

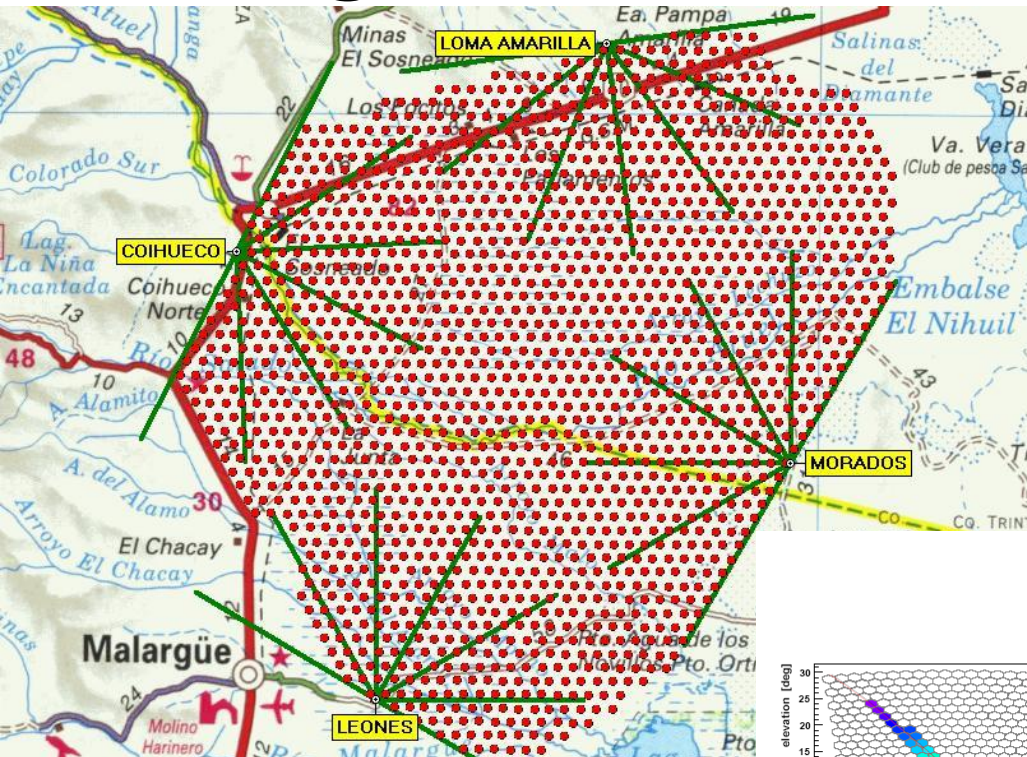
Augerでの超高エネルギー宇宙ニュートリノ探索

山本常夏：甲南大学

1. Auger観測の概要
2. 観測結果
3. 高エネルギーニュートリノ
検出方法
4. 将来計画

南Auger観測所

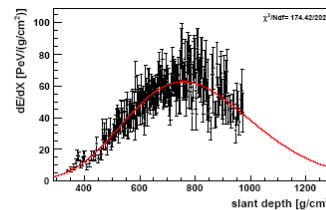
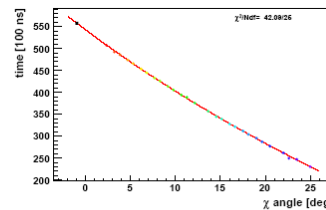
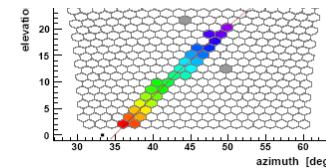
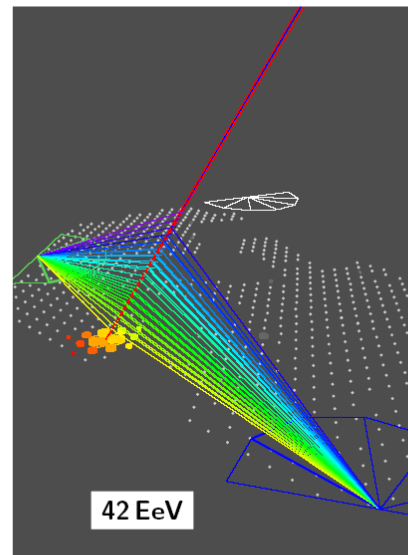
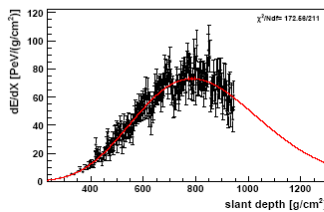
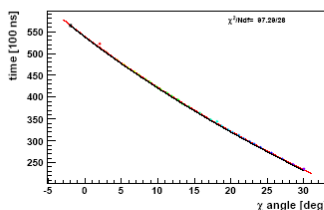
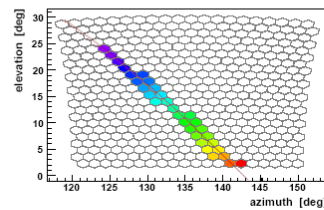
Measure UHECR with Unprecedented Precision and Accuracy



- アルゼンチンの草原に約50億円で建設された世界最大の宇宙線観測装置
- 1600個の粒子検出器、4ヶ所24台の大気蛍光望遠鏡
- 3000km²の検出面積
- 17ヶ国による国際協力

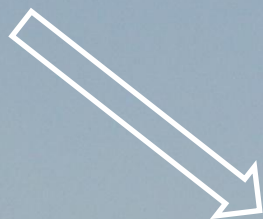
- 大気蛍光法と空気シャワーアレイを使ったHybrid観測
- できるだけシミュレーションを排除したデータ解析

- Auger Next ...

