

TA実験地表検出器アレイによる 極高エネルギー宇宙線空気シャワーフロント構造の研究

Study of the front structure of extensive air showers
induced by ultra-high energy cosmic rays
measured with the TA surface detector array

大阪市立大学大学院 理学研究科
宇宙線物理学研究室
高木 芳紀

Outline

●テレスコープアレイ実験

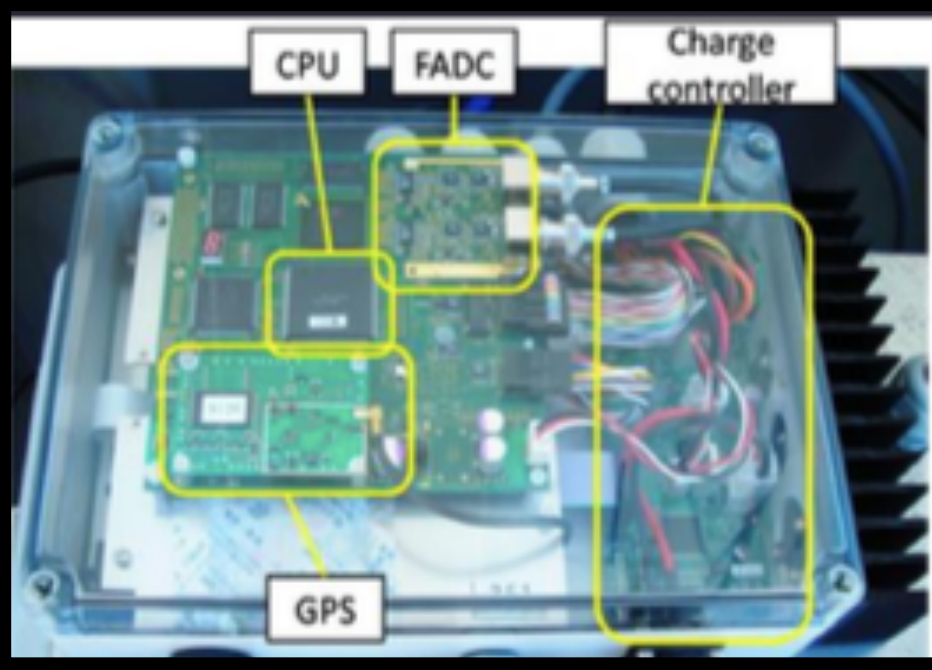
- Telescope Array実験
- 地表検出器

●SDアレイを用いた空気シャワー構造の研究

- 空気シャワーフロント構造
- 粒子の到来時間、粒子数の決定
- 到来方向、コア位置の計算
- 空気シャワーフロント構造の関数化

●まとめと今後

地表核

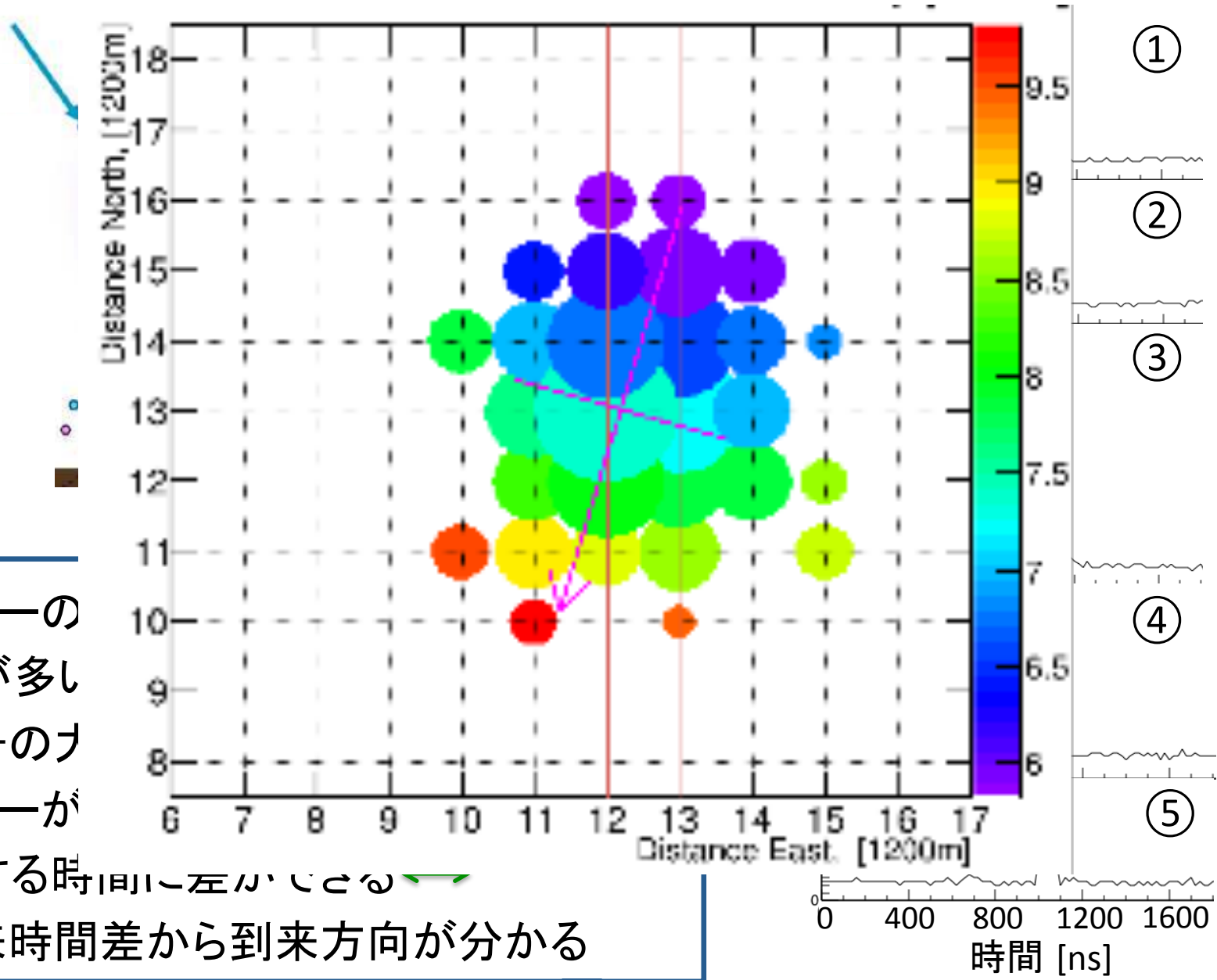


IT)へ集光

録

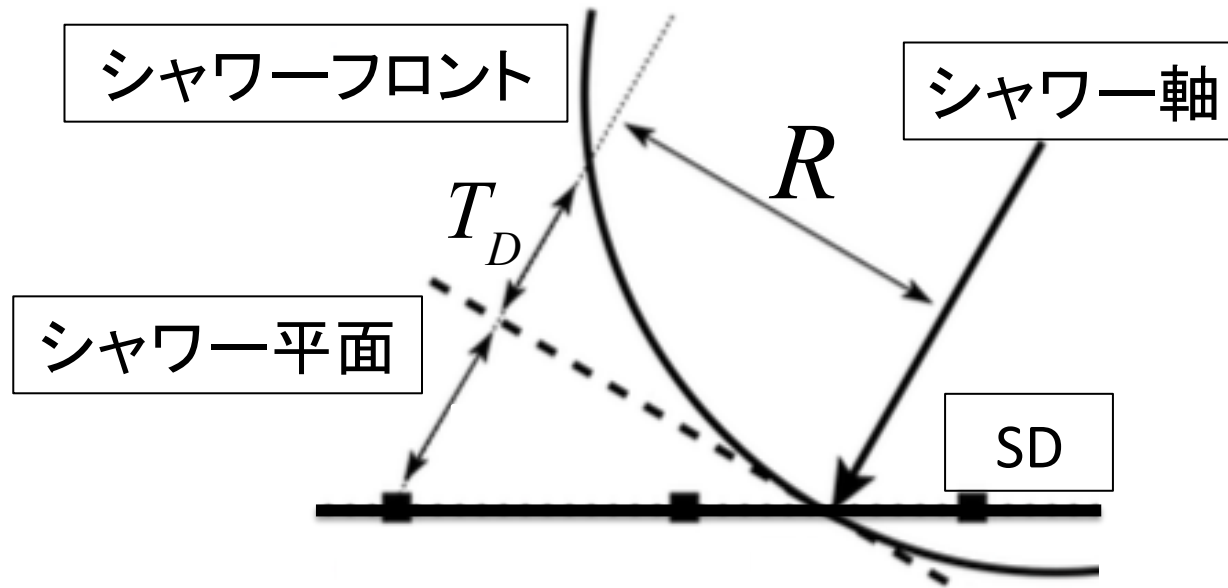


SDアレイによる空気シャワー観測



シャワーの粒子が多い
 →信号のノイズが少くなる
 シャワーが入射する時に
 同時に左から右へ
 →到来時間差から到来方向が分かる

空気シャワーフロント構造



- 空気シャワーの進行方向最前面(“シャワーフロント”)は、平面(“シャワー平面”)で近似されるが実際は曲面構造。
- 粒子の到来時間差から一次宇宙線の到来方向を決定する際、シャワーフロントの曲面構造を考慮する必要あり。
- 曲面構造は一次宇宙線のエネルギーや到来天頂角に依存。

