

# ① 素粒子理論

教授：安田 修 助教：北澤 敬章

標準模型を越えた物質の極微の構造を探求することを目標として、最近の進展が著しいニュートリノ物理学、さらには素粒子の質量生成機構についての研究を行っている。

## 1. ニュートリノ物理学、天体素粒子物理学（安田）

神岡大気ニュートリノ実験によってニュートリノ質量が発見され、標準模型を越える素粒子物理学の新たな未知の領域への扉が開かれた。これに続く太陽ニュートリノやカムランド原子炉実験によって3世代レプトンフレーバー混合の存在が明らかにされた。これらの発展を受けて、次のステップとしてレプトンフレーバー混合を記述する牧・中川・坂田(MNS)行列の全体構造の解明に向けた努力が進められている。具体的目標としてはレプトンCP非保存の発見、ニュートリノ質量パターンの決定等である。これらの目標は近未来の大強度加速器によるニュートリノ長基線実験で達成されると期待されており、その実験的解明に資するため、理論的な基礎研究を行っている。一方、大強度のニュートリノ実験では標準的な枠組からのずれを探索することも可能となり、標準模型を越える理論に関する手がかりが得られる可能性がある。それらのシナリオとしては、ニュートリノの非標準的な相互作用、ステライルニュートリノ、重い粒子の存在によるユニタリー性の破れ等があり、我々のグループでは、近未来の計画で可能な物理に関する研究を行っている。

ニュートリノ質量とレプトンフレーバー混合の存在は物質の基本的階層の構造理解にとって重要な意味を持ち、大統一理論などの巨大なエネルギースケールにおける物理の反映であると考えられる。ニュートリノを通じて得られる情報は、2010年から稼動しているLHC(大型ハドロン衝突型加速器)によるものとは相補的であり、それらを統合してクォークとレプトンの関係を手掛りにこの自然の深部構造に迫ろうとしている。

## 2. 素粒子の質量の起源（電弱対称性の自発的破れの物理）（北澤）

素粒子の質量の起源は謎に包まれている。電磁相互作用と弱い相互作用を生み出す電弱対称性と呼ばれるゲージ対称性が存在することは実験で検証されている一方で、この対称性は素粒子の質量がゼロであることを要求する。電子などの素粒子の質量はゼロでないことがわかっているので、この対称性は自発的に破れていなければならない。この電弱対称性の自発的破れのメカニズム（電弱対称性の自発的破れの物理）の詳細は未知である。様々な理論が提案されているが、特にそれが素粒子を弦理論に基づいて記述することによってはじめて理解できる可能性について主に研究している。欧州原子核研究機構（CERN）において継続中のLHC加速器による実験や高エネルギー加速器研究機構（KEK）のBelleII実験は、電弱対称性の破れの物理の解明を最も大きな課題としたものである。

弦理論は重力相互作用をも含めて物質と相互作用を統一的に扱うことのできる枠組みである。現時点で確立している量子場の理論の枠組みにおいては、物質粒子を用意してから相互作用を導入するという順序になっているため、電弱対称性の自発的破れが起こったことを素粒子に伝える相互作用について予言をすることができない。これが素粒子の質量の起源の謎であり、弦理論はこれを解き明かす枠組みである可能性がある。しかしながら、弦理論（超弦理論）は未完成の枠組であり、理論上の問題を多く含んでいる。上記の加速器実験に関係する研究と共に、弦理論の理論的問題の解決に関する研究も行っている。さらには、弦理論の宇宙論への予言についての研究も行っている。

## ② 高エネルギー理論

准教授：KETOV, Serguei

我々のグループでは、現代理論物理学および数学の最前線に立って、素粒子理論および量子重力理論の最新の研究を行っている。

すべての基本的な相互作用の究極的な統一の探求は、現在の素粒子理論物理学の最重要課題である。究極の(即ち最も基本的な)物理学の理論は、いわゆる標準模型と呼ばれる素粒子の理論を超え、量子重力を含み、更に我々の宇宙の未来を予言するものでなければならない。新しい統一理論から実際明らかにされる事柄は、素粒子理論に限らず、ブラック・ホール内部の問題、初期宇宙のこと、強結合のゲージ理論といった、宇宙理論や物性物理学の多くの未解決問題を解く鍵にもなるであろう。

超弦理論は量子重力を含み、素粒子の標準模型を超えた理論として最も有力な候補である。しかし、これまでに研究されてきた超弦理論は、現在の我々の自然界を説明するのに十分ではない。それは、可能な真空状態を求めるのに、相互作用を部分に分けて計算するという'摂動的方法'しかなかったことに原因がある。その結果無限に多くの安定状態が答えとして得られ、現在の宇宙を正しく選び出すことが出来ないからである。

