

A S Y M M E T R Y

# NewsLetter

#01

2023.09

Unveiling, Design, and Development of Asymmetric Quantum Matters





## CONTENTS

---

### 巻頭言

---

学術変革領域研究 (A)「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」の発足にあたって	鬼丸 孝博	02
---	-------	----

### 評価委員から

---

アシンメトリな物理が明らかにするもの	鳥養 映子	05
「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」発足に寄せて	小形 正男	06

### 領域紹介

---

A01 量子ビームという“光”で固体の中の電子を視る	田端 千紘	07
A02 アシンメトリ量子物質をマクロ物性から如何に可視化するか	柳澤 達也	09
B01 交差相関の定量的記述へ	大槻 純也	11
C01 典型物質の合成をめざして	大原 繁男	13
C02 アシンメトリを拓げる、アシンメトリで拓がる	吉田 紘行	16

### 研究会・アウトリーチ活動報告

---

キックオフミーティング開催記	小林 夏野	18
石黒鎮雄博士に学ぶ研究のすすめ方	大原 繁男	20

### コラム

---

アシメ★通信 Vol. 1		22
---------------	--	----

### 事務局からのお知らせ

---

今後の予定		23
編集後記		24



R1 2X 20 (R)

## 学術変革領域研究 (A) 「アシンメトリが彩る量子物質の 可視化・設計・創出」の 発足にあたって

鬼丸 孝博

領域代表  
広島大学 大学院先進理工系科学研究科

令和5(2023)年2月28日夕方、科研費電子申請システム上で「審査結果を閲覧する」のボタンをクリックすると、「採択」の2文字が目飛び込んできました。これが、学術変革領域研究 (A) に申請していた「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」の研究領域が誕生した瞬間でした。

さかのぼること約9ヶ月、私は昨年5月に領域代表として申請することを決意しました。申請期限が迫るなか、「学術変革としていったい何を指すのか?」という問いに対するビジョンを描こうと、苦心していました。それまでの関係者の方々と意見交換、そして領域メンバーとの日々の議論を通して、「拡張多極子」の概念をベースとした機能物性の開拓を目指す、という指針に沿って申請することが決まりました。

具体的には、量子ビームと微細加工を使った精密測定による「可視化」を始点として、新しい機能性物質を「設計」し、そして「創出」という流れです。出口にあたる「創出」のところで、対象を大きく拡げて物質科学の変革を成し遂げる、とした点が肝です。この指針を軸として、総括班メンバー総出で領域計画書を仕上げました。時間が合えば集まり、ギリギリまで議論できたのは、この数年間に外出制限を経験したからこそそのオンラインの効用でした。首尾よく書面審査を経て、10月下旬にヒアリング審査対象に選ばれました。そこからは、各計画研究の調書の作成に本腰を入れるべくギアを上げ、さらに15分動画を作成して提出し、1月末のオンラインでのヒアリング審査に臨みました。その間、まわりの方々に心強いお力添えをいただき、このスタートラインに立つことができました。お世話になったすべての方々に深く感謝するとともに、そのご恩に報いるためにも、これからの5年間、本研究領域で目指す学術変革に向けて、全力で取り組んでいく所存です。

さて、本研究領域は、平成27-31(2015-2019)の新学術領域研究「J-Physics：多極子伝導系の物理」で得られた成果をもとに、その先端的な部分の発展と飛躍的な展開を図る領域として申請したものです。最近の研究により、固体中の電子のスピンと軌道の結合による「拡張多極子」の概念を活用することで、交差相関や非相反伝導などの新たな機能物性を見通しよく整理できることが分かってきました。そこで、最先端計測手法による秩序と揺らぎの可視化ならびに理論による理解を通して、新しいアシンメトリ量子物質の設計と創出を具現化します。さらに、これらの知見を、原子スケールから複数の原子を組み合わせた原子クラスター、原子集団へとスケールシームレスに展開することによって、従来の物質科学を一新する学術変革へとつなげ、「アシンメトロニクス」の学理を構築します。

本研究領域で頻出する「アシンメトリ量子物質」はわれわれの造語です。具体的には、アシンメトリ（非対称性）によって生じる電子系の複合自由度である多極子が活性となり、交差相関や非相反伝導などの非自明な機能物性が誘起される物質のことを指します。なお、しばしば質問されることもある「アシンメトリ量子」は領域名の略称であり、アシンメトリ量子という自由度があることを意味するものではありません。今後、本研究領域の研究活動の展開によってアシンメトリ量子に明確な意味を付与できたならば、この研究領域が成功したことを物語る一つの証左となるでしょう。

本研究領域には、物性科学研究の各分野で活躍している研究者26名が集結し、「連携」と「チャレンジ」を合い言葉として、物質科学の変革に向けた研究活動を推進します。そのための研究組織として、5つの計画研究を設けました。アシンメトリ量子物質の電子状態の秩序と揺らぎを実験的計測により可視化するA01とA02、理論モデルを構築してアシンメトリ量子物質を設計するB01、多様な結晶合成技術を駆使してアシンメトリ量子物質を創出するC01とC02から成ります。（各計画研究の具体的な計画と研究内容については、各代表による本号の記事をご参照ください。）まず、計画研究内で密に連携することによって、それぞれ設定している目標・課題の達成に向けた共同研究を推進します。それらをベースとして、計画研究間をまたぐ連携へと押し進め、この研究領域だからこそできる、従来のテーマを大きく広げる挑戦的な研究に展開します。さらに、来年度から参加される公募研究メンバーと領域メンバーの連携をシナジー効果として活かし、初年度の組織だけでは挑戦できないような研究テーマを次々に創出します。これらの展開を通して、本研究領域で扱う対象を分子クラスターや人工物質などに大きく広げ、学術変革に向けた研究活動を加速させます。

本研究領域での活動は、すでにさまざまな形で始動しています。本研究領域のホームページは、5月上旬に公開しました (<https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp>)。ここには、研究領域の概要を説明した動画、研究組織、研





図. アシンメトリ量子物質を可視化・設計・創出する、という本研究領域のモチーフを表している。計画研究A02の代表である柳澤達也氏の作。

研究会やアウトリーチ活動などの情報を掲載し、領域内外へ広く情報を公開しています。この5月には、計画研究ごとにメンバーが集まって、アシンメトリ量子物質の可視化・設計・創出に向けた具体的な研究計画を共有し、研究を進展させるためのミーティングを行いました。

これらの準備のもと、6月10, 11日に岡山大学津島キャンパスの共育共創コモンズOUXにて、キックオフミーティングを開催したところ、領域内外から学生も含めて総勢141名の参加がありました。本研究領域の概要説明、各班の代表者による研究紹介、領域メンバーによる研究計画についての講演があり、休憩時間も含めて、研究に関する活発な意見交換、議論が行われました。実際、新たな共同研究の芽が、あちこちで出てきているようです。また、72件の申し込みがあったポスター講演のうち、特に学生の発表（35件）では、積極的な議論が行われ、大いに盛り上がりました。参加者の皆さんには、深く感謝いたします。（詳しくは本号の別記事をご参照ください。）

初年度のその他の活動として、7月にC01とC02、8月にA01とA02共催のトピカルミーティング、B01による「アシンメトリ夏の学校 ミニ（多極子編）」（ハイブリッド方式にて配信）の開催、10月にはフランス・グルノーブルで開催される国際ワークショップへ大学院生を5名派遣します。来年度は、大学院生を対象とした滞在型の若手スクールを開催します。本研究領域の研究活動の活性化ならびに若手研究者・大学院生を含めた交流を促進するためのイベントや、本研究領域が主体となって行うアウトリーチ活動など、学術変革領域研究だからこそできる活動を積極的に展開します。活動に関するご提案など、secretariat@asymmetry.hiroshima-u.ac.jpまでお寄せください。

以上、本研究領域の発足に当たって、研究領域の目的と体制ならびに研究内容に関する概要を述べて、領域代表としての挨拶とさせていただきます。これからの5年間、「連携」と「チャレンジ」を合い言葉に、メンバー全員で力を合わせて、本研究領域の目標を達成するために全力で取り組んでまいります。ご支援・ご協力のほど、何卒よろしくお願いいたします。



## アシンメトリな物理が明らかにするもの

鳥養 映子

山梨大学 名誉教授 / 高エネルギー加速器研究機構 協力研究員

重い電子系の特異な物性は、40年以上にわたり多くの物性研究者を魅了してきた。当時、企業の技術者を経て大学院に入学した筆者もその一人である。量子物性の勉強を始めた学生には4f電子軌道は複雑で、ましてや混成軌道を想像し、スピンとの相互作用を理解することは、数学的にも物理的にも高い壁であったが、いつか挑戦したい遠い目標であった。2011年にJ-PARCに世界初の「超低速ミュオン顕微鏡」の建設を開始したときに、表面・界面研究への実用化を目指す超低速ミュオンビームラインに加えて、まだ原理検証の段階にあったマイクロビームライン（ビーム系がミクロンサイズ）の分岐を設けたのも、大きな単結晶製作が困難な重い電子系などの微量試料を将来のターゲットにしたいという強い思いからであった。

学術変革領域「アシンメトリ量子」のキックオフ研究会で、当時の自分自身と同年代の若い研究分担者達と多くの学生の生き生きとした発表を伺い、重い電子系が今もなお若い研究者を惹きつけて成長する研究テーマであることを実感した。本学術変革領域の基盤を拓いた新学術領域J-Physicsでは、電流誘起磁化やトロイダル秩序相の発見、拡張多極子の完全基底の構築をはじめとする、質・量ともに卓越した研究成果を創出し研究人材育成にも大きく貢献していることを示している。若き研究分担者達は、学生達の5年後、10年後の姿である。先輩達をロールモデルに、学生達が大いに活躍することを期待したい。

