

理学部物理学科への進学を考えている学生の皆さんへ

物理学とは、実験と理論を両輪に、我々を取りかこむ森羅万象に潜む法則を一つ一つ解き明かしていく学問です。虹はなぜ7色か、雪の結晶はなぜあのように美しい形となるかなど、身近な疑問から、宇宙はどのようにしてでき、どうなってゆくのか。それを認識する我々という生命はどうやってできたのかなど、誰でも一度は疑問に思ったことのあるような根源的な疑問まで、科学は実験や観測を通して一つ一つ解き明かして、人類の知を蓄積してきました。その中でも物理学は、自然現象を極限まで単純化することで、問いと答えを正しさが検証できるところまで引きつけ、数学と観測を手段として自然に問いかけることで、理解を深めてきました。その意味で、物理学は自然科学のお手本とも言うことができます。中でも、物質の成り立ちを求めて、物質を極限まで分けて理解しようとする要素還元論的な手法は大きな成功を収めてきました。物質のミクロな姿を究極まで突きつめることで、拓けてきた素粒子の研究は、質量の起源にも到達し、さらに未知の粒子にも迫ろうとしています。そうやって追いつめてきたミクロの極限である素粒子の世界が、宇宙の始まりの高エネルギー状態の理解につながることもまた大きな驚きです。まさに、一周して自分自身の尻尾を飲み込むウロボロスの蛇の図を思い起こさせる、ミクロとマクロがつながる構造がそこにあります。

しかし、物理の世界はそれ以外の方向にも広がっていることも忘れてはなりません。要素還元的な物理の方法を、自然を掘り下げて理解する物理学の縦糸とすると、異なる現象の関係をつなぐ横糸のような物理もまた重要です。例えば、熱力学や統計力学は、物質やスケールの違いを超えて様々の系に適用できる物理学の強力な方法です。運動、熱、波動、対称性などの概念は、対象を”もの”ではなく”こと”として捉える概念であり、物理学に不可欠な横糸とも言うことができます。物性物理学は、物質が凝縮して集団となったとき、個々の原子の性質をはるかに超えた新たな性質を持ちうることを明らかにしてきました。そして、自然には存在しない物質さえ作り出し、現代社会をその根底から支えています。また、非平衡物理や生物物理、量子情報などの比較的新しい分野では、横糸としての役割を發揮して、従来の物理学が対象としてきた範囲をさらに拡張し、生命現象や情報の世界にも迫ろうとしています。このように、物理学のロジックは縦横に網目のように絡み合いながら自然の理解を少しずつ広げ、また社会にも影響を及ぼしています。その意味で今は、物理学自体も進歩を遂げ、新しい物理学の姿が見え始めてきている時代と言っても過言ではないでしょう。

皆さんが学ぼうとしている物理学は、その深さと広がりにおいて、真に学びがいのある、そして学んだことが確実に皆さんの将来の力となる学問であると確信します。多くの先輩と70名を超える教員、そして親切なスタッフが共に物理の新たなフロンティアを拓くべく皆さんを待っています。どうぞ希望を抱いて物理学科へ進学されることを期待します。

理学系研究科物理学専攻長・理学部物理学科長
佐野 雅己

東京大学理学部物理学教員一覧

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
相原博昭	高エネルギー物理学	高エネルギー素粒子実験を専門としている。：高エネルギー加速器研究機構(KEK)のスーパーBファクトリー(SuperKEKB)を使った粒子・反粒子非対称性(CP非保存)や、B中間子やタウレプトンの稀崩壊の測定をもとに、素粒子の標準理論を越える新しい素粒子物理法則を探索している。 J-PARCの大強度陽子加速器で発生させたニュートリノビームを使ってニュートリノの性質の精密測定を行っている。さらに、すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究も推進している。
青木秀夫	物性物理学理論	[A] 多体電子論、電子相関の物理：(1) 超伝導[高温超伝導体、エキゾチック超伝導体における電子機構超伝導]。(2) トポロジカル系[分数量子ホール効果とそのゲージ場の理論、整数量子ホール効果、グラフェン]。(3) 強磁性[遍歴強磁性、平坦バンド強磁性]。[B] 上記のような新奇物性を実現する舞台としての、「物質設計」。[C] これらを具体的に扱う理論的方法論として、量子Monte Carlo法、密度行列繰り込み群、動的平均場、第一原理電子状態計算、など。[D] 非平衡における新奇な電子相関、トポロジカル物性の探索。
浅井祥仁	素粒子物理学実験	(1) 世界最高エネルギー・LHC加速器を用いたアトラス実験において、標準理論を超えた新しい素粒子物理学を切り拓く研究：物質の質量の起源を担うヒッグス粒子の発見や、超対称性粒子の発見に向けた研究を行っている。ATLASグループの超対称性研究の責任者 (2) ポジトロニウムなどを用いた非加速器、小実験を通して、QEDの精密検証やAxionやDark Energyなど新しい素粒子現象の探索を行う。
安東正樹	重力波物理学・相対論実験	宇宙を見る新しい目として重力波天文学の実現を目指す。岐阜県・神岡の地下サイトで建設が進められている大型低温重力波望遠鏡KAGRA(かぐら)の建設、および、将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための基礎開発研究を推進する。また、それらに用いられる最先端のレーザー干渉計技術を利用した、相対論検証実験や量子光学的手法を用いた精密計測研究も行う。
上田正仁	冷却原子気体、量子情報、物性理論	冷却原子気体の理論(ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ超流動)、量子情報・測定、物性理論
大塚孝治	原子核物理学理論	原子核を陽子や中性子などからなる量子多体系とし、その性質や存在限界を探究する原子核構造理論を研究している。働いている力が核力であることから来る特異な性質を解明し、最近研究が始まった不安定原子核(エキゾチック核)の姿を明らかにすることを目指す。さらに、カオスやメソスコピック系など量子多体系のより一般的な面も研究している。
岡本 徹	物性物理学	低次元電子系を中心とした低温物性実験。量子ホール効果などの強磁場下の現象の研究とともに、ウィグナー固体の磁性や金属・絶縁体転移などの電子相関やスピンが主役となる新しい量子現象の解明および探索を行っている。最近では劈開表面の2次元電気伝導の測定に成功しており、単原子層膜の超伝導など新しい研究領域を開拓しつつある。
小形正男	物性理論	物性理論：凝縮系とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論。強い相関のある電子系、高温超伝導の理論、磁性、有機伝導体などの低次元伝導体、メソスコピック系、軌道・スピン・電荷の複合した物質、従来と異なった新しい超伝導現象など。場の理論的手法、厳密解、くりこみ群、変分法、計算機シミュレーションなどの手法を用いる。
桂 法称	物性理論、統計力学	[物性理論] 相関の強い多体系(電子系, ボゾン系, スピン系,...)における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性および新奇現象の理論的研究。平均場近似やスピン波理論などの従来の手法に加えて、場の理論や数理物理学的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチする。 [統計力学] 古典・量子統計力学における可解模型の代数構造の研究、およびその量子情報・物性への応用。非線形現象・フラクタルなどの数理構造の解明。
五神 真	光量子物理学	量子効果と多体効果に起因する新奇物質相の発現や非自明な光学現象を、物質科学と光科学の両面から追求する研究を主題とする。ミリケルビン領域に至る低温技術と、遠赤外から軟X線にわたるコヒーレント光の発生と分光技術、ナノ加工技術を駆使して進めている。(1) 励起子や電子正孔系の量子凝縮相と巨視的量子現象の解明 (2) 制御可能な非古典的光子源の開発とその高効率観察 (3) 電気四重極相互作用や磁気効果を含む、非局所・非線形光学効果の活用 (4) 次世代レーザー光源や分光手法の開拓。
駒宮幸男	素粒子実験	(1) 素粒子実験における国際的な次期基幹計画である電子・陽電子リニアコライダーILC計画の推進。ILCでの物理、測定器の検討。KEKのATF2での電子ビームサイズモニターの開発と測定。(2) 最高エネルギーの相互衝突型加速器(コライダー)を用いた素粒子物理学実験。特にCERNにおけるコライダー(LEP及びLHC)を用いたヒッグスボゾンや超対称性粒子群などの探索。(3) 粒子測定器の開発。特に冷中性子の地球の重力場中での量子効果測定と新短距離力探索のための検出器の研究開発とフランスILLでの実験。
酒井広文	最先端レーザー技術駆使した原子分子物理学実験	最先端レーザー技術駆使した原子分子物理学実験。(1) 高強度レーザー電場を用いた中性分子のマニピュレーションとその応用、(2) 整形された超短光パルスによる原子分子中の量子過程制御、(3) 高次非線形過程(多光子イオン化や高次高調波発生など)に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超高速現象、(4) レーザー誘起クーロン爆裂を用いた分子の構造とダイナミクス。
櫻井博儀	原子核物理学実験	重イオン原子核実験 重イオン核反応を用いて不安定核のビームを生成し、安定線から遠く離れたエキゾチック原子核の特異な性質・現象を調べる。研究テーマは、1) 高速RIビームを用いた新手法の開発による不安定核の核構造、ダイナミクスの研究、2) RIビーム開発と核存在限界の探索、3) 重イオン核反応の反応機構、等である。実験は主に理化学研究所加速器研究施設・不安定核ビーム生成装置を用いて行っている。

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
佐野雅己	非線形物理学、ソフトマター、生物物理学	非線形非平衡系および生物物理：非平衡系の統計物理、非線形動力学とカオス、散逸系におけるパターン形成と動力学、乱流の統計則・巨視的構造、非平衡ソフトマター、アクティブマター、定量的な生物物理。
島野亮	光物性物理	テラヘルツ分光、レーザー分光を主な手法とする固体量子物性の研究。エキシトン、マグノン等の固体内素励起の観測による電子・スピン系の相転移ダイナミクスの解明や、光による多体電子系の量子相制御を目指している。具体的には、半導体の電子正孔系の絶縁体金属転移及び量子凝縮相の研究、低次元量子液体における磁気光学効果、超伝導体の光による相制御及び秩序変数の時空間ダイナミクスの観測、時間空間反転対称性が破れた系で量子効果により発現する特異な電気磁気光学の研究、非摂動論領域における光と物質との相互作用の解明など。
須藤 靖	宇宙物理学・太陽系外惑星	宇宙物理学と太陽系外惑星に関する理論的および観測的研究。具体的な研究テーマは、多波長観測データをもとにした銀河団モデルの構築、ダークマターハローの非球対称性の統計的モデル、重力レンズ天文学、広域銀河探索によるダークエネルギーの性質の解明、銀河系ダスト減光地図の精密検証、スタッキング解析による遠方銀河の性質の特定、軟X線分光観測を用いたダークバリオン探索、太陽系外惑星系の角運動量の起源と進化、多重惑星系の力学進化。
高木英典	物性物理	固体、特に遷移金属酸化物中の絡み合う電子(相関電子)が創成するエキゾチックな量子凝縮相を現実の物質の中に探索・実現する。同時に相形成の物理を解明する。現在、高温超伝導、量子スピン液体、非自明なスピン・電荷秩序、トポロジカル絶縁体、などに具体的興味がある。舞台となる物質を自ら開拓すると同時に、電子輸送現象、熱物性、量子ビーム回折・散乱などのプローブを駆使して、ナノの世界での相関電子の静的・動的自己組織化構造を明らかにする。
高瀬雄一	プラズマ物理・核融合	プラズマは荷電粒子の集合体であり、非線形複雑系の典型例である。高温プラズマでは散逸が小さいので、熱平衡から遠い状態にある。また非線形性が顕著に現われ、それが発展して乱流状態が形成され、これらを介して複数の状態間で遷移を起こし、自ら構造を形成していく。高温プラズマは核融合発電に応用できるが、その実現はプラズマの振る舞いの物理的理解および制御にかかっている。本研究室では、TST-2球状トカマク装置のほか、国内外の大型核融合装置も使って高温プラズマ中の波動現象、不安定性、乱流等の研究を行っている。
立川裕二	場の量子論及弦理論	素粒子の世界を記述する場の量子論は、強結合領域でいろいろな面白い性質を示しますが、超対称性というボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性があると、この強結合領域が紙と鉛筆とすこしの計算機で理論的に調べることができ、それを主な研究対象にしています。超対称場の理論はまた超弦理論に埋め込むことによってより良く理解できるので、関連する超弦理論の研究も行っています。その過程で数学のいろいろな概念が自然に現れるのも興味深い点です。
常行真司	物性理論	第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算機シミュレーションは、観測や実験からは得られない物性情報を得たり、あるいは実験に先んじた予言を行うことを可能にする。当研究室では主にそのような計算物理学的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や2成分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、超高压下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。
藤堂眞治	計算物理	計算物理学：量子モンテカルロ法など最先端の計算物理学の手法を用いて、量子スピン系やボーズハバード系など強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象の解明を目指す。また、テンソルネットワークなどの量子多体系に対する新たなシミュレーション手法開発や京コンピュータなど最先端スパコンの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発も進めている。
中澤知洋	宇宙物理学実験	宇宙では、地上では実現し得ない、大規模で、極限の高エネルギー現象が起きている。我々は自ら開発したX線・ガンマ線の観測装置を衛星に搭載し、ブラックホールや銀河団などの高エネルギー天体を観測することで、宇宙の天体進化を支配する物理を探っている。現在は、軌道上の「すざく」衛星を用いた観測研究を進めると同時に、感度を飛躍的に向上させた次世代X線観測衛星 ASTRO-H (2015年打ち上げ予定)を開発している。研究活動では、牧島研究室およびJAXA宇宙科学研究所と協力している。
能瀬聡直	生物物理学	脳神経系の生物物理。神経回路の作動原理を神経配線や活動様式に基づき細胞レベルで理解することを目標とし、モデル動物を用いた研究を行う。光制御による神経活動操作、カルシウムイメージングやパッチクランプ法による神経活動測定、コネクトーム解析(電子顕微鏡画像再構築による神経配線解析)などを総合的に適用することで、神経細胞間の入出力関係を実験的に明らかにし、神経回路による情報処理の仕組みを探る。
長谷川修司	表面物理学	半導体、金属、トポロジカル絶縁体などの結晶表面や、その上に形成される原子層、原子鎖やクラスター、などのナノメータスケール構造体について、構造物性・電子/スピン物性、機能特性などを多角的に研究する。具体的には、原子配列構造、電子状態、電子・スピン輸送特性、光学応答、相転移、構造マニピュレーションなどを、電子回折・顕微鏡、走査トンネル顕微鏡・分光法、光電子分光法、微視的4端子プローブ法、分子線エピタキシー法、集束イオンビーム加工法などの実験手法を駆使して研究する。
濱口幸一	素粒子理論	素粒子の標準理論のエネルギースケールを超えたところにはどのような物理があるのかに興味があり、自然界に存在するより基本的な統一理論を目指して研究しています。現在は主に超対称性理論を軸にした現象論および素粒子論的宇宙論の研究を行っています。最新の素粒子実験や宇宙観測の結果にも注目して理論的研究に還元していきたいと考えています。

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
早野龍五	高エネルギー原子核物理実験	エキゾティック原子(反陽子、中間子などを含む奇妙な原子)の分光による基本対称性の実験的研究。 1) 反水素原子の研究、および反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光によるCPT対称性-物質・反物質の対称性-の精密検証(CERN研究所にて実施中)。 2) 中間子原子の生成・分光による、「ハドロンの質量起源 - 原子核中でのカイラル対称性の部分回復」の研究(J-PARC研究所にて)。
樋口秀男	生物物理学	当研究室では生体モータータンパク質を分子・細胞・個体の3つの階層からアプローチし、各階層の機能メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルを構築する。具体的な研究テーマは、1. 精製モーター1分子の3次元運動をÅ精度で解析し、Åレベルの運動メカニズムの解明を行う。2. 細胞内モーター分子の変位と力を3次元的に測定し、力学状態の時空間的变化を解析する。3. マウス内モーター分子の運動を解析し、個体内細胞の運動を明らかにする。4. 細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する。
福嶋健二	原子核理論	自然界の最も基本的な相互作用のひとつである『強い相互作用』の織り成す物理をさまざまな手法を用いて研究しています。強い相互作用するクォークとグルーオンが、パイ中間子や核子などハドロンを作り、多数のハドロンが集まって我々の身の回りの物質を構成しています。超高温・超高密度・強い外場(磁場・電場・重力場など)の中では、身近な物質からは想像もつかない面白い物性が『強い相互作用』の性質から導かれます。既知の理論から新奇現象を探る理論研究を目指しています。
福山 寛	低温物理学	低温物理学:(i)超低温における量子液体・固体研究(超流動、超固体、核磁性、強相関効果、相転移現象など)。特にヘリウム単原子層膜の2次元量子物性。(ii)ディラック電子系の物性研究。特にグラフェンのエッジ状態、バンドギャップ制御、超伝導近接効果。(iii)超低温の発生と測定技術の開発。比熱、核磁気共鳴、ねじれ振子、走査トンネル顕微鏡/分光、輸送現象測定など幅広い実験手法を用いる。
藤森 淳	光電子分光、強相関電子物性	光電子分光、放射光分光を用いた固体電子物性の研究。強相関電子系、磁性半導体およびそれらの界面、ナノ構造の特異な物性の発現機構解明。高温超伝導、巨大磁気抵抗、金属-絶縁体転移、非フェルミ液体的振る舞いの解明を目指す。
牧島一夫	高エネルギー宇宙物理実験	中澤講師、ビッグバンセンター、JAXAなどと協力し、科学衛星により宇宙X線やガンマ線を観測的に研究している。2005年に打上げられた「すざく」では、世界最高の性能をもつ硬X線検出器を担当し、ブラックホール、中性子星とマグネター、磁気プラズマ現象、銀河団の宇宙論的進化、元素合成、粒子加速などを観測している。2014年に打ち上げ予定の後継機ASTRO-H衛星に向けては、「すざく」を大幅に上回る性能をもつ、2台の搭載装置の開発を進めている
松尾 泰	素粒子理論	量子重力、超弦理論、場の量子論、可解な量子系、およびそれに関連する数理物理学が主要な研究トピックスである。より具体的な最近のテーマとしては、弦の場の理論の手法を用いたDブレーンの研究、行列模型を用いた低次元量子重力の研究、量子重力の数学的背景としての非可換幾何学の研究などがあげられる。
蓑輪 眞	非加速器素粒子物理学実験	みのわ研究室では、素粒子物理学のいろいろな未解決問題を解明するために、小型の反電子ニュートリノ検出器を開発して、原子炉の外側からニュートリノを検出する実験、超伝導電磁石を使って太陽の中心部で発生していると考えられる質量の小さな中性粒子アクシオンを宇宙空間をへだてた地球上で検出する実験のふたつの非加速器素粒子実験を行なっている。志願者は物理学に対する興味と学力だけではなく、実験技術に対する関心をも合わせて持っていることが要求される。
宮下精二	統計力学、物性基礎論、磁性	強く相互作用する系が見せる協力現象の特徴を統計力学的な手法を用いて研究する。量子効果や相互作用の競合(フラストレーション)、ランダム性がなどのよる興味深い相転移・臨界現象の研究や、それぞれの系が示す動的な性質を、非平衡統計力学や量子ダイナミクスの観点から調べていく。‘相互作用系のモデル化と制御’の観点から諸現象の積極的な把握を目指す。
村尾美緒	量子情報(理論)	計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえる。そして、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果を解明することによって、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深めるとともに、エンタングルメントなど量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などへ応用するための理論的研究を行っている。
諸井健夫	素粒子論・宇宙論	素粒子理論・素粒子論の宇宙論
山本 智	宇宙物理学、星間化学、分子分光学	電波、特にサブミリ波を用いて、星形成、分子雲形成、および銀河系の構造について観測的研究を進めている。そのために、富士山頂サブミリ波望遠鏡、18 cm可搬型サブミリ波望遠鏡の開発運用を行うとともに、国立天文台が推進する望遠鏡計画に参加している。特に、中性炭素原子が放つ波長0.6 mmのスペクトル線に着目して、星形成、分子雲形成の理解に新しい角度からアプローチしている。同時に、新しい星間物質を検出する目的で、実験室における分子スペクトルの研究も行っている。

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
横山将志	素粒子物理学実験	<p>加速器を用いた素粒子実験。クォーク・レプトンのフレーバー構造や質量起源の探索。現在は特にJ-PARC加速器とスーパーカミオカンデを使ったニュートリノ振動実験(T2K)でのニュートリノのフレーバー構造の精密決定、さらにその後のレプトンセクターでのCP非保存の研究を目指している。前置ニュートリノ検出器でのニュートリノ反応の研究や、検出器アップグレードの検討を行う。将来の実験計画の立案、光検出器等を中心とした新型の粒子検出器の開発も継続的に行う。</p>
吉田直紀	宇宙物理学	<p>専門は数値宇宙論。大規模なコンピューターシミュレーションを用いて星や銀河、ブラックホールの形成を明らかにすることを目指している。暗黒物質の素粒子的性質と宇宙の構造形成とは深く関わっている。様々な理論モデルに対してコンピューターシミュレーションにより定量的な予言を与え、豊富な観測データとの比較によって暗黒物質や暗黒エネルギーの正体に迫る。</p> <p>新たな計算手法の開発やマルチスケール・マルチフィジクスのシミュレーション、超高速計算にも取り組んでいる。</p>

以上 39名

2014年度 学部時間割

2年冬学期

	1限	2限	3限	4限	5限
月		電磁気学 I	解析力学・量子力学 I		
火					
水		物理実験学	物理学演習 II		
木		物理数学 I・物理数学 II		物理学演習 I	
金					

3年夏学期

	1限	2限	3限	4限	5限
月		電磁気学 II	物理学実験 I		
火	応用数学 XC	量子力学 II	物理学演習 III		
水		現代実験物理学 I	物理学実験 I		
木		流体力学	物理学実験 I		
金		統計力学 I	物理学演習 IV		

3年冬学期

	1限	2限	3限	4限	5限
月		物理数学 III	物理学実験 II		
火	解析学 XC	量子力学 III	物理学ゼミナール	物理学演習 V	
水	固体物理学 I	現代実験物理学 II	物理学実験 II		
木		電磁気学 III	物理学実験 II		
金	生物物理学	統計力学 II	物理学演習 VI		

4年夏学期

	1限	2限	3限	4限	5限
月		場の量子論 I	サブアトム物理学	統計力学特論	
火	応用数学 XC	一般相対論	特別実験 I / 理論演習 I		
水	宇宙物理学	プラズマ物理学	特別実験 I / 理論演習 I		
木		固体物理学 II	特別実験 I / 理論演習 I		
金		量子光学	計算モデル論	生物物理学特論	

4年冬学期

	1限	2限	3限	4限	5限
月	系外惑星	化学物理学	素粒子物理学	場の量子論 II/連続系アルゴリズム	
火	解析学 XC	原子核物理学	特別実験 II / 理論演習 II		
水		固体物理学 III	特別実験 II / 理論演習 II		
木		電子回路論	特別実験 II / 理論演習 II		
金		現代物理学入門	先端物理数学		

2013年度に行われた講義の概要

学部講義概要

1 2年生 冬学期

1.1 電磁気学 I : 駒宮幸男

- | | |
|------------|-----------------------|
| 1. 特殊相対性理論 | 5. 電磁誘導と Maxwell の方程式 |
| 2. 相対論的運動学 | 6. 電磁場中での荷電粒子の運動方程式 |
| 3. 電場 | 7. 準定常電磁場と交流理論 |
| 4. 磁場 | 8. 相対論的な電磁気学の形式 |

1.2 解析力学/量子力学 I : 吉田直紀, 村尾美緒

- | | |
|-------------------------|----------------------|
| 1. 解析力学 | 2. 量子力学 I |
| 1.1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ | 2.1 量子力学の導入と波動関数 |
| 1.2 ラグランジュ方程式とその応用 | 2.2 シュレディンガー方程式と定常状態 |
| 1.3 最小作用の原理 | 2.3 矩形ポテンシャルとトンネル効果 |
| 1.4 対称性と保存則 | 2.4 調和振動子と不確定性原理 |
| 1.5 ハミルトン形式と正準変換 | 2.5 ヒルベルト空間と状態ベクトル |
| 1.6 ハミルトン-ヤコビの偏微分方程式 | 2.6 ハミルトニアン動力学と量子測定 |