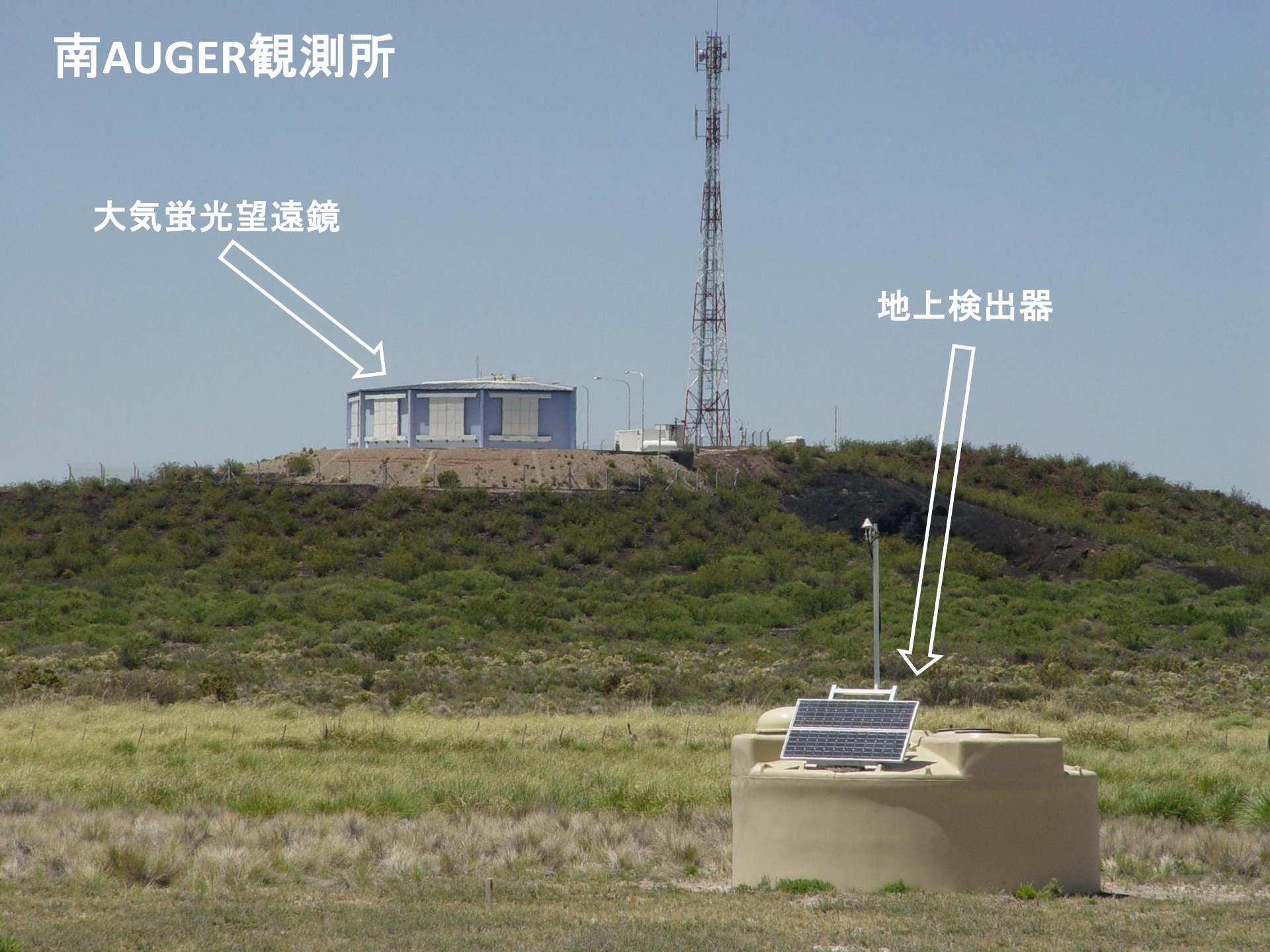


南AUGER観測所

大気蛍光望遠鏡



地上検出器



Communications antenna

GPS antenna

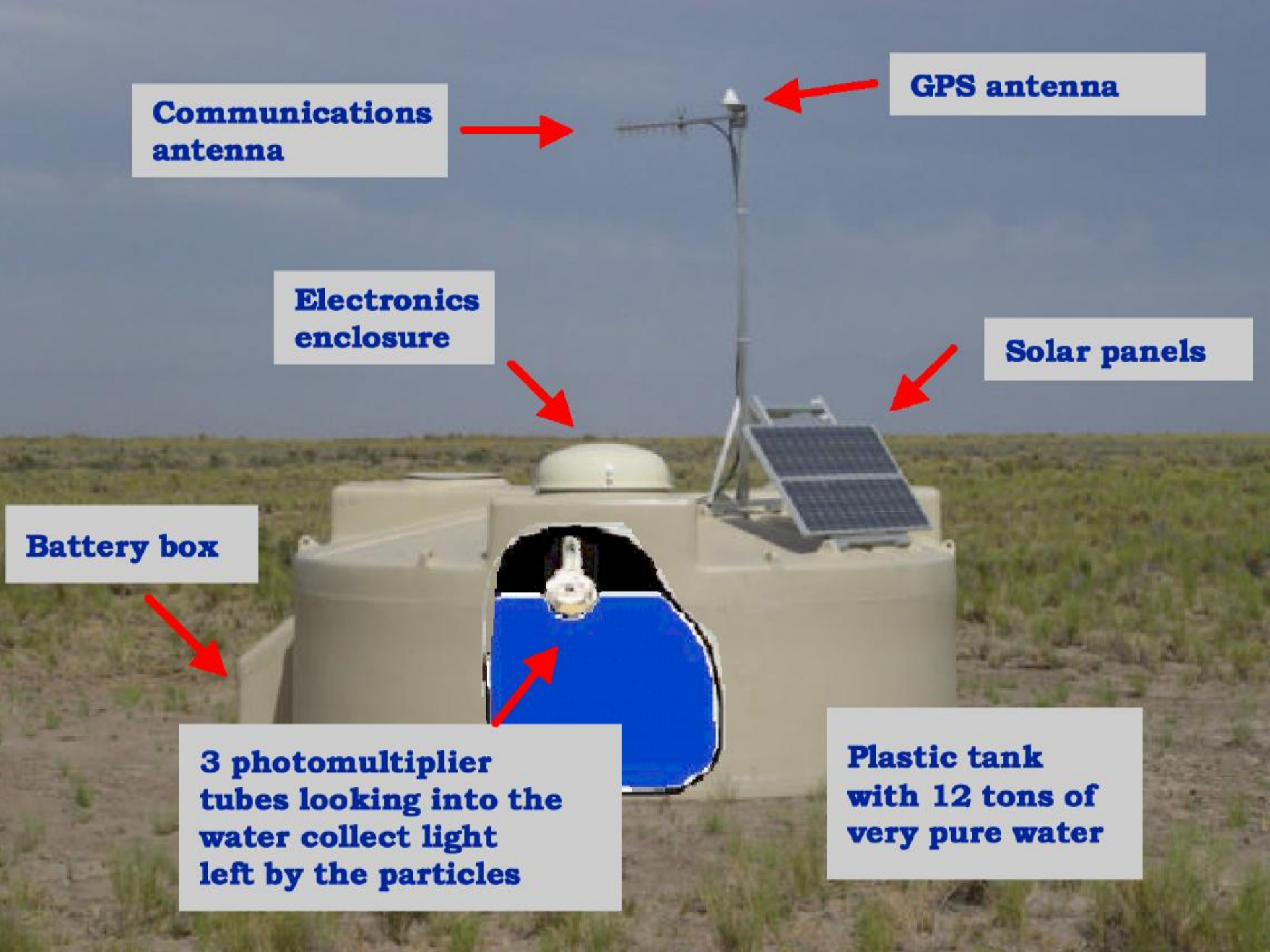
Electronics enclosure

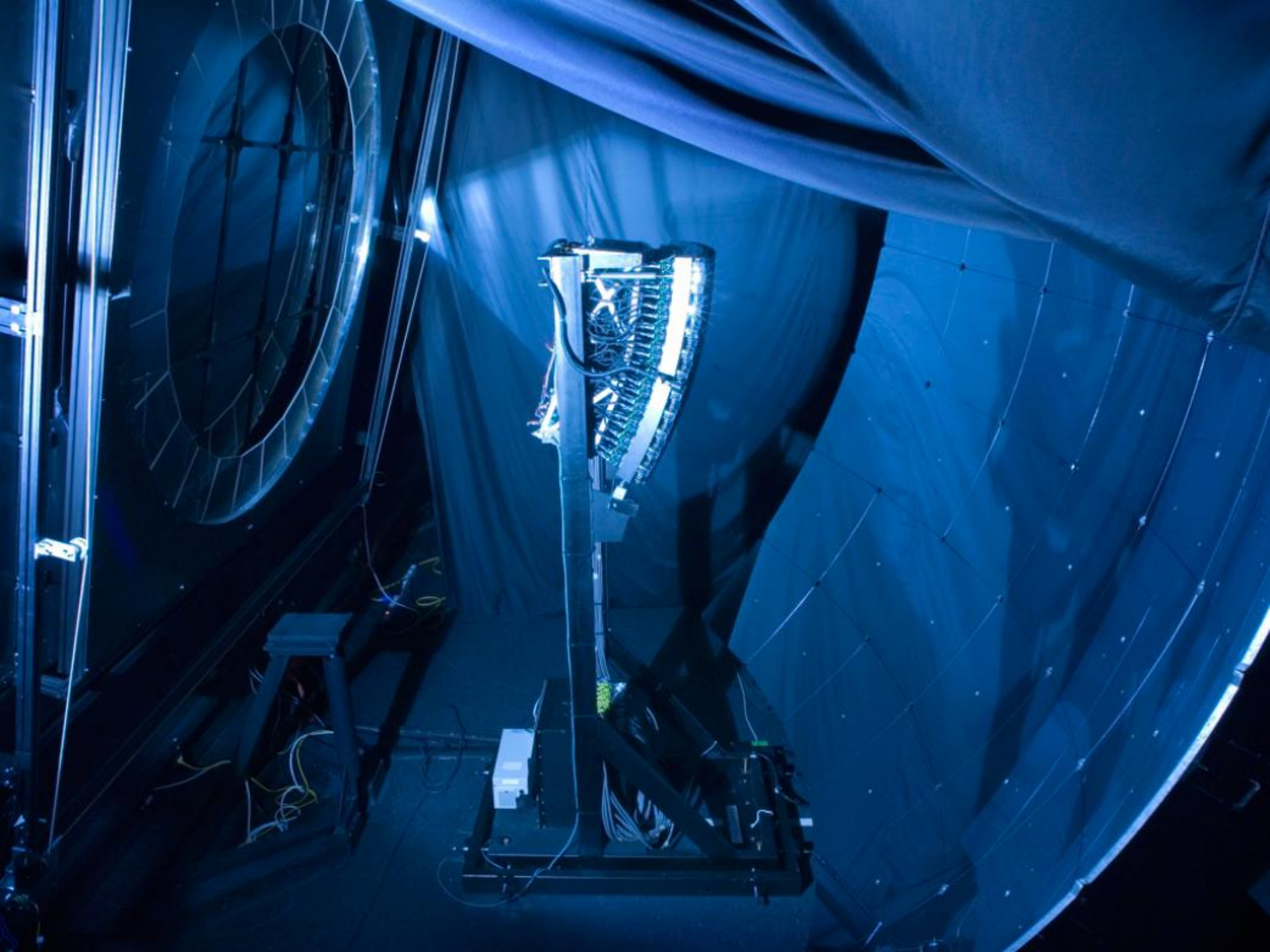
Solar panels

Battery box

3 photomultiplier tubes looking into the water collect light left by the particles

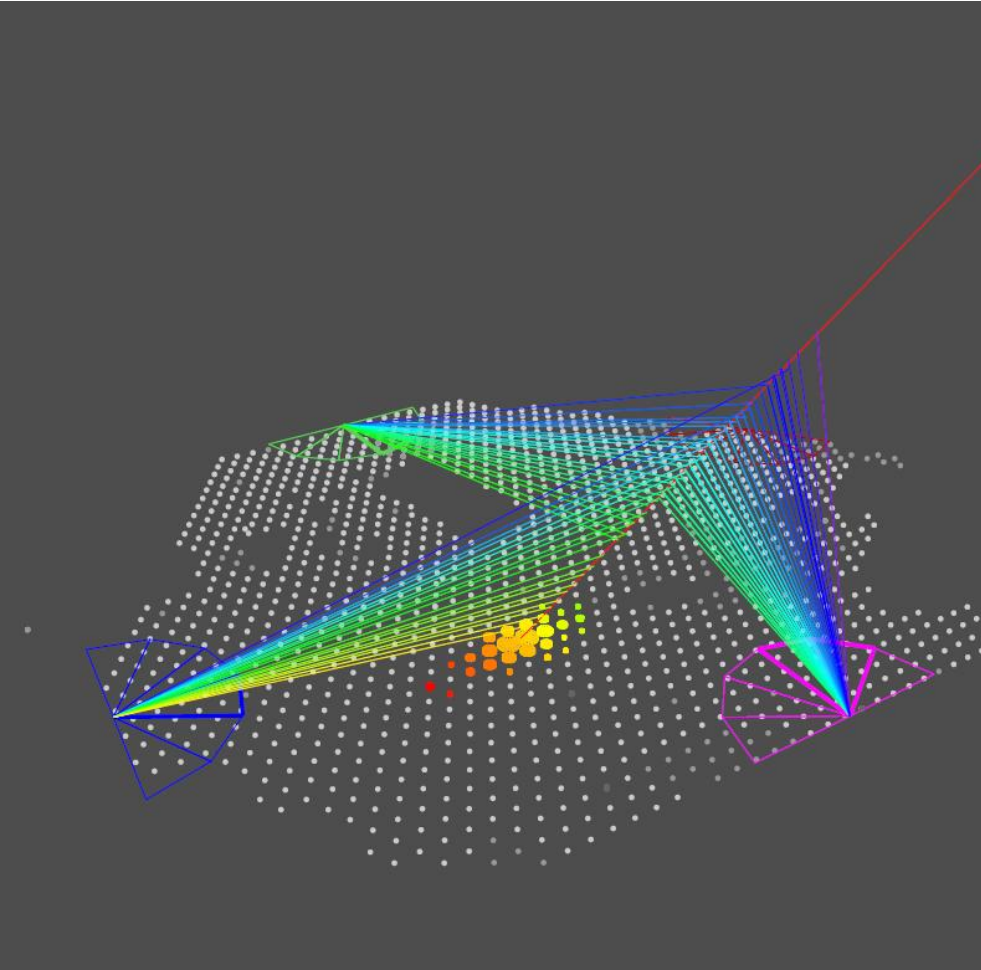
Plastic tank with 12 tons of very pure water





