

ニュートリノの 全断面積

京都大学理学部2020年度卒業研究P2

伊東利将 田舎和也 河本地弘 武市宗一郎

2021年3月30日

目次

- 導入
- 実験概要
- 結果/解析
- 考察

1. 導入

実験目的

理論

実験目的

- ニュートリノのエネルギーと断面積の関係を調べることによってニュートリノの存在や弱い相互作用の理論の妥当性を確かめる
- ニュートリノは重力相互作用の他には弱い相互作用しかしないと考えられている(その上質量は非常に小さい)ためその検出等は容易ではないので、ニュートリノの反応そのものを見ること自体も十分大きな意味を持つ

相互作用

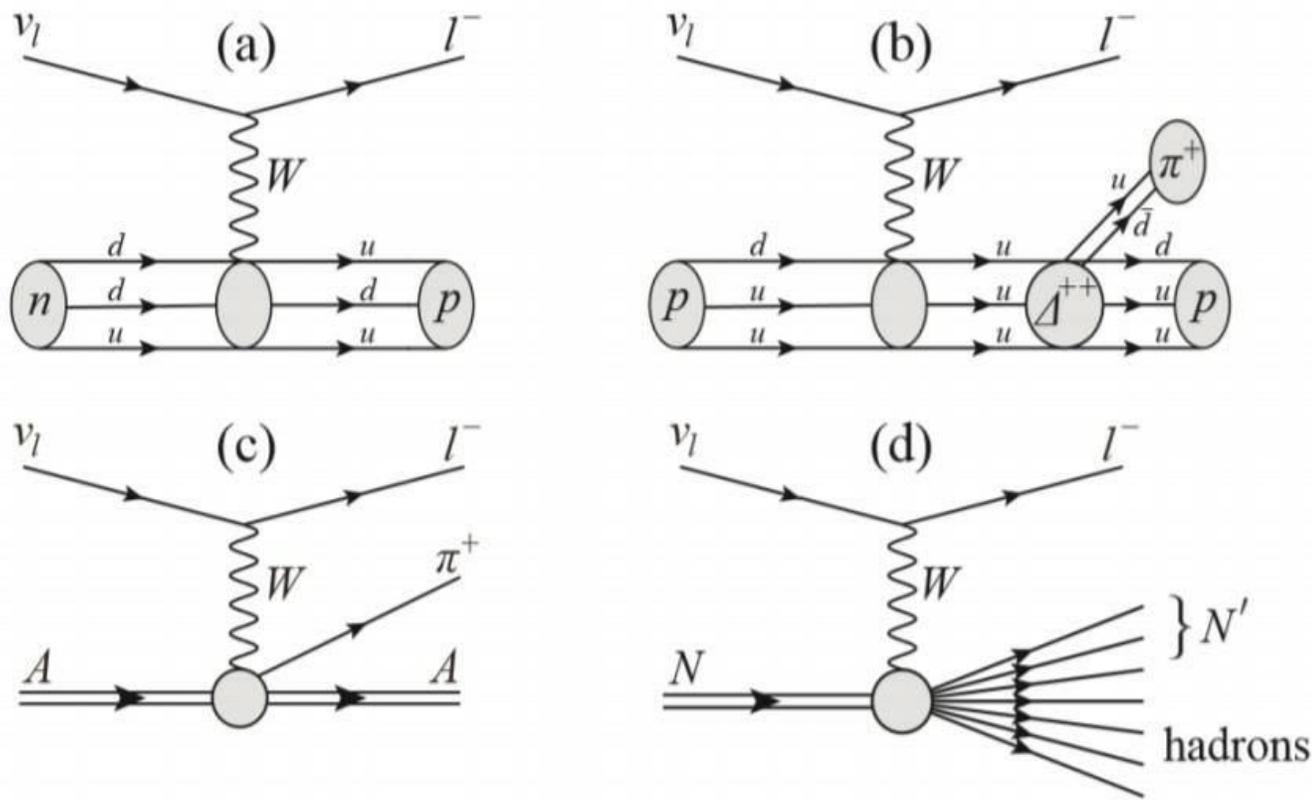
相互作用	ゲージ粒子
電磁相互作用	光子
強い相互作用	グルーオン
弱い相互作用	ウィークボソン
重力相互作用	グラビトン(未発見)

弱い相互作用は以下の2種類に大別される

弱い相互作用の種類	ゲージ粒子
荷電カレント反応(CC)	W^{\pm}
中性カレント反応(NC)	Z^0

我々の検出器ではCC反応で出てきた荷電粒子を観測することで間接的にニュートリノを確認することしかできないので以下CC反応に注目する

ニュートリノ反応



CC反応の例

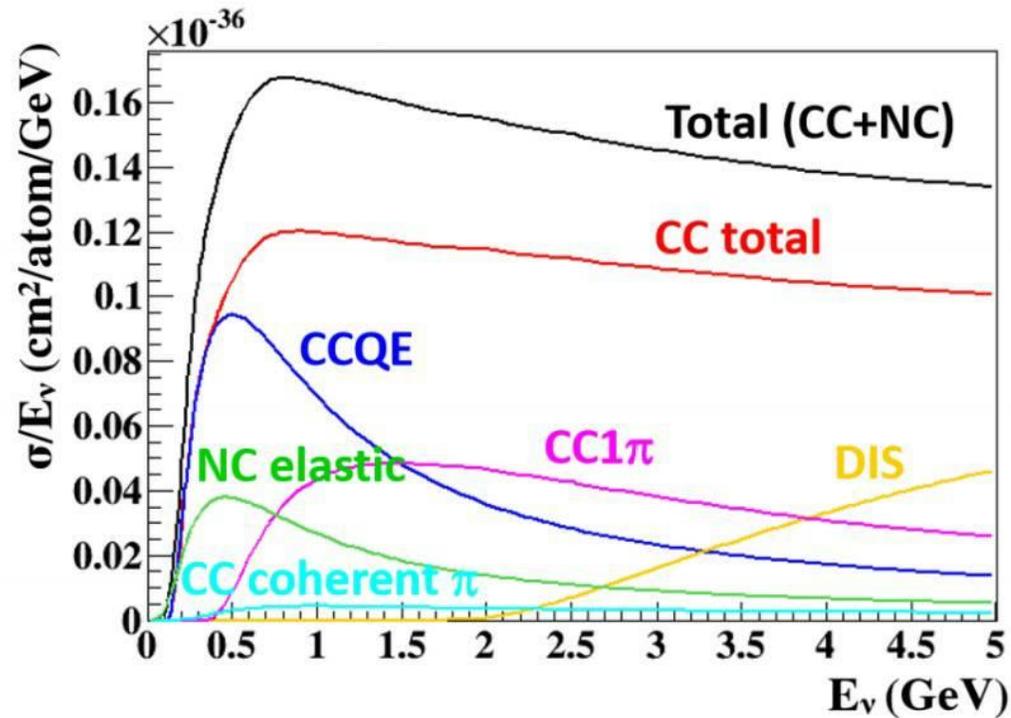
(a) CCQE ($\nu_l + n \rightarrow l^- + p$)

(b) CC1 π ($\nu_l + p \rightarrow l^- + \Delta^{++} \rightarrow l^- + \pi^+ + p$)

(c) CC coherent π ($\nu_l + A \rightarrow l^- + \pi^+ + A$)

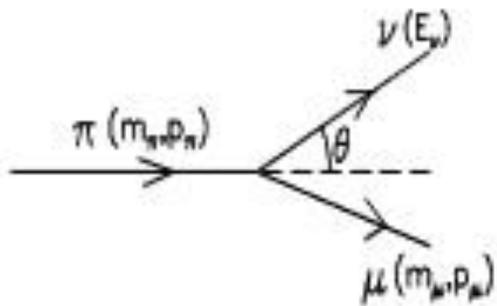
(d) DIS ($\nu_l + N \rightarrow l^- + N' + \text{hadrons}$)

ニュートリノ反応

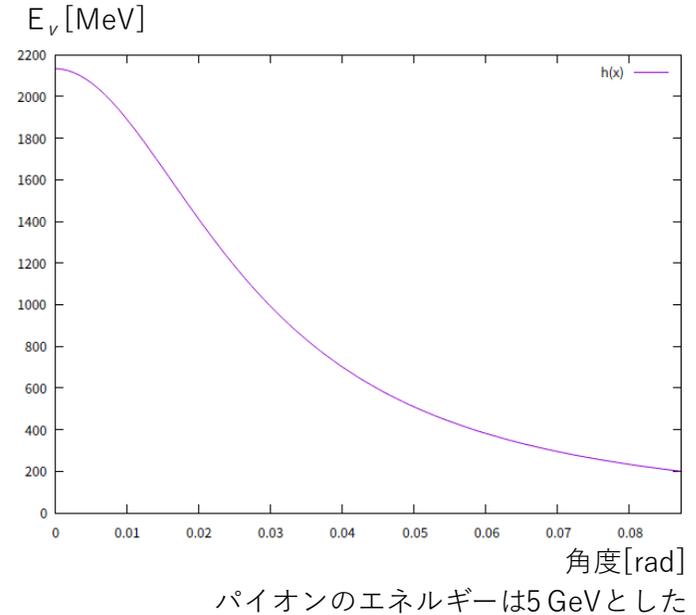
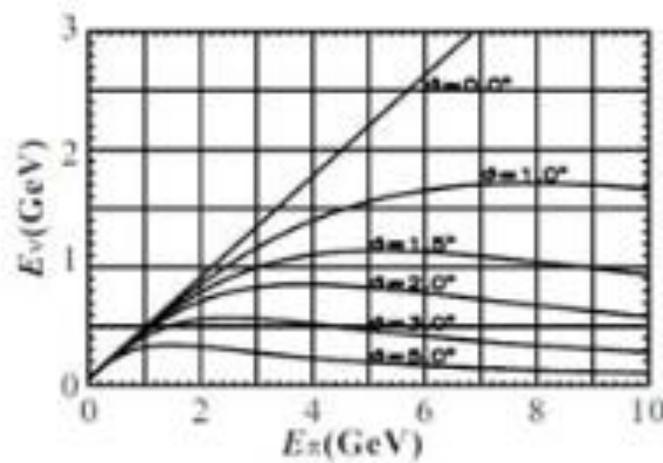


今回はピークが1 GeV程度のニュートリノビームを用いたので主な反応はCCQEとCC1 π である

ニュートリノ反応



$$E_\nu = \frac{m_\pi^2 - m_\mu^2}{2(E_\pi - p_\pi \cos \theta)}$$

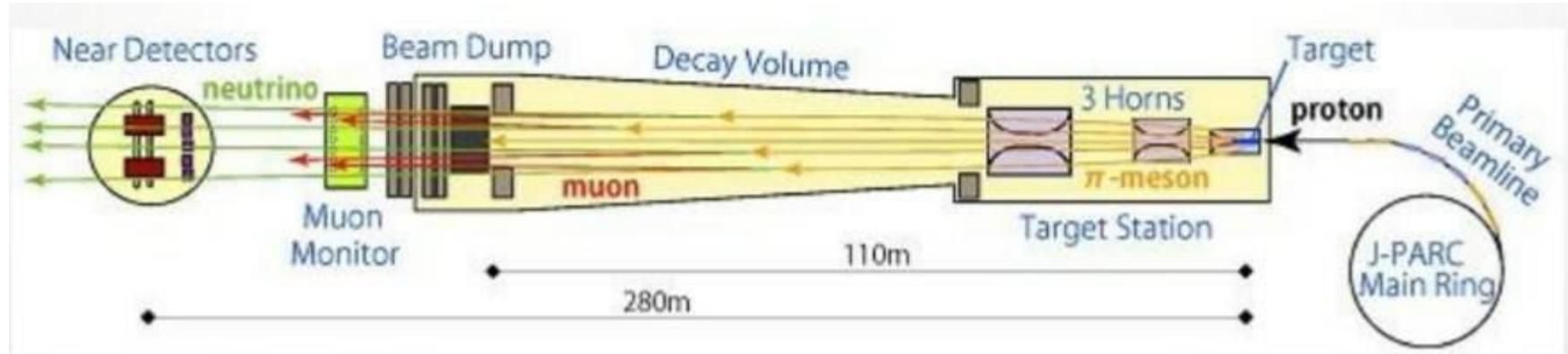


ビームとの角度が変わるとエネルギー分布が変わるので、それを利用して異なるエネルギー領域のニュートリノを集めて反応を見る
 ビームの中心軸から離れる程ニュートリノのエネルギーは小さくなる
 また、パイオンのエネルギーが十分大きいと、角度がある場合はニュートリノのエネルギーはパイオンのエネルギーに依存せずほぼ一定

