

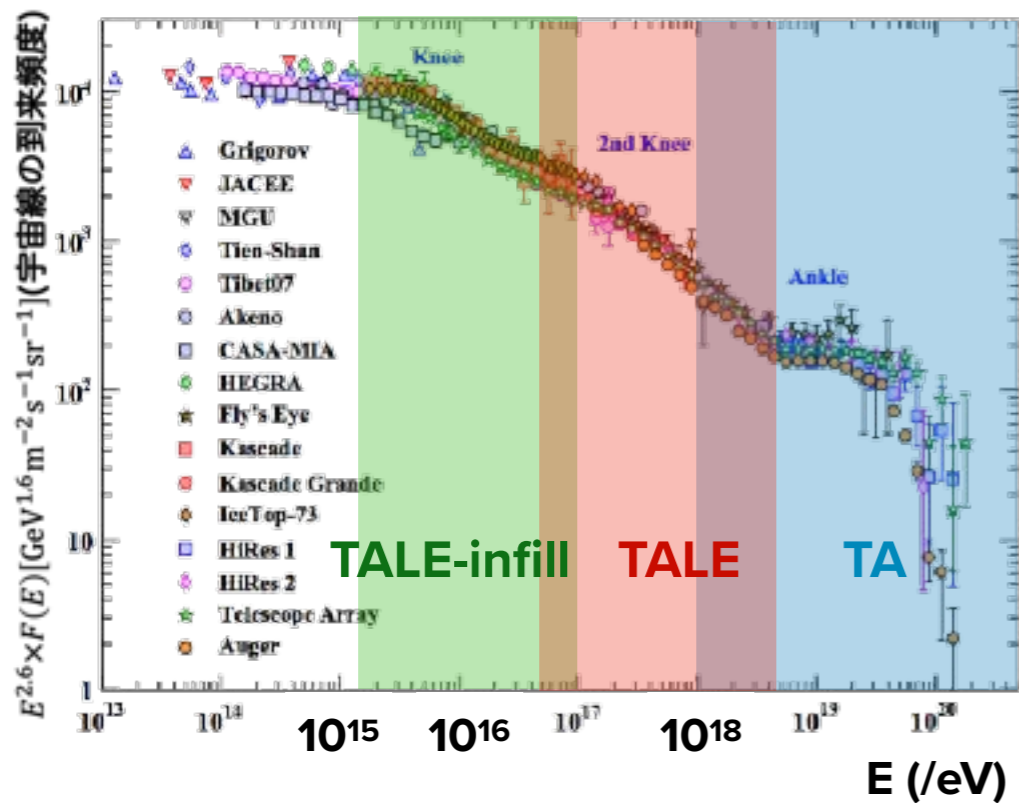
TALE-infill SD の再構成プログラムとデータ解析

大阪公立大学 河内祐輔

第七回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索研究会

2024/03/26

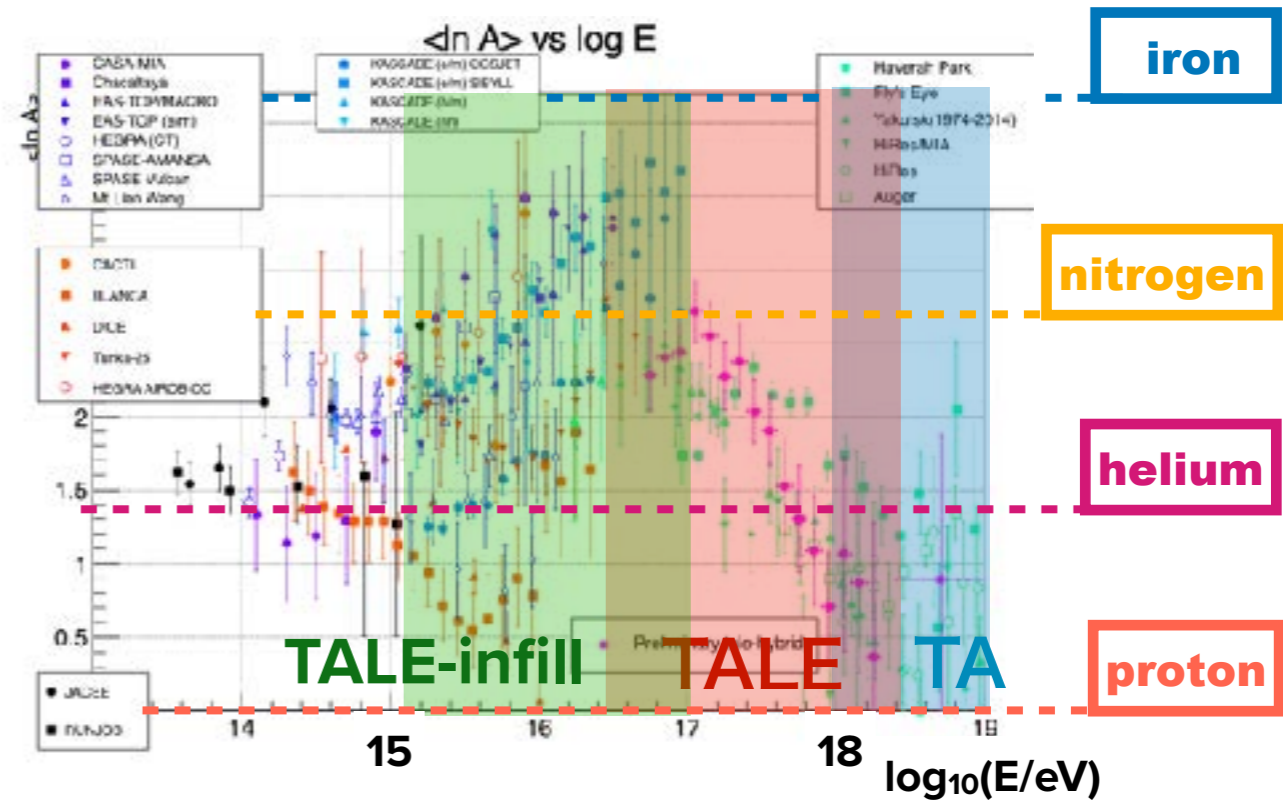
Knee領域宇宙線



エネルギースペクトル

$10^{15.5}$ eV付近に歪な折れ曲がり構造

→ Knee

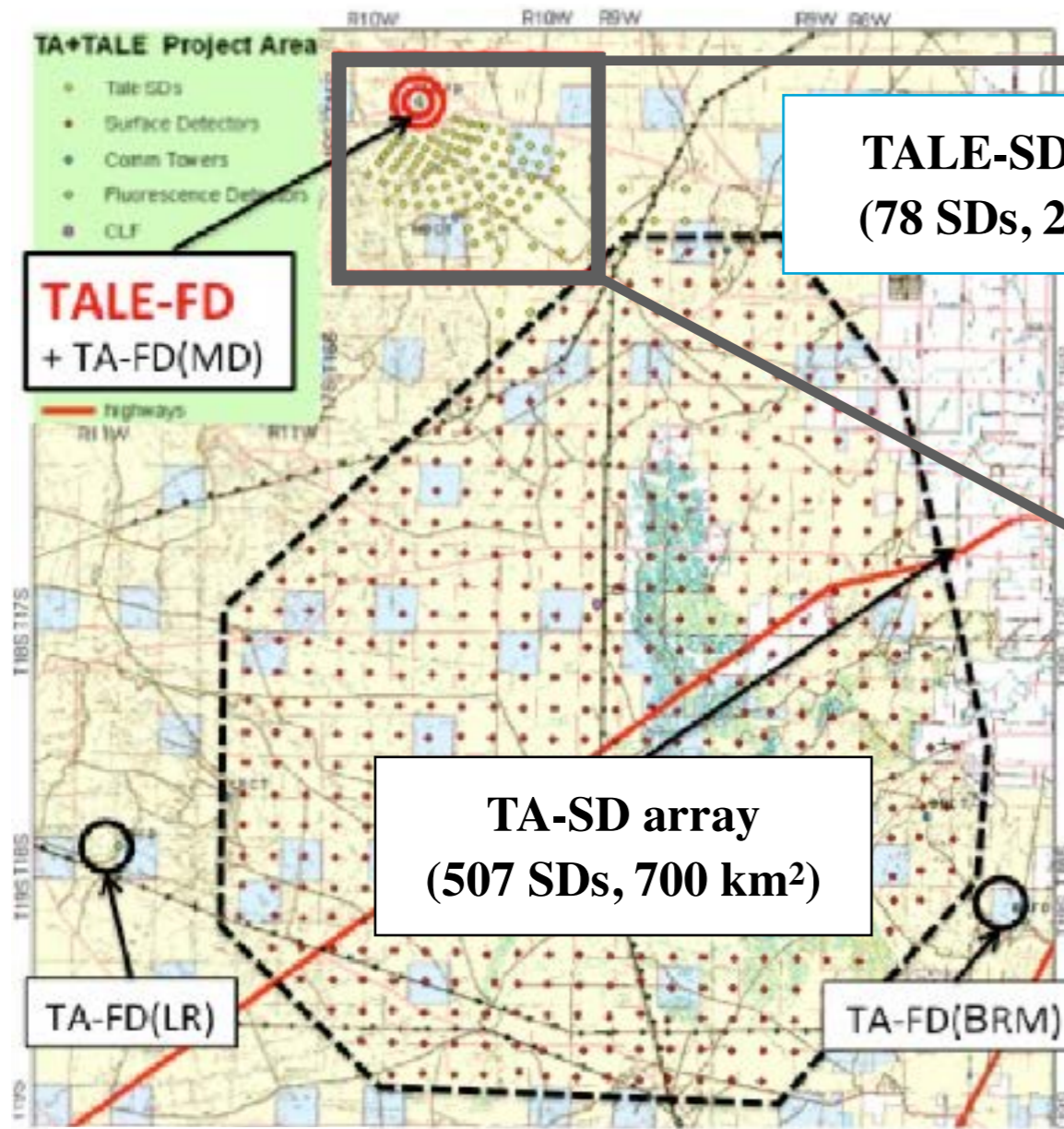


質量組成分布

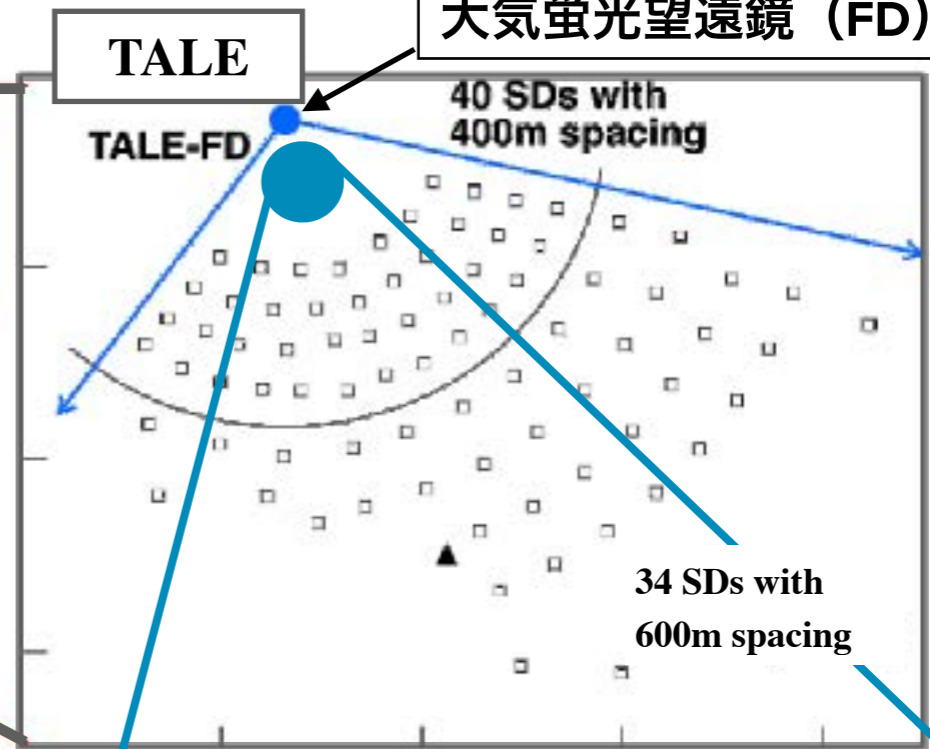
Knee付近のエネルギーでは、エネルギーが高くなるにつれて、軽い原子核から重い原子核へ

Knee領域宇宙線のエネルギースペクトル、質量組成、到来方向異方性を精密に測定

TALE infill実験



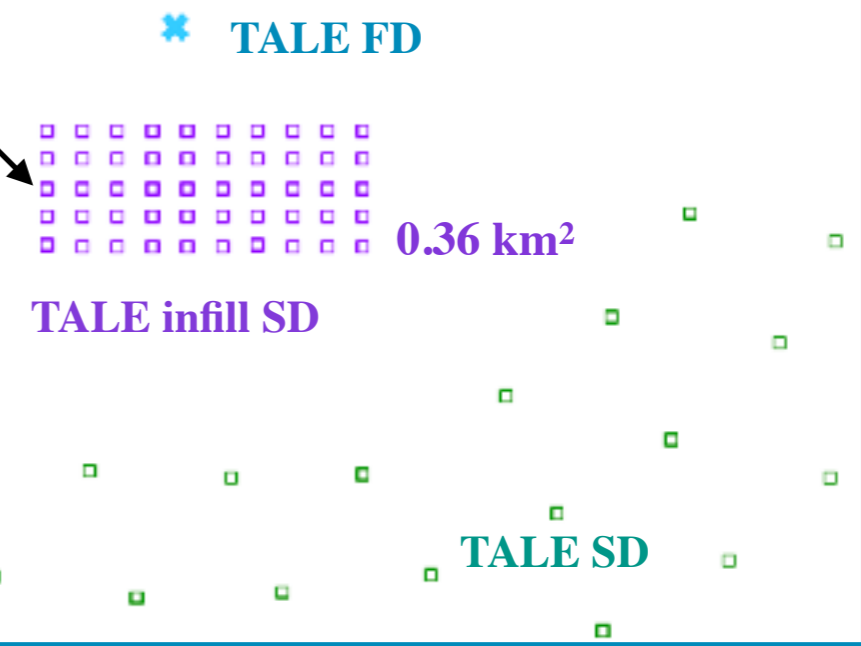
大気蛍光望遠鏡 (FD)



TALE infill



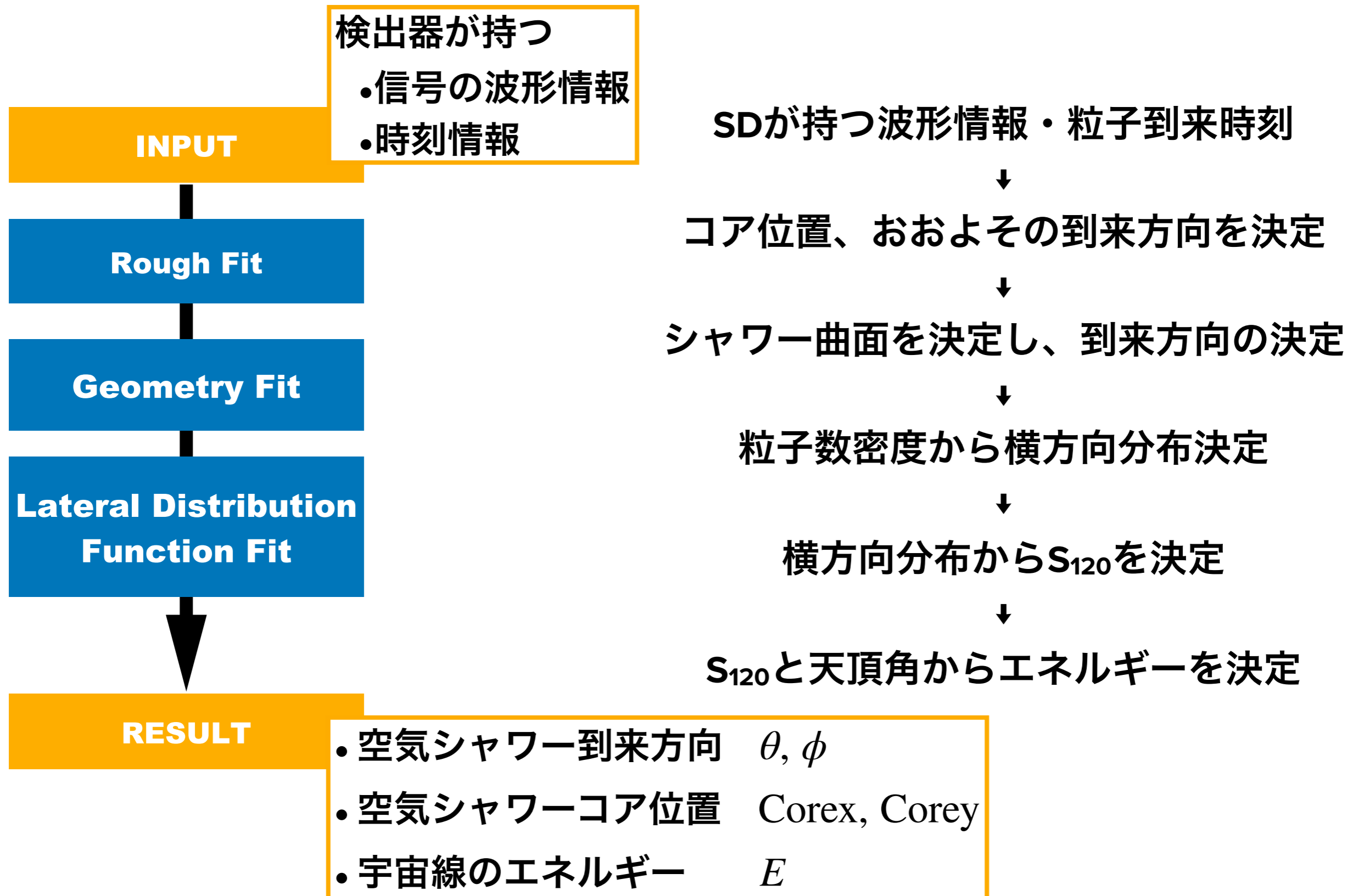
地表検出器 (SD)



TALE infill

検出器間隔：100 m 検出器台数：50台
 Knee領域のエネルギースペクトル、質量組成、
 到来方向異方性の精密測定

TALE-infill SDアレイにおける再構成



TALE-infillアレイによる再構成

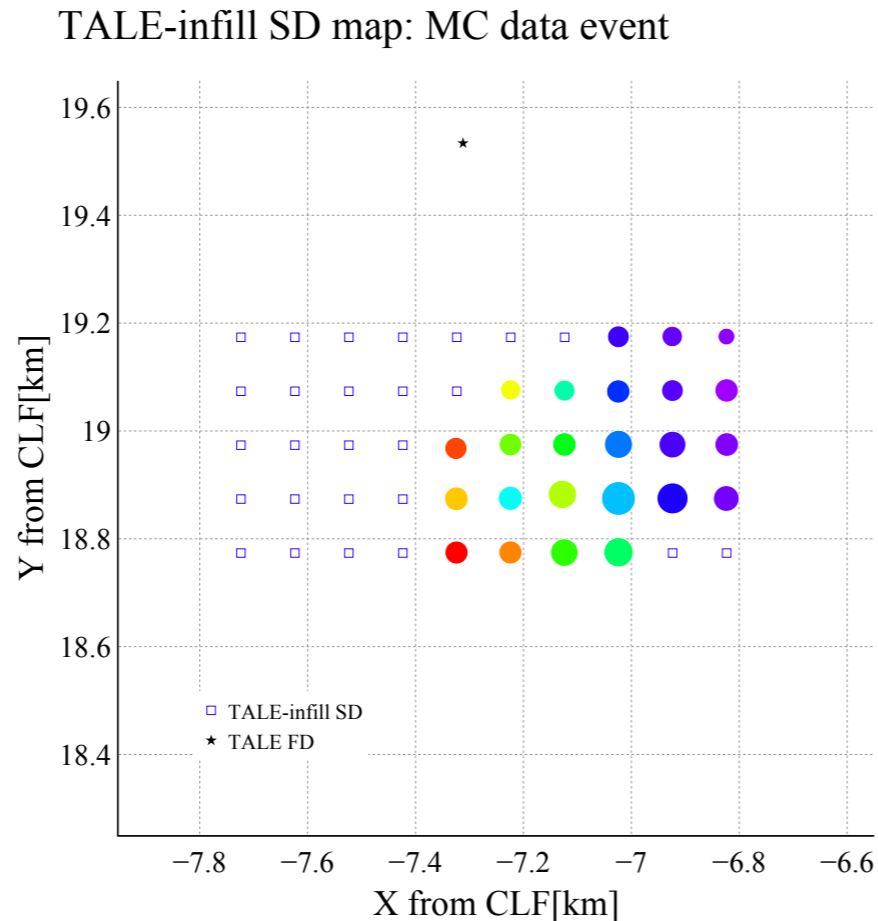
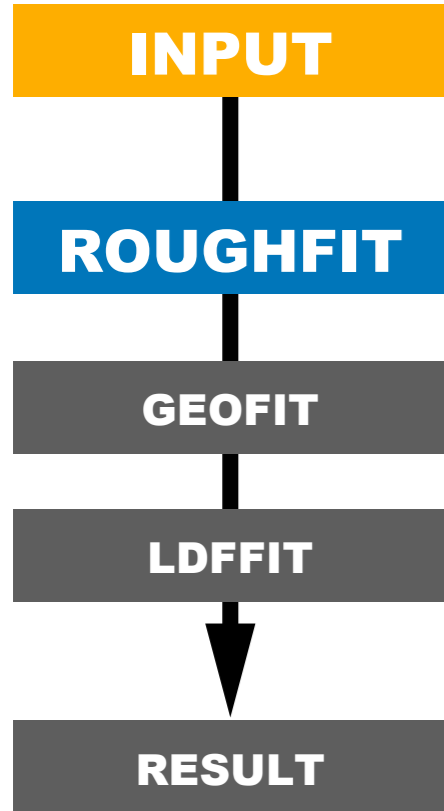
Rough fit

コア位置とおおよその到来方向を決定する

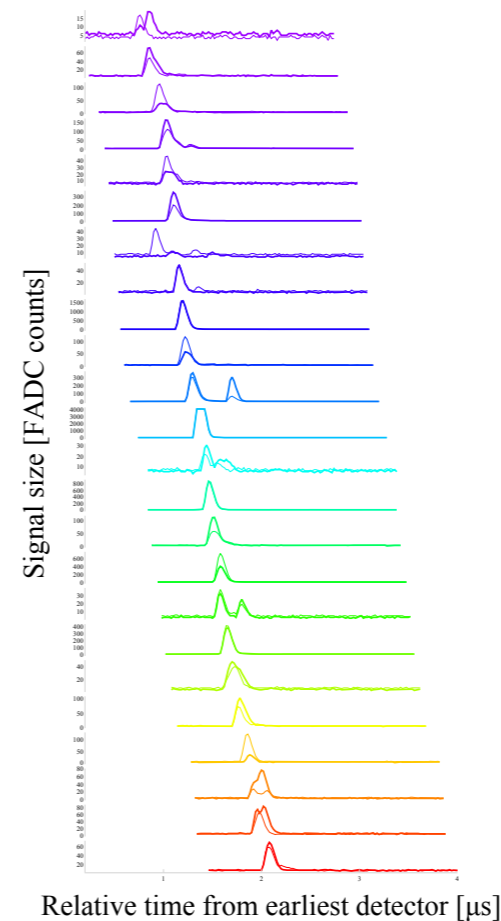
- コア位置 : 信号の大きさの重心で決定

$$\mathbf{R}_{\text{COG}} = \frac{\sum_{i=1}^N \rho_i \times \mathbf{r}_i}{\sum_{i=1}^N \rho_i}$$

- 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



Date:20231119 Time:131143.159919



SD

- ▶ 信号の波形情報
- ▶ 到来時刻の情報

TALE-infillアレイによる再構成

Geometry fit

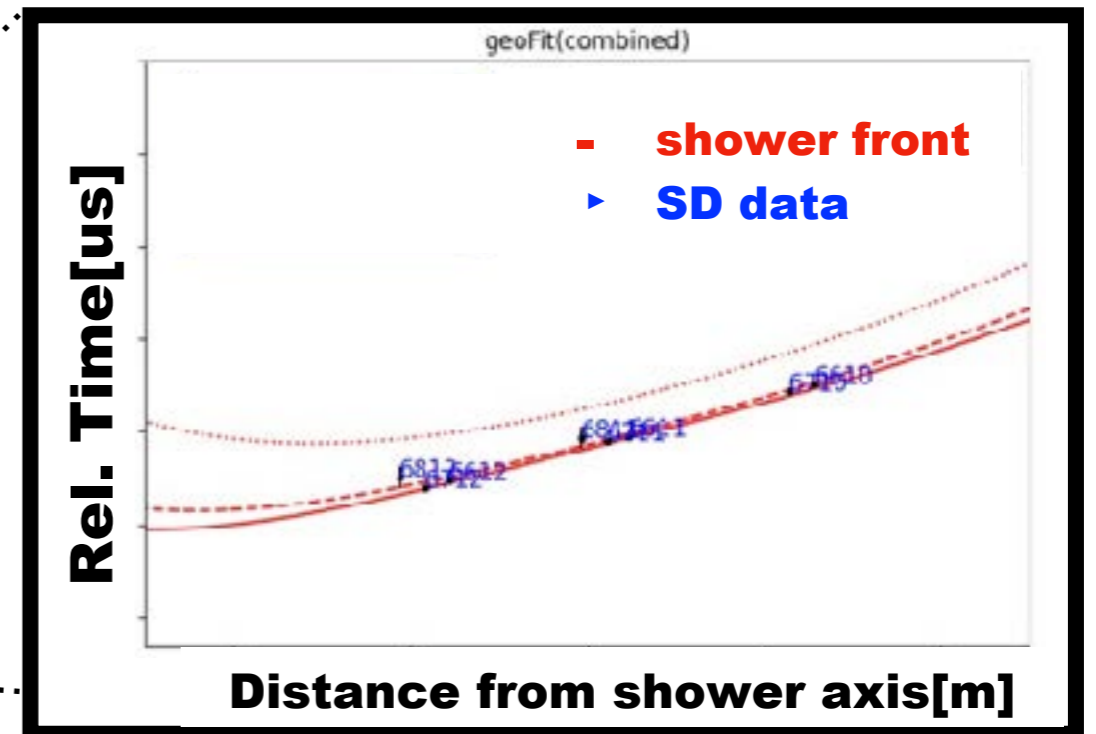
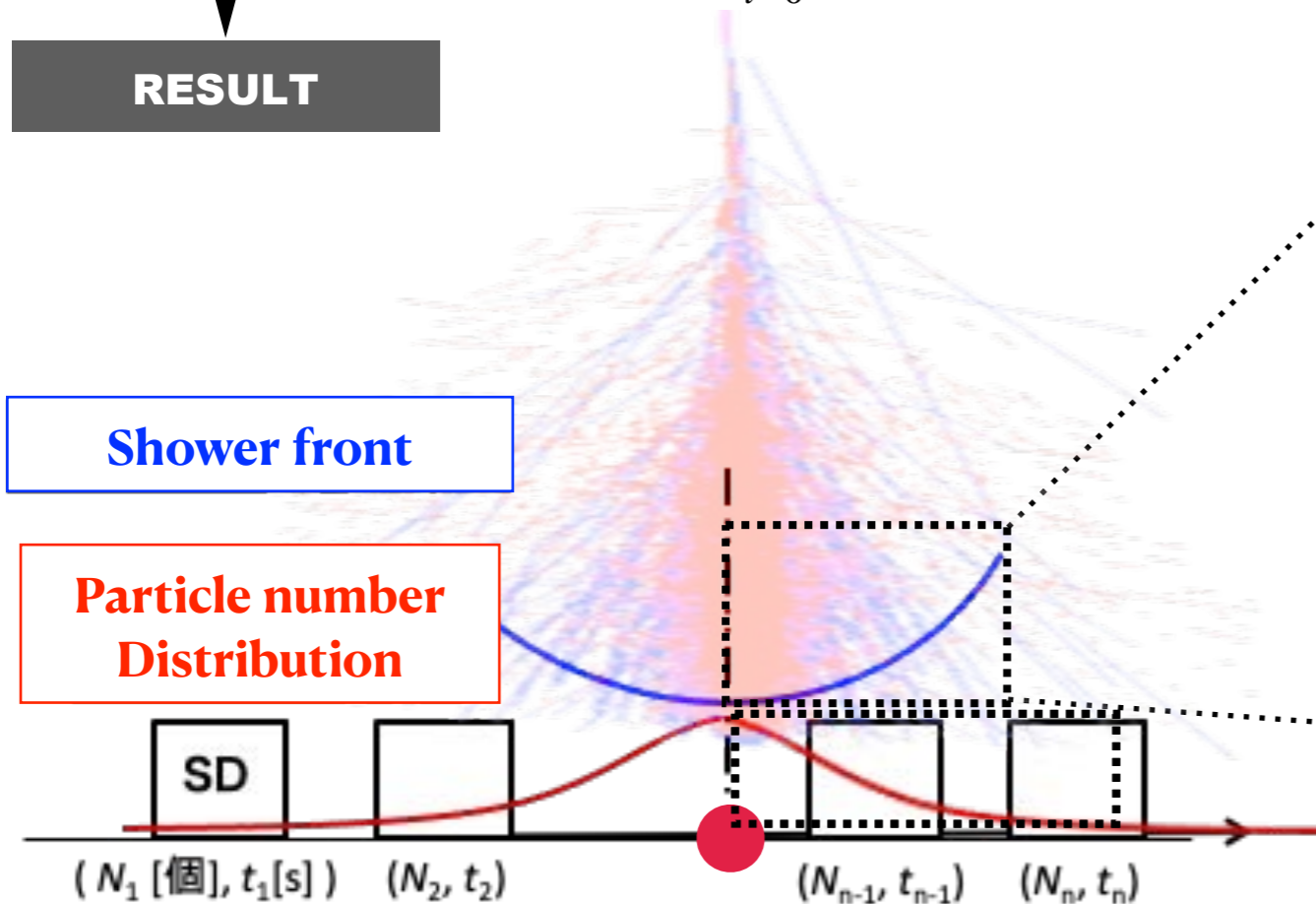
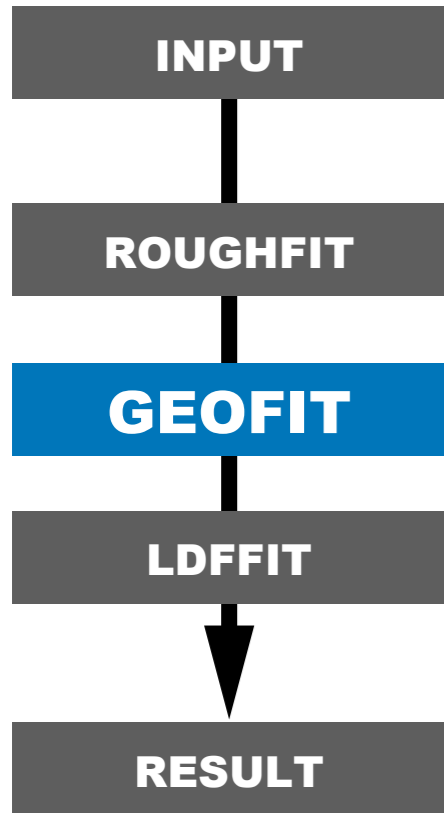
シャワー曲面をフィットし、到来方向を決定

