

# 地表検出器用プラスチック シンチレーターの特性調査

東京大学 宇宙線研究所 M1

水野 敦之

For the ALPACA Collaboration

# 共同研究者リスト



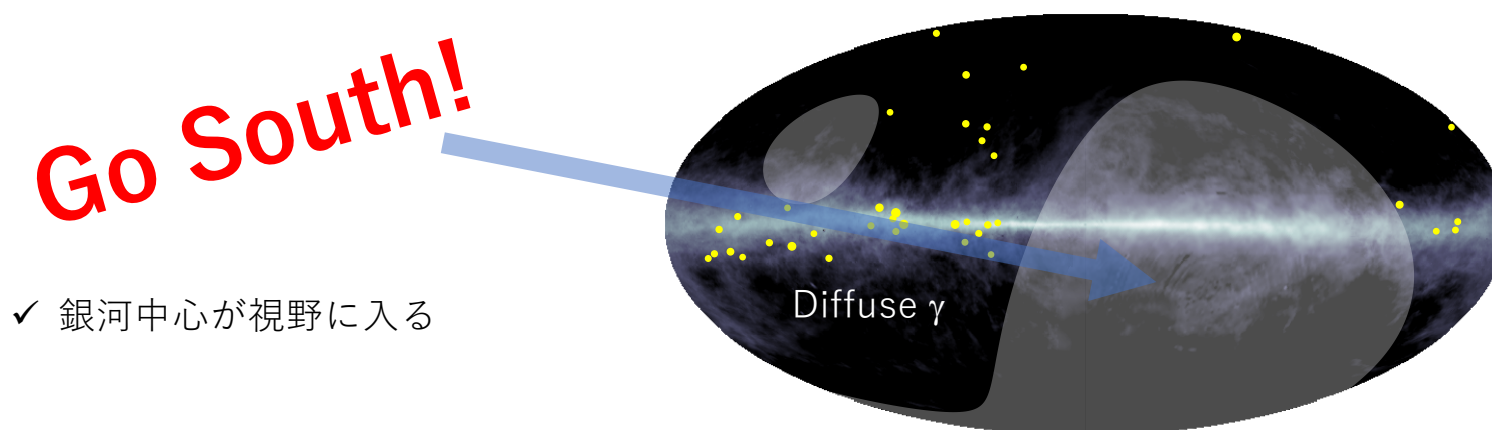
水野敦之, M. Anzorena, C. A. H. Condori<sup>B</sup>, E. de la Fuente<sup>C</sup>, 後藤佳歩<sup>D</sup>, 林優希<sup>E</sup>, 日比野欣也<sup>F</sup>, 堀田直己<sup>G</sup>, A. Jimenez-Meza<sup>C</sup>, 片寄祐作<sup>H</sup>, 加藤千尋<sup>E</sup>, 加藤勢, 川原一輝<sup>H</sup>, 川田和正, 川島輝能, 小井辰巳<sup>I</sup>, 小島浩司<sup>J</sup>, 榎島拓音<sup>H</sup>, 増田吉起<sup>E</sup>, 松橋祥<sup>H</sup>, 松本瑞生<sup>E</sup>, R. Mayta<sup>K,L</sup>, P. Miranda<sup>B</sup>, 宗像一起<sup>E</sup>, 中村佳昭, C. Nina<sup>B</sup>, 西澤正己<sup>M</sup>, 野口陸<sup>H</sup>, 荻尾彰一, 大西宗博, 奥川創介<sup>H</sup>, 大嶋晃敏<sup>D,I</sup>, M. Rajjevic<sup>B</sup>, H. Rivera<sup>B</sup>, 齋藤敏治<sup>N</sup>, 塔隆志, 佐古崇志, 佐々木翼<sup>F</sup>, 柴崎季哉<sup>O</sup>, 柴田祥一<sup>J</sup>, 塩見昌司<sup>O</sup>, M. Subieta<sup>B</sup>, 田島典夫<sup>P</sup>, 鷹野和紀子<sup>F</sup>, 瀧田正人, 多米田裕一郎<sup>Q</sup>, 田中公一<sup>R</sup>, R. Ticona<sup>B</sup>, I. Toledano-Juarez<sup>C</sup>, 土屋晴文<sup>S</sup>, 常定芳基<sup>K,L</sup>, 有働慈治<sup>F</sup>, 碓井玲<sup>H</sup>, 山崎勝也<sup>I</sup>, 横江誼衡, 他 The ALPACA Collaboration

東大宇宙線研, サン・アンドレス大<sup>B</sup>, グアダラハラ大<sup>C</sup>, 中部大工<sup>D</sup>, 信州大理<sup>E</sup>, 神奈川大工<sup>F</sup>, 宇都宮大<sup>G</sup>, 横浜国大工<sup>H</sup>, 中部大理工<sup>I</sup>, 中部大天文台<sup>J</sup>, 大阪公大理<sup>K</sup>, 大阪公大南部研<sup>L</sup>, 国立情報学研<sup>M</sup>, 都立産業技術高専<sup>N</sup>, 日本大生産工<sup>O</sup>, 理研<sup>P</sup>, 大阪電通大工<sup>Q</sup>, 広島市大情<sup>R</sup>, 原子力機構<sup>S</sup>

# Sub-PeVガンマ線天文学

## ★ Tibet AS $\gamma$ , HAWC, LHAASO実験によるsub-PeV天文学の発展

- sub-PeVガンマ線の初検出 (Crab Nebula) *Tibet AS $\gamma$ , PRL (2019)*
- PeVatronの有力候補の発見 (G106.3+2.7) *Tibet AS $\gamma$ , Nat. Astron. (2021) HAWC, ApJ (2020)*
- sub-PeV銀河面拡散ガンマ線の初検出 *Tibet AS $\gamma$ , PRL (2021)*
- 40個を超えるsub-PeVガンマ線天体の検出 *LHAASO, Nature (2021), ApJS (2024)*  
→ 北半球の空気シャワー観測装置による成果







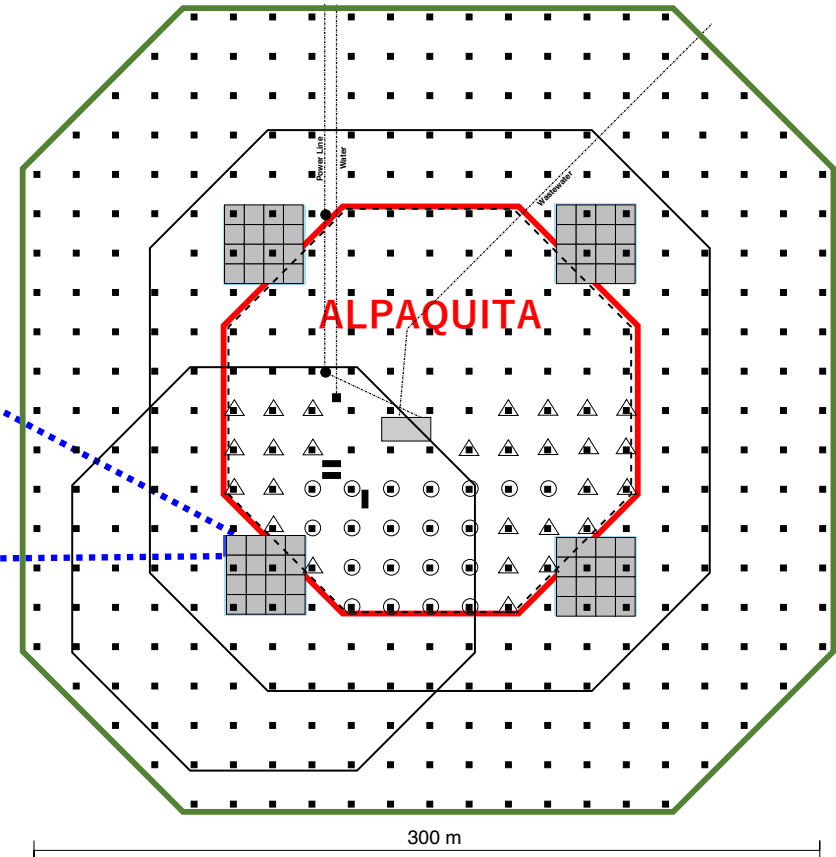
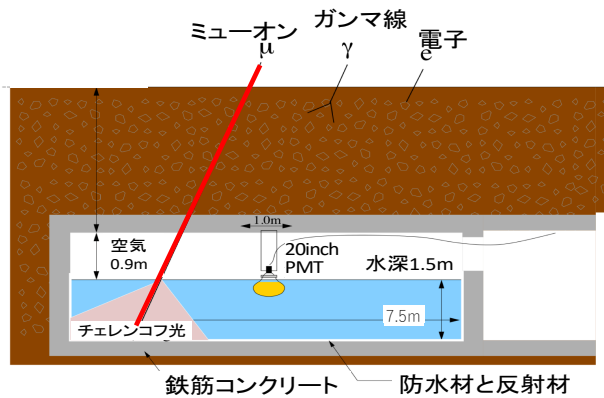
# ALPACA実験の紹介

