

# 中性子に働く重力相互作用の測定

伊藤望、道下佳寛、安留健嗣

2017年4月28日

## 目次

1	目的	3
2	実験の詳細	3
2.1	実験原理 . . . . .	3
2.2	実験器具、装置 . . . . .	3
2.3	セットアップ . . . . .	7
3	理論	8
3.1	仮定 . . . . .	8
3.2	分布関数の導出 . . . . .	8
4	シミュレーション	10
5	解析	13
5.1	理論との整合性 . . . . .	13
5.2	定義と計算式 . . . . .	16
5.3	データ解析 . . . . .	17
6	考察	23
7	謝辞	25
8	参考文献	26

# 1 目的

現在、既存の重力理論では説明できない現象が幾つか発見されており、それは理論が将来的には修正を受ける可能性があることを意味している。標準理論も重力相互作用を統一することはできていない。我々は自然界の四つの相互作用のうち、特に重力相互作用に興味を持った。素粒子間の重力相互作用は電磁相互作用と比べてはるかに無視できる程度の微力なものであり、現代の科学技術では測定は不可能である。しかし、スケールが素粒子スケールになったときに、重力定数が不変であることは認めて良いのだろうか。それは実験を通して初めて立証されることであろう。そこで、中性子に対して働く地球からの重力相互作用を測定することにより、既存の法則が質量ののごく小さい物体に対しても成立すること、あるいはしないことを実証することが、本実験の目的である。

## 2 実験の詳細

### 2.1 実験原理

幾つか候補は挙がったが、我々が使用可能な実験器具、装置を考慮した結果、もっともシンプルな方法で実験を行うことになった。すなわち、ニュートンの運動方程式である。具体的には、相対論的効果と波動性を無視できるようなエネルギーを持つ中性子を考え、その運動の始点、終点、初速度、移動時間の四つの情報を得ることで、地球の重力加速度  $g$  を求めた。

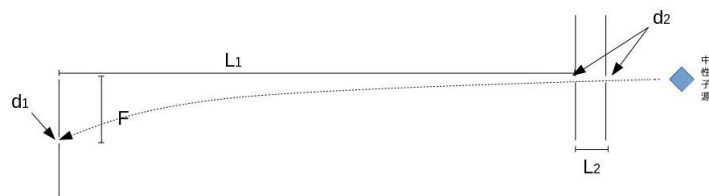
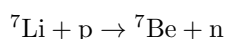


図1 実験の原理図。上流スリットを通過した中性子が重力影響で落下しながら検出器に向かっていることを表している。

### 2.2 実験器具、装置

#### 中性子源

中性子源として、理学部5号館東棟にある KUANS\*<sup>1</sup>を用いた。KUANS は、陽子線形加速器で生成されたパルス状の陽子ビームを  ${}^7\text{Li}$  ターゲットに衝突させ、反応



より高速中性子ビームを得、それをポリエチレン減速材を通すことで比較的低温の熱中性子成分をもつ

\*<sup>1</sup> \*Kyoto University Accelerator-driven Neutron Source 京都大学加速器中性子源

中性子ビームを得る装置である (図 2)。

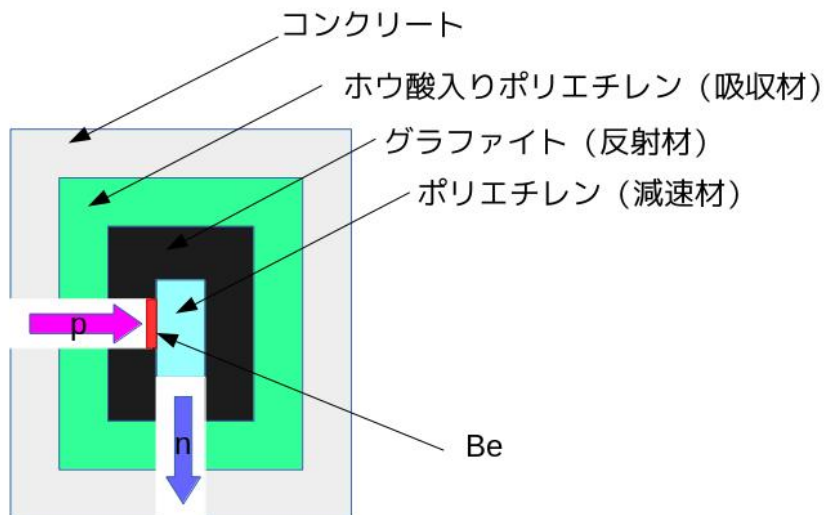


図 2 中性子生成部分の概念図。陽子ビームをベリリウム薄膜に当て、核反応によって生成された中性子をポリエチレンで減速させて取り出す。

予備実験で、そのビーム特性を以下のように得た (測定装置については先を参照)。

<<予備実験>>

図 3 のように place1、2 に測定装置をおいてそれぞれ測定を行った。

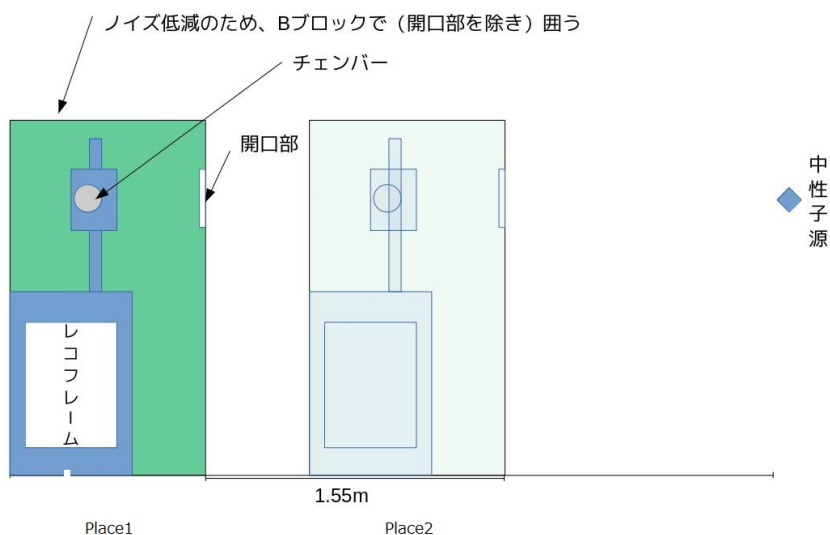


図 3 予備実験のセットアップ。中性子源から遠い方から、place1, 2 とする。



その結果、ビームの入射からチェンバーで中性子を検出するまでの時間測定において、以下の分布が得られた。

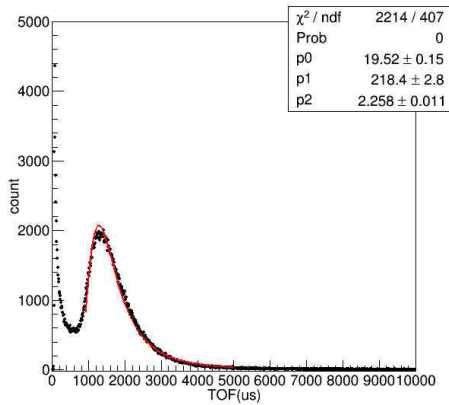


図 4 TOF 分布に対する Maxwell 分布での fit(place2)。フィッティングの様子から、発生した中性子がボルツマン分布に従っていることがわかる。