M-理論は、この問題を解決する為に最近提案された野心的な考えに基づき、いま世界の多くの若手研究者が取り組んでいる理論である。それは弱結合と強結合領域を関係付ける対称性(双対性)を武器に、総ての超弦理論だけでなく超重力理論をも一つの理論の中に統一する。ただし未だに全貌が明らかではなく、仮にM-理論と呼んでいるのである。

M-理論は本質的に非摂動的な理論であり、いま世界の先端では急速にその研究が進みつつある。このような状況の中で優れた研究を創造して行くには、国際的な協力が重要な鍵となる。我々のグループも、米国、ドイツ、ロシアの研究者達との共同研究を中心に研究を進めている。

## ③ 原子核ハドロン物理

准教授：兵藤 哲雄

陽子、中性子、パイ中間子など、強い相互作用をする粒子はハドロンと呼ばれる。本研究室では強い相互作用の非摂動的性質を反映したハドロンのエキゾチック状態や、有限量子多体系としての原子核の理論研究を行っている。

強い相互作用の基礎理論である量子色力学は、低エネルギー領域でカラーの閉じ込めが起き、基本自由度のクォーク・グルーオンは観測されず、300種以上のハドロンが多彩な動力学を示している。現代のハドロン物理では、世界中の実験施設から多くの新しいデータが供給され、従来の単純なクォーク模型による描像が破綻し、マルチクォークやハドロン分子など、新奇な構造を持ったハドロン状態が存在する可能性が盛んに議論されている。一方で、現在見つかっているハドロンのうち、強い相互作用に対して安定な粒子はごく少数の基底状態のみに限られ、エキゾチック構造を持つと期待されるほとんどの粒子は、多ハドロン状態への崩壊に対して不安定な共鳴状態である。この点は現在でもしばしば軽視されているが、現実のハドロンの構造を理解するには散乱、共鳴など動力的な側面を考慮してハドロン構造を研究することが不可欠である。

本研究室ではエキゾチックハドロンを散乱過程の共鳴状態として捉え、その構造の研究を通じて強い相互作用の非摂動的動力学を解明する。具体的には、実験データと直接関係するハドロン現象の解析、対称性に基ついた有効場の理論を用いたハドロン共鳴の記述、ハドロン間相互作用の構築、少数多体系の手法を用いた原子核の精密計算など、原子核ハドロン物理の課題を広範に取り扱い、実験グループを含む国内、海外の共同研究者と連携して研究を行う。さらに、共鳴状態の定式化の理論的基礎づけや、低エネルギー散乱と少数系の普遍的な物理の解明など、原子核ハドロン分野を超えて通用する課題も扱い、周辺分野の研究者と協力して研究を進める。

## ④ 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現象、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、 $\gamma$ 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・ $\gamma$ 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解過程

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 非線形物理

教授：首藤 啓 助教：田中 篤司

量子力学で記述されるミクロな物理過程から広くは生命現象まで、われわれを取り巻く自然には非線形な現象があふれている。当研究室では、非線形な系の動力学、なかでも、解析的な解の存在しない「非可積分系」の普遍的・数理的な構造を明らかにしつつ、自然現象の複雑さ・多彩さの起源を力学系理論の立場から理解すること試みている。とくに、力学系におけるカオスの問題を、古典および量子論双方について詳しく調べている。専門の近い物理の研究者たちとだけでなく、周辺分野（数学者、化学者など）の研究者たちとの共同研究、情報交換を積極的に行っている。具体的な研究テーマは以下である。

### 1. 量子論とカオスの問題

量子力学は可積分系を土台に作られた理論体系である。“量子現象の中でのカオスの役割”を探ることは物理現象の複雑さの起源である系の非線形性とミクロな法則を支配する量子力学との間にまたがる基本問題である。

#### (1) 多自由度・非可積分系固有の量子効果に関する研究（首藤、田中）

トンネル効果は典型的な量子効果のひとつであるが、その素性が明らかなのは、量子力学の教科書にもある1次元系に限られる。われわれは、複素空間の古典力学を用いることにより、多自由度・非可積分系のトンネル効果の基礎理論確立を試みている。派生する問題群として、近年進展を遂げつつある漸近展開理論の非可積分系への応用、量子局在現象の古典的解釈、量子絡み合いの動的生成、さらには、測定過程を通じた古典複素軌道の観測可能性などについて研究を進めている。