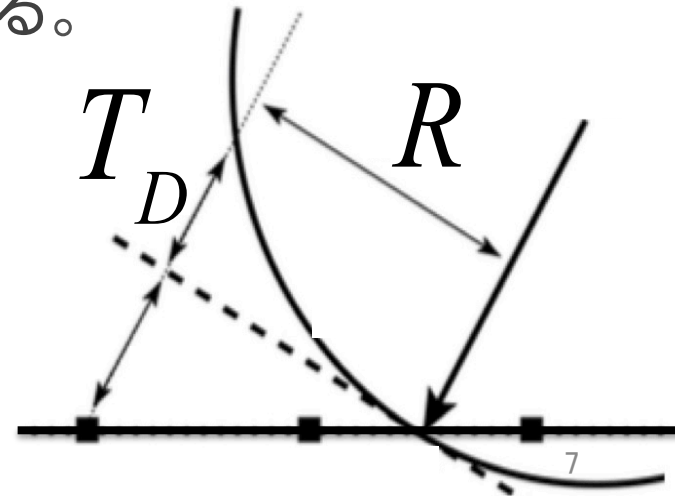
パラメータ T_D とエネルギー、到来方向の関係

●エネルギー高

- シャワー進行方向前方の粒子が検出されやすくなるため、 T_D は小さくなる。

●天頂角大

- 大気を通過する量が多くなりシャワー後方の電磁成分が大気に吸収され減少する。その結果、平面で到来するミュオン成分が大半を占めるので T_D は小さくなる。

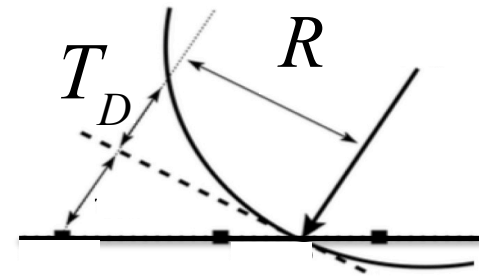


空気シャワーフロント構造の研究

- これまでにシャワー軸からの距離Rとシャワー粒子の到来時間の平面からの遅れ T_D の関係の関数化がされてきた。

➤ AGASAグループが使っていた実験式(“AGASAの式”)。

$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30\text{m}} \right)^{1.5} \times \rho^{-0.5} \times 10^{-9} [\text{s}]$$



- TA実験SDアレイの観測データを反映する実験式に更新する。

➤ TA実験(標高1400 m)とAGASA実験(標高900 m)ではシャワーの発達が異なる。

➤ TA実験SDアレイのデータを反映する際、到来天頂角依存性を確かめる。

➤ AGASAの式の冪(1.5, -0.5)を到来天頂角を考慮したものにする。

到来時間の決定と粒子数の計算

到来時間の決定

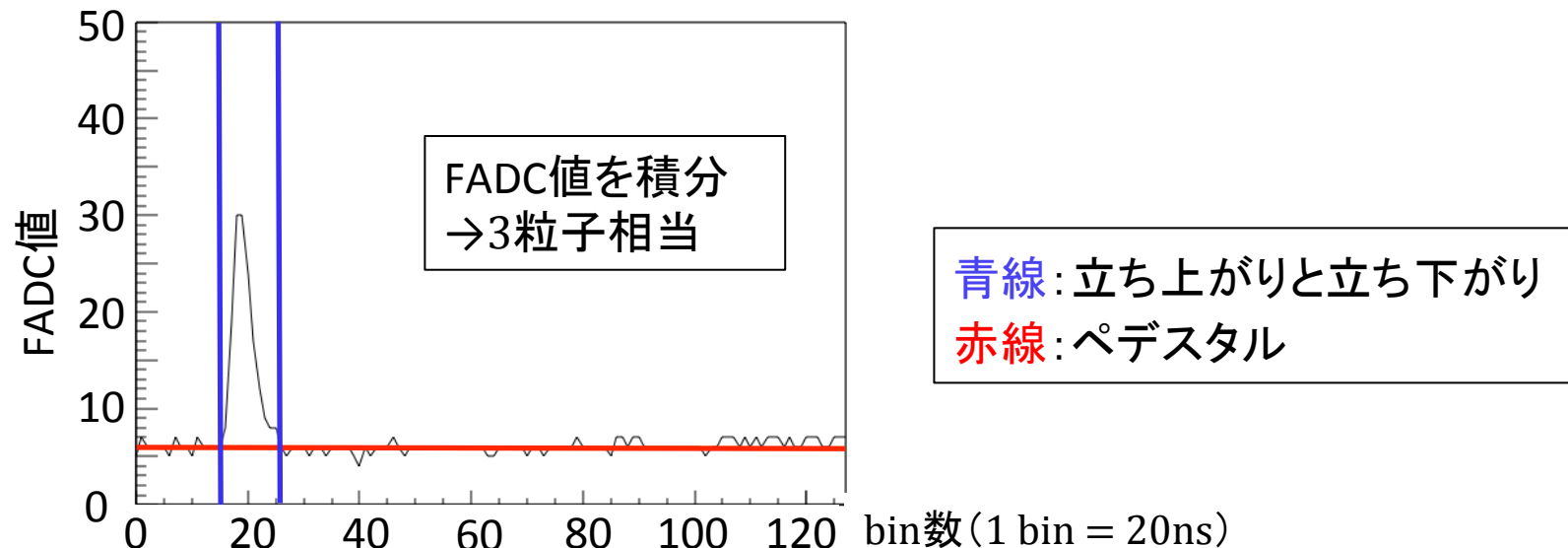
波形の立ち上がり時間(=粒子の到来時間)を決定

(8 binの(FADC値 - ペDESTAL)の和がしきい値以上 → 先頭のbin)

粒子数の計算

立ち上がり時間～立ち下がり時間までFADC値を積分

FADC値から粒子数へ変換係数を用いて変換



到来方向の計算

到来方向の計算時のみ、AGASAの式を変更した T_D とその標準偏差 σ_D を用いて χ_G^2/ndf を最小にするパラメータを探す。

t_i : 各検出器の到来時間

R_{core} : コア位置

R_{COG} : 重心の位置

T_{plane} : SDからシャワー平面までの距離を時間に換算したものの

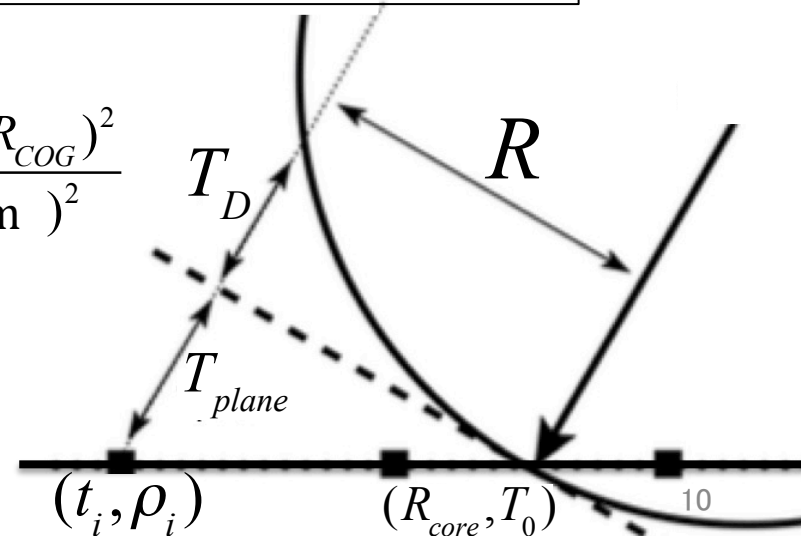
σ_{SD} : SDの時間分解能(20 ns)

R : シャワー軸からの距離

$$\chi_G^2/ndf = \frac{1}{n-5} \sum_{i=1}^n \frac{(t_i - T_0 - T_{plane}(\theta, \varphi) - T_D)^2}{\sigma_D^2 + \sigma_{SD}^2} + \frac{(R_{core} - R_{COG})^2}{(170 \text{ m})^2}$$

$$T_D = a(\theta) \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}}\right)^{1.5} \times \rho^{-0.5} \times 10^{-9} [\text{s}]$$

$$\sigma_D = a(\theta) \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}}\right)^{1.5} \times \rho^{-0.3} \times 10^{-9} [\text{s}]$$



コア位置の計算

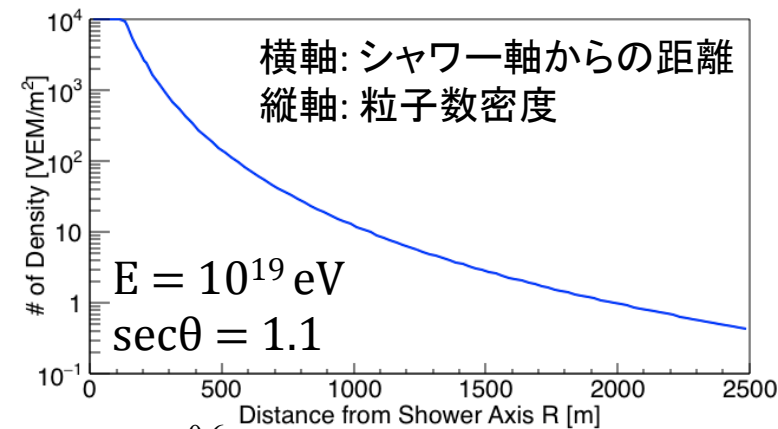
AGASA実験で得られた横方向分布を表す関数を用いて χ_L^2 / ndf を最小にするパラメータを探す。

$$\chi_L^2 / ndf = \frac{1}{n-3} \sum_{i=1}^n \frac{(\rho_i - \rho_i^{FIT})^2}{\sigma_\rho^2} + \frac{(R_{core} - R_{COG})^2}{(170 \text{ m})^2}$$

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

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

$$\sigma_\rho = \sqrt{0.56 \rho^{FIT} + 6.3 \times 10^{-3} (\rho^{FIT})^2}$$



ρ_i : 各検出器の粒子数密度 [m^{-2}]

N : 総荷電粒子数

R : シャワー軸からの距離

θ : 天頂角

解析イベントとセレクション

イベント: TA実験SDアレイで観測された7年分のデータ
(2008/05/11 ~ 2015/05/11)

