

中性子光学素子の開発と応用

研究代表者：清水 裕彦（(独) 理化学研究所）

I. 試験研究の全体計画

1. 研究の趣旨

低エネルギー中性子は、X線等の解析手段では解析が困難な生体高分子に代表される軽元素系の物質、中でも水素原子に関わる情報を引き出すための研究手段として、不可欠な観測手段である。X線や光子は電磁相互作用を基礎としているが中性子は原子核相互作用を基礎としている。原子核相互作用は元素の原子番号に対して殆ど規則性を持たず、且つ同位元素によっても異なる。この特性を利用して、原子番号が大きな元素が含まれた研究対象物の中にある原子番号が小さな元素を精度良く見る様な場合でも中性子散乱は高い感度を持つ。中性子は水素原子核との相互作用が極めて大きい事から、X線散乱では測定が極めて難しい有機物中の水素原子の位置の情報を得るような場合などは、中性子散乱実験が不可欠といっても良い好例である。したがって、生体物質の研究に代表される物質中軽元素の研究において、中性子は今後重要度を増すと言える。また中性子は磁気双極子モーメントを持っている事から、物質の磁気構造を調べるにも好都合である。さらに、放射線で工業製品などの大型の対象物の内部を研究するような場合には、荷電粒子やX線などの手段で透視することは現実的でないが、中性子であれば透過力が強いために実際に透視が可能となる。

しかし中性子は発生が容易でないため供給できる場所は限られる上に、ビームはX線に比べて桁違いに弱い。中性子散乱という実験技術は極めて有用であるにも関わらず、ビームの弱さが中性子を用いた解析の応用範囲を強く制限してしまっている。最も直接的な解決方法は中性子源自体の増強である。しかし、中性子源の増強は巨額の投資を必要とするため、容易なことではない。そこで現在世界的にも研究が不十分な中性子ビーム輸送技術の根本的な開発によって、中性子の利用効率を向上させることは、中性子源の増強と独立な新しい解決方法である。

本研究では、これまで総合的な研究が貧弱であった中性子光学を世界に先駆けて実用化し、世界全体を視野に入れた研究活動を展開することを目標とする。このような総合的研究開発によって、中性子の利用効率を最大限向上させ、中性子散乱という解析方法に高い汎用性を実現することによって、物質研究における基本的な手段として新たな可能

性を開拓するものになると考えられる。

本研究では、中性子光学の総合的な研究を基礎として、中性子解析という研究手段の解析能力を飛躍的に向上させて、中性子解析を汎用性の高い一般的な基本的研究手段のレベルに引き上げることを目指し、反射光学素子、屈折光学素子を基礎とした複合光学系の研究及びそれに伴う中性子解析法の包括的最適化手法の確立を行う。なお、開発研究全般を通じて、各協力研究機関は互いに緊密な連携を取りながら、研究機関の枠組を越えて開発を行う。

第I期では以下に述べる各研究機関が分担をする研究課題が互いに緊密な連携を取りつつ研究機関の枠組を超えて総合的に中性子光学の確立と発展を推進し、世界第一線となる一定の成果を得た。

1. 中性子光学素子製作技術に関する研究（理化学研究所）
2. 中性子光学素子単体性能評価に関する研究（京都大学原子炉実験所）
3. 中性子光学システム性能評価に関する研究（日本原子力研究所）
4. 中性子光学素子評価手法の開発に関する研究（北海道大学）
5. 中性子光学最適化数値シミュレーションに関する研究（高エネルギー加速器研究機構）
6. 中性子光学実用性能の理論的定式化に関する研究（東京大学物性研究所）
7. 中性子超伝導磁気光学素子製作の基礎に関する研究（東芝）
8. 研究運営（理化学研究所）

第II期においては、第I期の成果を踏まえて具体的な応用研究に着手し、本開発研究の成果によって実現される科学的成果に至る新手法の開発を行う。なお、第I期の成果に応じて新手法の開発のための最適な体制をとるために、第II期への移行時にグループ全体の再編成を行い、以下に述べるように各研究機関が分担をする研究課題が互いに緊密な連携を取りつつ、中性子光学を応用した新概念に基づく中性子散乱装置の実現に向け、研究機関の枠組を超えて総合的に研究を進めるものとする。これらの協力関係は複雑に絡み合っているが、新概念に基づく中性子散乱装置を実現するためには各機関の特性を生かして有機的に結合した密接な協力関係が不可欠である。