新しい物質、新しい理論、新しい測定法の開発は、新しい物理をもたらす。領域研究の初年度は、新たな挑戦のための種蒔きの大切な時期である。J-Physicsの研究を担ってきた若き研究者にとっては、今はその成果を刈り取る収穫期でもある。これまで築いてきた研究テーマのさらなる発展と新たな挑戦を計画するには、5年という研究期間は案外短い。領域研究の中であればこそ、たとえひとつひとつの挑戦が思い通りにならなくても、チーム全体の力でそれらの種を新たな稔りにつなげてほしい。

アシンメトリ量子は、注目系と環境系を非対称にとることから創発する複合自由度である。現象と環境をどのように切り分けて扱うかという視点のとりかたが重要課題となる。学術変革領域としては、そのような視点から、外場を非対称に繰り込んだ系、すなわち偏った見方、がなぜ面白いのかというような物理学の根本とも言える哲学が問われている。常温常圧超伝導の可能性が注目されている異種イオンの置換による局所歪みも、本領域の対象とする非対称なゲージ場のひとつであろう。アシンメトリ量子の様々なゲージ場に対する交差相関応答の研究には、目が離せない内容がたくさんつまっている。

ところで社会現象においてもアシンメトリな状態が安定で、シンメトリへの自発的な変革が起こりにくいようである。我が国の科学技術に欠けているもののひとつに研究人財の多様性があげられる。計画研究参加者の年齢分布においては理想的といえる本研究領域においても、26名中女性は2名のみである。せめて院生の比率まで引き上げるには何が必要か。相転移や希釈系の研究が社会現象をも見事に説明してきたように、アシンメトリ量子の研究がその環境である社会のアシンメトリをいかに解消するかへのヒントにもなる成果を発信することを期待している。



## 「アシンメトリが彩る量子物質の 可視化・設計・創出」発足に寄せて

小形 正男

東京大学 大学院理学系研究科 教授

領域の発足おめでとうございます。これからぜひ皆さんで一丸となって領域全体を盛り上げつつ、画期的な成果を上げてください。

今回、かなりまとまった分野として「アシンメトリ」が採択されたのは、すでに言われていることですが、良い面と悪い面があります。良い面は、もともとかなりまとまりのある分野の研究者が結集していて、全体が同じ目標に邁進するという同意がすぐに得られること、同じ目的が明確になることです。一方、悪い面としてメンバーが従来通りという批判があると思います。学術変革という名前がついていますので、このことには十分留意して、今後の領域運営をしていかれることと思います。とくによい面を活かして、すばらしいスタートダッシュが期待できると思います。それと並行して悪い面を積極的に補い、アシンメトリというキーワードで結ばれた、大きな研究グループを形成して行ってください。

研究は日々楽しいものですが、つつい狭い領域に閉じこもってしまいがちだと思います。それを打ち破るべく、領域全体でさまざまな企画、組織が今後進められると期待しています。領域メンバー全体が、この意識を常に保ちつつ、領域代表の鬼丸さんや事務局の大槻さん、総括班の皆さんを支えて行ってください。鬼丸代表を含む総括班の皆さんは、ご自分の研究も忙しいと思いますが、それに加えて領域全体を良い方向に引っ張っていくという重責がかかっています。非常に大変ですが、ぜひ頑張ってください。

キックオフのミーティングが開かれました。いつも感じることですが、重い電子系、J-Physicsの研究会は非常に大勢集まりますし、とくに若い方が多く参加しています。これからも、ぜひ若い方を楽しい研究に引き込んで、将来につながるような努力をしてください。一方、若い研究者の方々も年寄に物おじせず、ずけずけと研究に入り込んでください。若い人同士で議論が盛り上がっていくことが、新しい方向性や学術変革の種を見つける最もよい方法だと思います。また、そのために、さまざまな小さい研究会やチュートリアル、スキル相伝などの企画があると思いますが、ぜひ有機的にこれらを活用して行ってください。

C01、C02班はまず典型物質を作るという目標ですが、うまく見つけてほしい。これに領域全体の将来が掛かっているかもしれません。現状のメンバーに加えて化学・メタマテリアルという新機軸を含めていくということですが、異分野とうまく接合を取って、有機的にアシンメトリの活躍の場を広げて行ってください。

B01の理論班は中心にいるという構想ですが、拡張多極子という原理はかなり完成の域に達しているように思います。この基本原理のさらなる発展も必要ですが、今後現象論や実験とのかなりシリアスな比較、マテリアルインフォマティクスなどチャレンジングな計画で、責任が重大であるように思います。がんばってください。

A01、A02班は計測ということでこれまでの手法のうち一部にフォーカスして拡充・精密化することです。いくつか有望な手法もありますし、新しい交差相関・非相反・非線形など、ぜひ面白い物性をさらに開拓してください。量子ビームについても、対称性・ダイナミクス・空間スケールなど興味ある内容だと思いますので、有機的に成果をあげて行って下さい。

重い電子系からJ-Physicsの流れをくむ昔ながらの分野ですが、拡張多極子という新しい観点で、若い力を使って自由にかつアクティブに研究を進めて行かれることを期待します。





# 量子ビームという“光”で 固体の中の電子を視る

田端 千紘

日本原子力研究開発機構物質科学研究センター 研究員

A01は種々の量子ビーム観測技術を駆使して、アシンメトリ量子を微視的に可視化する役割を担います。本領域にはA01とA02の2つの可視化チームがありますが、A01の特色は何よりも、量子ビーム実験に特化している点です。

量子ビームには、X線（電磁波）、中性子、ミュオン、電子、陽電子…などがありますが、これらが共通して本質的に持つ特性が、波動性と粒子性です。これらは固体のマイクロな内部構造を知るためには極めて有用です。例えば、X線と中性子の波動性により、結晶構造や磁気構造を可視化できるようになりました。また、粒子性は物質とのエネルギー（量子）のやりとりに関与し、電子の励起構造を捉えるのに重要な役割を担います。これらに加え近年では、偏極性（X線では偏光性）とエネルギー可変性を利用した実験手法が駆使されています。前者は電子状態の時間・空間対称性の検出に有効です。後者は、見たい元素の電子軌道を「狙い撃ち」にできる共鳴現象を利用可能にします。これらの特性を活かすことで、従来の電荷、スピンのに加え、現在では軌道自由度の秩序も観測可能と

なっています。一方で、それ以外の複合自由度、特にアシンメトリな電子構造の観測は途上です。アシンメトリ量子は固体中の多彩な対称性を包括した複合電子自由度ですが[1]、このような複合的な量子自由度の観点での観測例は個別的なものにとどまるのが現状です。これを量子ビームの特性を用いて如何に系統的に観測するのか、その方

法を模索し確立していくことは、A01の重要なミッションのひとつです（図1）。

可視化において、もう一つの重要な側面は「スケール」です。本研究領域では、対称性の破れの概念に基づいて、物質の新奇機能を創出することを目標に掲げています。物質がマクロな材料として機能を発揮するためには、ミクロスケールでの秩序構造を明らかにするだけでは不十分で、マクロとミクロを繋ぐメゾスケールでの構造解明が重要になってきます。例えば、アシンメトリ量子物質の中には、磁気スキルミオンなどメゾスケールサイズの秩序構造をとるものもあります。A01では、このようなマルチスケールにわたる複合電子自由度の秩序構造を可視化することにも取り組みます。

本研究課題の具体的な計画を以下に記します。

## ① 結晶対称性およびクラスター構造の可視化

アシンメトリ量子物質の候補は、過去に既に調べられている磁性体の中にも多数存在しています。そのような磁性体を現代の最先端の量子ビーム測定で調べ直すことで、結晶構造や磁気構造の中に、従来は見落とされていた対称性の破れが見つかることがあります。

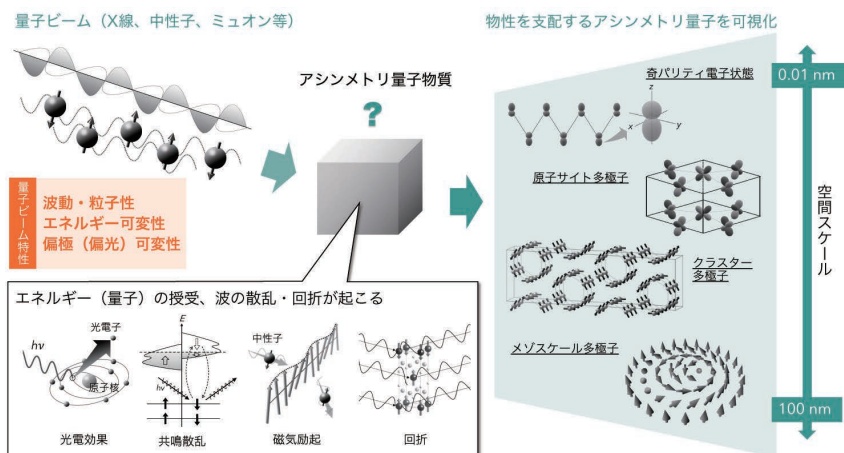


図1：A01の研究概要

結晶・磁気構造は、多極子の秩序構造の議論だけでなく、マクロ物性の理解にとってもベースになる重要かつ基礎的な情報です。中性子回折・放射光X線回折によって構造を精密に評価し、A02の精密マクロ物性測定、B01の理論設計をバックアップします。

