

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

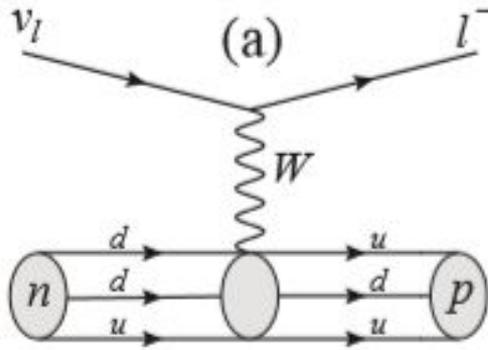
及び弱い相互作用の理論の検証を行う。

ニュートリノ反応の理論

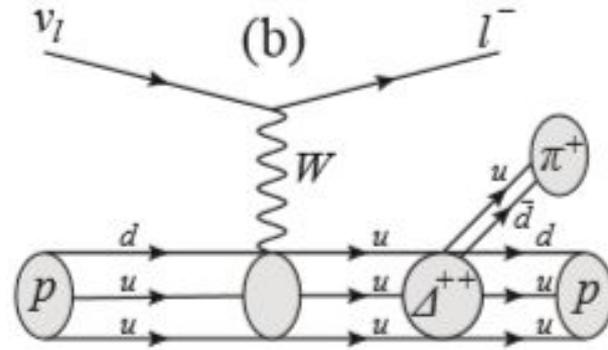
ニュートリノ-核子相互作用

荷電粒子を生成する反応(Charged Current反応)のみが検出可能

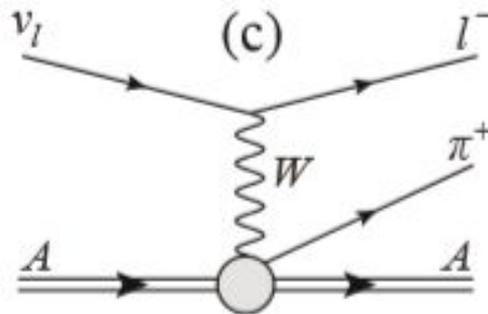
CCQE



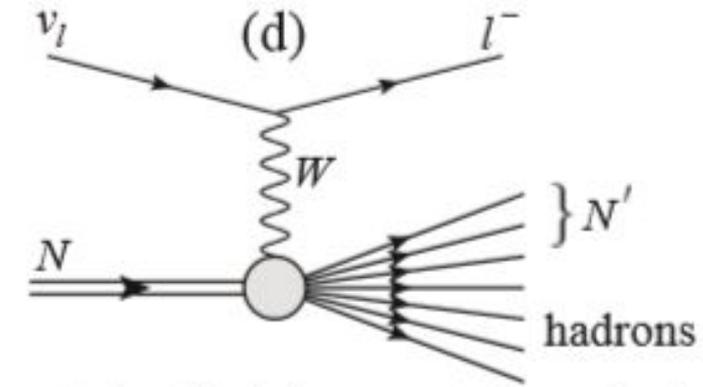
CC1 π

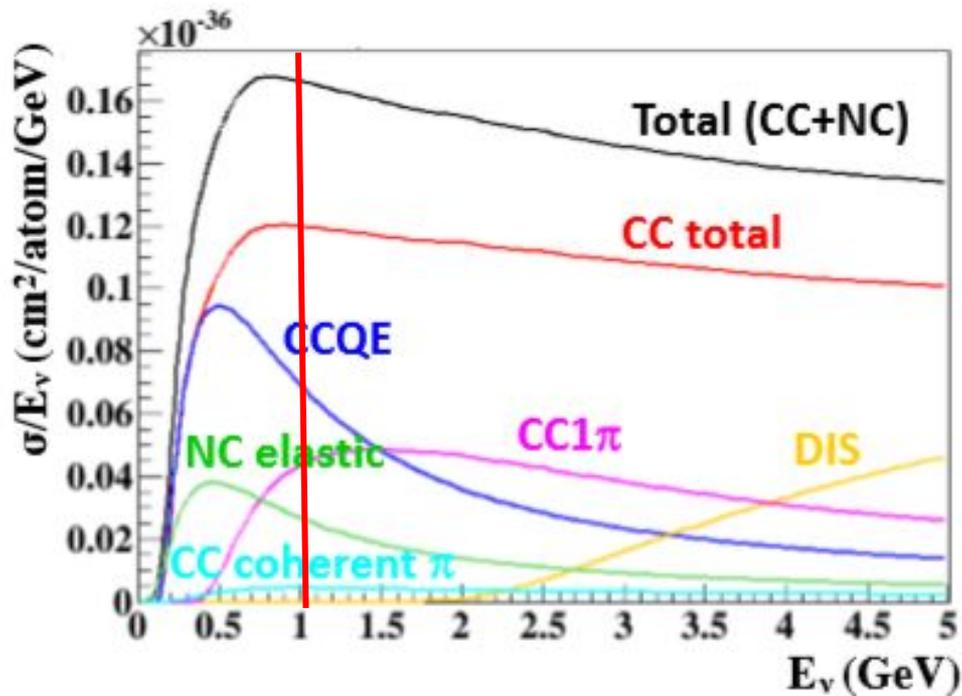


CC coherent π



DIS





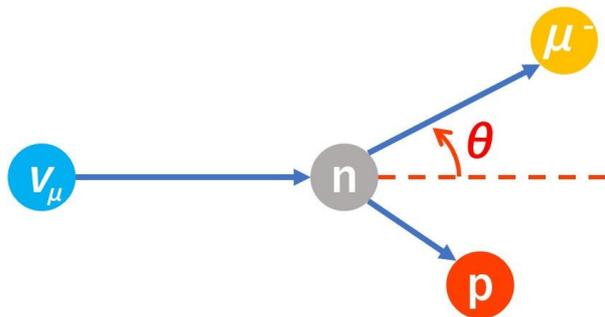
J-PARCニュートリノビームの
エネルギー分布

ピークはおよそ1GeV

CCQE+CC1 π の反応を考える

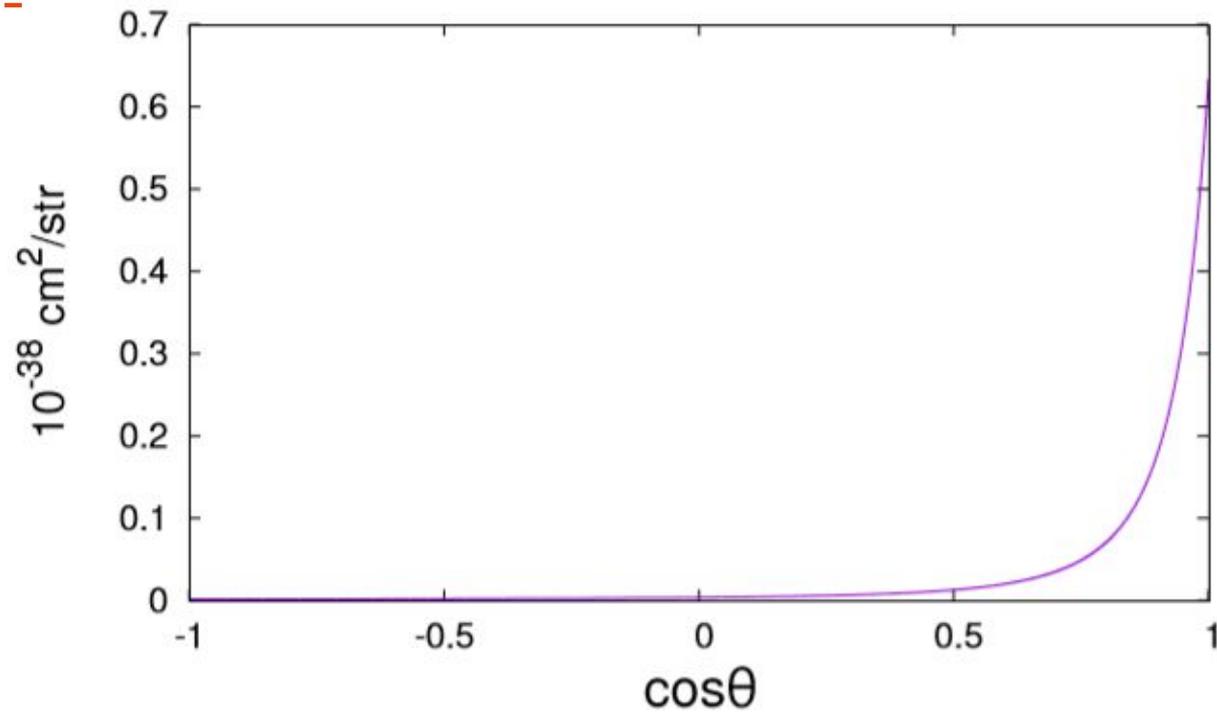
CCQEが主な反応

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

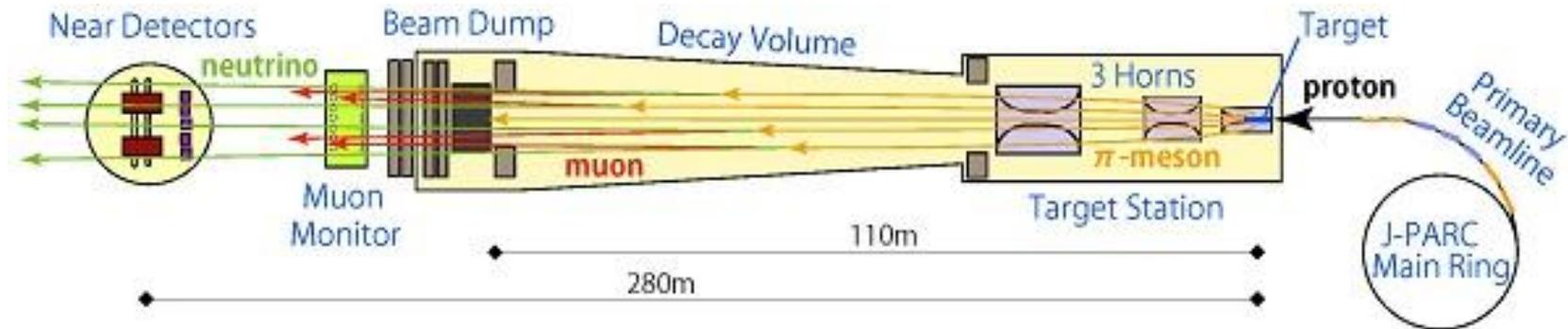
30 GeV
MR

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

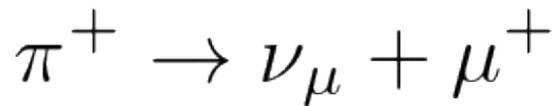
ニュートリノビームの生成



炭素標的に30 GeVの陽子ビームを照射

➡ パイオンが生成

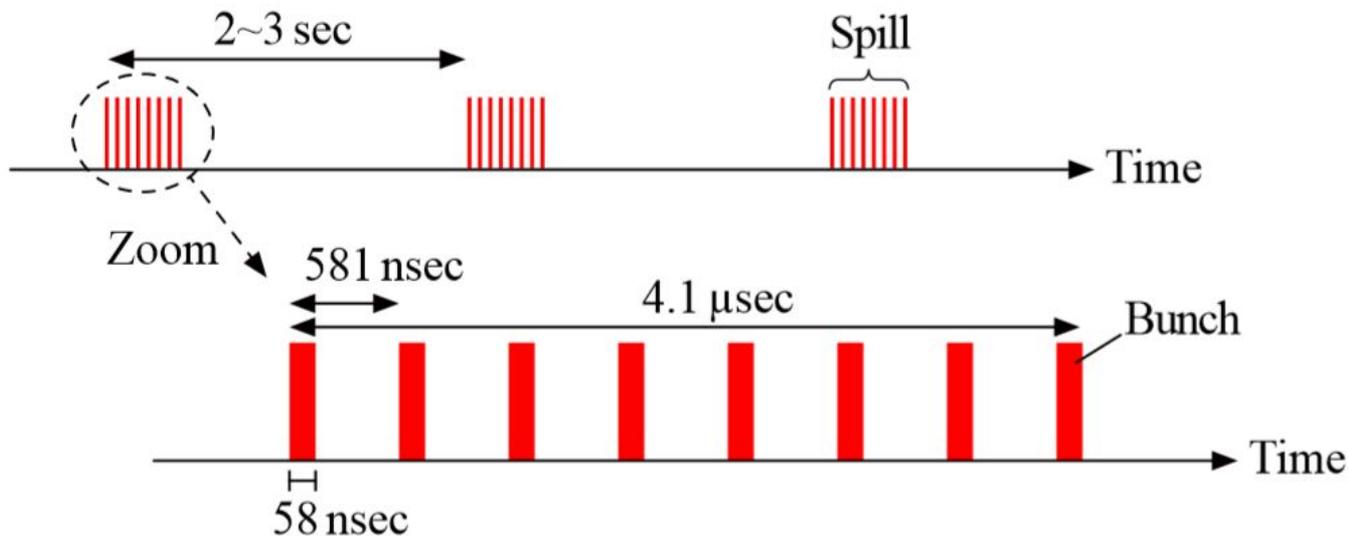
➡ パイオンの崩壊によりニュートリノが生成



ニュートリノビームの構造

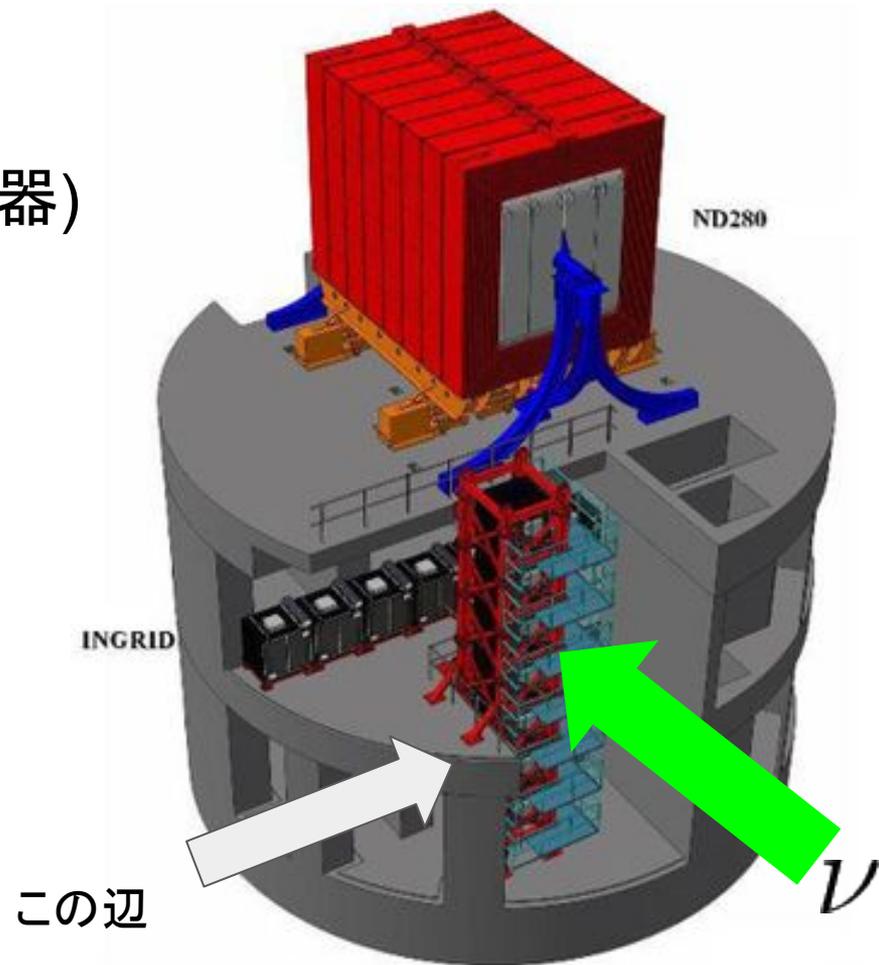
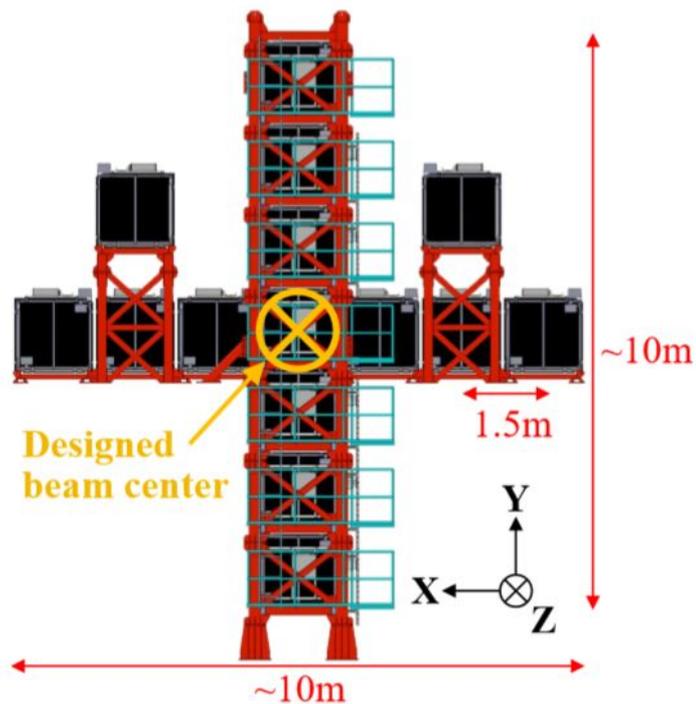
2.48 sec毎に一次陽子ビームがターゲットに打ち込まれる

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



実験場所

既存のINGRID

今回はここ
(2019年度)

ビーム中心

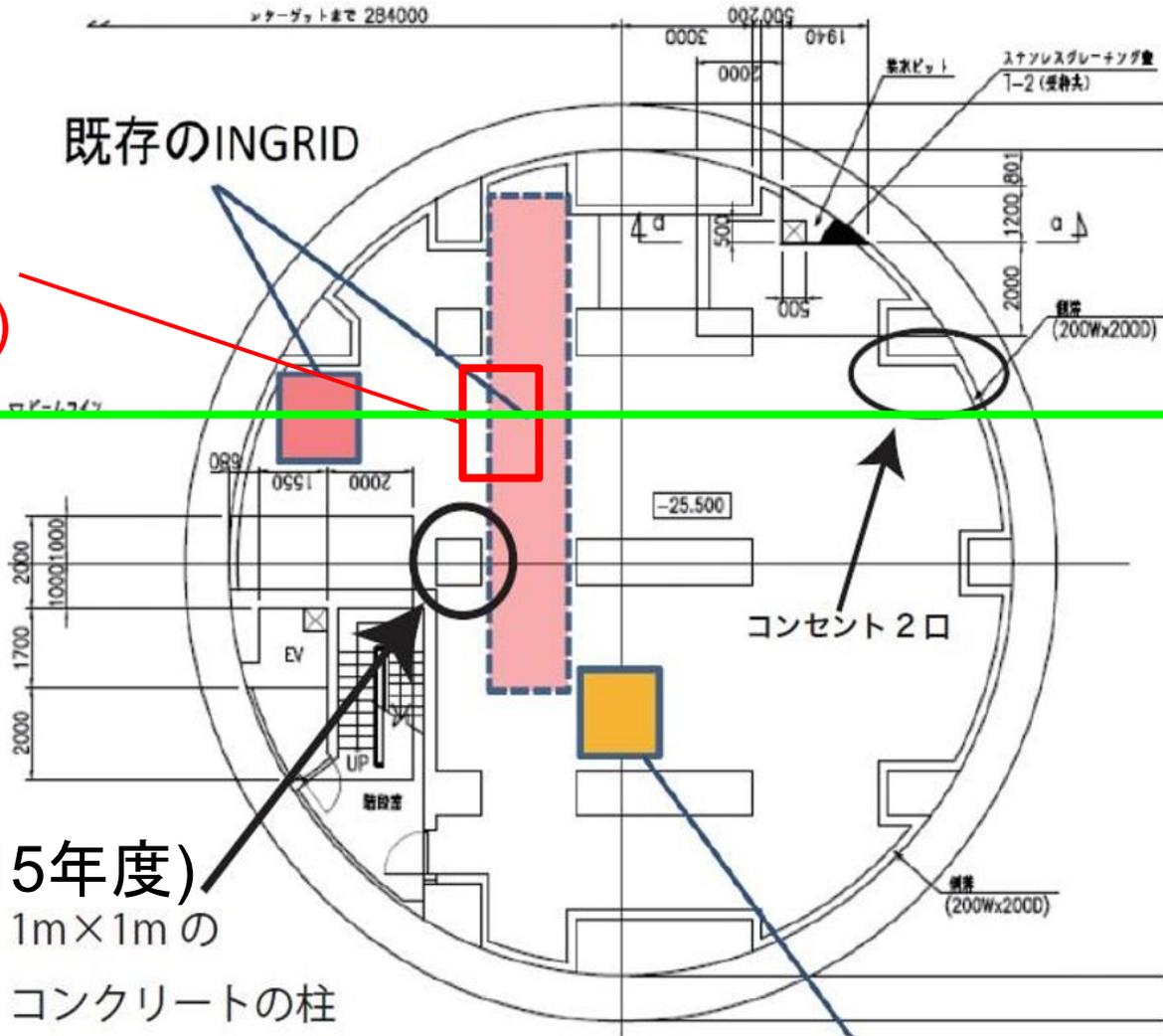


ビーム方向

(2015年度)

