

チェレンコフ光の異方性を用いた ニュートリノの反応断面積測定

荒川皓佑 印藤孝太郎 中川遥仁

実験日 2025年3月13日, 3月15日

発表日 2025年3月17日

目次

- 実験の目的
- 理論
- 当初やる予定だった実験
- 実験について
- シミュレーションとの比較
- 電子ビームでの検出器テスト実験
- 実験結果1
- 宇宙線での検出器テスト実験
- 実験結果2
- 考察および反省点

実験の目的

- 実験を通してニュートリノの存在を確かめる

→弱い相互作用の理論の検証

検出自体容易でないためニュートリノ反応を見ることが十分大きな意味を持つ

- チェレンコフ光の異方性を用いてより精度のある反応断面積の測定を試みる

→バックグラウンド (sand muon) の正確な除去

複数種ある荷電カレント反応をバックグラウンドと区別

- ニュートリノ反応
- チェレンコフ光

ニュートリノ反応

- 素粒子標準模型

4つの力とそれらを仲介するゲージ粒子

※重力は除く（グラビトンは未発見 2024）

力	ゲージ粒子
強い力	グルーオン
電磁気力	光子
弱い力	ウィークボゾン
（重力）	（グラビトン）



{ 荷電カレント(CC)反応
... $W^\pm$ 粒子
中性カレント(NC)反応
... Z^0 粒子 }

力とゲージ粒子

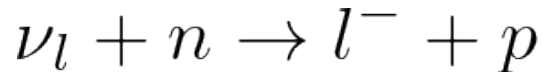
ニュートリノ反応

- 荷電カレント反応への注目

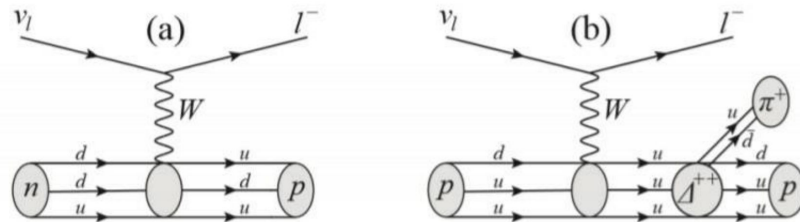
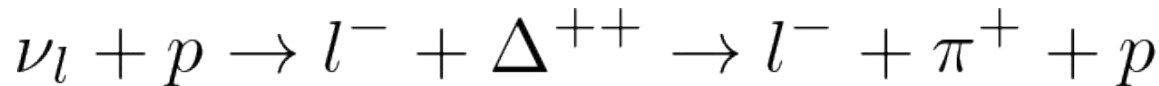
→生成された荷電レプトンは検出器中でチェレンコフ光を発し、これを検出することで間接的に反応を確認できる

- 荷電カレント反応の種類

- CCQE



- CC1 π



荷電カレント反応のダイアグラム

(a) CCQE, (b) CC1 π

他にも数種類あるがここでは我々が実験で用いる予定だったエネルギー帯で主だって起こる2種類のみ挙げておく

チェレンコフ光 (Cherenkov light)

荷電粒子が物質中の光速より速く運動した際に出す光の衝撃波.

荷電粒子の速度を v , 物質の屈折率を n とすると

$$v > \frac{c}{n}$$

であるとき, チェレンコフ光が発生する.

エネルギーについての条件で表せば, エネルギーが

$$E_{th} = mc^2 \left(-1 + \sqrt{1 + \frac{1}{n^2 - 1}} \right)$$

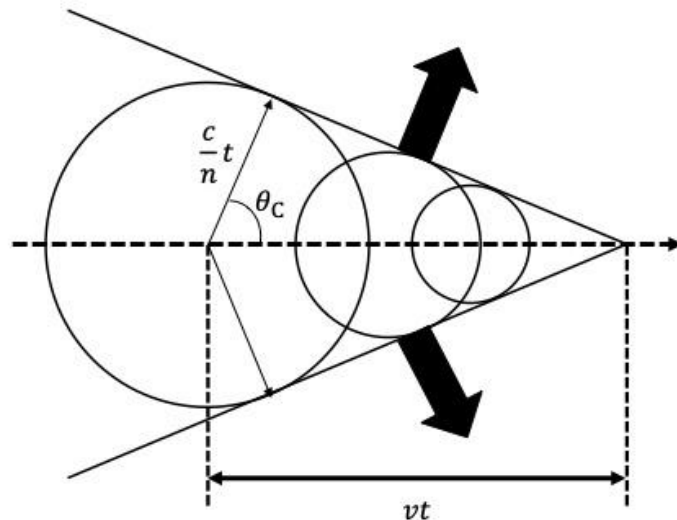
以上であるときにチェレンコフ光を発する

チェレンコフ光 (Cherenkov light)

- チェレンコフ光は粒子の進行方向に対し頂角 θ_C を持つ円錐状に出る

$$\cos \theta_C = \frac{1}{\beta n} \quad \left(\beta = \frac{v}{c} \right)$$

- 荷電粒子の速度がわかれば
上式より大まかな飛跡が求められる
- シンチレータのみで得られる情報
だけで速度を得られるかは疑問



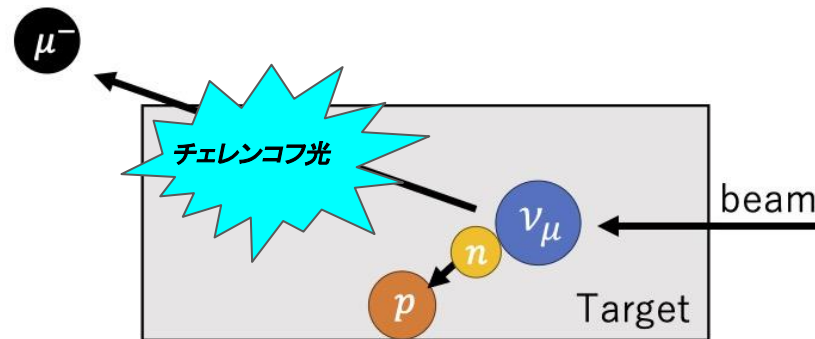
チェレンコフ光放射の模式図

当初やる予定だった実験

- 鉛ガラス（以下ターゲット）内でのニュートリノイベント

生成したミュオンの運動により出る
チェレンコフ光をPMTで検出

イベント数をカウントして反応断面積
を算出する



ニュートリノイベントの模式図

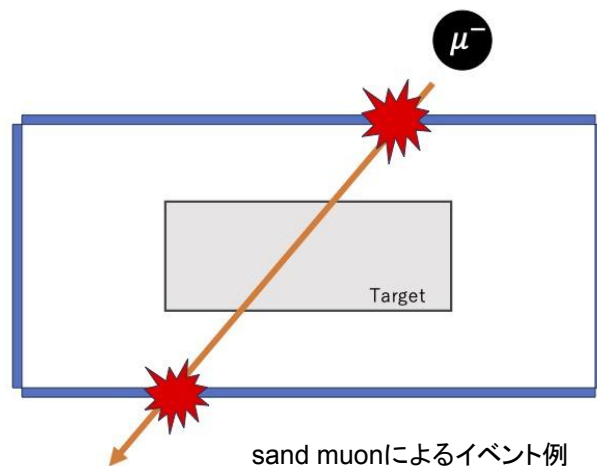
当初やる予定だった実験

- バックグラウンドの除去

ニュートリノがターゲット外で反応してできたミュオンが測定器を通ることがある (sand muon)