2. 実験概要

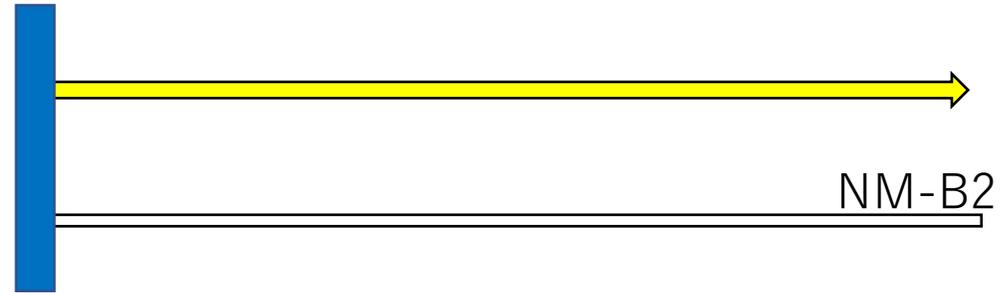
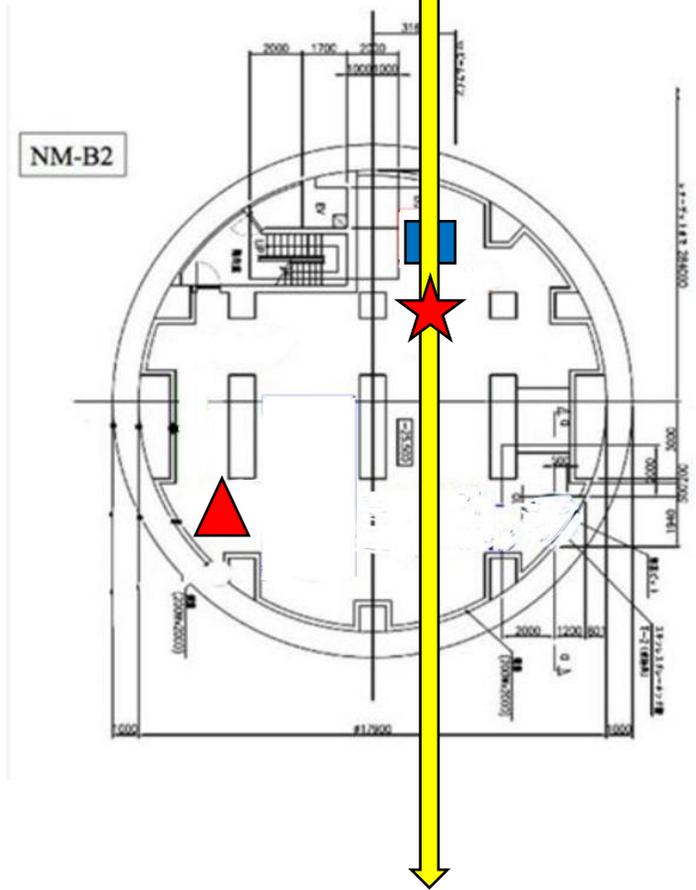
- J-PARC施設概要
- セットアップ

J-PARC施設概要



1. 加速された陽子ビームがグラファイトのターゲットに当たる
2. パイオンが生成され、ミューオンとニュートリノに崩壊する
3. ビームダンプでミューオンとニュートリノ以外が吸収される
4. ミューオンモニターでニュートリノの空間分布を間接的に知る
5. ニュートリノビームが実験場所に届く

実験場所



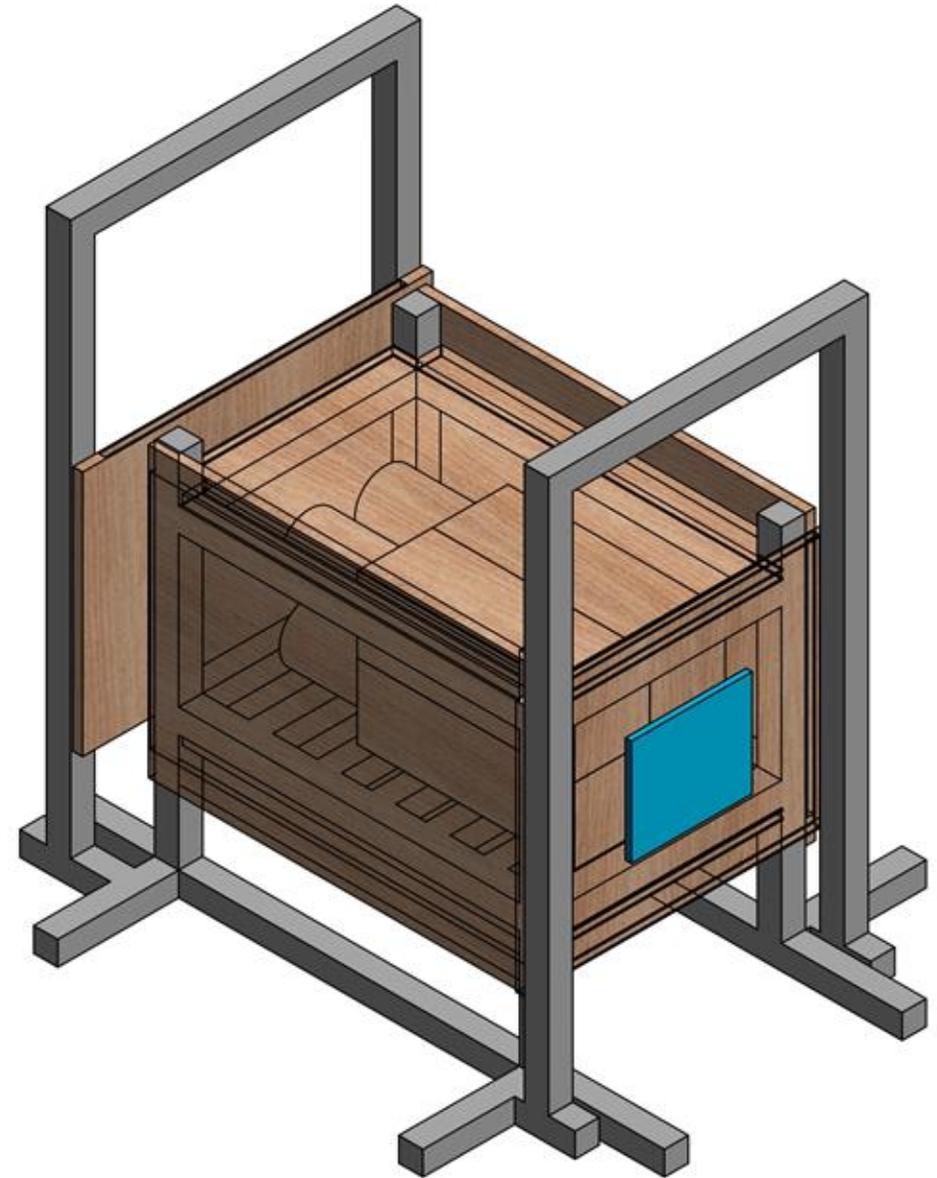
実験場所であるNM-B2フロアは既にニュートリノビームの中心からずれた場所にある

今回の実験場所は
★:1.1°
▲:2.0°
の二ヶ所である

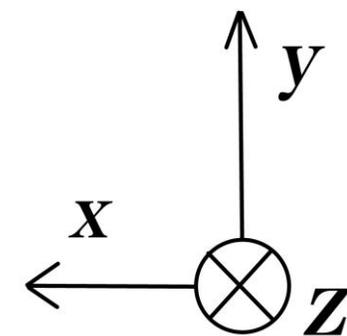
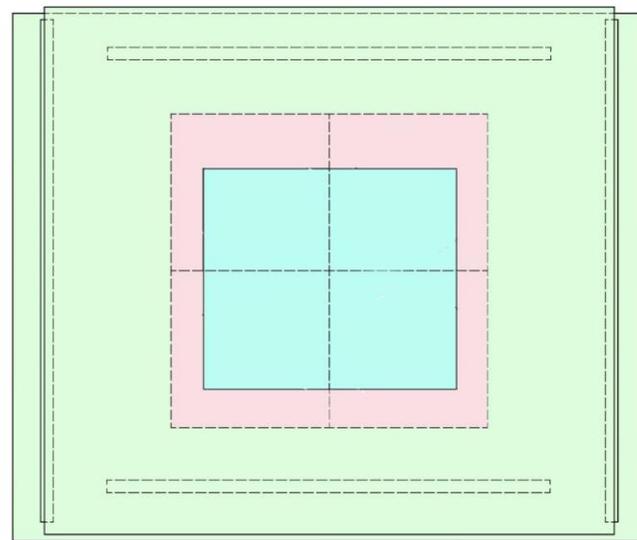
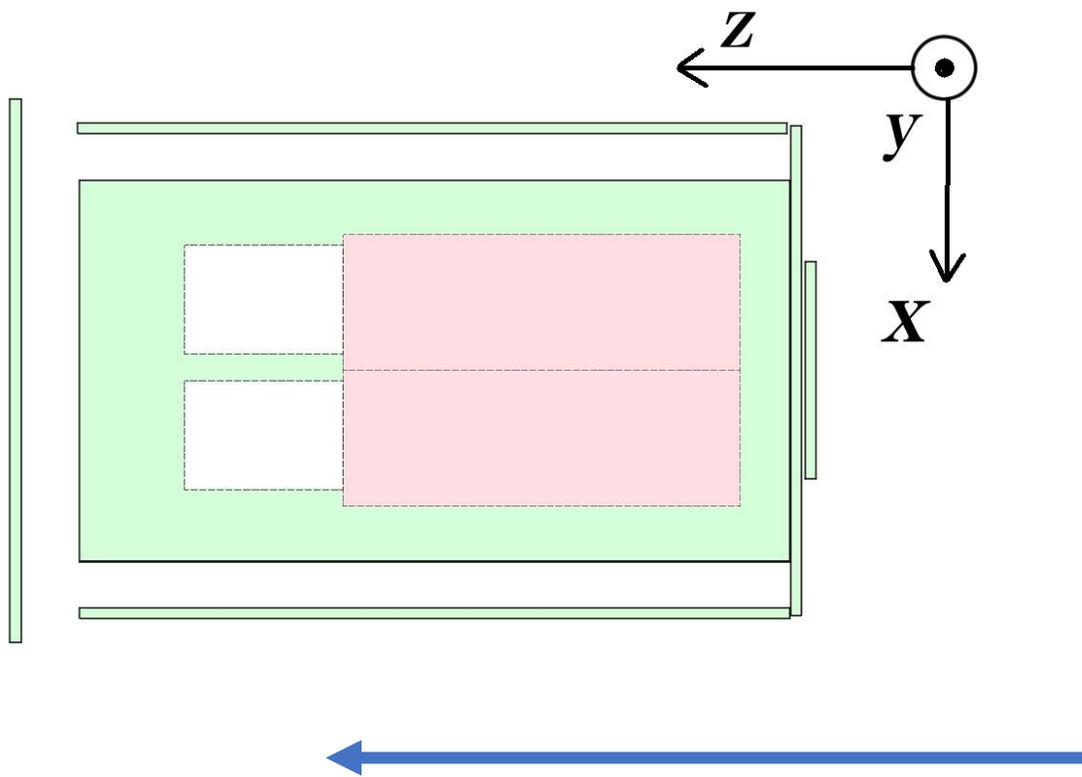


