

T2K実験次世代前置検出器SuperFGDにおける光漏れの影響の評価

首都大学東京 高エネルギー実験研究室

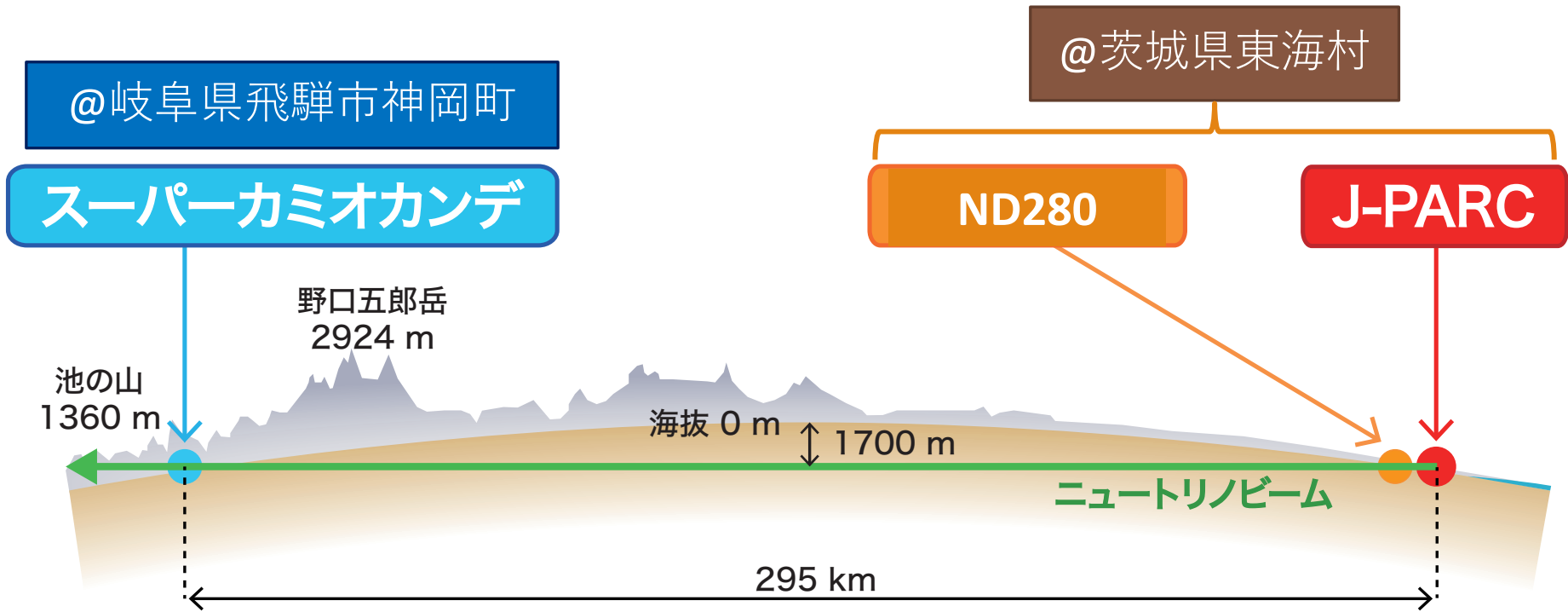
栗田口唯人

発表内容

- T2K実験の概要
- T2K実験で用いられる検出器について
- ビーム試験とシミュレーションによる新型前置検出器の性能評価

T2K実験の概要

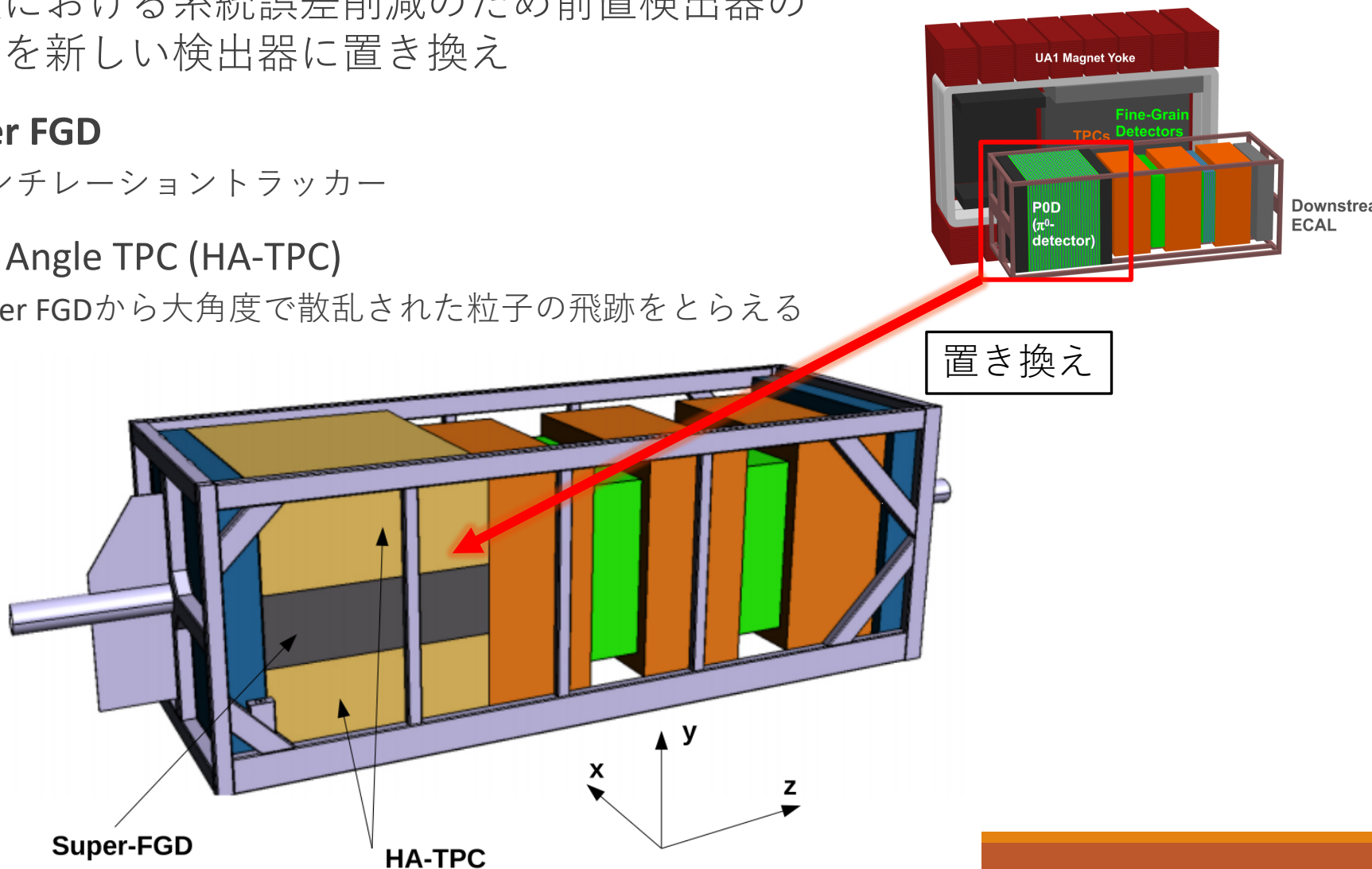
- 前置検出器（ND280）・後置検出器（スーパーカミオカンデ; SK）によってニュートリノの種類・エネルギーなどを測定
- ニュートリノ振動を観測



T2K実験 断面図

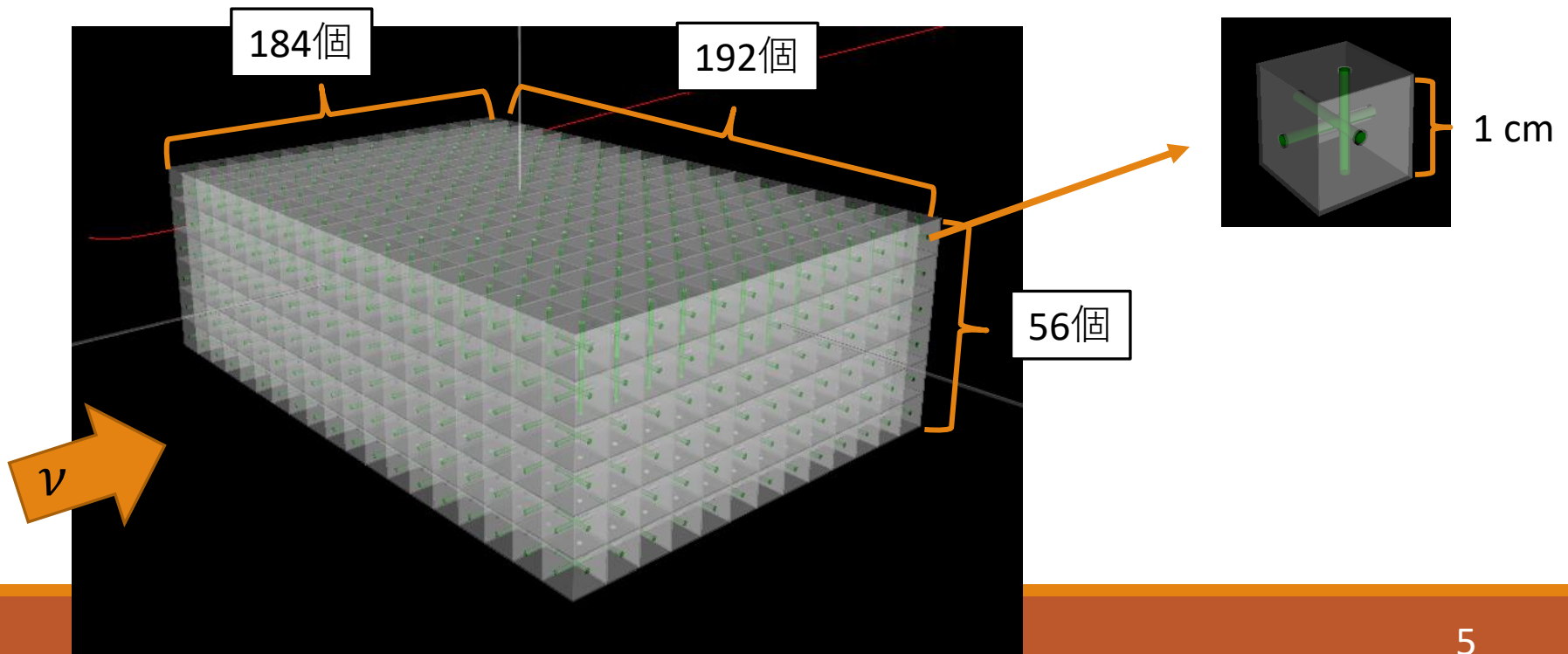
ND280 アップグレード

- 実験における系統誤差削減のため前置検出器の一部を新しい検出器に置き換え
- **Super FGD**
 - シンチレーショントラッカー
- **High Angle TPC (HA-TPC)**
 - Super FGDから大角度で散乱された粒子の飛跡をとらえる



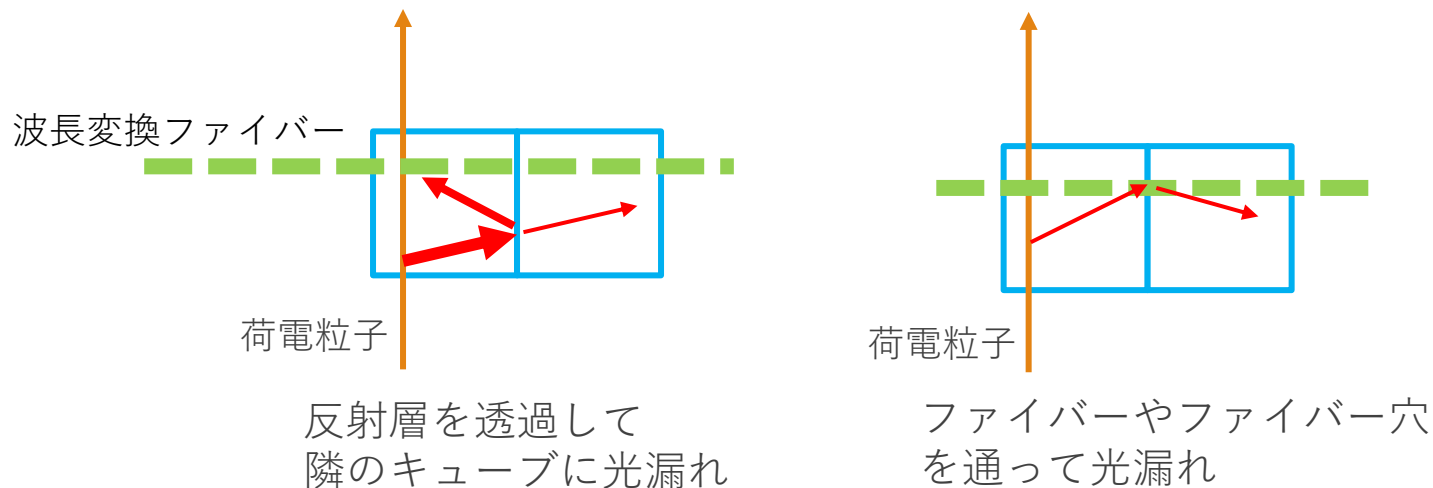
SuperFGD

- 1 cm立方のシンチレータを 192 x 184 x 56 個組み合わせて構成
- キューブ数：およそ198万個
- キューブに3方向から波長変換ファイバーを通し、ファイバーの末端で光検出器MPPCにより光を検出
- どの方向に進む飛跡も捉えられる



SuperFGDで懸念される点

- シンチレータは隣接キューブに光が漏れないように白色の反射層で覆われている
- しかし、一部は隣接キューブに光漏れしてしまう
→クロストーク
- クロストークが検出器の性能を低下させるおそれがある



クロストークの例

本研究の目標

- SuperFGDでのクロストークをビーム試験と光学シミュレーションの両面から定量的に評価
- 測定器全体のシミュレーション（運動量再構成や粒子の種類特定などを行うツール）にクロストークの効果を取り入れ、精度向上に寄与

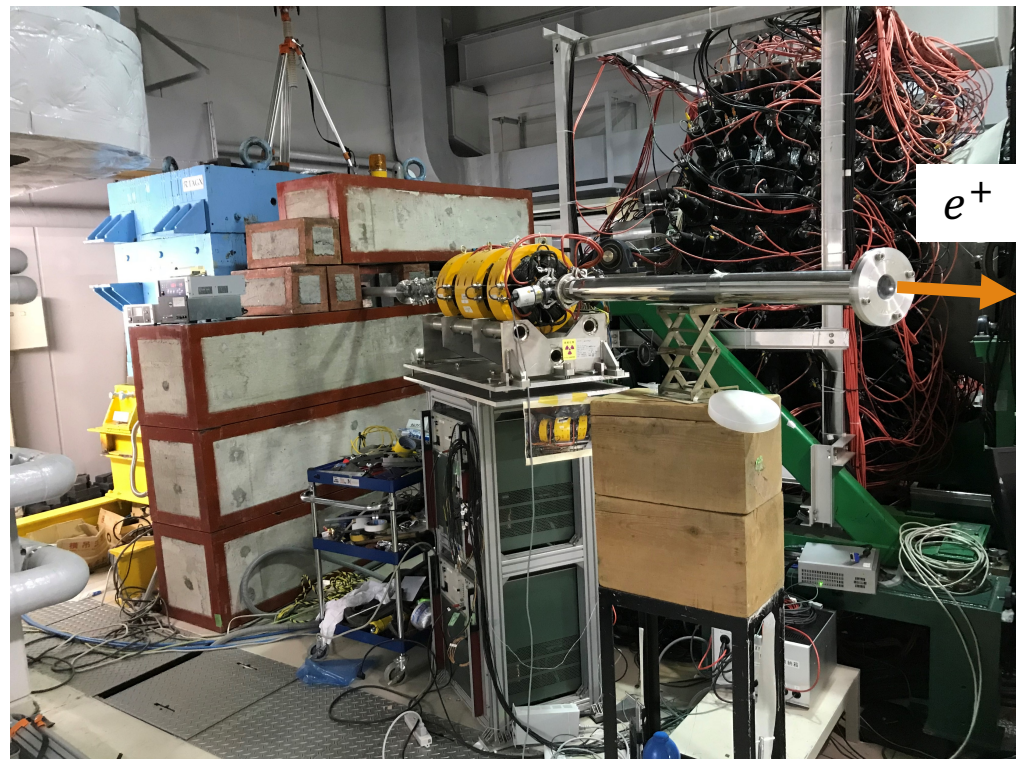
ビーム試験とシミュレーション による性能評価

ビーム試験の目的

- SuperFGDで使用するシンチレータキューブに陽電子ビームを照射し，クロストークを評価
- 加えて，キューブへのビーム入射位置を考慮したクロストーク解析も行なう（キューブ内の構造が複雑なため）

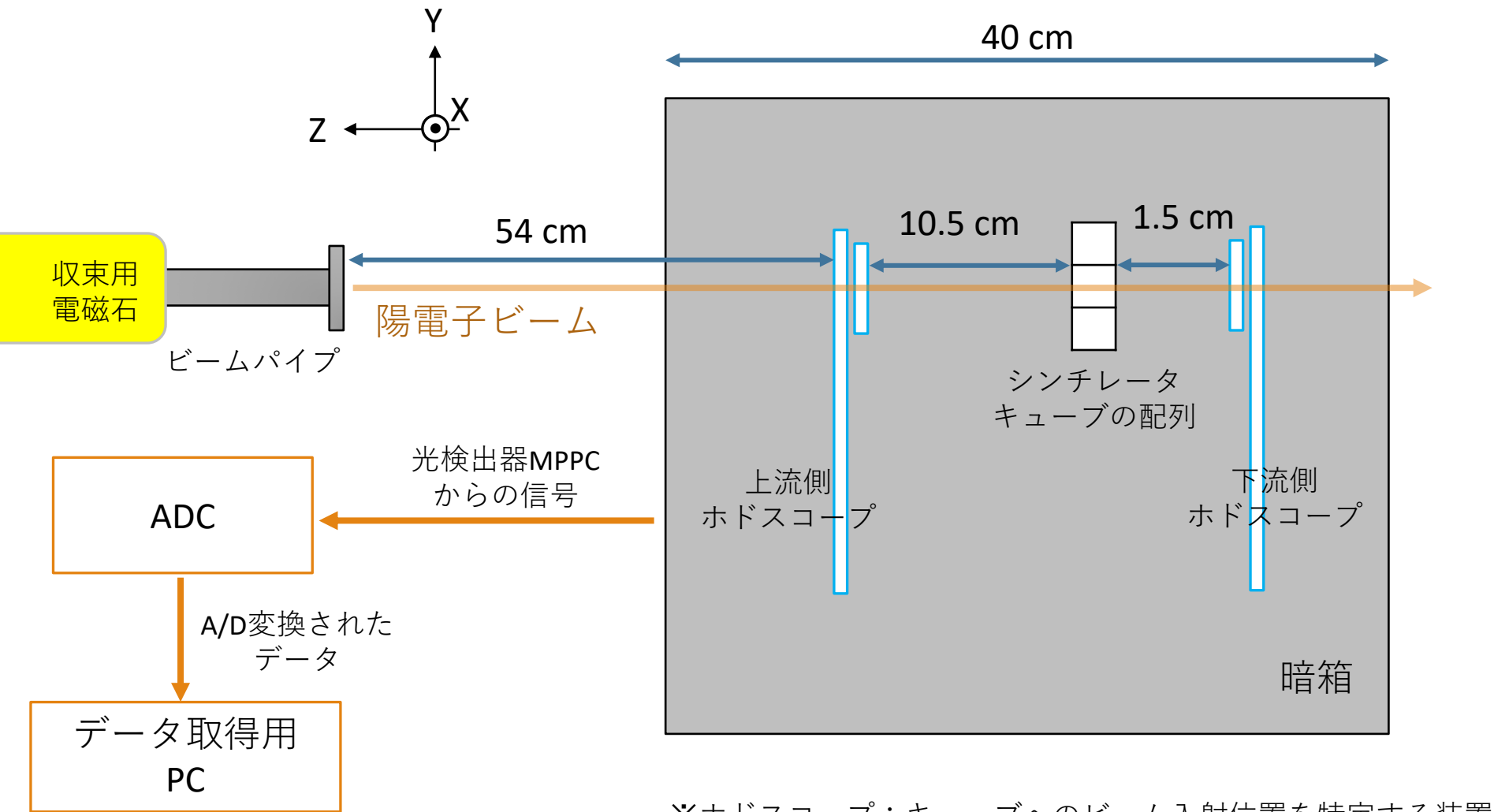
ビーム試験概要

- 実験日時：2018年11月13日～15日
- 場所：東北大ELPH（Research center for **E**lectron **P**Hoton science）
- 陽電子ビームライン
 - 運動量： $\sim 500 \text{ MeV}/c$
 - ビームサイズ： $\sigma_x = \sigma_y = 7 \text{ mm}$
 - ビームレート：2.7 kHz



陽電子ビームライン

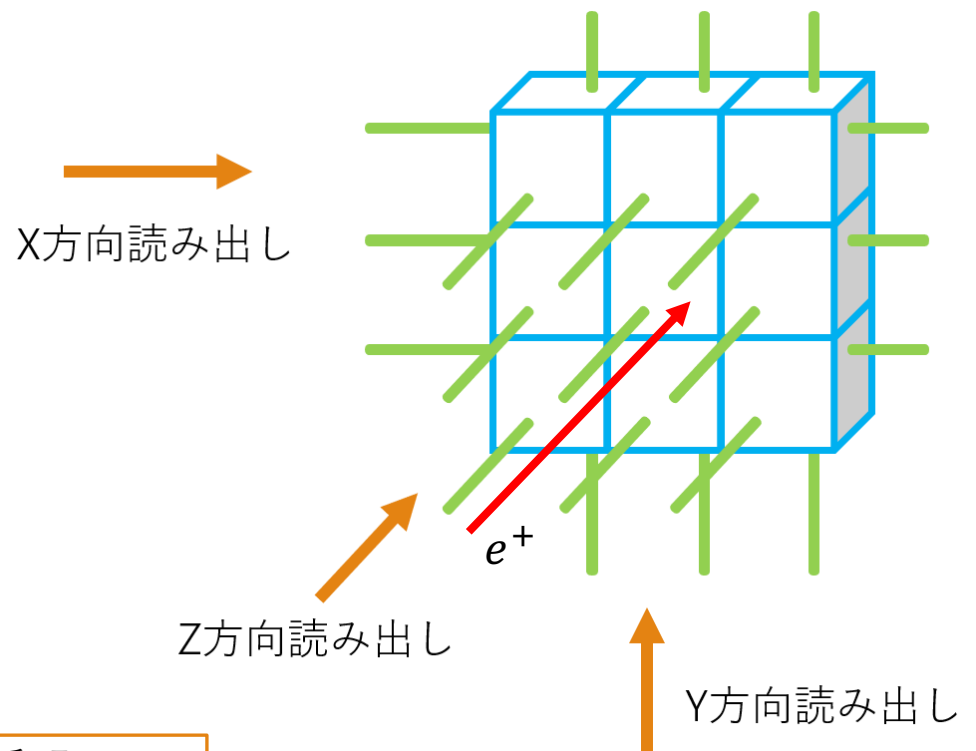
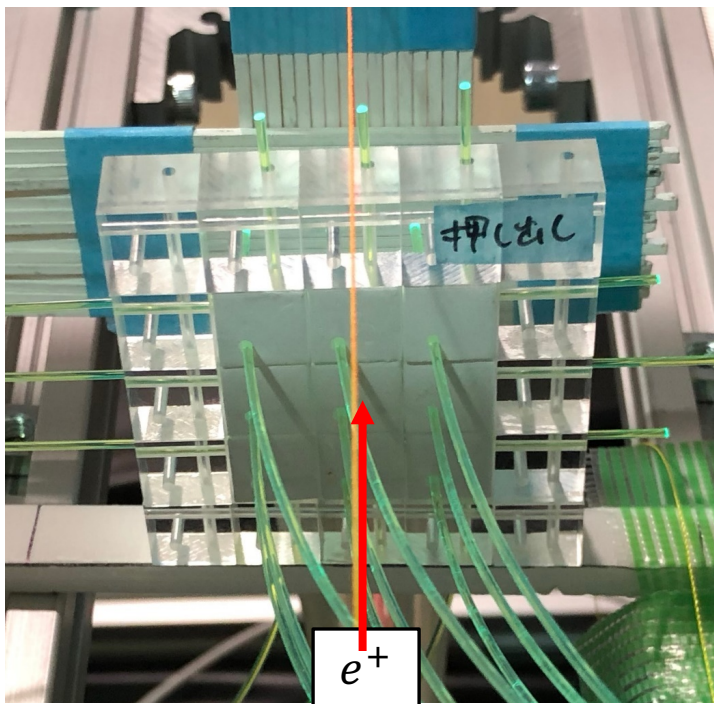
ビーム試験の全体セットアップ



※ホドスコープ：キューブへのビーム入射位置を特定する装置

キューブ配置

- 9つのキューブを用いて8方向（上下左右＋斜め方向）へのクロストークを評価
- 中央のキューブの中心がビーム中心となるように配置

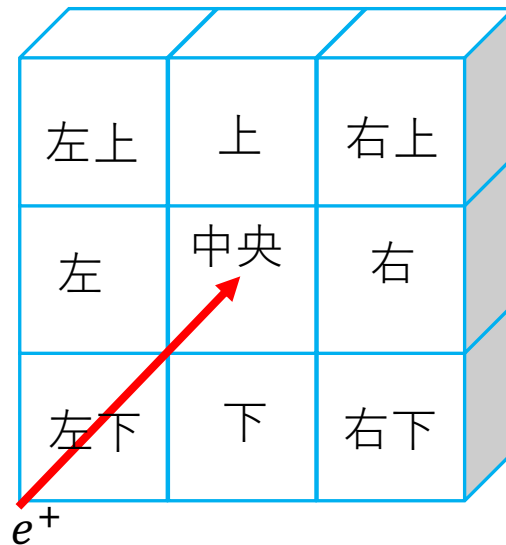


(注) 9つのシンチレータの周りには透明のキューブは固定具であり、シンチレータではない

クロストークの評価方法

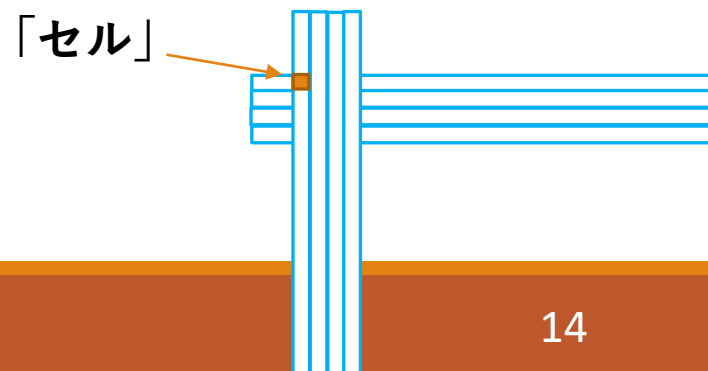
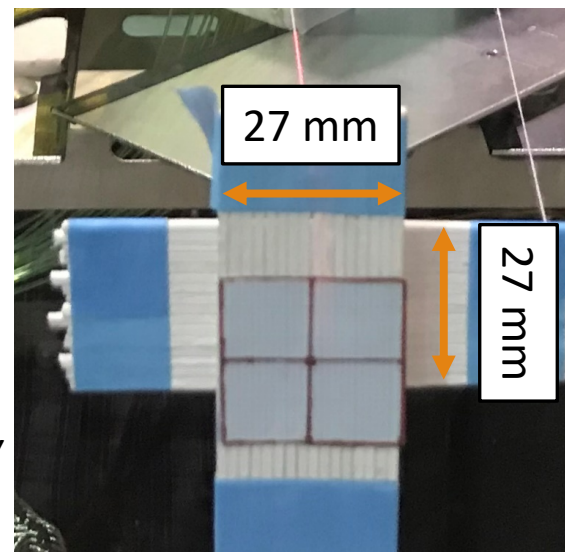
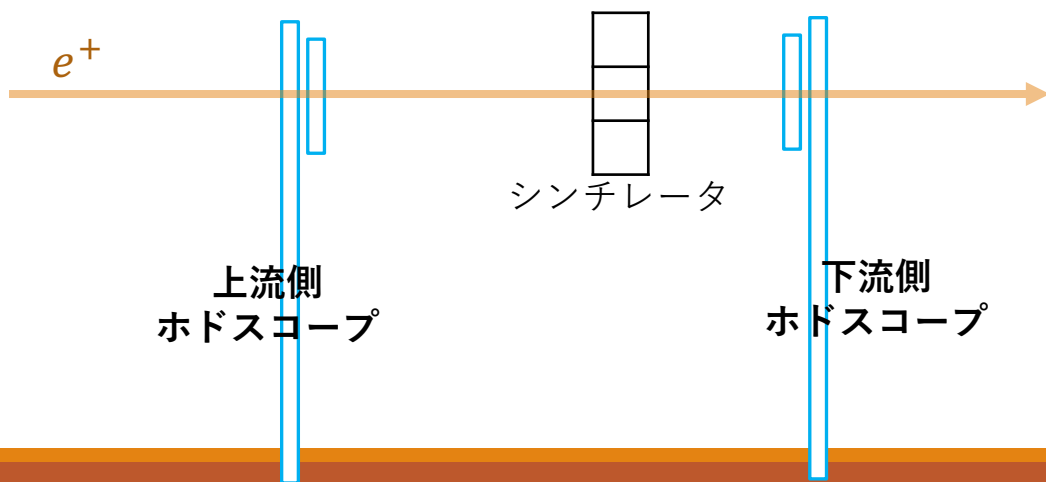
- Light Yield ratio (L.Y. ratio) で定量化し、評価する

$$\text{L. Y. ratio} = \frac{\text{中央以外の各キューブの光量}}{\text{中央のキューブの光量}}$$



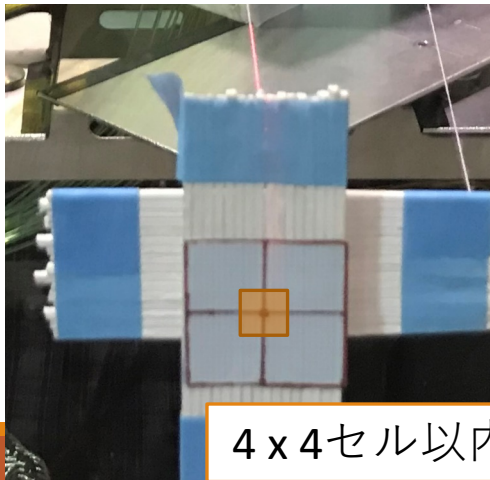
ホドスコープ

- 陽電子ビームの位置を特定するための装置
- 16本のシンチレーションファイバーを束ねたものをX, Y方向に配置
- ファイバー1本の幅：1.7 mm
→27 x 27 mm²の有効面積を持つ
- 位置特定の最小範囲（1.7 x 1.7 mm²）を以降の説明で「セル」と呼ぶ
- ホドスコープ中心 = キューブ中心 = ビーム中心

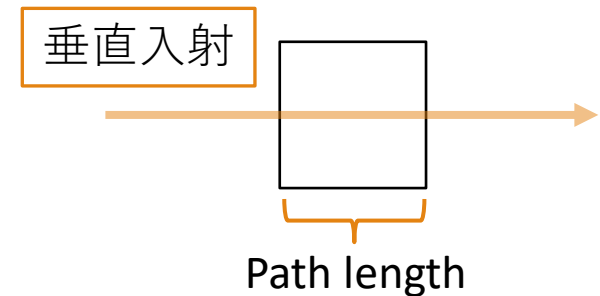
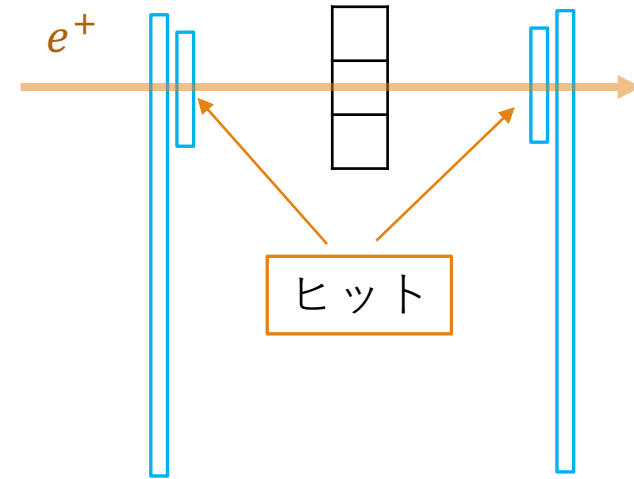


ビーム試験でのイベント選別条件

- 上流・下流ホドスコープにヒット
 - ビームが来たイベントのみを取得するため
- キューブに垂直入射
 - Path length (\propto 光量) を同じにするため
- ホドスコープの特定領域にヒット
 - 中央 4×4 セル = $6.8 \text{ mm} \times 6.8 \text{ mm}$ の領域
(中央のキューブにヒットしたイベントを選択するため)

