

多層膜ミラーによる COW 効果の検出

齊藤巧磨

松井一堯

2024 年 5 月 7 日

概要

純粋な量子現象に重力が関わるものとして、COW 効果が知られている。[3] 重力ポテンシャルが波動関数の位相に取り入れられ、2つの経路のビームを干渉させることで検出される。この現象は Collela, Overhauser と Werner によって単色熱中性子で検証された。[1] 単結晶の Bragg 反射を用いた従来の実験手法ではセットアップが簡単な一方で、使用できる中性子の波長が離散的になる。本実験では多層膜ミラー [2] を用いてこの問題点を解消することを試みた。

1 測定原理

1.1 中性子の干渉で発生する位相差

地上の中性子は重力ポテンシャルを受け、非相対論的には Hamiltonian が

$$H = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + mgy$$

となる。 \mathbf{p} は運動量、 m は中性子質量、 g は重力加速度でそれぞれ定数、 z は基準面からの高さである。中性子が弧長パラメーター s で表される軌道 $\gamma(s)$ を速さ $v(s)$ で通過するとき、Schrödinger 方程式の解は

$$\varphi = \exp\left[\frac{1}{i\hbar} \int dt \left(\frac{\mathbf{p}^2}{2m} + mgy\right)\right] = \exp\left[\frac{1}{i\hbar} \int_{\gamma} \frac{ds}{v} \left(\frac{\mathbf{p}^2}{2m} + mgy\right)\right]$$

の形で表される。図 1 のような経路を熱中性子が走る場合、中性子を波長 $\lambda = h/mv$ の単色平面波で近似すれば、面積 A の平行四辺形での干渉によって点 E で位相差

$$i\Delta\Phi_g := i(\Phi_{BCE} - \Phi_{BDE}) = \frac{mg}{i\hbar} \oint_{BDEC} ds \frac{z}{v} = -i \frac{2\pi\lambda m^2 g A}{h^2} \sin\delta \quad (1)$$

が生じる。

四角形 BDCE が平行四辺形から歪むと経路長や面積が変わって新たに位相差が生じる。図 2 のようにギャップ D のエタロン 2 組が平行から相対角 α だけずれているとき、(1) に現れる面積を四角形 BDEC で計算すると、

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

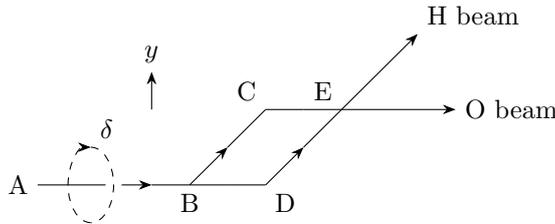


図 1: 中性子の経路。O ビーム、H ビームは共に $A \rightarrow B \rightarrow D \rightarrow E$, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow E$ の経路で進んだ中性子の干渉を反映する。AB を軸に全系を回転させると干渉が変化する。回転角度 δ は平行四辺形が水平面となす角で、図のように平行四辺形が鉛直面内にあるとき $\delta = \pi/2$ とする。 $\delta = \pm\pi/2$ とき干渉が最大で、0 のときは干渉しない。

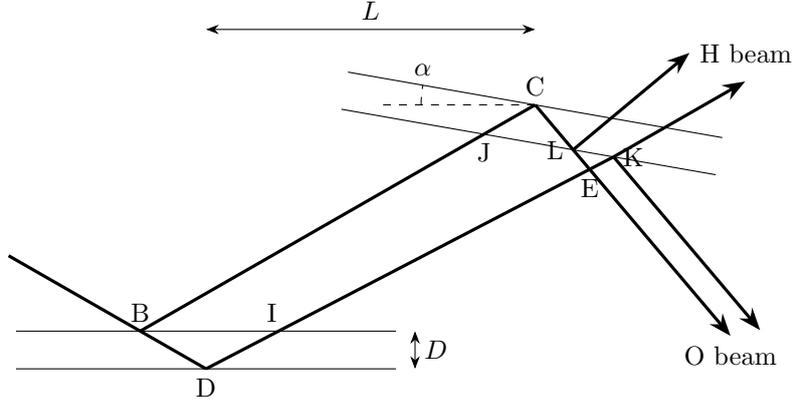


図 2: エタロンの相対角 α によるビーム経路 (太線) の変化。 $\alpha = 0$ のときに点 E, K, L が同一点になる。長さ L は 1 枚目のエタロンと平行に測ったエタロン間距離。

と近似される。加えて経路長の変化により

$$\Delta\Phi_\alpha \simeq 4\pi D \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{N b_c}{2\pi\theta^2} \lambda \right) \alpha \quad (3)$$

が現れる。これは屈折率

$$n \simeq 1 - \frac{\lambda^2 N b_c}{2\pi}$$

による効果を表し、 N, b_c はそれぞれ原子密度、中性子-原子核の散乱長である。[2] 本実験の装置は α を自由に変更することができ、 $\alpha = 0$ に設定されている保証はない。位相差は (2) と (3) の和

$$\Delta\Phi = \Phi_{BCE} - \Phi_{BDE} = \Delta\Phi_g + \Delta\Phi_\alpha \quad (4)$$

が実測される。

B, C, D, E 各点での反射や透過による位相の変化を考慮しても、上述の位相差を取り出せる。図 3 のような散乱体において入射、反射、透過の波動関数の間に

$$\begin{pmatrix} \psi_o^1 \\ \psi_o^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r & t \\ t' & r' \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \psi_i^1 \\ \psi_i^2 \end{pmatrix}$$

の関係があるとする。確率の保存から行列はユニタリでなければならず、

$$|r|^2 = |r'|^2 = 1 - |t|^2 = 1 - |t'|^2, \quad r^*t + r't'^* = r^*t' + r't^* = 0 \quad (5)$$

を満たす。ハーフミラーと全反射ミラーはそれぞれ同一のものであるとして、それぞれに対応する行列を

$$\begin{pmatrix} r & t \\ t' & r' \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} R & T \\ T' & R' \end{pmatrix}$$

