

PHYSICS  
2024

東京大学理学部  
物理学科

進学案内資料

## 物理学科への招待

物理学専攻長、物理学科長 松尾 泰

物理学とは何か、実験を通して得られた物質や力の性質を基礎方程式に落とし込み、そこから幅広い現象を説明する学問です。物理学はミクロな素粒子・原子核からマクロな宇宙まで幅広いスケールをカバーし、全ての自然科学の基盤であると同時に、自然科学の最先端にあって現在でもダイナミックに変化し続けています。

20 世紀には物質の成り立ちを探る原子核物理学や素粒子物理学が発展し、物質の構成要素が原子、原子核、素粒子と順次明らかになりました。磁性や電気伝導・超伝導のように、原子や電子が凝縮することで現れる性質を研究する物性物理学も生まれました。これらは半導体や磁気デバイス、レーザー技術と光通信、太陽光発電や蓄電池、医療用 MRI、原子力利用など、現代社会を支える様々な産業技術につながっています。さらに 20 世紀末から今世紀にかけて開発された様々な実験・観測装置は、物理学に新たな展開をもたらしました。たとえば走査プローブ顕微鏡は物質表面の不均一な構造を、ハッブル宇宙望遠鏡はダークマターの存在を明らかにし、カミオカンデ、スーパーカミオカンデによってニュートリノ天文学の幕が開きました。アインシュタインの最後の宿題と言われた重力波もついに検出されました。非平衡物理、生物物理、量子情報、AI の利用なども大きく進展していますし、ブラックホールの性質を用いて様々な物理現象を説明しようという試みも行われています。物理学は今後も私たちの自然観をより豊かにし、未来社会を切り開く原動力となると考えています。

理学部物理学科には約 40 名の教授・准教授・講師が在籍しています。また大学院の物理学専攻は物理学科教員のほか、物性研究所、宇宙線研究所、カブリ数物連携宇宙研究機構など 14 の学内組織、さらには外部機関である高エネルギー加速器研究機構 (KEK)、理化学研究所、宇宙科学研究所の教員も含めて、講師以上の教員数が 130 名を超える、世界でも最大規模の物理学の教育・研究拠点であり、広大な物理学のほとんどの領域をカバーしています。

理学部物理学科では 2～3 年生で学問体系の基礎となる量子力学、熱力学・統計力学、相対性理論、固体物理学と関連する実験技術などを学び確かな土台作りを行います。4 年生の研究室配属や大学院共通講義では最先端の研究に触れて実践することができます。卒業生の多くは大学院に進学し研究者を目指しますが、社会に出て物理学科で学んだ原理原則に立ち戻って問題を理解し解決するという能力を活かしている人も多くいます。

自然界の成り立ちや仕組みを理解したいという好奇心と探求心にあふれた方、曇りのない目と柔軟な発想で自然科学の新しい地平を切り拓きたい方、あるいは社会の課題解決に物理学を役立てたい方を、私たちは心から歓迎します。

## 東京大学理学部物理学科 教員一覧

氏名	専攻分野	研究内容
相川清隆	浮揚オプトメカニクス・原子分子物理学	浮揚オプトメカニクスとは、真空中に浮揚させたナノサイズの単一固体粒子の運動を量子レベルまで極限的に冷却することで拓かれる新しい研究分野です。当研究室では、浮揚ナノ粒子の運動をレーザー等で冷却する新しい技術の開拓から、ナノ粒子の運動の量子性を探る研究、ナノ粒子を利用した高感度センサーの開発、ナノ粒子を含むハイブリッド量子システムの実現まで、幅広い研究に取り組んでいます。
蘆田祐人	物性理論・量子物理学	量子多体物理と量子光学の境界領域における理論的研究。
安東正樹	重力波宇宙物理学・精密基礎物理実験	宇宙を見る新しい目として重力波天文学の発展を目指す。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、情報熱力学、物性理論、機械学習、物理学と人工知能の融合	冷却原子気体の理論、非平衡開放系の物理、情報熱力学、測定理論、物性理論、物理学と人工知能の融合
江尻 晶	プラズマ物理学	プラズマ物理。プラズマは、大自由度、非線形、非平衡で特徴づけられる。これらから生じる物理を明らかにするために、プラズマで観測される揺らぎに焦点を当てた研究を行っている。当研究室は辻井直人准教授とともにTST-2球状トカマク装置(東大)を用いて実験を行っている。さらに、LHD装置(核融合研)、QUEST装置(九大)との共同研究も行っている。
岡田康志	生物物理学	当研究室では、超解像顕微鏡など最先端のイメージング技術を開発し、機械学習やAI技術と組み合わせることで、細胞内で営まれる生命現象の定量的な計測を行っています。たとえば、細胞の中は、試験管内であればゲル化・ガラス化してしまう程の高濃度のタンパク質溶液であるにもかかわらず、生きている細胞の中では流動性が保たれています。熱ゆらぎより桁違いに大きい非熱的ゆらぎに駆動される非平衡環境が維持されているからだと考えられています。そのような非平衡環境における分子の運動や反応を計測し、非平衡統計力学・情報熱力学などの理論的枠組みで理解することで、生命とは何かという問いに物理学の立場から迫りたいと考えています。
岡本 徹	物性物理学	低次元電子系を中心とした物性実験。液体ヘリウム温度から希釈冷凍機を用いた極低温にいたる温度領域において、半導体二次元電子系や金属単原子層膜を対象に、量子ホール効果や超伝導をはじめとする量子現象の解明や新奇現象の探索を行っている。特に強磁場中の電気伝導特性や走査トンネル顕微鏡を用いた電子状態の観察などに興味をもっている。
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・ホール効果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、およびその応用。
樺島祥介	統計力学、情報理論、機械学習	情報科学の問題の多くは沢山の変数が複雑に絡みあった推定問題や連立方程式で表現されます。それらは沢山の要素が互いに相互作用する物理系の性質を調べる問題とそっくりな構造をしています。こうした観点から物理学の概念や解析法にもとづいて、情報通信、組み合わせ問題、機械学習などに現われるさまざまな問題を分析したり、効率的な求解アルゴリズムを開発する研究を行っています。
川口喬吾	生物物理・非平衡物理・機械学習	生命現象の仕組みを物理学的な視点から解明することを目指している。特に現在は多細胞現象や細胞分化現象、それを支える細胞内の多分子現象に興味があり、細胞観察実験から機械学習、数値計算や理論構築など、必要に応じて手段を変えて研究している。
日下暁人	宇宙物理学実験・観測の宇宙論	宇宙背景放射の観測を通じた宇宙物理学。初期宇宙の探索により、インフレーション宇宙論の検証と重力場の量子ゆらぎ検出を目指す。また、宇宙進化の観測により、宇宙の暗黒成分(暗黒エネルギー、暗黒物質、暗黒放射、宇宙背景ニュートリノ)を探る。超伝導・量子技術を用いた暗黒物質探索など、新技術を用いた宇宙物理研究の可能性も模索する。装置開発やデータ解析を駆使した実験物理学的アプローチで、宇宙の素顔に迫る。

氏名	専攻分野	研究内容
小林研介	量子計測・量子物性	結晶中に存在する色中心を量子力学的に制御することによって、磁場・電場・温度・圧力などを超精密に測定することができる。量子力学の原理を用いるこのような測定手法を量子計測と呼ぶ。私たちは、超伝導体・磁性体・トポロジカル物質などに対して量子計測を行うことにより、これまで誰も見たことがない非平衡現象や量子多体現象を可視化することを目指している。
酒井明人	強相関量子多体系	電子相関の強い多体系には未だ人類が手にしていない量子状態や素励起が数多く潜んでいる。それらを物質合成と低温物性測定を駆使して実験的に研究している。これまで行ってきた研究は、(i) 強相関電子系の多極子秩序と重い電子超伝導、(ii) フラストレート磁性金属の量子臨界現象、(iii) ワイル半金属、ノードライン半金属、ラッティンジャー半金属におけるベリー位相効果(異常ネルンスト効果や異常ホール伝導率)等である。
酒井広文	最先端レーザー技術 を駆使した原子分子 物理学実験	最先端レーザー技術を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気体分子の配列・配向制御とその応用、(2) 非摂動論的高次非線形光学過程(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、(3) 軟X線領域の単一アト秒パルス発生とその偏光制御、及び原子分子中の電子の超高速ダイナミクスの制御への応用、(4) X線自由電子レーザー光を用いた分子構造とその超高速ダイナミクスの観測、(5) 整形されたフェムト秒レーザーパルスによる原子分子中の量子過程制御。
島野 亮	光物性物理	レーザー分光を用いた量子物性の研究を行っている。光による誘起される相転移や非平衡ダイナミクスから、超伝導に代表される量子相発現機構の解明、マクロ量子状態の光操作、光による新規量子相の創成を目標としている。非従来型高温超伝導体、金属超伝導体、強相関電子系、トポロジカル物質、半導体電子正孔系など固体量子物質全般を対象とする。可視光領域からテラヘルツ波領域までの広い光子エネルギー範囲の先端光源開発、非線形レーザー分光法、超高速時間分解分光法などの観測技術の開発を並行して進めている。
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、などに具体的興味の中心がある。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。
竹内一将	非平衡物理学、実験 統計力学、ソフトマ ター、生物物理学	大自由度の非平衡現象を律する物理法則の理解を目指して、液晶、粉体などのソフトマターや、バクテリアなど微生物の集団を用いた実験研究を展開している。液晶実験では、乱流に伴う非平衡ゆらぎの普遍的統計法則や、位相欠陥ダイナミクスを主に研究している。生物実験は、微小流体デバイス等で実験系をデザインし、微生物集団がいかなる協同現象を示すか、それが物理法則として理解できるか等を調べている。個別の現象の理解はもとより、現象に依らない共通の物理法則を抽出すること、そのような俯瞰的な視点から物事を捉えることを目指し、研究室単位では他にも様々な対象を扱っている。
辻 直人	物性理論、非平衡量 子多体系	量子多体系における非平衡現象や非平衡物性、統計力学に興味をもって、物性物理の理論研究をしている。一見すると量子系を非平衡状態にすることで秩序が乱され、外から加えたエネルギーが熱に変わり、量子系の面白い性質が掻き消えてしまうように思われる。ところが近年、非平衡にすることで新たな秩序や物性が発現する例が次々に見つかっている。それらの現象を理解し、非平衡物性の可能性を広げていくことを目標としている。
辻井直人	プラズマ物理学	プラズマ波動によるプラズマの構造形成を理解することで、波動による効果的な核融合プラズマ生成・制御手法を開発すること。パラメトリック崩壊不安定性のような非線形波動物理、波動・粒子の共鳴的相互作用による粒子の位相空間輸送制御、プラズマ波動によって駆動される環状プラズマの大域的な構造形成などを、実験と数値計算の両面から定量的に理解することを目指す。江尻教授と東大柏キャンパスのTST-2球状トカマクを用いて研究を行うとともに、世界最高性能のトカマクであるJT-60SA(量研機構)における共同研究も行なっている。
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、超高圧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・物性理論	モンテカルロ法などのサンプリング手法、経路積分に基づく量子ゆらぎの表現、特異値分解やテンソルネットワークによる情報圧縮、統計的機械学習の手法など計算物理における新たな手法を開拓している。それらを駆使することで、量子スピン系から現実の物質にいたるまで、さまざまな量子多体系に特有の状態、相転移現象、ダイナミクスの解明を目指す。また、量子コンピュータの基礎理論や量子機械学習アルゴリズムの研究、次世代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・公開も進めている。
中島康博	素粒子・宇宙素粒子 物理学実験	ニュートリノの素粒子としての性質の実験的研究、およびニュートリノを用いた宇宙天体観測。特に、ガドリニウムを加えたスーパーカミオカンデにおける超新星背景ニュートリノの世界初観測、そして大強度陽子加速器J-PARCで生成したニュートリノを用いた、物質・反物質対称性の破れの測定を目指し実験を行っています。また、建設が始まったハイパーカミオカンデにおける観測に向けた研究も行っています。