#### (2) 階層性を持つ量子動力学の基礎付け（田中）

たとえば分子における電子と原子核のように、著しく異なる時間スケールを持つ物理系を理解する第一歩は「断熱近似」に基づく物理的描像から出発することである。その解析の核心では、物理系の定常状態のパラメータ依存性を調べることになる。数理的に同様の考えは様々な物理学の問題にも現われ、それらを縦貫する非自明な現象として「ベリー位相」が有名である。我々は古典対応物が非可積分な量子系を理解する途上で浮上して来た問題である「新奇な量子ホロノミー」（固有エネルギーや固有空間がパラメータに対多価性を帯びる現象）について、その物理的あるいは数理的な基礎付けと、量子情報処理や量子状態制御への応用について研究を進めている。

### 2. 混合位相空間と古典カオスの問題（首藤）

現実の物理過程に広く現れる最も一般的な力学系は、完全可積分・理想カオス、そのいずれでもなく、ひとつの位相空間内に、規則軌道とカオス軌道が共存、混在する「混合系」である。両者の境界には、可積分軌道ともカオス軌道ともつかぬ、未だ素性不明の軌道群が伏在しており、それらが、完全可積分・理想カオス両極限には存在しない、混合系固有の現象を発現させると考えられている。我々は、少数自由度混合位相空間に現れる遅い動的緩和過程の詳細を明らかにすると共に、大自由度系にしばしば見られる階層的タイムスケール発現の起源を探っている。内部自由度をもつハミルトン系、負曲率空間上における多体ハミルトン系など、現実の物理・化学・生物現象と力学系理論との接点を見出すことに注力し研究を進めている。

## ⑥ 量子凝縮系理論

教授：森 弘之 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点を共通項とする。大学院生の個別指導は担当指導教員が行うが、研究においては研究室全体で協力する。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 (森、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超伝導-超流動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、閉じ込め領域を操作することで、低次元量子凝縮系の実現も可能になってきた。さらに格子系やランダムポテンシャル、仮想的なゲージ場の印加も実現し、これまで固体物理でしか存在しなかった対象がこのような系でもさらに幅広い自由度を持って作成されるようになってきた。こうした系に対し、解析的なアプローチと数値的なアプローチの両面から検討を行い、新たな現象の解明・予言を目指している。(森、荒畑)

また、近年、重い電子系に属し、空間反転対称性のない結晶構造を持つ超伝導体が次々と発見された。この超伝導体の最大の特徴は空間反転対称性の破れに起因する強いスピン軌道相互作用による、スピン・シングレット超伝導とスピン・トリプレット超伝導の混成が可能であることである。この空間反転対称性のない超伝導は従来の超伝導とは異なる物性を示し、さまざまな分野への応用の観点からも注目を集めている。このような空間反転対称性のない超伝導における強いスピン軌道作用がもたらす新奇な量子現象に関して解析的、数値的の両面から研究をおこなっている。(荒畑)

### 2. 機械学習の物理学への応用 (森、荒畑)

機械学習あるいは深層学習の爆発的な発展に伴い、その適用分野も拡大を続けている。その一環として、機械学習の物理学への応用が世界で模索されている。機械学習は、これまで知られている数値解析とは本質的に異なるアプローチであり、有用性については未解明な部分が多いことから、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。また最近スピニ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。我々はスピニ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

教授：堀田 貴嗣 准教授：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. 対称性の破れと非対角応答

物質はその固有の対称性に応じて、電場や磁場に対する応答が様々に変化することが知られている。近年強相関電子系において、スピンや軌道などが自発的に対称性を破る際に新奇な応答を示す物質が注目されている。これらの物質は、次世代のデバイスに応用されることが期待されており、現在多くの研究が活発に行われている。例えば、系に磁場をかけると磁場の方向に磁気モーメントが誘起されるが、対称性が低くなると磁場方向以外にも磁気モーメントが発生したり、空間反転対称性が破れると電気的な応答も得られるようになる。このような応答を一般に非対角応答とよび、身近な例では、時間反転対称性が破れた場合の（異常）ホール効果などがあげられる。本研究室では、物質固有のスピンや軌道自由度が自発的に対称性を破った相において、どのような興味深い応答が発現するかを微視的な理論を元に解析し、様々な新しい提案を行うことを目標に研究を行なっている。

### 2. 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。

### 3. 強磁性と超伝導の共存

二十一世紀に入って超伝導の研究分野で注目を集めているものの一つに強磁性超伝導体がある。これはその名の通り、強磁性（磁石）状態と超伝導がミクロに共存している状態である。単純には、磁石になる電子と超伝導になる電子で役割分担をしているように思われるが、実はそうではなく、同じ電子が磁石と超伝導の両方を担っている不思議な状態が実現している。このような不思議な状態では、同じ向きのスピンを持つ二つの電子がクーパー対を組んで超伝導を発現していると考えられているが、そもそもどのような機構で実現しているのか、という素朴な疑問は現在も謎のままである。それに加えて、強磁性超伝導状態では強磁性磁荷の自発ボルテックスを生じることが可能であるが、その微視的機構もまだ解明されておらず、強磁性超伝導の実現機構と合わせて、解析的および数値的手法を組み合わせて研究を行っている。