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

$a(\theta)$: 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アレイによる再構成

LDF fit

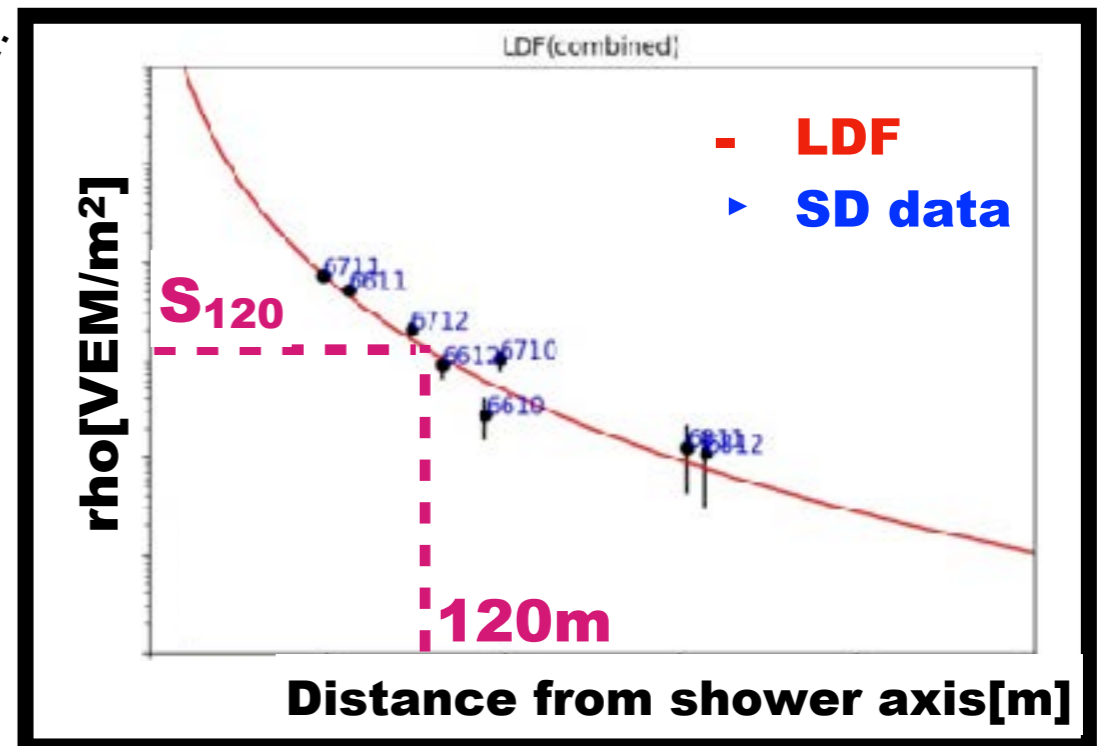
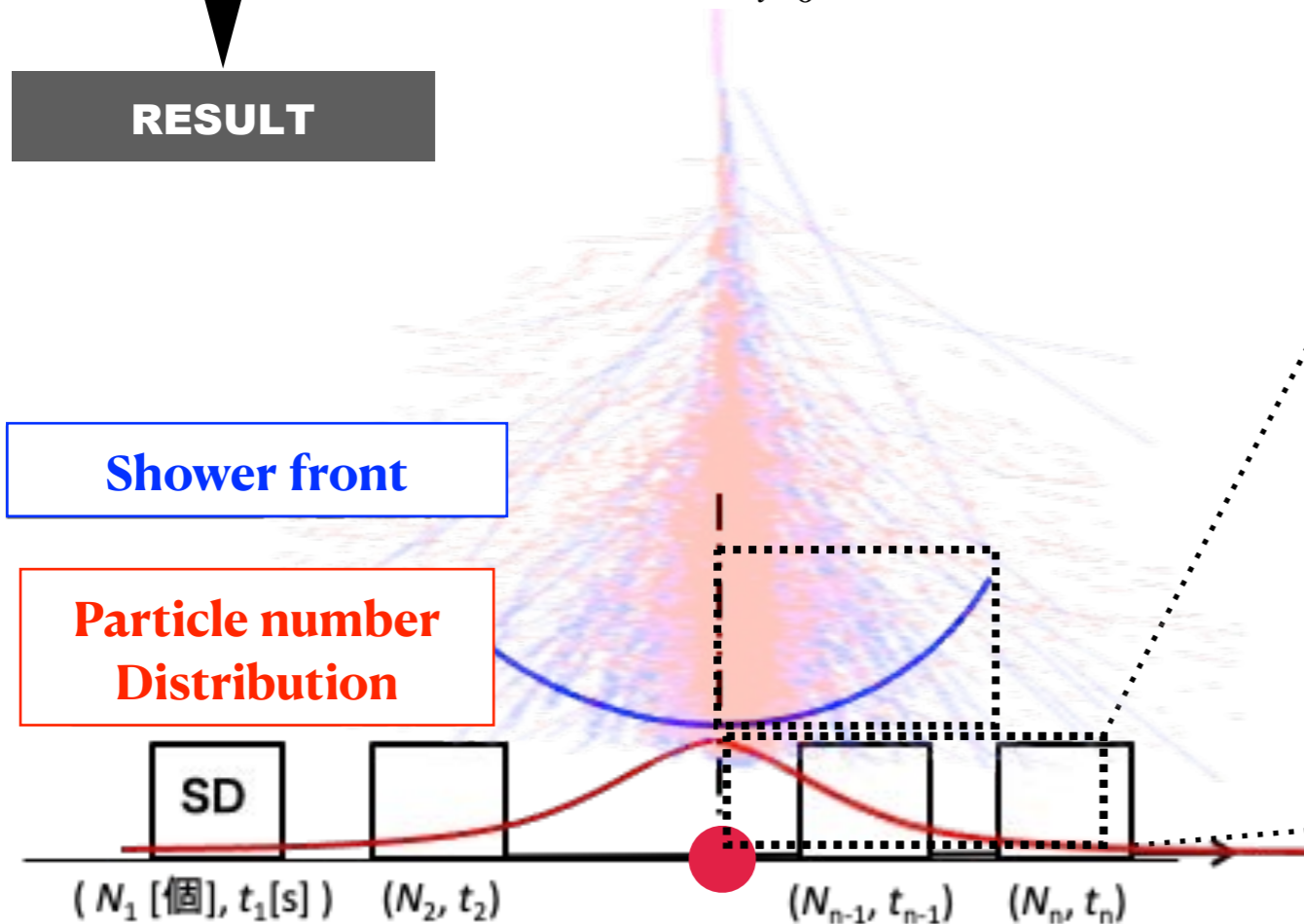
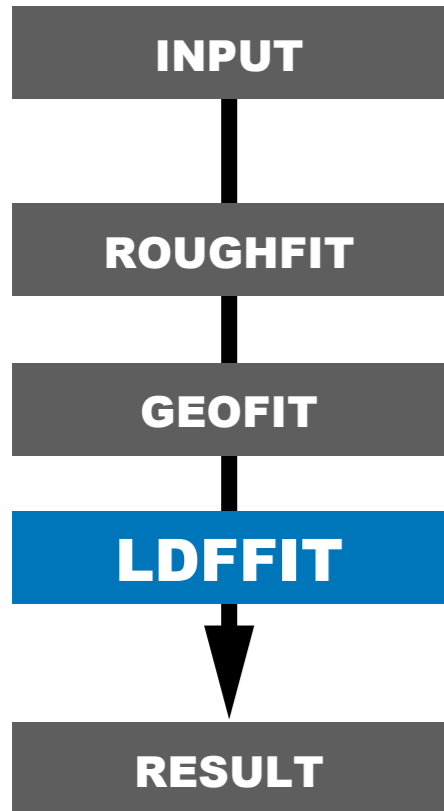
NKG関数でフィットしたLDFから S_{120} を求める

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

R_M : Moler radius, s : shower age

- χ_L^2 が最小となるような“ N ”と“ s ”を決定

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

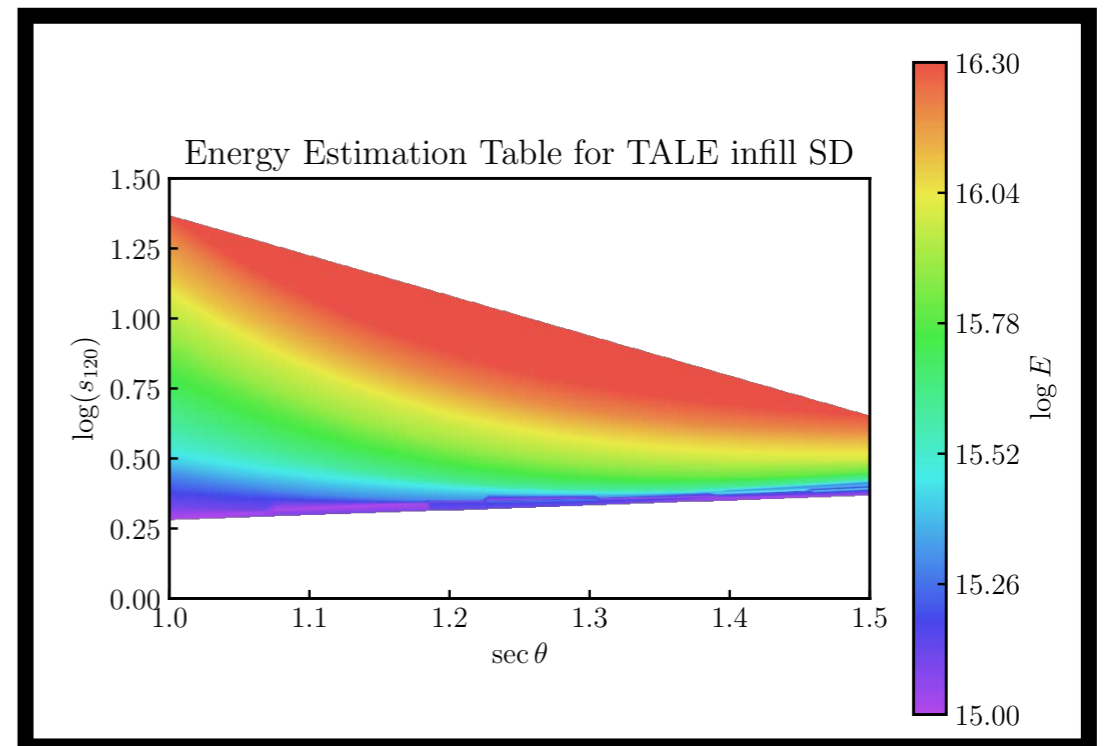
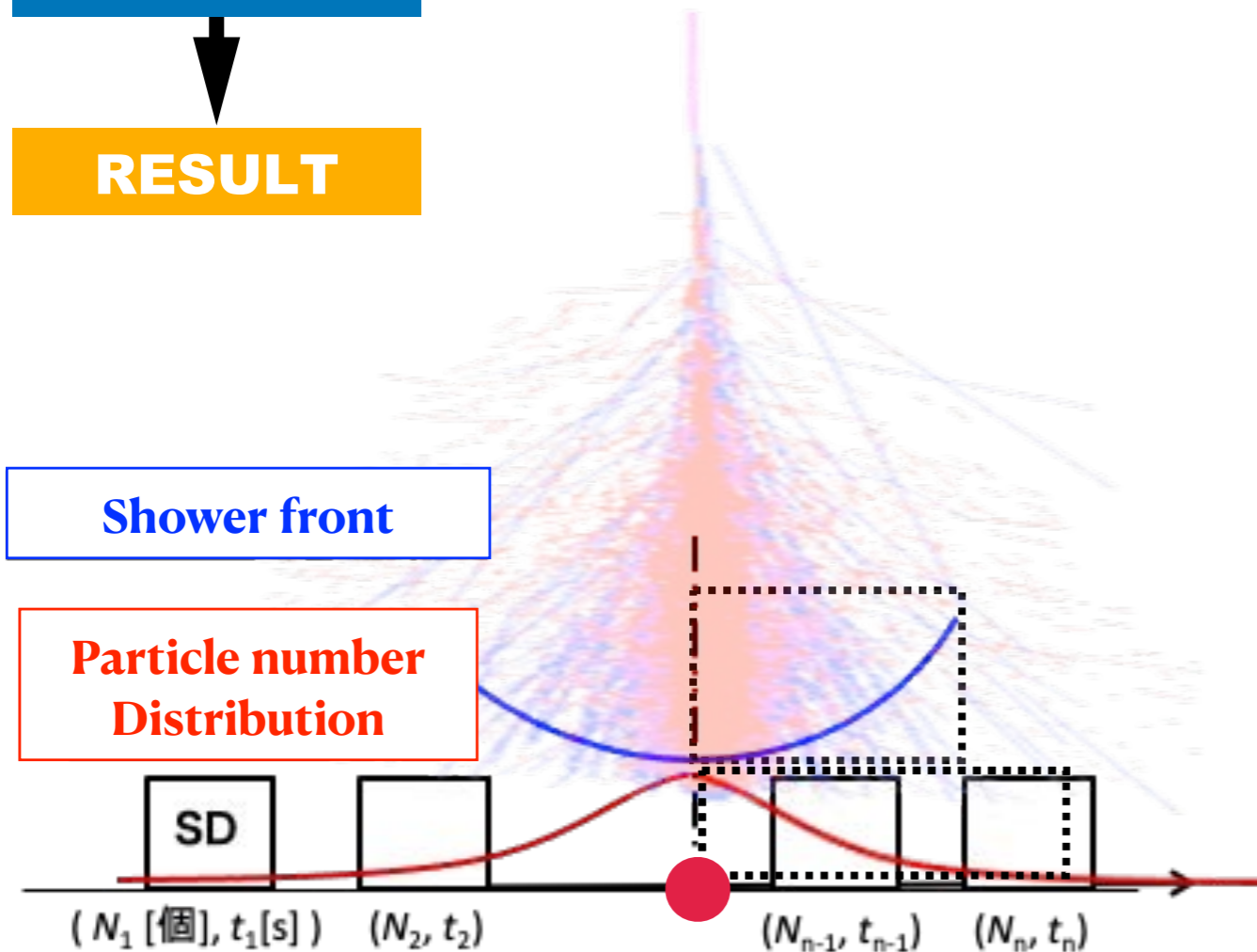
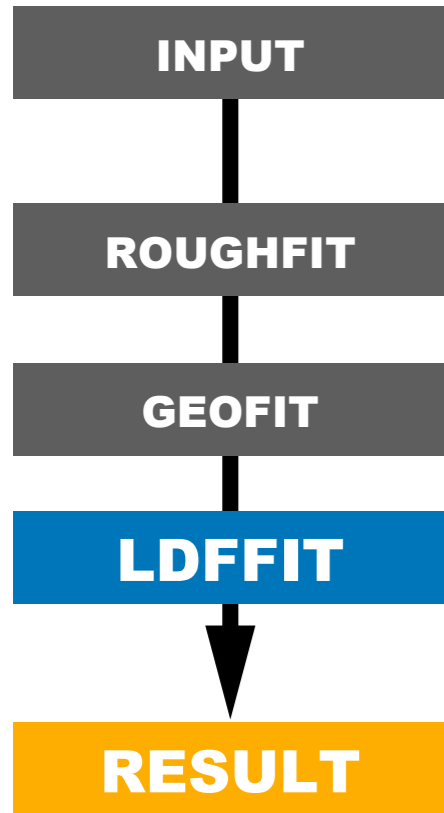


TALE-infillアレイによる再構成

LDF fit

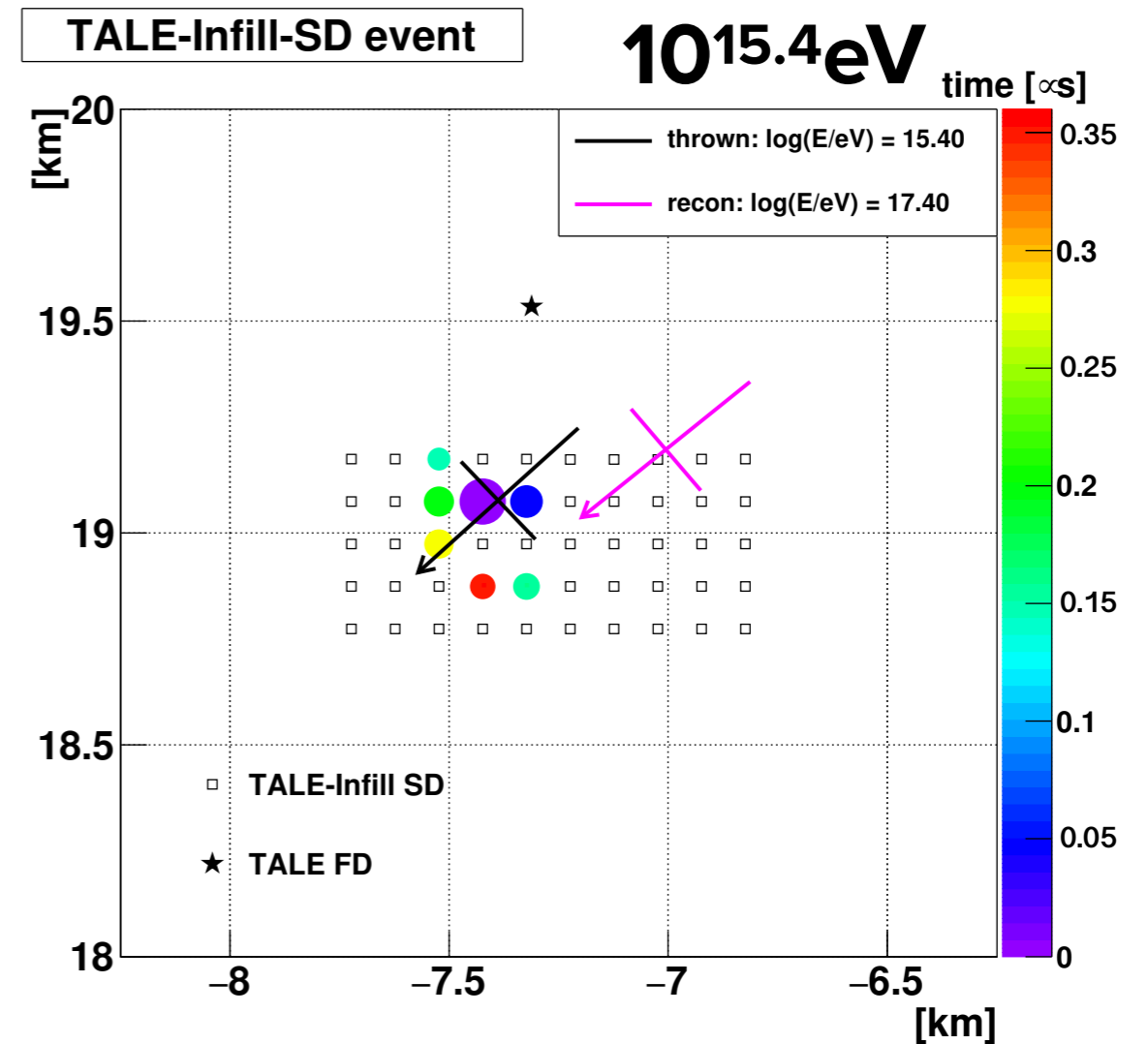
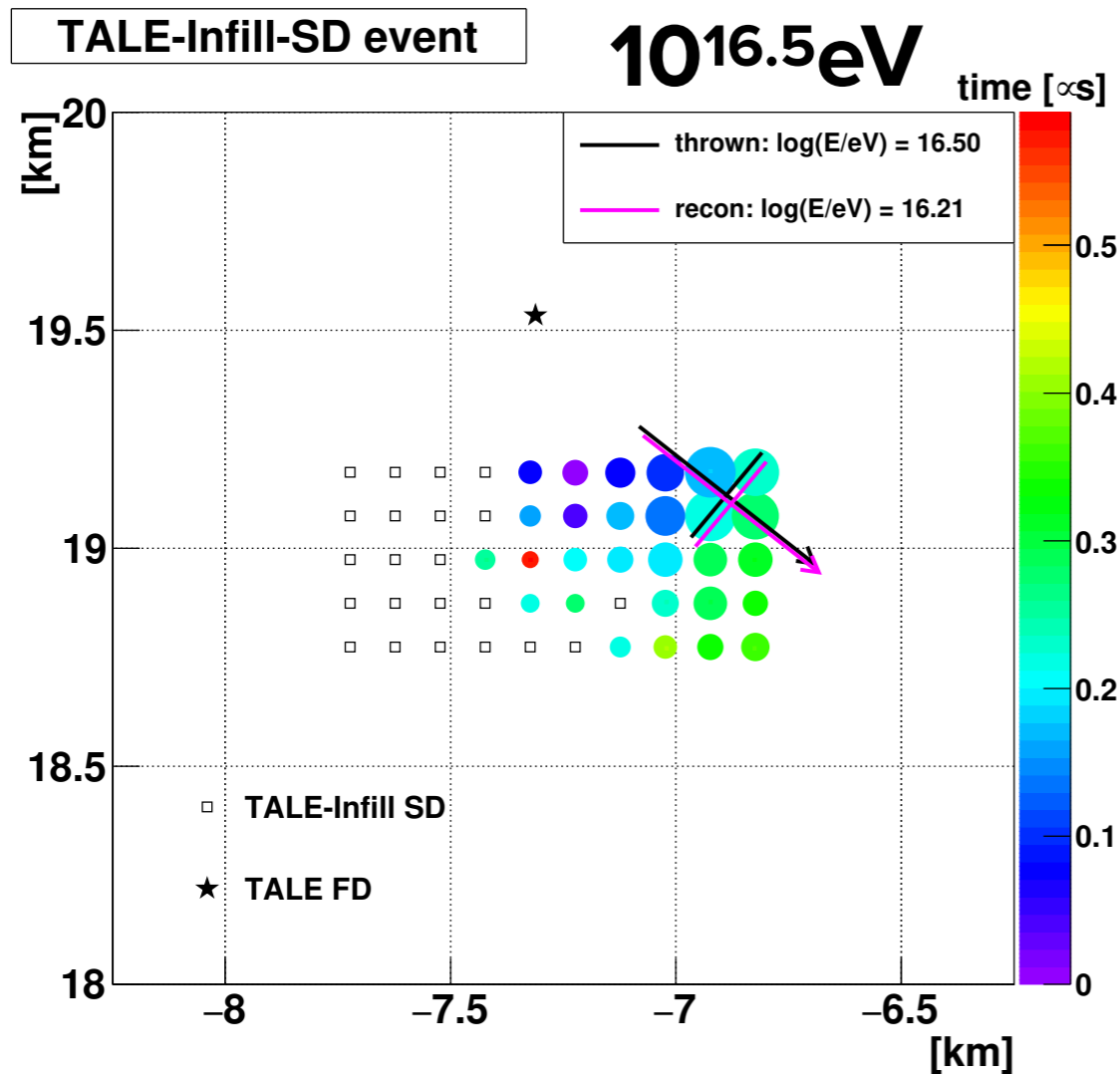
S_{120} と天頂角からエネルギーを決定

- S_{120} : シャワー軸から120 m 地点での粒子数密度
- エネルギー推定テーブルからエネルギーを決定



MCシミュレーション

Thinning option



**$10^{15.4}\text{eV}$ のイベントは到来時刻と粒子数分布がまばら
→シミュレーションのシャワー生成に問題**

MCシミュレーション

Thinning option

▶ シニング

大量の2次粒子が生成されるときに
粒子を「間引いて」計算量を減らす

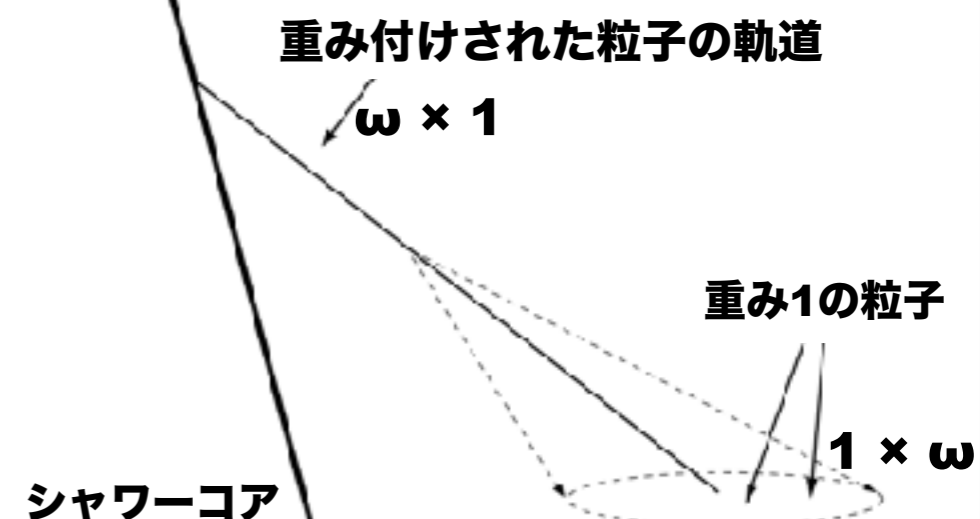
シニング



▶ デシニング

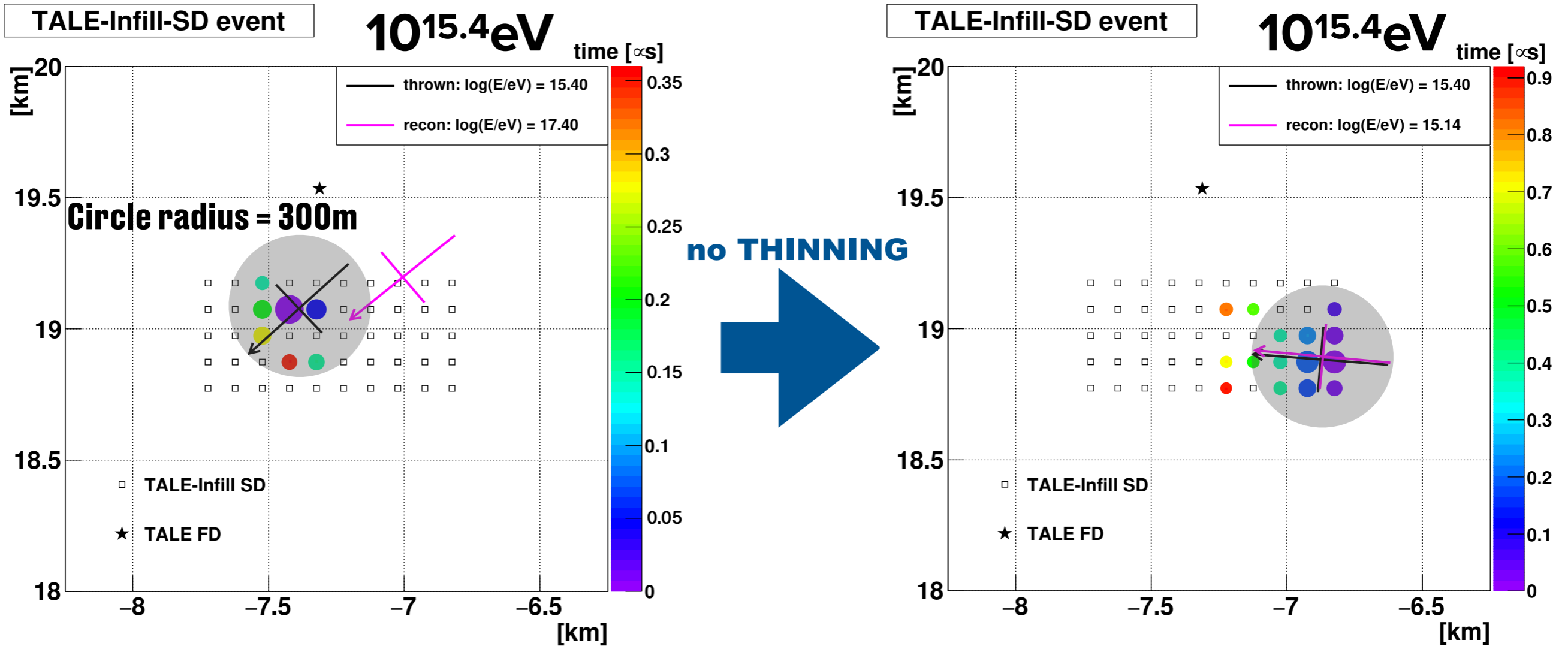
シニングによってまとめられた重み ω
を持つ1粒子から、重み1の ω 個の粒子
に戻す