氏名	専攻分野	研究内容
中辻 知	量子物性・スピントロニクス	物性研究の大きな潮流を先導するのは、新しい概念の創造であり、それを具現する量子物質の発見です。この原動力となっているのが、理論的な洞察に基づいた物質探索とその合成であり、世界最高精度の物性測定技術です。私達の研究室では、こうした独自の量子物質とそのデバイス構造をデザインし、様々な環境での精密な物性及びスピントロニクス測定を自ら行うことで、新しい物理現象とその背後にある物理法則の解明を進めています。具体的には、トポロジカル量子物性、ワイル半金属、超伝導、量子スピン液体、反強磁性スピントロニクス、エネルギーハーベスティングなどの幅広い研究課題を研究室の最新設備を使って進めています。また、そこで得た成果をもとに、多くの欧米の研究室と最先端の共同研究を展開しています。
中村 哲	原子核物理学実験	ストレンジネス核物理、ハイパー原子核の研究。大強度電子加速器施設において、ストレンジクォークを含む量子多体系であるハイパー原子核の研究を推進している。主な研究拠点は1) 米国ジェファーソン研究所(JLab)、2) ドイツマインツ大学(MAMI)、3) 東北大学電子光物理学研究センター(ELPH)というストレンジクォークを作ることができる高エネルギーの大強度電子加速器施設であるが、これらに加えて、4) 東海の大強度陽子加速器施設J-PARCにおけるハイパー核分光実験の推進、および次世代プロジェクトとして準備が進んでいる高分解能高強度ビームライン(HIHR)における次世代の $\pi$ 中間子ビームを用いたハイパー核実験を主導している。
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、原子配列、電子/スピン物性、機能特性などを多角的に研究する。具体的には電子バンド状態、電子・スピン輸送特性、光学応答、相転移などを、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。1原子層の超伝導やキャリアの後方散乱の抑制などを最近発見した。
濱口幸一	素粒子論・初期宇宙論	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の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。これまで私は、標準模型を超える物理の模型構築、現象論的研究、初期宇宙論への応用といった研究を行ってきました。また、最新の素粒子実験や宇宙観測の結果を模型構築に反映させたり、新しい実験・観測手法を提案するような研究も行っています。
林 将光	物性物理学	物性物理学において、電子がもつ角運動量「スピン」は磁性や電気伝導、光応答や超伝導など、多くの局面で重要な働きをすることが知られている。電子や光子、物質中の素励起であるフォノン(格子振動)やマグノン(磁気励起)など、スピンを持つ粒子や波動は物質の中でどのように躍動し、どのような物性を誘起するのか。これらの疑問に答え、スピンの物理学を確立する研究を行っている。
馬場 彩	宇宙物理学実験	宇宙は冷たく空っぽの世界に見えるが、実は熱く激しい天体現象が普遍的に存在することが分かってきた。我々はこれら超新星残骸やブラックホールといった激動天体からのX線・ガンマ線を人工衛星搭載検出器で観測し、宇宙の力学的進化・化学進化を探っている。世界各国のX線宇宙衛星の観測した天体データを解析するとともに、日本を主体としたX線宇宙衛星「XRISM」の開発や、超小型衛星を用いた偏光X線撮像計画cipherの立案、宇宙観測最後の窓であるMeVガンマ線観測計画GRAMSの開発などを行っている。
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。
古澤 力	生物物理学(理論/実験)	生物物理学: 適応・進化・発生・免疫といった多数の要素が関与するダイナミックな生物現象について、理論と実験の両面から解析する。計算機シミュレーション、理論解析、そして構成的生物学実験を統合し、個々の分子の詳細に依存しない普遍的な性質を切り出すことにより、生物システムの状態とその遷移を記述するマクロレベルの状態論の構築を目指す。
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論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、M理論に現れるブレーンの定式化、それに関連する新しい対称性や幾何学、また、ゲージ理論や低次元可解模型に現れる無限次元対称性などがあげられる。
三尾典克	レーザー応用、光計測	レーザーとその応用に関する研究を進めています。レーザーの発明は1960年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く利用されています。また、現代社会を支える基盤技術としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などでなくてはならないものとなっています。当研究室は、理学系研究科附属フotonサイエンス研究機構(IPST, <a href="http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/">http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/</a> )に所属しており、光を使って学術の深化と産業への展開を目指しています。具体的には、レーザー加工など高出力のレーザー光と物質の相互作用やそれにかかわる様々な物理と技術の研究をしています。

氏名	専攻分野	研究内容
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はなく、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、量子学習、量子操作などへ応用するための量子アルゴリズムや量子プロトコルの理論的研究を行っている。最近では、高階量子演算と分散型量子計算の研究を通して、量子情報処理および量子プログラミングにおける非局所性、因果構造、並列性と匿名性の解析を進めている。
諸井健夫	素粒子論・宇宙論	素粒子理論・素粒子論的宇宙論
横山順一	宇宙論・重力波	初期宇宙論と重力波物理学。場の量子論、素粒子物理、一般相対論等の基礎理論を用いて初期宇宙の進化を再現する研究と、宇宙背景放射等の観測データから出発して初期宇宙の物理に還元する研究を並行して行っています。また、KAGRAの稼働にともない、重力波データ解析の基礎研究、また重力波を用いた宇宙論の研究を行っています。
横山将志	素粒子物理学実験	ニュートリノ振動を通じたCP対称性の破れや世代混合などの研究、および陽子崩壊の探索により、素粒子物理の大統一スケールでの物理法則を探る。スーパーカミオカンデや大強度陽子加速器J-PARCを使ったニュートリノ振動の研究や、次世代実験・ハイパーカミオカンデの建設に関わる研究を進めている。
吉田直紀	宇宙物理学	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とその共進化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。新たな計算手法の開発や超高速計算に取り組むとともに、機械学習を用いた大規模観測データ解析や超新星検出などデータサイエンスもすすめている。
Haozhao Liang	Nuclear theory	Our research mainly focuses on quantum many-body theories and the relevant interdisciplinary studies in nuclear physics, nuclear astrophysics, and cold-atom physics. Key topics include nuclear density functional theory (DFT), the structure of exotic nuclei, nuclear collective excitations, weak-interaction processes, r-process nucleosynthesis, quantum tunneling, few-body correlations, and so on.

以上 40名



# 2024 年度 学部時間割





2024年度

2年 Aセメスター

	1限	2限	3限	4限	5限
月		電磁気学Ⅰ	解析力学(A1ターム)		
			量子力学Ⅰ(A2ターム)		
火		物理実験学	物理学演習Ⅱ		
水		物理学のための 科学英語基礎			
木		物理数学Ⅰ(A1ターム)		物理学演習Ⅰ	
		物理数学Ⅱ(A2ターム)			
金					

3年 Sセメスター

	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(量子力学Ⅱ・電磁気学Ⅱ)		
水	現代実験物理学Ⅰ	計算機実験Ⅰ	物理学実験Ⅰ		
木	量子コンピューター実習	流体力学	物理学実験Ⅰ		
金	代数学XC	統計力学Ⅰ	物理学演習Ⅳ(統計力学Ⅰ S2・A1ターム)		

3年 Aセメスター

	1限	2限	3限	4限	5限
月		物理学ゼミナール	物理学実験Ⅱ		
火	光学	量子力学Ⅲ	現代実験物理学Ⅱ	物理学演習Ⅴ(量子力学Ⅲ・電磁気学Ⅲ・統計力学Ⅰ)	
	解析学XC				
水	生物物理学	物理数学Ⅲ	物理学実験Ⅱ		
木		固体物理学Ⅰ	物理学実験Ⅱ		
金	電磁気学Ⅲ	統計力学Ⅱ	物理学演習Ⅳ(統計力学Ⅱ S2・A1ターム)		計算機実験Ⅱ

4年 Sセメスター

	1限	2限	3限	4限	5限
月	機械学習概論	場の量子論Ⅰ	サブアトム物理学	統計力学特論	現代物理学入門
			計算科学概論		化学物理学
火	応用数学XC	一般相対論	特別実験Ⅰ 理論演習Ⅰ		
水	系外惑星	量子光学	特別実験Ⅰ 理論演習Ⅰ		
木	量子コンピューター実習	固体物理学Ⅱ	特別実験Ⅰ 理論演習Ⅰ		
金	プラズマ物理学	宇宙物理学		生物物理学特論Ⅱ	
	代数学XC				

