



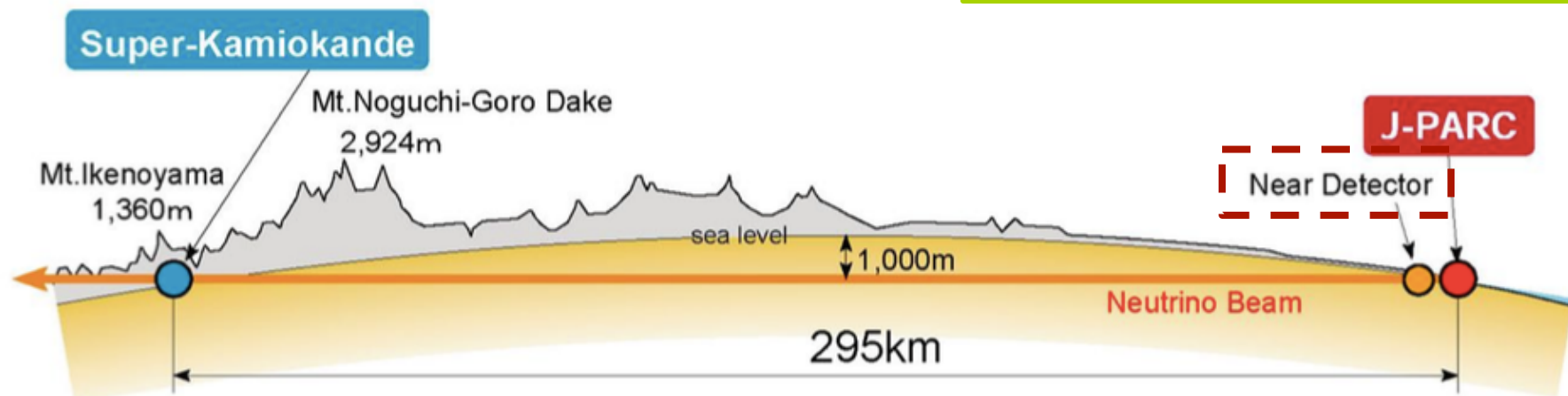
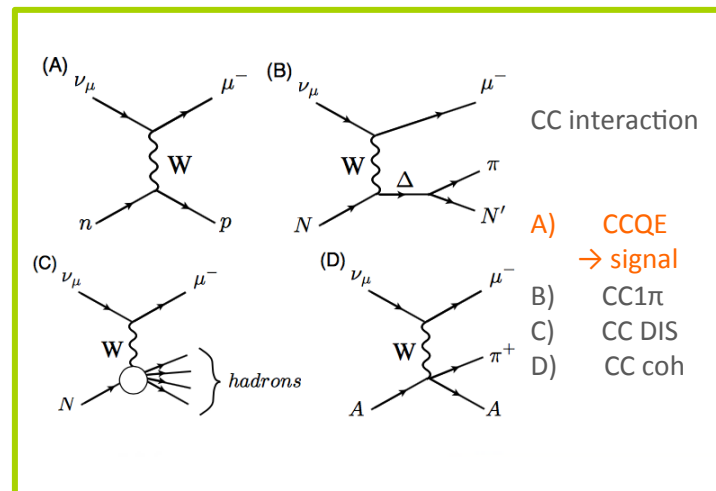
T2Kアップグレードに向けた 高性能ファイバートラッカーの開発

2016.03.01
京都大学 平本 綾美 (M1)

T2K experiment

❖ J-PARCからのニュートリノビームによる反応を**前置検出器 (ND280)**および**後置検出器(SK)**で観測することで、ニュートリノ振動のパラメータ(θ_{23} , δ_{cp})を測定している。

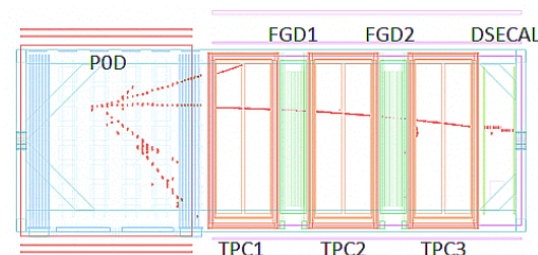
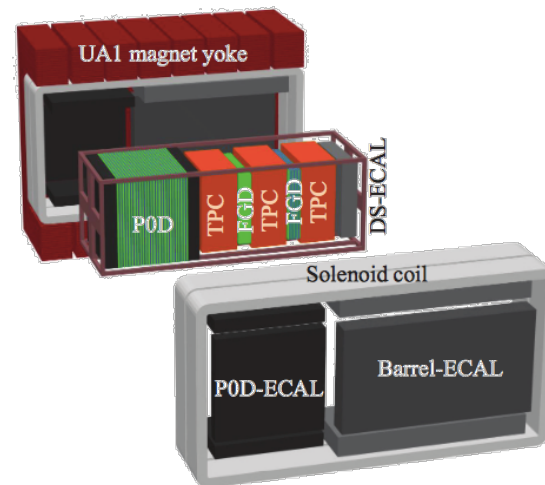
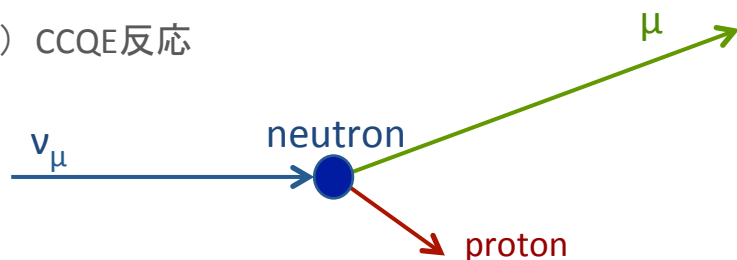
❖ どんな反応がどれだけ起きているのか正確に測る必要がある
→ 検出器の限界による系統誤差を減らしたい！



ND280 (Near Detector)

❖ND280におけるニュートリノ反応

例) CCQE反応



↑event displayの一例

シンチレータ内で起こるニュートリノ反応によって
出てくる二次粒子をTracking→反応モード識別

現在の前置検出器

- FGD(Fine Grained Detector)

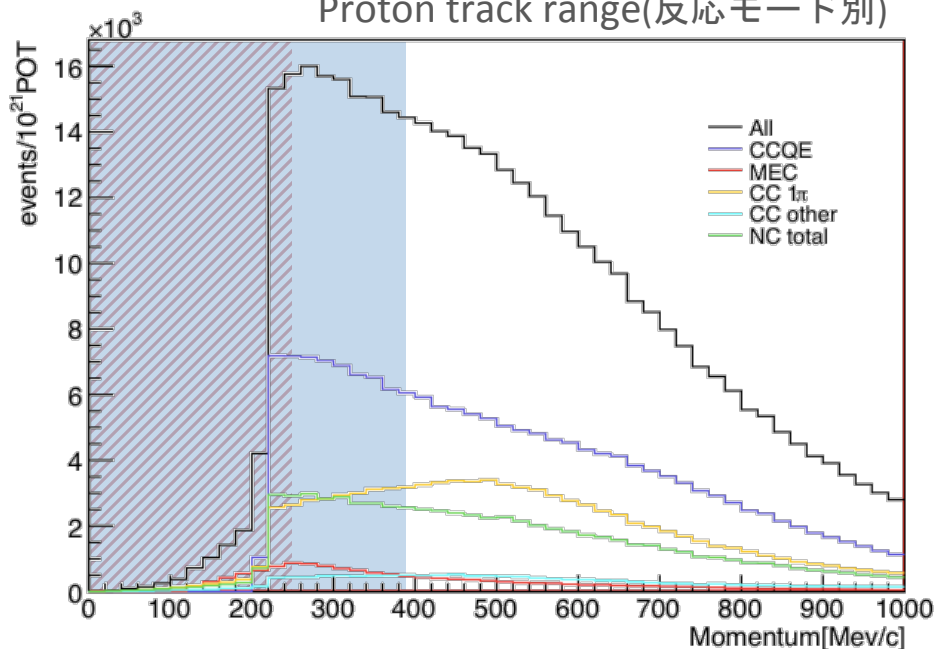
断面が約1cm×1cmからなるシンチレータバーでTracking

約**5cm以上**のtrackしか再構成できない=それより短いトラックは見えない

→反応モードを識別し間違える可能性がある

Proton track range

Proton track range(反応モード別)



❖ NEUTによるMC study

□ : 現在見えているTrack

■ : 1~5cm程度のTrack

▨ : 1cm以下のTrack

→5cm以上飛ぶものは全体の約56%

❖現状では運動量の小さなprotonはtrackingできない

1cm程度の飛跡でも精度よくTrackingできる検出器

→Scintillation Fiberを用いたトラッカーの考案

❖NEUT...ニュートリノ反応および、それによって生成された二次粒子の原子核内での反応をシミュレートするプログラムライブラリ。今回はdetectorの厚さを50cmとしてnormalizeしている。

