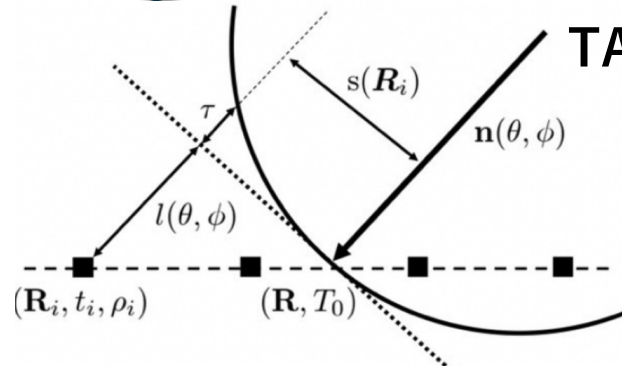


# TAx4実験のための 宇宙線空気シャワーの非対称性の研究



大阪電気通信大学  
B4 坂本 琉之助

# 研究背景



TAx4 SDでは以下の $\chi^2$ を最小化して、宇宙線の到来方向、コア位置などを推定している

$$\chi^2 = \underbrace{\sum_{i=0}^N \frac{(t_i - t_i^{\text{FIT}})^2}{\sigma_{t_i}^2}}_A + \underbrace{\sum_{i=0}^N \frac{(\rho_i - \rho_i^{\text{FIT}})^2}{\sigma_{\rho_i}^2}}_B + \underbrace{\frac{(\vec{R}_{\text{COG}} - \vec{R})^2}{\sigma_{R_{\text{COG}}}^2}}_C, \quad \vec{R}_{\text{COG}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{SD}}} \rho_i \vec{r}_{\text{SD}_i}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{SD}}} \rho_i}$$

- A 到来時刻、B 粒子数密度に関しては、分子が(測定値-理論値)の形である
- C コア位置には測定値はないため、粒子数密度分布の重心を測定値相当の値としている
- 重心は天頂角が大きくなると空気シャワー粒子が通過する大気の厚みが異なるため宇宙線の進行方向の手前側によってしまう
- そのため、重心の値は真のコア位置をよく再現しない
- 重心コア位置のずれはエネルギーの決定精度に影響する



エネルギーの決定精度を良くするには  
測定値相当のコア位置の求め方を改良する必要がある

# 重心コア位置 $\vec{R}_{\text{COG}}$

天頂角が大きいと...

通過する大気の厚みが異なる  
エネルギー損失量も異なる

宇宙線

Shower axis

粒子数(少)

粒子数(多)

手前にずれる

真のコア位置

重心コア位置

SD

SD

# 重心コア位置 $\vec{R}_{\text{COG}}$

天頂角が大きいと...

宇宙線

重心が真のコア位置に対してどのくらいずれるのかを  
シミュレーションで確認する

粒子数(少)

SD

真のコア位置



重心コア位置



粒子数(多)

SD

# 解析に使用するイベント

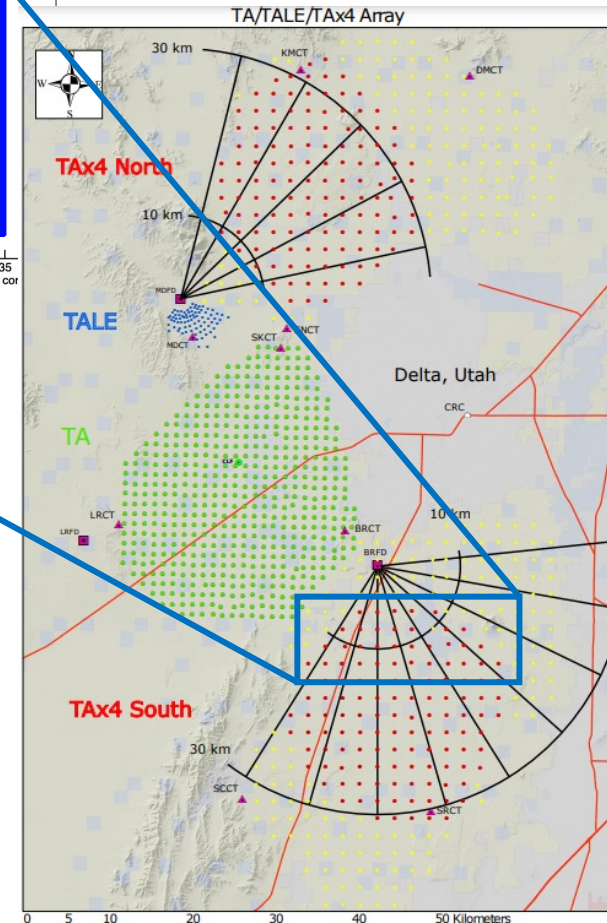
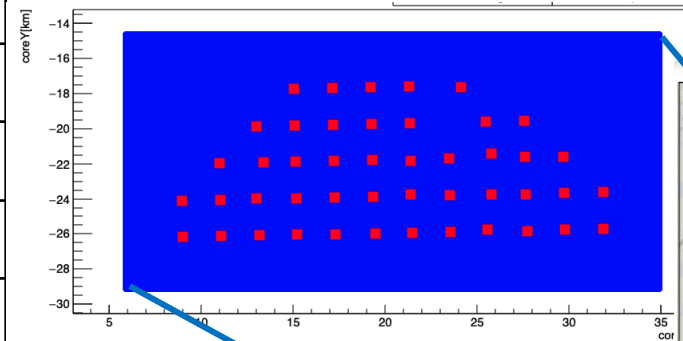
## シミュレーション条件

粒子種	proton
ハドロン相互作用モデル	QGSJET-II-04
エネルギー	$10^{19.0} \sim 10^{20.5}$ eV
天頂角	0 ~ 70 deg
方位角	0 ~ 360 deg