### ② 高次多極子・奇パリティ多極子の可視化

元素に固有なX線の吸収端では、X線の吸収・放出（共鳴）が起こります。この散乱現象と、回折を組み合わせた手法である共鳴X線散乱によって、高次の異方性をもった多極子が観測できます。従来はE1遷移を通して四極子まで、E2遷移を通して十六極子までの多極子の検出が可能とされてきましたが、最近ではE1遷移にもかかわらず拡張磁気八極子が検出され[2]、高次多極子観測の可能性が拓かれつつあります。一方、空間反転対称性が無い原子サイトにおける奇パリティ多極子の観測手法は、まだ一般的には確立されていませんが、異なるパリティに属する軌道の混成を示す観測例はいくつかあります。これらの研究を進展させ、トロイダル多極子も含めた拡張多極子を観測する手法の確立を目指します。

### ③ 巨大クラスター多極子の可視化

近年注目を集めている磁気スキルミオン等が発現するトポロジカル磁性体も、アシンメトリ量子物質の一形態として捉えられます。その単位スケールは、従来多極子に比べて非常に大きな周期サイズ（~100 nm）を持つことがあるため、軟X線と中性子の小角散乱によって可視化を行います。特に、軟X線小角散乱では、高輝度な放射光の一部をピンホールで切り出して得られるコヒーレントなX線を用いることで実空間イメージングが可能です。この実験に必要なナノスケールで微細加工した試料を、共通機器であるFIB加工装置を活用し、A02と連携して準備する計画です。

### ④ 単一原子サイト電子状態・電子構造の可視化

電子の秩序形成をミクロに解き明かすためには、そ

の源である単一原子サイトの電子構造・電子状態の情報が不可欠です。これらの精密なプローブであるX線光電子分光(XPES)およびX線吸収分光(XAS)を活用し、実空間と波数空間の両面からアシンメトリな電子状態を明らかにします。特に、X線の偏光状態を制御し、これらの分光スペクトルの円二色性・線二色性を測定することで、局在電子の軌道対称性を高感度に検出できます。

### ⑤ アシンメトリ量子のゆらぎ・ダイナミクスの可視化

多極子の秩序の起源となる相互作用を、X線や中性子の非弾性散乱による素励起観測から明らかにします。分散関係の実測データから相互作用の情報を抽出するには適切な有効モデルの設定が肝要なので、理論チームB01との連携が重要な鍵を握ります。また、従来の磁気フラストレーションの枠組みを超えた、拡張多極子に特有な新たなフラストレーション現象への展開も期待しています。

### ⑥ 時間反転非対称な多極子の可視化

微弱な内部磁場を敏感に検知できるミュオン回転・緩和・共鳴( $\mu$ SR)によって、時間反転対称性を破るアシンメトリ量子を高感度に検出します。また、X線や中性子等の回折の手法は並進対称性の破れの検出は非常に得意ですが、回転対称性の破れの検証に関しては少々注意深い測定を必要とします。そこで、有効な量子ビーム測定に臨むための予備評価として、時間反転×回転の対称性の破れを鋭敏に捉えることができる磁気トルク測定も行います。

以上の種々の量子ビーム実験を、C01・C02で開発された新物質について手法横断的に行い、アシンメトリ量子のミクロ描像を多角的に明らかにする研究を推進します。また、より幅広いビーム実験手法を専門とする研究グループに公募研究として参画いただき、多様なアシンメトリ量子の可視化に繋がりたいと考えています。

[1] S. Hayami *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).

[2] M. Kimata *et al.*, Nat. Commun. **12**, 5582 (2021).



## アシンメトリ量子物質を マクロ物性から如何に可視化するか

柳澤 達也

北海道大学大学院理学研究院 教授

計画研究A02の役割は「マクロ物性の観点からアシンメトリ量子物質を可視化すること」に設定しました。本領域での「アシンメトリ (非対称性)」とは「時間・空間の反転対称性」のみならず、「鏡映・回転対称性」や「共型・非共型」などの結晶の対称性も含まれます。物質中でそういった対称性の破れに付随して現れる様々な多極子自由度を「可視化」するために、微細加工によって極微非対角応答を増幅し、精密マクロ物性測定によって新機能を探索します。延いてはそれらを自在に制御できるようになることが究極の目標です。

新学術領域「J-Physics:多極子伝導系の物理」が契機となり、不完全殻イオンサイトが空間反転対称性を有しない結晶構造の物質、あるいは自発的に空間反転対称性を破る相転移を示す物質が集中的に研究されました。その成果として、電流誘起磁化、非線形ホール効果、磁気弾性効果、電流誘起歪みなどの交差相関現象の測定により、奇パリティ多極子の自発秩序の傍証が次々と報告されました。これらの発展を導いたのは、速水・八城・柳・楠瀬らによる多極子完全基底の構築であることは言うまでもありません[1-3]。スケールシームレスな普遍性を持つ拡張多極子の概念<sup>ふえん</sup>を敷衍することで、物性物理学の様々な現象を見通しよく記述することができるようになりました。後に物性物理学の歴史を見返したとき、「多極子」を言語

とした共通認識が生まれたパラダイムシフトとして認識される学術変革であると思います。

さて、「アシンメトリ量子物質の可視化」とは如何に達成できるのでしょうか。計画研究A02では、マクロ物性の観点から奇パリティ多極子に起因する交差相関応答や多極子感受率を定量化することが、可視化につながる重要なステップであると考えています。しかしながら、現状で観測されている交差相関現象は、特に金属化合物において、微弱なものが多いのが難点です。典型例として、金属化合物において磁気トロイダル双極子秩序を示すと目されているUNi<sub>4</sub>Bを例に上げましょう。本系の電流誘起磁化現象は齋藤・網塚らによって報告されましたが、その応答は微弱であり、SQUID信号の生波形まで遡ってバックグラウンドを差し引き、注意深く解析を行って観測精度ギリギリを攻めている難しい実験です[4]。それ故に、歩留まりの良い実験とは言えません。交差相関の美しさを乱す要因として、マクロスケールでは試料形状や電流端子の取り付け方、磁場方向のアライメントの精度、メゾスケールではドメインや試料内の転位・応力分布の存在、マイクロスケールでは結晶の低対称化や格子欠陥など、様々な理由が検討されています。これらの微視的な理解や、定量性の評価、理論との対応を調べるためには更なる高感度計測に挑戦することが必要です。最近、多田・下澤・井澤らは

[1] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi and H. Kusunose, Classification of atomic-scale multipoles under crystallographic point groups and application to linear response tensors, *Phys. Rev. B* **98**, 165110 (2018).

[2] 楠瀬博明, スピンと軌道の電子論, 講談社 (2019).

[3] ミクロな多極子による電子物性の表現論(その1~9), 速水賢 他, 固体物理 **54-58**号, (2019-2023).

[4] H. Saito *et al.*, Evidence of a New Current-Induced Magnetoelectric Effect in a Toroidal Magnetic Ordered State of UNi<sub>4</sub>B, *J. Phys. Soc. Jpn.* **87**, 033702 (2018).



UNi<sub>4</sub>Bの電流誘起Hall効果の測定において、直流成分と交流成分の周波数特性を解析することで電流誘起磁化を巧みに捉える手法を報告しました[5]。輸送現象による磁気トロイダル双極子秩序の可視化への新たな扉が開かれたわけです。

本研究計画では、高出力収束イオンビーム(FIB)加工技術・実空間磁化イメージング・三次元磁場角度精密回転測定技術を組み合わせることで、様々な交差相関応答の定量評価を目指します。即ち、ドメイン構造を含めた試料全体の磁化の巨視的空間分布を可視化したうえで、FIB微細加工によってモノドメイン領域を削り出し、ドメイン状態を選択・制御した上での精密計測が可能となるという道筋です。また、微細化により、最大でバルク実験の1万倍の電流密度での測定が可能となり観測精度のさらなる向上が見込めます。精密な熱流・表面弾性波制御も可能となり、精密電気計測、熱・弾性測定、高圧・高応力実験などの測定精度を桁違いに増大させることができると期待しています。ここで、計画研究A02はオーソドックスな（微細加工を用いない）マクロ物性測定を軽視しているわけではないことを強調しておきます。多極子の可視化と本領域の発展のためには「交差相関応答の多角化」こそが、必要不可欠な礎であると考えます。それを鑑み、A02メンバーは多彩なマクロ物性測定の専門家が集結した構成になっております（図1）。

