

多層膜ミラーによる COW効果の測定

齊藤巧磨 松井一堯

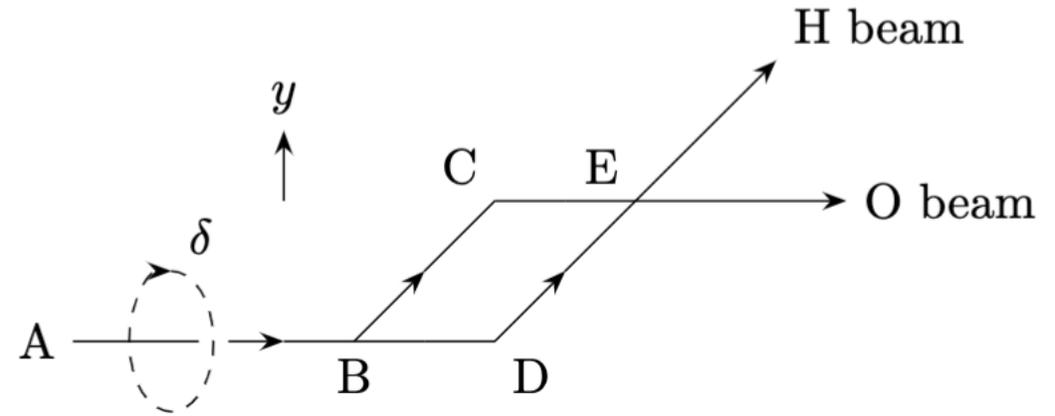
目次

- 原理
- 事前シミュレーション
- 実験
- 結果と考察

COW効果

重力場中の非相対論的中性は Schrödinger 方程式に従う。

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi}{dx^2} + mgy\psi = E\psi$$
$$\psi = \exp \left[\frac{1}{i\hbar} \int \frac{ds}{v} \left(\frac{p^2}{2m} + mgy \right) \right]$$



ループの面積 A に比例する位相差が発生、干渉する。

$$i\Delta\Phi_g := i(\Phi_{BCE} - \Phi_{BDE}) = -\frac{2\pi i \lambda m^2 g A}{h^2} \sin \delta$$

量子力学特有の現象に重力が現れる例。

ハーフミラーとフルミラーで作った系にて四角形が平行四辺形から角度 α 歪むと

- ループの面積が変化
- 経路差が発生

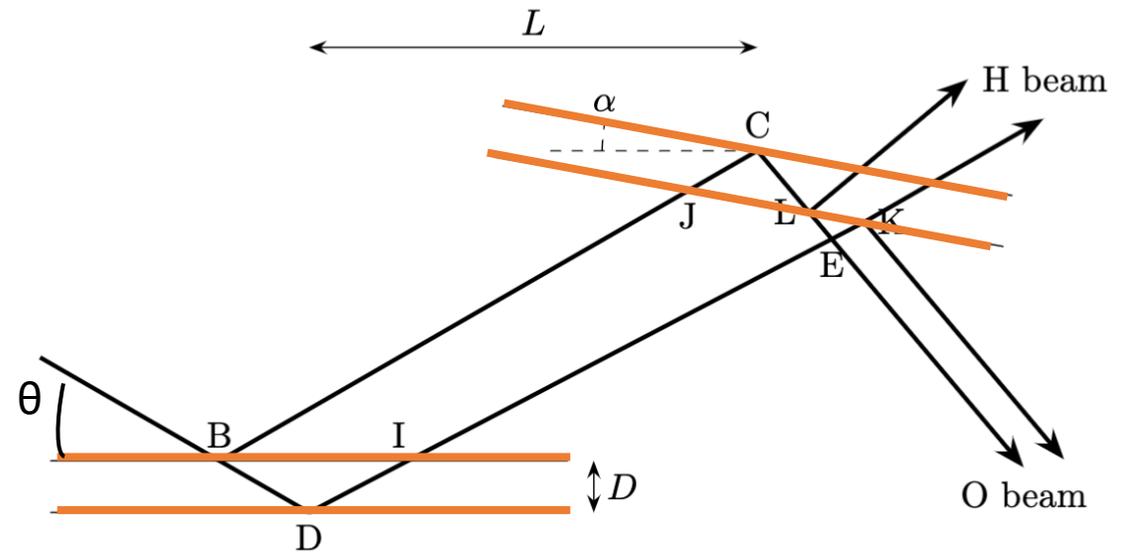
それぞれ考慮して位相差は

$$\Delta\Phi_g \simeq -\frac{2\pi m^2 g \lambda}{h^2} \left(\frac{2DL}{\theta} - \frac{D^2}{2\theta^2} \right)$$

$$\Delta\Phi_\alpha \simeq 4\pi D \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{Nb_c}{2\pi\theta^2} \lambda \right) \alpha$$

$$\Delta\Phi := \Phi_{BCE} - \Phi_{BDE} = \Delta\Phi_g + \Delta\Phi_\alpha$$

と計算できる。



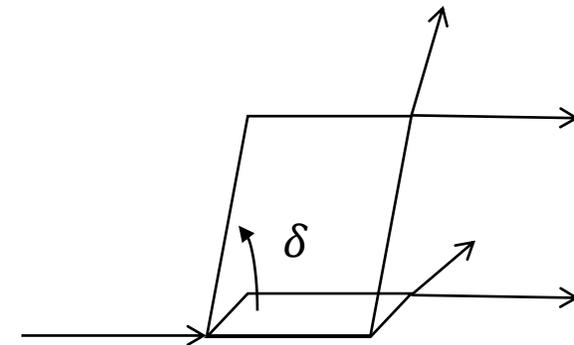
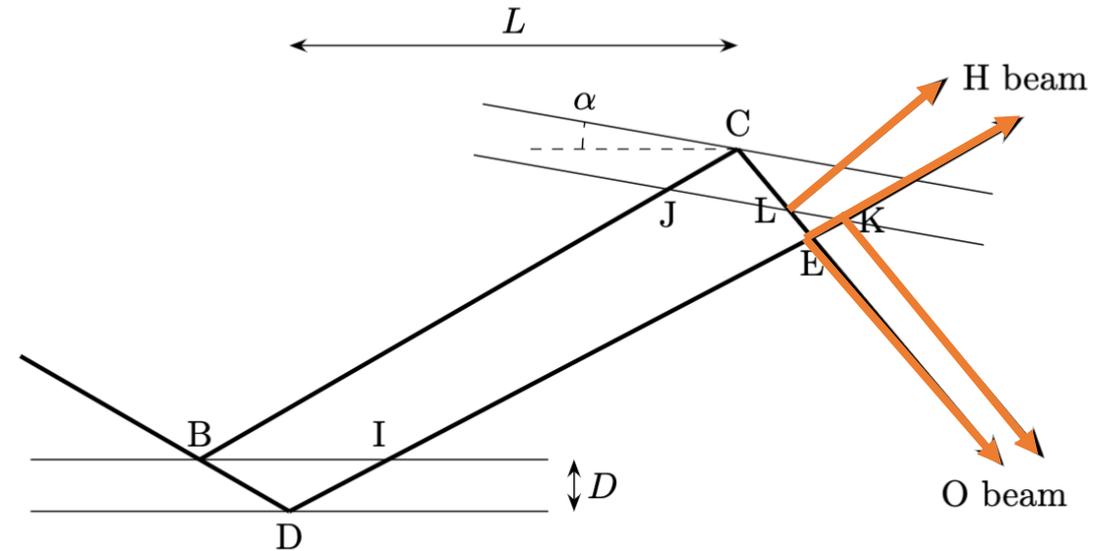
反射・透過による波動関数の位相変化を考慮するとHとOのビーム強度 I_H, I_O を用いて

$$O = \frac{I_H - I_O}{I_H + I_O} \propto \cos \Delta\Phi + \text{const.}$$

から位相差 $\Delta\Phi$ を取り出せる。

COW効果は $\Delta\Phi \propto \lambda \propto \text{TOF}$ なので、

1. $\delta = 0$ (四角形が水平) で $\Delta\Phi = 0$ となるようセットアップを調節
2. $\delta \neq 0$ で TOF と O のグラフを書けば振動が見える



