多層膜冷中性子干渉計の最近の展開

北口 雅暁

(京都大学大学院理学研究科)

Recent progress of cold-neutron interferometer using multilayer mirrors

Masaaki Kitaguchi

Department of Physics, Kyoto University

ABSTRACT

A novel type of cold-neutron interferometer has been developed. It contains a pair of new devices named 'beam splitting etalons (BSEs),' which enable us to align four independent multilayer mirrors in the interferometer within required precision. In this paper the recent progress of the interferometer using etalons will be reported. The future prospect of some applications for fundamental physics will be also discussed.

Keywords: *cold-neutron interferometer, etalon*

中性子干渉実験は基礎物理学の強力な研究手法です。干渉計の検出器としての高感度化には長波長中性子への適用と装置の大型化が重要ですが、最近多層膜ミラーを用いての取り組みに新しい展開がありました。この稿ではその現状と今後の可能性について報告します。

1. はじめに

シリコン完全単結晶による熱中性子干渉計の成功[1]以来、中性子干渉実験は基礎物理・物性物理においてめざましい成果を上げています。中性子波動関数に対する重力の効果の検出（COW 実験）[2,3]やスピノルの 4π 回転対称性の検証[4]など、中性子干渉実験は量子力学における様々な実験を実際に可能にできました。干渉計は波動関数の位相差を通じて相互作用を測定する超高感度検出器であり、基礎物理実験でこれからも重要な役割を演じてゆくでしょう。本稿で紹介する多層膜を用いた冷中性子干渉計はパルス中性子にも適用でき、

J-PARC の大強度中性子源を用いることでパルス中性子の特性を生かした新しい実験も期待できます[5,6].

さて一般に干渉計は2つの分割された波の経路でできていますが、2つの経路上での相互作用の違いで位相差が作られ、重ね合わされた結果その位相差は計数変化となって観測されます。中性子は質量やスピン・磁気モーメントを持つ核子なので中性子干渉計では重力・スピン相互作用・磁気相互作用・核力によって位相差が生じます。中性子干渉計が検出する位相差 $\Delta\phi$ は

$$\Delta\phi = 2\pi \frac{m\lambda L}{h^2} \Delta E$$

(m は中性子の質量は, λ は波長, h はプランク定数, L は相互作用する経路の長さ, ΔE は探索する相互作用) と書け, 中性子の波長が長いほど, また相互作用する距離が長いほど, 微小な相互作用に対する感度が良くなります. つまりより高感度の実験のためには, 干渉計の長波長中性子への適用と装置の大型化が重要になります. これに対し, シリコン完全単結晶を使った中性子干渉計 (Fig. 1) では経路の分割と重ね合わせに結晶格子による回折を利用しているため, 適用可能な中性子の波長は結晶の格子定数程度に制限されます. 相互作用する経路の長さも育成できる単結晶の大きさに制限されてしまいます. さらに動力学的回折のために結晶内で経路が広がり干渉計の 2 経路を正確に決定できず, 測定精度を下げる要因になっています.

これらの問題を解決する方法の一つが、中性子

Fig. 1. Si perfect single crystal interferometer.

Fig. 2. Cold-neutron interferometer using multilayer mirrors.

多層膜ミラーを用いる干渉計です。

2. 多層膜ミラーと冷中性子干渉計

長波長中性子を扱う光学素子として多層膜ミラーがあります。低エネルギーの中性子が物質に入射する際には反射や屈折といった現象を示し、物質に対して有効ポテンシャルを考えることができます。ポテンシャルの異なる2種類の物質を交互に積層した多層膜は入射中性子に対し1次元結晶として振舞い、冷中性子を Bragg 反射するミラーとして機能します。これが中性子多層膜ミラーです。また多層膜の2つの物質の一方を磁性体にして中性子のスピンによって選択的に反射し、偏極装置や偏極分析装置として用いることができます。これは磁気ミラーと呼ばれています。

多層膜ミラーを用いた冷中性子干渉計の可能性はペアミラーと呼ばれる素子の使用によって示されました[7]。ペアミラーは真空蒸着によって1枚のシリコンウエハの上に多層膜ミラー・中間層・多層膜ミラーと順に積層したもので、入射中性子を2つの空間的経路に分割します (Fig. 2)。またこの際2経路間にはミラー間の距離 D に基づく光路差 $2D\sin\theta$ が与えられます (θ はミラーへの入射角)。2つ目のペアミラーによる反射で2経路は再び重ね合わされ、さらに光路差が補償されて位相差0付近での明瞭な干渉縞を観測する事ができます。Fig. 2 は2つのペアミラーへの入射角の相対角 ($\theta_1 - \theta_2$) に対する干渉縞を示しています。