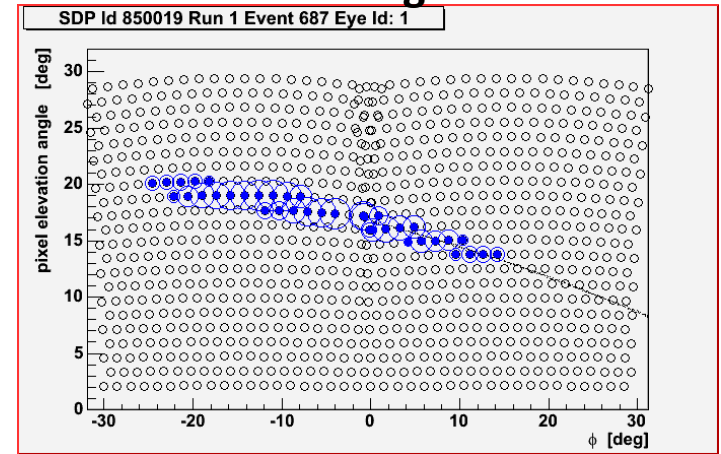
Hybrid Detection

$\Delta\theta=0.2$ degree



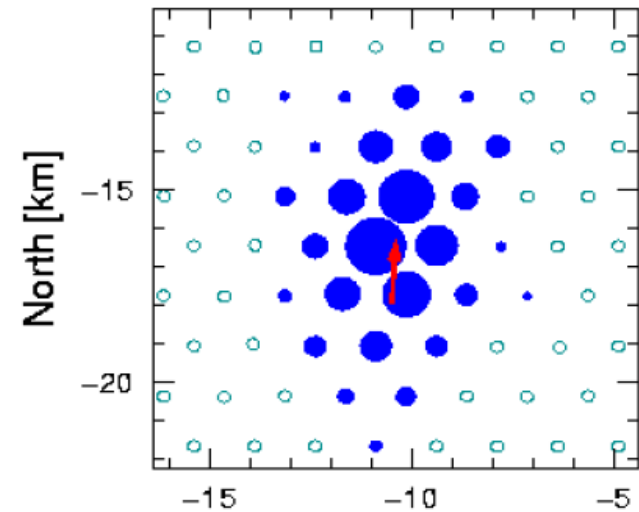
Longitudinal Profile

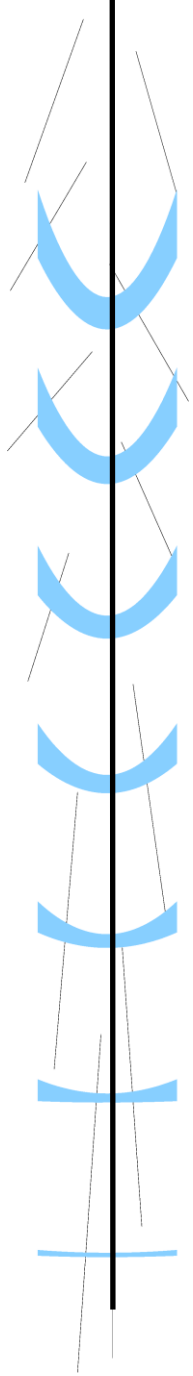
$\Delta\theta=3-5$ degrees



Lateral Distribution

$\Delta\theta=1-2$ degrees





最初は電磁カスケードが主成分

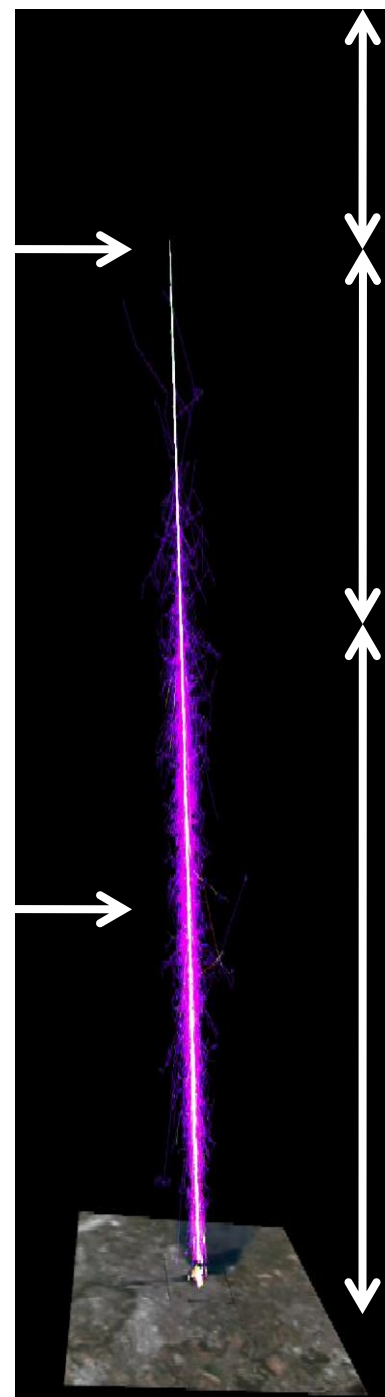
発達が進むと
ミュオンが主成分になる

シャワーフロントは
しだいに薄くなり、
平らになる

first interaction
 $\sim 50\text{g/cm}^2$ X1

観測可能領域

Shower maximum
(X_{max})
 $\sim 700\text{g/cm}^2$

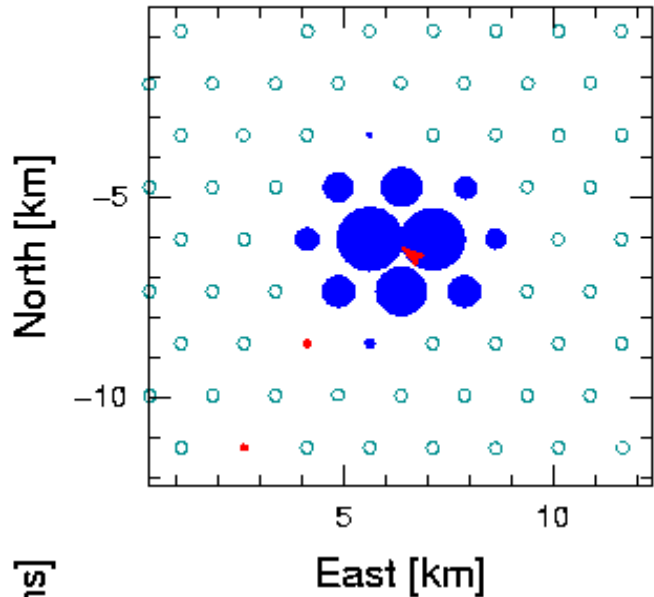


Primary particle

Shower startup

Shower cascade

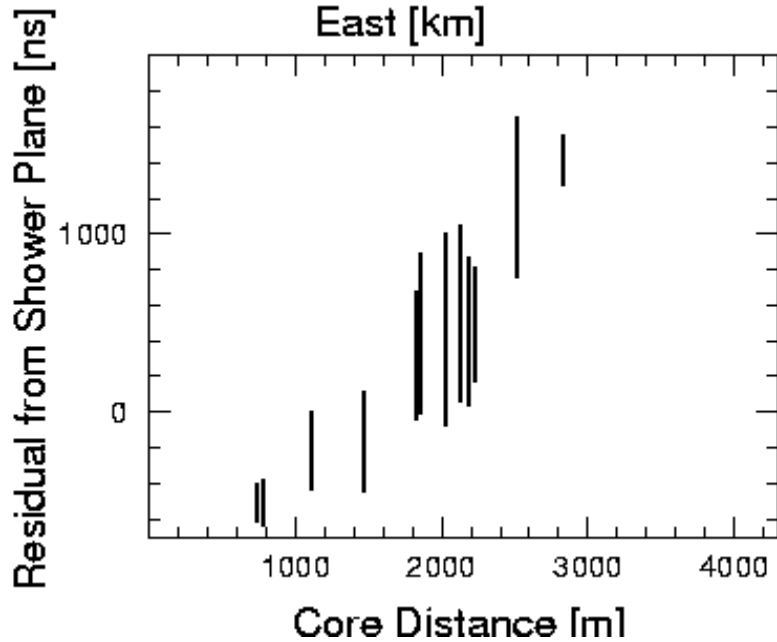
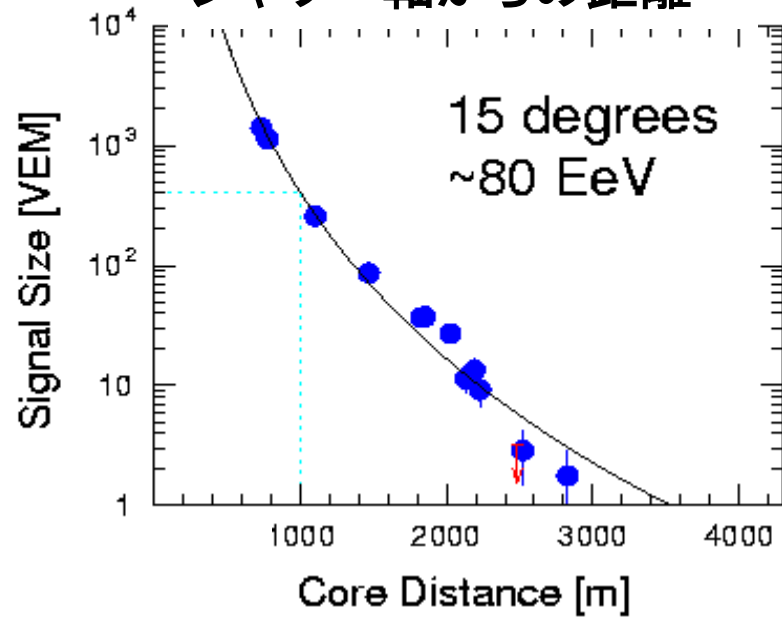
地表アレイで観測された 空気シャワーのイメージ



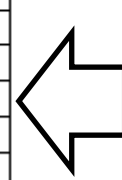
各検出器の信号強度

v.s.