セレクション: TA実験SDアレイの解析で用いられている標準的なもの
(イベント数: 35,883)

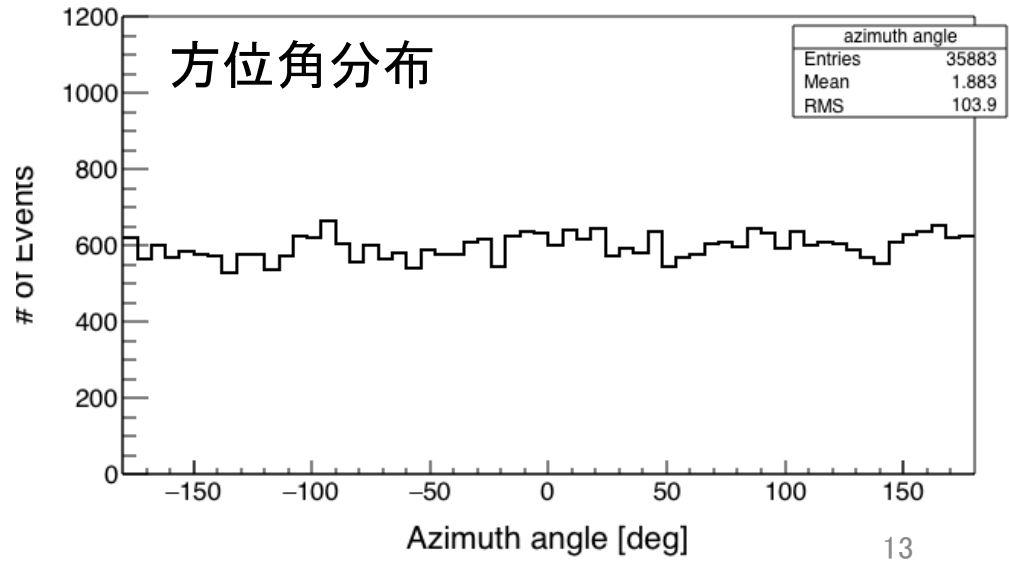
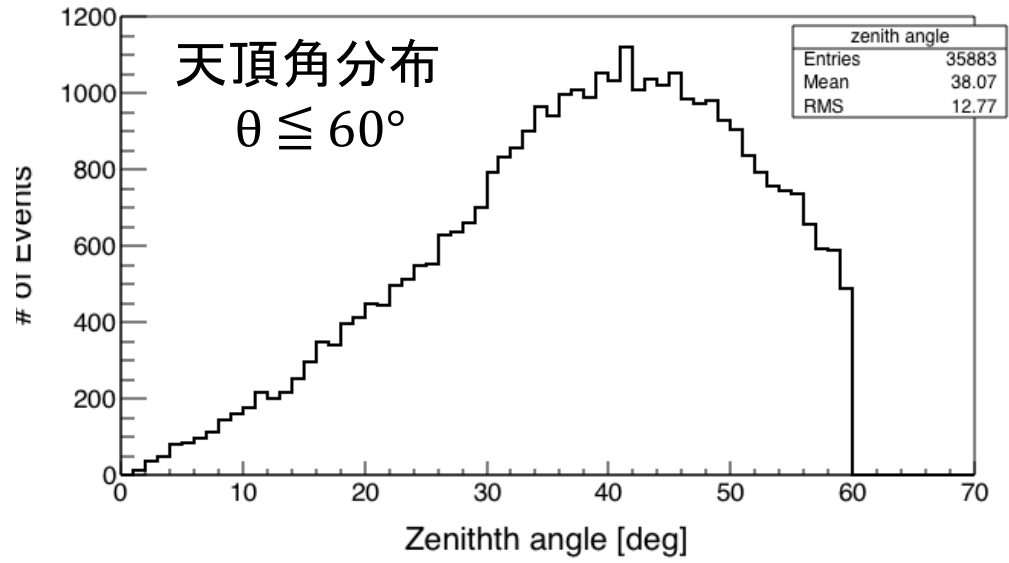
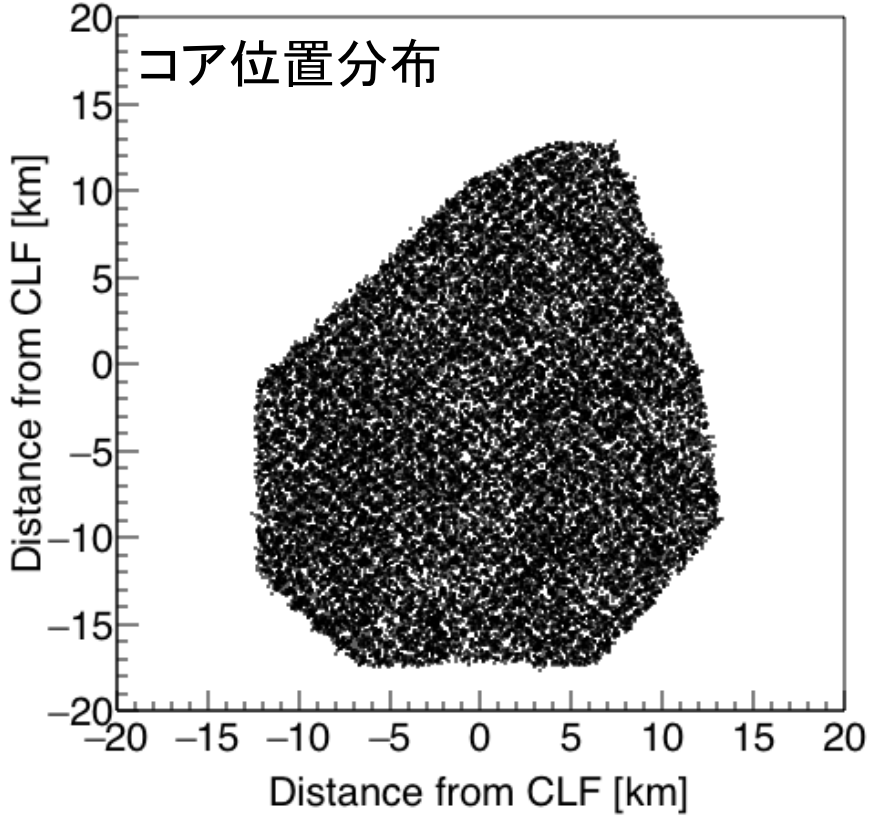
セレクションの詳細

energy ≥ 1 EeV 、 $\theta \leq 60$ degree 、 $X^2 / \text{ndf} \leq 4$

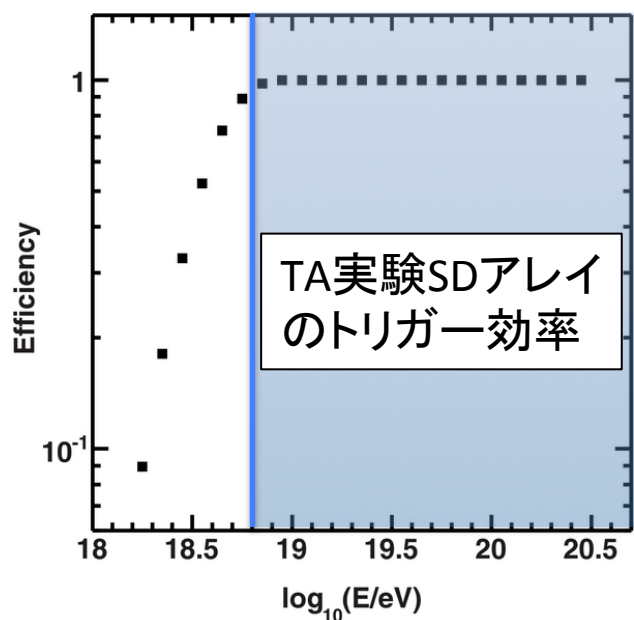
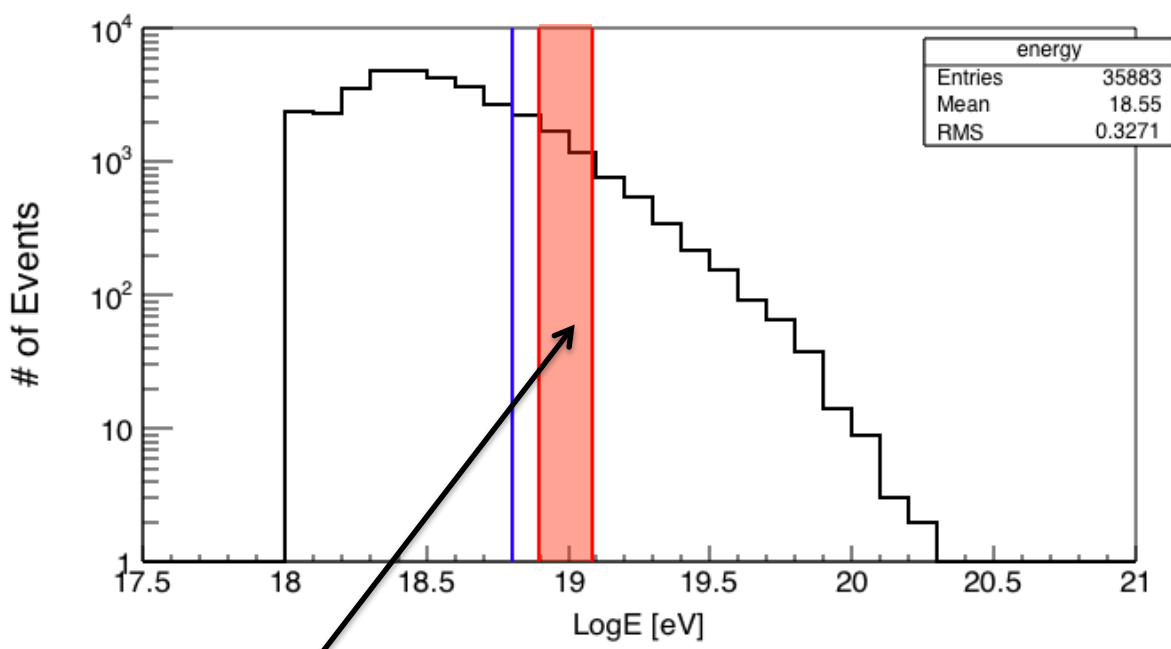
$\theta_{\text{err}} \leq 5^\circ$ 、 $\sigma(\text{s800}) / \text{s800} \leq 0.25$ 、 # of good SD ≥ 5

