

多層膜冷中性子干涉計の新展開

京大理 北口雅暁

概要

中性子干涉実験は基礎物理学の強力な研究手法である。冷中性子を用いた大型の干涉計は微小な相互作用を非常に高い感度で検出できる。これまでの多層膜冷中性子干涉計は技術的な理由から干涉計の二経路を空間的に大きく分離できなかった。今回多層膜ミラーをエタロン基板上に形成することにより二経路を大きく分離することに成功し、冷中性子干涉計の大型化への道を大きく開いた。その成果と今後の可能性について述べる。

中性子干涉実験は基礎物理学の強力な研究手法である。中性子は質量やスピン、磁気モーメントを持つ核子であり、中性子干涉計では重力、スピン相互作用、磁気相互作用、核力によって位相差がつく。中性子干涉計が検出する位相差 $\Delta\phi$ は

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

と書ける。ここで λ は中性子の波長、 L は相互作用する経路の長さ、 ΔE は検出する相互作用である。長波長の中性子を用いる程、また大型の干涉計を用いる程、微小な相互作用を検出できる。我々の目的は大型の冷中性子干涉計を開発し、基礎物理や物性物理に応用することである。

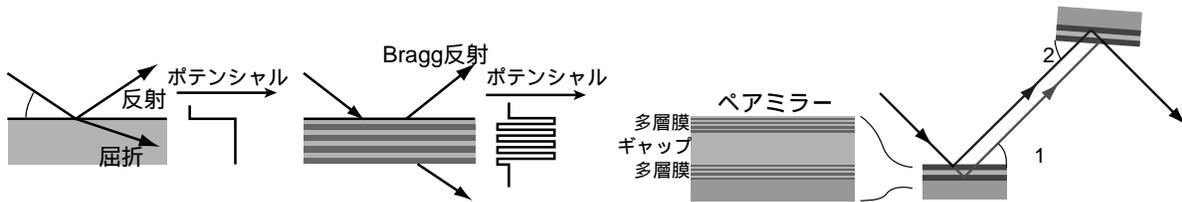


図 1: 中性子多層膜ミラーと多層膜冷中性子干涉計

低エネルギーの中性子が物質に入射する際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る。ポテンシャルの異なる二種類の物質を交互に形成した多層膜は一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用いることができる (図 1 左)。また多層膜の二つの物質の一方を磁性体にした磁気ミラーは中性子を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られている。

多層膜冷中性子干涉計 [1] は多層膜を用いた冷中性子干涉計の可能性を初めて示したものであり、中性子干涉実験の冷中性子への適用と装置の大型化を可能にした。この干涉計は二つのペアミラーと呼ばれる素子からなっている (図 1 右)。ペアミラーは真空蒸着によって多層膜ミラー、中間層、多層膜ミラーと積み上げたものである。一つ目のペアミラーによって入射中性子は二経路に分割され、二つ目のペアミラーの反射によって二経路は再び重ねあわされる。また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て中性子スピン干涉計 [2] が開発された。図 3 左は中性子スピン干涉計の配置である。中性子ビームは偏極ミラーと $\pi/2$ フリッパーによってスピン平行成分とスピン反平行成分との重ね合わせ状態になり、スピンスプリッ

タに入射する。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非磁気ミラーによって反射される。スピン状態によって分割されていた中性子はスピンスプリッタによる反射によって空間的に分離される。 π フリッパーによってスピンを反転し再びスピンスプリッタに入射することで2つの経路は空間的に重ね合わされる。最後に $\pi/2$ フリッパーにより基底を取り直すことで二つの成分の重ねあわせが得られる。

