

平成 24 (2012) 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 25 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

准教授：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性の破れ等があり、我々のグループでは、T2KK(神岡・韓国同一2検出器系による長基線実験)・ニュートリノファクトリー(ミュオン崩壊からのニュートリノを源とする長基線実験)等の近未来の計画で可能な物理に関する研究を行なっている。

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年から稼働している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)は未知である。様々な理論が提案されているなかで、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、2010年に稼働を始めた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

教授：鈴木 徹 ○

原子核は、強く相互作用する核子(陽子・中性子)・中間子などハドロンの有限な量子多体系であり、ハドロン自体もクォーク・グルーオンなどの構成要素からなっている。一方、最近飛躍的に研究が進んでいる極低温原子気体は、ボース統計やフェルミ統計に従う多数の原子がポテンシャル中で量子縮退を起こした多体系である。これらの系は構成要素や相互作用が非常に異なる一方、種々の相の発現と安定性や集団的励起などにおいて類似性を持ち、有限量子多体系としての普遍的性質を示している。原子気体では粒子間相互作用を自在にあやつることも可能であり、原子核・ハドロンあるいは強相関電子系など強結合系の複雑な性質を解き明かすヒントを与える点でも、理論的にきわめて興味深い。本研究室では、原子核・ハドロンおよび原子縮退系を中心に、量子多体系の広い領域にわたって理論的研究を行なっている。主な研究テーマは次の通りである。

1. 原子核・ハドロン多体系の静的・動的性質の研究

原子核には表面振動やスピン音波など種々の運動モードがあらわれ、有限量子系に特有の性質を示す一方で、核子間相互作用や粒子相関の基本的な情報を担っている。我々は、これらのモードの力学的特徴の解明と、その励起過程の研究を行なっている。また、励起エネルギーが高い状

態では、種々の非線形効果によりスペクトルや励起強度のゆらぎを示す。これらの観測量や励起状態の波動関数の統計的性質を、量子力学系のカオスの性質に焦点をあてて研究している。また、高エネルギー衝突や天体内部で実現される高温あるいは高密度の核物質では、種々のハドロンやクォーク・グルーオンの自由度が解放され、通常の原子核では見られない超流動など特徴的な相が現れると予想される。これらは、極低温原子気体との比較においても興味深く、その特徴や遷移過程の研究を行なっている。

2. 極低温における量子凝縮体の研究

ポテンシャルにトラップされた極低温原子気体は、新しい有限量子多体系として、実験的・理論的な研究が急速に進展し、その基底状態・励起状態の性質やマクロな量子現象など量子力学・統計力学の基礎にかかわる問題、人工的な格子系の実現による物性物理学への新しい寄与、さらに工学的応用の可能性まで広汎な課題を与えている。本研究室では、ボース-アインシュタイン凝縮の干渉効果や、フェルミ縮退系の示す新しい相、ボース・フェルミ混合縮退系の静的および動的性質、などに重点をおいて研究している。とくに、これらの系の安定性・対称性の破れや特徴的な集団励起を、原子核などの有限量子多体系で開発された理論的手法を発展させて研究している。また、粒子間引力による束縛状態の形成やその安定性・転移現象など、混合縮退系が示す新しい相の可能性を探究している。

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、他分野（数学者、化学者）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のものである。

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ひとつの基本問題である。

(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、近年著しい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関係、さらには、測定過程を通し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。

⑥⑦⑧⑨ 凝縮系理論

教授：岡部 豊 准教授：多々良 源, 森 弘之, 堀田 貴嗣
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。本グループ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、研究においてはグループ全体で協力する。以下に代表的な研究テーマをあげる。

1. 相転移の基礎理論と計算物理学的アルゴリズム開発 (岡部)

多体問題における代表的な問題である相転移現象においてスケーリングの概念が重要である。ランダム性やフラストレーションのある系の相転移のスケーリングの性質、臨界現象、そのダイナミクスなどを研究している。研究手段として、解析的なアプローチと共に、計算物理学的な手法(シミュレーション)に力点を置いており、新しいモンテカルロアルゴリズムや最適化アルゴリズムの開発などを推進している。具体的な問題として、最近、非平衡 reweighting 法の提唱、状態密度を求めるモンテカルロアルゴリズムの検討を行い、一方、希釈 XY モデル、次近接相互作用のあるポッツモデルなどにおけるスケーリングの性質、ナノ磁性体のダイナミクスにおけるハイブリッド法の応用、画像処理問題への統計物理学的手法の応用などを手がけている。