## ⑧ 高エネルギー物理実験

教授：角野 秀一 助教：汲田 哲郎 客員教授：足立 一郎 客員准教授：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 の探求に欠かせない。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、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 (KEKB) を用いた Belle 実験では、“粒子”で出来た“物質の世界”と“反粒子”で出来た“反物質の世界”で物理法則に僅かな違いがあること (CP 対称性が破れていること) を B 中間子系で確認し、小林・益川モデルの正しさを証明した。現在は、KEKB を高輝度化した加速器 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)

大気ニュートリノの振動現象が神岡で発見され、世界各地の様々な実験によってニュートリノ振動の理解が進められてきた。それらの実験のひとつとして、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建設にも参加している。

#### 3. ニュートリノを伴わない二重 $\beta$ 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、ニュートリノを放出しない二重  $\beta$  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、研究開発を進めている。

#### 4. 宇宙線ミュオンを利用した原子炉や火山の断層診断の研究 (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、原子炉や火山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。

## 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。

## ⑨ 原子物理実験

教授：田沼 肇 助教：飯田 進平 客員教授：東 俊行

原子物理学では、多くの自然現象の基礎となるミクロな原子・分子レベルの構造や動的過程を取り扱う。原子・分子レベルでの衝突、励起、発光、反応などの動的過程は総称して原子衝突、あるいは原子過程と呼ばれ、基礎的な物理の研究対象であるばかりでなく、星間での物質進化や核融合プラズマなど、他の基礎科学から応用分野にまで、広く深く関係している。

当研究グループは国内における研究拠点の一つとして重要な位置を占めているが、その際だった特徴は、数 10 GeV の相対論的エネルギーから 1 meV 程度の低エネルギーまでの 13 桁に亘る広い衝突エネルギーの範囲をカバーしていること、中性原子から多数の電子を剥ぎ取った多価イオン、正負の分子イオン、大型分子イオン、クラスターイオンなど多岐にわたる種類のイオンビームを対象としていることであり、自らが開発した装置を用いて様々な実験的研究が展開されている。以下に、現在行われている主な研究テーマを衝突エネルギーの高いものから順に示す。なお、これらの多くは理化学研究所を中心とした国内外の多くの研究者との共同研究として行われている。

### 1. 相対論的高速多価イオンと結晶場との相互作用（東）

放射線医学総合研究所にある重イオン治療用シンクロトロン加速器 (HIMAC) から供給される数 10 GeV の高エネルギー多価イオンビームを用いて、結晶中をチャネリングするイオンが感じる周期的結晶場を仮想的光子としたコヒーレントな共鳴励起現象に関する研究を行っている。その成果は高精度原子分光や強光子場のダイナミクスという観点から注目を集めている。これまで、取り扱うイオンは Ar イオンや Fe イオンが主であったが、ドイツ/GSI 重イオン研究所において国内では使用が難しい U イオンを使った実験も行っている。

### 2. 低速多価イオンの電荷移行衝突と電荷交換分光（田沼）

電子サイクロトロン共鳴型イオン源を用いて、中程度の電離度で大強度の多価イオンビームを生成し、気体分子との電荷移行衝突による発光の分光計測などを行っている。半導体加工用光源プラズマあるいは核融合プラズマの開発などに必要とされる重元素多価イオンの遷移波長などの原子分光データを提供するとともに、原子衝突物理学の立場から電荷移行反応機構の解明も進めている。また、太陽風に含まれる多価イオンの電荷交換反応の地上実験を、本学の宇宙物理実験研究室や海外の理論研究者などと共同で推進している。さらに、中性子星合体による重元素合成過程の研究に必要な分光学的データの取得を、天文学や核物理の研究者との共同研究として行っている。

### 3. 静電型イオン蓄積リングによる分子イオン・クラスターイオンの研究（飯田、東、田沼）

理化学研究所と共同で、静電型イオン蓄積リングを使った分子イオンやクラスターイオンを対象とした実験に取り組んでいる。この装置はイオン軌道の制御に磁場を使わないため、クラスターや生体分子といった非常に重い巨大な分子イオンでも周回させることが可能である。また、イオン源で生成された直後の分子イオンは内部温度が非常に高いが、長時間の蓄積において分子イオンが徐々に冷却されていく過程が観測できる。さらには、リング直線部に波長可変レーザーを導入し、生成される中性粒子を観測することで分子イオンの吸収スペクトルも測定できる。これらの特徴を活かして、大きな分子イオンの脱励起過程の観測や小さな分子イオンの準安定状態の量子状態を選別した寿命測定、さらには予言されてから数十年たっても観測されなかった再帰蛍光放出の直接観測など、多彩な実験を行っている。