sand muonによるターゲット内のイベントを区別するためにターゲットをプラスチックシンチレータで覆い、幾何的な条件のもと区別を図る

ミュオンは直線的に通過するため、ターゲットの六方向をシンチレータで覆えば幾何的に必ず2枚のシンチレータで信号を得ることになる



当初やる予定だった実験

- 複数種反応の考慮

実験に用いるビームのエネルギー帯（1GeV付近）では複数のニュートリノ反応が起こると考えられる

- CCQE

$$\nu_l + n \rightarrow l^- + p$$

- CC1 π

$$\nu_l + p \rightarrow l^- + \Delta^{++} \rightarrow l^- + \pi^+ + p$$

2つの荷電粒子が出るためシンチレータの反応枚数では sand muon と区別がつかない

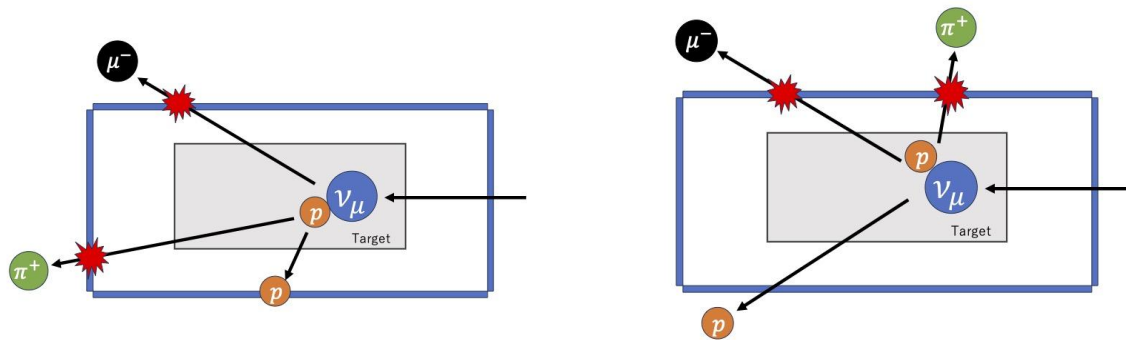
当初やる予定だった実験

- 複数種反応の考慮

CC1 π を sand muon とどう区別するか？

→シンチレータをなるべく分割して大まかな飛跡の推測

(同一のシンチレータに引っかかった場合は次のシミュレーションにより
光量で区別することが期待できる)

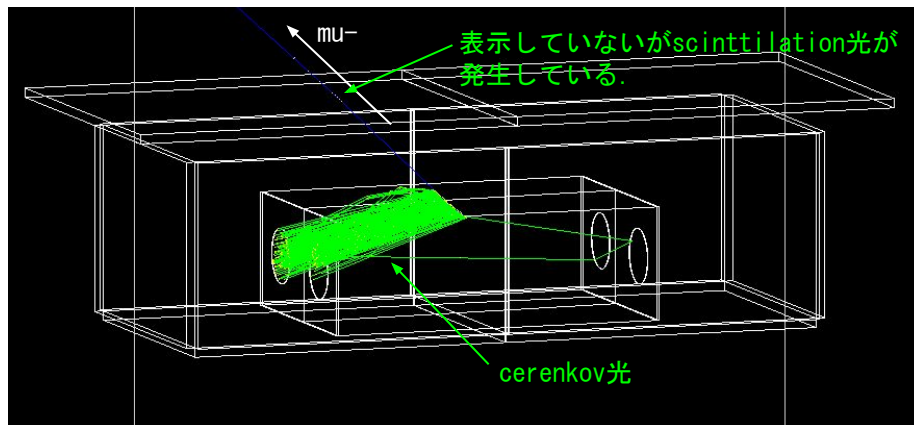


CC1 π 反応の例

左側は異なる2枚のシンチレータを2つの荷電粒子が通過し、右側は同一のシンチレータを2つの荷電粒子が通過している

当初やる予定だった実験のシミュレーション

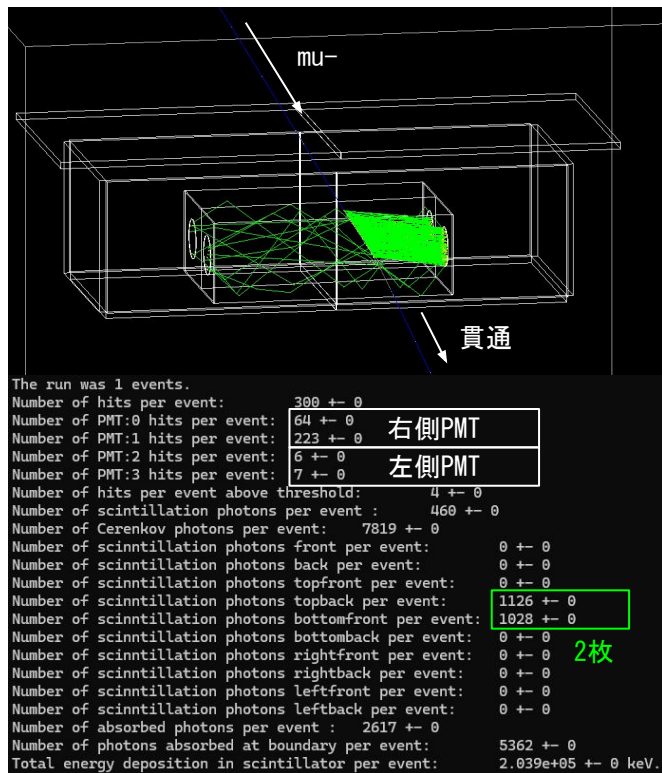
- シミュレーションにはGeant4を使用.
- 鉛ガラス内のランダムな位置からランダムな方向に μ^- を発射 (CCQE).
- 鉛ガラス内のランダムな位置からランダムな方向に μ^- と π^+ を発射 (CC1 π).
- ビーム上流のランダムな位置から鉛ガラス方向に μ^- を発射 (sand muon).
- 鉛ガラスのPMTと各シンチレータから光量を取得しtxtファイルに書き込み.
- 同じ解析コードを適用してCCQEだけを取り出せば良い.



