

平成 21 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2007～2008

課題番号：19540351

研究課題名（和文） 磁気回路による中性子偏極装置の性能実証

研究課題名（英文） Studies of neutron polarization by multi-pole magnetic circuits

研究代表者

猪野 隆（INO TAKASHI）

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師

研究者番号：10301722

研究成果の概要：多重極磁気回路は、その大きな磁場勾配により中性子ビームを偏極させることが可能である。しかし、その偏極性能を包括的に測定した例はなく、実用化も限られている。本研究では、広いビーム開口面積を持つ偏極ヘリウム 3 ガスの中性子スピン・フィルターを用いることにより、多重極磁気回路を透過する中性子ビームの偏極率を包括的に測定することができた。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：中性子科学

科研費の分科・細目：物理学・物性 I

キーワード：X線・粒子線、中性子

1. 研究開始当初の背景

中性子散乱研究における偏極中性子の役割は、磁気散乱と核散乱の違いを利用する磁性研究や水素を多く含む物質における干渉性散乱と非干渉性散乱の分離、そして散乱による中性子のわずかなエネルギー変化をラマースター運動から測定するスピン・エコー法やラムゼー法などにおよぶ。また中性子ベータ崩壊における各粒子の角度、スピン相関を調べることによる標準模型の検証や新しい物理の探求など、基礎物理学研究においても偏極中性子は重要な役割を担う。

中性子を偏極させる装置として、磁場勾配を利用するもの以外に、①磁性体の中性子に対するポテンシャルが磁場の向きと中性子スピンの向きによる違いを利用するミラー型、

②ヘリウム 3 や陽子の断面積がスピンの依存して大きく違うことを利用する偏極フィルターが存在する。①のミラー型は、低エネルギーの中性子に対して有効に作用し、99%程度の高い偏極率が容易に得られるため、広く利用されている。全反射を利用してスピンの成分を分けるため、中性子の入射角度に対して高い精度でミラーを設置する必要があり、同じ理由でビーム発散も問題となる。また、多くの場合ミラーを透過した偏極ビームを利用するため透過ビームの強度やガンマ線バックグラウンドの発生が問題となりうる。②のスピン・フィルターのうち偏極ヘリウム 3 を利用するものは、ガスであるため中性子入射角の問題がないので、大きい（広い）ビームを偏

極したり、あるいは散乱中性子を広角度にわたって偏極解析することが可能である。また、熱中性子以上のエネルギー領域でも偏極が可能である。最近、欧米での利用が広がっているヘリウム3偏極フィルターは、装置の開発や維持、管理が難しく、また、透過ビーム強度と偏極率が背反するので、適度なビーム強度を維持するためには偏極率が70%-90%程度におさえられてしまう。そこで、維持、管理が容易で、かつ高い中性子偏極率を実現できる多重極磁気回路型中性子偏極装置の性能を評価し実用化の可能性を研究する必要が生じていた。

2. 研究の目的

本研究は、磁場勾配を用いた中性子偏極装置の性能を高い精度で評価することにより、その有用性を実証し、利用を促進することが目的である。

磁場勾配を用いた中性子偏極装置とは、下図に示した四極磁気回路または六極磁気回路で発生する大きな磁場勾配の中に中性子ビームを通し、シュテルン-ゲルラッハ実験のごとく中性子が磁気モーメント、すなわちスピンの向きにより選択され、偏極中性子ビームを得る装置である。

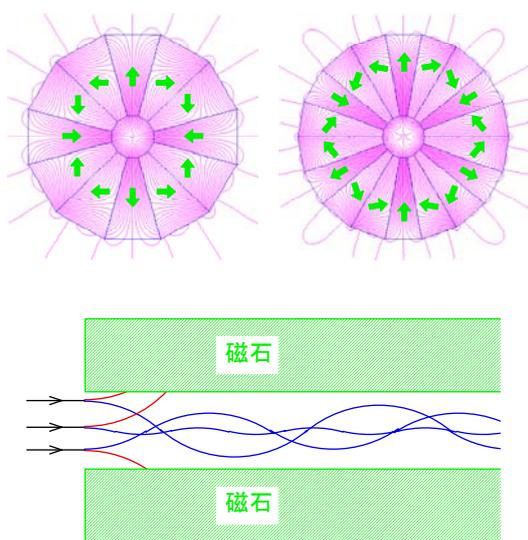


図1 上左から永久磁石による四極磁気回路と六極磁気回路。下は磁気回路の中空部を中性子が通過する様子。スピンの向きによって経路が異なり、特定のスピンを持つ中性子が選択的に多重極磁気回路を透過する。