#### 4. 超流動ヘリウム液滴内における分子イオンの生成（東、田沼）

理化学研究所において、冷却したノズルから高圧ヘリウム気体を放出することで、0.4 K の超流動状態にあるヘリウム液滴を生成し、これに分子を捕獲させた後にイオン化することで、振動・回転状態を 0.4 K に冷却した極低温の分子イオン生成を目指している。既にナノ液滴の生成および中性分子の捕獲には成功おり、イオン化に伴う液滴の蒸発を抑制することで、分子イオンを内包した液滴の生成を試みている。最終的には、極低温静電型イオン蓄積リングと組み合わせて、内部状態を冷却した分子イオンを入射・周回させる実験を計画している。

#### 5. 低温気体中における極低エネルギー・イオン衝突（田沼、飯田）

液体ヘリウムによって冷却したヘリウム気体中で、弱い電場によってイオンをドリフトさせることで meV 程度の極低エネルギー衝突を実現させている。イオンの移動度による粒子間ポテンシャルの決定、原子・分子イオンの準安定状態や構造異性体の分離、極低エネルギーに特有なイオン衝突過程の観測、三体結合反応によるヘリウムクラスターイオン生成など、世界で唯一の極低温移動管装置でしかできない実験を展開している。また、これまでの経験を元に、分子雲や原始惑星系形成領域における分子進化の解明を目指した「次世代アストロケミストリー」のプロジェクトに加わり、イオン-分子反応研究のために新たな装置開発を行っている。

## ⑩ 宇宙物理実験

准教授：石崎 欣尚、江副 祐一郎 助教：石川 久美 客員教授：石田 学

科学衛星による X 線  $\gamma$  線の観測研究と、新しい観測技術の開発を柱として、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  $\gamma$  線の観測は、宇宙の高エネルギー現象、たとえば超高温のプラズマや、ブラックホールに落ち込むガスの物理状態などを知るための重要な手段である。2005 年夏に打ち上げられた「すざく」衛星によって、X 線観測研究が大きく進展してきた。続いて 2016 年 2 月に打ち上げられた「ひとみ」の X 線マイクロカロリメータにより、高温ガスの運動が高精度で観測され、宇宙がダイナミックに進化する姿が明らかになってきた。「ひとみ」は同年 3 月で観測停止となったが、2020 年代早期の打ち上げを目指して、X 線分光撮像衛星 XRISM の計画が進行中である。より将来の X 線観測のために、エネルギー分解能の高い検出器マイクロカロリメータや次世代の X 線光学系などの技術開発を進め、科学衛星への搭載に向けた検討も進めている。

### 1. X 線 $\gamma$ 線による宇宙観測

主に「すざく」、「ひとみ」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硬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) 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い、将来の衛星観測へ向けた検討を行っている。(全員)

(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X線観測から高密度天体に落ち込みつつある物質や巨大ブラックホールを取り巻くガスの物理状態を研究している。(石田、江副)

(3) 太陽系天体の観測：惑星、彗星、地球磁気圏、太陽圏など、X線の放射源が太陽系の広い範囲に存在する。惑星磁気圏で加速された粒子や太陽風がX線放射に関与することがわかってきた。太陽系天体のX線観測を進めるとともに関連分野の研究者とも協力し、そこで展開するさまざまな高エネルギー過程を研究している。(江副)

## 2. 観測技術の開発

(4) 新しい観測装置の開発は、X線天文学の発展を支える原動力である。「ひとみ」の代替機XRISMは2020年代早期の打ち上げを目指しており、搭載されるマイクロカロリメータや望遠鏡を、JAXA、NASA、他大学のグループと共同で製作や試験を進め、新しいサイエンスについての検討も進めている。(全員)

(5) 将来のX線天文衛星のために、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、それを冷却するための新しい磁性材料を用いた小型冷凍機などを開発している。マイクロカロリメータの素子製作から性能測定までを宇宙研、産総研のグループとの緊密な連携のもとに進めている。また原子物理や原子核分野の研究者と協力して地上応用実験も進めている。(石崎、江副)

(6) X線天体のイメージを結像させるX線望遠鏡技術も重要な柱である。X線望遠鏡を将来衛星に搭載するため、微細加工技術などを応用し、超軽量で角分解能の優れた次世代X線望遠鏡を、宇宙研のグループと協力しながら開発している。(江副、石田)