Scintillation Fiber Tracker

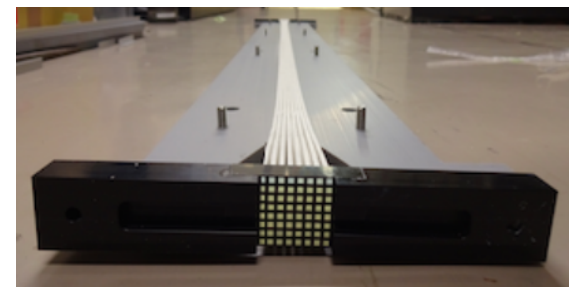
❖これまで (by 京大 山本さん)

2mm角ファイバー(w/反射材) 64本からなる $8 \times 8 = 64$ chのプロトタイプ
読み出しはMPPC Array(3mm $\times$ 3mm受光面64ch)

-2015年10月にe+ビームテストを実施

→1cm程度のTrack再構成に成功、

十分な光量(~ 40 p.e./ch)、Hit efficiency($>95\%$)を確認



しかし、このままでは実機として実現するにはch数が多すぎる
(2m $\times$ 2m $\times$ 50cmのサイズで約25万ch！)

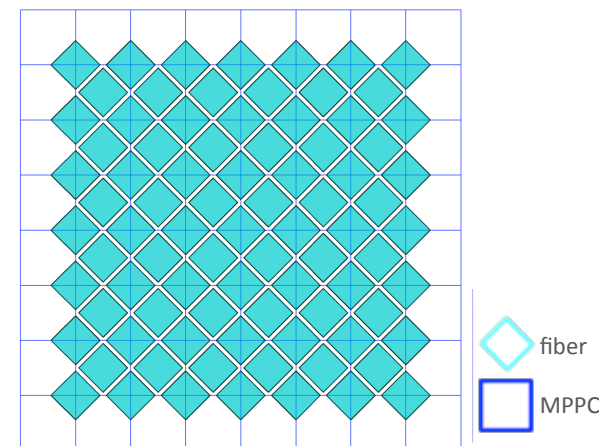
❖安いエレキを開発する？

❖いかにch数を減らすための工夫をするか？

❖ファイバーを細くする以外で位置精度を上げることができるか？

→右図のようなファイバー配置でプロトタイプを作成

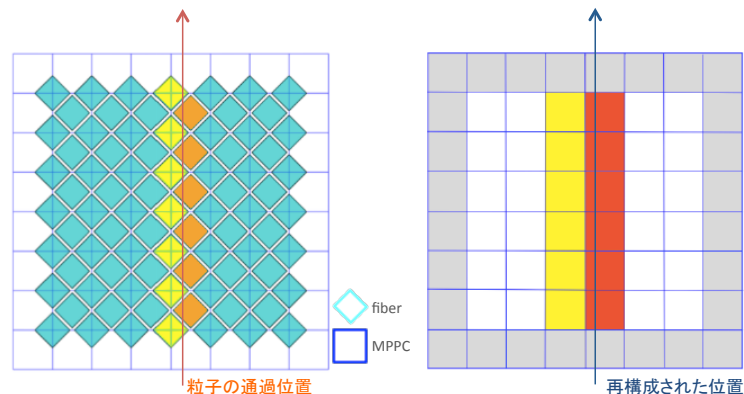
以下、このプロトタイプの評価をしていく



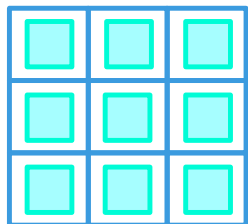
New tracker design

- ❖ ファイバーとMPPCが1対1対応ではない
- ❖ 通過した荷電粒子はファイバーのなかをすすむ距離に比例してエネルギーを落とす

→ 隣り合うMPPCの光量でmeanをとることによって
MPPCの幅以上に細かく位置を知ることができるはず



これまでのデザイン



あり

1本

178p.e./MeV

>95%

$$\frac{1}{\sqrt{12}}$$

わかりやすい

反射材

chあたりのファイバー

光量

Hit efficiency

分解能 σ

解析

なし

2本

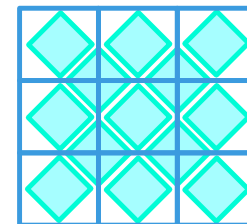
増える見通し

増える見通し

$$\frac{1}{2\sqrt{N}} \text{ (あとのスライド)}$$

むずかしい

新しいデザイン

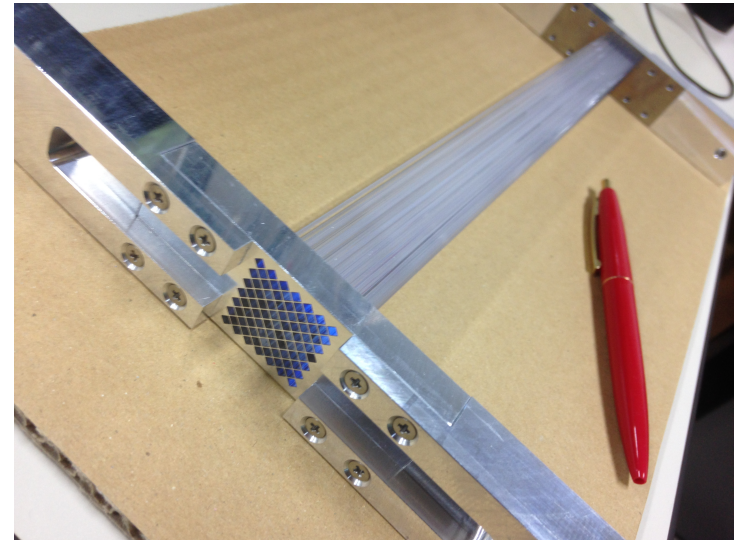
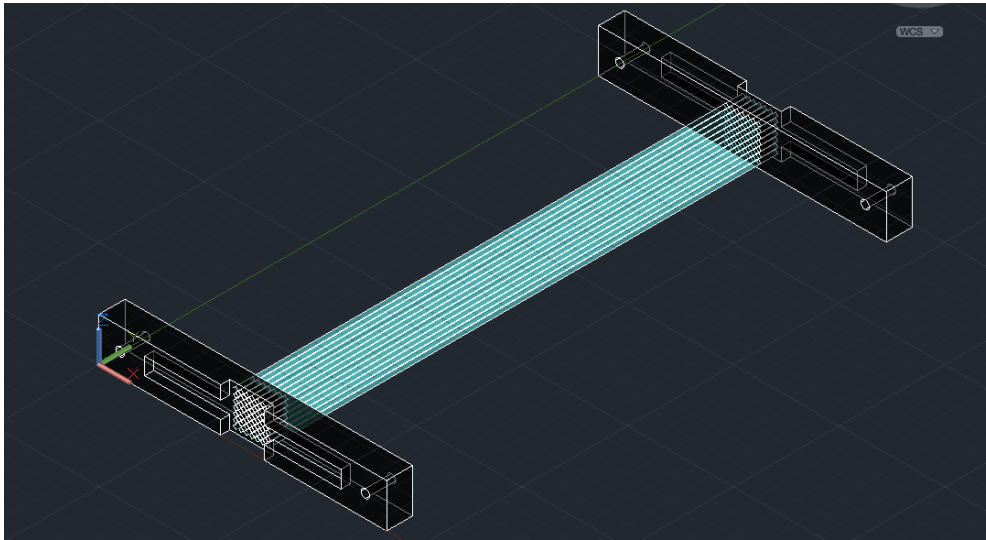
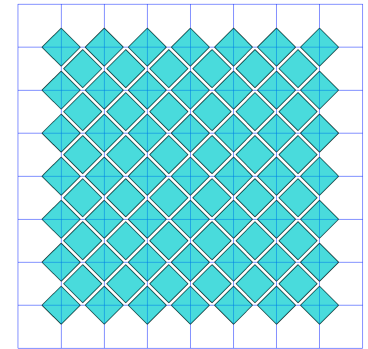


= 反応点周り自身をみるのには向いてない...?
→ ベストな使い方をよく考える必要がある

Prototype design

- ❖ 2mm角ファイバー (85本) + 3mm×3mm 64ch MPPC array (実質36ch)
- ❖ 既存のファイバーとMPPCの大きさの都合上、**ファイバー間に隙間**がある
→ 将来的にはMPPCの大きさを調整することで隙間をカバーできる