とすれば、点 B にて波動関数 Ψ_0 だったものは点 E にて

$$\begin{cases} \Psi_H = \Psi_0 (r_B t'_J R_C r'_L e^{i\Phi_{BCE}} + t'_B R_D t_I t'_K e^{i\Phi_{BDE}}) \\ \Psi_O = \Psi_0 (r_B t'_J R_C t_L e^{i\Phi_{BCE}} + t'_B R_D t_I r_K e^{i\Phi_{BDE}}) \end{cases}$$

となる。 $|\Psi_0|^2 = 1$ として (5) を利用すると、ビーム強度は

$$\begin{cases} I_H = |R|^2 |t|^2 (|r|^4 + |t|^4 - 2|r|^2 |t|^2 \cos(\Phi_{BCE} - \Phi_{BDE})) \\ I_O = 2|r|^2 |R|^2 |t|^4 (1 + \cos(\Phi_{BCE} - \Phi_{BDE})) \end{cases}$$

である。ビーム強度は λ の関数として表されるので、

$$\mathcal{O}(\lambda) := \frac{I_H - I_O}{I_H + I_O} = (|r|^2 - |t|^2)^2 - 4|r|^2 |t|^2 \cos(\Delta\Phi) \quad (6)$$

となり、 λ と比較すれば、位相差 $\Delta\Phi$ を取得できる。

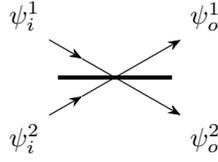


図 3: 入射・反射・透過波の波動関数。上面を表とする。

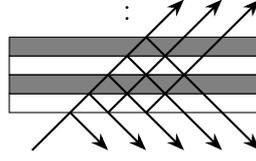


図 4: 多層膜ミラーの構造とビームの反射・透過。

1.2 多層膜ミラーの反射・透過特性

多層膜ミラーの反射・透過率は 1 次元ポテンシャル問題として計算できる。本研究で使用したミラーは 4 のようにガラスに Ti と Ni を積層しているものであり、それぞれ層の内部では中性子に optical potential がかかる。[4] V_i と k_i を i 番目の層における optical potential および波数の垂直成分、入射粒子の波数を k とすると、エネルギー保存から

$$k^2 = k_j^2 + \frac{2mV_j}{\hbar^2}$$

を得る。 $n_j^2 := k_j^2/k^2$, $\zeta := kx$ とすると、エネルギー E で入射した中性子の Schrödinger 方程式は

$$\frac{d^2\Psi_j}{d\zeta^2} = \frac{2m(V_j - E)}{\hbar^2 k^2} \Psi_j(\zeta) = -n_j^2 \Psi_j(\zeta)$$

と表せ、第 j 層と第 $j+1$ 層の波動関数の間には

$$\begin{pmatrix} \Psi_{j+1} \\ \Psi'_{j+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos n_j \delta_j & n_j^{-1} \sin n_j \delta_j \\ -n_j \sin n_j \delta_j & \cos n_j \delta_j \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Psi_j \\ \Psi'_j \end{pmatrix} = M_j \begin{pmatrix} \Psi_j \\ \Psi'_j \end{pmatrix}$$

の関係が成り立つ。よって全ての層を通して

$$\begin{pmatrix} \Psi_g \\ \Psi'_g \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} \Psi_0 \\ \Psi'_0 \end{pmatrix} \quad \left[M = M_N \cdots M_2 M_1 = \begin{pmatrix} M_{11} & M_{12} \\ M_{21} & M_{22} \end{pmatrix} \right]$$

と書ける。 $\Psi_0 = e^{ik\zeta_0} + R e^{-ik\zeta_0}$, $\Psi_g = T e^{ik(\zeta+\zeta_0)}$ となる R, T を求めると、

$$\begin{aligned} R &= \frac{(M_{21} + ikM_{22}) - ik(M_{11} + ikM_{12})}{ik(M_{11} - ikM_{12}) - (M_{21} - ikM_{22})} \\ T &= \frac{2e^{-ik\zeta} ik}{ik(M_{11} - ikM_{12}) - (M_{21} - ikM_{22})} \end{aligned} \quad (7)$$

を得る。

これをもとに本研究で用いるミラーの反射率を入射角 θ , 波長 λ ごとに計算すると、図 5 のようになった。実験には反射率が安定している波長帯を与える入射角が望ましい。(2) の角度依存性、使用する中性子ビームの波長帯、先行研究 [2] でのセットアップを合わせて考慮し、事前シミュレーションでは $\theta = 1.05^\circ$ を採用した。

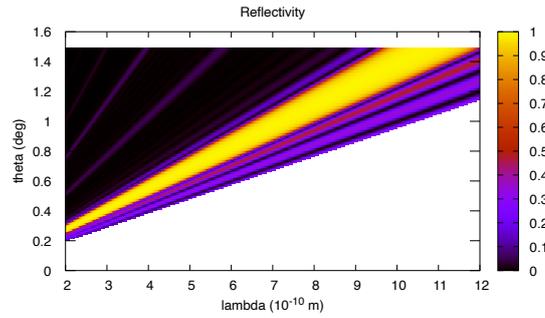


図 5: ミラーの反射率。計算にあたって [4] を参考にした。

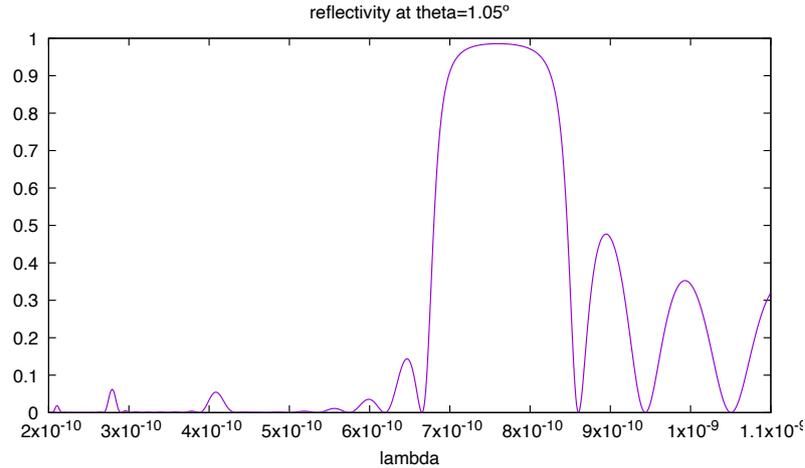


図 6: 入射角 $\theta = 1.05^\circ$ におけるミラーの反射率。

2 数値計算による実験方法の検討

図 5 に示すようにミラーの反射率、透過率は中性子の波長 λ や入射角 θ に大きく依存するため、手計算で実験結果を予測するのは非現実的である。そこで実験に先立ち、

