

# 中性子に働く重力相互作用の 測定実験

伊藤望、道下佳寛、安留健嗣  
17/03/23

# 目的

微小粒子に対して働く重力相互作用を測定することで、既存の重力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、補正項を持つこと）を実証する。

# 実験原理

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に対して、ニュートンの運動方程式を用い、地球での重力加速度 $g$ を測定する。

→中性子の始点と終点の位置とかかった時間、始点での速度より算出。

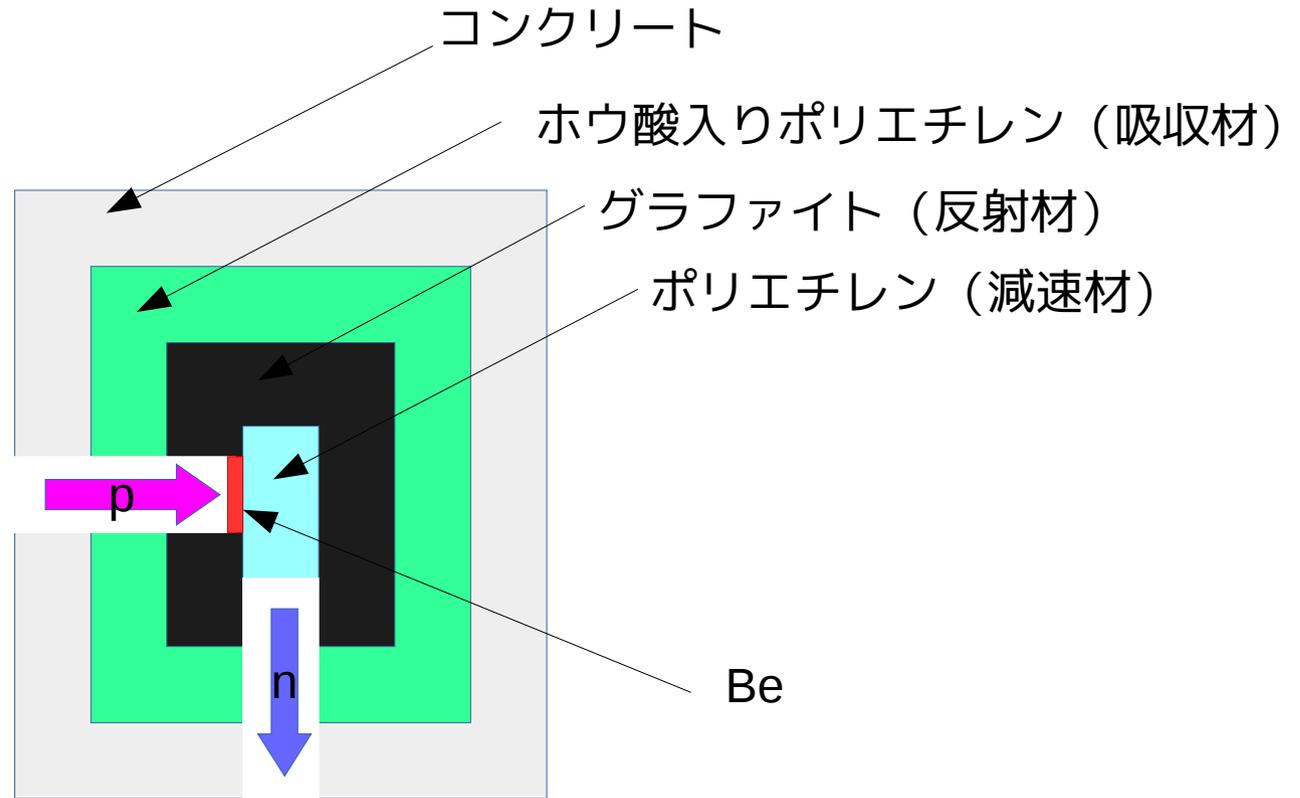
# 中性子源の概要

中性子源として、理学部5号館東棟にあるKUANSを使わせていただいた。

KUANS（京都大学小型中性子源）：

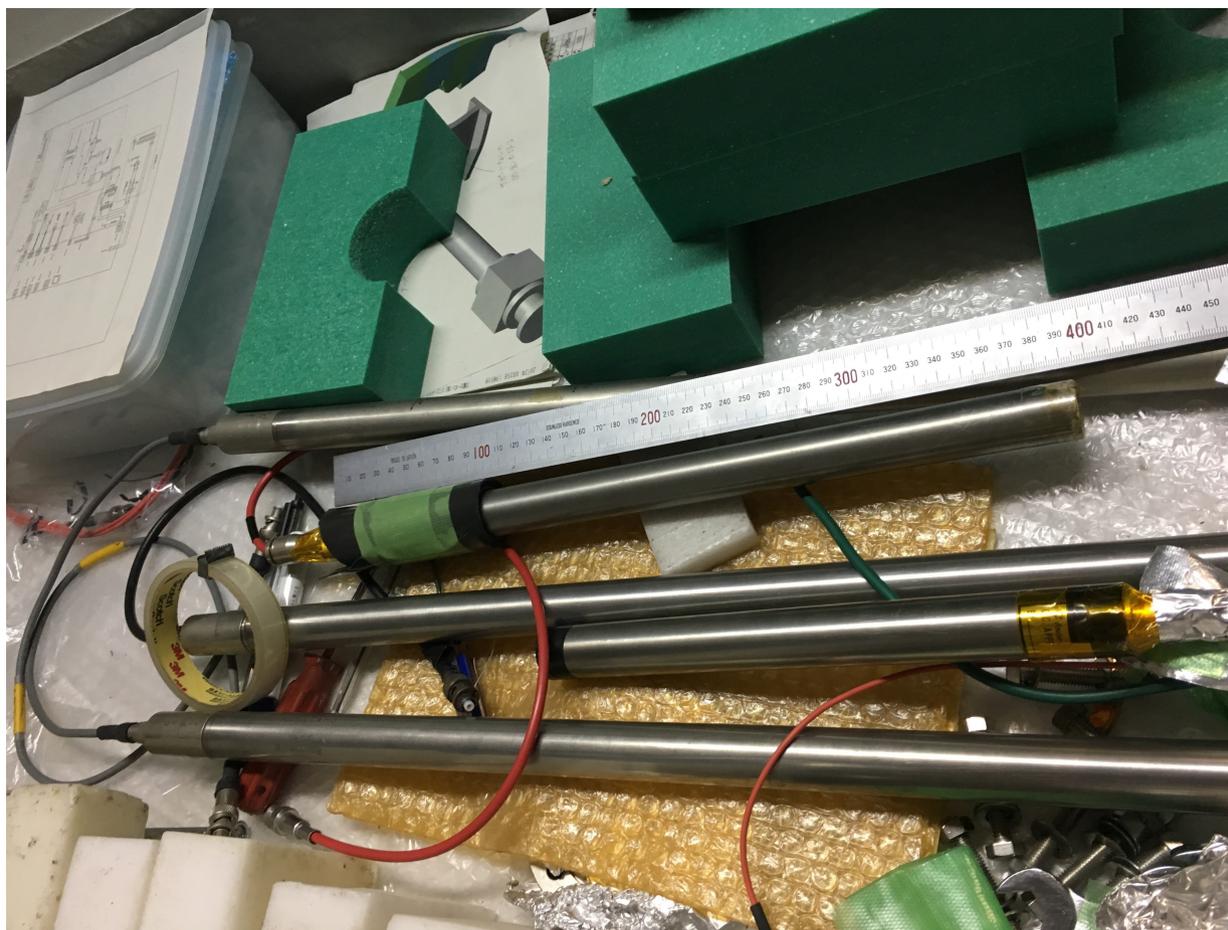
8MV Tandem van de Graaff加速器を用いて陽子ビームを生成、Beターゲットに衝突させることによって高速中性子ビームを生成し、それをポリエチレン減速材を通すことで熱中性子成分を持つ中性子ビームを生成する装置。