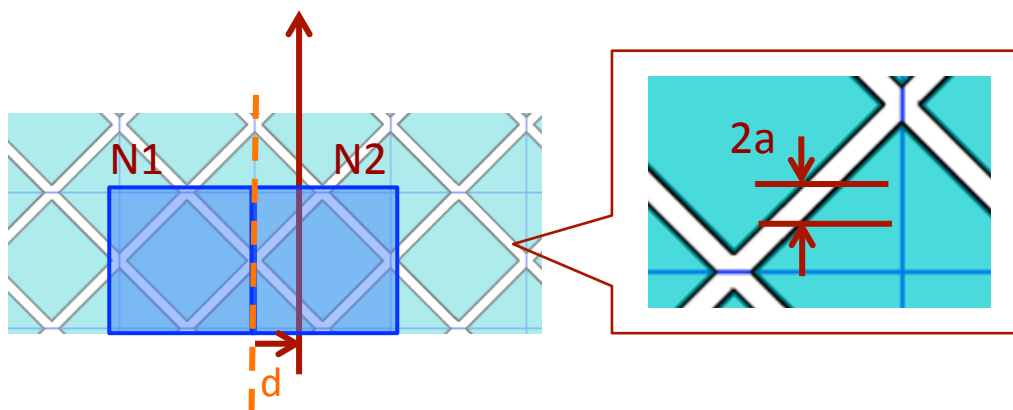
！ また今回は反射材なしで作成したので、クロストークの評価 (後述) が必要！



Reconstruction

❖どれくらいの精度が見込めるか？→GEANT4でシミュレーション

単純に重心をとるだけではファイバー間の隙間やクラッドの影響によって正確にreconstructできない
→隙間の補正が必要



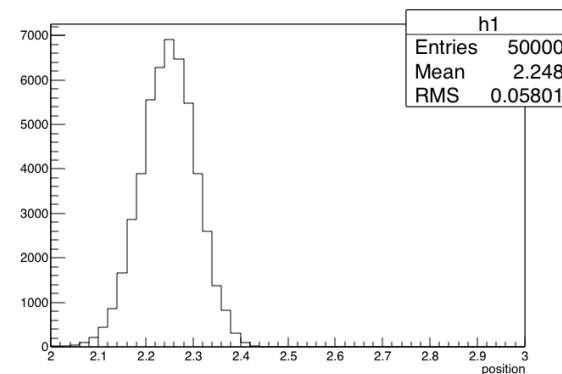
- ・ 1layerぶんの長さを飛んだ時の光量 : N_0
- ・ 左右それぞれMPPCの光量 : N_1, N_2
- ・ MPPC境界からの距離 : d
- ・ ファイバー間の隙間 : $2a$

$$N_1 = \left(\frac{1}{2} - d - a\right)N_0$$

$$N_2 = \left(\frac{1}{2} - d - a\right)N_0 + 2(d - a)N_0$$



$$d = (1 - 4a) \frac{1}{2} \frac{N_2 - N_1}{N_1 + N_2} + a$$



↑ $x = 2.25$ の位置に入射したとき

Reconstruction

$$d = (1 - 4a) \frac{1}{2} \frac{N_2 - N_1}{N_1 + N_2} + a$$

$$\sigma \sim \frac{1 - 4a}{2\sqrt{N}} \quad (N_1 \sim N_2 \text{ のとき最大})$$

❖ これをもとに、おおよその精度が予想できる。

いま、MPPCの幅 = 1、 $a = 0.037$ 、 $N \sim 84$

※MPPCから50cmのところに粒子が来たと想定した場合

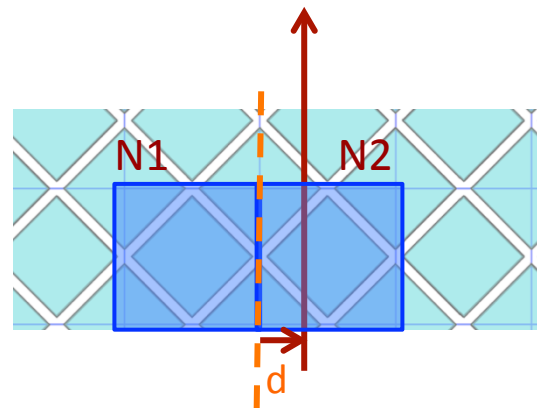
よって $\sigma \sim 0.046$ と予想

シミュレーション上では $\sigma \sim 0.055$ 程度になった。

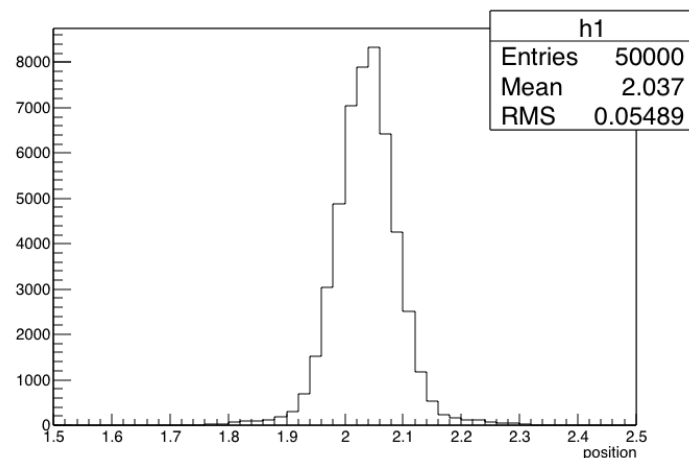
→ファイバー中での相互作用の影響と考える

この原理が実現できれば、

3mmのMPPCで $\sim 165\mu\text{m}$ 程度の精度がでる可能性！



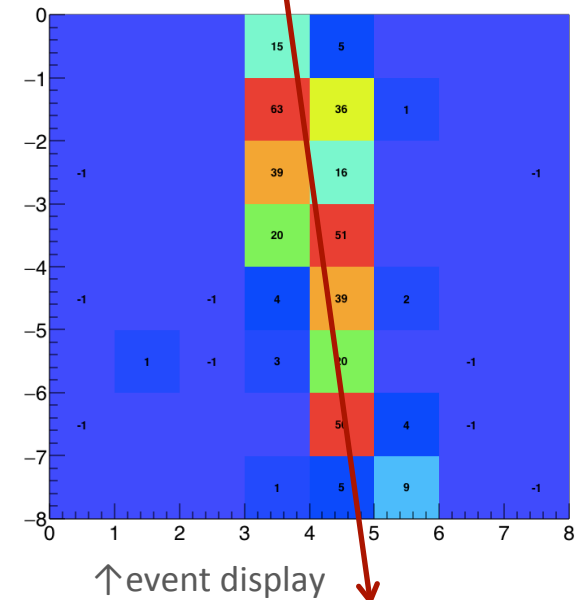
❖ $x = 2$ の位置に入射したとき



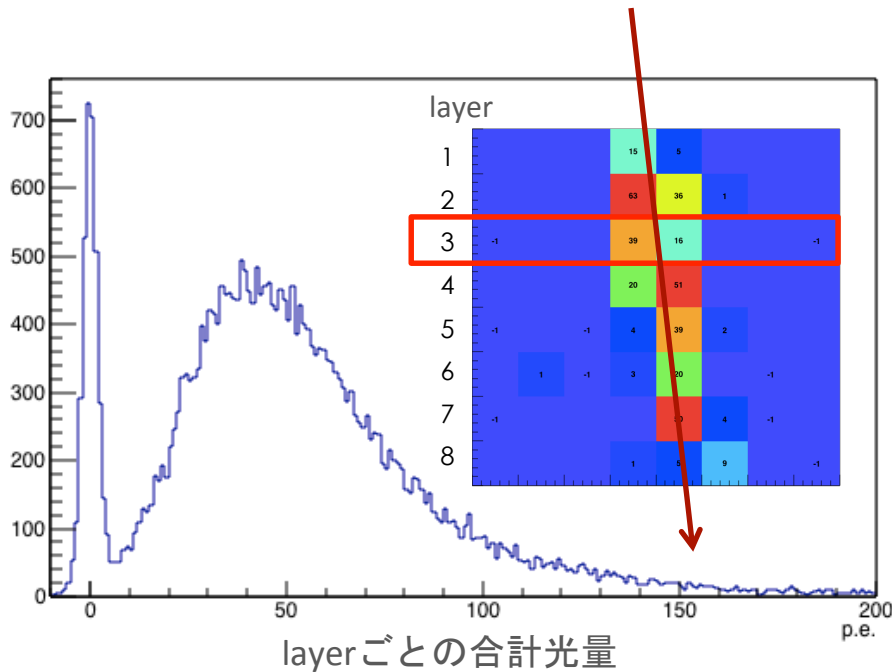
PMT A

fiber

PMT B



Light yield & Hit efficiency



❖ MPPCアレイ 64chのうち有効なchは中心の36ch

Hit = MPPCのlayerで合計光量が6p.e.以上

❖ layer2と7でHitがあったとき、あいだのlayerでHitがあるかでefficiencyを計算

layer 2 : 99.9

layer 3 : 99.8

layer 4 : 99.8

layer 5 : 99.7

Hit efficiency
99.7%以上 !

