

# ニュートリノの 微分散乱断面積測定

2019年度 課題研究P2

大内 柁人、川上 将輝、藤原 拓、細谷 享平

# 目次

## 1. 導入

- 実験目的
- 理論

## 2. 実験概要

- J-PARC施設概要
- 測定装置/機器類及びセットアップ説明

## 3. 結果/解析

- 解析手法
- イベント数・角度分布算出

## 4. 考察

- ニュートリノ事象に対する  
検出効率の評価
- 背景事象数の評価
- シミュレーションによる  
見積もりとの比較

謝辞

付録資料

# 1. 導入

- 実験目的
- 理論説明

実験目的

ニュートリノ反応で発生した

ミューオンの角度分布を測定することで、

ニュートリノの存在

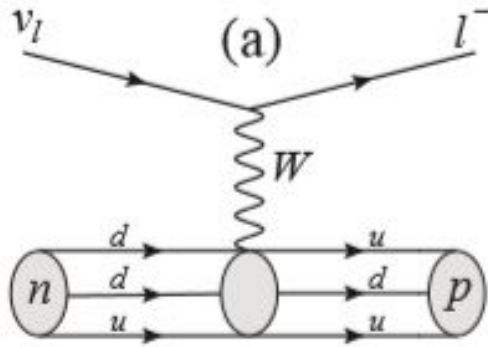
及び弱い相互作用の理論の検証を行う。

# ニュートリノ反応の理論

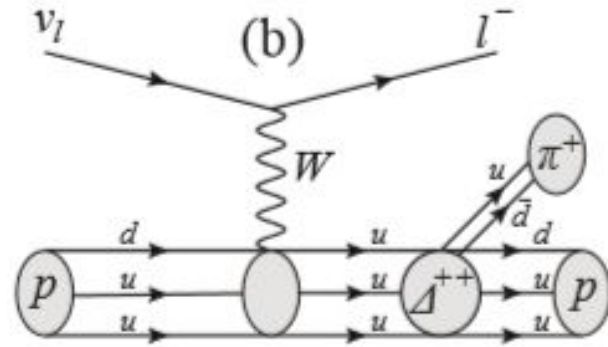
# ニュートリノ-核子相互作用

荷電粒子を生成する反応(Charged Current反応)のみが検出可能

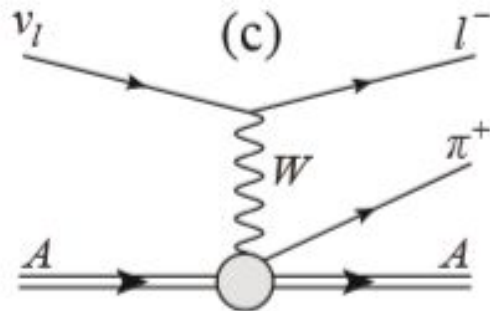
CCQE



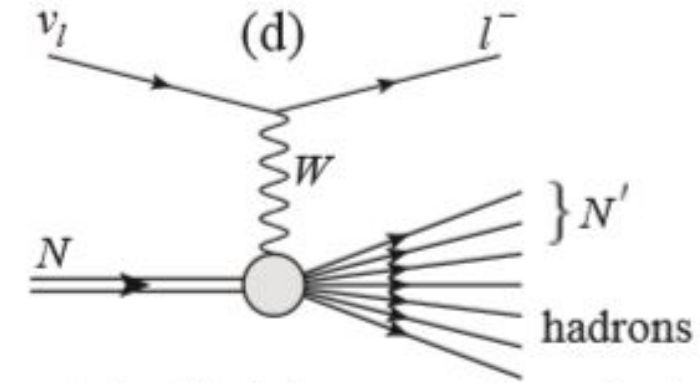
CC1 $\pi$

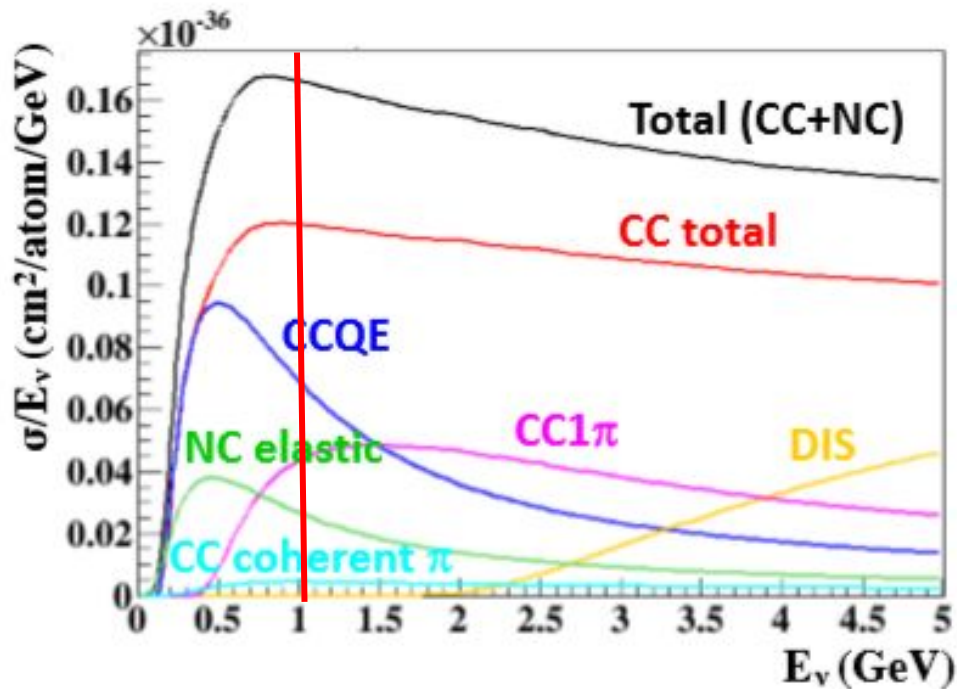


CC coherent  $\pi$



DIS





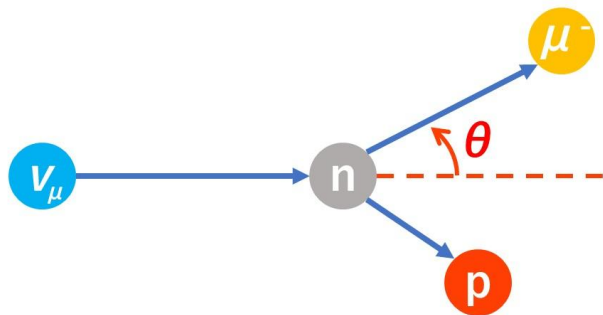
J-PARCニュートリノビームの  
エネルギー分布

ピークはおよそ1GeV

CCQE+CC1 $\pi$ の反応を考える

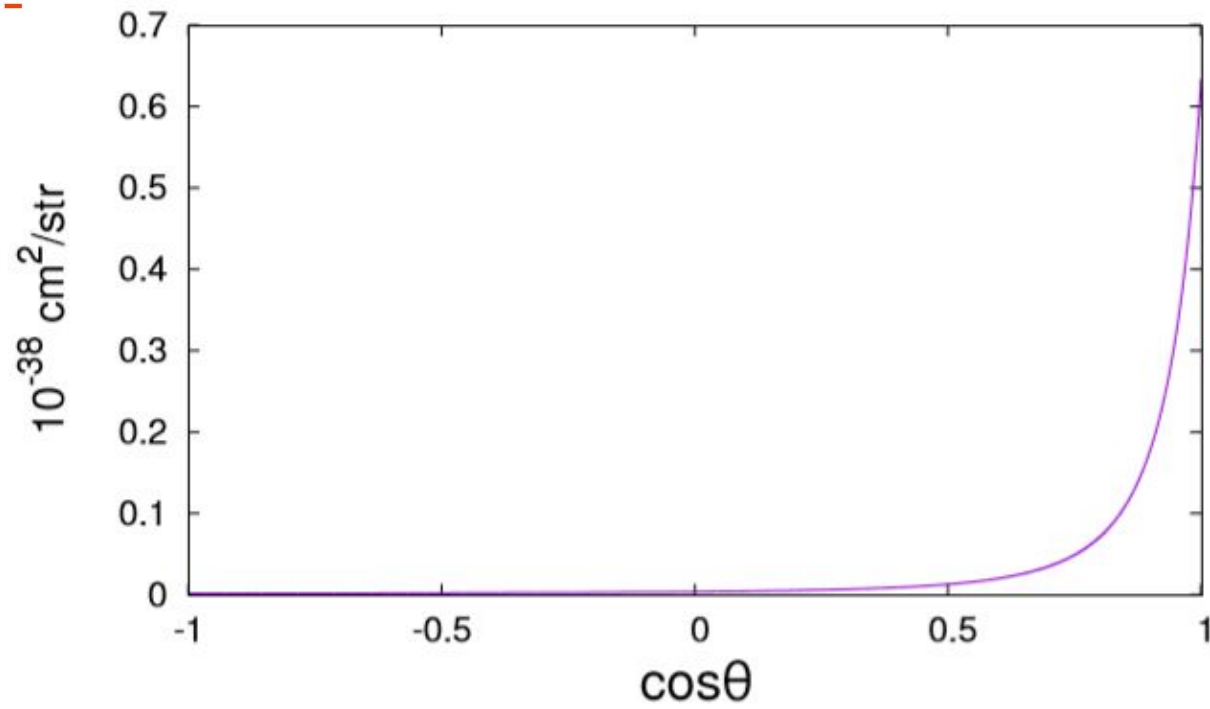
CCQEが主な反応

# 微分斷面積



$$E_\nu = 1 \text{ GeV}$$

CCQE

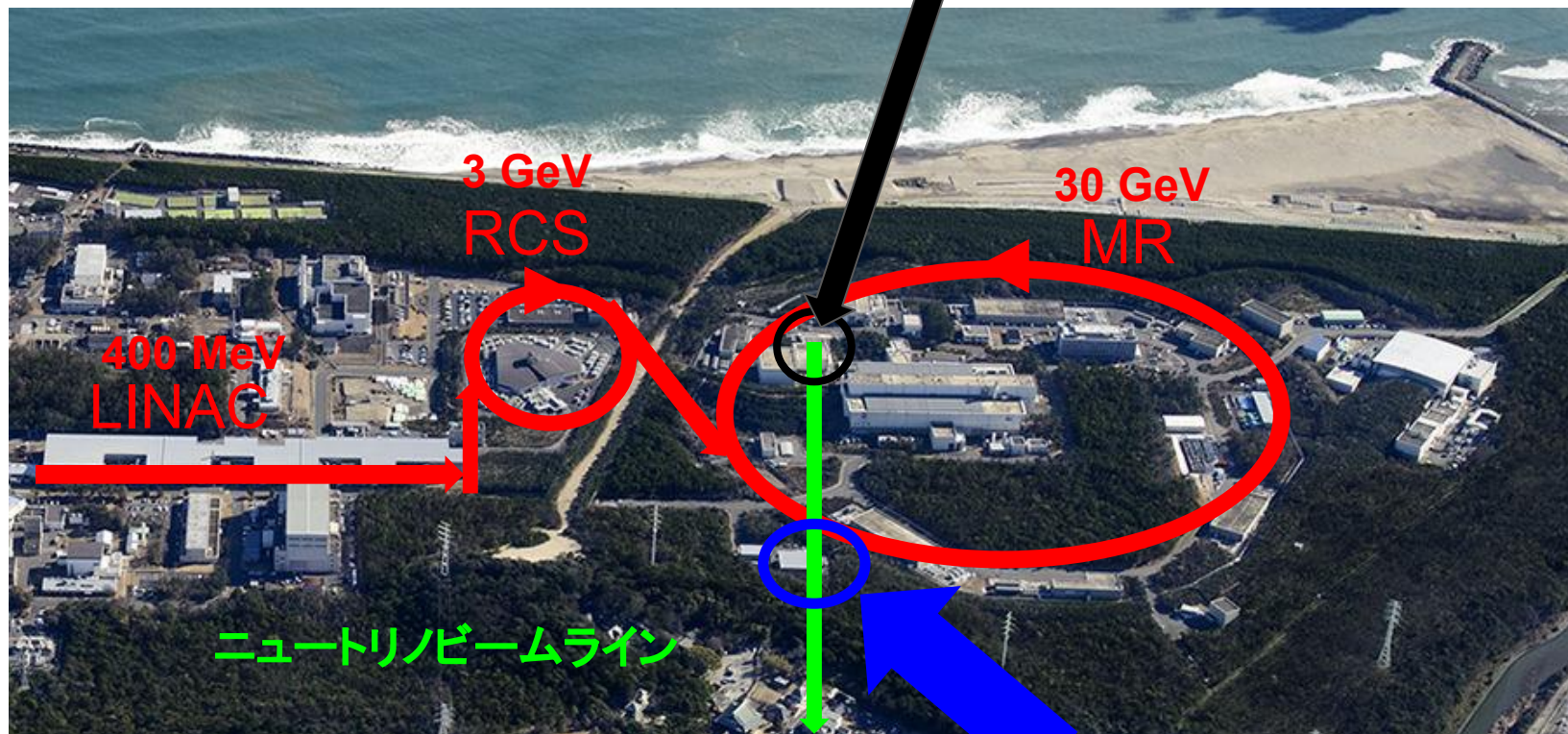




# 2. 実験概要

- J-PARC施設概要
- 測定装置/機器類及びセットアップ説明

# J-PARC施設概要



標的(グラファイト)

3 GeV  
RCS

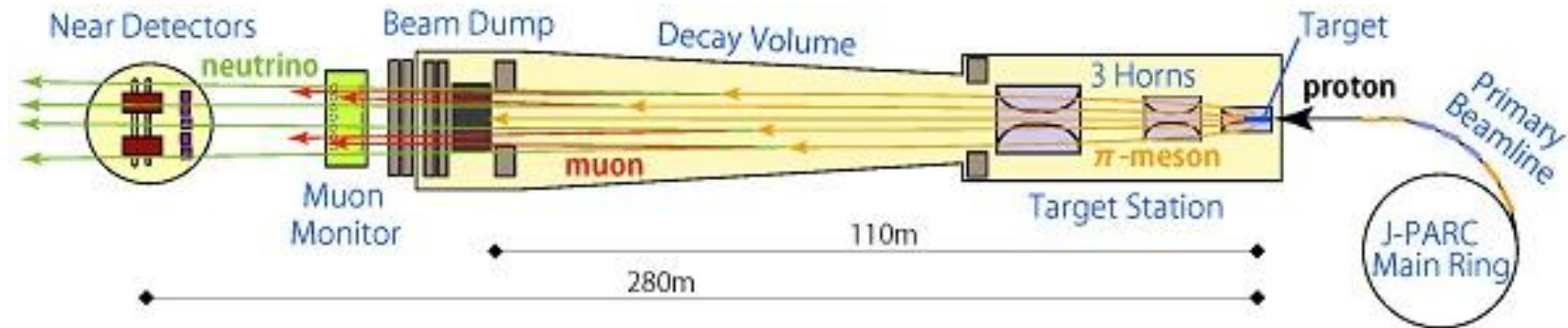
30 GeV  
MR

400 MeV  
LINAC

ニュートリノビームライン

ニュートリノ前置検出器

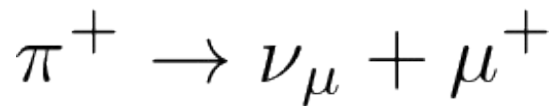
# ニュートリノビームの生成



炭素標的に30 GeVの陽子ビームを照射

➡ パイオンが生成

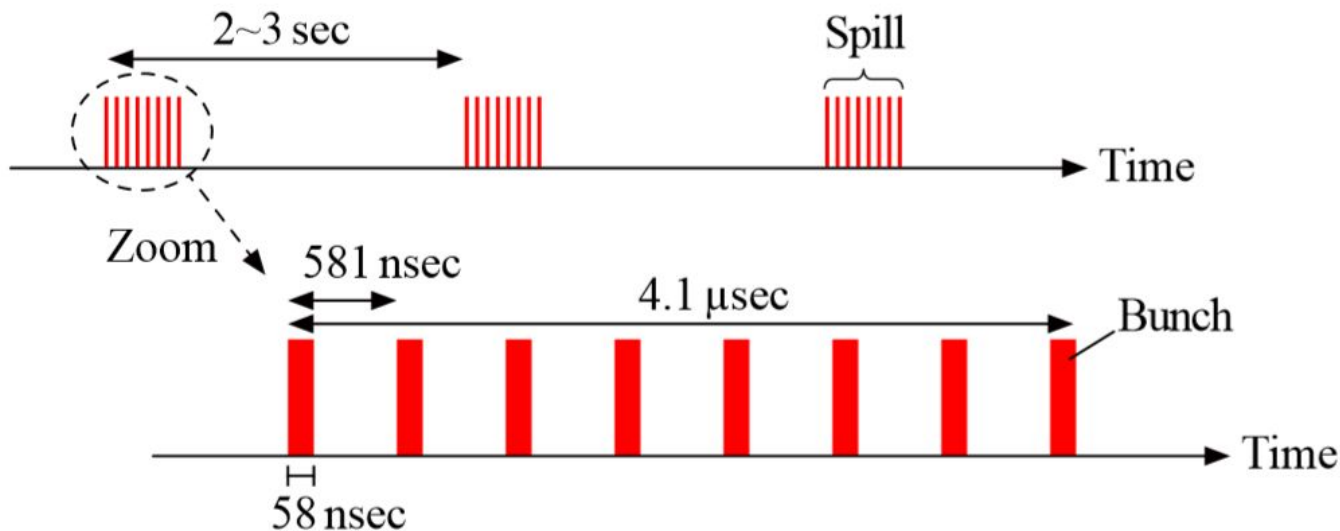
➡ パイオンの崩壊によりニュートリノが生成



# ニュートリノビームの構造

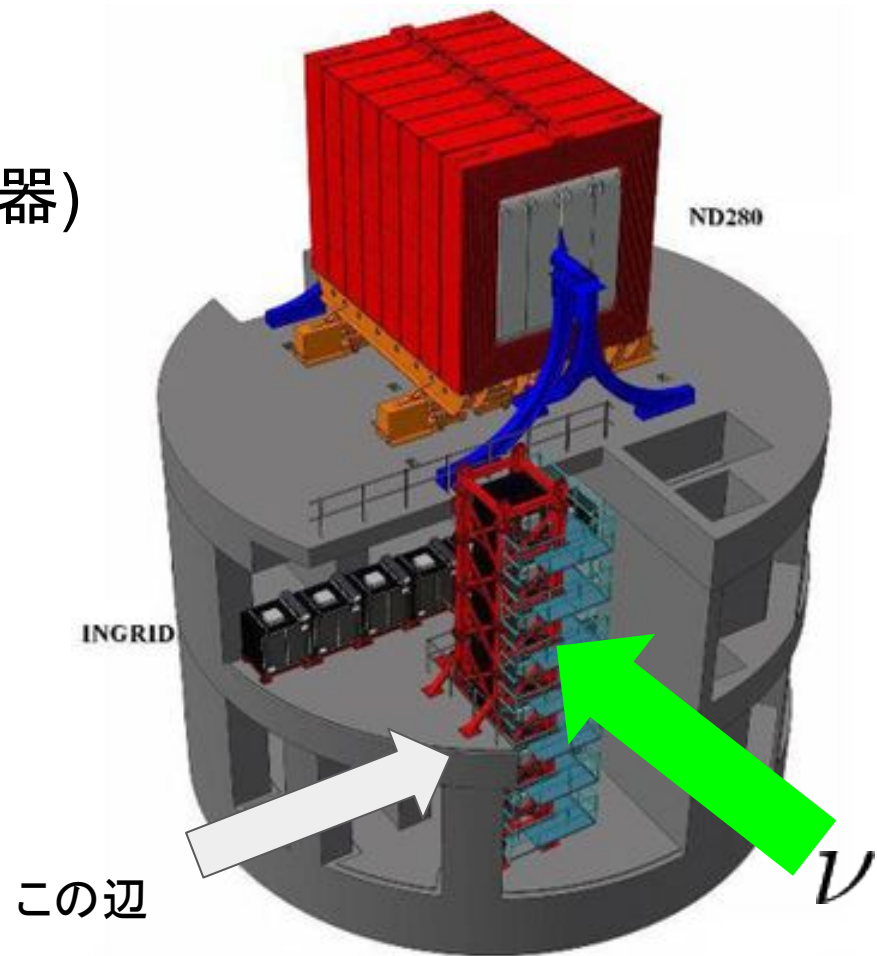
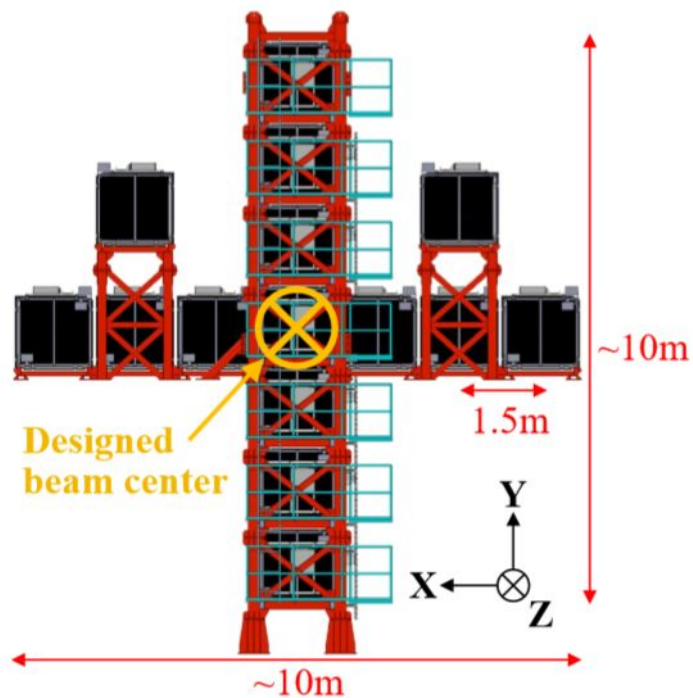
2.48 sec毎に一次陽子ビームがターゲットに打ち込まれる