- 波動関数の直接計算による確率分布の計算
- 確率分布に基づくモンテカルロシミュレーション

を行った。

2.1 波動関数の直接計算

はじめに、波動関数を直接計算して (6) の $\theta(\lambda)$ の分布を計算した。計算は

1. 波長を決定
2. (7) からミラーの反射率・透過率を計算
3. 図 2 点 E における H ビーム、O ビームの波動関数を計算
4. ビームの検出確率を計算
5. $\theta(\lambda)$ を計算
6. $\theta(\lambda)$ を高速フーリエ変換

の順に行った。図 6 をもとに、 $\theta(\lambda)$ のフーリエ変換は反射率が安定する $7 \times 10^{-10} \text{ m} \leq \lambda \leq 8 \times 10^{-10} \text{ m}$ の範囲で行う。シミュレーション結果は測定時間無限大に相当する。

δ, α を変えて計算したところ、 $\theta(\lambda)$ のフーリエ変換は図 7 のようになった。

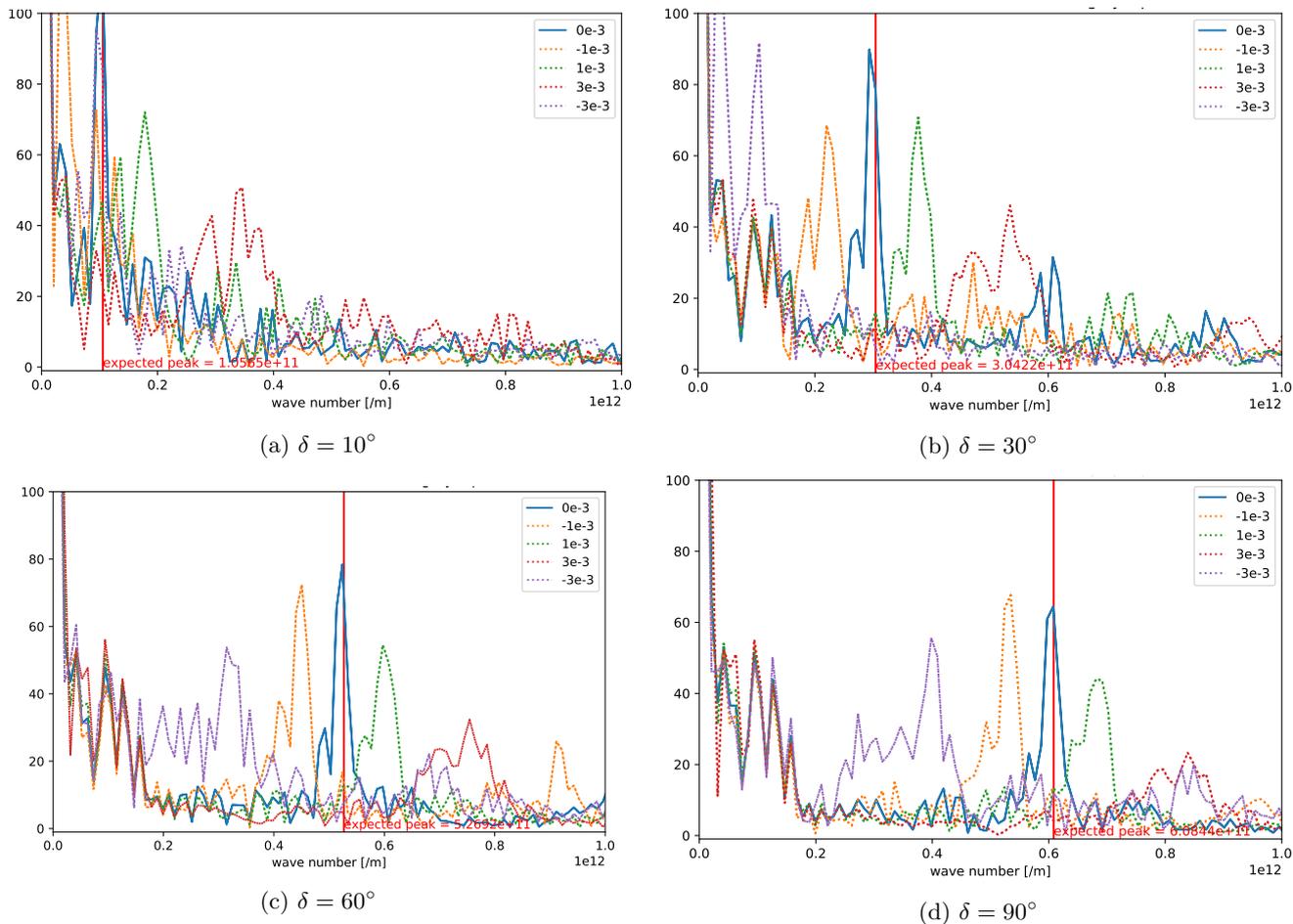


図 7: $\theta(\lambda)$ のフーリエ変換。赤の縦線は (1) から予想されるピーク位置を表す。青の実線が $\alpha = 0$ の場合であり、紫、黄、緑、茶の点線がそれぞれ $\alpha = -3 \text{ m deg}$, -1 m deg , 1 m deg , 3 m deg に対応する。

δ を変更しても $2 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$ 以下の低周波数領域がバックグラウンドとして残っている。バックグラウンドは主に FFT を行なっている波長領域 $7 \times 10^{-10} \text{ m} \leq \lambda \leq 8 \times 10^{-10} \text{ nm}$ におけるミラーの反射率から由来しているものと考えられる。 $\delta < 30^\circ$ ではピークがバックグラウンドと重なるため重力の効果のみを分離することが難しい。一方で δ を大きくすると特に大きい α でピークが低く広がるため傾斜角度は小さい方が望ましい。加えて今回用いるビームの形状とアラインメントでは $\delta > 30^\circ$ にてミラーの一部がビームからはみ出るため統計量を稼げなくなる。以上を考慮して、本実験では $\delta = 0$ と $\delta = 30^\circ$ を比較することで重力の効果を検証する。