シャワー軸からの距離



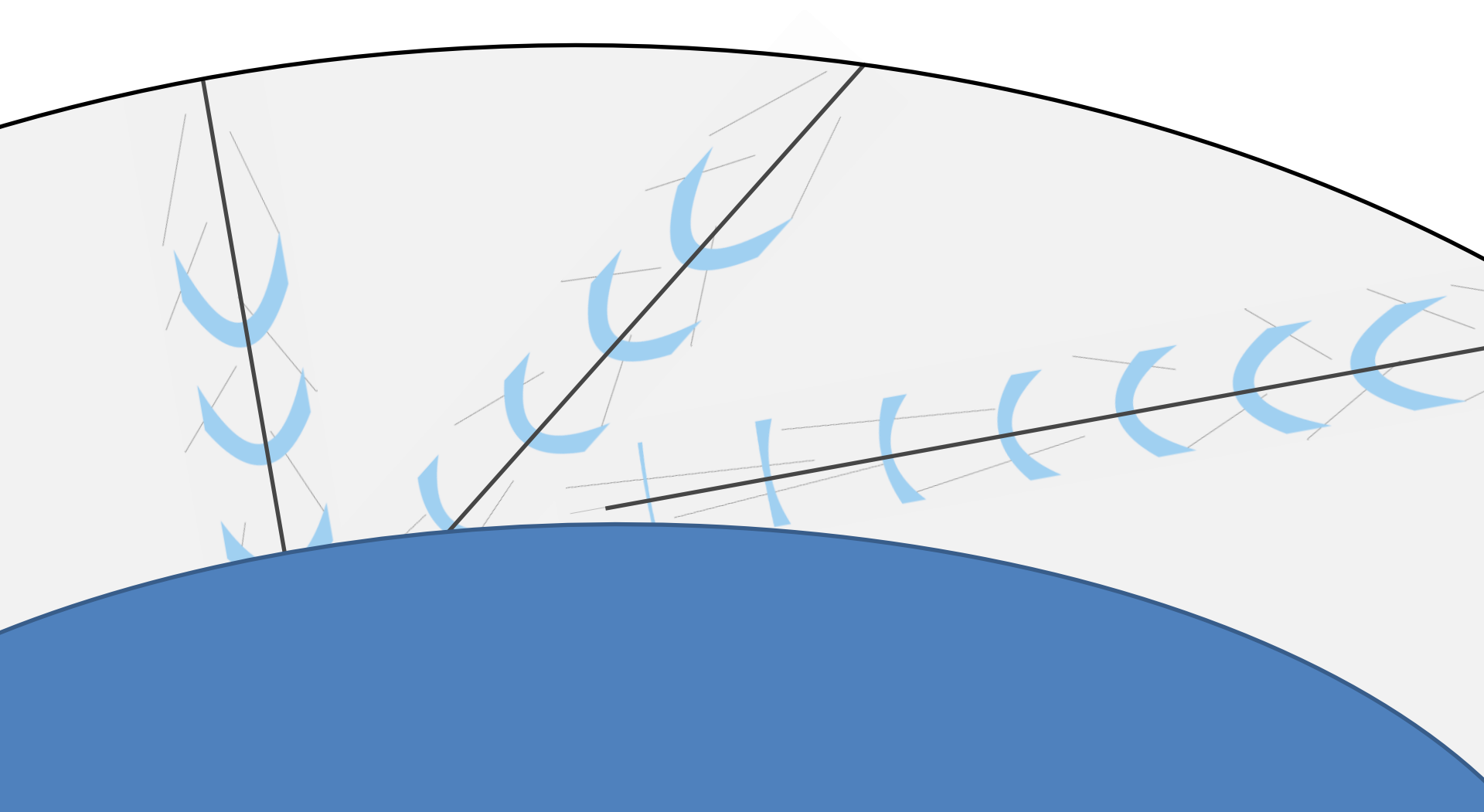
シャワー粒子の横方向分布



シャワー面の時間構造

下端は10%の信号が検出器に入った時間
上端は90%の信号が検出器に入った時間

空気シャワーの天頂角により通過した大気の厚さが変化する
鉛直方向からくる空気シャワーは通過物質が薄い
水平方向からくる空気シャワーは通過物質が厚い

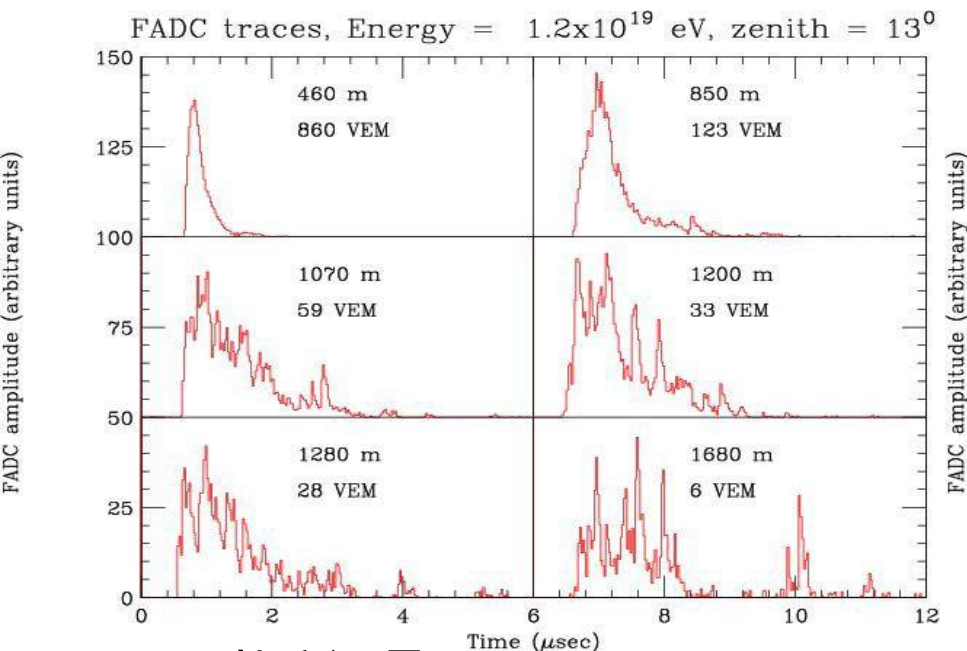


地表検出器の信号の時間構造からシャワー一面の構造が測定できる

つまり地上でのシャワー発達段階が分かる

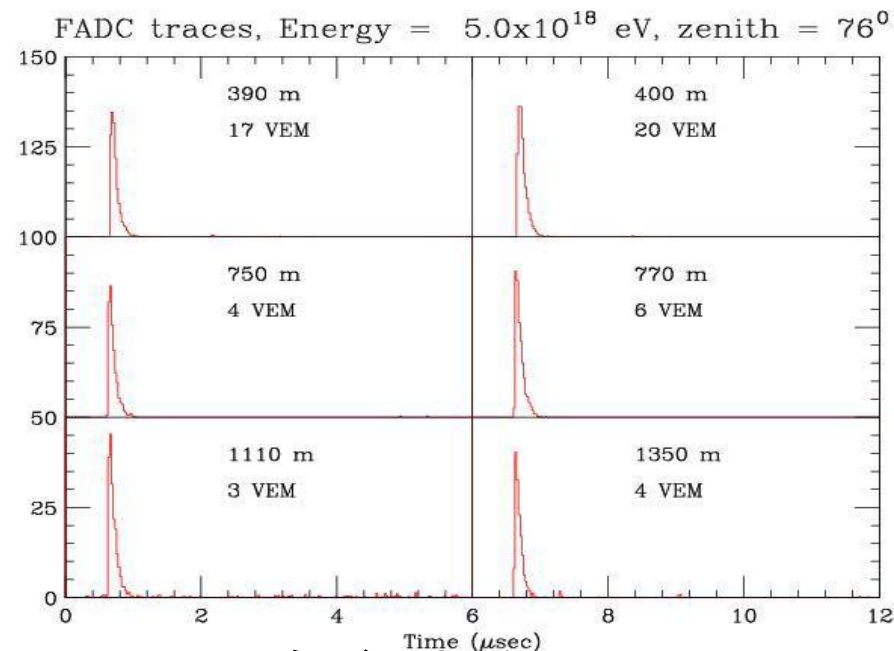
天頂角 13 度
シャワー ディスクが厚い

天頂角 76 度
シャワーディスクが薄い



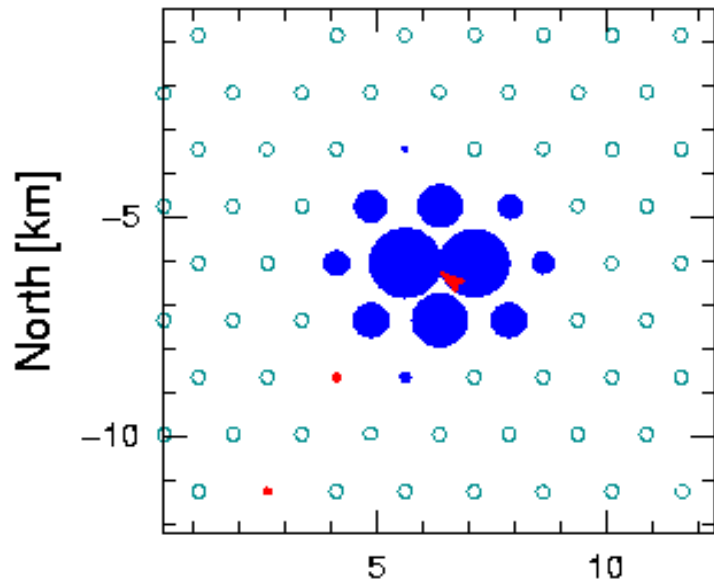
シャワー軸近くは電
磁成分がほとんど

シャワー軸から離れると
ミュオンがほとんど

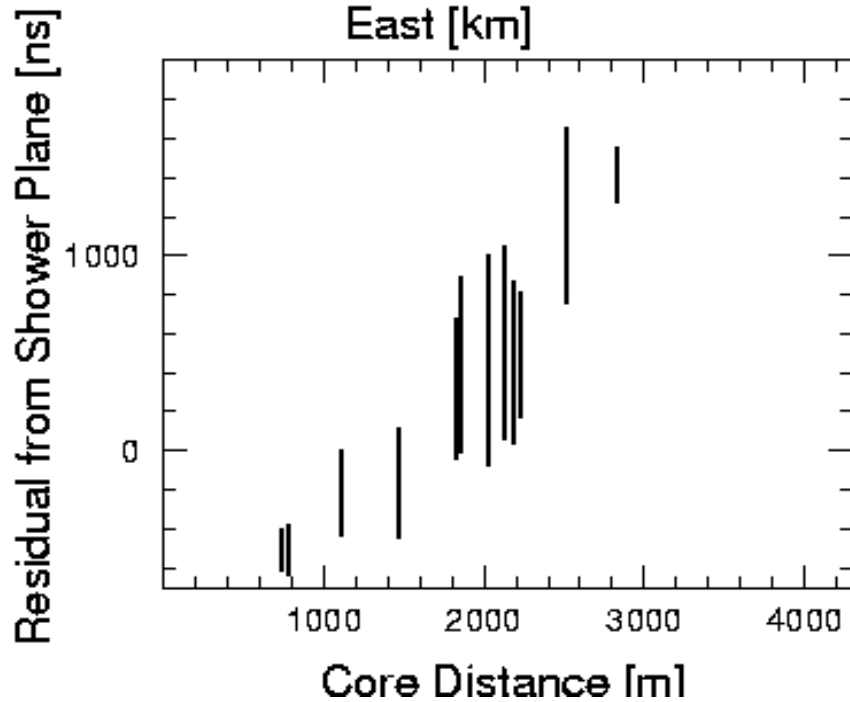
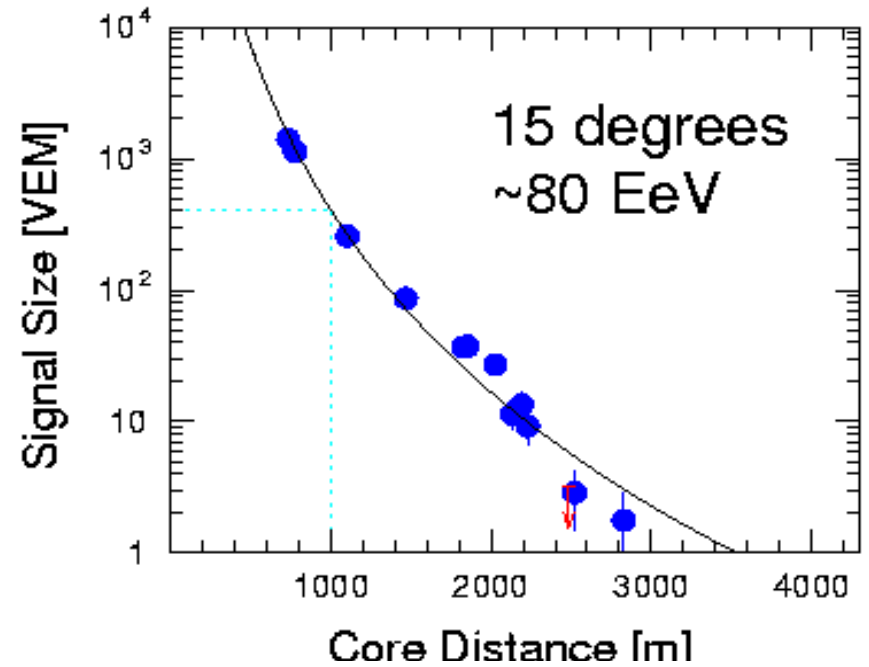


天頂角が大きくなるとミュオン
成分のみになる

ID 1748196



ID 1748196

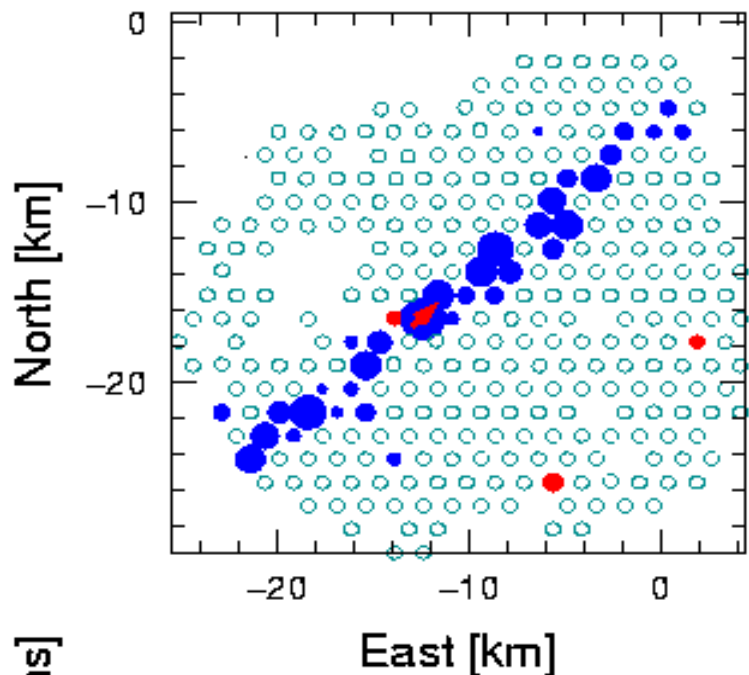


天頂方向からくる空気シャワーは 電磁カスケードが主成分で

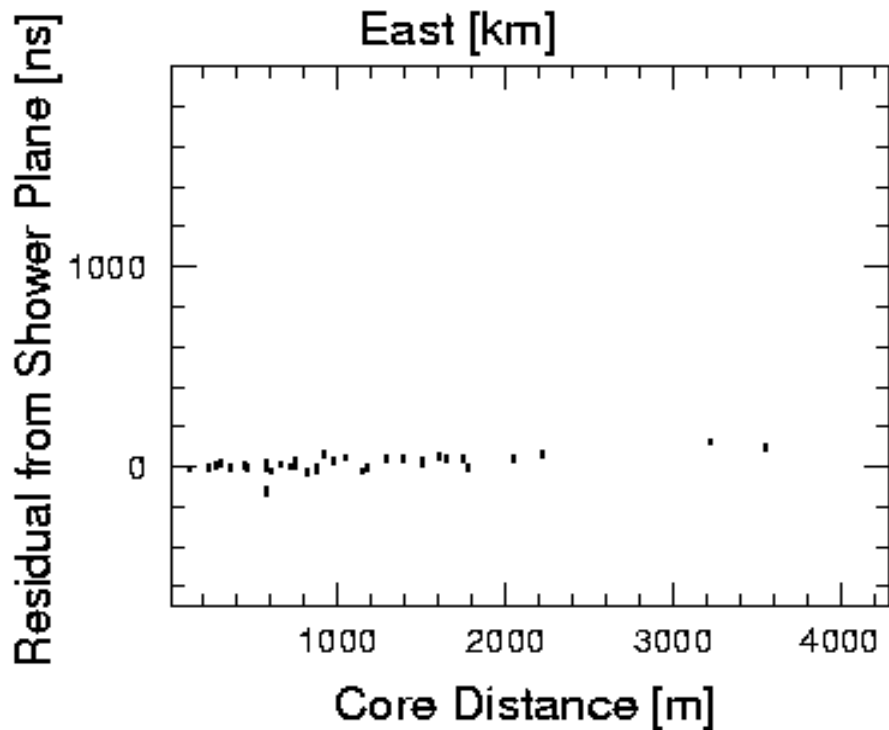
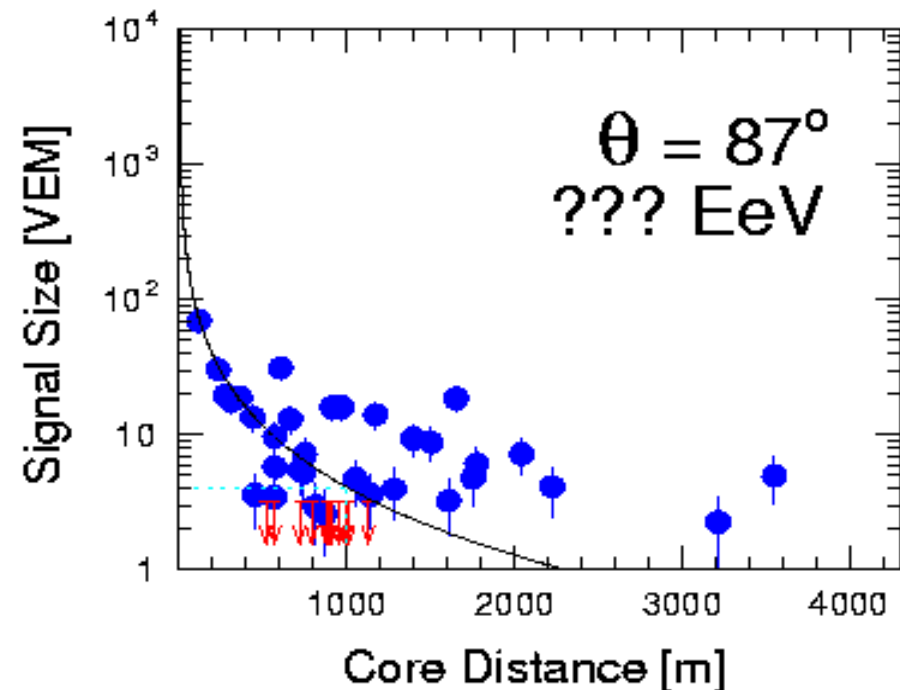
- ①コンパクトなイメージ
- ②急な横方向分布
- ③厚いシャワーデスク
- ④曲率の大きいシャワーフロント

などの特徴がある

ID 767138



ID 767138

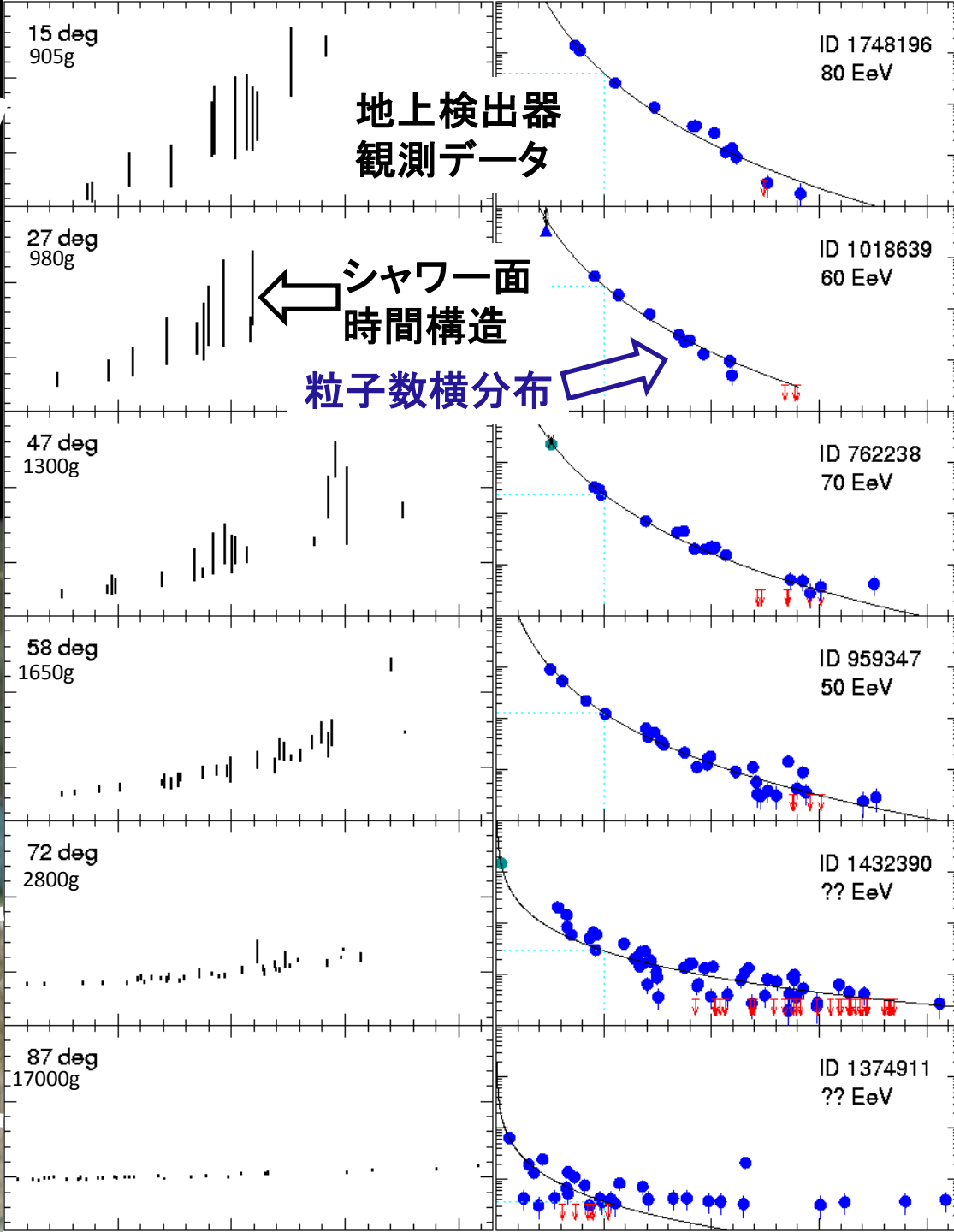
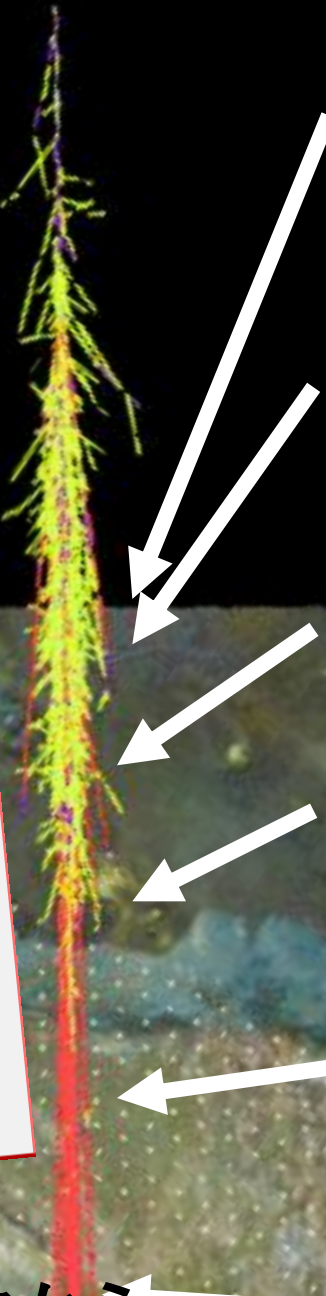
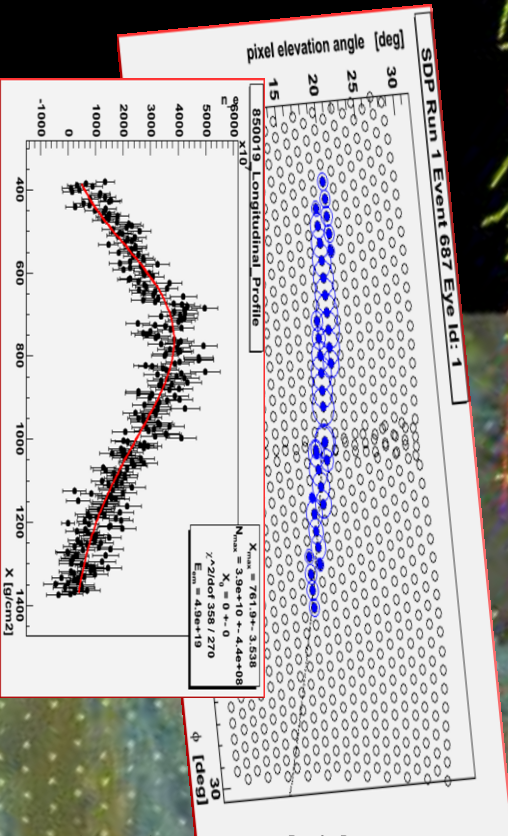