その後、ペアミラーの表側のミラーを磁気ミラーにしたスピンスプリッターと呼ばれる素子を用いた中性子スピン干渉計[8]が開発されました。これは空間的2経路を中性子のスピン状態によって分割し、高い反射率と高いコントラストの干渉縞を得ることを可能にしました。多層膜ミラーを用いるこれらの干渉計は長波長中性子を扱う事ができ、また2つのペアミラーの間の距離を大きく取る事で相互作用する距離を拡大する事が可能です。し

かし蒸着によるミラー形成という技術的な理由から、ペアミラーやスピンスプリッターの中間層の厚さは $1\mu\text{m}$ 程度にとどまっていた。このため2経路の空間的分離は小さく実際にはほとんど重なっており、これらの干渉計は応用において制限されていました。2経路の空間的分離を大きくできれば、経路の一方にのみ装置を挿入するなど新しい実験が可能になります。また検出される相互作用の大きさが経路の囲む面積に依存するようなものでは、経路の空間的分離が大きな干渉計でより高感度な実験を行なうことができます。

3. ビームスプリッティングエタロンと Jamin 型干渉計

経路間隔を大きくするために我々が用いたのがエタロンという素子です。エタロンは主にレーザー光学で Fabry-Perot 干渉計として用いられるもので、平面度の良い基板を平行度良く組み合わせた

Fig. 3. Spin splitter and beam splitting etalon to enlarge the beam separation.

ものです。一般のレーザー用のエタロン基板は表面粗さが中性子ミラーの基板としては十分ではありませんが、現在では特に表面粗さの良好なもの、RMS が $3\text{\AA}$ 以下程度のものを入手でき、中性子ミラーの基板として用いる事ができます。エタロンの相対平面度は $\lambda_{\text{He-Ne}}/150$ と干渉計を構成するのに十分です。エタロンの平行な2面に中性子多層膜ミラーを形成し、冷中性子を斜入射させると、エタロンはそのギャップを中間層とみなせるペアミラー・スピンスプリッターとして機能します (Fig. 3)。これを「ビームスプリッティングエタロン (BSE)」と名付けました。ギャップの大きなビームスプリッティングエタロン2つを用いる事で経路間隔の大きな干渉計を作成する事が可能になります。

Fig. 4. Beam splitting etalon with the spacing of $9\mu\text{m}$

Fig. 5. Experimental setup of Jamin-type interferometer and interference fringes.

今回実証のために一方の面に磁気ミラー パーマロイ 45/Ge 多層膜 8 複層を、もう一方の面に非磁気ミラー Ni/Ti 多層膜 8 複層を蒸着したエタロンを作成しました (Fig. 4). 複層厚は約 24nm です. ギャップは約 10 μ m で、これまでのスピンスプリッターの中間層の厚さの約 10 倍です. 実験は日本原子力研究所改 3 号炉冷中性子ビームライン C3-1-2 'MINE2' で行ないました. 中心波長 8.8 $\text{\AA}$, 波長分解能は半値全幅で中心波長の 2.7% です. 実験配置は中性子スピン干渉計と基本的に同じです. 入射中性子ビームは偏極ミラーと $\pi/2$ フリッパーによってガイド磁場とスピン平行な成分とスピン反平行な成分との重ね合わせ状態になり, エタロンに入射されます. エタロンの磁気ミラーはスピン平行成分のみを反射し, 透過したスピン反平行成分は奥の非磁気ミラーによって反射されます. これによって入射中性子はスピンによって特徴づけられた空間的 2 経路に分離されます. π フリッパーによってスピンを反転し再びエタロンに入射することで 2 つの経路は空間的に重ね合わされ, 最後に $\pi/2$ フリッパーにより基底を取り直すことで 2 つの成分の重ねあわせが得られます. 2 経路間の位相差は位相制御コイルによる磁場により制御する事ができます (Fig. 5). この配置は, 幾何光学の観点からは光学における最も古い干渉計である Jamin 干渉計と等価なものと言えます. 我々はこの干渉計でコントラスト 60% の干渉縞を観測しました. 2 つのエタロンの相対角の変化に対する干渉縞の振る舞いから, この縞が空間的に分離した 2 経路間の干渉であることを確かめています [9]. この縞の 1 周期は 2 経路間の 20peV のエネルギー差に相当し, この干渉計は peV を検出する検出器とも言えます. 4 枚の独立に作成した多層膜ミラーを組み合わせた冷中性子干渉計としては世界初の成功です.