core position ≥ 1200 m from edge of array

セレクション後のイベント



追加のイベントセレクション(エネルギー領域)



logE (eV)	# of Events
19.0	2723

横軸: エネルギー
縦軸: トリガー効率

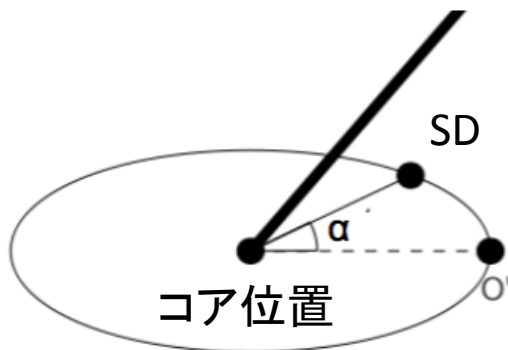
TA実験SDアレイのトリガー効率が100%になるエネルギー領域 ($E \geq 10^{18.8}$ eV) の中でイベント数の多い $E = 10^{19.0}$ eV ($\pm 21\%$) の範囲のデータを解析。

※幅21%はTA実験のエネルギー決定精度

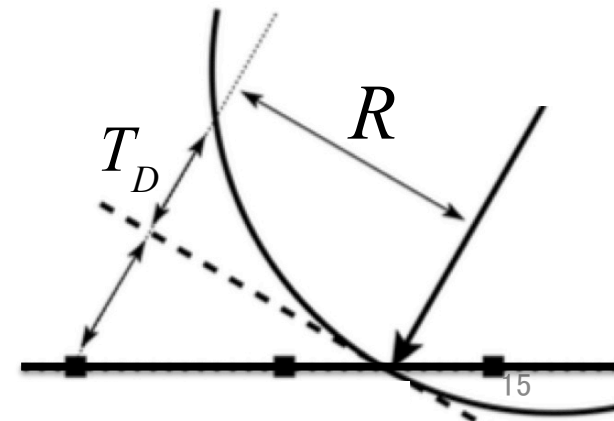
シャワー粒子の平面からの遅れの時間の関数化

シャワー平面からのシャワー粒子の到来時間の遅れの関数化の手順

1. データを天頂角($\sec\theta$)、角度 α で分割。
($1.0 \leq \sec\theta \leq 2.0$ 、0.2間隔、 $0^\circ \leq |\alpha| \leq 180^\circ$ 、 30° 間隔)
2. シャワー軸から距離500 mから2500 mの範囲でシャワー平面からの到来時間の遅れ T_D を計算し、距離250 mごとにシングルミュオンデータのデータを
取り除く。
3. ($\sec\theta, |\alpha|$)の組ごとにデータをフィッティング。



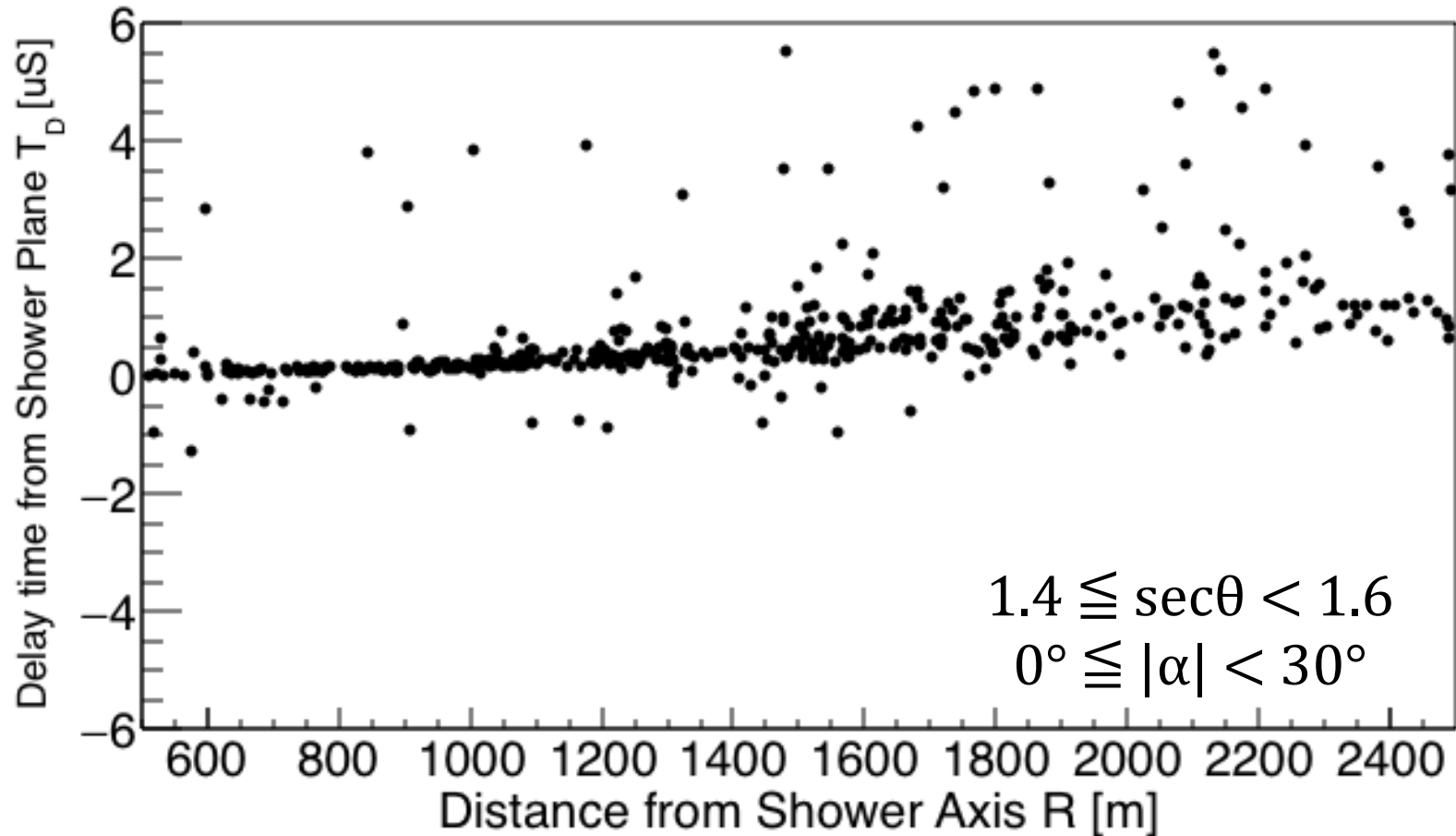
角度 α はシャワー軸を地表に
投影したものとSDとの方位角



シャワー軸からの距離と到来時間の遅れのプロット

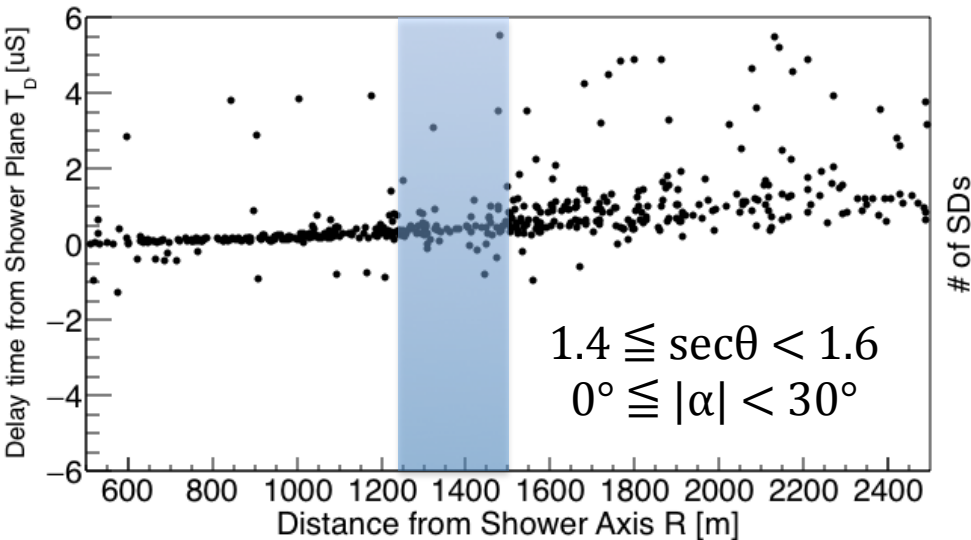
横軸: シャワー軸からの距離

縦軸: シャワー平面からの到来時間の遅れ

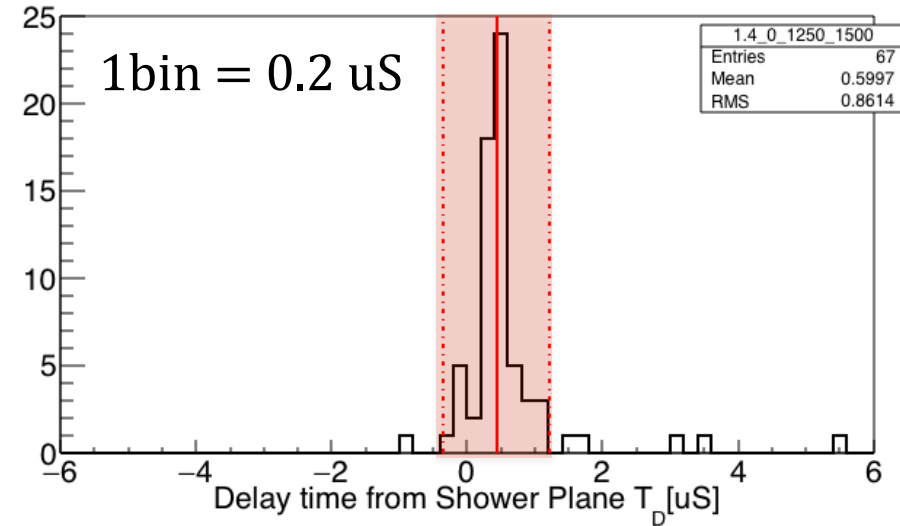


シングルミュオンのデータの除去

横軸: シャワー軸からの距離
縦軸: シャワー平面からの到来時間の遅れ



横軸: シャワー軸からの距離
 $1250 \text{ m} \leq R \leq 1500 \text{ m}$



シングルミュオンのデータの除去の手順。

1. 各binの要素数を計算し, 要素数 ≥ 2 のbinに入っているデータのみで平均値, 標準偏差 σ を計算。
2. 平均値 $\pm 3\sigma$ の範囲内(赤枠)のデータのみを以後のフィッティングに使う。
(フィッティングでは, 要素数1以下のbinのデータも使う)

