

2015（平成27）年度
首都大学東京 大学院
理工学研究科

物理学専攻
研究分野紹介

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。

教員名の○印は平成28年3月定年退職予定であることを示します。◎印は平成29年3月定年退職予定であることを示します。

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：Sergei Ketov

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 原子核理論

准教授：慈道 大介

現代の原子核物理学の研究対象は多岐にわたり、原子核をはじめ、その構成要素である陽子・中性子や π 中間子など強い相互作用をする粒子ハドロン、その基本粒子であるクォーク・グルーオンと、強い相互作用をする系全般を扱っている。本研究室では、多種多様に存在するハドロンを系統的に研究するとともに、新たなハドロン状態の予言やハドロン構造・相互作用の解明を目指している。また、原子核中でのハドロンの性質から、量子色力学の真空構造の理論的研究を行っている。本研究室は理論研究を行っているが、J-PARCやGSI等国内外の施設で行われる実験と密接に関係し、実験研究者と協力して新しい実験の提案や実験結果の理論的考察も行っている。国際研究交流も活発に行っており、ヨーロッパを中心に海外の研究者とも共同研究をしている。

1. ハドロン構造・動力学の研究とエキゾチックハドロン

近年、単純なクォーク模型では説明できないハドロン(エキゾチックハドロン)が理論的にも実験的にも活発に議論されている。従来の描像で説明できるハドロンが存在する一方で、ハドロンを構成要素とするハドロン(ハドロン複合状態)、多クォーク成分の成分を必要とするハドロン、ダイクォーク相関が重要な寄与をするハドロン等、ハドロン構造に対する多様性に注目が集

まっている。本研究室では、ハドロン構造をQCD和則、ハドロン多体系の有効模型などを用いて研究し、ハドロンの多様な存在形態を解明することで、強い相互作用の本質を探究している。

2. 原子核中のハドロンとカイラル対称性の部分的回復

原子核中でのハドロンの性質に対する現象論的な考察を系統的に積み重ねることにより、背後にある「強い相互作用」の普遍的な性質、つまり「QCD真空」の変化を調べることができる。動的に破れたカイラル対称性は、高温、高密度の環境下では回復すると考えられており、核密度程度でも対称性が部分的に回復し、その効果によってハドロンの性質が変化する。本研究室では、QCD真空の理解に対する基礎的な研究として、そのような核媒質中での「QCD真空」の変化の検証方法を探求し、原子核を舞台にしたクォークの自由度の直接的な現象の解明を目指している。

④ 宇宙理論

教授：政井 邦昭 助教：佐々木 伸

宇宙物理学は、量子力学や統計力学、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に物理学の興味ある対象を見出し解析していくことを目的としている。当研究室では、その中でも高エネルギー天体现象、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を用いた数値計算やシミュレーション、観測と密接に関連したものまで幅が広い。また、当専攻の宇宙物理実験研究室の他、他大学の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放射機構、高エネルギー粒子の生成機構、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。（政井）

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。（政井）

(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。また、X線観測によるダークバリオン探査の可能性をシミュレーションなどを用いて理論的に研究し、専門観測衛星による検出について検討を行っている。（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粒子加速の基礎過程の研究も行っている。（政井）

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”、“カオスの量子化”、“カオス系における量子相関”などの諸問題は、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、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）

多様な時間スケールを持つ要素から構成される物理系を理解する一つの考えは、分解された要素それぞれを最初に理解し、それらを全体へ再統合することである。これは極めて常識的な手法にもかかわらず、今日でも未解決な問題が残されている。特に、古典対応物が非可積分な量子系を理解する途上でしばしば、この問題が浮上してくる。近年は、そのなかでも “ 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ーに対して多価性を帯びる現象) とその量子情報への応用、および、量子絡み合いの動的生成について取り組んでいる。

2. 多自由度系の古典カオスの問題

大自由度が関与する複雑な物理・化学、さらには生物系の特徴は、動力学の中に階層的なタイムスケールや集団的運動が存在することである。それらは、大自由度系に広く見られる普遍的な現象であると共に、複雑系をミクロなレベルで理解する上での足がかりとなる。

