

中性子の重力相互作用の検出

浅野有香 小林滉一郎 中西泰一
(京都大学 理学部 課題研究 P2)

2021年10月5日

目次

1	実験の目的と原理	4
1.1	実験の目的	4
1.2	実験の原理	4
2	セットアップ	5
3	実験装置及び実験器具	6
3.1	中性子源	6
3.1.1	中性子の生成	6
3.1.2	低発散ビーム	7
3.1.3	低発散ビームのフラックス	8
3.2	シンチレータ	9
3.3	マルチアノード PMT	9
3.4	光拡散用ガラス	10
3.5	中性子検出器	11
3.6	スリット	13
3.6.1	上流スリット	13
3.6.2	下流スリット	13
3.7	DAQ 及び他の必要機器	14
3.7.1	DAQ	14
3.7.2	他の必要機器	14
3.8	配線図	16
3.9	セットアップの様子	17
4	シミュレーション	19
4.1	シミュレーションの設定	19
4.2	シミュレーションの結果	19
5	解析 (前半)	22
5.1	生波形	22
5.2	中性子パルスの切り取り	22
5.3	積分電荷の計算	24
5.4	重心計算と単位の変換	24
5.5	得られた中性子の (x, y) 分布, (t, y) 分布	25
6	解析 (後半)	25
6.1	ビーム信号時刻の決定	26
6.2	重心計算によるずれの補正	27
6.3	フィッティング関数の決定	29
6.4	フィッティングのためのデータ選別	31

6.5	フィッティング結果	32
7	考察	32
8	謝辞	38
9	参考文献	38

1 実験の目的と原理

1.1 実験の目的

自然界には4つの相互作用が存在するが、これらの相互作用を統一的に記述することは現代物理学の最も大きな目的の一つである。中でも、素粒子間に働く重力相互作用は電磁相互作用に比べてはるかに小さいため、測定が難しい。そこでこの重力相互作用が質量のごく小さい物体にも働くのかどうかを実験によって検証し、また既存の法則と一致するかどうかを確認、具体的には重力加速度 g を算出することが本実験の目的である。本実験では、中性子を使用した。

1.2 実験の原理

中性子は、相対論的效果と量子効果を見捨てるようなエネルギー領域として考える。つまり、中性子はニュートンの運動方程式に従う。中性子の運動の始点、スリット間の距離、検出された位置、検出された時間情報を測定し、適切な fitting 関数を用いることで、重力加速度 g を算出する。



図 1: 重力効果を受ける中性子の軌道の概要図

2 セットアップ

図2のように検出器, スリットを固定した. 図2は, それぞれの位置関係を横から見たものである. ビームの進む向きを z 軸の正の向き, 鉛直上向きを y 軸の正の向きとした. また, x 軸の正の向きは図2の手前から奥への向きとした. 中性子発生地点を $z=0$ とする. このとき, 中性子発生地点から上流スリットまでの距離は 11.880 m, 上流スリットから壁までの距離は 4.467 m, 壁から下流スリットまでは 0.35 m, 下流スリットから検出器までの距離は 6.533 m である.

ここで, z 方向の距離は正確に計測したが, x 方向と y 方向については, どれも (ビーム位置, スリット位置, 検出器位置) 正確に計測できなかった. この x 方向と y 方向については中性子ビームが検出器の受光面にしっかりぶつかる場所に固定した. つまり, ビーム射出部とスリット, 検出器はほぼ一直線上に並んでいると考えられる.

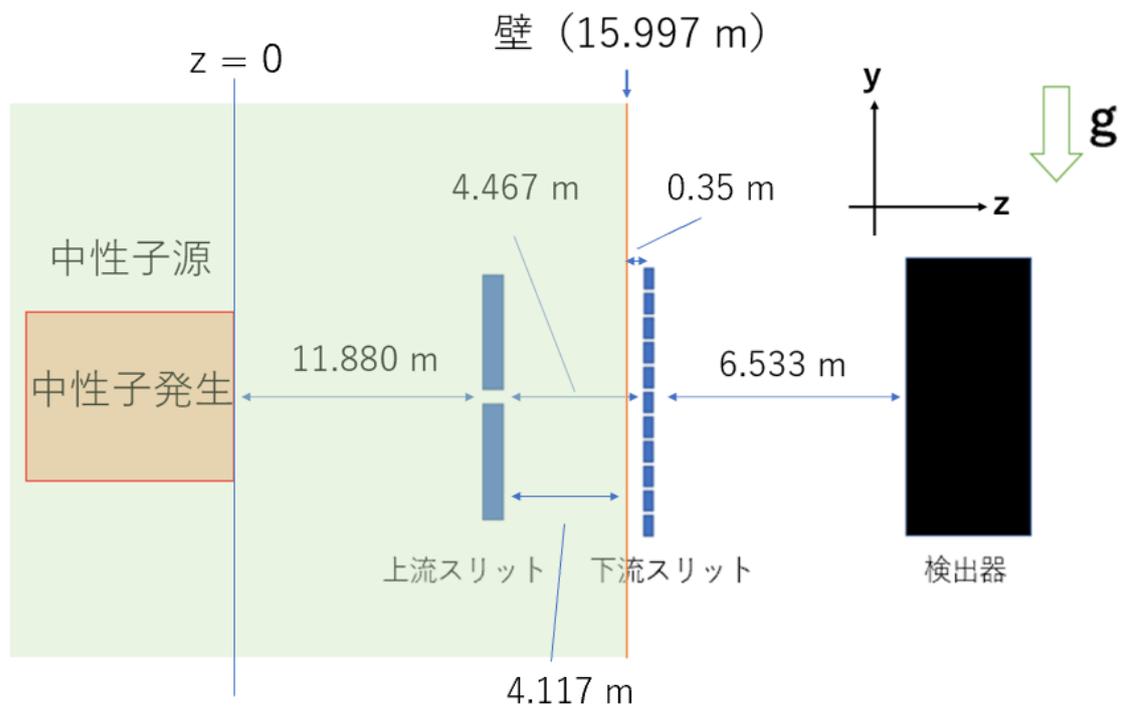


図 2: セットアップの概要図



図 3: J-PARC の概要図

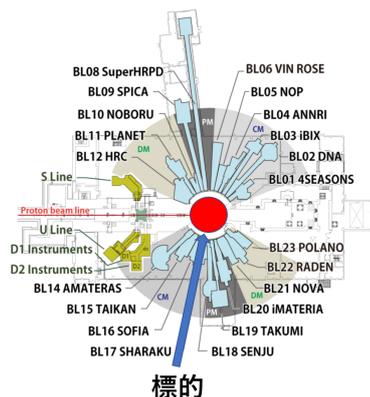


図 4: 陽子が標的に衝突し,中性子が発生し四方八方に打ち出される

3 実験装置及び実験器具

3.1 中性子源

中性子源として,大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) の物質・生命科学実験施設 MLF (Material and Life science Experimental Facility) の BL05 の中性子ビーム (低発散ビーム) を使用した. この中性子ビームは,周波数が 25 Hz, すなわち,40 ms 毎に中性子が打ち出される.

3.1.1 中性子の生成

J-PARC の 3GeV シンクロトロンでほぼ光速 (約 97%) まで加速した陽子を水銀の標的に衝突させることで中性子を作り出し,水素モデレーターによって中性子の温度を下げる (エネルギーを下げる) ことで冷中性子ビームを生成している. 図のように複数の中性子ビームが存在するが,その中の BL05 の中性子ビームを使用した.



図 5: 3本に分岐した中性子ビーム. 左から低発散, 非偏極, 偏極ビームである.



図 6: 低発散ビーム (奥から手前に向かって)

3.1.2 低発散ビーム

BL05のビームラインはスーパーミラー・ベンダーによって図5のように3本に分岐されて, 低発散ビーム・非偏極ビーム・偏極ビームが存在する. 本実験では低発散ビーム (図6) を使用した.

低発散ビームの概要

この中性子ビームは図2の16 m地点 (壁付近) において, 次の特徴を持っている.

- 5.4×10^4 n/s/cm² の中性子フラックスを持っている.
- ビーム射出角は 5.4×10^{-2} μ str の広がり (低発散) を持っている.
- ビーム射出部分の大きさは水平方向に 80 mm, 鉛直方向は 20 mm である.

3.1.3 低発散ビームのフラックス

低発散ビームの中性子速度分布は図7のような分布になっている。速度

$$v = 1534 \text{ m/s}$$

で最大強度となっている。

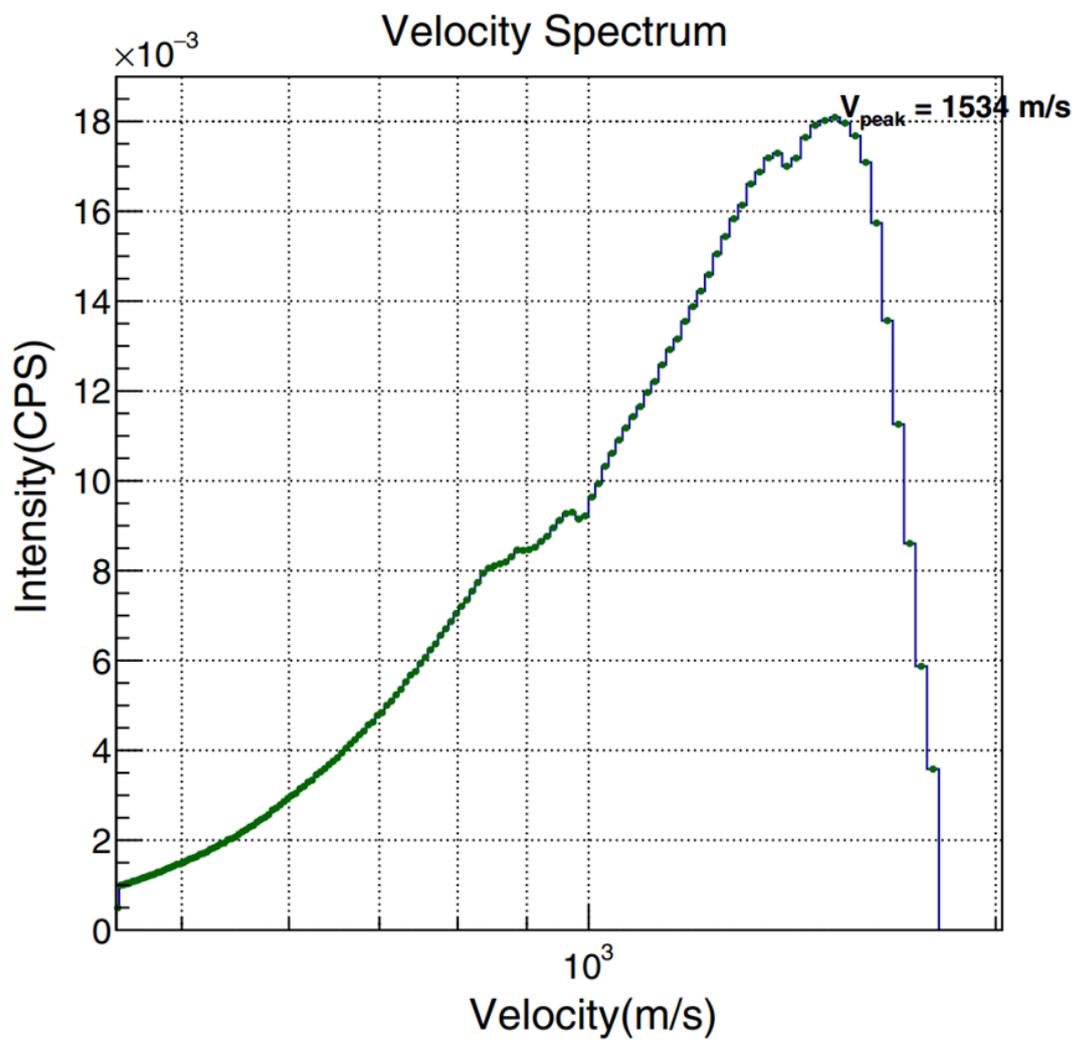


図 7:



