



THE UNIVERSITY OF TOKYO



**T2K実験新型前置検出器を用いた
電子ニュートリノ事象選別のための
反応点再構成手法の開発**

**Development of reconstruction algorithms for electron neutrino events selection
using the new type near detector of T2K.**

T2K EXPERIMENT

- About neutrino
- T2K experiment
- Far detector, Near detector
- T2K-II
 - ND upgrade
 - SuperFGD



ニュートリノ反応モデル

➤ ニュートリノは弱い相互作用のみを介して反応点

➤ **Charged Current(CC)**

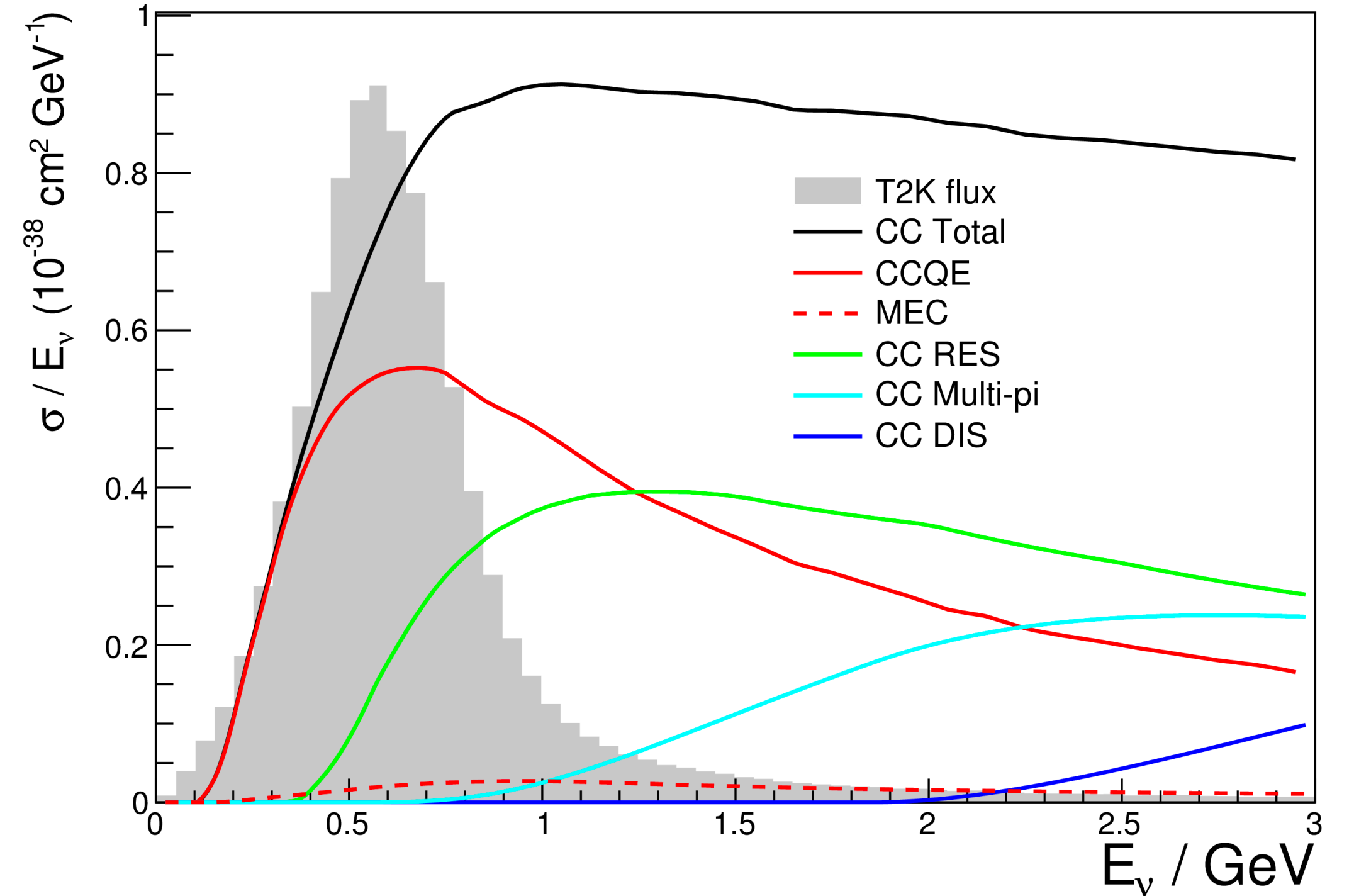
➤ **Neutral Current(NC)**

➤ 主要なT2Kのエネルギー帯での相互作用

➤ **CC Quasi-elastic (QE)**

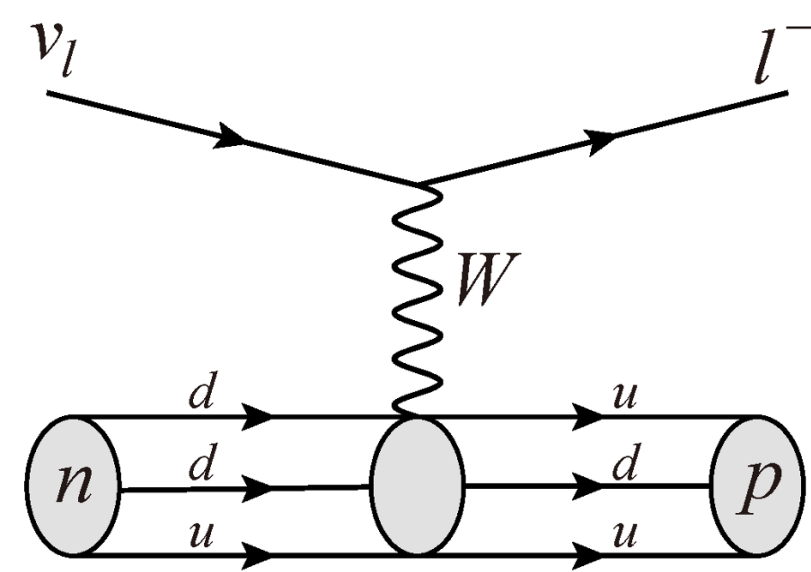
➤ **CC Resonance scattering (RES)**

➤ **CC Deep inelastic scattering (DIS)**

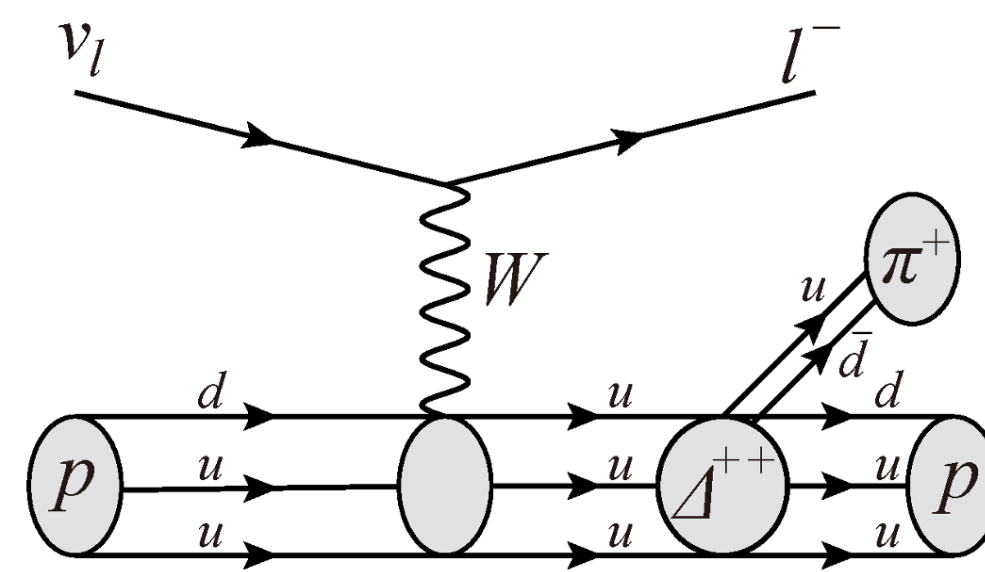


Neutrino cross sections

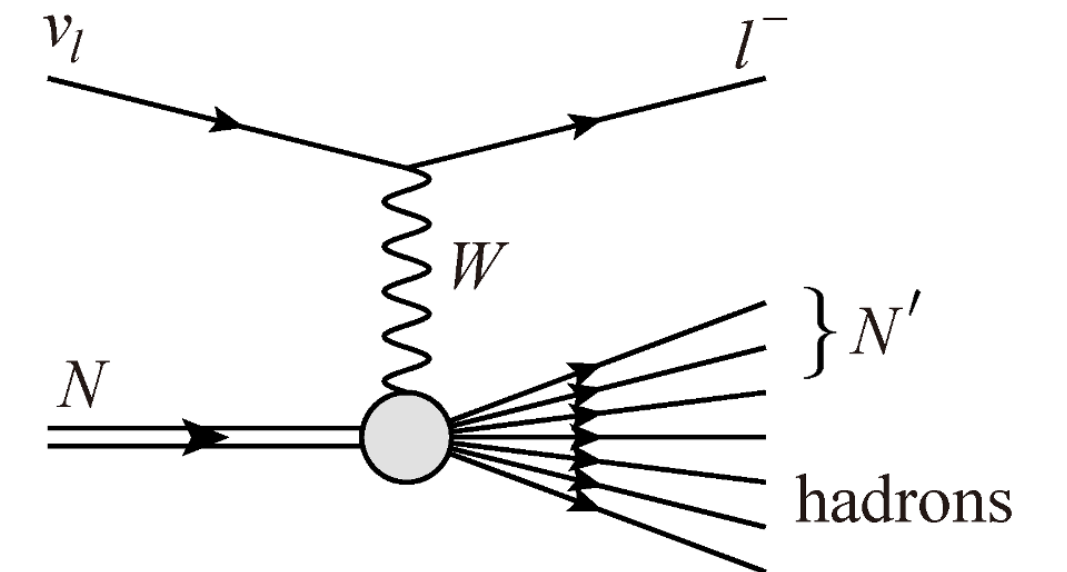
Quasi-elastic



Resonance scattering

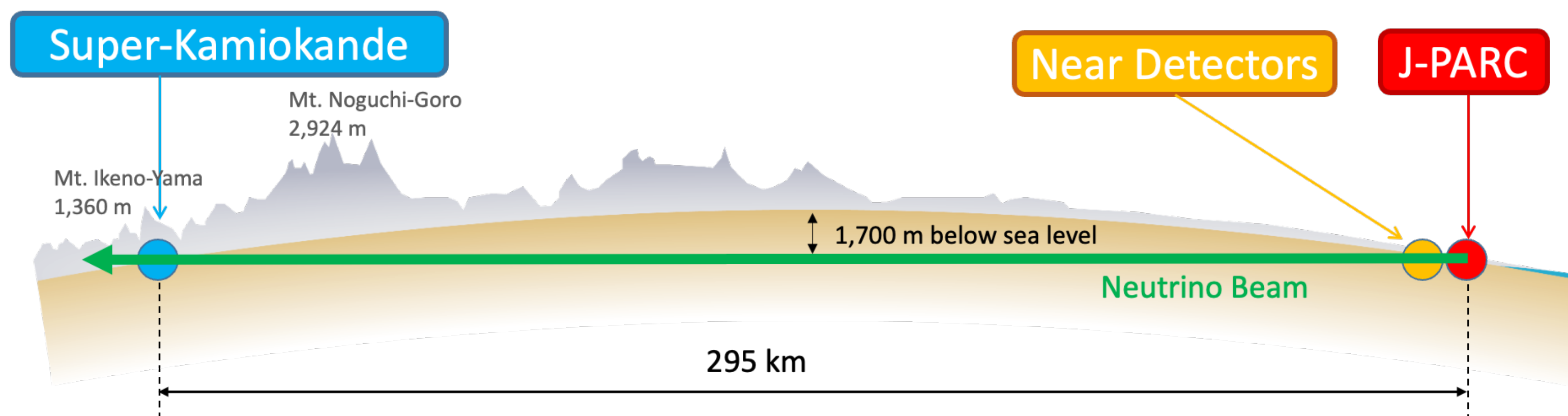


Deep inelastic scattering



T2K EXPERIMENT

- 茨城県東海村のJ-PARCで生成したニュートリノビームを岐阜県神岡のSuperKamiokandeで観測する長基線ニュートリノ振動実験
- 前置検出器 ND280 と後置検出器Super-Kで ν_μ から ν_e への振動現象を観測



ニュートリノ振動とT2K EXPERIMENT

➤ ニュートリノ振動

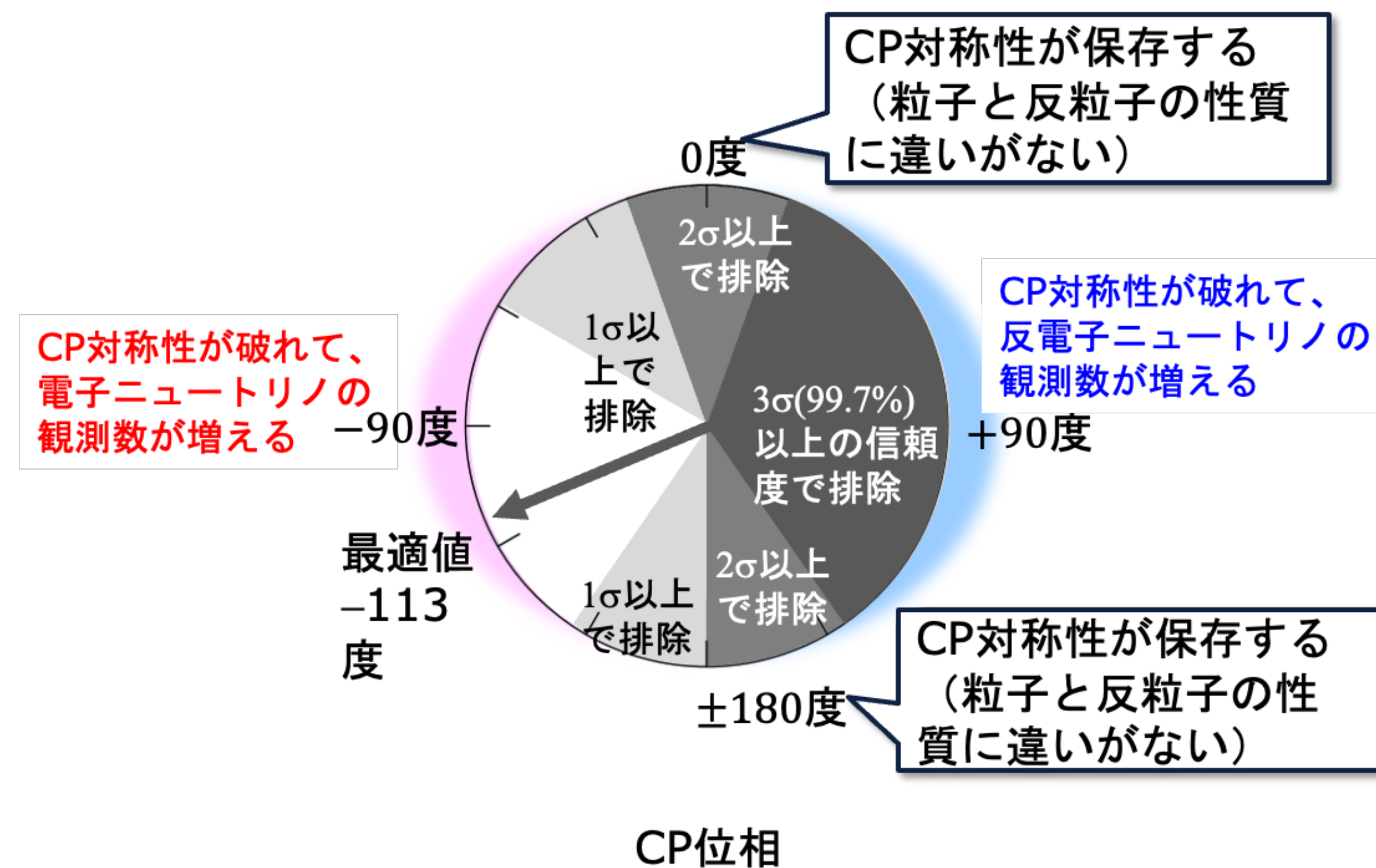
➤ ニュートリノが飛行中にそのフレーバーが変化する現象

➤ T2K実験では ν_μ から ν_e の振動を解析することでCP位相 δ_{cp} によりレプトンにおけるCP対称性の破れの検証を行なっている

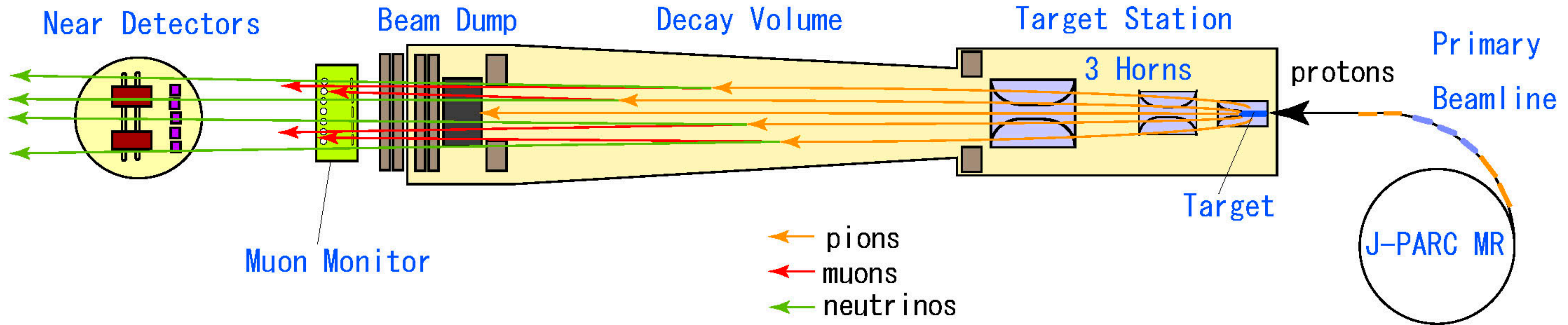
➤ 現状 2σ 以上の信頼度でCP対称性の破れを示唆

➤ 3σ 以上での測定には統計量の増加や

系統誤差の削減が必要

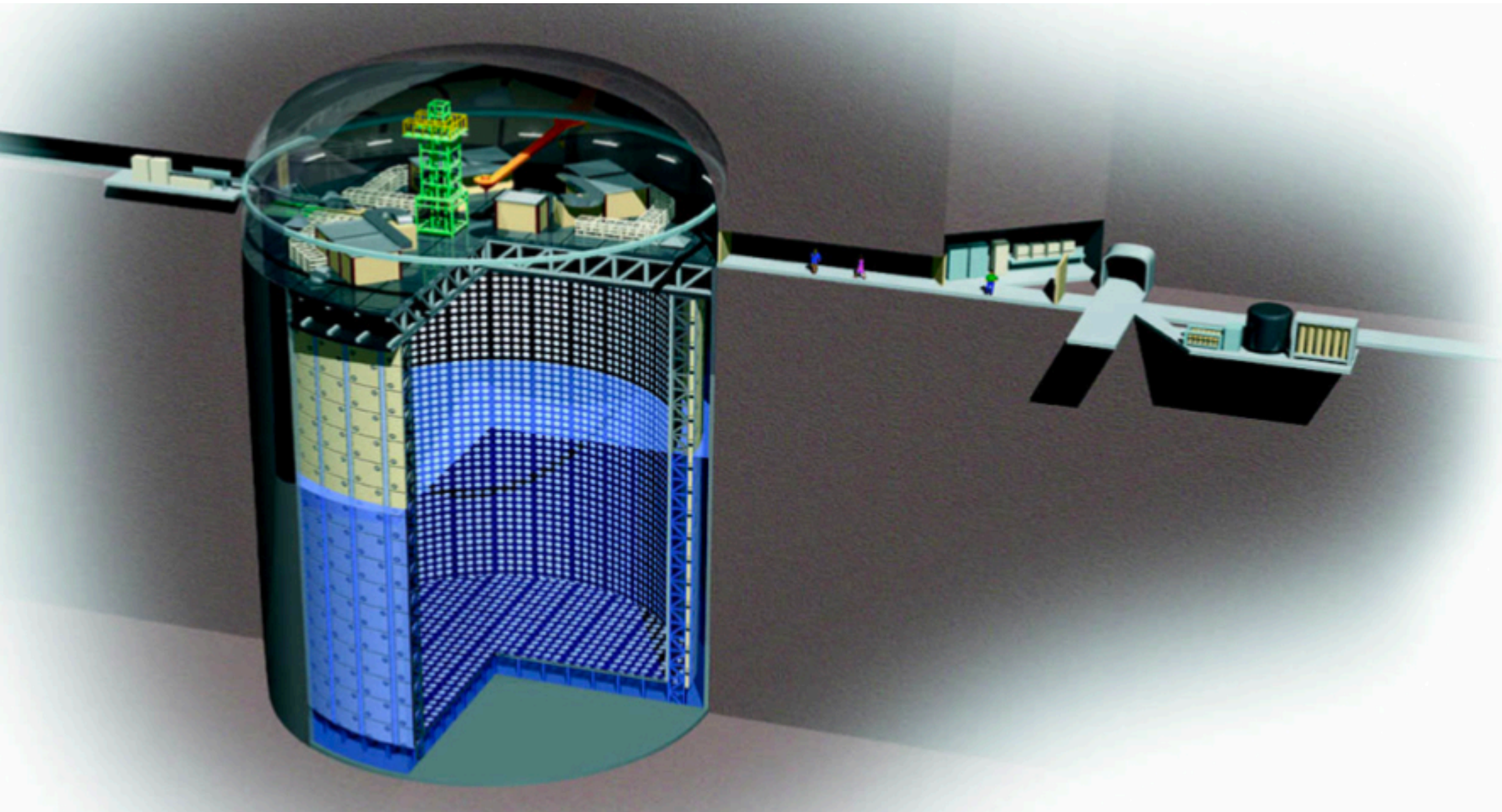


J-PARC NEUTRINO BEAMLINE

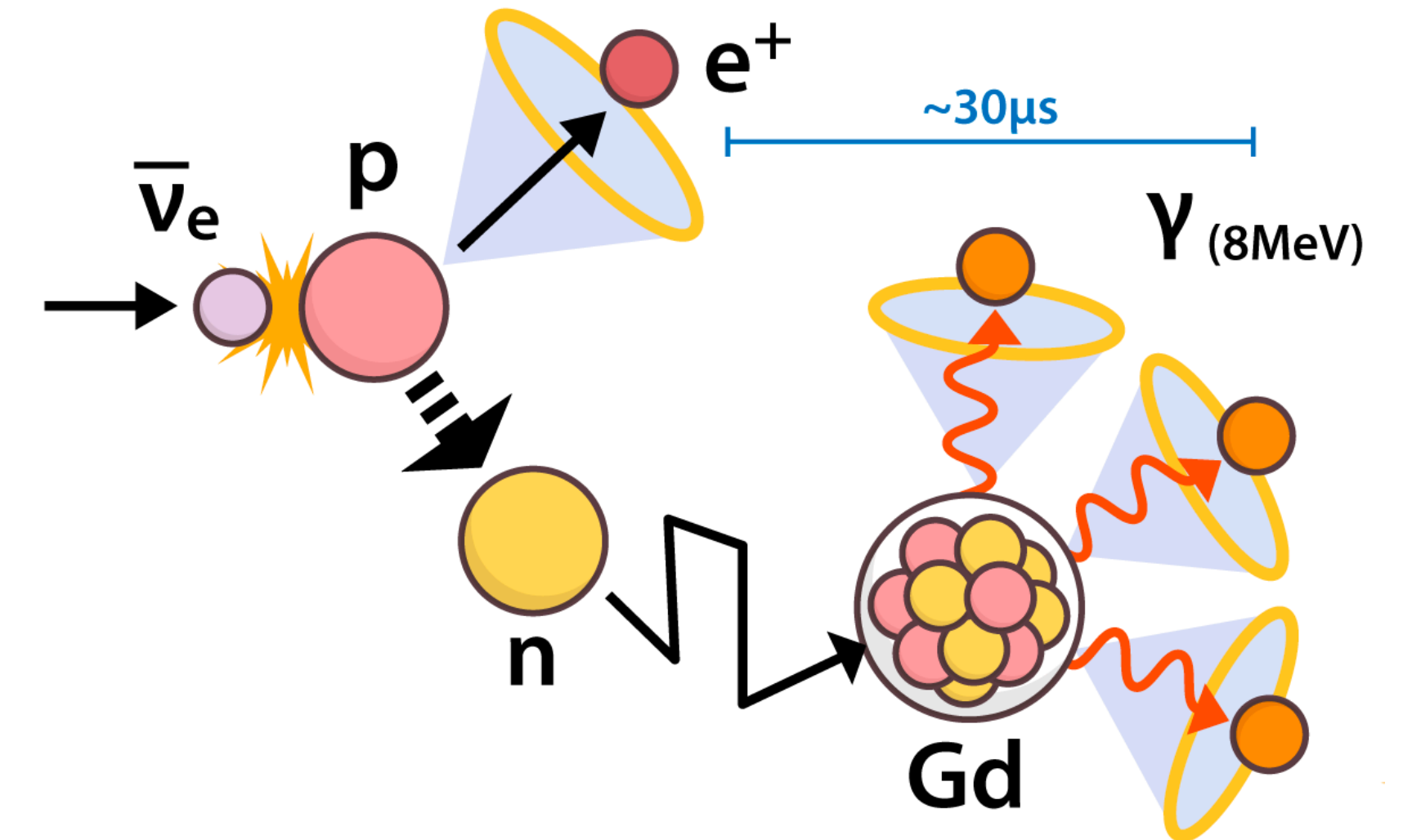
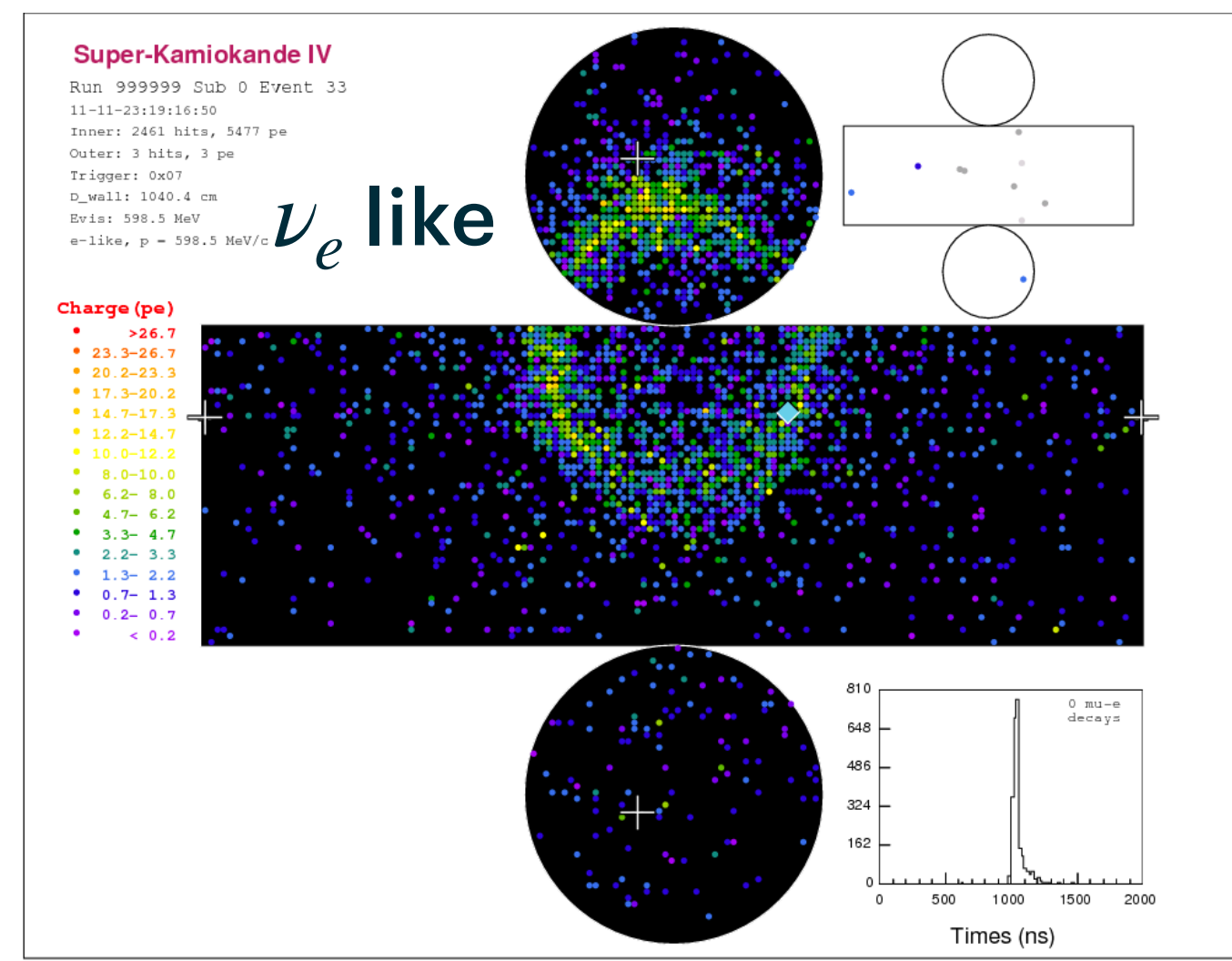
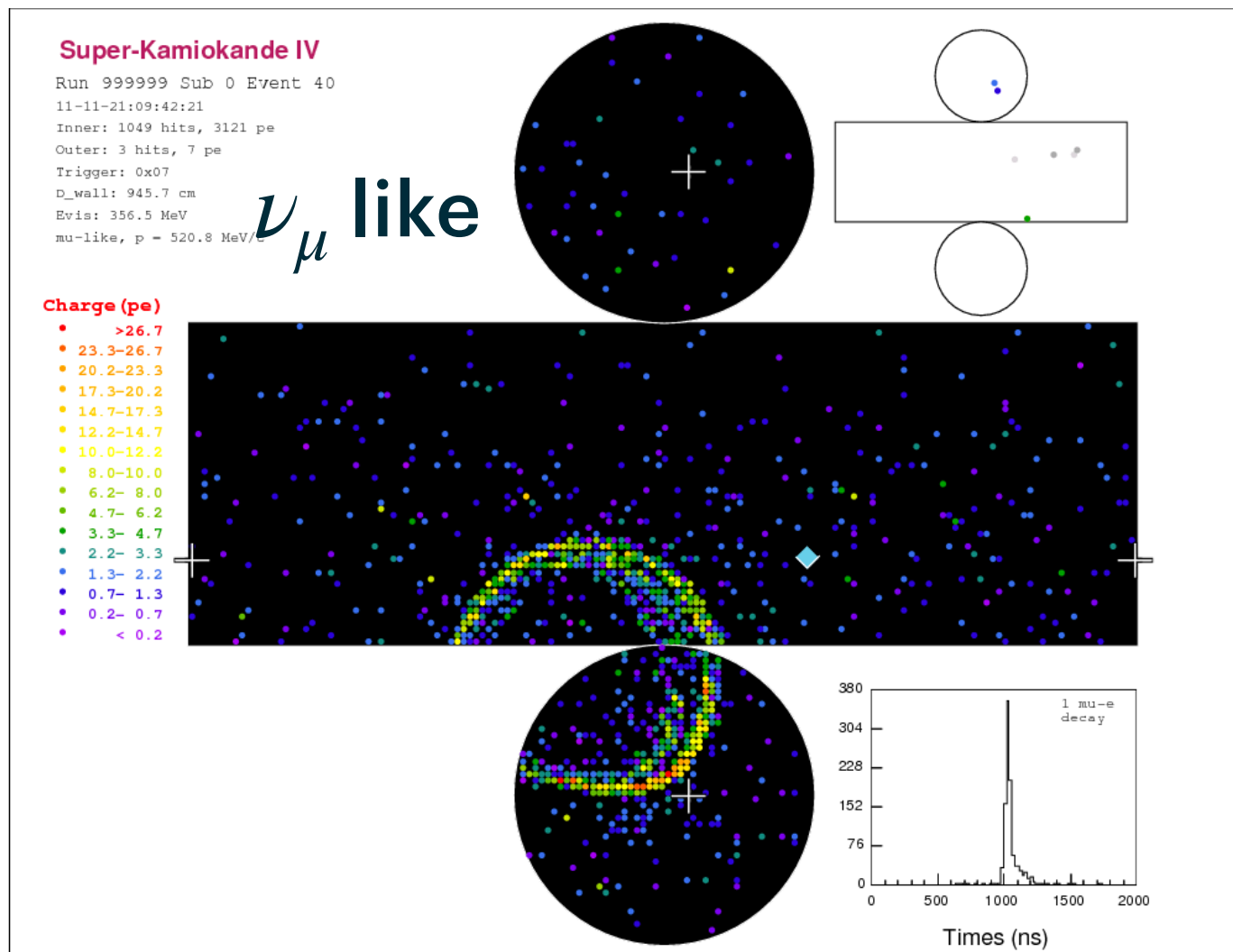


- **Horn**に流す電流を変えることで磁場を変更し、**neutrino, anti neutrino mode**の選択が可能
- 炭素標的から約**280m**離れた前置検出器で**neutrino** 反応の測定

FAR DETECTOR ~SUPER KAMIOKANDE~



- 水チェレンコフ観測装置(直径39.3 m,高さ41.4 m)
- SK-Gd
 - Gdを水中に溶かして中性子検出効率UP
 - Gdが中性子を捕獲し計8 MeVの γ 線を放出
 - 2020年7~8月に $Gd_2(SO_4)_3 \cdot 8H_2O$ 13 t
 - 2022年6月に26 t(中性子検出効率 75%)