2.2 モンテカルロシミュレーション

統計誤差を見積もるため、2.1 で求めた確率分布に従いモンテカルロシミュレーションを行った。2.1 の確率分布の計算と合わせたアルゴリズムは図 8 の通りである。

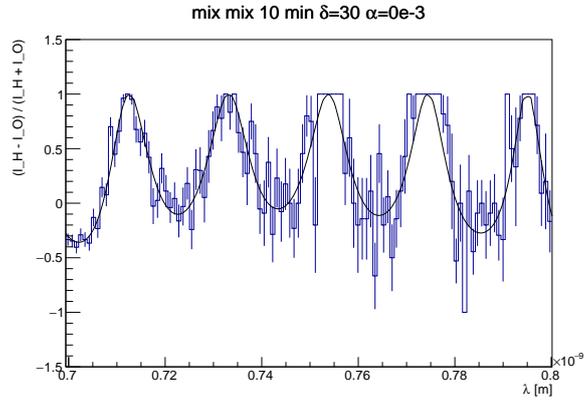


図 9: モンテカルロシミュレーションから求めた $\theta(\lambda)$ 分布と理論曲線。

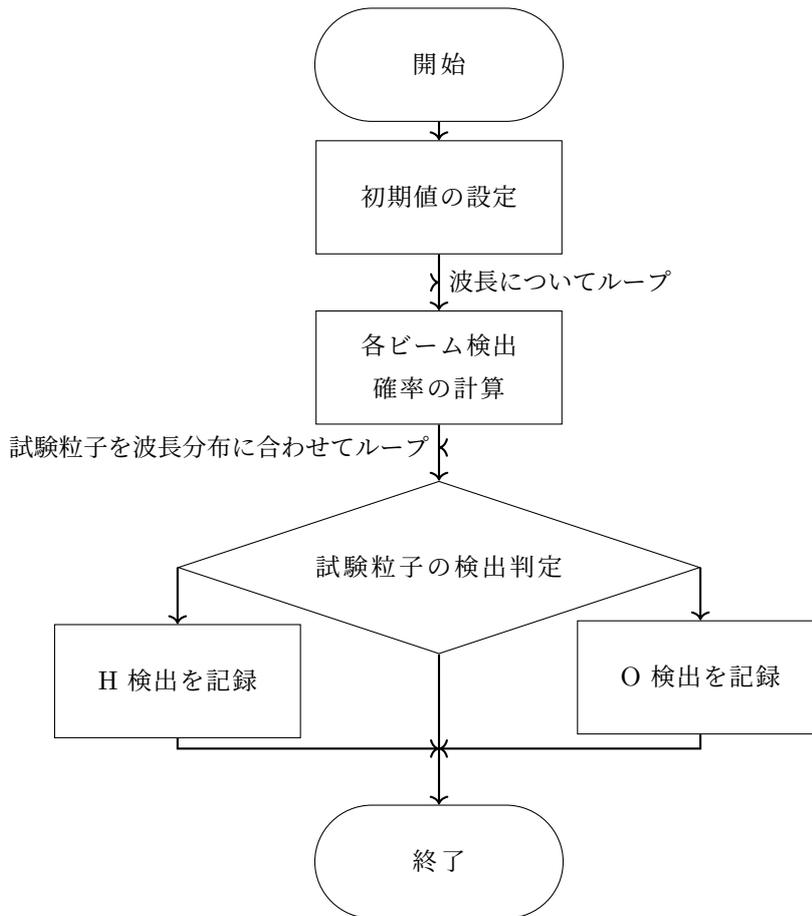


図 8: モンテカルロシミュレーションのアルゴリズム。波動関数を直接計算することでビームの検出確率 (3 段目) を導出し、2.1 の計算に用いる。ビームの波長分布に合わせて試験粒子をランダムに生成し、直前で求めた各ビームの検出確率に従って検出を判定、記録する (5 段目)。検出記録は 2.2 に使用する。

ビームの波長分布に応じた個数の試験粒子を用意し、2.1 で計算した検出確率に応じてランダムに分配した。10 分に相当する粒子数で計算した結果、 $\theta(\lambda)$ は図 9 のようになった。

以上を踏まえて、本実験では $\delta = 0$ と $\delta = 30^\circ$ で 10 min 以上計測し、フーリエ成分を比較、重力加速度を逆算して $g = 9.8 \text{ m/s}^2$ と照合する。

3 実験装置

特記がないものは全て JPARC の物質生命科学実験施設 (以下 MLF) の中性子光学基礎物理実験装置 (以下 BL05) の装置、備品を使用。

- 1° MLF BL05 の中性子ビーム。
- 2° 低発散ビームブランチ用中性子ビーム成形 B_4C スリット。スリットの高さ 80mm、幅は最大 20mm。
- 3° 中性子干渉計。コンピュータで位置調節ができる。詳細は後述。
- 4° 中性子検出器。上下左右の位置をコンピュータ制御できる。
- 5° 校正用天体望遠鏡 (以下望遠鏡)。接眼レンズ相当位置に緑色レーザー光源とカメラが取り付けられ、対物レンズ側から外側への平面光照射、対物レンズからの入射光検出が可能。カメラ映像はコンピュータでモニタリングできる。
- 6° 校正用赤色レーザー光源 (以下レーザー光源)。レーザー軸が中性子ビーム軸上に重なり、ビーム源と正対する位置に設置*1。
- 7° 校正用円状平面鏡 (以下鏡)。鏡面は鉛直方向に平行で、鉛直軸と鏡面に平行な水平軸で回転可能。
- 8° 書き込みのない白い紙。
- 9° 自作の三角台 (下図も参照)。詳細は後述。※ MLF 所有でなく、実験者設計。

以上の装置の位置関係は、鉛直上方から見た場合以下の概略図の通り。ただし、白い紙と三角台については後述するため省略し、煩雑を避けるために検出器の位置制御、干渉計の位置制御、望遠鏡のカメラモニタリングに用いるコンピュータも省略した。右下のグラフはこの系での座標名、回転角名である。