横方向からくる空気シャワーは ミューオンが
主成分で

- ①長く大きなイメージ
- ②フラットな横方向分布
- ③薄いシャワーデスク
- ④平らなシャワーフロント

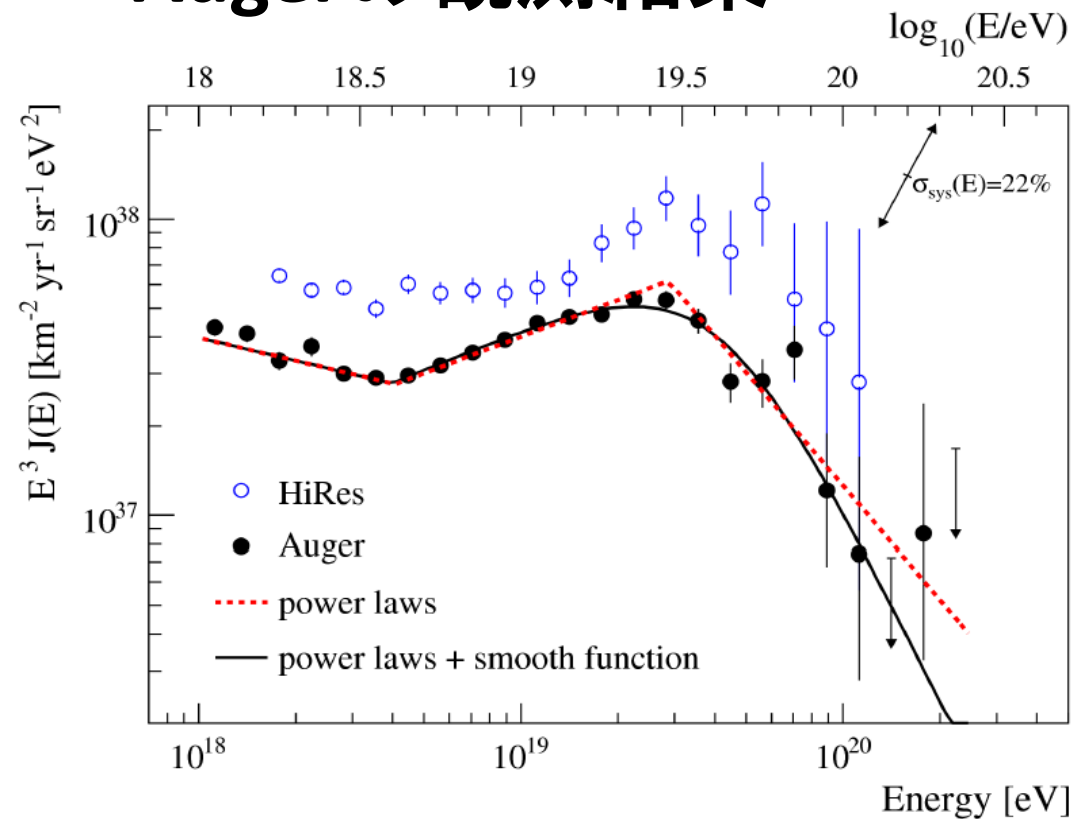
などの特徴がある

MCシミュレーション



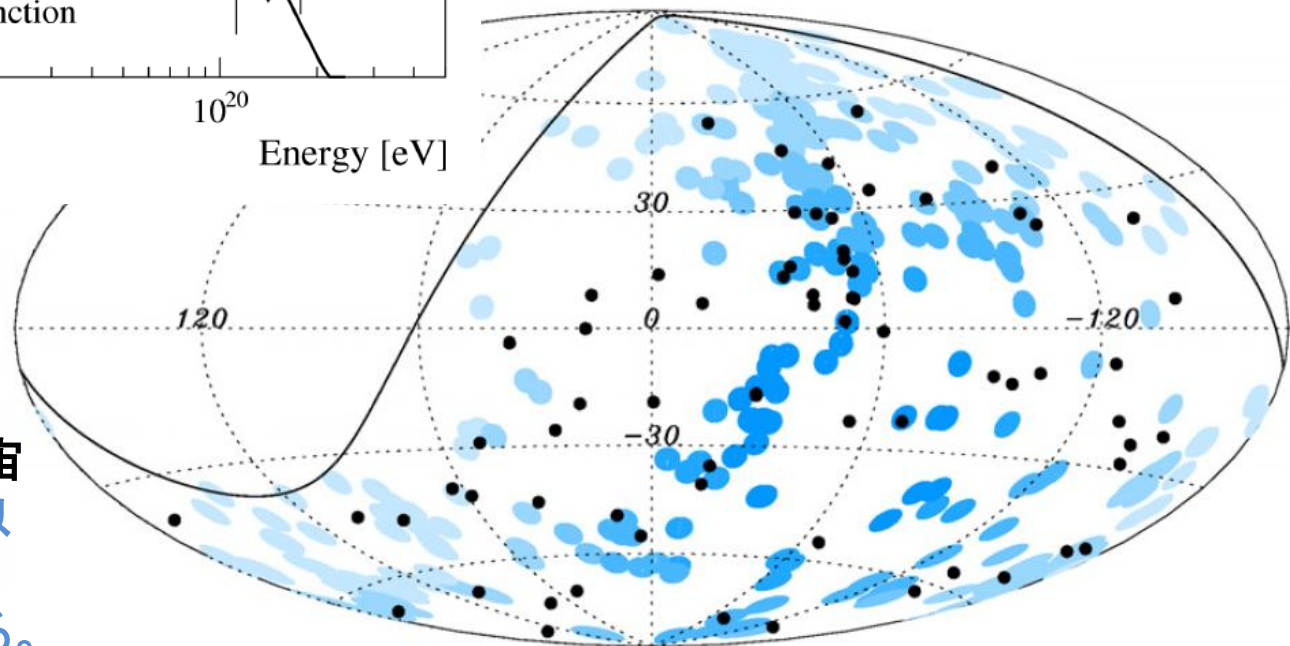
大気蛍光望遠鏡で観測されたシャワー縦方向発達SD, FDのデータから多様な情報が得られる

Augerの観測結果



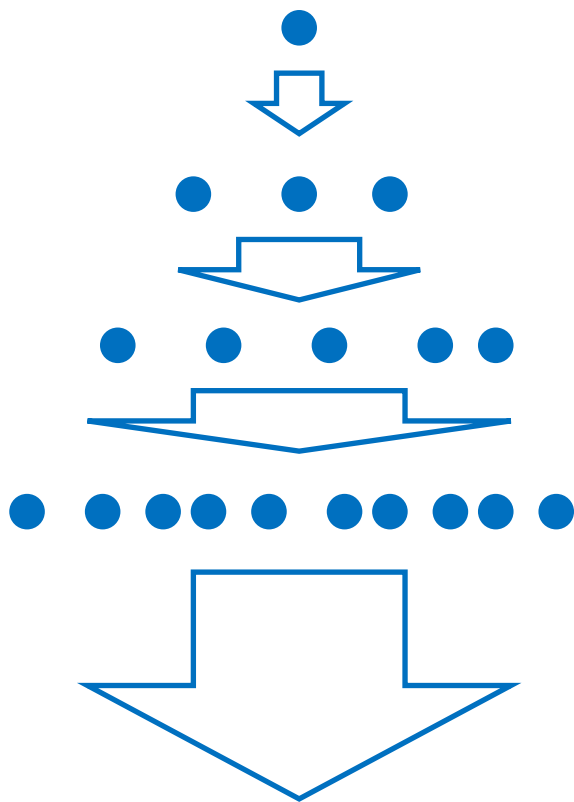
• キャリブレーションの精度が上がっているが、エネルギースケールは変わっていない

• $5.5 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上のエネルギーで、弱い異方性が示唆されている。

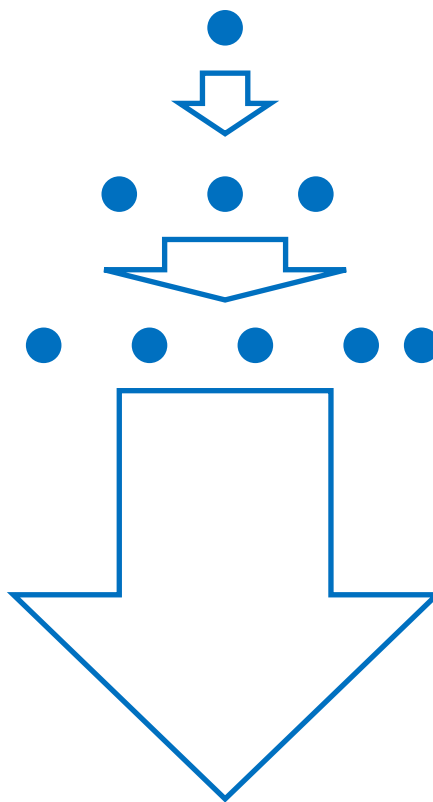


黒丸が $5.5 \times 10^{19} \text{eV}$ 以上の宇宙線到来方向。青丸が75Mpc以内にあるAGNの方向で、色の濃さでExposureを表わしている。