## イベントセレクション条件

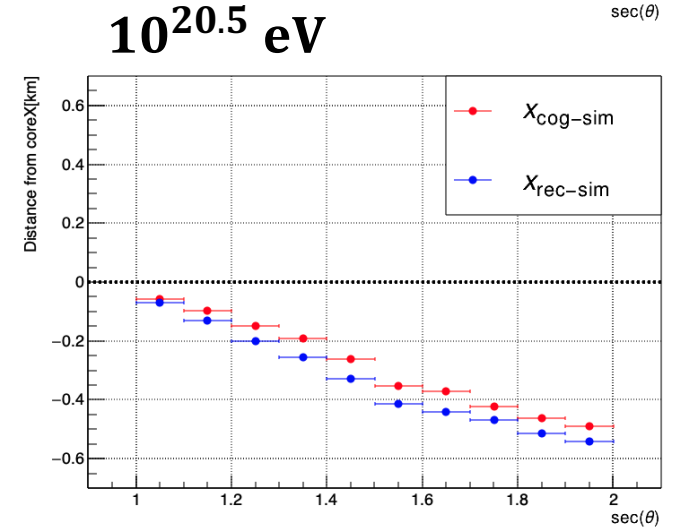
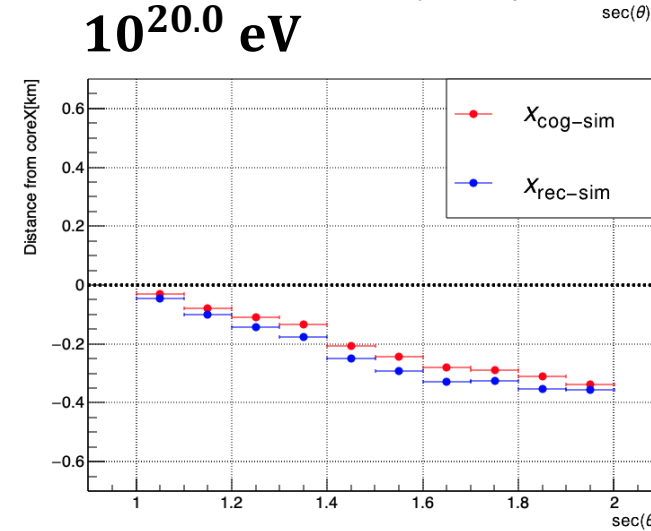
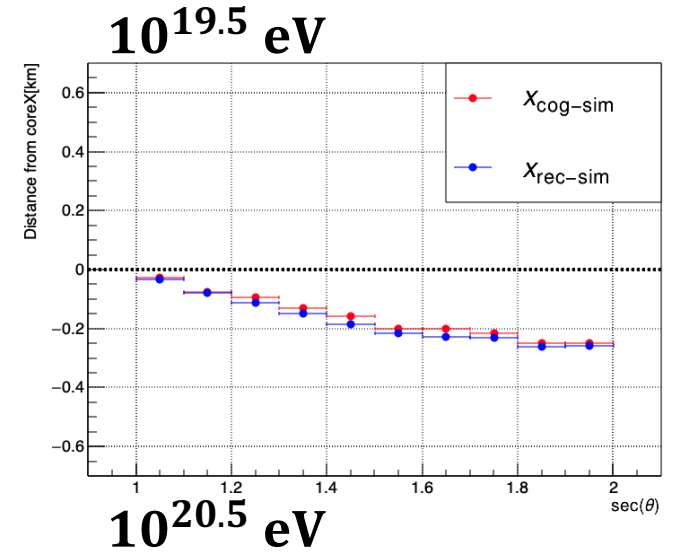
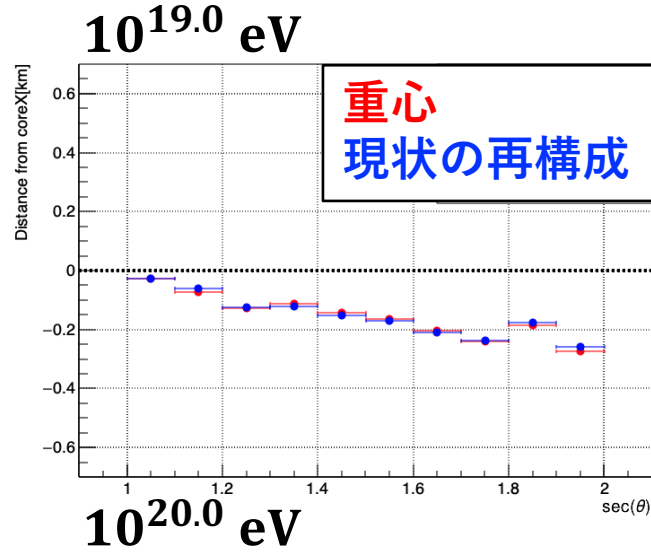
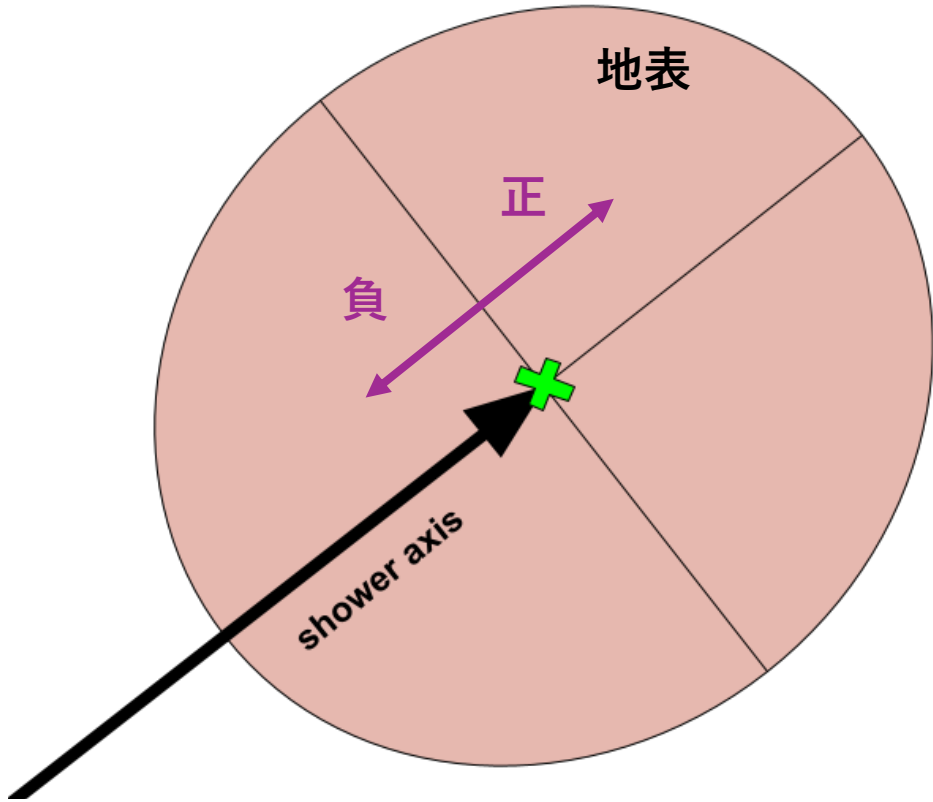
SDの台数	$N_{SD} \geq 5$
再構成の天頂角	$\theta_{rec} \leq 60$ deg
$\chi^2/ndof$	$\chi^2/ndof \leq 4$
S800の不確かさ	$\sigma_{S800}/S800 \leq 0.5$
到来方向の不確かさ	$\sigma_G \leq 8$ deg
$\vec{R}_{rec}$ のSDアレイの端からの距離	$D_{border} \geq 400$ m

● シミュレーションのコア位置  
■ SD の位置



# 現状のコア位置のbias

空気シャワーの真の進行方向とコア位置に対して前後にどのくらいずれたか



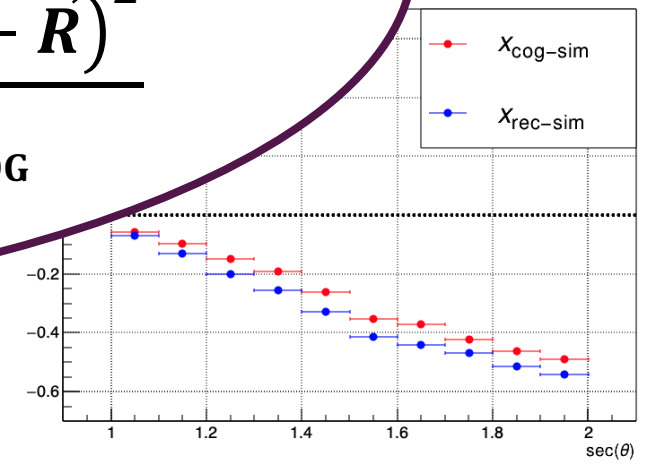
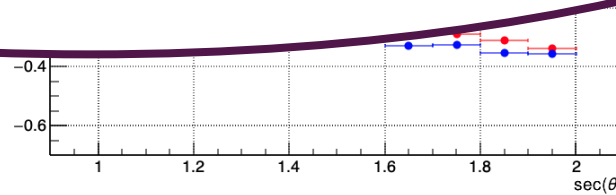
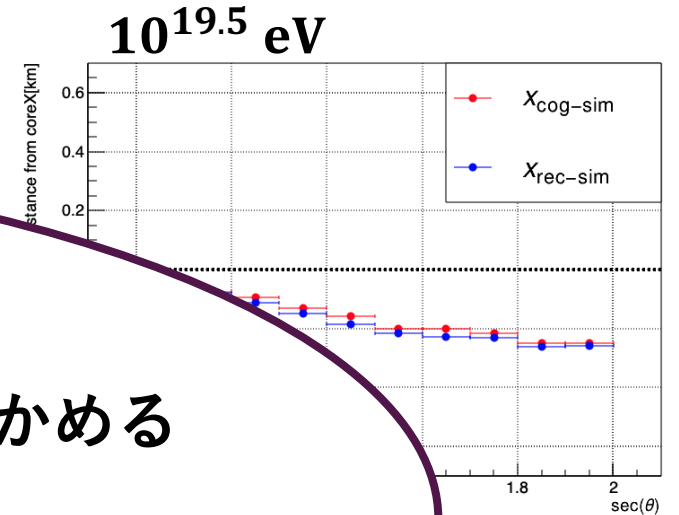
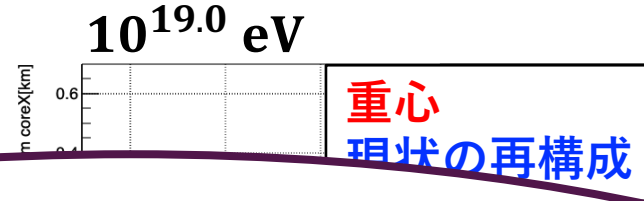
コア位置は天頂角、エネルギーが大きくなると手前に引っ張られやすくなる