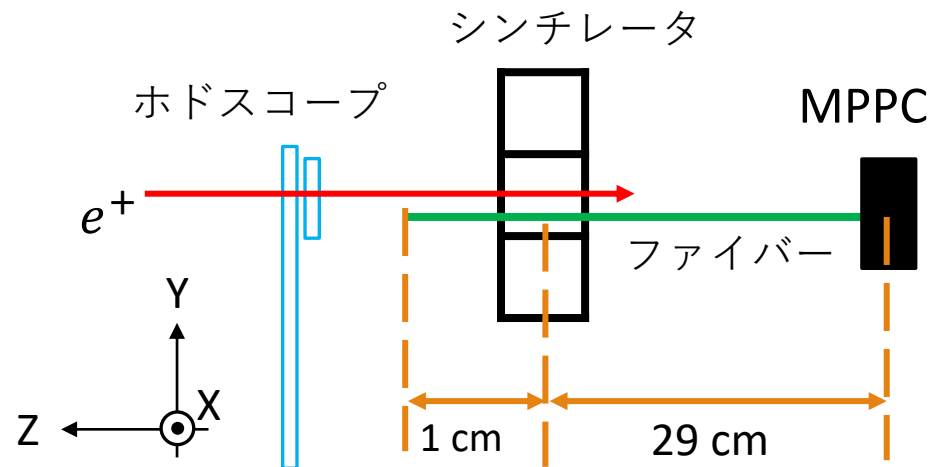


4 x 4セル以内



シミュレーションのセットアップ

- ビーム試験とほぼ同様のセットアップを作成し、Geant4による光学シミュレーションを行なった
 - 実験と異なる点
 - 下流側ホドスコープがない
 - z方向読み出しが下流方向になっている
 - MPPCにダークカウントがない
- 曲がったファイバーを再現することが困難だったため



Material	Parameter	Value	根拠となる文献の有無
シンチレータ	減衰長	38 cm	あり
	Energy depositあたりのシンチレーション光量		なし
	シンチレーション光量 (光の波長ごとの相対値)	(スペクトル)	あり
	Scintillation timing	1 ns	なし (有機シンチレータの典型値)
キューブ反射層	反射率		なし
波長変換ファイバークォア	波長変換時間	12 ns	あり
	発光量	(スペクトル)	あり
	屈折率	1.59	あり
	減衰長	(スペクトル)	あり
波長変換ファイバークォア内側クラッド	屈折率	1.49	あり
波長変換ファイバークォア外側クラッド	屈折率	1.42	あり
MPPC	光子検出効率	(スペクトル)	あり

シミュレーションのチューニング手順

1. キューブ反射率を調節し，上下左右方向のL.Y. ratioを合わせる
2. Energy depositあたりのシンチレーション光量を調節し，中央キューブの光量を合わせる



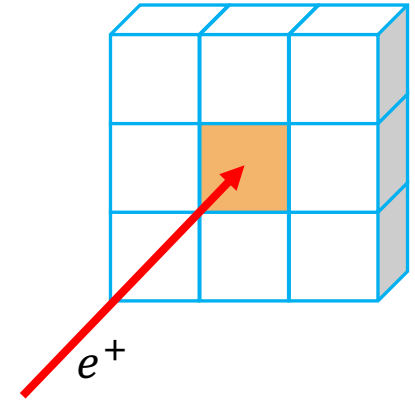
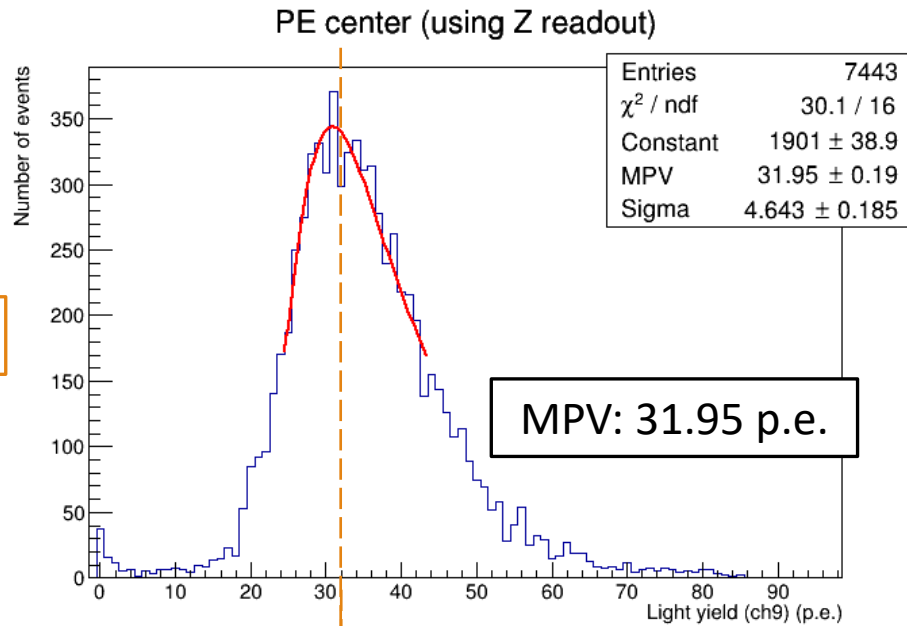
その結果

シンチレーション光量：12.8 (p.e./keV)
キューブ反射率: 96.8%

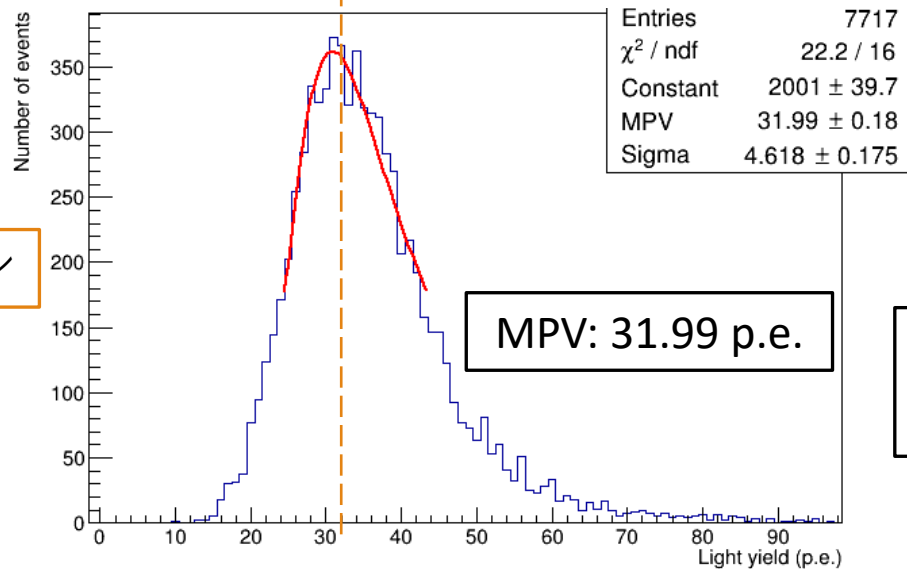
結果 実験とシミュレーションの比較

中央キューブの光量

ビーム試験



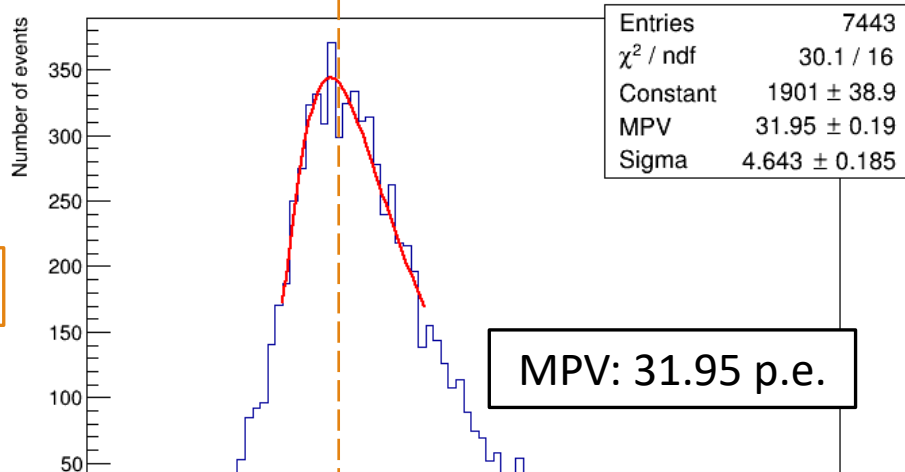
シミュレーション



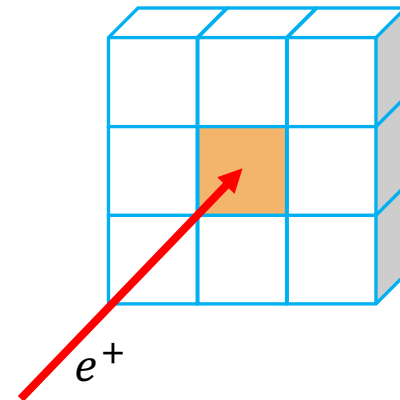
縦軸：イベント数
横軸：光量 (p.e.)

中央キューブの光量

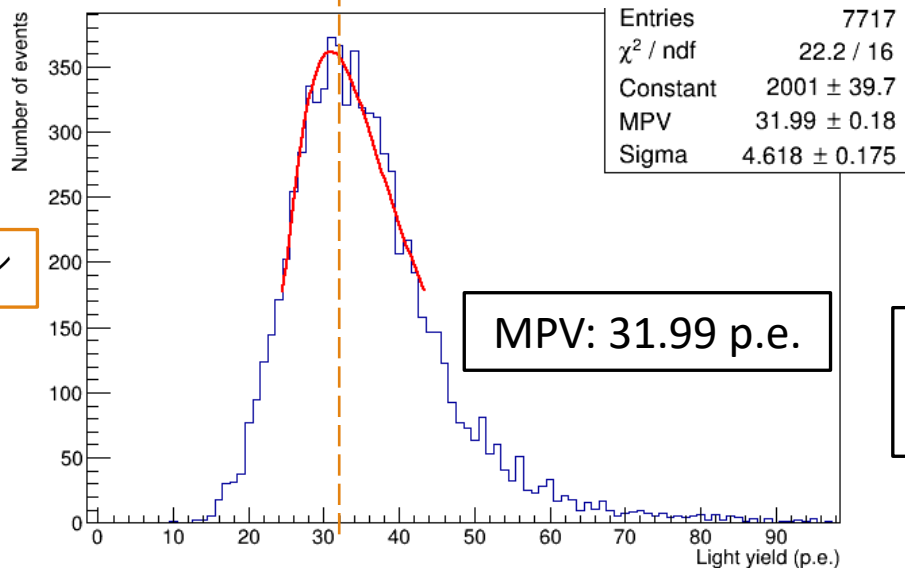
PE center (using Z readout)



ビーム試験



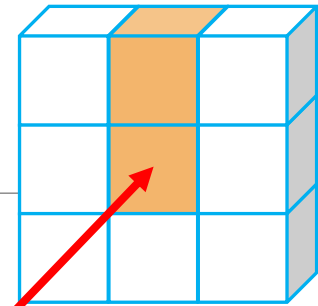
分布の平均やばらつきが再現できた



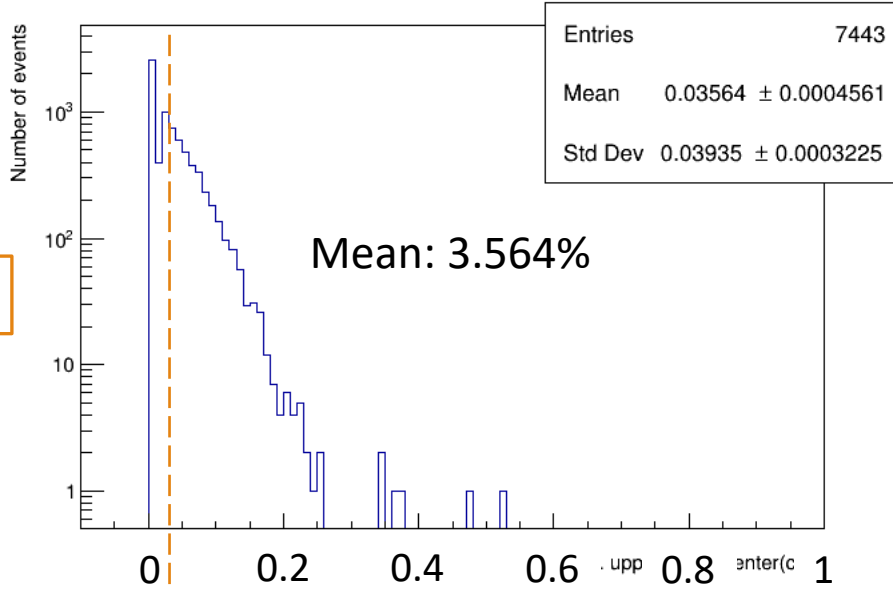
シミュレーション

縦軸：イベント数
横軸：光量 (p.e.)

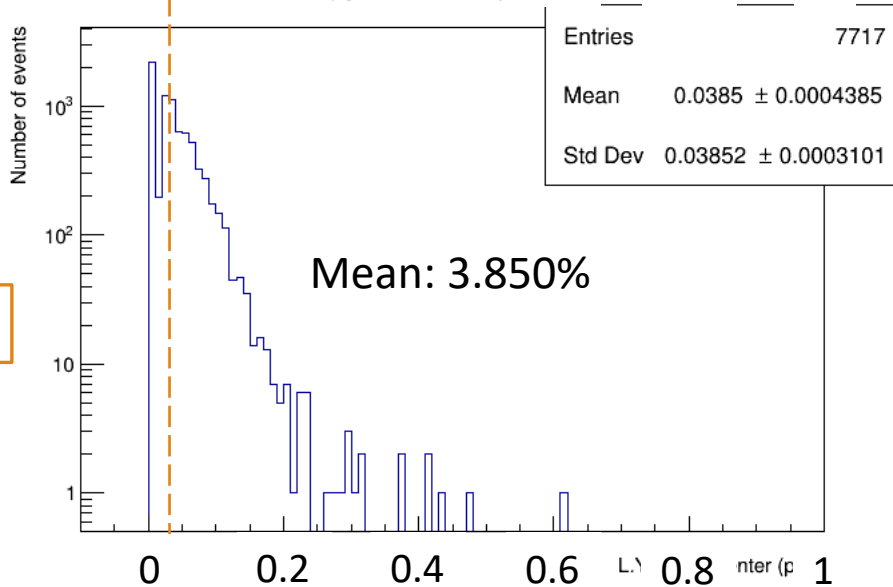
上側キューブに対するL.Y. ratio



L.Y. ratio upper/center (using Z readout, dark count cut)



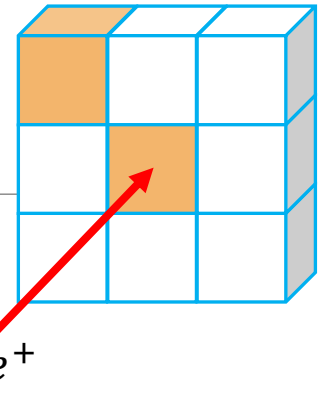
ビーム試験



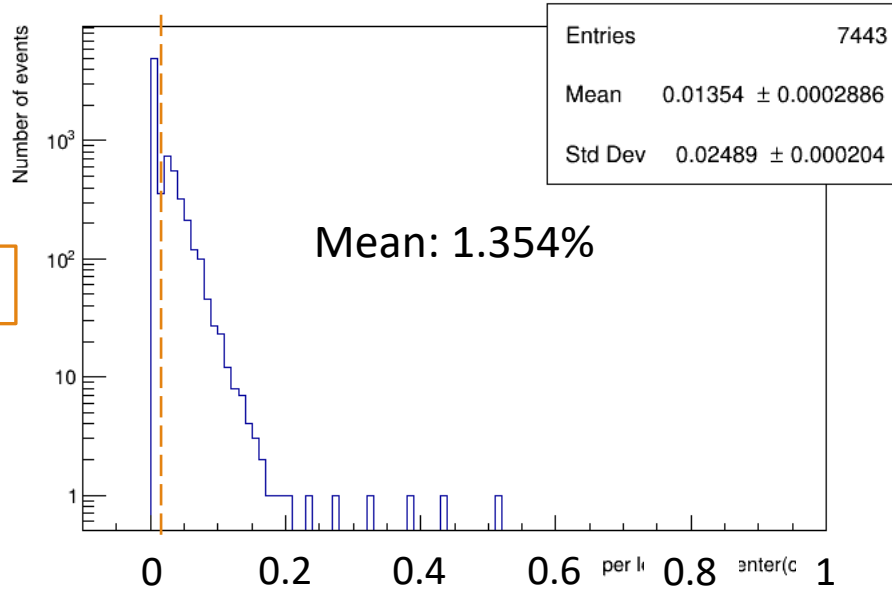
シミュレーション

縦軸：イベント数
横軸：L.Y. ratio

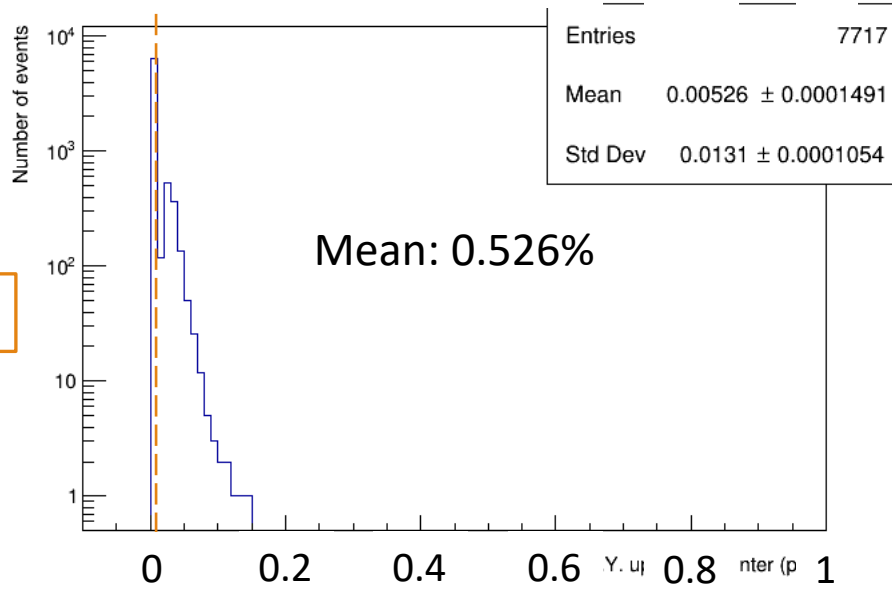
左上側キューブに対するL.Y. ratio



L.Y. ratio upper left/center (using Z readout, dark count cut)



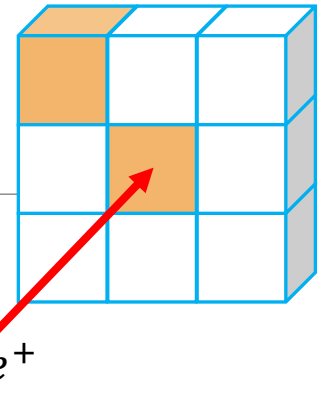
ビーム試験



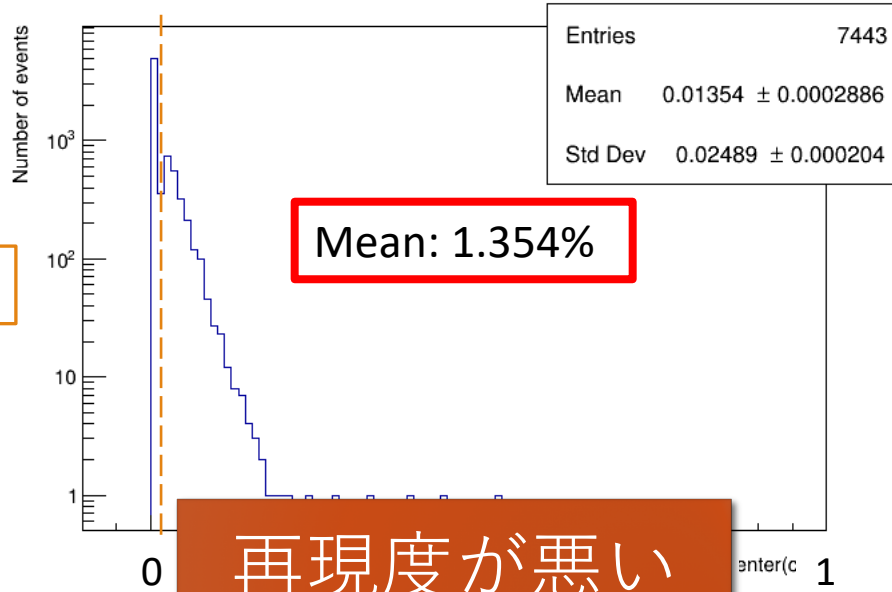
シミュレーション

縦軸：イベント数
横軸：L.Y. ratio

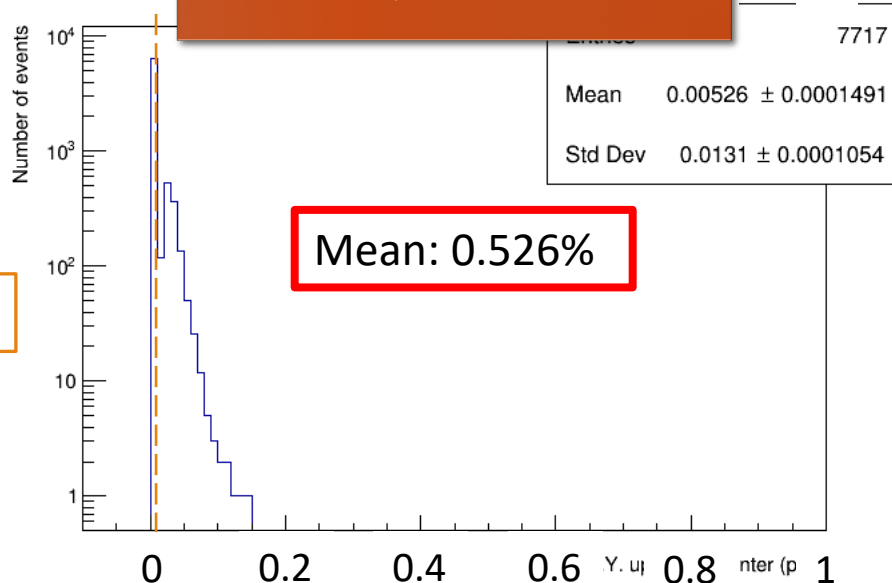
左上側キューブに対するL.Y. ratio



L.Y. ratio upper left/center (using Z readout, dark count cut)



ビーム試験

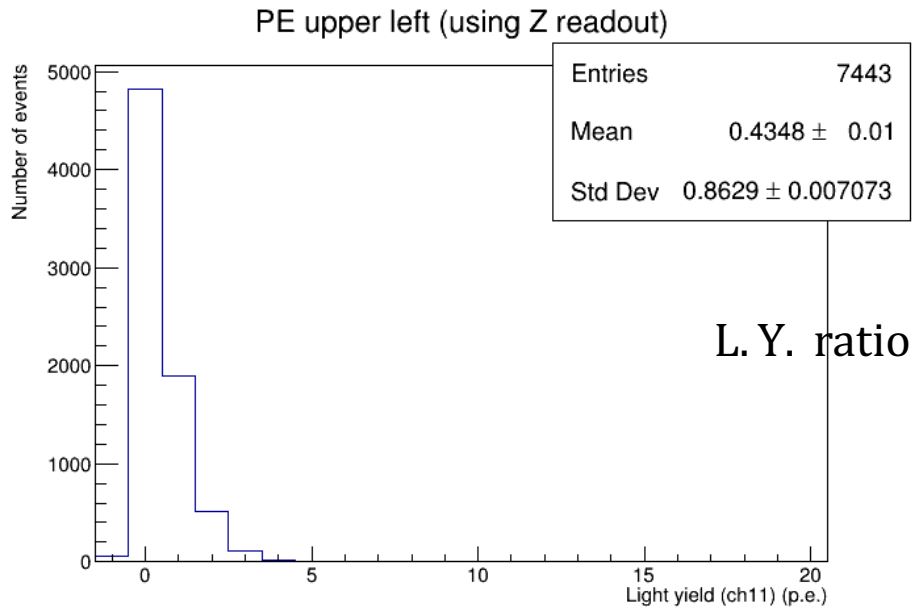


シミュレーション

縦軸：イベント数
横軸：L.Y. ratio

再現度が悪くなった理由

ビーム試験



この分布を確認

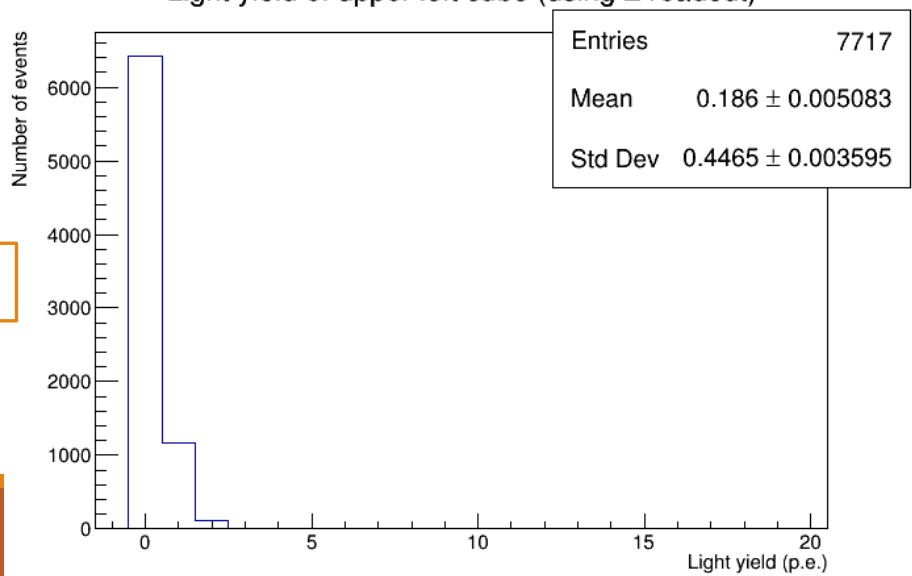


L. Y. ratio =

$$\frac{\text{左上のキューブの光量}}{\text{中央のキューブの光量}}$$

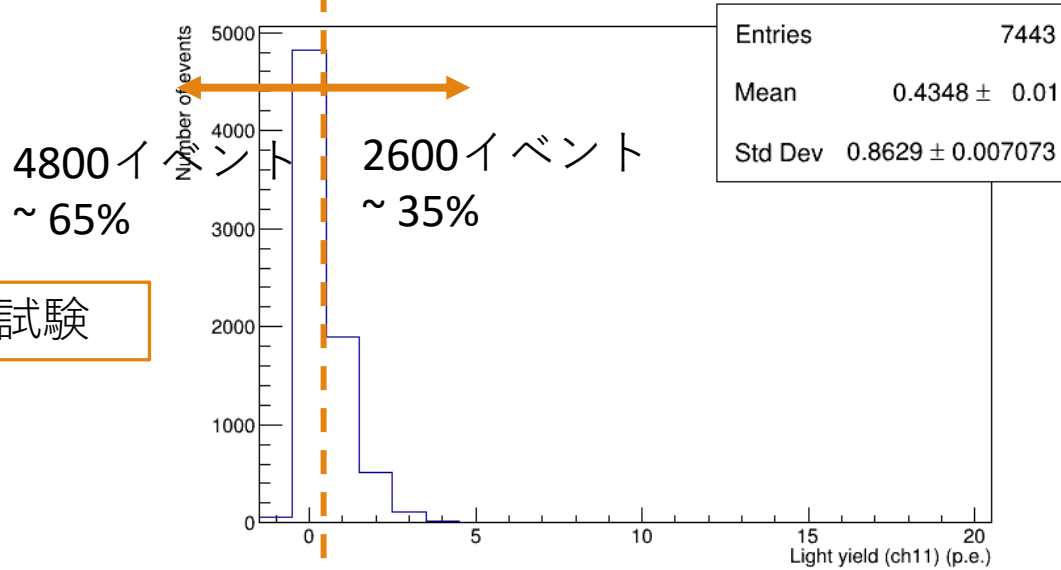
縦軸：イベント数
横軸：左上キューブ光量

シミュレーション



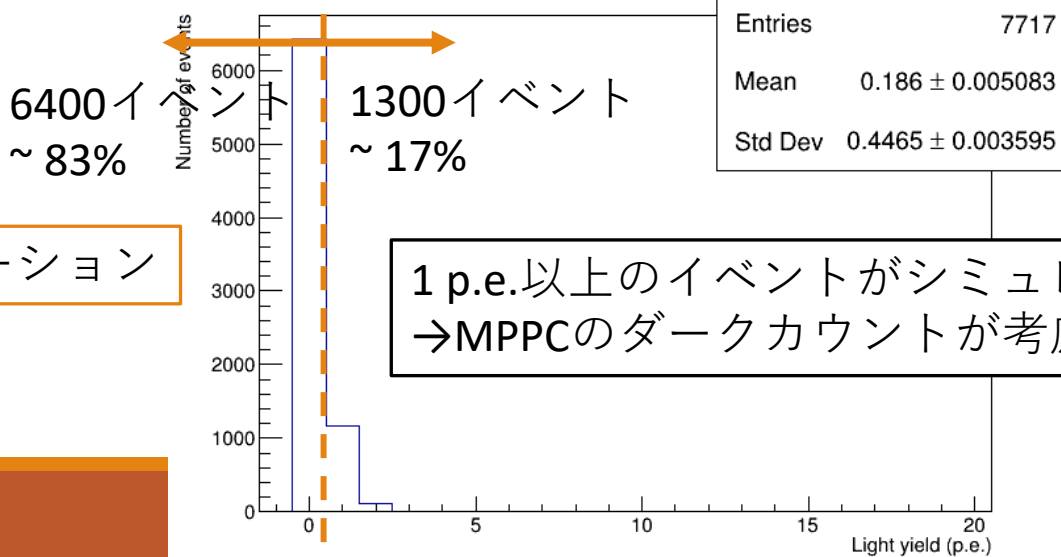
再現度が悪くなった理由

PE upper left (using Z readout)



ビーム試験

縦軸：イベント数
横軸：左上キューブ光量



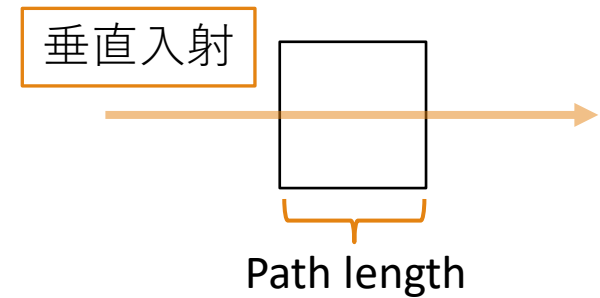
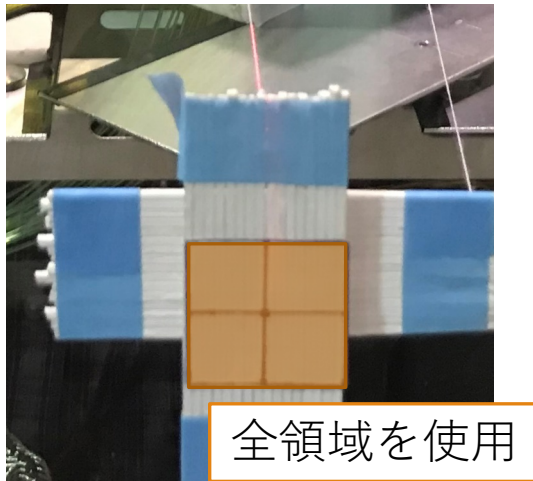
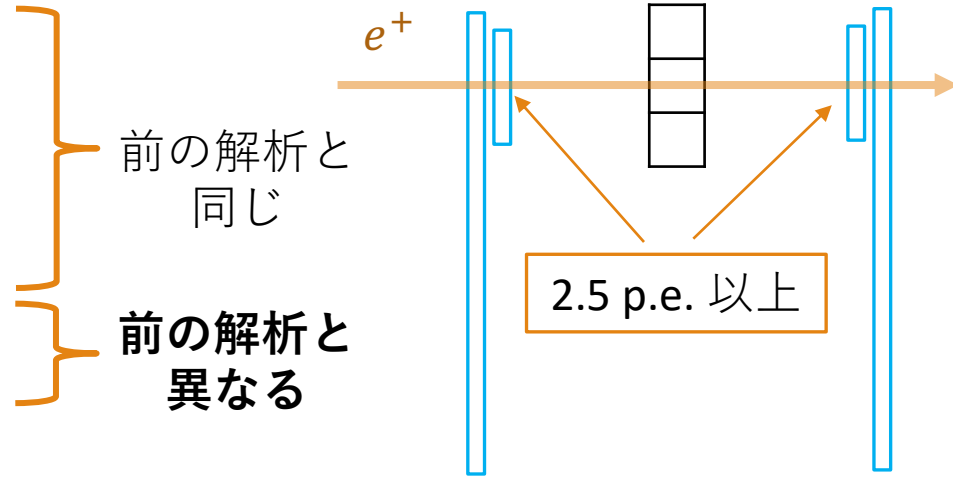
シミュレーション

1 p.e.以上のイベントがシミュレーションでは少ない
→MPPCのダークカウントが考慮されていないため？

クロストーク (キューブへのビーム入射位置依存性)

ビーム試験でのイベント選別条件

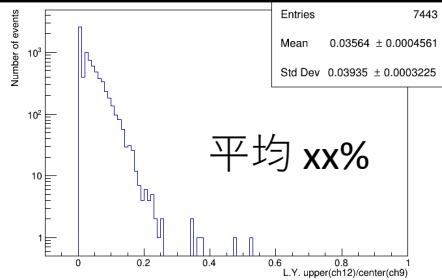
- 上流・下流ホドスコープにヒット
- ビームが来たイベントのみを取得するため
- キューブに垂直入射
- Path length (\propto 光量) を同じにするため
- ホドスコープによる領域指定はなし



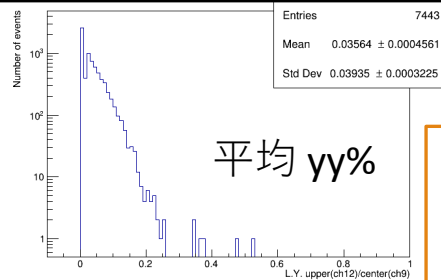
解析方法

- ビーム入射セルごとにL.Y. ratioのヒストグラムを作成
- 平均値をそのビーム入射位置でのクロストークの大きさと定義

セルの位置 X=1, Y=1での
L.Y. ratio分布

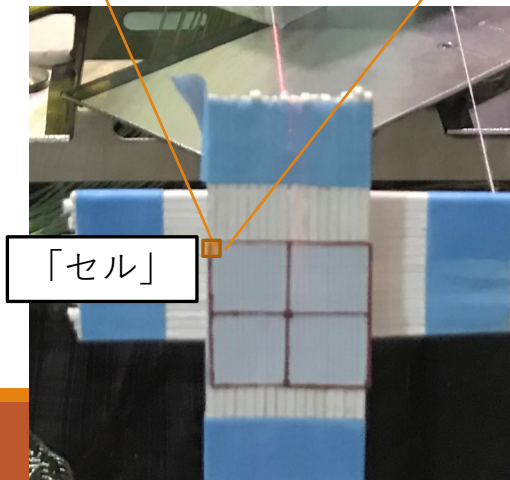


セルの位置 X=1, Y=2での
L.Y. ratio分布



...