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の中間層の厚さは $1\mu\text{m}$ のオーダー程度にしかならない。このため二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る。二経路の空間的分離を大きくできれば、経路の一方にのみフェイズシフタを挿入するなど新しい実験が可能になる。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量では、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る。例えば重力による量子力学的干渉では、シリコン完全単結晶干渉計で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 [3]、ニュートン近似とは異なる理論の提唱もある。多層膜ミラーのブラッグ反射を用いる多層膜冷中性子干渉計はシリコン干渉計に比べ動的回折の補正が小さく済み、議論が明瞭になる。経路の空間的分離が大きい多層膜干渉計を用いることでより詳細な検証が可能となる。また Aharonov-Casher 効果でもシリコン干渉計を用いた中性子による実験では理論とのずれが報告されている [4]。原子干渉計による精密な測定も行われているが、干渉計の幾何的な違いや中性子と原子の構造の違いに関する議論がある。多層膜冷中性子干渉計の2経路が空間的に分離すれば経路の間に長い電極を挿入でき、シリコン干渉計に比べて 10 倍程度高感度な実験が行なえる。

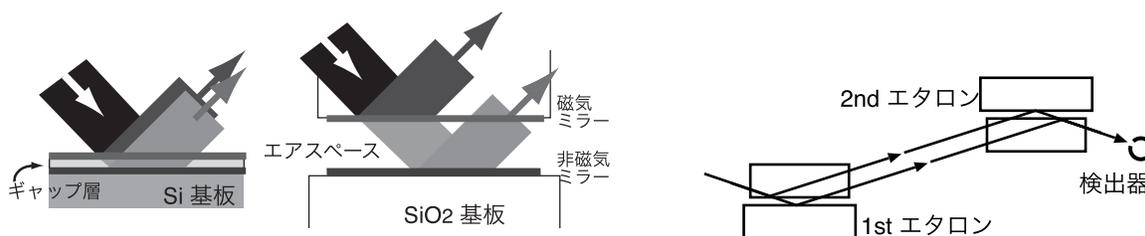


図 2: これまでのペアミラー（左）とエタロンによる経路間隔の拡大（中）。エタロンを用いた干渉計の配置（右）
 ペアミラーやスピンスプリッタではギャップ層の厚さが $1\mu\text{m}$ 程度にしかならない。用いる中性子ビームの中は 1mm 程度なので2経路は空間的に重なっている。
 エタロンを用いるとギャップを拡大することができ、2経路の間隔を上げることができる。

我々は経路間隔の大きくするためにエタロンという素子を用いた（図2）。エタロンは主にレーザー光学で用いられる光学素子で、平面度の良い基板を平行度良く組み合わせたものである。一般のレーザー用のものでは表面粗さが中性子ミラーの基板としては十分でないが、現在では特に表面粗さの良好なもの、RMS が 3\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出来る。エタロンの相対平面度は $\lambda/150$ であり、干渉計を構成するのに十分である。

エタロンの平行な二つの面にそれぞれ磁気ミラーと非磁気ミラーを形成する。今回磁気ミラーとしてパーマロイ 45/Ge 多層膜 8 複層を、非磁気ミラーとして Ni/Ti 多層膜 8 複層を蒸着した。複層厚は約 240\AA である。この基板を用いスペース長 $10\mu\text{m}$ でエタロンを組み立てた。エタロンはスペース長をギャップ厚さとみなせるスピンスプリッタとして機能する。

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’ にて行なった。中心波長 8.8\AA 、波長分解能は半値全幅で中心波長の 2.4% である。中性子スピン干渉計のスピンスプリッタをエタロンで置き換える（図3左）。2つのエタロンは図2右に示す配置となっており、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である。我々はこの干渉計で、コントラスト 60% の干渉縞を観測した（図3右）。中性子スピン干渉計では2経路はそれぞれスピン平行と反平行成分に対応しており、フェイズシフタコイルによる磁場によって2経路に位相差をつけることができる。図の横軸はフェイズシフタコイルに流す電流である。