1m×1mの

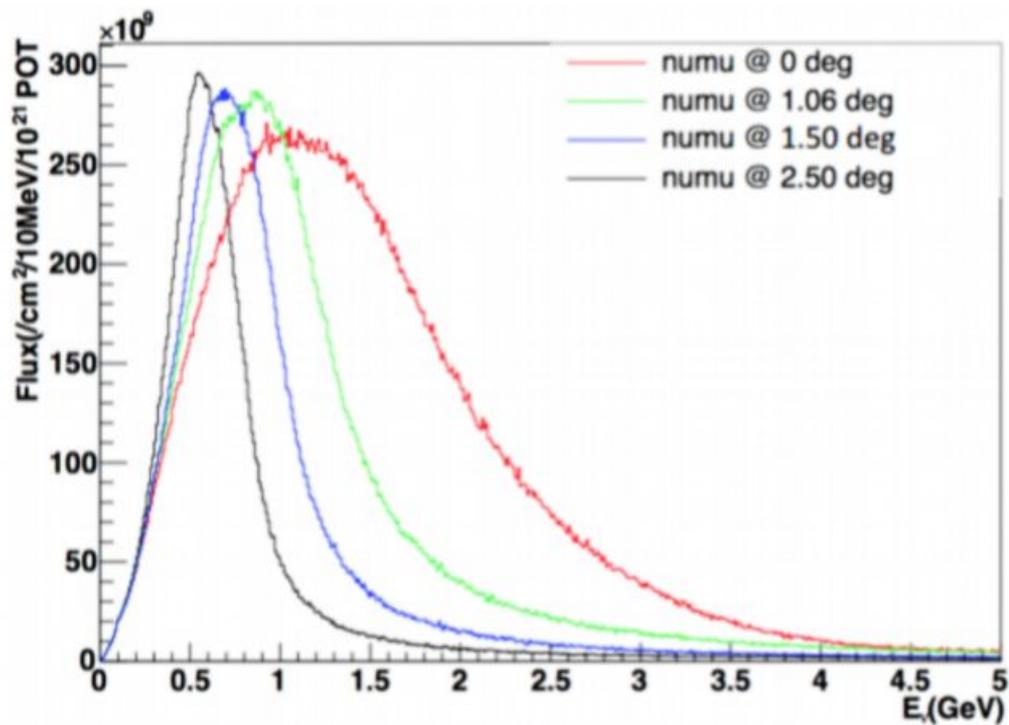
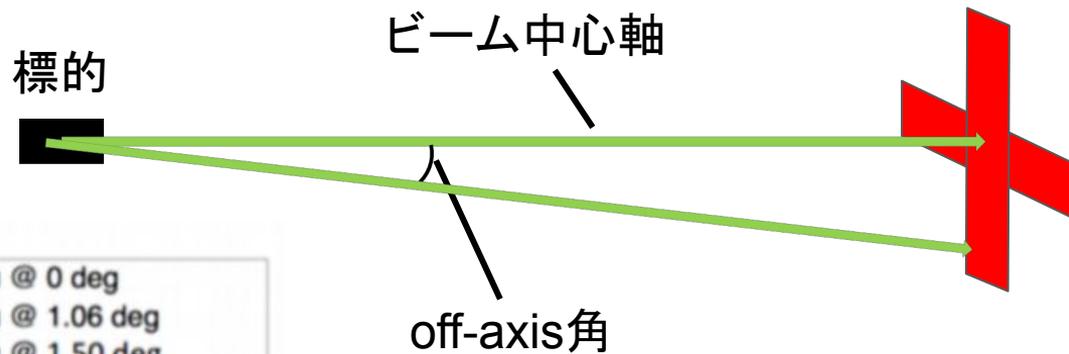
コンクリートの柱



上から見た
配置図

本実験の検出器

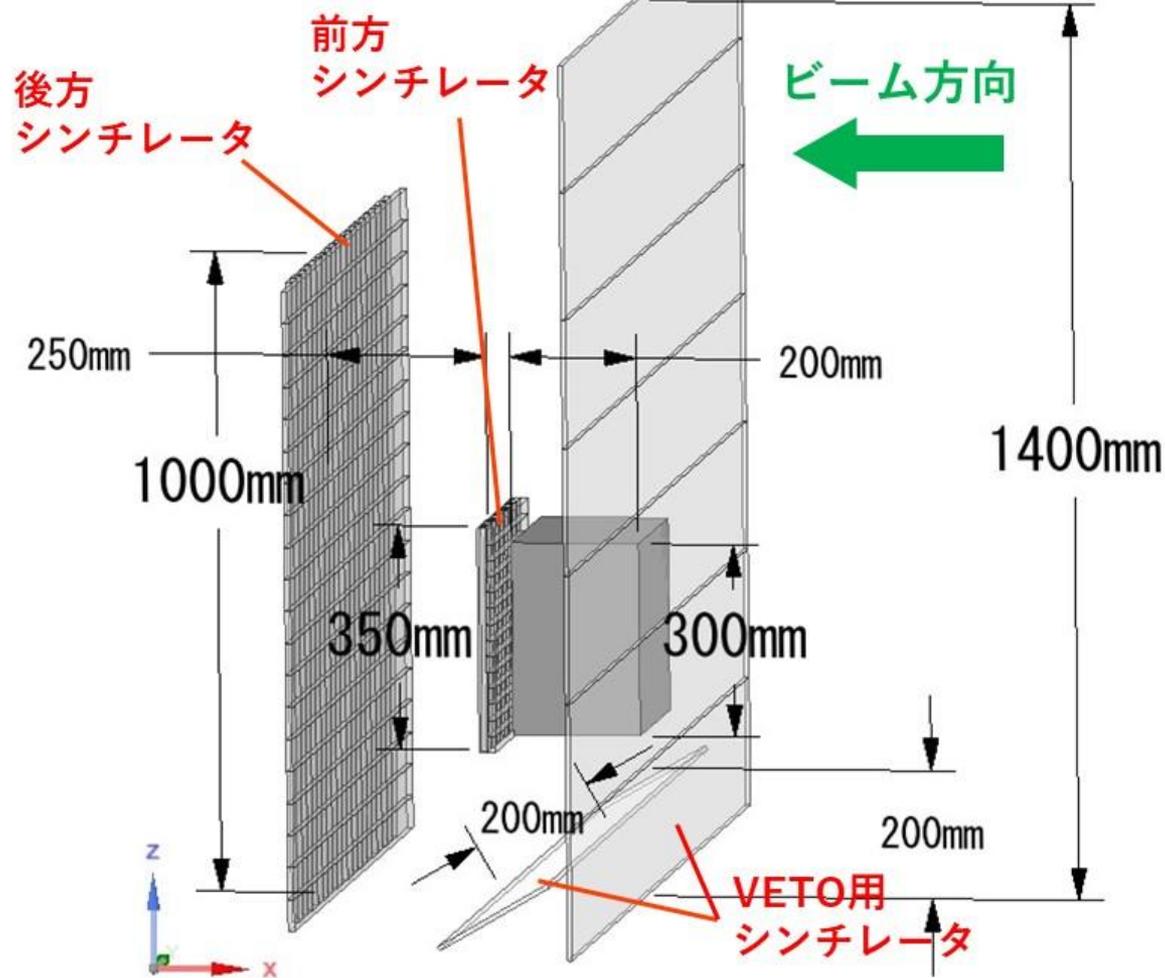
off-axis角 $\sim 1^\circ$



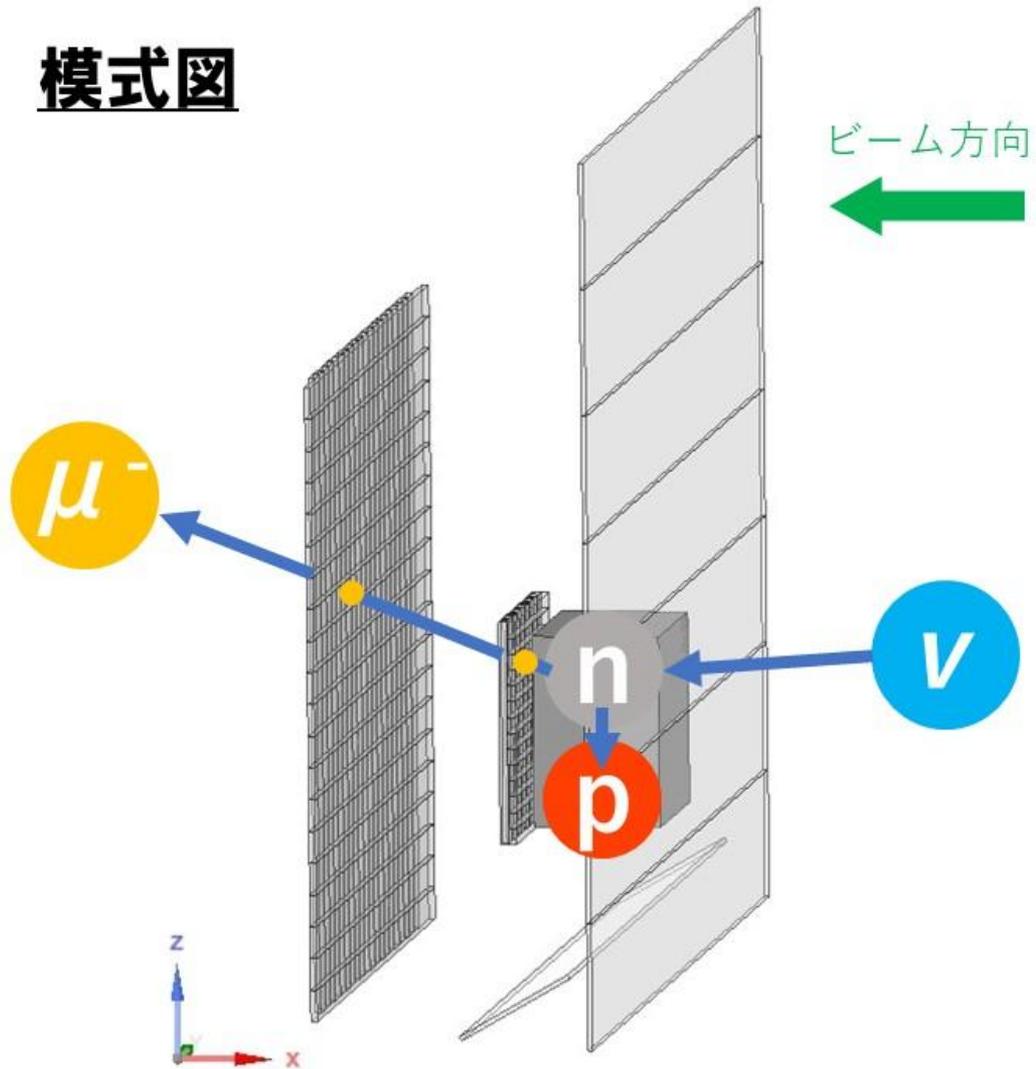
東大 田村さんの修論より

測定装置/機器類及びセットアップ説明

概念図

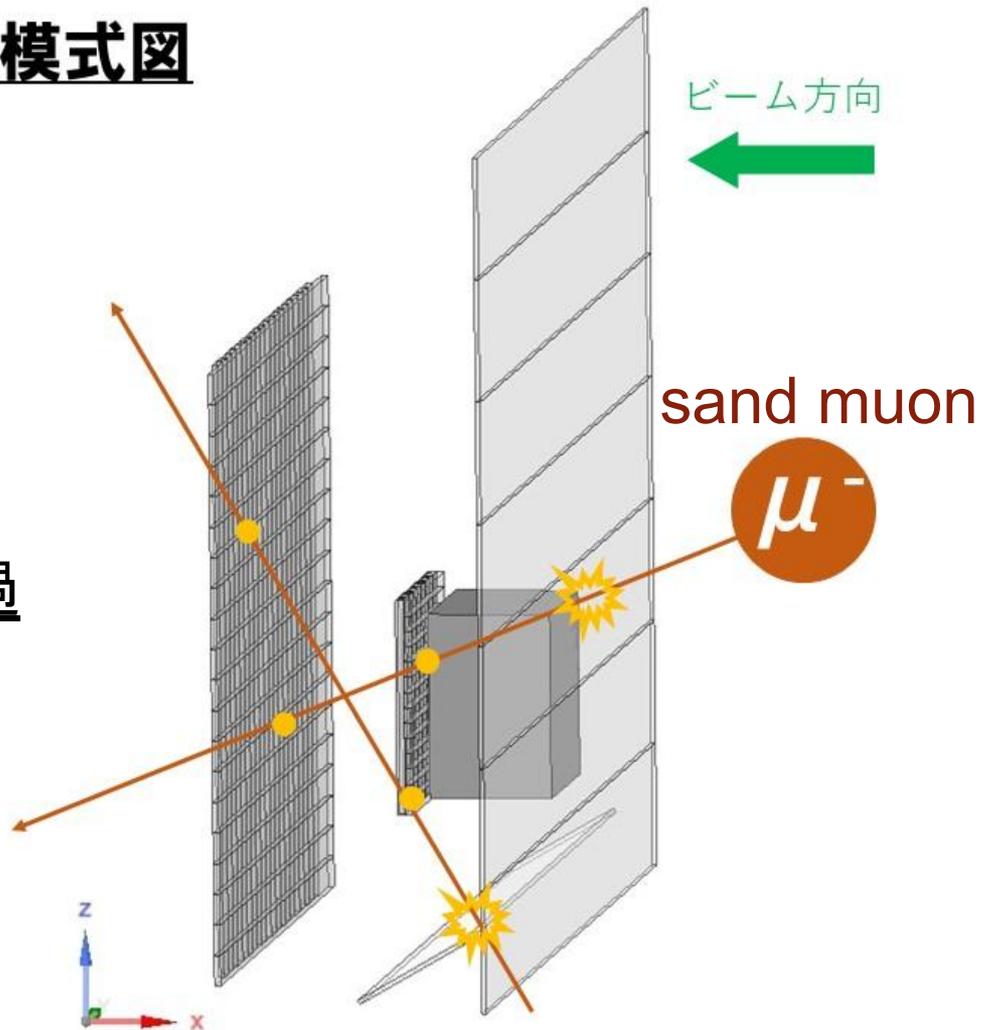


模式図

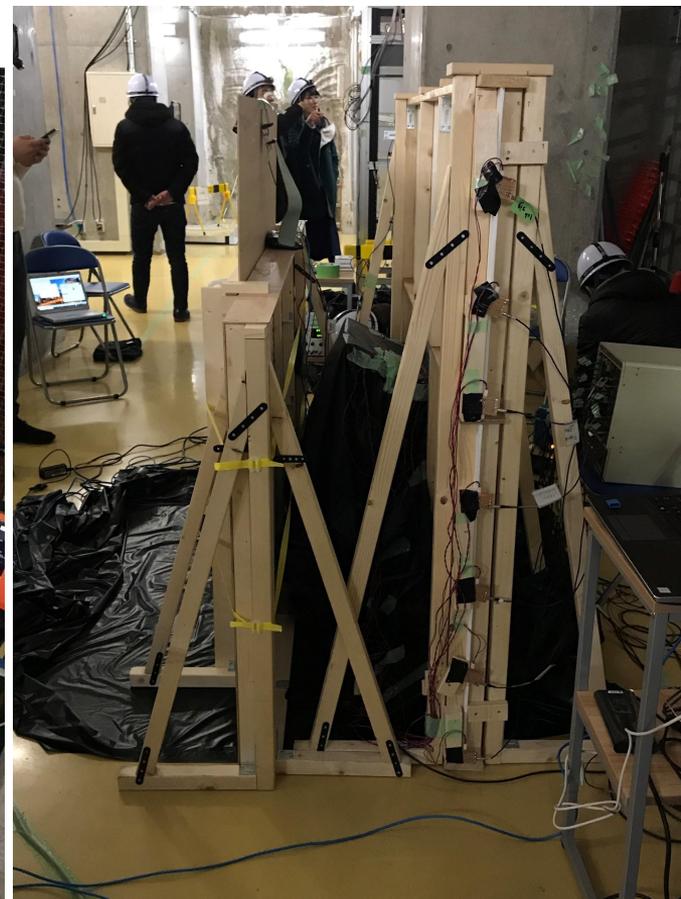


模式図

幾何的には
必ずVETOを通過



実際に組み立てた状態

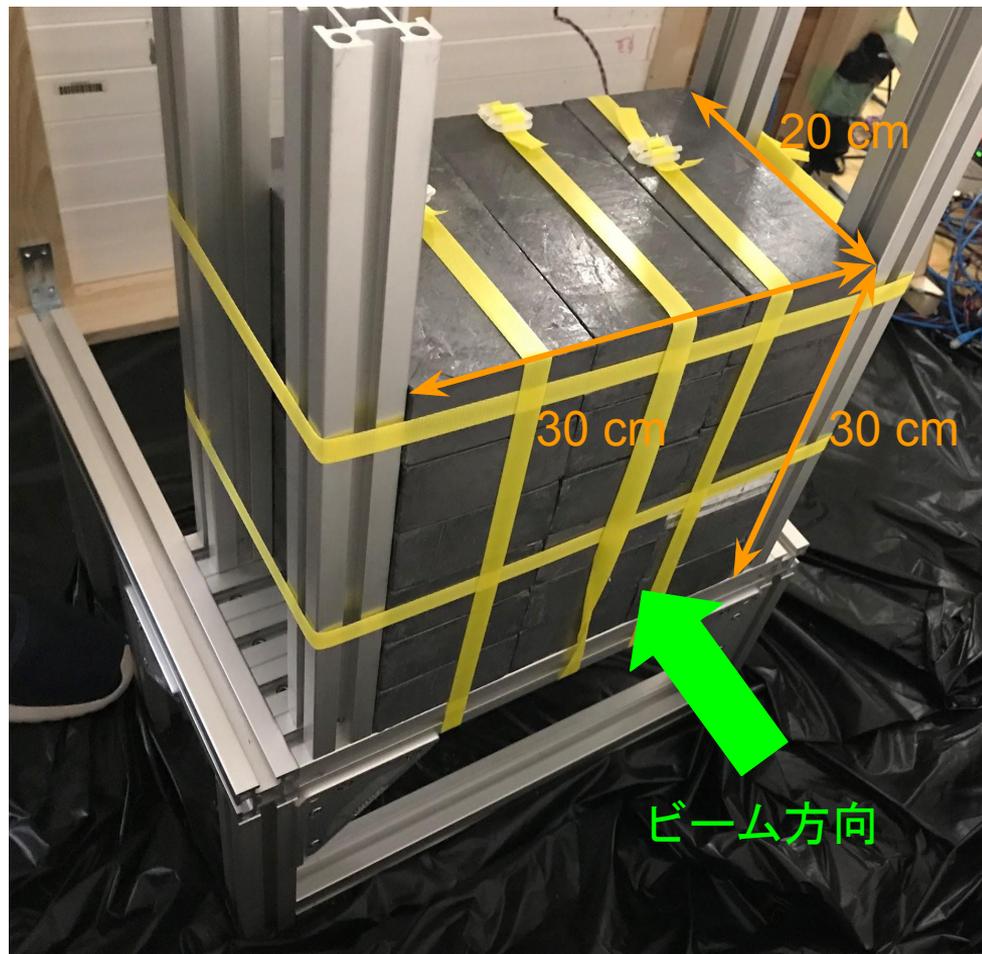


ターゲット

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

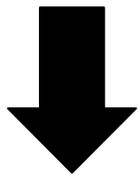
ビーム方向: 20 cm

ビーム垂直方向: $30 \times 30 \text{ cm}^2$

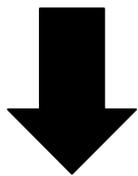


検出器

プラスチックシンチレータ

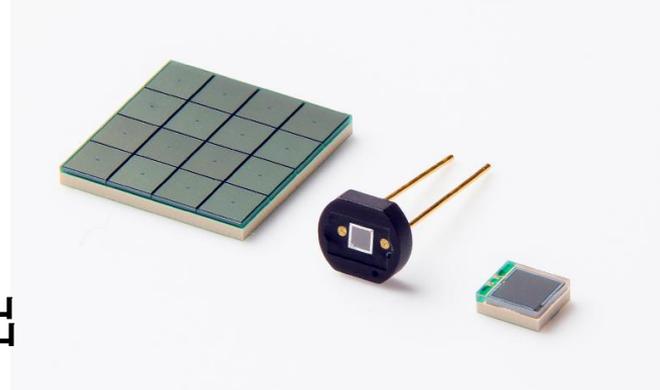
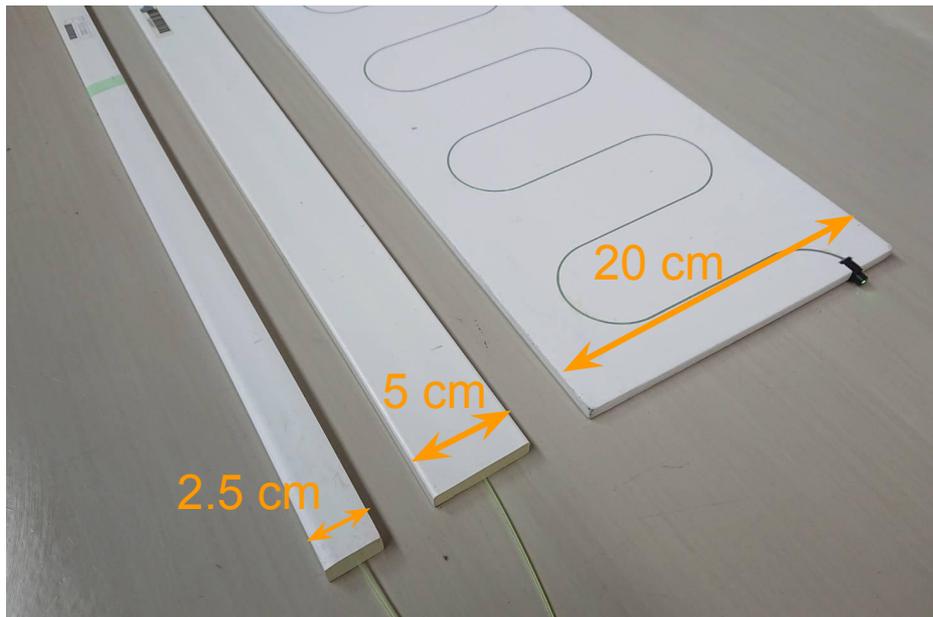


