

# 多層膜ミラーを用いた 中性子干渉計による重力加速度の測定

2021年度 課題研究P2  
竹内 広樹 對馬 拓実 武藤 優真

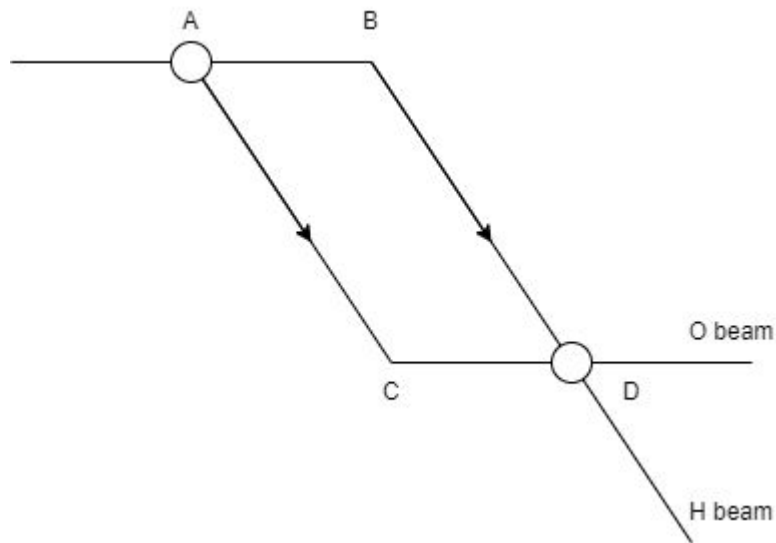
# 実験の目的

## 目的

- **中性子の重力干渉による位相変化を観測する**
  - 重力の影響が量子力学に表れる！おもしろい！！
  
- **中性子にはたらく重力加速度 $g$ を測定する**

# 実験の原理

# 実験の原理：中性子干渉計



中性子干渉計とは…

⇒2経路の位相差を検出する装置

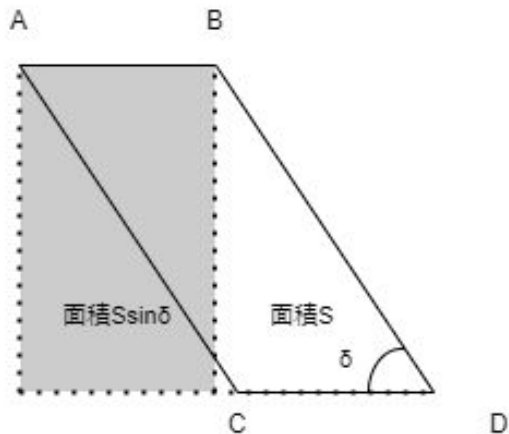
位相差があると波動関数が干渉するので、ObeamとHbeamの検出数に位相差が表れる

$$|\Psi_O|^2 = \alpha(1 - \cos \Delta\Phi)$$

$$|\Psi_H|^2 = \gamma + \alpha \cos \Delta\Phi$$

$\alpha, \gamma$ は反射率に依存する定数

# 実験の原理：重力による位相差



$$\psi \propto e^{-iEt}$$

$$\Delta\Phi_g = -\frac{2\pi\lambda m^2 g S \sin \delta}{h^2}$$

2経路に重力ポテンシャルの差があると 位相差がつく

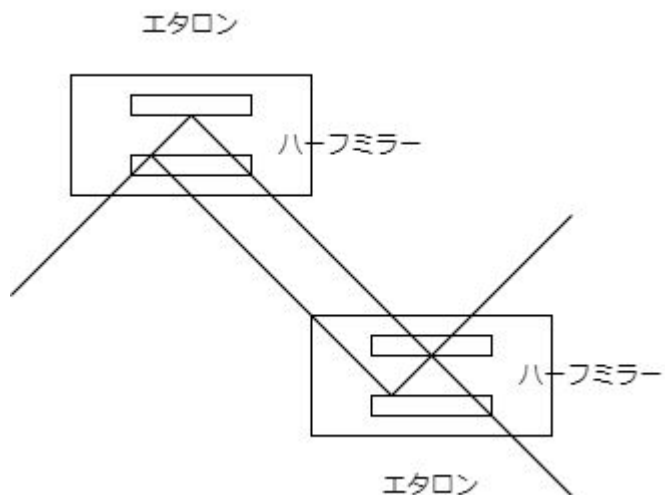
・経路が囲む面積に比例する

⇒装置全体を大きくすると精度が上がる

・中性子の波長に比例する

⇒長波長(=低エネルギー)であるほど精度が上がる

# 実験の原理：経路の分離の素子



経路を分ける素子…エタロン

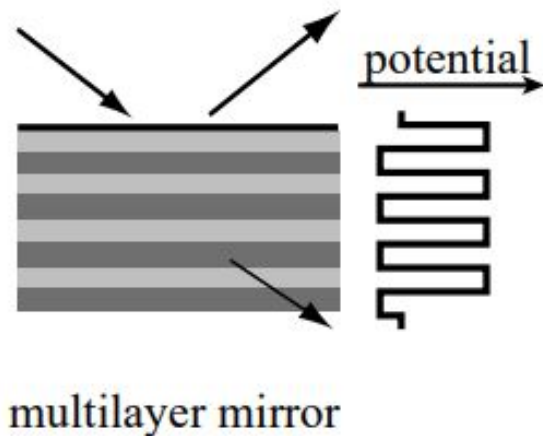
エタロンとは…ミラーを二枚平行に組み合わせたもの。  
(今回の場合理想的にはハーフミラーと全反射ミラーが一枚ずつ)

※先行研究では代わりにSi単結晶の回折を利用

- ①数Åの波長に限られる
- ②加工コストが高い
- ③動力的回折の影響か、理論と0.8%のずれが指摘されている

などの理由で今回は使用しなかった

# 実験の原理：多層膜ミラー



使用したエタロンの外側に使われている

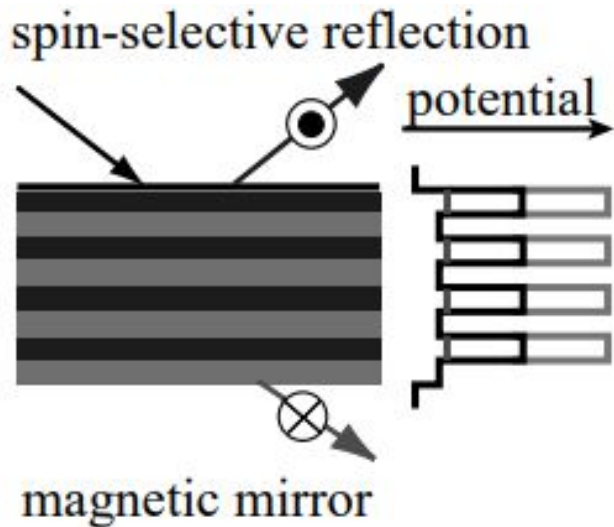
ポテンシャルの違う二つの素材が交互に貼り合わせられている  
⇒比較的大きな  
入射角で高い反射率を実現

Masaaki Kitaguchi. Cold-neutron  
interferometry using beam splitting etalons.  
PhD thesis, 京都大学, 5 2004. より引用

入射角、中性子の波長によって反射率が変わる



# 実験の原理：多層膜磁気ミラー



使用したエタロンの内側に使われている

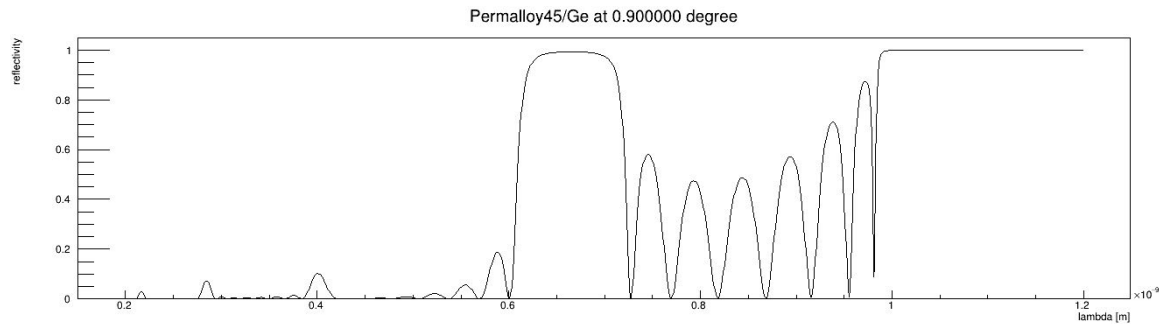
スピンの上下で感じるポテンシャルが違う ⇒upは反射、downは透過になるよう調整すると完全なハーフミラーを実現

(今回はupのみを用いてハーフミラーとして用いた)

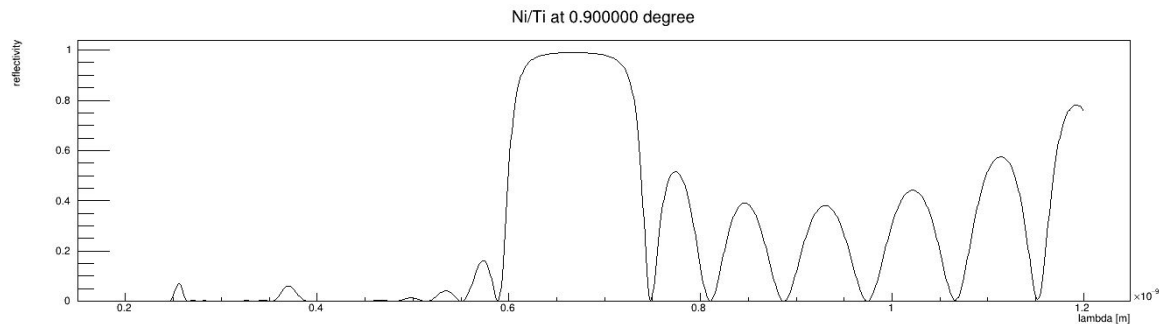
Masaaki Kitaguchi. Cold-neutron interferometry using beam splitting etalons. PhD thesis, 京都大学, 5 2004. より引用