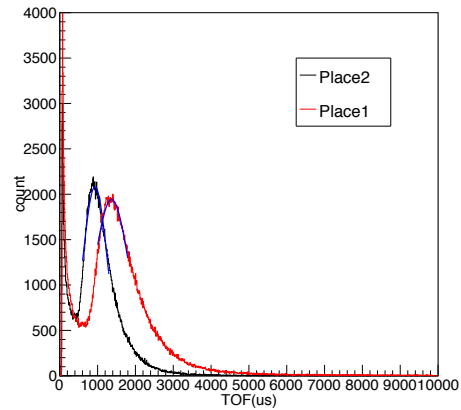


図 5 Gaussian を用いた peak の fit。このフィッティングによって熱中性子ピークの TOF を推定した。

図 4 より熱中性子が正しく Maxwell 分布に従っていること（一つ目の peak は高速中性子のものである）が分かった。

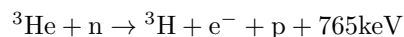
図 5 の peak の位置は、place1、2 でそれぞれ  $949 \pm 3$ 、 $1383 \pm 4$  [ $\mu\text{m}$ ] である。そこから熱中性子の TOF ピークでの速度が求まる。温度計算は、TOF の値の差から中性子の速度を求め、その速度を  $v$  としたとき中性子の温度  $T$  はボルツマン定数  $k$  を用いて

$$T = \frac{mv^2}{2k}$$

と与えられるので、この計算をすることにより温度が  $772.7 \pm 16.4$  K であることがわかった。誤差は統計誤差によるもので、誤差の伝搬則を用いて計算を行った。

## 計数管

発生した中性子の測定装置として、 $^3\text{He}$  比例計数管\*2を用いた。これは  $^3\text{He}$  を封入した、芯線を持つ金属管 (に読みだし部分がついたもの) であり、芯線と金属管表面に電位差を持たせた状態でこれに中性子が入射すると反応



が起き、生成したトリチウムと陽子がエネルギーを得て運動し、ガスをイオン化する。イオン化した  $^3\text{He}$  によって、芯線-金属管間に電流が流れ、中性子を検出できるという仕組みである。これと KUANS で借り受けた専用のモジュールを用いることで陽子ビーム発生から中性子ビーム到着までの時間（上図

\*2 \*[www.rist.or.jp/atomica/dic/dic\\_detail.php?DicKey=1194](http://www.rist.or.jp/atomica/dic/dic_detail.php?DicKey=1194)

における ToF) を測定することができる。

#### 遮蔽材

中性子の遮蔽材として、ボロン入りポリエチレンブロック、ボロンゴムシート、カドミウム板を用いた。これらはどれも、高速中性子に対しては断面積が小さいが、熱中性子に対してはほぼ完全な遮蔽材として振舞うことがわかっている。計数管の周囲を覆うことでバックグラウンドを抑えたり、スリットを作成するのに用いた。

#### Z 軸ステージ

カタログスペックで 2  $\mu\text{m}$  刻みで動かすことのできる Z 軸ステージを用いた。用途は計数管を上下させることである。

## 2.3 セットアップ

図6のようにセットアップを行った。なお、これらの具体的な寸法は必ずしも実験精度から来る要請により定めたものではなく、それよりはむしろ空間的、あるいは技術的制約よりこうならざるを得なかったのだということを含め指摘しておく。

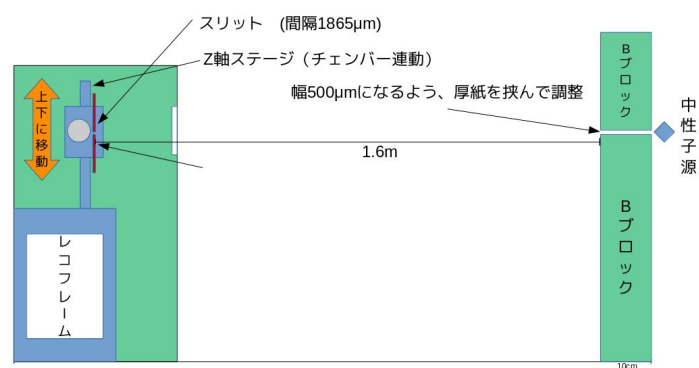


図6 セットアップの模式図

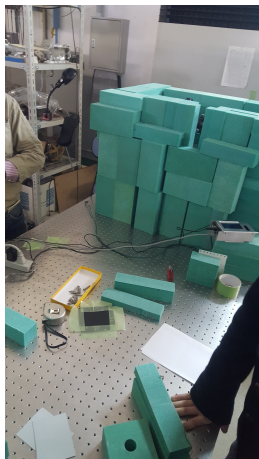


図7 上流スリットから下流スリットまでの装置。実験時はさらにボロンブロックの上からボロンゴムシートをかぶせている。



図8 ボロンブロック内の様子。円形のリングに固定されているものが今回の検出器である。

### 3 理論

以下では、上流スリットを通り抜けた中性子が下流スリットを通過してチェンバーで検出されたときの TOF 分布を導出する。

#### 3.1 仮定

- 発生する中性子の運動量分布はボルツマン分布に従う
- 中性子は等方的に発生しているものとする（実際は違うが、スリットを通る小さい  $\delta\Omega$  については等方向性が保証されているとする）。
- 中性子が発生してから、前方スリットに到達するまでに重力によって等方向性は崩れているはずであるが、発生源からスリットまでの距離は十分短いものとし、その効果は無視できるものとする（よって実験では前方スリットと検出器までの距離に比べ、前方スリットから発生源までの距離が十分小さい方が望ましいように思われる）。
- 中性子の運動はニュートン力学に従うとする。

以上を仮定して、以下の議論を展開する。

#### 3.2 分布関数の導出



図9 セットアップと座標設定。上流スリットを通り抜けた中性子が下流スリットを通り抜けて検出器に入る様子を示している。

まず前方スリットの幅を  $D$ 、スリットから検出器までの距離を  $L$ 、後方スリットの幅を  $\delta H$ 、検出した高さ（下向き）を  $H$  とする。

ひとまず、中性子が前方スリットのどの高さから出てきたかによらず、前方スリット通過時における中性子の速度分布を

$$f(v_x, v_y, v_z) = A \exp(-\alpha(v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)) \quad (1)$$

ただし

$$\int f(v_x, v_y, v_z) dv_x dv_y dv_z = N \quad (2)$$

と規格化する。前方スリットで速度  $\vec{v} = (v_x, v_y, v_z)$  を持っていた粒子が測定器の高さ  $H$  のところに来たとき、

$$H = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g + \left(\frac{L}{v_x}\right)v_y \quad (3)$$

が成立するので、高さ  $H$  における ToF 分布関数  $g_H(t)dt$  は

$$g_H(t)dt = dv_x \int_{-av_x}^{av_x} dv_y \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z f(\vec{v}) \delta\left(\frac{v_y}{v_x} + \frac{1}{L}\left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g - H\right) \quad (4)$$

$$= dv_x \int_{-av_x}^{av_x} dv_y \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z f(\vec{v}) \delta\left(v_y + \frac{v_x}{L}\left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g - H\right) \quad (5)$$

$$= dv_x Av_x \exp\left[-\alpha\left(v_x^2 + \frac{v_x^2}{L^2}\left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g - H\right)\right] \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z \exp(\alpha v_z^2) \quad (6)$$

$$= dt \frac{AL^2}{t^3} \exp\left[-\alpha\left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}\left(\frac{1}{2}gt^2 - H\right)^2\right)\right] \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z \exp(-\alpha v_z^2) \quad (7)$$

$$\simeq dt \frac{2bAL^3}{t^4} \exp\left[-\alpha\left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}\left(\frac{1}{2}gt^2 - H\right)^2\right)\right] \quad (8)$$

$a, b$  は、スリットを設けることによる  $v_y, v_z$  の制限である。(7) 式から (8) 式には、 $\alpha, bv_x$  が十分小さいはずなので ( $\alpha \simeq 0.7 * 10^{(-7)}, bv_x \simeq 10^2$ )、 $-bv_x \leq v_z \leq bv_x$  の範囲で  $\exp(-\alpha v_z^2) \simeq 1$  として良いことを用いている。