波長変換ファイバー

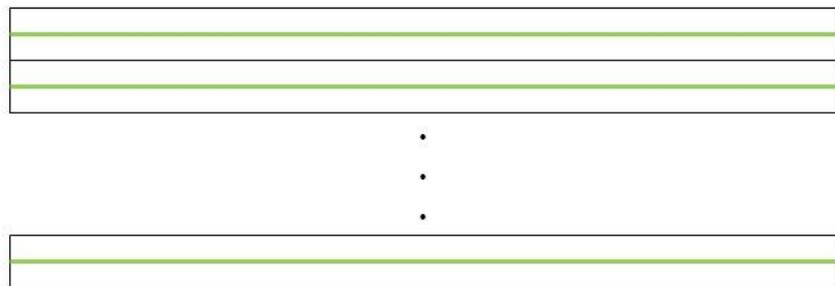
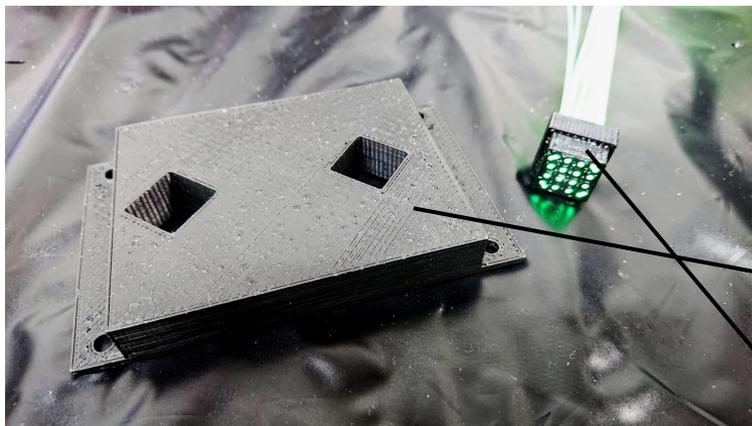
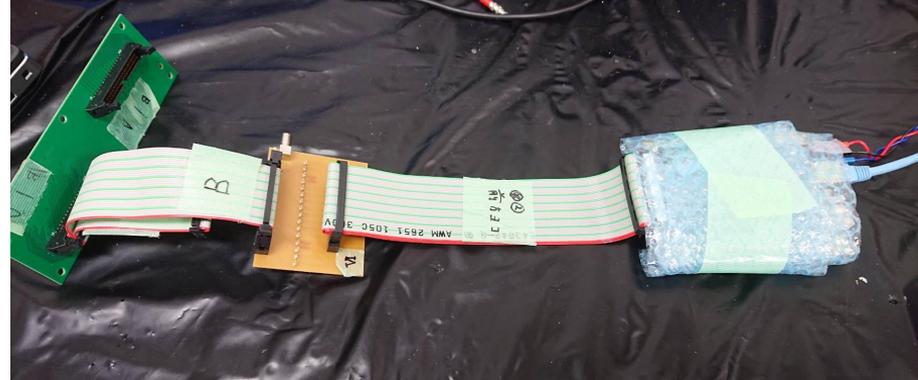


MPPC

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)



シンチレータ × 16 (or 14)
後方 前方

光ファイバー

治具
クッキー

16ch MPPC

フラットケーブル

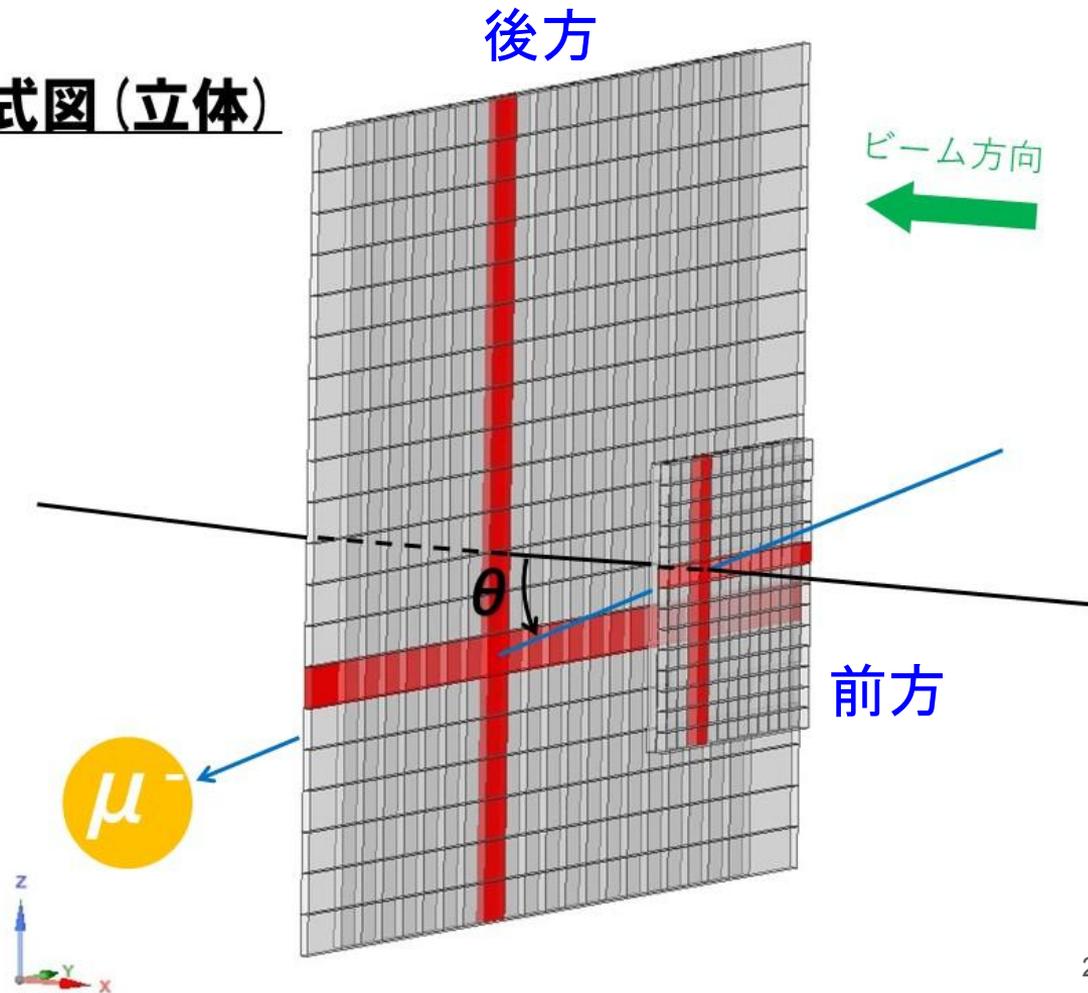
Hiramoto
ボード

トラッキング デザイン

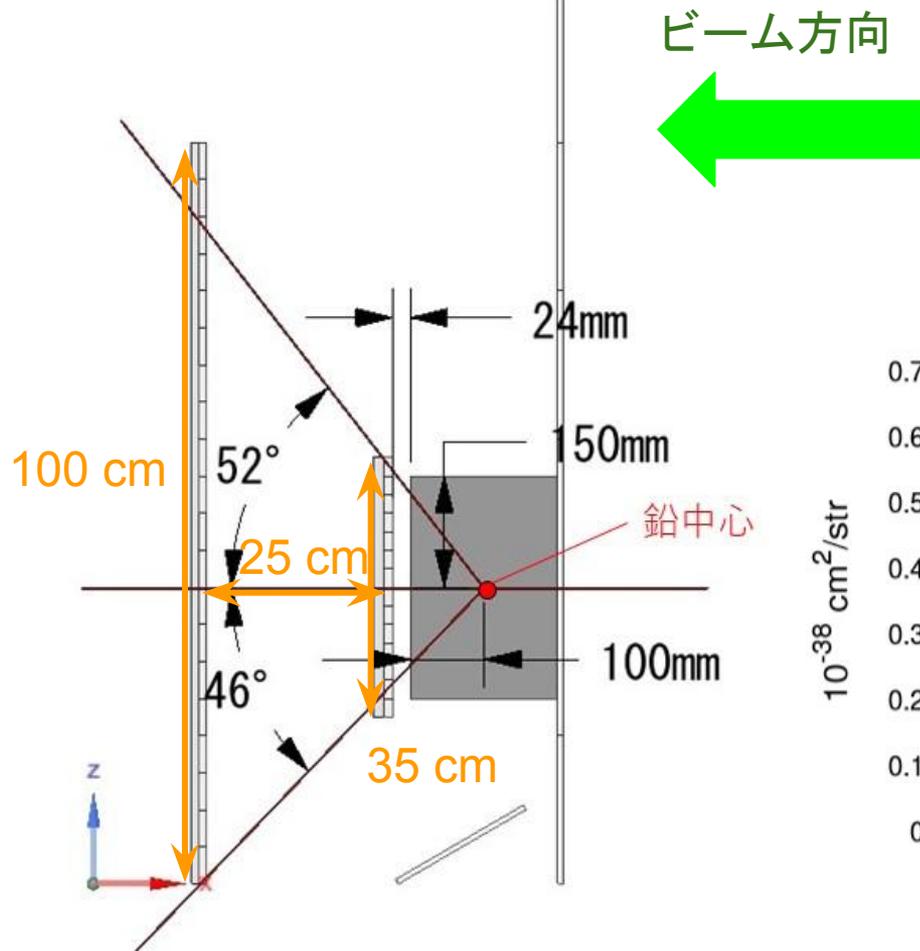
シンチレータを
縦横に並べる

2層, 計4枚を
ミュオンが貫通した場
合の角度を測定

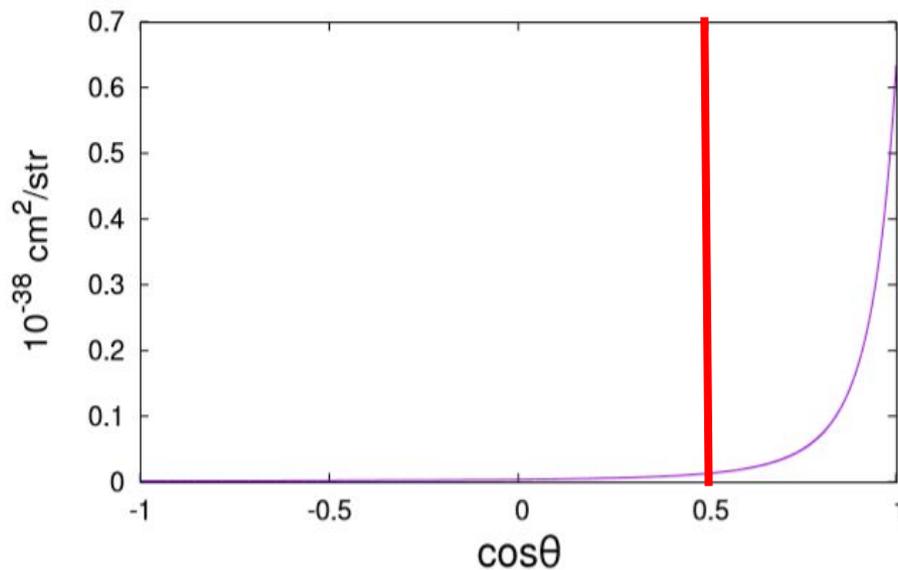
模式図 (立体)