4年 Aセメスター

	1限	2限	3限	4限	5限
月		現代物理と機械学習	素粒子物理学	場の量子論Ⅱ	物理学のための 科学英語特論
				連続系アルゴリズム	
火	光学	原子核物理学	特別実験Ⅱ 理論演習Ⅱ		
	解析学XC				
水		電子回路論	特別実験Ⅱ 理論演習Ⅱ		
木		固体物理学Ⅲ	特別実験Ⅱ 理論演習Ⅱ		
金	非平衡科学		普遍性生物学	重力波物理学	



## 2023年度に行われた講義の概要



# 1 2年生 A セメスター

## 1.1 電磁気学 I : 横山 将志

### 1. 特殊相対性理論

1.1 光の伝播とエーテル

1.2 Michelson-Morley の実験

1.3 Lorentz 変換

1.4 種々の相対論的效果

1.5 時空の構造

### 2. 相対論的力学

2.1 4元ベクトル

2.2 相対論的エネルギーと運動量

2.3 相対論的運動学

2.4 相対論的力学

### 3. 電磁気学と特殊相対論

3.1 相対論効果と磁気

3.2 電磁場の変換

3.3 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場

3.4 電磁場テンソル

3.5 電磁場テンソルと Maxwell 方程式

### 4. 電磁場中の粒子の運動

4.1 一様な静電場中の運動

4.2 一様な静磁場中の運動

4.3 非一様な静磁場中での運動

4.4 一様な静電磁場中の運動

### 5. 電磁場のエネルギーと運動量

5.1 電磁場のエネルギーと Poynting の定理

5.2 電磁場の運動量と Maxwell の応力テンソル

5.3 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

5.4 電磁場のラグランジアン

## 1.2 解析力学 : 常行 真司

### 1 ニュートンの法則からラグランジュ形式へ

1.1 ニュートンの法則

1.2 ガリレイ変換

1.3 オイラー-ラグランジュ方程式

1.4 一般化座標と拘束条件

1.5 ダランベールの原理

1.6 ホロノーム系の E-L 方程式の導出

### 2 最小作用の原理

2.1 最小作用の原理

2.2 変分法

2.3 自由粒子のラグランジアン

2.4 相互作用する質点系のラグランジアン

2.5 ラグランジュ未定乗数法と拘束条件

### 3 対称性と保存則

3.1 保存量

3.2 エネルギー保存則

3.3 運動量保存則

3.4 角運動量保存則

3.5 循環座標と保存則

3.6 ネーターの定理

### 4 さまざまなラグランジアン

4.1 回転座標系とコリオリ力

4.2 速度に比例する摩擦力 (抵抗力)

4.3 電磁場中の荷電粒子

### 5 ハミルトニアンと正準方程式

5.1 ルジャンドル変換

5.2 ハミルトニアン

5.3 正準方程式

5.4 ポアソン括弧と保存量

5.5 ポアソン括弧の諸性質

### 6 正準変換

6.1 正準変換

6.2 正準変数と母関数

6.3 正準変換の具体例

6.4 無限小変換

6.5 正準変換とポアソン括弧

6.6 リウヴィルの定理

6.7 ハミルトン-ヤコビの方程式

### 7 相対論と解析力学

### 1.3 量子力学 I : 日下 暁人

#### 1. イントロダクション

- 1.1 古典論とその綻び
- 1.2 量子力学的効果の例

#### 2. シュレディンガー方程式

- 2.1 シュレディンガー方程式と波動関数
- 2.2 確率解釈と物理量の期待値
- 2.3 不確定性関係

#### 3. 1次元の束縛状態

- 3.1 1次元の箱に閉じ込められた粒子
- 3.2 井戸型ポテンシャル

#### 4. 1次元の散乱

- 4.1 自由粒子の波動関数：平面波
- 4.2 散乱問題のいくつかの例

#### 5. 量子力学の基本的な性質

- 5.1 波動関数を用いた方法まとめ
- 5.2 エルミート演算子と物理量
- 5.3 測定値と期待値

#### 6. 形式的な体系

- 6.1 ディラックの記法と演算子を用いた定式化
- 6.2 ハイゼンベルグ表示
- 6.3 正準量子化

#### 7. 調和振動子

- 7.1 調和振動子の量子論的扱い：波動関数
- 7.2 調和振動子の量子論的扱い：演算子法
- 7.3 量子ビット

### 1.4 物理実験学 : 安東 正樹, 中島 康博

#### 1. 序論

- 1.1 現代物理と科学的手法

#### 2. 物理量と単位

- 2.1 国際単位系 SI
- 2.2 各種の常用単位系とその変換

#### 3. 誤差論

- 3.1 実験誤差
- 3.2 確率統計

#### 4. 計測法

- 4.1 電磁波の計測
- 4.2 温度の計測

- 4.3 距離の計測

- 4.4 その他の計測

#### 5. 実験の基礎技術

- 5.1 真空技術
- 5.2 エレクトロニクス
- 5.3 X線回折

#### 6. データ解析と可視化

- 6.1 グラフ作成
- 6.2 非線形最小自乗法
- 6.3 逆問題

#### 7. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

### 1.5 物理学演習 II (解析力学、量子力学 I) : 常行 真司, 日下 暁人, 田島 裕之、横溝 和樹

#### 1. 解析力学

- 1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事
- 1.2 一般化座標
- 1.3 振り子の運動
- 1.4 汎関数の極値問題
- 1.5 二重振り子
- 1.6 拘束問題
- 1.7 ビリアル定理
- 1.8 ばねの振動
- 1.9 ラグランジュ未定乗数法
- 1.10 保存量
- 1.11 時間に陽に依存するラグランジアン

- 1.12 戸田格子

- 1.13 分子振動

- 1.14 対称性と保存量

- 1.15 電磁場中の荷電粒子の運動 (サイクロトロン共鳴等)

- 1.16 正準変換を用いた方程式積分

- 1.17 ポアソン括弧

- 1.18 ハミルトン-ヤコビ方程式

- 1.19 リウビルの定理

#### 2. 量子力学

- 2.1 黒体放射

- 2.2 ボーアの量子模型

- 2.3 デバイ模型
- 2.4 ボーア-ゾンマーフェルトの量子化条件
- 2.5 波動方程式からシュレーディンガー方程式の導出
- 2.6 シュレーディンガー方程式
- 2.7 2重スリットを通過する電子線
- 2.8 シュレーディンガー方程式の古典極限とハミルトン-ヤコビ方程式
- 2.9 井戸型ポテンシャル

- 2.10 デルタ関数型ポテンシャル
- 2.11 エネルギー固有状態
- 2.12 粒子の反射
- 2.13 2重デルタ関数型ポテンシャル障壁の透過と反射
- 2.14 ブロッホの定理
- 2.15 線形ポテンシャルとエアリー関数
- 2.16 バイカー-キャンベル-ハウスドルフの公式

## 1.6 物理数学 I : 松尾 泰

### 1. 複素関数論

- 1.1 無限和と収束性
  - 1.1.1 数列の収束性
  - 1.1.2 級数
  - 1.1.3 無限積
  - 1.1.4 絶対収束と条件収束
  - 1.1.5 収束性の判定
  - 1.1.6 一様収束
  - 1.1.7 冪級数
- 1.2 正則関数と複素積分
  - 1.2.1 複素数
  - 1.2.2 正則性
  - 1.2.3 複素積分
  - 1.2.4 Cauchy の積分定理
  - 1.2.5 Cauchy-Goursat の定理
  - 1.2.6 Taylor 展開と Laurent 展開
- 1.3 正則関数の大局構造
  - 1.3.1 特異点の分類
  - 1.3.2 Liouville の定理
  - 1.3.3 解析接続
  - 1.3.4 多価関数とリーマン面
- 1.4 留数積分

- 1.4.1 留数定理
- 1.4.2 例 :: 三角関数・実軸上の積分・多価関数
- 1.5 発展的な話題
  - 1.5.1 部分分数展開・無限積展開
  - 1.5.2 ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数
  - 1.5.3 漸近展開と最急降下法
  - 1.5.4 デルタ関数と主値積分

### 1.6 等角写像

- 1.6.1 複素写像と等角性
- 1.6.2 等角写像の物理への応用
- 1.6.3 等角写像の例

### 2. 常微分方程式と Laplace 変換

- 2.1 常微分方程式
  - 2.1.1 解の存在と一意性
  - 2.1.2 積分により可解な微分方程式
  - 2.1.3 線形微分方程式
- 2.2 Laplace 変換
  - 2.2.1 定義
  - 2.2.2 例
  - 2.2.3 基本的な性質
  - 2.2.4 逆 Laplace 変換
  - 2.2.5 Laplace 変換を用いた微分方程式の解法

## 1.7 物理数学 II : 辻 直人

### 1. 偏微分方程式

- 1.1 導入
- 1.2 線形と非線形
- 1.3 重ね合わせの原理
- 1.4 2階の線形偏微分方程式の分類
- 1.5 境界条件
- 1.6 波動方程式
- 2. フーリエ級数

- 2.1 実フーリエ級数
- 2.2 フーリエ級数の収束
- 2.3 複素フーリエ級数
- 2.4 ベクトル空間としての見方
- 3. フーリエ変換
  - 3.1 周期  $L$  の周期関数
  - 3.2 非周期関数のフーリエ変換
  - 3.3 デルタ関数



- 4. 熱伝導方程式
  - 4.1 初期値問題
  - 4.2 初期境界値問題
  - 4.3 熱の発生がある場合
- 5. グリーン関数
  - 5.1 ポアソン方程式
  - 5.2 ラプラス方程式
  - 5.3 鏡像法
- 6. ベッセル関数
  - 6.1 ベッセルの微分方程式
  - 6.2 級数展開
  - 6.3 ベッセル関数の諸性質
  - 6.4 関連する諸関数
- 7. 直交多項式
  - 7.1 ルジャンドル多項式
  - 7.2 古典直交多項式
  - 7.3 ラゲール多項式
- 7.4 エルミート多項式
- 8. 超幾何関数
  - 8.1 ガウスの超幾何関数
  - 8.2 リーマンスキーム
  - 8.3 積分表示
  - 8.4 合流型超幾何関数
- 9. 球面調和関数と回転群
  - 9.1 球面調和関数
  - 9.2 回転操作
  - 9.3 無限小回転
  - 9.4 球面調和関数との関係
- 10. スツルム・リウビル理論
  - 10.1 スツルム・リウビル型微分方程式
  - 10.2 自己随伴演算子
  - 10.3 固有値、固有関数の性質
  - 10.4 量子力学との関係