ここから更に、前方スリットの幅、後方スリットの幅を考えると、実際に得られる時間分布  $g'_H(t)dt$  は、

$$dt \int_{H-\frac{1}{2}D'}^{H+\frac{1}{2}D'} dH' \int_{H'-\frac{1}{2}D}^{H'+\frac{1}{2}D} dH_0 \frac{2bAL^3}{t^4} \exp\left[-\alpha\left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}\left(\frac{1}{2}gt^2 - H_0\right)^2\right)\right] \quad (9)$$

$$\simeq dt \frac{2bADD'L^3}{t^4} \cosh\left(\frac{1}{2}\alpha gD\right) \cosh\left(\frac{1}{2}\alpha gD'\right) \exp\left[-\alpha\left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}\left(\left(\frac{1}{2}gt^2 - H_0\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{D'}{2}\right)^2\right)\right)\right] \quad (10)$$

$$\simeq dt \frac{2bADD'L^3}{t^4} \exp\left[-\alpha\left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}\left(\left(\frac{1}{2}gt^2 - H_0\right)^2 + \left(\frac{D}{2}\right)^2 + \left(\frac{D'}{2}\right)^2\right)\right)\right] \quad (11)$$

となる。得られたグラフのピークの高さ、ToF のピークの位置から  $A, \alpha$  の値が導ける。

さらに実験で得られる分布関数のどこに着目して測定位置による差を見出すかを調べるために、上記の関数のグラフを書いたものが図 10 である。赤線が原点（上流スリットと水平な位置）、黒線がそこから 1.5 cm 下ろした位置で計測したものに相当する。

図 10 のように黒が赤にはほぼ完全被ってしまっている。これでは実験したところで結果は出ない。

ところで上記の関数ではビームの水平方向への角度を絞っていない。1.5 cm というのは実際の実験におけるビームの広がりの中での測定に当たるのでそのままこの分布関数が使えるが、ビームの広がり際には、 $v_y$  についての  $\delta$  関数から  $v_x$  (ToF) の制約が生まれる。この制約には重力の相互作用定数の  $g$  が効いてくるので、ビームの際での測定なら結果が出る可能性がある。

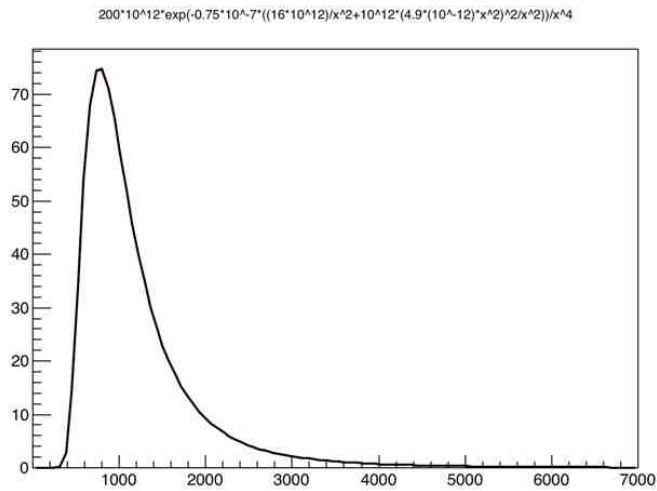


図 10 分布関数のグラフ。赤線が下流スリットが原点にある場合を表しているが、スリットを下方にずらした場合の分布関数のグラフとかぶって見えなくなっている。

## 4 シミュレーション

まず念のため今回の測定と同様の設定で行ったシミュレーションを見てみよう。プロットの色が黒=-0 mm、赤=-2 mm、黄緑=-4 mm である。

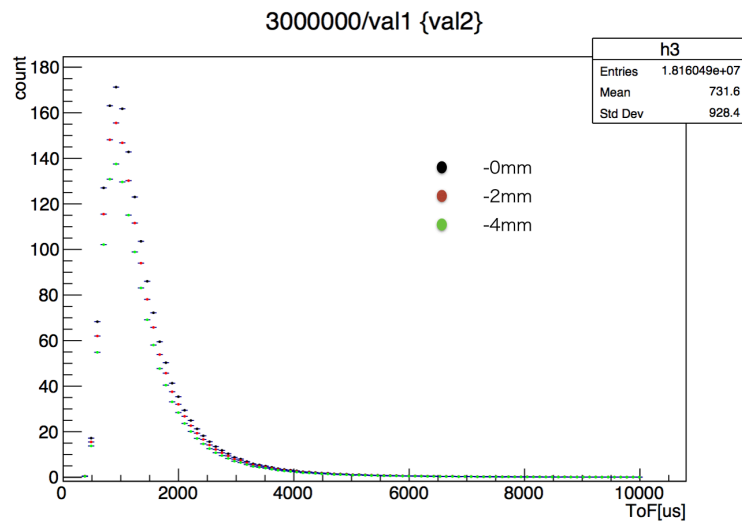


図 11 スリット位置が 0 mm, -2 mm, -4 mm の場合の生データ

上が生データ、下が総カウント数で規格化したものである。カウント数に差があるのは、厚みのあるスリッ

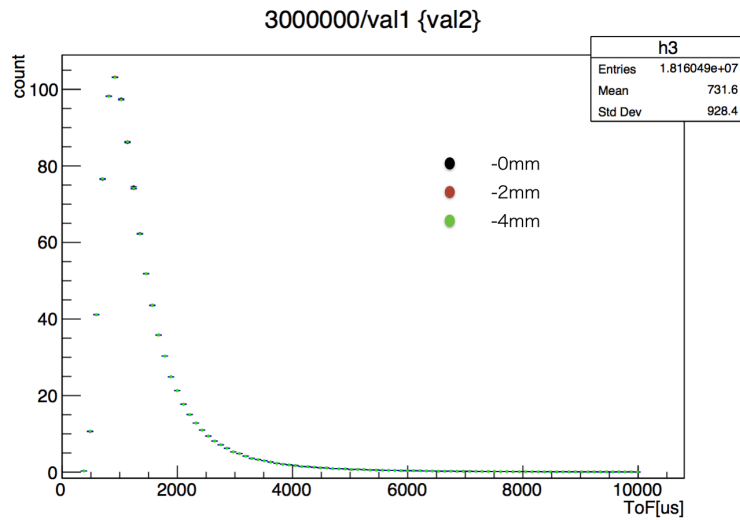


図 12 スリット位置が 0 mm, -2 mm, -4 mm の場合の規格化されたデータ

トを設けることによって生まれる角度分布のためである。図 12 のようにグラフの形による差異は見られない。よってこれでは結果は出ないように思われる。

次に下の際の方での測定をみる。ビームの角度の広がり距離 3 m で 15 mm 程度なのでその付近でシミュレーションしてみる。プロットの色が黒=-0 mm、赤=-16 mm、黄緑=-18 mm である。

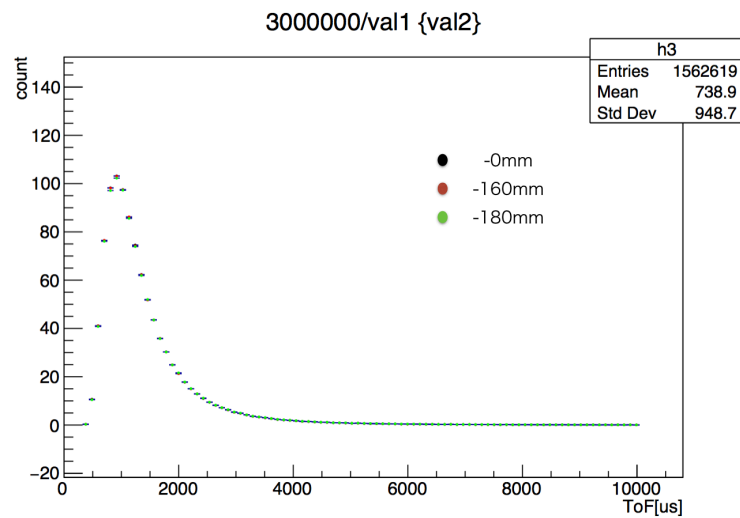


図 13 スリット位置が 0 mm, -16 mm, -18 mm の場合の規格化されたデータ

これも規格化したものであるが、前のグラフと同様グラフの形の差異は見られなかった。

さらに際での-19.5 mm,-19.7 mm では以下のようなになったがカウント数が 0 地点に比べ  $10^{-5}$  程度少ない。下が規格化したもの（黒=-0 mm、赤=-19.5 mm、黄緑=-19.7 mm）で、ここまでビームの広がり端であ