# 現状のコア位置のbias

空気シャワーの真の進行方向とコア位置に対して前後にどのくらいずれたか

重心が真のコア位置であった場合に  
コア位置のずれがどのように変化するかを確かめる

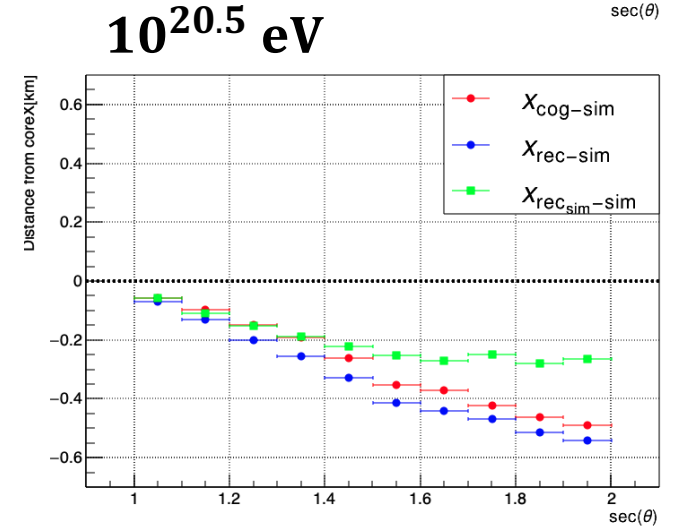
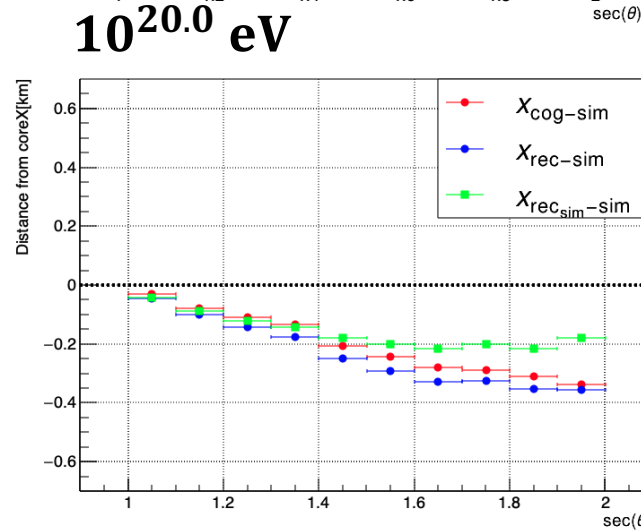
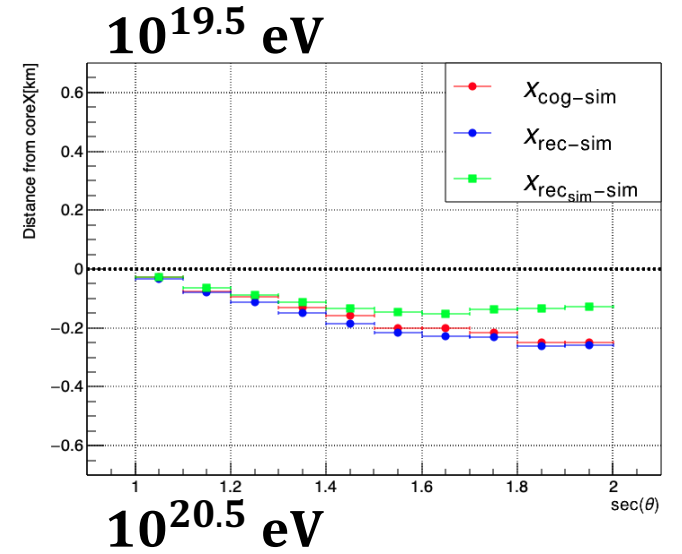
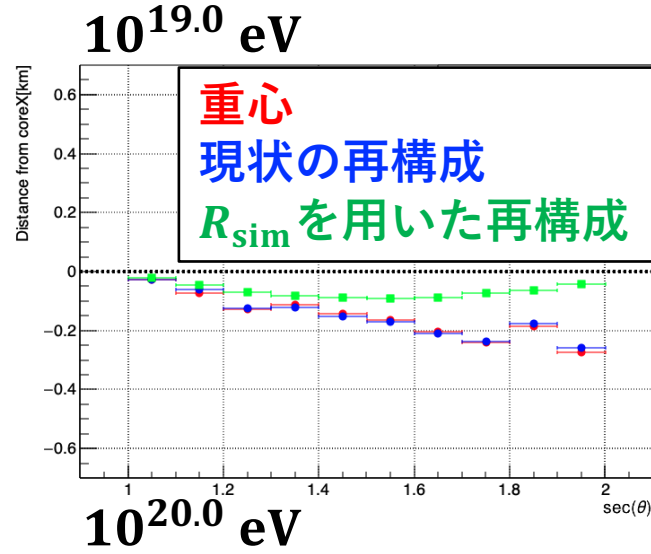
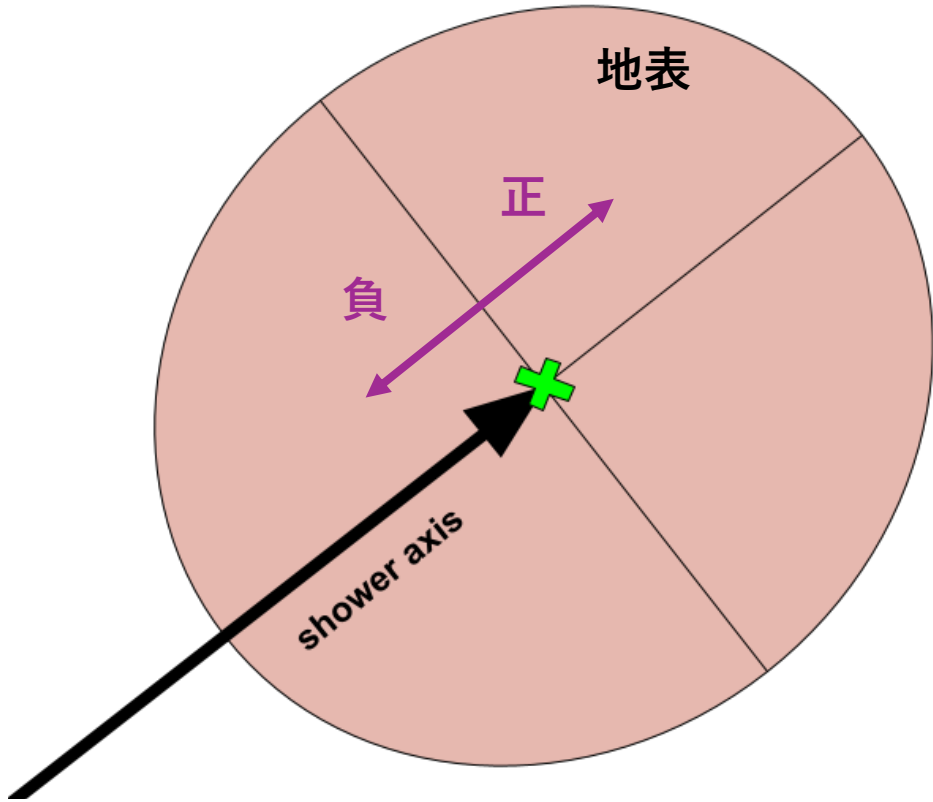
$$\chi^2 = \dots \frac{(\vec{R}_{\text{COG}} - \vec{R})^2}{\sigma_{R_{\text{COG}}}^2} \longrightarrow \chi^2 = \dots \frac{(\vec{R}_{\text{True}} - \vec{R})^2}{\sigma_{R_{\text{COG}}}^2}$$



