

2026年度10月入学

東京都立大学 大学院

理学研究科

研究分野紹介

このパンフレットは、本研究科を志望する人のために、各専攻の研究分野を、それぞれの分野について、詳細に紹介したものです。志望分野を決めるための資料として使用してください。

目次

物理学専攻

① 素粒子理論（素粒子）	1
② 宇宙重力物理（宇宙重力）	1
③ 原子核ハドロン物理（ハドロン）	2
④ 宇宙理論（宇宙理論）	3
⑤ 複雑系物理（複雑系）	4
⑥ 量子凝縮系理論（量子凝縮）	5
⑦ 強相関電子論（強相関）	6
⑧ 計算物質科学（計算物質）	7
⑩ 高エネルギー物理実験（高エネ実）	8
⑪ 宇宙物理実験（宇宙実験）	9
⑫ ソフトマター（ソフト）	10
⑬ 電子物性（電子物性）	11
⑭ 超伝導物質（超伝導）	13
⑮ ナノ構造物性（ナノ構造）	14

各専攻の分野名の前又は、研究室名の前につけた①、②などの番号は、学生募集要項の研究分野一覧表中に付してある番号と同一です。

※⑨番は欠番です。

教員名の○印は2028年3月、◎印は2029年3月退職予定であることを示します。

① 素粒子理論（素粒子）

准教授：殷 文 助教：北澤 敬章

素粒子理論は最も根源的な物理法則を探求する分野で、物質を構成するミクロな構成要素である素粒子の性質と振る舞いを記述することを目的としている。素粒子の標準模型は、既存の素粒子に関する現象を極めてよく予測できるだけでなく、電磁気学や核力の起源、素粒子質量の起源などをも説明する。しかし、この優れた模型にも、確実に解決できない謎として、宇宙の始まりを記述するインフレーション、現宇宙に存在する未知の物質であるダークマター、宇宙の物質と反物質の存在比率の非対称性、ニュートリノの世代間の振動、一般相対性理論との非整合性が存在している。

本研究室では、これらの謎に迫りつつ、標準模型を超えた新物理法則や宇宙の始まり・歴史の解明を目指す。素粒子理論にとどまらず、初期宇宙論や天文学といった分野との境界領域を含む、幅広いテーマに取り組んでいることが本研究室の特色の一つであり、最前線で研究を行っている。代表的テーマは以下に分類できる。

1. 素粒子論的研究

標準模型自体の不自然さや素粒子実験の現象に対する解釈から新物理法則を探る研究を行っている。例えば、超弦理論の現象論、場の量子論、微調整問題、力の統一、ニュートリノ振動を含むフレーバー物理、加速器現象論などについての研究を行っている。

2. 初期宇宙論的研究

初期宇宙論や宇宙観測実験結果と素粒子理論の無矛盾性の要求から、新物理法則の探究及び宇宙の始まりや歴史についての研究を行っている。例えば、ダークマター、宇宙項とも呼ばれるダークエネルギー、インフレーション、物質反物質非対称などを研究している。

3. 他分野融合研究

日進月歩で進化する観測・計測技術を新粒子探索に応用することで、研究目的達成への新しい道筋を模索している。例えば、宇宙背景光を応用した新物理探索、赤外線分光技術を駆使したダークマター実験、放射光施設を用いた新粒子探索などを提案・実施している。

② 宇宙重力物理（宇宙重力）

准教授：本橋 隼人

古来より人類は宇宙に強い関心を抱き、数多くの研究者がその謎の解明に挑んできた。しかし、宇宙には依然として多くの謎が残されている。宇宙初期のインフレーション、現在の加速膨張を司るダークエネルギー、銀河団大規模構造の起源となったダークマター、そして光さえ脱出できないブラックホール。いずれも、宇宙において本質的な役割を果たす重力と密接に関係している。

本研究室では、宇宙の成り立ちと進化を探る宇宙論と、重力の理解を深める相対論・重力理論の両面から、宇宙と重力の謎の解明に取り組んでいる。国内外の研究機関との共同研究を通じ

て、基礎理論研究を軸としつつ観測データの解析まで視野に入れた幅広い研究を展開している。近年の主な研究テーマは以下の通りである。

1. 重力波

アインシュタインによって100年以上前に予言された重力波は、宇宙の深奥の物理を明らかにする重要な手段である。長年困難とされてきた重力波の直接観測が可能となった現在、重力物理学研究はかつてないほどの発展期を迎えている。本研究室では、ブラックホールから放出される重力波や宇宙背景重力波の理論的研究、観測データを解析する新たな計算手法の開発などに取り組んでいる。

2. ブラックホール

ブラックホールは、宇宙で最も強い重力を持つと同時に、最もシンプルな天体でもある。この極限環境において、重力の本質が浮き彫りになり、一般相対論を超える新たな物理の手がかりが得られる可能性がある。本研究室では、ブラックホール解の導出、摂動論の確立、準固有振動の解析、共鳴現象の発見など、理論的基盤から応用的側面まで多角的に研究を進めている。

3. インフレーション

インフレーションは、宇宙初期に起こった急激な加速膨張であり、微小な量子揺らぎを指数関数的に引き伸ばして、今日の宇宙における銀河団大規模構造のタネを形成したと考えられている。このため、宇宙論は最大スケールと最小スケールの物理を結びつける、極めてユニークな学問領域といえる。本研究室では、新たなインフレーション模型の提唱、量子揺らぎの生成機構、ダークマターの有力候補である原始ブラックホールの形成などに関する研究を行っている。

③ 原子核ハドロン物理（ハドロン）

准教授：山口 康宏

ハドロンとは、素粒子・クォークが集まってできた複合粒子であり、その代表例として原子核の構成子である核子(陽子・中性子)や、湯川秀樹博士により予言されたパイ中間子がある。さらに、ハドロンの一種である核子が集まってできた複合粒子が原子核であり、原子核ハドロン物理学ではこのような多粒子系が作る構造や現象を探ることで、物質の成り立ちを明らかにする研究が行われていると言える。特に近年、従来のハドロン描像ではその性質を説明できない「エキゾチック状態」が加速器実験より数多く報告され、世界中で活発な研究が行われているが、その構造解明には至っていない。本研究室では、このような多粒子系が生み出す多彩なハドロン・原子核の構造や現象の謎を、国内外の他の理論グループや実験グループと協力しながら研究を進めていく。代表的な研究テーマを以下にあげる。

