



The First Results from The Pierre Auger Project

史上最大の検出器による 最高エネルギー宇宙線の観測

山本常夏 @ シカゴ大
for the Pierre Auger Collaboration

北半球
コロラドUSA
建設予定



南半球
アルゼンチン
建設中



概要

- **実験の現状**
 - 目的
 - 建設状況
 - パフォーマンス
- **観測結果**
 - 観測された高エネルギー宇宙線
 - 相互作用モデルに依存しない！ エネルギー決定
 - エネルギースペクトラム

実験の目的

➤ 10^{19} eV以上の宇宙線のエネルギーースペクトラム

- GZK 領域 エネルギーースペクトラムの構造
- $E > 5 \times 10^{19}$ eV で宇宙背景放射と相互作用

➤ 到来方向

- 宇宙線の起源と伝播

➤ 化学組成

- 陽子、原子核、ガンマ線、Exotic 粒子

設計概念

➤ 高統計精度-- 南北両半球に $>7000 \text{ km}^2 \text{ sr}$ の検出面積

➤ ハイブリット検出 – 地表検出器と大気蛍光望遠鏡

➤ 一様な視野で全天探索

➤ 国際協力

The Auger Collaboration

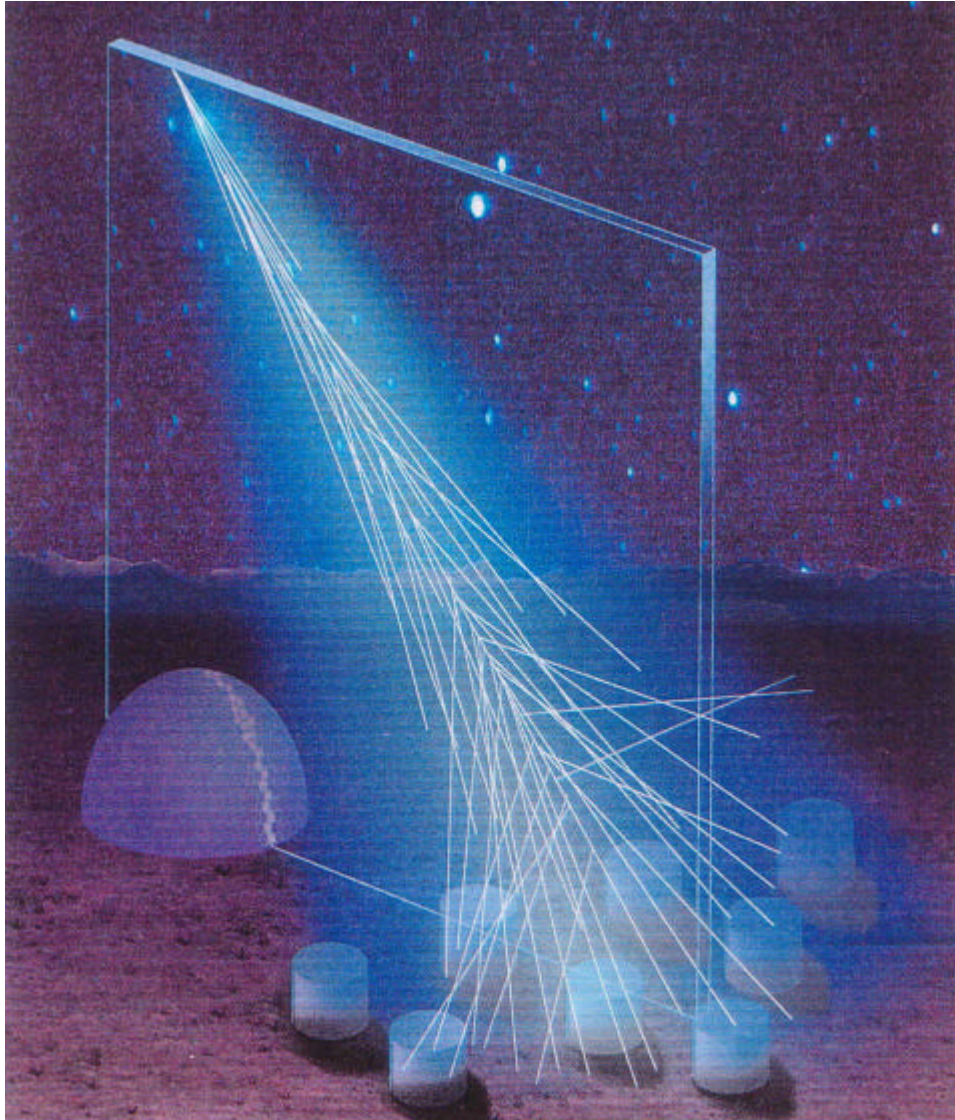
- 14カ国による国際共同実験

- | | |
|-----------|----------|
| • アルゼンチン | メキシコ |
| • オーストラリア | ニュージーランド |
| • ボリビア | ポーランド |
| • ブラジル | スロバニア |
| • チェコ共和国 | スペイン |
| • フランス | イギリス |
| • ドイツ | アメリカ |
| • イタリア | ベトナム |



63 グループから
369 人のPhD

ハイブリット設計



大面積地上アレイと大気蛍光望遠鏡の組み合わせによるユニークで効率的な設計

- 同時観測により カロリーメトリックなエネルギー測定を100%の検出効率で実現
 - 望遠鏡 検出効率 ~10%
 - 地上アレイ検出効率 ~100%
- 独立な測定により系統誤差の測定が可能
- ハイブリット解析により 高精度観測
 - ハイブリット解析 角度決定精度~0.5度
- 空気シャワーの縦横両方向の観測により宇宙線の化学組成を包括的に測定

The Auger Observatory

地上アレイ

1600 検出器

1.5 km 間隔

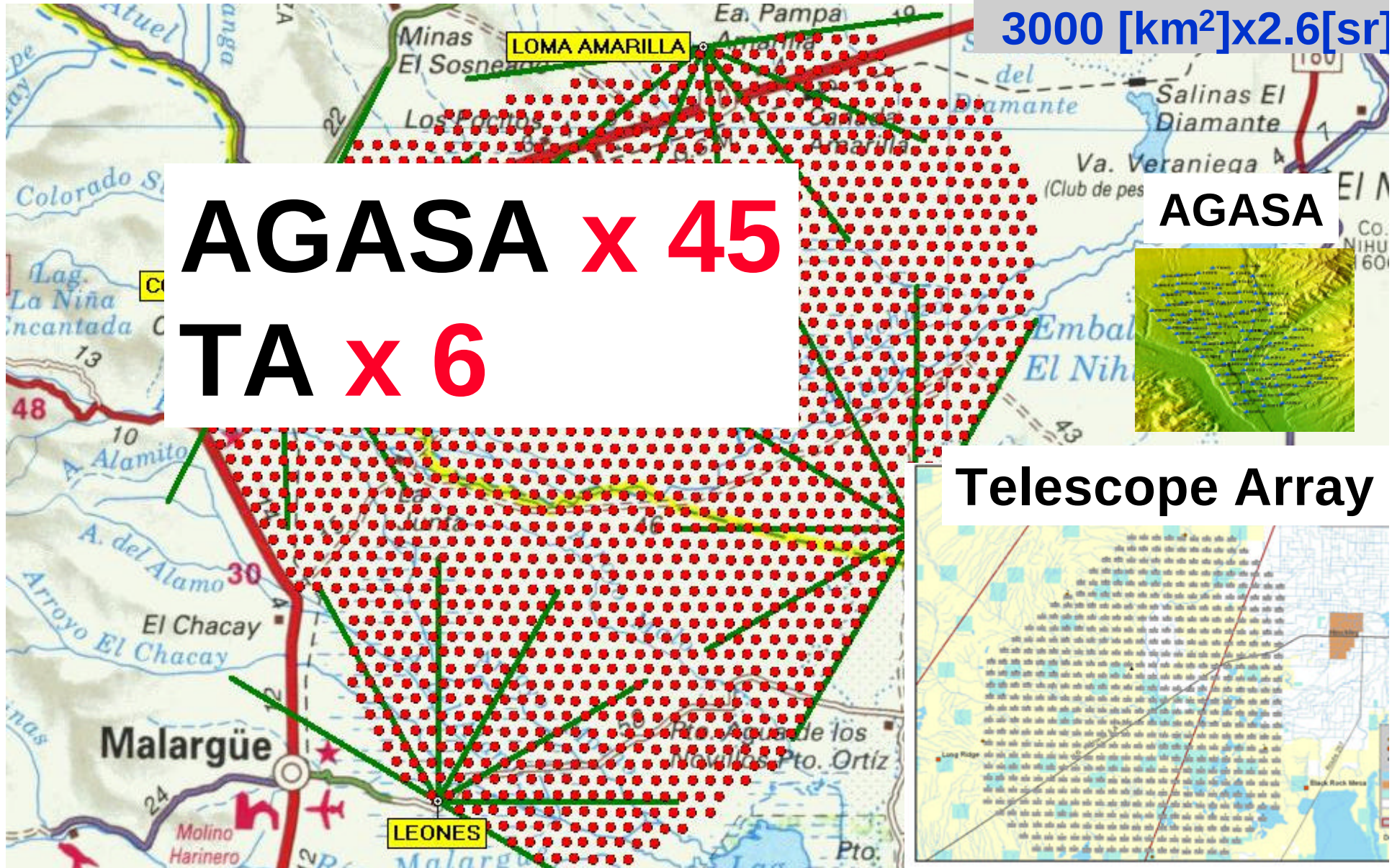
$3000 \text{ [km}^2\text{]} \times 2.6 \text{ [sr]}$

AGASA x 45

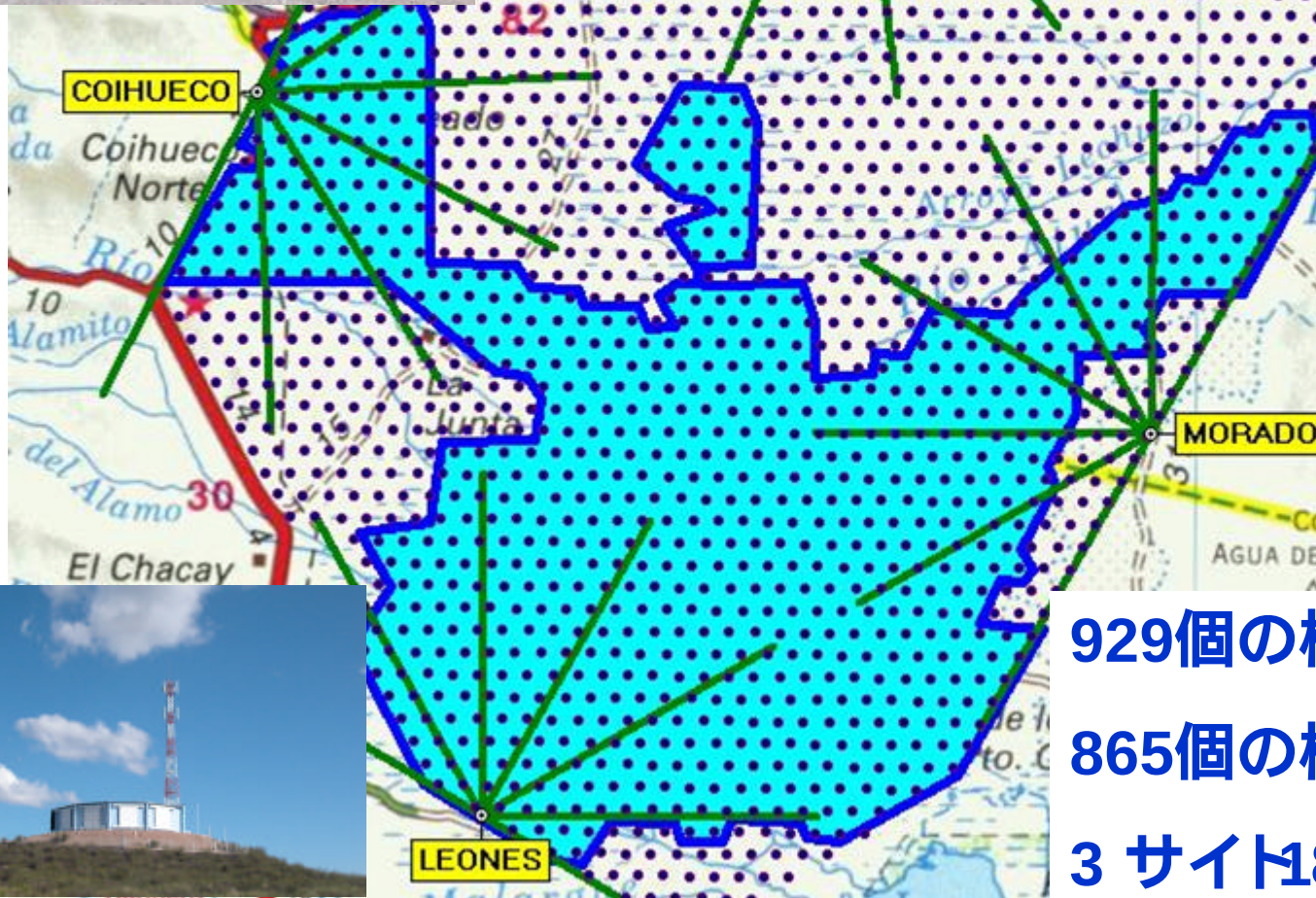
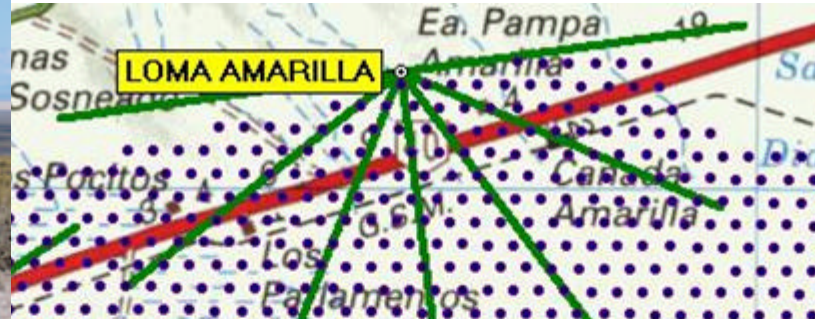
TA x 6

AGASA

Telescope Array



建設状況



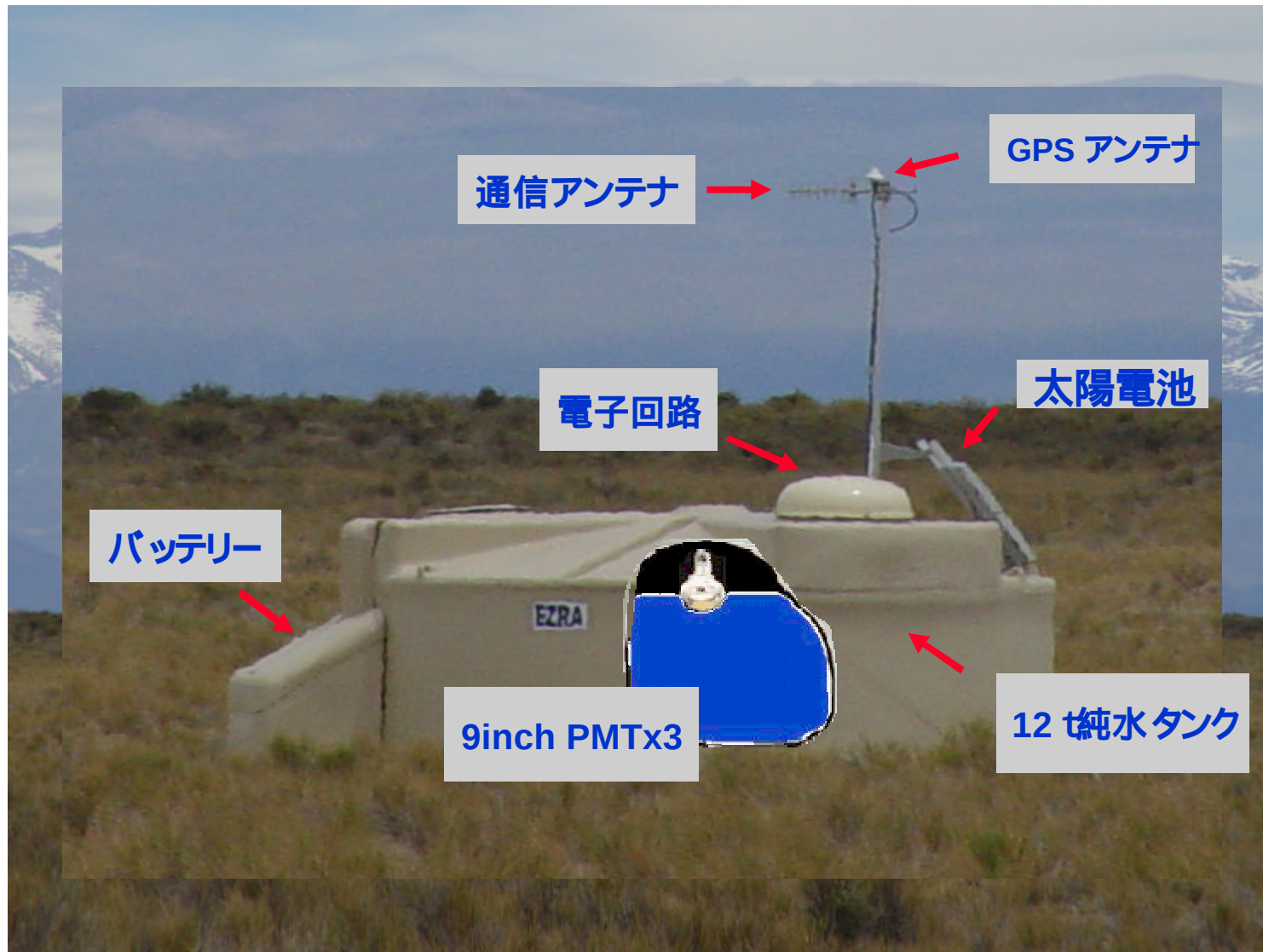
929個の検出器が設置

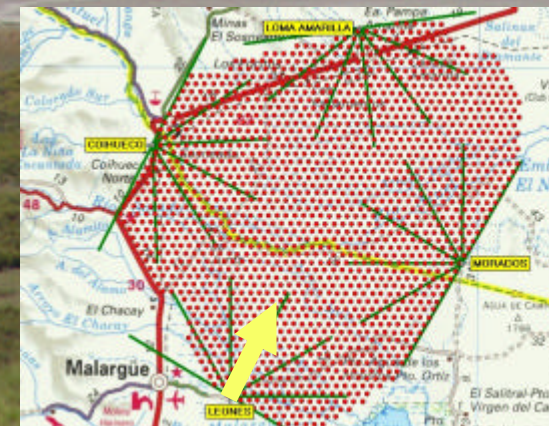
865個の検出器が稼動

3 サイト18望遠鏡が稼動

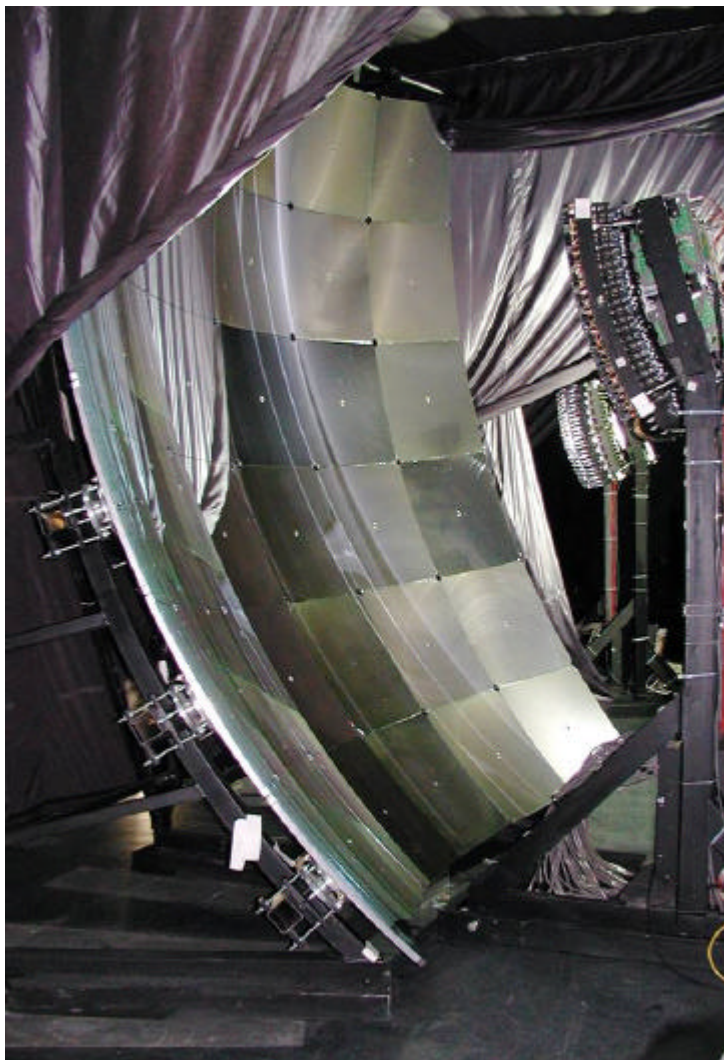
地上アレイ検出器

$10\text{m}^2 \times 1.2\text{m} = 12\text{ton}$ 純水

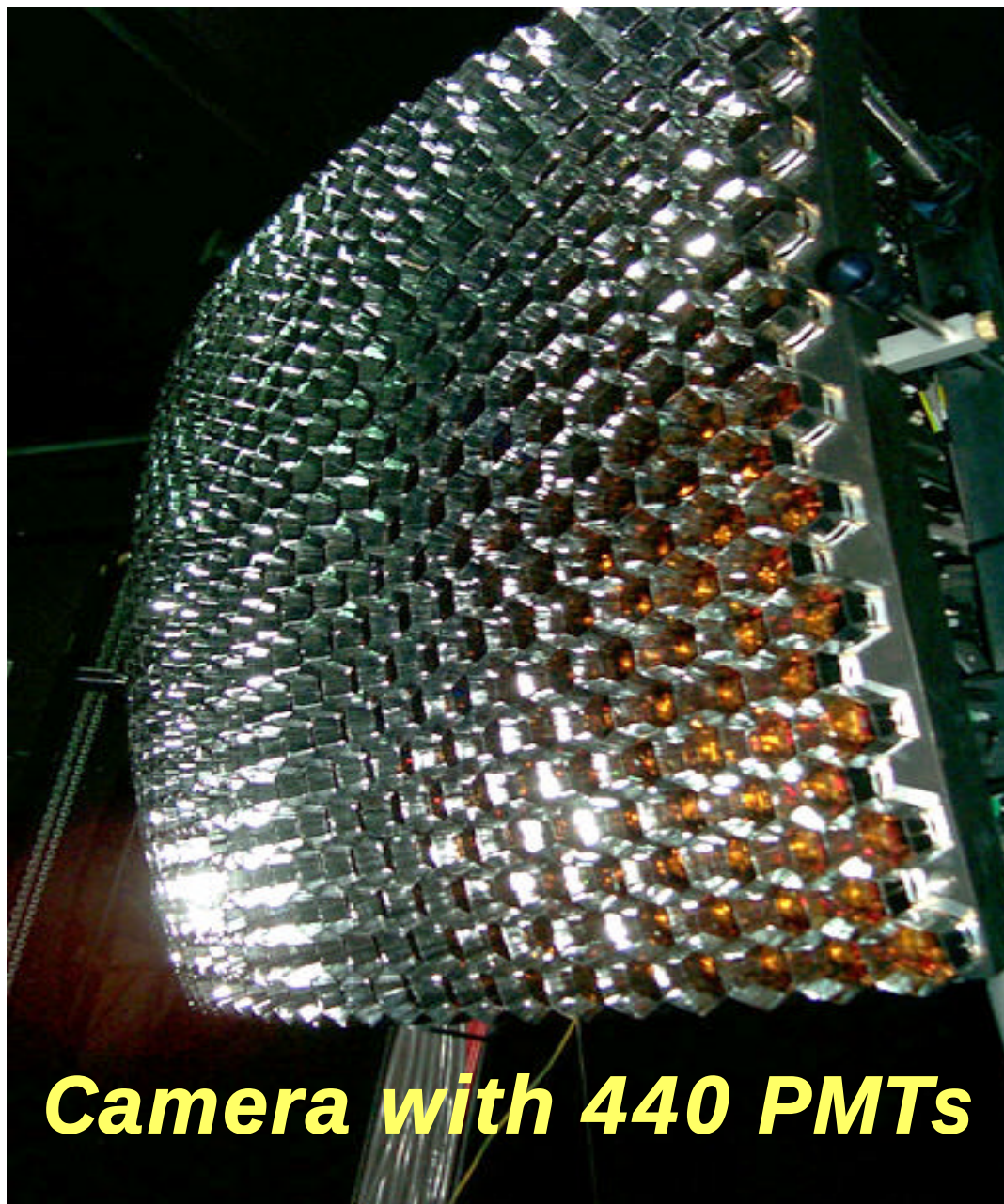




大気蛍光望遠鏡



440 素子カメラ
直径3.4 m セグメント鏡
口径、フィルター、補正



Camera with 440 PMTs

望遠鏡サイト *Los Leones*

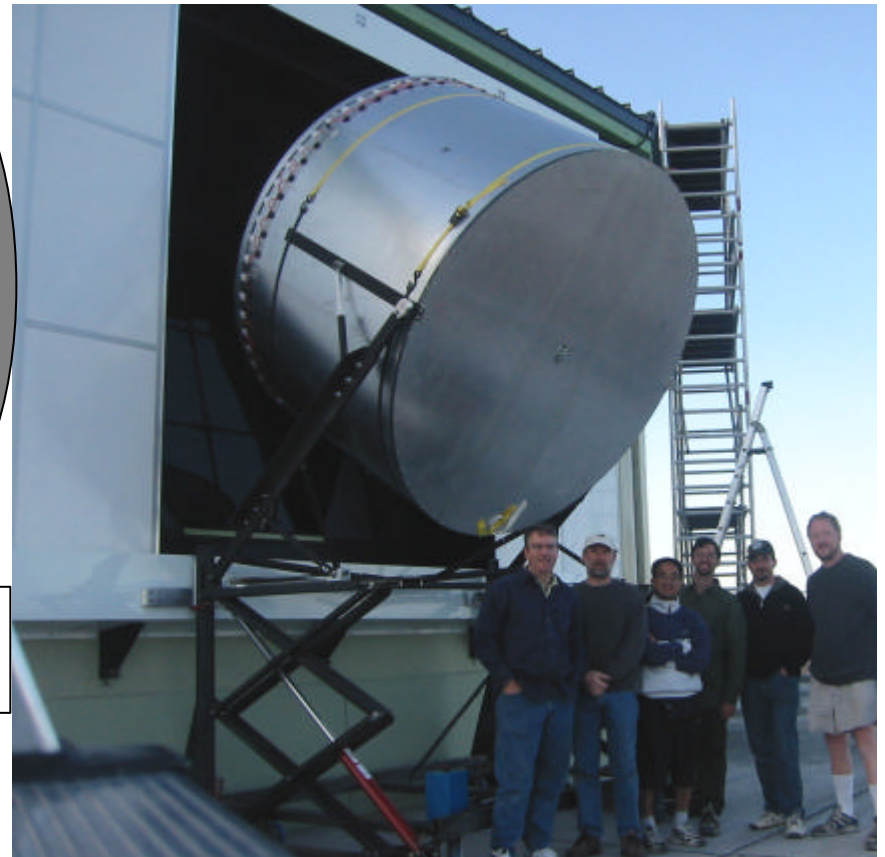
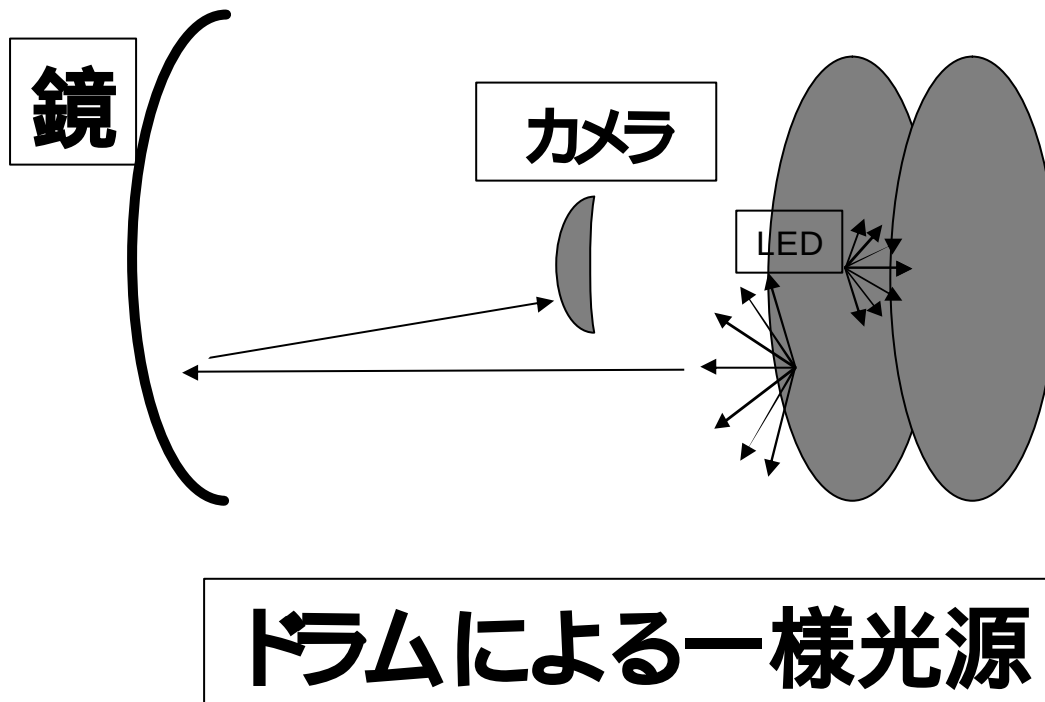