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

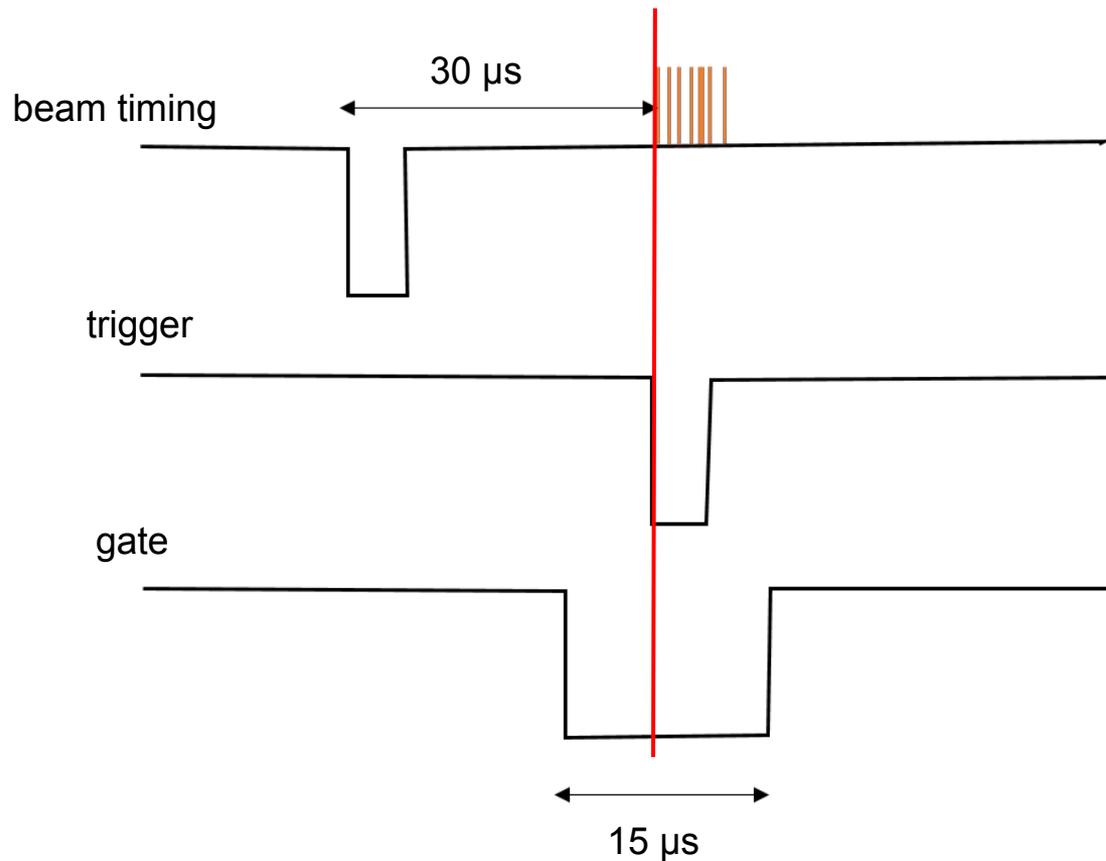
8ch

→ VETOに用いた

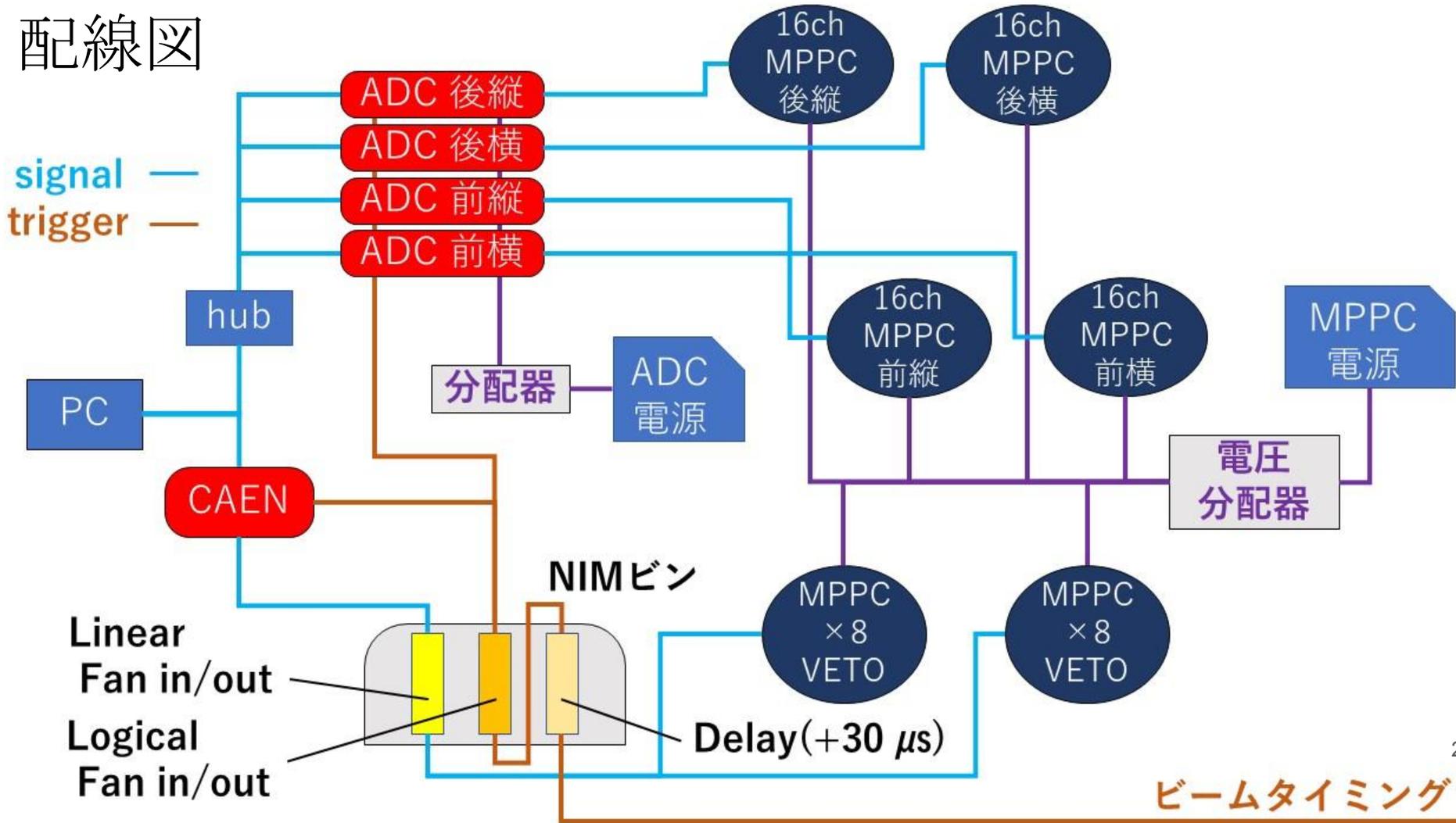


波形の記録

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



配線図





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、

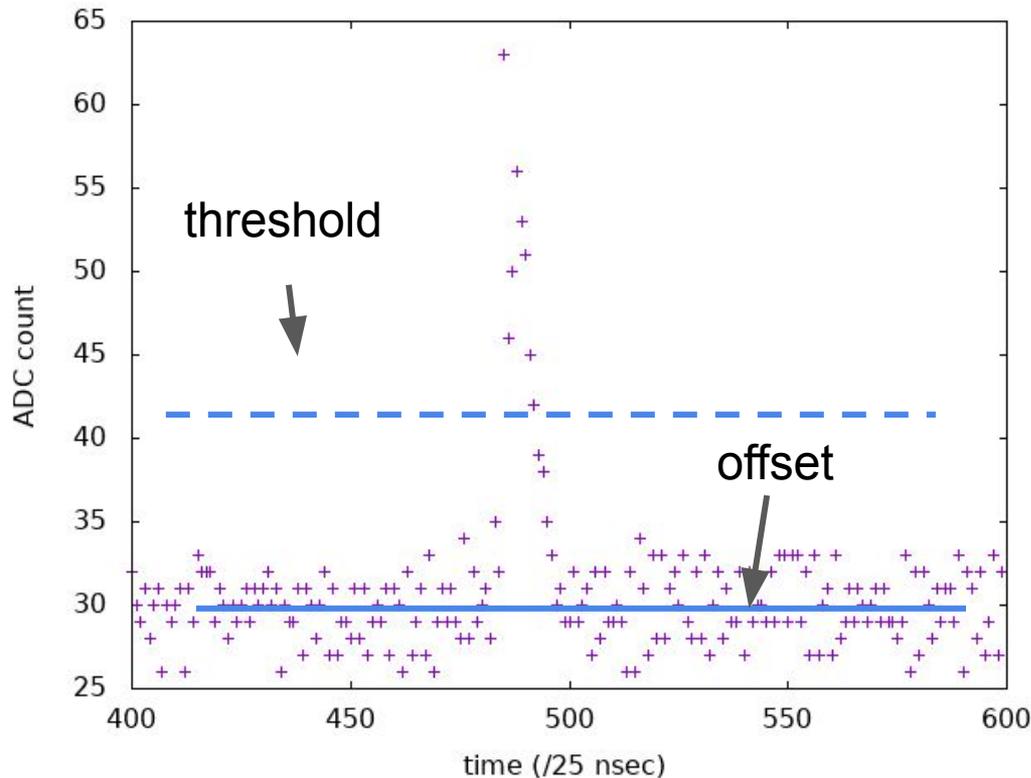
平均515 kWのビームパワーで

29.5時間(42882 spills)データ取得を行い、

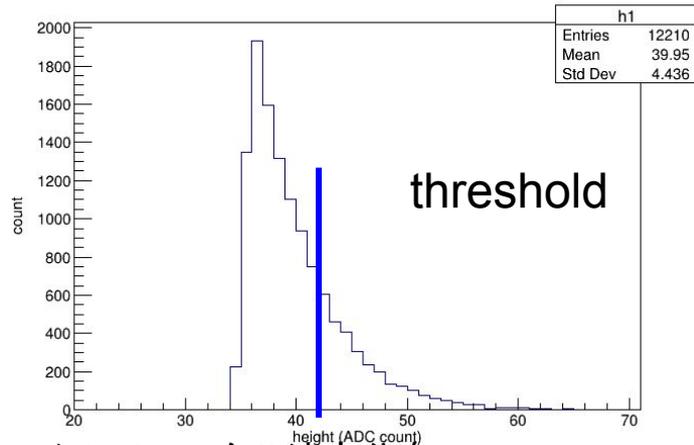
1.14×10^{19} proton on target 相当の

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

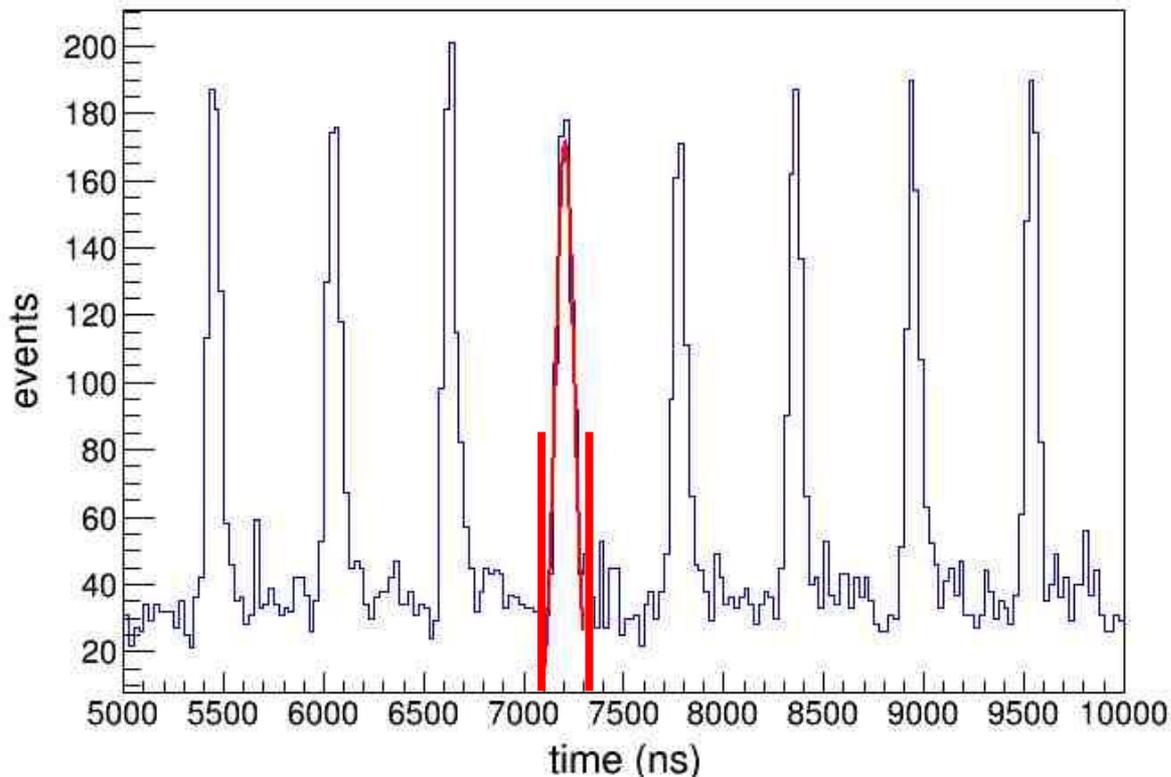
bunch cut

各bunchを
Gaussian+offsetで
フィッティング

→前方・後方: 2σ

Veto : 4σ

内をそのbunchの
イベントと判定

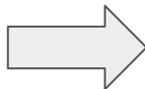


信号観測の時間分布(後方での一例)
8 bunchに対応したピークを確認

coincidence

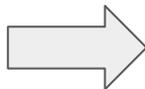
同一spill、同一bunchの反応 ⇒ 同一イベントと識別

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

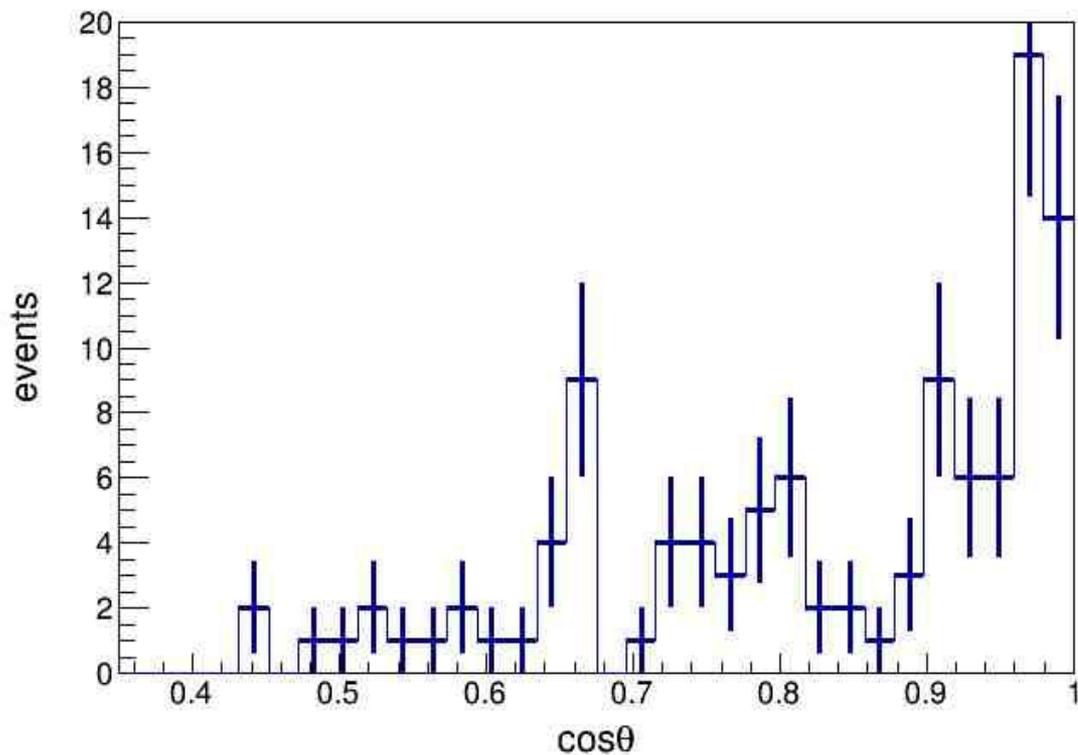
572 events

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

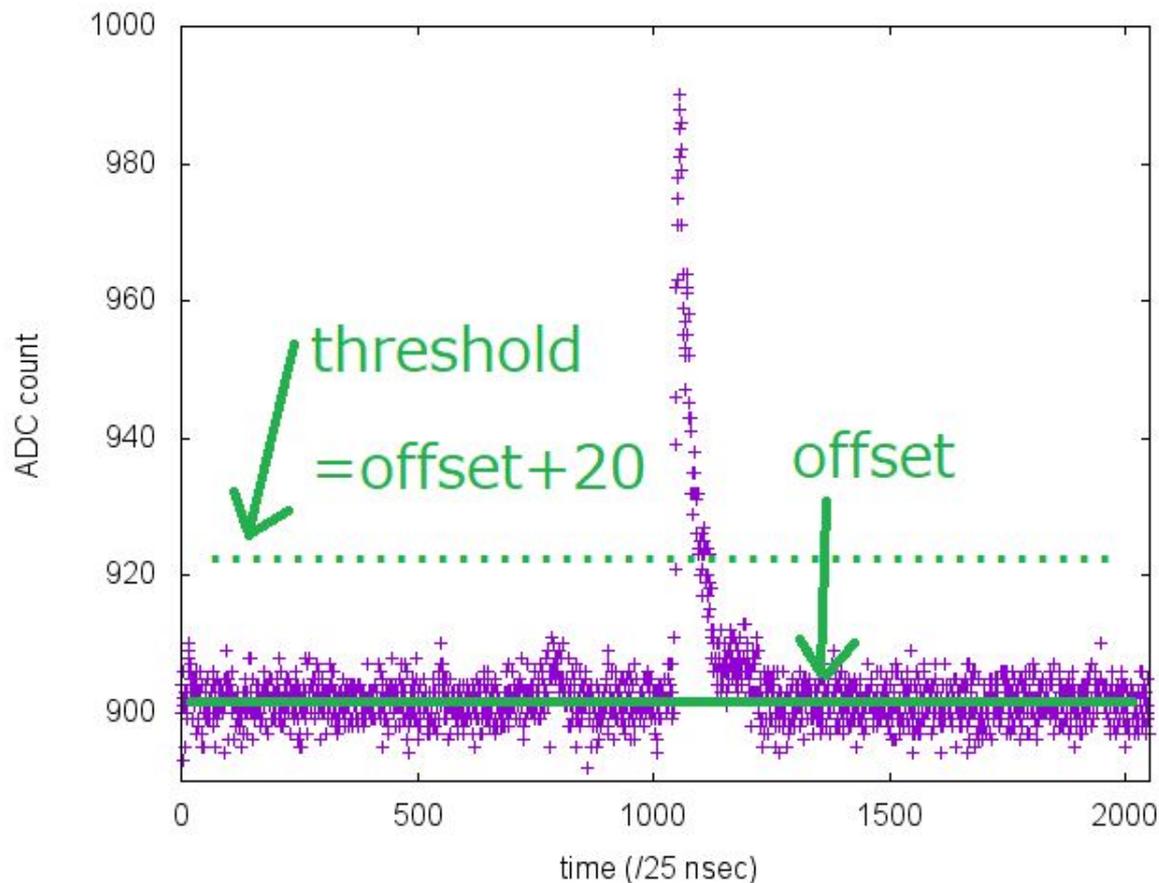
- ・Vetoの検出効率
- ・偶発同時イベント数

Veto thresholdの設定

生波形を見て

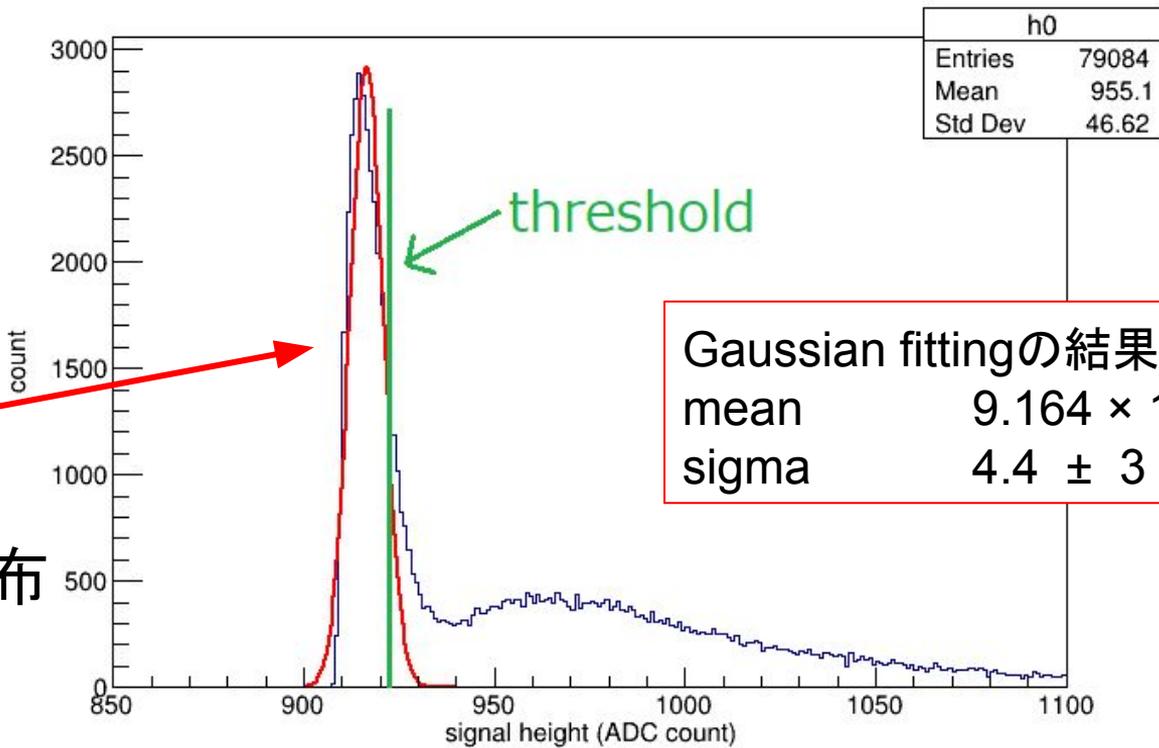
$\text{threshold} = \text{Offset} + 20$

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 σ 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

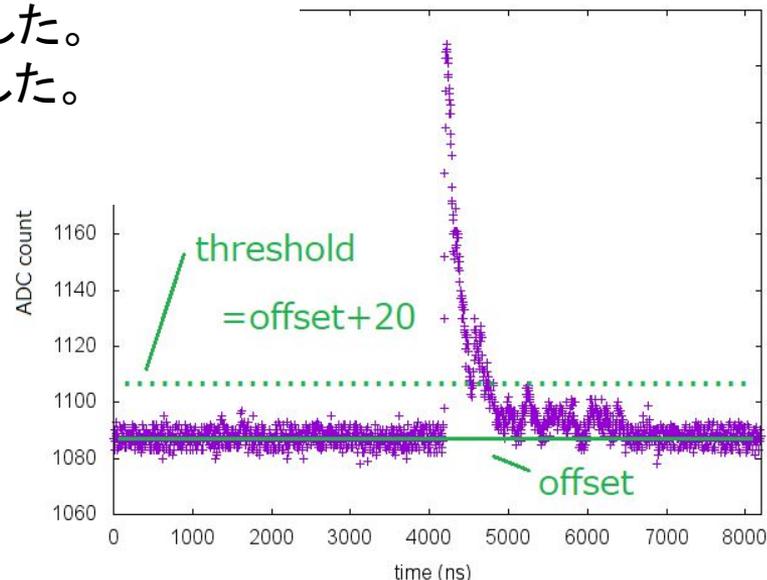
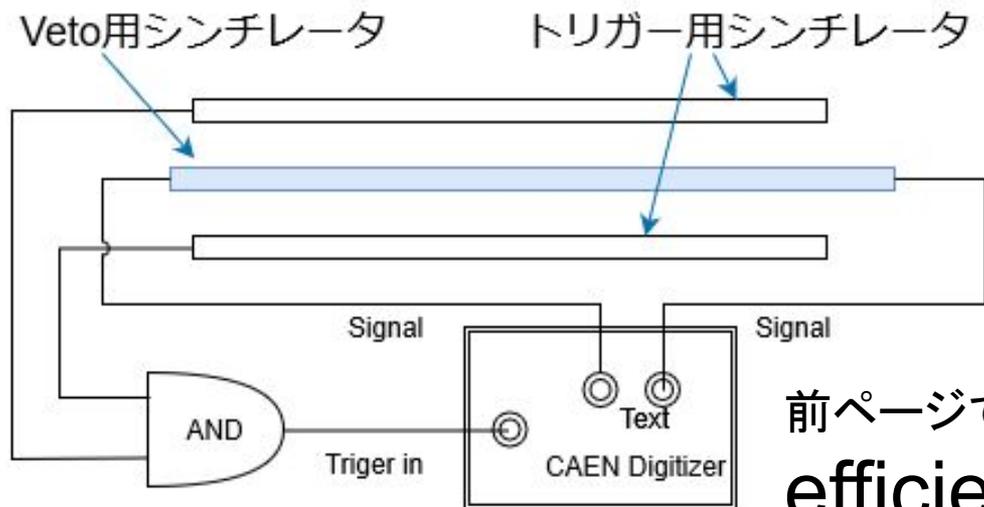
$$0.16 \times 0.3 = 0.05 \text{ 程度}$$

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

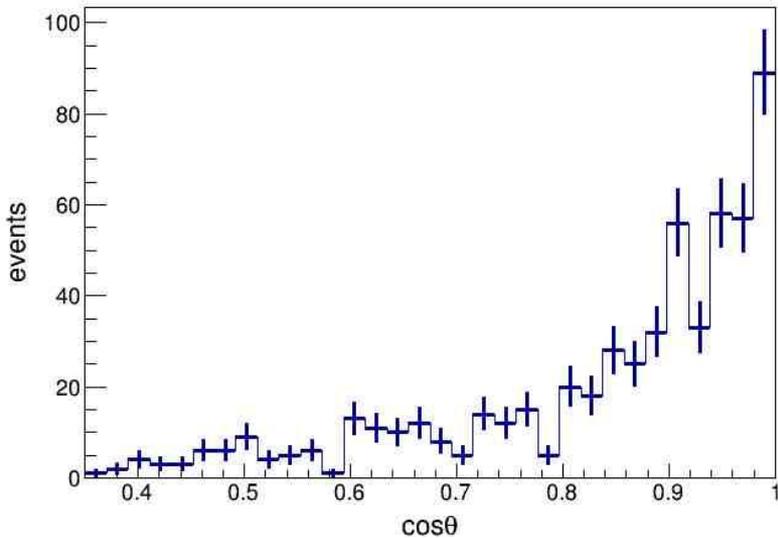
偶発的なcoincidence: -1.50 events

→ ニュートリノイベント数: **102**

(* 統計誤差付きで、 102 ± 10)

