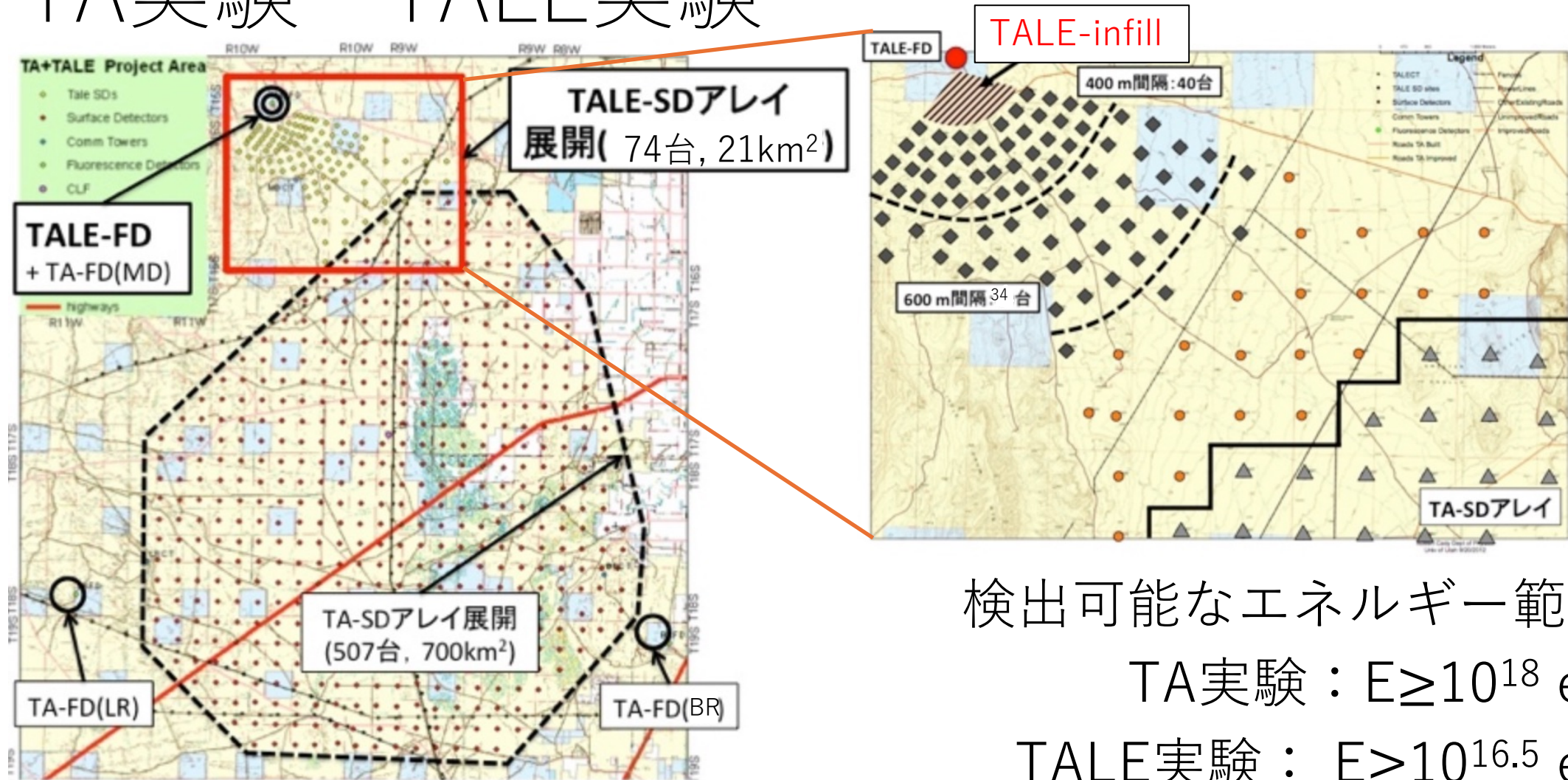


TALE-infill SD による 10の16乗eVの宇宙線観測

2024/3/26

大阪公立大学 敷田 淳

TA実験・TALE実験

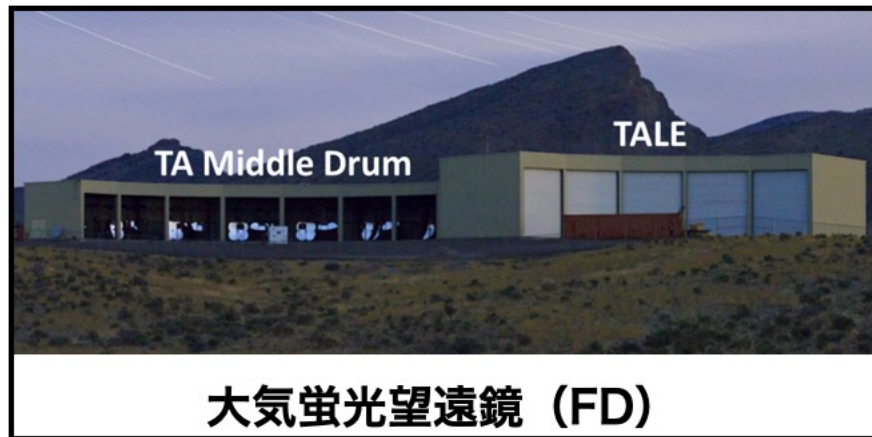


検出可能なエネルギー範囲

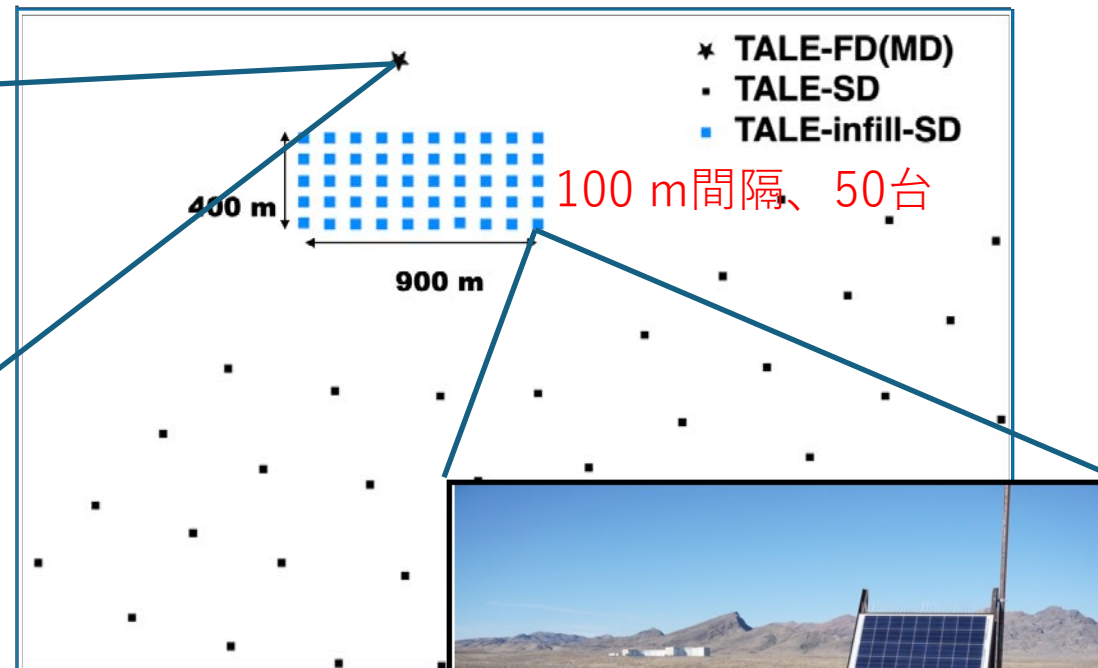
TA実験 : $E \geq 10^{18}$ eV

TALE実験 : $E \geq 10^{16.5}$ eV

TALE-infill



空気シャワー粒子に伴う大気蛍光とチェレンコフ光を観測
→上空での粒子数増減の情報を得る



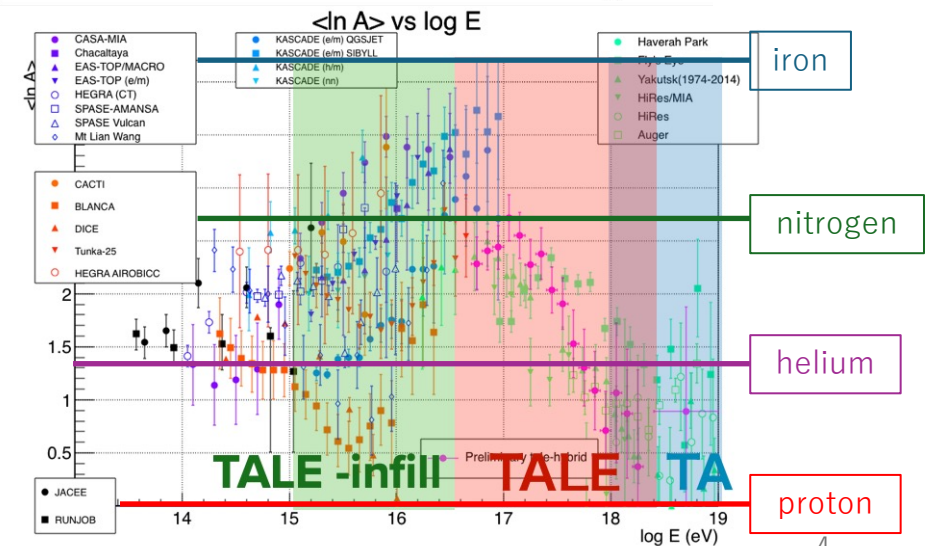
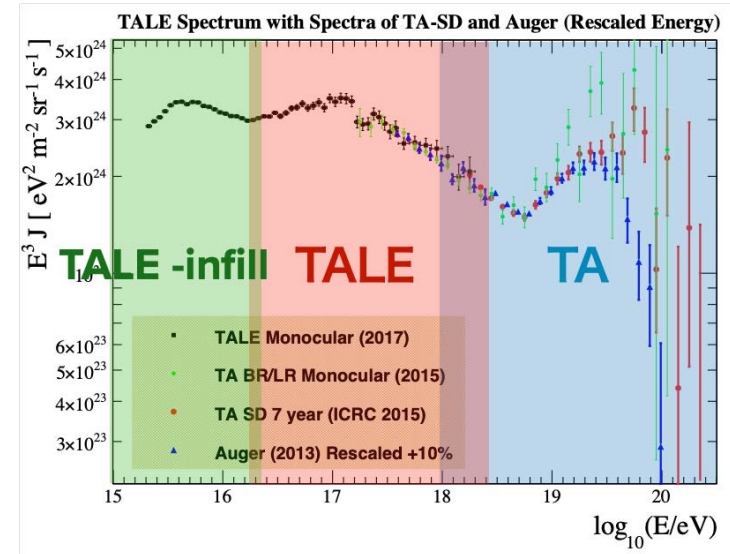
地表に到達した荷電粒子を観測
→地表での粒子数密度の情報を得る

検出可能なエネルギー範囲： $E \geq 10^{15}$ eV

2022年11月設置、2023年10月より定常観測

TALE-infill実験の目的

- knee 領域：銀河系内超新星残骸での加速限界
- 加速限界エネルギーは原子番号に比例するため、高エネルギー側では重い原子核が支配的
- 質量組成の分布測定：
研究グループごとにばらつき、不定性大
→knee領域の質量組成、エネルギースペクトル、異方性の精密測定