(1) 多体ハミルトン系の遅い緩和の起源（首藤）

非線形性の強い大自由度系に見られる遅い緩和現象の起源を、内部自由度をもつハミルトン系、負曲率空間上での多体ハミルトン系など、いくつかの観点から調べている。液相分子集団、過冷却液体、さらにはガラスにおける遅い緩和現象の起源を力学系理論の立場から研究する。詳しい解析の可能なミニマムな力学系モデルを考えることと並行して、現実の分子をモデルとした分子動力学計算を行う。

⑥ 量子凝縮系理論

准教授：森 弘之、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、仮想的な磁場の印加も実現し、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)

一方1, 2次元の系では強い量子効果が発現することから、興味深い現象が数多く観測されている。これは上述の冷却原子系でも実現されており、また固体の電子でもさまざまな現象が知られている。低次元ではランダムネスの効果も3次元に比べて顕著な影響をもたらす。これらの低次元に特有の量子現象問題に対して多様な理論的技法を用いて取り組んでいる。(森)

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. 低次元系の相構造 (大塚)

低次元系では、多くの興味深い相転移および臨界現象が見られる。そこでは、長波長の揺らぎおよび低エネルギー励起などが重要な役割を果たすため、これらを記述する場の理論に注目が集まっている。我々は、古典スピン系、量子スピン系、強相関電子系などの様々な理論模型に対する定量的な研究を行っている。一例として系のハミルトニアンまたは転送行列の固有値構造に関する数値データと場の理論による記述を手がかりに、系の相構造の研究などを行っている。

⑦ 強相関電子論

教授：堀田 貴嗣

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。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 電子系のスピン・軌道複合秩序など、電子軌道の絡んだ複雑な磁性も現れる。本研究グループでは、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。

⑧ 高エネルギー物理実験

教授：住吉 孝行 准教授：角野 秀一 助教：汲田 哲郎

現在、100GeV 以下のエネルギーの素粒子現象は標準モデル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、ニュートリノの質量が非常に軽いことや、階層性問題と呼ばれる標準モデルに存在する本質的な困難を解決するために、標準モデルを超える物理 (BSM) の存在が提案されている。現在、それら BSM の探索が急務となっており、その代表が LHC 実験である。その LHC 実験を補完するものとして、スーパー-B-ファクトリー実験 (Belle II) があり、2016 年からの開始に向けて着々と準備が進められている。また、ニュートリノ振動における未決定のパラメーターの測定や、ニュートリノのマヨラナ性の検証は BSM の探求に欠かせない実験である。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 (住吉、角野、汲田)

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) を用いた国際素粒子実験グループ Belle に参加し、“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”で物理法則に違いがあるかどうか (CP 対称性が保存されているかどうか) の研究を行ってきた。KEKB 加速器で大量の B 中間子・反 B 中間子対を生成しそれらの崩壊の様子を詳細に観察することから、B 中間子系での大きな CP 非対称性が確認され、小林・益川モデルの正しさが証明された。現在、KEK では KEKB を高輝度化した superKEKB の建設が進められている。2016 年に開始予定の新たな実験 Belle-II に備えて高性能粒子識別装置 (エアロゲル・リングイメージ・チェレンコフ検出器) の開発研究を進めている。Belle-II では B 中間子の稀崩壊事象の観測により BSM の探索が行われる。

2. フランスの Chooz 原子炉を用いたニュートリノ振動実験：Double Chooz 実験 (住吉)

ニュートリノ振動現象の理解は、現在の素粒子物理学における最も重要な研究テーマの一つとされている。神岡でのニュートリノ振動実験などからこれまで、第 1 世代から第 2 世代へ、第 2 世