(7) 大型衛星と相補的なサイエンスを迅速に実現し、同時に新しい技術の実証を行いつつ人材育成を担うことを目標に地球磁気圏観測などを目的とした50-100kg級の超小型衛星と小型X線撮像分光装置の開発を進めている。(江副)

## ⑪ ソフトマター

教授：栗田 玲 助教：谷 茉莉

ソフトマターとは一般に大きく柔らかい物質、例えば、液晶や高分子、ゴム、膜などの物質の総称である。このソフトマターは液晶ディスプレイ、タイヤ、プラスチック、薬品カプセルといった産業分野から泡、マヨネーズといった生活分野まで広く使われている。しかしながら、これまで経験則がメインであり、系統的な理解がいまだに得られていない。特に空間不均一(温度差や圧力差)があるような現実に近い状態における研究はほとんど行われていない。そこで、空間不均一におけるソフトマターの物性を研究し、その機構の解明や新規機能材料の基礎となる構造の発見を目指している。

### 1. 温度勾配下におけるソフトマターの相転移ダイナミクス

温度勾配が存在している系では、温度均一系では現れない現象がいくつも存在している。例えば、2成分系において温度勾配に比例して濃度勾配が生じるソレー効果や界面張力の温度依存性から流れや運動が生じるマランゴニ効果などが良く知られている。ソフトマターは温度や流れ場に敏感であるため、温度勾配下では複雑な挙動が予想される。本研究室では、温度勾配下でのソフトマターの挙動と性質について実験し、その機構について解明しようと研究が進められている。

### 2. 不均一駆動による粉体のダイナミクス

粉体とは数 mm の球状の物質が集まった多体系のことを指し、これまでも面白い実験例がいくつもある。例えば、でんぷんに水を混ぜ、力を加えると一時的に硬くなる現象が観察されている。この粉体系は現在さかんに研究が行なわれているが、我々は力を均一に加えるのではなく、不均一に力を加えた研究を行なっている。力の伝播やマクロな物性の局所的な変化を追うことにより、より詳細な理解を得ることを目指している。粉体は工学的にも重要であるため、このような研究は応用面をかなり含んでいる。

### 3. 生物の数理モデル化

生体の中には協動的な動きを発現し、面白い挙動を示す生物がいる。例えば、生物が水のように対流する生物対流やバクテリアのコロニー作成などが挙げられる。このような特徴的な協同現象を物理的な要因だけを抜き出し、簡単なモデル化をすることを目指している。

## ⑫ 粒子ビーム物性

准教授：門脇 広明 ○

中性子ビーム実験のために建設された研究用原子炉や陽子加速器で、中性子散乱法による物性研究を行っている。中性子は物質内の電子スピンおよび原子核と相互作用をするため、弾性散乱および非弾性散乱実験により、物質の磁気的性質、構成原子の構造や運動を調べることができる。当研究室では、主として新奇な電子状態による電子スピンの基底状態や励起状態を、この方法を用いてミクロスコピックに研究している。実験は、日本原子力開発機構および米、仏、独の中性子源施設（<http://nsrc.tokai-sc.jaea.go.jp/>、<http://neutrons.ornl.gov/>、<http://www.ncnr.nist.gov/>、<http://www.ill.eu/>）の研究グループと協力して行っている。

また中性子の実験に用いる大型単結晶作成にも力を入れ、電気抵抗、比熱、磁化等の測定も相補的な情報を得るために行っている。以下に具体的な研究テーマをあげる。

### 1. フラストレートした磁性体の研究

単純な磁気秩序を持つ強磁性体や反強磁性体ではない、所謂フラストレートした磁性体は、相互作用の競合により、複雑ではあるが多彩な現象を起こす可能性を秘めている。理論的な取扱いの進歩と、フラストレーションを示す新しい磁性体の発見により、この分野の研究が近年加速されている。ひとつの典型例と考えられているスピンアイス Dy<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> は、その素励起が磁気モノポールに類似した現象になり得るという興味深い理論予想があり、現在この系の実験を進めている。また、フラストレーションに起因する自明でない磁気構造は、伝導電子の波動関数の位相に不思議な影響を与えることが解明されつつあり、これを新しく見つけた PdCrO<sub>2</sub> を用いて、異常ホール効果（量子輸送現象）と磁気構造の側面から研究している。

## 2. 量子相転移

量子相転移は、絶対ゼロ度 ( $T=0$ ) で起こる相転移であり、量子力学の法則（不確定性原理）に従う量子揺らぎと、熱揺らぎを同時に取り入れる新しい枠組が必要であり、理論・実験の両側面から盛んに研究されている。d-, f-電子の強相関電子系における反強磁性磁気秩序と常磁性状態の間に位置する量子相転移の本質であるスピン揺らぎの研究を進めている。

