

テレスコープアレイ実験地表検出器を用いた 空気シャワーフロント構造の研究

2017/10/17

第2回 宇宙素粒子若手の会 秋の研究会

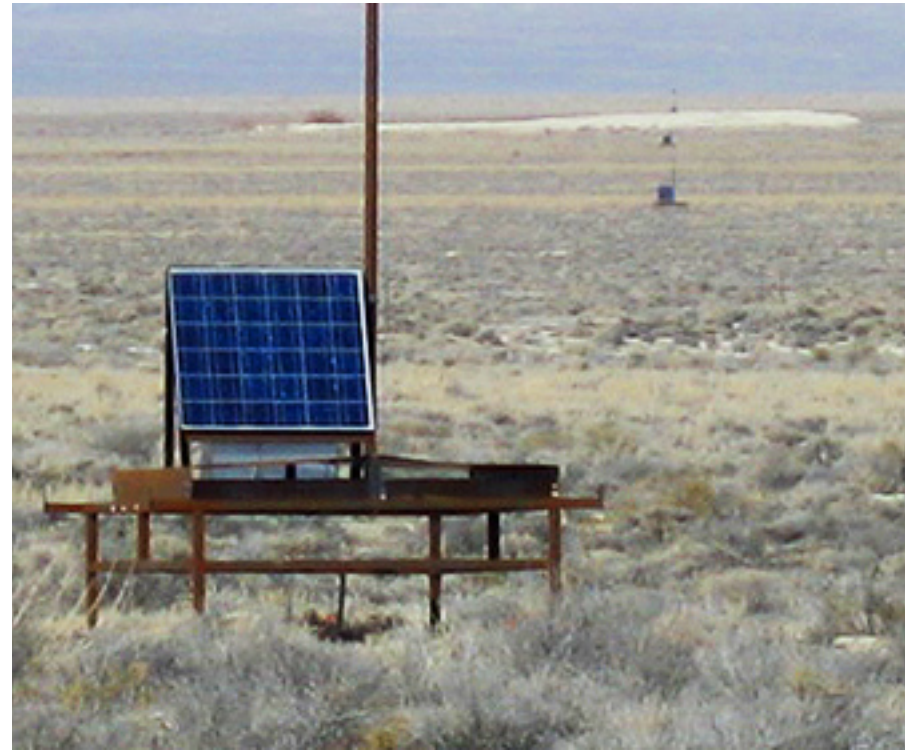
大阪市立大学 理学研究科

前期博士課程2年

高木 芳紀

Self Introduction

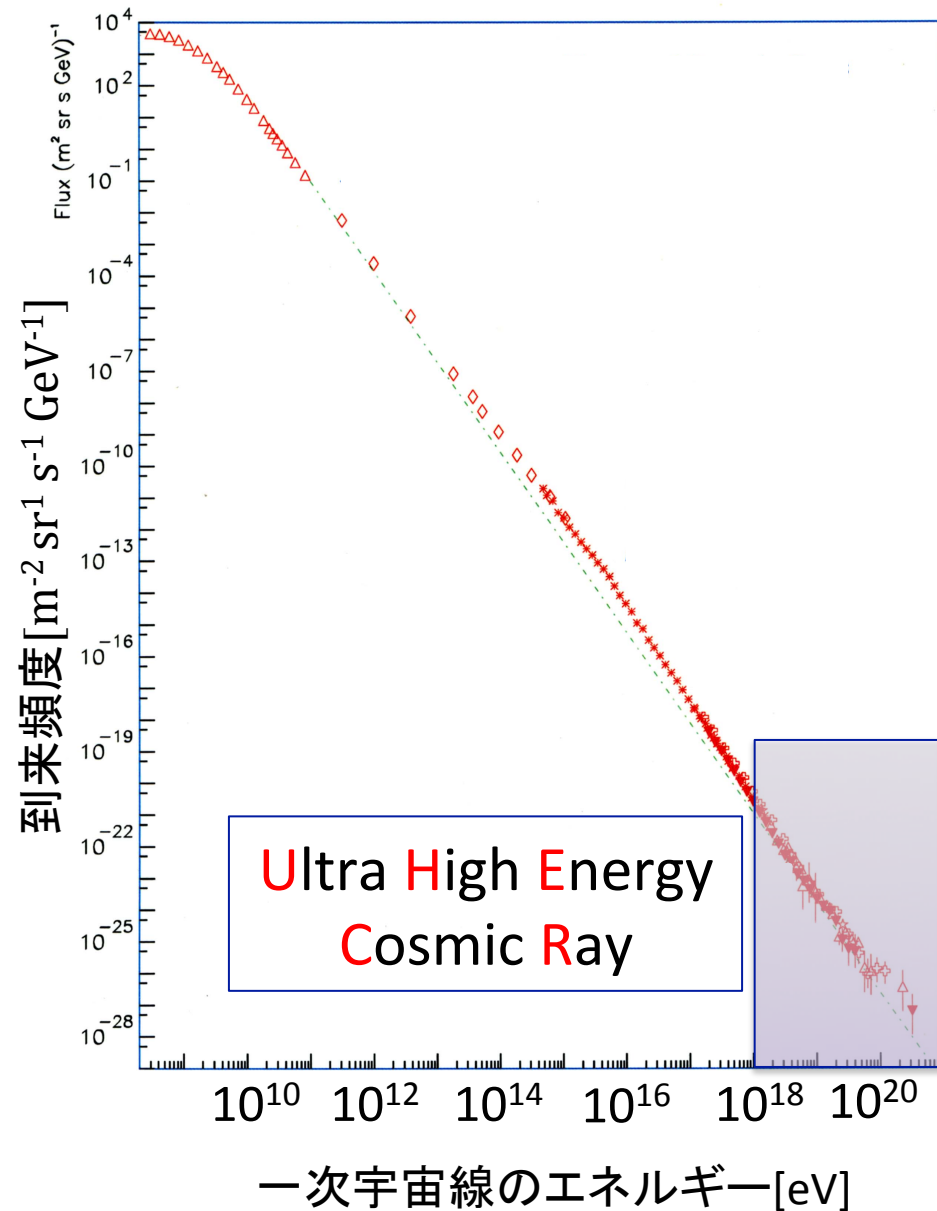
- ◆ 高木 芳紀 (Yoshinori Takagi)
- ◆ 大阪市立大学 大学院理学研究科 前期博士課程2年
- ◆ Telescope Array Collaboration
- ◆ 研究内容
TA地表検出器を用いた
空気シャワーフロントの構造



Outline

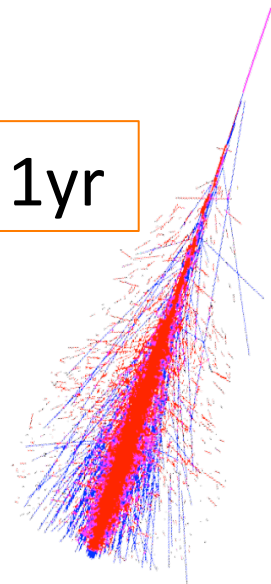
- ◆ 宇宙線 (Cosmic Ray) に関して
- ◆ テレスコープアレイ (TA) 実験に関して
 - TA実験の概要
 - TA実験地表検出器 (SD) に関して
- ◆ 地表検出器を用いた空気シャワー観測
- ◆ 空気シャワーフロントの構造研究
 - 研究背景とモチベーション
 - 空気シャワーフロントの構造研究
- ◆ まとめと今後

宇宙線 (Cosmic Ray)



- ◆ 宇宙に存在する高エネルギー放射線
- ◆ 宇宙線の起源は不明
- ◆ 宇宙線は大気中の原子核と相互作用し、二次粒子群を生成
⇒ 空気シャワー
- ◆ 宇宙線の到来頻度はほぼ E^{-3} に比例して減少

1 particle / 100km² / 1yr



テレスコープアレイ(TA)実験



◆ 超高エネルギー宇宙線観測実験

◆ 2008年5月～

◆ 米国ユタ州

◆ 観測装置

- 地表検出器(SD)

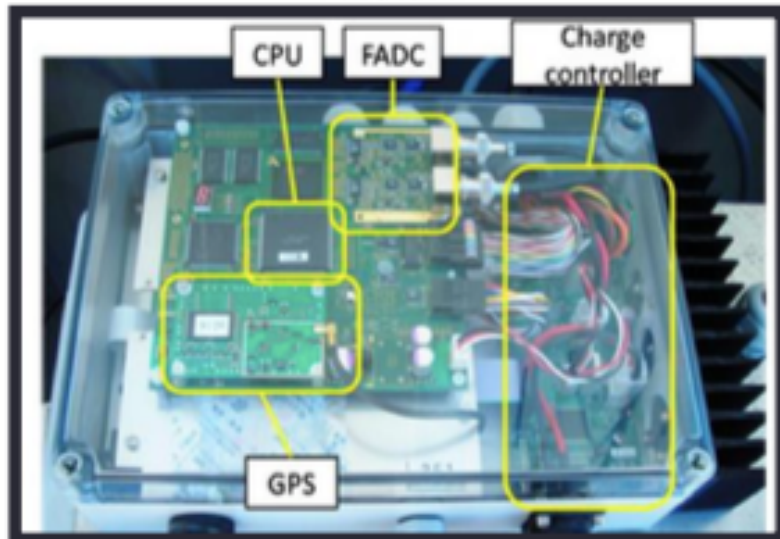
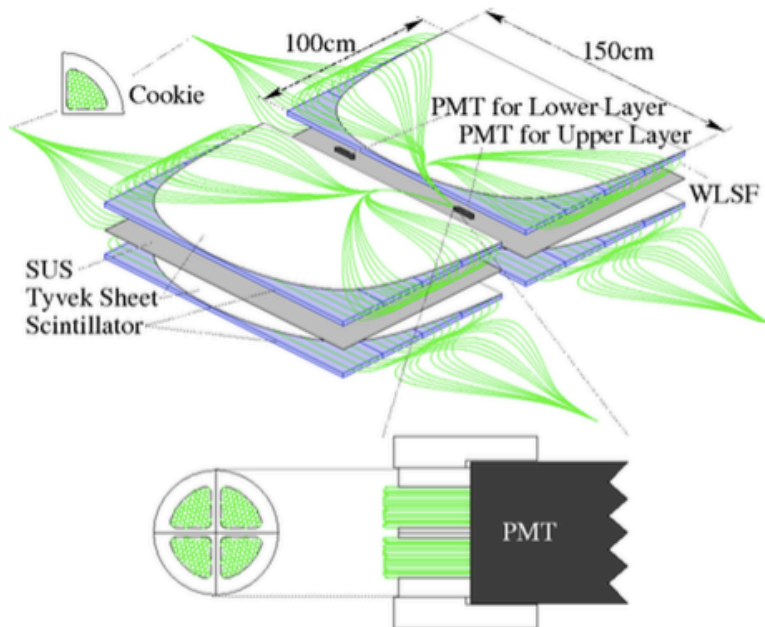
→ 700 km²、507台、1.2km間隔