# 中性子源の概要



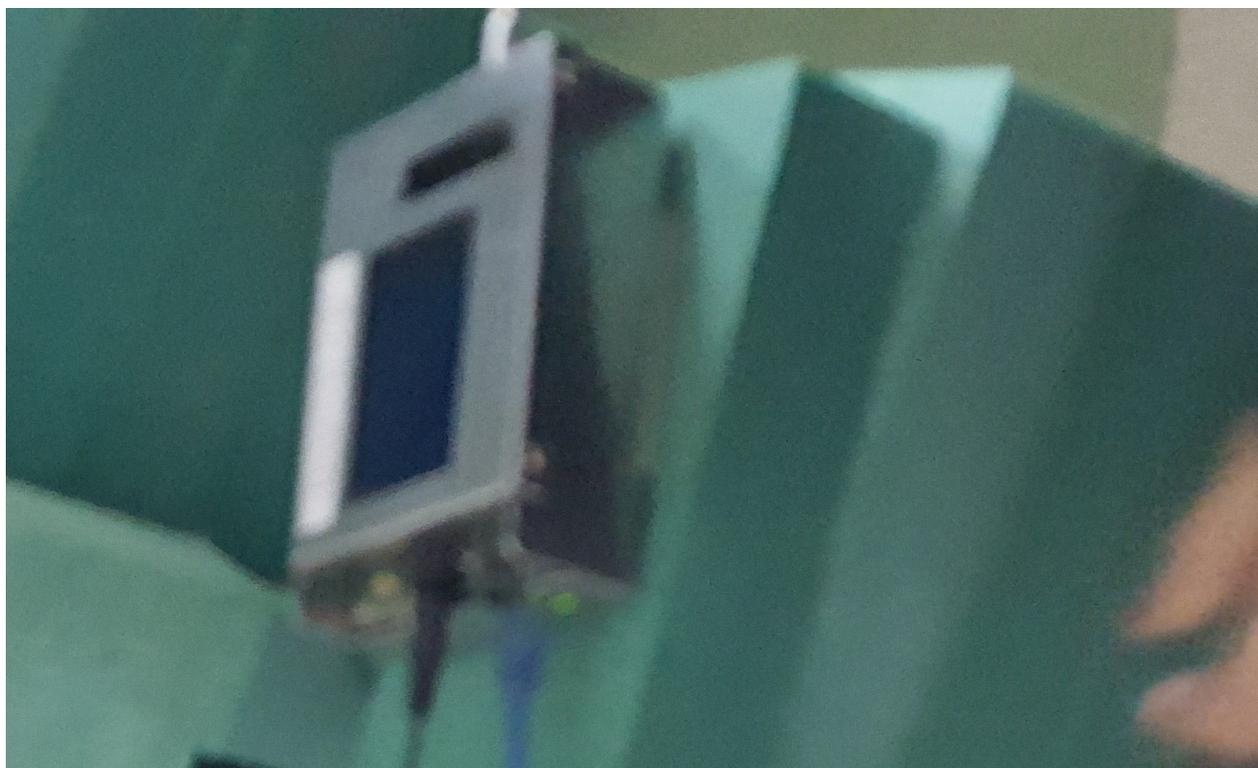
概略図

# 用いた検出器



He3チェンバー

# 用いた検出器



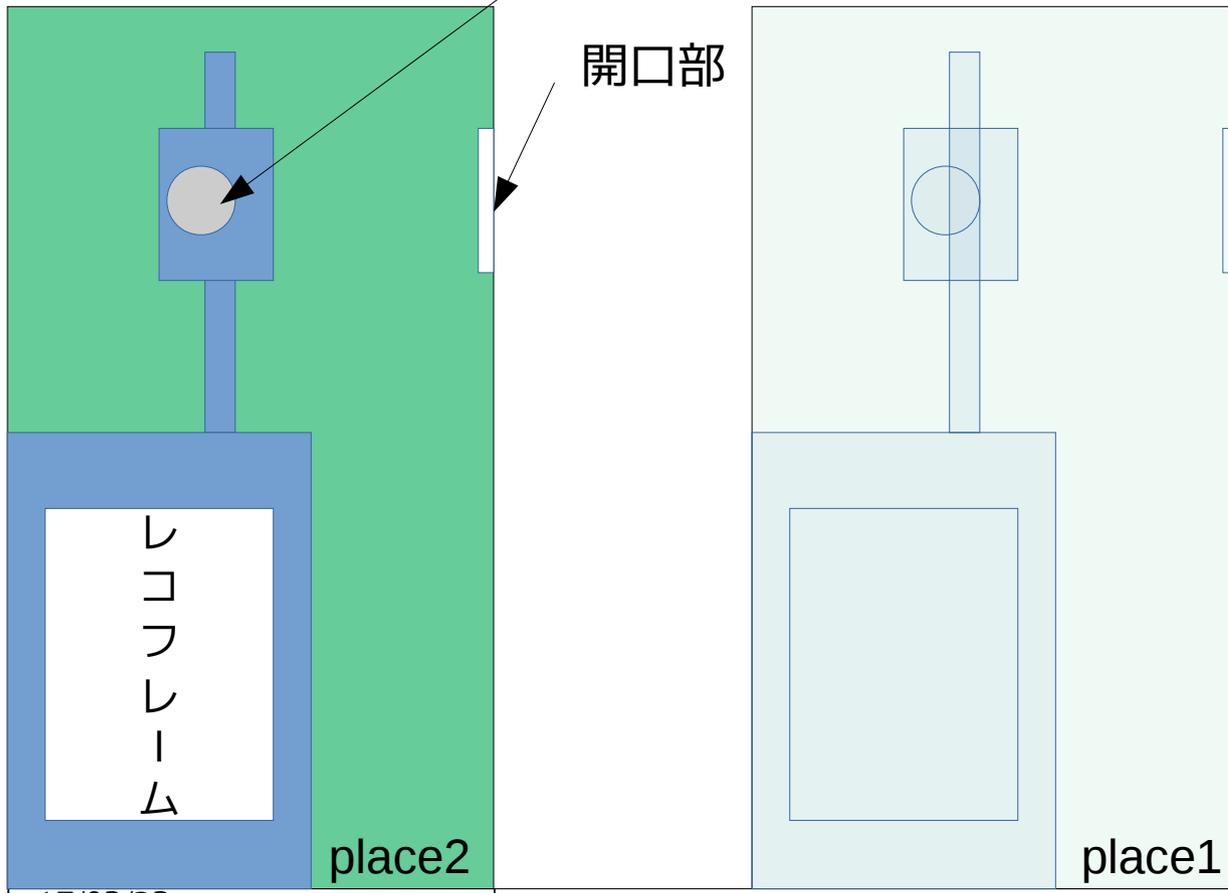
pビーム発射からn検出までの時間を測定、その長さ毎に計上する

# 中性子ビームの特性

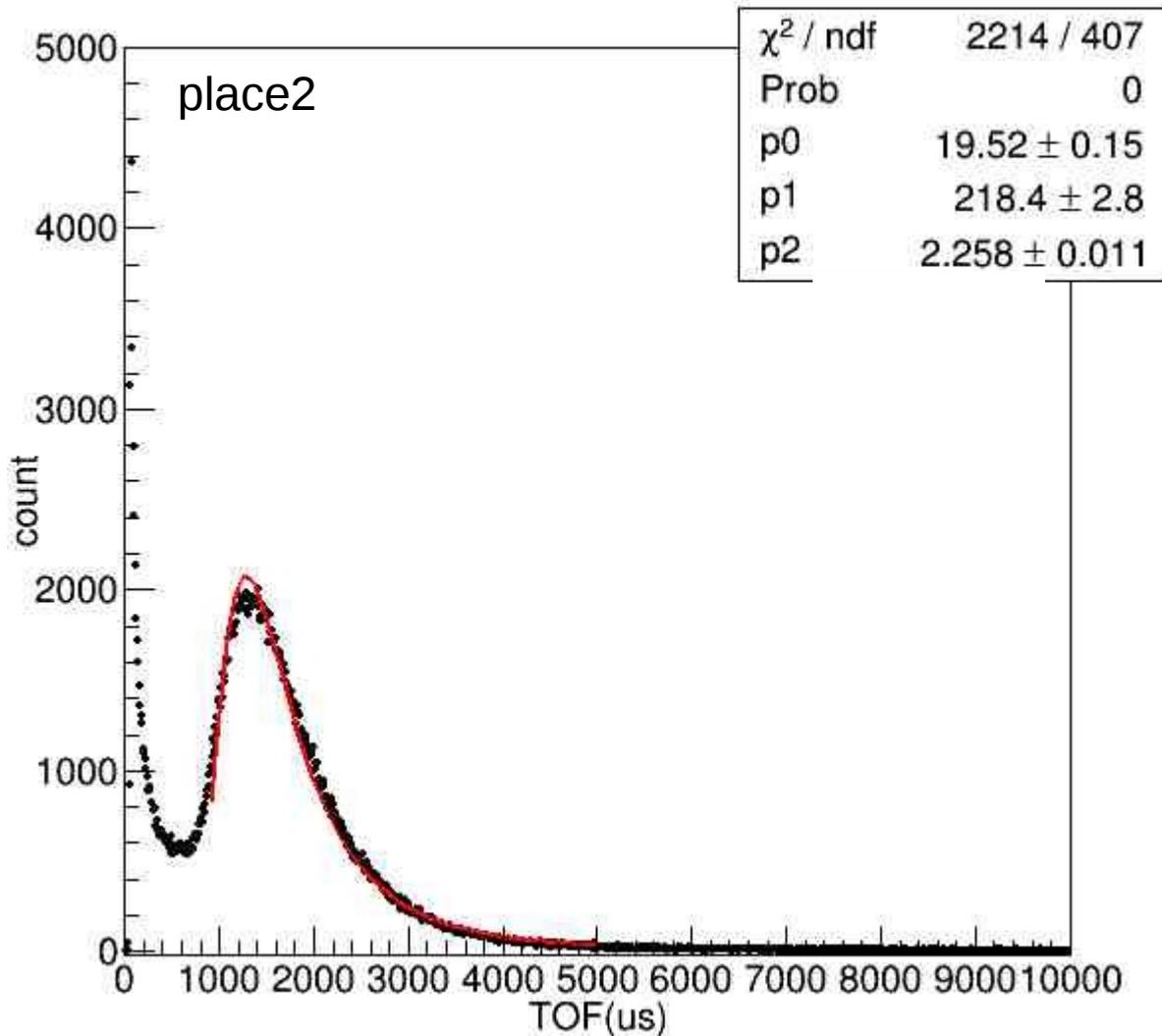
ノイズ低減のため、Bブロックで（開口部を除き）囲う

チェンバー

開口部



# 中性子ビームの特性

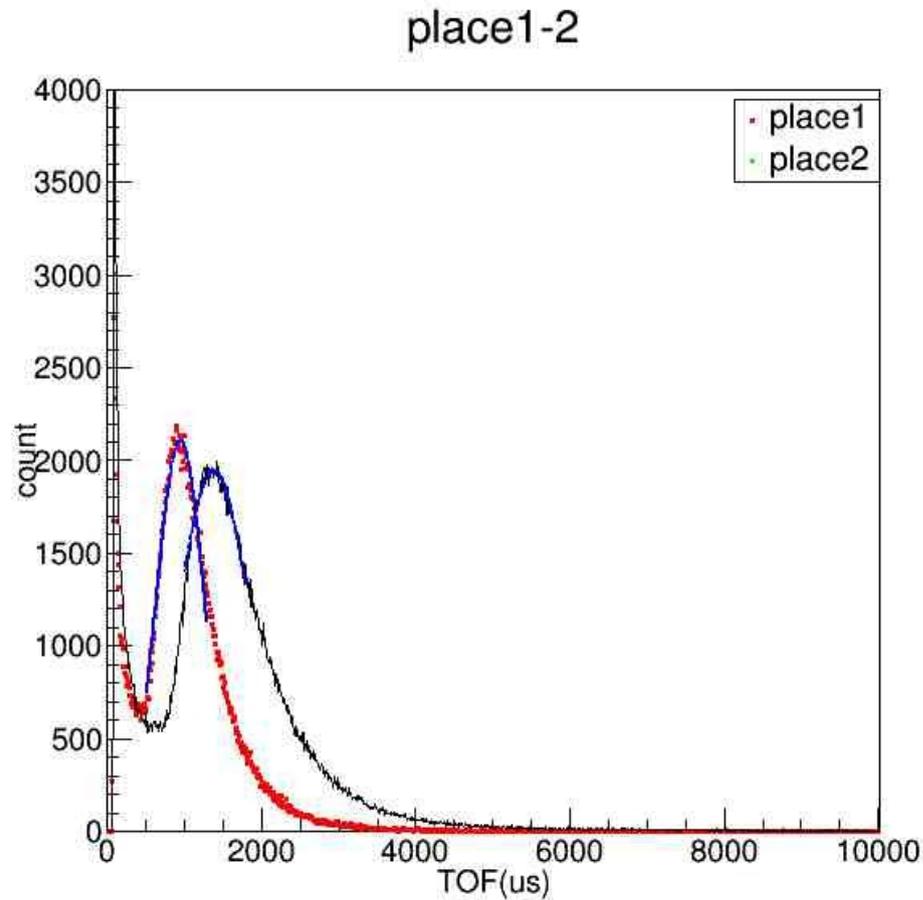


$$f(x) = p_0 \cdot 10^{15} \cdot (x - p_1)^{-4} \cdot \exp(-p_2 \cdot 10^6 \cdot (x - p_1)^{-2})$$

(マクスウェル分布を変数変換して得られる式)

