

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2012～2014

課題番号：24684018

研究課題名(和文)多層膜中性子干渉計による重力相互作用の精密測定

研究課題名(英文)Development of multilayer neutron interferometer for measurement of gravitationally induced phase

研究代表者

關 義親 (Seki, Yoshichika)

独立行政法人理化学研究所・光量子工学研究領域・特別研究員

研究者番号：90585209

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：地球と中性子の重力相互作用によって中性子波動関数に生じるCOW位相の精密測定のために、多層膜中性子の位相安定化と高統計化の開発を進めた。位相安定化については、ビームスプリッタ支持機構の高剛性化とガイド磁場のフィードバック制御を図った。高統計化については、単にスーパーミラーを適用するのではなく、ミラー反射・透過時の位相分散を抑えるために複数の格子定数を持つ多色ミラーによって白色ビーム対応を図るという指針を得た。また、さらなる大型化・高統計化による一般相対論的效果の検出可能性についても評価を行った。

研究成果の概要(英文)：We have advanced the multilayer neutron interferometer for the measurement of COW phase induced in the neutron wave function by gravitational interaction between the neutron and the Earth. For the phase stability, the rigidity of mounting mechanism for the beam splitters has been improved and the feedback mechanism for guiding magnetic field has been introduced. For utilization of white beam, it has been shown that we should use not just supermirrors but multi-colored mirrors to avoid phase dispersion in mirrors. We also have evaluated the possibility of the detection of phases induced by general-relativistic effects.

研究分野：中性子光学

キーワード：中性子 干渉計

1. 研究開始当初の背景

原子核・素粒子物理学の実験的研究はこれまで主に粒子線加速器を用いた散乱実験によって進められてきたが、その一方で、加速器によらない素粒子物理・基礎物理実験の分野にも高い注目が集まっている。

そのひとつの例として、低エネルギー中性子を用いた干渉計実験があげられる。エネルギー 25 meV 程度以下の低速中性子は、ドブロイ波長が原子核スケールに比べて非常に大きく、またクーロン力による擾乱を受けず透過性が高いので顕著な波動性を示す。核力・重力・電磁気力・弱い相互作用をし、かつスピン 1/2 を持ち偏極可能といった中性子の性質を活かしたさまざまな基礎実験が考えられる。とりわけ、重力相互作用に大きな感度を持つ点はレーザー干渉計にはない際立った特徴となる。

歴史的には、シリコン単結晶から3枚の歯を切り出したタイプの熱中性子干渉計がまず初めに開発された。この干渉計を用いて、スピノルの 4π 回転対称性の検証といった基礎物理に関する実験や観測問題など量子力学の基本問題に対する実験が行われてきた。特に、重力効果による波動関数の位相変化の測定は、最初の論文の著者たちの名前から“COW 実験”とよばれている。

しかし、シリコン単結晶熱中性子干渉計では中性子波の分波に結晶の周期性を用いているため、格子定数の2倍 (~6 Å) を超える長波長中性子には使用できない。また、単結晶の加工精度から干渉計の大きさが最大でも 20 cm 程度に制限されてしまうという問題もある。

これに対して、多層膜ミラーを利用した中性子干渉計の開発が日本発の独創的な研究として進められてきた。

2. 研究の目的

COW 位相に代表される重力相互作用に起因する位相の精密測定のために、多層膜中性子干渉計の大型化・安定化・高統計化を進め、新しい低エネルギー中性子干渉光学技術を確立させ、中性子を用いた一般相対論的效果検証実験の足掛かりとする。

3. 研究の方法

中性子干渉実験では、量子力学的な中性子波動関数をマクロスコピックに分割し、それぞれの波動に働く相互作用ポテンシャルの違いをその分波を重ねて生じる干渉縞の位

相差から検出する。干渉計が検出する位相差は、中性子波長と相互作用領域の長さに比例する ($\Delta\phi = 2\pi m\lambda L\Delta V/h^2$, $\Delta\phi$: 位相差, m : 中性子質量, λ : 中性子波長, L : 相互作用距離, ΔV : 2 経路のポテンシャルの差, h : プランク定数) (図 1)。したがって、長波長中性子に適用できる大型干渉計が高感度の装置となる。

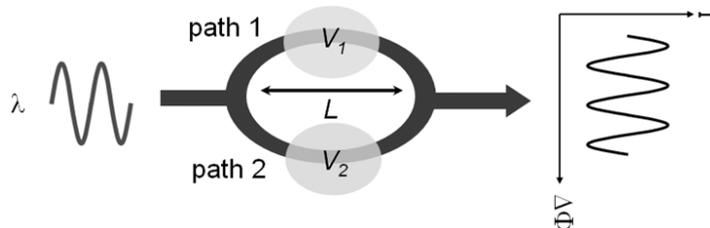


図 1: 中性子干渉計の模式図

干渉計の長波長化・大型化のため、多層膜ミラーを用いて中性子干渉計を構築する。多層膜ミラーは中性子に対して異なるポテンシャルを持つ2種類の物質を交互に積層したもので、1次元人工格子として、波長が数Åから数十オングストロームの冷中性子・極冷中性子とよばれる長波長中性子を Bragg 反射するのに最適な中性子光学素子である (図 2)。シリコン単結晶熱中性子干渉計を用いた COW 実験では、厚いシリコンの歯での Bragg 反射中にビームが拡がってってしまう動力的回折効果が系統誤差の大きな要因と考えられている。しかし薄い多層膜による Bragg 反射では、動力的回折効果を無視できるという長所もある。