更に、本領域では量子ビームを用いたマイクロな観

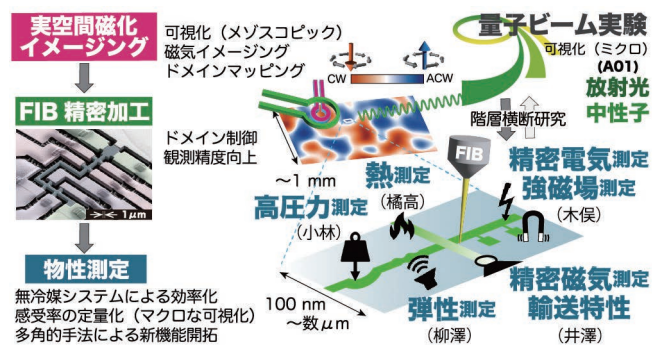


図1 A02 計画研究の概要

点からの可視化を担う計画研究A01と協働し、マクロとマイクロ双方からスケール横断型の研究を行います。たとえば、結晶の対称性を低下させず消滅則を変えない電子系秩序(例:共系→非共系秩序)や波数( $q=0$ )で多極子秩序が生じている場合、量子ビーム実験だけでは判別が困難な例があります。また、マクロ物性測定による交差相関現象から、X線や中性子などの量子ビーム実験で得られた結晶構造や磁気構造に再考を迫った例も少なくないようです[6]。このように、多極子の「対称性」と「定量性」を議論する為には、マイクロとマクロの両方の実験結果を相補的に用いる必要があり、マイクロ領域→メゾ領域→マクロ領域へとスケールシームレスな多極子応答の定量評価を行う研究アプローチは本領域の特色といえるでしょう。更に、C01・C02の物質合成のチームからは純良結晶をご提供いただき、B01の理論家の皆さんには引き続き実験家に寄り添って助言を与えていただきます。ここに、来年度から公募研究で参画いただく方々を加え、電流のみならず多彩な外場で多角的に交差相関現象・非相反性伝導(ダイオード性)を捉え、それらをアシンメトリ量子物質のマクロな機能として統一的に取り扱うことで「アシンメトロニクス」の学理構築に一步近づくと信じています。

さいごに、伝統芸能的な側面を持つ低温技術・精密マクロ物性測定技術をきちんと若手に伝承し、マイクロとマクロの実験データを読み解ける若手理論家を育成し、交差相関応答の検証実験と理論接続が「あたりまえ」にできる状況を作り出すことが学術変革の駆動力になります。院生諸君や若手研究者の柔軟な発想と無限の体力をお借りしつつ、アシンメトリ量子物質の豊穡なる世界を切り拓いていく機会を与えていただいたことに身が引き締まるとともに胸が高鳴ります。

5年間よろしくお願いたします!

[5] K. Ota *et al.*, Zero-field current-induced Hall effect in ferrotoroidic metal, arXiv:2205.05555.

[6] T. Katsufuji, Flow the Electric Current, and a Magnetization Shall Be Given You, JPSJ News Comments **15**, 02 (2018).





## 交差相関の定量的記述へ

大槻 純也

岡山大学異分野基礎科学研究所 准教授

B01計画研究は、本領域でただ一つの理論グループです。理論グループがABCの真ん中に配置されており、とても重要な位置づけになっています。

本領域の前身となるJ-Physicsとその後の研究で、拡張多極子の理解が進みました。従来の単一の原子軌道を対象とした多極子展開は電気多極子 (E) と磁気多極子 (M) で十分でしたが、複数の原子あるいは複数の軌道をまとめて表すには、さらに電気トロイダル多極子 (ET) と磁気トロイダル多極子 (MT) が必要になります。これら4種類の多極子で構成される基底は完全系を成すため、あらゆる自由度を展開できます (図1)。さらに、各多極子の持つ対称性 (時間・空間) を考慮することで、外場への応答も分類することができます。速水さんらの精力的な研究により、対称性に基づく分類学はほぼ完成したと、いい状況です [1, 2]。ある多極子秩序が起こっているときに、磁場・歪み・電流などの外場に対してどのような応答が発現するかということが予想できます。本研究では分類学に基づき未発見の交差相関を探索すると同時に、さらにその先の理論展開も目指します。それは定量性です。

本研究課題の計画は以下の3つで構成されます。

- ① 基礎理論
- ② 現象論から定量的記述へ
- ③ 物質設計

「基礎理論」では、A01・A02と連携して、新たな交差相関の探索や秩序変数の同定、多極子の観測を目指します。従来の多極子展開に新たに加わったトロイダル多極子 (ETとMT) は、実はそれほど珍しいものではありません。単位胞に複数の磁性元素を含む結晶において磁気秩序等が起これば、多くの場合、全体としてトロイダル多極子とみなせます。ただ、これまでそのような見方をしてこなかっただけです。したがって、既存の物質をあらためて見直してみると、有用な交差相関が発現する可能性があります。このように、多極子の完全基底による分類は、対称性の破れに対して新しい視点を与えます。

多極子の観測も重要な課題です。高ランクの多極子は直接観測できないため、間接的な検証が必要です。これが多極子研究で大きな障壁となってきました。分類学によって交差相関が整理されたことにより、多極子を間接的に同定する手段が増えたといえます。これまでの主要なツールは、磁場誘起の磁気モーメントや歪みへの応答でしたが、電流誘起磁化のような新しい交差相関も秩序変数を同定するための重要な情報となります。様々な交差相関の有無を表と照らし合わせることで、秩序変数の候補を絞り込むことができます。ただし、交差相関が観測されない場合に、「交差相関がない」ことを結論するには注意が必要です。ドメインにより打ち消し合っている可能性や信号が小さすぎて見えていない可能性がある

タイプ	記号	空間反転	時間反転	単極子	双極子	四極子	八極子
E	$Q_{lm}$	$(-1)^l$ 極性	+	(+, +)			
M	$M_{lm}$	$(-1)^{l+1}$ 軸性	-	(-, -)			
MT	$T_{lm}$	$(-1)^l$ 極性	-	(+, -)			
ET	$G_{lm}$	$(-1)^{l+1}$ 軸性	+	(-, +)			

図1: 多極子展開の例  
楠瀬博明, 速水賢, 固体物理 55(11), 323 (2020)より

るからです。前者は微細加工技術による解決が期待できます。後者は我々理論グループの仕事です。交差相関の定量性をそのオーダーだけでも見積もることができれば、交差相関がないという結論が下しやすくなります。

点群や空間群を駆使した分類学は、化合物の詳細に依らず、対称性のみから最大限の結論を導き出せる非常に強力なツールです。一方、応答や転移温度の「定量性」を議論するためには、化合物の詳細を考慮に入れて、応答関数や電子間相互作用の大きさを見積もる必要があります。これらの計算で必要となるのは、第一原理に基づく電子構造計算（いわゆるバンド計算）と量子多体計算です。

10～20年程前までは、電子構造計算と量子多体計算は別々に扱われていました。量子多体計算では、化合物の詳細を極力落とした典型的なモデルハミルトニアン（代表はハバード模型や周期アンダーソン模型）を考え、量子多体効果を考慮します。こうして現象の本質のみを議論するのが物理学的なアプローチです。しかし、スピンと軌道の自由度が絡み合って現れる現象は非常に多彩で、ひとつの「典型的なモデルハミルトニアン」を解けばよいという状況にはなりません。また、例えば、非従来型超伝導の性質にはフェルミ面の構造が強く影響するため、エネルギー分散を取り入れた計算が不可欠です。

近年では、電子構造計算と量子多体計算の融合が進んでいます。理論化学と理論物理の境界線が無くなってきているとも言えます。電子構造計算によって得られるバンド構造を相関のない一体のエネルギー準位とみなし、ここに多体効果を加えます。こうすることで、化合物の個性を考慮に入れた応答や相転移温度の計算が可能となります。ただし、多くの軌道を考慮した多体計算は当然それだけ難しくなります。多極子基底を用いて、なるべく少ない自由度で有効

ハミルトニアンを表現するなどの工夫が役に立つと期待できます。

「物質設計」という言葉は近年ではよく耳にするようになってきました（図2）。それは計算機の進歩も一因ではありますが、第一原理計算パッケージが一般に利用できるようになってきたことが大きいと思います。基本的な物理量であれば、密度汎関数理論を知らなくても、マニュアルに従えば計算できます。また、Materials Projectのようなデータベースには、結晶構造だけでなく電子構造や様々な物理量の計算結果までもが登録されており、その信頼性はさておき、代表的な化合物であれば自分で計算する必要すらなくなってきています。

バンド計算ができるだけでは仕事にならない時代には、他人にはできない計算をすることが重要です。その一つが多極子物性です。多極子物性には多体効果を考慮する必要があるため、既存のパッケージを少し拡張するだけでは計算できません。多極子物性に関する理解は日本がもっとも進んでいます。この優位性を生かし、多極子物性の第一原理計算も日本で発展させるべき研究課題です。第一原理的なアプローチに関する基礎研究では、個々の物質との比較検証を積み重ねる着実なプロセスが必須です。C01・C02と連携して、トロイダル多極子の秩序を含む典型物質（あるいは物質群）を定め、まずはその典型物質の多極子物性の再現に取り組みます。そこから対象物質を広げていき、測定されていない物質の計算、そして実験による検証まで行います。

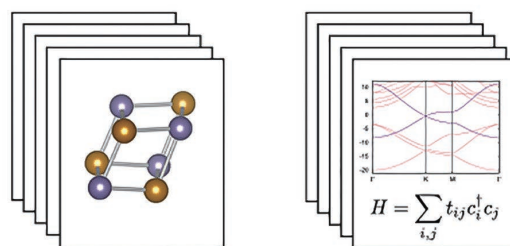


図2：物質設計のイメージ図

[1] M. Yatsushiro, H. Kusunose, and S. Hayami, Phys. Rev. B **104**, 054412 (2021).  
[2] 楠瀬博明, 速水賢, 固体物理 **58**(1), 11 (2023).