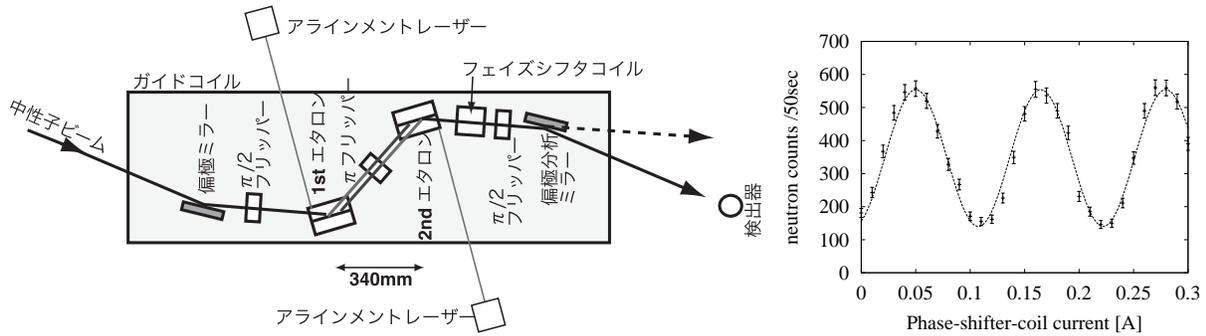


図 3: 実験の配置と観測された干渉縞

エタロンを用いた干渉計の実験の一つとして、冷中性子ビームの横方向の可干渉長を直接測定する実験を行った。後段のエタロンを鉛直から α だけ傾けてやると、重ねあわされるべき 2 経路の間に $2D \sin \alpha$ の上下方向の空間的な分離が生じる。 α を変化させて干渉縞のコントラストの変化を見た (図 4)。上下方向の運動量分布の標準偏差 σ_T を用いると 2 経路の分離 L_T に対して干渉縞のコントラストの減衰は $\exp(-\sigma_T^2 L_T^2 / 2)$ に比例する [5]。コントラストが $1/e$ になる分離を横方向可干渉長とする。入射ビームの上下のコリメーションを変え、上下方向の運動量分布を変えると可干渉長が変化するのがわかる。ビームラインのコリメーションから予測される可干渉長と実験結果は良く一致している。この実験からもエタロンを用いた干渉計が 2 経路を空間的に分離した干渉計として機能していることがわかる。

今回、4 枚の独立な基板上的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初めての成功した。今回のエタロンのスペース長は $10\mu\text{m}$ と小さく 2 経路は未だ空間的に重なっている。しかしエタロンのスペース長を $200\mu\text{m}$ にまで拡大することはすぐにも実現でき、この時 2 経路は空間的に完全に分離する。また実際にエタロンを用いて冷中性子干渉計を構成できることを確認した意味は大きい。エタロンの平面度と平行度が冷中性子干渉計を構成するのに必要な精度を満たしているということである。今回のエタロンと同様の精度を持つソリッドエタロンを図 5 のように配置すれば、大型の Mach-Zehnder 型の冷中性子干渉計を構成することができる。厚さのそろった 6 枚のソリッドエタロンと平面度 $\lambda/20$ 程度の高精度定盤を用いることで 2 経路の光路長を可干渉長内でそろえることができる。大型の 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。

一方物性物理の面からも経路の分離を大きくすることは重要である。図 6 に示す (+ + - -) 配置と呼ばれる配置 [6] にエタロン 4 組を並べるとスピネコー装置と等価な高分解能準弾性散乱分光器を非常にコンパクトに実現できる。スピネコー装置は生体高分子の緩和現象などを調べることのできる装置であり、より長い緩和時間の現象の研究に関心が持たれている。図 6 の配置では装置の分解能を表すフーリエ時間はエタロンのギャップの厚さに比例している。スペース長 $200\mu\text{m}$ のエタロンと波長 20\AA の中性子を用いれば、フーリエ時間 300ns のスピネコー装置が実現できる。

参考文献

- [1] H. Funahashi *et al.*, Phys. Rev. **A54**, 649 (1996).
- [2] T. Ebisawa *et al.*, Phys. Rev. **A57**, 4720 (1998).
- [3] K. C. Littrell *et al.*, Phys. Rev. **A56**, 1767 (1997).
- [4] A. Cimmino *et al.*, Nucl. Inst. and Meth. **A440**, 579 (2000)
- [5] Y. Morikawa and Y. Otake, Il Nuovo Cimento **vol.105 B**, N. 5, 507 (1990).
- [6] T. Ebisawa *et al.*, Phys. Lett. **A259**, 20 (1999).

