

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年5月7日現在

機関番号：11301
 研究種目：基盤研究（B）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21340048
 研究課題名（和文） 未知短距離力探索を目指した極冷中性子干渉計用コンポーネントの開発研究
 研究課題名（英文） Development of very-cold-neutron interferometer components toward search for exotic short-range force
 研究代表者
 佐貫 智行（SANUKI TOMOYUKI）
 東北大学・大学院理学研究科・准教授
 研究者番号：70323491

研究成果の概要（和文）：将来的には未知短距離力を探索する実験に用いることを目指して、極冷中性子干渉計の重要なコンポーネントを開発した。白色光干渉を用いることで、開発した干渉計用コンポーネントを極冷中性子の干渉を実現できる精度に配置するシステムを作成した。

研究成果の概要（英文）：We have developed some indispensable components for realization of very-cold neutron interferometer, which would be a tool to search for exotic short-range force. Those components were aligned precisely, using a white light fringe pattern.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010年度	5,000,000	1,500,000	6,500,000
2011年度	4,000,000	1,200,000	5,200,000
年度			
年度			
総計	14,700,000	4,410,000	19,110,000

研究分野：素粒子実験

科研費の分科・細目：素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：中性子干渉計・白色干渉計・微小重力

1. 研究開始当初の背景

パラメータ振動とは、振動系に含まれるパラメータを周期的に変化させて系に振動を発生させることであった。外力の振動数と振動系の固有振動数が特定の関係を満たしたときに、振幅が急激に増大する。これをパラメータ共鳴と呼ぶ。“ブランコの立ち漕ぎ”は、漕ぐ人の屈伸運動の振動数がブランコの振動数の2倍のときに起こるパラメータ共鳴として紹介されることも多い。また、この現象はテレビやラジオの電波の増幅などにも広く応用されている。ブランコや電波の増幅などの古典的な系だ

けでなく、量子力学的な系でもパラメトリック共鳴は起こり得る。量子力学では、振幅に加えて位相が重要な意味を持つ。外力となるポテンシャルが系のエネルギーと特定の関係を満たすとき、位相が急激に進む「位相のパラメトリック共鳴」が引き起こされる。最近になって、中性子とマクロな物体の間に湯川ポテンシャルで記述されるような未知の相互作用が存在する場合について、位相のパラメトリック共鳴の計算が行われた[1, 2]。これらの計算では、非常に狭い間隙を持った物体を中性子が通過していく状況を想定している。間隙の幅が中性子の波長の1/4倍に

なったときに位相のパラメトリック共鳴が発生し、位相が急激に進むと予想される。位相のパラメトリック共鳴現象では、非常に大きな位相変化が起こる。しかし、我々が観測する位置やエネルギーなどの物理量は波動関数の自乗に依存するので、位相が急激に進んだとしても感知することはできない。ところが、干渉計では状況が異なる。波を2つの経路に分けた後に、各々の経路で異なるポテンシャルを与え、再び1つの経路に合わせると、経路に依存して異なる位相の進み方を干渉によって明確に見ることができる。

中性子を用いる干渉計は、広く利用されているレーザを用いる干渉計と比べて波長が短いために、非常に微細な対象を研究するのに適している。ところが、強力な光源が存在し、多種多様な光学素子で光路を自由自在に制御できるレーザ光と比較すると、中性子は取り扱いが難しかった。しかし、近年になって中性子用の高性能な光学素子が開発され、中性子干渉計を用いた精密な実験が可能になった。

高感度の中性子干渉計を利用すれば、位相のパラメトリック現象を観測できる可能性がある。特に、極冷中性子を用いる干渉計では、一般的に使用されている冷中性子を用いた干渉計よりも位相の決定精度が高い。中性子の波長が10nmであることと考えると、ナノメートルスケールの物理現象を調べることができる。すなわち、本研究で目指している極冷中性子干渉計を用いると、パラメトリック共鳴の観測によって、到達距離がナノメートル程度の力に対する非常に高感度な探索が可能になる。