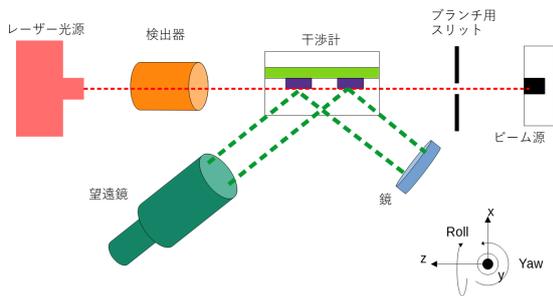


図 10: 実験装置の配置概要

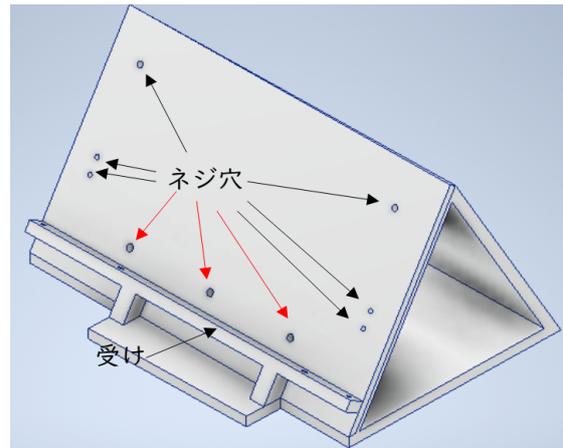


図 11: 自作の三角台見取り図

■干渉計について 干渉計は大体次の三つで構成される。

- 1° 干渉計本体。図??で 4 つの孔の空いたアルミ板から上の機構。アルミ板とその上の部分とは着脱可能である。
- 2° Yaw 軸回転ステージ。シグマ光機製 SGSP-80Yaw。回転面上に上記アルミ板が取り付けられている。
- 3° X 軸スライドステージ。シグマ光機製 SGSP33-100。回転ステージが固定されている。

図 12 には、実験操作でビーム経路の構築に関わる single slit、1st ethalon、double slit、2nd ethalon の 4 つについても示した。これらについて、以下を注意しておく。

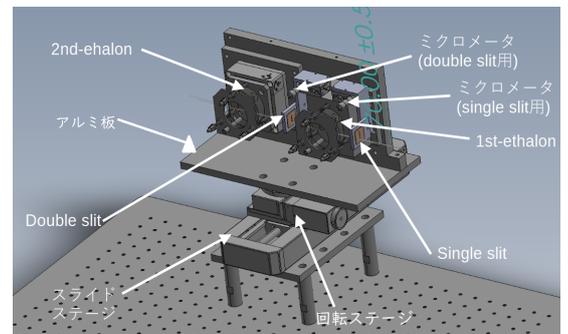


図 12: 干渉計の詳細。右側がビーム源側。

*1 本来は実験者が設置するが、今回は直前の実験者が設置した状態を引き継いで使用した。

- これらはいずれも着脱可能である。
- slit はいずれも x 軸方向にマイクロメータで併進させられる。
- 2nd ethalon は Yaw 軸回転をコンピュータ制御で、Roll 回転をマイクロメータで調節可能。

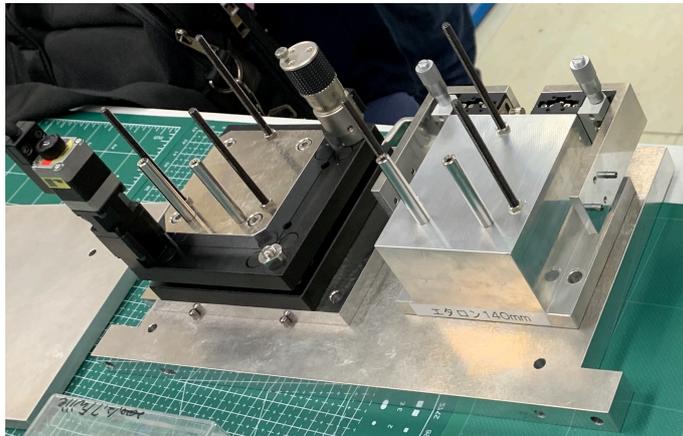


図 13: etalon、slit が全て取り外された干渉計

■ethalon について 円筒形硝子が若干の隙間を空けて底面で平行に対向し、対向面に固定された Ni-Ti 多層膜ミラー (neutron half mirror) が平行に対向する光学素子。図 14 のように、円筒硝子は一部切り落とされており、そこから中性子線が入り出してミラーに入射できる。それ以外では中性子線は反射、散乱され、ミラーには入射しない。中性子線の反射は厳密にはミラーで起こり、ethalon で起こるわけではないが、本稿ではミラーと ethalon を同一視して記述する。

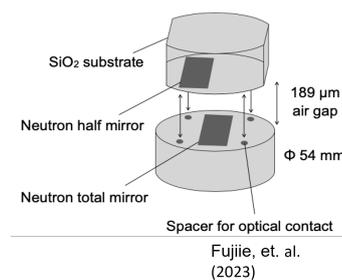


図 14: ethalon の模式図

■自作三角台について 三角台の壁面は互いに 60° を成している。底面中央付近には回転ステージに装着するためのネジ穴が環状に 8 つ*2、斜面の一つにはアルミ板から外した干渉計を載せて固定する「受け」、干渉計を固定するためのネジ穴がある。

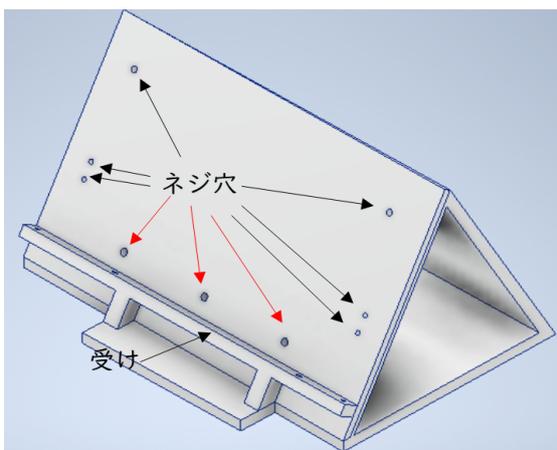


図 15: 自作三角台



図 16: 三角台の上部拡大図。右がビーム源側。

図 16 のように、干渉計を寄りかからせる斜面は、鉛直方向からの傾きとは別に、レーザー源側からビーム源側にかけて約 1° の傾斜がある。

*2 見取り図の角度からは見えない。

4 実験手順

■概要 当実験は非傾斜下での干渉計較正、30° 傾斜下での干渉計測の2段階から成る。非傾斜下で較正した後、回転ステージから干渉計を取り外し、三角台を回転ステージに取り付ける。アルミ板から取り外した干渉計を三角台の斜面に取り付け、非傾斜下での較正が崩れていないものとして計測を行う。