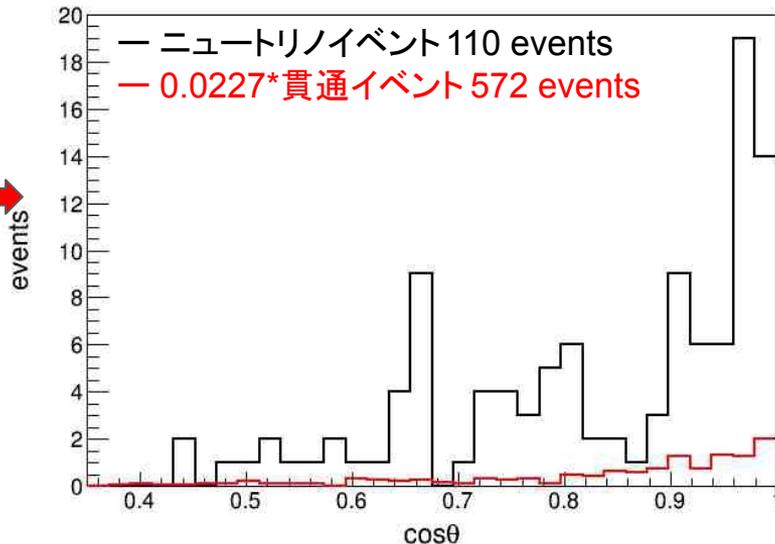
角度分布

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

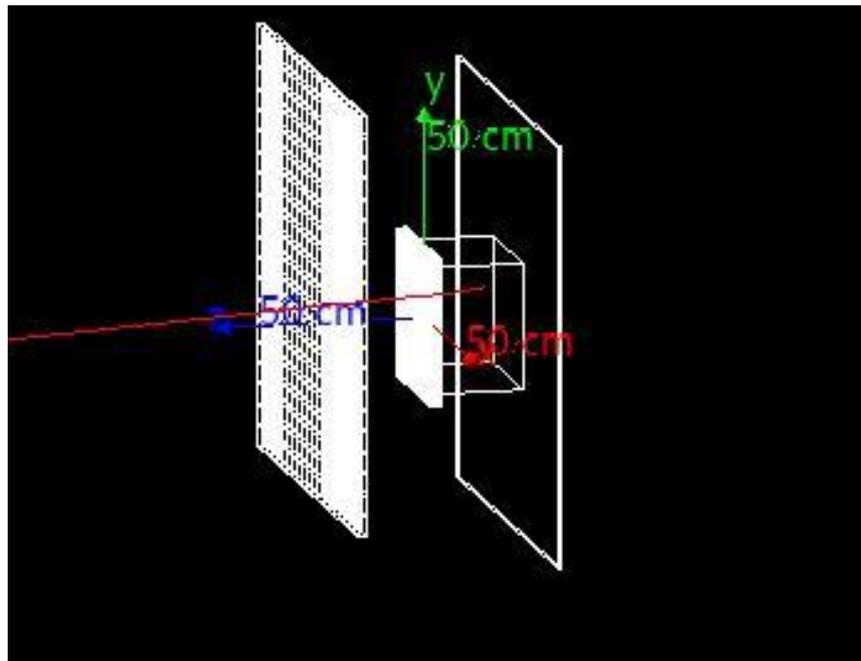
WAGASCI実験(OA角 1°)のもの

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



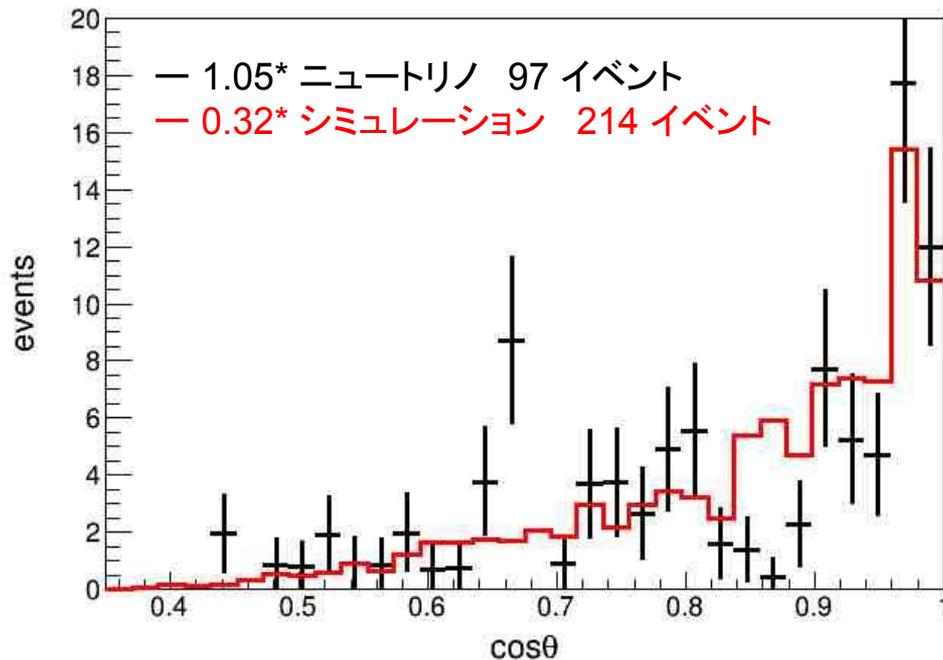
Geant4 によるシミュレーションの様子

シミュレーションとの比較

【イベント数】

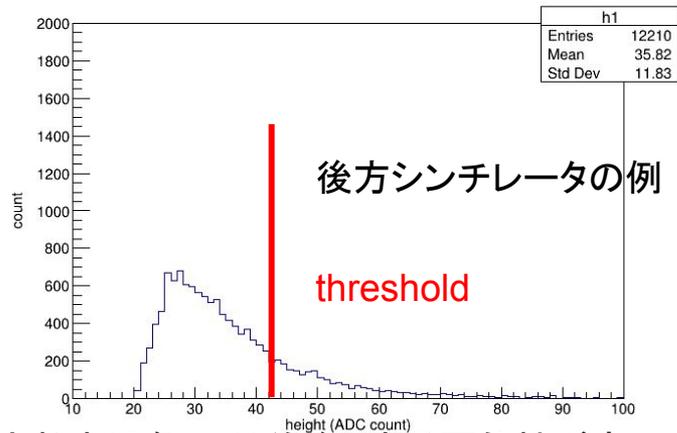
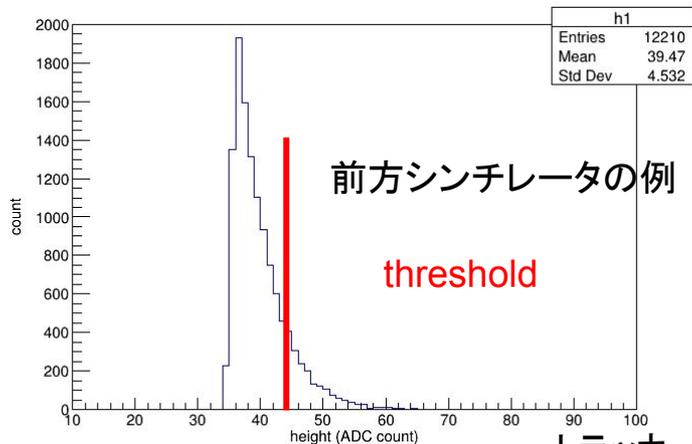
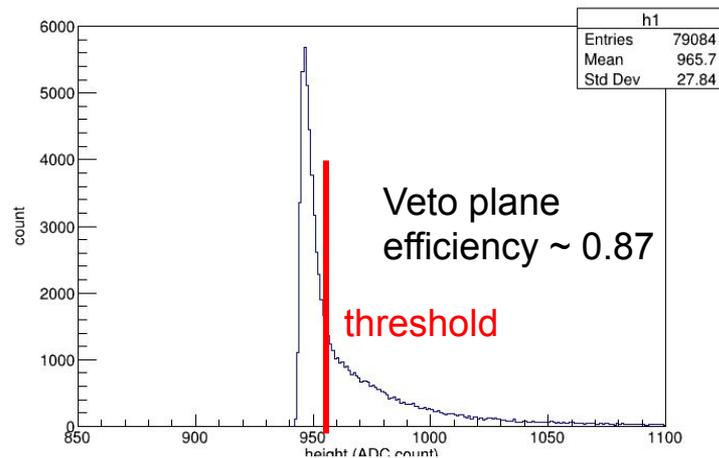
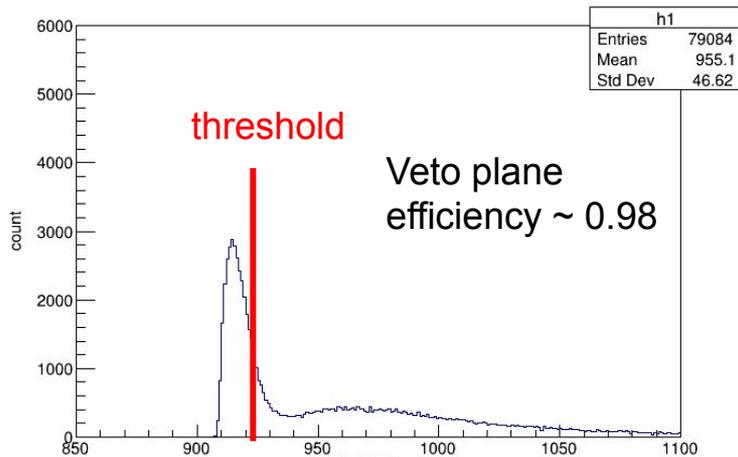
シミュレーション結果	実験結果
213.89	102 ± 10

【角度分布】



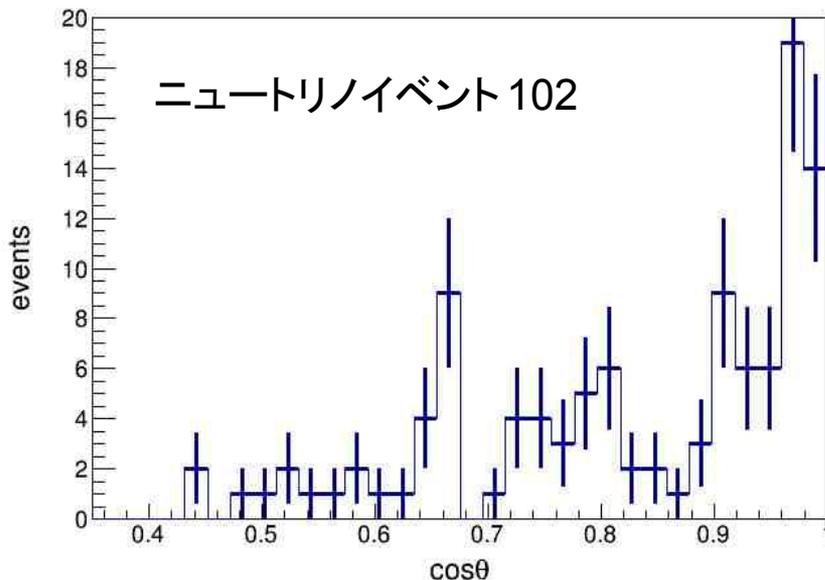
前方・後方シンチレータの反応効率の示唆

波高分布



トラッカーの反応効率は各 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.

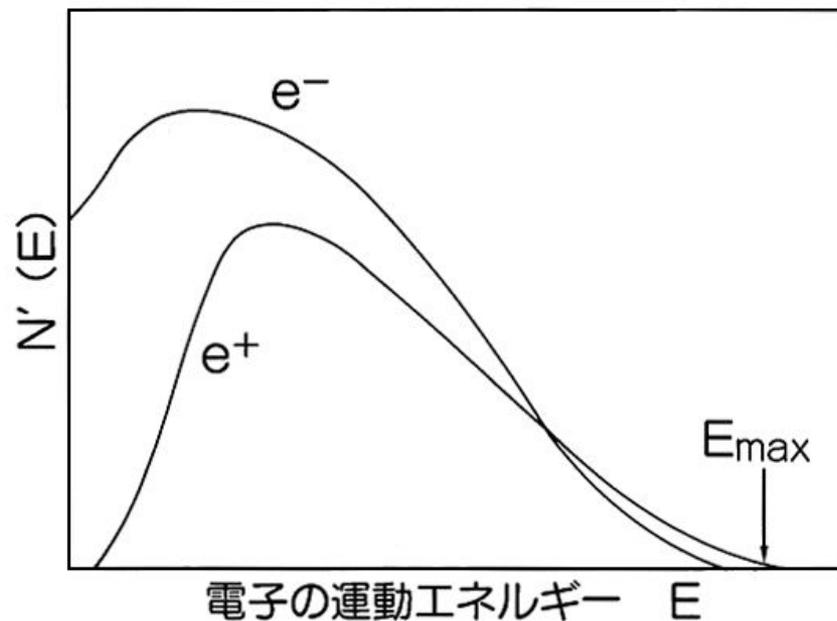
本当にありがとうございました！

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



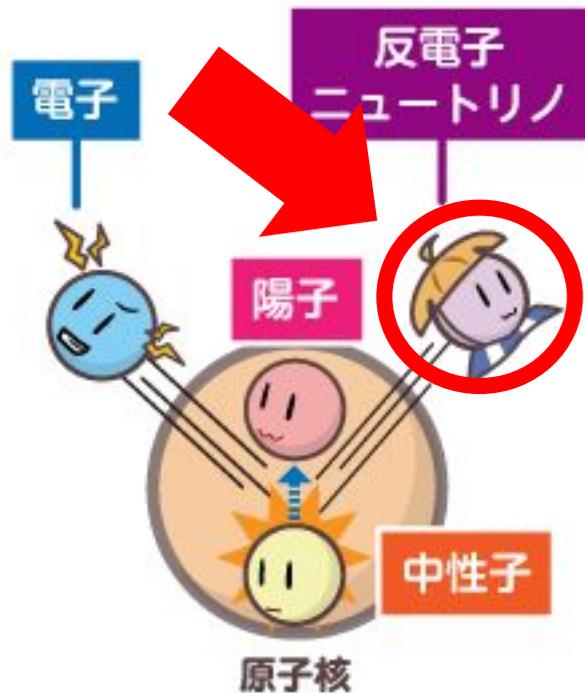
エネルギー保存則
が破れた



図1 β 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 μsec 前と100 msec前にパルス信号

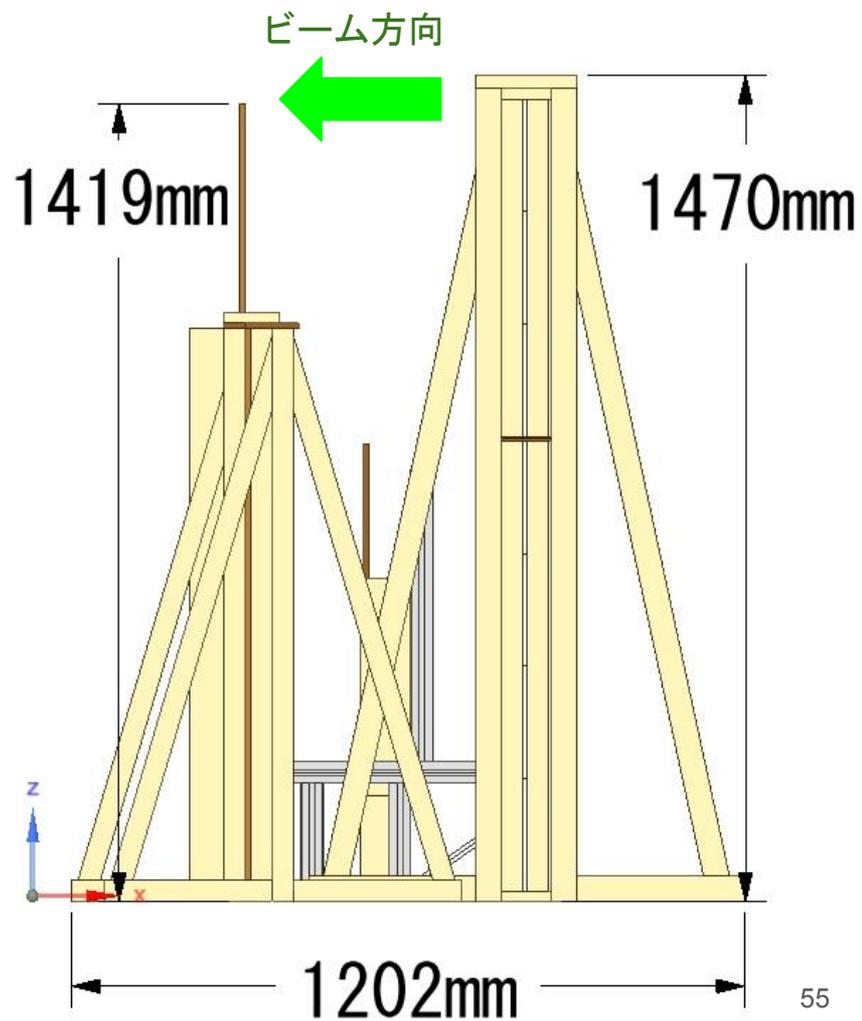
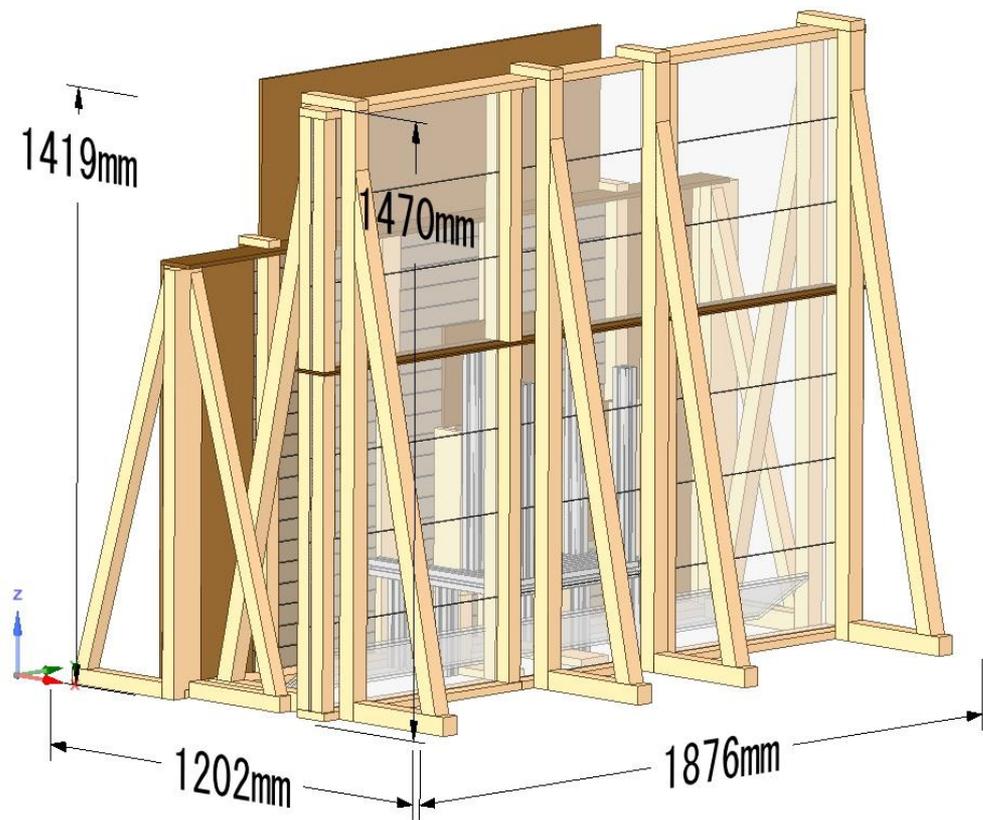
➡ 30 μsec 前の信号をトリガーとして使用

ビーム強度

単位 POT (Proton on Target)

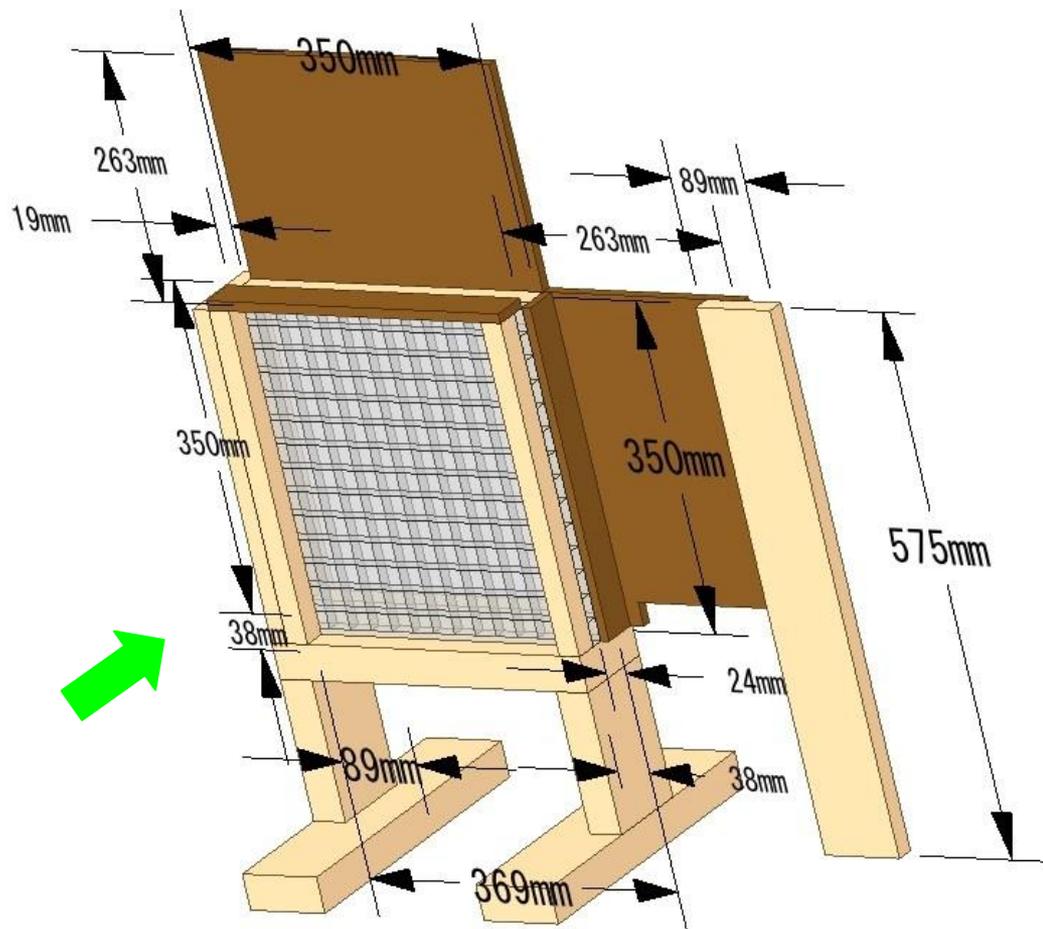
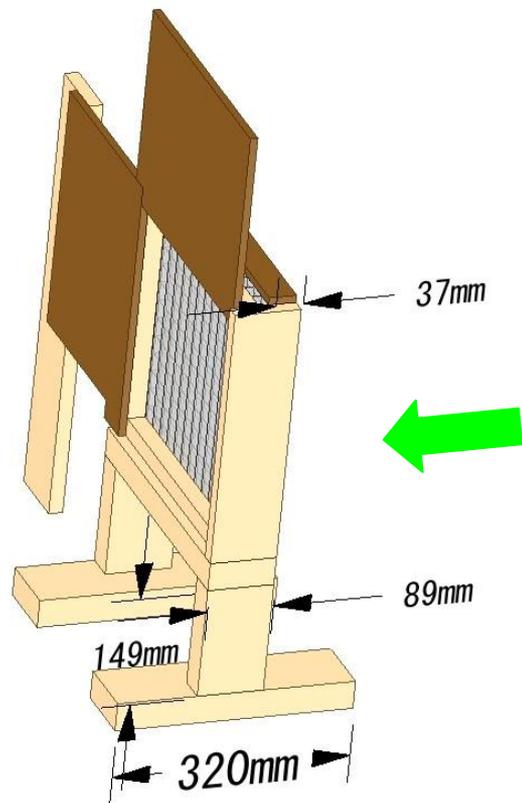
$$\frac{500 \text{ kW} \times 2.48 \text{ sec/spill}}{30 \text{ GeV/POT}} \sim 2.6 \times 10^{14} \text{ POT/spill}$$