一度のビーム(spill)は8つのbunchに分かれている。



# 実験場所

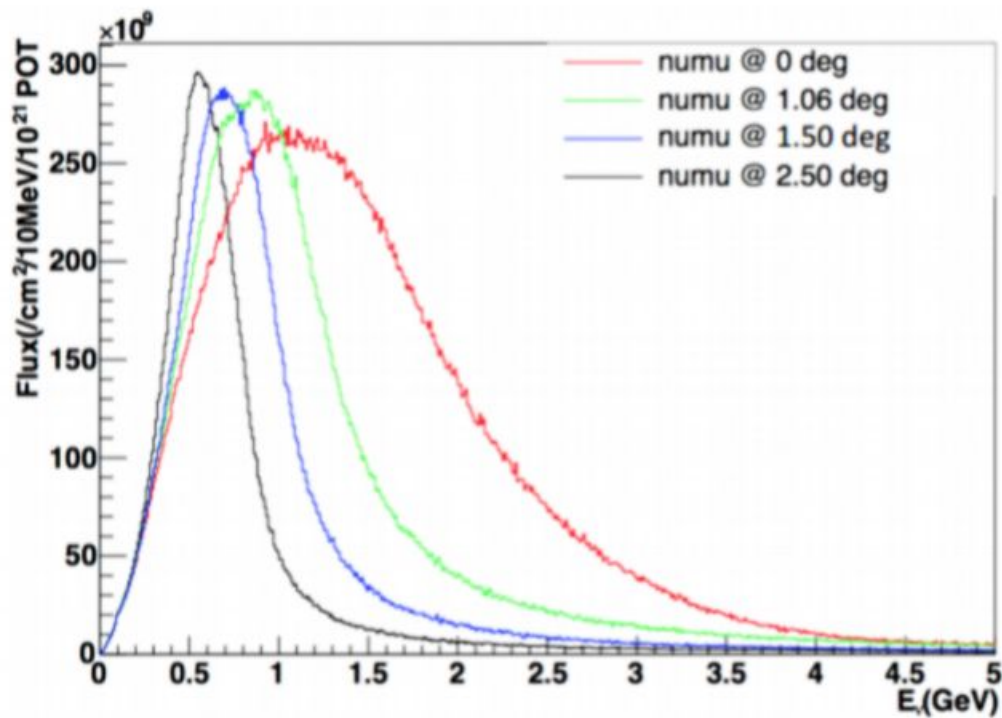
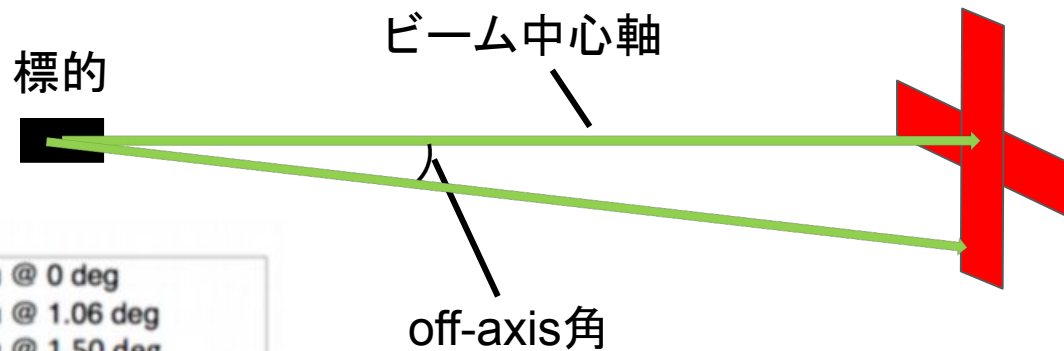
INGRID (ビームの中心軸上の検出器)  
の真後ろ





# 本実験の検出器

off-axis角  $\sim 1^\circ$

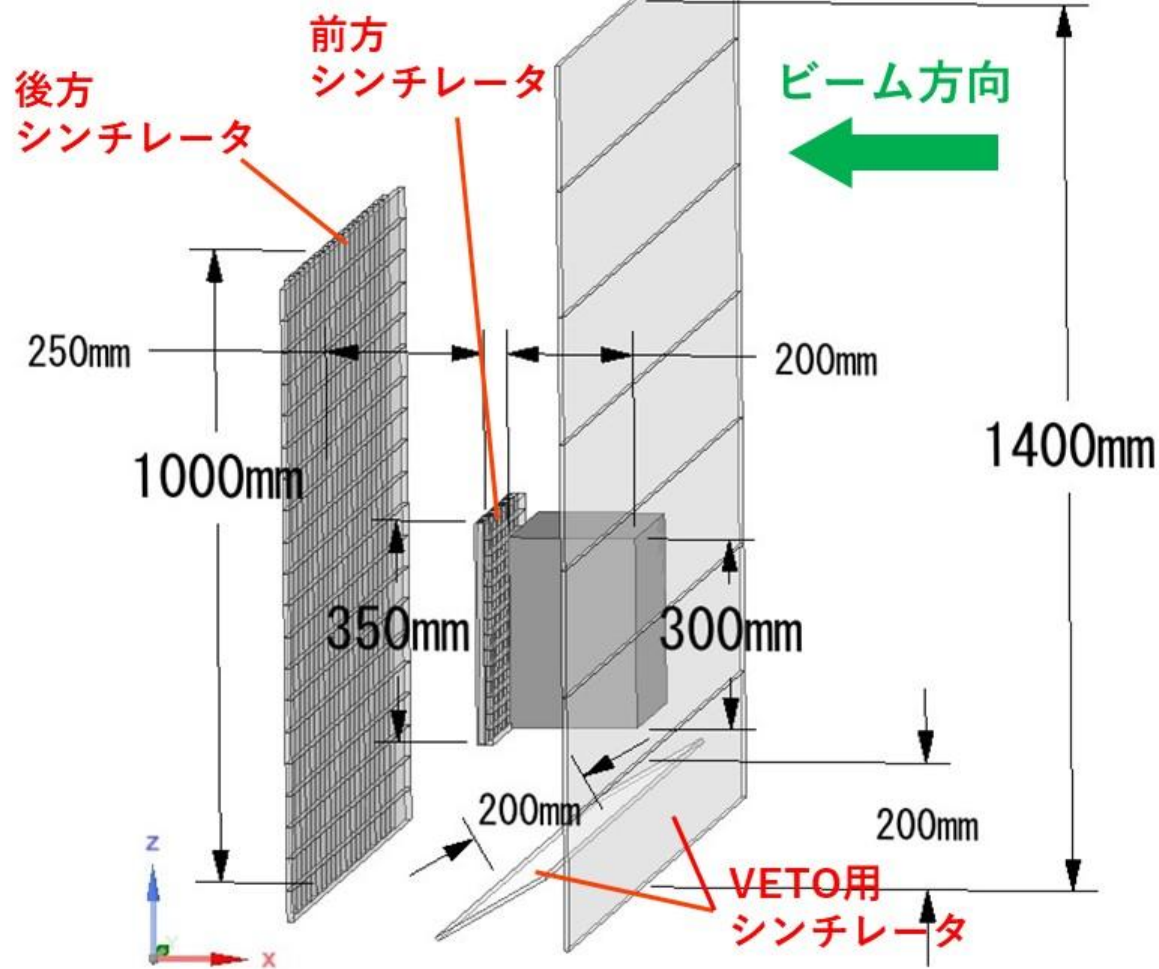


東大 田村さんの修論より

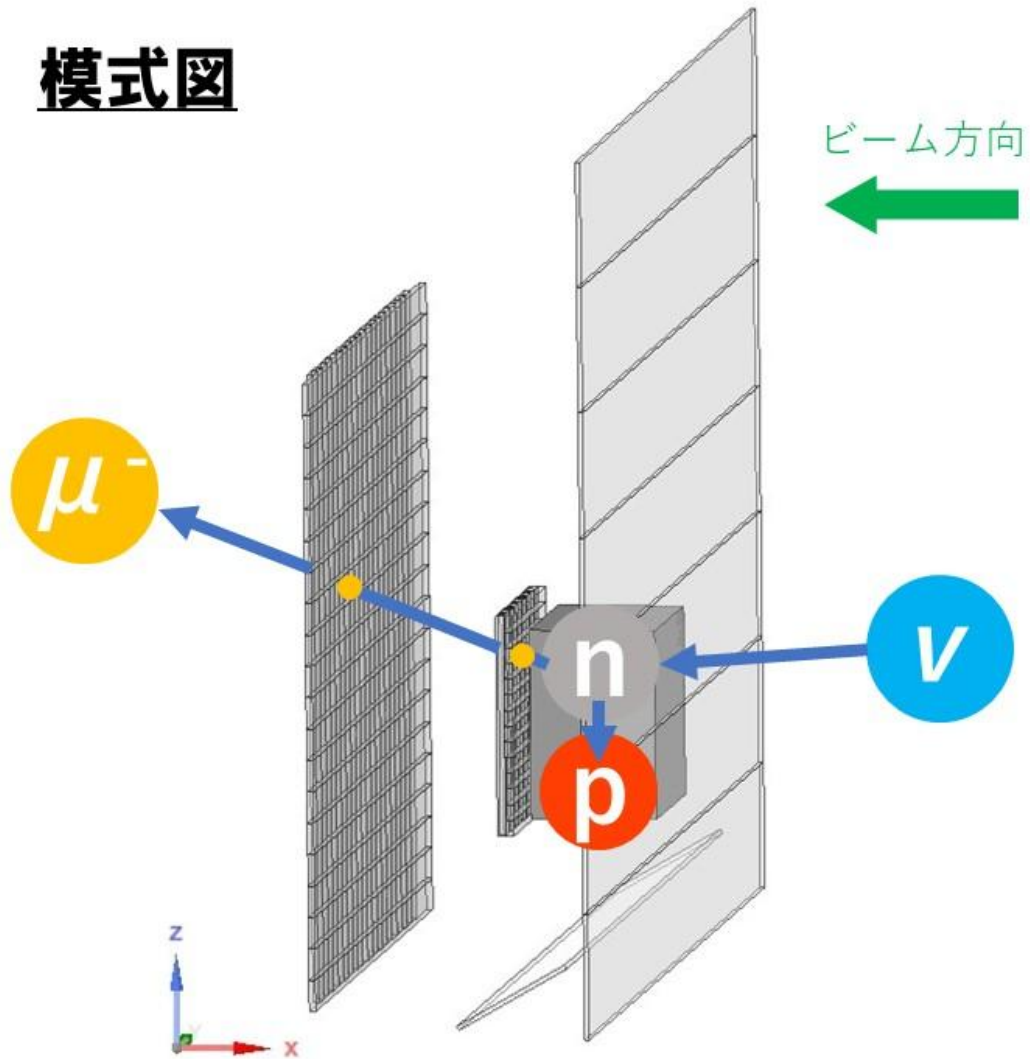
# 測定装置/機器類及びセットアップ説明



# 概念図

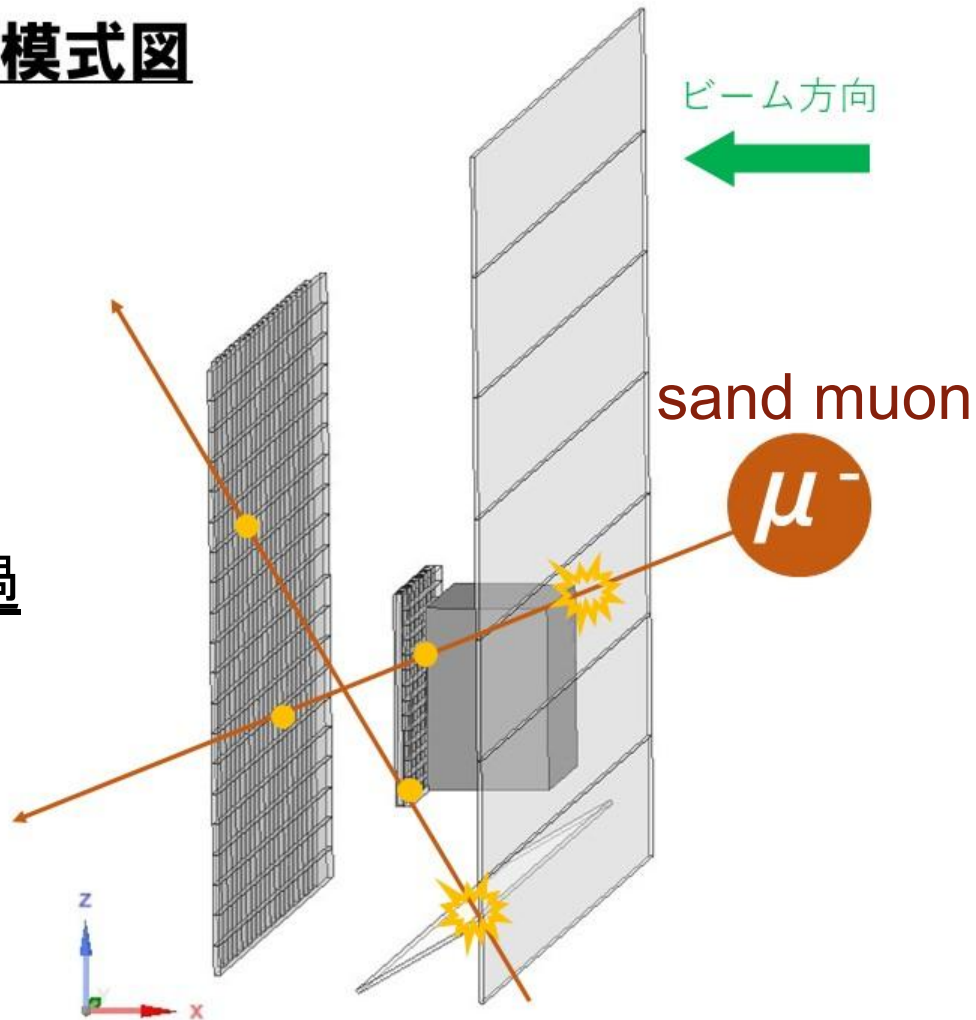


# 模式図

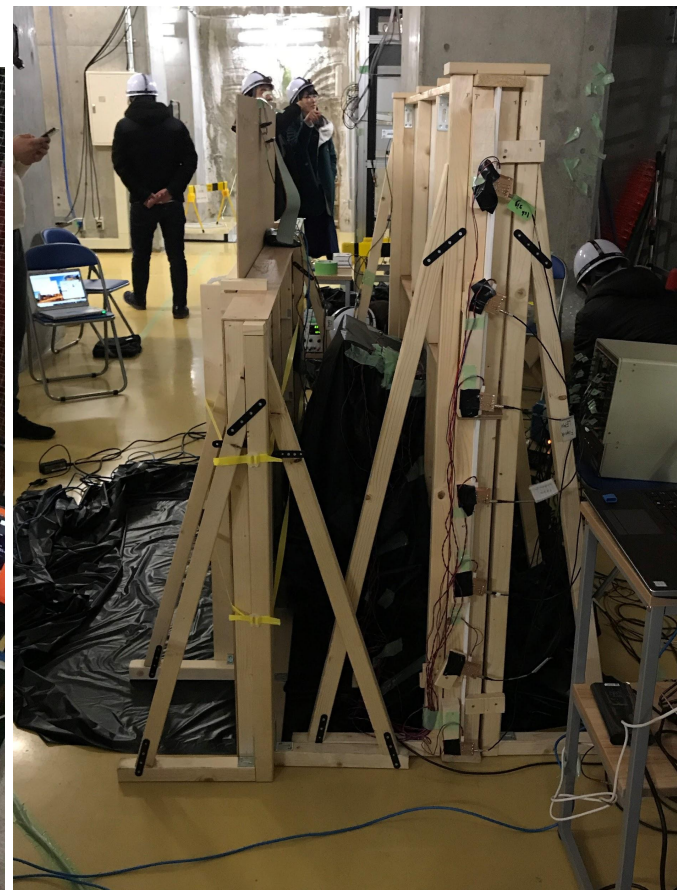


# 模式図

幾何的には  
必ずVETOを通過



# 実際に組み立てた状態

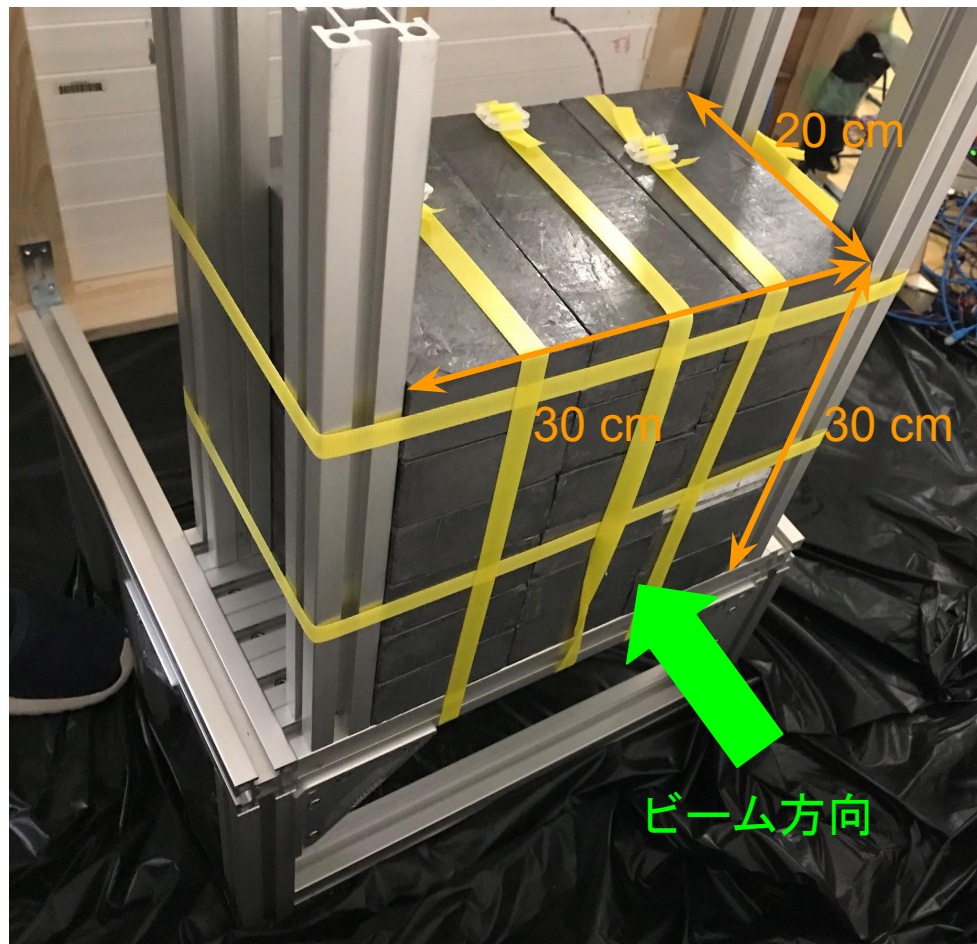


# ターゲット

密度の大きく手頃な(?)  
Pb( $11.34 \text{ g/cm}^3$ )を約200 kg使用

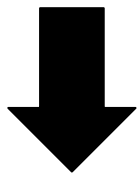
ビーム方向: 20 cm

ビーム垂直方向:  $30 \times 30 \text{ cm}^2$

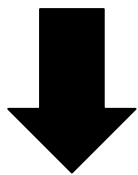


# 検出器

プラスチックシンチレータ

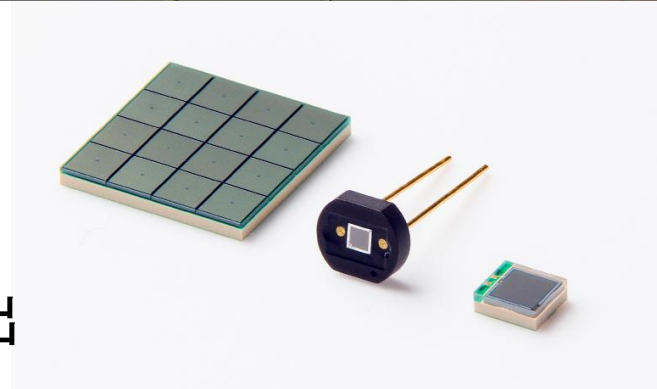
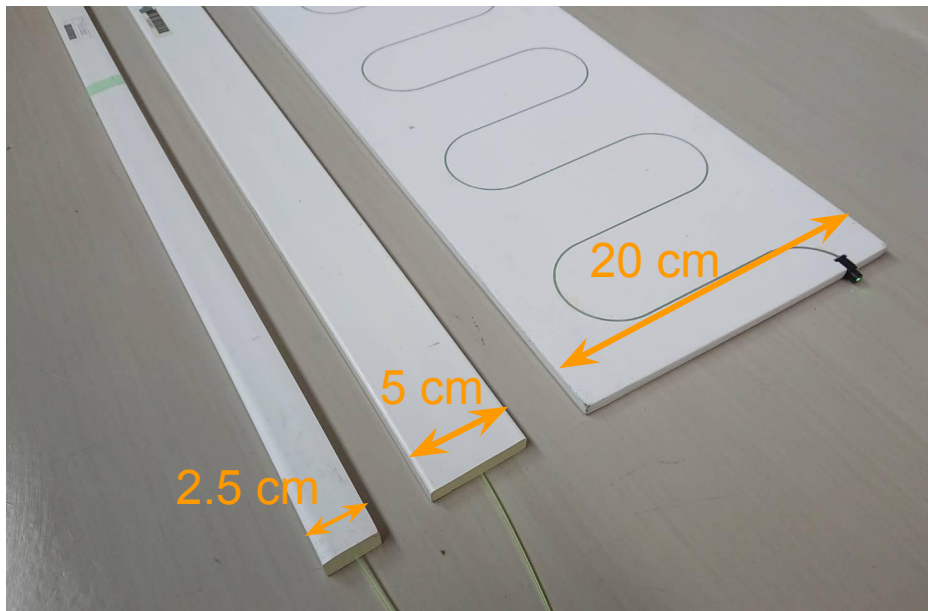