1台の望遠鏡で
30 度 x 30 度 x 30 km
の視野

6 台で180 度観測

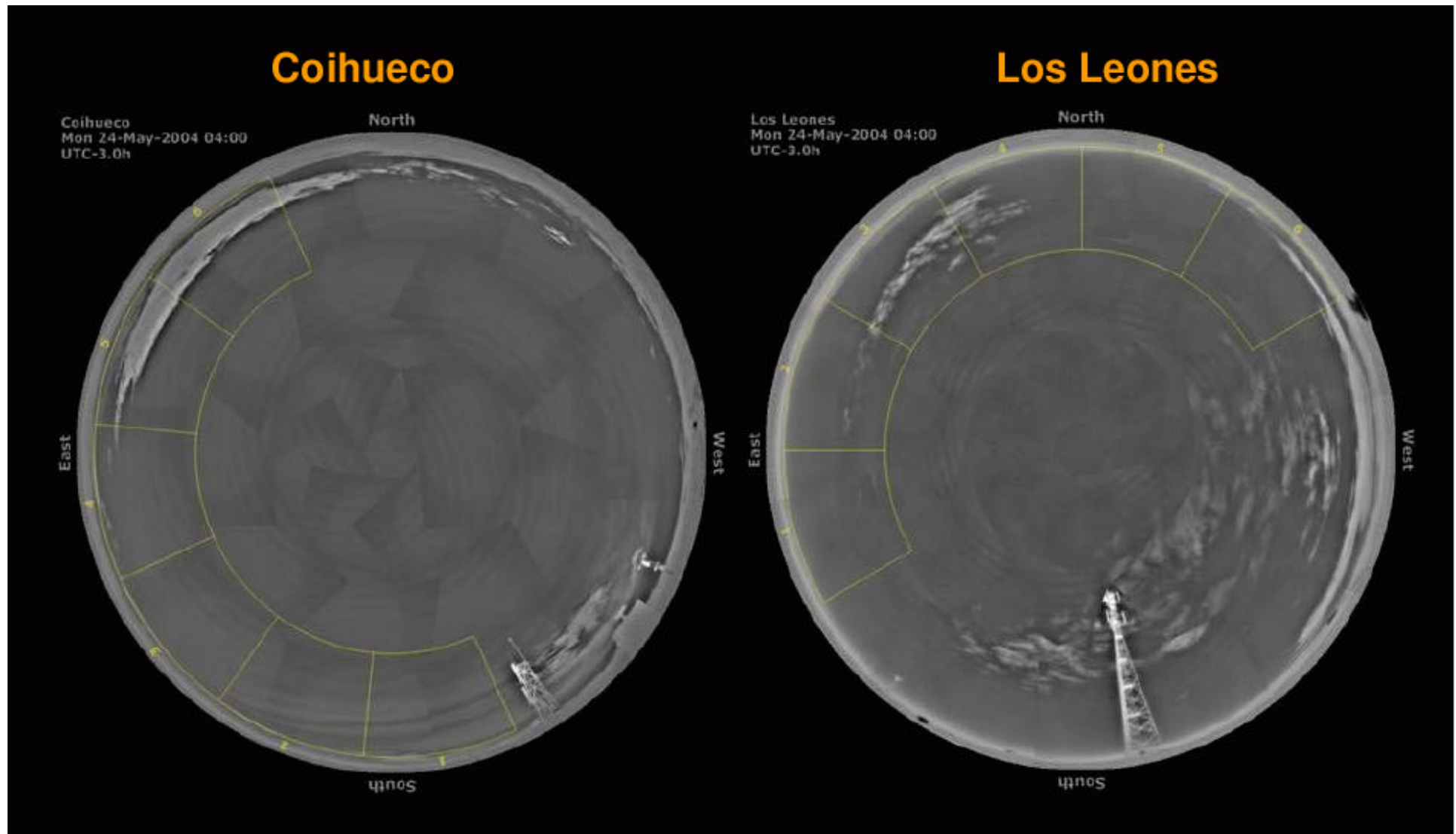
大気モニター & 望遠鏡キャリブレーション

End to End キャリブレーション



大気モニター & 望遠鏡キャリブレーション

赤外線カメラによる雲モニター：各望遠鏡サイトで15分おきに撮影



大気モニター & 望遠鏡キャリブレーション

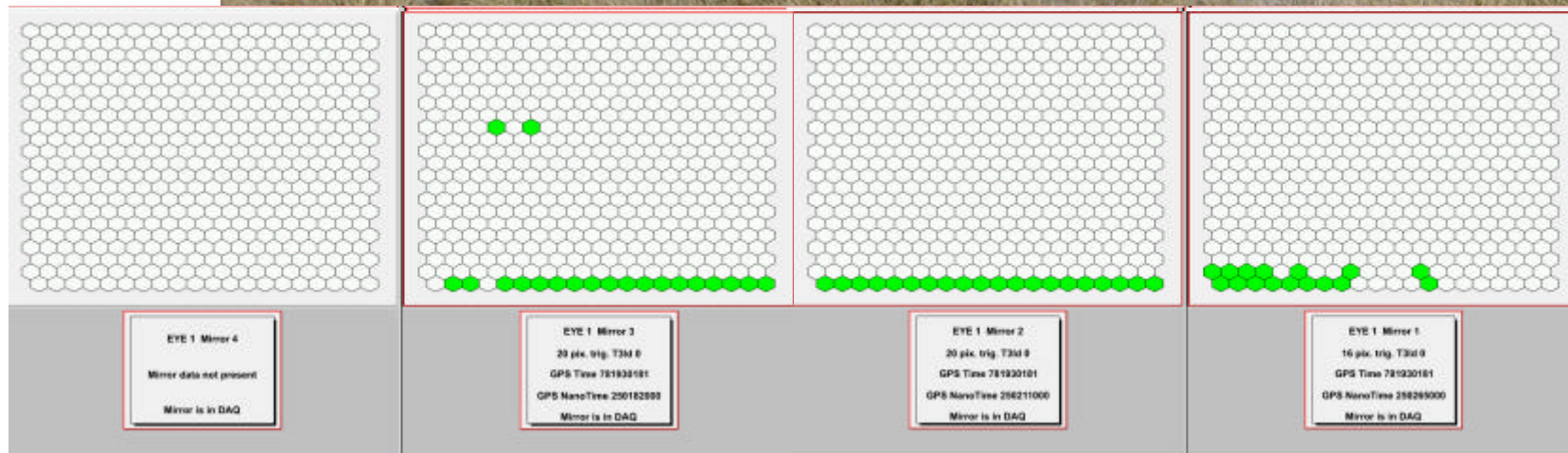
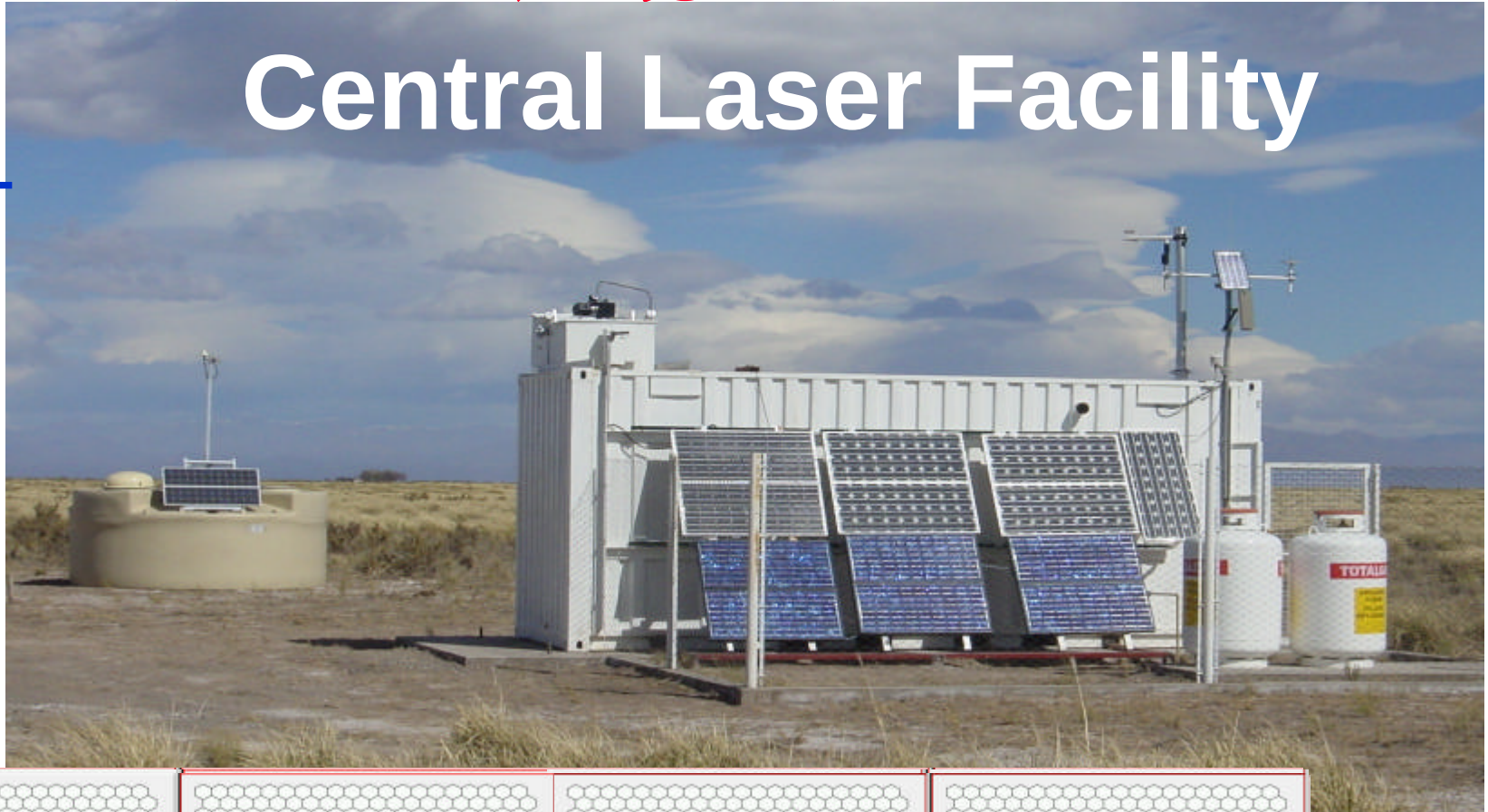
駆動鏡によるライダー
大気モニターシステム



大気モニター & 望遠鏡キャリブレーション

Central Laser Facility

- 大気モニター
- 観測精度
- Timing

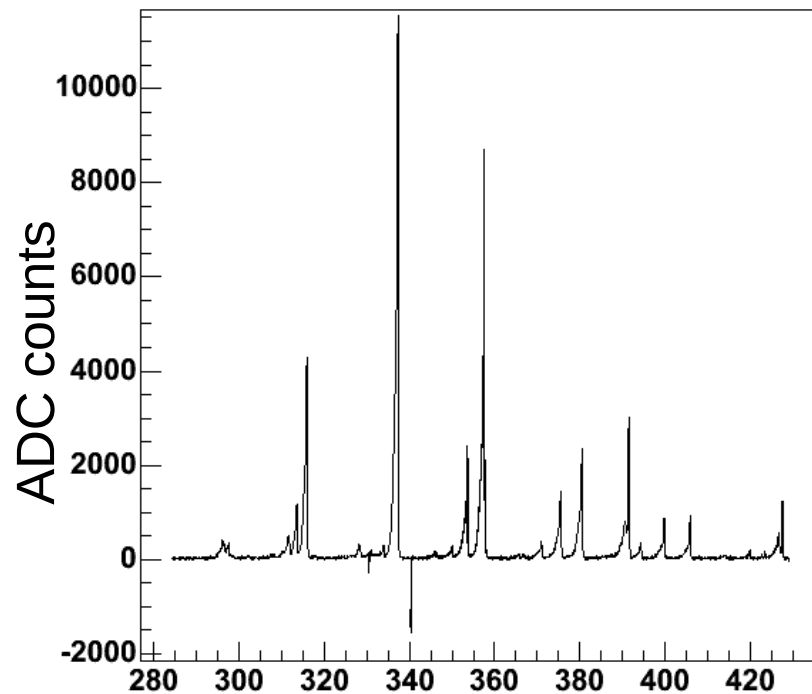


大気モニター & 望遠鏡キャリブレーション

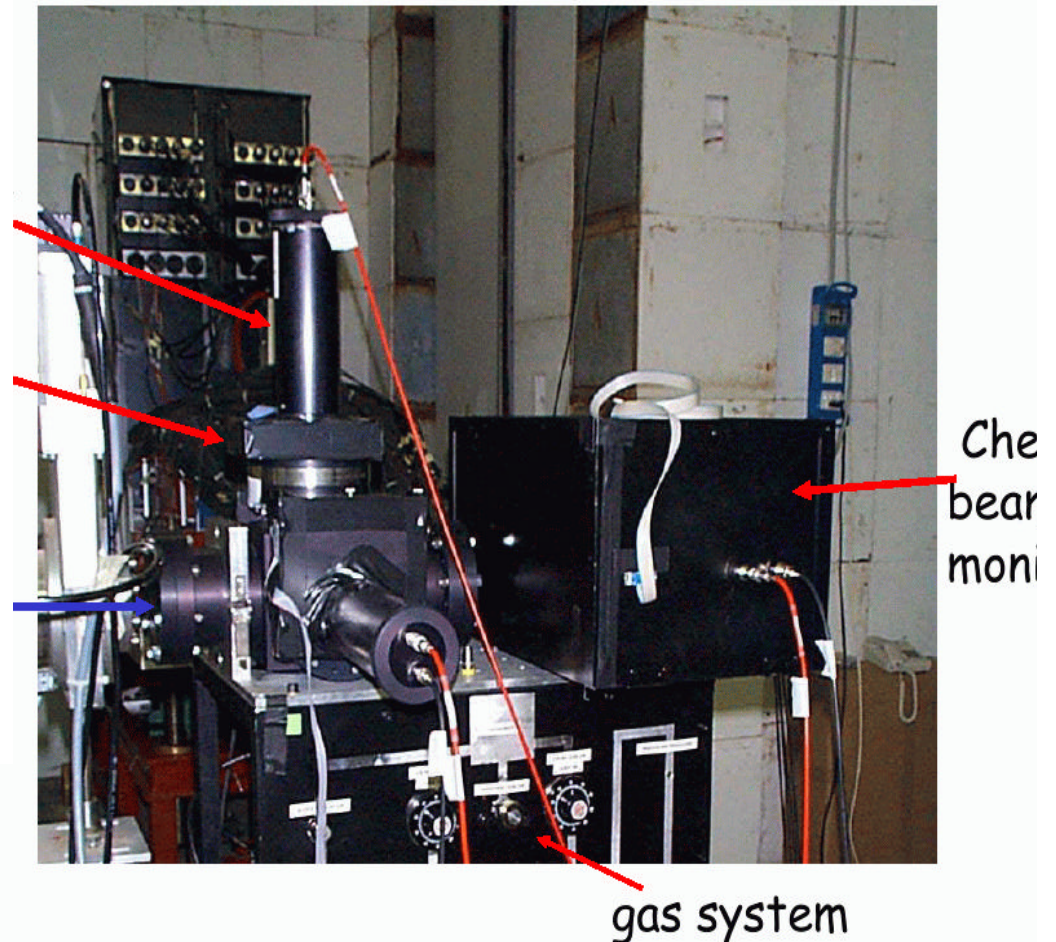
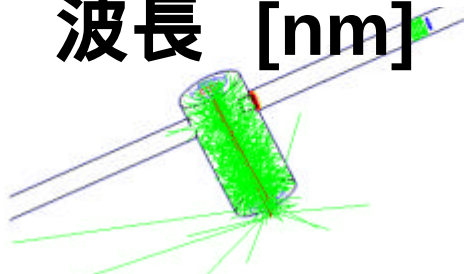
Fluorescence Yield 測定

AIRFLY fluorescence chamber at the E

Raw measured spectrum

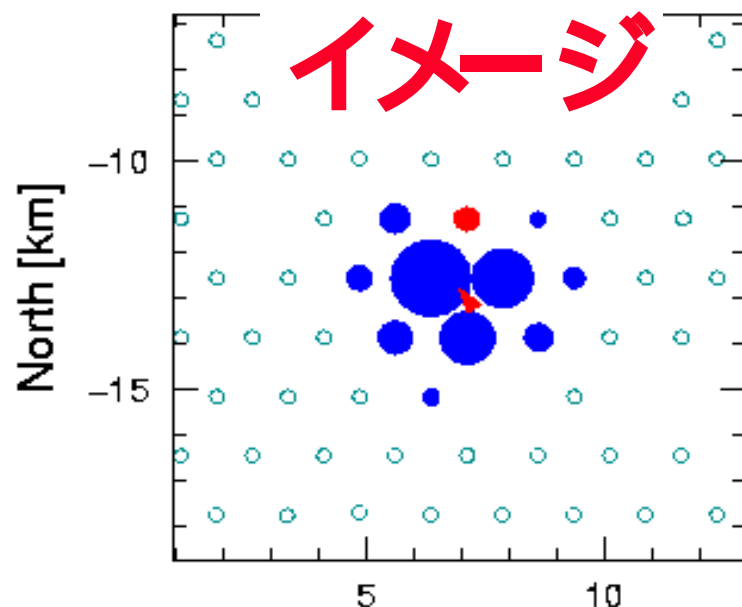


波長 [nm]



ID 1264145

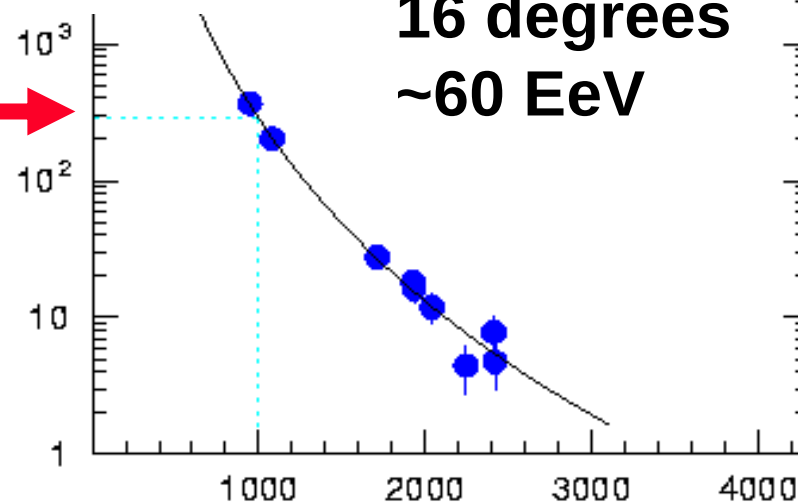
イメージ



横方向分布

S1000

Signal Size [VEM]

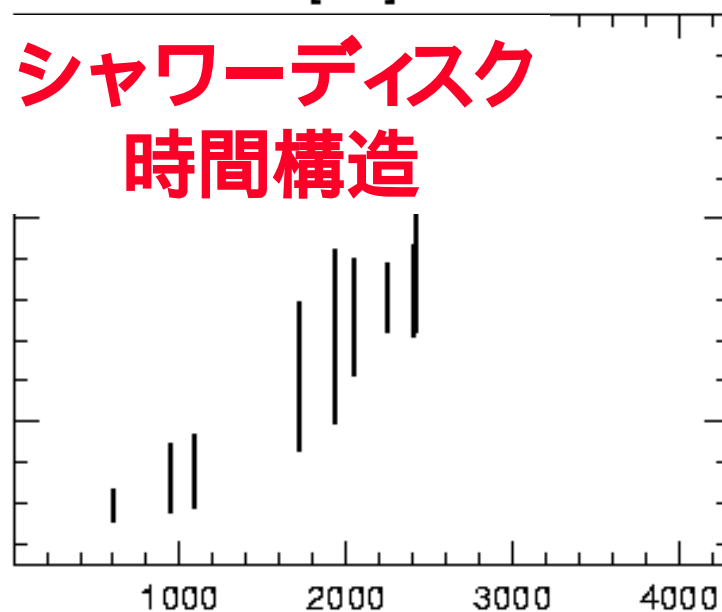
16 degrees
~60 EeV

Residual from Shower Plane [ns]

シャワーディスク
時間構造1000
0

1000 2000 3000 4000

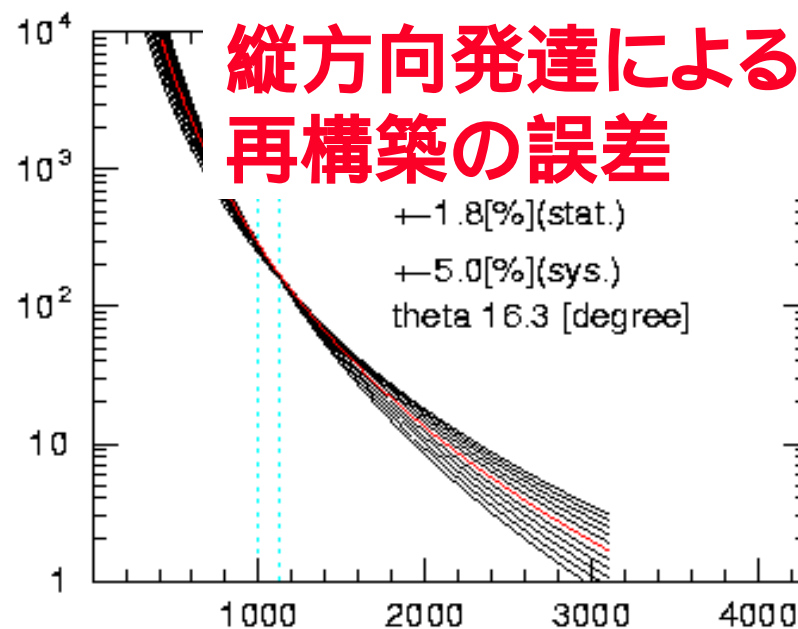
Core Distance [m]



Core Distance [m]

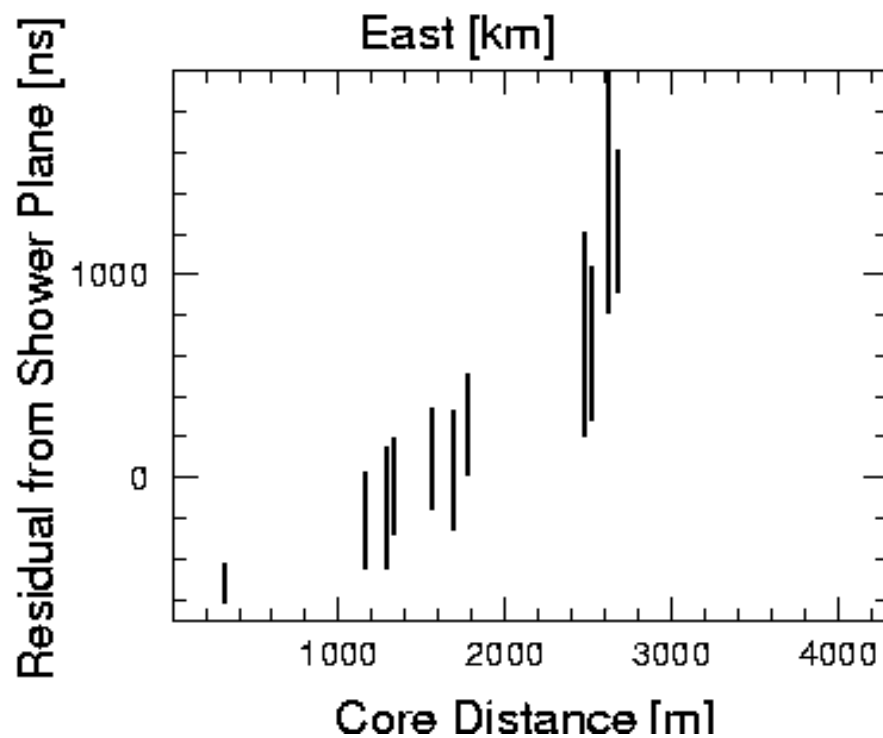
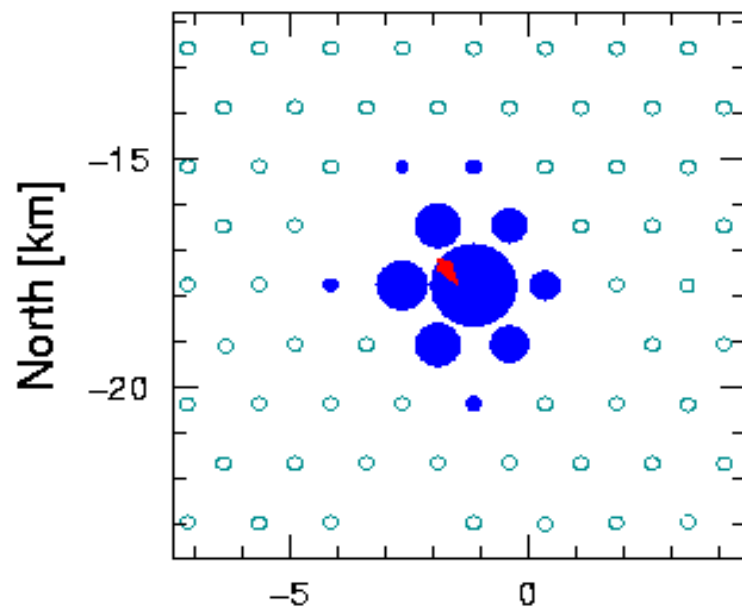
縦方向発達による
再構築の誤差

Signal Size [VEM]

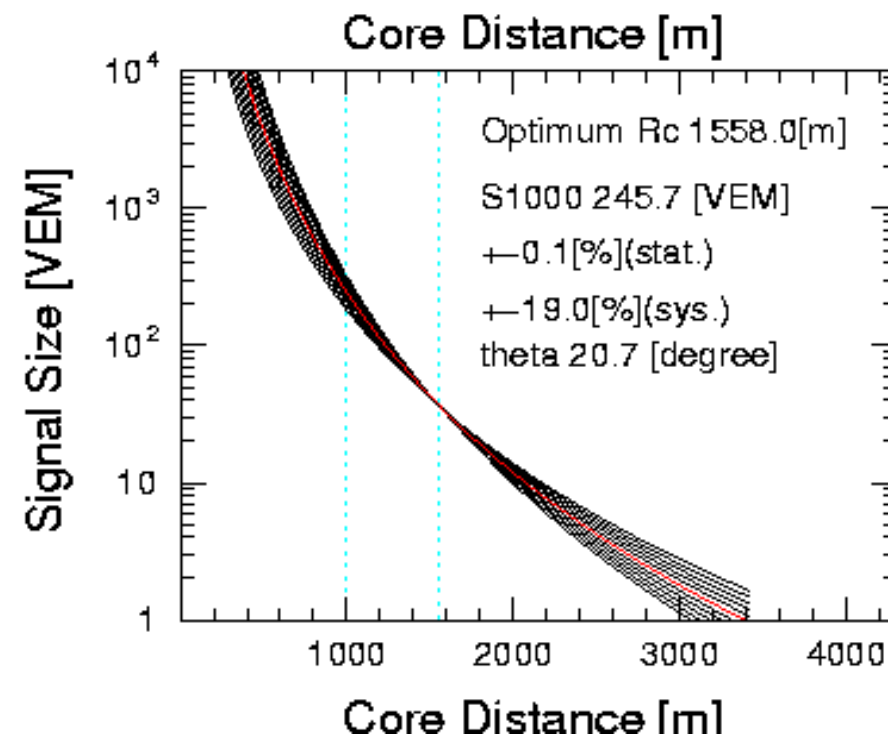
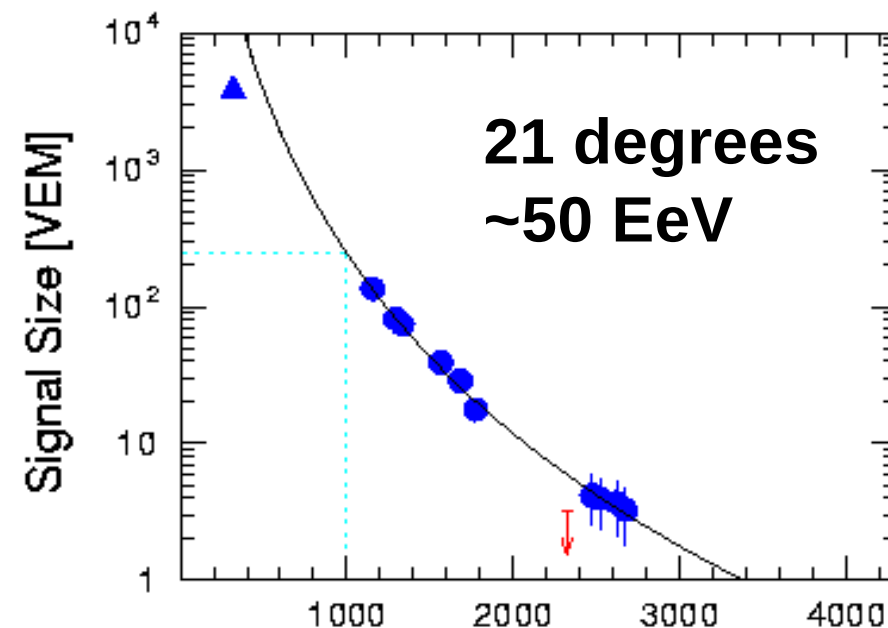
 $\pm 1.8\%$ (stat.)
 $\pm 5.0\%$ (sys.)
 theta 16.3 [degree]


Core Distance [m]

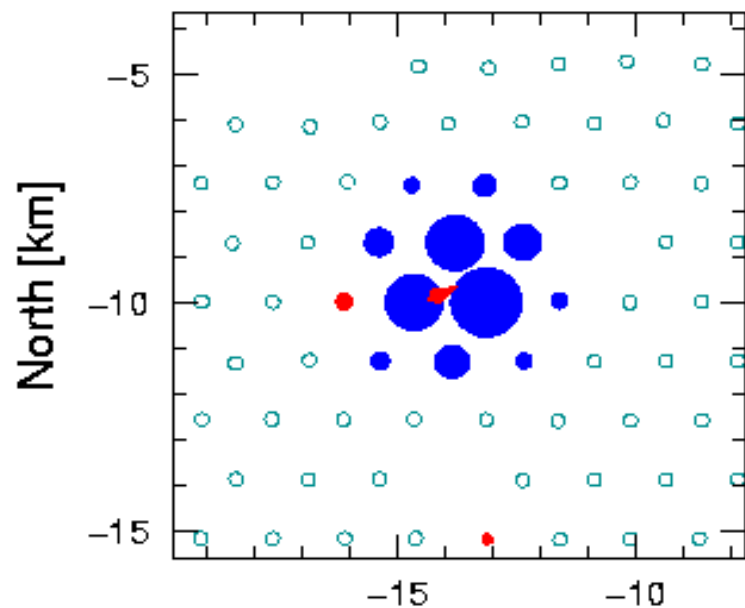
ID 1263529



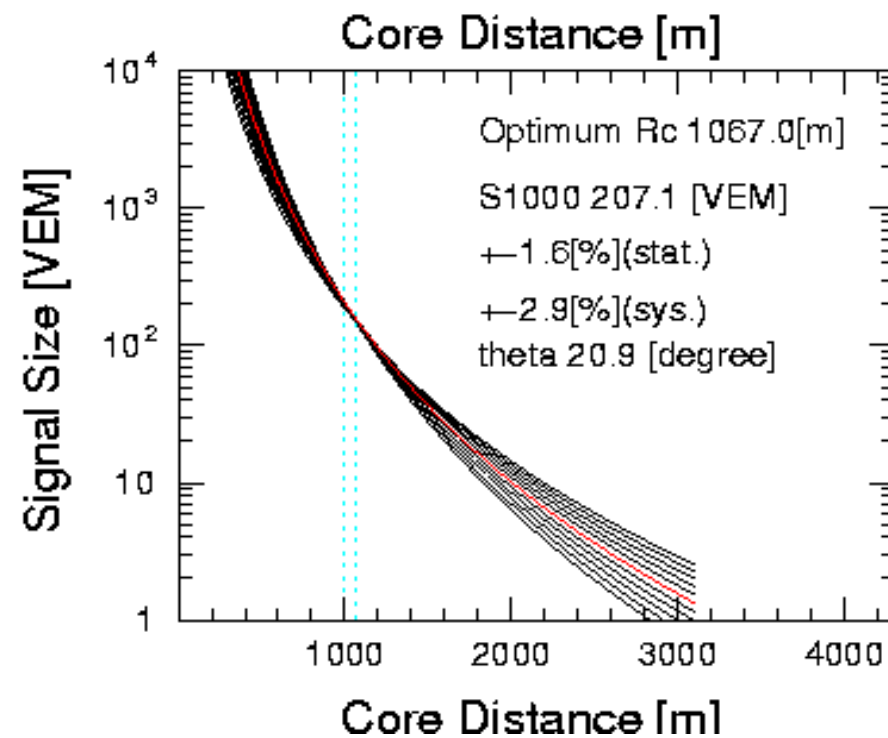
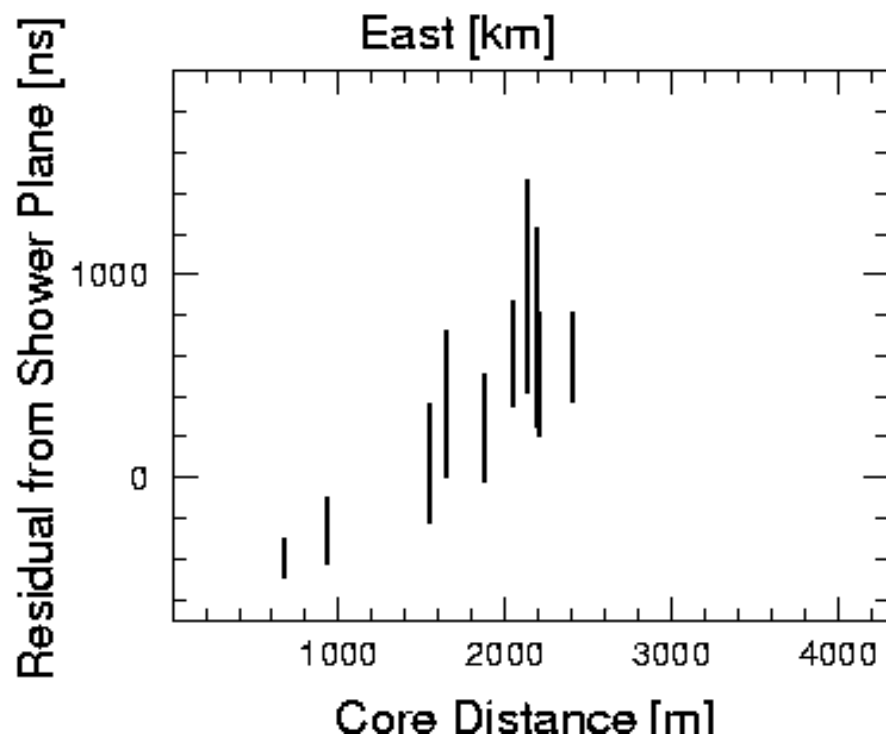
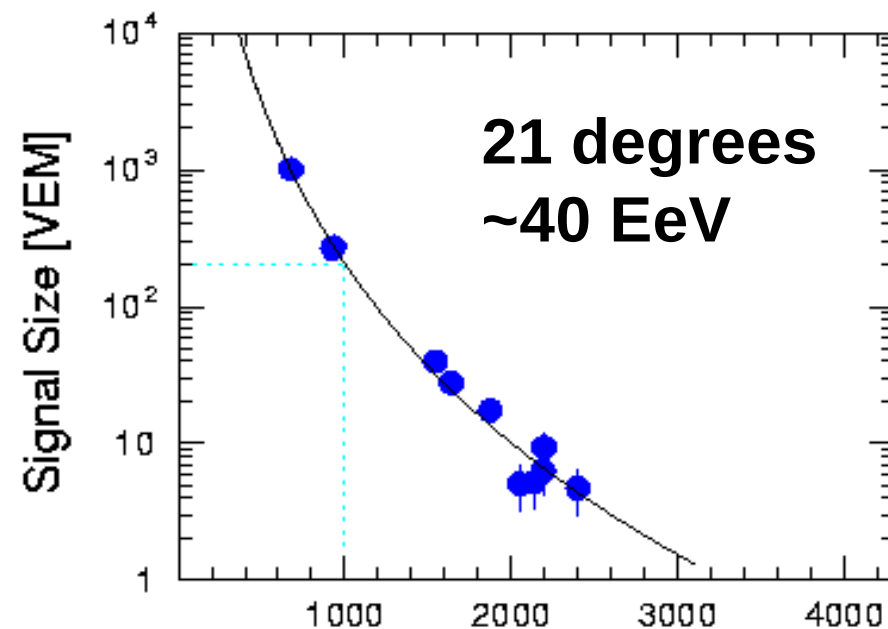
ID 1263529