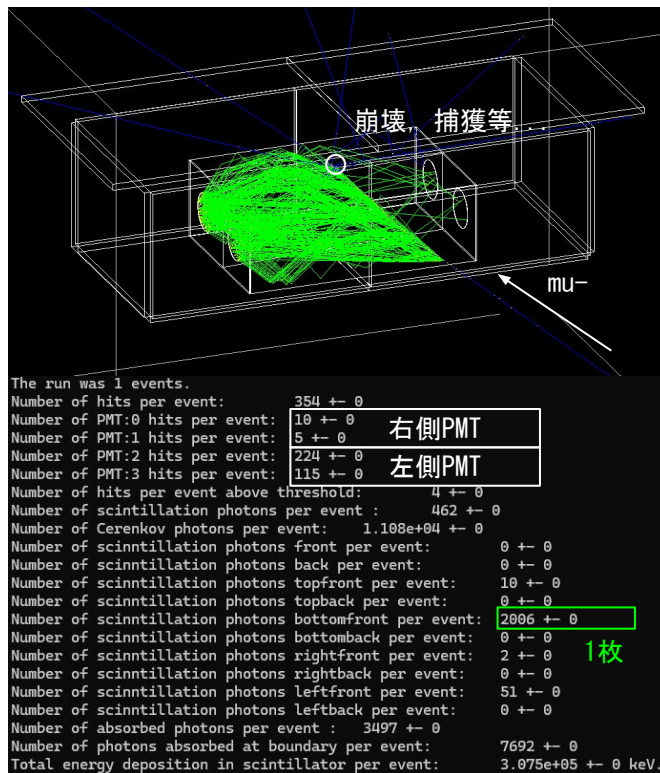
CCQE反応として μ^- を鉛ガラス内から200MeVで発射している例.

シミュレーションから考えられる問題点と改善点

- 検出器外からmuon-を打ち込んだ時のチェレンコフ光発生の様子。



装置を貫通する場合のsand muonの例。



鉛ガラス内で崩壊、捕獲を起こすsand muonの例。

sand muonが鉛ガラス内で崩壊や捕獲を起こした場合、シンチレーター一枚のみで検出される。

↓
シンチレーター一枚 = ニュートリノ反応のミュオンとは限らない。

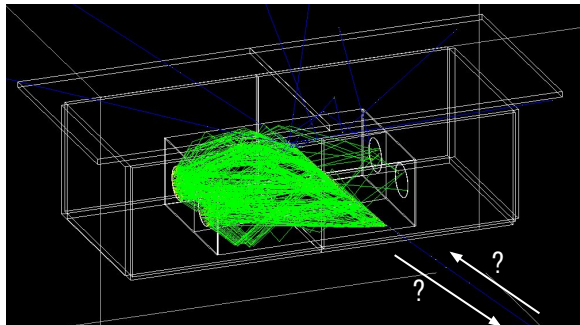
しかし、チェレンコフ光の異方性の情報で区別できるのではないだろうかと考えた。

実際左のシミュレーションではPMTでの光量差からミュオンの飛来方向を識別できている。

これを踏まえてCCQE反応だけを取り出す条件を考えて解析。

CCQE反応を取り出す条件とサンドミュオンVETO条件

- 主な方針はシンチレータのヒット情報とcherenkov光の方向の情報を照合.



例) 左図の場合, 右側の光量が多ければCCQE反応.

左図では左側が多いのでsand muonと考える.

方向情報 使用データ	使用しない	使用する
CCQE (1000 Events)	CCQEのデータでCCQEと判定 : 93%	71% (22%悪化)
CC1 π (1000 Events)	CC1 π のデータでCCQEと誤判定 : 30%	24% (6%改善)
sand muon (1000 Events)	sand muonの内CCQEと誤判定 : 41%	1.5% (39.5%改善)

← 理想は100%

← 理想は0%

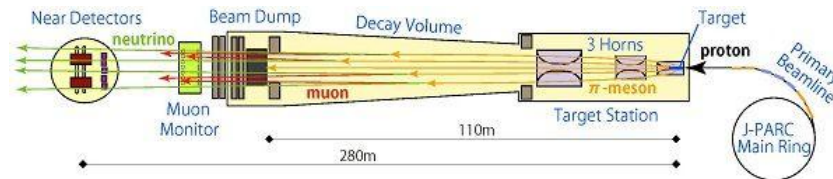
← 理想は0%

- 29%のCCQE反応を見逃す. 一方で98.5%のsand muonをVETOできている.

当初やる予定だった実験

- 鉛ガラスを用いたニュートリノの反応断面積測定

茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設J-PARCにおいてニュートリノビームを用いて実験予定であったが、施設トラブルのため利用不可能に



J-PARCとニュートリノビーム概要

(いずれも<https://j-parc.jp/c/facilities/nuclear-and-particle-physics/neutrino.html>より引用)

2025.03.14



J-PARCニュートリノ実験施設の利用運転の停止について

J-PARCユーザーのみなさま、特にニュートリノ実験施設のユーザーの皆様

平素よりJ-PARCの活動にご高配を賜り感謝申し上げます。

3月4日（火）6時29分ごろ、J-PARCニュートリノ実験施設のニュートリノ生成標的を冷却するヘリウムガスの流量が低下したため、ニュートリノ実験施設へのMR加速器のビーム供給を停止しました。

現在、当該設備を調査していますが、原因を特定するためにはさらにターゲットステーションのヘリウム容器内の調査が必要になりました。この作業には3ヶ月以上の期間を要するため、2025年前半のニュートリノ実験施設のビーム利用運転を停止することになりました。