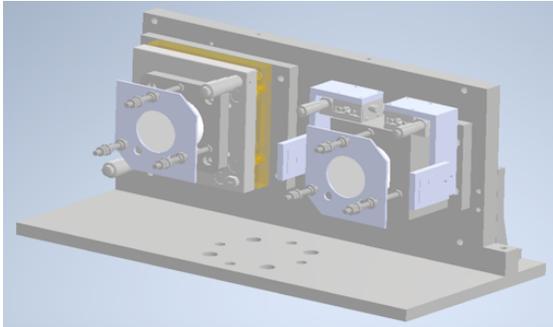


図 17: 非傾斜時の見取り図

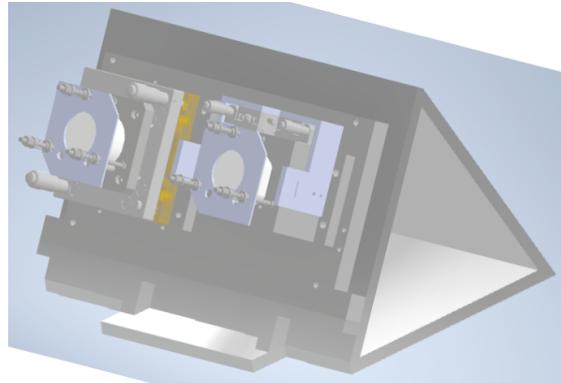


図 18: 30deg 傾斜時の見取り図

4.1 非傾斜下での較正 (予備実験)

較正は、1st ethalon の設置、single slit の設置、double slit の設置、2nd ethalon の設置、干渉の調節の5段階から成る。2nd ethalon の積載まで終えた段階の模式図を示す。

4.1.1 1st ethalon の設置

- 1° 1st ethalon のみを干渉計に載せ、レーザー源からのレーザー光が 1st ethalon に垂直に入射するよう回転ステージを 90° 程度回転させた。
- 2° レーザー光の照射を止め、回転ステージを前記操作とは逆方向に位置決め精度 $0.1^{\circ*3}$ で 90° 回転させた。
- 3° 干渉計を x 軸方向にずらし、中性子ビームが入射する位置に検出器を移動させた。
- 4° 干渉計をもとの位置に戻した。

4.1.2 single slit の設置

single slit を低発散ビームブランチ用中性子ビーム成形 B₄C スリットと 1st ethalon の間に設置し、マイクロメータで x 軸方向の位置を調節、図 19 の direct、H-beam が検出されることを確認した。図??がその時の信号である。破線で囲まれた最も右の長方形内にある信号が direct、最も左の長方形の信号が H-beam である。

4.1.3 double slit の設置

double slit を 1st ethalon と 2nd ethalon の間に設置し、マイクロメータで x 軸方向の位置を調節、図 19 の direct が検出されず、H-Beam が検出されることを確認した。図 21 がその時の信号である。