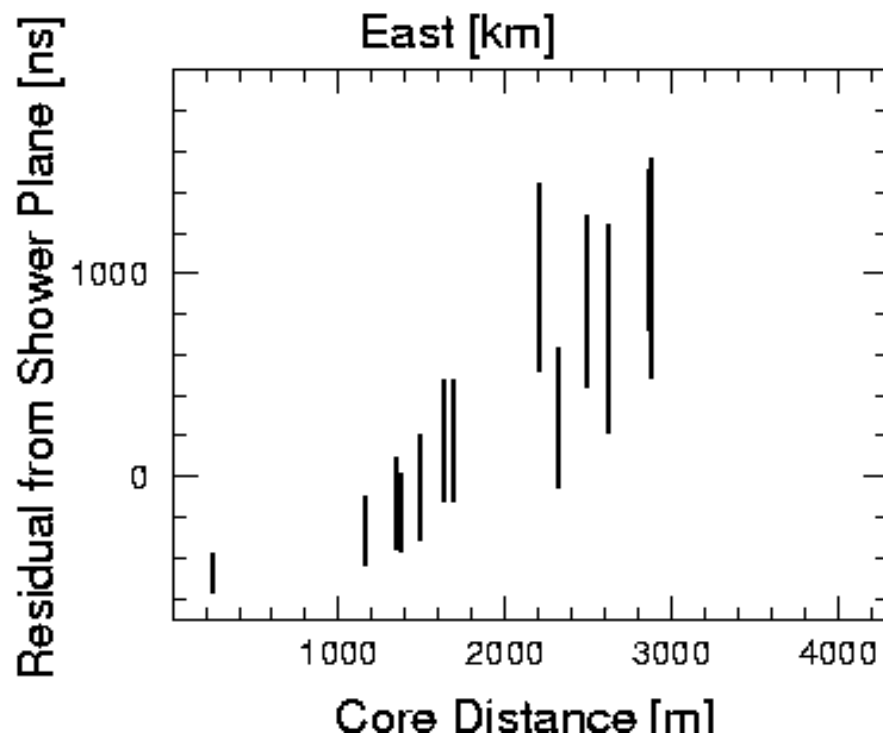
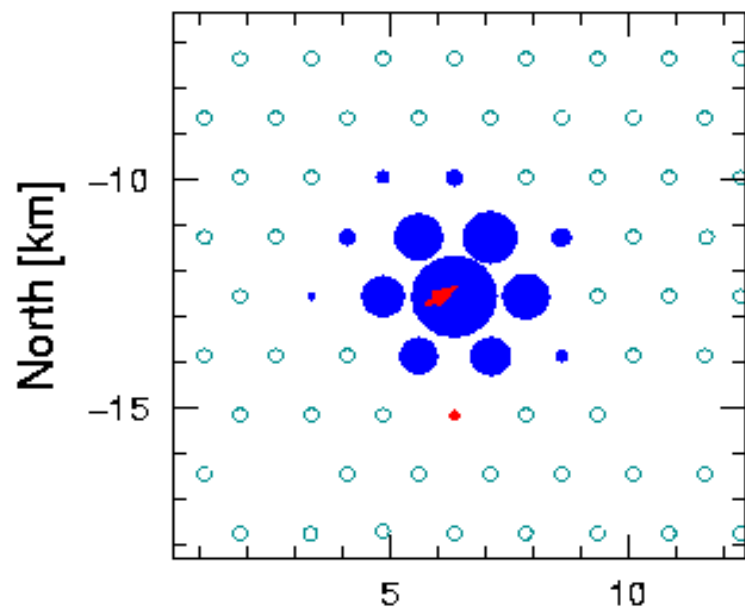
ID 1207334



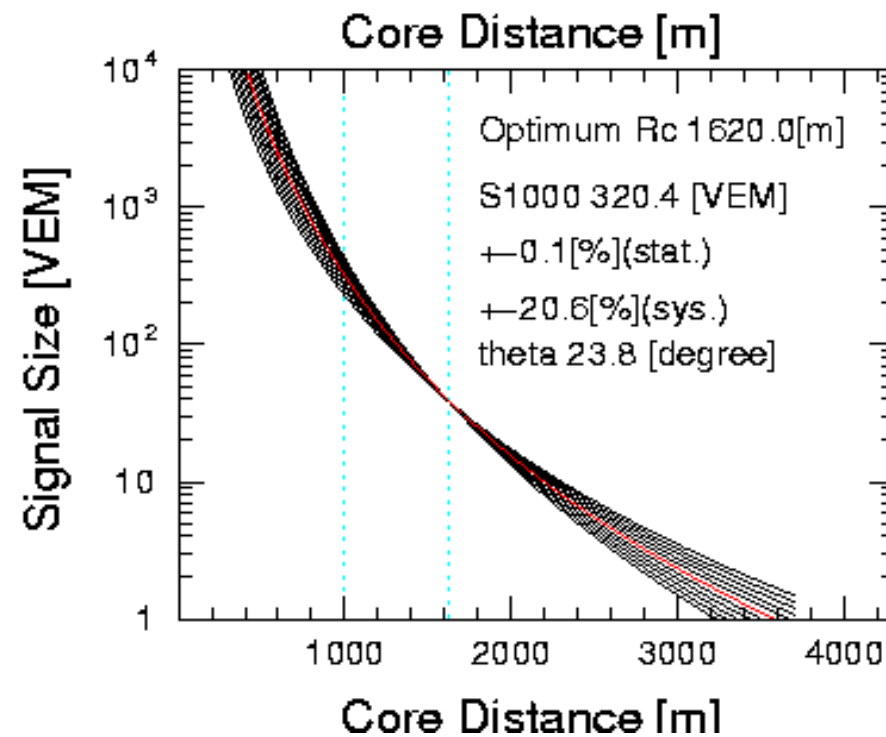
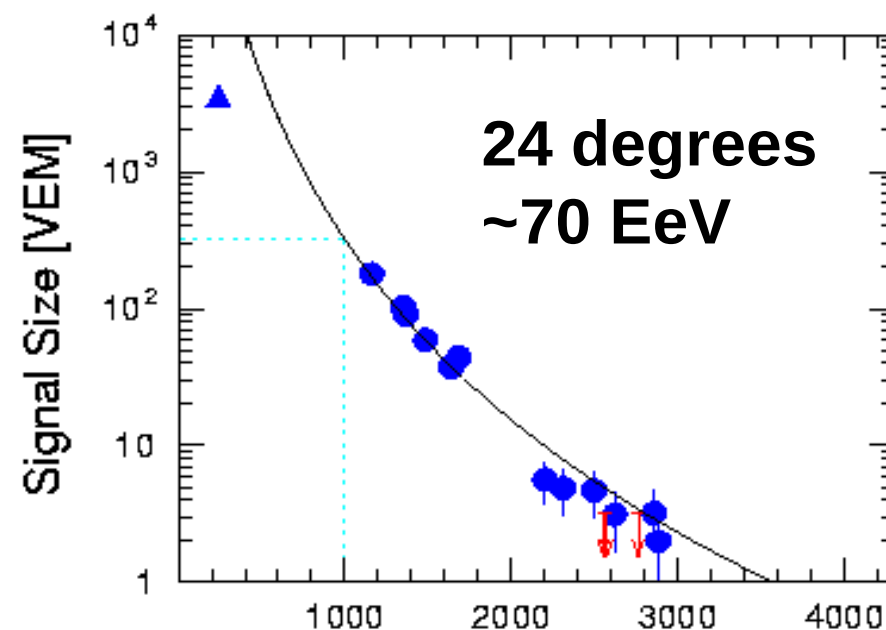
ID 1207334



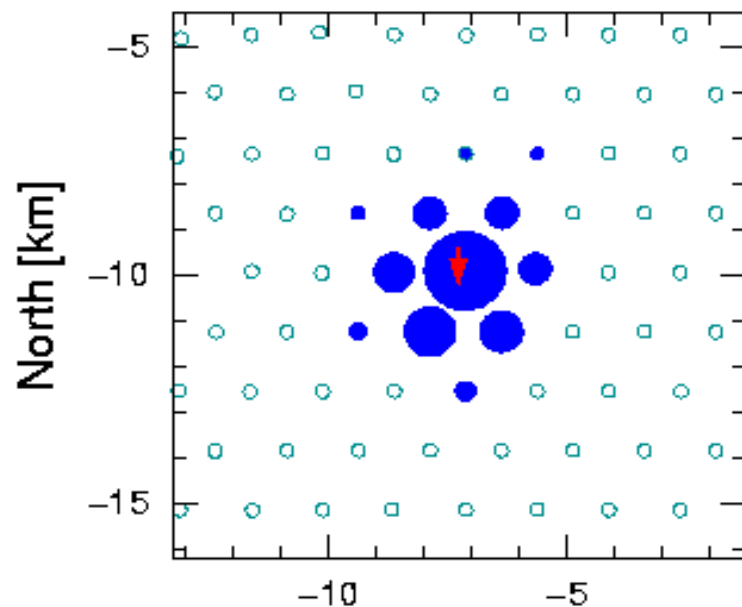
ID 1102721



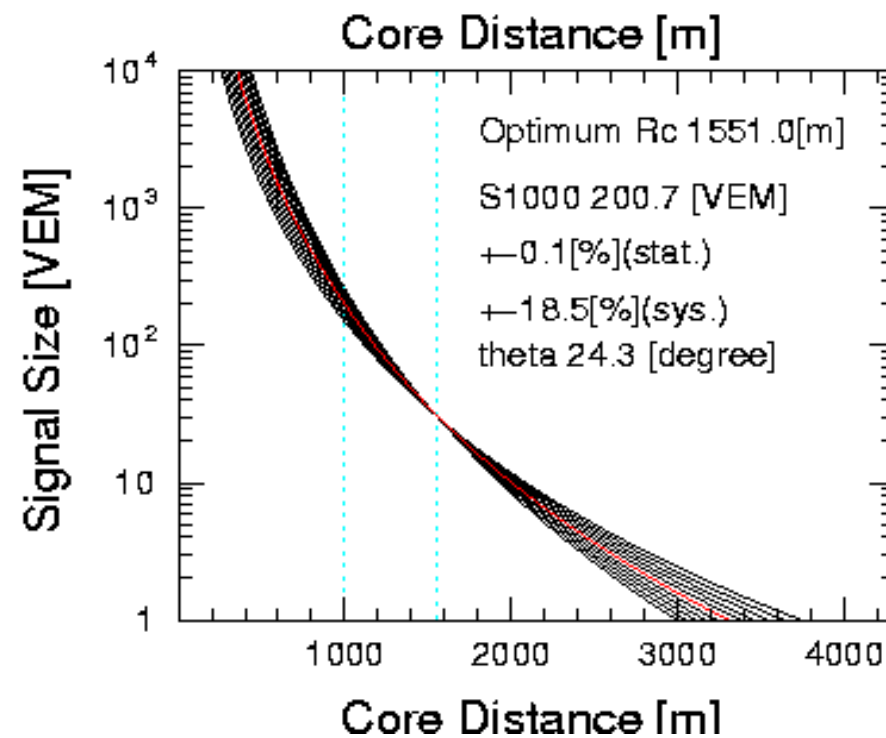
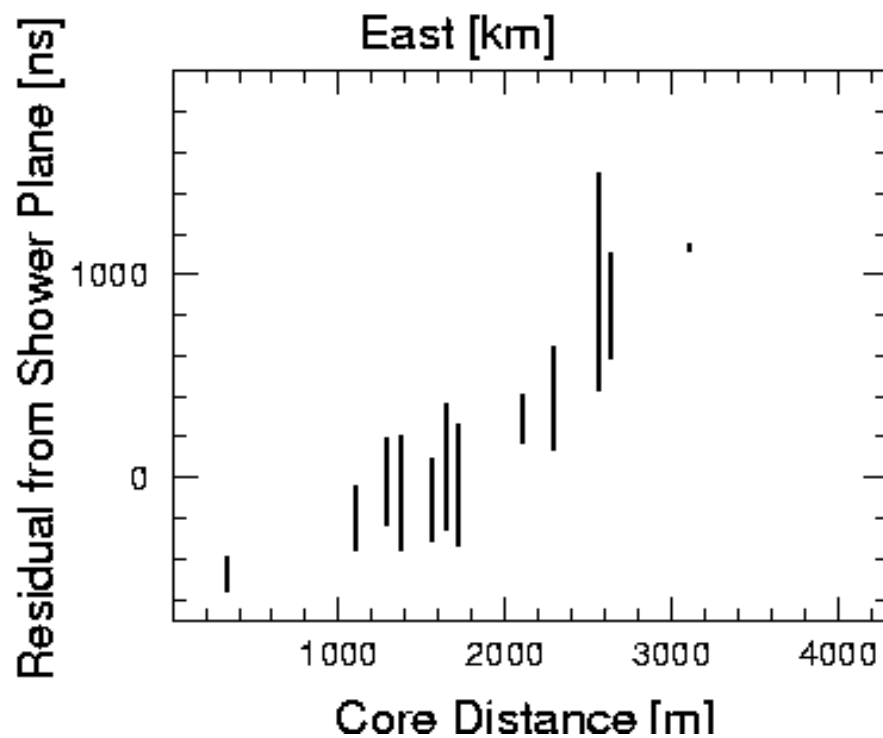
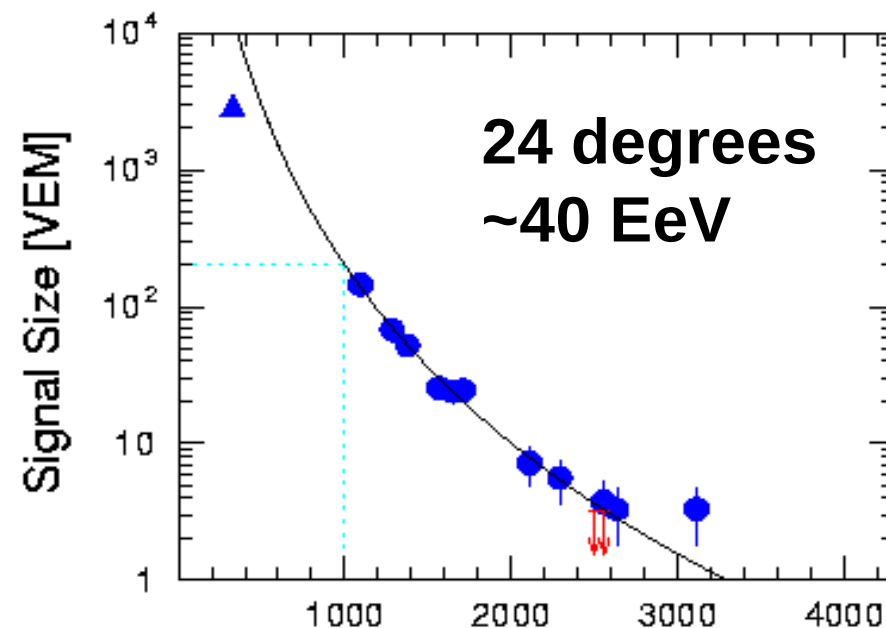
ID 1102721



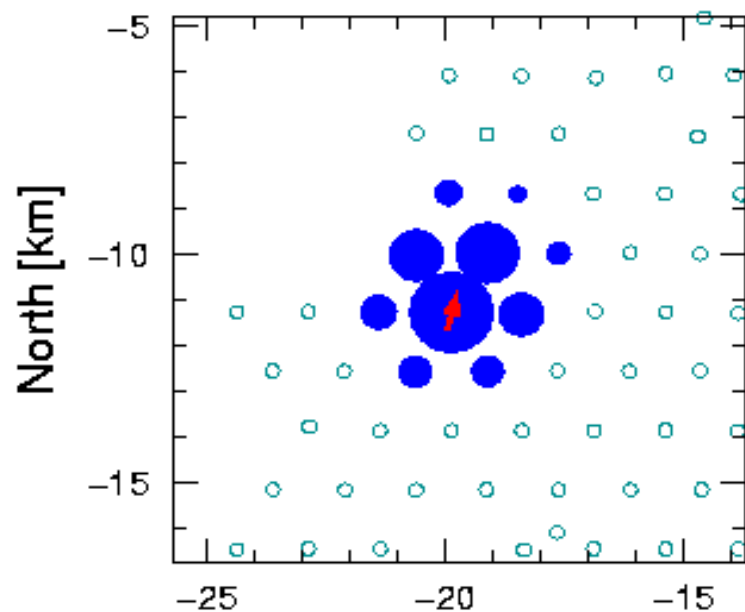
ID 1056373



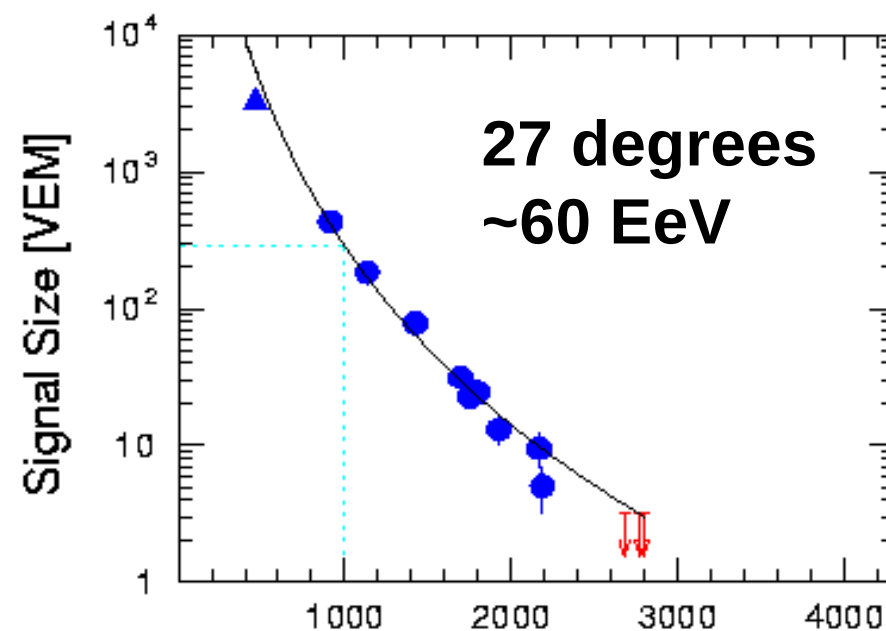
ID 1056373



ID 1018639

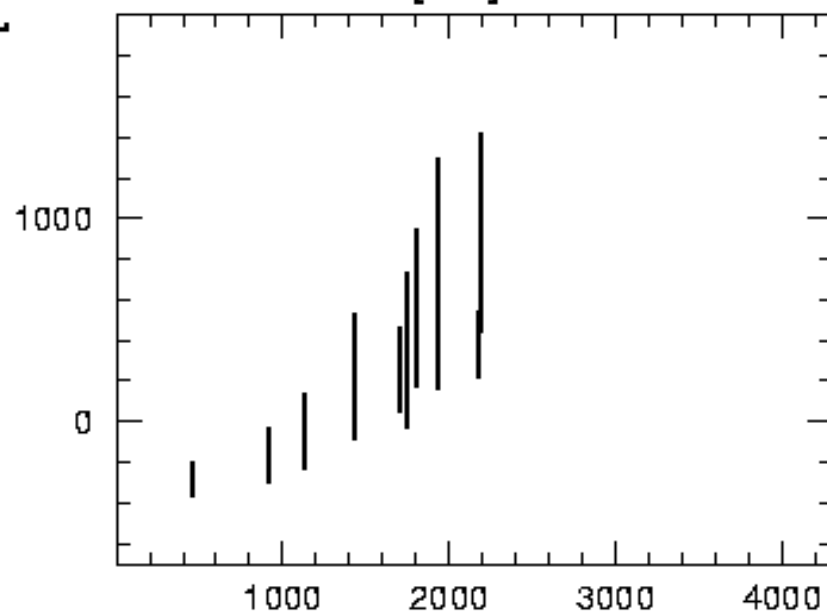


ID 1018639



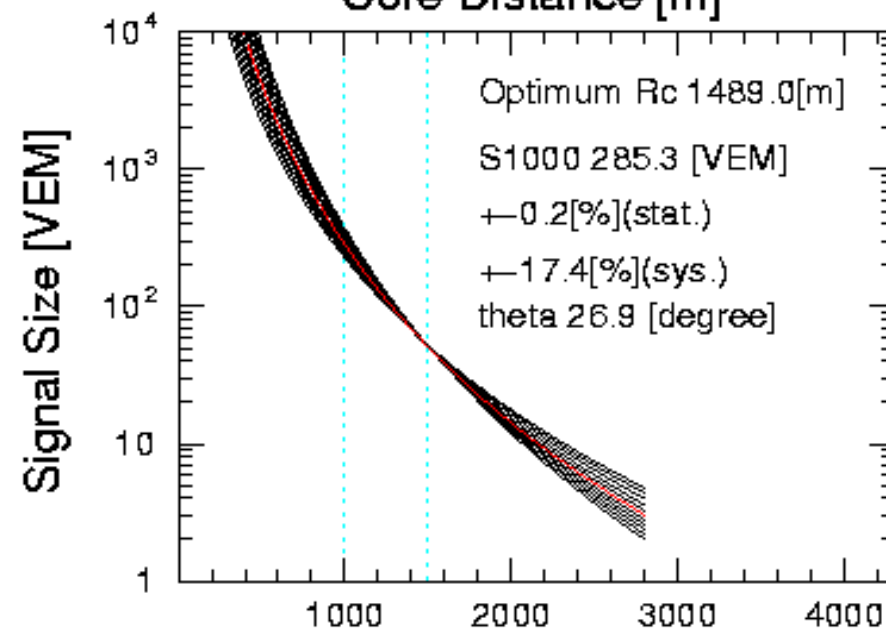
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



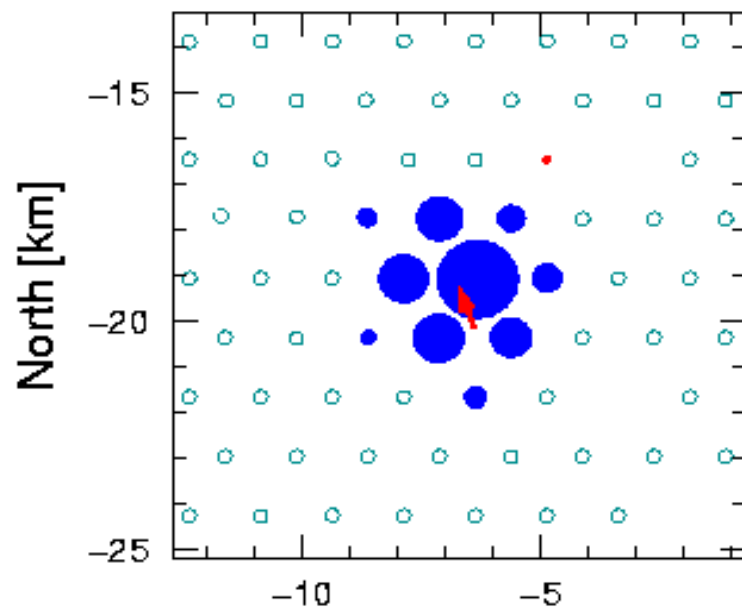
Core Distance [m]

Core Distance [m]

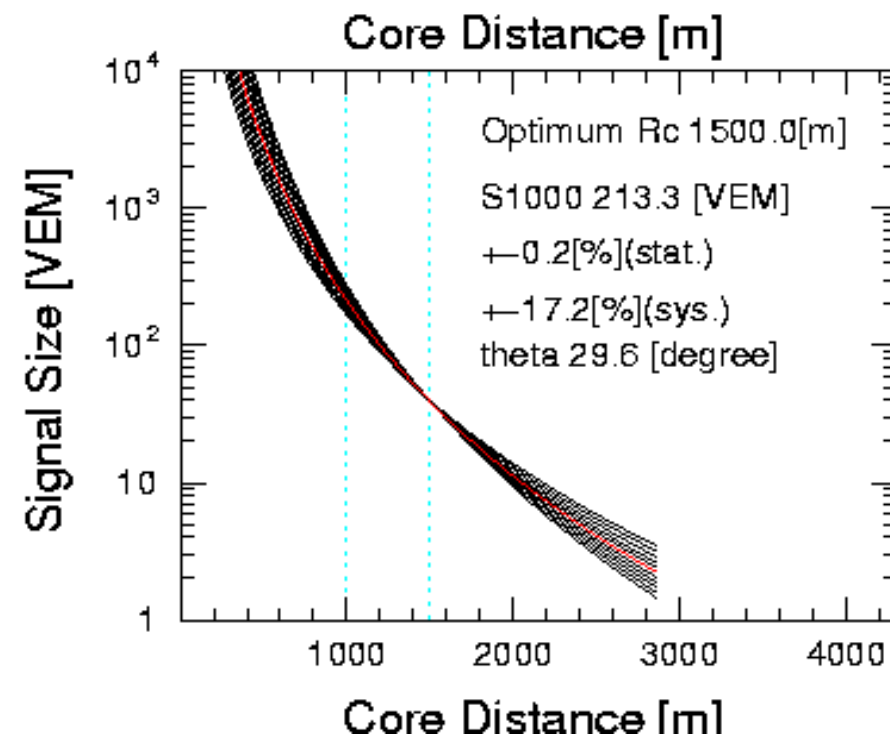
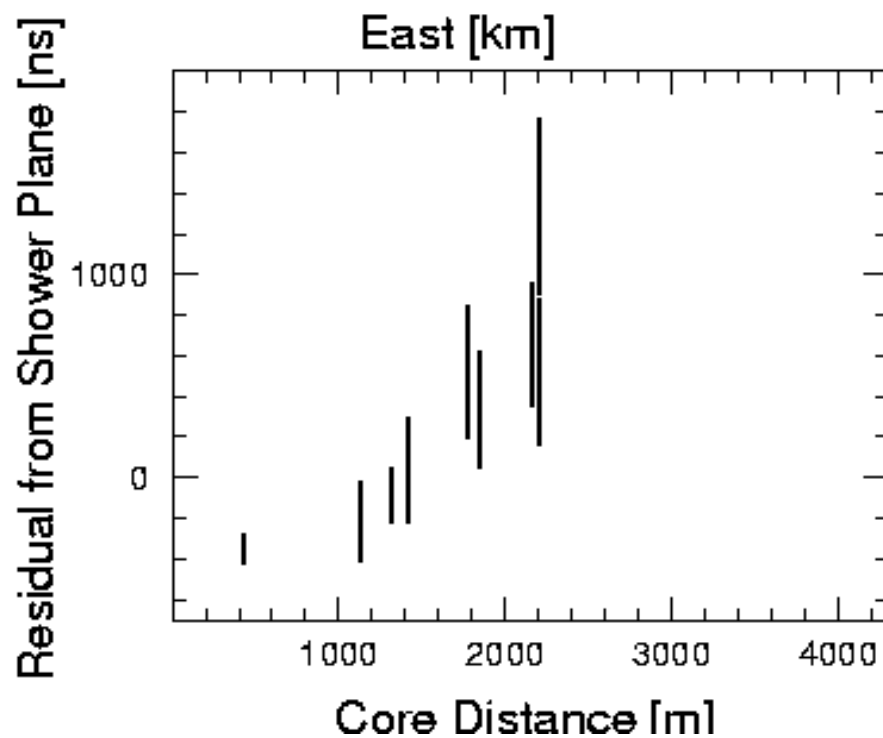
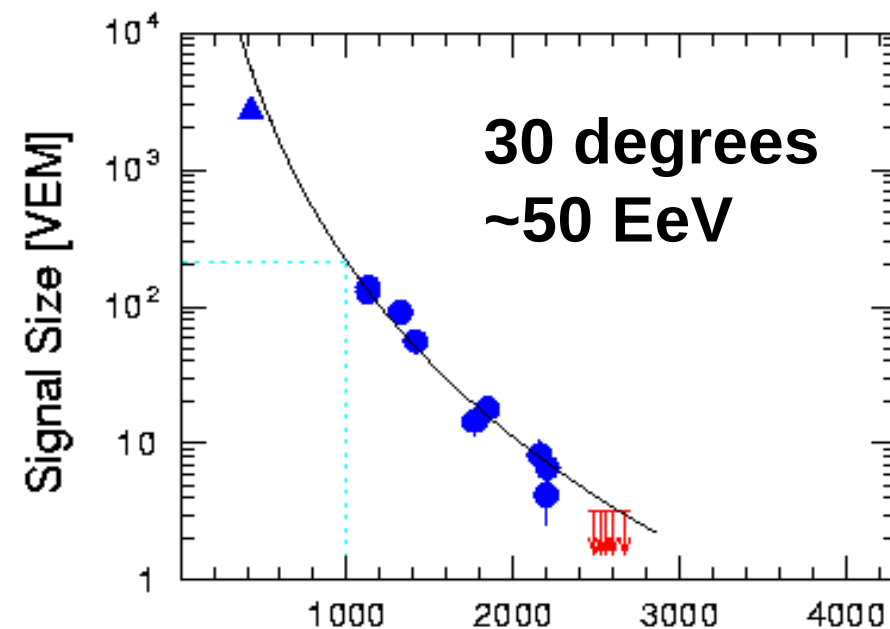


Core Distance [m]

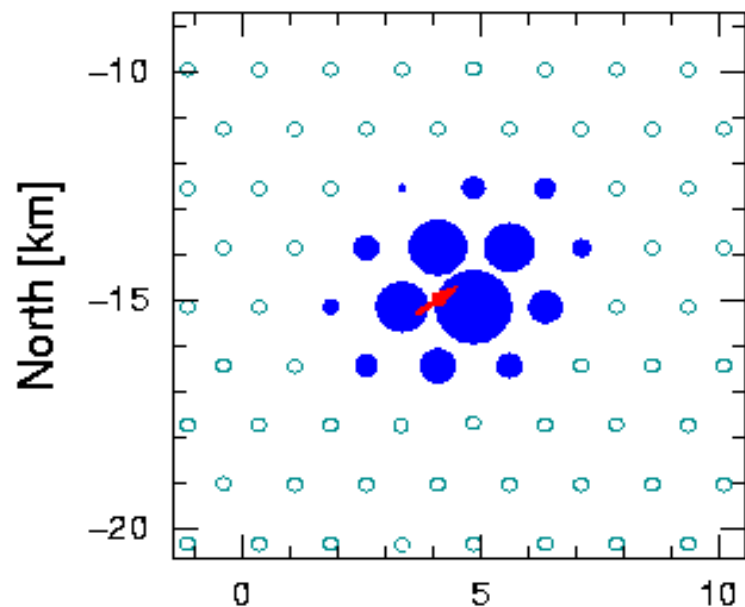
ID 767157



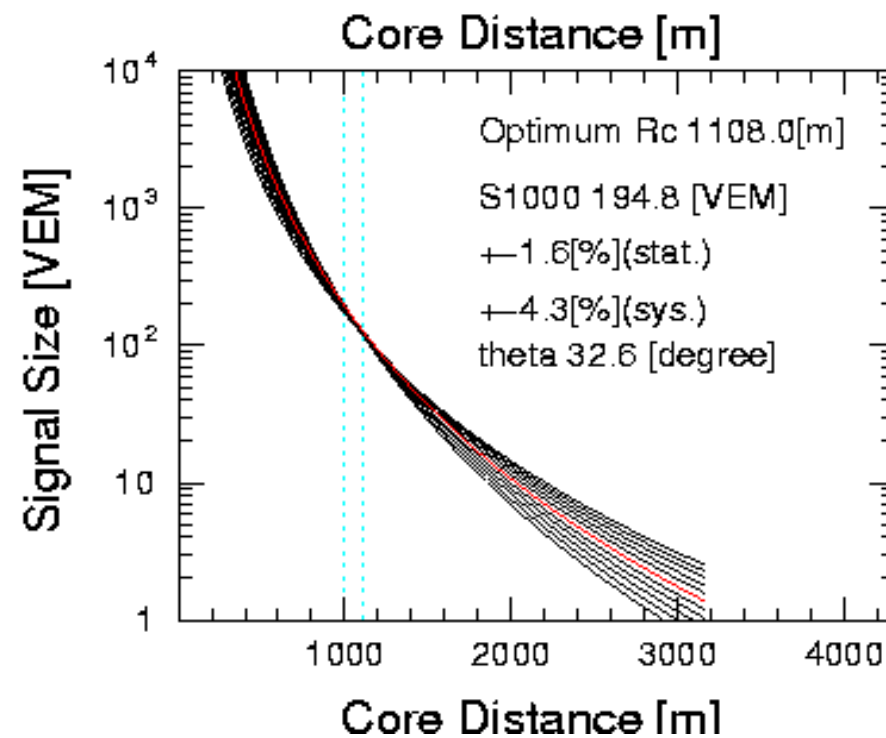
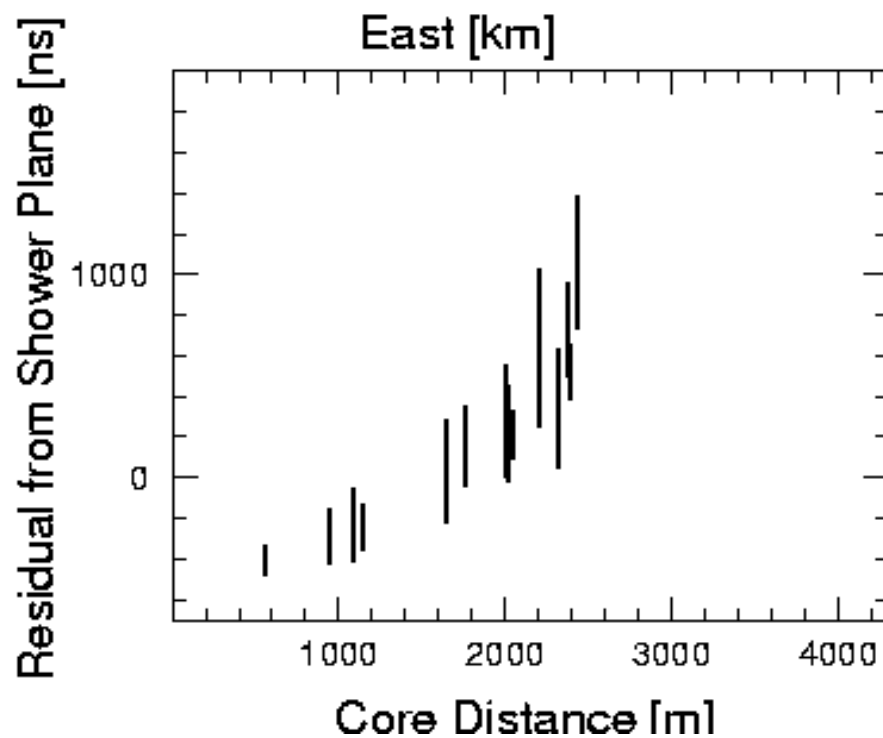
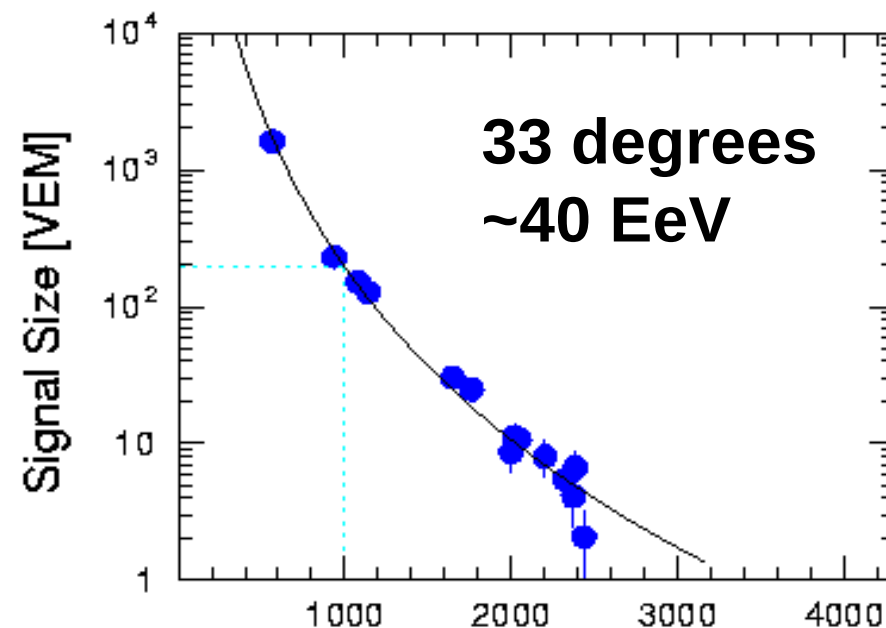
ID 767157