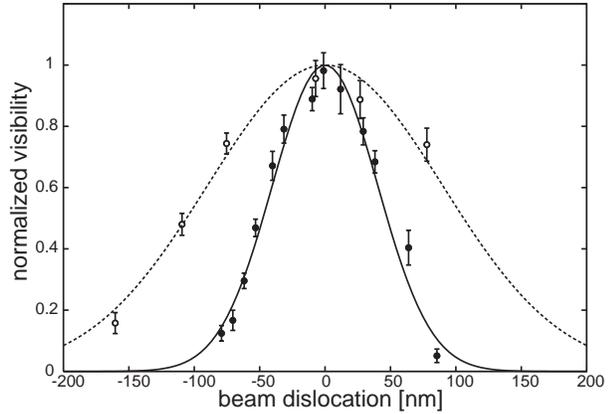
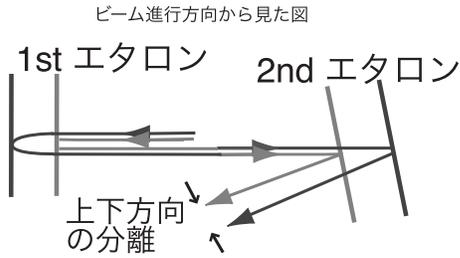


図 4: 横方向可干渉長の測定

黒丸と実線では 4855mm 離れた巾 40mm のスリットでコリメーションを決めている。この時予測される可干渉長は 58.9nm。実験結果は 57 ± 2 nm。白丸と点線では 2675mm 離れた巾 10mm のスリットでコリメーションを決めている。この時予測される可干渉長は 129.8nm。実験結果は 127 ± 10 nm。

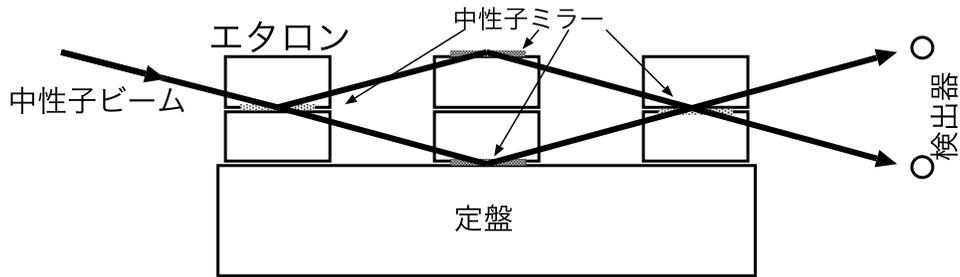


図 5: Mach-Zehnder 型冷中性子干渉計

基板の両面が平行なソリッドエタロン基板を高精度の定盤（平面度 $\lambda/20$ ）の上に配置すれば、Mach-Zehnder 型の冷中性子干渉計を構成する精度が満たされる。

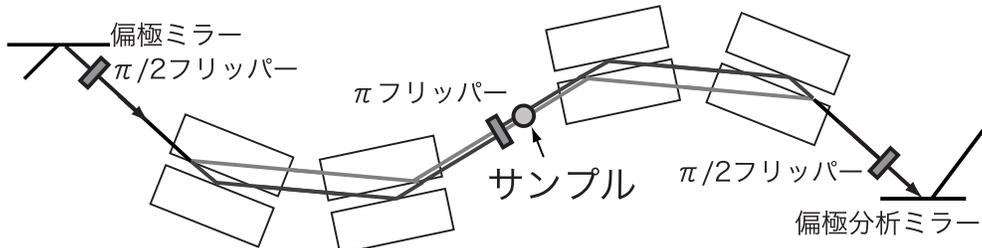


図 6: エタロン 4 組を用いたスピネコー装置

スペース長の大きいエタロンを用いることで大きな歳差回転数を得ることができ、高分解能のスピネコー装置をコンパクトに実現できる。