

T2K実験における 新型前置検出器SuperFGDの 宇宙線等を用いた較正

第28回 ICEPPシンポジウム

Feb. 21st, 2022

東京大学 理学系研究科 物理学専攻 修士1年
児玉 将馬

T2K実験

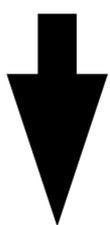
T2K (Tokai to Kamioka)

- CP対称性の破れの発見を目的とした長基線ニュートリノ振動実験
- J-PARC陽子加速器を用いて $\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu$ ビームを生成、射出
- 前置検出器 ND280 と後置検出器 Super-Kamiokande で測定



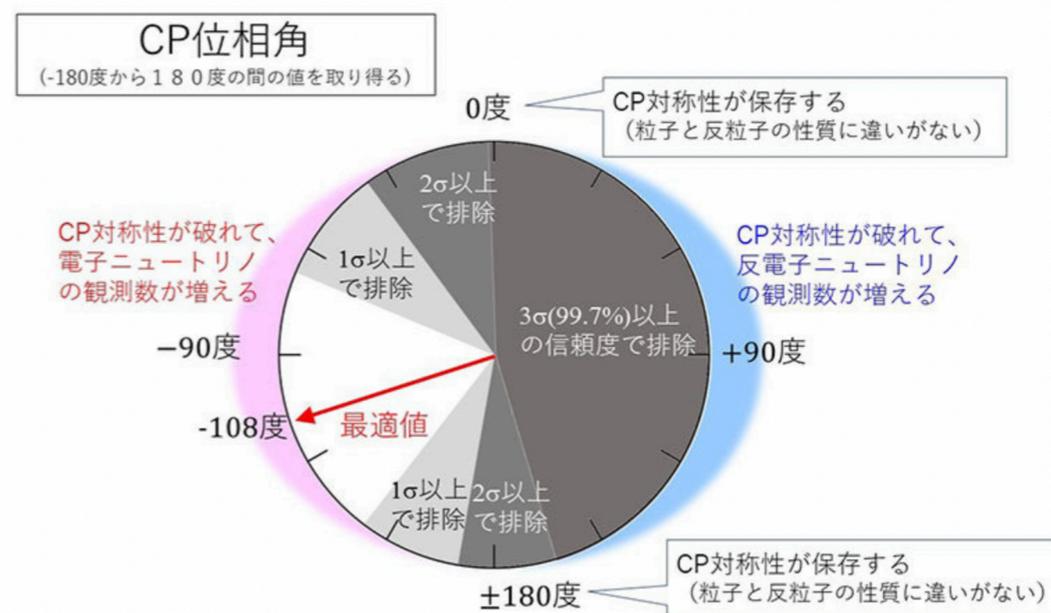
現状と今後

- これまでに95%の信頼度でCP対称性の破れを示唆



精度を高めるために…

- **統計量の増加**
 - ビーム強度の増強、測定の継続
- **系統誤差の削減**
 - **前置検出器 ND280 のアップグレード**



前置検出器 ND280

ND280

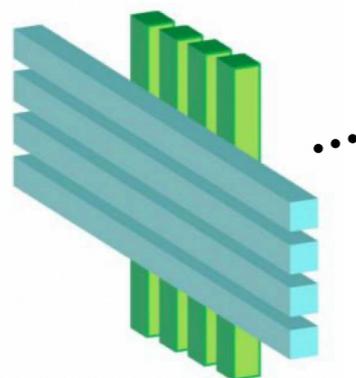
- ・ 標的から 280 m 離れたホール内に設置
- ・ 複数の飛跡検出器、カロリメータからなる

測定対象

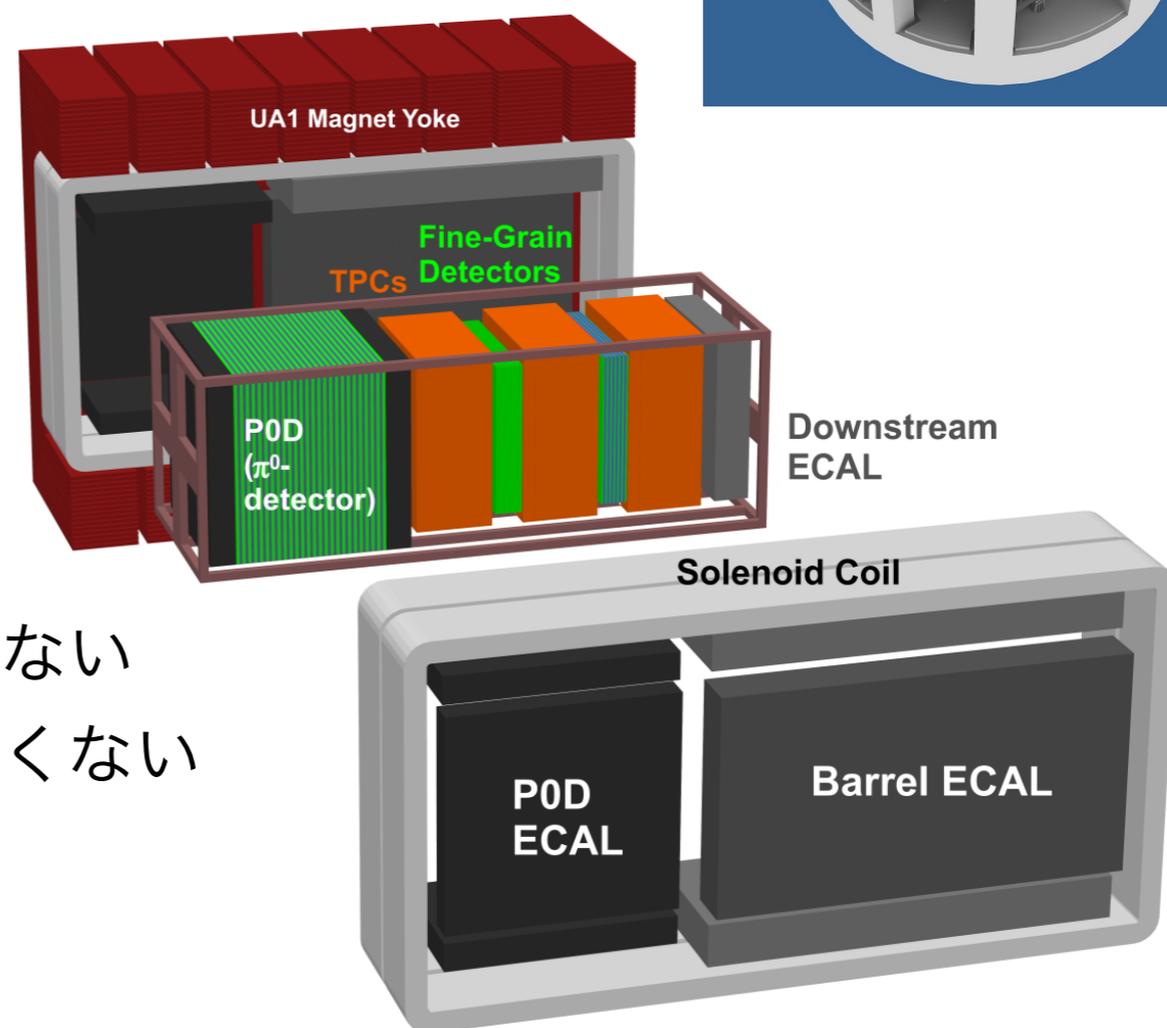
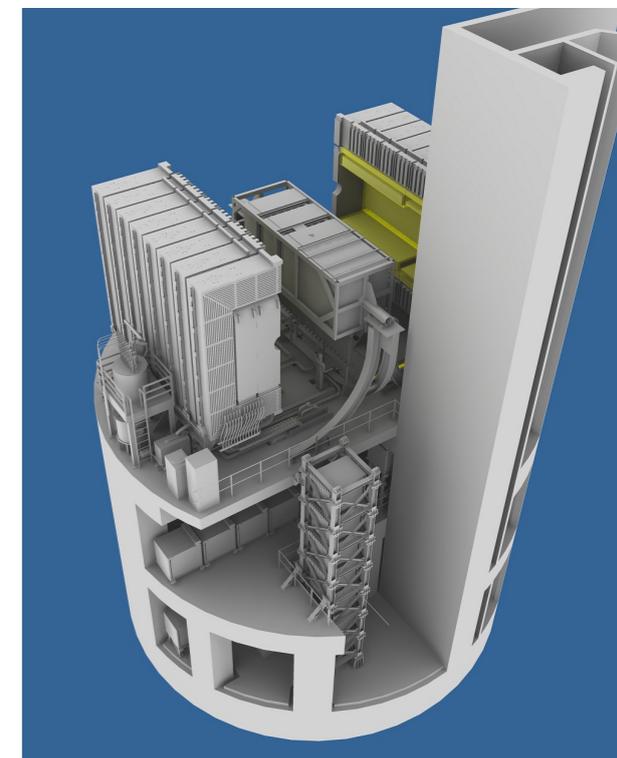
- ・ 振動前のニュートリノフラックス
(エネルギー分布)
- ・ ニュートリノ反応断面積