波長変換ファイバー

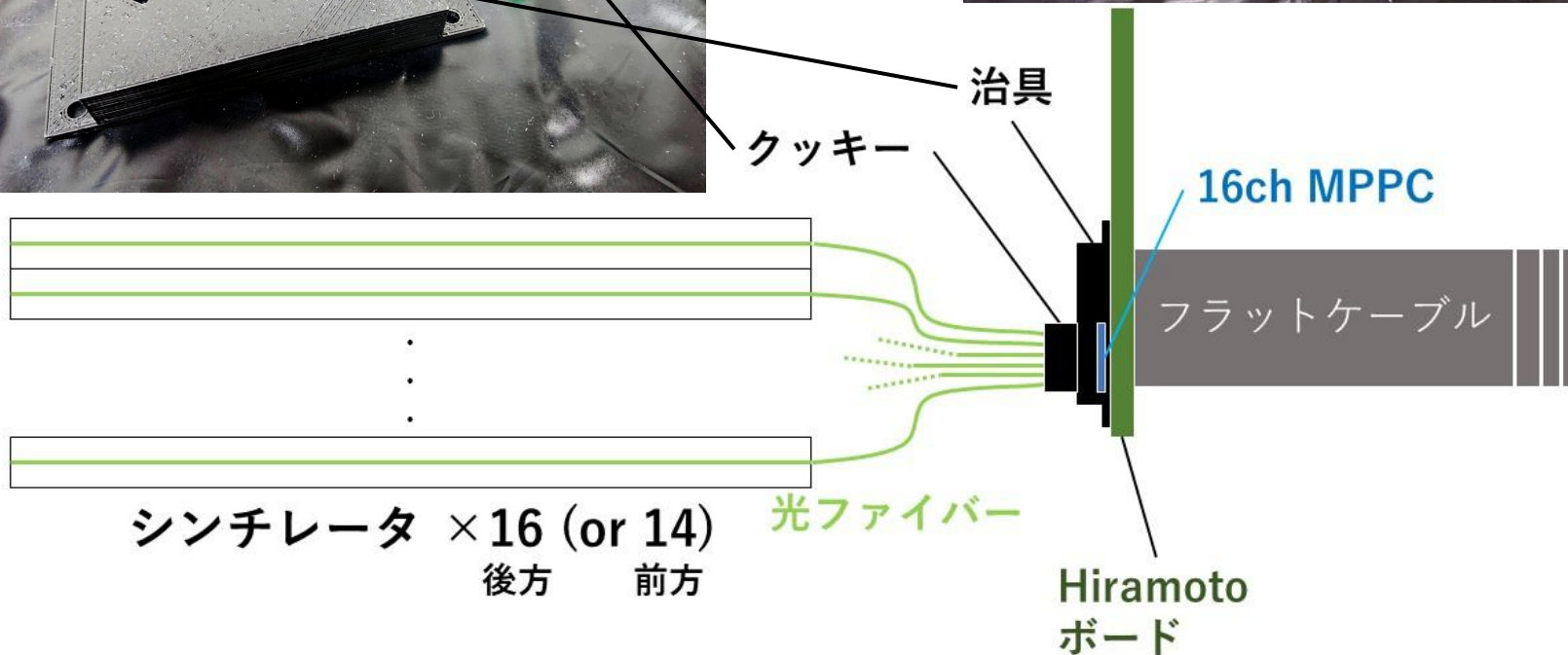
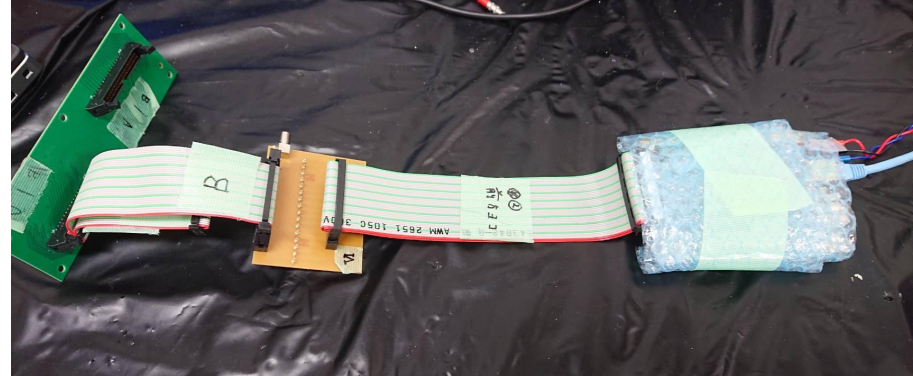
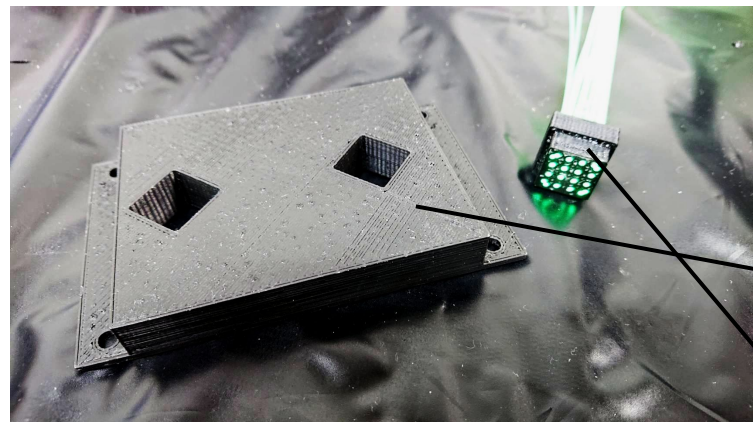


MPPC

ミュオンによるシンチレーション光を検出



# 信号伝達回路 (ADCまで)

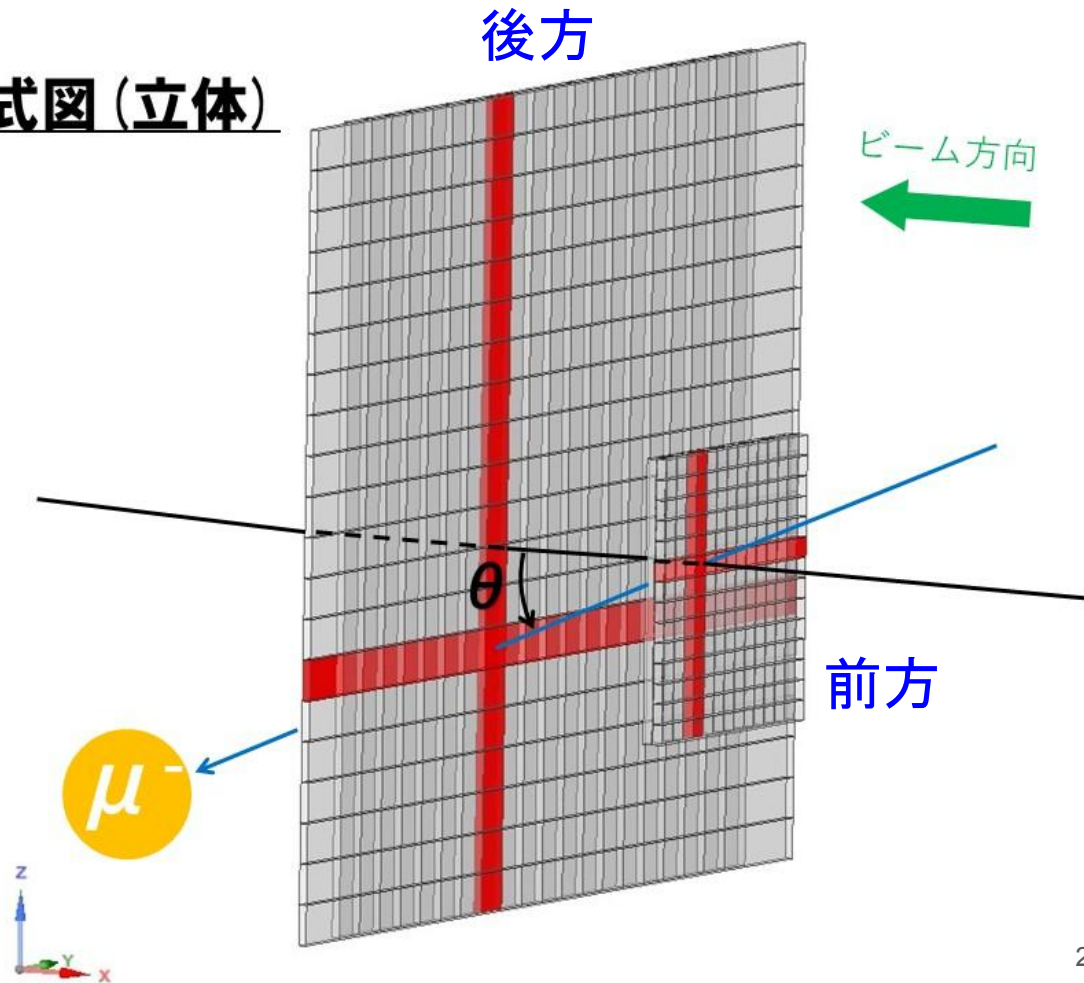


# トラッキング デザイン

シンチレータを  
縦横に並べる

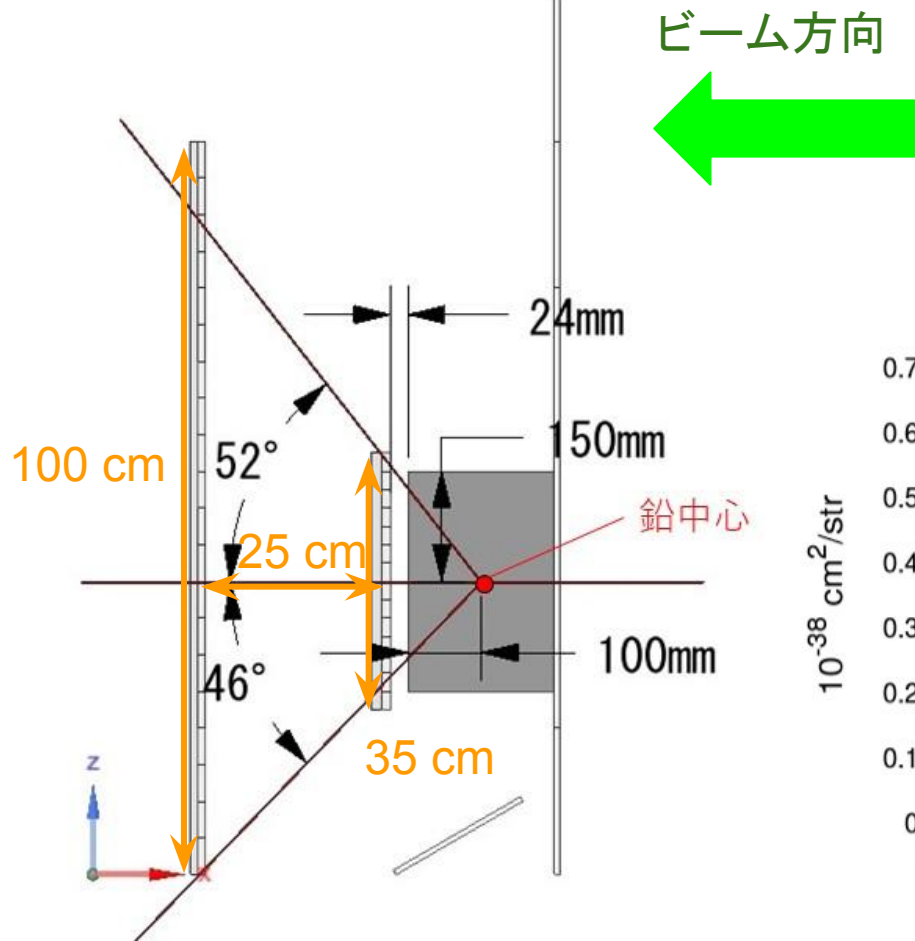
2層, 計4枚を  
ミュオンが貫通した場  
合の角度を測定

**模式図 (立体)**

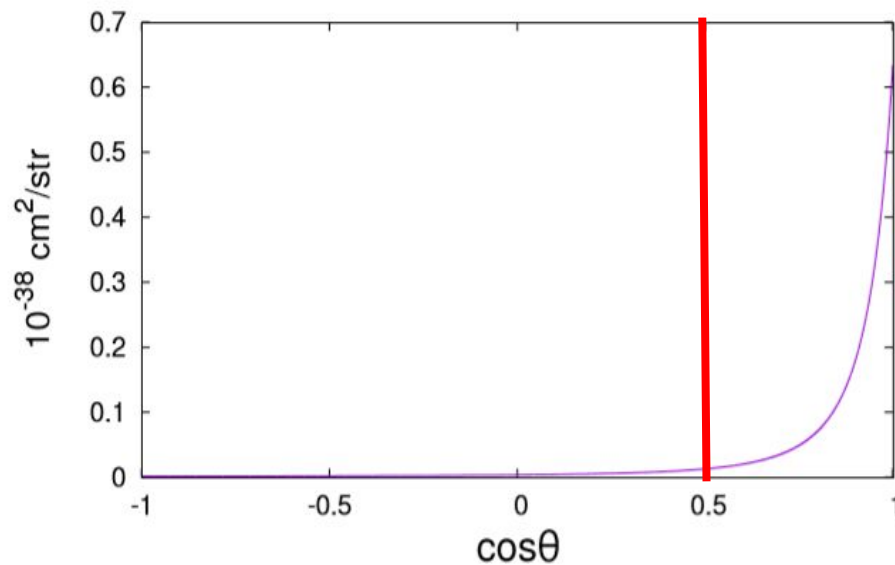




# 概念図 (角度)



おおよそ60°以下の  
角度が欲しい



# 信号の読み出し

ADC: アナログ波形からデジタル信号へ変換

## ADC-SiTCP(FADC)

40 MHz Sampling

16ch × 4枚

→ トラッキングに用いた



## CAEN製FADC

250 MHz Sampling

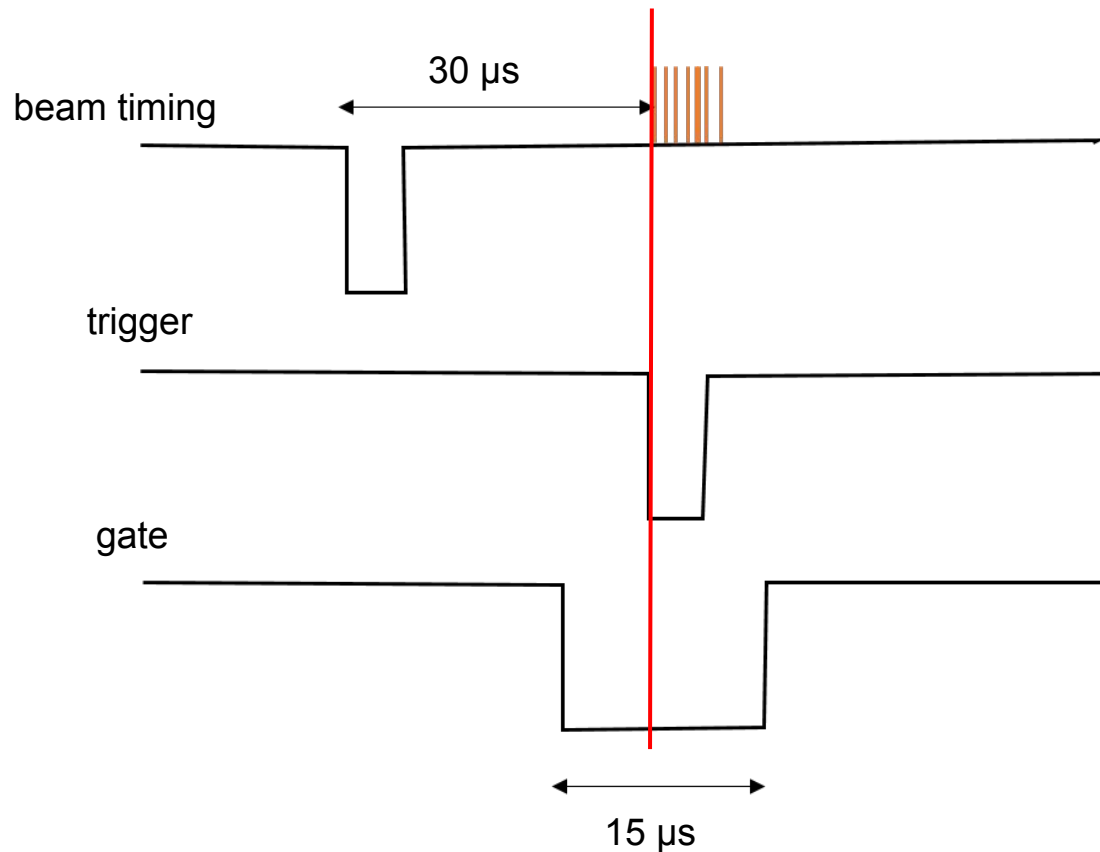
8ch

→ VETOに用いた



# 波形の記録

- ・ビームタイミング信号を30  $\mu\text{sec}$  delayさせてトリガーとする
- ・トリガー前後の15  $\mu\text{sec}$  の間の波形を記録







# 3. 結果/解析

- 解析手法
- 解析結果(イベント数、角度分布)

# データ取得

2020/

2/2 3:00~15:00

2/2 15:30~2/4 2:00

## アクシデント

2/3 1:00~ 断続的に5時間以上ビームがストップ

2/4 2:00 PCの電源が落ちる(?!!?)→測定終了

最終的に、

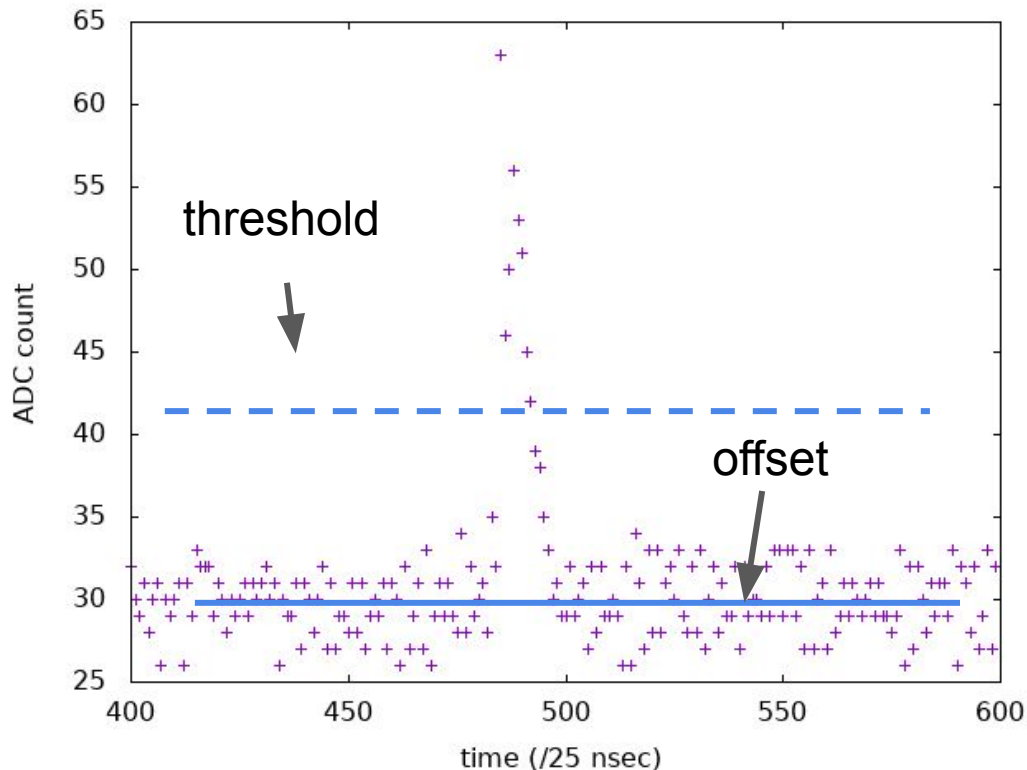
平均515 kWのビームパワーで

29.5時間(42882 spills)データ取得を行い、

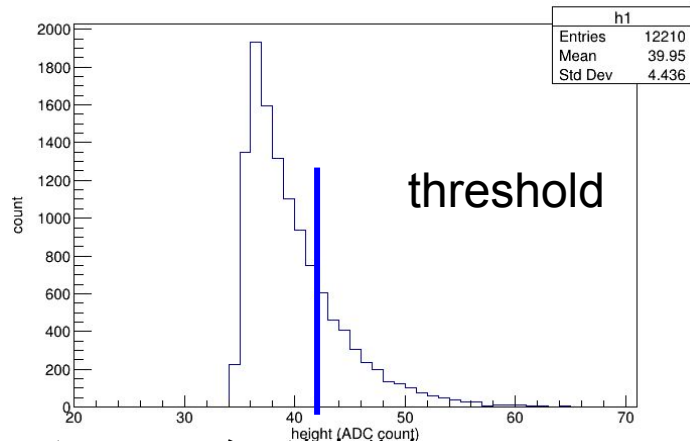
$1.14 \times 10^{19}$  proton on target 相当の