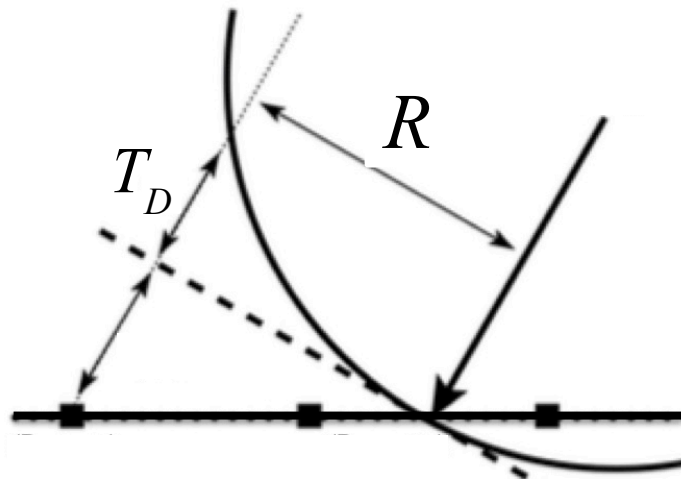
シャワー平面からの遅れの時間のフィッティング

フィッティング関数はAGASAの式を元にし、 $(\sec\theta, |\alpha|)$ の組ごとにデータをフィッティングしてパラメータ p_0 、 p_1 を得た

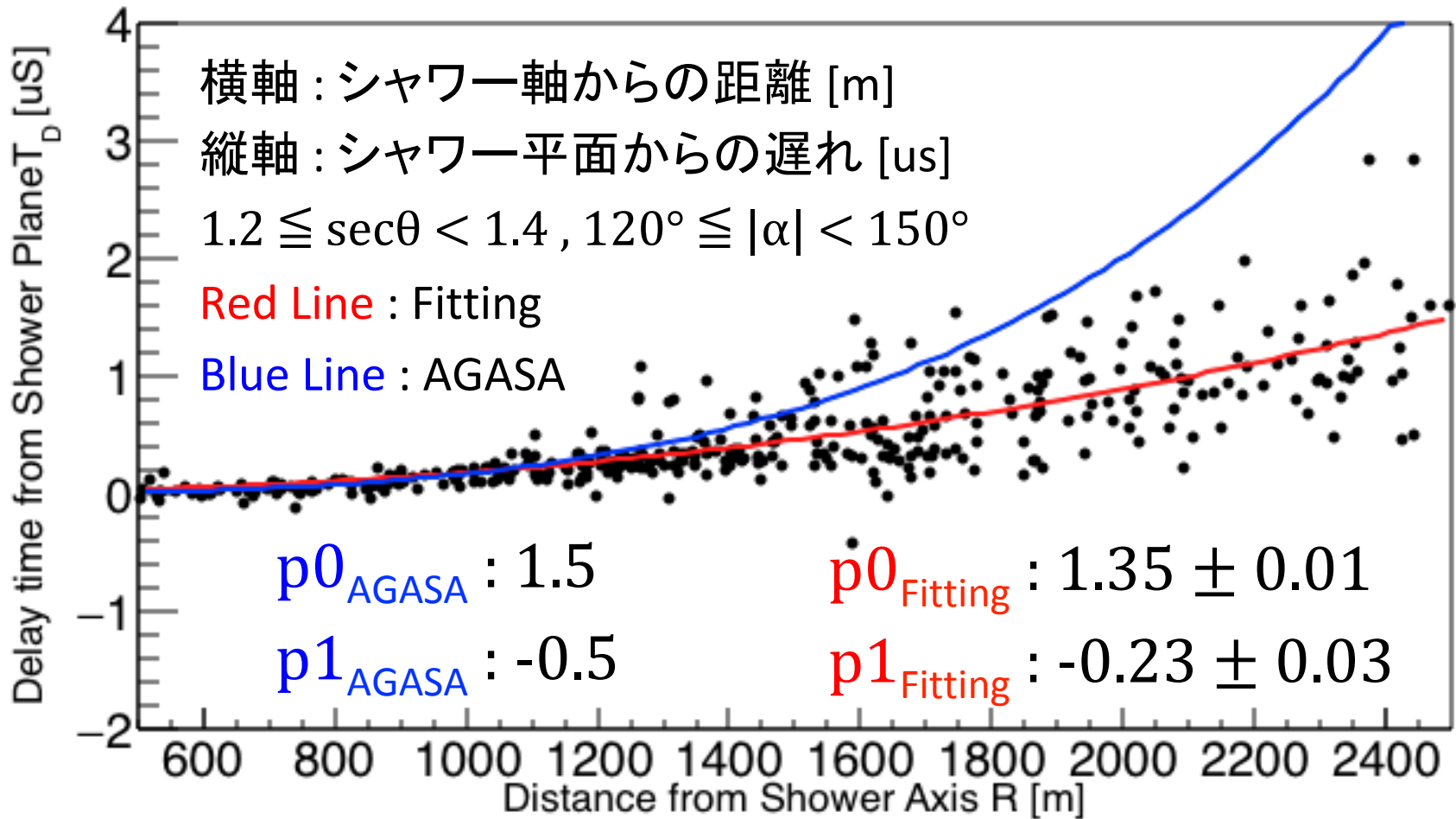
$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}}\right)^{p_0} \rho^{p_1} \times 10^{-9} \text{ [s]}$$

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

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



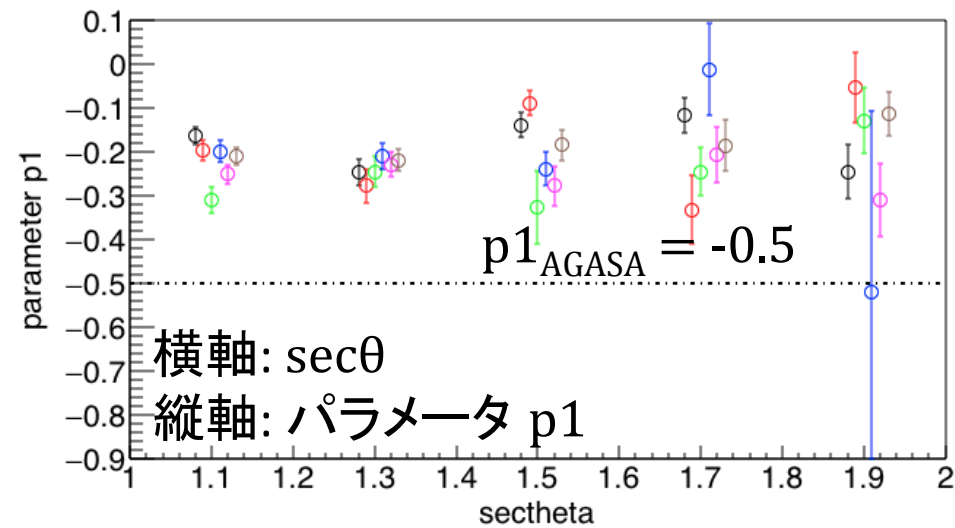
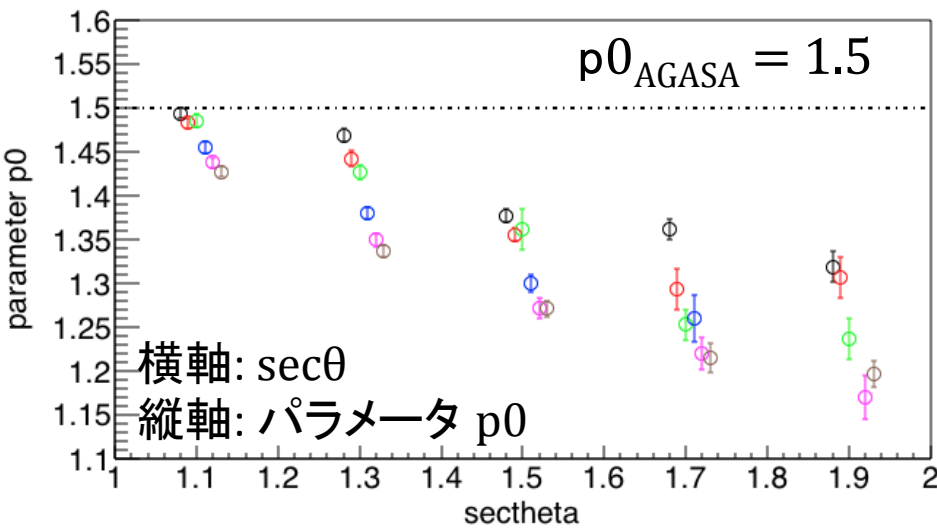
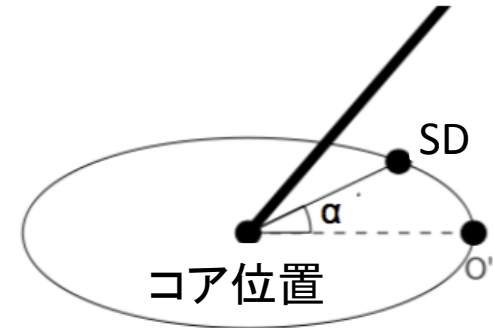
シャワー平面からの遅れの時間のフィッティングの1例