1. 新しいハドロン状態：エキゾチックハドロンの研究

通常のハドロンは3クォークからなるバリオンと、クォーク-反クォーク対からなる中間子(メソン)で分類されてきたが、これら描像では説明ができないハドロンが加速器実験で報告され、エキゾチックハドロンと呼ばれている。これまでの研究から、4つや5つのクォークからなる多クォーク状態であると考えられているが、その空間的構造として、多クォークがコンパクトにまとまった状態(コンパクト状態)や、原子核のような複数ハドロンの複合状態(ハドロン分子)などが考

えられ、活発な議論が行われている。ここでは、クォークやハドロンの少数多体問題を数値解析することで、その性質の解明や新しいエキゾチック状態の予言を行う。

2. ハドロン間相互作用機構の研究

エキゾチック状態や原子核を含むクォーク・ハドロン多体系の多彩な現象を理解する上で、構成粒子間に働く相互作用の解明は必要不可欠である。しかし、クォークの動力学を記述する基礎理論・量子色力学(QCD)は低エネルギー領域で非摂動的であるため解析が困難であり、また、多くのハドロンは不安定であるため、散乱実験が難しく、相互作用に関する情報は非常に限られている。ここでは、QCDの持つ対称性に着目した有効模型や、クォークの動力学を現象論的に記述する構成クォーク模型を用いたアプローチにより、メソン交換力やクォーク交換力などハドロン間相互作用がどのような機構により記述されるか、それはハドロンの種類や量子数の違いによりどう変わってくるかなどを明らかにしていく。また、このことは、この宇宙の物質の素となっている核子や原子核に働く相互作用の理解にも新たな側面を与える。

④ 宇宙理論 (宇宙理論)

教授：藤田 裕 助教：佐々木 伸

宇宙物理学は、電磁気学、流体力学、相対論などの基礎的な物理学に基づいて、宇宙・天体の構造や進化を解明するとともに、さまざまな現象の中から物理学的に興味ある対象を見つけ出し、解明していくことを目的としている。当研究室では、その中でもブラックホールをはじめとする極限天体现象、銀河・銀河団の形成および進化、それらの研究の基礎となる物理過程について、理論的研究を中心に行っている。研究テーマは多岐にわたり、研究方法も基礎理論からコンピューターを用いた数値計算やシミュレーション、多波長の観測データの解析など幅広い。また、当専攻の宇宙物理実験研究室の他、国内外の理論、観測研究者とも協力しながら研究を進めている。

1. 高エネルギー宇宙物理

クェーサーや銀河中心核、X線連星、 γ 線バースト、超新星残骸などの活動天体の理論モデルの構築と物理過程の解明を目的とする。具体的には、ブラックホールや中性子星へのガス降着、X線・ γ 線などの高エネルギー電磁波放射機構、高エネルギー粒子の生成や伝搬、相対論的ジェット形成機構などについて研究を行っている。(藤田)

2. 銀河・銀河団の形成と進化

(1) 銀河団ガスの力学的構造や粒子のエネルギー分布、熱的・化学的進化を通して、銀河・銀河団など宇宙の構造形成と進化を解明するための研究を行っている。(藤田)

(2) 膨張宇宙における密度揺らぎの成長の理論に基づいて、銀河や銀河団の形成・進化を記述する理論モデルを構築し、それをX線や可視光などの様々な観測データと比較、検討をすることで、銀河、銀河団の形成・進化の物理過程を理解することを目指している。(佐々木)

3. 宇宙プラズマの基礎的物理過程

宇宙プラズマの組成や構造、輻射や粒子の輸送過程などを定量的に解明するため、粒子衝突や放射の素過程について基礎的研究を行っている。また、星間ガスや銀河団ガスでの衝撃波や乱流による宇宙線加速の基礎過程の研究も行っている。(藤田)

⑤ 複雑系物理（複雑系）

准教授：上田 仁彦 助教：田中 篤司

我々の身のまわりの現象は全て物理現象であるが、多様な構成要素が複雑に絡み合っているため、それらを物理学の基本法則に基づいて説明することは成功に至っていない。特に、人間や社会スケールでの現象では個別の現象論は存在するが、物理学的な視点に基づく統一的な理解には至っていない。本研究室では、このような複雑なシステムを数理的に理解することを遠くに見据えて、自然界や人工システムに見られる複雑な振る舞いを「最適な状態へと至ることができなくなっているシステムの振る舞い」という切り口から分野横断的に研究している。特に近年は以下のようなテーマに注力しているが、研究対象はこれらに限られるわけではない。

1. ゲーム理論における利得制御の数理

繰り返しゲームは将来の利得を考慮したエージェントの意思決定を扱う枠組みである。例えば囚人のジレンマゲームにおいては、一回のゲームでは均衡点として裏切りが実現されるが、無限回ゲームを繰り返すことでプレイヤーが将来を考慮した行動をとり協力が達成されることが知られている。近年、繰り返しゲームにおいて様々な利得制御戦略が発見された。利得制御戦略はプレイヤーの利得の組を一方的にある関係に強いる戦略クラスである。利得制御戦略は相手に合理性を仮定せずに制御を行えるため、これまでに考案されてきた戦略よりも弱い条件下で協力行動を創発することなどが知られている。しかしながら、利得制御戦略のゲームによらない一般的な性質はこれまであまり注目されてこなかった。本研究室ではこの利得制御戦略の数学的性質の解明と応用を行っている。

2. 模倣の数理

模倣行動は単純な行動原理でありながらも、様々な状況で有用な行動の獲得につながることが多い。例えば繰り返し囚人のジレンマにおいては、しつぺ返し戦略と呼ばれる模倣戦略が相互協力を合理的な行動として達成することが知られている。我々は模倣戦略が有用となりうる条件の特定と模倣の限界の解明を目指して研究を行っている。特に、模倣の成功と利得制御の関係に注目しながら研究を行っている。