使用にはPermalloyなどの素材を磁化させる磁場を かける必要がある

# 実験の原理:ミラーの反射率の波長依存性

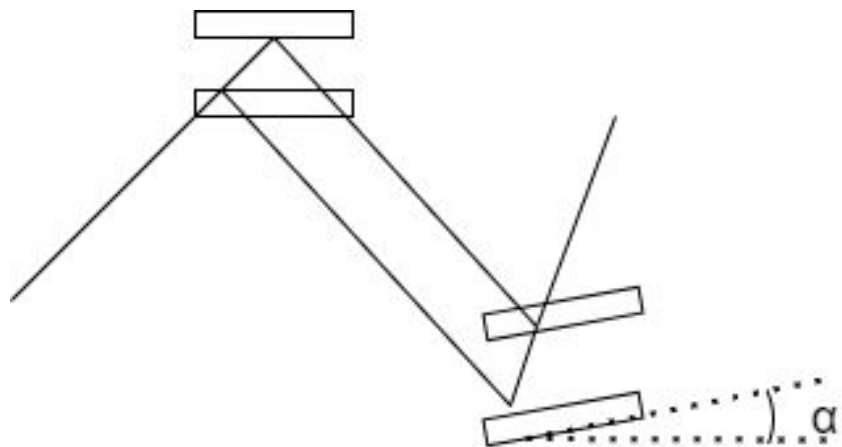


磁気ミラーの up spin の  
反射率 ( $\theta=0.9$  deg)



全反射ミラーの反射率  
( $\theta=0.9$  deg)

## 実験の原理：経路変化による位相差



エタロン同士を平行にするのは難しい

⇒ 相対角  $\alpha$  によって経路長が変わり、位相差が生まれる

$\lambda$  に反比例であり重力の効果とは違う 依存性

$$\Delta\Phi_{\alpha} \approx -\frac{4\pi d\alpha}{\lambda}$$

# 実験の原理: 位相差まとめ

既知の定数:  $m, S, \delta, h, d$

未知の定数:  $g, \alpha$

既知の変数:  $\lambda$ (ビームの波長分布)

想定されるノイズ: 反射率の波長依存性(一般には反射は  $\pi$ 反転ではない)

$$\begin{aligned}\Delta\Phi &= \Delta\Phi_g + \Delta\Phi_\alpha \\ &= -\frac{2\pi\lambda m^2 g S \sin\delta}{h^2} - \frac{4\pi d\alpha}{\lambda}\end{aligned}$$

# 測定手法の事前検証

# 測定手法の事前検証:シミュレーションの概要

1. 波長分布にしたがって中性子の波長を決定
2. 実験の原理にしたがってO,Hビームとして観測される確率を計算し  
観測されるかを判定
  - a. 多層膜ミラーの反射率を計算
  - b. 位相差 $\Delta\phi$ を計算
  - c. a,bから波動関数を求める
3. cpsと観測時間の分だけ上記を繰り返し、O,Hビームの観測数の波長分布を作成
4. 得られたデータを解析し、実験方法の妥当性を検証

## 測定手法の事前検証: $g$ の決定

$$\text{O: } I(\lambda)(A(\lambda, \alpha) \cos(k_1 \alpha / \lambda + k_2 g \lambda) + B(\lambda, \alpha))$$

$$\text{H: } I(\lambda)(-A(\lambda, \alpha) \cos(k_1 \alpha / \lambda + k_2 g \lambda) + D(\lambda, \alpha))$$

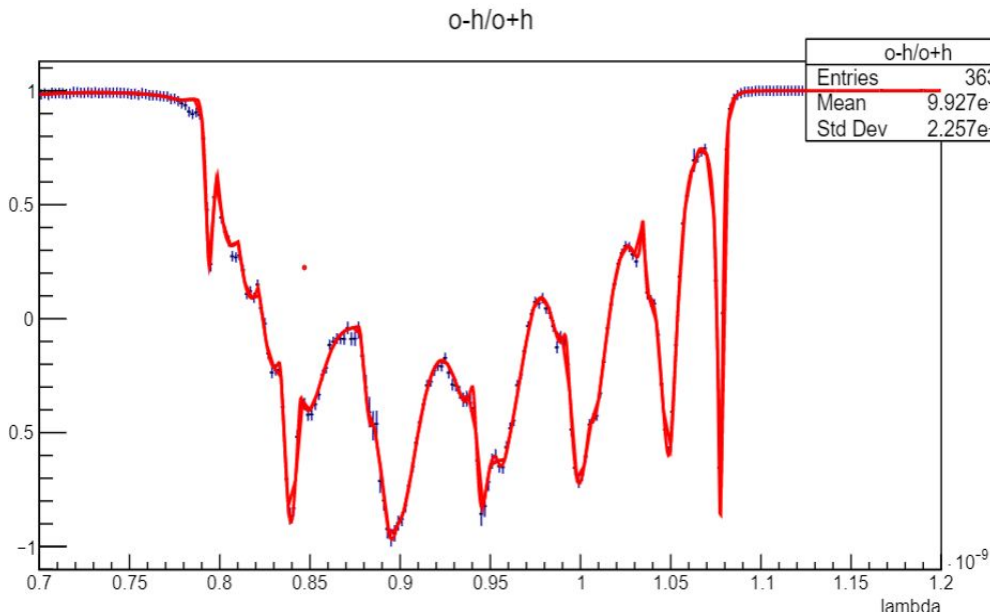
ビーム強度  $I(\lambda)$ を消去するために

O-H/O+H:

$$A'(\lambda, \alpha) \cos(k_1 \alpha / \lambda + k_2 g \lambda) + B'(\lambda, \alpha)$$

を見る

# 測定手法の事前検証：反射率依存性を考慮した干渉縞



$\theta=17.5$  mrad,  $\alpha=0.227$  mradでの干渉縞

反射率を完璧に知っている場合には

fitが出来るが、反射率の理論とのズレやノイズなどから非現実的



# 測定手法の事前検証: 測定方法の改良

反射率の $\alpha$ 依存性は波長依存性に比べてずっと小さい

→ $\alpha$ を少しずつ(17.5  $\mu\text{rad}$ 程)変化させて実験を行う。 $\lambda$ を固定したときの $\alpha$ による位相の変化を調べる。(全範囲の $\lambda$ について調べると統計量の損失は無くなる。)

得られた位相から $\lambda$ に比例する部分を取り出せば、 $g$ の効果が見える

$$\underline{A'(\lambda, \alpha)} \cos(\underline{k_1 \alpha / \lambda + k_2 g \lambda}) + \underline{B'(\lambda, \alpha)}$$

この部分は $\alpha$ に対する変化が緩やか

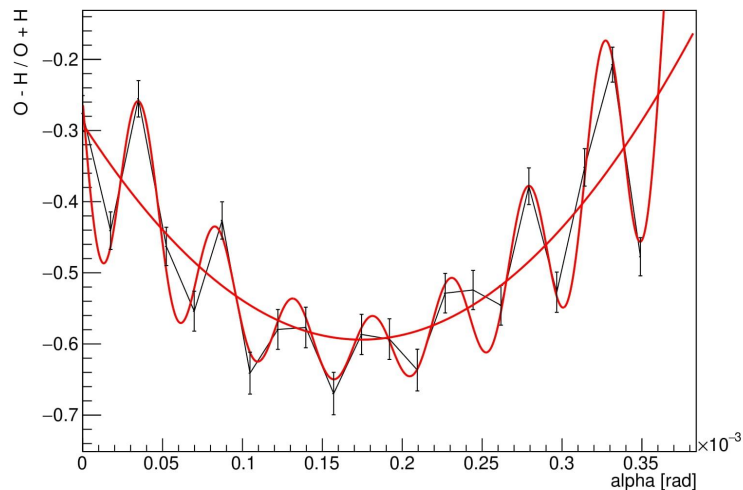
各 $\lambda$ カットでのfitから $k_2 g \lambda$ が分かれば $\lambda$ に対するプロットから $g$ が分かる

この部分は $\alpha$ に対する変化が緩やか

# 測定手法の事前検証: フィッティング結果

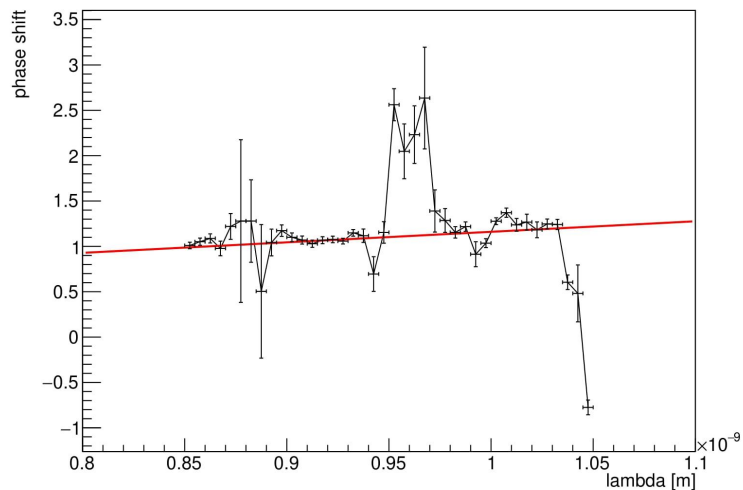
$\lambda=0.85$  nmでの $\alpha$ に対するプロットの干渉縞

Graph



各波長での $k_2 g \lambda$ の値

Graph



$\alpha_0 = 0$  rad, 実際より緩い条件でのシミュレーション

$A'$ ,  $B'$ は $\alpha$ に対する二次関数と仮定している

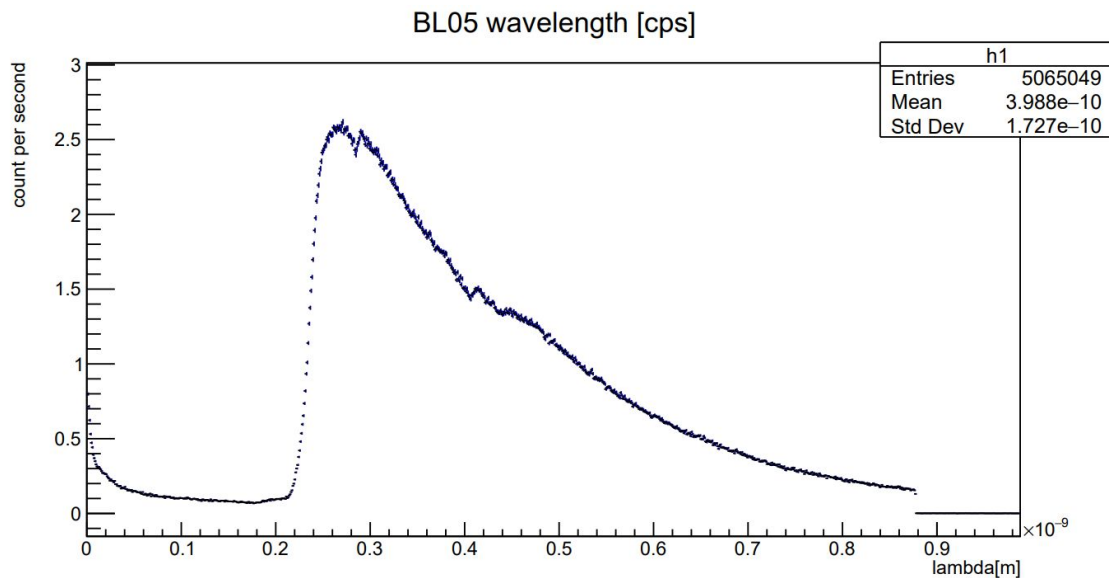
# 実験装置

# 実験装置: 中性子源 J-PARC MLF BL05

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ビームを作り出し, 各実験に適したモデレーターでエネルギーを下げることによって冷中性子を作り出している