TALE-infill SDの運用状況

- 組み立て～展開・設置（2022年10月～11月）

SD の動作テスト、シンチレーター・バッテリー等の取り付け



トレーラーで TALE FD サイト付近へ運搬



再び SD の動作テスト、展開の準備



ヘリコプターで展開



TALE infill SD の運用状況

- TALE FD サイトに中央通信塔、データ収集PCなどを設置
(2023年9月)
- SDデータ収集用のエレクトロニクスやアンテナ等を設置
(2023年10月4日～)



TALE-infill SD の運用状況

- 定常観測開始（2023年10月24日～）

トリガー条件

Lv.0（波形保持、記録）：0.3粒子以上の信号

Lv.1（SDヒット）：3.0粒子以上の信号

Lv.2（イベント）：3us以内で隣り合ったSD5台以上にヒット

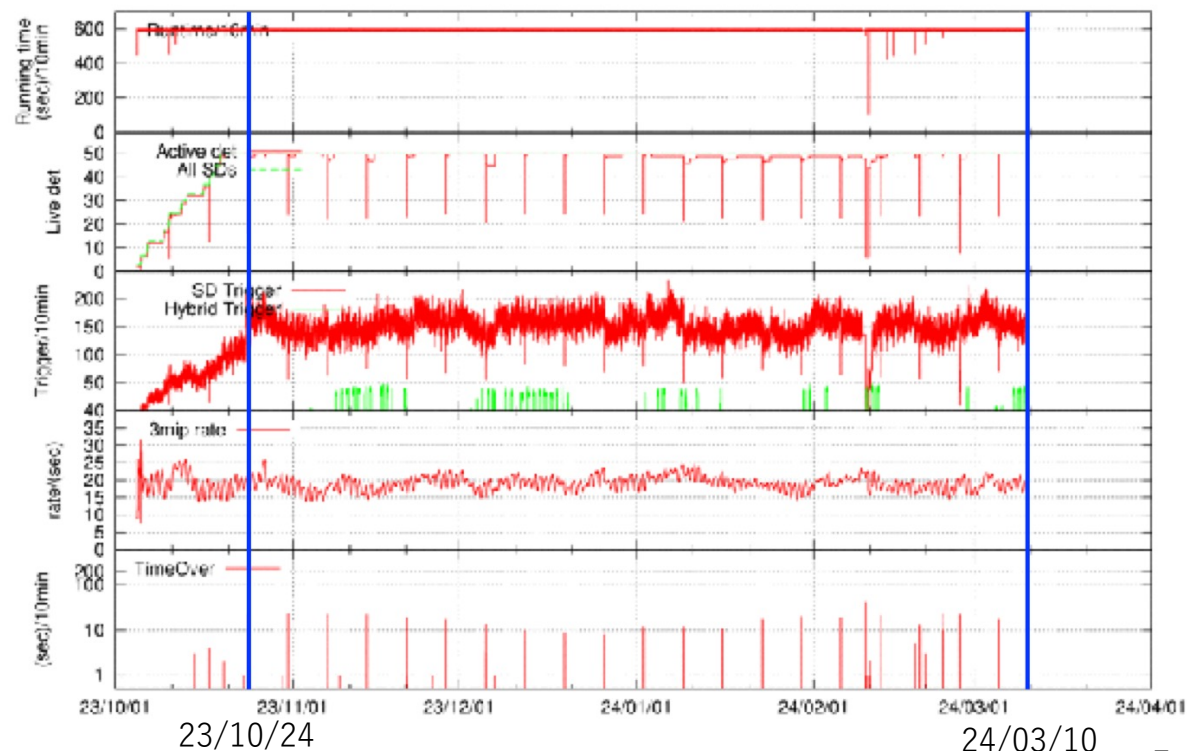
10分間あたりの実稼働時間：～600秒

稼働しているSDの台数：～50台

10分間の平均イベント数：～160

SD1台の平均ヒット数：～20Hz

10分間あたりの通信エラー時間：～0秒



TALE infill SDアレイにおける再構成

検出器が持つ

- 信号の波形情報
- 時刻情報

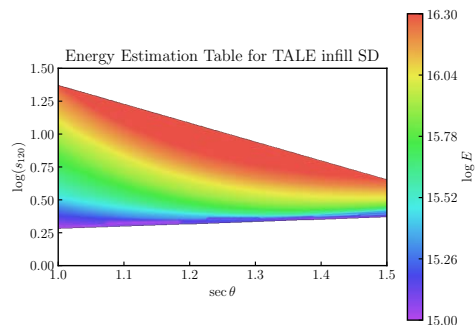
Rough Fit

Geometry Fit

Lateral Distribution Function Fit

空気シャワー到来方向 θ, φ
空気シャワーコア位置 Corex, Corey
宇宙線のエネルギー E

SDが持つ波形情報・粒子到来時刻
↓
コア位置、おおよその到来方向を決定
↓
シャワー曲面を決定し、到来方向の決定
↓
横方向分布を決定し、コア位置の決定
↓
横方向分布から S_{120} を決定
↓
 S_{120} と天頂角からエネルギーを決定



