

立教大学学術推進特別重点資金（立教SFR）
個人研究
2024年度研究成果報告書

研究代表者	所属部局・職名	氏名
	理学部・助教	藤家 拓大
研究課題	多層膜冷中性子干渉計を用いた等価原理の検証に向けた、光学素子の開発	
研究期間	2024年度	
研究経費 (1円単位)	(支出金額) 999,985円 / (採択金額) 1,000,000円	
研究の概要 (200~300字で記入、図・グラフは使用しないこと。)		
当該研究の研究目的を含むこと。 【以下、報告書全体について】他の研究分野の委員が評価することも想定し、わかりやすく記載すること。		
<p>本研究は現代物理学の根底を成す基本原理である、等価原理の普遍性について実験的に迫る。現代物理学における4つの基本的相互作用は宇宙誕生初期において統一的に記述されると予想されるが、その統一は困難を極めている。この問題を解決する超弦理論などの新理論は究極の理論として近年注目されているが、このような新理論は物理学の基本原理である等価原理の破れを要請している。等価原理は巨視的な物質を用いた実験によって10^{-15}の精度で検証されているが、量子論的粒子を用いた検証精度は10^{-3}程度に留まっている。等価原理が厳密に成り立っているのであれば、巨視的な物質や量子論的粒子などの階層に関係なく重力結合定数が正確に等しくなるため、多くの階層の物質について重力結合定数の同一性を実験的に検証することが重要となる。そこで本研究は、量子論的粒子である中性子を用いて等価原理の検証に挑む。この研究には、我々の研究グループが新たに開発した世界最高感度の多層膜冷中性子干渉計を用いることで、先行研究を上回る検証精度を目指す。</p>		

キーワード (研究内容をよく表しているものを3項目以内で記入。)
[等価原理] [中性子干渉光学] [重力]

研究成果の概要 (図・グラフ等は使用しないこと。)

以下の視点を含めて記載のこと。

- ・当該研究は何をどこまで明らかにできたのか (できなかったのか)。
- ・何をもちて研究成果 (経過) を達成できた (できなかった) と考えられるのか
自身が設定した研究目的・目標に照らして、その根拠がわかるよう記載のこと。
- ・どのような点において、当該研究分野の学術研究推進の高度化に寄与できたのか。

本研究では、中性子干渉計を用いて重力ポテンシャル差を観測する実験体系の構築を通じて、等価原理の検証に利用可能な中性子波動制御技術の確立を目的とした。その第一段階として、異なる重力ポテンシャルと中性子波動を相互作用させるための 3 つの実験体系を提案・検討し、それぞれの実現可能性と課題を明らかにした。検討した体系から実験装置を開発し、中性子利用施設での実験を通して等価原理の検証可能性について実証した。

まず、申請時に計画していたプリズムによる屈折を利用した波動制御方式について検討した。この方式において、光学素子の設置制御精度が重力ポテンシャル差の擬似信号となるため、光学素子の精度に関する詳細な見積もりを行った。双対するプリズム間隔 0.4 mm、ウェッジ角 0.74 度の条件下で、相対平行度が 8 nrad 以下の制御が必要であることを示した。また、J-PARC BL05 ビームラインを用いる場合、目標とする重力信号の 0.5% 相対精度を達成するには約 24 時間の測定が必要であると見積もった。プリズムを要求精度以内の平行度で制御するために、既存の光学基板とフィゾー干渉計を用いた予備実験を行った。その結果、最高で 5 nrad での素子制御が可能であることを確認した。

次に、中性子ミラーによる波動制御方式を検討した。この方式では、光学基板に中性子ミラーを成膜して中性子反射を用いることで中性子波動の 2 経路を制御し、重力ポテンシャル差を与える。双対するミラーの間隔が 0.2 mm、反射角が 1.0 度の条件下で、ミラーを相対平行度 10 urad 以下の精度での制御が必要であることを示した。この方式の場合、プリズム方式と比較して必要な測定時間が約 3 時間と短縮可能であることが分かった。この方式は素子制御の要求精度を緩和できる一方で、ミラー成膜を要するなど開発項目が増加することから、実装には高い技術的ハードルがあると判断した。