ニュートリノビームデータを得た。

# 信号判定



thresholdの例



Vetoシンチレータの波高分布  
(1回のトリガーイベントのうち最大の波高の分布)

offsetからの波高として  
:hresholdを設定  
:hresholdを超える=信号

前方・後方:ノイズ量により値設定

Veto:  
誤Vetoの確率と検出効率により値設定



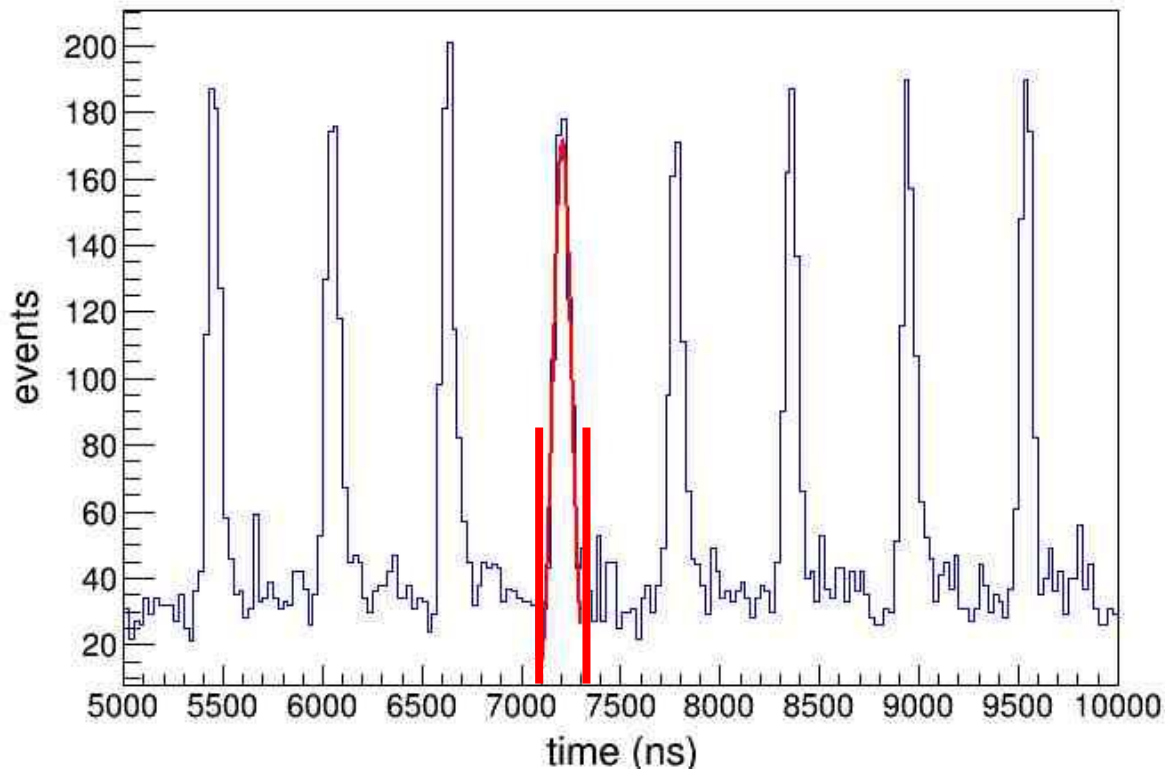
# bunch cut

各bunchを  
Gaussian+offsetで  
フィッティング

→前方・後方: $2\sigma$

Veto : $4\sigma$

内をそのbunchの  
イベントと判定

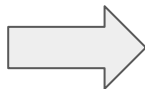


信号観測の時間分布(後方での一例)  
8 bunchに対応したピークを確認

# coincidence

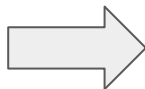
同一spill、同一bunchの反応 ⇒ 同一イベントと識別

Veto、前方、後方 全て反応したイベント  
(Veto  $\wedge$  前方  $\wedge$  後方)



**貫通イベント**  
(装置外で発生したミュオン)

Vetoは反応せず、前方、後方が反応したイベント  
( $\neg$ Veto  $\wedge$  前方  $\wedge$  後方)



**ニュートリノイベント**

と定義

# イベント数

貫通イベント

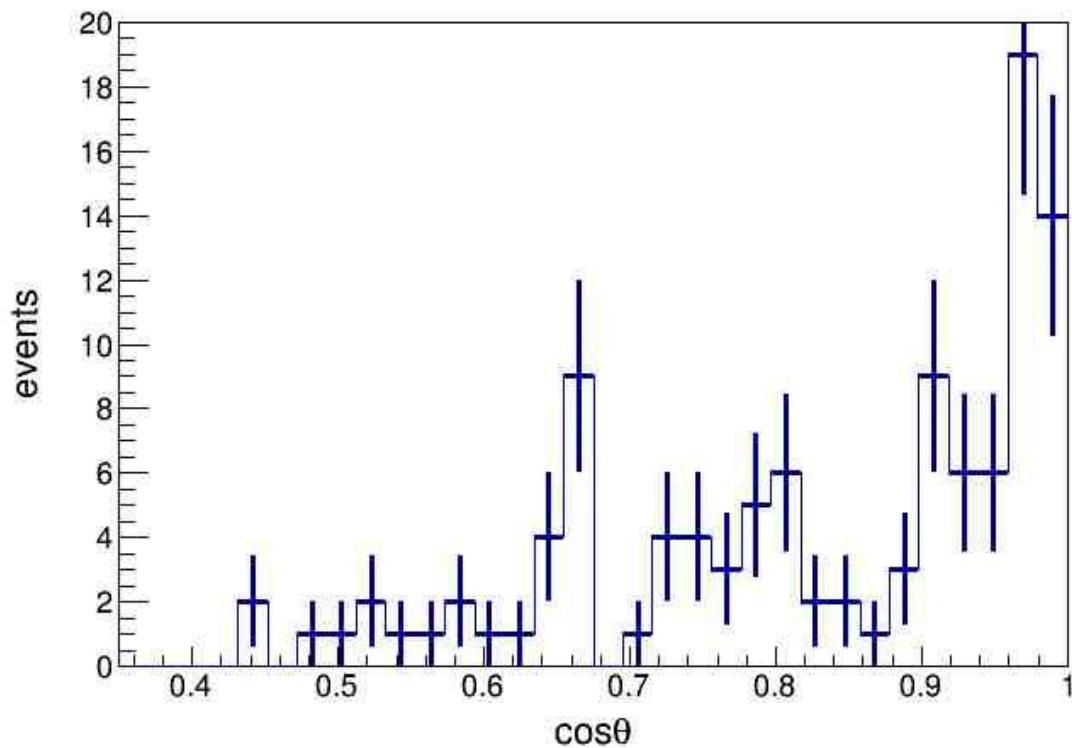
**572** events

ニュートリノイベント

**110** events

# 角度分布

各シンチレータの中心を通ったものとし、散乱角を算出



# 4. 考察

- ニュートリノ事象に対する検出効率の評価
- 背景事象数の評価
- シミュレーションによる見積もりとの比較

## ☆ニュートリノ事象に対する検出効率の評価

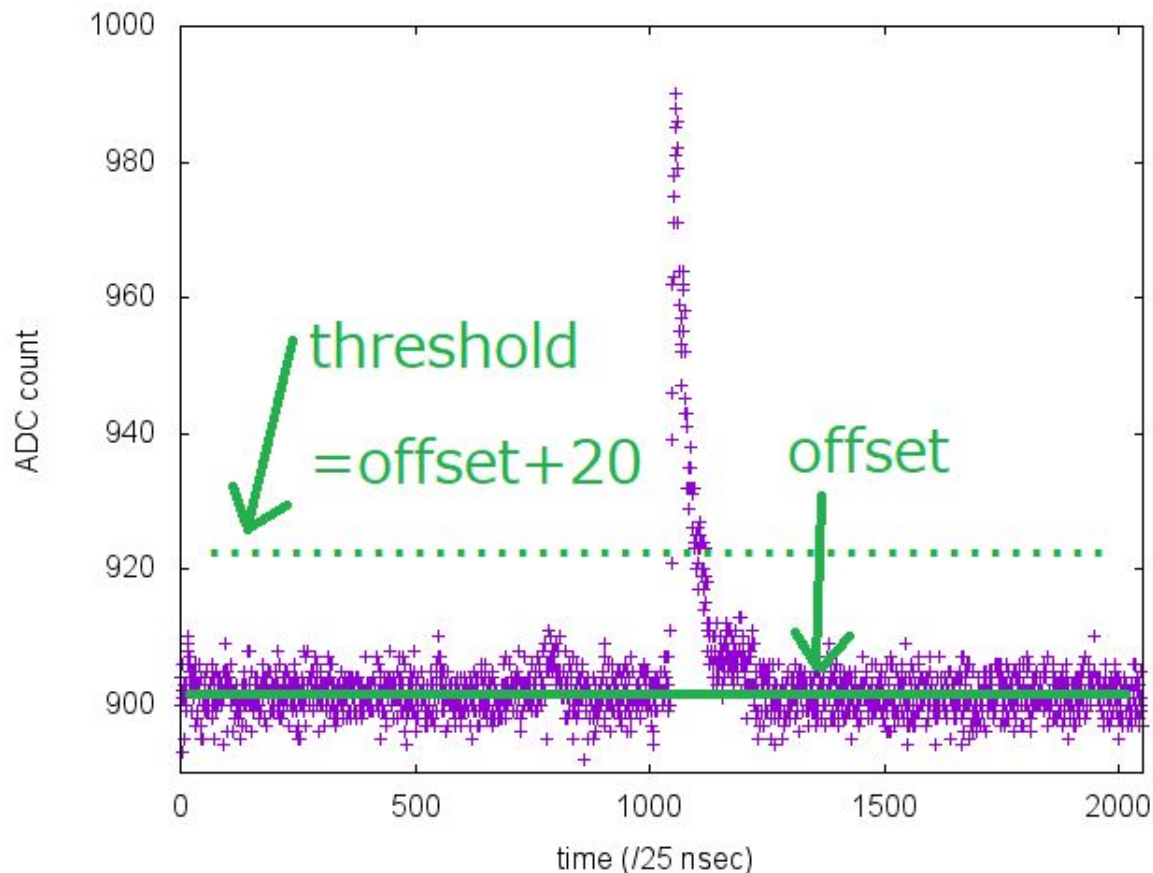
- ・ノイズによる誤Vetoの確率
- ・trackerの検出効率(後で触れる)

## ☆背景事象数の評価

- ・Vetoの検出効率
- ・偶発同時イベント数

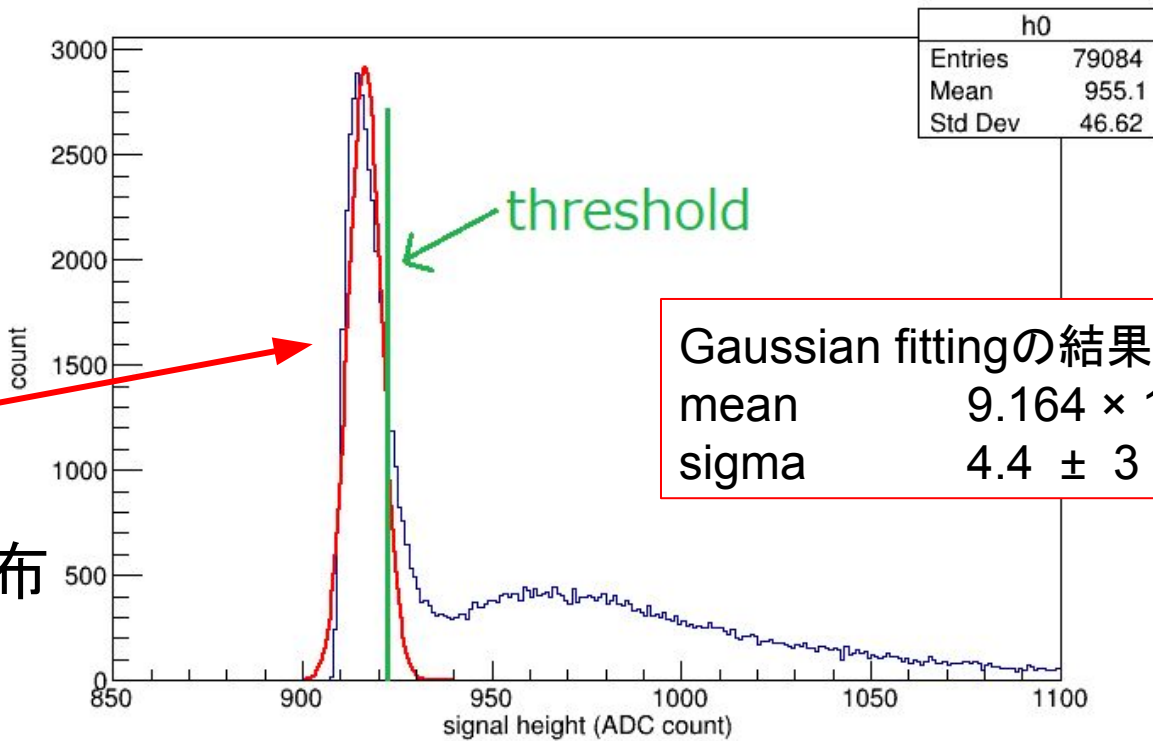
# Veto thresholdの設定

生波形を見て  
threshold = Offset + 20  
と設定



# ノイズによる誤Veto

offsetの  
最大値の分布



Gaussian fittingの結果  
mean  $9.164 \times 10^3 \pm 3 \times 10^{-2}$   
sigma  $4.4 \pm 3 \times 10^{-2}$

Vetoシンチレータの波高分布(1回のトリガーイベントのうち最大の波高の分布)

→ threshold = offsetの平均+20  
(図のGaussianではmean + 1σ)



1 $\sigma$ でよいか？

約16%の確率でノイズを信号と判断してしまう。

しかし、それがbunchに対応するタイミングで起きる確率は、

$$\text{bunch判定の時間} / \text{測定時間} = 2.4 \mu\text{s} / 8 \mu\text{s} = 0.3$$

結局、ノイズによる誤Vetoの確率は

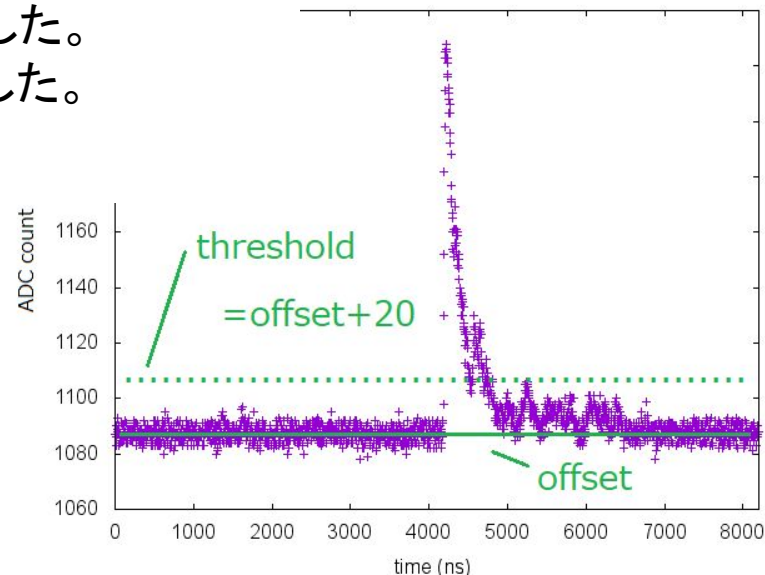
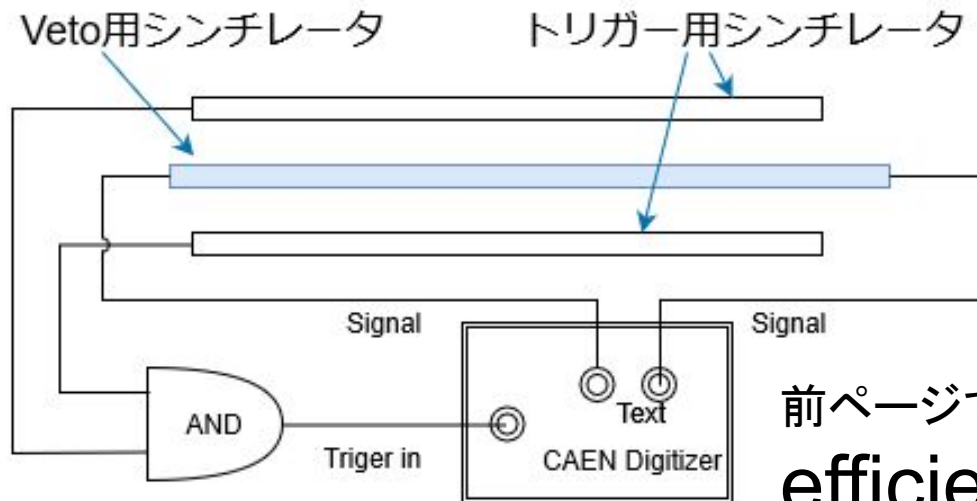
$$0.16 \times 0.3 = 0.05 \text{ 程度}$$

# Vetoプレーンの効率テスト

neutrinoイベントの識別にvetoプレーンの感度は非常に重要。

## 【セットアップ】

- 宇宙線ミュオンが突き抜けた信号をトリガーとした。
- トリガーがかかったうち、何回反応したかを測定した。
- $\text{efficiency} = \text{反応回数} / \text{トリガー回数}$



前ページで設定したthresholdをかけたとき、  
**efficiency = 98~99%であった**

# 偶発イベント

$\neg \text{Veto} \wedge \text{前方} \wedge \neg \text{後方}$



前方のみが  
反応する割合

$\neg \text{Veto} \wedge \neg \text{前方} \wedge \text{後方}$



後方のみが  
反応する割合



偶然前方と後方が同時に反応する割合

ニュートリノイベント中に含まれる偶発イベント数

~ 1.50 events

# イベント数評価

ノイズによる誤Veto: +5.10 event

Vetoのinefficiency: 貫通 572 events  $\times 0.02 / 0.98 = -11.67$  events

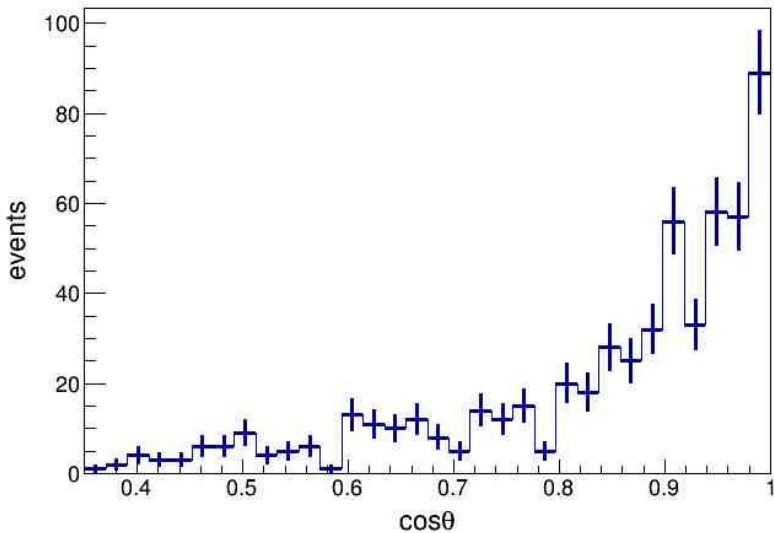
偶発的なcoincidence: -1.50 events

→ ニュートリノイベント数: **102**

( \* 統計誤差付きで、 $102 \pm 10$  )