木枠付き全体図



実験装置分解詳細図

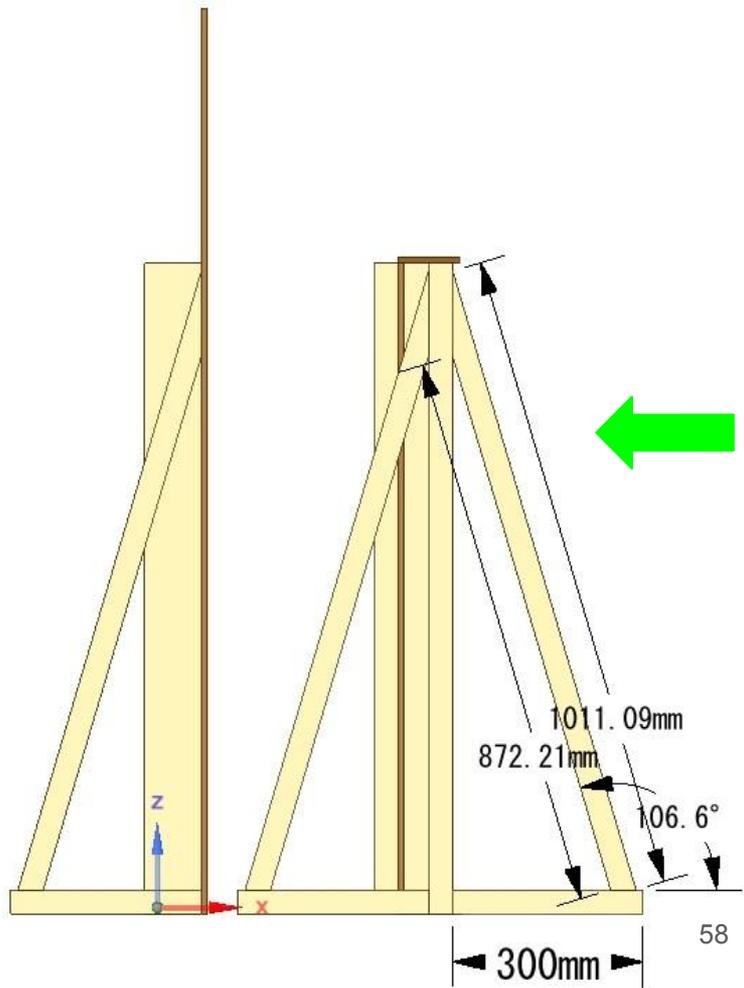
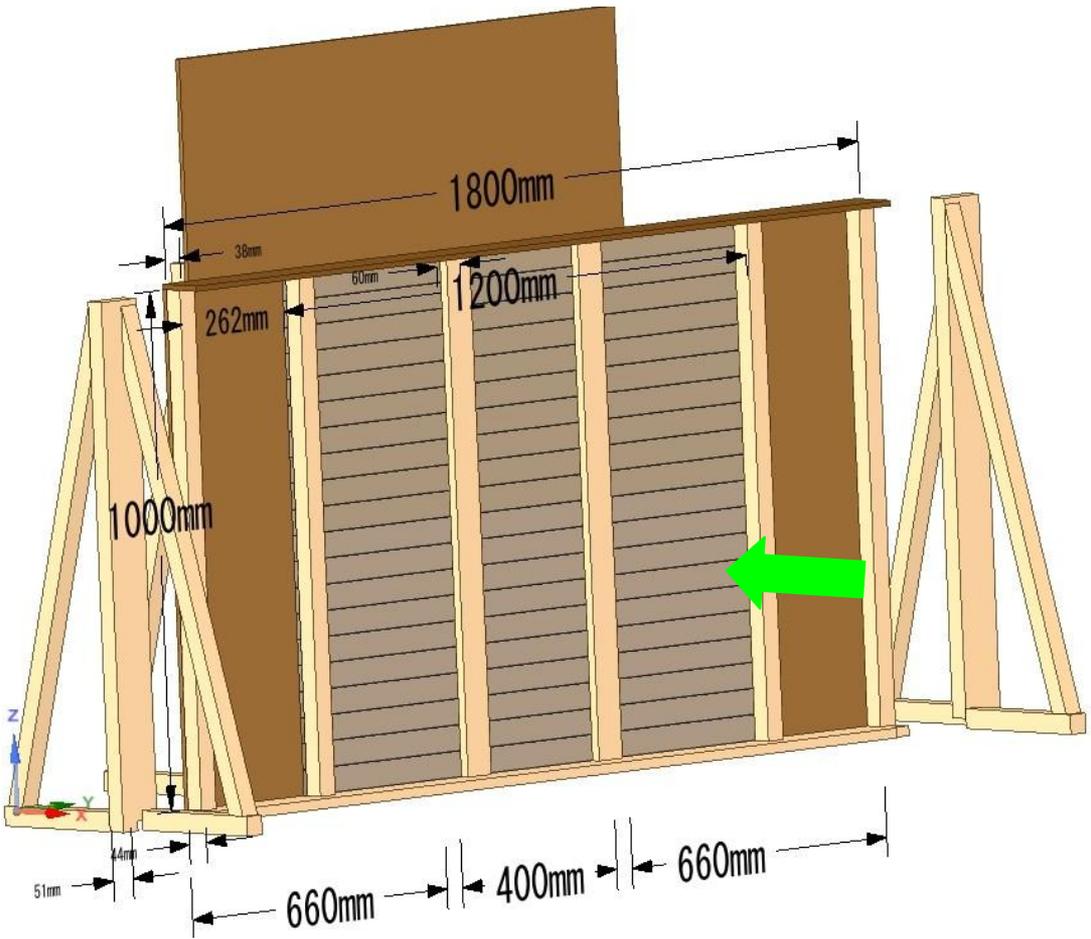
・ 前方シンチレータ



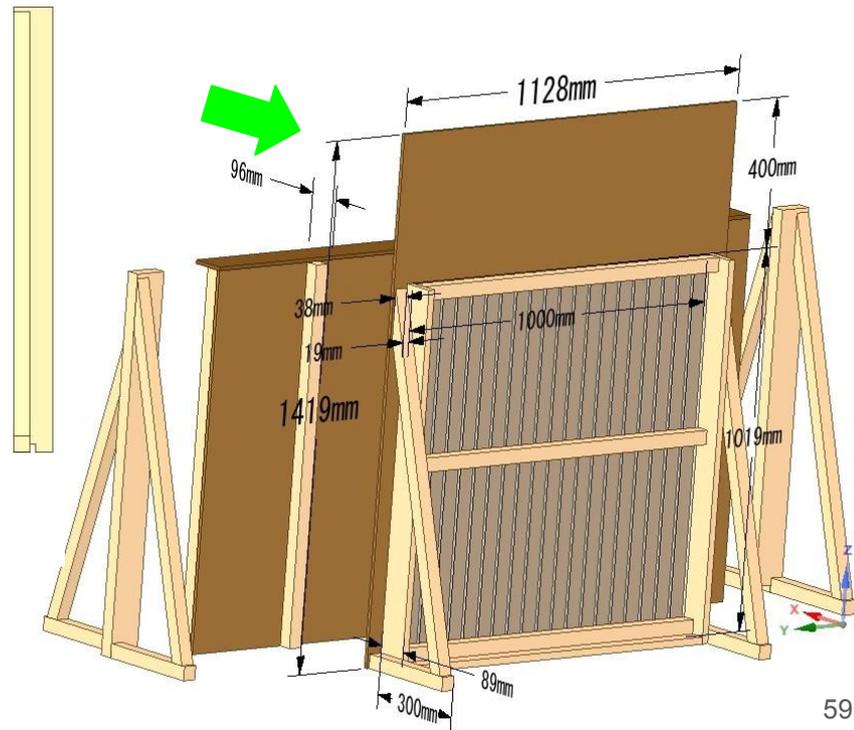
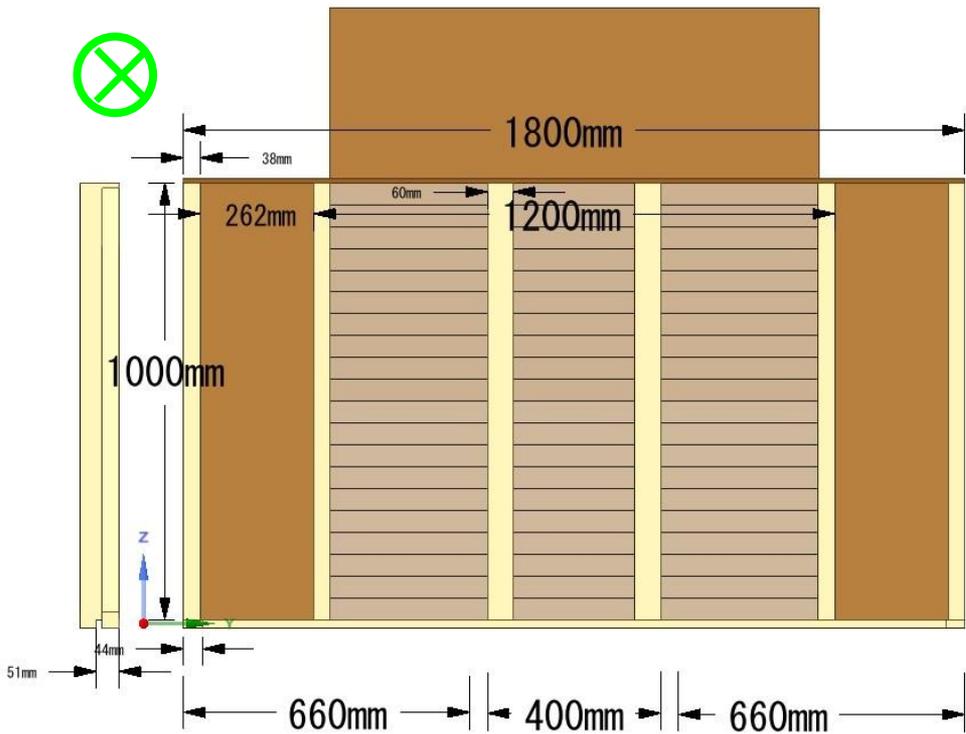
- 前方シンチレータ



・ 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



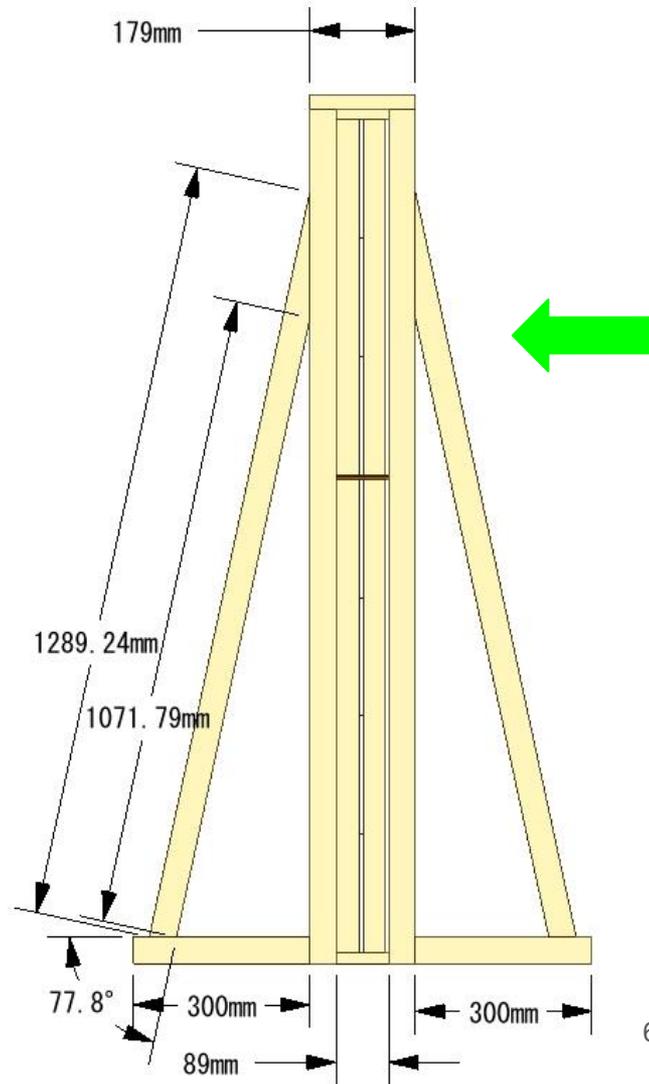
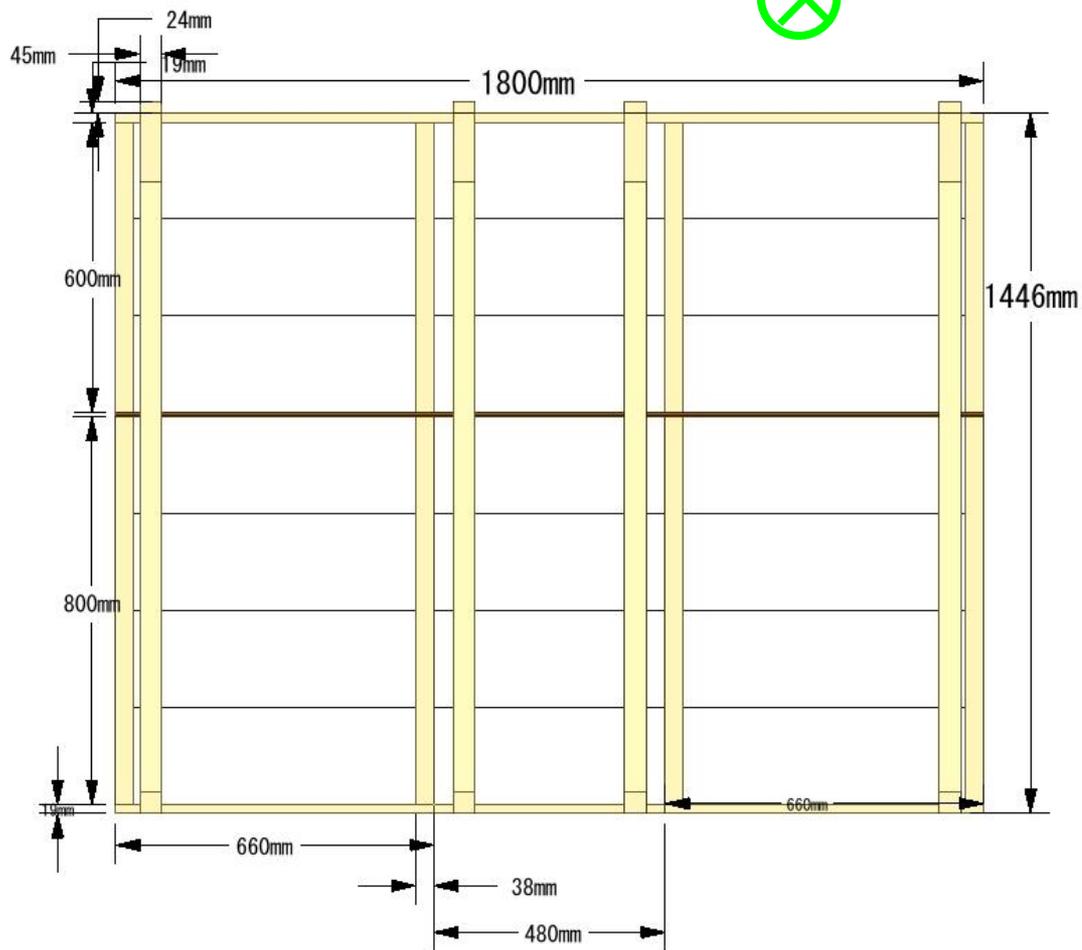
• VETOシンチレータ (1)

展開図 (運搬時)

完成図



• VETOシンチレータ (2)

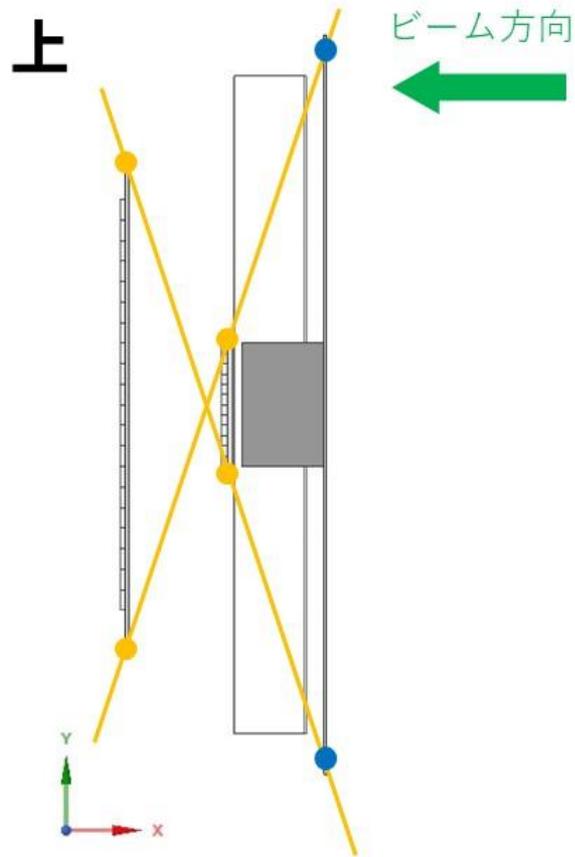
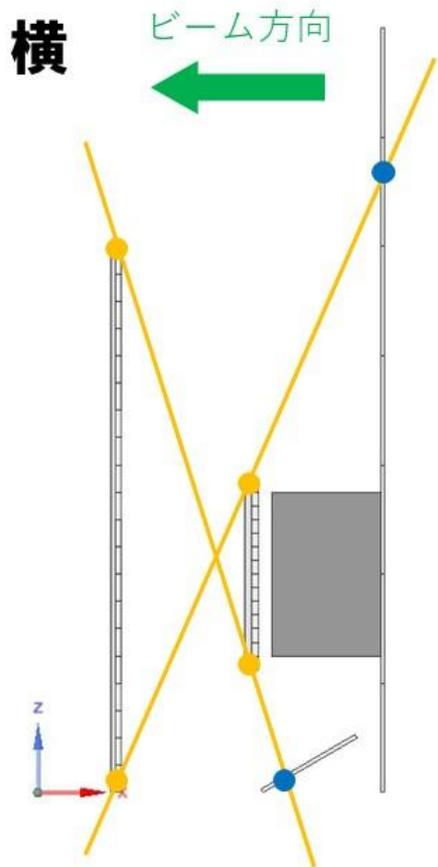