図 8: ZnS(⁶Li を添加) シンチレータ

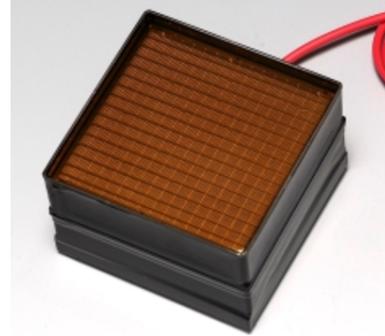
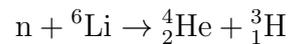


図 9: マルチアノード PMT

3.2 シンチレータ

本実験では、中性子を検出するために ZnS(⁶Li を添加) シンチレータ (図 8) を使用した。⁶Li 原子核は



という反応を起こし、生成された 2 種類の粒子が ZnS を励起することで発光する。発生する光の波長は約 450 *nm*, 発光量は keV あたり約 50 光子, 減衰時間は約 0.1 μsec である。

3.3 マルチアノード PMT

シンチレータによって発生した光をとらえる装置として、図 9 のマルチアノード PMT (型番:H9500) を用いる。受光面は正方形のピクセルで埋め尽くされた形になっており、光が入射した点をピクセルサイズ程度の分解能で測定することができる。

実際に使用する PMT は、ピクセルサイズが 3mm×3mm でピクセル数が 16×16 のものである。我々がとりたいデータは鉛直方向の位置データであるため、水平方向のチャンネルの出力については抵抗回路を用いてデータをまとめてしまい、16+16 の 32 チャンネルでデータを読みだし、それらの重心計算から鉛直方向の位置を求める。図 11 のように抵抗をつなぐと、両端の信号比から位置決定はできるものの、回路が存在する分だけ誤差が大きくなることが考えられる。そのため正しい数値が欲しい鉛直方向のデータはそのまま読み出し、比較的重要でない水平方向についてはデータをまとめて読み出してチャンネル数を減らすことにする。図 11 の右の抵抗回路は基板上に実装し、PMT と抵抗回路、抵抗回路と CAEN の digitizer(型番:DT5740) をフラットケーブルを用いて接続する。図 10 はその時に使用した抵抗回路である。

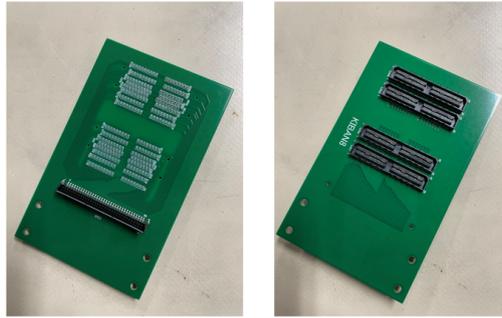


図 10: 読み出しに用いた抵抗回路

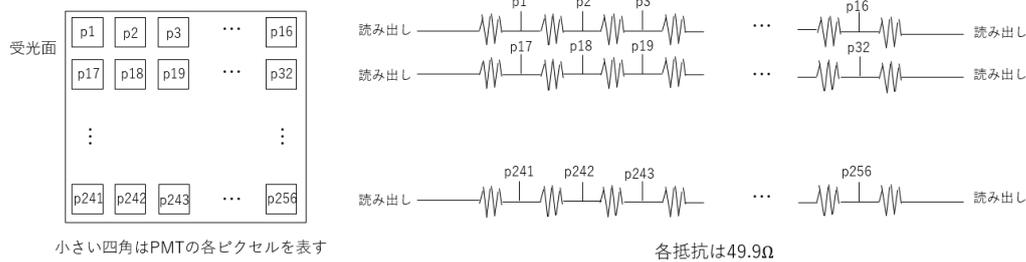


図 11: PMT の読み出しの概略図. PMT からの信号 p_1, \dots, p_{256} を右図のような抵抗回路で 16 個にまとめ、それらをフラットケーブルで読み出す.

3.4 光拡散用ガラス

マルチアノード PMT での測定はピクセルサイズ程度の分解能を持つが、我々が測定したいのは約 1 mm 程度の位置の差であるため、精度を高めなければ意味のあるデータを得ることはできない. そこで、光をあえてある程度拡散して複数のピクセルに入射させ、入射光量で重み付けして平均をとることで位置を決定する. この方法を用いることで、もともと (ピクセルサイズ) $/\sqrt{12}$ の 1 mm 程度の分解能だったものを 0.3 mm 程度まで精度を高めることができる. これを実装するために、シンチレータと PMT の間に距離をとって光を広げる目的で間に石英ガラスを挟む. 厚さ 3 mm の 50 mm \times 50 mm の石英ガラスを用いることにする.

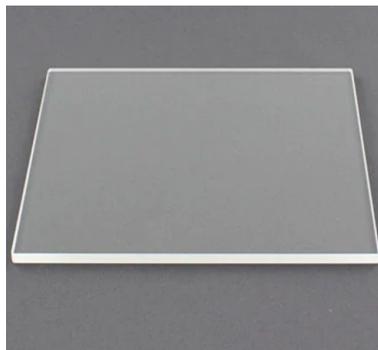


図 12: 石英ガラス

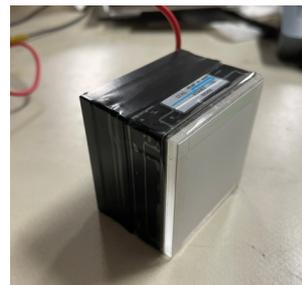
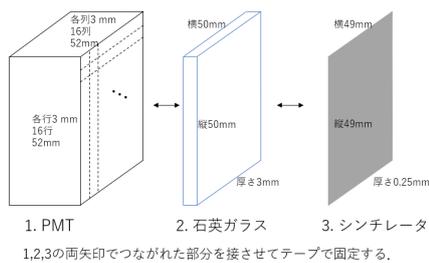


図 13: PMT, ガラス, シンチレータのジオメトリー 図 14: 実際の中性子検出器

3.5 中性子検出器

マルチアノード PMT にシンチレータと石英ガラスをテープで張り付けて、図 13 のようにしたものを本実験の検出器として用いる。図 14 は実際にくっつけた中性子検出器であり、接着はセロハンテープで施した。

光拡散の模式図

図 15 は光の拡散の仕方を表したものである。ZnS の屈折率はおよそ 2.35, 光拡散用ガラスの屈折率はおよそ 1.54 である。屈折の法則より、シンチレータで発生した光は光拡散用ガラス全体に広がると考えられる。ただし、接着は隙間なくされているものと仮定、すなわち隙間に空気は入っていないと仮定した。

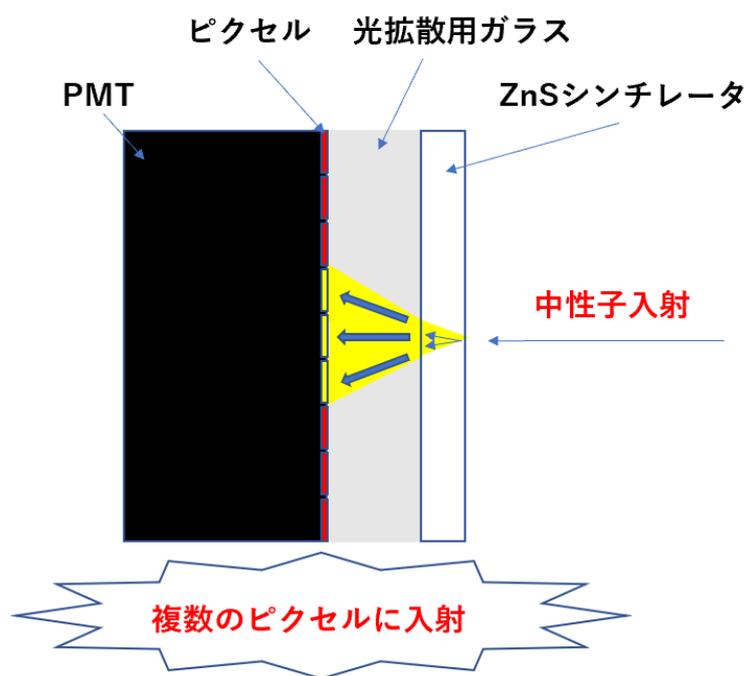


図 15: 光拡散の模式図

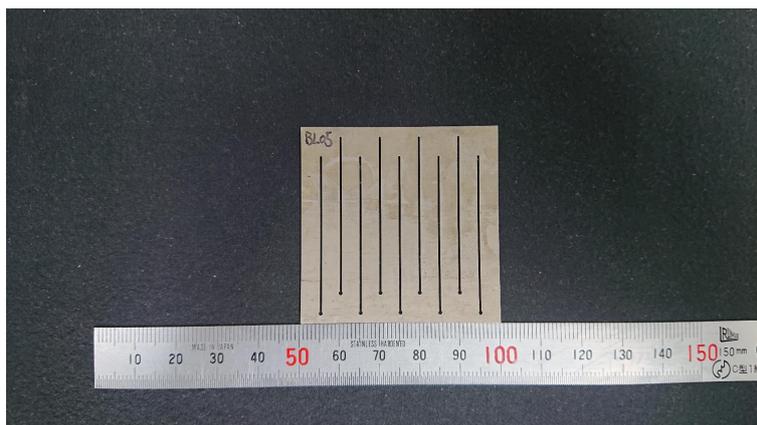


図 16: コリメート用 Cd スリット (下流スリット)

3.6 スリット

中性子ビームは低発散ビームではあるが, ある程度広がりを持っているので, コリメートしてより細いビームにする必要がある. 我々が重要視するのは鉛直方向であるため, 鉛直方向に対してコリメートした. 今回用いた B_4C スリットと Cd スリットはともに中性子を遮蔽することができる.