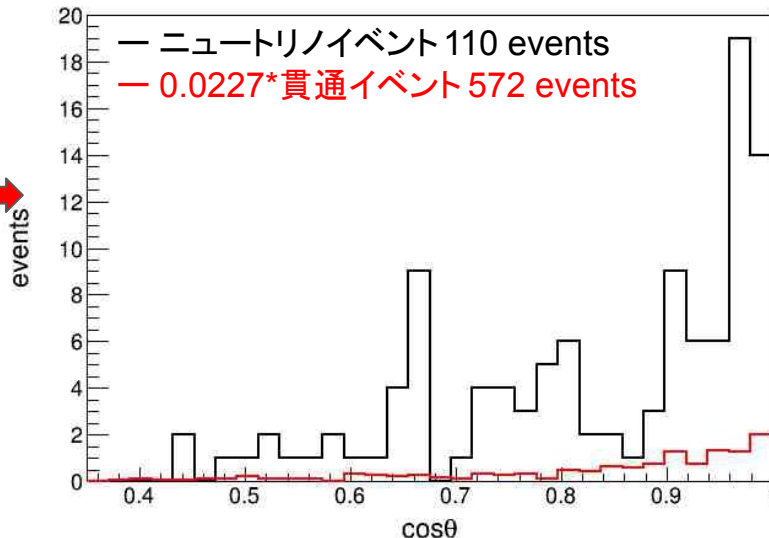
# 角度分布

ニュートリノに混ざり込んだ貫通イベントを取り除く



貫通イベントの角度分布

スケーリング



↑ ニュートリノイベントに  
混入している貫通イベント

# シミュレーションによる見積もり

## ニュートリノ反応 NEUT

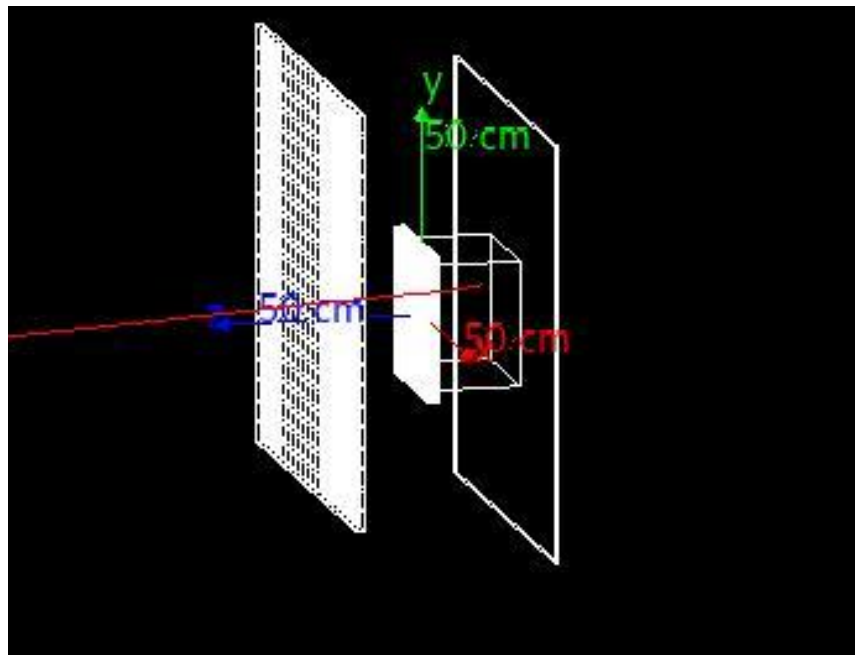
WAGASCI実験(OA角 1°)のもの

ターゲットの質量・面積・組成  
ビームの運転電力を調整

## ミューオンの輸送 Geant4

本実験のセットアップを構築

ミューオンの電磁相互作用を計算



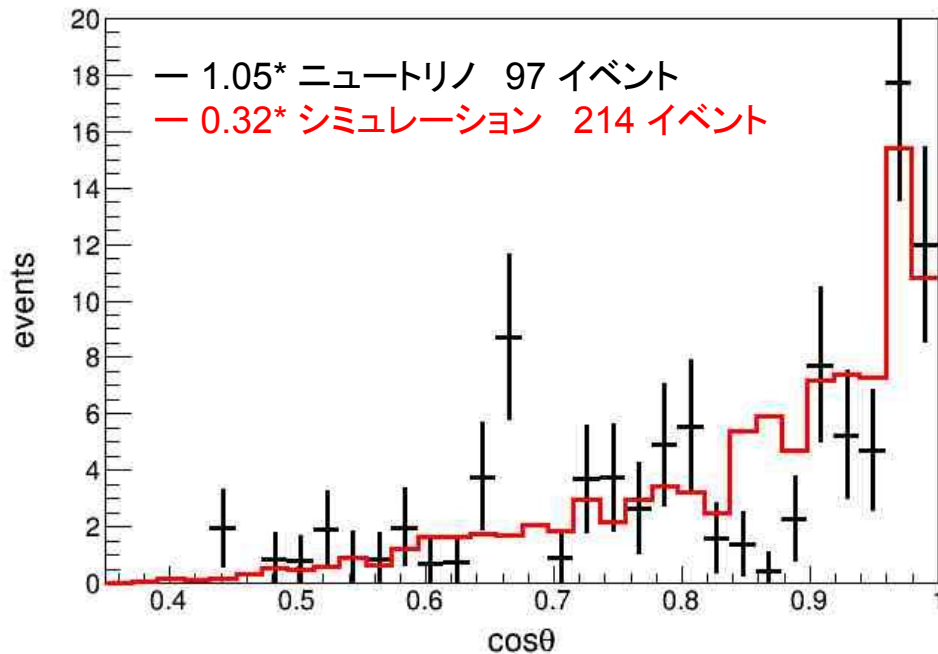
Geant4 によるシミュレーションの様子

# シミュレーションとの比較

【イベント数】

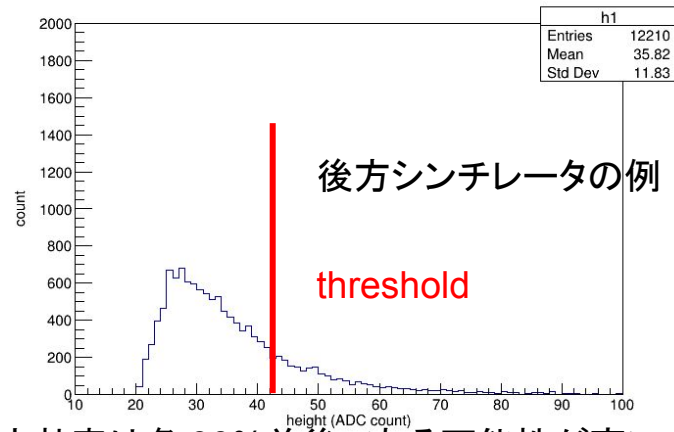
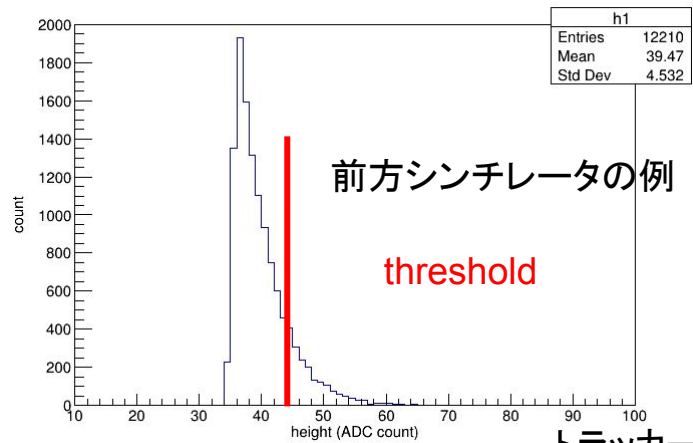
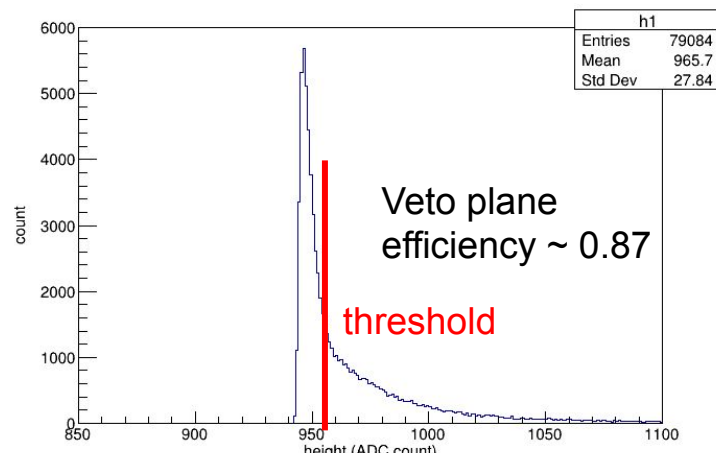
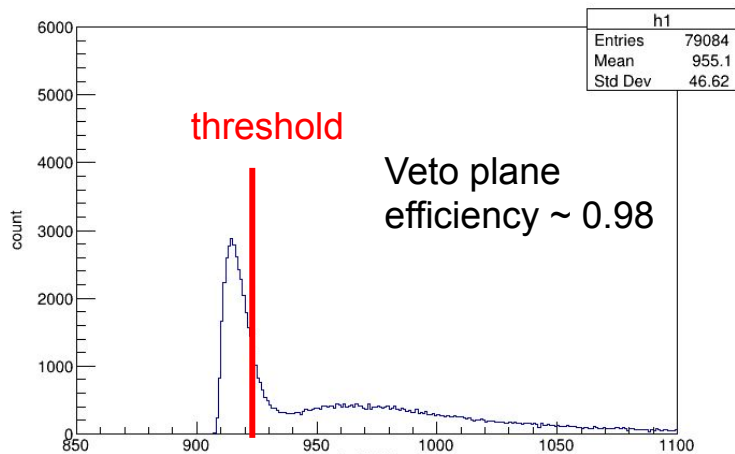
| シミュレーション結果 | 実験結果         |
|------------|--------------|
| 213.89     | $102 \pm 10$ |

【角度分布】



# 前方・後方シンチレータの反応効率の示唆

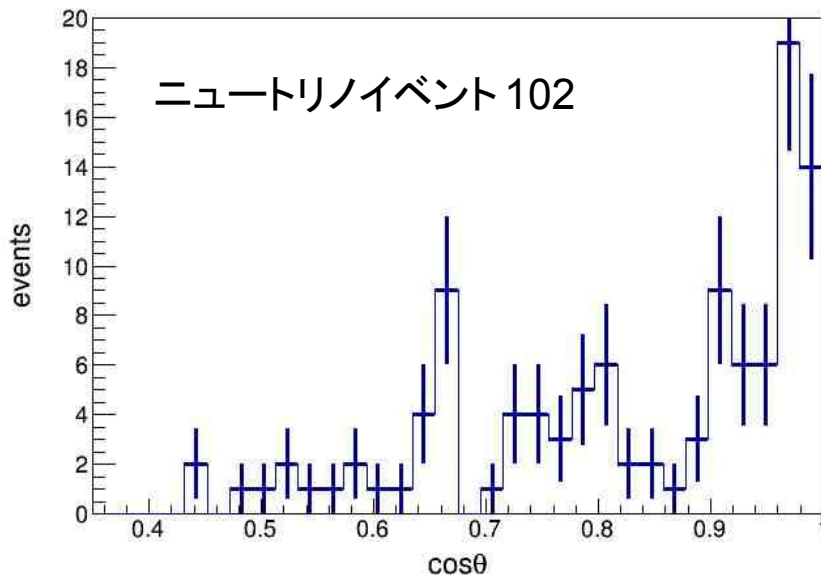
波高分布



トラックの反応効率は各 90% 前後である可能性が高い。



# 結果



# 考察

- ・角度分布・・・シミュレーションと概ね一致
- ・ニュートリノイベント数・・・大幅に少ない
  - tracker の検出効率によるものと考えられる

# 謝辞

指導教員：中家さん、隅田さん

TA：辻川さん、森さん、李耀漢さん

高エネの院生方：中村和広さん、平本さん、小林さん、e.t.c.

木河さん、塚本さん、KEKの方々、P2のメンバー、e.t.c.

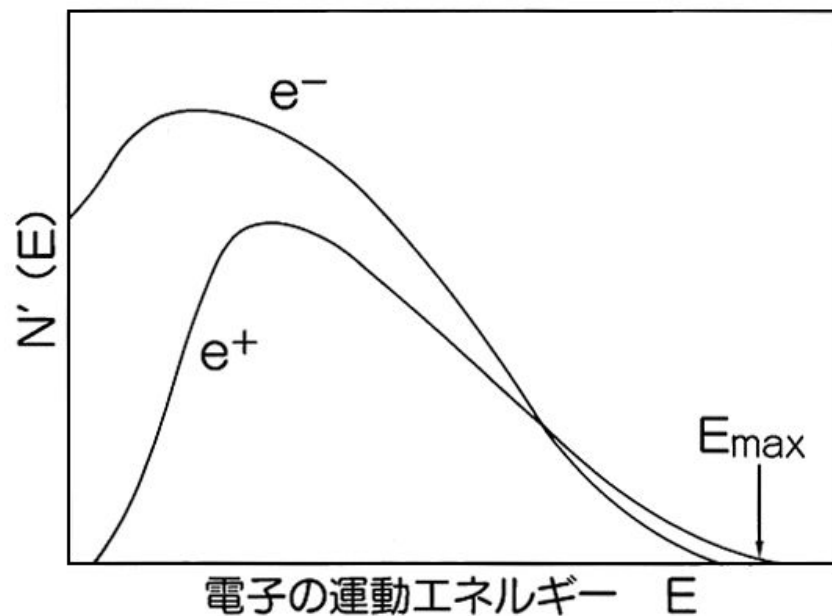
**本当にありがとうございました！**

# 付録資料

- 使わなかったスライド集
- 実験装置分解詳細図及び写真
- VETOシンチレータの詳細 (デザイン, efficiencyテスト)
- MPPCについて (各種回路図もあり)
- 4枚コインシデンス時の生波形
- $\cos$ の誤差資料
- 信号判別thresholdの値設定

使いません

# ニュートリノの発見



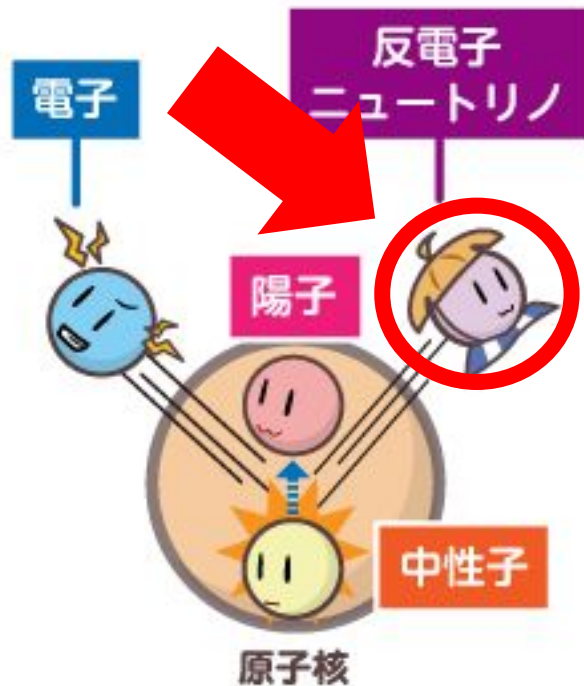
エネルギー保存則  
が破れた



図1  $\beta$  壊変で放出される電子、陽電子のエネルギー一分布

使いません

謎の粒子が  
エネルギー  
(運動量)を  
持って行った  
のでは？



ベータ崩壊

ニュートリノと  
名づけよう



あった



使いません

## ビームタイミング信号

ビームの30  $\mu\text{sec}$ 前と100 msec前にパルス信号

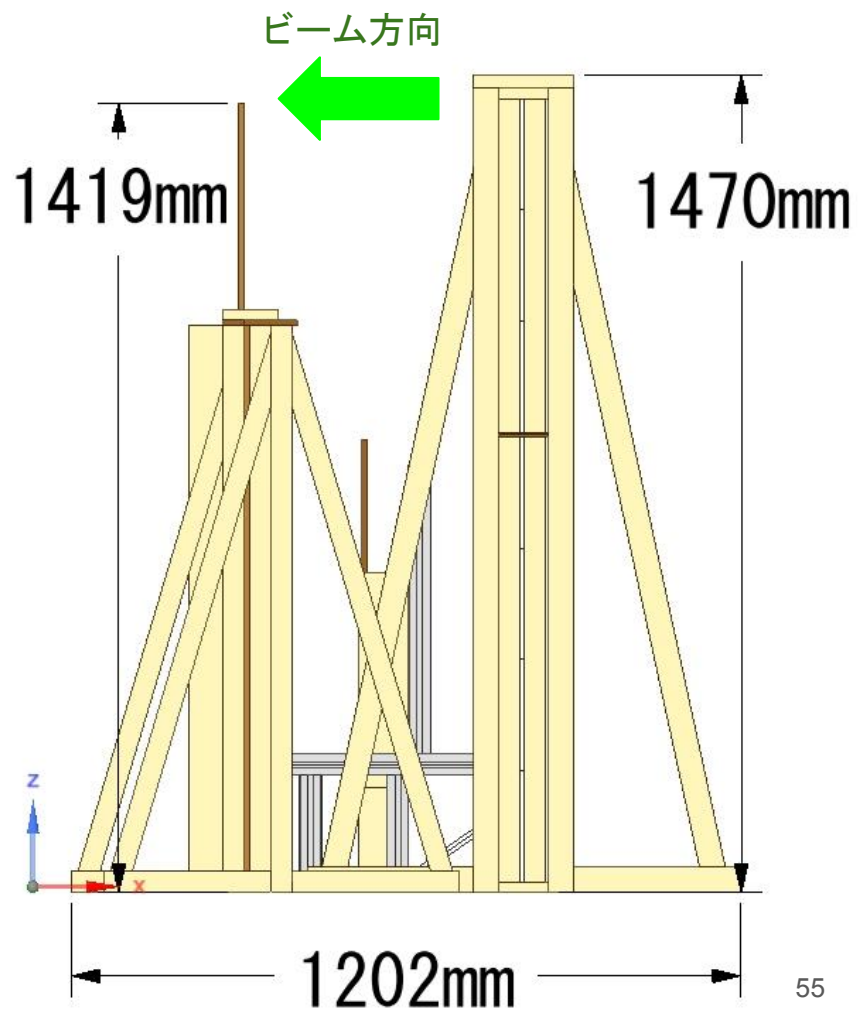
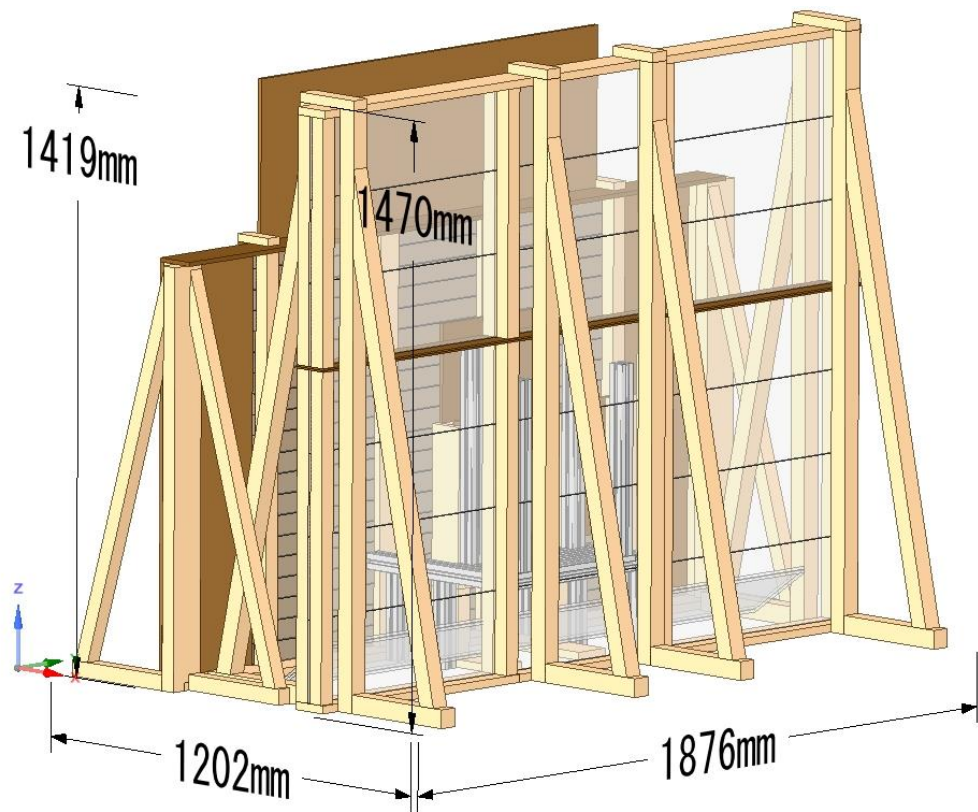
➡ 30  $\mu\text{sec}$ 前の信号をトリガーとして使用

## ビーム強度

単位 POT (Proton on Target)

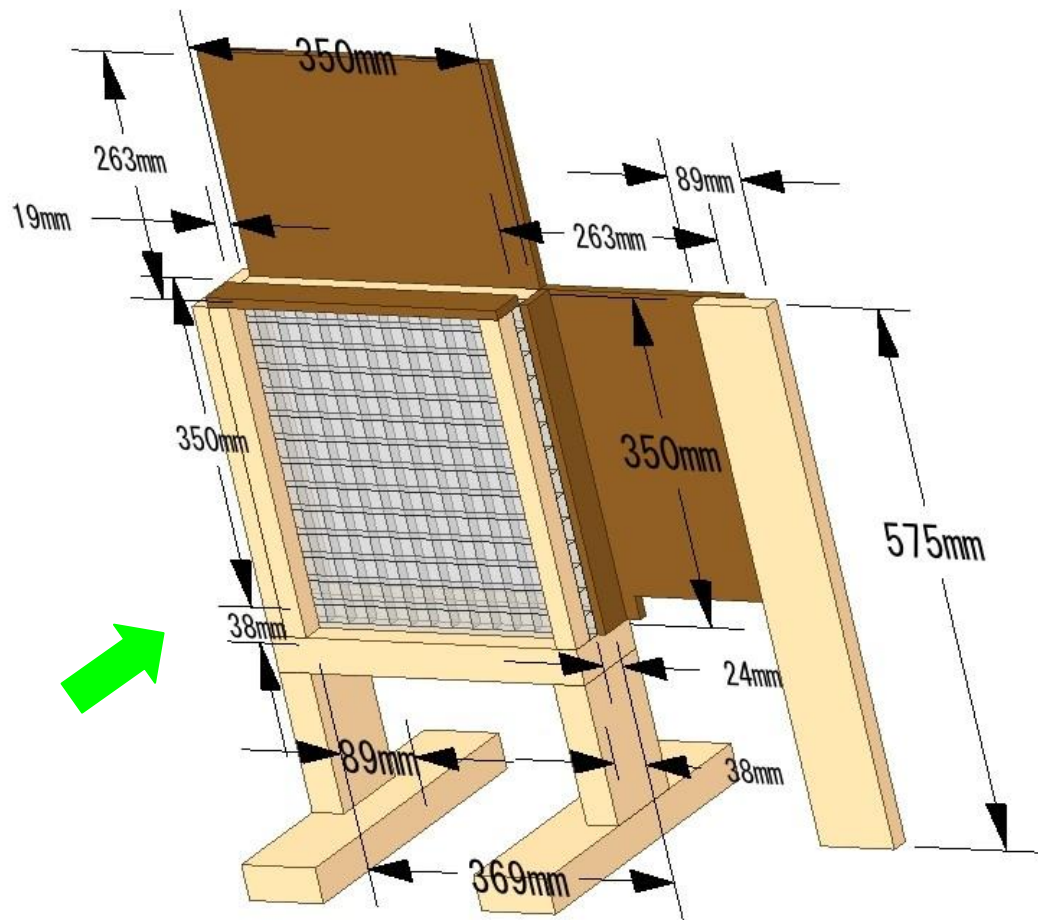
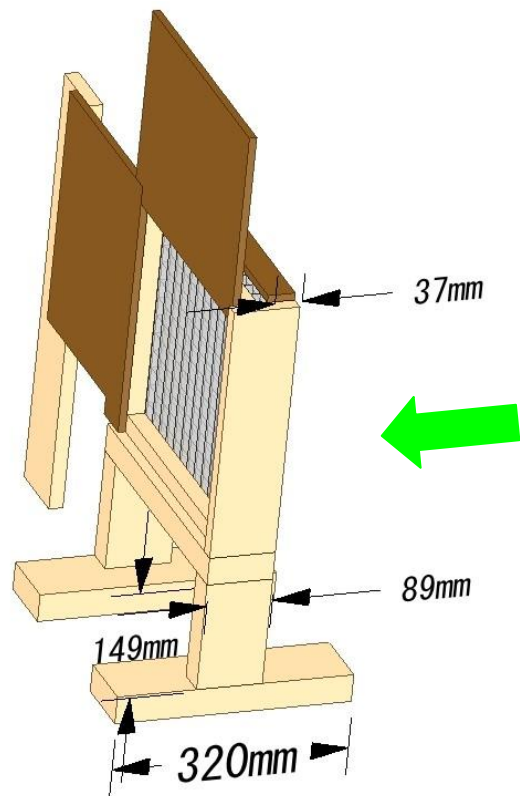
$$\frac{500 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill}}{30 \text{ GeV/POT}} \sim 2.6 \times 10^{14} \text{ POT/spill}$$