1.3 物理実験学 : 藤森 淳, 酒井 広文

- | | |
|---|---|
| 1. 序論 (物理実験の魅力) | 3.2 放射線の計測
放射線の基礎、放射線と物質の相互作用、放射線検出器 |
| 2. 単位 | 4. 実験の基礎技術 |
| 2.1 SI 基本単位の定義 | 4.1 実験環境技術
真空、低温、磁場、強電場 |
| 2.2 代表的な物理量の単位 | 4.2 試料作製技術 |
| 2.3 各種の常用単位系とその変換 | 5. 誤差論
実験誤差、確率統計、最小二乗法 |
| 3. 各種の計測法 | 6. 実験レポートや論文を書く上での注意事項 |
| 3.1 レーザーの基礎と光の計測
出力の測定、パルス幅の測定、超高速ストリークカメラ、強度相関法 | |

1.4 物理数学 I : 小形正男

- | | |
|----------------|---------------------|
| 1. 複素関数 | 1.2 複素関数と Riemann 面 |
| 1.1 物理学における複素数 | 1.3 初等関数と収束半径 |

2. 複素関数の微分と正則性

- 2.1 複素微分
- 2.2 Cauchy-Riemann の関係式
- 2.3 調和関数

3. Cauchy の積分公式とその応用

- 3.1 複素積分の定義と Cauchy の積分定理
- 3.2 主値積分
- 3.3 Cauchy の積分公式と Taylor 展開
- 3.4 Laurent 展開
- 3.5 解析接続

1.5 物理数学 II : 立川 裕二

1. 偏微分方程式とフーリエ変換

- 1.1 偏微分方程式
- 1.2 熱伝導方程式
- 1.3 波動方程式
- 1.4 ポアソン方程式
- 1.5 ラプラシアンと特殊関数

2. 特殊関数

- 2.1 直交関数系 / 直交多項式としての特殊関数

4. 等角写像

- 4.1 正則関数と等角 (共形) 写像
- 4.2 共形変換の応用

5. Γ 関数

- 5.1 Γ 関数
- 5.2 鞍点法
- 5.3 Γ 関数の無限乗積表示と Hankel 表示
- 5.4 Stirling の公式
- 5.5 ζ 関数

2 3年生 夏学期

2.1 電磁気学 II : 島野 亮

1. 電磁場の基本法則

- 1.1 真空中の Maxwell 方程式
- 1.2 微視場と巨視場
- 1.3 分極と磁化
- 1.4 連続媒体 (物質) 中の Maxwell 方程式
- 1.5 電磁場とポテンシャル

2. 静電場

- 2.1 静電場の方程式
- 2.2 境界値問題とグリーン関数の方法
- 2.3 極座標における境界値問題

2.2 量子力学 II : 浜口 幸一

0. はじめに

1. 3次元・球対称ポテンシャル内での粒子

- 1.1 この章でやること

2.4 誘電体

3. 静磁場と定常電流

- 3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則
- 3.2 境界値問題
- 3.3 磁性体

4. 電磁波

- 4.1 真空中と物質中の電磁波
- 4.2 電磁波の伝搬
- 4.3 電磁波の性質
- 4.4 電磁波のエネルギーと運動量

1.2 可換な演算子の固有状態

1.3 角運動量演算子

1.4 角運動量演算子の固有状態

- 1.5 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数
- 1.6 動径方向
- 1.7 水素原子
- A. 運動量 P は並進の生成子、角運動量 L は回転の生成子
 - A.1 P は並進
 - A.2 L は回転
- 2. 角運動量とスピン
 - 2.1 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数

- 2.2 スピン
- 2.3 $s=1/2$ のとき：パウリ行列
- 2.4 スピンと磁気モーメント
- 3. 様々な近似法
 - 3.1 摂動論（定常状態）
 - 3.2 摂動論（時間発展）
 - 3.3 WKB 近似
- 4. 対称性と保存則
- 5. オマケ

2.3 現代実験物理学 I : (前半) 長谷川修司 (後半) 溝川貴司

4 学期の「物理実験学」に引き続いて、主として物性物理学に関連する実験手法について、「物理実験 I」および「物理実験 II」で行う実験を中心に、物理的な原理や歴史的な背景とともに最近の話題も含めて概説する。

- 1. X 線
 - 1.1 X 線の発見
 - 1.2 特性 X 線と連続 X 線
 - 1.3 Moseley の法則
 - 1.4 Thomson 散乱と Compton 散乱
 - 1.5 X 線回折結晶学
 - 1.6 X 線研究の拡がり
 - 1.7 CT
 - 1.8 リソグラフィ
 - 1.9 宇宙 X 線
- 2. 電子
 - 2.1 粒子性と波動性
 - 2.2 電子回折と顕微鏡
 - 2.3 Aharonov-Bohm 効果
 - 2.4 トンネル効果と走査トンネル顕微鏡
- 3. 多様な実験手法

- 3.1 顕微鏡
- 3.2 分光法
- 3.3 伝導
- 4. 低温を利用する実験手法
 - 4.1 低温技術
 - 4.2 超流動
 - 4.3 超伝導
- 5. 磁場を利用する実験手法
 - 5.1 磁場の発生
 - 5.2 SQUID と MEG
 - 5.3 NMR と MRI
- 6. 電磁波を利用する実験手法
 - 6.1 光源技術
 - 6.2 ポンプ・プローブ分光
 - 6.3 X 線散乱
- 7. 粒子線を利用する実験手法
 - 7.1 電子線散乱
 - 7.2 光電子分光
 - 7.3 中性子散乱
 - 7.4 μ SR

2.4 統計力学 I : 佐野 雅己

- 1. 熱力学再考
 - 1.1 熱力学第二法則
 - 1.2 熱力学関数と変分原理
- 2. 統計力学の基礎と適用
 - 2.1 統計力学の原理
 - 2.2 ミクロカノニカル分布
 - 2.3 カノニカル分布
 - 2.4 グランドカノニカル分布
 - 2.5 理想気体 (単原子分子、2 原子分子)

- 2.6 物性への適用 (磁性、固体の比熱、高分子鎖とゴム弾性、生物物理)
- 3. 量子統計力学
 - 3.1 量子統計の考え方
 - 3.2 理想フェルミ気体
 - 3.3 理想ボース気体
 - 3.4 縮退したフェルミ気体
 - 3.5 量子統計の適用 (固体の比熱、黒体放射)
 - 3.7 ボース・アインシュタイン凝縮

3 3年生 冬学期

3.1 物理数学 III : 松尾 泰

1. 群論

- 1.1 物理学と対称性
- 1.2 基礎概念
- 1.3 指標とその直交性
- 1.4 点群
- 1.5 分子振動への応用
- 1.6 同一粒子の取り扱い

1.7 リー群とリー代数

2. 微分形式

- 2.1 外積代数
- 2.2 微分形式とその基本的な性質
- 2.3 ベクトル解析との関係
- 2.4 電磁気学への応用
- 2.5 積分定理

3.2 量子力学 III: 福嶋健二

1. 多体系の量子論

- 1.1 同種 2 粒子系
- 1.2 同種多粒子系
- 1.3 第二量子化
- 1.4 Hartree-Fock 近似
- 1.5 電磁場との相互作用

2.2 中心力ポテンシャルと部分波展開

- 2.3 Lippmann-Schwinger 方程式と Born 近似
- 2.4 Eikonal 近似
- 2.5 光子の吸収・放出

2. 散乱問題

- 2.1 波束とポテンシャル散乱

2. 非平衡場の量子論入門

- 2.1 Wigner 関数の性質
- 2.2 Schwinger-Keldysh 形式

3.3 固体物理学 I : 岡本 徹

1. 原子構造

- 1.1 水素原子
- 1.2 多原子分子
- 1.3 イオン化エネルギー

5.2 ポテンシャルが小さい場合

- 5.3 エネルギーバンド
- 5.4 束縛が強い場合

2. 結晶の結合力

- 2.1 イオン結合
- 2.2 共有結合
- 2.3 金属結合
- 2.4 ファンデルワールス結合

6. 電子の運動

- 6.1 電子の速度
- 6.2 運動方程式
- 6.3 有効質量
- 6.4 磁場中の運動

3. 結晶構造

- 3.1 空間格子と単位胞
- 3.2 空間格子の分類
- 3.3 代表的な結晶構造

7. 金属中の伝導電子

- 7.1 比熱
- 7.2 電気伝導と散乱機構
- 7.3 ボルツマン方程式と輸送係数

4. 逆格子

- 4.1 逆格子の求め方
- 4.2 X線回折
- 4.3 ブリルアン域

8. 半導体

- 8.1 電子と正孔
- 8.2 不純物ドーピング
- 8.3 pn 接合
- 8.4 量子ホール効果
- 8.5 メゾスコピック系

5. 結晶中の電子

- 5.1 ブロッドホ状態

3.4 現代実験物理学 II : 安東正樹, 中澤知洋

1. 素粒子・原子核実験の方法論
2. 単位系とスケール
 - 2.1 自然単位系
 - 2.2 エネルギーと距離のスケール
3. 相対論的運動学
 - 3.1 相対論的エネルギー・運動量
 - 3.2 粒子の生成, 崩壊
4. 反応断面積と遷移確率
 - 4.1 反応断面積
 - 4.2 Fermi's golden rule
 - 4.3 ラザフォード散乱
 - 4.4 形状因子
5. 粒子加速器
 - 5.1 静電加速器
 - 5.2 線形加速器
 - 5.3 サイクロトロン
 - 5.4 シンクロトロン
6. 宇宙物理実験概要
 - 6.1 宇宙物理実験学イントロダクション
 - 6.2 現代の宇宙物理実験
7. 荷電粒子・光子の相互作用と検出器
 - 7.1 粒子と光子の検出の基礎
 - 7.2 荷電粒子と物質の相互作用
 - 7.3 高エネルギー荷電粒子の検出器
 - 7.4 光子と物質の相互作用
 - 7.5 高エネルギー光子の検出器
8. 実験データの統計学
 - 8.1 イントロダクション
 - 8.2 実験データの扱いの基礎
 - 8.3 重要な統計分布
 - 8.4 統計モデルの応用
 - 8.5 誤差の伝搬
 - 8.6 パラメータ推定
 - 8.7 モンテカルロ法
 - 8.8 確率論と誤差の基礎的な考え方

3.5 電磁気学 III : 櫻井博儀

1. 電磁波の基礎
 - 1.1 真空中の電磁場
 - 1.2 電磁波のスペクトル
2. 電磁波の伝播
 - 2.1 物質中の電磁波
 - 2.2 分散
 - 2.3 反射と屈折
 - 2.4 導波管
 - 2.5 空洞共振器
3. 電磁波の放射
 - 3.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
 - 3.2 遅延ポテンシャルの多重極展開
4. 荷電粒子の出す電磁波
 - 4.1 リエナール-ヴィーヘルトのポテンシャル
 - 4.2 運動する荷電粒子の作る電磁場
 - 4.3 制動放射
 - 4.4 点電荷による電磁波の散乱
 - 4.5 チェレンコフ放射

3.6 生物物理学 : 樋口秀男、能瀬聡直

生物物理学は物理学的な観点や手法を用い、生命現象の基本原則を究明することを目指す研究領域であり、その対象は、蛋白質や核酸などの分子レベルから脳・神経系の機能などの高次の生命現象まで多岐にわたっている。本講義では、その基礎的な概念、手法を解説するとともに、最近のトピックスについても紹介する。以下のような内容を予定している。

1. 生物物理学とは
2. 遺伝情報の流れ
3. 蛋白質の構造と機能
4. 細胞内タンパク質のダイナミクス
5. 遺伝子操作技術
6. ゲノム科学とバイオインフォマティクス
7. バイオイメーjing、生体分子計測
8. 脳・神経系の生物物理

3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

- 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
- 1.2 二次相転移と Ginzburg-Landau 理論
- 1.3 相転移における臨界指数と空間次元

2. 同種粒子系の統計力学

- 2.1 有限温度における Fermi 気体

- 2.2 有限温度における Bose 気体

- 2.3 多体問題と平均場近似

- 2.4 Bose-Einstein 凝縮と超伝導

3. 非平衡統計力学への序論

- 3.1 輸送現象と Boltzmann 方程式

- 3.2 線形応答理論

4 4年生 夏学期

4.1 場の量子論 I : 諸井 健夫

1. 相対論的量子力学

- 1.1 Klein-Gordon 方程式
- 1.2 Dirac 方程式
- 1.3 対称性と保存量 : Noether の定理

2. 場の量子化

- 2.1 Klein-Gordon 場の量子化
- 2.2 Dirac 場の量子化
- 2.3 電磁場の量子化

4.2 サブアトム物理学 : 早野龍五

学部・大学院共通講義として新設されたこの講義は、原子核物理学と素粒子物理学の入門として位置づけられる。

1. 原子核の大局的性質

- 1.1 原子核の安定性
- 1.2 原子核による電子の散乱
- 1.3 原子核の形状
- 1.4 準弾性散乱

2. 核子の性質

- 2.1 核子による電子散乱

- 2.2 核子の深部非弾性散乱

3. 標準模型

- 3.1 クォーク, グルオンと強い相互作用

- 3.2 弱い相互作用の現象論

4. サブアトム物理学の研究手段

- 4.1 加速器
- 4.2 放射線と物質の相互作用
- 4.3 放射線検出器

4.3 統計力学特論 : 宮下 精二

1. 相転移と臨界現象

2. 平均場理論

3. くりこみ群とスケーリング

4. 厳密解

5. いろいろなタイプの相転移

6. 非平衡現象

4.4 宇宙物理学: 牧島 一夫

1. 宇宙を理解する基礎

- 1.1 多体系と自己重力系

- 1.2 電磁放射

2. 星とその物理学

- 2.1 自己重力系としての星
- 2.2 星の力学と熱力学
- 2.3 星内部の原子核反応
- 2.4 星の進化と終末
- 3. フェルミオンの縮退圧で支えられた星
 - 3.1 電子縮退と白色わい星
 - 3.2 核子縮退と中性子星

- 4. ビッグバン宇宙論
 - 4.1 膨張宇宙の記述
 - 4.2 宇宙論パラメータと暗黒エネルギー
 - 4.3 宇宙の誕生と初期進化
 - 4.4 宇宙初期の素粒子と、軽元素の合成
 - 4.5 宇宙の「晴れ上がり」と天体形成

4.5 固体物理学II :高木英典

- 1. 金属と半導体（復習）
 - [1.1] バンド構造
 - [1.2] 金属のフェルミ面
- 2. 格子振動
 - [2.1] フォノン
 - [2.3] デバイ模型
 - [2.3] 比熱と熱伝導
- 3. 電子相関と磁性
 - [3.1] 電子相関
 - [3.2] 反磁性と常磁性
 - [3.3] 磁気秩序
 - [3.4] 磁気デバイス
- 4. 超伝導
 - [4.1] 超伝導現象概観
 - [4.2] 電子格子相互作用とクーパー対
 - [4.3] BCS理論
 - [4.4] 量子磁束
- 3. 低次元電子系の量子現象
 - [5.1] 量子ホール効果
 - [5.3] 電荷密度波

4.6 量子光学：五神 真

- 1. 光と物質
 - 1.1 媒質中の電磁波
 - 1.2 2準位原子と光の相互作用
 - 1.3 非線形光学とレーザー
- 2. 光の量子論
 - 2.1 輻射場の量子性
 - 2.2 輻射場の量子状態
 - 2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

4.7 生物物理学特論：豊島近、新井宗仁、樋口秀男

- 1. 蛋白質の生物物理学
 - 1.1 生体内のタンパク質機能とは。
 - 1.2 蛋白質や生体膜とはどのようなものか。そこで働いている原理は何か。
 - 1.3 蛋白質はイオンをどのように見分け、使い分けるか
 - 1.4 蛋白質はどのようにして反応を触媒するか。 — 酵素反応の構造生物学
 - 1.5 蛋白質はエネルギーをどのように変換し、利用するか
 - 1.6 蛋白質はどのようにして立体構造を形成する
 - 1.7 蛋白質の構造と機能を予測する
 - 1.8 蛋白質のダイナミクスと機能発現
 - 1.9 蛋白質と病気の関わり
 - 1.10 蛋白質の進化とデザイン
 - 1.11 蛋白質 1 分子の機能をいかに測定し、理解するか。
 - 1.12 細胞内蛋白質機能をイメージングしてわかること。
 - 1.13 個体内蛋白質の役割の多様性

5 4年生 冬学期

5.1 化学物理学：山本 智

1. 原子の電子構造とスペクトル

- 1.1 水素原子と水素様原子
- 1.2 多電子系 1：ヘリウム原子
- 1.3 多電子系 2：ハートリー・フォック法による取扱い
- 1.4 組立の原理
- 1.5 スピン軌道相互作用、LS 結合、jj 結合

1.6 原子スペクトル

2. 分子の対称性と群論

- 2.1 点群の分類
- 2.2 対称操作の行列表現
- 2.3 既約表現と可約表現
- 2.4 指標表による表現の簡約
- 2.5 直積の表現
- 2.6 群論の応用例

3. 分子の電子構造

- 3.1 核と電子の運動の分離

3.2 原子価結合法と分子軌道法

- 3.3 二原子分子の電子状態
- 3.4 非経験的分子軌道法計算
- 3.5 配置間相互作用
- 3.6 近似的分子軌道法
- 3.7 分子軌道と化学反応

4. 分子スペクトルの概要

- 4.1 回転スペクトル
- 4.2 振動スペクトル
- 4.3 電子スペクトル
- 4.4 光解離、前期解離、光イオン化

5. 分子間相互作用

- 5.1 配光力、誘起力
- 5.2 分散力
- 5.3 分子間力の現れ
- 5.3 ファン・デル・ワールス分子とクラスター
- 5.4 分子間力と化学反応

5.2 素粒子物理学 I：浅井祥仁

1. 単位系、概論

2. クォークモデル

3. Dirac 方程式：反物質、スピン

4. 反応の運動学

5. 不連続対称性

6. 連続対称性

7. ゲージ原理

8. ?電磁相互作用

9. ?弱い相互作用

10. 隠れた対称性とヒッグス機構

5.3 原子核物理学：大塚孝治

1. 原子核のスケールと単位

2. 原子核の大きさや密度

3. 原子核の質量と結合エネルギー

4. フェルミガス模型

5. 平均ポテンシャル

6. 調和振動子ポテンシャル

7. 殻構造

8. シェルモデル、アイソスピンと核力

9. 原子核の形

10. 原子核の崩壊と放射線

11. エキゾチックな原子核

5.4 物性物理学特論：長谷川修司、小森文夫

1. 概論 —ナノサイエンス・ナノテクと表面—

2. 表面構造

- 2.1 表面超構造と相転移
- 2.2 回折法
- 2.3 顕微鏡法
- 2.4 動的過程
- 3. 表面電子状態
 - 3.1 表面電子状態・トポロジカル表面状態
 - 3.2 (逆) 光電子分光法
 - 3.3 トンネル分光法
 - 3.4 光電子分光によるバンド分散・原子結合状態測定
 - 3.5 時間分解測定
- 4. 走査トンネル顕微鏡
 - 4.1 走査トンネル顕微鏡の原理
 - 4.2 表面原子構造観察

- 4.3 局所電子状態測定
- 4.4 表面バンドの観測
- 4.5 表面電子定在波
- 4.6 原子マニピュレーション
- 5. 表面電子輸送
 - 5.1 表面空間電荷層の2次元電子系
 - 5.2 表面電子バンドの2、1次元電子系
 - 5.3 表面スピン輸送
- 6. 表面超薄膜磁性
 - 6.1 磁気モーメントと相転移
 - 6.2 強磁性超薄膜
 - 6.3 表面ナノ強磁性体
 - 6.4 スピンドYNAMIX

5.5 電子回路論：福山 寛，横山 将志

- 1. 線型応答システム
 - 1.1 フーリエ変換
 - 1.2 インパルス応答
 - 1.3 ステップ応答
 - 1.4 伝達関数
- 2. 基礎的な電子素子と回路
 - 2.1 半導体の基礎
 - 2.2 ダイオード
 - 2.3 トランジスタ
 - 2.4 オペアンプと増幅器
- 3. 回路の安定性
 - 3.1 フィードバック制御
 - 3.2 ボーデ線図
 - 3.3 ナイキストの安定条件
- 4. デジタル信号処理
 - 4.1 デジタル信号の基礎
 - 4.2 サンプリングとデジタル化
 - 4.3 アンチエイリアシング
 - 4.4 D/A 変換と A/D 変換
 - 4.5 FFT
 - 4.6 デジタルフィルター
- 5. 回路の設計
 - 5.1 回路設計論
 - 5.2 現実の回路の等価回路
 - 5.3 プログラマブルデバイス

5.6 現代物理学入門：安東正樹・福嶋健二

- 1. 重力波天文学（担当：安東）
 - 1.1 相対論と重力波
 - 1.2 重力波源と観測
 - 1.3 観測手法とレーザー干渉計
 - 1.4 感度と要素技術・制御
 - 1.5 観測とデータ解析
 - 1.6 観測・解析結果 1
 - 1.7 観測・解析結果 2
- 2. ハドロン物理学（担当：福嶋）
 - 2.1 ハドロン物理：クォークとグルーオン
 - 2.2 物質と質量の起源：カラー閉じ込めとカイラル対称性
 - 2.3 高温物質：カイラル対称性の回復と相転移の理論
 - 2.4 人類の作った最も熱い物質：クォーク・グルーオン・プラズマ
 - 2.5 高密度物質：中性子星の諸問題
 - 2.6 理論が導く高密度極限：カラー超伝導
 - 2.7 「強い相互作用」の未解決問題

各研究室の研究活動内容

相原・横山研究室

相原 博昭 教授 横山 将志 准教授 小貫 良行 助教 Denis Epifanov 特任助教

当研究室の専門は、素粒子物理学を実験的に研究する高エネルギー物理学である。高エネルギー加速器研究機構 (KEK) のスーパー B ファクトリーを使った実験、および、大強度陽子加速器 (J-PARC) とスーパーカミオカンデを使ったニュートリノ振動実験を推進している。さらに、すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究や、次世代の大型水チェレンコフ検出器であるハイパーカミオカンデ計画を推進している。これら世界最先端の実験設備を使って、自分たちの手で素粒子や宇宙の謎を実験的に解き明かすことを目指している。

1 スーパー B ファクトリーでの物理

素粒子物理学は、物質の究極の構成要素である素粒子の探究とその反応メカニズムの解明を目指している。当研究室は、素粒子反応が持つ対称性に着目して、究極の物理法則の姿を明らかにしようとしている。すべての粒子には、電荷が逆の反粒子が存在する。たとえば、電子には陽電子、陽子には反陽子が存在する。これら粒子と反粒子は、電荷が逆であること以外、量子力学的に全く同じ性質を持っている。これを CP 対称性と呼ぶが、素粒子に働く「弱い力」と呼ばれる力では、その対称性がわずかに破れていることが知られている。

当研究室は、CP 対称性の破れの起源を説明する理論として提唱された小林益川理論を、最先端加速器 B ファクトリーを使って検証した。小林益川理論は 2008 年ノーベル物理学賞に輝いたが、当研究室では、さらにその先を見据え、次世代加速器スーパー B ファクトリーを使って、超対称性理論など現在の素粒子理論の先にある、より根源的な素粒子物理の解明を目指した実験を遂行しようと

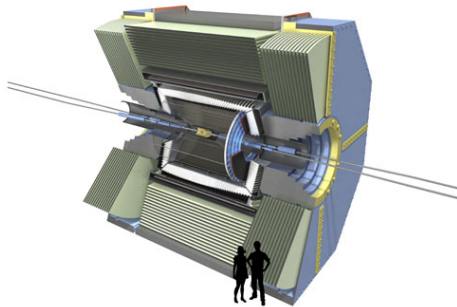


図 1. Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図。

している。Belle II (ベルツー) と呼ばれるこの実験に向けて、現在加速器と測定装置の大幅な改良作業を行っている (図 1, 2)。

また、B ファクトリーは τ レプトンを大量に生産する τ ファクトリーでもある。荷電レプトンの稀崩壊は、新物理を探索するための有力な手段の一つであると考えられている。当研究室では、 τ レプトンの研究によっても新物理を探求している。