問題点

- ・ 大角度散乱粒子に対する精度が良くない
- ・ 低運動量ハドロンに対する精度が良くない



…
現行のFGDは棒状のシンチレータを使用している



前置検出器アップグレード

ND280 アップグレード

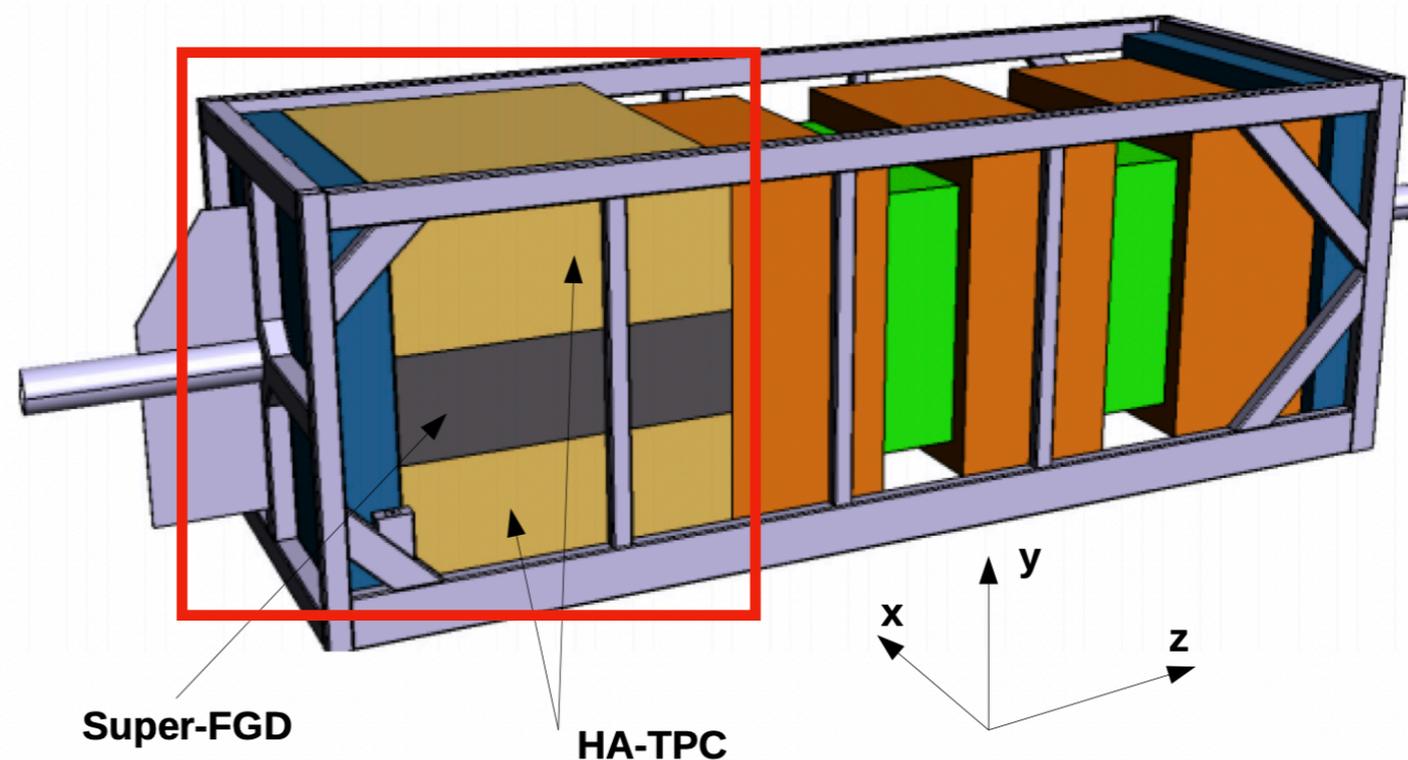
- ・ 上流側に新検出器を導入

Super Fine-Grained Detector (SuperFGD)

- ・ 1 cm^3 のシンチレータキューブを $192 \times 56 \times 182$ 個並べた構造
- ・ ニュートリノ反応の標的、飛跡検出器

High-Angle Time Projection Chambers (High-Angle TPCs)

- ・ SuperFGDの上下に設置
- ・ 荷電粒子をトラッキング

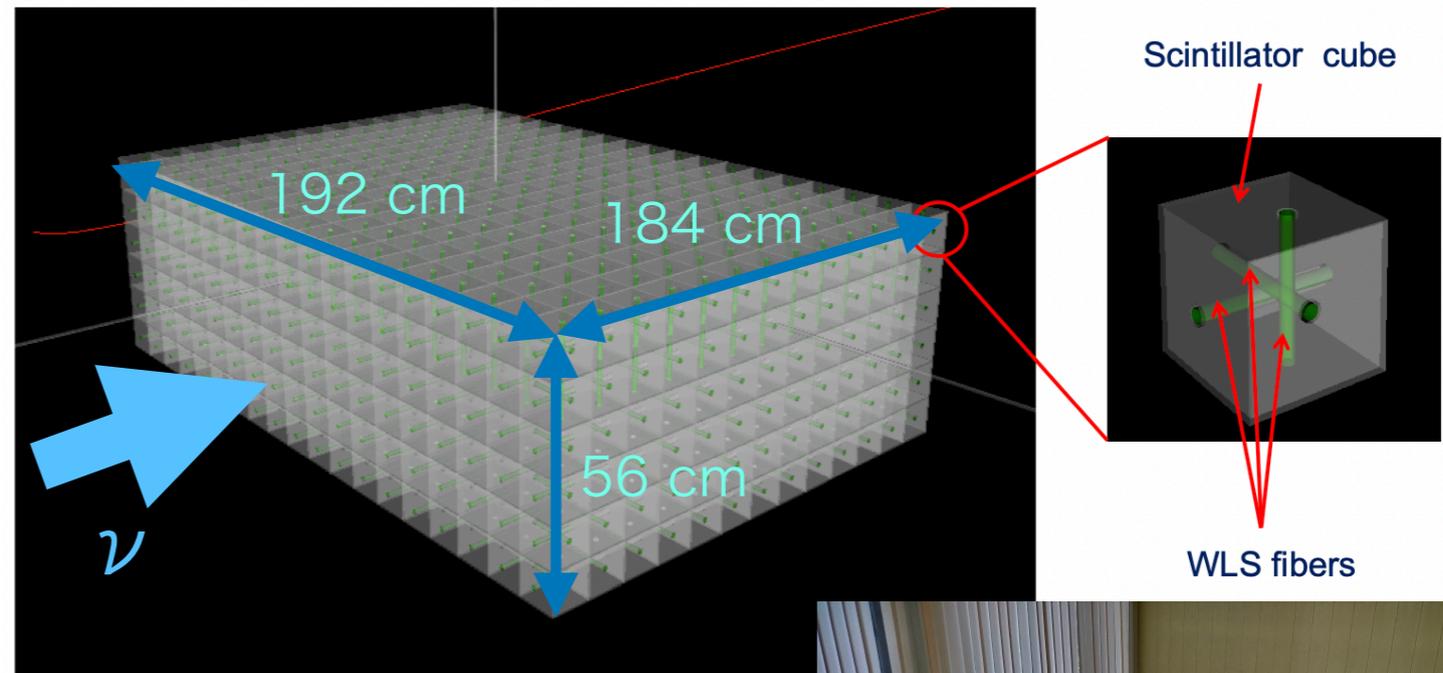


SuperFGD

検出器概要

- 1 cm³ のシンチレータキューブを約200万個並べた構造(2トン)
- 各キューブはx, y, zの3方向に波長変換ファイバーを通す穴がある
- ファイバーの片側はMPPC (約5万6千個) に繋がれ、読み出しを行う