NEAR DETECTOR HALL

➤ ビームターゲットから約280 mに位置するdetector

➤ **ND280**

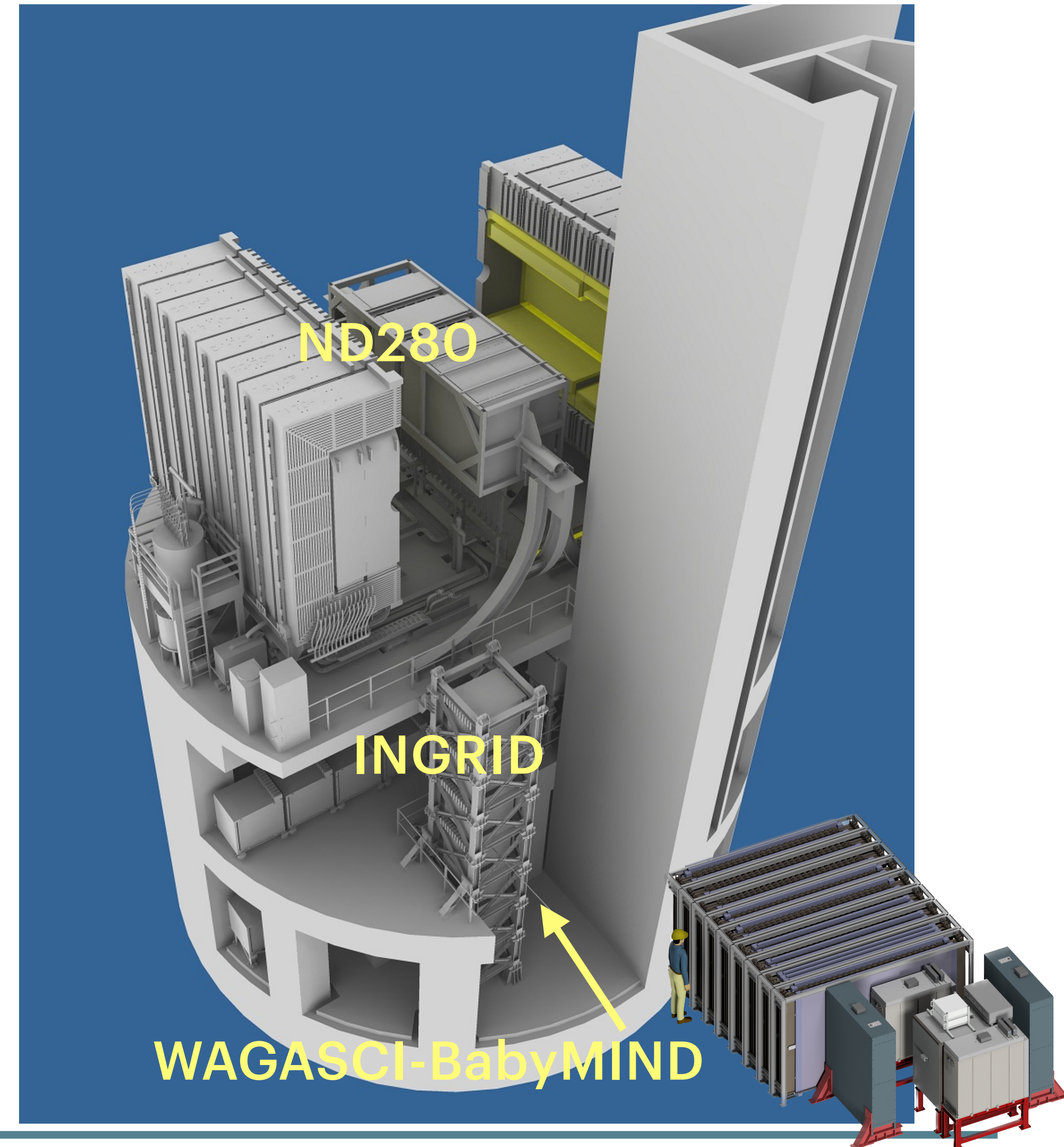
➤ 振動前のニュートリノ測定・反応断面積測定

➤ **INGRID**

➤ ニュートリノビームモニター

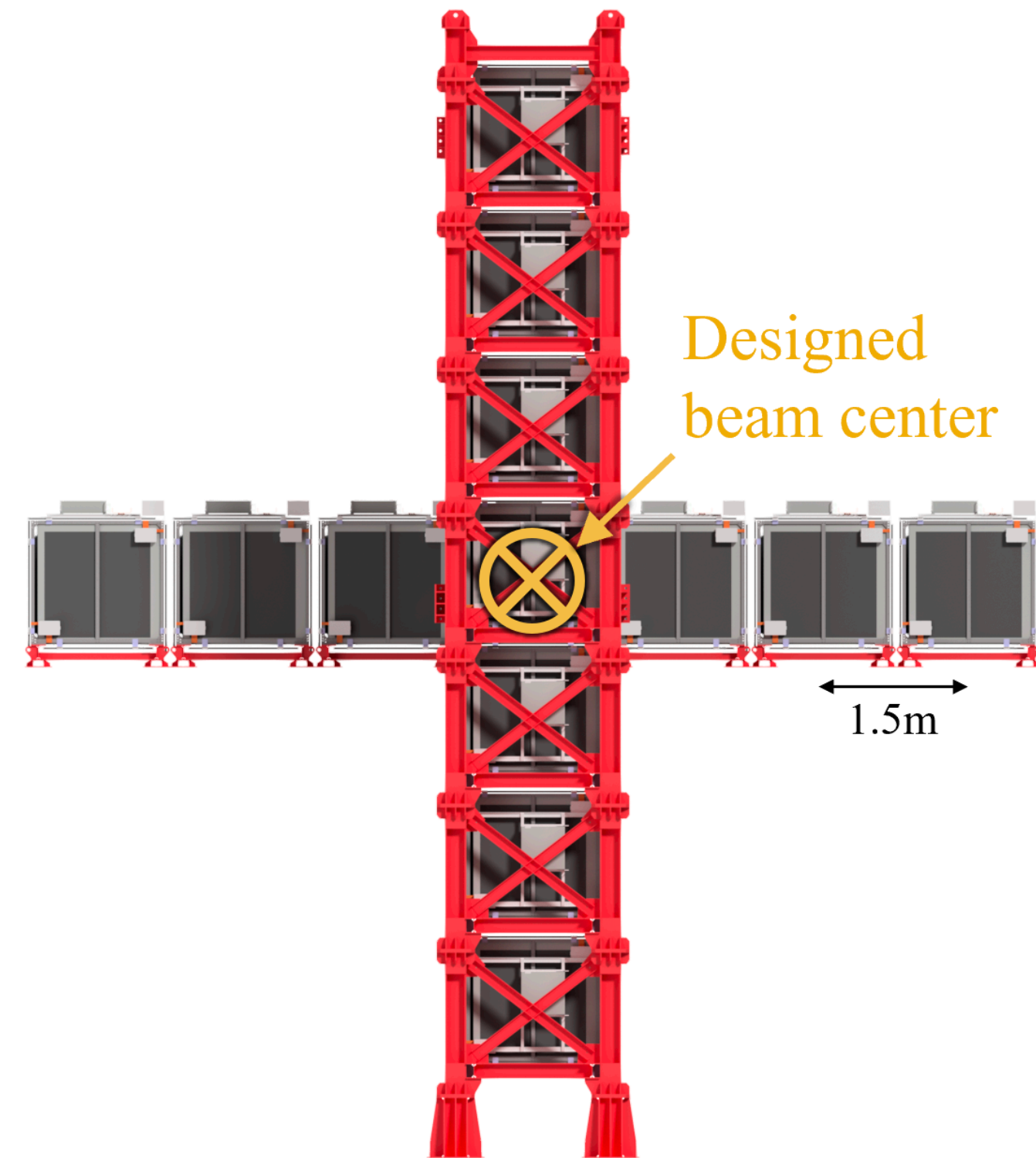
➤ **WAGASCI-BabyMIND**

➤ **ND280**と異なる標的・エネルギーでのニュートリノ測定



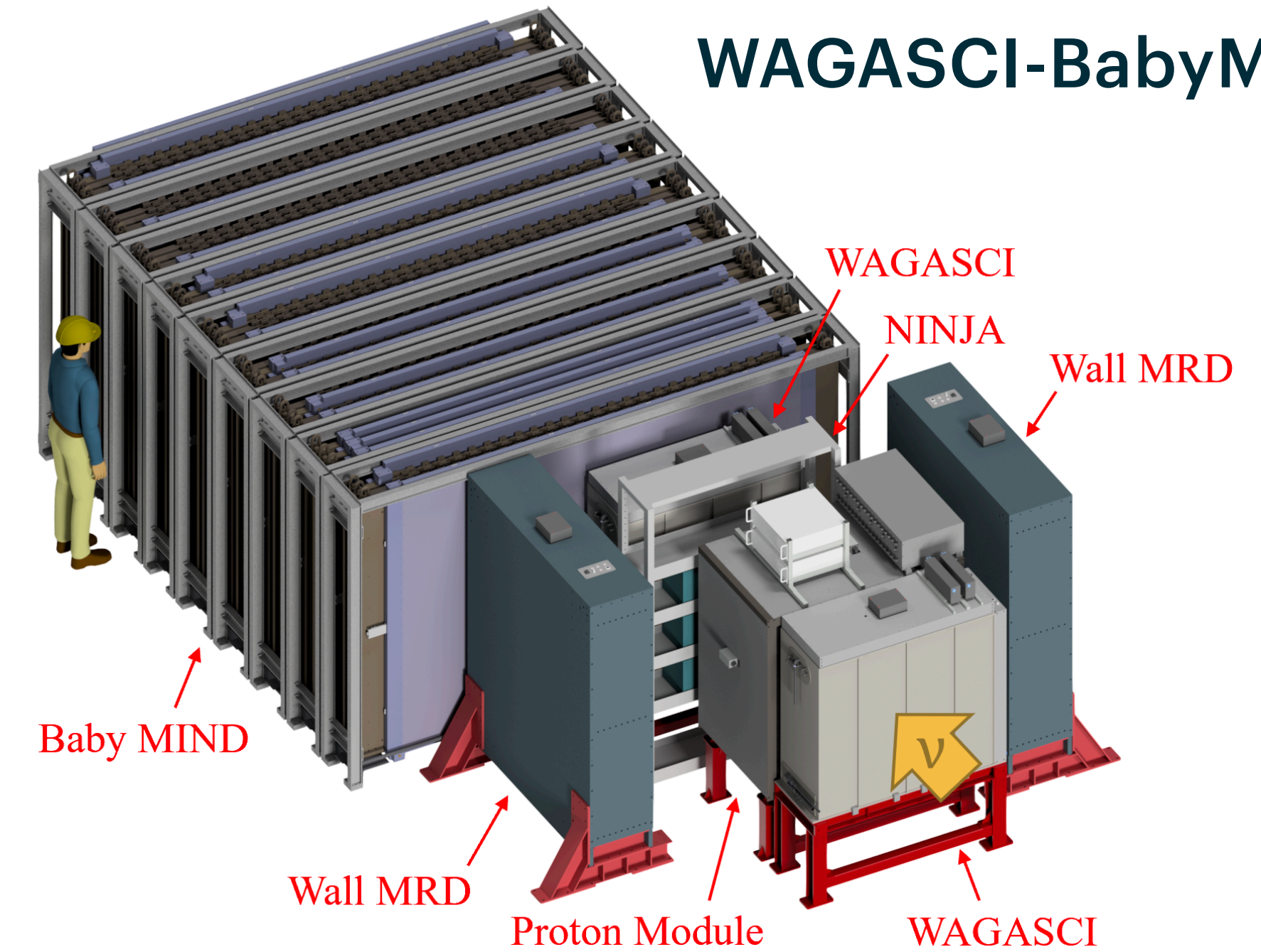
NEAR DETECTOR

INGRID



- ニュートリノビーム中心に十字で配置
- シンチレータ・鉄層で構成されビーム強度・方向をモニター

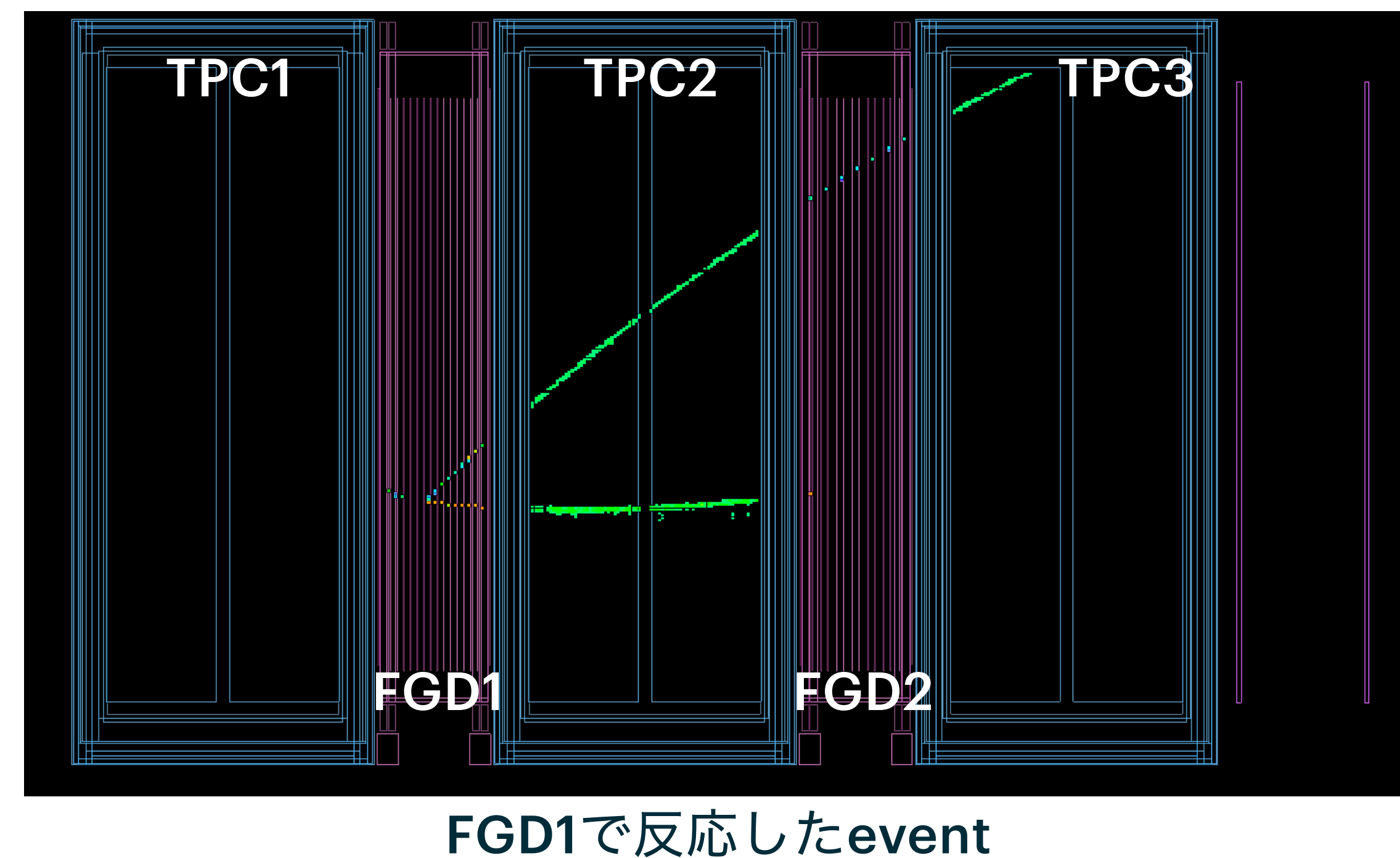
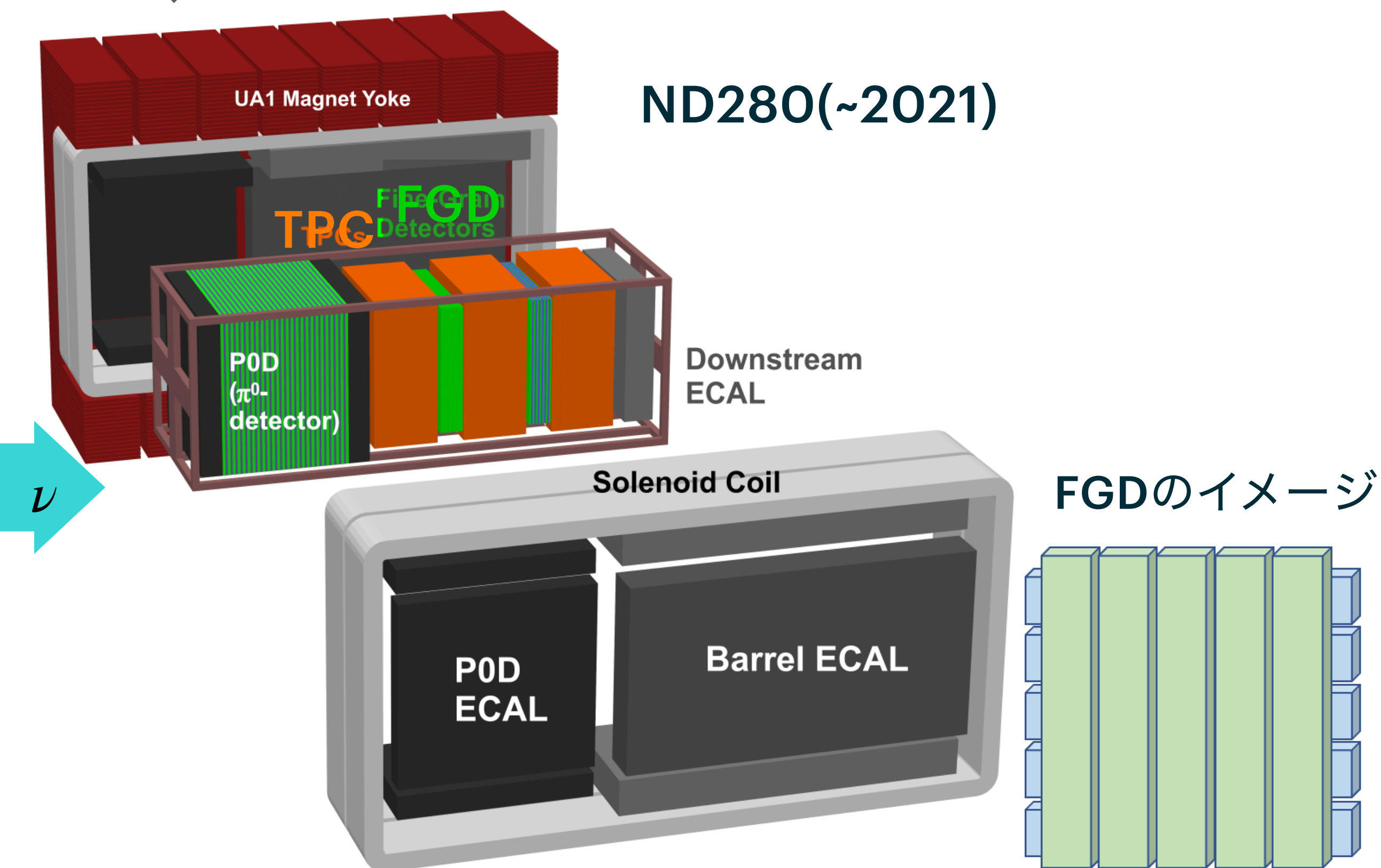
WAGASCI-BabyMIND



- ニュートリノビーム中心からoff-axis 1.5° に配置
- ND280と異なるエネルギーでの測定
- WAGASCIモジュールで水標的反応を測定可能

ND280

- ニュートリノビーム中心からoff-axis 2.5° に設置
- 棒状シンチレータで構成されたFGDとその前後に配置されたTPCで荷電粒子の方向・運動量を測定
- ニュートリノ反応断面積の測定→反応モデルの構築



T2K II

➤ 3σ 以上の信頼度で**CP**対称性の破れを示唆するために

➤ ビームパワー増強(統計量の増加):→**1.3 MW**

➤ **Hyper Kamiokande(2027)までに**

10×10^{21} **POT(Proton On Target)**のデータ取得

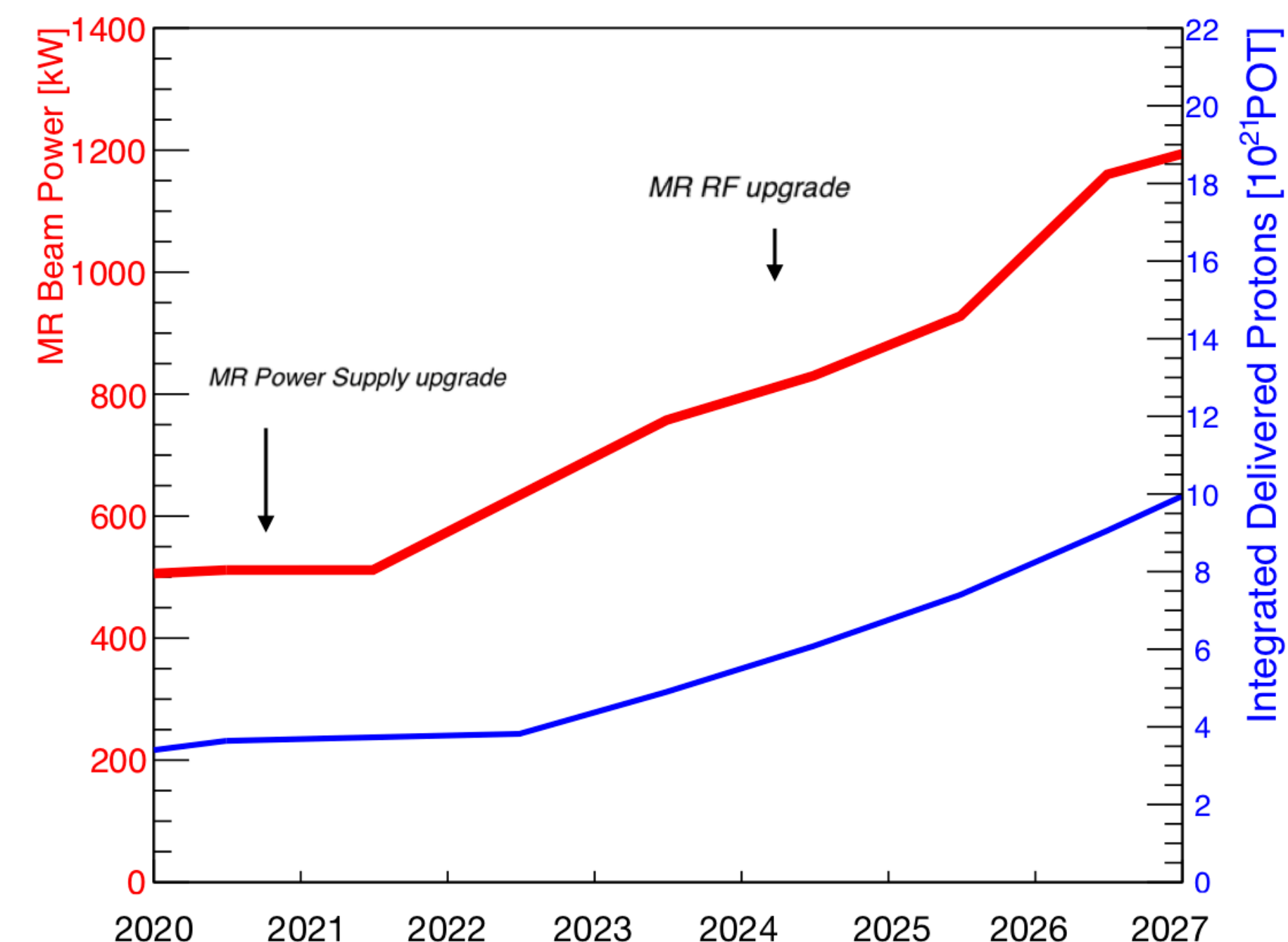
➤ 系統誤差の抑制

➤ 外部実験(**NA61/SHINE**)による**Beam flux**の理解

➤ **SK-Gd**

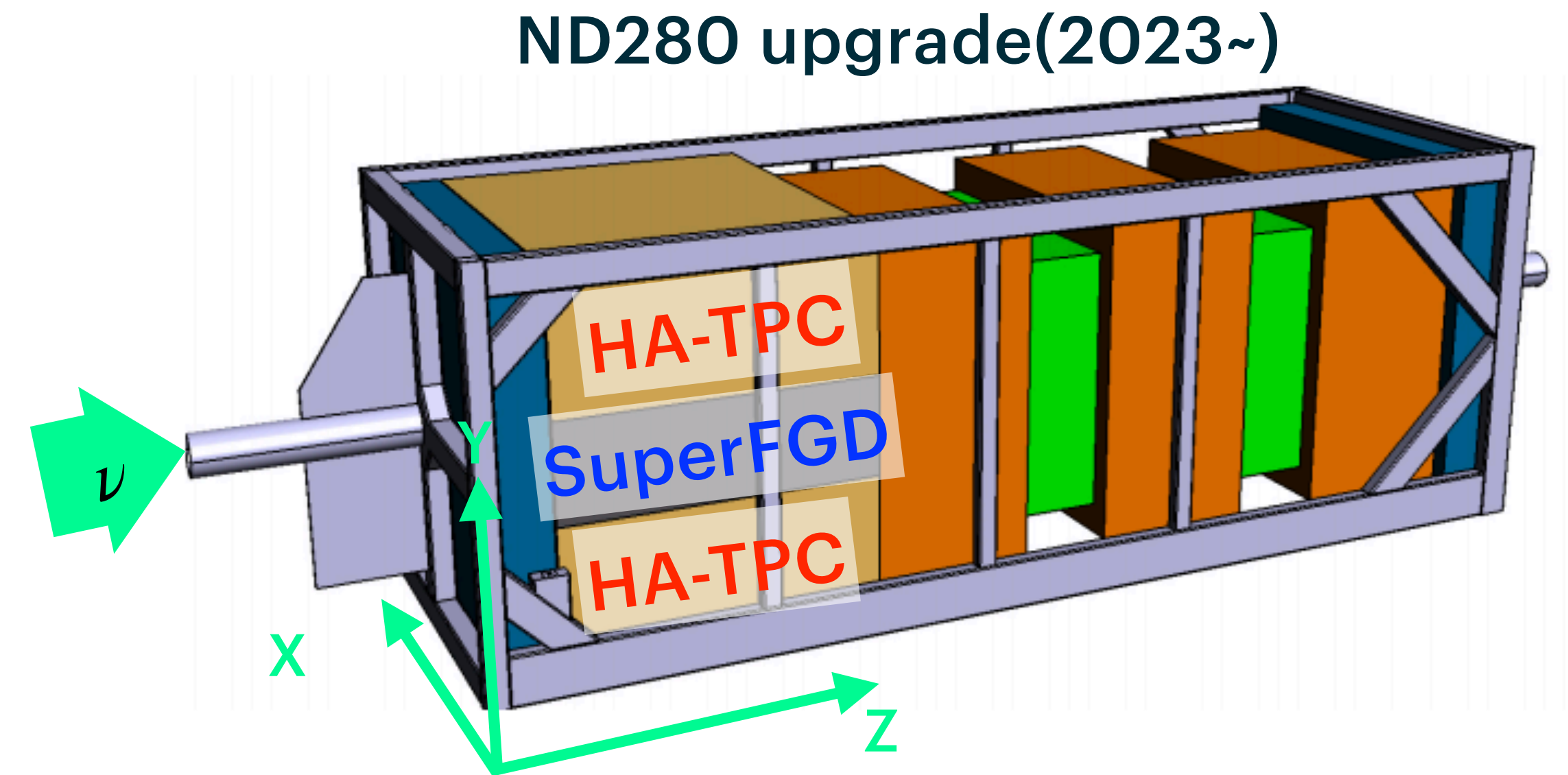
➤ **Near detector upgrade(2023~)**

T2K Projected POT (Protons-On-Target)

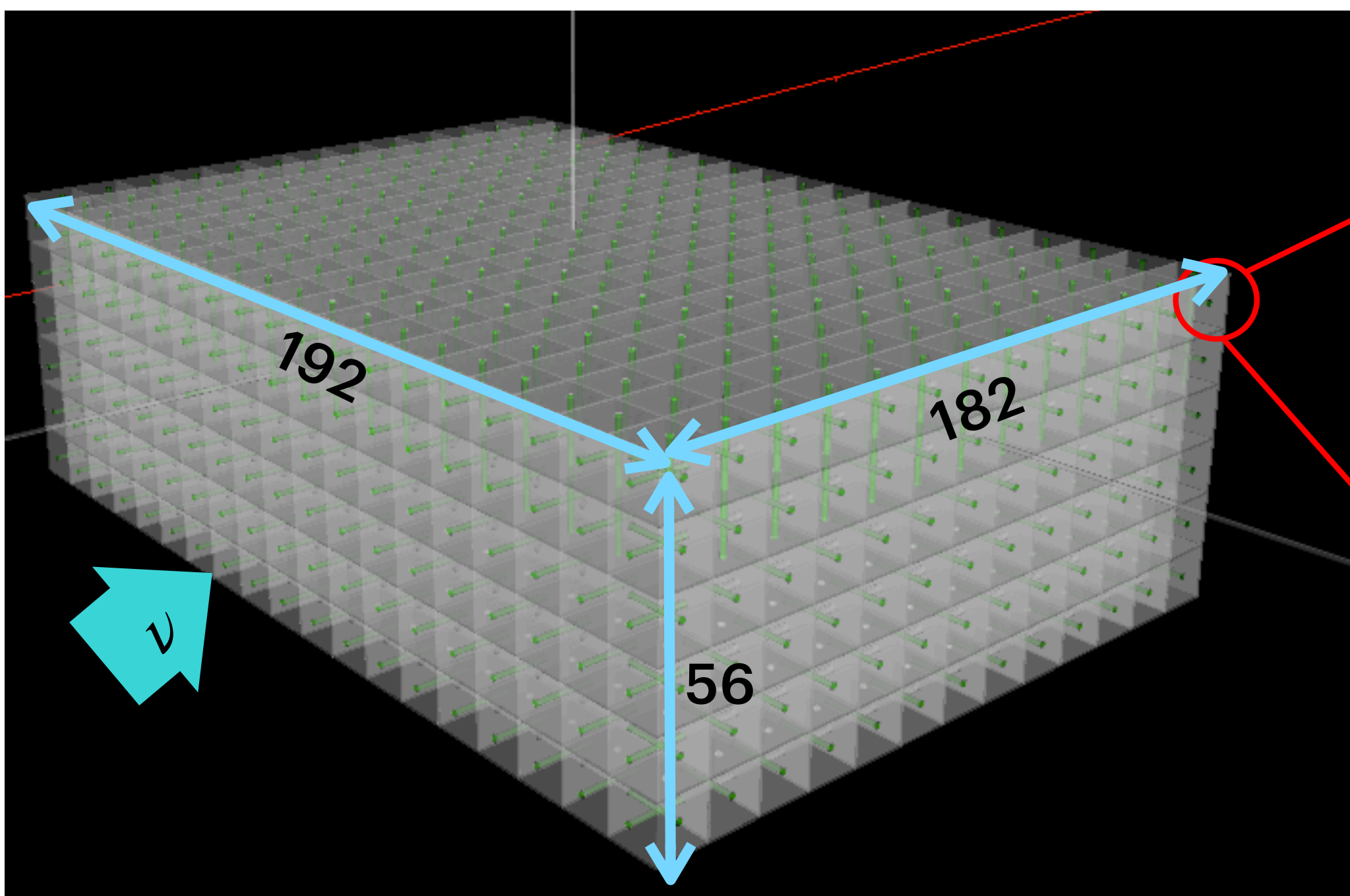


ND280 UPGRADE

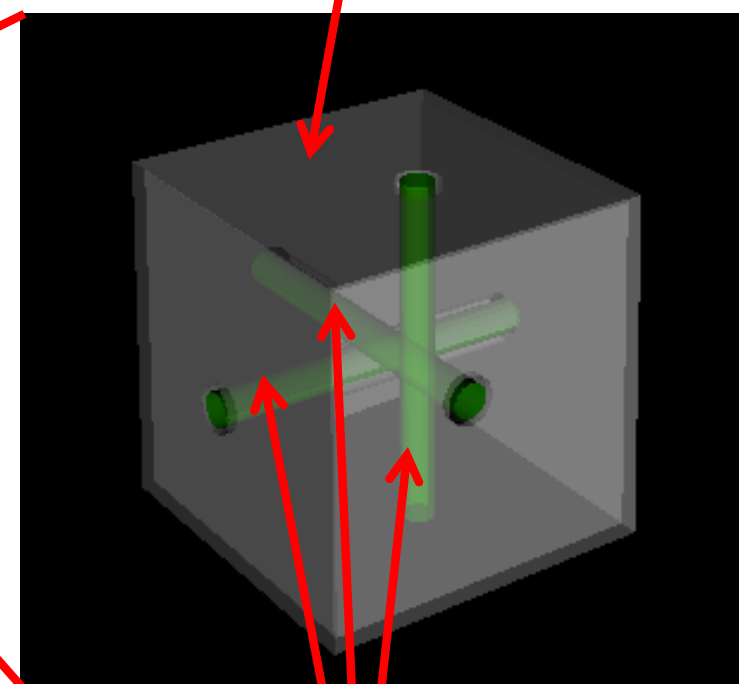
- **FGD**は棒状シンチレータを縦横に重ねた構造→大角度散乱粒子や短い飛跡に対して分解能が悪い
- 新型検出器を**2023年**に導入予定
 - **SuperFGD**
 - 4π アクセプタンスで測定可能
 - トラック・ニュートリノ標的
 - **High Angle-TPC**
 - SuperFGDの上下に設置
 - **Time of Flight**
 - Upgrade detectors を囲うように配置
- Upgradeにより飛跡の短い低運動粒子検出効率が向上
 - ニュートリノ相互作用における終状態の理解
 - ν_e 由来の事象と γ 由来の事象の識別



SUPERFGD

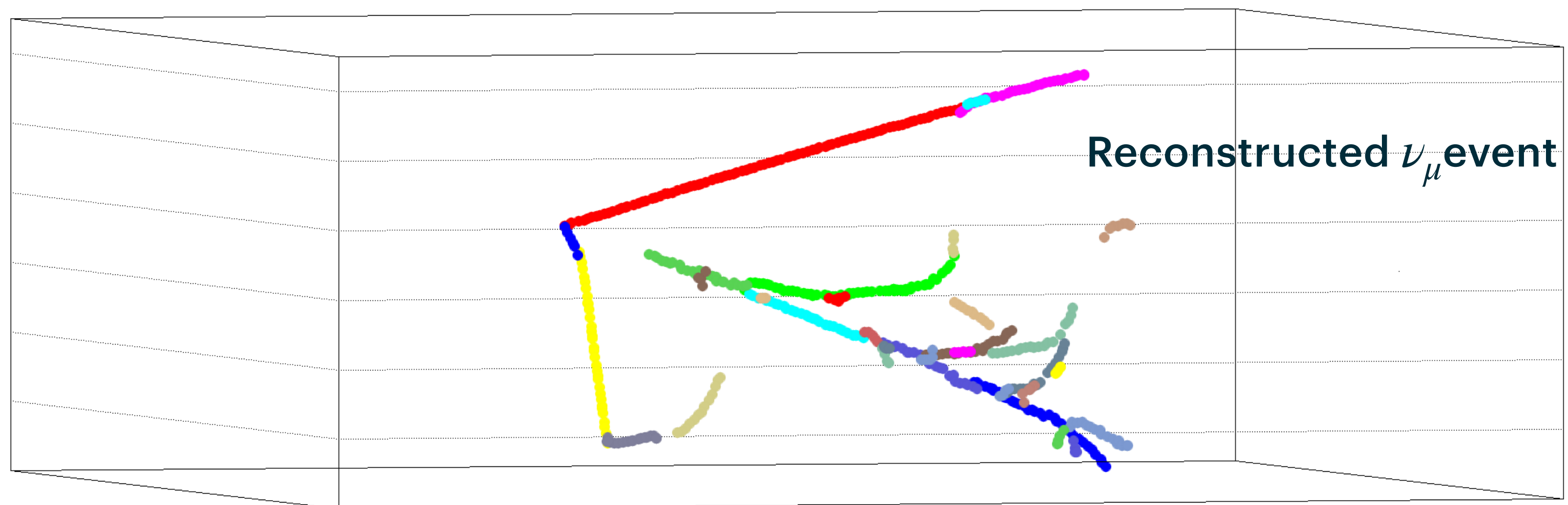


Scintillator cube



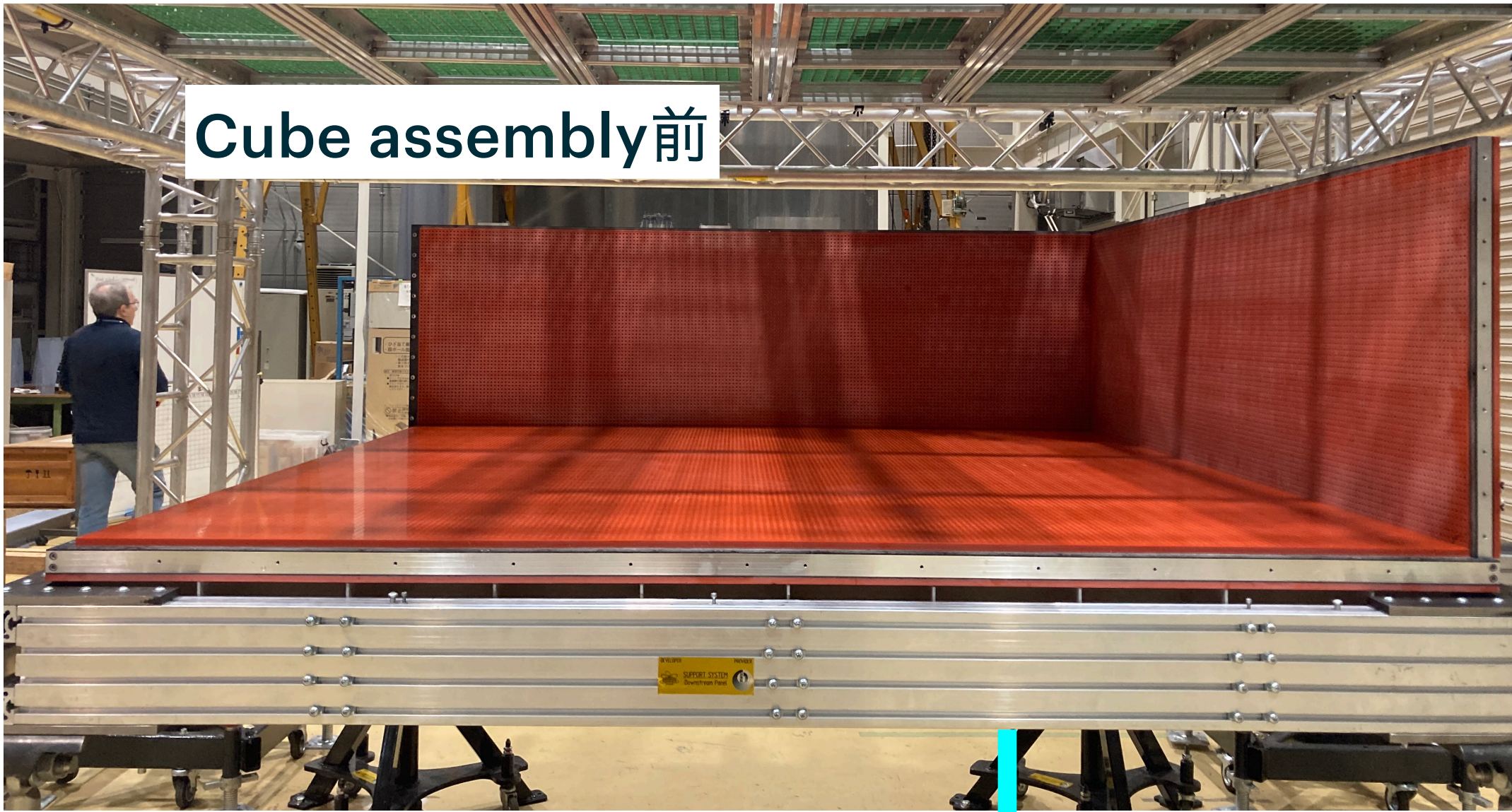
WLS fibers

- 約 $1 \times 1 \times 1$ cmのシンチレータキューブ
192 × 56 × 182 個
- x, y, z **3**方向から波長変換ファイバー
+MPPCで読み出し(55888 ch)
- **2023年10月の稼働に向けて現在建設中**

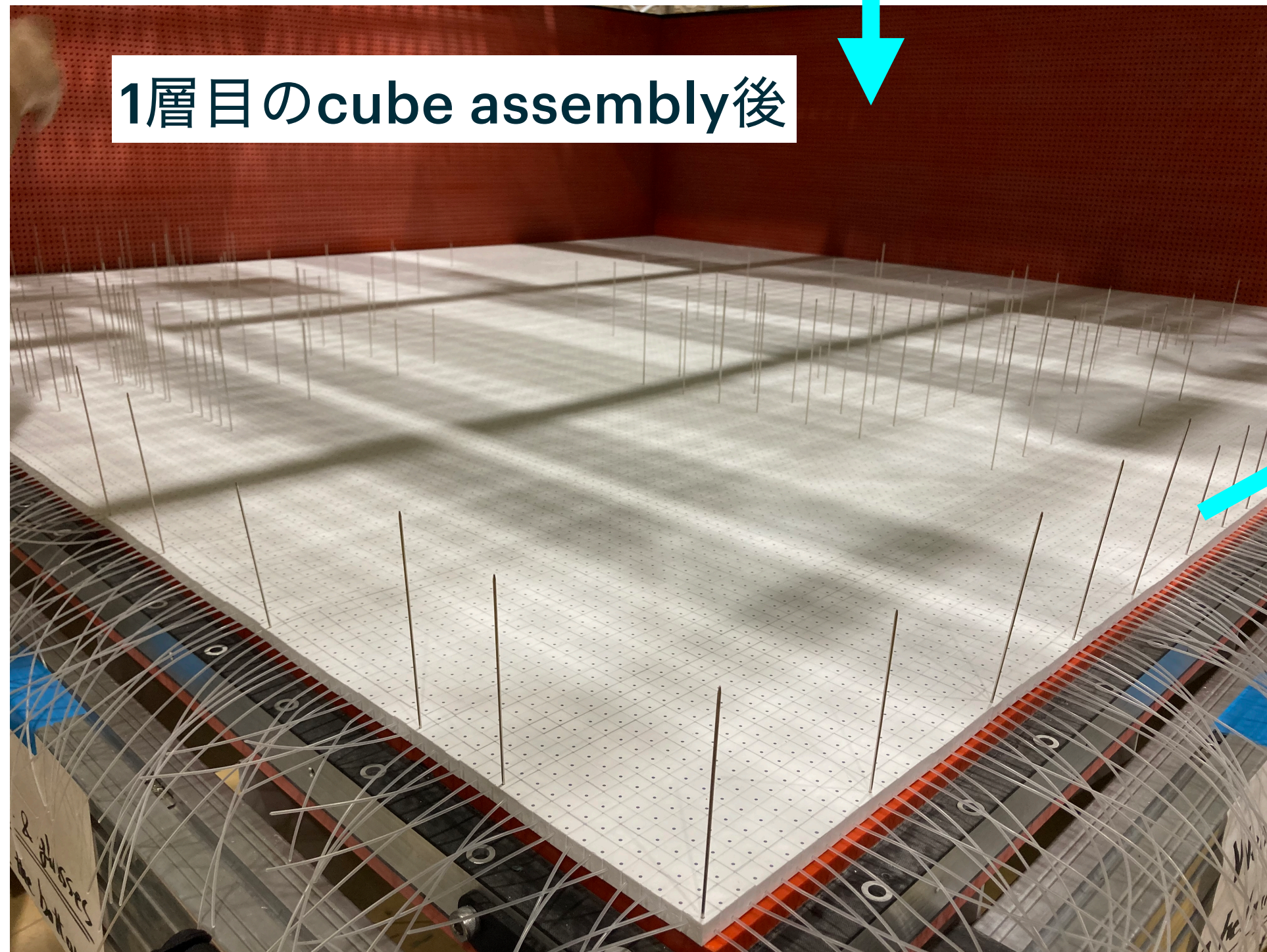


SUPERFGD CUBE ASSEMBLY (FINISHED)

