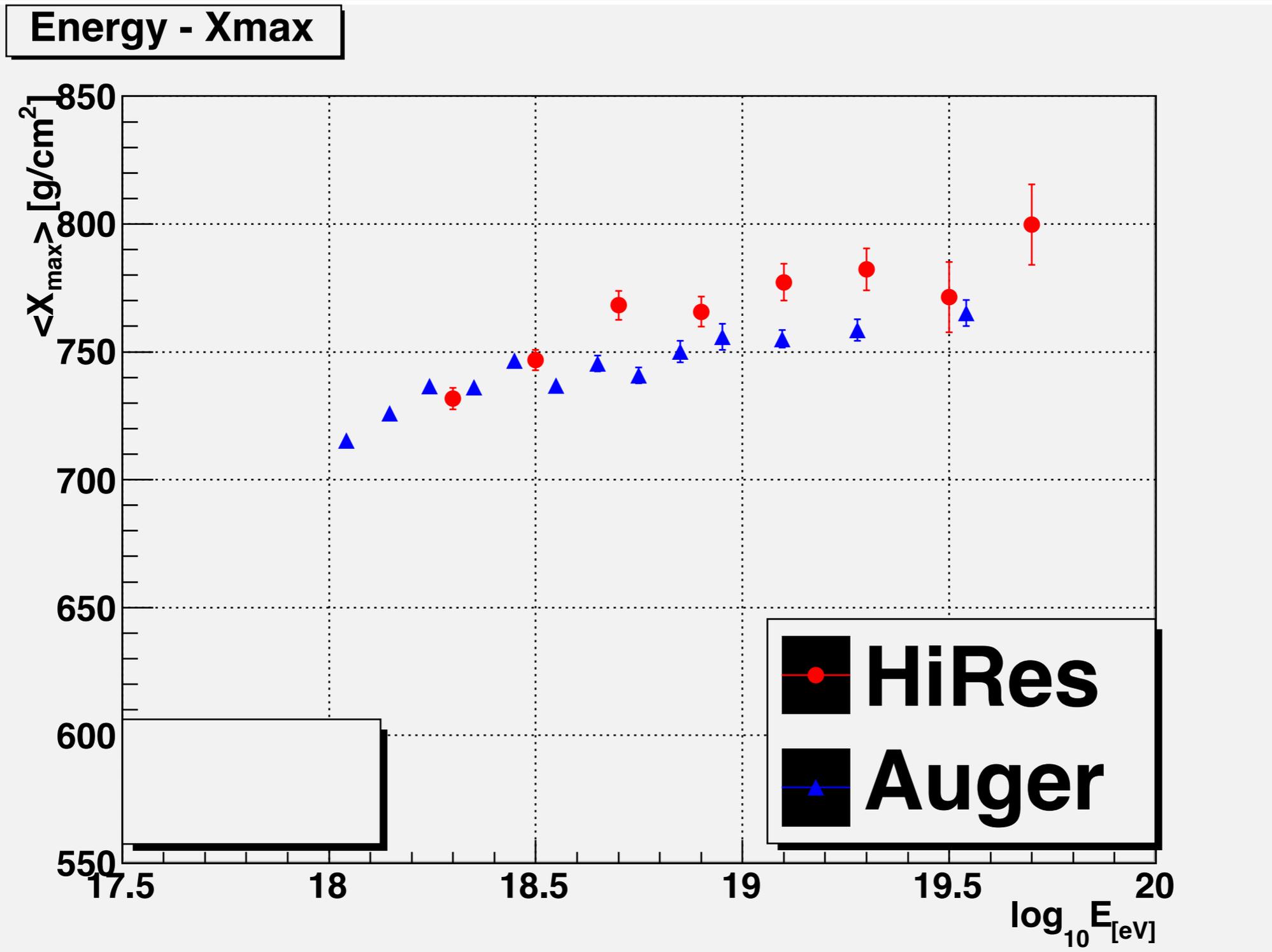
p or Fe?



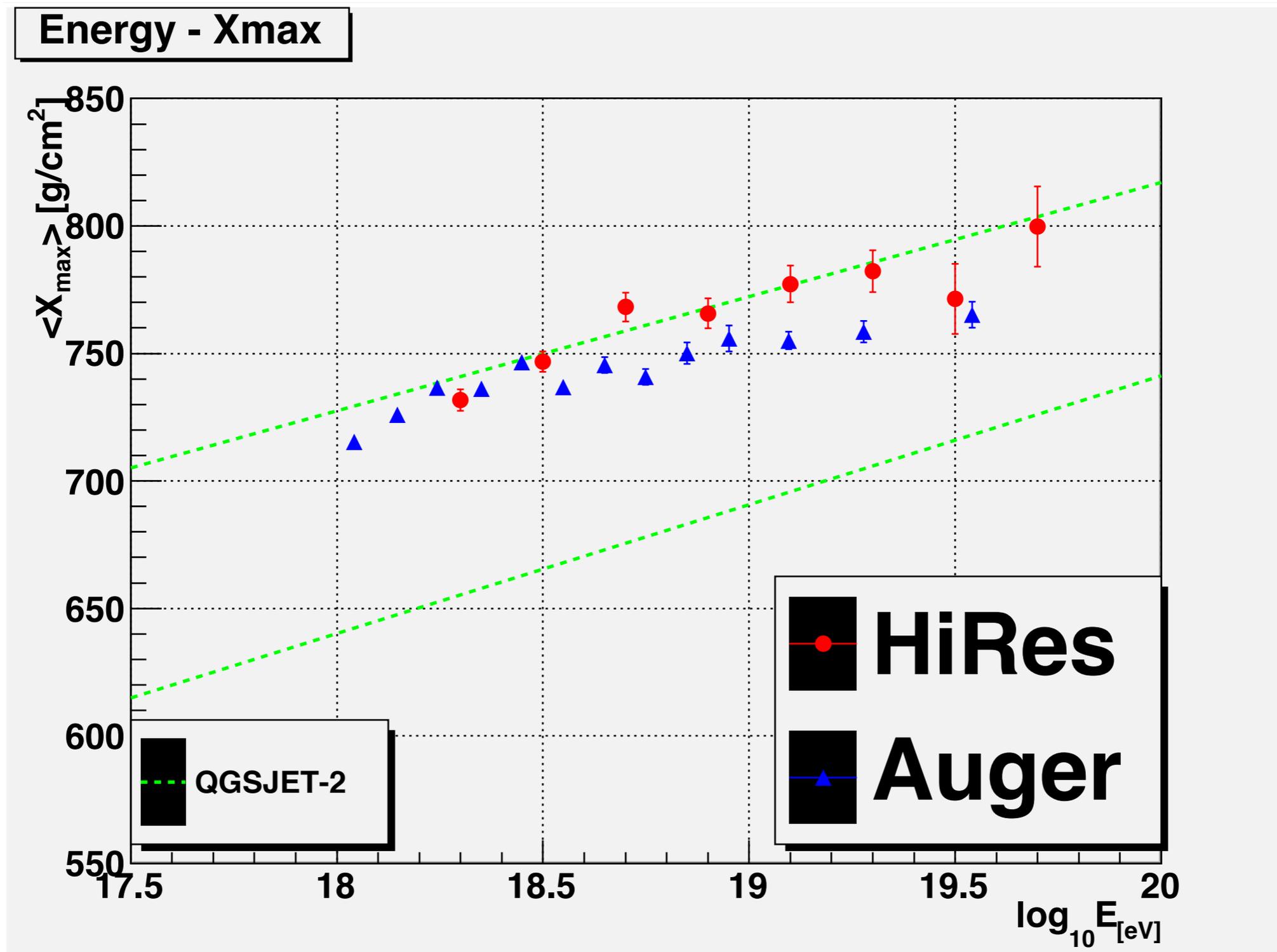
p or Fe?