3.6.1 上流スリット

$z=11.880$ m の位置に, 鉛直方向に 0.5 mm の B_4C スリットがある. 図 2 には明示していないが, この上流スリットの手前 118 mm ($z=11.762$ m) に横スリット (6 mm) が存在するが, 鉛直方向が重要である今回の重力相互作用の測定ではそれほど重要視はしなかった.

3.6.2 下流スリット

$z=16.347$ m にある下流スリットとして, 図 16 に示す Cd でできたスリットを用いる. この Cd シートは 5 mm 間隔で 0.5 mm 幅のスリットが合計 9 本入っている. 我々の実験のセットアップにおいては 5 mm 落ちる中性子はほとんどないため, それぞれのスリットごとにデータをとることができる (異なるスリットを通過してきた中性子が測定において重なることはないと考えられる).



図 17: CAEN

3.7 DAQ 及び他の必要機器

3.7.1 DAQ

マルチアノード PMT が発した信号を処理するために CAEN の digitizer (型番:DT5740) を用いる。この装置は周波数が 62.5 MHz であるので、16 ns ごとに信号を記録することができる。depth (サンプリング数) を 192000 とし、1/16 にダウンサンプリング (つまり 256 ns ごとに 1 点を記録) することにより 49.152 ms の時間領域を記録することができる。中性子のビームパルスが 40 ms であるため、このように設定することで、速い中性子から遅い中性子までを一度に測定することができる。また他の設定として、Post trigger が存在し、本実験では、0 に設定していたが、測定ごとにトリガーの位置が変わるというバグが起きることがあり、あまり信用できないため、解析には関与させなかった。

3.7.2 他の必要機器

Preset Scaler

この機器は、入力信号の周波数に対して周波数を下げて出力できるものである。プリセット値というものを設定し、カウンターが設定したプリセット値と一致したときプリセットシグナルを出力し、再度カウントを始める仕組みである。これによって周波数を下げることができる。本実験では、プリセット値を 25 に設定、つまり、中性子ビームの周波数 25 Hz を 1 Hz に下げた。

Function Generator

この機器は、任意の周波数の波形をもった交流電圧信号を生成することのできる電気計測器である。本実験での使用目的としては、入力信号に対して Delay (+ 30 ms) をさせることである。これによって、トリガーの位置を遅らせることができ測定データを見やすくすることができる。



図 18: Preset Scaler



図 19: Function Generator

3.8 配線図

信号読み出しの配線図は図 20 のようになっている. まず 25 Hz (40 ms) ビーム信号を Prest Scaler によって 1 Hz の信号に周波数を下げる. その後その信号を Function Generator によって Delay (+ 30 ms) させる. これを生データ取得のトリガーとし, CAEN の TRG IN につなげ, PMT には -1100 V (PMT 動作の最大効率) の電圧をかけた. PMT の信号は 4 本のフラットケーブルによって抵抗回路につなぎ, 1 本のフラットケーブルによって CAEN につないだ. 読みだしたデータは DAQ 用 PC に送る. 3.7.1 小節でも述べたように, CAEN の設定として, depth (サンプリング数) は 192000, 1/16 にダウンサンプリングした.

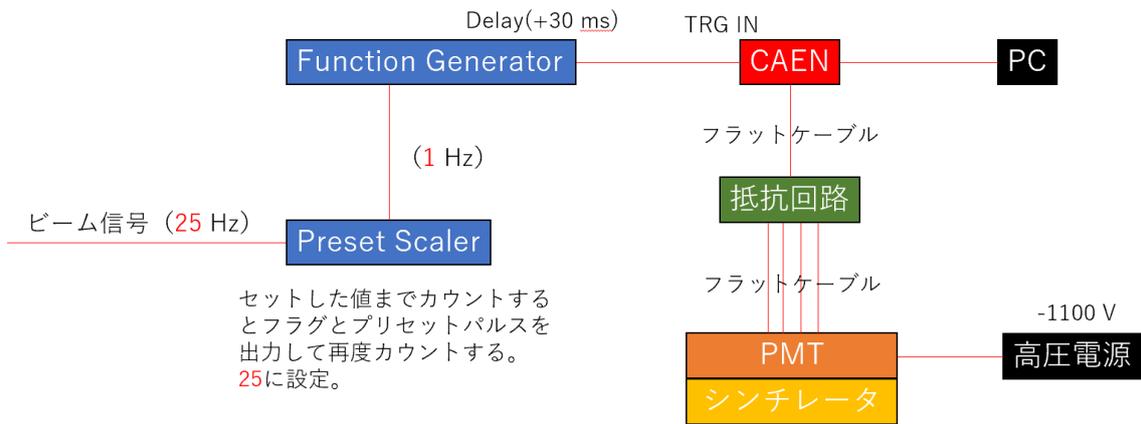


図 20: 配線の概念図

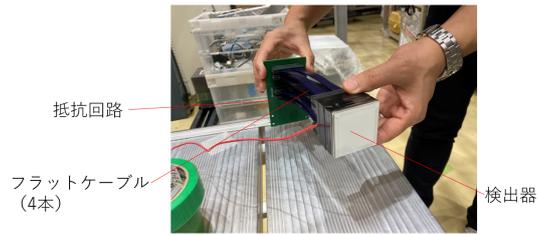


図 21: 4本のフラットケーブルによって抵抗回路をつないだ検出器

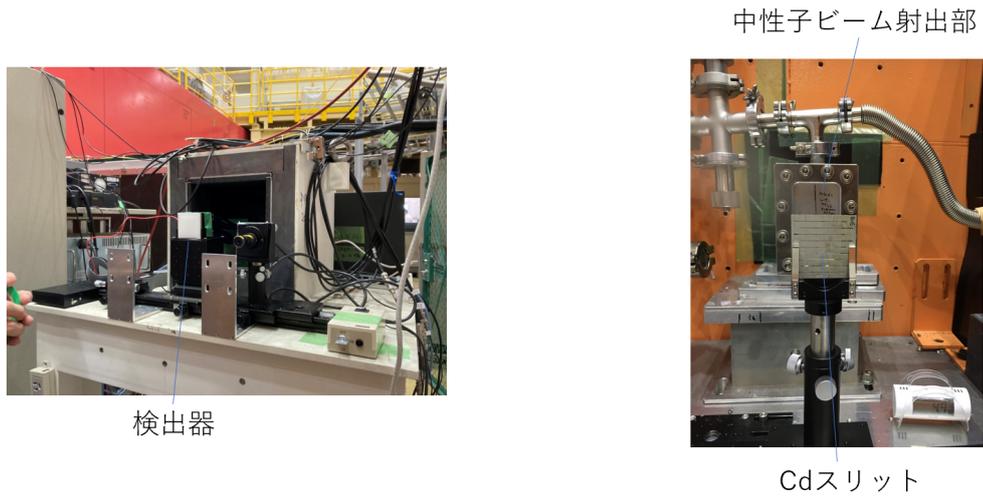


図 22: 検出器を固定した様子

図 23: Cdスリットを固定した様子

3.9 セットアップの様子

図 21 から図 24 は実際にセットアップをした様子である.

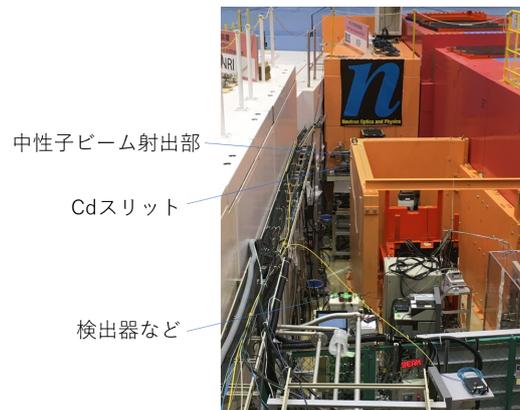


図 24: セットアップを上から見た様子

4 シミュレーション

4.1 シミュレーションの設定

今回のセットアップで実際に中性子がどのように振舞うかをみるために、簡単なモンテカルロシミュレーションを用いて検出地点での中性子の分布をみた。シミュレーションのセットアップを図 25 に示した。中性子発生場の中心を $(0, 0, 0)$ とするような座標をとった。Cd スリット、検出器の z 方向の距離は実際に測定した値である。また、上流スリットと Cd スリットの中心を $(x, y) = (21.5 \text{ mm}, 33 \text{ mm})$ としたが、これはビームの装置で実際に設定した値である。中性子発生場については、 $100 \times 100 \times 10 \text{ mm}$ の空間を仮定し、そこから一様に時刻 $t = 0 \text{ s}$ で中性子が発生するとした。また、スリットの厚さは全て 5 mm と仮定した。

また、発生した中性子の速度の大きさは 200 m/s から 1800 m/s の範囲で、方向は上流スリットを通過する範囲で一様に発生させた。

発生させた中性子はニュートンの運動方程式に従うとする。

4.2 シミュレーションの結果

検出器地点での中性子の分布は以下に示した図 26 のようになった。縦軸は検出器地点での中性子の y 座標、横軸は検出器地点に中性子が到達した時刻 t である。

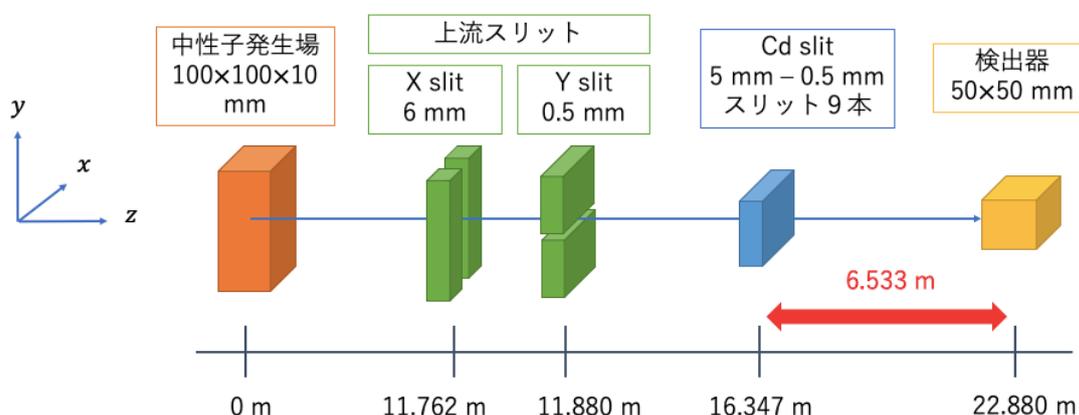


図 25: シミュレーションのセットアップ概念図

図 26 から 6 本の線は時刻 t が大きくなるにつれ、わずかに下がっていることがわかる。これには重力の影響だけでなく、中性子の発生位置による影響も含まれている。中性子発生点の y 座標を $y_0 \text{ mm}$ とおくと、検出器地点での $y \text{ mm}$ との関係は図 27 のようになる。