目次

- 原理
- 事前シミュレーション
- 実験
- 結果と考察

波動関数の直接計算

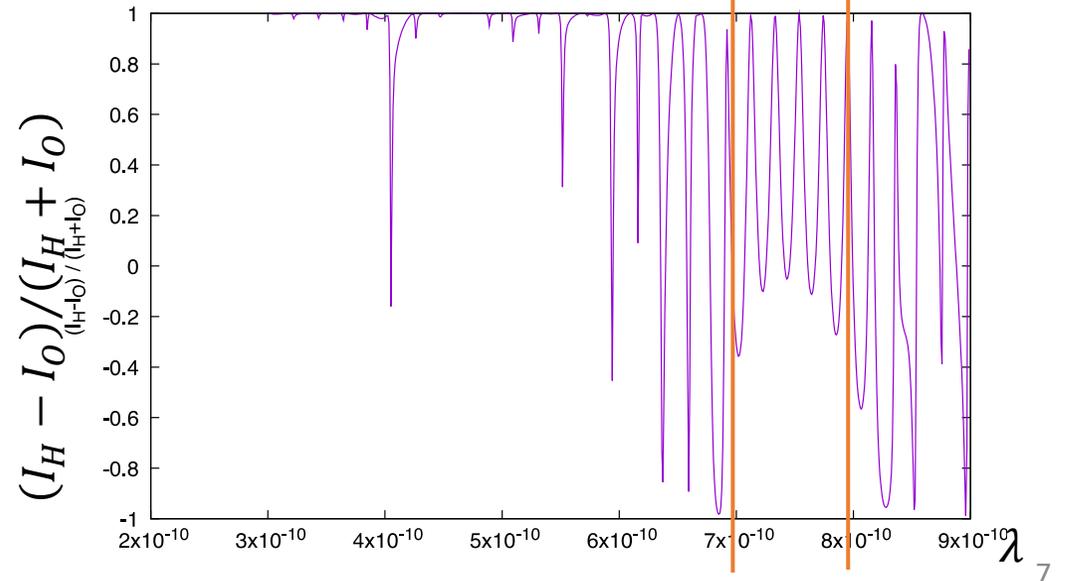
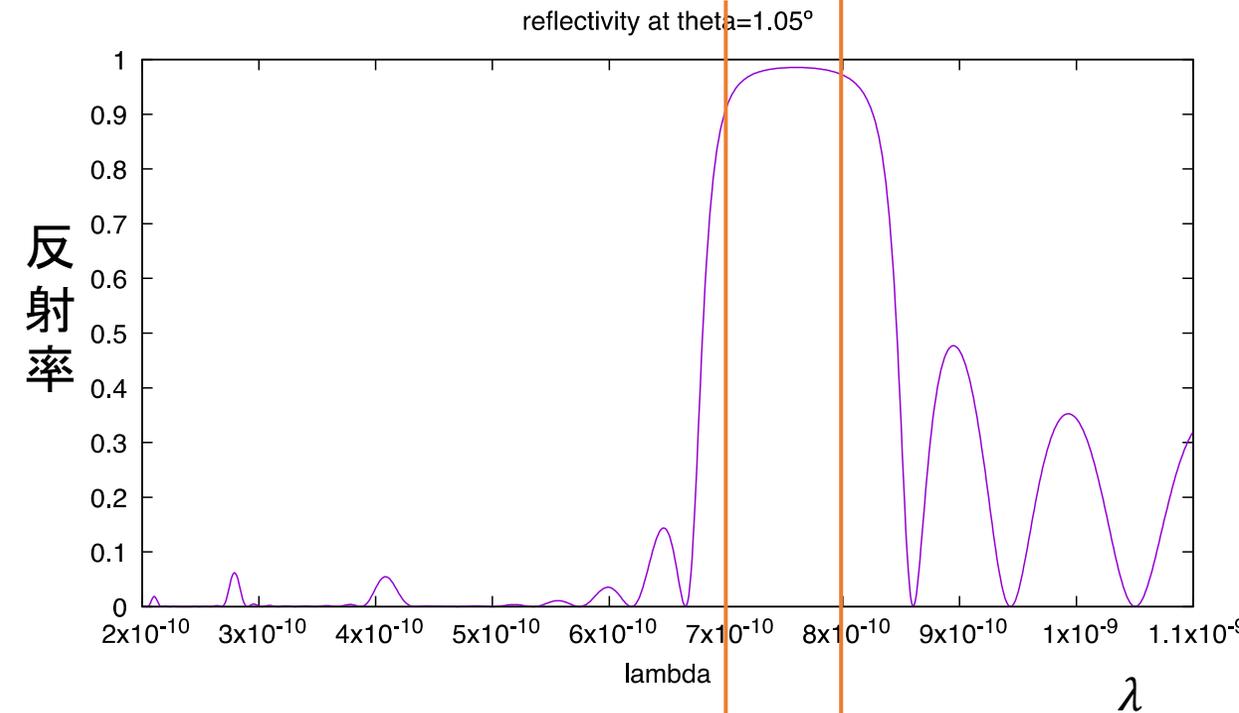
波長 λ ごとに