- 大気蛍光望遠鏡(FD)

→ 38台(3ステーション)



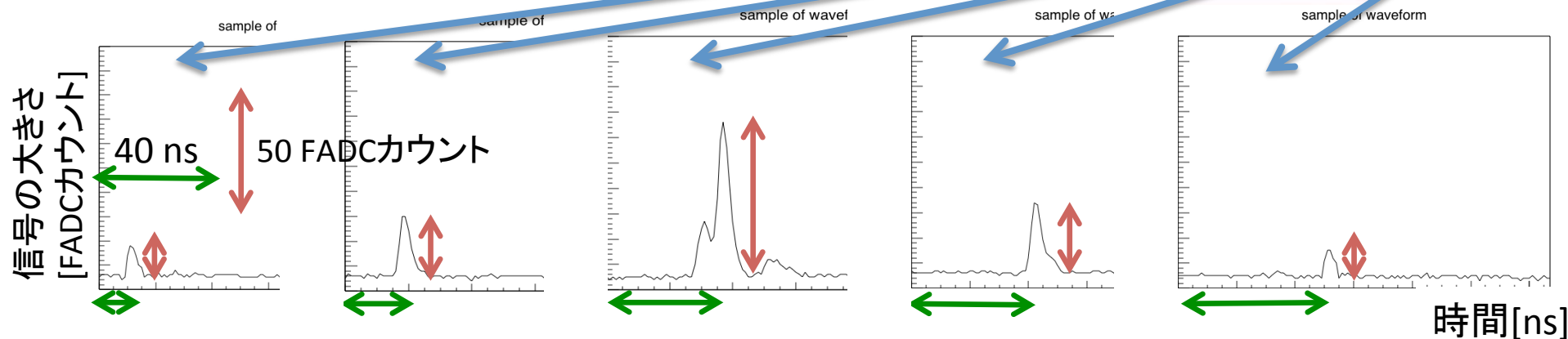
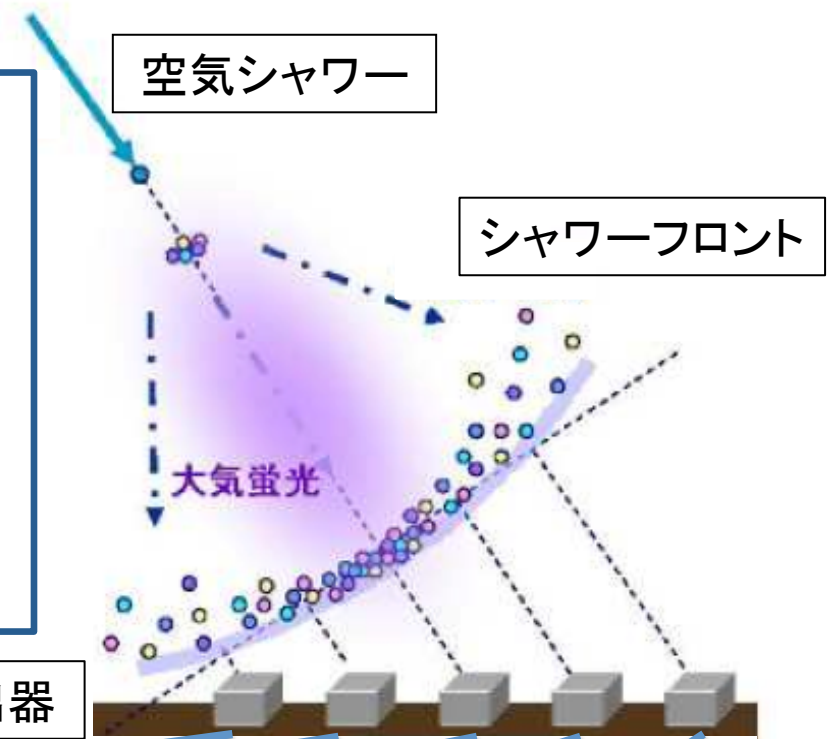
TA実験 地表検出器(SD)の構成



- プラスチックシンチレーター上下二層
($3 \text{ [m}^2\text{]} \times 1.2 \text{ [cm]} \times 2 \text{ [layers]}$)
- 波長変換ファイバーでPMTへ
- エレクトロニクス
 - ✓ FADC(50MHz)
 - ✓ FPGA
 - ✓ チャージコントローラー
 - ✓ GPS
 - ✓ 無線LANカード

SDを用いた空気シャワー観測

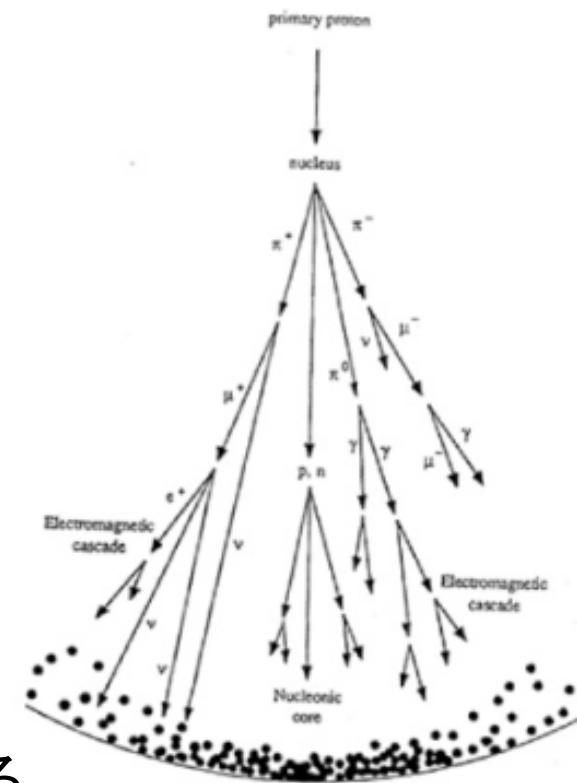
シャワーの中心(シャワーコア)に近いほど
粒子が多いので信号が大きくなる \updownarrow
→信号の大きさからコア位置が分かる
シャワーが傾いていると、検出器に粒子が
入射する時間に差ができる \leftrightarrow
→到来時刻の差から到来方向が分かる



空気シャワーフロントの構造研究

研究背景

- ◆ 宇宙線の起源の特定には到来する宇宙線のエネルギーと到来方向を高精度で測定することが必要.
- ◆ SDでは、地表に到来する空気シャワーの粒子数から一次宇宙線のエネルギーを、到来時刻差から到来方向を計算.
→ 決定精度を決めるのはシャワー構造の取り扱い
- ◆ 空気シャワーフロントは平面でなく曲率を持っているため空気シャワーフロント曲率の到来時刻への影響を考慮することが必要.



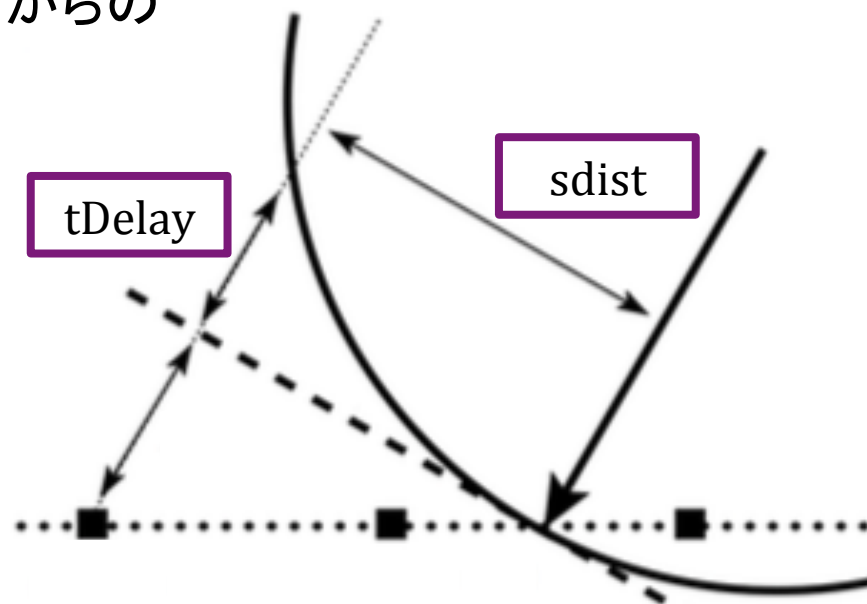
シャワーフロント

空気シャワーフロントの構造研究

Motivation

空気シャワーフロントの構造がシャワー軸からの距離、空気シャワーの天頂角、age(若いかな老いているか)によってどのように変化するかをTA-SDのデータを用いて調べ、シャワーフロントの構造を表す距離と角度の関数を作成する。

TA-SD7年分(2008/05/11 ~ 2015/05/11)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粒子のシャワー平面からの到来時刻の遅れを計算し、関係を調べる。



シャワーフロントの構造を表す関数

$$tDelay = 2.6 \times \left(1 + \frac{sdist}{30[m]}\right)^{1.5} \times \rho^{-0.5} \times 10^{-9} [s]$$

$$\sigma_{tDelay} = 2.6 \times \left(1 + \frac{sdist}{30[m]}\right)^{1.5} \times \rho^{-0.3} \times 10^{-9} [s]$$