※TOFの原点は陽子ビームが発生した瞬間である。

# 中性子ビームの特性



Place1のPeak:  
 $t1=948.7\pm 2.983$

Place2のPeak:  
 $t2=1383\pm 3.598$

用いた中性子ビームの特性

# 中性子ビームの特性

$$\text{時間差 } \Delta t = t_2 - t_1 = 434.3 \pm 4.67 \mu\text{s}$$

TOFピークでの中性子の速度

$$V_{\text{peak}} = \Delta L / \Delta t = 1.55 / (t_2 - t_1)$$

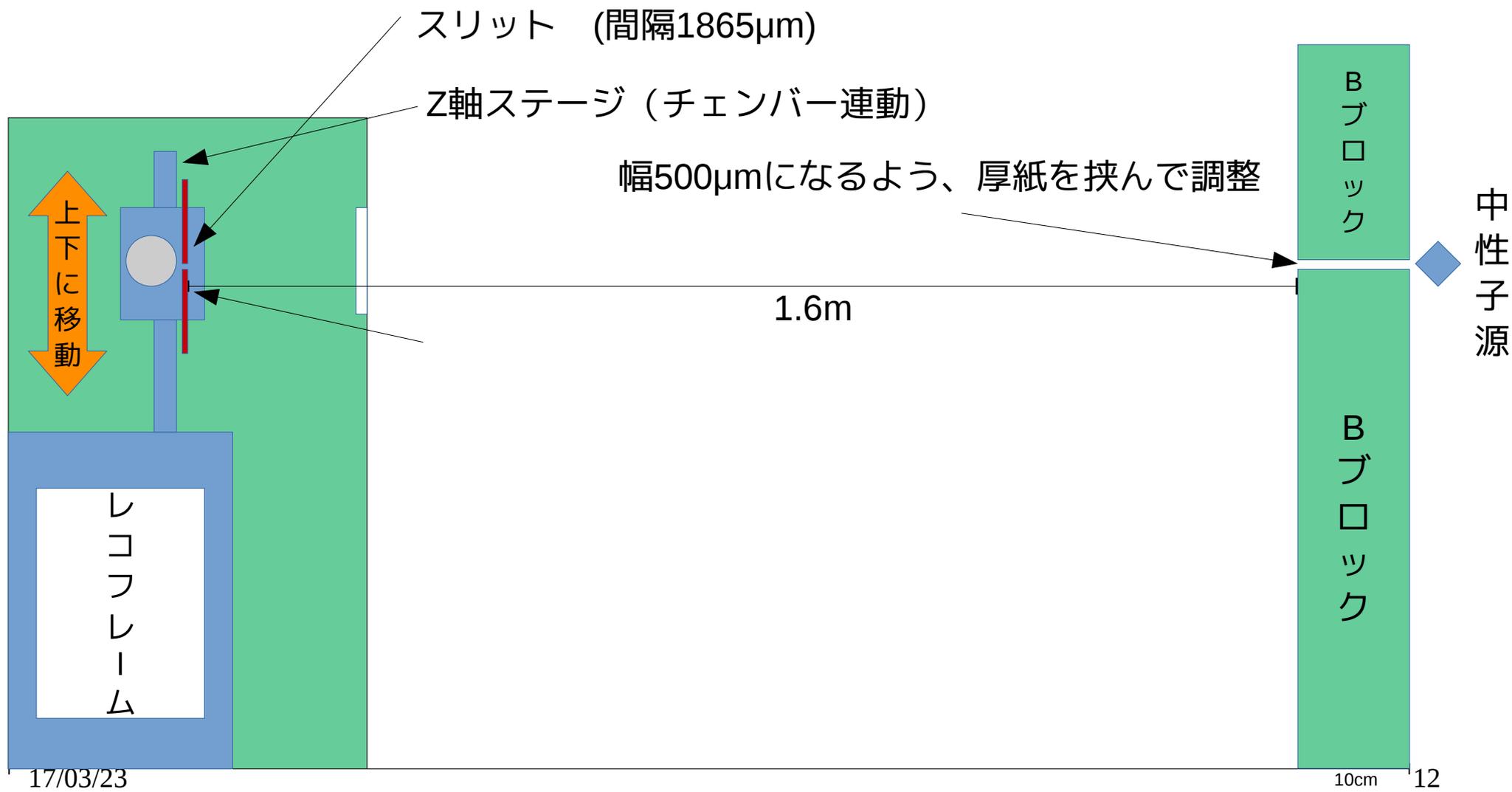
$$= 0.003569 (1 \pm 0.0107) \text{ m}/\mu\text{s}$$

$$= 3.569 \pm 0.380 \text{ km/s}$$

熱中性子の温度  $T$  は関係式  $v_{\text{peak}} = (2kT/m)^{0.5}$  より

$$T = m * v_{\text{peak}}^2 / 2k = 772.7 \pm 16.4 \text{ K}$$

# セットアップ



# 測定原理

## 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
- ・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
- ・中性子の運動はニュートン力学に従うとする（相対論的効果は無視）。また中性子に一樣重力が加わるものとする。

# 測定原理

## ②分布関数の導出

- ・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D'を、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を気にせずに、前方スリット通過時における中性子の速度分布は、

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

- ・ただし  $f(v_x, v_y, v_z)dv_xdv_ydv_z = N$  という規格化をする。
- ・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、  $H = \frac{1}{2}\left(\frac{L}{v_x}\right)^2g + \left(\frac{L}{v_x}\right)v_y$  が成立するので

# 測定原理

## ②分布関数の導出

- ・ 高さHにおけるToF分布関数  $g_H(t) dt$ は

$$\begin{aligned} g_H(t)dt &= dv_x \int_{-av_x}^{av_x} dv_y \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z f(\vec{v}) \delta\left(\frac{v_y}{v_x} + \frac{1}{L} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g - H\right)\right) \\ &= dv_x Av_x \exp\left[-\alpha \left(v_x^2 + \frac{v_x^2}{L^2} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{L}{v_x}\right)^2 g - H\right)\right)\right] \int_{-bv_x}^{bv_x} dv_z \exp(\alpha v_z^2) \\ &\simeq dt \frac{2bAL^3}{t^4} \exp\left[-\alpha \left(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2} \left(\frac{1}{2} gt^2 - H\right)^2\right)\right] \end{aligned}$$

となる。

- ・ 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、 $-bv_x \leq v_z \leq bv_x$  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  $g'_H(t)dt$  は、

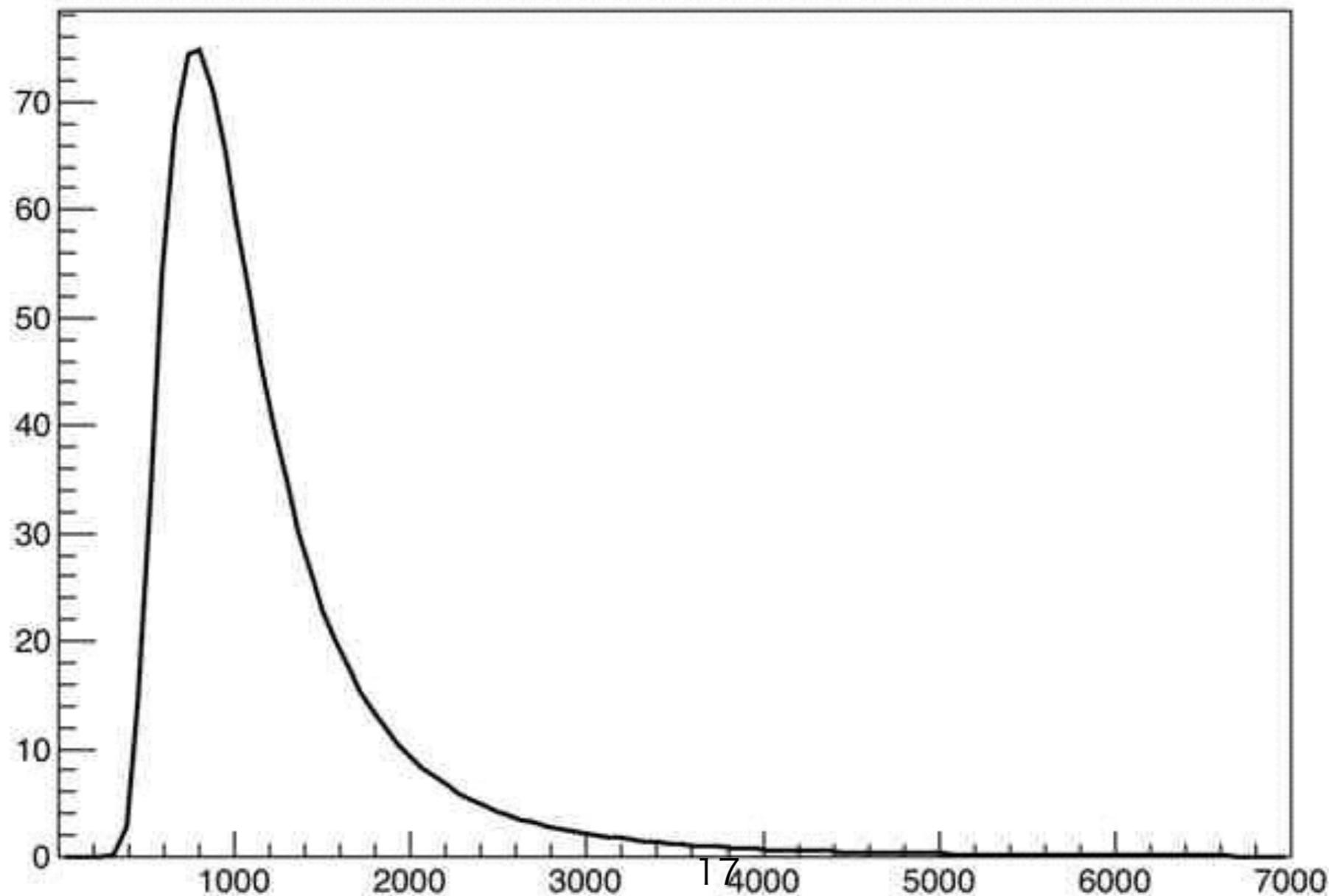
$$\begin{aligned}
 & dt \int_{H-\frac{1}{2}D'}^{H+\frac{1}{2}D'} dH' \int_{H'-\frac{1}{2}D}^{H'+\frac{1}{2}D} dH_0 \frac{2bAL^3}{t^4} \exp[-\alpha(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}(\frac{1}{2}gt^2 - H_0)^2)] \\
 & \simeq dt \frac{2bADD'L^3}{t^4} \cosh(\frac{1}{2}\alpha gD) \cosh(\frac{1}{2}\alpha gD') \exp[-\alpha(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}((\frac{1}{2}gt^2 - H_0)^2 + (\frac{D}{2})^2 + (\frac{D'}{2})^2))] \\
 & \simeq dt \frac{2bADD'L^3}{t^4} \exp[-\alpha(\frac{L^2}{t^2} + \frac{1}{t^2}((\frac{1}{2}gt^2 - H_0)^2 + (\frac{D}{2})^2 + (\frac{D'}{2})^2))]
 \end{aligned}$$

と表せる。

- 最後の式変形には積分区間の台形近似を用いている。
- この式が実際に実験で得られるToFグラフのはずである。
- 得られたグラフのピークの高さ、ToFのピーク的位置からA、 $\alpha$ の値は導ける。
- よって各グラフにfittingを施すことによりgの値を得ることは理論的にはできそうな気がする。。

- ・ 実験で得られる分布関数のどこに注目すれば差異が見えるかを検討するために上で導出した関数をグラフに書いてみた。
- ・ 赤が原点、黒がそこから1.5cm下にずらした場合である。  
ご覧のように完全に被り差が見えない。。

$$200 \cdot 10^{12} \cdot \exp(-0.75 \cdot 10^{-7} \cdot ((16 \cdot 10^{12})/x^2 + 10^{12} \cdot (4.9 \cdot (10^{-12}) \cdot x^2)^2/x^2)) / x^4$$