図 28 には、横軸に時刻 t 、縦軸に検出器地点での y から発生位置 y_0 を引いたものをとったが、図 26 より 6 本の線が下がっていることがわかる。

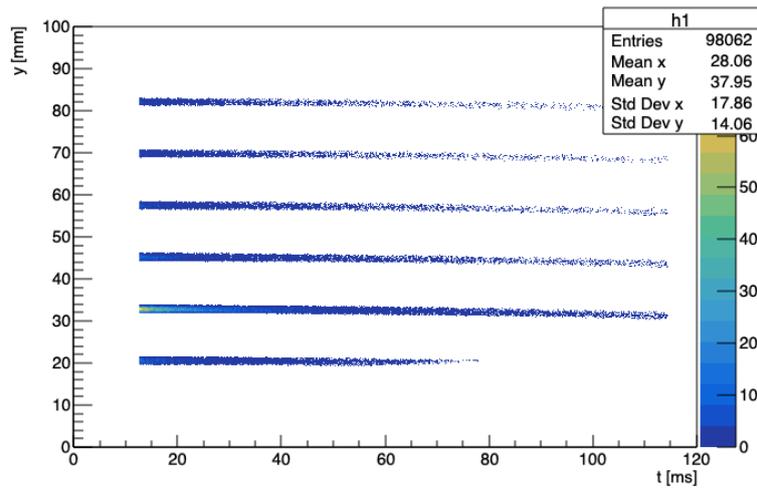


図 26: 検出器地点での時刻 t と y 座標の関係のシミュレーション結果

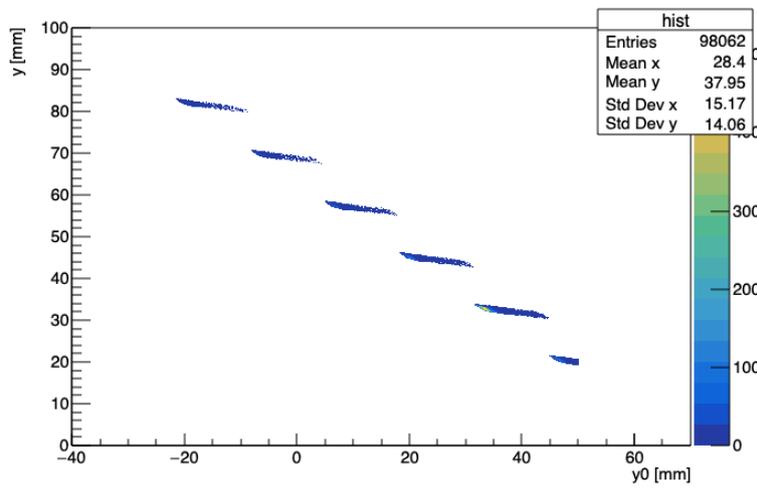


図 27: 中性子発生点での y_0 と検出器地点の y の関係

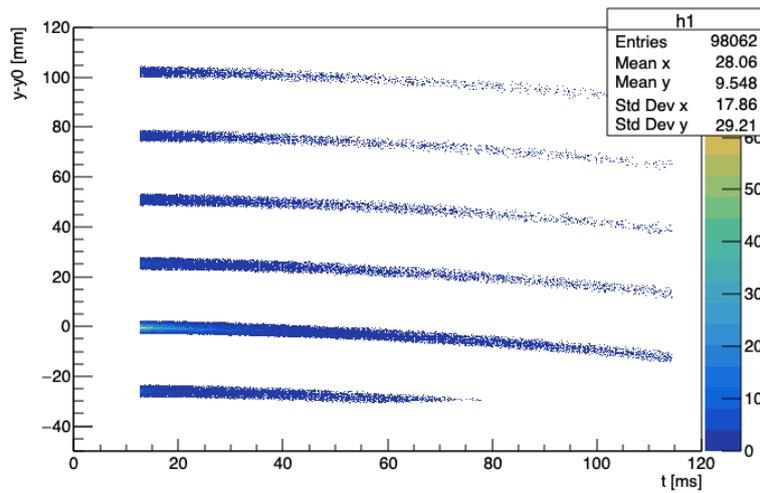


図 28: 検出器地点での時刻 t と $y - y_0$ の関係

実際に,6.3章で導入されるフィッティング関数

$$y = p_0 - \frac{1}{2}p_1 \frac{L_3(L_2 + L_3)}{(L_1 + L_2 + L_3)^2} (t - T)^2$$

を用い, T をフィッティングパラメータとして追加すると,フィッティングの様子は図 29,30に,結果は表 1,2 のようになる.ただし,フィッティングの範囲は 10 ms から 50 ms とした.

ただし,実際のビームの発生分布など不明なため,今回のシミュレーション設定とは異なる可能性がある.

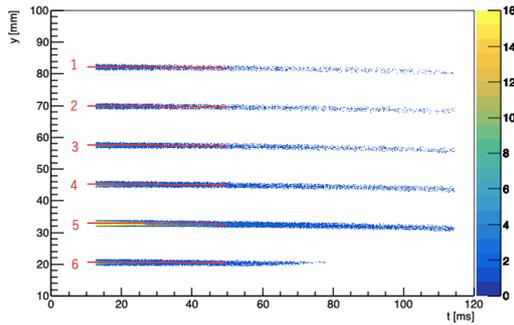


図 29: 時刻 t と y の fitting の様子

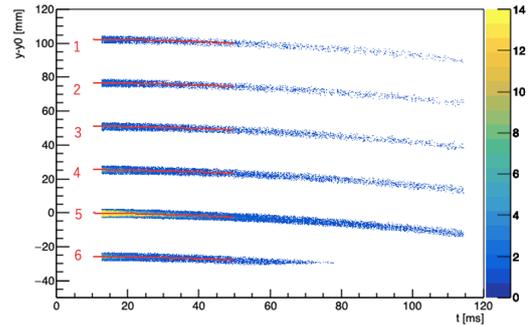


図 30: 時刻 t と $y - y_0$ の fitting の様子

表 1: 時刻 t と y の fitting 結果

	p_0 [mm]	p_1 [m/s ²]	T [ms]
1	82.21 ± 0.02	3.5 ± 1.3	11 ± 6
2	70.05 ± 0.06	0.9 ± 0.2	-31 ± 17
3	57.62 ± 0.06	1.7 ± 1.0	-3 ± 19
4	45.30 ± 0.08	1.2 ± 1.0	-7 ± 29
5	33.07 ± 0.14	1.4 ± 0.9	-18 ± 30
6	20.69 ± 0.03	1.9 ± 0.9	2 ± 12

表 2: 時刻 t と $y - y_0$ の fitting 結果

	p_0 [mm]	p_1 [m/s ²]	T [ms]
1	102.3 ± 0.1	17.0 ± 3.0	4 ± 4
2	77.0 ± 0.3	9.8 ± 3.0	-11 ± 12
3	51.2 ± 0.1	12.8 ± 2.6	-1 ± 6
4	25.5 ± 0.1	11.9 ± 2.3	-2 ± 5
5	0.1 ± 0.1	12.6 ± 1.7	-5 ± 4
6	-25.5 ± 0.1	13.4 ± 2.2	-0 ± 4

5 解析 (前半)

5.1 生波形

CAEN の digitizer で記録された生波形の一部を図 31 に示した. さらに, これらのデータを単純に足し合わせたデータの図を 32 に示した. 1つのパルスに注目して拡大したものが図 33 であり, 実際にテールを持った波形をしていることがはっきり見える. これらの図を見ると, バックグラウンドと中性子のデータの区別が明確であり, 適切に threshold をかけてやれば見たいデータが得られるであろうことが予想される. 図 31 のように 1チャンネルずつのデータで見たときに, ノイズによるベースラインからのふらつきは ADC 値にしてせいぜい 2,3 程度であるのに対し, パルスの高さは一番高いところで多くのパルスで 10 以上はあり, 目視の段階でははっきり区別されている.

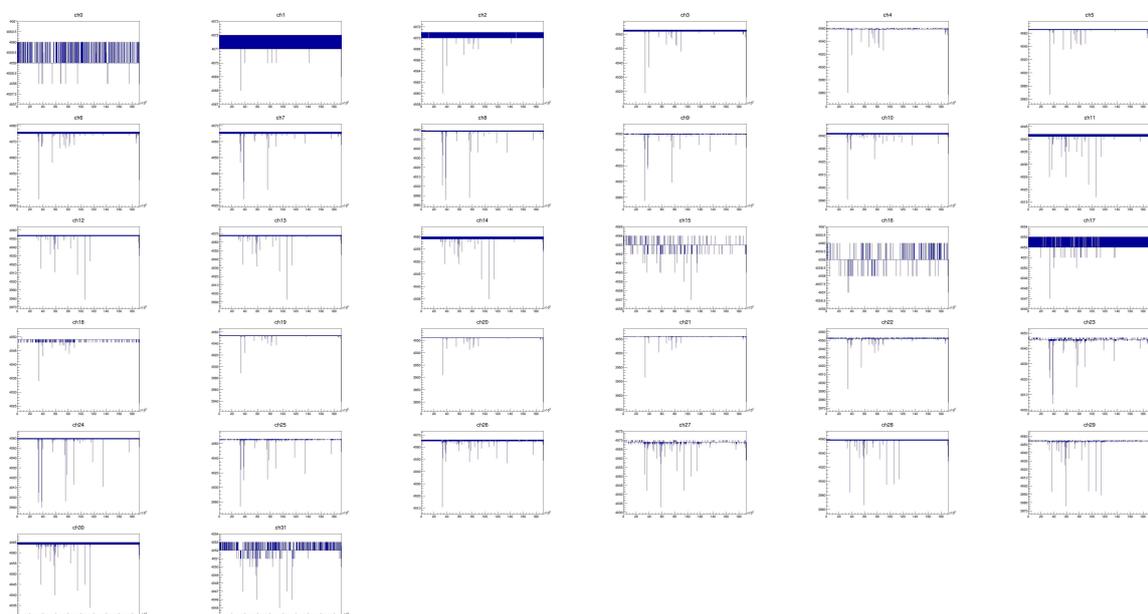


図 31: 1つのバンチの測定で各チャンネルから得られた生波形. 横軸は CAEN の digitizer のサンプル番号で, 1 サンプルが 0.000256 ms に対応する. 縦軸は ADC 値

5.2 中性子パルスの切り取り

次に, 得られた図 32 のようなデータから中性子のパルスの部分だけを切り出したい. この為に以下のような方法を用いた.