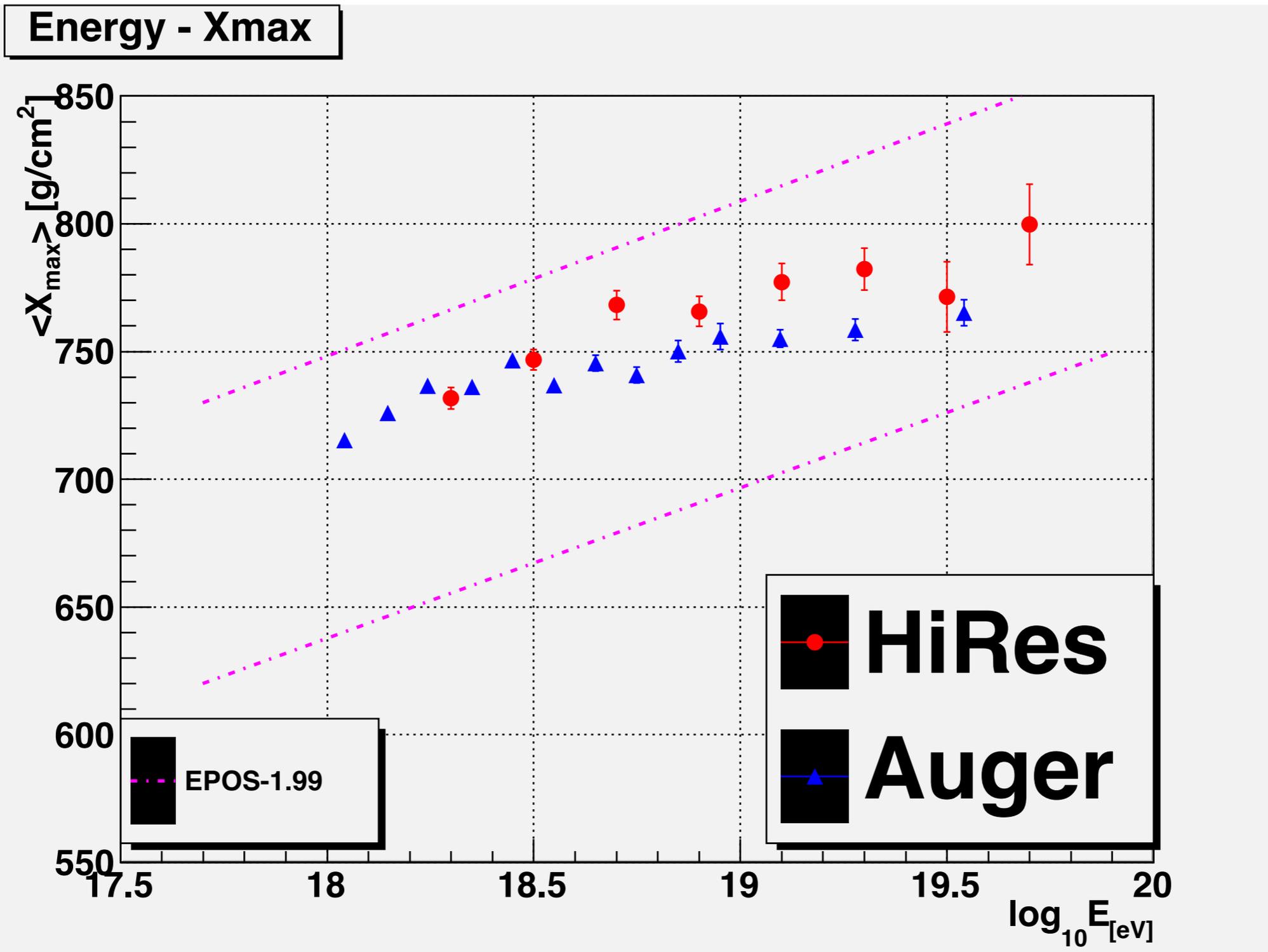
p or Fe?



p or Fe?



p or Fe?

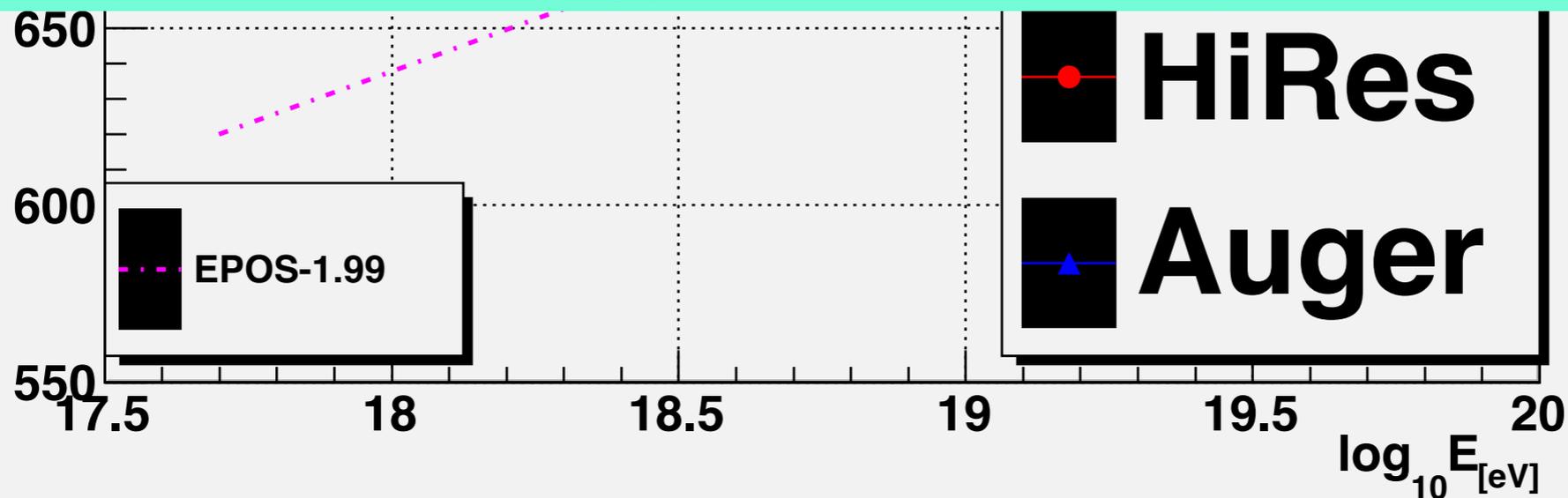


p or Fe?