コア位置は天頂角、エネルギーが大きくなると手前に引っ張られやすくなる

# 真のコア位置を用いた再構成結果

空気シャワーの真の進行方向とコア位置に対して前後にどのくらいずれたか



真のコア位置を用いると手前に引っ張られにくくなる



# エネルギー分解能

現状のエネルギー分解能

$R_{sim}$  を用いた場合のエネルギー分解能

真のコア位置を用いた場合  
エネルギー分解能が良くなる



重心を真のコア位置に近づけて  
エネルギー分解能を良くしたい

$10^{19.0}$  eV

$$\Delta E / E_{sim} = 47\%$$



$$\Delta E / E_{sim} = 36\%$$

$10^{19.5}$  eV

$$\Delta E / E_{sim} = 41\%$$



$$\Delta E / E_{sim} = 31\%$$

$10^{20.0}$  eV

$$\Delta E / E_{sim} = 33\%$$



$$\Delta E / E_{sim} = 25\%$$

$10^{20.5}$  eV

$$\Delta E / E_{sim} = 31\%$$



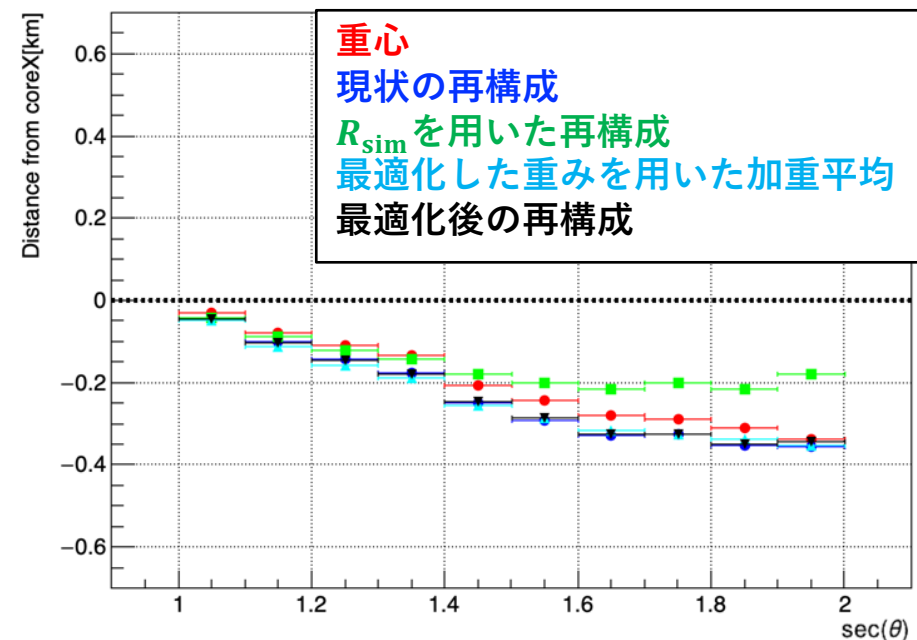
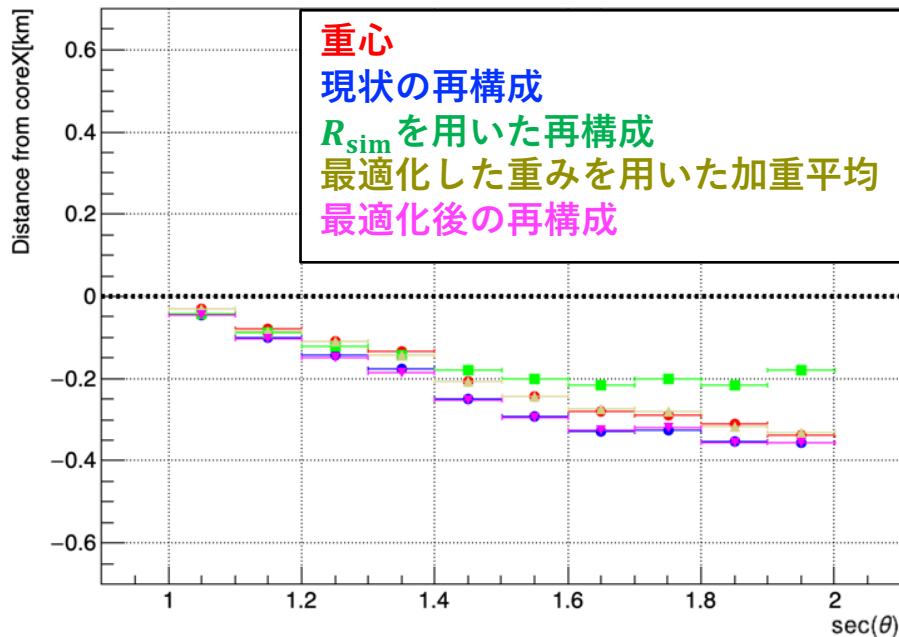
$$\Delta E / E_{sim} = 22\%$$

# コア位置の改良案1

粒子数密度 $\rho_i$ を重みとして重心を求めた場合、シャワーの手前側にずれる重みの影響が小さくなるよう、重みの最適化を行なった

$$w_i \rightarrow \rho_i^{1/1.4} - 1, \log_{1.05} \rho_i + 0$$

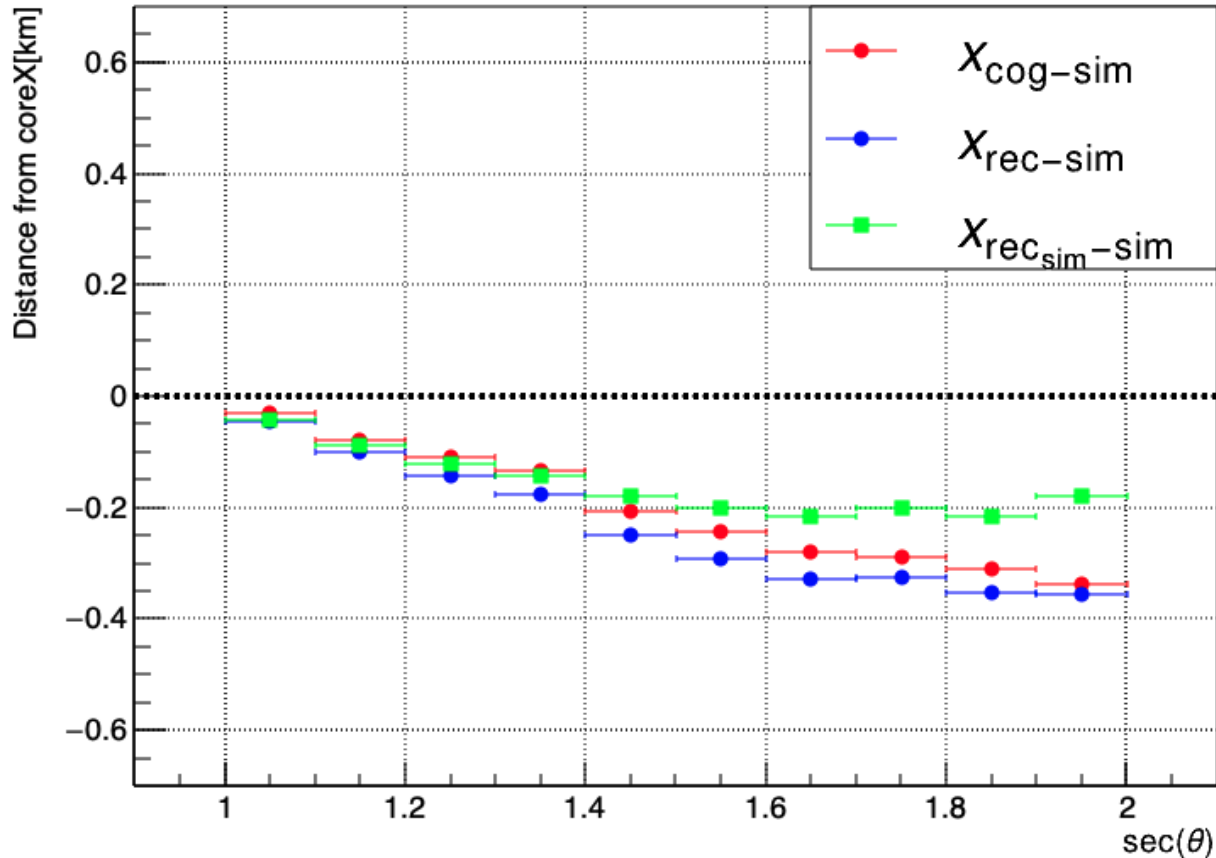
$$\vec{R}_{\text{COG}} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{\text{SD}}} w_i \vec{r}_{\text{SD}i}}{\sum_{i=1}^{N_{\text{SD}}} w_i}$$