2. ナノ磁性体のスピントロニクス理論と応用 (多々良)

ナノスケールの磁石を電気が流れる際に起きる現象(スピントロニクス)を理論的に研究している。現象は[1] 磁石の向きによって電流がどう変化するか(磁気抵抗効果)、[2] 逆に電流により磁石の性質をコントロールできるか(電流による磁化反転。磁気抵抗の一種の反作用)の2種類に分けられる。磁気抵抗効果はハードディスクなどで用いられている重要な効果であり、多層膜構造の巨大磁気抵抗(GMR)効果のような最新の物理研究の成果が用いられている。しかし人間の欲は深いもので高密度化はとどまるところを知らず、記憶素子の単位はナノスケールにも到達しつつある。[2]の電流による磁化反転は、将来の超高密度記録素子の書き込みを高速で行うための必須の技術となると期待される。物理現象としては、磁石のナノ構造の中を電子が通る際に電子のスピン角運動量及び運動量がどのように磁石を構成する磁化や磁壁に受け渡され、その結果どのように磁化や磁壁の運動に変換されていくかという問題で、最近ナノの制御が可能になって明らかになりつつある新しい問題である。これらの現象を基礎研究の立場から、多体量子系を記述するグリーン関数法、場の理論を用いた厳格な解析的アプローチを中心に行っている。

3. 低次元量子凝縮系を中心とした理論解析 (森)

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、閉じ込める領域を2次元あるいは1次元的なジオメトリーに作成することで、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ネスの印加も実現し、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。

4. 強相関電子系、特に遷移金属化合物、希土類化合物、アクチノイド化合物の磁性・超伝導の研究(堀田)

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。

5. 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。

⑩ 高エネルギー物理実験

教授：住吉 孝行 助教：千葉 雅美 ○, 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る。素粒子反応における CP 対称性の破れは、小林・益川モデルで説明されることが検証された。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、その代表が欧州合同原子核研究所の LHC 実験である。その LHC 実験を補完するものとして、B-ファクトリー実験があり、今、その upgrade 計画が進められている。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、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。2014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世代への振動は未だ見つかっていない。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、ユニークなニュートリノ振動実験（Double-Chooz）が始まった。大きな成果が期待されている。

3. ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象 ($0\nu\beta\beta$) の観測実験；DCBA 実験（住吉）
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。DCBA-T2 を改良した DCBA-T3 も間もなく稼動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。

4. 岩塩を用いた超高エネルギーニュートリノ観測のための基礎研究（千葉）
宇宙から降り注ぐ超高エネルギーニュートリノは活動銀河核、ブラック・ホールなどの高エネルギー現象からの直接的な信号として貴重な情報を有している。しかし、その事象は非常に稀なためそれを捉えるためには広大な面積の検出器が必要となる。そこで海外に存在する巨大な岩塩ドームを使った検出器が考案されている。超高エネルギーニュートリノが岩塩中で起こした電磁シャワーによって局所的に温度が上昇し岩塩の屈折率が変化する。屈折率の変化はレーダー波の反射強度の変化として観測される。この方法をレーダー法と呼んでいるが、それを実現するための基礎研究を国内・海外の研究者らと協力して進めている。

⑪ 原子物理実験

准教授：田沼 肇 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も用いて、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供給するとともに、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（東、田沼）

分子物質化学専攻・反応物理化学研究室と共同で、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、黒体放射が低減し、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、測定と平行して京都大学と共同でエレクトロスプレーや金属クラスターなどの新たな入射用イオン源の開発にも取り組んでいる。

4. 極低温気体中における極低エネルギーイオン衝突（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。

⑫ 宇宙物理実験

教授：大橋 隆哉 准教授：石崎 欣尚 助教：江副 祐一郎
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、宇宙航空研究開発機構・宇宙科学研究所 (ISAS/JAXA) や国内、海外のグループとの共同研究を進めている。X 線天文学の分野は、2005 年夏に打ち上げられた「すざく」衛星によって、観測研究が大きく進展してき