## 1.8 物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II) : 横山 将志, 松尾 泰, 辻 直人, 石河 孝洋, 森脇 可奈

- 1.
  - 1.1 Galilei 変換
  - 1.2 級数の収束・発散
  - 1.3 級数の収束・発散: 応用
- 2.
  - 2.1 Lorentz 変換の導出
  - 2.2 Michelson-Morley の実験
  - 2.3 Weierstrass の M 判定法
  - 2.4 収束半径
- 3.
  - 3.1 速度の合成と超光速運動
  - 3.2 Lorentz 収縮に関するパラドックス
  - 3.3 Cauchy-Riemann の関係式
  - 3.4 正則関数の性質
  - 3.5 Laurent 展開
- 4.
  - 4.1 光のドップラー効果
  - 4.2 Fresnel 積分
  - 4.3 留数積分 (実積分への応用 I)
  - 4.4 留数積分 (実積分への応用 II)
  - 4.5 留数積分 (分岐線がある場合)
- 5.
  - 5.1 粒子の崩壊
  - 5.2 Kramers-Kronig の関係式
  - 5.3 部分分数表示・無限乗積表示
  - 5.4 Gamma 関数の応用
  - 5.5 Beta 関数の応用
- 6.
  - 6.1 相対論的力学
  - 6.2 相対論的散乱問題と MUonE 実験
  - 6.3 Lorentz 変換の一般論
  - 6.4 鞍点法
  - 6.5 解析接続
- 7.
  - 7.1 斜交座標系における反変・共変ベクトル
  - 7.2 相対論的質点の運動と作用汎関数
  - 7.3 Fourier 級数展開
  - 7.4 Fourier 級数展開の応用
- 8.
  - 8.1 電磁場の Lorentz 変換
  - 8.2 電磁ポテンシャルと対称性
  - 8.3 Fourier 変換の応用
  - 8.4 熱伝導方程式 (拡散方程式)
- 9.
  - 9.1 電磁場テンソル, 4 元電流
  - 9.2 Green 関数
  - 9.3 2次元 Laplace 方程式の境界値問題

- 10.
- 10.1 Larmor の定理
- 10.2 外場中の荷電粒子の古典力学
- 10.3 空洞共振器と Bessel 関数
- 10.4 Hermite 多項式

- 11.
- 11.1 電磁場のエネルギー・運動量
- 11.2 球対称場における Schrödinger 方程式
- 11.3 極座標系における Laplace 方程式
- 11.4 Sturm-Liouville 理論

## 1.9 物理学のための科学英語基礎：小野 義正

1. 科学・技術英語とは、日本人英語の欠点と改善策；動詞の適切な時制；What Is Physics？
2. 直接翻訳はするな、和文和訳せよ、物主構文；句読点の使い方；The Spectrum and “Coloured” Light
3. 英語の基本は三拍子、パラグラフ・ライティング；文頭・数字の書き方；What is Science？
4. パラグラフ・リーディング；関係代名詞と前置詞の使い方；Benjamin Franklin
5. 読みやすい英語（論文）を書く、論文用英文の組み立て；並列構造で書く；Thomas A. Edison
6. 起承転結はやめよう、日本語の構造 vs. 英語の構造、結論を先に、理由を後に；数字・記号の表現法；Inventions Essential for Research
7. わかってもらえる英語は「英語の発想で書く」（Leggett’s Trees）、英語活用メモを作り、英借文する；名詞；Questions about the Universe
8. 否定形を避けて、肯定形で書く、あいまいな表現をさげ、きっぱりと書く；冠詞；The Story of Silent Spring
9. 辞書の使い方、参考文献；短い簡潔な文を書く；Graphene
10. 通じる英語のしゃべり方 1；レポート課題: Self Introduction；受動態を避けて能動態で書く；Dark Matter
11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う；Volcanoes
12. 通じる英語のしゃべり方 3；不必要な単語は省く；The Internet
13. 英語口頭発表での注意点；日本人に多い間違いを直す；Artificial Intelligence (AI)

## 2 3年生 S セメスター

### 2.1 電磁気学 II：中辻 知

1. Maxwell 方程式
2. 保存則
3. 物質中の静電場
4. 物質中の静磁場
5. 真空中の電磁波
6. 物質中の電磁波
7. 準定常電流と伝送線
8. 平面波の反射と透過
9. 導波路

### 2.2 物理学実験 I: 全実験担当教員

1. 放射線：横山 将志、中桐 洸太
2. 真空技術：岡本 徹、枡富 龍一
3. X線回折：高木 英典、北川 健太郎、平岡 奈緒香
4. エレクトロニクス I：三尾 典克、中島 康博、小貫 良行
5. エレクトロニクス II：馬場彩、萩野 浩一

### 2.3 量子力学 II：村尾 美緒

1. 軌道角運動量
  - 1.1.1 波動関数を用いた量子力学の復習

- 1.1.2 中心場の定常状態の Schrödinger 方程式
- 1.2.1 軌道角運動量
- 1.2.2 球面調和関数
- 2. 角運動量の一般論
  - 2.1 ブラ・ケットを用いた量子力学の復習
  - 2.2 角運動量の一般化
  - 2.3 角運動量の合成
- 3. 中心場中の Schrödinger 方程式の解
  - 3.1 動径部分の Schrödinger 方程式の一般論
  - 3.2 三次元調和振動子
  - 3.3 水素原子

- 4. 摂動論
  - 4.1 時間によらない摂動 縮退の無い場合
  - 4.2 時間によらない摂動 縮退のある場合
    - 4.2.1 時間によらない摂動の例: Van der Waals 力とパリティ
    - 4.2.2 時間によらない摂動の例: LS 結合
  - 4.3 時間による摂動
  - 4.4 WKB 近似
- 5. スピン角運動量と量子力学の本質
  - 5.1 量子ビットの量子力学
  - 5.2 測定演算子と密度演算子

## 2.4 物理学演習 III : 中辻 知, 村尾 美緒, 諏訪 秀磨, 高三 和晃

- 1. 量子力学
  - 1.1 量子力学 I の復習, Gauss 波束, 不確定性関係
  - 1.2 対称性と保存則
  - 1.3 角運動量の合成
  - 1.4 極座標系と角運動量, スピン演算子, 球面調和関数
  - 1.5 極座標表示での Schrödinger 方程式の解法, 合流型超幾何関数
  - 1.6 時間に依存しない摂動
  - 1.7 時間に依存しない摂動 (縮退のある場合)
  - 1.8 時間に依存する摂動
  - 1.9 変分法
  - 1.10 ベルの不等式の破れ
  - 1.11 量子テレポーテーション
- 2. 電磁気学
  - 2.1 Maxwell 方程式の性質, ベクトル解析
  - 2.2 Poisson 方程式, 鏡像法
  - 2.3 Laplace 方程式, Green 関数, 多重極展開
  - 2.4 静電場, 誘電体中の境界値問題
  - 2.5 静磁場, 定常電流, 磁性体
  - 2.6 準定常電流, 導体内の電磁波
  - 2.7 電磁波の反射・屈折
  - 2.8 物質中の電磁波

## 2.5 現代実験物理学 I : 岡田 康志, 酒井 明人

- 1. 顕微鏡光学系の基礎
  - 幾何光学、結像理論
- 2. 弱位相物体観察
  - 位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡、ホログラフィー顕微鏡など
- 3. 蛍光・散乱光観察
  - 暗視野顕微鏡、(超解像) 蛍光顕微鏡、干渉散乱顕微鏡 (iSCAT) など
- 4. 多光子顕微鏡と量子計測
  - 多光子励起顕微鏡、量子もつれの応用など
- 5. 顕微鏡のデジタルトランスフォーメーション
  - コンピュータショナル・マイクロコピー
- 6. X 線による試料の同定
  - X 線の発生、構造解析、元素分析 等
- 7. 極限環境技術
  - 真空、低温、磁場 等
- 8. 低温測定技術
  - 比熱、磁化、電気抵抗、ホール効果、熱膨張 等
- 9. 電子構造及び磁気構造の決定手法
  - 光電子分光、量子振動、中性子散乱、核磁気共鳴、ミュオンスピン回転 等

## 2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰

- 1. 講義・実習の概要
  - 1.1 講義・実習目的

- 1.2 講義・実習内容
- 1.3 計算機実験に必要な環境整備
- 2. 計算機実験の基礎
  - 2.1 数値誤差
  - 2.2 数値微分
  - 2.3 ニュートン法
  - 2.4 二分法
  - 2.5 行列と LAPACK
  - 2.6 疑似乱数
  - 2.7 複素数
  - 2.8 ライブラリの利用
  - 2.9 グラフの描画
- 3. 常微分方程式
  - 3.1 初期値問題と境界値問題
  - 3.2 Euler 法・Runge-Kutta 法

- 3.3 陽解法と陰解法
- 3.4 Numerov 法
- 3.5 シンプレクティック積分法
- 4. 連立一次方程式
  - 4.1 物理に現れる連立一次方程式
  - 4.2 ガウスの消去法・LU 分解
  - 4.3 逆行列の求め方
  - 4.4 反復解法
- 5. 行列の対角化
  - 5.1 物理の問題にあらわれる行列演算
  - 5.2 行列の性質・べき乗・指数関数
  - 5.3 密行列の対角化
  - 5.4 疎行列に対する反復法
  - 5.5 特異値分解・一般化逆行列
  - 5.6 最小二乗法による回帰分析