右の図は見やすさのため
キューブの数を減らしている



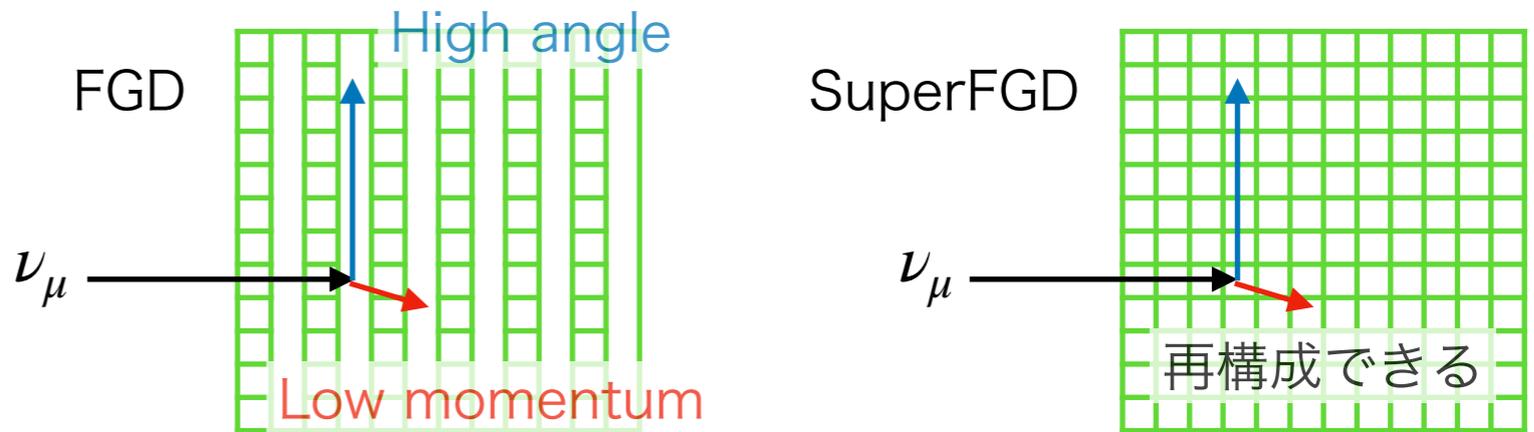
スケジュール

- 今年の夏頃からJ-PARCで検出器の組み立てを開始
- 冬頃に設置、稼働開始予定



SuperFGD

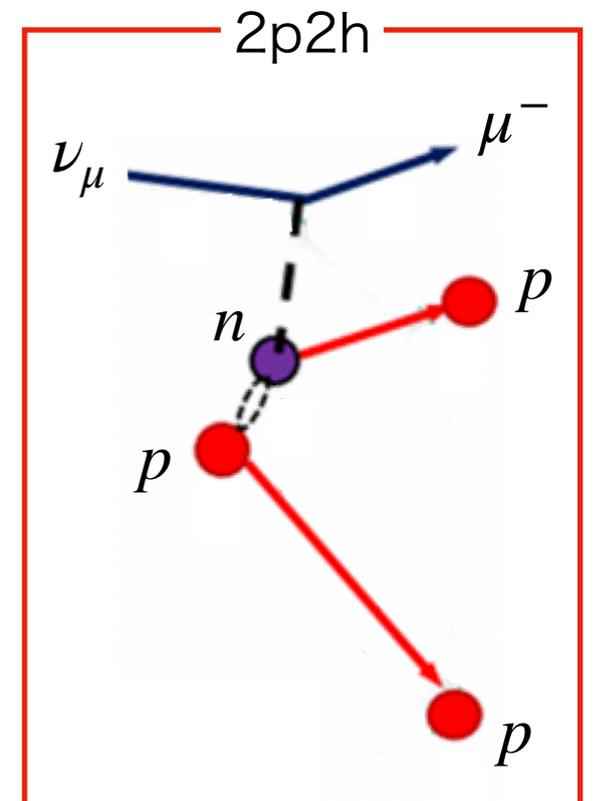
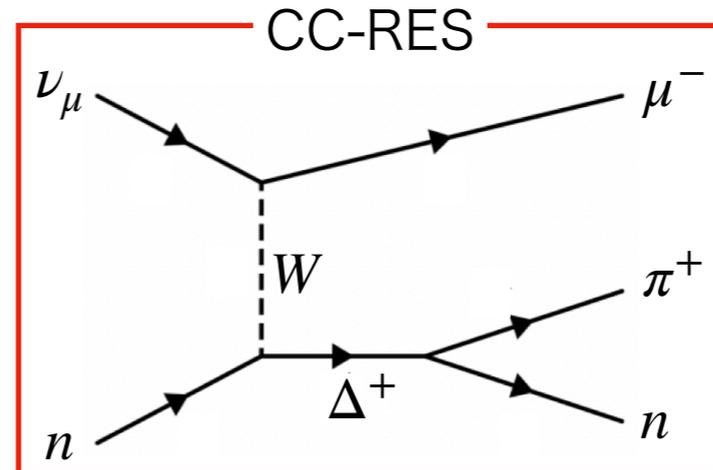
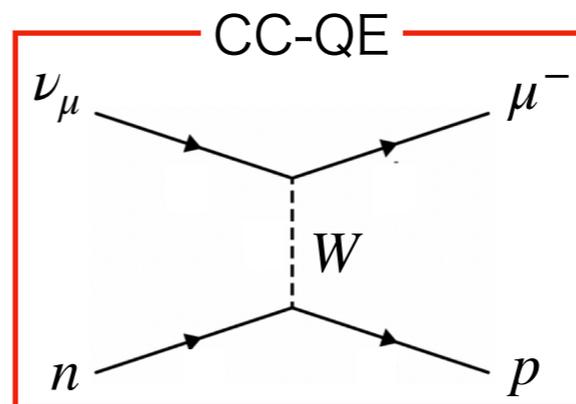
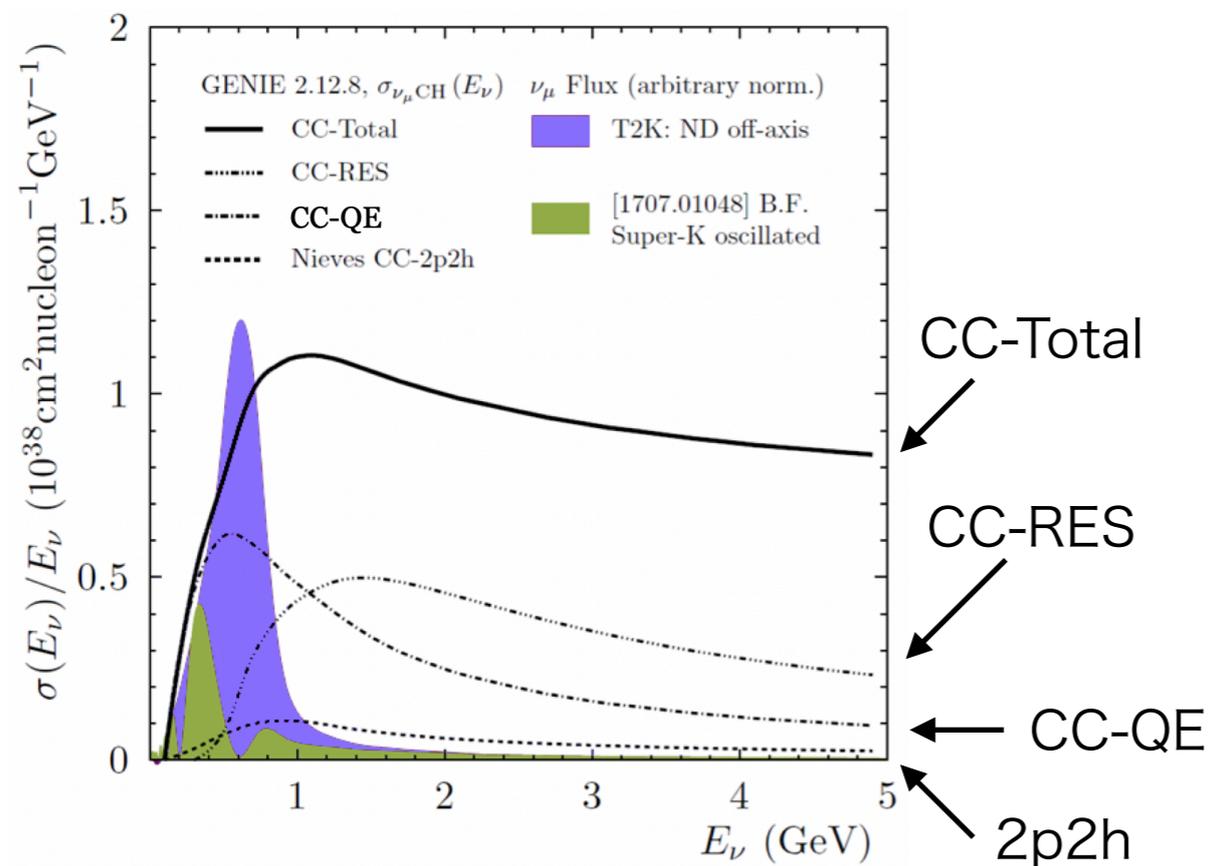
検出器の特徴



ニュートリノ反応の標的 兼 反応点付近の飛跡検出器 として作用するために

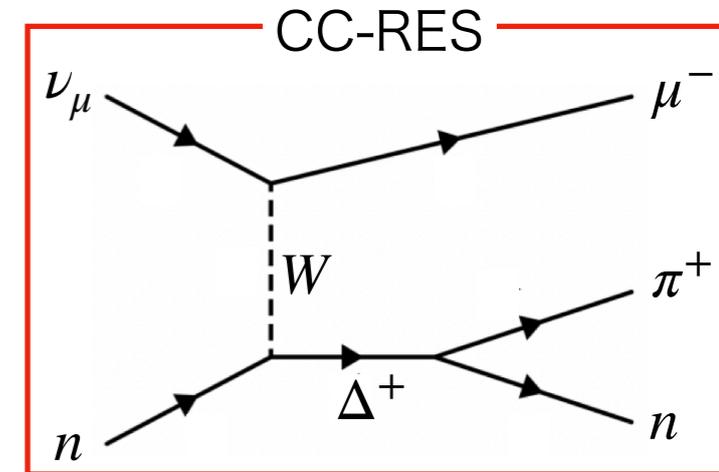
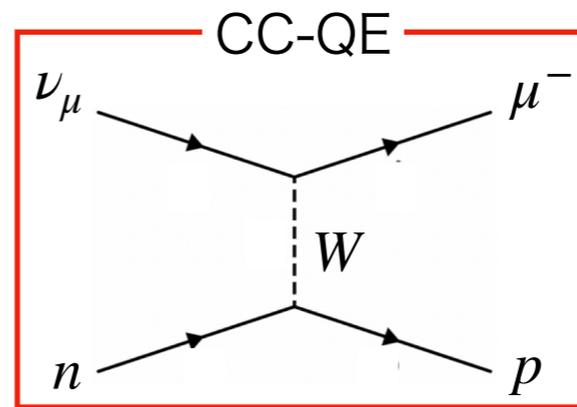
- 十分な質量を持つ
- 大角度方向の荷電粒子に対してアクセプタンスを持つ
- 低エネルギーハドロンの短い飛跡を再構成できる

ニュートリノ反応(T2K実験のエネルギー付近)