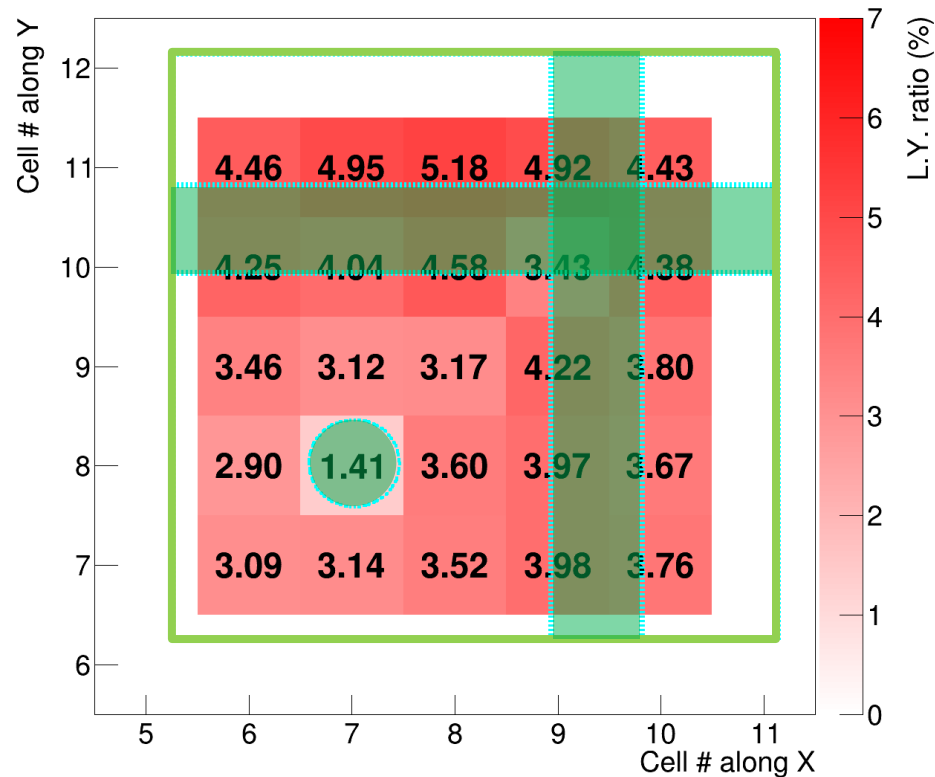
すべてのセルに対して分布を作成
分布の平均値をそのビームヒット位置での
クロストークと定義し、2次元プロット



上側キューブとの比較

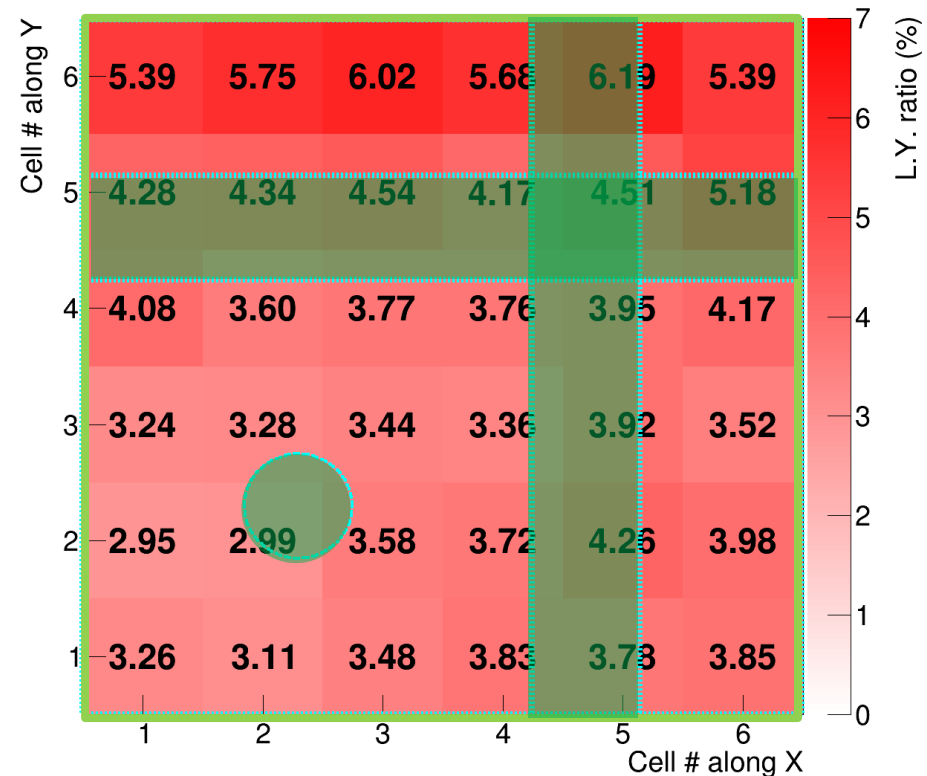
ビーム試験

L.Y. ratio (upper, using Z readout, dark count cut)



シミュレーション

L.Y. ratio upper/center (using Z readout)

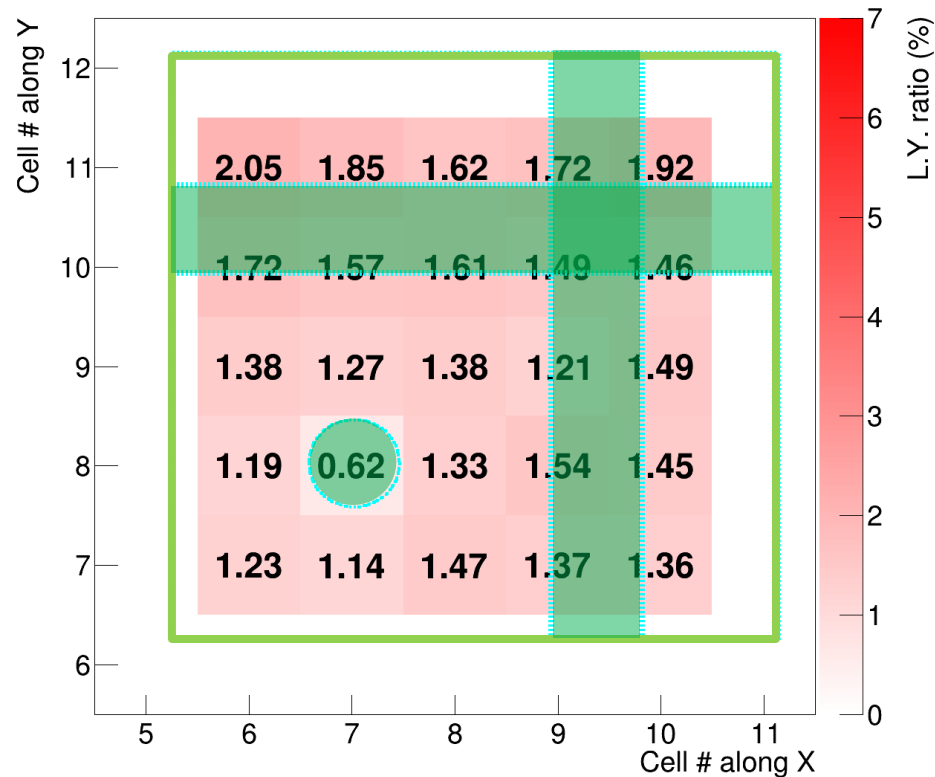


- 黄緑色の実線：キューブ境界
- 緑色半透明の領域：ファイバー穴

左上側キューブとの比較

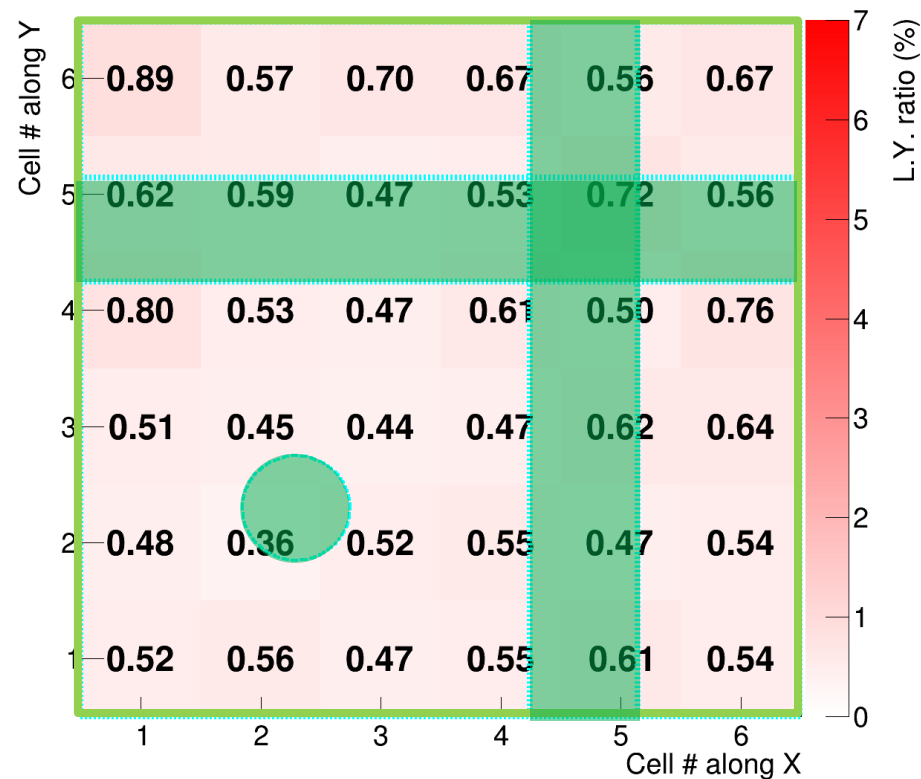
ビーム試験

L.Y. ratio (upper left, using Z readout, dark count cut)



シミュレーション

L.Y. ratio upper left/center (using Z readout)



左上に近い位置ほどL.Y. ratioが大きくなる傾向は再現できている

本研究のまとめ

- SuperFGDではクロストークによる性能悪化が懸念される
- 陽電子ビームを用いたシンチレータへのビーム照射試験を行い，クロストークに関するデータを得て，クロストークを定量的に評価した
- ビーム入射位置が隣接キューブに近いほどクロストークが大きくなる傾向が確認できた

- ビーム試験を再現する光学シミュレーションツールを作成し，おおむね実験を再現するシミュレーションを作成できた
- しかし，斜め方向のキューブに対するクロストークは再現性が悪かった
- その理由としてMPPCのダークカウントがシミュレーションに取り入れられていないことなどが挙げられる

今後の計画

- MPPCのダークカウントを取り入れるなどシミュレーションのチューニングをすすめる
- ND280アップグレードの検出器全体のシミュレーションツール（飛跡から粒子の特定や運動量の再構成を行うツール）では、計算時間の問題からシンチレーション光子1つ1つを追跡していない
 - 不正確なシミュレーションとなっている可能性がある
- 本研究で評価したクロストークの効果を取り入れる
- クロストークが検出器の性能に与える影響を調べるとともに、シミュレーション精度の向上を目指す

Backup

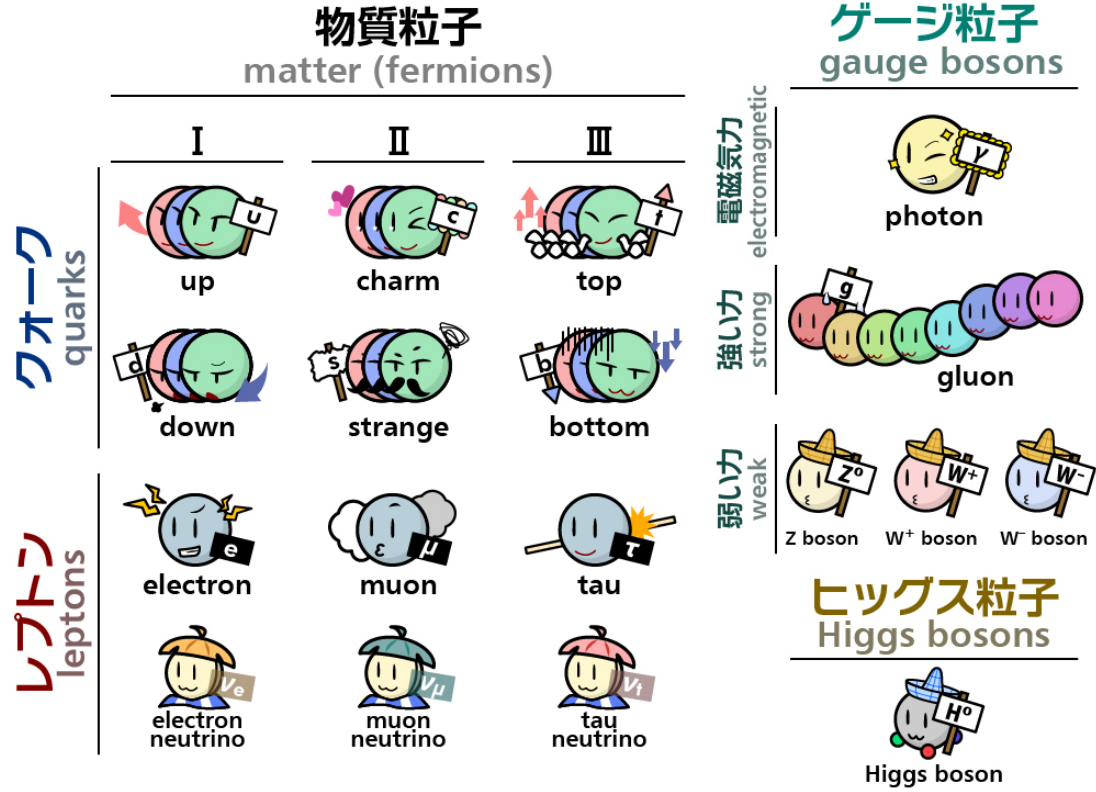
スーパーカミオカンデ
@岐阜県飛騨市神岡町

J-PARC @茨城県東海村



ニュートリノとは

- レプトン
- 3種類ある
- 質量は
 - 標準模型では0
 - ニュートリノ振動の発見により0でないことがわかった (SKによる大気ニュートリノ観測)
- 弱い/重力相互作用のみ
 - 観測が難しい



<http://higgstan.com>

固有状態とフレーバー

- ニュートリノが物質と相互作用するとき

$$|\nu_\alpha\rangle = a|\nu_1\rangle + b|\nu_2\rangle + c|\nu_3\rangle$$

フレーバー固有状態

質量（エネルギー）固有状態

- 複数の質量固有状態が特定の割合で重なった状態
しか相互作用しない
- この割合のパターンを**フレーバー**と呼ぶ
 - フレーバーは3種類ある

レプトン
leptons



フレーバー・質量固有状態の関係

- ユニタリ行列 U_{PMNS} を使って関係づけられる

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

フレーバー固有状態

2つの関係を表す行列
(PMNS行列)

質量固有状態

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} \equiv \sin \theta_{ij}$$

$$c_{ij} \equiv \cos \theta_{ij}$$

θ_{ij} : 混合角

δ_{CP} : CP対称性の破れの位相

ニュートリノの時間発展

- ニュートリノが空間を伝搬するとき

$$|\nu_\alpha(t)\rangle = a|\nu_1\rangle e^{iE_1 t/\hbar} + b|\nu_2\rangle e^{iE_2 t/\hbar} + c|\nu_3\rangle e^{iE_3 t/\hbar}$$

- 各質量固有状態の項に $e^{iE_j t/\hbar}$ がつく
- 時間が経過すると（=空間を伝搬すると）別のフレーバーとして観測されることがある
- 観測される確率が飛距離によって周期的に変動することからこの現象を**ニュートリノ振動**と呼ぶ

実験から得られるパラメータ

- 実験で測定できるのは振動確率のみ

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta)(t) = |\langle \nu_\beta | \nu_\alpha(t) \rangle|^2 \propto e^{-i(E_i - E_j)t} \times (\theta_{ij} \text{を含む三角関数})$$

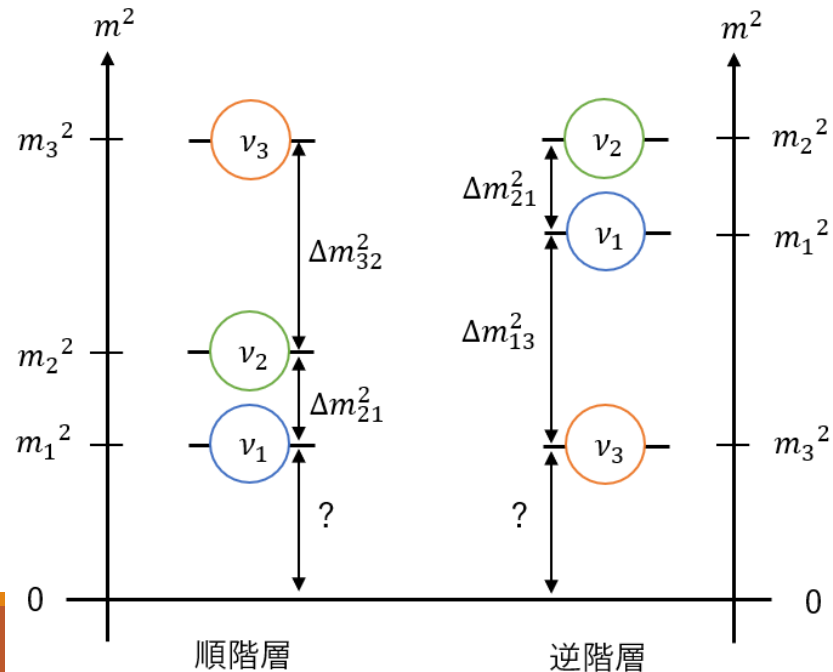
👉 フレーバー α のニュートリノがフレーバー β に変わる確率

$$E_i - E_j \approx \frac{\Delta m_{ij}^2}{2E}$$

$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$: 質量2乗差

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) = \frac{\text{後置検出器での}\nu_\beta\text{の数}}{\text{前置検出器での}\nu_\alpha\text{の数}}$$

- 混合角と質量2乗差が実験から得られる
 - 質量の絶対値はわからない
 - 質量階層は2パターン考えられている



T2K実験の目的

- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動現象の発見
- 振動パラメータの精密測定
- CP位相 δ_{CP} の測定
 - つまり、(レプトンでの) CP対称性の破れを証明する

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta_{CP}} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

T2Kで測定可能なパラメータ

- ν_μ を飛ばして ν_μ が検出される確率から

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \cos^2(\theta_{13}) \sin^2(2\theta_{23}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2}{E} L\right)$$

- ν_μ を飛ばして ν_e が検出される確率から

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx \sin^2(\theta_{23}) \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2}{E} L\right)$$

$\theta_{12}, \theta_{13}, \Delta m_{21}^2$: 他のニュートリノ
実験から得られた値を用いる

- ニュートリノと反ニュートリノの比較から

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \approx -2 \sin(\delta_{CP}) \cos(\theta_{13}) \sin(2\theta_{12}) \sin(2\theta_{13}) \sin(2\theta_{23}) \\ \times \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m_{32}^2}{E} L\right) \sin\left(1.27 \frac{\Delta m_{21}^2}{E} L\right)$$

$\delta_{CP} = 0$ or π ならば CP 対称

Δm_{ij}^2 [eV²]: 質量2乗差

L [km]: ニュートリノの飛距離

E [GeV]: ニュートリノエネルギー

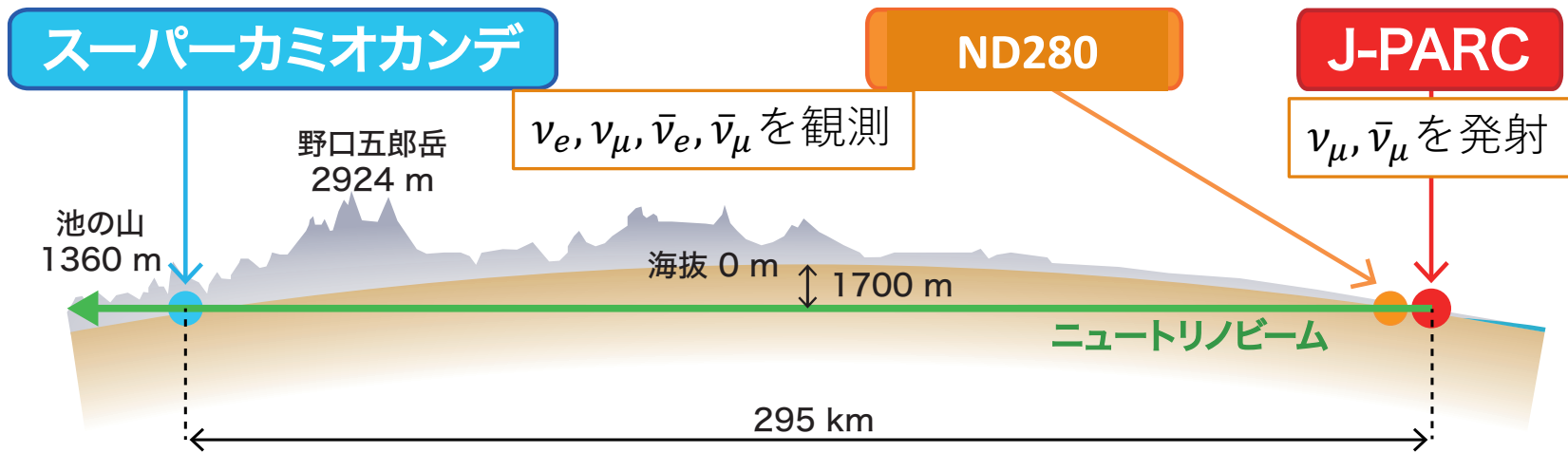
T2K実験の目的

レプトン
leptons



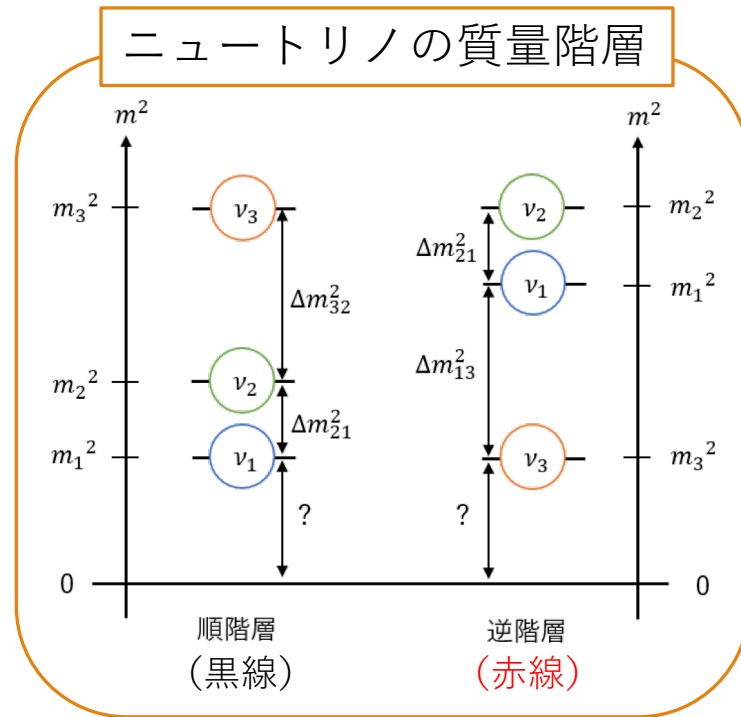
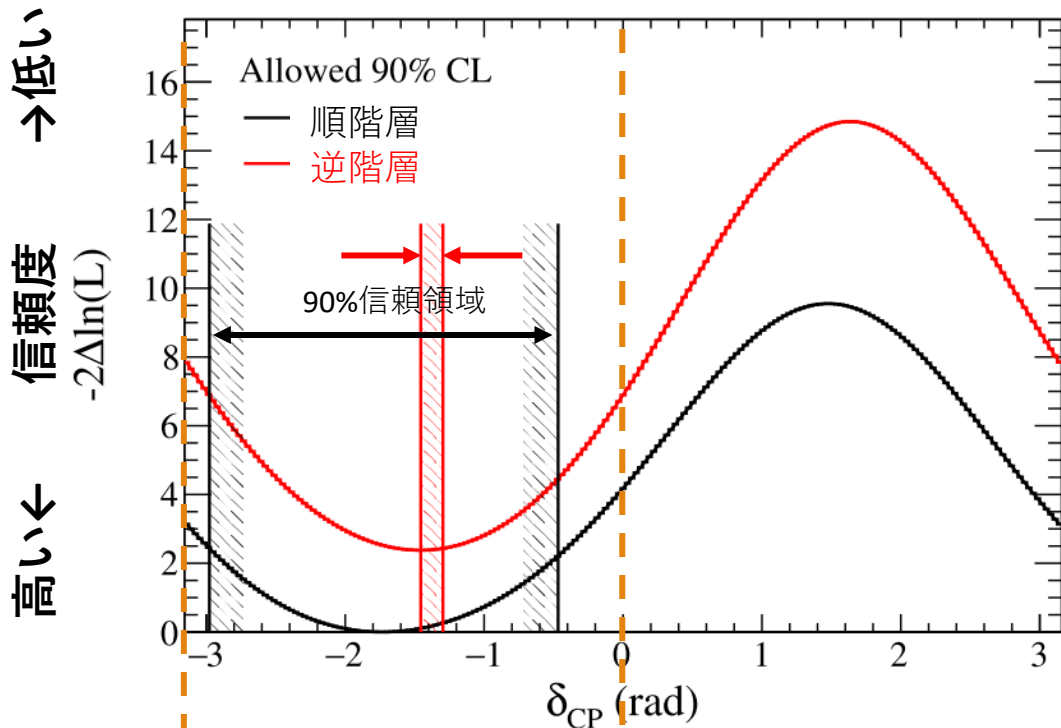
- $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ 振動と $\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$ 振動を観測
 - $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = 0 \rightarrow \text{CP保存}$
 - $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \neq 0 \rightarrow \text{CP非保存}$
- CP対称性が破れているかどうかを検証

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \propto \frac{\text{SKでの}\nu_e\text{の数}}{\text{J-PARCから発射した}\nu_\mu\text{の数}}$$



測定の現状

- CP非保存を信頼度90%で示した



$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \propto \sin \delta_{CP}$$

$\delta_{CP} = 0$ or π ならばCP保存

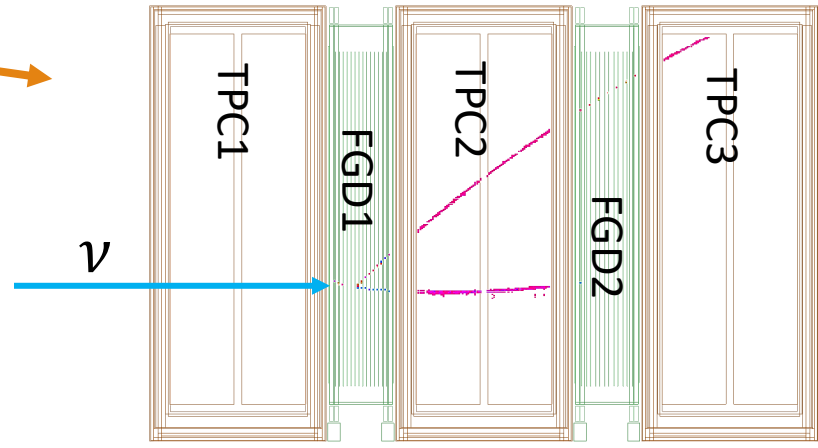
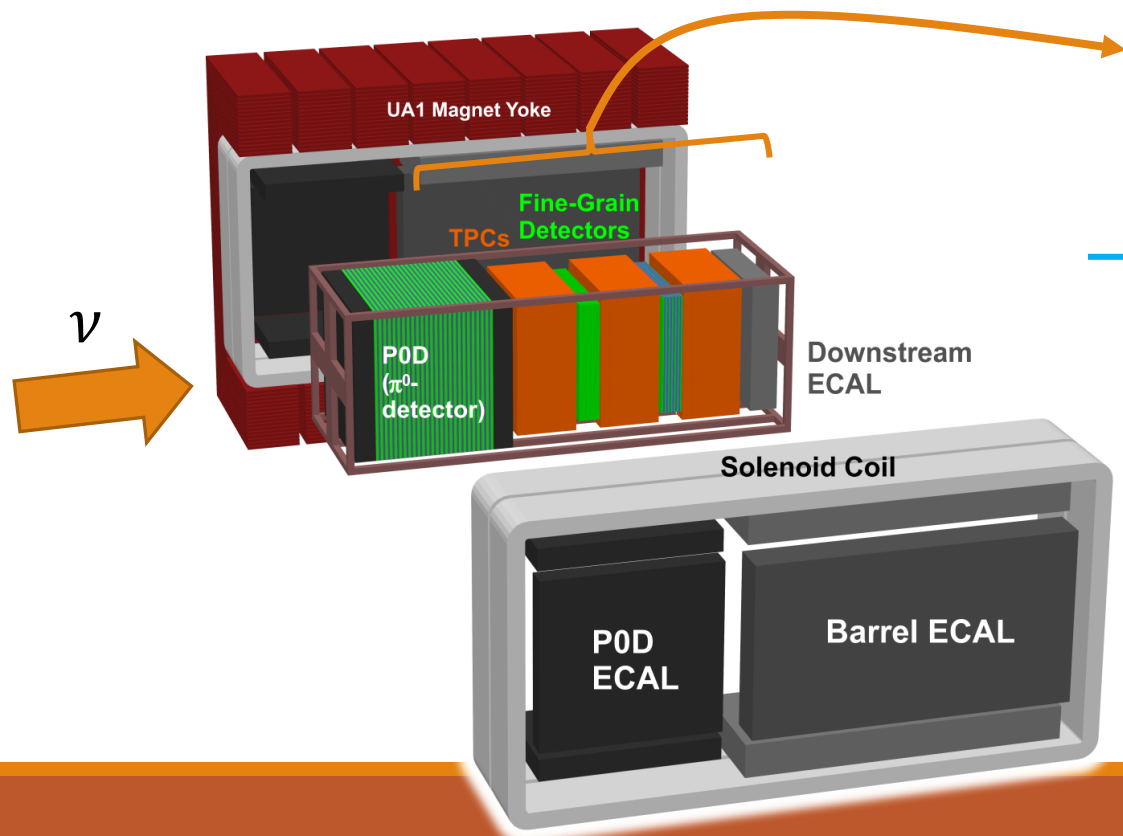
T2K-II

- CP対称性の破れを2026年度までに信頼度 3σ （99.7%）で示す
→T2K-II計画
- 統計量の増大と**系統誤差の削減**が必要
- 系統誤差の要因として前置検出器ND280が大きな割合を占めているためアップグレードが計画されている

現行の前置検出器 (ND280)

- Fine Grained Detector (FGD) :
ニュートリノターゲット+シンチレーショントラッカー
- TPC : 3次元飛跡検出器
- FGDとTPCによって飛跡検出

Event number : 24083 | Partition : 63 | Run number : 4200 | Spill : 0 | SubRun number : 6 | Time : Sun 2010-03-21 22:33:25 JST | Trigger : Beam Spill

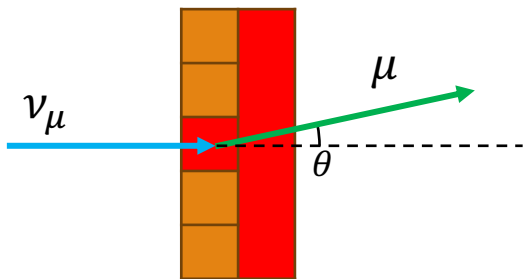
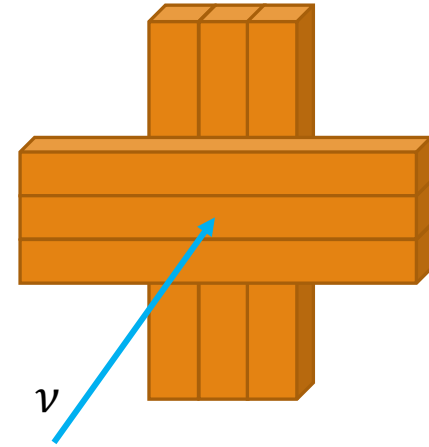