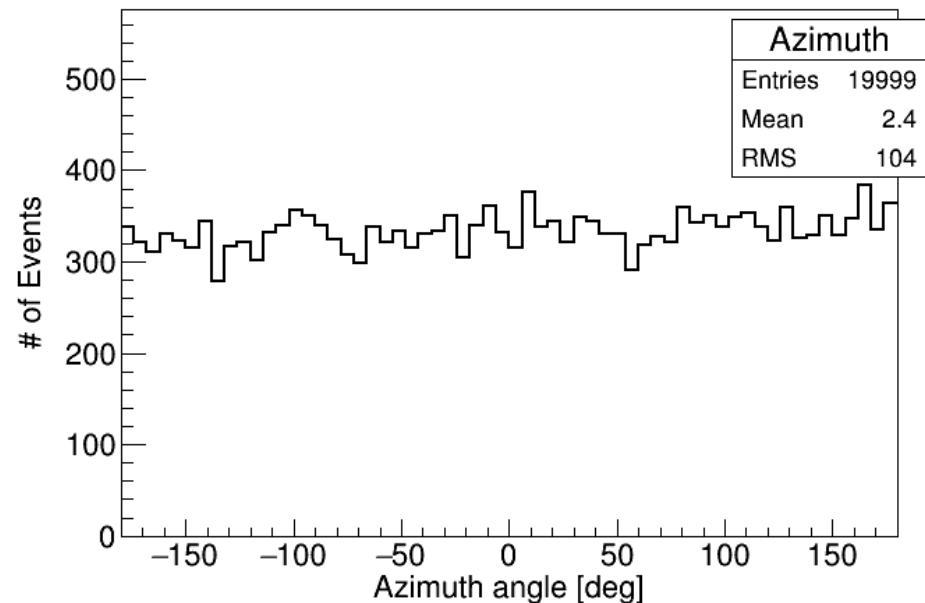
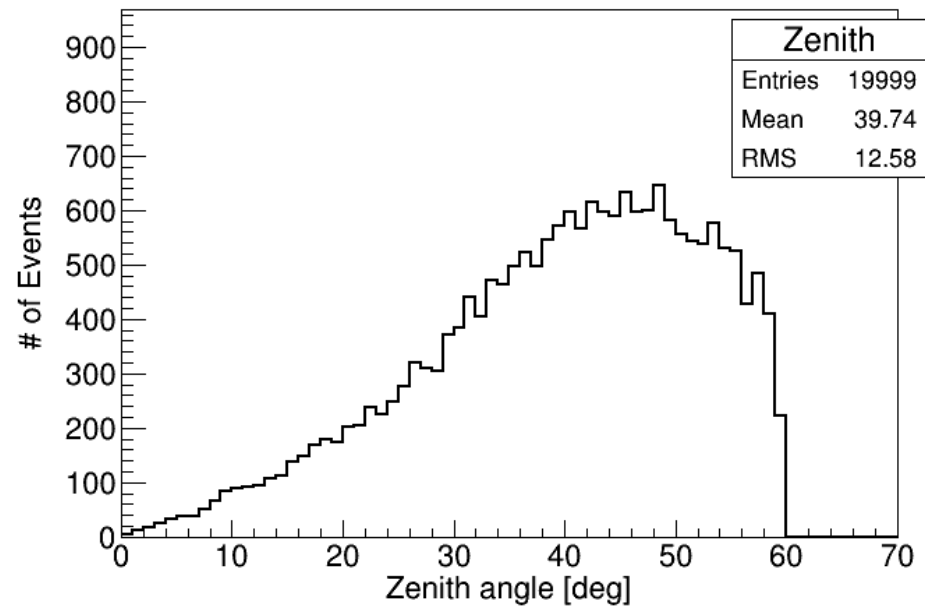
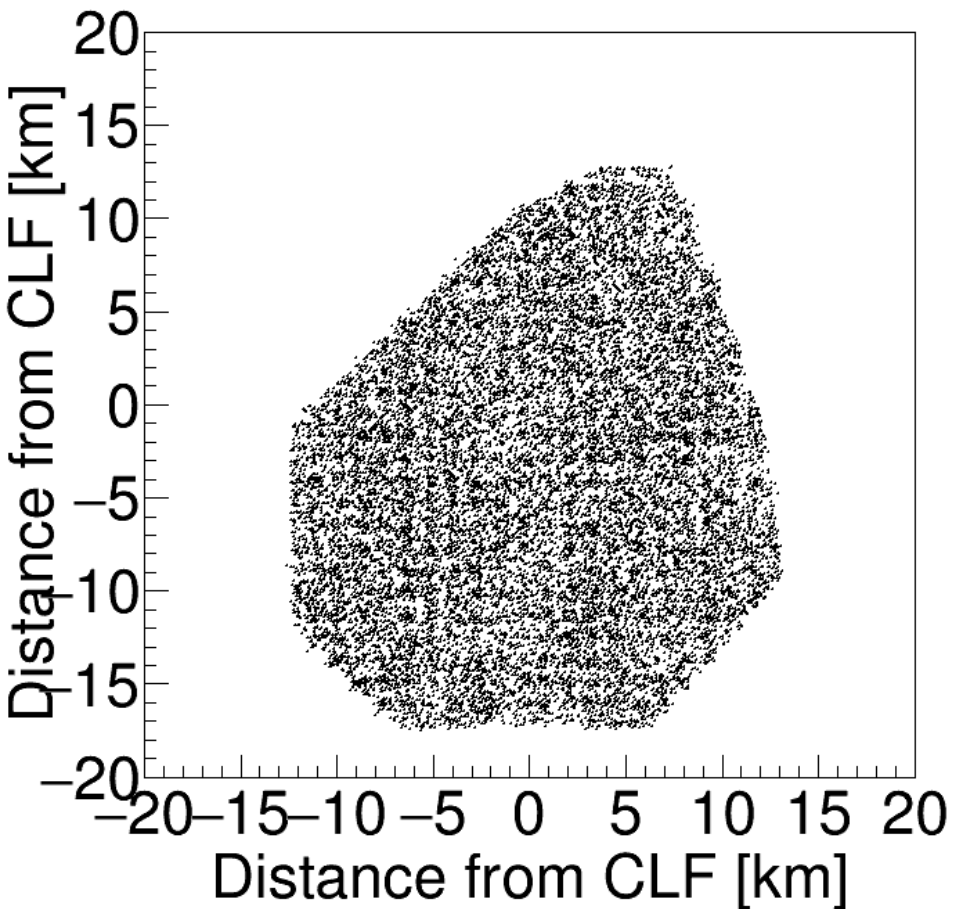
AGASAの経験式(上式)のベキの部分に空気シャワーの構造(天頂角、age)を反映した成分が入った関数を作成する。

今回用いたデータセットに関して

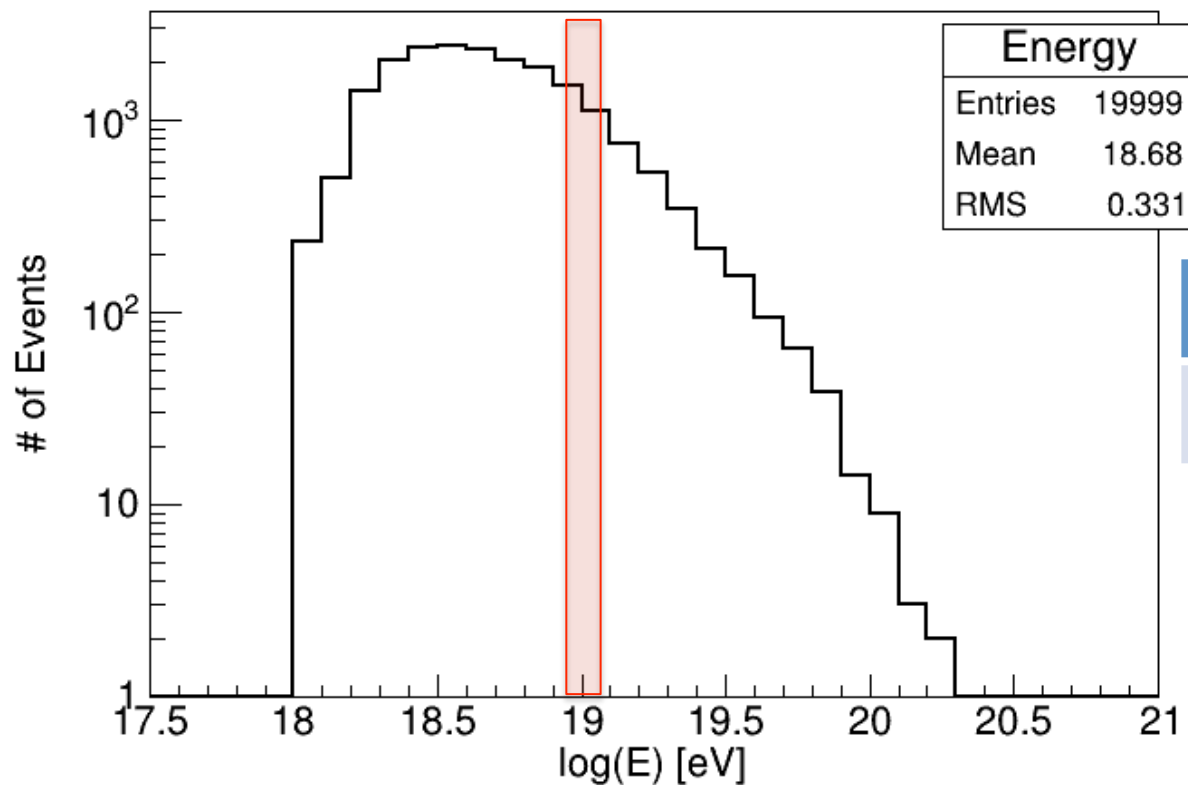
TASD7年分(2008/05/11 ~ 2015/05/11)のデータを使用
イベントセレクションとして以下の選別条件を用いた。

- $\text{energy} \geq 1 \text{ EeV}$
- $\theta \leq 60 \text{ degree}$
- $X^2 / \text{ndf} \leq 4$
- $\sigma_{s800} / s800 \leq 0.25$
- $\# \text{ of good SD} \geq 8$
- $\theta_{\text{err}} \leq 5^\circ$
- $\text{core position} \geq 1200 \text{ m from edge of array}$
- $\# \text{ of events} : 19999$

ALL Dataset energy $> 1\text{EeV}$



エネルギー分布



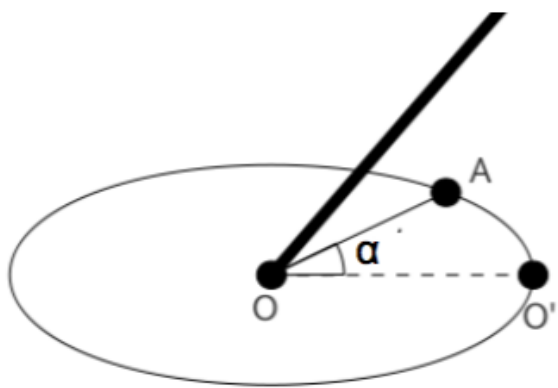
logE (eV)	# of events
19.0	2491

$\log E (\text{eV}) = 19.0$ のイベントに関して考える。
ただし、SDのエネルギー決定時の不確かさ $\pm 21\%$ をもたしている。