ビームスプリッティングエタロンを用いることで干渉光学系の経路を自在に操ることが可能になります. その一例として冷中性子ビームの横方向

Fig. 6. Direct measurement of the transverse coherence length.

(Top) Tilting of the 2nd BSE makes vertical shift of the beam. (Bottom) Loss of contrast as a function of the vertical shift. Wide collimation: Two slits with the width of 40 mm and the distance between the slits of 4855 mm give the estimated value of the coherence length of 59nm. Measured value was 58 ± 2 nm. Narrow collimation: Two slits with the width of 10 mm and the distance of 2675 mm give the estimated value of 130nm. Measured value was 129 ± 10 nm.

可干渉長の直接測定を紹介しましょう [10]. 第 2 のエタロンを鉛直から α だけ傾けると, 重ね合わされるべき 2 経路が上下に平行に $2D\sin\alpha$ だけずれます (Fig. 6). 傾きを調節することでずれの量を自由に変えることができ, 図はその際の干渉縞のコントラストの変化, つまり可干渉性を示しています. ビームラインの上下方向の運動量分布の標準偏差を σ_y , ビームの分離を L_T とすると, 干渉縞のコントラストは

$$\exp(-\frac{1}{2}\sigma_T^2 L_T^2)$$

にしたがって減衰し、コントラストが $1/e$ になる分離を可干渉長と定義します。実験ではビームラインのコリメーションから見積もられる可干渉長と測定値とがよく一致していることを確認しました。シリコン干渉計を用いたこれまでの干渉長の測定では経路の分離に物質による屈折を利用していたため分散なしに測定することが困難でした。多層膜ミラーによる鏡面反射を用いたこの光学系では分散なしに経路を制御することが可能です。

4. 今後の可能性

－ 干渉計を使った基礎物理実験－

今回のビームスプリッティングエタロンのギャップは $10\mu\text{m}$ と小さく実際には2経路は未だ空間的に重なっています。既にギャップ $200\mu\text{m}$ のエタロンを作成し、その反射によって空間的に完全に分離した2経路が得られる事を確認しています。このエタロンによる Jamin 型干渉計は2経路が空間的に分離し、一方の経路にのみ装置を挿入することもできます。現在実際に干渉計を構成する準備を進めています。

Jamin 型干渉計の成功は、エタロンを用いることで多層膜ミラーを高精度に配置し、冷中性子干渉計を構成できる、ということを実験的に示しています。また干渉性の測定を通じて、干渉計の配置に必要な精度をビームラインからあらかじめ見積もれることを示しました。これらの知見を得てより大型の干渉計の開発をスタートさせています。

Fig. 7. Mach-Zehnder interferometer.

基板の両面が平行で厚さのそろった6枚のエタロン基板と、平面度 $\lambda_{\text{He-Ne}}/20$ 程度の高精度定盤を Fig. 7 のように配置すれば、Mach-Zehnder 型と呼ばれる冷中性子干渉計を構成することができます。経路の分離を飛躍的に拡大させる Mach-Zehnder 型冷中性子干渉計の開発によってさらに様々な基礎物理実験への応用が可能になるでしょう。現在長さ約 50cm の定盤と厚さ 5mm のエタロン基板を用いた Mach-Zehnder 型干渉計を試作し、実験を始めています。Mach-Zehnder 型干渉計の経路を調整するための、より高精度な制御技術も研究されています。

多層膜を用いた中性子干渉計は、基本的にパルス中性子に対応できます。多層膜ミラーの各層の

厚さを徐々に変化させ幅広い波長の中性子を反射する中性子スーパーミラーをエタロンに形成するだけで白色対応の干渉計になります。時間分析によって相互作用の波長依存性を効率よく測定することができます。これは単結晶を用いた干渉計では得られない特徴です。J-PARC の大強度中性子源の建設と近年の多層膜作製技術の向上は、多層膜を用いた干渉実験を強力に後押しするでしょう。

大型の多層膜冷中性子干渉計による基礎物理実験を2つ紹介します。

(1) Aharonov-Casher 効果

磁気モーメントを持つ粒子が電荷を取り囲む経路を通る際に位相変化を受けるという Aharonov-Casher 効果は、ちょうど Aharonov-Bohm 効果の磁場と電荷の関係を逆にしたものです[11]。実験的には干渉計の2つの経路に静電ポテンシャルを印加することで実現され (Fig. 8), 中性子は電荷を持たず磁気能率を持つので中性子干渉計はこの実験に適しています。その位相変化は

$$\phi_{AC} = \pm \frac{4\pi\mu\Lambda}{\hbar c}, \quad \Lambda = 2LE/4\pi$$

(μ は磁気モーメント, Λ は線電荷密度, L は相互作用する距離, E は電場)と書け、相互作用する経路が大きいほど高感度で検出する事ができます。シリコン単結晶を用いた熱中性子干渉計による過去の実験では位相変化の量のずれが報告されていますが、実験精度が十分ではありません[12]。近年原子干渉計を用いた高い精度の測定もなされていますが、干渉計の2経路が空間的に分離できないため経路が電荷を囲んでおらず幾何的性質が異なるという指摘もあり、経路の分離した中性子干渉計での検証が必要です。

Fig. 8. Aharonov-Casher effect.