れば分布の違いが見て取れる。

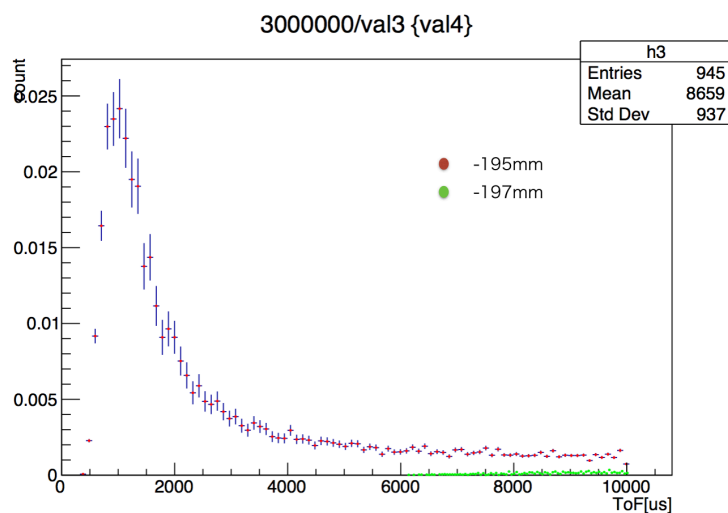


図 14 スリット位置が 0 mm, -19.5 mm, -19.7 mm の場合の生データ。

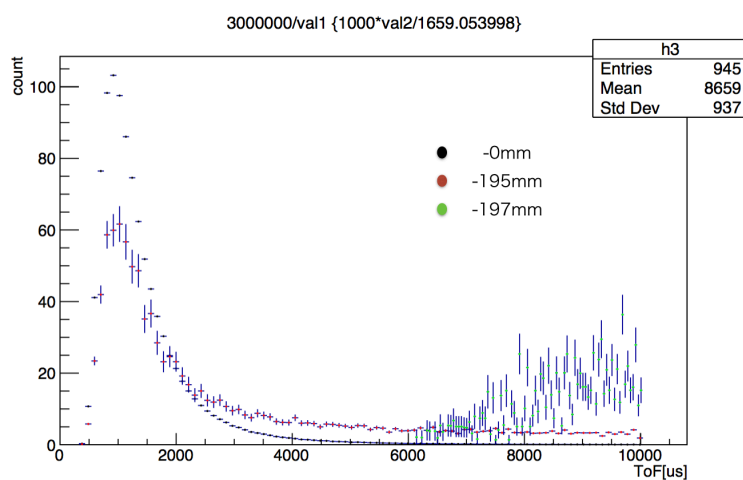


図 15 スリット位置が 0 mm, -19.5 mm, -19.7 mm の場合の規格化されたデータ。6000  $\mu\text{s}$  程度からの中性子カウントは、重力の影響で落下した中性子が検出器に入ったことを示す。

19.5 mm 地点ではマクスウェル分布が見て取れるが 19.7 mm 地点ではそうでなくなり、6000  $\mu\text{s}$  からしか観測されないことから、 $0.2\text{mm} \simeq \frac{1}{2}g(6 \times 10^{-3})^2$  が成り立ち、 $g \simeq 11(\text{m/s}^2)$  をこのグラフから導くことができる。

しかし、そもそもこのシミュレーションではバックグラウンドを考慮していないが、今実験におけるこの地点でのバックグラウンドの大きさは例えば赤プロットの  $\text{ToF}=4000 \mu\text{s}$  での count の  $10^4$  程度で誤差がルート



程度あるとすると完全に隠れてしまい測定は困難であろう。逆に、バックグラウンドを大きく減らすことが出来れば、ビームの範囲の端での測定により、中性子に働く  $g$  を求めることができる。

## 5 解析

### 5.1 理論との整合性

理論から導いた TOF 分布の式を用いて、今回の実験で得られたプロットをフィッティングする。まず、上流スリットを設置し、下流スリットを設けない場合について考える。下流スリットを設けない場合の理論式は、スリットありで導いた式において、 $\delta H$  をチェンバーの太さであると解釈すればよいので依然として

$$T = dt \frac{2bAL^3 D \delta H}{t^4} \exp \left( -\alpha \left( \frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2} \left( \frac{1}{2} g t^2 - H_0 \right)^2 + \frac{D^2}{4} + \frac{\delta H^2}{4} \right) \right)$$

が成り立っている。exp の引数は  $\frac{1}{t^2}$  の項が主要項なので、その部分を抽出しフィッティング関数としては

$$\frac{p_0}{(x - p_1)^4} \exp \left( -\frac{p_2}{(x - p_1)^2} \right)$$

を用意する。これを用いて、下流スリットなしのデータに対してフィッティングをすると

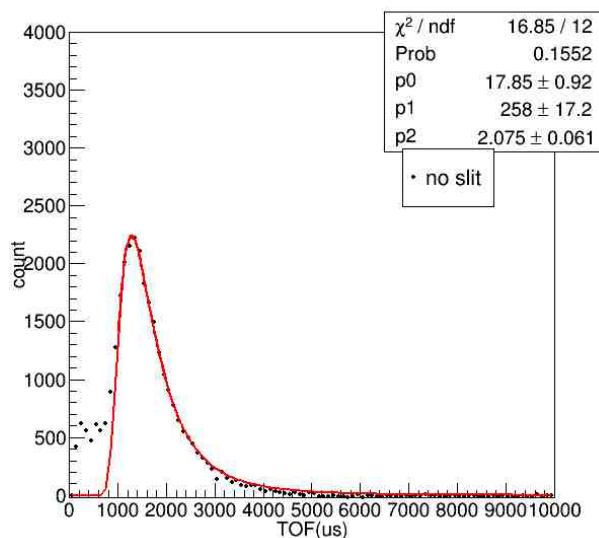


図 16 スリットなしのデータに対するフィッティング結果。測定データに対して良い一致でフィッティングができていることから、理論式の妥当性が示される。

となる。ちなみに、フィッティング時には  $p_0, p_2$  を、

$$p_0 = p_0 \times 10^{15}, p_1 = p_1 \times 10^6$$

とした。TOF が 4000  $\mu\text{s}$  から 5000  $\mu\text{s}$  付近でフィッティングとずれていることがわかるが、中性子ピーク付

近ではよい一致である。このことから、上流スリットを通して中性子はマクスウェル分布に従っていると考えてよい。次に、スリットを設けた場合の TOF 分布を上記の関数を用いてフィッティングする。