## 2.7 量子コンピューター実習：浅井 祥仁, 寺師 弘二

- 1. 量子コンピュータに触れる
  - 1.1 量子計算の基礎、量子回路、ゲート
  - 1.2 CHSH 不等式の破れを確認する
  - 1.3 実習：回路を実機で実行する
- 2. 量子回路の実装
  - 2.1 Qiskit の基本構造を学ぶ
  - 2.2 量子計算のプログラミング
  - 2.3 実習：シミュレータ・実機での実行
- 3. 超並列計算機としての量子コンピュータ
  - 3.1 量子フーリエ変換による足し算
  - 3.2 量子系のダイナミクスシミュレーション
  - 3.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展
- 4. ショアのアルゴリズム
  - 4.1 量子位相推定とは
  - 4.2 アルゴリズム本体を学ぶ
  - 4.3 実習：シミュレータでの実行
- 5. グローバーのアルゴリズム
  - 5.1 非構造化データの探索
  - 5.2 アルゴリズム本体を幾何学的に学ぶ
  - 5.3 実習：シミュレータと実機での実行
- 6. 変分法と変分量子固有値ソルバー

- 6.1 変分法と変分量子固有値ソルバー法を学ぶ
- 6.2 パラメータの最適化
- 6.3 実習：変分量子アルゴリズムの実習

## 7. 量子・古典ハイブリッドによる機械学習

- 7.1 機械学習と深層学習について
- 7.2 変分量子アルゴリズムによる機械学習
- 7.3 実習：素粒子物理への応用

## 8. 演習

- 8.1 量子誤り耐性の基礎
- 8.2 量子化学計算への応用
- 8.3 組み合わせ最適化の問題

## 9. 超伝導量子コンピュータの仕組みと操作

- 9.1 回路量子電磁力学の基礎を学ぶ
- 9.2 超伝導量子ビットとは
- 9.3 量子ビットの操作と読み出し
- 9.4 実習：量子コンピュータの操作を体験する

## 10. 超伝導量子コンピュータの実機環境

- 10.1 超伝導量子ビットの製作
- 10.2 希釈冷凍機、マイクロ波制御・読み出し系
- 10.3 量子コンピュータ以外への応用

## 2.8 統計力学 I：小林 研介

### 0. 熱力学 再訪

### 0.1 熱力学

- 0.2 熱力学第 0 法則
- 0.3 熱力学第 1 法則
- 0.4 カルノーサイクル
- 0.5 熱力学第 2 法則
- 0.6 エントロピー
- 0.7 熱力学関数
- 0.8 平衡条件
- 1. 統計力学とは
  - 1.1 統計力学の考え方
  - 1.2 確率分布
- 2. ミクロカノニカル分布
  - 2.1 状態数
  - 2.2 熱平衡と微視的状态
  - 2.3 ミクロカノニカル分布の導入
  - 2.4 ボルツマンの原理
  - 2.5 理想気体
  - 2.6 二準位系
  - 2.7 ミクロカノニカル分布のまとめ
- 3. カノニカル分布：導入
  - 3.1 カノニカル分布の導出
  - 3.2 カノニカル分布の性質
  - 3.3 ヘルムホルツの自由エネルギー
  - 3.4 二準位系
- 4. カノニカル分布：古典近似
  - 4.1 量子論と古典論
  - 4.2 古典統計力学近似
  - 4.3 振動子系
  - 4.4 理想気体
  - 4.5 エネルギー等分配則
  - 4.6 エルゴード仮説
- 5. カノニカル分布：量子効果
  - 5.1 熱力学第 3 法則
  - 5.2 黒体放射
  - 5.3 格子比熱
- 6. グランドカノニカル分布
  - 6.1 グランドカノニカル分布の導出
  - 6.2 グランドカノニカル分布の性質
  - 6.3 ラングミュアの等温吸着式
- 7. フェルミ統計とボース統計
  - 7.1 フェルミ粒子とボース粒子
  - 7.2 フェルミ分布とボース分布
  - 7.3 理想フェルミ気体
  - 7.4 理想フェルミ気体の比熱
  - 7.5 理想フェルミ気体の帯磁率
  - 7.6 フェルミ気体の例
  - 7.7 理想ボース気体
- 8. まとめと展望

## 2.9 流体力学：吉田 直紀

- 1. 流体力学の基礎方程式
  - 1.1 流れを表す物理量
  - 1.2 保存則とエネルギー方程式
- 2. 二次元の流れ
  - 2.1 流れ関数と複素ポテンシャル
  - 2.2 解析関数による流れの表現
  - 2.3 渦の運動
- 3. 圧縮性流体
  - 3.1 音波と特性曲線
  - 3.2 準一次元流
  - 3.3 衝撃波
- 4. 粘性流体の力学
  - 4.1 ナビエ-ストークス方程式
  - 4.2 ポアズイユの法則
  - 4.3 乱流の生成
- 5. 波
  - 5.1 重力波と表面張力波
  - 5.2 非線型波動とソリトン
- 6. 流体の不安定性
- 7. プラズマ・電磁流体力学
- 8. ボルツマン方程式と運動論
  - 8.1 速度分布関数と局所熱平衡
  - 8.2 運動量輸送とストレステンソル
  - 8.3 モーメント方程式

## 2.10 物理学演習 IV (統計力学 I、II)：小林 研介、竹内 一将、中川 大也、福田 朝

- 1. 統計力学モデル
  - 1.1 ミクロカノニカルアンサンブル

- 1.2 カノニカルアンサンブル
- 1.3 理想気体
- 1.4 エントロピー
- 1.5 グランドカノニカルアンサンブル
- 2. 波の振動
  - 2.1 格子振動
  - 2.2 黒体輻射
  - 2.3 電磁場の量子化
- 3. 量子理想気体
  - 3.1 理想フェルミ気体

- 3.2 理想ボース気体
- 4. スピン系
  - 4.1 Ising 模型
  - 4.2 Heisenberg 模型
  - 4.3 転送行列
- 5. 相転移
  - 5.1 平均場近似
  - 5.2 Landau 理論
  - 5.3 繰り込み群

### 3 3年生 A セメスター

#### 3.1 物理学実験 II: 全実験担当教員

- 1. パルス技術：浅井 祥仁、石田 明
- 2. メスバウア効果：日下 暁人、木内 健司
- 3. 原子核散乱：中村 哲、永尾 翔
- 4. 分光測定：島野 亮、吉川 尚孝
- 5. 低温：小林 研介、佐々木 健人
- 6. 自動計測制御：林 将光、河口 真志
- 7. 電子回折：長谷川 修司、秋山 了太

- 8. 量子演算入門：中辻 知、酒井 明人
- 9. 相転移：竹内 一将、西口 大貴
- 10. レーザー：酒井 広文、峰本 紳一郎
- 11. 生物物理：樋口秀男、川口 喬吾、茅元司、佐伯 喜美子
- 12. 顕微鏡光学系：岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子
- 13. ブラウン運動：安東 正樹、小森 健太郎

#### 3.2 光学：井手口 拓郎, 三尾 典克

- 1. イントロダクション
- 2. 真空中の光の性質
- 3. 等方媒質中の光の伝搬
- 4. 結晶光学
- 5. 回折
- 6. 干渉

- 7. 幾何光学
- 8. レーザー
- 9. ビーム光学
- 10. 光共振器
- 11. 光計測：分光、イメージングなど

#### 3.3 量子力学 III：諸井 健夫

- 1. 同種粒子系の量子力学的扱い
  - 1.1 多体系の量子力学
  - 1.2 同種粒子の多体系
  - 1.3 同種粒子系の波動関数
  - 1.4 第 2 量子化
- 2. 電磁場中での荷電粒子
  - 2.1 電磁場中の荷電粒子を記述するハミルトニアン
  - 2.2 ゲージ対称性
  - 2.3 軌道角運動量と磁場の結合

- 2.4 ランダウ順位
- 2.5 Aharonov-Bohm 効果
- 2.6 スピンの歳差運動
- 3. 3次元の散乱問題
  - 3.1 散乱断面積
  - 3.2 確率の保存と光学定理
  - 3.3 散乱の簡単な例：剛体球による散乱
  - 3.4 グリーン関数を用いた散乱の記述
  - 3.5 ボルン近似