デシニング



MCシミュレーション

Thinning option



TA実験ではコアから300 mはデシニングしない



TALE infillではno-thinning showerを用いる

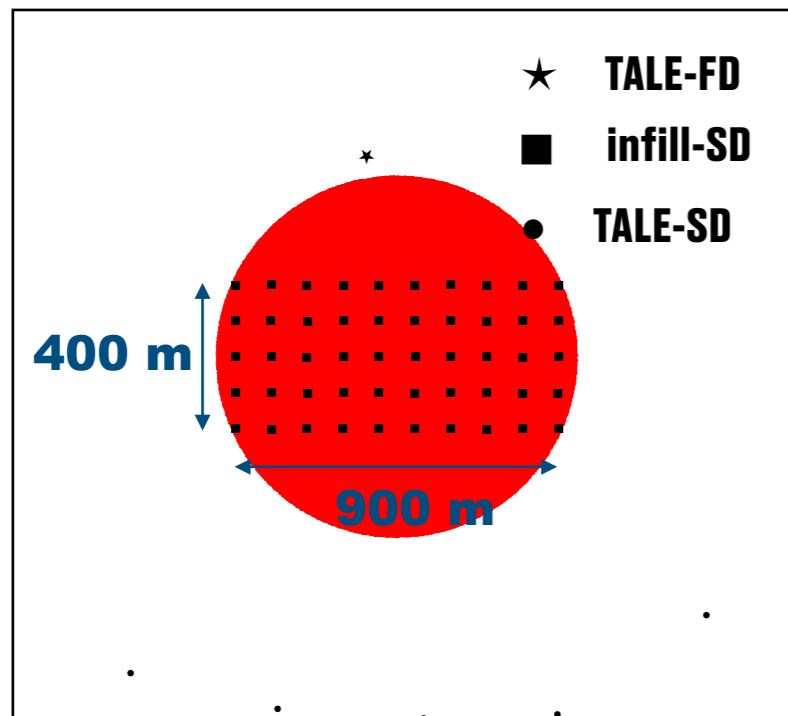
MCシミュレーション

- プログラムの性能をシミュレーションデータを解析して評価

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
- ▶ $E = [10^{15.4}\text{eV}, 10^{16}\text{eV}]$
- ▶ $[\theta, \phi] = [[0^\circ - 45^\circ], [0^\circ - 360^\circ]]$
- ▶ 範囲 : 半径 0.5 kmの円
- ▶ 空気シャワーの数 : 300,000 個
(各エネルギー)



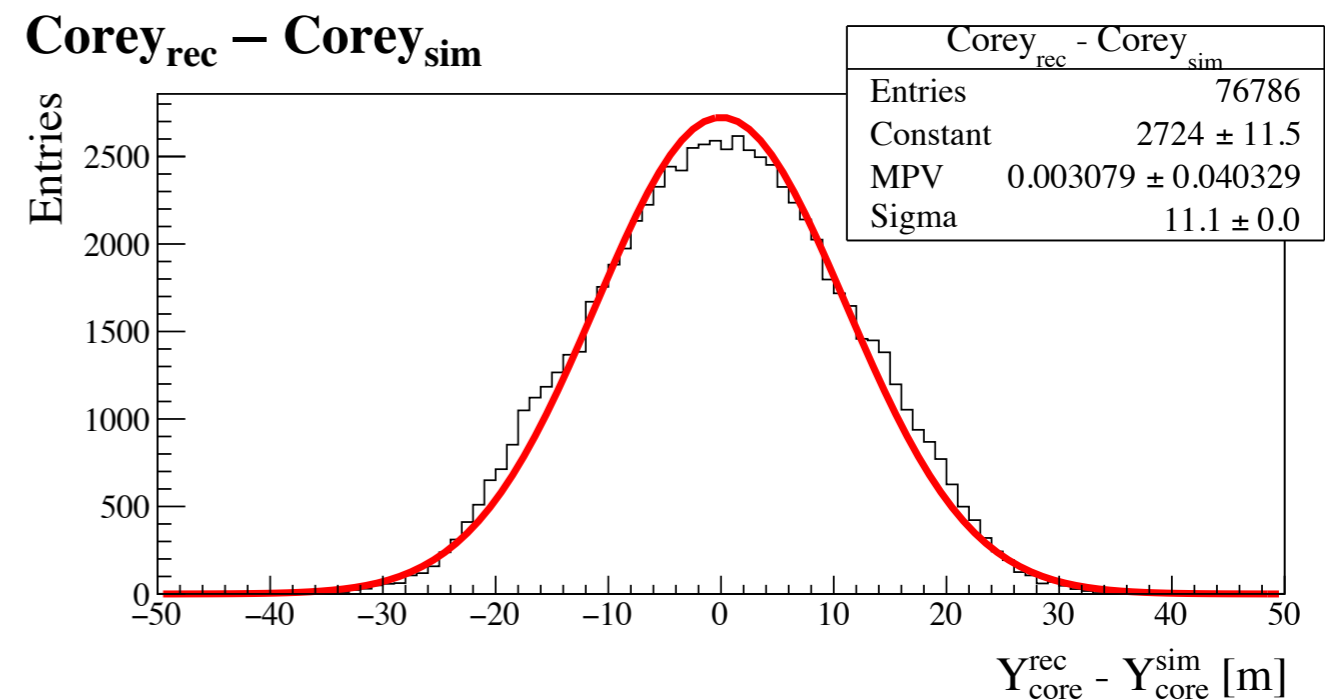
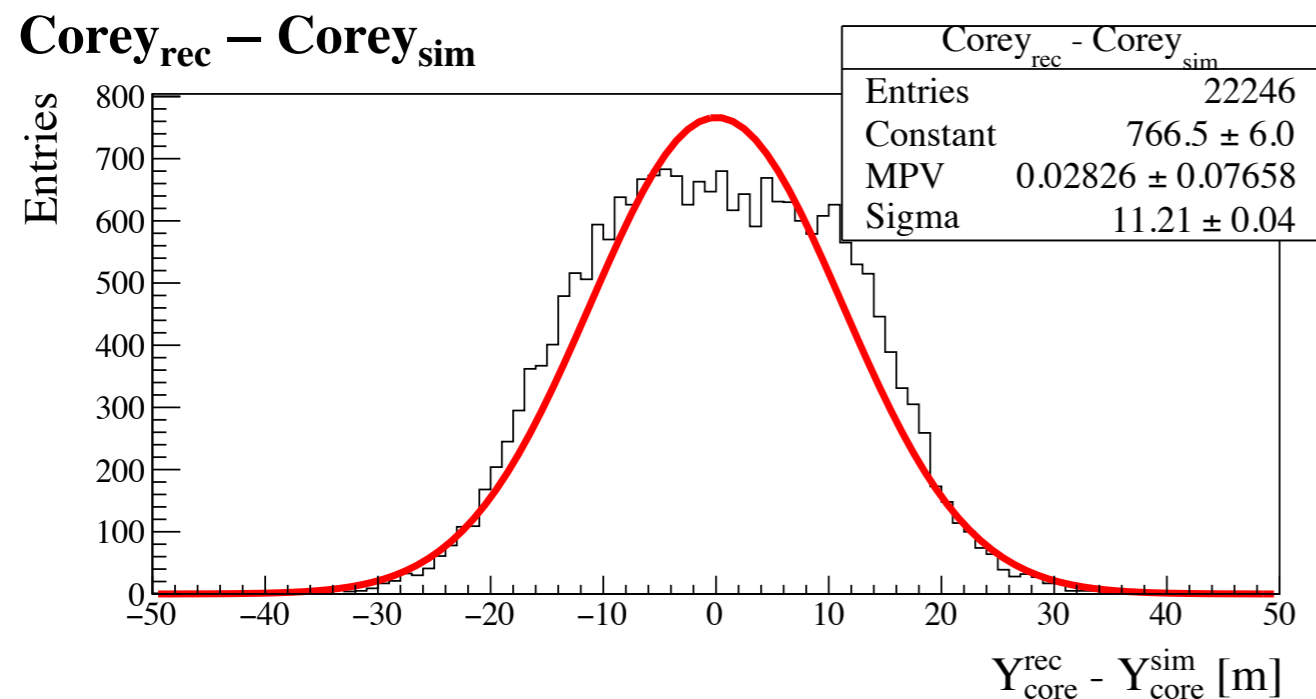
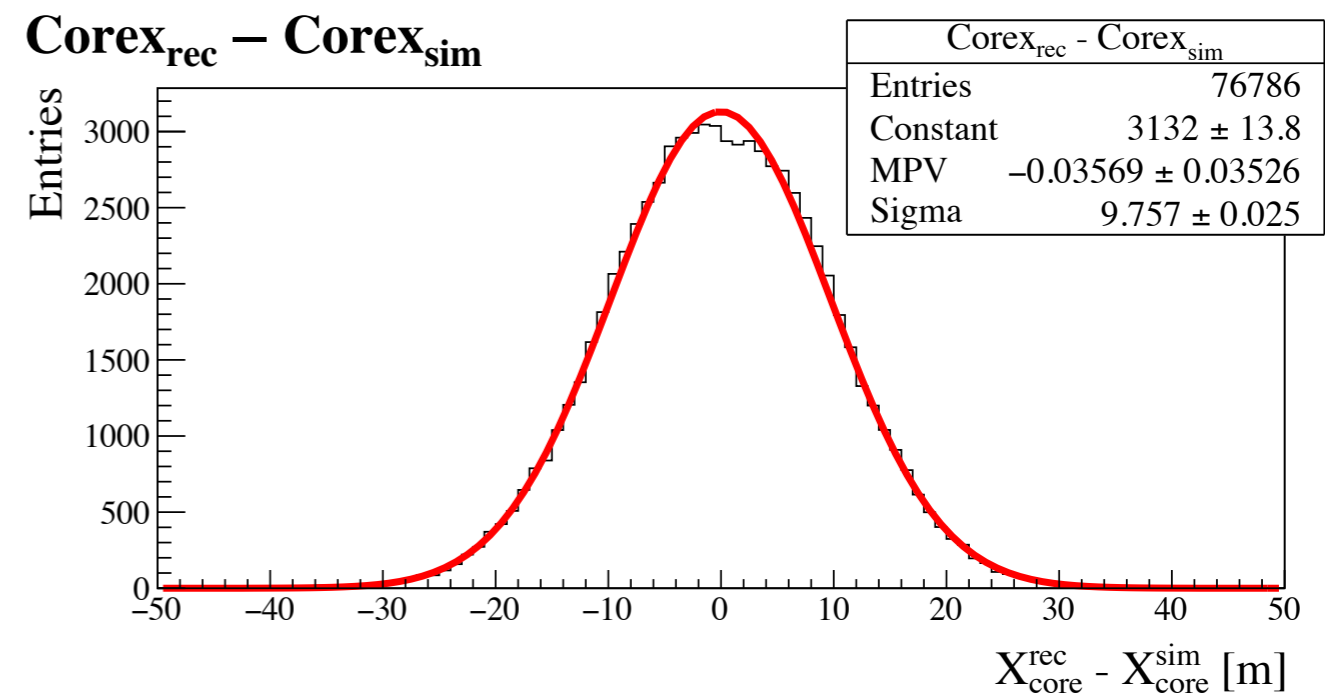
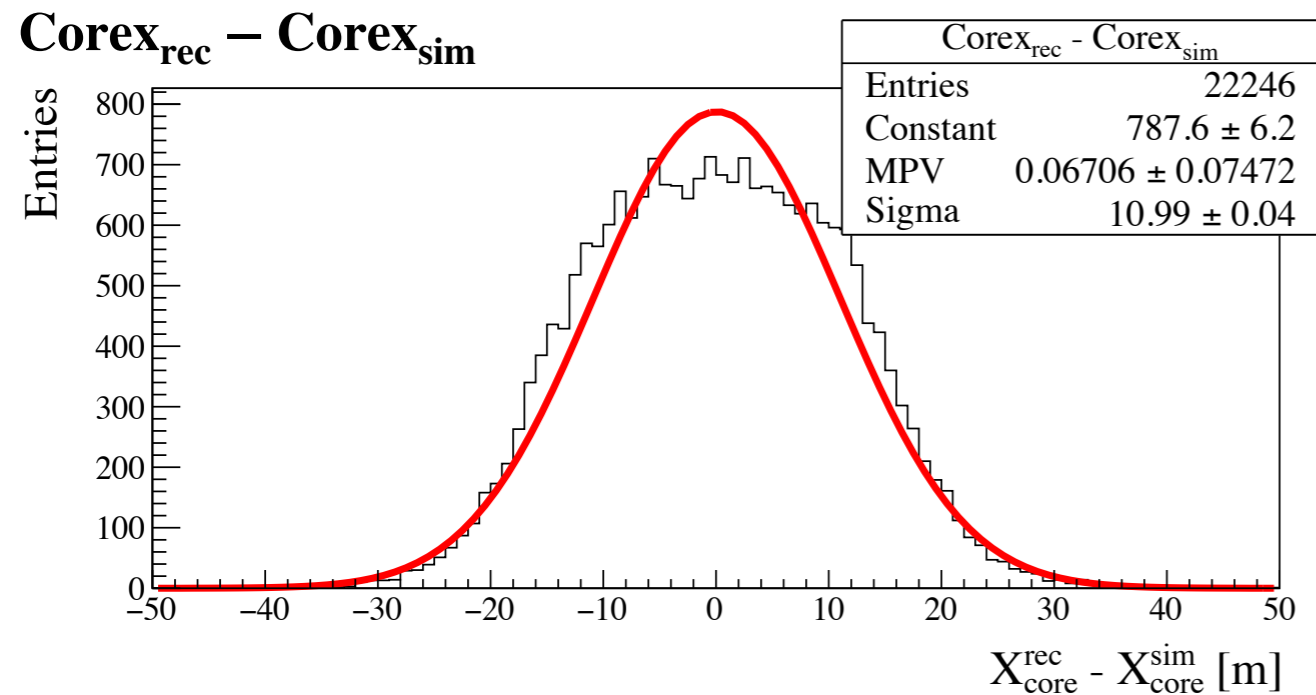
イベント選択条件

- ▶ **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 “ $\frac{l}{c} > t_{\text{hit}}^j - t_{\text{hit}}^i$ ”
 l : distance from SD_{hit}^i to SD_{hit}^j
(隣り合う検出器が $\sim 0.3\mu\text{s}$ 以内)
- ▶ **Boundary cut**
 - 信号が最大のSDが一番外側の検出器でない

決定精度 (コア位置)

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

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

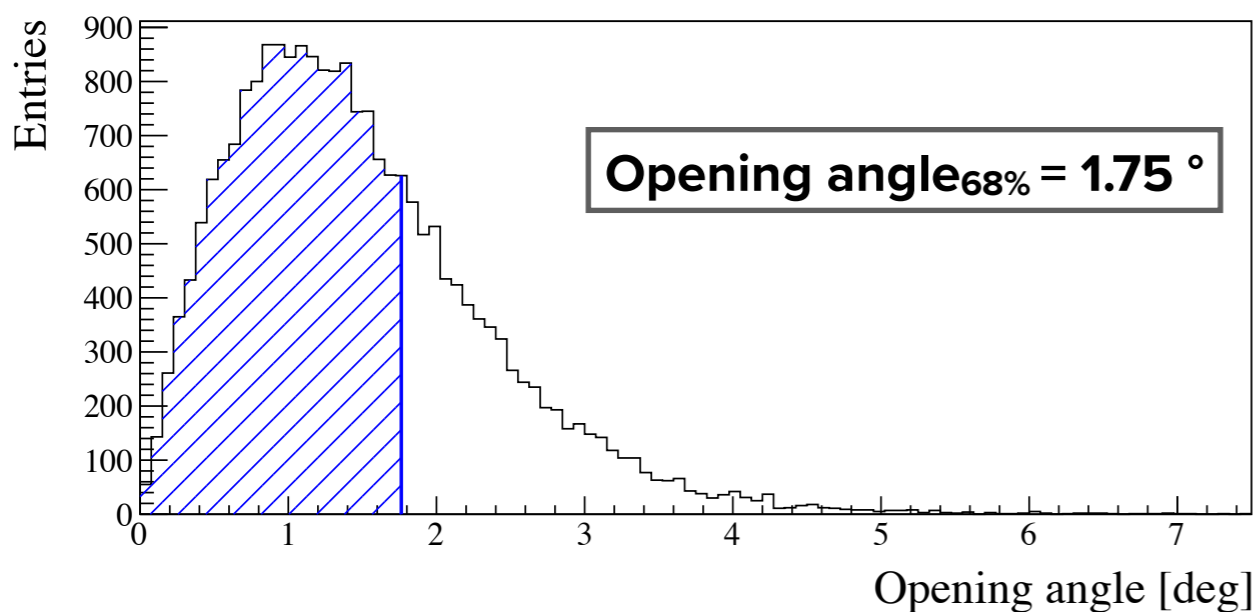


決定精度 (到来方向, エネルギー)

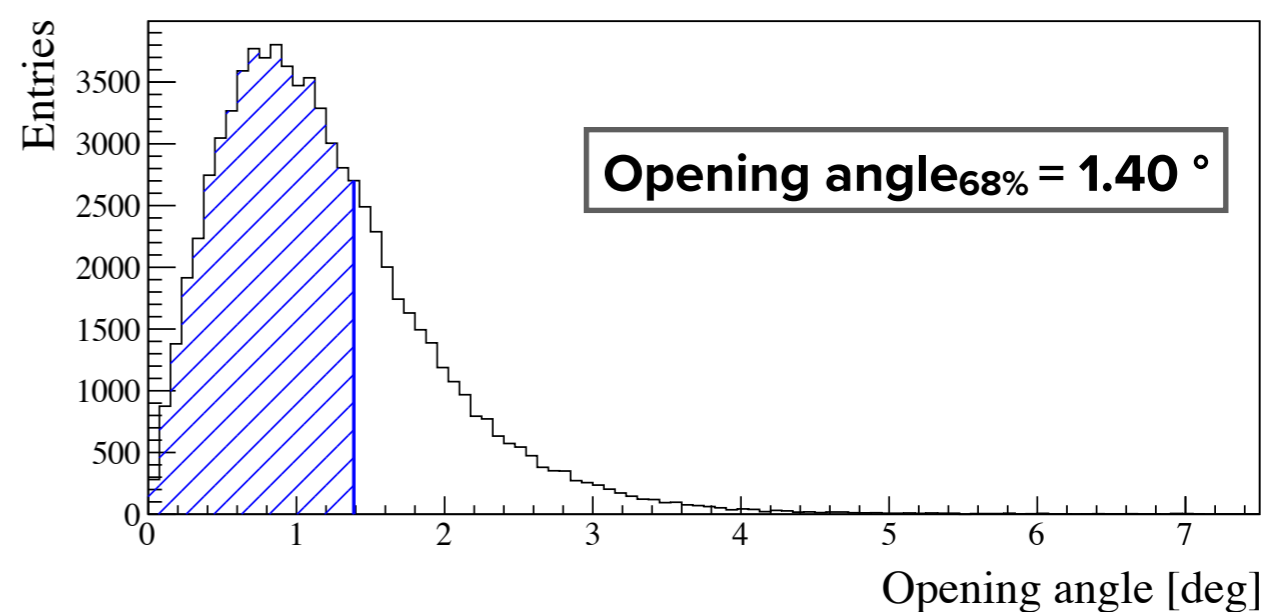
Energy : $10^{15.4}\text{eV}$

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

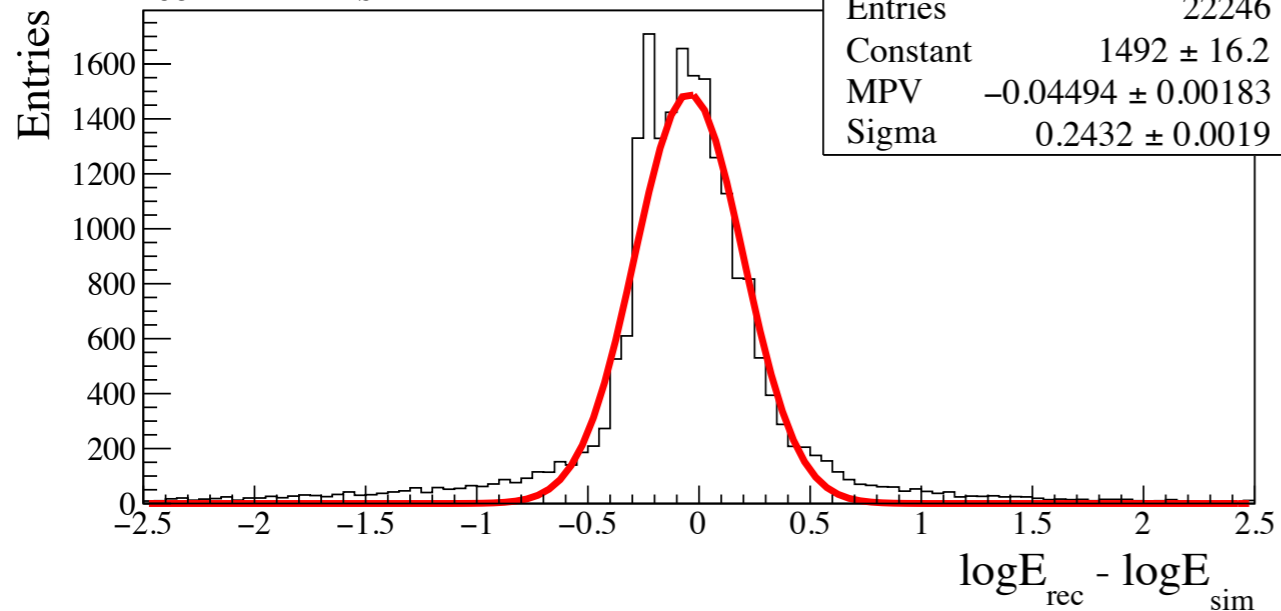
Opening angle $\delta = \cos^{-1}(\hat{n}_{\text{rec}} \cdot \hat{n}_{\text{sim}})$



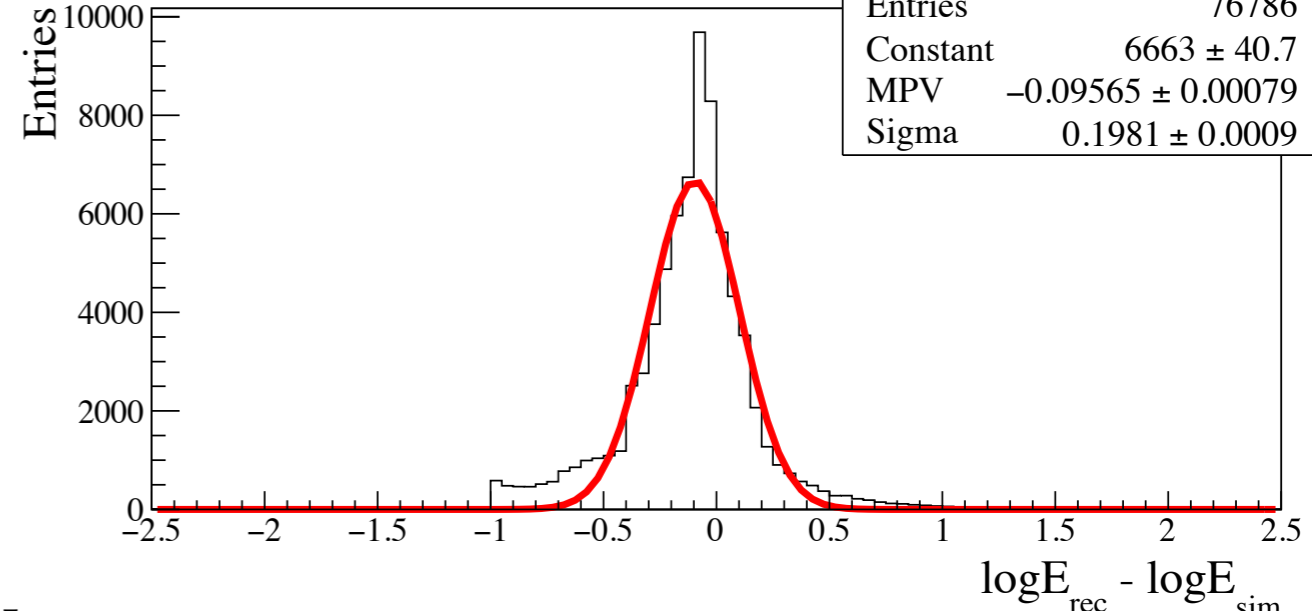
Opening angle $\delta = \cos^{-1}(\hat{n}_{\text{rec}} \cdot \hat{n}_{\text{sim}})$