1. ミラーの反射率・透過率
 2. H/Oビームの波動関数
 3. 各ビームの検出確率
- の順で計算。

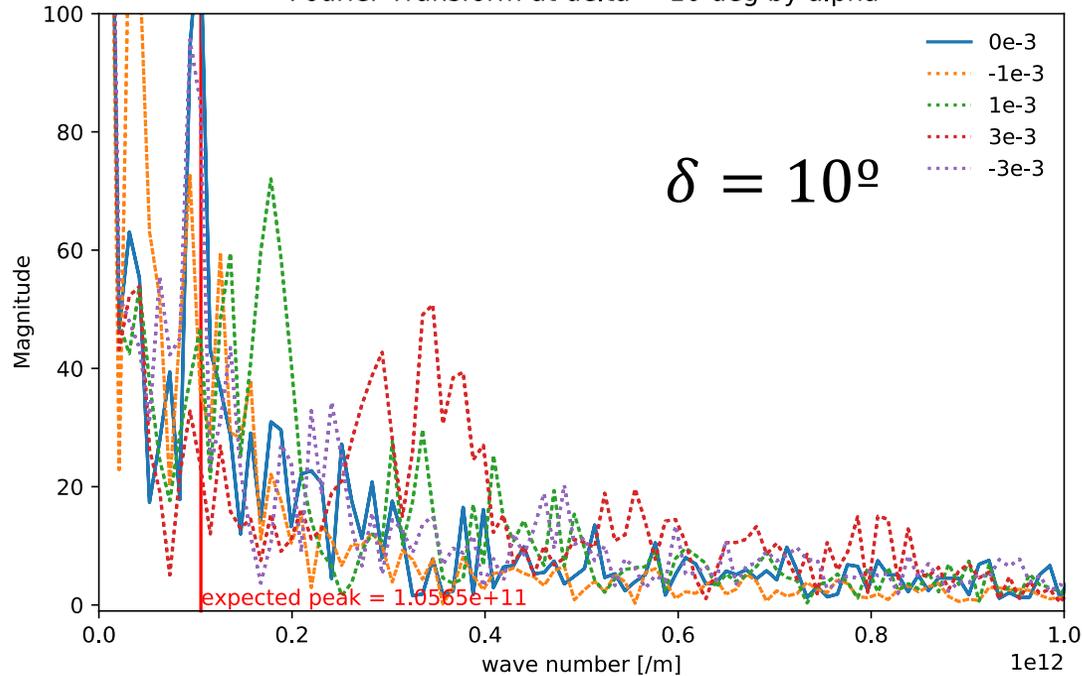
結果は測定時間無限大に相当。

検出確率 \propto ビーム強度なので、計算結果に基づいて $O(\lambda)$ をプロット、さらにFFTで振動成分を抜き出す

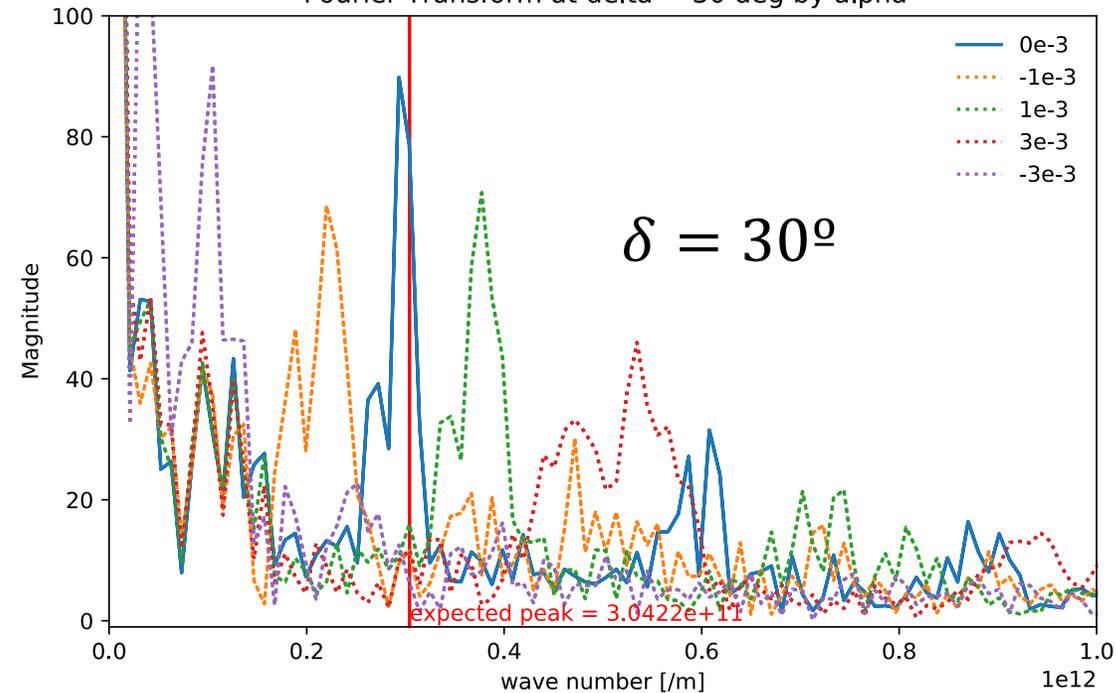
解析には反射率が安定する波長領域を用いる。



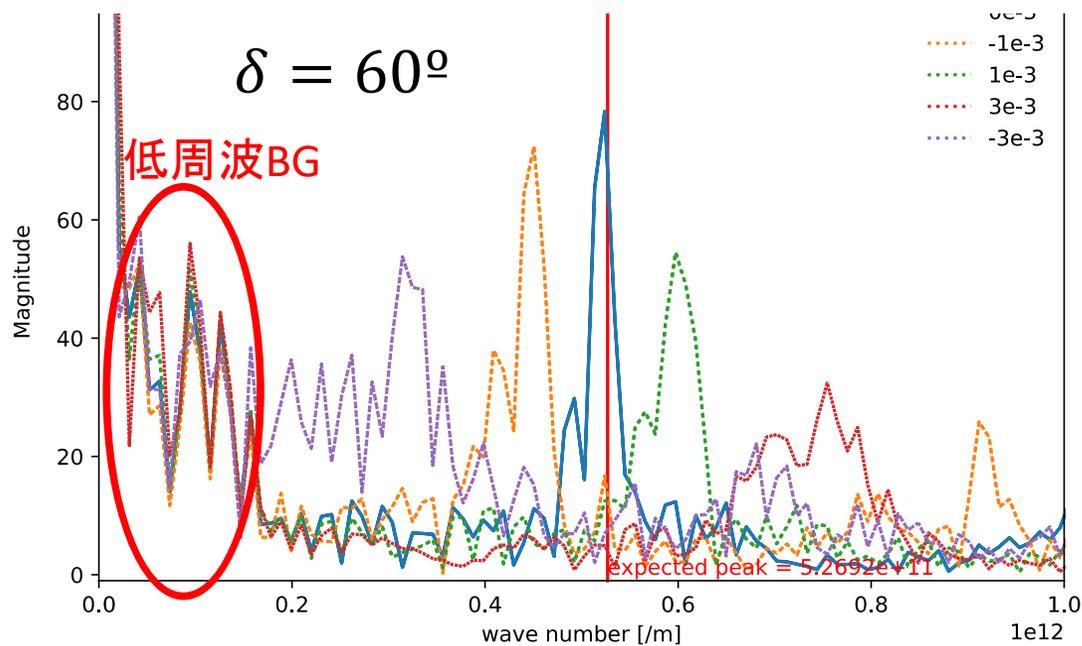
Fourier Transform at delta = 10 deg by alpha



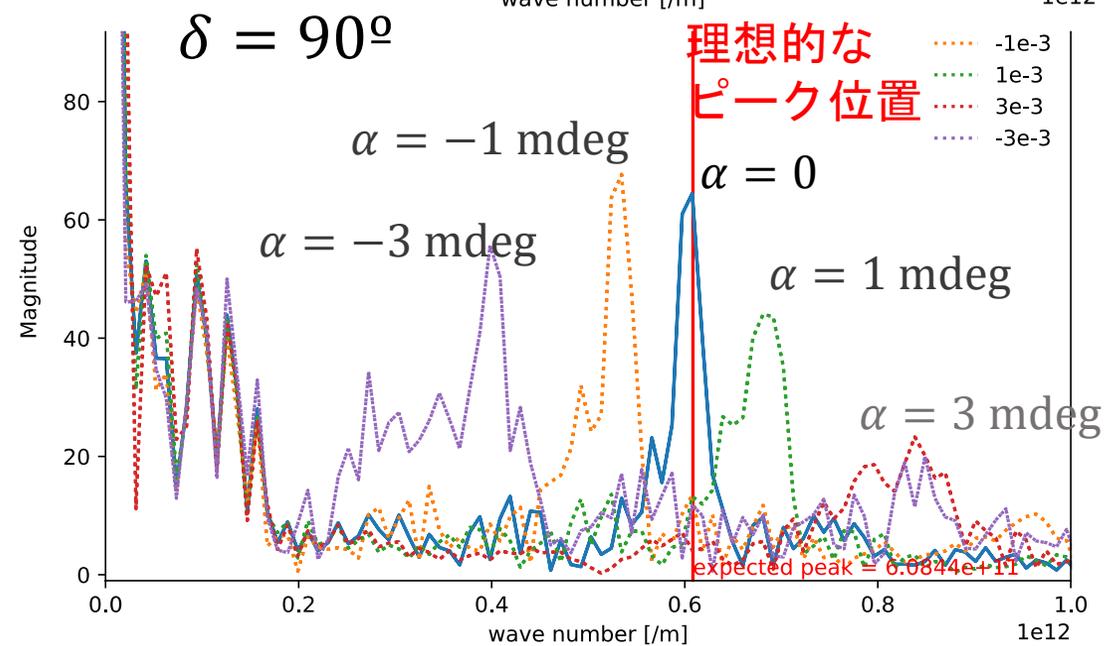
Fourier Transform at delta = 30 deg by alpha



$\delta = 60^\circ$



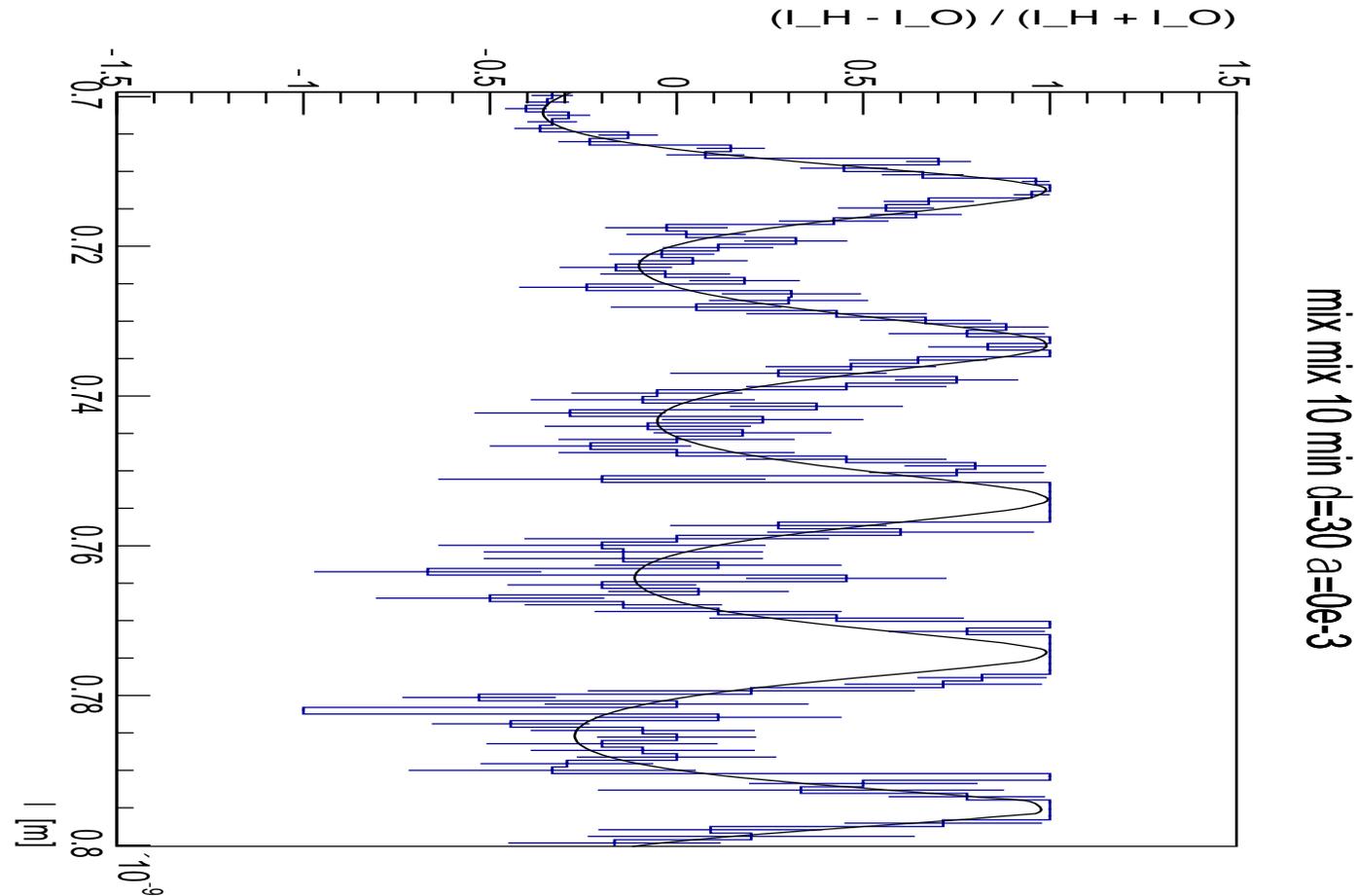
$\delta = 90^\circ$



- 傾斜角 $\delta < 30^\circ$ では見たいピークが低周波数のBGと混ざる
- 平行からのズレ α が 1 mdeg 生じると、重力加速度 g は 35% ズれる