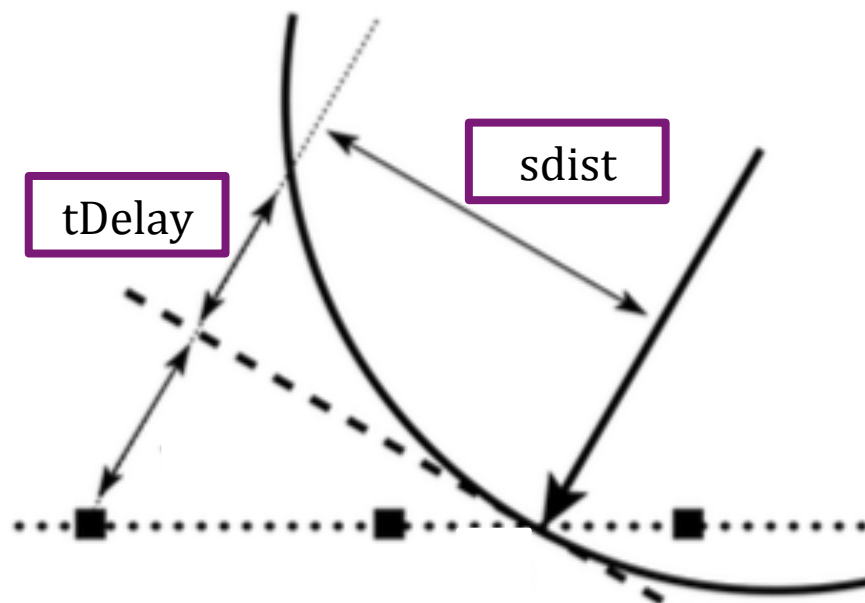
シャワー軸からの距離と遅れの関係

シャワー軸からの距離 s_{dist} とシャワー平面からの遅れの時間 t_{Delay} をそれぞれ計算し、シャワー軸からの距離が0.5 ~ 2.5 kmの範囲で横軸にシャワー軸からの距離、縦軸に遅れの時間を取りプロットする。

天頂角 $\sec\theta$ とSDの方位角 α でデータのセレクションを行う。



OO' : シャワー軸の地表への投影
点O : コア位置
点A : SDの位置



データセレクション

データセレクションに関しては以下のように行う

- $\sec\theta$ を1.0から2.0まで0.2刻み
- SDの方位角 α を 0° から 180° まで 30° 刻み

今回は

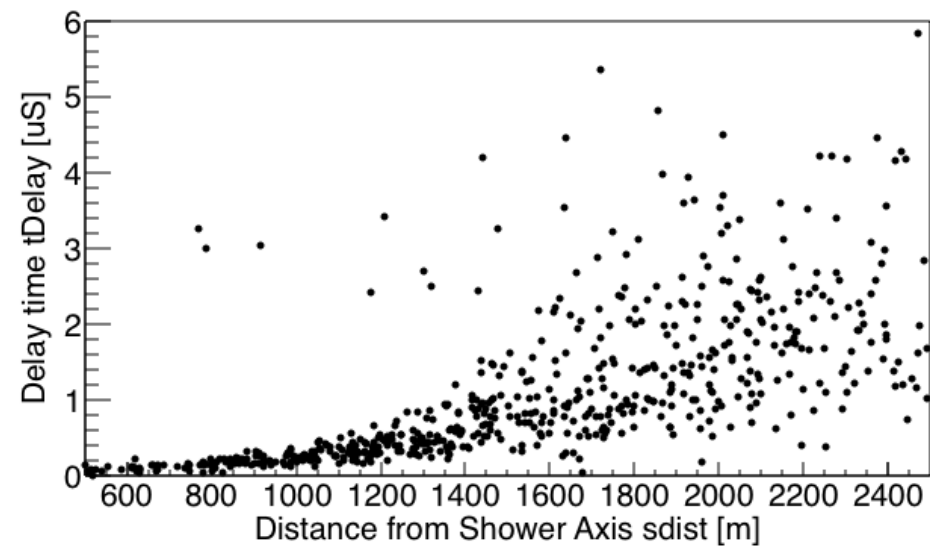
$1.0 \leq \sec\theta \leq 1.2$ と $1.4 \leq \sec\theta \leq 1.6$ の比較

$0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ と $150^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ$ の比較

に関して発表する.