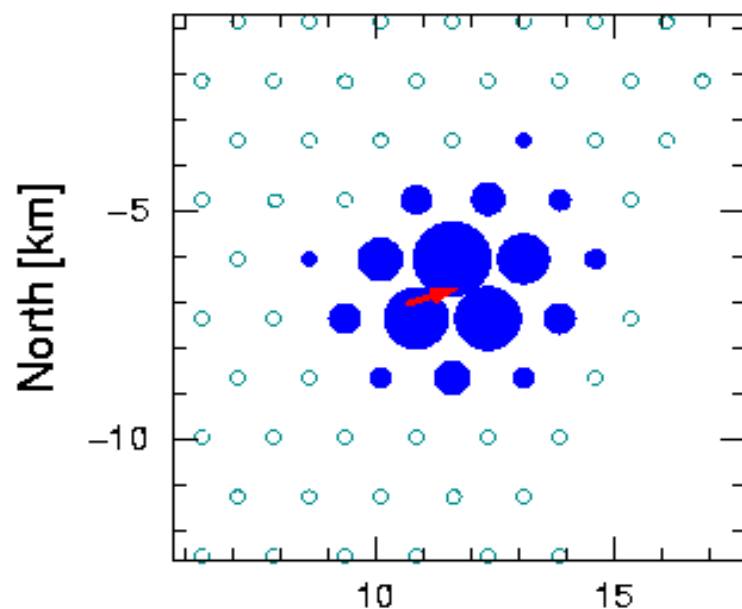
ID 1124397



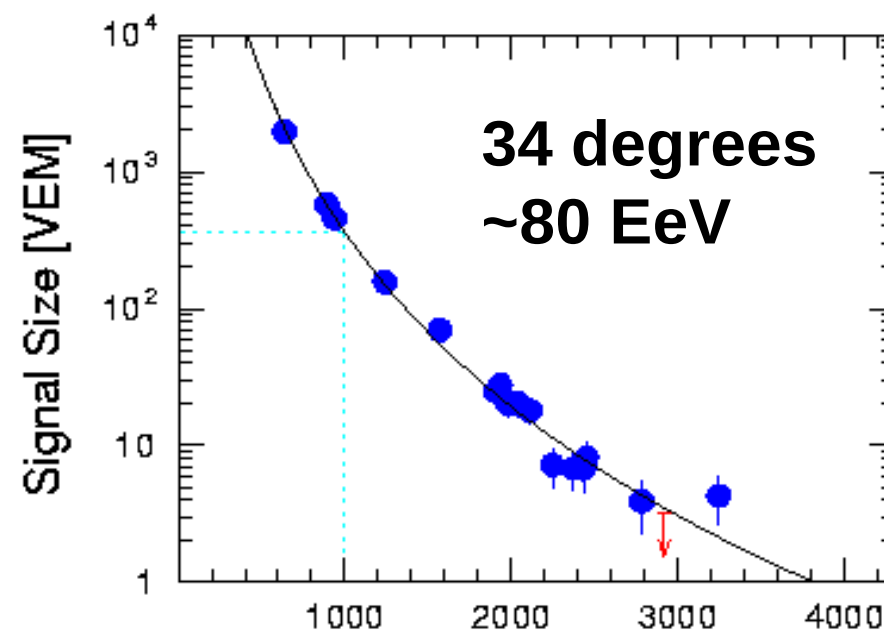
ID 1124397



ID 1225537

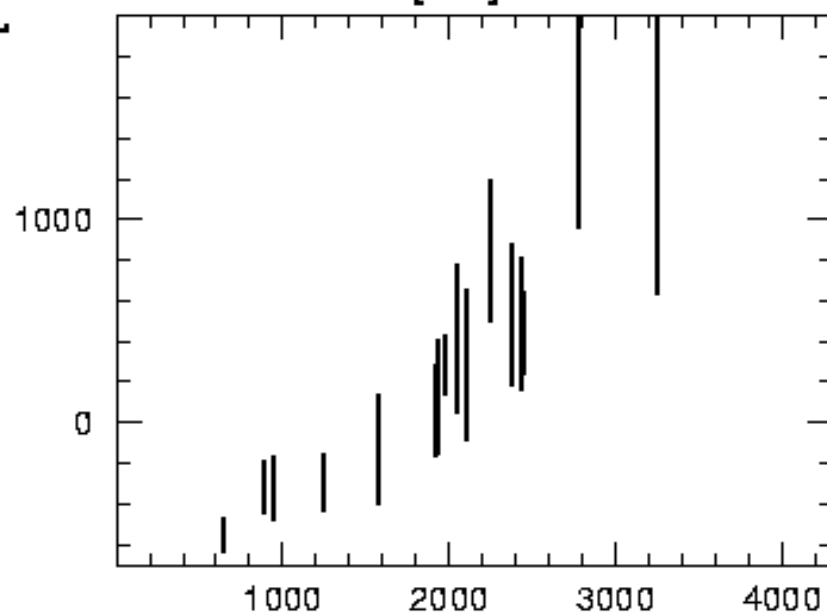


ID 1225537



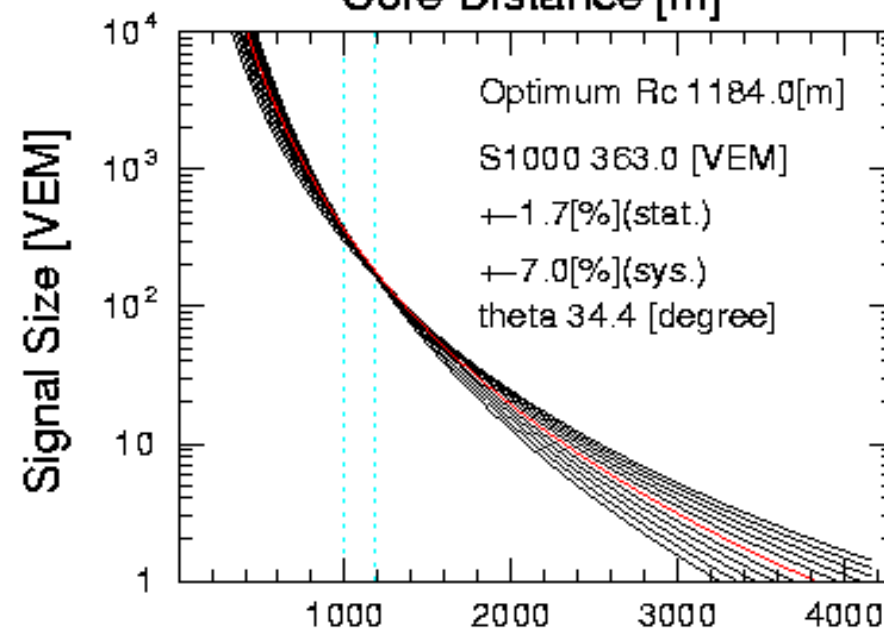
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



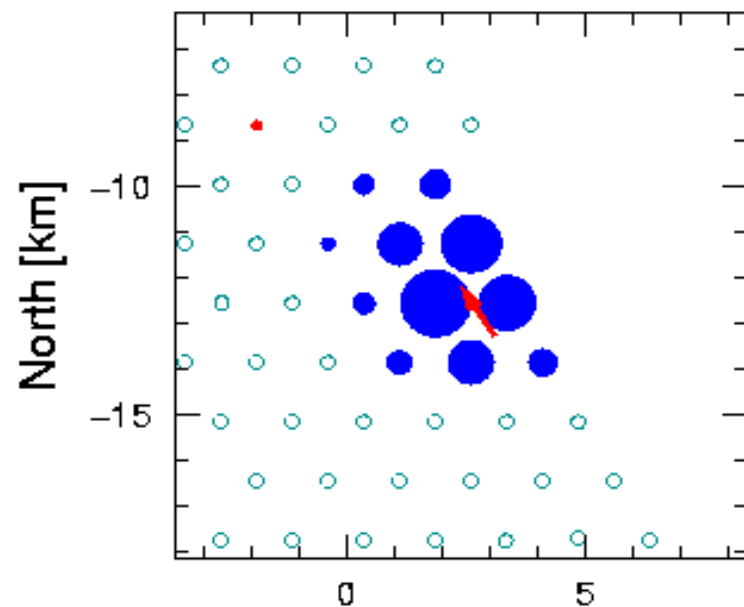
Core Distance [m]

Core Distance [m]

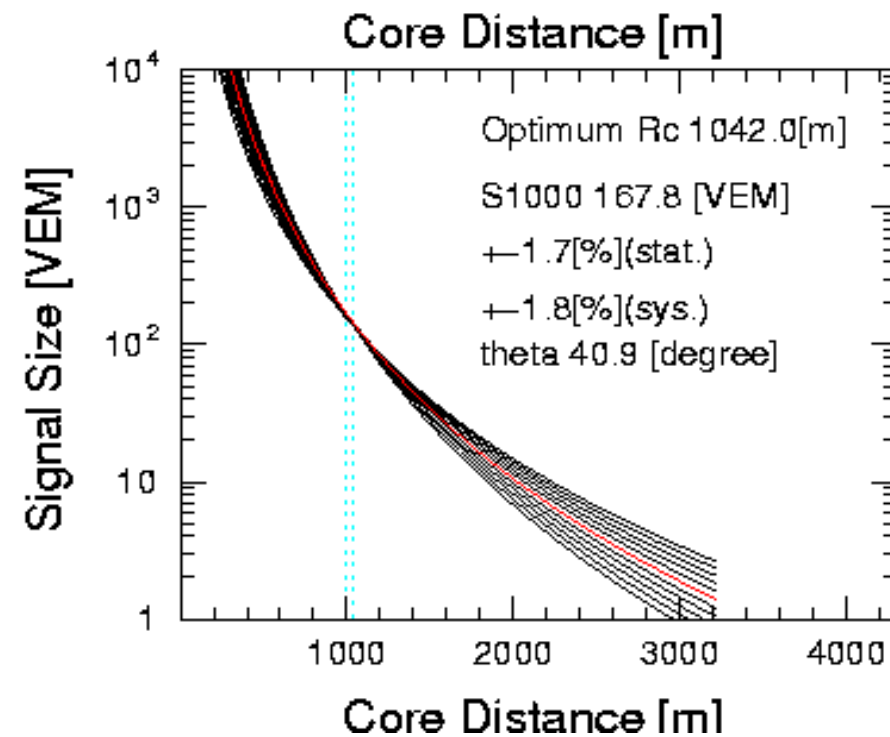
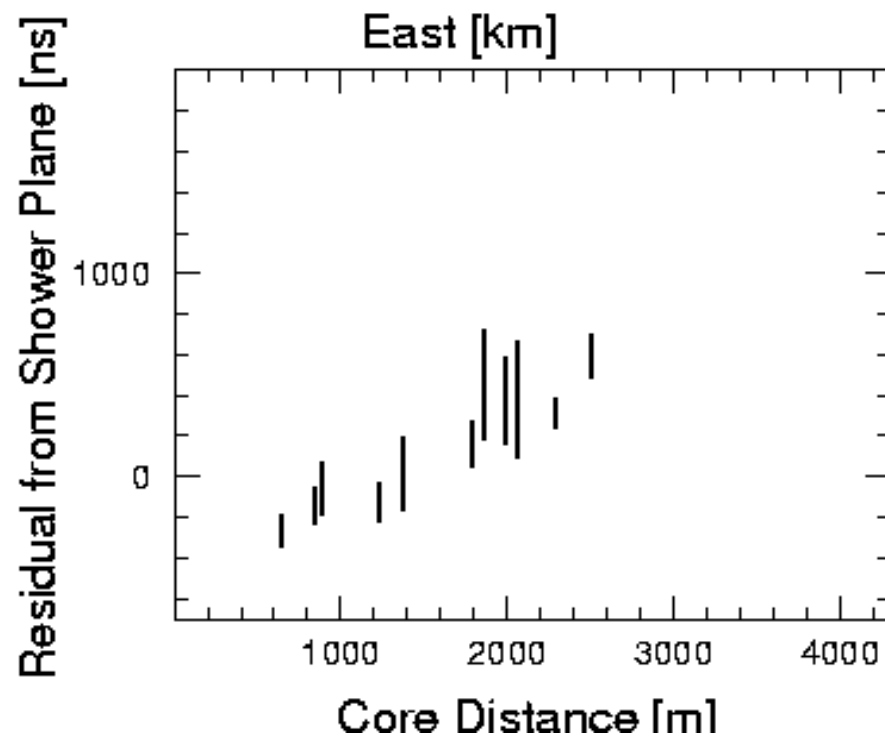
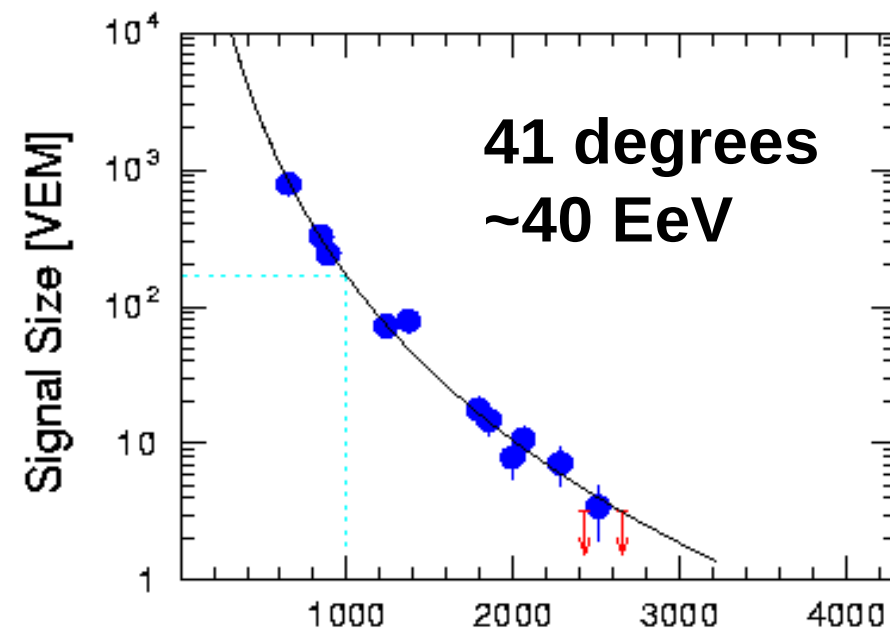


Core Distance [m]

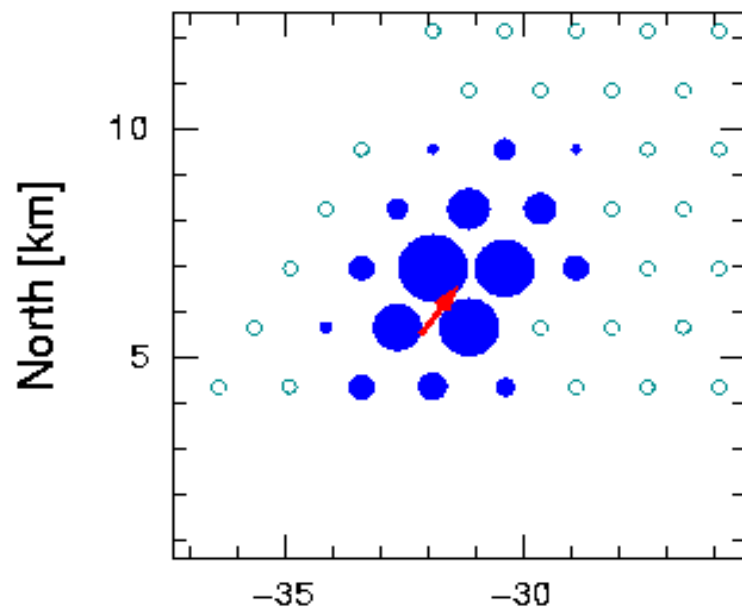
ID 800142



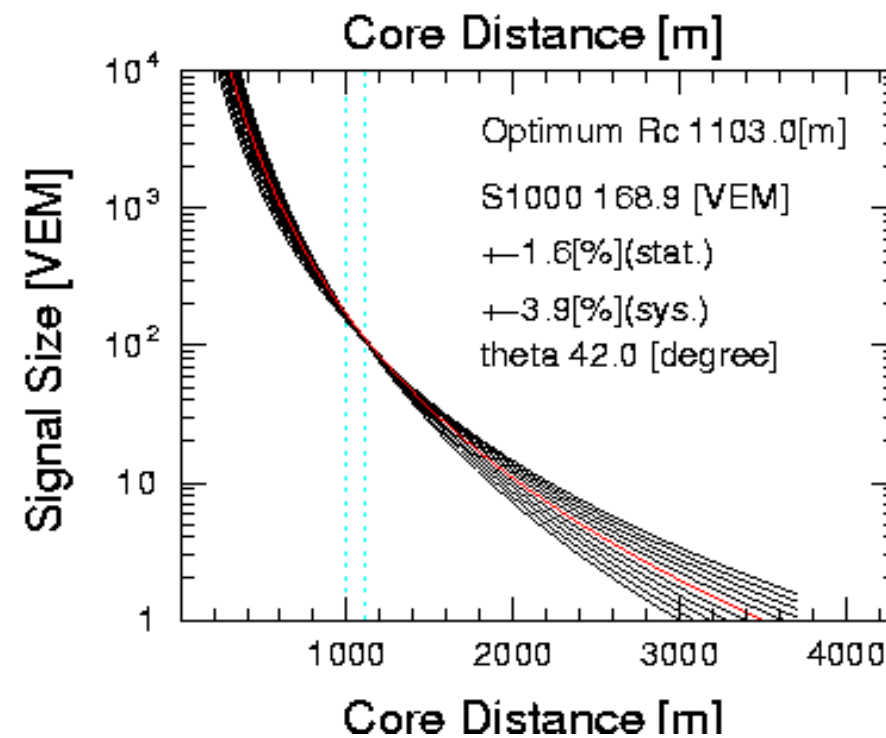
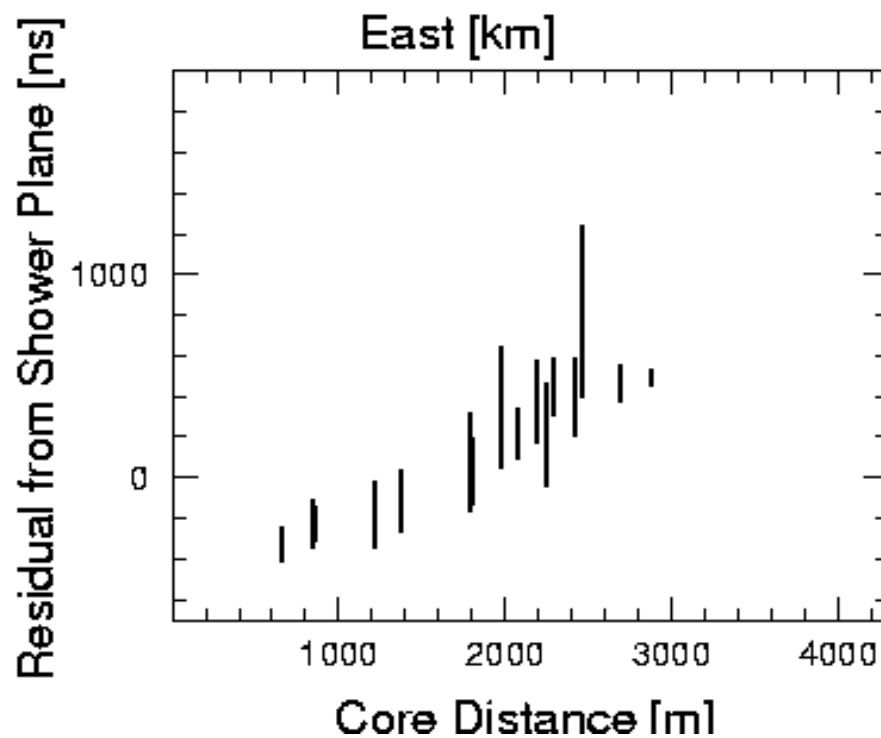
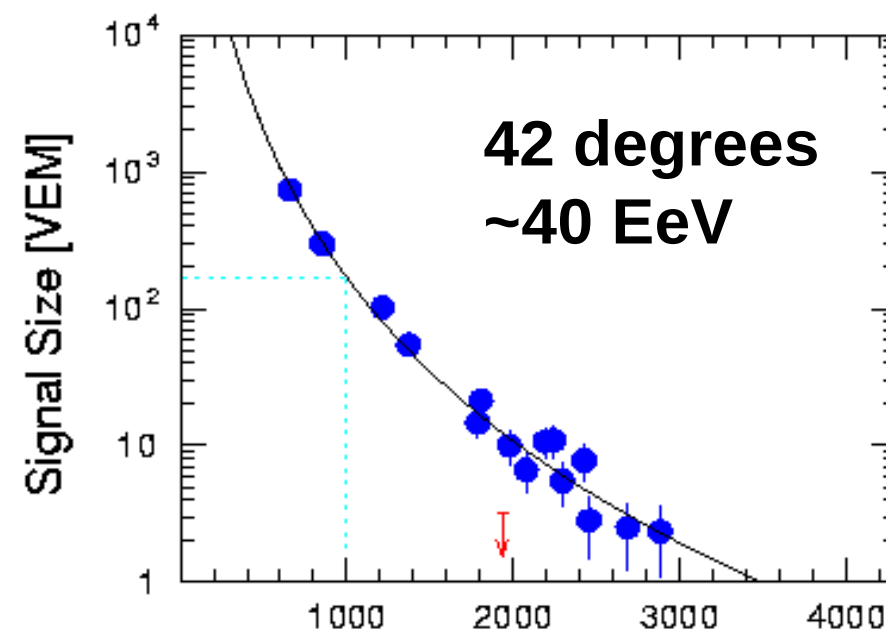
ID 800142



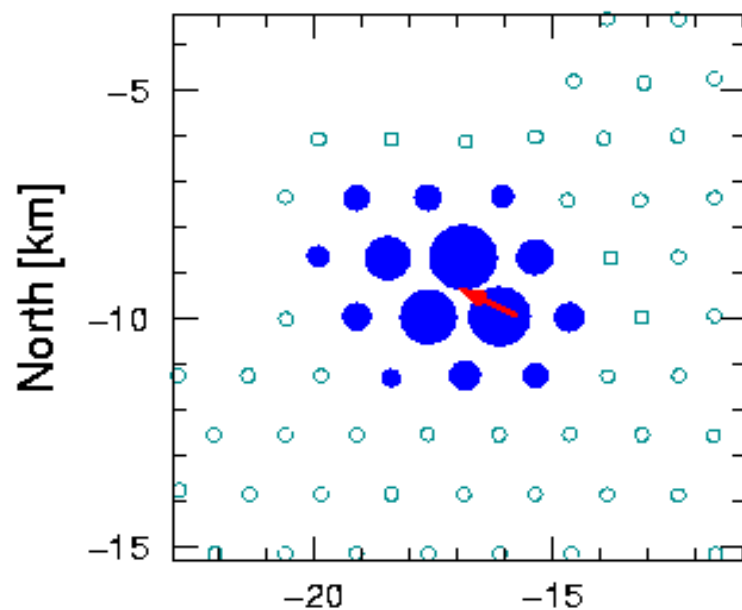
ID 1164385



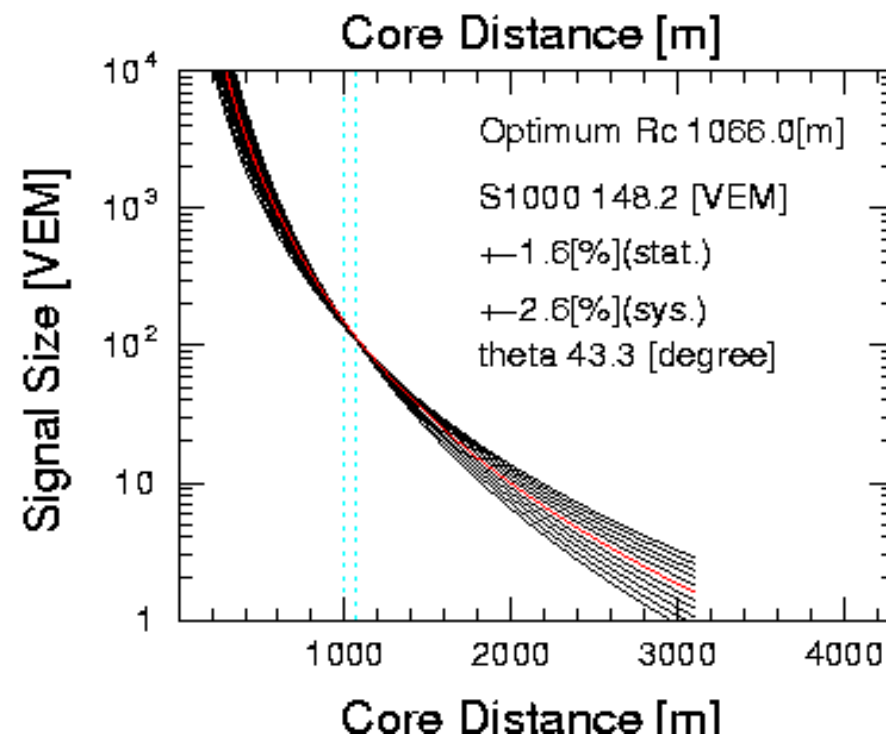
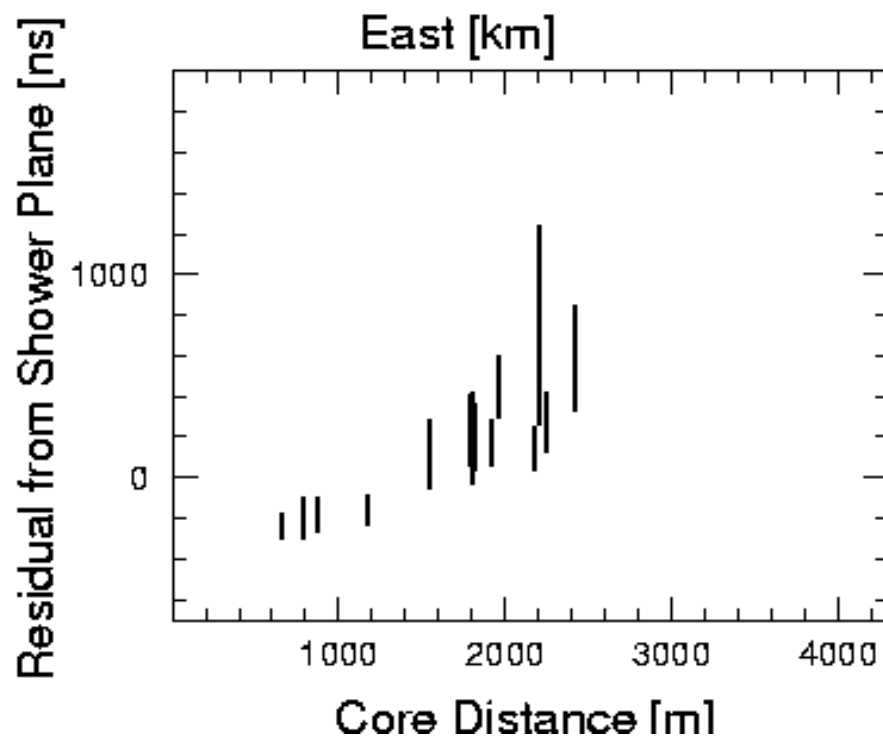
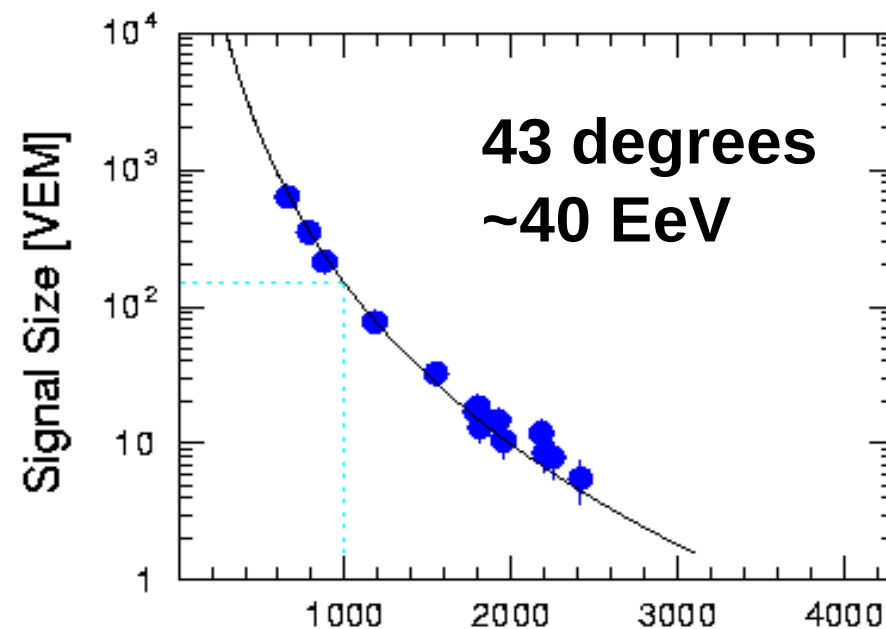
ID 1164385



