

# 中性子光学素子の開発と応用

研究代表者：清水 裕彦（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よう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ことから、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ことから、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。

### 2. 研究概要

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、研究機関の枠組を乗り越えて開発を行う。

第I期では中性子光学素子そのものの研究を最も効率的に行える研究環境を実現し、中性子光学素子の製作と評価を迅速に推進することを最優先する。並行して複合光学システムや中性子光学素子の能力を引き出すために必要な周辺技術開発を推進する。さらに、中性子光学システムがもたらす中性子解析能力の向上を包括的に理論体系化することによって、先端的科学研究分野における新たな研究手法の開拓を迅速に行う準備とする。以下に述べる各研究機関が分担をする研究課題は全くに独立に機能するものでなく、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するものである。各課題内に予め想定される連携状況を含めて記述する。特に光学素子の評価作業は光学素子の性能を向上させるために不可欠であるが、極めて時間のかかる作業であり、研究上有用な装置は研究機関の枠組みを超えて互いに使用できる体制を組む必要がある。したがってほぼ全ての機関に素子評価作業が割り当てられているが、互いに重複しているわけではなく、互いに補いあって素子開発の迅速化を図るものである。

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に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視野に入れて研究運営を行うものとする。

1. 中性子光学素子製作技術に関する研究(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基礎研究を行う。反射光学素子として多層膜を利用した多層膜中性子反射ミラーの製作技術を研究し、再現性良く作成する技術を開発する。多層膜中性子反射ミラーは中性子を利用した科学研究において必要性が極めて切迫した光学素子で、素子単体開発後直ちに応用開始が可能なものである。開発に際しては2.及び3.のテーマと協力して研究を行い、作成された素子は単体性能を2.に於いて

行い、光学系としての性能評価を2.において行い、光学系としての性能評価を3.において実行する。多層膜中性子反射ミラーは平面型を出発点として開発に着手し、全反射臨界角の高いミラーの製作技術の基礎研究を推進した後、テーマ2.におけるミラー生産に技術移転を行う。その後、曲面多層膜中性子反射ミラーの開発に着手し、実用化研究を推進する。

屈折光学素子としては、物質レンズと磁気レンズの開発を行う。

物質レンズは、テーマ2.及び3.において透過効率と屈折効果を両立させる素材の検討が行われた結果を受けて、製作を行う。物質レンズの表面粗さと中性子の乱屈折の関係はこれまで実験的に求められていないので、現段階では実用上要求されるレンズ表面の加工の質について詳細な議論が困難である。本研究では、この点を明らかにすることを含み、物質レンズ設計の精度を向上させた上で、素子製作を行う。

磁気レンズは、永久磁石で構成された原理実証器を用いてテーマ2.と協力して得られる情報を及びテーマ7.で得られる技術情報もとにテーマ3.において行われる実用型磁気レンズの設計及び製作に寄与する。特に出力ビームの断熱的スピン輸送及び磁気複合レンズのためのスピン極性反転器の製作を行う。また以上の光学素子についてテーマ5.において明らかになる最適化を製作技術に反映させるとともに実現可能な素子性能の情報をテーマ6.に提供し、中性子解析法の総合的な実用性能の向上の度合いを理論的に推定する。この推定値はテーマ3.によって実験的な実証を行う。また、スピンコントラスト等の試料への付加的な支援技術の基礎研究を必要に応じて行う。

## 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）

中性子反射光学素子、中性子屈折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体制の確立を行う。

光学素子の評価のためのビームライン整備から研究を開始する。反射光学素子としての多層膜中性子反射ミラーについては、テーマ1.によって作製される多層膜中性子反射ミラーの性能を中性子反射率の測定によって評価し、その結果をテーマ1.の作製技術に反映させる。また、スーパーミラー作製技術について、必要に応じてテーマ1.と協力して基礎研究を行った後に、実用レベルで要求される量産体制の確立を行う。

屈折光学については、まず物質レンズの屈折効果の確認と透過率の測定を実行し、単体性能の評価を行う。並行して、磁気レンズ原理実証器について出力ビームの偏極度の測定、及び磁気複合光学に必要な断熱的スピン輸送及びスピン極性反転器の性能評価を行う。これらの情報はテーマ1.にフィードバックされ、テーマ3.においてシステム化される。

## 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）

中性子光学素子の実用に向けて、光学システムとしての性能評価と大型光学素子の研究を担当する。

光学システムの最終評価のためのビームライン整備から研究を開始する。当該ビームラインはビーム特性の詳細なデータが明らかになっている必要があるため、まずビーム特性測定を行い、その後テーマ2.によって性能評価または原理実証された反射光学素子及び屈折光学素子の実用的な性能を実証することを主な目的として利用する。なお、磁気レンズ単体は既に原理実証が終了しており、運動学的によく定義された光学系であるので、磁気収束レンズについては研究発足当初から直ちに製作上の技術的検討作業に入り、実用に近い比較的大型の磁気レンズの設計作業を行った後に、実用型の磁気レンズの製作を行う。並行して、反射光学素子、屈折光学素子を用いた複合光学素子を配置して性能を実装するためのビームライン整備を行い、中性子解析としての性能向上の実験的検証を実行する。また本テーマで整備するビームラインは、実用的な散乱装置をできるだけ早期に建設するためのプロトタイプに発展できるようなものとする。このプロトタイプ建設においてはテーマ1., 2., 4., 5., 6., 7.の研究成果を結集して設計製作にあたるものとし、本研究全体の最終成果とする。