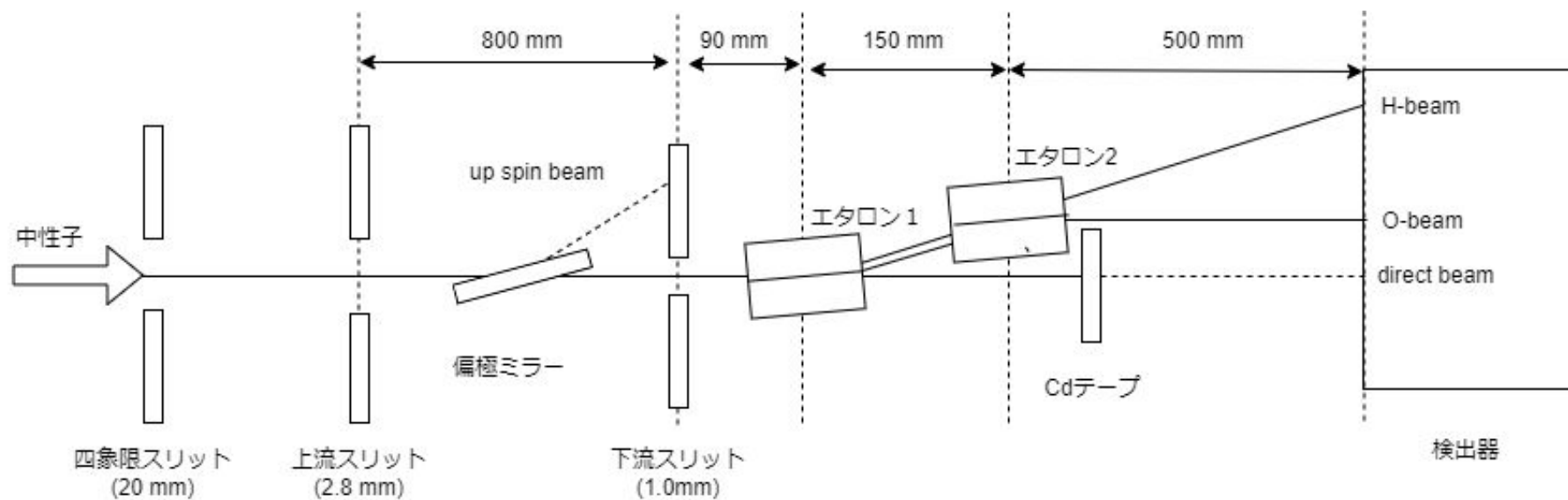
今回はBL05の低発散ビームラインを使わせていただいた

# 実験装置: BL05の波長分布

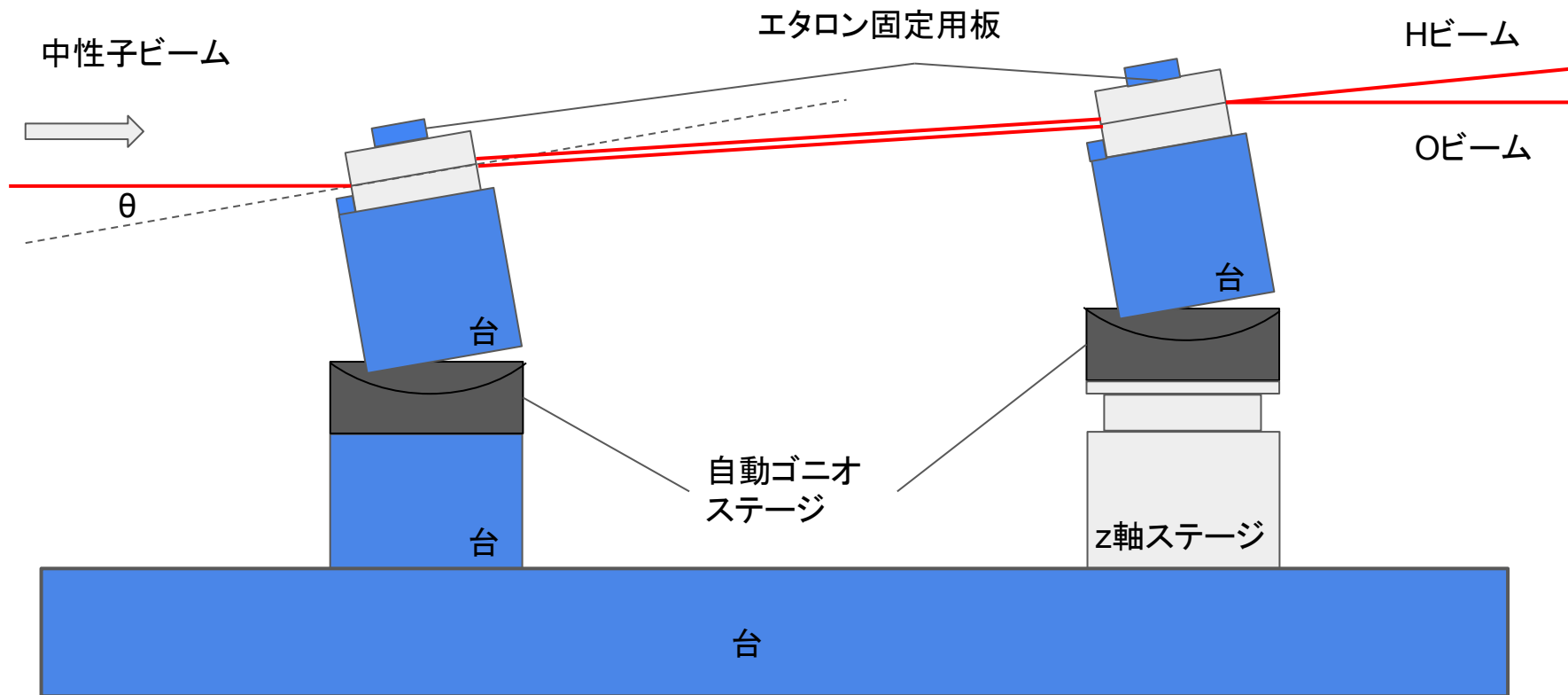


0.3 nmにピークがあるが、中性子ミラーの性質などから0.7 nm~1 nmの領域を利用

# 実験装置: 全体の概念図



# 実験装置：干渉計部分



# 予備実験



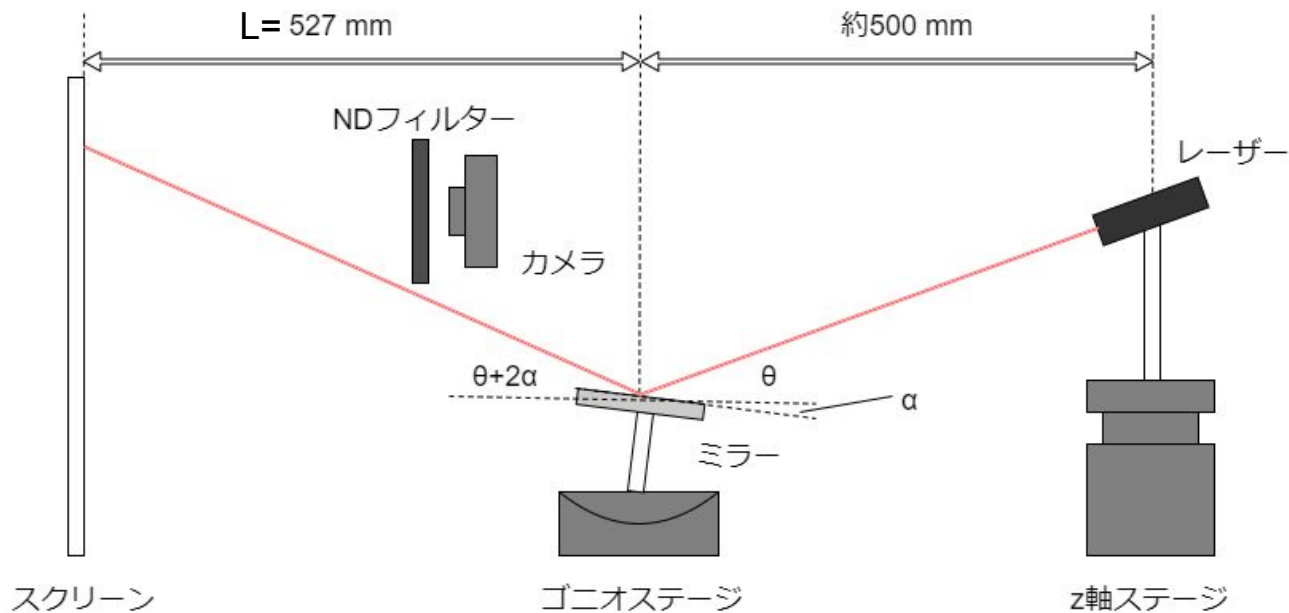
## 予備実験: 目的

本実験では二つのエタロンの相対角 $\alpha$ による, 干渉縞の変化を調べる

使用する自動ゴニオステージの分解能 $\Delta\alpha$ は, 説明書によると約1 mdeg/pulse

→本実験で必要な1%程度の精度で $\Delta\alpha$ を調べたい

# 予備実験: セットアップ: 概念図



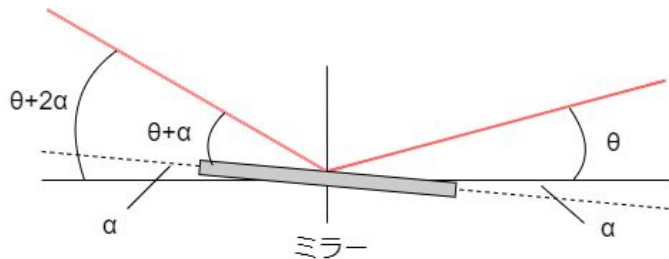
ゴニオステージに固定したミラーでレーザーを反射

→スクリーンをカメラで撮影し, レーザー位置の変化を調べる

## 予備実験：測定の原理

レーザーは水平面から $\theta+2\alpha$ の方向に反射

→スクリーンにあたるレーザーの実際の高さ $z$ は、ミラー-スクリーン間距離 $L$ 、入射角 $\theta$ 、ゴニオステージの傾き $\alpha$ を用いて、( $\alpha \ll \theta$ )

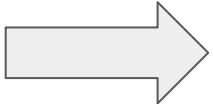


$$z = L \tan(\theta + 2\alpha) \simeq \frac{2L}{\cos^2 \theta} \alpha + \text{const.}$$