モンテカルロ法で 10 min に相当する粒子数をシミュレートすると右図。

実験では $\delta = 30^\circ$ を 10 min 以上計測する。

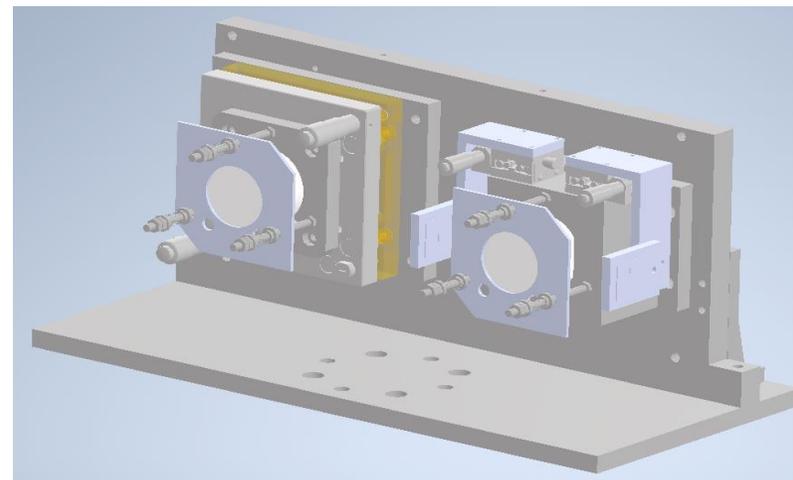
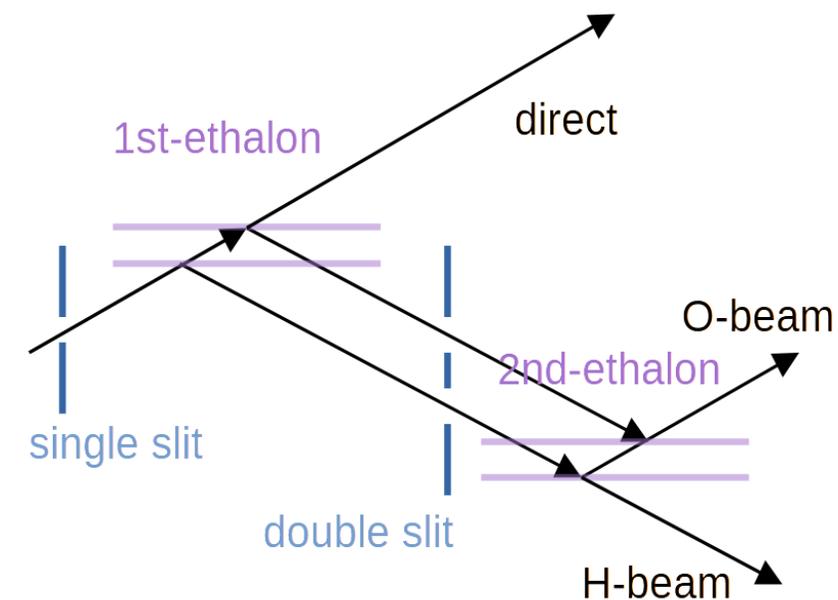


目次

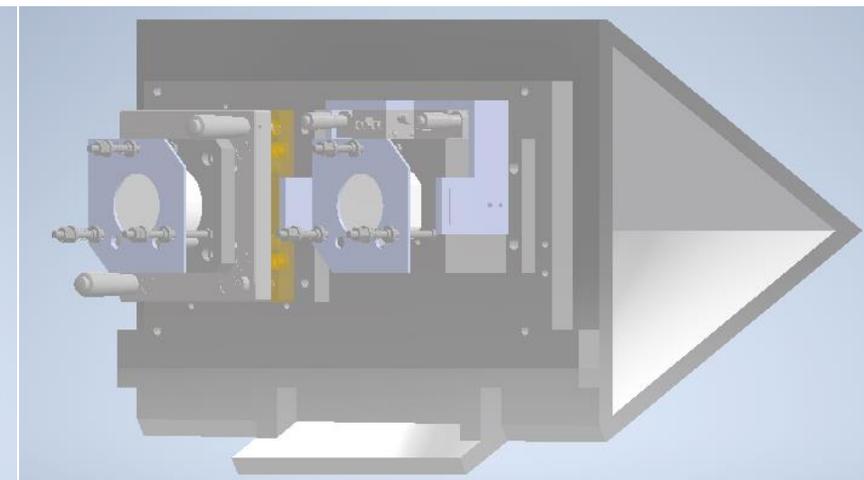
- 原理
- 事前シミュレーション
- 実験
- 結果と考察

実験の基本構想

- $\delta = 0$ で光学系を校正。位相差を可能な限り小さくしておく。
- 干渉計を30deg傾け、前段階の校正が崩れないと仮定して位相差測定、重力加速度を計算。
- 実験ではOビームとHビームの強度を測定