Energy - Xmax

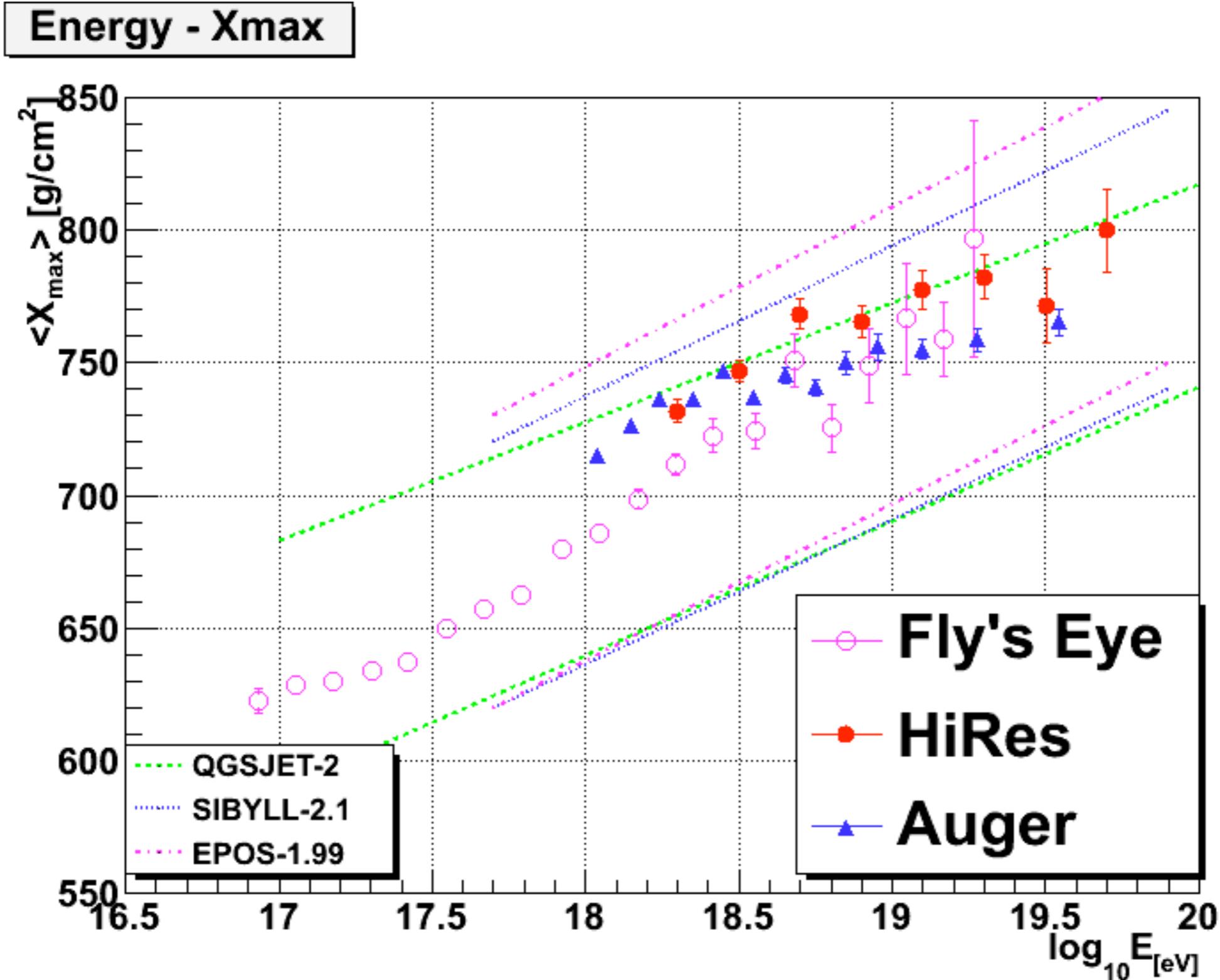
850

- まだ早い。
- 実験ごとの比較は難しい：イベント選別バイアス？
- どのモデルと比較するかでも違う
 - モデル予測のラインの引き方も違う（同じモデル予測でもHiResの引いたラインとAugerの引いたラインでは値も意味も違う）
- エネルギースケールも違う
- Xmaxの定義からして違う（縦方向フィットなど）



p or Fe?

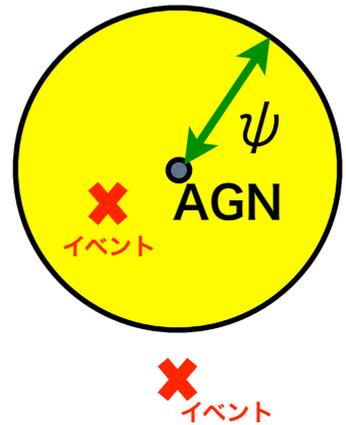
- 既に 10^{18} eVではプロトン優勢への遷移が終了？
銀河系外の見え始めはどこだ？