# 木枠付き全体図



# 実験装置分解詳細図

## ・ 前方シンチレータ

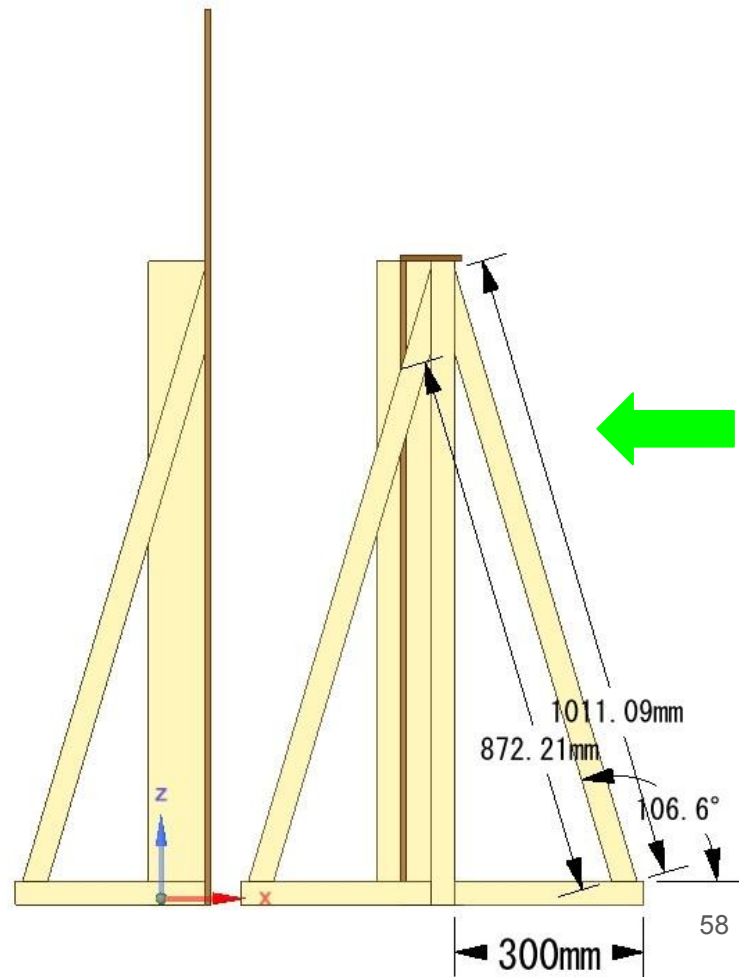
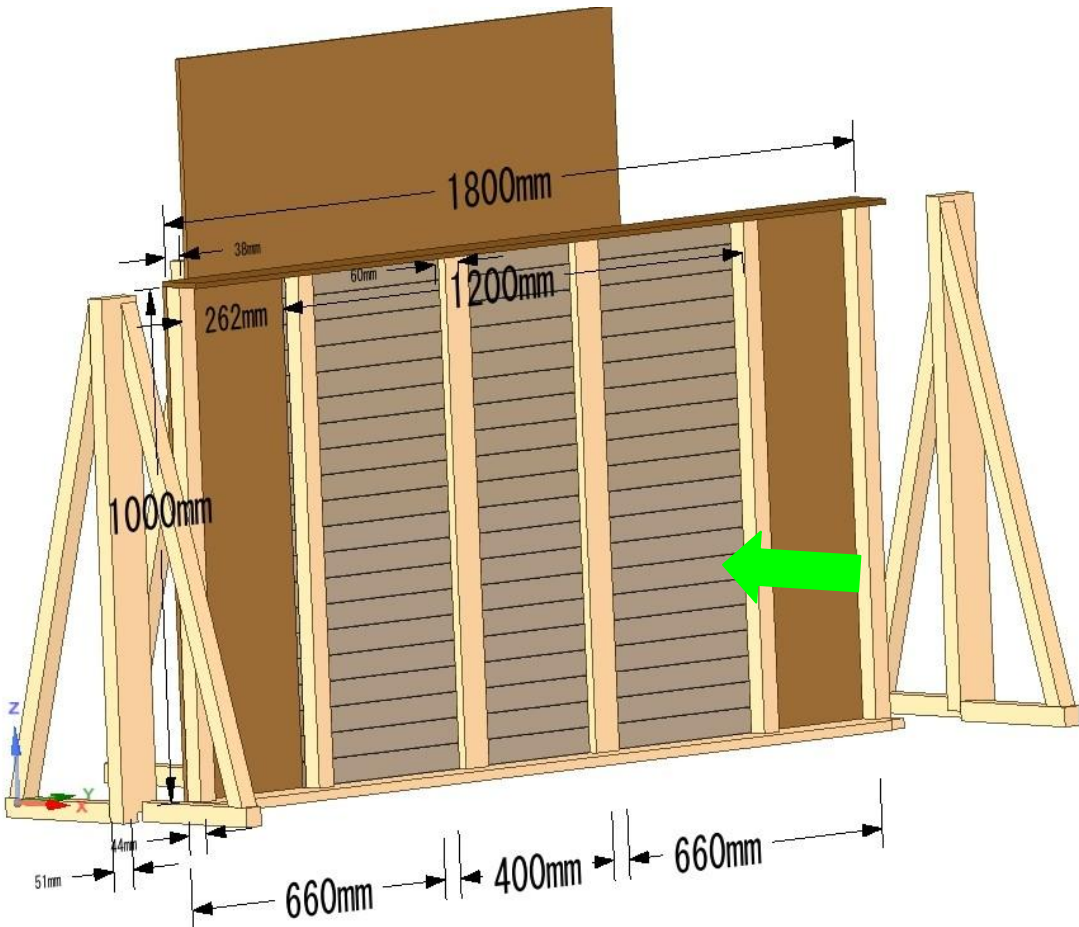




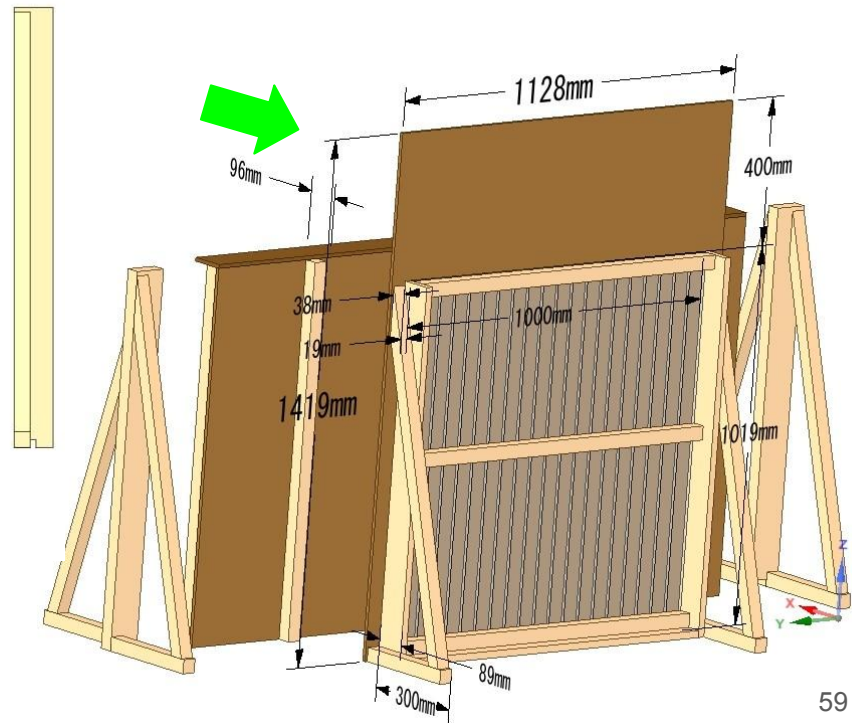
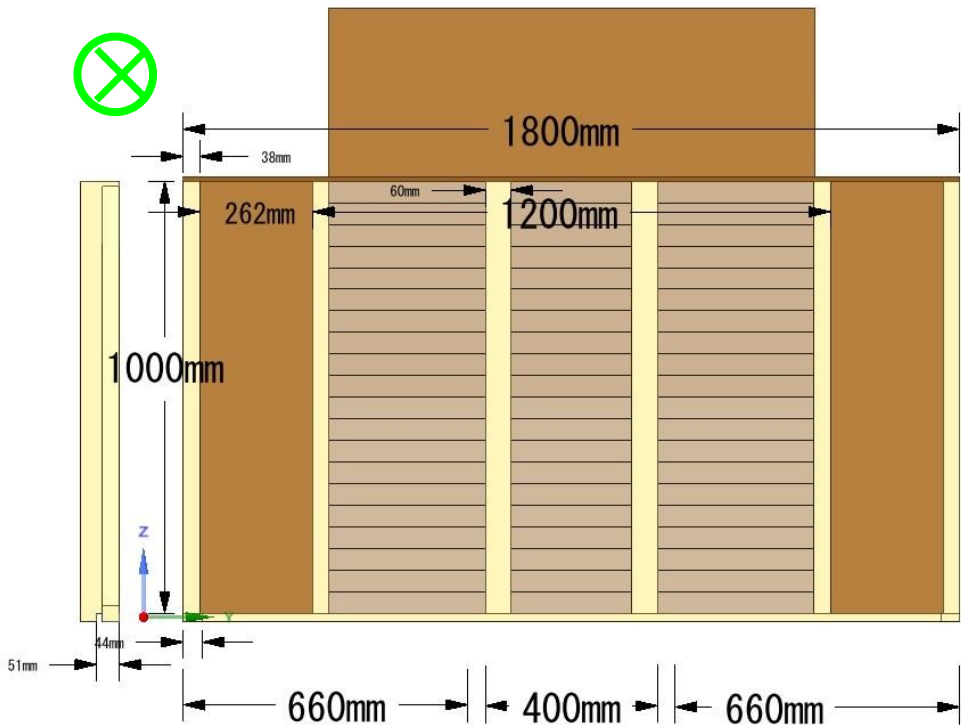
- 前方シンチレータ



・ 後方シンチレータ (1)



# ・ 後方シンチレータ (2)



- ・ 後方シンチレータ



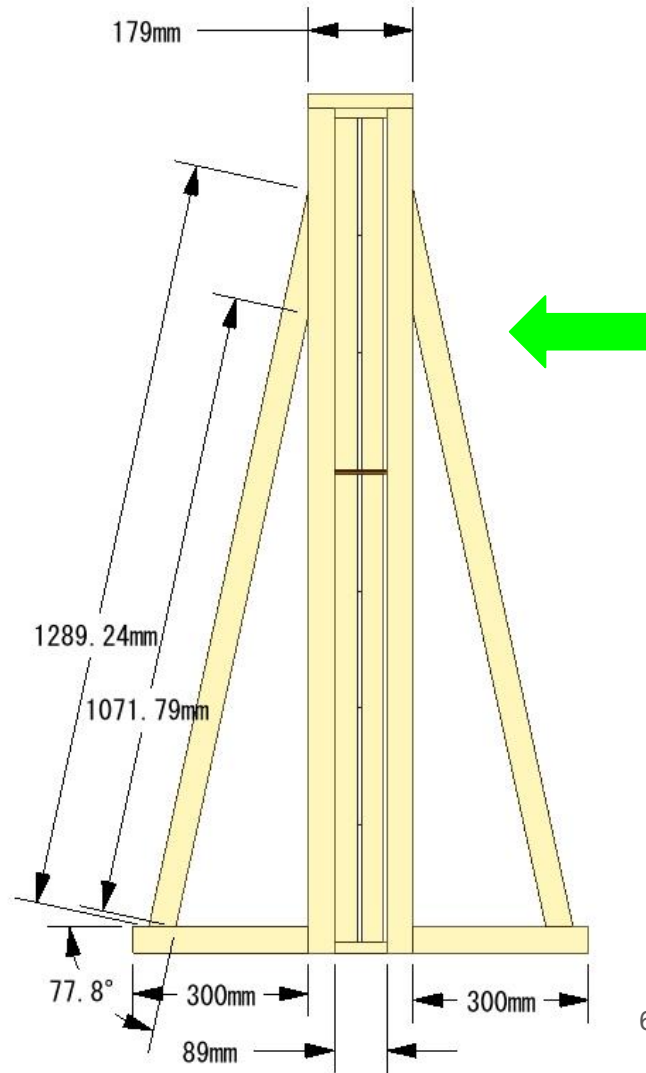
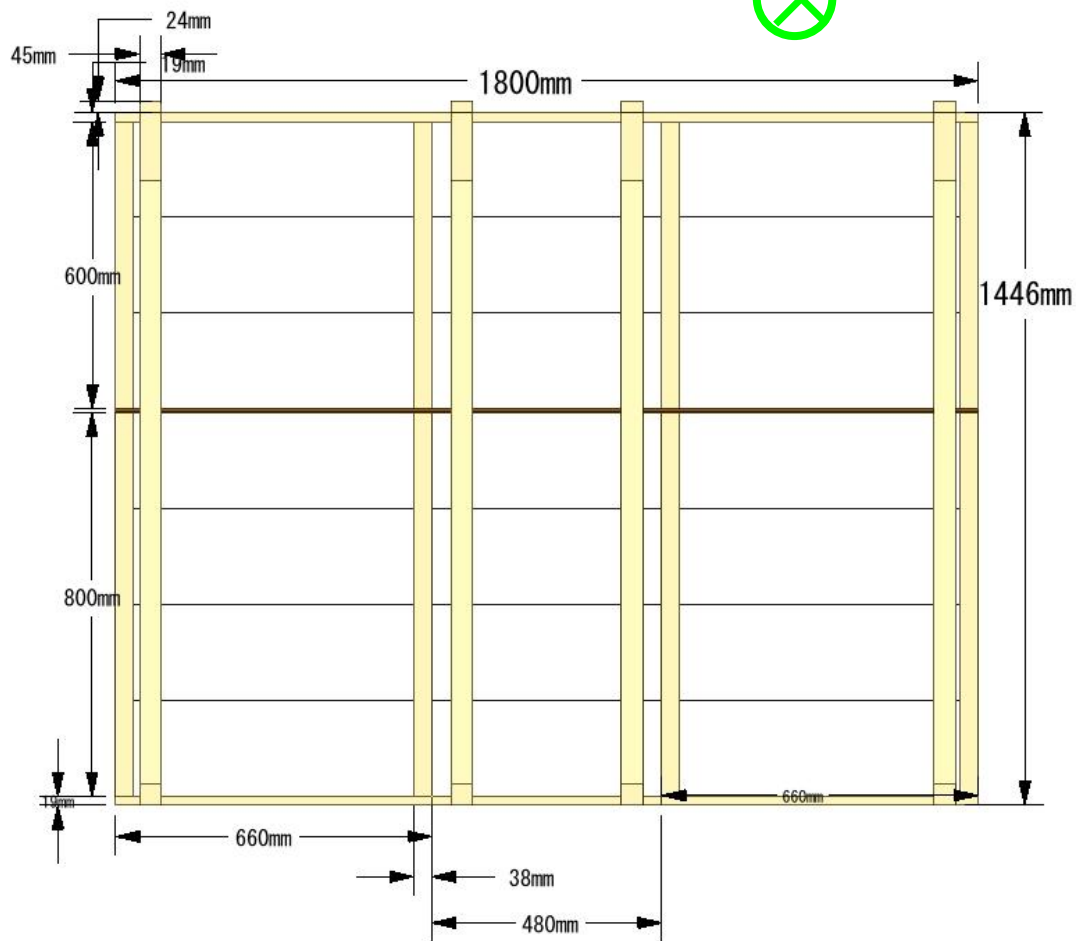
• VETOシンチレータ (1)

展開図 (運搬時)

完成図



# • VETOシンチレータ (2)

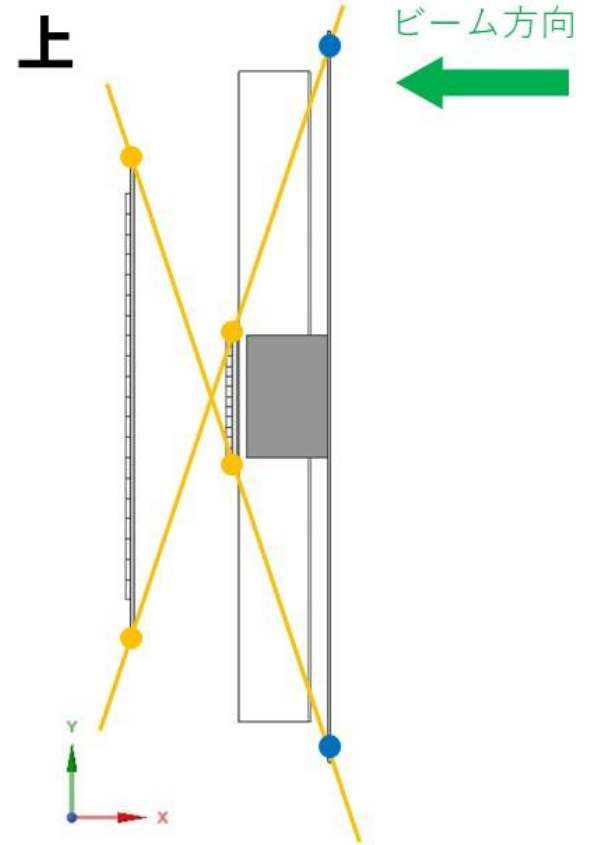
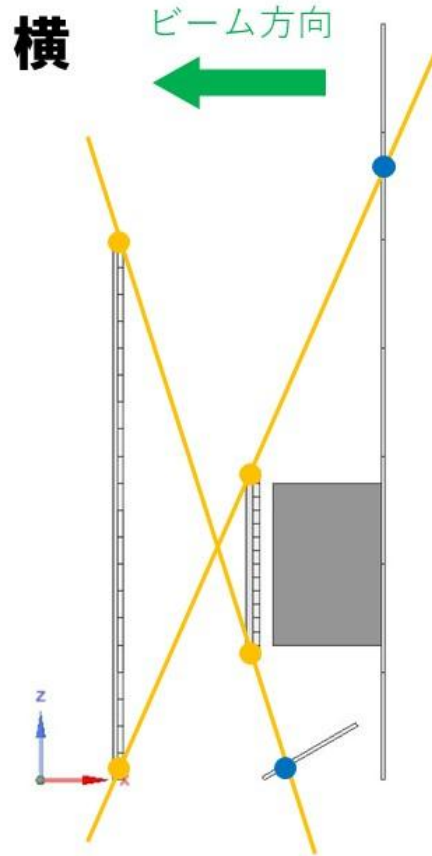


- VETOシンチレータ



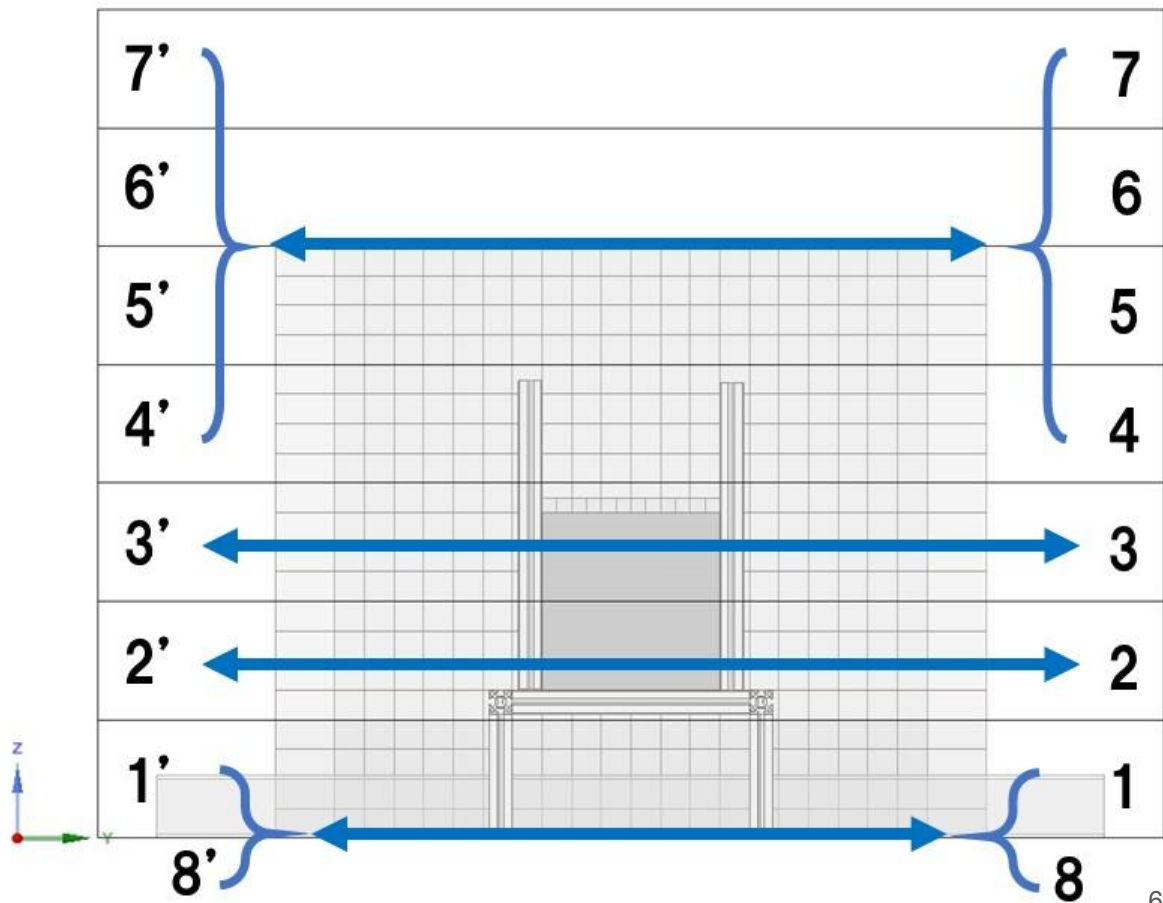
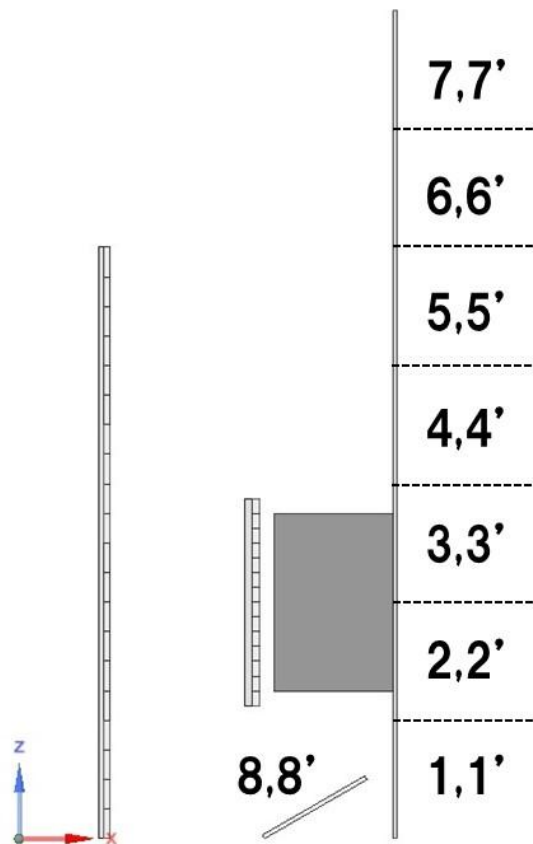
# VETOデザイン