## 予備実験:原理

実際の高さ  $z$  と写真上の高さ  $y$  の関係:  $y = a_{\text{calib}} z + \text{const.}$

ゴニオステージの傾き  $\alpha$  とpulse数  $x$  の関係:  $\alpha = \Delta\alpha x$


$$y = \frac{2La_{\text{calib}}}{\cos^2 \theta} \underline{\Delta\alpha} x + \text{const.}$$

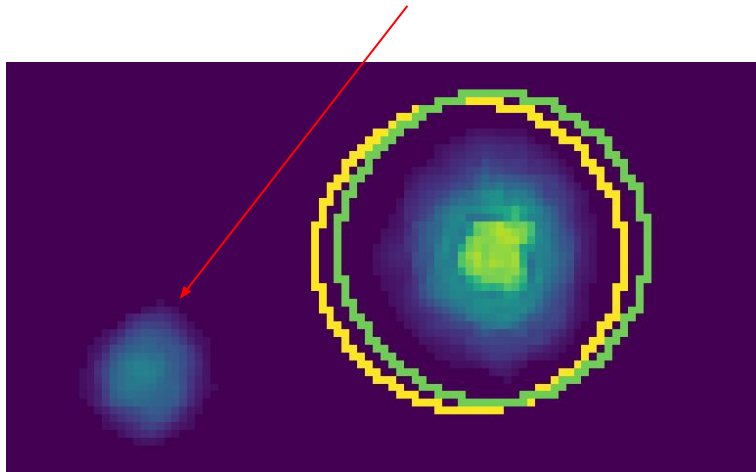
pulseを変化させたときの写真上の高さの変化を調べることで $\Delta\alpha$ を測定できる

# 予備実験:レーザー位置の決定

レーザー位置は二段階に分けた重心計算で決定:

1. thresholdを120に設定して重心計算
2. 1で求められた位置から縦横 $\pm 20$  pixelの範囲でthresholdを20にして重心計算

→情報を減らさずにノイズ(レンズ内での光の反射)を除去

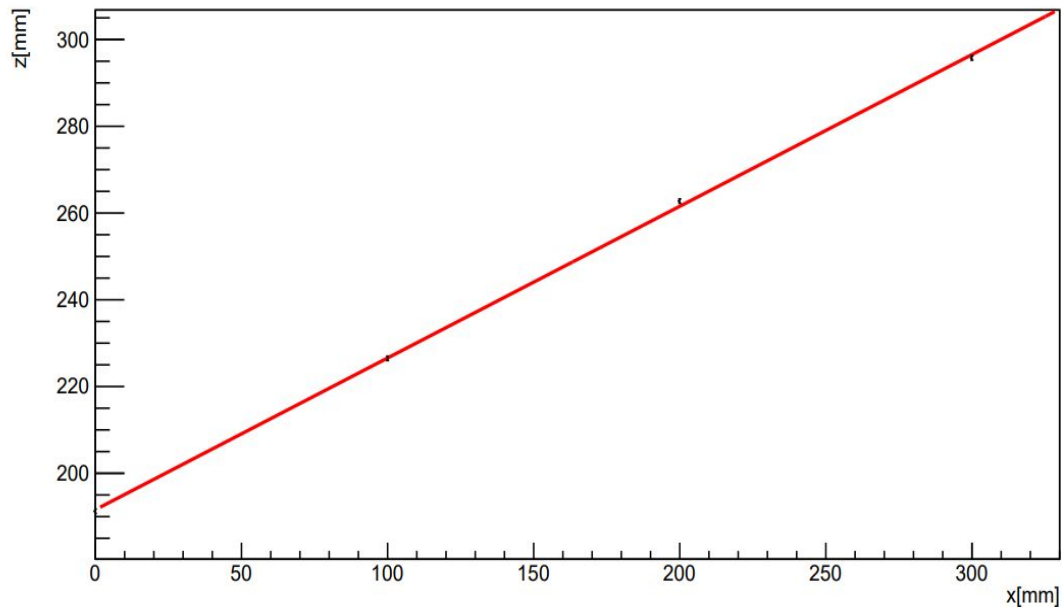


黄: threshold=75で重心計算

緑: 二段階に分けて重心計算

# 予備実験：入射角の測定

cos value



定規にあたるレーザー位置を100 mmごとに測定

その傾きが $\tan\theta_0$ であることから 入射角を求める

fitting結果： $c_2=1/\cos^2\theta_0$

$c_2=0.8777$ ,  $\delta c_2=0.00156$

( $\theta_0=19.28$  deg)

# 予備実験: z軸ステージによるキャリブレーション

z軸ステージの分解能は $0.2 \mu\text{m}/\text{pulse}$

→z軸ステージの移動量を正しいものとして, 写真上での移動量を調べる

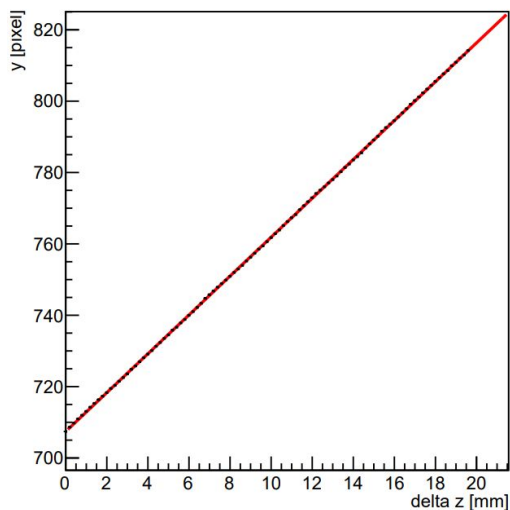
精度測定で実際に使用する二つの領域

- ・minus側: 700 pixel ~ 800 pixel
- ・plus側: 480 pixel ~ 580 pixel

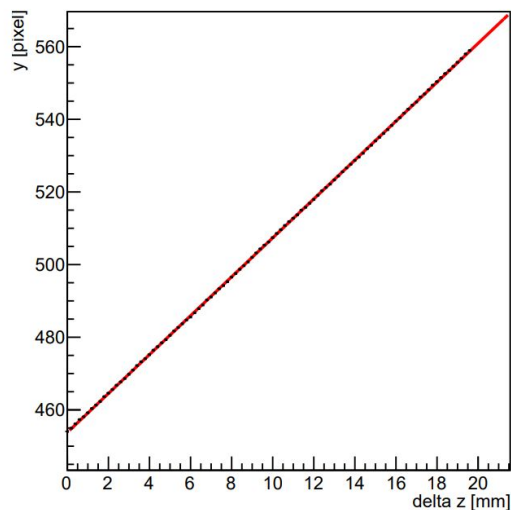
において, 1000 pulseずつ100回(移動量 20 mm)

# 予備実験: キャリブレーション 結果

z stage calibration (minus)



z stage calibration (plus)



	$a_{\text{calib}}$ [pixel/mm]	$\delta a_{\text{calib}}$
minus側	5.445	0.0027
plus側	5.357	0.0027



# 予備実験:ゴニオステージの精度測定

本実験で使用する $\pm 1$  deg付近の精度を調べた(-4200 pulseでミラーが水平に)

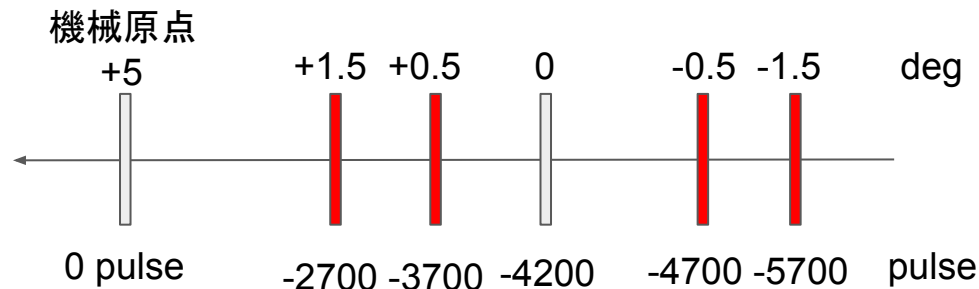
(1) -0.5 deg  $\rightarrow$  -1.5 deg (-4700 pulse  $\rightarrow$  -5700 pulse)

(2) -1.5 deg  $\rightarrow$  -0.5 deg (-5700 pulse  $\rightarrow$  -4700 pulse)

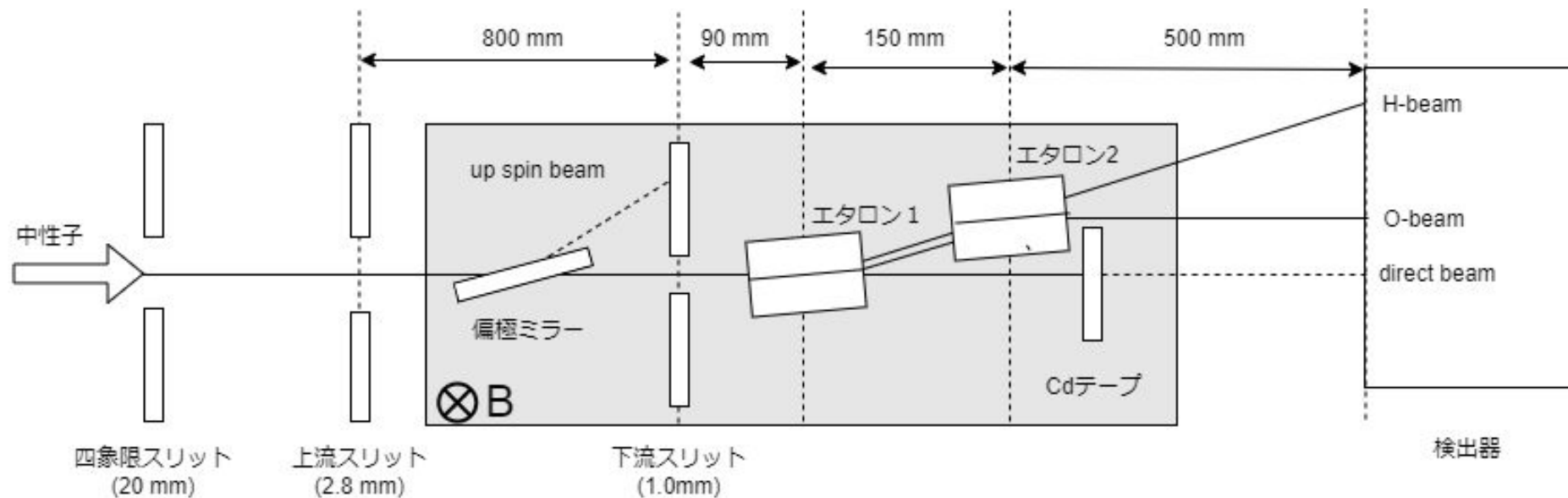
(3) +0.5 deg  $\rightarrow$  +1.5 deg (-3700 pulse  $\rightarrow$  -2700 pulse)