異方性：Auger：AGNとの相関

1. AGNカタログ (VCVカタログ) 天体周りの角度 ψ ($\sim 3^\circ$) の円を定義し、
2. その合計が観測全天をどれだけ覆うかを計算 (Exposureを考慮)

- Augerの場合観測全天の21% (HiRes/TAの場合24%)
- 宇宙線イベントを等方ランダムにばらまけば21%はAGNの円内に入ってよい



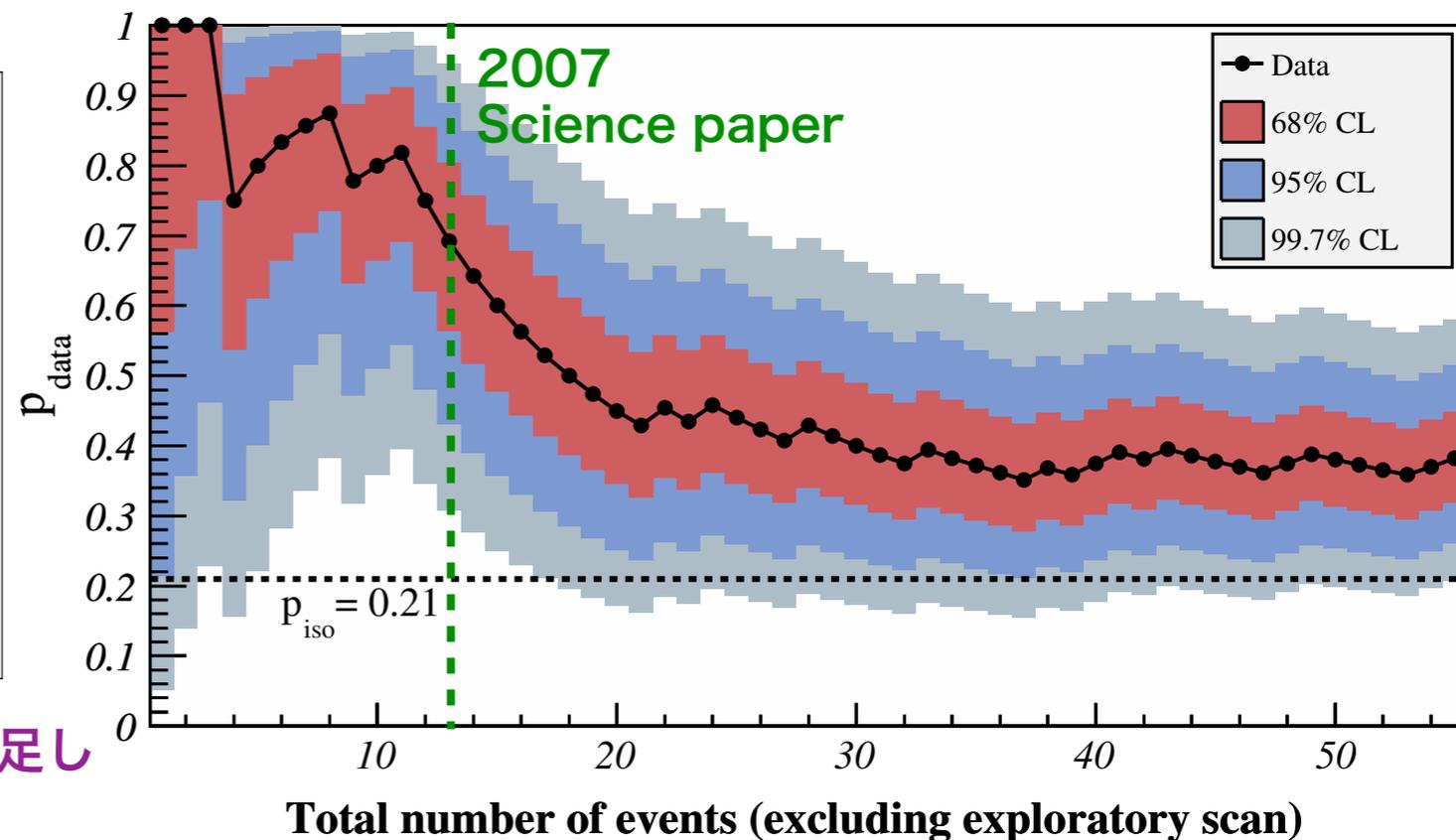
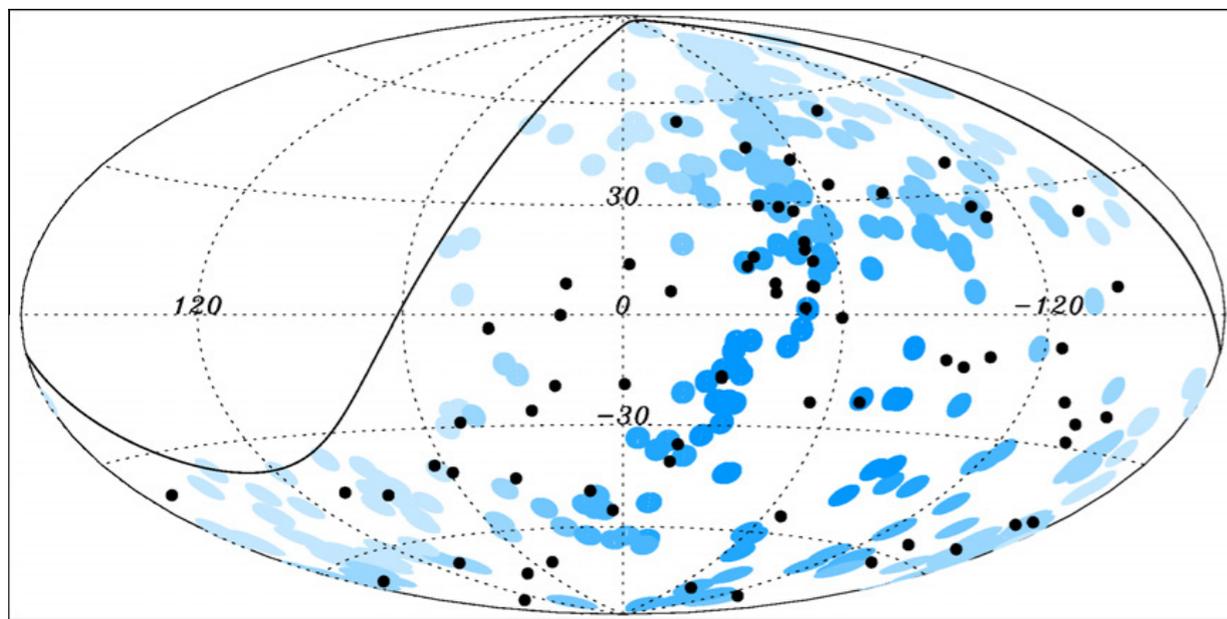
3. 観測イベントの場合は何%が円内に入るか？

結果：

- 2007 Science: 9/13 = 69%
- 2010 APP: 21/55 = 38%

$\psi = 3.1^\circ, E > 56 \text{ EeV}, z < 0.018$

Astropart. Phys. 34 314 (2010)



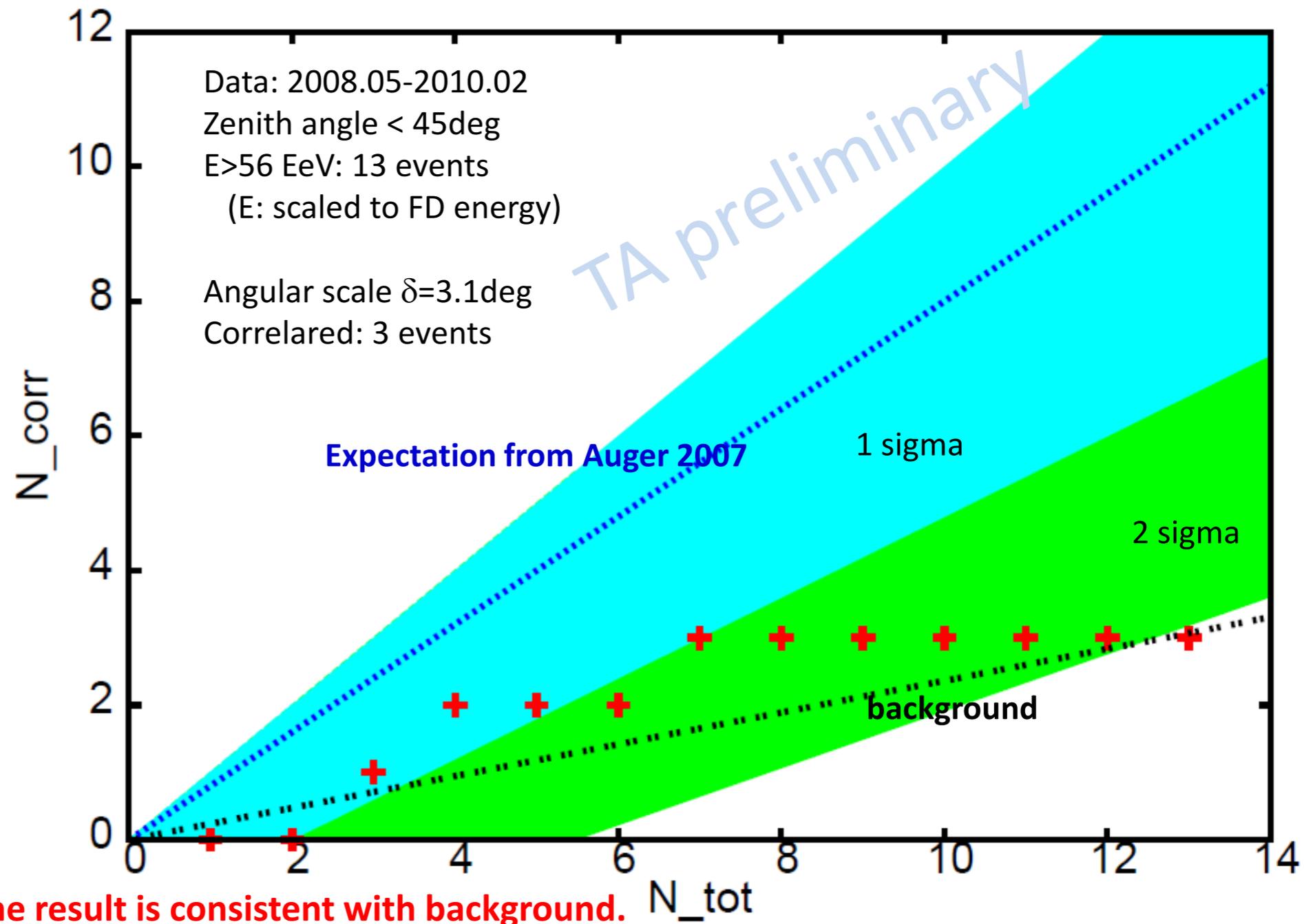
水色の円の面積をexposure (濃淡) で重みをつけて足し上げると観測全天の21%