### 3.6 部分波展開と phase shift

### 3.7 共鳴散乱

## 3.4 現代実験物理学 II : 安東 正樹, 中島 康博

### 1. イントロダクション

### 2. 物質と粒子の相互作用と粒子検出器

- 素粒子実験の例
- 粒子と物質の相互作用
- 粒子測定器の原理
- 素粒子実験で使われている測定器

### 3. 粒子加速器

- 粒子加速の歴史
- 現代の加速器施設
- 将来計画と課題

### 4. 統計の基礎・実験データの解析

- 確率分布
- パラメーター推定

### 5. その他の宇宙素粒子実験

- 低バックグラウンド実験

暗黒物質探索

二重ベータ崩壊探索

ニュートリノ実験

### 6. 宇宙観測における物理量の求め方

- 宇宙の観測
- 距離、質量、温度の導出方法

### 7. 望遠鏡とその仕組み

- 解像度を決める要因
- 光・赤外線望遠鏡
- 電波望遠鏡の仕組み
- 集光と光検出器
- 干渉計と開口合成

### 8. 重力波の観測

- 望遠鏡の仕組み
- 連星合体の観測
- 宇宙論的観測

## 3.5 物理学演習 V : 横山 順一, 諸井 健夫, 竹内 一将, 大森 寛太郎, 山本 新

### 1. 量子力学

#### 1.1 調和振動子と摂動論

#### 1.2 平面回転子

#### 1.3 時間に依存する摂動

#### 1.4 スピンの相互作用

#### 1.5 結晶場分裂

#### 1.6 同種類のスピン 1/2 フェルミ粒子 2 個からなる系

#### 1.7 フェルミオン系と Kramers 縮退

#### 1.8 Lyman- $\alpha$ 遷移

#### 1.9 球対称調和振動子型ポテンシャルのもとでの N 粒子系

#### 1.10 同種粒子の多体系と第二量子化

#### 1.11 電磁場中での荷電粒子の運動

#### 1.12 コヒーレント状態

#### 1.13 磁場中の原子

#### 1.14 水素分子

#### 1.15 Aharonov-Bohm 効果

#### 1.16 平面波の展開公式

#### 1.17 合流型超幾何関数

#### 1.18 放物線座標

#### 1.19 Coulomb 散乱

#### 1.20 散乱断面積

#### 1.21 同種粒子の散乱

#### 1.22 Born 近似

#### 1.23 Berry 位相とホール伝導度

### 2. 電磁気学

#### 2.1 波動方程式の Green 関数

#### 2.2 真空中の Maxwell 方程式と対称性

#### 2.3 原子の電気双極子モーメント

#### 2.4 古典的な原子・分子模型と光ピンセット

#### 2.5 遅延ポテンシャル

#### 2.6 磁気双極子放射とパルサー

#### 2.7 Lienard-Wiechert ポテンシャル

#### 2.8 振動する電荷からの放射

#### 2.9 Larmor の公式

#### 2.10 同軸ケーブル

#### 2.11 導波管

#### 2.12 ロンドン方程式

#### 2.13 電磁場の Lorentz 共変形

### 3. 統計力学

#### 3.1 Boltzmann 方程式

#### 3.2 2次元イジング模型

#### 3.3 線形応答理論

#### 3.4 Langevin 方程式

### 3.6 生物物理学：樋口 秀男, 能瀬 聡直, 川口 喬吾

1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報
2. タンパク質の構造と安定性
3. タンパク質の 1 分子機能
4. 筋肉運動と制御の分子論
5. 細胞機能を支える分子たち
6. 脳・神経系の生物物理 1: 脳神経系における情報の流れ
7. 脳・神経系の生物物理 2: 活動電位と H-H 方程式
8. 脳・神経系の生物物理 3: 神経ネットワークによる情報処理
9. 脳・神経系の生物物理 4: 脳の可塑性と記憶
10. 脳・神経系の生物物理 5: ゲノム科学、神経活動イメージング、光による神経活動操作
11. 多細胞現象と理論モデル 1: パターン形成
12. 多細胞現象と理論モデル 2: 確率過程とスケーリング
13. 多細胞現象と理論モデル 3: アクティブマターとトポロジー
14. 細胞内現象と理論モデル: 液液相分離

### 3.7 物理数学 III：小形 正男

1. 群と対称操作
2. 群論の基本概念
3. 有限群の表現
4. 既約表現の指標
5. 回転群
6. 点群、結晶群
7. 物理への応用
8. リー群
9. リー群からリー代数へ
10. リー代数の表現

### 3.8 固体物理学 I：林 将光

0. 固体物理学とは
1. 固体の電子状態
  - 1.1 1 粒子ハミルトニアン
  - 1.2 分子軌道法
  - 1.3 並進対称性とブロッホの定理
  - 1.4 周期的境界条件
  - 1.5 強結合モデル
  - 1.6 逆格子とブリルアンゾーン
  - 1.7 結晶格子
  - 1.8 グラフェン
  - 1.9 自由電子モデル
  - 1.10 フェルミ面と状態密度
2. 輸送特性
  - 2.1 自由電子ガス
  - 2.2 ブロッホ電子の運動方程式
  - 2.3 ボルツマン輸送方程式
  - 2.4 格子振動
  - 2.5 格子振動の量子化
  - 2.6 電子-フォノン相互作用
  - 2.7 2次元電子系
  - 2.8 ランダウ準位
  - 2.9 量子ホール効果
  - 2.10 半古典量子化条件
  - 2.11 ベリー位相
3. 磁性
  - 3.1 交換相互作用
  - 3.2 格子モデル
  - 3.3 ハバード模型
  - 3.4 ストナー条件
4. 超伝導
  - 4.1 クーパー対
  - 4.2 BCS モデル

### 3.9 電磁気学 III：横山 順一

1. ヘビサイド・ローレンツ単位系によるマックスウェル方程式
2. 電磁ポテンシャルと電磁波
3. グリーン関数



- 4. 遅延ポテンシャル
- 5. 先進ポテンシャルと因果律
- 6. 多重極放射
- 7. シンクロトロン放射
- 8. サイクロトロン放射
- 9. チェレンコフ放射
- 10. 境界値問題
- 11. 導波管
- 12. 電磁波の回折

### 3.10 統計力学 II : 竹内 一将

- 1. 相互作用がある系の平衡統計力学 - 相転移を中心に -
  - 1.1 相転移とは何か?
  - 1.2 相転移と自由エネルギー、分類
  - 1.3 磁性体モデル：相転移の代表的舞台
  - 1.4 相転移のメカニズムと空間次元
  - 1.5 平均場近似
  - 1.6 Landau の理論 (平均場)
  - 1.7 Ginzburg-Landau の理論
  - 1.8 平均場の破綻と空間次元
  - 1.9 臨界現象
- 1.10 スケーリング仮説
- 1.11 くりこみ群の考え方
- 2. 線形応答理論：非平衡統計力学への序論
  - 2.1 現象
  - 2.2 Boltzmann 方程式
  - 2.3 線形応答理論
- 3. Brown 運動と確率過程
  - 3.1 現象
  - 3.2 Langevin 方程式
  - 3.3 Fokker-Planck 方程式

### 3.11 計算機実験 II : 藤堂 眞治, 高橋 昂, 山崎 隼汰

- 1. モンテカルロ法
  - 1.1 乱択アルゴリズム
  - 1.2 物理過程のシミュレーション
  - 1.3 モンテカルロ積分
  - 1.4 多体系の統計力学
  - 1.5 マルコフ連鎖モンテカルロ
- 2. 偏微分方程式と多体系の量子力学
  - 2.1 偏微分方程式の初期値問題
  - 2.2 横磁場イジング模型
  - 2.3 多体量子系の時間発展
  - 2.4 量子コンピュータ
- 3. 少数多体系・分子動力学
  - 3.1 少数多体系・分子動力学
- 3.2 シンプレクティック積分法
- 3.3 長距離ポテンシャルの計算
- 3.4 ビリアル定理
- 3.5 温度の制御
- 3.6 ハミルトニアンモンテカルロ法
- 4. 最適化問題
  - 4.1 最適化問題
  - 4.2 最急降下法・勾配降下法
  - 4.3 共役勾配法
  - 4.4 勾配の計算
  - 4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
  - 4.6 シミュレーテッドアニーリング

## 4 4年生 S セメスター

### 4.1 機械学習概論 : 樺島 祥介

- 0. 導入
- 1. 数理基礎 (1)
- 2. 数理基礎 (2)
- 3. 回帰と分類
- 4. 統計的信頼性 (1)
- 5. 統計的信頼性 (2)

- 6. カーネル法 (1) : ガウス過程
- 7. カーネル法 (2) : サポートベクトルマシン
- 8. 多層ニューラルネット (1)
- 9. 多層ニューラルネット (2)

- 10. 主成分分析と因子分析
- 11. クラスタ分析
- 12. 敵対的生成ネットワーク
- 13. 拡散モデル

## 4.2 場の量子論 I : 福嶋 健二

### 1. Introduction

- 1.1 Analogy from a classical field theory
- 1.2 Symmetries and the Noether currents

### 2. Fields

- 2.1 Lorentz group
- 2.2 Poincare group
- 2.3 Scalar, spinor, vector

### 3. Quantization

- 3.1 Many-body problem
- 3.2 scalar field theory
- 3.3 Discrete symmetries of the scalar field

### 4. Interaction

- 4.1 Interacting scalar theory
- 4.2 Reaction Rates
- 4.3 Vacuum in the interaction representation

### 5. Calculus

- 5.1 Generating functional
- 5.2 Feynman propagator
- 5.3 Perturbation in the  $\phi^4$  theory
- 5.4 Self-energy and 1PI graphs
- 5.5 Ultraviolet divergence
- 5.6 Renormalized perturbation theory

### 6. Dirac fields

- 6.1 Dirac equation and free spinor basis
- 6.2 Discrete symmetries of fermions
- 6.3 Anti-commutation relation
- 6.4 Time-ordered product and the Dirac propagator
- 6.5 Constrained systems
- 6.6 Dirac's quantization method

### 7. Vector fields

- 7.1 Polarization vectors
- 7.2 Feynman rules in QED
- 7.3 Compton scattering

### 8. Applications

- 8.1 Nambu-Jona-Lasinio model
- 8.2 Origin of the mass
- 8.3 Schwinger model (1+1D QED)
- 8.4 Chiral anomaly

### 9. Advanced topics

- 9.1 Non-Abelian gauge theory
- 9.2 Asymptotic freedom
- 9.3 Spinor helicity formalism

## 4.3 サブアトム物理学 : 中村 哲

### 1. はじめに

物質の構成、相互作用、歴史、加速器、元素合成、サブアトム物理学を俯瞰する

### 2. 原子核の基本的性質

質量と結合エネルギー

### 3. ミクロの世界を覗く

電子散乱実験、加速器技術、原子核や核子の大きさと形

### 4. 核子の内部構造

電子-核子散乱、核子共鳴、クォーク

### 5. クォーク、グルーオン

ハドロン、構造関数

### 6. 核力

パイオン交換ポテンシャル、格子 QCD

### 7. 原子核構造

フェルミガス模型、殻模型、魔法数、ハイパー原子核

## 4.4 計算科学概論 : 6名によるオムニバス講義・実習

### 1. 高性能計算機のアーキテクチャ

### 2. スーパーコンピュータと並列プログラミング

### 3. 大規模疎行列ソルバー入門

### 4. 第一原理計算による物質科学研究

## 4.5 統計力学特論：加藤 岳生

1. Phase Transition
2. Mean-field approximation and solvable models
3. Spatial correlation
4. Scaling theory

### 5. 高性能プログラミングと性能測定

### 6. 並列 FEM と CAE (Computer Aided Engineering)

5. Real-space renormalization group
6. Momentum-space renormalization group
7. Mermin-Wagner Theorem
8. Kosterlitz-Thouless transition

## 4.6 現代物理学入門：渡利 泰山, 今井 伸明, 三部 勉

### 1. 超弦理論と一般場の理論の研究のおはなし

- 1.1 弦理論の源流
- 1.2 弦理論の定式化：どこまでわかっているか
- 1.3 一般抽象場の理論の研究、量子重力の課題
- 1.4 弦理論を数学の道具として使う
- 1.5 素粒子物理、初期宇宙論を弦理論の言葉でとらえる