装置 概観

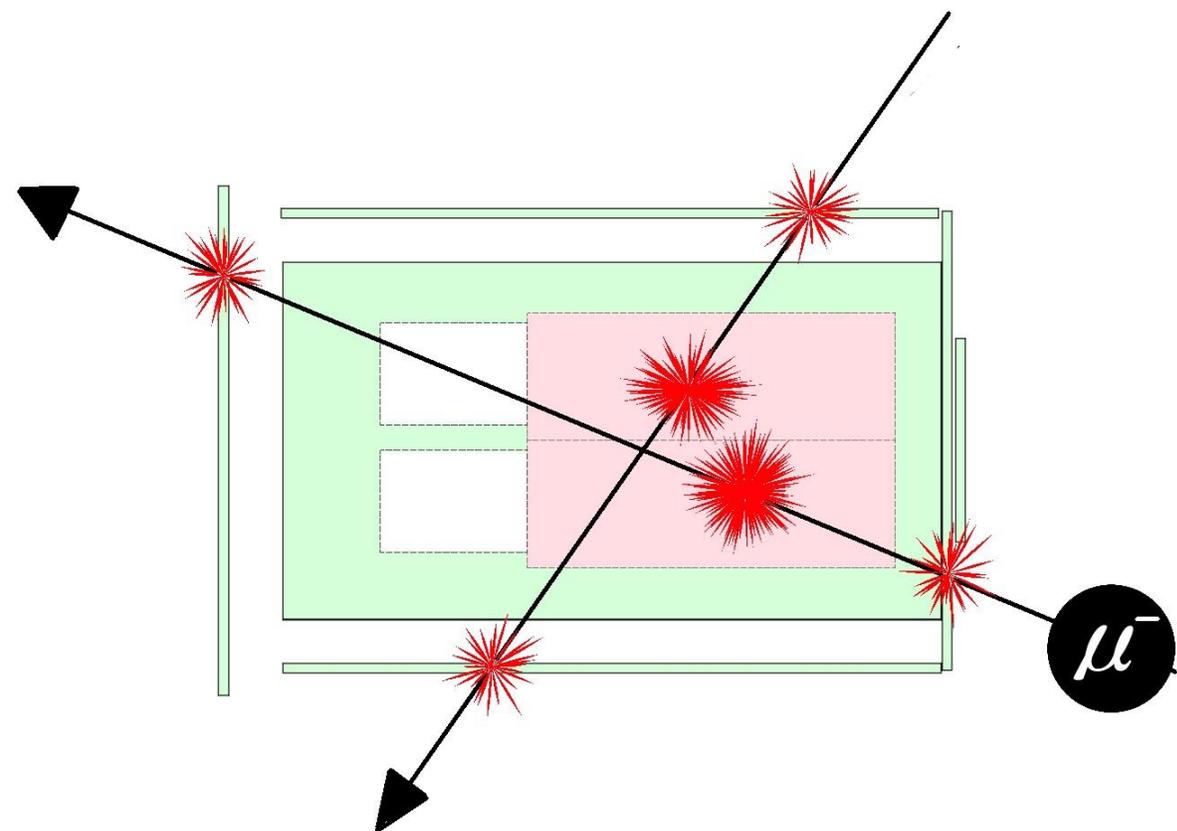
- 装置中央に鉛ガラス（アクティブターゲット）を置きその周りを6面シンチレーターで覆う



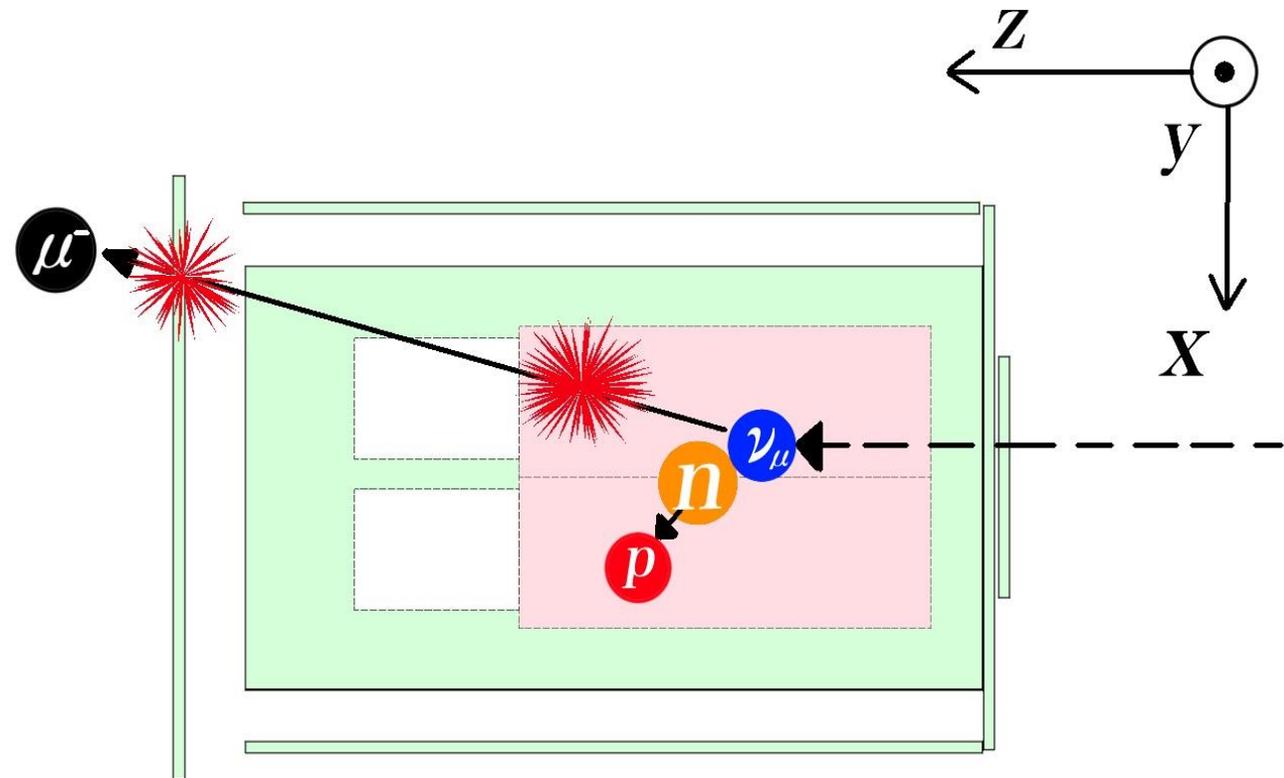
装置概略图



ニュートリノイベントとサンドミュオン



サンドミュオンはシンチレーターが二枚反応

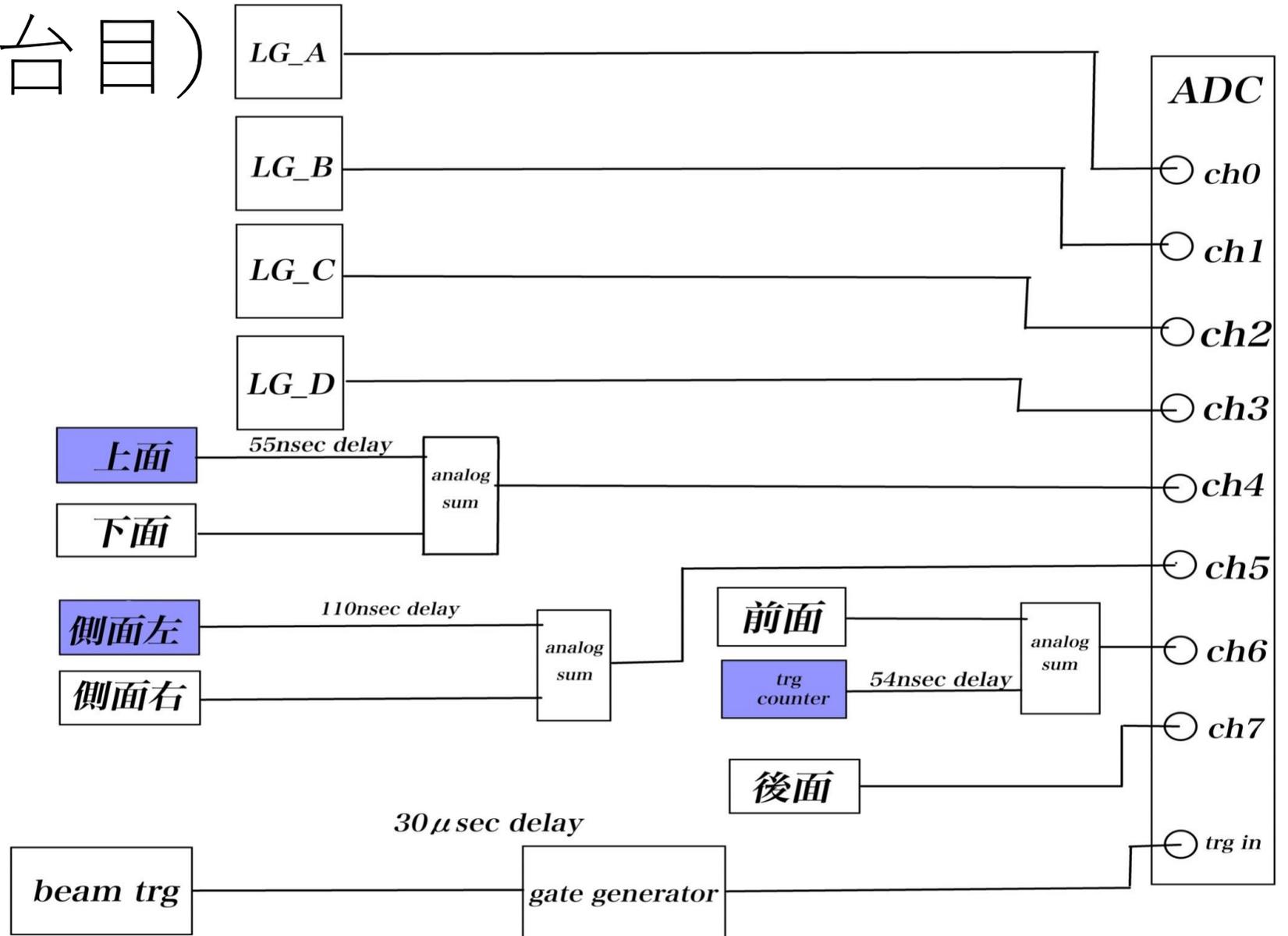


ニュートリノイベントはシンチレーターが一枚反応

ニュートリノイベント

- Beam trgが掛かったタイミングで鉛ガラスが反応したものの内で
- Veto用シンチレーターが1枚したもの→ニュートリノイベント
- Veto用シンチレーターが2枚反応したもの→サンドミュオンイベント