TA : AGNとの相関

- $\psi = 3.1^\circ$, $E > 56 \text{ EeV}$, $z < 0.018$ (Auger解析と同じ条件)
- HiRes: $2 / 13 = 15\%$ (等方の場合の期待値24%)
- TA: $3 / 13 = 23\%$

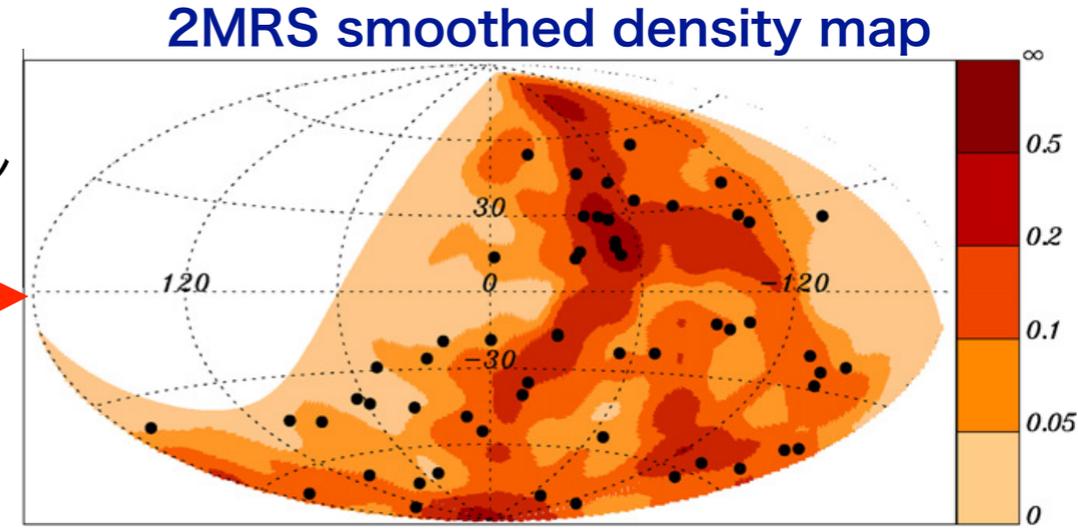
Astropart. Phys. 30 175 (2008)

HiRes、TAとも
等方分布の場合
からのずれは見
えない。



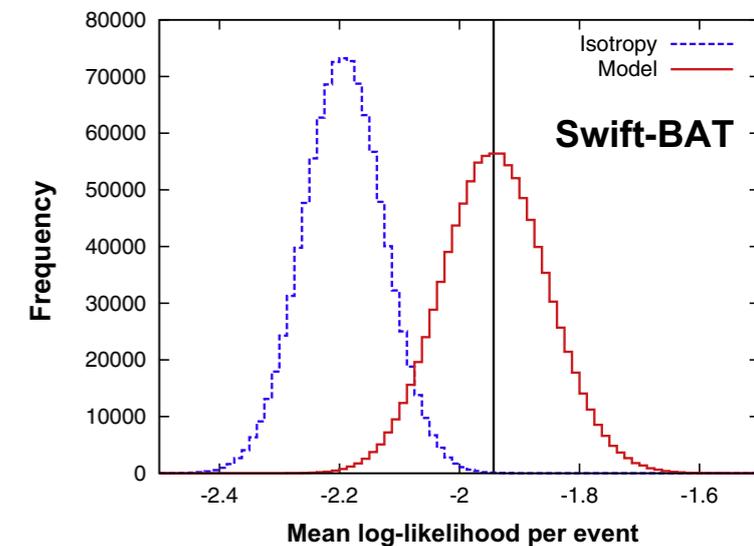
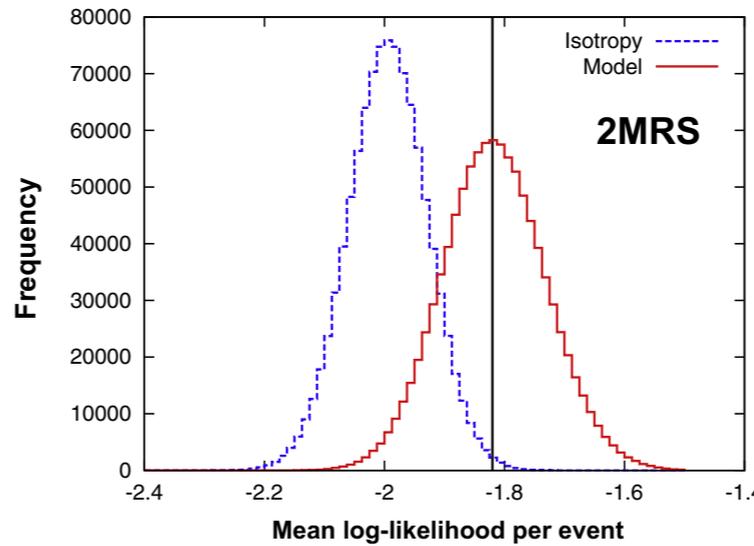
相関：Alternative Approach

1. カタログを用意
2. 天体への距離、磁場の影響を入れるためのsmearing, ルミノシティ、減衰効果を考慮した smoothed density map を作る
3. マッチングを調べる