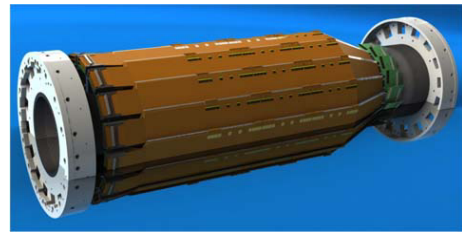


図 2. 当研究室で製作する、Belle II 測定装置心臓部の半導体粒子検出器の完成予想図。

2 ニュートリノビームを使った物理

J-PARC 加速器では、電荷を持たない、クォークとは別種の素粒子である「ニュートリノ」の実験を行っている。ニュートリノは、既知の素粒子のうちでその性質が最も調べられていないものの一つであり、現在の素粒子理論を越えた物理の手がかりを秘めていると考えられている。J-PARC で作ったニュートリノのビームを、約 300km 離れた岐阜県の神岡にあるニュートリノ検出器 (スーパーカミオカンデ) に打ち込み、ニュートリノが飛んで行く間に別の種類のニュートリノに変わる様子 (ニュートリノ振動) を観測する。T2K 実験と呼ばれるこの実験で、我々はこれまで確認されていなかった種類のニュートリノ振動を発見した (図 3)。

また、クォークと同じようにニュートリノでも CP 対称性が破れていることが予想されている。もしこの予想が正しければ、ニュートリノは、ビッグバンから始まった宇宙における物質創成の歴史、すなわち、宇宙の進化において重要な役割を果たした可能性がある。ニュートリノ振動実験は、ニュートリノと宇宙進化の関わりを解明するための実験でもある。今後、T2K 実験では反ニュートリノビームでの測定を行うことで、ニュートリノの CP 対称性の破れを探索する。しかし、CP 対称性の破れ

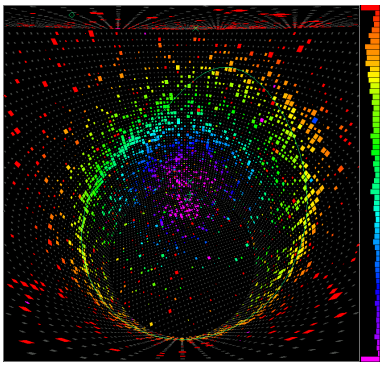


図 3. スーパーカミオカンデ検出器でとらえた、加速器ニュートリノビームによるニュートリノ反応事象。粒子が放つチェレンコフ光がリング状に見えている。

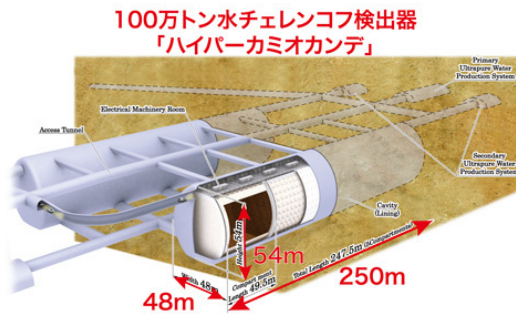


図 4. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。縦横約 50m，長さ約 250m のタンク 2 つに計 100 万トンの超純水を満たす。

を確実に測定するためには、さらに高統計・高精度の実験を行う必要がある。当研究室では、次世代実験のための装置として、現行のスーパーカミオカンデの約 20 倍の大きさを持つハイパーカミオカンデ検出器（図 4）を実現させるべく研究を行っている。ハイパーカミオカンデ検出器は、素粒子の大統一理論で予測されている陽子崩壊の探索や、超新星からのニュートリノ検出なども世界最高感度で行うことのできる、宇宙と素粒子の分野にわたる幅広い研究を行うための実験装置である。

3 すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究

近年の宇宙論観測は、宇宙の約 23%と 73%は、それぞれダークマターとダークエネルギーによって占められていて、物質はわずか 4%を占めるのみであり、かつ、宇宙は現在、加速膨張しているという驚くべき発見をもたらした。通常物質や輻射（光）だけが存在している宇宙では、宇宙の膨張は減速する一方である。膨張を加速させるためには、重力とは異なり、宇宙全体に対して斥力として働

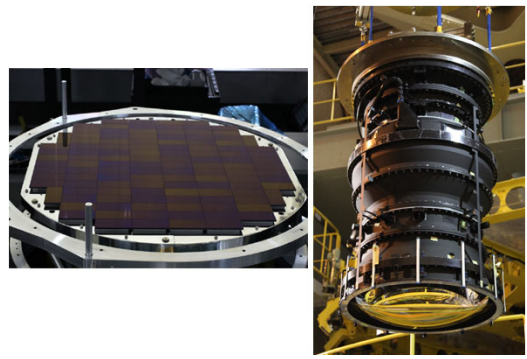


図 5. 完成した 928 メガピクセル CCD カメラ（左）。現在はすばる望遠鏡に取付けられている（右）。

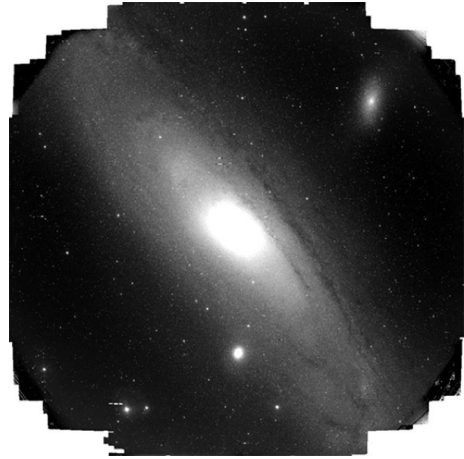


図 6. 試験観測で得られたアンドロメダ銀河 M31 の画像。拡大すると、230 万光年かなたの M31 の星々が一個々々分離して見分けられる。

く存在が必要であり、これがダークエネルギーである。ダークエネルギーは、アインシュタインの一般相対論に取って代わる新たな物理法則の存在を意味しているかもしれない。ダークエネルギーの研究は、時空の構造とその究極の構成要素を探求する素粒子物理学のメインテーマとなりつつある。

この不思議なエネルギー、ダークエネルギーの研究は、現在のところ加速器実験では不可能で、天文観測によって行う必要がある。当研究室では、重力レンズと呼ばれる天体現象を、世界最大級の望遠鏡である すばる望遠鏡 を使って測定することで、ダークエネルギーの正体に迫る。すばる望遠鏡に搭載した 928 メガピクセル CCD カメラ（図 5）は、平成 24 年 8 月にファーストライトに成功した（図 6）。素粒子物理と宇宙論と呼ばれる宇宙の進化を研究する分野との関わりはますます深くなってきた。今後、この学際的分野をおおいに発展させていきたい。

1. 物性物理学理論、特に多体効果とは？

Powers of Ten という本を見たことがあるだろうか。超銀河団から始まり、十倍ずつ拡大して見てゆき、クォークに至る、という本であるが、その中心をなす十数ページを舞台としているのが物性物理学である。そこでは巨視的な系の性質を微視的な基本原理から理解したり、新奇な現象を予言したりする。主役は電子であり、電子がクーロン斥力のために強く相互作用しているために発生するとんでもなく面白い現象（**電子相関効果**）が1980年代から続々と発見された — 高温超伝導、分数量子ホール効果が代表である。

2. 超伝導の理論

「ゲージ対称性」が破れた巨視的量子現象である超伝導（2008年ノーベル賞の南部理論も、超伝導における対称性の自発的破れに導かれた）は物理学で最も興味深い現象の一つである。特に高温超伝導体では、電子間斥力から超伝導が発生する。青木研究室では、この**電子機構超伝導**の基礎理論から始まり、発生する温度を高める（究極的には室温超伝導！）にはどうしたら良いか、といった予想まで試みている。2008年には鉄の化合物である新高温超伝導体（図1）、2010年には芳香族としては初めての有機超伝導が共に日本で発見されたが、青木研究室ではこれらの超伝導に対する世界に先駆けた理論を構築した。最近では超固体という、複数の秩序が共存する相も調べている。

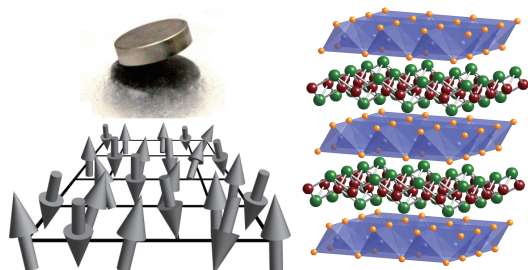


図1. 左：高温超伝導体が「ゲージ対称性の破れ」のために磁気浮上している様子と、高温超伝導体の理論的模型、矢印は電子スピン。右：最近我国で発見された鉄化合物高温超伝導体の結晶構造。

3. トポロジカル系

トポロジカル系というのは耳慣れないだろうが、元祖は量子ホール効果で、2次元空間を走る電子に強磁場をかけた系で起きる（1985年ノーベル賞；現在は抵抗標準に使用）。その後、さらに奇妙な分数量子ホール効果が発見され、超伝導・超流動とは別のゲージ対称性破れが起きている（1998年ノーベル賞）。さらに最近では、**グラフェン**（炭素原子一層からなる物質；2010年のノーベル賞）も新たなトポロジカル系である。青木研究室では、量子ホール効果の初期から最近のグラフェンまで主要テーマの一つとしている。

3. 物質設計・非平衡

「面白い物質で面白い物理現象」ということを開拓するための**物質設計**も目指している。超伝導や強磁性も含め、基礎理論と現実物質（無機および有機）という両輪からの設計を深めている。さらに、最近では、様々な系における新奇な**非平衡現象**（図2）も調べている。詳しいことに興味がある諸君は、別冊数理科学「場の理論」、別冊数理科学「現代物理の展開—発見と創造のドラマ」（以上サイエンス社）、「ボース・アインシュタイン凝縮から高温超伝導へ」（日本評論社）、「超伝導入門」（裳華房）などを参照。

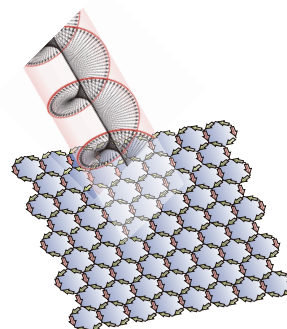


図2. 非平衡効果の一つとして、グラフェン（炭素の蜂の巣格子）に円偏光した強いレーザーを照射すると、直流のホール電流が予言される。

浅井研究室

浅井祥仁 教授 石田明 助教

1 研究の背景

この研究室は、素粒子研究をエネルギーフロンティア加速器と小型テーブルトップ実験の両側から研究を行うユニークな研究室です。

2 最近の研究テーマ

(A) ヒッグス粒子の発見： 世界最高エネルギー LHC での素粒子研究;

2012年7月についてヒッグス粒子が発見された。この研究に東京大学素粒子物理国際研究センターと当研究室はこの重要な成果をあげてきている。ヒッグス粒子の発見は、真空はカラではなく、特殊な状態(ヒッグス場に満ちている)にあることの初めての実験的な検証である。ヒッグス場は、素粒子の質量の起源のみならず、その変化(真空の相転移)が宇宙の進化をもたらしたと考えられており、素粒子の研究を通して宇宙誕生の謎にせまる。これからヒッグス粒子や真空の研究が重要になってくる。

LHC(Large Hadron Collider) 実験は、ジュネーブ郊外にある円周 27km の大型加速器(写真)であり 2015 年より重心系エネルギー 14TeV の世界最高エネルギーで素粒子実験が再開される。ヒッグス粒子の発見は、新しい原理が背後にあることを示唆している。その最有力候補が超対称性である。超対称性粒子は宇宙の暗黒物質の有力候補でありその発見は宇宙の進化を理解する上でも、また超対称性は時空の構造に密接に結びついた本質的な対称性であり、重力を場の理論に取り込む上でも不可欠である。この様に素粒子物理ばかりでなく、宇宙など多くの関連分野に大きな影響を与えることが期待されている。この超対称性粒子の探索を LHC で行っている。

(B) 小規模実験(テーブルトップ)での標準理論を超えた素粒子現象の探索; 大きな実験で最先端の素粒子物理を追い求めると同時に、自分の手や頭で「実験する技術や能力」を高める為の小規模な実験を LHC 実験と並んで取り組んでいる。

アクシオンなどの軽い未知の素粒子探索、レプトン世界の CP 破れの探索やポジトロニウム(電子と陽電子で構成される世界で一番軽い原子)を用いた高精度の量子電磁気学の検証、新しい光を



LHC 加速器の写真

使った素粒子実験など幅広く行っている。下の写真は自由電子レーザー(サクラ)である。世界最高強度の光を用いた、光同士の散乱実験を行い、ヒッグスで垣間見た真空の構造を探っている。

本研究室は、「光を用いた新しい素粒子実験」を目指し、SACLA などの高輝度 X 線を用いた実験や、強力なミリ波(THz 波)の光源開発や検出器開発を行っている。



Spring8 と SACLA: 世界最強強度 X 線実験装置

3 今後の展開

LHC でヒッグスが発見され、2015 年には超対称性の発見が期待されている。これらは、ただの新粒子の発見でなく、新しい素粒子研究の時代の幕開けである。真空や時空と言ったいままで入れ物だと思われていたものへ研究対象が広がっていくと思われる。これらのトピックスを、別の角度から研究するテーブルトップ実験も展開していく。

安東研究室

安東 正樹 准教授 麻生 洋一 助教

当研究室では「重力波物理学・相対論実験」の研究を進めている。特に、「重力波天文学」の分野を切り拓くことが現在の中心テーマであり、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の建設、および、重力波の観測技術に関する研究を精力的に進めている。

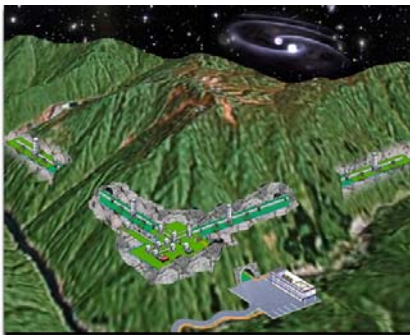
1. 重力波による新しい天文学・物理学

重力波は「時空のさざ波」とも呼ばれ、質量の激しい加速度運動などで生じた時空の歪みが波として空間を伝搬するものである。重力波は、物質に対する強い透過力を持ち、誕生直後の宇宙の姿や、超新星爆発や連星合体などの高エネルギー天体现象の中心部を直接観測することを可能にする。またそれにより、地上の実験で再現することが困難な極限状態（高エネルギー、高密度、強重力場、強磁場）の現象を調べ、物理学のフロンティアを切り拓くことも期待されている。

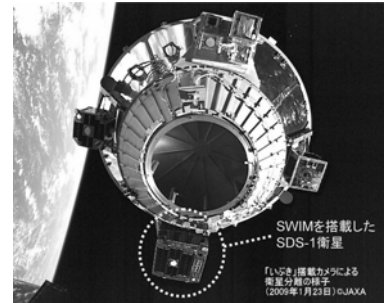
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらすことで、それらに直接迫る手段となる可能性をもっているのである。

2. 重力波天文学の幕あけ

重力波の存在は、一般相対性理論の帰結の1つとして、1916年にアインシュタインによって予言された。また、連星パルサー (PSR1913+16) の公転周期減少を観測することにより、重力波の存在は間接的には証明されている(1993年ノーベル物理学賞 ハルスとテイラー)。しかし、重力波の効果は非常に微弱であり、これまでに重力波の直接



大型低温重力波望遠鏡 KAGRA の概念図。



2009年に打ち上げられた SDS-1 衛星。当研究室開発の超小型重力波望遠鏡 SWIM を搭載していた。

検出に成功した例はない。

現在世界各地では、新しい「重力波天文学」を目指して、高い感度を持つ次世代レーザー干渉計の建設が進められている。日本でも、岐阜県・神岡の地下サイトで、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (かぐら) の建設が進められている。これらの干渉計では、重力波信号の直接観測に十分な感度が実現される見込みであり、本格的な観測が開始される 2017 年頃には、本格的な重力波観測が開始され、「重力波天文学」が幕を開けることが期待されている。

3. 重力波研究のひろがり

重力波望遠鏡では、 10^{-23} 程度の歪み量といった微弱な効果を観測するための極限的な計測技術が用いられており、それ自身が興味深い研究対象にも成り得る。光スクイーミングなどの量子光学的な手法、熱雑音の低減のための冷却技術などを用いることで、高精度の周波数基準、巨視的な物体の量子力学、相対論・重力法則の検証、といった精密計測実験研究への広がりももたらされている。

初期宇宙の直接観測を目指して、将来宇宙に重力波望遠鏡を打ち上げる計画も進められている (欧米の eLISA 計画や日本の DECIGO 計画)。当研究室では、そのための宇宙技術の基礎研究開発も進めており、2009年には、小型の重力波望遠鏡モジュール SWIM の打ち上げと宇宙実証に成功している。

私たちは、重力波の研究や、その観測に必要な先進的な技術の研究開発を通じて、物理学のフロンティアを押し広げたいと考えています。

研究室の HP: <http://granite.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

上田研究室

上田正仁教授 古川俊輔助教

1 研究の背景

近年のナノサイエンスの発展により、原子や分子、光子を量子1個のレベルで精密に測定し、制御することが可能になってきた。当研究室では、このような高い制御性を有する系での量子多体問題の解明と、その基礎となるナノスケールの熱力学・統計力学の構築を目指して理論研究を行っている。

2 最近の研究テーマ

【冷却原子気体】

真空中にトラップされた極低温の原子気体は、原子間相互作用の強さを含むほとんどすべての物質パラメーターを自在に変化させることができる究極の人工量子物質であり、様々な物理現象に共通する普遍的な法則の探究が可能である。例えば、極低温で実現される巨視的量子現象であるボース・アインシュタイン凝縮のダイナミクスには、超新星爆発や宇宙初期の相転移とも類似した現象が現れる。また、原子気体の時間発展を正確に追うことで、孤立系がいかに熱平衡状態に至るかという統計力学の基本的問題を研究することもできる。私たちは冷却原子気体を題材に、様々な量子多体物理の解明を目指して研究に取り組んでいる。

最近の研究では、相互作用が強い極限（いわゆるユニタリティ極限）における原子系の普遍的な性質の解明に取り組んでいる。ユニタリティ極限のフェルミ気体には原子種に依らない普遍的熱力学が観測され、高温超伝導や中性子星との類似性からも興味深い問題を提示している。ユニタリティ極限近傍では自己相似性を持った三体束縛状態であるエフィモフ状態も観測され、くりこみ群の流れが周期性を持ったリミット・サイクルのユニークな具体例としてその普遍性を研究している。また、系の大局的性質を捉えるトポロジーの概念を応用して、凝縮相における渦や単極子の性質の解明や、人工ゲージ場のもとでの量子ホール状態の研究にも取り組んでいる。今後は、様々な対称性を持った超流動や、極低温における化学反応、非可換統計の具現化など様々な分野にまたがる学際的な研究に発展していくものと期待される。

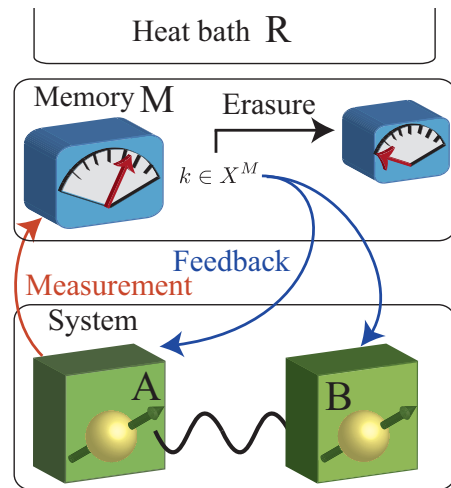
【量子論および統計力学と情報理論の融合】

私たちは情報をキーワードとして量子論や統計力学の基礎づけとなる研究を行い、さらに情報理

論と量子論・統計力学を融合することで新たな学問分野の構築を目指している。最近私たちは、量子力学特有の相関である量子もつれを利用した熱機関の研究に取り組んだ（右下図参照）。測定結果に基づくフィードバック制御を行うことで、古典的相関を利用した熱機関よりも大きな仕事を取り出せることを示した。また、測定やフィードバック制御を伴うもとの揺らぎの定理や熱力学第二法則の一般化、ハイゼンベルグの不確定性関係の情報論的定式化、量子連続測定のもとでの波束収縮のダイナミクスと情報の流れの関係などの研究にも取り組んでいる。これらの研究は、量子揺らぎや測定の反作用が無視できない微小非平衡系の研究の基礎を与えると期待される。他方で、熱力学におけるエントロピー増大則も系の乱雑さの単調増加性として情報論的に捉えられると期待される。私たちは最近、情報論的エントロピーを応用して、エントロピー増大則の統計力学からの基礎づけに取り組んでいる。

3 今後の展開

情報（認識）・数学・生命を含む広い視点から、物理現象の基礎的理解とその普遍性を探究する。



量子もつれを用いた熱機関。もつれ状態にある複合系 AB のうち的一方 A に対して測定を行い、測定結果 k をメモリーに記録する。この測定結果に基づき A、B それぞれにフィードバック操作を施す。測定で得られた情報を利用することで、通常の熱力学第二法則を超えた仕事を系から取り出すことができる。最後にメモリーを消去し、もう一度量子もつれ状態を作ることによって初期状態に戻る。Physical Review A **88**, 052319 (2013) より転載。

大塚研究室

大塚孝治 教授 阿部喬 助教

1 研究の背景

原子の中心には原子核がある。原子核の半径は原子の半径の約 10 万分の 1 で、マイクロな原子よりさらに小さく、原子核は超マイクロな世界となる。原子核の中には物質＝エネルギーがびっしりと詰まっている。原子核は陽子と中性子で構成され、陽子と中性子は総称して「核子」と呼ばれる。核子同士は「核力」と呼ばれる「強い相互作用」によって結合し原子核は量子論的な塊になっている。原子核の中では陽子や中性子がいろいろな軌道の上を動いている。核子は核力のために互いに引っばったり反発したりして、そのため核子は絶えず軌道を変えているが、全体としてはまとまっているちょっと不思議な世界である。このように複数の核子から構成される量子多体システムである原子核の構造、それが引き起こす反応を理論的に研究しているのが我々の研究室である。さらには、核力そのものも、完全には分かっていないので研究の対象である。

2 最近の研究テーマ

地球上に自然にある物質を構成している原子核は安定核と呼ばれ、陽子と中性子の数が大体等しくなっている。陽子と中性子が強い引力で一体となって多体系を構成しているため、安定しており、寿命が無限か非常に長い。

宇宙には陽子と中性子がひどくずれている不安定核というものが存在し、それが、超新星爆発など物質誕生プロセスの謎を解き明かす鍵になっている。不安定核はその名に違わず存在時間が非常に短く、また、陽子数と中性子数のアンバランスに起因する安定核には見られない特異な性質を数多く持っている。その不安定核が持つ性質を解明し、その存在限界をさぐるのが最近の大きな研究テーマである。それには様々な理論手法が用いられる。我々のグループにより、約 20 年前に「モンテカルロ殻模型」という計算手法が提案され、それまでは巨大な計算機を用いても実行不可能とされてきた理論計算が可能になった。モンテカルロ殻模型に基づくシミュレーションにより、ある与えられた陽子数と中性子数の原子核が球形や楕円形になったりすることを示すことができる。その例が下の図に示されており、ニッケル 68 という不

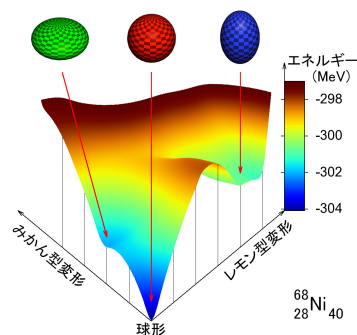
安定原子核がそのエネルギーによって球になったり、楕円になったりするの分かる。

1949 年にメイヤーとイェンゼンが原子核の殻モデルを発表して、「魔法数」について説明した。魔法数とは、陽子や中性子の個数が魔法数 (2,8,20,50 などが安定核の魔法数) になった時に原子核が特別な安定性を得るものである。一方、核力の特徴的な成分であるテンソル力などのために、不安定核の「魔法数」は安定核のものから変わり得る事を我々の研究室で発見した。そのために、上で示した 20 が魔法数でなくなり、16 が取って代わることがある、などを世界で初めて示してきた。

原子核に中性子を加えていくと、それ以上には加えられない限界に達する。この存在限界の解明は原子核物理学の基本課題の一つである。最近、この課題に、3 体力が極めて重要で明瞭な役割を果たしていることを発見した。通常、力は 2 個の間に働くものであり、3 個の間に働く力は珍しく、それが決定的な役割を果たしていることは予想されていなかった。その顕著な例として、酸素原子核の存在範囲が異常に狭いのは何故か、という長年の謎を解決した。

3 今後の展開

不安定核の物理は始まったばかりで、新しい現象やデータが出つつある。様々な理論手法を用い、或いは創りだして、それらを予言したり、解析したりしながら、原子核の真の姿を探り、核力の隠された性質を研究している。