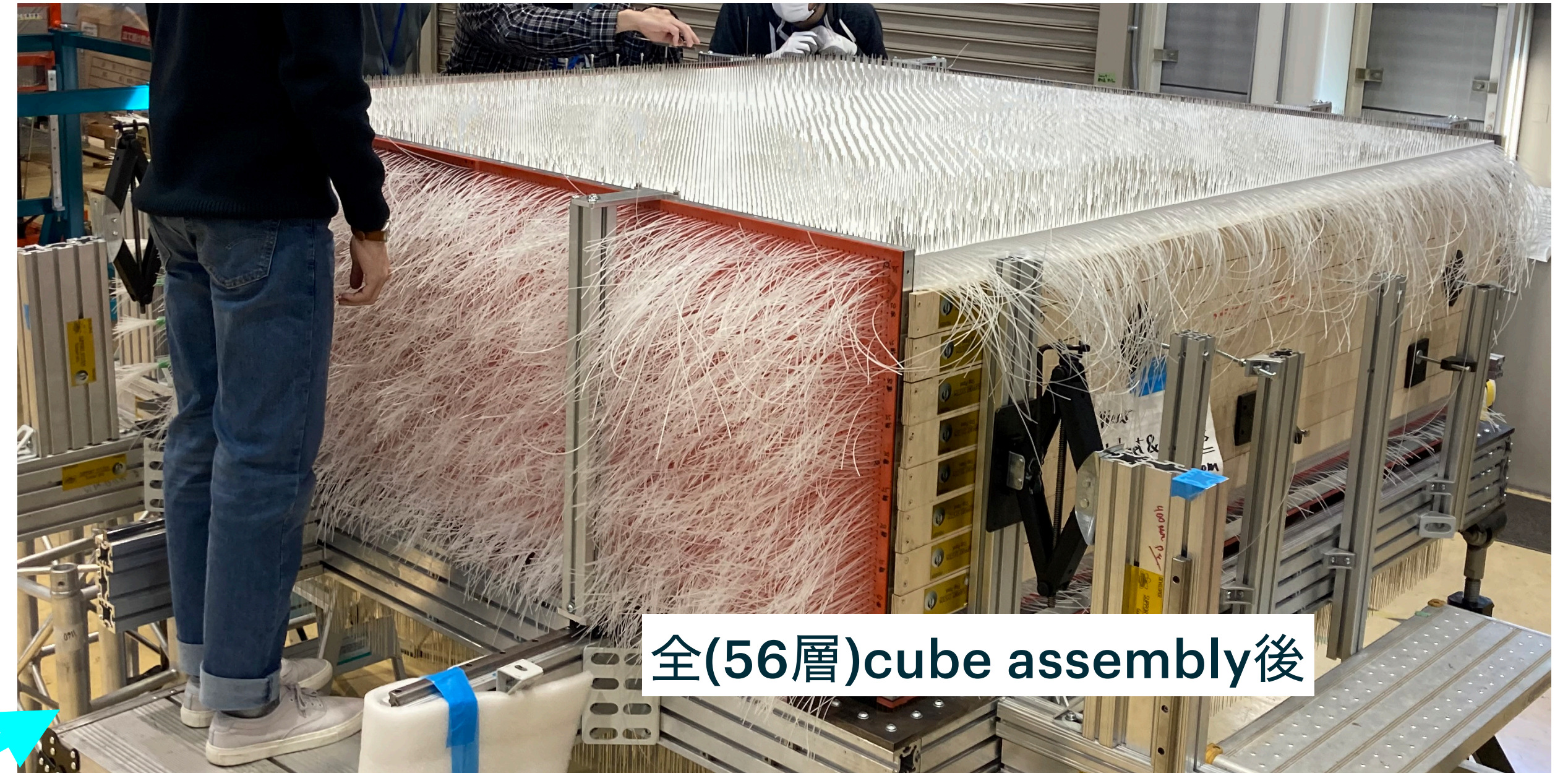
Cube assembly前



1層目のcube assembly後

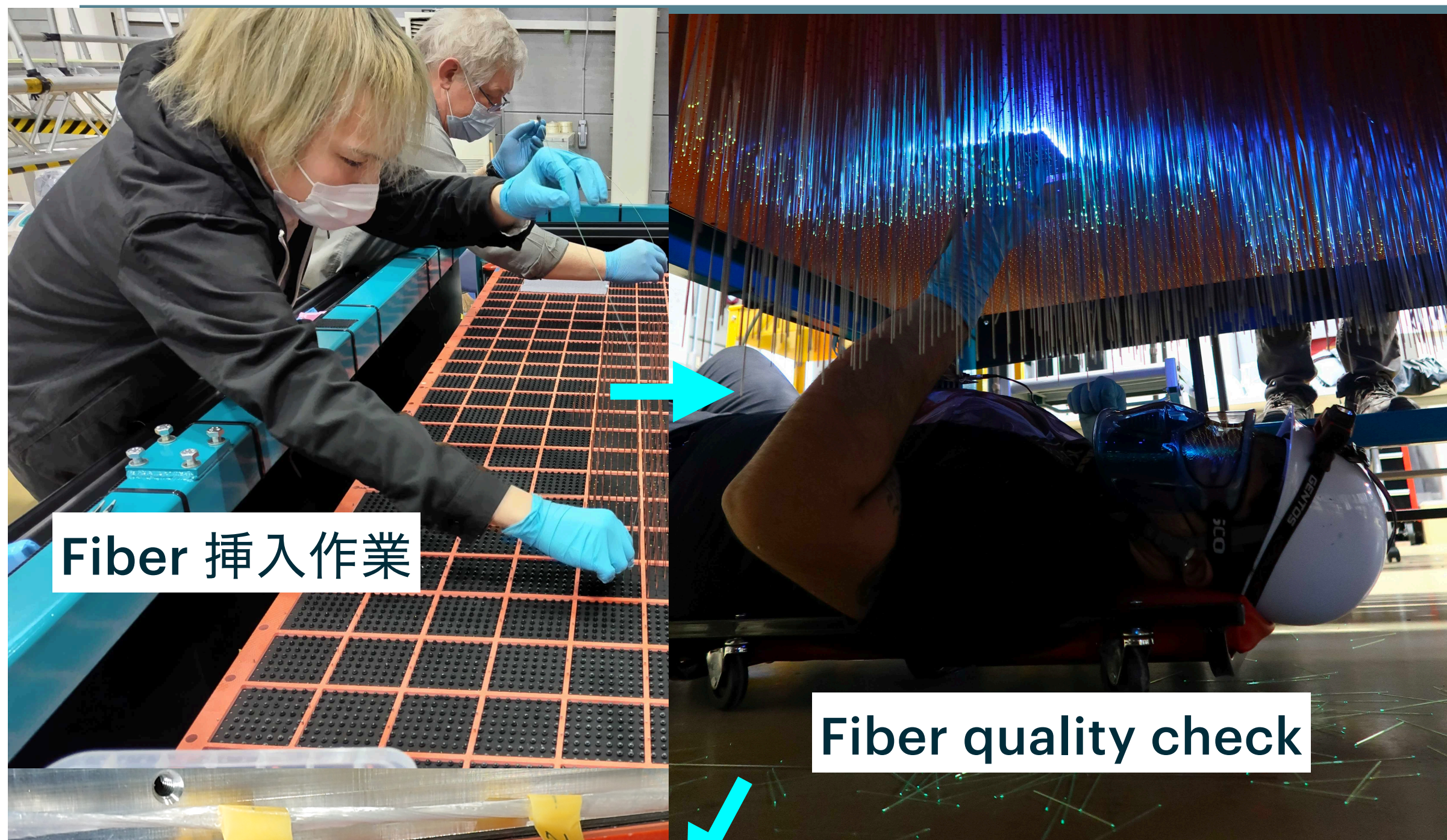
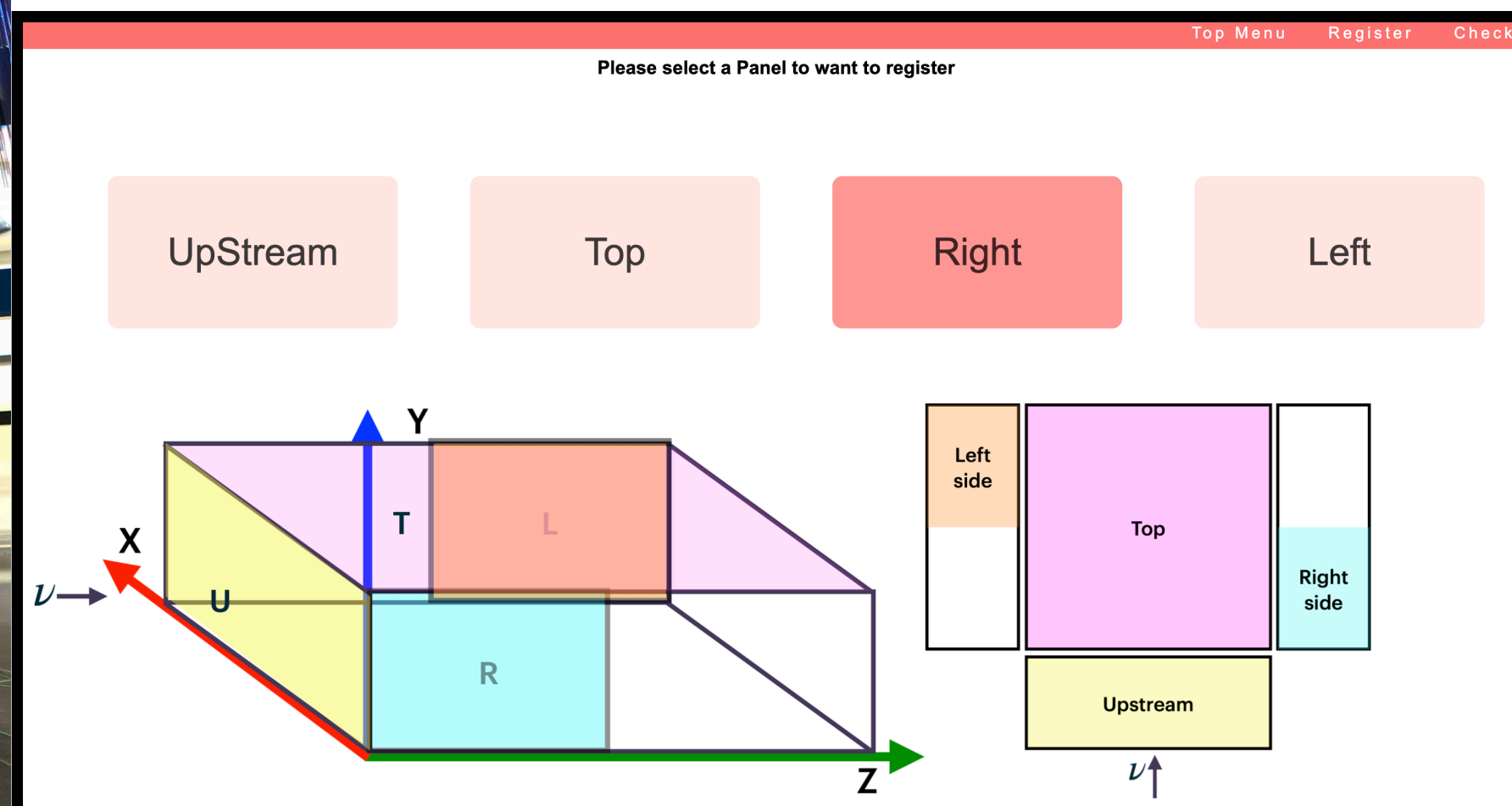


全(56層)cube assembly後



SUPERFGD ASSEMBLY(ON GOING)

➤ 881枚のMPPC PCBを正確に取付(種類や向き)、取付した場所をデータベース化するシステムを作成・運用

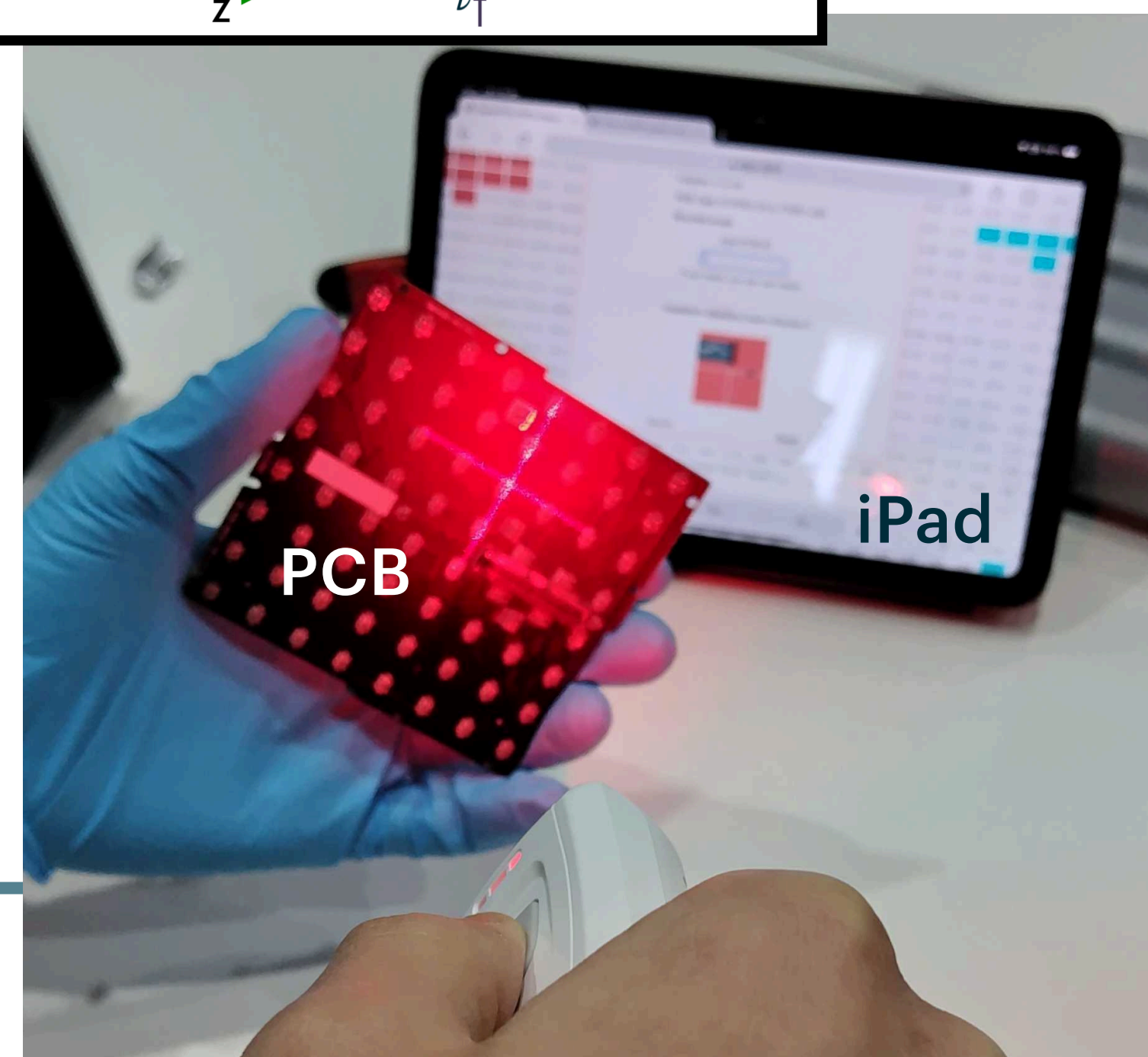


Fiber 挿入作業

Fiber quality check

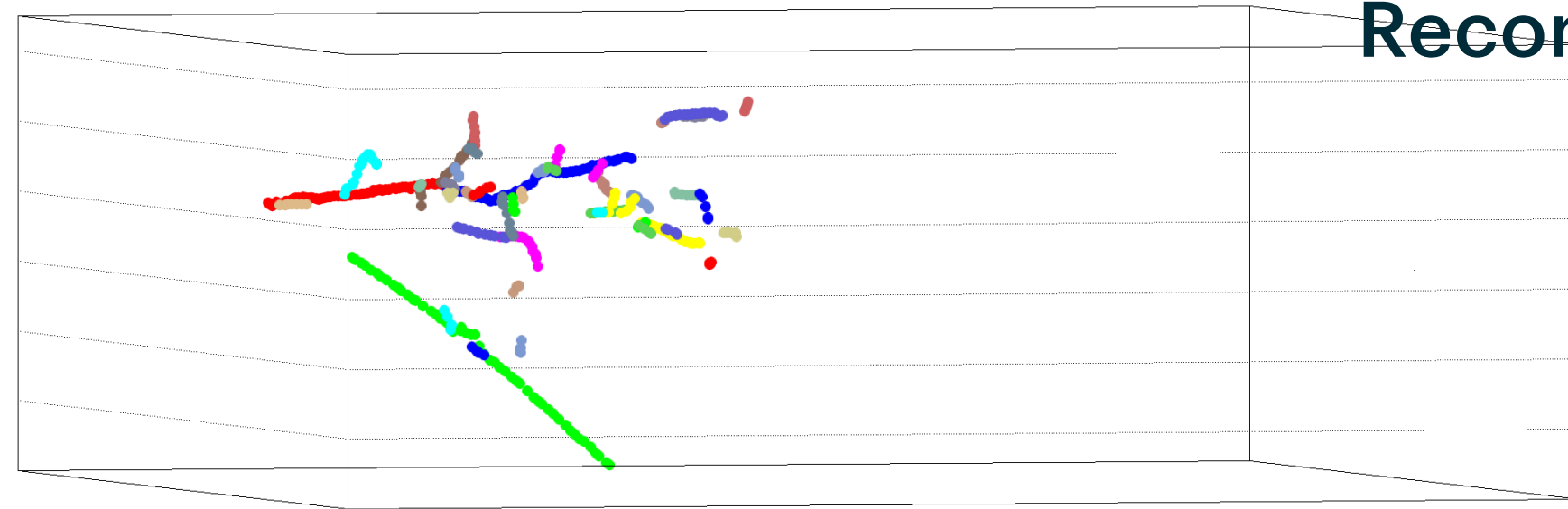


MPPC取付作業



PCB

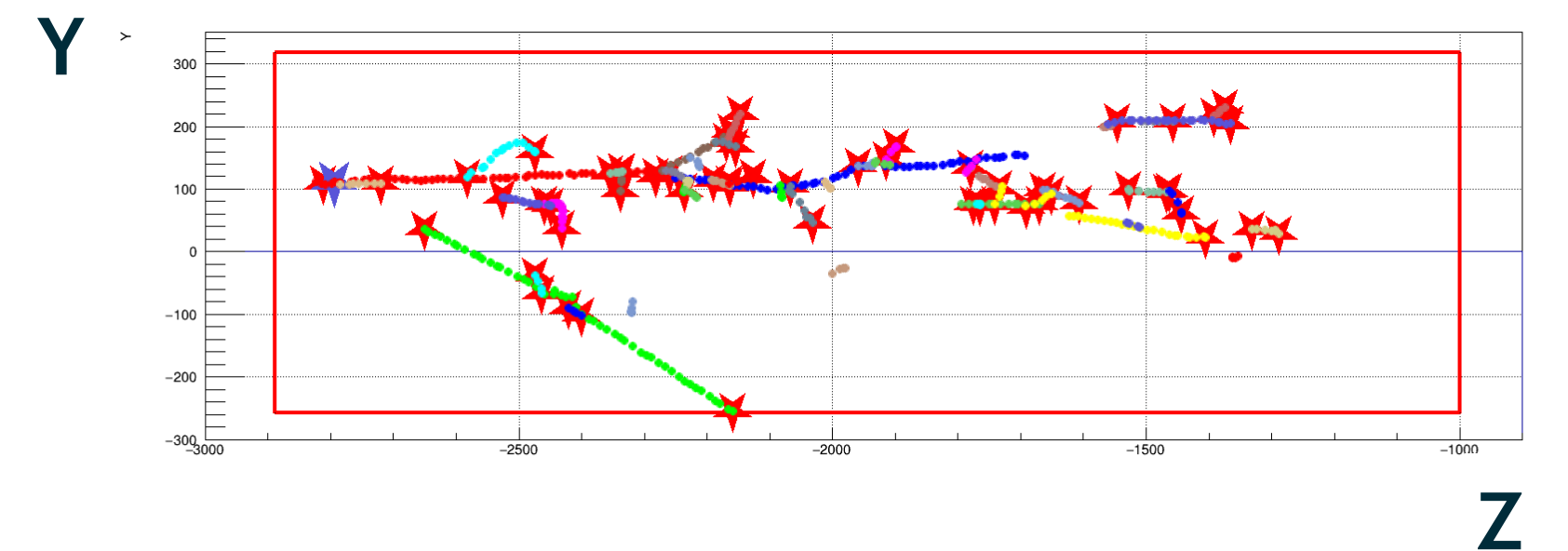
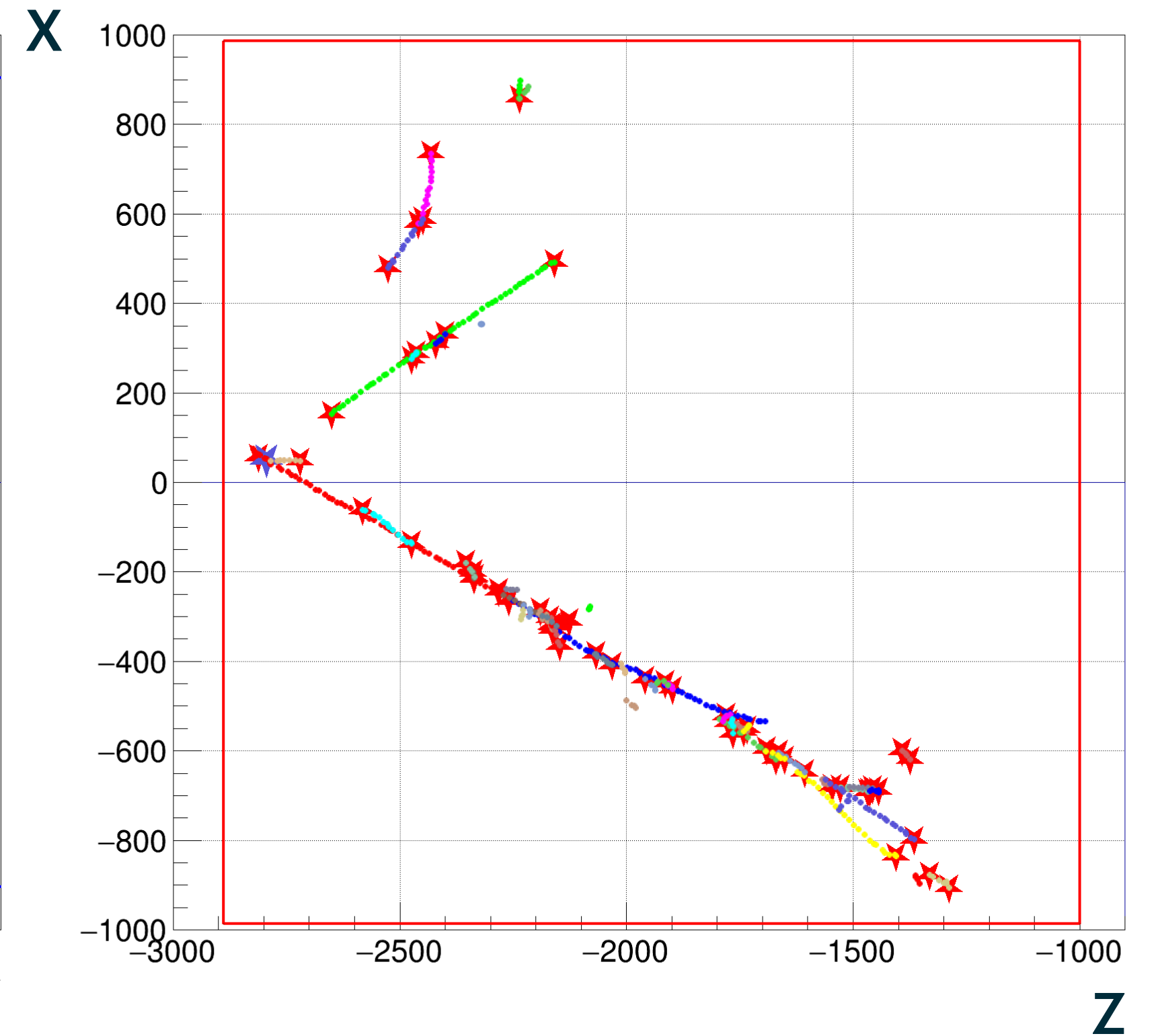
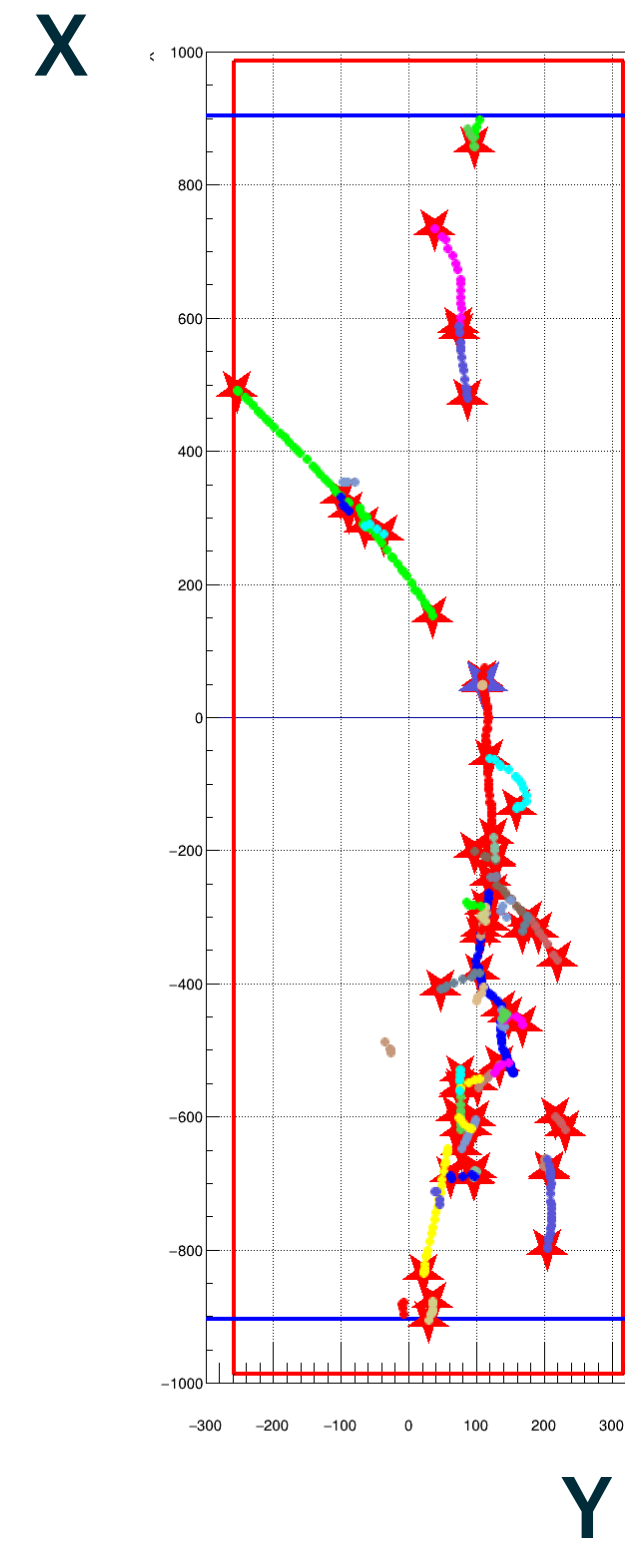
iPad



Reconstructed ν_e event

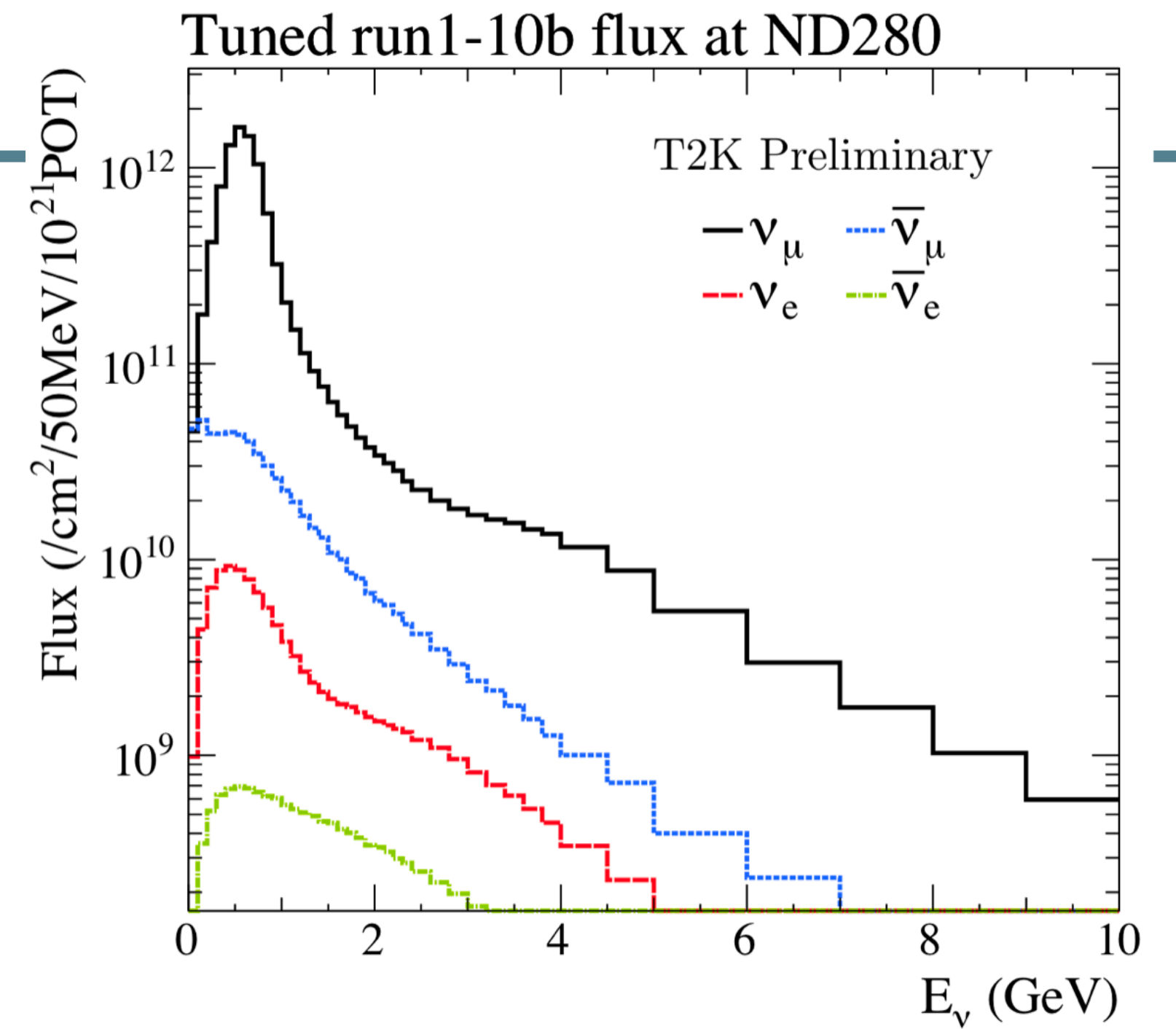
ν_e SELECTION

- Overview
- Selection steps
- Vertex selection
- Vertex reconstruction

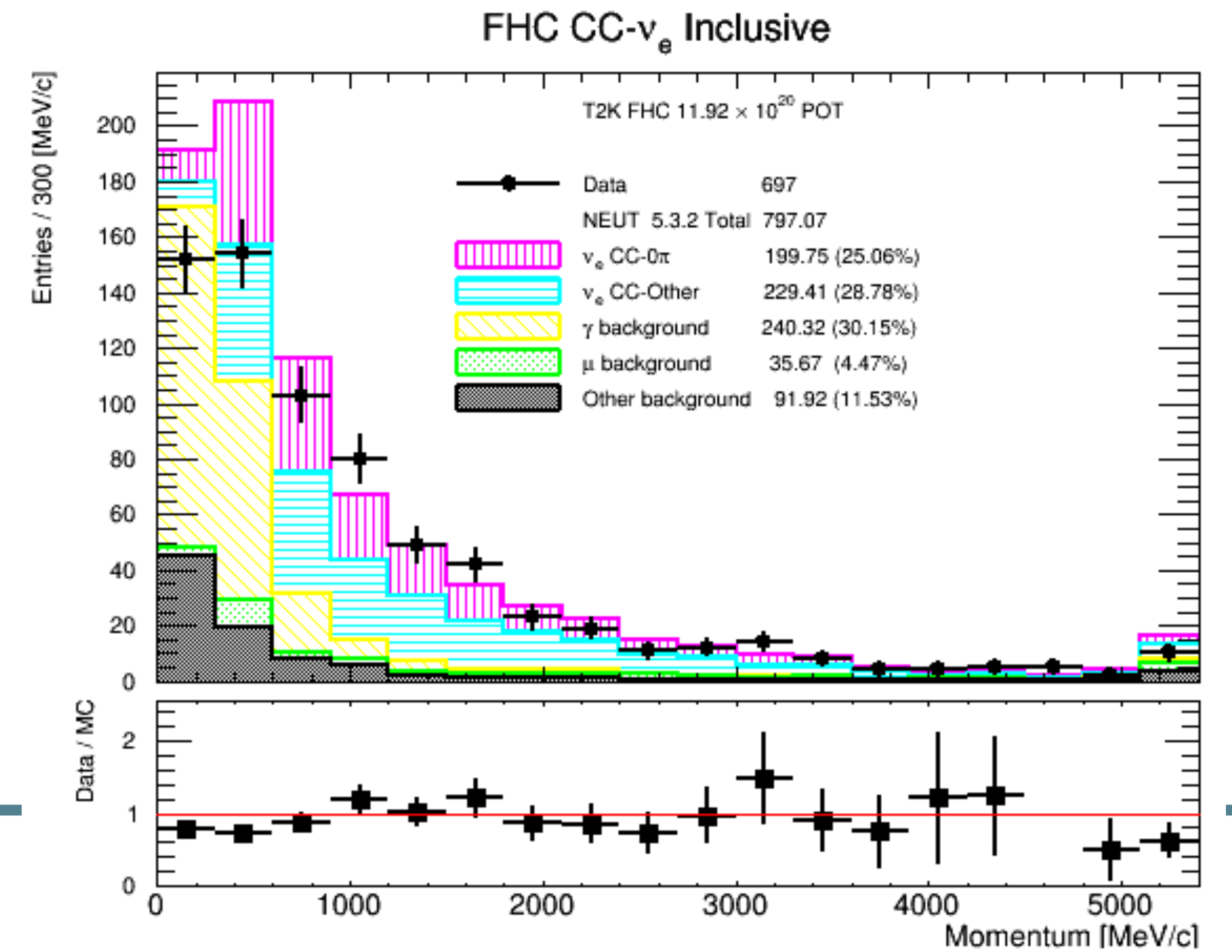


ν_e SELECTION

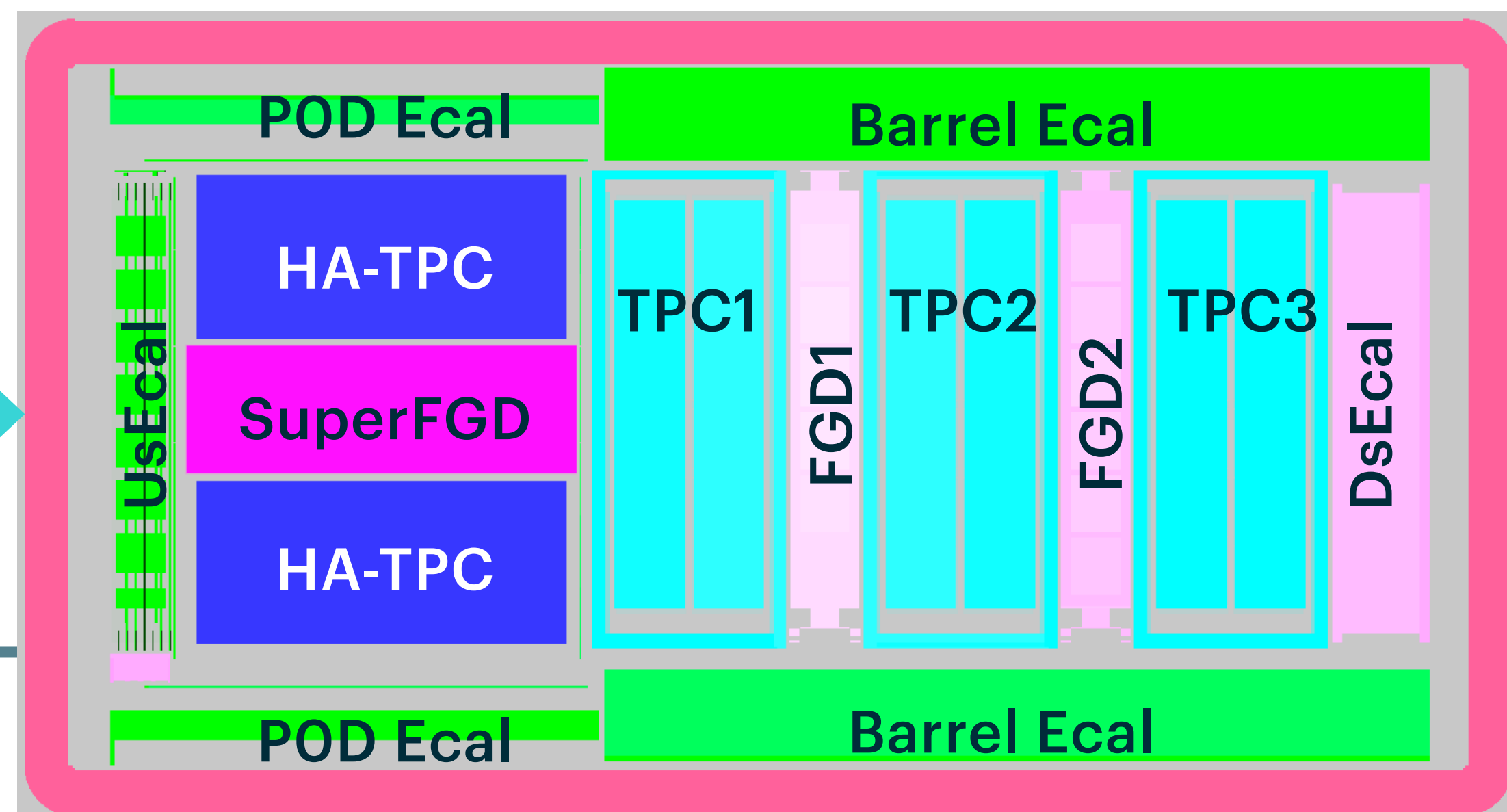
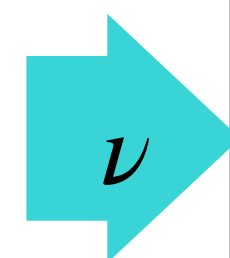
- ν_e 反応断面積由来の系統誤差削減
- NDでの ν_e 直接測定
- ν_e 測定の難しさ
- 統計量が ν_μ に対して1%程度
- ニュートリノ反応等による γ, μ の除去
- Upgrade detectorを利用した ν_e selectionを開発中