ユーザーの皆様には大変ご迷惑をおかけして申し訳ありません。今後のスケジュールについて、後日お知らせいたします。

J-PARCセンター長 小林 隆

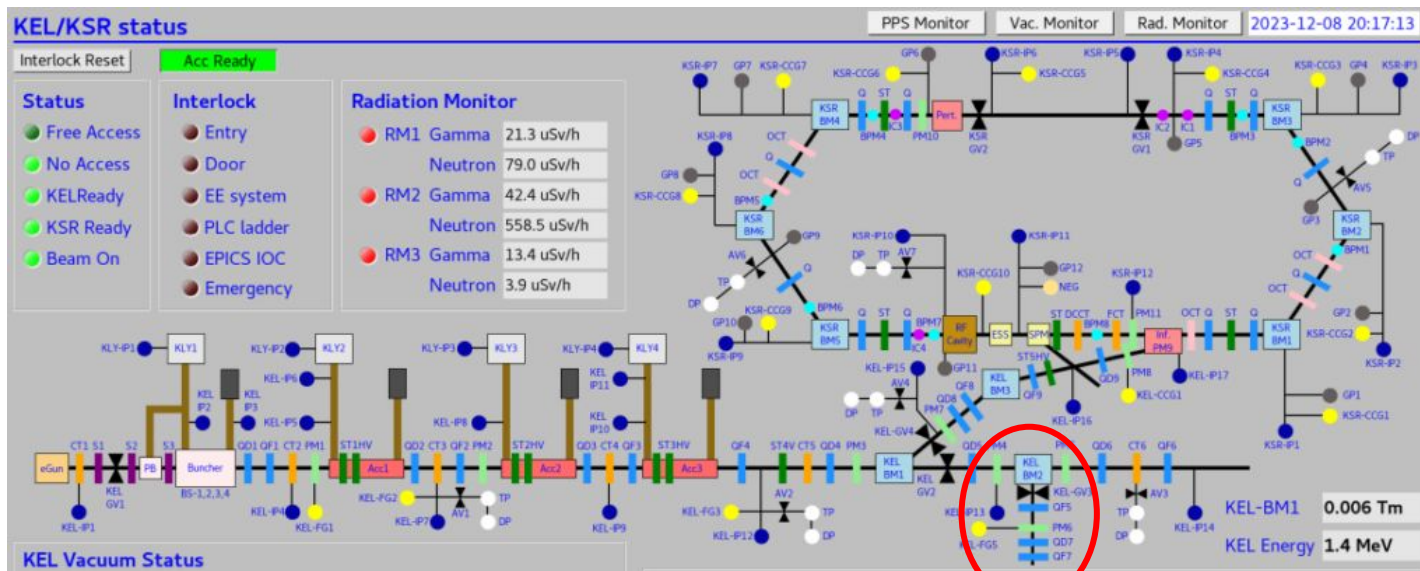
(<https://j-parc.jp/c/information/2025/03/14001484.html>より)

実験について

○ 京大化研電子線形加速器KEL

90° ビームラインで電子ビーム実験を行った

10~70MeVのエネルギー調整が可能

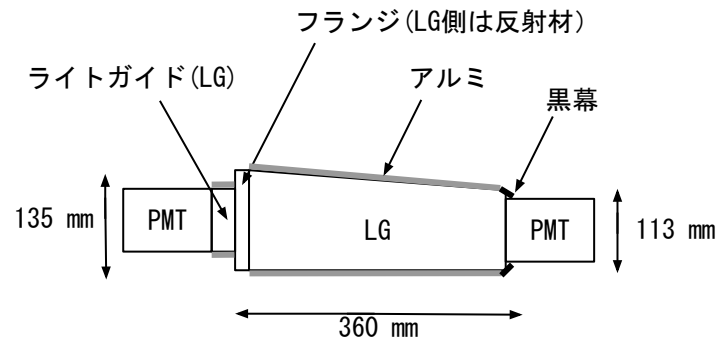
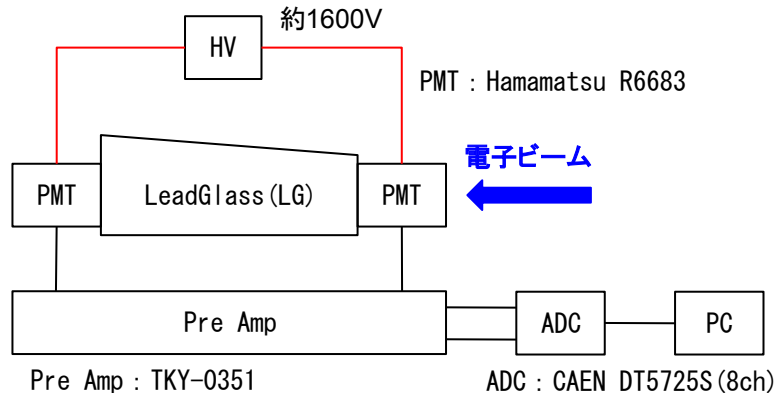


実験について

- 鉛ガラスに電子ビーム（荷電粒子と想定）を角度，エネルギーの複数条件で入射
- 鉛ガラスを挟むように設置した2つのPMTでチェレンコフ光を検出，光量を比較する

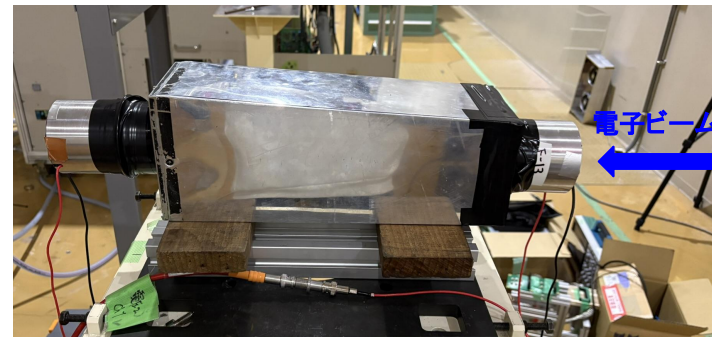


電子ビーム実験でのセットアップ



○ 以下の9データ取得.

配置 Energy	0度 LG	90度 LG	180度 LG
30MeV	10min	10min	5min(時間都合)
50MeV	10min	10min	5min
60MeV	10min	10min	5min

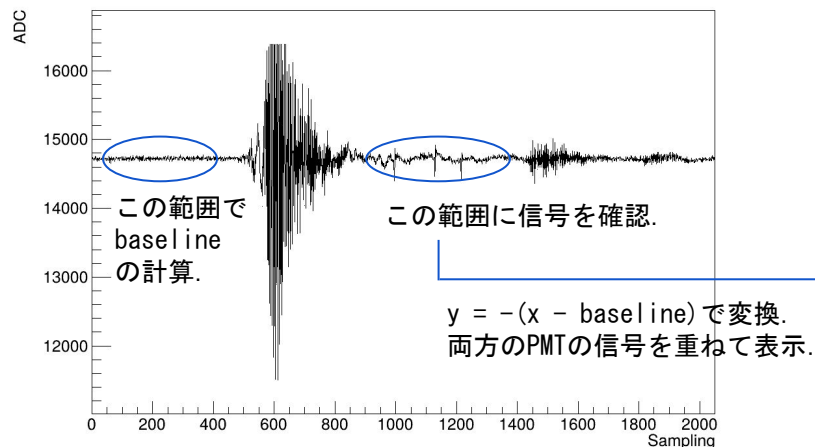


ビームラインに対して鉛ガラスが0度の時のセットアップ.
データ取得時は暗幕で覆う.