ここ数年、超弦理論に登場する Large Extra Dimension が注目を集め、様々な現象論が研究された。その中で、短距離力が予言されている。最も直接的な未知短距離力の探索手段は、マクロな2つの物体を近づけて、両者の間に働く力をねじり秤等で精密に測る方法である。ところが、この方法では、物体が僅かに帯電しただけで電気力による大きなバックグラウンドの影響を受けてしまう。中性子を用いると、電気力の影響を無視できるので非常に有利である。

現存する実験では、力の到達距離が10nm程度の短距離力に対しては、力の強さが重力の 10^{20} 倍ほど強くても検出できない。しかし、パラメトリック共鳴を利用した探索では、理想的な実験装置を製作できれば、重力と同程度の弱い相互作用でも十分に検出が可能である[2]。その感度は極めて高く、既存の実験をどんなに精密化しても到底到達できないほど鋭敏である。

素粒子世界の未知相互作用の研究には、大型加速器実験が強力な研究手段であるが、未知の短距離力の探索によって超高エネルギー

の世界を間接的に探ることも極めて興味深い実験手段である。

2. 研究の目的

上に述べたように、パラメータ共鳴を利用した未知相互作用の探索実験は極めて感度が高く、非常に有望である。しかし、実際に実験を行うためには、いくつかの重要な開発項目がある。また、強力な極冷中性子源は世界中を見ても数が限られているため、開発した素子の試験には時間を要する危険性もある。そこで、本研究では、本番の実験を行うのに必要な素子の開発と、それらの素子の性能を評価する方法を確立する。

3. 研究の方法

(1) 間隙が広い極冷中性子用エタロンの開発：

① 中性子干渉計を用いて位相差を正確に決定するためには、波長の長い極冷中性子を用いる方が有利である。そこで、動作実績のある冷中性子用ではなく、極冷中性子の波長に合わせて設計する。また、エタロンで分けられた2本の中性子ビームの間隔を十分に確保できるように間隙を広くしながらも、十分に良い精度で平行な間隙を持ったエタロンを製作する。

② 中性子反射膜のデザインを行う。反射膜には、金属の薄膜多層膜を用いる。反射率は反射膜に用いる金属の種類や厚さ、層構造に依存し、用いる中性子の波長に応じて最適化を図る必要がある。また、中性子はエタロンの基材を通過する必要があるため、基材での吸収を少なくするためには入射角をあまり小さくはできない。これらの要件を考慮しながら、動作実績のある冷中性子用ではなく、極冷中性子用に反射膜を設計する。設計と最適化には、計算機によるシミュレーションを用いる。透過や吸収は一次元の量子力学問題として取り扱えるため、解析的な見積も可能である。シミュレーションと解析的な計算結果を合わせて、反射膜の最適化を進める。

③ 極冷中性子に最適化した反射膜をエタロンの基材上に実際に製作し、基本的な性能を試験する。製作には、京都大学原子炉実験所が所有する蒸着装置やスパッタ装置を用いる。基材上に作った反射膜の基本的な性能を日本原子力研究開発機構の施設に於いて冷中性子を用いて確認する。

(2) アライメント装置の製作：

① 種々の素子を配置して中性子干渉計として動作させるためには、素子を正確にアライメントする装置が必要である。市

販されているアライメント用の各種ステージを利用してシステムを組み、基本的な動作確認を行う。

- ② 干渉計コンポーネントを正確にアライメントするための機構を開発する。申請者も計画の当初から参加していた KEK に建設中の ATF2 加速器では、35nm という細さに絞った電子ビームの軌道をナノメートルの精度で制御するために、電磁石やビームモニタの位置をナノメートルの精度で制御する必要がある。この精度を実現するために、様々なセンサや微動装置が開発されてきた。これらの技術を参考にして、中性子干渉計の素子の位置を実験中も常に監視しながら必要に応じてフィードバックをかけるシステムを開発する。

