

# 波形フィットによる 宇宙線空気シャワー再構成手法の開発

大阪電気通信大学 多米田研究室  
西尾 瑛司

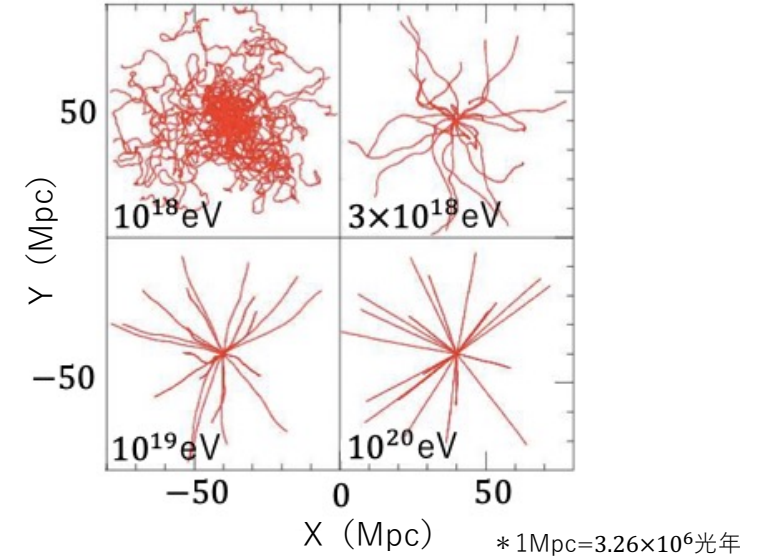


# 将来の超高エネルギー宇宙線観測

## 超高エネルギー宇宙線

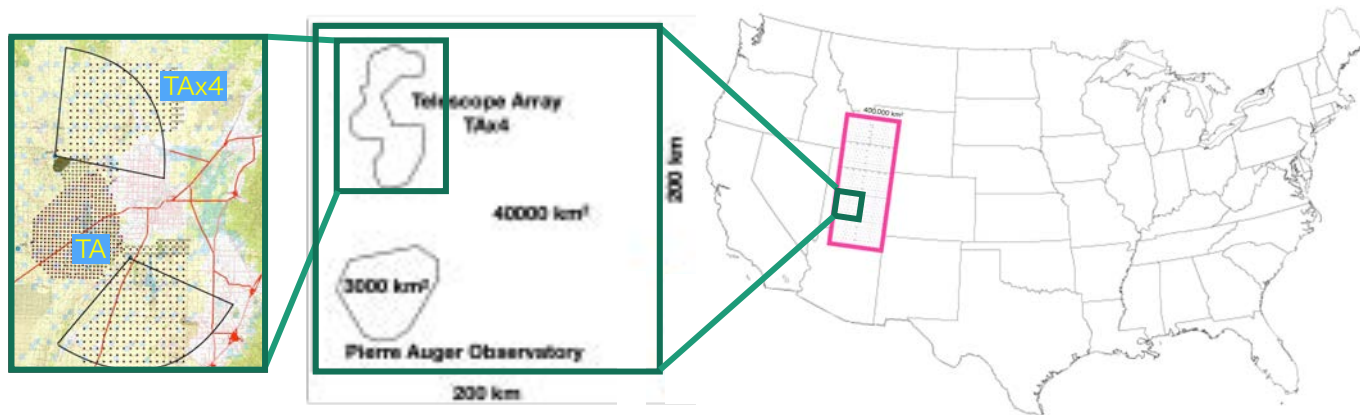
$10^{18}$ eV以上のエネルギーを持つ宇宙線

- より高エネルギーの宇宙線の到来方向と起源の方向が一致する.
- 起源を知るには超高エネルギー宇宙線の観測が必要.
- 到来頻度が低い.



宇宙線の軌跡シミュレーション

大規模な超高エネルギー宇宙線観測のための  
 低コストかつ完全自動で観測可能な  
 次世代型大気蛍光望遠鏡の開発



将来の超高エネルギー宇宙線観測のイメージ図

**Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel-lens Telescope**

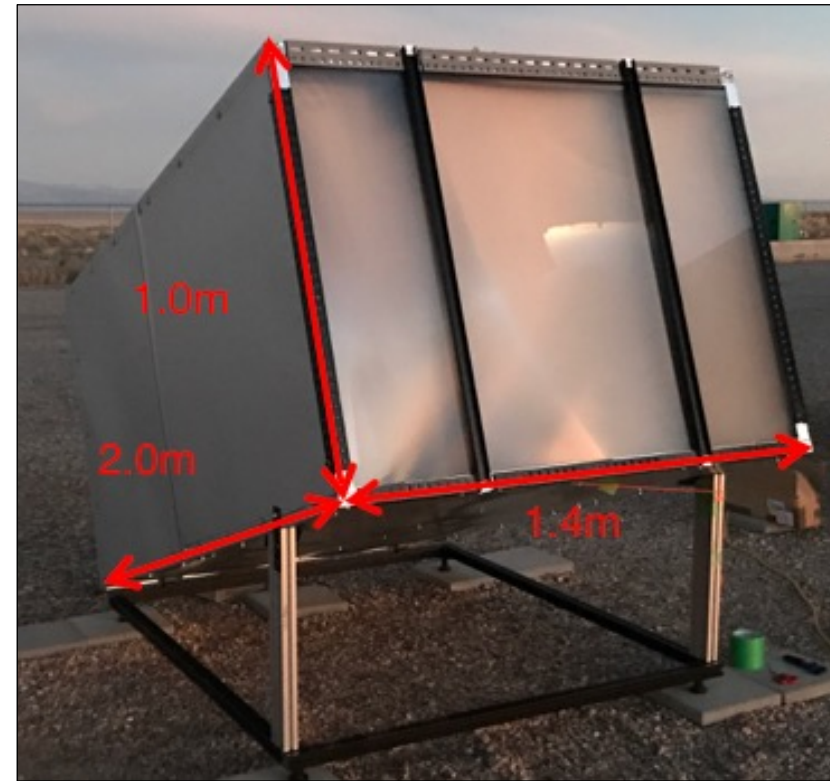


# CRAFFTの構成

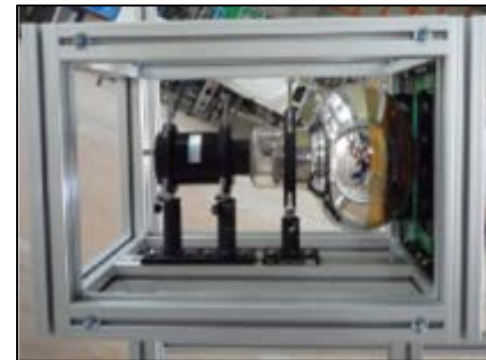
## 低コスト化

- シンプルな構造
- 自動観測の実現
- 設置が容易
- 電力自給システム

構成部品	仕様
フレネルレンズ	1.4 m <sup>2</sup> , f=1.2 m
光電子増倍管	8inch, 8°×8°
UV透過フィルタ	90%@300-360nm
アルミフレーム	