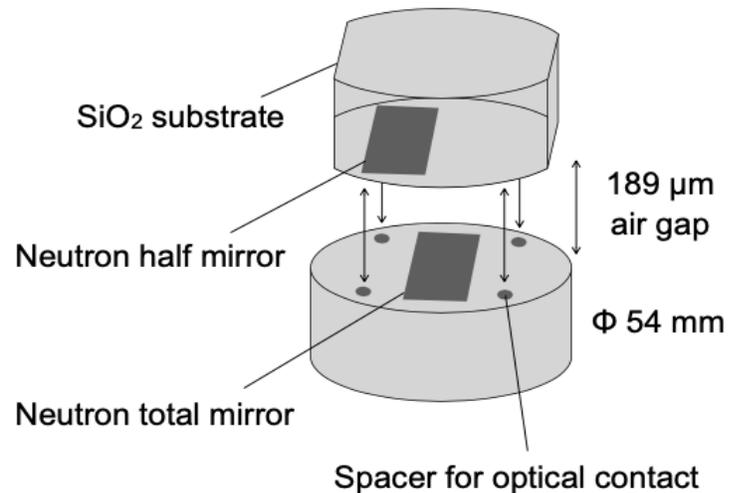
$\delta = 0$



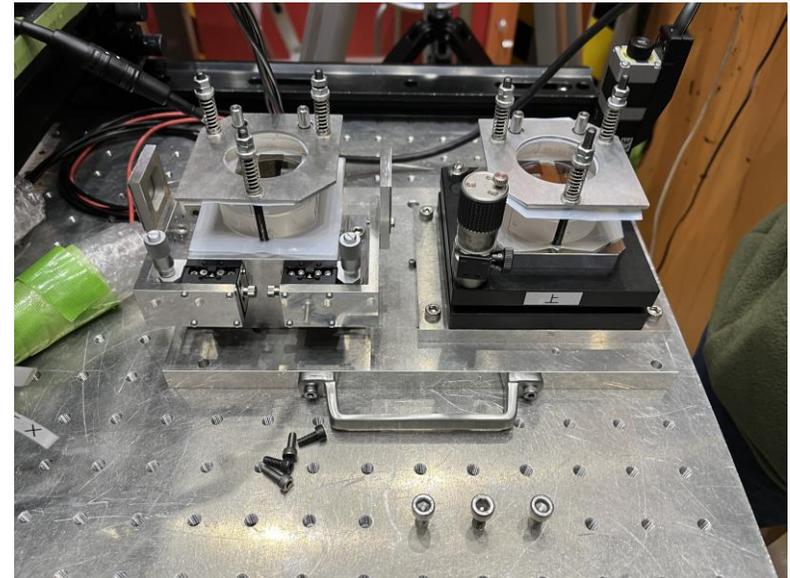
$\delta = 30^\circ$

エアギャップエタロン（名大素粒子物性研より借用）

- 円筒形ガラス、微小の間隙で向かい合わせ。間隙にミラーが向かい合わせで固定。
- ミラーはTiとNiの多層構造。
- 図の削れた部分は透明。中性子線が透過。

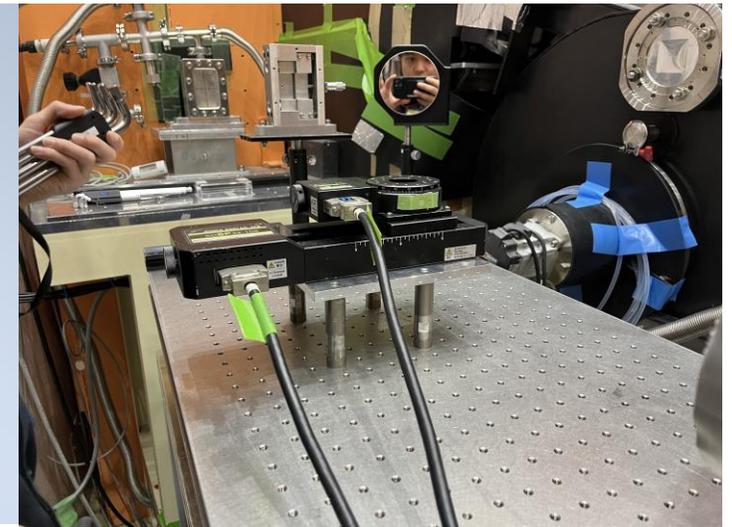
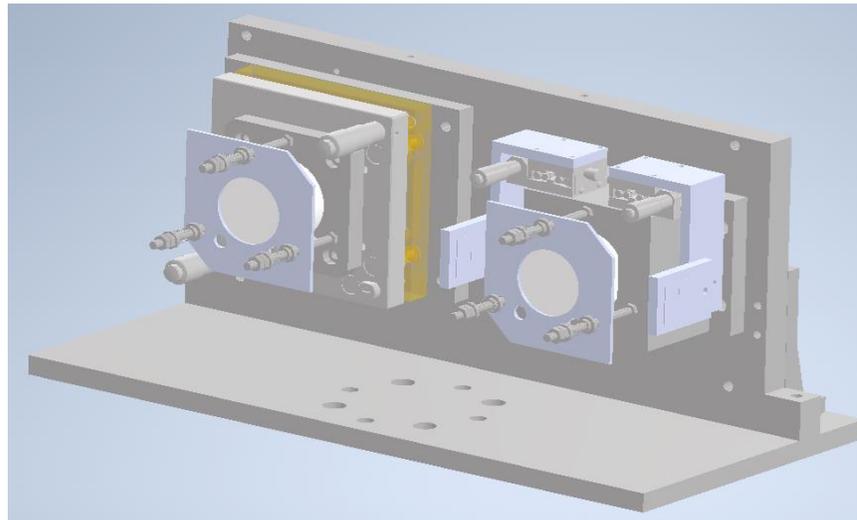
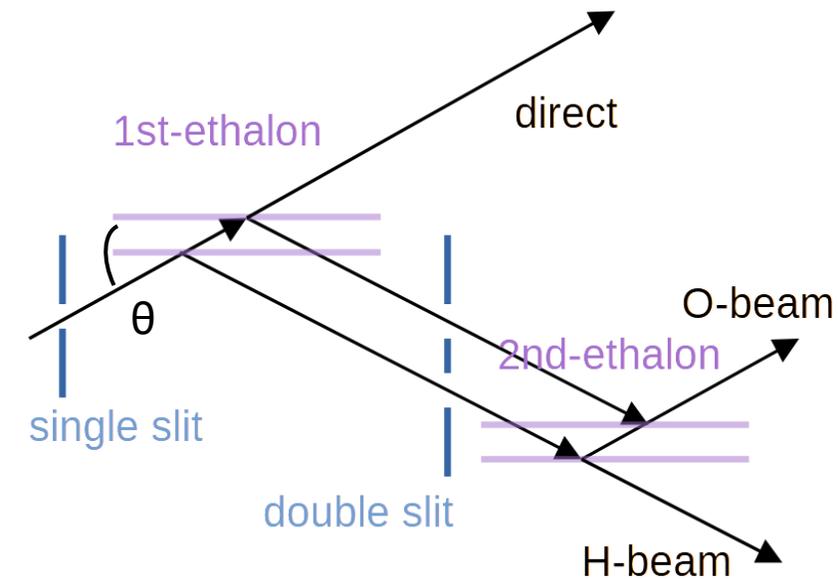


Fujiie, et. al. (2023)



実験 1 : $\delta=0\text{deg}$ 校正

- 1stエタロンのみを設置。中性子ビームを入射角 $\theta=1\text{deg}$ で入射させる。
- single slit を挿入し、反射が見えることを確認。
- double slitを挿入し、反射が見えることを確認。
- 2ndエタロンを設置、1st エタロンと平行になるよう調節。
- H-beamとO-beamの干渉を確認。



実験 1 : $\delta=0\text{deg}$ 校正

1. 1stエタロンのみを設置。中性子ビームを1degで入射させる。(図1)
2. single slit を挿入し、反射が見えることを確認。(図2)
3. double slitを挿入し、反射が見えることを確認。(図3)
4. 2ndエタロンを設置、1st エタロンと平行になるよう調節。(図4)