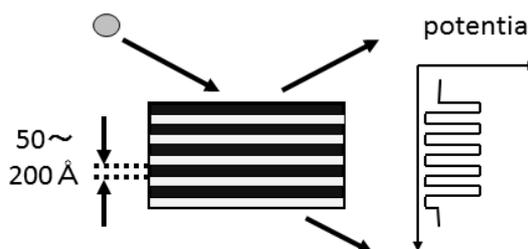


図 2: 多層膜ミラー

多層膜ミラーによる干渉計開発は人工格子を用いるがゆえに、ミラーのアラインメントが問題となるが、レーザー光学で用いられる超高平面度基板 (エタロン) を利用して、ビームスプリッターを構成することができる。ビームスプリッティングエタロン (図 3) は多層膜ミラーをエタロンの高精度の平行面に製膜し、対向させたもので、斜入射する中性子を分波するとともに、反射される2経路が平行であることを保証する。

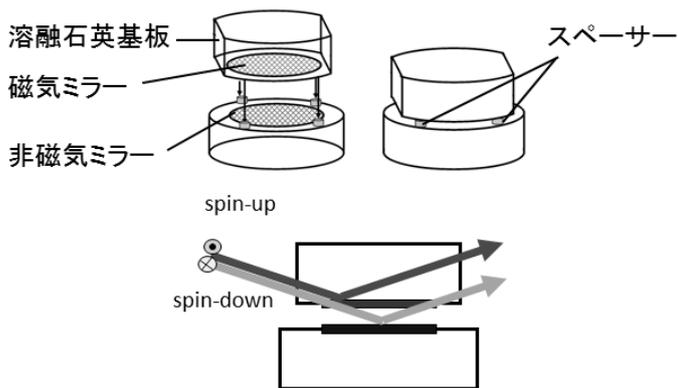


図3：ビームスプリッティングエタロン

平行な2面間の距離（スペース長）が189 μm のビームスプリッティングエタロン2個1組を用いて、2経路を完全分離する Jamin 型多層膜冷中性子干渉計（図4）を構築することができる。経路の完全分離により、片方の経路のみに位相物体を挿入する実験や経路が装置を取り囲む配置での実験が可能になった。また、重力起因位相のように経路が取り囲む面積に比例する位相の測定においては、位相検出感度が従来の多層膜干渉計から20倍程度向上する。これまでに、波長8.8 \AA の冷中性子を用いて最大コントラスト67%の明瞭な干渉縞を観測することに成功している。しかし、安定性が悪く位相ドリフトが生じる、日本原子力研究開発機構研究炉 JRR-3M の MINE2 ビームラインでは0.7 n/s の中性子計数しか得られないという問題点がある。そこで、物理測定を行うために、位相安定化と高統計化を図る。

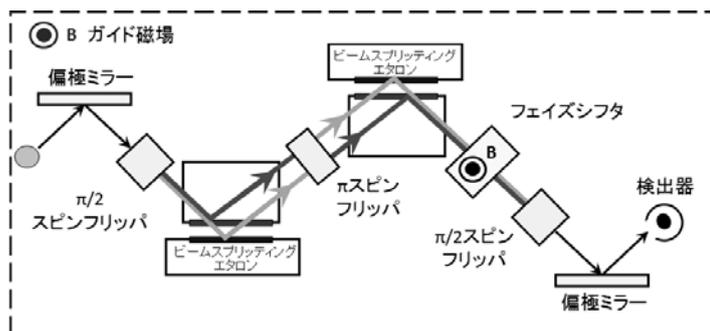


図4：ビームスプリッティングエタロンを用いた Jamin 型干渉計

4. 研究成果

当初実験を予定していた日本原子力研究開発機構研究炉 JRR-3M が長期間稼働せず、中性子ビームを用いた測定は残念ながら行えなかった。以下、オフビームで得られた結