❖ 以前よりefficiencyが上がった(旧プロトタイプ : ~98.5%※ただしこのときは恒温槽に入れていない)

❖ 光量は十分に出ていると考えられるが、定量的にはbeamtestで評価する予定

Cross talk

❖ Scintillation fiberの仕組み

radiation(250nm) → polystyrene励起(300nm) → 1次波長変換(360nm) → 2次波長変換(450nm)

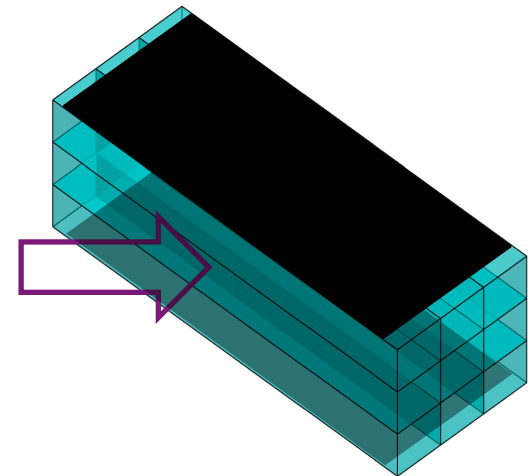
反射材がないので、UV光によるクロストークが心配
(クロストークが起こる原因についてはBackup参照)

❖ UV光の吸収長がわかればクロストーク率を概算することができる

setup

- ・ 2mm 角ファイバー 3×3本
- ・ 上下の面を遮光
- ・ 横からUV ledで光をあてる(LED ↔ ファイバー : 約20cm)

→ UV光はほぼまっすぐ飛んでいると考える

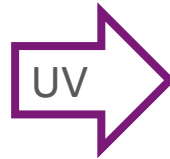


Cross talk – result -

❖chごとの光量

- ダークカレントを引き算
- 1層目：ガウシアンピーク
- 2、3層目：Poisson分布期待値

これを、吸収率 $A=1-\exp(-\alpha x)$
としてフィッティングすることで
吸収長 $1/\alpha$ を概算



300nm(p.e.)

355nm(p.e.)

139	0.63	0.68
113	0.39	0.43
90	0.39	0.53

108	0.63	0.46
93	0.83	0.35
81	0.48	0.24

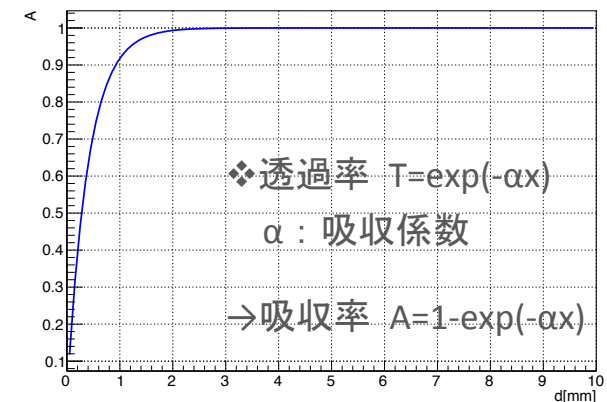
❖2→3層目であまり減っていない：吸収以外の効果？

今回は概算なのでこのまま用いることにする

$1/\alpha \sim 0.38\text{mm}$ (300nm), 0.41mm (355nm)となった

→1mm進むと10%くらいしか残っていない

❖実際UV光は4π方向に出るので、隣のファイバーに届くまでの距離
は1mm以上になるものが多い＝**クロストークは10%以下の見込み**



Summary & Next step

- ❖位置精度の高いファイバートラッカーのプロトタイプを作成
 - ❖宇宙線によるテストの結果、十分な光量とefficiency99.7%以上を確認
 - ❖クロストークは10%以下になると予想
- ビームテストで評価

- ・ 今後、ビームテストを行って位置精度の評価を行う
- ・ よりよいreconstructionを確立する
- ・ ななめに飛ぶ粒子の応答をシミュレーション
- ・ TDCを用いた時間分解能の測定
- ・ ch数を減らすためのさらなる工夫の考案

- ❖最も効果的にこのアイデアを活かせる将来デザインを検討中！（アイデア募集中）

Buck Up



Neutrino Oscillation

フレーバー固有状態は質量固有状態の混合状態として

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{MNS}^{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

と書ける。

Pontecorvo-Maki- Nakagawa-Sakata(PMNS) 行列

$$\begin{aligned} U_{MNS} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} c_{12}s_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

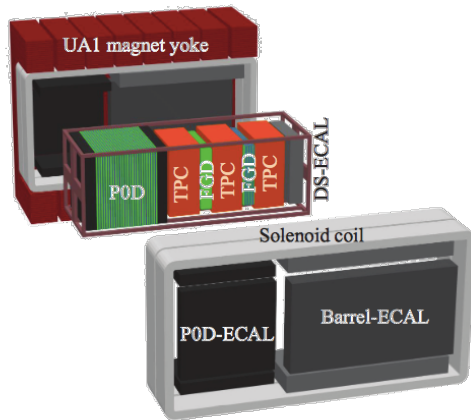
質量固有状態の時間発展 $|\nu_k(t)\rangle = e^{-i(E_k t - p x)} |\nu_k\rangle$ からフレーバー固有状態は

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_{\mu=e,\mu,\tau} \left(\sum_k U_{\alpha k} e^{-i(E_k t - p x)} U_{\beta k}^* \right) |\nu_\beta\rangle$$

となるのでここから計算すると、 $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動確率は以下のようになる。

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \left(\frac{1.27 \Delta m_{23}^2 [\text{eV}^2] L [\text{km}]}{E_\nu [\text{GeV}]} \right)$$

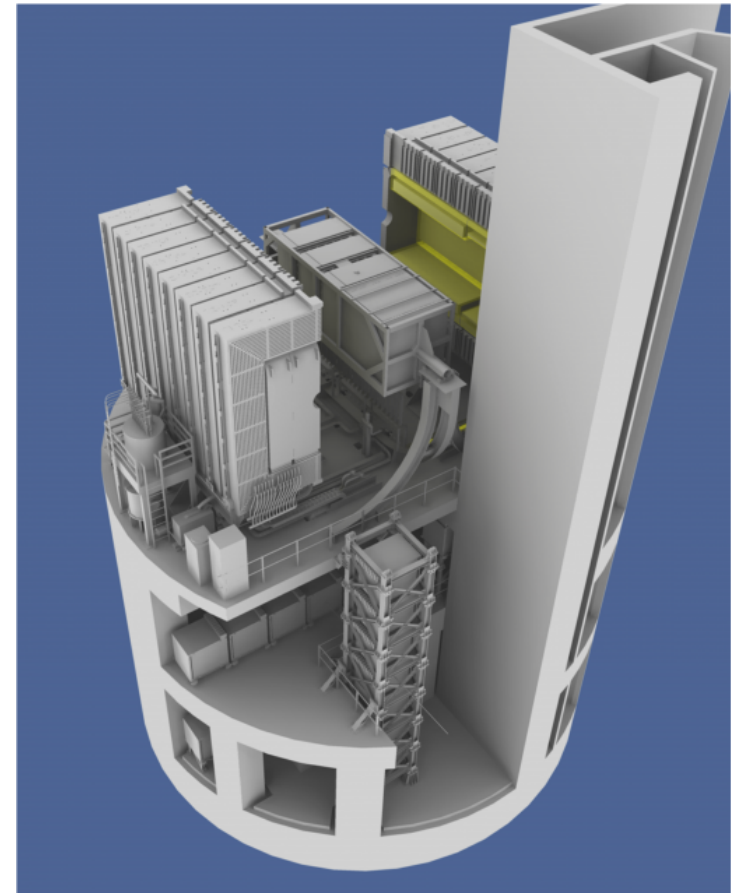
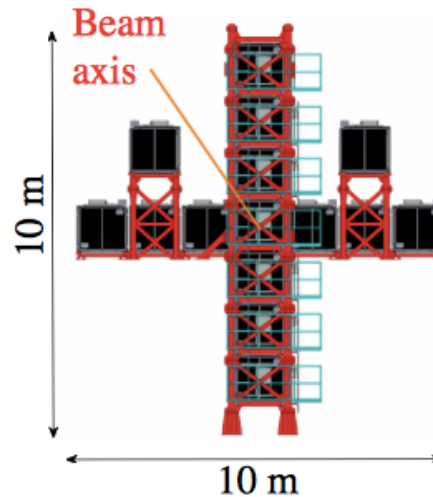
ND280 detectors