(4) +1.5 deg  $\rightarrow$  +0.5 deg (-2700 pulse  $\rightarrow$  -3700 pulse)

各領域で, 10 pulseずつ100回



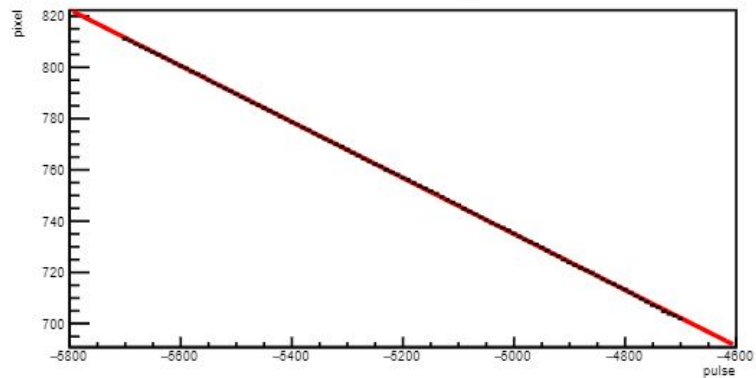
# 本実験: 実験装置の概念図



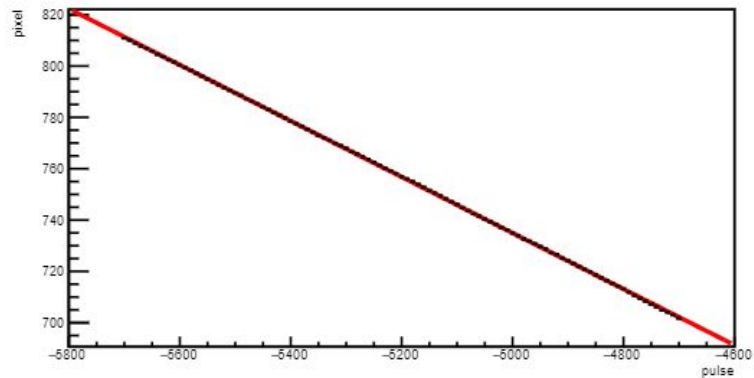
エタロンへの入射角は0.9 degに調整する(反射率の波長依存性から決定)

# 予備実験: 精度測定 重心位置とpulse数の関係

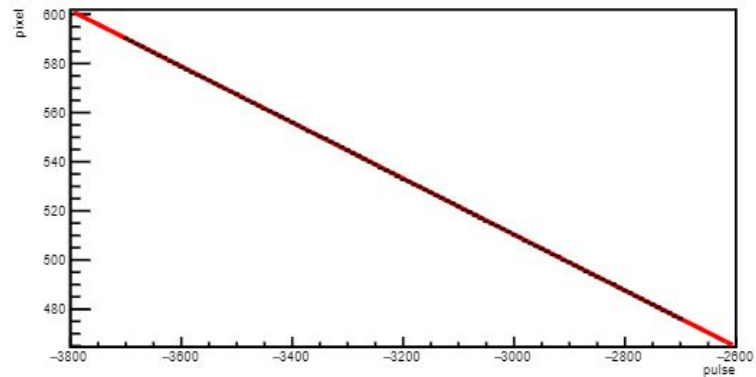
-0.5 → -1.5 deg



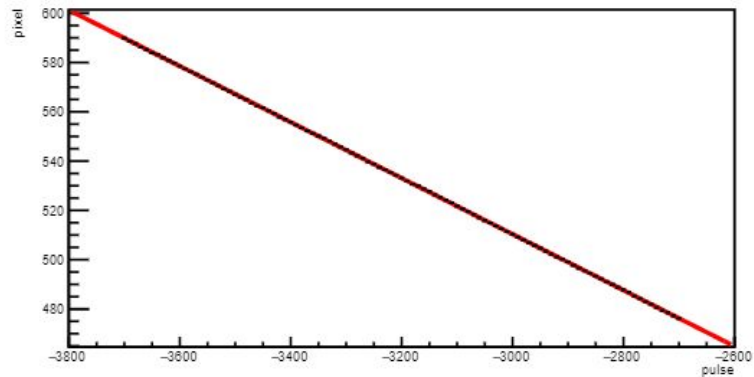
-1.5 → -0.5 deg



+0.5 → +1.5 deg



+1.5 → +0.5 deg



## 予備実験:ゴニオステージの精度測定 結果

	K[pixel/pulse]	$\delta K$
-0.5deg→-1.5deg	0.1093	0.000066
-1.5deg→-0.5deg	0.1092	0.000068
+0.5deg→+1.5deg	0.1141	0.000046
+1.5deg→+0.5deg	0.1136	0.000041

## 予備実験： $\theta$ の訂正

キャリブレーションと精度測定の傾きの誤差は約0.05 %

$\theta_0=19.28\text{deg}$ に対して、調べた領域の中心である $\pm 1 \text{ deg}$ は約5 %で無視できない程大きい

→plus側, minus側でそれぞれの入射角を $\theta_0 \pm 1.0 \text{ deg}$ に訂正して, 解析を行った

## 予備実験:結果

各パラメータと $\Delta\alpha$ の関係は,  $c_2 \equiv \frac{1}{\cos^2 \theta}$ として,  $\Delta\alpha = \frac{1}{2La_{\text{calib}}c_2}$

誤差伝搬の法則を適用し, 系統誤差まで含めた $\Delta\alpha$ の結果は,

	$\Delta\alpha$ [mdeg/pulse]	$\delta(\Delta\alpha)$
-0.5deg→-1.5deg	0.9946	0.0027
-1.5deg→-0.5deg	0.9936	0.0027
+0.5deg→+1.5deg	1.0055	0.0027
+1.5deg→+0.5deg	1.0013	0.0027

plus側とminus側で異なる可能性があるがすでに十分な精度(約0.27%)

→本実験で実際に使った方の結果を用いる

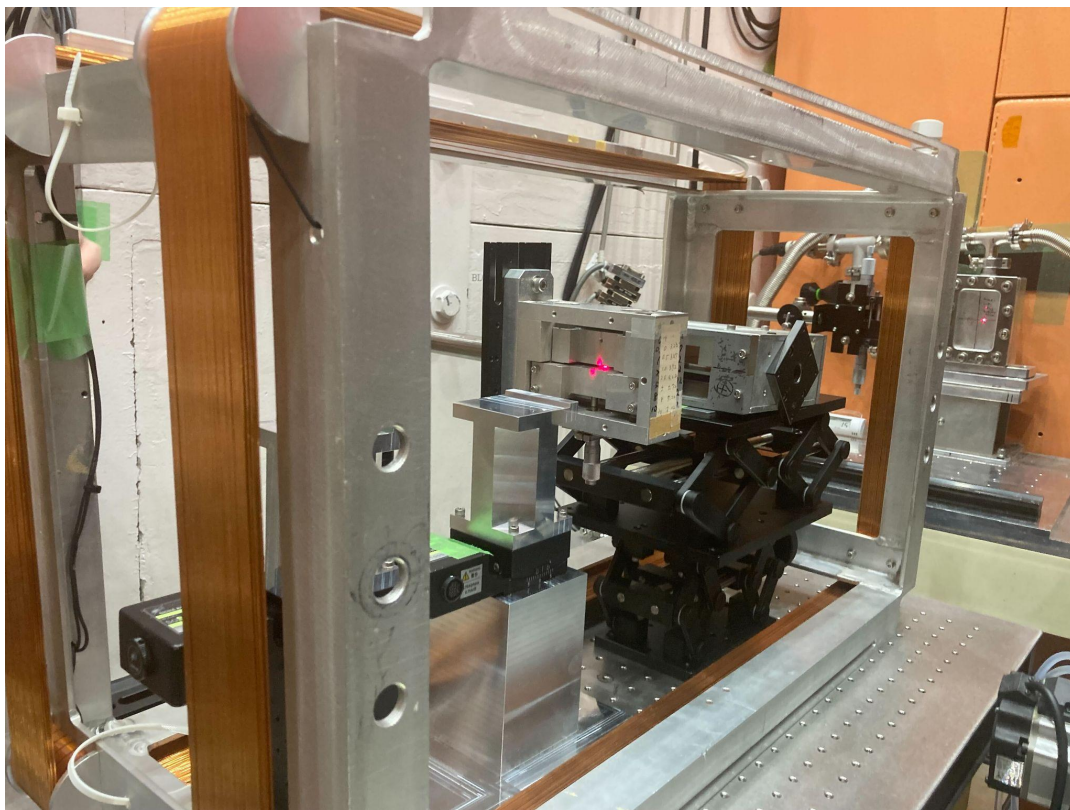
# 本実験

# 本実験: 実験の流れ

1. 偏極ビーム作成
2. アライメント
  - 2.1. 一枚目エタロンへの入射角
  - 2.2. 二枚目エタロンのz位置
  - 2.3. 二枚目エタロンの角度
3. 干渉していることの確認
4. 本測定
5. 解析