ν_e selection with FGD&TPC



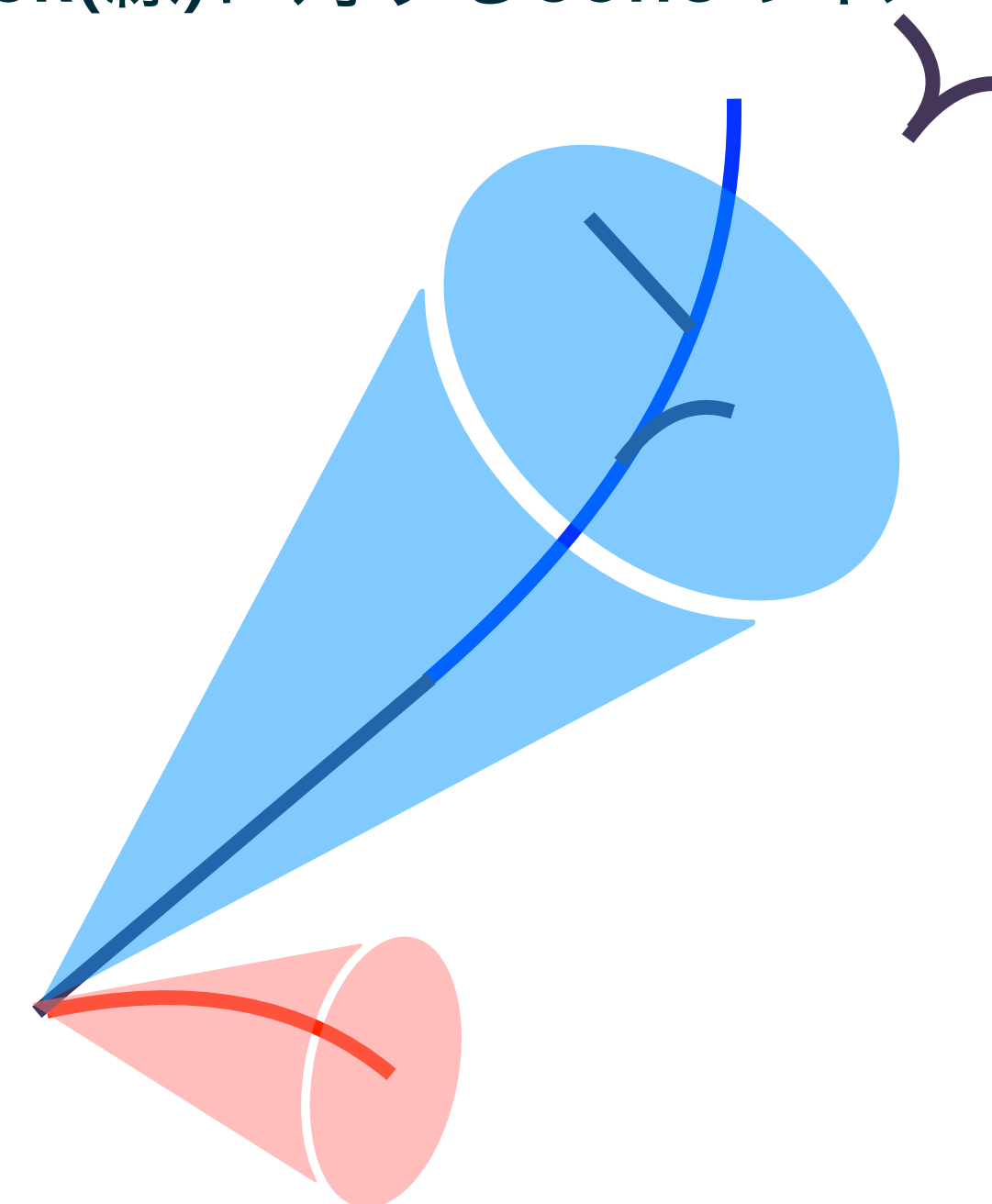
SELECTION STEPS



VERTEX SELECTION

- 正確にVertex(反応点)を選択することで
 - SuperFGD内eventの選択
 - 選択したvertexを下流の再構成や物理解析に利用
- Vertexを誤選択してしまうと
 - PIDのためのcone構築を間違えることによる影響
 - ① Event topologies
 - ② Particle identification
 - ③ エネルギー再構成

track(線)に対するconeのイメージ



NEUT

(Neutrino event generator)

- FHC(T2K neutrino mode)
- RHC(T2K anti neutrino mode)

Particle bomb

- 1つのvertexから複数粒子が発生するサンプル

➤ 使用するサンプル

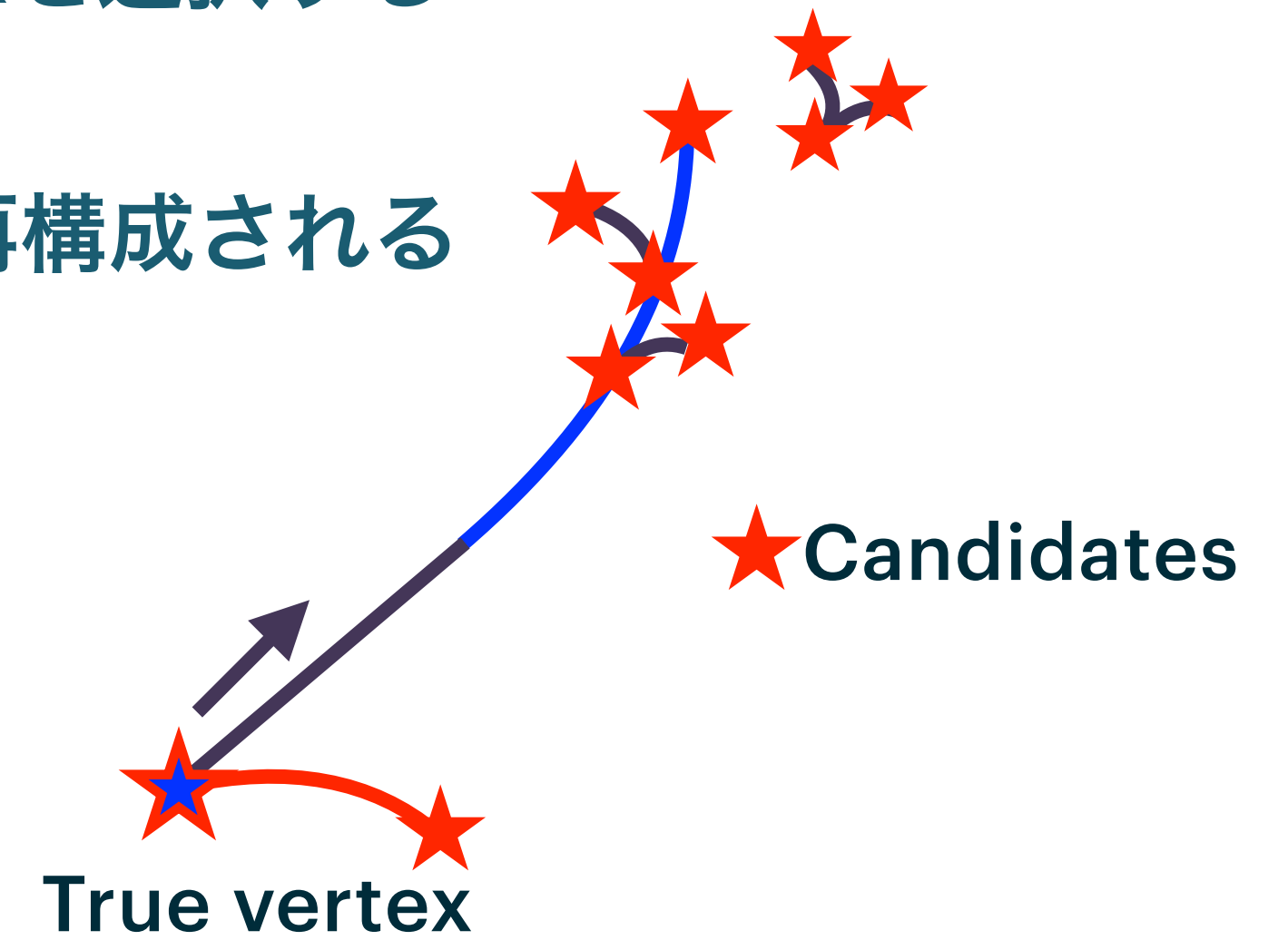
- **NEUT FHC** 5.0×10^{20} **POT(Proton On Target)**
- **e+p bomb** (ν_e **CCQE** と似た組み合わせ) **123000 entries**

VERTEX SELECTION STATUS

➤ ν_e selection では

➤ 他アルゴリズムで既に再構成された候補から反応点として1つのvertexを選択する

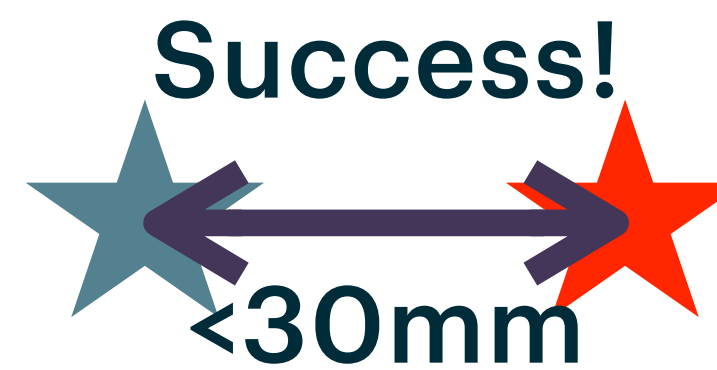
➤ (Vertex)候補:粒子飛跡の端や飛跡同士の分岐点などが候補として再構成される



➤ good vertex selectionの基準

➤ MC trueのvertexから30mm以内に選択されたvertexがあること

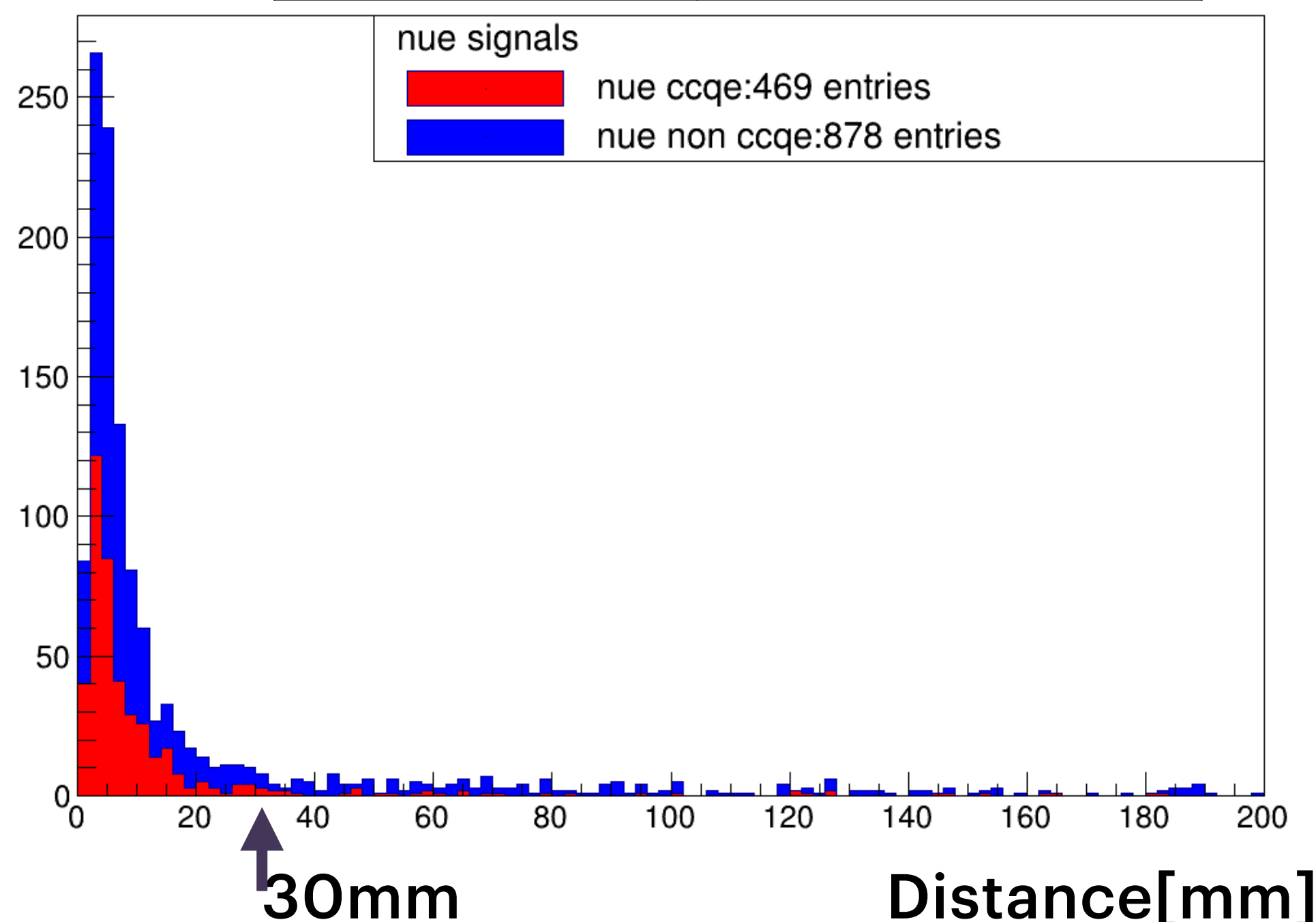
➤ 30mm ~ 数cube



SELECTED VERTEX RESULT

NEUT sample(ν_e CCのみ)

	Nue CC
Success	402 entries (85.7%)
Failure	67 entries
Total	469 entries



- 85%のvertexは正確に選択されている
- 15%程度の誤選択の原因
 - Miss-reconstruction
 - Vertex候補が正しく再構成されていない
 - Miss-selection
 - Vertex候補から正しく選択できていない

↓ e + p Bomb sampleで再構成されたトラックを調べると

- 全イベントのうち5~10%が正しく再構成されていない
- 再構成アルゴリズムの改善が必要

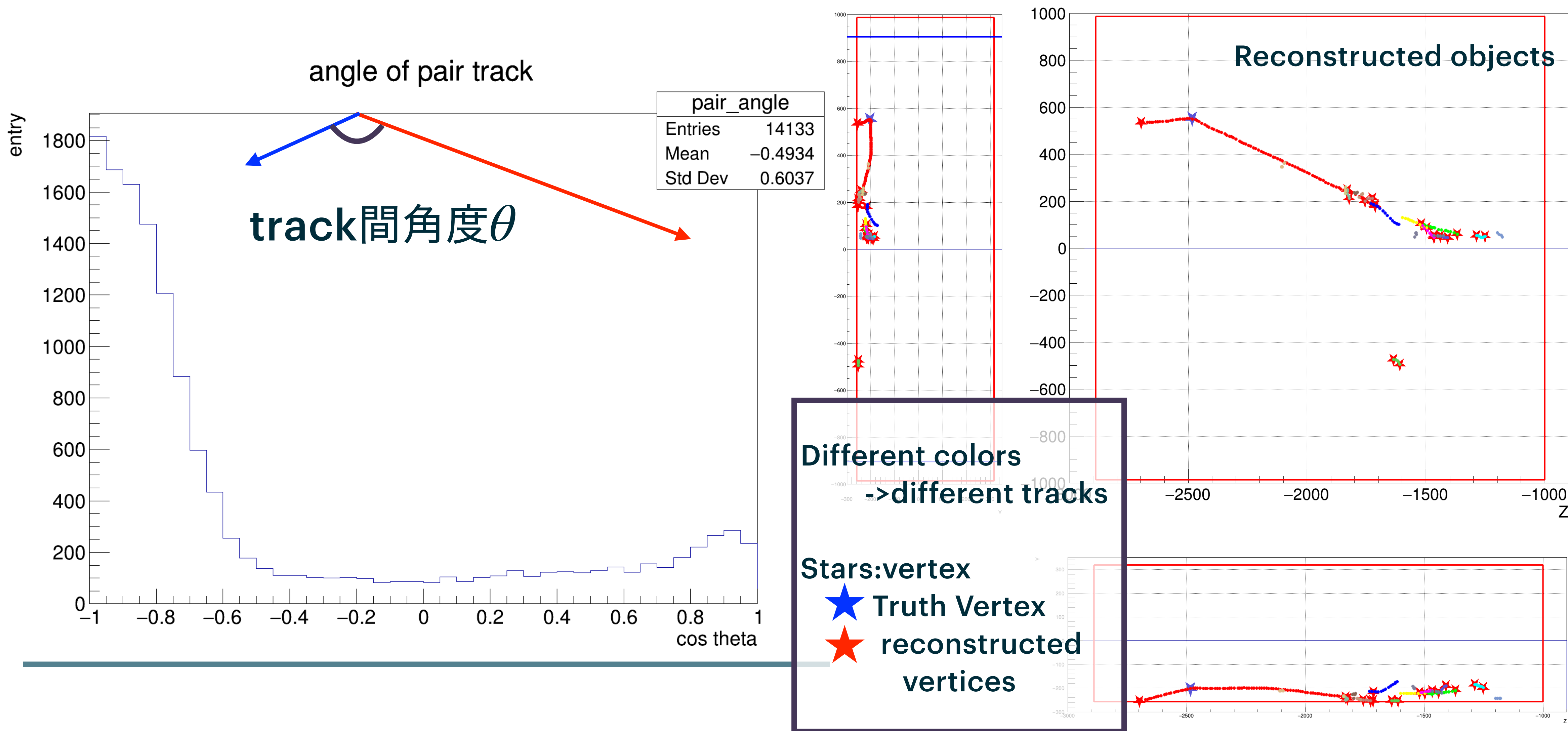
	e + p
Success	80 to 85%
misreconstruction	10%
misselection	5 to 10%
Total	100%

Vertex selection failure

MISS RECONSTRUCTION EVENT

➤ e+p bomb sampleでvertexが再構成されていないイベントの多くがtrack同士の角度が大きい

➤ electron, proton track同士が分割されていない→1粒子のtrackとして認識されている

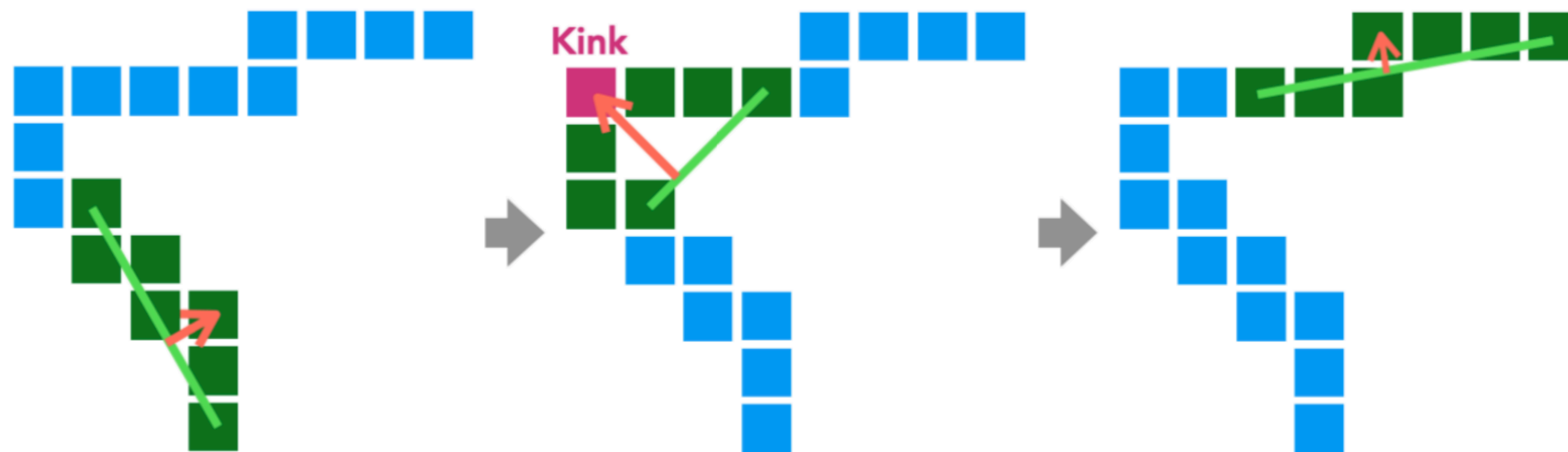
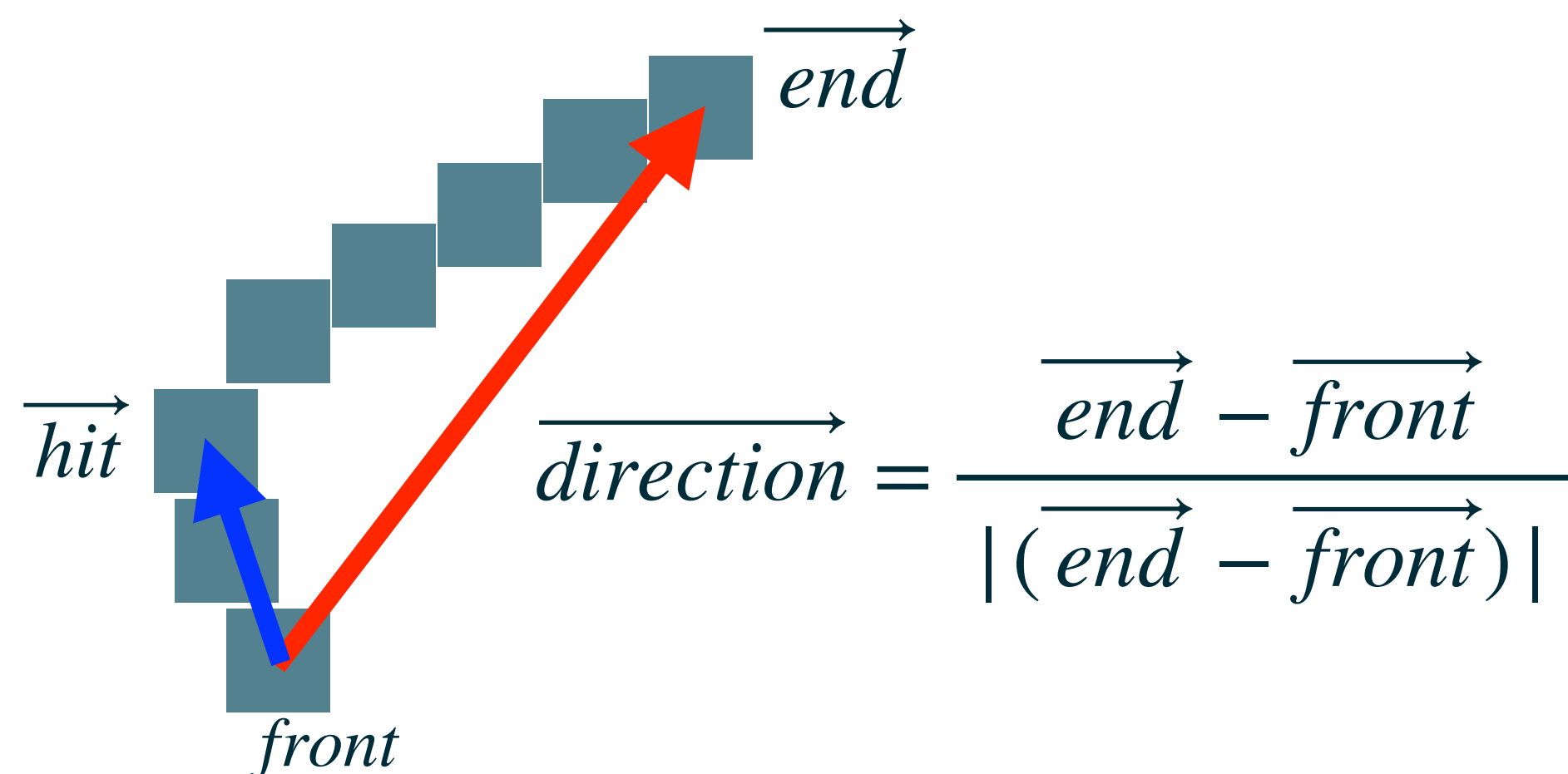


KINK STEPS

➤ Trackの分割アルゴリズム→kink finding

➤ つながっている全てのhitの集合から分割点を探索するアルゴリズム

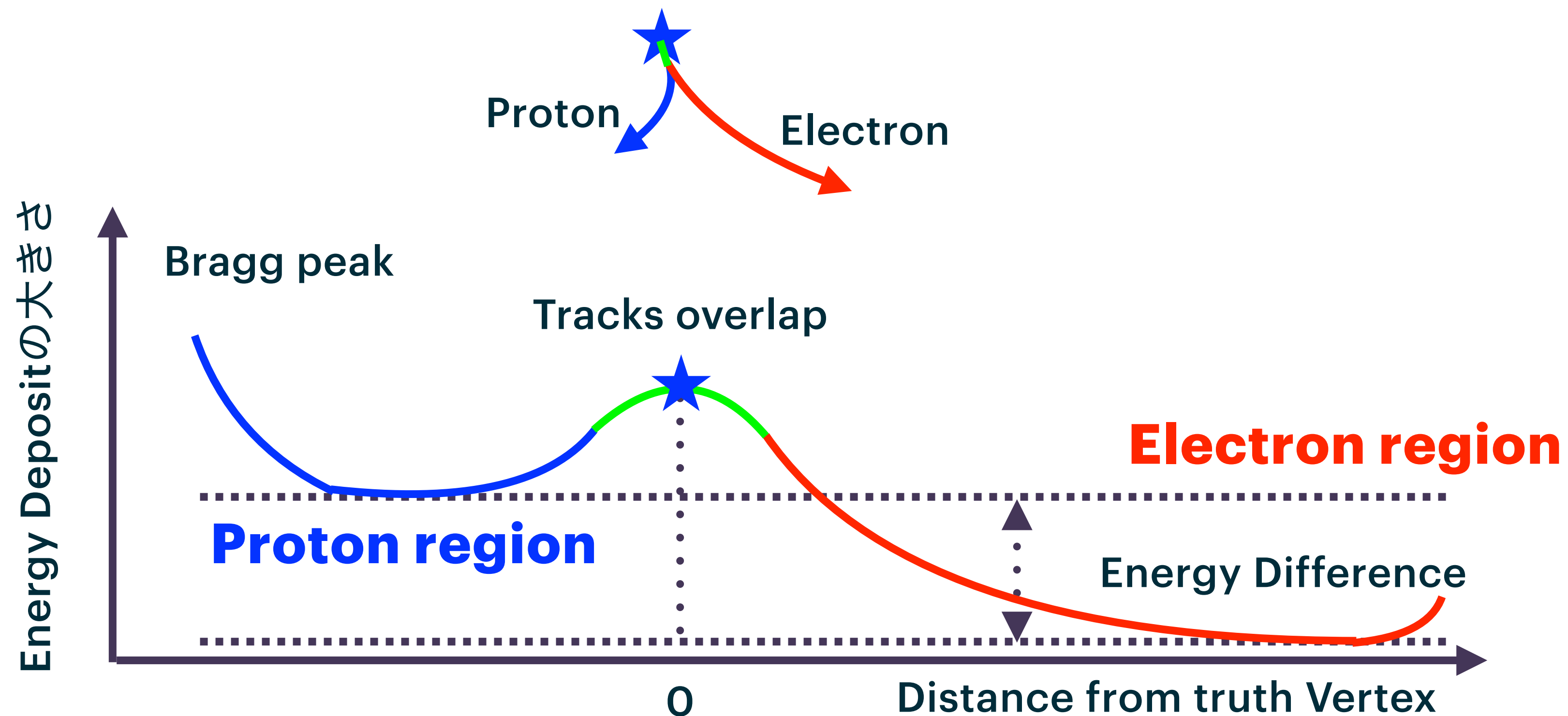
- 8点ずつの単位でスキャンを繰り返し、最初と最後の点を結ぶ直線から各点の距離(deviation)を計算する
- deviation > 2 cmの点で分割される→2 track間の角度が大きいものへの感度が低い



$$(\text{deviation}) = |(\vec{hit} - \vec{front}) - (\vec{hit} - \vec{front}) * \vec{direction}|$$

VERTEX RECONSTRUCTION USING EDEPOSIT INFORMATION

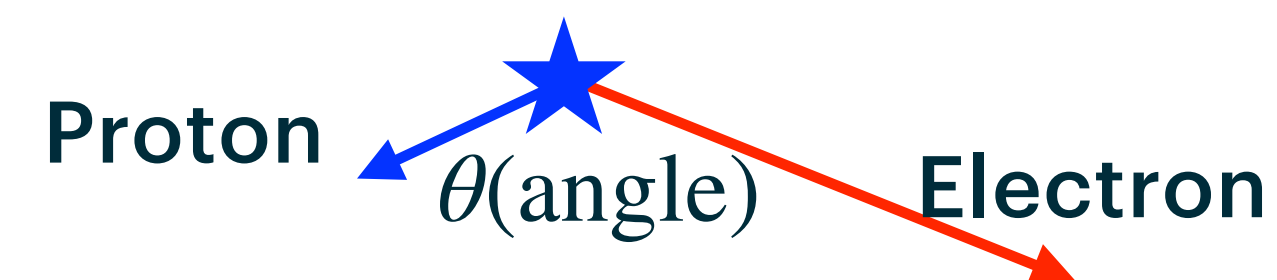
- electronとprotonのEDeposit(dE/dx)の違いからvertexを探索できる可能性
- EDeposit(dE/dx)はelectronで小さくprotonで大きい



Ideal Energy Deposit
Truth Vertex is $x=0$ (For simplicity)

EDEPOSIT FIT

➤ 2 track間の角度が大きい場合、track同士のoverlapが少ないため



➤ EDepositの違いをsigmoid関数でフィッティングできる

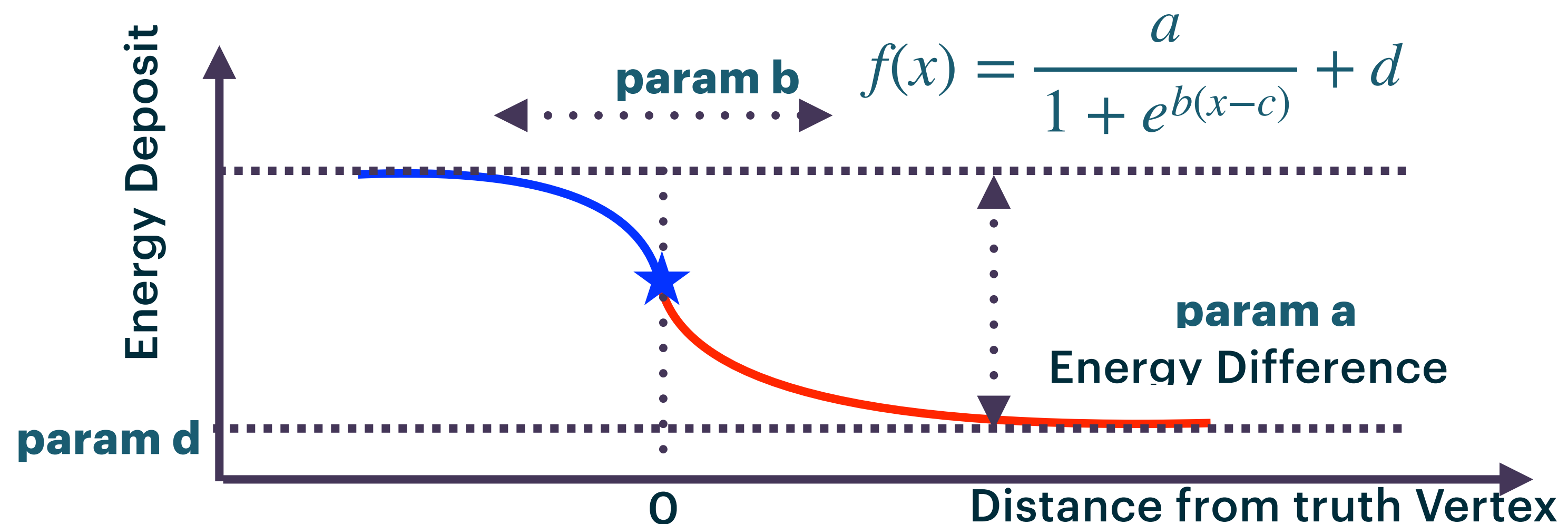
➤ Parameters

➤ a~protonとelectronのエネルギー差

➤ b~vertex周りの変化率

➤ c~Vertex position

➤ d~Offset



Fitting結果の期待される性能として

① 1粒子track,2粒子trackの判別

➤ 誤分割防止

② Fitted vertexの精度

➤ 0付近にfitされるべき

VERTEX IDENTIFICATION

Fit result

a-value(エネルギー差) < 100 p.e.

or

|b-value(変化率)| < 0.025

or

|c-value(vertex position)| > 500mm(EMshower region)

Some values need to be improved

True

One particle

➤ Fitted by

$$f(x) = \frac{a}{1 + e^{b(x-c)}} + d$$

➤ a~Energy difference

➤ b~Slope around vertex

➤ c~fitted vertex position

➤ d~Offset

False

Two particles

Identify c-value as a vertex

or

Find vertices in a limited range

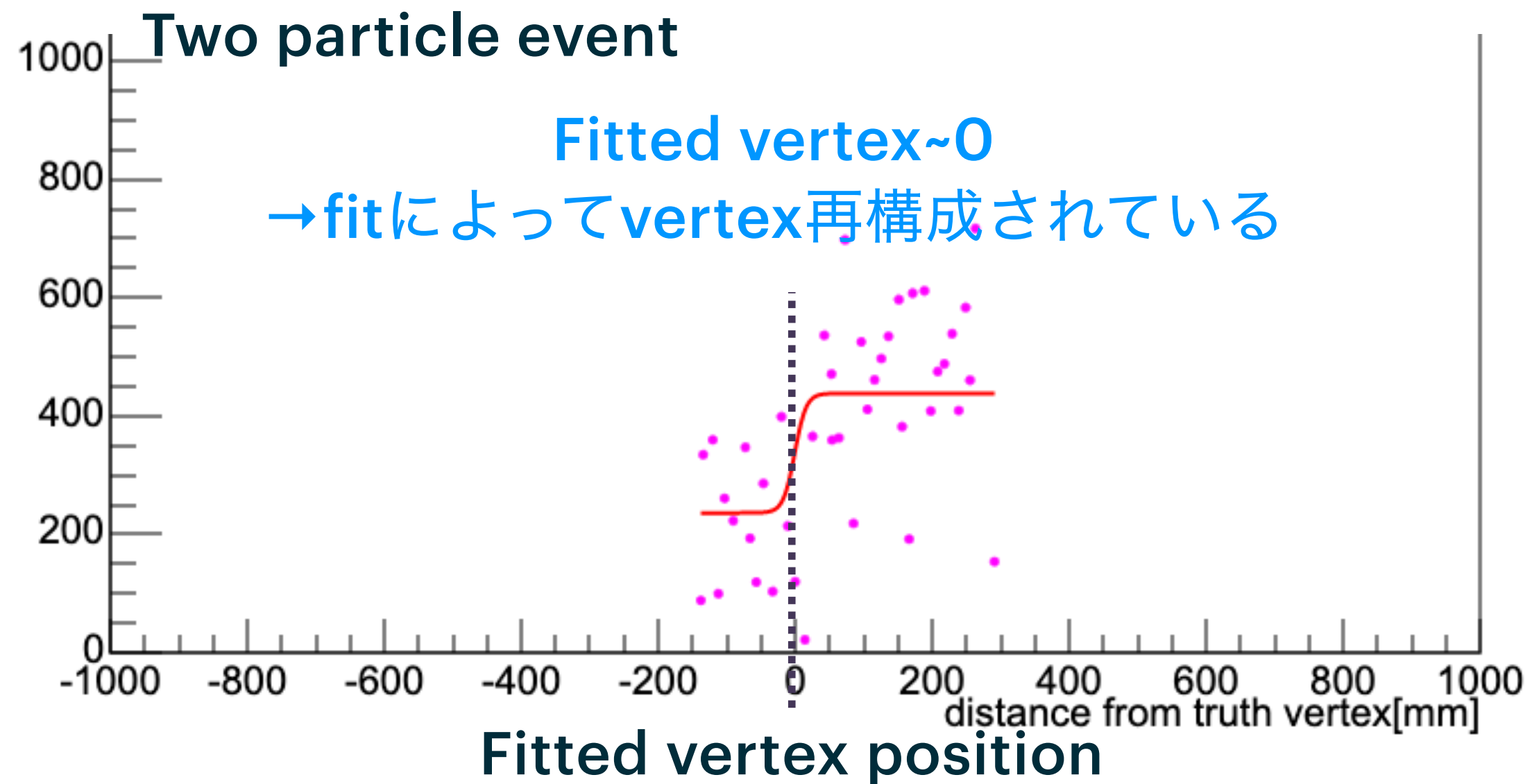
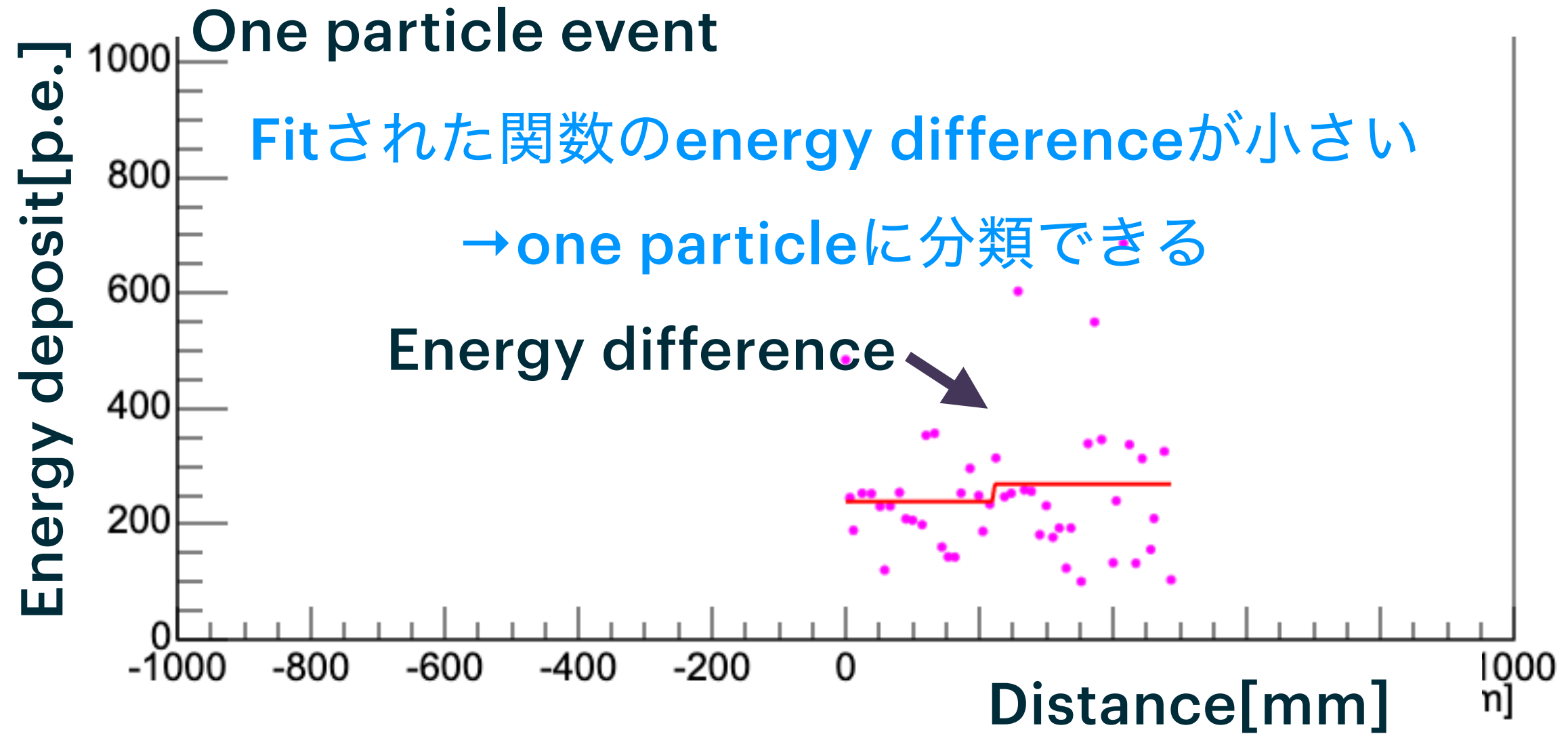
(Use lower the threshold)