コア位置の精度に大きな改善が見られない

# コア位置の改良案2

$10^{20.0}$  eV



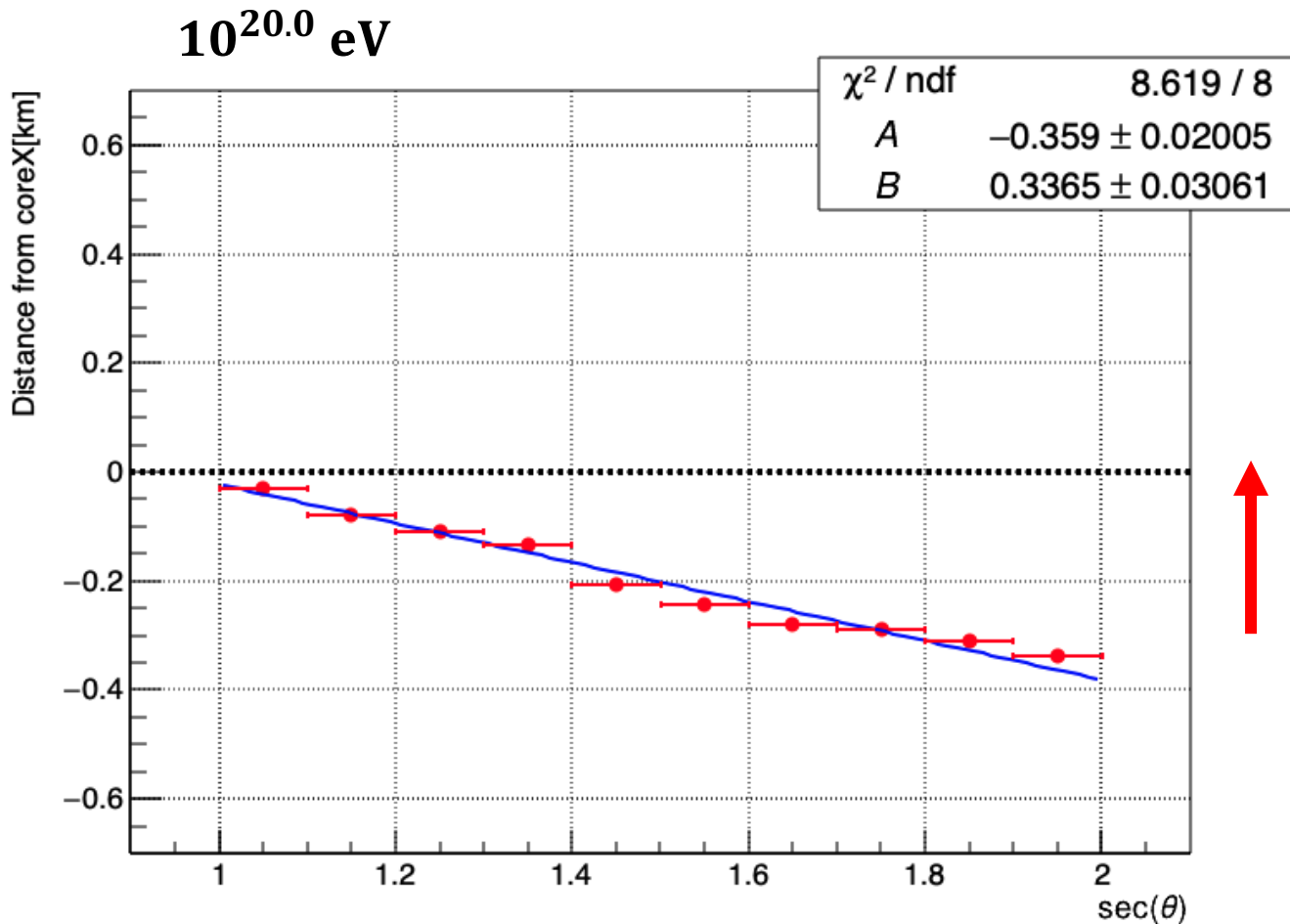
重心が真のコア位置であれば  
再構成コア位置になる



天頂角とコア位置のずれの関係を  
フィッティングで求めて  
そのずれの分補正する

$$x_{\text{bias}}(\theta) = A \sec(\theta) + B$$

# フィッティング結果



$10^{20.0}$  eVでは

$$x_{\text{bias}}(\theta) = A \sec(\theta) + B$$



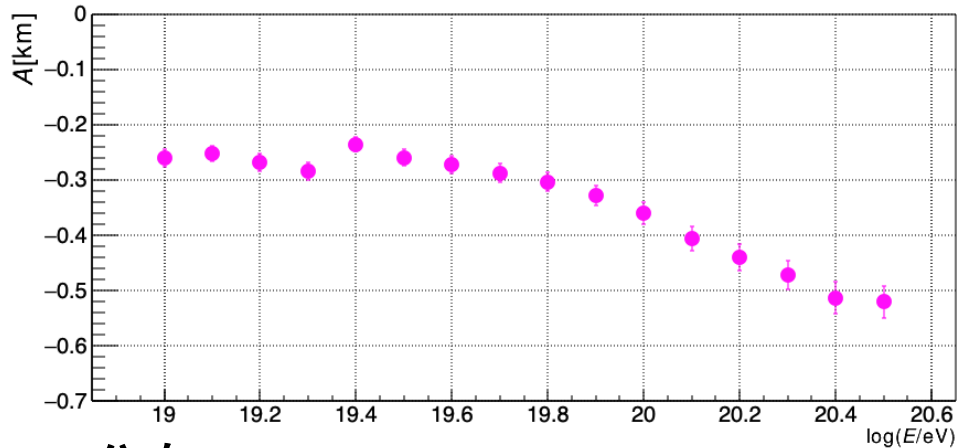
$$A = -0.36 \pm 0.02$$

$$B = 0.34 \pm 0.03$$

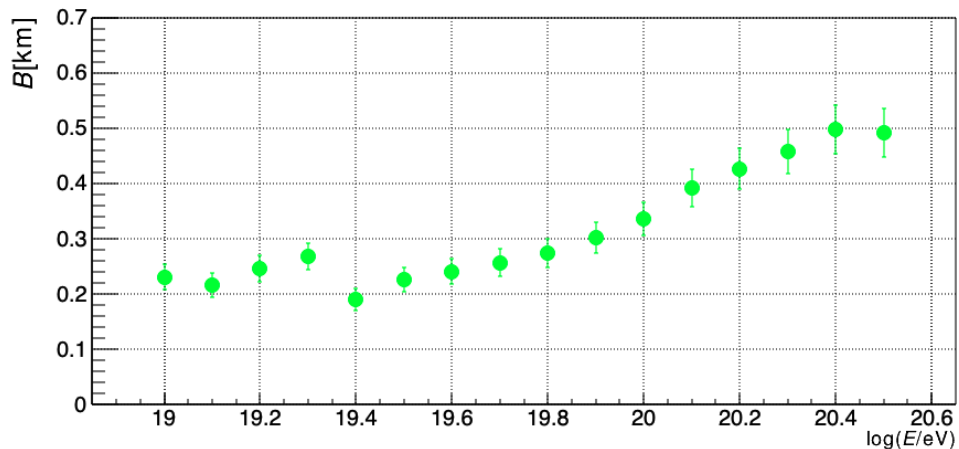
他のエネルギーに対しても  
フィッティングを行う

# フィッティング結果

Aの分布



Bの分布



エネルギーごとにフィッティングを行う

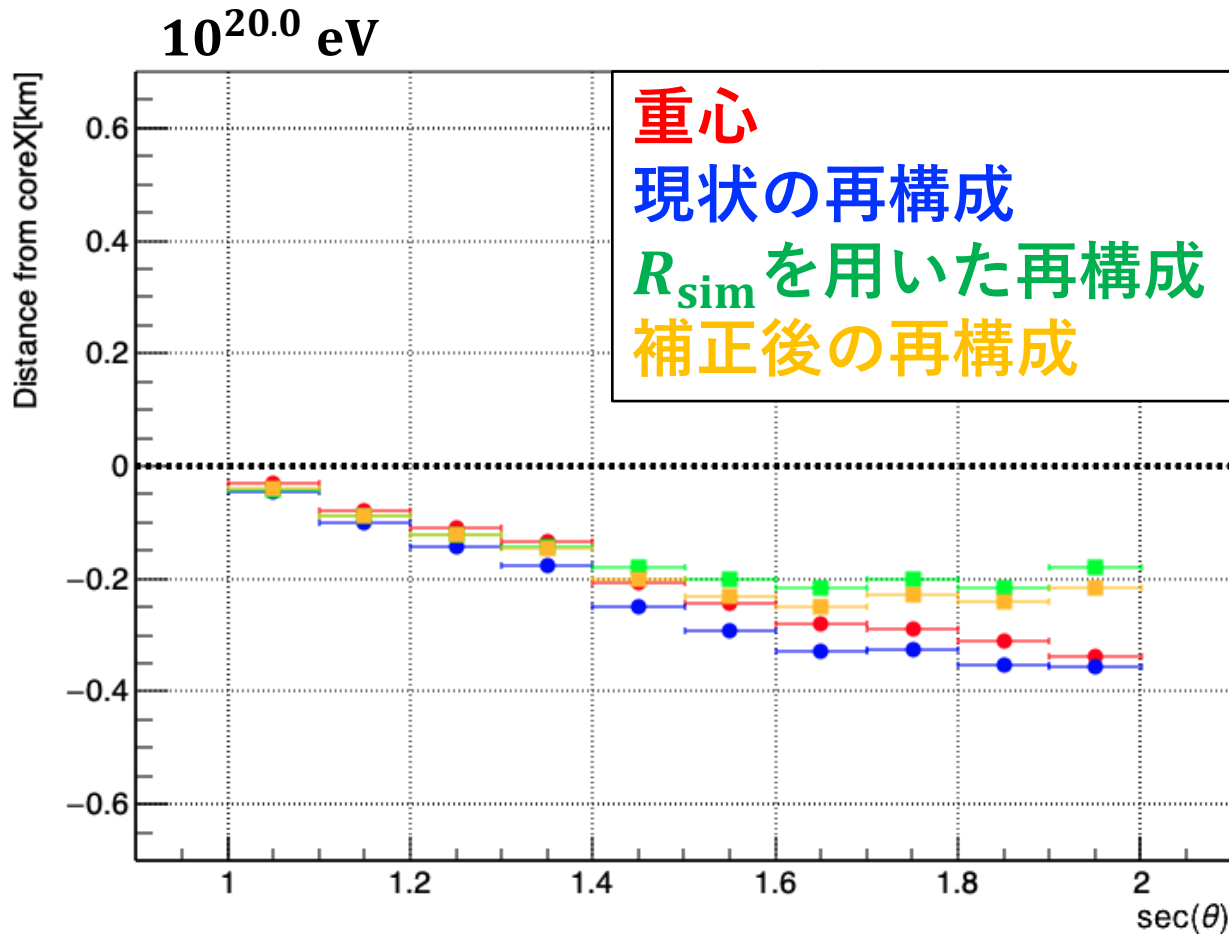
$$x_{\text{bias}}(\theta) = A \sec(\theta) + B$$



エネルギーが大きくなるにつれて傾きが大きくなる  
→ 高エネルギーほど手前に引っ張られやすい

エネルギーの値を再構成に用いることはできない  
 $10^{20.0}$  eVの $x_{\text{bias}}(\theta)$ を用いて再構成してみる