事象数は# of SDsとしてSDの数で示す

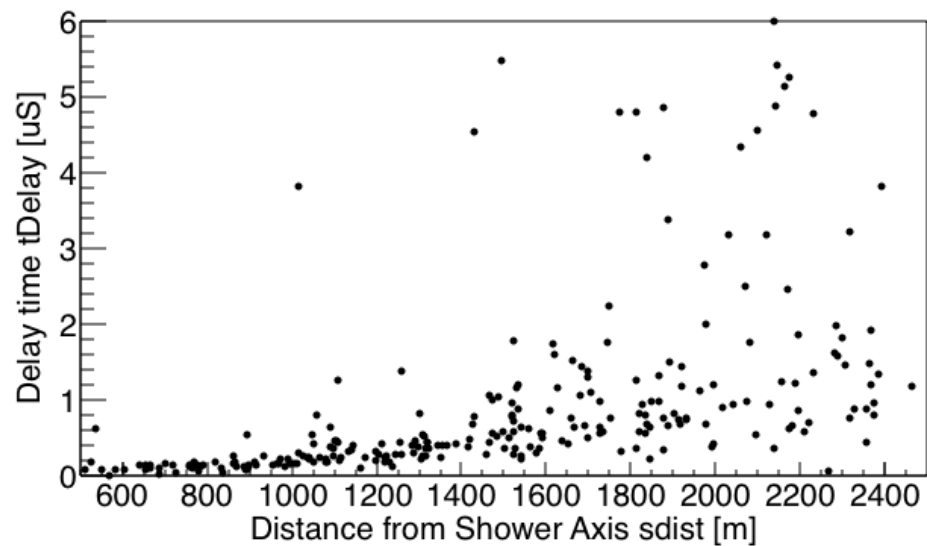
sec θ でのシャワーフロントの比較



$$1.0 \leq \sec\theta \leq 1.2$$

$$0 \leq \alpha \leq 30$$

of SDs = 613

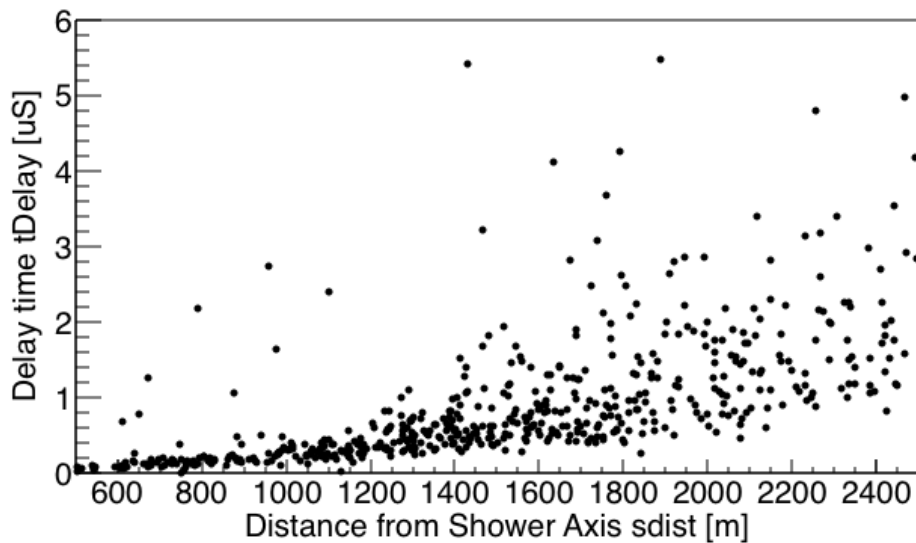


$$1.4 \leq \sec\theta \leq 1.6$$

$$0 \leq \alpha \leq 30$$

of SDs = 268

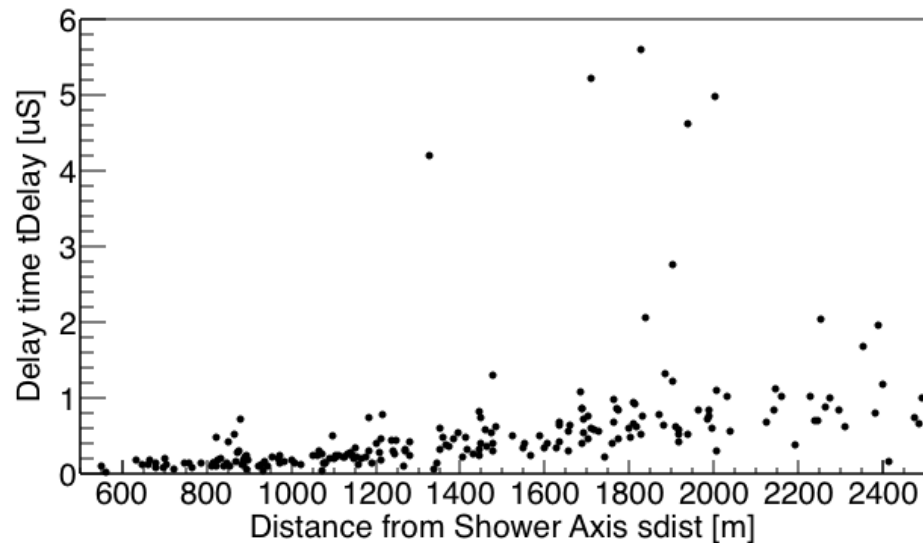
sec θ でのシャワーフロントの比較



$$1.0 \leq \sec\theta \leq 1.2$$

$$150 \leq \alpha \leq 180$$

of SDs = 565

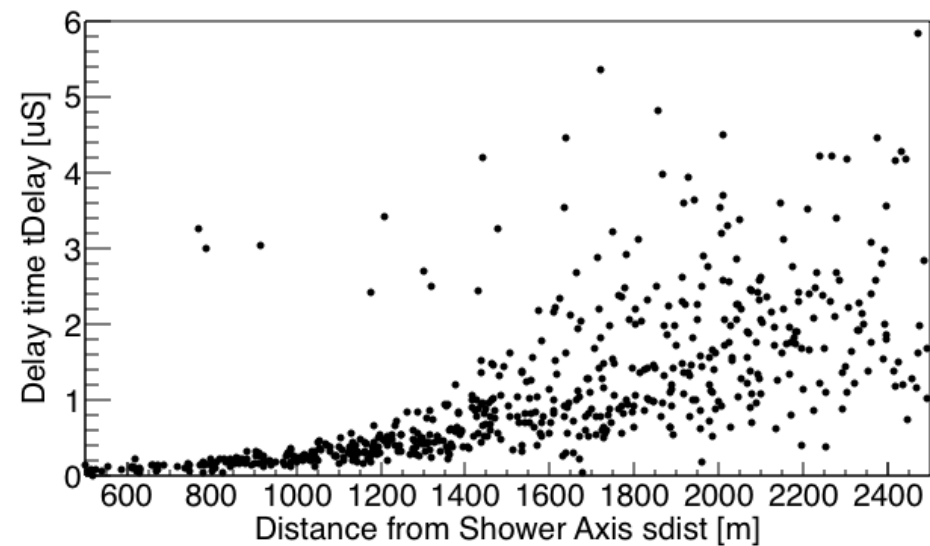


$$1.4 \leq \sec\theta \leq 1.6$$

$$150 \leq \alpha \leq 180$$

of SDs = 209

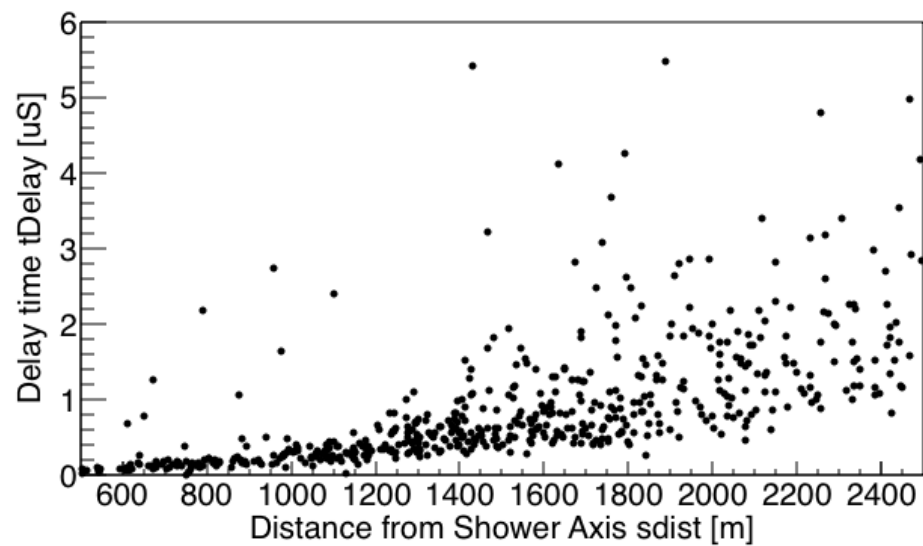
角度 α でのシャワーフロントの比較



$$1.0 \leq \sec\theta \leq 1.2$$

$$0 \leq \alpha \leq 30$$

of SDs = 613

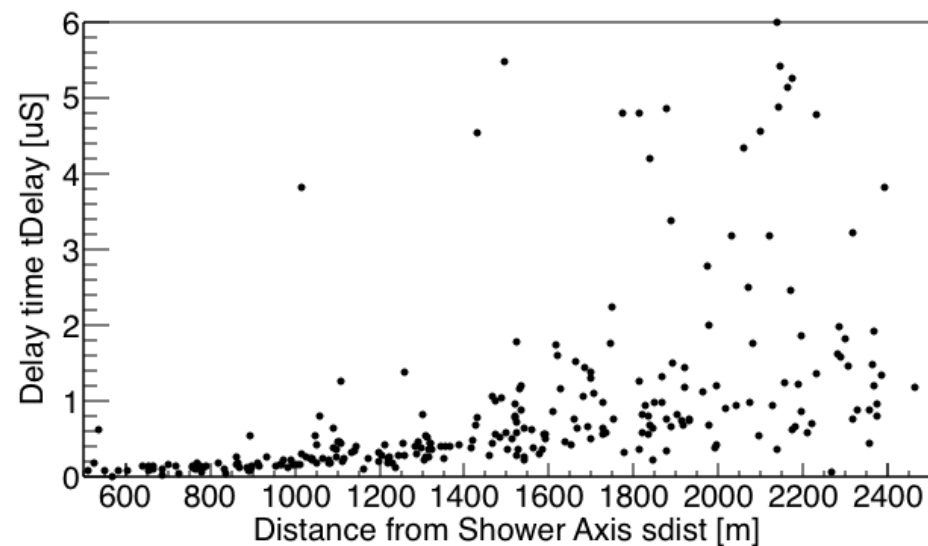


$$1.0 \leq \sec\theta \leq 1.2$$

$$150 \leq \alpha \leq 180$$

of SDs = 565

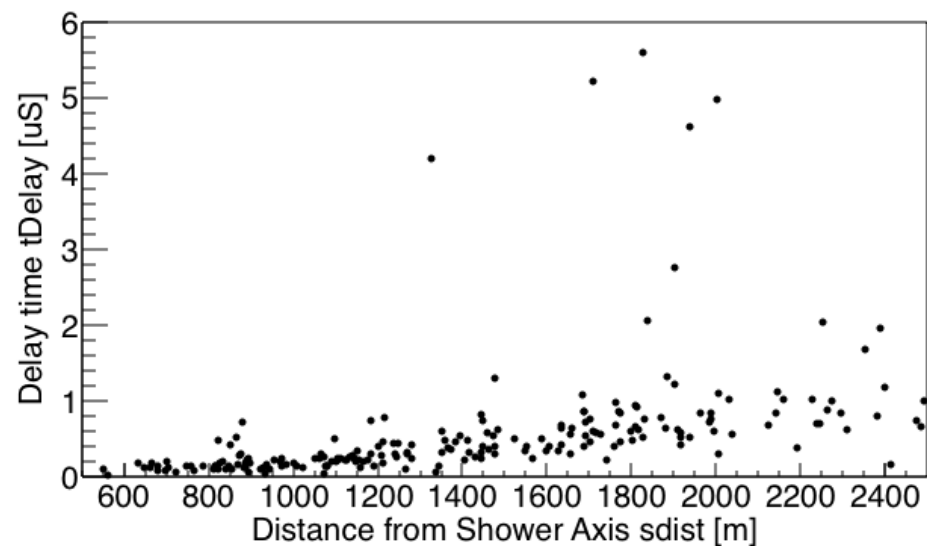
角度 α でのシャワーフロントの比較



$$1.4 \leq \sec\theta \leq 1.6$$

$$0 \leq \alpha \leq 30$$

of SDs = 268



$$1.4 \leq \sec\theta \leq 1.6$$

$$150 \leq \alpha \leq 180$$

of SDs = 209

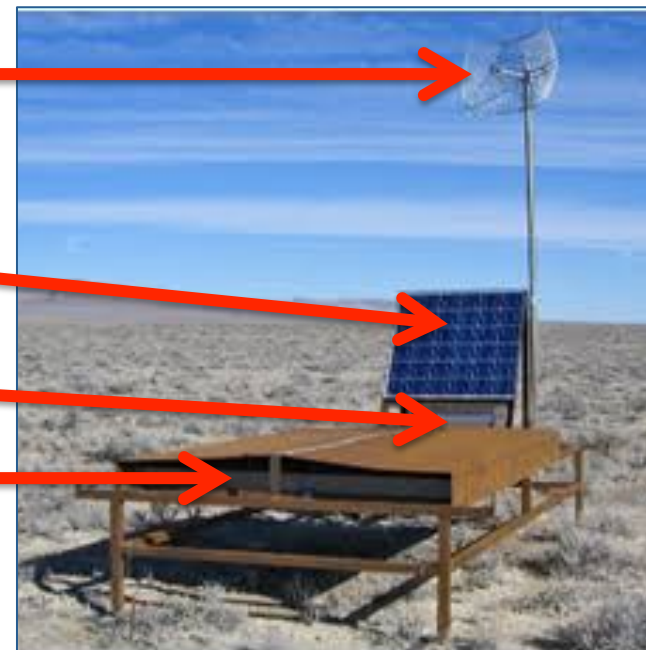
まとめと今後

- ◆宇宙線の起源を特定するためには一次宇宙線のエネルギーと到来方向を高精度で測定することが必要
- ◆空気シャワーは曲率をもって地表に到来するため、到来時刻差の計算には曲率を考慮することが必要
- ◆シャワー軸からの距離とシャワー粒子のシャワー平面からの遅れの関係について調べた
- ◆100 mごとに代表点と 1σ の範囲を決め、フィッティングを行いシャワーフロントの関数($sdist, \theta, \alpha$)を得る