← off-axis

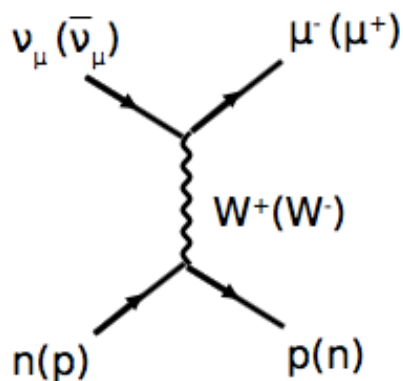
- UA1 magnet
- FGD
- P0D
- TPC
- ECAL
- SMRD

on-axis → : INGRID



CCQE/MEC

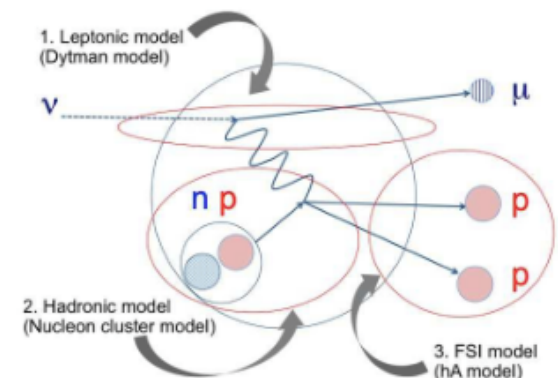
T2Kにおけるイベント=CCQE



$$E_v^{\text{rec}} = \frac{m_n E_\mu - m_\mu^2 / 2}{m_n - E_\mu + P_\mu \cos \theta_\mu}$$

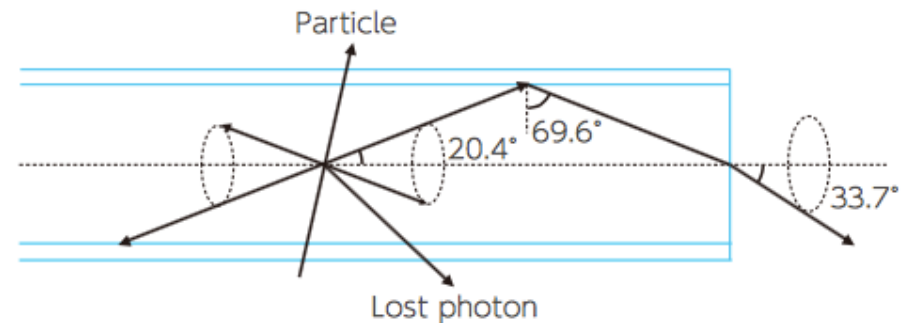
二体問題なのでニュートリノエネルギーを再構成できる

これと混同しやすいのがMEC(2p2h)であり、二つ以上の核子が出てくると考えられている。
 ここで出てくる陽子は運動量が低いので、片方を見逃すとCCQEと間違えてしまう。
 こういった反応をファイバートラッカーで見ることができるかも？



Scintillation fiber

ポリスチレン
+シンチレーション光をだすもの
+ 2種類の波長変換剤



radiation(250nm)→ polystyrene励起(300nm)→ 一次波長変換(360nm)→ 二次波長変換(450nm)

2mm角ファイバーはコア(n=1.59)+クラッド(n=1.49)でできている

Beam test w/ e⁺

❖ 東北大学電子光物理学研究センター GeVガンマ照射室

90 MeV 電子LINAC

↓

1.3 GeVシンクロトロン

STB (ストレッチャーブースターリング)

↓

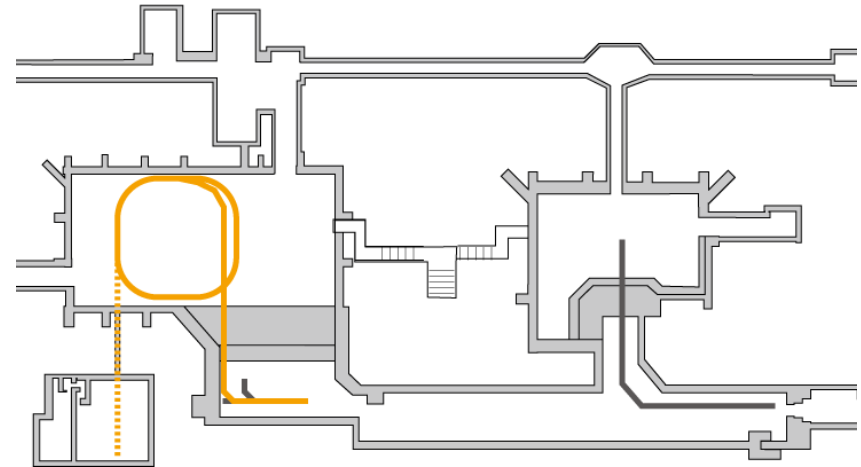
GeVガンマ照射室

❖ ビーム

- e⁺
- エネルギー : ~600MeV
- ビーム径 : ~2cm

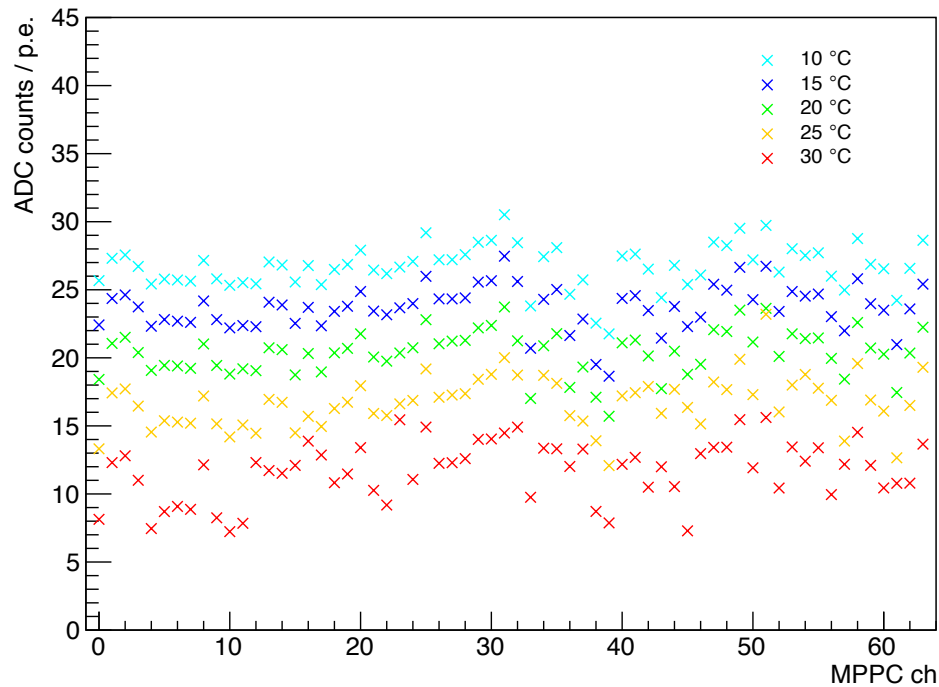
❖ 結果

- Hit efficiency > 95%, 光量~40p.e./hit (MPPCから75cmの距離のところ)
- Attenuation length > 2m