$\log E_{\text{rec}} - \log E_{\text{sim}}$



$\log E_{\text{rec}} - \log E_{\text{sim}}$

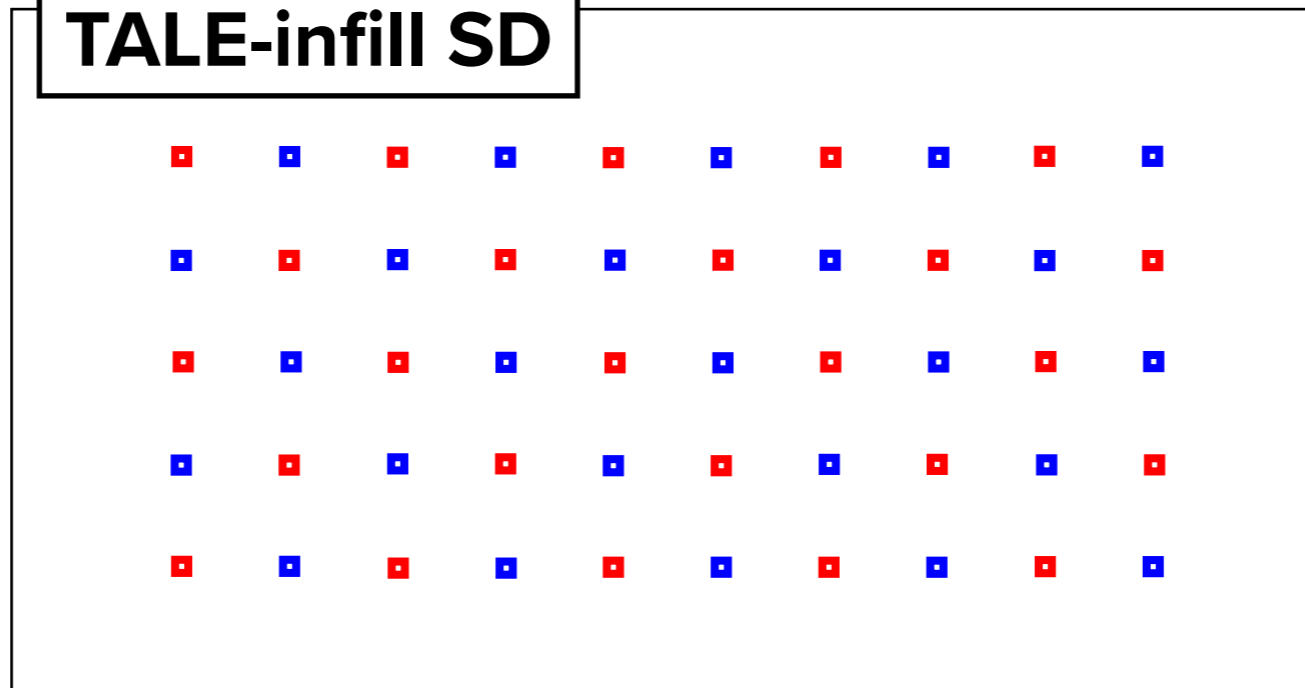


実データ解析

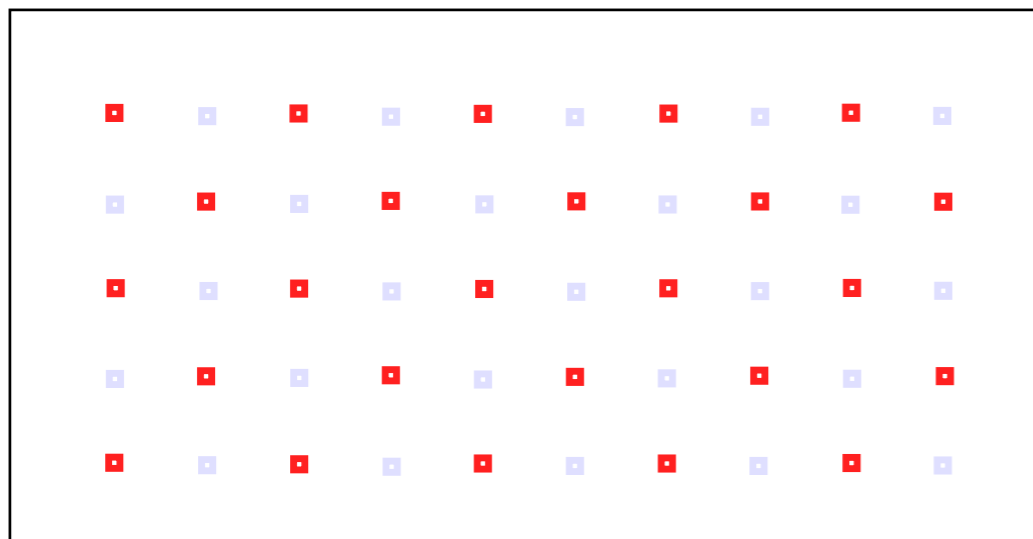
実データのみを使用して
角度決定精度を検証する

even-odd法

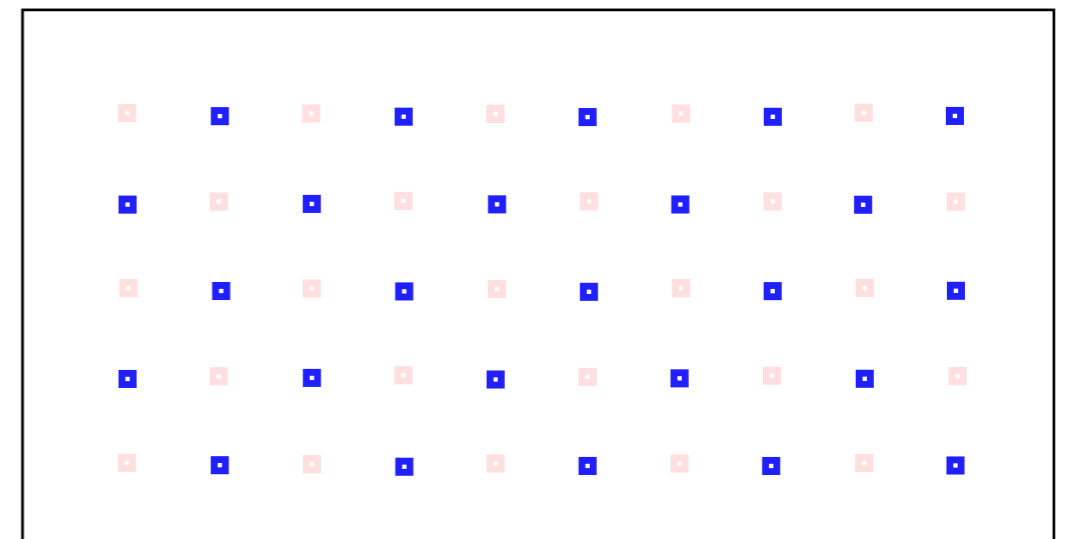
TALE-infill SD



odd



even



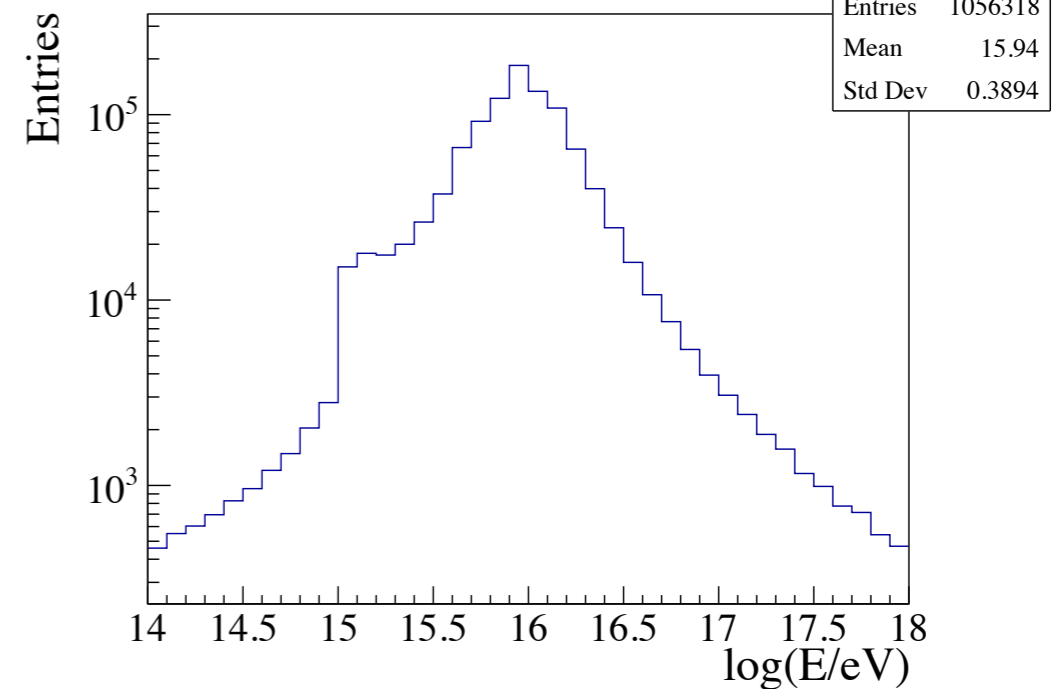
実データ解析

even-odd法

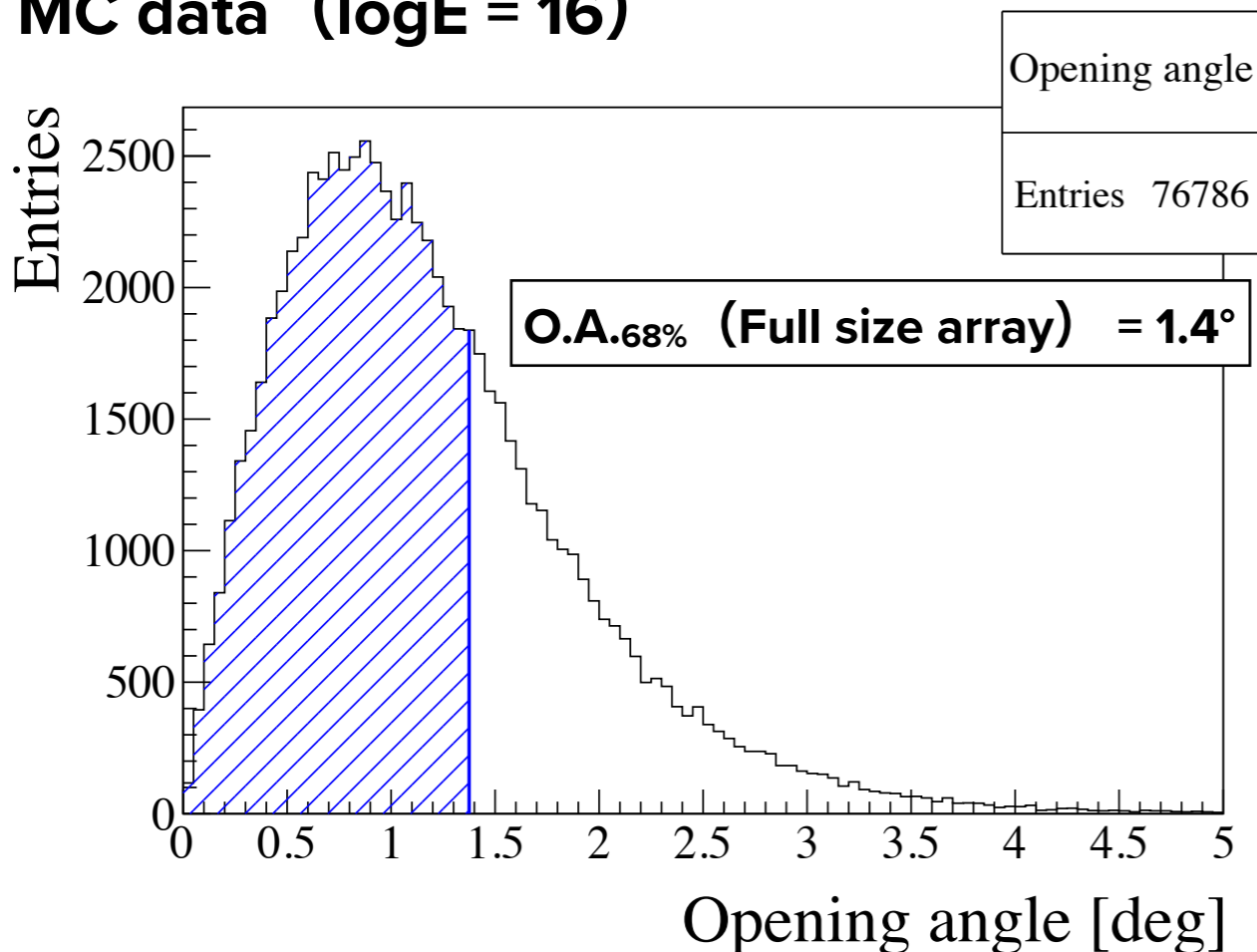
エネルギー分布は、おおよそ $E=10^{16}\text{eV}$ にピークを持つ。

→MC ($E=10^{16}\text{eV}$) の再構成結果と実データ (even-odd) を比較

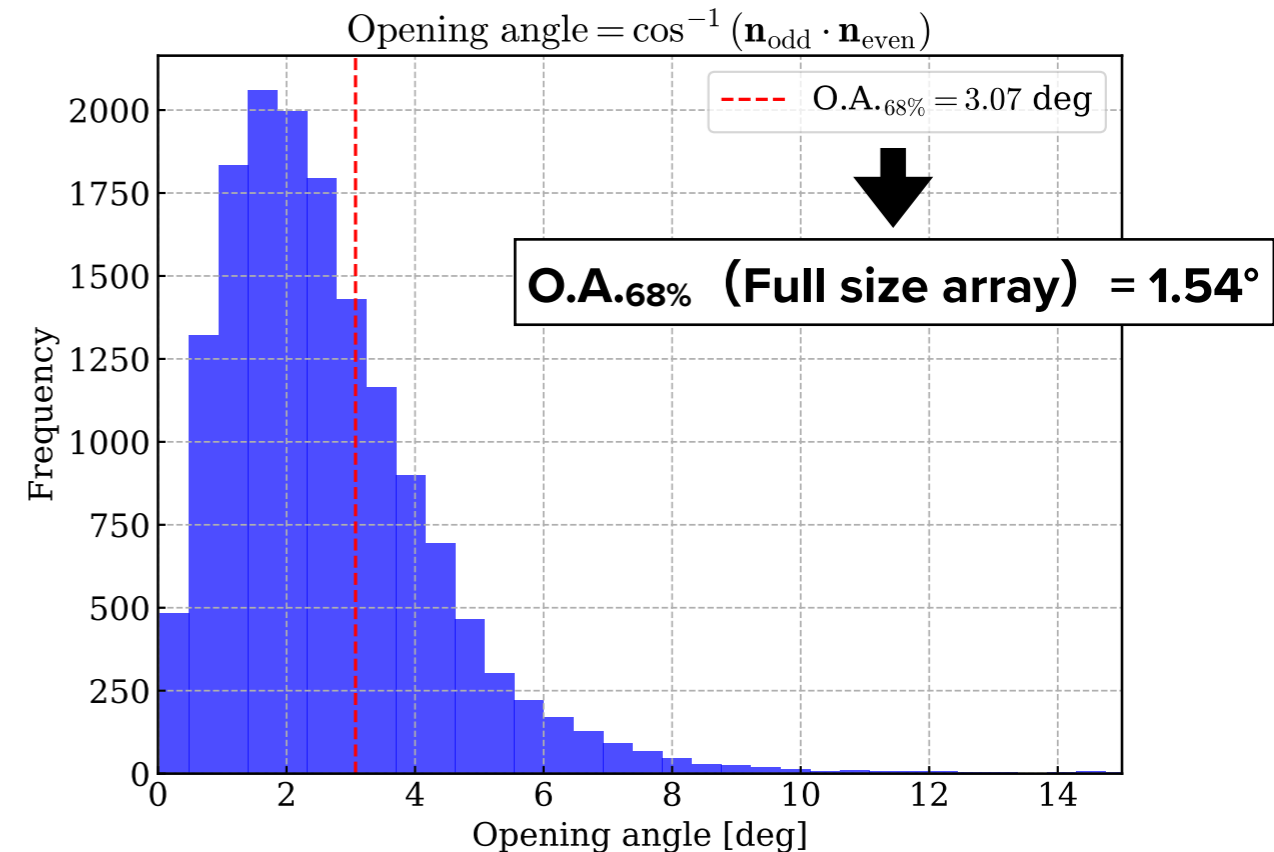
2023/10/24 - 2024/02/27



MC data (logE = 16)



Real data (2023/11/01 - 2023/11/30)



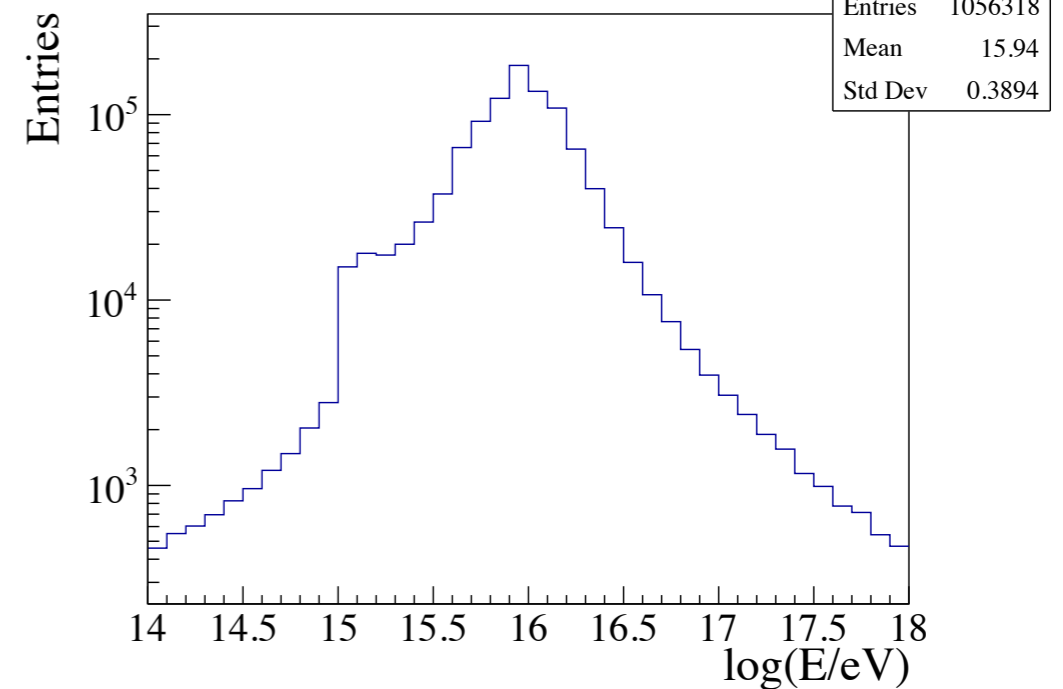
実データ解析

even-odd法

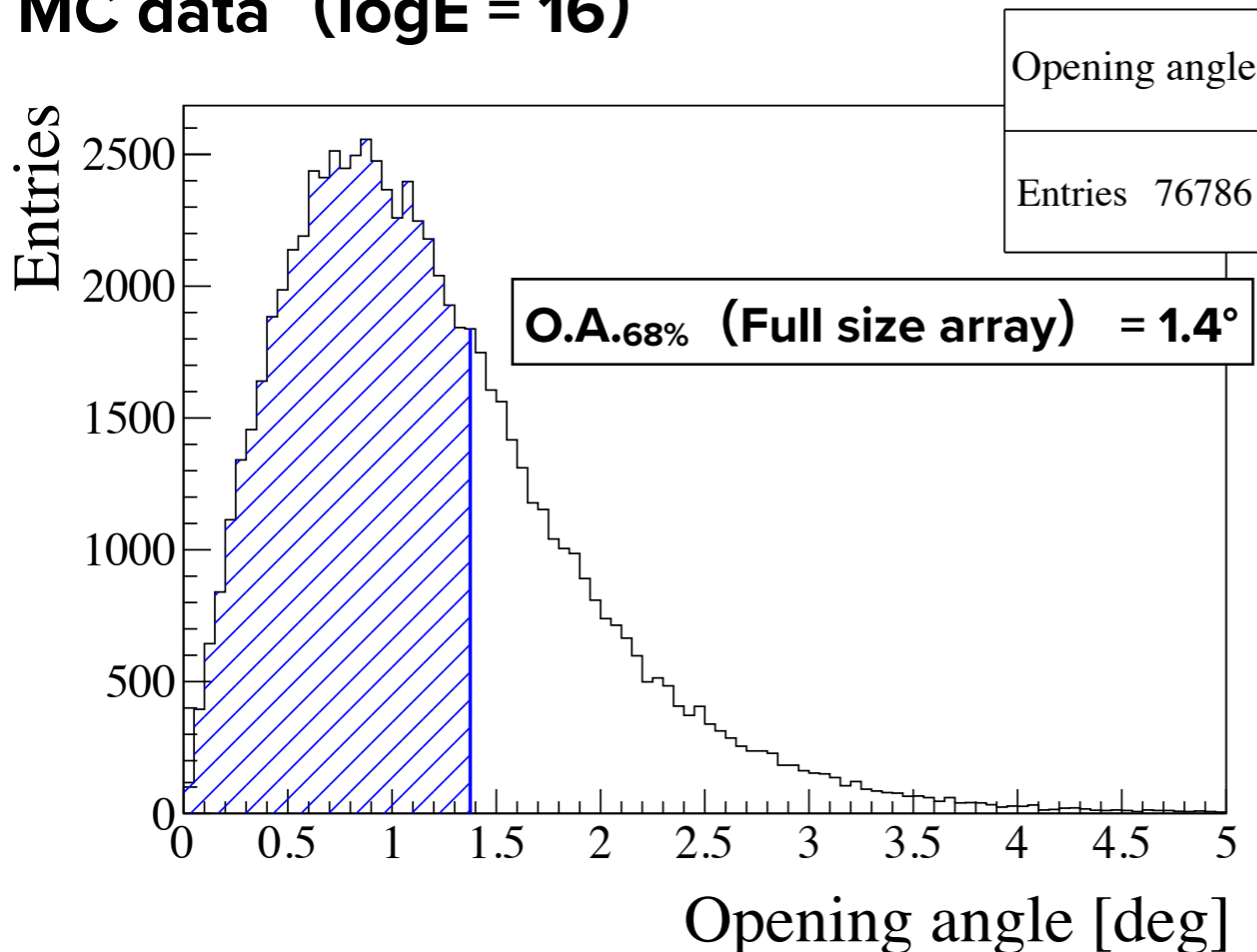
エネルギー分布は、おおよそ $E=10^{16}$ eVにピークを持つ。

→MC ($E=10^{16}$ eV) の再構成結果と実データ (even-odd) を比較

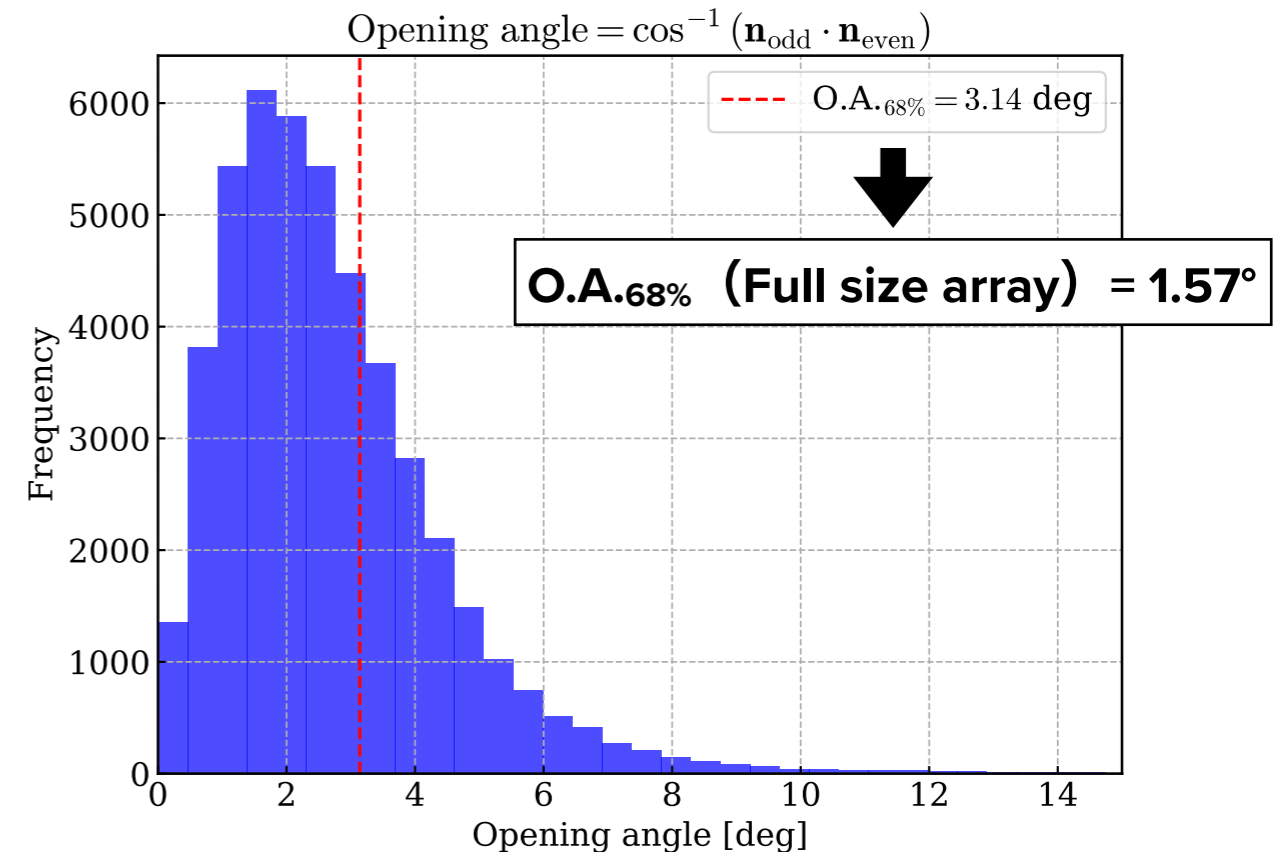
2023/10/24 - 2024/02/27



MC data (logE = 16)



Real data (2023/11/01 - 2024/01/31)



まとめと今後

▶ TALE-infill SDを用いた再構成

	Opening angle_{68%} [deg]	$\log E_{\text{rec}} - \log E_{\text{sim}}$
$10^{15.4\text{eV}}$	1.75	-0.05 ± 0.24
$10^{16\text{eV}}$	1.40	-0.10 ± 0.20

▶ TALE-infill SDによる解析

- even-odd法を用いて3ヶ月分のデータを解析
 - 角度決定精度の評価からデータとMCがおおよそ一致していることを確認



再構成プログラムの改善、データとMCの比較を行い、SDを用いた解析を進める。更に、TALE-FDと組み合わせたハイブリッド解析と併せて質量組成、エネルギースペクトル、異方性の精密測定。



BackUp

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

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

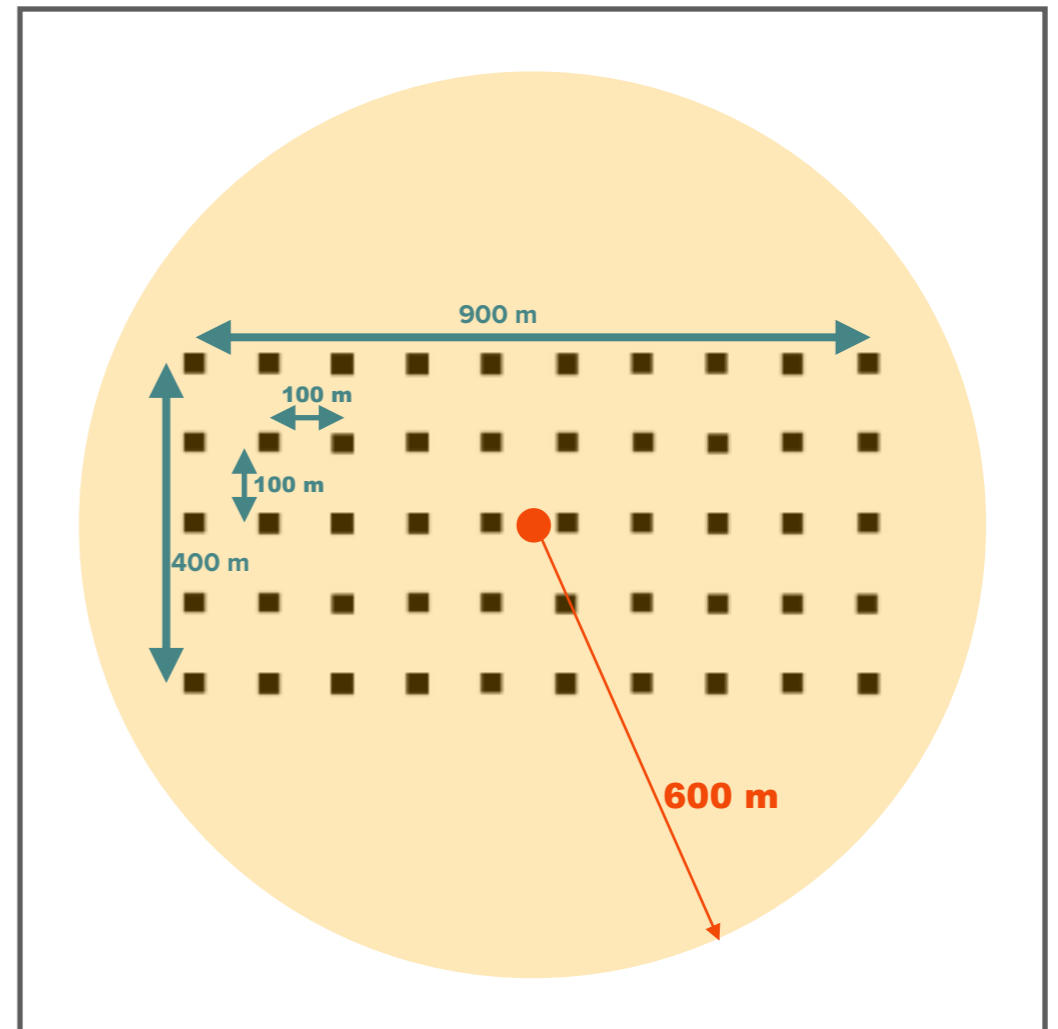
$$N : \text{scale factor}, \quad s : \text{shower age}, \quad R_M = \frac{9.3}{1.205 \times 10^{-1}} [\text{m}]$$