## 本実験：装置の実際の写真

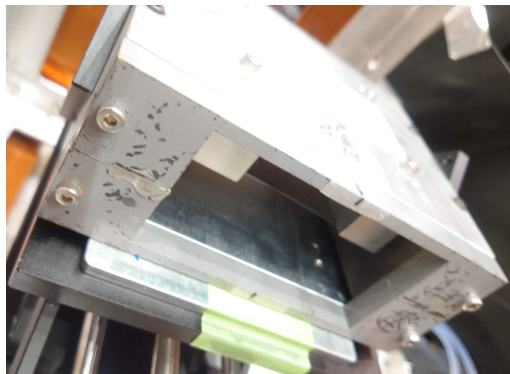


下流スリット位置のアライメントの様子

赤いレーザーの光は中性子ビームが通る経路を表している

エタロンは画像中央部に見えるアルミ台の上に設置する

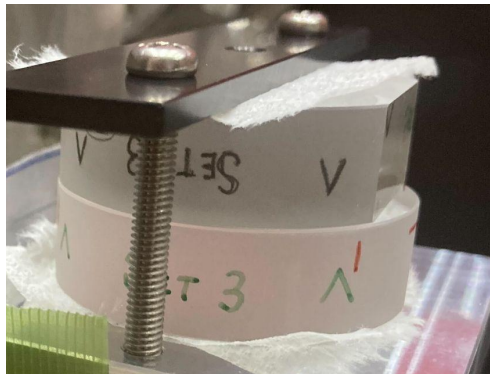
## 本実験: 実際の写真



偏極ミラー

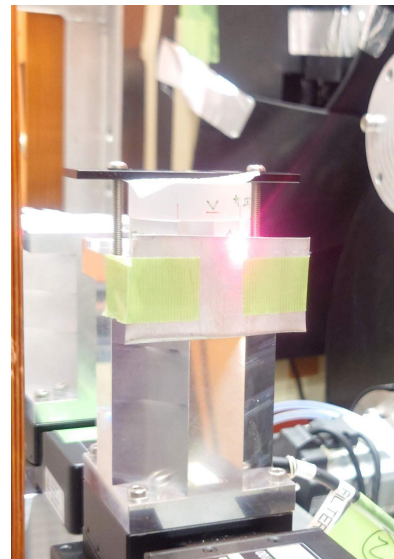
ミラーの入射角を調整(~2deg)するため板を挟んでいる

箱の中にミラーがあり両側から磁石で磁化させている



設置したエタロン

air gapは10  $\mu\text{m}$



Cdシートでダイレクトビームの経路を塞ぐ様子

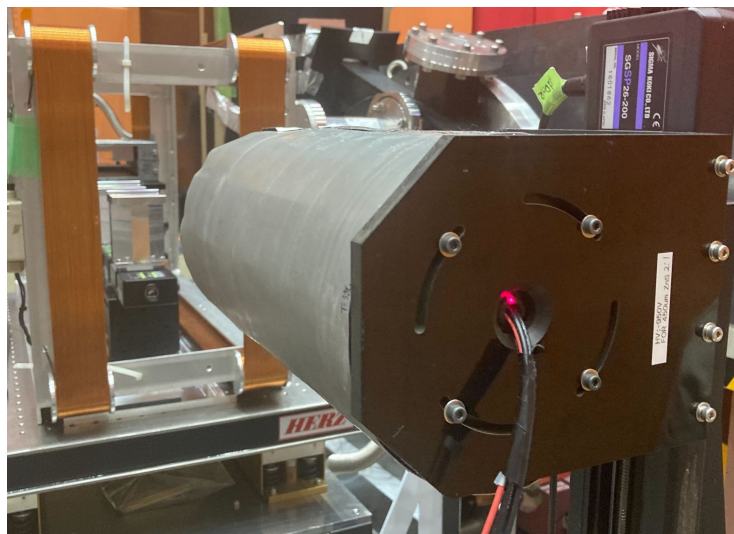
Oビームはダイレクトビームより5mm上から飛んでくるので、下からレーザーを覆えばダイレクトだけを止められる

# 本実験: 実際の写真

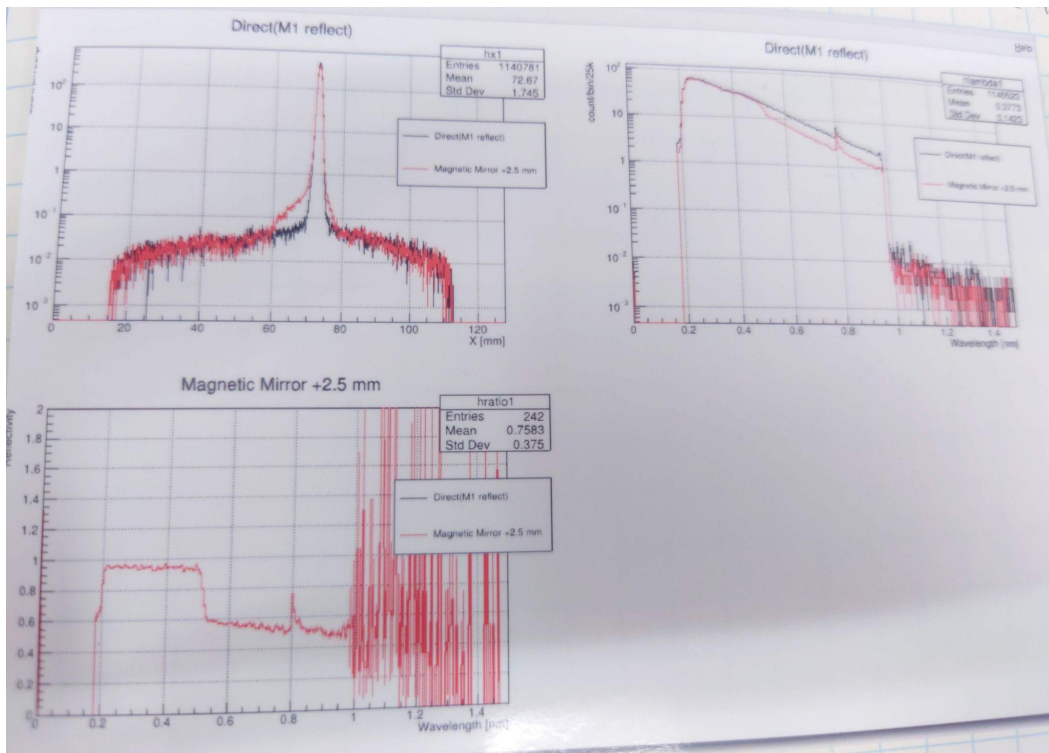


検出器

抵抗分割により中性子の位置を測定



# 本実験: 偏極ビームの作成

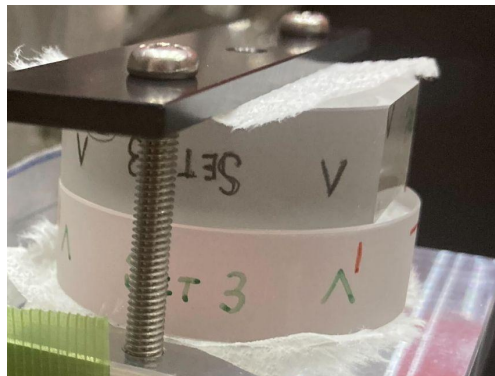


黒: 偏極ミラーなし

赤: 偏極ミラーあり

左下のグラフは赤/黒の検出数の波長分布, 0.5 nm 当たりから偏極していることがわかる

## 本実験:エタロンの 設置・平行の設定(アライメント)

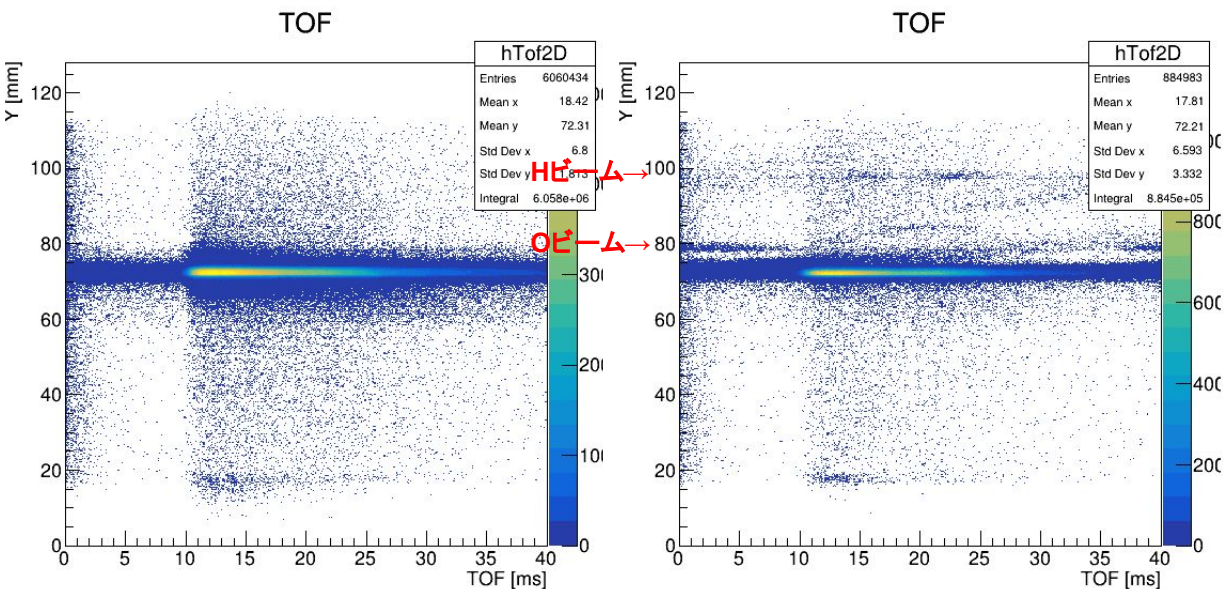


アルミ台の上にエタロンを置き板で軽く止めた

エタロンに傷が付かないようにキムワイプを上下に挟んだ

水平器を用いて二枚のエタロンを0.1 deg程度の精度で 平行にした

# 本実験:エタロン2の高さ調整・入射角の確認(アライメント)



左:エタロン無し

右:エタロン有り(高さ調整後)

O,Hビームがともに観測出来る事が分かる

⇒zステージの高さはこのとき60250だった(入射角1.1 deg相当)

⇒ステージの角度を修正する必要がある

## 本実験：入射角の修正・zステージの再調整(アライメント)

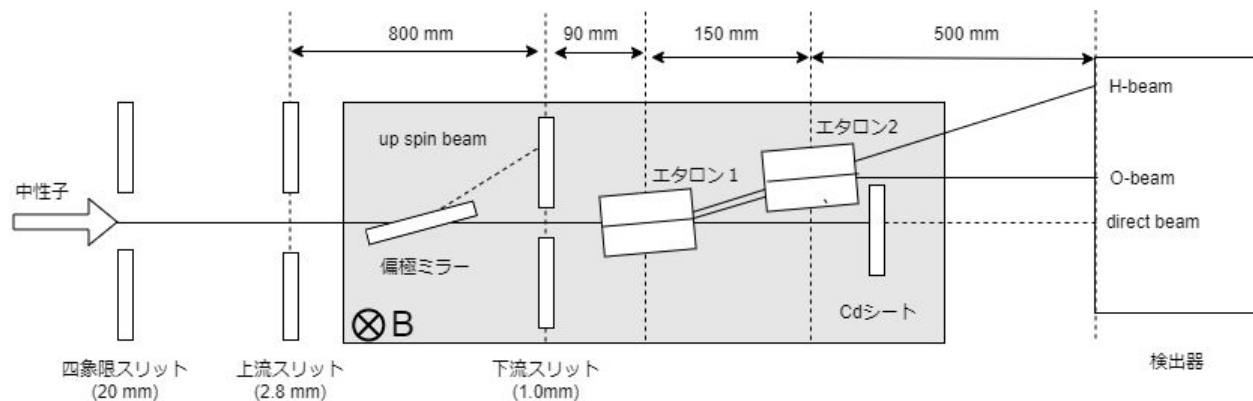
入射角を0.2 deg下げるためにゴニオステージを1800→1400パルスに変更

それに合わせて計算の結果zステージは60250→47250に変更

⇒O,Hビームが両方観測出来た. またこのzステージの値は入射角0.9 degの時の 計算結果と合致するため入射角は概ね0.9 degと考えられる

ゴニオステージを1400に固定してzステージの値を1000パルス(0.1mm)ずつ変えていくと, z=49250でO,Hビームが最もはっきり見えたのでこの値を採用