$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}} \right)^{p0} \rho^{p1} \times 10^{-9} [\text{s}]$$

フィッティングの結果

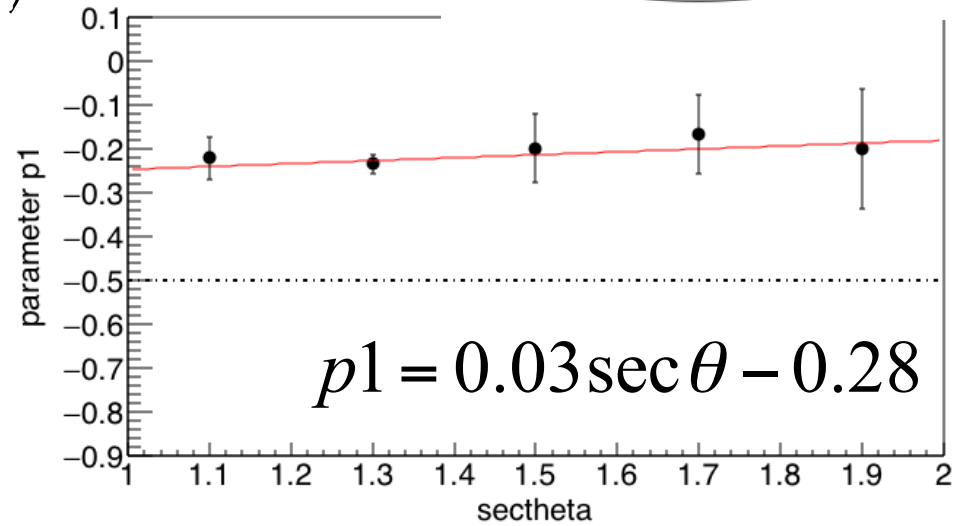
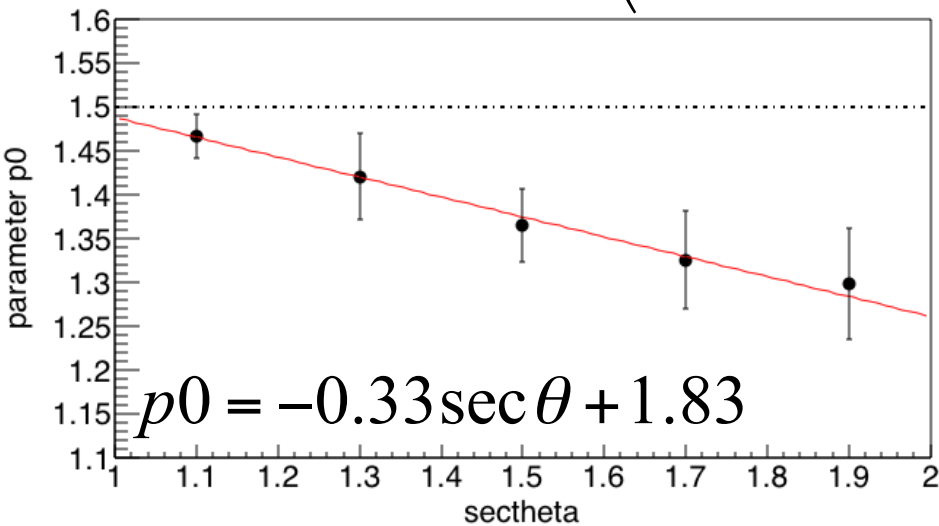
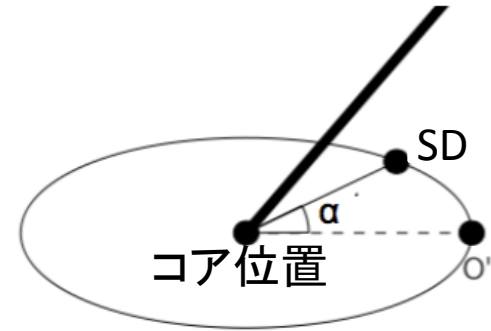
$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}} \right)^{p_0} \rho^{p_1} \times 10^{-9} [\text{s}]$$



black : $0^\circ \leq |\alpha| < 30^\circ$ 、red : $30^\circ \leq |\alpha| < 60^\circ$ 、green : $60^\circ \leq |\alpha| < 90^\circ$
 blue : $90^\circ \leq |\alpha| < 120^\circ$ 、pink : $120^\circ \leq |\alpha| < 150^\circ$ 、brown : $150^\circ \leq |\alpha| < 180^\circ$

フィッティングの結果

$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}} \right)^{p_0} \rho^{p_1} \times 10^{-9} \text{ [s]}$$



secθ	parameter p0	parameter p1
$1.0 \leq \sec \theta < 1.2$	1.46 ± 0.03	-0.22 ± 0.05
$1.2 \leq \sec \theta < 1.4$	1.40 ± 0.05	-0.24 ± 0.02
$1.4 \leq \sec \theta < 1.6$	1.32 ± 0.04	-0.21 ± 0.08
$1.6 \leq \sec \theta < 1.8$	1.27 ± 0.05	-0.18 ± 0.10
$1.8 \leq \sec \theta < 2.0$	1.21 ± 0.10	-0.23 ± 0.16

secθごとの平均値 ± 標準偏差を
一次関数でフィッティング。

まとめと今後

TA実験SDアレイ7年分の観測データを用いてシャワー軸からの距離とシャワー平面からの粒子の到来時間の遅れの間をTA実験SDアレイの標高での空気シャワーの発達の様子、到来天頂角を考慮して関数化した。

$$T_D = 2.6 \times \left(1.0 + \frac{R}{30 \text{ m}}\right)^{p_0} \rho^{p_1} \times 10^{-9} \text{ [s]}$$

$$p_0 = -0.33 \text{ sec } \theta + 1.83$$

$$p_1 = 0.03 \text{ sec } \theta - 0.28$$

- 2.6もパラメータにして関数化する。
- シングルミュオン除去の方法の再検討。
- 別のエネルギー領域でも関数化する。

大気蛍光望遠鏡 (Fluorescence Detector, FD)