- VETOシンチレータ

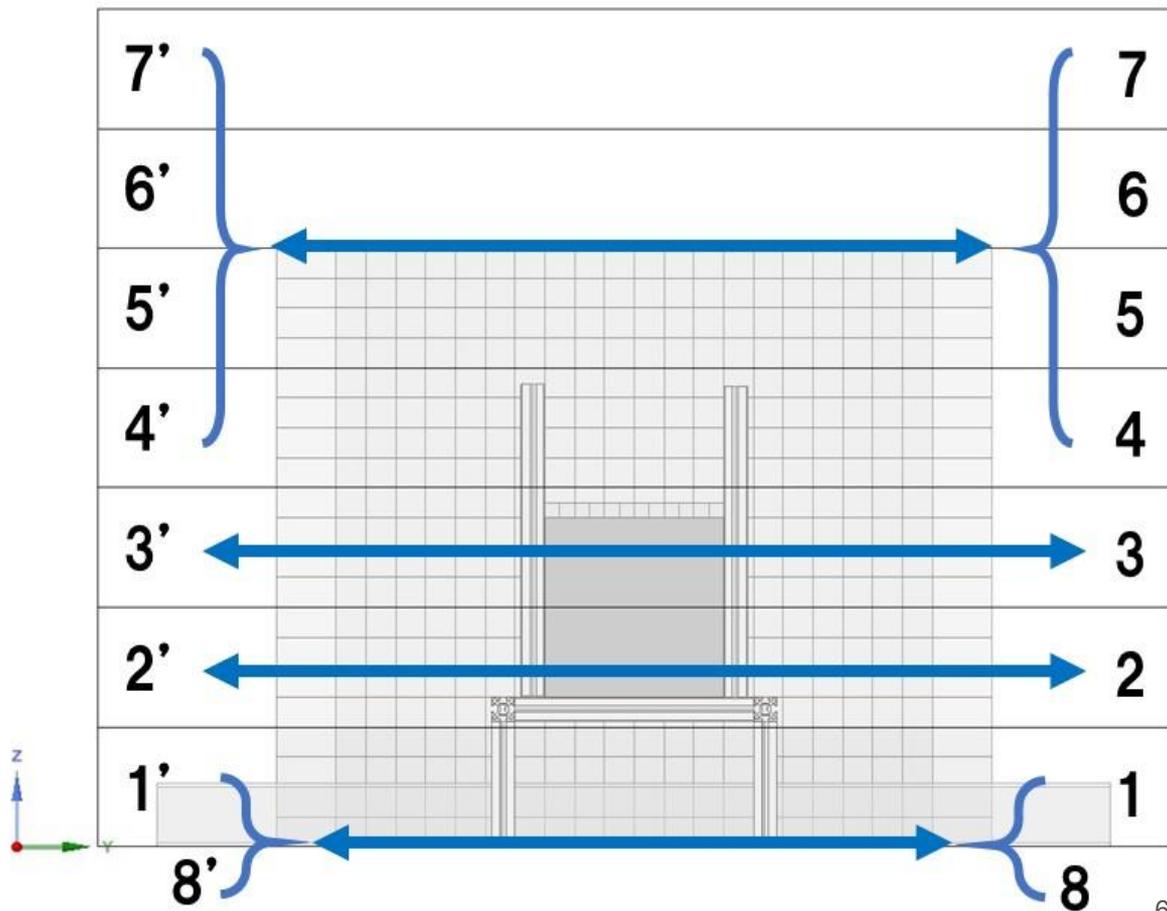
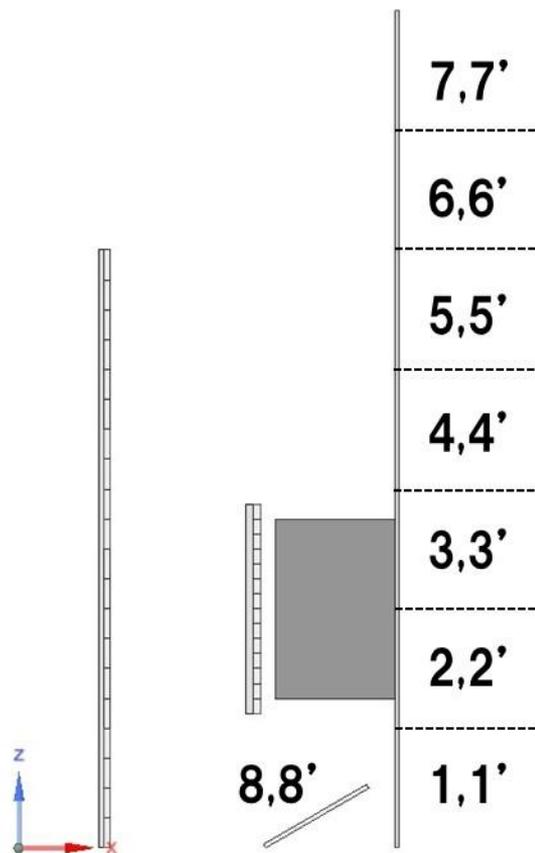


VETOデザイン

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		

両側読みの一端的の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



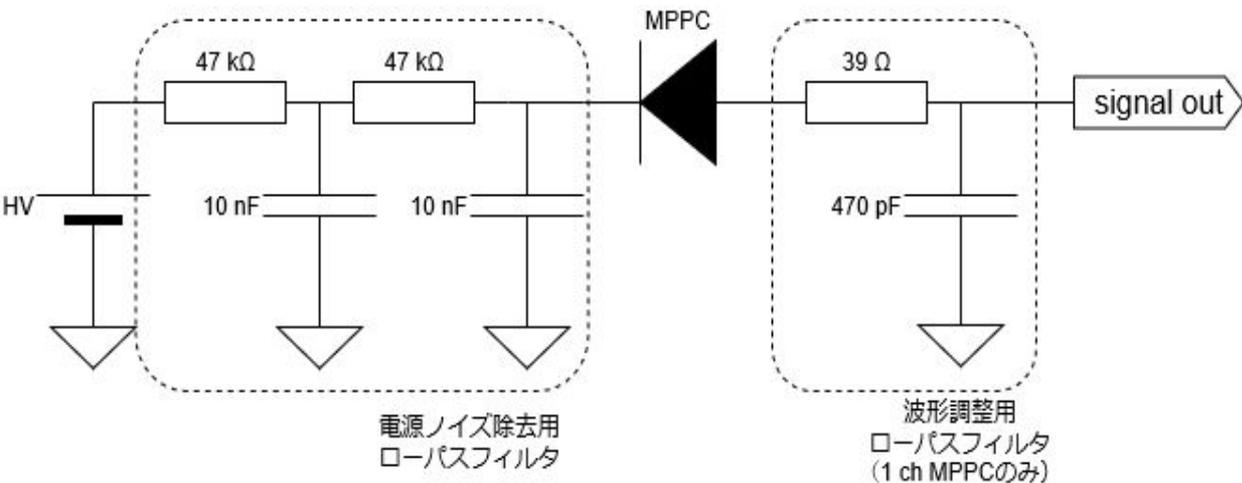
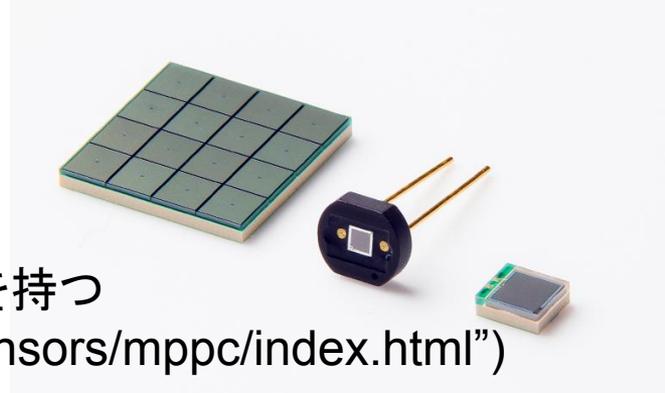


MPPCについて

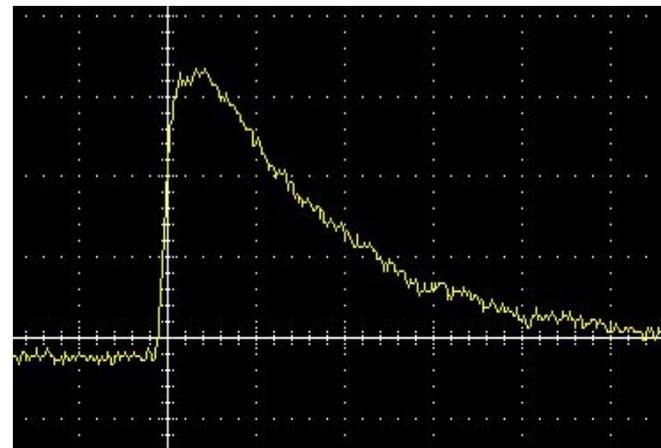
浜松ホトニクス製の光子測定デバイス

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

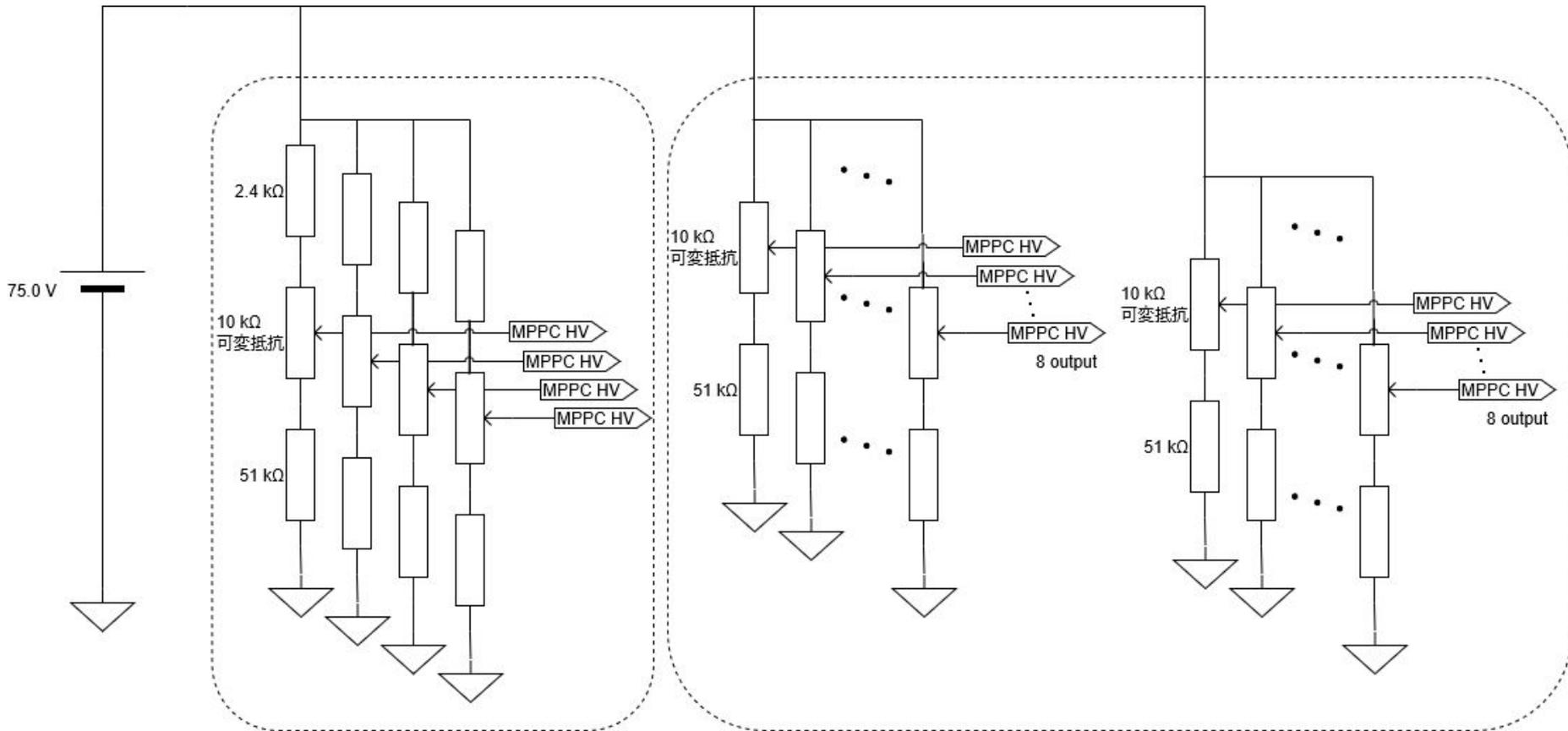
(“<https://www.hamamatsu.com/jp/ja/product/optical-sensors/mppc/index.html>”)



信号読み出し回路図



MPPC信号波形
: 1目盛り10 mV, 100 ns



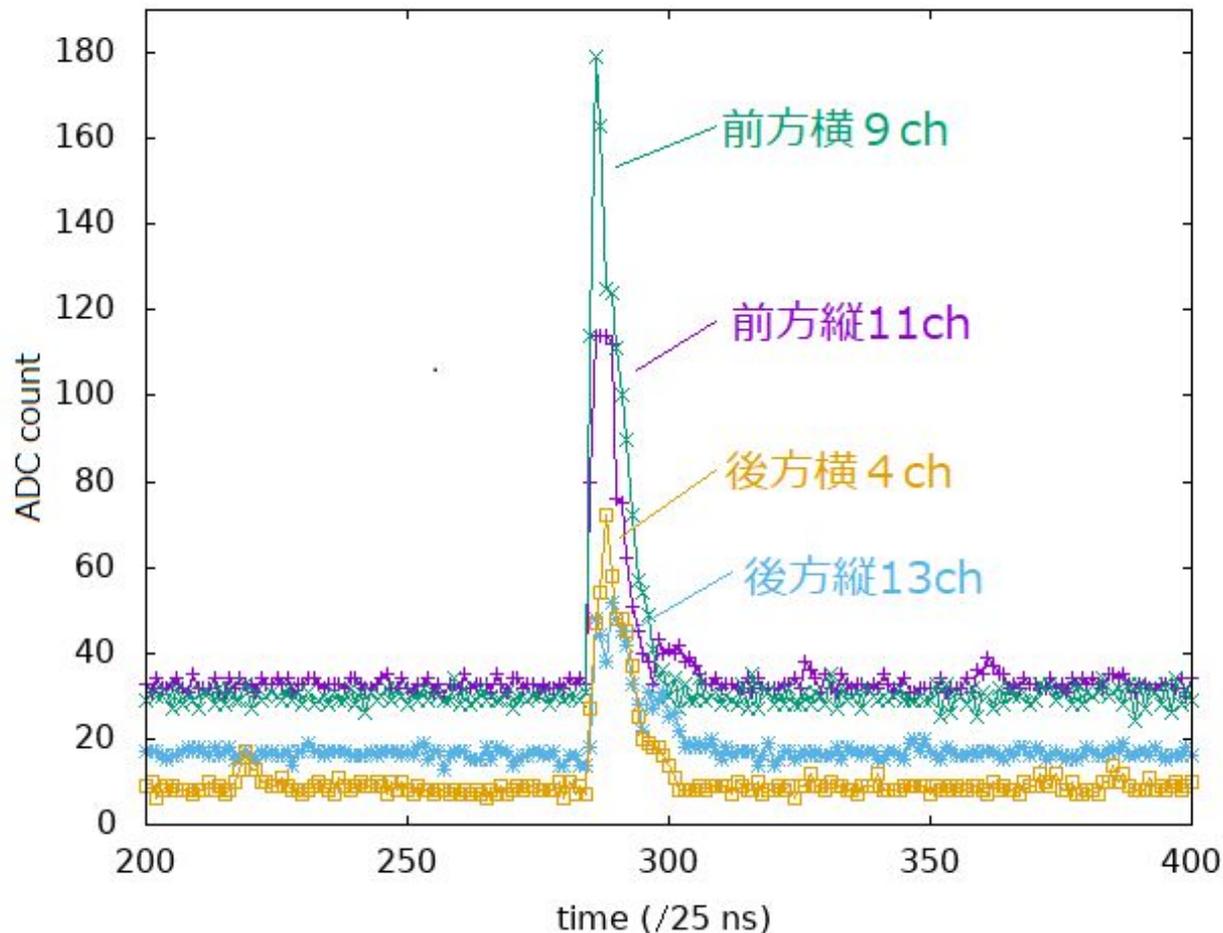
16 ch MPPC用電圧分配回路
60 ~ 72 Vの範囲で調整可

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 θ 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。