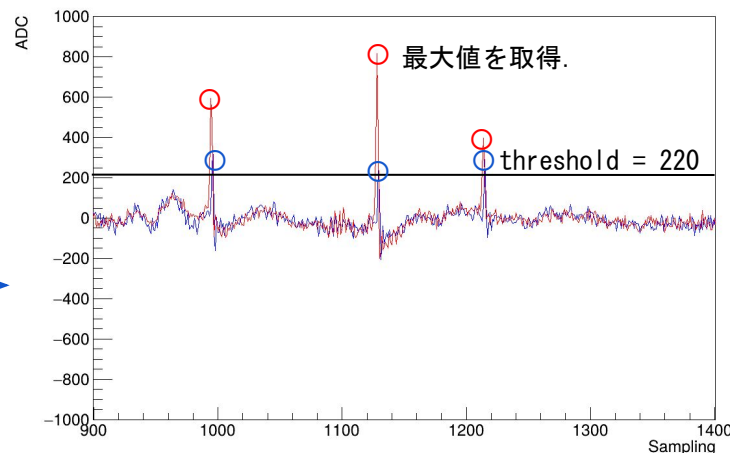
電子ビーム実験の結果の解析手順

- 信号のない範囲のデータから平均値としてbaselineを決定.
- チェレンコフ光の信号が確認できる箇所を抜粋.
- 解析用に $y = -(x - \text{baseline})$ で変換.
- ノイズが入らないようにthresholdを決定(全てthreshold = 220).
- PMT0 or PMT1がthresholdを超えた箇所で両方のPMTの最大値を取得.

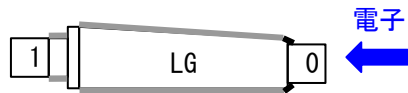
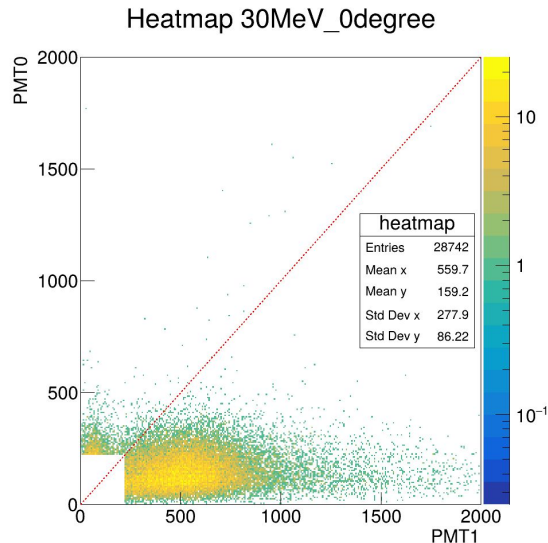
An example of raw data



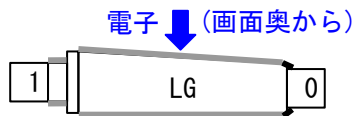
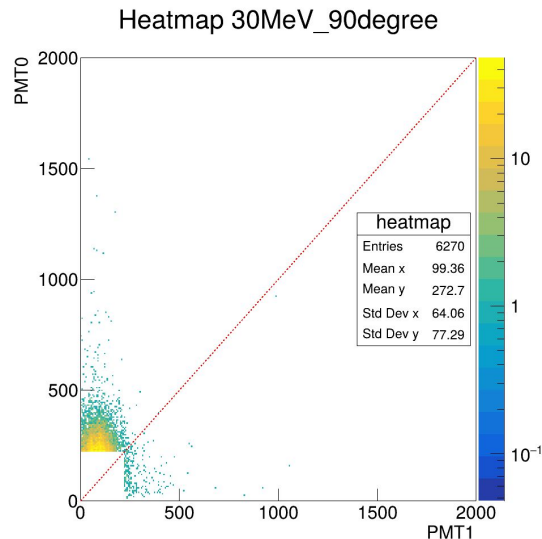
Graph for analysis



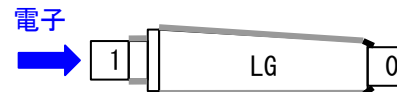
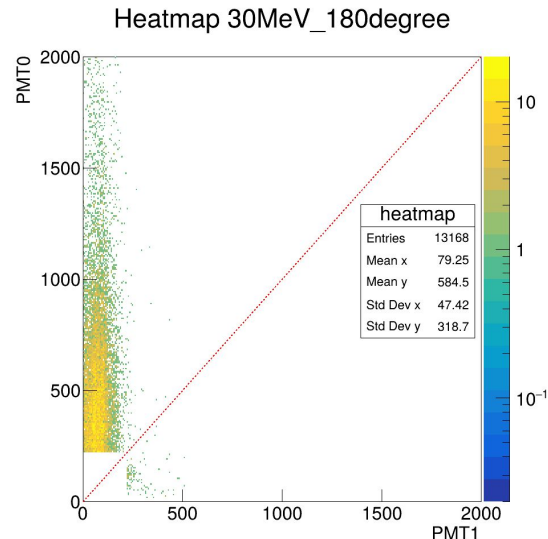
30MeVの結果



PMT1の方が光量多い。



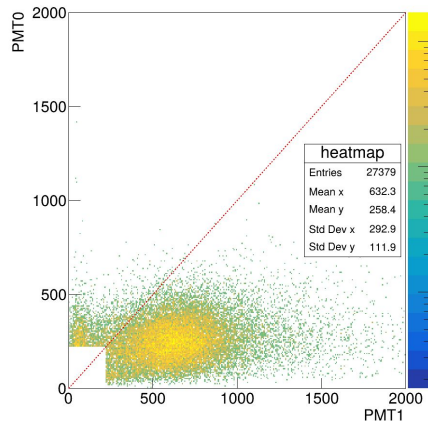
ややPMT0の方が光量多い。
→フランジでの反射分がPMT0に到達するからだと考えられる。