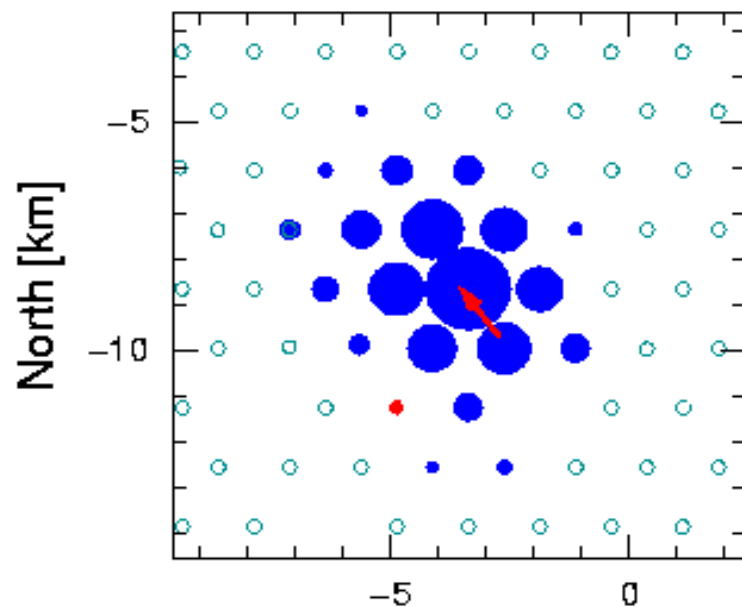
ID 1234800



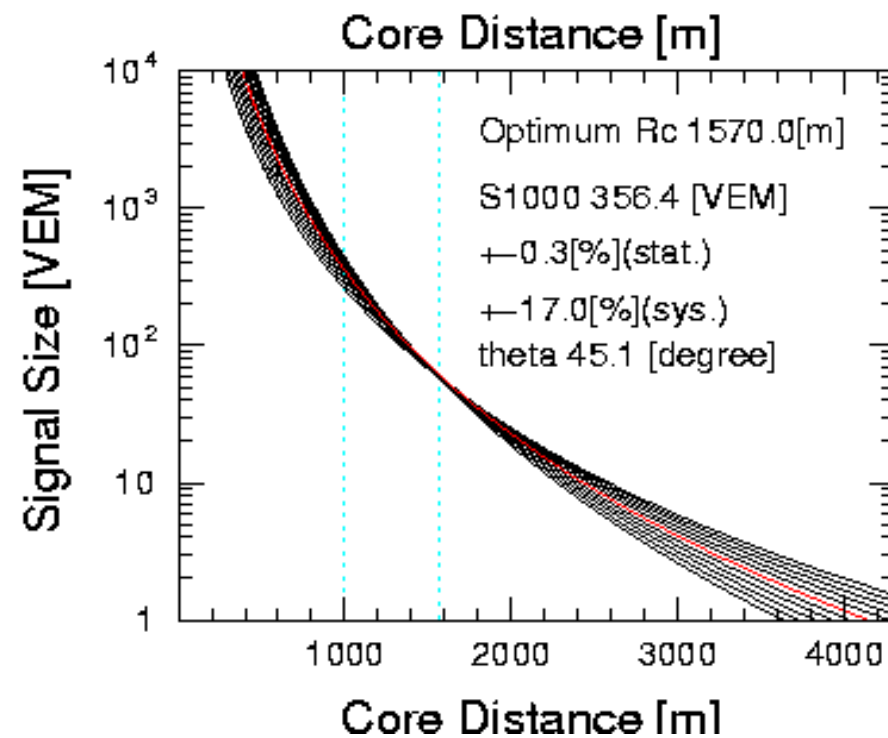
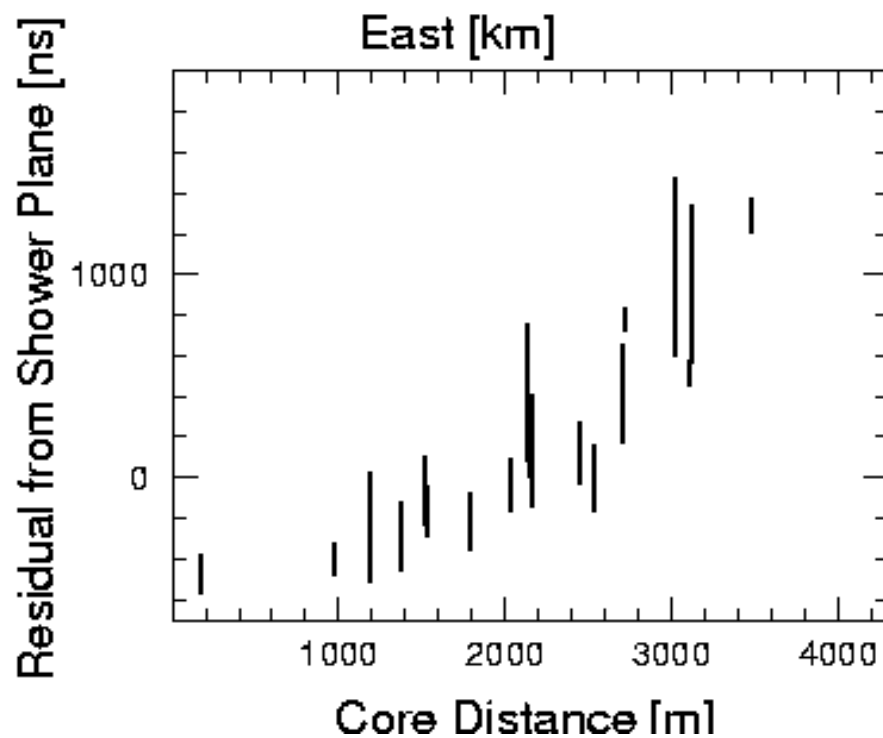
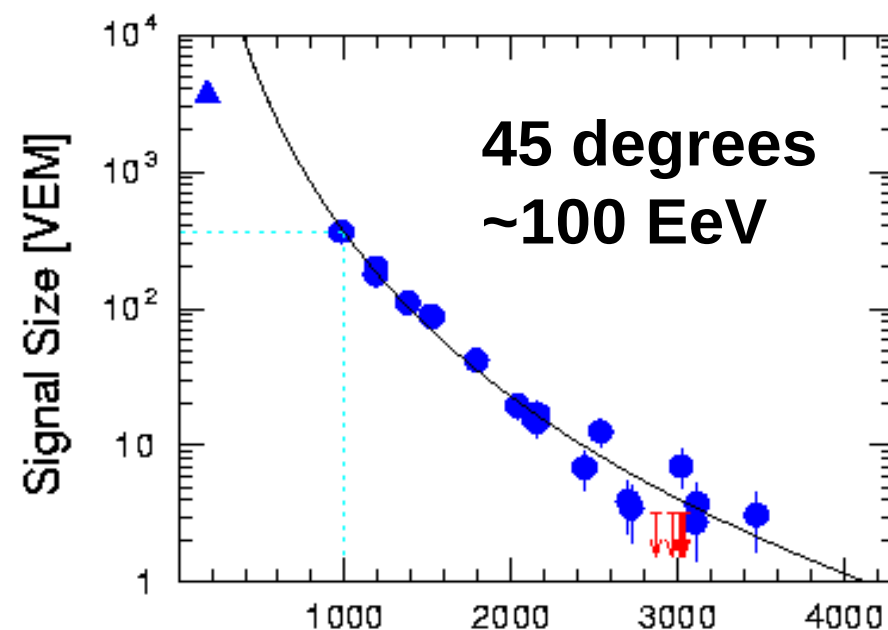
ID 1234800



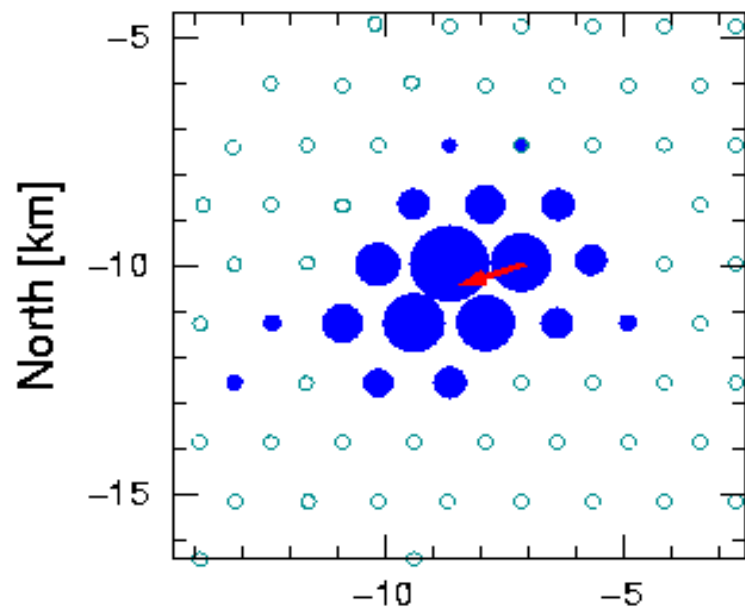
ID 1096757



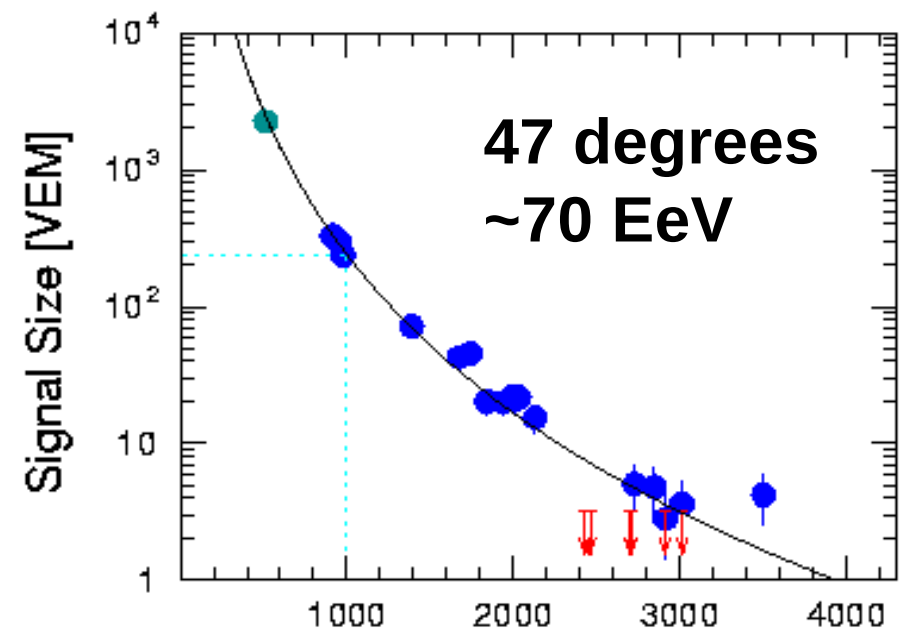
ID 1096757



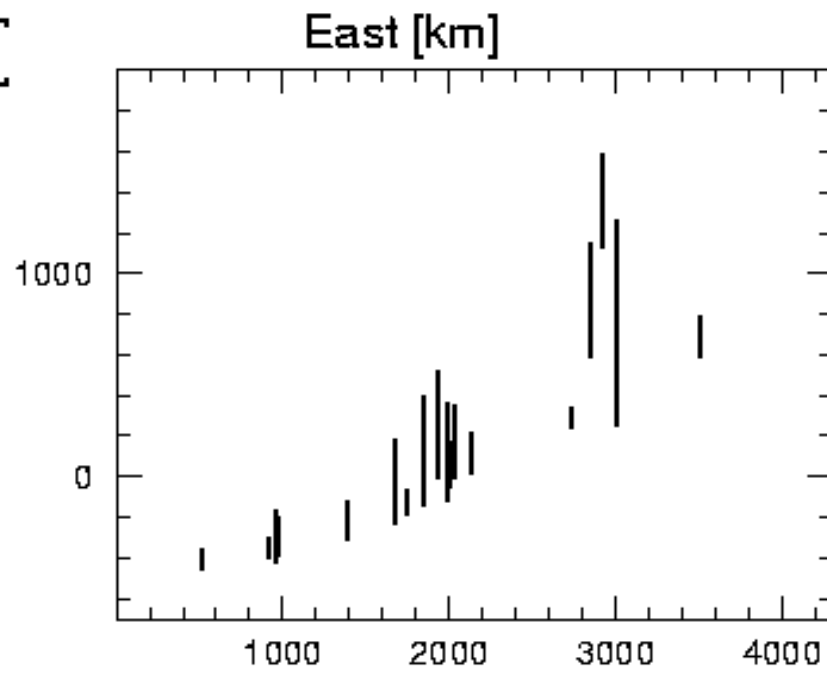
ID 762238



ID 762238

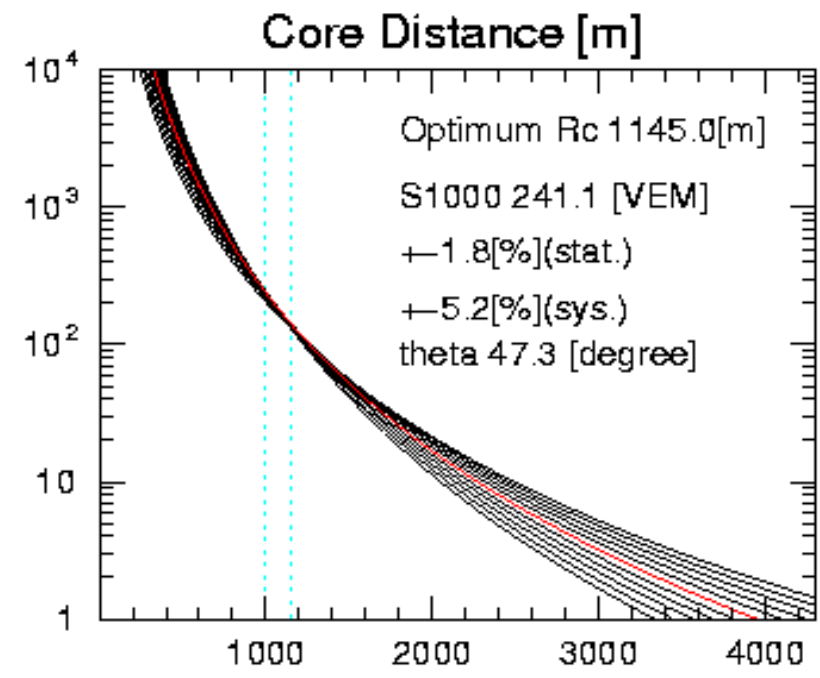


Residual from Shower Plane [ns]



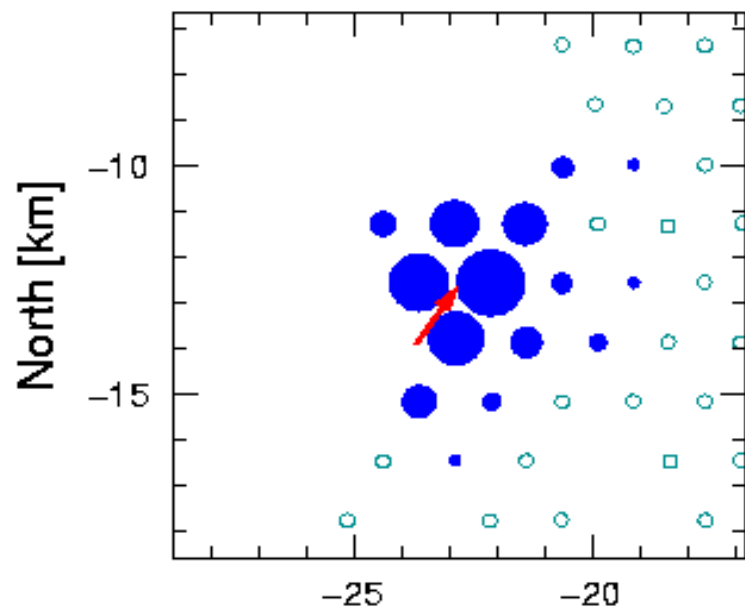
Core Distance [m]

Signal Size [VEM]

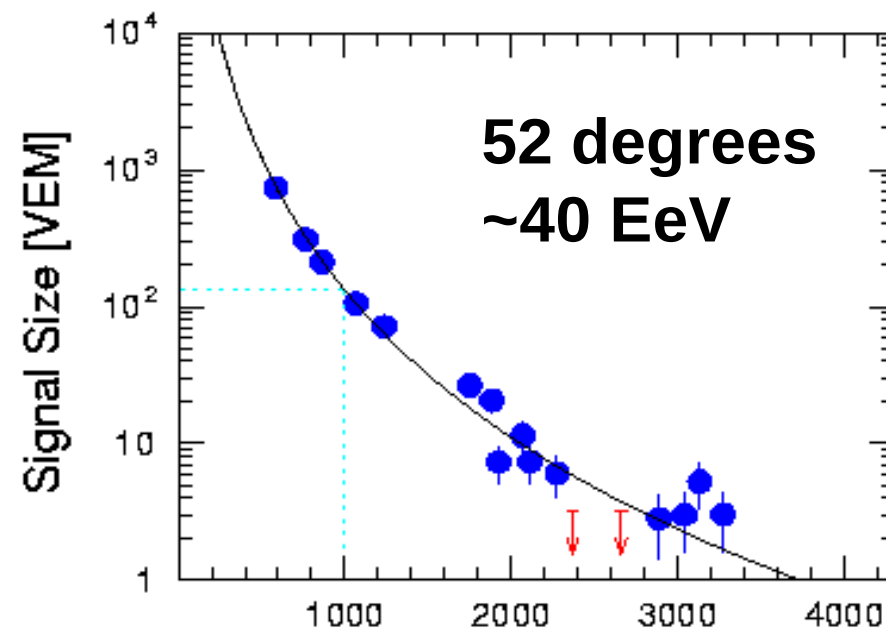


Core Distance [m]

ID 1219738

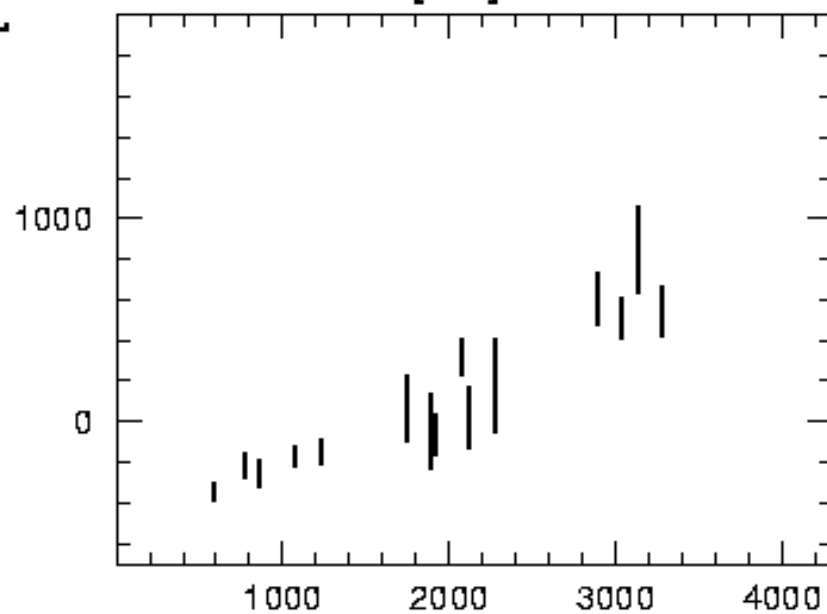


ID 1219738



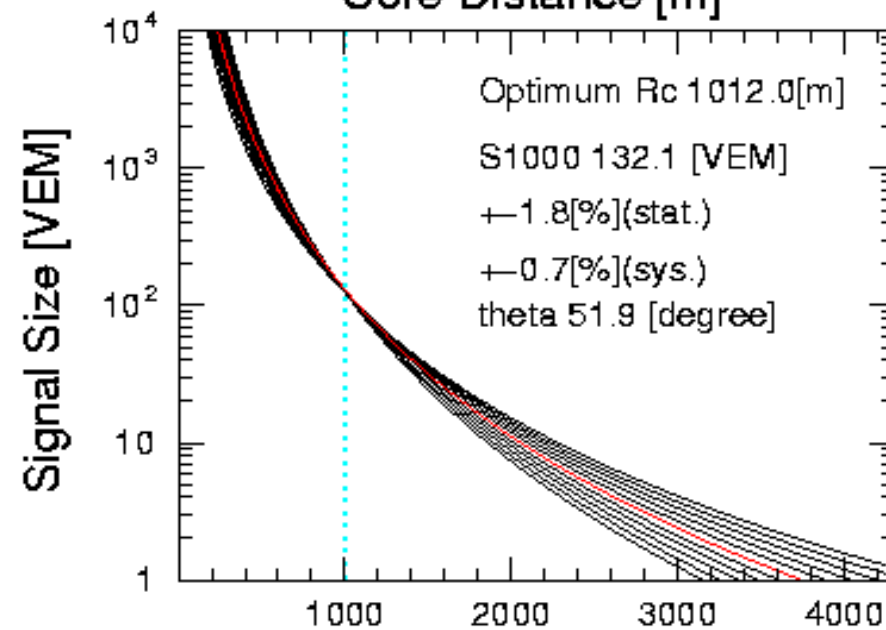
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



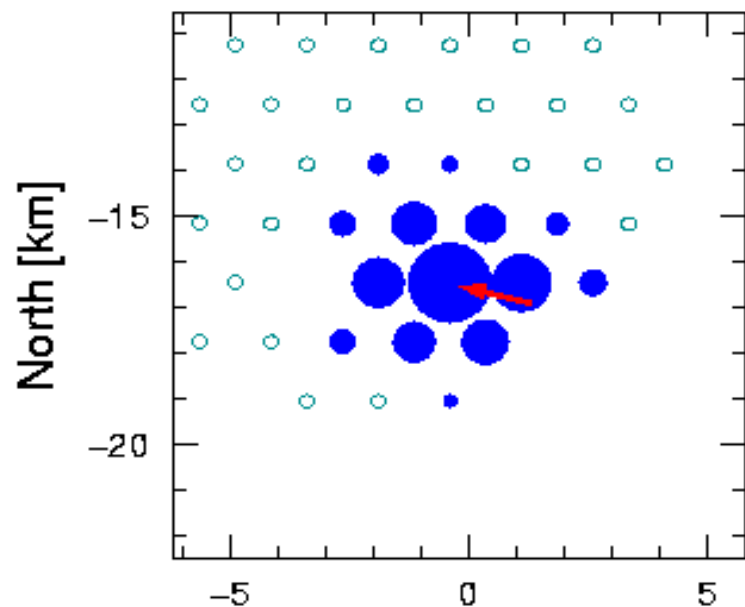
Core Distance [m]

Core Distance [m]

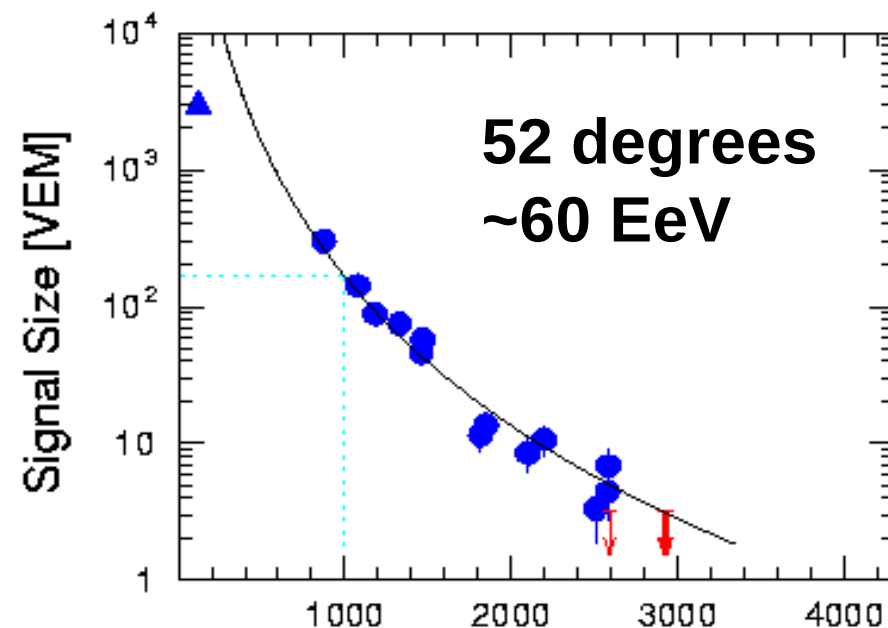


Core Distance [m]

ID 634746

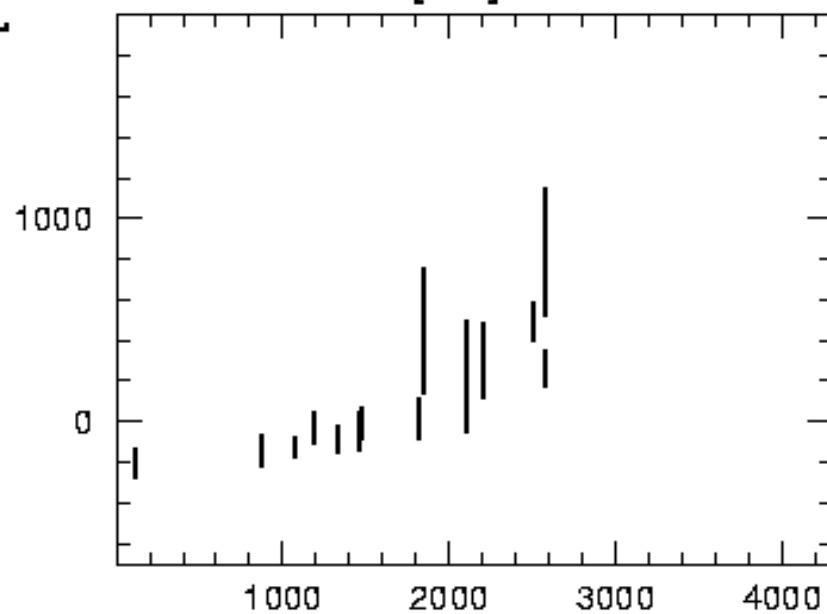


ID 634746



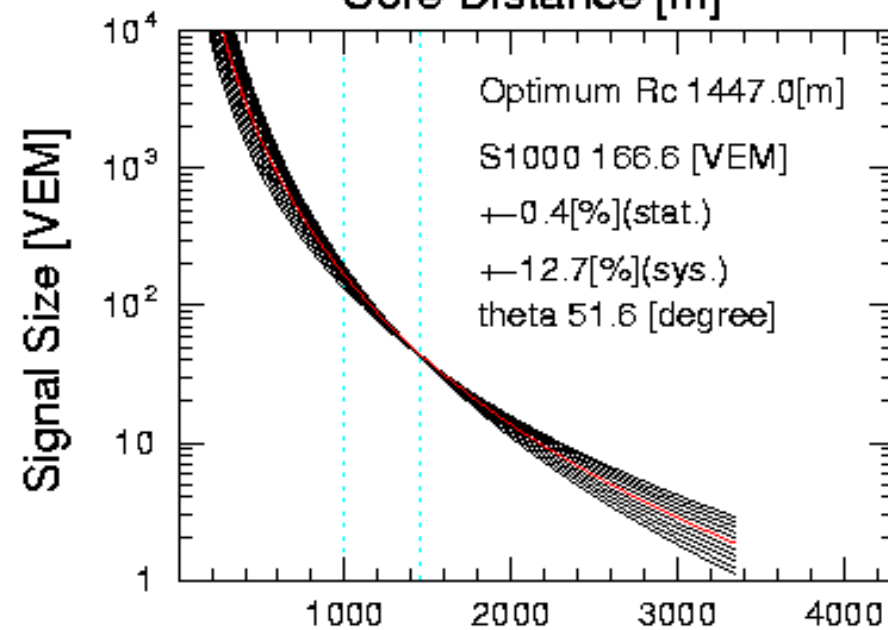
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



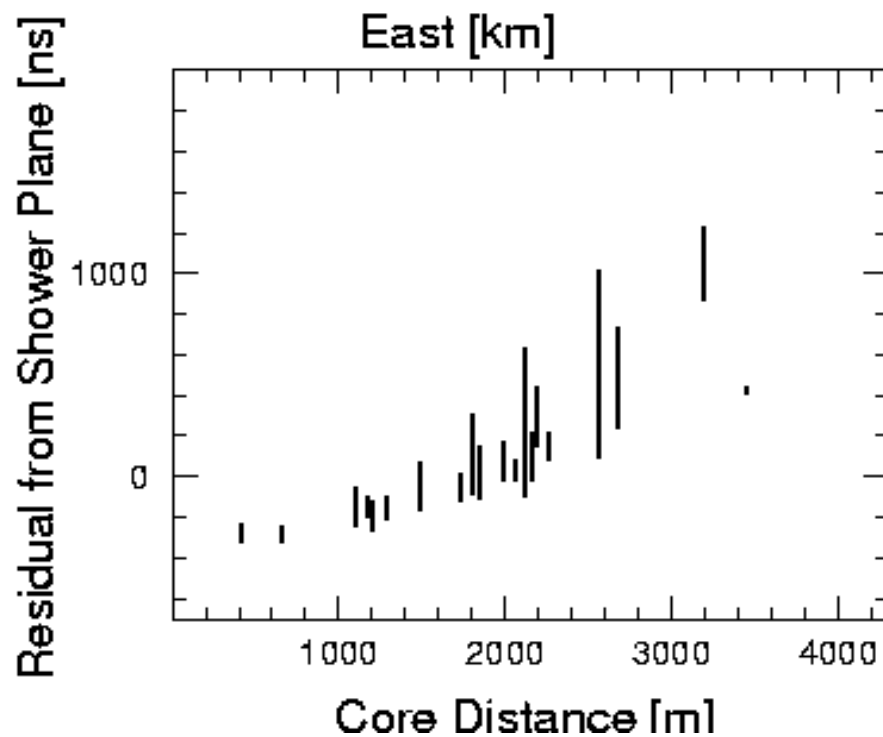
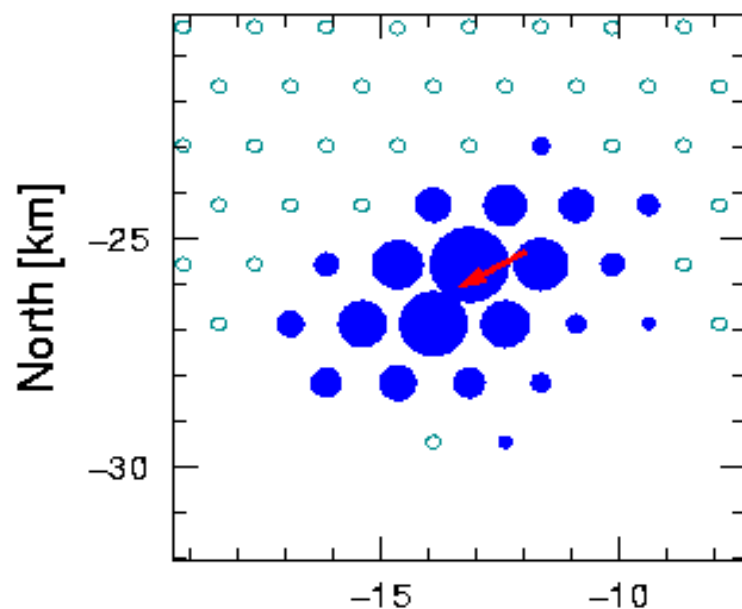
Core Distance [m]

Core Distance [m]

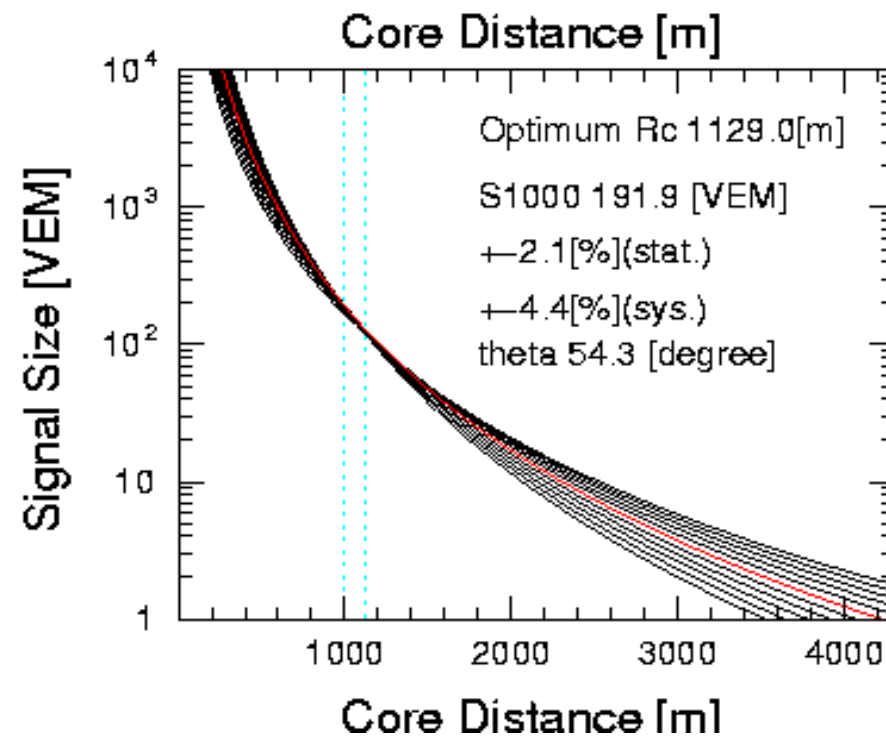
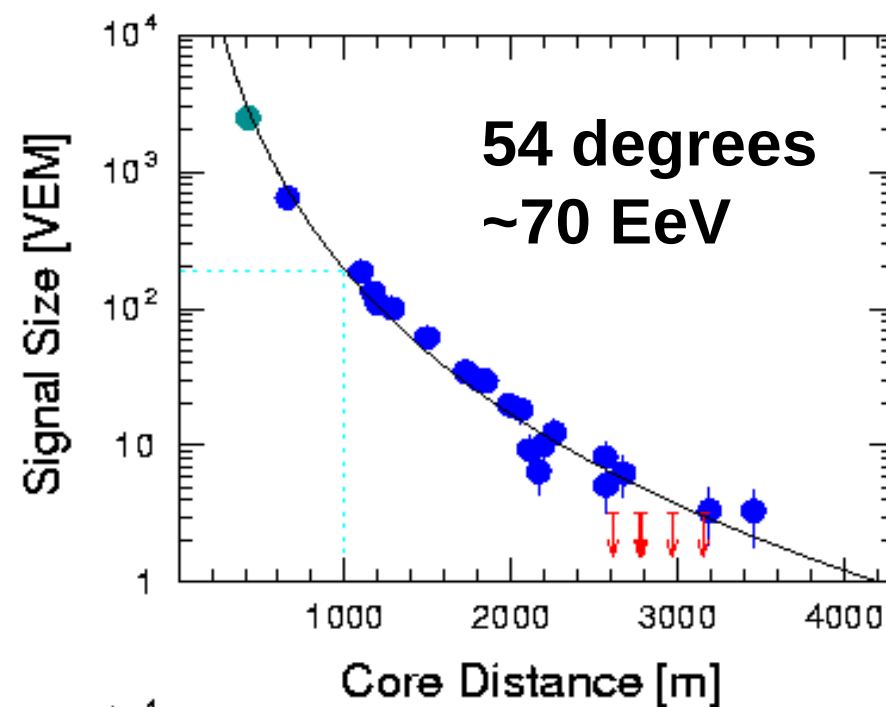


Core Distance [m]