SuperFGD

較正の必要性



CC-RESや2p2h反応は終状態粒子によって見分けられるが、これをCC-QE反応と誤認すると正確なエネルギーの再構成ができなかったり、系統誤差の要因になったりする

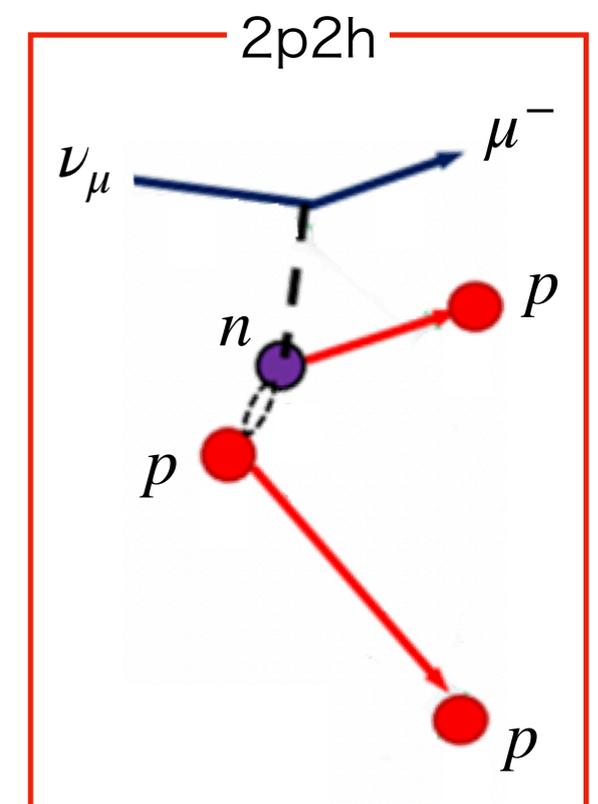
以上のように、ニュートリノ反応では陽子やパイオンを見分ける必要がある
この粒子識別は主に観測された光量の大きさから行われる
つまり、**エネルギーを正確に再構成**することが必要