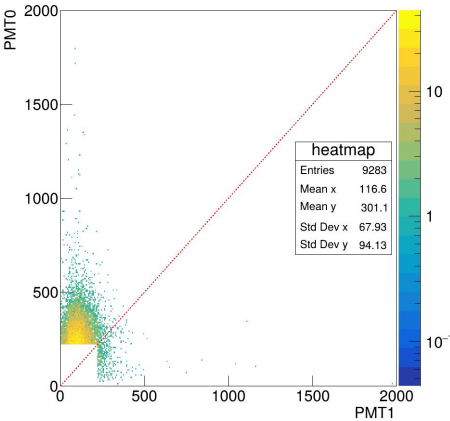
PMT0の方が光量多い。

50MeVと60MeVの結果

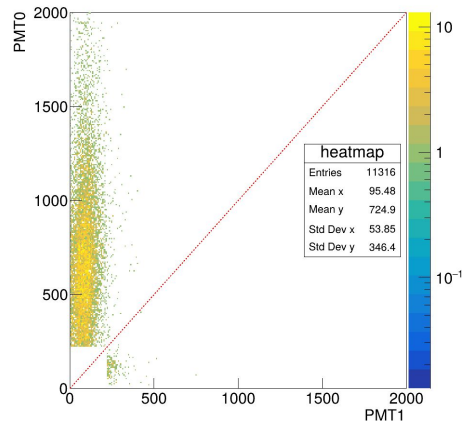
Heatmap 50MeV_0degree



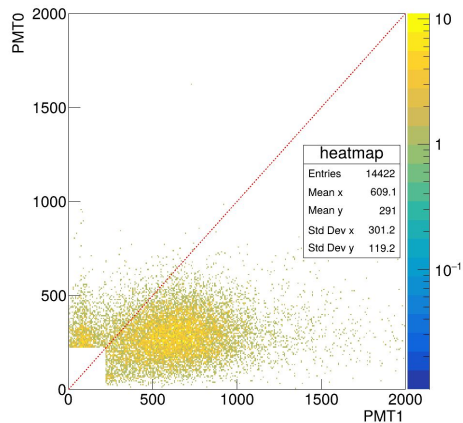
Heatmap 50MeV_90degree



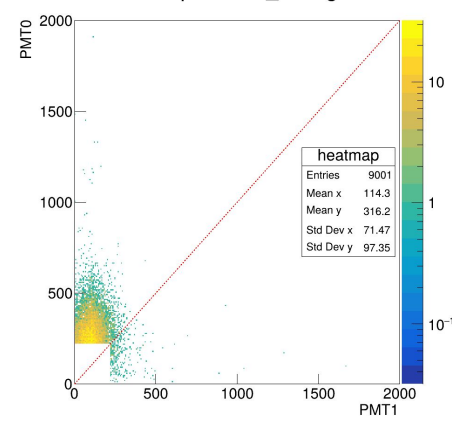
Heatmap 50MeV_180degree



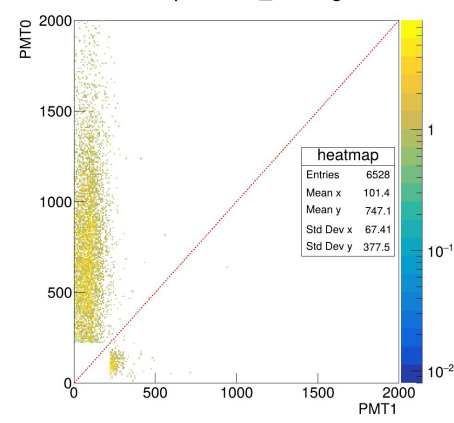
Heatmap 60MeV_0degree



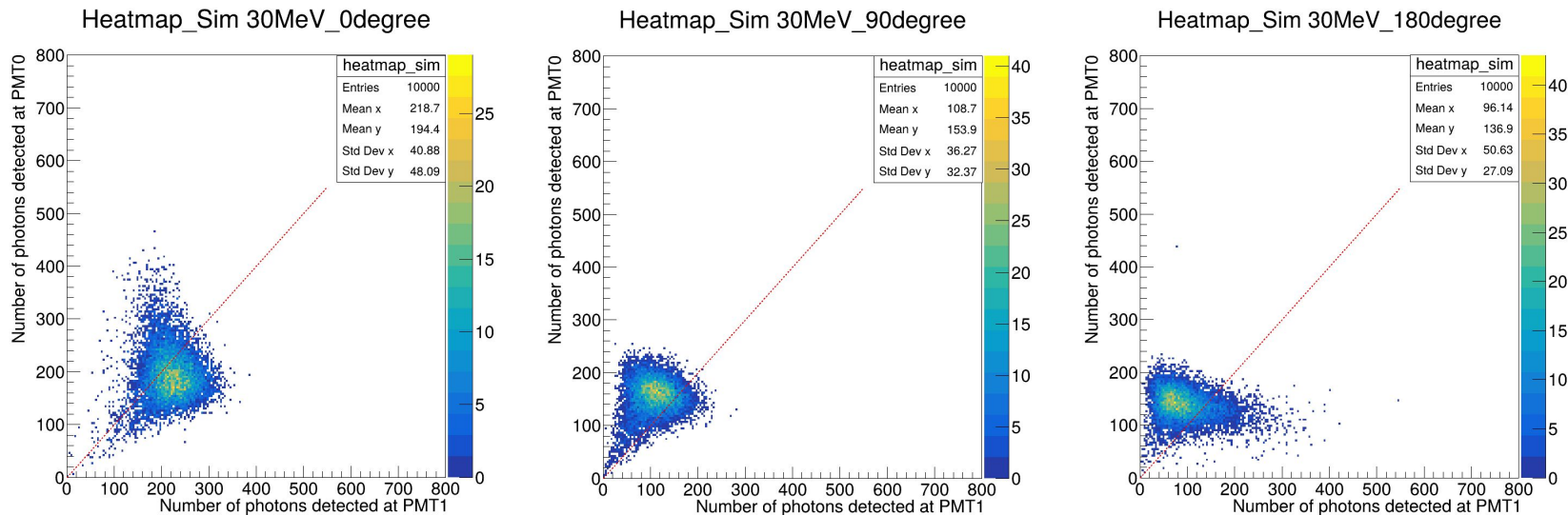