Middle Drum

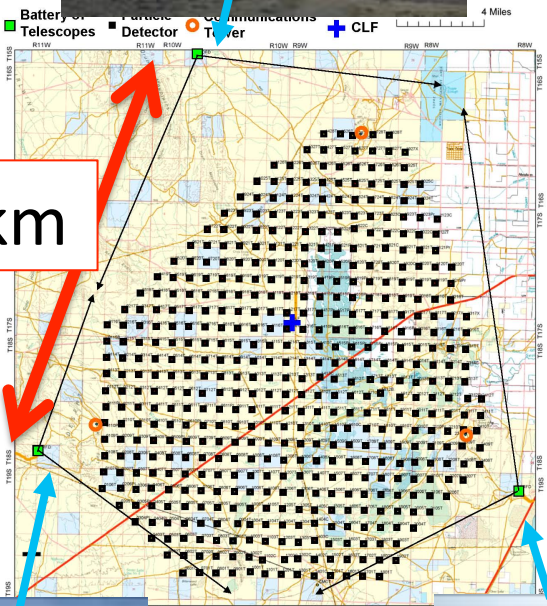


14カメラ
256 PMTs / カメラ

HiRes実験から移設



5.2 m²



新造大気蛍光望遠鏡

12カメラ / ステーション
256 PMTs / カメラ
FOV ~ 15° × 18° / カメラ



~1 m²

6.8 m²

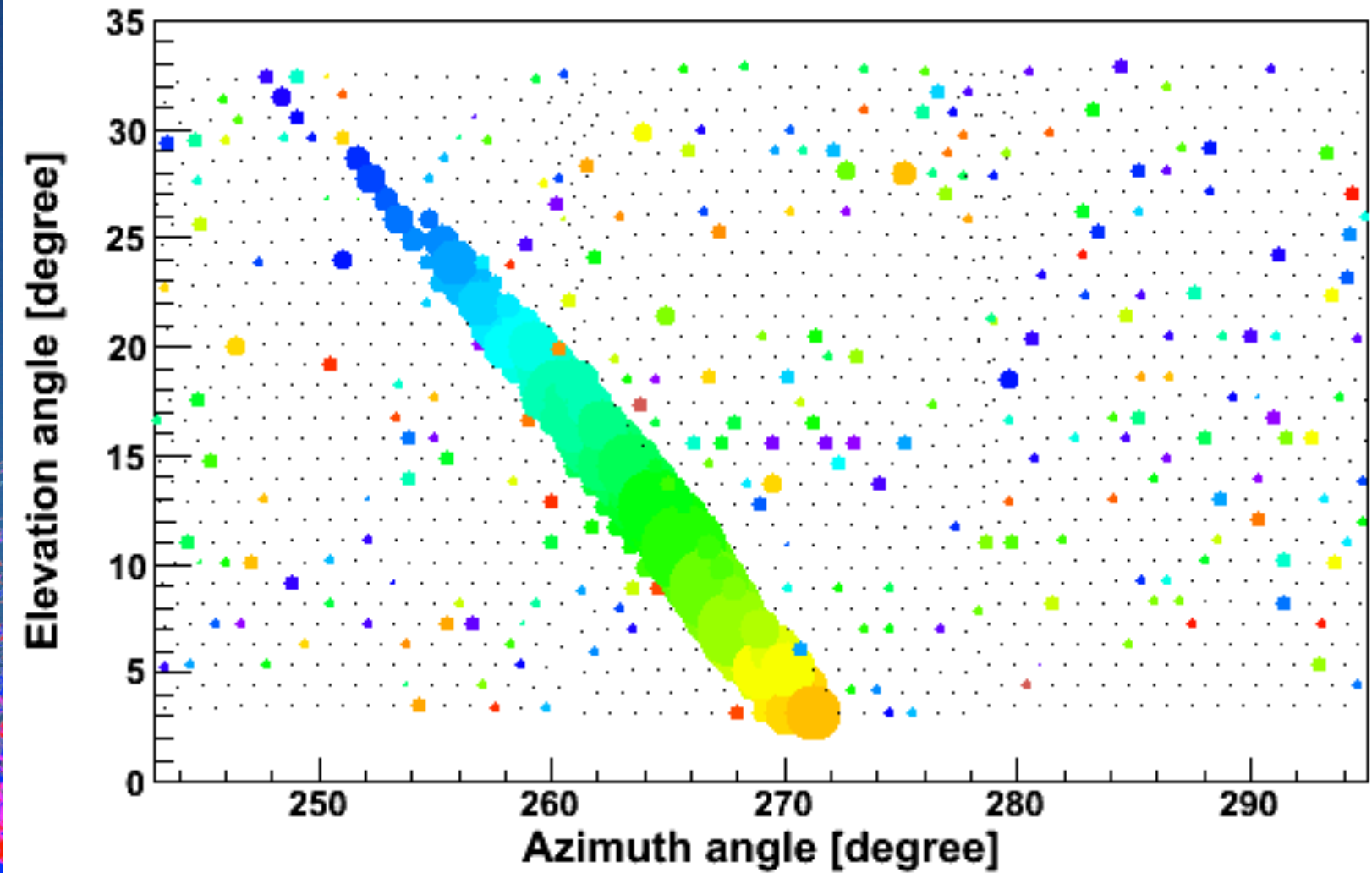
Long Ridge



Black Rock Mesa



FDによる空気シャワー観測

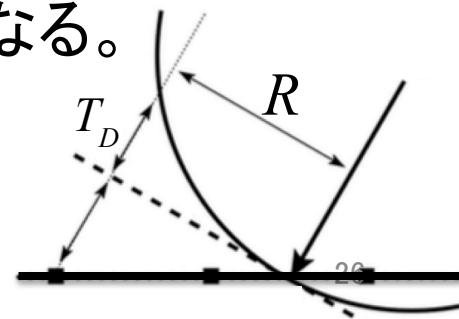
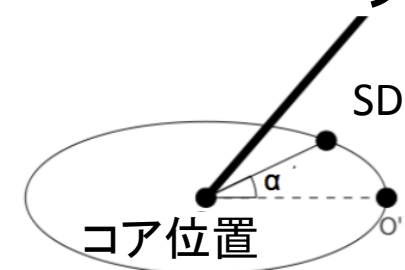


camera

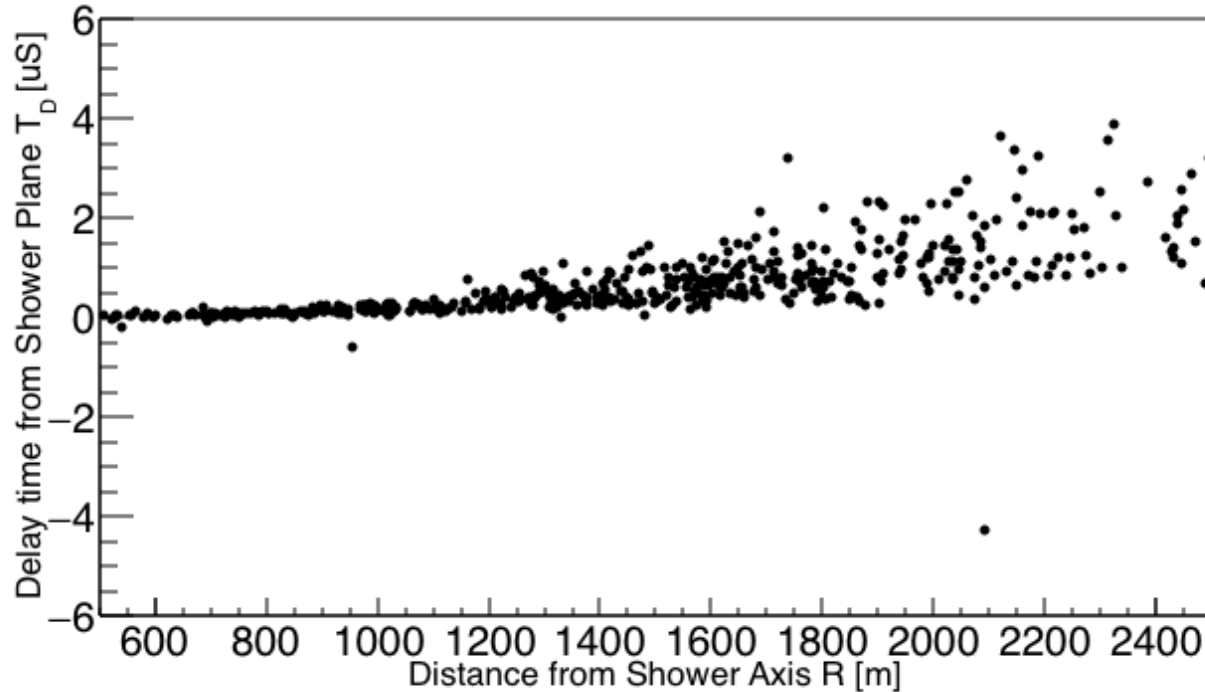
シャワーフロントの曲面構造

シャワーフロントの曲面構造を表すパラメータ T_D とエネルギー、到来方向の関係

- エネルギー高: シャワー進行方向前方の粒子が検出されやすくなるため、 T_D は小さくなる。
- 天頂角大: 大気を通過する量が多くなりシャワー後方の電磁成分が大気に吸収され減少する。その結果、平面で到来するミュオン成分が大半を占めるので T_D は小さくなる。
- 角度 $|\alpha|$ 大: 角度 $|\alpha|$ が小さいときよりも大気の通過量が多くなるので天頂角大のときと同じ理由で T_D は小さくなる。



データ点の精度



- 到来時間(波形の立ち上がり判定)

- 1bin、多くても2~3 binの揺らぎで収まり、時間に変更しても60 ns以内にはおさまる。

- シャワー平面の決定

- TA実験SDアレイの到来方向の決定精度は 10^{19} eV以上では $\sim 1.4^\circ$ であり、平面の揺らぎは $\tan(1.4^\circ) = 0.02$ 。1 km先で0.1 us程度の揺らぎである。

イベントセレクション

フィッティングして到来方向を計算する際、ROOTのMINUITパッケージを使用している。
フィッティングすると天頂角、方位角のエラー(σ_θ 、 σ_φ)が得られる。

$$\theta_{err} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sin^2 \theta \times \sigma_\varphi^2}$$

明野グループの横方向分布関数を用いてシャワー軸から距離800 mの地点での
粒子数密度s800をフィッティングで得た際に $\sigma(s800)$ が得られる。
これとAGASAグループの横方向分布関数の規格化定数Cを用いて計算する。

$$C = \frac{\Gamma(\eta(\theta) - 1.2)}{2\pi\Gamma(0.8)\Gamma(\eta(\theta) - 2)}$$
$$\eta(\theta) = 3.972 - 1.792(\sec \theta - 1)$$
$$\frac{\sigma(s800)}{s800} = \frac{\sigma(s800)}{C}$$

地表検出器のシンチレータ

●シンチレータの選択

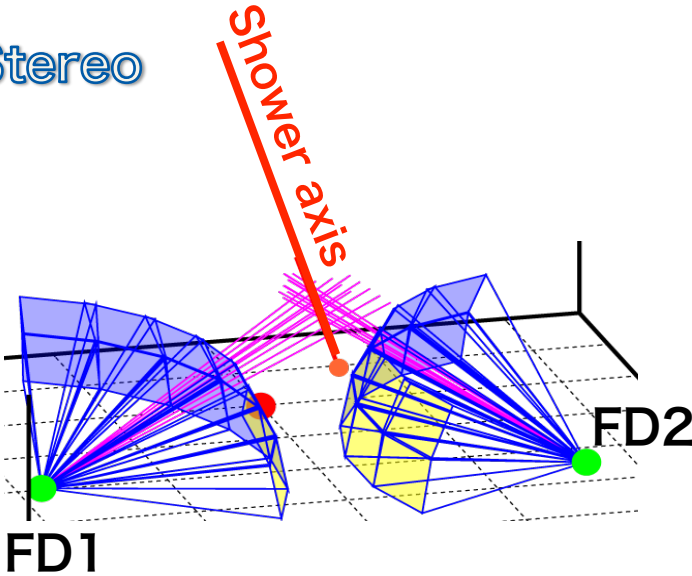
- 有機シンチレータ: 安価、簡易
- 無機シンチレータ(NaI): Z大、 γ 線の吸収量が大い、潮解性