COMPARING FIT RESULT

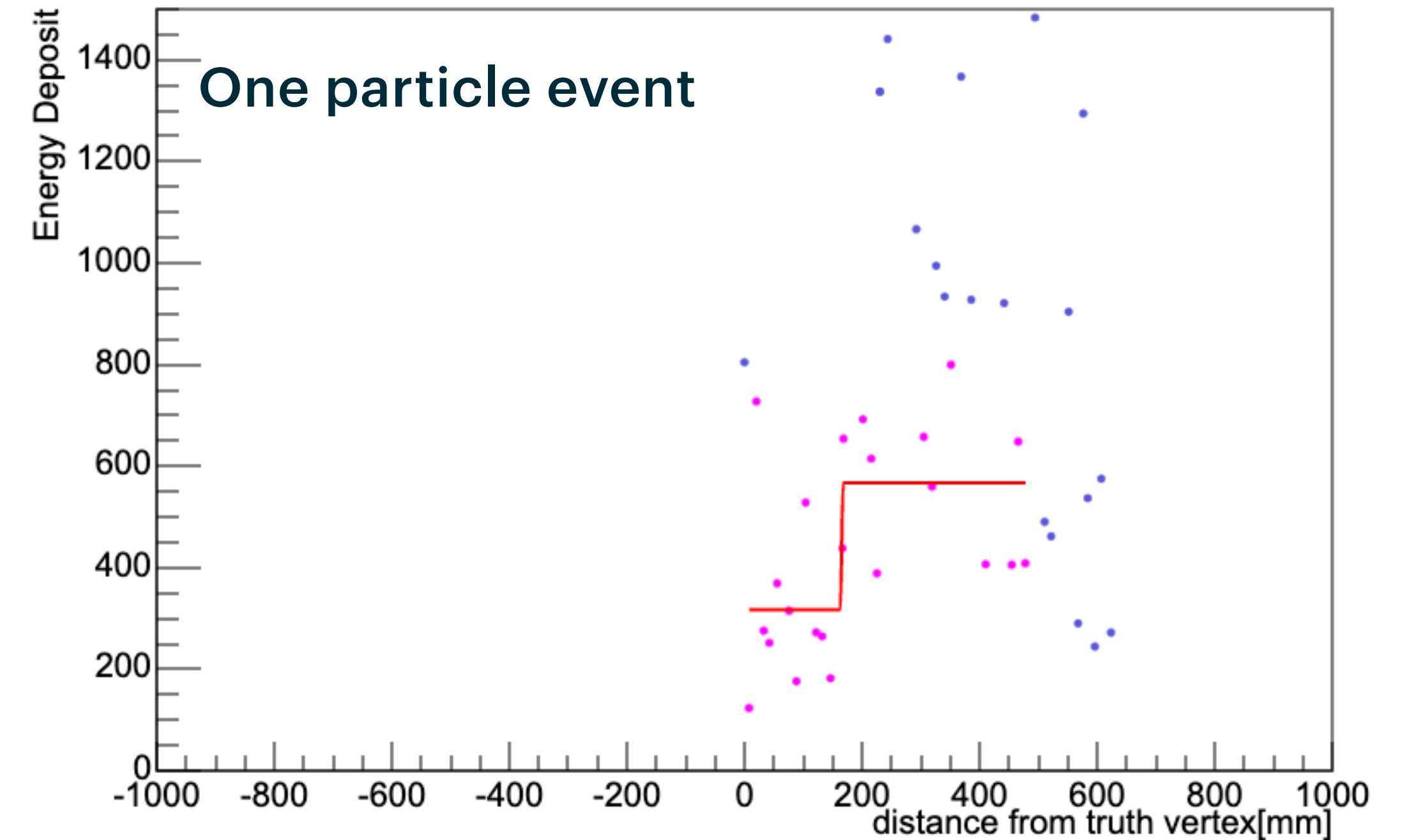
- **Energy Deposit** を利用した**Vertex**再構成精度の確認のため、**2種類**の**event**に**fitting**を適用した
 - **vertex**が再構成されている**event**
 - **1つのtrack**には**1粒子のみ**が含まれる(**one particle event**)
 - **vertex**が再構成されていない**event**
 - **1つのtrack**に**2粒子**が混ざっている(**two particles event**)

FIT RESULT

fitting成功パターン



fitting失敗パターン



Fitされた関数のenergy differenceが大きい

→ two particleに誤認識されてしまう

Fitted vertexも0付近にないので不適

VERTEX IDENTIFICATION RESULT

	Identified as one particle	Two particles
One particle events	30.5%	66.3%
Two particles events	38.2%	48.6%

Result of the two particles ↓

	Distance < 50 mm
One particle events	33.8%
Two particles events	45.2%

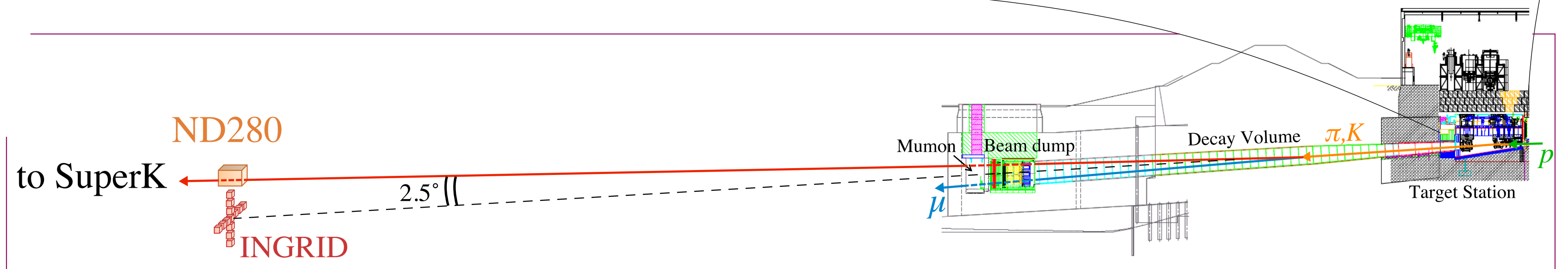
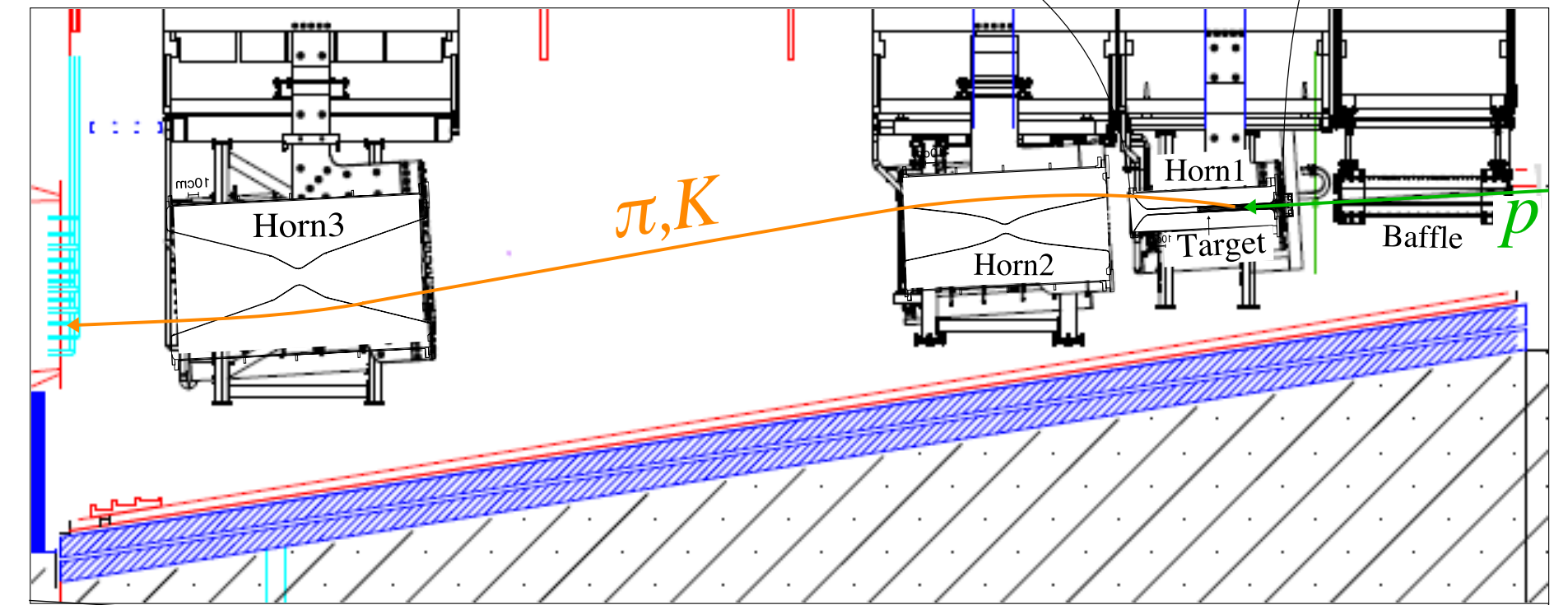
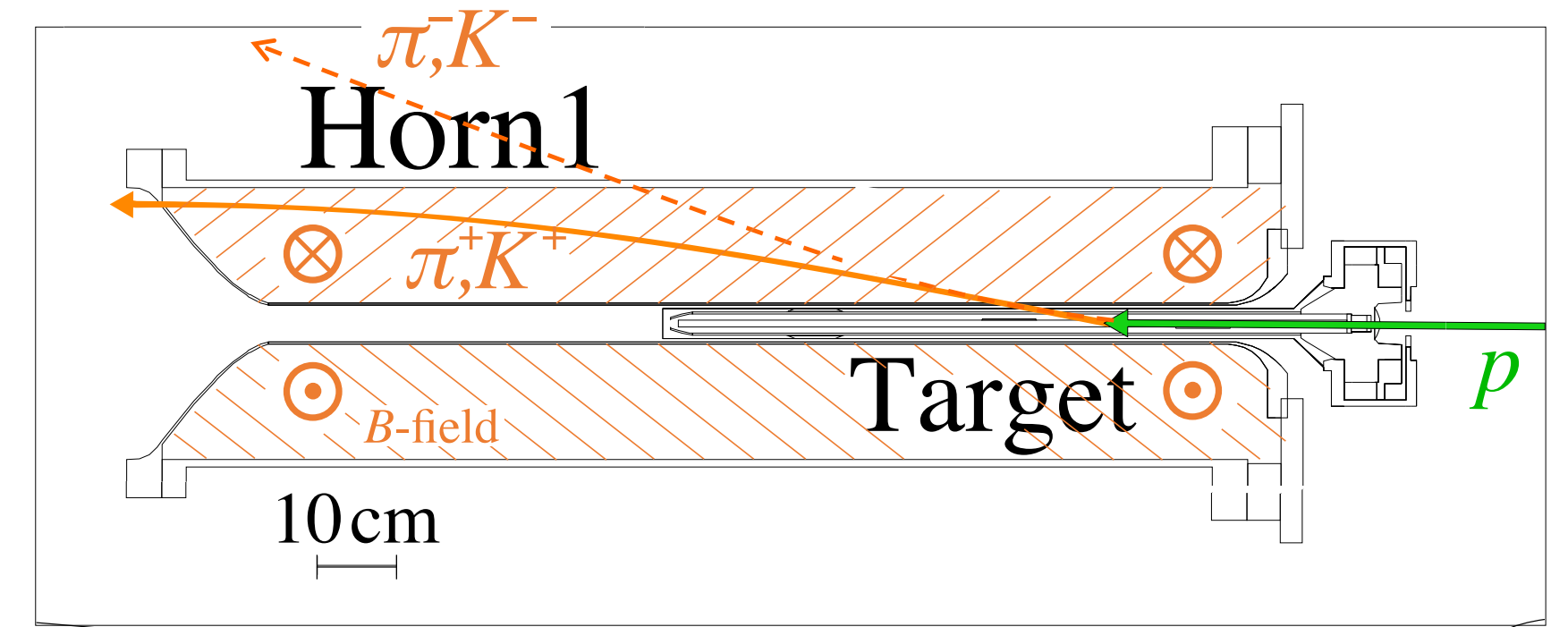
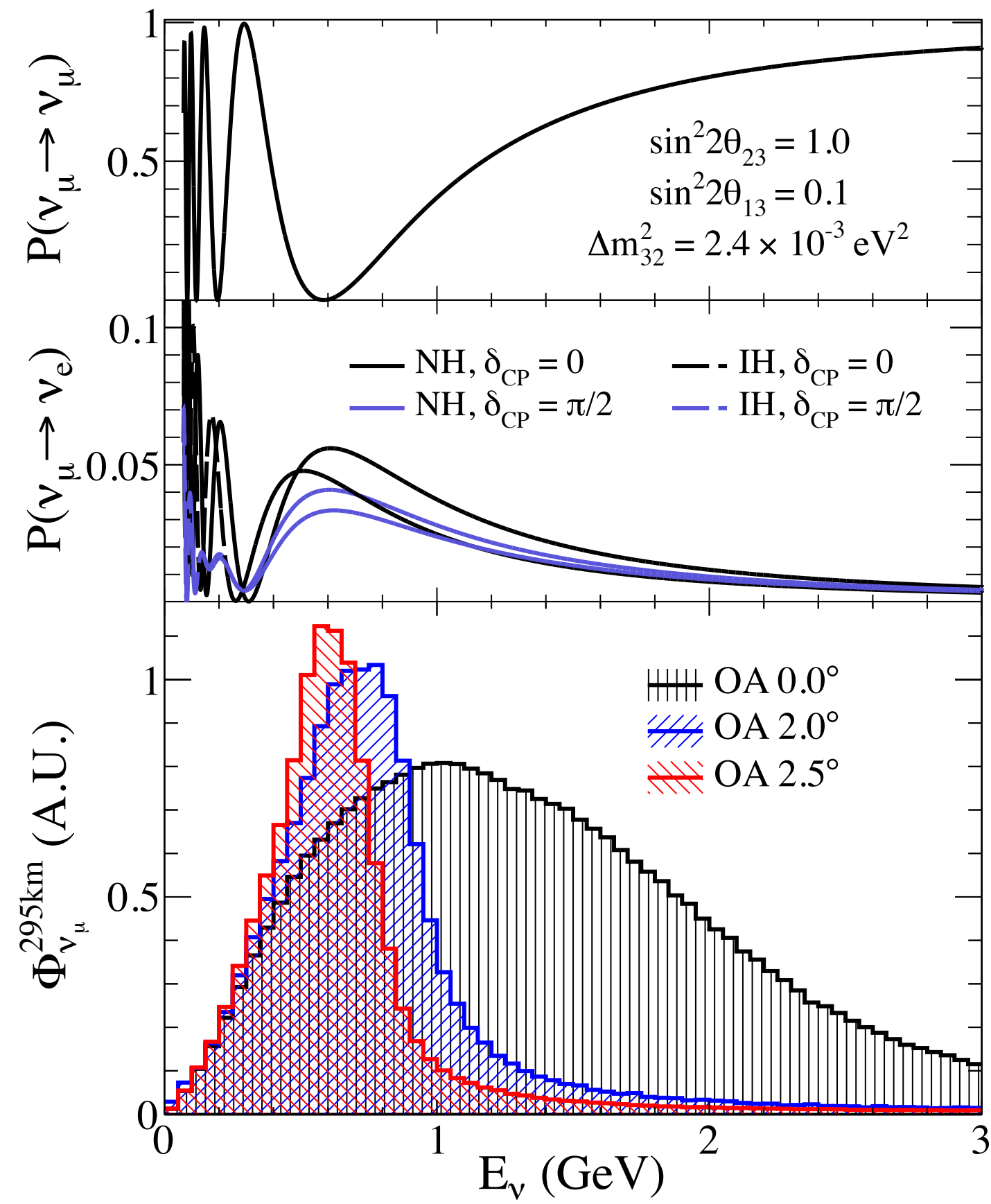
- Vertexが再構成されていないeventに対して **Energy deposit**を利用すると約**20~25%**の割合で **vertex**を再構成することができる
- 全eventのうち再構成できていないeventは約**10%**
- **2~3%**程度**vertex**再構成率の上昇が見込める
- 誤認識率が大きいため,**fitting**方法などの見直しが必要

SUMMARY

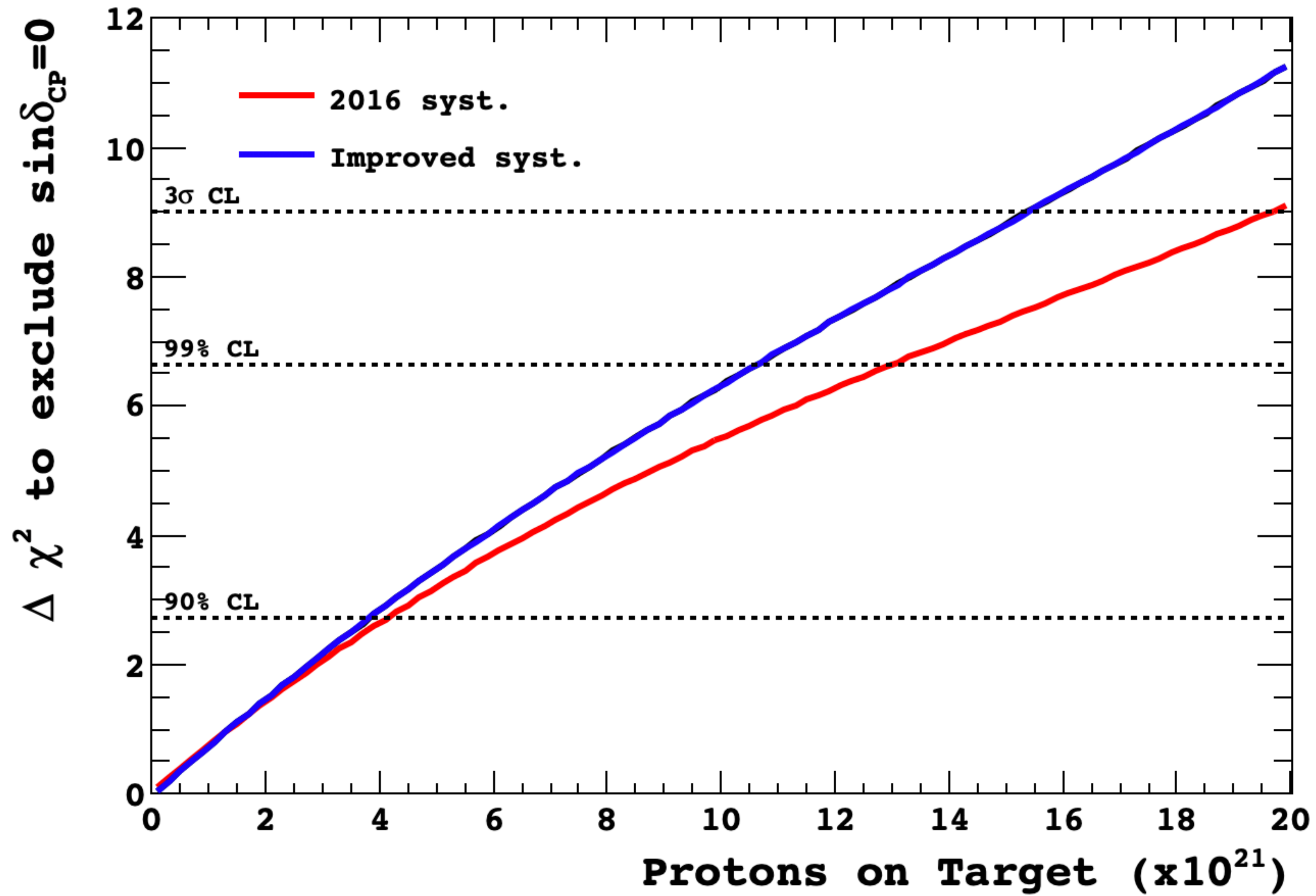
- **T2K実験では $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ の振動を観測しており、今後より感度の高い測定のために様々なupgradeがされる**
 - **Near detector upgradeによるニュートリノ反応の理解**
- **ν_e selection では約15%のeventにおいてvertexが誤選択されている**
 - **10%程度がvertexが正しく再構成されていないことが原因だと思われる**
- **Energy deposit fitting**
 - **Electron&proton のEnergy depositの違いを利用してvertexの探索を試みた**
 - **Fittingによってvertexの再構成率が現状で2~3%向上することができる**
 - **誤認識率が高いためfitting方法などの改善が必要**