## 1. 空気シャワーアレイ ~83,000m<sup>2</sup>

= 401 x 1m<sup>2</sup> シンチ検出器

## 2. 地下ミュオン検出器~900m<sup>2</sup> x4プール

= 土被り2m, 1プール=16セル、  
1セル = 56m<sup>2</sup> 水深1.5m with 20inch  $\phi$  PMT



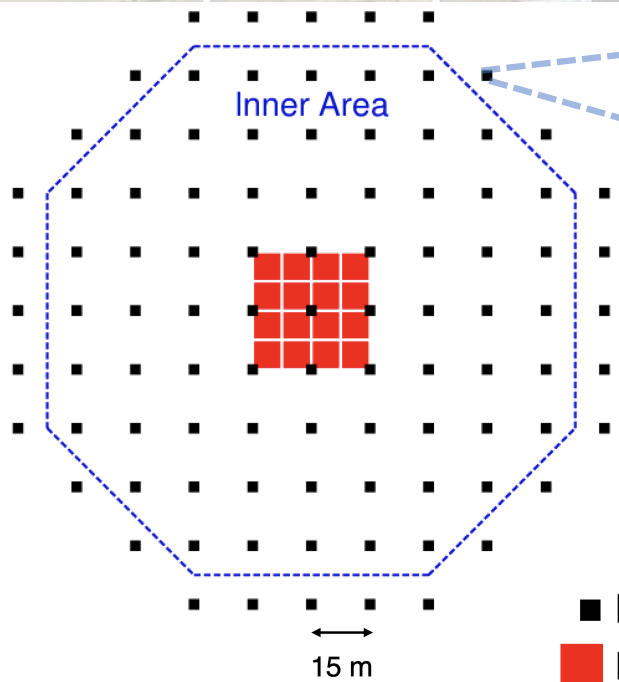
✓ バックグラウンド宇宙線の除去率 >99.9% @100TeV

✓ 広視野(~2sr)で昼夜問わず24時間観測可能

- 角度分解能 ~0.2° @100TeV

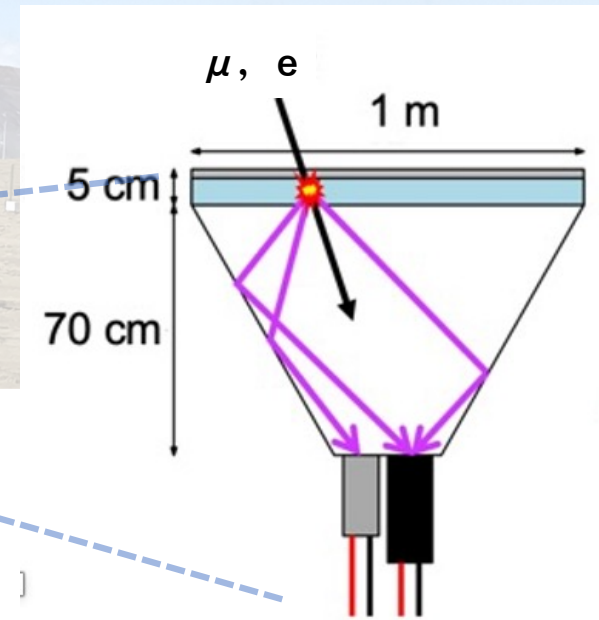
- エネルギー分解能 ~20%@100TeV

# ALPAQUITAの紹介



ALPAQUITA ASアレイ  
→1/4 ALPACA ASアレイ  
97台 総面積:18,450m<sup>2</sup>

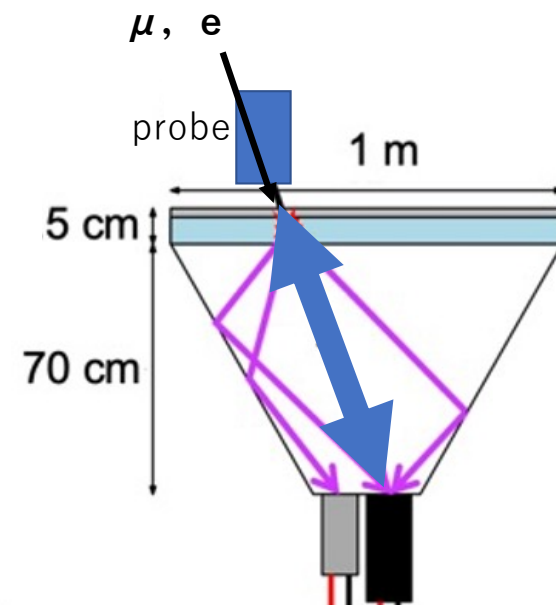
- Plastic scintillators (1 m<sup>2</sup>)
- MD cells (56 m<sup>2</sup>)