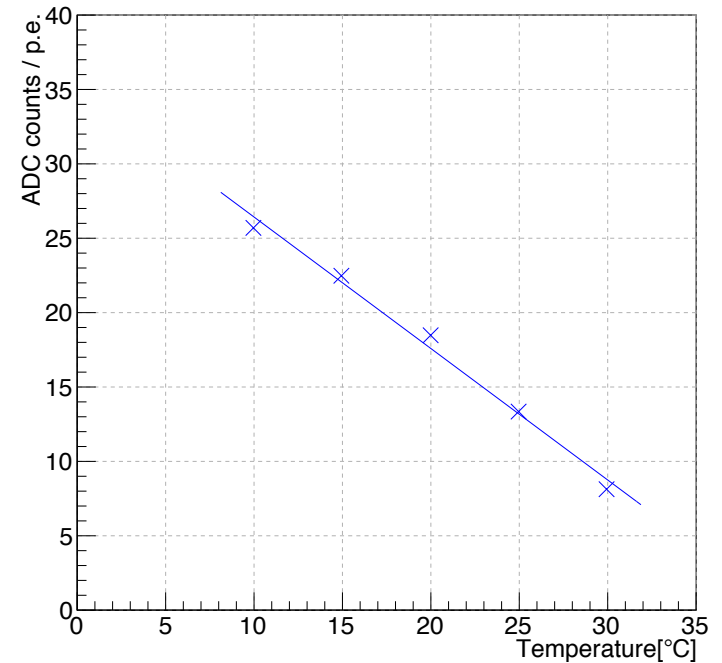


MPPC array

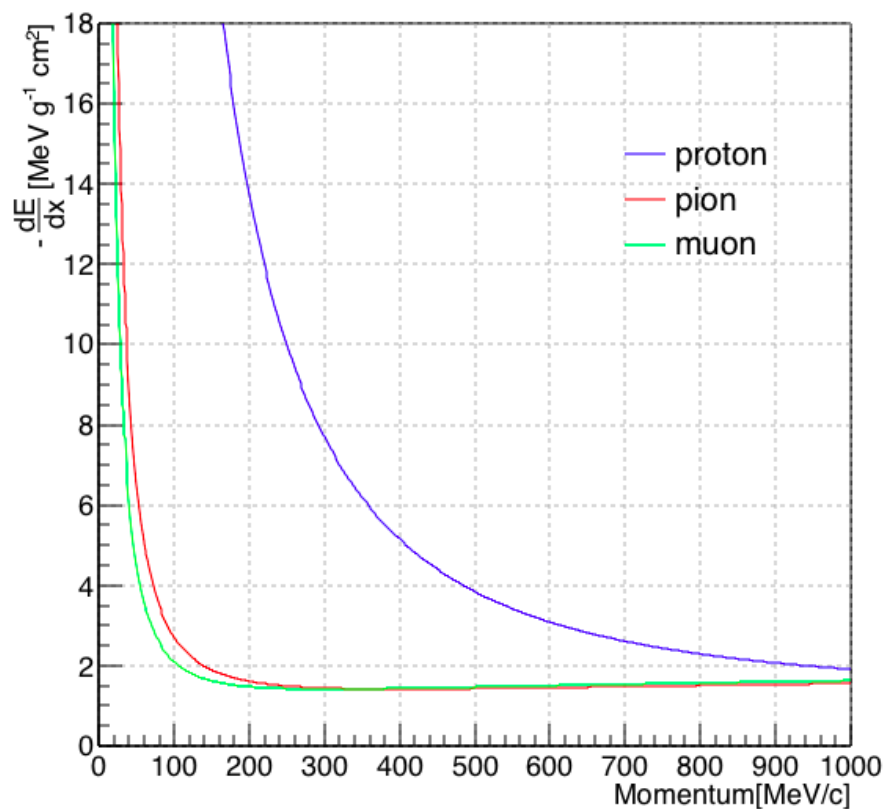
- ❖ MPPCアレイのゲインを恒温槽の温度を変えて測定
- ❖ 温度が上がるほど V_{bd} が上がるのでゲインは下がる



あるchでの温度vsゲイン



Background

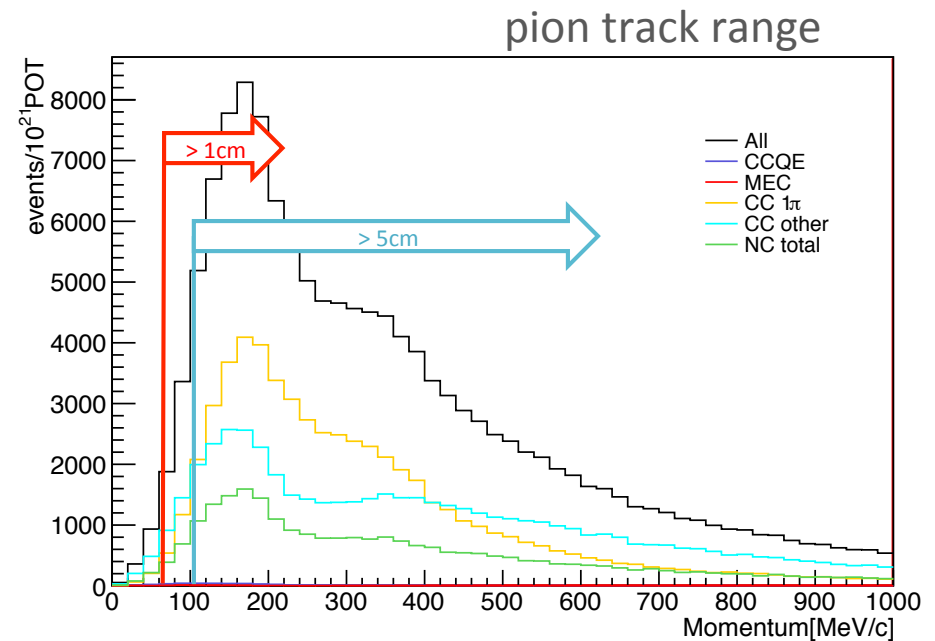
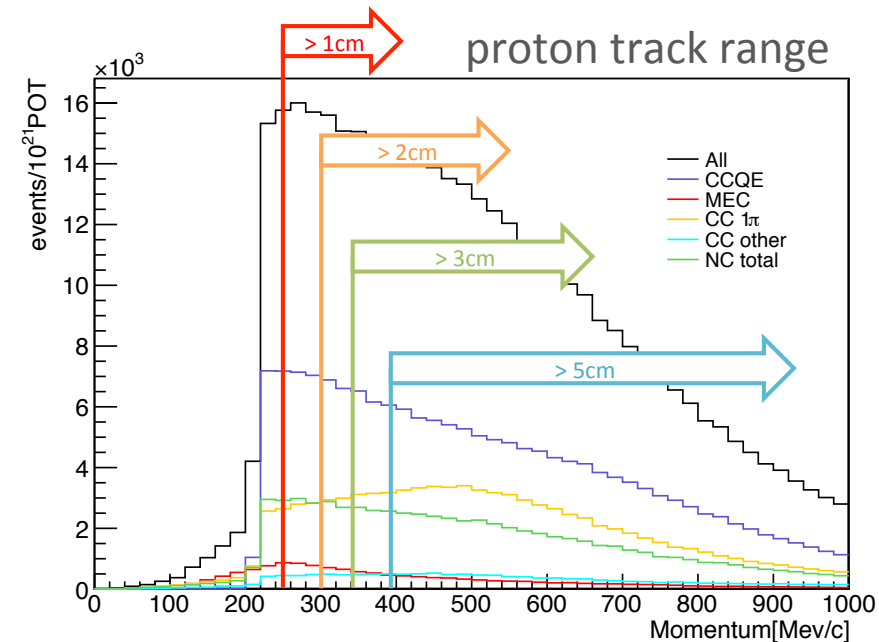