BACKUPS

J-PARC NEUTRINO BEAMLINE, BEAM ENERGY

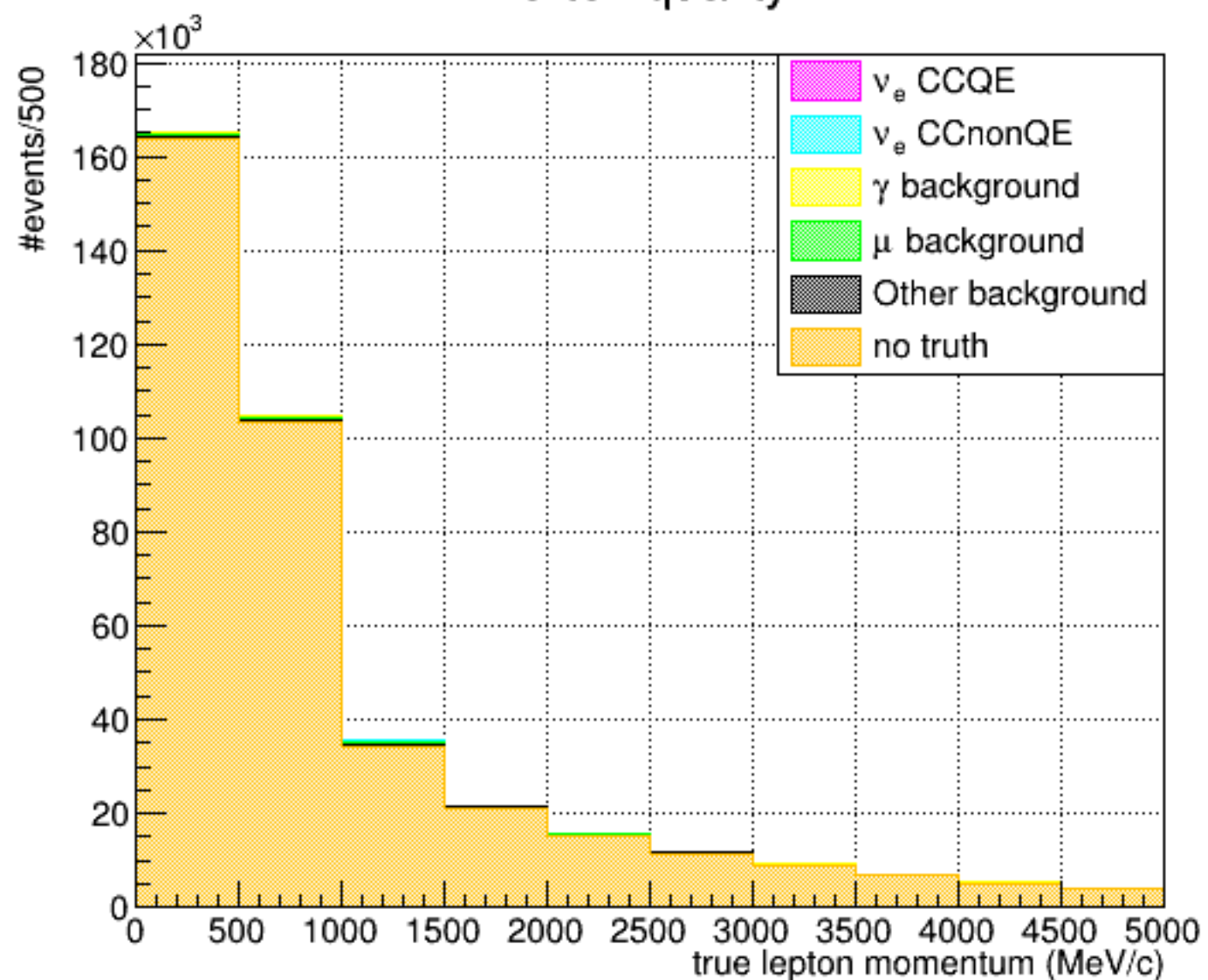


SENSITIVITY-POT WITH SYSTEMATIC

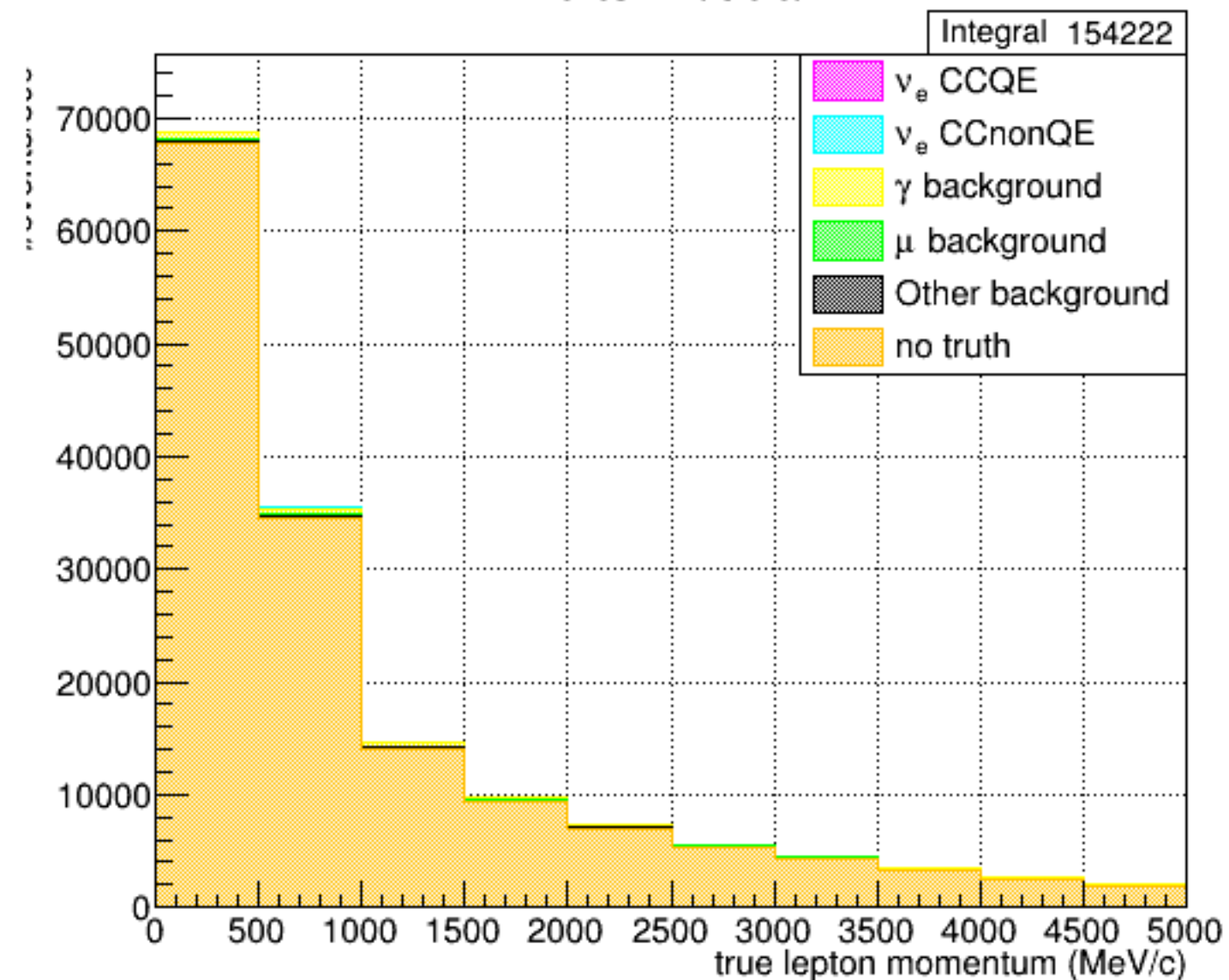


NUE REACTION

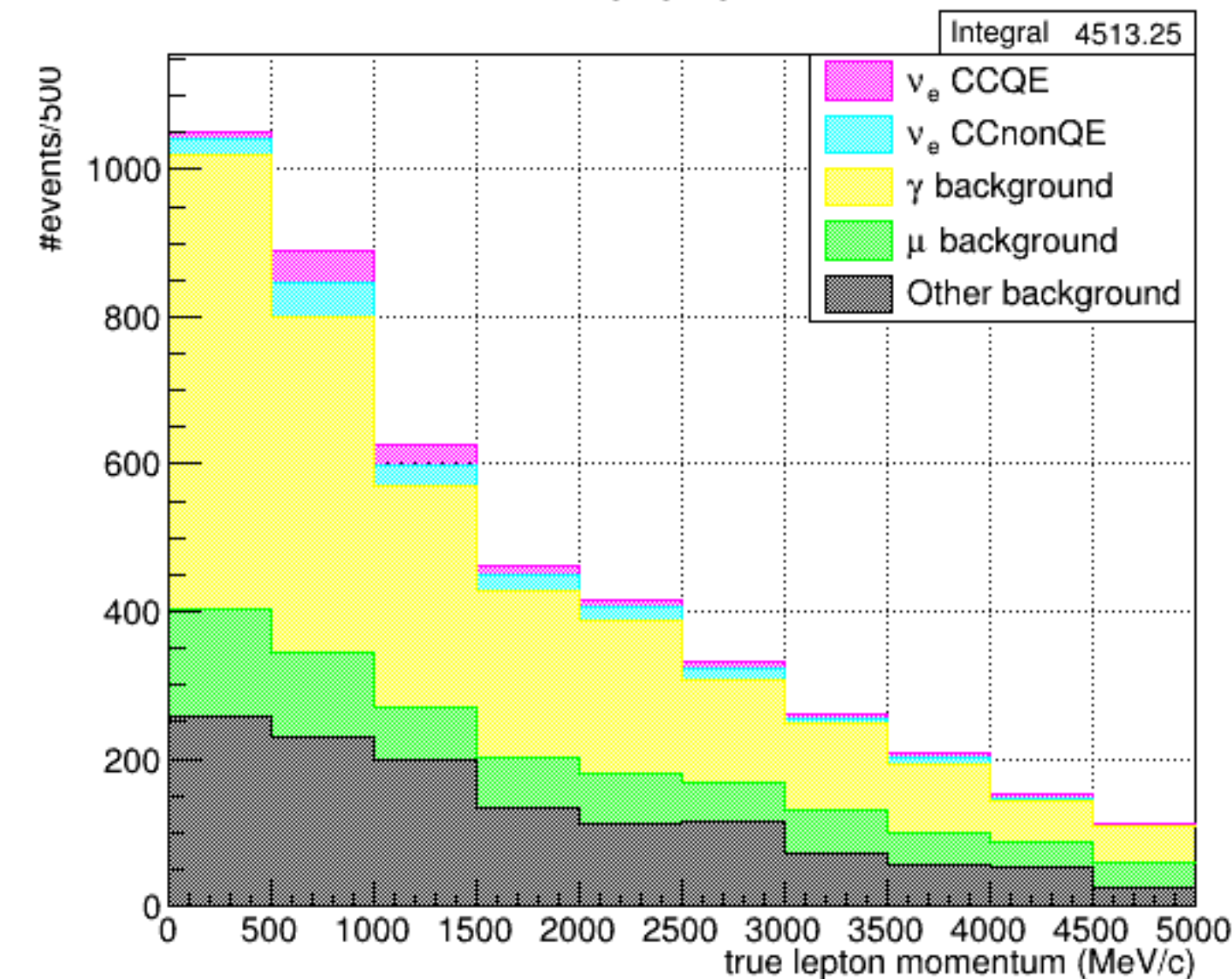
vertex quality



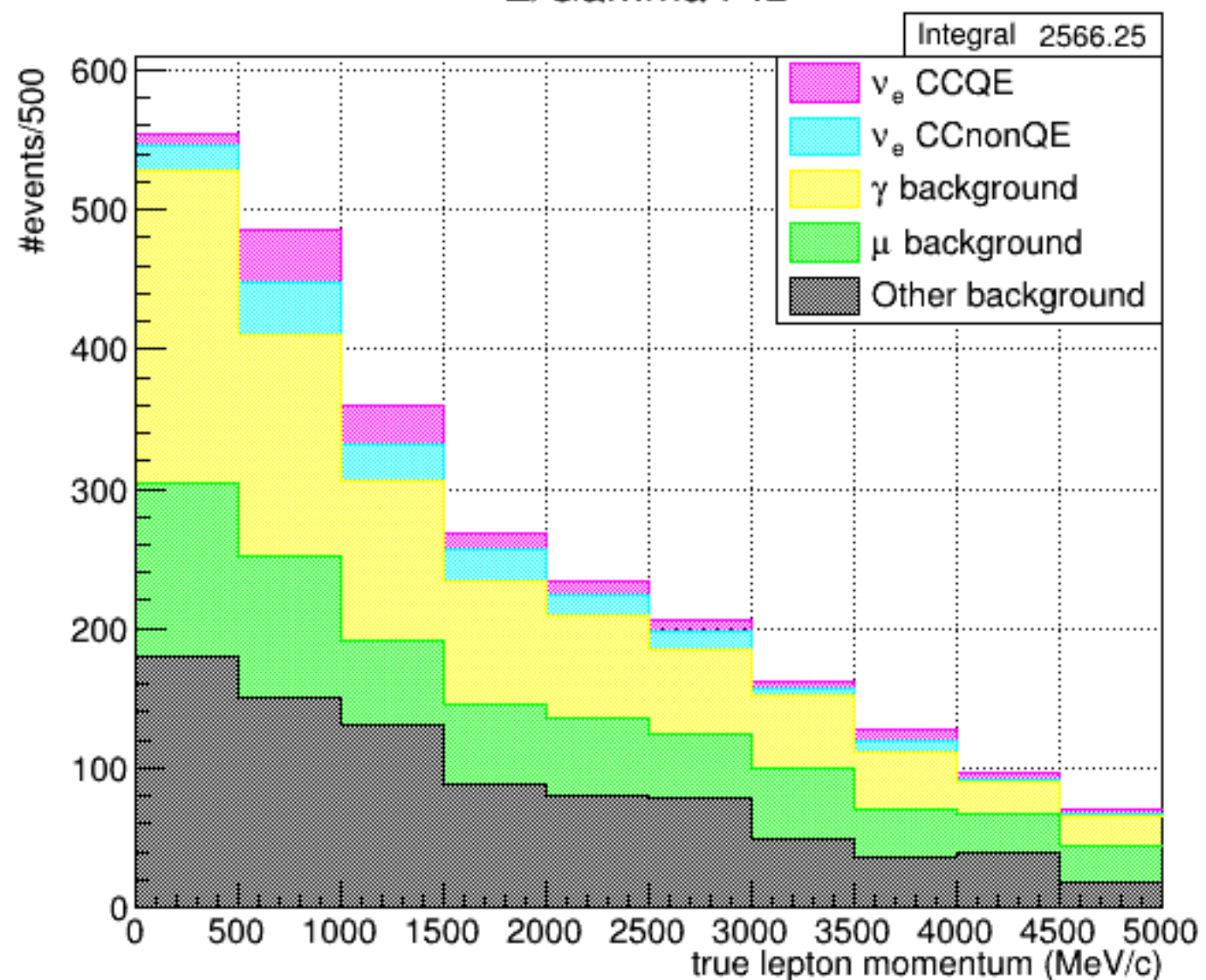
vertex fiducial



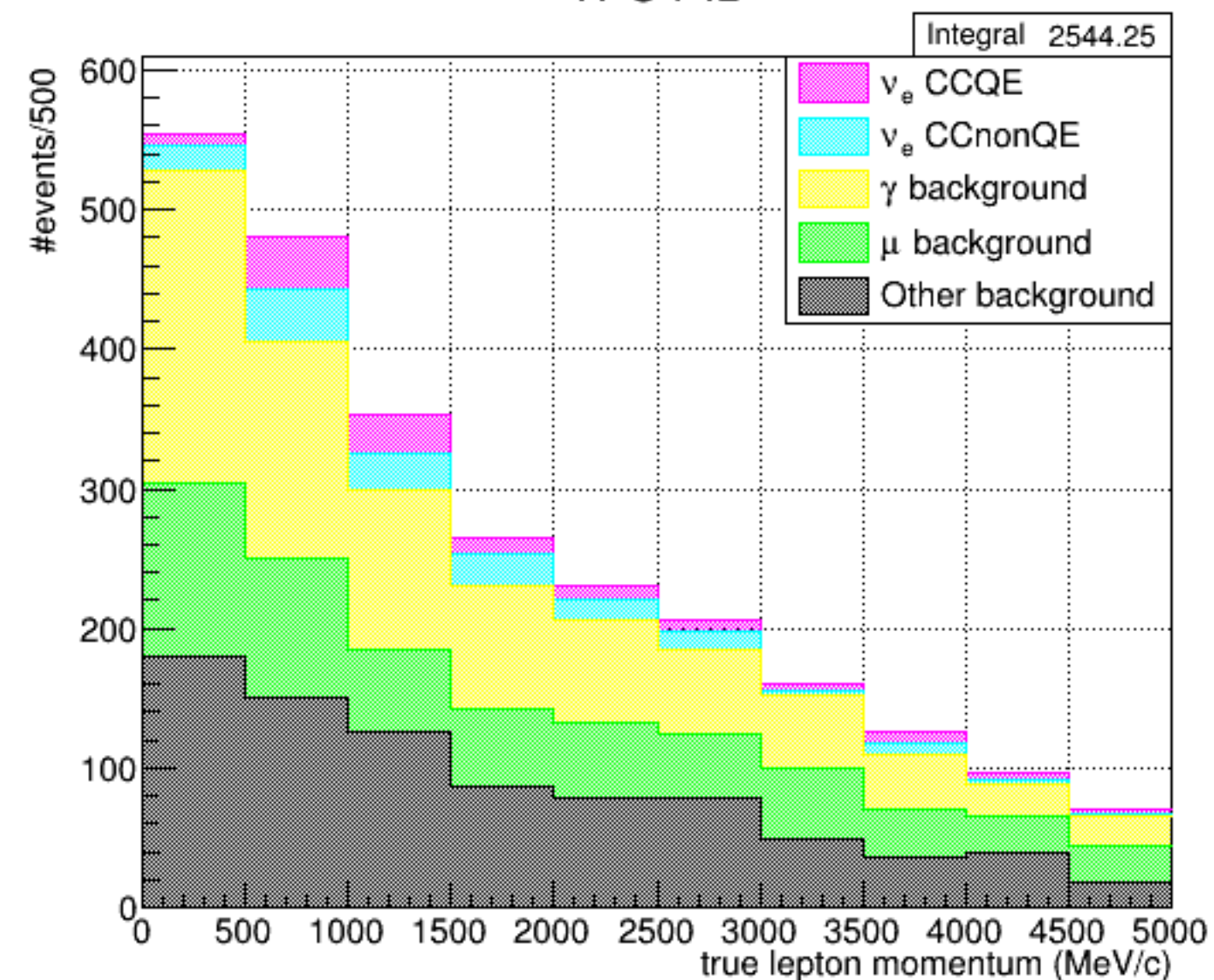
EM shower PID



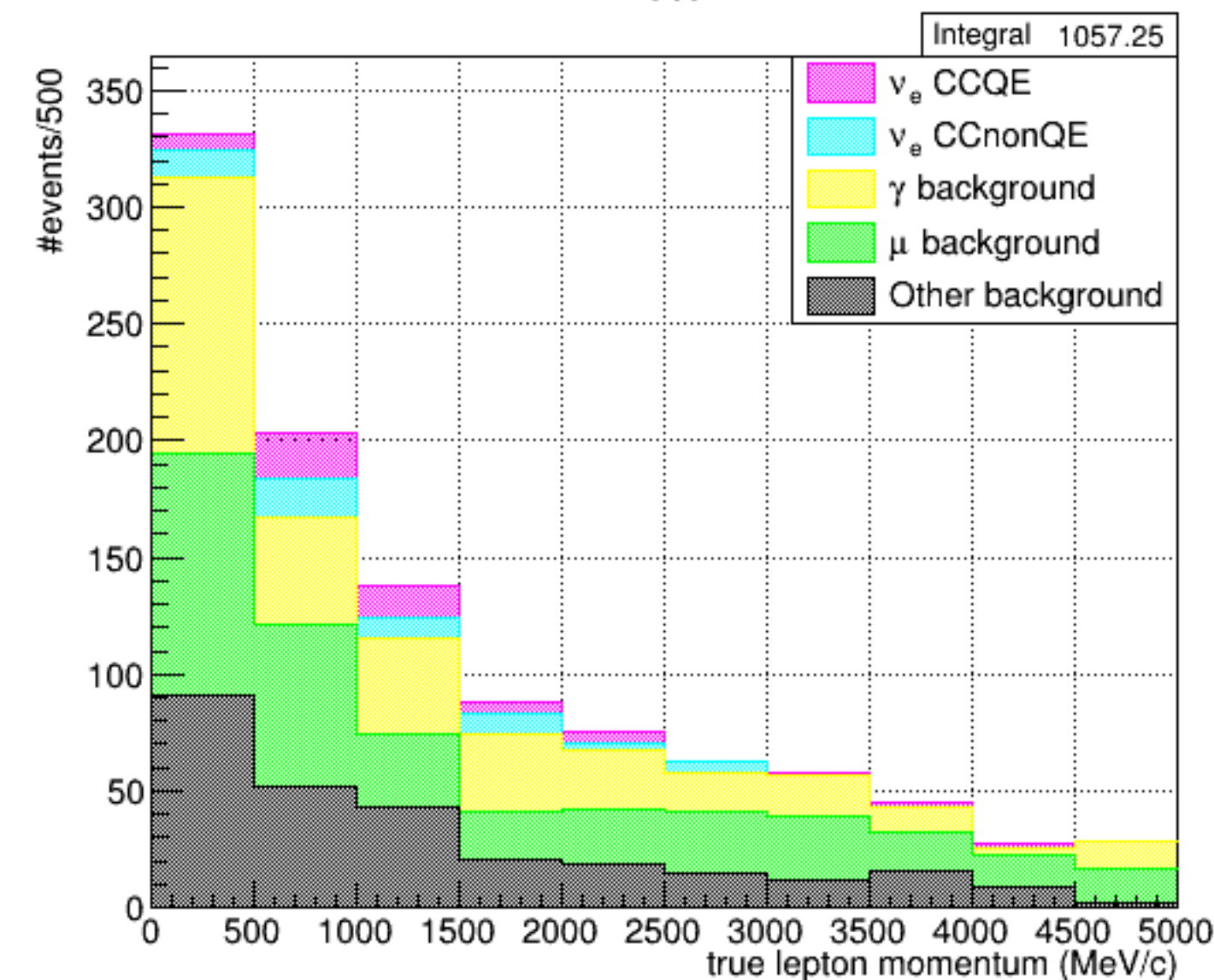
E/Gamma PID



TPC PID



veto



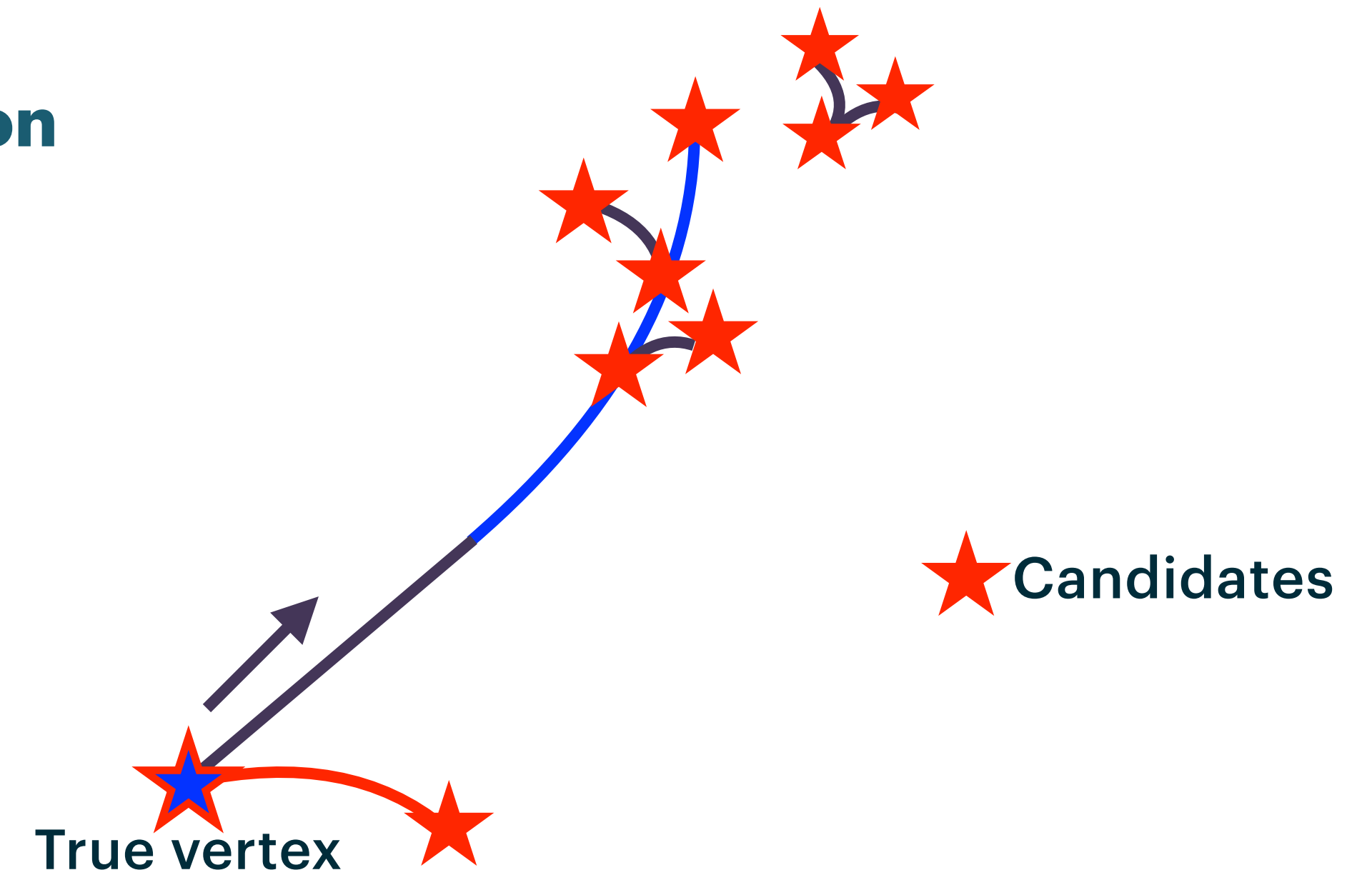
VERTEX SELECTION STEPS

➤ In vertex selection steps, a vertex is selected from reconstructed vertex candidates.

➤ Candidates are vertices object reconstructed by sfgrecon

➤ Steps

1. **Select vertices in FV.**
2. **Select vertices not intersecting any connected tracks at the middle point.**
3. **Select vertices that is consistent with the directions of tracks whose length is > 30 cm.**
4. **Select vertices within 2 nsec from the earliest vertex timing.**
5. **Select a vertex connected to the longest track.**



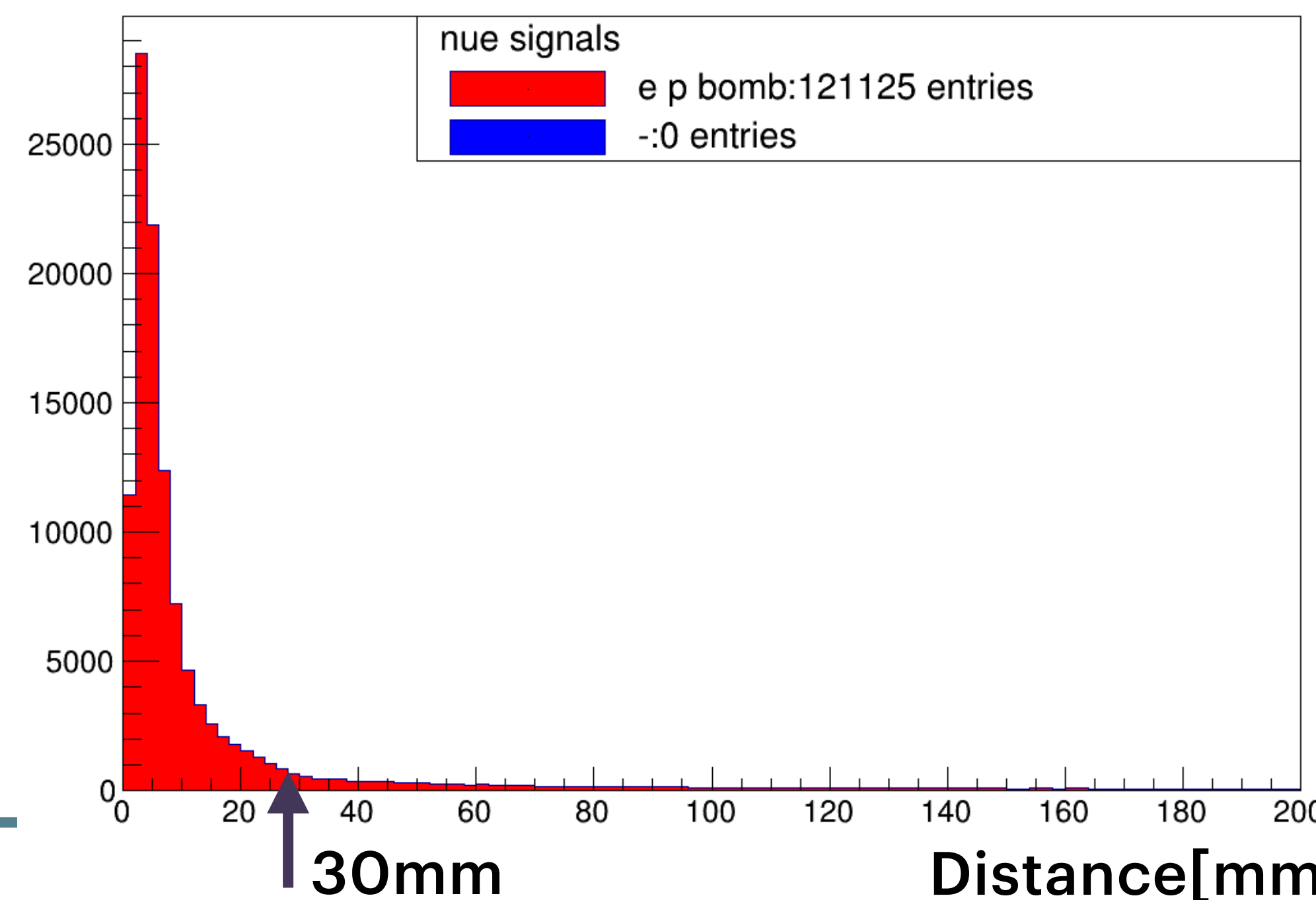
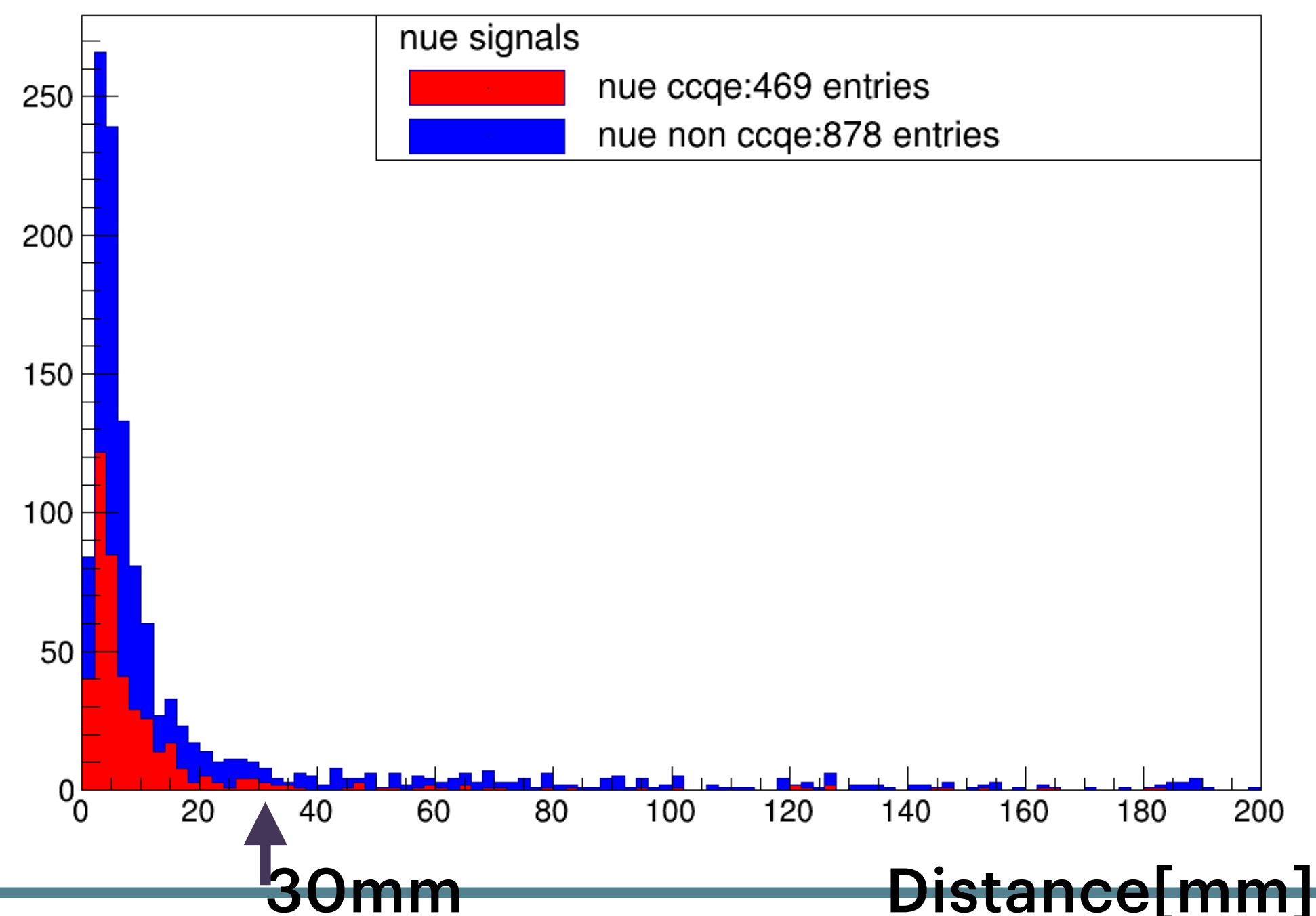
DISTANCE BETWEEN TRUTH AND SELECTED

➤ **NEUT sample(using only ν_e signal)**

➤ **$e + p$ bomb sample**

	Nue CC	Nue Non CC
Success Selection	402 entries (85.7%)	617 entries (70.3%)
Failure	67 entries	217 entries
	469 entries	834 entries

	$e + p$
Success	101263 entries (83.6%)
Failure	19862 entries
Total	121125 entries



MIS RECONSTRUCTION EVENTS

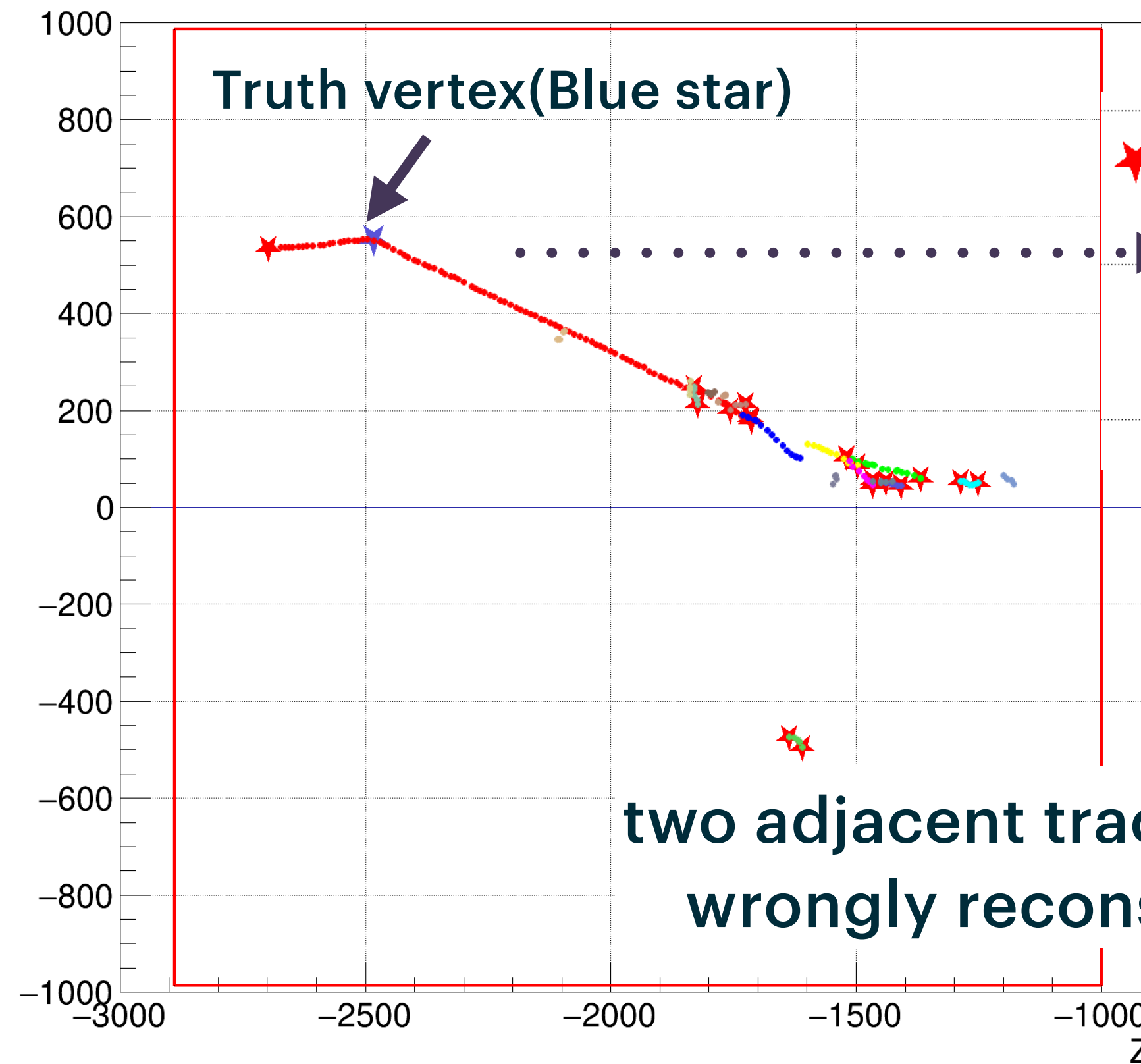
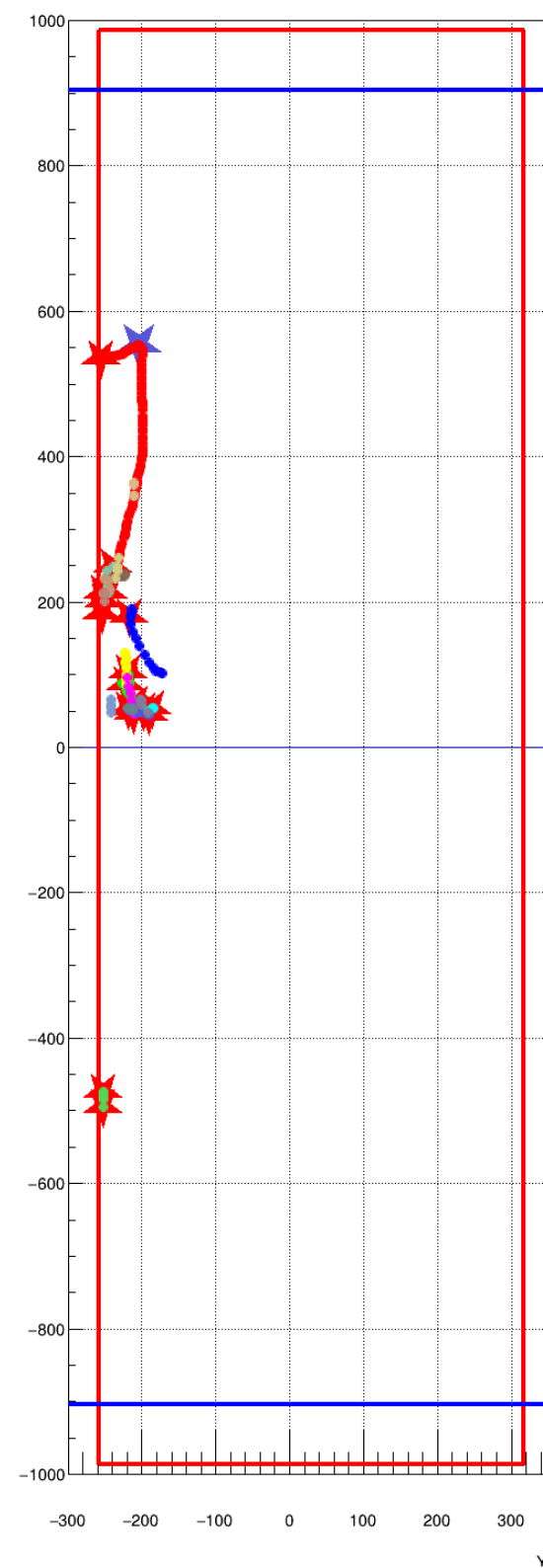
➤ At first I checked failure event(look event display of **reconstructed objects**)

Event Display:
Reconstructed objects

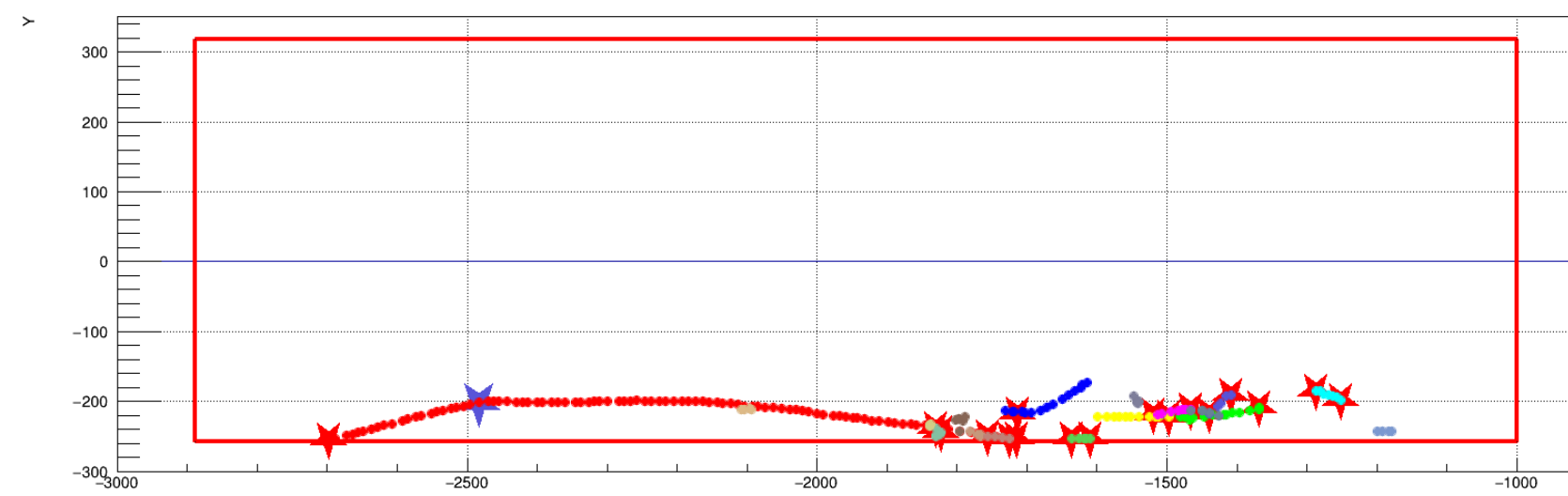
Line(point):Track
Different colors
->different tracks

Stars:vertex

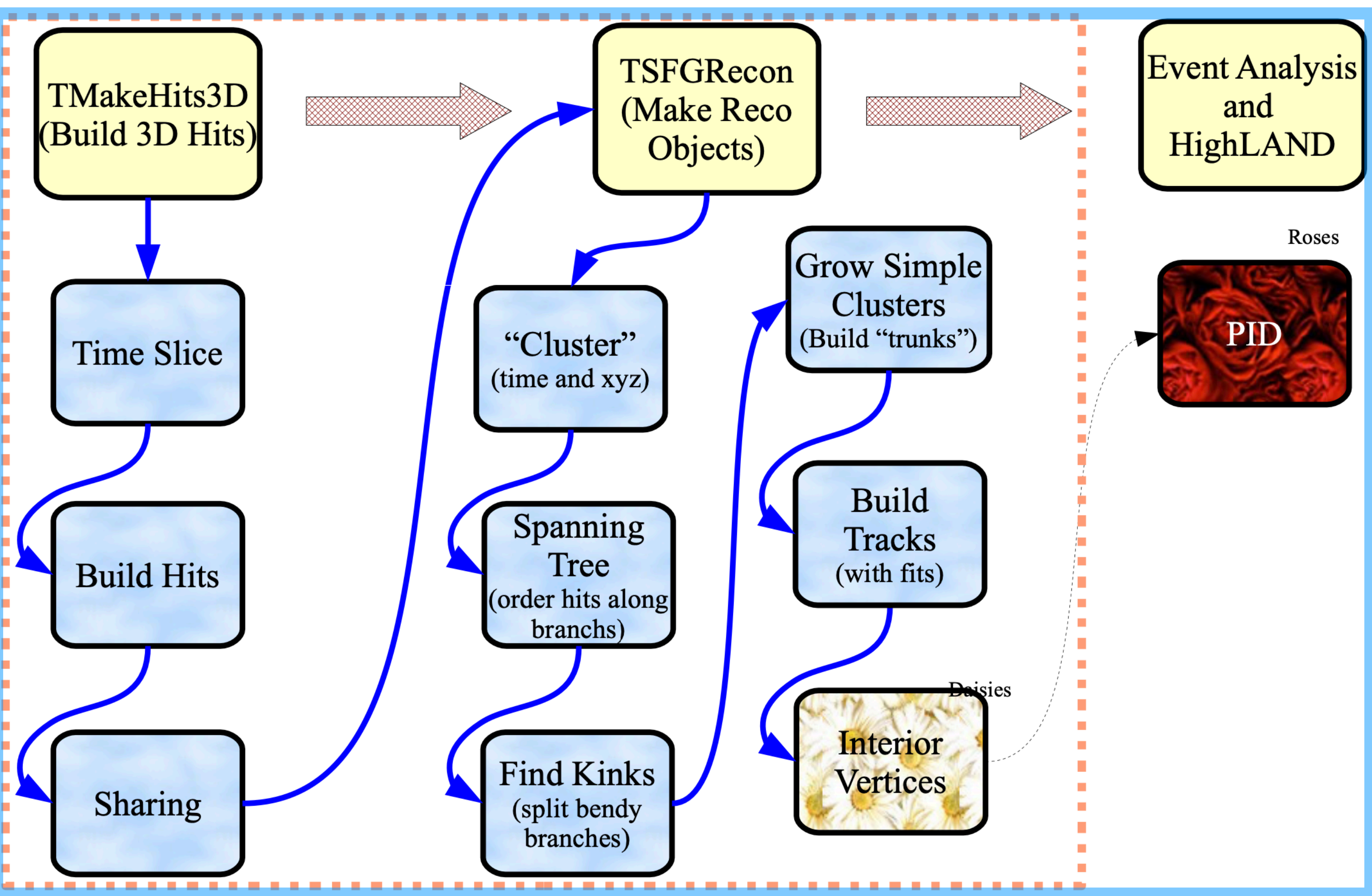
★ Truth Vertex
★ reconstructed vertices



two adjacent tracks are
wrongly reconstructed as a single track.

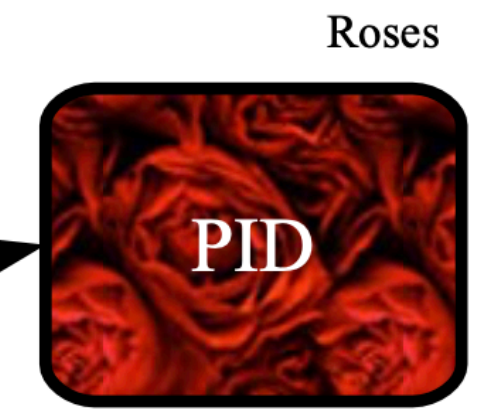


SUPERFGD RECONSTRUCTION(SFGRECON) STEPS



Sfgrecon algorithm flow

➤ In sfgrecon, mainly vertex mis-reconstruction occurred at kink steps.