Heatmap 60MeV_90degree



Heatmap 60MeV_180degree

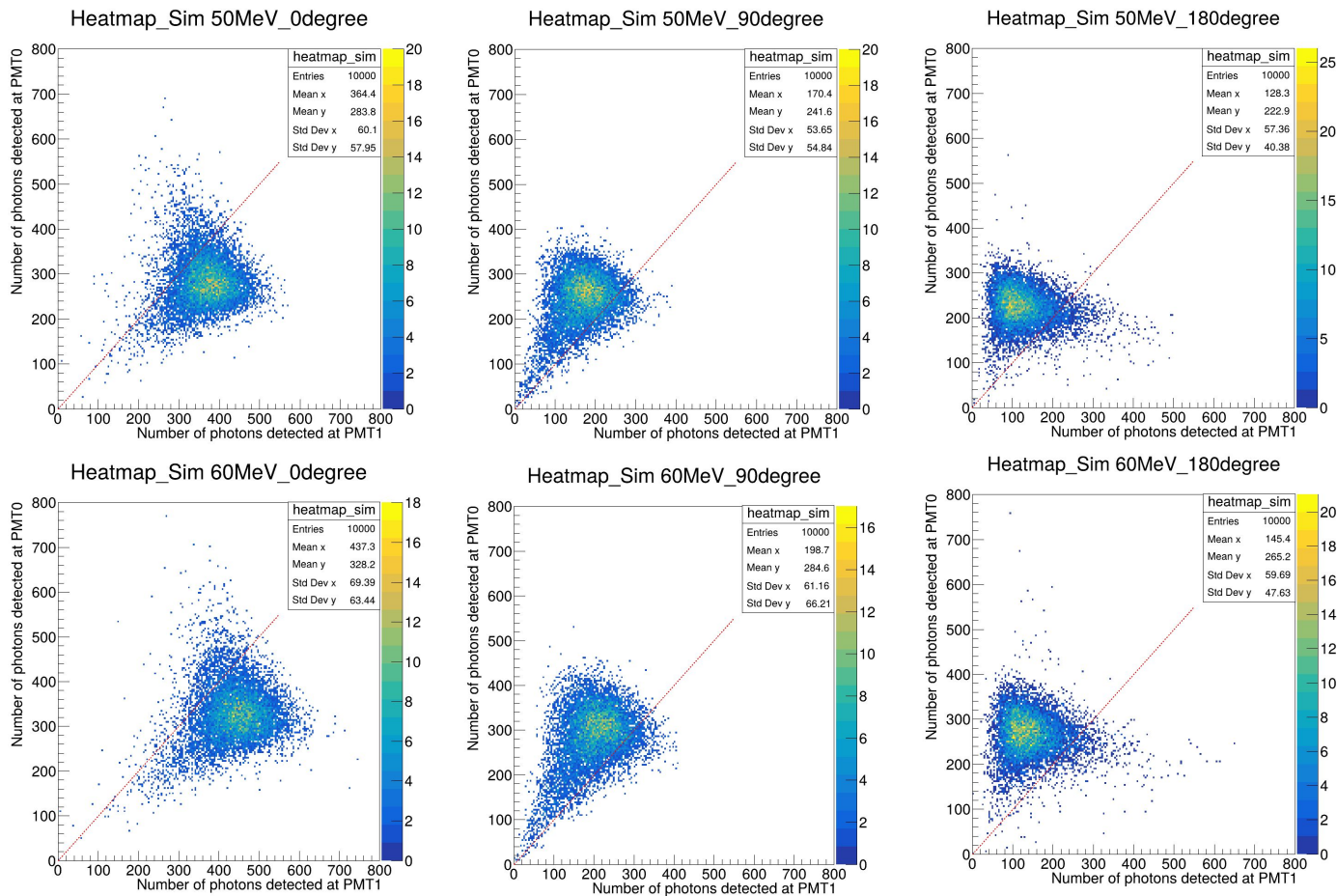


30MeVのシミュレーション結果



- ビーム上流と下流で偏りはあるが、実験データよりは差が見られない。
 - ビーム実験ではノイズにまぎれた信号を見落としている可能性.
 - ADCのデータを較正していないのが問題の可能性.

50MeVと60MeVのシミュレーション結果



電子ビームでの検出器テスト実験を踏まえた考察と反省点

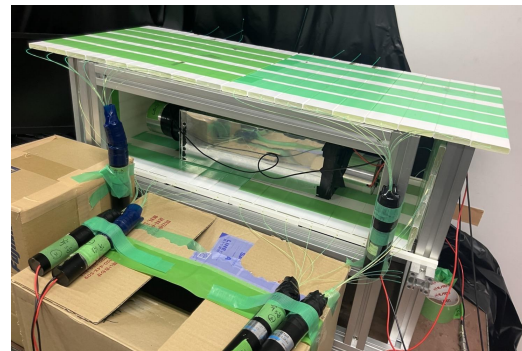
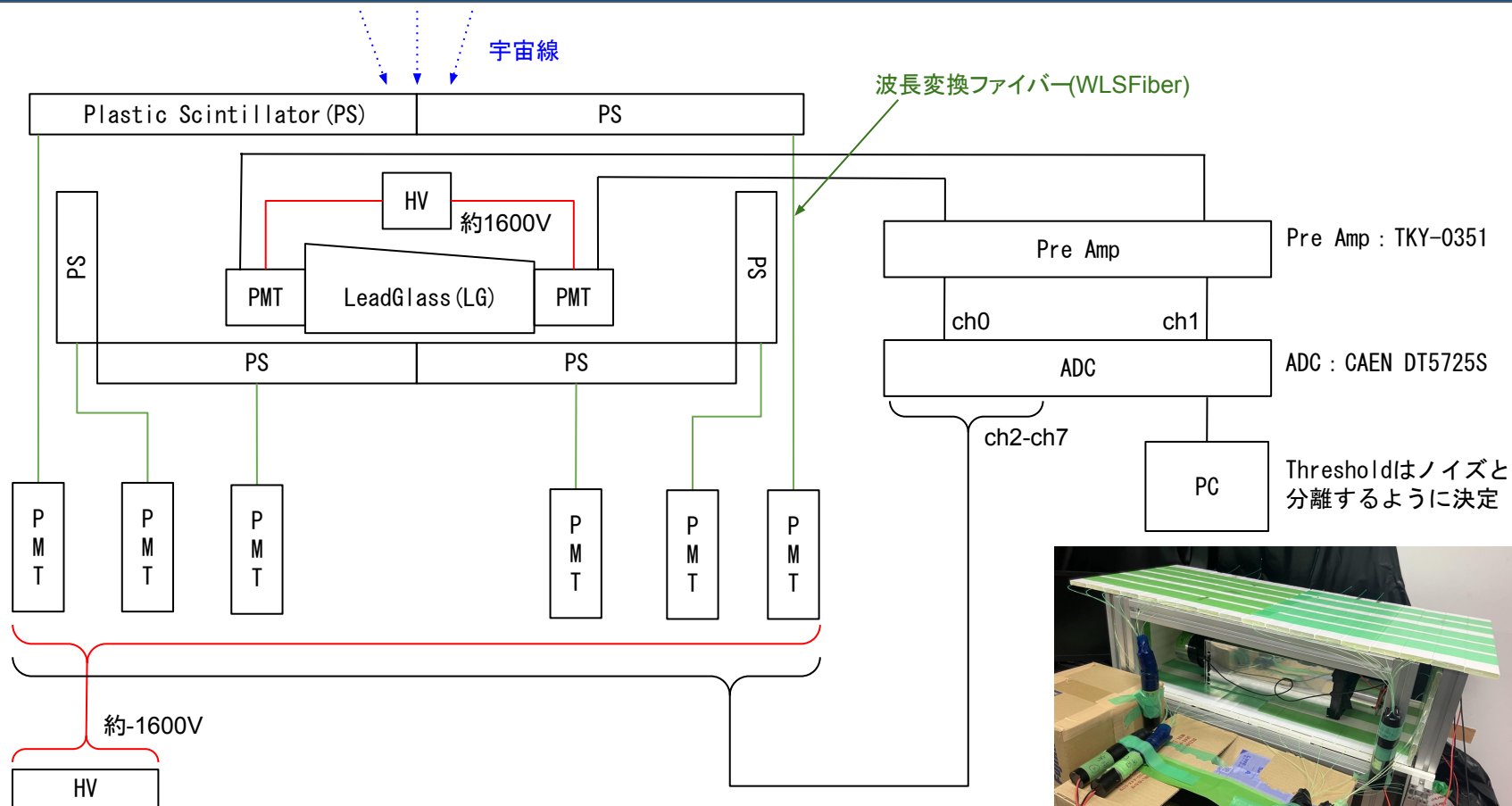
考察