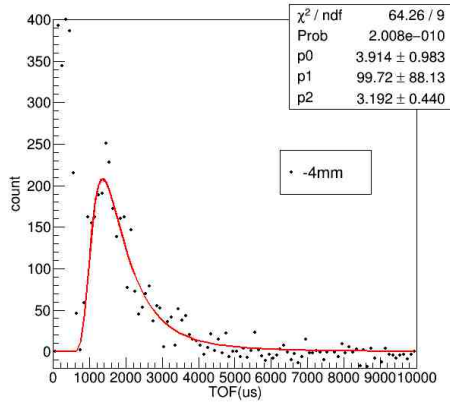


図 17 -4 mm の位置でのフィッティング結果

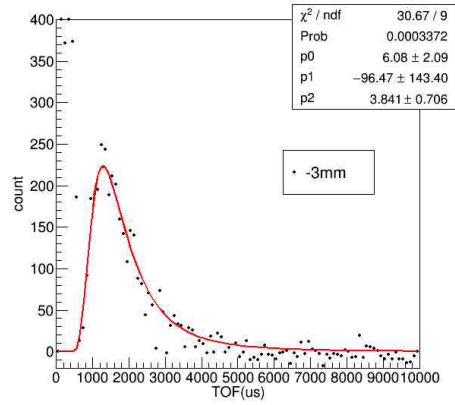


図 18 -3 mm の位置でのフィッティング結果

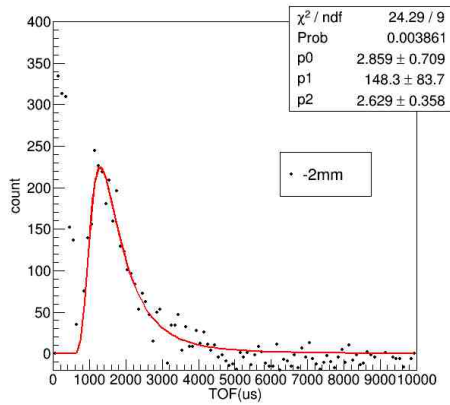


図 19 -2 mm の位置でのフィッティング結果

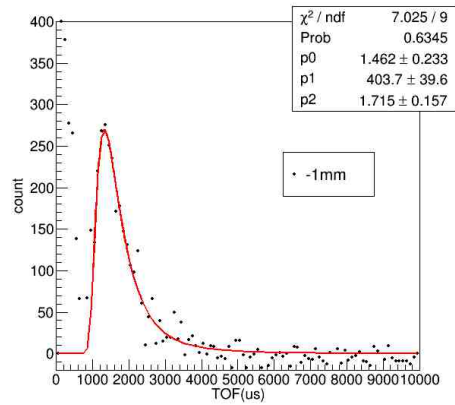


図 20 -1 mm の位置でのフィッティング結果

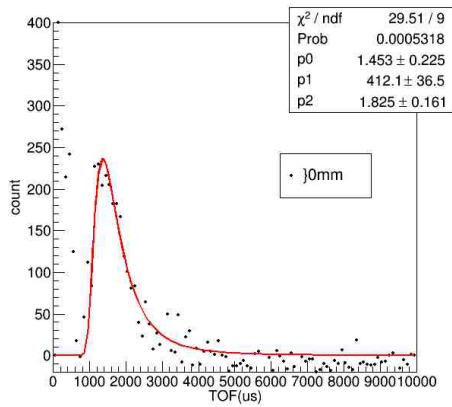


図 21 ±0 mm の位置でのフィッティング

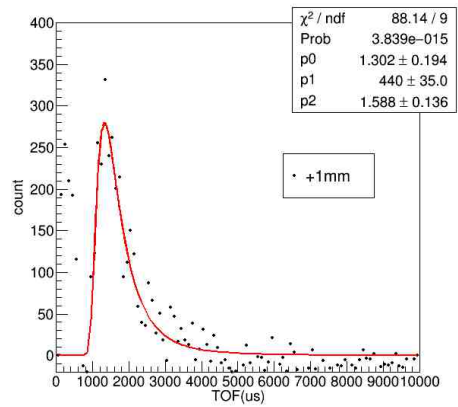


図 22 +1mm の位置でのフィッティング

フィッティングは  $g = 0$  と見なした場合のものであるが、このグラフを見る限り大きなずれは見られない。中性子発生が等方的であるという状況では、 $g$  の効果を見出すことができないことがわかる。よって、以下では中性子の時間分布の tail 部分に注目して、重力の効果を見ることができないかを解析する。

## 5.2 定義と計算式

解析データに関して、基準点とされているものはビーム強度が最大であると思われる鉛直方向の位置を指す。我々の実験では以下のような位置に関するデータを得た。

1. +2mm
2. +1mm
3. ±0mm
4. -1mm
5. -2mm
6. -3mm
7. -4mm
8. no slit

また、バックグラウンドは origin の位置で 3 時間測定したものを共通に用いた。得られるデータは各 TOF ごとのカウント数である。これらのデータを次のように加工して、各 TOF ごとの中性子の信号とした。

$$N_s = N_c - N'_{bg} \quad (12)$$

$N_c$  は各位置、各 TOF における中性子のカウント数で、 $N'_{bg}$  は規格化されたバックグラウンドのカウント数を表す。規格化は測定された時間の小さい、高速中性子成分を用いて行う。

$$N'_{bg} = N_{bg} \times \frac{N_{c-peak}}{N_{bg-peak}} \quad (13)$$

いずれも peak とは、最も多いカウント数を表す。以上のように得られたデータに含まれる統計誤差は以下の式から算出される。

$$\sigma_s = \sqrt{(\sigma_{bg})^2 + (\sigma_c)^2} \quad (14)$$

$$\sigma_{bg} = \sqrt{\sum N'_{bg} \times \frac{t_{slit}}{t_{bg}}} \quad (15)$$

$$\sigma_c = \sqrt{\sum N_c} \quad (16)$$

式 (15) における  $\frac{t_{slit}}{t_{bg}}$  は、バックグラウンドの測定時間と各スリット位置におけるデータの測定時間の比を考慮したものである。我々の実験では、バックグラウンドの測定時間に対して、データの測定時間は  $\frac{1}{2}$  であった。また、本実験ではビーム強度の違いによるわずかなカウント数の変化は  $g$  を求める上で重要ではないと思われるため、ビーム強度による規格化は行っていない。

### 5.3 データ解析

以下は各位置における生データと規格化されたバックグラウンドのデータを同時にプロットしたものである。

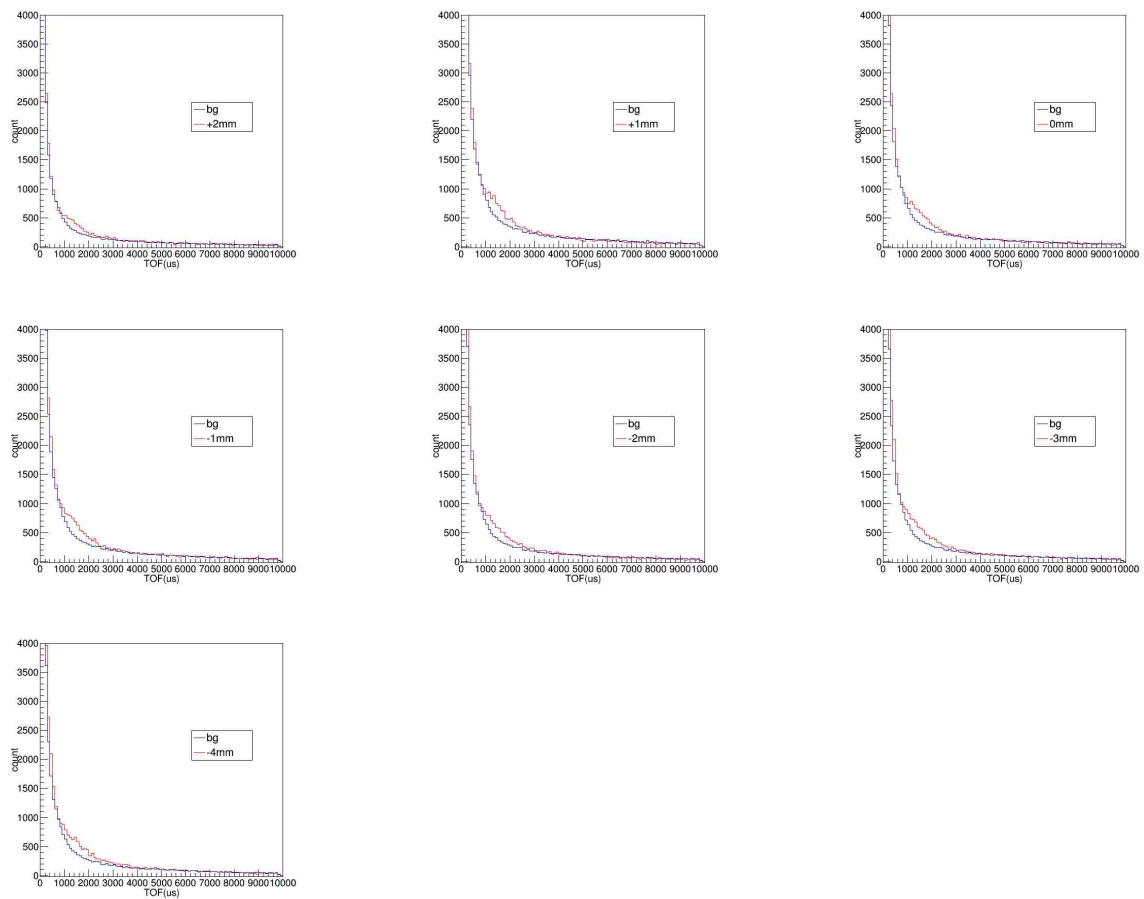


図 23 各位置における規格化されたバックグラウンドと生データの比較

熱中性子ピークのある 1300  $\mu\text{s}$  付近ではバックグラウンドの差がよく見える。このことをはっきりさせるため両者の差を取り、中性子の信号としてプロットする。