イベント選択条件

Space cluster

信号が最大のSDを含む隣接する5台以上のSDが信号を記録

Space time cluster

4台以上のSDが以下の条件を満たす

$$\frac{l}{c} > |t_{hit}^j - t_{hit}^i|$$

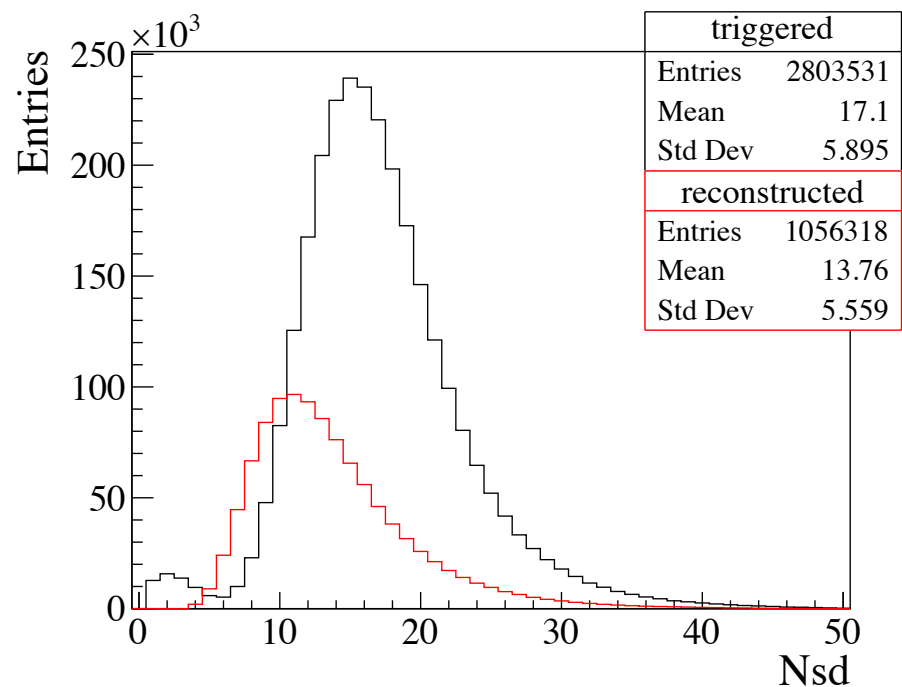
Boundary cut

信号が最大のSDが一番外側の検出器でない

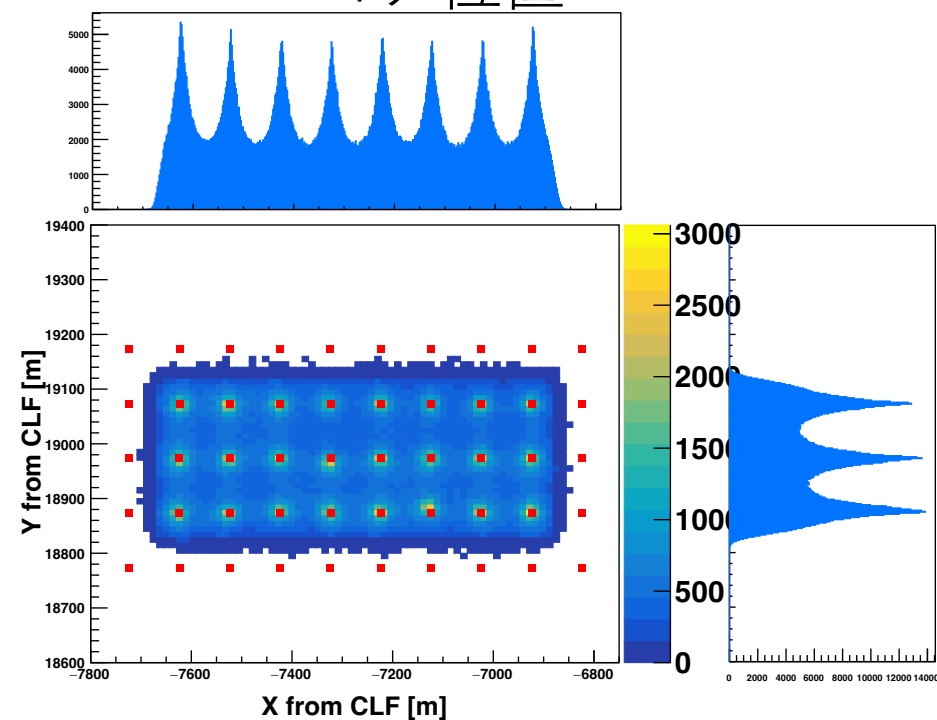
実データ解析

2023/10/24 ~ 2024/2/27 (127日間) 1,056,318イベント

検出器台数



コア位置

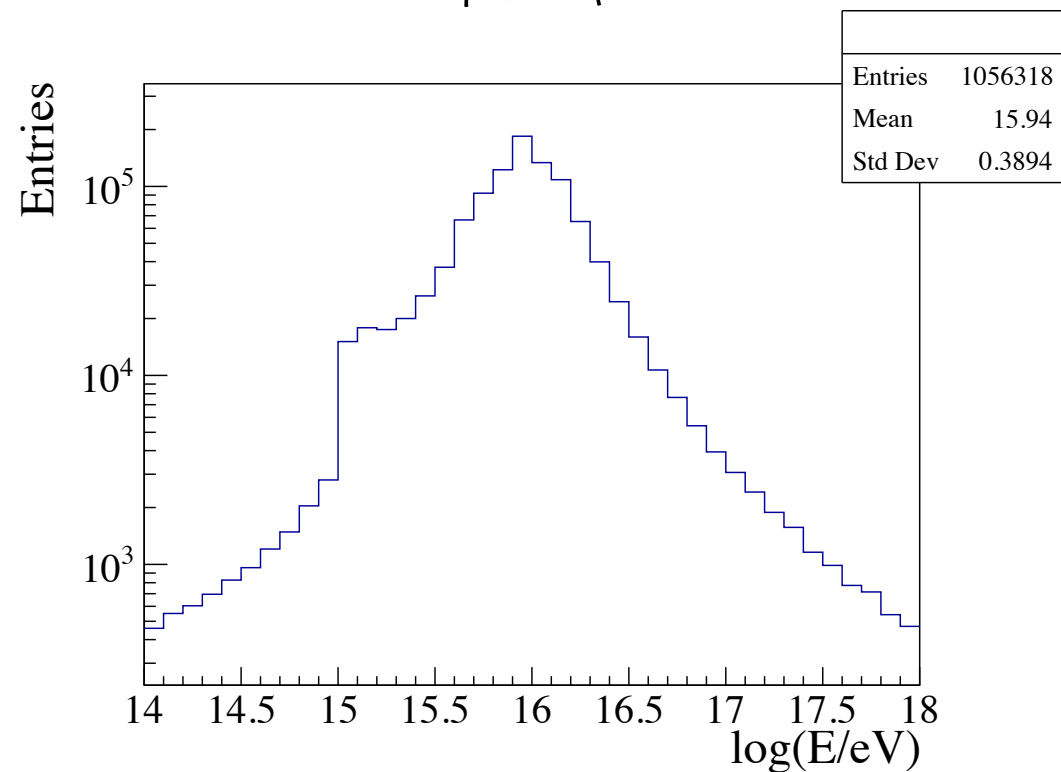


実データ解析

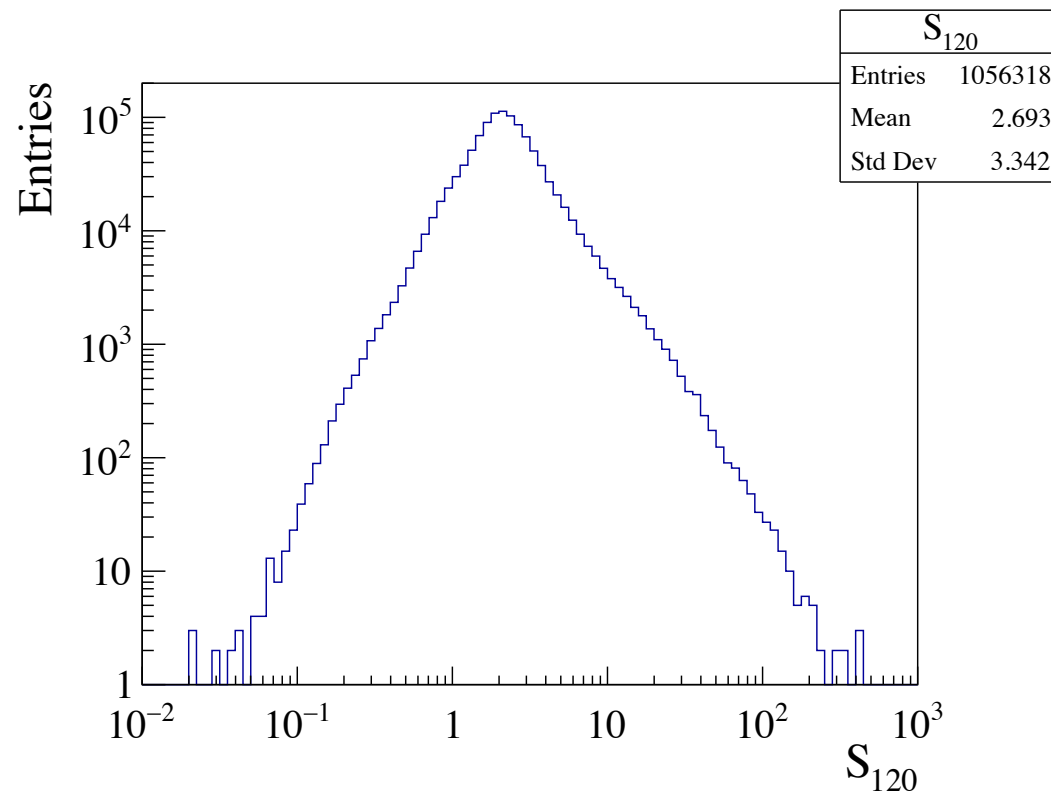
2023/10/24 ~ 2024/2/27 (127日間)

1,056,318 イベント

エネルギー



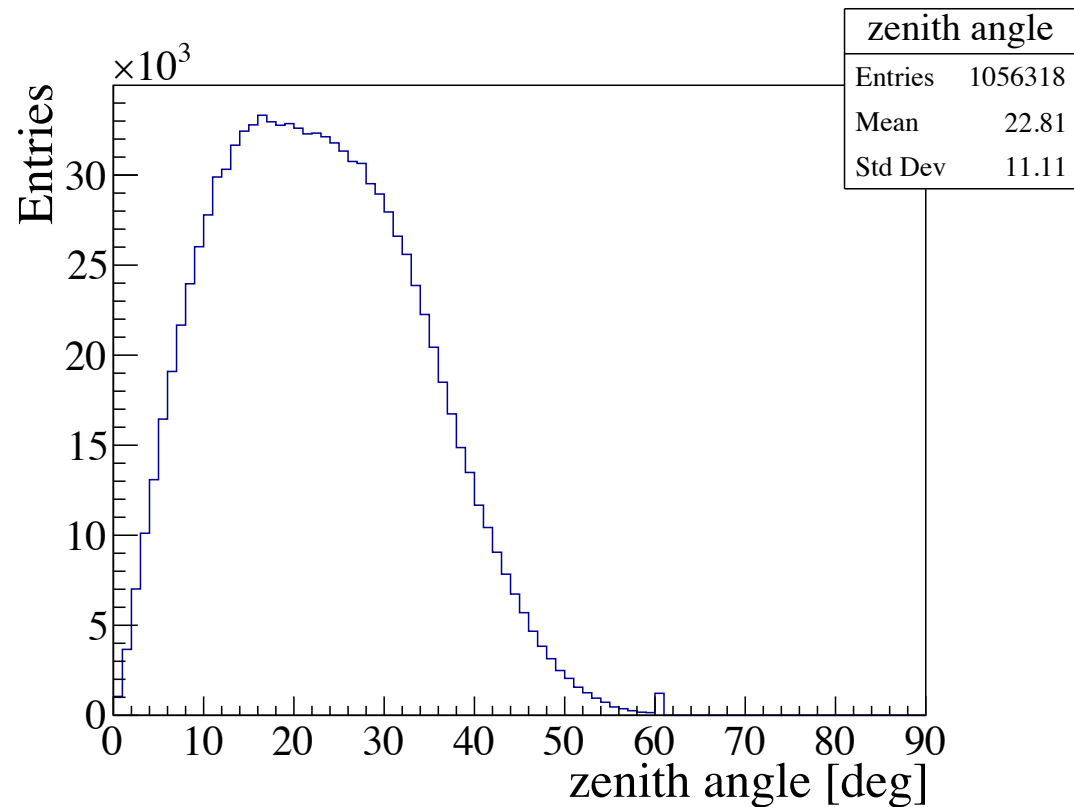
S_{120}



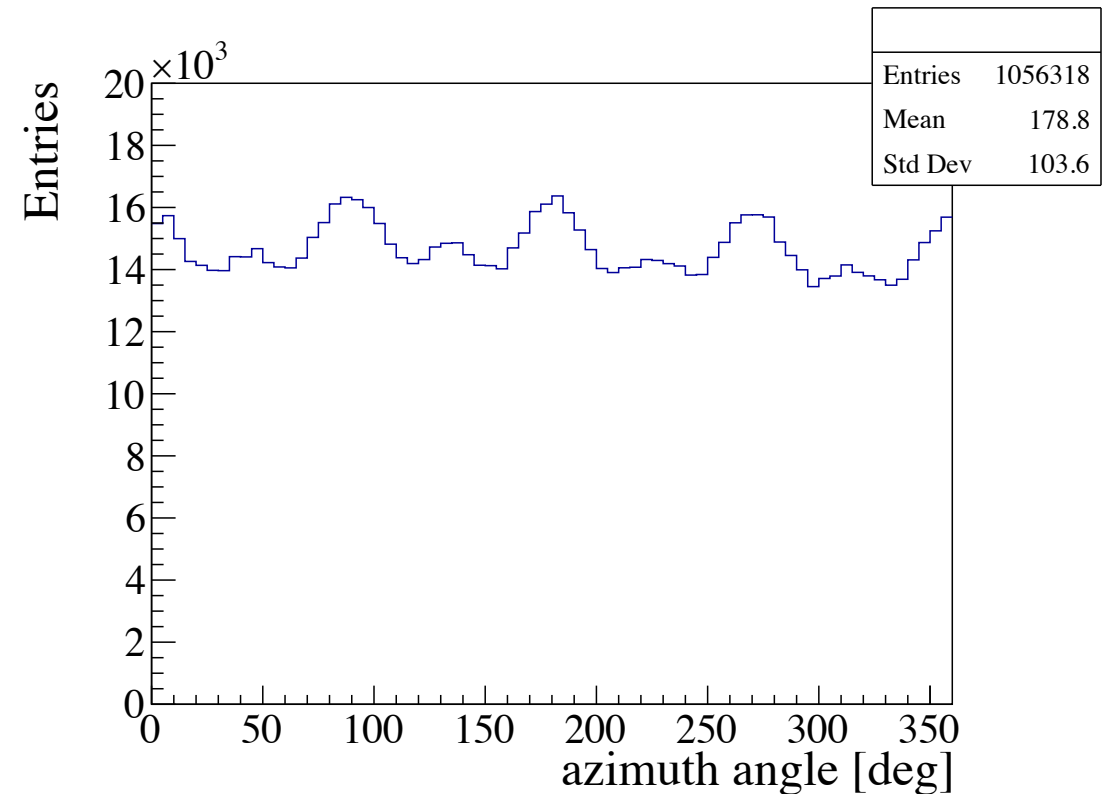
実データ解析

- 2023/10/24 ~ 2024/2/27 (127日間) 1,056,318イベント

天頂角



方位角



実データ解析

- 分布に時間変化がないことを確認するため、
2023年11月～2024年2月で月ごとに比較
(2023/11/1～2024/2/27 に得られたイベントを使用)

イベント数

| | 2023 November (30 days) | 2023 December (31 days) | 2024 January (31 days) | 2024 February (27 days) |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|
| Triggered (Adjacent 5) | 664,639 | 720,961 | 670,841 | 565,161 |
| Reconstructed | 247,017 | 265,138 | 256,959 | 217,387 |