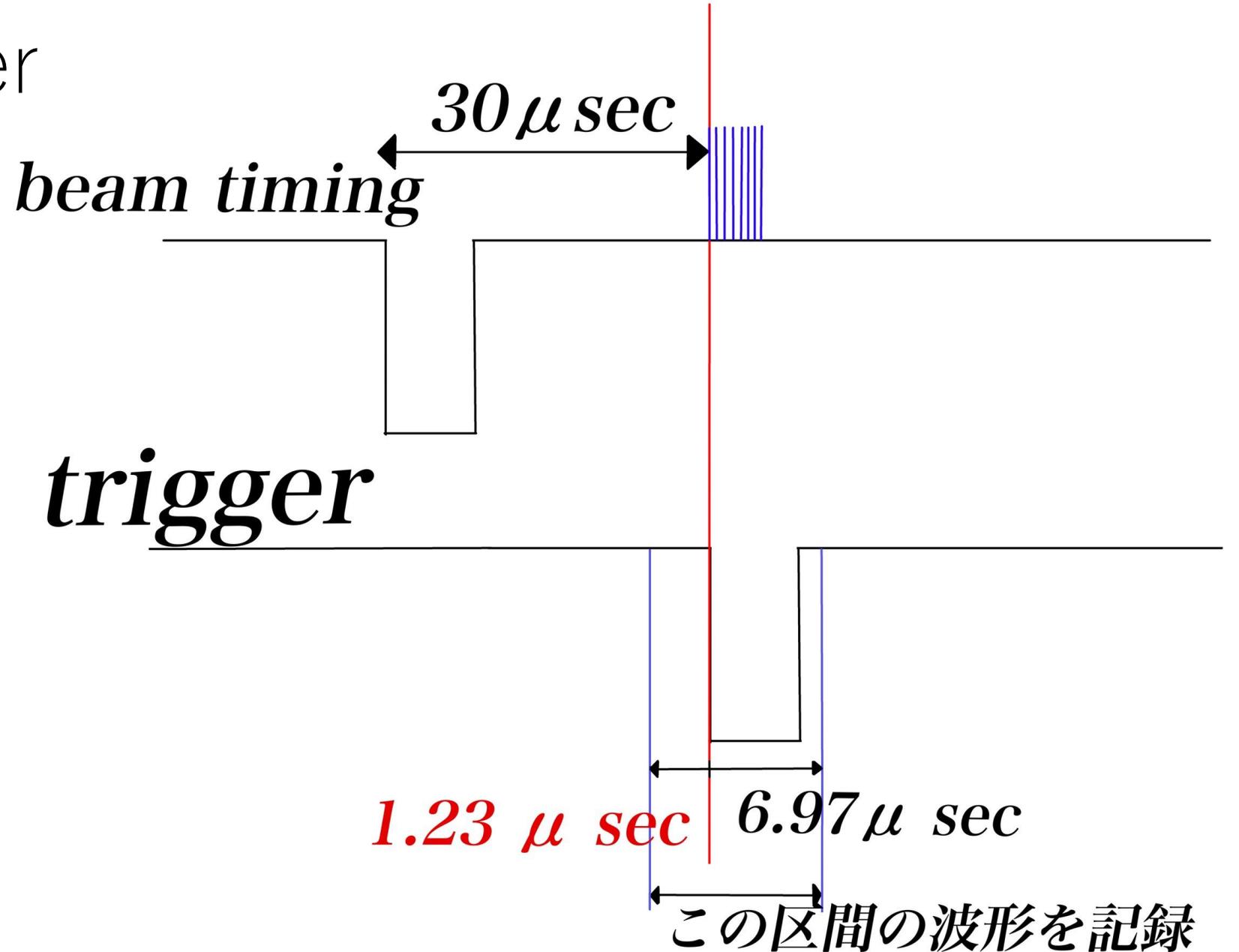
回路図 (1台目)



Beam Trigger

Beam timing 信号
をgate generator
で30 μsec 遅延さ
せトリガーとする。

トリガーの前1.23
 μsec ,後6.97
 μsec の波形を
ADCで記録する。

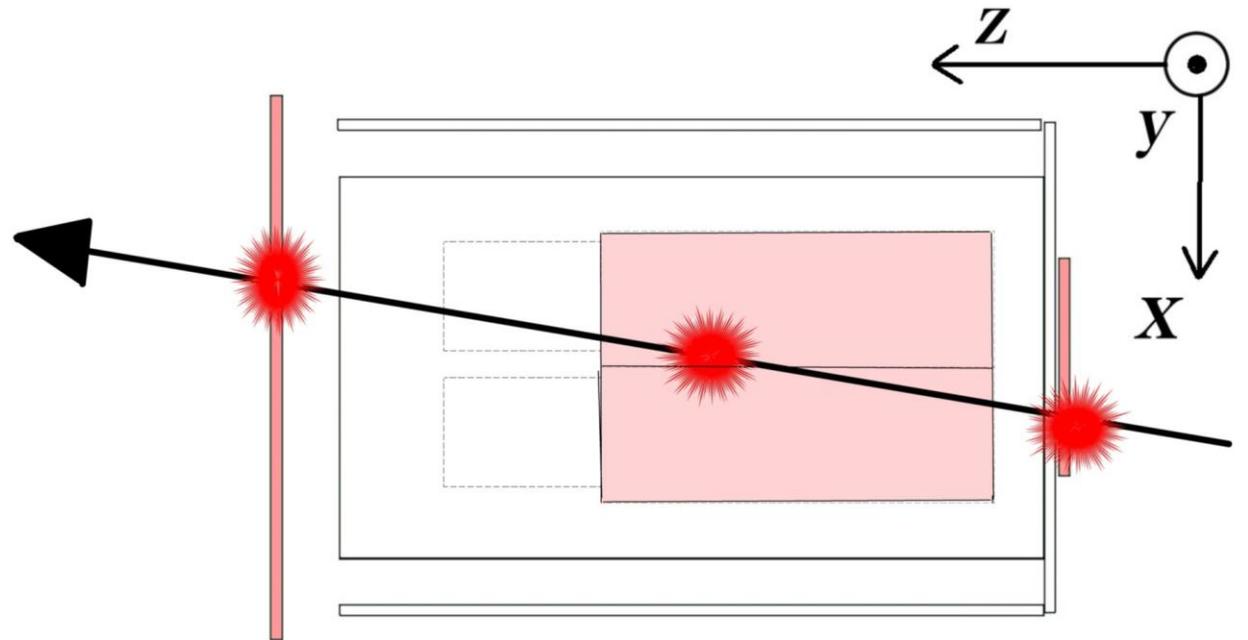


Linear fan-in/out

- 読みたい信号は鉛ガラス×4 + シンチレータ－6面 + trg counterで合わせて11個ある。ADCのチャンネル数が8しかないので3個溢れる。
- 片方の信号をケーブルを伸ばして遅延させた後、Linear fan-in/outを用いて信号のanalog sumを取ることによって二つの信号を一つに束ねる。