2. 研究の概要

- a. 中性子光学素子製作

(1) 反射および屈折光学素子の製作（(独) 理化学研究所）

中性子反射光学素子，中性子屈折光学素子の製作及び周辺技術の研究を行う。

反射光学素子として多層膜を利用した多層膜反射鏡による中性子の集光素子を製作する。この素子の設計は b. のテーマで行われるものであり，製作に際しては a. (2)，b. (4) 及び c. (1) のテーマと協力して研究を行う。作成された素子は単体性能評価を a. (2) あるいは b. (4) に於いて行い，新概念に基づいた中性子散乱装置の光学系としての性能評価と組み込みを c. (2) において実行する。より高性能な反射特性を持った平面鏡の開発と曲面多層膜中性子反射鏡の開発を並行して行い，実用化を推進する。

屈折光学素子として，物質光学素子と磁気光学素子の製作を行う。

物質光学素子は物質レンズと物質プリズムを含み，その表面粗さと中性子の乱屈折との間の関係がこれまでの実験で明らかになってきた。b. (1) と協力して実用上要求される素子表面の加工の質について詳細な議論を行い，物質光学素子設計と加工の精度を向上させた上で素子製作を行う。製作された素子は単体性能評価を b. (2) あるいは c. (1) に於いて行い，新概念に基づいた中性子散乱装置の光学系としての性能評価と組み込みを c. (1) に於いて実行する。

磁気光学素子は磁気レンズと磁気プリズムを含み，永久磁石を用いた素子と電磁石を用いた素子にそれぞれ大別され，電磁石を用いた素子はさらに超伝導電磁石を用いた素子と常伝導電磁石を用いた素子に分類される。このうち，超伝導電磁石を用いた素子については a. (3) 及び b. の協力のもとに設計されるものであり，a. (3) 及び c. (1) と協力して製作する。永久磁石を用いた素子と常伝導電磁石を用いた素子については b. に於いて設計されたものを c. (1) と協力して製作する。製作された素子の単体性能評価及び新概念に基づいた中性子散乱装置の光学系としての性能評価と組み込みは c. (1)，パルス中性子源が必要な場合には b. (2) または b. (4) に於いて実行される。これらの磁気屈折光学素子は全て大がかりな装置となるために移設が簡単ではなく，直接 c. (1) b. (2) または b. (4) に設置することになる。

周辺技術として陽子核偏極の技術研究と検出器の開発研究を行う。陽子核偏極は試料偏極によるスピンコントラスト法という将来性の高い技術のもととなる基礎技術である。容易には実現できないので長期的展望のもとに研究を行う。検出器は素子評価及び装置評価には欠かせないものであるが，既存のものでは必ずしも性能が十分でない場合があり，その要求を満たすために開発を継続する。

(2) 反射光学素子の製作（京都大学原子炉実験所）

中性子反射光学素子の単体性能評価及び反射光学素子の実用レベルの量産を行う。

これまでに光学素子の評価のためのビームラインが整備されており，そのビームラインを利用して光学素子の単体性能評価を行う。反射光学素子としての多層膜中性子反射鏡については，a. (1) または自機関によって作製される多層膜中性子反射鏡の性能を中性子反射率の測定によって評価し，その結果を b. で行われる設計に反映させる。また，スーパーミラー作製技術については世界第一線の研究レベルにあり，必要に応じて a. (1) と協力して実用レベルで要求される量産を行う。並行して，中性子をスピン選択的に反射する磁気鏡の開発及び製作を行う。特に，低磁場環境下で動作する高性能の磁気鏡が新概念に基づく中性子散乱装置に必要なであるとされており，これを主な対象とする。

(3) 超伝導技術を用いた磁気光学素子の開発（(株) 東芝）

将来的に発展しそうな超伝導技術を調査し，中性子磁気光学素子に適用できるように開発研究を行う。

中性子磁気光学素子は大きな磁場勾配を必要とする。磁場勾配を大きく取るためには強力な磁場を狭い領域に入れ込む必要が生じる。そのための電磁石として超伝導電磁石の使用が望ましいが，そのような高勾配磁場を発生させるための超伝導線材や熱構造，機械的構造は設計に先立って十分検討される必要がある。これまでに，実用化されている線材を用いた超伝導電磁石についての製作技術を獲得した。そこで，将来の超伝導技術を見越した開発研究を含み，より大きな磁場勾配を得るために必要となる，まだ実用化されていない超伝導線材及びそれを用いた超伝導電磁石の製作について技術的検討を推進する。