3. マルチエージェント学習の数理

強化学習はエージェントが好ましい行動を取った場合に報酬を与えることで特定の環境に対する最適な行動を学習しようという機械学習の方法である。近年ゲーム理論のような複数のエージェントが存在する状況での強化学習（マルチエージェント強化学習）が盛んに研究されている。これは、エージェントが初めから合理的でなくても、学習の結果合理的な行動を獲得する可能性があるからである。本研究室ではマルチエージェント学習が成功する条件の特定や、失敗する場合に起こる現象の解析などを行っている。

⑥ 量子凝縮系理論（量子凝縮）

准教授：荒畑 恵美子 助教：大塚 博巳

我々の身のまわりの物質は、多くの原子核と電子からできているが、粒子間の相互作用のために、個々の粒子からは予想のつかない多様な性質を示す。本研究室で取りあげる研究対象や研究観点は多岐に亘るが、量子力学と統計力学に基づき、固体やその他の凝縮系の示す物理学的性質をミクロな立場から研究している。以下に代表的な研究テーマをあげる。

1. 量子凝縮系を中心とした理論解析（荒畑）

近年、さまざまな原子を一定の領域に閉じ込め、極低温にまで冷却する技術が実現し、ボーズ粒子系、フェルミ粒子系、ボーズ・フェルミ混合系といった多様な量子凝縮体が観測されている。ボーズ系におけるボーズ・アインシュタイン凝縮やフェルミ系におけるBCS-BECクロスオーバーなどの興味深い現象が見られているだけでなく、閉じ込めポテンシャルの制御により低次元系や光格子系など、従来の固体物理系を模擬した人工量子系の構築が可能となっている。さらに、人工ゲージ場やスピン軌道結合の導入により、より高い自由度を持つ新奇量子状態の実現も進んでいる。このような人工量子系の発展に伴い、従来の超流動・超伝導の枠組みを超えた新しい量子相の理解が重要となっている。特に、強いスピン軌道相互作用を有する系では、スピン・シングレットとトリプレットの混成が生じる新奇な超伝導状態が現れることが知られており、トポロジカル超伝導の実現も期待されている。これらの多様な量子凝縮体系および関連する新奇量子相に対し、解析的手法と数値計算の両面から体系的な研究を行い、量子状態や励起構造、さらにはトポロジカルな性質の解明を通じて、新たな物理現象の理解と予言を目指している。

2. 機械学習の物理学への応用（荒畑）

機械学習および深層学習の急速な発展に伴い、その応用分野は物理学を含む幅広い領域へと拡大している。特に近年では、従来の解析的・数値的手法とは異なる新しいアプローチとして、機械学習を用いた物理現象の理解や予測が世界的に注目されている。しかしながら、その有効性や適用限界については未だ十分に解明されておらず、基礎的な検証を含めた研究が活発に進められている。本研究室でも、機械学習によるシュレディンガー方程式の解法、画像認識を使った相転移現象の解析、従来の数値手法との組み合わせによる計算の高速化など、さまざまな機械学習の可能性を多角的な視点から追及している。

3. 新奇凝縮相に関する理論的研究（大塚）

低次元性や量子性またはフラストレーションにより引き起こされる相転移や、それらにより実現される可能性のある新奇な凝縮相に多くの興味が集まっている。そこでは長波長揺らぎや低エネルギー励起を正確に記述する有効理論が重要な役割を果たすが、我々は古典および量子スピン系や強相関電子系などの理論模型について有効理論と数値計算法を併用することで相構造や相転移の普遍性クラスに関する定量的な研究を行っている。また最近スピンアイスと呼ばれる一連の希土類化合物の静的動的性質に注目が集まっている。この系はフラストレーションの効果により低温まで秩序を持たないスピン液体相にあると考えられている。我々はスピンアイス特有の欠陥励起に起因したAC磁気応答の解析的数値的研究（手法の開発も含む）を行なっている。

⑦ 強相関電子論（強相関）

教授：堀田 貴嗣、服部 一匡 客員教授：久保 勝規

銅酸化物高温超伝導体や巨大磁気抵抗を示すマンガン酸化物などの d 電子系は、希土類化合物やアクチノイド化合物の f 電子系と共に「強相関電子系」と総称され、現代物質科学における重要な研究テーマとなっている。このような系では電子間のクーロン斥力が非常に大きく、従来のバンド理論を超えた理論的枠組みが必要になり、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して研究を行っている。代表的には以下のような研究がある。

1. 軌道自由度のある強相関電子系の磁性や超伝導

従来、強相関電子系では、モデルをなるべく単純化するために電子軌道の自由度は捨象され、スピンと電荷の自由度を有するモデルが主として研究されてきた。しかし、近年これらの強相関電子系では、純良単結晶育成技術や実験装置の長足の進歩により、伝統的な概念では理解できない磁性や超伝導が次々と発見されている。たとえば強相関電子系では、電子が避け合いながらクーパー対を組む異方的超伝導がしばしば出現する。また、d 電子系の軌道秩序や f 電子系の多極子秩序など、電子軌道の絡んだ複雑な磁性も現れる。本研究室では、バンド計算による電子構造の知識に基づいて構築した多体電子モデルを、場の量子論的手法や計算物理的手法を駆使して解析し、軌道自由度のある強相関電子系の磁性や超伝導に対する新概念の形成を目指す。基礎理論研究であるが、新超伝導体の設計や強力磁石の開発など、応用につながる道は常に意識しており、未来に貢献する楽しみがある。

2. エキゾチックな近藤効果

二十世紀半ばに明らかにされた金属中の磁性不純物の多体効果、すなわち近藤効果の研究は、近年の量子ドットや強相関電子系の理解の基礎となっており、現在でも盛んに研究がなされている。特にエキゾチック近藤効果とよばれる不思議な性質は、摂動論などのいわゆる通常の理論計算では決して到達できない量子状態として注目を集めている。一例を挙げると、そのような状態では絶対零度においても分数化されたエントロピーが有限に残り、種々の物理量に異常な温度依存が現れることが知られている。本研究室では、そのような新奇な状態が実現する多軌道の近藤モデルを提案し、数値解析を行うことで新しい物性を解明する研究を行っている。