CRAFFTプロトタイプの外観



PMT



フレネルレンズ

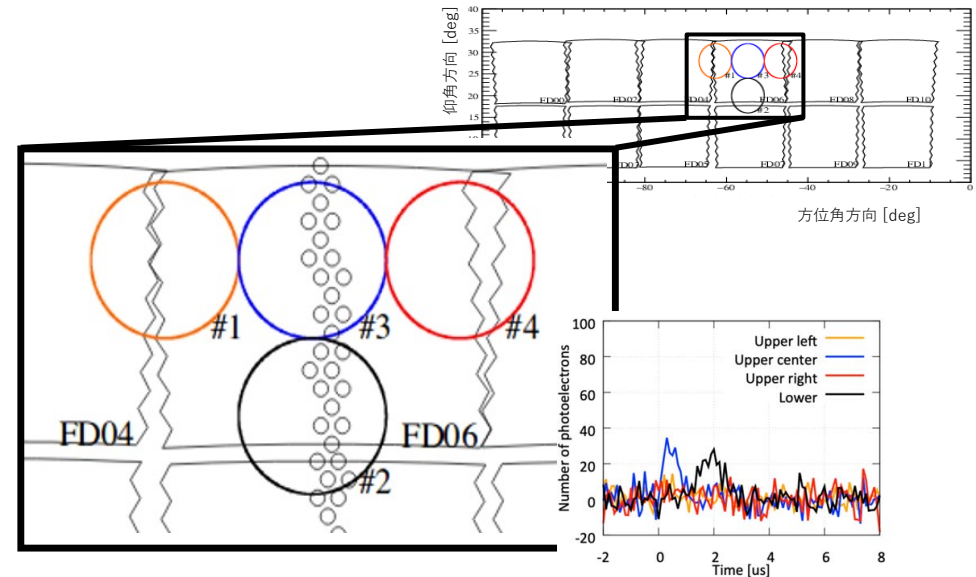


# CRAFFTによる宇宙線空気シャワー観測

➤ 従来の望遠鏡より低空間分解能

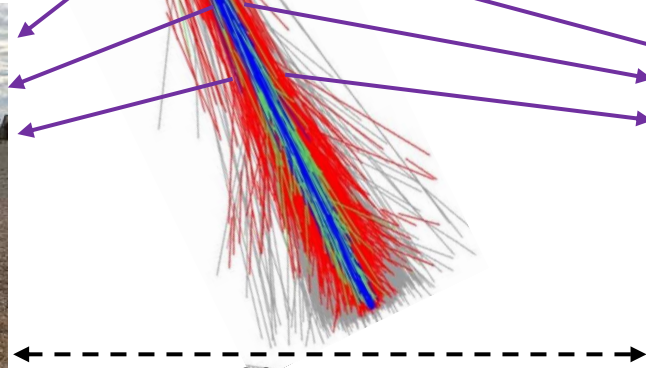
空間幾何に頼らない

**新しい再構成手法**の開発が必要



蛍光

CRAFFTとTA実験のFDとの視野重なり



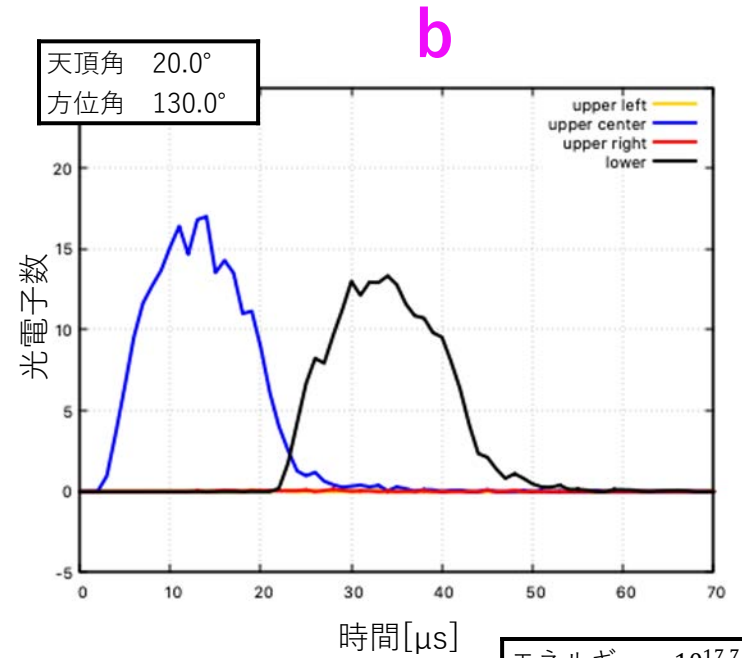
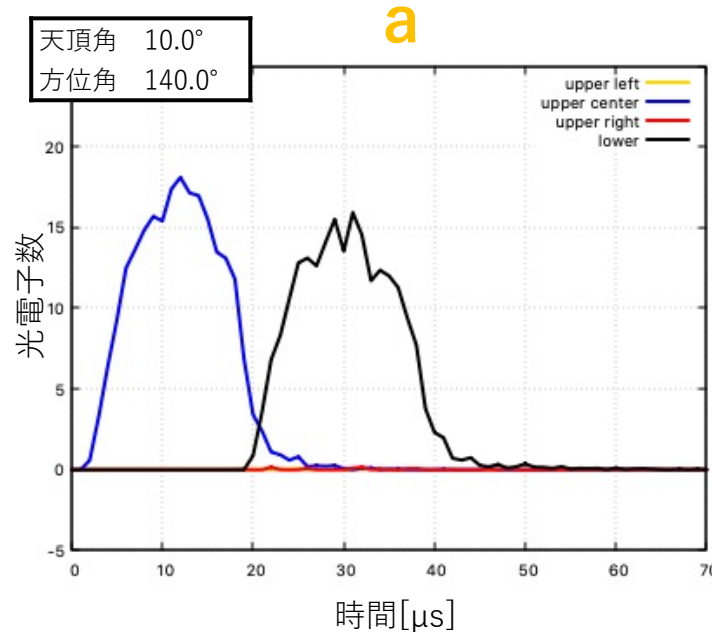
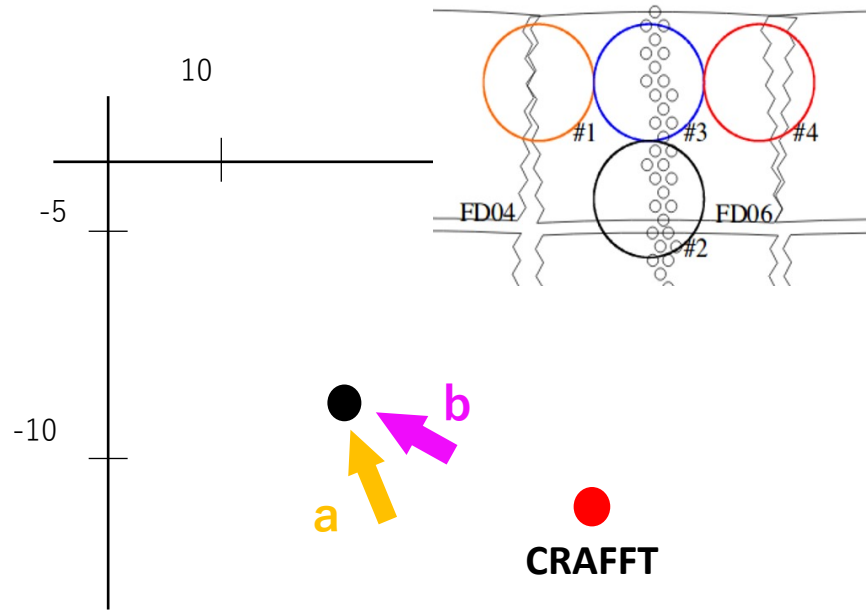
20~ km

CRAFFTの観測の様子



# 研究目的

黒の波高や青の立ち上がりの時間が異なる



エネルギー	10 <sup>17.7</sup> eV
X	13.0 km
Y	-9.0 km

宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図

到来方向を変えた擬似波形

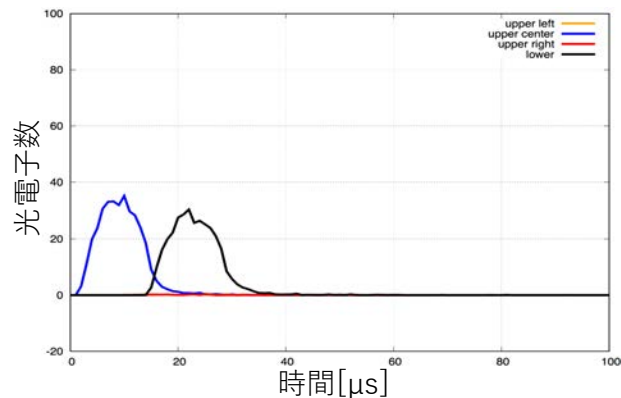
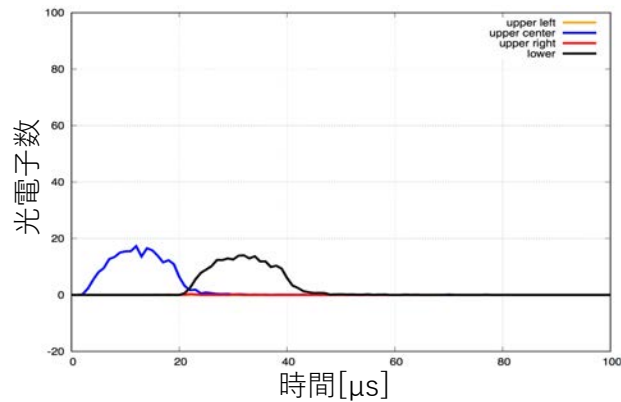
## 波形の違いを利用した再構成する手法の開発をする



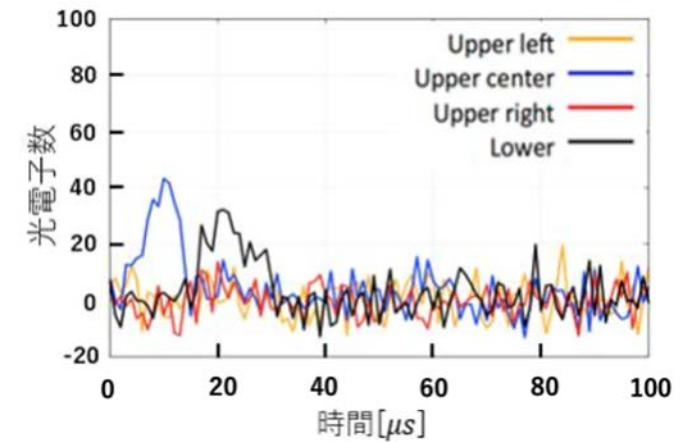
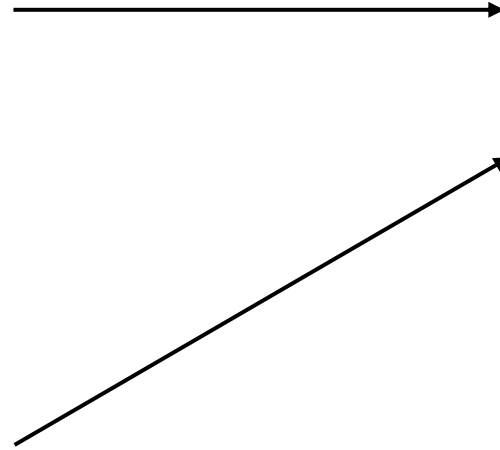
# 波形フィットによる再構成手法

検出器シミュレーションを用いて, 様々な条件で観測が期待される波形を作成する  
(エネルギー,  $X_{max}$ , 天頂角, 方位角, 落下地点(X, Y))

観測した波形を最もよく再現している波形を調査し, その波形のパラメータを求める



観測が期待される波形



CRAFFTが実際に観測した波形

## 波形フィットの評価指標

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = \frac{1}{\text{d.o.f.}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x(i) - E(i)}{\sigma} \right)^2$$

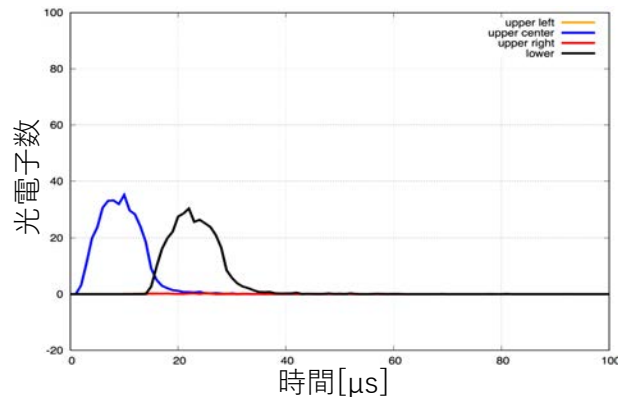
$x(i)$ : 観測値(実際の波形の光子数)  
 $E(i)$ : 期待値(CRAFFTシミュレーションで得られた光子数)  
 $\sigma$ : 標準偏差(各望遠鏡が取りうる誤差)