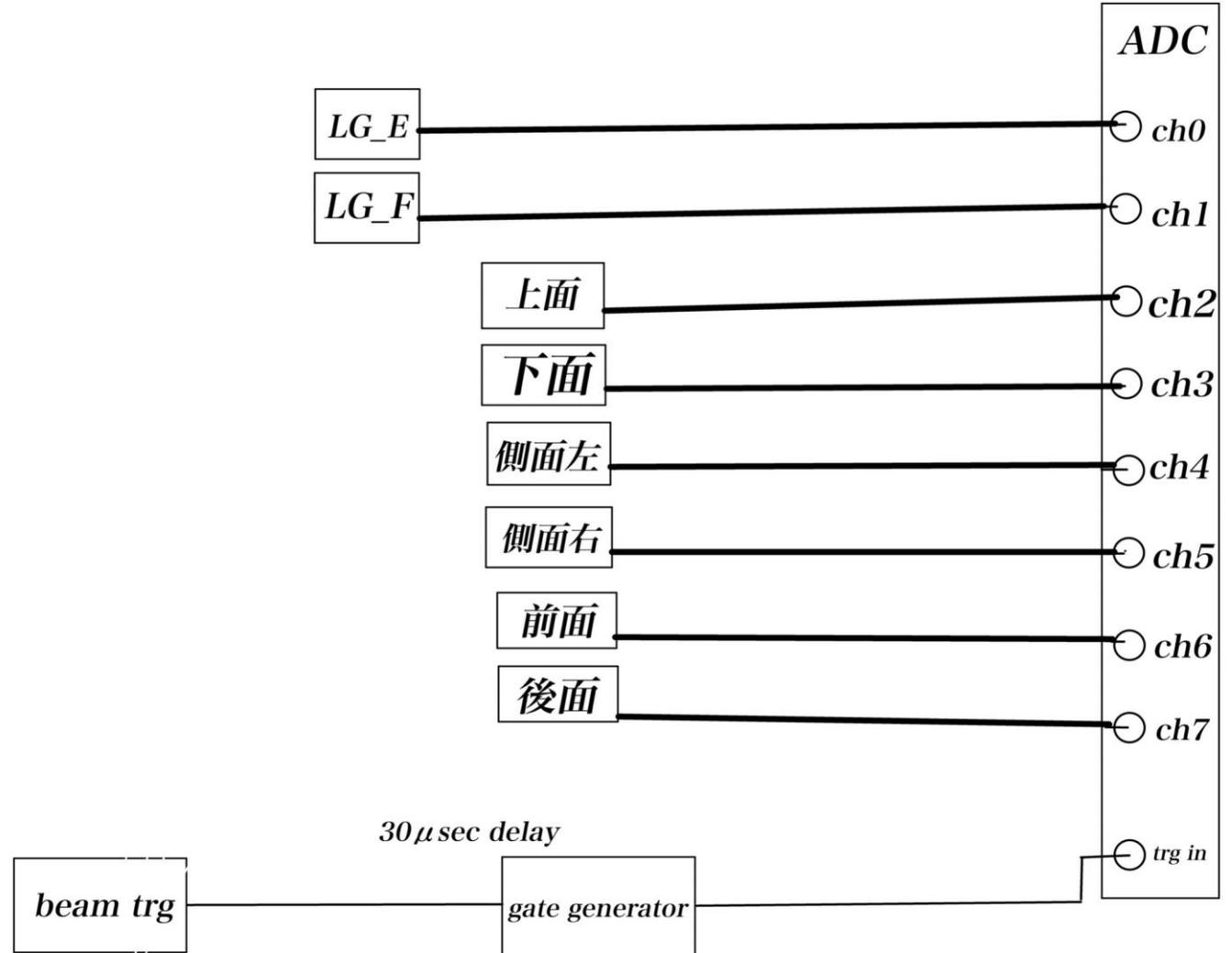
Trg counter

Trg counterと後面で
coincidenceをとり、それを
trgとして、鉛ガラスが鳴っ
た回数を調べることで鉛ガ
ラスの検出効率を調べる。

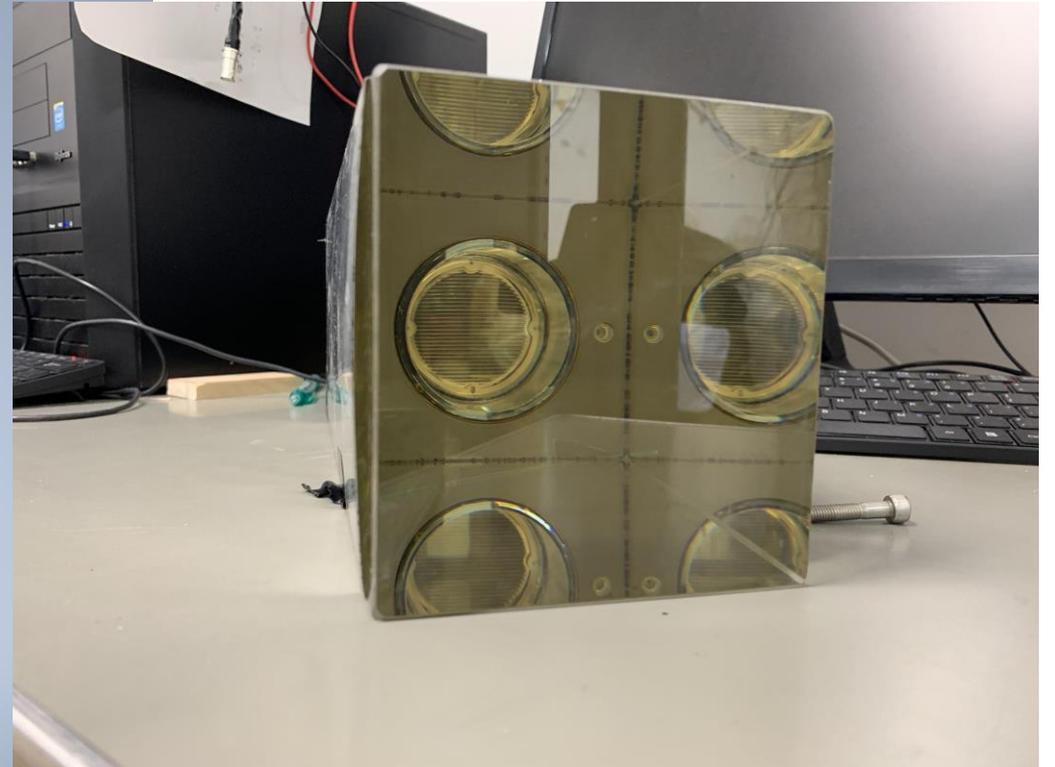
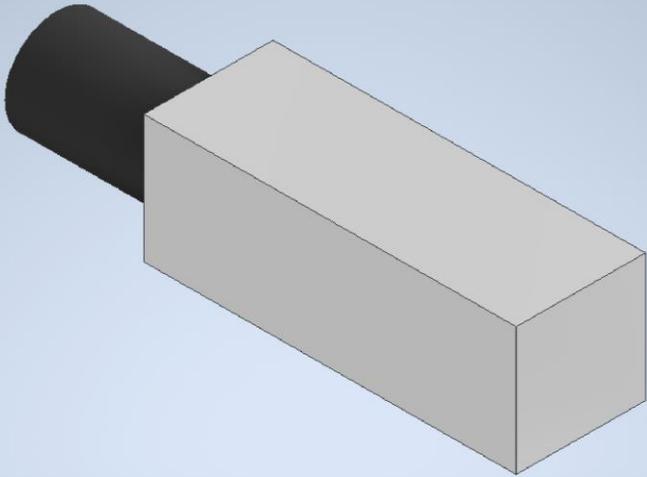


回路図 (二台目変更後)

- 2台目はlinear fan-in/outの故障のため配線を途中で変更した

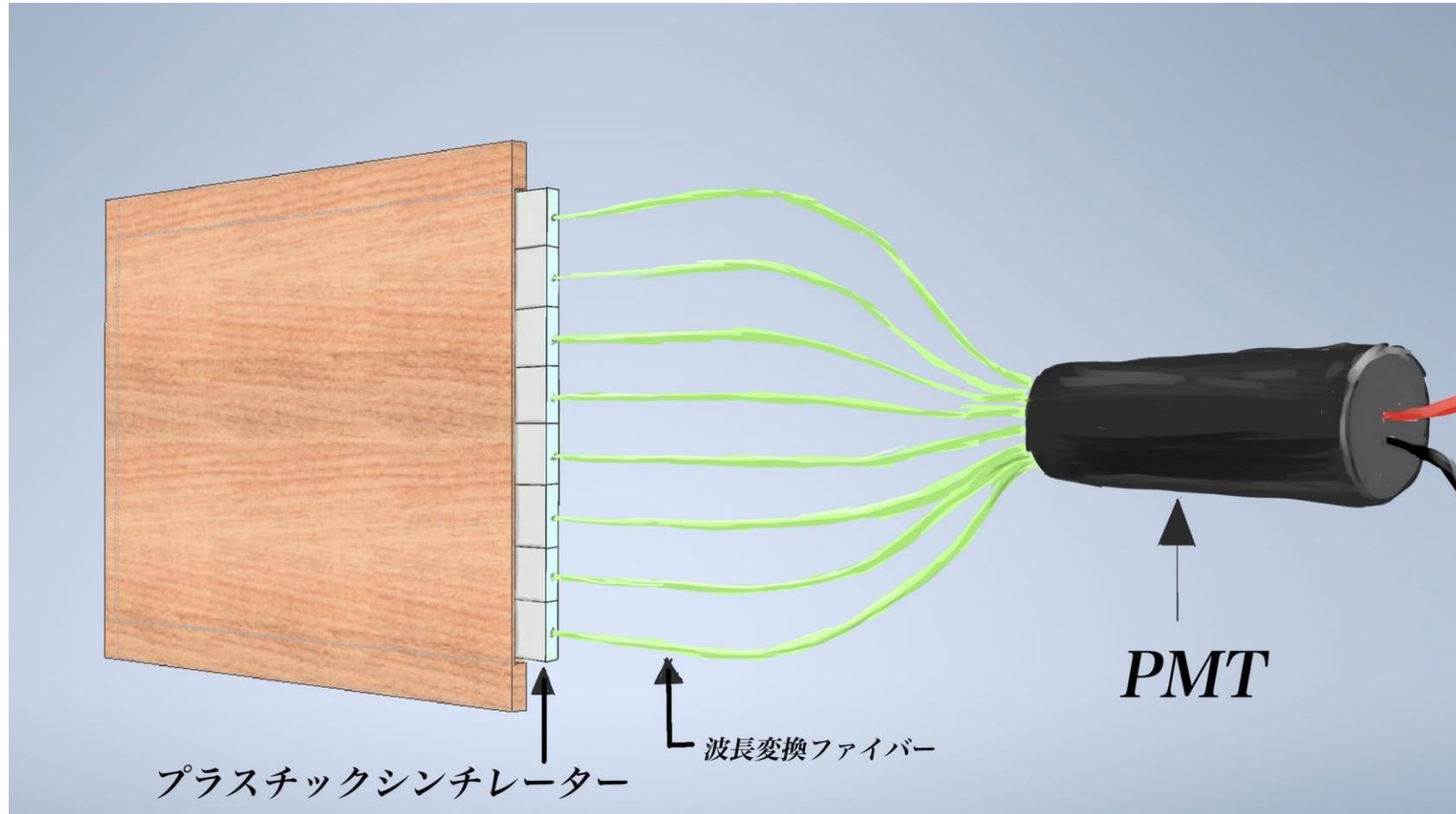


ターゲット（鉛ガラス）



- 鉛ガラス中を荷電粒子が通過する際に発するチェレンコフ光をPMTで検出する。

プラスチックシンチレーター



プラスチックシンチレーターの発光を波長変換ファイバーで
PMTで読めるように繋ぐ

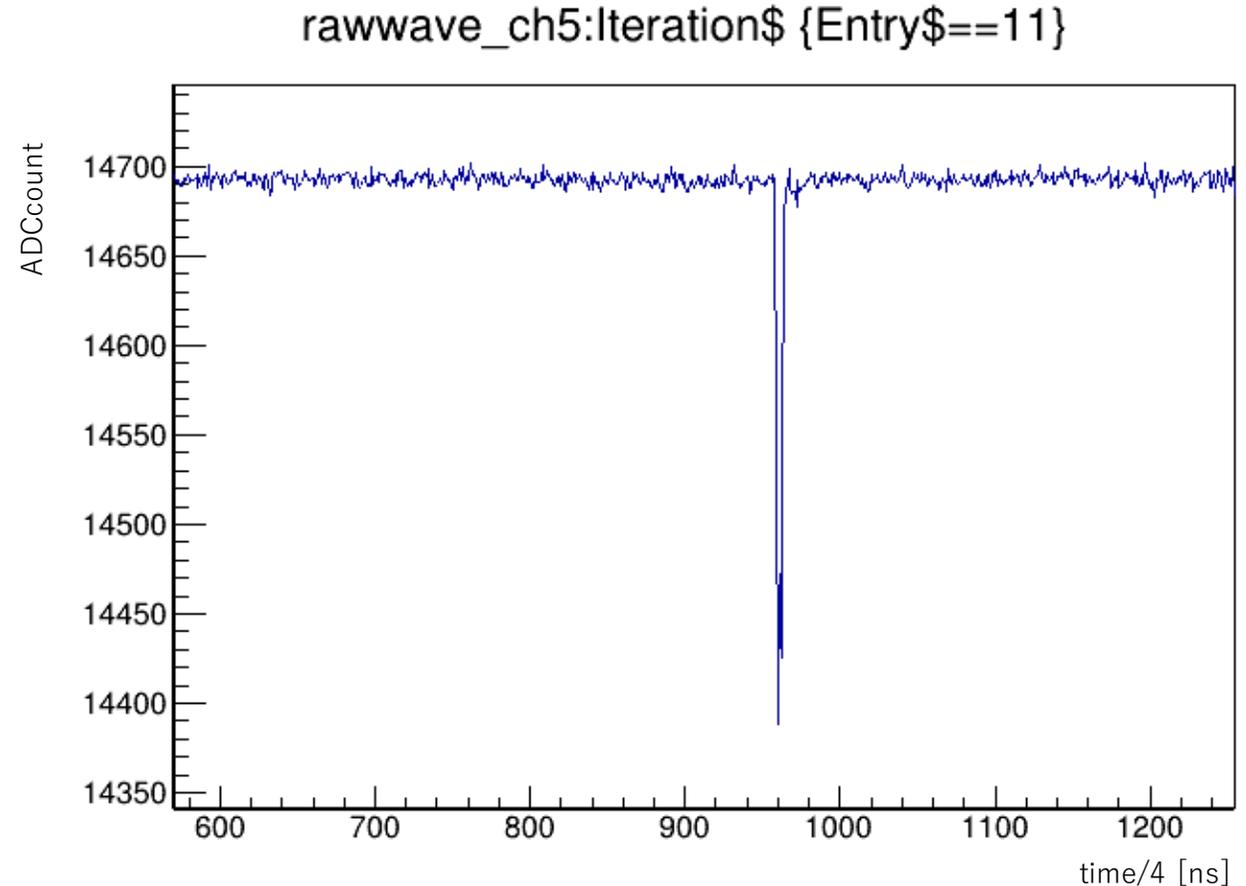
ADC

- Analog信号をDigital信号に変換
- 今回用いたのはCAEN社製のDT5725S (1台目) とDT5725 (2台目)
- Sampling数は250 MHzで8 ch