# コア位置補正後の再構成結果



$$x_{\text{bias}}(\theta_{\text{sim}}) = -0.36 \times \sec(\theta_{\text{sim}}) + 0.34$$

真の到来方向を用いて  $x_{\text{bias}}(\theta)$  で補正後  
再構成コア位置がずれにくくなった

$$\Delta E / E_{\text{sim}} = 33\%$$



エネルギー分解能は解析中

# まとめと今後

## まとめ

- TAx4 SDの再構成に用いるパラメータのひとつとして粒子数密度の重心がある
- 空気シャワー粒子の通過する大気の厚みの違いにより、重心は真のコア位置からずれる
- 重心が真のコア位置に近づくように重みを最適化した
- 重心を補正するために重心と天頂角との関係を調査した
- 重心と天頂角の関係を用いて再構成を行うとコア位置が手前にずれにくくなった

## 今後

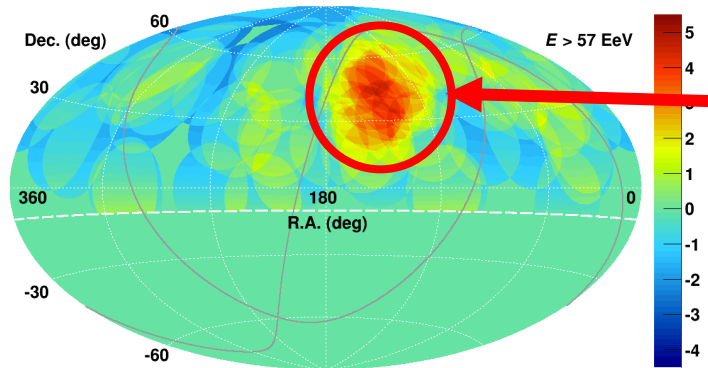
- 重心のずれと天頂角依存性の関係を用いて、コア位置の補正するには到来方向やエネルギーを知っている必要がある
- 今後はそれらを考慮してコア位置の補正をする

# BACK UP



# TAx4実験

TA実験では、ある方向から超高エネルギー宇宙線イベントが多く集中する兆候(ホットスポット)を発見

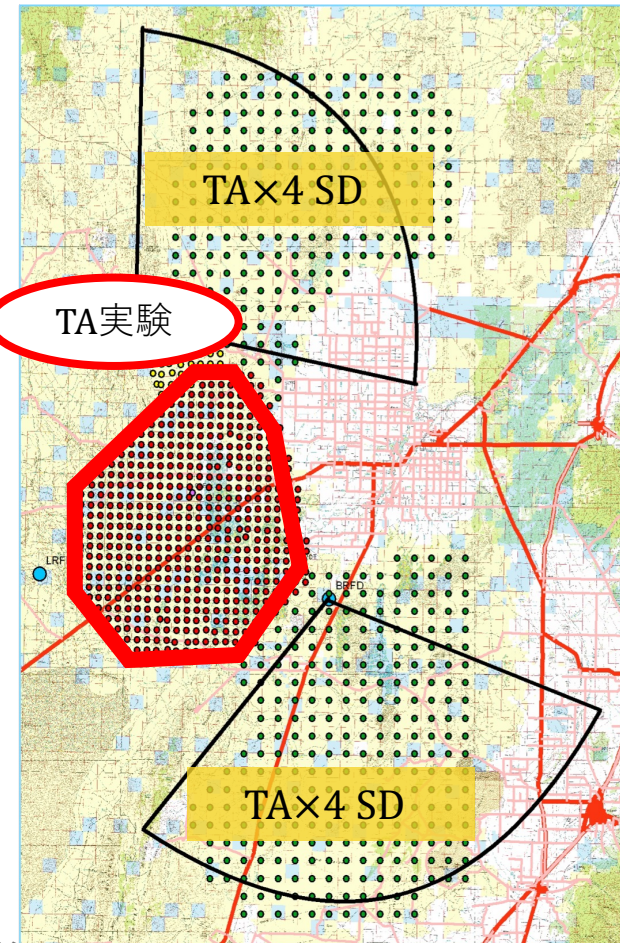


ホットスポット  
・おおぐま座の方向

赤道座標での5年間のTA実験の観測データにおける、  
57 EeV以上の高エネルギー宇宙線のイベントの有意度分布  
(2008年～2013年)

出展: 「宇宙の最高エネルギー粒子生成源へ手がかり」  
- 最高エネルギー宇宙線のホットスポットの兆候 - (2014/07/08)