粒子識別は dE/dx で行うことができる

pionはprotonのバックグラウンドになりうる

今後、シミュレーションやビームテストが必要

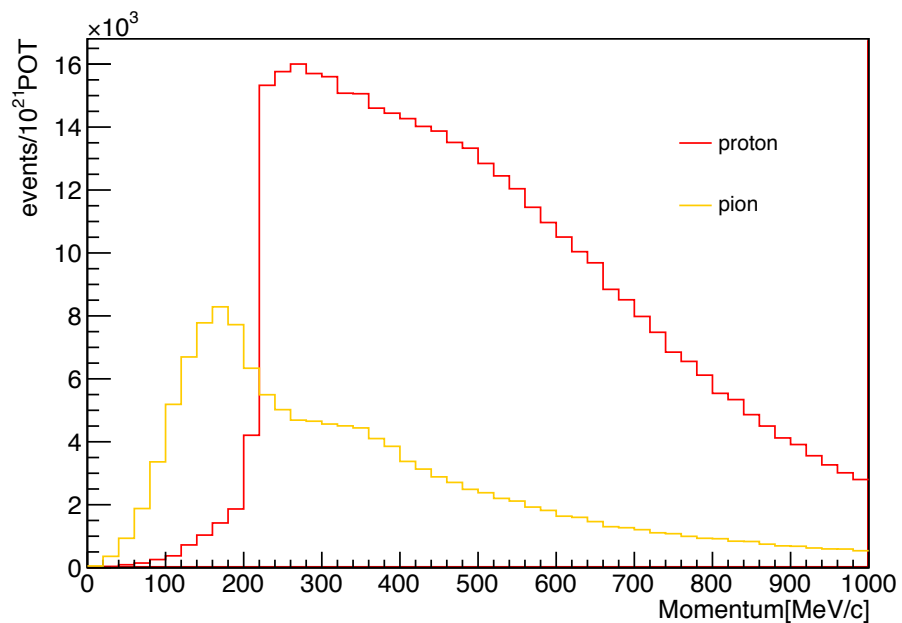
Proton/Pion track range



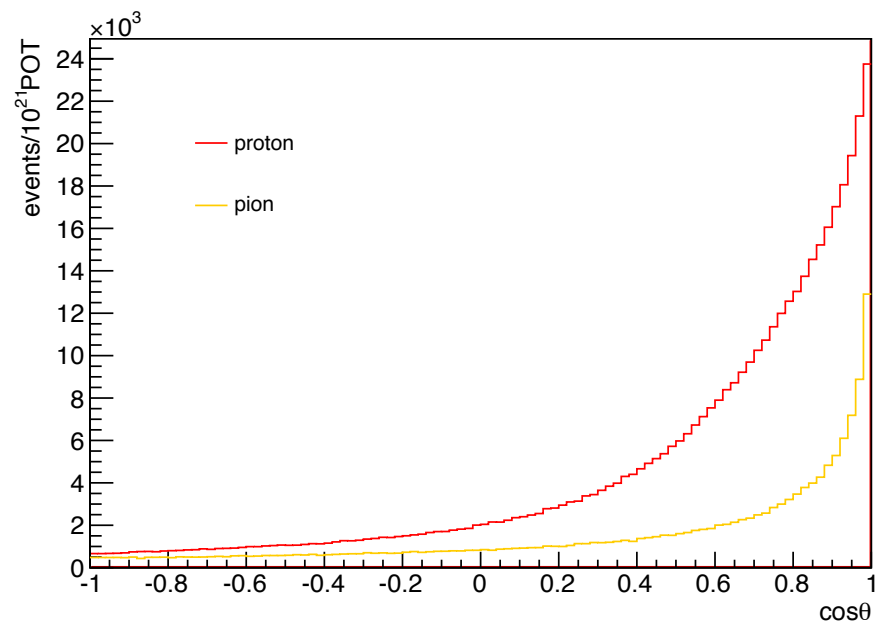
pionは運動量がちいさくてもよく飛ぶ

NEUT

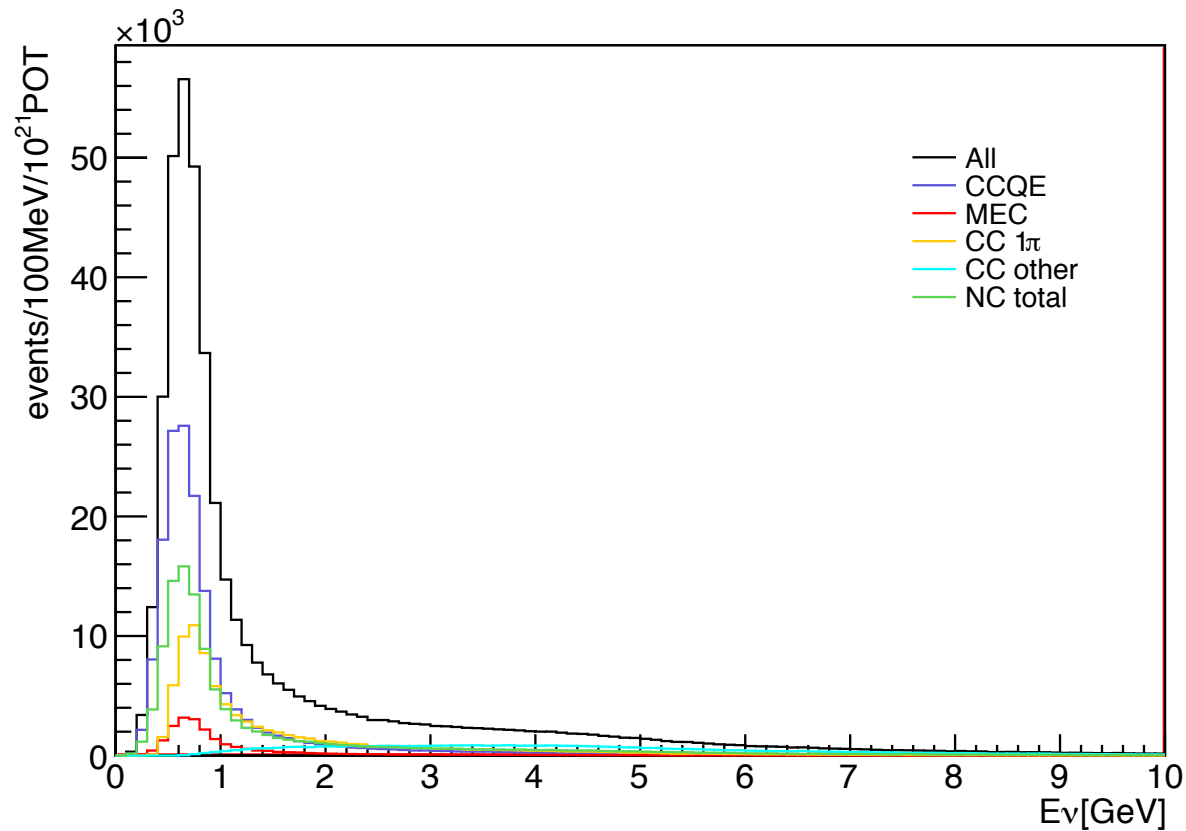
proton/pion pid
momentum



cos

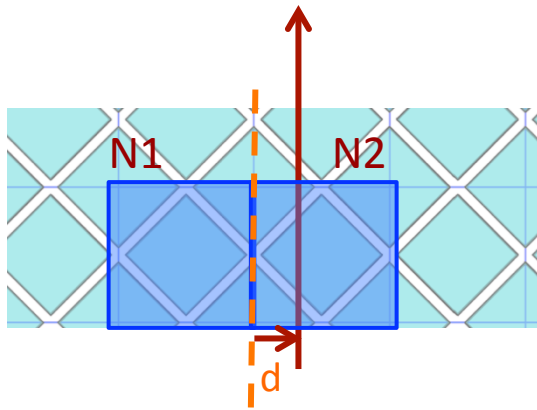


NEUT # of event



- ・ ターゲットの厚さ50cmのとき
- ・ POT=proton on target

Reconstruction



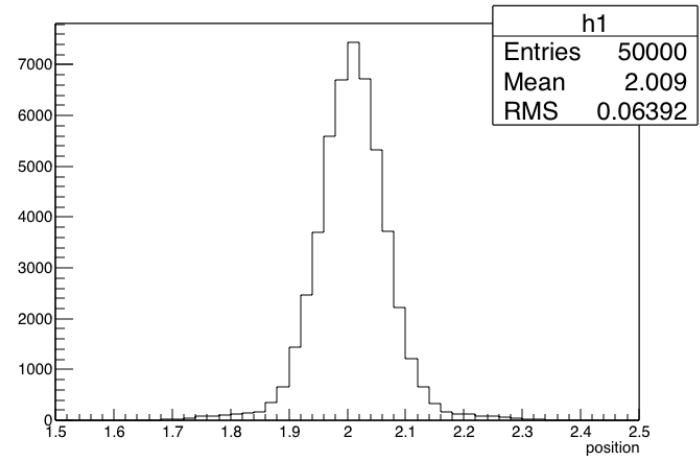
$$d = (1 - 4a) \frac{1}{2} \frac{N_2 - N_1}{N_1 + N_2} + a$$