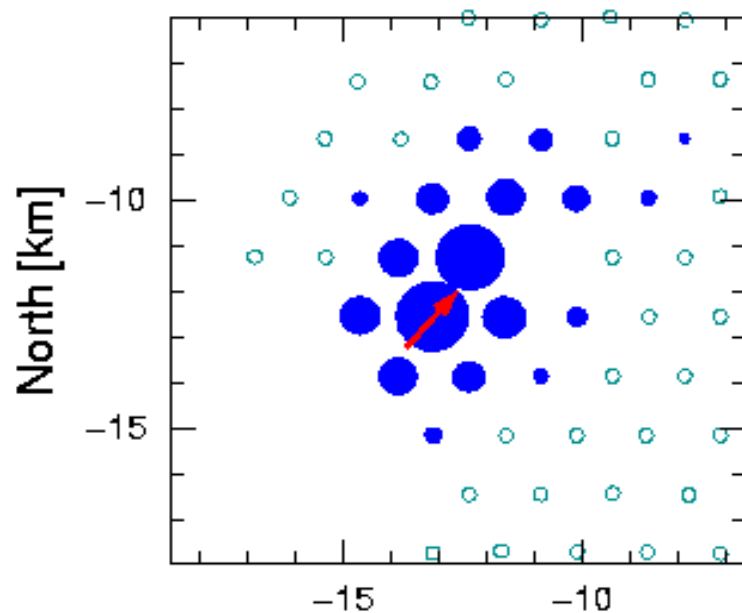
ID 1233429



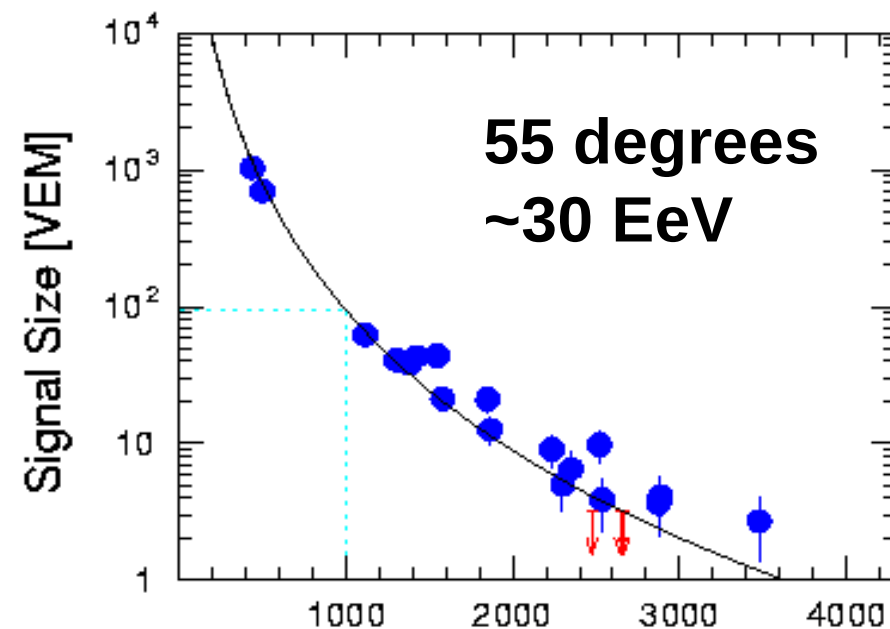
ID 1233429



ID 648728

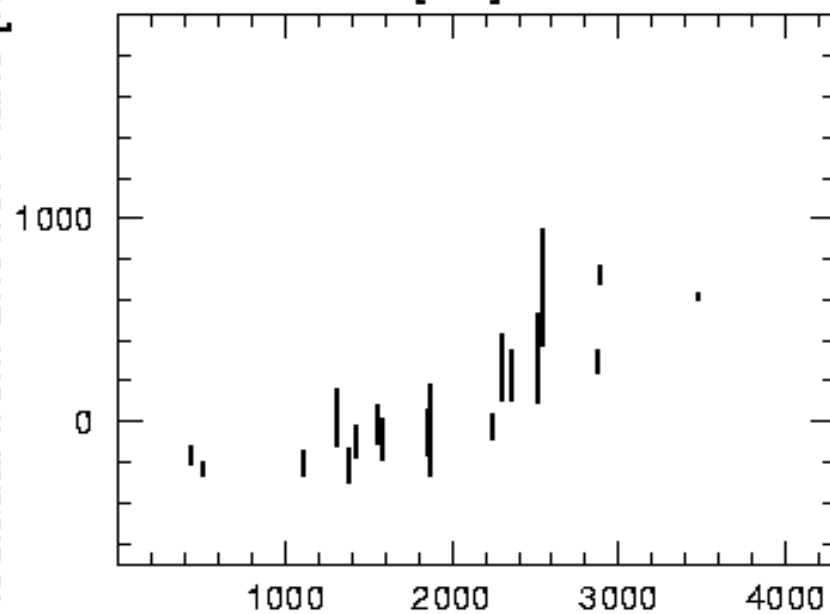


ID 648728



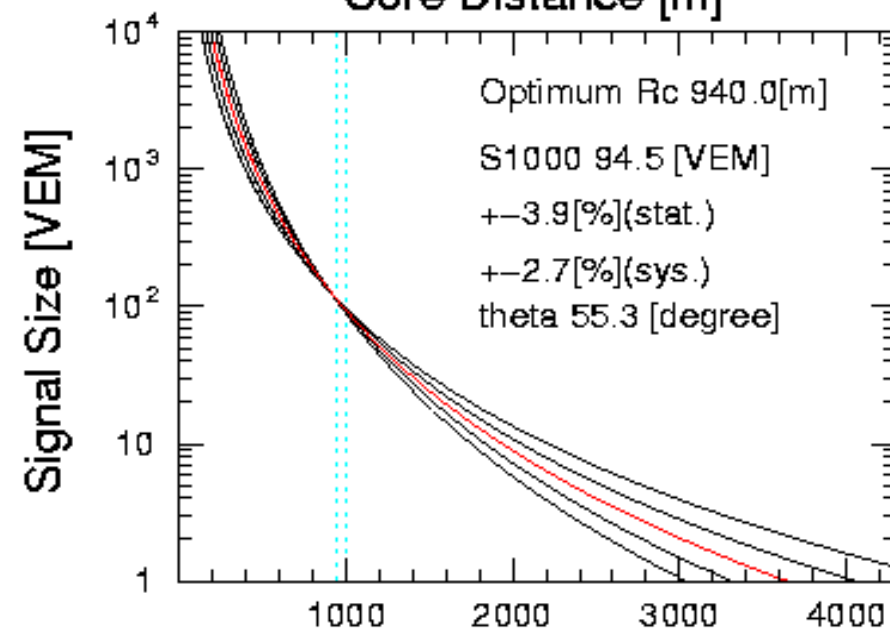
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



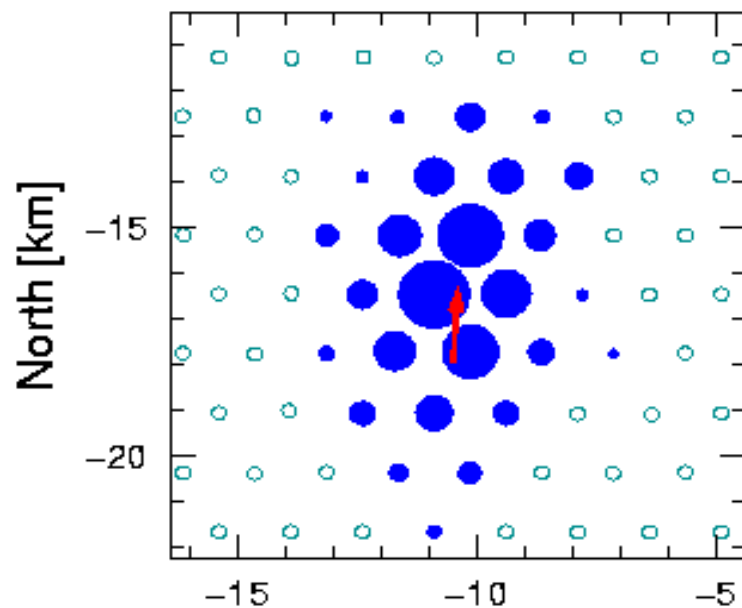
Core Distance [m]

Core Distance [m]

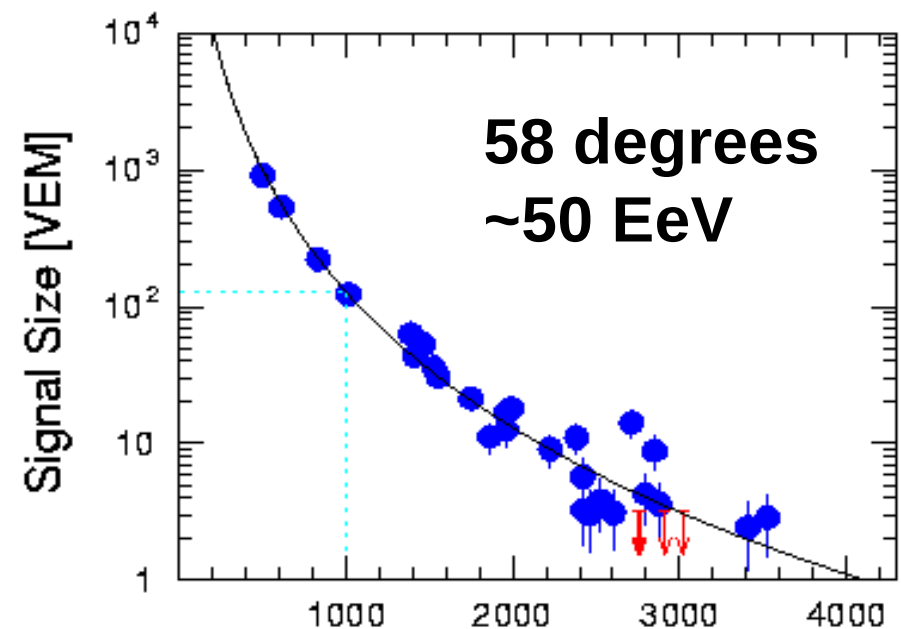


Core Distance [m]

ID 959347

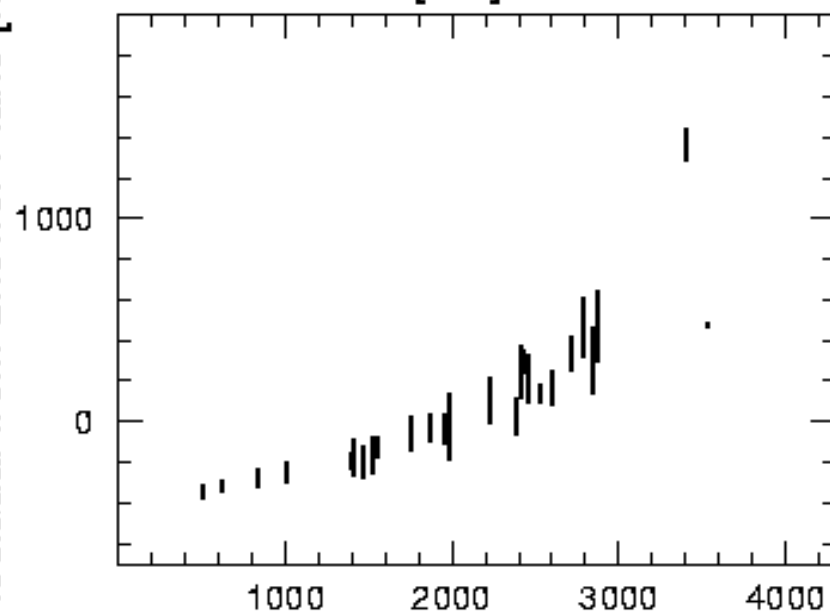


ID 959347



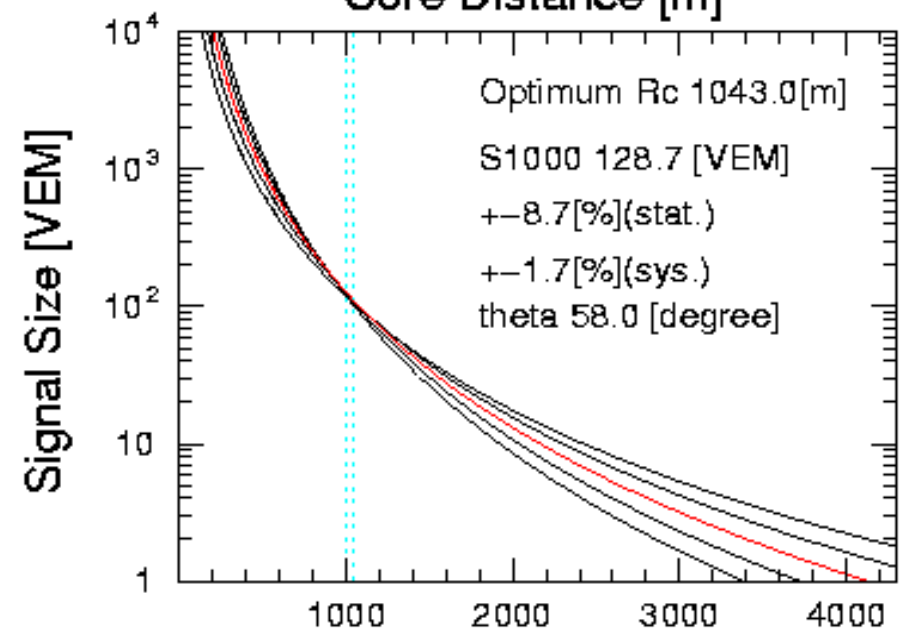
Residual from Shower Plane [ns]

East [km]



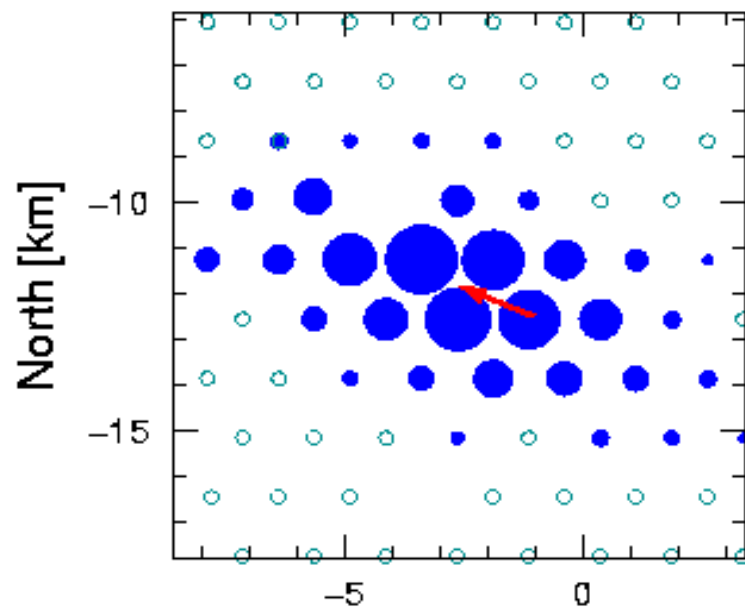
Core Distance [m]

Core Distance [m]

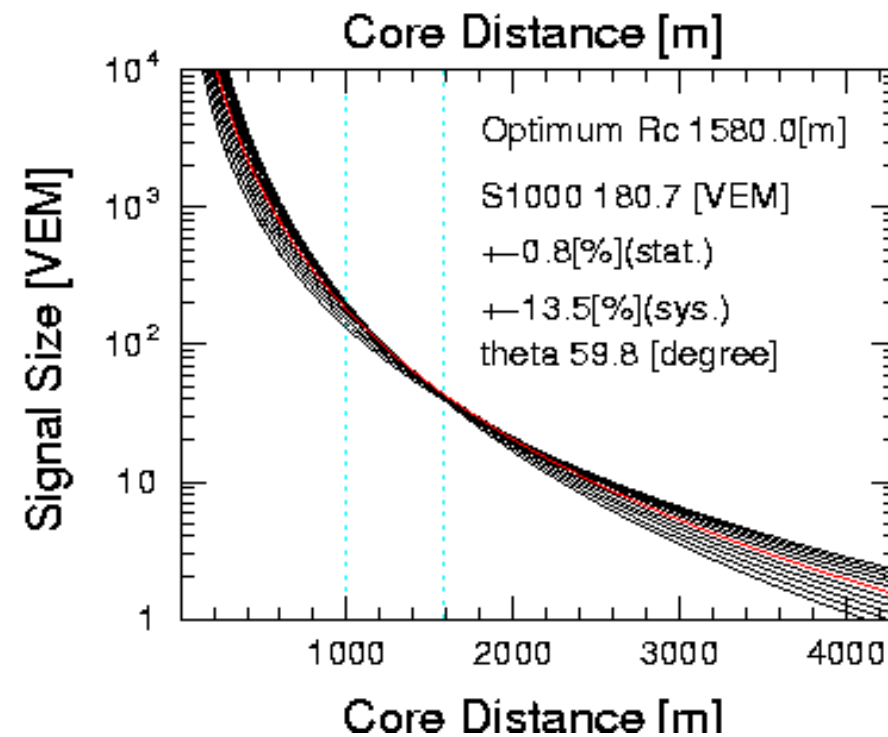
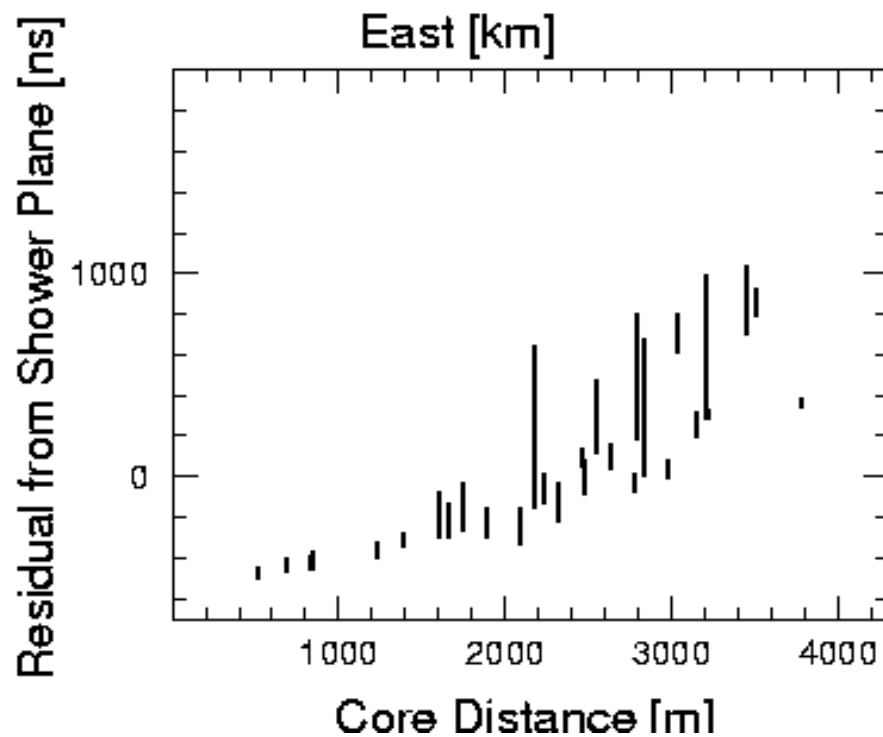
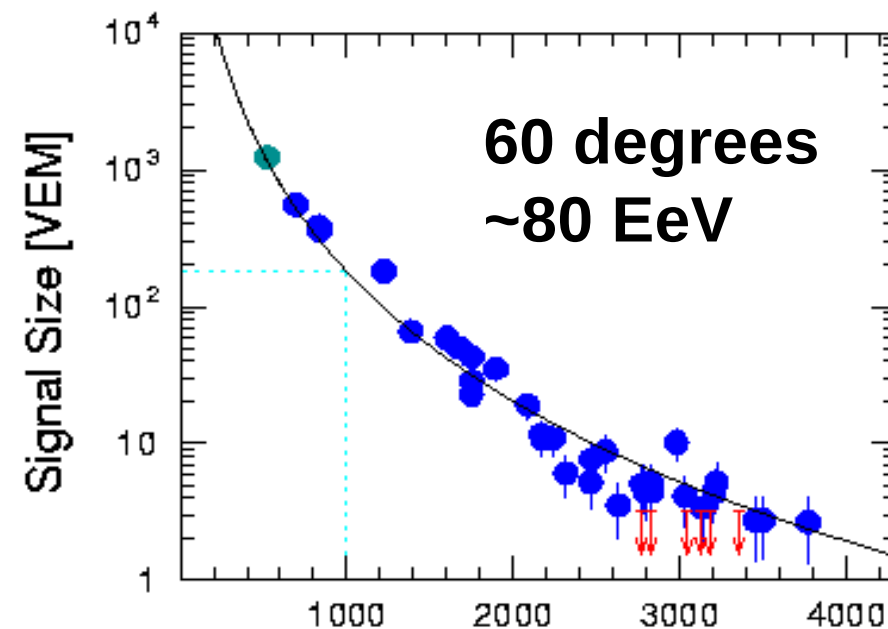


Core Distance [m]

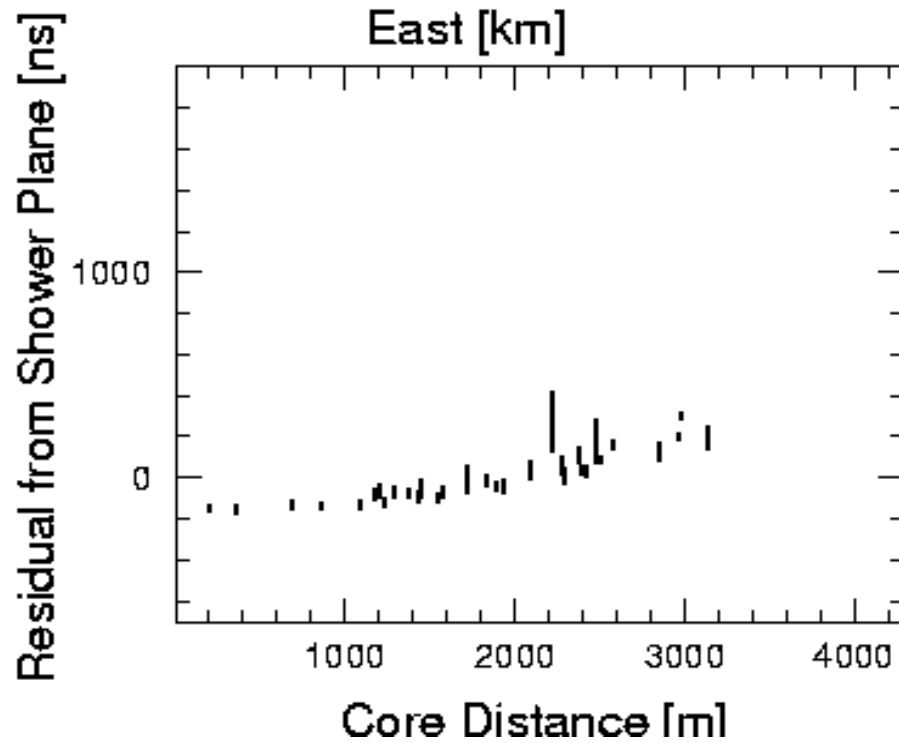
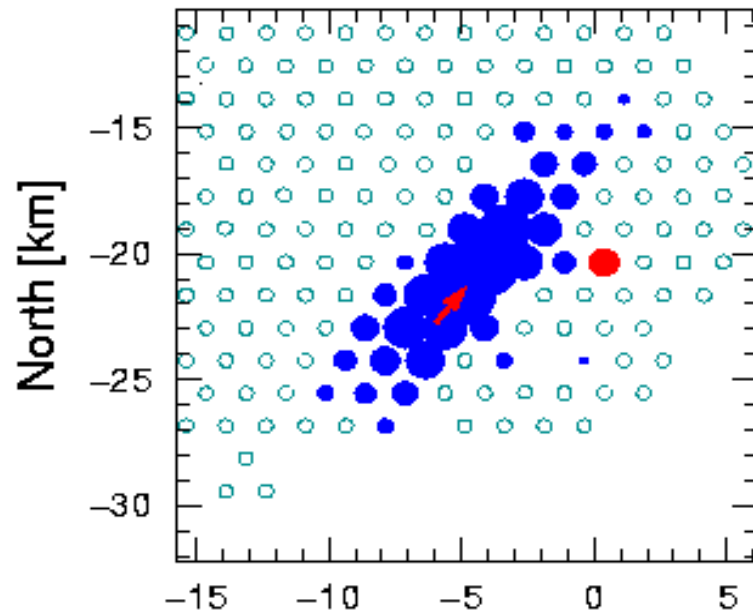
ID 787469



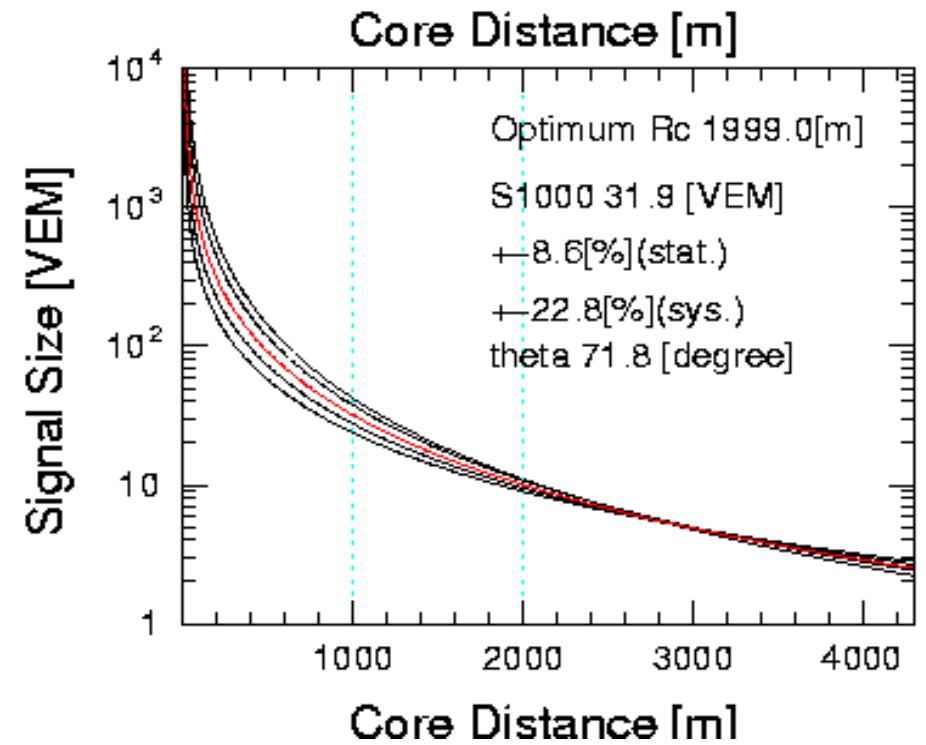
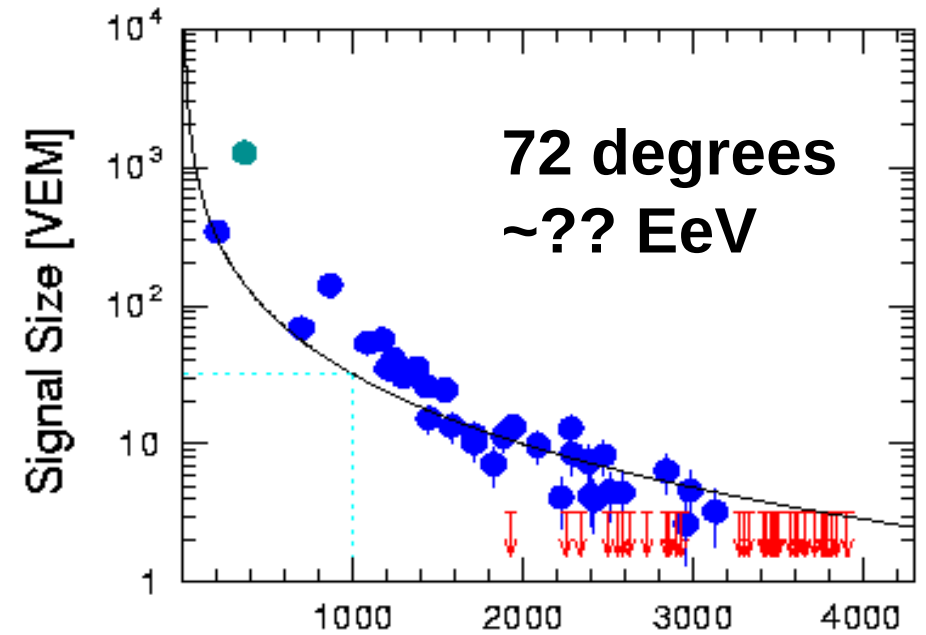
ID 787469



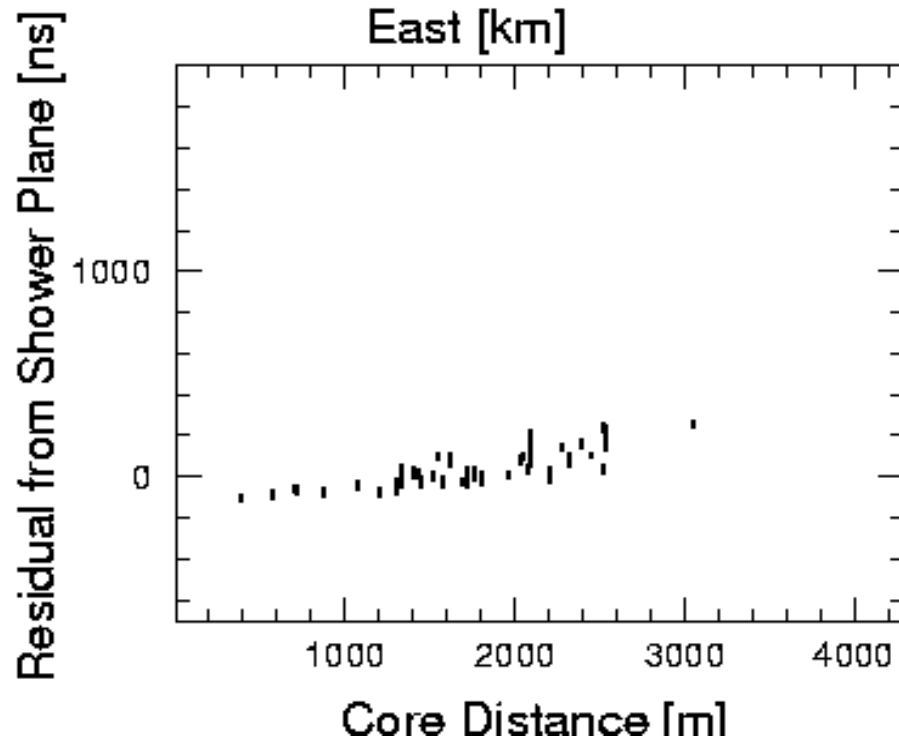
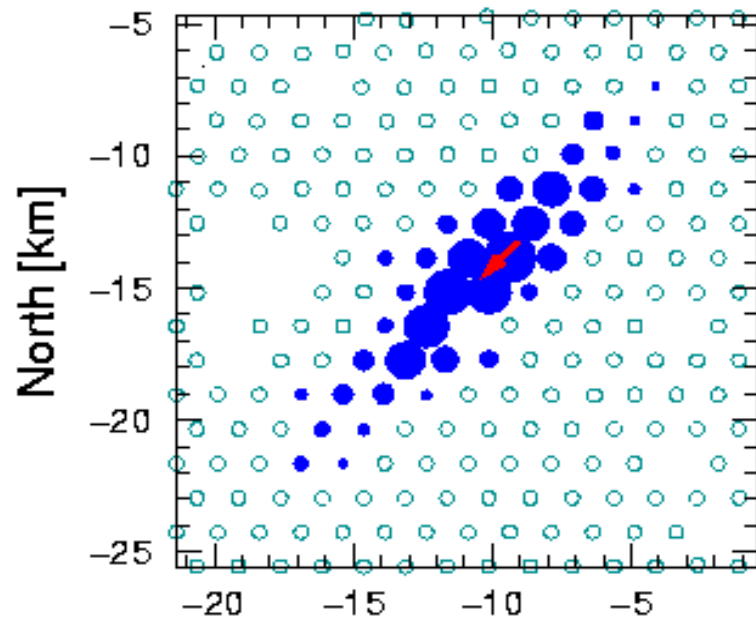
ID 762577



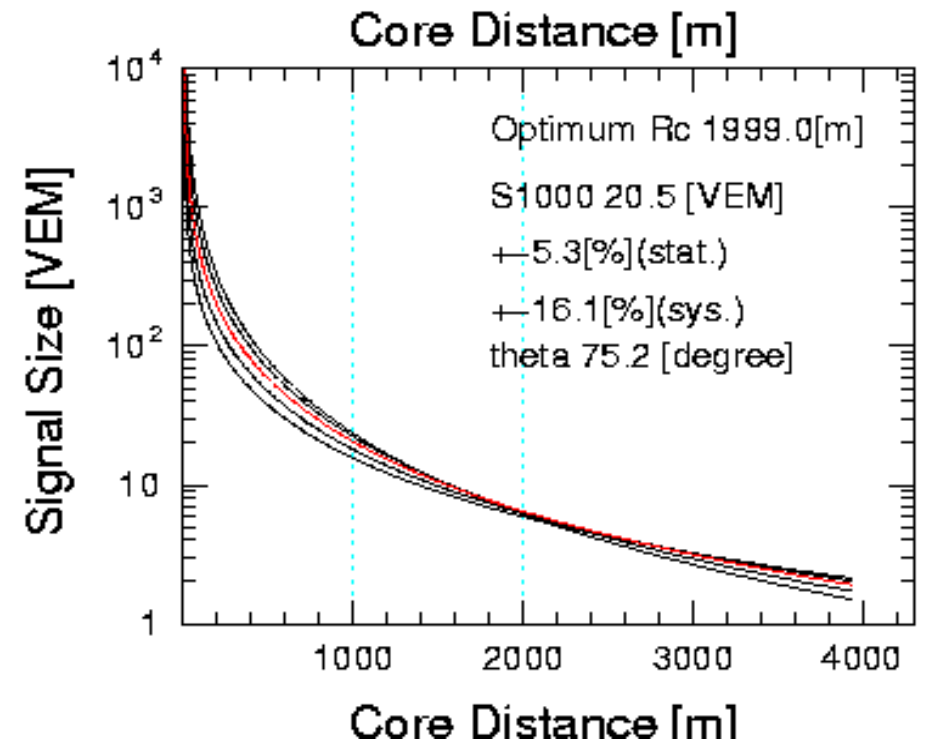
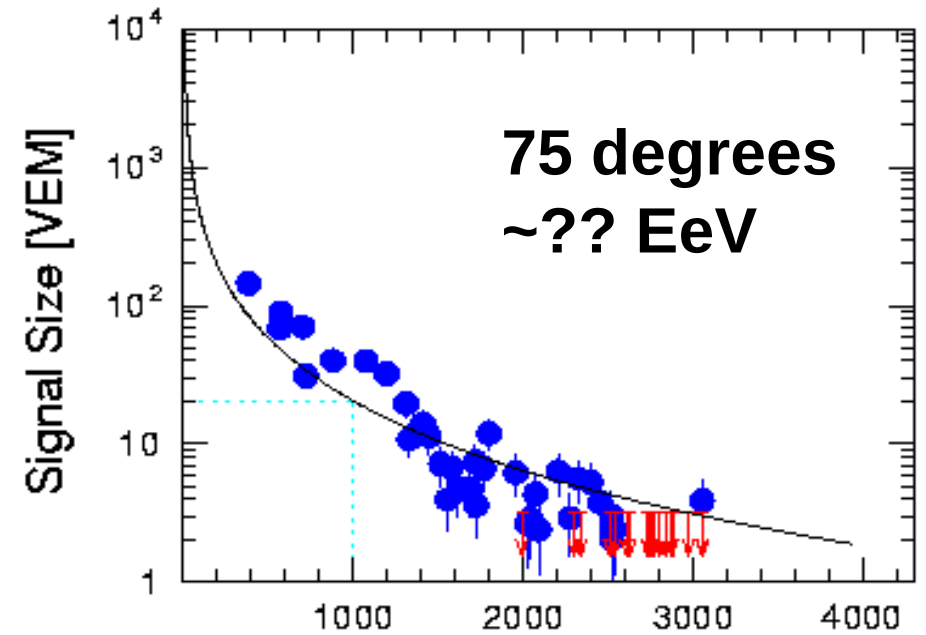
ID 762577