要差し替え

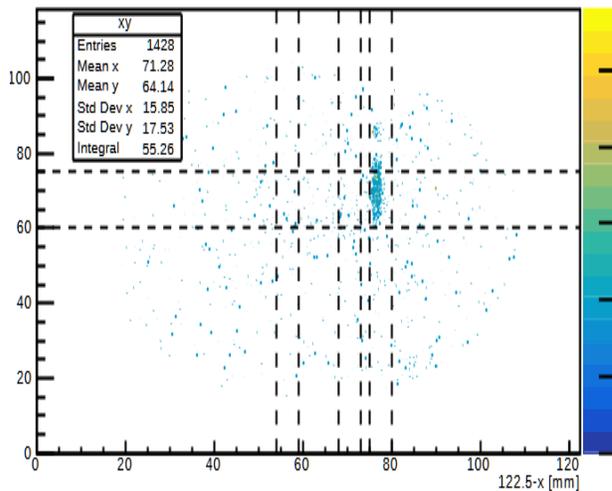


図1

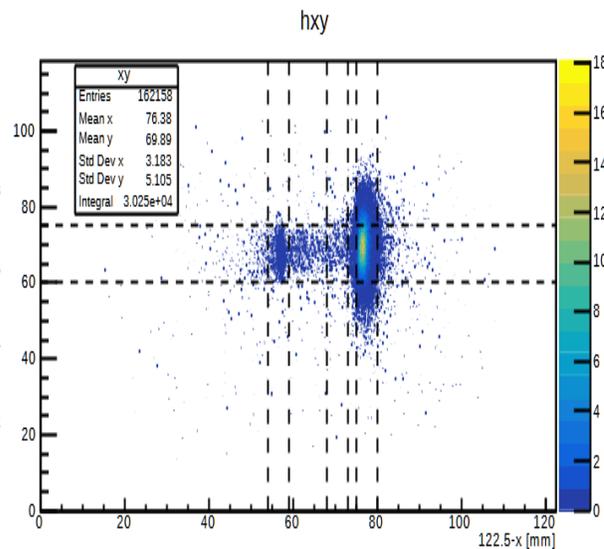


図2

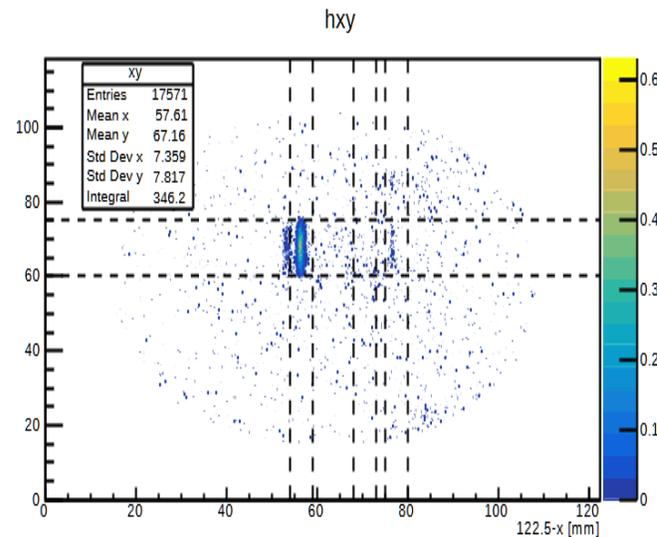


図3

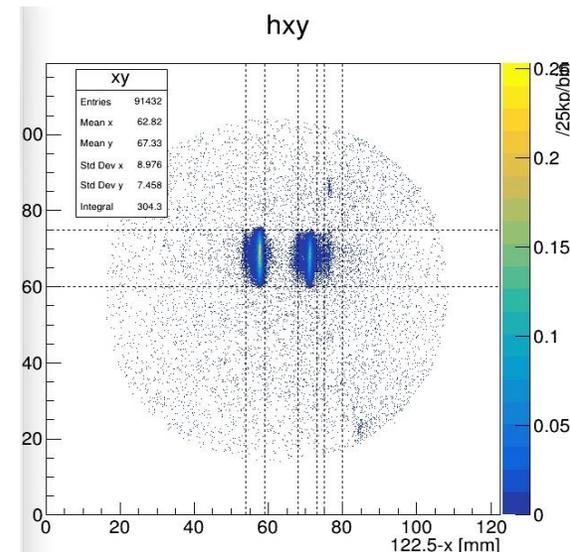


図4

実験 1 : $\delta=0\text{deg}$ 校正

5. H-beamとO-beamの干渉を確認。振動の穏やかなセットアップを特定。

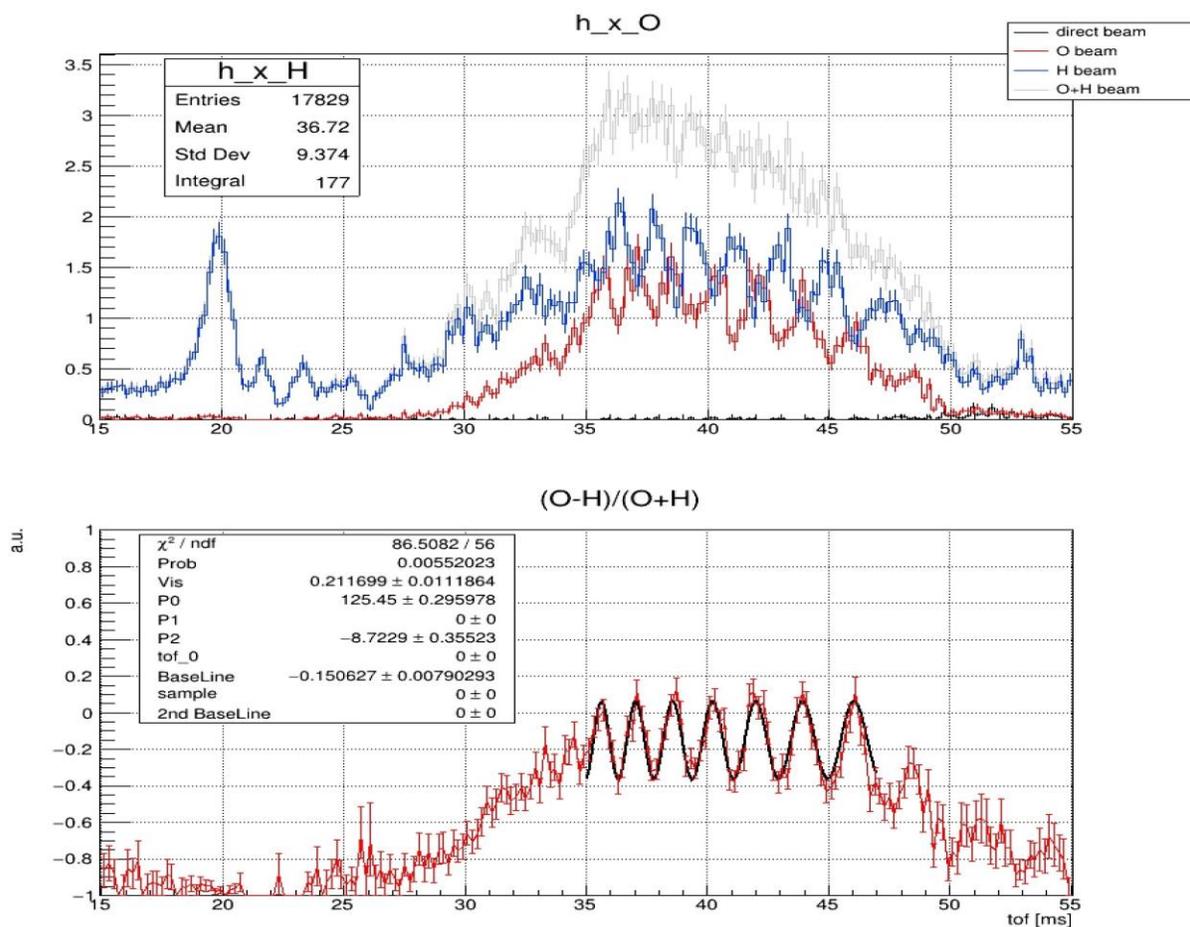


図5

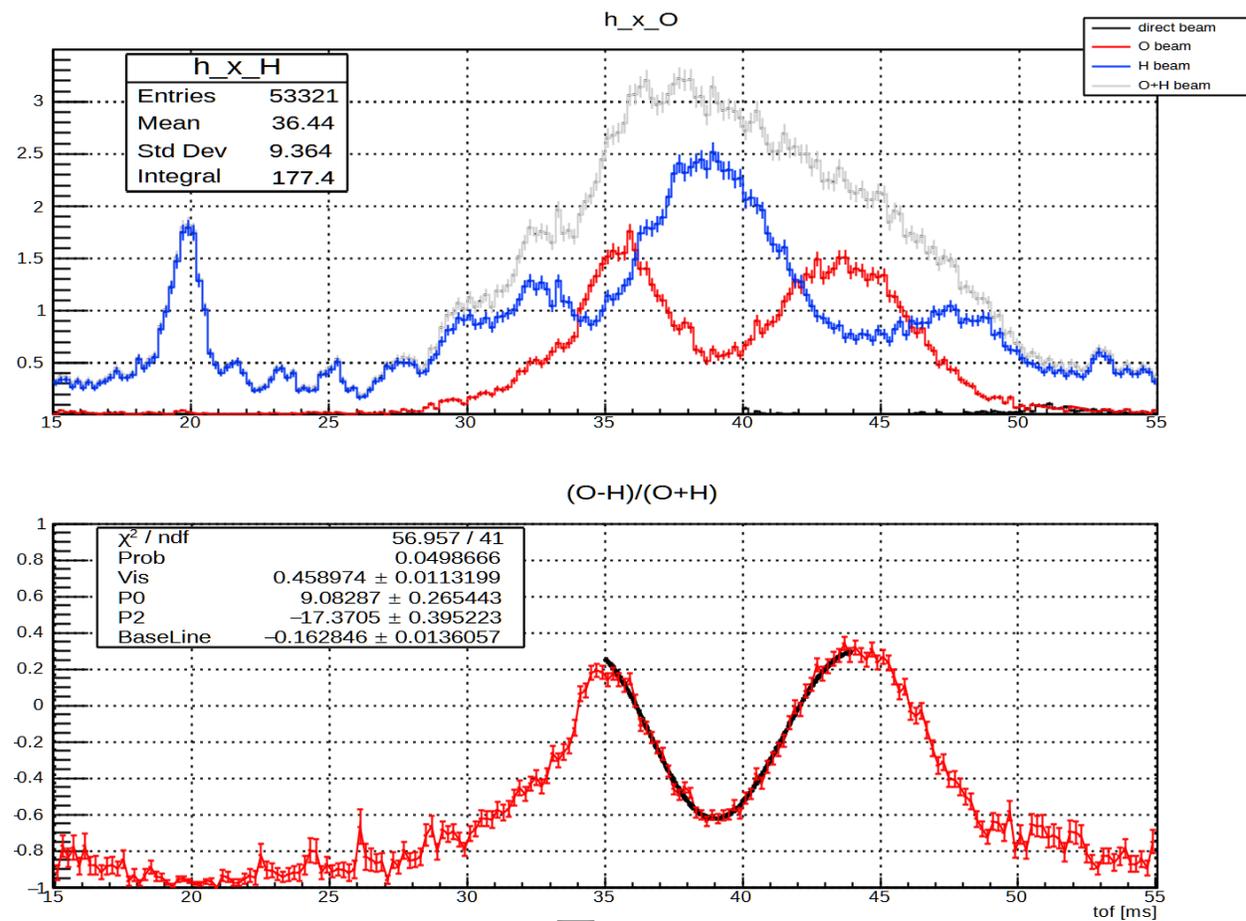