# 本実験: エタロン2の角度調整・ $\alpha=0$ の粗い調整(アライメント)



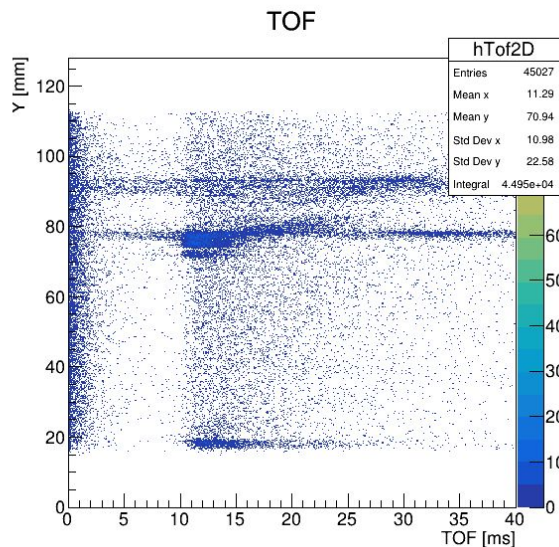
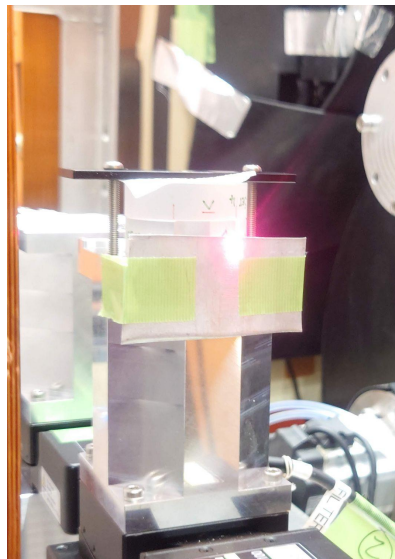
エタロン2の角度を動かしてエタロン1と平行にした

この時点で, Oビームとダイレクトビームを分離するためにCdシートを導入

※平行の判断基準→二枚のエタロンが平行なとき, Oビームは入射ビームと平行に出てくるのでダイレクトビームとOビームの高さの差はzステージの高さに一致



## 本実験:ダイレクトビームの遮断・ $\alpha=0$ の粗い調整(アライメント)

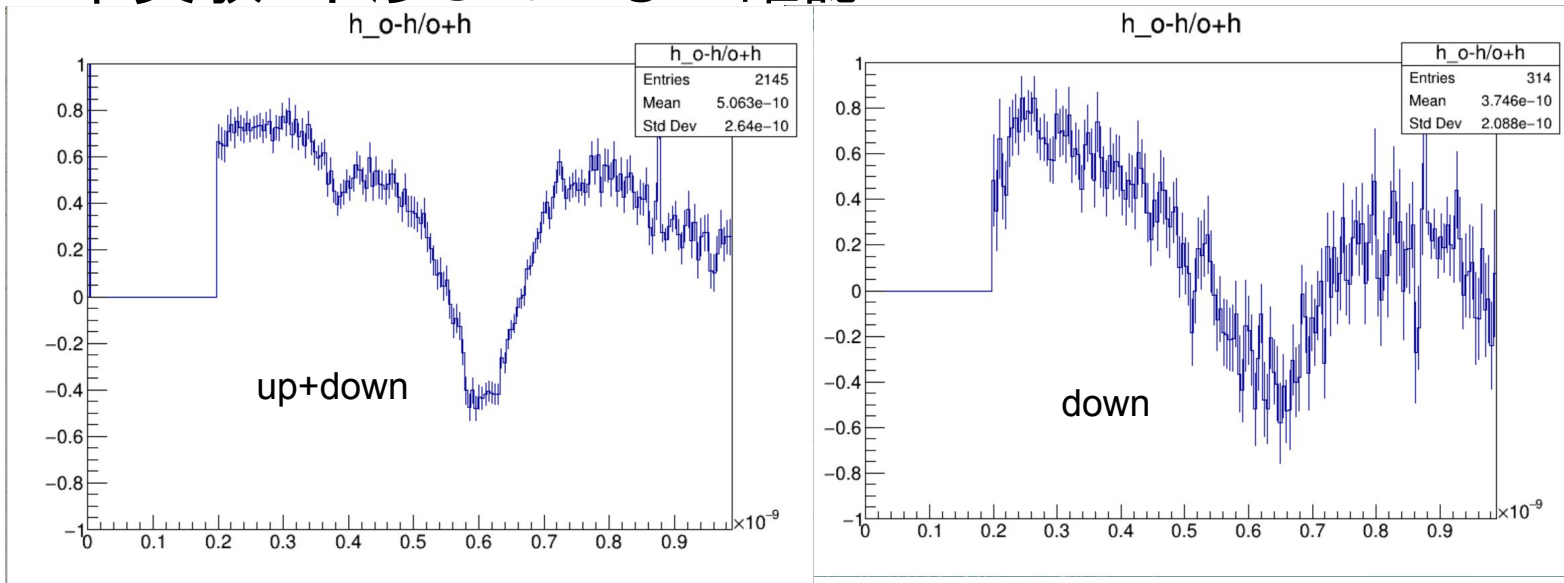


余分なダイレクトビームを遮断して Oビームを見やすくし, cpsを低くした

Oビームの位置がダイレクトビームの位置(71.5~72.5mm)からzステージの値(4.795mm)だけ大きい位置にくるように角度を20パルス(0.01 deg)単位で動かす

⇒1300~1320パルスに平行となる点がありそう

# 本実験: 干渉しているか確認



干渉を見るには偏極ミラーの反射成分(spin up)を使う必要がある

⇒ビームが水平に飛んでくる前提で装置を設計していたので、ミラー無し(non-polarized)状態(左)とミラー透過成分であるdown状態(右)測定し、結果を見比べる

⇒両方の状態の7~9Åで高周波の振動構造が見える?

## 本実験：測定

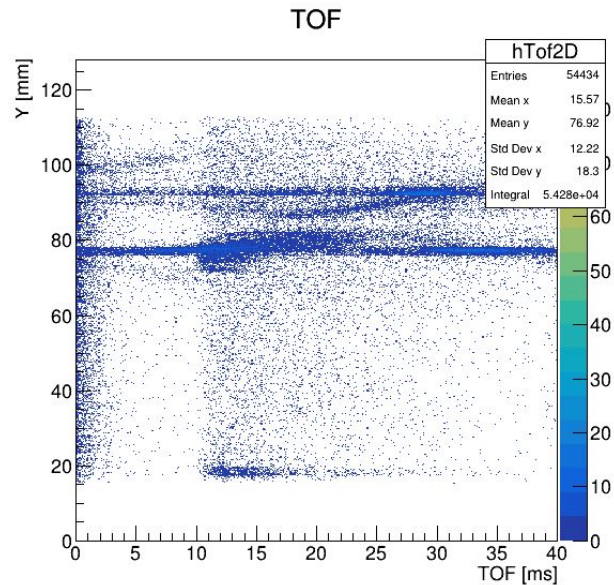
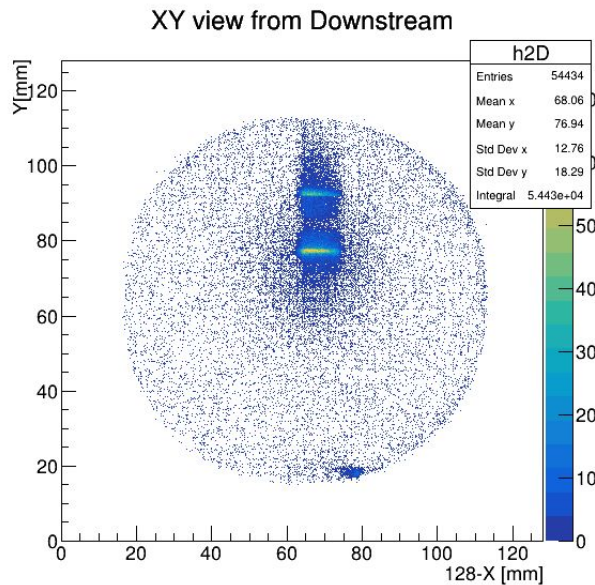
エタロン2のゴニオステージを1300 pulseから1320 pulseまでを3分ずつ21回測定