他にも**時間情報の較正**なども必要

そのためには検出器を正しく理解する必要がある

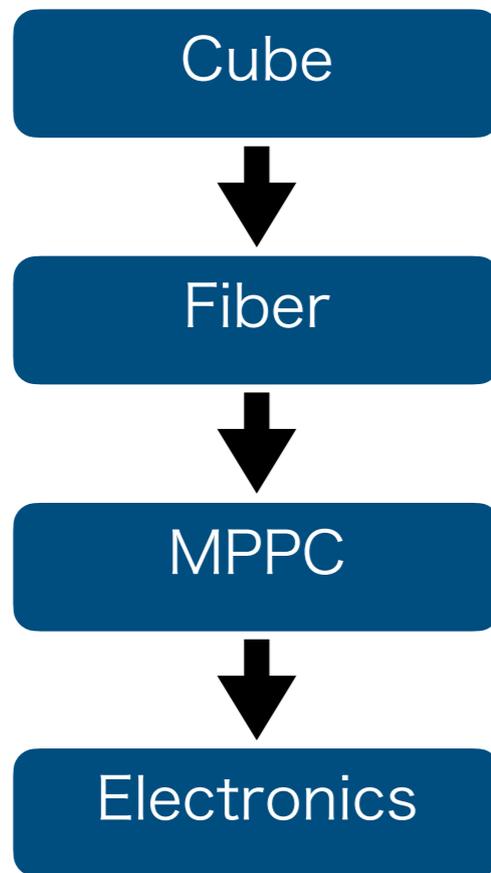
→ **較正**が必要不可欠

宇宙線を用いてその較正を行う

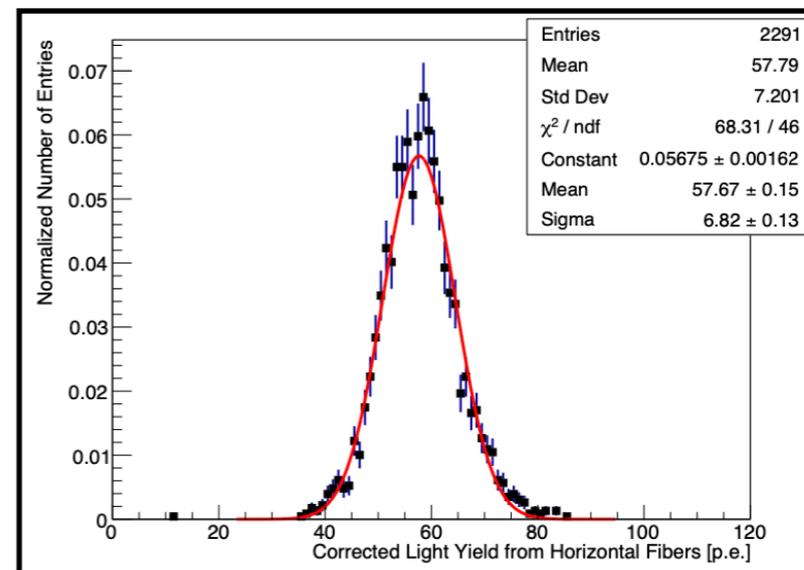


SuperFGD

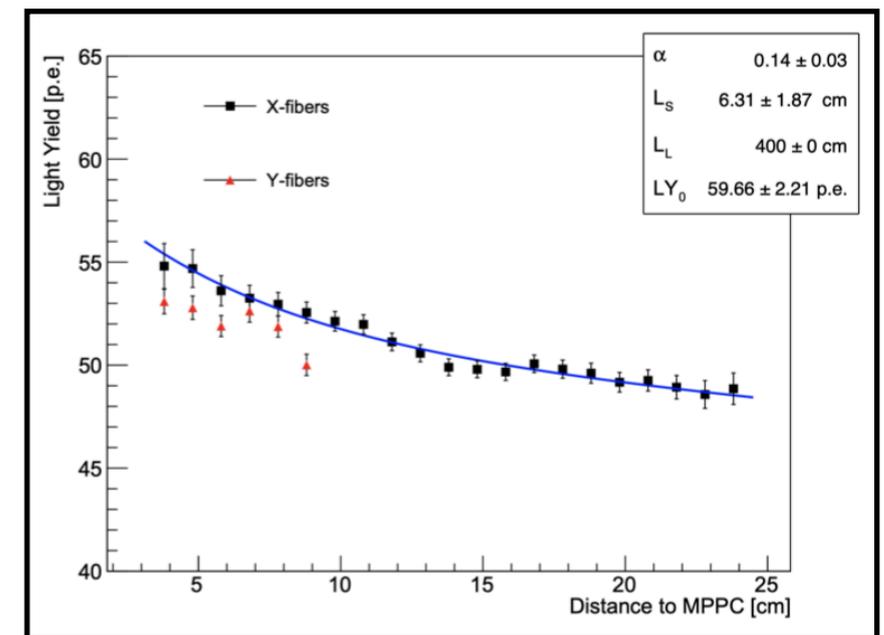
検出器の要素とパラメータの例



Ex) 発光量、クロストーク、アラインメント

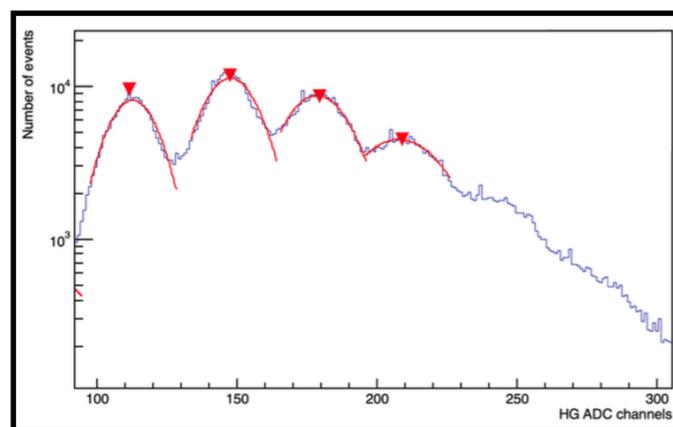


Ex) 減衰長
後で詳細を述べます



Ex) 光子検出効率

Ex) ペDESTAL、ゲイン



他に、時間分解能など

図は2020年に行われた
Beam Test時のもの

宇宙線キャリアレーション

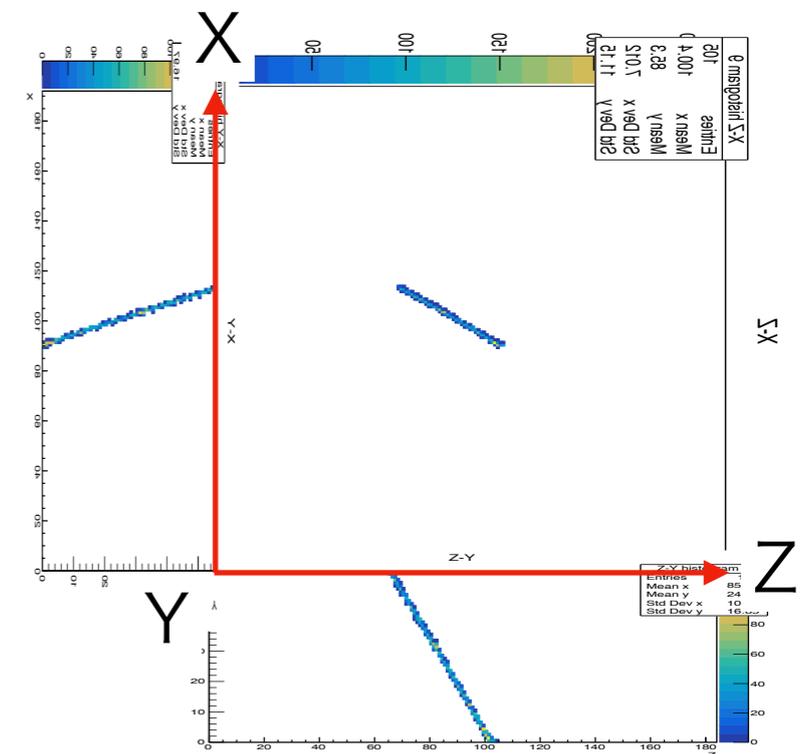
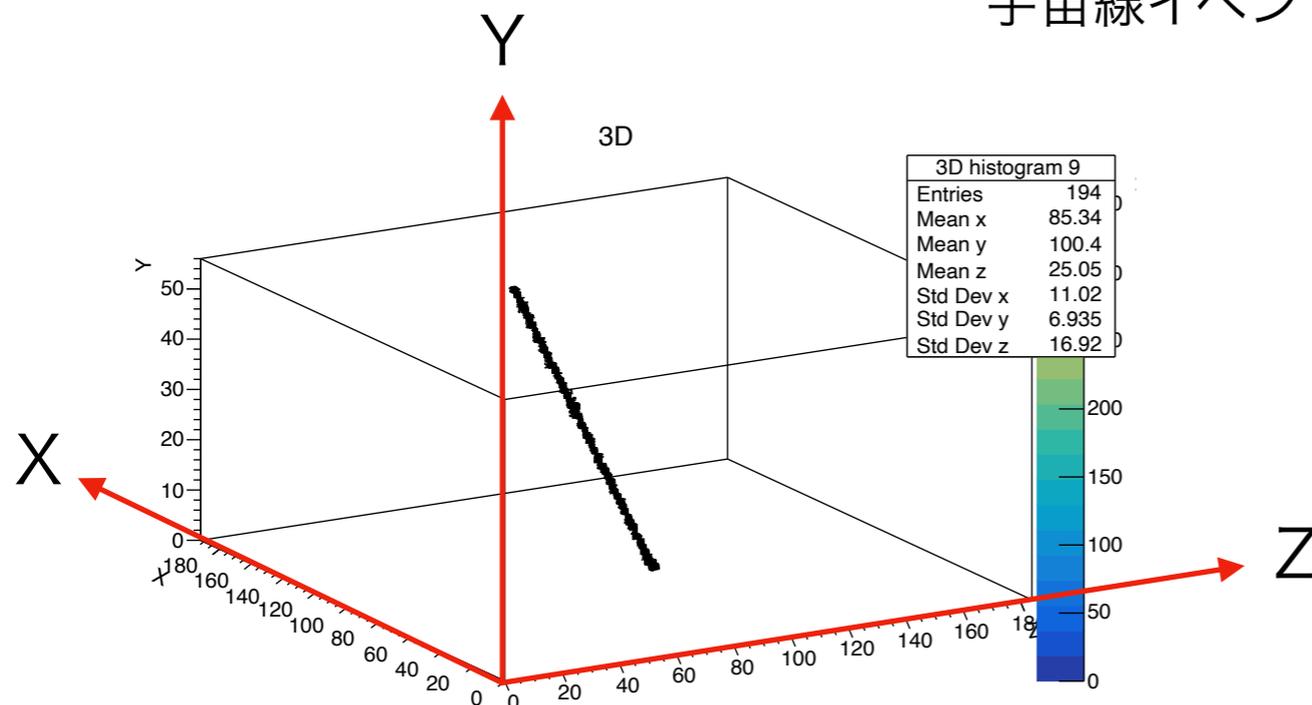
現在行っていること

- 要求精度の見積もりと較正手法の開発を実施中
- 実機がまだないためシミュレーションを用いて疑似データを作成

本日の発表

- シミュレーションの開発
- 較正手法例（ファイバーの減衰に関して）

宇宙線イベント例



宇宙線シミュレーション

参考文献

- [arXiv:hep-ph/0604145v2](https://arxiv.org/abs/hep-ph/0604145v2)
- 宇宙線ミュオンの角度・エネルギー依存性

仮定

- レートは地表面と同じ（ピットの影響を無視）
…その程度は評価する必要あり
- 他の検出器や磁場がなかったときにSuperFGDに到達する粒子のみ考慮
…他の検出器で散乱された粒子や
磁場によって曲げられて入射した粒子は考えない

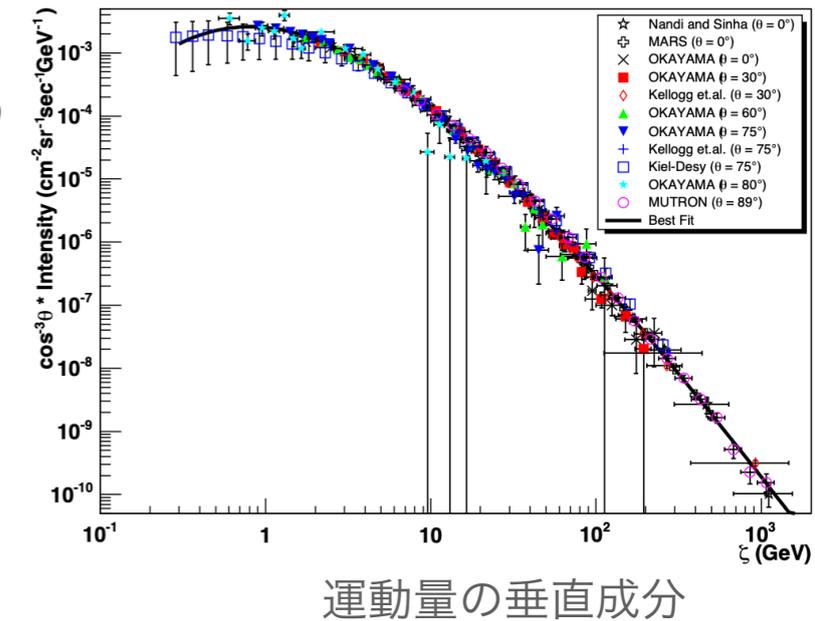
フィッティング関数

$$I_V(\zeta) = c_1 \times \zeta^{-1(c_2+c_3 \log_{10}(\zeta)+c_4(\log_{10}(\zeta))^2+c_5(\log_{10}(\zeta))^3)}$$

ベストフィットは

$$c_1 = 0.00253, c_2 = 0.2455, c_3 = 1.288, c_4 = -0.2555, c_5 = 0.0209$$

強度 $\times \cos^{-3} \theta$

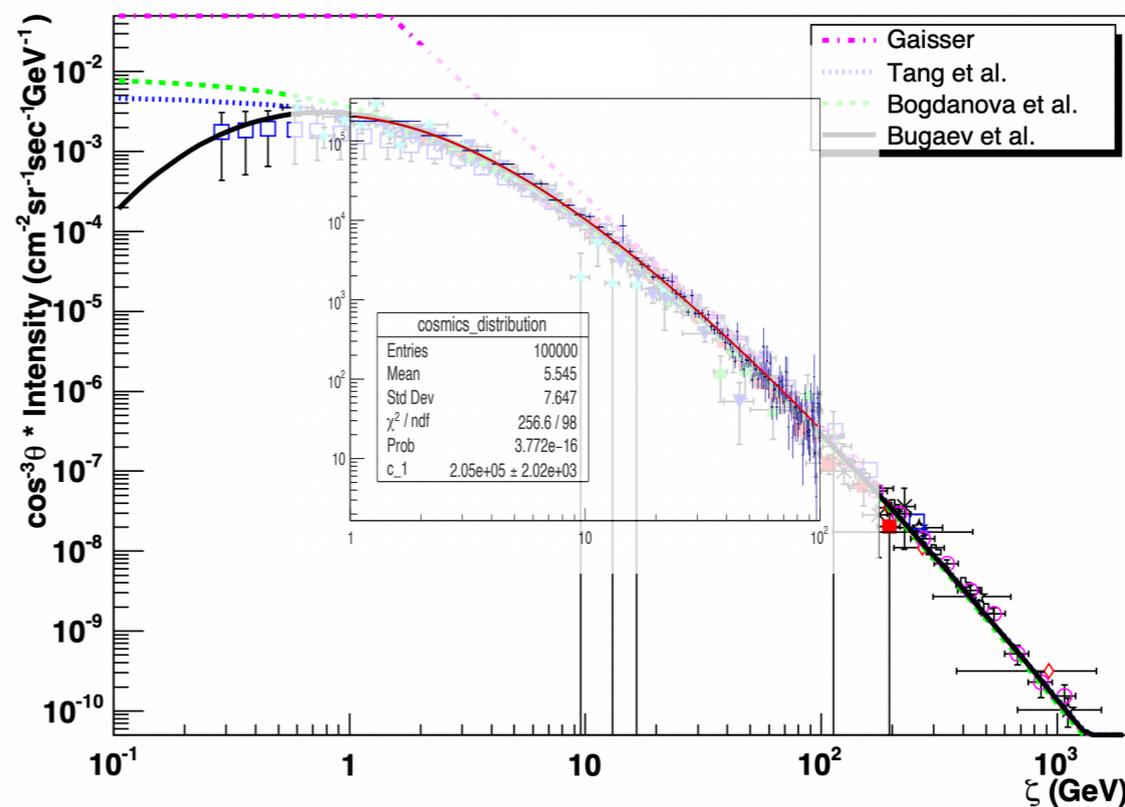
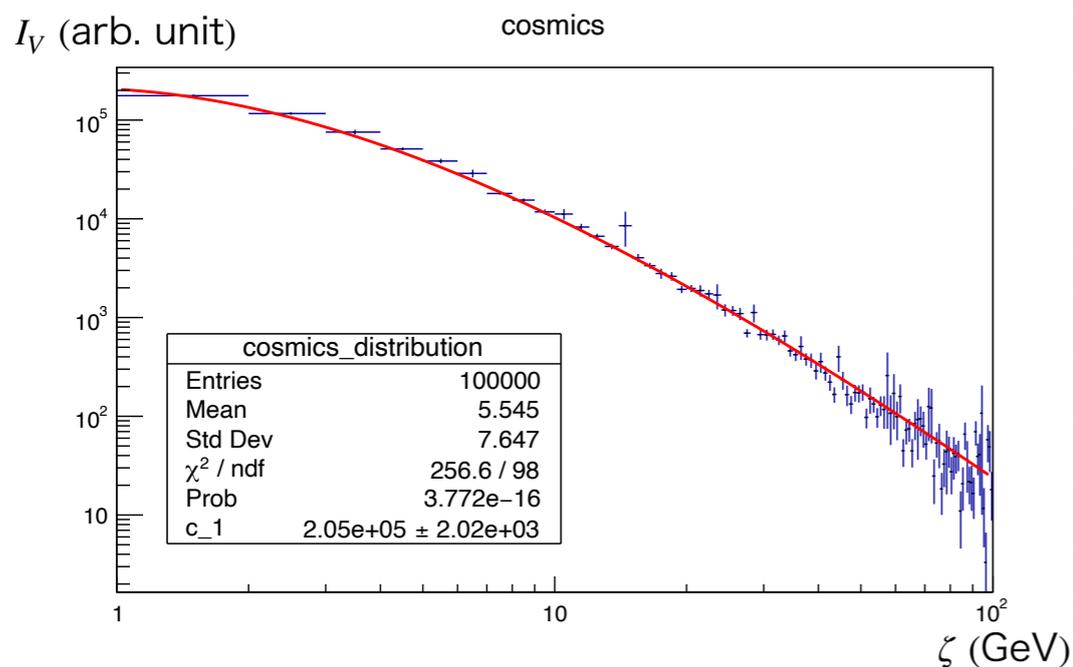