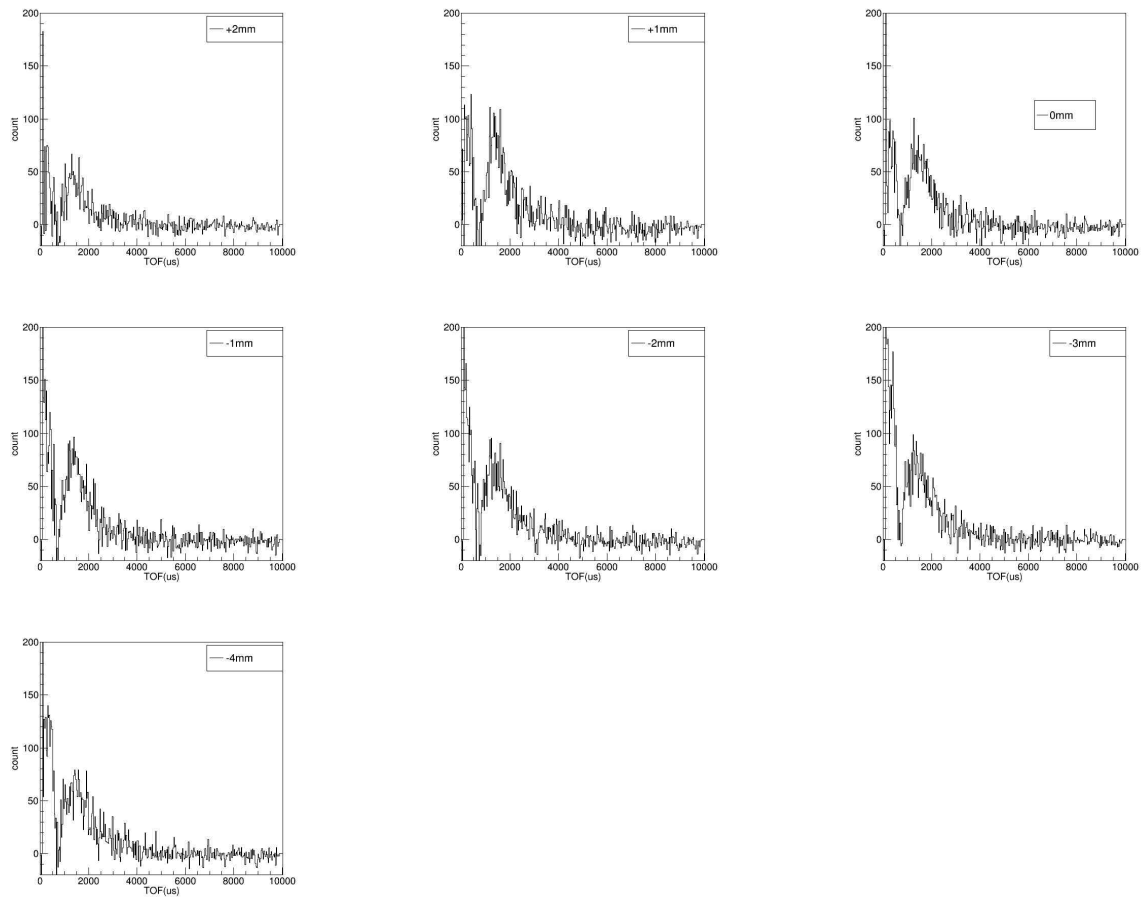


図 24 バックグラウンドを引いた後の中性子の時間分布。どの位置に対しても熱中性子のピークが見えている。

このように、いずれも熱中性子ピークが観測されていることがわかる。我々が検証したいのは、中性子が重力の影響で自由落下していることである。そのため、これらのグラフを相互に比較する必要がある。

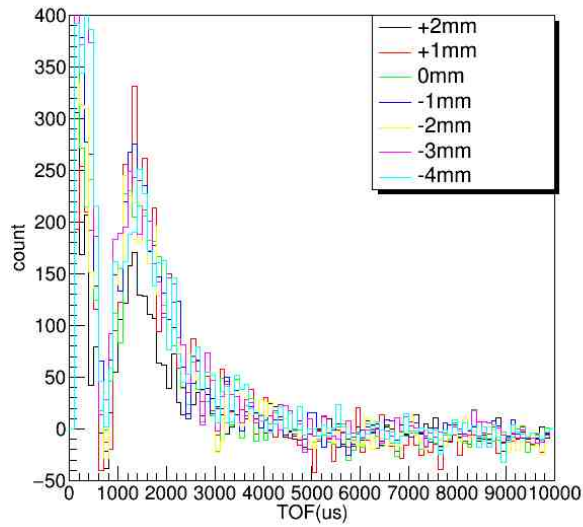


図 25 同時プロット。注目したのは中性子のテールがどこまで続いているかということである。このプロットによれば、5000  $\mu\text{s}$  程度以降は中性子のカウント数はバックグラウンド程度だと思える。

これは、各点で測定した中性子の信号を同時にプロットしたものであるが、単純な傾向としてスリットの位置を鉛直下方向に移動させるほど熱中性子ピークのカウント数が増加していることがわかる。また 5000  $\mu\text{s}$  以降はどれも 0 と見なせるので、以下では中性子のテールを 4000  $\mu\text{s}$ ~5000  $\mu\text{s}$  のものとする。

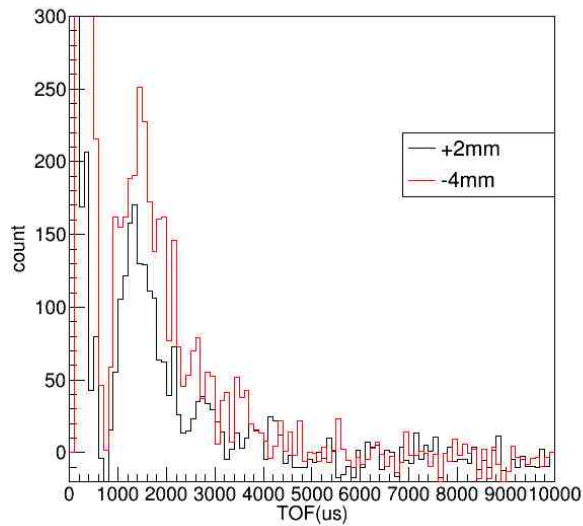


図 26 スリットが  $\pm 0$  mm から -4 mm の位置と +2 mm の位置のプロット。下流スリットが下方にあるほど中性子数は多くなっている。

この図から読み取れることは、スリット位置が鉛直下方向に移動することで熱中性子ピークの TOF が増加していることである。もし中性子が重力で落下するなら、速度の大きい中性子ほど下にあるスリットを通過し

にくくなるはずであり、中性子ピークの TOF は減少する。このグラフはそれと矛盾しない。次に、中性子のテール部分の比較を行う。

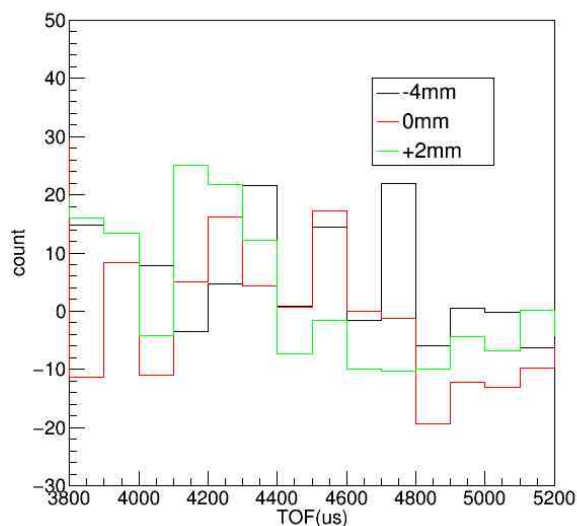


図 27 スリットが  $\pm 0$  mm から -4 mm の位置と +2 mm の位置と  $\pm 0$  mm の位置のテール部分のプロット

0consistent とみなせるテールの位置は各スリットによって異なり、明らかにスリット位置が鉛直下方向にずれているほど、テールの TOF は大きい。この様子を表で表す。