図の説明： 陽子 28 個、中性子 40 個からなる不安定核、ニッケル 68 の形状の理論的予言。3 種類の形が比較的低いエネルギーで出現する。

岡本研究室

岡本 徹 准教授 柘富 龍一 助教

1. はじめに

分子、原子、電子、原子核などのミクロな粒子の性質がわかっているにもかかわらず、その集合状態の諸性質を解明することは容易ではありません。「物性物理学」が対象とするのは、こうしたマクロな物質中に見られる諸現象であり、磁性や超伝導などがなじみ深いかと思えます。私たちの研究室では、半導体に作られた「2次元電子」の集団的振る舞いを研究しています。

2. へき開表面に作られた2次元電子系

これまで、2つのノーベル物理学賞が2次元電子における発見に対して与えられていますが、いずれも半導体デバイスの中に閉じ込められた界面2次元電子系の電気抵抗に関するものでした。これに対して最近私たちの研究室では、極低温・超高真空下でへき開して得られた表面に微量の金属原子を乗せることによって作られる2次元電子系の研究を始めました。界面の2次元系とは対照的に、「表面2次元電子系」には(1)さまざまな種類の原子の乗せることで“いじれる”、(2)マイクロプローブで直接“触れる”、といった楽しみがあります。

右図に表面2次元系で初めて観測された量子ホール効果の実験例を示します。InAsへき開表面に微量の銀を蒸着することによって2次元電子を誘起しました。磁場中におかれた物質に電流を流すと、電流方向だけではなく、電流および磁場に直交する方向に電圧(ホール電圧)が生じます。この現象はホール効果として知られていますが、ホール電圧と電流の比、すなわちホール抵抗が完全に量子化された値(物理定数 h/e^2 を整数または分数で割った値)を示すのが量子ホール効果です。これは、電子の運動エネルギーが強磁場中ではランダウ準位と呼ばれるとびとびの値に量子化されることから生じる、2次元系だけで見られる現象です。

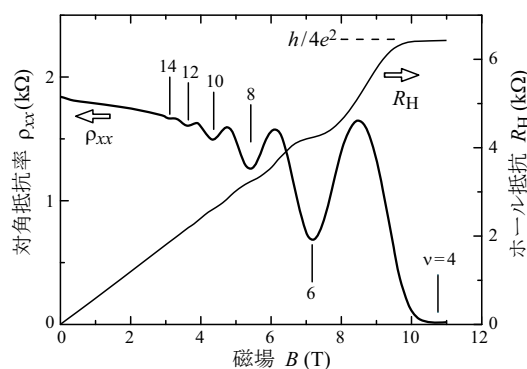
最近では、絶縁体基板のへき開面上に原子一個分程度の厚さの金属薄膜を作り、超伝導・磁性などの研究も行っています。

3. 避けあう電子とスピン

2次元に閉じこめられた電子の間には、クーロン反発力が働いています。電子間クーロンエネルギーは、電子が三角格子状に規則正しく並んだときに最も低くなりますが、量子力学的な波としての性質が強いために問題は単純ではありません。自由に動ける電子気体と三角格子を組んだ固体との中間に相当する液体状態を考える必要があります。ハミルトニアンは簡単にかけるのですが、多体系の固有状態を理論的に求めることは簡単ではなく、実験屋の出番になります。こうした電子間の相互作用が強い系においては、量子統計を通じて電子のスピンが顔を出してきます。

私たちの研究室では、超伝導コイルを用いた強磁場装置を用いて電子状態やスピンを制御し、極低温下における2次元世界の電子の性質を調べています。具体的には、(1)液体-固体の間の相転移と両相におけるスピン状態、(2)分数量子ホール効果、(3)イジング量子ホール強磁性体間の相転移、などに関連した研究を行っています。

詳細およびその他の研究テーマについては <http://dolphin.phys.s.u-tokyo.ac.jp> をご覧ください。



InAs 劈開表面で観測された量子ホール効果

小形研究室

小形正男教授 松浦弘泰助教

小形研究室では、物性物理学に関する理論的研究を行っている。

マクロ又はメゾ的なスケールで原子や電子が集まった場合には、単なるシュレディンガー方程式では記述できないような振る舞いをする。たとえば相転移現象や巨視的な量子コヒーレンス状態の実現などである。物性物理学、または凝縮系物理学と呼ばれる分野は、この複雑かつ多様な物理現象を追求するということに興味の根源がある。物質という日常的なものの中に、いろいろな可能性が含まれており、実験によって検証できる奇妙な(予想外な)現象をミクロに理解することを通して、新しい法則や概念を見出すことを目標にしている。

我々の研究室で扱っている対象は、金属・絶縁体・超伝導・超流動などで、とくに量子効果が目に見える効果として現れるものに興味を持って研究している。通常の金属中の電子に関しても、フェルミ縮退という極めて量子力学的な状態にあり、さらにクーロン相互作用によって1つの電子の運動が他の電子に強く相関を持ちつつ運動するという『強相関』の状態になっている。またスピンによって生じる強磁性(磁石)なども古典力学の範囲内では理論的に理解できないものであり、純粋に量子力学的効果によるものであることが簡単に示される。

これらの問題とくに強い相関を持つ電子系などを理論的にどのように取り扱ったらよいかという問題は、長年にわたる理論物理学の未解決の問題になっている。従って、強相関の問題の解明のための新しい手法を開発し、それのもたらす特異な物性を明らかにすることができれば、本質的に新しい物理の一分野を開拓することに繋がると考えている。

研究室としては、毎週のセミナーがある以外には各自ほとんど勝手に研究を行っている。自分でこれは面白そうだという問題があれば、それを取り上げて日夜徹底的に考える。ただし、よい問題を探し出すのが最も重要であり、その人のセンスが問われるところである。研究に用いる手法は問題に応じてさまざまで、問題に適した新しい手法を開発して用いることになる。具体的には、場の理論的手法、厳密解、変分法、計算機シミュレーションなどの方法を組み合わせて用いている。

最近の研究テーマ

以下、例として現在研究室で行なわれている研究のいくつかを挙げる。

(1) 高温超伝導

高温超伝導という通常の金属と全く異なった特異な性質を、強相関または強い超伝導ゆらぎに起因するものと考えて研究している。とくにモット絶縁体という、強相関特有の状態を深く考察することによって、新たな理論物理の地平を目指している。

(2) 固体中のディラック電子

単層グラファイト(グラフェン)や、ある種の有機導体、さらに古くから調べられている物質であるBi(ビスマス)において、電子の運動が相対論的量子力学におけるディラック方程式と全く同じ形式で記述される。こうした固体中のディラック電子は、これまでにない新しい伝導現象を生み出しようかと予想される。ディラック電子のトポロジカルな性質とともに、我々は興味ある物性を開拓すべく研究を開始している。科研費のホームページは <http://www.kookai.pc.uec.ac.jp/dirac/>

(3) 低次元有機伝導体に関する理論

有機物においても電気伝導を示す物質群がある。その場合には電荷の自由度が特異な振舞いをする可能性がある。我々の研究室では、電荷秩序状態や、それが量子融解した状態などを調べている。さらに絶縁体状態でのスピン自由度については、スピン液体という非常に理解不能な液体状態が可能であり、これについても研究している。

(4) 新しい超伝導体や新しい量子状態

日本で作られた鉄を含む新しい超伝導体などは高温超伝導体と似た構造をしているが、新しいタイプの超伝導である可能性がある。これらの物質における超伝導発現のメカニズムを、従来の考え方と異なる新しい観点から理論的に探求している。また、スピン軌道相互作用が効いているような物質で新しい量子状態が生まれる可能性があり、これについても微視的な観点からの理論を構築している。とくにスピンホール効果と磁性の関連性、トポロジカルな性質についても研究を行っている。

ホームページ <http://hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

桂研究室

桂 法称 准教授

1 研究の概要

本研究室では、物性物理学・統計力学の基礎的な問題に関する理論的研究を行っている。研究内容は多岐に渡り、実験系の研究者から数学者まで、幅広い分野の研究者との共同研究を行っている点も特色である。

●物性理論

物質の見せる多彩な相や相転移・臨界現象を、個々のミクロな構成要素に関する情報だけから説明することは一般には難しいが、なるべく単純な原理・原則からスタートして理解することを試みたいと考えている。より具体的には、相互作用する多体系（電子系、ボゾン系、スピン系、…）における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性の発現するメカニズムの解明、新奇現象の理論的な提案を目指したい。同時に新しい理論的手法の開発も積極的に行いたいと考えている。

●統計力学

古典・量子統計力学や場の理論における可解なモデルの解けるメカニズムに興味を持って研究を行っている。多くの場合、これらの背後には何らかの代数構造が潜んでいることが多いが、そのような数学的概念の探究および物性や量子情報分野への応用を行いたいと考えている。また非線形・非平衡系の統計力学にも興味を持っている。

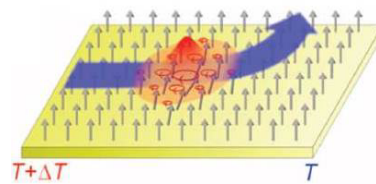
2 最近の研究テーマ

2-1. マグノンの熱ホール効果

ホール効果は、古典的には磁場中の荷電粒子に働くローレンツ力によって引き起こされる効果で、電氣的に中性な粒子（たとえば光子やフォノン）では起こらないと考えられる。しかし、本研究室では磁性体においてスピン間の相互作用（Dzyaloshinskii-守谷相互作用）が、電氣的に中性な素励起（マグノン）に仮想的な磁場として働き、ホール効果を引き起こすことを世界に先駆けて理論的に提案した。このマグノンのホール効果は、熱流のホール効果としてパイロクロア構造を持つ強磁性体 $\text{Lu}_2\text{V}_2\text{O}_7$ などの物質において実際に実験的に観測されている。また理論的には、この現象の背景には電子系での量子ホール効果やトポロジカル絶縁体と共通の構造がある。

2-2. Fermi/Bose-Hubbard 模型の研究

Hubbard 模型は、古くは固体中の電子間相互作用を記述する理想化されたモデルとして、近年では光学格子中の原子を記述する基礎的なモデルとして、重要な役割を果たしてきた。この模型のハミルトニアンは単純であるが、その基底状態や熱力学的性質を調べることは通常困難である。現在まで、一次元系や特殊な状況においてのみ厳密な結果が知られている。本研究室では、分散のないバンドを持つ Fermi-Hubbard 模型における強磁性の時間反転対称性の破れのある場合への拡張、長岡強磁性の $\text{SU}(n)$ 対称性のある Fermi-Hubbard 模型への拡張を行った。また、分散のないバンドを持つ Bose-Hubbard 模型における朝永-Luttinger 液体相の存在や、スピン自由度を持つ Bose-Hubbard 模型における基底状態の磁性に関する研究も行った。



マグノンの熱ホール効果の概念図。(Science **329**, 297 (2010) より)

2-3. その他

フラストレート磁性体とマルチフェロイクス/ $5d$ 遷移金属酸化物と量子スピンホール効果/Rydberg 原子系とハードスクエア模型/量子スピン系とエンタングルメント/Berry 位相と Lieb-Schultz-Mattis の定理/Bethe 仮設状態の行列積表示/量子ウォークとフラクタル/一次元量子系のサイン二乗変形

3 これからの研究

電子間（あるいは原子間）斥力がはたらく系において、どのようなメカニズムで超伝導・Bose-Einstein 凝縮・RVB(resonating-valence-bond) 状態などが発現するかを理論的に解明したい。スキルミオンやエニオン、パラフェルミオンといった「物質中の不思議な粒子」に関する研究も精力的に行いたい。また、可解模型を含む量子多体系の数理的な研究も意欲的に行いたいと考えている。

五神研究室

五神真教授 吉岡孝高助教

1 光物理学の展開

光とは何かという問いは、永く人々を捉えてきた。19世紀後半に電磁気学が完成し、光は電磁波であることが見いだされ、20世紀には、現代物理学の柱となる量子論、相対論が完成し、光の物理学は一旦完成した。しかし、1960年のレーザーの発明により齎された全く異なる光 - 強くかつコヒーレントな光 - が光の物理学の様相を一変させた。可視光の周波数は $10^{14} \sim 10^{15}$ ヘルツで、テレビやFM放送で使われる超短波帯の電波に比べ周波数は7桁も高く、光の位相や振幅の自在な制御は不可能であった。しかし、半導体エレクトロニクス技術とレーザー技術の融合により、レーザー光を波として完全に制御可能となった。この革新により、アト秒 (10^{-18} 秒) というとてつもない短パルス光を発生する技術が生まれつつある。これは、従来は "瞬間" 現象として捉えられてきた電子の量子準位間の "遷移" を、リアルタイムに追跡可能とする。また、16桁以上の周波数純度をもつレーザー光も実現しつつある。これは、"一秒" を定義する高精度の時間基準を与え、物理基本定数の恒常性の検証や一般相対論の効果の検証など物理学の土台を精密に検証するツールとなる。

五神研究室では、このようなレーザーの革新によって始まった新しい物理学の研究に取り組んでいる。現在、理化学研究所の協力を得て本郷キャンパスに新しいコヒーレント光源施設 "フォトンリング施設" の整備を進めている。この施設は、テラヘルツ領域から軟X線にわたる広い波長領域のコヒーレント光ビームを発するものである。この光源を用いると、アト秒スケールの超高速現象や、強い光子場での量子現象など、まだ人類が見たことのない世界を見ることが出来る。これらは、物理学の新しい境地を開くとともに、医療・バイオあるいはエネルギーなど広い分野の新しい技術の扉を開くものと期待されている。

2 光で創る巨視的量子現象

五神研究室のもう一つの研究課題は、光を用いて物質を極低温な状態とし、そこに生じる巨視的な量子現象を探索することである。可視光の光子は温度に換算すると数万度という高いエネルギーを持つが、一方で、レーザーから出てくる光子集

団は非常にエントロピーが小さい。従って、光を巧みに制御して物質に照射すると、瞬時に極低温にすることができる。この手法を用いて、真空中に捕獲された原子気体、半導体中で光により励起された電子系を対象として巨視的量子状態を創る実験を進めている。量子統計性と物質に内在する相互作用との競合、ボース・アインシュタイン凝縮をはじめとする量子力学的な相転移などをクローズアップし、量子論の本質に迫ることを目指している。高い安定性を有するレーザー光源と物質系の挙動を完全に理解するための最先端の分光技術開発を精力的に進めている。現在 100mK という極低温下での半導体のレーザー照射という世界でもユニークな実験や、リチウム同位体原子を用いたフェルミ粒子系の巨視的な量子凝縮相の探求などを進めている。このような巨視的な量子系が放射する光の量子統計性も重要な課題であり、このための量子光学的計測手法の開発も進めている。

3 時空間の対称性制御による新しい量子光学

半導体超LSI作製に用いる最新の微細加工技術を駆使すると、光の波長より遙かに小さいナノスケールの人工構造を作ることが出来る。このようなナノスケール構造をうまく設計すると、自然界とは全く異なる光学特性を示す "人工材料" を作ることが出来る。"透明マント" の実現も夢ではない。五神研究室では、最先端の微細加工技術、3次元電磁波解析といった最新の支援ツールを駆使して、局所及び大域的な対称性制御の物理という観点からフォトンを自在に操るための新原理探索とその実証を進めている。現在 "人工キラル構造"、金属ワイヤをロスなく伝わる光波、三角格子によるフォトン角運動量変換などの研究を進めている。

参考

1. 五神真「原子を光で冷やす-レーザー光が拓く極低温の世界」イリウム, Vol.11 (2) 4-21(1999)
2. 五神真「光で創る固体の巨視的量子現象」数理科学, 40-49 (2004)
3. 五神真「加速する光科学の先端研究」科学(岩波書店), 76 (10) 1004-1010 (2006)
4. 吉岡孝高, 五神真「励起子」他 理学部ニュース 2011年9月号, 2012年5月号
5. <http://www.gono.t.u-tokyo.ac.jp/>

駒宮研究室

駒宮幸男 教授 神谷好郎 助教

1 最高エネルギー加速器を用いた素粒子物理学

我々は、最高エネルギーでの素粒子の衝突実験によって素粒子物理学の分野で新たな地平を切り拓くことを目指している。ジュネーブの CERN では陽子・陽子コライダー LHC が稼働し、2012 年 7 月には、ヒッグス粒子と見られる新粒子の発見があった。ヒッグス粒子の発見は 1974 年の J/ψ 粒子（チャームクォーク）の発見以来の革命的な発見であり、「7 月革命」と呼んでいる。また、重力も含めた統一理論で決定的な役割を果たす「超対称性」の発見が有力視されている。これに引き続き将来は、電子・陽電子 (e^+e^-) の線形コライダーである国際リニアコライダー ILC での実験でこれらの詳細研究を行なう。暗黒エネルギーや宇宙のインフレーションはヒッグス粒子のような基本的なスカラー粒子と恐らく関係し、暗黒物質は超対称性粒子である可能性が有力である。極微の世界 = 素粒子物理学と壮大な宇宙論は深く関係している。我々は、素粒子物理学国際研究センターと協力して大学院生を CERN に送り、ヒッグス粒子の研究や超対称性粒子の探索などの重要なデータ解析を行っている。当研究室は、ILC 実験で最も重要な検出器の一つである電磁カロリメータの開発や、加速器の極端に絞られたビームサイズの測定など、世界中の大学や研究所と共に国際リニアコライダー ILC の推進を牽引している。

2 革新的な中小実験や測定器開発研究の推進

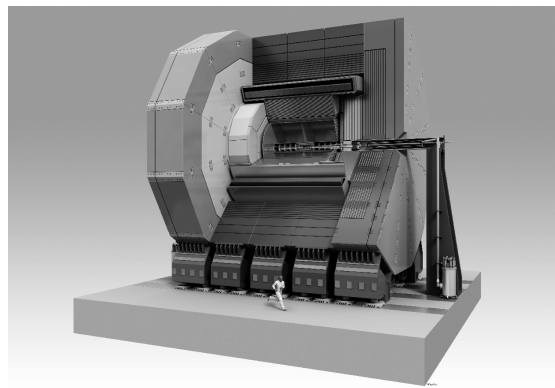
大学院生や若い研究者が大型国際実験の舞台にデビューするには、物理や測定器の基礎的な知識を十分に身に付け実験全体を見渡せる広い視野をもつことが必要である。このため、本質的な物理に迫る中小実験や測定器の開発を行なうことによって基礎的なトレーニングを行なっている。人の歩く速度くらいの超低エネルギー中性子（超冷中性子）を高さ $100\mu\text{m}$ のスリットに通すと、地球の重力で量子力学的束縛状態となり鉛直方向に約 $10\mu\text{m}$ 間隔で疎密の縞ができる、この中性子の位置を μm 以下の精度で測定する為、CCD の表面に ^{10}B を中性子 → 荷電粒子コンバータとして蒸着した測定器を開発し、グルノーブルの ILL で実験を行ない、昨年世界で初めてサブミクロンの精度で重力による量子束縛状態の疎密の縞を観測する事に成功した。更に、新しいアイデアに基づく測定器開発研究を適

宜実施する。

3 国際リニアコライダー ILC の推進と開発研究

LHC のような陽子・陽子の衝突実験に比べて、 e^+e^- の実験はバックグラウンドが圧倒的に低くクリーンで素過程が直接見えヒッグス粒子の詳細研究などが可能である。しかし、円形の e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によってエネルギーが急速に失われるため、 e^+e^- を向かい合わせて直線的に加速して正面衝突させるエネルギー欠損のないリニアコライダーが圧倒的に有利である。このため、世界では ILC の開発を行なっており、本研究室は ILC のビームサイズをレーザー干渉によって精密に測る機器（新竹モニター）の研究開発を行ない、世界一絞られた電子ビームが出る KEK の ATF2 でビーム試験を行なっている。ここでは 37nm のビームサイズ測定を目指している。これにはハードウェアが好きな大学院生が中心となって KEK と協力して研究している。また、ILC 実験で最も重要な検出器の一つである電磁カロリメータの開発を、この測定器のエキスパートであるイギリス人のポスドクを中心として、平成 24 年度から新たに始めた。

本研究室のメインテーマは最高エネルギーでの加速器を用いた素粒子実験であるが、実際の研究は学生の希望と資質によって上記したように様々な選択肢がある。



「国際リニアコライダー ILC」の検出器概観

酒井広文研究室

酒井 広文 准教授 峰本 紳一郎 助教

1. はじめに

酒井広文 研究室では、最先端レーザー技術を駆使した原子分子物理学に関する実験を中心とした研究を行っている。当研究室では、安易に流行を追うような研究態度を極度に嫌い、自分達が流行の発信地となるようなオリジナリティーの高い研究を行うことを目標としている。

2. 研究テーマ

相互に関連する以下のテーマを中心に研究を進めている。

(1) 回転量子状態を選別した分子の配向制御

超短パルス高強度レーザー光と分子との相互作用で発現する様々な興味深い物理現象において、分子の配向依存性を明らかにするためには、配向度の高い分子試料を生成する技術の開発が不可欠である。分子の頭と尻尾を区別しない分子配列制御と異なり、分子の頭と尻尾を区別する分子配向制御における困難は、初期回転量子状態によって分子配向の向きが異なる点にある。この困難を克服するために、主として対称コマ分子の量子状態選択に適した六極集束器やより一般的な非対称コマ分子の量子状態を選択できる分子偏向器を用いて特定の回転量子状態を選別することにより、高い配向度を実現しつつ、分子配向制御の更なる高度化を進めている。

(2) 全光学的分子配向制御技術の高度化

当研究室は、レーザー光を用いてマイクロの世界の分子を操る研究で世界の先頭を走っている。直線偏光したレーザー電場と静電場を併用して有極性分子の頭と尻尾も区別した配向制御の実現に成功したのを始めとし、レーザー光の偏光を楕円とし、非対称コマ分子の3次元配向制御にも成功した。最近、レーザー光のピーク強度付近で急峻に遮断されるレーザーパルスを整形し、レーザー電場の存在しない状況下での分子配向制御に成功したり、静電場を用いずに非共鳴2波長レーザー電場のみを用いる全光学的分子配向制御にも成功した。今後は上述した量子状態選別技術との融合を図り、全光学的手法で高い配向度をもつ分子試料を用意して、次に述べる分子内電子の立体ダイナミクス研究に適用する。

(3) 分子内電子の立体ダイナミクスの研究

超短パルス高強度レーザー光と分子の相互作用により観測される高次高調波発生、非段階的2重イオン化、超閾イオン化などは、トンネルイオン化した電子が光の1周期以内で再衝突することによって起こる超高速現象である。また最近、搬送波包絡位相の制御された数サイクルパルスも利用可能である。本研究室では、(2)で述べた他のグループでは容易に用いることのできない配向した分子試料を用いることにより、光の1周期以内で発現する上記の諸現象に関する分子内電子の立体ダイナミクスを明らかにする研究を進めている。

(4) 電子・イオン多重同時計測運動量画像分光装置を用いた分子中の超高速現象の研究

分子から生成される光電子とイオンの3次元運動量を多重同時計測できる装置を最近開発した。(3)で述べた現象を始めとする様々な現象の詳細なメカニズムの解明を目指す。

3. 研究活動

オリジナリティーの高い実験研究を行うためにはお金を出しても手に入らない独自の実験装置を作る必要があり、当研究室でも実験装置の製作には力を入れている。また、研究室では実験データの解釈などに関するディスカッションが頻繁に行われている。一方、実験結果と理論との比較を行うため、シミュレーションコードの開発にも力を入れている。

4. メッセージ

当研究室の研究テーマには化学との境界領域に位置するものもあるが、基本は原子分子と電磁場との相互作用に関する量子力学であり、当該分野はまさに物理学を学んだ者の活躍の場である。知的好奇心に溢れた若い頭脳を歓迎する。

当研究室に関する情報は、ホームページ (<http://www.amo-phys-s-u-tokyo.jp>) や年次研究報告で得られる。また、具体的な質問や見学の申し込みなどは、酒井広文まで (TEL: 03-5841-8394, E-mail: hsakai@phys.s.u-tokyo.ac.jp)。

学部学生向けの解説

- (1) 酒井広文、Journal of the Vacuum Society of Japan(真空) Vol. 53, No. 11, 668-674 (2010).
- (2) 酒井広文、日本物理学会誌、Vol. 61, No. 4, 263-267 (2006).