- (3) 極冷中性子干渉計の実現：極冷中性子に最適化した、2 本の中性子ビームが完全に分離させる干渉計を実際に組み、その性能を評価する。

4. 研究成果

- (1) 間隙が広い極冷中性子用エタロンの設計：これまでに動作実績のある冷中性子用のエタロンではなく、より波長の長い極冷中性子に合わせたエタロンを設計した。エタロンの対向する内面に形成する中性子反射膜をデザインし、計算によって性能を見積もった。中性子反射膜には金属の薄膜多層膜を用いることとし、中性子の入射角を考慮しながら、反射膜に用いる金属の種類や厚さ・層構造を最適化した。形成する薄膜多層膜の機械的な強度等も考え合わせた検討の結果、動作実績のある冷中性子用のエタロンと似た薄膜多層膜を形成し、入射角を調整することで極冷中性子に用いる方法が最善であると分かった。このとき、対向する中性子反射膜の間隔は、動作実績のある冷中性子用のエタロンの 10 倍ほどの 1.8mm となり、高度な製作精度が要求されることになる。

設計した中性子反射膜を実際に製作し、茨城県東海村にある日本原子力研究開発機構の原子炉施設において実際に中性子を照射して性能を評価した。その結果、ほぼ予想通りの性能を有することを確認できた。

- (2) 極冷中性子干渉計の設計：極冷中性子干渉計として、上述のエタロンを用いるジャマン干渉計と、ビームスプリッターとミラーを用いるマッハ・ツェンダー干渉計を検討した。前者は、干渉計コンポーネントのアライメントが比較的容易であるが、中性子の 2 つの経路がほとんど分離せず、未知相互作用の探索等の実験には不向きである。後者は、干渉計コンポーネントのアライメントが困難であると予想されるが、中性子の 2 つの経路が大

きく分離するので未知相互作用の探索等の実験には好都合である。詳細な検討の結果、2 つの方式の干渉計で、干渉計コンポーネントのアライメントに要求される精度は予想したほど変わらないことが分かった。そこで、当初検討していたジャマン干渉計ではなく、マッハ・ツェンダー干渉計を目指すこととした。中性子の 2 つの経路は最大で 6cm ほども離れるので、様々な実験が可能になる。

- (3) 干渉計アライメント機構の開発：現存する極冷中性子源を用いた干渉計の可干渉長について詳しく調べた結果、極冷中性子の干渉を明確に観測するためには干渉計を構成する各素子の位置を 10nm 程度の精度で制御する必要のあることが分かった。特に、極冷中性子干渉計の 2 つの経路の長さは、25nm の精度で一致させる必要がある。

経路の長さを正確に一致させるために、白色光干渉法を用いる方法を考案した。上述のような高精度での配置を実現するために、中性子と可視光をほぼ同じ経路で通すことのできる干渉計を設計した (図 1)。入射する可視光としてはコヒーレン長が短い白色光源を利用し、干渉させる 2 つの経路長が一致するように調整できるようにした。

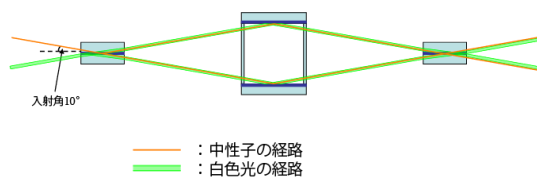


図 1 設計した干渉計の概念図

- (4) 極冷中性子干渉計コンポーネントの開発：白色干渉計を組み込んだような極冷中性子干渉計を実現するために、必要となるコンポーネントを開発した。

- ① 上述のように中性子と可視光をほぼ同じ経路で通そうとしても、中性子と可視光に対する光学ガラスの屈折率が大きく異なるために一般的なハーフミラーは動作しない。中性子と可視光をほぼ同じ経路で通し、両者に対して同時に使用可能な”ハイブリッド”半透明鏡を開発した。中性子と可視光に対する反射膜を成膜した 2 枚の光学ガラスを光学ガラスに近い屈折率を持つ接着剤を用いて貼り合わせている。機械的強度が不足する中性子用反射膜を保護する工法を開発し、可視光だけでなく中性子に対しても必要な性能を有するレベルにまで達した。
- ② 白色光干渉縞の形状と色を測定するために、小型分光計を利用したコンパクト