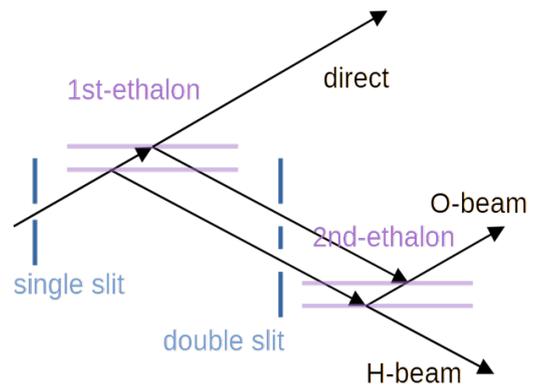


図 19: 鉛直上方から見た経路模式図。左がビーム源側。

*3 使用した回転ステージ SGSP-80Yaw の位置決め精度。

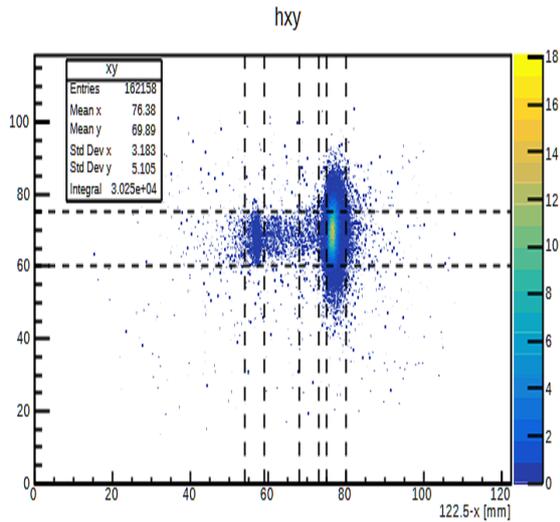


図 20: single slit 設置完了時の信号。縦軸は mm。

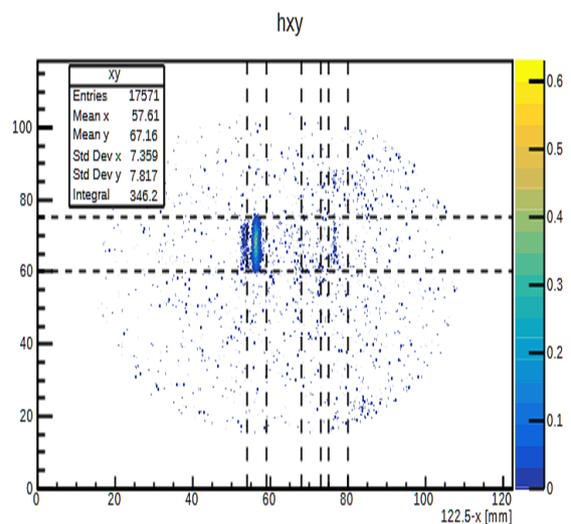


図 21: double slit 設置完了時の信号。縦軸は mm。

4.1.4 2nd ethalon の設置

- 1° 望遠鏡の緑色レーザーが 1st ethalon に入射するように望遠鏡の角度を調節した。
- 2° 鏡と 1st ethalon の間に紙を差し込み、1st ethalon で反射されたレーザー光について鏡への入射光と鏡からの反射光が同一直線上に重なるように鏡の角度を調節するとともに、鏡から 1st ethalon への入射光が反射されて望遠鏡のカメラに反射光の像が映ることを確認した。
- 3° 2nd ethalon を干渉計に載せ、2nd ethalon から望遠鏡に反射される光の像が 1st ethalon の像に重なるよう、2nd ethalon の Yaw 軸と Roll 軸の回転角を調節した。
- 4° 回転ステージの角度、スライドステージの位置を微調整し、図 19 の O-Beam,H-Beam が検出され、direct が検出されなくなることを確認した。図??がその信号である。図 20 で direct が確認された位置の左の長方形内の信号が O-Beam である。

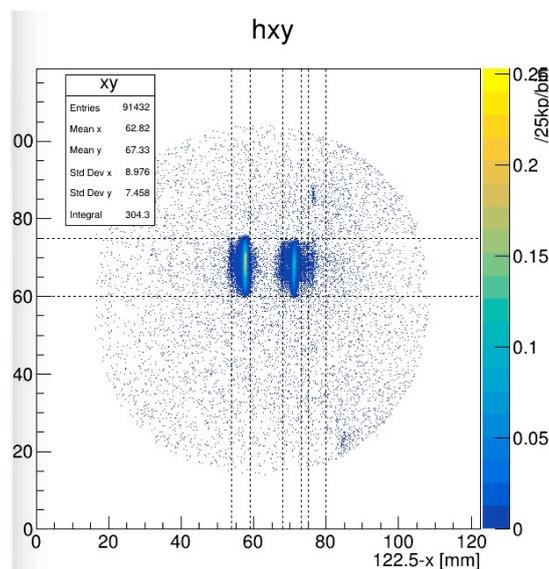


図 22: 2nd ethalon の設置完了時の信号。縦軸は mm。

4.1.5 干渉の調節

- 1° スライドステージを調節し、干渉縞が確認できる位置に干渉計を調節した (図 23)。
- 2° スライドステージを調節し、干渉縞の振動が少ない位置に干渉計を調節した (図 24)。

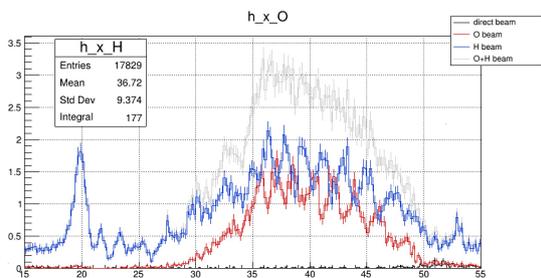


図 23: 確認された干渉縞。横軸は mm。

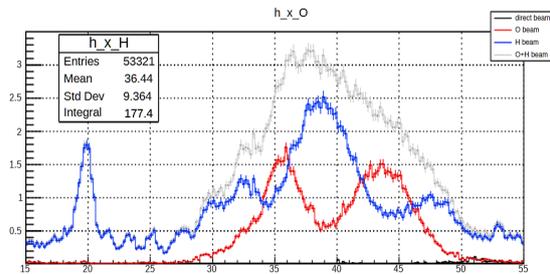


図 24: 振動を減らした干渉縞。横軸は mm。

4.2 本実験

- 1° 干渉計を取り外し、図 18 のように三角台に設置した。干渉計と三角台の規格不整合により、「受け」に干渉計を載せられず、図 15 の赤い矢印で示したネジ穴のみでの固定となった (図 25)。
- 2° 回転ステージ、スライドステージを微調整し、O-Beam と H-Beam の信号が得られる位置を探した。
- 3° 信号が得られる見込みがないので、double slit を取り除いて回転ステージ、スライドステージの微調整を続けた。

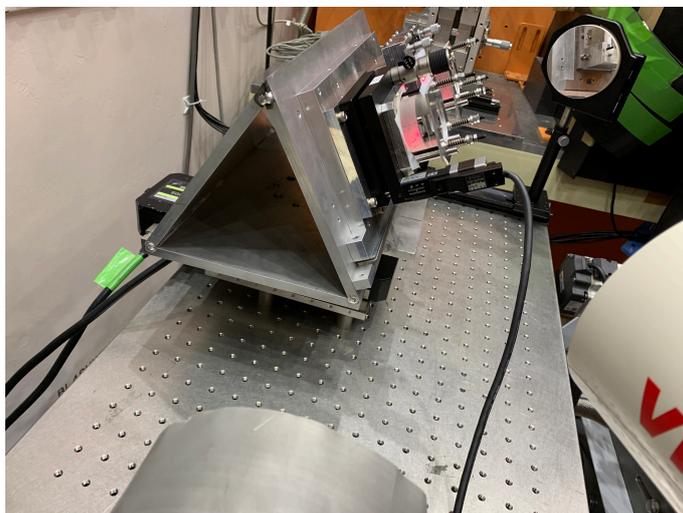


図 25: 三角台に干渉計を搭載

5 実験結果の解析と考察

5.1 結果と解析

実験の結果、図 26 の 2 次元ヒストグラムを得た。

■**ビームの傾斜** x 軸方向、y 軸方向の区間を合わせて (x,y) とすると、(63mm 68mm,60mm 73mm) の範囲と (75mm 80mm,65mm 79mm) の範囲の 2 か所に、鉛直軸 (y 軸) から見て約 30° 傾斜したビームの信号が認められる。これは、干渉計を三角台上に搭載したことで etalon が傾斜し、反射されたビームが傾斜したものと考えられる。

■**どのビーム信号か** 2 つのビーム信号の位置関係を比較すると、以下の 2 つが考えられる。

- 左側が H-Beam、右側が direct である。
- 左側が H-Beam、右側が O-Beam である。

前者の可能性は、右側の信号と破線の位置関係、及び図 20 に於いて direct 信号の方が強いことに基づく。後者の可能性は、O-Beam と H-Beam に相当する破線の長方形の水平距離と、得られた信号の斜め方向の距離とがほぼ等しいことに基づく。本実験は double slit を外した状態で試験をしており、前者である可能性が高い。しかし、本実験だけではどちらが妥当であるのかを決するのは難しい。