櫻井研究室

櫻井博儀教授 新倉潤助教

1 研究の背景

我々の研究対象は、天然に安定に存在する安定核と比べ、陽子数、中性子数が極端に多い不安定核であり、そのエキゾチックな性質を実験的に見出すことが我々の研究テーマである。

原子核は陽子と中性子で構成された有限量子多体系であり、これまで数10年にもおよび、安定核およびその近傍の核構造・核物質研究が進められ、原子核描像が確立してきた。最近になって不安定核、特に陽子数と比べ中性子数が極端に多い中性子過剰核に関する実験的研究が進むにつれ、従来の原子核の描像とは大きく異なる現象・性質（「魔法数」の喪失と新しい「魔法数」の出現、異常に大きな中性子分布をもった中性子ハロー・スキン核の発見など）が軽い核の領域で見出されつつある。これらの成果は「魔法数」や「飽和性」といった核構造、核物質の従来の基本概念を揺るがしており、不安定核は原子核物理学の新しい展開をもたらす研究対象である。

また不安定核の核構造・核物質研究は、宇宙での元素合成や中性子星内部などの極限状況下での核物質の状態方程式なども深く関わっている。特に中重核領域でその性質が未知の中性子“超”過剰核の性質は超新星爆発での元素合成過程（r-過程）シナリオと密接に関係しており、その性質を実験的に調べることが重要となっている。

以上の様に不安定核は有限量子多体系の新しい存在形態を示す魅力ある研究対象であり、また天体現象への展開も視野にいたれた大きな発展を期待できる分野である。

2 最近の研究テーマ

不安定核は重イオン加速器で加速された重イオンビームを標的核に衝突させ、「破碎・分裂」させることによって生成する。この破碎・分裂片は重イオンビームとほぼ同じ速度で飛行し、ビーム（不安定核ビーム）として得ることができる。我々は現在、理化学研究所・RIビームファクトリー（RIBF）で得られる不安定核ビームを用いて実験を行っている。RIBFで供給される不安定核ビームの生成領域、収量はともに世界一であり、この強力なビームを最大限活用した新しい実験手法をゲリラ的に開発・展開し、不安定核の新しい現象・性質を実験的に見出すことが当研究室の信条である。

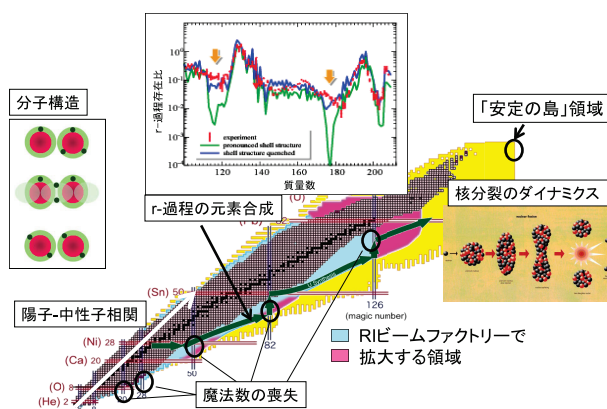
実験手法は従来の教科書的手法とは異なるスタイルをとる。伝統的な手法は実験室系で静止している原子核を対象としてきたが、不安定核ビームを用いた場合は、調べたい原子核が高速の約60%で運動しており、これに適した新しい実験手法を確立することが肝要である。このような不安定核ビームを用いた実験研究は始まったばかりで歴史が浅い。これまで逆運動学的特徴を生かした新手法を開発してきたが、これをもとに、「魔法数の問題」、「核内の核子相関」、「原子核の分子構造」などに関連した核構造の研究を行っている。r-過程での元素合成過程についても未知核の半減期測定などを行っており、新しい成果を挙げつつある。

3 今後の展開

核構造研究に加え、核反応研究を新しい軸として研究展開し、前人未到の新データの取得と不安定核特有の新現象の発見を行いつつ、「不安定核反応学」の確立に挑戦し、原子核物理学者の夢の領域「安定の島」原子核を生成するレシピづくりを目指したい。研究戦略は、不安定核の特異な構造を活かした新規反応実験の開拓、古くて新しい問題としての核分裂反応研究などである。これらの研究展開に必要な新手法、検出器などを開発し、世界初の研究を次々と展開して、世界を牽引する。

3 今後の展開

核構造研究に加え、核反応研究を新しい軸として研究展開し、前人未到の新データの取得と不安定核特有の新現象の発見を行いつつ、「不安定核反応学」の確立に挑戦し、原子核物理学者の夢の領域「安定の島」原子核を生成するレシピづくりを目指したい。研究戦略は、不安定核の特異な構造を活かした新規反応実験の開拓、古くて新しい問題としての核分裂反応研究などである。これらの研究展開に必要な新手法、検出器などを開発し、世界初の研究を次々と展開して、世界を牽引する。



核図表（原子核を陽子数、中性子数で分類した図表）。この研究室では、RIBFを利用して核図表上を縦横無尽に移動し、新しい現象を見出していく。

佐野研究室

佐野雅己教授 竹内一将助教

非平衡開放系の物理

熱力学は、閉鎖系のエントロピーは増大し続け、最終的にはエントロピー最大の無秩序状態に達することを教える。ところが、我々の周りを見わたしてみると、秩序のない状態から自発的に秩序が形成される現象が、宇宙スケールの現象から、身の周りの物理現象まで至るところに見られる。生物の発生過程はその最たるものであろう。単一の細胞として誕生した生命が、発生の過程を経て、多様で複雑な形態や機能を獲得していく様子には驚嘆するよりほかない。これは、系が熱平衡状態になく、エネルギーや物質の流れが存在する非平衡開放系になっているからに他ならない。一般に、系が平衡から遠く離れると、空間的・時間的な秩序形成（リズム・パターンの形成）、カオスや乱流状態など、多彩な運動形態が巨視的なスケールで現れてくる。これらの様々な系の一見多様な振る舞いの中に、対象を横断するような一般的な法則が存在することが最近明らかになってきた。これまで数多くの重要な発見や発展がなされてきたものの、未だに未解明な現象や、根本的な未解決問題も多く残されている。我々の研究室の目標は、新規な非平衡現象を発見し、そのメカニズムを明らかにするとともに、様々な非平衡現象に共通する普遍的な法則を見いだすことである。そのために、非平衡現象を扱うための新規な実験手法の開発や、新しい理論的枠組みの構築と応用を軸として、実験と理論を組み合わせた柔軟なスタイルで研究を行っている。

1 非平衡統計力学

平衡系や、平衡から少しだけずれた系に関しては、それを扱う一般的な理論の枠組みはほぼ完成されている。それに対して、系が平衡から大きく離れていて、駆動力と系の応答との間に線形関係が成り立たないような場合には、まだ極めて限定的な理論しか得られていない。そこで、平衡から遠く離れた系における揺らぎの性質に関する知見を得ていくことは、非平衡系に対する一般的な理論の枠組みを探っていく上で重要なステップになると考えている。我々は、新しい実験技術を用いて、非平衡における新しい法則を探求している。

2 非線形動力学・自己組織化

系に注ぎ込むエネルギーや物質の流れを増加させてゆくと、次々と新たな運動状態や空間構造が現れて、転移を繰り返す。しかも各転移は物質や系によらない普遍的な性質を持つことが明らかになっている。例えば、非線形力学系は分岐点近傍での繰り込み的な性質により、系固有の方程式によらず、普遍的な法則に従う。分岐が集積するカオスへの転移はその典型である。また、大自由度の非平衡系の相転移現象は、臨界点で相関長が発散するため、やはり系の詳細によらない、しかも平衡のものとは異なることが普遍法則に従うことが明らかとなりつつある。我々は、流体や液晶などのソフトマターの非平衡状態の実験を通して、空間自由度や系の対称性により現れる様々な自己組織化やその崩壊のメカニズムを探っている。

3 生命システムの物理

冒頭に述べたように、生命現象も我々の主要な興味の対象である。生命現象の非平衡系としての研究や多くの要素が集まって相互作用する結果として生み出される、システムレベルでの秩序や機能の研究はまだ始まったばかりである。この問題に取り組むための足がかりとなり得るのが、やはり非平衡統計力学や大自由度力学系に関する知見や方法論である。我々は、分子レベルでの知見を基礎にして、生命現象をシステムレベルで記述し、予測や制御を行うための手法を開発することを目指している。そのために、人工遺伝子ネットワークの構成実験、細胞運動のメカニズムや、細胞分化などのテーマについて、実験と数理モデルを併用したアプローチを行っている。



固体中では多数の電子が相互作用することによって、量子力学効果が巨視的なスケールで現れることがある。超伝導はその代表例で、一つの電子の運動を考えている限りは予想もつかない面白い現象が発現する。当研究室では、レーザー光を用いた最先端光技術を駆使して、様々な物質系を対象に多体の量子効果によって発現する物理現象を調べている。特に、光で物質中に巨視的な量子状態を創り出す、或いは自在に制御することを目標として研究を進めている。最近の主なトピックスを以下に挙げる。

1) 半導体中に光でつくる量子凝縮相

半導体に光を照射すると、結晶中を自由に動ける伝導電子と価電子の抜け殻である‘正孔’ができる。正孔は正の電荷を持った粒子として結晶中を動き回る。電子と正孔が近づくと、互いのクーロン引力によって束縛し合い水素原子と同様の状態(粒子)、エキシトンになる。エキシトンは整数スピンを持ち、ボース粒子のように振る舞うため、極低温でボース-アインシュタイン凝縮を起こす。このエキシトンを高密度にしていくと、ある程度の密度になったところで構成粒子である電子と正孔に解離し金属的なプラズマになる。ところが、十分低温では電子と正孔は対を組んだままであることが理論的に予測されている。この状態は、金属中で電子同志が対(クーパー対と呼ぶ)を形成して発現する超伝導状態に似ていて、電子と正孔が対凝縮したマクロ量子状態である。量子効果により生じるこれら未知の物質相の解明を目指して研究を進めている。

2) 光による超伝導体の量子操作

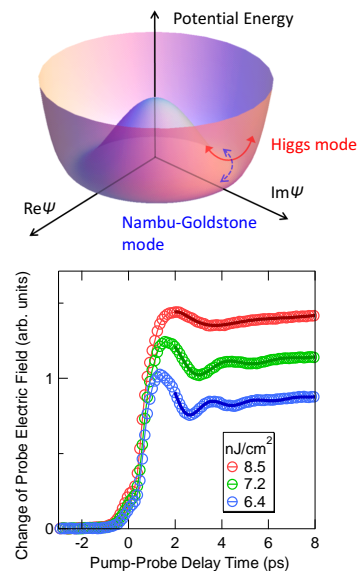
超伝導体に光を照射すると、通常は試料の温度が上がり超伝導は壊れる。ところが、超伝導を担うクーパー対を壊すのに必要な最低のエネルギー程度の波長の光を瞬時に照射すると、超伝導は壊れることなく、マクロ波動関数の振幅の振動が始まる。これは対称性の自発的破れに伴い発現する集団モードであり、図に示すワインボトルの底のようなポテンシャル上の動径方向の振動に相当し、素粒子のヒッグスボソンとの類似性からヒッグスモードと呼ばれている。ヒッグスモードを観測しその性質を調べることにより、隠れた対称性や競合す

る秩序の解明、マクロ波動関数を超高速で制御する研究を進めている。

3) 強相関電子系の光応答と相制御

高温超伝導体の発見以来、強い電子間相互作用が物性を支配する系、所謂、強相関電子系の物理が大きく進展してきた。強相関電子系の基底状態は、電荷、スピン、格子間の相互作用が拮抗した結果として現れる。このためそのバランスを僅かに変えただけで電気抵抗や磁性といった物性が劇的に変化することがある。我々は光を用いてこの強相関電子系の性質を調べている。さらに、周波数や位相を制御したレーザー光を用いて、電荷、スピン、格子を選択的に励起する(揺さぶる)ことで、拮抗する電荷、スピン、格子間の相互作用のバランスを崩したり、或いは物質系を極端な非平衡状態に光により到達させ、背後に隠れた対称性を解き明かす研究、非平衡系に現れる新しい物理現象や新物質相の探求、それらがもたらす新規光学現象の探求を進めている。

上記以外にも光と量子物性に関する様々な研究を進めています。詳しくは研究室ホームページ:
<http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index.htm> をご参照ください。



超伝導体 NbTiN のマクロ波動関数の振幅の振動 (ヒッグスモード)

宇宙理論研究室

須藤 靖 教授 大栗 真宗 助教
吉田 直紀 教授 細川 隆史 助教

宇宙は、微視的スケールから巨視的スケールにわたる多くの物理過程が複雑に絡まりあった物理系であり、図1に見られるように、具体的な研究テーマは多岐にわたっている。しかしそれらの共通のゴールは、宇宙の誕生から現在、さらには未来に至る進化史を物理学によって記述することである。そのためには、常に学際的かつ分野横断的な活動が本質的である。我々は、ビッグバン宇宙国際研究センターやカブリ数物連携宇宙研究機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。

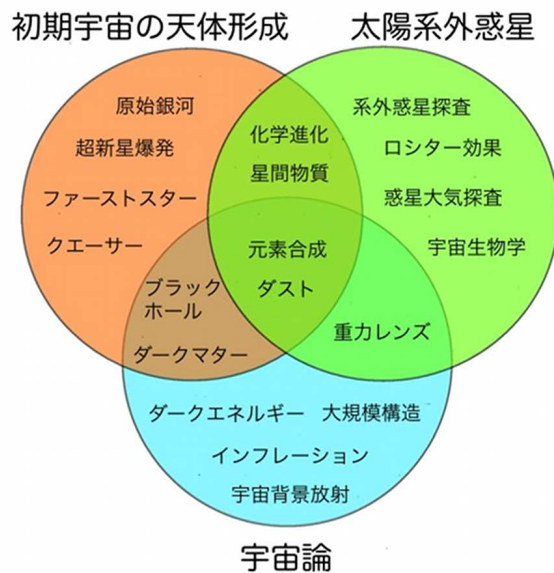


図1: 宇宙理論研究室で行われている研究テーマの概念図。3つの分野が有機的によく結びついていることが分かる。

1 最近の主な研究テーマ

1.1 宇宙論

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモ

フによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。宇宙の加速度的膨張が発見されたのはつい最近のことである。多くの観測データを組み合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の7割がダークエネルギー、2割5分がダークマター、そして残りの約5パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。2013年には、宇宙マイクロ波背景放射の精密観測衛星プランクによる1年以上の観測成果が公表され、標準モデルの正しさを裏付ける強固なデータが得られるに至っている。しかしながら、標準モデルがいかに正しいとはいえ、宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという点は驚くべき事実であり、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く21世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

我々の研究室では、大規模な観測データからこのような宇宙の暗黒成分の正体を読み解くための理論的な研究を行なっている。具体的には、ダークエネルギーの性質や進化の解明、ダークマター分布や銀河分布の大規模構造、ミッシングバリオンの探査などのテーマがある。

1.2 初期宇宙の天体形成

最近の大型望遠鏡や宇宙望遠鏡を用いた深宇宙探査により、130億年以上も前、つまり宇宙が誕生してから数億年という早期に存在した銀河やブラックホールが発見されている。ビッグバンの後文字通り暗黒となった宇宙にいつ、どのように光り輝く天体が生まれたのか。宇宙初期の巨大なブラックホールはどのように成長したのだろうか。第一世代の天体はその後の銀河形成や宇宙の進化に大きな影響を及ぼすと考えられており、現代天文学のホットトピックの一つである。次世代の大型望遠鏡により第一世代天体の形成や宇宙進化の最初の段階が明らかになると期待されている。

コンピューターの性能向上の速度は著しく、数年前には不可能であった計算が次々と実行可能になり、宇宙最初の星の誕生の様子やブラックホー

ルの形成進化のような複雑な問題にもチャレンジできるようになった。近い将来のエクサフロップス級のコンピューター利用を視野に入れながら、超並列計算機や専用計算機をもちいてマルチスケール・マルチフィジクス現象の統合シミュレーションを目指している。

1.3 太陽系外惑星

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえかねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系外惑星はすでに2000個以上の惑星候補が検出されている。初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型（ガス）惑星だったが、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程度の質量を持つ惑星の発見も検出されるようになった。とすれば、それら遠方の地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか、まさに「第2の地球は存在するか」という問いに答える日が現実のものとなりつつある。これは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部横断的な研究テーマである。

この問いに対して、我々の研究室では、ロスター効果による主星と系外惑星の自転・公転軸のずれの検出とそこからの惑星形成論へ制限、惑星の軌道進化、次世代の地球型系外惑星直接撮像計画を念頭においた系外惑星の”地図”の作成、バイオマーカーの検出可能性など、さまざまな角度から研究を行なっている。

2 今後の展開

2014年3月からはハワイ島にある口径8.2メートルのすばる望遠鏡を用いたHyper-SprmeCamサーベイが始まる。これは、高性能の新型カメラを用いて何百万個もの銀河の画像解析から宇宙のダークマターの分布を割り出し、その時間進化から今度はダークエネルギーの性質に迫ろうという野心的な計画であり、今後5年にわたって観測が続けられる。その後には、Prime Focus Spectrographと呼ばれる、大規模な多天体分光装置による宇宙論サーベイも計画されている。カブリ数物連携宇宙研究機構、国立天文台、プリンストン大学などと連携しながら初期データの解析などに加わっていく予定である。また、同サーベイ観測によって最遠方の超新星爆発を捉えようと準備を進めている。宇宙初期に生まれたのはどのような星だったのか、超新星爆発の観測から直接証拠をつかめる

かもしれない。

一方で、既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、物理と数学を融合した斬新な手法による宇宙大規模構造形成におけるボイドの性質など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

また、系外惑星の分野は今まさに黎明期といったところであり、観測、理論共に著しい進展を見せている。今後数年～数十年で計画されているさまざまな規模の将来計画とも合わせて、異形の系外惑星たちはどのようにしてできたのか、地球のような惑星がどれほど普遍的なのか、我々とはいったいどのような存在なのか、そのような根源的な問いに迫ることができるだろう。

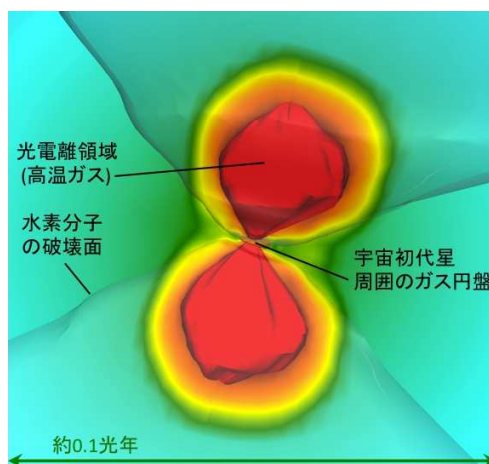


図2: 宇宙初代星形成の3次元数値シミュレーション。中心星放射により高温ガスが生じている様子。

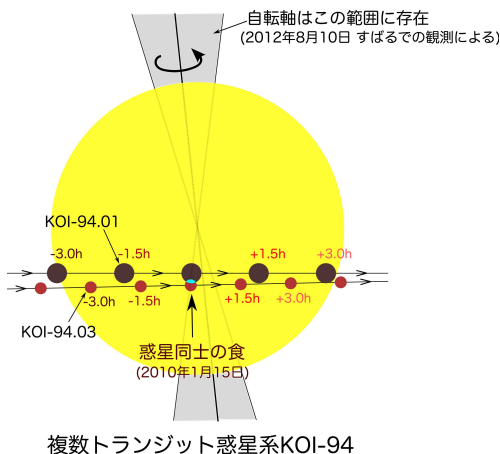
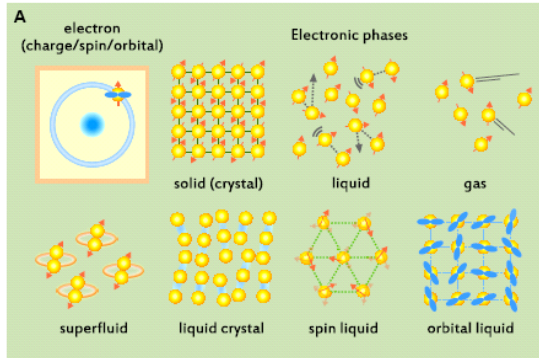


図3: すばる望遠鏡の観測により明らかにされた系外惑星系 KOI-94 の概念図。系外惑星同士の食を史上初めて観測した。

固体中の電子多体系が示す新奇な量子電子相の探索と相形成のメカニズム解明の研究を推進している。遷移金属酸化物中の伝導や磁性を支配するのは遷移金属元素の d 軌道を占める電子である。 d 軌道は空間的広がりが小さく、電子はクーロン相互作用により強く相関する。相関電子は、その相互作用を通じて電子液体・電子液晶と呼ばれる相を形成する。相関電子では電荷、スピン、軌道 (縮退する軌道のどれを選ぶか) の自由度がしばしば顔を出し、電荷液晶状態、スピン液体状態といった多彩な状態が出現する。以下に具体的なプロジェクトの例を挙げる。



相関電子が形成する様々な電子相

(1) 超伝導機構の解明と開拓

高温超伝導機構解明および新奇な超伝導体の開拓を推進している。これまで高温超伝導が発現する直前に現れる擬ギャップ相の概念の確立、擬ギャップ相の背景に隠れた電子結晶状態の発見などに貢献してきた。並行して面白い超伝導体の設計と探索に尽力している。最近では (Ru,Rh)P の擬ギャップ臨界点での超伝導、パウリ極限を破る高い臨界磁場を誇る Ta_2PdS_5 などを発見した。

(2) 量子スピン液体の探索

反強磁性的に相互作用するスピンを三角格子上に置くと、幾何学的にすべての結合を満たすことができない。この効果は幾何学的フラストレーションと呼ばれ、磁気秩序を著しく妨げる。この効果と量子効果の協奏により、ある種の三角形を基本

とする格子状では絶対零度でも磁気秩序を示さない量子スピン液体と呼ばれる状態が基底状態となると指摘された。当研究室はハイパーカゴメ構造を有するイリジウム酸化物 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ が磁性体であるにも関わらず極低温まで磁気秩序を示さないことを発見し、量子スピン液体状態が実現していることを提唱した。

(3) スピン軌道相互作用誘起の新奇電子相の開拓

遷移金属酸化物における電子相探索の舞台は、これまで最も電子相関の強い $3d$ 遷移元素からなる複合酸化物であった。ところが最近、相関効果の弱い $5d$ イリジウム酸化物でもモット絶縁体状態になる例が次々と見付き、大きな謎が投げかけられた。我々は、層状 $5d$ イリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 について、Ir の強いスピン軌道相互作用により最外殻の $5d$ 電子が軌道自由度をほぼ完全に回復した状態 ($J_{eff} = 1/2$ 状態) にあることを明らかとし、スピン軌道相互作用誘起のモット電子固体状態の出現を提唱した。新奇な電子固体におけるスピン、電荷、軌道の素励起を探るべく非弾性共鳴 X 線散乱の実験を進めている。

(4) 固体中の 3 次元ディラック電子の創成

グラフェン中の 2 次元ディラック電子はよく知られているが、電子軌道の波動関数の対称性と結晶構造の対称性の協奏によって、3 次元のディラック電子が形成され得る。小形研究室によって理論的にアンチペロブスカイトと呼ばれる物質群に 3 次元ディラック電子が形成されることが提唱された。これを実験的に検証し、実験的に得られる電子有効質量が自由電子の 2% しかないディラック電子の存在が確認された。量子効果の検証や Weyl 半金属への展開などを進めている。

(5) 薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の創成

原子層レベルで制御された超格子薄膜構造を用いて、スピン軌道相互作用が顕在化する反転対称性のない状態や近接効果を用いた超伝導状態を創成し、非自明なクーパー対を有する超伝導やトポロジカルに非自明な電子を実現する試みを進めている。

高瀬・江尻研究室

高瀬雄一教授 江尻晶准教授 辻井直人助教

1 研究の背景

我々の研究グループでは、将来のエネルギー源としての核融合の実現を念頭においた高温プラズマ実験を行っています。プラズマは非線形・非熱平衡・複雑系の典型例であり、プラズマ中では様々な集団現象が起こります。プラズマを制御するには、その複雑なふるまいの物理的理解が不可欠です。核融合プラズマの研究は過去30年ほどでめざましく進歩し、次のステップとして国際協力により、核融合反応による出力がプラズマ加熱入力の10倍程度となる「燃焼プラズマ」実験装置、ITER（国際熱核融合実験炉）の建設が始まりました。また近年の計測技術の進歩に伴い、物理現象を高時間・空間分解能で精密に計測することが可能となり、その結果プラズマ中の乱流状態を制御し、熱や粒子の損失を低減させることもできるようになりました。更にプラズマの幾何学的形状や、密度・温度・流速などの空間分布の制御を用い、より高圧力のプラズマを安定に閉じ込める工夫がなされています。このような手法を最大限活用して、高温・高圧力プラズマを定常的に維持することが目標となります。