Step	Mis-reconstruction	
Find Kinks	11730 entries	94.8%
Build Tracks	403 entries	3.25%
Another factor	234 entries	
Total	12367 entries	

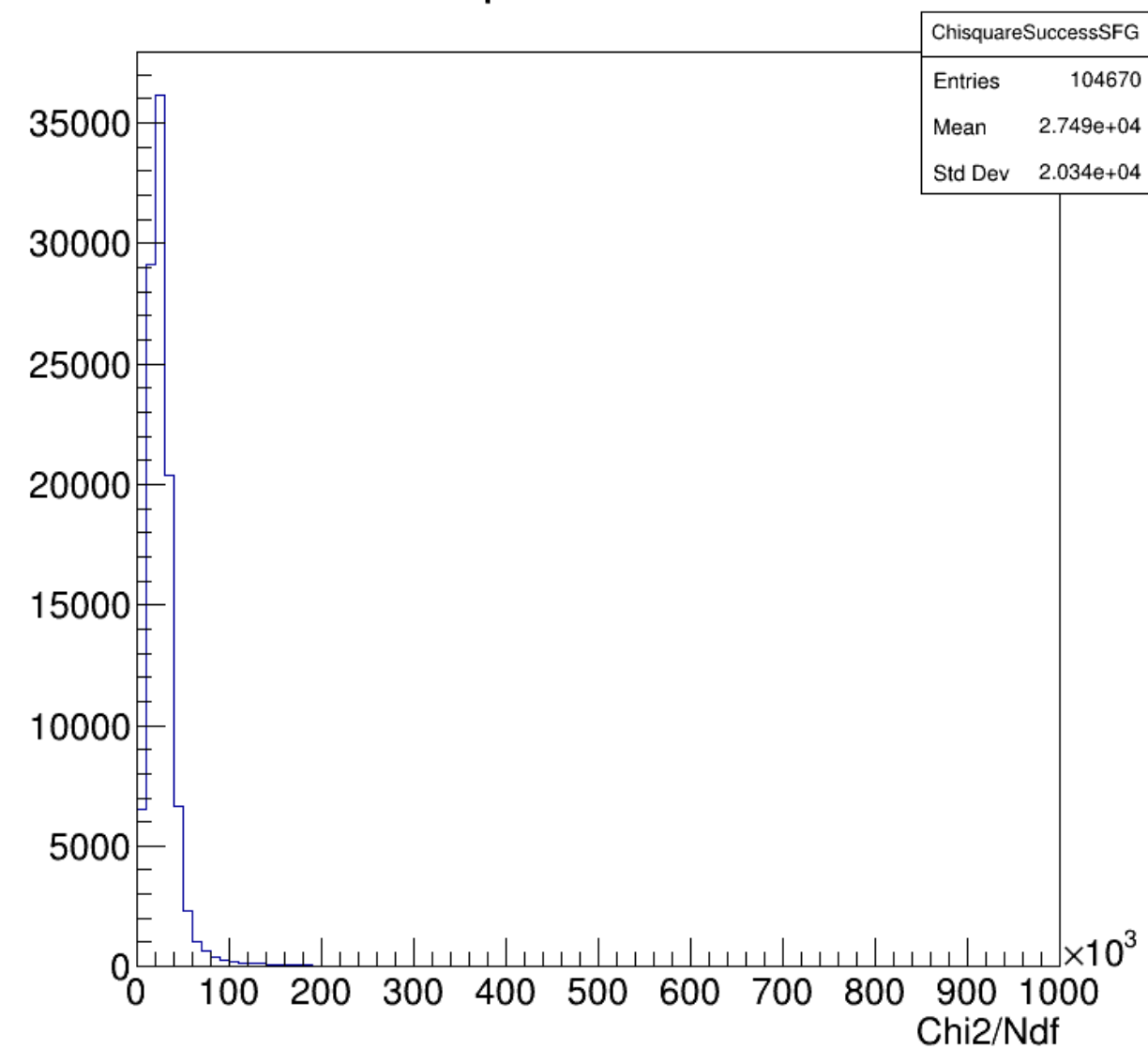
Failed cases of mis-reconstructed events

GROW TRACKS

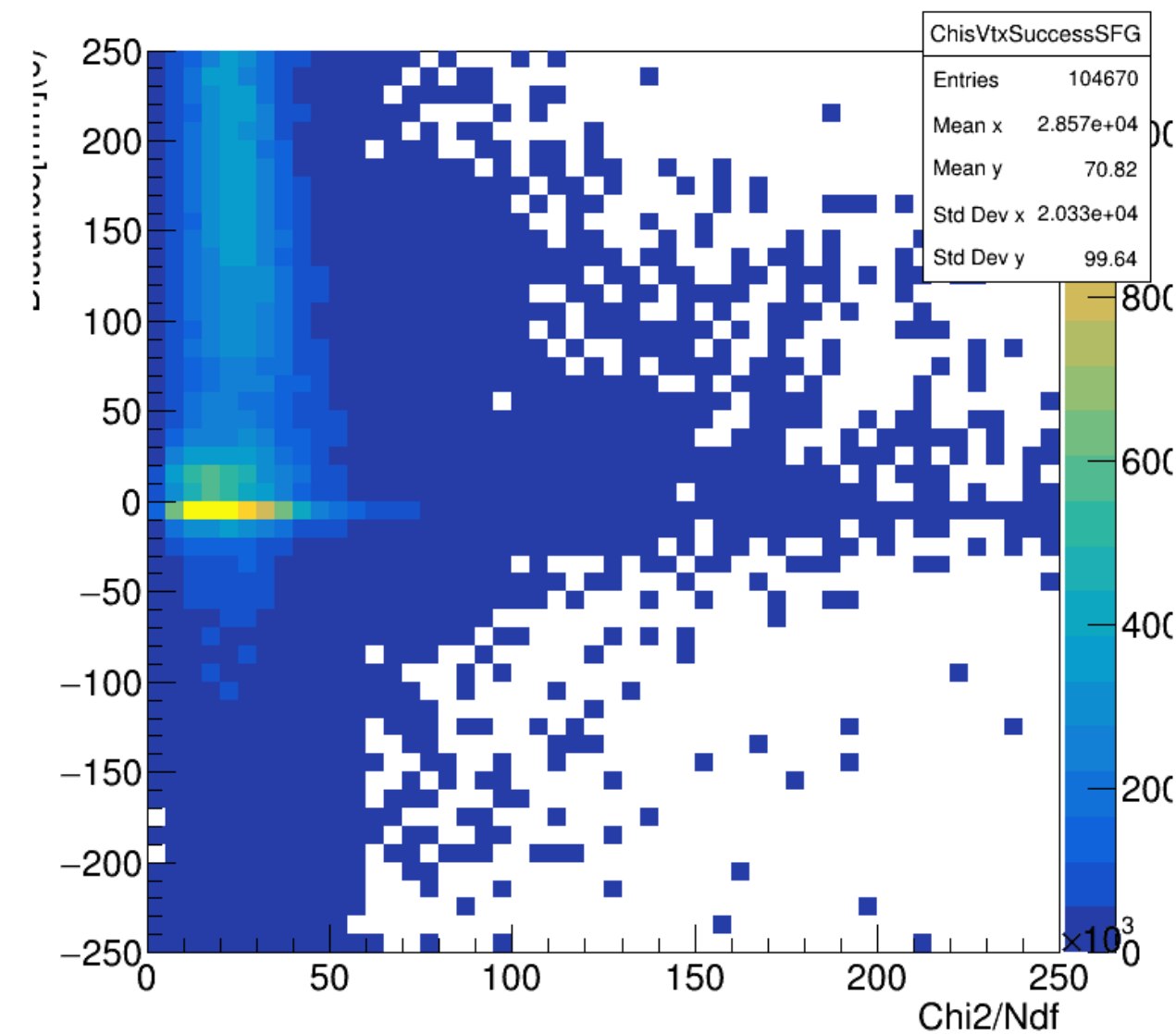
- **After fitting tracks, combining pairs of tracks has good match.**
 - **Goodness match**
 - **distance of the end points of two tracks < 15.0 mm**
 - **direction change of the end points < 15.0°**
 - **Maybe insensitive to large angle tracks same as kink steps.**
 - **I want to devise a large angle too.**
 - **χ^2 of the linear fit between the end states < 16.0**
 - **As long as the straight edges match, it will be misidentified.**
 - **Insensitive to curving tracks at edges of tracks.**

TRUE VERTEX RECONSTRUCTED EVENTS

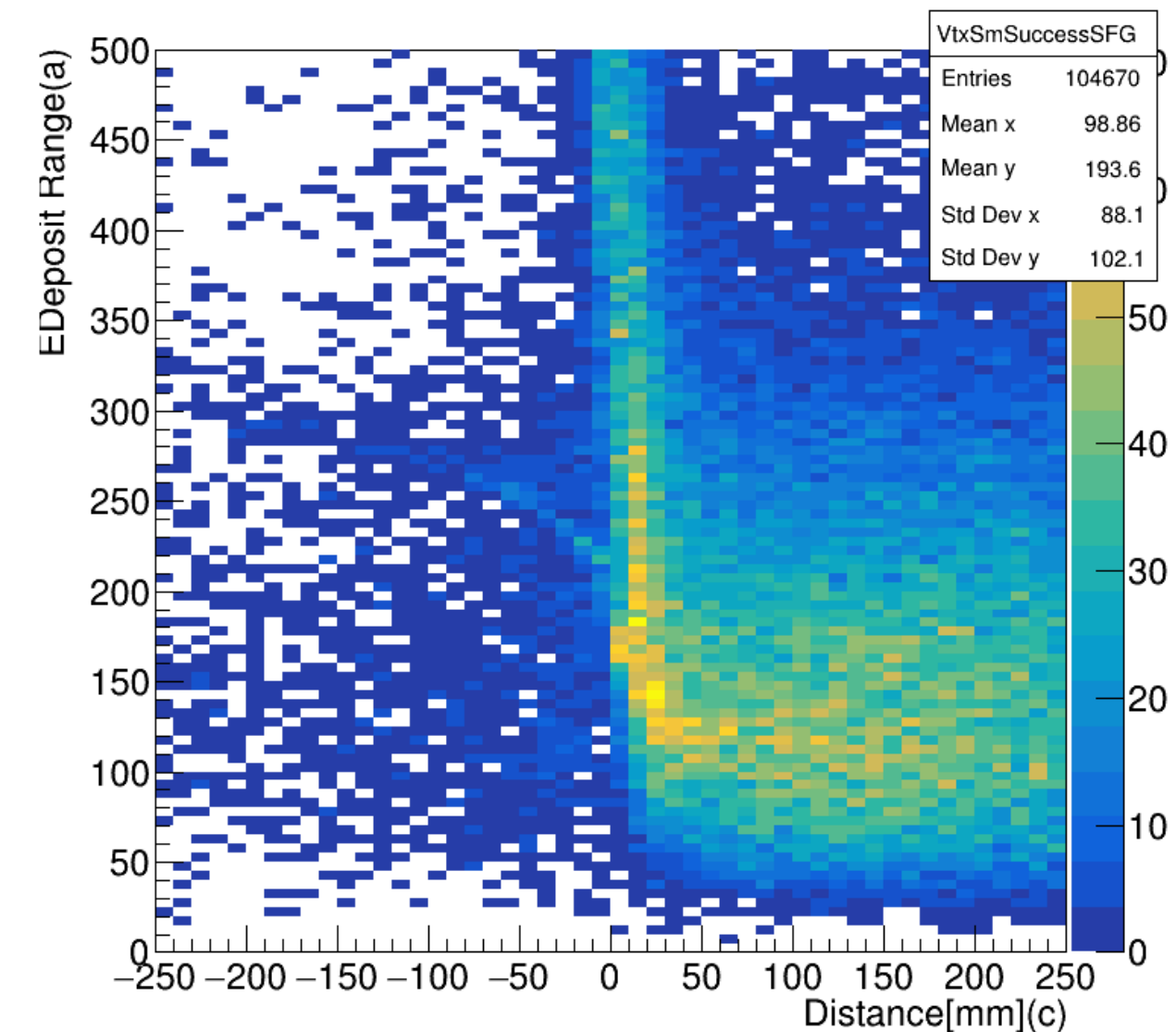
EDeposit Fit result



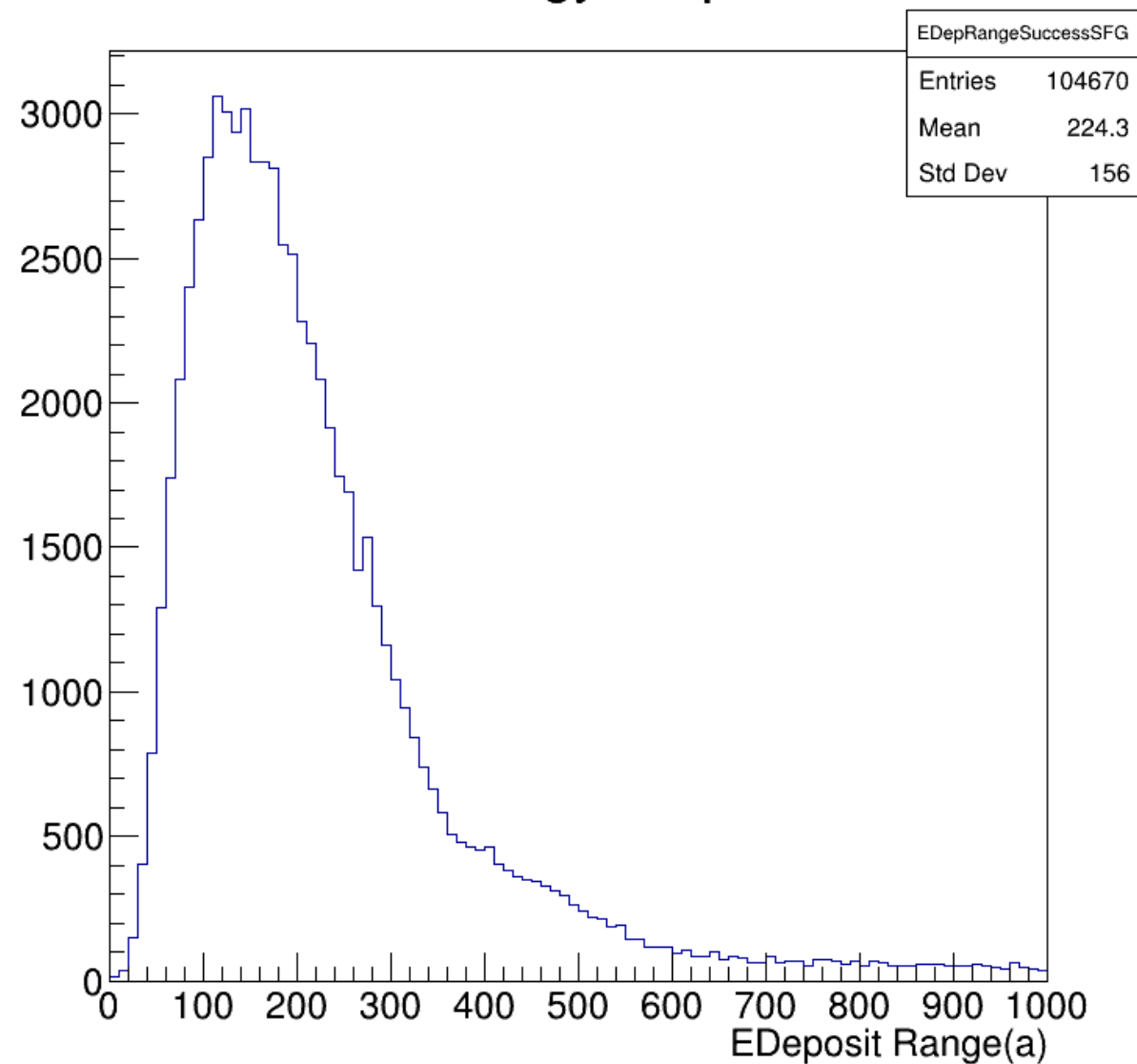
EDeposit Fit result - Distance from Vertex



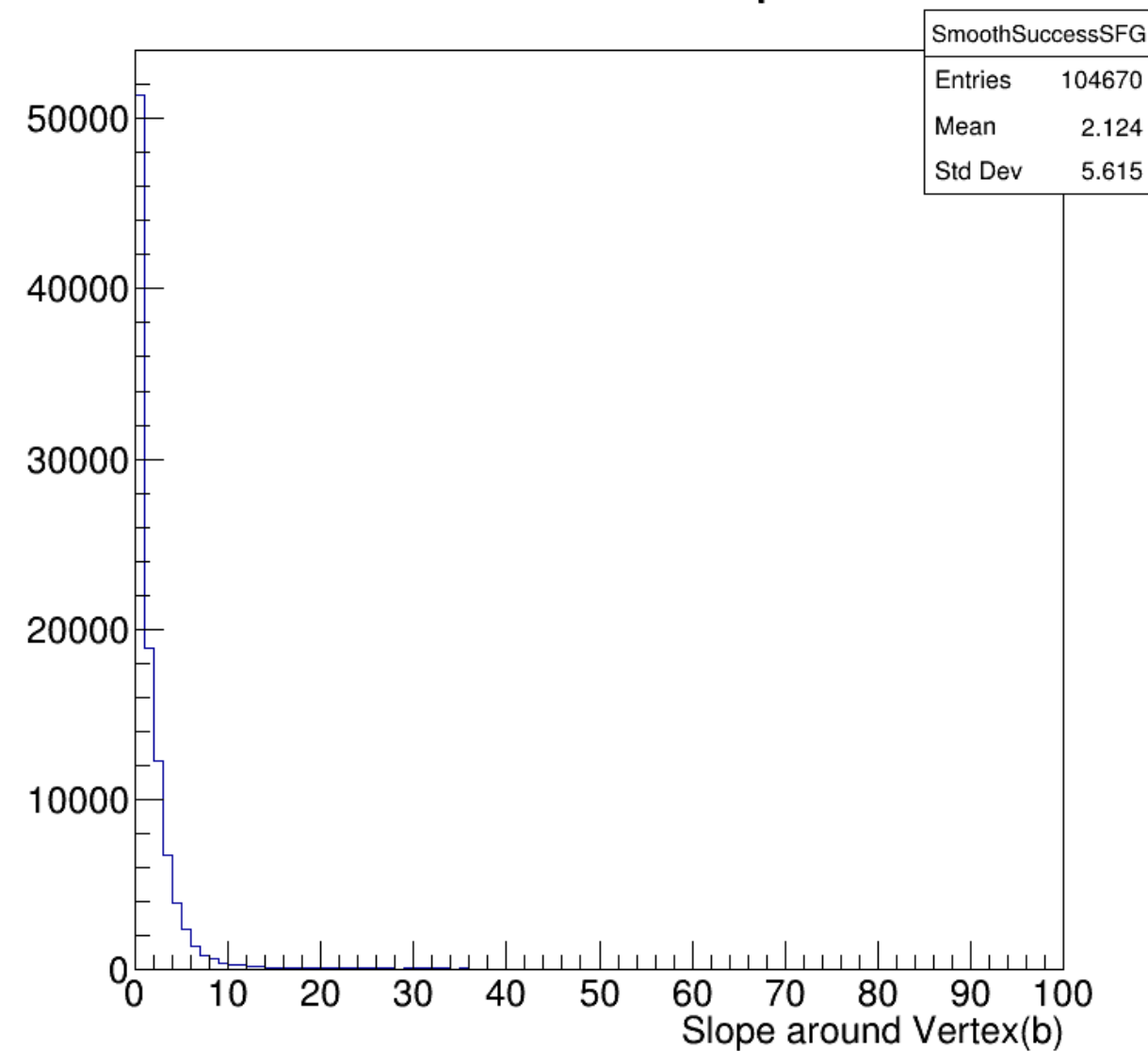
Vertex - Smooth



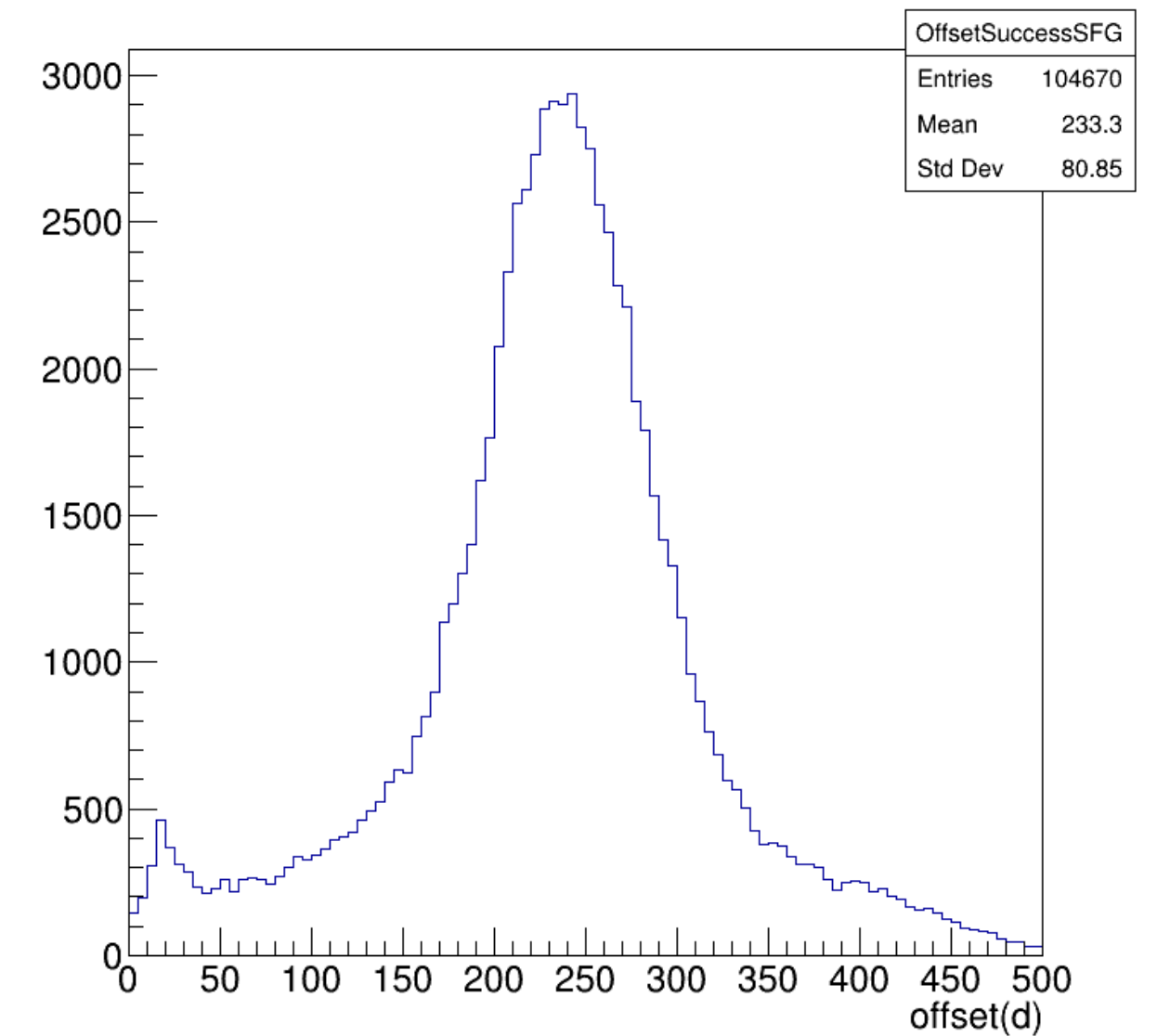
Energy Step



Smooth of step

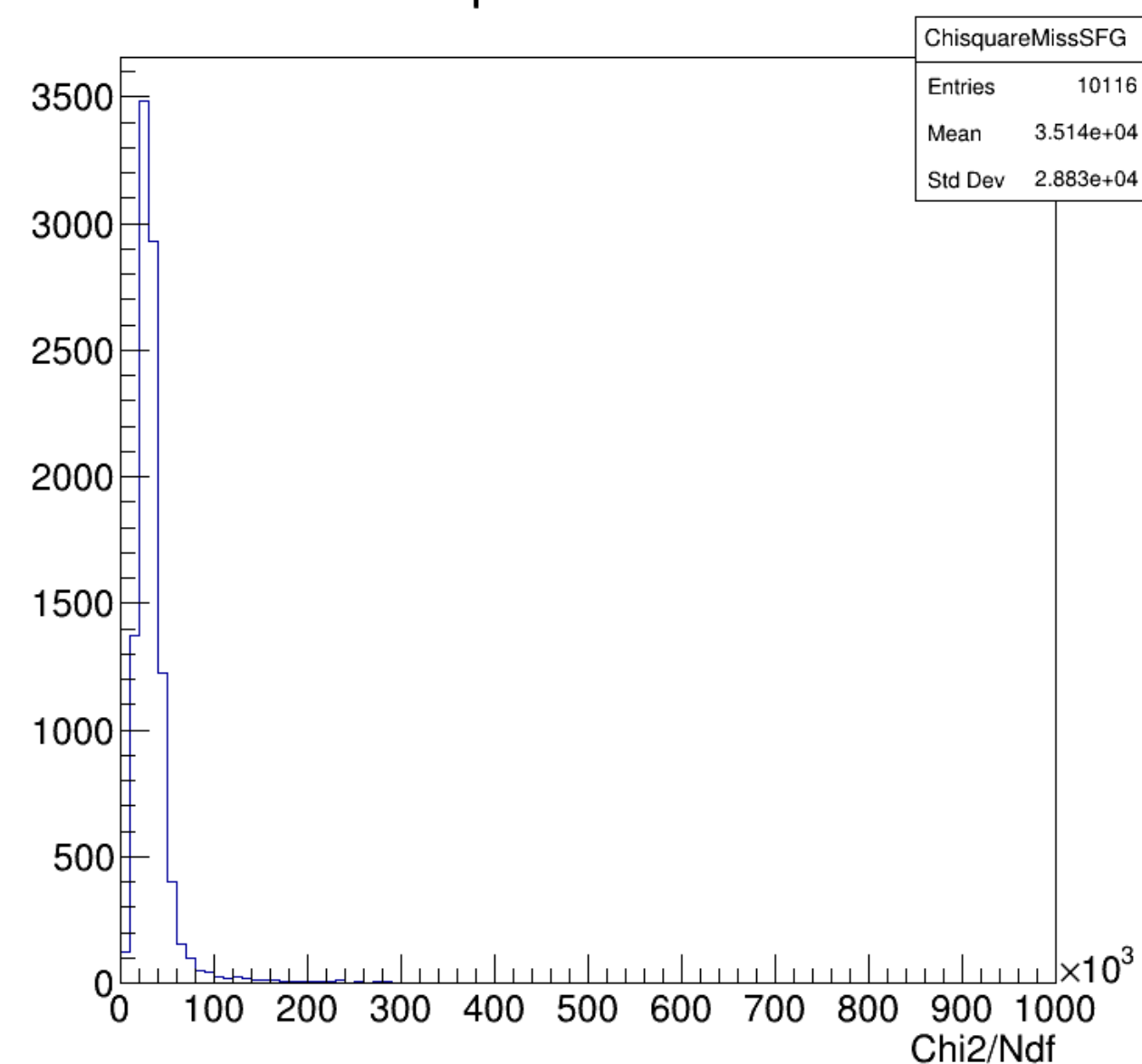


OffSet

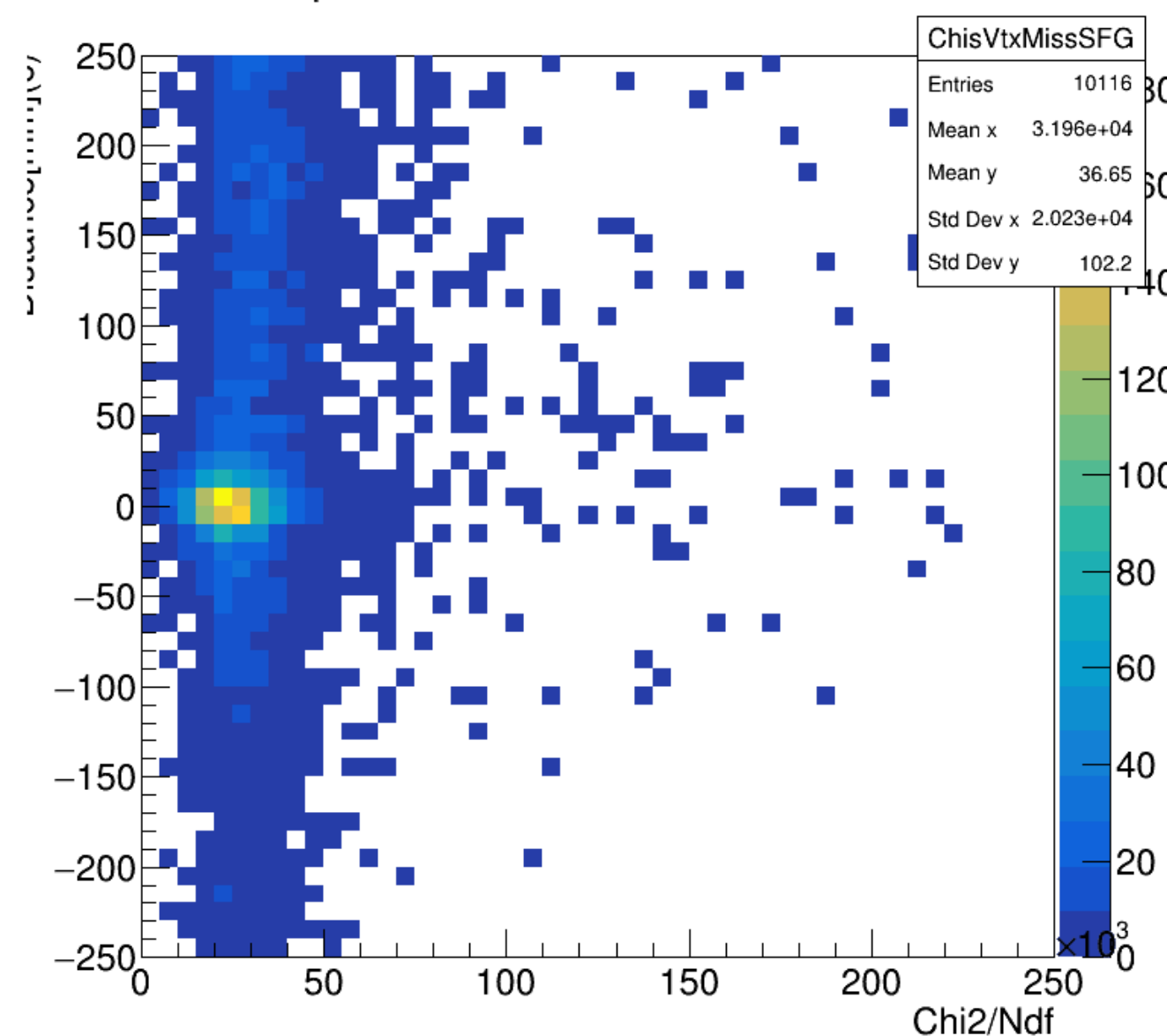


MISS RECONSTRUCTED EVENTS

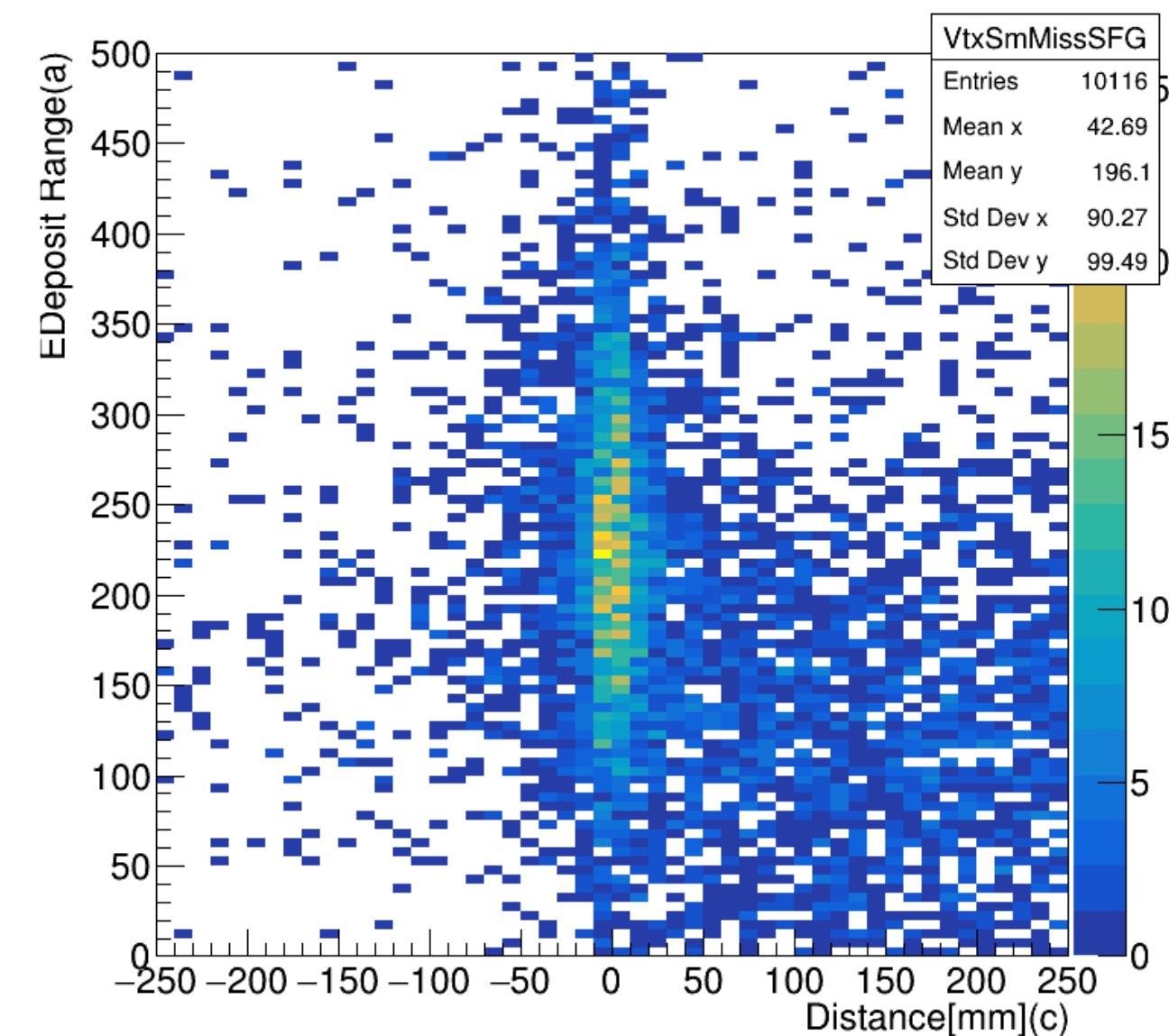
EDeposit Fit result



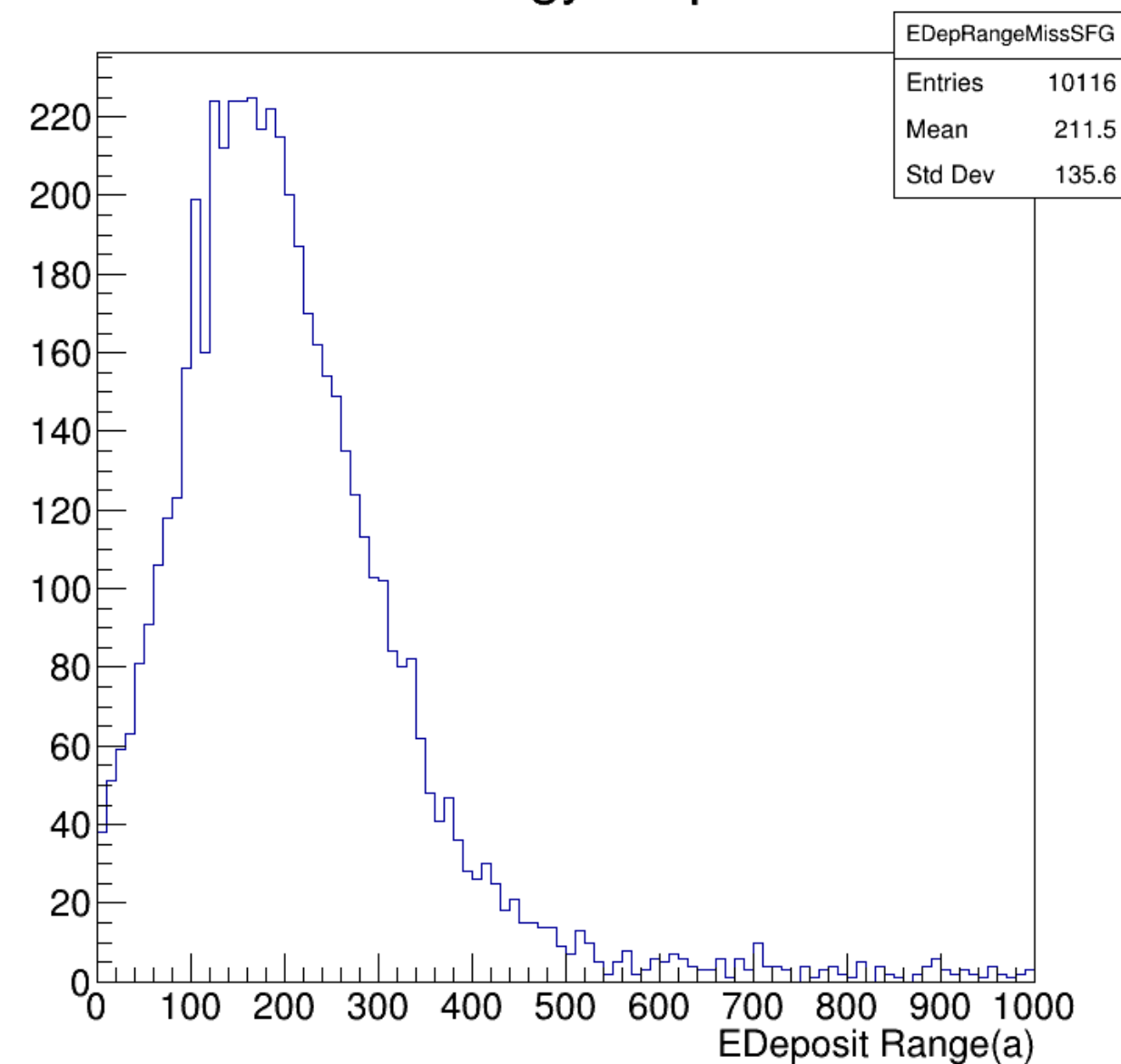
EDeposit Fit result - Distance from Vertex