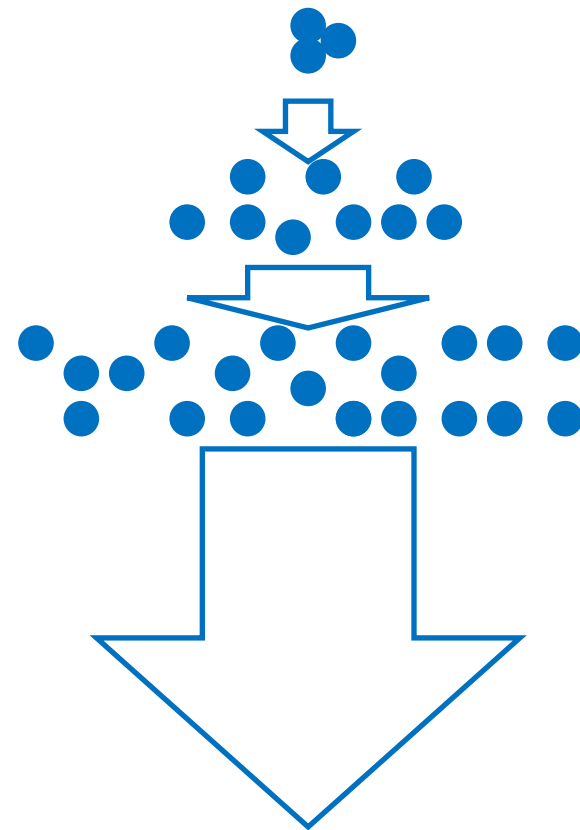
高エネルギー陽子



低エネルギー陽子

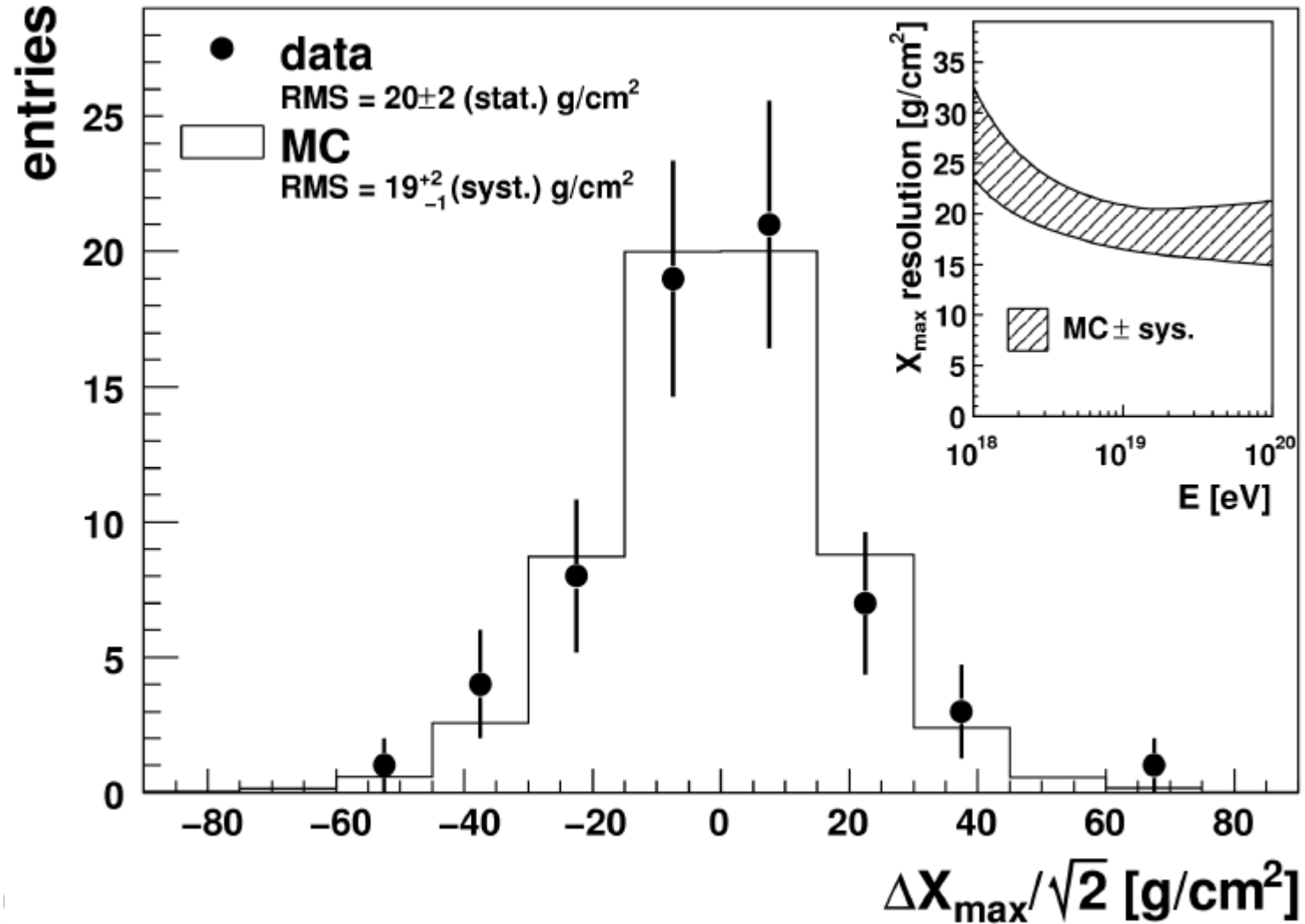


高エネルギー原子核



大気中の電磁カスケードの発達は2次電子のエネルギーが84MeVになったら終わる
高エネルギー陽子は大気深くで最大発達を迎えるが、
低エネルギー陽子と高エネルギー原子核は上空で最大発達を迎える

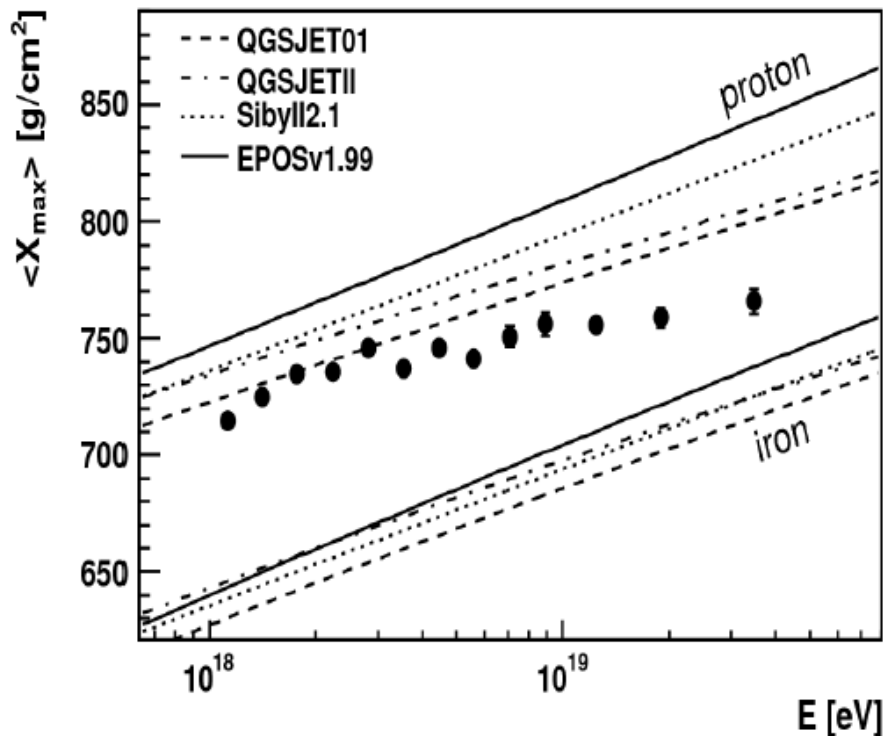
2ヶ所以上の望遠鏡で観測されたデータを使いXmaxの決定精度を実験的に求めている



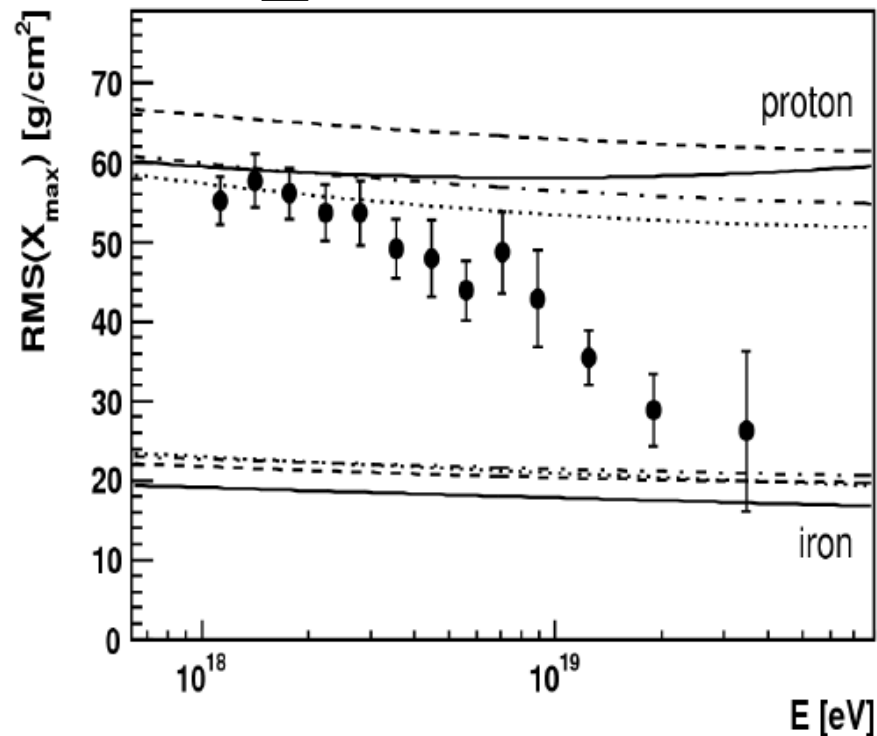
20gの精度でXmaxを決めることができる

Xmax : 空気シャワー最大発達の大気深さ

Xmax -- E

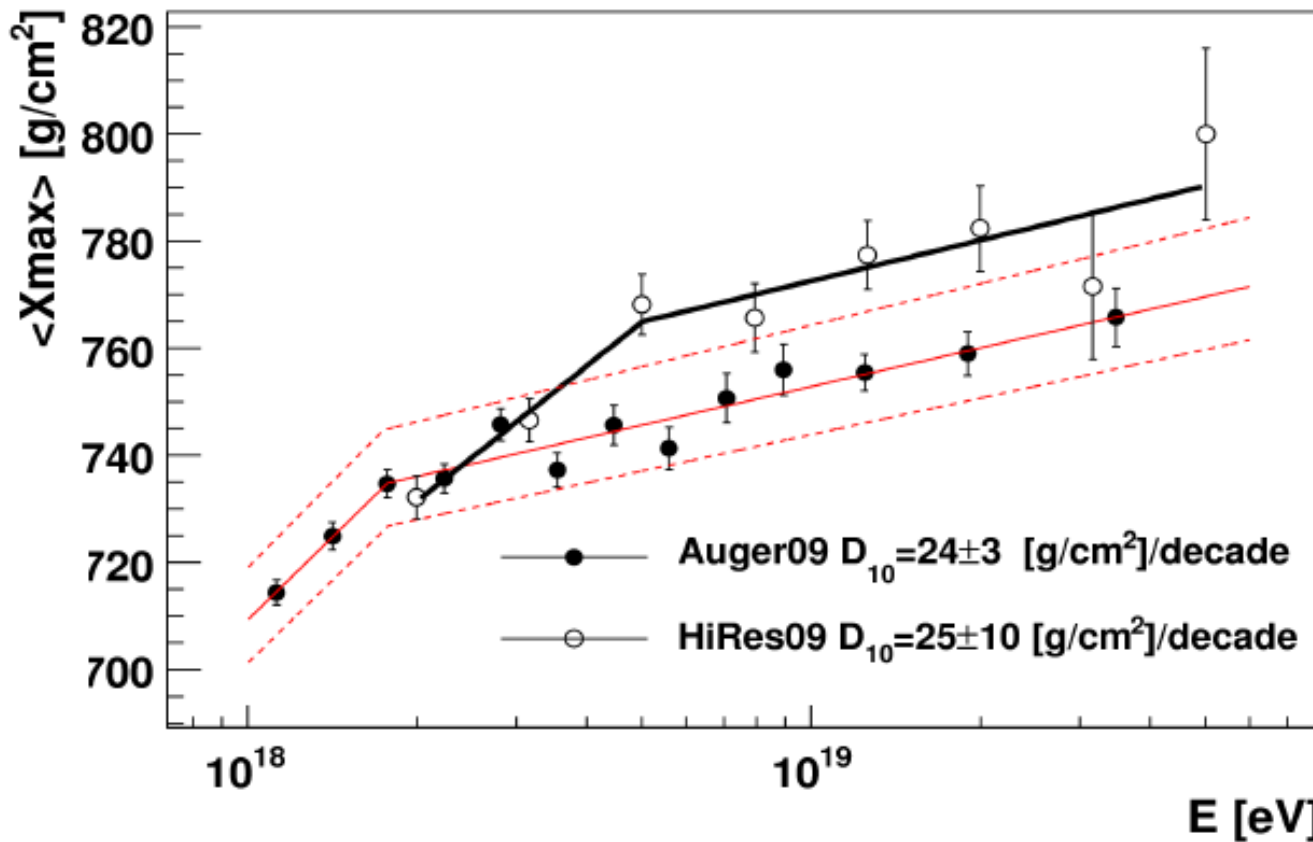


$\sigma_{X_{\max}}$ -- E

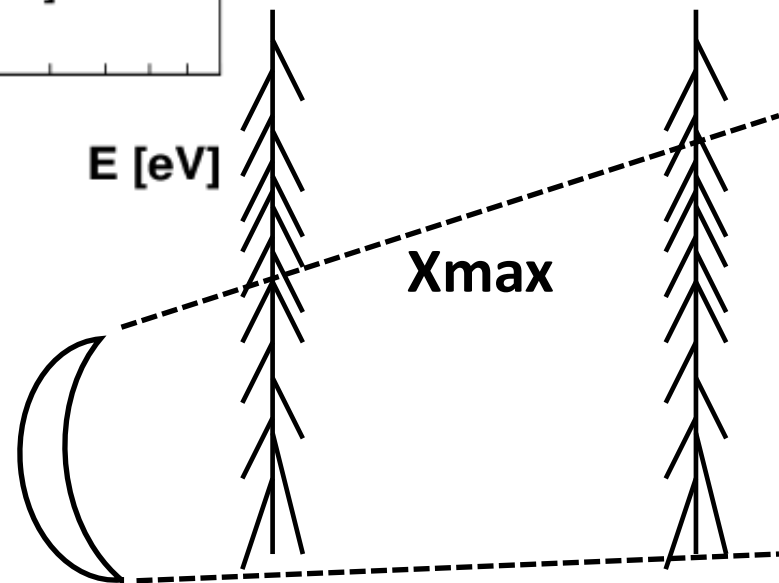


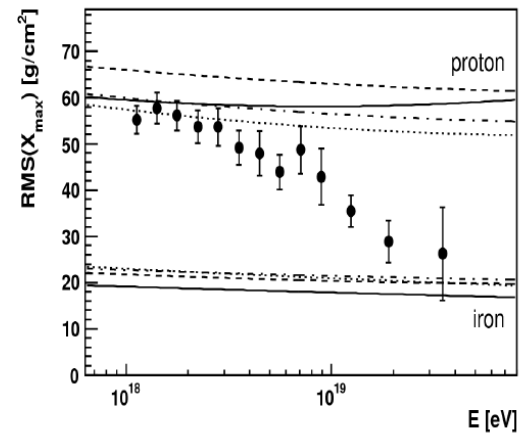
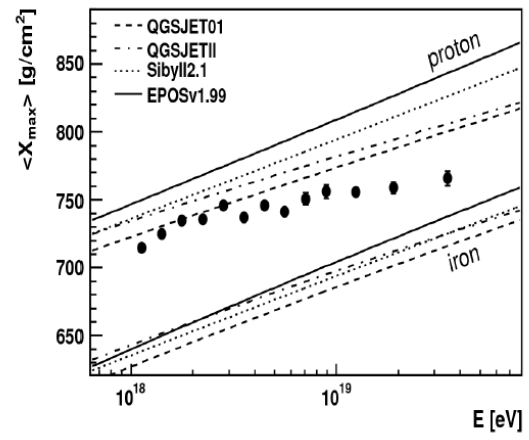
Xmaxの測定は高エネルギーで原子核成分が増えていることを示唆している
 $\sigma_{X_{\max}}$ の揺らぎを測ると、モデル依存性が小さな測定ができる。