果についてまとめる。

精密測定実験を行うためには、長波長化と大型化によって位相検出感度向上を図るとともに、干渉計自体の位相安定性も確保する必要がある。これまでの多層膜中性子干渉計では平均 0.6rad/h 程度の干渉縞の位相ドリフトが観測されている。これは干渉計のビームスプリッタ支持機構の不安定性と装置全体に掛けられているガイド磁場の揺らぎに起因するものだと考えられる。そこで、ビームスプリッタ支持機構については、回転部分を安定性の高いエンコーダ付きの回転ステージに変更して高剛性化を図り、経時安定性をレーザードップラー変位計で測定した。また、ガイド磁場については、磁場コイル電流のフィードバック制御機構を検討した。ビームスプリッタ位置、磁場強さの経時安定性から評価される干渉計の位相安定性は 0.25 rad/h に向上した。

多層膜ミラーを用いた中性子干渉計では、シリコン単結晶中性子干渉計と異なり、多層膜の格子定数を変化させることでさまざまな波長の中性子を利用することができる。とくに膜厚を徐々に変化させながら製膜されたスーパーミラーを多層膜中性子干渉計に適用すれば、J-PARC などの大強度パルス中性子源の積分強度を有効に活用することができる。

しかし、これまで、中性子波動関数が多層膜ミラーで Bragg 反射するもしくは透過するときときに生じる位相変化についてはあまり考慮がされてこなかった。多層膜中での波動関数の伝播を1次元ポテンシャル問題として扱う光学ポテンシャル法によって数値計算したところ、格子定数が連続的に変化するスーパーミラーでは反射波・透過波の位相が激しく振動することが判明した。これにより、スーパーミラーを用いたビームスプリッタではわずかなアラインメントのずれやビーム発散、干渉縞のコントラストが大きく減衰してしまうと考えられる。一方、格子定数をもつモノクロミラーでは反射波の位相は Bragg ピーク周りでゆるやかに線形変化しており、アラインメントのずれ・ビーム発散による位相差のずれについては、ビームスプリッタの配置を工夫することで打ち消すことができる。したがって、白色ビーム対応中性子干渉計に用いる多層膜ミラーはスーパーミラーよりも複数のモノクロミラーを組み合わせた多色ミラーの方が適することがわかった。多色ミラーの使用は、幾何光学的には、白色入射波の各波長に対して一意にビームスプリッタでの光路差が定義できることを意味する。この結果は、これまで2種

類の格子定数を持つビームスプリッタ，および比較的幅広い Bragg ピークを持つモノクロビームスプリッタでは干渉縞の観測に成功している事実とも矛盾しない。

また，日本原子力研究開発機構研究炉 JRR-3M 冷中性子ビームライン MINE2 から，J-PARC 物質・生命科学実験施設基礎物理ビームライン BL05 への干渉実験設備の移設を検討した．現状の多層膜中性子干渉計ではスピンの向きによって波面分割をしており，干渉計中の 3 個のスピンフリッパでスピン回転操作が行われる．特に白色ビームを扱う場合，このスピンフリッパの駆動パラメータを各波長成分の通過時刻に合わせて変化させる必要がある．その他，防振設備等の附随する装置の準備も行った．

さらに，COW 位相の測定精度を向上させていった場合，現有の技術をベースとして，一般相対論的效果に起因する位相差の検出が可能かどうかについても評価を行った．一般相対論的效果として現れる位相差で最も大きいものは，中性子のポテンシャルエネルギーのレッドシフトに起因するものであるが，COW 位相と比較すると何桁も小さい．そのため，大面積化と高統計化をさらに推し進める必要がある．大面積化については，干渉計の幾何光学として，非対称な Mach-Zehnder 型を採用することで 2 経路が囲む面積を 1m^2 程度確保する．高統計化については，ミラーサイズを $100\text{mm} \times 10\text{mm}$ 程度に拡大するとともに， 10Qc 程度の性能をもつ白色対応ミラーを用いる．ただし，明瞭な干渉縞の観測に必要なビームの空間・時間コヒーレンスを確保するために，ビームを複数の分割し，かつ時間分解測定を行うことが必要である．このような高度化を行えば，レッドシフト項に起因する一般相対論的位相差は J-PARC BL05 ビームラインにおいて，100 日程度で到達可能であることを示した．

5. 主な発表論文等

[学会発表] (計 3 件)

① 關 義親，北口 雅暁，日野 正裕，清水 裕彦，and the NOP Collaboration，“重力起因位相測定のための多層膜中性子干渉計の開発”，日本物理学会第 70 回年次大会，2015 年 3 月 21 日，早稲田大学早稲田キャンパス（東京都・新宿区）

② 關 義親，“BL05 における干渉実験—重力起因位相の測定—”，中性子物理研究会，2013 年 12 月 25 日，名古屋大学東山キャンパス（愛知県・名古屋市）

③ 關 義親，“重力起因位相測定に向けての中性子干渉計開発”，中性子物理研究会，2012 年 11 月 21 日，名古屋大学東山キャンパス（愛知県・名古屋市）

[その他]

ホームページ等
<http://rans.riken.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

關 義親 (SEKI, Yoshichika)
理化学研究所・光量子工学研究領域・光量子技術基盤グループ・中性子ビーム技術開発チーム・特別研究員
研究者番号：90585209