3. 結果・解析

ADCで取得したデータは、
ビーム信号をトリガーとして
記録を開始し、右図のように
保存されている。
これを次の手順で解析し、
「信号」とする。



解析手順

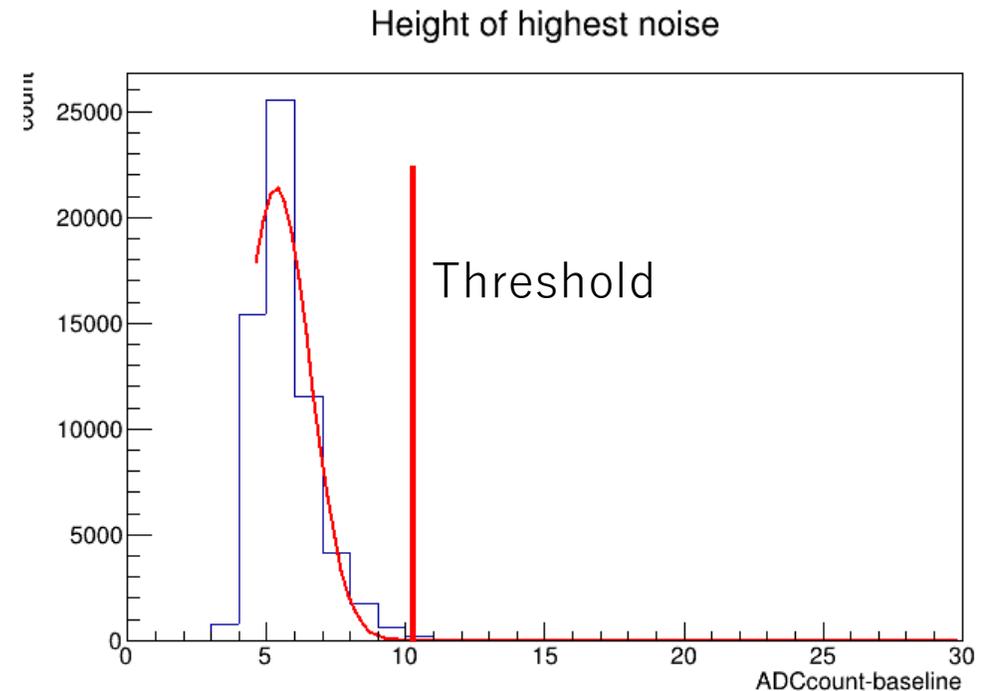
(1) Baselineの決定

Beam trigger 前 (ADCcount<500)の信号の波高の平均

(2) Thresholdの決定

Beam trigger 前の信号の最大値を
取り出し、gaussianでfitする

- baseline より鉛ガラスは 4σ 、
シンチレータは 2σ 高いADCcountを
threshold とした。



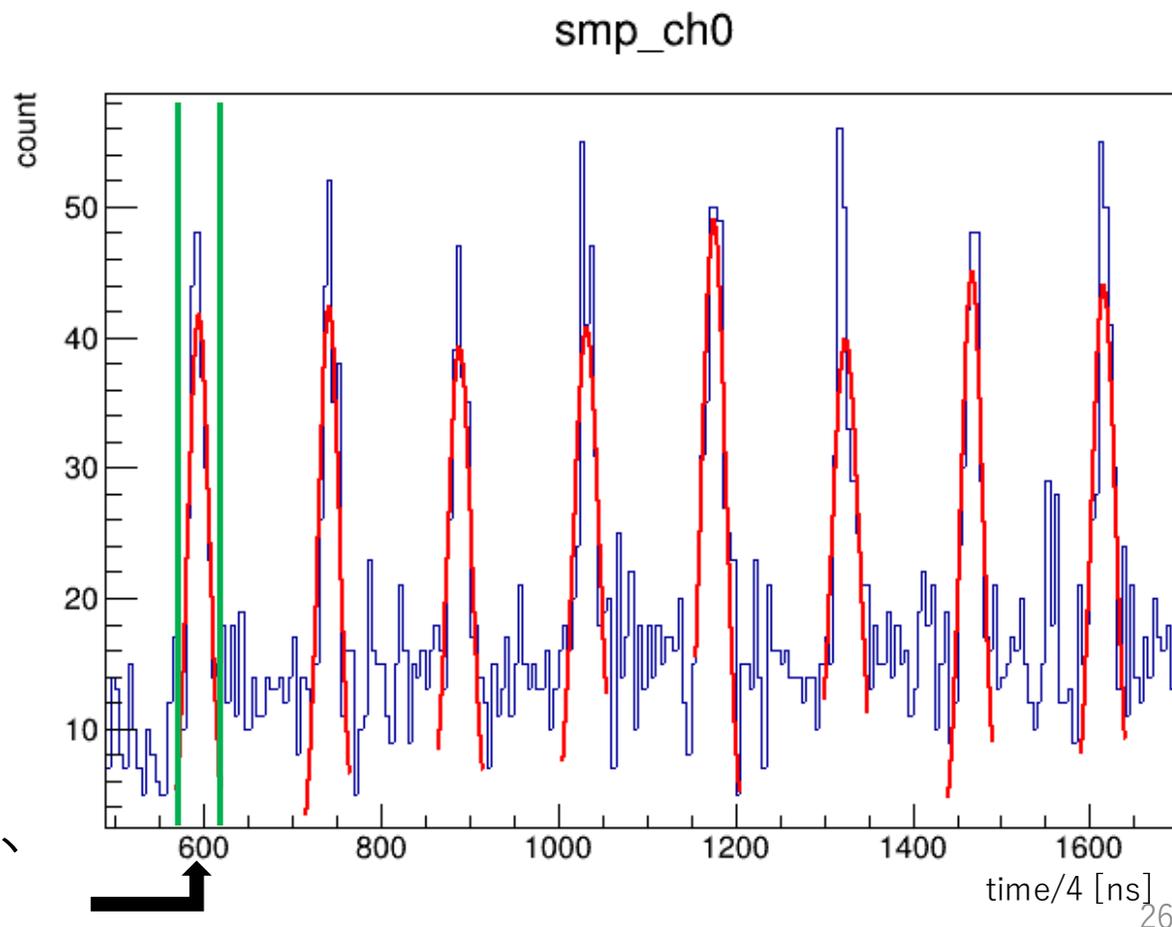
(3) bunch幅の決定

各bunchの信号として取得する範囲を決定する。

Thresholdを超えた信号を取り出すと8bunchの信号が見え、

各bunchにgaussian fitし、
 $\pm 2\sigma$ の範囲を信号とする。

この範囲を信号とし、
周りは捨てる



判定・VETO条件

鉛ガラスが1つ以上反応

→シンチレータ0ch反応

→シンチレータ1ch反応

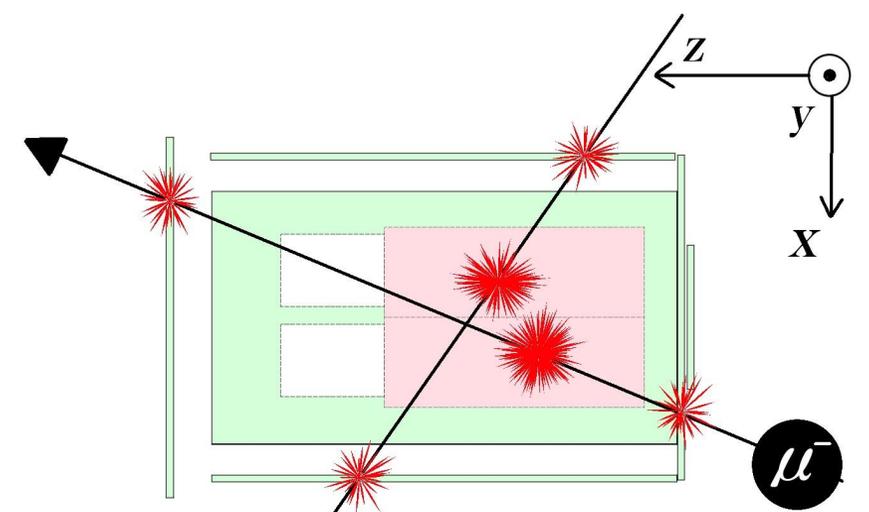
→反応面が前面

→Linear fan-in/out で束ねた5chが反応し、

2面と判定できる信号である

→シンチレータ2ch以上反応

→その他



▶ VETO (noise)

▶ VETO (muon)

▶ VETO (muon)

▶ VETO (muon)

▷ NEUTRINO EVENT

結果

データ取得時間	: 43時間06分
鉛ガラス反応数	: 6765
うちシンチレータ反応数0	: 2488
シンチレータ反応数1(前面以外)	: 641
前面シンチレータのみ反応	: 208
シンチレータ反応数2以上(前面以外)	: 1942
シンチレータ反応数2以上(前面含む)	: 1486

ニュートリノイベント数 : 641 ± 25

ミュオンVETOイベント数 : 3636 ± 60

4. 考察

- ・ シンチレータの効率（予備実験）
- ・ Simulationとの比較
- ・ 2台目について

効率

- 実際には、Veto用シンチレーターを通過しても反応しない場合がある。
- つまり、シンチレーターが1枚しか鳴っていない場合でも全てがニュートリノイベントというわけではない。
- なのでシンチレーターの検出効率を測定し補正をかける必要がある。