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。さらに高温ガスの運動を高精度で観測し、宇宙がダイナミックに進化する姿をとらえるために、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線望遠鏡を中心に、将来を目指した技術開発を進めている。

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：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銀河団は、力学的に緩和した系として宇宙で最大の構造である。銀河団に充填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さまざまな検討を行っている。（大橋、石崎）

(2) 銀河系内の高密度天体の観測：星は、その進化の最終段階で重力崩壊を起こし、ブラックホール、中性子星、白色矮星などの高密度天体になり、これらが連星系中の相手の星から質量の供給を受けるとX線を放射する。その性質から、高密度天体そのものや、こうした天体に落ち込む直前の、極限状態にある物質の物理状態を研究している。（石田）

(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線放射に関与すると考えられ、軟X線背景放射にも重要な寄与を行うことがわかってきた。太陽系天体のX線観測を進め、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解明しようとしている。（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2014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しながら製作を進めている。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更に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、その信号を低雑音で読み出す信号処理システム、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、宇宙研グループとの緊密な連携のもとに進めており、また原子物理グループと協力して地上応用実験も進めつつある。（大橋、石崎、江副）

X線天体のイメージを結像させるX線望遠鏡技術は、X線天文学を支える大きな柱である。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。（石田、江副）

⑬ 光物性

准教授：石井 廣義 ○

物質の大部分の性質は、それらを構成する電子や原子核の間の電磁的な相互作用で決まっているので、光子は電磁的相互作用を調べるプローブとして重要な役割を果たす。当研究室では放射光、紫外線、X線などを用いて物質の基底状態および励起状態の性質を解明し、種々の物性が発現するメカニズムを調べている。特に、放射光は赤外線からX線までの光を放射する加速器で、当研究室では SPring-8、広島大学 HiSOR やつくばの放射光施設などを利用する機会も多い。具体的なテーマを下に示す。

1. カーボン・ナノチューブやフラーレンなどの通常の3次元物質とは異なる空間特性をもつ物質群はそれ自身で、またはそれらに他の物質（金属やフラーレン）を導入したとき、極めて特異な性質・機能を発現する可能性がある。既に、我々は放射光を用いた高分解能光電子分光により、カーボンナノチューブにおいて朝永-ラッティンジャー流体という特異な電子状態の存在を世界で初めて明らかにしている。最近では、カーボン・ナノチューブにC60やC70を内包した系や、さらにそのフラーレン内部にGdなどの磁性イオンを内包したナノチューブについても研究している。これらの物質群は「ナノ物質」とよばれ、基礎物理学の観点からも特異な電子状態が注目されている。

2. 次世代太陽電池として半導体量子ドット増感太陽電池が注目されているが、実用化には光電変換効率の飛躍的向上が必要である。そこで、高効率化を目指して、太陽電池を他研究機関（電通大）と共同で作製し、光吸収・光化学電流測定、光電子分光によって電極の電子構造と変換効率との関連を調べている。また、増感剤として使用している半導体量子ドットは「ナノ物質」でもあり、ナノ物質に特有な電子状態の解明は、基礎物理学の観点から興味深い。

3. 希土類化合物やカーボン・ナノチューブの逆光電子分光測定を行い、物質の非占有状態を調べている。具体的には、Ce、Pr 化合物の逆光電子スペクトルを不純物アンダーソン模型により再現することで4f電子状態の解明や、フラーレン・ピーポッド（フラーレンを内包したカーボン・ナノチューブ）の非占有電子状態を調べることで、価電子帯全体の電子構造の解明を試みている。

4. 希土類元素や3d遷移金属を含む物質は、しばしば局在性の強い価電子を含むためそれらの間の相互作用が大きく「強相関電子系」と呼ばれることがある。これらの物質群について、放射光を用いた高分解能光電子分光法により、また必要に応じて「共鳴光電子分光法」という手段により、価電子の軌道対称性を特定したうえでの部分状態密度を明らかにしている。これらの結果から熱力学的な近藤温度と分光学的な近藤温度との差異と関連を明らかにした。また内殻励起磁気二色性（MCD）の測定により構成原子の局所的な磁気的性質を調べている。特に、局所帯磁率の温度依存性の測定結果はNMRに替わる「局所的帯磁率」を見積もる新しい手段として注目を集めている。