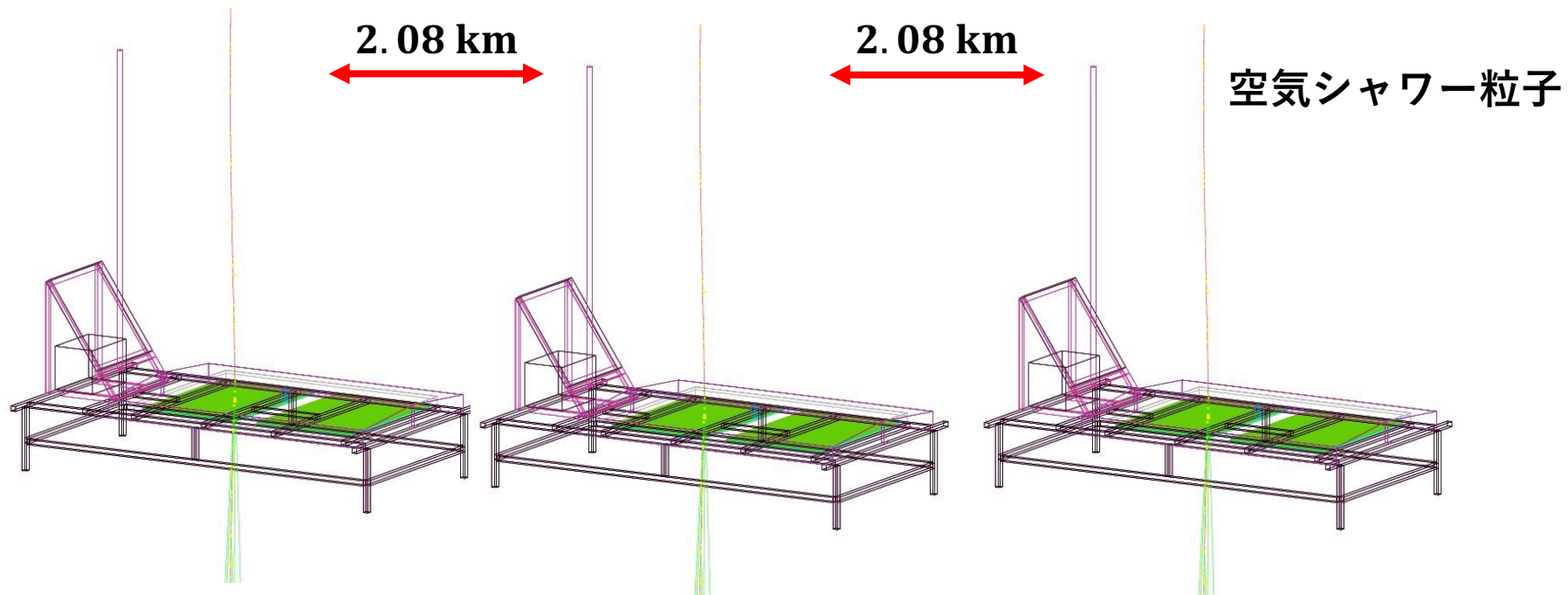
さらに統計量を増やして超高エネルギー宇宙線の  
解析を行うためTAx4実験が計画



- ・ 観測面積はTA実験の4倍の約3000 km<sup>2</sup>
- ・ TAx4実験のSDの設置間隔は2.08 km

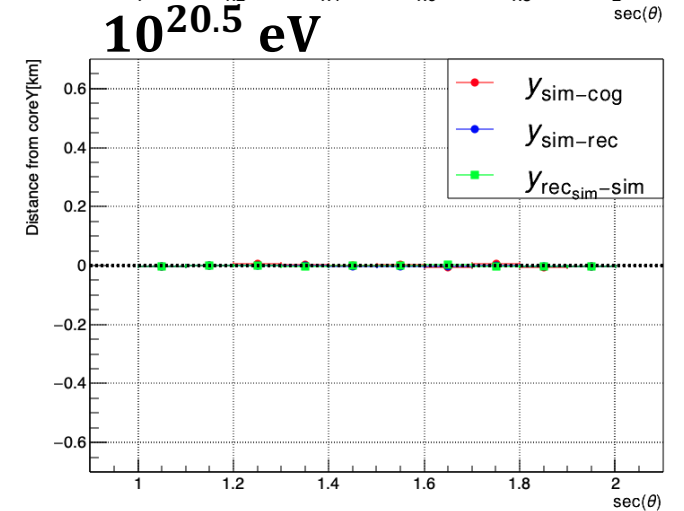
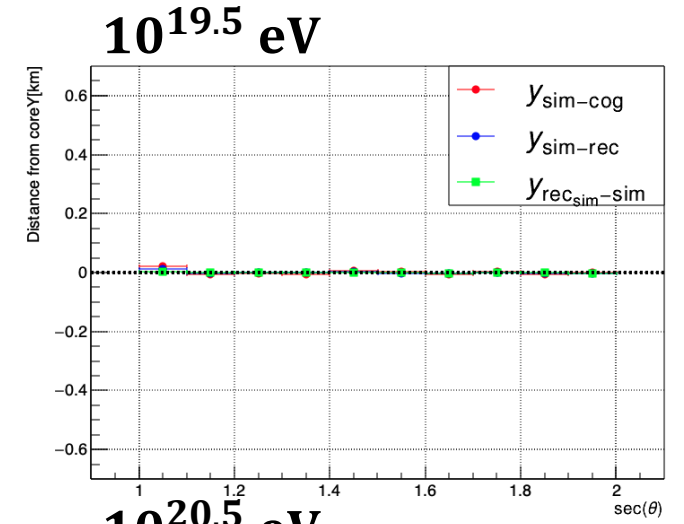
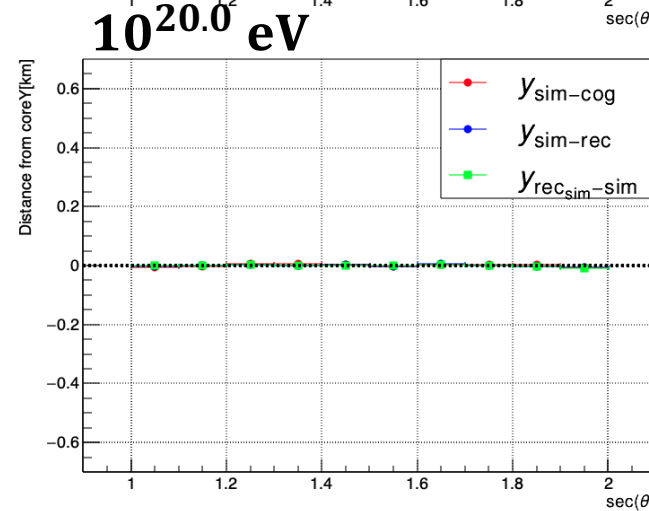
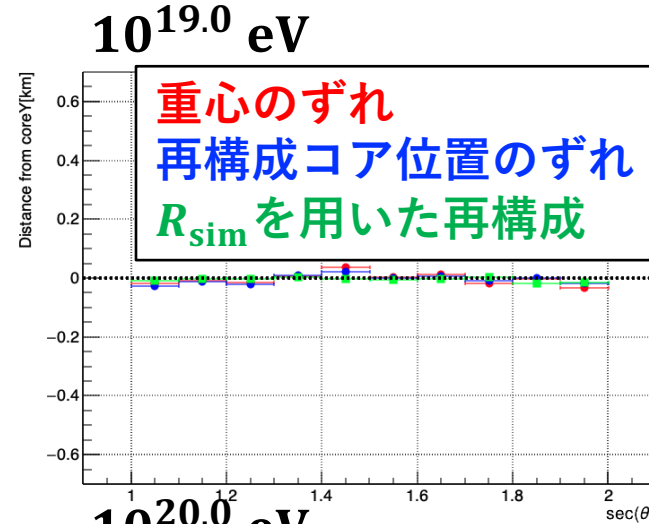
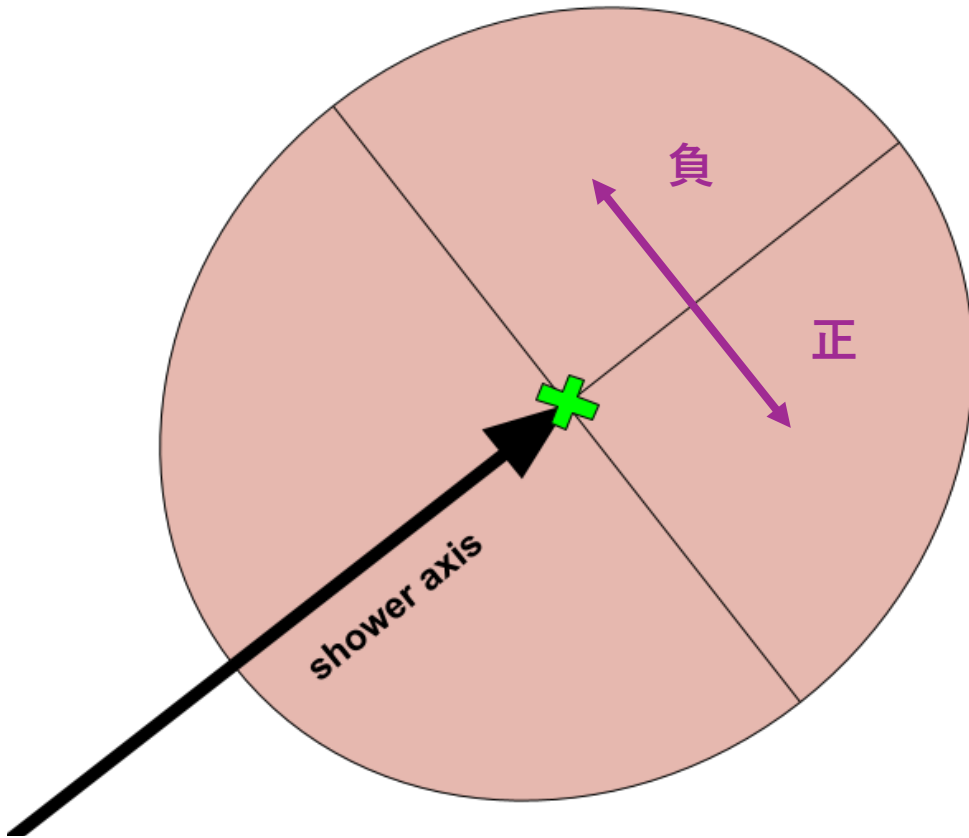
# 地表検出器