3. 層状構造物質における非従来型超伝導

高温超伝導体開発の一つの方向性として、層状構造物質が考えられる。これは、銅酸化物高温超伝導体に端を発し、鉄系超伝導体に引き継がれたが、本学で発見された BiS_2 系超伝導体もこの系譜に連なる。最近では、二層系ニッケル酸化物において、銅酸化物以来初めてとなる液体窒素の沸点を超える転移温度を持つ超伝導が見出された。これらの系に特徴的なのは、電気伝導に寄与する伝導層と電氣的に絶縁なブロック層が積層する層状構造を持つことである。従来型超伝導体が格子振動を媒介とする s 波クーパー対の凝縮によるものであったのに対し、層状超伝導体では、スピンなどの電子自由度の揺らぎを媒介とする s 波ではない非従来型超伝導が生じることが知られている。そこにさらに軌道の自由度や層の自由度も絡んで、新奇超伝導の可能性が広がる。本研究室では、単層あるいは二層などの電子モデルにおいて、数値計算手法を駆使してその特異な超伝導状態の研究を行っている。

⑧ 計算物質科学（計算物質）

准教授：野本 拓也

我々は普段、さまざまな物質を目にし、利用している。電子と原子核の多体効果から生じる多様な物性をミクロな理論に基づいて理解し、望んだ物性を創り出して自由自在に制御するという事は、物質科学の究極目標と言えるだろう。このような定量評価を含んだ物性研究には、第一原理計算に基づく電子・フォノン状態計算や、ダウンフォールディングを通じた有効モデルの解析が欠かせない。本研究室では、第一原理計算や機械学習を含むさまざまな数値計算ツールを駆使して物質の多様性とその起源を明らかにし、それらを制御、設計するための指導原理の確立を目標に研究を行なっている。特に、磁性体や超伝導体に対する研究を中心としており、代表的なテーマを以下にあげる。

1. 磁性体の磁気構造予測と新材料探索

磁性体は、社会を支える科学技術の基盤として、おそらく半導体に次いで重要な材料だろう。近年では、トポロジカル反強磁性体や磁気スキルミオン物質といった、電子相関によって発現するエキゾチックな磁気構造物質が次世代型磁気デバイスの候補物質として注目を集め、精力的に研究されている。一方、電子相関に起因し、かつ無限の可能性を持つ複雑な磁気構造を計算ベースで予測するという問題は極めて難しく、計算科学の観点からも重要な課題となっている。本研究室では、クラスター多極子理論を用いた磁気構造生成や、第一原理計算と有効モデルへのダウンフォールディングを用いた数値計算手法によりこの難問に挑戦し、磁気構造発現機構の解明や新材料探索を行なっている。

2. 超伝導物性の定量評価手法の開発

超伝導転移温度をはじめとする超伝導物性の定量評価は、計算科学の観点からも超伝導応用の観点からも重要なテーマである。近年では、量子計算に用いる超伝導量子ビットとしての性質やバルク非相反応の一種である超伝導ダイオード効果を用いた新たな応用などさまざまな発展を見せており、超伝導物性を第一原理的に評価する手法の重要性はますます高まっている。このような背景のもと、本研究室では、超伝導密度汎関数理論やMigdal-Eliashberg理論を用いた第一原理的な超伝導転移温度計算や、臨界電流等の超伝導物性の定量評価に向けた計算手法開発を行なっている。

3. 反強磁性スピントロニクス理論構築

磁性体を電子回路素子として用いる、いわゆるスピントロニクスの研究は、従来、強磁性体を念頭に行われてきた。反強磁性体は強磁性体と比べて、漏れ磁場の有無や応答速度の観点から本質的な優位性があり、その検出と制御手法の確立が次世代型磁気デバイス研究の喫緊の課題となっている。磁気構造の急峻な変化やスピンの非保存性に由来して反強磁性体の取り扱いは一様に困難となるが、本研究室では、有効場の理論や実時間・実空間シミュレーションを用いた数値計算研究により、この問題に取り組んでいる。

⑩ 高エネルギー物理実験（高エネ実）

教授：角野 秀一 助教：汲田 哲郎 © 客員教授：足立 一郎 客員教授：西田 昌平

100GeV 程度までのエネルギー領域における素粒子現象は、標準模型と呼ばれる理論により見事に記述されている。素粒子の CP 対称性の破れは小林・益川モデルで説明され、質量の起源は欧州合同原子核研究所の LHC 実験での Higgs 粒子の発見で解明されたと言える。しかし、ニュートリノが質量を持ちかつその質量が非常に軽いことや、標準模型には階層性問題と呼ばれる本質的な困難があることなどから、標準模型を超える新物理（BSM）の存在が示唆されている。現在、それら BSM の探索が世界各地で進められており、衝突型加速器を用いた探索としては、高エネルギーのビーム衝突を用いて直接的な探索を行う LHC 実験、大強度のビーム衝突を用いて間接的な探索を行う Belle II 実験がある。また、ニュートリノのさまざまな性質（質量、混合、マヨラナ性）の解明も BSM の探索に欠かせない。当研究室ではこのような現状に鑑みて、以下に示すいくつかの重要な研究を推進している。

1. 電子・陽電子衝突型加速器を用いた素粒子実験： Belle II 実験

（角野、汲田、足立、西田）

つくば市にある高エネルギー加速器研究機構（KEK）の非対称エネルギー電子・陽電子衝突型加速器（SuperKEKB）を用いて BSM の探索を行う Belle II 実験を行っている。本研究室では、Belle II 実験の粒子識別装置エアロゲル・リングイメージ・チェレンコフ検出器（ARICH）の開発を長く行ってきた。Belle II 実験が開始された現在は、データの解析により BSM の探索を行うとともに、ARICH のさらなる高性能化に向けた研究開発を進めている。