具体的には、四極磁気回路の場合、中空部では動径方向に対して磁場の変化が一定なので、中性子は放物運動をする。その方向は、スピンの向きにより中心へ向かうか、あるいは中

心から遠ざかる方向となるので、中心へ向かうスピン成分のみが中空部を通過し、逆向きスピンの中性は磁石にぶつかり吸収されてしまう。六極磁気回路の場合は、中性子に働く力が中心からの距離に比例するためバネ運動となる以外は四極の場合と同様である。また、これら磁気回路の中空部に閉じこめられた中性子は放物運動あるいはバネ運動を繰り返しながら磁気回路の軸方向に進むため、これらの磁気回路は中性子偏極装置としてのみならず中性子輸送管としての機能も有する。

多重極磁気回路型偏極装置は、原理的に、非常に高い偏極率を容易に得ることが可能である。図2は、磁気回路を通過する中性子の偏極率と強度の変化を通過距離に対してシミュレーション計算したものである。

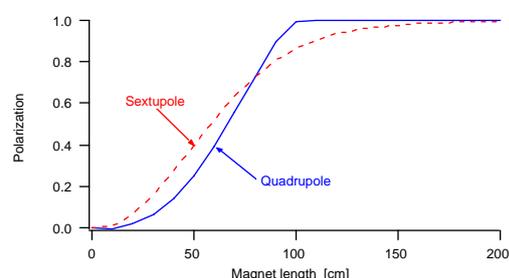


図2 波長 8Å の中性子が四極磁気回路、六極磁気回路を通過する間の偏極率の変化。

図2は、波長 8Å の中性子が四極磁気回路、六極磁気回路を通過する間の偏極率の変化と中性子透過率の変化を示したものであるが、この例では、四極磁気回路の場合、わずか1m通過するだけで99.99±0.01%のビーム偏極率が得られている。このような非常に高い偏極率は、一般的な偏極中性子散乱実験では必要ないが、スピン・エコーやラムゼー法による非弾性散乱、中性子ベータ崩壊などの基礎物理実験では非常に有効となる。

計算の上では、磁気回路型偏極装置により非常に高い偏極率が得られるが、それを実験的に包括的に実証した例はない。磁気回路内のごく一部分の経路について、そこを透過する中性子の偏極率を測定した例は存在したが、磁気回路内の全領域に渡って透過中性子の偏極率を測定した例はない。磁気回路内を透過する中性子の偏極率は場所によって変化するはずであり、また中性子散乱実験では全透過中性子を利用するので、中性子偏極率を包括的に測定する必要がある。

3. 研究の方法

多重極磁気回路型偏極装置は直径1cmから

数 cm の口径を有するがこのような広い領域に渡って中性子偏極率を測定するには、偏極ヘリウム 3 中性子フィルターを用いるのが望ましい。偏極ヘリウム 3 中性子スピン・フィルターは透過ビーム強度と透過中性子偏極率が背反するので、これを利用し、透過ビーム強度を犠牲にすることにより、非常に高い中性子の偏極率（偏極解析能）が得られる。図 3 は、偏極率が 50%であるヘリウム 3 ガスを透過する 8 Å 中性子の偏極率と透過強度をヘリウム 3 ガスの実行的厚さ（圧力×厚さ）に対して計算したものである。