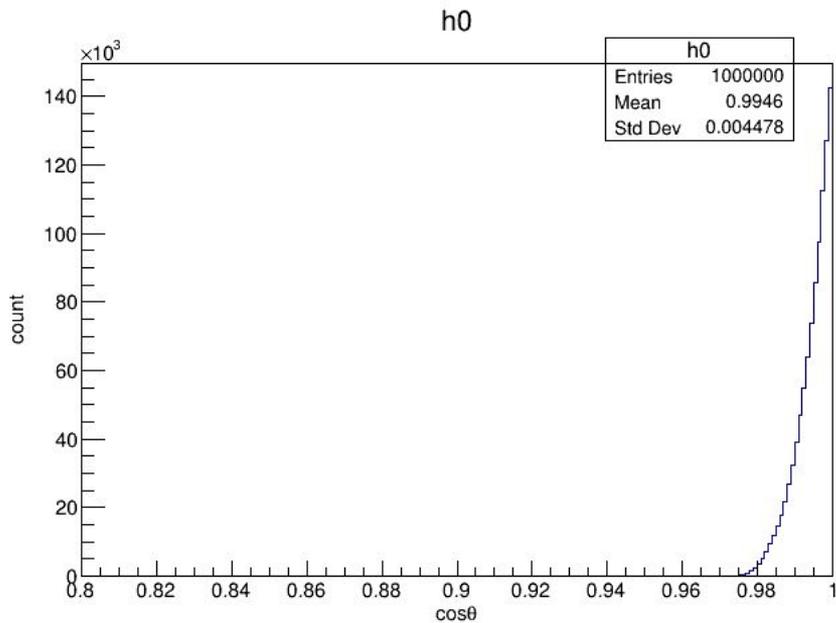
ある組み合わせのシンチレータに対して、

- ・前方: 2.5 cm四方
- ・後方: 5.0 cm四方

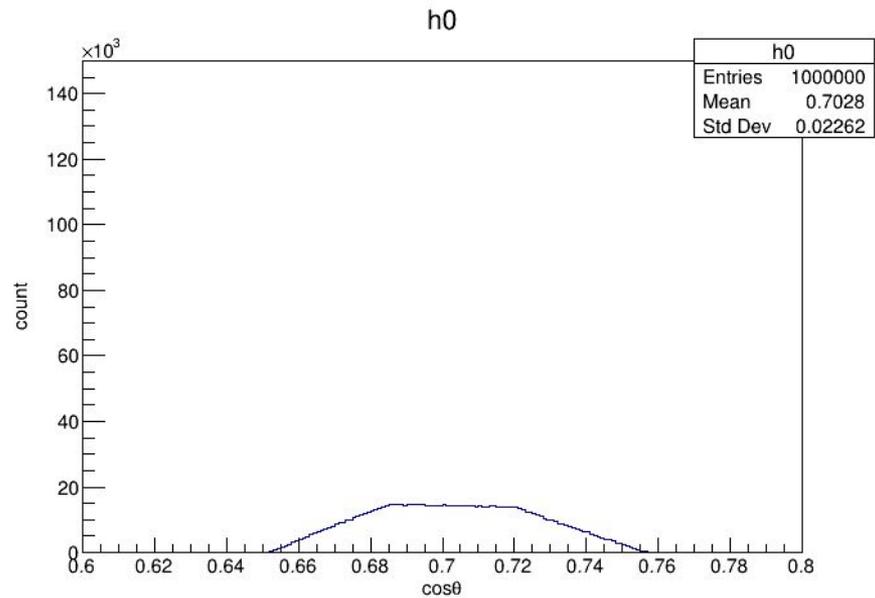
の領域からランダムに反応点を選び、cosの値を計算した。

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。

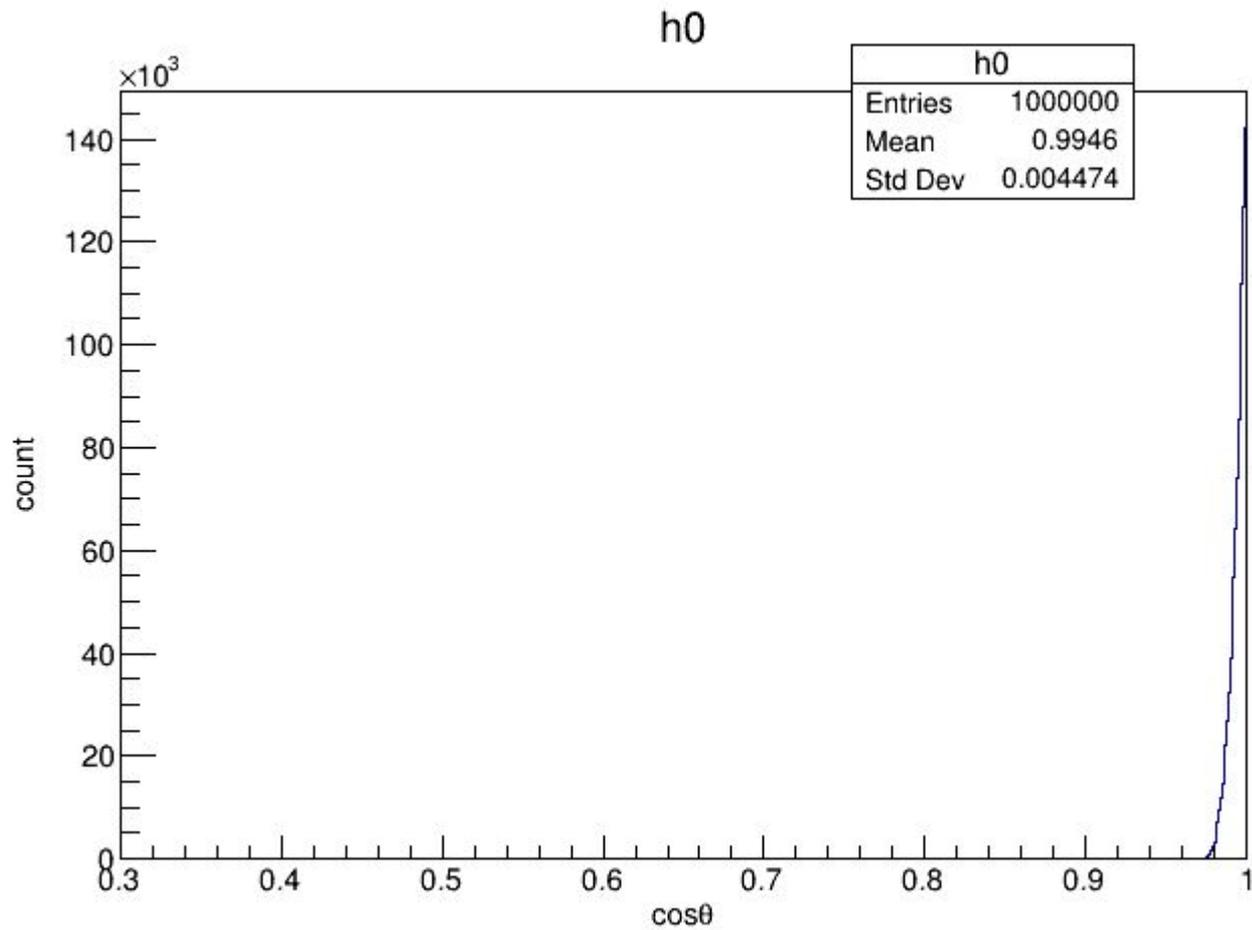


cos_center=0.998のイベント
幅は最大でも0.025程度で、
ほとんどがcos_centerの値付近に集中

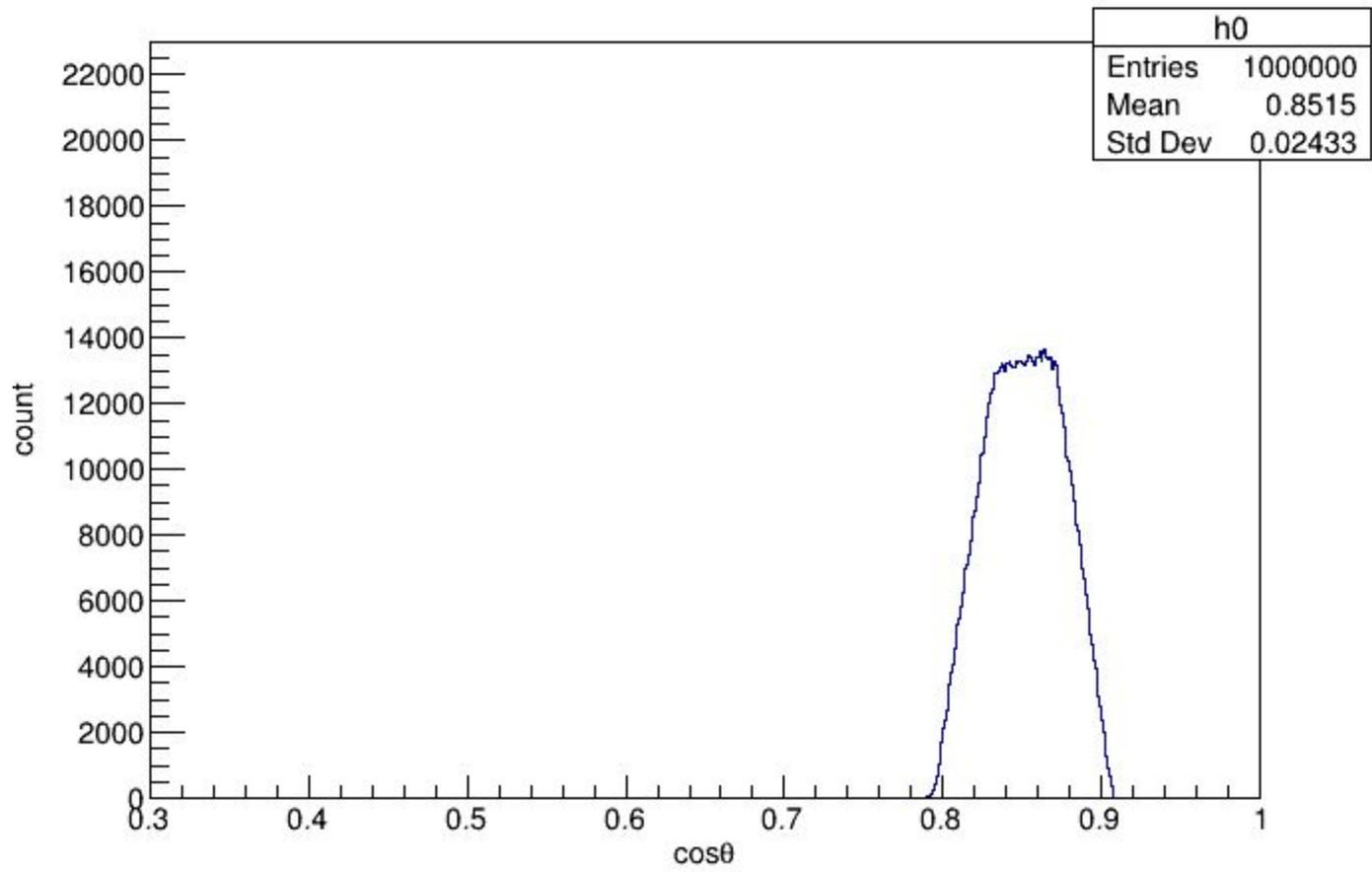


cos_center=0.703のイベント
幅は最大でも0.1程度あり、
cos_centerの値を中心として
比較的一様に分布

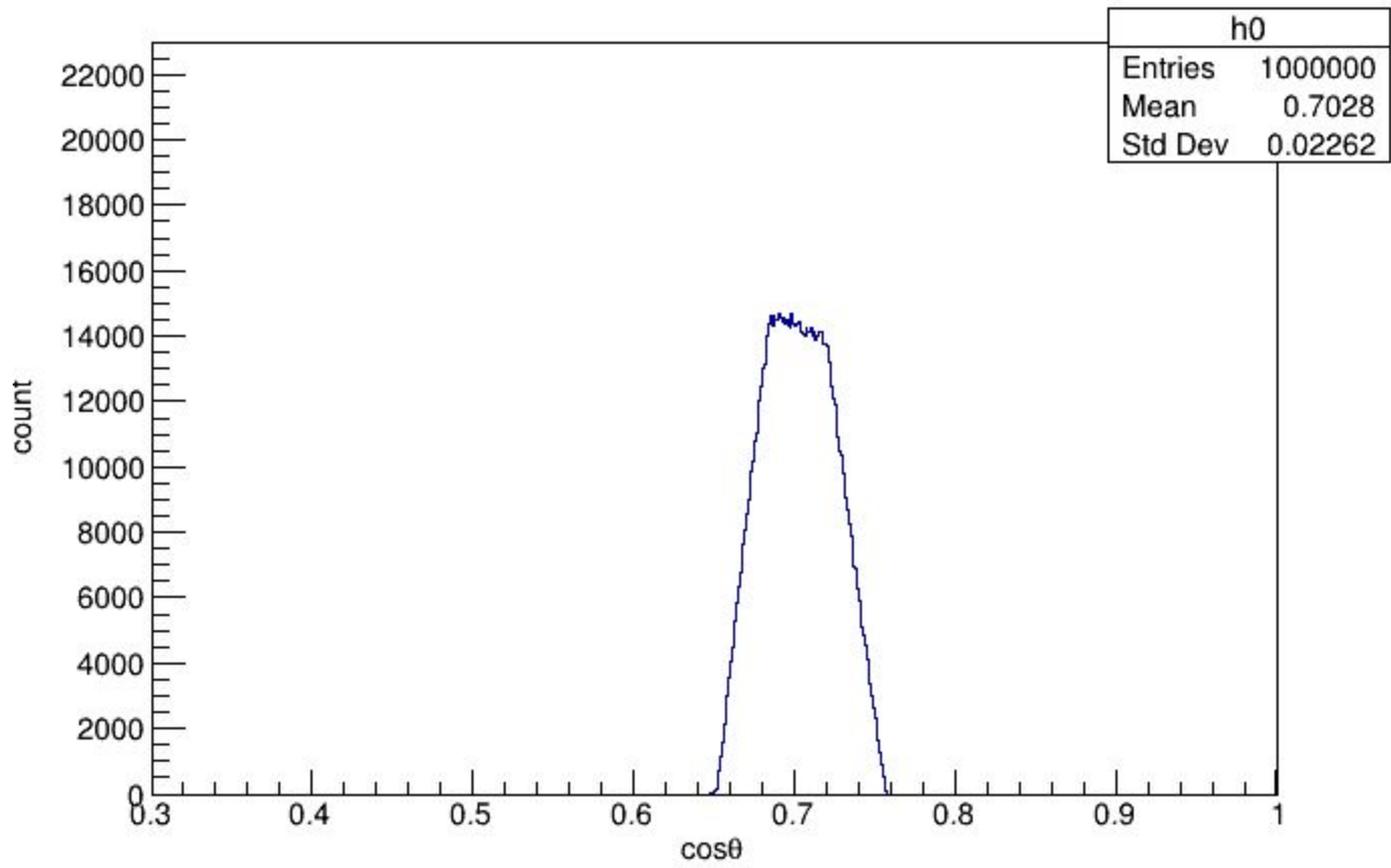
→実際のcosが取り得る値の幅は、大きい所でも0.1くらい



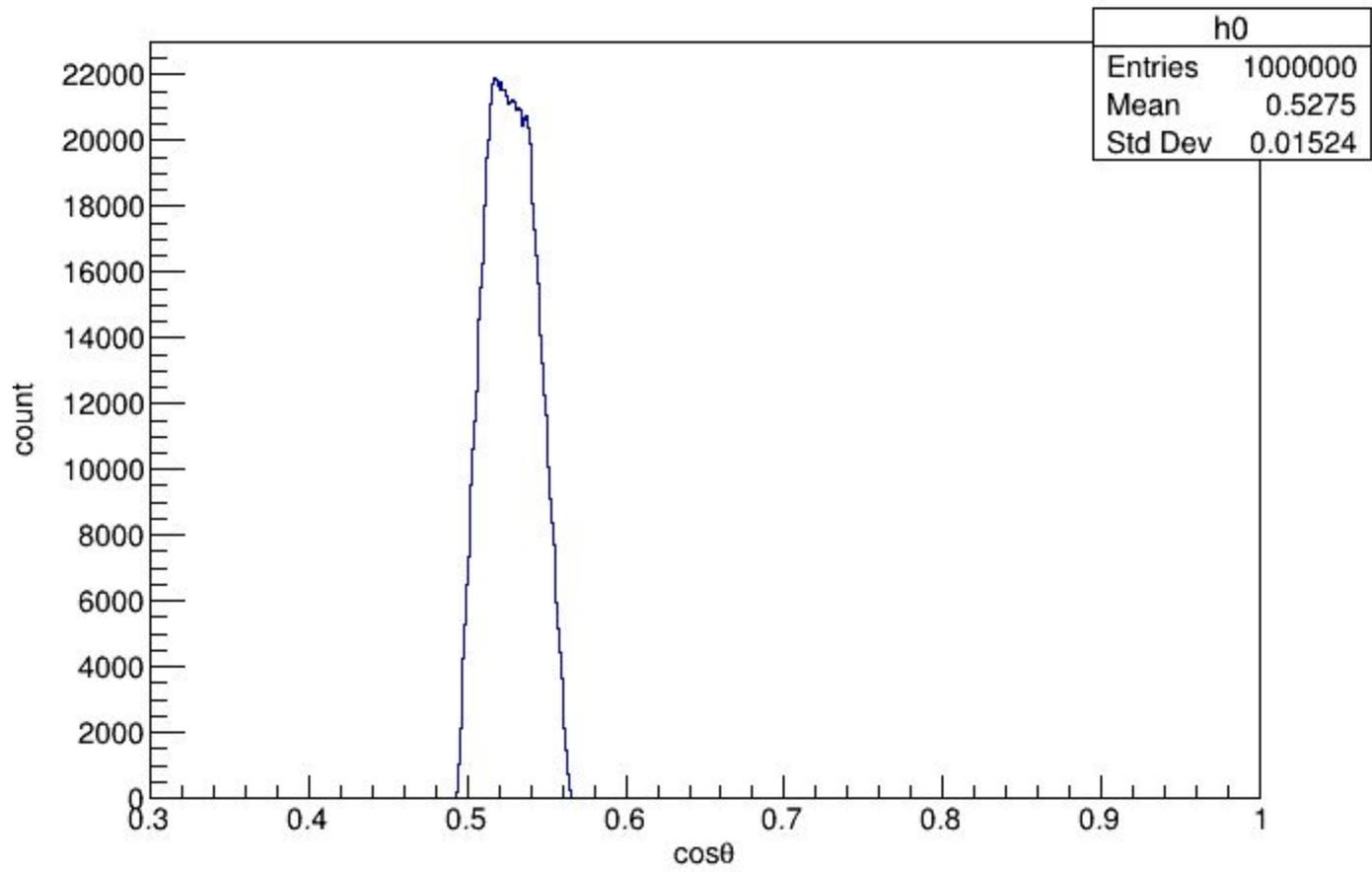
h0



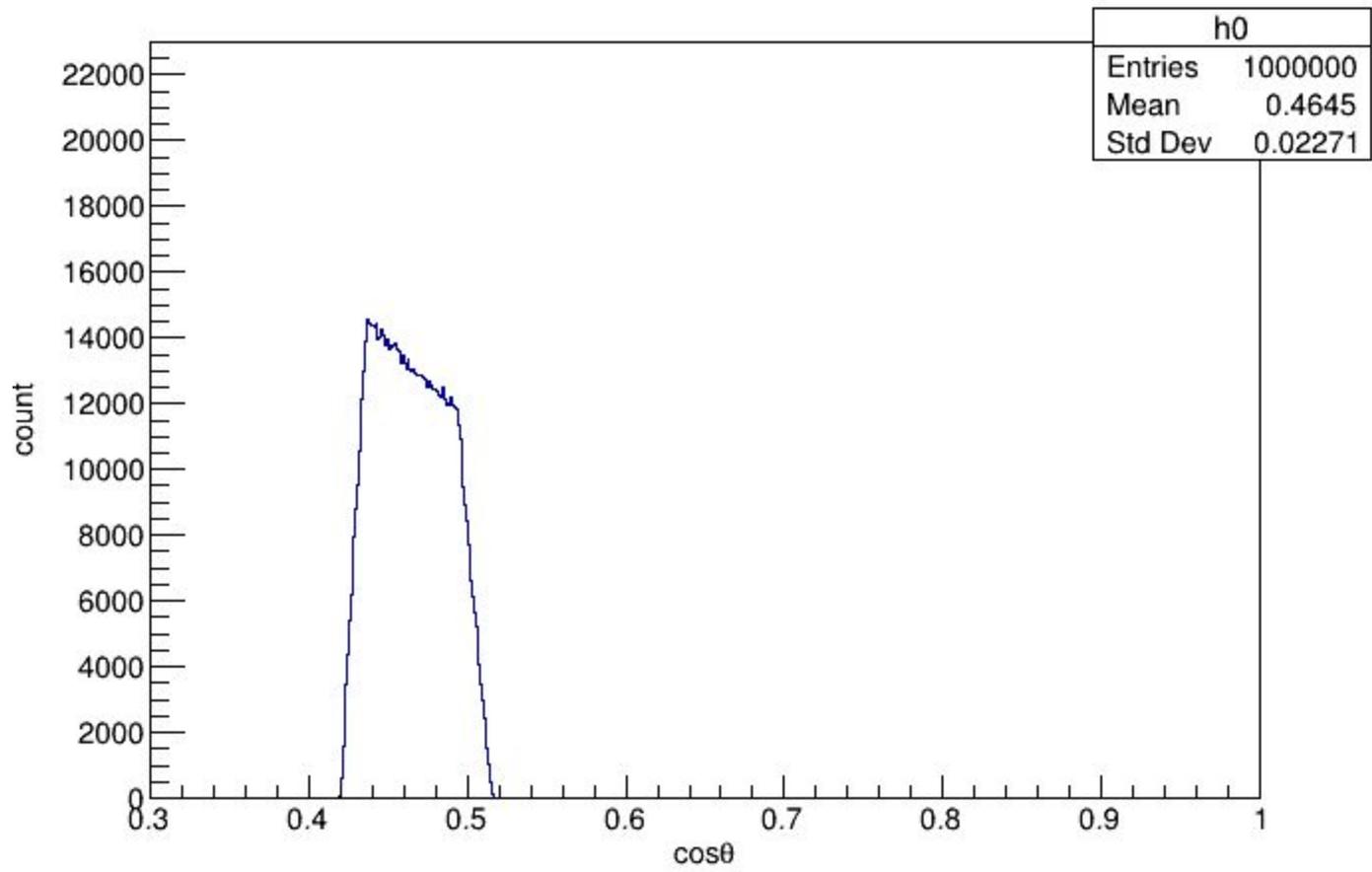
h0



h0



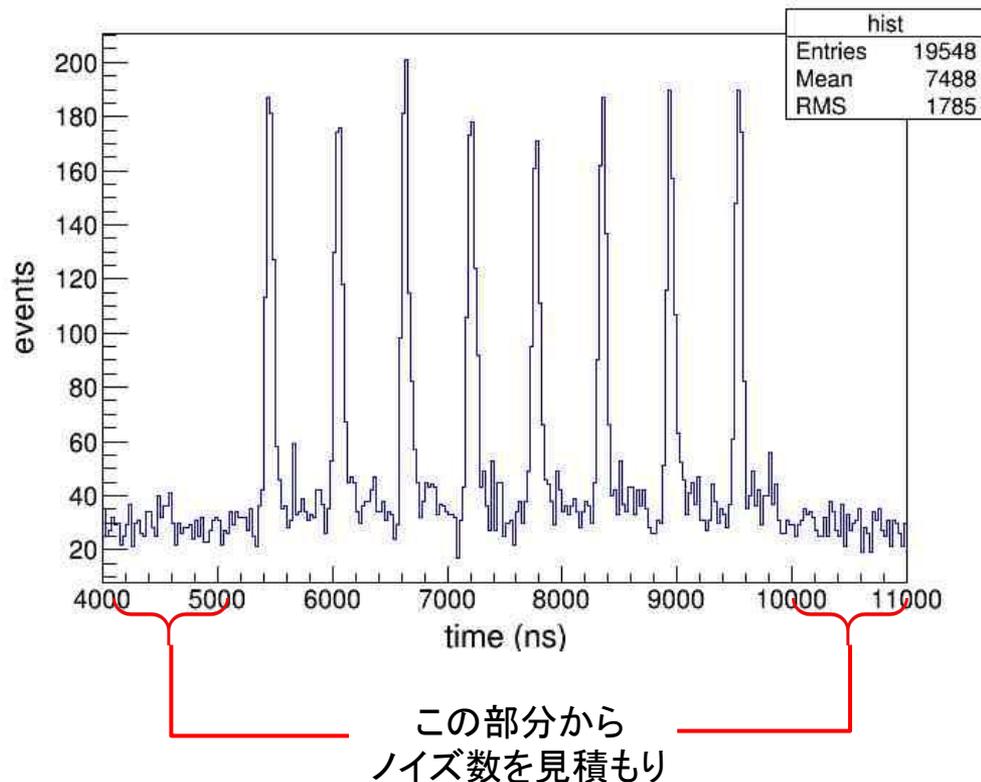
h0



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 μ s、計8 μ 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 μ s / 8 μ 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

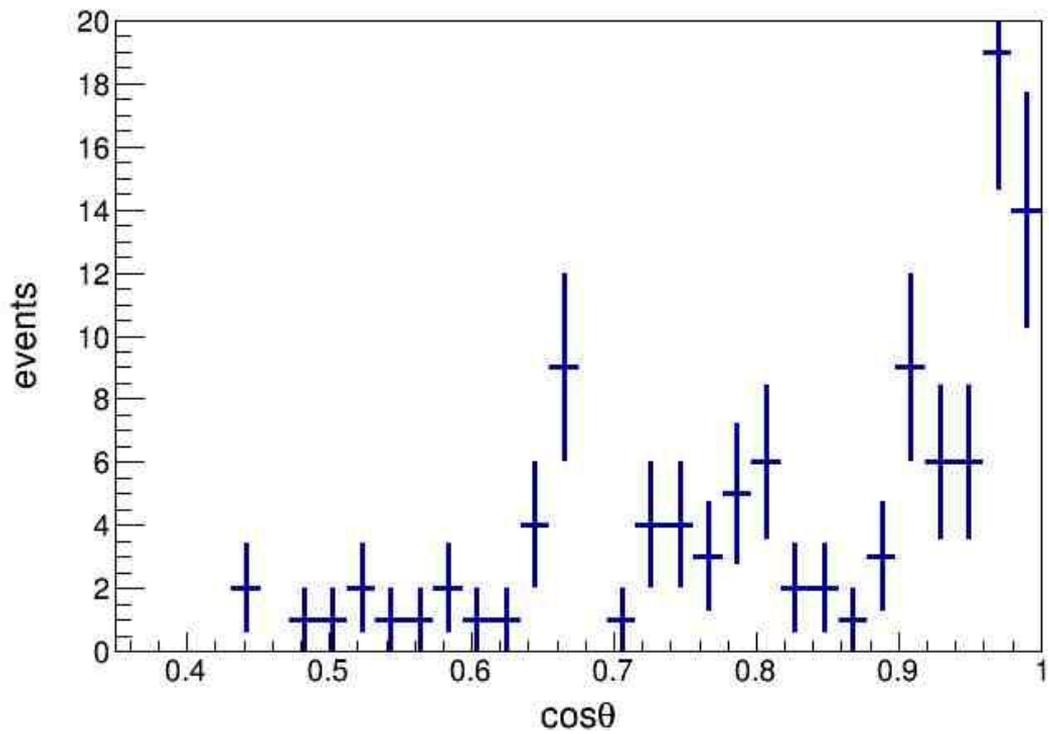
$$600 * 599 / 2 * (1-r)^2 * r^{598} = 0.0013$$

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