- 足しあげられた波形において ADC 値の 3 点移動平均をとり, threshold を超えたサンプル番号から下回ったサンプル番号までを 1つの中性子パルスであると考え.
- 得られた中性子パルスのサンプル番号幅が一定の長さを超えないものは捨てる.

このようにして切り出された中性子パルスの波形の一例を図 34 に示した.

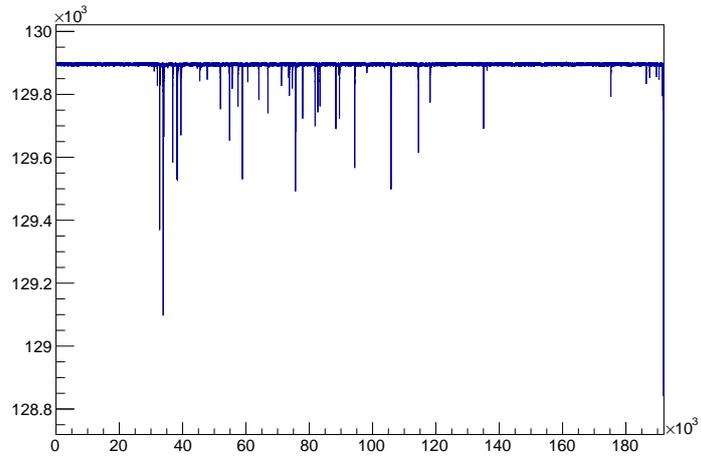


図 32: 各チャンネルごとに得られた生波形の ADC 値を単純に全チャンネル分足しあげたものの波形

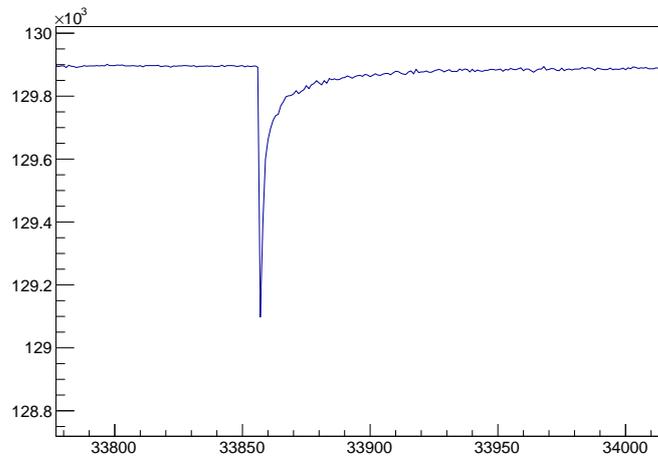


図 33: 足しあげられた波の 1 つのパルスに注目した図

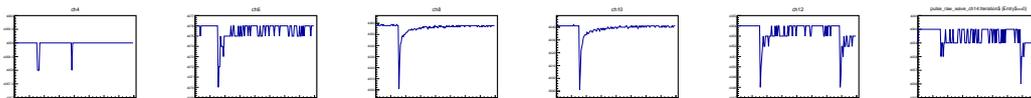


図 34: 切り出された中性子パルスの波形 (左からチャンネル 4,6,8,10,12,14 の波形)

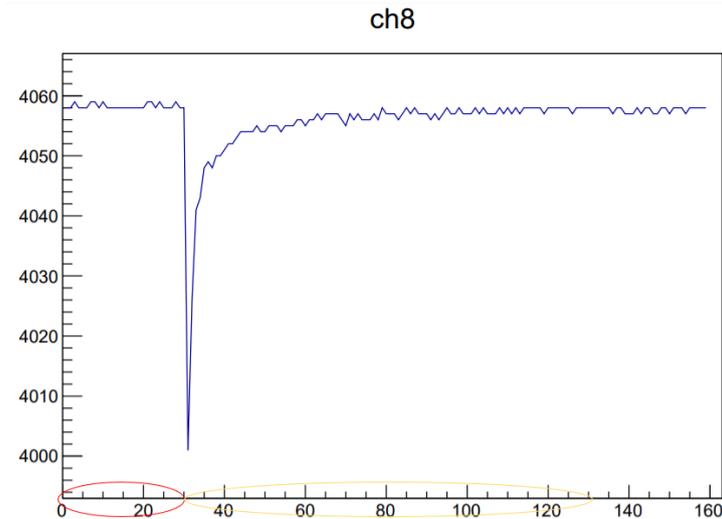


図 35: 中性子の波形でベースラインの算出に求める部分と積分範囲を図示したもの。例としてチャンネル8のデータを取り、赤で囲ったサンプル番号のデータをベースラインの算出、黄色で囲ったサンプル番号のデータを電荷の積分に用いる。

5.3 積分電荷の計算

切り出された中性子パルスの積分電荷をチャンネルごとに求める。35において赤丸で囲まれた部分の平均 ADC 値をベースラインとし、黄色の丸で囲った領域についてベースラインからのずれを足し合わせたものを積分電荷とする。ただしこの方法はパイルアップによる影響を強く受けてしまう。我々は注目している中性子パルスの前後数マイクロ秒に別の中性子パルスが存在するようなものは僅かであることを仮定している。もし存在してしまうと、ベースラインが正しく求められず積分電荷が狂ったデータが出てきてしまう。

5.4 重心計算と単位の変換

各チャンネルの物理的な位置関係は図 36 のようになっている。重心計算によって水平座標（以下 x 座標）と鉛直座標（ y 座標）を物理的な単位で表す式は以下のようになる。ここで、 c_i をチャンネル i での積分電荷とする。

$$x = 49 \times \frac{c_0 + c_1 + \dots + c_{15}}{c_0 + c_1 + \dots + c_{31}} \text{ [mm]}$$

$$y = 49 \times \frac{\frac{15.5}{16}(c_0 + c_{16}) + \frac{14.5}{16}(c_1 + c_{17}) + \dots + \frac{0.5}{16}(c_{15} + c_{31})}{c_0 + c_1 + \dots + c_{31}} \text{ [mm]}$$

さらに中性子が観測された時刻も ms（ミリ秒）に変換しておく。我々の用いた設定では CAEN の digitizer は 1 サンプルあたり 0.000256 ms でデータを記録するので、中性子の記録された時刻 t [ms] は、記録されたサンプル番号 smp と

$$t = 0.000256 \times \text{smp} \text{ [ms]}$$

という関係で結ばれる。

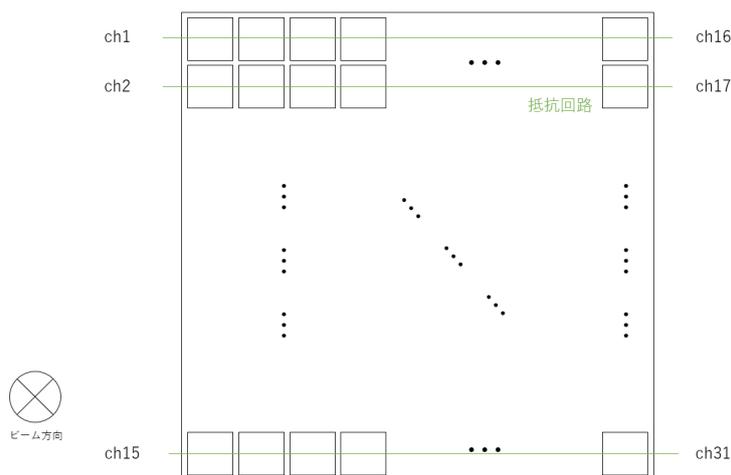


図 36: 各チャンネルの検出器上での位置との対応

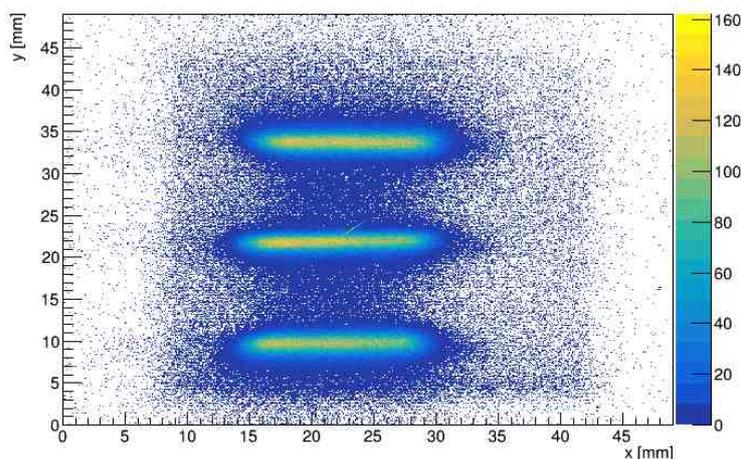


図 37: 中性子が検出された x 座標と y 座標の関係

5.5 得られた中性子の (x, y) 分布, (t, y) 分布

以上の手順を踏むことにより得られた (x, y) 分布を図 37 に, (t, y) 分布を図 38 に示す. 図 37 から検出された中性子がスリットの形を保っていることがわかる. また, 図 38 からは中性子の検出される y 座標が時間とともに変化する様が見て取れる.

以下の解析では主に図 38 を用いて地上での重力パラメータの値を推定することを目標とする.

6 解析 (後半)

ここまでの議論で得られた中性子分布を眺めると, 以下のような 3 つの特徴的なふるまいが見える.