TALE-infill再構成の最適化

▶ S₆₀₀

コア位置から600 m 地点での粒子数密度
エネルギー推定に用いる

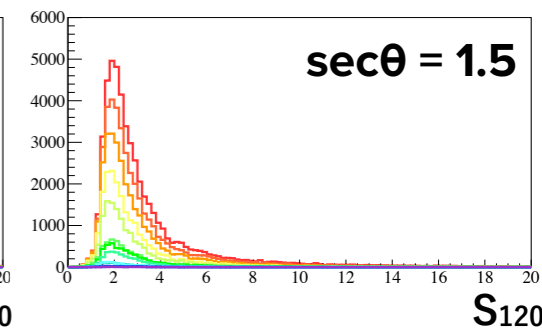
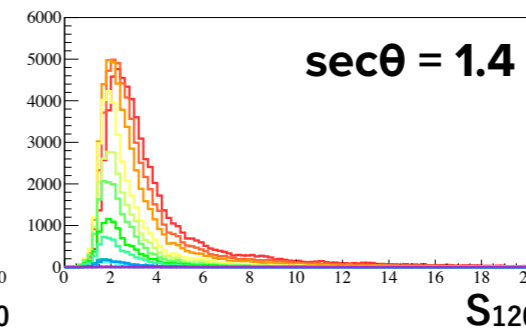
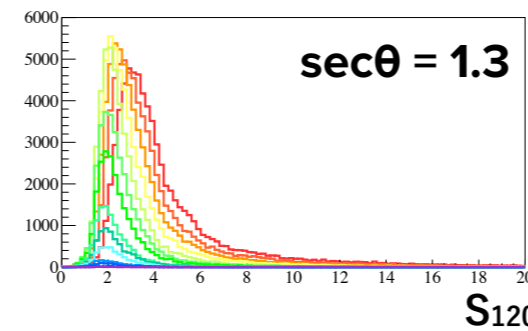
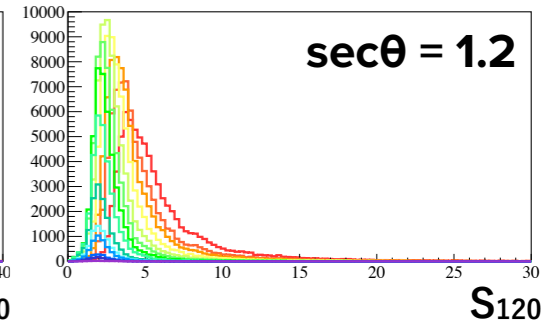
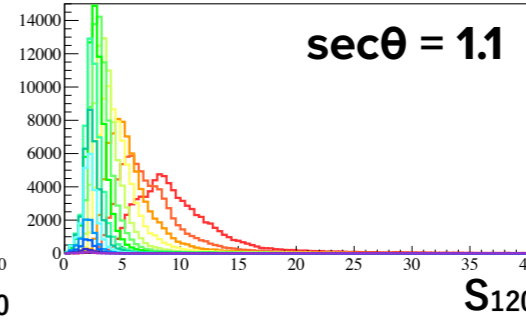
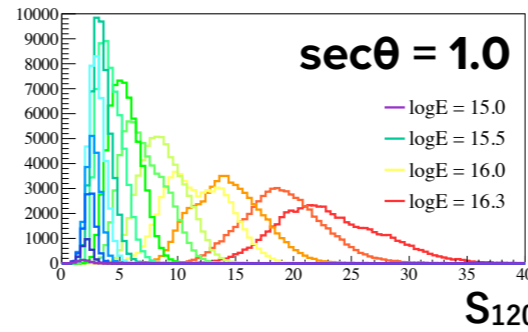
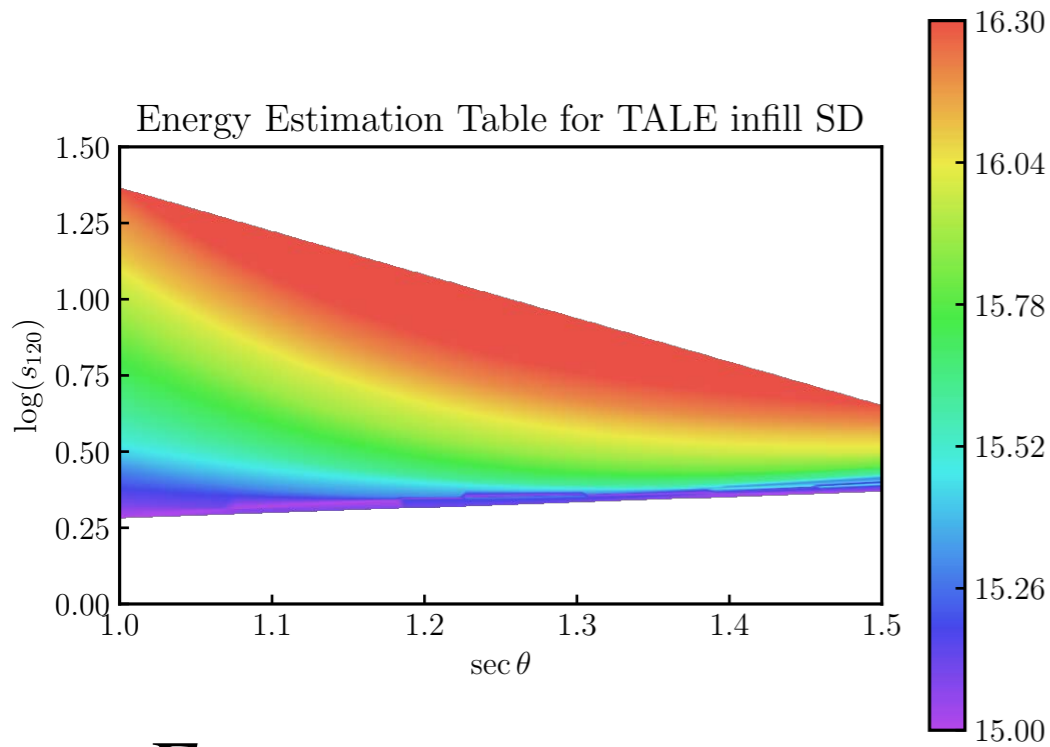
S₆₀₀では、InfillSDアレイの中心に
シャワーコアがあったとしても全ての
SDの外側での場所での粒子数密度
でエネルギーを推定することになる



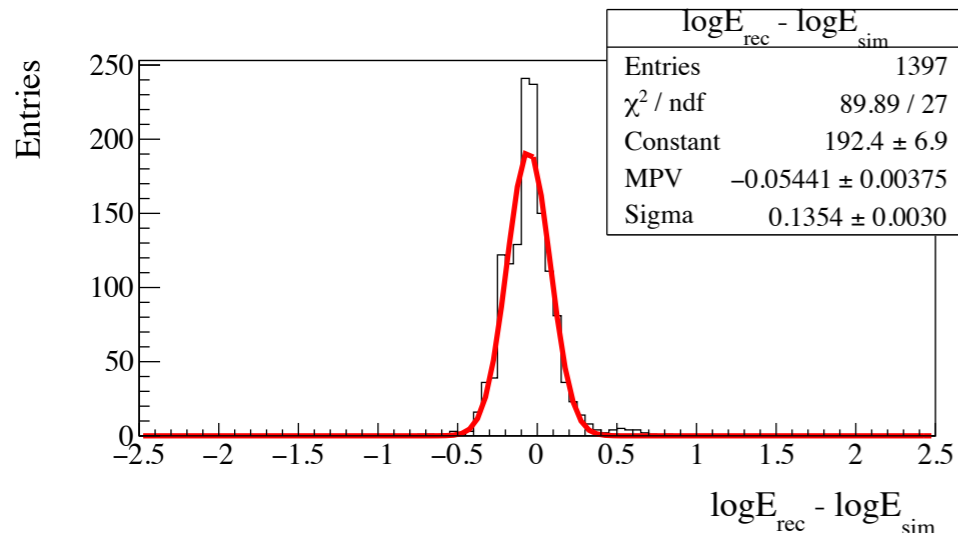
Infillアレイの大きさに適している
かつ
エネルギー分解能が高い
ような距離を探す

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



$\log E = [15.0 - 16.3, 0.1 \text{ step}]$



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 ($\log E = [15.0 - 16.3, 0.1 \text{ 間隔}]$) を作成し、エネルギー分解能を比較する

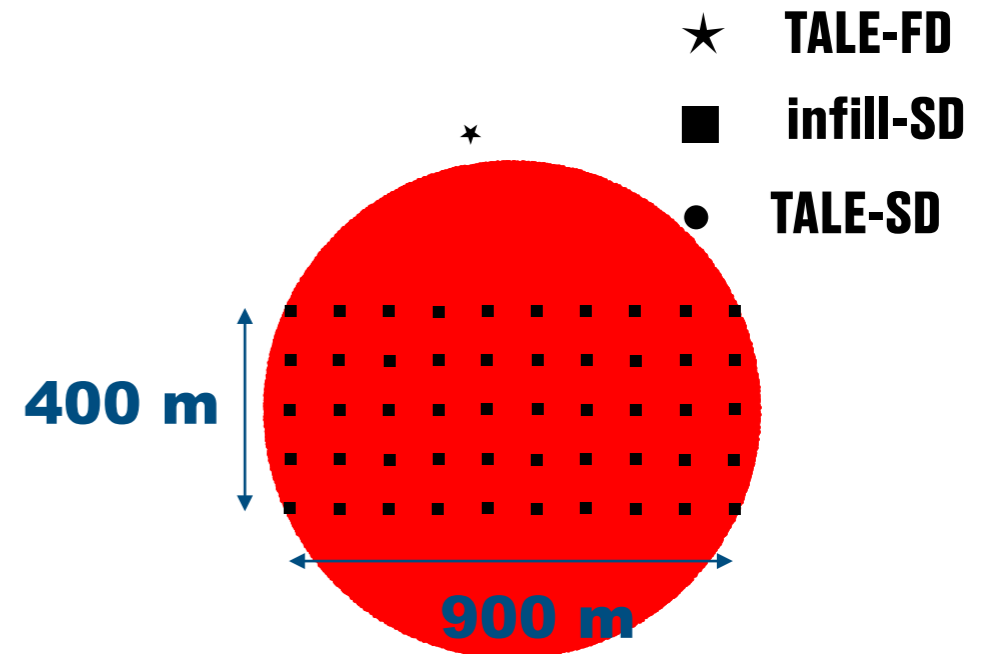
- 以下のシミュレーションデータを用いてエネルギー推定テーブルを作成

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

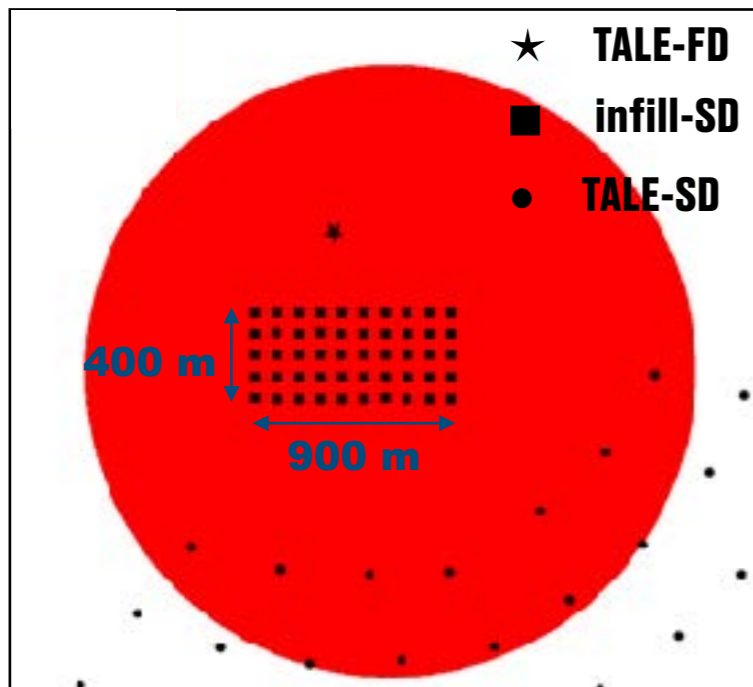


- 以下のシミュレーションデータを用いてエネルギー分解能を求める

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
- ▶ $E = [10^{15.4}\text{eV}, 10^{16}\text{eV}]$
- ▶ $[\theta, \phi] = [[0^\circ - 45^\circ], [0^\circ - 360^\circ]]$
- ▶ 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

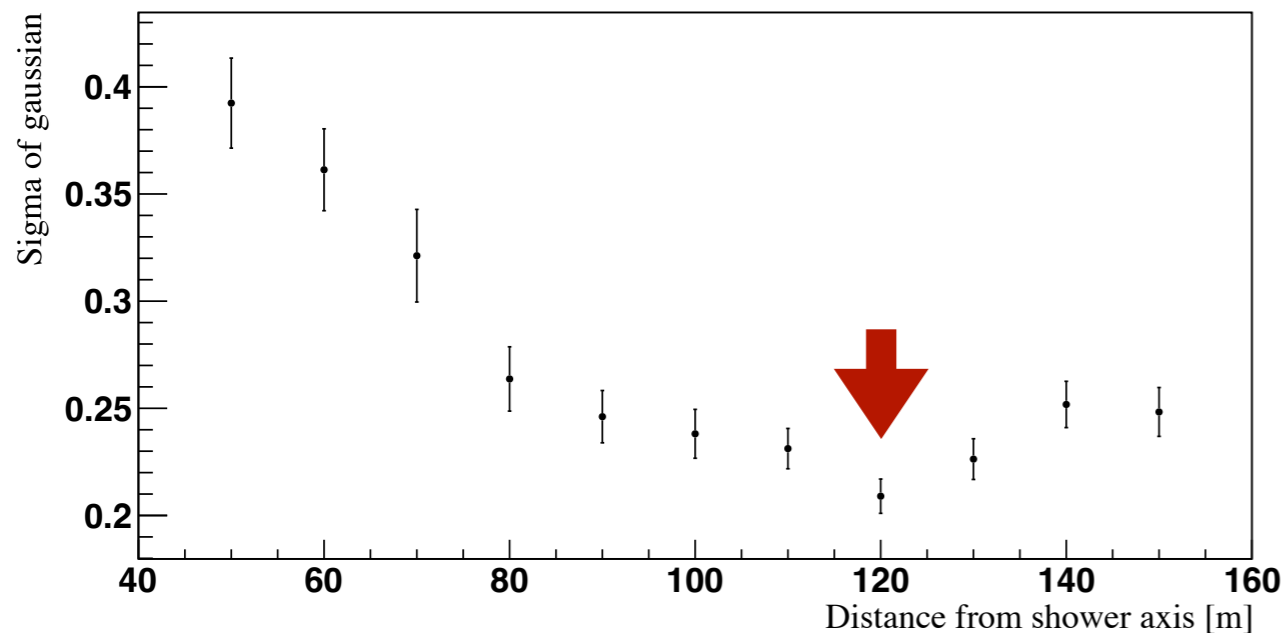
- ▶ **Space cluster**
 - 信号が最大のSDを含む隣接する5台以上のSDが信号を記録
- ▶ **Space time cluster**
 - 4台以上のSDが以下の条件を満たす “ $\frac{l}{c} > t_{\text{hit}}^j - t_{\text{hit}}^i$ ”
 l : distance from SD_{hit}^i to SD_{hit}^j
- ▶ **Boundary cut**
 - 信号が最大のSDが一番外側の検出器でない
- ▶ **Zenith cut**
 - $0^\circ \leq \theta \leq 30^\circ$

TALE-infill再構成の最適化

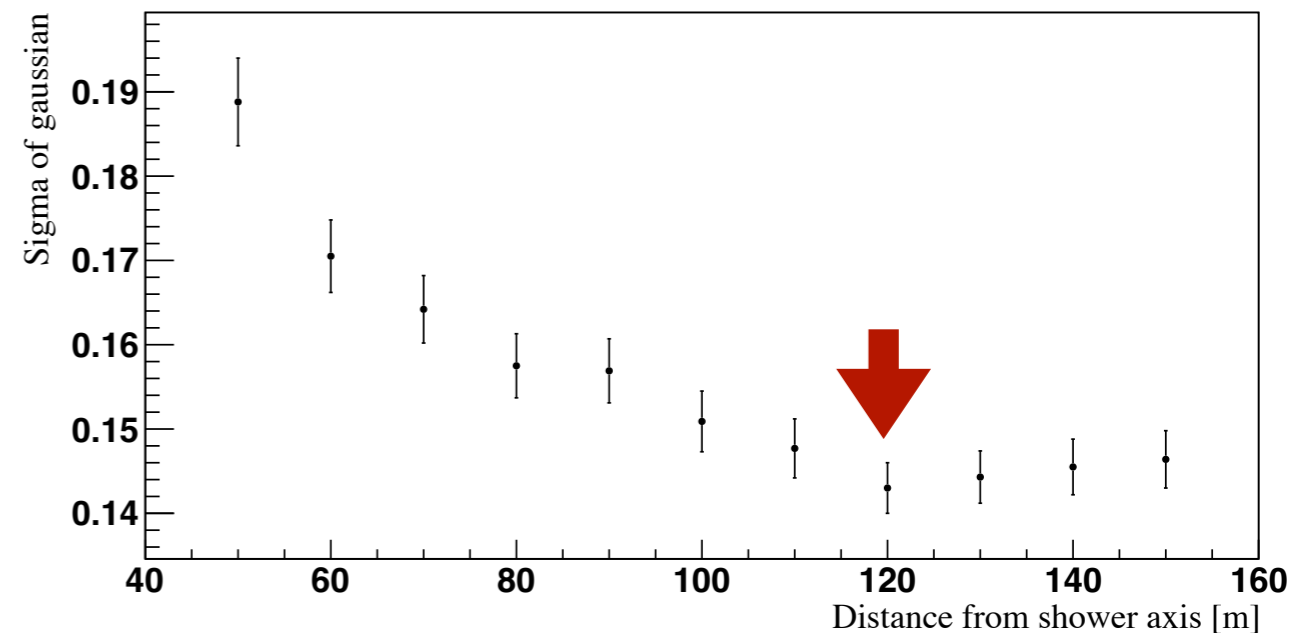
Energy : $10^{15.4}\text{eV}$

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

Energy resolution



Energy resolution

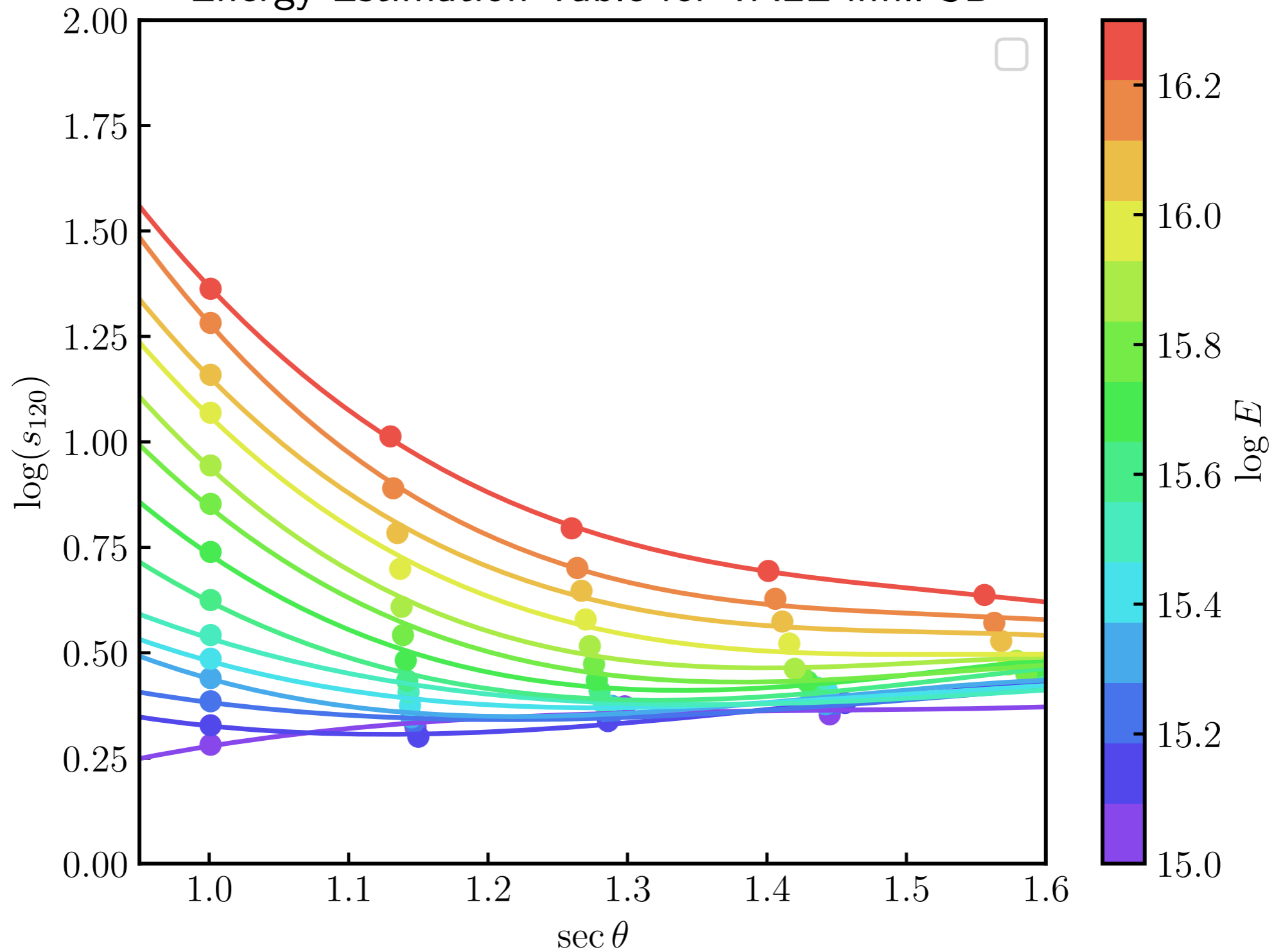


120 m でのエネルギー決定精度が最も良い

S₁₂₀ でエネルギー推定を行う

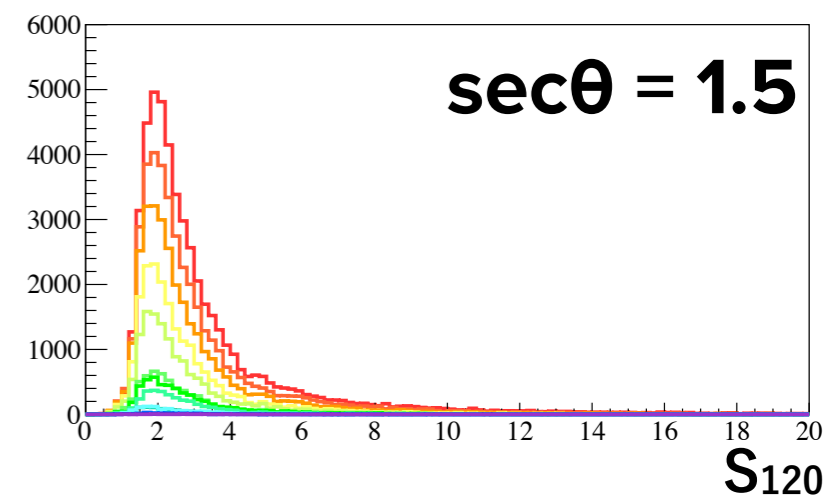
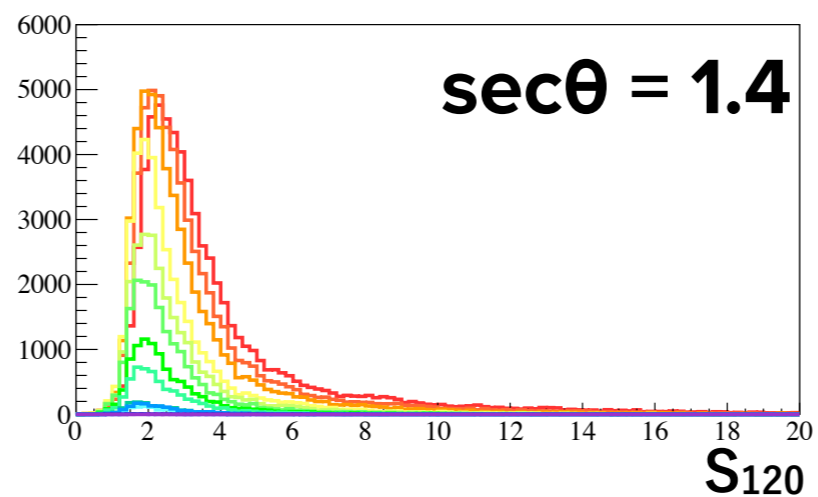
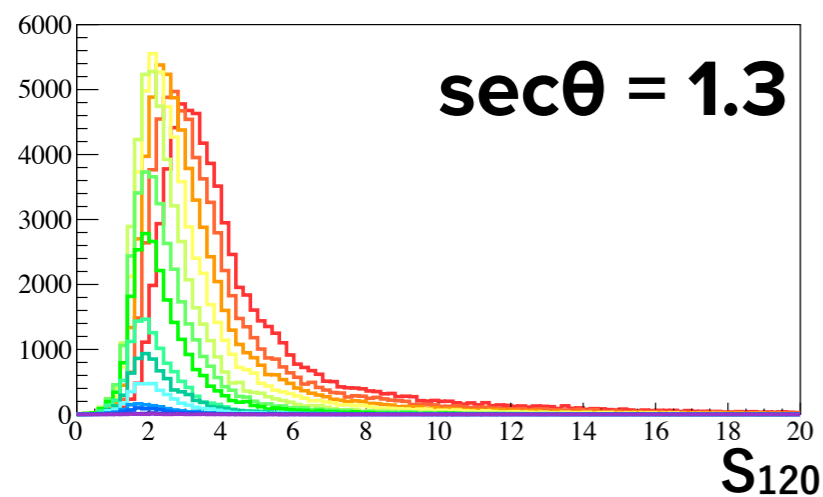
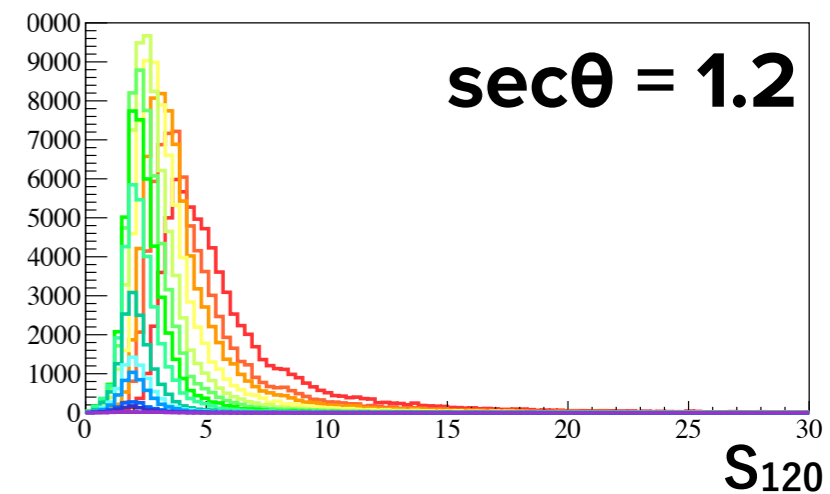
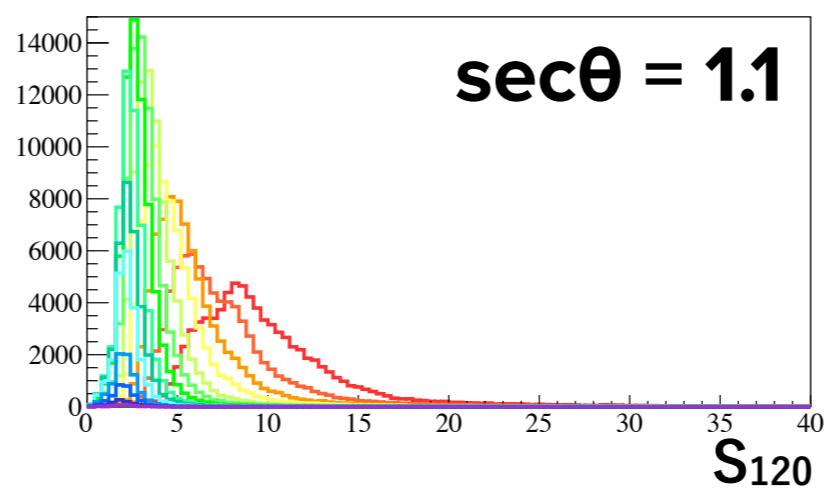
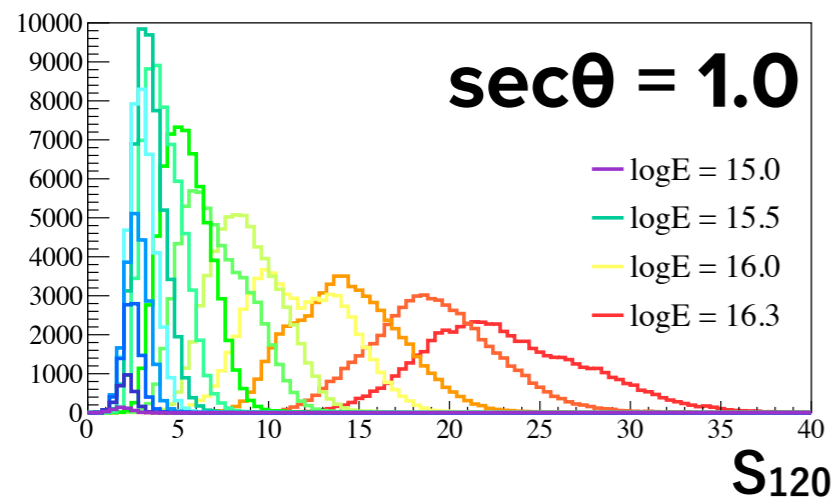
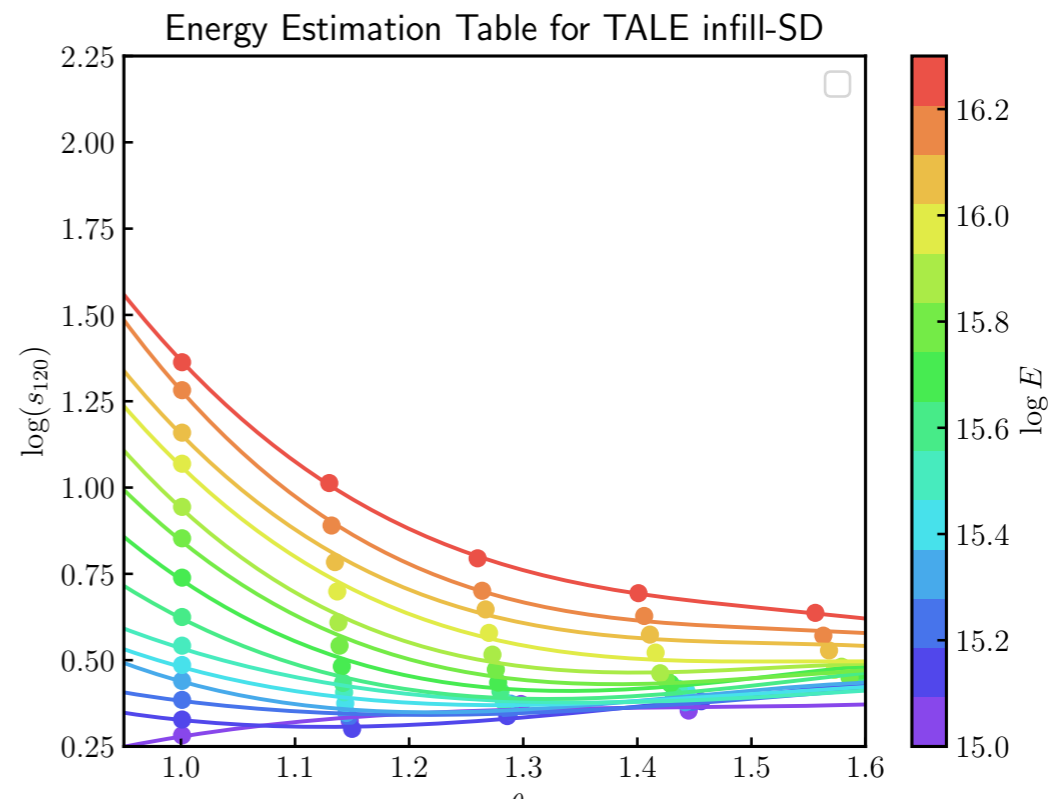
エネルギー推定テーブル