## 典型物質の合成をめざして

大原 繁男

名古屋工業大学大学院 教授

学術変革領域研究(A)「アシンメトリ量子」が走り始めました。2023年6月10日のキックオフミーティングの懇親会では「今日は楽しくて仕方がない。これから5年間、みなさん、楽しみましょう!」と、ご挨拶させていただきました。楽な研究はありません。むしろ苦しいことが多々あるでしょう。しかし、目標へ向けて研究を楽しむ気持ちを持ち続けたいと思います。

C01では「アシンメトリ量子物質の深化」を主題に掲げています。目標は、アシンメトリ量子物質を一連の物質系として創出して、系統的な研究から、その機能の理解と制御を深化させること、そのために、非対称性と機能物性が強く紐付けられた、典型となる、原子からクラスターサイズのアシンメトリ量子物質系を開発することです。

図はC01の研究の概念図であり、他の計画研究との関係も示してあります。

「アシンメトリ量子物質」とは、空間や時間などの対称性が破れた電子状態を持つ物質を指します。C01では、カイラルを始めとした構造に反転中心がない結晶、および、局所的に反転中心を持たない構造(ジグザグ、ハニカム、カゴメ、ダイヤモンド構造など)において磁気秩序が生じて時間反転対称性を消失す

る結晶を主にねらって合成を進めます。

結晶において、外場と応答を結ぶ物質定数(感受率)は物性テンソルで表されます[1]。空間反転対称性が破れると、軸性の物性テンソルが活性になり、交差相関応答が生まれます。軸性テンソルは、極性と軸性のテンソル量(ベクトルを含む)を外場と応答として結びつけることができ、時空の反転に対して偶奇性の異なる物理量の相関を可能とするからです。

物性テンソル量の対称性は32の結晶点群に従います。テンソル成分を定量的に測定し、構成元素や結晶構造、スピンも含めたバンド構造との相関を明らかにできる典型物質を合成することがC01の当初目標となります。

そのために、アシンメトリ量子物質「系」を創出して比較研究をすることを重視します。例えば、単体で

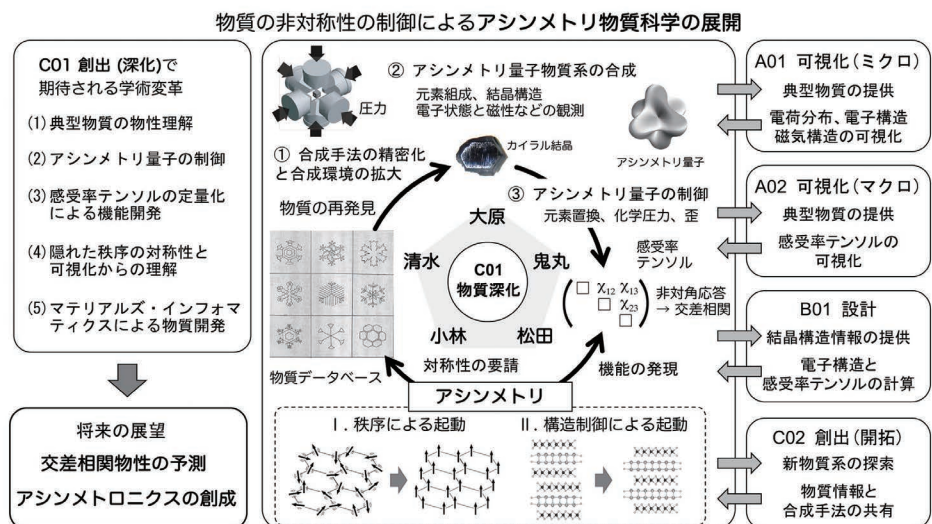


図 C01の研究概念図。アシンメトリ量子物質の構造と機能を結びつける。そのために、合成手法の精密化と合成環境の拡大、アシンメトリ量子物質系の合成、アシンメトリ量子の制御を行う。

[1] J.F. Nye, "Physical Properties of Crystals" Oxford Univ. Press (1957).

[2] T. Yamashita, R. Miyazaki, Y. Aoki, and S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn. **81**, 034705 (2012).



あれば、同素体や同族元素間での構造や物性の比較、二元系や三元系物質であれば、特定のサイトの原子を別の元素に置き換える、あるいは、部分置換することで、構造や物性の制御を行うことを進めます。物質データベースを元に、アシンメトリ量子物質系となりうる代表的な結晶構造からの物質系探索も始めています。

アシンメトリ量子物質の基本学理の解明には、いわゆる、反対称スピン軌道相互作用を理解しなくてはなりません。その源は構成原子のスピン軌道結合であり、元素の置き換えにより（いくらかは）調節できることが期待されます。もっと重要なのは、電子の波動関数の奇パリティ混成と、空間反転対称性の破れによる奇パリティな結晶場での電子軌道の局所的混成です。これによってバンドがパリティ混合分裂することが本質です。

このことを踏まえると、観測に適した物質系としては、反転対称性を持たない単体やp-dやd-f混成を持つ化合物となります。二元系シリサイドやカルコゲナイド、三元系希土類金属間化合物を候補物質としてC01では合成をはじめています。カルコゲナイド合成のために、岡山大学に分子線エピタキシー (MBE) 装置を導入します。また、東北大学大洗に共同利用設備としてウラン化合物の高圧合成装置を設置します。

パリティ混合分裂を調べるためには、A01との連携により、スピンを含めた電子状態および磁気構造、あるいは、多極子の秩序構造、を明らかにする必要

があります。B01によるバンド構造の理論計算と比較することで、電子軌道の混成の度合いやスピン分裂の大きさの定量化が望まれます。どこまでこの比較がうまくいくかが難しいと思っていますが、物質系を用いた研究は、理解の助けとなるはずで

かなりの工夫が必要ですが、A02との連携では、物性テンソルの成分を定量的に観測することに挑戦します。微細加工試料を用いることで、結晶中のドメイン選択を可能にし、測定感度と精度を向上させることができます。 $10^8 \sim 10^{10} \text{A/m}^2$ といった高い電流密度を得ることも可能となり、電流誘起現象の観測が可能となります。逆スピンホール効果によるスピン流の観測や実空間での磁化の顕微測定など、高度な技術を用いたテンソル成分の定量的な観測にも期待が持たれます。

C02とは、物質探索と合成手法について常に情報交換しながら共にアシンメトリ量子物質開拓をおこない、C01が深化、C02が開拓を担います。

C01での研究例として、筆者の研究しているカイラル螺旋磁性体 $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$ について物質の広がりを紹介します。この物質は空間群 $R32$  (#155)、結晶点群 $D_3$ に属するカイラルな結晶構造を持ち、Ybはハニカムに配列しています。3.4K以下の低温でc軸を螺旋軸とした一軸カイラル螺旋磁性を示します[2, 3]。重い電子系物質でもあります。Ybを重希土類と、AlをGaに替えることができます[2]。p-d-f電子からなる金属間化合物です。

YbをYやLuに替えると非磁性体になりますから、面

[3] S. Ohara, S. Fukuta, K. Ohta, H. Kono, T. Yamashita, Y. Matsumoto, J. Yamaura, JPS Conf. Proc., 3, 017016 (2014).; T. Matsumura, Y. Kita, K. Kubo, Y. Yoshikawa, S. Michimura, T. Inami, Y. Kousaka, K. Inoue, S. Ohara, J. Phys. Soc. Jpn. **86**, 124702 (2017).

[4] H. Ninomiya, T. Sato, Y. Matsumoto, T. Moyoshi, A. Nakao, K. Ohishi, Y. Kousaka, J. Akimitsu, K. Inoue, S. Ohara, Physica B, **536**, 392-396 (2018).

[5] H. Ninomiya, Y. Matsumoto, S. Nakamura, Y. Kono, S. Kittaka, T. Sakakibara, K. Inoue, S. Ohara, JPSJ, **86**, 124704 (2017).



白くなさそうです。しかし「アシンメトリ量子」の観点からは違います。結晶点群 $D_3$ では二階軸性テンソルが対角成分を持っていますから、電流に沿って磁化が生じるはずで、むしろ磁性元素に邪魔されずに電気磁気効果を観測できることとなります。通常金属ですから量子振動現象によるフェルミ面観測もやりやすい。スピンおよび角度分解光電子分光の観測、バンド計算との比較もやりやすいことが期待されます。アシンメトリ量子物質の典型になりえます。

$\text{ErNi}_3\text{Ga}_9$ では、ハニカム構造上で磁気モーメントがc軸を向いたIsing反強磁性に秩序します[4]。磁気空間群 $C_2'$ です。 $\text{DyNi}_3\text{Ga}_9$ では強電気四極子秩序と磁気秩序を同時に示します[5, 6]。温度の低下とともに結晶は歪み、3回軸を失って磁気空間群は $C_2$ になります。これらの物質では、二階軸性テンソルの成分が秩序とともに変化しているはずで、これまでバルク試料を用いて電流誘起磁化の観測を試みて来ましたが、うまくいきませんでした。電流密度が足りないと考えられることから、微細加工試料を用いた観測に挑戦し始めています。

$\text{GdNi}_3\text{Ga}_9$ では、c面内に磁気モーメントが反強磁性的に秩序した上で、c軸に沿ってカイラルな螺旋を巻きます[7]。磁気伝播ベクトルは(0, 0, 1.485)であり、結晶構造と整合するには200単位胞が必要です。Gdの磁気モーメントは結晶場の影響を受けにくいことから、この長周期の螺旋こそがこの物質系におけるパリ

ティ混合分裂の効果と直結しているのかもしれませんが。RKKY型の反対称スピン相互作用（いわゆるDzyaloshinskii-Moriya相互作用）を理論的に説明するための典型となるかもしれません。

スピン-軌道相互作用を調整するなら、 $\text{YbNi}_3\text{Al}_9$ のNiをPdやPtに替えることがよさそうです。残念ながら同じ結晶構造では置き換えられません。しかし、部分的な置換は可能で、カイラル磁性が強調される結果が見えはじめています。

NiをCoやCuに一部置換することも可能で、Co置換では磁気秩序が抑制され、Cu置換では強められます[3]。これらはキャリア密度を変化させることからRKKY型のカイラル磁性はフェルミ面敏感なのかもしれません。置換した試料についても角度分解光電子分光の測定を進めています。

この他、類似した構造をもつハニカム磁性体[8]も数多く合成しています。ハニカムネット上での磁気秩序が生み出すアシンメトリ量子状態の観測に挑戦していく予定です。

この学術変革の最初の一步は、モノの見方を変えることにあります。アシンメトリ量子の観点からモノを見直してみてください。これまで平凡だと思っていた反強磁性体や、よく解らなかつた磁気相が、アシンメトリ量子の観点からは、交差相関現象を示す興味深い物質であったり、スピンが渦巻いた磁気構造であったりするかもしれません。

[6] I. Ishii, K. Takezawa, T. Mizuno, S. Kamikawa, H. Ninomiya, Y. Matsumoto, S. Ohara, K. Mitsumoto, T. Suzuki, J. Phys. Soc. Jpn. **87**, 013602 (2018); T. Mitsuru, M. Takeshi, M. Shinji, I. Toshiya and O. Shigeo, PRB, **105**, 014428 (2022).