Jamin 型多層膜冷中性子干渉計はシリコン単結晶による干渉計に比べ長い相互作用距離を取ることができます。前述のギャップ $200\mu\text{m}$ のビームスプリッティングエタロンを用いた干渉計に電極を挿入し、シリコン単結晶の実験の約10倍の精度で

測定する計画を現在進めています。

(2)中性子波動関数に対する重力の効果

重力ポテンシャルの異なる経路を中性子波が通る際の位相差の検出 (COW 実験) では、感度は波長と経路の囲む面積に比例します。

$$\phi_g = -2\pi m^2 \frac{g}{h^2} \lambda A \sin \theta$$

(g は重力加速度, λ は中性子波長, A は経路が囲む面積, θ は装置の傾き). シリコン完全単結晶干渉計での過去の実験と理論との間に位相変化の 0.8% のずれがある, との報告があります[3]. このずれに対しニュートン近似とは違う理論の提唱もあり, より高精度の測定が期待されています. 経路の空間的分離が大きい Mach-Zehnder 型多層膜干渉計は面積を大きく取ることができます. 多層膜ミラーのブラッグ反射を使っている多層膜冷中性子干渉計はシリコン干渉計に比べて動的回折の補正が小さくて済み, 議論が簡単になります.

5. まとめ

エタロンを用いることにより 4 枚の独立な基板上の多層膜ミラーによって冷中性子干渉計を構成することに成功し, 様々な中性子干渉光学系を開発する可能性を開きました. 現在より大型の干渉計の開発と基礎物理への応用を進めています.

謝辞

この研究は京都大学理学部の舟橋春彦氏, 名倉照直氏, 竹谷薫氏, 京都大学原子炉実験所の日野正裕氏, 理化学研究所の清水裕彦氏, 大竹淑恵氏との共同研究です. 京都大学工学部の丸山龍治氏ほか多くの方の協力があります. 科学研究費補助金, 日本原子力研究所黎明研究, 松尾学術振興財団の助成を受けています. また著者は理化学研究所ジュニアリサーチアソシエイトとして研究に参加する機会を得ました. 実験では日本原子力研究所, 東京大学物性研究所, 京都大学原子炉実験所のお世話になっています. ここに感謝の意を表します.

参考文献

- [1] H.Rauch, W.Treimer, U.Bonse, Phys. Lett. A47, 369 (1974).
- [2] R.Collella, A.W.Overhauser, S.A.Werner, Phys. Rev. Lett.34, 1472 (1975).
- [3] K.C.Littrell, B.E.Allman, S.A.Werner, Phys. Rev. A56, 1767 (1997).
- [4] H.Rauch, A.Wilfing, W.Bauspiess, U.Bonse, Z. Phys, B29, 281 (1978).
- [5] R.Maruyama, S.Tasaki, M.Hino, M.Takeda, T.Ebisawa, Y.Kawabata, Nucl. Inst. and Meth.A, in press.

- [6] 舟橋春彦, 原子核研究, to be published.
- [7] H.Funahashi, T.Ebisawa, T.Haseyama, M.Hino, A.Masaike, Y.Otake, T.Tabaru, S.Tasaki, Phys. Rev. A54, 649 (1996).
- [8] T.Ebisawa, S.Tasaki, M.Hino, N.Achiwa, Y.Otake, H.Funahashi, D.Yamazaki, T.Akiyoshi, Phys. Rev. A57, 4720 (1998).
- [9] M.Kitaguchi, H.Funahashi, T.Nakura, M.Hino, H.M.Shimizu, Phys. Rev. A67, 033609 (2003).
- [10] M.Kitaguchi, H.Funahashi, T.Nakura, K.Taketani, M.Hino, Y.Otake, H.M.Shimizu, J. Phys. Soc. Jpn. 72, 3079 (2003).
- [11] Y.Aharonov, A.Casher, Phys. Rev. Lett. 53, 319 (1984).
- [12] A.Cimmino, G.I.Opat, G.Klein, Phys. Rev. Lett. 63, 380 (1989).