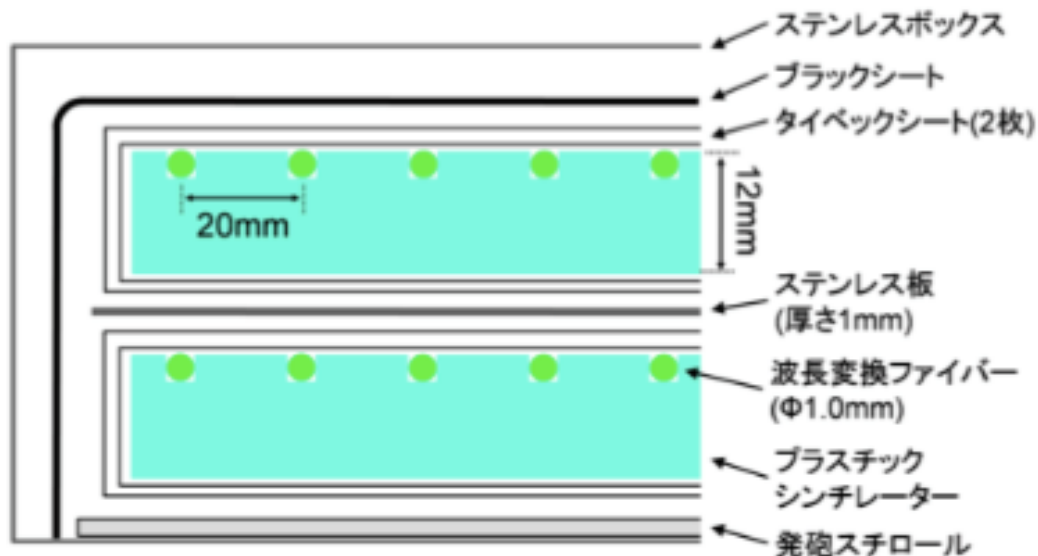
BackUp

TA実験 地表検出器(SD)の構成

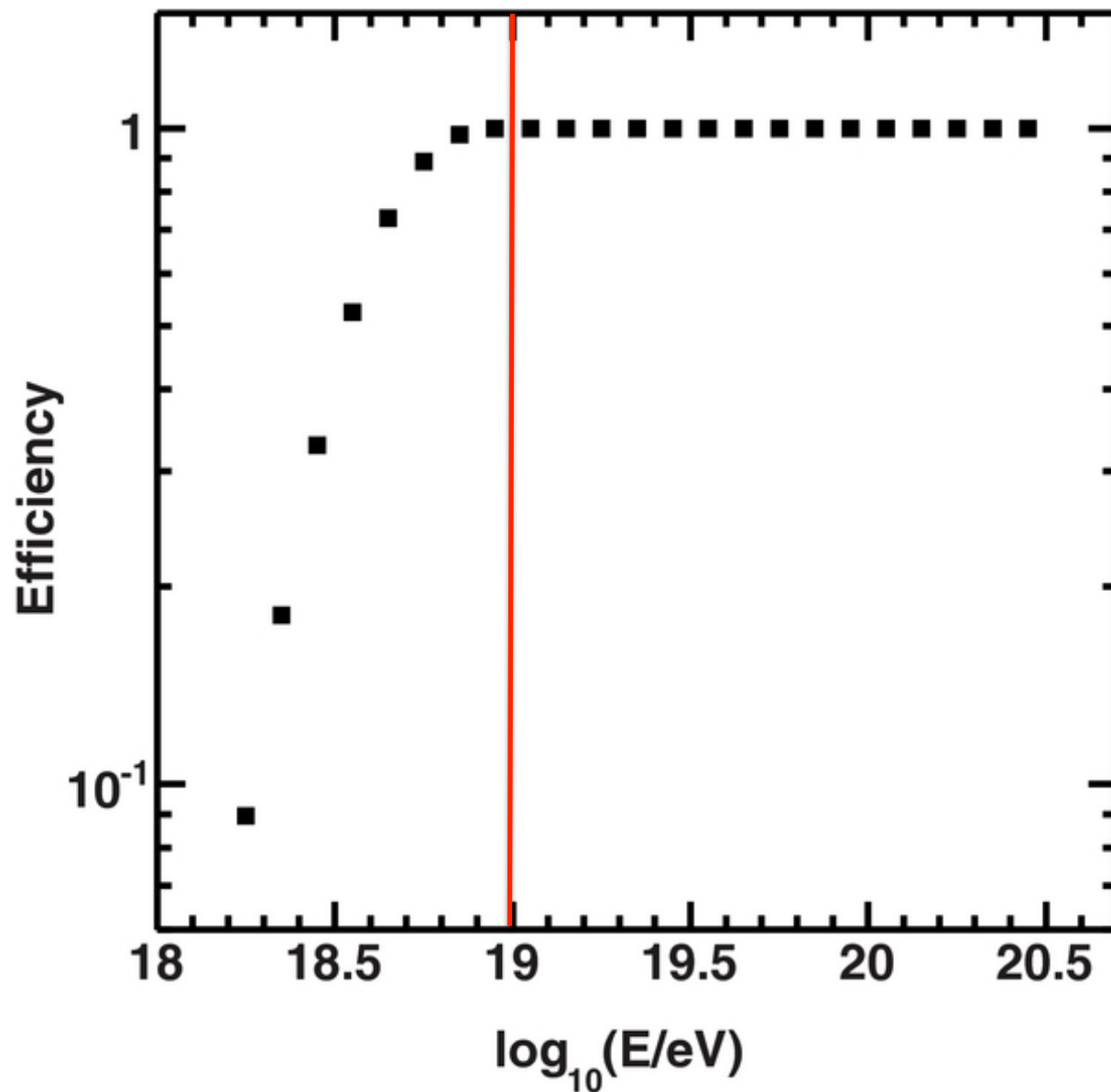
- 無線通信アンテナ
- ソーラーパネル
- エレクトロニクスボックス
- シンチレーター用
ステンレスボックス



- ブラックシート
- タイベックシート(2枚)
- シンチレーター
- ステンレス板(1mm)
- シンチレーター
- タイベックシート(2枚)
- 発泡スチロール



トリガー効率のエネルギー依存性



各SDでのシャワー粒子の到来時刻と粒子数の計算

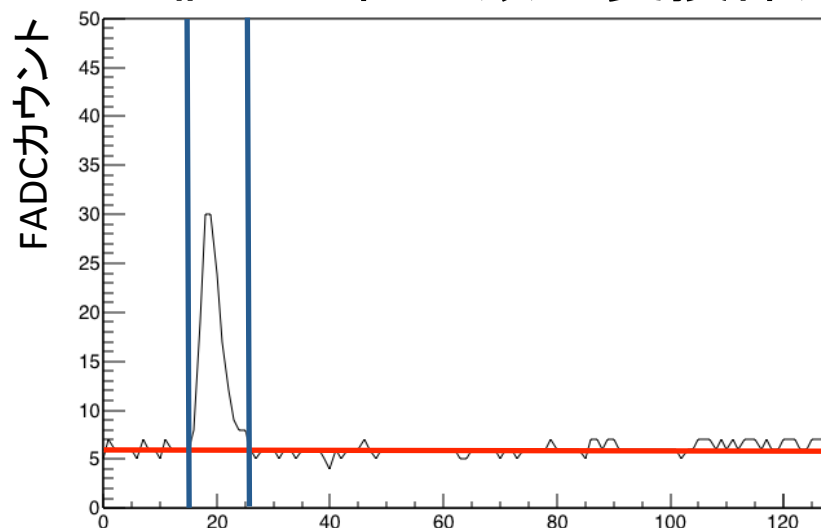
到来時刻の計算

FADC値からペDESTAL値を引いた値が8ビン連続してペDESTALの 1.5σ を超えたときを立ち上がり(到来時刻)、8ビン連続して下回ったときを立ち下がりとする

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



青線: 立ち上がりと立ち下がり
赤線: ペDESTAL

ビン数(1ビン = 20ns)

各SDでのシャワー粒子の到来時刻と粒子数の計算

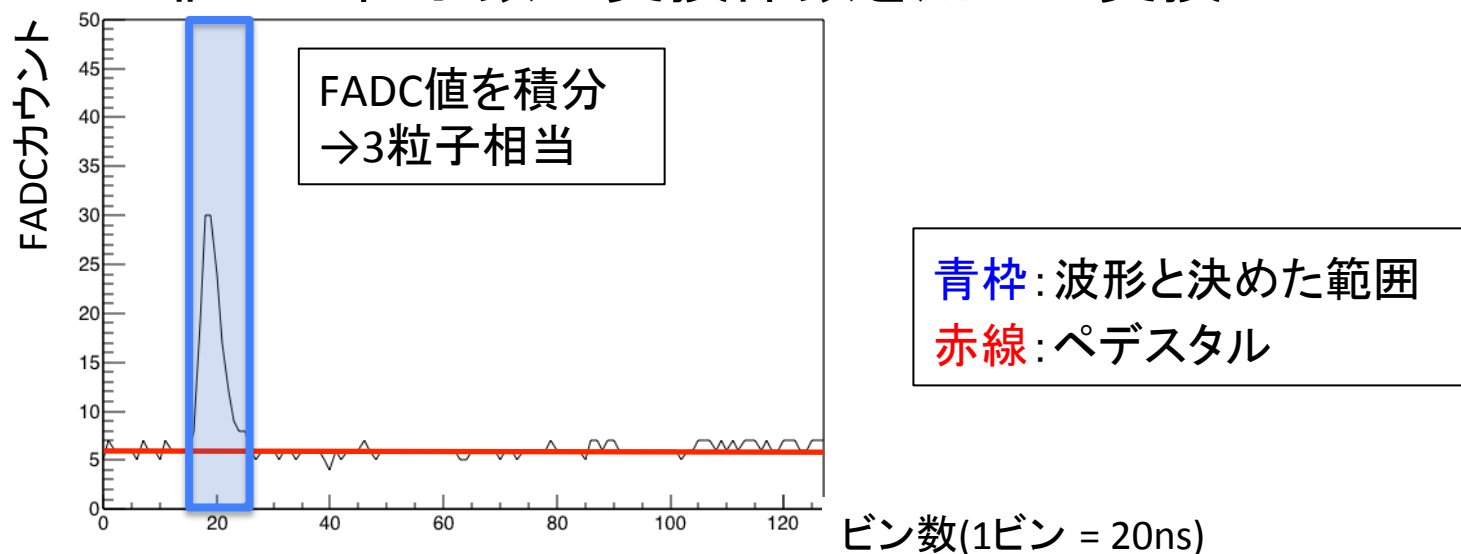
到来時刻の計算

FADC値からペDESTAL値を引いた値が8ビン連続してペDESTALの 1.5σ を超えたときを立ち上がり(到来時刻)、8ビン連続して下回ったときを立ち下がりとする