[7] S. Nakamura, T. Matsumura, K. Ohashi, H. Suzuki, M. Tsukagoshi, K. Kurauchi, H. Nakao, S. Ohara (submitted to PRB).

[8] Y. Matsumoto, T. Ueda, S. Ohara, J. Phys. Conf. Ser., **683**, 012035 (2016).



吉田 紘行

北海道大学大学院理学研究院 教授

## アシンメトリを拡げる、アシンメトリで拡がる

“非対称性”とは、一般に何らかの変換操作によって定義される対称性からのズレを意味する概念であり、様々な機能性と密接に関係しています。例えば、空間的に高い対称性を有する丸い球は水平面に置かれるとじっとして動きませんが、鉛直軸に対して非対称な形になるとバランスを崩して動き始めます。重力という外場に対する非対称性が物体に動きを生み出したこととなります。また、対面通行の道路の往来は時間的に対称な運動ですが、しばしば衝突事故の原因にもなります。他方、対称性を破った一方通行の道路は対向車のことを気にかける必要がなく、安全性が高まっています。注目する系のもつ様々な対称性とその破れは機能性と密接に繋がっており、人類はこれらを巧みに利用して、高度な文明社会を構築してきました。

同様に、固体物質における電子状態の非対称性（アシンメトリ）は多彩な機能性を発現させます。固体には様々な対称性が存在しており、例えば空間反転対称性、時間反転対称性の破れは、それぞれ強誘電性、強磁性をもたらし、それらを用いて多種多様な機能性材料が創出されています。

固体物質におけるアシンメトリは多極子の概念によって整理されます。f電子系で議論された従来の多極子は単一原子サイト上の電荷や磁荷の空間分布を表す概念でしたが、近年、複数サイト上にまたがる磁気・電荷秩序状態を記述するよう多極子の概念が拡張され（拡張多極子）、その完全基底が構築されました[1]。これにより、電子状態のいかなる非対称性をも記述する

ことが出来るようになり、その結果二つの重要な帰結が導かれました。

一つは、交差相関物質の設計指針が示されたことです。固体物質中では、アボガドロ数の電子が互いに相互作用し、ひしめき合いながら電子状態を形成します。多体効果の末に生じた電子状態がいかなる機能性を有するのか、それは単純な問題ではありません。拡張多極子は電子状態と機能性の関係を見通しよく整理します。これによって、アシンメトリを指導原理とした戦略的な機能性物質開発を行うことが可能となります。これは物質開発における従来の経験則を形式知として可視化し、変革をもたらすものです。さらに、奇パリティ多極子が活性となる場合は、電流誘起磁化や電流誘起歪み等の新しい交差相関の発現も予想されており、革新的な物質機能開拓の道標にもなっています。

二つ目は、空間スケールシームレス性による分野融合の可能性です。拡張多極子は複数サイトにわたる電子状態を記述するため、0.1 nm程度のf電子系の電荷分布から、1~10 nm程度の多量体や原子クラスターの電子状態、100 nm程度のスキルミオン粒子、0.1~1 μm程度のメタマテリアルにおけるトロイダル秩序に至るまでスケールシームレスに適用できる可能性があります。空間スケールの違いにより独自に発展してきた諸分野の研究を拡張多極子で統一的に理解し、物性物理学に分野横断的な展開を引き起こすことも期待されます。

C02では、拡張多極子が躍動する多彩なアシンメトリ量子物質の開拓と精密物性評価を通して、結晶構造

[1] S. Hayami, M. Yatsushiro, Y. Yanagi and H. Kusunose, Phys. Rev. B **98**, 165110 (2018).

や電子状態におけるアシンメトリを切り口とした戦略的物質探索を展開し、分野融合研究の推進、革新的な交差相関応答材料の創成を目指します。

それでは、どのようにアシンメトリ量子物質を開拓すればよいでしょうか。本研究では以下の“手法”を考えています。

① **多彩な化学的手法による物質合成**：C01と協力し、アクチノイド物質の合成や、高温高压法、水熱法、ブリッジマン法、化学気相輸送法、フラックス法、イオン交換などの手法を駆使し、トポタクティックなルートや、分子軌道に基づく結合制御、極限環境下で安定化する高密度構造や異常原子価、配位環境を利用することで局所非対称性を導入したアシンメトリ量子物質の戦略的な開発を行います。中でも、高温高压合成に関しては既存の装置を高度化し、最大で1500°C, 11 GPa以上の条件まで物質探索領域を拡張します。極限環境下で得られる試料は少量であるため、微細試料の精密物性評価技術を有するA02と協力し物性を評価します。

② **結晶構造及び秩序構造の考察**：ジグザグ鎖やハニカムネットなどの局所非対称構造や、カイラル空間群等に着目し、磁気・電荷秩序の形成に伴う奇パリティ多極子秩序の探索を行います。特に、A01, B01と連携し、感受率の大きい物質の候補として、 $q=0$ の秩序構造を有する物質をデザインします。

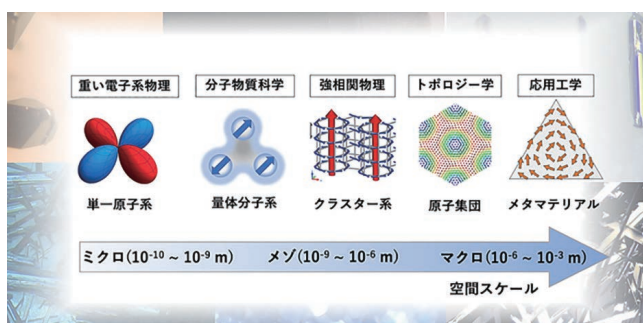
③ **複合精密物性評価**：物質合成と並行して、単結晶X線回折装置、レーザードップラー振動計、NMRを有機的に連動させて局所非対称性を評価することにより、アシンメトリ量子物質のモデル物質を探索します。またA02と連携し、磁場や圧力などの外場に対する交差相関応答を検証します。

具体的な対象は、単一原子系、量体化合物、クラスター化合物、トポロジカル物質、人工物質と多岐にわたります。これまでに、Mn化合物やIr酸化物で観測された異常ホール効果や非線形伝導、電流誘起歪み効果などが、磁気トロイダル四極子、電気トロイダル双極子に起因するものとして理解されつつあり、空間ス

ケールの異なる物質系におけるアシンメトリの普遍性が垣間見られています。

これらの対象物質を開拓するため、C02では強力なメンバーが連携しています。主に3-5d電子系の量体及びクラスター多極子化合物を吉田が、5f電子を含むアクチノイド化合物を芳賀芳範氏（原研）が、スピン軌道相互作用の強い4-5d電子系の電気トロイダル多極子化合物を松平和之氏（九工大）が、p-d電子系の大きな空間スケールを有するトポロジカル物質を石渡晋太郎氏（阪大）が、4f, d電子系のクラスター多極子化合物の開発及びNMR、NQR、X線構造解析を用いた局所非対称性の評価を小手川恒氏（神戸大）が担当し、アシンメトリ量子物質の開発を進めていきます。

創出班におけるC02の重要な役割は、アシンメトリの概念をより広い対象に広げることにあります。アシンメトリを横串として多様な物質系を統一的に理解し、それをもって学術変革の礎としたいと考えています。拡張多極子の興味の一つは、数多ある物質に埋もれてきた磁性体や電荷秩序系に再び光を当てることです。取るに足らないと思えるハニカム構造上のNéel秩序を、磁気トロイダル八極子と捉えた瞬間に、我々は新規交差相関現象が眠る豊かな大地に立っていることに気がきます。地中深く埋まった宝を掘り起こすにはどうすれば良いでしょうか。深く、そして径の大きい穴を掘る必要があるでしょう。創出班の役割は眠っている物質を掘り起こす事であり、そのためにC01が深く掘り下げ、C02は大きく広げる役割を担います。我々はその役割を全うし、多彩なモデル物質の開拓により、アシンメトリの対象を広げ、そしてアシンメトリによって広がる物質科学の可能性を楽しみたいと思います。







## キックオフミーティング開催記

小林 夏野

岡山大学 異分野基礎科学研究所 准教授

2023年6月10-11日に岡山大学にて、領域のキックオフミーティングが開催されました。課題採択後初めての会議ということで多くの参加者(～141名)に恵まれました(図1)。あいにくの曇天ではあったものの、大きなトラブルもなく無事にミーティングを終えることが出来ました。