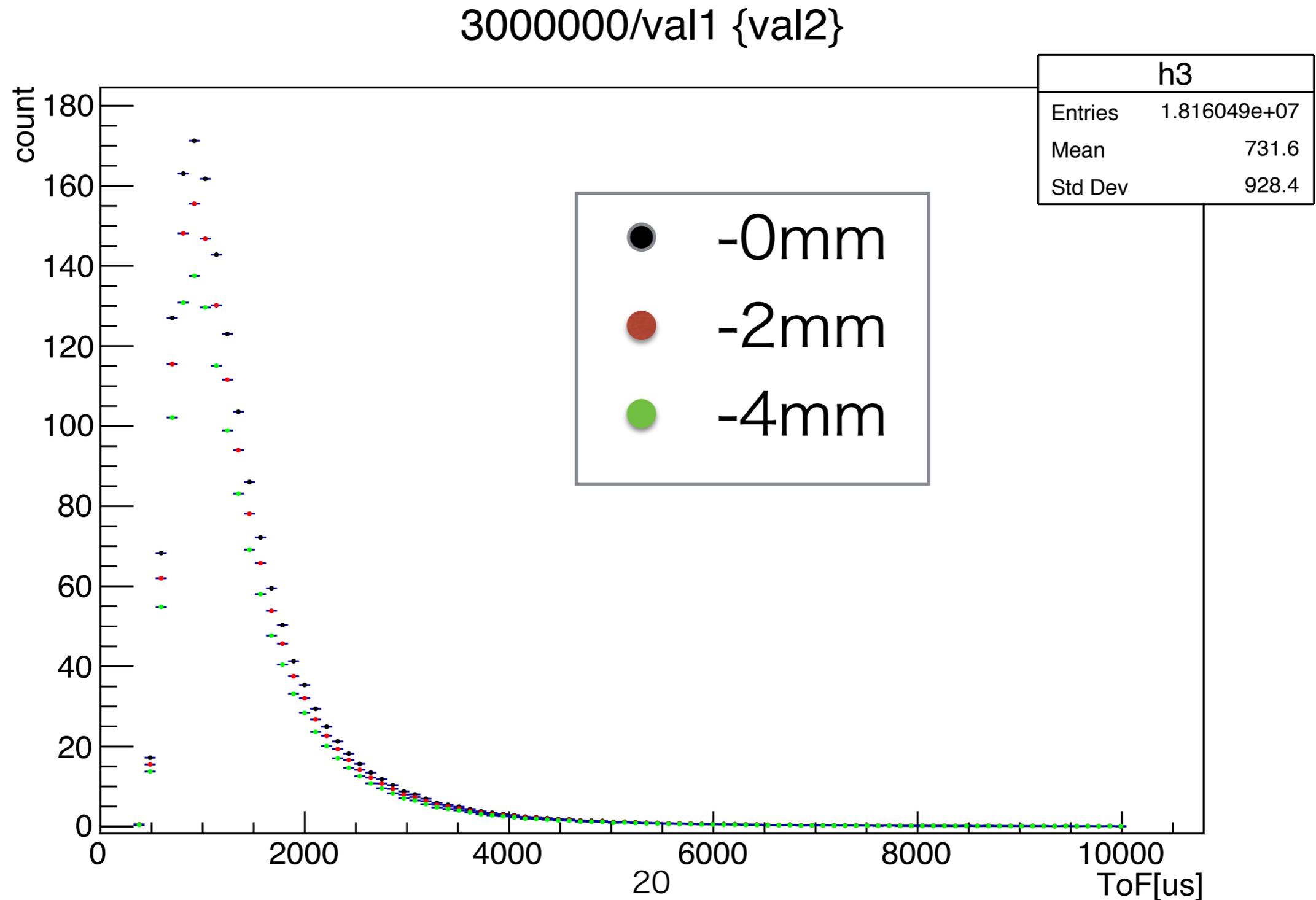


- この理論はビームの角度を絞ってない。よってビームの広がりの中で測定したものと同じことになる。
- ビームの広がりの際ならば差異が見えるかも？

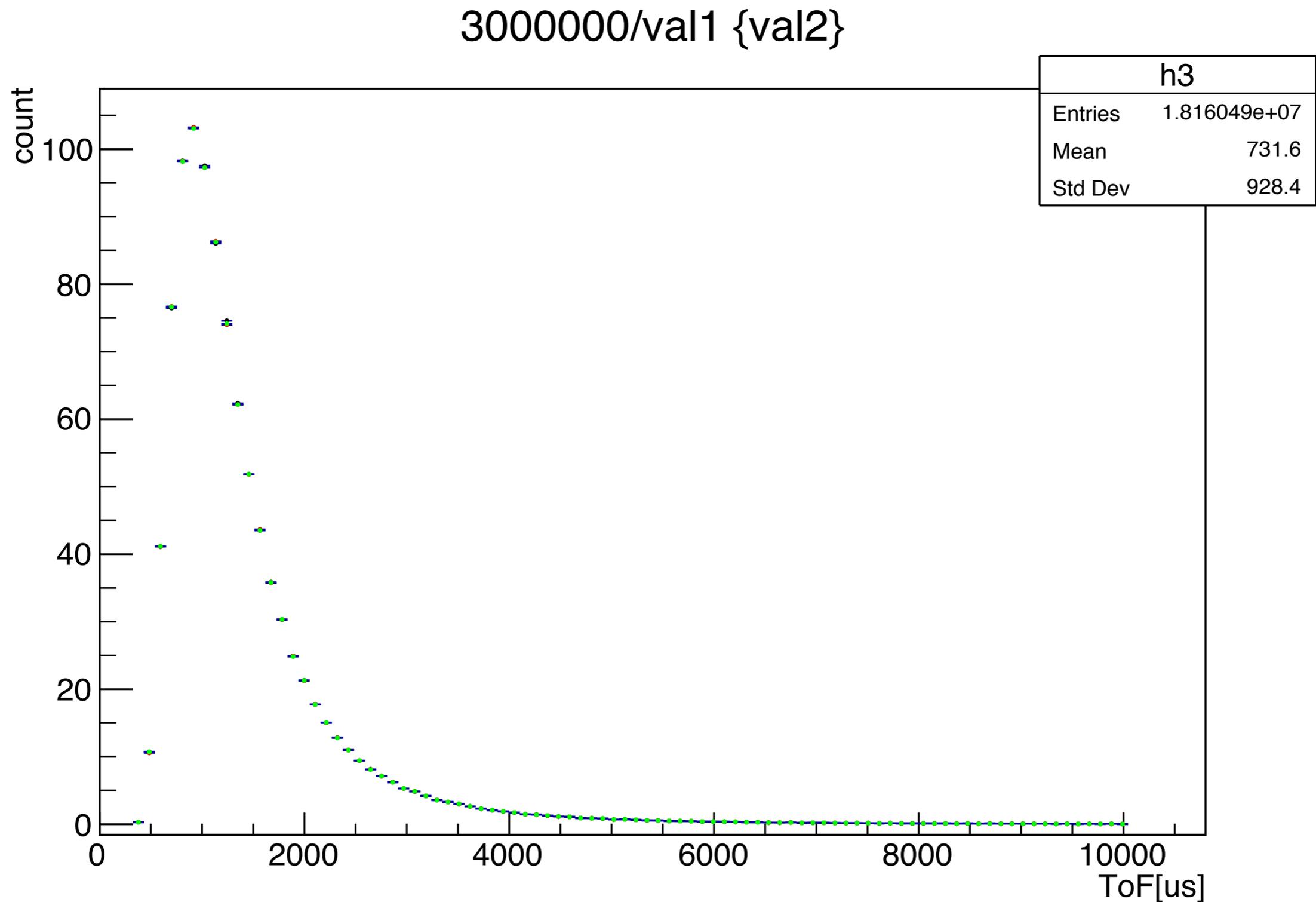
# シュミレーション

- 一発の中性子に対して確率重みをつけているので、誤差が実際よりも小さく出る問題はあるが、それ以外はほぼ現実に即してシュミレーションを行った。
- 検出器を下げていくことで有意な差が見られるかどうかを検証するのが目的である。

- まずL=3mとしてそれ以外は今回の実験と同じ設定で行ったシュミレーション。
- カウント数が異なるのは厚みのあるスリッ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