FGDとTPCで飛跡を検出している例
($\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$)

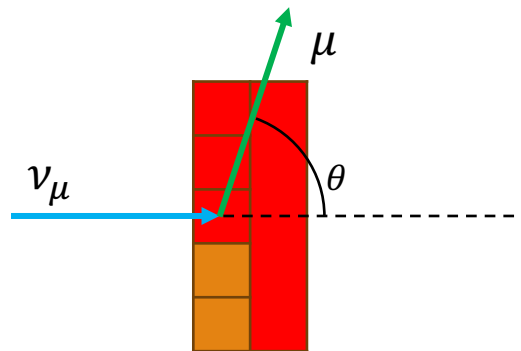
FGDの問題点

- 1 cm x 1 cm x 200 cm サイズの細長いシンチレータをX, Y方向に組み合わせることにより2次的に位置を特定している
- ニュートリノとシンチレーターが反応して出てくる粒子が90度以上の角度を持つと検出できなくなる

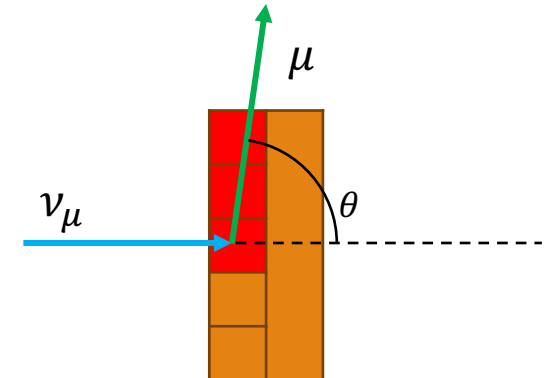
→大角度にも感度を持つ検出器が必要



小角度のとき→分解能が良い



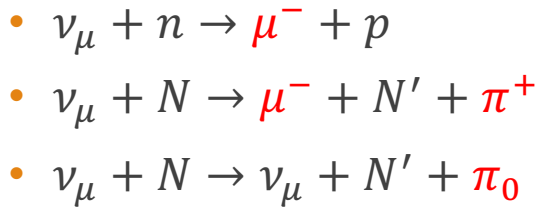
大角度のとき→分解能が悪い



90度に近いとき
→X方向の位置がわからない

ND280による飛跡検出

- ニュートリノはFGDで反応

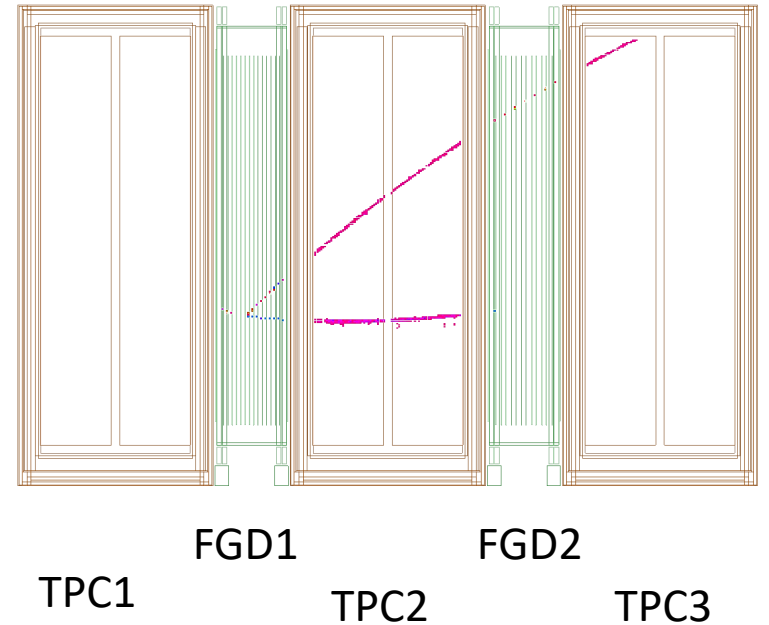


- 反応した粒子の飛跡をTPCとFGDで検出

- TPCの位置分解能：~1 mm
- FGDの位置分解能 (=シンチレータサイズ)
：~1 cm以上

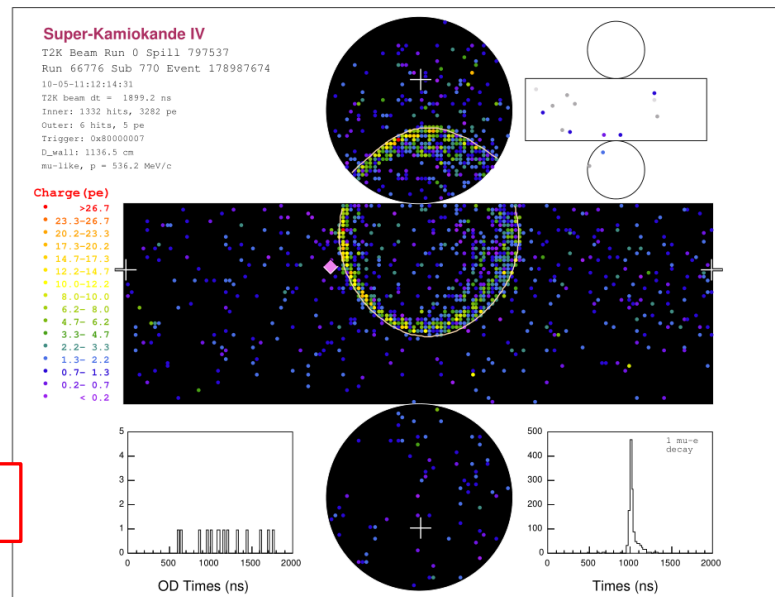
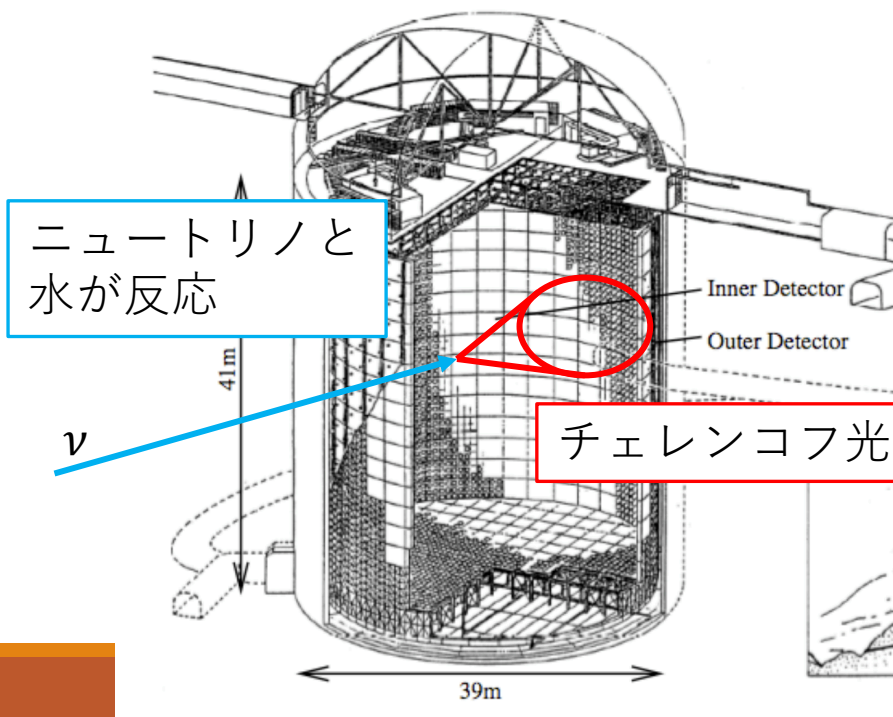
- 測定精度確保のため、TPCを通ったイベントのみ採用
- 振動解析にはPODは用いない

Event number : 24083 | Partition : 63 | Run number : 4200 | Spill : 0 | SubRun number : 6 | Time : Sun 2010-03-21 22:33:25 JST | Trigger: Beam Spill



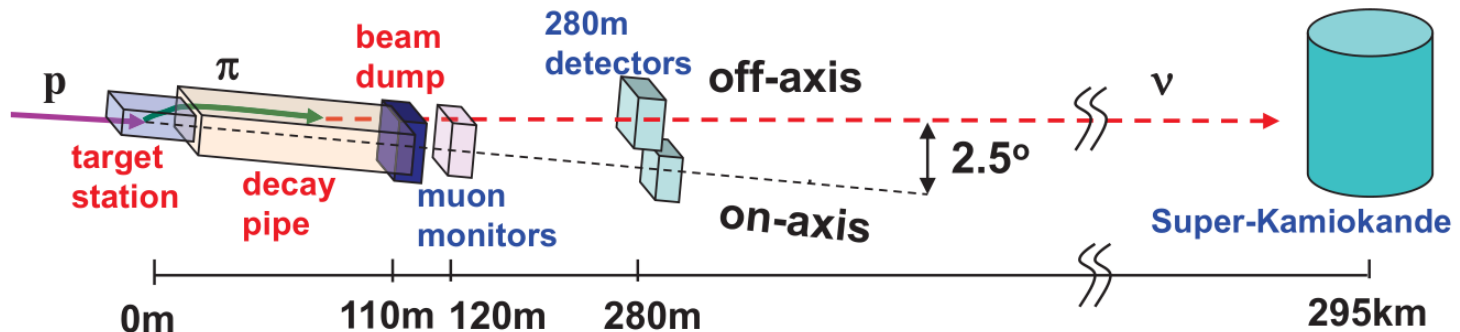
後置検出器（スーパーカミオカンデ）

- 高さ41 m，直径39 mの円筒形水槽・50キロトンの純水
- ニュートリノと水が反応してできた粒子から放出されるチェレンコフ光を観測
- チェレンコフリングの光量・形状・位置からニュートリノの飛来方向・エネルギー・フレーバーを推測

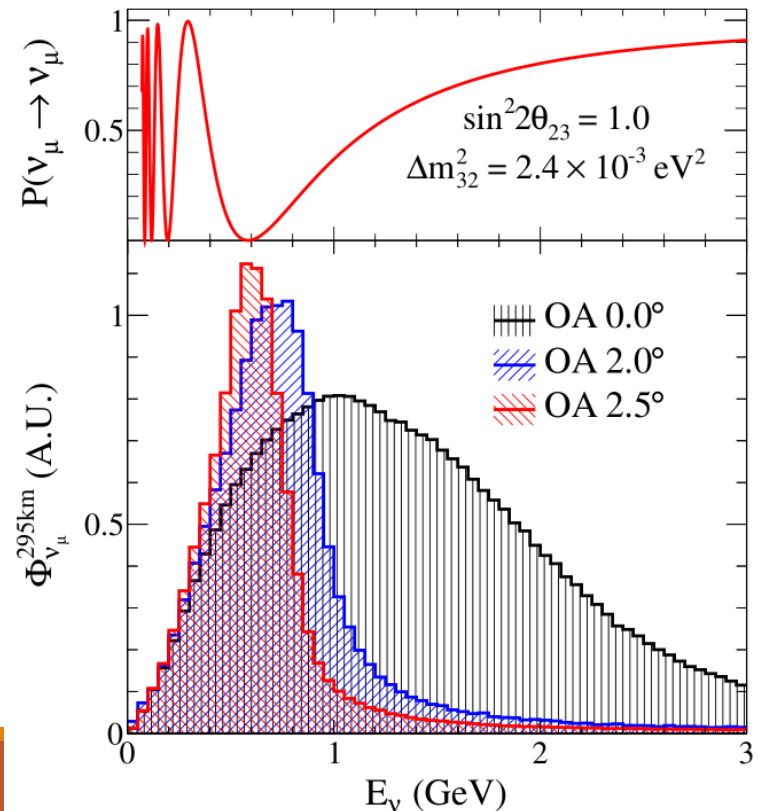


チェレンコフリングの例

Off-axis 法

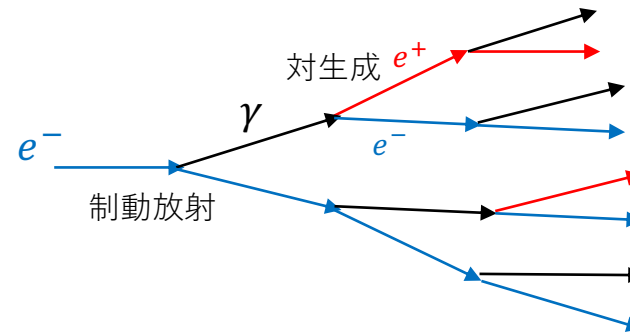


- ニュートリノビームの中心軸方向はSK方向から2.5度ずれたところに向けられている
- SKでの ν_e 出現率が大きくなる



π^0 検出器 (POD) の意義

- CCQE : $\nu_e + n \rightarrow e^- + p$
- NC1 π : $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N + \pi^0$
 $\pi^0 \rightarrow 2\gamma$



- SKにおいて、 π^0 から出る γ のうち片方を見落とすとCCQEと誤認識する (γ と e^\pm はどちらもシャワーを起こすので同じに見える)
- したがって、CCQEに見える反応のうちどのくらいの割合でNC1 π が含まれるかを調べることが重要だった
- しかし、当初の予想よりもNC1 π が少なく、ソフトウェア面の改良もあり誤認識が少なくなったのでPODの重要性が下がった

SKでのイベント数予測に対する系統誤差

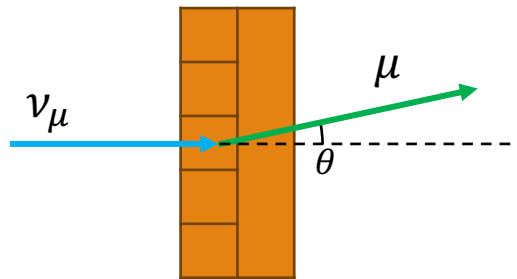
TABLE II. Systematic uncertainty on the predicted event rate at the far detector.

Source (%)	ν_μ	ν_e	$\bar{\nu}_\mu$	$\bar{\nu}_e$
ND280-unconstrained cross section	0.7	3.0	0.8	3.3
Flux and ND280-constrained cross section	2.8	2.9	3.3	3.2
Super-Kamiokande detector systematics	3.9	2.4	3.3	3.1
Final or secondary hadron interactions	1.5	2.5	2.1	2.5
Total	5.0	5.4	5.2	6.2

前置検出器の系統誤差（角度ごと）

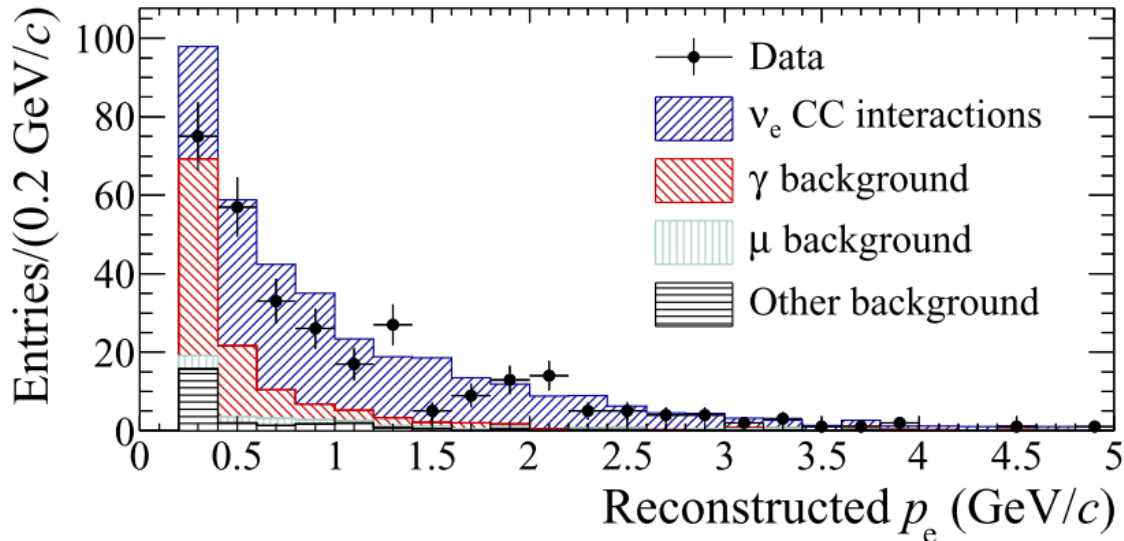
Table 6.6: Detector systematic uncertainties parametrized as a function of the muon true momentum and angle with respect to the Z direction.

Detector configuration	Momentum / $\cos\theta$	$0 < p < 0.5 \text{ GeV}/c$	$p > 0.5 \text{ GeV}/c$
FGD1, FGD2	$-1 < \cos\theta < -0.6$	20%	20%
	$-0.6 < \cos\theta < 0$	50%	60%
	$0 < \cos\theta < +0.6$	30%	50%
	$+0.6 < \cos\theta < +1$	9%	2.5%
SD	$-1 < \cos\theta < -0.6$	9%	2.5%
	$-0.6 < \cos\theta < 0$	9%	2.5%
	$0 < \cos\theta < +0.6$	9%	2.5%
	$+0.6 < \cos\theta < +1$	9%	2.5%

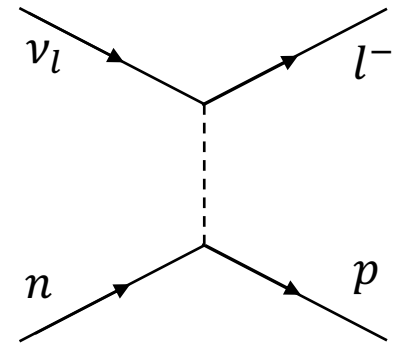


低運動量荷電粒子の測定

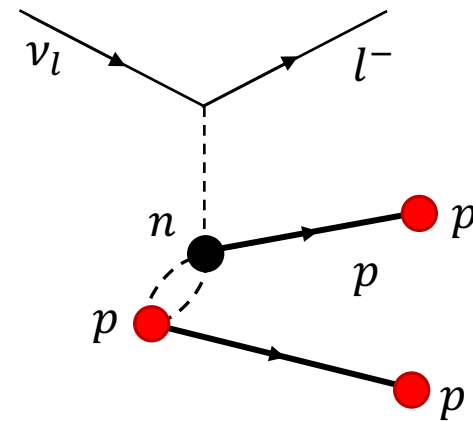
- CCQEと2p2hの識別
- ν_e 由来・ γ 由来イベントの識別



CCQE



2p2h



シミュレーションによる相互作用の種類ごとのイベント数

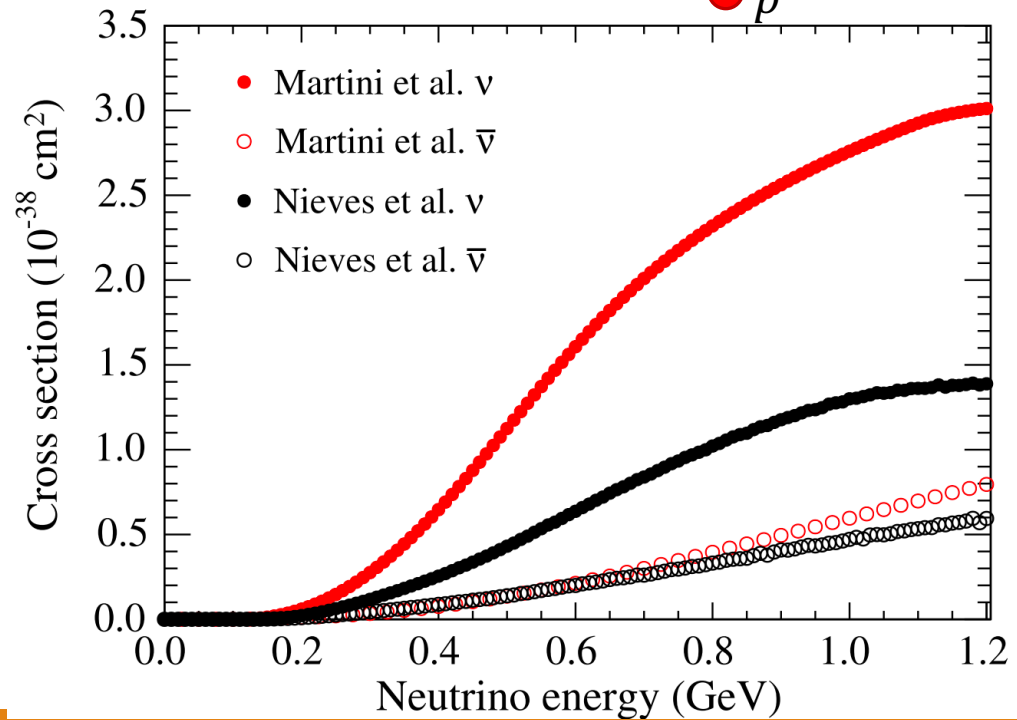
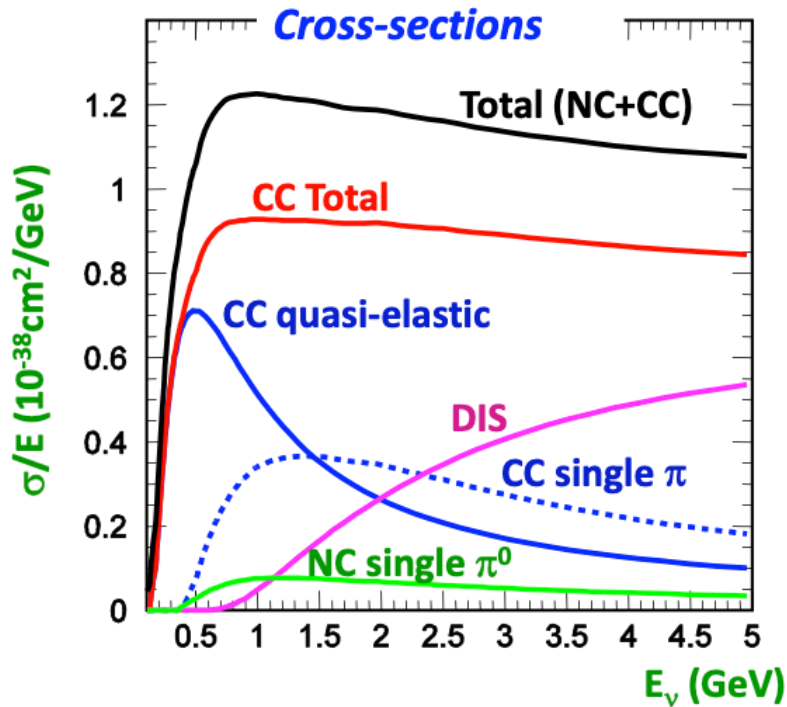
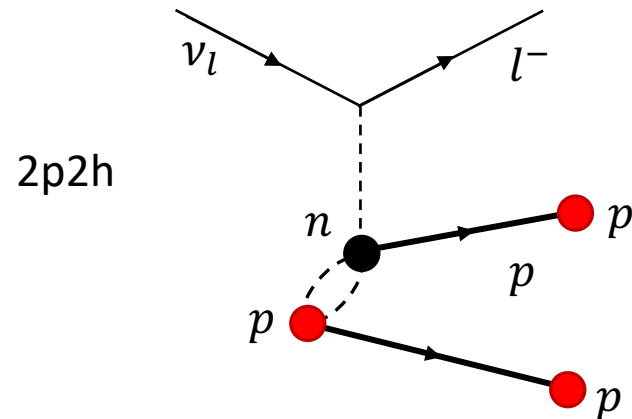
ニュートリノ反応断面積

CCQE: $\nu_\mu + n \rightarrow \mu^- + p$

CC1 π : $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + N' + \pi^+$

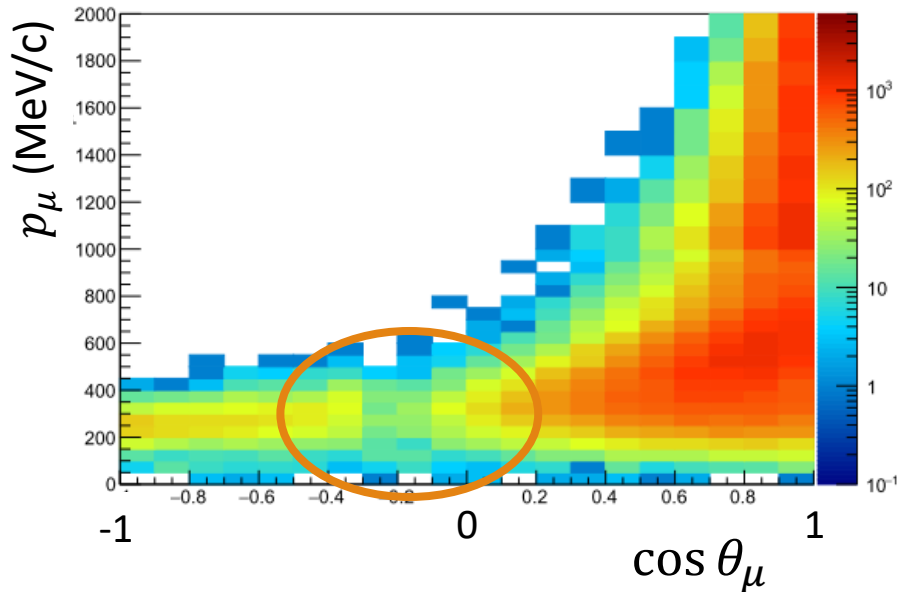
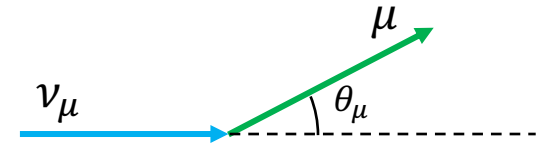
NC1 π : $\nu_\mu + N \rightarrow \nu_\mu + N' + \pi_0$

DIS: $\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + N' + (\text{hadrons})$

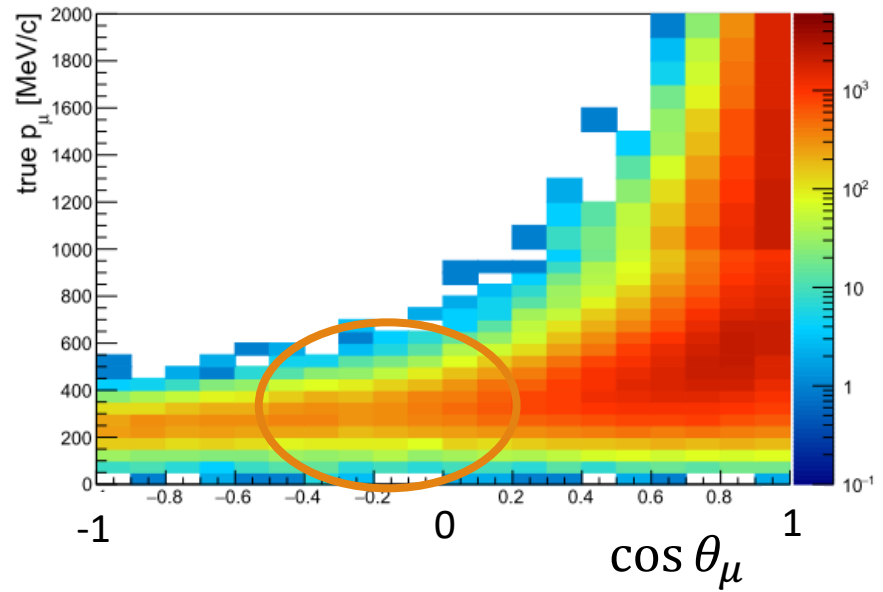


検出効率の比較

- ニュートリノとシンチレータが反応して放出されるミューオンの角度と運動量の分布をシミュレーション
- θ_μ が90度 ($\cos \theta_\mu = 0$) 付近で検出効率改善



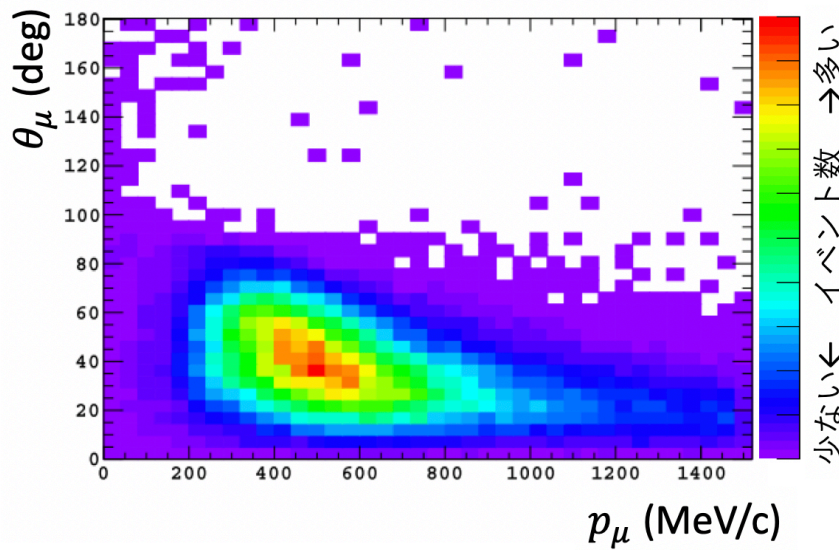
現行のND280



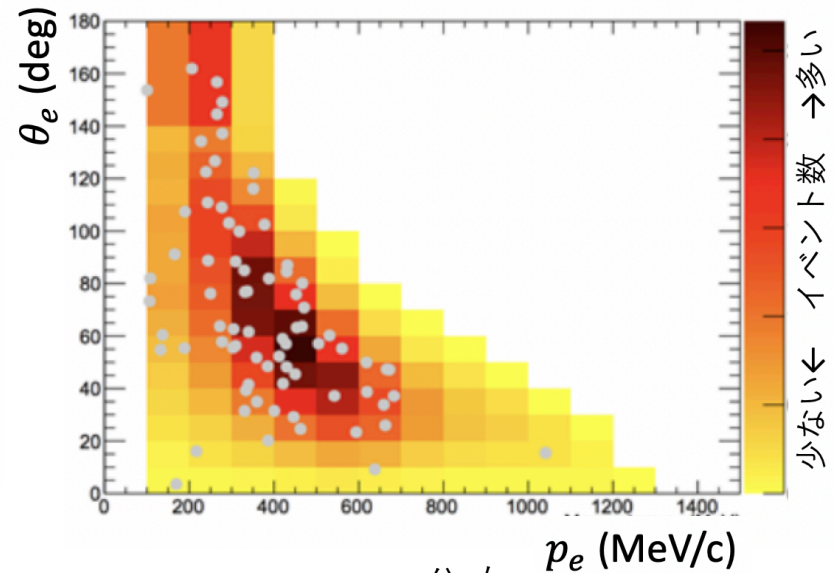
アップグレードされたND280

ND280での後方散乱トラック

- 後方散乱トラックは運動量が低く飛程が短いため、TPCまで到達する確率が低くなる
(運動量100 MeV/cだとポリスチレン中でおおよそ7 cm, アルミニウム中でおおよそ3 cm, 一方でFGDの厚さは約30 cm)
- 再構成の対象となるのはTPCを一定距離以上飛行したイベントのみ
- そのため, $\theta > 90^\circ$ でも検出効率が低下する