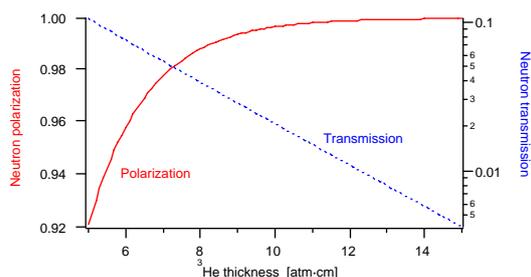


図 3 スピン偏極したヘリウム 3 ガスを通過する中性子の透過率と偏極率の様子。

図 3 に見るように、ヘリウム 3 の偏極率が有限でもガスの実行的厚さを増すことにより、ビーム強度（透過率）を犠牲にして非常に高い中性子偏極率が得られる。

実際の測定は、透過中性子強度が弱いため、長時間にわたる。偏極ヘリウム 3 ガスは時間とともにスピン偏極が失われるが、測定期間中偏極率を一定に保つ必要があり、中性子ビームライン上でヘリウム 3 を偏極するコンパクトなヘリウム 3 偏極装置の開発を行い、これにより多重極磁気回路型偏極装置を通過する中性子ビームの偏極率を測定した。中性子ビームテストは JRR-3/NOP ビームラインで行った。NOP ビームラインの中性子ビームは上流に設置されたモノクロメータにより 7.6 Å となっている。実験セットアップの概要図を下に示す。

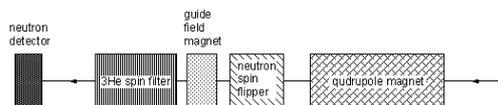


図 4 JRR-3 中性子ビーム実験の測定体系概念図。

図 4 で中性子ビームの上流側は右で、上流から、四重極磁気回路、中性子スピン・フリップパー、中性子偏極保持のためのガイド磁場を発生する電磁石、中性子偏極解析用ヘリウム

3 スピン・フィルター、中性子検出器が配置されている。四重極磁気回路で偏極された中性子ビームは、直下流の中性子スピン・フリップパーでスピン方向が 180 度回転できるようになっており、この中性子スピン・フリップパーをオン/オフすることにより、スピン方向の相異なる中性子がヘリウム 3 スピン・フィルターに入射する。ヘリウム 3 スピン・フィルターを透過した中性子は、最下流に設置された中性子検出器によりその強度が測定でき、透過中性子の強度比から四重極磁気回路で偏極された中性子のスピン偏極率を求めることができる。

4. 研究成果

中性子テストビーム実験の結果を図 5 に示す。

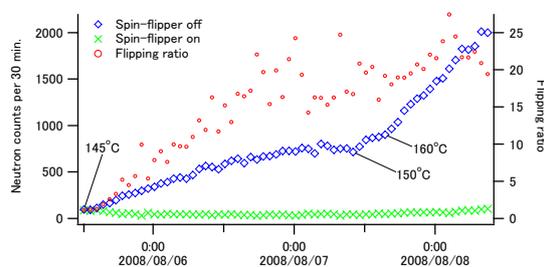


図 5 ヘリウム 3 の偏極に伴う中性子計数およびそれらの比。

図 5 で、” Spin-flipper off ” は中性子とヘリウム 3 のスピンが同方向の時の中性子計数、” Spin-flipper on ” は中性子とヘリウム 3 のスピンが反平行の場合の中性子計数である。” Flipping ratio ” はこれらの比である。測定は、ヘリウム 3 偏極装置の調整をかねて行われたため、これらの値が時間とともに変化しているが、” Spin-flipper off ” での中性子強度の上昇からヘリウム 3 の偏極率が時間とともに上昇していることがわかる。

偏極中性子のヘリウム 3 透過率は次の式で表せる。

$$T = e^{-\sigma \rho t} (\cosh P_{He} \sigma \rho t + P_N \sinh P_{He} \sigma \rho t) \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 σ はヘリウム 3 の非偏極中性子に対する吸収断面積で、7.6 Å に対しては 22532 b である。また、 ρ と t はセル内のヘリウム 3 数密度と厚さである。 P_N と P_{He} は、それぞれ入射中性子とヘリウム 3 の偏極率である。中性子透過率 T の絶対値測定は困難であるため、

