

氏 名	たけ 谷 かおる 竹 谷 薫
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 3239 号
学位授与の日付	平 成 20 年 3 月 24 日
学位授与の要件	学 位 規 則 第 4 条 第 1 項 該 当
研 究 科 ・ 専 攻	理 学 研 究 科 物 理 学 ・ 宇 宙 物 理 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	A study of a Mach-Zehnder interferometer for cold neutrons (冷中性子用 Mach-Zehnder 型干渉計の研究)
論文調査委員	(主 査) 教 授 今 井 憲 一 教 授 笹 尾 登 教 授 永 江 知 文

論 文 内 容 の 要 旨

申請論文は高感度の冷中性子干渉計を実現するための新しい方法に関する研究である。これまでシリコン単結晶から切り出した中性子干渉計（シリコン干渉計）を用いて様々な基礎物理実験が行われてきた。しかし、シリコン干渉計を用いて高精度測定を行うには動力学的回折を補正する必要がある。動力学的回折とは有限の厚みを持つシリコンを通過することで中性子を分波するときに中性子の幅が広がることである。動力学的回折を無視できる中性子回折素子として多層膜がある。ゆえに多層膜を用いた多層膜干渉計を用いればシリコン干渉計を用いた場合に比べてより高精度な測定が可能になると思われる。しかし、これまでの多層膜干渉計はJamin型と呼ばれる光学系を構成しており、二経路の分離がビーム幅より小さいため、応用範囲に制限を持つ。

二経路の分離がビーム幅より大きい Mach-Zehnder 型の多層膜干渉計は非常に高いミラーアライメントの精度を要求される。Mach-Zehnder 型干渉計の二経路を通過する中性子を逆向きに偏極するとミスアライメントのためにずれた干渉計の二経路を磁場によって重ね合わせられる。スピン偏極を利用した干渉計にはスピンの向きを保存するために一様磁場をかける必要がある。一様磁場の向きに磁場勾配を掛けると一様磁場に平行な向きに中性子を曲げることができる。一様磁場と同じ向きに三角形の一様磁場を掛けると一様磁場に鉛直な向きに中性子を曲げることができる。そこで、鉛直方向と水平方向のミスアライメントの補償のために三角形の一様磁場と磁場勾配の双方について考察した。

この光学系を部分コヒーレント理論に基づいてモデル計算を行った。まず、中性子と不均一磁場の相互作用を考察するためにスピン干渉計に磁場勾配と三角形の一様磁場を導入することで得られる空間縞を導いた。つぎに、ミラーのミスアライメントを有する干渉計を通過したときの空間強度を積分することで得られる干渉縞のコントラスト低下を導いた。最後にコントラスト低下した干渉計に磁場勾配を導入することでコントラストを回復させるのに必要な磁場の条件を導いた。

さらにこのモデル計算の妥当性を以下に述べる実験で検証した。中性子スピン干渉計に四重極磁石を導入し、磁場勾配を生成することで得られる空間縞を測定した。四重極磁石を用いて中性子のスピン上向き成分とスピン下向き成分に 100nrad の交差角をつけることで明瞭な空間縞を観測した。様々のパラメーターを変更し、モデル計算の結果と比較した。その結果、実験結果とモデル計算はよい一致を示した。さらに Jamin 型多層膜干渉計のコントラストを意図的に低下させた後、その下流に四重極磁石のペアを挿入することでコントラストの変化を測定した。干渉計の二経路を 40 nm 分離したものに 2.0 G/cm の磁場勾配のペアを与えることでコントラストを完全に回復できることを確認した。実験データとモデル計算は非常によい一致を示した。さらに中性子スピン干渉計に三角形の一様磁場をつくるコイルを導入し、空間縞を測定した。パラメーターを変更しモデル計算と比較した。その結果、実験結果とモデル計算は定性的な一致を示した。上記のモデル計算を基にして Mach-Zehnder 型干渉計に要求される精度を導いた。各自由度に対する要求精度は現在の技術で達成可能であるが、全自由度にたいして達成することは難しい。四重極磁石を導入することで鉛直方向の自由度に対して補償し、Mach-Zehnder 型干渉計に対する要求精度を満足できることが期待できる。

論文審査の結果の要旨

本申請論文は、多層膜中性子干渉計におけるミラーのミスアライメントの磁場補償についての研究結果を述べたものである。多層膜中性子干渉計は冷中性子に有効な干渉計として従来のシリコン中性子干渉計より、感度をあげることができると考えられている。感度を大幅に改良できれば、重力やその他の基礎物理の新たな展開が可能となるかもしれない。多層膜干渉計は最近申請者もふくむグループによって2経路の分離のごく小さなJamin型干渉計で干渉縞を見ることに成功している。しかし、経路分離を大きくとれて感度を飛躍的に改良できると考えられるMach-Zehnder型干渉計では、多層膜ミラーのアライメントの要求精度が厳しすぎてそのままでは実現が困難であった。そこで申請者はその困難を克服するために磁場補償を行うことを提案した。

Mach-Zehnder型干渉計の二経路を通過する中性子を逆向きに偏極するとミスアライメントのためにずれた干渉計の二経路を磁場によって重ね合わせられる。スピンの向きを保存するための一様磁場の向きに磁場勾配を掛けると一様磁場に平行な向きに中性子を曲げることができる。一様磁場と同じ向きに三角形の一様磁場を掛けると一様磁場に鉛直な向きに中性子を曲げることができる。そこで、申請者は鉛直方向と水平方向のミスアライメントの補償のために三角形の一様磁場と磁場勾配の双方を用いればよいことに気づき、これらの磁場をふくむ光学系について理論的な計算とそれを確かめるための実験を行っている。これらの研究は中性子干渉計としてははじめての試みであり、高く評価できる。

この光学系のモデル計算は部分コヒーレント理論に基づいて行っている。まずスピン干渉計に磁場勾配と三角形の一様磁場を導入することで得られる空間縞を導き、つぎに、ミラーのミスアライメントを有する干渉計を通過したときの空間強度を積分することで得られる干渉縞のコントラスト低下を導いた。最後にコントラスト低下した干渉計に磁場勾配を導入することでコントラストを回復させるのに必要な磁場の条件を導いた。つぎに実際の中性子スピン干渉計に四重極磁石を導入し、磁場勾配を生成することで得られる空間縞を観測した。様々のパラメーターについてのモデル計算の結果と観測結果はよい一致を示している。さらにJamin型多層膜干渉計のコントラストを意図的に低下させた後、その下流に四重極磁石のペアを挿入することでコントラストを完全に回復できることを確認している。このように自ら提案した方法がうまくいくことを実証したことは十分評価に値する。

上記のような磁場補償によって、Mach-Zehnder型干渉計に対する要求精度を満足できることを示したことは、今後の高感度多層膜中性子干渉計の実現にむけての大きなステップを与えた研究として評価できる。なおこの研究の主要内容については、すでに学術誌に掲載されている。

よって本申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認める。また、論文内容と関連研究分野に関する試問を行った結果、合格と認めた。