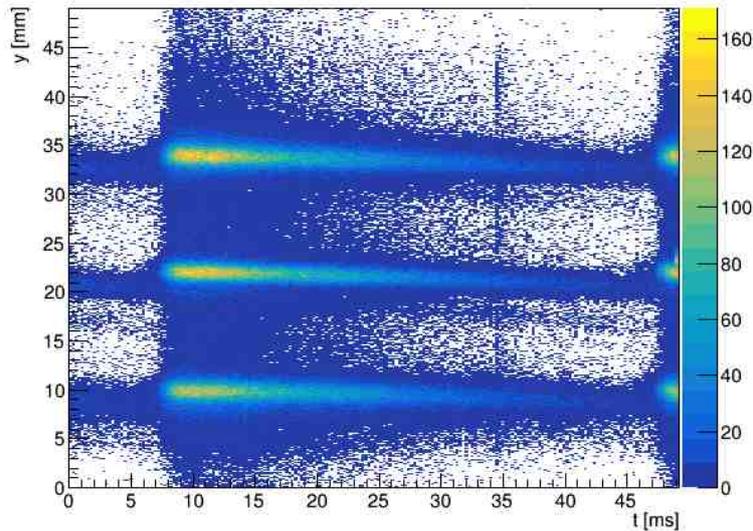


図 38: 中性子が検出された時刻 t と y 座標の関係

- 1つ目は全体としてのふるまいで、測定された時刻が遅くなるにつれて y 分布の中心が下がっていること。
- 2つ目は図 39 の中で赤丸で示した部分の中性子が周りに比べて多くなっていること。
- 3つ目は図 39 の中で黄色の丸で示した部分に薄く中性子の分布が見られること。

これらの3つの点に着目して解析を進めていく。

6.1 ビーム信号時刻の決定

重力パラメータを求めるにあたって中性子の飛行時間と検出された鉛直位置の関係を調べたいので、まずは正確なビーム信号の時刻を手に入れたい。本来このデータは事前の設定からわかるはずの量ではあるが、CAENのdigitizerが設定通りに動かないというトラブルが発生したためわからなくなっていた。

まず、中性子の検出時刻の分布図 40 を見る。すると、35 ms 付近に鋭いピークが立っているのがわかる。この位置は上で2つ目の着目すべき点として述べた部分と同じあたりの領域である。我々が事前に知っていた中性子の速度分布 41 を見てもこれに対応する部分は見当たらないので、出所不明の謎のピークということとなる。

しかし、このピークの時刻と図の右端部分に見えている次のバンチのピークの時刻の差を見ると約 15 ms 程度であり、これは速度分布のピーク速度である 1534 m/s でビーム発生点から検出器までの距離 22.88 m を割った値とほぼ等しい。このことからこの細かいピークはビーム発生と同時に発生した何かしらの信号をとらえたものであると推測できる。

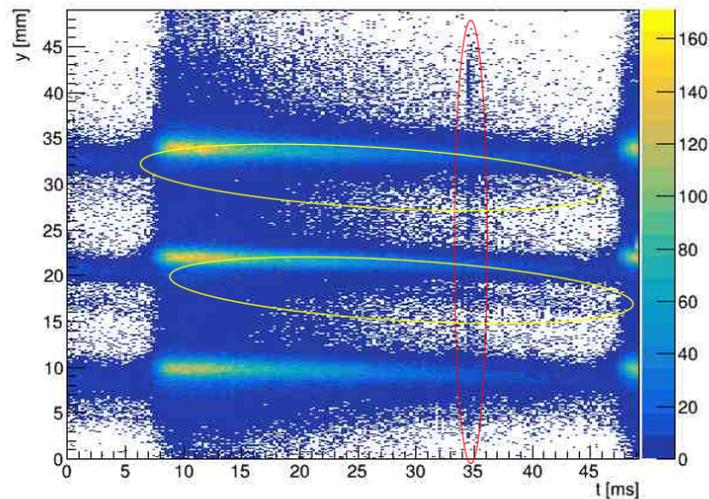


図 39: 中性子が検出された時刻 t と y 座標の関係のグラフで特徴的な部分

このピークに対してガウシアンフィッティングで中心位置を求めると、34.571 ms となる。また、事前にビーム信号は 40 ms ごとに発せられるということを知っていたので、我々が着目しているバンチのビーム信号の位置は -5.429 ms の位置にあることが分かった。

6.2 重心計算によるずれの補正

上でも述べたが、中性子が検出器にぶつかった位置を決定する方法として、シンチレータによる発光をガラスで拡散させてから重心をとるという方法を用いている。しかしこの方法で求めた y 座標は、本来中性子がシンチレータにぶつかった位置からは少しずつれてしまう。これは図 42 のように PMT の大きさが有限であるため、拡散した光のすべてをとらえることができず、しかもとらえきれない光に非等方性があることから生じる。

このずれを補正するために図 43 のように考える。中性子がぶつかった位置から PMT の上端を見上げる角度を θ_1 、PMT の下端を見下ろす角度を θ_2 とする。また、中性子がシンチレータにぶつかった位置の y 座標を y_0 、重心計算で求めた PMT 上での y 座標を y とする。光は中性子がシンチレータにぶつかった点から角度について一様に放射されるので、重心計算で求まる中性子の位置は、ぶつかった点からみて角度 θ のところにある。

これらの文字の定義や関係を数式で書くと、

$$\begin{aligned}
 y &= y_0 + d \tan \theta \\
 \theta &= \frac{\theta_1 - \theta_2}{2} \\
 D - y_0 &= d \tan \theta_1 \\
 y_0 &= d \tan \theta_2
 \end{aligned}$$

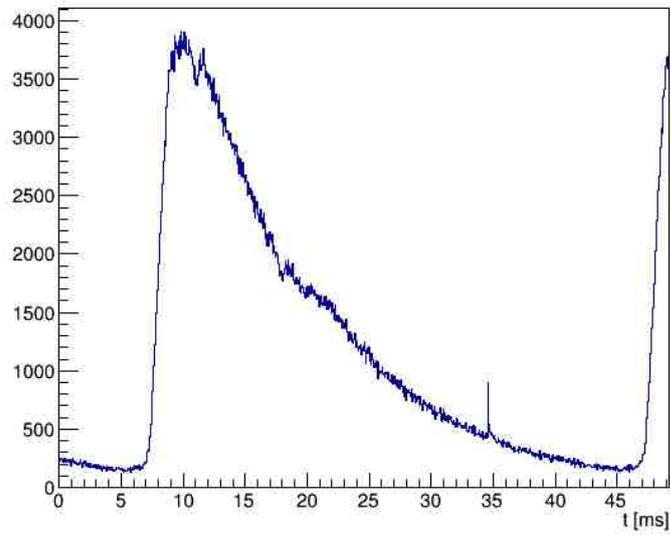


図 40: 中性子の測定された時刻の分布

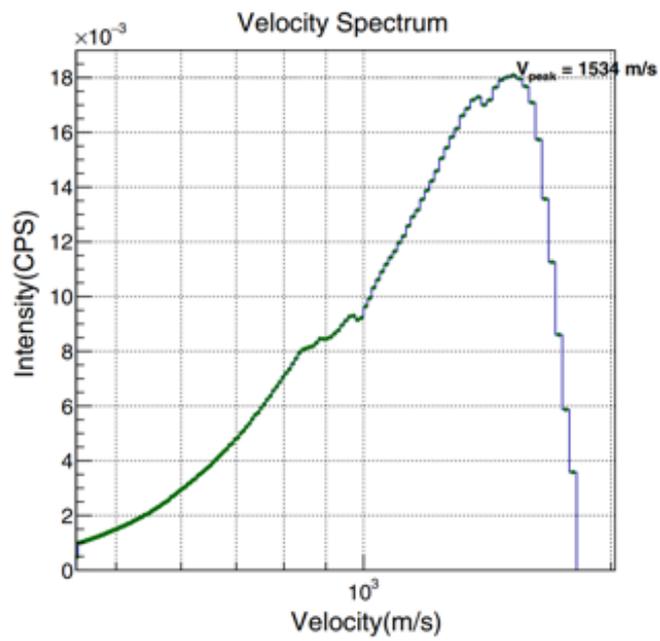


図 41: 文献から得られた中性子の速度分布

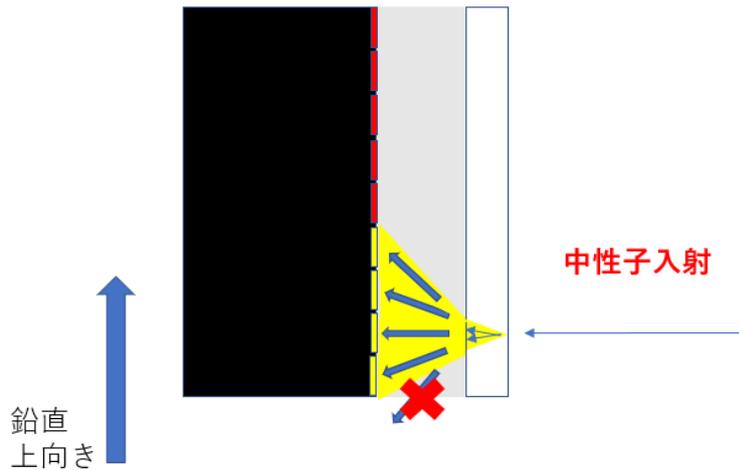


図 42: 光の一部を検出器がとらえきれず、重心計算によってずれが生じることを示した模式図

となる。さらに、これらの式から θ , θ_1 , θ_2 を消去すると、

$$y = y_0 - \frac{d^2 + y_0(D - y_0)}{D - 2y_0} + \sqrt{\frac{(d^2 + y_0(D - y_0))^2}{(D - 2y_0)^2} + d^2}, (y > y_0)$$

$$y = y_0 - \frac{d^2 + y_0(D - y_0)}{D - 2y_0} - \sqrt{\frac{(d^2 + y_0(D - y_0))^2}{(D - 2y_0)^2} + d^2}, (y < y_0)$$

となる。これを y_0 について解きたいが、あまりに複雑な式であるため数値的に解くことにする。既知のパラメータとして、 d には拡散用ガラスの厚さである 3 mm, D には PMT の受光面有感領域の辺の長さである 49 mm を用いる。得られる y と y_0 の対応は図 44 のようになる。