宇宙線シミュレーション

作成方法

- ランダムに以下を決定
 - ①垂直方向の運動量と天頂角（前述の分布から）
 - ②SuperFGDへの入射位置（SuperFGDの上面に一様分布）
 - ③方位角（一様分布）
 - ④電荷の正負
- これらから粒子の入射位置や入射方向を決定し、Geant4シミュレーション

有効性の確認



分布が一致
↓
有効である

宇宙線レート

数値計算（積分範囲）

以下の範囲で積分

x : [0, 192] cm

z : [0, 184] cm

θ : [0, $\pi/2$], 天頂角

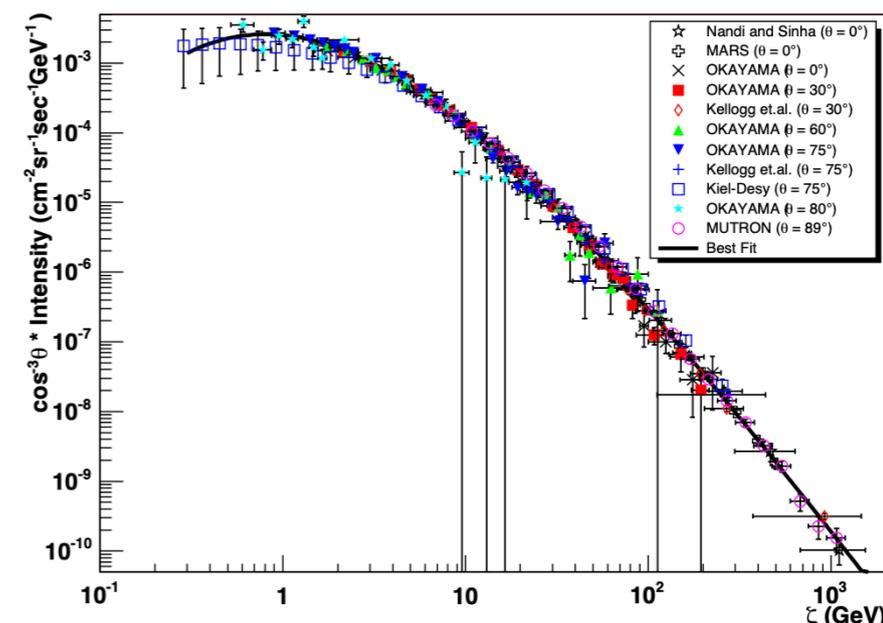
ϕ : [0, 2π], 方位角

ζ : [1, 100] GeV, 垂直方向の運動量

これらより、フラックスは約 **208 particles/s**

イベント数	必要時間	時間(73%)
10,000	48.1 sec	65.9 sec
1,000,000	80.1 min	110 min

強度 $\times \cos^{-3} \theta$



運動量の垂直成分

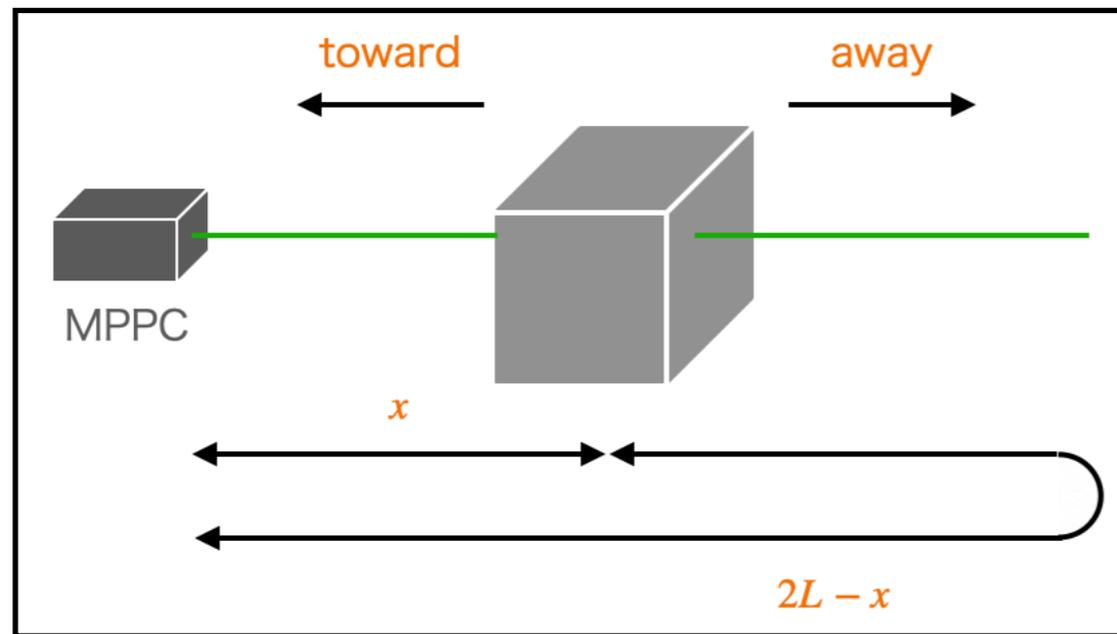
SuperFGDの上面を通過した
宇宙線のうち

下面まで到達するものの割合は
約 **73%** である

トリガーやDAQを考慮したレートは
今後詳細を調べる予定

ファイバー減衰長の較正手法

ファイバーのパラメタ



L_0 : 減衰前の光量

A_L : 減衰長の long 成分

A_S : 減衰長の short 成分

α : long 成分の比率

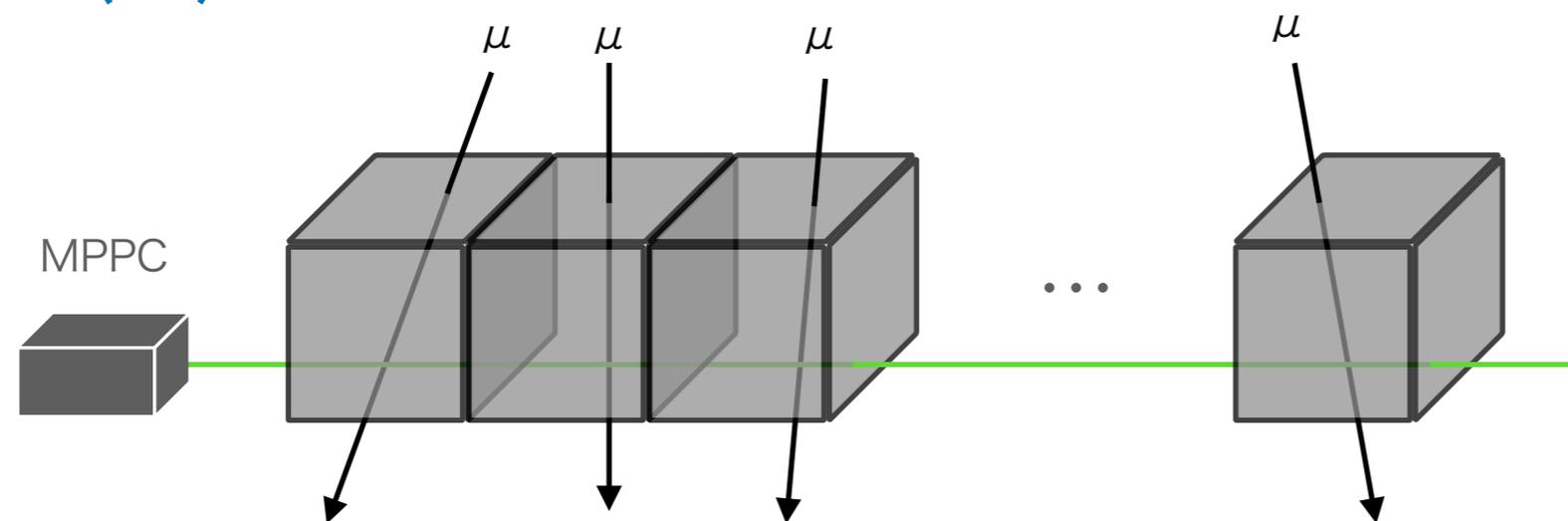
MPPCの反対側のファイバー端での反射を無視すると

$$L = L_0 \times \left[\alpha \times \exp\left(-\frac{x}{A_L}\right) + (1 - \alpha) \times \exp\left(-\frac{x}{A_S}\right) \right]$$