## 3. カーボンナノチューブ

カーボンナノチューブの内部は1次元的なトンネル状のナノ空間であるため、チューブ内部の原子、分子は、3次元空間における物性とは異なる準1次元物性を示すが、この原子、分子の状態を調べている。

# ⑬ 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した特異な伝導現象や、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た研究を推進している。

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。また微小単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国際的にも認識されている。

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を含め、電子輸送特性や磁気特性を精密測定できることである。実験室に設置している冷凍機、14テスラ超伝導磁石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電子輸送特性や比熱、磁化の高精度測定を行っている。さらに、SPring-8、東大物性研の強磁場施設、J-PARC などの学外実験設備を利用した実験、核磁気共鳴(NMR/NQR)、角度分解光電子分光(ARPES)、ミュオンスピン緩和(muSR)などの実験については、国内のみならず海外のグループとも共同研究を活発に行なっている。

近年、重点的に進めている研究テーマを以下に紹介する。

**【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、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する。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準粒子有効質量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】トポロジカル物質**：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「カイラル物質」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。これま

で、右手系と左手系それぞれの単結晶を完全に創り分けたり、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。

**【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、こ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」との密接な関係が理論的に指摘されている。このような希土類化合物の物性に焦点を当て、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】 新規層状物質における新たな伝導現象の探索**：異なる 2 次元の原子層を積み重ねることにより、これまでにない新たな電子状態を創出することができる。我々は、磁性イオンを含む層と、電気伝導を担う層を積み重ねた系において、磁性と伝導がカップルした新奇現象を探索している。これまでに、2 次元に閉じ込められた磁性イオンがもたらす量子臨界現象の発見、磁性イオンを用いて電気抵抗を制御することができる新たな電気伝導機構の発見、2 次元性を反映した異方的な超伝導現象の特徴の解明などの成果を得ている。

**【5】 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がある。我々は、新規超伝導体や熱電変換材料・磁性材料としての可能性を持つ「カゴ状構造を持つ物質」、「超強力磁性体」等の物質開発を進めている。例えばカゴ状化合物では、内包されるイオンがカゴ状構造の中心で大きな振幅を持って局所的に振動（「ラットリング」）し、熱を電気エネルギーに変換する熱電変換効率に有効に働くが、そのメカニズムについては未解明な点が多く基礎研究対象としても重要である。「超強力磁性体」の実現は、ミクロな視点で安定化メカニズムの解明が課題であるが、応用面では、新規材料開発はエネルギー変換の観点だけでも大きな影響をもたらす研究である。

## ⑭ 超伝導物質

准教授：水口 佳一 助教 後藤 陽介

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紹介する。

### 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 BiS<sub>2</sub> 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。BiS<sub>2</sub> 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。BiS<sub>2</sub>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、BiS<sub>2</sub>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。

## 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。

# ⑮ 表界面光物性

教授：柳 和宏 助教：蓬田 陽平

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。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、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指の一つとして、①界面や表面の制御、②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、に着目して研究している。一次元材料である単層カーボンナノチューブや無機ナノチューブ・ナノワイヤ、二次元材料である原子層物質などを対象に、合成・精製技術開発、新規測定技術開発、電気伝導特性・磁性・光物性・熱物性の研究を行っている。それら物質の構造、フェルミレベル、界面の接合構造、の制御を通して新たな物性の探索を行っている。本研究室の研究課題の例を以下に示す。

## 1. 一次元・二次元ナノ物質系の新規物性探索と制御の研究

単層カーボンナノチューブ（SWCNT）や無機ナノチューブ・ナノワイヤといった一次元ナノ物質や、遷移金属カルコゲナイドといった二次元ナノ物質、更にそれらの複合体・ヘテロ構造を対象として、特殊なナノ構造に由来する新しい物性の探索を行っている。特に、その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. ナノ物質を用いた熱電変換の研究

低次元ナノ物質は大きな熱電変換性能を示すことが可能であると理論的に予想されているが、未だ十分な性能を実現できていない。その背景を深く理解する為、電荷の流れと熱の流れの両面でその性質を理解し、そして制御する手法の研究を進めている。

## 3. 近接場分光によるナノ構造体の光物性研究

可視光領域の波長は約 500nm 程の長さであるが、それより小さい分解能で物質の光学特性を解き明かすことは、回折限界の存在によって通常の分光測定技術ではできない。しかし、近接場光という特殊な光を用いることにより、回折限界を超えた極めて微小な領域の光学特性を解き明かすことができる。同測定技術を用いて、表面ナノ構造に由来した新たな光物性の探索を進めている。