# Motivation

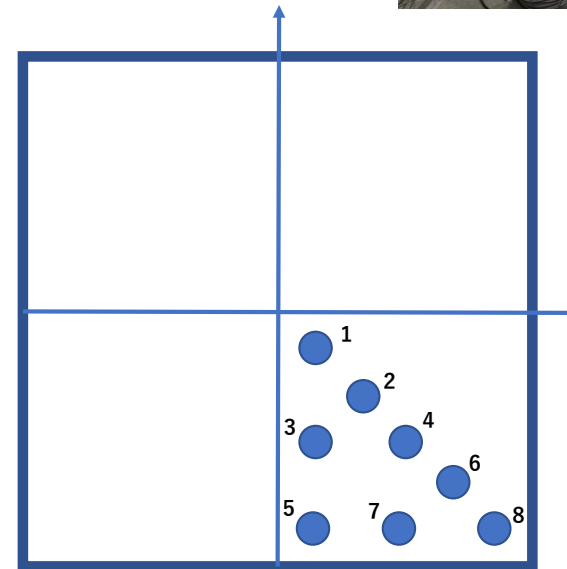
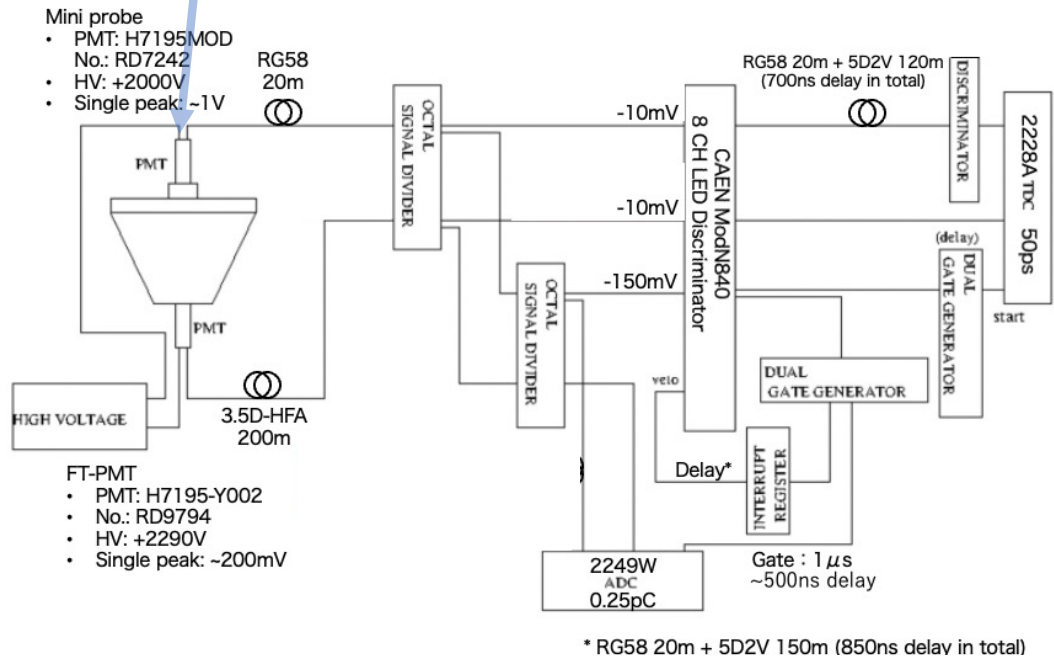
- ✓ 50cm\*50cm\*5cm シンチレーター (× 4 枚)におけるPMT信号の発光位置依存性が予想される
- ✓ シンチレーター・容器・PMTを通しての発光量（電荷量）・  
信号の遅れ・信号立ち上がり時間の揺らぎ（t.t.s. = transit time spread）の  
位置依存性の測定→モンテカルロシミュレーション（MC）に考慮
- ✓ 実験データとMCの比較

外部トリガーシンチレーター（probe）側の  
PMTが発光してからBOX側のPMTが発光する  
までの時間差分布の幅をt.t.s.とする



# Experimental setup

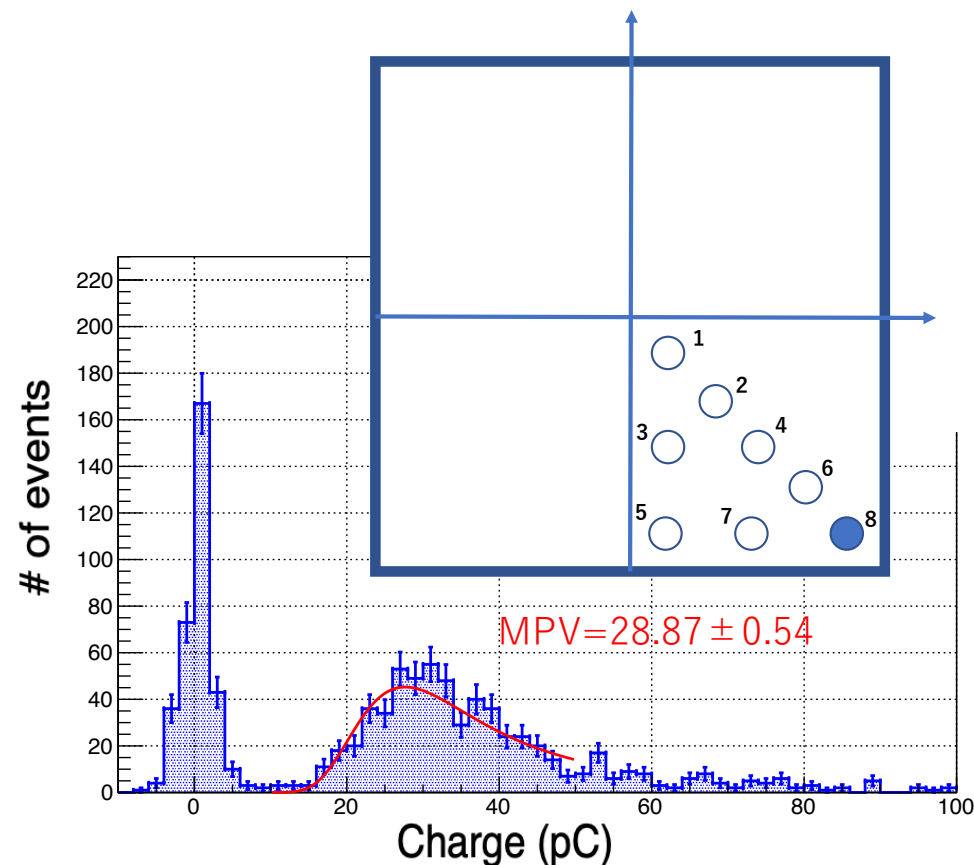
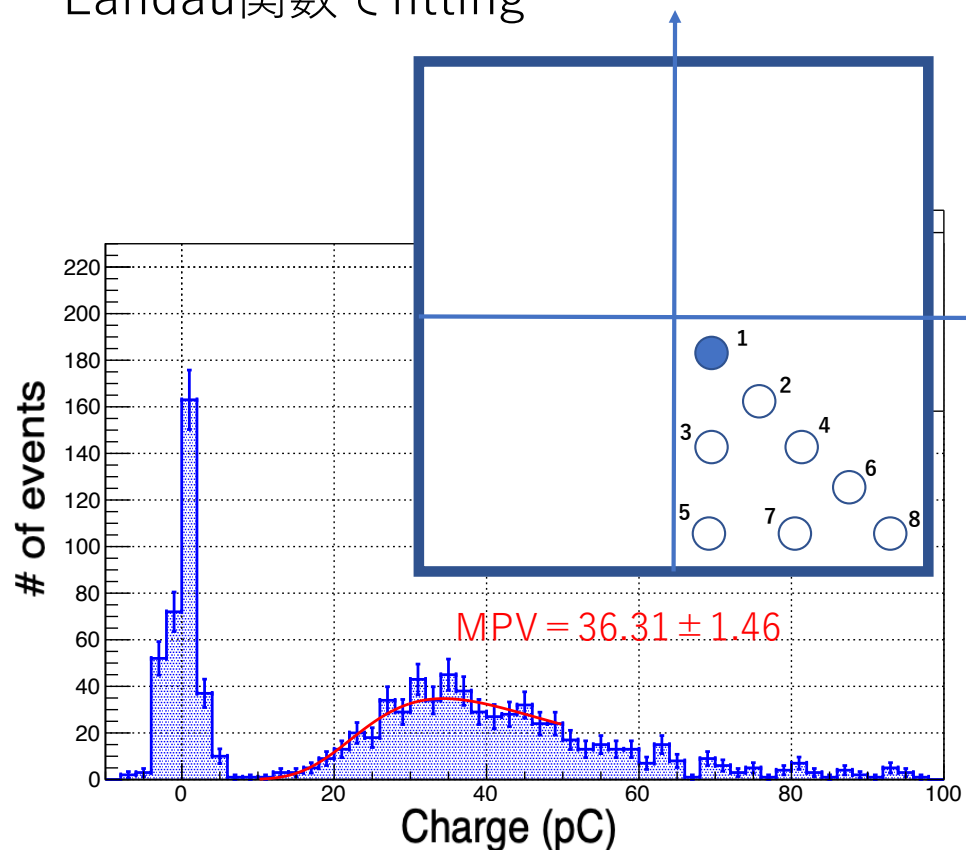
- ✓ ALPAQUITAのシンチレーター・PMT・BOXを用いて宇宙線研で測定
- ✓ 1m<sup>2</sup>検出器の上に置いた probe検出器 (2inch PMT+2inch φシンチレーター) でトリガー
- ✓ 8箇所でADC, TDCの値を記録
- ✓ シンチレーターは2枚測定