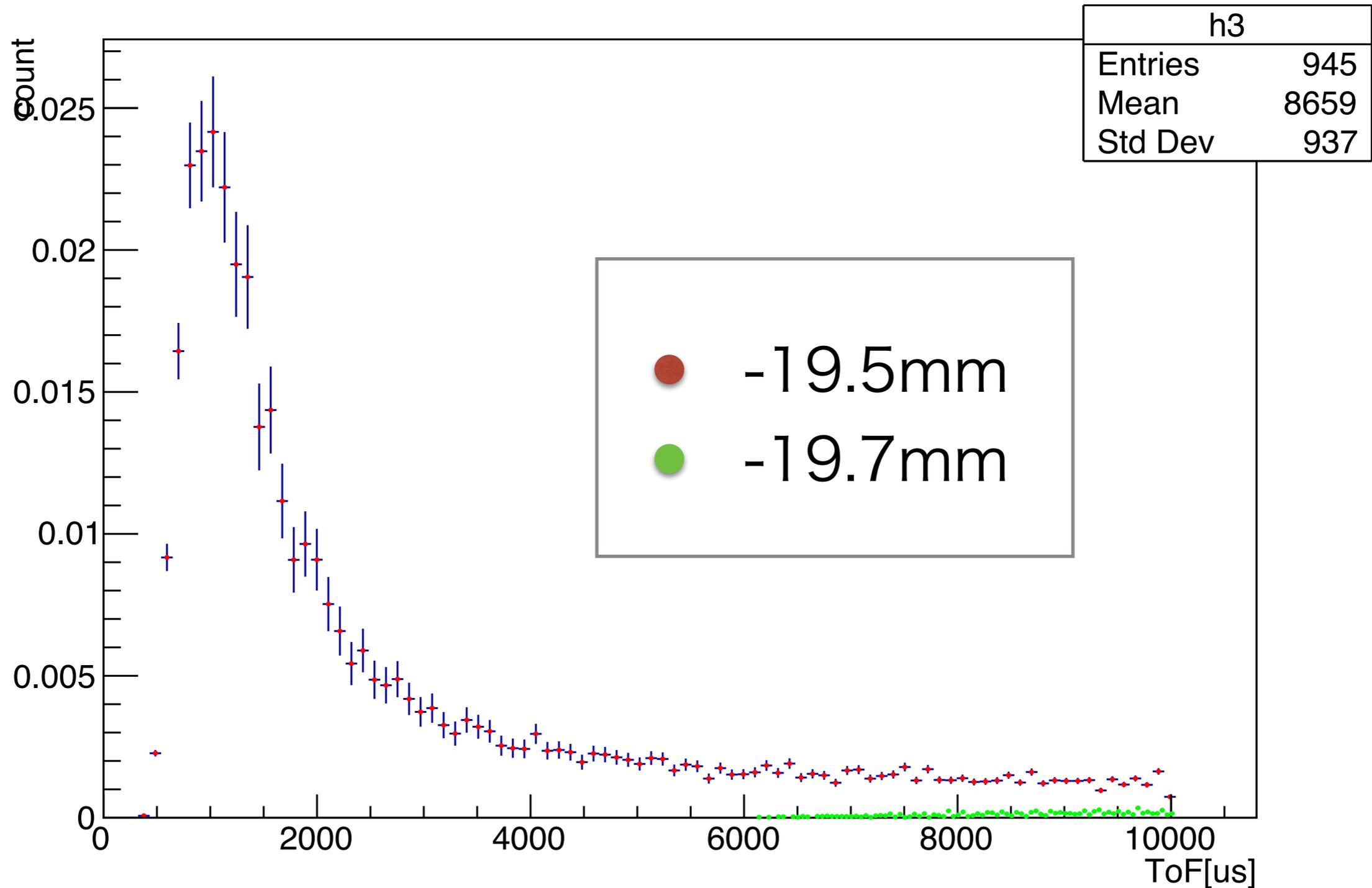


- 先のグラフをカウント数で規格化したもの。
- やはり全く差は見えなかった。

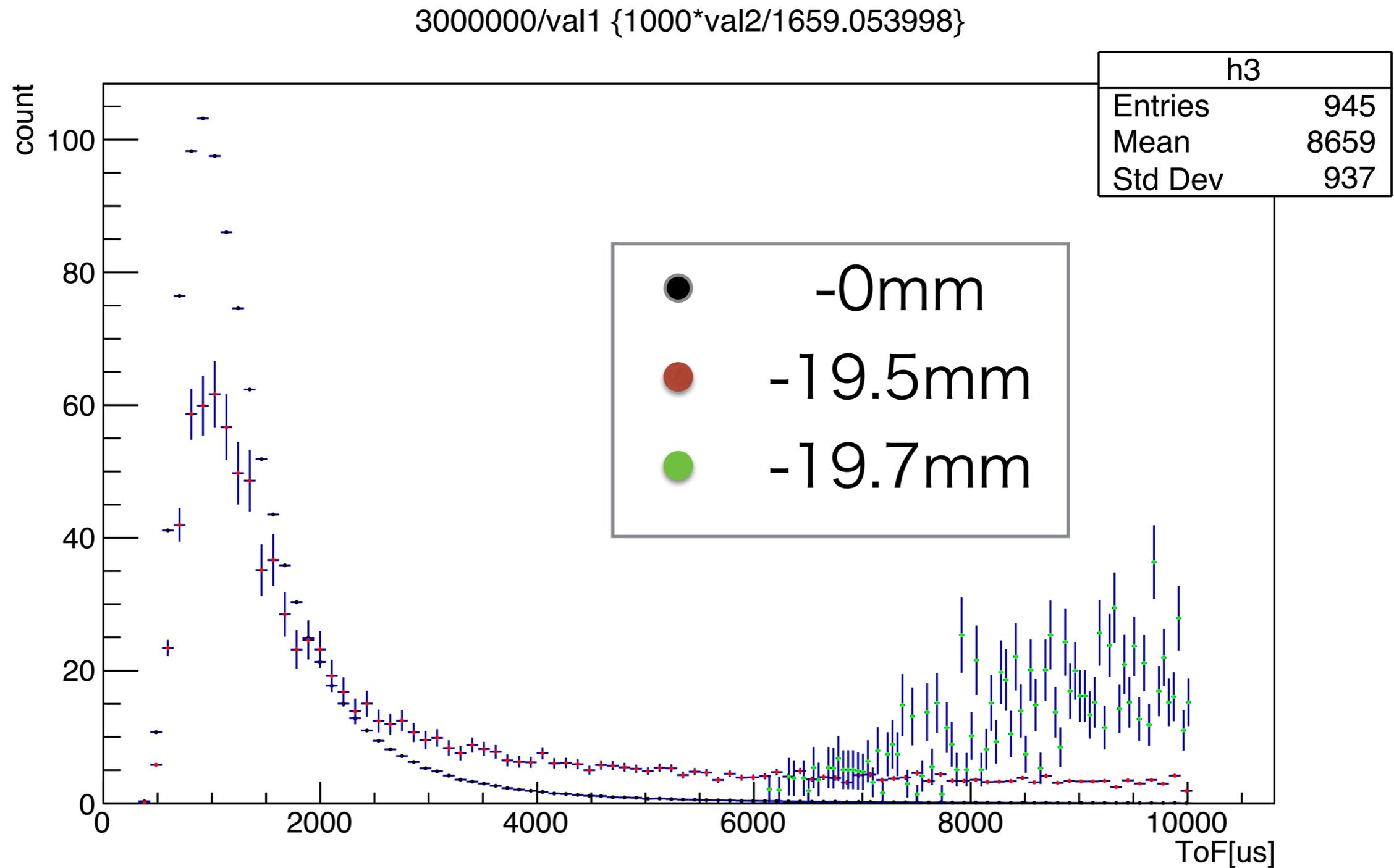


- さらに際でのシュミレーション。赤=-19.5mm、黄緑=-19.7mm
- カウント数が0地点に比べ $10^{-5}$ 程度少ない。

3000000/val3 {val4}



- 前のグラフを規格化したもの。黒=-0、赤=-19.5mm、黄緑=-19.7mm
- ここまで際だと、分布の違いは見て取れる



- しかしそもそもこのシュミレーションではバックグラウンドを考慮していないが、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ToF=4000usでのcountの $10^5$ 程度.
- 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。

# 解析データ

ビーム中心がスリットを通過している地点を”Origin”と定義するとステージ位置が

+2mm

+1mm

0(origin)

-1mm

-2mm

-3mm

-4mm

の7種類の位置で測定を行った。また、バックグラウンドはOriginの位置で測定したものを共通して用いた。

# 統計誤差

信号を求める式より、統計誤差は以下の式から求められる。

$$\sigma_{signal} = \sqrt{(\sigma_{bg})^2 + (\sigma_{xmm})^2}$$

$$\sigma_{bg} = \sqrt{\sum_n D_{N-bg}} \times \frac{t_{xmm}}{t_{bg}}$$

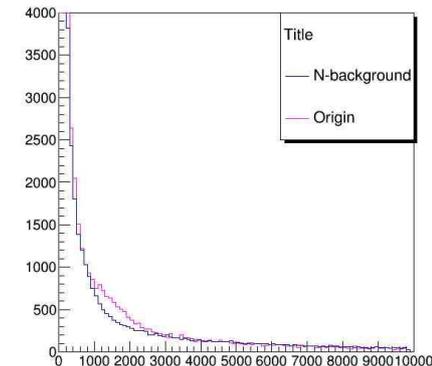
$$\sigma_{xmm} = \sqrt{\sum_n D_{xmm}}$$

# 各データの規格化

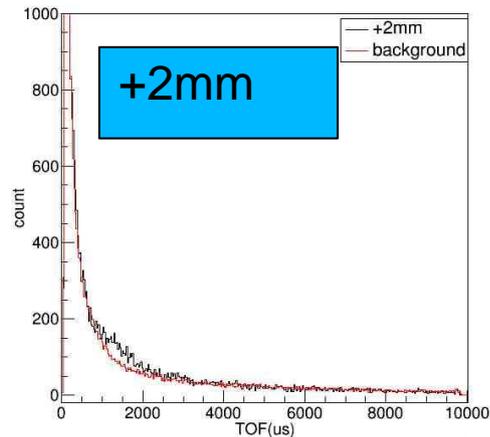
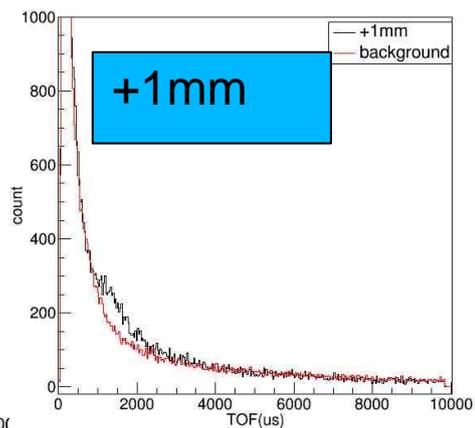
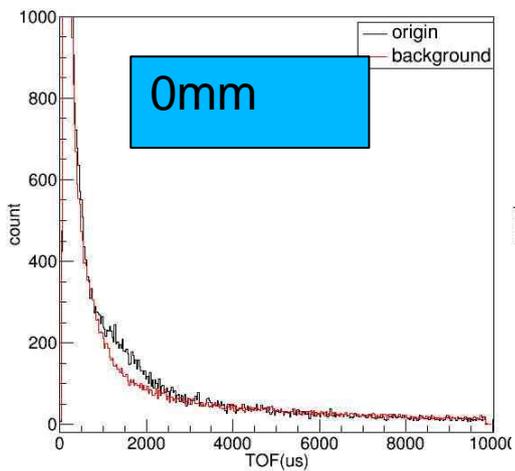
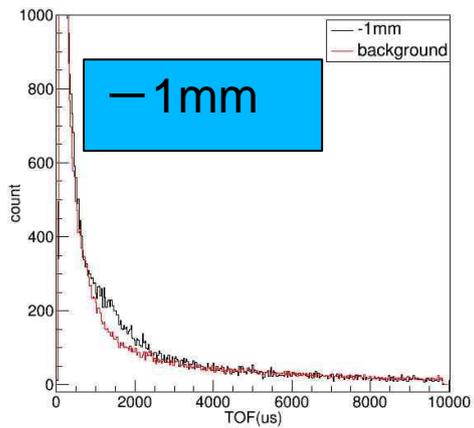
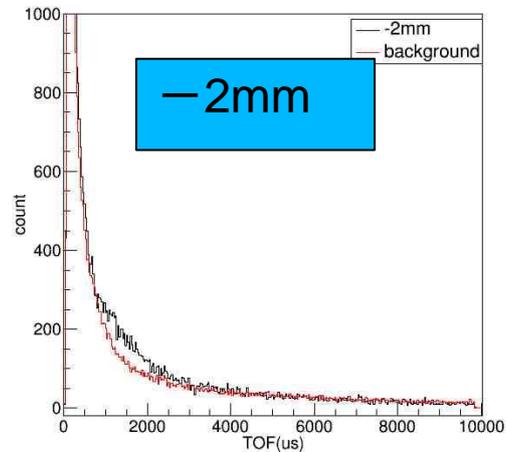
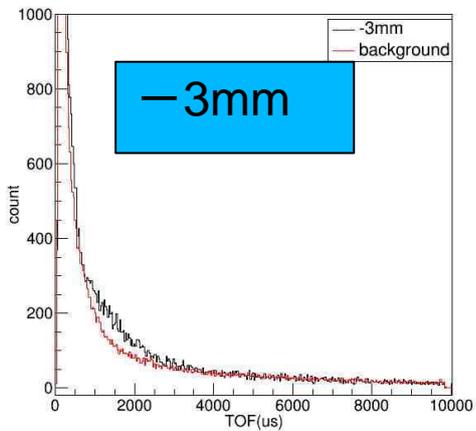
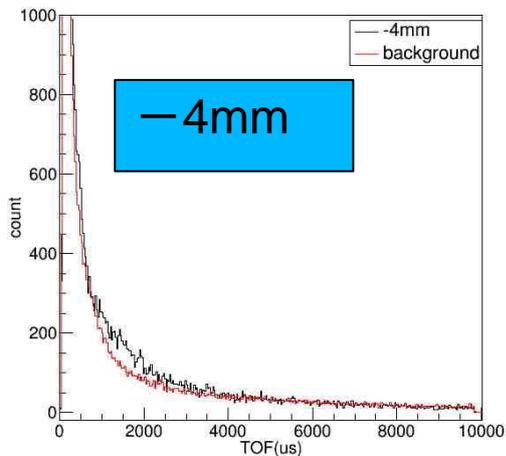
各データの測定時間は90分程度であるが、バックグラウンド(bg)は180分測定した。データを次のように規格化し、中性子の信号を次のように定義する。