### 2. クォーク、核子多体系の物理

- 2.1 量子多体系の多様な実験研究
- 2.2 宇宙での元素合成過程と核物理

### 2.3 量子多体系での基本対称性の破れの研究

- 2.4 中性子過剰核、超重元素
- 2.5 クォークグルーオンプラズマ

### 3. ミューオンを用いた素粒子物理学研究の最前線

- 3.1 ミューオンの基本的性質
- 3.2 ミューオンを作る
- 3.3 異常磁気能率・電気双極子能率
- 3.4 荷電レプトンフレーバー対称性の破れ
- 3.5 ミューオニウムの精密分光

## 4.7 一般相対論：須藤 靖

### 1. 序論

- 1.1 ありそでなさそでやっぱりあるもの：物理法則はどこにある
- 1.2 物理学の幾何学化：一般相対論の示唆と限界
- 1.3 物理量と座標系
- 1.4 線素と計量

### 2. 一般相対性原理とその数学的表現

- 2.1 特殊相対論の限界：慣性系とは？重力は“力”か？
- 2.2 一般相対論の概念構成
- 2.3 物理量の表現：ベクトル
- 2.4 物理量の表現：双対ベクトル
- 2.5 物理量の表現：テンソル
- 2.6 まとめ：物理量とテンソル

### 3. 測地線の方程式

- 3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
- 3.2 ニュートン理論との対応

### 4. 重力場の方程式

- 4.1 マッハの原理と重力場の方程式
- 4.2 エネルギー運動量テンソル
- 4.3 アインシュタイン方程式への道
- 4.4 ニュートン理論との対応
- 4.5 宇宙定数
- 4.6 変分原理による定式化
- 4.7 法則は時空に刻まれている

### 5. シュワルツシルト時空とブラックホール

- 5.1 球対称重力場の計量
- 5.2 シュワルツシルト解導出の概略
- 5.3 シュワルツシルト半径と事象の地平線
- 5.4 シュワルツシルトブラックホールのまわりの質点の運動
- 5.5 一般相対論の古典的検証
- 5.6 水星の近日点移動の計算
- 5.7 光線の曲がり角の計算

## 5.8 ブラックホール天文学

## 6. 物理法則と基礎物理定数

### 6.1 質量と長さ

### 6.2 温度と長さ

### 6.3 電磁相互作用と微細構造定数

### 6.4 重力と重力微細構造定数

### 6.5 プランクスケール

### 6.6 原子の大きさ

### 6.7 天体の力学的時間スケール

## 7. 相対論的宇宙モデル

### 7.1 宇宙原理と宇宙の一様等方性

### 7.2 ロバートソン-ウォーカー計量の幾何学的性質

### 7.3 アインシュタイン方程式からフリードマン方程式へ

### 7.4 宇宙の状態方程式と宇宙定数

### 7.5 ハッブルの法則と宇宙論的赤方偏移

### 7.6 アインシュタイン-ド・ジッター宇宙モデル

### 7.7 フリードマン宇宙モデル

### 7.8 宇宙の年表

### 7.9 宇宙の未来

## 4.8 量子光学：上田 正仁

### 1. 量子力学の基礎

### 2. 不確定性関係

### 3. 測定の理論

### 4. 電磁場の量子化

### 5. コヒーレント状態、スクイズド状態、位相演算子

### 6. 量子干渉効果

### 7. 量子情報の消去とコヒーレンス

### 8. 原子と光の相互作用

## 9. アインシュタイン-ポドルスキー-ローゼン相関

## 10. 自然放出のワイスコップ-ウィグナー理論

## 11. 共振器量子電気力学

## 12. クローン禁止定理、ベルの不等式

## 13. 量子テレポーテーション

## 14. 量子アルゴリズム

## 15. 量子暗号

## 4.9 固体物理学 II：長谷川 修司

### 1. 1. 物性物理学とノーベル賞

#### 1.1 超伝導・超流動に関するノーベル賞

#### 1.2 半導体に関するノーベル賞

#### 1.3 低次元系・トポロジカル系に関するノーベル賞

### 2. 格子振動と比熱

#### 2.1 格子振動とフォノン

・1次元結晶での格子振動 ・3次元結晶での格子振動

・光学フォノンと音響フォノン ・格子振動の量子化とフォノン分光

#### 2.2 比熱

・Dulong-Petit の法則 ・格子比熱 Einstein モデルと Debye モデル

・電子比熱 ・熱膨張

#### 2.3 熱伝導

・熱伝導率 ・熱電効果 ・Wiedemann-Franz の法則

### 3. 超伝導

#### 3.1 超伝導の発見と現象論

・完全導体とマイスナー効果 ・London 方程式

・その他の実験事実 ・Ginzburg-Landau 理論

#### 3.2 ミクロな理論

・電子格子相互作用 ・Cooper 対の形成  
・BCS 理論 ・臨界電流と臨界磁場 ・BCS 規格状態とマイスナー効果

#### 3.3 超伝導の物性

・磁束の量子化 ・第1種・第2種超伝導体 ・Josephson 効果

## 4. スピンと磁性

### 4.1 スピン

・実験事実 ・Dirac 方程式とスピン ・電子の磁気モーメント

### 4.2 磁性

・原子・イオンの磁性 ・自由電子ガスの磁性  
・交換操作

・自由電子間の交換相互作用 ・強磁性のバンドモデル

・自発磁化の温度変化 ・局在スピンモデル

### 4.3 対称性

・対称性の破れとスピン分裂 ・スピン軌道相互作用

・ラシュバ効果 ・トポロジカル絶縁体

## 4.10 プラズマ物理学：江尻 晶

### 1. 様々なプラズマ

- 1.1 様々なプラズマ
- 1.2 プラズマを特徴づける量
- 1.3 サハの熱電離平衡
- 1.4 衝突時間
- 1.5 電気抵抗
- 1.6 プラズマ中のスケール
- 1.7 デバイ遮蔽

### 2. 単一粒子の軌道

- 2.1 サイクロトロン運動、ラーマ運動
- 2.2 各種のドリフト
- 2.3 ミラー配位と断熱不変量
- 2.4 種々の磁場配位と粒子軌道

### 3. 衝突と拡散

- 3.1 衝突時間
- 3.2 電気抵抗
- 3.3 拡散とランダムウォーク
- 3.4 拡散係数と閉じ込め時間

### 4. 電磁流体としてのプラズマ

- 4.1 電磁流体方程式
- 4.2 MHD 方程式のまとめ
- 4.3 抵抗の役割と磁力線の凍結

4.4 MHD 発電, MHD 加速

4.5 磁気再結合

### 5. 平衡と安定性

- 5.1 プラズマの圧力と磁場の圧力
- 5.2 円柱プラズマの平衡
- 5.3 トーラスプラズマの平衡

### 6. 不安定性

- 6.1 不安定性の分類
- 6.2 不安定性の例
- 6.3 交換不安定性の成長率の導出
- 6.4 トマカクにおける良い曲率、悪い曲率

### 7. プラズマ中の波

- 7.1 波動の分類と取り扱い方
- 7.2 電磁場中の粒子の運動
- 7.3 誘電率と誘電テンソル
- 7.4 屈折率と分散式
- 7.5 分散式の解と様々な波

### 8. 波と粒子の相互作用

- 8.1 ランダウ減衰
- 8.2 トランジットタイム減衰
- 8.3 サイクロトロン減衰

### 9. プラズマ物理と核融合

## 4.11 宇宙物理学：馬場 彩

- 1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体
- 2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体
- 3. 星の基礎物理
- 4. 星の進化と終末
- 5. 縮退星（白色矮性と中性子星）とブラックホール

6. 膨張宇宙の性質

7. 初期の宇宙

8. 宇宙の超高エネルギー現象

9. 宇宙観測の今

## 4.12 生物物理学特論 II：岡田 真人, 野口 博司, 伊藤 創祐

### 1 Chemical reaction and rate equation

- 1.1 Chemical reaction in cells and chemical thermodynamics
- 1.2 Population dynamics
- 1.3 Dynamics and information geometry

### 2 Structure and function of biomembrane

- 2.1 Physics of curved surface, surface tension, wetting

2.2 Red blood cells and blood flow

2.3 Membrane deformation by curvature-inducing proteins

### 3 Dynamics of motion perception

- 3.1 Dynamics of pattern recognition
- 3.2 Spectral deconvolution
- 3.3 Face perception and sparse modeling

## 4.13 化学物理学：高木 英典

### 1. 原子（イオン）の電子状態

- 1.1 水素原子の1電子波動関数
- 1.2 多電子原子（イオン）の電子状態と周期表
- 1.3 電子間相互作用と多重項
- 1.4 孤立イオンの磁性
- 1.5 Hartree-Fock 近似

### 1.6 群論

### 1.7 配位子場とイオンの電子状態

### 2. 分子の電子状態

- 2.1 水素分子
- 2.2 分子軌道
- 2.3 分子振動

## 5 4年生 A セメスター

### 5.1 素粒子物理学：田中 純一, 澤田 龍

- 1. Introduction
- 2. Basic Concepts
- 3. Experimental Tools
- 4. Decay and Cross Sections
- 5. Dirac Equation
- 6. Quantum Electrodynamics (QED)

- 7. Weak Interactions
- 8. Electroweak Theory
- 9. Quark Model and QCD
- 10. Quark Mixing and CP Violation
- 11. Forefront of Particle Physics

### 5.2 場の量子論 II：堀 健太郎

#### 1. 経路積分

オペレーター形式から経路積分の導出  
対称性とワード恒等式  
経路積分からオペレーター形式の導出  
フェルミオン系：反可換変数の代数と解析  
相関関数と時間順序積の真空期待値

#### 2. ゲージ理論

ゲージ固定条件  
ファデーフ・ポポフ行列式とゴースト  
BRST 対称性とコホモロジー  
正準形式での量子化

#### 3. 自由場の理論

スカラー場  
ベクトル場  
ディラック・フェルミオン  
ゴースト系  
マックスウェル理論の BRST コホモロジー

#### 4. 摂動論

ファインマン図形  
連結と非連結

#### 5. 粒子のスペクトルと相互作用

2点関数のスペクトル分解  
散乱過程と漸近状態  
LSZ 簡約公式  
摂動論における S 行列  
1粒子規約な図形

#### 6. 1粒子規約有効作用

定義

性質 1：1粒子規約な図形の生成汎関数  
性質 2：プランク定数による展開＝ループ展開  
性質 3：背景場の周りの分配関数

#### 7. 正則化と繰り込み

発散：見かけの発散次数  
正則化：運動量カットオフ、パウリ・ヴィラーズ、格子、次元正則化  
繰り込みのアイデア：打ち消し項  
繰り込み可能性  
繰り込み条件  
具体例  
有効ポテンシャルの計算  
有効ポテンシャルの物理的な意味