2. J-PARC 加速器施設を用いたニュートリノ振動実験：T2K 実験（角野）

茨城県東海村で稼働中の J-PARC 加速器を用いて大強度のニュートリノビームを生成し、295km 離れた岐阜県神岡に設置された大型水チェレンコフ検出器（スーパーカミオカンデ）でニュートリノを観測する長基線ニュートリノ振動実験を行なっている。これまでに、T2K 実験ではミューニュートリノが電子ニュートリノに転換するニュートリノ振動現象を発見した。ニュートリノの CP 対称性の破れや質量階層性の理解に向けて実験が進められており、本研究室では、加速器ビーム強度の増強や前置検出器の高度化に参加しており、スーパーカミオカンデに代わる次世代の大型ニュートリノ検出器ハイパーカミオカンデの研究にも参加している。

3. ニュートリノを伴わない二重 β 崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) の観測実験：DCBA 実験（角野）

ニュートリノ振動実験によりニュートリノに質量があることが分かり、かつその質量は他の粒子と比較して非常に軽いことが示唆されている。その理由を自然に説明するためには、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが前提とされる。もし、ニュートリノがマヨラナ粒子であるならば、ニュートリノを放出しない二重 β 崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) が観測されるはずである。本研究室では、ガス飛跡検出器と磁場を組み合わせることにより、 $0\nu\beta\beta$ 事象を運動学的に完全に再構成して発見することを目指し、基礎的な研究開発を進めている。

4. 宇宙線ミュオンを利用した火山や遺跡の内部診断の研究（角野）

宇宙線ミュオンは、上空の大気で生成され毎秒手のひらに一個の割合で飛来する粒子である。ミュオンは電子と比べて非常に質量が大きくかつ強い相互作用をしないため、物質を透過しやすい性質を持っている。この宇宙線ミュオンの性質を生かして、火山の内部や古墳の内部などの大

規模な物体の透視を行い、それらの内部の構造の診断を行う研究を進めている。また、その研究を行うための装置開発を進めている。

5. 陽子・陽子衝突型加速器を用いた素粒子実験：LHC ATLAS 実験（汲田）

ATLAS 実験は、欧州合同原子核研究所の LHC 加速器を用いた世界最高エネルギーの素粒子実験である。ATLAS 実験は、同じく LHC 加速器を用いる CMS 実験と同時にヒッグス粒子を発見し、現在はヒッグス粒子の性質の解明を進めるとともに BSM の探索が行われている。LHC は、High-Luminosity LHC へのアップグレードが計画されている。ビーム高輝度化に伴い ATLAS 実験では、最内層の検出器群を、新たな検出器群である Inner Tracker (ITk) に置き換える予定であり、本研究室ではその研究開発に参加している。

⑪ 宇宙物理実験（宇宙実験）

教授：江副 祐一郎 准教授：石崎 欣尚 助教：石川 久美 客員教授：石田 学

宇宙における極限的な高エネルギー現象の解明を目指して、科学衛星による X 線 γ 線の観測研究と、新しい観測技術の開発、衛星ミッションの検討・開発・運用の 3 つを柱として、JAXA 宇宙科学研究所をはじめ国内、海外のグループとの共同研究を進めている。X 線 γ 線の観測は、星や銀河団、高密度天体等に付随した物質中に存在する高温プラズマや、磁場や電場を介して高エネルギーに加速された粒子を精密に診断することを可能にする。当研究グループは、2005 年に打ち上げられた「すざく」衛星、2016 年に打ち上げられた「ひとみ」衛星、そして 2023 年に打ち上げられた X 線分光撮像衛星 XRISM の開発に携わり、それらを用いた観測的研究を進めている。将来の観測のために、次世代の観測技術開発を進めつつ、新しい科学衛星の提案・開発も行っている。

1. X 線 γ 線による宇宙観測

主に「すざく」、「ひとみ」、XRISM による X 線観測データを用い、優れたエネルギー分解能と X 線感度を生かして、さまざまな天体について研究を進めている。宇宙理論研究室をはじめ国内・海外の研究者との共同研究も活発に行なっている。

(1) 太陽系の観測：近年、惑星、彗星、地球磁気圏、太陽圏など、X 線の放射源は太陽系の広い範囲に存在することが分かってきた。惑星磁気圏で加速された粒子や太陽風等が X 線放射に関与する。X 線による観測は太陽地球系科学の新たな観測手段となると共に、宇宙進出を進める人類にとって社会的な意義を持つ研究となる。太陽系天体の X 線観測を進めつつ関連分野の研究者とも協力し、将来の探査衛星の提案及び開発を行っている。（江副、石川）

(2) 高密度天体の観測：銀河系内にはブラックホール、中性子星、白色矮星などの高密度天体があり、たとえば多くの銀河の中心には太陽質量の 100 万倍を超える巨大ブラックホールがある。鉄輝線や硬 X 線の観測からこうした高密度天体に落ち込みつつある物質の物理状態を研究している。（石田）

(3) 銀河・銀河団・銀河間物質の観測：銀河団は、100 以上の銀河が 1 千万光年もの大きさに集中し、ダークマターが重力を支配するシステムで、そこに充満する数千万度の高温ガスを観測し、ダークマターや重元素の分布、銀河団がダイナミカルに進化していく過程を調べる。また、宇宙の大規模構造をトレースする中高温の銀河間物質の探索を行っている。（石崎）

2. 観測技術の開発と将来の宇宙ミッションの推進

(4) 新しい観測装置の開発は宇宙X線観測の発展を支える原動力である。XRISMに搭載されたマイクロカロリメータや望遠鏡について、JAXA、NASA、他大学のグループと開発を行い、打ち上げ後はXRISMを用いた観測的研究を進めている。(全員)

(5) 将来の宇宙X線観測のために、超伝導転移を利用して高いエネルギー分解能と多素子を実現できるTES型マイクロカロリメータと周辺技術について、JAXAや他大学のグループと開発しつつ、将来の衛星の検討も進めている。(石崎、江副、石川)