$$\sigma \sim \frac{1 - 4a}{2\sqrt{N}} \quad (N_1 \sim N_2 \text{ のとき})$$

$d < a$ ではこの式は正しくない

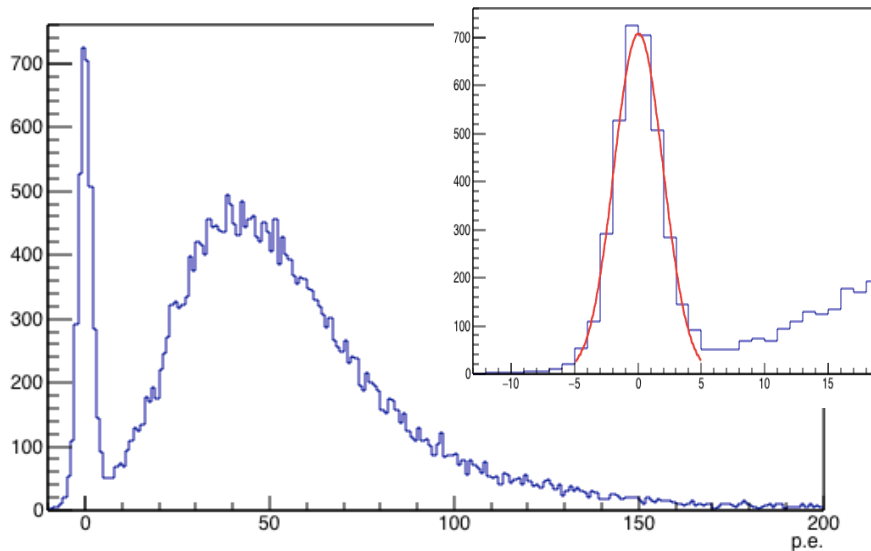
→将来的にはギャップはcladdingのぶんだけになるので
大きな問題ではない

❖あるいは $d=0$ 付近だけべつの方法を考える？



❖ $x = 2$ の位置、隙間をなくした場合
→正しい位置に再構成される

Hit efficiency Threshold



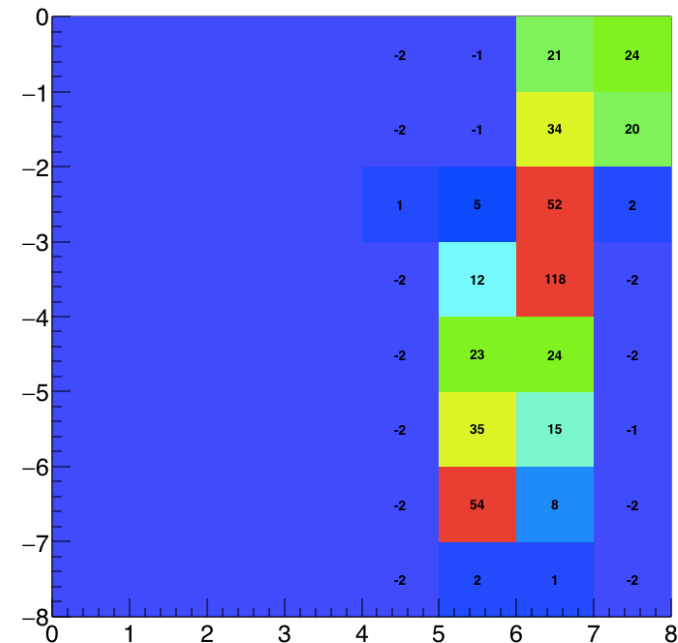
←ペDESTALをフィッティング

$$\sigma = 1.93$$

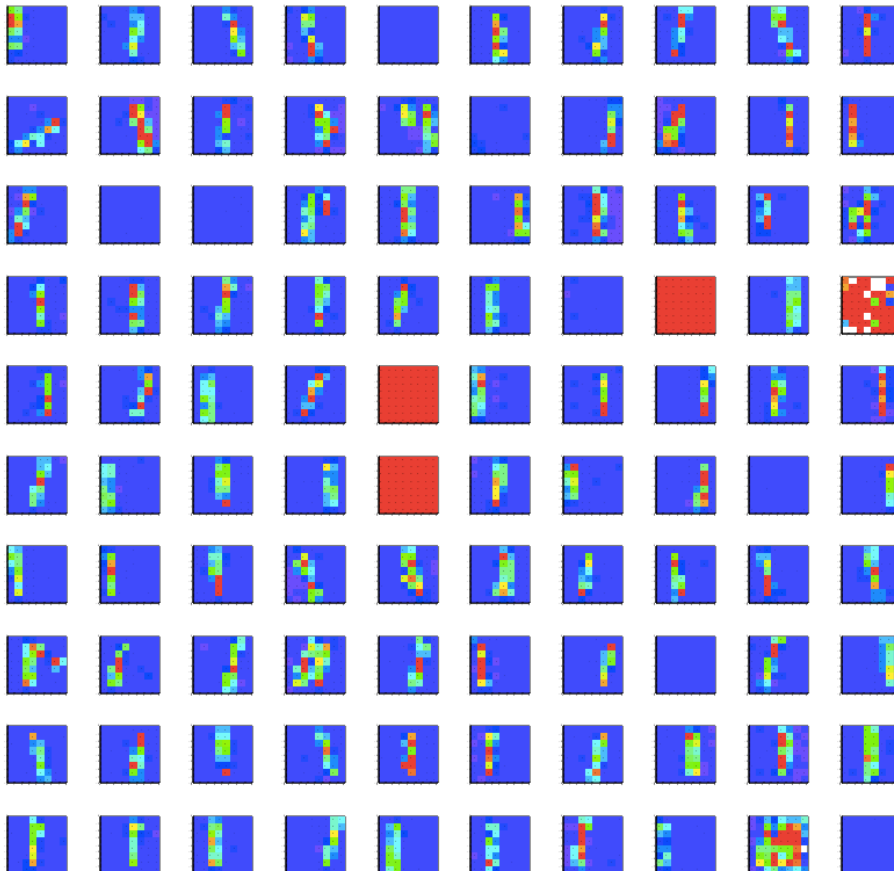
3 σ で6.p.eとしてスレッシュホールドを決定

❖なぜペDESTALが太いのか？

- ・エレキのクロストーク（最有力）
- ・ファイバー/MPPCのクロストーク



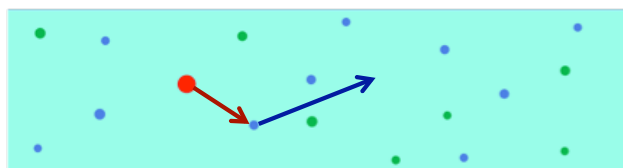
Hit efficiency Threshold



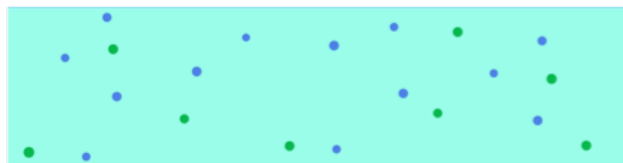
エレキのクロストークと同様の原因？
で、たまに全chに信号が来ることがある。

宇宙線での測定でのみ確認
3~4/100回（1時間に1回程度）起こっている

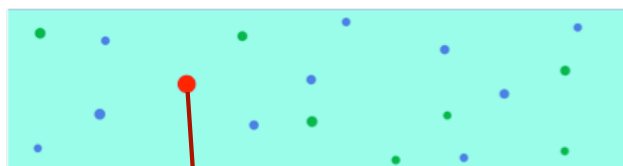
Cross talk



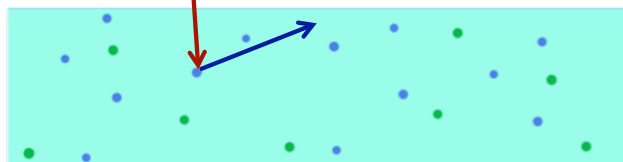
- シンチレーション光
- 一次波長変換
- 二次波長変換



クロストークしていない



クロストークしている



❖ クロストークの起こる原因

シンチレーション光が発生したファイバーの中では波長変換されず隣のファイバーまで透過することでクロストークしてしまう。

Cross talk -absorption length-

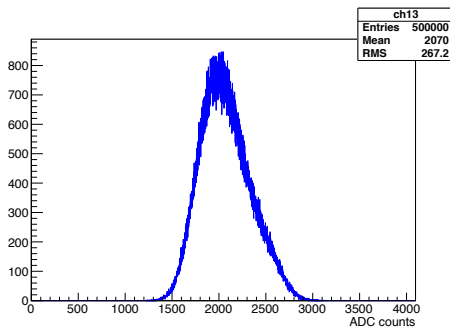
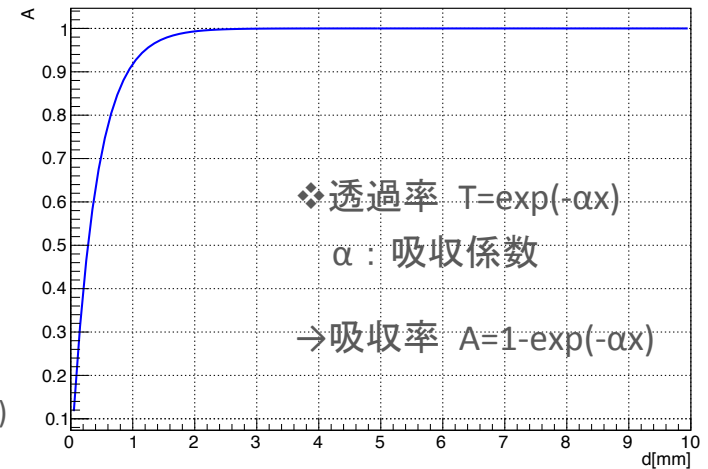
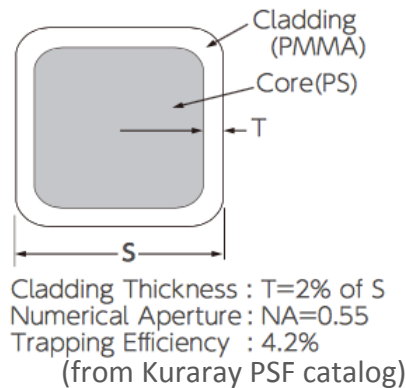
❖ 1,2,3層目での光量をP1,P2,P3とすると

$$P1 = I_0(1-\exp(-\alpha x))|_{x=1.96}$$

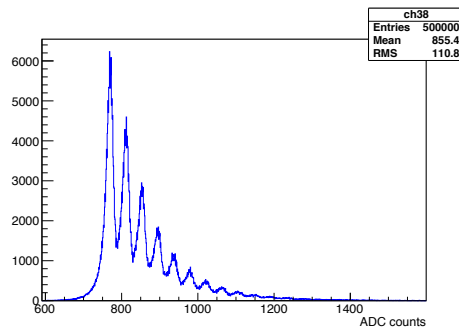
$$P1+P2 = I_0(1-\exp(-\alpha x))|_{x=1.96*2}$$

$$P1+P2+P3 = I_0(1-\exp(-\alpha x))|_{x=1.96*3}$$

→これを解けば吸収係数 α がわかるはず



1層目



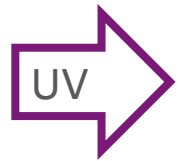
2層目

❖ 2,3層目はpoisson分布であると考え、
ペDESTALのエントリー数から期待値
を算出

Cross talk -absorption length-

❖ α の値

吸収率 $A=1-\exp(-\alpha x)$



300nm(p.e.)

139	0.63	0.68	2.58±0.31
113	0.39	0.43	2.72±0.32
90	0.39	0.53	2.56±0.36

355nm(p.e.)

108	0.63	0.46	2.52±0.24
93	0.83	0.35	2.36±0.15
81	0.48	0.24	2.55±0.18