2 最近の研究テーマ

当研究室では、主にTST-2という球状トカマク型プラズマ閉じ込め装置を用いて研究を行っています。TST-2は平成11年に製作された、日本を代表する球状トカマクです。平成16年度には、柏キャンパスに移設され、順次高性能化を進めており、この装置で生成される高性能プラズマを用いて様々な実験が行われています。球状トカマクは、トーラス状プラズマの大半径 R と小半径 a の比 $A = R/a$ （アスペクト比）を1に近づけたもので、プラズマは球に近い形状をもち、特に高いベータで優れた安定性をもちます（ベータとはプラズマ圧力の閉じ込め磁場圧力に対する比であり、磁場閉じ込めの性能を表す重要な物理量です）。高ベータプラズマは高い自律性をもつので、非線形現象や自己組織化が顕著に起こります。TST-2では、プラズマの安定性、プラズマ波動を用いた新加熱・電流駆動法の開発、熱・粒子輸送過程の解明およびその制御等の研究を行っています。最近、外部からの加熱のみにより、自発的にトーラスプラズマが形成さ

れるという興味深い現象が発見されており、その物理過程の解明を目指した研究が進められています。このほか、より大型の装置である日本原子力研究開発機構のJT-60Uトカマク（JT-60SAに改修中）や核融合科学研究所のLHDヘリカル装置において、波動を用いた加熱・電流駆動実験や、プラズマの新生成法の開発、プラズマの熱輸送低減現象（輸送障壁の形成）の解明等をテーマとした共同研究を行ってきました。特に当研究グループの主導したJT-60Uの電流立ち上げ実験では、核融合炉の経済性向上につながる画期的成果をあげました。さらに米国プリンストン大学のNSTX球状トカマク装置、英国カラム研究所のMAST球状トカマク装置における高ベータ化実験、電流駆動実験、マイクロ波を用いた新計測法の開発など、国際共同研究も活発に実施しています。

3 今後の展開

今後の核融合反応を起こす装置に球状トカマク方式を採用するための条件として最重要なのは、プラズマ閉じ込めに必要なプラズマ電流を定常的に駆動する方法を実証することです。当研究室では、これまでの非誘導法によるトーラスプラズマ生成の実績に基づき、非誘導法によるプラズマ電流の増加を目指した研究を開始しています。また、これに関連した非線形波動現象の研究や、プラズマ乱流の研究も推進します。これらの研究および上述の国内・国際共同研究により、世界的指導者となれる研究者の育成を目指しています。



TST-2 球状トカマク装置（柏キャンパス）。中央に見える真空容器の中に磁場で閉じ込められた高温プラズマが生成されます。

1 研究の概要

素粒子間の相互作用は電磁場の拡張である非可換ゲージ場で記述されます。ですから、その研究は実験結果を解釈する上で当然重要ですが、理論上の性質自体にも興味深い点が種々あります。現実世界を記述している非可換ゲージ理論は、出発点のラグランジアンは簡単なものの、量子効果が大きいので具体的な計算を遂行するのは非常に困難で、多人数の共同研究でスーパーコンピュータを使って、ということになります。ボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性である超対称性を導入すると、ボゾンからとフェルミオンからの量子効果がかかり打ち消しあって、紙と鉛筆と個人のパソコンでかなり細かいところまで調べることが出来ます。これが主な研究対象の一つです。

また、超対称ゲージ理論は自然に超弦理論に埋め込むことが出来、その性質を直接反映しますので、超弦理論自体の性質を調べることも主要な研究目的です。通常の場合の量子論は相対論的粒子を量子化したものですが、そのかわりに相対論的弦を量子化することを考えると、時空 10 次元で超対称な時のみ矛盾無く定式化でき、さらに量子重力を自動的に含みます。無矛盾な定式化は 5 種類あることが 80 年代半ばより知られていますが、11 次元の膜の理論である M 理論を用いて全ての定式化は等価であることが 90 年代半ばに認識されました。これを弦理論の双対性といいます (図 1)。この双対性を超弦理論に埋め込まれた超対称ゲージ理論に適用することで、純粋にゲージ理論のみを考えていただけでは理解することが難しい性質を見いだすことができ、その結果は超弦理論を離れて、その他の数理物理学の分野、また数学とも深い関係を持つことが知られています。

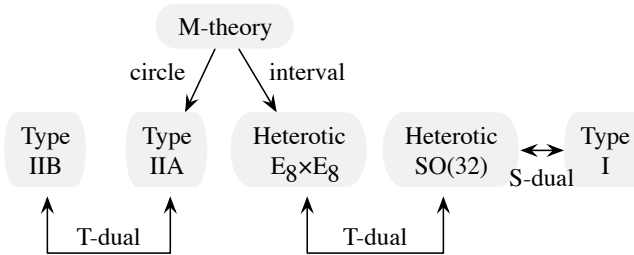


図 1: 超弦理論の双対性

これらの課題について、本郷の素粒子論の研究室の皆さんと共に、また、柏の素粒子論グループ、駒場の素粒子論研とも密接に連絡を保ちつつ研究を行っています。

2 最近の研究テーマ

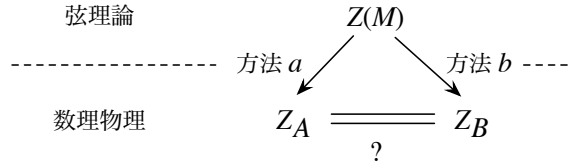


図 2: 弦理論からの「不思議な関係」の導出

前節で述べたように、弦理論内の与えられた系 M を調べる際には、深いところでは等価けれども一見ただけでは異なる記述 a, b を使うことが出来ます。その記述をそれぞれ追求すると、超弦理論を必要としない数理物理学での系 A, B を得ることが出来ます (図 2)。その際、系 A と系 B は全く違うもののように思えるのですが、分配関数等を調べると実は一致してしまうということが起こります。これは出発点と同じ系 M であったことを思えば当たり前ですが、このようにしてこれまで知られていなかった不思議な関連が弦理論から得られることがしばしばあります。最も著名なのは 90 年代初頭に見つかったミラー対称性ですが、数年前みつけたものとして、 A として四次元のゲージ理論、 B として二次元の共形場理論を取ったときの対応があり、最近はこのことについて研究を進めています。興味のあるかたは、日本語で解説を書きましたので <http://jp.arxiv.org/abs/1108.5632> をご参照ください。

3 これから

ここに書いたことに限らず、ゲージ理論、超弦理論の面白いテーマであればどんな内容でもやってみてみたいと思っておりますので、意欲的な方に研究室に来てもらえたらと思います。

常行研究室

常行真司教授

1 研究の背景

結晶の色や形，電気特性，磁気特性といった物質の性質（物性）は，たくさんの電子や原子が集まって初めて生まれる性質である．このような物性の起源を研究する物性物理学分野において，計算機シミュレーションは実験，理論とならぶ第3の研究手法として欠くことのできない重要な手法となっている．

中でも「第一原理電子状態計算」と総称される手法は，実験データに合致した答えが得られるように理論モデルのパラメータを調整するのではなく，物質を構成する原子の原子番号や質量数などの基礎的情報と量子力学の基礎方程式から出発して物質の構造物性や電子物性を非経験的に計算できる，いわば予言力のある研究手法である．そのため実験や観測が難しい原子レベルでのダイナミクス，固体中の欠陥や微量不純物が生み出す物性，実験室での実現が困難な超高压下の結晶構造，自然界には存在しない新しい物質や材料，次世代半導体素子やナノサイエンスの基礎研究など，近年その応用範囲は大きな広がりを見せている．

2 最近の研究テーマ

現状の第一原理電子状態計算手法には，基礎となる電子状態理論や実際の計算量の問題で，様々な適用限界があることが知られている．そこで当研究室では，これまで取り扱うことのできなかった物質群や物性のシミュレーションが可能な新しい基礎理論の構築と，実際のシミュレーションに使えるプログラム開発を行いながら，物性物理学の理論研究を行っている．とくに高温超電導体のような電子相関の強い系を正しく取り扱うための相関波動関数を用いた電子状態計算手法，原子間相互作用の非調和性を定量的に扱うことで熱電材料やナノ構造体の熱伝導の第一原理に基づき計算する手法，超伝導転移温度の計算手法は，広い応用範囲の期待できる新しい手法として，開発に力を入れている．

最近3年間の具体的な研究テーマには，下記のようなものがある．

[新しい方法論の開発]

・波動関数理論に基づく多体電子状態計算手法「ト

ランスコリレイティッド法」

- ・第一原理非調和格子模型の構築と熱伝導計算への応用
- ・超伝導密度汎関数理論
- ・大規模系のエネルギースペクトル計算手法
- ・物質構造探査手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

- ・固液界面に生じる電気二重層とそのキャパシタンス
- ・酸化物中の不純物水素の電子状態
- ・結晶磁気異方性と保磁力
- ・クラスレート型熱電材料
- ・新しい強誘電体材料
- ・固溶体太陽電池材料の物質デザイン

3 今後の展開

化学，地球惑星科学，生物学など異分野との境界には，物性物理学としては未開の広大な領域が広がっている．我々は原子論・電子論に基づく計算機シミュレーションを使って，物性物理学の観点から，そのような新しい領域を開拓したいと考えている．

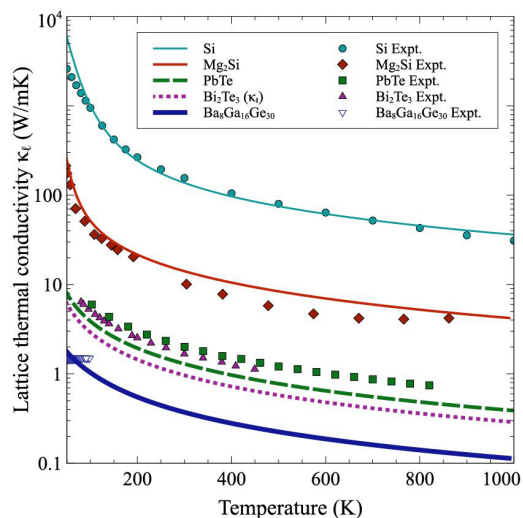


図: 様々な物質の熱伝導の温度依存性実測値と、第一原理非調和格子模型による計算値。

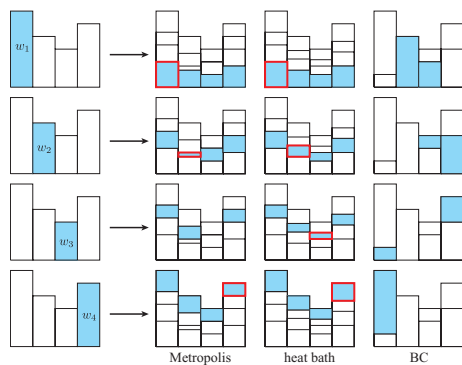
1 研究の背景

量子モンテカルロ法など最先端の計算物理学の手法を用いて、量子スピン系やボーズハバード系など強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象の解明を目指しています。また、テンソルネットワークなどの量子多体系に対する新たな計算手法開発や京コンピュータなど最先端スパコンの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発も進めています。

2 最近の研究テーマ

2.1 新しいモンテカルロアルゴリズムの開発

物性物理学の分野においても他の理工学系の分野と同様、計算科学的手法の重要性は、年々増えています。量子格子模型の理論的研究においても、近年、量子モンテカルロ法などの新しいアルゴリズムが開発され、さらには超並列スーパーコンピュータの登場による計算機資源の飛躍的増加もともなって、計算機シミュレーションは数々の重要な発見・発展に貢献しています。当研究室では、量子モンテカルロ法における「連続虚時間ループアルゴリズム」の任意のスピンの大きさを持つ系への拡張や、長距離相互作用系に対するオーダー N 法、幾何学的カーネル構成法など、数々の新手法を開発しています。



モンテカルロ法における幾何学的カーネル構成法

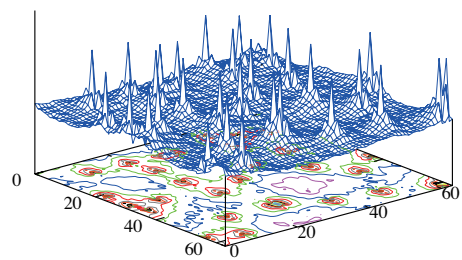
2.2 スピンギャップ状態とトポジカルな秩序

低次元の量子反強磁性体においては、強い量子ゆらぎのため、熱ゆらぎの全くない基底状態においてさえもスピンは古典的なネール状態を取るこ

とはできず、お互いに強くゆらいだスピンギャップ状態となっています。当研究室では、量子モンテカルロ法を用いて、スピンギャップ状態をもつ量子反強磁性体の性質を解析し、スピンギャップ状態間の量子相転移の臨界現象を調べています。また、スピンギャップ状態を特徴付ける新たな秩序変数を提案し、量子相転移現象の解明を試みています。

2.3 量子磁性体のランダムネス誘起量子相転移

長距離秩序をもつ反強磁性体へのスピン希釈の効果の大規模数値シミュレーションにより研究し、量子効果とランダムネスとの相乗作用を明らかにしました。一方で、非磁性スピンギャップ基底状態の場合には、量子効果とランダムネスがお互いに競合し、ランダムネスにより長距離秩序が誘起されるという興味深い現象が観測されています。当研究室では、これらの量子相転移におけるランダムネスのタイプによる効果の違いを詳細に調べました。また、ランダム量子系に特有のスローダイナミクス現象についても研究を行っています。



量子モンテカルロで計算された、サイト希釈により誘起された磁気モーメントの空間分布

2.4 オープンソースソフトウェア開発

ALPS は、量子磁性体・電子系など強相関量子格子模型のシミュレーションのためのオープンソースソフトウェアです。大規模並列シミュレーションプログラム開発の基盤となる C++ ライブラリ群が整備されています。また、計算物理の専門家でなくともモンテカルロ法などの最新のアルゴリズムを用いたシミュレーションが行えるよう、様々なアプリケーションプログラムの開発も進めています。

藤堂研究室ホームページ:

<http://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

中澤研究室

中澤 知洋 講師

私たちは宇宙X線・ガンマ線の観測装置を開発して科学衛星に搭載し、宇宙の高エネルギー現象を観測的に研究している。物理教室内の関連研究室、同じ研究科内のビッグバン宇宙国際研究センターや天文学専攻、JAXA、理化学研究所、米国NASAなどの研究機関、国内外の大学などと、広い共同研究を展開している。

宇宙はしばしば、人類の想像を超える新発見をもたらす。近年の例だけでも、宇宙を満たす暗黒エネルギーの発見、中性子星の超強磁場の発見、銀河やその大集団（銀河団）の進化と、銀河の中心の巨大ブラックホールの関係性など、それまで想像もしなかった、意外性に満ちた発見が多数ある。

X線やガンマ線は、エネルギーの集中に伴い放射される。天体の速い運動、強い重力場、強磁場、超高温、宇宙における粒子加速現象などを探る絶好の手段となる。たとえば銀河団をX線で見ると、図1のように数千万度の高温電離ガスから広がったX線が放射されている。この電離ガスは、宇宙で知られている「見える」物質のうち最も卓越し、しかもそれが散逸せず重力で閉じ込められていることから、銀河団には、「見える」物質の数倍に達する「暗黒物質」が存在すると結論される。

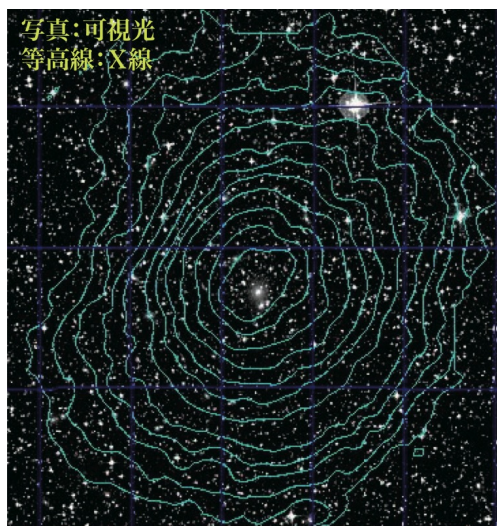


図1：可視光（写真；白い点の多くは銀河）およびX線（等高線）で見た、「みなみのさんかく座」銀河団の画像。大きさは、ほぼ満月と同じ。

宇宙では、荷電粒子が超高エネルギーにまで加速されており、宇宙線として地球に降り注いでい

る。宇宙線そのものは宇宙磁場で曲げられてしまうが、同時に作られるX線やガンマ線は直進できるため、加速現場を「見る」ことが可能となる。

X線やガンマ線は大気で吸収・散乱されるため、大気圏外からの観測が不可欠である。我々は現在、2005年に打ち上げられた、JAXAのX線衛星「すざく」を用い、研究を進めている。ここに搭載された硬X線検出器（HXD）は、私たちがJAXA、理化学研究所、広島大、埼玉大、スタンフォード大などと共に10年がかりで開発した装置で、10-600 keVのエネルギー域で史上屈指の感度をもつ。我々の研究対象は、銀河団、超新星の残骸、巨大ブラックホール、中性子星と恒星の連星系、超強磁場の中性子星など、X線を出す多様な天体や現象であり、時には電波や可視光の観測と組み合わせ、その背後にある物理現象に迫る。



図2：2015年打ち上げ予定のASTRO-H衛星の想像図（JAXA提供）。

「すざく」後継のASTRO-H（図2）は、重量2.7t、全長14mの大型衛星である。2015年にH2Aロケットで打ち上げ予定で、世界最高のX線分光精度と広いエネルギー帯域を誇る。ブラックホール近傍での相対論的効果の実測、元素合成シナリオの構築、最高エネルギー宇宙線の加速現場の特定など、宇宙物理学に大きな進展をもたらすと期待される。我々はASTRO-Hに向け、JAXA、名古屋大、広島大、早稲田大、フランス国立宇宙センターなどと協力し、「すざく」HXD装置を発展させた、硬X線撮像検出器（HXI）および軟ガンマ線検出器（SGD）の開発製作を担当している。

分子や細胞、すなわち物質の集合に過ぎない脳に、なぜ情報処理能力が出現するのでしょうか。この問いは現代科学に残された最大の謎の一つです。脳・神経系はニューロン同士が配線し回路を構成することで機能します。したがって、脳の情報処理の仕組みを解明するには、回路を構成する多数のニューロンをシステムとして理解しなければなりません。このために、以下の2つの方法論が必要とされます。1. 回路の構造、すなわち神経細胞がどのように配線しているのか、を解析する。2. 回路活動の時空間ダイナミクス、すなわち神経細胞がどのようなパターンで活動するのか、を解析する。以上の構造とダイナミクスに関する実験データをもとに、回路内の情報の流れを明らかにし、さらに背景にある回路の論理を探ることができると期待されます。従来、神経回路の複雑さから、このような解析は困難でした。しかし、最近の技術革新により、上記の2つの解析手法に大きな進展があり、脳の研究を飛躍的に発展させることができるとの機運が高まっています。私達は、こうした技術革新を特に適用しやすいショウジョウバエの神経系をモデルとして、神経回路の作動原理を探っています。脳情報処理の機能単位となるような基本回路を見つけ出し、それをモデル化することで脳を理解するのが目標です。

具体的には、ショウジョウバエ幼虫の運動を制御する神経回路に着目し、特定の運動パターンを生む基本回路の仕組みを探っています。ショウジョウバエを用いる大きな利点は、発達した遺伝子操作技術を用いることで、複雑な脳神経組織のなかで特定の神経細胞の活動を可視化し、さらに活動操作することが可能なことです。例えば、カルシウムイメージングという手法を用いると、多数の神経細胞が活動する様子を系統的に測定することができます(図1)。また、パッチクランプ法は神経細胞の活動を高い時間分解能で測定することを可能にします。最近開発された画期的な技術である光遺伝学(optogenetics)を用いると、光を照射することで特定の神経細胞の活動を操作することができます。このような活動操作が、神経回路内の他の神経細胞の活動様式にどのような変化を生じるかを調べることで、回路内の情報の流れ

を明らかにできます(図2)。一方、回路の構造の解析についても、我々も参加する国際的な共同研究により進められています。コネクトームとよばれる、神経細胞間の結合様式を電子顕微鏡画像からすべて再構築するという手法です。以上のような実験手法を総合的に適用することで、どのような配線をもつ回路のなかを、どのように情報が流れることで、特定の運動パターンが生成されるのかを探っています。特に、神経活動操作による特定の神経細胞群への摂動が、回路全体の活動にどのような影響を与えるかを系統的に解析し、さらにモデル化することで、神経回路がシステムとしてどのように作動し情報処理能力を創出するのかを理解したいと願っています。構成要素間の相互作用をリアルタイムに解析可能な基本回路の研究により、心までも生み出すような脳神経系の創発システムを理解することが私たちの夢です。

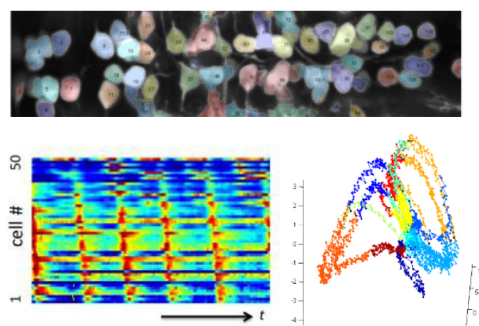


図1：カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞(上)の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する(左下、赤色が活動状態を示す)。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を3次元空間内で可視化することもできる(右下)。

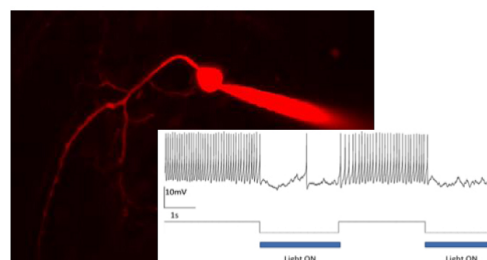


図2：パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射(light ON)により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。

長谷川研究室

長谷川 修司 教授 平原 徹 助教 高山あかり助教

1 表面・ナノ物理学とは

当研究室が専門としている表面・ナノ物理学とは、物質表面やナノメートルスケールに特有な構造、物性、現象を研究する分野で、従来の固体物理学には無い考え方や手法を使う。例えば、結晶表面の最上層での原子には、結合する原子が片側には存在しないので、そのままでは不安定なため、表面近傍の原子だけが並び替えを起こして、結晶内部では見られない特殊な原子配列（表面超構造）を作って安定化する。また、物質内部と異なり、空間反転対称性が破れており、その結果、特殊な電子状態が形成されたり、スピンの向きによってエネルギー準位が分裂したり、全く新しい物性を示すことがあり、今までに無いナノスケールの低次元物性物理の舞台となる。最近では、マスコミなどで取りざたされているナノテクノロジーと呼ばれる分野とも直結し始めている。つまり、原子や分子1個1個を自由自在に操作して、ナノメートルスケールの極微細な人工構造を物質表面上に構築し、そこで起こる現象を利用したデバイスに応用しようという研究が盛んに行われている。表面物理学は、さまざまな分野に関連する学際的分野である。

2 当研究室では

当研究室では、半導体や金属、トポロジカル絶縁体と呼ばれる結晶の表面を対象として、原子配列、電子状態、相転移、電子輸送、質量輸送などをテーマに多角的に実験研究を進めている。同時に、新しい実験手法の考案や表面現象を利用した量子効果の観測にも取り込んでいる。実験設備として、電子回折、走査トンネル顕微鏡、走査電子顕微鏡、光電子分光、マイクロ4端子プローブ、4探針型走査トンネル顕微鏡、強磁場印加型表面電気伝導測定装置などの超高真空装置を備え、多角的な研究を進めている。詳細は当研究室のホームページや単行本 長谷川修司著「見えないものをみる」(東京大学出版会, 2008年)を参照。

3 最近の話題

シリコン結晶の表面上に銀原子を1原子層だけ付着させて、1原子層厚さの金属を作ることができる。そこでは電子が自由に動き回る。その表面を6 Kに冷却して、走査トンネル顕微鏡で観察した結果が図1である。非常に細かな規則的な点列は、規則的に並んだ銀原子に対応している。この他に(A)で示した原子ステップ端や(B)で示した直