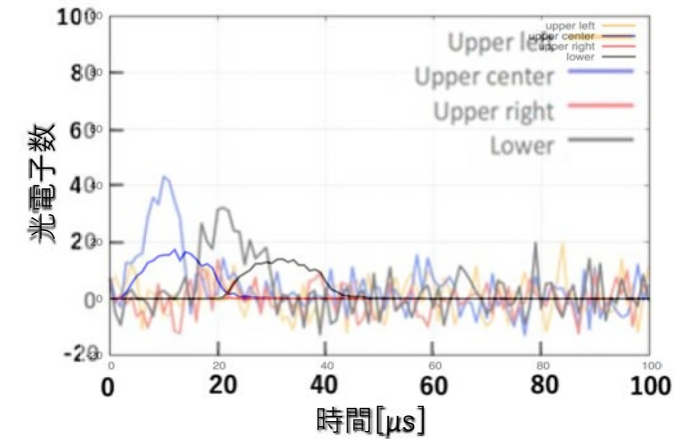
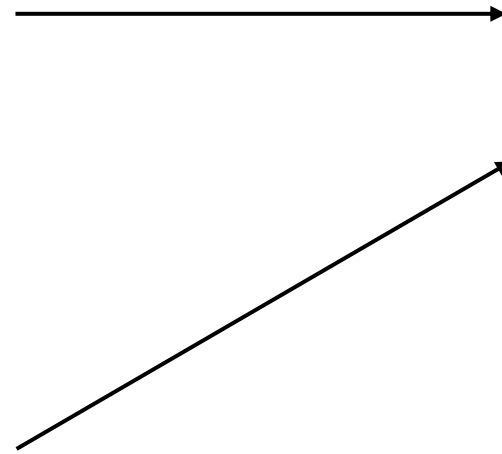
# 波形フィットによる再構成手法

検出器シミュレーションを用いて, 様々な条件で観測が期待される波形を作成する  
(エネルギー,  $X_{max}$ , 天頂角, 方位角, 落下地点(X, Y))

観測した波形を最もよく再現している波形を調査し, その波形のパラメータを求める



観測が期待される波形



CRAFTが実際に観測した波形

## 波形フィットの評価指標

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = \frac{1}{\text{d.o.f.}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x(i) - E(i)}{\sigma} \right)^2$$

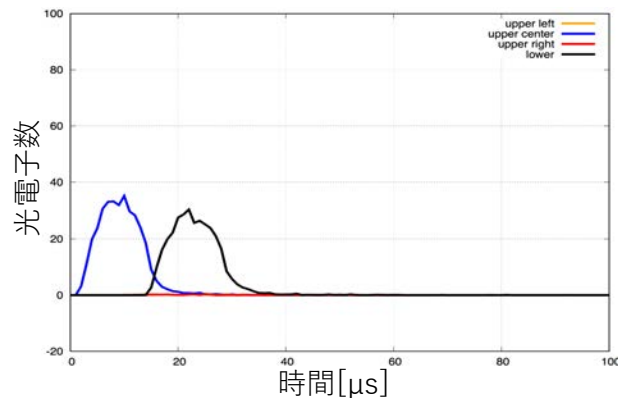
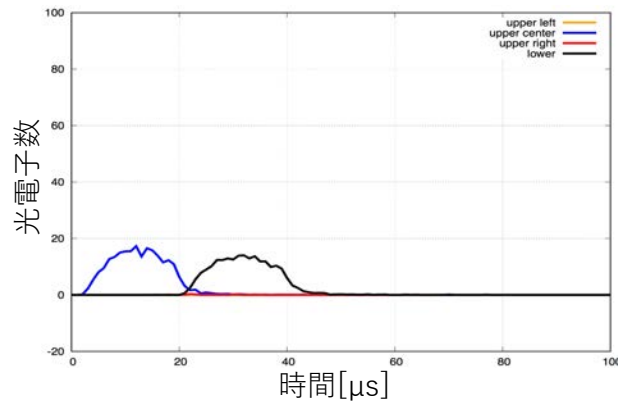
$x(i)$ : 観測値(実際の波形の光子数)  
 $E(i)$ : 期待値(CRAFTシミュレーションで得られた光子数)  
 $\sigma$ : 標準偏差(各望遠鏡が取りうる誤差)



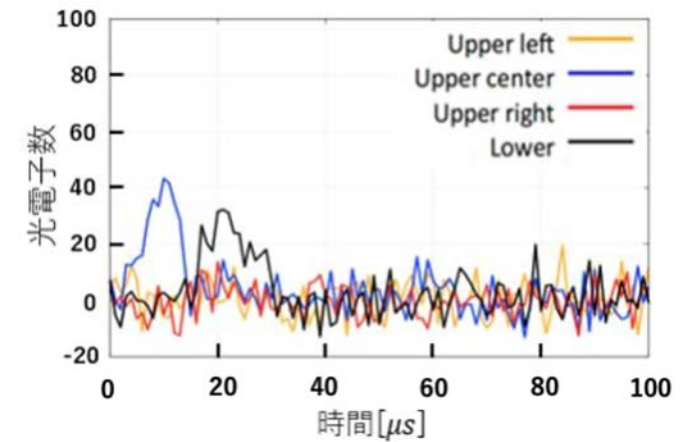
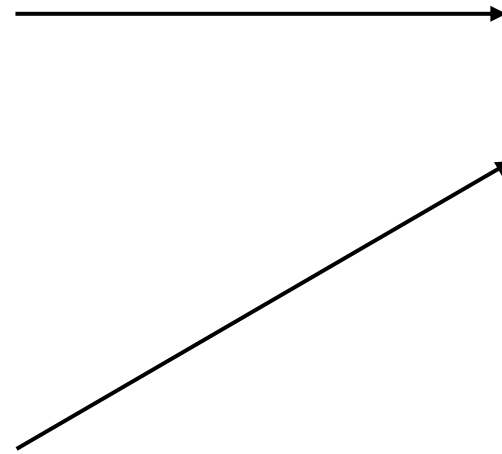
# 波形フィットによる再構成手法

検出器シミュレーションを用いて、様々な条件で観測が期待される波形を作成する  
(エネルギー,  $X_{max}$ , 天頂角, 方位角, 落下地点(X, Y))

観測した波形を最もよく再現している波形を調査し、その波形のパラメータを求める



観測が期待される波形



CRAFTが実際に観測した波形

## 波形フィットの評価指標

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = \frac{1}{\text{d.o.f.}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x(i) - E(i)}{\sigma} \right)^2$$

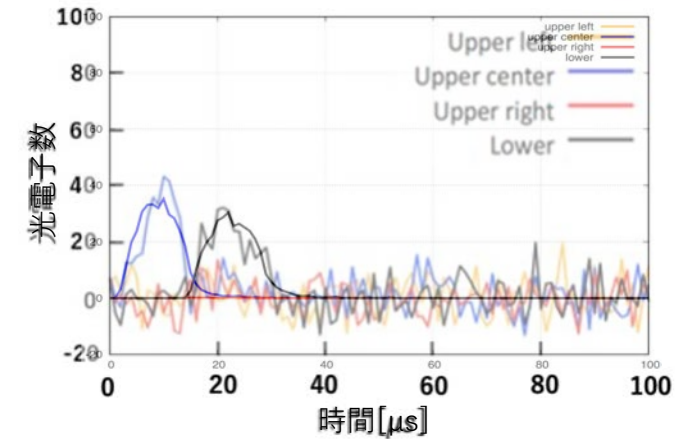
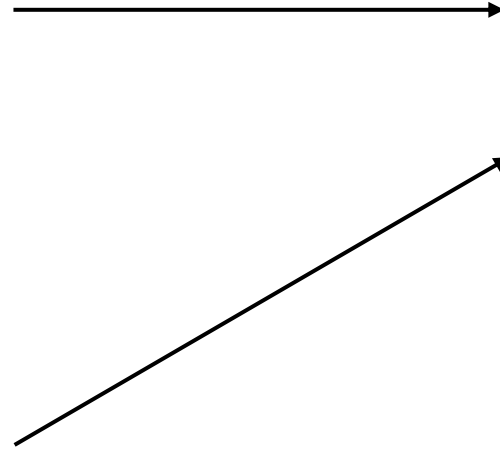
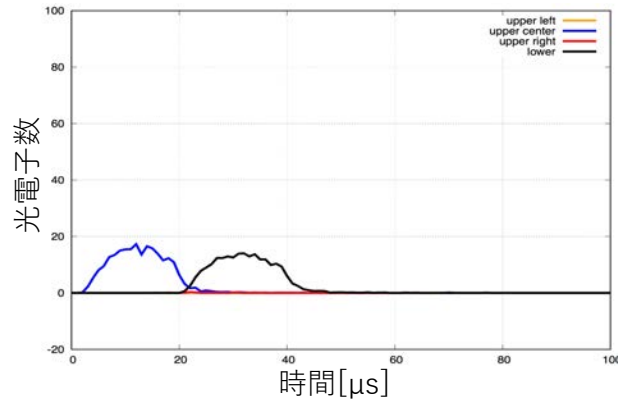
$x(i)$ : 観測値(実際の波形の光子数)  
 $E(i)$ : 期待値(CRAFTシミュレーションで得られた光子数)  
 $\sigma$ : 標準偏差(各望遠鏡が取りうる誤差)



# 波形フィットによる再構成手法

検出器シミュレーションを用いて、様々な条件で観測が期待される波形を作成する  
(エネルギー,  $X_{max}$ , 天頂角, 方位角, 落下地点(X, Y))

観測した波形を最もよく再現している波形を調査し、その波形のパラメータを求める



CRAFTが実際に観測した波形

## 波形フィットの評価指標

$$\chi^2/\text{d.o.f.} = \frac{1}{\text{d.o.f.}} \sum_{i=1}^n \left( \frac{x(i) - E(i)}{\sigma} \right)^2$$