⑭ 電子物性

教授：佐藤 英行 ○ 教授：青木 勇二 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収容されると、超伝導や磁性などの多彩な物質固有の性質が現れる。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、これまでにない新奇物性が近年続々と発見され、「多極子(電子軌道)の揺らぎと秩序、金属絶縁体転移、BCS の枠組みを超えた新しいタイプの超伝導、量子臨界点近傍の量子揺らぎ、幾何学的フラストレーションを伴う量子磁性」などの新しい研究分野が生まれてきている。この流れの中で、当研究室では、新物質の合成や純良単結晶育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高度な特殊測定を含めて)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。

その中でも、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」に焦点を当てた物性開拓を重点的に進めている。f 電子を持つ希土類イオンがカゴ状構造の中で局所的に振動する振る舞いはラトリングと呼ばれ、温度差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、基礎物性の観点からも、ラトリング振動が f 電子自由度とどのように結合するのかは未だ解明されておらず、重要な課題として残されている。これら物質系で見出した興味深い現象の代表例を、充填スクッテルダイト化合物を始めとして、以下に挙げる。これらは、国内外の多くの研究グループの興味を集め共同研究が進められている。

(1) 典型物質 $\text{PrOs}_4\text{Sb}_{12}$ は、Pr 化合物としては初めて重い電子超伝導状態を示す化合物である。我々は、低温・高磁場領域に、新たな磁場誘起の四極子秩序相を発見した。さらに、 μSR 測定により、時間反転対称性が破れた超伝導状態の発現を示唆する結果を得た。この超伝導の特性は極めて異例であり、国内外の多くのグループと精力的な研究を進めている。

(2) $\text{PrFe}_4\text{P}_{12}$ では、Pr 化合物としては異例の顕著な近藤効果を示し、低温で非磁性の秩序を示す物質であることを発見した。更に、磁化の量子振動を観測して Pr 系で最も重い電子質量の直接観測に成功するとともに、秩序状態が特異なスカラー型多極子秩序であることを明らかにした。

(3) 磁場を加えても軽くならない“重い電子物質” $\text{SmOs}_4\text{Sb}_{12}$ や、不思議な多重転移を示す $\text{SmRu}_4\text{P}_{12}$ などの Sm 系、更には新奇な半導体状態を持つ Ce 系など、興味深い現象が次々と見出されている。

本研究室では、純良単結晶を育成するための高圧合成炉やテトラアーク炉、極低温強磁場を得るための稀釈冷凍機、トップローディング 3He 冷凍機、16T 超電導磁石など、様々な大型機器を保有している。種々の DC、AC 微電圧測定システムを用いた電子輸送特性測定や、比熱の連続磁場依存測定など、独自の工夫を加えた物性測定を特徴とする。国内外の共同利用施設の利用も組み合わせて、幅広く総合的な実験研究を推進する。

⑮ ナノ物性 I

教授：真庭 豊 助教：松田 和之
客員教授：片浦 弘道 客員准教授：齋藤 毅

本グループは、多数の原子・分子の集合体であるバルクからナノメートルサイズまで物質を小さくしたときに現れる種々の現象(強磁性、超伝導、誘電体、電気伝導、光物性、相転移挙動など)の系統的な研究を行っている。1 ナノメートル ($10^{-9}\text{m}=1\text{nm}$) とは原子を数個程度並べた大きさであり、このような微小な物質系の性質はバルク領域からの推測を超えており、物理学の対象として極めて興味深い。また、今後の産業と技術の発展にとっても重要な研究領域である。本グループの最近の研究例として、

- (1) カーボンナノチューブ (CNT) 内部の水や酸素などの相転移挙動—次元クロスオーバー—の研究、
- (2) 新しい水の結晶“アイスナノチューブ：ice-NT” および世界初の室温氷 ice-NT の発見、
- (3) CNT 内フラーレンの 1 次元相転移挙動の観察、
- (4) 層状超伝導体やフラーレン超伝導体の超伝導機構の研究、
- (5) ゼオライト周期構造内のアルカリ金属の強磁性発現機構の研究、
- (6) ゼオライトにおける新しい機構によるサーモクロミズムの観察、
- (7) 水-CNT 複合系における交換転移の発見とナノバルブの提案、