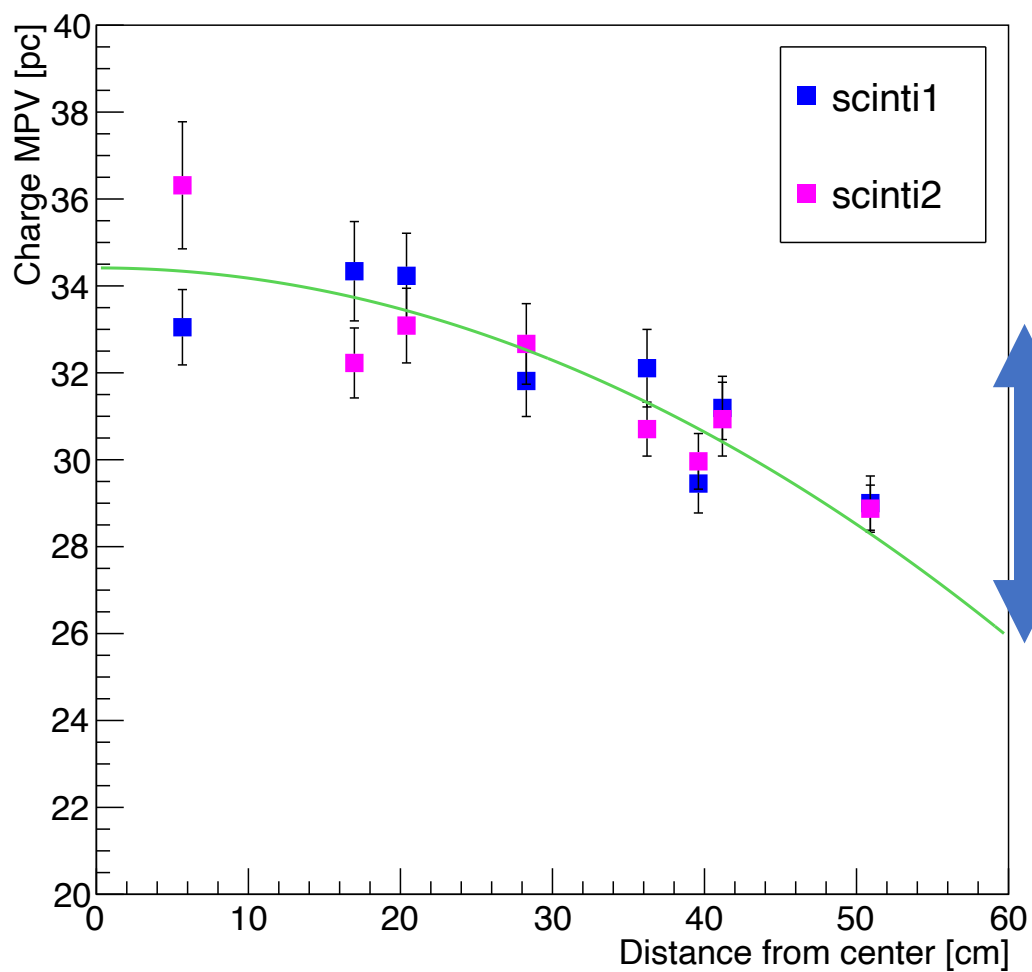
# 各位置における電荷量の測定

Landau関数でfitting



1 (中心付近) と 8 (角付近) の場所を比較すると 20%程の差が見られた

# 電荷量の位置依存性



2枚のシンチレーターで、各8箇所測定

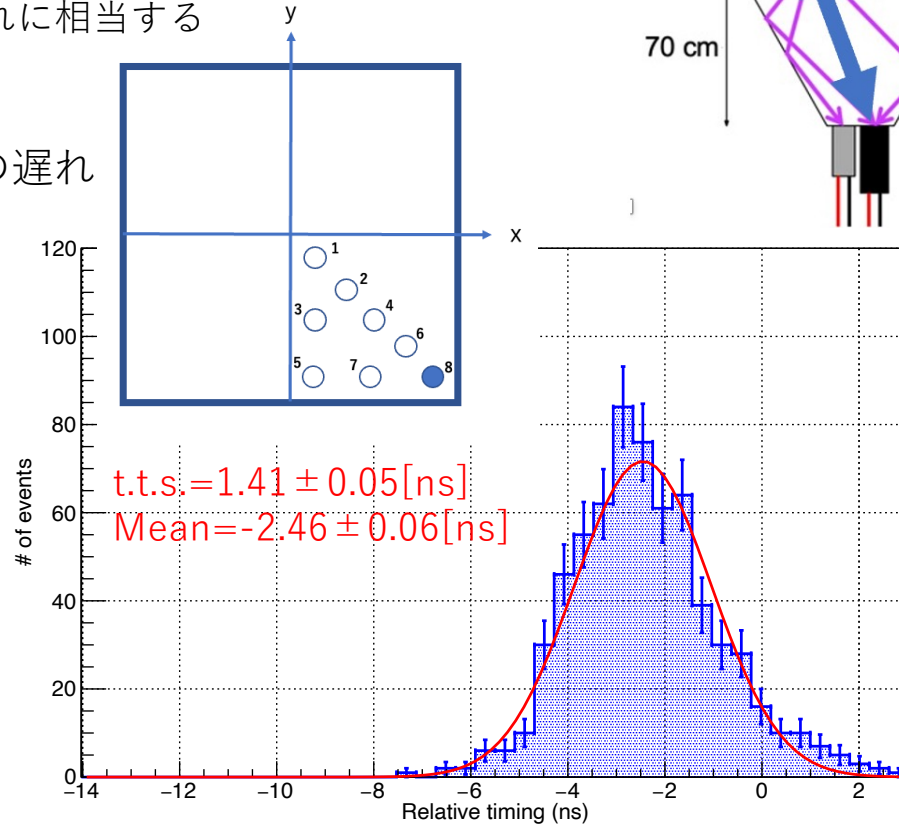
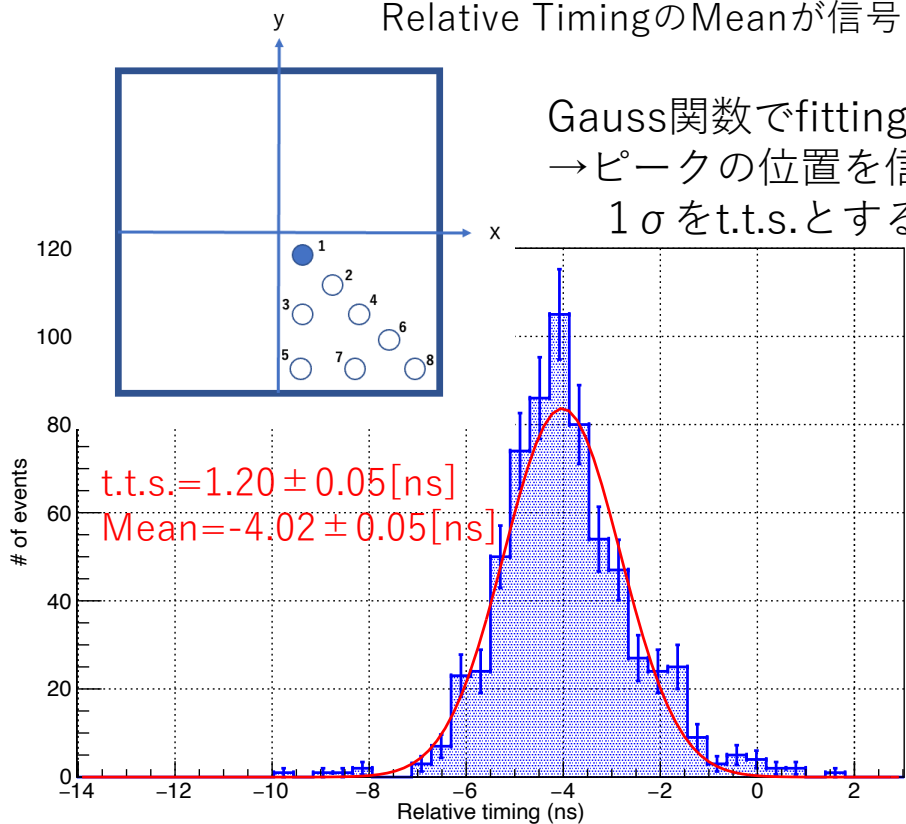
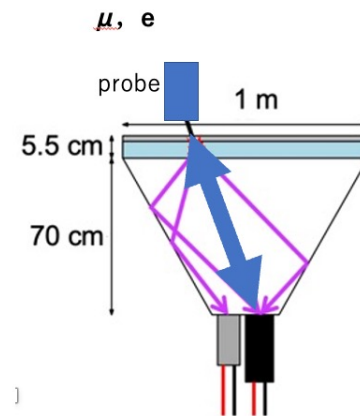
Fitting function:

$$-5.90 \left( \frac{x_{(cm)}}{50(cm)} \right)^2 + 34.4 \text{ (pC)}$$

20%

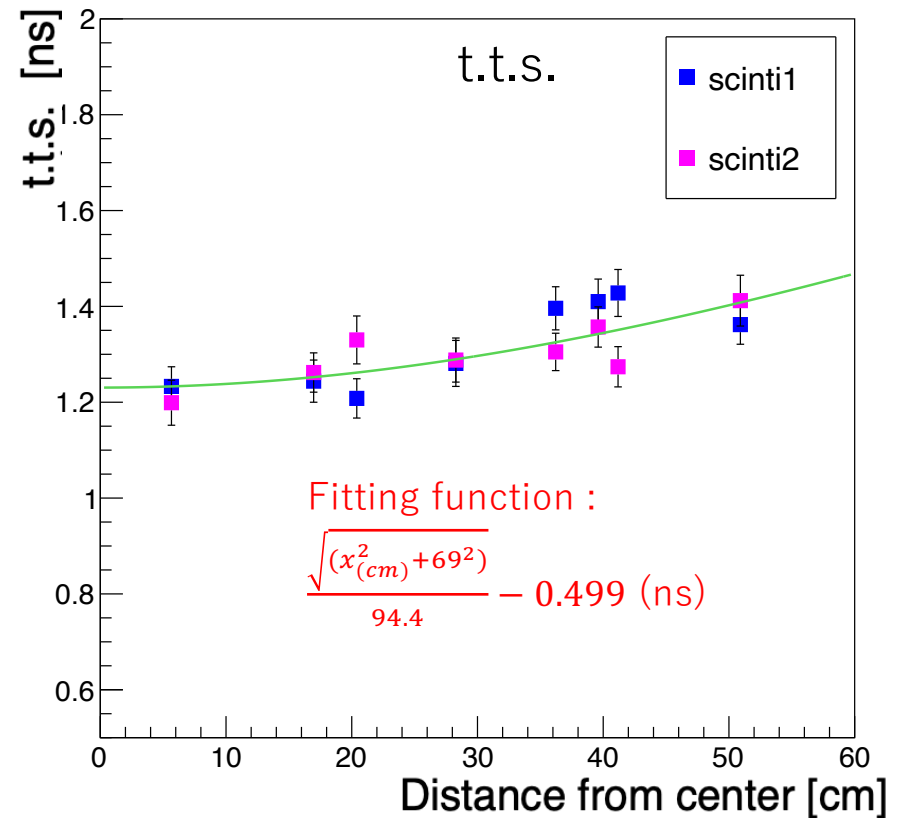
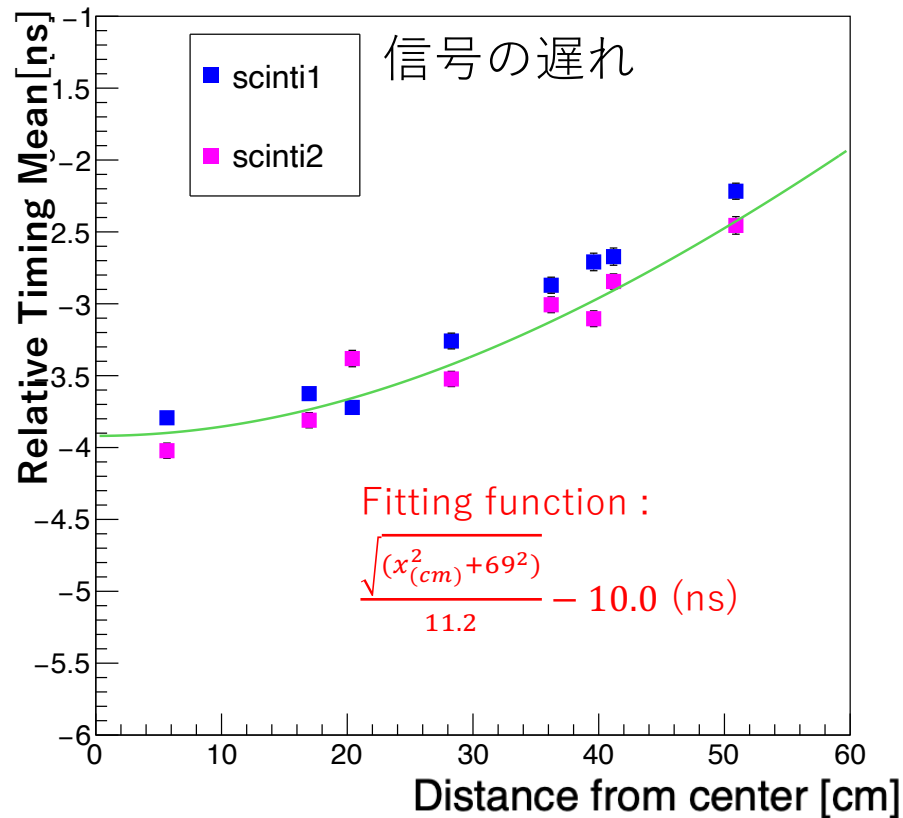
# 各位置における信号タイミングの測定

Relative Timing (横軸) = シンチレーターのTDC値 - プローブのTDC値  
 Relative TimingのMeanが信号の遅れに相当する



8 (角付近)の方が信号が遅れる  
 8の方がt.t.s.が大きい

# 信号の遅れとt.t.s.の位置依存性



# Fitting Resultsのまとめ

1. 電荷量： $-5.90 \left( \frac{x_{(cm)}}{50(cm)} \right)^2 + 34.4$  (pC)

2. 信号の遅れ： $\frac{\sqrt{(x_{(cm)}^2 + 69^2)}}{11.2} - 10.0$  (ns)

3. t.t.s.[ns]： $\frac{\sqrt{(x_{(cm)}^2 + 69^2)}}{94.4} - 0.499$  (ns)