## 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）

中性子光学素子の性能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を中心に研究を行う。特に中性子の画像データを取得することが光学素子の性能評価の効率を飛躍的に向上させるので、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時間分解能を持ったリアルタイム中性子画像検出器の開発を担当する。これらの開発研究においては、マイクロキャピラリ型中性子反射光学素子を用いて検出器の性能評価を実行することから開始し、研究成果はテーマ2., 3.において使用され、その結果得られた高品位の性能評価結果はテーマ1.にフィードバックされて素子作製技術に反映される。また、優れた時間分解能の実現によりテーマ5.において試みられるパルス中性子源を用いた光学素子評価においても利用される。この新しい検出システムは最終的な中性子散乱装置においても利用されるものである。

## 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）

中性子光学を最適化するために数値シミュレーションの手法を開発する。各光学素子を設計する段階で多数の実験を繰り返すことは、中性子ビームが弱い現在ではあまり現実的ではない。そこで、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が必要である。反射光学素子や物質レンズのように材料の物性に依存する光学素子、及び磁気レンズの場合には断熱的スピン輸送系やスピン極性反転器のように実験的に求めにくい詳細な物理量が設計時に必要なものについては、中性子測定による結果と設計製作技術上の問題とを正確に関連づけるために数値シミュレーションが欠かせない。また、同時に実用性能を光学設計から推定するために必要であるので、柔軟性に富んだ数値シミュレーション技術を開発する。この技術はテーマ2.、3.の光学素子評価技術に利用され、テーマ1.の光学素子製作技術において設計作業に利用される。

また、現有の国内最強のパルス中性子源とテーマ4.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システムとを統合することにより、広い波長領域を同時に評価する手法の確立を試みる。この試験的研究の成果は、今後さらなる発展が期待されるパルス中性子源を利用した研究において本研究の成果がもたらす新たな研究分野の開拓に寄与するものである。

#### 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)

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的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的研究の間に共通概念を確立して、科学的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旨とする。このような研究はこれまで世界的にも系統的に行われた例が無く、今回の研究の一つの大きな柱である。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、その結果をテーマ1.、2.、3.、4.、5.における中性子光学素子あるいは周辺技術の設計の指針とする。なお、並行して、X線解析装置や電子顕微鏡等の現有設備を利用して、テーマ1.あるいは2.において作成される多層膜中性子反射ミラーの評価に協力するものとし、利用が限られている中性

子ビームを用いた直接評価で不足する評価作業を補う。これによって中性子光学素子の評価作業の効率の最大化を図る。

#### 7. 中性子超伝導磁気光学素子製作の基礎に関する研究(株式会社)

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充分検討される必要がある。また、その際に中性子スピンの断熱的輸送及び非断熱輸送を利用したスピン極性反転器等の設計には、詳細な磁場計算が必要である。本テーマでは、超伝導線材の調査及び実験的研究、磁場・熱・応力の解析を行う。これらの成果はテーマ1.、2.、5.に反映され、磁気レンズ及び周辺磁場設計が行われる。また、テーマ5.で試験研究が行われるパルス中性子源への応用拡張においては、様々な波長の中性子が中性子飛行時間法で選別されながら測定が進行するため、波長依存性を有する中性子磁気光学素子は焦点を一定位置に保つためには速い磁場変更が要求されることになる。超伝導磁気光学素子の設計製作が終了後は、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、超伝導にこだわらず常伝導磁気光学素子までを対象として、速い磁場変更が可能な磁気光学素子の概念設計、技術的検討を推進する。

#### 8. 研究運営(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、その研究運営業務として、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、これらの研究運営業務を遂行する。

3. 年次計画

研究項目	12年度	13年度	14年度	15年度	16年度
1. 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製作	革新的中性子散乱実験装置の評価ととりまとめ
2. 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
3. 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	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
4. 中性子光学素子評価手法の開発に関する研究	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
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	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
6. 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
7. 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	時間依存型超伝導及び常伝導磁気屈折光学素子の技術的検討及び概念設計	革新的中性子散乱実験装置のための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
8. 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		

II 平成14年度における実施体制

研究項目	担当機関	研究担当者
1. 中性子光学素子製作技術に関する研究	理化学研究所	◎清水裕彦
2. 中性子光学素子単体性能評価に関する研究	京都大学	川端祐司
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	鈴木淳市
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	鬼柳善明
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	古坂道弘
6. 中性子光学実用性能の理論的定式化に関する研究	理化学研究所	藤井保彦
7. 中性子超伝導磁気光学素子製作の基礎に関する研究	(株)東芝	渡辺郁男
8. 研究運営	理化学研究所	戎崎俊一 清水裕彦

(注: ◎は研究代表者)

### Ⅲ 運営委員会

委 員	所 属
○清水 裕彦	理化学研究所
戎崎 俊一	理化学研究所
川端 祐司	京都大学 原子炉実験所
鬼柳 善明	北海道大学
鈴木 淳市	日本原子力研究所
藤井 保彦	東京大学 物性研究所
古坂 道弘	高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所
渡辺 郁男	(株)東芝

(注：○は運営委員長)