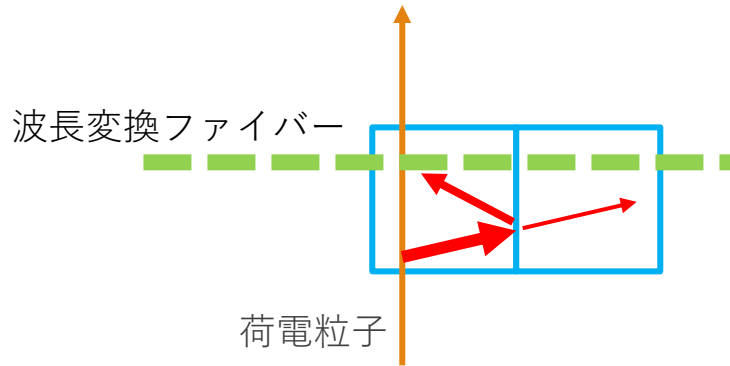


ND280での p, θ 分布

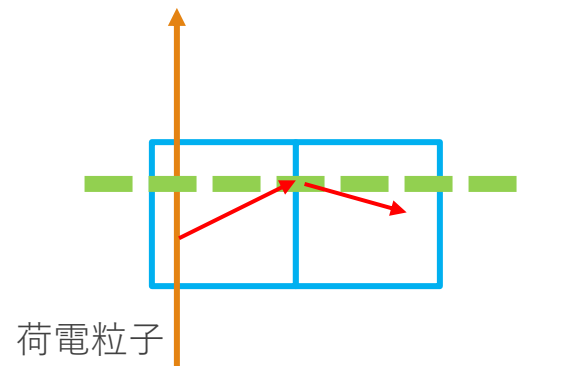


SKでの p, θ 分布

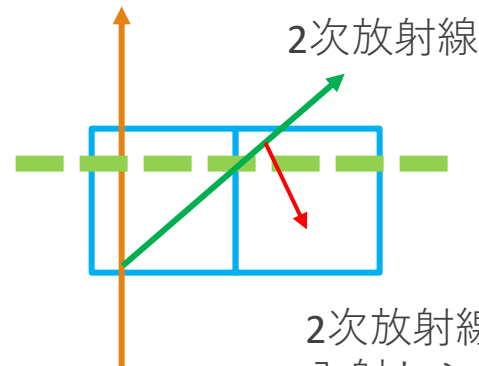
クロストークの例



反射層を透過して
隣のキューブに光漏れ



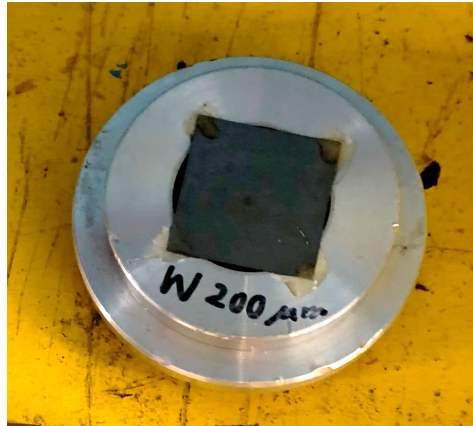
ファイバーやファイバー穴
を通過して光漏れ



2次放射線が隣接キューブに
入射しシンチレーション光
発生

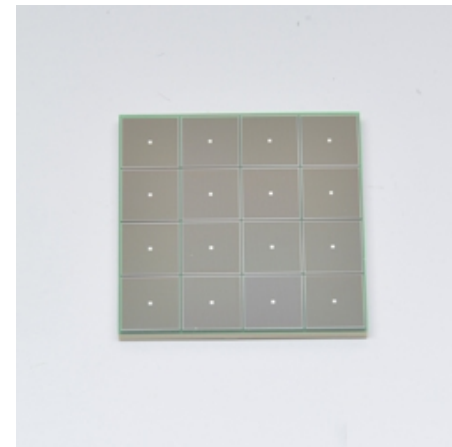
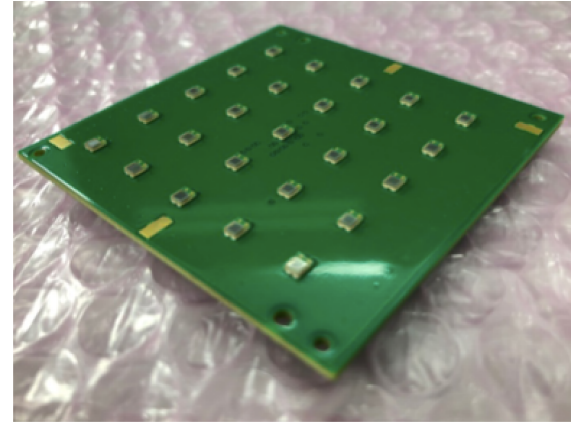
使用したビーム

- 陽電子ビーム
 - タングステン標的（厚さ $200\mu\text{m}$ ）にガンマ線を照射して生成
 - 運動量： $\sim 500\text{MeV}/c$ （電磁石で調節可能）
 - ビーム幅： $\sigma_x = \sigma_y = 7\text{ mm}$
 - ON/OFFサイクル： $10\text{s} / 6\text{s}$ または $10\text{s} / 18\text{s}$
 - ビームレート： 2.7 kHz (ON state)

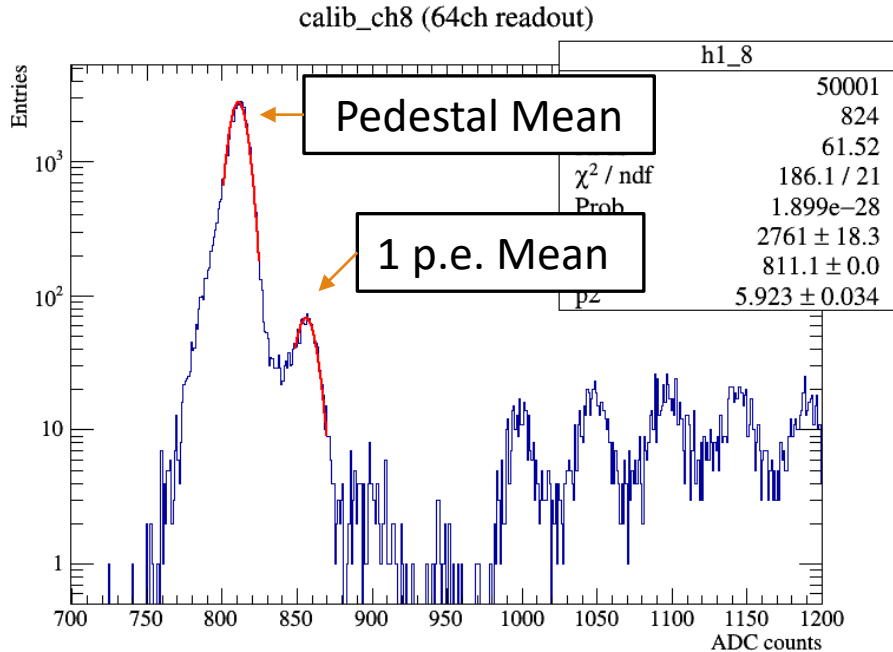


使用機材

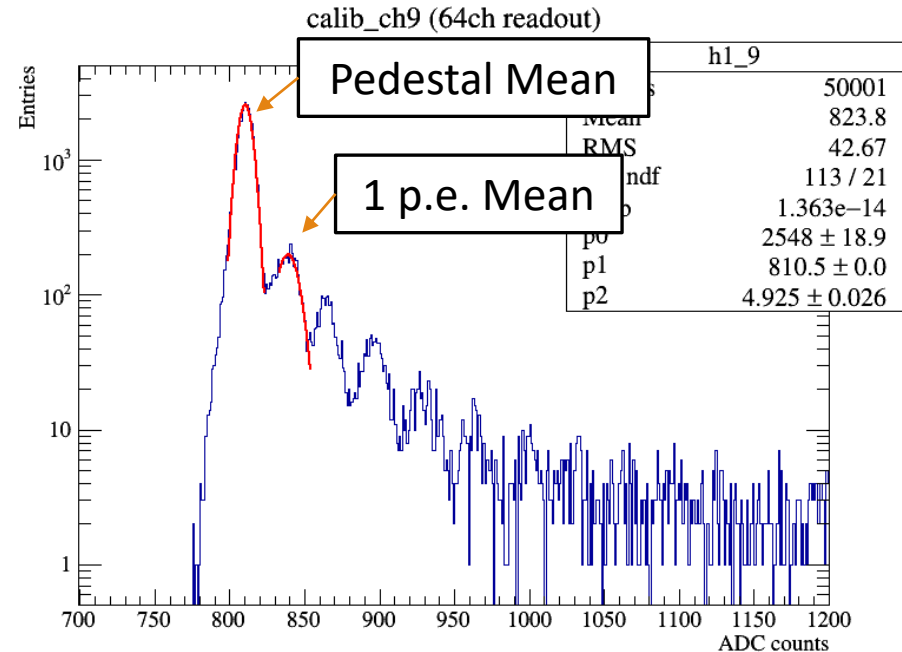
- シンチ用MPPC
 - S13360-1325PE
 - 1ボードに25ch
 - 有効受光面直径：1.5 mm
 - ダークカウントレート：70 kHz
- ホドスコープ用MPPC
 - S13361-3050AE-04
 - 16ch MPPC array
 - ダークカウントレート：500 kHz
- 波長変換ファイバー
 - Kuraray Y11
 - 直径：1.0 mm
- EASIROC



MPPCの較正について



ホドスコープのADCカウント分布

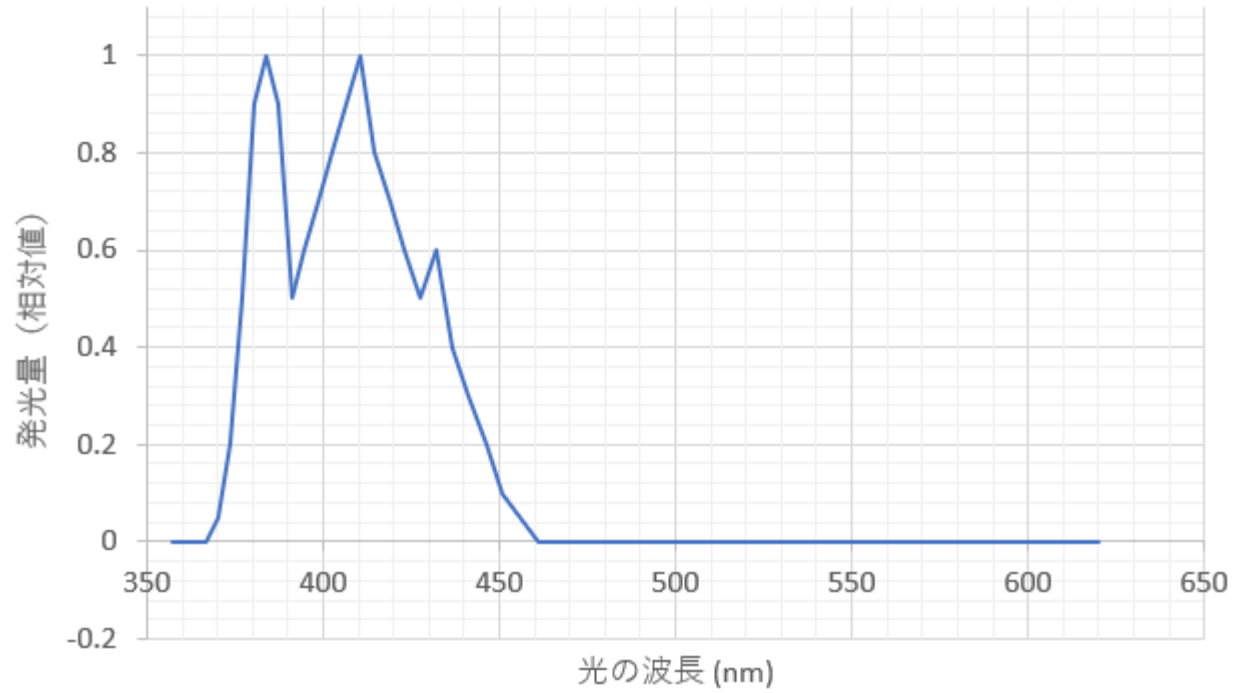


シンチレーターのADCカウント分布

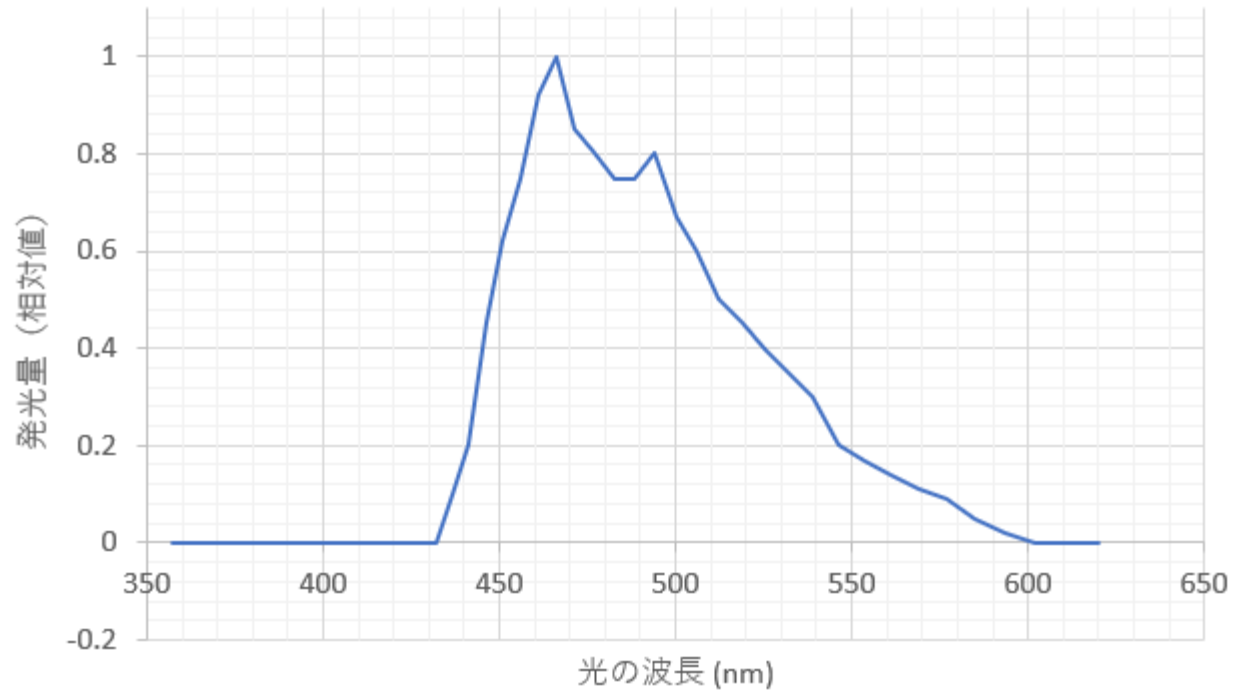
ADCカウントと光子数 (photo-electron; p.e.) の関係

$$\text{p. e.} = \frac{(\text{ADC counts}) - (\text{Pedestal Mean})}{(1 \text{ p. e. Mean}) - (\text{Pedestal Mean})}$$

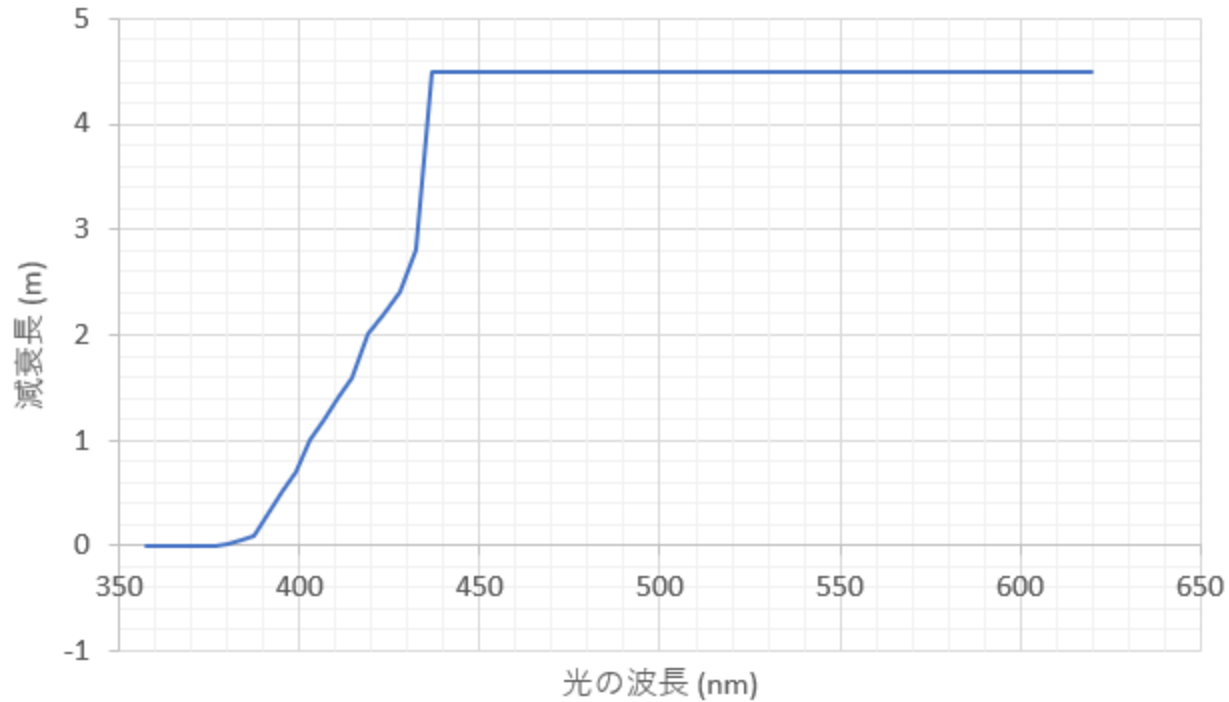
シンチレーション光量



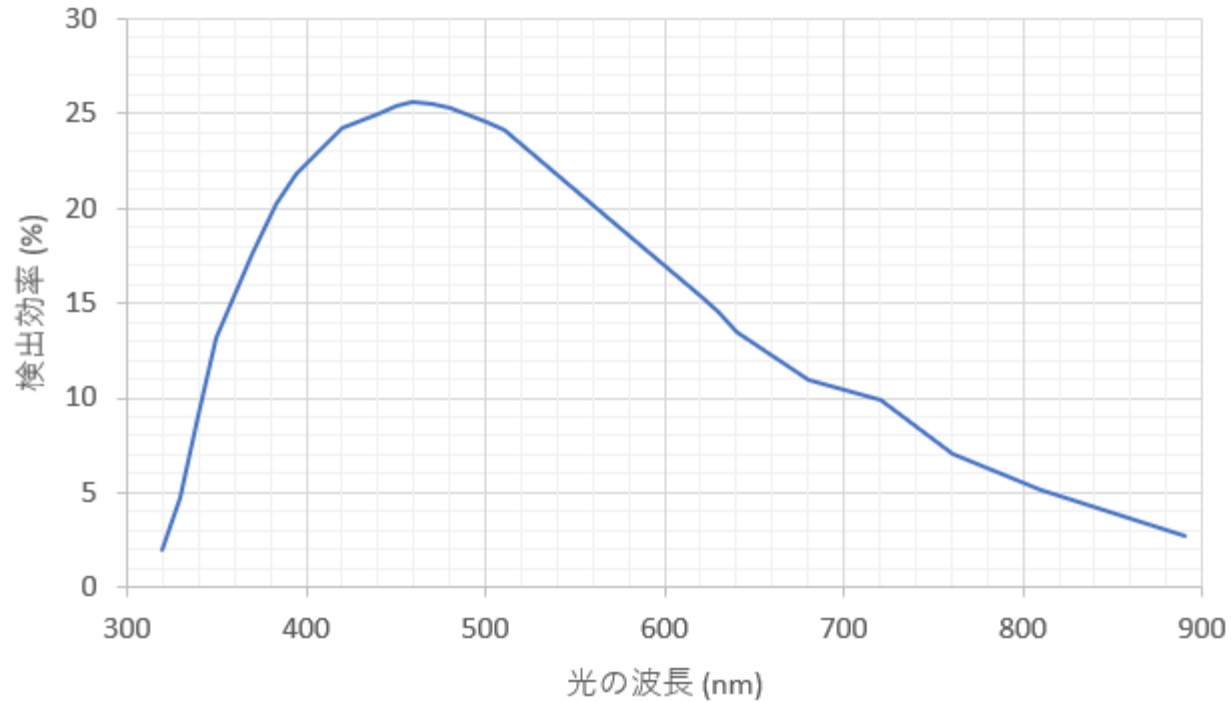
波長変換ファイバーコアの発光量



波長変換ファイバーコアの減衰長

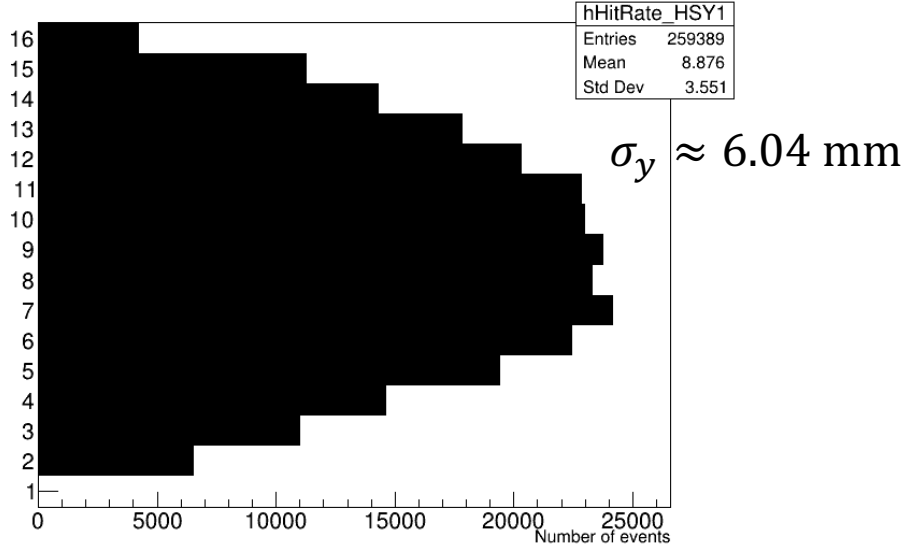


MPPCの光子検出効率

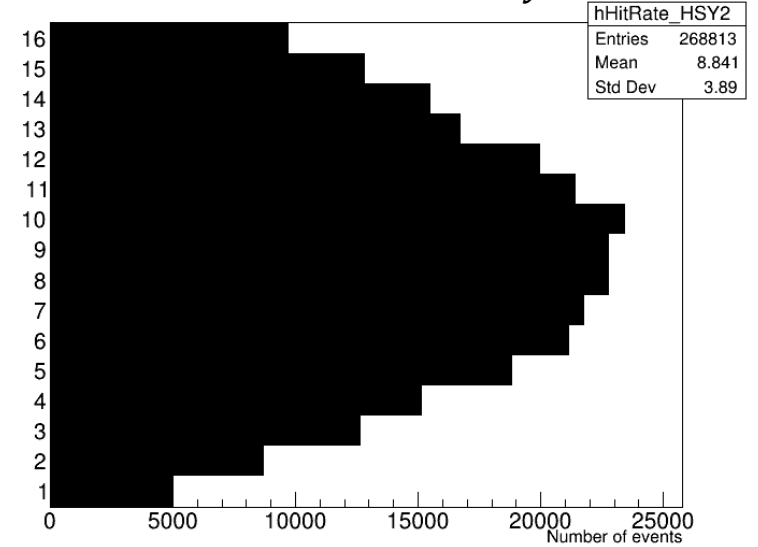


ビームプロファイル

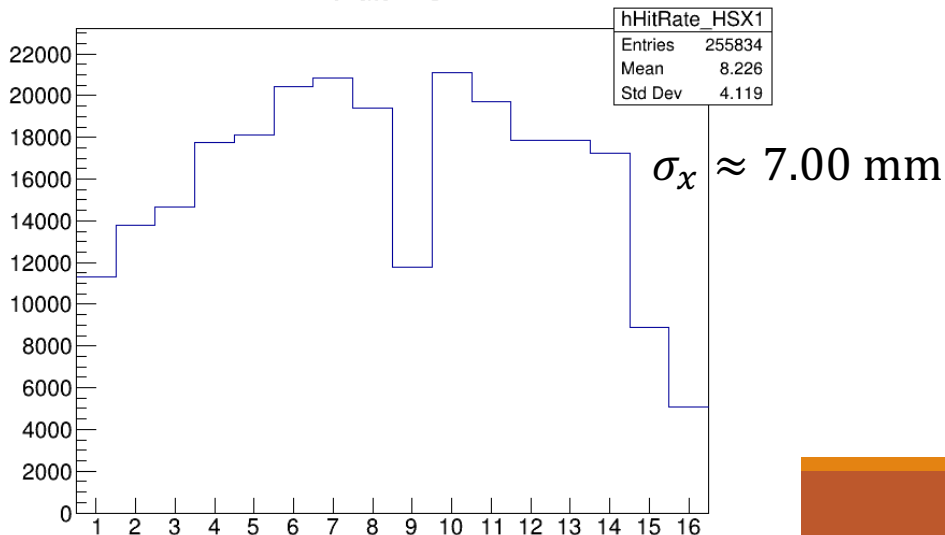
HitRate HSY1



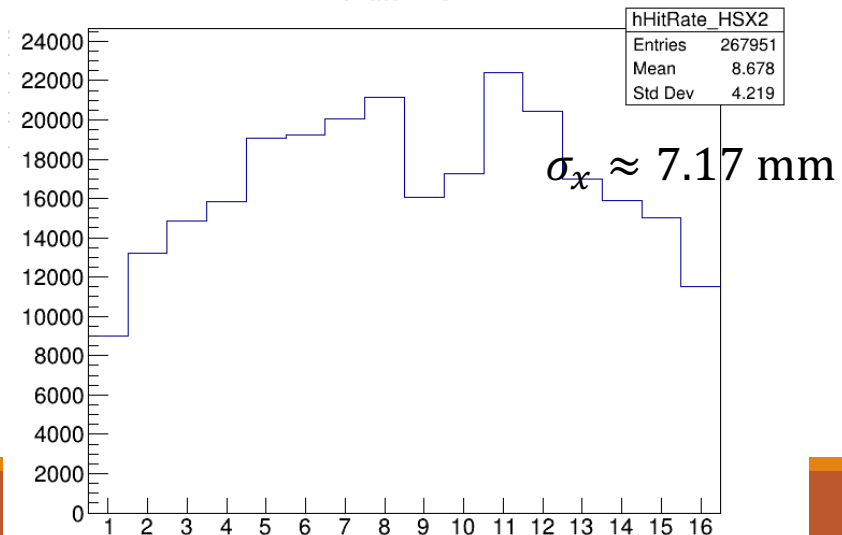
HitRate HSY2 $\sigma_y \approx 6.61 \text{ mm}$



HitRate HSX1

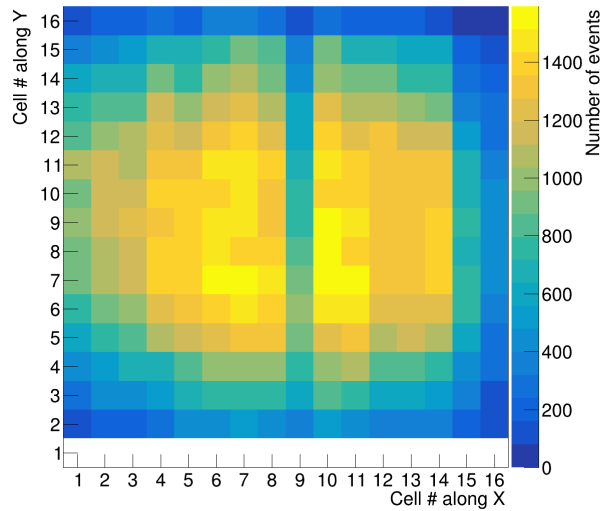


HitRate HSX2

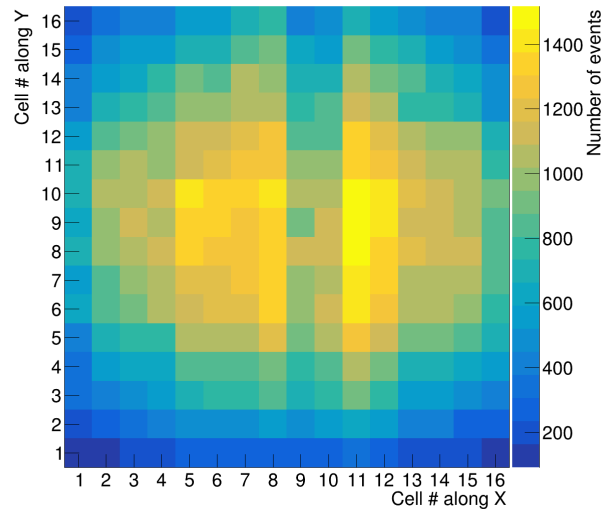


ビームプロファイル

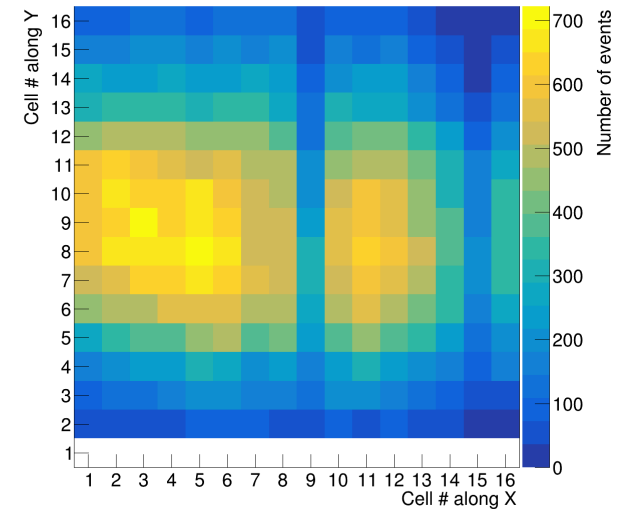
Upstream hodoscope hitmap



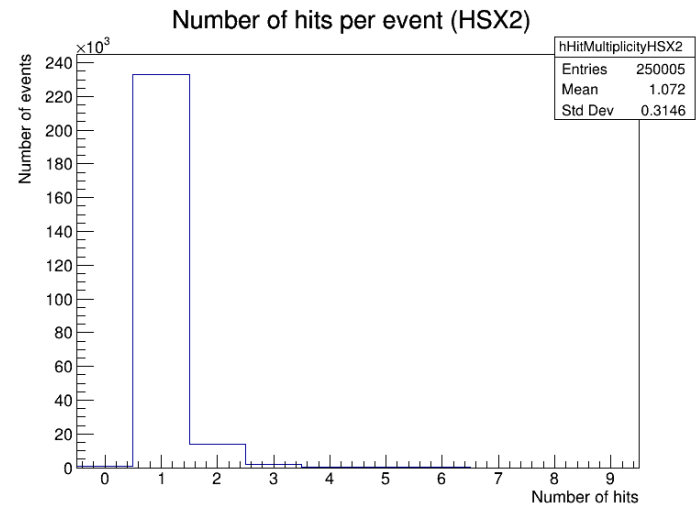
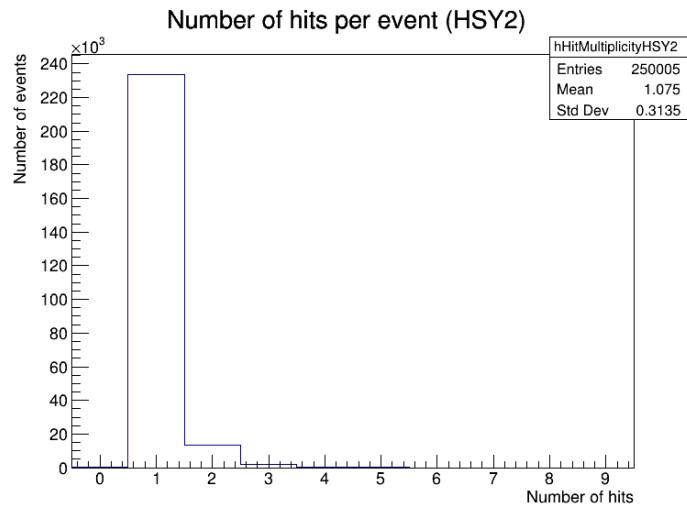
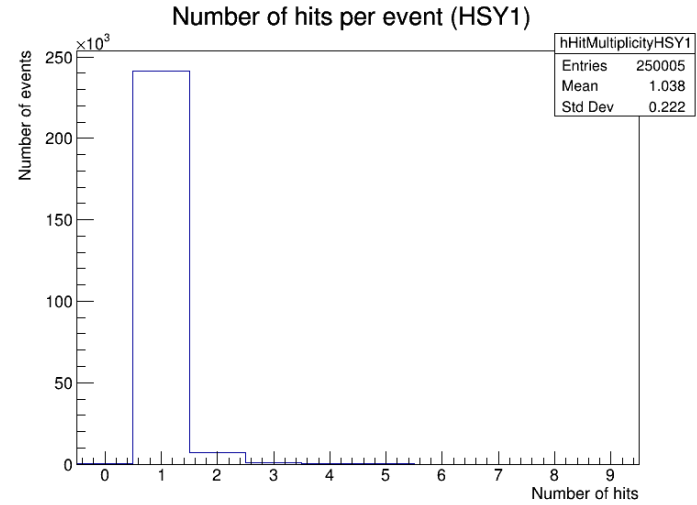
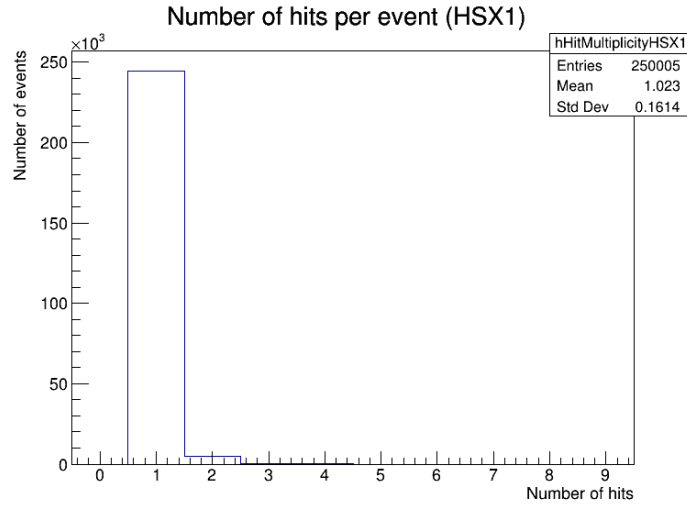
Downstream hodoscope hitmap