**これらの性能をMCに導入し、データとの比較を行った**



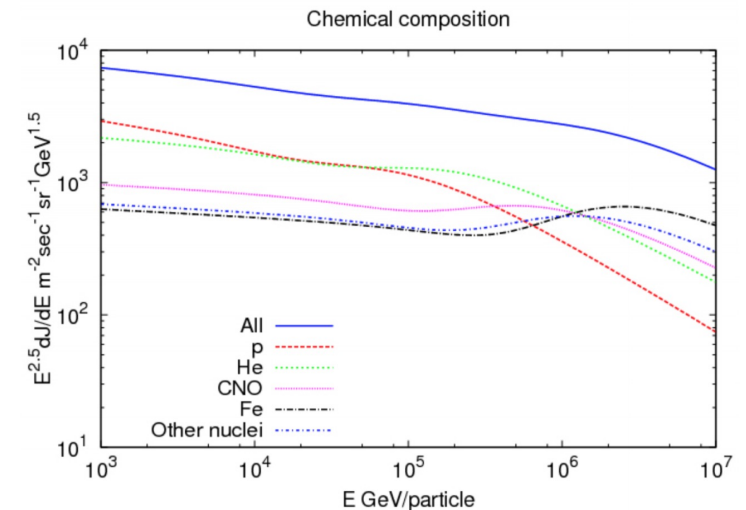
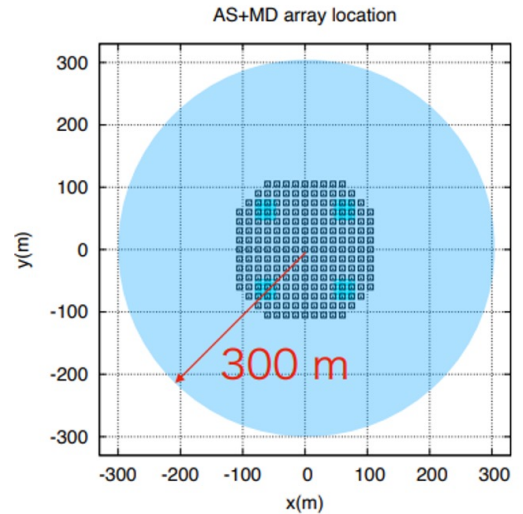
# MC simulation & Reconstruction

1. 空気シャワー生成 : CORSIKA V7.6400 でコア位置はarray中心から300m以内  
(相互作用モデル : EPOS-LHC、化学組成モデル : Shibata モデル)
2. 二次粒子を検出器応答シミュレーションに入力  
: Geant4 10.04.p02 (5mm鉛+1mmステンレス+50mmシンチレーター)

3. Energy deposit に位置依存性を考慮してPMT出力電荷量に変換
4. 各検出器で二次粒子を検出したタイミングにt.t.s.と信号の遅れを考慮

→今回測定したシンチレーターの特性を導入

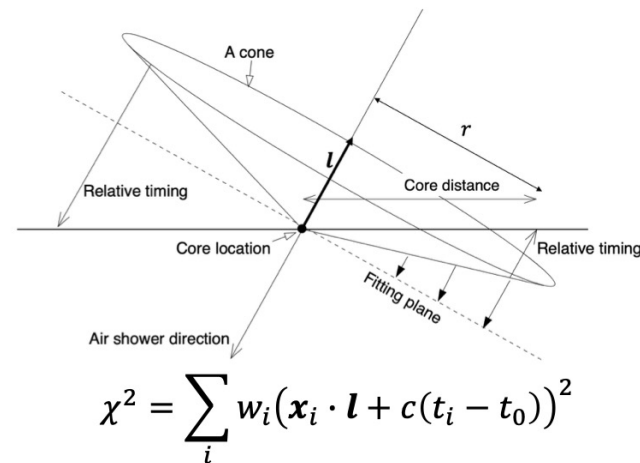
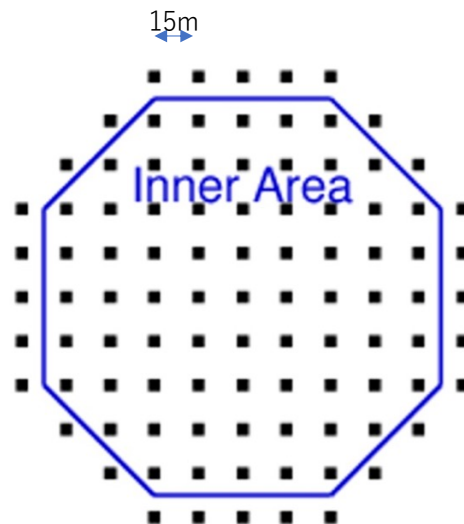
5. 出力をADC, TDC値に直して再構成プログラムに通す



M. Shibata et al, ApJ, 716, 1076 (2016)

# Reconstruction後のEvent selection

- 最も多く粒子を検出した3台のうち2台はInner area
- 空気シャワーフロントフィッティングの誤差残差  $\chi < 1.0\text{m}$
- 1.25粒子以上検知した検出器が4台以上
- 天頂角  $< 50^\circ$

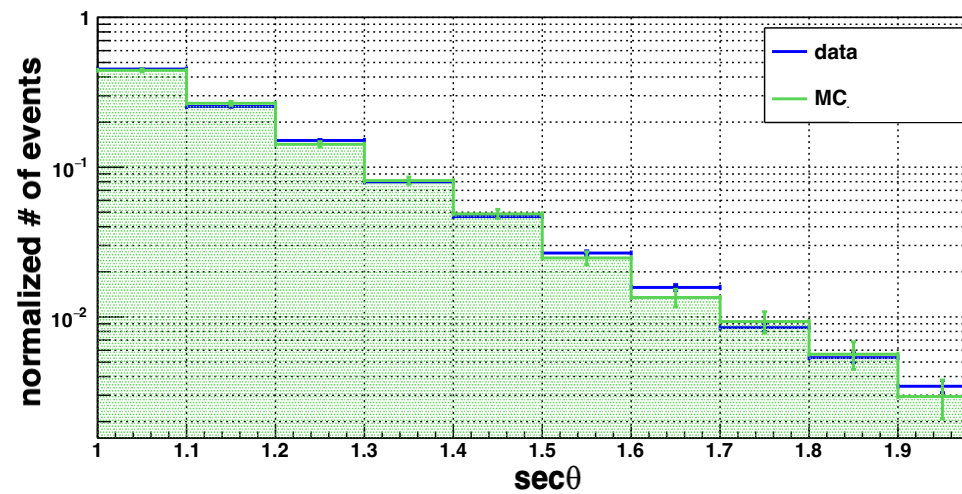


# Data/MC comparison of $\sec \theta$ and $\text{Log}(\sum \rho_{FT})$

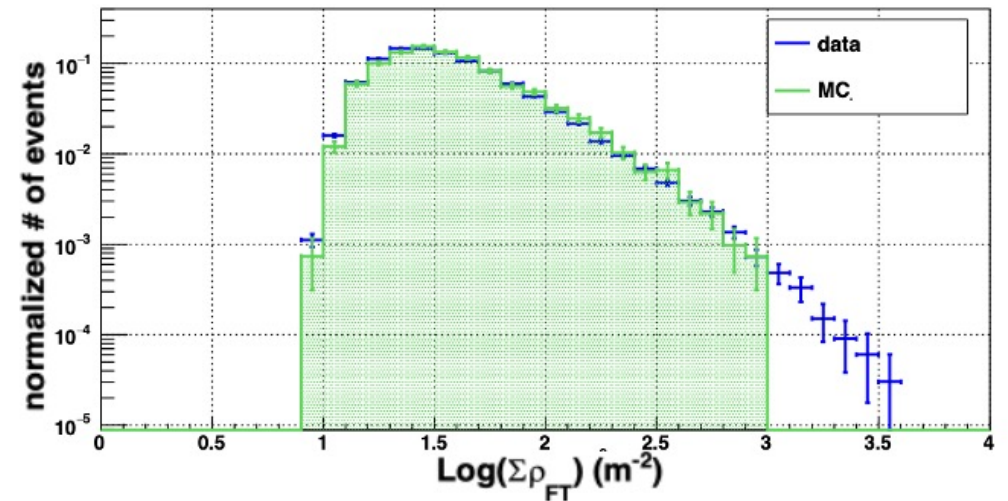
Experimental data (2023/6/25, 20min) : 33093 events

Event selection後のMC event数 : 4078 events

$\theta$  : 天頂角



$\sum \rho_{FT}$  : 総検出粒子数 (エネルギーに比例)