- ビーム実験では電子でcherenkov光の異方性を顕著に測定できた.
- 当初の目的であったニュートリノ 反応断面積でのsand muonのVETO条件を改善できることが見込まれる.

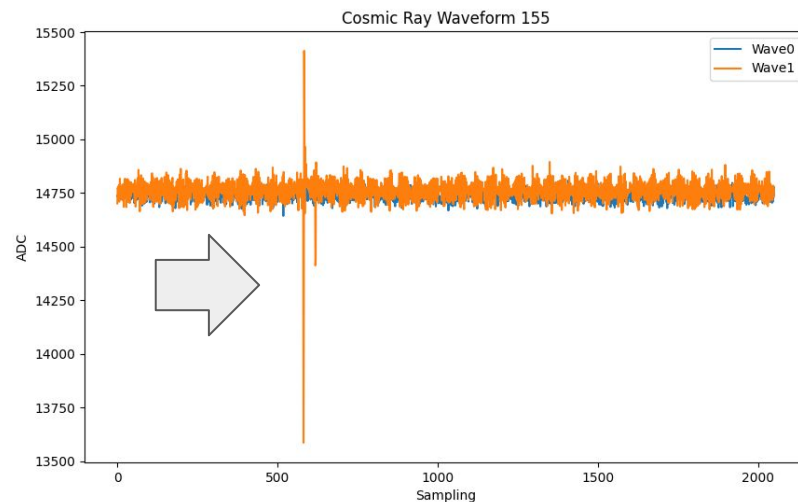
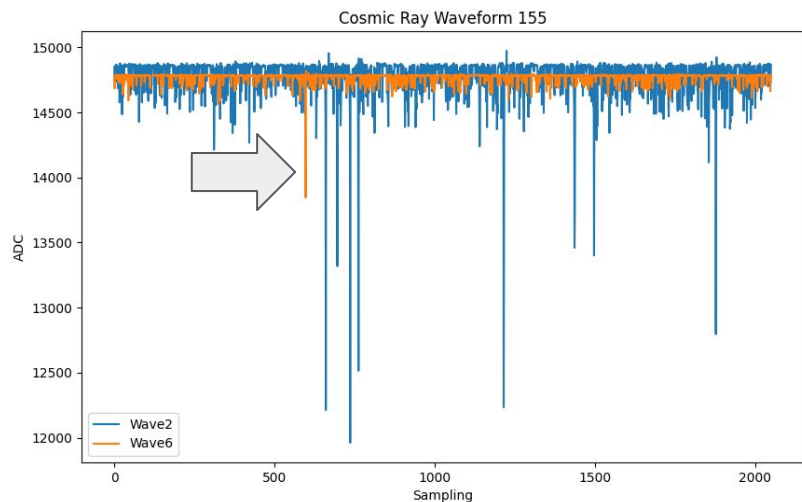
反省点と改善点

- ビーム実験のデータを較正できていないためにシミュレーションと正確に比較できない.
- シミュレーションではCC1 π 反応の内24%をCCQE反応だと誤判定している.
- MPPCでより詳細なヒット情報の位置を見ればCC1 π もVETOできる可能性.
- 宇宙線実験に関して時間が足りず定量的な解析ができなかった。レポートまでにしっかりとした解析を行いたい. (今から紹介)

宇宙線での検出器テスト実験のセットアップ



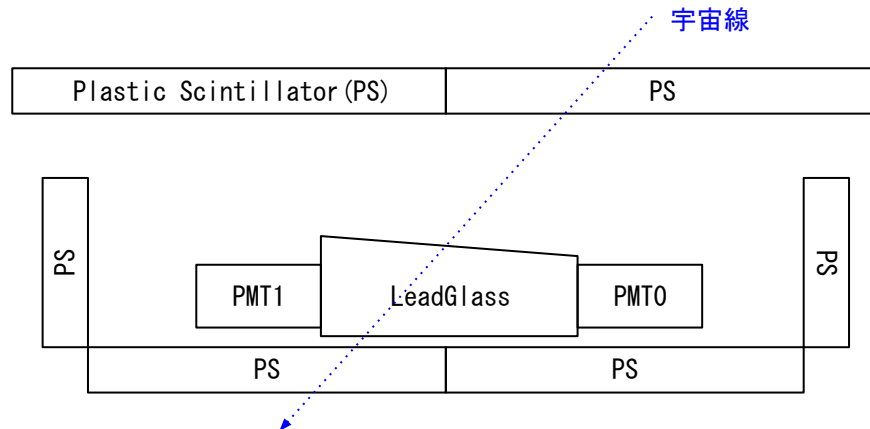
宇宙線での検出器テスト実験の解析



- 左図はシンチレータ上面の前方, 右図はシンチレータ下面の後方.
- 右図はその時の鉛ガラスPMTの信号.

宇宙線での検出器テスト実験の解析方針

- シンチレータのヒット情報と鉛ガラス内でのチェレンコフ光の左右差の相関を定量化したい.



- 上図の場合, 光量は $\text{PMT1} > \text{PMT0}$ になることが予想される.
- 具体的にその割合等を求め, ニュートリノ実験に応用できる範囲を検証予定.

指導教員の中家さん，木河さん，TAの恩田さん，溝添さん

急遽施設を使用させていただいたKELの方々

PMTや鉛ガラスをお貸しくださった原子核実験の方々

HV等の実験道具をお貸しくださった高エネの院生の方々，P1の方々

P2のミュオニウム班，ミュオン班の方々...

多くの方の支えで卒業研究をなんとか無事に遂行することができました.

本当にありがとうございます.

以下予備スライド