幾何的には  
必ずVETOを通過





# VETO番号対応図



vetoプレーンの反応効率 $\sim 99\%$   
(threshold=offset+20)

## VETOシンチレータのefficiencyテスト詳細

| channel | entry  | count  | efficiency | OR     | eff_OR |
|---------|--------|--------|------------|--------|--------|
| 1'      | 120460 | 119440 | 0.992      | 119645 | 0.993  |
| 1       | 120460 | 105065 | 0.872      |        |        |
| 2'      | 83411  | 82675  | 0.991      | 82803  | 0.993  |
| 2       | 83411  | 75282  | 0.903      |        |        |
| 3'      | 80910  | 79820  | 0.987      | 79820  | 0.987  |
| 3       | 80910  |        |            |        |        |
| 4'      | 81632  | 80189  | 0.982      | 80330  | 0.984  |
| 4       | 81632  | 71089  | 0.871      |        |        |
| 5'      | 144334 | 143137 | 0.992      | 143402 | 0.994  |
| 5       | 144334 | 127480 | 0.883      |        |        |
| 6'      | 146943 | 145701 | 0.992      | 145923 | 0.993  |
| 6       | 146943 | 123171 | 0.838      |        |        |
| 7'      | 114323 | 113172 | 0.990      | 113389 | 0.992  |
| 7       | 114323 | 99924  | 0.874      |        |        |
| 8'      | 303293 | 301829 | 0.995      |        |        |
| 8       | 470257 | 467773 | 0.995      |        |        |

両側読みの一端のefficiencyが悪い  
(MPPC電圧が低かったため)

信号の論理和(OR)を取ると  
98~99%のefficiencyとなる

→解析でvetoプレーンだけが反応  
しなかったイベントのうち、  
99%はニュートリノイベント

- ❑ 3'は基盤の破損のためデータが取れなかった。本測定時には動作していた。
- ❑ 8,8'は1本ずつ測定したため論理和を載せていない。1本ずつでも99%のefficiencyがある。

# シンチレータの隙間による inefficiencyのテスト

## inefficiencyの原因

- 光量不足による読み落とし
- ファイバーのヒビなどによる伝達不能
- シンチレータの隙間に当たった場合

| Entry | 反応数(OR) | efficiency |
|-------|---------|------------|
| 79084 | 77548   | 0.981      |



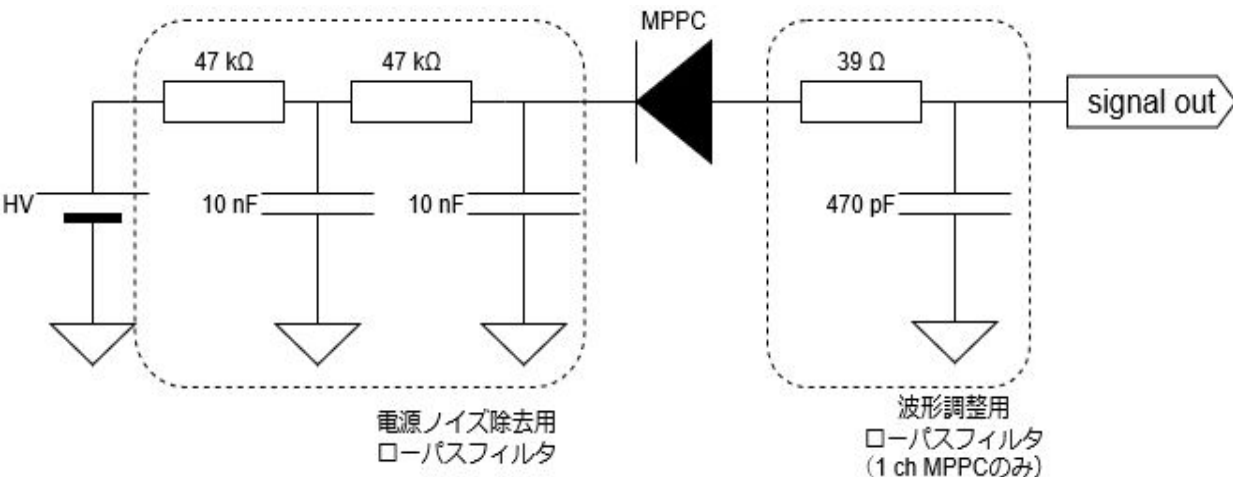
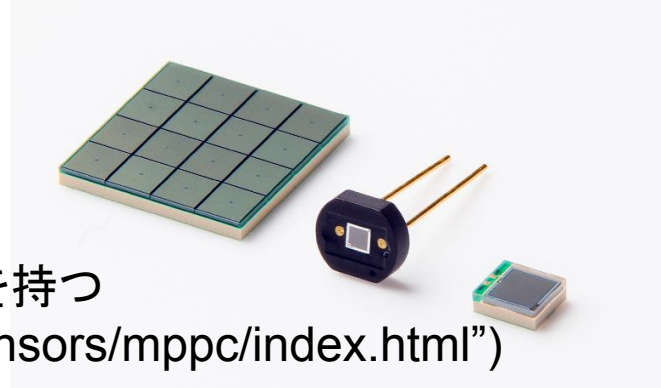


# MPPCについて

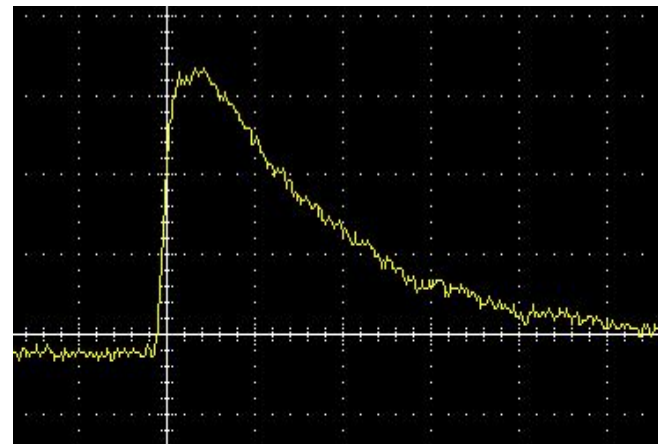
浜松ホトニクス製の光子測定デバイス

光半導体素子であり、優れたフォトンカウンティング能力を持つ

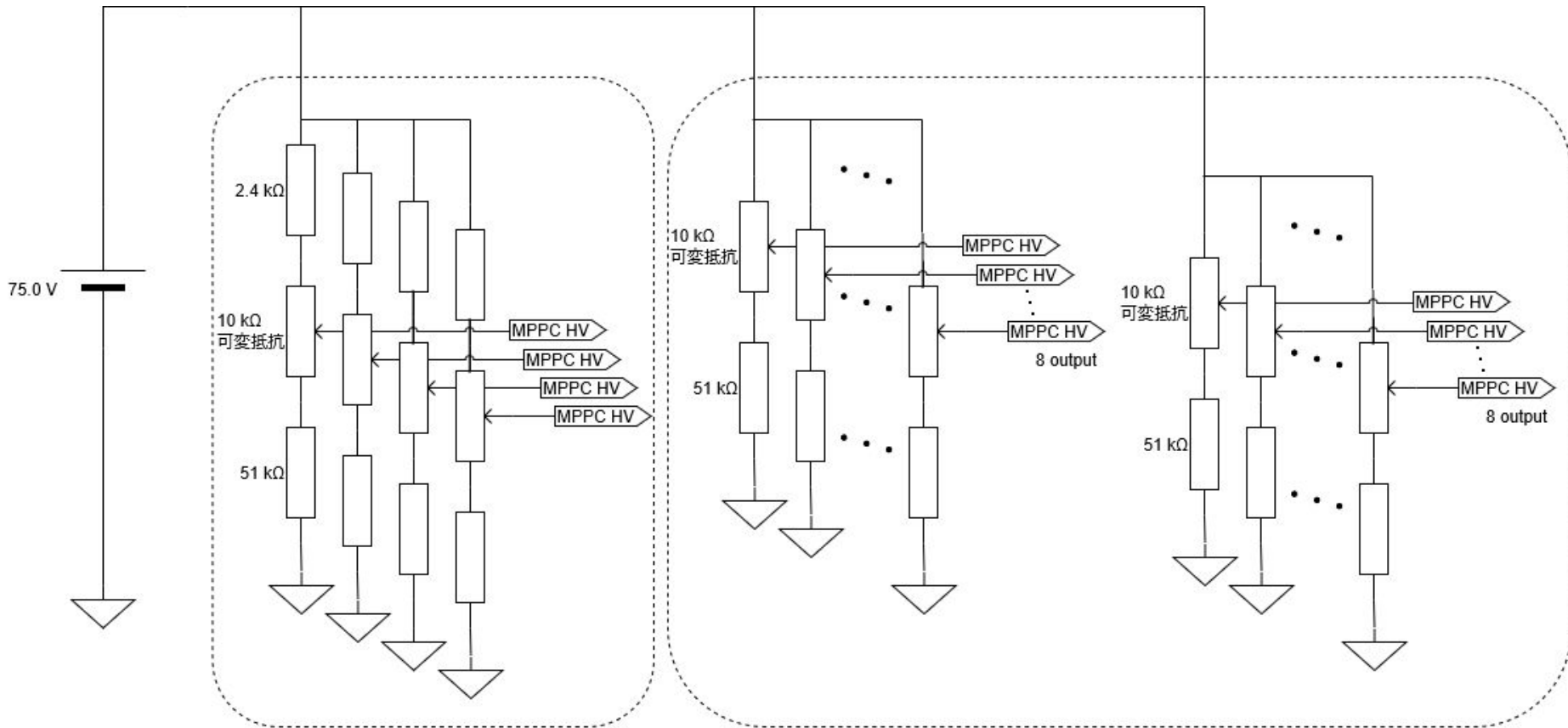
(“<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/index.html>”)