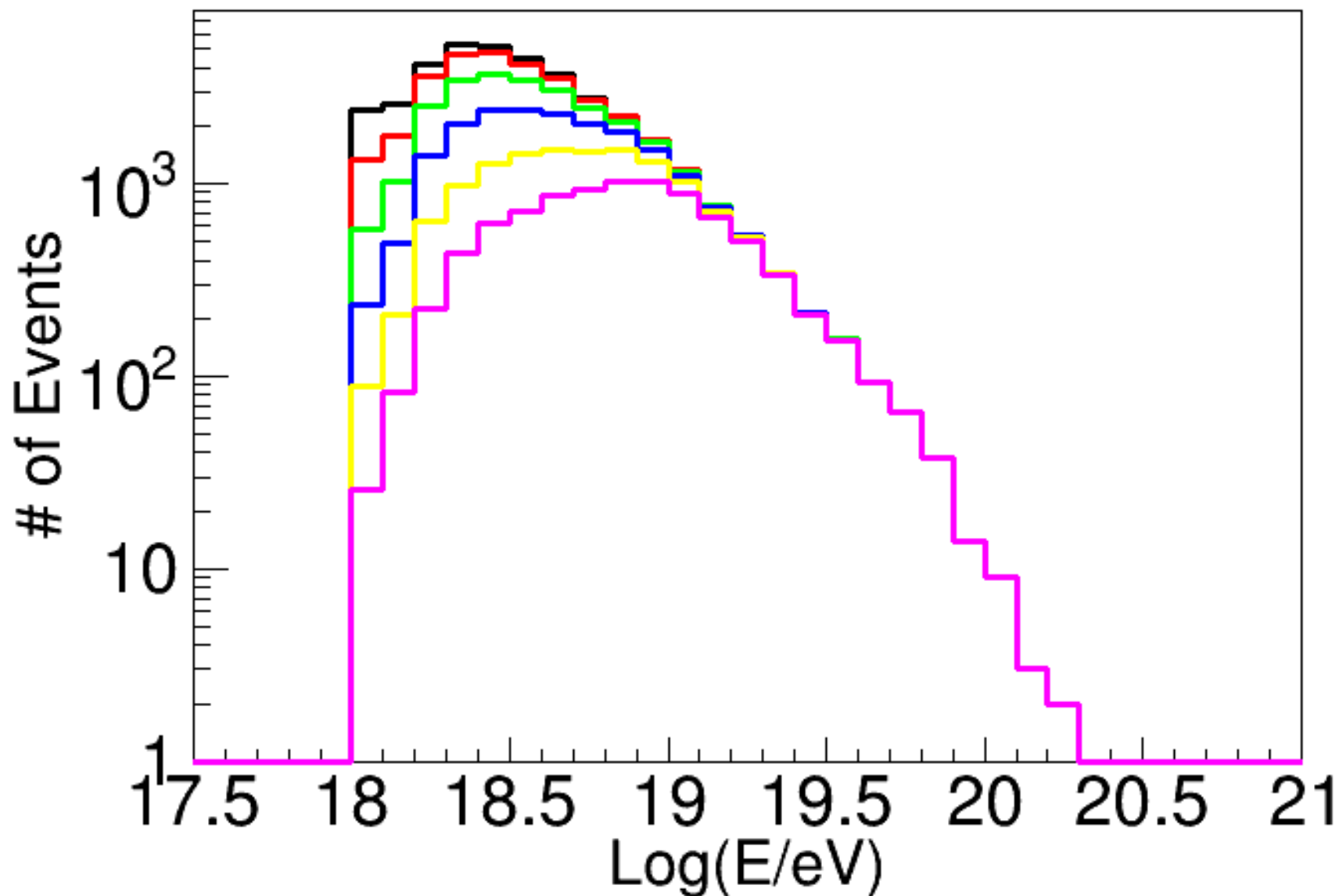
粒子数の計算

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



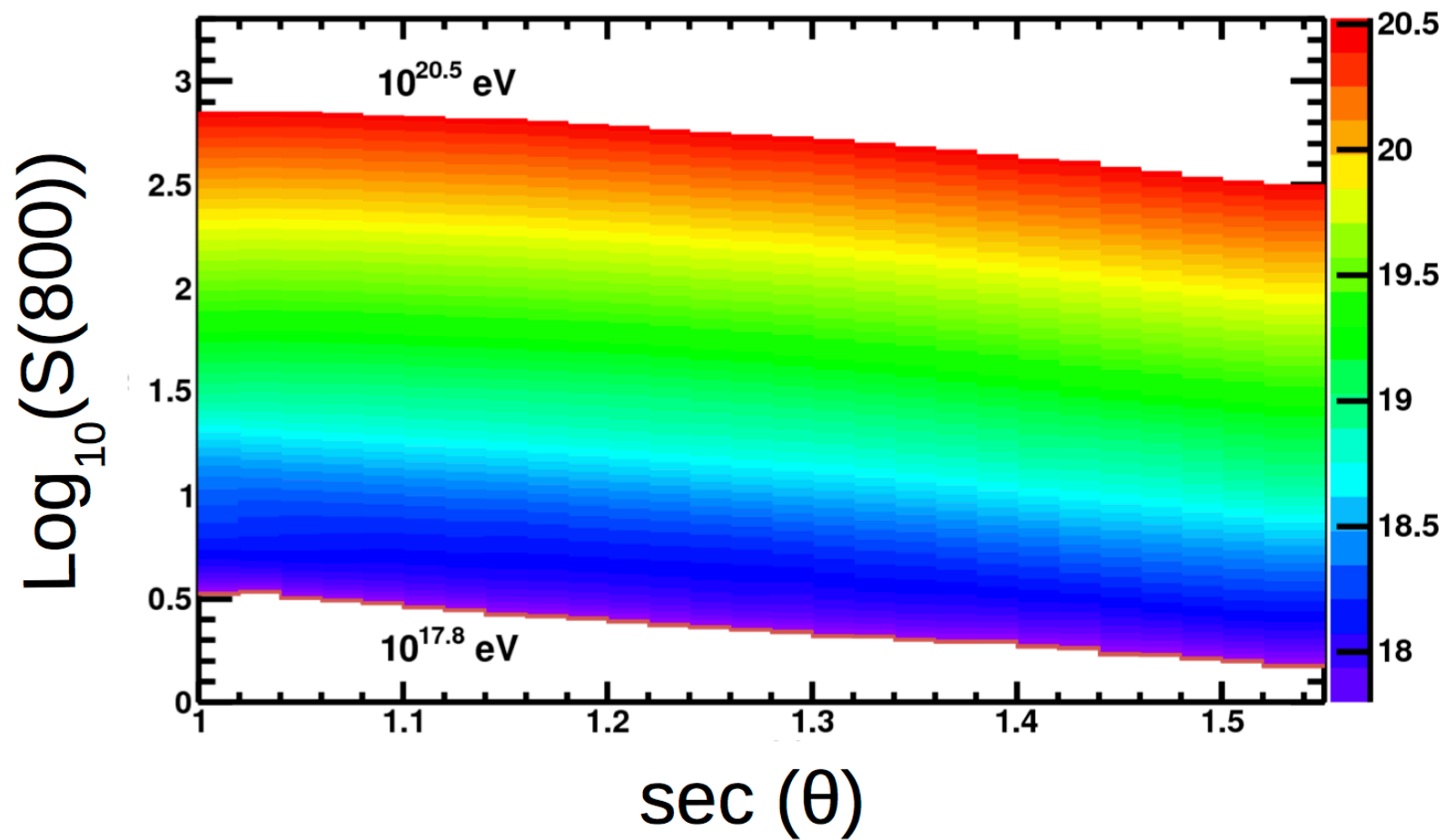
of good SDとエネルギーの関係



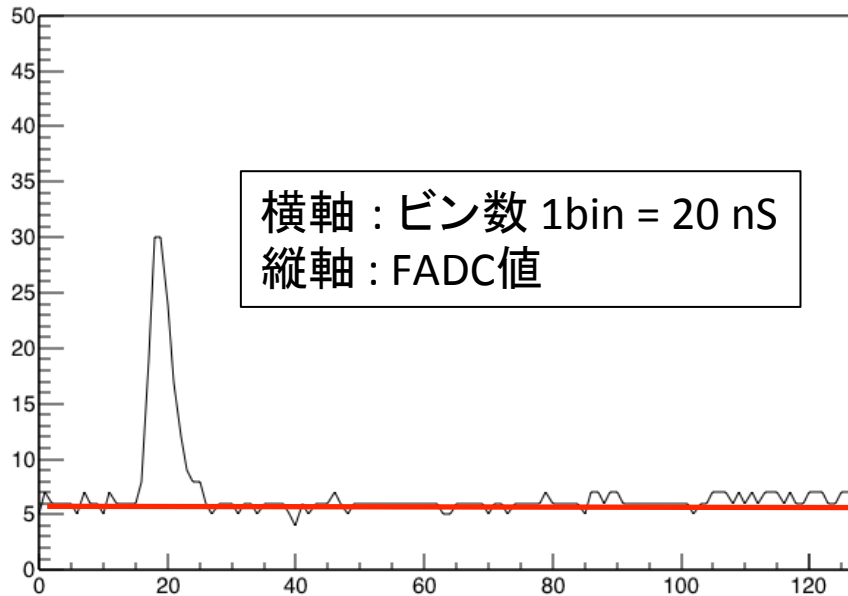
of good SDとエネルギーの関係

# of good SD	# of events	ratio
over 6	2724	99
over 7	2659	97
over 8	2491	91
over 9	2203	80
over 10	1806	66

エネルギー計算



イベントトリガーの判定



8ビンごとに移動和を計算し、
ペデスタル (赤線) を引いた値が
15 FADC値以上か判定

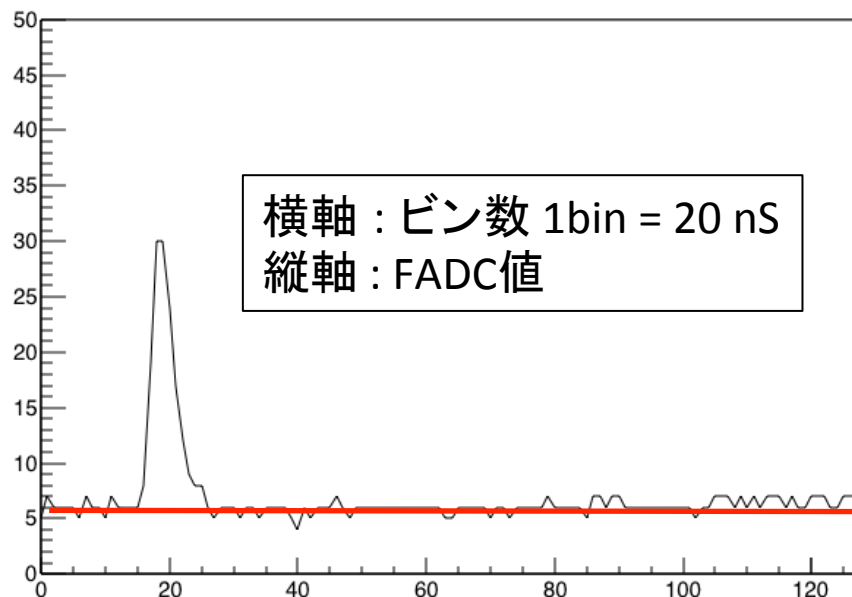


Lv.0トリガーを発行
トリガーの前640nSから
以後1920nSの波形を記録し、
Lv.0トリガーテーブルを作成



波形の2560nSの和から
ペデスタルを引いた値が
150 FADC値以上か判定

イベントトリガーの判定



Lv.1トリガーを発行
波形の時刻(μ S)、波形の積分値
の上下層の平均を記録し、
Lv.1トリガーテーブル作成



Lv.1トリガーが 8μ S以内に
隣接3台のSDで見つかる



Lv.2トリガーを発行
 $\pm 64\mu$ S内に存在するLv.0
トリガーテーブルを収集、記録

セレクション条件に関して

天頂角 θ 、方位角 φ をFittingで計算する際にMINUIT package というものを用いている。

計算した際に不確かさとして σ_θ 、 σ_φ が得られる。

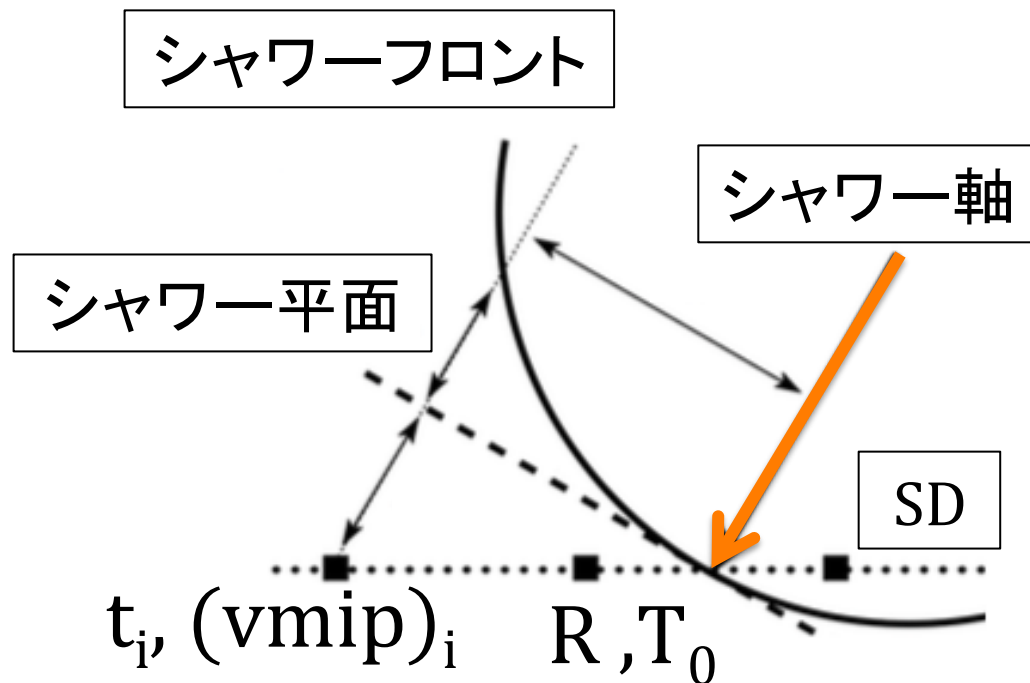
$$\theta_{err} = \sqrt{\sigma_\theta^2 + \sin^2 \theta \sigma_\varphi^2}$$

AGASAのLateral Distribution Functionを用いて $S800$ を計算 (上記同様にMINUIT packageを使用)した際に不確かさ σ_A が得られる(A はAGASA LDFの規格化定数)

この σ_A 、 A を用いて $\sigma_{S800}/S800 = \sigma_A/A$ を計算している

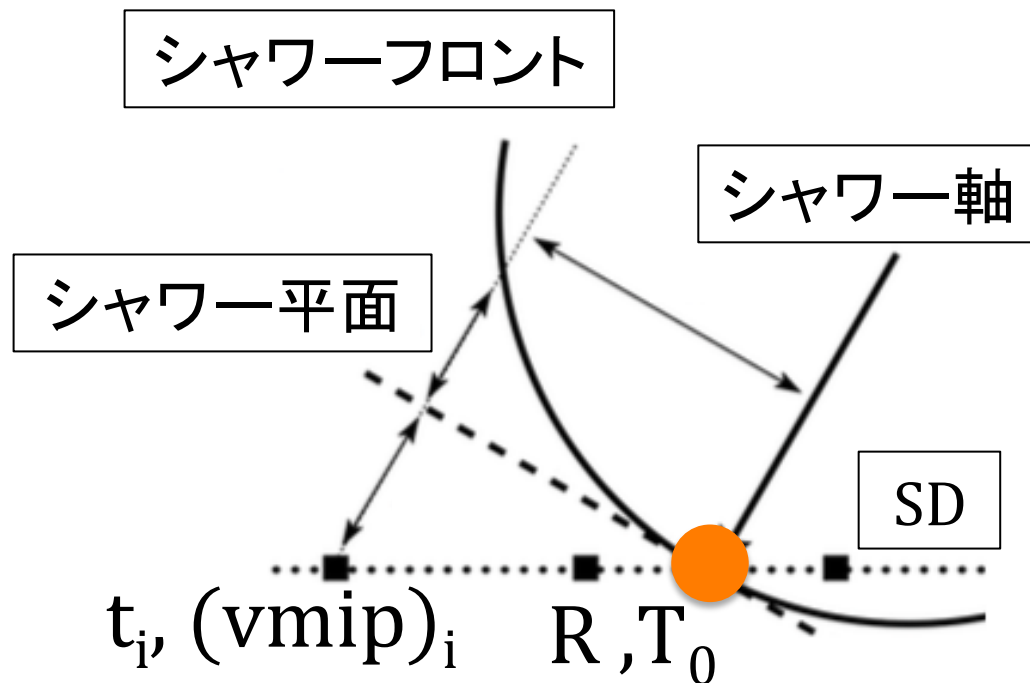
パラメーターに関して

- シャワー軸
 - 宇宙線の到来方向
- コア位置 : $R = (R_x, R_y, 0)$
 - シャワー軸と地面の交点
- $R_{\text{COG}} = ((R_{\text{COG}})_x, (R_{\text{COG}})_y, 0)$
 - 重心の座標
- T_0
 - コアの到来時刻
- t_i
 - SDに粒子が到来した時刻
- $(vmip)_i$
 - SDに到来した粒子数



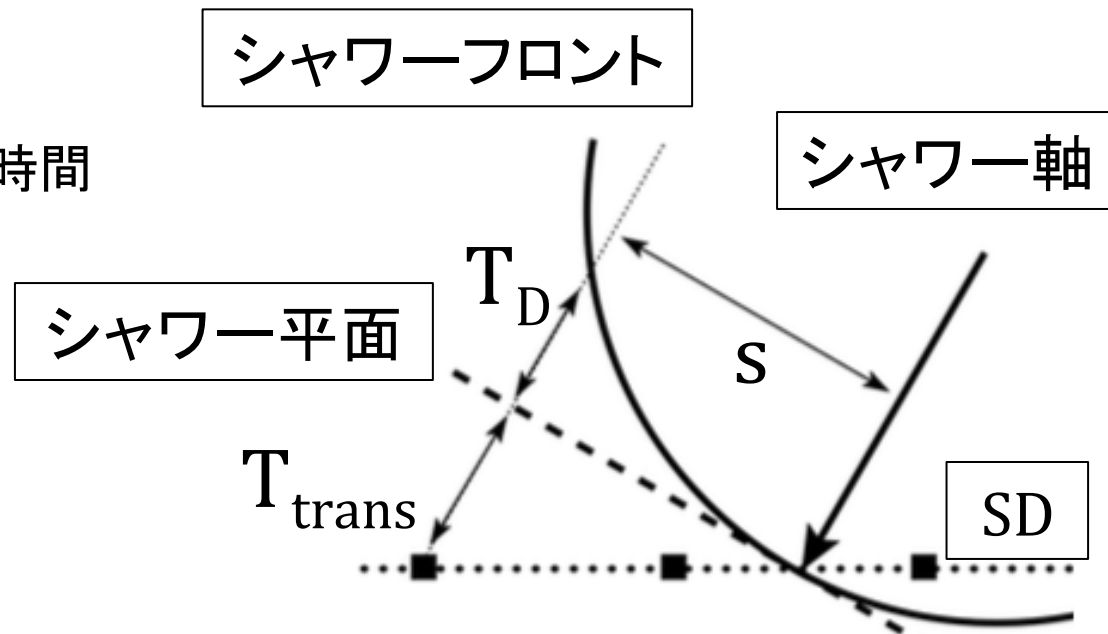
パラメーターに関して

- シャワー軸
 - 宇宙線の到来方向
- コア位置 : $R = (R_x, R_y, 0)$
 - シャワー軸と地面の交点
- $R_{\text{COG}} = ((R_{\text{COG}})_x, (R_{\text{COG}})_y, 0)$
 - 重心の座標
- T_0
 - コアの到来時刻
- t_i
 - SDに粒子が到来した時刻
- $(vmip)_i$
 - SDに到来した粒子数



パラメーターに関して

- T_{trans}
 - SDからシャワー平面までの時間
- s
 - シャワー軸からの距離
- T_D
 - シャワー平面からの遅れ



ジオメトリの計算

重心 R_{COG} を計算する

$$(R_{\text{COG}})_k = \frac{\sum_{i=0}^N (r_i)_k (vmip)_i}{\sum_{i=0}^N (vmip)_i}, (k = x, y)$$