実データ解析

再構成されたイベント数

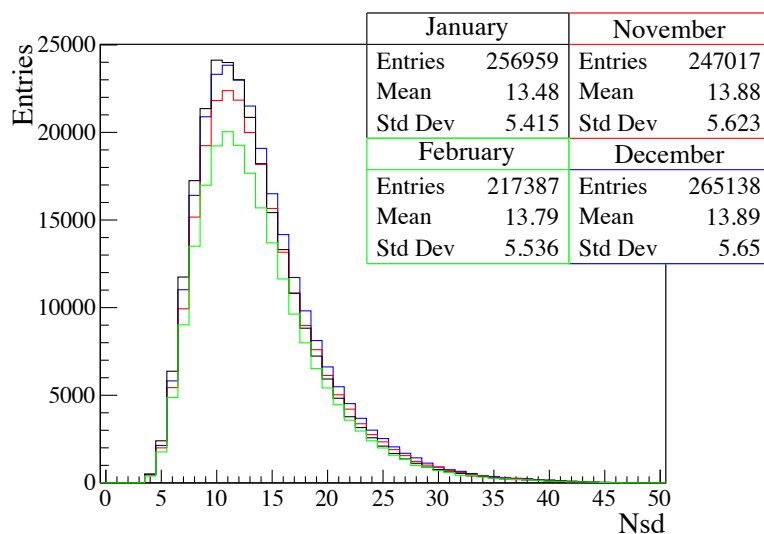
2023年11月：247,017

2023年12月：265,138

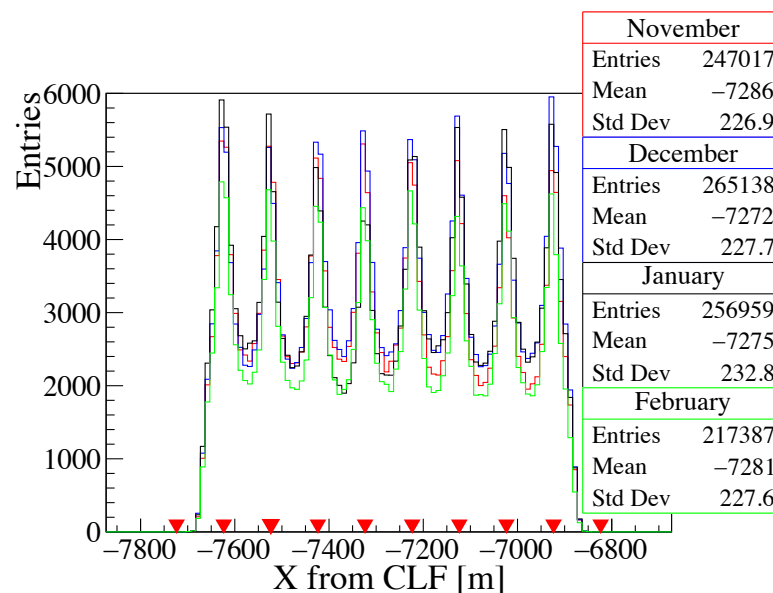
2024年1月：256,959

2024年2月：217,387

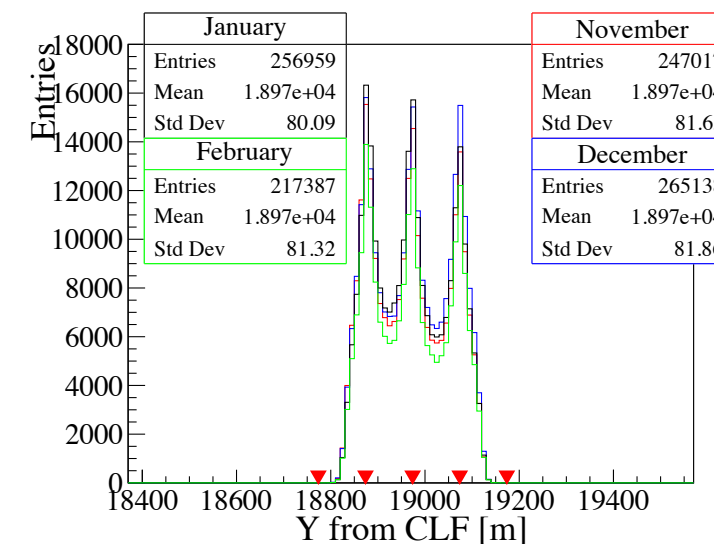
検出器台数



Core X



Core Y



実データ解析

再構成されたイベント数

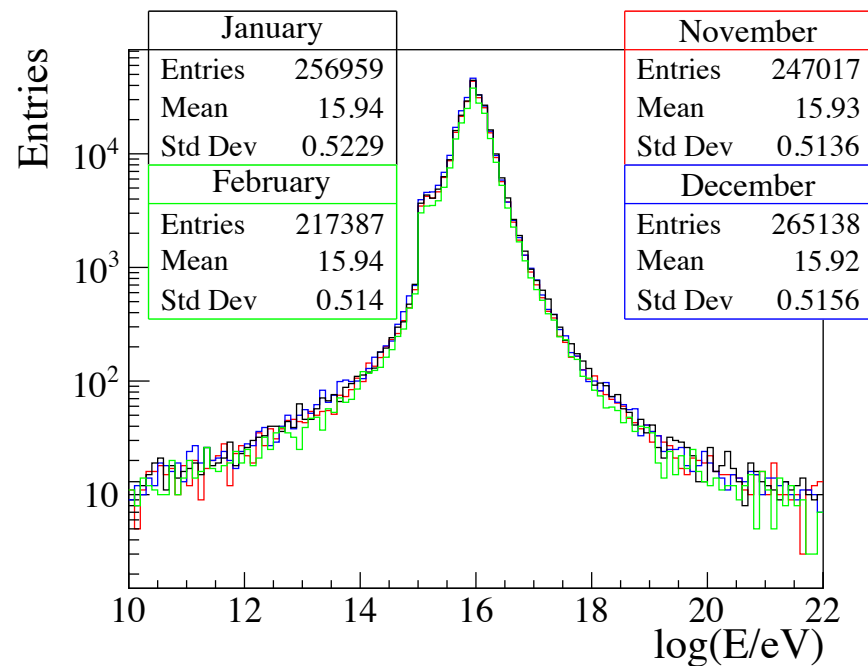
2023年11月：247,017

2023年12月：265,138

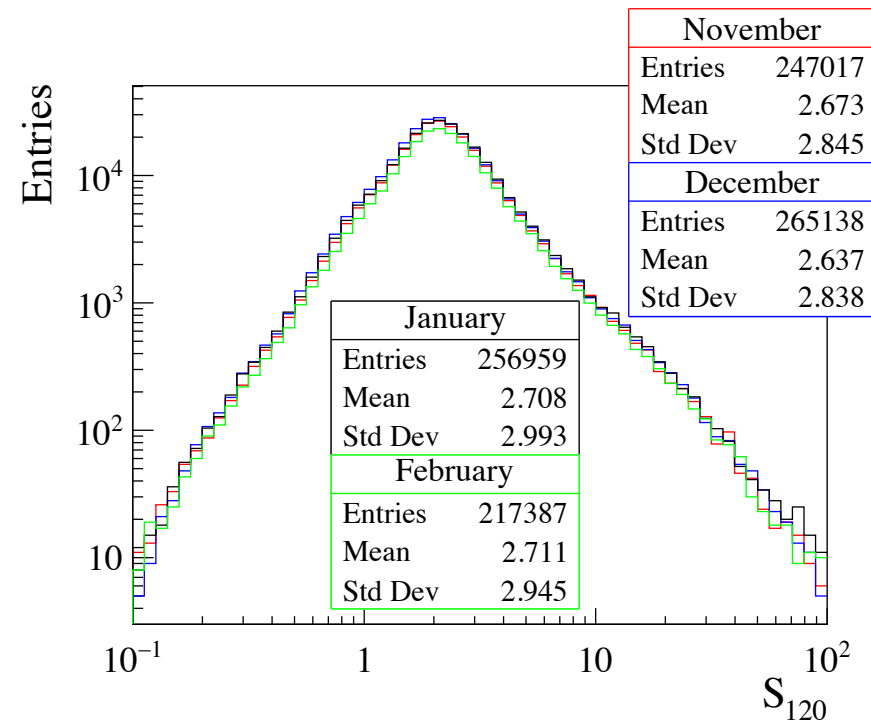
2024年1月：256,959

2024年2月：217,387

エネルギー



S_{120}



実データ解析

再構成されたイベント数

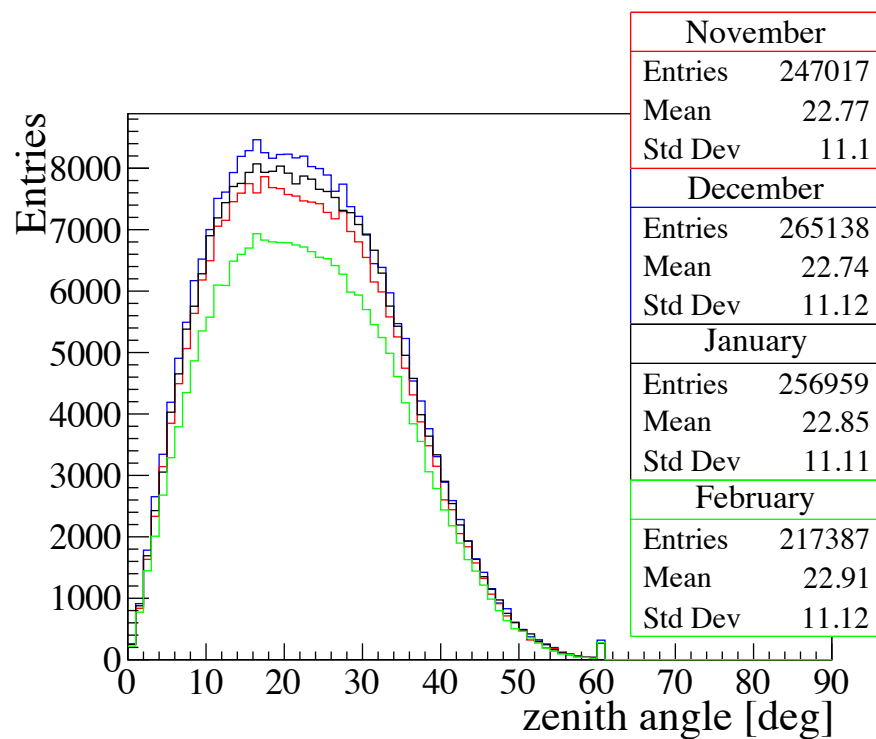
2023年11月：247,017

2023年12月：265,138

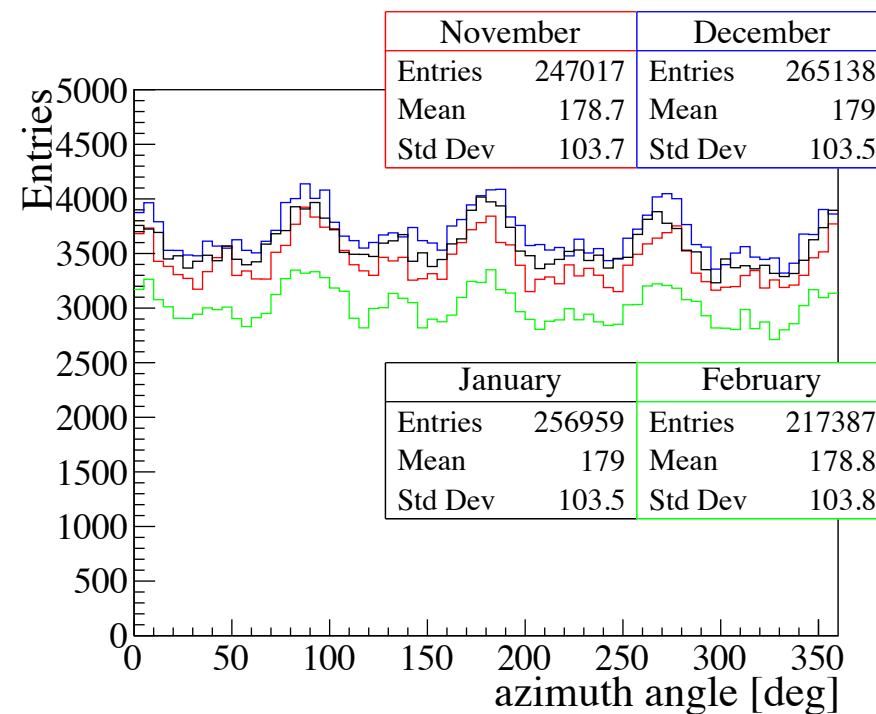
2024年1月：256,959

2024年2月：217,387

天頂角



方位角



実データ解析

- エネルギーごとに分布を比較

2023/10/24 ~ 2024/2/27 (127日間) 1,056,318イベント

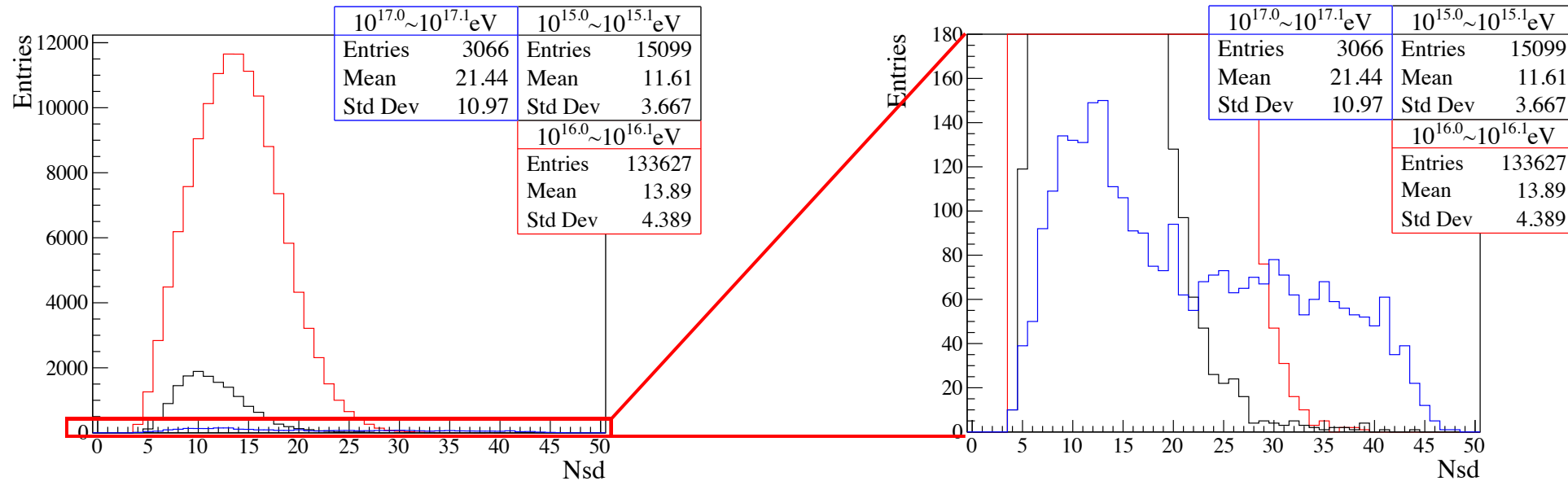
イベント数

$10^{15.0}$ eV~ $10^{15.1}$ eV : 15,099