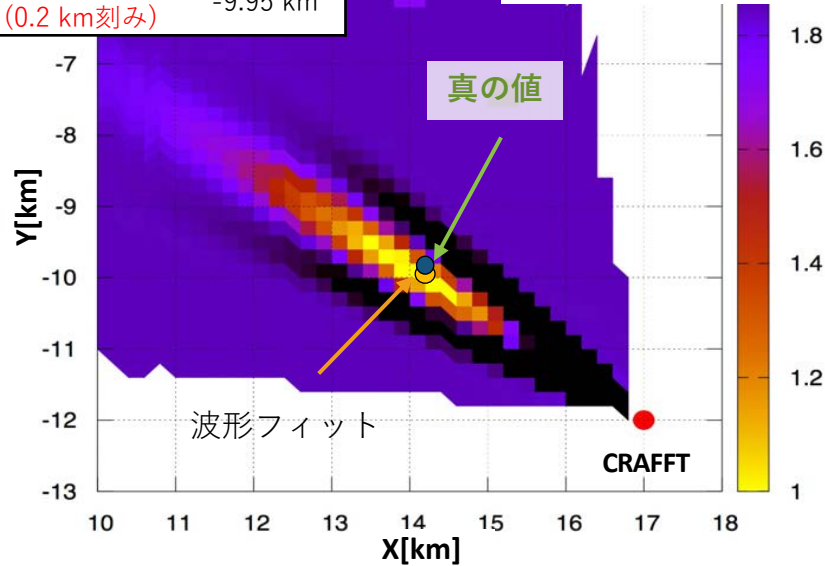
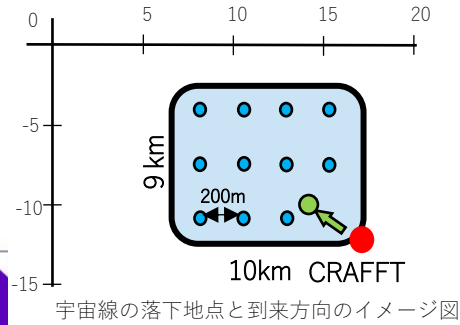
$x(i)$ : 観測値(実際の波形の光電子数)  
 $E(i)$ : 期待値(CRAFTシミュレーションで得られた光電子数)  
 $\sigma$ : 標準偏差(各望遠鏡が取りうる誤差)

観測が期待される波形



# 落下地点・到来方向が変化した時の $\chi^2/d.o.f.$ 分布

	解析条件	真の値
エネルギー	$10^{17.7} \text{eV}$	$10^{17.7} \text{eV}$
天頂角	$0.0^\circ$	$14.2^\circ$
方位角	$0.0^\circ$	$132.4^\circ$
X	7.0~17.0 km (0.2 km刻み)	14.18 km
Y	-12.0~-3.0 km (0.2 km刻み)	-9.95 km

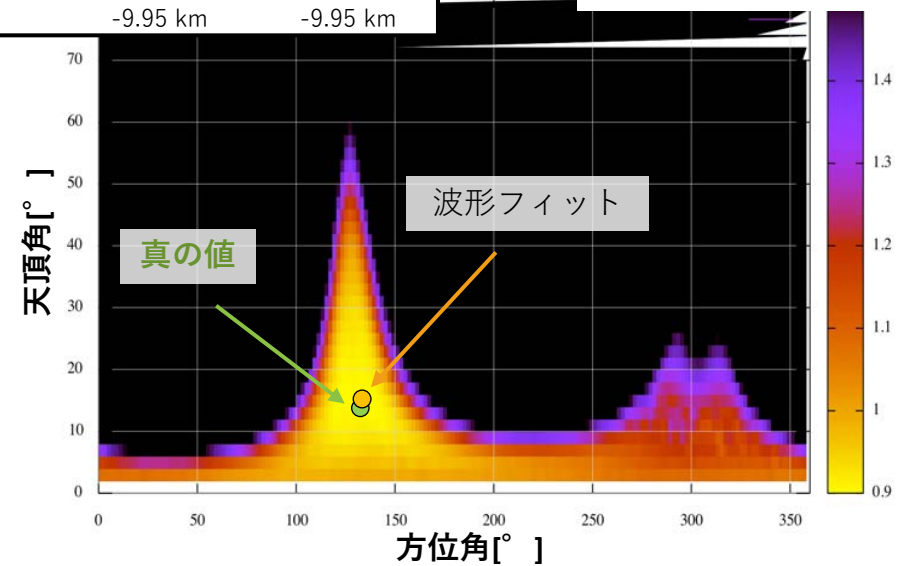
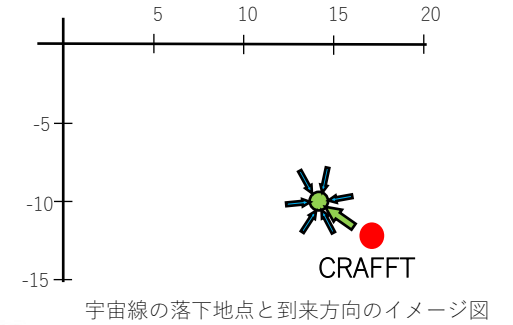


コア位置を少しずつ変えた $\chi^2/d.o.f.$ 分布

	真の値	波形フィット
X	14.18 km	13.80 km
Y	-9.95 km	-9.80 km
$\chi^2/d.o.f.$		0.91

約400 m程度で  
収束する

	解析条件	真の値
エネルギー	$10^{17.7} \text{eV}$	$10^{17.7} \text{eV}$
天頂角	$0.0 \sim 80.0^\circ$ ( $2^\circ$ 刻み)	$14.2^\circ$
方位角	$0.0 \sim 360.0^\circ$ ( $2^\circ$ 刻み)	$132.4^\circ$
X	14.18 km	14.18 km
Y	-9.95 km	-9.95 km



到来方向を少しずつ変えた $\chi^2/d.o.f.$ 分布

	真の値	波形フィット
天頂角	$14.2^\circ$	$16^\circ$
方位角	$132.4^\circ$	$134^\circ$
$\chi^2/d.o.f.$		0.90

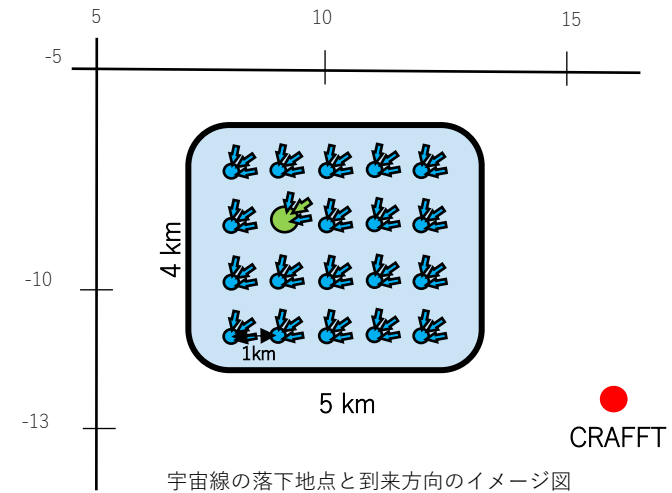
約 $2^\circ$ 程度で  
収束する



# 5パラメータフィット

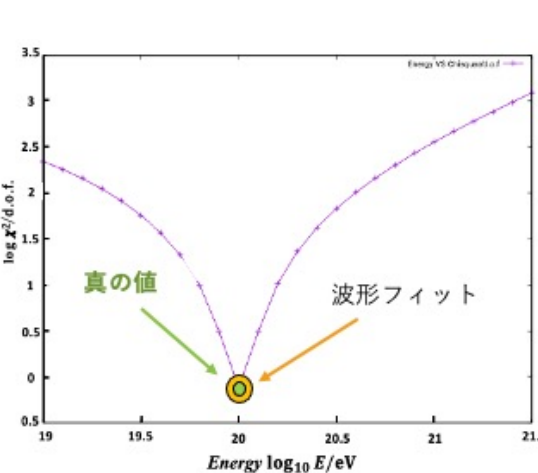
## 解析条件

	範囲	刻み	真の値
エネルギー $E$	$10^{19.0} \sim 10^{21.5}$ eV	$\log \Delta E / eV = 0.1$	$10^{20.0}$ eV
天頂角 $\theta$	$20.0 \sim 60.0^\circ$	$\Delta\theta = 10^\circ$	$40.0^\circ$
方位角 $\phi$	$10.0 \sim 50.0^\circ$	$\Delta\phi = 10^\circ$	$30.0^\circ$
$X$	$8.0 \sim 13.0$ km	$\Delta X = 1$ km	$9.0$ km
$Y$	$-11.0 \sim -8.0$ km	$\Delta Y = 1$ km	$-9.0$ km
$X_{\max}$	$750 \text{ g/cm}^2$		$750 \text{ g/cm}^2$

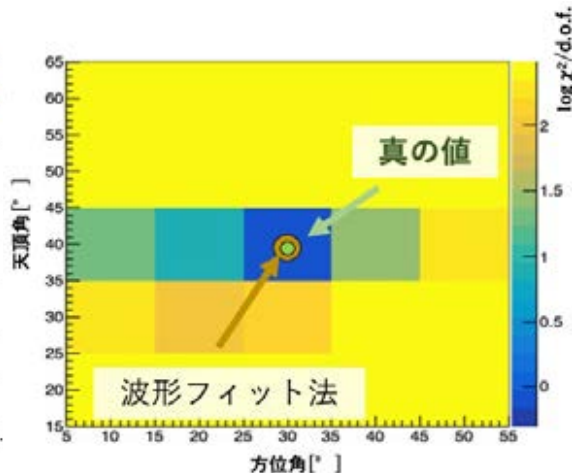


## 解析結果

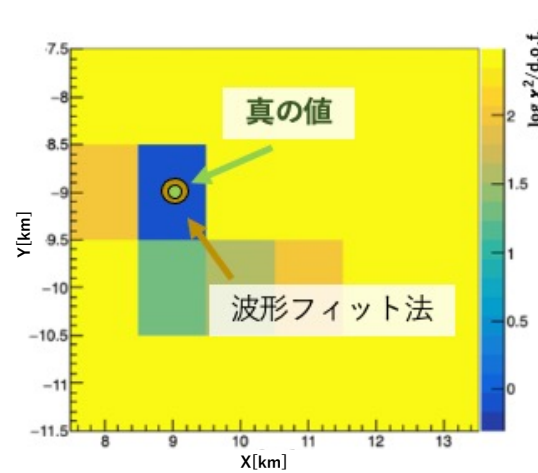
	真の値	波形フィット
エネルギー	$10^{20.0}$ eV	$10^{20}$ eV
天頂角	$40.0^\circ$	$40^\circ$
方位角	$30.0^\circ$	$30^\circ$
$X$	$9.0$ km	$9$ km
$Y$	$-9.0$ km	$-9$ km
$X_{\max}$	$750 \text{ g/cm}^2$	
$\chi^2 / \text{d.o.f.}$		$0.77$