- 荷電粒子が通過すると発光するシンチレータが二層搭載されている
- 空気シャワー粒子が通過した際の発光量を記録
- 隣接したSD3台以上が信号を検出すると、空気シャワーが来たと判断



# 現状のコア位置のbias

空気シャワーの真の進行方向とコア位置に対して左右にどのくらいずれたか



左右のずれは平均的に0になる

# エネルギー推定

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

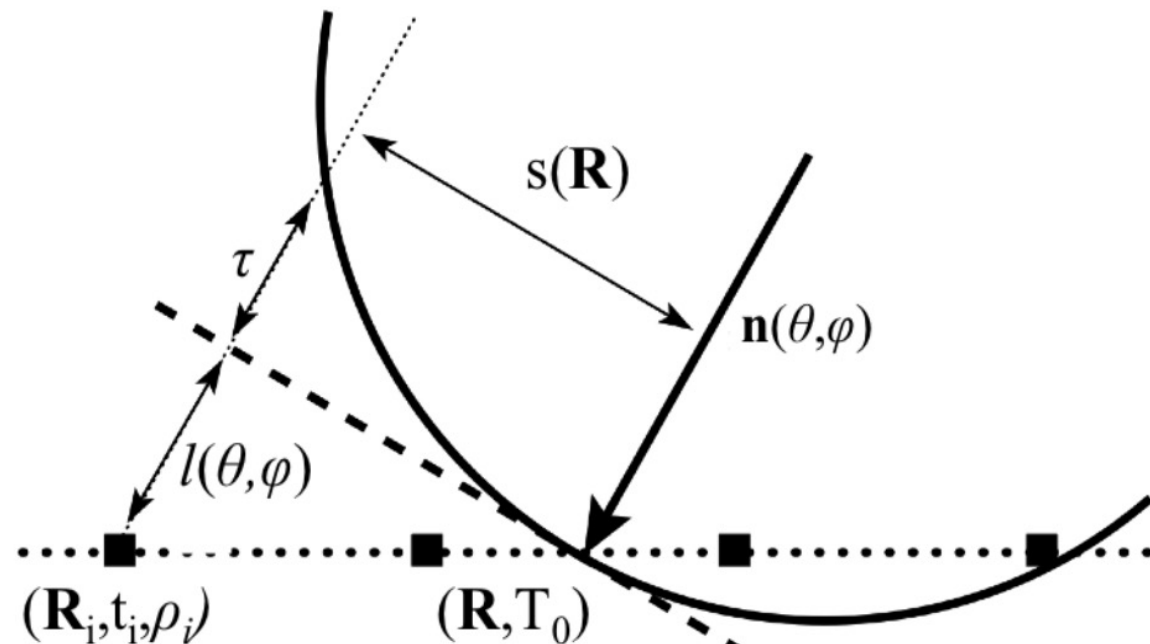
$$\rho_i^{\text{FIT}}(s) = A \left( \frac{s}{91.6 \text{ m}} \right)^{-1.2} \left( 1 + \frac{s}{91.6 \text{ m}} \right)^{-(\eta(\theta)-1.2)} \left( 1 + \left[ \frac{s}{1000 \text{ m}} \right] \right)^{-0.6}$$

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

$$\sigma_{\rho_i} = \sqrt{0.56\rho_i + 6.3 \times 10^{-3}\rho_i^2}$$

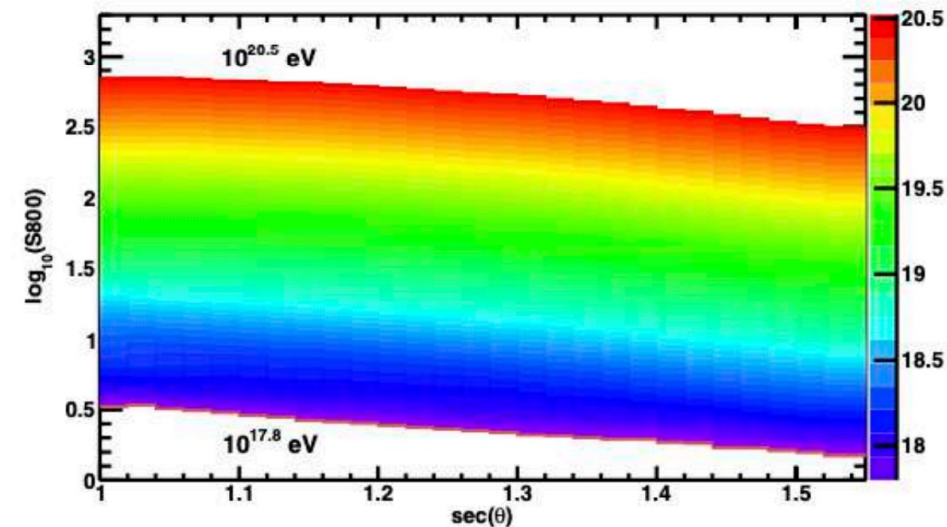
$$\sigma_{t_i} = \sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_t^2}, \sigma_{R_{\text{COG}}} = 150 \text{ m}$$

$\chi^2$ を最小化するための変数のひとつに  
シャワーの大きさを決めるパラメータAを求める



シャワー軸から800 m離れた位置での粒子数密度と  
天頂角の関係からエネルギーを推定する

← TA SD用のエネルギーテーブル



# 重みの最適化

$$w_i \rightarrow \rho_i^{1/a} + b, \log_a \rho_i + b$$

$$\vec{R} = \frac{\sum_{i=1}^{N_{SD}} w_i \vec{r}_{SDi}}{\sum_{i=1}^{N_{SD}} w_i}$$

目的関数	$\Delta R =  \vec{R}_{sim} - \vec{R} $
最適化関数	Nelder-Mead法
目的関数の最小値	$\Delta R \geq 0.01 \text{ km}$
最適化パラメータ	$a, b$
最適化パラメータに課す条件	$a \geq 1$