●シンチレータの厚さ

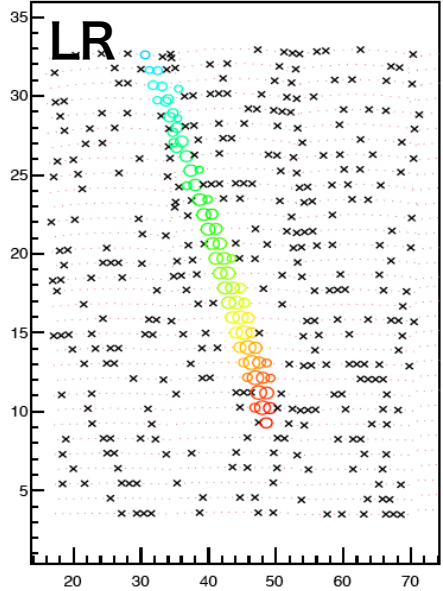
- 厚くすることでエネルギーの大きい粒子を測る。
- 環境放射線は数MeV
- TAは上下2層にしてコインシデンスを取ることで分厚いシンチレータにしている。

FD検出からイベント再構成

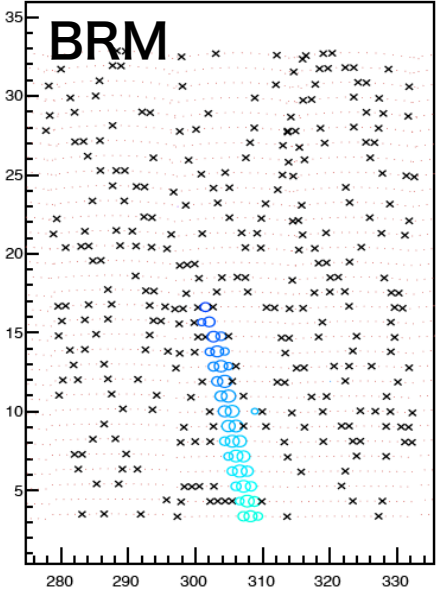
Stereo



Camera images

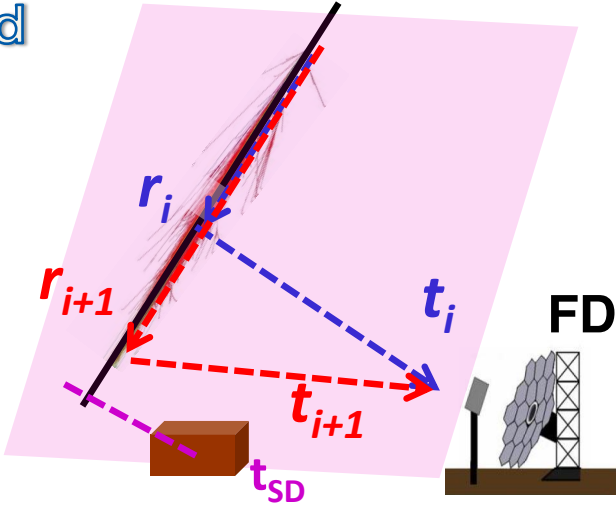


Tsunesada, ICRC2013



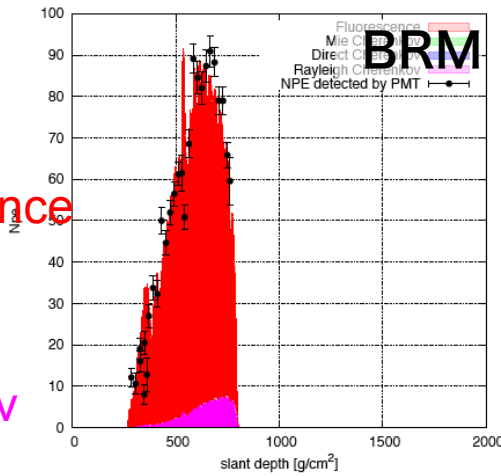
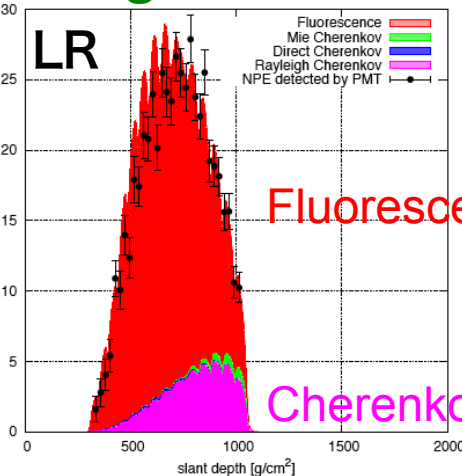
Hybrid

Timing Fitting



$$\sigma_{X_{\max}} \sim 20 \text{ g/cm}^2$$

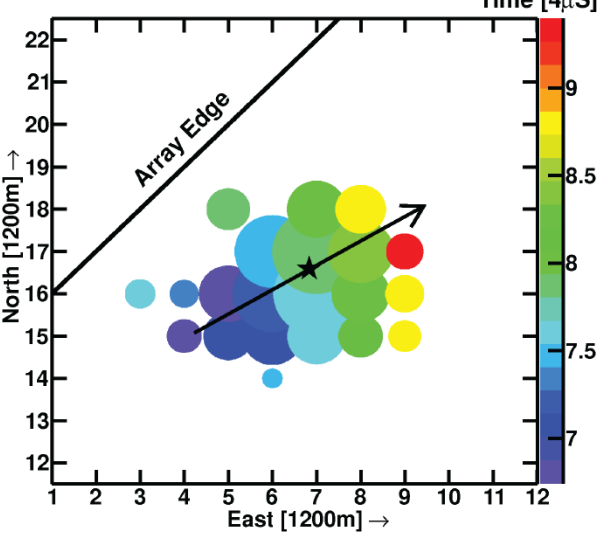
Longitudinal Profiles



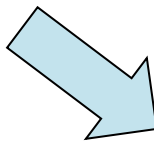
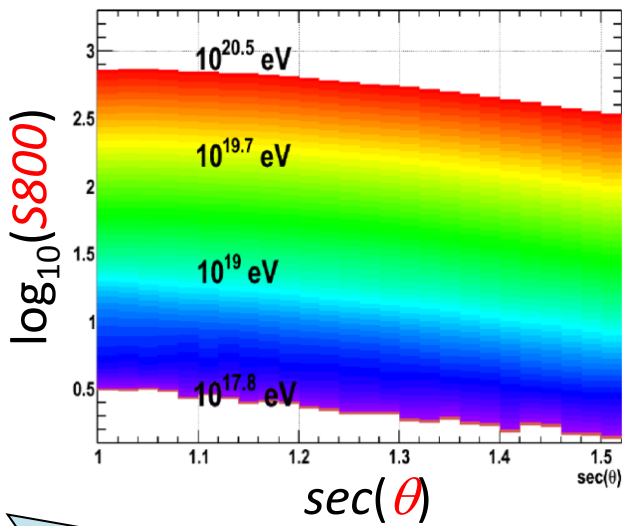
SDイベントに対するエネルギー決定

Ivanov, ICRC2013

An SD hit map of a typical high energy event

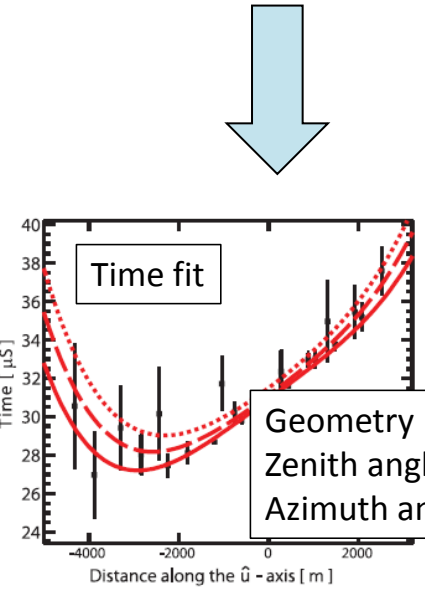


$$E'_{SD} = E'_{SD}(S800, \theta)$$

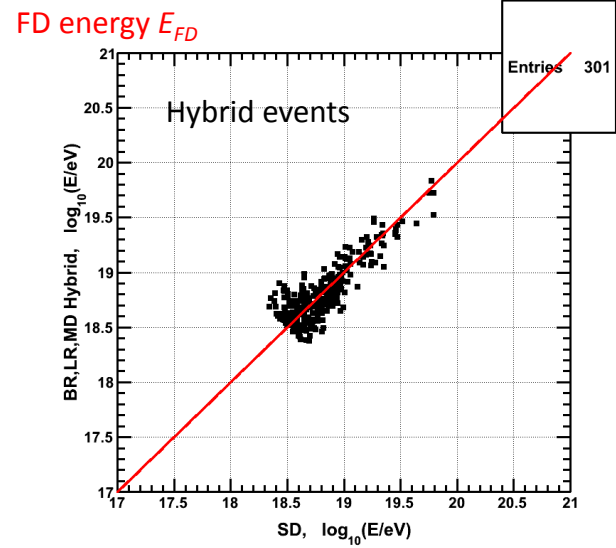
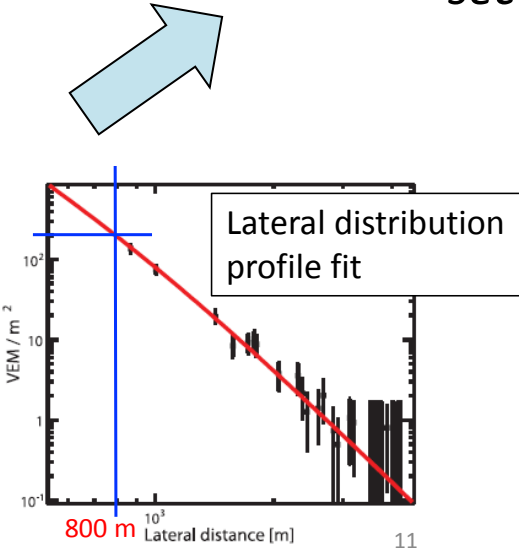


(scaled to FD energy)

$$E_{SD} = E'_{SD}/1.27$$



S800



SD energy E_{SD}

関数変更前後の開き角