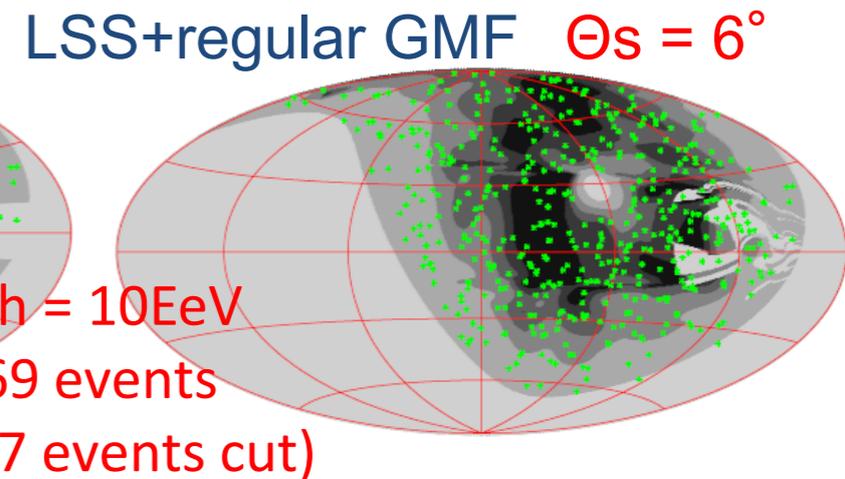
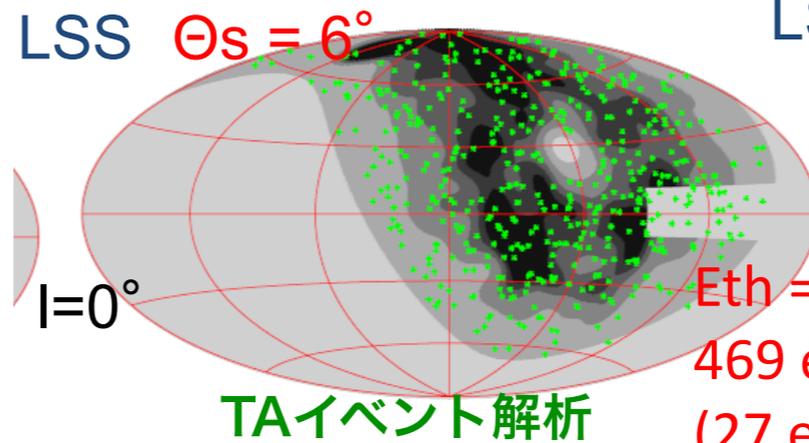
- I. 観測イベントとmapのマッチを比較
- II. mapの分布にしたがって観測と同数のランダムイベントを作ってマッチを計算、これを何度も繰り返す->分布
- III. 観測イベントとのマッチは、ランダムイベントの場合の分布に対してどのあたりの値になるか？

Astropart. Phys. 34 314 (2010)
Augerイベントとsmoothed density mapとのマッチング

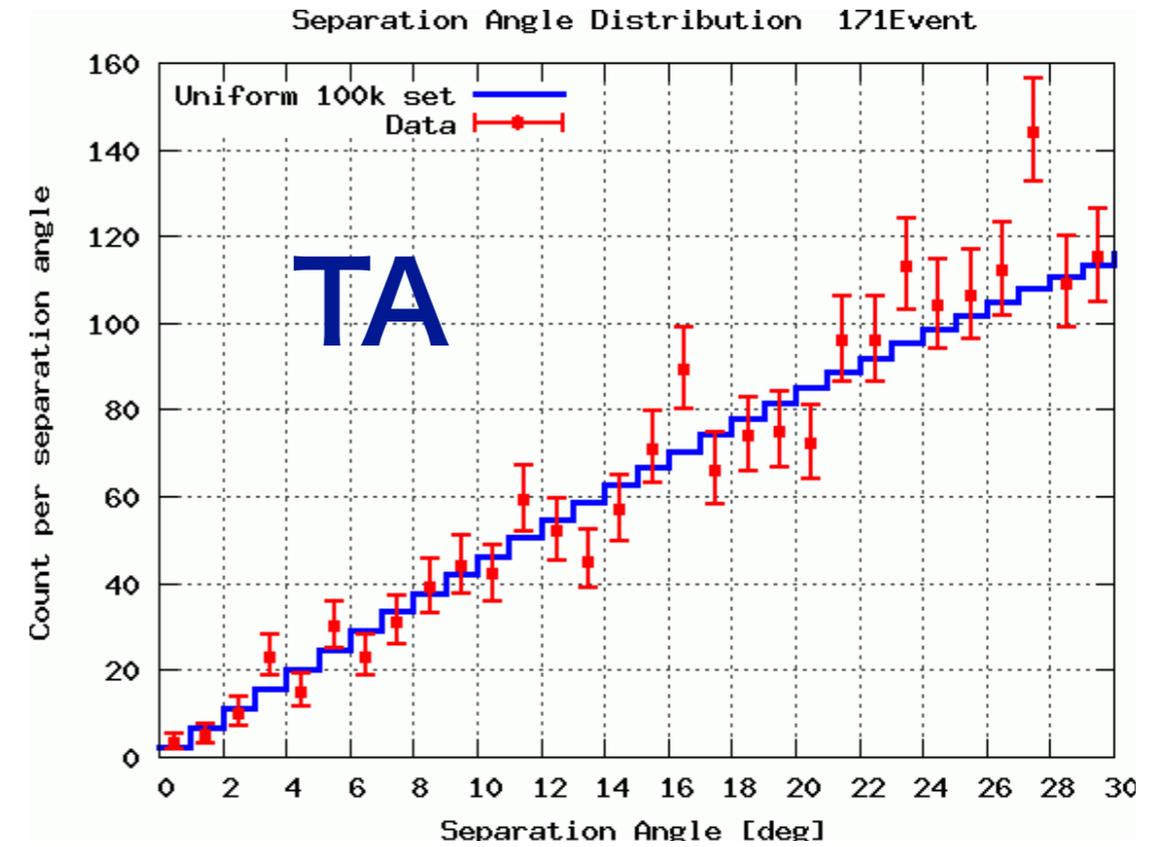
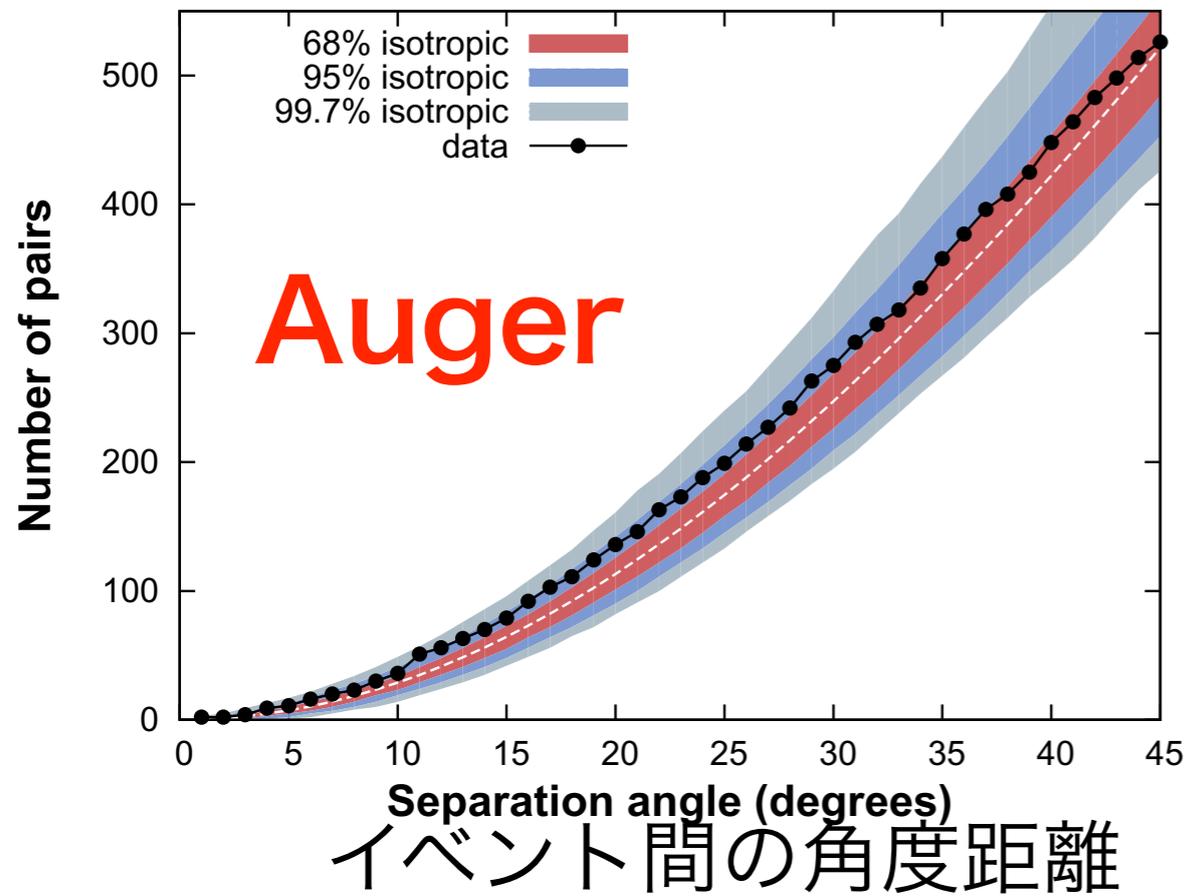