代から第3世代へのニュートリノ振動は見つかっているが、唯一第1世代から第3世代への振動は見つかっていなかった。それを見つけるために、フランスのChooz原子力発電所で生成される大量の反電子ニュートリノを用いたユニークな国際共同原子炉ニュートリノ振動実験（Double-Chooz）を2011年より開始した。いち早く比較的大きな振動現象を発見し、現在では他の実験でも確認されている。今後はニュートリノにおけるCP対称性の破れや質量の階層性が大きなテーマになっていくが、それらに関しては次のT2K実験で探索される。

3. 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遂行している。本実験は上記のDouble Chooz実験と同様に第1世代から第3世代へのニュートリノ振動を観測することを主目的とした実験であるが、生成するニュートリノの種類が異なり、互いに相補的な実験である。CP対称性の破れや質量階層性の理解に向けて、加速器ビーム強度の増強や大型ニュートリノ検出器の新設を行う計画も実験と並行して進められている。

4. 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 （住吉、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判明した現在、ニュートリノがマヨラナ粒子である可能性が益々高くなっている。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 β 崩壊事象（ $0\nu\beta\beta$ ）が観測されるはずである。DCBA実験では、この $0\nu\beta\beta$ 事象をドリフトチェンバー（DC）を利用して観測することを目指している。これまでに、DCBA-T2と呼ばれる常伝導電磁石とDCを組み合わせたスペクトロメーターで、 ^{207}Bi の β 崩壊で生成された電子のエネルギー分布を測定し、高いエネルギー分解能が確認されている。また、 ^{100}Mo を用いてニュートリノを放出する二重 β 崩壊事象（ $2\nu\beta\beta$ ）の観測が行われ、約 10^{18} 年の半減期が得られている。超伝導電磁石を用いたDCBA-T3も間もなく稼働する事になっており、測定器の大型化に向けた準備が着々と進んでいる。

⑨ 原子物理実験

教授：田沼 肇 助教：古川 武 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。特に、これら原子・分子レベルの衝突、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、衝突エネルギー範囲が数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にわたる13桁もの広い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、様々な実験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 U イオンを使った実験も開始した。

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研究に必要な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、発光ラインの偏光度を測定することで磁気副準位分布を調べるなど、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宇宙物理実験研究室などと共同で推進している。

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（田沼，古川，東）

分子物質化学専攻・反応物理化学研究室および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蓄積が可能である。また、内部電極全てを液体窒素によって冷却できるため、黒体輻射が低減し、周回する分子イオンの振動が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が測定できる。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などを行っている。また、京都大学と共同でエレクトロスプレーイオン源を開発し、液体試料から巨大分子イオンを生成してリングに入射する実験も開始した。

4. 極低温気体中における極低エネルギーイオン衝突およびイオン移動度分析（田沼）

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、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、この技術を応用して、科学警察研究所を中心とした化学剤（化学兵器）検出装置開発のプロジェクトにも参画している。

⑩ 宇宙物理実験

教授：大橋 隆哉 准教授：石崎 欣尚、江副 祐一郎
助教：山田 真也 客員教授：石田 学

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、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が、2015年打ち上げのASTRO-H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に迫ることができると期待されている。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、科学衛星へ向けた検討も進めている。

1. X線 γ 線による宇宙観測

主に「すざく」によるX線観測を行い、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。（大橋、石崎）

(2) ブラックホールと高密度天体の観測：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、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、山田）

(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、大橋）

2. 観測技術の開発

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。「すざく」に続いて、日本は2015年にX線天文衛星ASTRO-Hを打ち上げる予定である。ここに搭載されるマイクロカロリメータやX線望遠鏡を、NASAグループなどと共同で製作や試験を進めている。またASTRO-Hで明らかになる新しいサイエンスについての検討も進めている。（全員）

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。カロリメータの素子製作から性能測定までを宇宙研グループとの緊密な連携のもとに進めており、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つつある。（大橋、石崎、江副、山田）

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。本グループでは、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、宇宙研グループと協力しながら開発している。（江副、石田）