線的な境界の近傍では縞模様が見えるが、これは、表面上を動いている電子の波が境界で反射されるためにできる定在波なのである。防波堤にぶつかった水が水面上にさざ波を作るように、「電子の海」でもさざ波ができていくことになる。ただし、その波長は3 nm程度なので、極微の波である。物理学の基礎として習う量子力学がいう電子の波動性を直接見ていることになる。画面中央やや右上の小さな領域では、さざ波が同心円状に広がっている。周囲の境界がポテンシャル障壁となって電子を閉じ込めているわけで、まさに量子力学のポテンシャル井戸の演習問題を直接見ていることになる。

このように結晶表面1原子層だけに自由電子が存在すると、当然、電気伝導度も高いはずである。当研究室では、1原子層の電気伝導度や数原子列の幅の原子鎖の電気伝導度を測定するために、マイクロな針を4本使った4探針電気伝導測定法を開発した。図2は、直径10 nm程度のカーボンナノチューブを探針として利用し、外側2本の探針から電流を流し込み、内側2本の探針で電圧降下を測定しているときの電子顕微鏡写真である。探針間隔は数十 nmまで小さくできる。

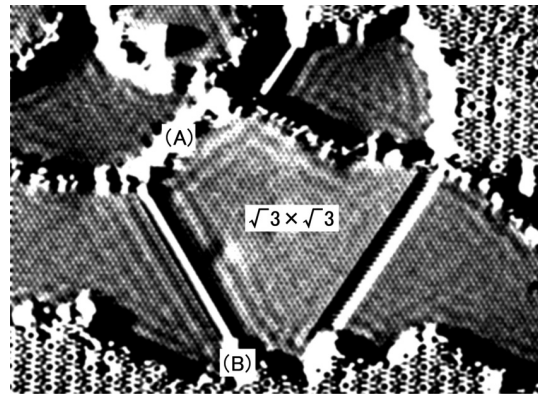


図1 . 電子の海のさざなみ

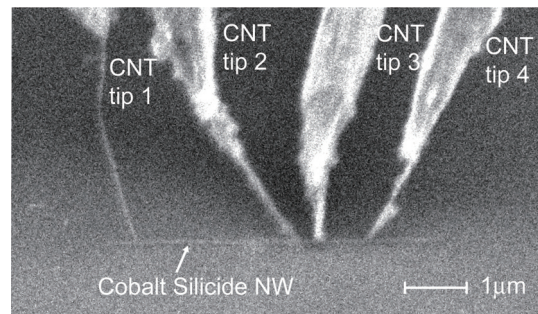


図2 : ミクロな針を使った4探針電気伝導測定

浜口研究室

浜口幸一准教授 遠藤基助教

1 研究概要

私は、素粒子の標準模型を超えたところにどんな物理があるのか、自然界に存在するより基本的な統一理論が何なのかが知りたくて研究しています。

2012年、素粒子の標準模型で唯一未発見だったヒッグス粒子がついに発見されました。素粒子の標準模型は非常に素晴らしい成功を収めており、現在知られている高エネルギー実験の結果のほとんどを矛盾なく説明する事が出来ています。しかしながら自然界には標準模型では説明出来ない現象があり、標準模型が素粒子物理を記述する究極の理論であるとは考えられません。

現在の宇宙のエネルギーは約68%が暗黒エネルギー、約27%が暗黒物質、約5%が我々の知っている通常の物質(主にバリオン)から成っている事が分かっています。しかしながら暗黒エネルギーの正体/起源、暗黒物質の正体/起源、そして物質・反物質の非対称性の起源(バリオン非対称性の起源)のいずれもまだ解明されていません。これらの謎は素粒子の標準模型/標準宇宙論の枠内では説明出来ず、標準模型を超えた理論が必要となってきます。さらに宇宙のごく初期にはインフレーションが起こったと考えられていますが、インフレーションもまた、標準模型を超えた物理を要求しています。

また標準模型には理論的にも不自然な点、不完全に見える点があります。特に、自然界の基本的なスケールが非常に高いエネルギースケール(素朴にはプランクスケール $\sim 10^{18}$ GeV 近辺)にあるであろう事を考えると、標準模型の電弱対称性の破れのスケール(~ 100 GeV)がそれに比べて何故そんなに小さいのかが謎のままです。したがって(私も含めた)多くの素粒子物理研究者は、標準模型を超えたところ(エネルギーで言えば100 GeV ~ 1 TeV以上)により基本的な理論が存在し、それが標準模型の不自然さを解決しているのではないかと考えてきました。

標準模型を超えた物理の候補として私が特に興味を持っているのが、超対称性理論です。超対称性理論は、(i)標準模型の不自然さの問題を解決する(ii)暗黒物質の正体を説明出来る(iii)標準模型ではバラバラだった3つの相互作用の強さが高エ

ネルギーで1つに統一され「大統一理論」の予言を再現する、などの特長があります。また、重力も含めた究極の統一理論の最有力候補である超弦理論も超対称性の存在を要求しています。

これまで私は、主に超対称性理論の枠組みの中で素粒子の現象論的研究、素粒子論の宇宙論への応用的研究を行なってきました。

2 実験・観測との関連

最新の宇宙観測や素粒子実験の結果にも注目して理論的研究に還元していきたいと考えています。

- 2015年より、世界最高エネルギーの衝突実験・LHCが再稼働します。超対称性理論が本当に正しければ、LHCで検証される可能性は十分にあります。LHCの実験結果が何であれ、標準模型を超えた物理に対する貴重な情報を与えてくれる事は間違いありません。

- Planck衛星による宇宙背景放射の温度ゆらぎの測定により標準宇宙論がますます詳細に検証されるようになり、インフレーションに関する重要な情報も次々と明らかになって来ています。

3 これまでの研究

- LHCで見つかったヒッグス粒子の質量(~ 125 GeV)とミューオンの異常磁気能率を同時に説明出来る超対称性模型の構築および解析、
- 超弦理論、高次元理論に内在するモジュライ粒子が存在する時の初期宇宙論の研究、
- 超対称性理論・超重力理論が自然界に存在する事を検証する鍵を握る粒子「グラビティーノ」を実験的に検出する方法の提案・解析、およびそれに関連した初期宇宙論の研究、
- 宇宙のバリオン非対称性を説明するシナリオ(特に非常に小さなニュートリノ質量の起源と関連したシナリオ)の研究、など

キーワード：標準理論を超えた物理、超対称性理論、LHC、初期宇宙論、暗黒物質、宇宙の物質・反物質非対称性(バリオン生成)、インフレーション

4 研究室ホームページ:

素粒子論研究室

<http://www-hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

個人のページ

<http://www-hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~hama/welcome.html>

早野研究室

早野龍五 教授 鈴木隆敏 助教

1 奇妙な原子

早野研究室では、反水素（反陽子と陽電子でできた反原子）、反陽子ヘリウム（ヘリウム原子核のまわりを反陽子と電子がまわっている原子）、 π 中間子原子、 K 中間子原子（原子核のまわりを π^- 中間子や K^- 中間子がまわっている原子）など、さまざまな奇妙な原子（エキゾチック原子）を研究し、物理学の基本的な対称性を研究しています。

2. 反陽子の重さを量る - 理科年表にも出ています

素粒子の標準理論では、粒子と反粒子の間に *CPT* と呼ばれる対称性があり、その結果、粒子・反粒子の質量は等しいとされますが、これを高精度実験で確かめることが「宇宙から消えた反物質の謎」などと関連して、非常に重要になってきました。

私たちは最近、反陽子ヘリウム原子の精密なレーザー分光実験を行い、その遷移周波数が反陽子と電子の質量比に比例することを利用して、反陽子質量を陽子質量に迫る精度で決定することに成功しました。その結果は既に知られている陽子の質量と 10 桁まで一致し、*CPT* 対称性が高精度で検証されました。また、逆に *CPT* 対称性を仮定すると、この結果から基礎物理定数が決定できます。実際、現在の理科年表に載っているリュードベリ定数や陽子・電子質量比には、私たちの実験結果が反映されています。

CPT 対称性を更に高精度で検証する上で有望なのが、反水素原子です。通常の水素原子では、すでに遷移周波数を実に 15 桁に迫る超高精度で分光することが可能であるため、反水素原子を大量に生成して高精度分光を行えば、*CPT* 対称性の検証精度が飛躍的に高まると期待されます。

私たちは最近、加速器で発生させた反陽子と、放射線源から集めた陽電子とを反応させ、反水素原子を大量に生成することに世界で初めて成功し、夢の実現に一步近づきました。現在は分光をめざして研究を進めています。なお、これらの研究はスイスの CERN 研究所で行っています。

2. 中間子原子が解き明かす質量の起源

南部先生が予言された「自発的対称性の破れが粒子質量の起源である」という理論の実験的検証は、現在の重要課題の一つです。素粒子の標準理論で

は、真空中に凝縮したヒッグス粒子によってクォークや電子などが質量獲得されるとされ、LHC でヒッグスを探索する実験が今年開始されますが、ヒッグスだけでは物質質量の大部分を占める陽子や中性子の質量起源は説明できません。

陽子や中性子はクォーク三個から構成されますが、それらクォーク三個の質量を足しても、たかだか陽子質量の 2% にも達しません。陽子の質量は、真空中に（ヒッグスに加え）「クォーク対が凝縮」し、カイラル対称性というものが破れたことに起因すると考えられています。

理論予想では、原子核中でのクォーク凝縮の強度は、真空中よりも減少するとされており、その検出器として私たちが用いているのが中間子です。私たちは最近、加速器を用いて原子核と π 中間子（湯川秀樹が予言）が束縛した π 中間子原子を生成し、そのエネルギー準位を測定することで、クォーク凝縮強度の変化量を求めることに初めて成功しました。 π 中間子原子の研究は、私たちがドイツの GSI 研究所で開拓したのですが、その後、理化学研究所に最新の RIBF 加速器が完成し、日本でも実験ができるようになりました。

3. 福島県での活動

福島原発事故に関連し、ホールボディーカウンターによる内部被ばくの測定精度の向上や、除染に関連したリアルタイム線量計の開発などを行なっています。

早野研に関する理学系研究科プレスリリース等
ホームページ:

<http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/hayano/>

- リガクル 01 原子番号マイナス 1
-反陽子の質量を高精度に計測する-
- 2013/03/06 早野龍五教授、GENCO 賞を受賞
- 2011/10/30 理学が拓く未来 反物質
- 2008/11/13 早野龍五「反陽子ヘリウム原子の研究」により仁科記念賞を受賞
- 2008/07 反陽子を使って基礎物理定数を測る
(理学部ニュース掲載)
- 2007/11/03 堀博士のヨーロッパ 若手研究者賞受賞
- 2006/10/12 反物質と物質の「化学反応」の観測
- 2006/ 6/ 9 反陽子の質量を 10 桁の精度で測定

樋口研究室

樋口秀男 教授 茅 元司 助教

「生体分子・細胞・個体の1分子生物物理学」

我々の研究室では生体運動や細胞分裂や神経の物質輸送に関与する生体モータータンパク質を原子・分子・細胞・個体の4つの階層からアプローチし、各階層の動的（ダイナミクス）メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルの構築を行っている。具体的な研究テーマを以下に述べる。

1 Å精度の1分子運動解析

我々は蛍光でラベルされたモーター分子の3次元運動を、1msの時間分解能で~2nmの位置精度で測定する世界最高精度の装置を開発し、ステップ様の運動を検出した。今後は精度を数Åに高めてモータータンパク質1分子の運動を解析し、モーター分子が熱揺らぎとATPのエネルギーをどのように利用して、Åオーダーの構造変化を10nmオーダーのステップ運動に変換するのかを明らかにする。

2 細胞内モーター分子の3次元力学状態

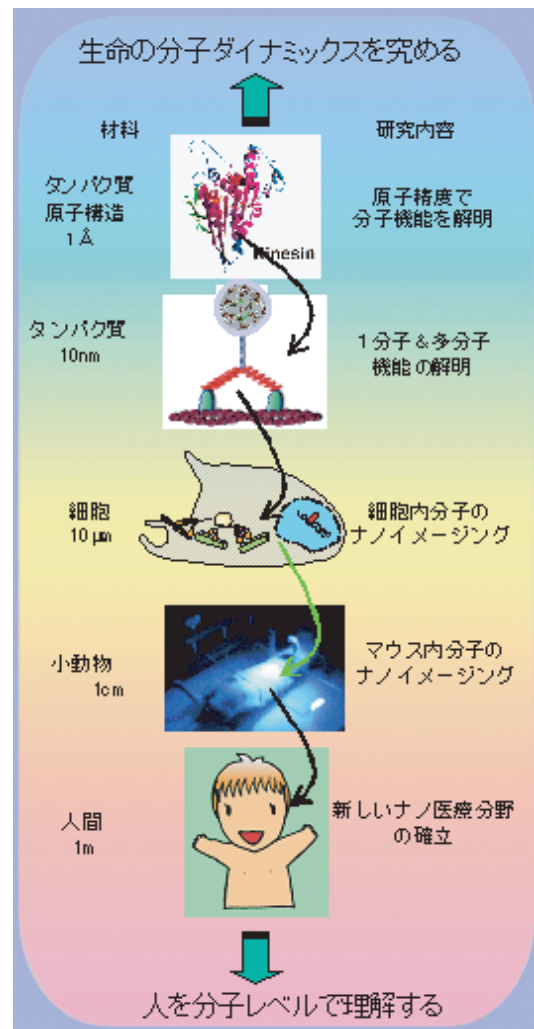
細胞内には運動を障害する構造体や制御タンパク質が存在するため、培養細胞内モーター分子の運動を短時間解析した我々の結果が示すように、細胞内運動はかならずしも精製分子と同じではない。そこで現在は細胞内のモーター分子あるいはそれが運搬する小胞の3次元的位置および力を長時間測定して、モーター分子の多様な運動の全体像を明らかにしている。

3 マウス内1分子運動

個体は多数の細胞が立体的に相互作用しホルモン等の制御を受けているので、生体内運動機能全体を知りたいければ、個体を用いなければならない。我々は、これまでに生きたマウス個体内を運動する蛍光でラベルされたタンパク質の位置を~30nm精度で追跡することに成功し、タンパク質の挙動を分子レベルで解析できた。今後は、3次元位置精度を数nmまで改良し、細胞全体の運動と細胞内モーター分子の3次元運動を測定する。

4 運動機能の普遍的な物理モデル

細胞内をモーター分子によって輸送される小胞は、短時間では方向性のあまりない運動であることが我々の研究でわかった。ブラウン運動をしたり、一方向に動いたり、停止したり、方向を変えるなどである。ところが、長時間経過すると小胞は核の周りに集まるといった方向性のある輸送を達成した。小胞の運動を理解するために、我々は短時間の部分運動と長時間の全体運動を繋ぐ物理モデルの構築を行っている。



研究概要図

福嶋研究室

福嶋 健二 准教授 山本 新 助教

1 研究の背景

『強い相互作用』の基礎理論である量子色力学 (QCD) を研究しています。我々は物質の構成要素が原子であることを知っています。原子が電子と原子核からできていることも知っています。さらに原子核が陽子と中性子 (核子) の束縛状態であることも知っています。陽子や中性子を形作っているものが QCD の基本要素であるクォークとグルーオンです。それでは逆に、クォークとグルーオンの理論を解くことによって、我々の身の回りの物質の性質、例えば物質の質量を正しく導くことができるでしょうか?あるいは、温度や密度や外部電磁場を極限的に大きくしたときに、物質がどのような振る舞いを示すか、理論的に予言できるでしょうか?答えはイエス。QCD から全ての答えが出てくるはずですが、そして同時に答えはノー。QCD は限定的にしか解けない複雑な理論です。この解けそうで解けないパズルが、強い相互作用の物理を研究する醍醐味です。

2 最近の研究テーマ

実時間粒子生成: 場の量子論の『真空』は空っぽではなく、いつでも粒子・反粒子の量子揺らぎで満ちています。電場や重力場など外から刺戟を加えると、これらの揺らぎが実粒子として出てくる現象が理論的に予言されています。このような非平衡量子現象を非摂動的に解析することは、現代の物理学の大きな挑戦課題のひとつです。我々は確率過程量子化法や格子シミュレーション等、様々なアプローチを駆使して、この難問に取り組んでいます。特に QCD の場合、外的な環境によって、核子あるいは中間子からクォークとグルーオンに自由度が移り変わったり、質量の起源となっているクォーク凝縮について相転移が起きたりします。相転移と粒子生成との関係は、RHIC や LHC で研究されている『クォーク・グルーオン・プラズマ』の初期時空発展を解明するために重要だと考えられています。

高密度物質の状態方程式: 中性子星内部や中間エネルギーでの重イオン衝突実験では、原子核内部の密度よりもさらに高密度状態が実現しています。このような標準核密度を越えた物質については、理

論の不定性が大きく、まだ解明されていない謎がたくさん残されています。『符合問題』と呼ばれる数値計算の原理的困難についての研究や、現象論・汎関数繰り込み群に基づいた有効理論の展開等を通して、我々は、高密度物質の基底状態の同定や状態方程式の構築を目指しています。特に高密度で初めて解放されるエキゾチックな自由度 (ダイクォーク等) に興味を持って研究を進めています。QCD 真空のトポロジ的性質: インスタントンと呼ばれるグルーオンの特殊な配位によって、QCD の基底状態がいわゆる θ 真空という構造を持っていることが理論的に知られています。中性子星のような高密度・強磁場中では、QCD 真空そのものが変化したり、外場が QCD 真空の性質と量子異常を介して結び付いたりして、特異な現象を引き起こします。QCD の θ 真空研究の歴史は古いですが、まだ現象論的には θ の値が極めて小さいことくらいしか分かっておらず、 θ 真空の理論と現象論を橋渡しする可能性を模索しています。

3 今後の展開

RHIC や LHC で精力的に研究されてきたクォーク・グルーオン・プラズマに加え、最近ではより中間エネルギーの重イオン衝突実験によって低温・高密度領域を走査する実験的試みが、RHIC、FAIR、NICA、J-PARC 等の加速器施設で予定されています。様々な理論的困難はありますが、このような実験計画に対して具体的な提言をすることが高温高密度 QCD 理論の急務です。

よりアカデミックなレベルで、第一原理理論である QCD そのものへの興味も尽きません。最近ではいわゆるゲージ・重力対応によって、QCD のある極限 (強結合・カラー数無限大) における非摂動的性質を詳細に調べられるようになってきました。まだ QCD の解法としては発展途上段階ですが、高次元時空を利用した QCD の定式化は、徐々にひとつの分野として確立しつつあります。我々の研究している汎関数繰り込み群や確率過程量子化法も、実は高次元的な理論形式になっているので、見掛けは違うけれど何らかの繋がりを見出せるかも知れないと期待しています。

福山研究室

福山 寛 教授 松井 朋裕 助教

私たちは極低温下で起こる超流動、超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果など様々な量子現象を実験的に研究しています。特に、原子の中で最も量子効果が強いヘリウム³(³He)やヘリウム⁴(⁴He)の運動を2次元空間に閉じ込めた系の性質を調べています。また、炭素の単原子層膜であるグラフェンの示す特異な電子物性も調べています。

1. 2次元の量子物質

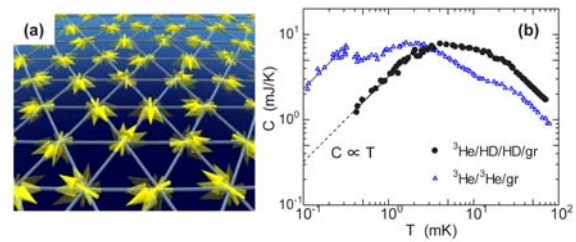
³Heは核スピン1/2をもつフェルミ粒子、⁴Heは³Heと全く同じ原子間相互作用をもつもののスピン0のボース粒子です。したがって³Heと⁴Heの性質を比較したり、両者を組み合わせることで、統計性や磁性をさまざまに制御することができます。一方、Heや原子スケールで平坦なグラファイト基板上に一層ずつ物理吸着して単原子層膜を形成するので、理想的な2次元フェルミ粒子系やボース粒子系が得られます。

なかでもグラファイトをHe原子あるいは水素分子でコートした上に作成されるC2相と呼ばれる低面密度の2次元He固体では、興味深い物性が提案されています。³HeがつくるC2相は、強磁性のおよび反強磁性的な相互作用が競合した、磁気的にフラストレートした2次元量子スピン系で、絶対零度でもスピンの長距離秩序をもたない“量子スピン液体”と呼ばれる特異な磁気相だと考えられています。一方、⁴HeのC2相は、結晶の周期性と超流動性が共存する「超固体」状態である期待があります。超固体は、気体、液体、超流体、固体に続く未発見の物質の第5の状態として、理論的な研究が活発に行われています。

2次元Heは、C2相の他にも、その面密度に応じて多様な量子物性を示します。私たちはこうした2次元量子液体・固体の研究を100 μKという超低温から室温まで6桁にわたる幅広い温度域で、熱容量、核磁気共鳴、ねじり振子等の測定から調べています。超低温の実現には核断熱消磁冷凍機や無冷媒希釈冷凍機を用いています。

2. ナノスケールの電子物性

グラフェンは電子やホールが質量ゼロのディラック粒子として振舞い、半整数量子ホール効果など



(a) 量子スピン液体のイメージ。(b) 2次元³He C2相では、下地が³He単原子層(△)とHD2分子層(●)の両方で、最低温度付近でギャップレスの量子スピン液体状態特有の温度に比例した熱容量が観測されています。

の興味深い物性を示します。その端構造にはジグザグ型とアームチェア型の2種類ありますが、ジグザグ端にのみ特異な局在電子状態が現れることが、私たちの研究から分かっています。このグラフェン端状態はスピンが揃った強磁性的な状態と考えられており、その検証と制御を目指した研究を行っています。

グラフェンは高い熱伝導度、電気伝導度を備え、機械的にも強くしなやかであることから、優れた次世代エレクトロニクス素材としての応用が期待されています。ところが、バンドギャップをもたないため、高い消光比が得られないというデバイス応用への壁があり、その伝導特性を制御する研究が世界中で進められています。例えば、私たちは、酸素分子を表面修飾することで、電荷の密度や局在の強さを制御しています。また、マイクロメートルサイズの微小グラフェンでは、極低温で量子干渉効果のために、電荷密度に依存した伝導度の揺らぎが現れます。

これらの実験は、超低温(30 mK)、高磁場(13 T)中の走査トンネル顕微/分光法(STM/S)や電気伝導度測定を通じて行っています。

藤森研究室

藤森 淳 教授 岡崎浩三 助教

1 研究の背景

物質中の電子の間の強い相互作用，電子と格子との相互作用は，高温超伝導，金属-絶縁体相転移，強磁性，巨大磁気抵抗など，様々な際立った物性をもたらす．このような強く相互作用をする電子系を強相関電子系と呼ぶ．

藤森研究室では，光電子分光，軟 X 線吸収分光を実験的手段として用いて，強相関電子系の電子状態を調べ，多様な物性が発現する機構を研究している．高温超伝導体，強相関酸化物，磁性半導体，強磁性金属などを対象物質とし，超伝導，金属-絶縁体相転移，巨大磁気抵抗現象を出現させる電子的機構の解明を目指している．その結果は，新物質探索，新機能物質開発にもフィードバックされている．

実験は本郷キャンパスの実験室光源の他に，電子加速器から放出される放射光を用いておこなっている．放射光を用いた実験と装置開発を，つくばの高エネルギー加速器研究機構，スタンフォード放射光研究所，台湾放射光，SPring-8などの放射光実験施設で行っている．また，国内外の物質開発研究グループ，放射光研究グループとの共同研究を積極的に行っている．