Hodoscope hitmap with straight beam event

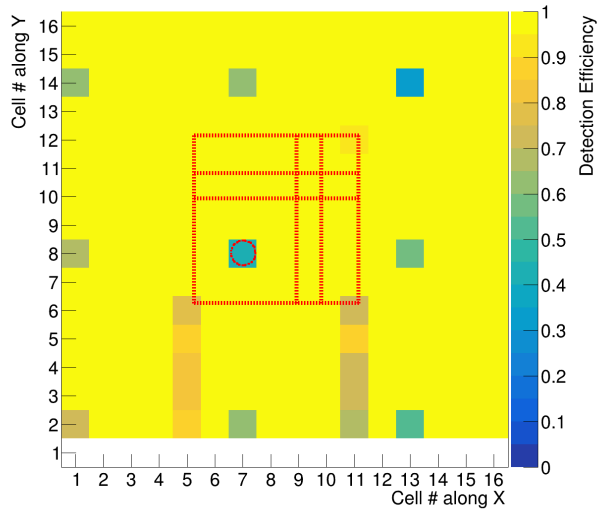


ホドスコープヒット多重度

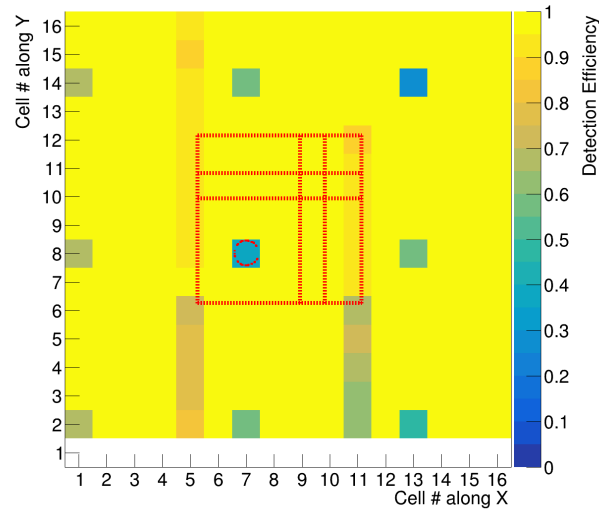


シンチレータ検出効率

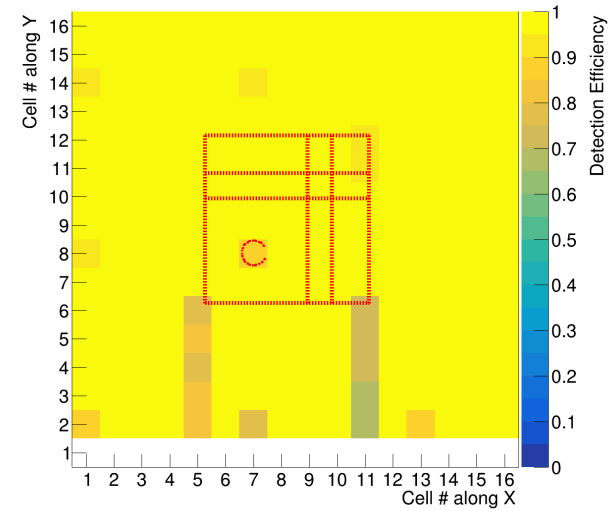
Detection efficiency (using X readout)



Detection efficiency (using Y readout)

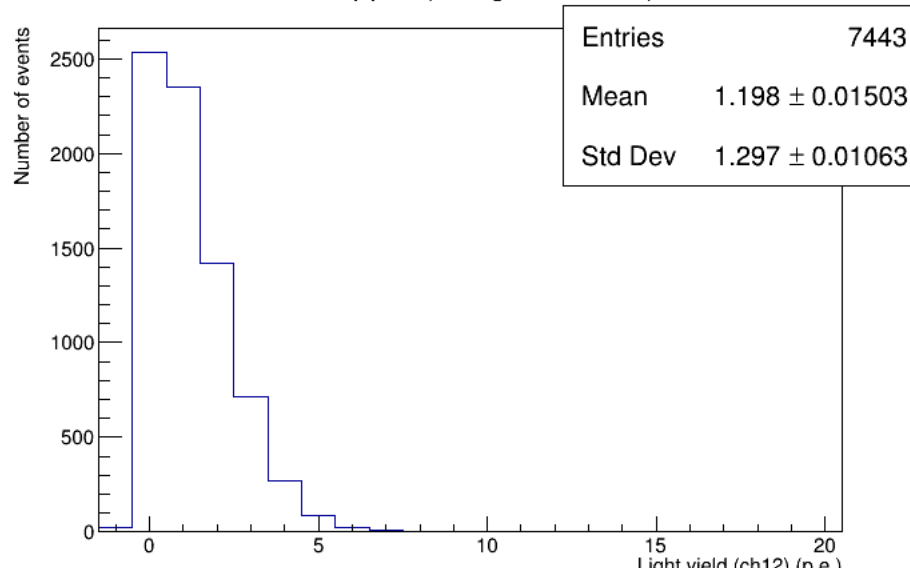


Detection efficiency (using Z readout)



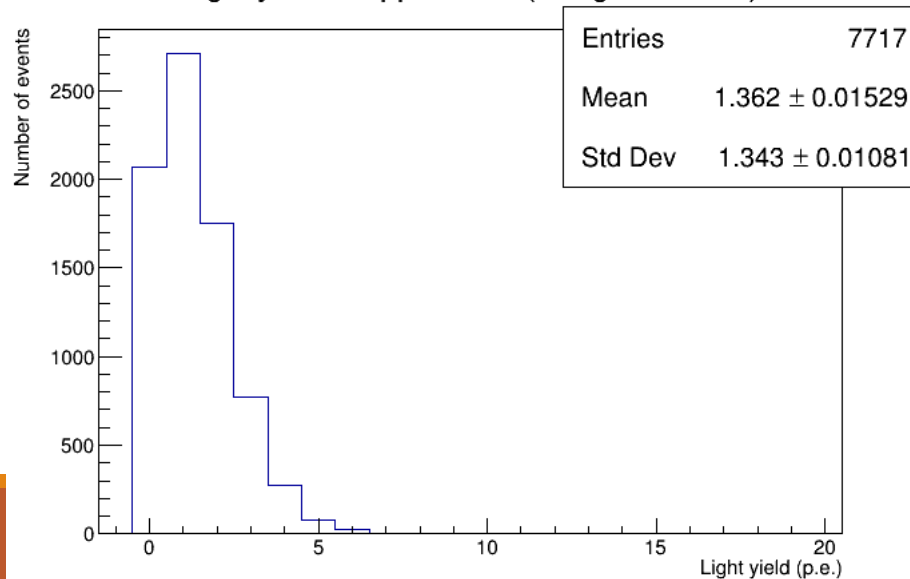
上のキューブの光量

PE upper (using Z readout)



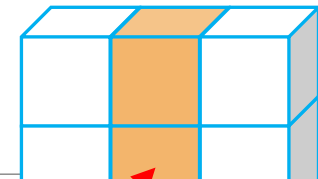
ビーム試験

Light yield of upper cube (using Z readout)

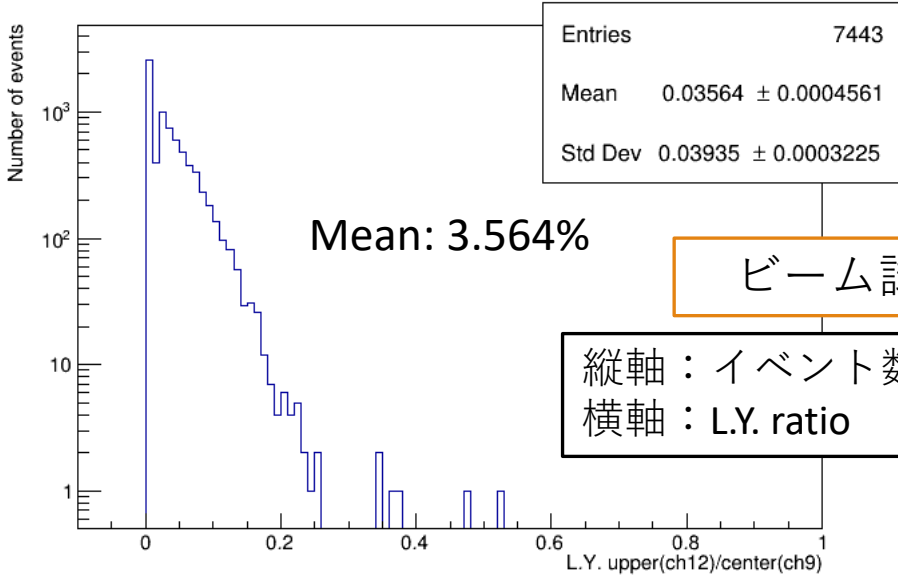


シミュレーション

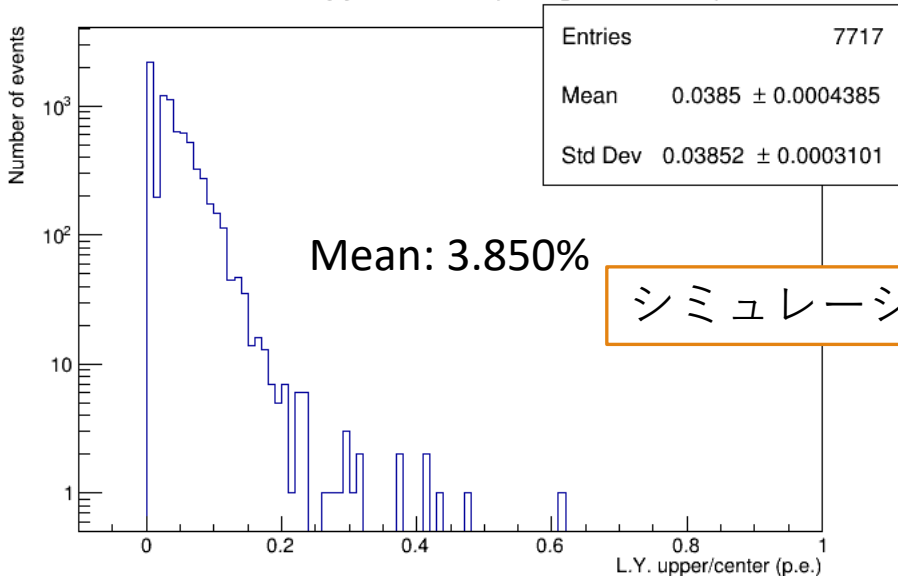
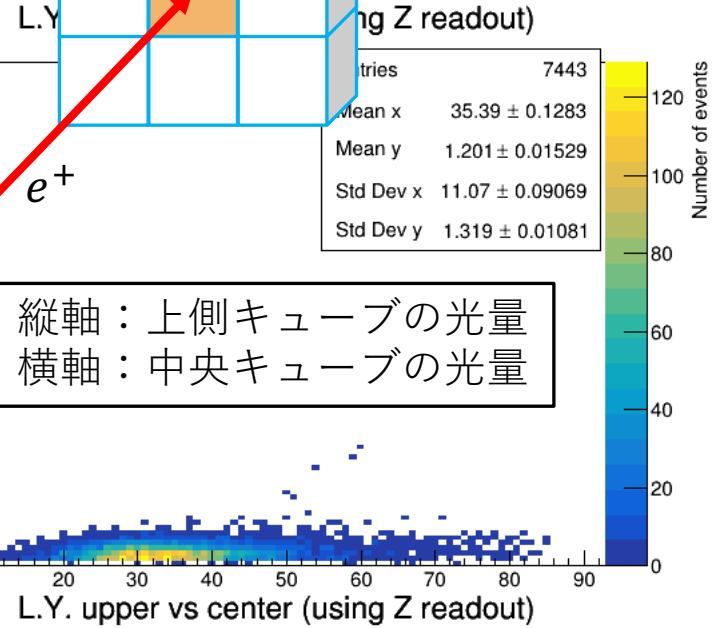
上側キューブとの比較



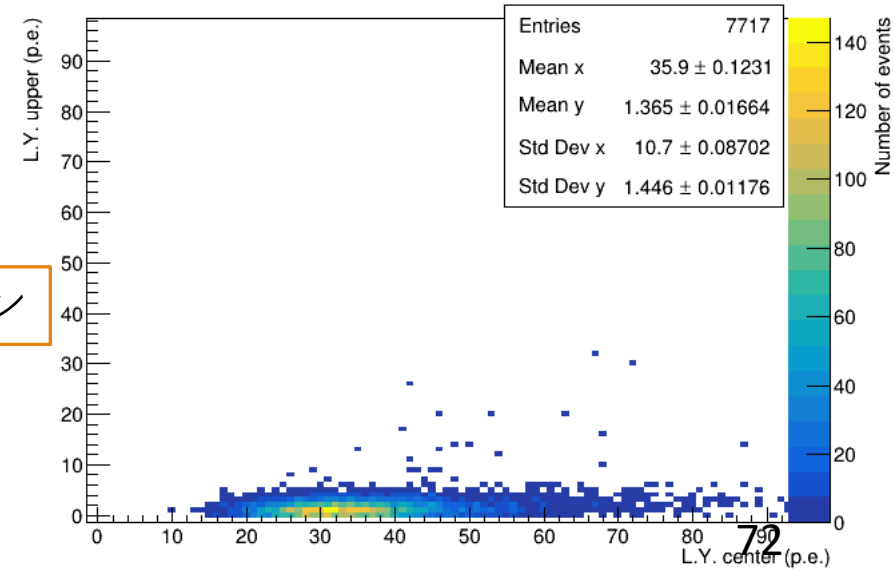
L.Y. ratio upper/center (using Z readout, dark count cut)



ビーム試験



シミュレーション



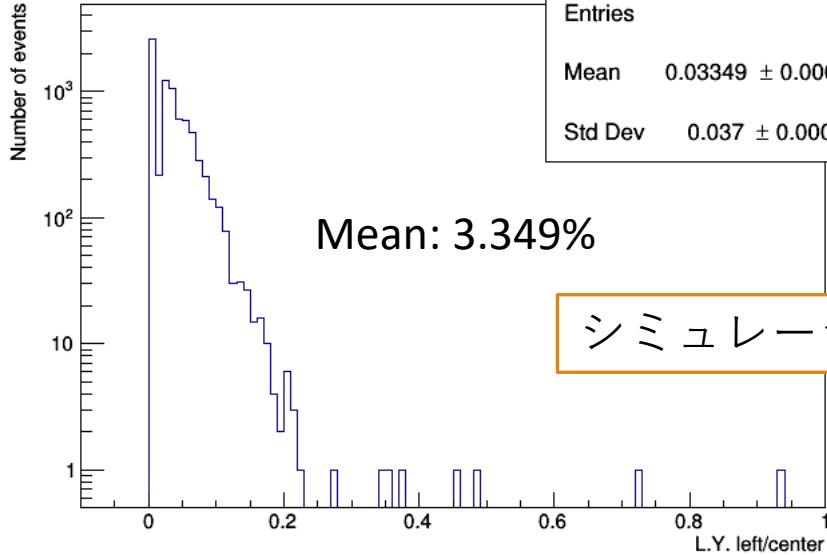
左側キューブとの比較

L.Y. ratio left/center (using Z readout)

Entries	7717
Mean	0.03349 ± 0.0004211
Std Dev	0.037 ± 0.0002978

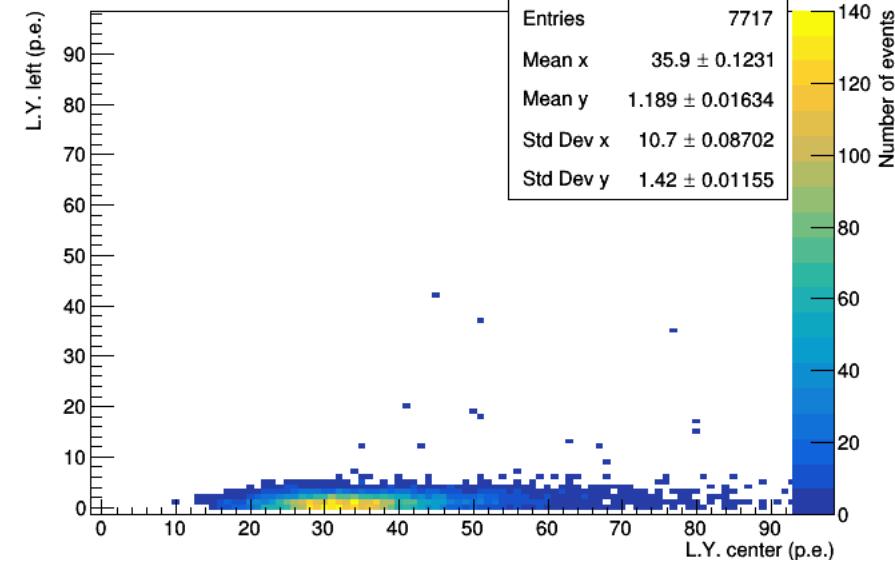
Mean: 3.349%

シミュレーション



L.Y. center vs left (using Z readout)

Entries	7717
Mean x	35.9 ± 0.1231
Mean y	1.189 ± 0.01634
Std Dev x	10.7 ± 0.08702
Std Dev y	1.42 ± 0.01155

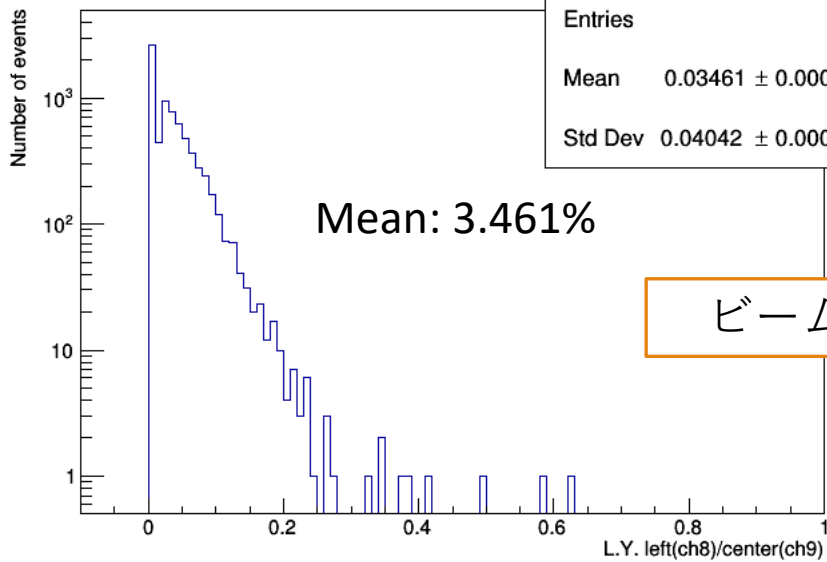


L.Y. ratio left/center (using Z readout, dark count cut)

Entries	7443
Mean	0.03461 ± 0.0004687
Std Dev	0.04042 ± 0.0003314

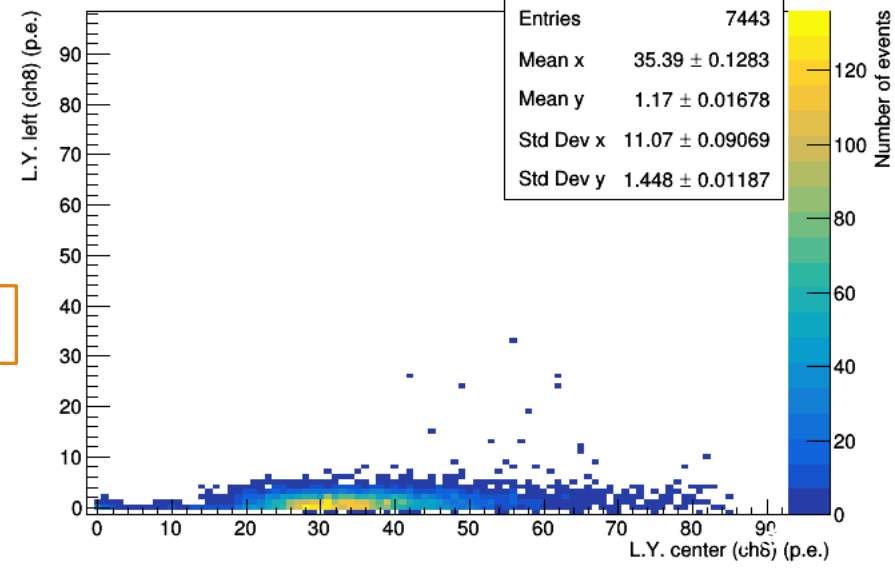
Mean: 3.461%

ビーム試験



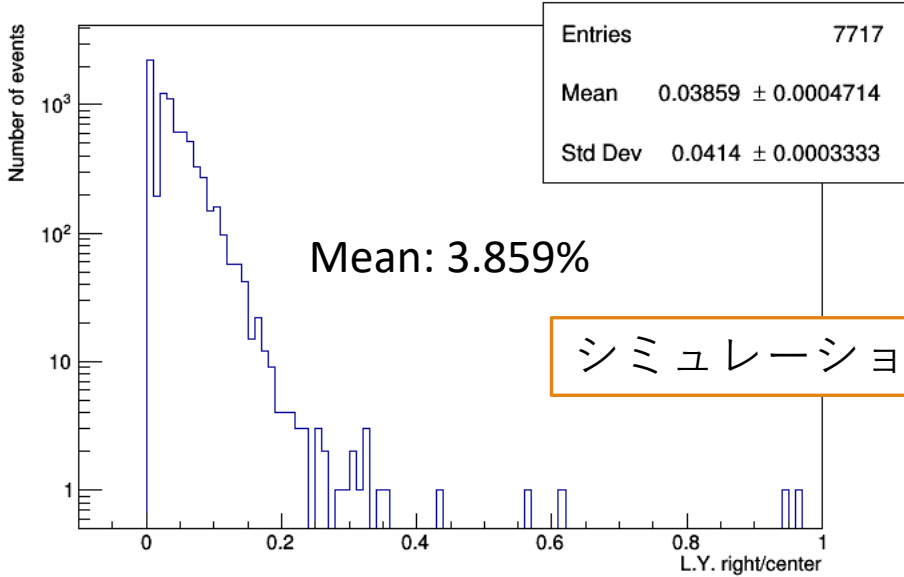
L.Y. left vs center (using Z readout)

Entries	7443
Mean x	35.39 ± 0.1283
Mean y	1.17 ± 0.01678
Std Dev x	11.07 ± 0.09069
Std Dev y	1.448 ± 0.01187

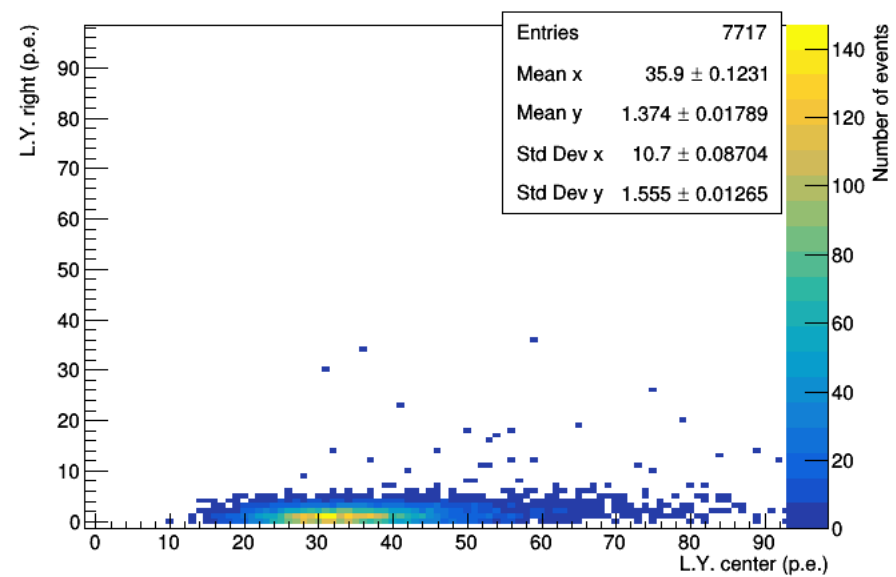


右側キューブとの比較

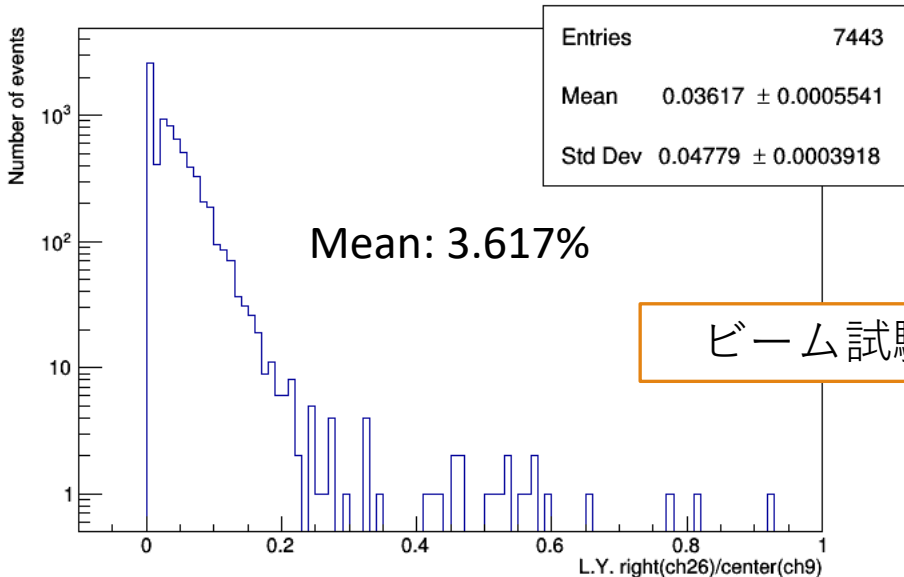
L.Y. ratio right/center (using Z readout)



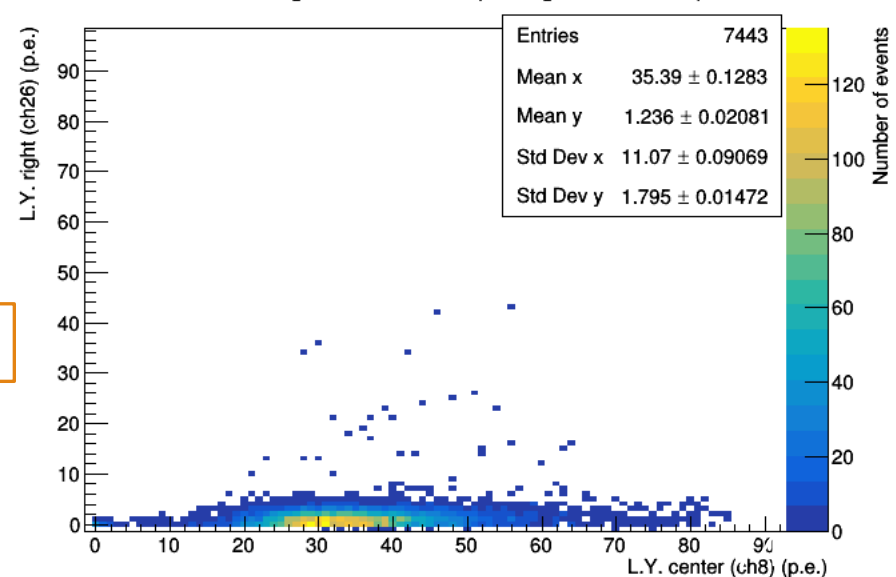
L.Y. center vs right (using Z readout)



L.Y. ratio right/center (using Z readout, dark count cut)

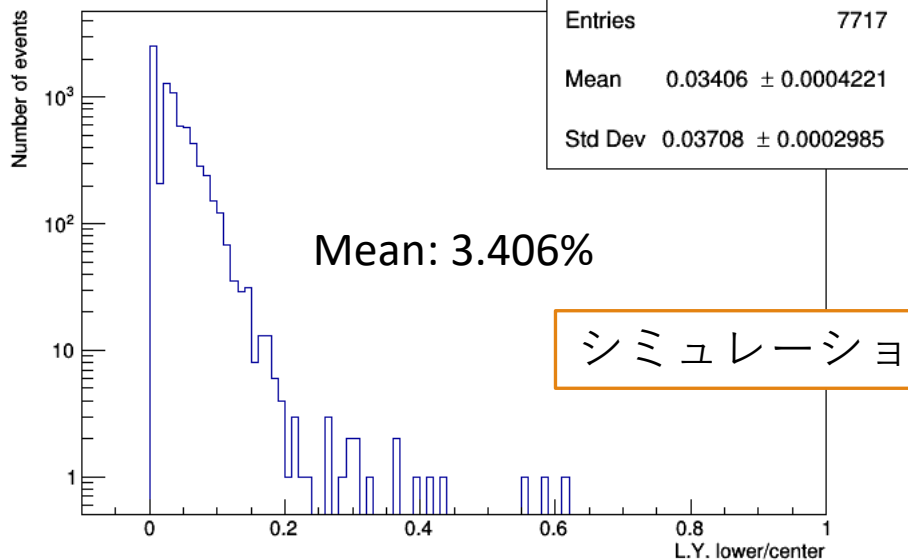


L.Y. right vs center (using Z readout)

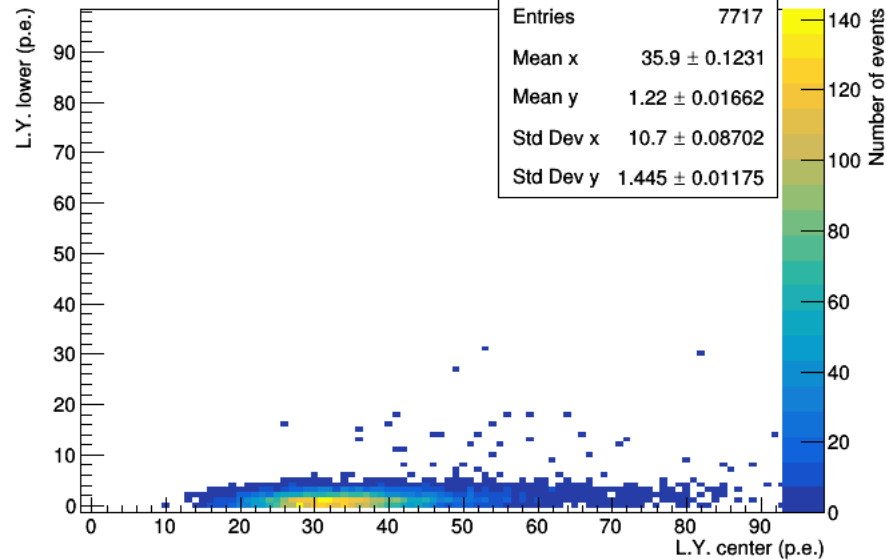


下側キューブとの比較

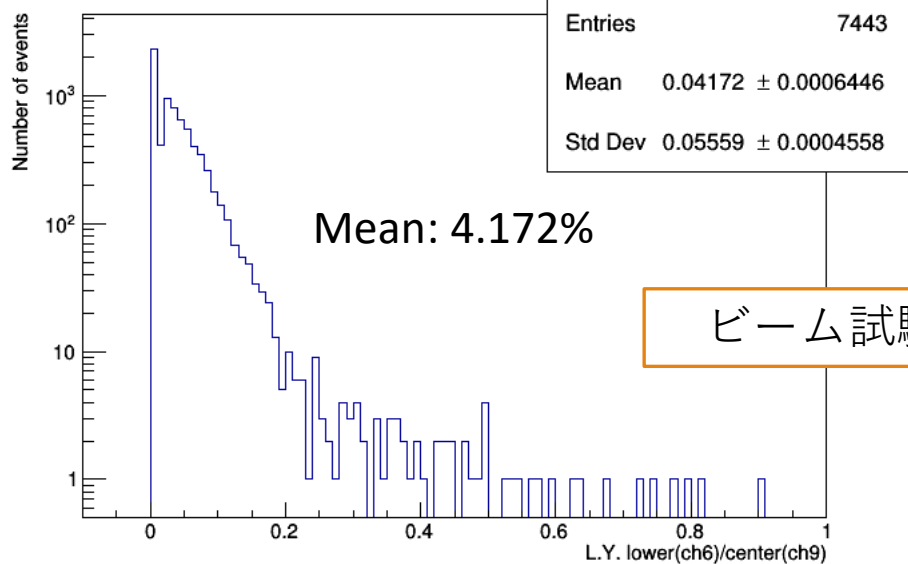
L.Y. ratio lower/center (using Z readout)



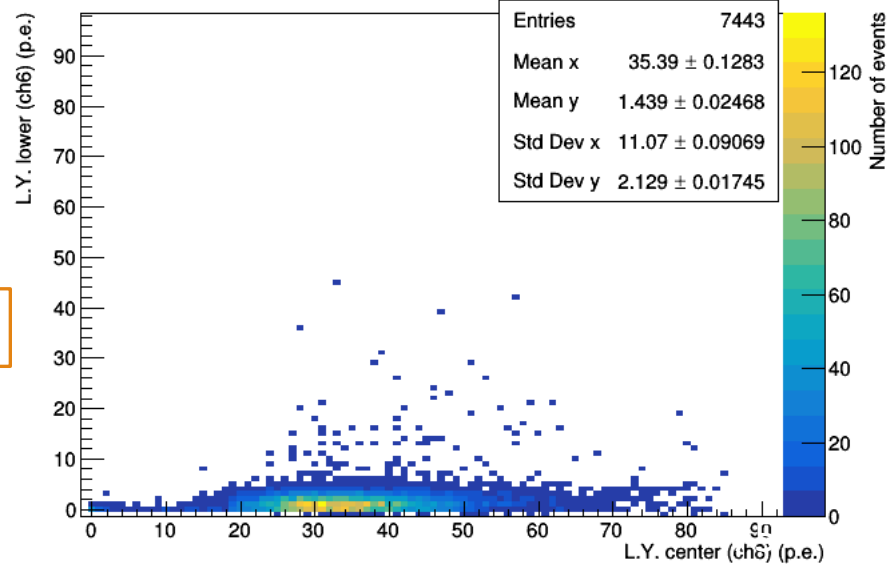
L.Y. center vs lower (using Z readout)



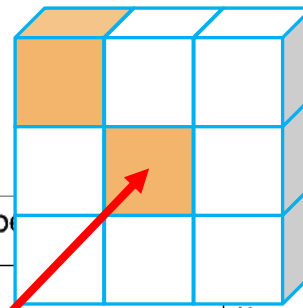
L.Y. ratio lower/center (using Z readout, dark count cut)