信号読み出し回路図



MPPC信号波形  
: 1目盛り10 mV, 100 ns



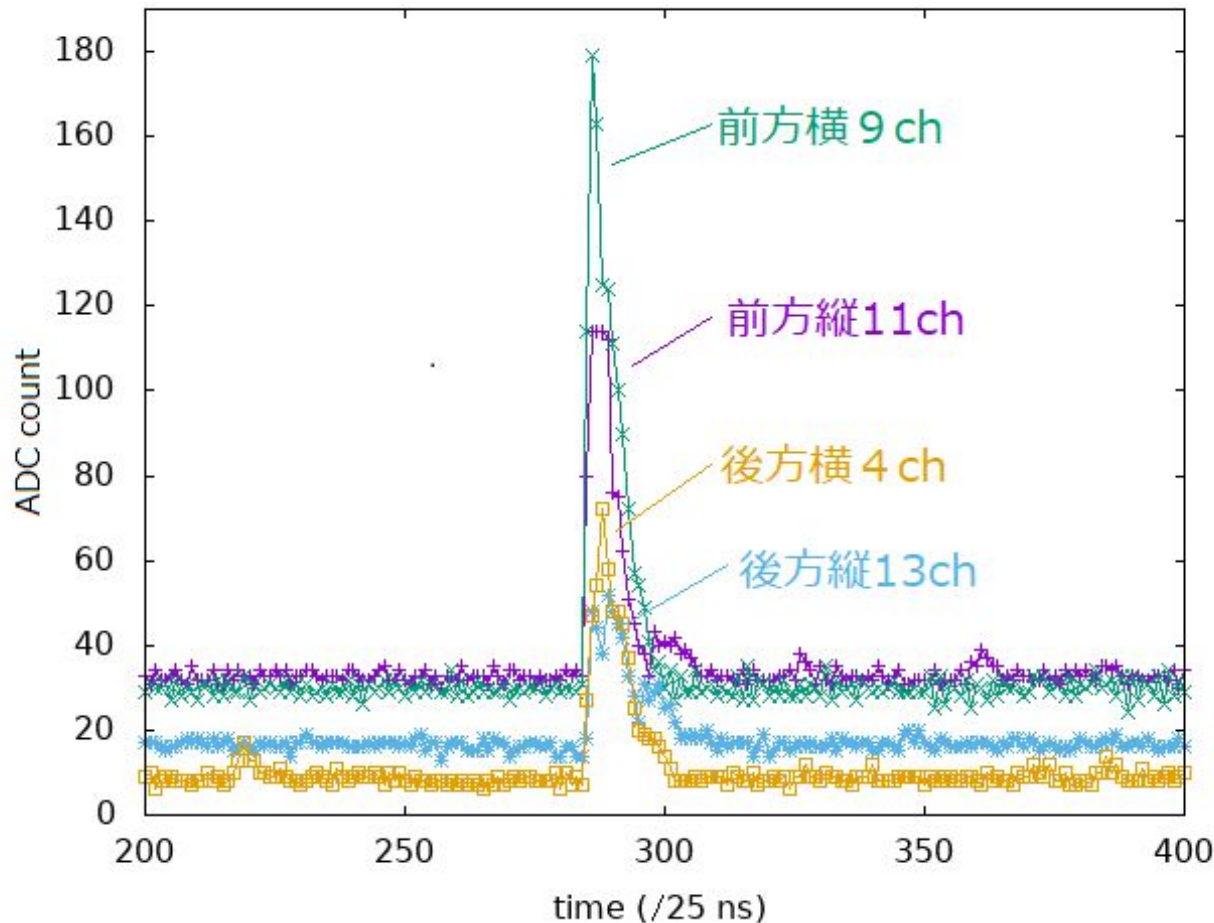
16 ch MPPC用電圧分配回路  
60 ~ 72 Vの範囲で調整可

1 ch MPPC用電圧分配回路  
62 ~ 75 Vの範囲で調整可

## MPPC電源分配回路図

: 1台の電源で20個のMPPCを駆動

# 4枚のシンチレータによるコインシデンスが取れた時の生波形



# cosの誤差資料



## cos $\theta$ の標準偏差

解析では、ミューオンがシンチレータの中央を通ったと見なした。  
実際には幅がある。

この幅を評価するために以下のようなシミュレーションを行った。

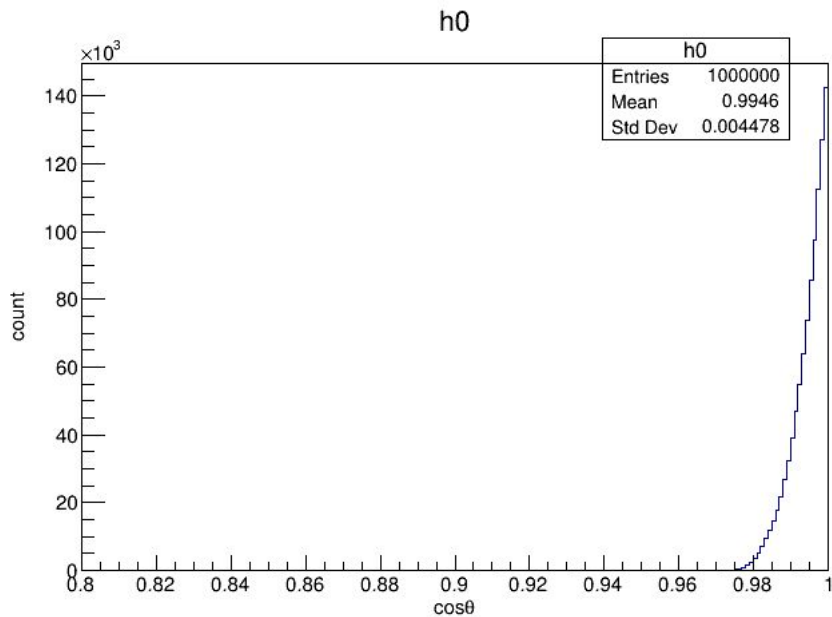
ある組み合わせのシンチレータに対して、

- ・前方: 2.5 cm四方
- ・後方: 5.0 cm四方

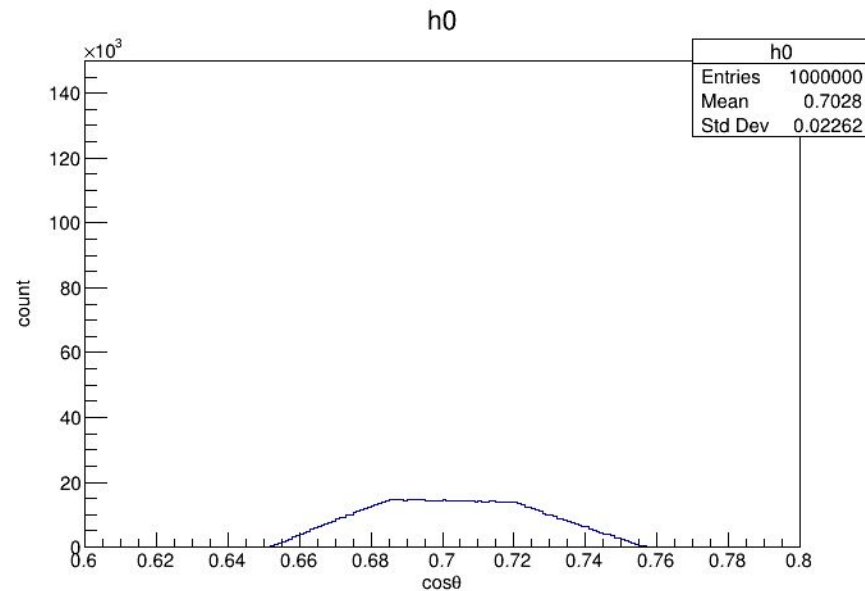
の領域からランダムに反応点を選び、cosの値を計算した。

これを繰り返して、cosの分布を描いた。

この分布と、中心を通ったとして計算したcosの値とを照らし合わせる。

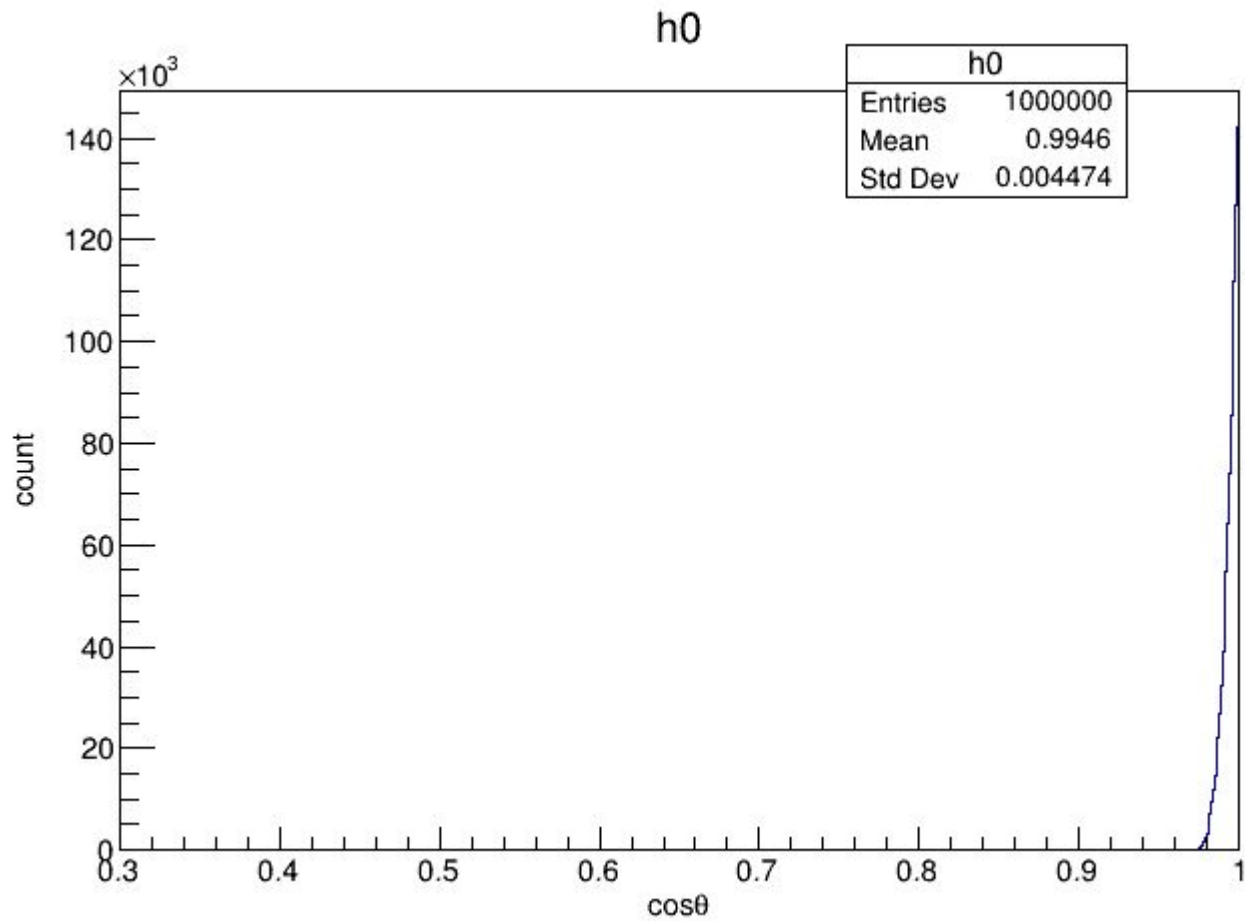


cos\_center=0.998のイベント  
幅は最大でも0.025程度で、  
ほとんどがcos\_centerの値付近に集中

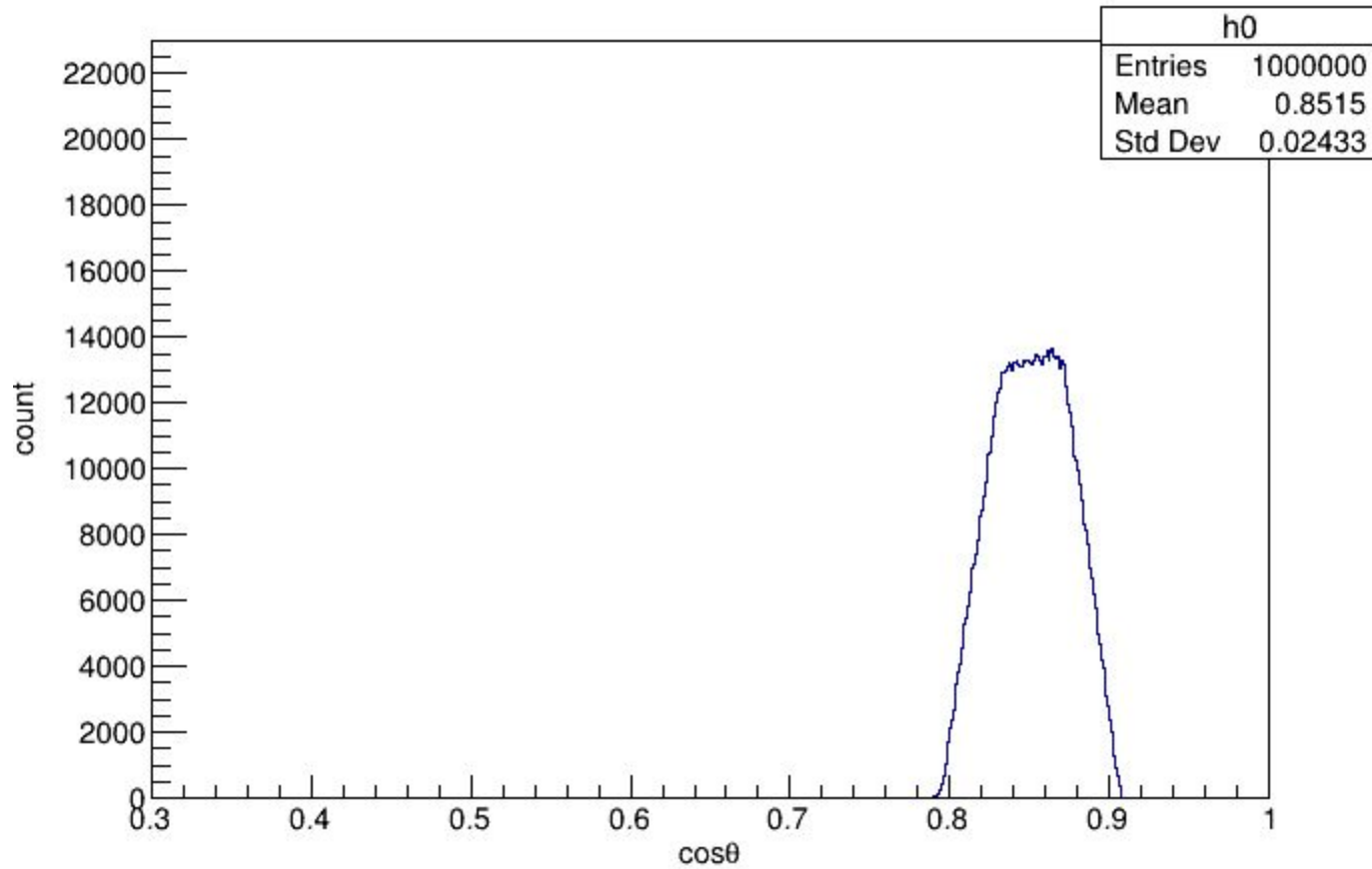


cos\_center=0.703のイベント  
幅は最大でも0.1程度あり、  
cos\_centerの値を中心として  
比較的一様に分布

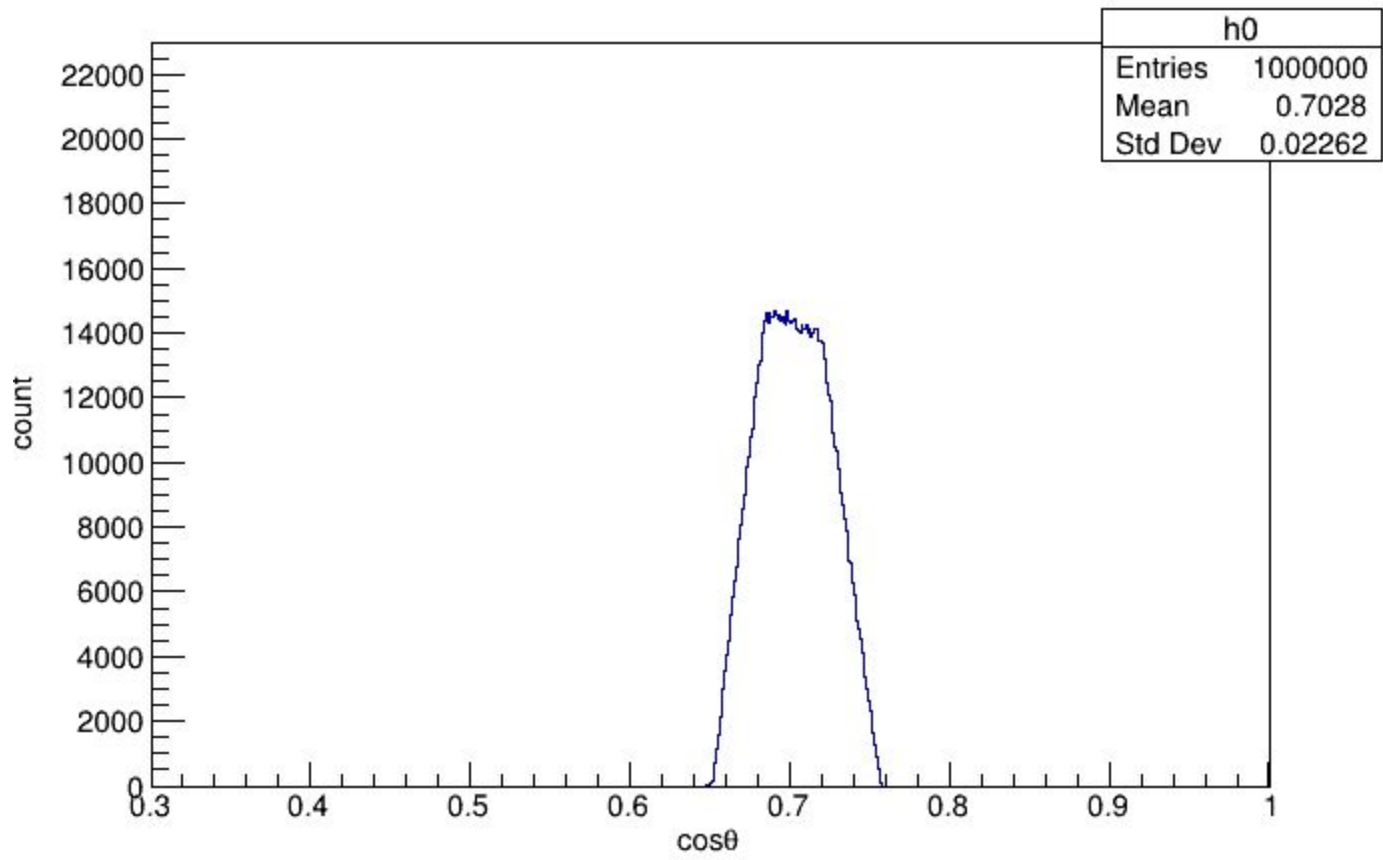
→実際のcosが取り得る値の幅は、大きい所でも0.1くらい



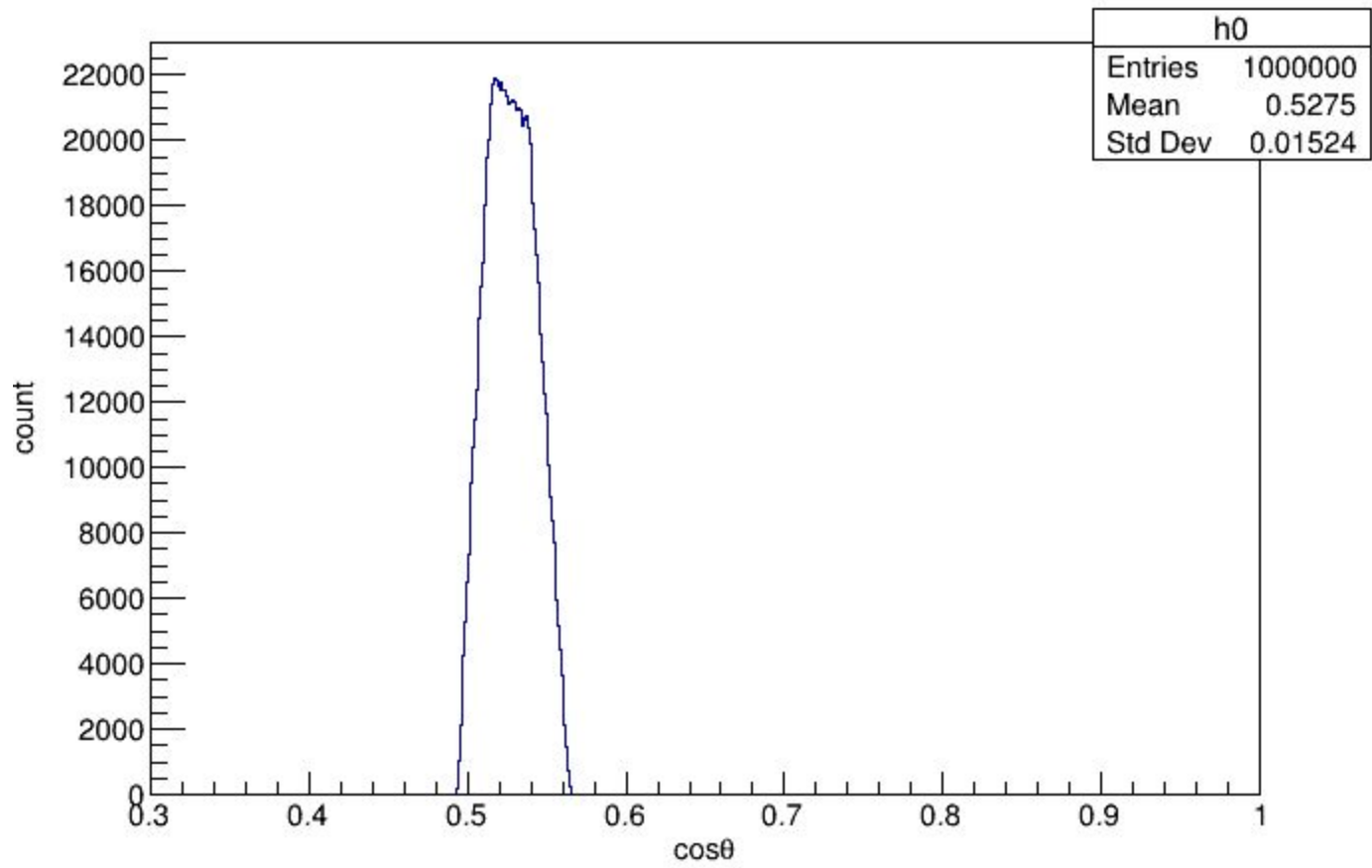
h0



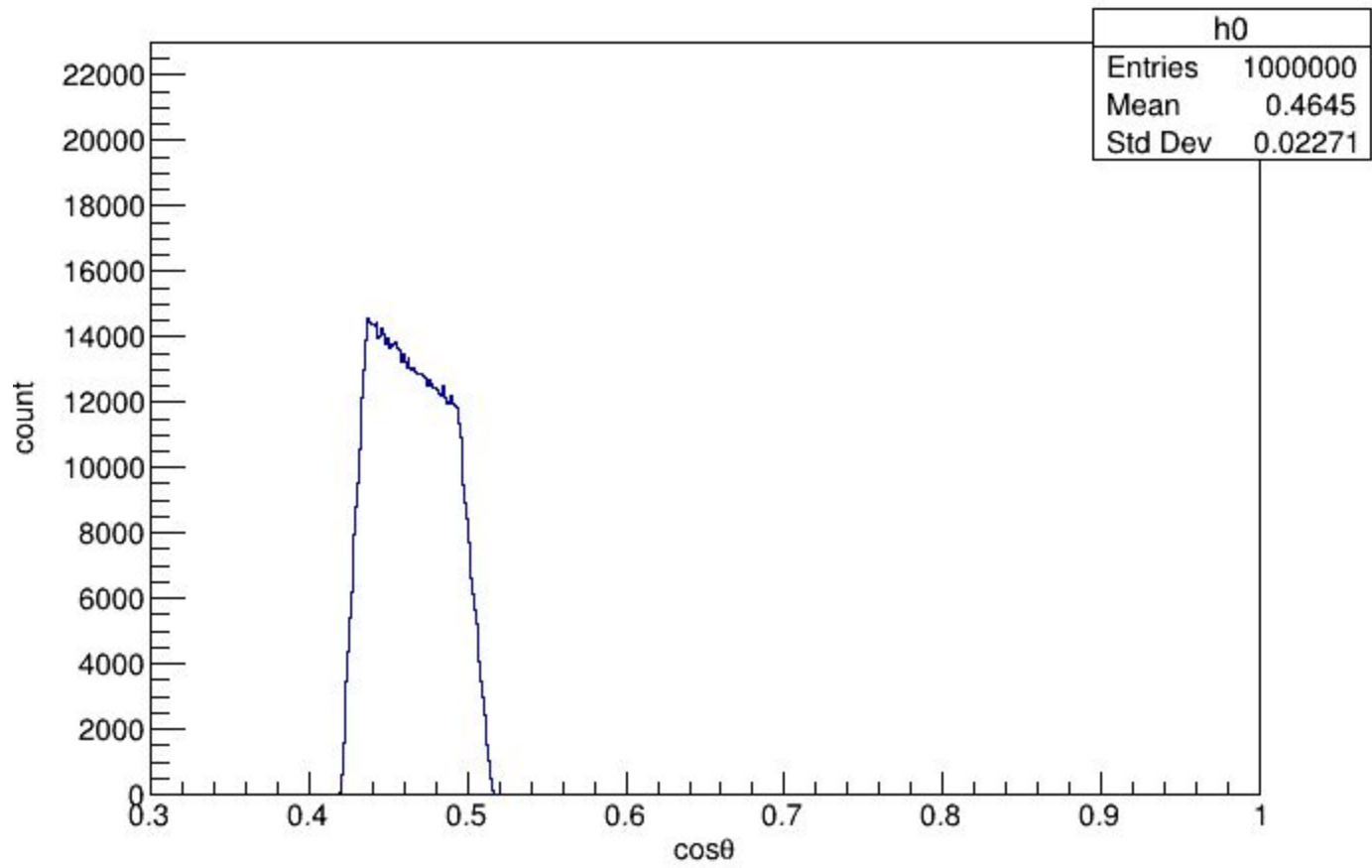
h0



h0



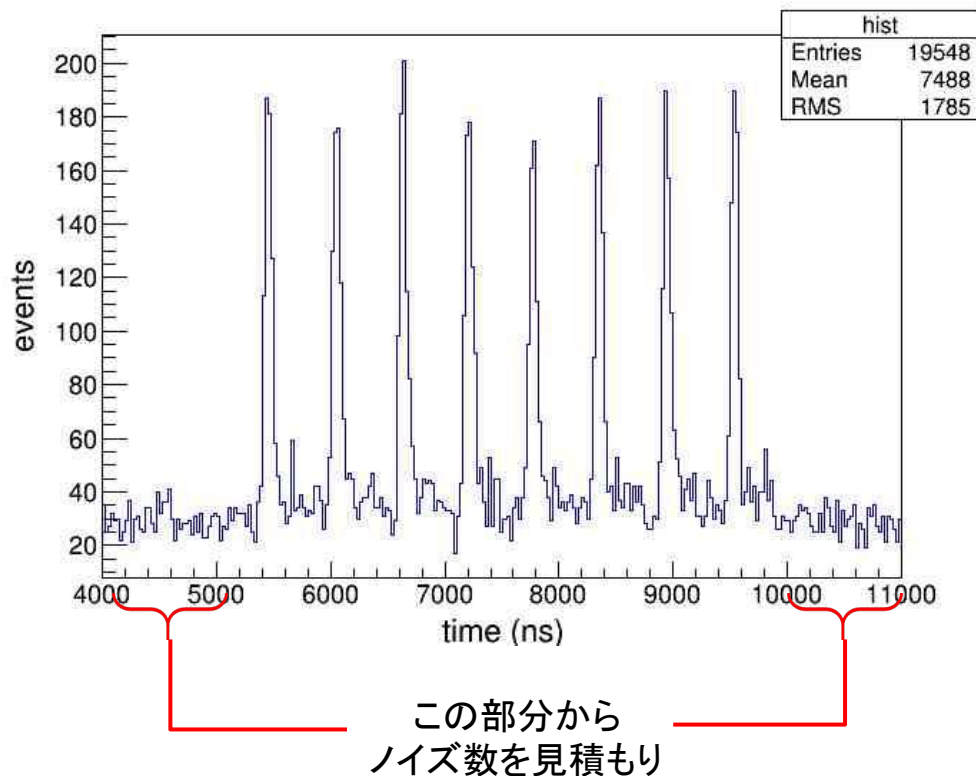
h0



# 信号判別thresholdの値設定

thresholdの値を変えて  
信号 / ノイズの比率を見積もり  
比率上で線引きしthreshold値決定  
(8bunchから外れている部分の信号を  
全てノイズによるものとした)

⇒4層のコインシデンスを取ったとき  
ニュートリノイベント100に対し  
ノイズによるイベント0.01未満に  
なることを確認。





# False Veto見積もり

データは各イベントでトリガー信号を中心に、前後4 $\mu$ s、計8 $\mu$ s分のデータを取得。

データ点は4nsに1点で2000点。

そのうち、データとして有効な8bunchに対応するのは 2.4 $\mu$ s / 8 $\mu$ s ; 600 / 2000

各2000点データセットの16%は、ノイズ最大波高がthresholdを超える。

→各2000点データセットの84%は、2000点全てのノイズがthreshold未満。

データ各点でノイズがthresholdを超えない確率を $r$ とすると、

$$r^{2000} = 0.8413$$

よって、 $r = 0.999914$

8bunch中で1点もノイズがthresholdを超えない確率は、

$$r^{600} = 0.9497$$

8bunch中、1点のみノイズがthresholdを超えるイベントである確率は

$$600 * (1-r) * r^{599} = 0.0490$$

8bunch中、2点だけノイズがthresholdを超えるイベントである確率は

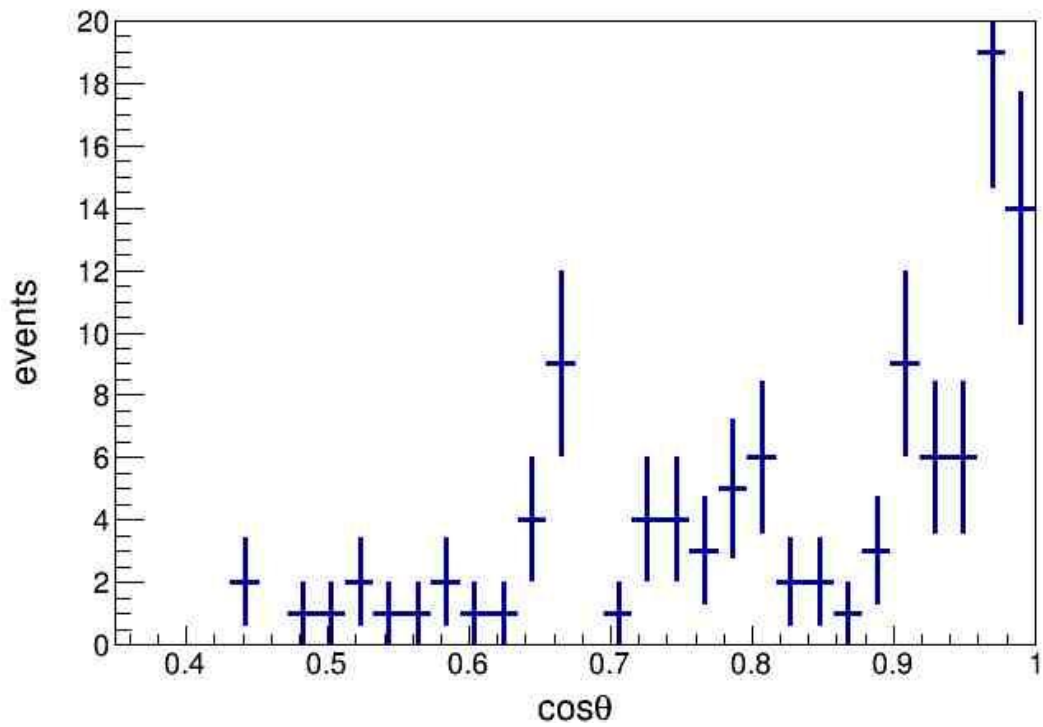
$$600 * 599 / 2 * (1-r)^2 * r^{598} = 0.0013$$

以上から観測イベント8bunch(1spill)中で

94.97% はノイズが一度もthresholdを超えない

04.90% はノイズが1点だけthresholdを超える

00.13% はノイズが2点だけthresholdを超える



# 図捨て場