⑪ 電子物性

教授:青木 勇二 准教授:松田 達磨 助教:東中 隆二

個々の電子は電荷とスピンの自由度を持つ単純な素粒子でありながら、多数の電子が物質中に高密度で凝縮すると、超伝導や磁性などの多彩な性質が現れる。特に、強相関効果が顕著である

f 電子を含む化合物において、「BCS の枠組みを超えた新しいタイプの超伝導、多極子(電子軌道)の揺らぎと秩序、金属絶縁体転移、量子揺らぎが引き起こす特異な磁性や臨界現象」などの新しい研究領域が生まれてきている。この潮流の中で、新物質の合成から様々な物性測定まで(電気抵抗、磁化、比熱などの基礎物性から学外施設を利用した特殊測定を含めて)幅広い実験を行いながら、新奇物性の発見やそのメカニズムの解明を推進している。

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、世界最高純度の結晶育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、多様な化合物合成に対応している。また微小単結晶を用いた構造決定方法を確立しており、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、自前で育成した高純度結晶を使い、極低温・強磁場等の極限環境下で電子輸送特性や磁気特性を精密測定できることである。実験室内の希釈冷凍機、トッピング3He 冷凍機、16T 超伝導磁石などの様々な大型機器に、独自の工夫を加えた DC・AC 微電圧測定システムなどを組み合わせ、電子輸送特性や比熱の高精度測定を行っている。さらに、SPRING-8 や強磁場施設などの学外実験設備も利用しながら、国内・海外のグループとの共同研究や交流も活発に行なっている。

以下の研究テーマを、研究室で一丸となって進めている。

(1) 新物質探索：新しい結晶構造には、新しい物性が宿る。新たな結晶構造を持つ希土類化合物を創出し、新たな超伝導、多極子秩序と揺らぎ、量子臨界現象を開拓する。純良単結晶については、量子振動を観測し、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)にもチャレンジする。

(2) 新規 BiS₂ 系超伝導体における超伝導と磁性の共存と競合：最近発見された超伝導体 R(O,F)BiS₂ は、希土類イオン R を含む磁性層と、超伝導を担う BiS₂ 層が交互に積層する構造を持つ。超伝導と磁性の相関を明らかにするため、単結晶試料を用いた各種物性測定を国内外の多数の研究グループと共同で進めている。類似構造を持つ銅酸化物系や FeAs 系の超伝導体と比較しながら、本系の超伝導機構の解明を目指す。

(3) 将来の新機能材料につながる基礎技術の創出を視野に入れながら、「カゴ状構造を持つ物質系」の物性探索を進めている。RT₄X₁₂系(充填スクッテルダイト)や RT₂X₂₀系などのカゴ状化合物では、f 電子を持つ希土類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している。この「ラットリング」と呼ばれる現象は、熱を電気エネルギーに変換する熱電変換機能に有効に働くことが期待されているが、未解明な点が多い。ゼーベック係数を含む基礎物性測定と X 線・中性子散乱を組み合わせ、ラットリングと電子系の相互作用機構の究明を目指す。

(4) Sm や Yb イオンを含む化合物の中には、電荷揺らぎが支配的となっているものがあり、そこに発現する「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。また、Pr イオンを含む化合物では、多極子自由度に起因する強相関電子状態(多極子近藤状態)と推測される状態が発見されている。このような特定イオンを含む化合物の物性解明を、国内外の研究グループと共同で進めている。

⑫ 粒子ビーム物性

准教授：門脇 広明 助教：高津 浩

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ニアイス $Dy_2Ti_2O_7$ 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ふ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 $PdCrO_2$ 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 ナノ物性 I

教授：真庭 豊 准教授：宮田耕充 助教：中井祐介、坂本 浩一

客員教授：片浦 弘道

本グループでは、原子や分子の集合体である物質をナノメートルサイズまで小さくしたときや、異なる物質の間（界面）で現れる種々の現象（磁性、超伝導、誘電性、電気伝導、光物性、相転移挙動など）の研究を行っている（全員）。1 ナノメートル ($10^{-9}m=1nm$) とは原子数個を並べた程度の大きさであり、このような微細な物質ではバルクにない様々な特異な性質が出現する。たとえばカーボンナノチューブ、フラーレン、グラフェンなどが研究対象である。また高圧力下や広帯域の ESR、低次元有機物質系の電子状態の研究も行っている（主に坂本）。以下に研究例をあげる。