$10^{16.0}$ eV~ $10^{16.1}$ eV : 133,627

$10^{17.0}$ eV~ $10^{17.1}$ eV : 3,066

検出器台数



実データ解析

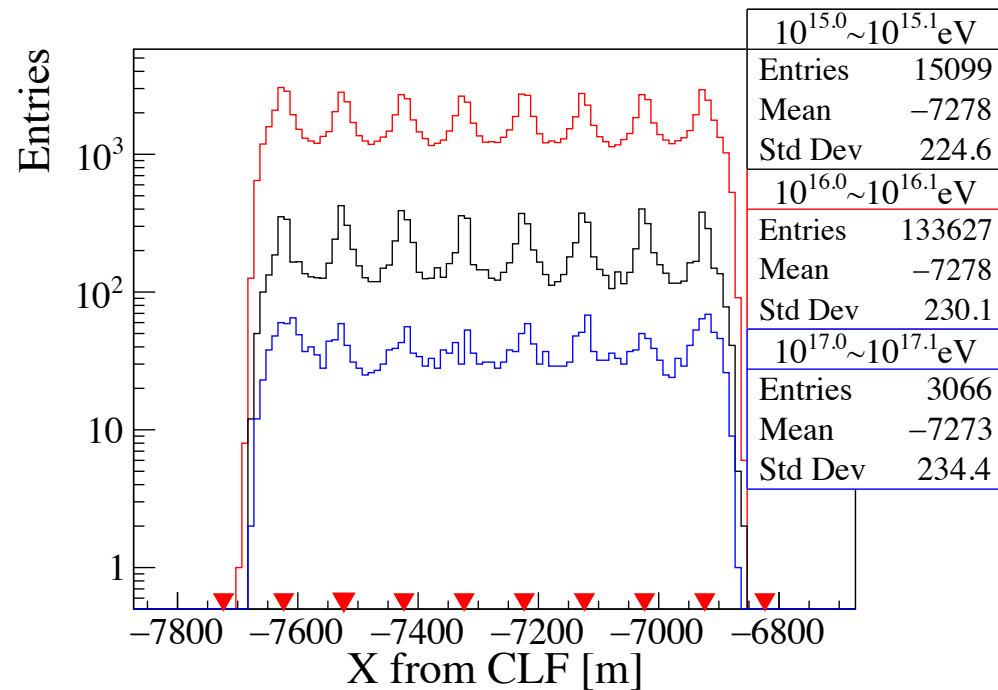
イベント数

$10^{15.0}$ eV $\sim 10^{15.1}$ eV : 15,099

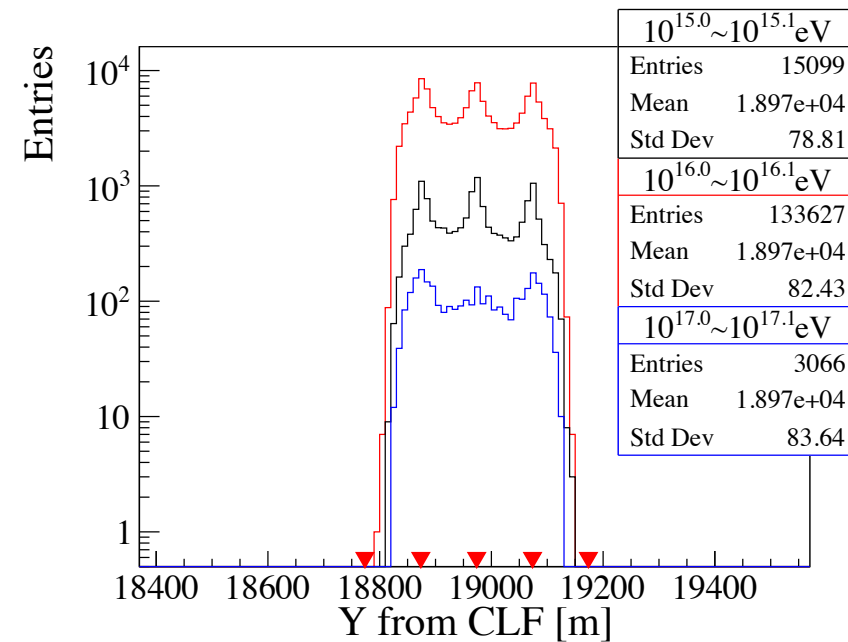
$10^{16.0}$ eV $\sim 10^{16.1}$ eV : 133,627

$10^{17.0}$ eV $\sim 10^{17.1}$ eV : 3,066

Core X



Core Y



実データ解析

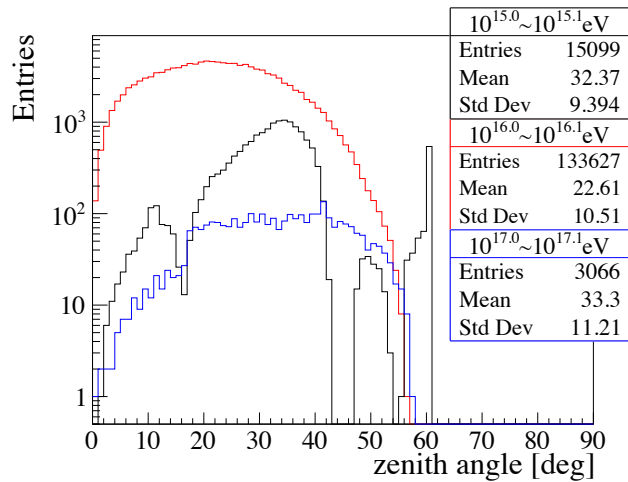
イベント数

$10^{15.0}$ eV \sim $10^{15.1}$ eV : 15,099

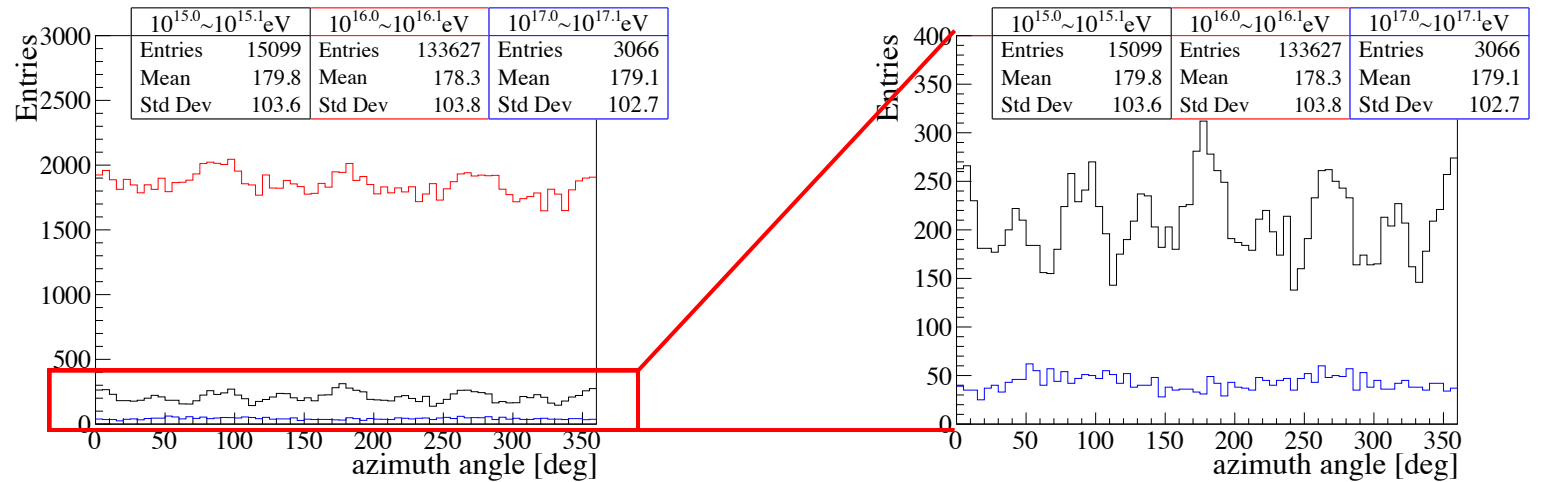
$10^{16.0}$ eV \sim $10^{16.1}$ eV : 133,627

$10^{17.0}$ eV \sim $10^{17.1}$ eV : 3,066

天頂角



方位角



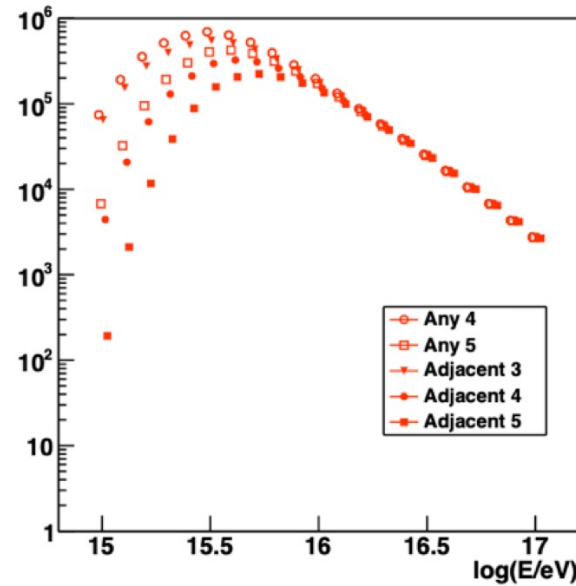
まとめと今後

- TALE-infill実験の目的：knee領域の質量組成、エネルギースペクトル、異方性の精密測定
- 2022年11月設置、2023年10月より定常観測
- 2023年10月24日～2024年2月27日の実データを解析した
- 今後はクオリティーカットの決定、異方性の精密測定を行う