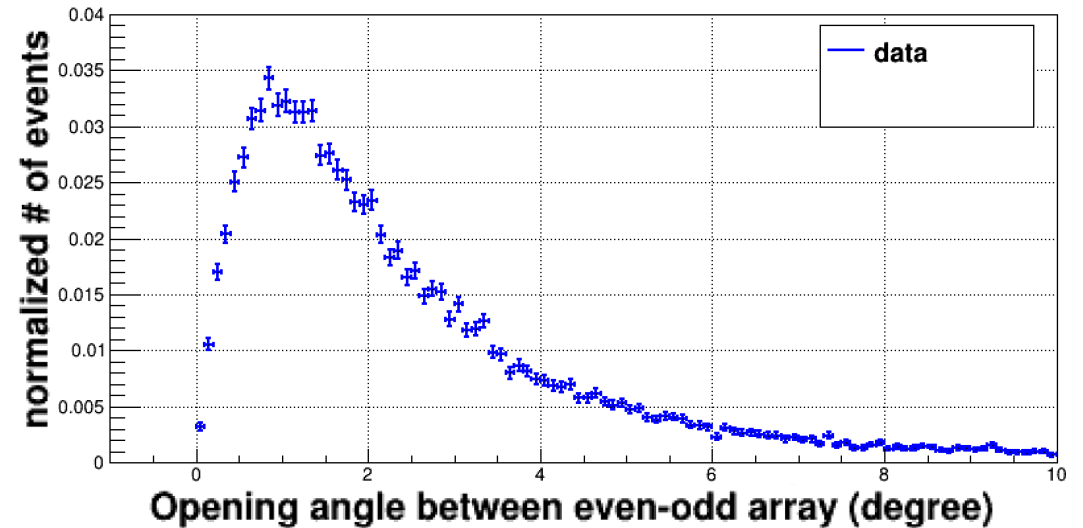
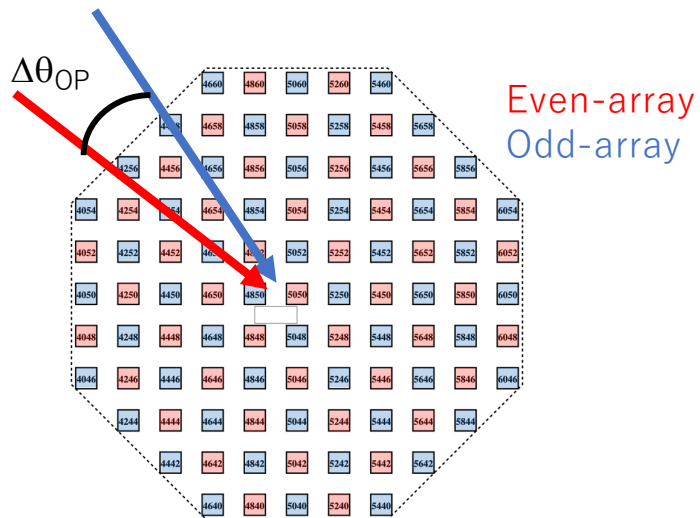
実験データとよく一致

# Data/MC comparison of Even-Odd opening angle

→ 信号の遅れとt.t.s.の影響を受ける物理量

Even-Odd opening angle :

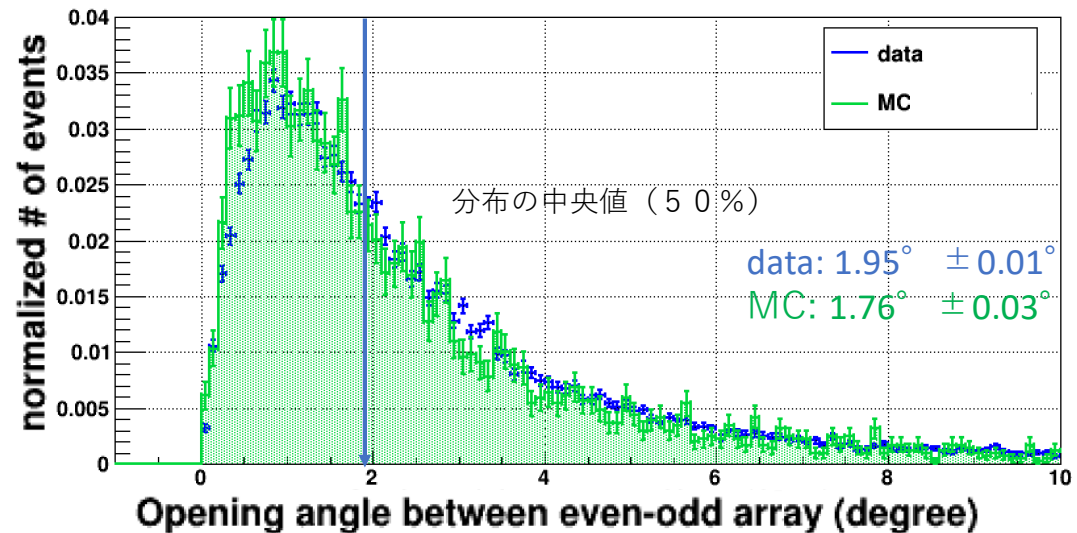
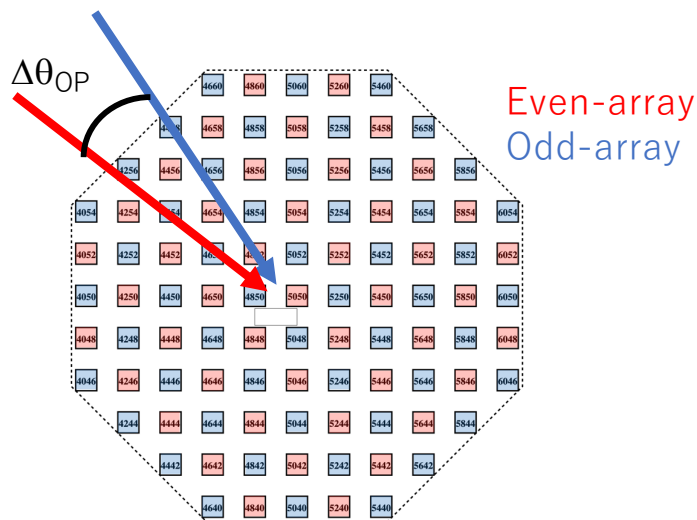
2つの独立したarray(even-array, odd-array)により決定された方向の開き角



# Data/MC comparison of Even-Odd opening angle

→ 信号の遅れとt.t.s.の影響を受ける物理量

Even-Odd opening angle :  
2つの独立したarray(even-array,  
odd-array)により決定された方向  
の開き角



分布は実験データとおおよそ一致

開き角の半分がおおよそ角度分解能  
→ 角度分解能  $\sim 1^\circ$  (5-10TeV)