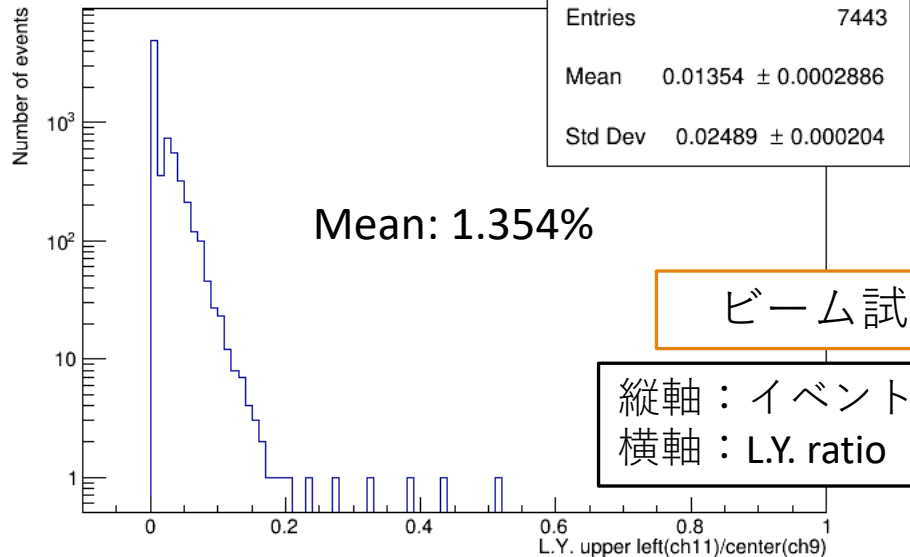
L.Y. lower vs center (using Z readout)



左上側キューブとの比較



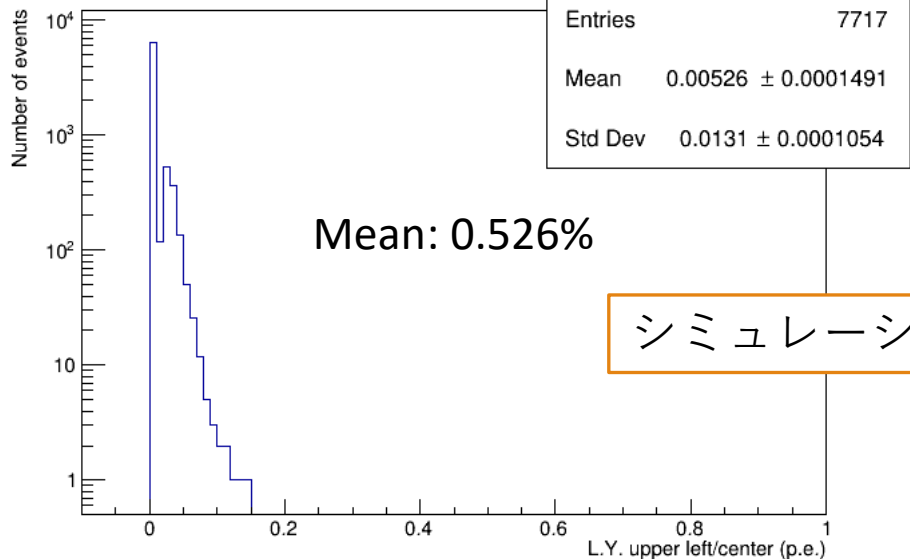
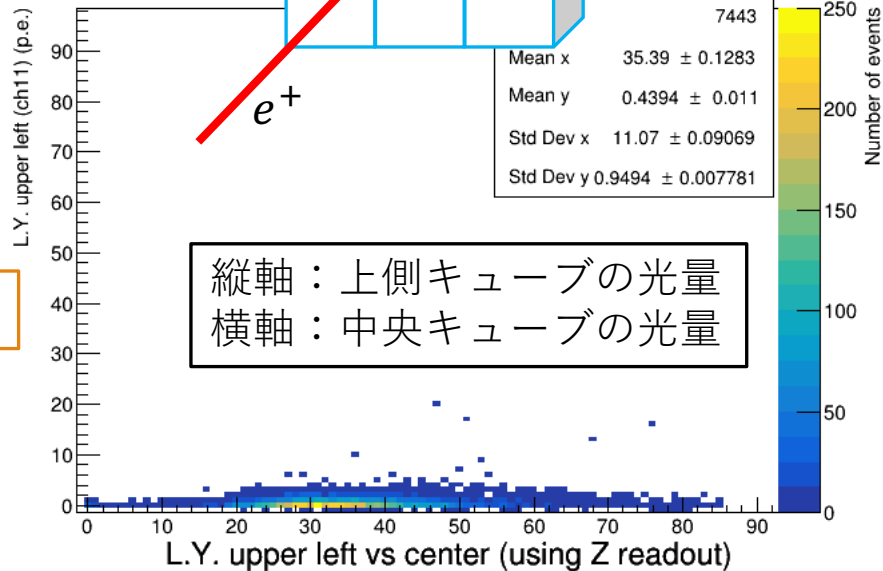
L.Y. ratio upper left/center (using Z readout, dark count cut)



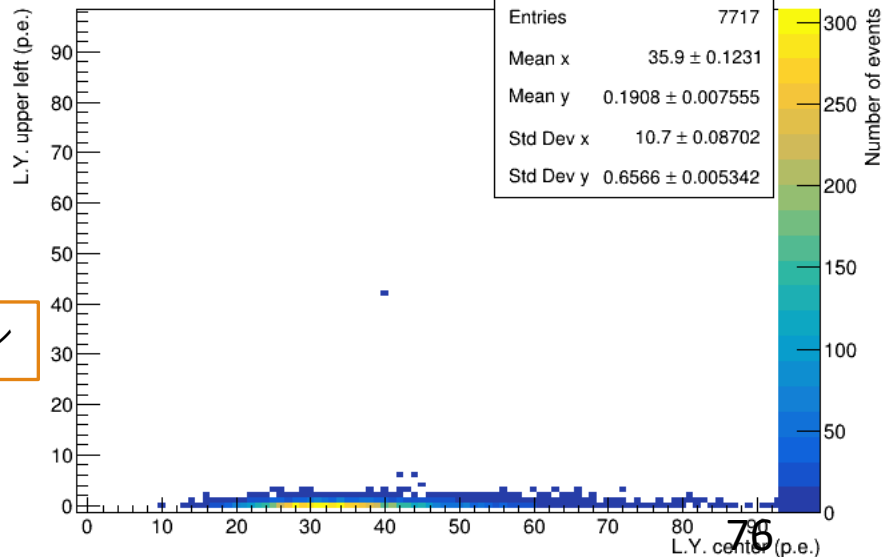
ビーム試験

縦軸：イベント数
横軸：L.Y. ratio

L.Y. upper left vs center (using Z readout)

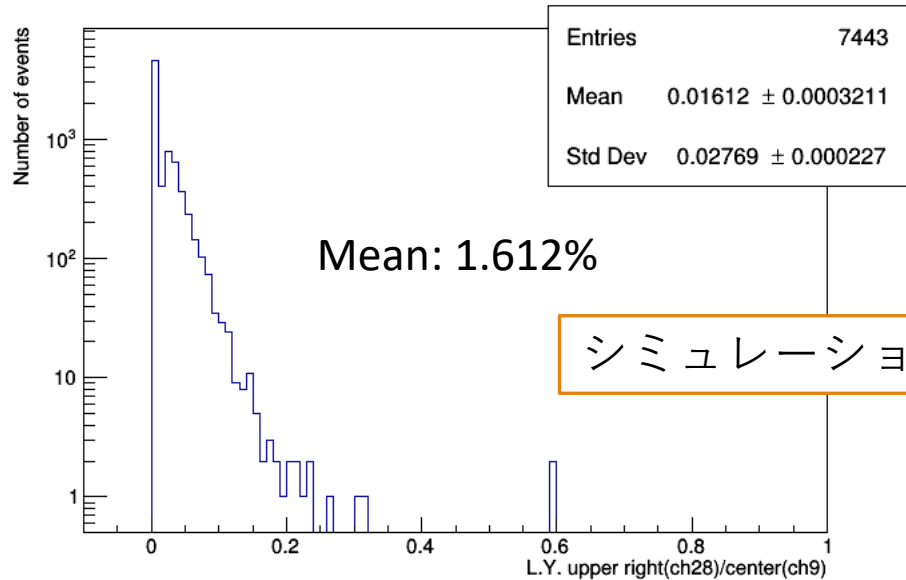


シミュレーション

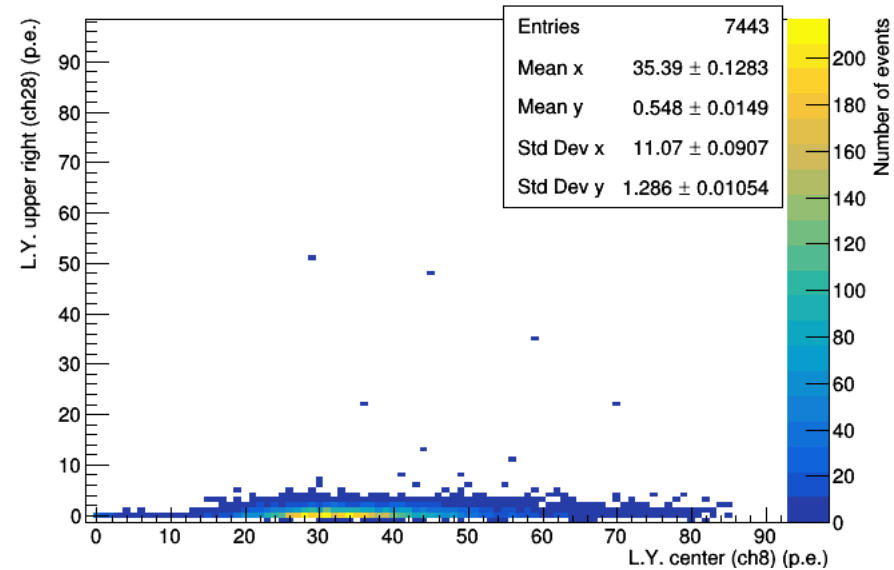


右上側キューブとの比較

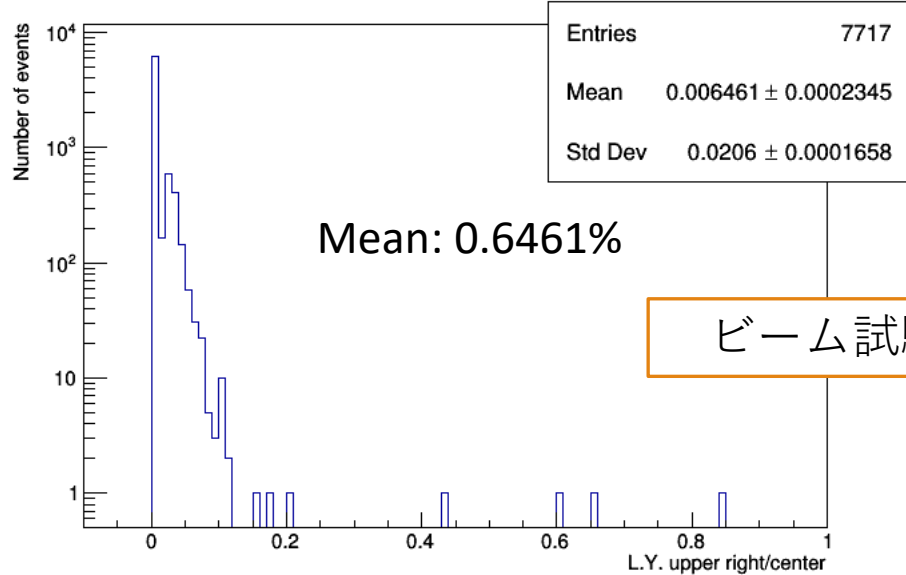
L.Y. ratio upper right/center (using Z readout, dark count cut)



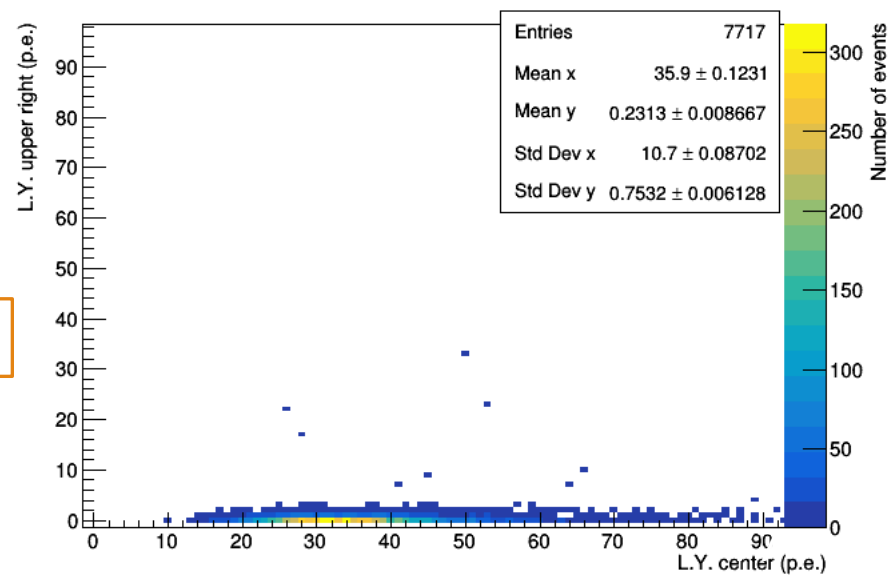
L.Y. upper right vs center (using Z readout)



L.Y. ratio upper right/center (using Z readout)

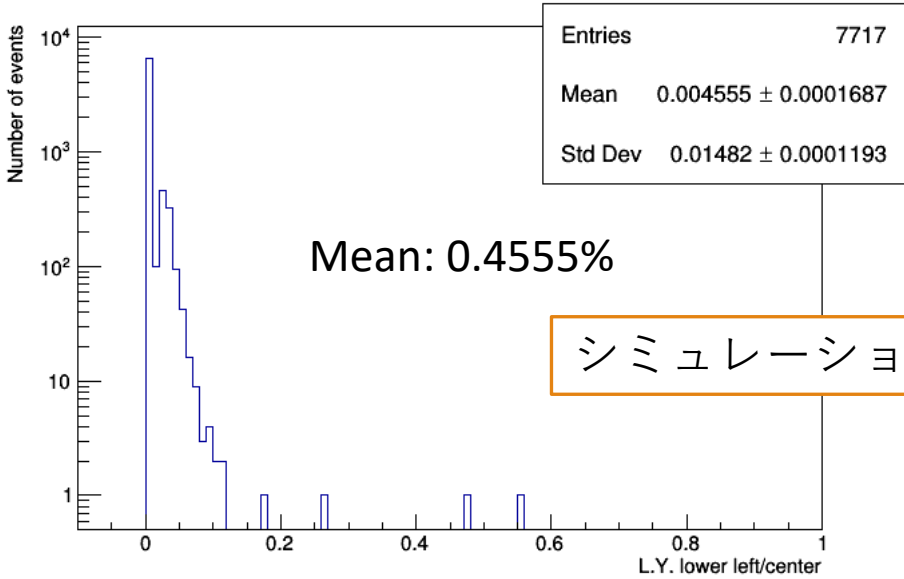


L.Y. center vs upper right (using Z readout)

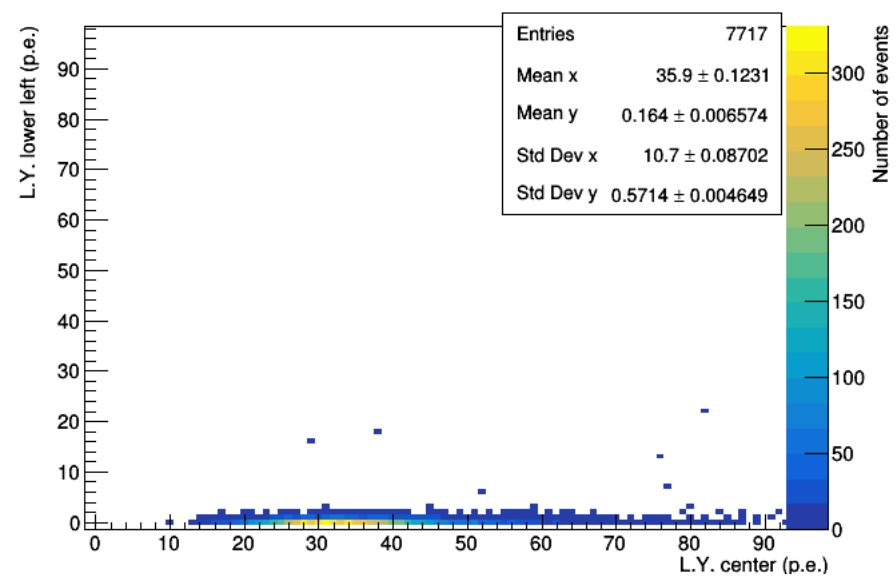


左下側キューブとの比較

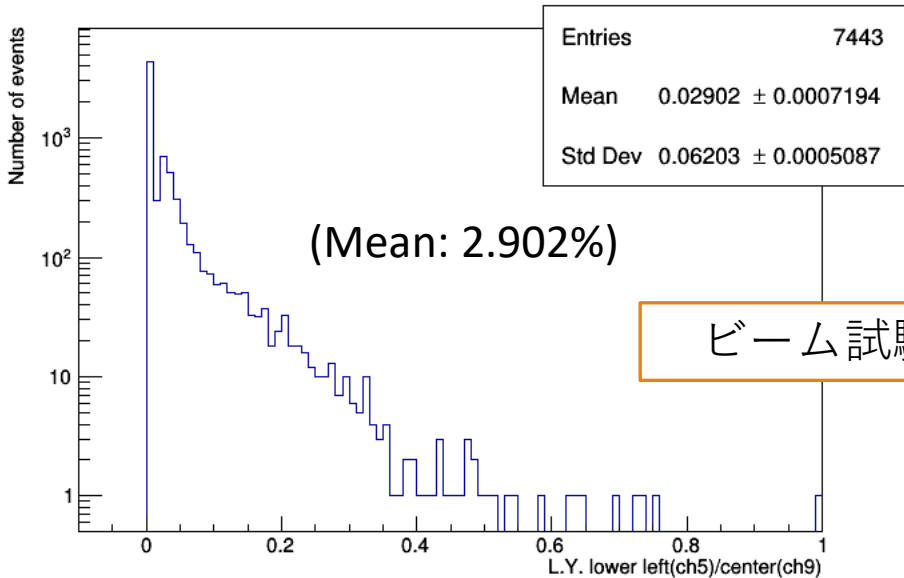
L.Y. ratio lower left/center (using Z readout)



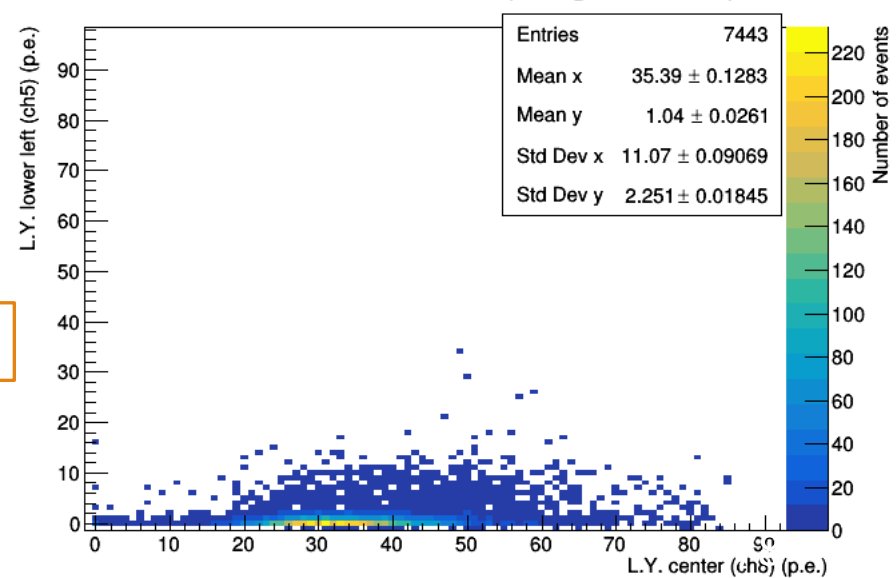
L.Y. center vs lower left (using Z readout)



L.Y. ratio lower left/center (using Z readout, dark count cut)

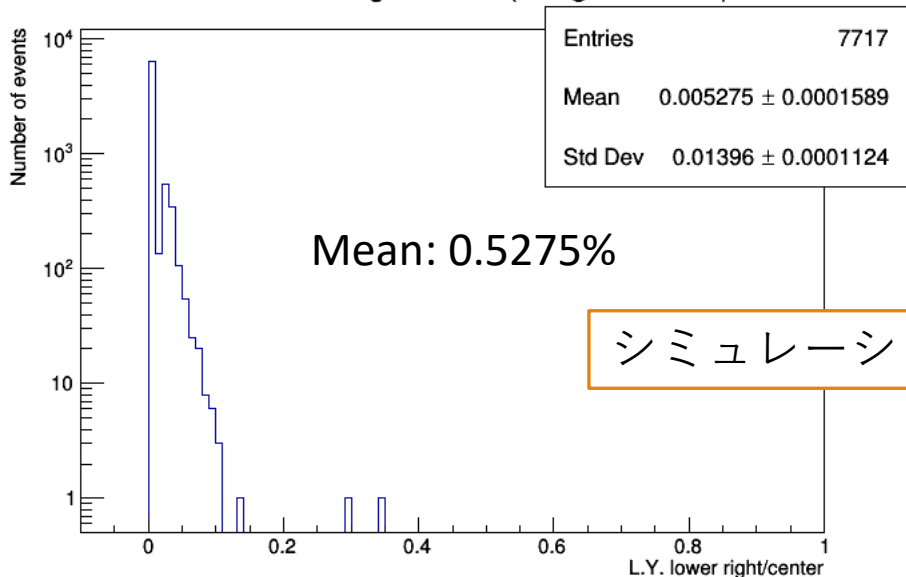


L.Y. lower left vs center (using Z readout)

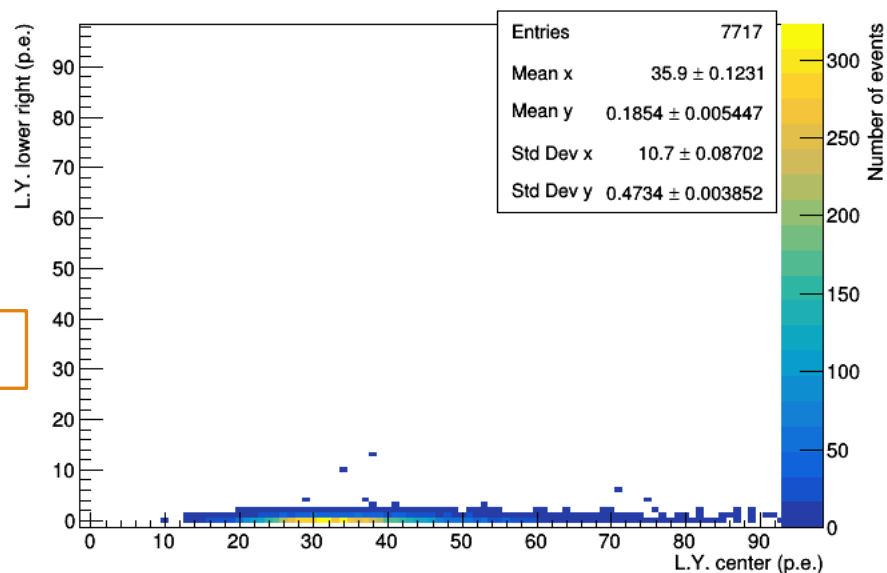


右下側キューブとの比較

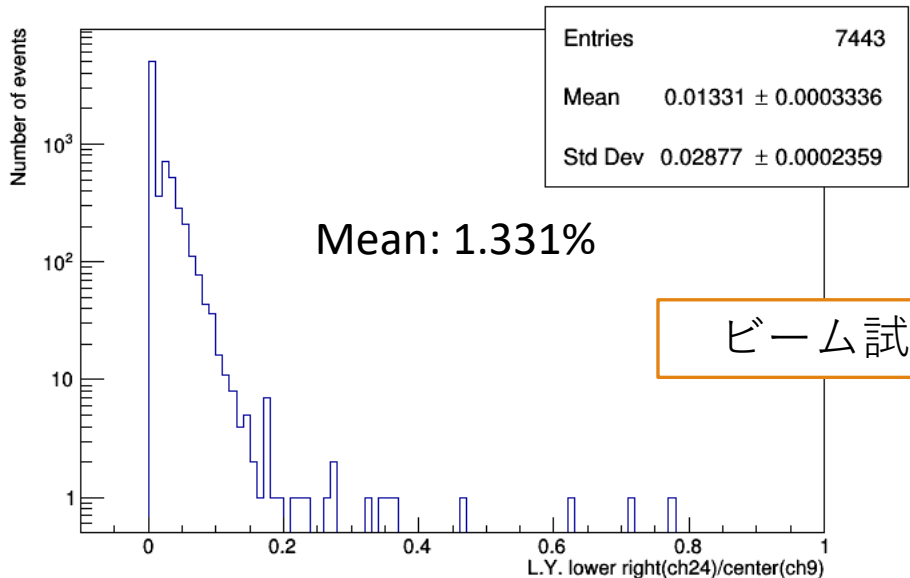
L.Y. ratio lower right/center (using Z readout)



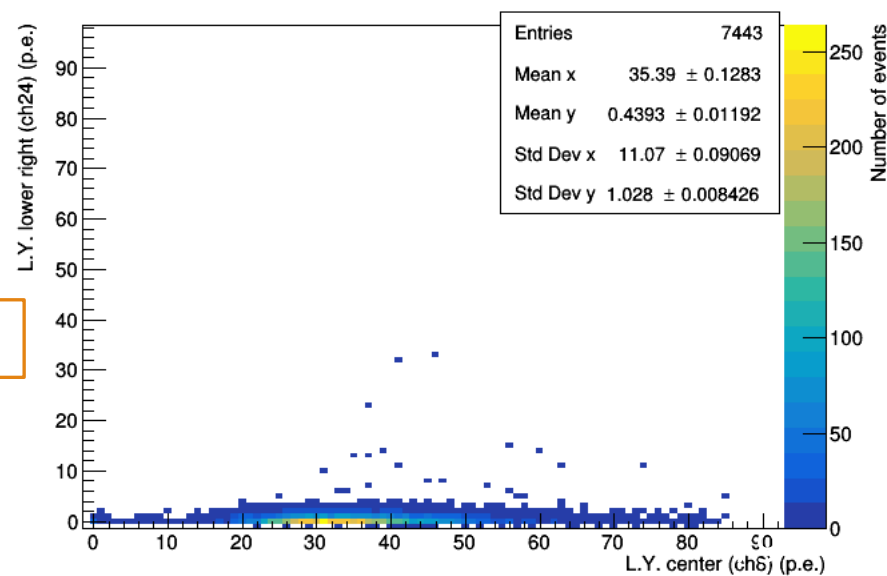
L.Y. center vs lower right (using Z readout)



L.Y. ratio lower right/center (using Z readout, dark count cut)



L.Y. lower right vs center (using Z readout)

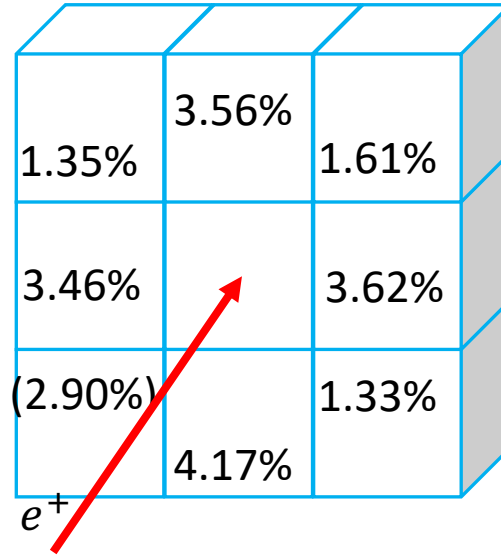


斜め方向クロストークの再現度が悪い原因

- MPPCダークカウントが考慮されていない→原因の1割程度と推定
- エレキのノイズが考慮されていない→ほぼ影響なし
- 下流側ホドスコープがない→ほぼ影響なし
 - ビーム試験ではホドスコープで陽電子ビームが跳ね返るなどしてキューブに入射した？
- シンチレータや波長変換ファイバーの吸収・再発光プロセスが正しくシミュレーションに実装されていない
→未調査 今後の課題

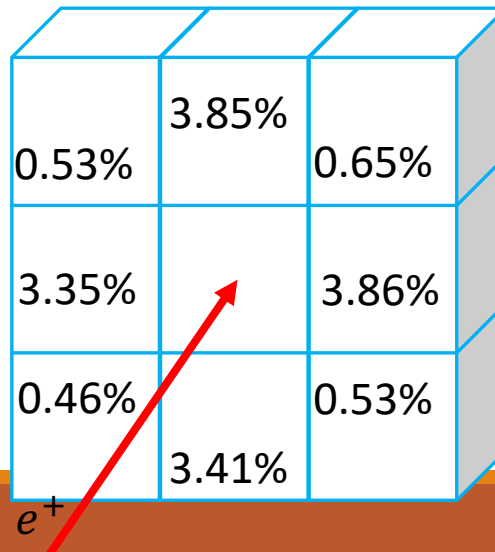
L.Y. ratio 比較のまとめ

ビーム試験



- 上下左右方向の再現度は良い
- 斜め方向は光量が小さいため、MPPCダークカウントの影響を大きく受けて再現度が悪くなっていると考えられる

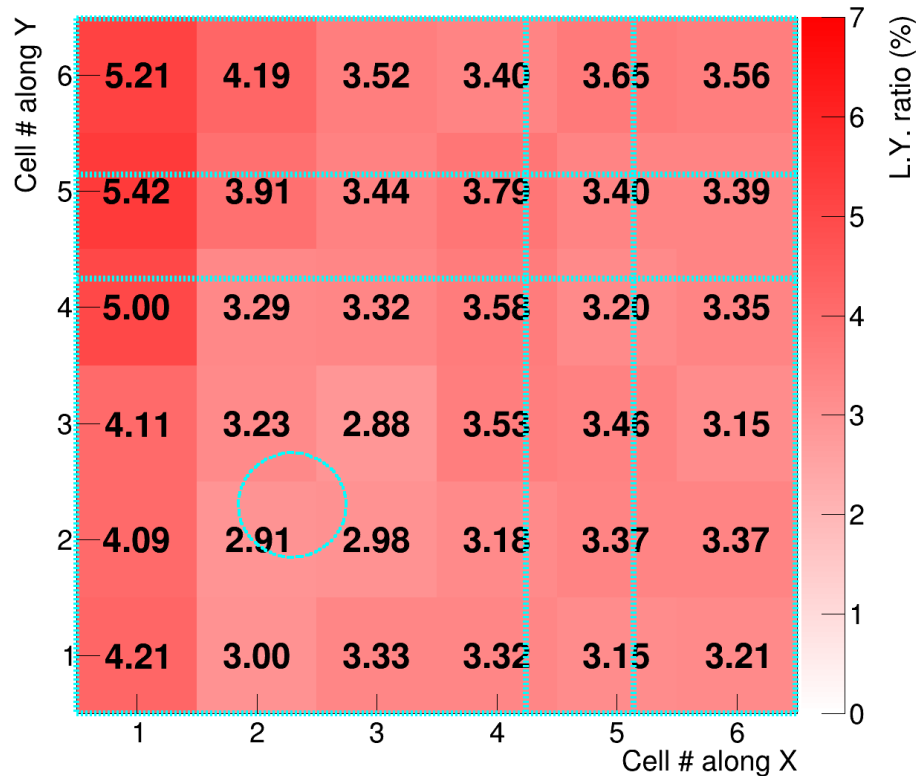
シミュレーション



左側キューブとの比較

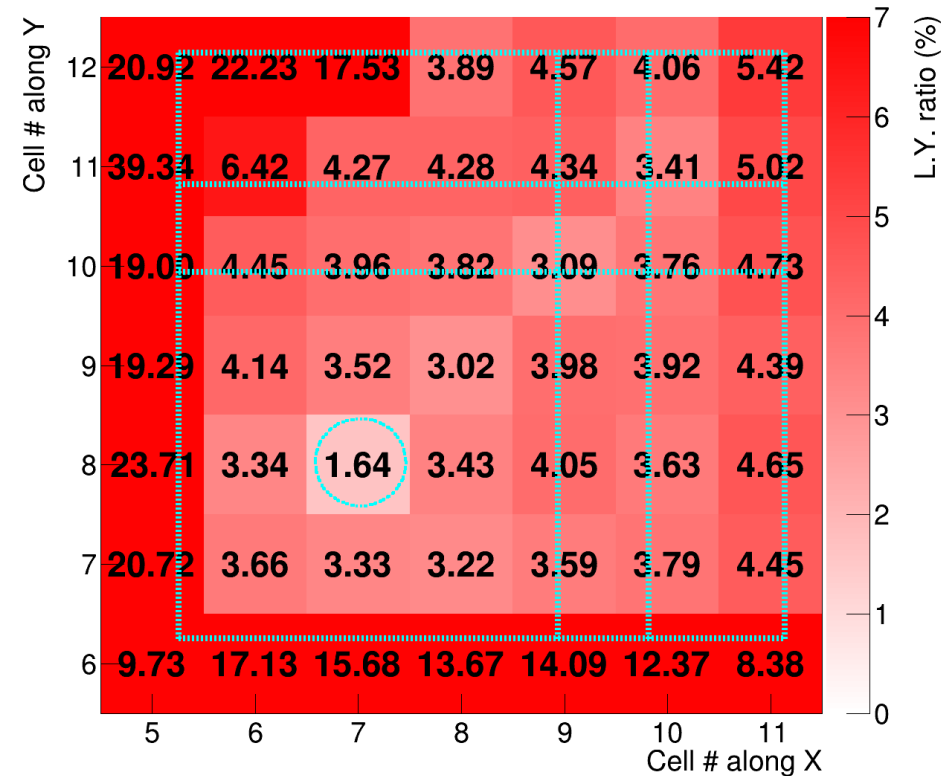
シミュレーション

L.Y. ratio left/center (using Z readout)