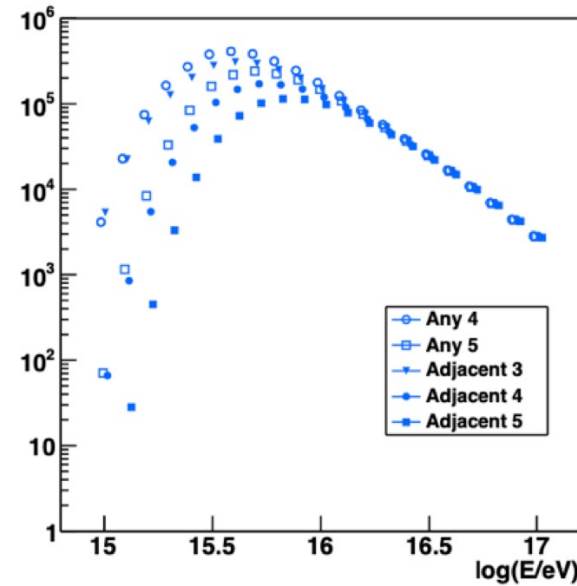
back up

トリガー効率

of expected triggering event / year: proton



of expected triggering event / year: iron



Note: considered
TALE-mono spectrum

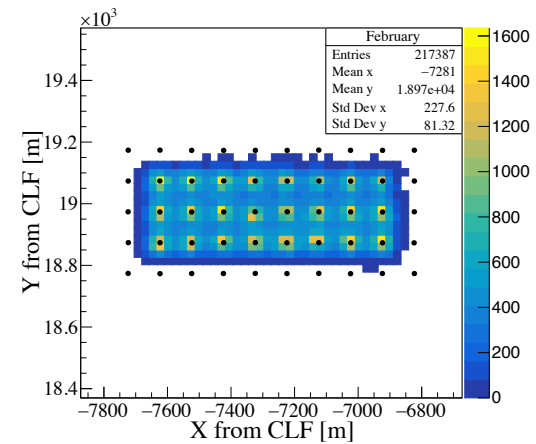
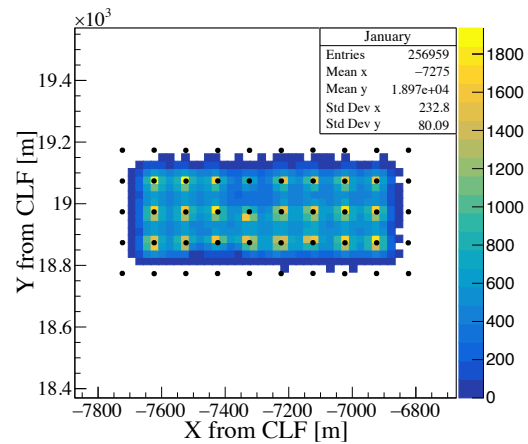
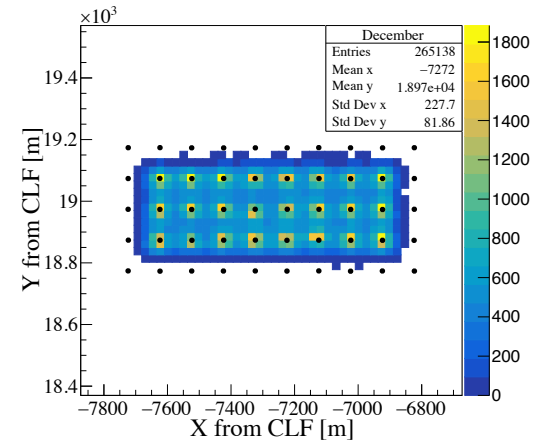
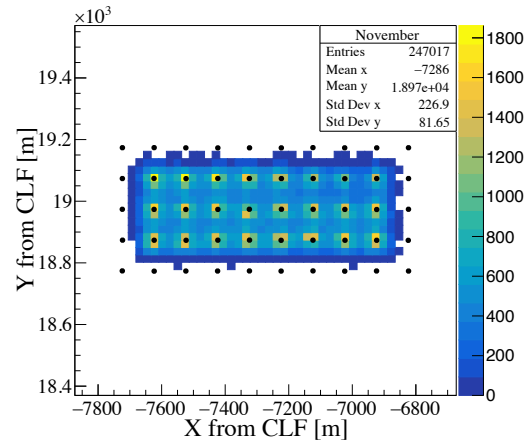
| Exp. Rate / 10min | proton | iron |
|-------------------|--------|------|
| Any 4 | 92.7 | 53.6 |
| Any 5 | 55.9 | 31.4 |
| Adjacent 3 | 76.2 | 42.6 |
| Adjacent 4 | 44.0 | 23.5 |
| Adjacent 5 | 29.7 | 15.8 |

+ Hybrid trigger
(~50/10min)

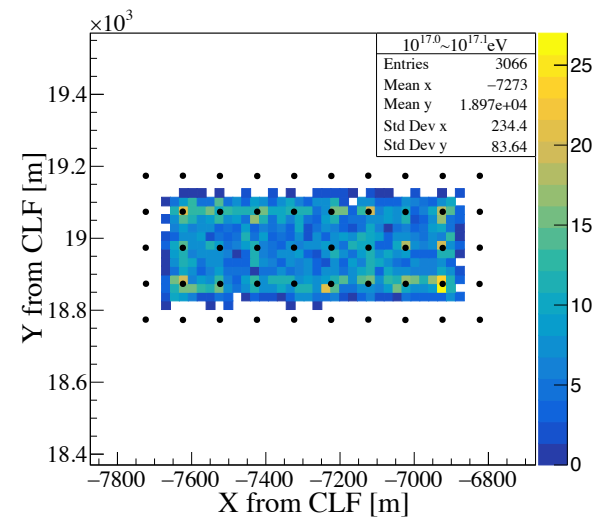
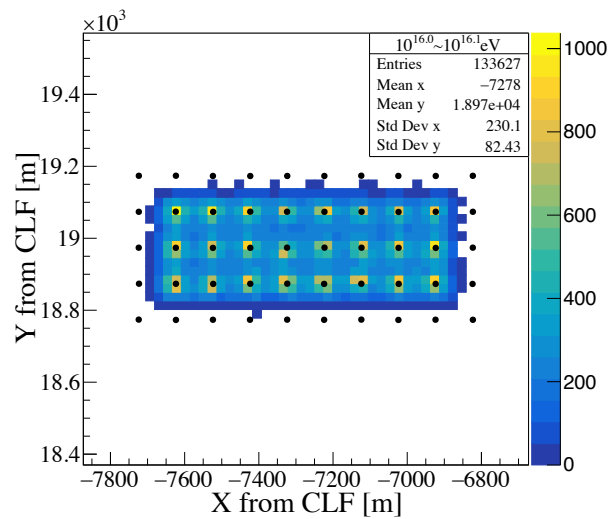
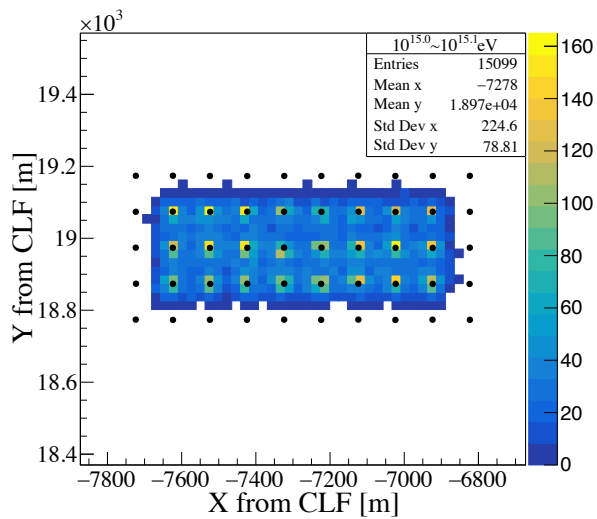
9

x

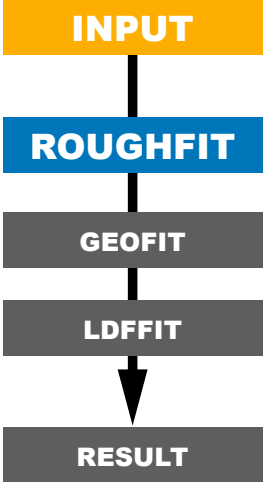
コア位置 (1 month)



コア位置 (Energy)



TALE-infill再構成の最適化



Rough fit

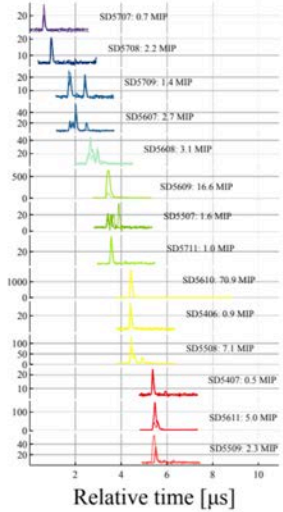
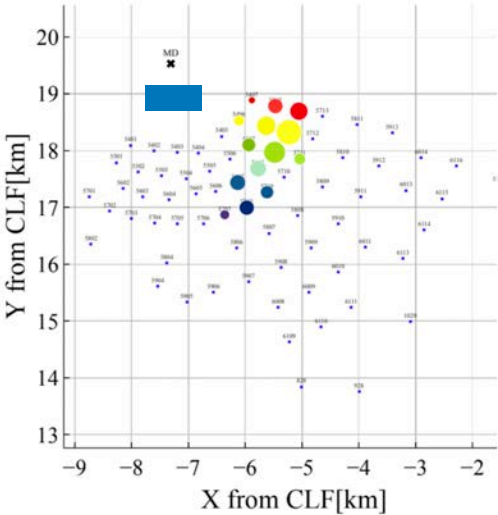
コア位置とおおよその到来方向を決定する

- コア位置 : 信号の大きさの重心で決定

$$R_{\text{COG}} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \times r_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i}$$

- 到来方向 : 信号の時間差を線形でフィットし、おおよその方向を決定

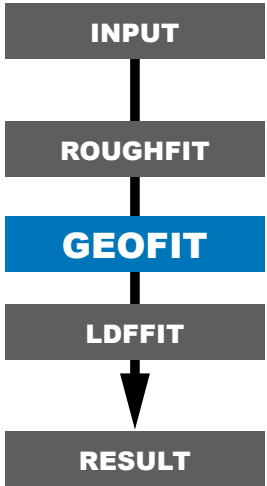
TALE - SD で観測された空気シャワー Date: 2018/11/07 Time: 09:11:48.965272