初日は鬼丸代表による研究領域紹介(図2)から始まり、それぞれの計画研究ごとに代表による計画研究全体の紹介と構成員による各自の研究紹介などが行われました。発表人数も多く、それぞれの発表も多彩な研究を出来るだけ広く紹介したため駆け足といった印象は否めなかったですが、限られた時間の中でも活発な議論が行われました。

初日の講演は精密測定と量子ビーム測定による秩序の可視化と定量化についてで、精密測定を中心としたA02と量子ビームを中心としたA01が発表を行いました。特に、領域で購入予定である集束イオンビーム(FIB)装置による微細加工についての講演では、



図2 領域紹介を行う鬼丸代表

加工に関して活発な議論が行われました。他にもスケールを変えて時間変化も観測できる軟X線散乱を用いた顕微など意欲的な発表が相次ぎ、新しい測定技術について測定手法の側面だけでなく、その手法で得られる物理についてなどの活発な議論が行われました。

夕方からは、キャンパス内を移動して懇親会が行われました。107名の参加者があり、比較的小さかった会場は熱気に包まれていました。シニア研究者の

熱意のある決意表明などもあり、非常に活発な交流があったことは、ここ数年多かったオンラインでの会議と大きく異なる点ではなかったかと思います。

2日目は、B01の発表で始まり、多極子を用いてどのような新奇物性がおこるか、多極子を用いてどのように物理を理解することが出来るかなどについて実験結果との関連なども含め活発な議論が行われました。続いて、典型的なアシンメトリ量子物



図1 会議参加者全体写真



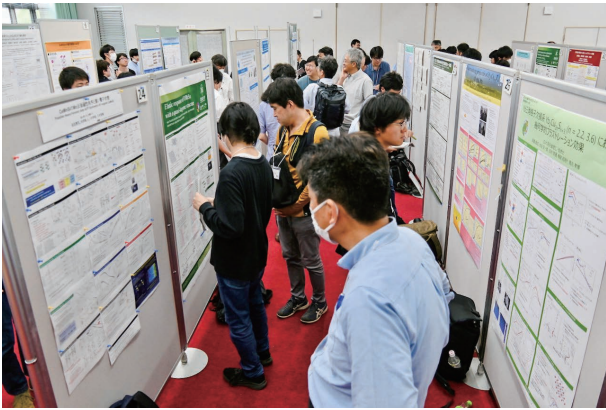


図3 ポスターセッションの様子

質の合成を目指すC01の発表があった後に、会場の外で集合写真の撮影を行いました(図1)。

昼食後は、会場を移してポスターセッションが行われました。ポスター発表も72件と大盛況だったため、会場はかなりの熱気(温度的にも雰囲気的にも)に包まれていました(図3)。人数も多かったので、前半後半に分けての発表としたのですが、結局議論が盛り上がったようで、後半になっても前半のプログラムの人が続けて議論しているなど、会場は常に混雑していました。

メイン会場に戻ってからは物質開拓に関してC02のメンバーからアクチノイドから遷移金属酸化物ま

で、興味深い物質についての幅広く発表が行われました。最後にポスターセッションで発表した学生のうち、審査員の採点を集計して選ばれた最優秀賞1名と優秀賞4名の表彰が行われました(図4)。今回は選ばれなかった学生の方々も非常に良い評価の発表が多く、ぜひ今後も頑張ってくださいと思います。

クロージングでは、評価委員の鳥養先生と小形先生から、どのように社会と接続するか視点について、またこれまで行われてきた研究との差異と接続についてなど、貴重なご意見を頂きました。特に、鳥養先生が示された10年前に学生として参加していた人が計画研究の代表になっているという話が、印象に残りました。丁度この原稿を書いているときにGoogleが5年前に…と言って出してきた写真がJ-Physicsの淡路島で行われたワークショップだったため、感慨深く思い返しました。あのとき学生だった人たちが学位を取って今回のキックオフに参加しているように、今回のキックオフミーティングが、参加学生や、若手研究者にとって飛躍への良い足掛かりになったら願っています。



図4 ポスター最優秀賞・優秀賞受賞者



## 石黒鎮雄博士に学ぶ研究のすすめ方

大原 繁男

名古屋工業大学大学院 教授

日時：2023年6月6日(火) 2・3限(9:55～12:15)1、2組 / 4・5限(12:55～15:15)3、4、5組  
場所：愛知県立一宮高等学校 桃陵館  
対象：2年生生理系クラス(1～5組、200名弱)

アウトリーチ活動として、愛知県立一宮高校で「石黒鎮雄博士に学ぶ研究のすすめ方」の講演を行いました。理系の2年生200名弱を2クラスに分けて、同じ内容を午前と午後で講演しています。SSH校である一宮高校の生徒が取り組む課題研究への導入として、研究の進め方について学ぶ内容になります。

教材には、ノーベル文学賞を受賞したカズオ・イシグロ氏の父親であり、海洋学者の石黒鎮雄博士のエッセイ『自記波高計の作り方と実験』[1]を用いています。講演の冒頭では、石黒博士の業績として、長崎でのあびき現象の解明、イギリスでの波高予測のアナログコンピュータの開発(ロンドン科学博物館に永久展示されている)、北海油田の実現やテムズ川河口堰の設置と運用との関わりなどを紹介しました[2]。同時期に真鍋淑郎博士はアメリカにわたり

デジタルコンピュータで地球の気象予測に取り組んだことも話して、興味を高めてもらいました。

エッセイをあらかじめ読んで、印象に残った文を3つ選び出してもらうことを生徒への事前課題としています。生徒が選んだ文をテコに、研究動機、研究計画、文献調査、研究全体の構造、「考える」ことの重要性や思考実験について説明していきました。

一宮高校の生徒に選ばれた、印象に残った一文の第1位は「研究の全コースの中で、考えることは如何に多くの努力をはらっても無駄にはなりません。」(33名)でした。第2位が次の2文で24名が選んでいます。「観察を注意深く行うのは申すまでもありませんが、同時に多くの種類、多くの場合を、多くの角度から眺めてみることも大切です。」「目的に対して、あらゆる場合を検討すること…それをただ思いつきに任

せて調べてみるよりは系統的に順序立ててやっていくことが上手方法だと言えましょう。(原文ママ)」でした。なかなかよい文を選んでくれたと思っています。

常に考えること、あらゆる場合を検討することは、我々が日頃、学生に対して行っている指導の本質ではないかと思います。観察を注意深く行い、新しい視点を得た例としては、パスツールによる酒石酸塩の謎の解明、すなわち、カイラリティの発見を紹介しました。「アシンメトリ量子」もまた、視点の転換と言えるでしょう。科学研究費



助成事業の構造も説明し、「アシンメトリ量子」を例に、学術変革領域研究を大型研究の一例として紹介しました。

石黒博士による「こうして得られた知識の上に、自分の手によって小さいながら更に一段の足場を築くことが私たちの仕事なのです。」という文も印象に残ったようで13名が選んでいました。ラヴォアジエとニュートンによる次の言葉も紹介して、人類が歩んできた研究の道筋について感慨を持ってもらいました。「常に知られている事を土台としてのみ、知られていないことへ進むこと・・・」

ラヴォアジエ (1743-1794)、「もし私が他の人よりも多少遠くを見通せたのだとすれば、それは巨人の肩の上に乗って遠くを眺めているからです。」  
ニュートン (1642-1727)。これらの言葉は、我々の持つべき研究への基本の態度と言えましょう。

授業の終わりに、いくつか質問をうけました。その中で「チームリーダーとしてうまくやるにはどうしたらいいですか」という難しいものがありました。C01代表としては、おそろしい質問です。とっさに吉田松陰の言葉を思い出して、必ず志(こころざし)を持つこと、自分(リーダー)の能力に頼って仕事をしてしまわないこと、を紹介しました。授業後のアンケートで84もの質問がきているので、書面で回答をしようと思っています。

生徒はよく聞いてくれて、手応えはよかったです



が、アンケート結果をみるとやや難しく感じたようです。また、グループでの話し合いの時間がもっと長いほうがよいなど、演習時間を増やす要望が多くありました。詰め込み過ぎなので、内容を思い切って減らして、演習を増やしたほうがよさそうです。具体的なアドバイスが欲しかったという声もありましたが、これは個々に知りたいことが異なると思われ、難しいところです。こういった生徒の声に耳を傾け、改善しながら、このアウトリーチ活動を続けていきます。

[1]石黒鎮雄「自記波高計の作り方と実験」(第1回～5回)、海と天気のある、長崎海洋気象同好会発行(1950)。

快く資料のコピーを提供していただいた長崎地方気象台とお世話いただいた長崎海洋アカデミー所長の中野俊也先生に厚くお礼申し上げます。

[2]小栗一将, Oceanography in Japan, **27**, 189 (2018)., 日本物理学会会誌, **77**(9), 632 (2022).



