

京都大学	博士 (工学)	氏名	船間 史晃
論文題目	パルス中性子源における集光ビームを用いた中性子共鳴スピネコー分光法および小角散乱法の開発		
<p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、大規模と小規模のパルス中性子源において、集光ビームを利用した新たな中性子散乱分光法の実現可能性を探求したものである。具体的には中性子共鳴スピネコー (NRSE) 分光器で高エネルギー分解能を達成するための位相補正法の開発、集光 NRSE 分光器の実現可能性の実験的評価、小型中性子源における中性子小角散乱 (SANS) 実験体系の開発を行った結果についてまとめたものである。</p> <p>第 1 章では、中性子散乱全体を俯瞰し、中性子散乱分光法の中で最も高いエネルギー分解能を有する中性子スピネコー分光法の位置づけを行い、さらにその中で NRSE 分光法のこれまでの発展についてまとめ、最後に本研究の目的について記述している。</p> <p>第 2 章は、中性子散乱分光法において静的な均一磁場によって中性子スピン状態間に導入される位相差を利用する中性子スピネコー分光法および静的磁場の代わりに二つの共鳴スピネフリップパーを用いる NRSE 分光法の原理を中性子スピン状態間位相差に基づいて記述し、両スピネコー分光法の特徴について記述した。特に、光学機器を導入しやすく、共鳴フリップパー間の距離によって中性子のスピン状態間の位相差が決まる NRSE 分光法について、回転楕円体集光ミラーを用いることで試料位置での高いビーム強度が得られるだけでなく、広い散乱角をカバーしながら高エネルギー分解能が達成可能であることを述べた。同時に、散乱後の中性子の回転楕円体ミラーによる集光の有効性が実験的に確かめられていないこと、高い中性子ビーム強度を維持し高エネルギー分解能を実現するために必要な、焦点からずれて入射した中性子の軌道による経路長のばらつきを減らす有効な方法が考えられていないという問題点も明らかにした。</p> <p>第 3 章では、NRSE 分光法について、エネルギー分解能の悪化をもたらす経路長のばらつきを減らすため、回転楕円体集光ミラーを直列に 2 つ配置した 2 回集光 (DF) 配置を提案した。この配置では、入射位置が焦点からずれている場合、上流の集光ミラーにおける経路差は、下流の集光ミラーで打ち消されることが示される。さらに、この配置について詳細にシミュレーションを行った結果、従来提案の 1 回集光配置では最大 300 μm にも達する経路差が DF 配置では 4 μm と極めて小さくなることを示した。これによって DF 配置を用いれば、これまで NRSE 分光器で達成できなかった 1 neV 以下のエネルギー分解能の実現に道を拓くものである。</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	船間 史晃
------	---------	----	-------

第4章では、散乱中性子を集光した場合に中性子のスピン状態間の位相差が保持されるかを確認するため、理化学研究所および京都大学複合原子力科学研究所との共同研究により開発された回転楕円体ミラーを用いて、実際に共鳴スピネコー分光器の一種である Mieze 分光器を構築し、中性子の弾性散乱体である粉末ダイヤモンド試料からの散乱中性子を集光する実験を行った。その結果、入射中性子および試料による弾性散乱中性子のスピネコー信号は、広い波長帯にわたって誤差の範囲で一致することが実験で示された。本実験により広い散乱角で実験可能な集光 NRSE 分光法の実現性がより高まった。

第5章では、近年、利用が広がりつつある小型加速器中性子源における SANS 装置の開発を行った。小型中性子源ではその熱中性子束の低さによって、これまで SANS 実験があまり実施されてこなかった。本論文では、円環状にコリメートしたビームを平板状試料に入射させ散乱中性子が中心軸上に集光する SANS 体系を考案し、これを京都大学加速器中性子源 (KUANS) において実際に構築し、テスト試料を用いて SANS 実験を行った。得られたデータはシミュレーションを援用することで、X 線による小角散乱の結果と誤差の範囲で一致した。これにより、非常に熱中性子束の低い小型中性子源でも、集光を利用することで SANS 装置が構築できる可能性を示した。

第6章では、以上の成果をまとめ、それぞれの成果に関して将来的な展望を述べた。

DF 配置による経路補正法に関して、集光による微小試料へ高輝度化と高エネルギー分解能化は定常中性子源においても利用できるが、パルス中性子源と組み合わせることで幅広い運動量遷移空間の同時測定等、さらなる精密測定の可能性に言及した。

Mieze 分光器を使った散乱ビームの集光実験においても、集光による S/N 比の増加は、試料からのより弱い散乱を測定可能とし、従来の NSE 分光器では困難な幅広い運動量遷移空間の同時測定について言及した。

円環状にコリメートしたビームによる SANS 装置の開発に関しては、パルス中性子源の特徴を活かして S/N 比を上げ、シミュレーションを援用して解析することで、KUANS のような小型中性子源においても SANS 実験機会の増加が期待できることを言及した。パルス中性子源と集光を活かし、シミュレーションを援用して解析するアプローチは集光 NRSE 分光器のデータ解析でも重要である。

(論文審査の結果の要旨)

本論文では、中性子スピネコー分光法および中性子小角散乱法に関し、中性子の集光を利用することにより、これまで達成できなかった性能を実現する道筋を示したものである。

中性子スピネコー分光法に関しては、第一に回転楕円体集光ミラーを用い中性子共鳴スピネコー(NRSE)分光器において、焦点から外れた位置から入射した中性子に対する経路差が、2つの集光ミラーを直列に配することにより、劇的に減少させることができるという新しい配置を提案した。さらに、このような新しい配置によるNRSE分光器の改善についてモンテカルロシミュレーションを用いて詳しく解析し、高エネルギー分解能NRSE分光器が実現できるであろうことを示した。これにより、回転楕円体による集光を用いることで得られる中性子ビーム強度の試料位置での劇的な向上、試料位置にビームを集中することによる試料体積の減少という利点に加えて、 $1\mu\text{s}$ 程度の緩和現象あるいは数neV程度の準弾性散乱が測定可能となり、現在の中性子分光器の測定限界を広げるばかりでなく、光散乱やX線散乱も含めた種々の測定法のギャップを埋めることができ、生体高分子等の比較的長い時間を要する運動を観測する手段を提供するものと期待される。

第二には、試料によって大きな立体角に散乱された中性子に対し、集光することによるスピネコー信号への影響がないことを、理研・京大複合研の共同研究により製作された回転楕円体ミラーを用いて初めて実験的に確認した。この結果は、散乱中性子に対しても集光などの光学的処置を行っても中性子スピンの位相関係に影響を与えないことを示しており、集光の利用の基礎となる結果である。

また、中性子小角散乱法に対しては、入射中性子を円環状にコリメートし、試料によって散乱された中性子が中心軸上に自然に集光し開口部の小さい検出器で測定する体系を考案し、中性子束の小さい小型中性子源においても小角散乱測定が可能であることを実験的に示した。この成果は、今後利用が広がると期待される小型中性子源の有効利用の促進への指針を与えるものと思われる。

本論文は、中性子散乱の分野において学術の上でも応用に関しても、実際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認められる。また、令和3年12月13日、論文内容とそれに関連した事項について諮問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。