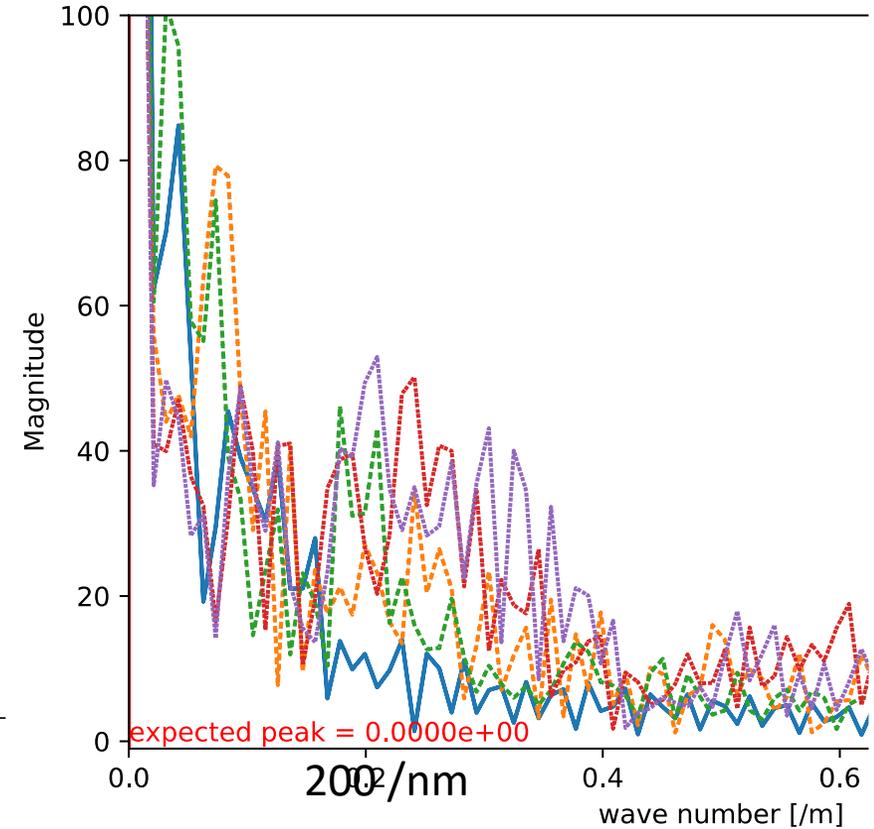
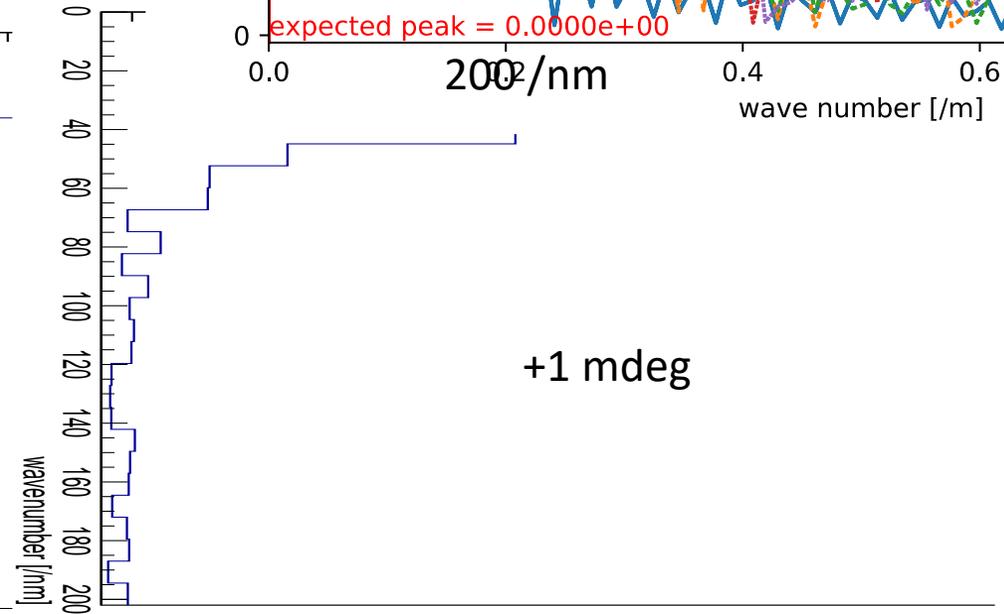
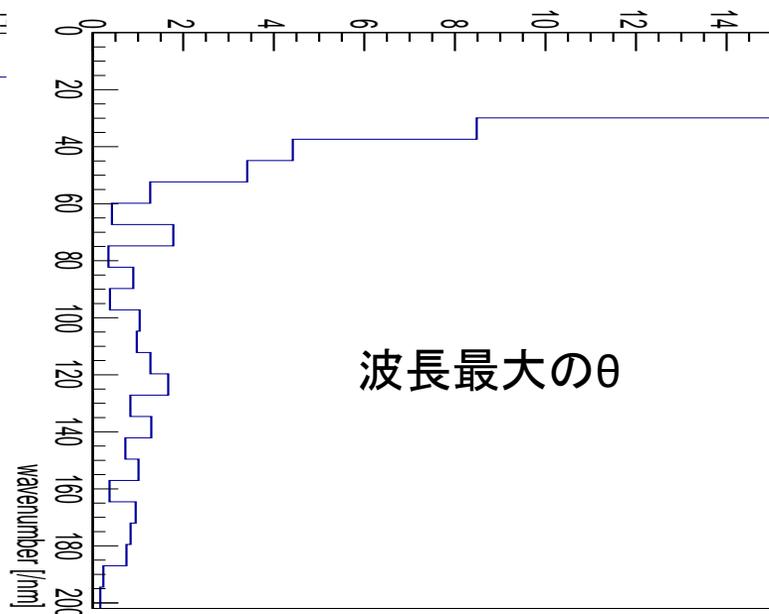
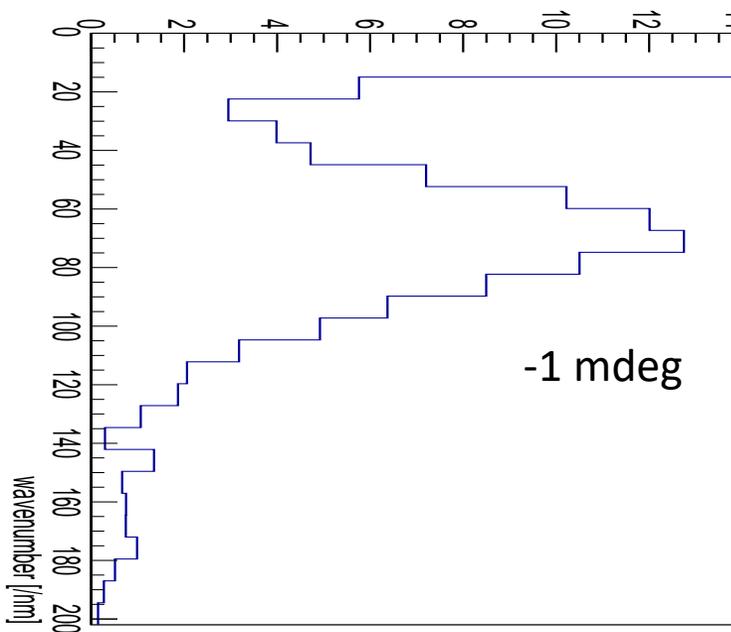


図6

実験 1 : $\delta=0\text{deg}$ 校正

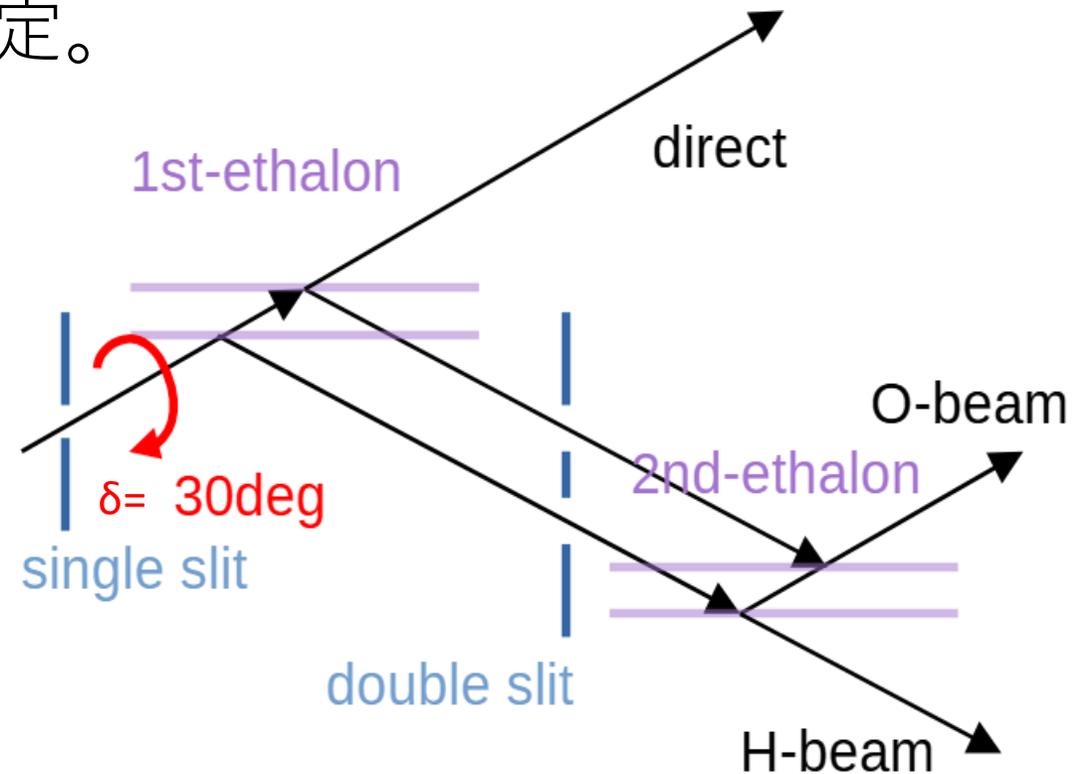
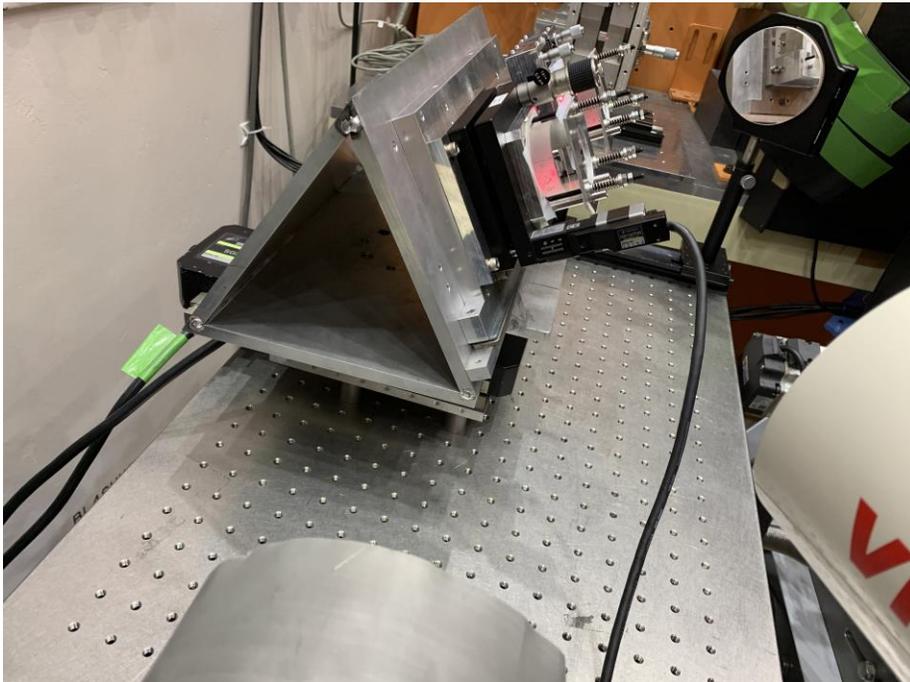
波長最大を取る θ とその前後 $\pm 1\text{ mdeg}$ のFFTによって $\alpha < 1\text{ mdeg}$ を再確認 (事前シミュレーションと照合)