■**COW 効果について** 本実験では、COW 効果を確認する段階まで実験操作が到達せず、測定はできなかった。

5.2 考察

■**着想の是非** 実験の結果、干渉計を傾斜させたことによって etalon で反射するビームがある程度想定通りに傾斜していることから、三角台上に干渉計を搭載して傾斜させる実験法は意義があったと言える。ただし、今回は単に傾斜させることだけを念頭に置いた仕様であったため、幾つか弊害も確認された。中でも最大の問題点について考察する。

■**問題点と解決法** 30deg 傾斜時に、1st etalon へのビームの入射角を制御できない仕様であった点にある。図 16 のように、レーザー源側からビーム源側に 1° 傾斜させこれによって入射角を固定する構想であった。従って、この角度を三角台の鉄材の整形で実現し、微調整はできなかった。しかし、三角台自体の加工誤差、干渉計の付け替えによる入射角のズレが発生することは不可避であり、この点に対処する方法が必要である。

解決法としては以下の 2 点が挙げられる。

- レーザー源側に蝶番機構を設け、角度の微調整を可能とする。
- そもそもこのような傾斜をつけず、回転ステージとスライドステージによる微調整のみで入射角 1° を実現させる。

前者の解決法はここまでの考察から自然に導かれる方法である。後者は、本実験で用いたビームが鉛直方向に縦長であることに着眼した方法である。非傾斜時の較正時に入射角は 1° に制御されている。干渉計を単純に 30° 傾斜させても、縦長のビームの一部は 1° で入射し得ることが幾何学的考察から導かれる。

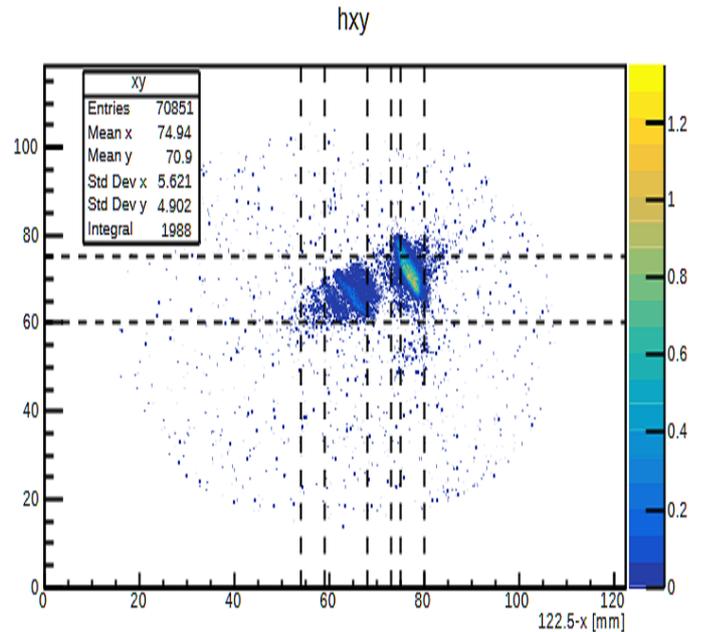


図 26: 得られたヒストグラム。縦軸は mm。

6 結論

30deg 傾斜させる三角台に干渉計を搭載しての COW 効果測定はできなかった。三角台に干渉計を搭載しての実験方法は、ビームの入射角を適切に制御する工夫を施すことにより、中性子ビームの経路を傾斜させた状態での測定を実現できる可能性がある。

謝辞

実験の構想、計画段階では、2021年度P2でCOW効果の実験[5]をされた高エネルギー物理学研究室の竹内広樹さんに貴重なご意見をいただきました。それまでは論文の計算を追うのみで、具体的な実験計画の方針を立てられずにいましたが、アドバイスをいただいたおかげで、実験の計画を練り始め軌道に乗せられるまでになりました。

実験の計画から実現に渡り、高エネルギー加速器研究機構物質構造科学研究所の三島賢二さん、名古屋大学理学研究科の北口雅暁さんに多くをご指導いただきました。ビームタイムの4ヶ月前から事前シミュレーションの検討、実験手法への助言をいただきました。5日もの長期間にわたってビームタイムを確保していただき、またエタロンのセットアップは完成品[2]をほぼそのまま使わせていただきました。

ビームタイム当日は、名古屋大学理学研究科の南部太郎さん、藤家拓大さんのご協力がなければ、この実験は成立しませんでした。装置の操作、実験結果の解析だけでなく、実験の方針、考察までお手伝いいただきました。装置のセットアップは過去の研究から多くを参考にいたしました。

1年に渡りご指導いただいた指導教員の中家剛さん、木河達也さんに心より感謝申し上げます。TAの星野大輝さん、有元隼太さんにも、長きにわたって大変お世話になりました。

参考文献

- [1] R. Colella, A. W. Overhauser, and S. A. Werner. Observation of gravitationally induced quantum interference. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 34, pp. 1472–1474, Jun 1975.
- [2] Takuhiro Fujiie, Masahiro Hino, Takuya Hosobata, Go Ichikawa, Masaaki Kitaguchi, Kenji Mishima, Yoshichika Seki, Hirohiko M. Shimizu, and Yutaka Yamagata. Development of neutron interferometer using multilayer mirrors and measurements of neutron-nuclear scattering length with pulsed neutron source. *Physical Review Letters*, Vol. 132, No. 2, January 2024. 多層膜ミラー.
- [3] A. W. Overhauser and R. Colella. Experimental test of gravitationally induced quantum interference. *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 33, pp. 1237–1239, Nov 1974.
- [4] Yoshichika Seki. *Multilayer Neutron Interferometer with Complete Path Separation*. PhD thesis, 京都大学, 3 2011. 中性子干渉実験周辺、特に屈折率計算.
- [5] 広樹竹内, 拓実對馬, 優真武藤. 多層膜ミラーを用いた中性子干渉計の作成と重力加速度の測定. 卒論, 京都大学 (Kyoto University), 10 2022.