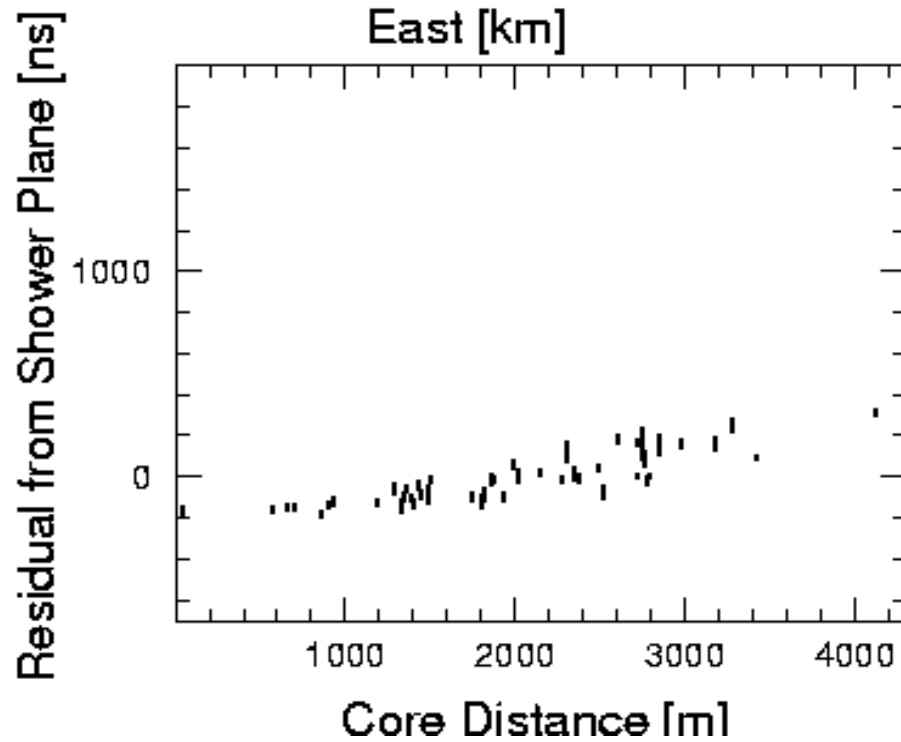
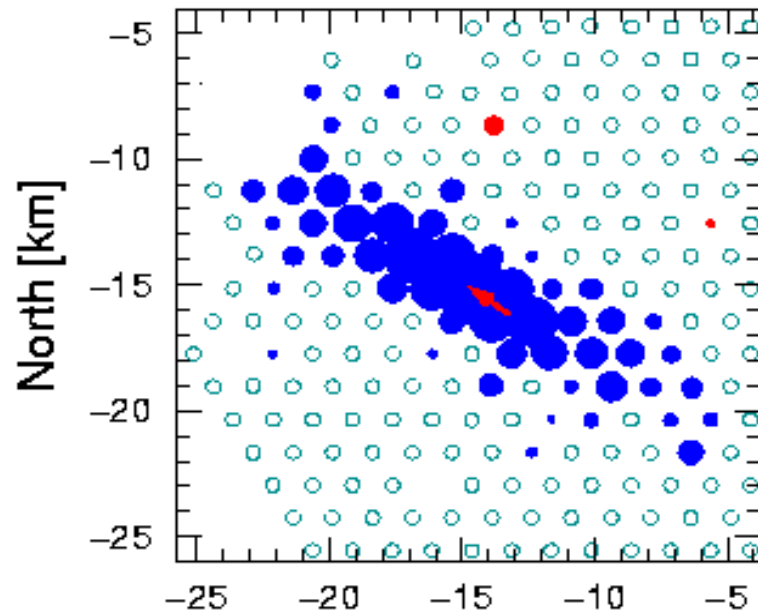
ID 836287



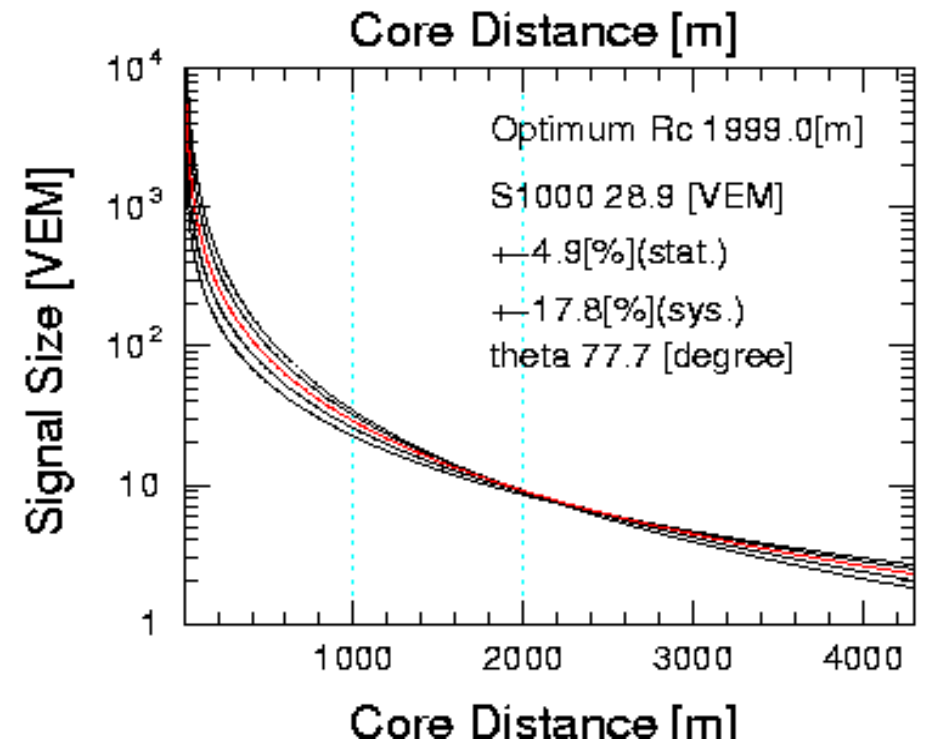
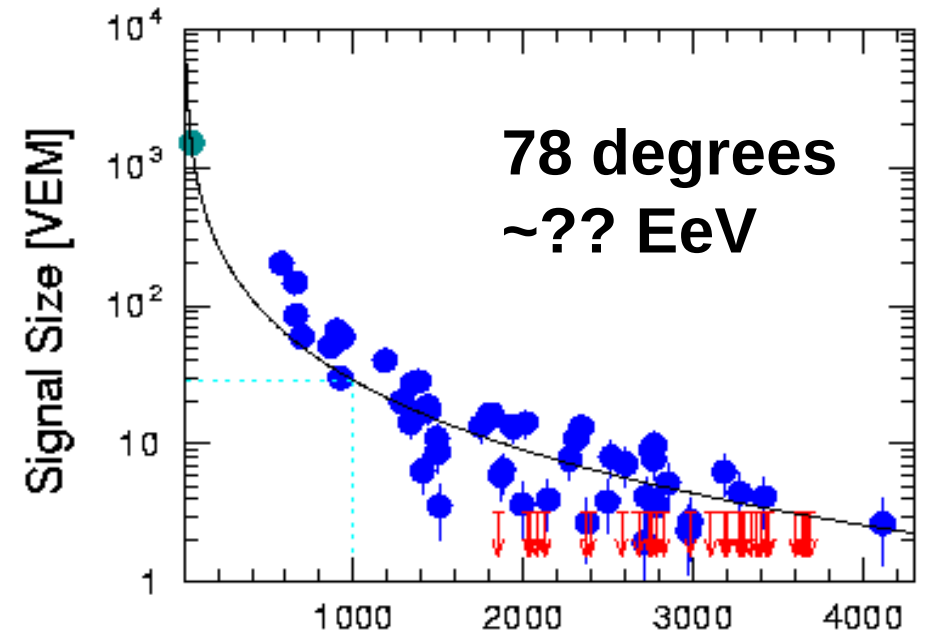
ID 836287



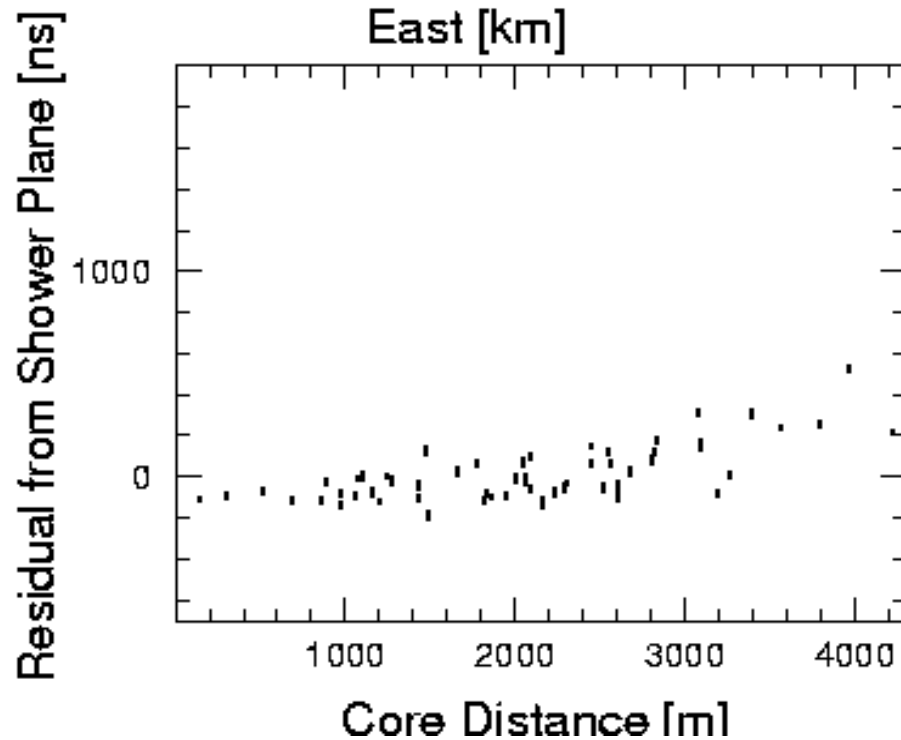
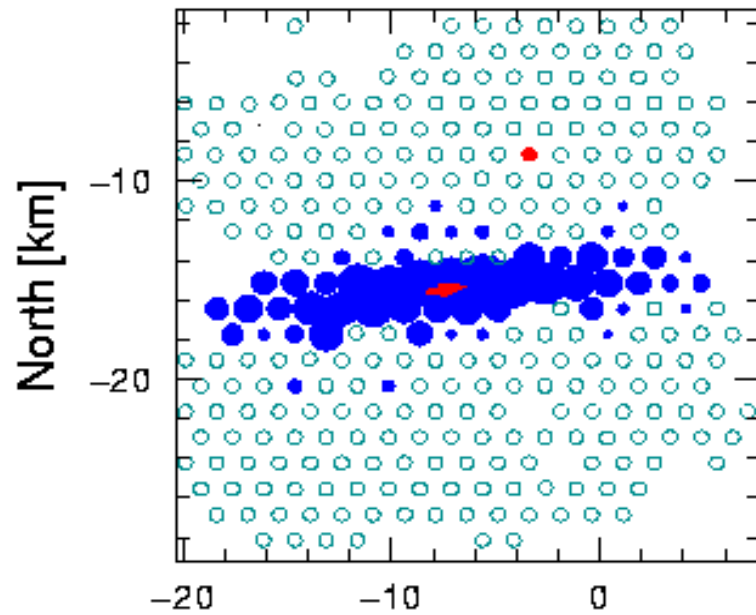
ID 1432390



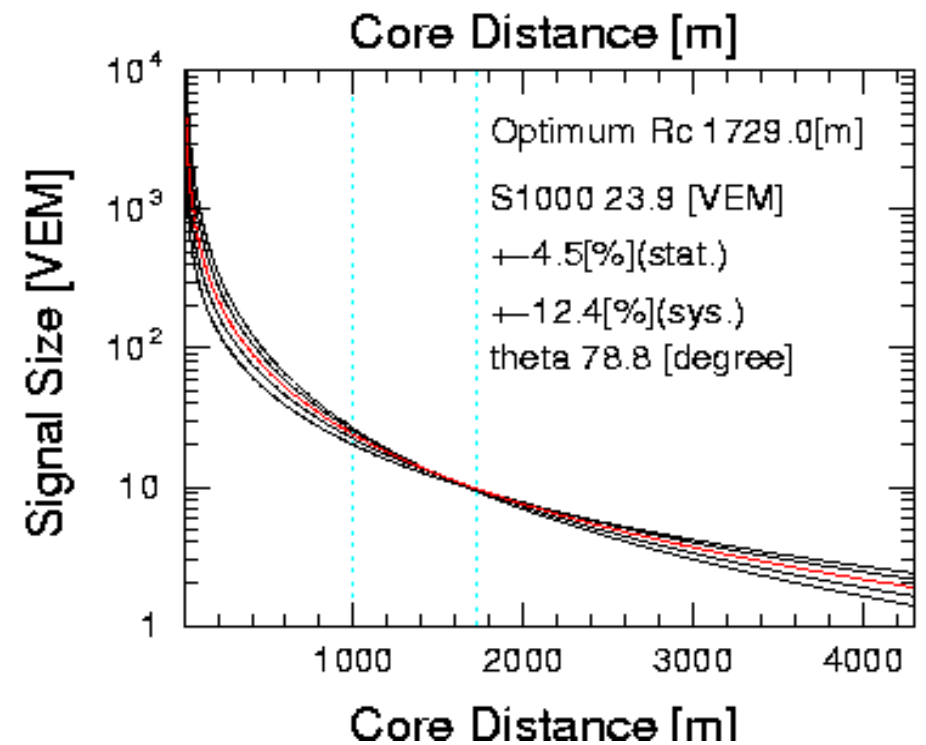
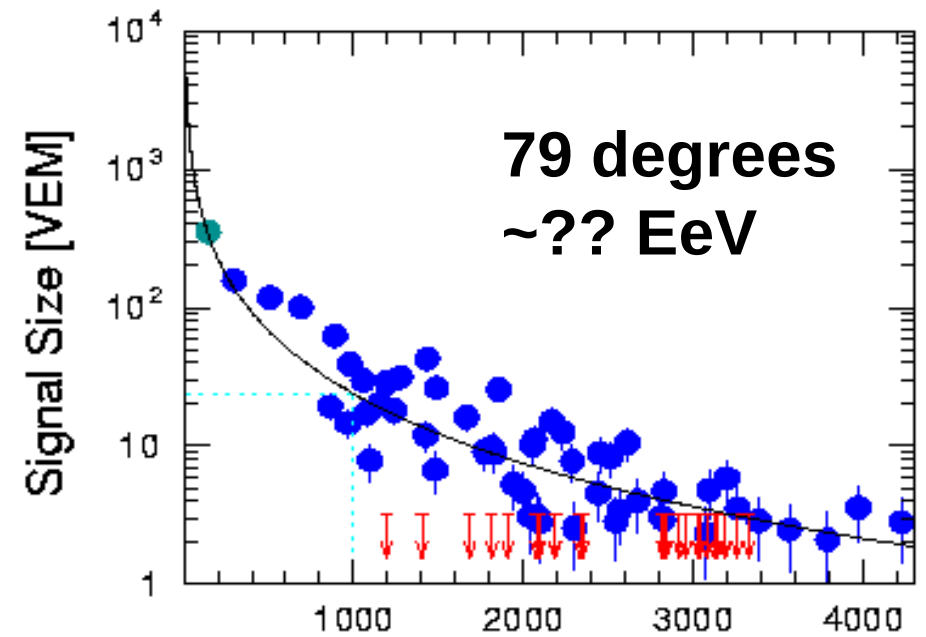
ID 1432390



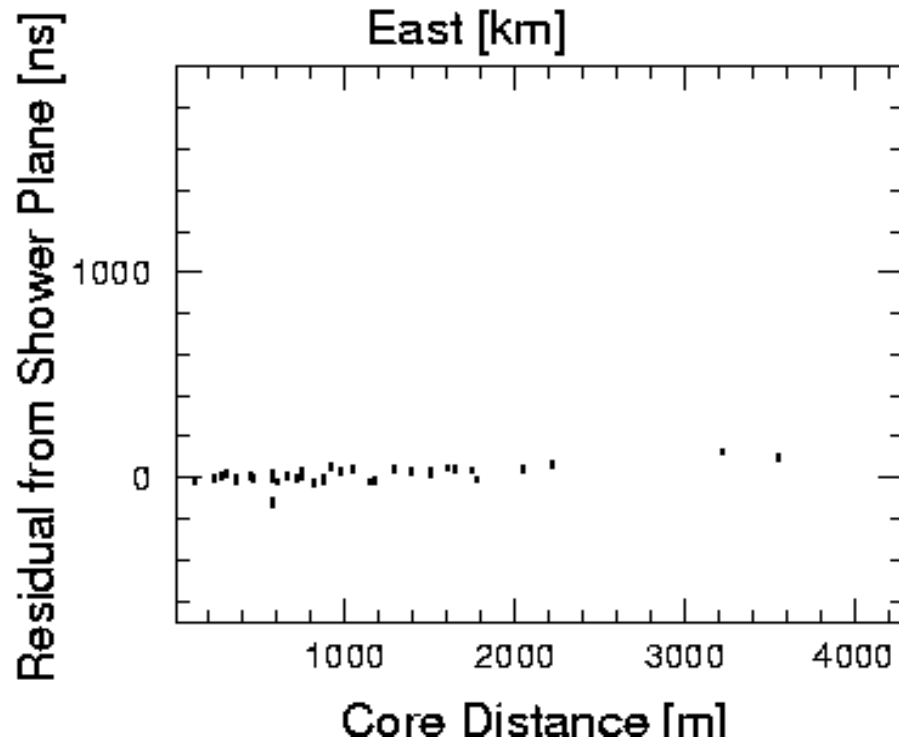
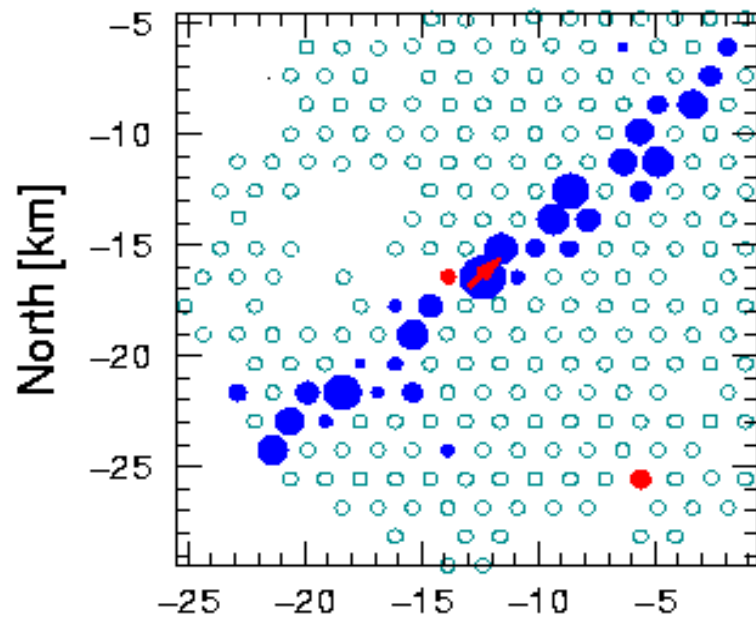
ID 856369



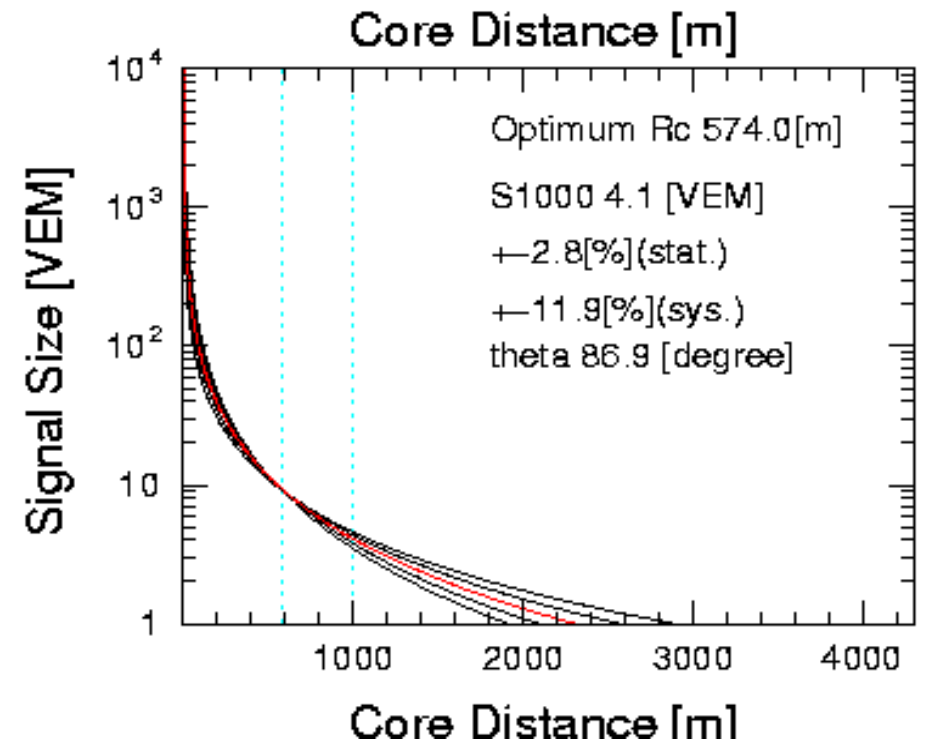
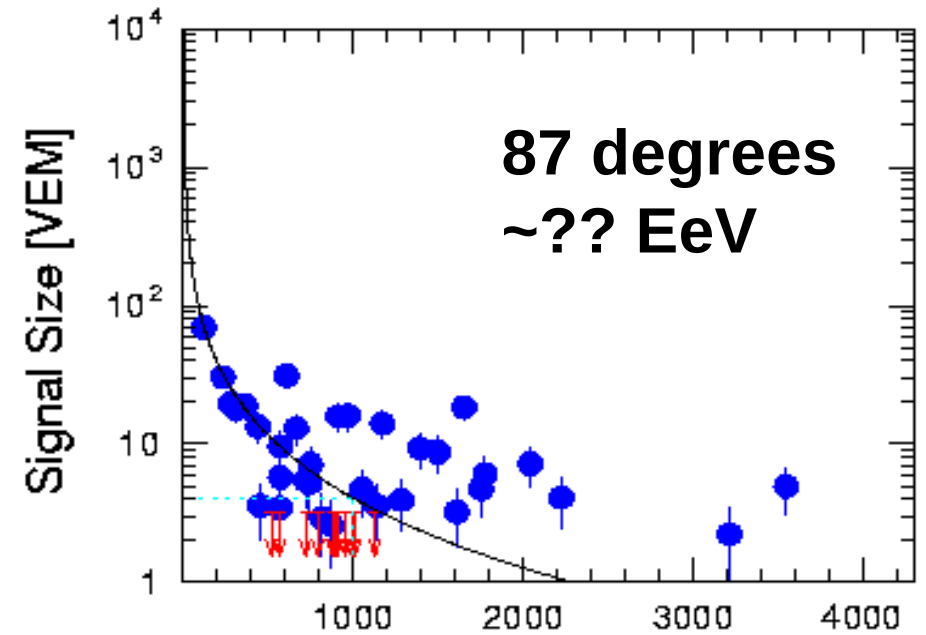
ID 856369



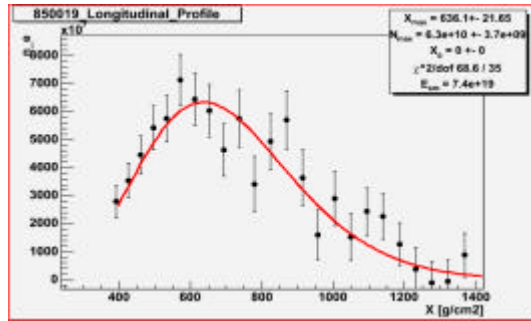
ID 767138



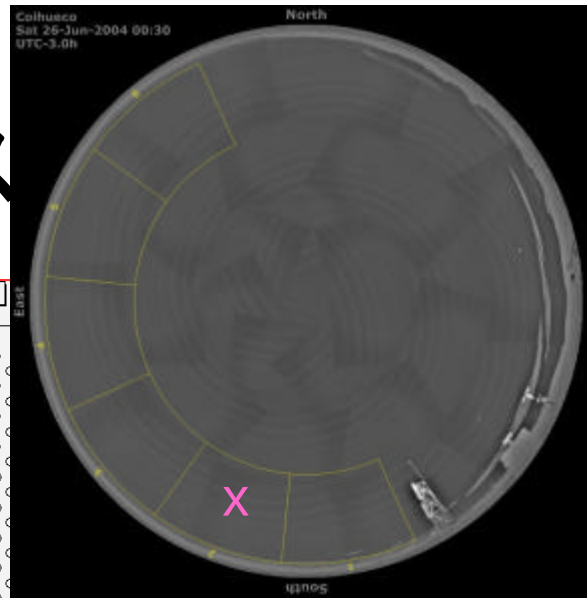
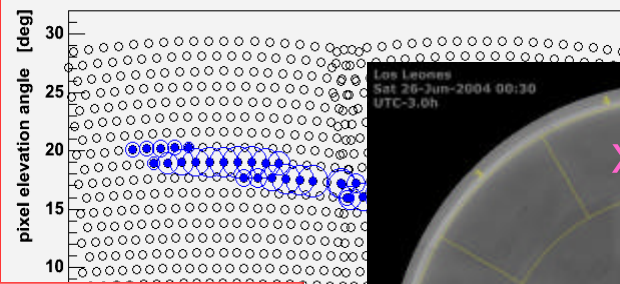
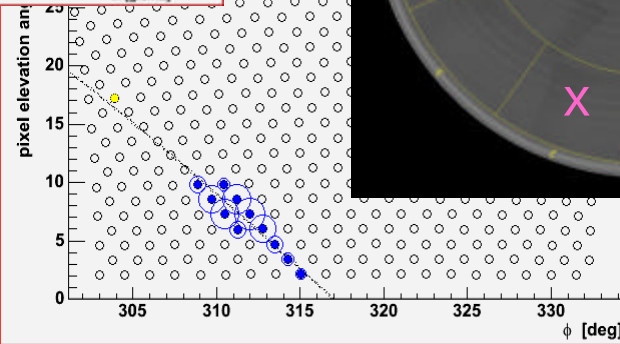
ID 767138



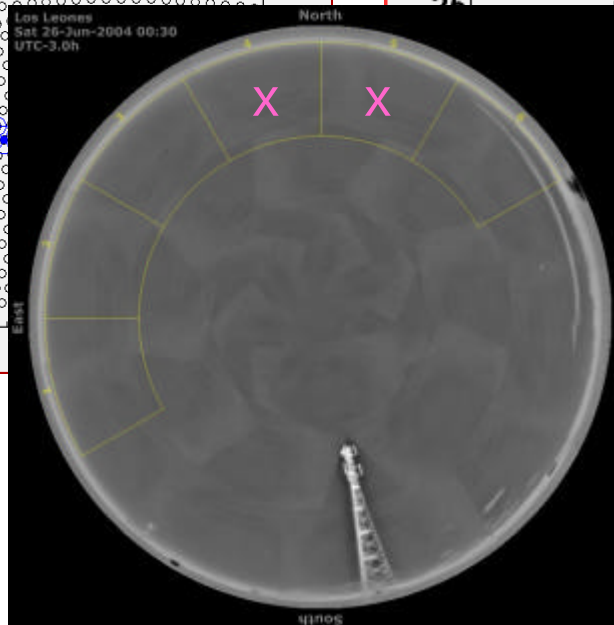
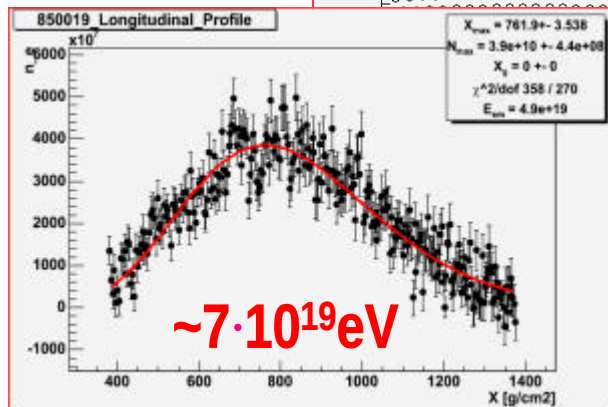
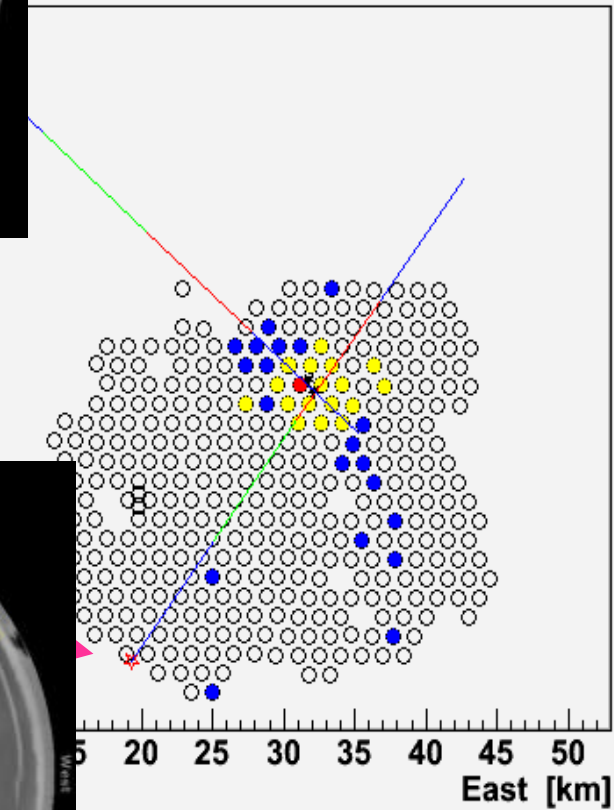
スット