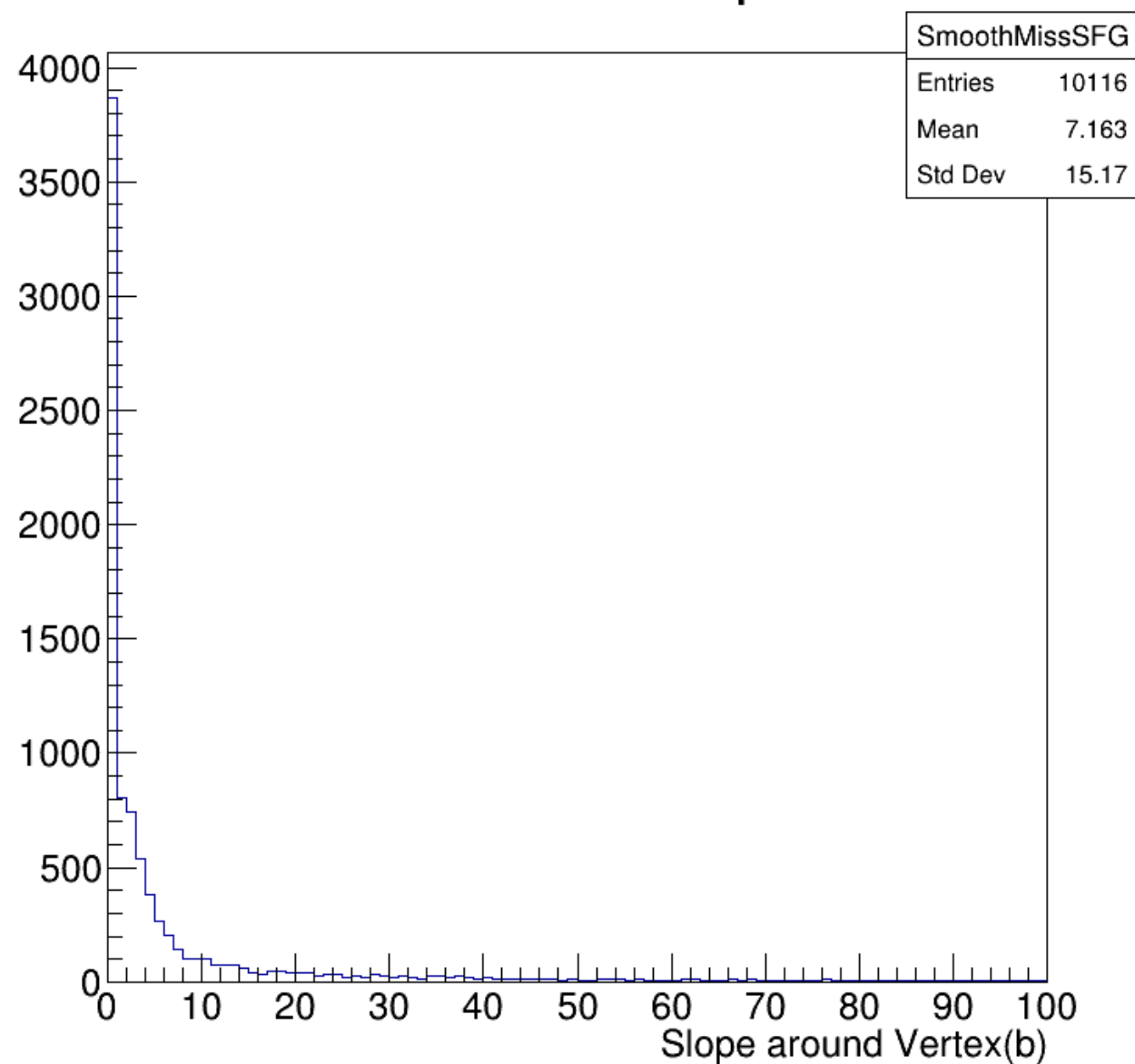
Vertex - Smooth



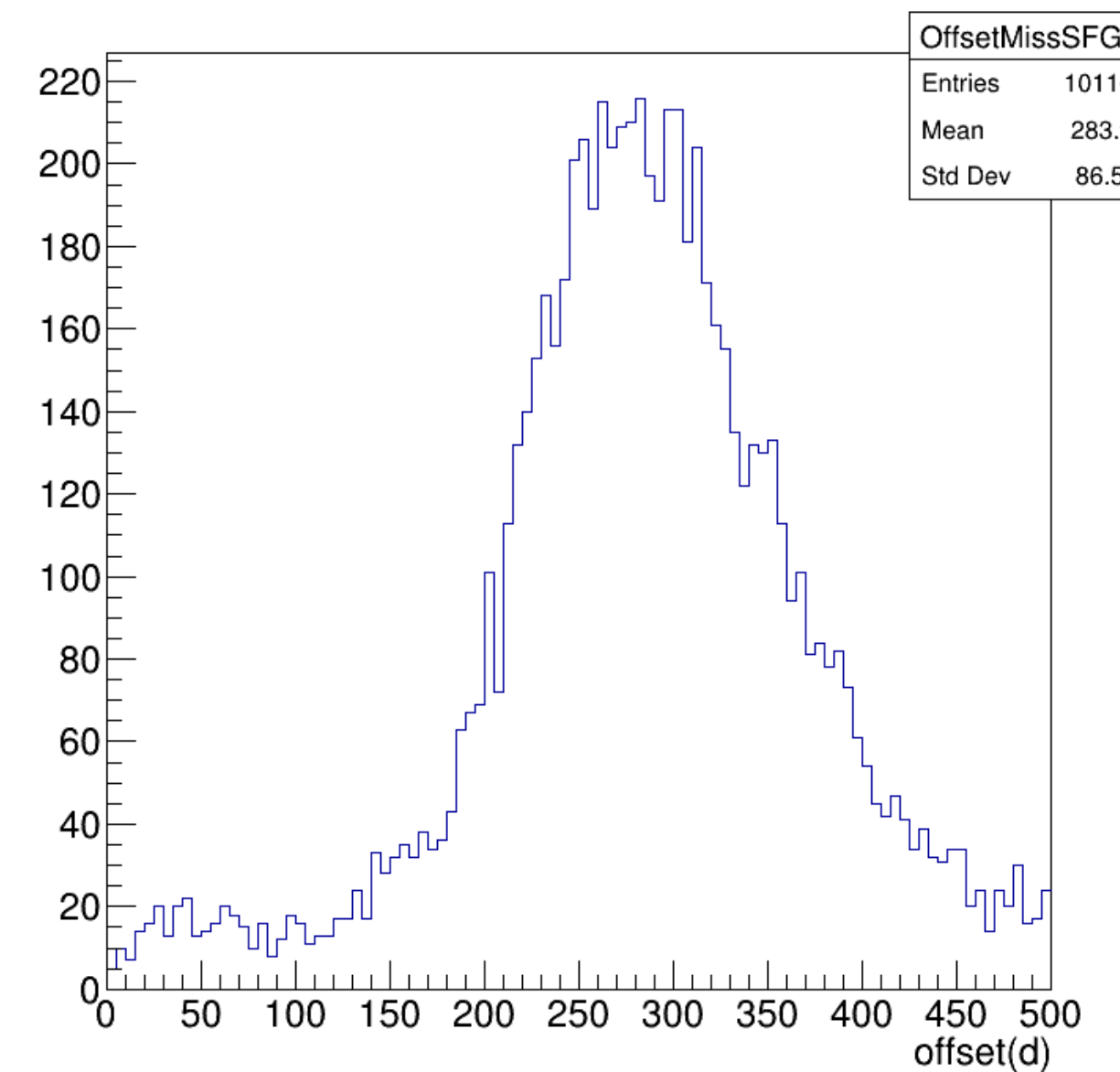
Energy Step



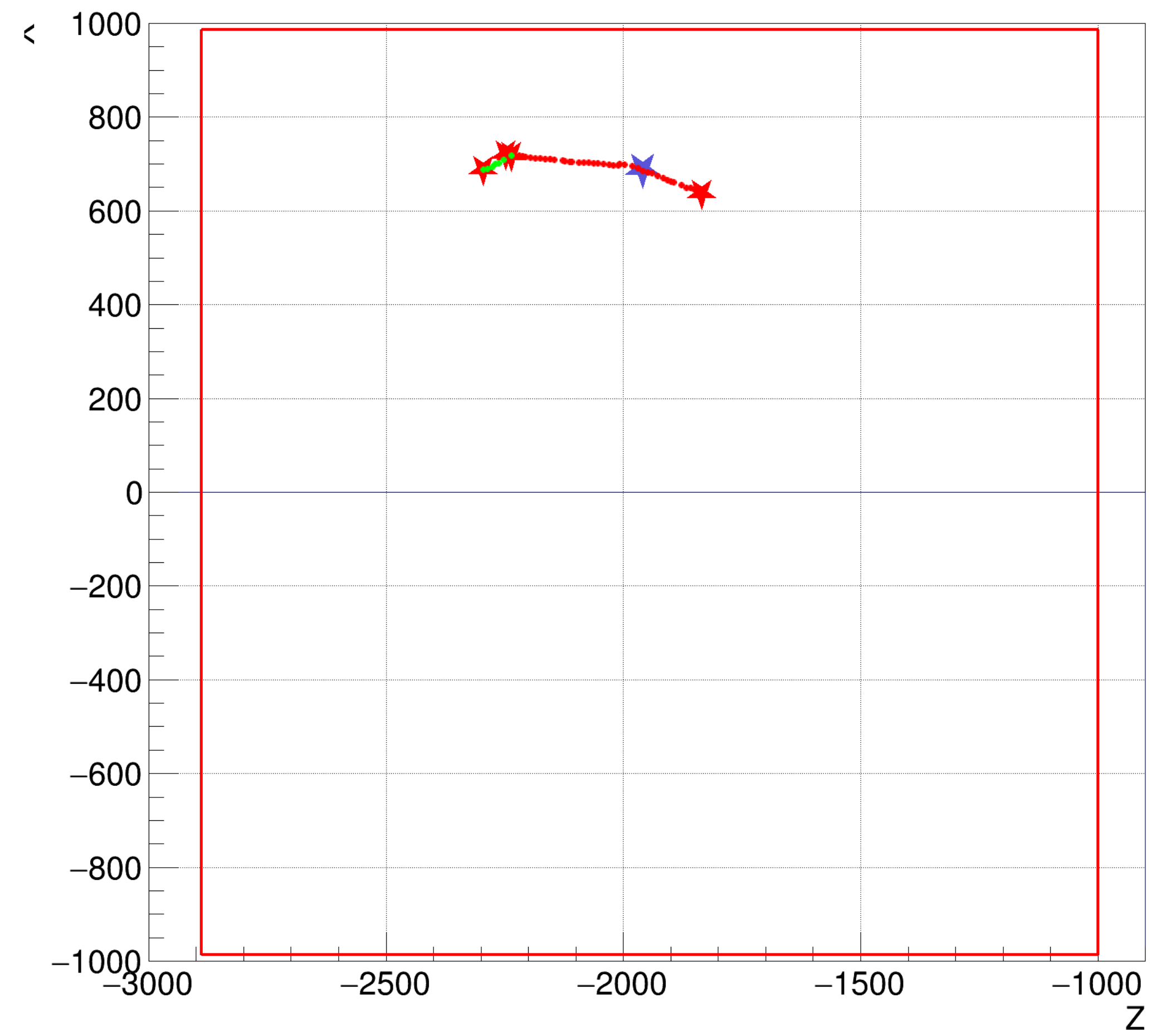
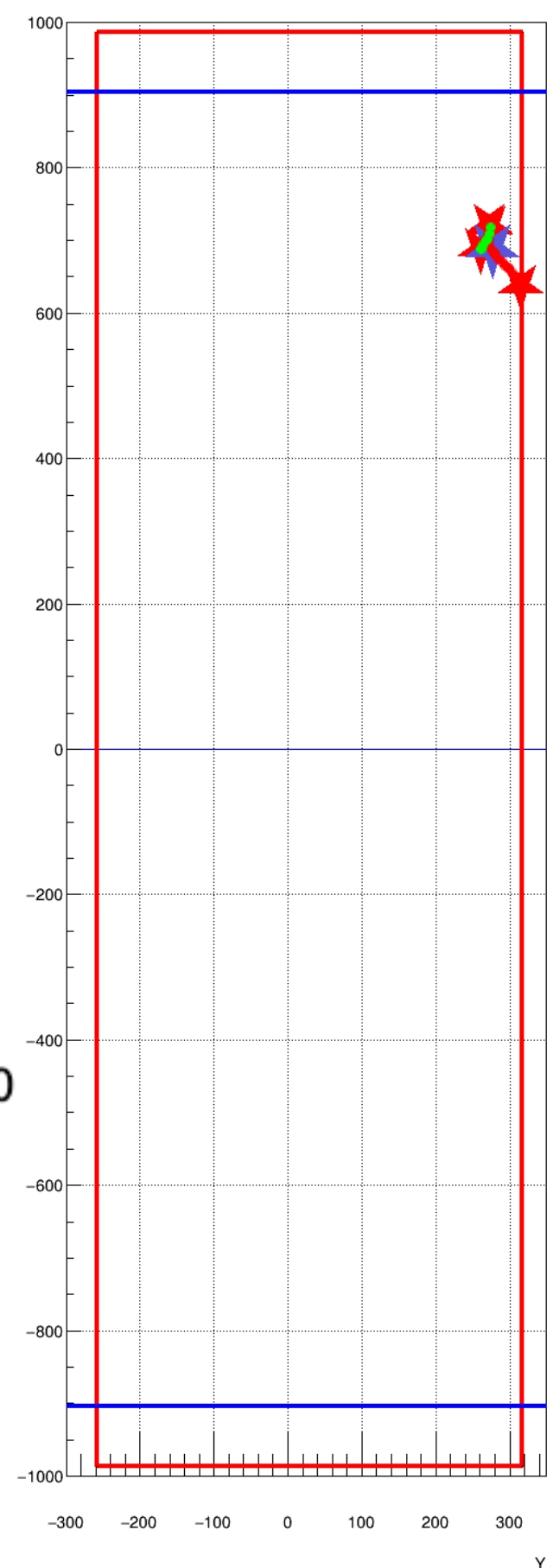
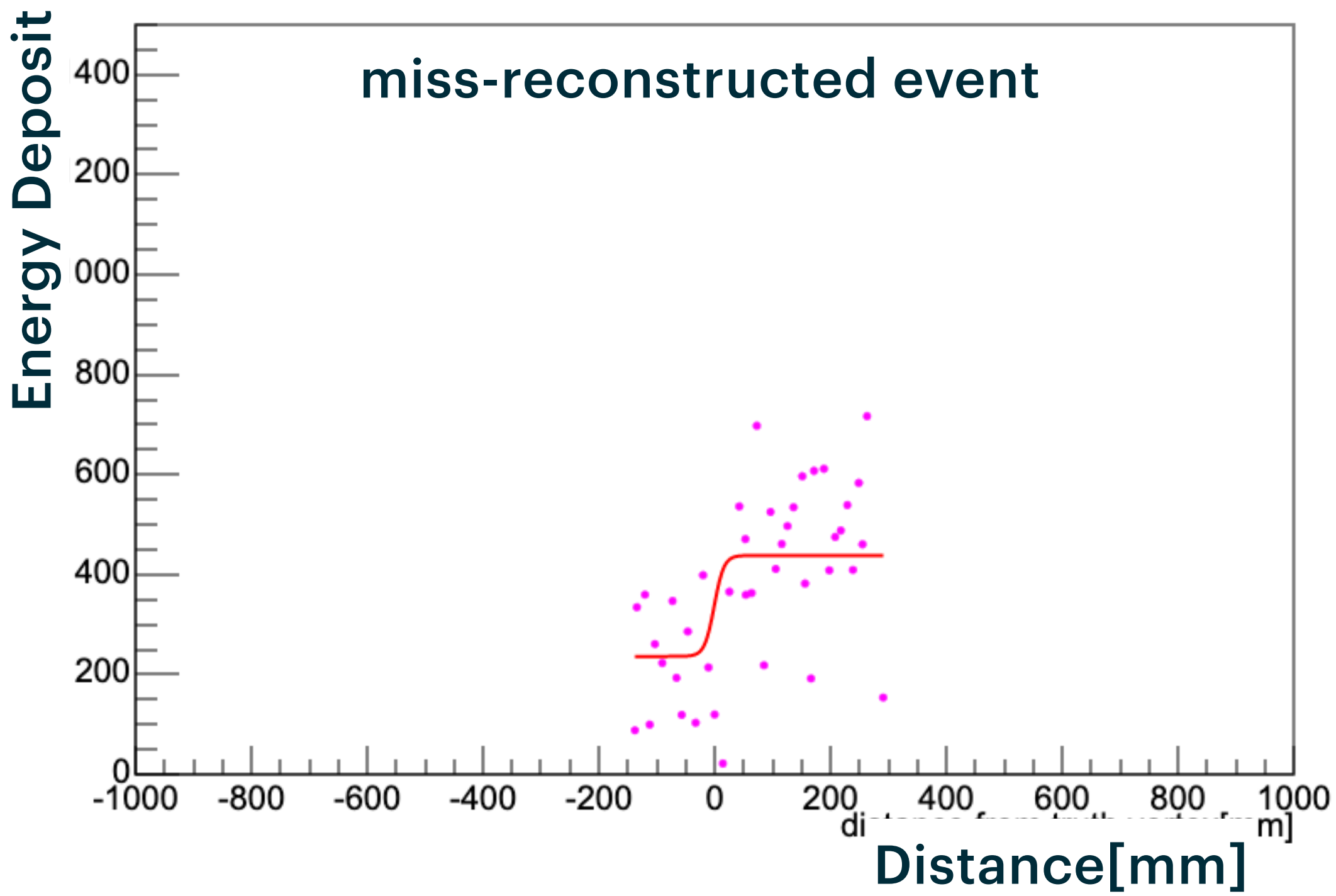
Smooth of step



OffSet

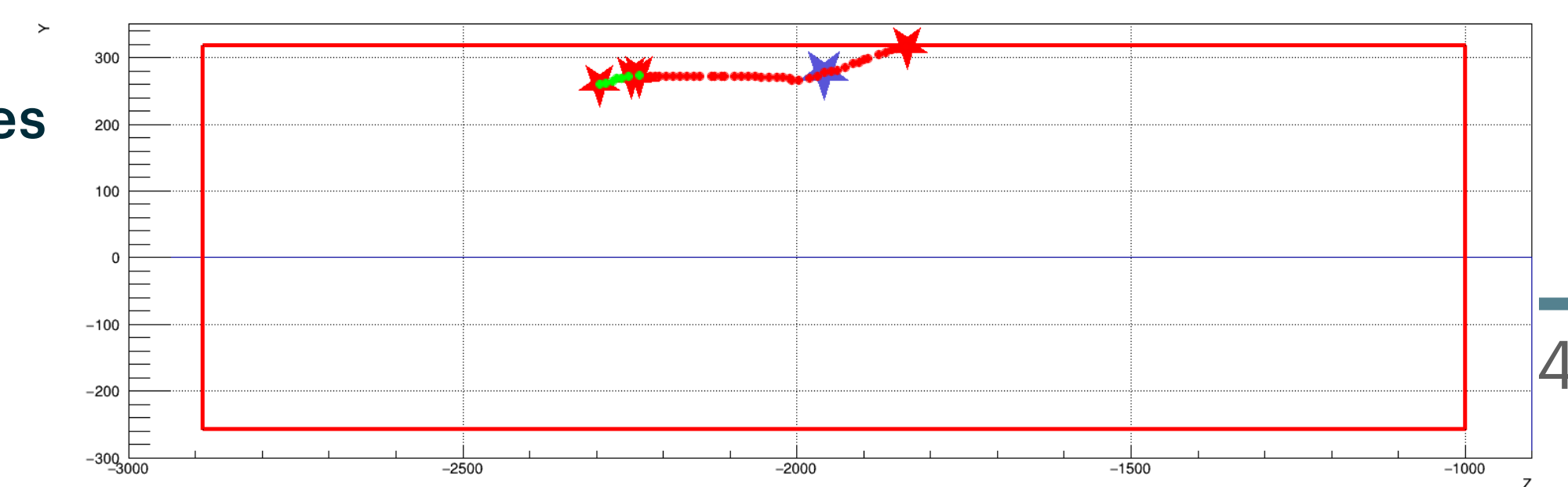


② SUCCESS FIT - FIT RESULT IN MISS RECONSTRUCTED(EVENT4)

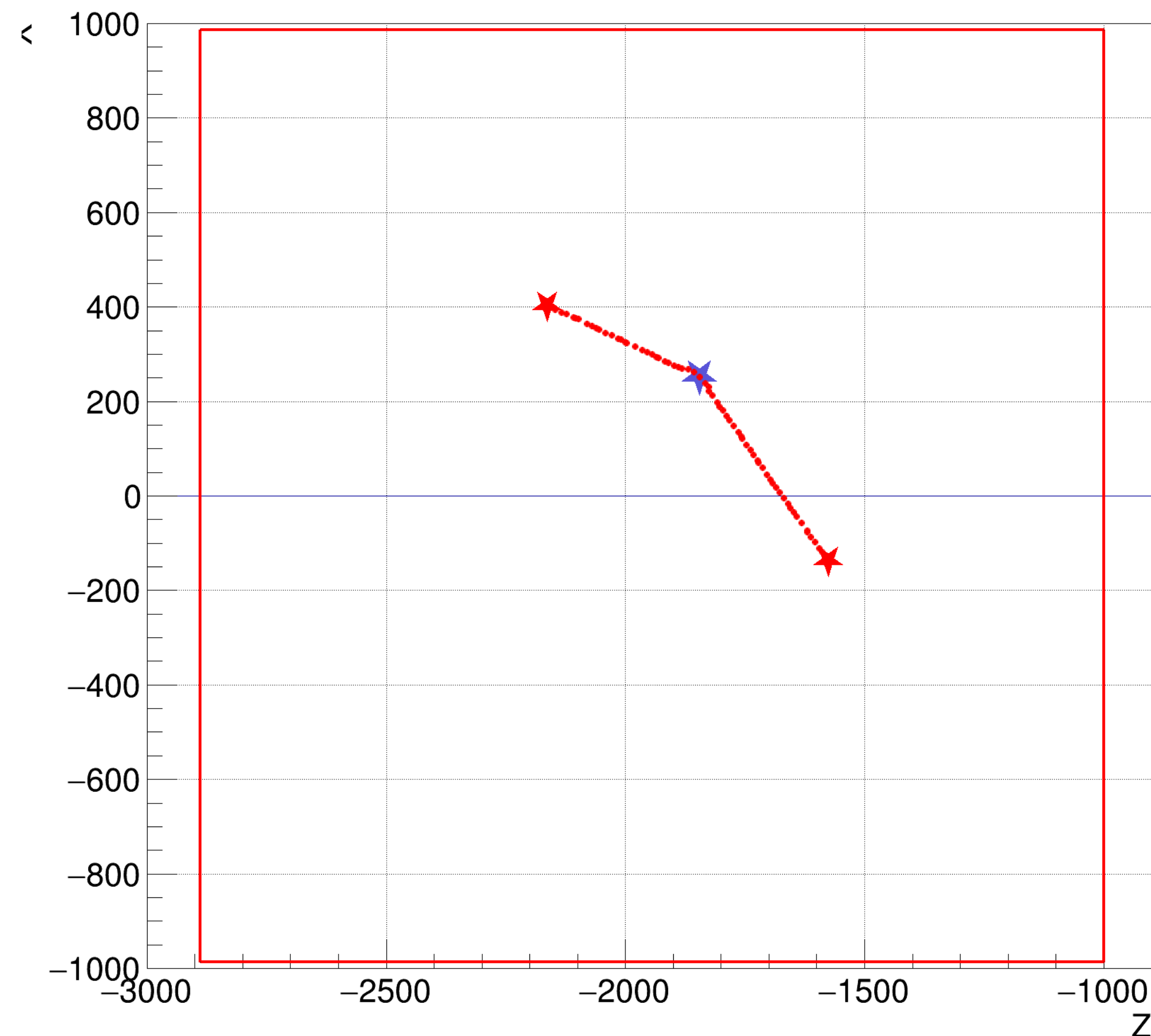
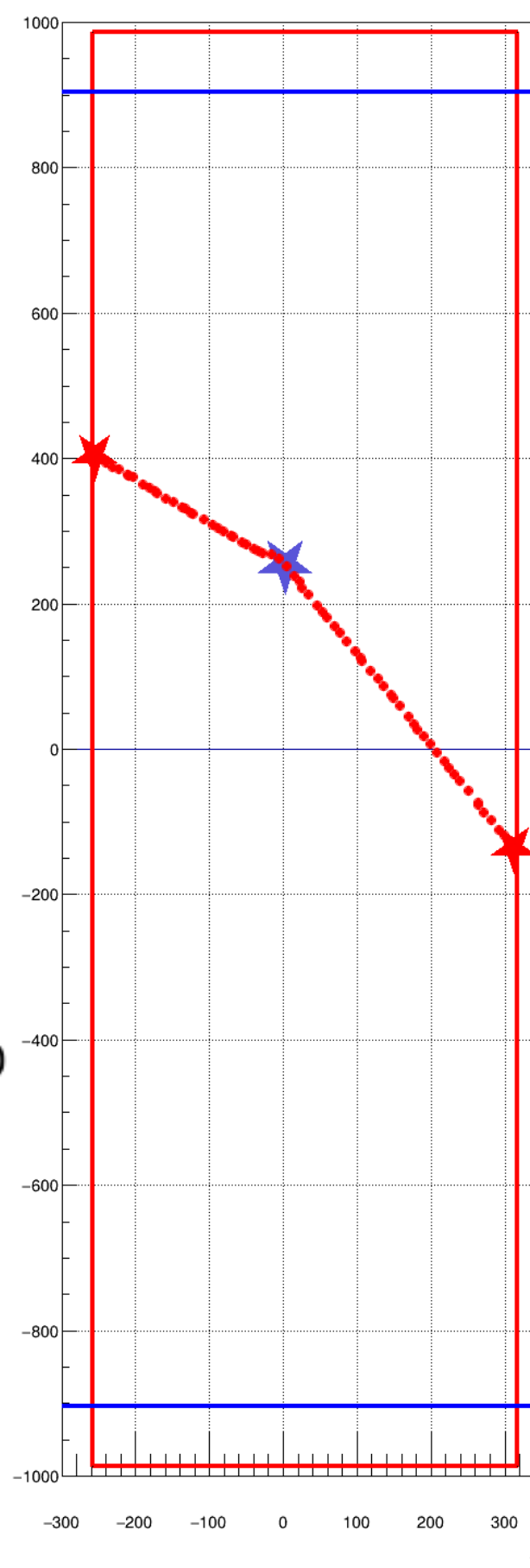
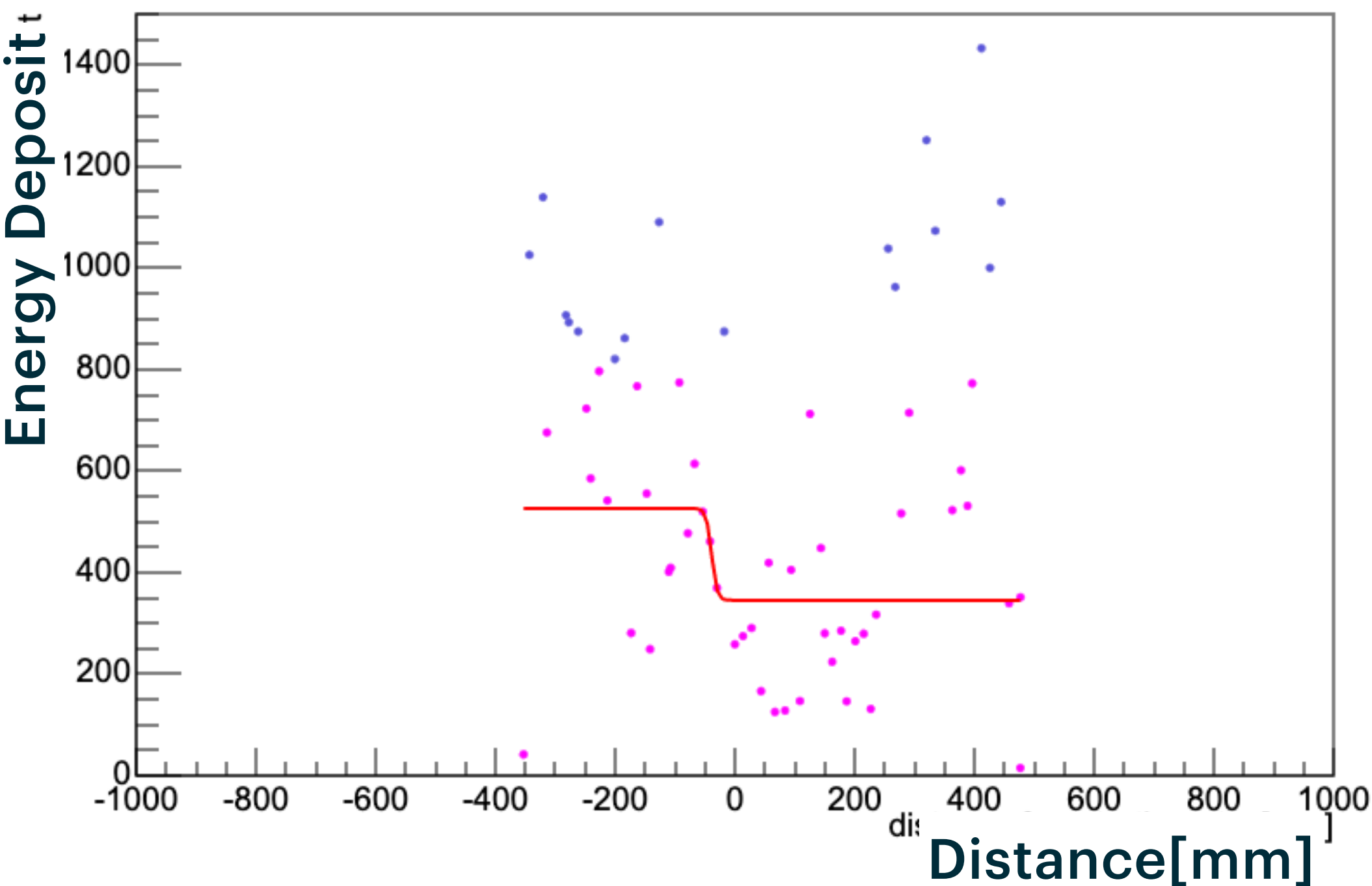


- **c-value(fitted Vertex) ~ 0 (true vertex)**
- **It can be identified as a vertex**
- **a=-202,c=0.7**

★ True vertex
★ Reconstructed vertices
 Different colors are reconstructed as different tracks



SUCCESS FIT - FIT RESULT IN MISS RECONSTRUCTED(EVENT228)



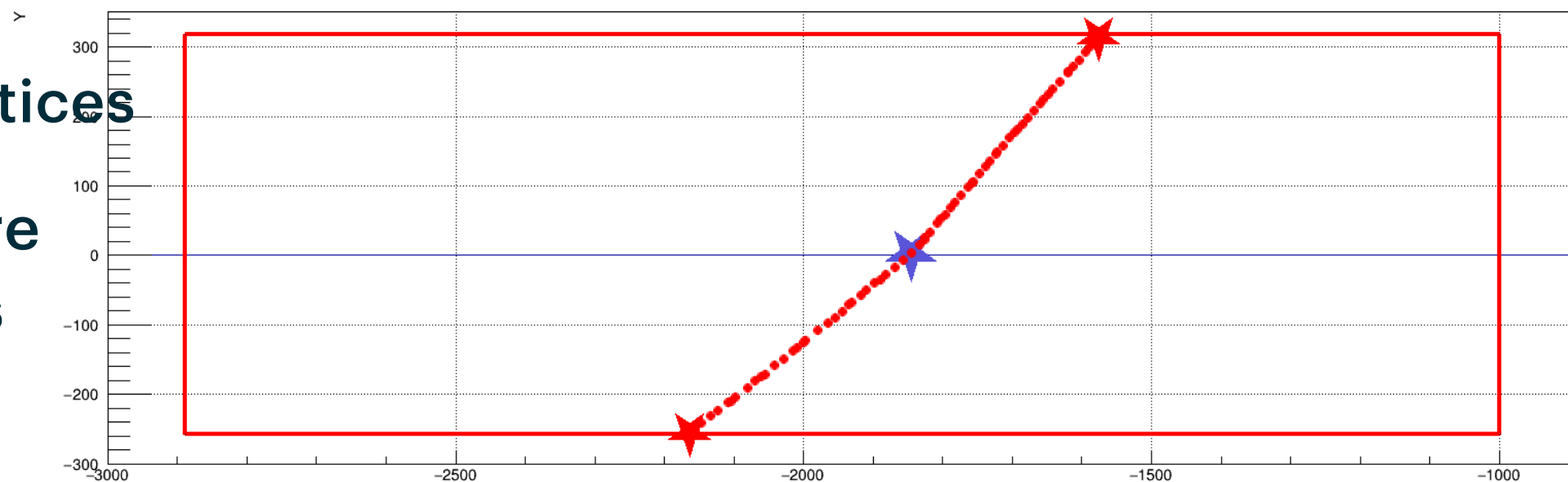
➤ **c-value(fitted Vertex) is around 0**

➤ **It cannot be identified as a vertex.**

➤ **But it can limit the range of vertex position.**

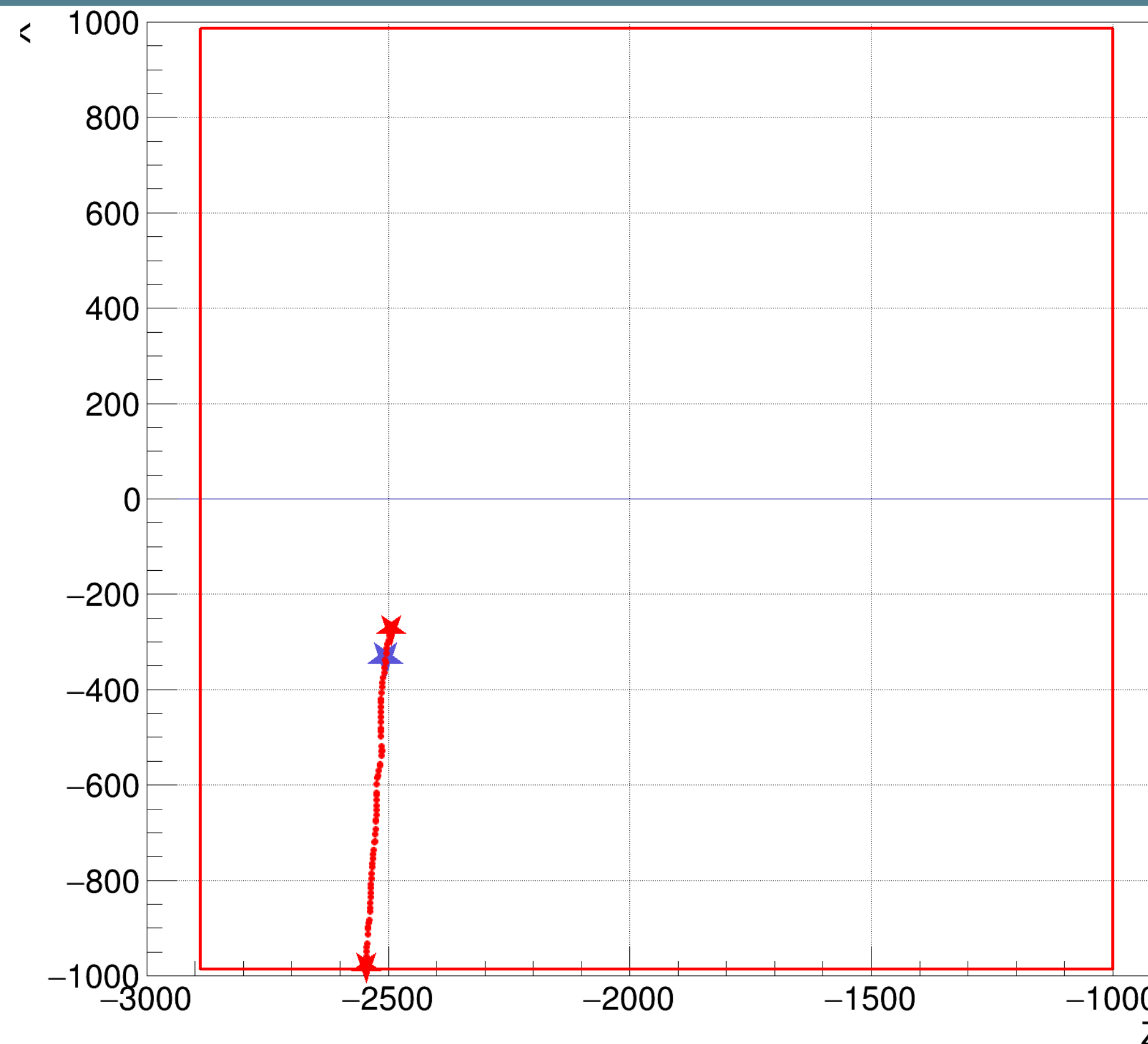
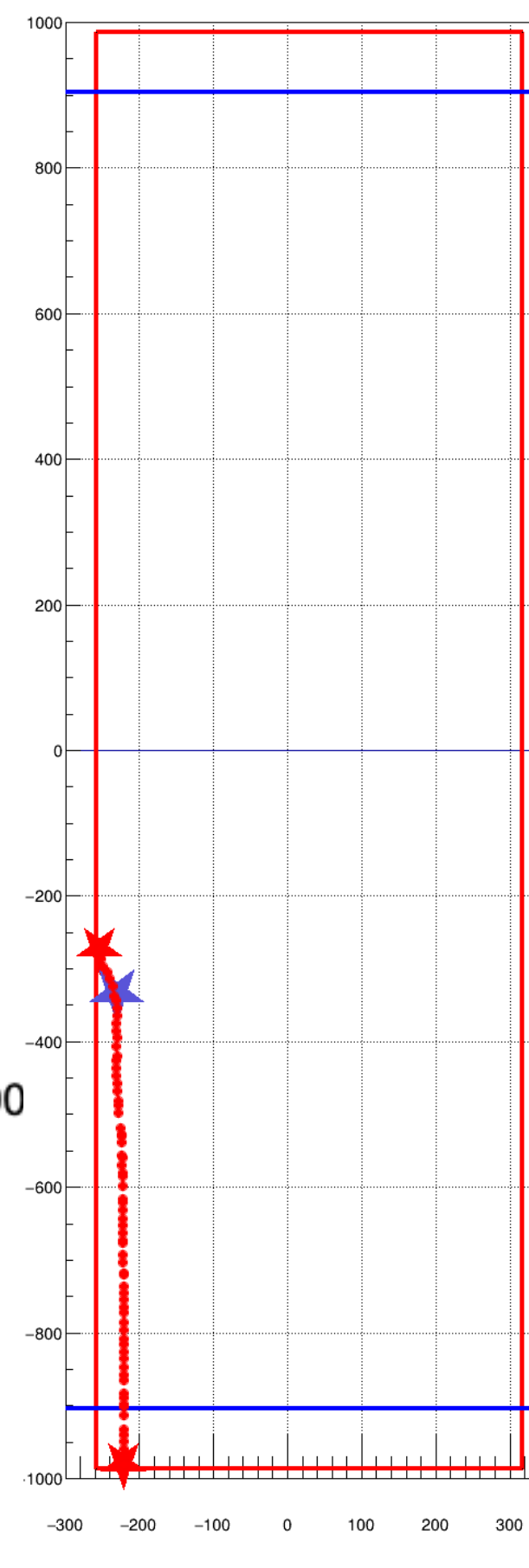
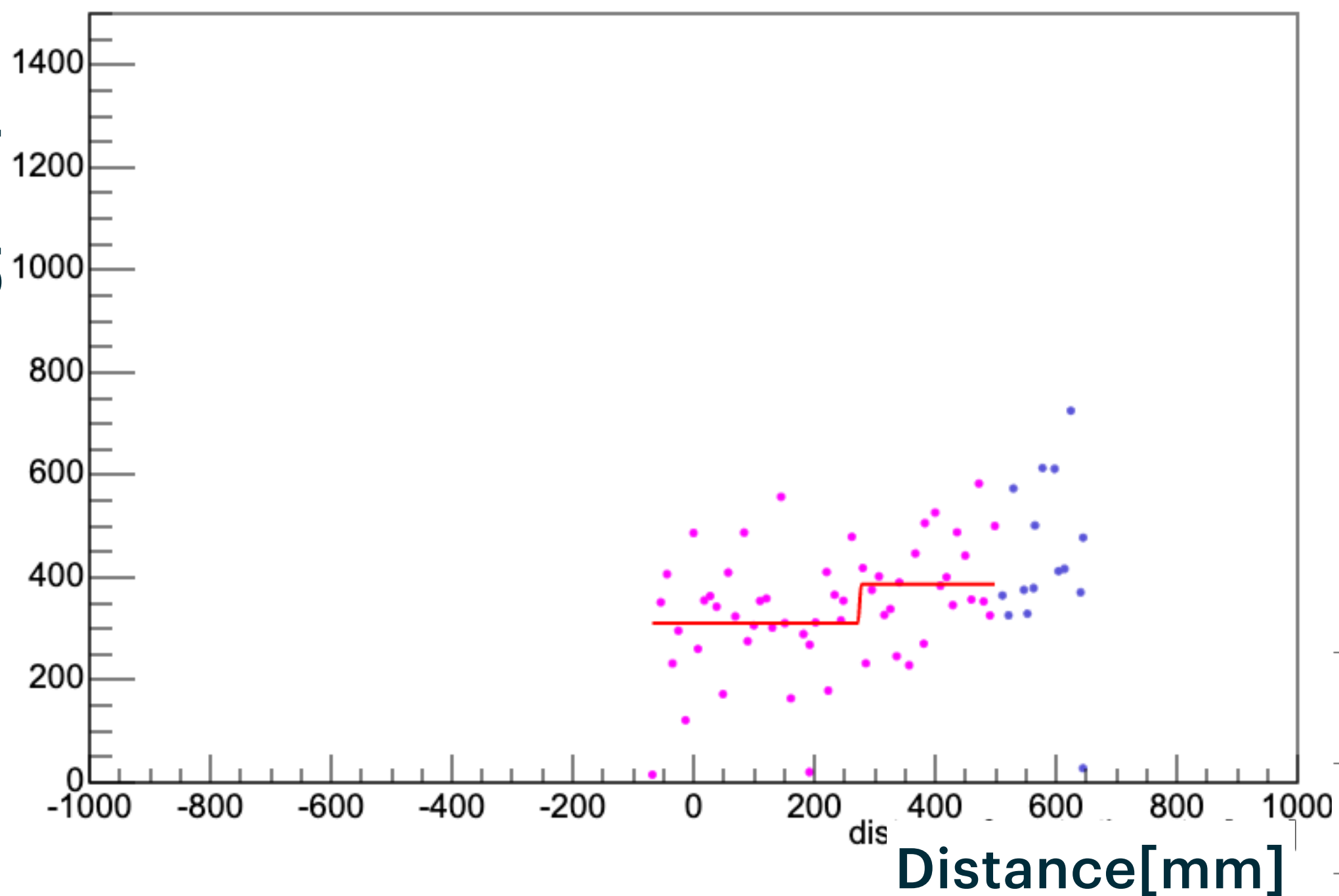
➤ **a=180 ,c= -38**

★ True vertex
 ★ Reconstructed vertices
 Different colors are reconstructed as different tracks



FAILURE PATTERN - FIT RESULT IN MISS RECONSTRUCTED (EVENT523)

Energy Deposit



➤ **Fitting fails because of the proton track is too short.**

➤ **It cannot be identified as a vertex.**

➤ **There is no misidentification since a-value is small (~75)**

★ True vertex
★ Reconstructed vertices
Different colors are reconstructed as different tracks