SD
 ▶ 信号の波形情報
 ▶ 到来時刻の情報

X

TALE-infill再構成の最適化



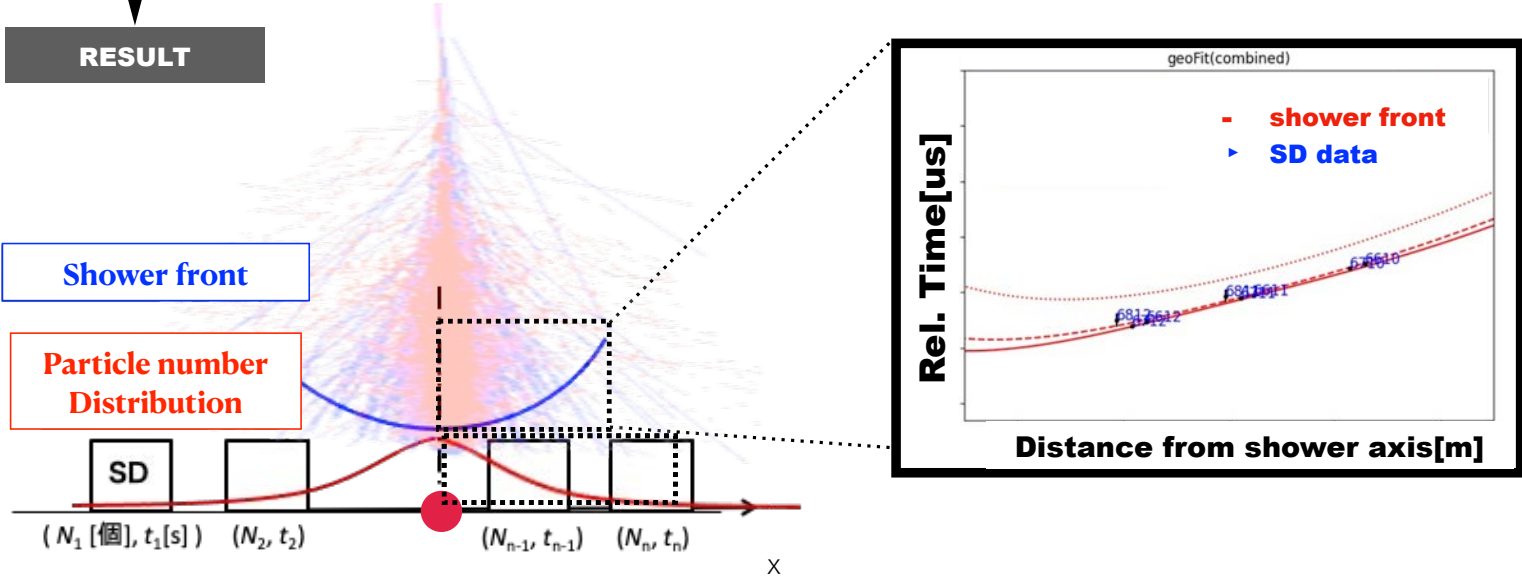
Geometry fit

シャワー曲面をフィットし、到来方向を決定

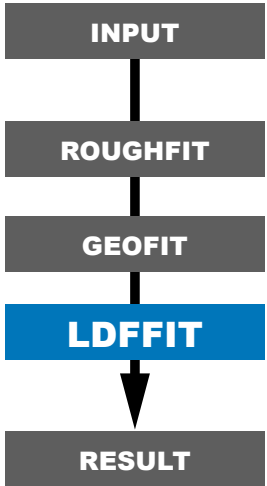
- フィット関数: $\tau = (8 \times 10^{-10})a(\theta) \left(1.0 + \frac{r}{30[\text{m}]}\right)^{1.5} \rho^{-0.5} \text{ [s]}$
 $a(\theta)$: Linsley curvature

- コア位置を中心とした一辺100 mの正方形で χ_G^2 が最小となる点を探す

$$\chi_G^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(t_i - t_i^{\text{FIT}})^2}{\sigma_{t_i}^2} + \frac{(\mathbf{R} - \mathbf{R}_{\text{COG}})^2}{\sigma_{\mathbf{R}_{\text{COG}}}^2} \quad \sigma_{\mathbf{R}_{\text{COG}}}^2 = 800, \text{ temporarily}$$



TALE-infill再構成の最適化



LDF fit

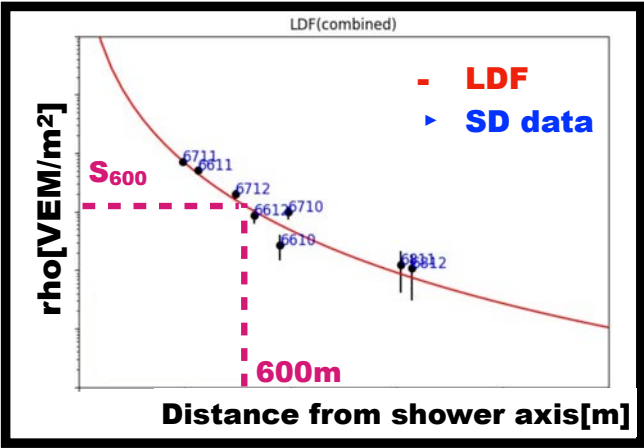
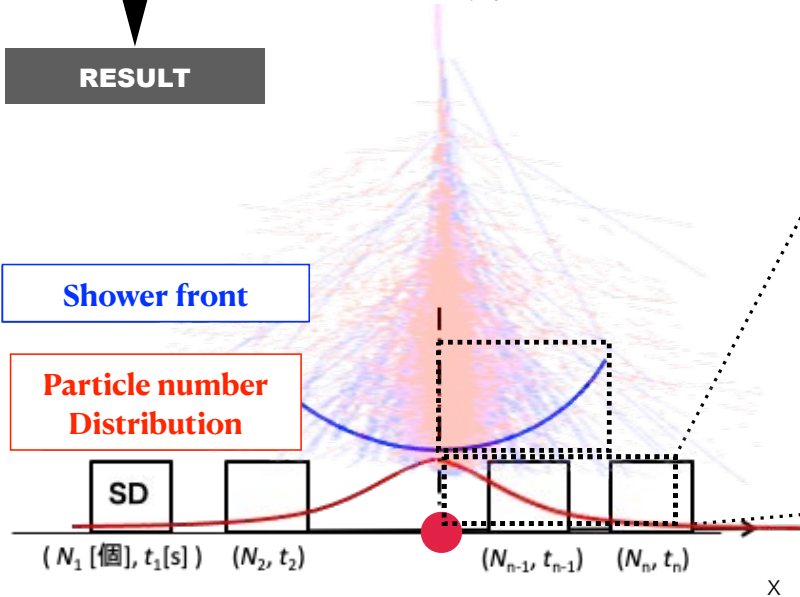
NKG関数でフィットしたLDFから S_{600} を求める

- フィット関数:
$$\rho^{FIT} = N \left(\frac{1}{R_M [\text{m}]} \right)^2 \left(\frac{R}{R_M [\text{m}]} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{R}{R_M [\text{m}]} \right)^{s-4.5} [\text{m}^{-2}]$$

R_M : Molier radius, s : shower age

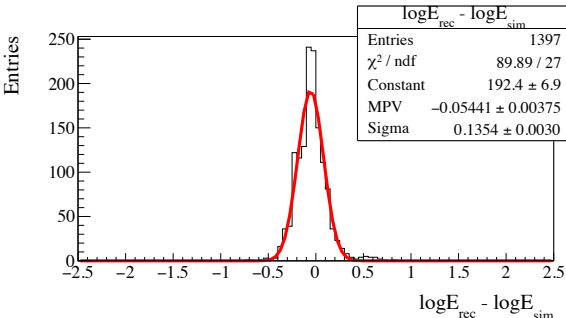
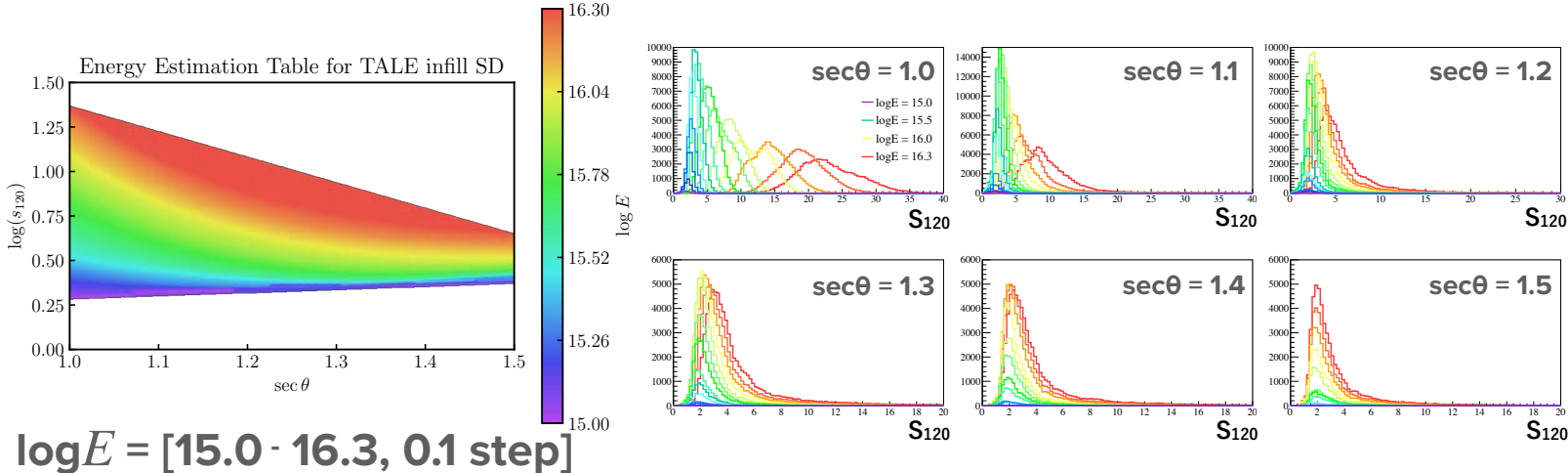
- χ^2_L が最小となるような “ N ” と “ s ” を決定

$$\chi^2_L = \sum_{i=0}^N \frac{(\rho_i - \rho_i^{FIT})^2}{\sigma_{\rho_i}^2}$$



TALE-infill再構成の最適化

50 m - 150 m の間で最もエネルギー分解能が高い位置で決定



50 m - 150 m の 10 m 間隔で各距離でのエネルギー推定テーブル ($\log E = [15.0 - 16.3, 0.1$ 間隔]) を作成し、エネルギー分解能を比較する

X

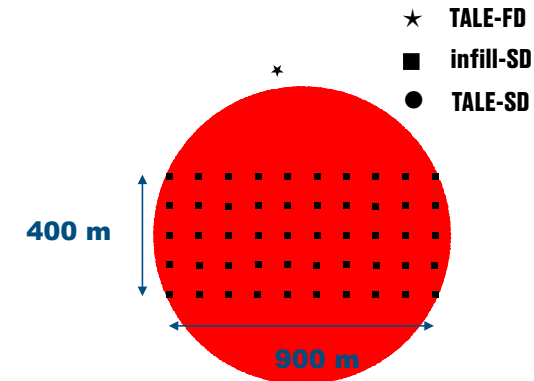
- 以下のシミュレーションデータを用いてエネルギー推定テーブルを作成

No thinning used in CORSIKA

- ▶ 宇宙線核種 : proton
- ▶ ハドロン相互作用: QGSJetII-04
- ▶ $\log E = [15.0 - 16.3, 0.1 \text{ step}]$
- ▶ $[\sec\theta, \phi] = [[1.0 - 1.5, 0.1 \text{ step}], [0^\circ - 360^\circ, \text{uniformly}]]$
- ▶ 範囲 : 半径 500 m の円
- ▶ 空気シャワーの数 : 300,000 個
(各エネルギー、 $\sec\theta$)