r_i = 各検出器の位置、 $(vmip)_i$ = 各検出器の粒子数

ジオメトリの計算

$$\chi_G^2 = \sum \frac{(t_i - t_i^{FIT})^2}{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_\tau^2}} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

$$t_i^{FIT} = T_0 + \tau \pm T_{trans}$$

$$\tau = 8 \times \alpha \times \left(1 + \frac{S}{30[m]}\right)^{1.5} \times vmip^{-0.5} \times 10^{-10}$$

$$\sigma_\tau = 7 \times \alpha \times \left(1 + \frac{S}{30[m]}\right)^{1.5} \times vmip^{-0.3} \times 10^{-10}$$

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

$$c_0 = -7.76168 \times 10^{-2}, c_1 = 0.299113$$

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

1. χ_G^2 を左式のように定義する。
ここで、パラメーター α は
空気シャワーフロントの構造を
表すパラメーター
2. χ_G^2 を計算して最小になるときの
天頂角、方位角、 T_0 を選ぶ

式中の τ はAGASAの経験式をTA用
に変形したもので σ_τ は標準偏差

ジオメトリの計算

$$\chi_G^2 = \sum \frac{(t_i - t_i^{FIT})^2}{\sqrt{\sigma_e^2 + \sigma_\tau^2}} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

$$t_i^{FIT} = T_0 + \tau \pm T_{trans}$$

$$\tau = \alpha \times \left(1 - \frac{c \times T_{trans}}{12 \times 10^3 [m]}\right)^{1.05} \times \left(1 + \frac{s}{30 [m]}\right)^{1.35} \times \rho^{-0.5}$$

$$\sigma_\tau = (1.56 \times 10^{-3}) \times \left(1 - \frac{c \times T_{trans}}{12 \times 10^3 [m]}\right)^{1.05} \times \left(1 + \frac{s}{30 [m]}\right)^{1.5} \times \rho^{-0.3}$$

1. χ_G^2 を上式のように定義する(ここで α はフリーパラメーター)
2. χ_G^2 を計算して最小になるときの天頂角、方位角、 T_0 を選ぶ

コア位置の計算

$$\chi_L^2 = \sum \frac{(vmip_i - \rho_i)^2}{\sigma_{\rho_i}^2} + \frac{(R - R_{COG})^2}{(170[m])^2}$$

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

$$\rho = A \left(\frac{s}{91.6[m]} \right)^{-1.2} \left(1 + \frac{s}{91.6[m]} \right)^{-(\eta-1.2)} \left(1 + \left[\frac{s}{10^3[m]} \right]^2 \right)^{-0.6}$$

$$\eta = 3.972 - 1.792(\sec \theta - 1)$$

1. 横方向分布にLinsleyの式を用いた χ_L^2 を上記のように定義する。(Aはフリーパラメーター)
2. χ_L^2 を計算して最小になる時のコア位置Rを選ぶ