Energy Estimation Table for TALE infill-SD



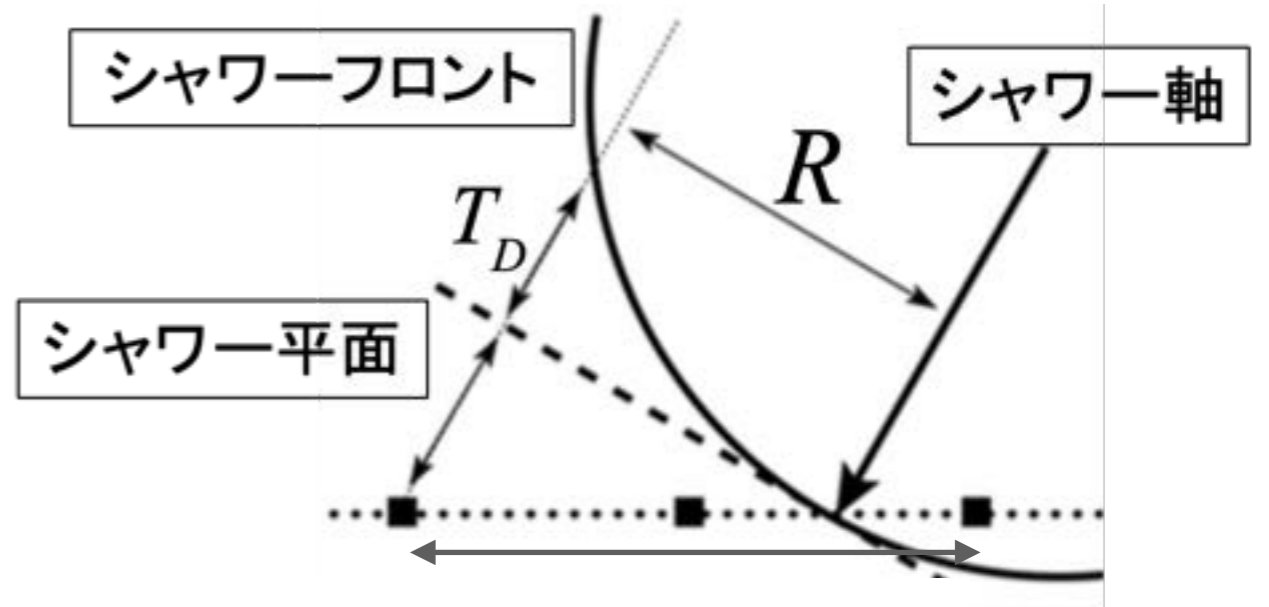
S₁₂₀

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

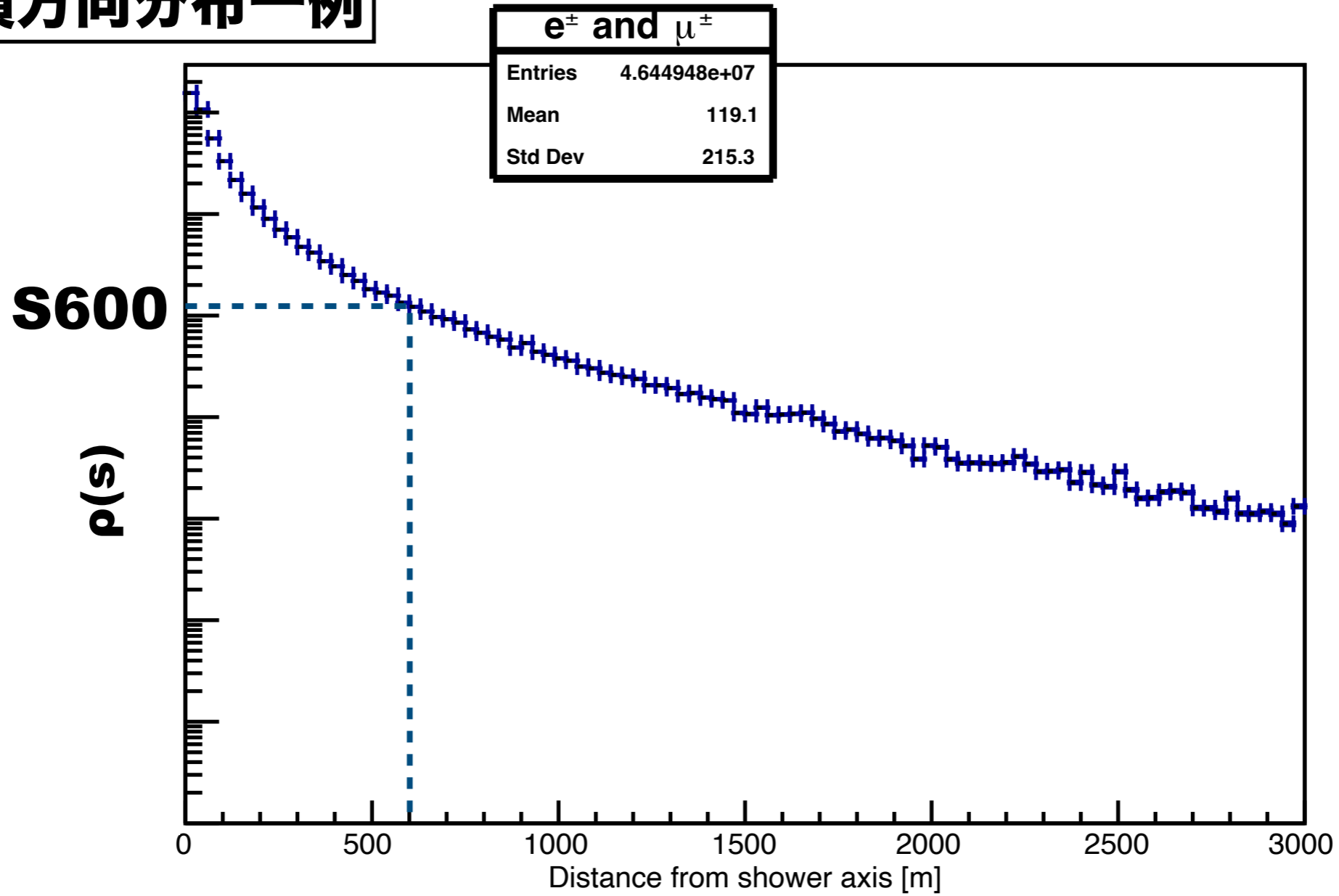


S600

$\theta = \text{constant}$
 E は $\rho(s)$ に依存
 $E = \text{constant}$
 θ が増加 \rightarrow $\rho(s)$ は減衰



横方向分布一例



フィット関数(TALE)

▶ Time delay from shower plane

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

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

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

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

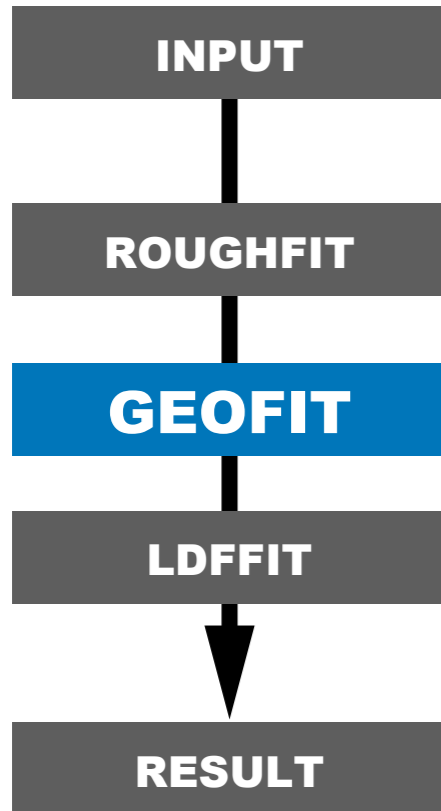
▶ Lateral distribution function

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

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

TALE-infill再構成の最適化

Geometry fit



Determine the arrival direction
from fitted shower surface

- ▶ Introduce additional core constraints

$$\chi_G^2 = \sum_{i=0}^N \frac{(t_i - t_i^{\text{FIT}})^2}{\sigma_{t_i}^2} + \frac{(R - R_{\text{COG}})^2}{\sigma_{R_{\text{COG}}}^2}$$

- $\sigma_{R_{\text{COG}}}^2 = 800$, temporarily

91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10

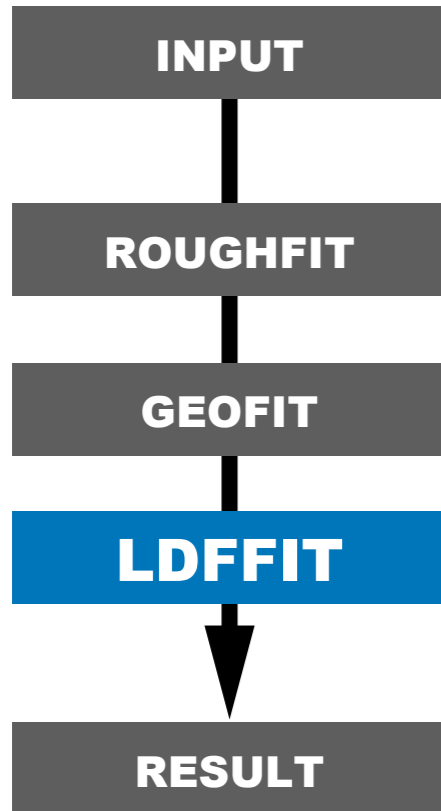
Calculate χ_G^2 from Grid No.1 to Grid No.100



Select θ and ϕ with smallest χ_G^2

TALE-infill再構成の最適化

LDF fit



~~Determine the core position and estimate the energy based on the lateral distribution~~

- ▶ Fix the core position from Rough fit
- ▶ Change the fitting function to the NKG function

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

- **N** : scale factor
- $\eta(\theta) = 3.972 - 1.79(\sec\theta - 1)$



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

- **s** : shower age
- **R_M** : Moliere radius (= 9.3 / 0.1205 [m])

MC Simulation

logE = 15.4

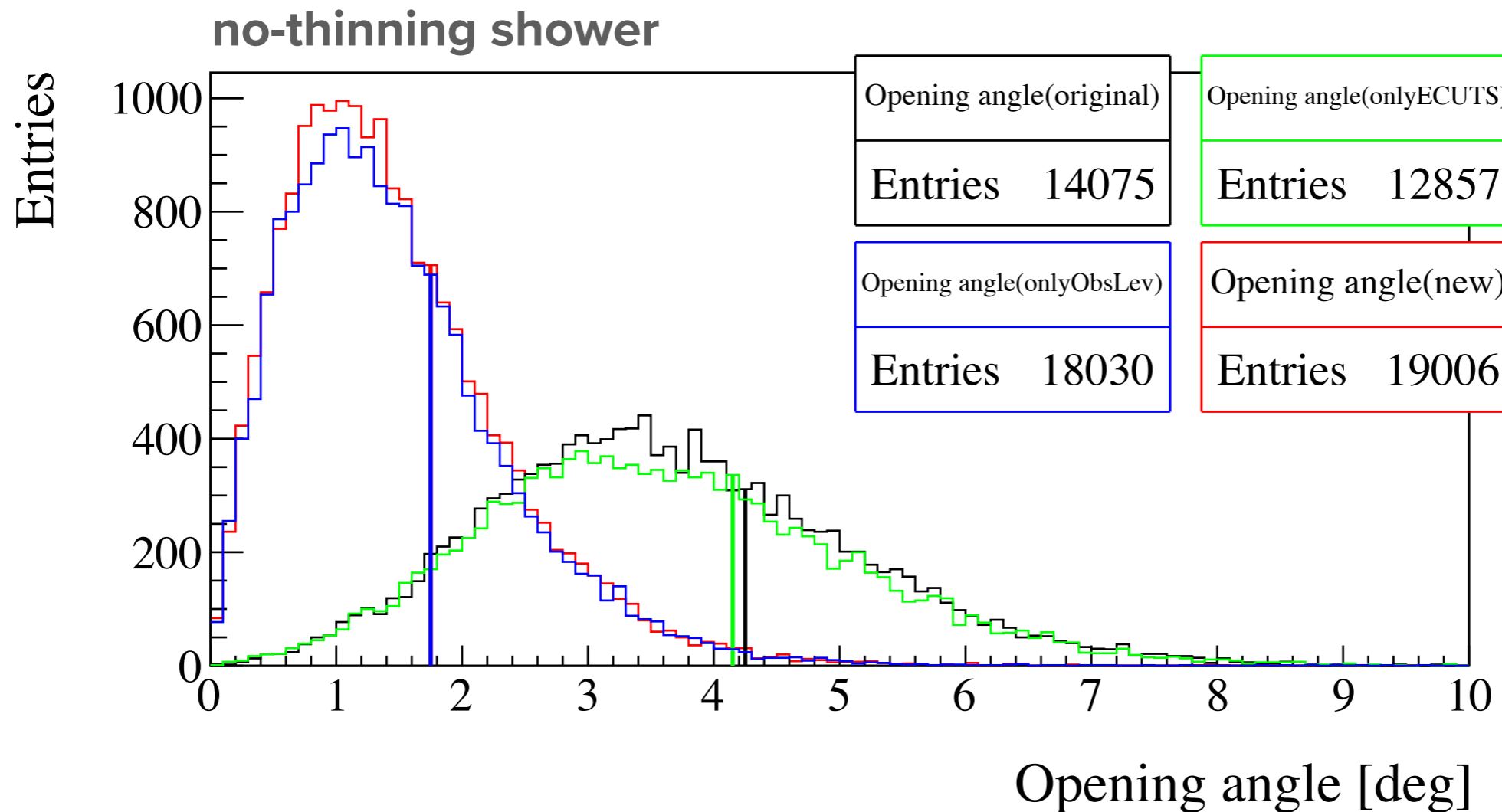
MCのObsLvを変更した場合、角度決定精度の値が大きく変化する

Opening Angle_{68%} = 4.2°

Opening Angle_{68%} = 4.2

Opening Angle_{68%} = 1.7°

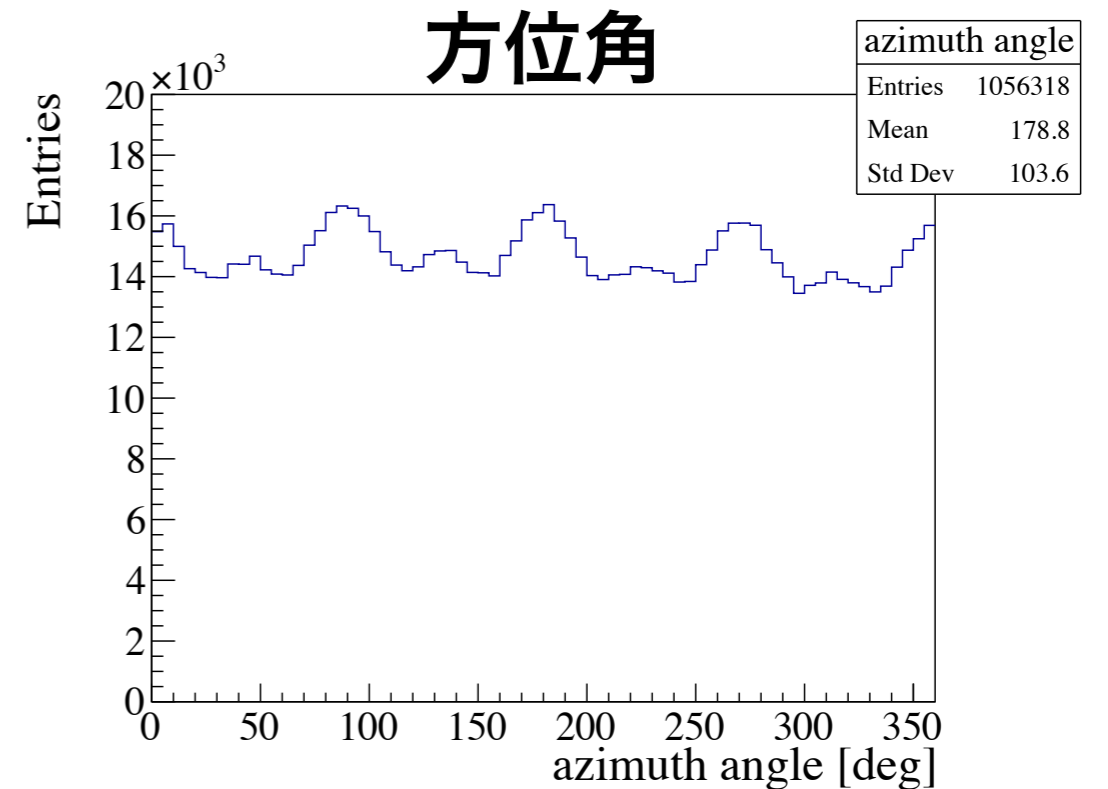
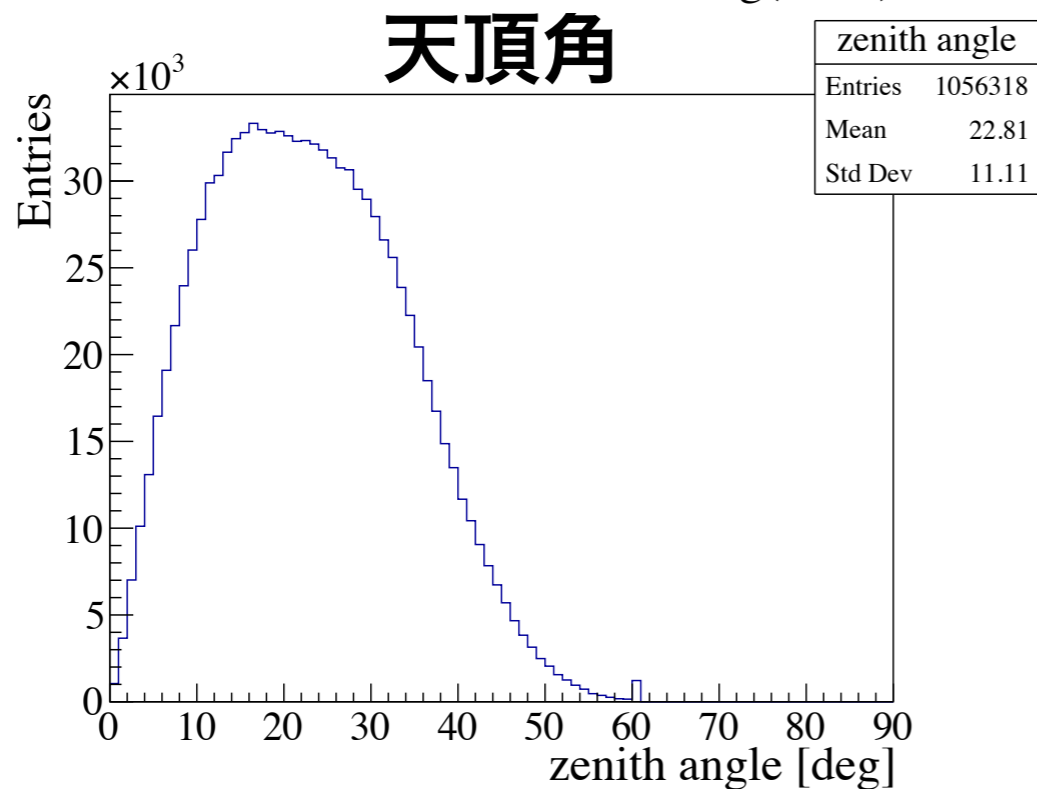
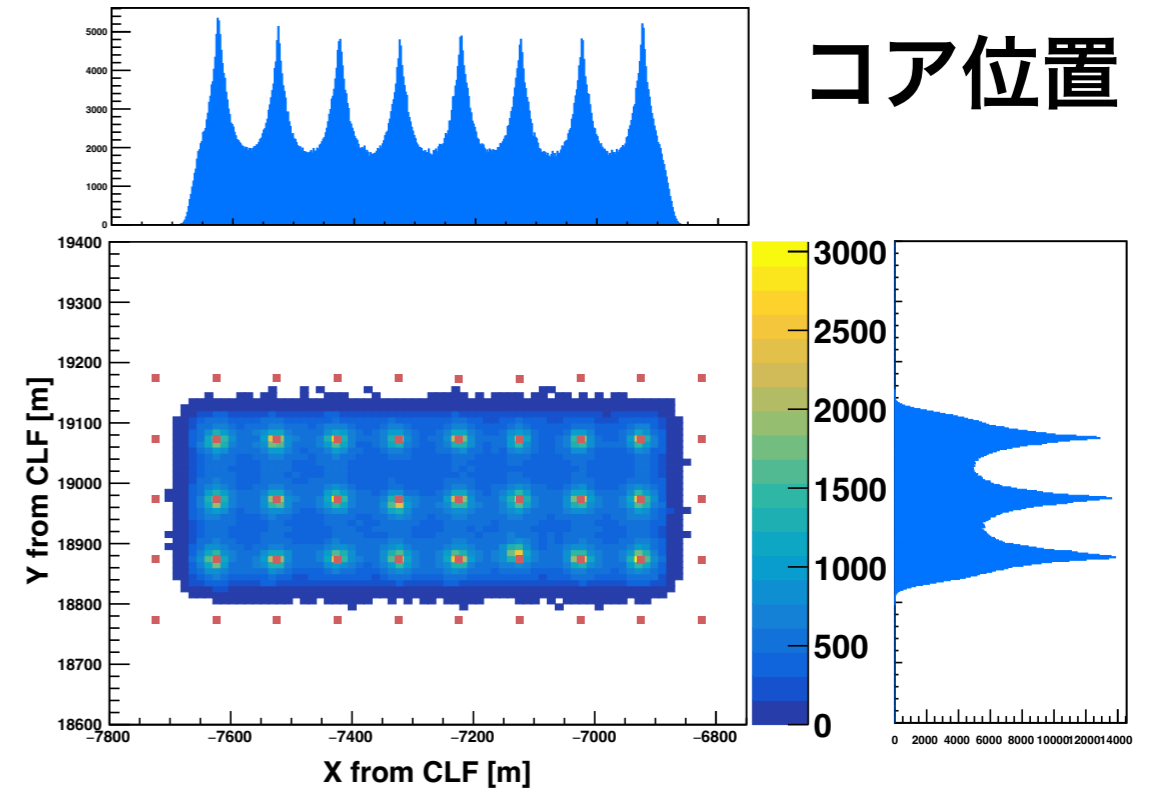
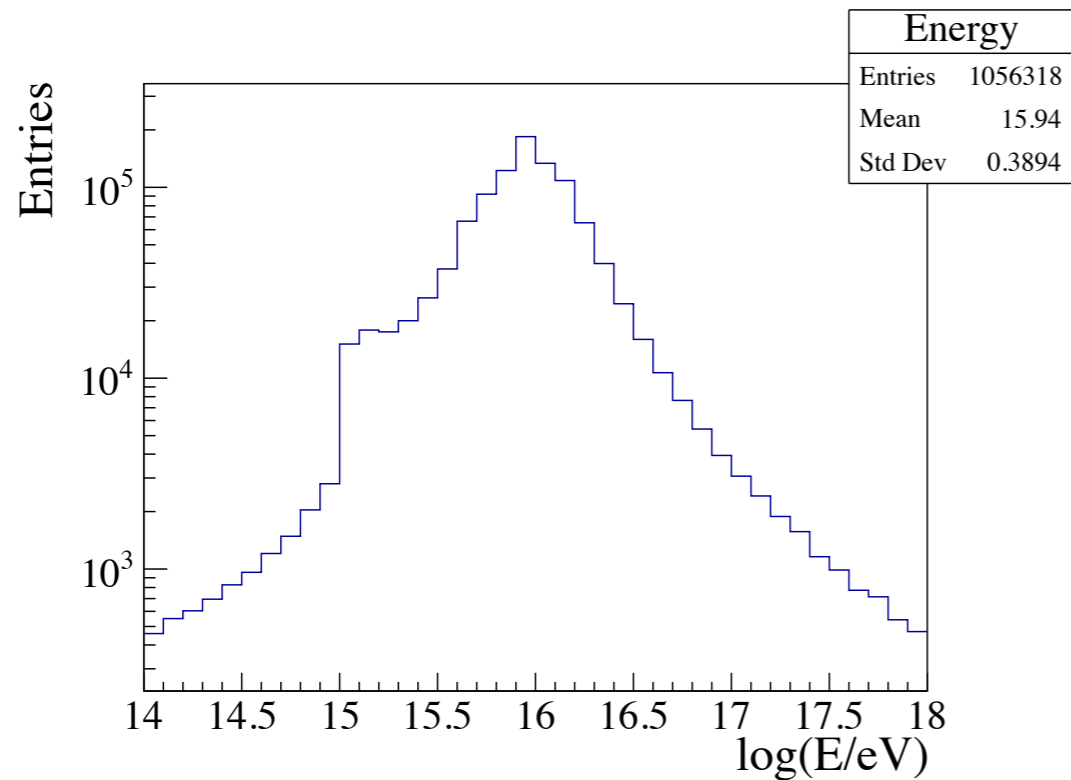
Opening Angle_{68%} = 1.7°



4か月間の実データ解析

2023/10/24 - 2024/02/27 (127days)