$$D_{N-bg} = D_{bg} \times \frac{D_{xmm-peak}}{D_{bg-peak}}$$

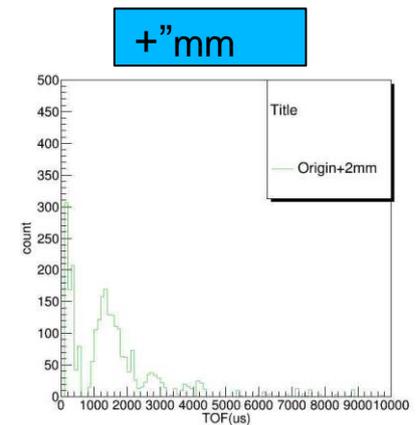
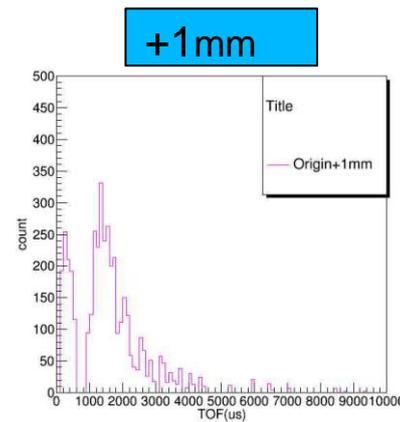
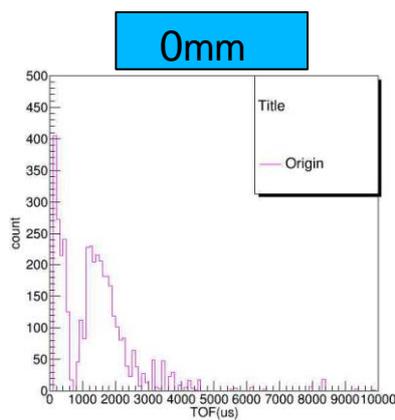
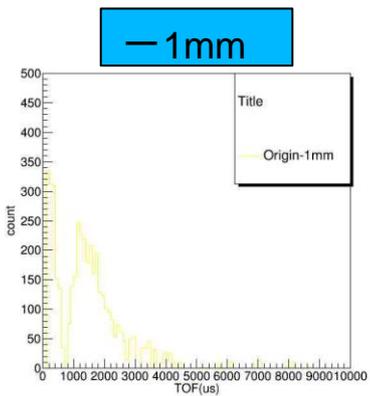
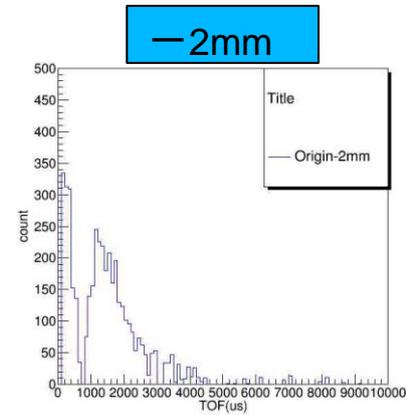
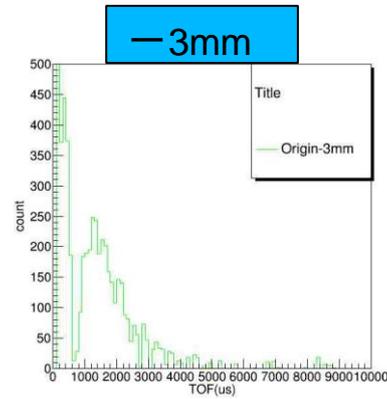
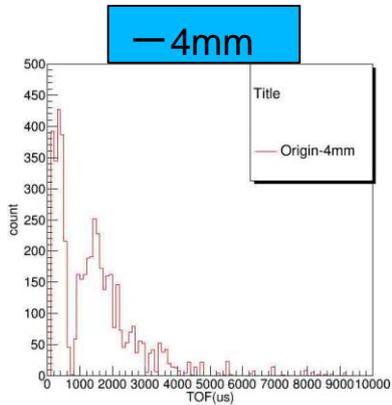
$$D_{signal} = D_{xmm} - D_{N-bg}$$



# Row Data



# Signal Data



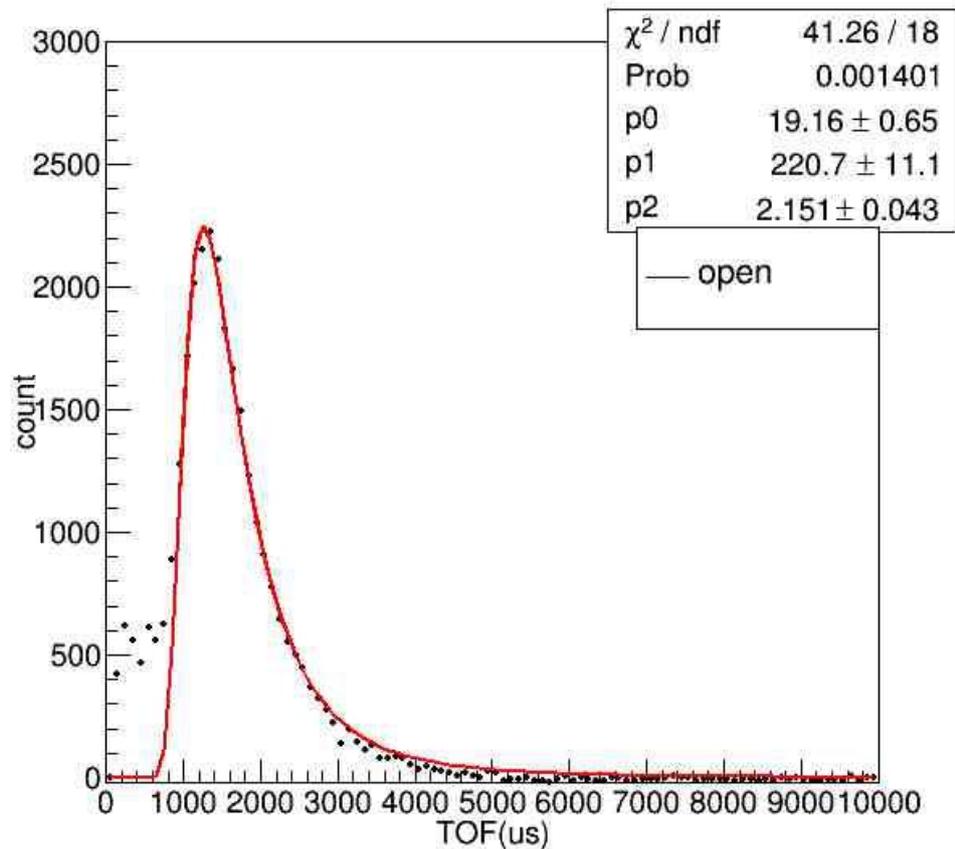
高速中性子成分に埋もれることなく、  
熱中性子ピークを取り出すことに成功！

# 理論との整合性

スリットなしの場合のt分布は理論で導いたスリット有の場合の $\delta H$ を、チェンバーの太さと解釈すればよいので、式としては近似形で

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

# 理論との整合性



フィッティング関数は

$$\frac{p0 \times 10^{15}}{(t - p1)^4} \exp\left(-\frac{p2 \times 10^6}{(t - p1)^2}\right)$$

を用いた。TOFの大きいところで少し外れているが、おおむね一致している。

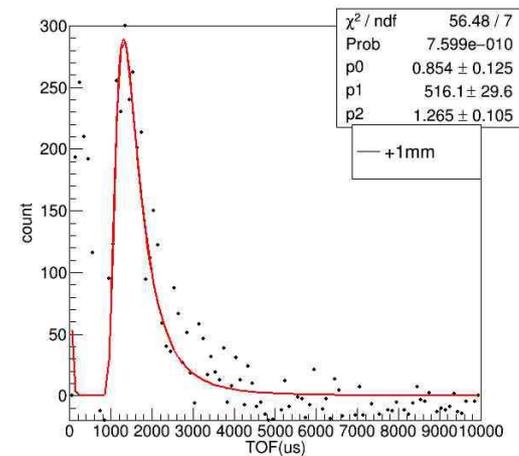
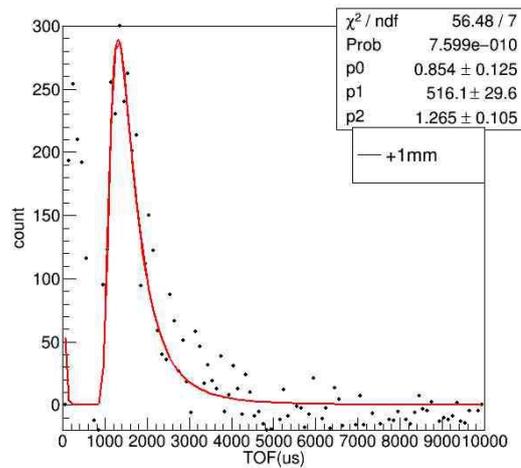
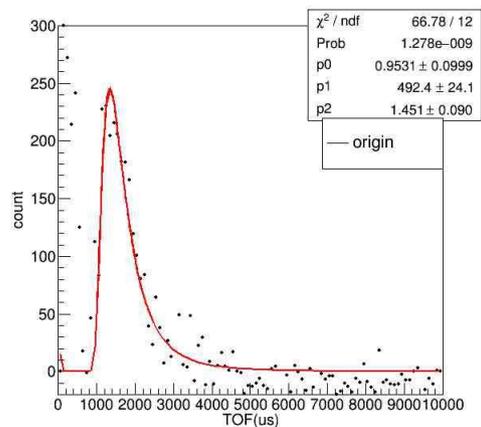
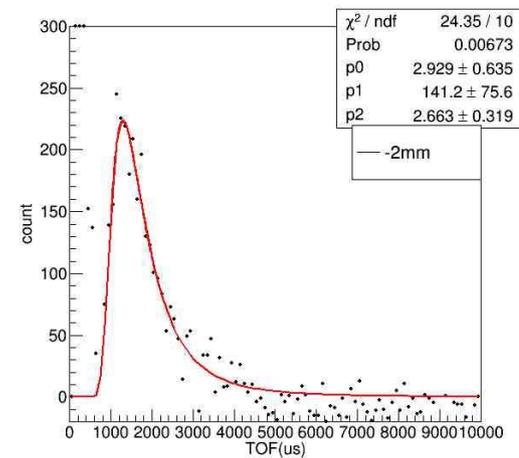
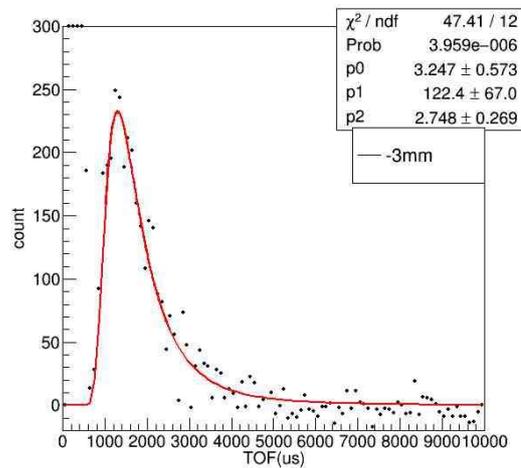
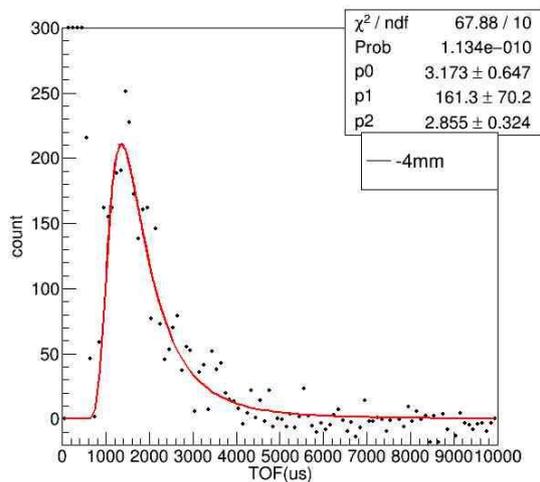
# 理論との整合性