同測定体系において、ふたつ以上の異なる条件での相対透過率から各々のパラメータを求める。例えば、 ρt は非偏極のヘリウム 3 セル ($P_{He} = 0$) と同形状でヘリウム 3 が封入されていないセル ($\rho t = 0$) に対して各々透過率 T_0 、 T_{empty} を測定し、その比からヘリウム 3 セルの ρt を求めている。この実験で使用中性子スピン・フリップパーは、スピン反転効率が 0.99 以上であるため、近似的にこれを 1 と見なせば、“Spin-flipper off” と “Spin-flipper on” の透過率は式(1)において入射中性子偏極率が P_N と $-P_N$ の場合となる。すなわち、これら 2 条件のデータを足し合わせると、次式の関係が得られる。

$$T = e^{-\sigma t} \cosh P_{He} \sigma \rho t \dots \text{式(2)}$$

式(2)から、ヘリウム 3 偏極時と非偏極時 ($P_{He} = 0$) の中性子透過率の比を取ることにより、次式のようにヘリウム 3 偏極率を求めることができる。

$$\frac{T}{T_0} = \cosh P_{He} \sigma \rho t \dots \text{式(3)}$$

一方、“Flipping ratio” は式(1)から次の式で表される。

$$\frac{T_+}{T_-} = \frac{\cosh P_{He} \sigma \rho t + P_N \sinh P_{He} \sigma \rho t}{\cosh P_{He} \sigma \rho t - P_N \sinh P_{He} \sigma \rho t} \dots \text{式(4)}$$

この式により、“Flipping ratio” とヘリウム 3 偏極率から入射中性子偏極率を求めることができる。図 6 にこれらにより導かれた入射中性子偏極率およびヘリウム 3 偏極率をプロットした。

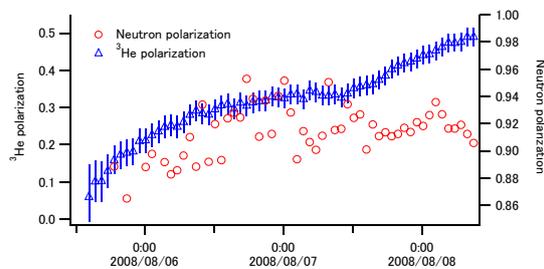


図 6 中性子透過率から求めたヘリウム 3 偏極率と入射中性子偏極率。

図 6 に見るように、入射中性子の偏極率は 90% 以上であることが確認できた。しかし、ヘリウム 3 の時間変化に見るように、今回のテストビーム実験は、かならずしも安定した条件で行われてはいない。ヘリウム 3 スピン・フィルターの調整が充分なされておらず、また、限られたビームタイムのため、今回の測定結果に対して系統誤差の評価もできていない。具体的には、四重極磁気回路からヘリウム 3 スピン・フィルターに至る中性子ビームライン上で、十分に中性子スピン偏極が保持されているかは、現在のところ、不明である。すなわち、この領域では中性子のスピン偏極が失われている可能性があり、このことにより、入射中性子の偏極率が実際のものより小さく測定されている可能性がある。

以上の結果から、四重極磁気回路により 90% 以上の偏極率を持つ偏極中性子ビームが生成されることは確認できたが、当初の予想である 99% 程度以上という高い中性子ビーム偏極率を研究期間内に確認することはできなかった。しかし、測定のための装置類は、その基本的動作も含め準備ができたので、今後もこの研究を継続し、より精度の良い測定を行う所存である。

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 著者名 : Takashi Ino, Mitsutaka Nakamura, Takayuki Oku, Takenao Shinohara, Jun-ichi Suzuki, Kenji Ohoyama, Haruhiro Hiraka
論文標題 : Development of a Compact on-beam SEOP Neutron Spin Filter
雑誌名 : Physica B
査読 : 有
巻、発行年 : In print (2009)

[学会発表] (計 1 件)

- ① 発表者 (代表) 名 : Takashi Ino
発表標題 : Development of a Compact on-beam SEOP Neutron Spin Filter
国際会議名 : Polarized Neutron for Condensed Matter Investigations - PNCMI 2008
発表年月日 : September 1-5, 2008
発表場所 : Tokai, Ibaraki, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

猪野 隆 (INO TAKASHI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師

研究者番号：10301722

(2) 研究分担者

武藤 豪 (MUTO SUGURU)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・研究機関講師

研究者番号：90249904

(3) 連携研究者

なし