

令和 4 年 6 月 13 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21876

研究課題名（和文）熱外中性子反射光学

研究課題名（英文）Reflective Epithermal Neutron Optics

研究代表者

清水 裕彦（Shimizu, Hirohiko）

名古屋大学・理学研究科・教授

研究者番号：50249900

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,900,000円

研究成果の概要（和文）：中性子の物質表面における全反射は、熱中性子や冷中性子あるいはそれよりも低速の中性子の光学的制御に用いられ、中性子利用効率の大幅な向上に寄与している。大強度スパレーション中性子源の稼働により熱外中性子ビームの本格的利用が進んでおり、熱外中性子の全反射光学の実用化が望まれる。本研究では、J-PARC MLFにおいて、単結晶シリコンによる中性子回折を用いて77meVから695meVのエネルギー範囲の平行中性子ビームを用意し、多層膜中性子ミラーによる鏡面反射を実測した。これによって、中性子全反射光学系の適用範囲は、500meVを超えて、近熱外中性子領域に拡張された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で近熱外中性子の全反射が実測されたことにより、中性子の物質表面における全反射が物質表面が完全な平面である限り、表面法線方向の中性子速度成分が物質固有の臨界速度に比べて小さい範囲において、入射中性子のエネルギーに依存せずに生じることが実証された。同時に、現在の精密機械加工の水準で問題なく近熱外反射光学を構成できることが実証され、熱外中性子を用いた中性子吸収による複合核過程を利用した基礎物理研究、熱外中性子非弾性散乱による物性物理あるいは化学研究における利用の拡大を図ることが可能となった。

研究成果の概要（英文）：The total reflection of slow neutrons on material surfaces is widely applied to enhance the utilization efficacy of neutrons. The extension of the applicable energy range to higher energies enables the practical and efficient use of epithermal neutrons introduced by the stable operation of the spallation neutron sources. In this research, the specular neutron reflection on a multilayer neutron mirror has been observed using the low divergence neutron beam via neutron diffraction with Si crystal in the energy range between 77 meV and 695 meV. Consequently, the applicable energy range of neutron optics by the total reflection has been expanded to the near-epithermal region beyond 500meV.

研究分野：原子核素粒子物理学、中性子科学

キーワード：中性子光学 中性子反射光学 熱外中性子

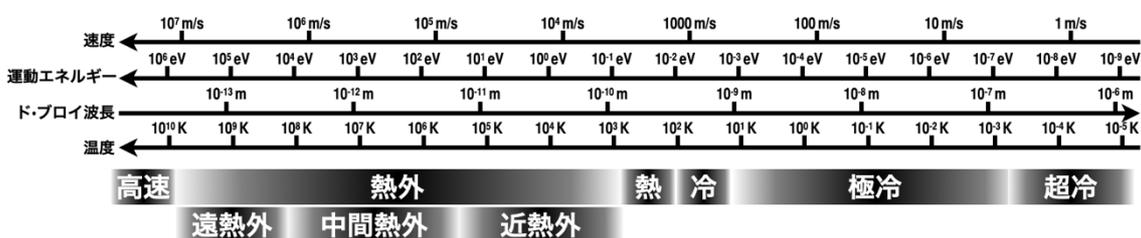
様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

熱中性子や冷中性子は、対応するド・ブROI波長が固体中の原子間隔に近いので、物質内の原子配置や、原子同士の空間的秩序などの物質科学上必要な情報を引き出すプローブとして用いられる。この事情は X 線と同様だが、X 線が物質内の電子によって散乱されるのに対して、中性子は原子核によって散乱される点が大きく異なる特徴である。その結果、中性子は X 線に比べて物質透過力に優れ、軽元素に対する感度が相対的に大きくなる。さらに、中性子の質量が原子に近いので、物質中の原子の動力学的情報を引き出すのに優れている。しかし、中性子は位相空間密度がとても低いため、光学系で効率よく試料にビームを導くことが極めて重要である。最も広く用いられる方法が、物質表面での中性子の全反射を利用する中性子反射光学系である。しかし、中性子反射光学系の実用は熱中性子および冷中性子以下のエネルギー領域に限られており、元素ごとあるいは同位体毎の情報を引き出すのに適した熱外中性子に対する実用は未だなされていない。

2. 研究の目的

本研究では、物質表面における熱外中性子の完全反射を実測し、熱外中性子反射光学系の実用化によって熱外中性子の利用効率を引き上げることが目的とする。なお、中性子の持つ運動エネルギー領域毎に、下図に示すような名称を用いることとし、この研究では近熱外領域のうち、およそ 100 meV から 1 eV のエネルギー領域における全反射を、J-PARC の中性子ビームを用いて実測することを目指す。



3. 研究の方法

一般に、中性子は物質中では核散乱を原子体積で平均したポテンシャルを感じる。このポテンシャルはフェルミポテンシャルと呼ばれ、原子核による中性子の散乱長を a 、中性子質量を m_n 、核数密度を N と置くと、 $U = (\hbar^2 / 2\pi m_n) a N$ であり、その大きさは概ね 10^7 eV ととても小さい。中性子が物質表面に沿うように入射し、物質表面の法線方向の中性子速度に対応する運動エネルギーがフェルミポテンシャル以下になるほどに入射見込角度が小さければ、全反射を起こす。対応する表面法線方向の速度は 10 m/s のオーダーであり、例として速度 1000 m/s の冷中性子を考えると、おおよそ 10^{-2} rad 以下の角度で入射した場合にのみ反射されることとなる。このように、一般に中性子反射光学系のアクセプタンスは小さいのだが、近熱外中性子の速度はさらに桁大きいので、全反射が起こる入射見込角はさらに桁以上小さく 1 mrad のオーダーとなる。そこで問題になるのが、中性子反射鏡表面の平坦度の向上である。これは理化学研究所の精密機械加工技術によって解決する。その上で、J-PARC の熱外中性子ビームを用いて、全反射を実測する。