次に、スリットありのデータを理論で導いた式でフィッティングする。理論で導いた式の中の支配的な項を抽出して、フィッティング関数は

$$\frac{p0 \times 10^{15}}{(t - p1)^4} \exp\left(-\frac{p2 \times 10^6}{(t - p1)^2}\right)$$

を用いた。

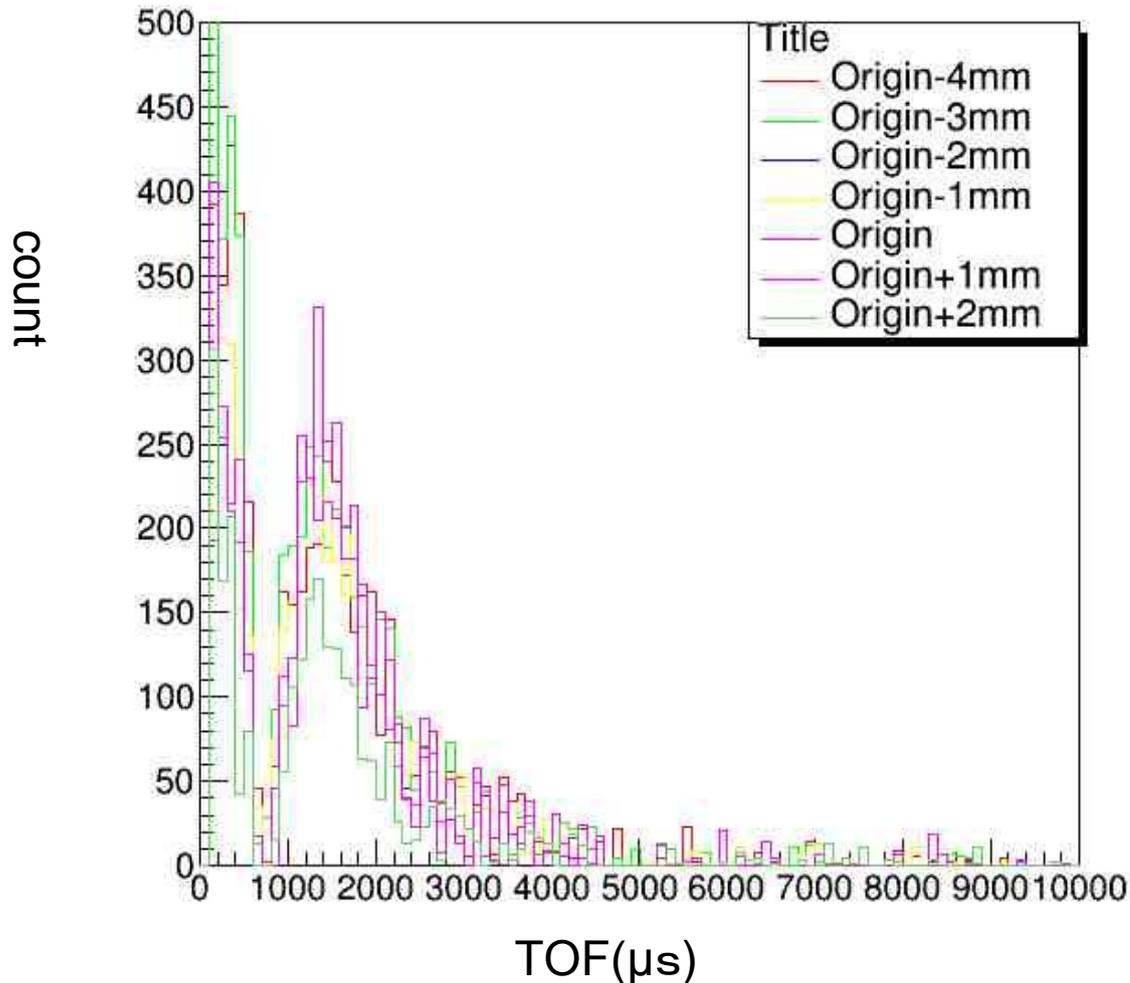
# 理論との整合性



# 理論との整合性

上のフィッティング結果から、 $g$ の効果を検証するためには、TOF分布のtail部分に注目するべきであることがわかる。以下、中性子のtail部分を定義し、その解析を行う。

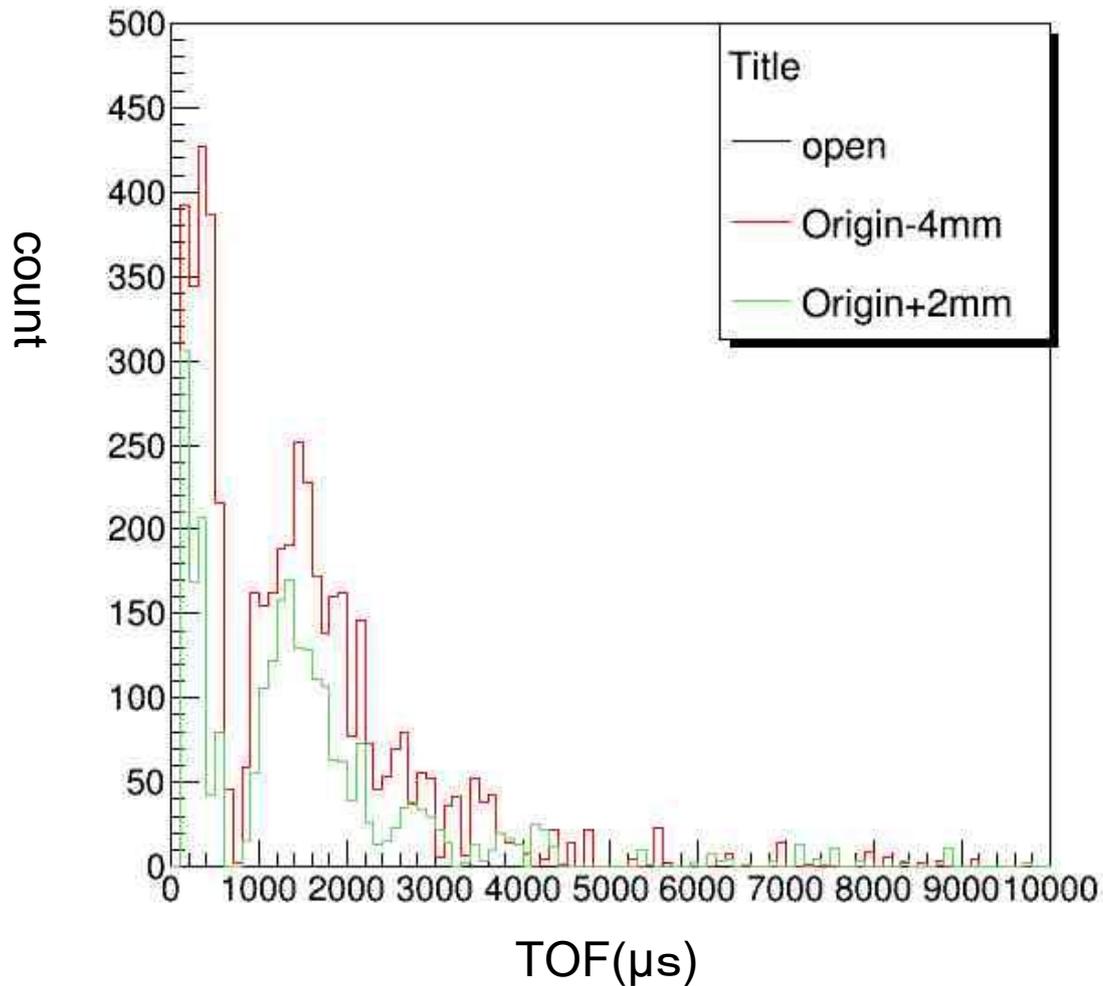
# 測定データ概観



単純な傾向として、スリットの位置をOriginから鉛直下方向に動かすほど熱中性子のピークのカウン数が減少している。TOFの変化はあまり読み取れない。

5000μs以降はほとんど0なので、以下、テール部分4000~5000μsとする。

# TOFの変化

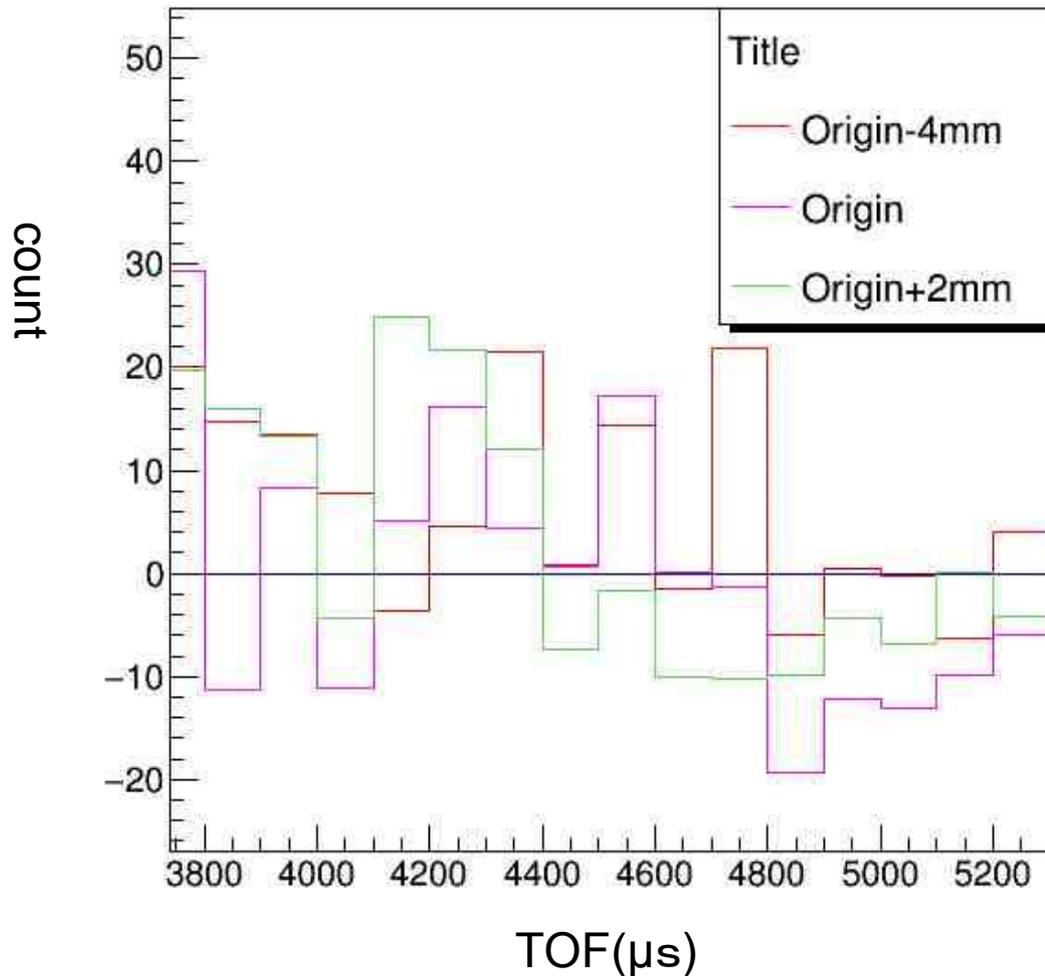


理論上では、スリットの位置を鉛直下にずらすほど速度の大きい中性子は増加するので熱中性子のピークは増加するはずであり、左の2つのグラフを比較すると、差はりそうである。