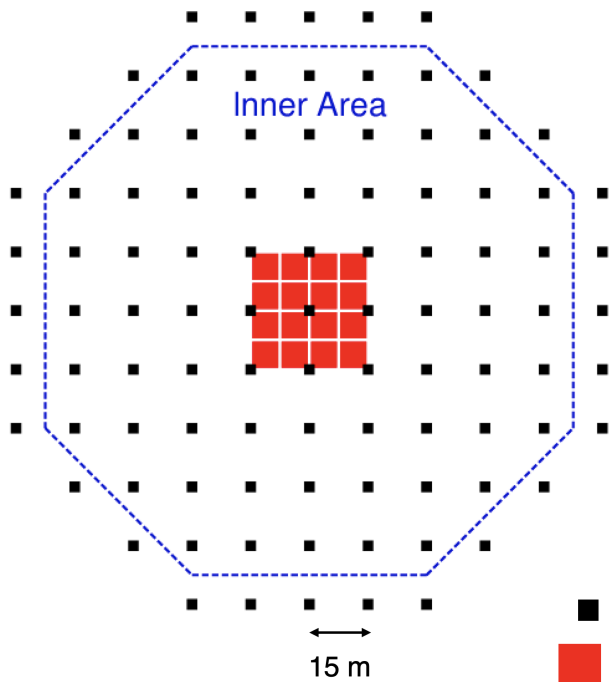


# Summary & Next step

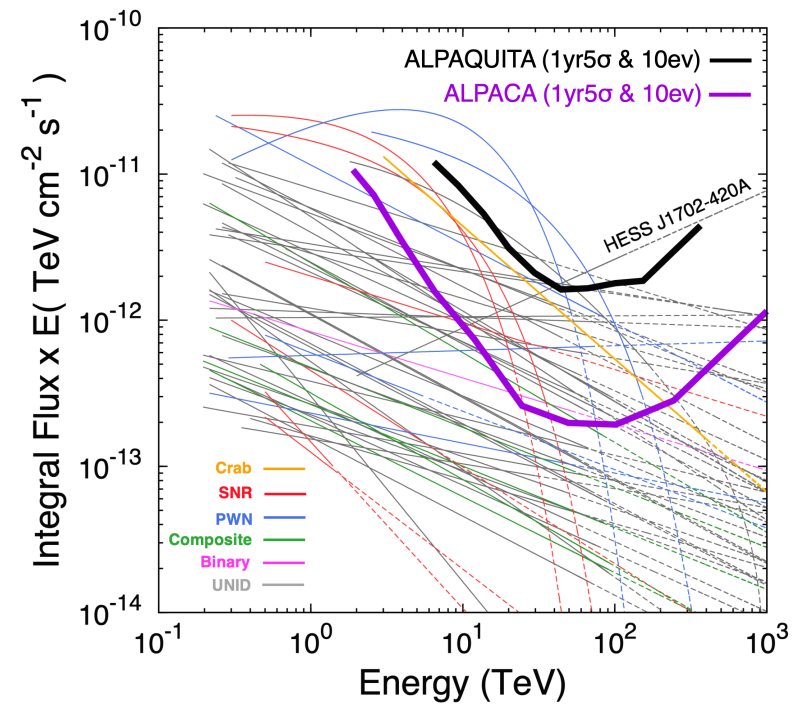
- ✓ ALPAQUITA実験で用いるシンチレーターの発光量（電荷量）・信号の遅れ・t.t.s.の位置依存性を測定し、MCに適用した
- ✓ DataとMCで天頂角分布・Sum  $\rho$  分布・Even-oddの分布を比較した  
->よく一致した
- ✓ シンチレーターの個体差を調べる
- ✓ MCのデータ量を増やす

Back up

# ALPAQUITA実験 感度

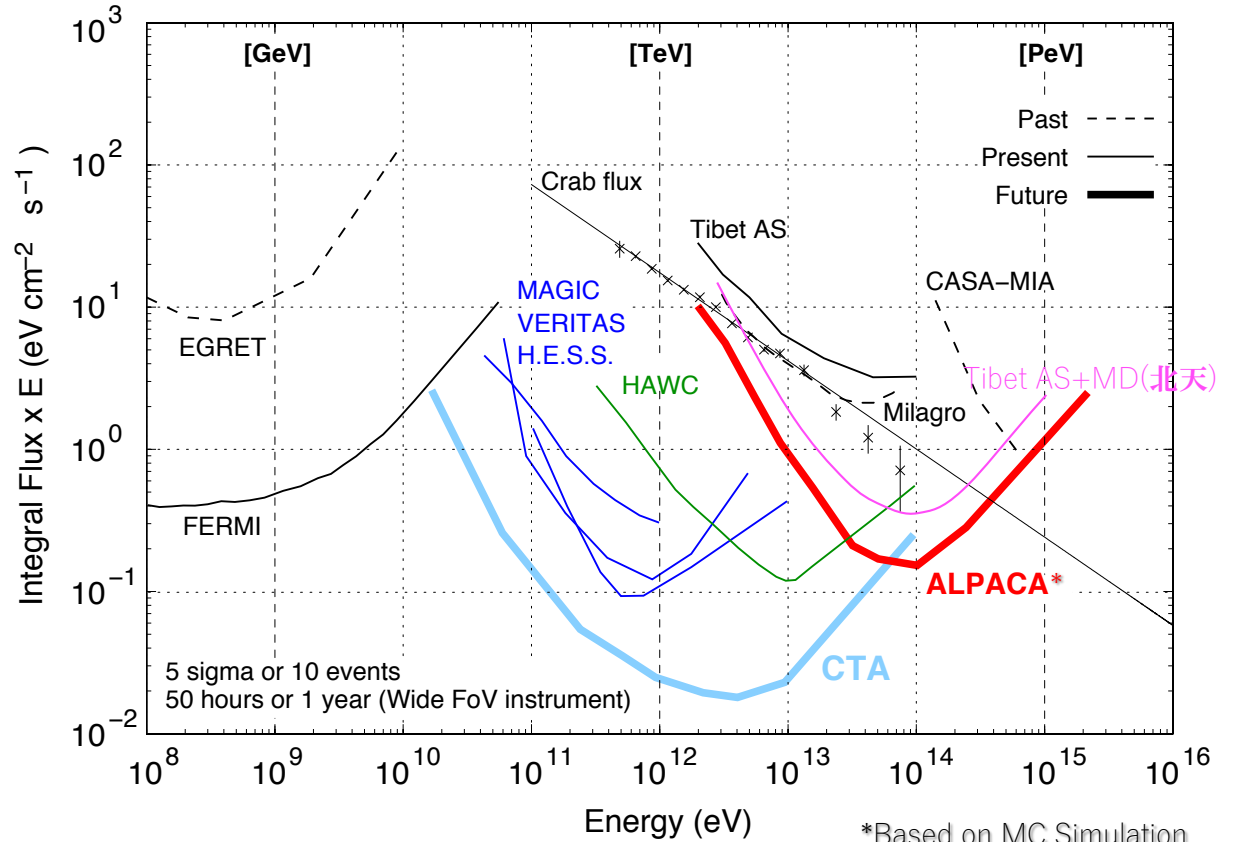
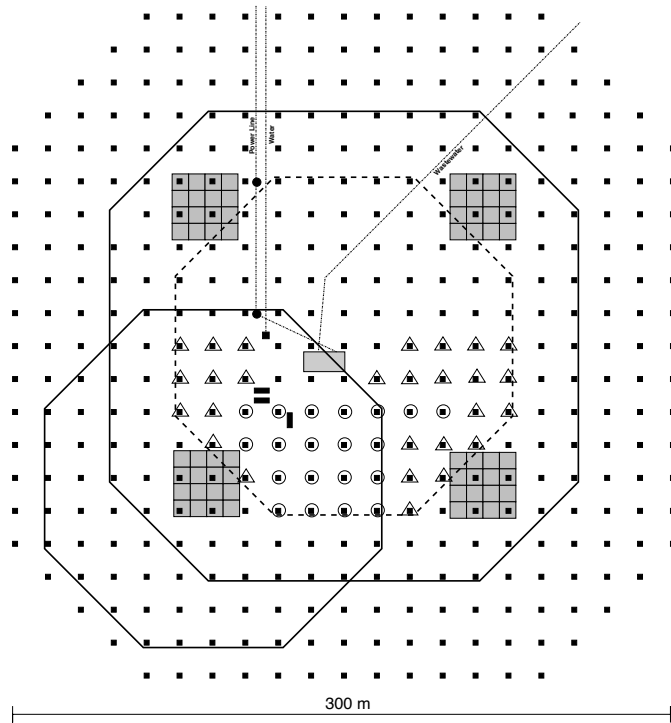


- Plastic scintillators (1 m<sup>2</sup>)
- MD cells (56 m<sup>2</sup>)



*Kato et al (ALPACA Collob.), 52, 85 (2021)*

# ALPACA実験 感度



\*Based on MC Simulation  
For the Tibet AS+MD  
22

