

氏 名	ふな はし はる ひこ 舟 橋 春 彦
学位(専攻分野)	博 士 (理 学)
学 位 記 番 号	理 博 第 1801 号
学位授与の日付	平 成 9 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 第 二 専 攻
学 位 論 文 題 目	多層膜冷中性子干渉計

論文調査委員	(主 査) 教 授 政 池 明 教 授 今 井 憲 一 教 授 前 田 豊
--------	--

論 文 内 容 の 要 旨

量子力学の誕生以来“量子と波動の2重性”に関してさまざまな解釈がなされてきたが、近年従来の思考実験を越える新しい実験の可能性が各種技術の進展により拡がり、2重性の問題や量子論の基礎について興味を持たれるようになってきている。なかでも中性子干渉計は最も重要なものの一つとして注目されてきた。特にシリコン単結晶を用いた中性子干渉計は基礎物理・物性物理に於てめざましい成果を上げてきた。しかし、中性子のdeBroglie波としての特徴はその波長が長くなるほど顕著になるので、より長波長の中性子（冷中性子）に適用できる干渉計の開発が望まれていた。平面基板の上に異なる2種の物質を交互に積層した多層膜ミラーは、面の法線方向に深さの異なる光学ポテンシャルの矩形井戸が交互に並んだ周期構造と見なすことができる。この周期構造のための多層膜ミラーは1次元“結晶”として Bragg 反射により長波長中性子（冷中性子）を振幅分割することが可能となる。

この冷中性子波の振幅分割に適している多層膜ミラーを利用して中性子干渉計を開発すれば、シリコン単結晶干渉計の場合に問題となる大きさと波長の限界を越えることができる。本研究では、4枚の多層膜ミラーから構成される新しい型の冷中性子干渉計を実験的に検証した。4枚のGe/Ti多層膜ミラーは、2枚ずつ1基板上に多層膜ミラー（Ge/Ti）・中間単一層（Ge）・多層膜ミラー（Ge/Ti）の順で真空蒸着法により積層し1組（ペアミラー）にまとめ、2つのペアミラーを130 mm 隔て設置した。

実際の実験では2種の干渉計で測定を行なった。第一のものでは多層膜ミラーは複層厚 $d=143.2 \text{ \AA}$ 、複層数 $N=10$ であり、中間層厚 T は $1987 \text{ \AA}$ である。第2のものでは、 $d=183.3 \text{ \AA}$ 、 $N=5$ 、 $T=8650 \text{ \AA}$ である。中心波長 $12.56 \text{ \AA}$ 、波長分解能 3.5% （半値全幅）の単色長波長中性子ビームラインを建設し実験に用いた。2つのペアミラーによる2回反射の際の、後段のペアミラーの中性子反射強度をその入射角の関数として測定し、そこに顕れる干渉現象を観察した。第1・第2各々の干渉計の場合に於て、干渉のコントラストは33%及び30%であった。また、干渉縞の周期は各々 0.10° 、 0.035° であった。

この測定結果について光学ポテンシャル法に基づく中性子反射率の数値計算を行ない実験値を再現した。

また、実験値を再現するパラメータ（複層厚・中間層厚・光学ポテンシャルの補正）を用いた運動学的モデルによって干渉縞のコントラストと周期が理解できることを示し、この型の干渉計は2つのペアミラー間の相対角により2光束の位相差を制御する干渉計として機能しているという結論を得た。

更に本論文では多層膜干渉計を用いてしか出来ないさまざまな基礎物理学の実験の可能性を論じている。特に多層膜によって中性子干渉実験の長波長化と大型化が可能となり、その特長を生かした新しい実験が可能となると述べている。また、多層膜冷中性子干渉計は磁気多層膜ミラーの適用によりスピン選択や干渉のスイッチングの機能が附与されるので、これまでの中性子干渉計では土えられなかった実験も可能になるはずである。なかでもこれらを利用した“スペクトル分解に於ける可干渉性の検証”と“重力に於けるスピン依存性の探索”の可能性について具体的に論じている。