などがあげられる。研究手法としては、核磁気共鳴 (NMR)、光ポンプ NMR、X 線回折 (実験室および放射光施設による)、物質創製、などを主力とするが、研究室および物性系共通実験室における、磁気、熱、電気伝導度、インピーダンス、ESR 測定などによる総合的な物性研究が行われている。

本グループはナノ領域でおこる基礎物理過程の解明を目指しているが、研究成果は 10~20 年後の産業や技術を支える有用な知的財産をなすものであると期待され、特許出願などについても配慮している。特に、ナノ構造炭素、ナノチューブ、ゼオライトなどのナノ構造物質系について、

- (1) 新規物質の創製、
- (2) 新規物性の探索、
- (3) 基礎物理過程・機構の解明、
- (4) ナノ計算機シミュレーションによる物性解明、
- (5) 環境・生体応用、などの研究に興味と意欲のある学生を求めたい。

⑩ ナノ物性 II

准教授：柳 和宏

ナノスケールの構造体は、幾つかの要素 (原子・分子など) から構成される。その要素が秩序ある構造を取ると、バルクの状態や単一の状態にある場合とは全く異なる物性を示す。構造と物性との関係解明に焦点を当てながら、この領域において発現する新奇な光物性・電子物性に注目して研究を進めている。様々な技術開発も行い、特許出願や企業連携も行っている。自然界の光合成反応初期過程においては、ナノ構造体である色素蛋白複合体が、高効率の光励起エネルギー移動や電荷分離など、非常に重要な役割を果たしている。そのような特殊な機能を備えたナノ構造体を創製し、またそれを更に高次に配列させ、全く新しい機能や現象が発現する系を人為的に創製することを研究課題としている。その帰結として、光合成系に見られるような高効率なエネルギー変換を、新しいコンセプトで実現することを目指している。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。以下に当研究室の代表的な二つの研究テーマを挙げる。

1. 単一電子構造単層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。その次元性に由来して特異な物性を示し、希少金属代替や低炭素化の実現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、金属型・半導体型の性質を示し、多種多様な物性を示す。当研究室では、高純度・大量精製 (金属型・半導体型・単一カイラリティ) を達成し、混合系や一本では見られないマクロなスケールで現れる新奇物性を探索している。例えば、合成時の試料の色は黒ずんだ色となっているが、高純度の金属型 SWCNT で直径が 0.9、1.0、1.3nm のものを精製すると、シアン・マゼンタ・イエローの三原色を示すこと、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、そして実証してきた。構造を極めて単一としたSWCNT 試料を用いて、その光学的・電氣的性質を正確に解明し、マクロにその物性を制御することを目標に研究している。

2. 一次元ナノ空孔内における光物性

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で、新たな分子構造や結晶相を取ることによる新奇な光物性を探索している。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・光学特性評価までの一連の研究を行い、光エレクトロニクス・太陽電池応用への基礎となる物性研究を進めている。

⑰ 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、物質の磁氣的性質、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 $\text{Dy}_2\text{Ti}_2\text{O}_7$ 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_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。

⑱ ESR 物性

教授：溝口 憲治 ○ 助教：坂本 浩一

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する、或は共有結合で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が、本サブグループでは、物性を支配する電子が持つスピンの注目し、その共鳴 (Electron Spin Resonance) 現象を最大限に活用している。

測定パラメーターとして、温度以外に、周波数 (磁場とも同義) を数 MHz (~ 10 の 6 乗 Hz) から 94 GHz (~ 10 の 11 乗 Hz) まで変えて電子のダイナミクスを調べている。また、圧力を 3 GPa (3 万気圧、現在、10 GPa まで拡張中) 以上かけて分子間の距離を変化させ、電子バンド幅、交換相互作用、電子-格子、電子スピン-格子 相互作用などの物性を支配している重要な相互作用を直接変化させて物性の発現機構を探っている。ESR においてこのような研究条件が使えるのは、世界広し、といえども我々のグループ以外にほとんどない。実際の研究には、試料作成はもとより、ESR と共に、NMR、X 線構造解析、X 線元素分析、SQUID 磁束計、電気伝導度等、多くの測定手段を併用し明解な物性解明を心がけている。

現在進めている研究内容としては、DNA、導電性有機結晶、導電性高分子、中性-イオン性転移、フラレン化合物等がある。