(6) X線天体のイメージを結像させるX線望遠鏡を軽量化・高分解能化・広視野化するために、微細加工技術を応用して製作する次世代X線望遠鏡を、JAXA、国立天文台、他大学のグループと協力しながら開発している。(江副、石川、石田)

(7) X線を用いた太陽系探査を切り開くために、地球磁気圏のグローバル撮像を目的とした50-100 kg級の超小型衛星GEO-Xを推進し、超軽量望遠鏡を用いた小型の観測装置を開発している。さらにGEO-Xに用いる装置技術を活用した、月面・火星・木星等の探査計画の検討、系外惑星観測といった天文・基礎物理のフロンティアへの挑戦、そして全天X線監視装置等の新しい宇宙観測を、JAXA、国立天文台、他大学のグループと協力して検討・開発している。(江副、石川)

⑫ ソフトマター (ソフト)

教授：栗田 玲 准教授：柳島 大輝 助教：横田 宏

ソフトマターとは一般に柔らかい物質、例えば液晶や高分子、ゴム、膜などに代表される物質群の総称であり、産業分野から生活・食品分野に至るまで広く利用されている。これらの物質は多自由度・非平衡・空間的不均一といった特徴を持つため、これまで経験則を中心とした開発が進められてきたが、本質的な理解が十分でないまま応用が進められている場合も多く、効率的な設計指針の確立が重要な課題となっている。

当研究室では、ソフトマターの本質的理解を目指し、泡や粉体、機能性コロイドなどの超複雑系に関する実験研究、コロイドをモデル系として用いた物性現象の解明を進めている。さらに、高分子物理とのアナロジーに基づいた認知症発症メカニズムの理解や、生体高分子シミュレーションによる生体内現象の解明など、ソフトマター・複雑系の概念を基盤として多様な対象へ研究を展開している。

1. 泡沫の基礎物性理解 (栗田)

液体吸収や塗り広げ、放出など泡沫の現象や利用には、泡沫の変形や流動(レオロジー)が直接に関わっている。泡沫内部では、気泡が液体中に高密度に詰まっており、内部運動(ミクロ)と全体の変形(マクロ)が複雑に絡み合っているため、泡沫のレオロジー基礎がいまだに確立されていない。当研究室では、液体の流動と泡内部の気泡の運動が互いに影響を及ぼす新しい動力学的機構を提案している。泡沫内部への液体浸透実験や液体表面への塗り広げなどの実験からレオロジーの基礎の確立を目指している。

2. 相互作用のある粉粒体の系統的な理解 (栗田)

粉体とは多数の粒子からなる多体系であり、個々の粒子は古典力学に従って運動するにもかかわらず、力の伝播やマクロな力学特性などにおいて単純な予測が困難な複雑系として振る舞うことが知られ、統一的な理解は十分に得られていない。当研究室では、相互作用をもつ粉粒体系に着目し、粒子間結合のネットワーク形成をパーコレーションの観点から解析することで、ゲル系

との類似性に基づいた新しい理解を提案し、パーコレーションモデルによる粉体構造および粉体ブロック形成の理解を目指して研究を進めている。

3. 生体内現象の理解 (栗田・横田)

生体内には多数のタンパク質が存在し、それらの構造変化やダイナミクスの異常がさまざまな疾患の発症につながる事が知られている。アルツハイマー型認知症やパーキンソン病などは、天然変性タンパク質が異常に凝集することが一因と考えられているが、その凝集機構はまだまだ十分に解明されていない。タンパク質は高分子の一種として理解することができるため、本研究室では高分子物理で培われてきた理論やモデルを基盤として、生体高分子の凝集過程を記述する物理モデルの構築を行っている。これにより、認知症発症メカニズムの理解を目指すとともに、生体内で起こる複雑な現象を物理学的視点から明らかにすることを目的として研究を進めている。

4. コロイドから読み解く物性現象 (柳島)

コロイドとは数ナノからミクロの微粒子が液体に分散した物質形態の総称であり、熱運動が顕著である。「揺らぐ粒」が自己組織化する様子は液体の凝固・ガラス転移等と多々共通点があるため、コロイドから読み解く物理現象の起源は多くの物質系に適応できる。本研究室では分散系の内部のミクロ粒子一つずつの追跡ができる技術と微粒子系の合成技術を有しており、コロイド結晶の形成過程の特定、アモルファスなコロイドガラス膜の形成メカニズムの解明等、光学素子やコーティング剤への工業的応用も視野に入れた物性研究を進めている。

5. 物理を活かした微粒子工学 (柳島)

微粒子は様々な形で社会実装されている物質形態であり、新しい機能性をもった分散系等の作成は重要である。コロイド開発には主に化学的手法が用いられているが、近年、攪拌やOuzo効果等、物理的な考察から生まれた合成法も使われ始めている。本研究室では振盪、複合構造等を屈指して、棒状粒子や内部構造が非対称な粒子等、新しい微粒子系の開発に取り組んでいる。

⑬ 電子物性 (電子物性)

教授：青木 勇二 ◎、松田 達磨 助教：東中 隆二

本研究室は、物質の結晶構造が持つ対称性やトポロジカルな性質に起因する特異な伝導現象や、それらを応用したスピントロニクスに向けた研究、BCS理論の枠組みを超えた新しいタイプの超伝導状態、電子軌道に起因する多極子の揺らぎと秩序、量子揺らぎが引き起こす特異な磁性や臨界現象など、物性物理学として広い視野を持って、最新の研究テーマに取り組んでいる。対象となる現象を発現するような新物質の合成・評価から基礎物性測定までを、自分達の研究室で全て行える実験環境を活かしつつ、学外施設を利用した特殊・極限物性測定を行い、新奇物性の探索やその発現メカニズムの解明を目指している。

本研究室の研究手法は、技術的に大別して2つの特色を持っている。1つ目は、世界最高純度の単結晶合成技術を有していることである。高圧合成炉、テトラアーク炉、FZ炉、温度勾配炉、ブリッジマン炉等の装置を用いて、多様な化合物合成が可能である。また微小結晶を用いた結晶構造決定技術を有しており、新物質を探し出すパイオニア的研究拠点として活動している。