減衰長は波長に依存するため、近似的にこのように定式化している

ファイバー減衰長の較正手法

方法(例)



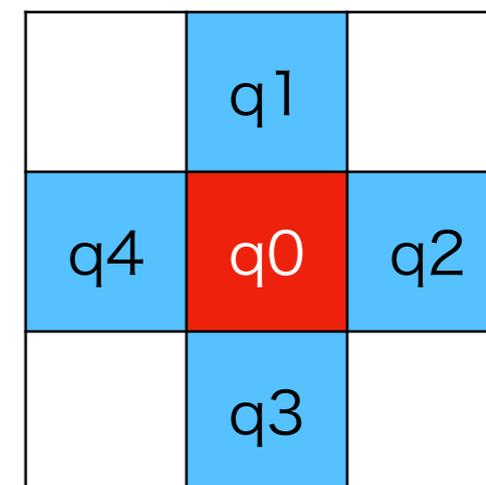
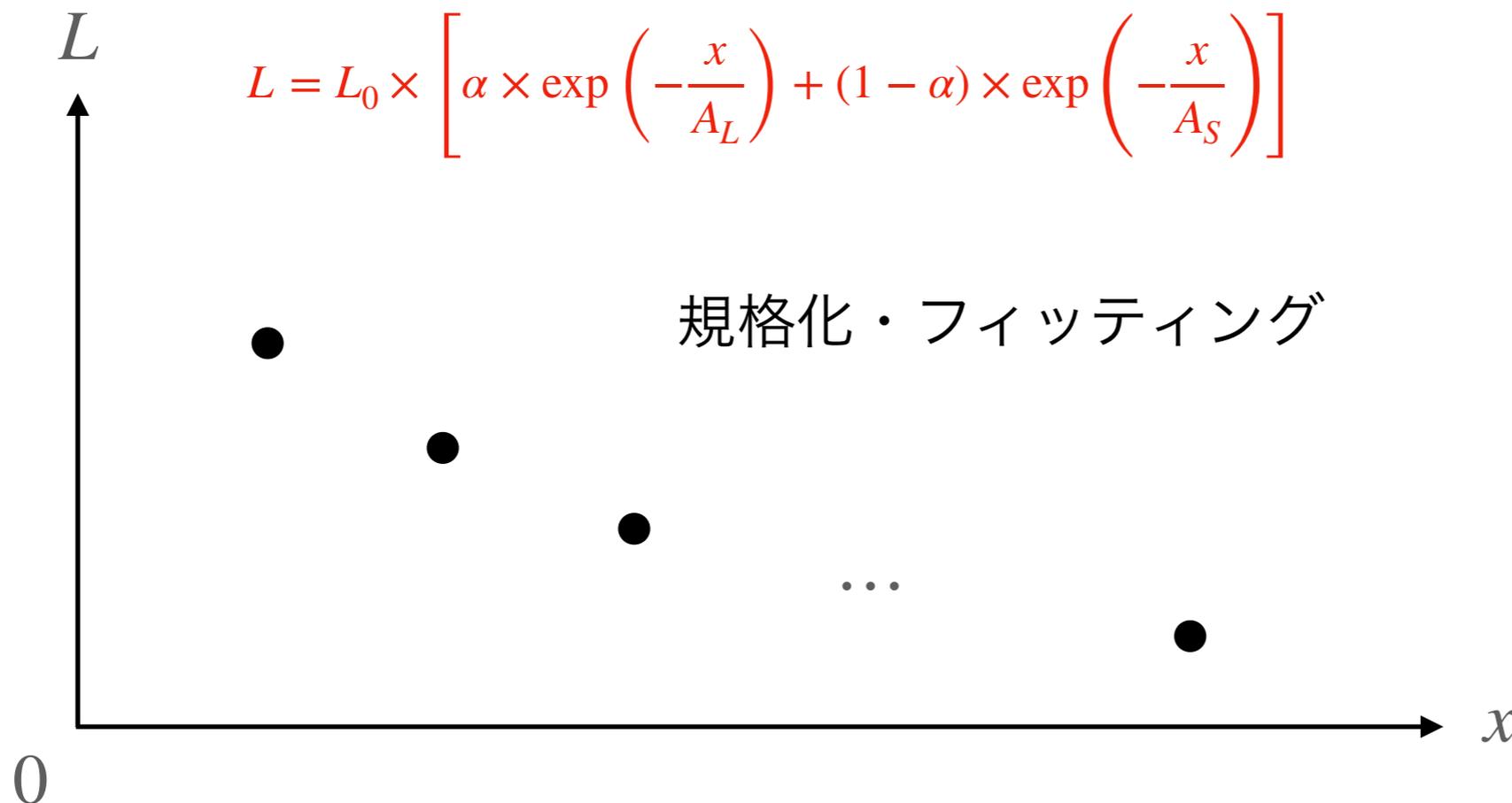
接している4つのキューブに
ヒットがないことを要求

$$q_0 \times \underline{0.1} > q_1, q_2, q_3, q_4$$

仮の値

$$L = L_0 \times \left[\alpha \times \exp\left(-\frac{x}{A_L}\right) + (1 - \alpha) \times \exp\left(-\frac{x}{A_S}\right) \right]$$