b. 新概念に基づく中性子散乱装置設計

(1) 新装置に最適化した光学素子と周辺装置の設計（(独) 理化学研究所）

中性子光学素子全般及び周辺装置の設計を行う。設計は製作担当の各テーマ及び必要に応じて 2 の他の各テーマと協力して行う。

反射光学素子においては a. (1)，a. (2) と協力し，より高性能な反射特性を持った素子を製作するための設計を行うとともに，曲面を用いた集光素子の最適な形状を検討し，設計を行う。屈折光学素子においては a. (1)，a. (3)，b. (3)，b. (4) とそれぞれ協力し，新装置に最適化した設計を行う。周辺装置においては a. (1)，b. (2)，b. (4) と協力して設計を行う。設計された素子あるいは装置は製作を行う各テーマに於いて製作される。

(2) 新装置に最適な検出器体系の設計（北海道大学）

中性子光学素子及び新装置の性能評価を行うための検出器体系を設計するとともに，その評価を可能な限り効率的に実行できるように，評価手法及び評価に必要な周辺技術の研究を行う。

新装置の評価には中性子の画像データを高い空間分解能で取得することが重要であり，a. (1)，b. (4) と協力し

ながらこの点を中心に研究を進める。中でも特に評価効率を飛躍的に向上させる画像データ取得系を開発するために、現有のパルス中性子源を利用して、優れた時間分解能を持ちながらその場で画像を確認することが可能な実時間中性子画像検出器の設計開発を行う。この新しい検出器体系は最終的な中性子散乱装置においても利用され得るものである。

(3) 新装置の理論的検討（日本原子力研究所中性子利用研究センター）

これまでの理論的定式化の研究を継続しながら、その理論体系を新装置に適用することを試み、設計に反映させる。

中性子散乱実験においては、使用する試料や測定する物理量によって最適化するべき測定性能が大きく変化する。現在多岐にわたる中性子を用いた科学研究分野を総合的に考慮して、それぞれの場面でどのような中性子光学がどの程度の最終性能の向上に寄与するのかを定量的に理論体系化することは、中性子光学の能力を最大限に活かすために不可欠である。中性子光学と中性子を用いた科学研究の間に共通概念を確立して、科学研究分野の先端を先取りした技術開発を可能にすることを目指す。本研究では単に現在中性子散乱が適用されている分野に限ることなく、一般的な実験的科学研究分野の最先端情報を調査した上で、中性子光学が寄与または開拓する分野を系統的に体系化し、その結果を他のテーマにおける中性子光学素子、周辺技術、そして新装置の設計の指針とする。

また、技術の進歩等によって生まれる新たな中性子光学素子の調査探索を行い、必要に応じて素子の試験的単体性能評価も行う。

(4) 新装置のシミュレーション（（独）高エネルギー加速器研究機構）

新装置を最適化するために数値シミュレーションを行う。

各光学素子はもちろん、新装置を設計する段階で多数の実験を繰り返すことは、中性子ビームが弱くかつ占有できる実験場所も限られる現在では現実的では無い。そこで、これまでに中性子特有の挙動を総合的に計算できるような数値シミュレーション体系を整備した。このテーマは他の

全てのテーマから必要とされ、協力して研究を進める。

また、b. (2) と協力して、そこで開発される優れた時間分解能を有する中性子画像検出器体系とパルス中性子源における中性子の検出に特化したデータ処理体系を統合する。現有の国内最強のパルス中性子源を利用して、光学素子の単体性能評価も必要に応じて協力して行う。

c. 新概念に基づく中性子散乱装置評価

(1) 中性子ビームを用いた新装置の評価（日本原子力研究所先端基礎研究センター）

新概念に基づく中性子散乱装置を設置するに当たって、構成する各光学素子の単体での性能評価を行い、装置として組み上げた後にその最終的な性能評価を行う。したがって、ほぼ全ての成果はここに集約され、新概念に基づく中性子散乱装置のプロトタイプとして最終成果となる。

これまでに光学システムの最終評価のためのビームライン整備を行った。そのビームラインに於いて、これまでに製作した実用型の磁気レンズの評価を行い、b. で行われる新概念に基づく中性子散乱装置の設計にフィードバックする。その設計をもとに新概念に基づく中性子散乱装置をプロトタイプとして組み上げ、設置する。