# Tailのsignal

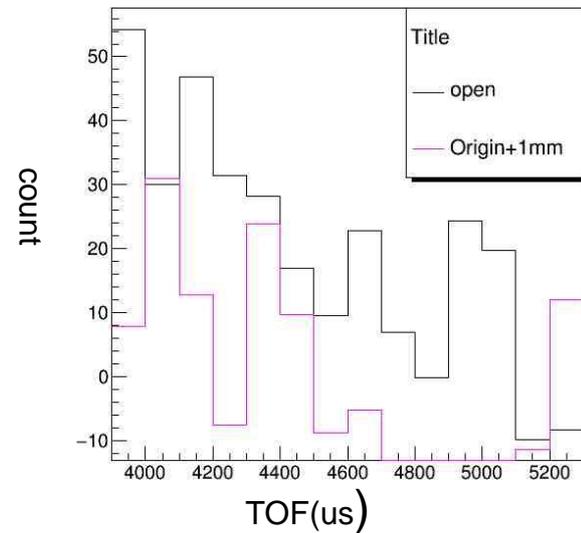
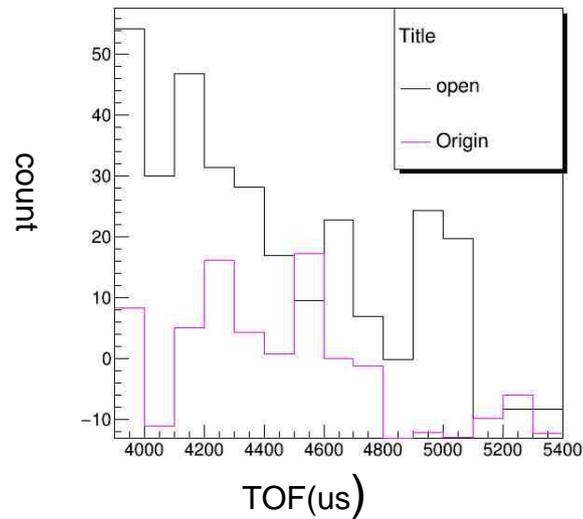
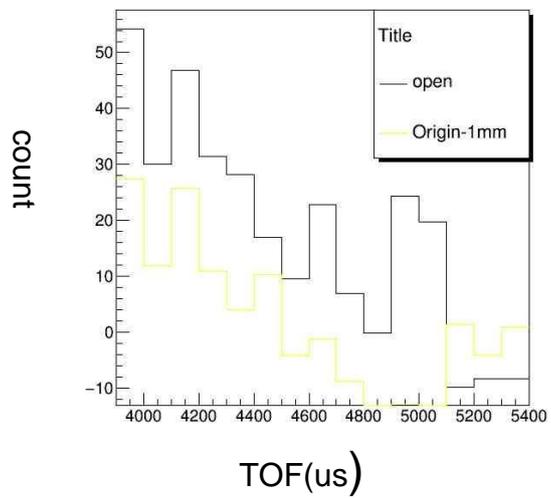
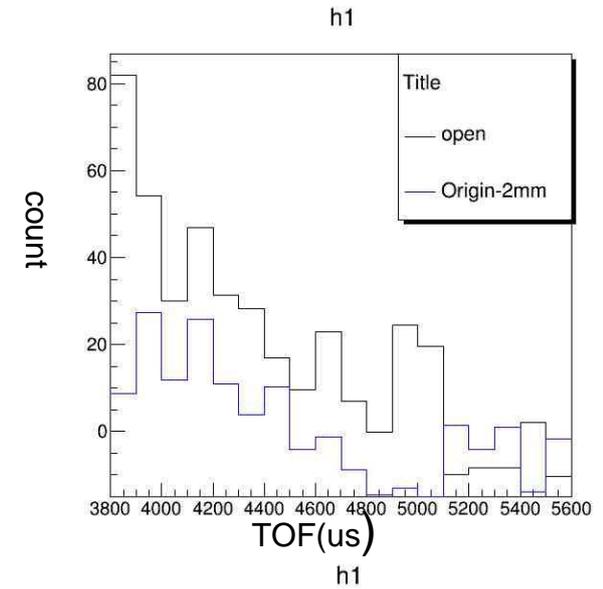
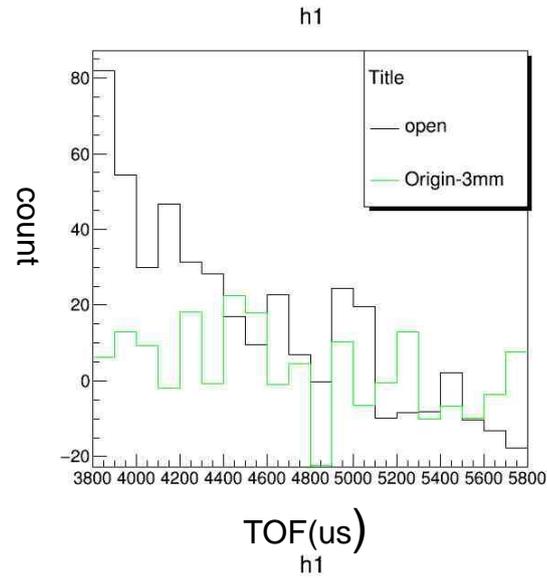
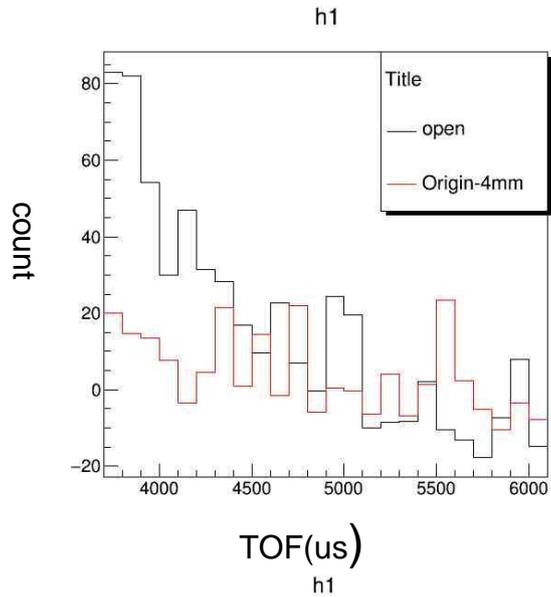
Slit position	+2mm	+1mm	origin	-1mm	-2mm	-3mm	-4mm
Signal	16.0	34.4	46.0	-15.0	46.0	80.0	98.0
Signal error	41.6	40.3	40.4	40.0	39.5	37.6	52.9
neutron	no	no	no	no	no?	exist	exist

# Tailの比較

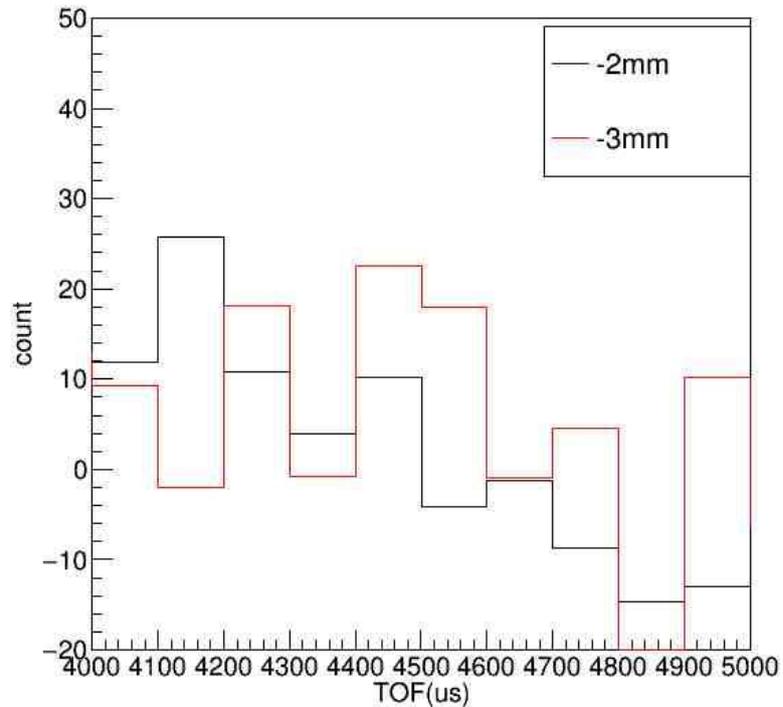


0 consistentと見なせるTOFはスリットの位置によって異なり、下方にあるほど、より大きなTOFの成分がありそうである。これは、重力の影響で中性子が落下していることと矛盾しない。

# No slit との比較



# テールの解析



この図を見ると、4500  $\mu\text{s}$ 付近での中性子数は-3mmの方が多く、4100 $\mu\text{s}$ 付近での中性子数は-2mmの方が多くなっている。誤差でないことを期待して、 $g$ の導出を行う。

# 中性子に対する重力加速度

Originの位置を $z=0$ とする。

スリット位置が $-2\text{mm}$

→ $-1\text{mm} < z < -3\text{mm}$ の中性子を捕獲

→ $-1\text{mm} < z < -2\text{mm}$ ・・・①

スリット位置が $-3\text{mm}$

→ $-2\text{mm} < z < -4\text{mm}$

→ $-3\text{mm} < z < -4\text{mm}$ ・・・②

$4100\mu\text{s}$ の中性子が①の区間に入り、 $4500\mu\text{s}$ の中性子が②の区間に入ったことになる。その差を平均すると $2\text{mm}$ 。

# 中性子に対する重力加速度

遮蔽材から下流スリットまで4m程度なので、この間にこれらの中性子は

$4100\mu\text{s} \cdots 8.41\text{g} [\mu\text{m}]$   $4500 \cdots 10.1\text{g} [\mu\text{m}]$

だけ落下する。その差は

$1.6\text{g} [\mu\text{m}]$

もし、遮蔽材から水平に飛び出した中性子だけを考えるなら、先ほどの2mmの差はこの差に由来する。

# 中性子に対する重力加速度

$$g = \frac{2000}{1.6} = 1250 \left[ m / s^2 \right]$$

# 中性子に対する重力加速度

しかし、この解析に意味を持たせるなら、実験セットアップとして、

- 1、ビームの鉛直成分をさらに絞り
  - 2、下流スリットの幅を2mmから数10 $\mu$ mまで狭めて
  - 3、上記の状態では中性子ピークが見える
- セットアップを考えなければならない。

## 謝辞 \*タンデムにて

加速器の扱いに関して、こちらの不手際を心やさしく対応してくださった広瀬さん。

お忙しい中、予備実験・本実験に参加していただき、中性子および周辺機器の説明を丁寧にしてくださった田崎さん。

# 謝辞

実験のアドバイスやセットアップの相談に乗ってくださった藤岡さん。

P2部屋にて様々なサポートをしていただいた中村さん、篠原さん。

理論や実験でご指導を賜った中家さん、隅田さん。

ご清聴

ありがとうございました