な読み出し装置を開発した。極冷中性子干渉計に組み込んで使用することができる。小型分光計からの信号を解析することで、干渉計の各種コンポーネントを所定の位置へとアライメントするフィードバック装置が可能になる。

- ③ 干渉計素子は比較的軽量な一枚板の上に設置し、移動しても短時間のうちに元の精度を実現できる可搬システムとすることができた。

(5) 極冷中性子干渉計の製作：開発したコンポーネントを実際に組み上げ、白色干渉を用いたアライメント機構が動作するか確認した。調整の結果、きれいな白色干渉縞を見ることができた。

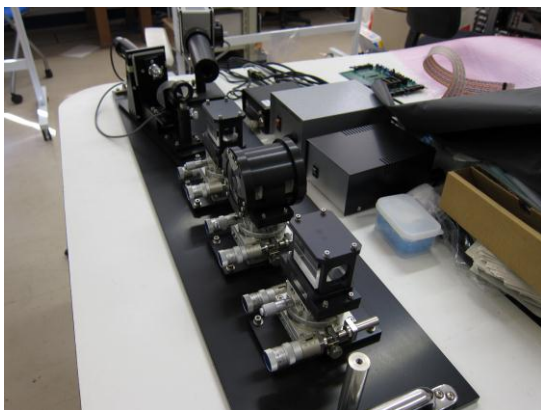


図2 干渉計を組み上げた様子

(6) 白色光干渉の様子を長時間にわたって調べると、開発した干渉計は比較的長時間にわたり安定して動作すると見込まれた。この結果、当初考えていたピエゾステージを用いたアクティブなフィードバック機構を導入することよりも、温度等の環境変化を小さくすることを優先することとした。



図3 白色光干渉縞（色が見えるようにアライメントをずらして撮影している）

(7) 今後の展望：開発した極冷中性子用干渉

計が本当に必要な性能を有しているか確認するためには、実際に極冷中性子を用いた実験が不可欠である。実験に必要な強力な極冷中性子源は国内には存在しないので海外へ赴かねばならないが、海外での実験には時間も費用もかかるので、国内における事前の予備実験が必須である。国内での予備実験には、城県東海村にある日本原子力研究開発機構の原子炉施設が最適であるが、当該研究期間中は運転されていない期間が長かった。特に、2011年度末に起こった東北地方太平洋沖地震後は運転再開の予測すら立たなくなってしまった。

こういう状況であるので今後のスケジュールを明確にすることは難しいが、開発した極冷中性子用干渉計にできるだけ早く極冷中性子を照射し、性能を確認したい。そして、パラメトリック共鳴を利用した未知短距離力の探索実験に取りかかりたい。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表] (計3件)

- ① 北口雅暁、超冷中性子を用いた基礎物理と J-PARC での展開、中性子科学会、2010年12月10日、東北大学
- ② 鈴木善明、極冷中性子用干渉計の設計、日本物理学会、2010年3月23日、岡山大学
- ③ 佐貫智行、未知相互作用の探索、日本物理学会、2009年9月12日、甲南大学

6. 研究組織

(1) 研究代表者

佐貫 智行 (SANUKI TOMOYUKI)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70323491

(2) 研究分担者

北口 雅暁 (KITAGUCHI MASAOKI)
京都大学・原子炉実験所・助教
研究者番号：90397571