2つ目の特色は、上記の手法によって合成した結晶を使い、極低温・強磁場等の極限環境下における精密物性測定を研究室内で実施できることである。実験室に設置された冷凍機、14テスラ超伝導マグネットなどの様々な大型機器を用い、ドハース・ファンアルフェン(dHvA)効果測定

をはじめとする輸送・熱力学量・磁性の高精度測定を行なっている。さらに、国内外の研究グループとの強力なネットワークを活かし、量子ビーム実験をはじめとした共同研究を展開している。近年、重点的に進めている研究テーマの一部を以下に紹介する。

1. 新物質探索

新しい結晶構造には、新しい物性が発現する。新たな結晶構造を持つ化合物を創出し、スピントロニクスに関わる基礎物性研究や、新奇な超伝導、トポロジカル量子状態や量子臨界現象を開拓している。合成した高純度単結晶を用いて量子振動(dHvA効果)の観測を行い、フェルミ面の形状やフェルミ面近傍のバンド構造を明らかにする実験(フェルミオロジー研究)を進めている。

2. カイラル物質・トポロジカル物質研究

物質の持つ対称性は、物性応答と密接に関わる。近年、カイラル構造に注目した研究が注目されている。カイラリティとは、右手と左手の関係のように、自身の鏡像が重なり合わない状態を示す言葉である。固体物理の世界では、これらを作り分ける方法が確立していない上に、分離が難しいことを理由に基礎研究が進んでいない。このカイラル構造が生み出す特異な電子状態は、様々な新しい機能性材料開発につながる。我々の研究グループの結晶合成技術と経験が、この研究テーマを推進する上で有効となっている。右手系と左手系の結晶をそれぞれ分離し、このカイラル構造を反映した電子状態の解明や、輸送現象等の観測をすすめている。また、物質におけるトポロジーとは、形を分類する学問であるが、物質中の電子状態も、同様なコンセプトで分類できることが最近わかってきた。「トポロジカル物質」と呼ばれる一群の物質を用いれば、スピンを制御するスピントロニクスデバイスや、高速で動作するトランジスタを実現できるため、世界的に活発に研究されている。我々は、この中の「ワイル半金属」や「ディラック電子」に焦点を当て、独自に物質を開発し、新奇な電子状態を探索している。電気抵抗が磁場中で1500000%も増大する巨大な磁気抵抗効果を示す WTe_2 において、そのフェルミ面の奇妙な特徴を明らかにすることなどに成功している。また、磁気構造としてトポロジカル状態を実現している「磁気スキルミオン」は、メモリデバイスへの応用が期待されているが、そのトポロジカル状態を発現する物質開発を進めている。

3. 価数・多極子の揺らぎがもたらす新しい量子状態

希土類元素を含む化合物の中には、それらの元素の電荷や多極子の揺らぎが支配的な特異な量子状態が実現しているものがあり、そのような状況で発現する「超伝導状態」や「磁場の影響を受けない特異な磁気転移や量子臨界現象」との密接な関係に興味もたれている。このような希土類化合物の新奇物性に焦点を当て、その量子状態についての普遍的知見の獲得をめざしている。

4. 機能材料及び基礎技術の開発

新物質の発見や特定の物性の向上は、現代社会を支える新たな基盤技術の発展や、エネルギー問題の解決につながる可能性を秘めている。我々は、新規超伝導体や、磁性材料・熱電変換材料としての可能性を持つ「磁気スキルミオン」、「超強力磁性体」、「カゴ状構造を持つ熱電変換物質」等の物質開発を進めている。

⑭ 超伝導物質（超伝導）

教授：水口 佳一 助教：服部 裕也

エネルギー問題を解決しうる革新的な新機能性物質（超伝導物質や熱電変換材料など）の創出を目指し、新物質探索および結晶構造・物性の解明に関する研究を行っている。超伝導は物質の電気抵抗が消失する現象で、超伝導物質を用いることでロスが少ない大電流送電や強磁場の発生が可能となる。超伝導物質は MRI をはじめとした様々な機器で実用化されているが、さらなる実用化のために超伝導特性の向上が求められる。最も重要なパラメータの一つが超伝導転移温度 (T_c) であり、より高い T_c を実現するためには、従来の概念にとらわれない新超伝導物質の開発が重要な課題であり、様々な新超伝導体の開発に力を入れている。また、新たな機能を持った超伝導体の開発や、超伝導応用の開拓を目指した研究も行っている。熱電変換材料は熱を電気に直接変換できる機能性材料であり、排熱の有効利用において注目されている。新超伝導物質探索および物性解明で培ったノウハウを生かし、新熱電変換材料の開発も進めている。我々は新物質を探索するだけでなく、電子状態や局所構造の自由自在な制御を可能とする物質設計指針の構築にも力を入れており、国内外の研究者との共同研究を主導している。以下に主な研究内容を示す。

1. 層状構造を持つ新超伝導物質の探索と物性研究

高温超伝導を示す銅酸化物系や鉄系の超伝導物質は、共通して層状構造を有している。超伝導層と絶縁層（ブロック層）の積層構造は、次元性を含めた電子状態の制御が可能であり、高温超伝導を目指す上での指針となる。我々は2012年にBiS₂超伝導層を有する新超伝導物質を発見し、世界中で研究が進められている。BiS₂層と交互積層するブロック層を置換することや、超伝導層を多層化することで、さらなる新超伝導物質の発見と高温超伝導化を目指している。また、超伝導機構解明を目指し、放射光を用いた局所構造解析や多重極限下での物性評価を進めている。BiS₂系研究で得られた知見を活かし、さらなる層状超伝導物質の探索を推進している。

2. 新熱電変換材料の探索と物性研究

層状構造は、超伝導物質のみならず熱電変換材料としても有用である。我々は、BiS₂系層状化合物が高い熱電変換性能を示すことを見出し、特性向上と物性解明を目指した研究を推進している。熱電変換材料においては局所構造を制御することが重要である。圧力効果を生かした局所構造制御やバンド計算を生かして革新的な熱電変換材料の創出を目指している。さらに、純良な単結晶の育成や様々な物性測定を通じた電子状態の解明によって、熱電特性の向上を目指している。