6.3 フィッティング関数の決定

ビーム発生点から出発し、検出器に届く中性子が満たさねばならない古典力学の方程式から、重力パラメータのフィッティングに用いるべき関数を導出する。まず、我々が用いているセットアップは以下の図 45 のようなものである。地上での重力パラメータを g とすると、以下のような方程式が成立する。

$$v_{x1} = v_{x2} = v_{x3} (= v_x)$$

$$v_{y2} = v_{y1} - g \frac{L_1}{v_x}$$

$$v_{y3} = v_{y2} - g \frac{L_2}{v_x}$$

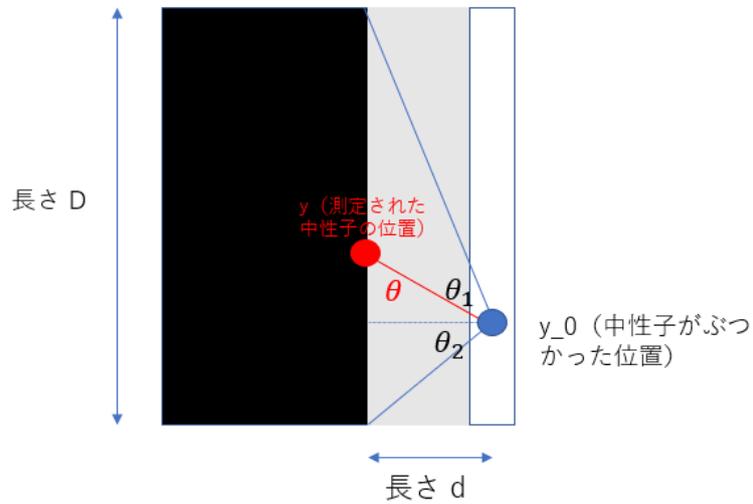


図 43: 重心計算によるずれを補正するためのパラメータ, 変数の定義

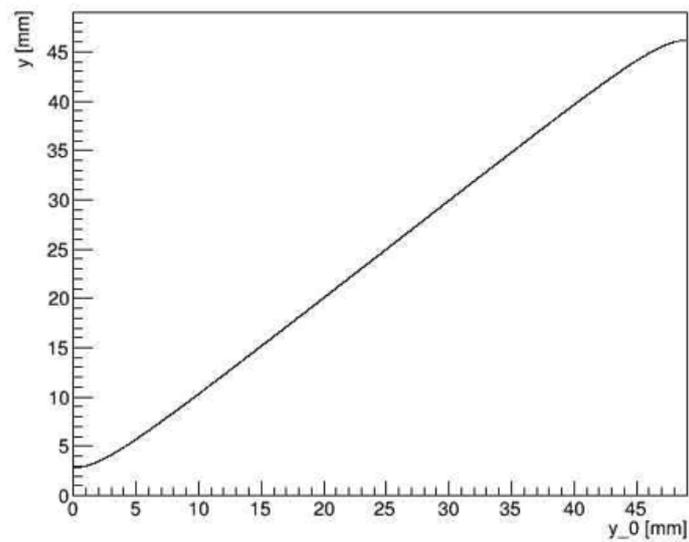


図 44: 中性子が検出された位置 y と中性子が実際にぶつかった位置 y_0 の関係

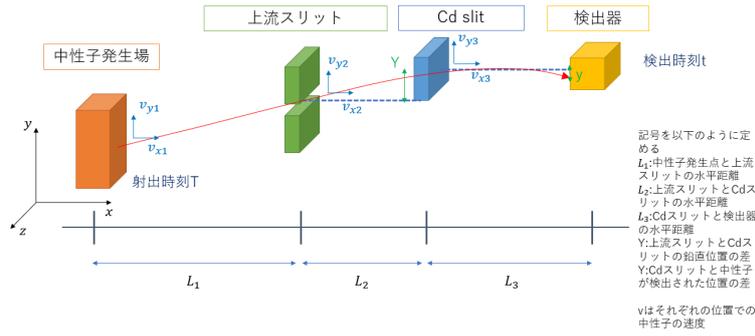


図 45: 実験のジオメトリを模式的に表した図

$$Y = v_{y2} \frac{L_2}{v_x} - \frac{1}{2} g \left(\frac{L_2}{v_x} \right)^2$$

$$y = v_{y3} \frac{L_3}{v_x} - \frac{1}{2} g \left(\frac{L_3}{v_x} \right)^2$$

$$T - t = \frac{L_1 + L_2 + L_3}{v_x}$$

なお、記号の定義は図 45 の通りとする。我々が現在持っているデータは y と t の関係なので、この連立方程式の変数を消去し、 t と y が満たすべき関係を導き出す。その結果は、

$$y = \frac{Y L_3}{L_2} - \frac{1}{2} g \frac{L_3 (L_2 + L_3)}{(L_1 + L_2 + L_3)^2} (t - T)^2$$

である。つまり、我々はフィッティングパラメータを p_0 , p_1 として、

$$y = p_0 - \frac{1}{2} p_1 \frac{L_3 (L_2 + L_3)}{(L_1 + L_2 + L_3)^2} (t - T)^2$$

という式を用いてフィッティングすればよく、得られた p_1 の値が求めたい重力パラメータに相当する。なお、 L_1 , L_2 , L_3 については直接の測定などによって求まっており、

$$L_1 = 11.88 \text{ [m]}$$

$$L_2 = 4.467 \text{ [m]}$$

$$L_3 = 6.533 \text{ [m]}$$

である。さらに、ビーム信号の時刻 T については上で議論しており、

$$T = -5.429 \text{ [m]}$$

であることがわかっている。

6.4 フィッティングのためのデータ選別

フィッティングをするときには、中性子がどのスリット由来のものかを区別してやる必要がある。図 38 のような分布にフィッティングをかけようとしても異なるスリットか

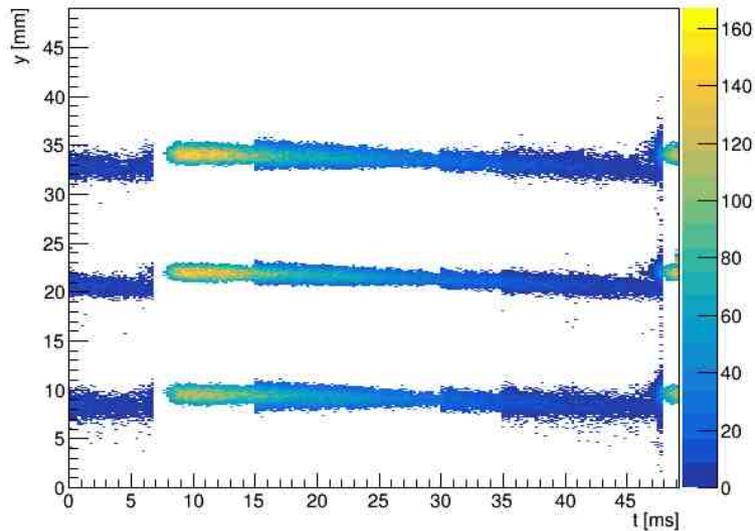


図 46: ヒストグラムの bin に threshold をかけて各スリットのデータを分離させたもの

表 3: 3本のスリットのデータに対するフィッティング結果

	p_0 [mm]	p_1 [m/s ²]
上スリット	34.290 ± 0.0032	9.84 ± 0.052
真ん中スリット	34.290 ± 0.0032	9.78 ± 0.046
下スリット	9.679 ± 0.0036	8.25 ± 0.058

ら来た中性子が混ざってしまっているのので、結果がフィッティング方法に大きく依存してしまう可能性がある。これを避けるためにあらかじめフィッティングするデータを選別しておく。2次元ヒストグラム図 38 において、時刻 t に依存した threshold をかける。つまり、ヒストグラムの各 bin について、threshold を超えなかった bin のデータはないものとみなす。そうして得られた新たな分布が図 46 である。

6.5 フィッティング結果

上で導いたフィッティング関数を図 46 の分布に適用する。結果は表 3 で、そのときのフィッティングの図は 47 のようになる。上と真ん中のスリットに関しては我々が知る値である 9.8 m/s に近い値が得られたが、下のスリットだけはそれらの値から大きくずれている。

7 考察

まず 1 点目に、解析の章でも触れた 35 ns の付近にあるピークの正体について考える。このピークの特徴として、この信号を与える粒子はスリットを通り抜けていることがあげら

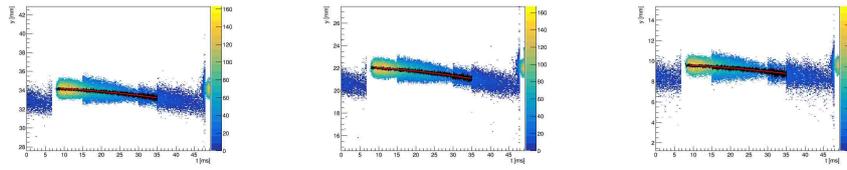


図 47: 各スリットのデータにフィッティングを施したときの様子. 左が上, 中央が真ん中, 右が下のスリットに対応



図 48: 中性子が検出された時刻の分布で一部の時間領域を切り取ったもの. 左が 34.56 ms から 34.58 ms, 右が 33.56 ms から 33.58 ms の区間を切り取っている.

れる. 図 48 でそれぞれ t が 34.56 ms から 34.58 ms の領域を切り取ったものと, 33.56 ms から 33.58 ms の領域を切り取ったものの比較をしている. ここでわかるのは後者ではスリットの形がはっきりわかるのに対し, 前者ではスリットとスリットの間にもイベントがあり, スリットの形がぼやけていることである. このことから, このピークの原因は熱中性子や冷中性子のようなスリットで止められてしまう粒子ではないことがわかる. さらに, このピークの特徴として, 図 48 に示したように時間幅が非常に狭いことがある. これは, ピークの原因となった信号が検出器に到達するまでにぼやけていないということなので, 信号の伝達速度が一樣であったということが予想される. はじめはこのピークの正体がビーム射出と同時に生成された非常に速い高速中性子がスリットをすり抜けて届いたのではないかと考えたが, もし高速中性子であったとするとピークの裾の部分はもっと広がっているべきであり, ピークの時間幅が数十マイクロ秒に収まってしまうことは考えにくい. この為, この信号を伝達した粒子の正体は光子 (γ 線) ではないかと予想する. γ 線であればスリットは通り抜けられるし, 速度にばらつきがないので我々が観測したピークの特徴と整合する. γ 線そのものが検出器に観測されることはほとんどないと考えられるが, γ 線がシンチレータや検出器などを構成する原子の原子核にぶつかることで中性子が核から分離され, それを検出器が信号として拾ったものであると考えると説明がつく.

2点目に, 解析(後半)の章の冒頭で述べた図 39 の黄色の丸で囲った部分のふるまいについて考察する. 解析の章でフィッティングによって得られたパラメータを用いて, 我々が注目するバンチの1つ前のバンチの y 分布の中心の t 依存性のグラフをヒストグラムに重ね書きしたものが図 49 である. これを見ると, 黄色の丸で囲った部分は1つ前のバンチの分布の中心と重なっている. このことから, 黄色の丸の部分は1つ前のバンチの非常に遅い中性子が検出されていたものと考えられる.