イベント選択条件

- ▶ **Space cluster**
 - 信号が最大のSDを含む隣接する5台以上のSDが信号を記録
- ▶ **Space time cluster**
 - 4台以上のSDが以下の条件を満たす “ $\frac{l}{c} > |t_{\text{hit}}^j - t_{\text{hit}}^i|$ ”
- ▶ **Boundary cut**
 - 信号が最大のSDが一番外側の検出器でない

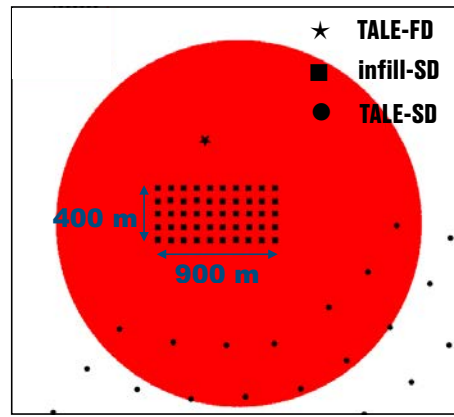


- 以下のシミュレーションデータを用いてエネルギー分解能を求める

MCデータセット

No thinning used in CORSIKA

- ▶ 宇宙線核種 : 陽子
- ▶ ハドロン相互作用 : QGSJetII-04
- ▶ $E = [10^{15.4}\text{eV}, 10^{16}\text{eV}]$
- ▶ $[\theta, \phi] = [[0^\circ - 65^\circ], [0^\circ - 360^\circ]]$
- ▶ 範囲 : 半径 1.4 kmの円
- ▶ 空気シャワーの数 : 150,000 個
(各エネルギー)



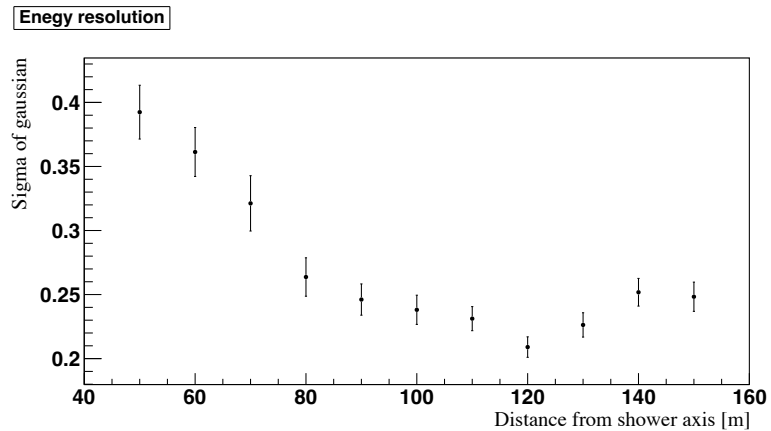
イベント選択条件

- ▶ **Space cluster**
 - 信号が最大のSDを含む隣接する5台以上のSDが信号を記録
- ▶ **Space time cluster**
 - 4台以上のSDが以下の条件を満たす “ $\frac{l}{c} > |t_{hit}^j - t_{hit}^i|$ ”
 l : distance from SD_{hit}^i to SD_{hit}^j
- ▶ **Boundary cut**
 - 信号が最大のSDが一番外側の検出器でない
- ▶ **Zenith cut**
 - $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$

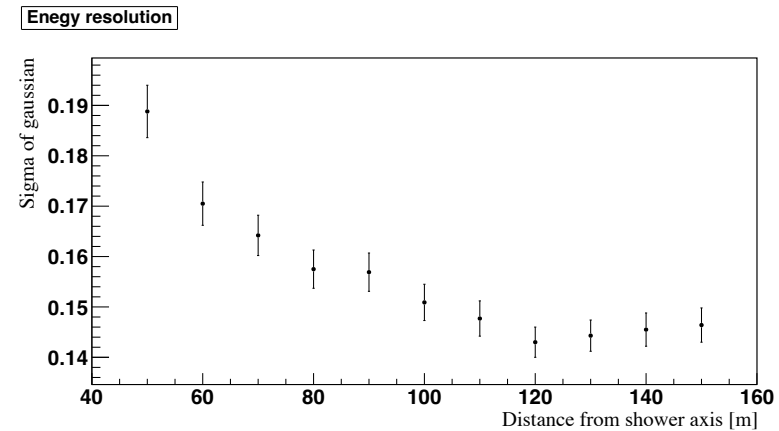
x

TALE-infill再構成の最適化

Energy : $10^{15.4}\text{eV}$



Energy : $10^{16.0}\text{eV}$



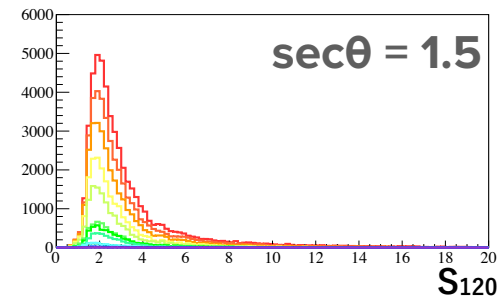
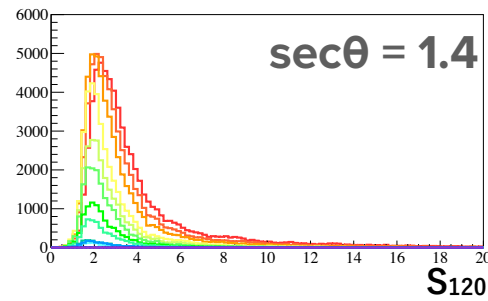
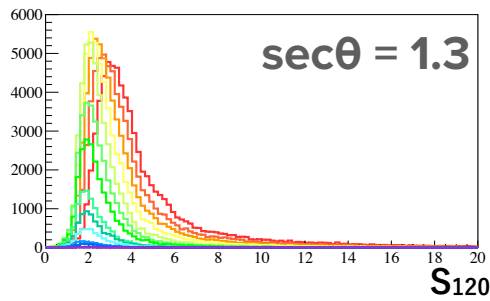
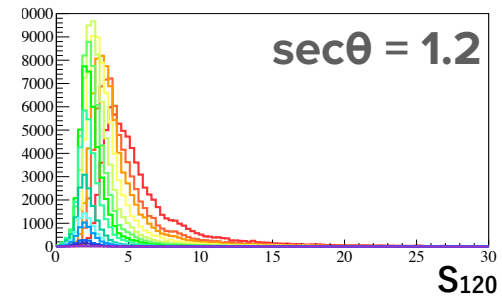
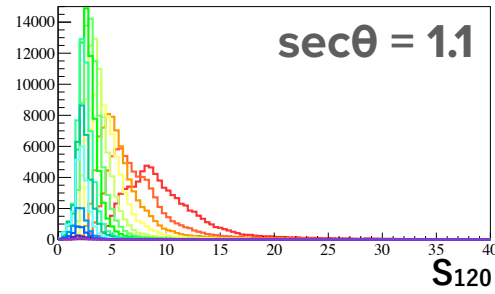
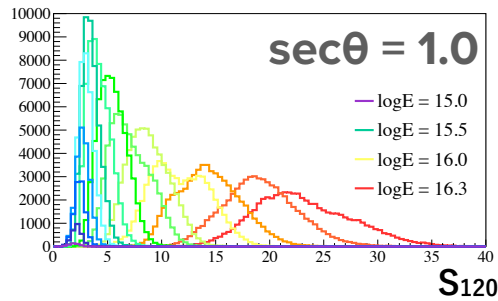
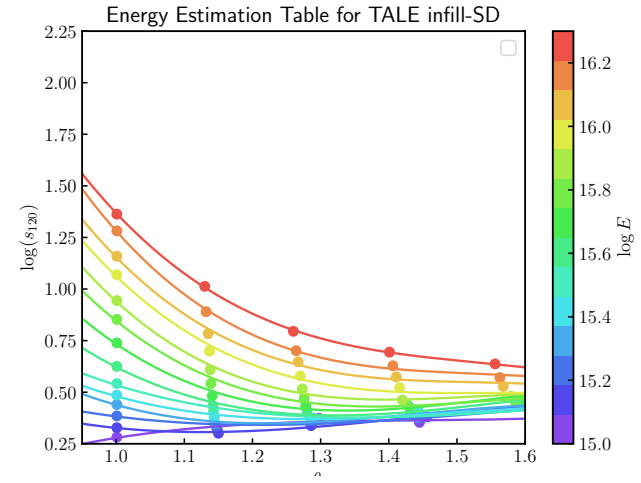
120 m でのエネルギー決定精度が最も良い

S₁₂₀でエネルギー推定を行う

x

S₁₂₀

Energy table(fitted by cubic function)
S₁₂₀ logE = [15.0 - 16.3, 0.1 step]



X

フィット関数

- ▶ シャワー平面に対するシャワー粒子の遅れ

$$\tau = (8 \times 10^{-10}) a(\theta) \left(1.0 + \frac{r}{30[\text{m}]} \right)^{1.5} \rho^{-0.5} \quad [\text{s}]$$

- ▶ 横方向粒子数密度分布

$$\rho^{FIT} = N \left(\frac{1}{R_M [\text{m}]} \right)^2 \left(\frac{R}{R_M [\text{m}]} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{R}{R_M [\text{m}]} \right)^{s-4.5} \quad [\text{m}^{-2}]$$

$$N : \text{scale factor}, \quad s : \text{shower age}, \quad R_M = \frac{9.3}{1.205 \times 10^{-3}} [\text{cm}]$$

x

Fitting function (TALE)

► Time delay from shower plane

$$\tau = (8 \times 10^{-10})a(\theta) \left(1.0 + \frac{r}{30[\text{m}]} \right)^{1.5} \rho^{-0.5} \quad [\text{s}]$$

$$a(\theta) = \begin{cases} 3.3836 - 0.01848\theta & (\theta < 25^\circ) \\ c_3\theta^3 + c_2\theta^2 + c_1\theta + c_0 & (25^\circ \leq \theta \leq 35^\circ) \\ \exp(-3.2 \times 10^{-2}\theta + 2.0) & (\theta > 35^\circ) \end{cases}$$

$$c_0 = -7.76168 \times 10^{-2}, \quad c_1 = 2.99113 \times 10^{-1}$$

$$c_2 = -8.79358 \times 10^{-3}, \quad c_3 = 6.51127 \times 10^{-5}$$

► Lateral distribution function

$$\rho^{\text{FIT}}(r) = A \left(\frac{r}{91.6[\text{m}]} \right)^{-1.2} \left(1 + \frac{r}{91.6[\text{m}]} \right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1 + \left(\frac{r}{1000[\text{m}]} \right)^2 \right)^{-0.6} \quad [/\text{m}^2]$$

$$\eta(\theta) = 3.97 - 1.79(\sec\theta - 1)$$

x

New fitting function

- **LDF Fit**

LDF from AGASA

$$\rho^{FIT} = N \left(\frac{R}{91.6 \text{ [m]}} \right)^{-1.2} \left(1.0 + \frac{R}{91.6 \text{ [m]}} \right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left(1.0 + \left[\frac{R}{1000 \text{ [m]}} \right]^2 \right)^{-0.6} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$\eta(\theta) = 3.972 - 1.79(\sec\theta - 1)$$



LDF by NKG

$$\rho^{FIT} = N \left(\frac{1}{R_M \text{ [m]}} \right)^2 \left(\frac{R}{R_M \text{ [m]}} \right)^{s-2} \left(1 + \frac{R}{R_M \text{ [m]}} \right)^{s-4.5} \text{ [m}^{-2}\text{]}$$

$$N : \text{scale factor, } s : \text{shower age, } R_M = \frac{9.3}{1.205 \times 10^{-3}} \text{ [cm]}$$

x