これを合計4回繰り返した

そして $\lambda$ を0.1Åごとにスライスし、 $(O-H)/(O+H)$ の変化を $\alpha$ について調べる

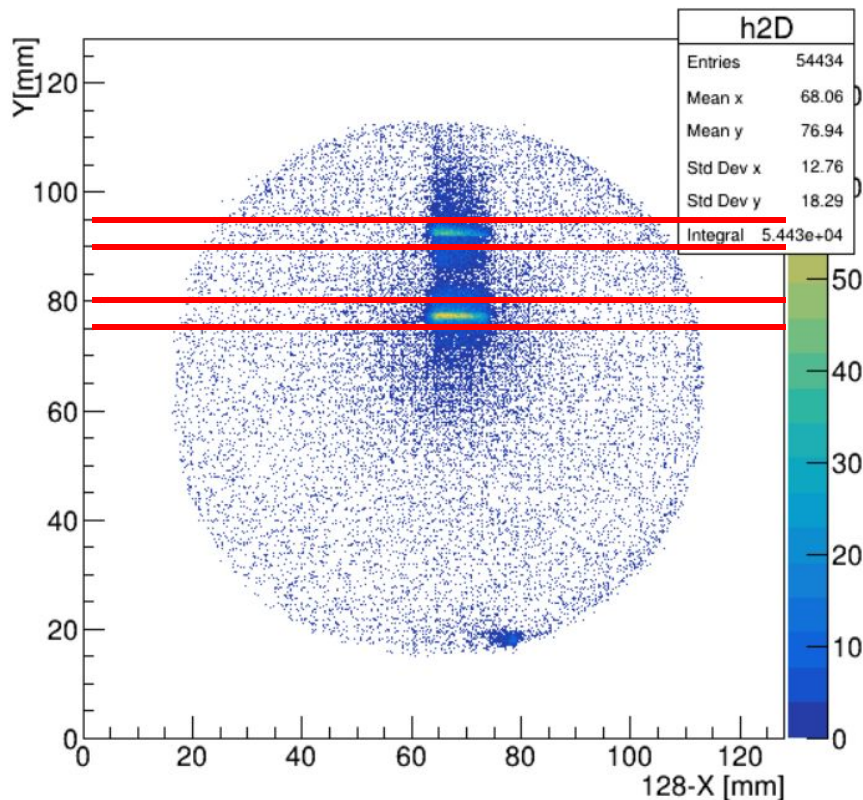
解析

# 解析：観測された中性子の時間・空間分布



# 解析：O,Hビームの判定

XY view from Downstream



Y方向でそれぞれ

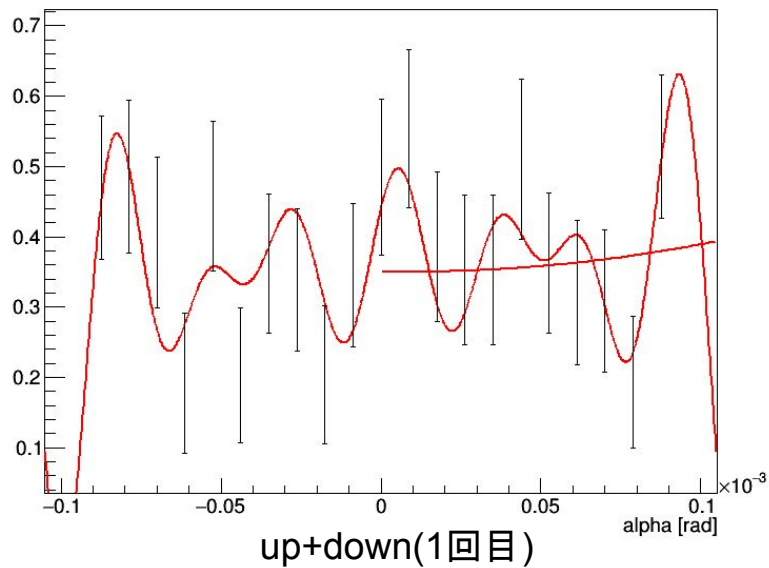
Oビーム: 75 mm ~ 80 mm

Hビーム: 90 mm ~ 95 mm

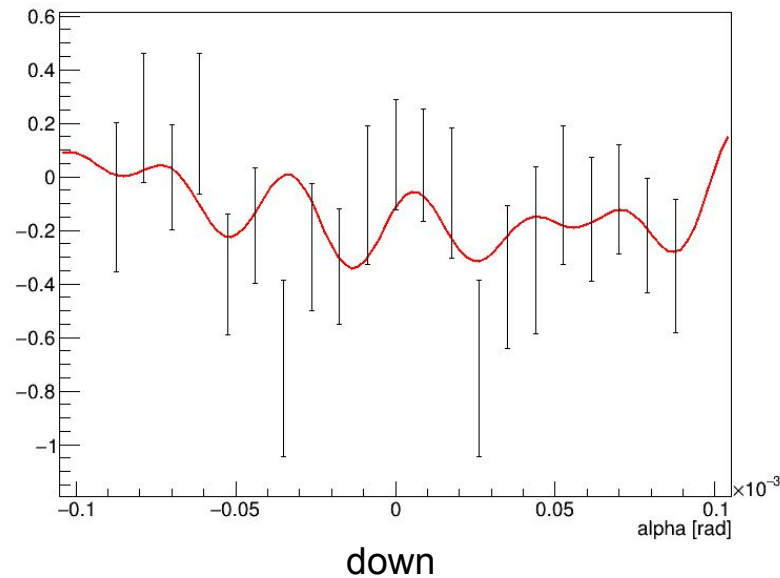
の領域を用いた

# 解析: O-H/O+Hの干渉の様子

O - H / O + H at 0.705000 [nm]



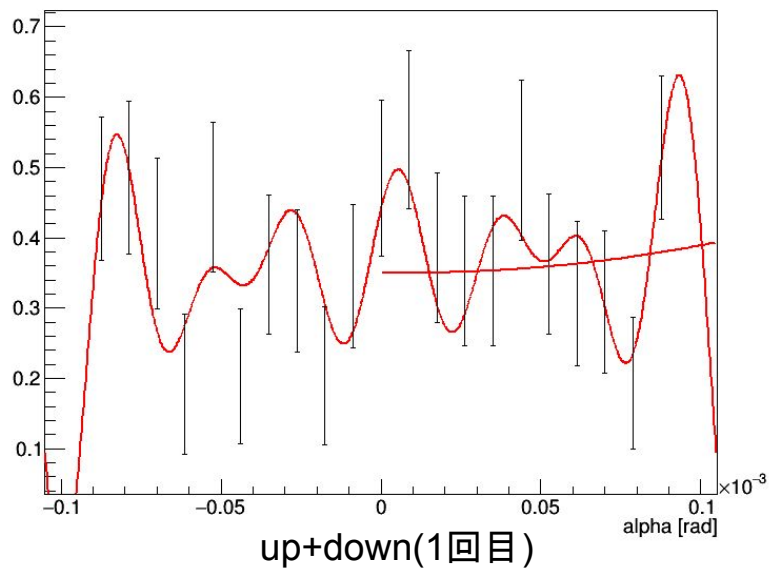
O - H / O + H at 0.705000 [nm]



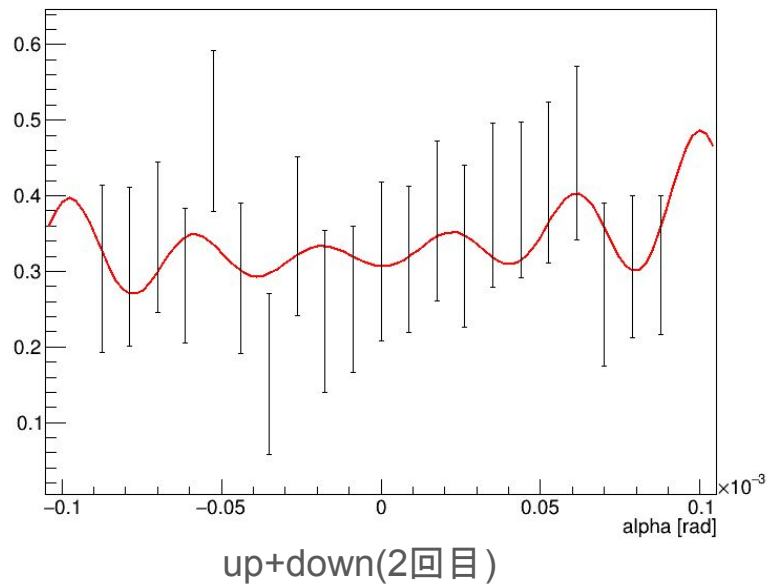
振動が見えている??

# 解析: O-H/O+Hの干渉の様子

O - H / O + H at 0.705000 [nm]



O - H / O + H at 0.705000 [nm]



同じ波長範囲なのに二回目は振動が全く見えない...

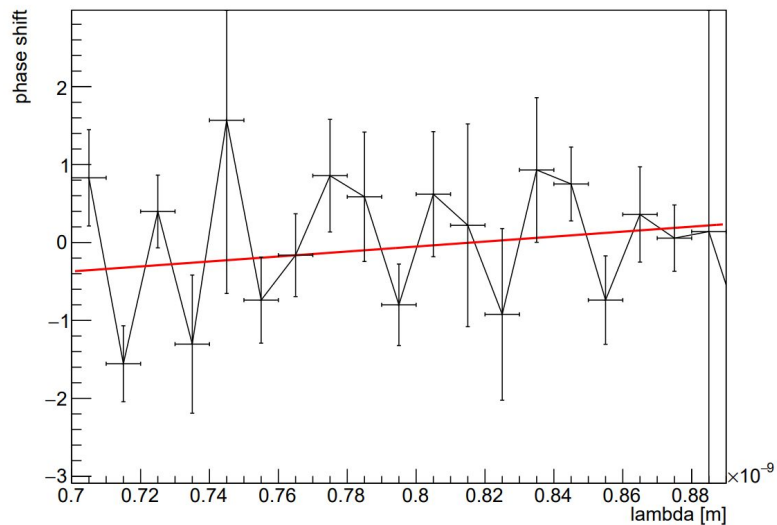


# 解析: $g$ の fit

第1回

$$g = 26 \pm 20 \text{ m/s}^2$$

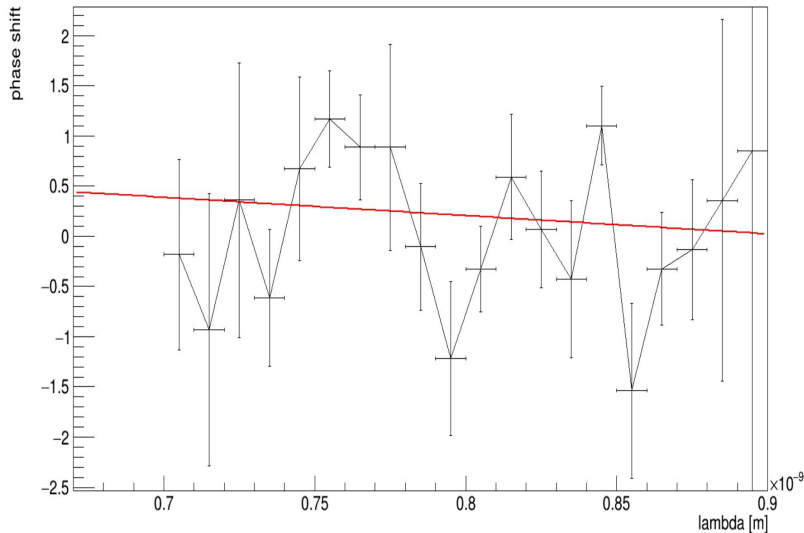
phase shift



第2回

$$g = -15 \pm 24 \text{ m/s}^2$$

phase shift



データ範囲が小さく統計が少ない、位相の絶対値を用いているのでエラーが $\pi$ を超えると全範囲を覆ってしまうなど課題がたくさん

## 結論

- $\alpha$ 方向の振動が見えた？
- $g$ の値を求めるのは難しい
- もう少し解析を進める必要がある

## 今後の展望：解析方法

1. 4回の実験結果を一つにまとめて扱う(繰り返し位置決め精度を考慮する 必要?)
2. (up+downのデータ)-(downのデータ)でdownの影響を減らす

$$|\psi_{\text{up}} + \psi_{\text{down}}|^2 = |\psi_{\text{up}}|^2 + \underline{|\psi_{\text{down}}|^2} + \underline{2\text{Re}(\psi_{\text{up}}\psi_{\text{down}}^*)}$$

引き算で消せる項

upとdownの重なり  
の項が出る?

## 今後の展望：解析方法

3. Y方向のカットに加えてX方向もカットしたい
4.  $\lambda$ と $\alpha$ で二次元fitなど、位相の周期性を回避する解析がしたい
5. 反射率の理論式を考慮したfittingがしたい

# 謝辞

一年間ご指導してくださった指導教員の中家さん, 隅田さん, 木河さん

様々な助言をしてくださったTAの菅島さん, 武市さん

実験の計画や当日の測定など実験全般をサポートしていただいた

三島さん, 北口さん, 藤家さん

大変お世話になりました。ありがとうございました。