エネルギーと $\chi^2 / \text{d.o.f.}$ のグラフ



到来方向を表した  
 $\chi^2 / \text{d.o.f.}$ 分布



落下地点を表した  
 $\chi^2 / \text{d.o.f.}$ 分布

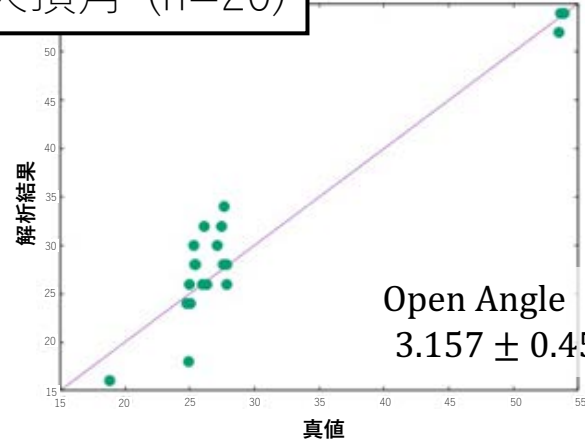
探索間隔は荒いが5パラメータの解析も可



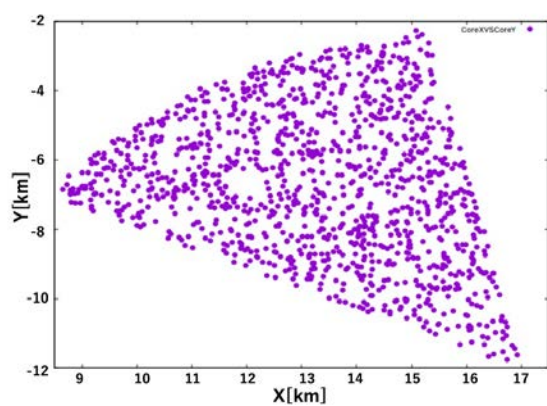
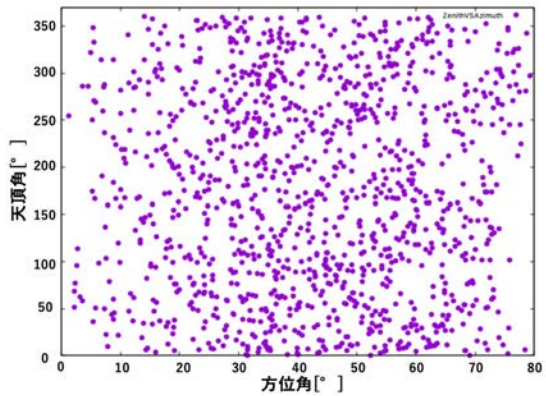
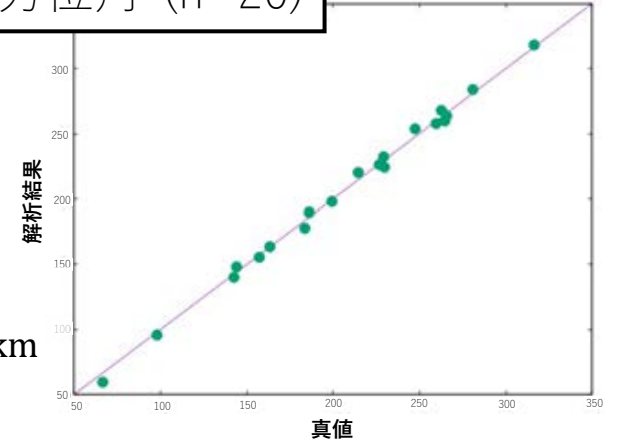
# 10<sup>20</sup> eVの決定精度の調査

エネルギー	10 <sup>20</sup> eV
天頂角	0.000~80.000°
方位角	0.000~360.00°
CRAFTからの距離	0.000~10.000 km
エントリー数 n	1200個

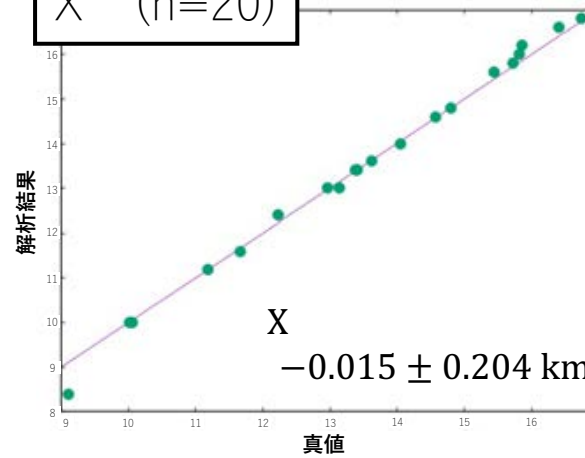
天頂角 (n=20)



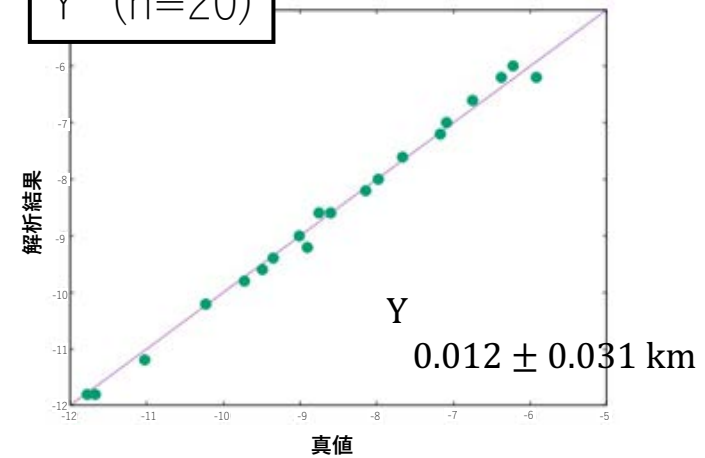
方位角 (n=20)



X (n=20)



Y (n=20)

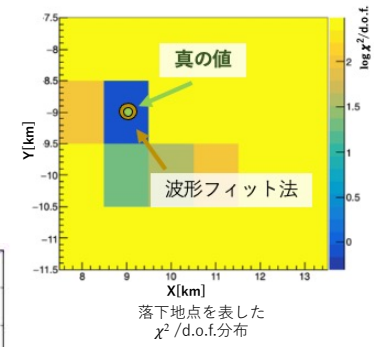
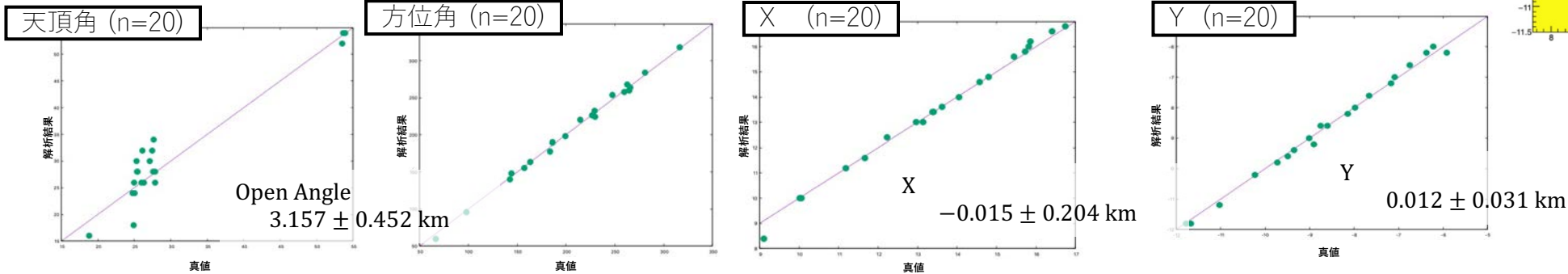
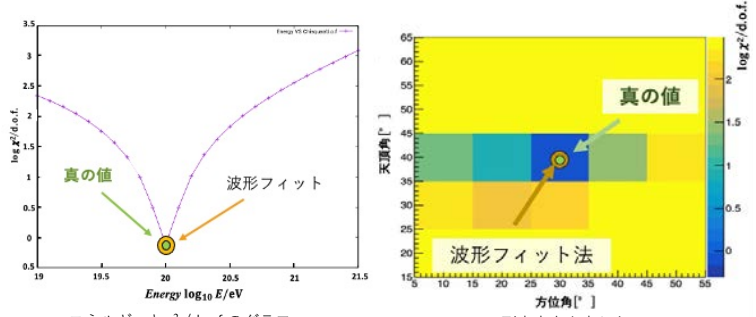




# まとめと今後

## まとめ

- 擬似波形を用いて、エネルギー、天頂角、方位角、落下地点 (x, y) の5パラメータで宇宙線空気シャワーの再構成が可能であるか評価した。
- 現在、天頂角、方位角、落下地点 (x, y) の4パラメータでの波形フィットの決定精度を調査している。



## 今後

- 天頂角、方位角、落下地点 (x, y) の4パラメータでの波形フィットの決定精度を求める。
- エネルギー、天頂角、方位角、落下地点 (x, y) の5パラメータでの波形フィットの決定精度を調査する。
- エネルギー、天頂角、方位角、落下地点 (x, y) に加えて  $X_{max}$  の6パラメータで 原理実証を行う。