# ⑩ ナノ物性

准教授：宮田 耕充 助教：中西 勇介

本グループでは、物質の厚さや直径を1ナノメートル程度(原子数個分)まで極限的に「薄く」もしくは「細く」した新しいナノ物質を創出し、このようなナノ物質自体の物性や、ナノ物質を「曲げる」、「ねじる」、「繋げる」、「重ねる」、「動かす」ことで発現・変調する種々の物性(超伝導、発光、光電変換、光起電力、構造相転移、金属・絶縁体転移、電気伝導、熱伝導、磁性、誘電性など)の研究を行っている。

最近では、炭素の単原子膜であるグラフェンや層状カルコゲナイド(二硫化モリブデン( $\text{MoS}_2$ )等)などの二次元物質、およびカーボンナノチューブ(CNT)、金属カルコゲナイドナノチューブ、金属ナノワイヤーなどの一次元物質、を研究対象としている。

また、世界初となる新規ナノ物質の実現やその物性の理解を研究の軸としながら、最先端の機能性材料の開発を通じ、センサー、医療・ヘルスケア、フレキシブル電子デバイス、レーザー光源、水素発生触媒、超低摩擦システム、量子情報通信、微小電気機械システムなどのへの応用など、多彩な分野での共同研究を推進している点も特徴である。以下に研究例をあげる。

### 【1】新規ナノ物質の創成と物性

ナノ物質の持つ独特の形状は、新たなナノ物質を合成する鋳型(テンプレート)として利用できる。このようなテンプレートを利用すれば、既存の半導体や金属、超伝導体を含む様々な物質をナノ構造化でき、その超伝導転移温度や電子構造などが劇的に変化することが期待されている。

テンプレートとして代表的なナノ物質であるカーボンナノチューブは、1ナノメートルほどの円柱状物質である。このようなナノチューブの内部や表面を反応場とすることで、直径が原子数個分から数 nm のナノチューブ、ナノワイヤー、ナノリボン、など様々な原子・分子のナノ構造の合成が可能となってきた。

同様に、二次元物質の「端」や、二枚以上の二次元物質が重なった場合の層間の「すき間」も、別の物質を成長させるテンプレートとして利用できる。例えば、グラフェン結晶の端から窒化ホウ素単原子層、二硫化モリブデン結晶の端から二セレン化タングステンなどの結晶が成長する。このとき、成長速度を制御することで、ナノメートル幅の極微細な原子層(ナノリボンと呼ばれる)やその超格子を合成することが出来る。本グループでは、独自に開発してきた手法で世界初の物質を実現し、その低次元の構造に由来する物性の探索を進めている。

## 【2】原子層ヘテロ構造の物性研究と機能開拓

ナノ物質では多くの原子が表面に存在するため、表面で接触した物質との相互作用を通じ、物性が劇的に変調することがある。例えば、二枚のグラフェンシートは、積層角が約 $1^\circ$ ずれて重なるだけで金属から絶縁体や超伝導体になることが知られている。また、異なる原子層が面内で接合した場合、接合部には一次元的な界面が形成し、閉じ込めポテンシャルやトンネル電流を流す障壁として利用できると期待されている。

本グループでは、種々の原子層物質の接合構造（ヘテロ構造）を自在に合成する技術の開発に成功してきた。最近では、得られた高品質な試料を用いて、一次元界面における量子閉じ込め効果やトンネル電流の検証や、高性能な光・電子スイッチング素子やエネルギー変換素子の実現などに取り組んでいる。

## 【3】曲がったナノ物質の物性

ナノ物質が持つ特徴の一つとして、その極限的な柔らかさにより、指で曲げる程度の力でその構造が大きく変わる（歪む）ことが上げられる。従って、高価な圧力発生装置がなくても、物質の格子定数、対称性、積層角、カイラリティなどを制御できる。また、周囲の物質との接触によっても「局所的」もしくは「周期的」に歪んだユニークな原子構造の実現も可能となる。

本グループでは、柔らかい超伝導体、金属、半導体の原子層物質に着目し、「曲げ」や「ねじれ」を利用した超伝導、発光、磁性などの物性制御や金属・絶縁体転移等について研究している。

上記の研究では、スコッチテープ法、ナノ鋳型法、化学気相成長法を用いた物質合成、光吸収・ラマン散乱・発光のエネルギー・空間・時間・偏向分解分光とイメージング、電界効果型トランジスタなどの半導体デバイス作製と電気伝導測定、電子顕微鏡や走査型プローブ顕微鏡による原子像観察・電子状態計測、などを利用した実験を行う。また、国内外の大学・研究所・企業との共同研究を通じ、物理を軸に化学・工学・医学などの分野横断的な知識と技術を習得することを推進している。