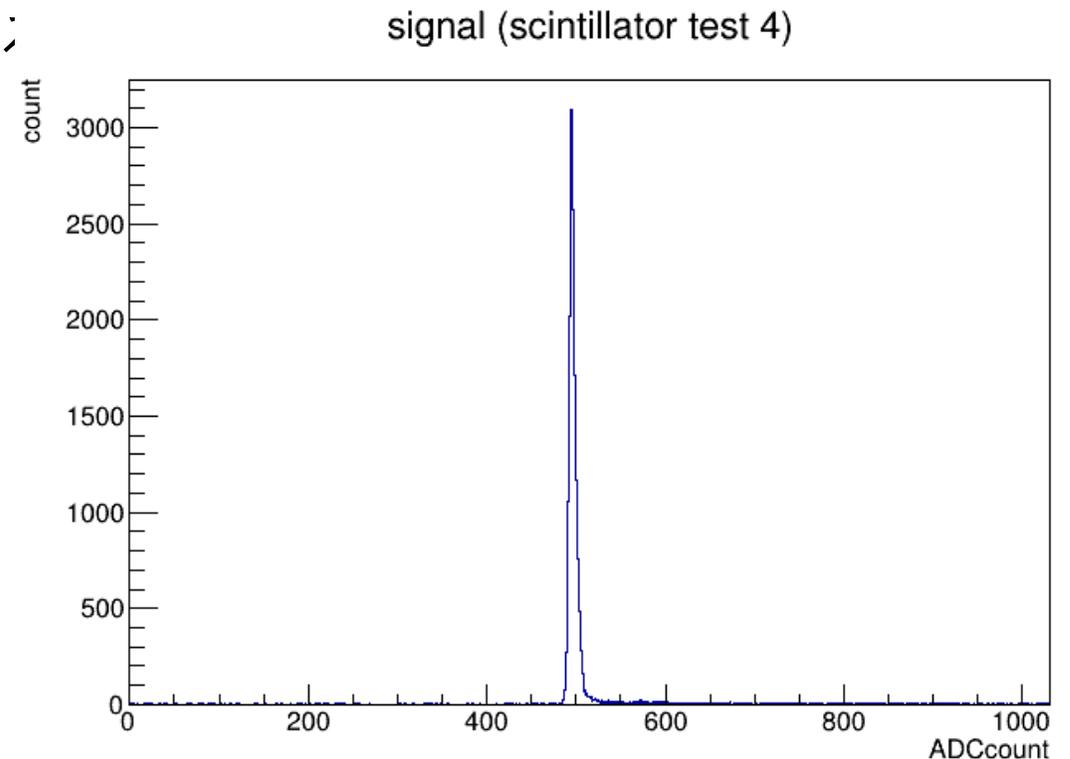
予備実験によるシンチレータ一検出効率

- 各面を同じ大きさの面で挟み、上下でコインシデンスをとり、これをト

リガーとして間の面で信号を検出す；
(率)を求める。

- 本番回路についてと同じ方法で Threshold及び範囲を決定した。
- 今実験では反応面の推定が難しい部分があるため効率を平均化して評価した。

⇒ 検出効率：70.7%



イベント数較正の失敗

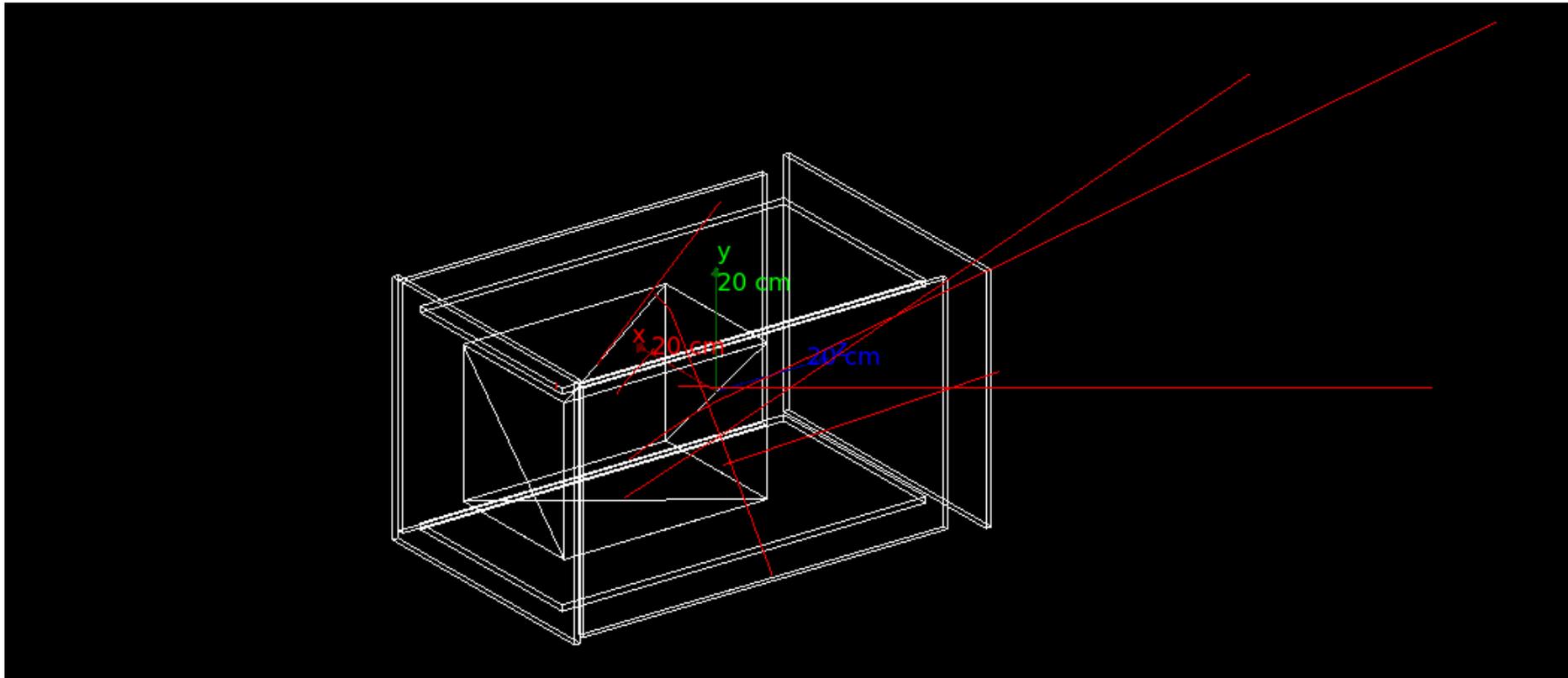
- ・ 検出効率を用いてイベント数が較正できない
（イベント数が負になる??）→検出効率そのものが低すぎる
（正しく計測できていない）と考えられる

NEUT及びGeant4を用いたSimulation

- NEUTファイル：ニュートリノビームによる様々な反応についてのsimulationデータ
- 各off-axis角で1.5 m × 1.5 m × 1 cmの水に照射したsimulationを、密度、体積、POTで較正
- NEUTが持つ反応の種類のデータを用いて陽子数、中性子数で較正 (e.g. $\nu + P \rightarrow \mu^- + P + \pi^+$ or $\nu + N \rightarrow \mu^- + N + \pi^+$)
- 鉛ガラスの陽子：中性子比 64：88
- 今回の実験で予想されるニュートリノ反応の数： 3.4×10^2

Geant4を通じたSimulation

- Geant4で実際のGeometryを配し、ニュートリノ反応（できたミューオン等の荷電粒子）を検知できる確率を調べる



反応数の予想と結果

- ・シンチレータが空間的にカバーする割合
（反応数換算）：99.80 %
- ・ニュートリノ反応が（VETOされずに）検出
される割合：85.4 %

→NEUTとGeant4から導かれる反応数： 2.9×10^2

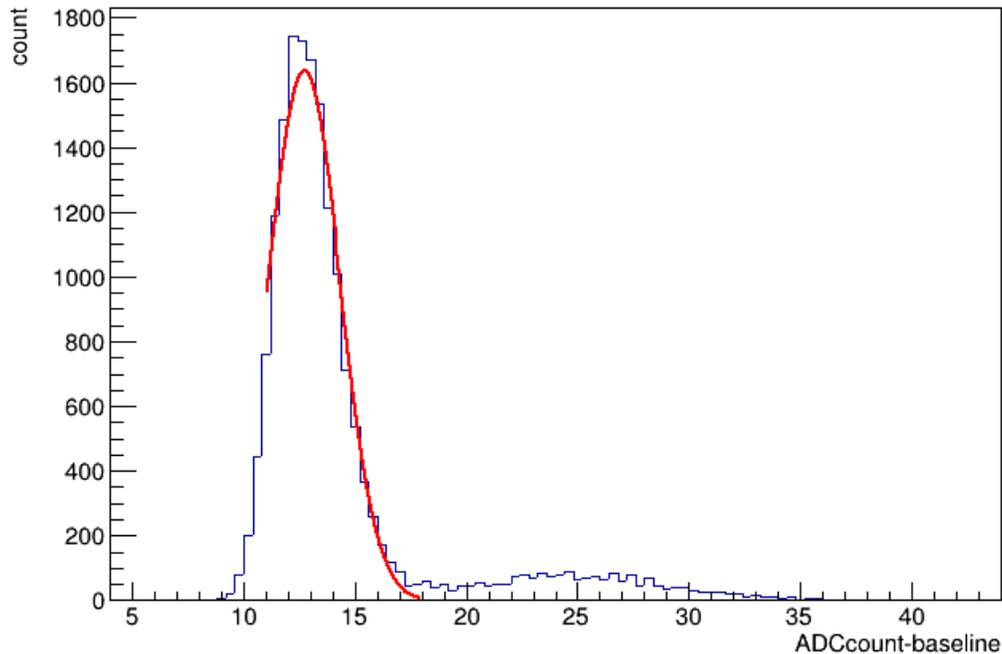
⇔本実験での反応数： 6.1×10^2 (2.1倍)



2台目の装置が
うまく取れてい
ない

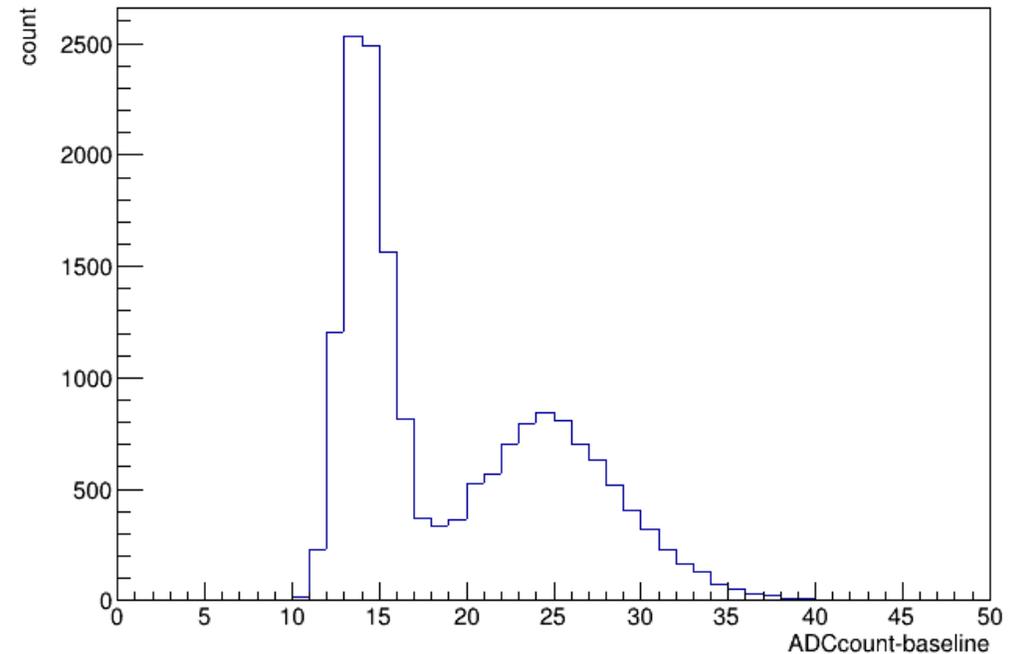
Thresholdの決定 (ch0)