近熱外中性子の全反射を実測するためには、ビーム発散を 1 mrad 程度以下に抑制する必要がある。ビーム発散の抑制には、ダブルスリットを用いることが一般的であるが、ダブルスリットを用いると中性子速度が大きくなるにつれて長いフライトパスが要求され、J-PARC のビームラインでの実測が難しい。そこで、シリコン単結晶の高次回折を用いて平行ビームを得ることとする。

4. 研究成果

実験は J-PARC MLF BL10 (NOBORU) において実行した。図 1 のように、単結晶シリコンによって回折した中性子を多層膜中性子ミラーに入射させた。多層膜ミラーは $m=6$ 付近の単色反射ミラーになっていた。 $\langle 111 \rangle$ から $\langle 999 \rangle$ に至る範囲での位置分布を図 2 に示す。 $\langle 222 \rangle$ および $\langle 666 \rangle$ は消滅則により回折は起こらない。熱中性子の運動エネルギー 25 meV を超えるのは $\langle 333 \rangle$ から $\langle 999 \rangle$ までであり、中性子エネルギーとしては 77 meV から 695 meV の範囲であった。図中、塗り潰し点がミラーを置かない時の位置分布、中抜き点がミラーを置いた時の位置分布を示している。この図だけからでも、熱外中性子の全反射は十分に確認できる。バックグラウンドを補正した上で、反射成分を抜き出した最終結果を間もなく投稿する。以上より、熱外中性子ビームの鏡面反射の実測は成功し、前例のない 500 meV 以上の近熱外中性子の全反射を観測した、と結論する。当初の見積通り、現在の精密機械加工の水準で問題なく近熱外反射光学を構成できることが実証されたことで、熱外中性子を用いた中性子吸収による複合核過程を利用し

た物理研究、熱外中性子非弾性散乱による物性物理あるいは化学研究における利用の拡大を図ることが可能となった。

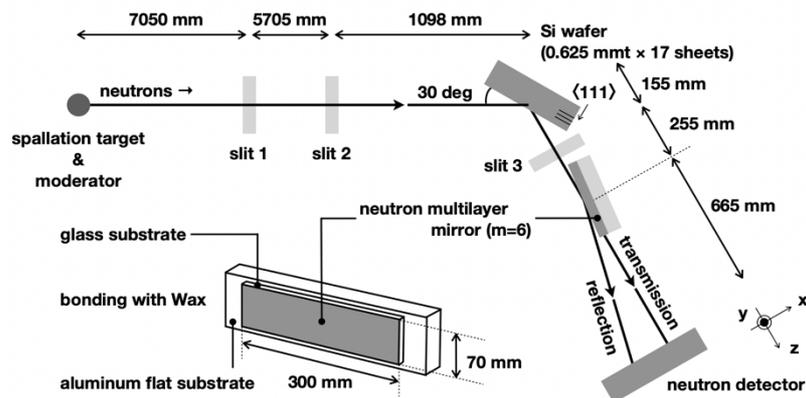


図1. 測定のセットアップ

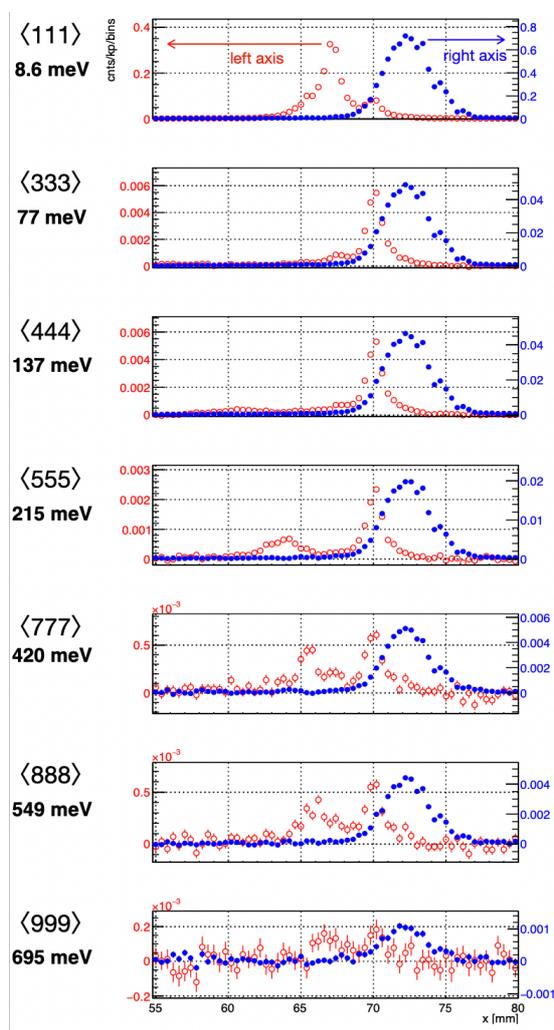


図2. シリコン単結晶によって回折した中性子ビームの位置分布。測定された中性子位置分布。塗り潰し点はミラーを置かなかった場合で、中抜き点はミラーを置いた場合である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 藤家拓大、安部亮太、石崎貢平、伊東佑起、遠藤駿典、奥平琢也、亀田健斗、北口雅暁、木村敦、酒井健二、嶋達志、清水裕彦、高田秀佐、中井飛翔、広田克也、藤岡宏之、吉岡瑞樹、吉川大幹、他NOPTREXコラボレーション 2. 発表標題
2. 発表標題 複合核反応を用いた時間反転対称性の破れ探索実験に向けた熱外中性子反射光学の検証
3. 学会等名 日本物理学会 2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------