Auger と HiRes / TAの結果について解釈が違っている

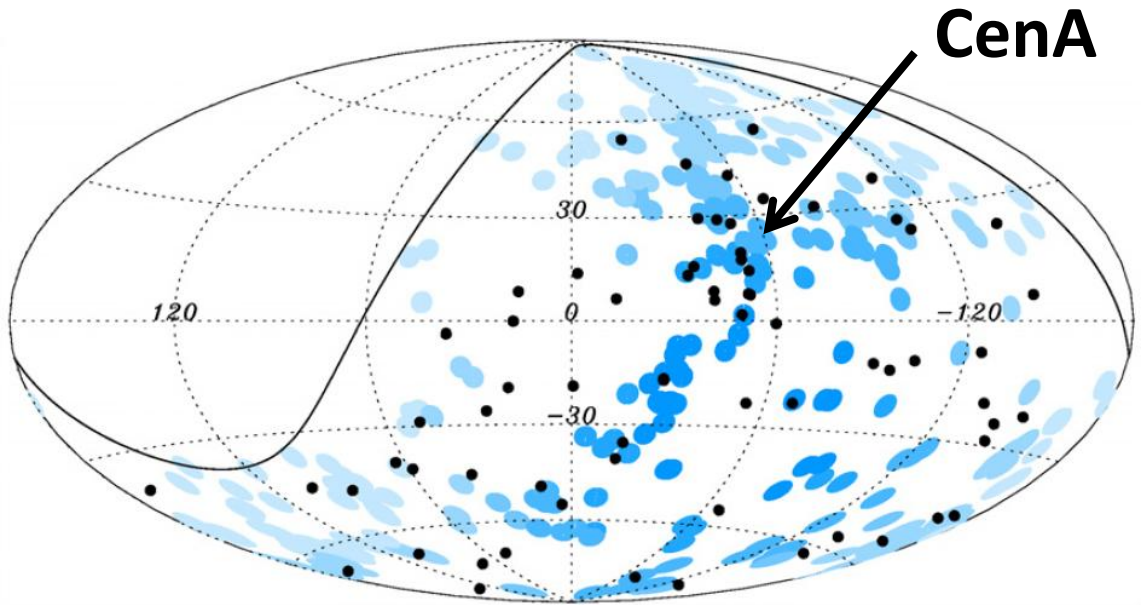


Augerは X_{max} を含んでいない領域をのぞいて解析し、バイアスを軽減してる
HiRes/TAは全ての領域を使い、バイアスをシミュレーションに入れることにより、モデルとの比較を行っている





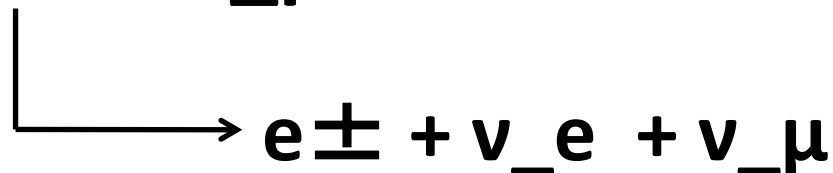
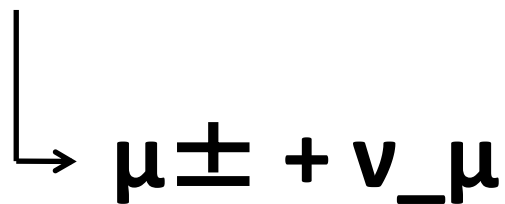
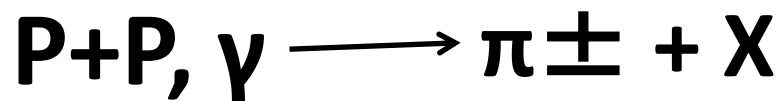
近傍の活動銀河CenAからの鉄が検出されていると仮定すると、低エネルギーの陽子も同時に検出されるはずである。



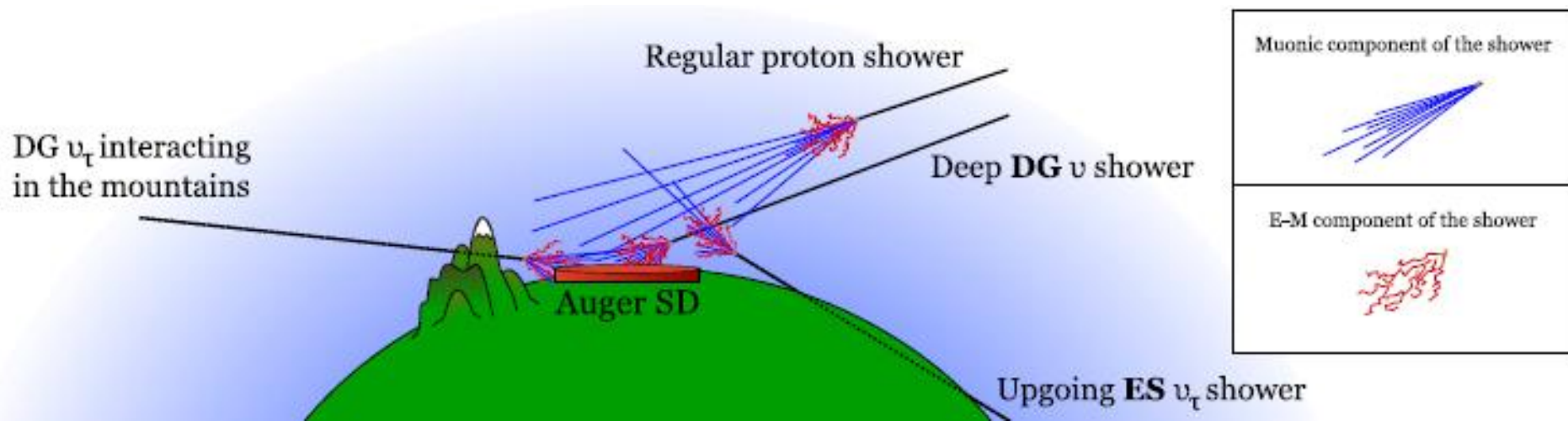
10EeV以下のエネルギーでは2%レベルで等方性が確認されているので、検出結果と矛盾する。

宇宙線源の特定はニュートリノ検出が最強

最高エネルギー陽子は、発生源と、伝搬過程でニュートリノを放出する



大気深くで発達したシャワーを探せば
ニュートリノを検出できる

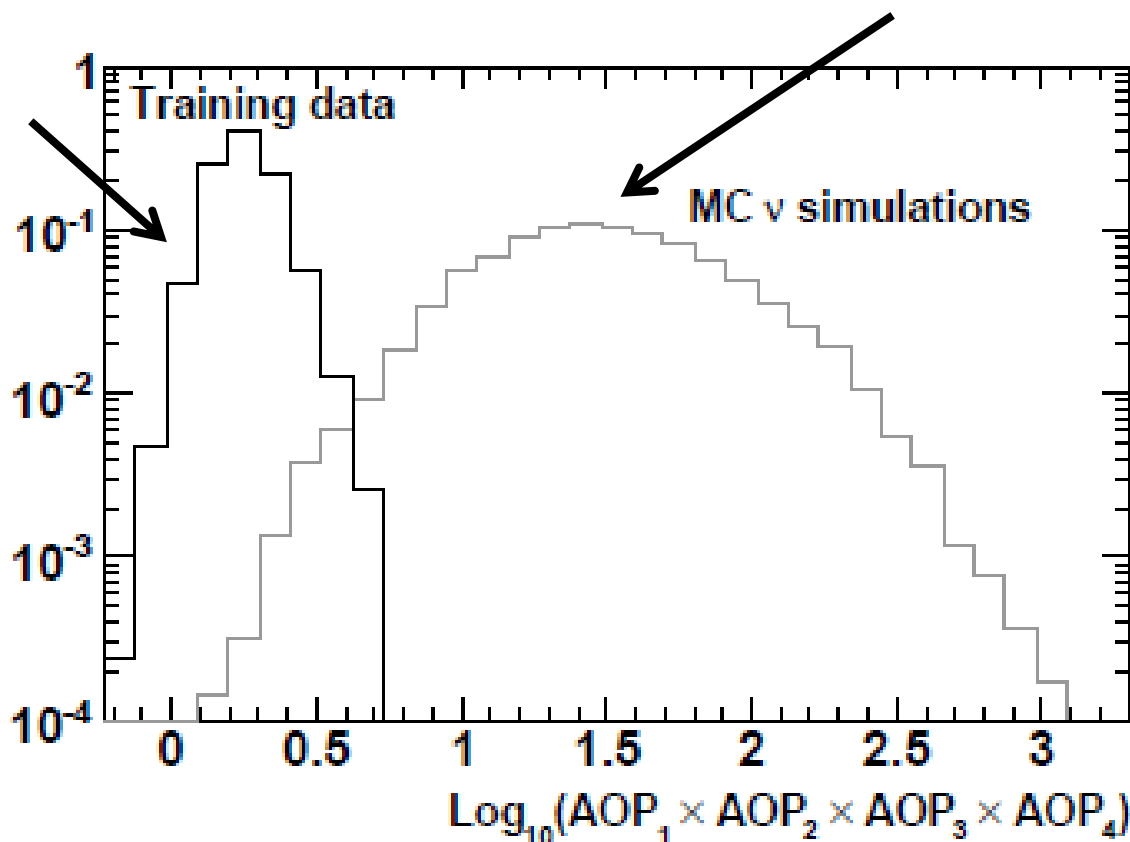


地表検出器によるニュートリノ検出

信号の時間構造により水平方向シャワーから未発達シャワーを抜き出す

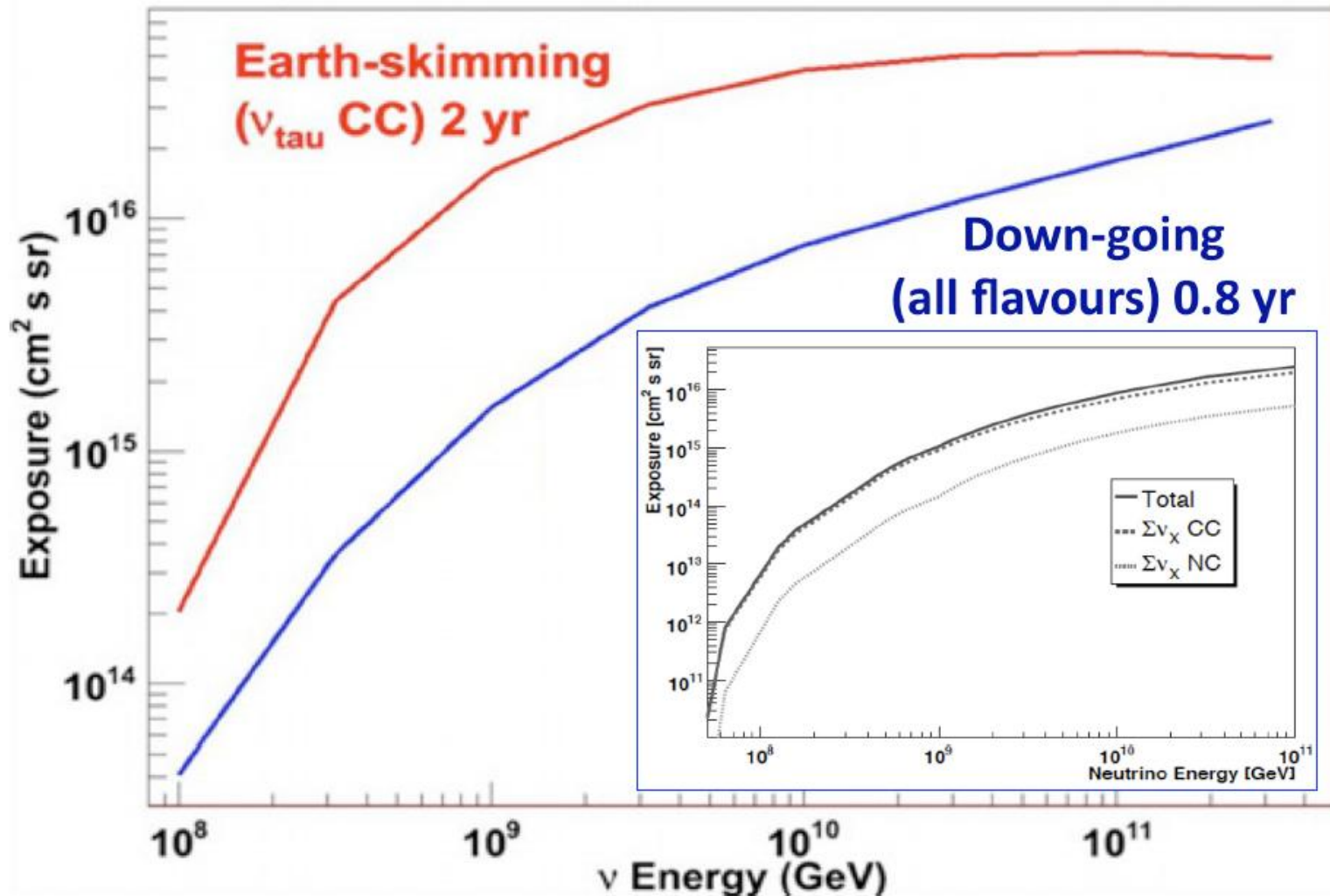
地表アレイによる水平方向シャワーの信号から求めたShape Parameter分布(観測データ)

下向きニュートリノから生じる2次粒子が作るシャワーから期待される分布 (MCシミュレーション)



各検出器での信号の形を表わすパラメータ

Neutrino Auger Exposure



一年あたりのExposure

Neutrino

2×10^{16} [cm²sr s]