【1】構造制御された単層カーボンナノチューブ (SWCNT) の基礎物性の研究。従来の SWCNT の固体物性の研究では、様々な構造の SWCNT が混在した試料について行われることが多かった。本研究グループでは、特定の SWCNT のみを高濃度に濃縮して高純度固体試料を準備し、朝永ラッティンジャー状態、磁性、熱電物性などの基礎物性を調べている。このような試料の高純度化により、混合材料ではわからなかった SWCNT の際だった性質が明らかにできる。たとえば、最近、高純度 SWCNT 試料が熱電変換材料として優れた性能を有することを見出した。

【2】カーボンナノチューブ (CNT) の複合化による新規 1 次元ナノワイヤーの研究。CNT の 1 次元空洞に物質を閉じ込め、新規機能の探索と物性研究を行っている。細い CNT 内に閉じ込められたスピン 1 の酸素分子が低温でハルデン磁性体となることを予測し、現在その検証実験を進めている。1 次元の (反) 強磁性体や誘電体、新規プロトン伝導体の設計・開発も目指している。

【3】細孔内の水の研究。水は、宇宙を含むあらゆる場所に存在するが、その性質の理解はいまだ充分ではない。生体内部にも水は存在し生命活動にも必要不可欠の物質となっている。本グループではナノ細孔内に水を閉じ込め、その構造や相転移挙動、さらにバルク水の本質に関わる研究 (第二臨界点仮説の検証など)、燃料電池や生体機能の理解に重要である細孔内のプロトン伝導機構の解明などの研究を行っている。

【4】ゼオライト鑄型炭素 (ZTC) の複合化による物性研究。ZTC は 1nm 程度の空洞が連結した 3 次元物質である。この空洞内に物質を閉じ込めると、通常では得られない構造の 3 次元物質ができる。たとえば水は容易にアモルファス化する。またアルゴンのような希ガスでさえガラス様の低温構造を示す。本グループでは、このような ZTC の幾何学的制限効果を使って新規物質を創製し、またガラス化機構を含むその基礎物性の研究を行っている。

これらの研究では、研究室に設置されている核磁気共鳴 (NMR) 装置、走査プローブ顕微鏡、示唆走査熱量計、FTIR 装置、計算機シミュレーション、ESR 装置や、共通実験施設内の汎用物性測定装置、SQUID 磁束計、X線回折装置などが使用されている。必要に応じて放射光施設などの学外共同利用施設も利用している。

【5】原子層物質におけるヘテロ構造の合成と機能開拓。炭素の単原子膜であるグラフェンは、その原子 1 個分の厚さのシートという構造的な美しさや特異な物性により、21 世紀のマテリアルサイエンスを代表する物質となっている。近年、グラフェンに加え、窒化ホウ素や二硫化モリブデンなど、絶縁性や超伝導特性を示す様々な原子厚の 2 次元物質について、高品質結晶の合成が可能になってきた。本グループでは、このような様々な 2 次元物質について、積層化や端での接合を利用した低次元ナノ構造体を作製し、新しい物理現象やデバイス応用の可能性を探索している。具体的な課題として、

- ・ 1 次元的なエッジ・界面状態の電気伝導や磁気特性の検出と制御

- ・ 複合ヘテロ構造を利用した超高速スイッチング素子や高効率エネルギー変換素子の実現

などに取り組んでいる。本研究では、透過型電子顕微鏡を利用した原子配列の観察、走査型プローブ顕微鏡によるナノ領域での構造観察・電気特性計測、化学気相成長法を用いた物質合成、光吸収・ラマン散乱・レイリー散乱・発光の分光とイメージング、電界効果型トランジスタなどのデバイス作製と電気伝導測定などによる物性解析を行う。また、国内外の研究グループ・企業との積極的な共同研究・交流を通じ、物理・化学・工学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。