• Auger: 何か相関ありそう

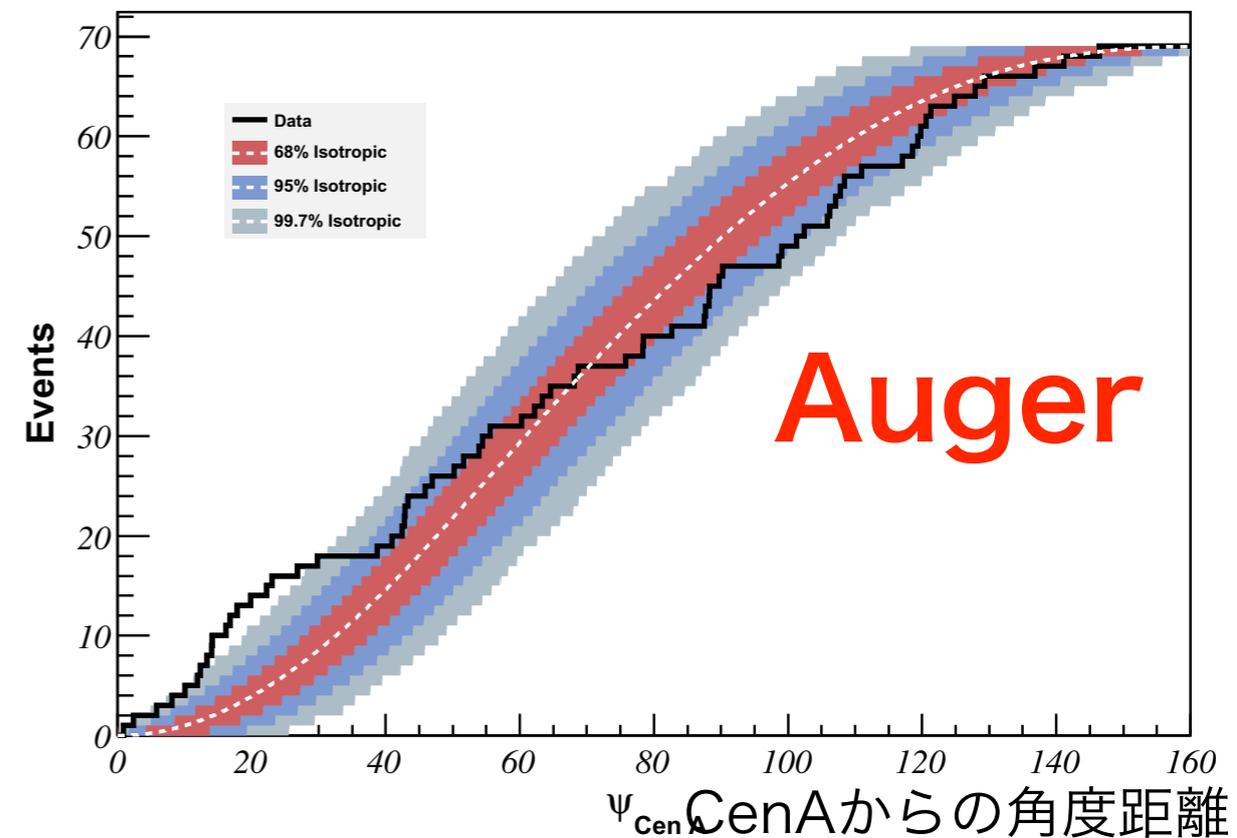
• HiRes, TA: 明確な相関はない



イベントクラスタリング?



- Auger, TAとも、等方的な場合の偶然の方向一致以上にはクラスタリングは見つからない
- Auger: CenA の方向にイベント集中?



Fermi-LAT天体との相関?

Jiang et al., *Astrophys. J.*, **719** 459 (2010)

• Mirabal and Oya, *MNRAS*, **409** L99 (2010)