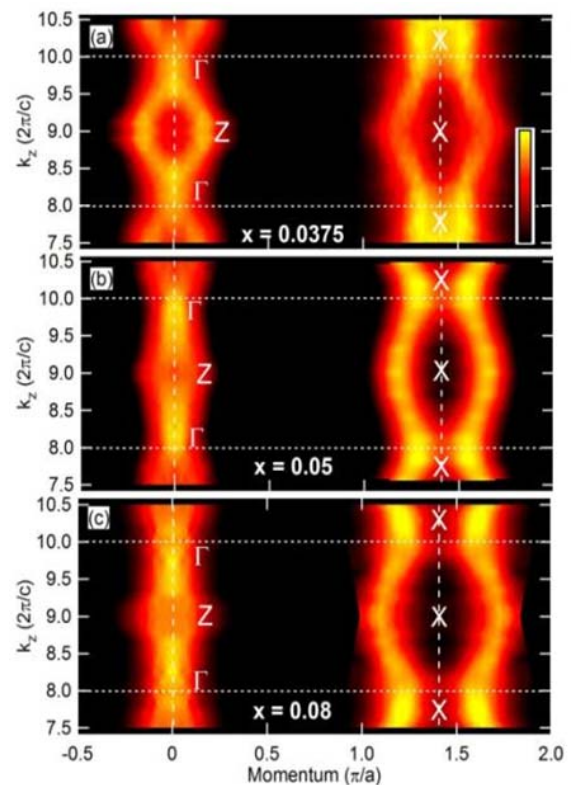
2 最近の研究テーマ

i) 高温超伝導体の電子状態 絶縁体である層状銅酸化物にキャリアをドーブした高温超伝導体の発見から 20 年以上を経たが，高温超伝導の発現機構解明は世紀を越えた難問として残され，研究が続いている．さらに最近，やはり層状構造を持つ鉄化合物高温超伝導体が発見され，再び研究が活発化している．我々は，これらの高温超伝導体のバンド構造，フェルミ面，超伝導ギャップ等を光電子分光法を用いて調べることによって，超伝導機構の解明，異常物性発現機構の解明を目指している．

ii) 強相関酸化物ヘテロ界面 遷移金属酸化物は，巨大磁気抵抗，金属 - 絶縁体転移，軌道秩序などの多様な物性を示し，基礎科学的に重要なばかりでなく，機能性材料として期待され，利用されはじめている．とくに，異なった遷移金属酸化物が接合した界面は，両者にはない全く新しい物性を示すことがある．これらの物質に対して高精度の光

電子分光実験および軟 X 線吸収分光を行い電子構造の解明を行うとともに，新たな物性の探索を行っている．

iii) スピントロニクス材料 電子のもつ電荷のみを利用した従来の半導体エレクトロニクスに対して，電子の持つスピンも利用したスピン・エレクトロニクス（スピントロニクス）が次世代の技術として期待されている．半導体に遷移金属をドーブした磁性半導体，磁性体と強誘電体を組み合わせ電気-磁気結合性を持たせた複合材料，強磁性金属と絶縁体薄膜からなる磁気トンネル接合素子などの電子状態，磁気状態を解明し，物質・ナノ構造設計指針を得ることを目的として，光電子分光および軟 X 線吸収の磁気円二色性の測定を行っている．



図の説明：光電子分光で見た鉄系高温超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{As}_2$ のフェルミ面の断面図．フェルミ面とは，電子の運動量空間において，電子が占有する領域と占有しない領域を分ける境界で，オレンジ色部分が実験で観測されたフェルミ面を示す．化学組成によってフェルミ面が系統的に変化している．

松尾研究室

松尾泰准教授 川野輝彦助教

1 M理論とは

本研究室の主要な研究テーマである超紐理論は、素粒子の相互作用として現在知られている4つの力の統一理論として、また唯一可能な一般相対論の量子論として活発に研究されている。現在矛盾のない超紐理論は5種類知られており、それぞれ10次元で定義されているが、90年代後半にこれらの5種類の理論は結合定数に関する強弱双対性と呼ばれる対称性で結びついており、一つの根本的な理論の様々なパラメータ領域における実現であると理解されるようになった。この基本理論はM理論と呼ばれており、11次元で定義される量子化された膜の理論であると考えられている。

2 M理論の難しい点

M理論は基本的な役割を果たす一方で、理論自体の定義がまだはっきりしていないという困難を持つ。その最も典型的なものとしてM理論に現れるブレーンの内部自由度があげられる。

通常の粒子を複数個集めるとその自由度は粒子の数に比例する。一方超紐理論のブレーン（Dブレーンと呼ばれる）をN枚集めたときの自由度は N^2 のオーダーであることが知られていた。この自由度は行列のサイズをNとしたときの行列要素の個数であり、Dブレーンの自由度が行列を用いた非可換ゲージ理論で書かれていることが理解されている。

一方、M理論のブレーンは2次元と5次元の2種類のブレーンがあることがわかっており、それぞれM2ブレーン、M5ブレーンと呼ばれている。これらのブレーンをN枚集めたときに自由度がどのようになるのかについて、様々な計算がなされてきたが、M2ブレーンについては $O(N^{3/2})$ 、M5ブレーンについては $O(N^3)$ という変わったスケーリングになることが知られていた。このような内部自由度は通常の行列では書けないので、定式化が難しかった。

3 南部括弧式を用いた M2 ブレーンの定式化

この行列に変わる自由度については、南部陽一郎氏が1973年に提唱した南部括弧式を用いることがよいことが2007年にBaggerとLambertにより発見された。通常の行列に対しては交換関係 $[T^a, T^b] = f^{ab}_c T^c$ を用いて対称性が定義されるが、

南部氏はそれを一般化された3-代数と呼ばれるものの $[T^a, T^b, T^c] = f^{abc}_d T^d$ に拡張した。これまでこの3-代数については詳しいことが数学的に知られていなかったが、BaggerとLambertはM2ブレーンが2枚ある場合の3-代数の構造を明らかにしたのである。当研究室ではこのBagger-Lambertの発見を受け3-代数の数学的研究を行い、一般にN枚M2ブレーンが存在する場合のモデルの提案や、Nが無限大の極限でM2ブレーンの理論を用いてM5ブレーンの定式化が行えることなどを具体的に示した。

4 M5 ブレーンの定式化へのアプローチ最近理解が急速に進んだM2ブレーンに比べて、重複したM5ブレーンの定式化は難点が多い。我々のグループでは非可換gerbeと呼ばれる2000年代に発展した一般化された幾何学的概念を、M5ブレーン適用することにチャレンジしている。今のところM5ブレーンをあらかず6次元時空の一つの空間次元をコンパクト化した場合に閉じた形でゲージ不変な作用を書くことができることを理解されており、現在はそこに超対称性を組み込むことに取り組んでいる。

5 ゲージ理論の双対性への応用

以上の流れとは多少異なるが、4次元の超対称ゲージ理論の双対性や分配関数の研究を2次元のリーマン面の幾何学に帰着して理解できるというSeiberg-Witten理論が以前より活発に研究されてきたが、最近より精密な対応、すなわち4次元理論の分配関数と2次元の戸田方程式系の相関関数が一致するという予想が大きな注目を集めている。M5ブレーンがしめる6次元空間を4次元と2次元に分けそれぞれの理論の間の橋渡しとしてM理論を用いることができるのではないかと予想がなされている。当研究室でも2次元理論のW(1+infinity)代数と呼ばれる無限次元対称性とその量子変形がこの対応関係の背後にあると考え、研究を進めている。最終的には以前謎めいているM5ブレーンの性質の解明に結びつけたいと考えている。

蓑輪研究室

蓑輪 眞 教授 井上慶純 助教

1 加速器を使わない素粒子実験

素粒子の実験的研究の分野は、大型の高エネルギー加速器を使った研究が主流であった。しかし、加速器の大型化の技術的限界や、研究グループの巨大化に伴うさまざまな問題を考えると、加速器という手法に捕らわれない自由な発想による研究が必要になってきたと思われる。我々の研究室では、次にあげるようなさまざまな「非加速器素粒子実験」を計画し、実行してきた。

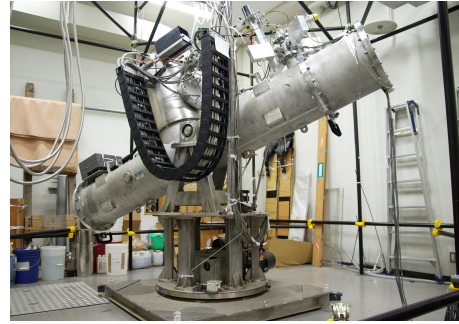
2 最近の研究

右上の図に示すのは、当研究室のアクシオンヘリオスコープ（愛称 Sumico）¹と呼ぶ太陽観測装置である。

素粒子の強い相互作用は量子色力学によってうまく記述されていると考えられているが、そのままでは有効ラグランジアンに CP 対称性を破る項が現れて実験事実と反するという「強い力の CP 問題」が残されている。アクシオン模型においては大局カイラル $U(1)$ 擬対称性を導入し、それが自発的に破れる時、 CP 対称性を破る項を相殺することでこの問題を解決する。それに伴って生まれる擬南部 Goldstone 粒子がアクシオンである。

アクシオンを探すさまざまな試みが行なわれているが、我々は、太陽内部で黒体放射の光子が陽子や電子の電磁場でアクシオンに転換して発生していると考えられている、いわゆる太陽アクシオンを地上で検出する実験を行なっている。この実験では、超伝導磁石による強磁場を用意して太陽から飛来したアクシオンを再び光子 (X 線) に転換して検出する。これまでの観測の結果ではアクシオンは発見されておらず、アクシオンと二つの光子の結合定数にきびしい制限をつけている。この制限の一部は直接観測によるものとしては世界最高の感度である。

また、右下の図は、現在開発中の可搬型の反電子ニュートリノ検出器 PANDA(Plastic Anti-Neutrino



理学部一号館に設置されているアクシオンヘリオスコープ Sumico

Detector Array) である。原子炉中での核分裂反応によって発生する核分裂破砕片のベータ崩壊により、反電子ニュートリノが発生する。厳重な遮蔽により、通常の放射線は原子炉格納容器の外には漏れてこないが、反電子ニュートリノはほとんど遮蔽されることなく外部に出てくる。この反電子ニュートリノを検出することにより、原子炉の運転・停止や熱出力などの運転状況を知ることが可能である。われわれは、関西電力大飯発電所において、トラックに積んだ試作器による測定を行い、原子炉からの反電子ニュートリノの検出に成功した。

国際原子力機関 (IAEA) が、核不拡散のための原子力活動の監視業務 (保障措置) の新しい手段として、原子炉のすぐ横で駐車したまま原子炉の運転状況をモニターできるようにすることを目指している。



PANDA deployed in the van beside the reactor building of Ohi Power Station in Fukui, Japan.

¹理学部ホームページ内「望遠鏡物語」
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ken/telescope/04.html> を参照

宮下研究室

宮下精二教授、森貴司助教

1 研究テーマ

統計力学、物性理論：具体的には

- (1) 相転移臨界現象の統計力学、
- (2) 協力現象の動的性質、非平衡統計物理、
- (3) 量子ダイナミクス、

などが主なテーマ。研究テーマとして「相互作用現象のモデリングと制御」をあげている。ここで相互作用現象とは、造語で多体の要素が相互作用している系での協力現象といった意味のつもりである。このテーマについて統計力学的な研究を進め、いろいろな系でのおもしろい現象の機構解明やより新しい現象の発見、さらにはその背後にある普遍的な物理原理の探求をめざしている。

2 最近の研究テーマ

2-1. 新しいタイプの相転移、協力現象

多くの構成要素からなる系は互いの相互作用のため、多彩な協力現象を示す。特に、マクロな特異性を引き起こす相転移現象は統計力学の重要なテーマである。相転移は、秩序化を引き起こそうとする相互作用と、それを乱そうとする擾乱効果の競合によって生じるが、相互作用の間に矛盾があるフラストレーションを持つ系や、秩序変数が多数の縮退を持つ系、熱的擾乱でなく量子ゆらぎが重要な役割をする量子相転移を示す系などでは特に興味深い現象が生じる。

最近のテーマとして、スピנקロスオーバー物質や電荷移動物質の系の相転移について研究している。ここでは、電子状態の変化によって基本構成単位の体積が変化し、そのための弾性エネルギーによって生じる実効的長距離相互作用によって新しいタイプの協力現象が現れる。特に、長距離相互作用がある場合には、系の振る舞いが、系全体の大きさに依存するマクロ的な新しいタイプのダイナミクスを示すことがわかり、その特徴の統計力学的性質についても調べている。

2-2. 非平衡現象の統計物理学

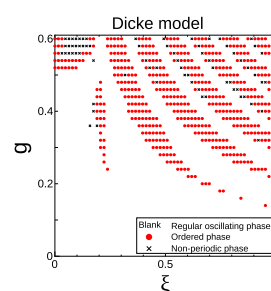
相転移に伴う系の状態変化である動的臨界現象や、外場や外圧、温度変化、さらには光照射などによって引き起こされる系のミクロ・マクロの実時間ダイナミクスも興味深いものであり、たとえ

ば、スピנקロスオーバー系の光誘起磁気相転移の磁化スイッチング機構や、相互作用が長距離の場合に系が示す動的振る舞いの研究も進めている。また、拡散現象などに関する数理物理学的研究や、平衡状態の実現機構など統計力学の基礎的な性質についても研究を進めている。

2-3. 量子ダイナミクス

動的な外場のもとでの系の量子運動、特に、量子干渉によって生じる Non-trivial resonance 現象、ナノ磁性での量子ダイナミクスにおける非断熱遷移機構、また熱浴との相互作用で起こる Magnetic Foehn 現象、量子トラップによる粒子移送、格子操作による量子磁性制御などを明らかにしてきた。このような外場の変化によって状態を断熱的、非断熱的にコントロールすることにより、量子力学ならではの量子情報処理の新しい機構の基礎研究の開拓を目指している。さらに、キャビティ内に閉じ込められた原子集団、あるいはスピン集団が光子との相互作用によって示す、optical bistability や Dicke 転移などの協力現象について研究を進めている。そこでは、外場による駆動、散逸機構、そして量子力学的干渉によって様々な新規現象が出現する。

また、量子系でどのように熱平衡状態が実現されているかなど統計力学の基礎的な問題についても研究を進めている。



多くの2準位系を2準位系を含むキャビティを共鳴周波数で駆動した場合に現れる、励起モードによる対称性破れを伴う非平衡秩序相の相図 T. Shirai, T. Mori, and S. Miyashita: J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **47** (2014) 025501 より転載。

村尾研究室

村尾美緒 准教授 添田彬仁 助教

1 量子情報とは

当研究室は、物理学の中でも最も新しい分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報は、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるといえるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット」を基本単位とする（図参照）。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として近年注目を集めている。量子情報処理の例としては、量子計算、量子暗号、量子テレポーション等が提案されている。

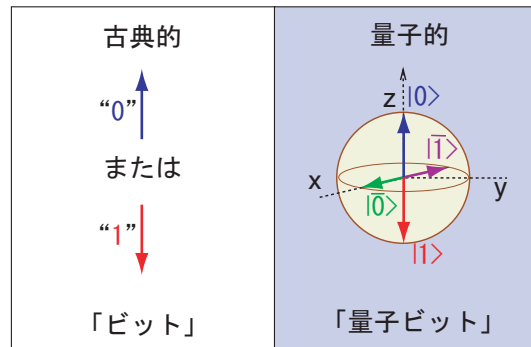
2 当研究室では

計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメント^注など量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させていることが特徴である。最近では、量子ネットワークでつながった小規模量子計算機からなる分散型量子情報処理の研究や、量子計算機と乱択アルゴリズム併用した量子系のシミュレーション、エンタングルメントを用いた量子計算の並列化と因果性の解析、トポロジカルな量子系におけるエンタングルメントの操作論的な定式化など、多岐にわたるテーマを関連づけながら研究を進めている。

ところで、量子情報分野のほとんどの成果は過去20年間に行われたものであり、物理学の他の分野に比べて研究者の平均年齢は若く、20代で有名な教科書を書いた人(Nielsen)もいるくらいである。量子情報は数学・計算機科学・情報工学とも関

連が深いため、物理のみならず幅広い視野をもって研究することが望まれる。量子情報では、いわゆる『物理的直感』に反する現象も多く、先入観を排して論理のみに基づいて証明を詰めることが重要となる一方で、発想の転換によって新たな手がかりをつかむ発想力や独創性も不可欠である。このため、異なる背景を持つ国内外の様々な研究者との議論を通じて効率良く研究を進める場合が多い。

当研究室では、柔軟な発想で本質を探求する能力・自己マネジメント能力・英語で議論する能力の指導に重点を置き、世界の第一線で活躍できる人材の育成を目指している。



図：ベクトル表示での古典情報（ビット）と量子情報（量子ビット）との比較。ビットは上向き“0”または下向き“1”のいずれかのベクトルのみをとるが、量子ビットは上向き状態 $|0\rangle$ と下向き状態 $|1\rangle$ のみならず、これらの任意の量子力学的重ね合わせ状態をとることができるため、球面上どの向きのベクトルもとることができる。

注：エンタングルメントとは複数の部分系からなる量子系において個々の部分系状態の積では表されないような「分離不能な状態」に現れる非局所的相関である。アインシュタインもを悩ませたエンタングルメントは、古典的情報処理にはない量子情報処理独自のリソース（資源）として非常に重要であり、量子情報処理が古典情報処理より優位である鍵であると考えられている。しかし、3粒子間以上の多粒子間エンタングルメントや多準位系・無限準位系のエンタングルメントに関しては研究は発展途上であり、未解決の問題が多く残っている。

研究室ホームページ:

<http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexj.htm>

諸井研究室

諸井 健夫 教授 中山 和則 助教

1. はじめに

本研究室では、素粒子物理学、なかでも特に標準理論を超えた素粒子理論と、それに基づく宇宙の進化の理解とを目的として、研究を行っています。標準理論を超えた素粒子理論や初期宇宙論に関連する全般が研究対象で、特に主要な研究内容は以下の通りです：

- 素粒子模型の構築とその実験的検証方法の探求
- 素粒子現象を記述する場の理論の理解
- 宇宙進化のシナリオの構築

2. 研究の背景

素粒子標準理論は、テラスケール（約 1TeV 程度のエネルギースケール）までの高エネルギー現象をほとんど正しく説明することができます。しかしこれは、我々が究極の理論を手に入れたということではありません。むしろ、多くの素粒子物理学研究者は、さらに高いエネルギースケールにはきっと標準理論を内包する未知の理論が存在すると考えています。これは根拠の無い期待ではなく、むしろ標準理論に内在する「不自然さ」を解消するためにどうしても必要なことなのです。

宇宙の進化を理解する上でも多くの謎が残されています。例えば宇宙暗黒物質の起源、宇宙に反物質がほとんど存在しない理由、さらには宇宙初期に起きたと考えられるインフレーションのメカニズムなどについて、素粒子標準模型の枠内での説明は不可能です。これらの謎を解明し、正しい宇宙模型を構築するためにも、標準理論を超える理論が不可欠です。

3. 研究内容

素粒子物理学や初期宇宙論の研究には、場の理論や重力理論についての深い理解が必要となると共に、素粒子実験や宇宙観測実験についての知識が要求されます。それら幅広い研究を総合的に進めつつ、テラスケール以上のエネルギースケールにおける素粒子理論を確立し、その知見を用いて正しい初期宇宙像を構築することが、本研究室における活動の大きな目標です。

テラスケール以上のエネルギースケールで現れる素粒子模型として、特に興味深いのは「超対称

模型」と呼ばれる模型です。超対称模型にはボソン（スピンが整数の粒子）とフェルミオン（スピンが半奇数の粒子）がペアとなって現れるため、この模型は超対称粒子と呼ばれる新しい粒子の存在を予言します。超対称性を持つ理論の構造を理解し、超対称粒子が自然界で果たし得る役割を明らかにすることは、重要な研究内容のひとつです。また、超対称模型に基づく宇宙進化のシナリオの構築についても研究を進めています。例えば、超対称粒子のうちで最も軽い粒子は安定になることが知られていますが、その粒子は宇宙暗黒物質の極めて有力な候補です。

無論、超対称模型以外にも、標準理論を超えた素粒子模型の可能性は様々考えられます。テラスケールより高いエネルギースケールの物理に関して、新たな可能性を探り、その検証方法を探求することは、興味深い研究対象です。それと併せて、新たな素粒子模型に基づく宇宙進化のシナリオについてもさらに理解を深めていく予定です。

ヨーロッパの陽子型加速器（LHC）は現在多くの成果を出しつつあり、特に素粒子標準模型の最後の未発見粒子であったヒッグス粒子の発見を果たしました。また、宇宙観測の発展もめざましいものがあります。特に、最近 BICEP2 実験は、宇宙背景放射の揺らぎの中に、インフレーション中に量子揺らぎとして生成されたと考えられる重力波のシグナルを発見したと発表しました。今後は、LHC 実験や宇宙背景放射の観測結果以外にも、ニュートリノや荷電レプトンのフレーバーの破れに関する実験、暗黒物質の直接及び間接検証実験、高エネルギー宇宙線の観測など、様々な実験の結果が次々と明らかになってきます。それらの素粒子実験や宇宙観測を視野に入れた理論的研究は、高いエネルギースケールの物理や初期宇宙の様相を明らかにする上で今まで以上に重要となると考えており、今後さらに研究を進めたいと考えています。

研究室ホームページ:

素粒子論研究室

<http://www-hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

個人のページ

<http://www-hep.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~moroi>

山本研究室

山本智教授 坂井南美助教 渡邊祥正助教

1 はじめに

星と星との間の空間には、ガスと塵からなる希薄な「雲」- 星間分子雲 - が存在している。星間分子雲はやがては自己重力で収縮して密度を上げ、中心部分で新しい恒星と惑星系が誕生する。その過程は、現代宇宙物理学の主要な課題として活発な研究が世界的に展開されている。星間分子雲は温度が 10 K 程度と非常に低いので、電波の観測ではじめてその分布や物理状態を調べることができる。また、分子の回転スペクトル輝線を観測することで、その化学組成を詳細に捉えることができる。本研究室では、電波のなかでもサブミリ波領域（波長 1 mm ~ 0.1 mm）の観測技術を開拓しながら、星形成から惑星系形成に至る物理過程と物質進化についての研究を進めている。

2 . 星形成領域の観測的研究

国内外のミリ波サブミリ波望遠鏡を用いて、近傍星間分子雲中の星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成から惑星系形成に至る物質進化に着目し、化学組成をもとに星・惑星系形成過程を探る新しい手段を開拓している。

星形成の研究では、その「始まり」を観測的に捉えることが重要な課題である。誕生する星の質量や形態（単独、連星など）は初期段階で決定されるからである。その目的のために、 HCOOCH_3 などの星間分子としては複雑な有機分子の観測を進めている。そのような有機分子は、星形成以前には存在しないが、星形成とともに星間塵の氷マンツルの蒸発が関与して生成される。従って、これらの分子の検出により、星形成の「始まり」を捉えることができる。事実、非常に若い原始星 NGC1333 IRAS4B において、 HCOOCH_3 のスペクトルを検出することができた。

一方で、星形成領域の化学組成には天体ごとのバリエーションがあることを見出した。その最も端的な例は、おうし座の L1527 である。そこでは星形成領域ではほとんど見られない炭素鎖分子が豊富に存在する。これは、原始星近傍において、星間塵からの CH_4 の蒸発が引き金となって爆発的に炭素鎖分子が生成しているものと見られる。これを Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) と名付けた。一方、この天体では HCOOCH_3 のような複

雑な有機分子は見られない。このような化学組成のバリエーションは、主に星ができるまでの時間スケールの違いを反映しているものと考えられ、化学組成をもとに星形成の物理過程を探る新しい手段として注目されている。また、星形成領域の化学組成のバリエーションは、将来形成される惑星系にも伝わると考えられる。その伝播のメカニズムの解明は、太陽系の起源の理解につながる重要な課題であり、現在、南米チリに建設された ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 望遠鏡を用いて、研究を進めている。(下図)。

3 . テラヘルツ・ヘテロダイナミクスへの挑戦

サブミリ波領域での観測研究とともに、さらに周波数の高いテラヘルツ帯 (1 THz - 3 THz) における観測技術の開拓を進めている。そのために、専用装置を使って数 100 nm のマイクロブリッジ構造をもつ超伝導ホットエレクトロン・ボロメーター (HEB) ミクスア素子の開発を行っている。現在のところ、NbTiN を超伝導物質に用いた導波管型 HEB ミクスアにおいて、0.8 THz 帯で 350 K、1.5 THz 帯において 490 K の世界最高水準の受信機雑音温度を達成している。超伝導薄膜の改良や素子構造の最適化を通して、一層の性能向上を追求している。この受信機をチリのアタカマ砂漠にある ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡に搭載し、1.5 THz 帯にある CH, HD^+ , H_2D^+ などの基本的分子を観測することにより、星形成から惑星系形成に至る化学進化を探求することを目指している。すでに試験搭載に成功しており、科学運用に向けた準備を進めている。

星間分子雲から惑星系への物質進化