3. 局所構造制御を生かした新物質・新奇物性の探索

数万気圧の高圧下で物質を合成することや、高圧を印加しつつ物性を評価することで、常圧下では得られない超伝導相の発見を目指している。また、高圧セルを用いた物理的圧力と元素置換による化学的圧力の効果を融合させることで、自在な物質設計と物性制御を実現する。カルコゲナイド系やニクタイト系を中心とした探索的研究を進めている。結晶中の局所的な原子変位や乱れは物性に大きな影響を及ぼす。高圧効果や化学圧力効果に加え、多元素を意図的に固溶させた高エントロピー合金 (HEA) のコンセプトにも着目しており、HEA 型超伝導体・熱電材料の開発および物性研究を推進している。

4. 超伝導応用の新規開拓

超伝導体の有用性を決めるのは T_c だけでなく、例えばゼロ熱膨張の超伝導体の開発など、素子応用を考えた際に有利な新超伝導体の開発を行っている。具体的には、様々な遷移金属ジルコナ

イド超伝導体で巨大負熱膨張やゼロ熱膨張を発見している。また、超伝導体を用いた熱制御研究も最近行っており、世界初となる不揮発磁気熱スイッチングや、超伝導体を用いた熱ダイオードの開発を行っている。

⑮ ナノ構造物性（ナノ構造）

教授：柳 和宏 助教：草場 哲

ナノスケールの構造に特徴をもつ物質群であるナノチューブや2次元原子層材料系は、その特殊な構造に依存して様々な多様な物性を示す。またその界面や表面でおこる様々な現象は、物質の性質やデバイスの性能に大きく影響を及ぼす。ナノ構造および界面や表面でおこる様々な物理現象を深く理解し、そして制御することができれば、新たな物性を見出すことや、革新的なデバイスの実現につながる。本研究室では、ナノスケールの構造で見いだされる新たな現象を物性物理の立場で理解を深め、そして制御していくことを課題として研究を進めている。高効率な光電変換・熱電変換などの創エネルギーのサイエンスに貢献することを目標の一つとして、①構造と物性の相関、②界面や表面の制御と高次構造の創出、③光励起によって生じる非平衡キャリアに由来する光物性、④熱・電荷輸送の相関、に着目して研究している。最近では、排熱の高効率利用や情報機器デバイスにおける熱マネジメントといった社会的課題解決の観点から、ナノ界面における熱輸送と電子輸送の相関に注目した研究を進めている。研究対象としては、一次元材料である単層カーボンナノチューブや遷移金属ダイカルコゲナイドナノチューブといったナノチューブ構造を有する物質群、二次元材料である原子層物質、そしてそれらの配列・積層構造が挙げられる。新たな合成・精製技術開発、配列制御や積層構造といった高次構造の創出、新規測定技術開発をとおして、輸送特性（電子・フォノン）・光物性・熱電物性等の研究を進めている。それら物質の構造、フェルミレベル、界面の接合構造、の制御を通して、構造が精密に制御されたナノ物質・界面構造で見いだされる新たな物性が研究の興味の対象である。本研究室の代表的な研究課題の2例を以下に示す。

1. ナノチューブの構造制御・高次構造制御と物性の研究

単層カーボンナノチューブ（SWCNT）や遷移金属ダイカルコゲナイド（TMDC-NT）ナノチューブといった一次元ナノチューブ構造をもつ物質群を対象として、その次元性、量子物性、カイラル構造に由来する物性を研究している。ナノチューブはそのカイラル構造に依存して極めて多彩な物性を示す。しかし、合成時においては様々な構造多形が含まれる為、マクロにそのユニークな物性を見出すことは困難である。本研究室では、分離精製技術や合成技術を駆使して、ミクロとマクロを横断して現れる物性に注目して研究を進めている。SWCNT系においては、電子構造、単一カイラル、右巻き・左巻きを選択し、且つ、配列制御といった高次構造を制御した系におけるカイラル構造に由来する新たな物性探索を進めている。最近では、高次構造の一つとして、高配向ファイバ構造にも注目している。

TMDC-NTにおいては合成技術開発と構造と物性との相関解明の研究を進めている。直径制御されたTMDC-NTやヘテロTMDC-NTの合成技術開発を、特に、光物性・電子物性などの物性に注目して研究を進めている。

また、ナノチューブ物性がフェルミレベルの位置に大きく依存することに着目し、フェルミレベルを制御することによる新規物性探索や物性制御の研究を、新規物質設計および測定技術開発の両面で行っている。界面制御によりキャリア注入を行い、フェルミレベルを制御し、これまで、光物性、電気伝導、熱電物性がダイナミックに制御可能であることを明らかにしている。

2. 構造が精密に制御された2次元・1次元ナノ積層界面における熱輸送・電荷輸送に関する研究

配列制御・積層された一次元系や、積層制御された2次元原子層材料系を対象として、構造が精密に制御されたファンデルワールス界面における熱輸送・電子輸送の相関に関する研究を進めている。研究室で開発した時間領域サーモリフレクタンクス法を駆使して、熱輸送の理解と同時に、電子輸送および熱電特性と、界面構造との関係を解き明かすことを進めている、熱輸送、電荷輸送、そして界面構造の3者の関係を物質横断的に理解していくことを進めている。界面構造を外場により変調することにより、熱スイッチなど、熱・電荷流を制御する手法の研究も進めている。更には、熱起電力計測法の開発を進め、界面における特殊な熱電応答を明らかにする研究を進めている。

以上のような物質開発・高次構造創出・計測技術開発や、得られた試料の輸送特性（電子・フォノン）、光物性、熱電物性に関するテーマに関して、国内・海外の研究グループと多くの共同研究を進めている。ナノチューブや2次元材料系などの1次元、2次元物質合成の技術や、電界効果型トランジスタなどの半導体デバイス作製、様々な分光計測（時間分解、ラマン、発光、吸収等）、電子輸送・熱輸送特性評価、電子顕微鏡を用いた構造評価など、分野横断的な理解と技術開発を進めている。