非物理の人に非対称性が彩る物理の面白さを伝える

ゆるい科学マガ

# アシメタ通信

第1話

「はじめまして！ 芦芽量子です」



芦芽量子

初めまして。うちの名前は**芦芽量子**(あしめりょうこ)言うんよ。名前が似るといっただけで広報担当に任命されたんよね。皆さんが頑張ってる研究の内容を市民目線で発信しよーと思っとります。ぶち緊張しとるけど、どうぞよろしゅーお願いします。

芦芽さん！この度は大役を引き受けてくれてありがとうございます。失礼ですが、その…脚に螺旋状に巻き付いていらっしやるのは？

鬼  
鬼丸



うちのお友達の蛇、ウロボロス いうんよ。うろたん、って呼んであげてーや。夜行性なんで普段は頭のお団子の中で寝とるけど、今日は周りが賑やかじゃけー外に出てきとるんよ。この子は右巻きのカタツムリを食べすぎてしもうて、**左右非対称**の歯になったんよ。可愛いじゃろ？

うろたん、ですか

本研究領域のコンセプトにピッタリですね。**左右非対称**。アシメさんも**左右非対称**(アシメ)なファッションが素敵ですね。

鬼



ありがとーね。非対称なものに何かしら美を感じるんじゃわ。早速じゃけど、鬼丸先生の研究対象はどのあたりがアシメなんかね？

たとえば、お友達のうろたんを鏡に映すと、自分自身とは重なりませんよね？  
そういった**左右非対称**の鏡映の対称性のみならず、時間や空間の対称性を組み合わせるといろいろな対称性が見つかります。  
実はこの世の中は、そういった対称性が自発的に破れることで成り立っているのですよ。

鬼



いきなりいたいしいけー！  
時間・空間…もうギブアップじゃわ。じゃけど、「**自発的対称性の破れ**」っていう言葉は聞いたことがあるわー。

自然科学では重要なコンセプトですね。  
対称性の概念を使うと物事の普遍的な性質を理解する上で見通しが良くなります。  
我々は、非対称な構造を持ったり、自発的に非対称になったりする新物質を探索し、その性質を理解し、そこに新しい機能が創発されるかどうか調べています。

鬼



かっこえーねー！  
じゃったら、このコラムで分からんことをいっぱい聞けーねー楽しみにしとるけん！

芦芽さんともども、アシメトリ量子の応援よろしくおねがいします！

鬼



名前：  
**芦芽量子**(あしめ りょうこ)  
出身地：  
広島県 廿日市市 宮島  
すきなもの：  
チョココロネ(パン、右巻き限定)

蛇：  
**ウロボロス**(愛称：うろたん)  
出身地：  
沖縄県 八重山郡 竹富町  
すきなもの：  
かたつむり(右巻き限定)

## 2023年10月からの関連行事

### H-Physics Workshop (incl. Tutorial “Kinken-Wakate 2023”)

日時：2023年10月9日（月）～10月12日（木）

場所：LNCMI (Tutorial), Basilique du Sacre-Coeur (Workshop) (Grenoble, France)

<https://sites.google.com/view/h-physics-workshop/home?authuser=0>

アシンメトリ量子共催

### 第17回 物性科学領域横断研究会（領域合同研究会）

日時：2023年11月24日（金）～11月25日（土）

場所：名古屋工業大学4号館ホール（愛知県名古屋市）

[https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan\\_17th/index.html](https://www.rs.tus.ac.jp/ryoikioudan_17th/index.html)

アシンメトリ量子共催

### APS March Meeting

日時：2024年3月3日（日）～8日（金）

場所：Minneapolis Convention Center (Minneapolis, MN, USA)

<https://march.aps.org/>

### 日本物理学会 2023 年春季大会

日時：2024年3月18日（月）～21日（木）

場所：オンライン開催

### 領域全体会議

日時：2024年5月（予定）

場所：東広島芸術文化ホールくらら（広島県東広島市）

アシンメトリ量子主催

### ICM2024 International Conference on Magnetism 2024

日時：2024年6月30日（日）～7月5日（金）

場所：Bologna Congress Center (Bologna, Italy)

<https://www.icm2024.org/>

### 日本物理学会第79回年次大会

日時：2024年9月16日（月）～19日（木）

場所：北海道大学札幌キャンパス（北海道札幌市）

### 若手秋の学校

日時：2024年9月20日（金）～23日（月）（予定）

場所：国立大雪青少年交流の家（北海道美瑛町）（予定）

アシンメトリ量子主催

# 事務局からのお知らせ

## ■ 謝辞記載のお願い

本学術変革領域に関する業績には、以下の謝辞の記載をお願いいたします。

### ■ 記載例は次のとおりです。

【英文】: This work was supported by JSPS KAKENHI Grant Number JPXXXXXXXX.

【和文】: 本研究はJSPS科研費 JPXXXXXXXXの助成を受けたものです。

(※XXXXXXXXは課題番号)

### ■ 計画研究の課題番号と課題名の対応は次のとおりです。

23H04867 A01: 量子ビームによるアシンメトリ量子物質のミクロ解析

23H04868 A02: 精密物性測定によるアシンメトリ量子物質の新機能開拓

23H04869 B01: アシンメトリ量子物質の基礎理論と設計

23H04870 C01: アシンメトリ量子物質の深化

23H04871 C02: アシンメトリ量子物質の開拓

23H04866 X00: アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出の研究総括

(※ 共用機器の利用。国内旅費援助・海外派遣で得られた成果の場合、こちらも含めてください。)

## ■ 公募研究

令和6(2024)年度の公募研究は令和5(2023)年7月中旬より公募を行っています。

# ASYMMETRY NewsLetter #01 2023.09



## 編集後記

学術変革「アシンメトリ量子」ニュースレターの初めての刊行に際し、編集委員として非常にワクワクしています。ニュースレター担当を拝命した当初は、何をどのように進めたらよいかかわからず右往左往していましたが、経験豊富な領域メンバーの先輩方に手取り足取り助けて頂き、なんとか第1号の刊行にこぎつけることができました。サポート頂いた皆様にはこの場を借りて深く感謝申し上げます。今後、この学術変革で行われる最新のプロジェクトや面白い発見について読者の皆様に広く情報を共有し、研究コミュニティをより一層活性化させる一助になるべく、このニュースレターを充実させていきたいと思っています。読者の皆様からのご意見やご提案は今後の改善に非常に有用ですので、いつでも歓迎です。「アシンメトリ量子」で開拓していく新しい景色を追いかけながら、自身も共に成長していくことを楽しみにしています。5年間どうぞよろしくお願いいたします。

(田端 千紘)



## 「非」対称性から「生」まれる物語

去る8月30日、「学術変革領域研究(A)」アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出のロゴが納品されました。アートディレクターの岡田善敬さんと話し合いを重ね、我々の研究に対する思いを盛り込んだデザインにまとめることができました。研究内容を表すことはもちろんのこと、特に重要視したのは、専門家だけでなく一般の方にも分かるストーリーを組み込むことでした。

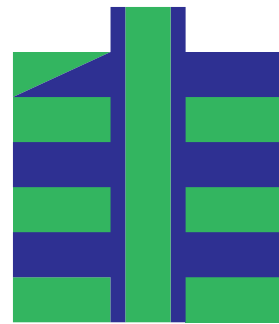
それでは、このロゴにはどのようなストーリーが込められているでしょうか。本ニュースレターの表紙を飾るロゴは2つの部分から構成されていて、一つは青く塗られた部分、もう一つは緑の部分です。青い部分に注目すると、「非」という漢字が浮かび上がってきます。これはアシンメトリに相当する日本語の「非対称」から取られたものです。しかし、単純に「非」の一文字を借りてきたところで、何もストーリーは生まれません。実は、よく見ると「非」の左上部分が三角形に欠けており、文字の形が非対称になっています。この非対称性はロゴに面白い変化をもたらし、緑で塗られた部分を「生」という漢字で浮かび上がらせませす。我々は、物質の非対称性が新しい現象や機能性を生み出す鍵になると信じています。「非」対称性から「生」まれる物理の追求、これこそが我々がこのロゴに込めた思いです。

専門的には、「非」の一部が欠けたことで、元々の文字が持つmmmの対称性がmにまで落ちたこととなります。この対称性の低下は、強誘電性、強弾性、強軸性の発現を許容するもので、まさにアシンメトリ量子の研究にも直結する興味深いものです。

さて、ロゴにはどのような役割があるでしょうか。ロゴとは様々な組織や商品、個人などを象徴する図形です。日本でも古くから用いられており、戦国武将の馬印、家紋など多種多様です。私は以前、東京国立博物館で「錦の御旗」を見る機会がありました。初めて目にした日本を象徴する御旗の美しさと力強さに、しばらく動くことができなかった思い出があります。

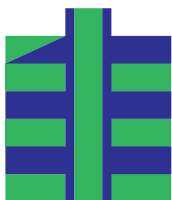
鬼丸代表のもと、領域メンバーが一致団結して新しいサイエンスを切り開くことによって、本ロゴが真にアシンメトリ量子物質をシンボライズするものに成長していくことを期待しています。「非」対称性から「生」まれる物語を是非楽しみにしててください。

(吉田 紘行)



# ASYMMETRY

Unveiling, Design, and Development of  
Asymmetric Quantum Matters



A S Y M M E T R Y

Unveiling, Design, and Development of  
Asymmetric Quantum Matters

## アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出

文部科学省科学研究費補助金「学術変革領域研究(A)」(令和5年~9年度)

領域番号: 23A202

学術変革領域研究(A)

「アシンメトリが彩る量子物質の可視化・設計・創出」ニュースレター 第1号

2023年9月 発行

編集人 田端 千紘

発行人 鬼丸 孝博

発行所 広島大学大学院先進理工系科学研究科

TEL: 082-424-7027

事務局 岡山大学異分野基礎科学研究所

大槻 純也

TEL: 086-251-7804



領域ホームページ

<https://asymmetry.hiroshima-u.ac.jp/>