また、a. (1), b. (1) と協力して、今後さらなる発展が期待されるパルス中性子源での理想的な使用方法を開拓するために、速い磁場変更が可能な磁気光学素子の概念設計、技術的検討及び試作を継続して推進する。

d. 研究運営（（独）理化学研究所）

本研究は多数の研究機関の研究能力を総動員して、各研究機関の研究成果が他の研究機関の方針決定に迅速に反映されるべく互いに緊密な連携を取ることが欠かせない。このため、その研究運營業務として、参加機関・研究者のオーガナイズ、研究計画の作成、研究費の積算、研究実施の調整、研究運営委員会の開催、研究成果の取りまとめ、研究会の開催及び研究成果の普及及び広報活動等の多岐にわたる連絡調整業務を行う必要がある。本研究運営では、中核機関が国内外の情報交換の拠点となり、中性子光学素子の開発と応用に関する研究活動が日本国内、国際協力を含めて効率的に推進できるように、これらの研究運營業務を遂行する。

3. 年次計画

研究項目	12年度	13年度	14年度	15年度	16年度
a. 中性子光学素子製作技術に関する研究	光学素子製作技術	光学素子製作	光学素子製作、複合光学システム最適設計	革新的中性子散乱実験装置のための光学素子設計・製作	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
b. 中性子光学素子単体性能評価に関する研究	光学素子評価装置整備	光学素子評価、多層膜反射光学素子生産準備	多層膜反射光学素子生産	革新的中性子散乱実験装置のための光学素子製作	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
c. 中性子光学システム性能評価に関する研究	光学システム評価装置整備	光学システム評価、超伝導磁気屈折光学素子製作	中性子光学システム評価基礎研究及び時間依存型磁気屈折光学素子の概念設計	革新的中性子散乱実験装置建設	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
d. 中性子光学素子評価手法に開発に関する研究	中性子検出器要素技術開発	中性子検出システム開発	中性子検出システム実用化研究	革新的中性子散乱実験装置のための中性子検出システム製作	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
e. 中性子光学最適化数値シミュレーションに関する研究	シミュレーションプログラム開発	中性子光学素子最適化計算手法の確立	複合光学システム最適化計算	革新的中性子散乱実験装置のためのシステム最適化設計	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
f. 中性子光学実用性能の理論的定式化に関する研究	調査研究	実用性能の理論的定式化	応用分野開拓の概念設計	革新的中性子散乱実験装置のための概念設計	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
g. 中性子超伝導磁気光学素子製作の基礎に関する研究	超伝導磁気屈折光学素子製作基礎技術開発、工学的設計	超伝導磁気屈折光学素子製作技術開発、設計	高磁場超伝導磁気屈折光学素子の技術的検討及び時間依存型磁気屈折光学素子の技術的検討	革新的中性子散乱実験装置のための次世代磁気屈折光学素子の設計	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
h. 研究運営		研究運営			研究運営・全体取りまとめ
所要経費(合計)	350百万円	433百万円	450百万円	499百万円	466百万円

II. 平成16年度における実施体制

研究項目	担当機関	研究担当者
a. 中性子光学素子製作 (1) 反射および屈折光学素子の製作 (2) 反射光学素子の製作 (3) 超伝導技術を用いた磁気光学素子の開発	(独) 理化学研究所 (独) 京都大学原子炉実験所 (株) 東芝	◎ 清水 裕彦 川端 祐司 渡辺 郁男
b. 新概念に基づく中性子散乱装置設計 (1) 新装置に最適化した光学素子と周辺装置の設計 (2) 新装置に最適な検出器体系の設計 (3) 新装置の理論的検討 (4) 新装置のシミュレーション	(独) 理化学研究所 北海道大学 日本原子力研究所中性子利用研究センター (独) 高エネルギー加速器研究機構	清水 裕彦 鬼柳 善明 藤井 保彦 古坂 道弘
c. 新概念に基づく中性子散乱装置評価 (1) 中性子ビームを用いた新装置の評価	日本原子力研究所先端基礎研究センター	鈴木 淳市
d. 研究運営	(独) 理化学研究所	清水 裕彦
e. 研究進捗管理	文部科学省研究振興局	

(注：◎は研究代表者)

III. 運営委員会

委 員	所 属
○ 清水 裕彦 川端 祐司 鈴木 淳市 鬼柳 善明 古坂 道弘 藤井 保彦 渡辺 郁男	(独) 理化学研究所 研究ユニットリーダー (独) 京都大学原子炉実験所 教授 日本原子力研究所 先端基礎研究センター 副主任研究員 (独) 北海道大学 教授 (独) 高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所 教授 日本原子力研究所 中性子利用研究センター センター長 (株) 東芝 主査

(注：○は運営委員長)