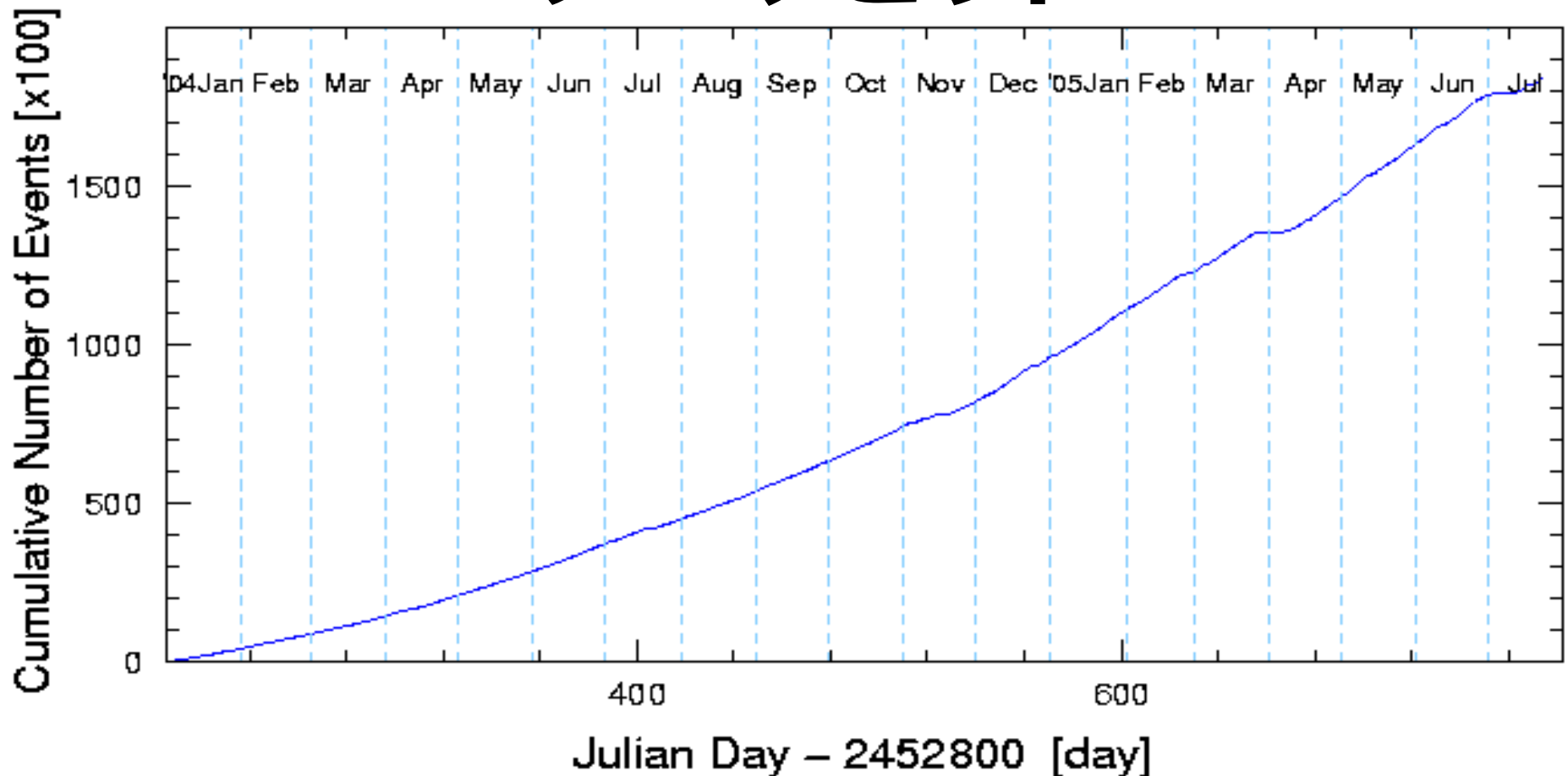
7 Eye Id: 4



SDP Event Id: 850019



データセット



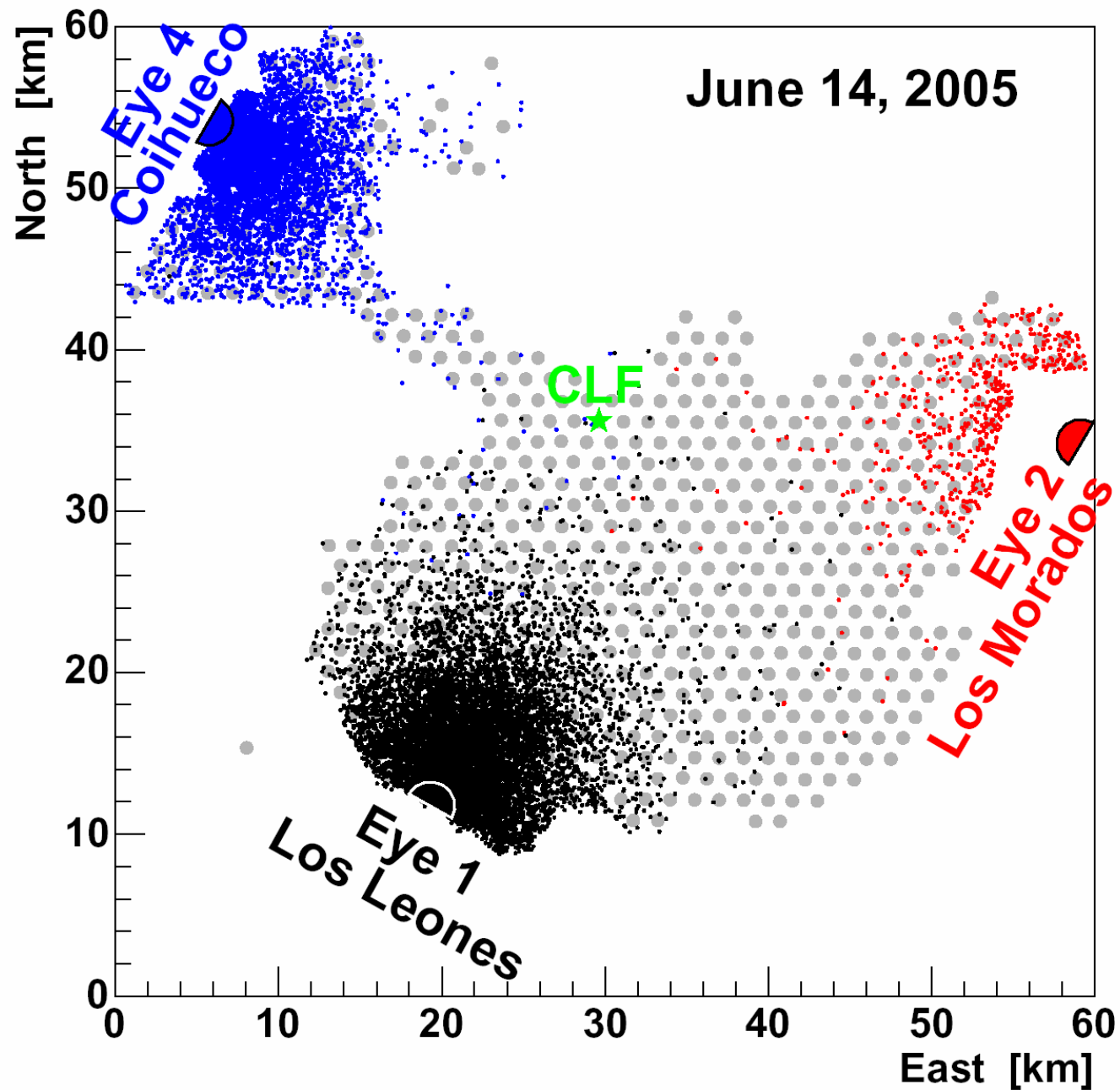
2004年1月 - 2005年6月

天頂角 0 - 60°

Total exposure 1750km² sr yr (~ 1.07 * AGASA)

18,000 events / 月 Total - 1,500,000 events

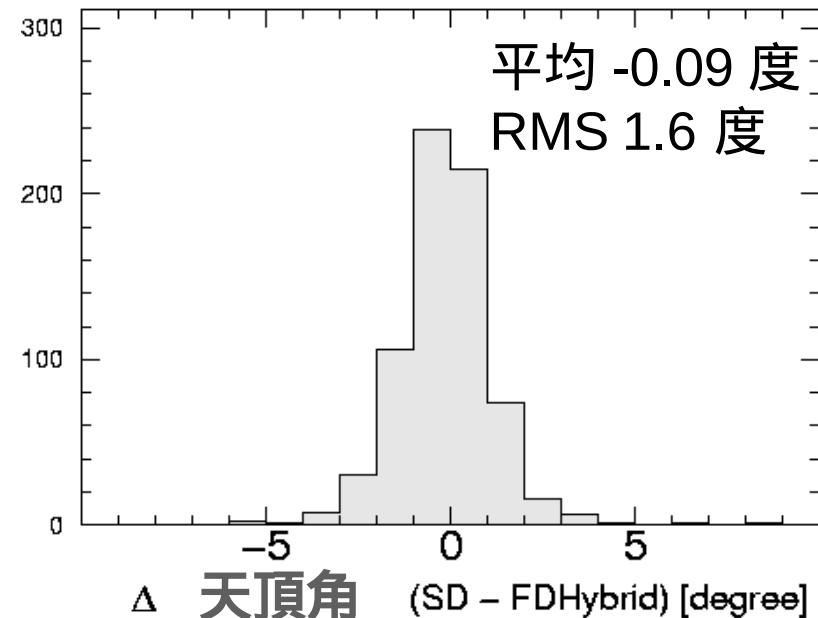
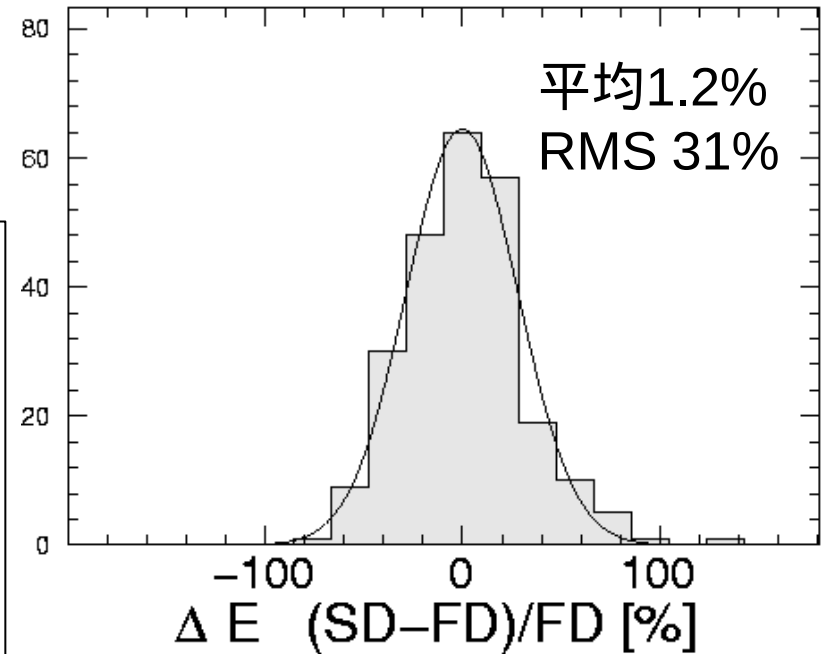
ハイブリッドデータ



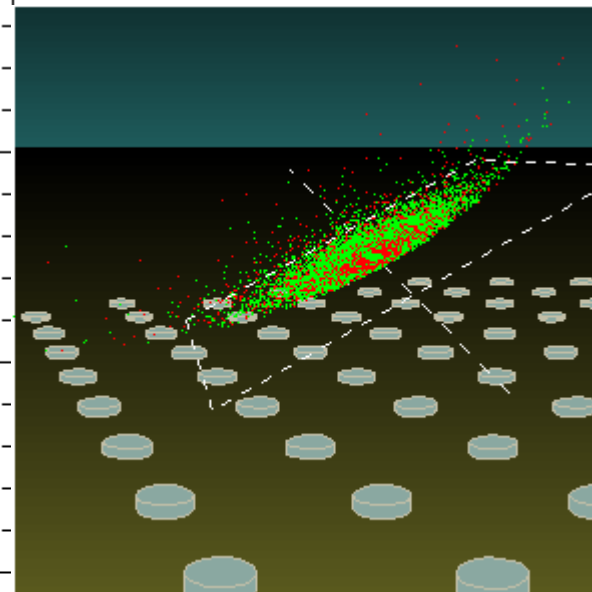
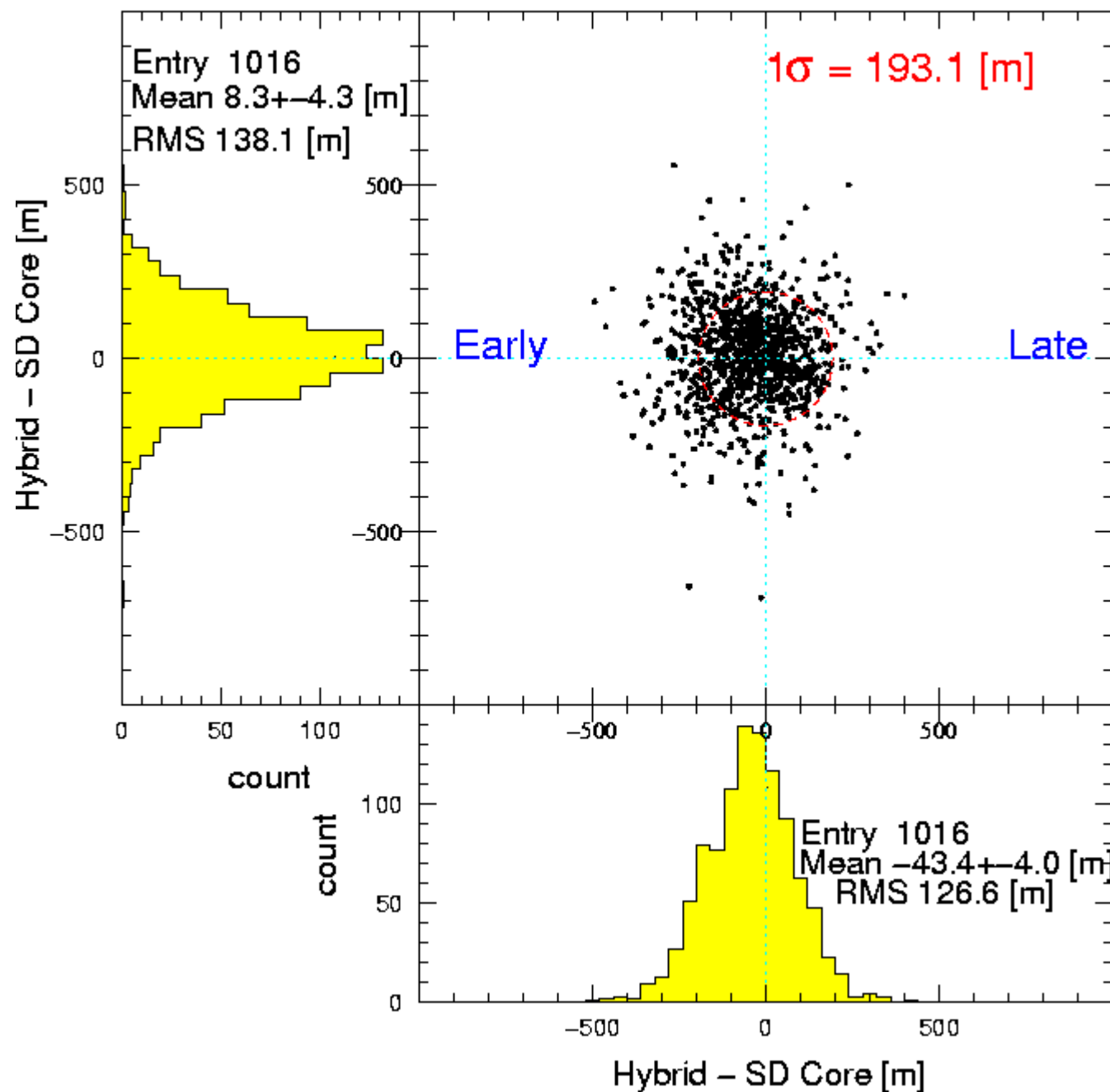
- 1800/月
- Total = 10,000
- ~2000 (>1 EeV)

全ての決定精度を実験データから求められる

- 角度決定精度:
 - ハイブリッド – 0.6 度
 - 地上アレイ
 - 1.4 -- 2.2° 度
- シャワー コア
 - ハイブリッド – 60 [m]
 - 地上アレイ < 200 [m]



シャワーコア 決定精度 ハイブリッド と 地上アレイ解析の比較





大気蛍光法によるエネルギー測定

- 利点: カロリーメトリック
- 欠点:
 - 非効率的 (10% 検出効率)
 - 有効面積の測定が困難
 - 高価
 - キャリブレーションが複雑

例：大気が濁っていると

- エネルギーを過小評価
- 有効面積を過大評価

地上アレイのみによるエネルギー測定



- 欠点: MCシミュレーションに強く依存
 - 低いエネルギー領域の相互作用モデルを外挿から推定している
 - 化学組成を仮定
 - 系統誤差を求めることが 原理的に不可能
- 利点:
 - 100% 検出効率
 - 有効面積が確実に算出
 - キャリブレーションが確実



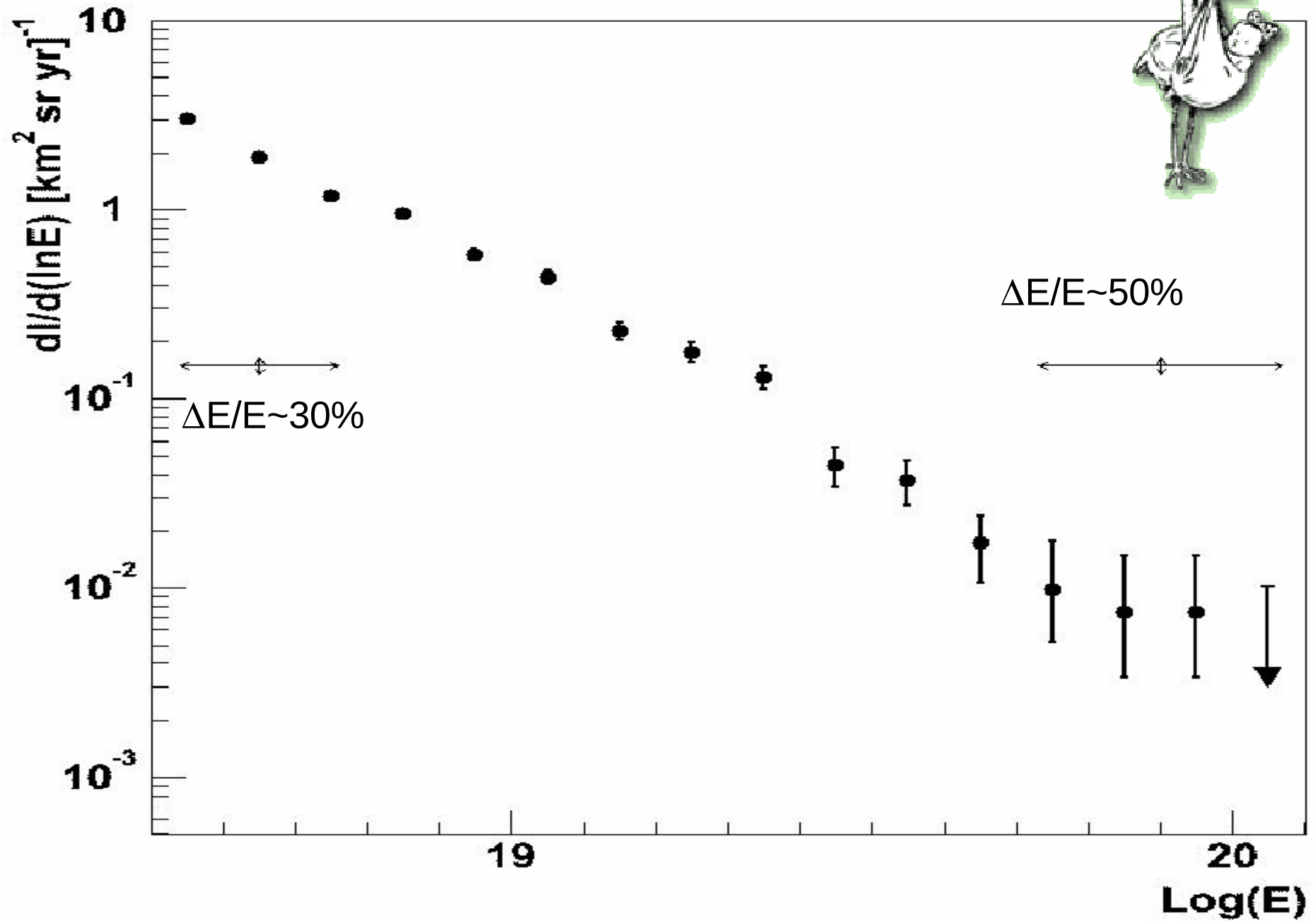
Auger の出した解

2 つの方法の利点を使う

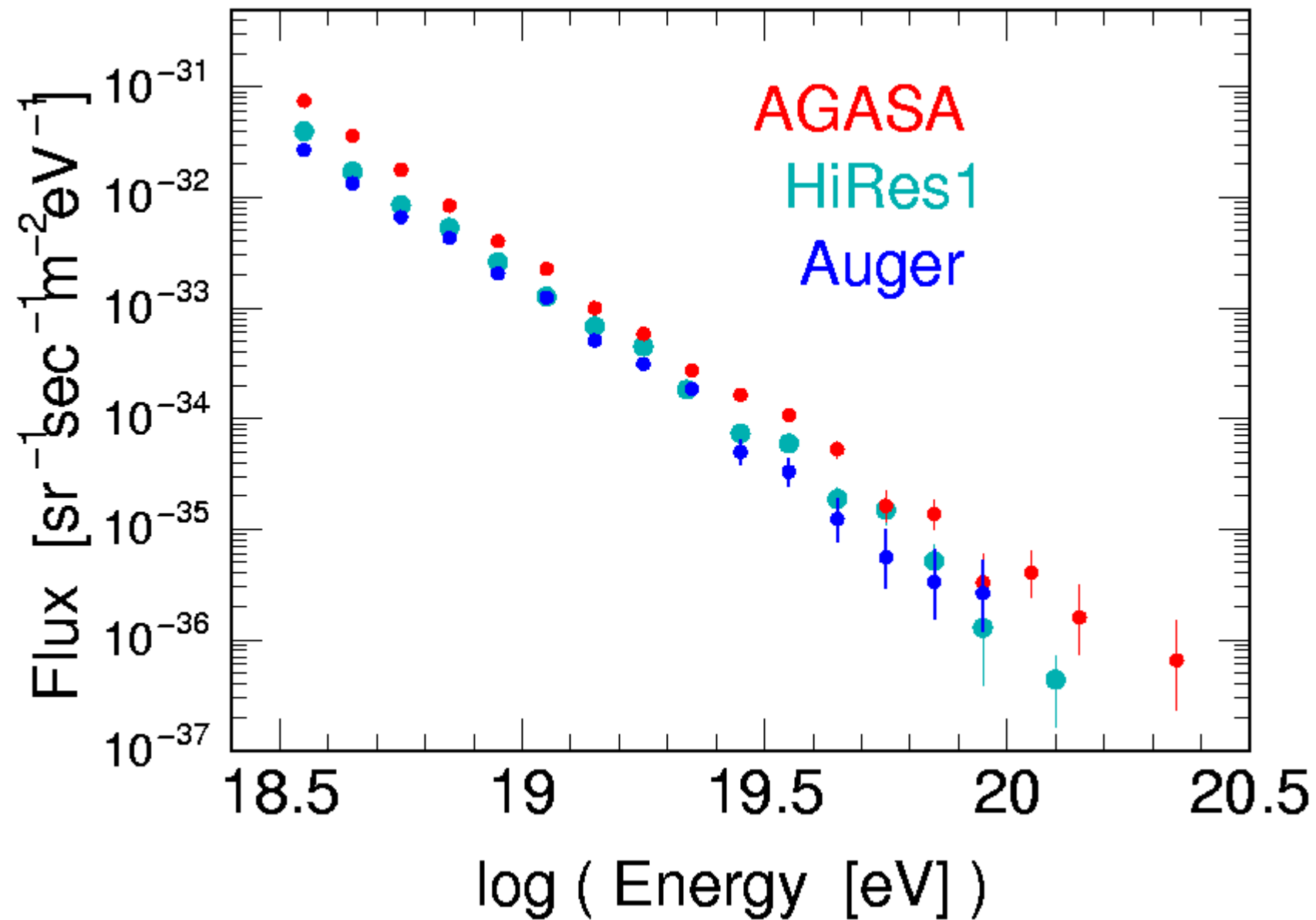
大気蛍光法からエネルギー：地上アレイから統計量

- 地上アレイ データから シャワーサイズ パラメータを測定
S1000 --- シャワー軸から 1000 [m] での 粒子数
- S1000 → エネルギーの関係を実験データのみから決定
 - 宇宙線の到来方向が一様であることを利用し、天頂角依存性を測定
 - ハイブリッドデータから:
 - エネルギー絶対値の更正
 - S1000 のエネルギー依存性の推定
- 地上アレイデータのエネルギー分布と有効面積から スペクトラムを算出

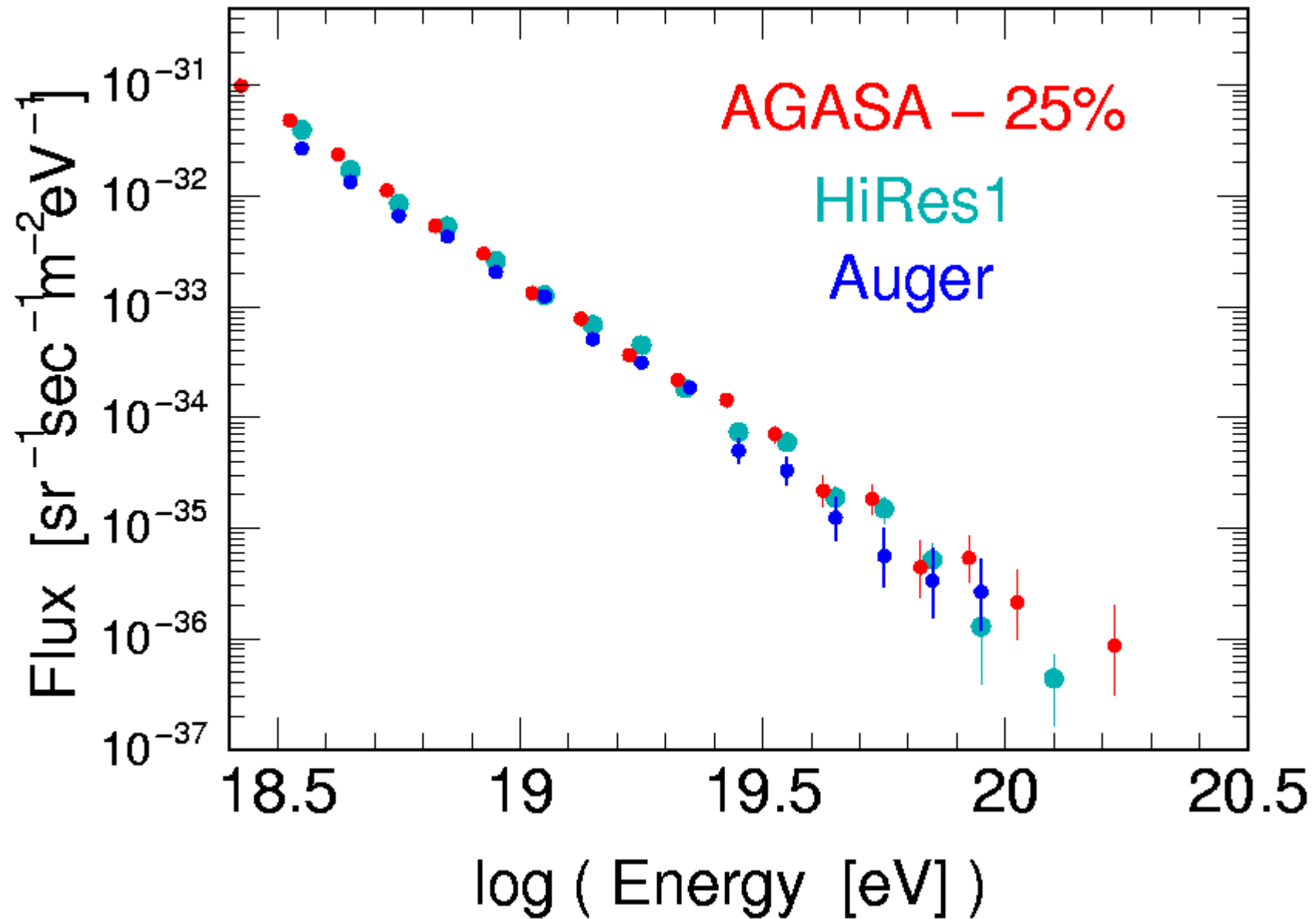
Auger 南半球スペクトラム '05



Comparison with HiRes1, AGASA

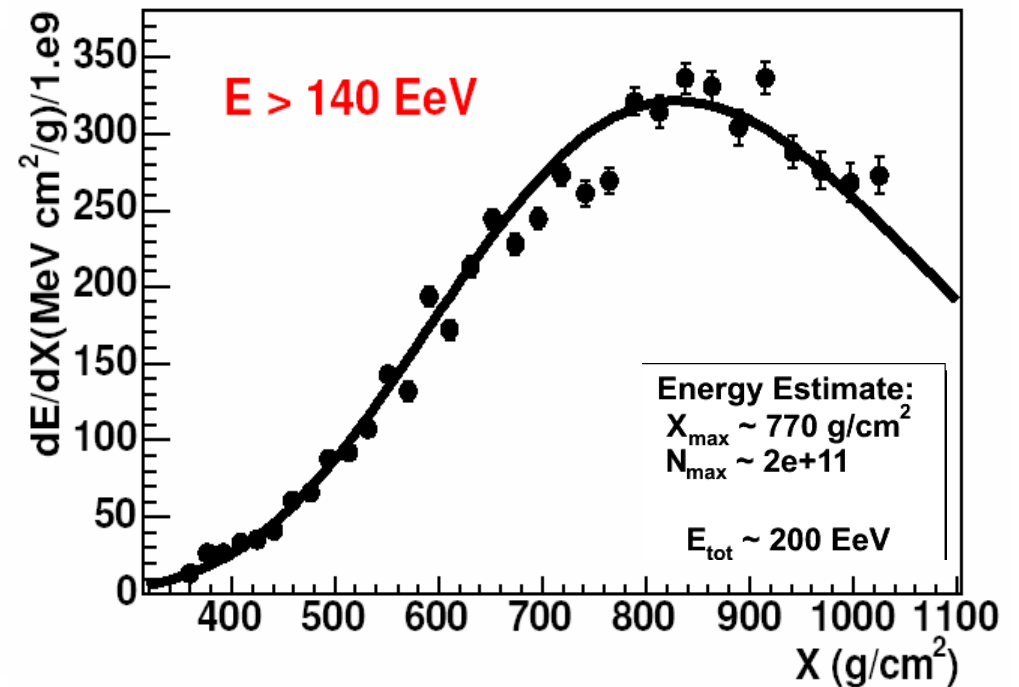
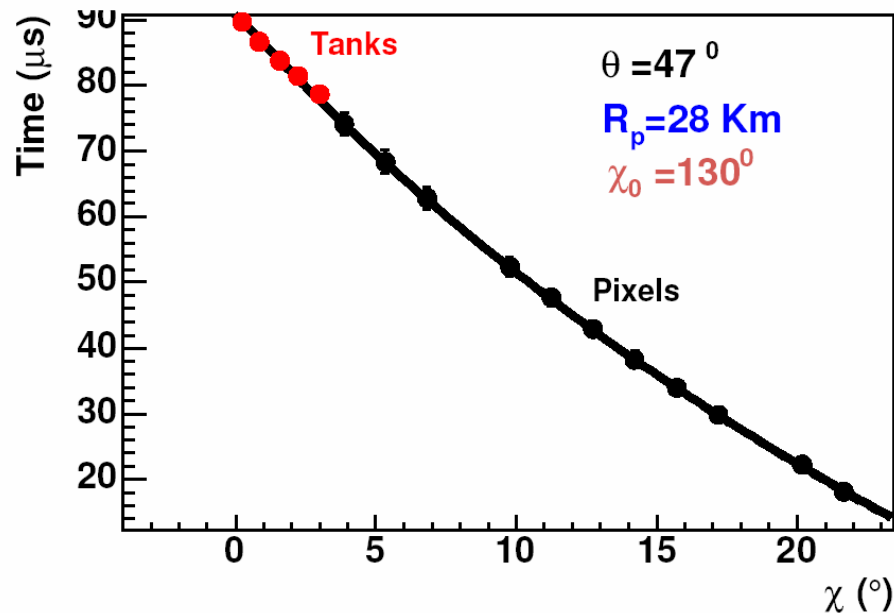
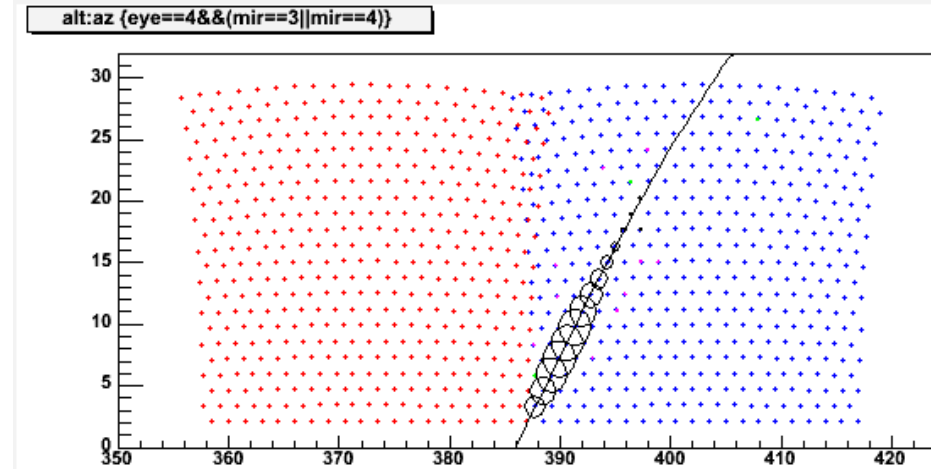
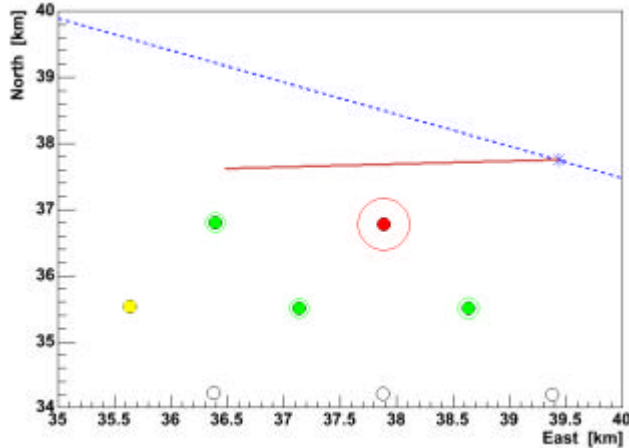


Comparison with HiRes1, AGASA-25%





Our Highest Energy Event $E_{FD} \sim 2 \cdot 10^{20} \text{ eV}$ *Landed just outside the array, so not used in spectrum!*



まとめ

- 南半球サイトは ほぼ予定通り半分以上完成
- $\frac{1}{4}$ 年x Full Auger のデータら：観測データに特化した解析方法を確立
 - 大気蛍光法によるエネルギースケールは 空気シャワーシミュレーションによるエネルギーと比べ 25% 小さい
 - 10^{20} eV 以上の宇宙線は存在する

今後の予定

- 2006 年中旬までに 南半球サイト完成
 - 有効面積 $> 7000 \text{ km}^2 \text{ sr}$
- キャリブレーション、系統誤差評価の確立
- 倍増し続けるデータ (2 年で 7 倍以上) により:
 - 解析精度の向上
 - スーパー GZK エネルギー領域を高い統計で測定
 - 到来方向の異方性、点源探索
 - 化学組成と相互作用モデルの研究
- 大天頂角 $> 60^\circ$ event の解析
 - ν , exotic 粒子の探索
- 北半球サイトR&D