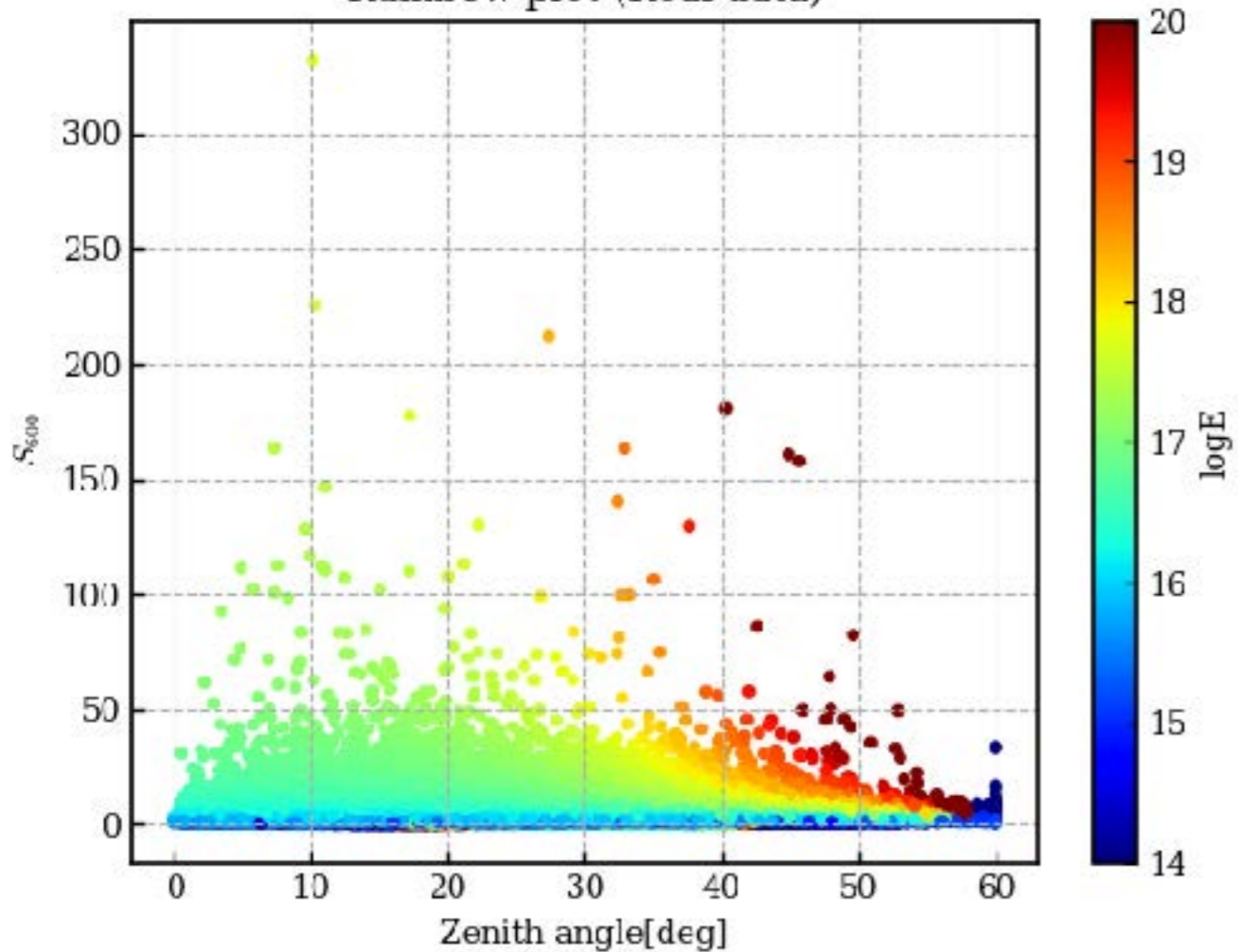
1,056,318 events



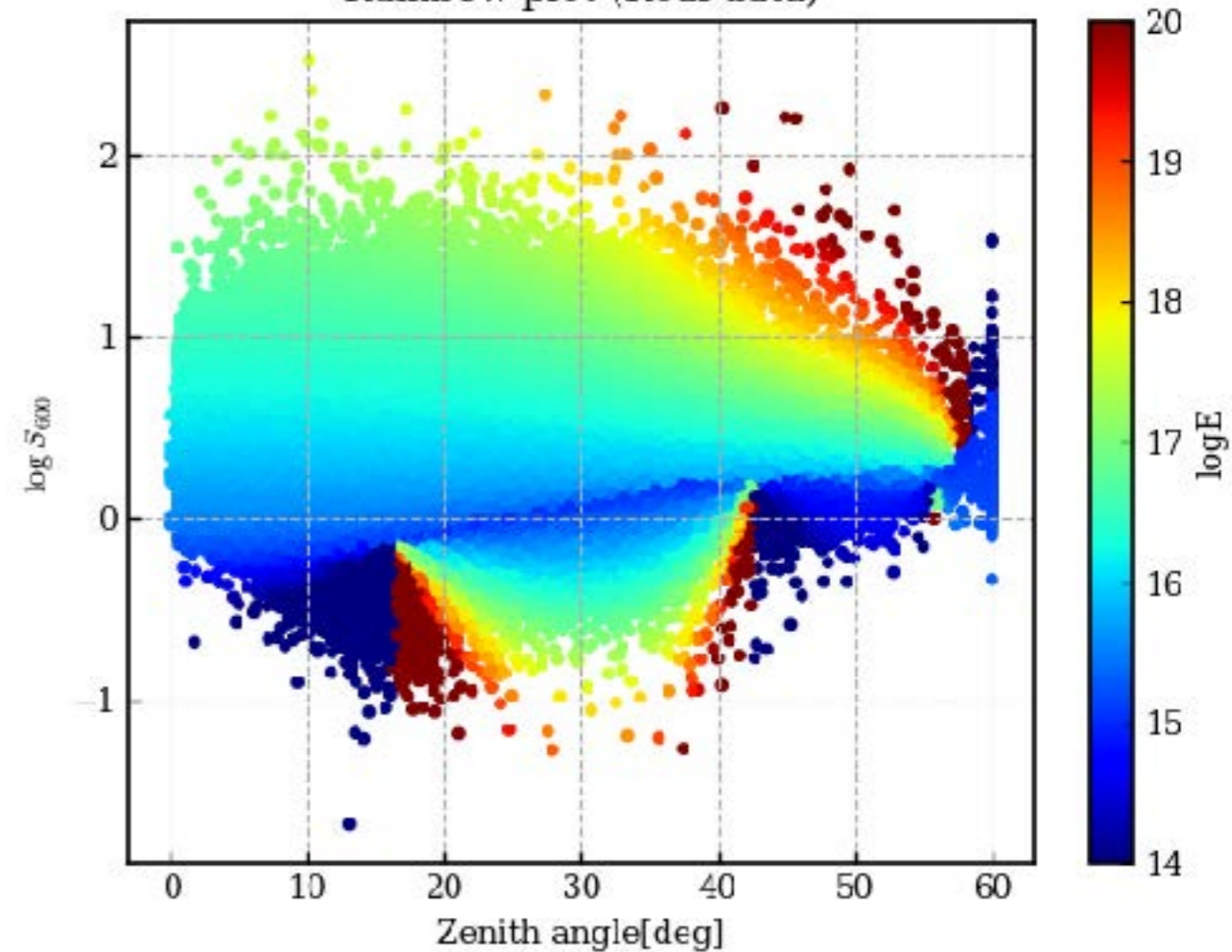
4か月間の実データ解析

2023/10/24 - 2024/02/27 (127days)

Rainbow plot (Real data)



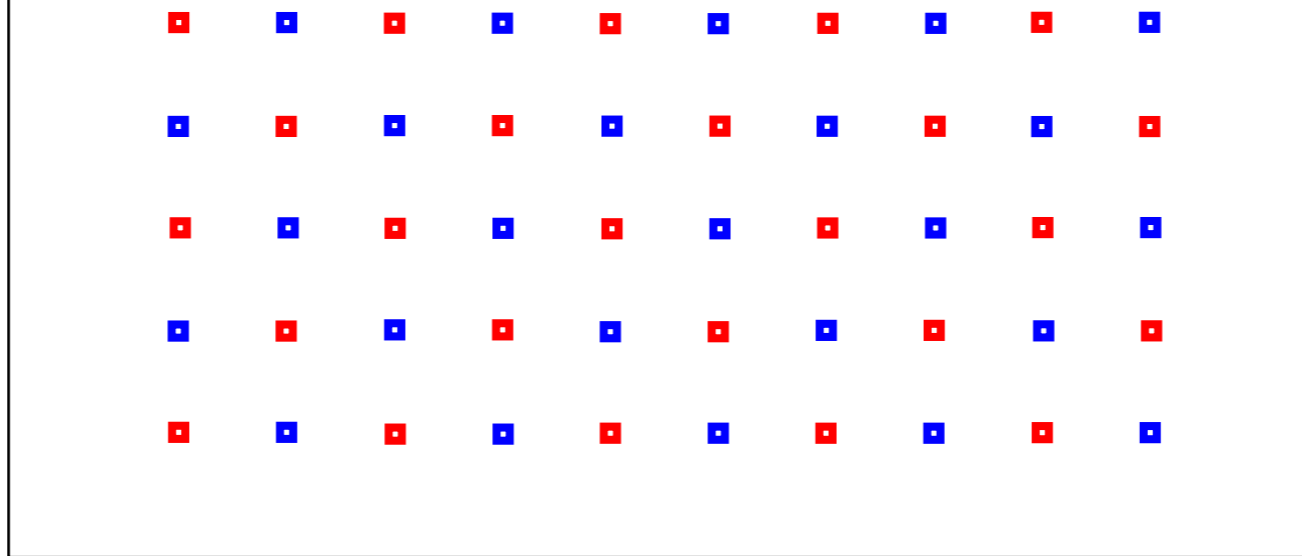
Rainbow plot (Real data)



実データ解析

TALE-infill SD

even-odd法



Opening angle $\delta = \cos^{-1}(\hat{n}_{\text{rec}} \cdot \hat{n}_{\text{sim}})$

$$\sigma_{\text{half}} = \sigma_{\text{even}} = \sigma_{\text{odd}}$$

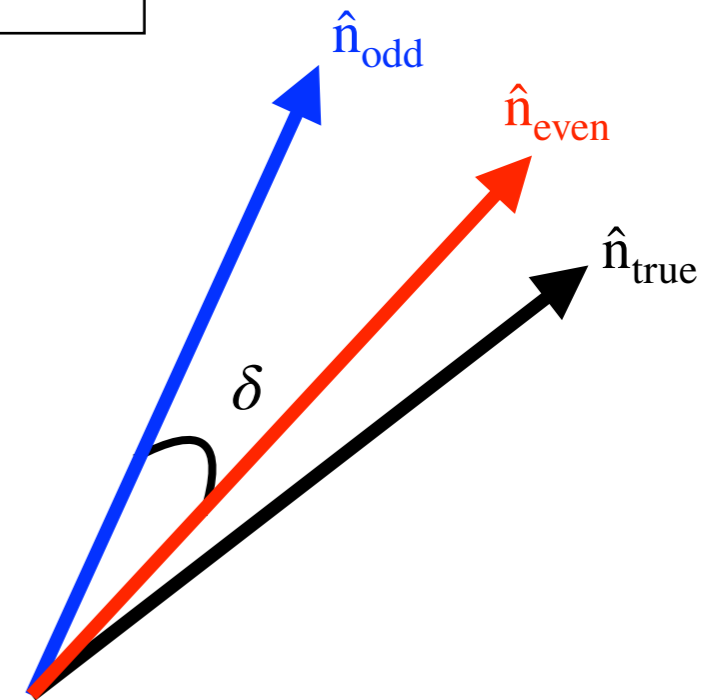
$$\sigma_{\text{half}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{all}}$$

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\sigma_{\text{even}}^2 + \sigma_{\text{odd}}^2} = \sqrt{2}\sigma_{\text{half}}$$

$$\sigma_{\text{all}} = \frac{1}{2}\sigma_{\delta}$$



$$\delta_{\text{all}} = \frac{1}{2}\delta$$



実データ解析

even-odd法

Opening angle $\delta = \cos^{-1}(\hat{n}_{\text{rec}} \cdot \hat{n}_{\text{sim}})$

$$\sigma_{\text{half}} = \sigma_{\text{even}} = \sigma_{\text{odd}}$$

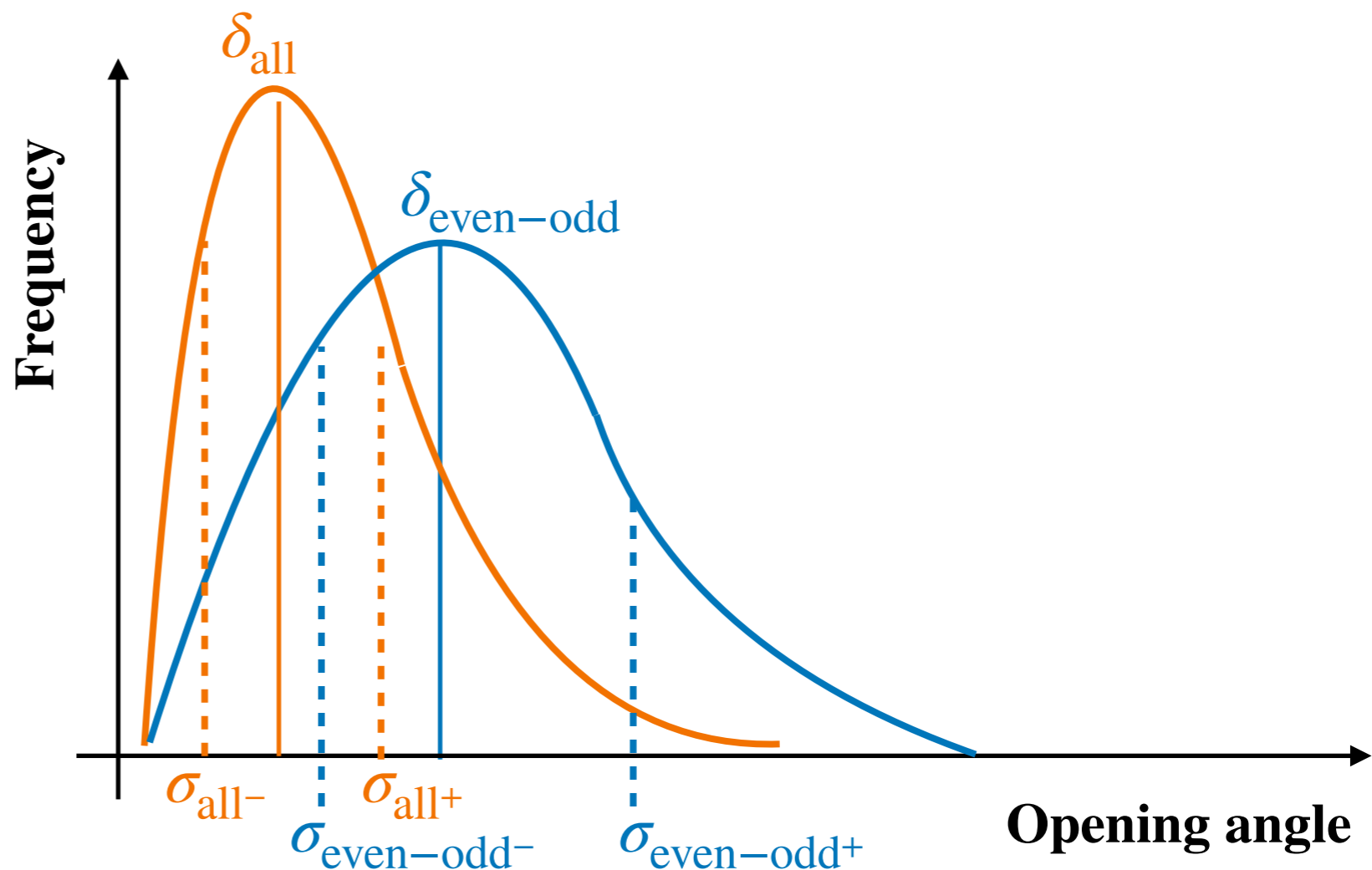
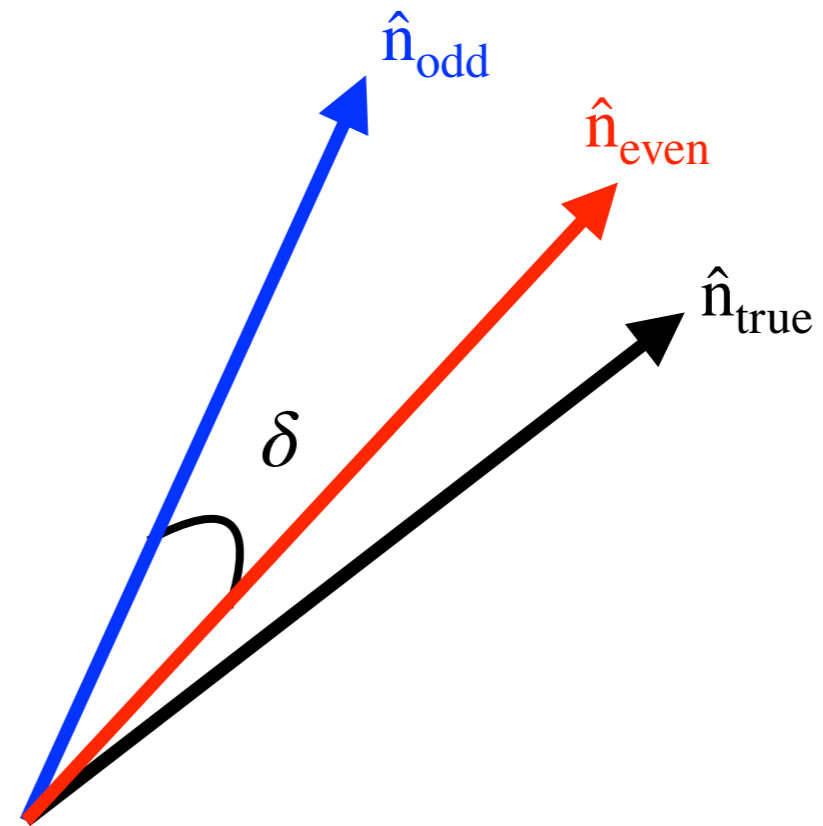
$$\sigma_{\text{half}} = \sqrt{2}\sigma_{\text{all}}$$

$$\sigma_{\delta} = \sqrt{\sigma_{\text{even}}^2 + \sigma_{\text{odd}}^2} = \sqrt{2}\sigma_{\text{half}}$$

$$\sigma_{\text{all}} = \frac{1}{2}\sigma_{\delta}$$



$$\delta_{\text{all}} = \frac{1}{2}\delta_{\text{even-odd}}$$



TALE-infil SDの運用状況

2023年10月24日より定常観測開始

トリガー条件

Lv. 0 (波形保持・記録)

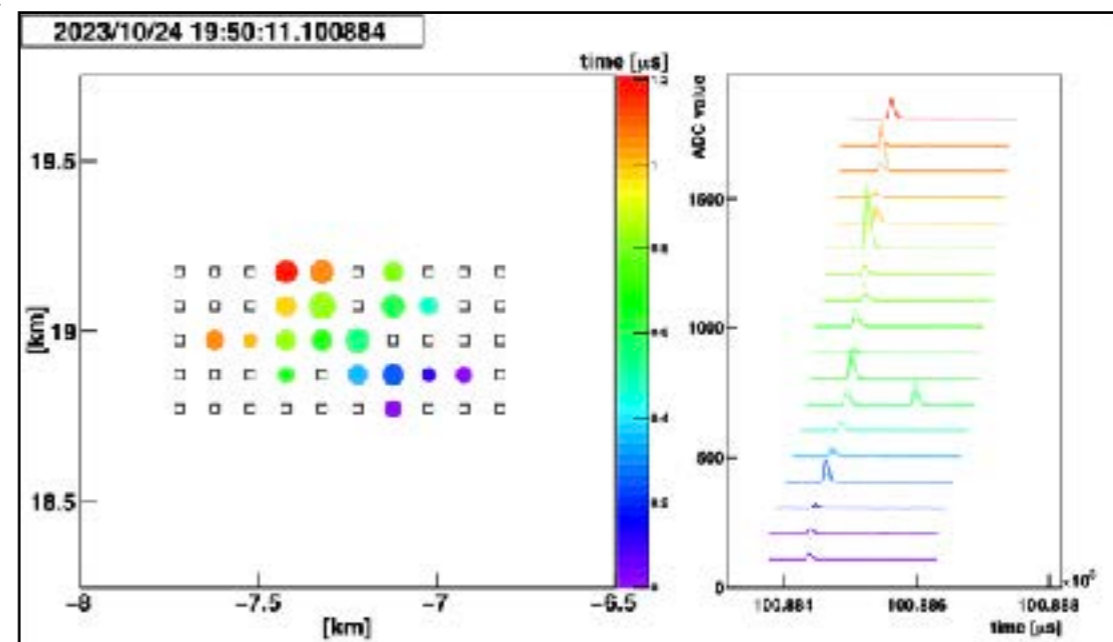
0.3粒子相当以上の信号

Lv. 1 (SDヒット)

3.0粒子相当以上の信号

Lv. 2 (イベント)

3 μ s以内の時間幅で隣り合ったSD5台以上ヒット



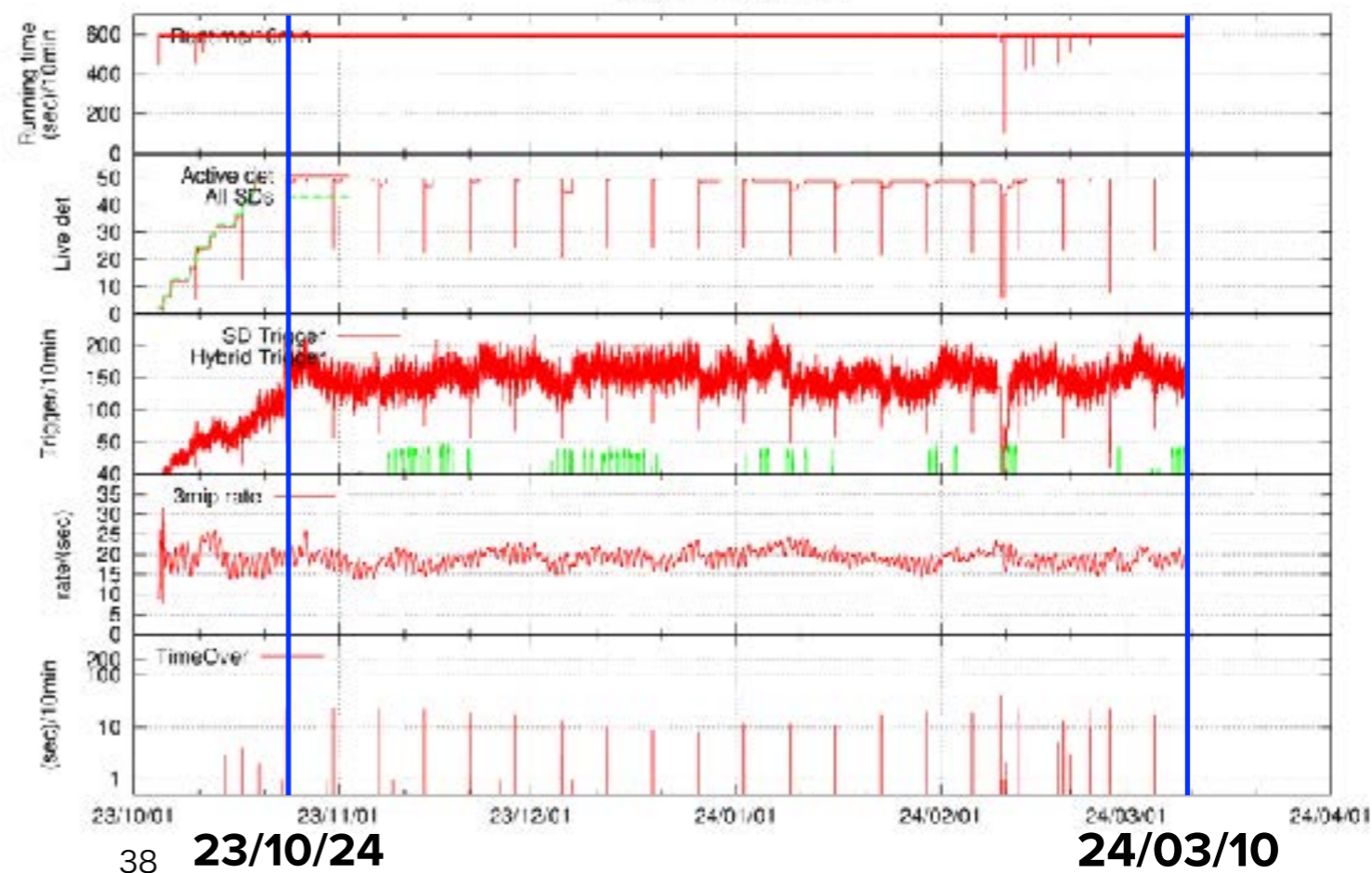
10分間あたりの実稼働時間 ~600秒

稼働しているSDの台数 ~50

10分間の平均イベント数 ~160

SD1台の平均ヒット数/秒 ~20Hz

10分間あたりの通信エラー時間 ~0



イベント選択条件

▶ Space cluster

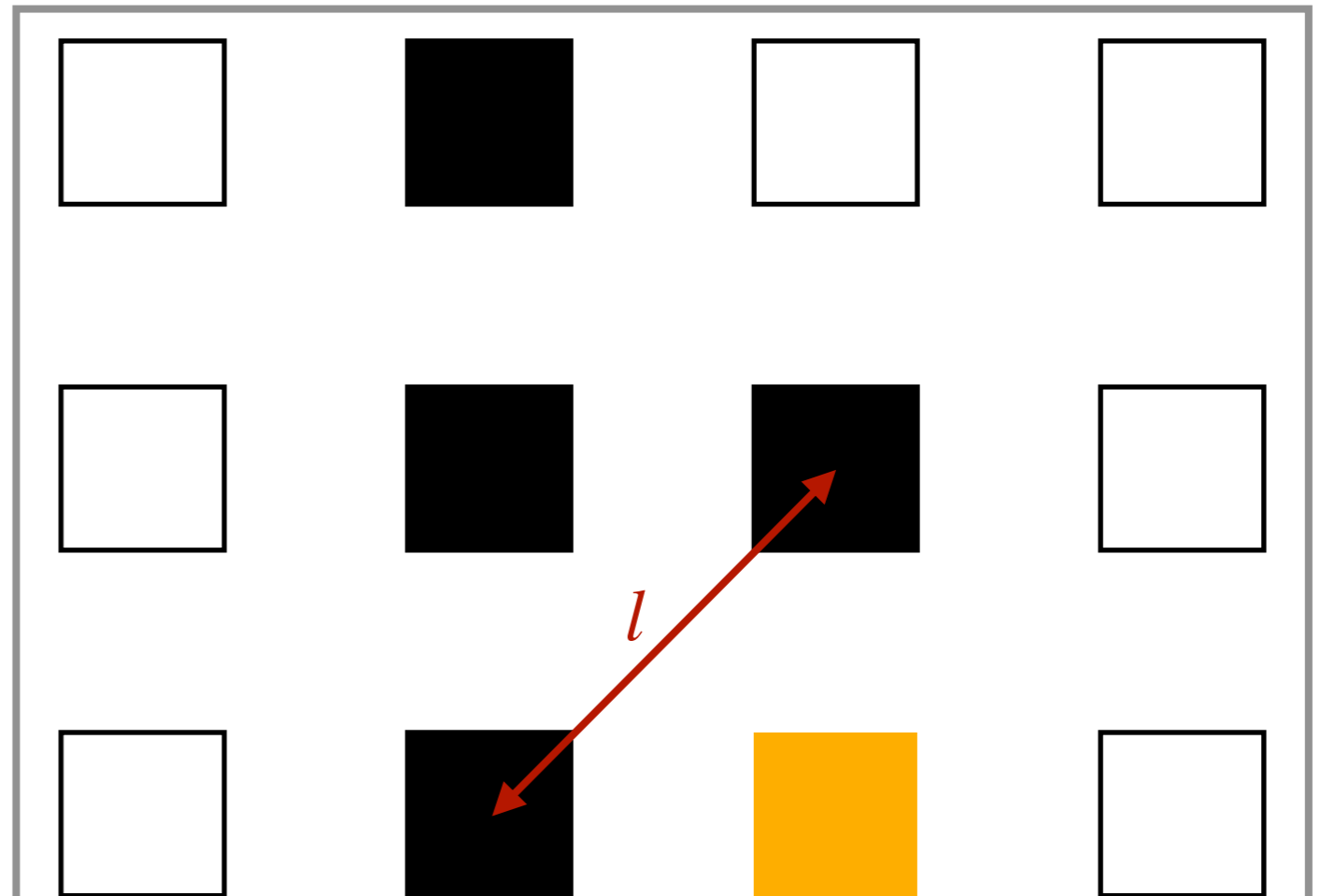
- 信号が最大のSDを含む隣接する5台以上のSDが荷電粒子を検出

▶ Space time cluster

- 4台以上のSDが以下の条件を満たす

$$\left\langle \frac{l}{c} > t_{\text{hit}}^j - t_{\text{hit}}^i \right\rangle$$

l : distance from SD_{hit}^i to SD_{hit}^j



- The detectors that do not have a signal
- The detectors that have a signal
- The detector with the maximum signal