【6】広帯域電子スピン共鳴 (ESR) や走査トンネル顕微鏡 (STM) による低次元有機物質系の電子状態の研究。C、N、O、H からなる有機物質は、生体を構成する重要な要素であるだけでなく、新物質としても多くの可能性を秘めている。強固な共有結合からなる有機分子を弱い分子性結合で結合させ結晶を構成し、1 次元鎖や 2 次元面、3 次元構造をつくる事が出来る。これらを自由に組み合わせることにより、結晶の構造や電子構造の設計が可能になる。このような有機物質

の電子状態は、その次元性の制御、バンド幅の制御が可能であるため、種々の興味深い新奇物性を発現する。しかし、新たな物性を発現する物質を開発する際に、その物性がどのような機構によって発現しているのかを突き止める事が大変重要である事は言を俟たない。このような物性発現機構を解明するには多くの手段があり、それらの与える情報を総合して目的を達成する。本研究では、物性を支配する電子が持つスピンの注目した ESR による電子状態の解明や、STM による表面電子状態の観測を行っている。圧力で電子状態を制御しながら ESR を行うために、10 GPa までの高圧下で測定できる装置の開発も進めている。現在対象としている物質としては、DNA、導電性有機結晶、導電性高分子、中性-イオン性転移、フラーレン化合物等がある。

⑭ ナノ物性 II

准教授：柳 和宏

ナノスケールの構造体は、有限な要素（原子・分子など）から構成され、それが秩序ある構造を取ると、バルクの状態とも単一要素の状態とも全く異なる物性を示す。例えば、自然界の光合成反応初期過程では、ナノ構造体である色素蛋白複合体において、色素がタンパク質骨格の中で整然と配列することにより、高効率の光励起エネルギー移動や電荷分離などが起きている。そのようなナノ領域において発現する新奇な光物性・電子物性に関して、ナノ炭素材料（カーボンナノチューブなど）を対象として研究を進めている。特殊な機能を備えたナノ構造体を創製し、またそれを高次に配列させることで、全く新しい機能や現象が発現する系を創製することを研究課題としている。ナノ物性 I 研究室と緊密な連携を取り、国内外の大学・研究所と共同で研究を進めている。当研究室の最近の二つの研究例を以下に挙げる。

1. 単一電子構造カーボンナノチューブの光・電子物性

単層カーボンナノチューブ（SWCNT）はグラフェンシートを円筒状に巻いた中空ナノ炭素材料である。SWCNT は、一次元性に由来する特異な物性を示し、希少金属代替やエレクトロニクスデバイスへの応用が期待される材料である。その巻き方（カイラリティ）によって、金属的・半導体的な性質を示し、極めて多様な物性を示す。当研究室では、高純度・大量精製、配列制御、複合化（分子内包・二層化）などによって出現する新しい状態に由来する新奇な物性を研究している。例えば、直径の異なる金属型 SWCNT を用いて、シアン・マゼンタ・イエローの三原色を作製し、またその色を電氣的に可逆制御出来ることを原理的に示し、実証している。

2. 一次元ナノ空孔内に束縛された分子の光物性

光励起によりエネルギー移動・電荷移動・構造変化などを起こす色素分子や、相転移を起こす分子結晶を対象にした光物性研究を進めている。それら分子を、SWCNT 内部の一次元ナノ空孔内に束縛することによる新奇な光物性を研究している。特に、SWCNT の電子構造を制御する技術（電気化学ドーピング等）と分光測定技術を融合した光物性研究を進めている。物質創製・構造評価・光学特性評価の一連の研究を行い、光エレクトロニクス・太陽電池・二次電池応用への基礎となる物性研究を進めている。

⑮ ソフトマター物性

准教授：栗田 玲 助教：及川 典子

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。特に空間不均一下（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、空間不均一下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。