表 1 テール (4000  $\mu$ s $\sim$ 4500  $\mu$ s) の中性子数の変化

スリット位置	+2 mm	+1 mm	$\pm 0$ mm	-1 mm	-2 mm	-3 mm	-4 mm
signal	16.0	34.4	46.0	-15.0	46.0	80.0	98.0
signal error	41.6	40.3	40.4	40.0	39.5	37.6	52.9

この表によれば、 $\pm 0$  mm からスリット位置が -3 mm や -4 mm 下方にずれているものに関して中性子が生き残っている様子がうかがえるが、それ以外のものに関してはもはや誤差に埋もれている。これは重力の影響を示唆しているが、一様に広がりを持つと仮定した中性子ビームが下方にずれている可能性は否定できない。そこで、熱中性子のカウント数を調べてみる。

表 2 熱中性子 (2000  $\mu$ s $\sim$ 2200  $\mu$ s) の中性子数の変化

スリット位置	+2 mm	+1 mm	$\pm 0$ mm	-1 mm	-2 mm	-3 mm	-4 mm
signal	103	284	196	181	209	280	205
signal error	28.3	39.5	35.1	36.5	35.1	36.0	34.7

これを見ると、スリットが下方にあることと中性子数のカウント数に相関は見られないので、中性子ビーム



が下方方向にずれているという可能性は棄却できる。スリット位置が +2 mm のものだけ極端にカウント数が少ないのは他の測定時間が 90 分であるのに対し、測定時間が 40 分のためである。以上のことから、スリット位置が -3 mm のものと -4 mm のものに関して、他の位置では消失しているはずの中性子が生き残っていることが重力の影響であると思われる。このことをさらに突き詰めるため、スリットを設けなかったときの中性子の分布との比較を試みる。

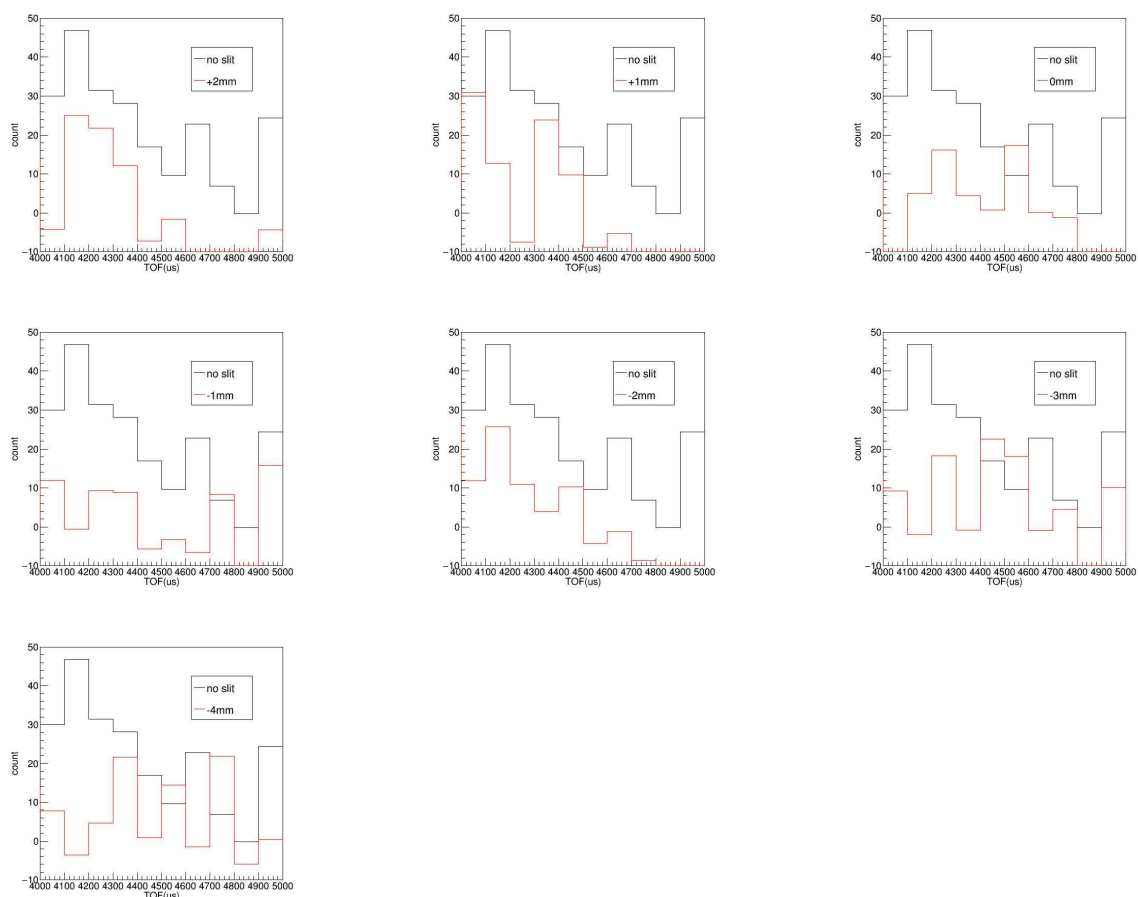


図 28 スリットなしのデータと各位置にスリットを置いたときのプロットの比較

このプロットから明らかなように、図 5.3 と図 5.3 からは、テール部分においてスリットなしで通ってきた中性子が失われていないことがわかるが、それ以外のものはほとんど中性子が見られない。以上の解析を受けて、我々のセットアップと条件から中性子が重力の影響を受けていることを確かめるためには、スリット位置が ±0 mm から -3 mm のものと -4 mm のものの中で、TOF が 4000 μs ~ 4500 μs における中性子に注目すればよいと結論できる。では、この範囲の中性子は我々のセットアップの下で理論上どれだけ落下するのだろうか。簡単な計算により

$$\frac{1}{2}gt^2 = g \times 0.5 \times \left(\frac{1.6}{4000}\right)^2 \quad (17)$$