論文審査の結果の要旨

量子力学における物質波の概念は波動方程式の導入と、その実験的検証によって確立したものとなった。この波動関数の位相を直接見ることは出来ないが入射する波動を可干渉な2つの成分に分け、それぞれ別の経路を通過させた後再び重ね合わせて2成分の位相差を計数率として測定することは可能である。本研究では中性子の干渉計について論じているが中性子は核子であり、さらに、磁気モーメント・質量を持つので、干渉計中の分けられた2経路上に働く核力・磁気相互作用・重力の違いに因って2成分間に位相差を生じさせることが出来る。H. Rauch等はシリコン単結晶を用いてはじめて中性子干渉計の干渉性を確認し、それを用いて基礎物理・物性物理に於いてさまざまな実験を行ってきた。

ところで中性子の波長が長くなるほどその波動としての特徴が顕著になるため長波長の中性子を用いれば中性子の波動性に関する更に広範囲な研究を行なうことが可能となる。しかし上記のシリコン単結晶を用いた中性子干渉計の場合、結晶格子の隙間が決められているため長波長の冷中性子の干渉を行なうことは出来ない。

ところで干渉計の応用として微小相互作用の検出を考えると、干渉計の2経路上に働く微小相互作用の違いを ΔE としてそれに起因する位相差 $\Delta\phi$ は、

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

となる。ここで、 L は相互作用の働く区間の長さであり、 τ はその区間を中性子が通過するのに要する時間である。 $\Delta\phi$ は中性子波長 λ と L に比例する。干渉計をシリコン結晶を用いたものより大型化できれば、微弱な相互作用の検出に関して干渉計の光路長に比例した感度の向上を図ることができるはずである。本研究では長波長の冷中性子の干渉を行なわせるためにシリコン単結晶を用いる代わりに平面基板の上に異なる2種の物質を交互に積層した多層膜ミラーを用いている。これは、面の法線方向に深さの異なる光学ポテンシャルの矩形井戸が交互に並んだ周期構造と見なすことができ、1次元“結晶”としてBragg反射により長波長中性子（冷中性子）を振幅分割出来る。また、2種の物質のうちの一方が強磁性体であれば磁気多層膜ミラーとして中性子をスピンの向きについて選択的に反射することができる。このように多層膜冷中性子干渉計の特徴は長波長中性子への適用と大型化に留まらず、磁気多層膜ミラーを組み込む

ことにより中性子のスピン偏極やスイッチングの機能を持つ中性子干渉計となり得る点にある。

ところで、多層膜中性子干渉計開発の困難な点は光学系要素のアライメントにある。シリコン結晶の干渉計には、中性子波を分波・反射・合波する光学系要素が1個の完全単結晶から削り出され原理的にアライメントされていると云う長所があるが、多層膜を用いた干渉計の場合多層膜ミラー同士のアライメントを人為的に施す必要がある。本申請者はこのようなアライメントの問題を克服するために4枚のGe/Ti多層膜ミラーを2枚ずつ1基板上に多層膜ミラー・中間単一層・多層膜ミラーの順で真空蒸着法により積層してペアミラーとし、2つのペアミラーを十分離して設置する方法をはじめて考案した。この方式では、中間層の膜厚の均一性により1つのペアミラー中の2枚の多層膜ミラーの相对平行度を保証することにより、アライメントの問題を解決した。また、2組のペアミラーを用いることで各々のペアミラーで生じる光路差が補償でき、コントラストの高い干渉縞を得ることができた。実際2種の厚みの異なる多層膜を用いた干渉計で顕著な干渉縞のコントラストを得た。この測定結果は光学ポテンシャル法を用いた数値計算によって再現でき、また運動学的モデルによって干渉縞のコントラストと周期を理解できることを示した点も興味深い。本研究によって多層膜ミラーの反射・透過に於ける干渉性の確認と多層膜ミラーを用いた冷中性子干渉計の実証がなされ、中性子干渉実験の長波長化と大型化による測定感度の向上について新たな可能性が開かれたことは大いに評価されてよいことである。特に磁気多層膜ミラーの適用によりスピン偏極やスイッチングの機能が附与されるので、これまでの干渉計では考えられなかった実験も可能になり、中性子干渉計の新しい分野を開くことになったと考えられる。

よって、本申請論文は審査の結果、博士（理学）の学位論文として価値あるものと認定した。

なお、平成9年2月7日、論文内容とそれに関連した口頭試問をした結果、合格と認めた。