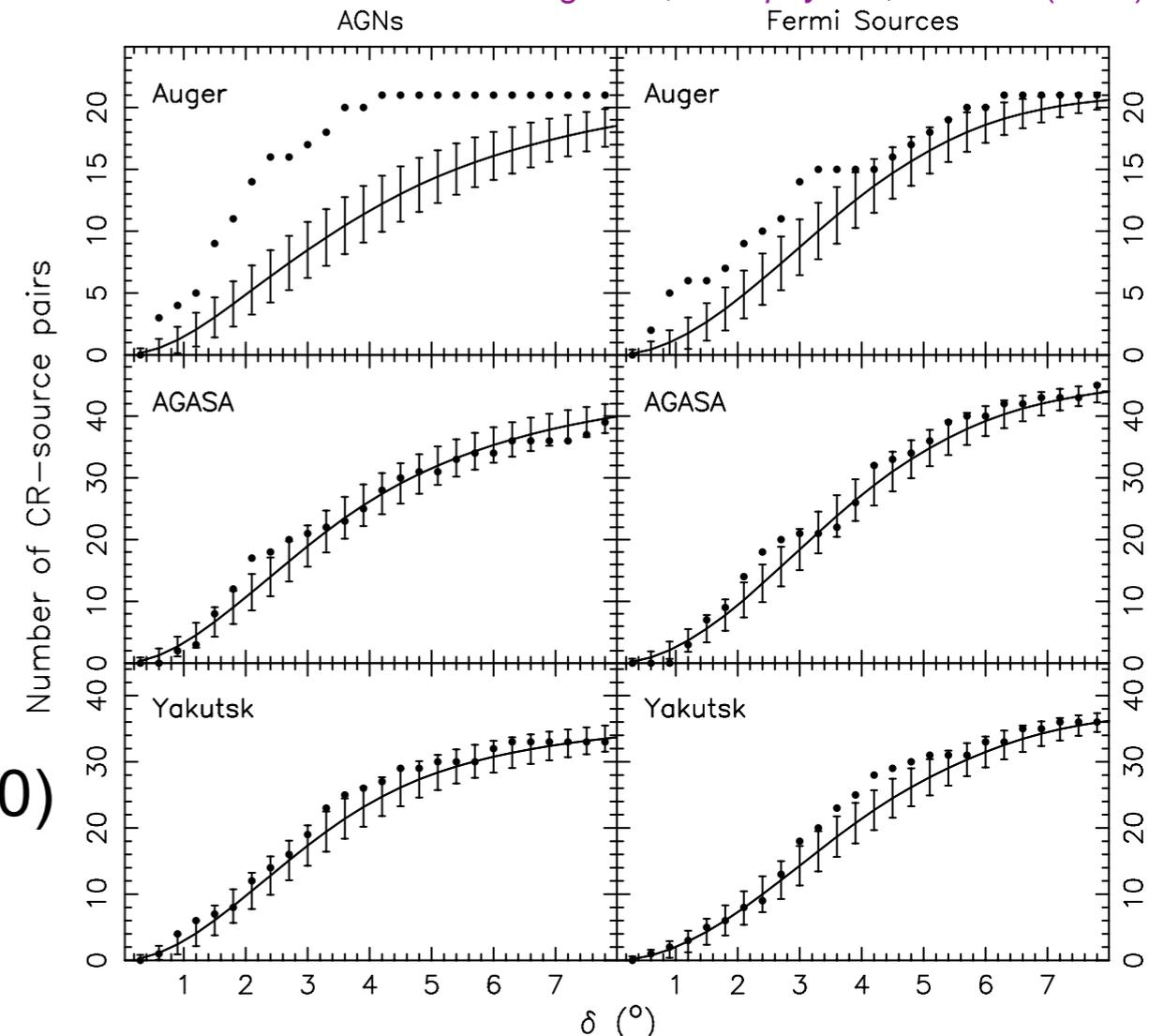
- 相関なし

• Jiang et al., *Astrophys. J.*, **719** 459 (2010)

- AGASA, Yakutsk, Auger
- VCVカタログほどの相関はない

• Nemman et al., *Astrophys. J.*, **722** 281 (2010)

- 銀河内天体、blazerとの相関はない
- 1LACとは “a mild correlation (2.4° , 2.6σ)”
- 1LAC AGN で距離 $<200\text{Mpc}$ に限ると “a strong association (17° , 5.4σ)”
- 具体的7天体：Cen A, NGC 4545, ESO 323-G77, 4C+04.77, NGC 1218, RXJ 0008.+1450, NGC 253



- 全て Auger 2007 Science論文までのデータ
- 注視に値、ただし現在はまだどうこう言える段階ではない
- これまでのAGNカタログは宇宙線的には玉石混交
- Gamma-ray-loud天体のみ集めてやればより期待できる

結果のまとめ

	AGASA	HiRes	Auger	TA
Ankle	あり	あり	あり	あり
カットオフ	なし	あり	あり	あり
組成	"No drastic change"	陽子	重い	陽子
異方性	銀河中心、クラスタリング	なし	AGN相関	なし

結果の解釈には注意を！

- エネルギースケールの異なる実験結果の比較は難しい
- Ankle構造の解釈は、、、：既にそのエネルギーより前にプロトン優勢ということは？
- 少数統計は嘘をつく。純統計的には起こりそうもないことが平気で起こる。
- 「GZK cutoff が確認された」の論調多いが：
 - “GZK”であることの証明はカットオフの位置、組成、異方性の合わせ技による裏付けが不可欠
 - 異方性が見えないのに地平線は見えた？
 - 鉄と言われて信じるか？陽子でないのにあの位置にカットオフ？
 - 「鉄」とはけしからんと論調もあるが、、、気に入らんからけしからんってサイエンス？
 - AGASA/HiResのエネルギー問題はAuger/TAでも未解決。カットオフの位置はOK？
- 実験装置は立派ながら解析はどこも熟していない。解釈に物理的アクロバットを要するのはどれも同じ。

結び

● やることはまだまだ多い：伸びしろ十分。

- TAの観測/解析体制は充実。まずはTA-特別推進の残り3年半にご期待を。

● TA-日本の最高エネルギー宇宙線研究の今後：

- TALE（低エネルギー拡張）

- ・ $10^{17}\sim 10^{18}\text{eV}$, 銀河系内-銀河系外宇宙線の遷移は見えるか？
- ・ infill アレイ、高視野望遠鏡

- TA-Phase 2（アクセプタンス増強：統計！）

- 世界情勢を受けて：

- ・ 北Augerの予算獲得見通しが厳しい（なくなった） -> TAの将来計画においても米国側の資金はあまり期待できない。
- ・ 分野ごと消えてなくならないためには：日本一極を張り続けるか、大団円か、それとも？

分野の生き方を考える必要が出てきているかもしれない。

アナウンス：最高エネルギー宇宙線シンポジウム

<http://uhecr2010.icrr.u-tokyo.ac.jp/>

- ・12月10-12日
- ・名古屋国際会議場
- ・ハイライトトーク、パネルディスカッション中心
 - ・HiRes, Auger, TA
 - ・LHCf
 - ・AirFly, FLASH (大気蛍光効率)
 - ・理論 (加速、磁場etc.)
 - ・電波による宇宙線観測
- ・講演集で終わらせず、突っ込んだ議論を

The poster features a central image of a cosmic ray air shower, depicted as a bright, multi-colored (red, orange, yellow, green) streak of light radiating from a point, set against a dark, starry background. In the bottom right corner, there is a detailed illustration of a traditional Japanese castle, likely Nagoya Castle, with its characteristic green roof and white walls. The text is arranged in a structured layout, providing event details and scientific context.

**THE SYMPOSIUM ON
"THE RECENT PROGRESS
OF ULTRA-HIGH ENERGY
COSMIC RAY OBSERVATION"**

**UHECR
2010**

Nagoya Congress Center, Nagoya, JAPAN

Dec.10(Fri)-12(Sun),2010

web site : <http://uhecr2010.icrr.u-tokyo.ac.jp/>
contact : uhecr2010@icrr.u-tokyo.ac.jp

New generation experiments of UHECRs; Pierre Auger Observatory in Argentina and Telescope Array in Utah, USA, have been collecting a large number of event samples. Precision calibrations obtained by LHCf, AIRFLY, FLASH, ELS and others are contributing to a rapid understanding of the air shower phenomena at extremely high energy.

In the symposium, we review existing and emerging results on the energy spectrum, particle composition and the anisotropy, and discuss its implications to the physics of UHECRs.

International Advisory Committee
V.Berezinsky, J.Bluemner, T.Ebisuzaki, R.Engel,
M.Fukushima (secretary), F.Haizel, Y.Iitow, P.Lipari,
K.Makishima, P.Privitera, K.Sato, P.Sokolov, F.Takahara

Local Organization Committee
M.Fukushima, Y.Kawasaki, S.Ogino, H.Sagawa (chairman),
T.Sako, M.Takeda, T.Terasawa, Y.Tsunetsugu, T.Yamamoto

Supported by
• Institute for Cosmic Ray Research, University of Tokyo
• Nagoya University GCOE program "Quest for Fundamental Principles in the Universe"
• Osaka City University GCOE program "Research and Education linked by Einstein's Physics"
• Tokyo Institute of Technology GCOE program "Nanoscience and Quantum Physics"