# 自己紹介

西尾 瑛司

- 大阪電気通信大学大学院 工学研究科 修士1年
- 京都市生まれ 大阪育ち
- バレーボールをすること, 野球観戦, ゆるりんぱんだのグッズ収集

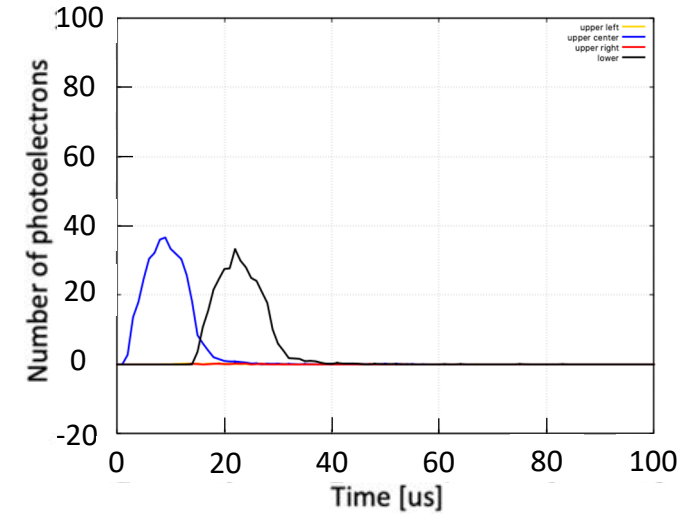
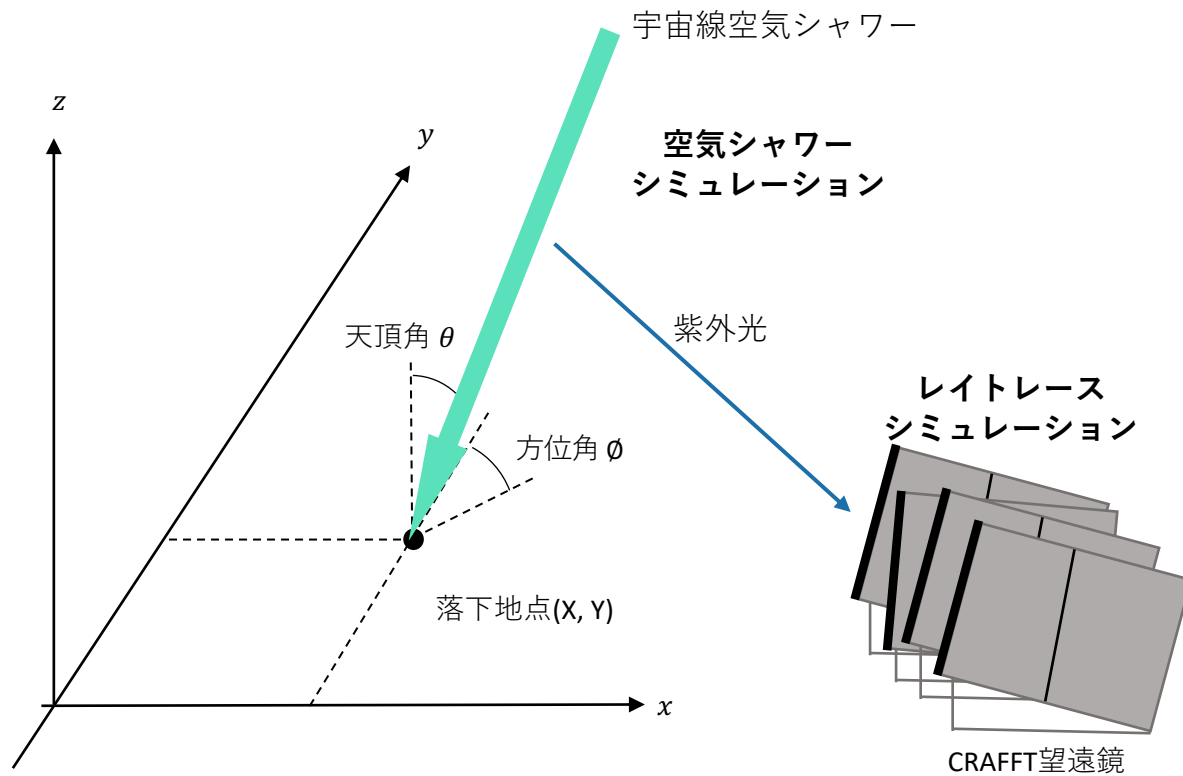




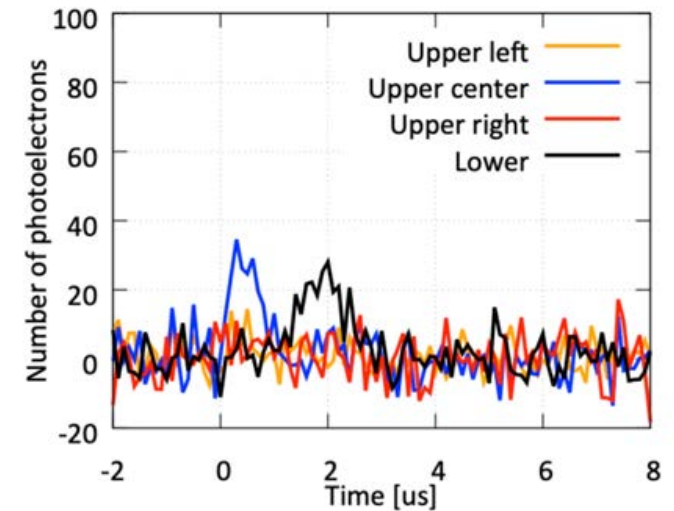
# CRAFFTシミュレーション

シミュレーションに必要なパラメータ

- エネルギー,  $X_{max}$ , 到来方向, 落下地点



シミュレーションで作成した擬似波形



CRAFFTが実際に観測した波形



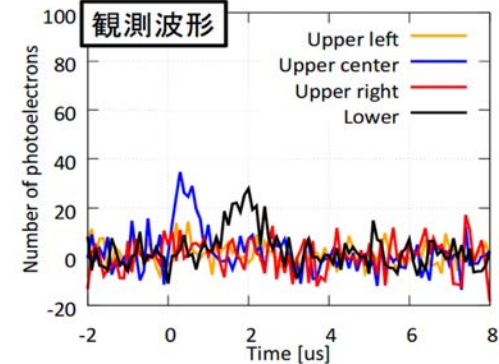
# CRAFFTの研究計画

## フェーズ1(～2021):検出器概念の確立

- プロト機の試験 (2017)
  - 100万円/台で4機作成
  - 宇宙線を検出できることを実証
- テスト機の試験 (2021)
  - 400万円/台で1機作成
  - PMTを6~12本に増量
  - 電力自給・自動観測システムの導入
  - 検出面の最適化を行った



CRAFFT望遠鏡 (プロトタイプ)



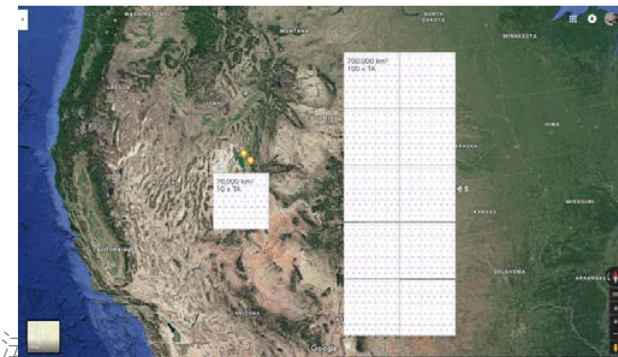
CRAFFTによる取得された宇宙線の信号  
2017-11-11 06:53:31

## フェーズ2(2021～):観測方法の確立

- TAサイトに6+6(+6)のCRAFFTを配備 (≈ TA observatory)
- ステレオ観測
- ネットワークのテスト
- 再構成解析

## フェーズ3(2030～):大規模観測

- 360° 観測可能なFDステーション
- 20km間隔で検出器を合計900ステーション配置
- TA×100の観測範囲
  - 700,000km<sup>2</sup>



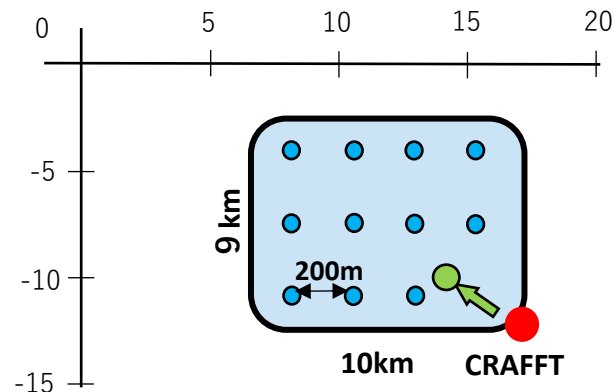
大規模観測時における予想図



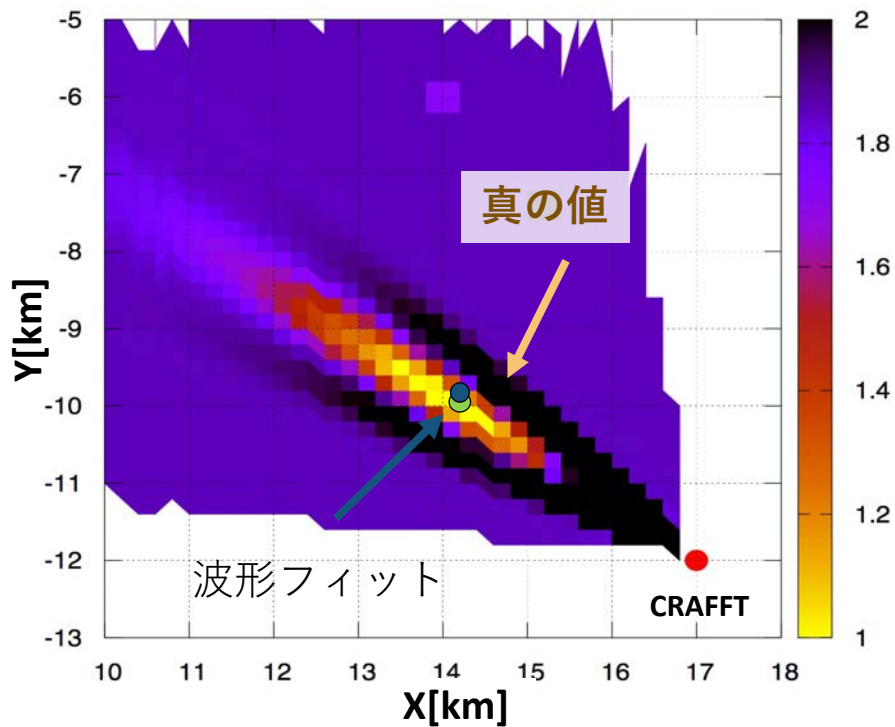
# 落下地点が変化した時の $\chi^2/d.o.f.$ 分布

解析条件	
エネルギー	$10^{17.7} \text{eV}$
天頂角	$0.0^\circ$
方位角	$0.0^\circ$
X	7.0~17.0 km(0.2 km刻み)
Y	-12.0~-3.0 km(0.2 km刻み)

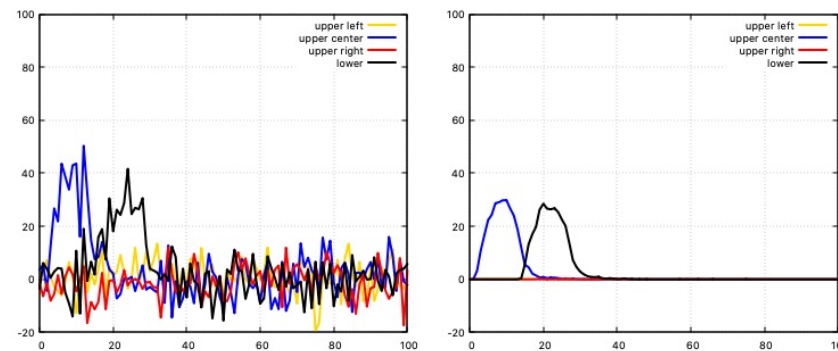
真の値	
エネルギー	$10^{17.7} \text{eV}$
天頂角	$14.2^\circ$
方位角	$132.4^\circ$
X	14.18 km
Y	-9.95 km



宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図



コア位置を少しずつ変えた $\chi^2/d.o.f.$ 分布



真の値	
X	14.18 km
Y	-9.95 km

波形フィット	
X	13.80 km
Y	-9.80 km
$\chi^2/d.o.f.$	0.91

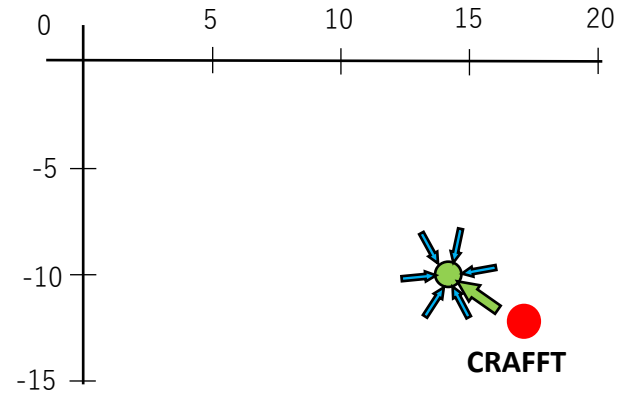
約400 m程度で収束する



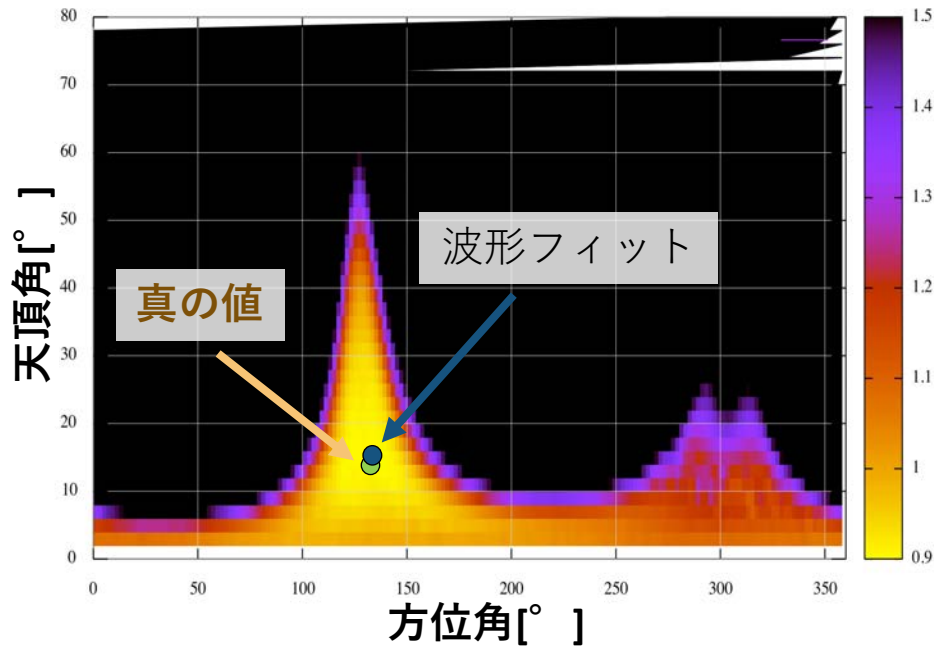
# 到来方向が変化した時の $\chi^2/\text{d.o.f.}$ 分布

解析条件	
エネルギー	$10^{17.7}\text{eV}$
天頂角	0.0~80.0° (2° 刻み)
方位角	0.0 ~360.0° (2° 刻み)
X	14.18 km
Y	-9.95 km

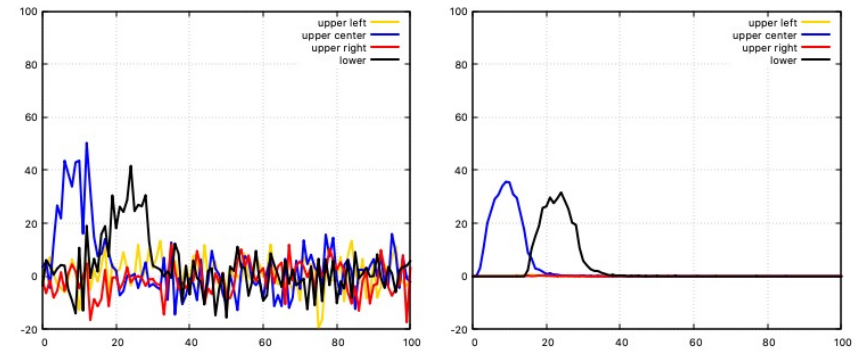
真の値	
エネルギー	$10^{17.7}\text{eV}$
天頂角	14.2°
方位角	132.4°
X	14.18 km
Y	-9.95 km



宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図



到来方向を少しずつ変えた  $\chi^2/\text{d.o.f.}$  分布



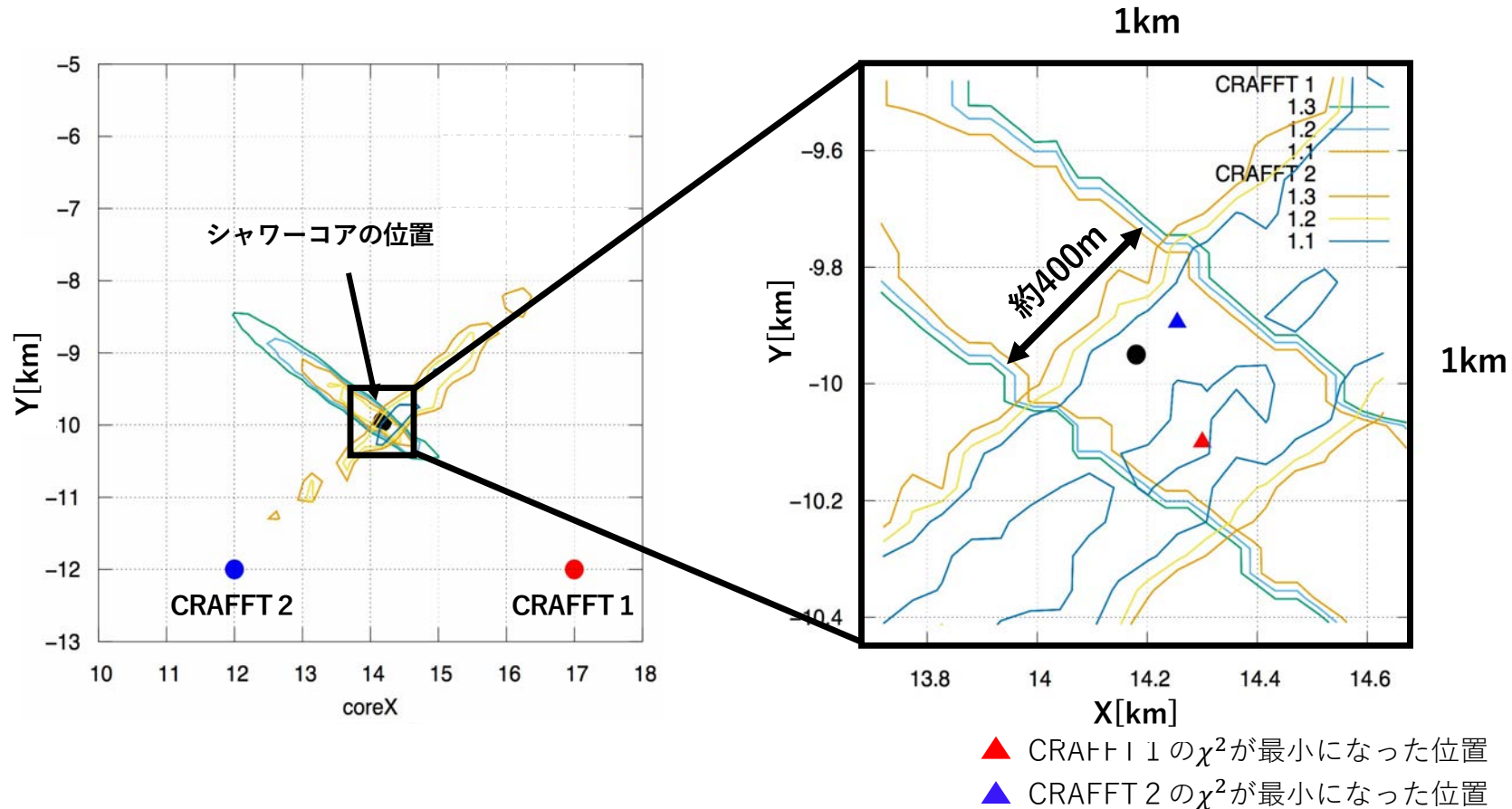
真の値	
天頂角	14.2°
方位角	132.4°

波形フィット	
天頂角	16°
方位角	134°
$\chi^2/\text{d.o.f.}$	0.90

約2° 程度で収束する



# ステレオ解析



等高線で表したステレオ解析による  $\chi$  二乗分布

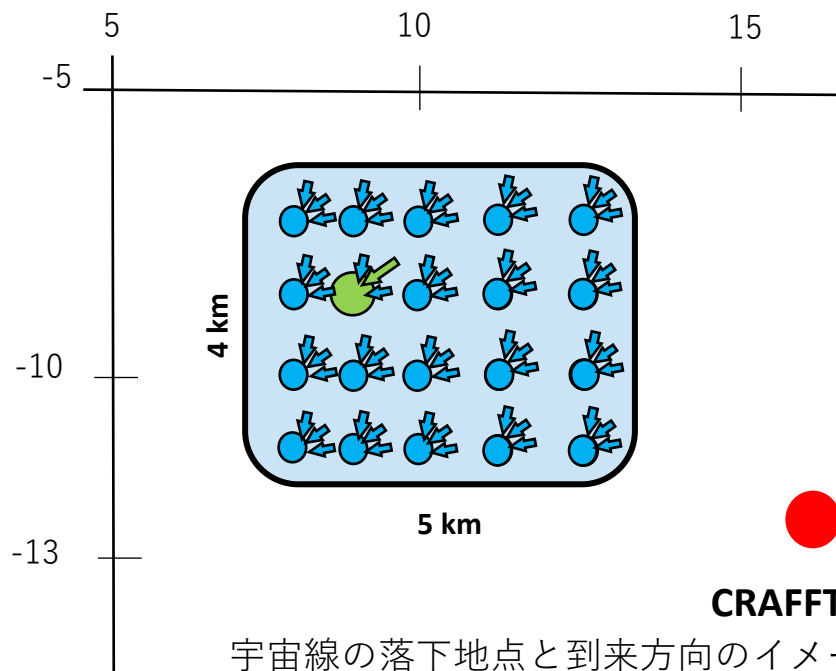
約400mの範囲内で宇宙線のシャワーコアの位置を絞ることができた。



# 様々な条件で波形フィットを行う条件

解析条件	
エネルギー	$10^{19.0} \sim 10^{21.5}$ eV
天頂角	$20.0 \sim 60.0^\circ$
方位角	$10.0 \sim 60.0^\circ$
X	8.0 ~ 13.0 km
Y	-11.0 ~ -8.0 km