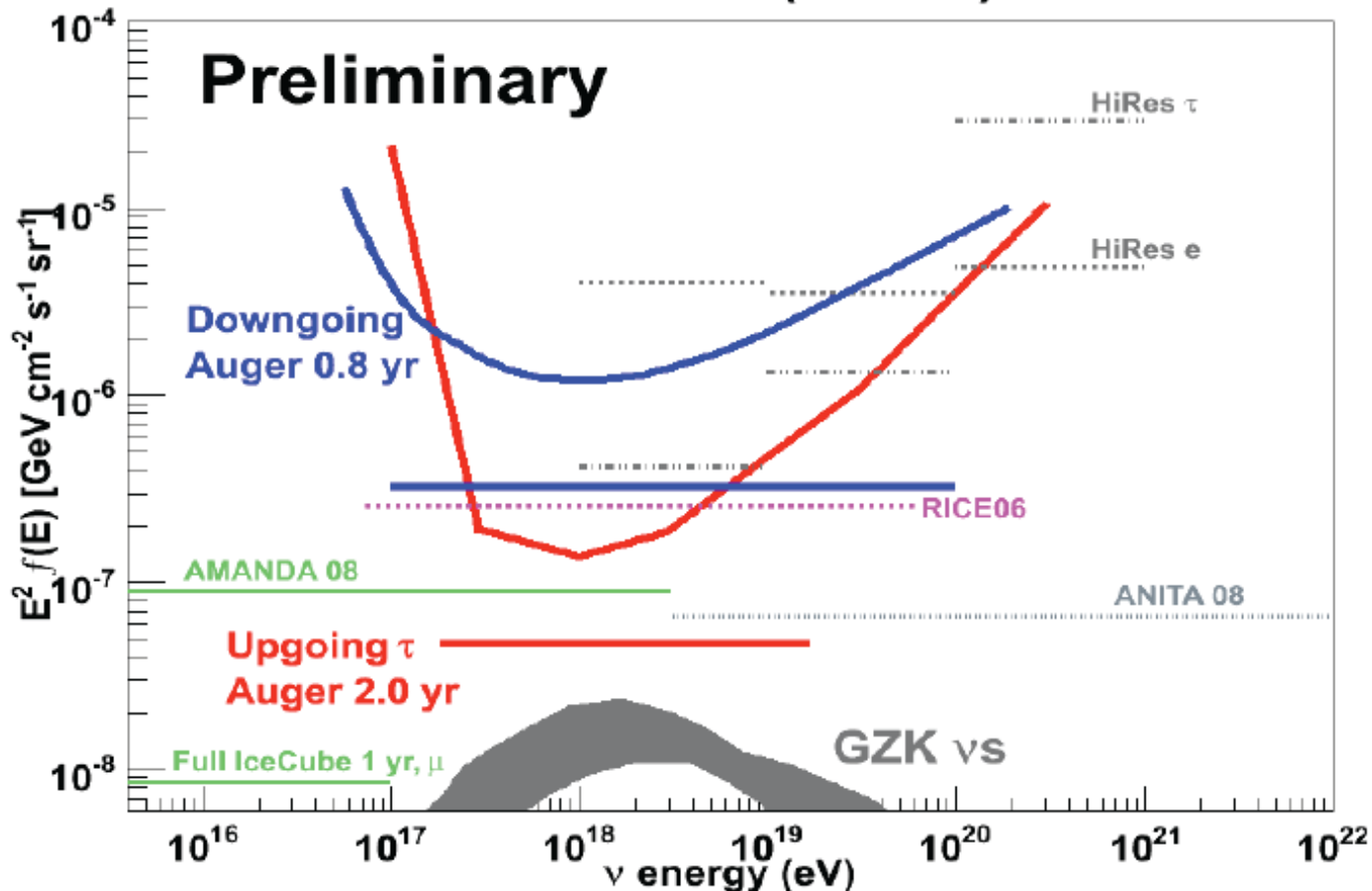
Hadronic

2×10^{21} [cm²sr s]

Upper Limit on Flux on neutrinos from Auger

2009年2月までのデータ

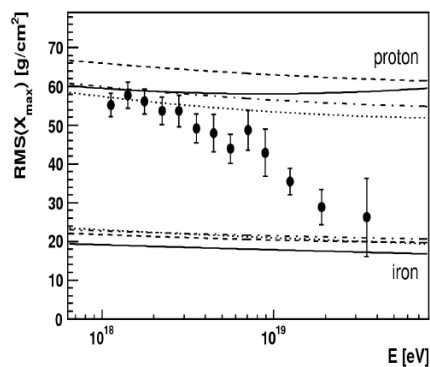
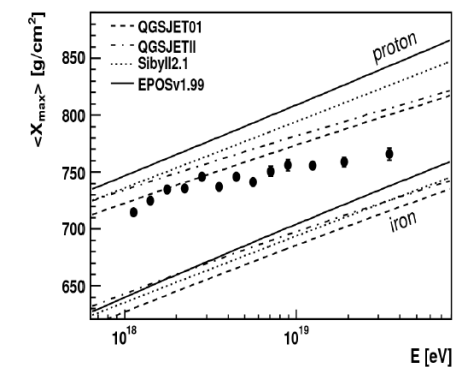
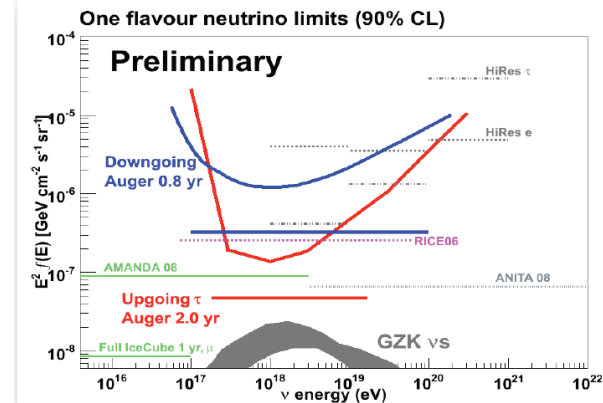
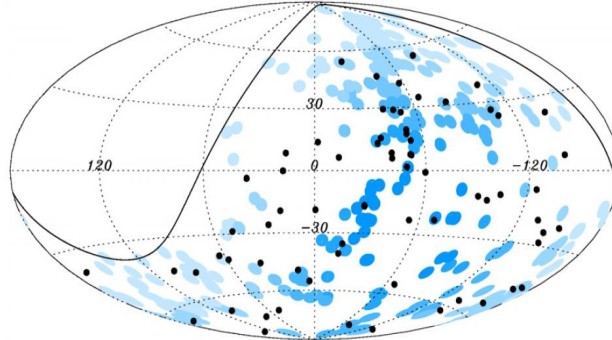
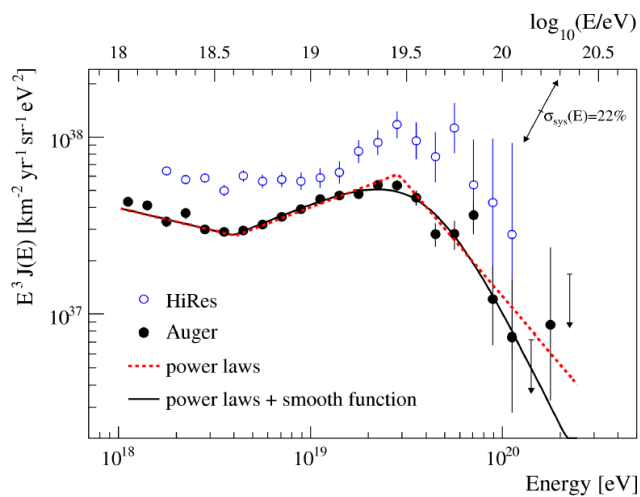
One flavour neutrino limits (90% CL)



もうすぐGZK
ニュートリノまで
到達する。

$$E_\nu^2 \Phi(E_\nu) < 3.2 \times 10^{-7} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (\text{Downgoing})$$

$$E_\nu^2 \Phi(E_\nu) < 4.7 \times 10^{-8} \text{ GeV cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \text{ sr}^{-1} \quad (\text{Upgoing } \tau)$$



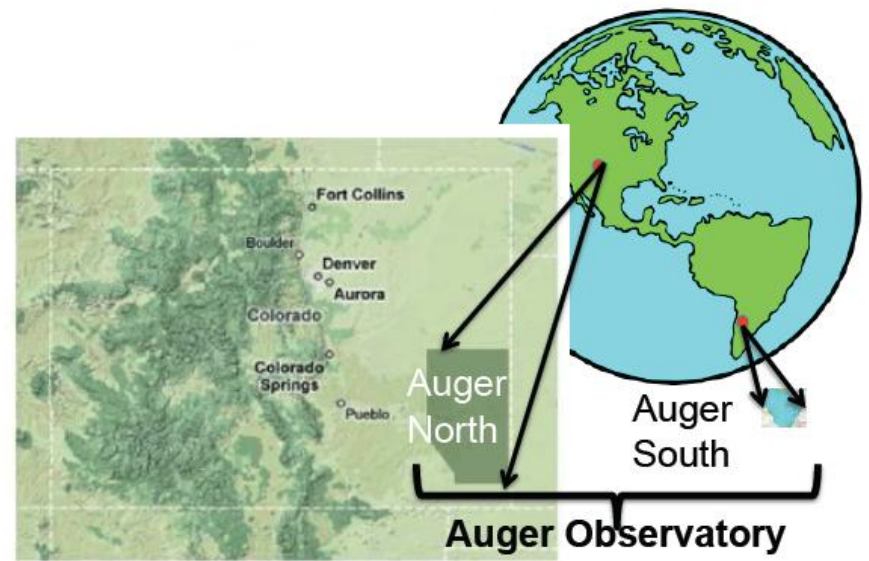
5x10¹⁹eV以上のフラックスの減少の起源はなにか？

- UHECRが陽子でCMBとの相互作用によるものなら γ と ν が見えてくるはず。
- UHECRが鉄だと ...
- 源での加速限界??

10²⁰eV付近の化学組成の測定と、低エネルギー一拡張計画が現在の中心課題になっている

北Auger

- 米国コロラド州に南Augerの7倍以上の観測所を作る計画を米国でNFSとDOEに提案
- 2009年9月にParticle Astrophysics Scientific Assessment Group (PASAGE)がレポートを提出。科学予算が3.5%の率で増え続ければCTAをサポート。さらに6.5%増え続ければ北Augerもサポート。
- 2010年8月にAstro2010 decadal surveyが公表される。UHECR観測はサポートされなかった。
- 2010年9月にUS Funding Agenciesから解答がある。「**粒子天文学上重要な発見がない限り北Augerに予算をつけない**」
- **南Augerのサポートは続ける**
- EUでは今年ASPERAで高エネルギー宇宙線の”innovation detection method”に1.8MEuroついた。
- EUでMulti-Messenger全天観測の提案がMP7に10MEuroなされている。



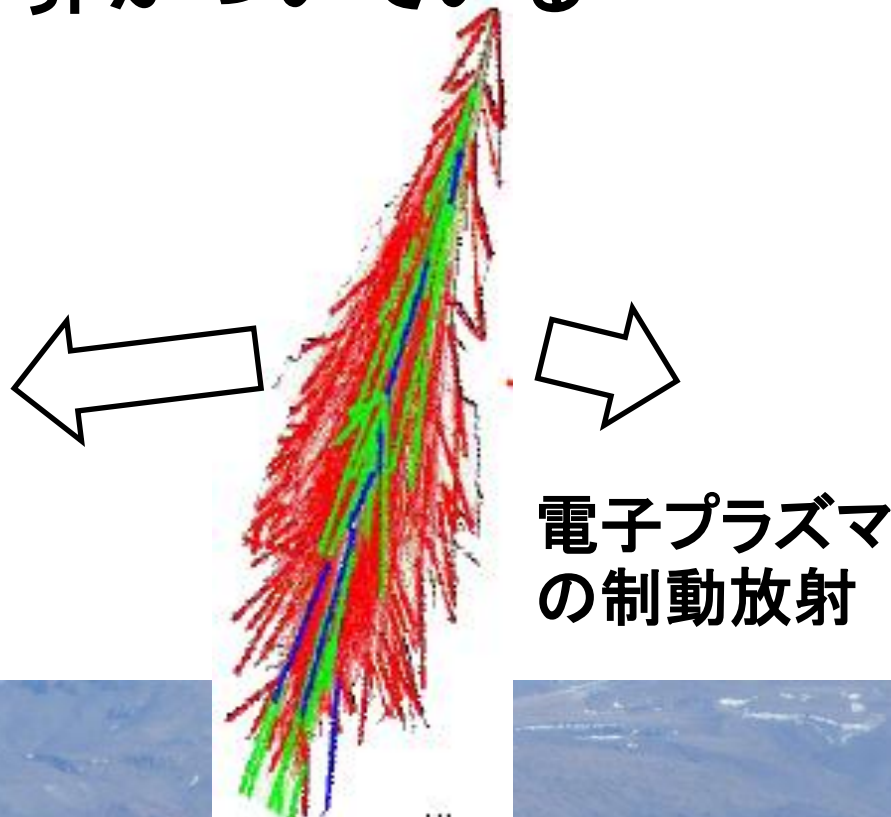
- Auger Nextなど新しい枠組みを作り全天観測を目指す。
- 現実的に南Augerの拡張を行いながら結果を見て対応を考えるか。。



北Augerサイトに先週
設置された最初の地
表検出器

まだあきらめていない

低予算で開発ができる 空気シャワーからの電波観測に予算がついている



電子プラズマ
の制動放射



地磁気による
シンクロトロン
放射

大阪市立大一甲南大により建設中の宇宙線電波望遠鏡

大学の屋上に1.2m口径のBSアンテナを12台設置し、空気シャワーからのマイクロ波を測定するシステムを建設中



まとめ

- Full Auger 2年分のデータによる スペクトル、異方性、光子制限、ニュートリノ制限が公表されている。
- 今後「スイス時計」のように定期的に結果を更新する予定
- 高エネルギー相互作用に関する解析を行っている
- 宇宙線源特定に向けて、空気シャワーを高精度で測定できる巨大な地上検出器の建設が必要