ビーム試験

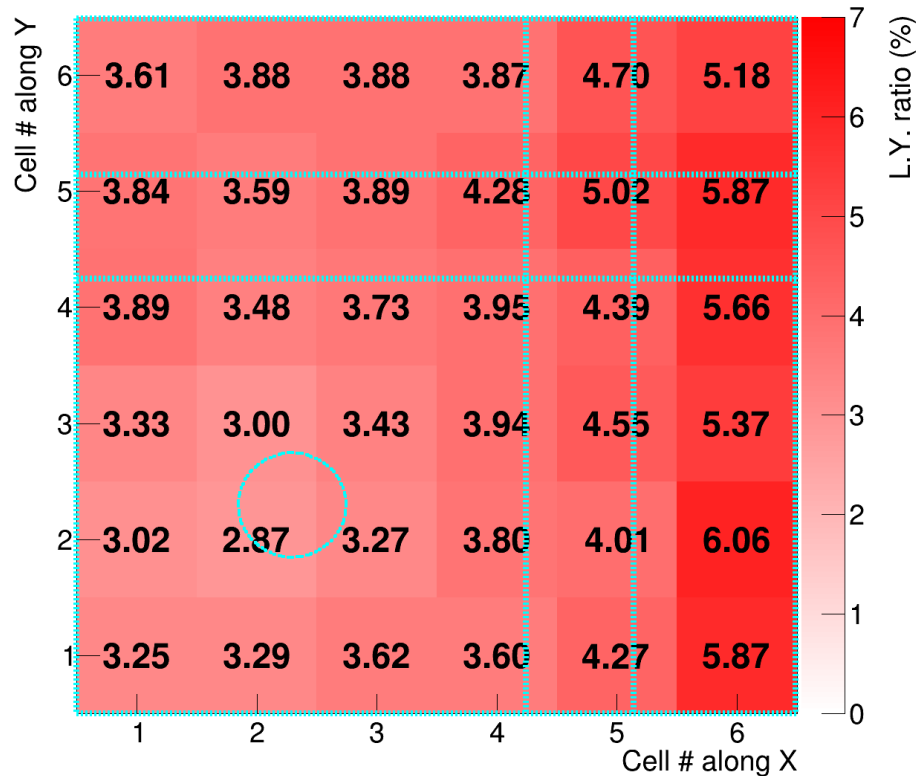
L.Y. ratio (left, using Z readout, dark count cut)



右側キューブとの比較

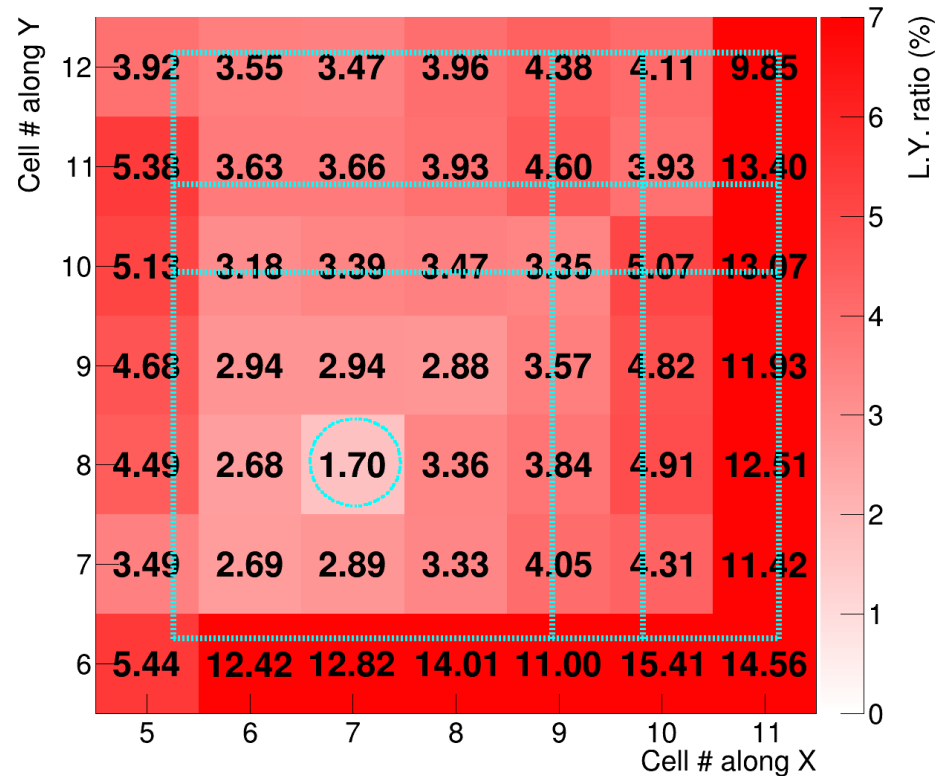
シミュレーション

L.Y. ratio right/center (using Z readout)



ビーム試験

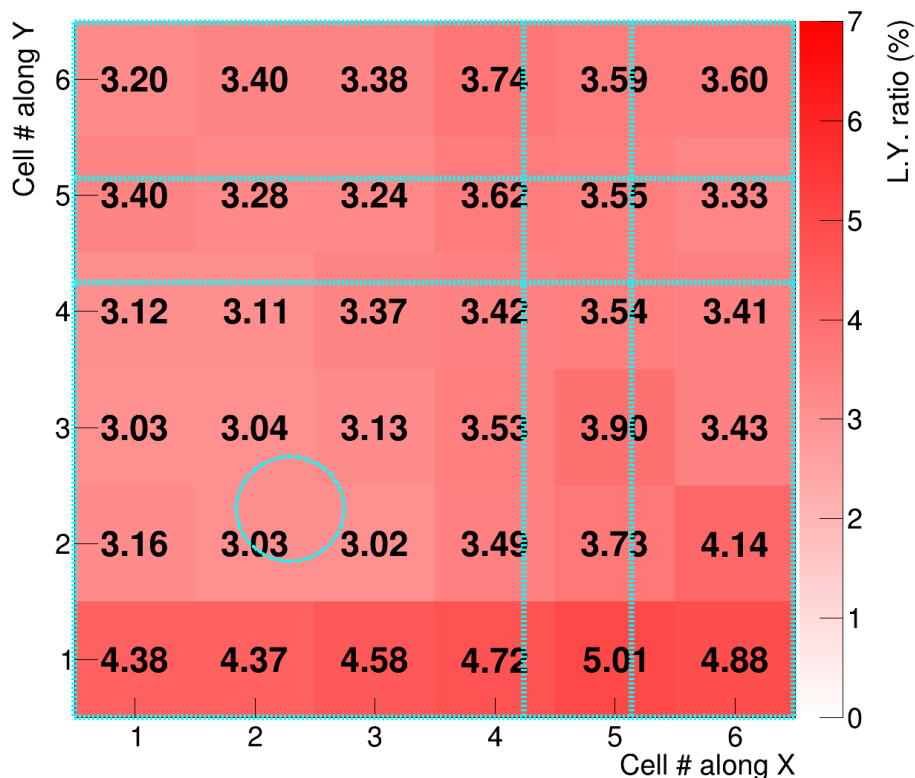
L.Y. ratio (right, using Z readout, dark count cut)



下側キューブとの比較

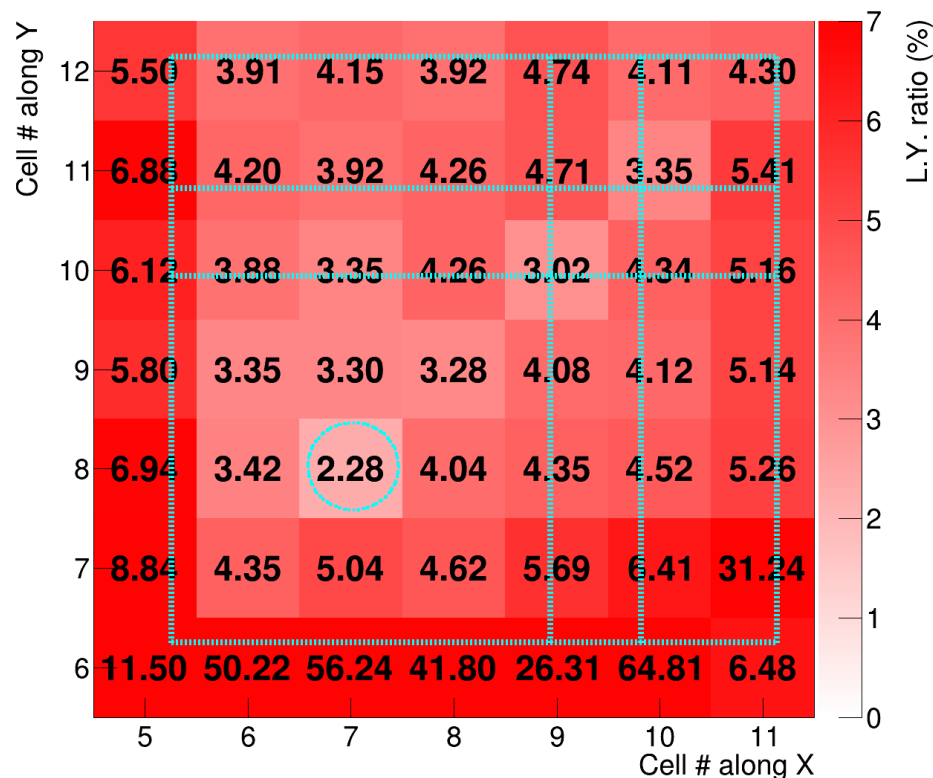
シミュレーション

L.Y. ratio lower/center (using Z readout)



ビーム試験

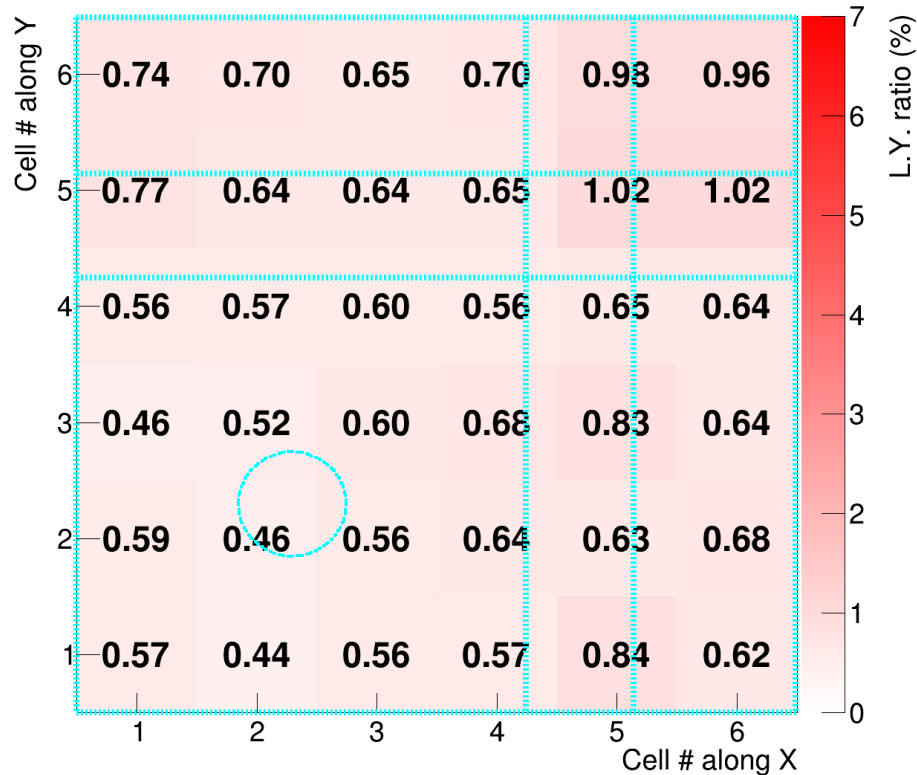
L.Y. ratio (lower, using Z readout, dark count cut)



右上側キューブとの比較

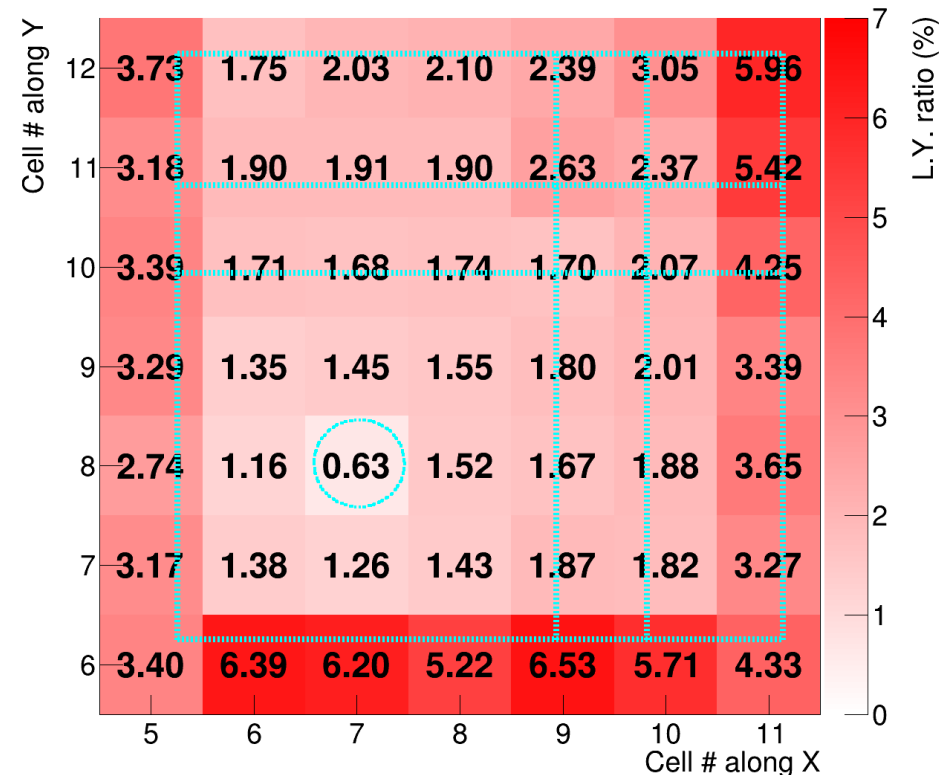
シミュレーション

L.Y. ratio upper right/center (using Z readout)



ビーム試験

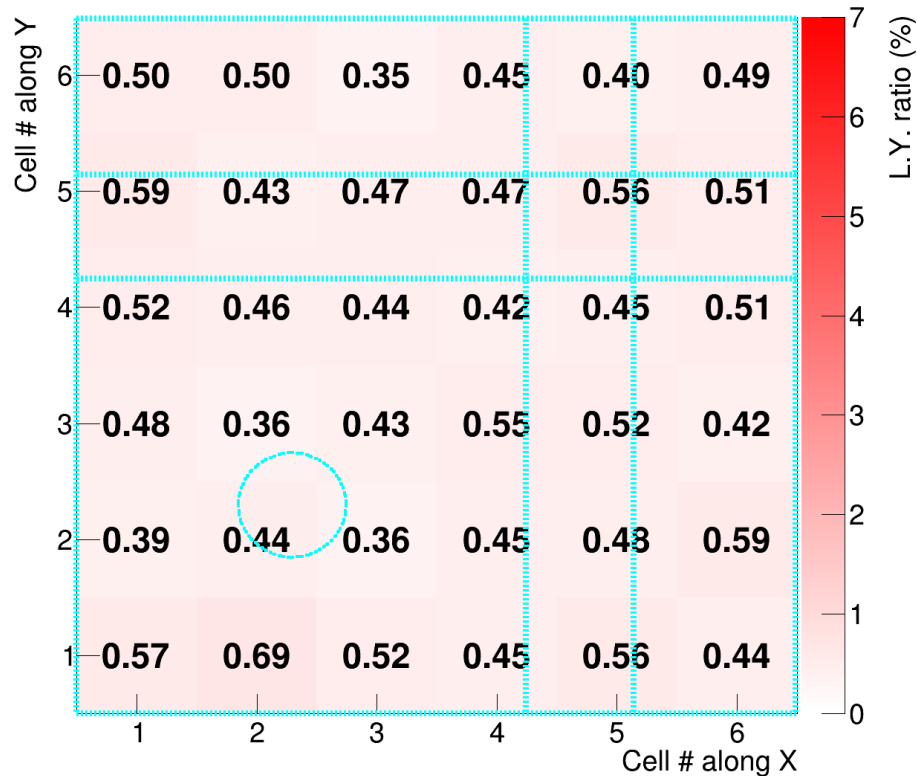
L.Y. ratio (upper right, using Z readout, dark count cut)



左下側キューブとの比較

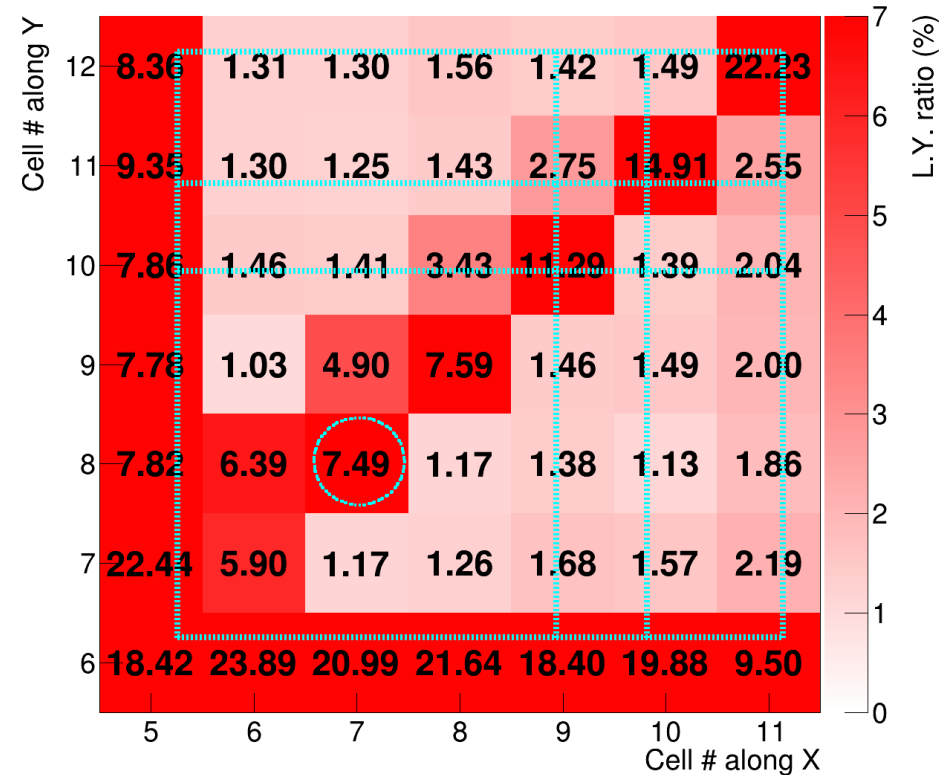
シミュレーション

L.Y. ratio lower left/center (using Z readout)



ビーム試験

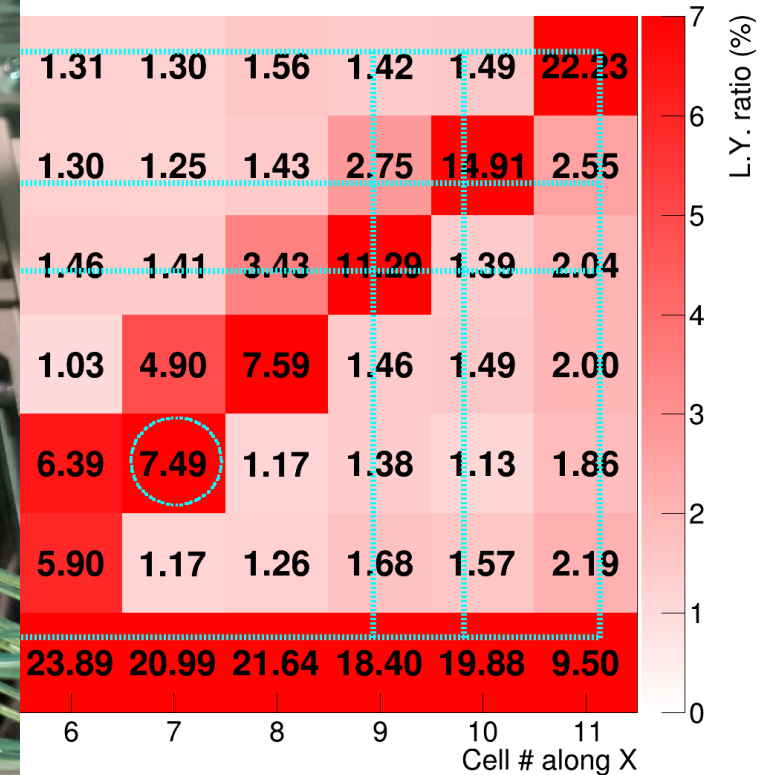
L.Y. ratio (lower left, using Z readout, dark count cut)



較

ビーム試験

L.Y. ratio (lower left, using Z readout, dark count cut)

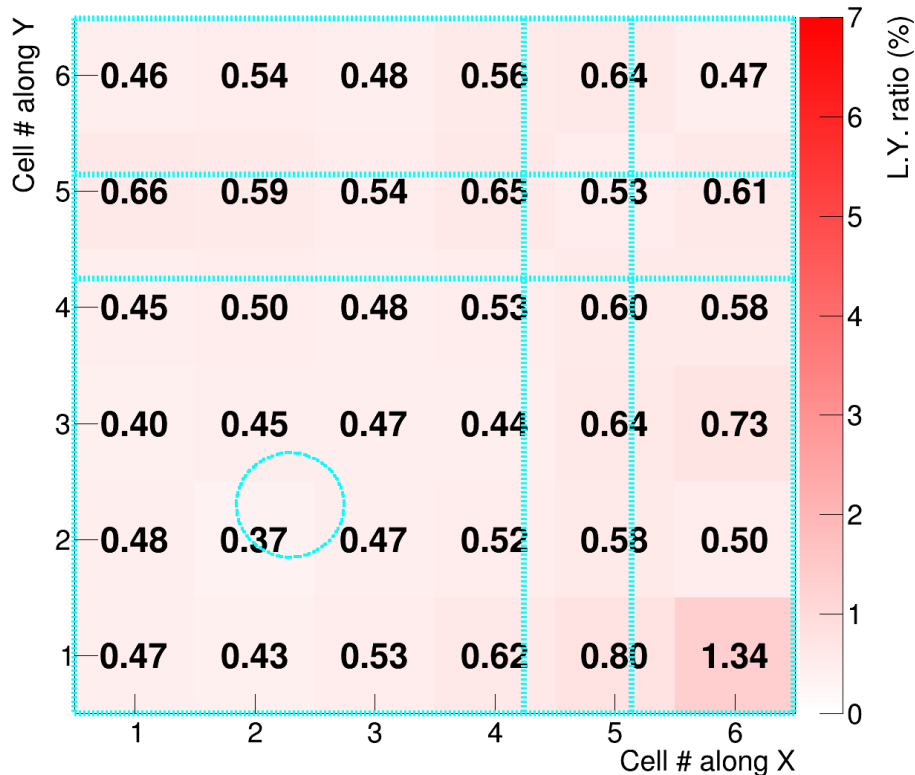


左下のキューブから来たファイバーが
右上方向に伸び、ビーム経路に干渉して
しまっている

右下側キューブとの比較

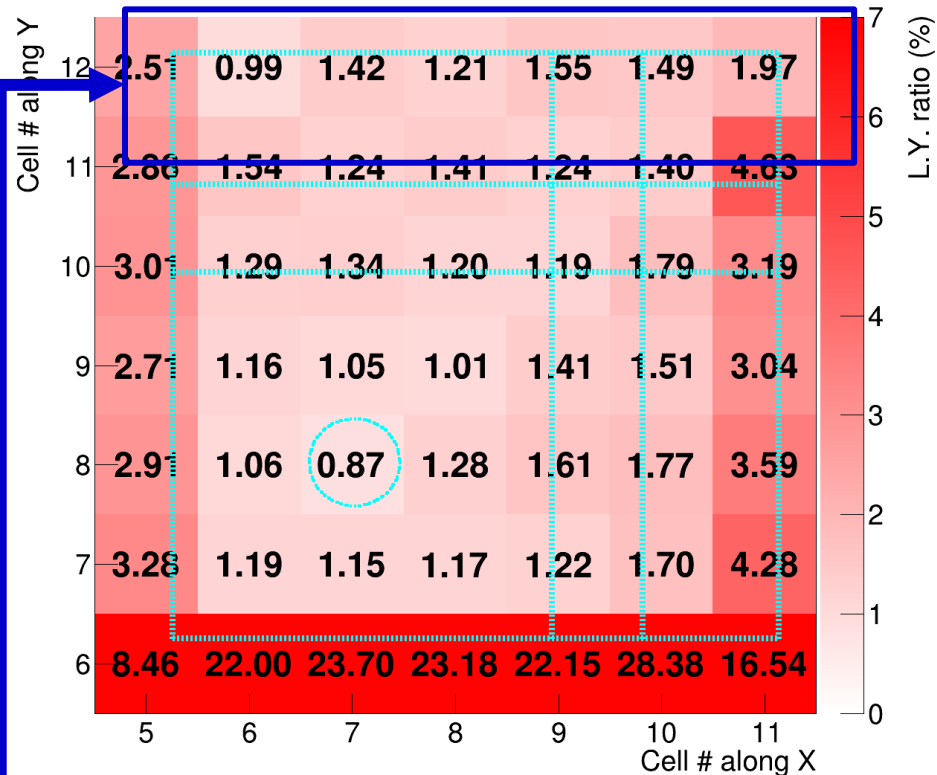
シミュレーション

L.Y. ratio lower right/center (using Z readout)



ビーム試験

L.Y. ratio (lower right, using Z readout, dark count cut)



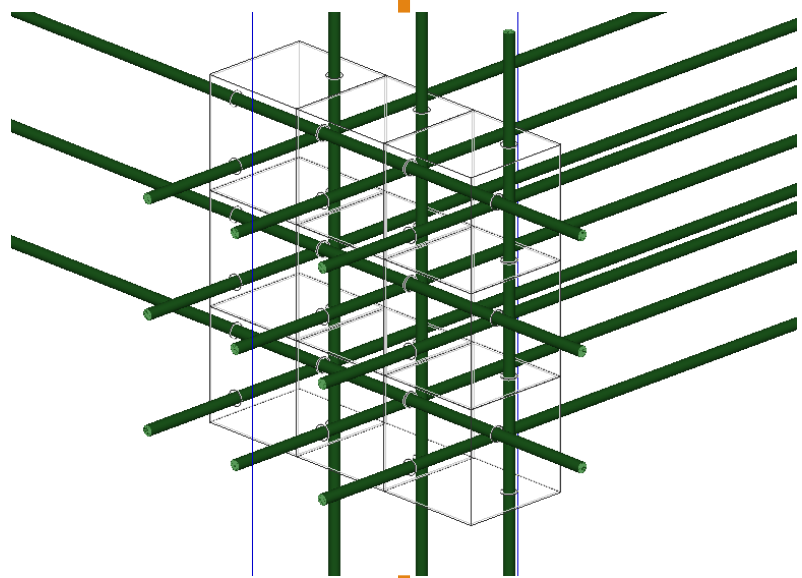
キューブ境界付近では両方のキューブに
ビームがヒットしたイベントが混じり
L.Y. ratioが過大評価される
→点線の内側のセルのみ信頼する

ファイバー穴部分でL.Y. ratioが落ちる理由

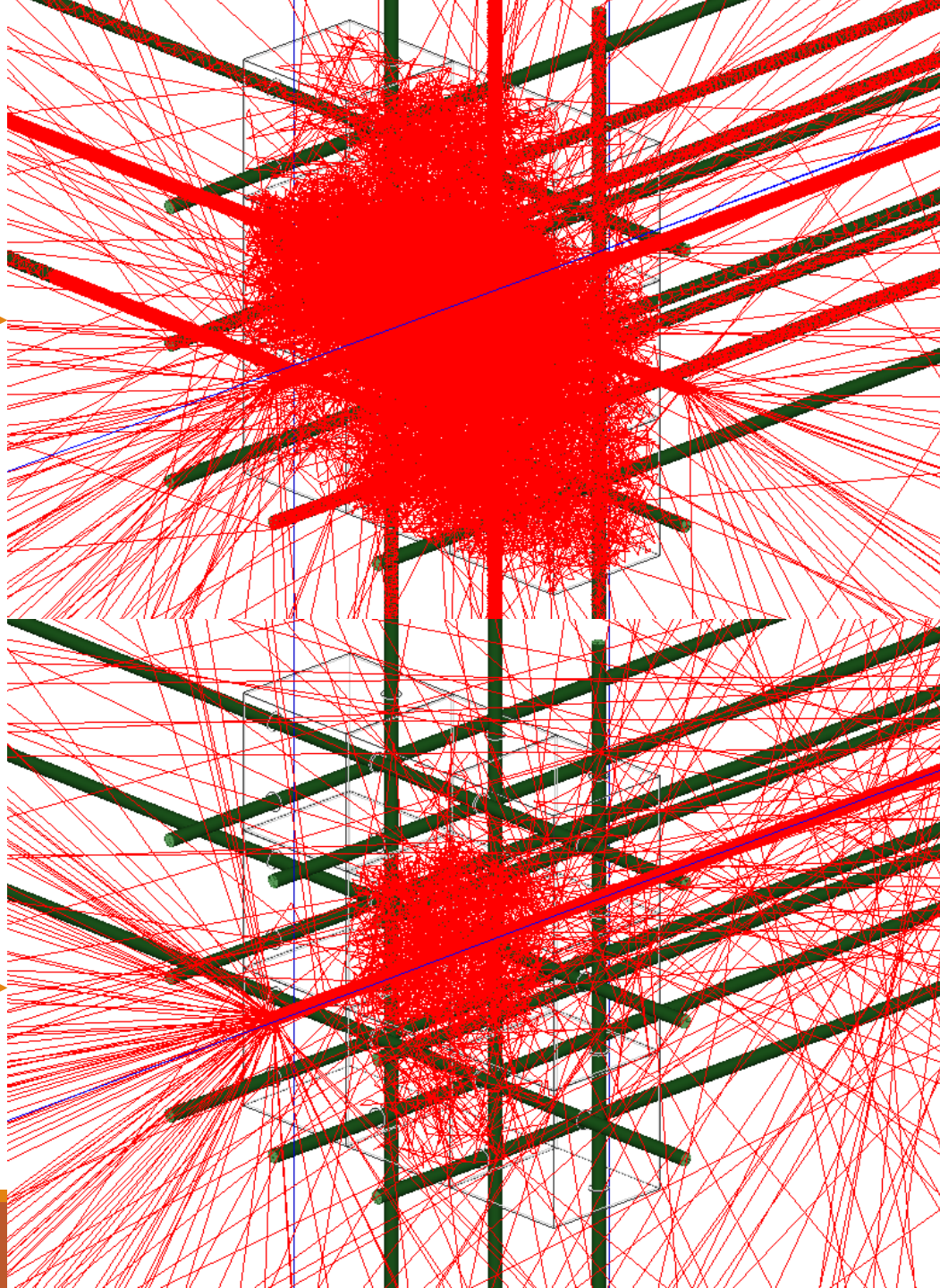
- ビームがファイバーとシンチレータの隙間を通るイベント
→L.Y. ratioの計算から除外される
- ビームがファイバーに入射するイベント
 - ファイバー内でチェレンコフ光が発生するが、ほとんどの光はファイバーの外に漏れないため隣のキューブにも光が入らない
 - L.Y. ratioの分子が小さくなり、分母が大きくなる

$$\text{L. Y. ratio} = \frac{\text{中央以外の各キューブの光量}}{\text{中央のキューブの光量}}$$

ビームが中央キューブに入射



ビームが中央キューブの
Z方向ファイバーに入射



クロストークのシミュへの取り入れ方

- キューブ内のビームの位置や, **energy deposit**を引数に取り, 周りのキューブへのクロストーク確率を返すような「クロストーク関数」を定義
- 本研究で開発したシミュレーションによってこの関数を作成
- **ND280**全体のシミュレーションに関数を取り入れる
- シンチレーション光子**1つ1つ**を追跡しなくてよいので, 計算時間を抑えつつシミュレーションの精度向上が見込める

まとめ

特定の条件に対する
クロストークの定量化

← 本研究で行なったこと

一般的な状況での
クロストークの定量化

クロストークを検出器
シミュレーションへ実装

最終的な目標



クロストークが検出器の
パフォーマンスに与える
影響を調査