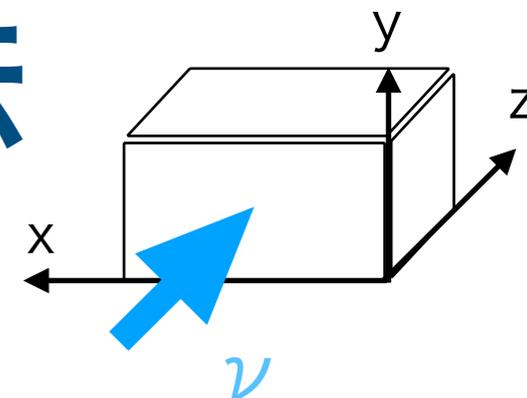
規格化・フィッティング



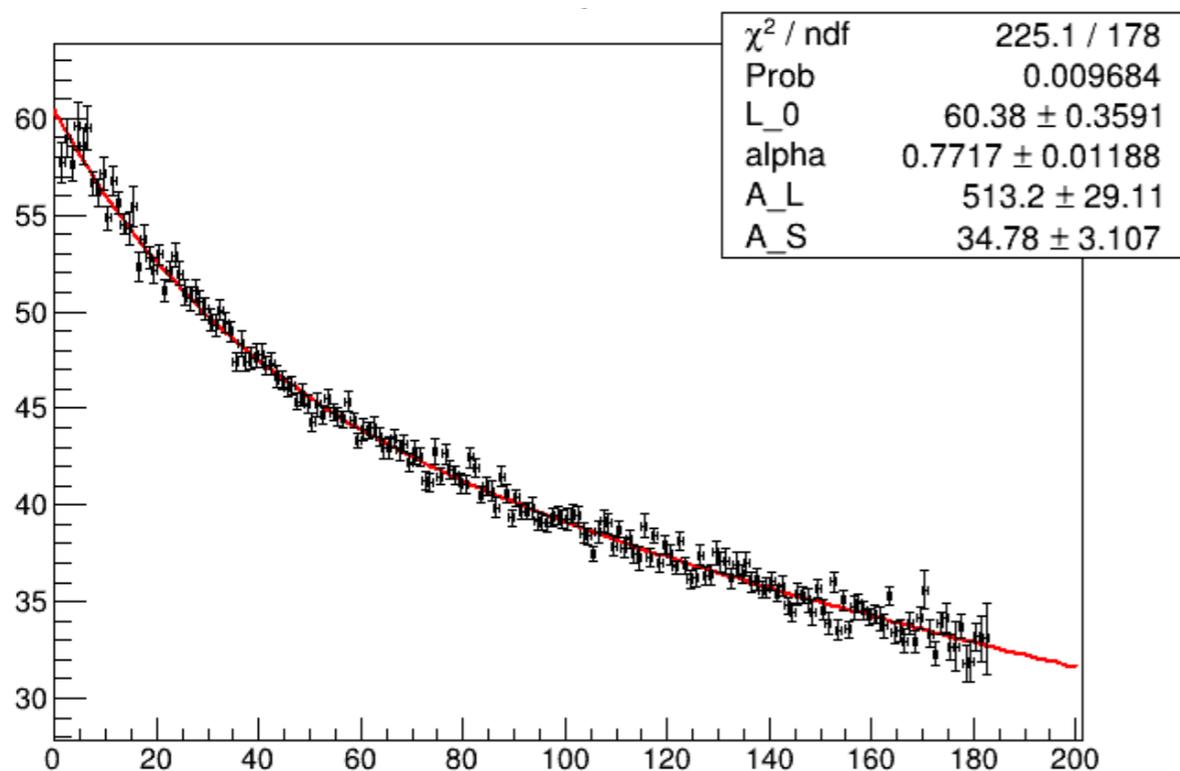
上から見たイメージ

ファイバー減衰長の較正手法

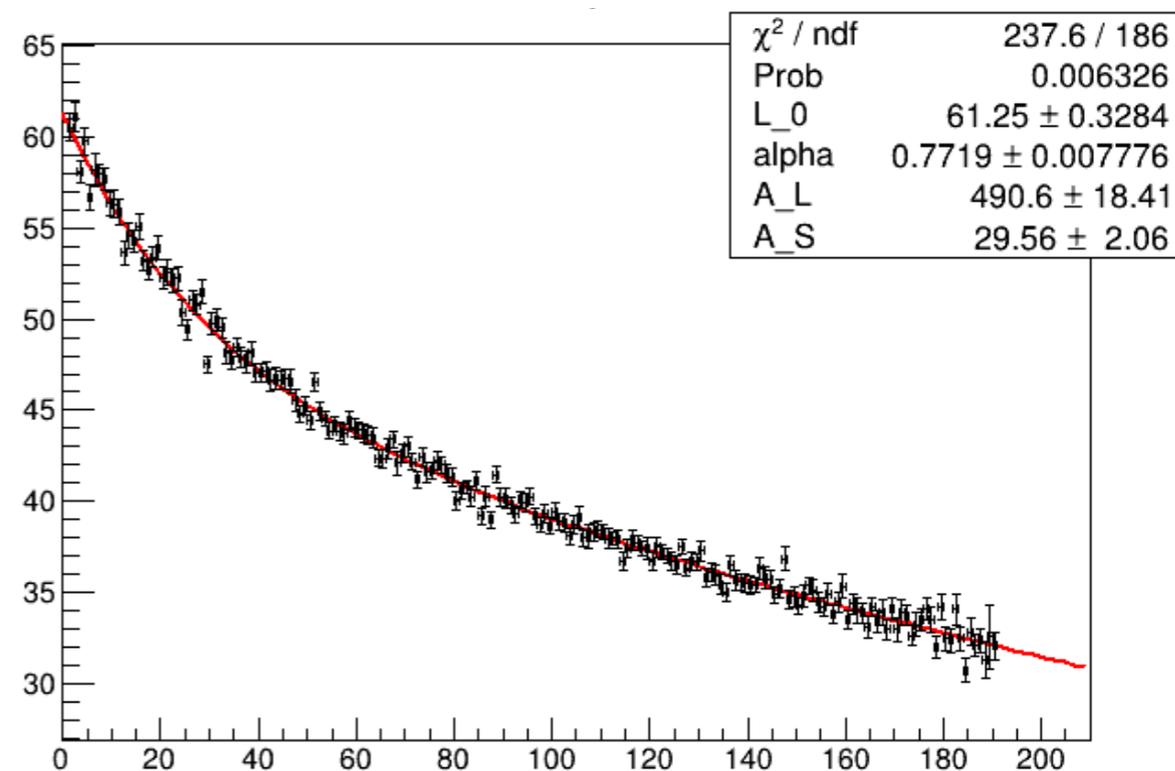
シミュレーション結果



z-fiber



x-fiber



10,000イベント分の
データを使用

$$L = L_0 \times \left[\alpha \times \exp\left(-\frac{x}{A_L}\right) + (1 - \alpha) \times \exp\left(-\frac{x}{A_S}\right) \right]$$

	α	A_L (cm)	A_S (cm)
Simulation Input	0.77	463.4	33.2
z-fiber	0.771	513 +- 29	35 +- 3
x-fiber	0.772	491 +- 18	30 +- 2

まとめ

- T2K実験では前置検出器のアップグレードを実施中
- SuperFGDという新型ニュートリノ検出器を2022年度にインストール
- 外部から入射する荷電粒子を用いた較正を実施予定
 - 宇宙線ミュオン
 - ビーム由来のミュオン（サンドミュオン）
- 較正手法の開発を現在実施中
 - 要求精度の見積もりが喫緊の課題

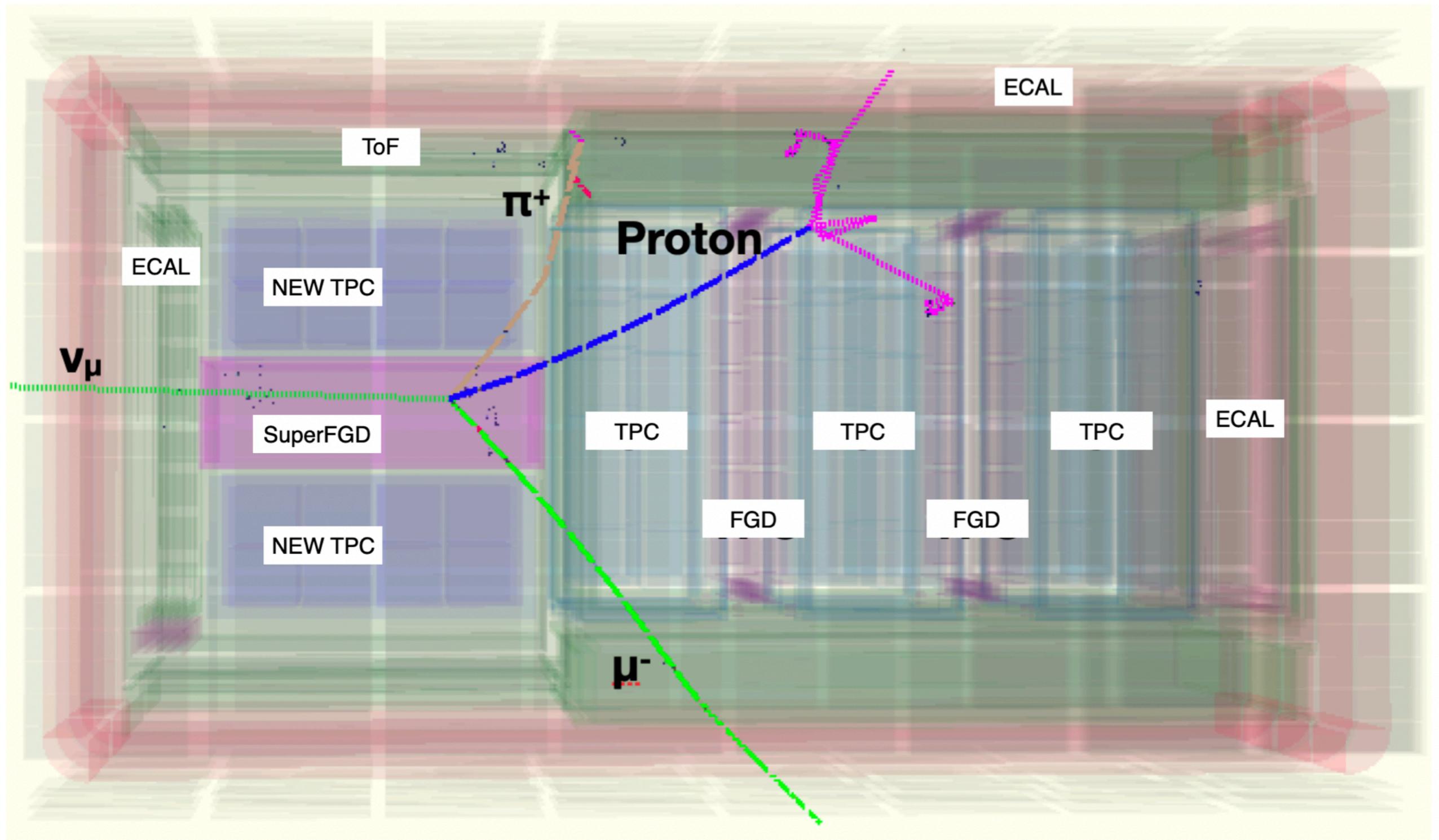
Back Up

宇宙線キャリアレーション

予定パラメター一覧 (随時追加予定)

	パラメタ	ツール	単位	チャンネルごと
Channel	Pedestal	LED	ADC	Y
	High gain			Y
	Low gain			Y
	Pedestal sigma			Y
	PE sigma			Y
	High/Low ratio	宇宙線	TDC (ns)	N (Y later?)
	Time over threshold (ToT)			N (Y later?)
	Time of arrival (ToA)			N (Y later?)
	Time resolution			N (Y later?)
Cube/Fiber/MPPC	Light yield	宇宙線	p.e. / MeV	N (Y later?)
Fiber	Light Attenuation	宇宙線	m (%)	N (Y later?)
	Reflection	宇宙線	%	N (Y later?)
Cube	Optical crosstalk	宇宙線	%	N (Y later?)
	Alignment	宇宙線	mm	N (Y later?)

予想されるイベント例



宇宙線イベント例