これ以上精度を上げることは非現実的



実験2： $\delta=30\text{deg}$ 測定

1. 干渉計を三角台に設置。平行四辺形の経路は入射軸に対して 30deg 回転。
2. 三角台ごと回転Stageに搭載。
3. 水平位置と δ を微調整して測定。

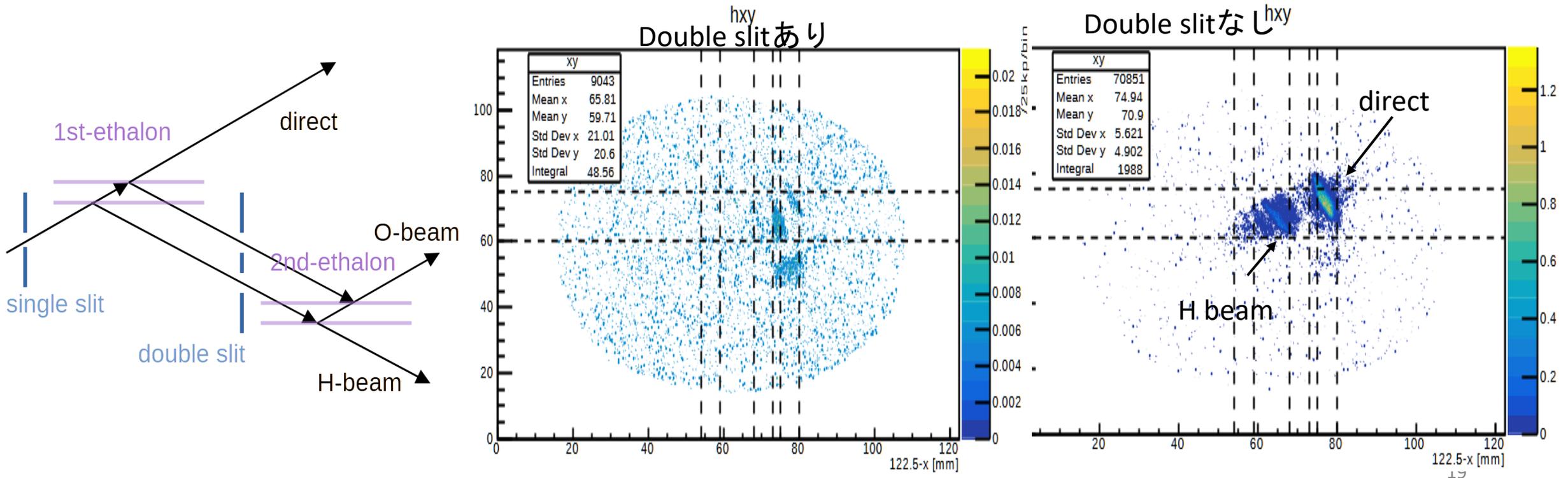


目次

- 原理
- 事前シミュレーション
- 実験
- **結果と考察**

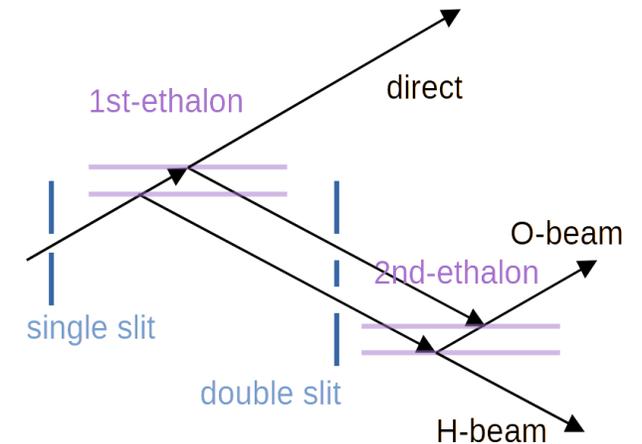
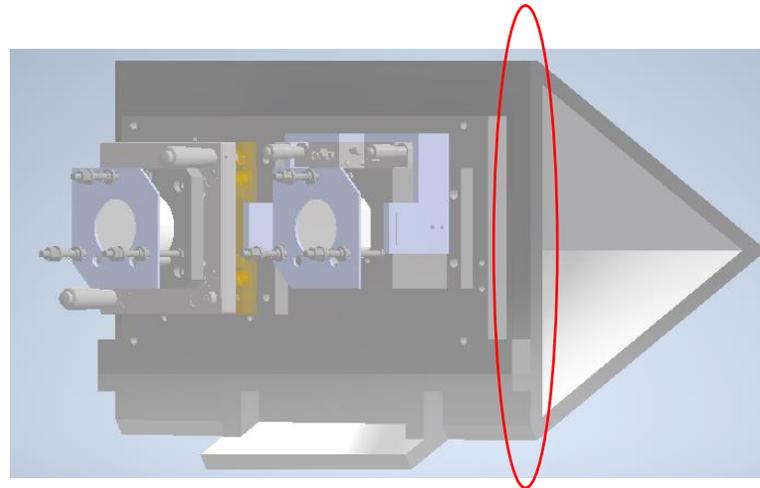
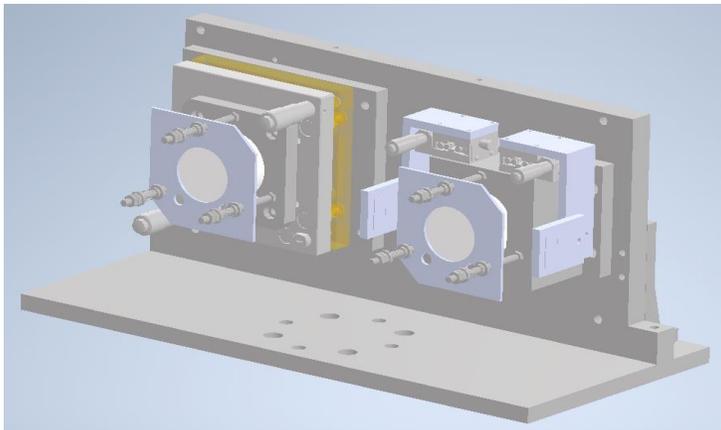
結果と考察

- 単に30deg傾けたときは、**direct**のみ確認された。
- **double slit**を外して測定すると、**direct**と反射信号1つ(H-Beam)が確認された。
- 30deg傾斜させた状態で干渉は観察できなかった。



結果と考察

- ダイレクトと反射が確認できているので、1stエタロンでは反射が起こっていると考えられる。
- 30deg傾斜状態で入射角を厳格に制御できない難点。
- 蝶番機構を活用することで、平行四辺形に垂直な軸で回転可能にできる可能性がある。



謝辞

- 高エネルギー研究室 竹内広樹さん
 - J-PARC MLF 三島賢二先生
 - 名古屋大理学研究科 北口雅暁先生、南部太郎さん、藤家拓大さん
 - 指導教員 中家剛先生、木河達也先生
 - TA 星野大輝さん、有元隼太さん
- 大変お世話になりました