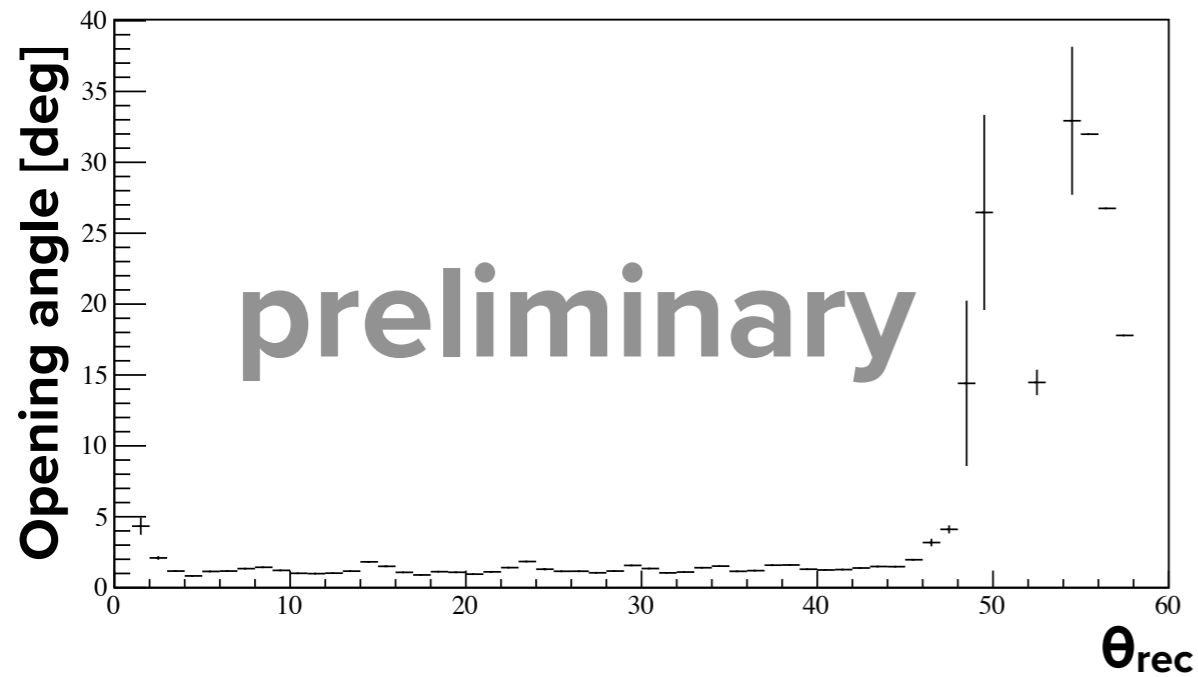
イベント選択条件

zenith cut

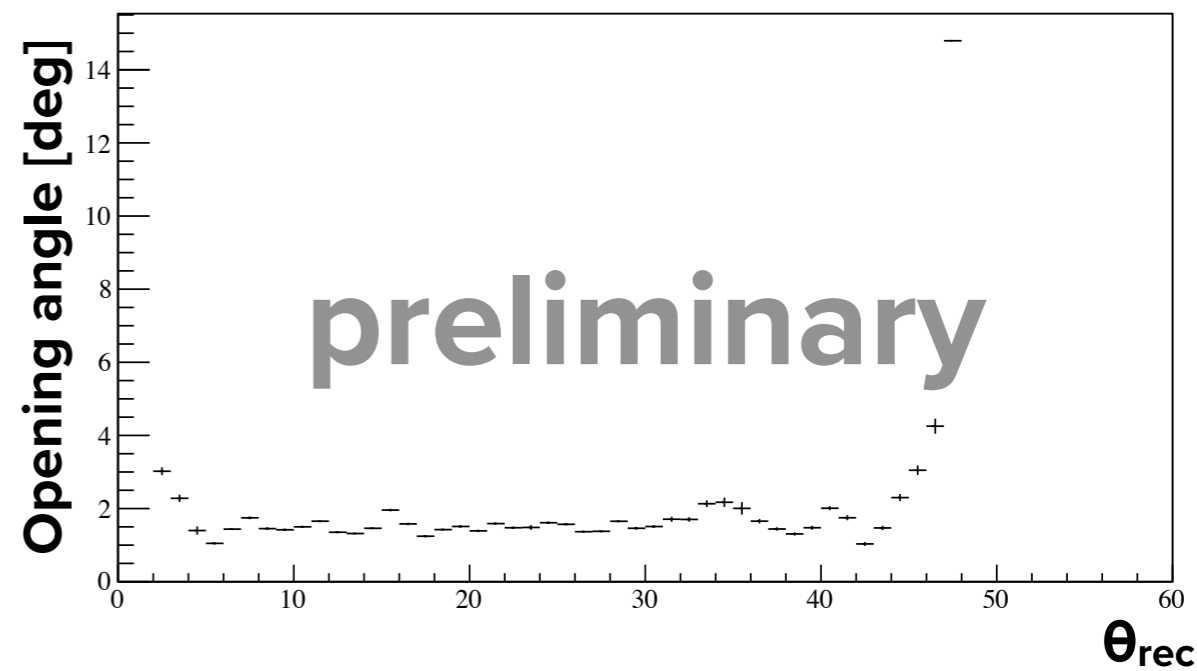
logE = 16

logE = 15.4

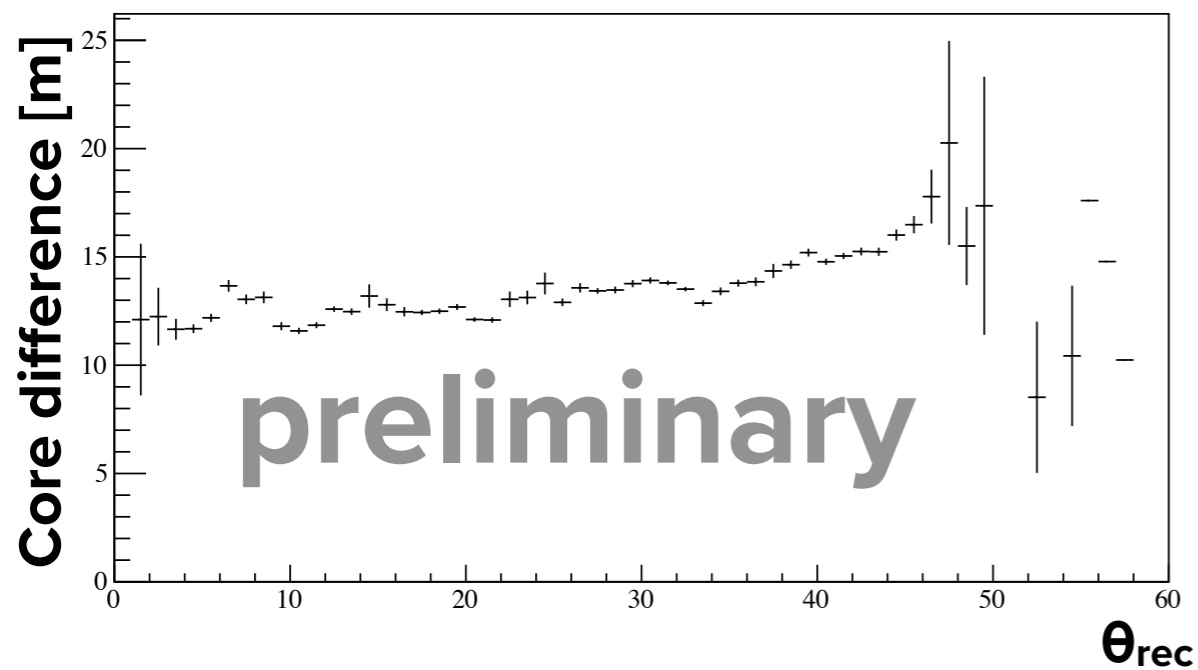
Opening angle



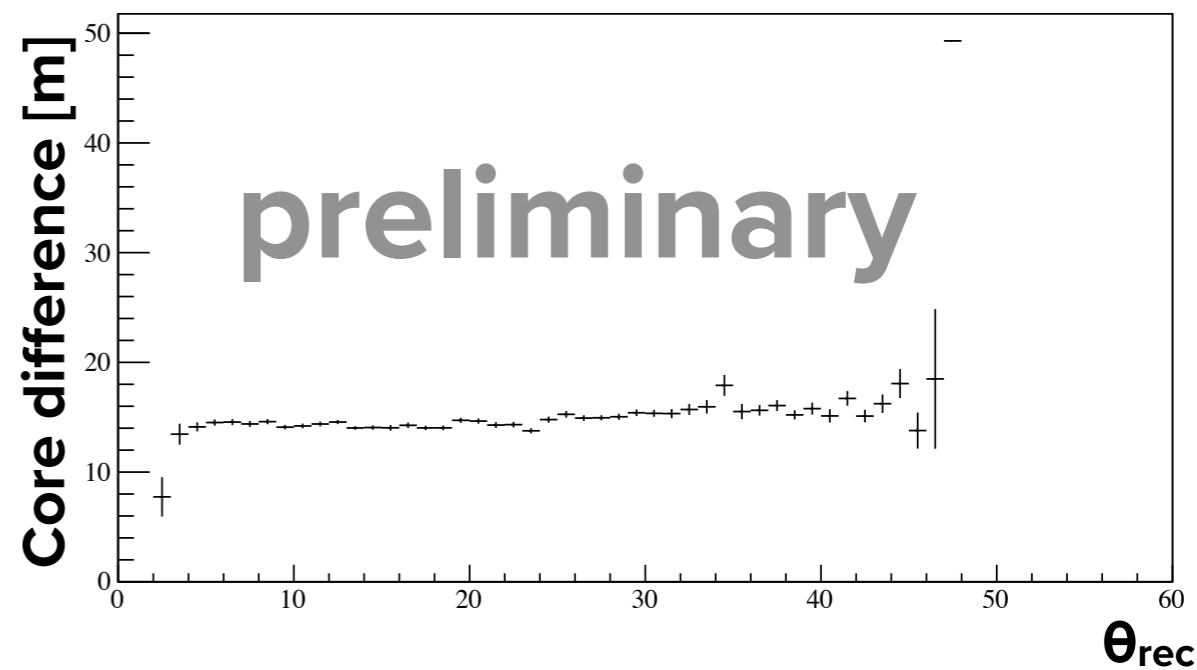
Opening Angle



Core difference

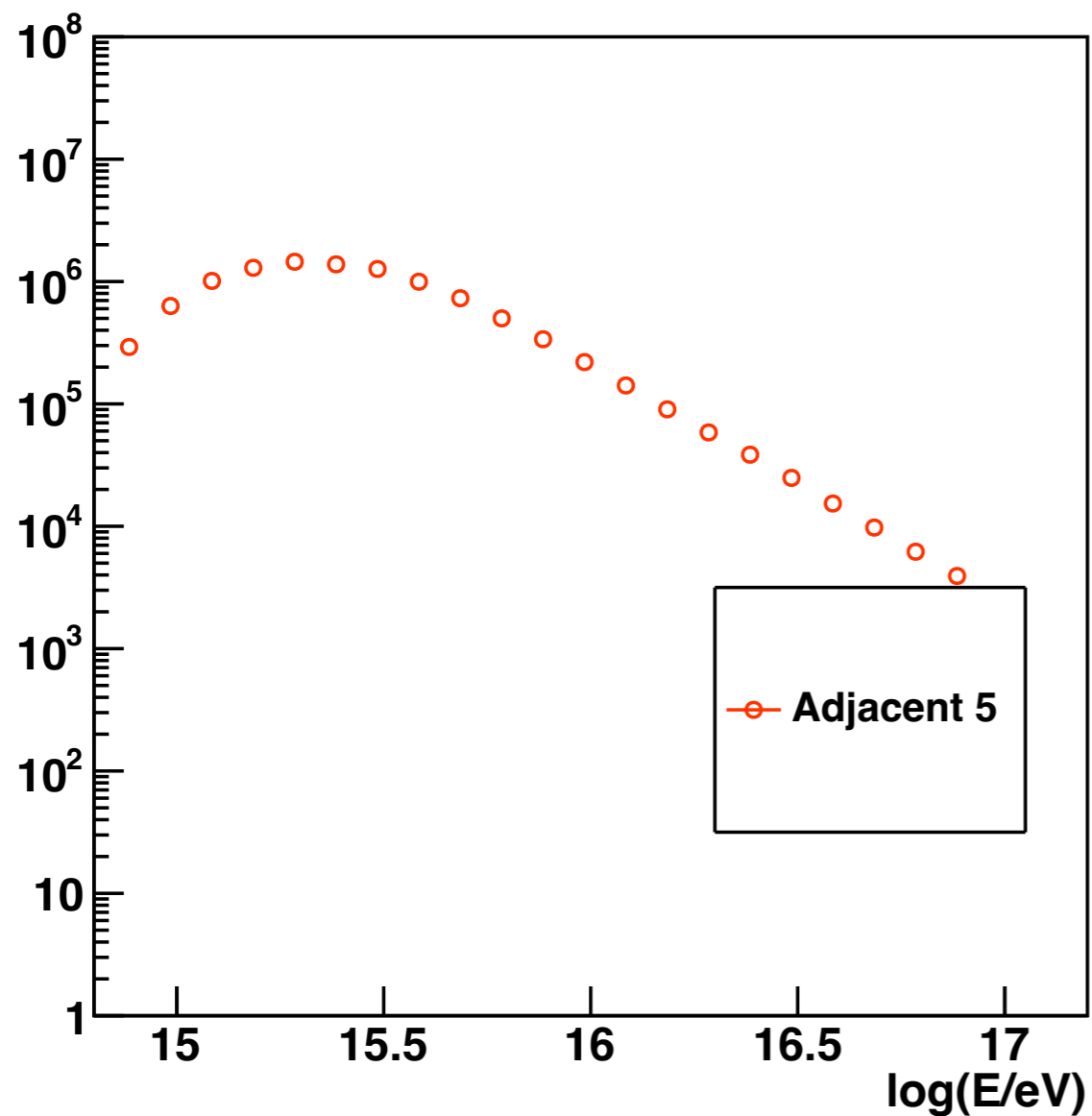


Core difference

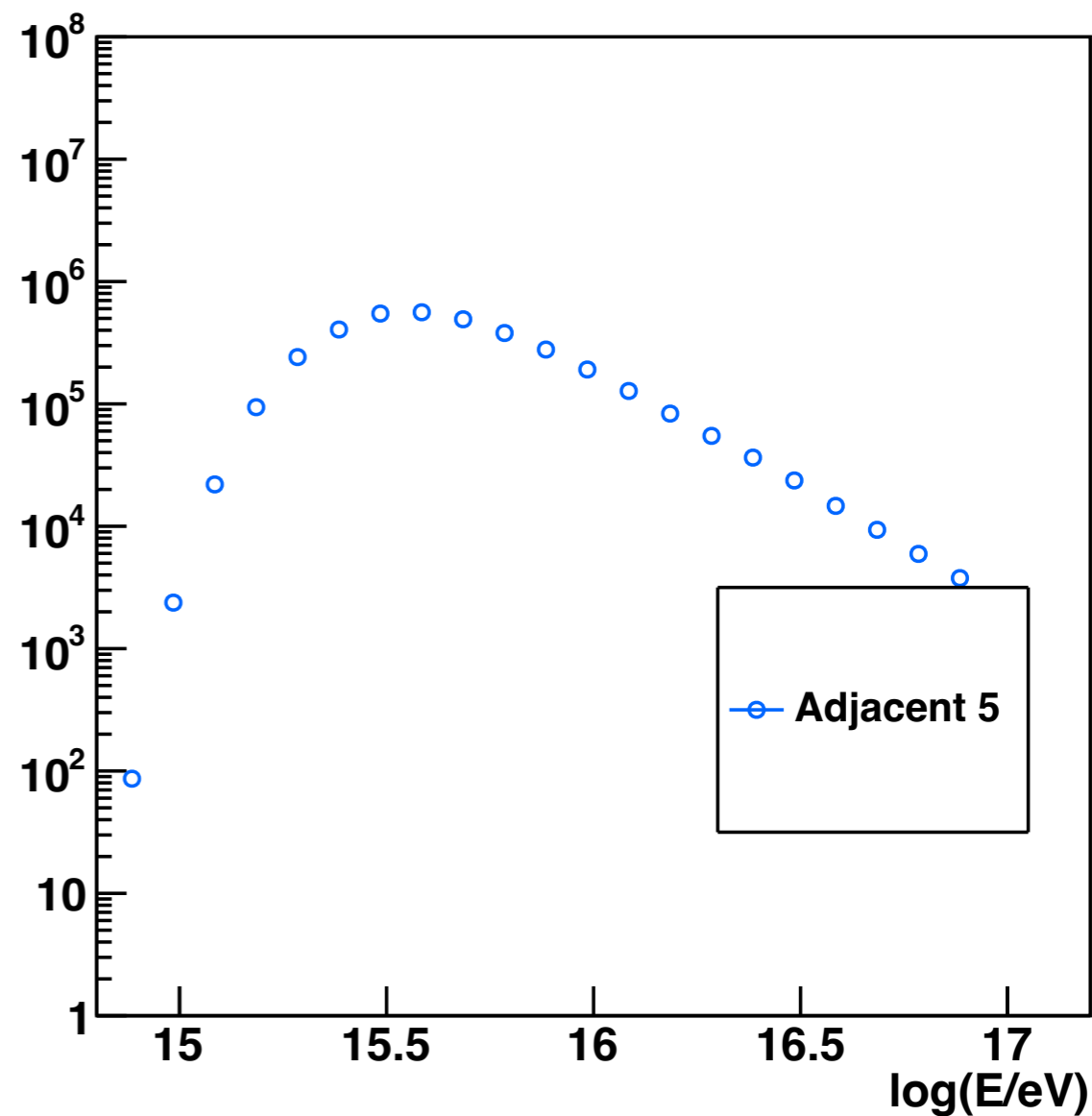


予想されるトリガーイベント

of expected triggering event / year: proton

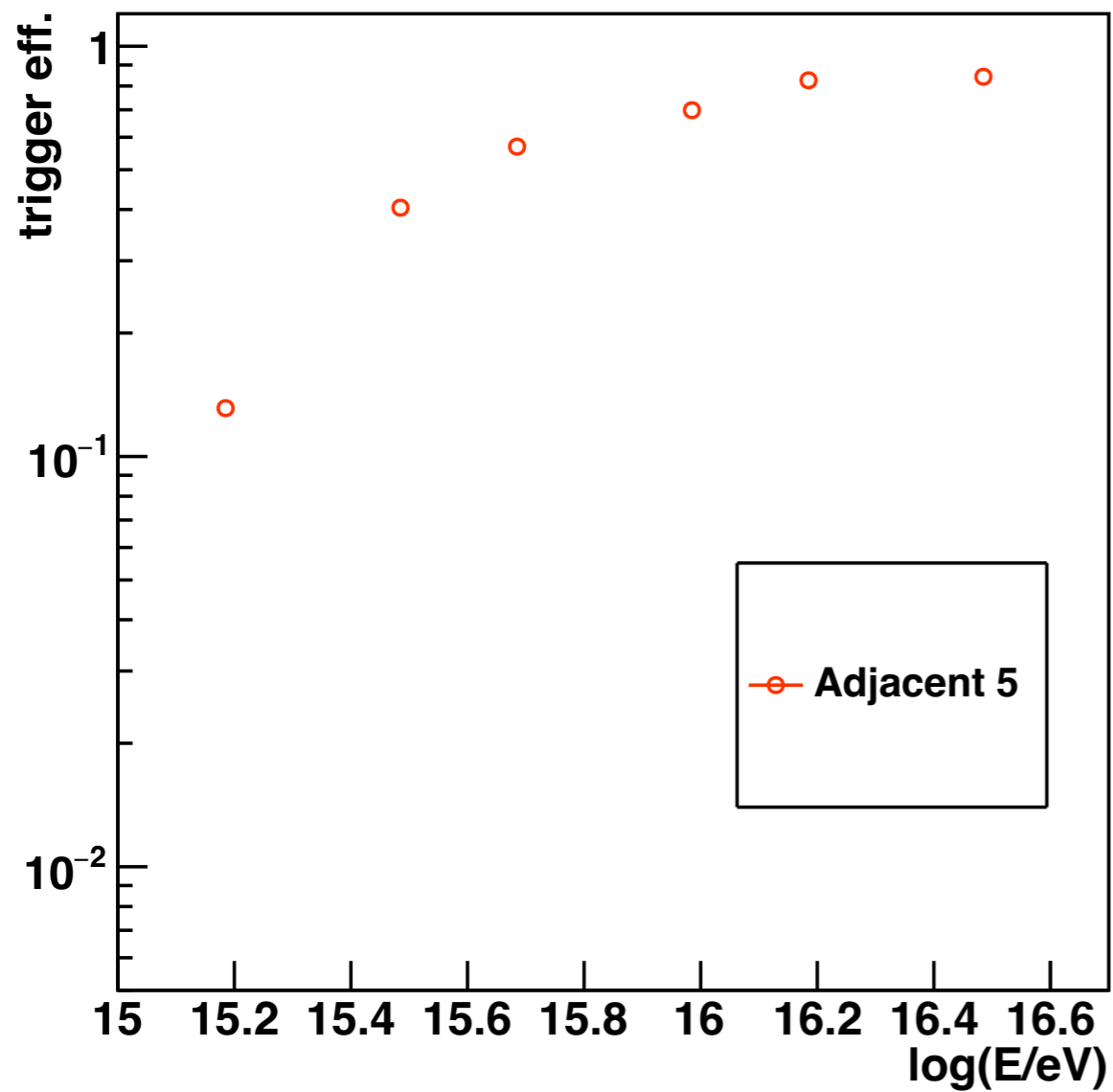


of expected triggering event / year: iron

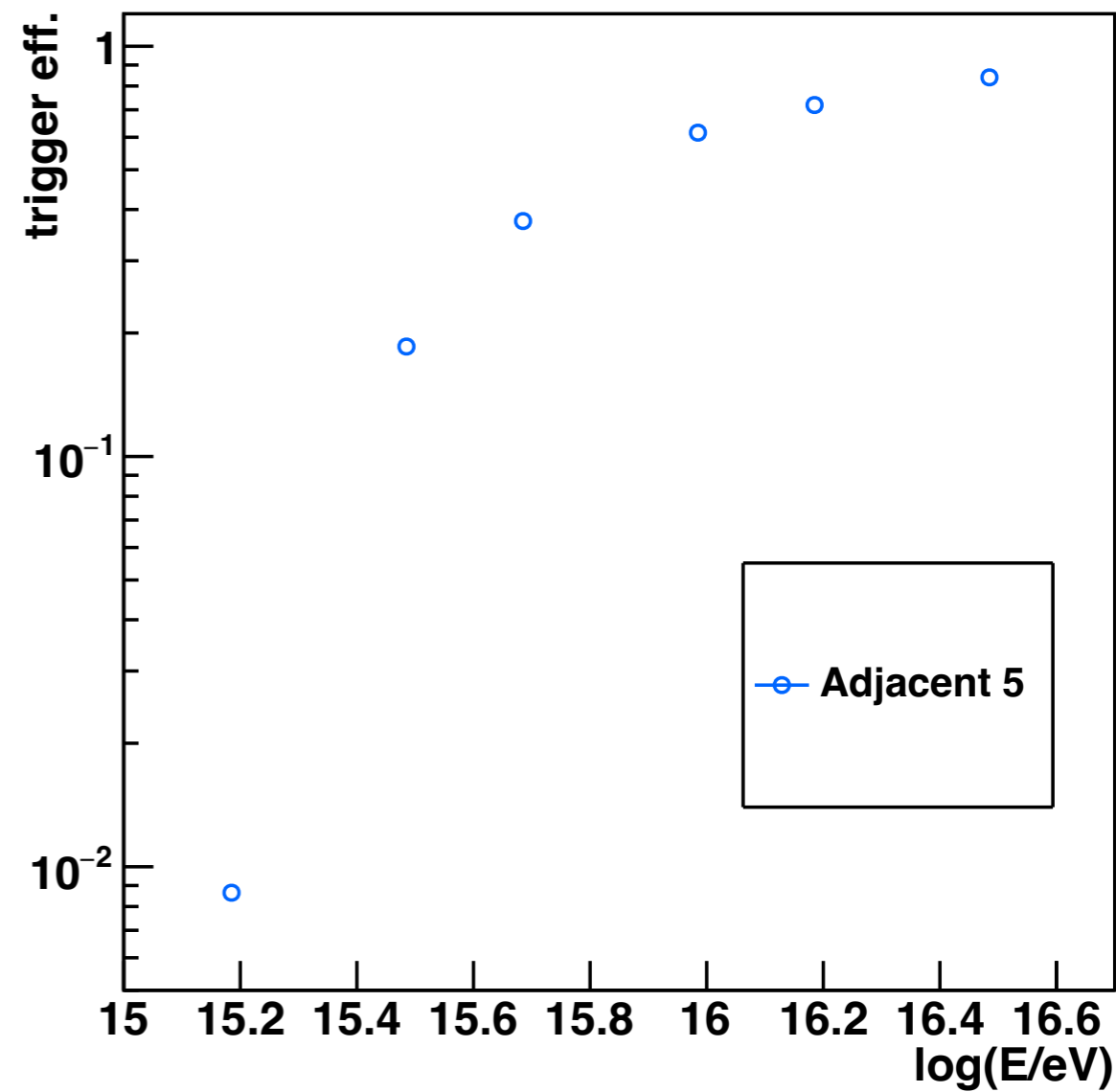


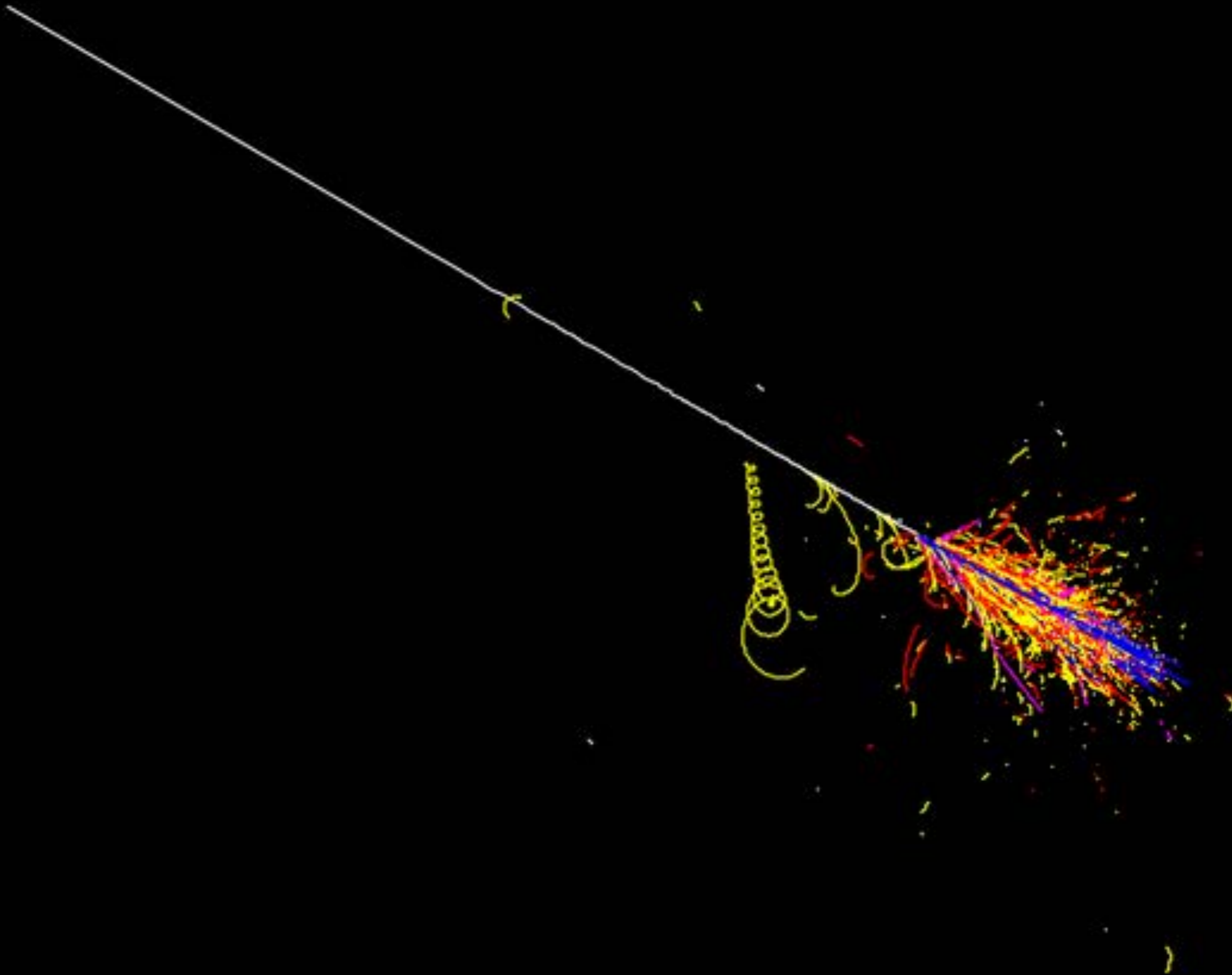
トリガー効率

trigger efficiency: proton



trigger efficiency: iron





COSMOS講習会

大阪公立大学 河内祐輔

Lateral Distribution @1580m