Height of highest noise ch0



sampling<50における波高の最大値
これをガウシアンフィッティングで評価した

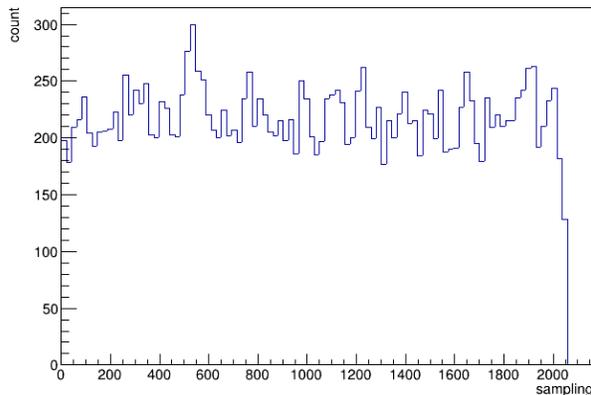
Height of highest signal ch0



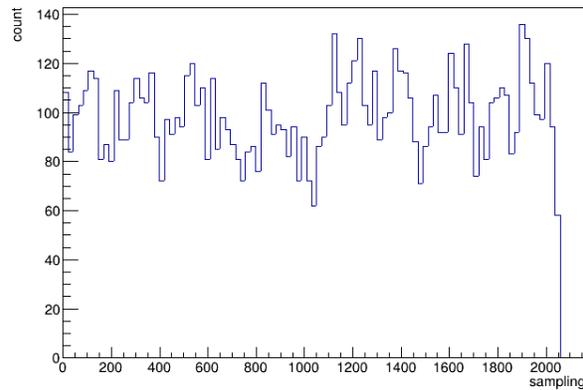
参考：spill全体での波高の最大値

2台目の信号タイミングのヒストグラム

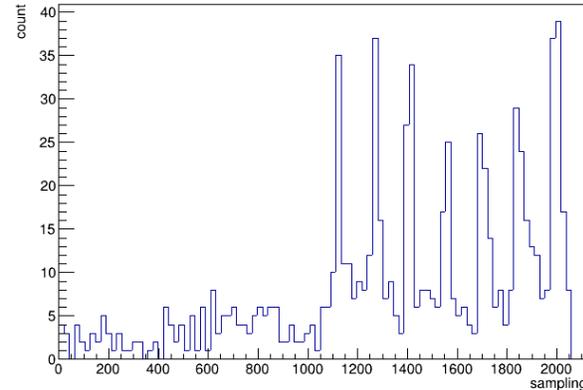
Timing of Top of Hakei ch0



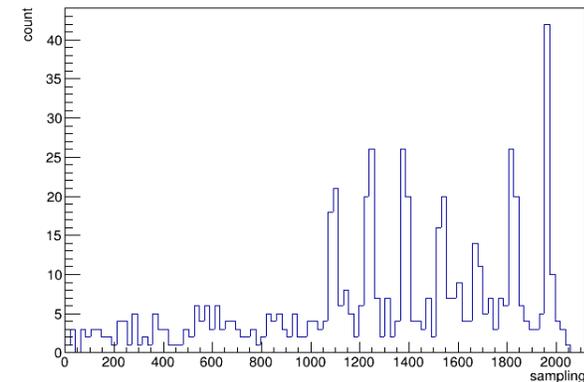
Timing of Top of Hakei ch1



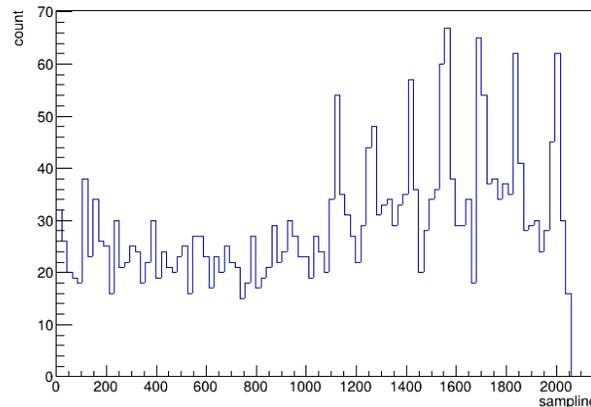
Timing of Top of Hakei ch2



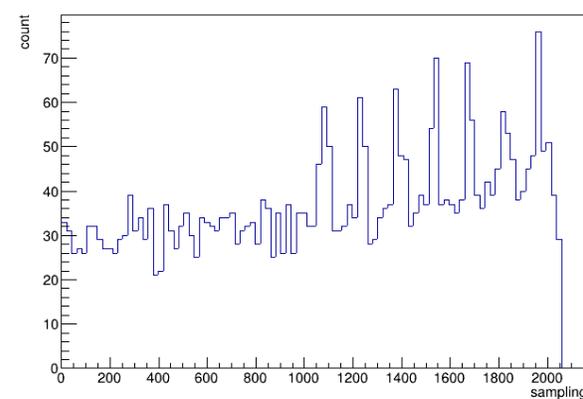
Timing of Top of Hakei ch3



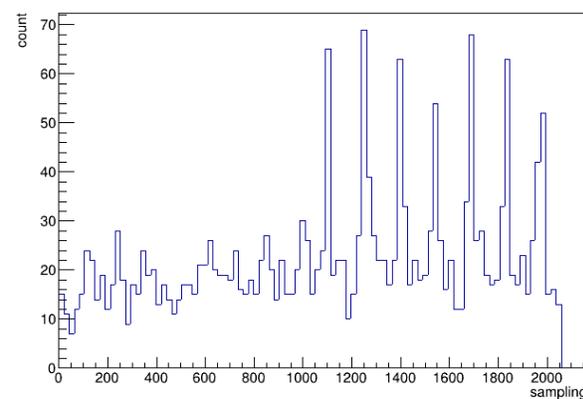
Timing of Top of Hakei ch4



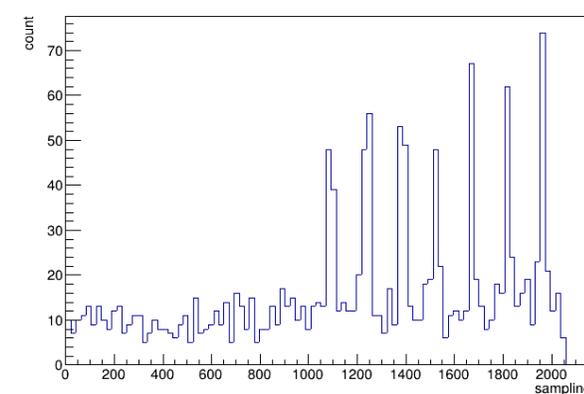
Timing of Top of Hakei ch5



Timing of Top of Hakei ch6



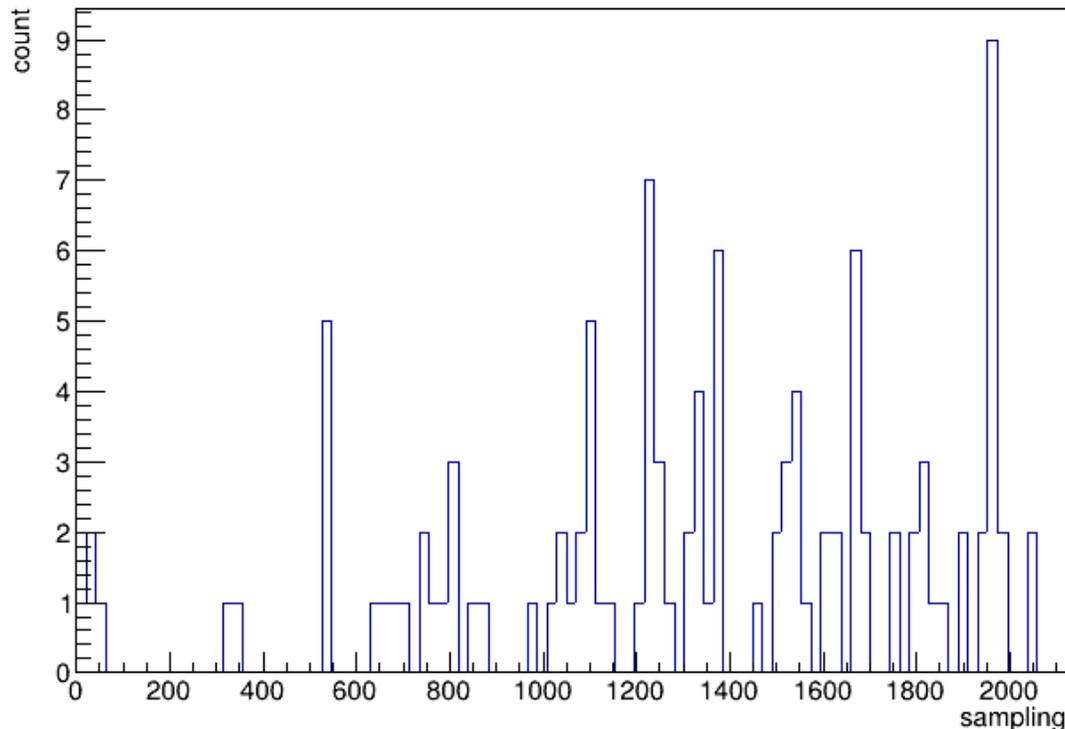
Timing of Top of Hakei ch7



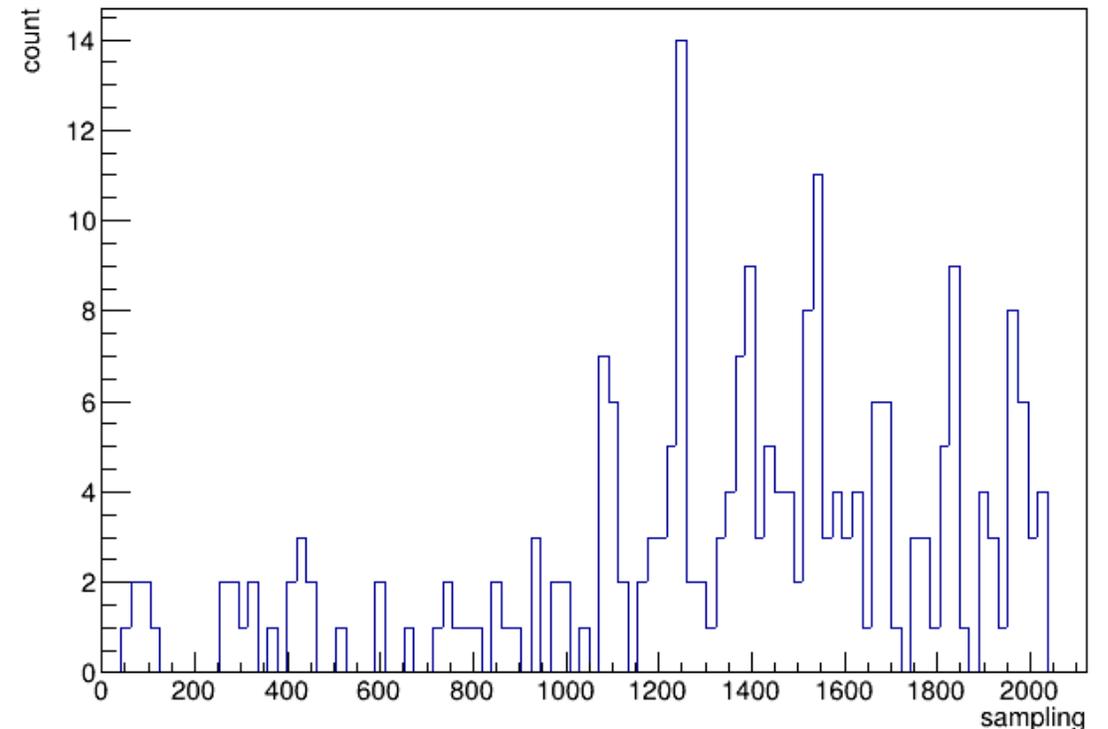
Ch0, 1が鉛ガラス、ch2～がプラスチックシンチレータ。ch0, 1はbunchも全く見えない。
プラスチックシンチレータはbunchが7つに見える（ホントは8つ見えるはず）。

thresholdを越えてから切るまでの
sampling数 >1 の条件を課してヒストする。

Timing of Top of Hakei ch0(tennnokazu >1)



Timing of Top of Hakei ch1(tennnokazu >1)



特にch1のLGにうっすらbunchが見えていそうだが、イベント数が少なくよく見えない。

結論

- ・ニュートリノイベント数は 641 ± 25 となり、Simulationの2倍程度検出された。
- ・2台目についてはおそらく信号も混ざっていきそうだが、鉛ガラスのノイズが激しく、信号との分離ができなかった。
- ・全断面積をエネルギー依存性で比較するには至らなかった。

謝辞

指導教員の中家さん、隅田さん

TAの中村さん、川上さん

安留さんをはじめとする高エネの院生の方々

木河さん、塚本さん、KEKの方々. . .

右も左もわからず、日程や進捗もギリギリな状況の中大変お世話になりました。

本当にありがとうございました。

- 前面を含まない2面が鳴ったイベントのinefficiency

$$1942\text{events} \times \frac{2 \times 0.12}{0.88} = 530$$

シンチレータ反応数と考えられる イベント

PS0枚カウント

- ・LGのノイズ (たくさん)
- ・ニュートリノイベントでPS一枚取り逃し (構造的隙間抜け、PSのinefficiency)

PS1枚カウント

- ・ニュートリノイベント
- ・ミュオンイベントで1枚取り逃し

PS2枚カウント

- ・ミュオンイベント

$$n_{1\mu} = n_2 \times \frac{(1-p)}{p}$$

$$n_{1\nu} = n_1 - 2 \times n_{1\mu}$$

$$N_\nu = \frac{1}{p} n_{1\nu}$$

検出効率