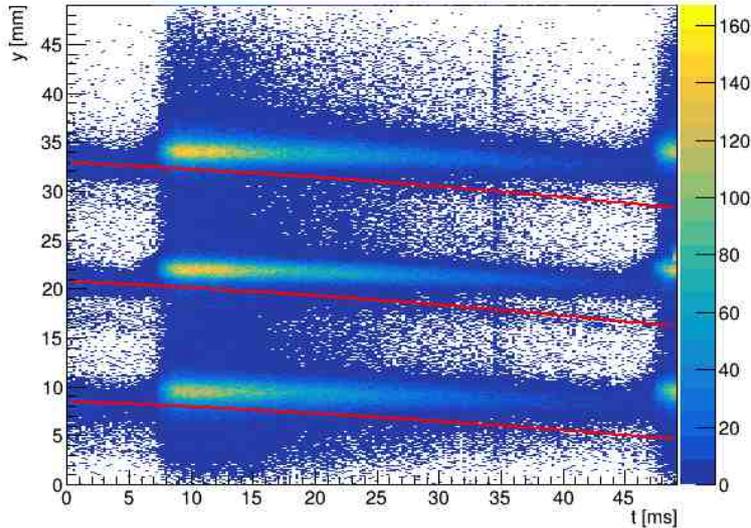


図 49: ひとつ前のバンチに対するフィッティング関数を (y, t) の 2 次元ヒストグラムに重ね書きしたもの

表 4: $d = 4$ [mm] としたときのフィッティング結果

	p_0 [mm]	p_1 [m/s ²]
上スリット	34.498 ± 0.0033	10.05 ± 0.053
真ん中スリット	22.117 ± 0.00029	9.92 ± 0.047
下スリット	9.258 ± 0.0038	9.01 ± 0.061

3 点目にフィッティングの際に一番下のスリットからほかの 2 つのスリットでの値から大きくずれた値が得られた理由を考察する. セットアップにおいて下のスリットがほかの 2 つと異なっている点は, 下のスリットからのイベントは比較的検出器の端のほうによっていることがあげられる. 解析の章で述べたが, 端に近いイベントは重心計算による実際の位置からのずれの影響を大きく受ける傾向がある. このため, 重心計算の補正がうまくいっていなかったために, フィッティングパラメータが実際の値からずれてしまったのではないかと考えられる. 解析の章では図 43 において, d を拡散用ガラスの厚さである 3 mm であるとして補正を行った. しかし実際には PMT の受光面にもガラスがあり, その厚さは 1.5 mm である. この分の厚さを合わせて $d = 4.5$ [mm] であるとして補正を行う.

$d = 4.5$ [mm] としたときの y と y_0 の関係は図 50 のようになっており, この補正を用いたフィッティング結果は表 4, そのときの図が図 51 である. 先ほどに比べて 3 つのスリットから得られる結果は接近したが, まだ差がみられる.

さらに d を広げて $d = 6$ [mm] であるとして補正を行ってみる. このときの y と y_0 の関係は図 52 であり, この補正を用いたフィッティング結果は表 5, そのときの図が 53 である. 今回の結果では 3 つのスリットから得られる結果は十分に近くなった.

$d = 6$ [mm] という値に根拠はないが, d の値を広げるにつれて 3 つのスリットから得ら

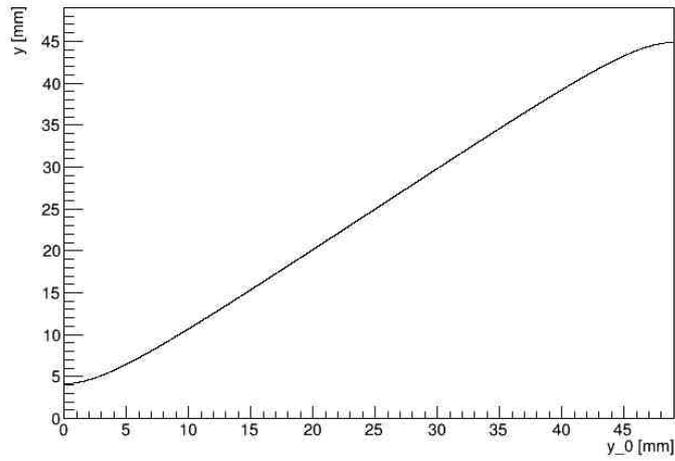


図 50: $d = 4.5$ [mm] としたときの観測された鉛直位置 y と実際にぶつかった鉛直位置 y_0 の関係

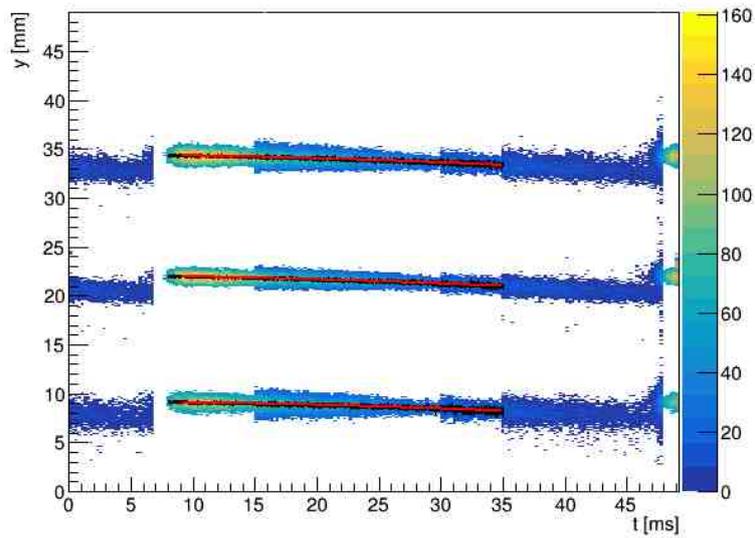


図 51: $d = 4$ [mm] としたときのフィッティング結果

表 5: $d = 6$ [mm] としたときのフィッティング結果

	p_0 [mm]	p_1 [m/s ²]
上スリット	34.800 ± 0.0036	10.36 ± 0.036
真ん中スリット	22.060 ± 0.00030	10.25 ± 0.049
下スリット	8.625 ± 0.0044	9.93 ± 0.070

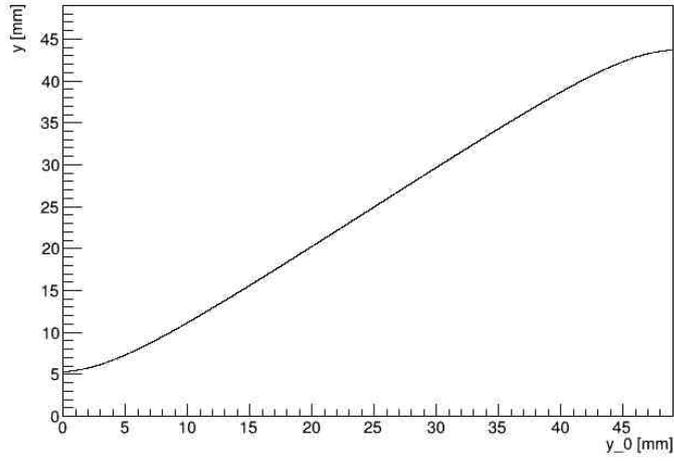


図 52: $d = 6$ [mm] としたときの観測され鉛直位置 y と実際にぶつかった鉛直位置 y_0 の関係

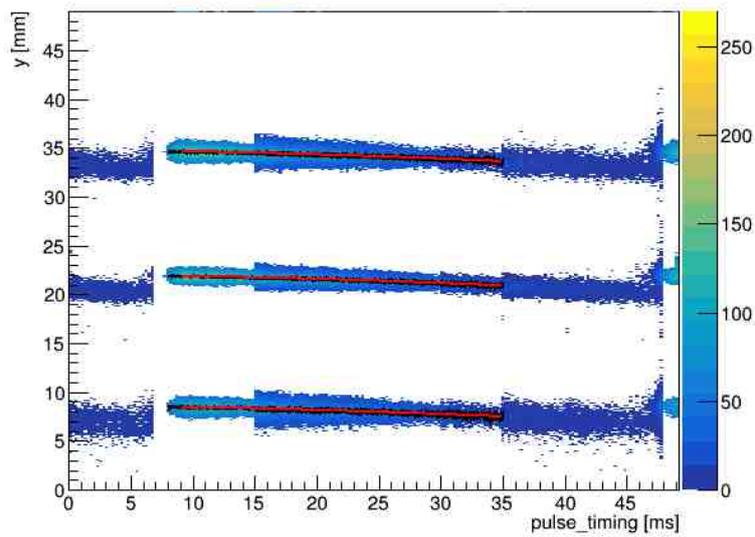


図 53: $d = 6$ [mm] としたときのフィッティング結果

れる結果が近づいていくという傾向がみられた。現在、データの補正をするにあたって、ガラス内での反射や散乱の効果を全く考慮に入れなかった。検出器の構造として正しい d の値は 4.5 mm であるはずだが、反射や散乱の効果によって実質的な d の値が伸びているのではないだろうかと予測される。それらの効果を正しく考慮に入れた補正を行えばより良い結果が得られるであろうと考えられるが、そのような補正方法はまだ考えついておらず、今後の課題である。

8 謝辞

指導教員の中家さん、隅田さんには、卒業研究のテーマ決めからいろいろとアドバイスや提案をしていただきありがとうございました。また、実験に必要な物品の購入をしてくださったり、京大内での実験において、たくさんの失敗や疑問点が出てくる中でも、的確なアドバイスをしていただき本当に感謝しています。6日間の J-PARC での本実験でも、1日中面倒を見てくださり大変お世話になりました。

J-PARC の三島様には、BL05 の中性子ビームを使わせていただきとても感謝しています。また、実験の打ち合わせや現地でのご協力本当にありがとうございました。備え付けてあったシリコンウェハーを落として割ってしまったことは本当に申し訳ありませんでした。

予備実験として KUANS の中性子ビームを使わせていただいた廣瀬さんには、迷惑をおかけすることもありましたが、優しく対応して下さいありがとうございました。

TA の中村さんと川上さんには、実験のアドバイスや分からないところを教えていただき、本当に感謝しています。また、中村さんには現地での本実験でも、セットアップの準備や DAQ の手伝いをしていただきました。ありがとうございました。

最後に、皆さんの協力がなければ、実験はうまくいかなかったと思います。中性子班一同、心から感謝申し上げます。

9 参考文献