3 つ目として、ゴニオステージを用いて干渉計全体を回転させる方式について検討した。この方式は装置全体の回転により 2 経路間に重力ポテンシャル差を生み出すため、装置が簡素であるという利点がある。一方で、先行研究において現れた未知の擬似信号への対処が課題となる。擬似信号はビーム中心と回転中心のずれが起因となるほか、使用するビームの発散角によっては干渉縞が失われることが懸念され、これらの対処が課題となる。前者の課題に対しては、ビーム軸と回転軸の一致精度が 6 mrad 以内であれば擬似信号の影響を排除できることを見積もった。これは学部卒業研究として学生と共同で達成した。

これら 3 つの実験体系の検討を踏まえて、研究の第一段階としてもっとも開発難易度が低いゴニオステージを用いた波動制御方法を採用することとした。上述の要求精度を満たした干渉計の固定治具を学生とともに開発し、干渉計装置に組み込んだ。開発した装置を中性子利用実験施設 (J-PARC MLF BL05) に持ち込み、中性子を用いた実験を行なった。J-PARC では中性子発生源の水銀循環系において不具合が発生していたため、本来の約 1/10 の中性子強度 (100 kW) において実験を行なった。強度の問題から、重力信号を目標精度で捉えることは不可能であったため、この実験では新たに導入した装置を用いて理想的な干渉縞が得られるかを確かめることを目的とした。

実験は 2025 年の 2 月に 3 日間行い、想定通りの干渉縞を観測することに成功した。この結果により可干渉長に関する懸念が解消され、開発した体系で重力ポテンシャル差を含んだ干渉縞の観測が可能であることを初めて示した。一方で、干渉縞から得られた位相差は理論値とは大きく異なる値であった。これは干渉計の微細な歪み等による幾何経路の変化に起因する擬似信号の存在を示唆する。重力起因の位相差は波長に比例する一方、幾何学的な要因は波長に反比例する項として現れるため、これらを分離することが今後の課題である。本実験で得られた統計量では分離は困難だが、J-PARC の本来の出力 (約 800 kW) を活用できれば、十分な統計量が得られることを見積もった。

以上より、本研究では多層膜冷中性子干渉計を用いた実験体系が重力ポテンシャル差の測定に有用であることを実証した。これは、最終目標である「等価原理の検証」への重要な一歩であり、実験的アプローチの妥当性を示すマイルストーンとなった。得られた位相差の解析結果より、統計量の課題が次のステップに必要な要素であることが明確になった。加えて、当初から教育目的として位置づけていた学生との共同研究体制についても、要求精度の見積もりや装置開発を共同で実施することにより、学部教育と研究活動の融合を具体的に実現できた。

研究成果の概要 (つづき)

一方で、当初の主目的であったプリズムを用いた波動制御方式の実装は、本予算内で要求精度の素子を調達できなかったため未達成に終わった。ただし、nm オーダーの制御が可能なピエゾステージは購入済みであり、次年度以降に向けた技術基盤は整いつつある。この点は、研究計画の柔軟な転換と段階的発展を可能にしたという意味で、研究戦略上の前進であると評価できる。

本研究を通じて、多層膜冷中性子干渉計による重力ポテンシャル差の観測技術が確立され、その方式が中性子に対する重力相互作用の精密測定に有効であることが示された。さらに、幾何学的擬似信号と重力起因の位相差を分離する枠組みと、そのために必要な実験条件も明確化された。今後、統計量の増加により、より高精度な等価原理の普遍性の検証が期待される。本体系は核力や基本対称性の破れといった他の基本的相互作用の検証実験にも応用可能であることから、中性子干渉計を用いた基礎物理実験分野の学術的高度化に大きく寄与する成果となった。

※この(様式 2)に記入の、成果の公表を見合わせる必要がある場合は、その理由及び差控え期間等を記入した調書(A 4 縦型横書き 1 枚・自由様式)を添付すること。

研究発表 (研究によって得られた研究経過・成果を発表した①～④について、該当するものを記入してください。該当するものが多い場合は主要なものを抜粋してください。)

- ①雑誌論文 (著者名、論文標題、雑誌名、巻号、発行年、ページ)
- ②図書 (著者名、出版社、書名、発行年、総ページ数)
- ③シンポジウム・公開講演会等の開催 (会名、開催日、開催場所)
- ④その他 (学会発表、研究報告書の印刷等)

1. 雑誌論文：なし
2. 図書：なし
3. シンポジウム・公開講演会等：なし
4. 日本物理学会 秋季大会 北海道大学「多層膜冷中性子干渉計を用いた等価原理の検証について」藤家拓大、北口雅暁、三島賢二、市川豪、南部太郎、関義親