$$\doteq 1.2 \times g \quad (18)$$

とわかる。単位は μm である。よく知られている値  $g = 9.8(\text{m/s}^2)$  を用いると落下距離はおよそ 10 μm であ

り、この落下を説明できるのかどうか本解析の要である。

次に、スリット位置が  $\pm 0$  mm から  $-2$  mm のものと  $-3$  mm のものに注目した。

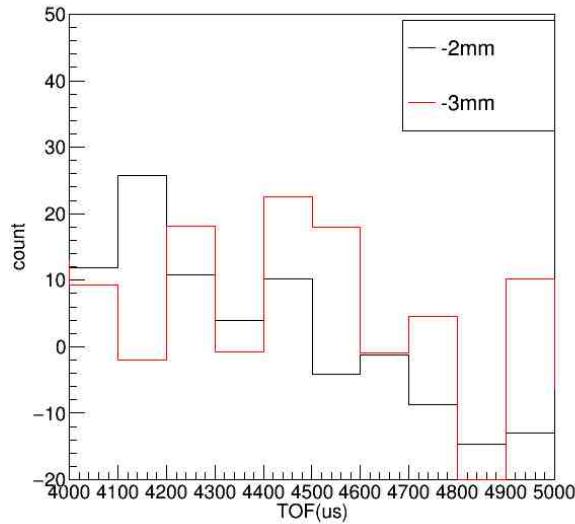


図 29 スリットが  $\pm 0$  mm から  $-2$  mm の位置と  $-3$  mm の位置とスリットなしのテール部分のプロット

黒い実線がスリット位置が  $-2$  mm のものを表し、赤い実線はスリット位置が  $-3$  mm のものを表している。この範囲内で、特に  $4100 \mu\text{s}$  付近と  $4500 \mu\text{s}$  付近のグラフを比較してみたい。この TOF 以外は両者は似たようなグラフ分布になっているが、この部分に関しては顕著に異なる傾向を示している。このことに関する検証はさらに必要だが、現時点ではデータ不足なので、この付近の TOF で先に述べたような特徴が見られるとして、その原因を考える。両者のスリットの位置関係を考える。スリットが  $\pm 0$  mm の位置を  $z = 0$  とすると、スリット位置が  $-2$  mm であるとは、 $-1 \text{ mm} < z < -3 \text{ mm}$  の範囲内の中性子を通過させることを意味し、スリット位置が  $-3$  mm であるとは、 $-2 \text{ mm} < z < -4 \text{ mm}$  の範囲内の中性子を通過させることを意味している。すると、 $-2$  mm のものだけに特有の範囲は、 $-1 \text{ mm} < z < -2 \text{ mm}$  であり、 $-3$  mm のものだけに特有の範囲は、 $-3 \text{ mm} < z < -4 \text{ mm}$  である。グラフの傾向に変化が出たとするならば、単純に考えて  $4100 \mu\text{s}$  付近の中性子は前者の範囲に多く現れ、 $4500 \mu\text{s}$  付近の中性子は後者の範囲に多く現れたという傾向があるとしても矛盾はない。これを説明するために単純に重力での中性子の落下を想定してみよう。単純化のため上流から飛び出した後、鉛直方向の速度成分を持っていない中性子を仮定する。上流スリットを飛び出してから下流スリットに到達するまでにはおよそ  $1.5 \text{ m}$  程度である。中性子に対する重力加速度を  $g$  とすると、下流スリットに到達するまでに  $4100 \mu\text{s}$  の中性子は、 $1.18g (\mu\text{m})$  落ち  $4500 \mu\text{s}$  の中性子は  $14.2g (\mu\text{m})$  落ちる。よって、その差は  $0.24g (\mu\text{m})$  程度である。これが今の  $2 \text{ mm}$  程度の差を生んだとするならば、 $g$  の値は  $g \approx 8300 \text{ m/s}^2$  ということになる。

## 6 考察

今回、もっともらしい  $g$  の値を得ることができなかつたため、考察では今回の実験の問題点と改善点をまとめておくことにする。理論とシミュレーションの結果は実験事実と差がほとんどないことを説明することに成功していたと思われるため、そのセクションで触れていたように問題点の一つは鉛直方向のビームの広がりの端における測定でなかつたことにある。シミュレーションによれば、鉛直方向のビームの広がりの中では、スリットを動かしても分布に違いが現れない。これは、実験装置の規模とも関連しておりタンデムでは  $L$  の値として 1.5 m 程度しか稼げなかつた。これが仮に 30 倍程度になれば中性子が落ちる距離は 2 乗に比例するので 1000 倍程度になる。すると、2000m/s 程度の中性子に注目すれば mm 単位で中性子は落下することが予測される。これだけ落下すれば分布にも大きな違いが現れると思われる。あくまでタンデムでこの実験を続ける場合は、シミュレーションで述べたように鉛直方向のビームの広がりの端における測定に頼るしかないが、高速中性子によるバックグラウンドをどのように減らすかが課題となる。また、実験装置の規模を変えるのではなく、中性子をもっと冷やすという試みについては、今までに試みた実験を参照するとたかだか 300 K 程度までしか冷やせないので、仮にできたとしても実験結果を変えるほどの効果は期待できないと思われる。そこで、次のような実験提案を行う。

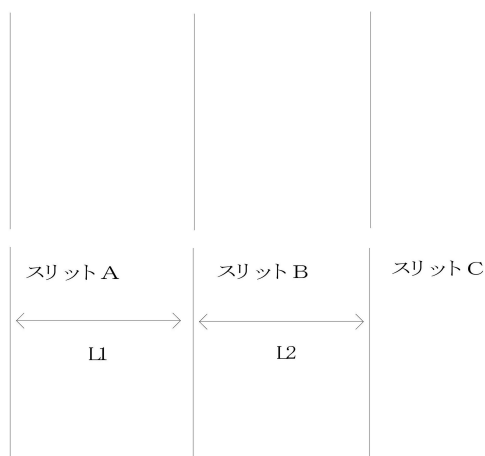


図 30 新しいセットアップ。改善点は、二つのスリットの間に一つスリットを追加したこと。

上記のようなセットアップを用意する。タンデムでは  $L1 + L2 = 1.5\text{m}$  程度が限界である。スリット A とスリット C については固定し、スリット B を鉛直方向に移動可能とする。また各スリットの幅は一律 2 mm となるように調整する。初期段階で、各スリットの鉛直方向についてのアラインメントがとれたとする。この状態で、スリット B を上方に移動させる。1000 m/s の中性子は仮に  $g = 10 \text{ m/s}^2$  とすれば古典的な等加速度運動の計算に従い、1m 程度の距離の間に 5  $\mu\text{m}$  程度落ちることが予想されるので、ステージの最小移動距離 2m に耐えうる。ステージを上方に移動させると、重力の効果がなければ 2 mm 移動させたところで 1000 m/s の中性子の信号（バックグラウンドから差し引いたもの）は消えるはずである。しかし、重力で中性子が落ちるのなら、2 mm を越えても信号は途切れない。よって、1000 m/s（TOF 換算で 4000  $\mu\text{s}$ ）の中性子数をスリット B の位置でプロットし、信号が消えるもっともらしい移動距離を割りだし、それと 2 mm の差を取れば 1000  $\mu\text{s}$  の中性子がスリット C を通過して検出器に到達するまでの落下した距離を与えるだろう。これは、ビームの際を測定するという手法のアナロジーであるが、問題点もいくつかある。まず、落下距離が 5  $\mu\text{m}$  であることから、3つのスリット幅と高さのアラインメントについて最低限  $\mu$  単位の精度が要求されているという点である。この点を改善するには、落下距離を増やす試みが必要であり、仮に 1 m の 10 倍の距離を稼げるとすれば落下距離は 100 倍になり、中性子は 500  $\mu\text{m}$  落下するので、アラインメントも少しは容易になるだろう。次に信号が高速中性子のバックグラウンドに埋もれるのではないかという問題がある。このあたりの問題を解決できれば、 $g$  の測定が可能になると思われる。高速中性子がテール部分にまぎれてくるのは、ビームラインから大きく外れた中性子が、散乱によってチェンバーに遅れて当たることが原因である。バックグラウンドを抑えるためにはビームラインをさらに厳密に定義し直す必要がある。具体的には、厚さ数 mm 程度のポロンゴム素材のパイプを作ってビームの発射口からチェンバーまで通せば、今回よりもバックグラウンドは減ると思われる。直径を数 cm 程度にすれば我々が欲しい熱中性子成分は失われないので、S/N 比は改善することが期待される。

## 7 謝辞

1年間の間理論指導から始まり、実験に関わるあらゆることについて鋭いご指摘、アドバイスを賜った中家さんと、漢字を間違えることはあったけれどもP2部屋の片付けや、実験装置の準備に骨を折っていただいた隅田さんには大変お世話になりました。また、TAの篠原さんには解析技術やシミュレーションのプログラム作成等で様々な技術指導をいただきました。TAの中村さんには、実験装置の作成や細かいポイントのご指摘など参考になる視点を導入していただきました。また、P2関係者以外の方にも大変お世話になりました。まず、P3を担当していた藤岡さんには、実験そのものが成立しているかどうかの検証をして頂いたり、本実験に参加して頂いてセットアップに関してアドバイスを賜りました。KUANSではオペレーターの広瀬さんは、我々の加速器での経験不足ゆえ未熟な点が多々あったにも関わらずとても心優しく対応してくださりました。予備実験、本実験においては工学部の田崎さんに加速器関連の設備、セットアップの構築において多くのことを教えていただきました。本実験は、P2ではおそらく初めての試みであり手探りの中での実験でしたが、多くの先生方、大学院生の方の協力を仰ぎ結果を出すことができたものと思っております。P2中性子班一同、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

## 8 参考文献

- Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, W, R, Leo, Springer-Verlag