真の値	
エネルギー	$10^{20.0}$ eV
天頂角	$40.0^\circ$
方位角	$30.0^\circ$
X	9.0 km
Y	-9.0 km



宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図

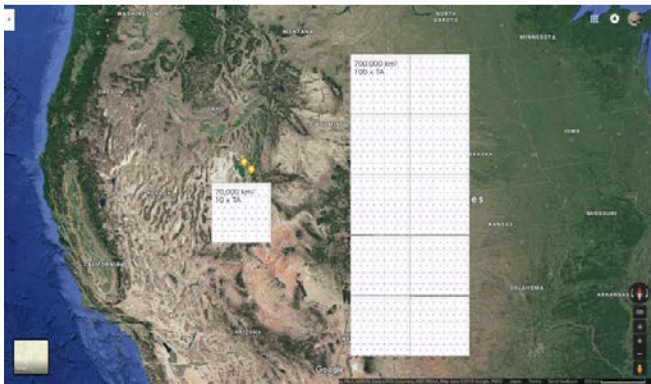


# CRAFTの目的

大規模な極高エネルギー宇宙線観測のための  
低コストかつ完全自動で観測可能な次世代型大気蛍光望遠鏡の開発

〈目標〉

- 超高エネルギー宇宙線の質量組成大統計解析  
→大気蛍光望遠鏡
- 観測統計量拡大のための大規模観測  
→設置・運用コストの削減

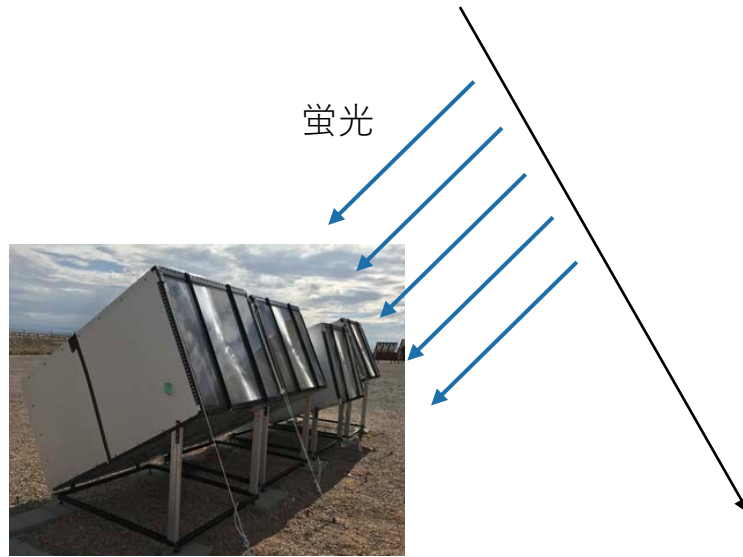


CRAFT =

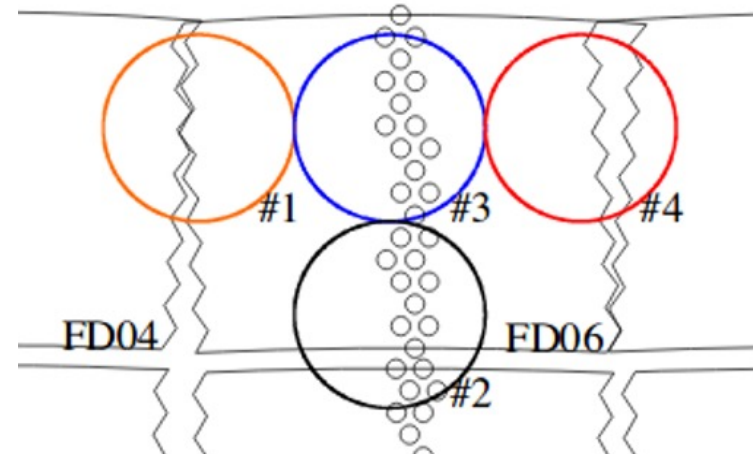
**C**osmic **R**ay **A**ir **F**luorescence **F**resnel-lens **T**elescope



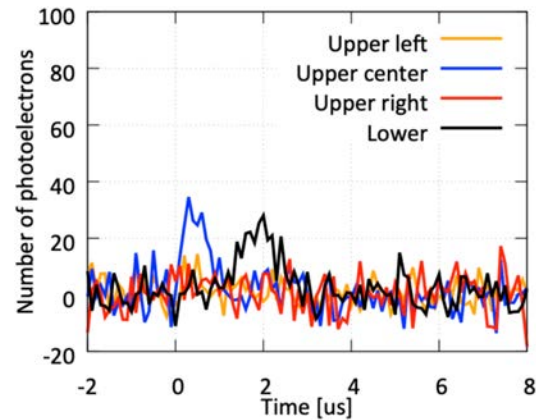
# CRAFFTの観測手法



CRAFFTの観測の様子



CRAFFTとTA実験のFDとの視野重なり



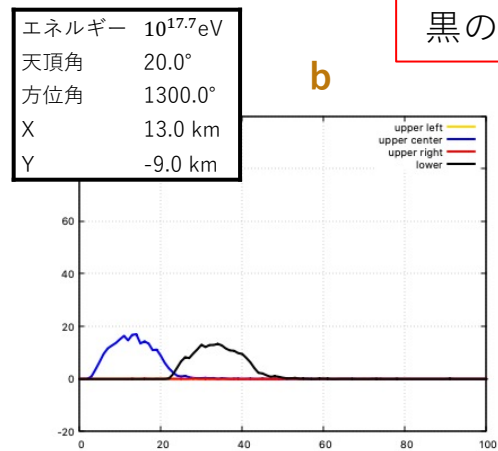
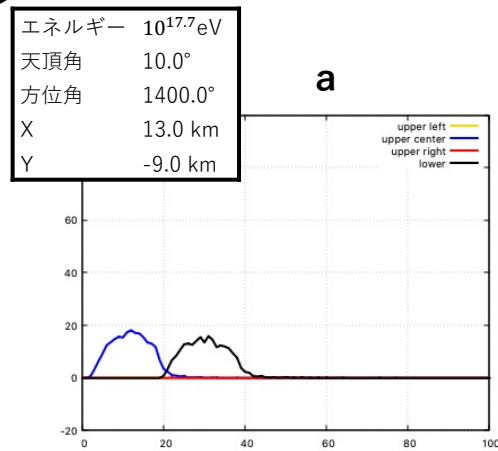
本望遠鏡が観測した空気シャワーの信号

既存の宇宙線空気シャワー再構成手法を用いる事ができない。

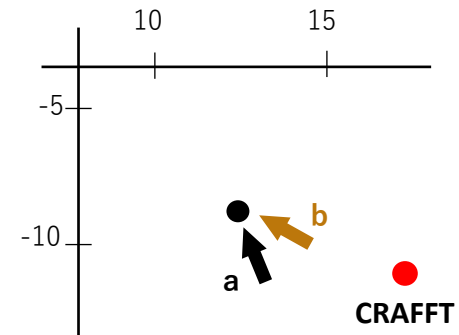
新たな再構成手法の開発が必要



# 波形フィットの原理

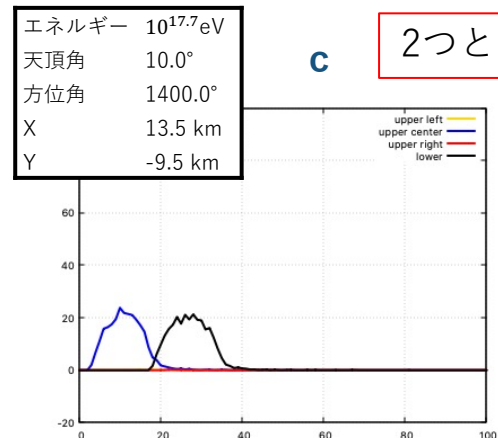
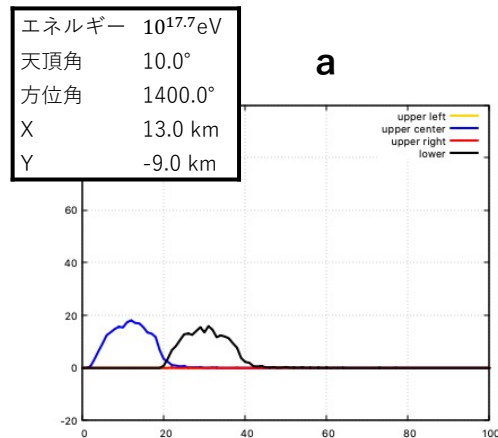


黒の波高が異なる

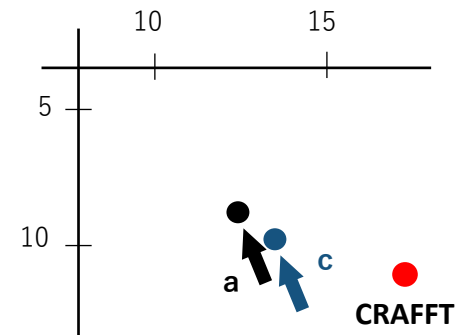


到来方向を変えたシミュレーション波形

宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図



2つとも波高が異なる



コア位置を変えたシミュレーション波形

宇宙線の落下地点と到来方向のイメージ図

似た波形が出来れば, 再構成ができる