#### 8. 繰り込み群

繰り込み群のアイデア  
繰り込み群方程式  
4次元スカラー理論での繰り込み関数の計算  
繰り込み群固定点の性質  
繰り込み群による摂動論の改善

#### 9. QED の繰り込み

ゲージ対称性からくるワード恒等式  
発散の幕勘定  
ゲージ不変な正則化  
1ループ図形の計算  
スラフノフ・テイラー恒等式  
繰り込まれた摂動論  
繰り込み群による結合定数の流れ

## 5.3 原子核物理学 : Haozhao Liang

1. Introduction of atomic nuclei
  - 1.1 Basic properties
  - 1.2 Creations and decays
  - 1.3 Outstanding features
2. Nuclear bulk properties
  - 2.1 Nuclear masses and liquid drop model
  - 2.2 Nuclear saturation and Fermi-gas model
  - 2.3 Magic numbers and shell model
3. Nucleon-nucleon interactions
  - 3.1 Symmetries and basic properties
  - 3.2 Non-perturbative nature and effective interactions

4. Nuclear structure and its understandings
  - 4.1 Global descriptions and Hartree-Fock vs density functional theory
  - 4.2 Pairing correlations and BCS vs Bogoliubov
5. Nuclear radioactivity and its understandings
  - 5.1 Alpha decays
  - 5.2 Beta decays
  - 5.3 Gamma decays
6. Selected advanced topics and discussion

## 5.4 現代物理と機械学習 : 蘆田 祐人

1. Introduction
2. Quantum mechanics review
  - 2.1 Fundamental concepts
  - 2.2 Ensembles
  - 2.3 Distance measures
3. Theory of quantum measurement and open systems
  - 3.1 Positive operator-valued measure
  - 3.2 Kraus operators
  - 3.3 Bayesian inference and quantum measurement
  - 3.4 Continuous quantum measurement
4. Foundations of quantum optics
  - 4.1 Quantization of the electromagnetic field
  - 4.2 Bosonic Gaussian states
  - 4.3 Fermionic Gaussian states

- 4.4 Superconducting qubits
5. Quantum light-matter interaction
  - 5.1 Quantized electrodynamics Hamiltonian
  - 5.2 Long wavelength approximation
  - 5.3 Introduction to Cavity/Waveguide QED
6. Machine learning and quantum science
  - 6.1 Supervised learning
  - 6.2 Unsupervised learning
  - 6.3 Black-box optimization
7. Reinforcement learning
  - 7.1 Motivating example
  - 7.2 Markov decision process
  - 7.3 Value-based search
  - 7.4 Deep Q-learning
  - 7.5 Policy-based search
  - 7.6 Black-box optimization in deep RL

## 5.5 電子回路論 : 北川 健太郎

0. 令和時代の信号処理・装置制御
  1. 回路図の書き方、シミュレーション
  2. 線形システムとフィルタ
  3. 離散信号とデジタル信号処理
  4. 増幅回路とフィードバック制御

5. 分布定数回路と信号伝送
6. 雑音と信号
7. デジタル回路
8. パワー回路
9. 基板実装

## 5.6 固体物理学 III : 酒井 明人

1. トポロジカル物性
  - 1.1 物性物理におけるトポロジー

- 1.2 幾何学との関係
- 1.3 ベリー曲率による物性
- 1.4 ワイル半金属
- 2. 電子相関を考慮した固体中の電子
  - 2.1 相互作用の無い電子系
  - 2.2 フェルミ液体

- 2.3 ハバードモデルにおける電子相関
- 2.4 アンダーソンモデルにおける電子相関
- 2.5 重い電子系
- 3. 磁性
  - 3.1 磁性の起源
  - 3.2 量子磁性

## 5.7 非平衡科学：伊藤 創祐

### 1. Introduction

Non-equilibrium systems, Stochastic processes, Steady state

### 2. Stochastic processes

Markov chain, Chapman-Kolmogorov equation, Master equation, Fokker-Planck equation, Onsager-Machlup function, Langevin equation

### 3. Stochastic thermodynamics

Flow and force, Entropy production rate, The second law of thermodynamics, Linear irreversible thermodynamics, Onsager reciprocal

relations

### 4. Information theory

Shannon entropy and differential entropy, Kullback-Leibler divergence

### 5. Dynamical systems

Cumulants and moments, Fixed points and stability

### 6. Optimal transport theory

Monge-Kantorovich problem, 2-Wasserstein distance, Benamou-Brenier formula, Minimum entropy production

## 5.8 普遍性生物学：古澤 力

### 1. Introduction

Universal properties of biological systems

### 2. Universal properties in steady growing systems

growth laws, phenomenological theory of dormant state

### 3. Adaptation

attractor selection dynamics for environmental adaptation

### 4. Robustness of development

dynamical system model of cell differentiation, morphogenesis

### 5. Evolution (I)

fluctuation-response relationship in evolution, genetic variance and fluctuation

### 6. Evolution (II)

emergence of evolutionary constraint, experimental evolution studies

### 7. Ecosystem

mechanisms for coexistence, symbiosis

### 8. Summary and perspectives

toward phenomenological theories for universal biology

## 5.9 重力波物理学：Kipp Cannon, 都丸 隆行

### 1. Introduction to General Relativity

- 1.1 Motivation
- 1.2 Spaces
- 1.3 Linear Gravity

### 2. Orbiting Binary System

- 2.1 Metric Perturbation
- 2.2 Time Evolution
- 2.3 Energy Balance
- 2.4 Time to Coalescence

### 2.5 Newtonian Chirp

### 2.6 Extra Comments

### 3. Detection of Gravitational Waves (Tomaru)

#### 3.1 Philosophical Introduction

#### 3.2 Various Methods of Gravitational Wave Detection 1 – Doppler Tracking & Pulsar Timing

#### 3.3 Various Methods of Gravitational Wave Detection 2 – Resonant Mass Detector & CMB



- Polarization
- 3.4 Laser Interferometric Gravitational Wave Detector
- 3.5 Noises in Gravitational Wave Detector
- 4. Gravitational-Wave Signal Identification
  - 4.1 Choosing a Detector
  - 4.2 Neyman-Pearson Criterion
  - 4.3 Neyman-Pearson Lemma
  - 4.4 Time Series as a Vector

- 4.5 The Fourier Transform as a Unitary Linear Operator
- 4.6 Gaussian Random Variables
- 4.7 Karhunen-Loève Theorem
- 4.8 Matched Filter
- 5. Gravitational-Wave Astronomy
  - 5.1 Parameter Estimation and Bayes' Theorem
  - 5.2 Compact Object Merger Rates

## 5.10 物理学のための科学英語特論：松村 知岳

1. 物理学／研究における英語とは
2. 学術論文とは（自分が読みたい学術論文を解析することで理解する Title, Abstract, Introduction）
3. 学術論文の書き方概要。書く前の準備（書き方、校正方法）
4. 学術論文を意識した文章作成（Title, Abstract, Introduction）
5. 口頭によるプレゼンテーション方法の概要、プレゼン作りの準備
6. 口頭によるプレゼンテーションの実践、Q/A への対処
7. ポスターによるプレゼンテーション方法、ポスターを作るための準備
8. リモート会議を模擬したプレゼン、Q/A、議事録

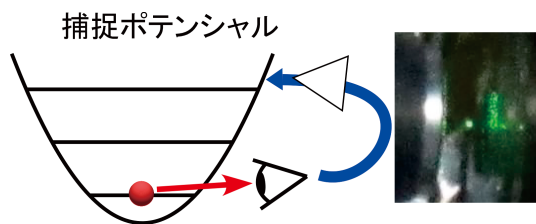
## 1 研究の背景：浮揚オプトメカニクス

オプトメカニクスとは、巨視的物体の運動を主に光によって制御し、センサーへの応用や基礎物理の探究を行う分野である。その中でも、特に環境からの高い隔離性を有し、物体の運動の量子性を探るために適した実験系が、真空中に浮揚させた単一固体ナノ粒子である。近年、その運動を観測・制御する研究が急速に進展し、運動の量子基底状態（エネルギー的に最も低い状態）へと冷却することが可能となりつつある。このような実験系を利用し、電子・原子・分子などにおいて正しさが実証されてきた量子力学が、どの程度大きな物体まで成り立つのかを探る基礎的研究や、ナノ粒子をセンサーとして用いてダークマターや重力波を検出しようとする研究、またナノ粒子による高感度な加速度センサーへの応用など、様々な方向性での研究が開始されている。

## 2 最近の研究テーマ

### (1) 量子基底状態への全光学的冷却

浮揚ナノ粒子の重心運動は、単一粒子の運動を観測し、その運動が減衰するようにフィードバックをかけるフィードバック冷却と、共振器を用いてレーザー冷却を行う2つの手法が確立されている。当研究室では、世界にさきがけて、電場ノイズの影響を受けない中性ナノ粒子を全光学的にフィードバック冷却する手法を新たに実現した（図）。



図：単一ナノ粒子のフィードバック冷却。右は実際に捕捉されたナノ粒子の写真。

### (2) 6 自由度制御と運動量観測

ナノ粒子の一方向の重心運動を基底状態へと冷却する技術の実現と共に、その他の自由度の観測・冷却についても重要なテーマとなりつつある。当研究室では、3つの重心運動を基底状態付近へと

冷却した上で、3つの回転運動を全て超低温へとフィードバック冷却する新しい手法を開発し、これを利用して、飛行時間法に基づくナノ粒子の運動量観測の技術を実現した。この技術を利用し、運動の量子性を探る研究や、高感度加速度センサーとしての応用に向けた研究も開始している。

## 3 今後の展開

### (1) 浮揚ナノ粒子によるハイブリッド量子系

浮揚ナノ粒子は新たな量子系であると同時に、固体であることによる熱化の過程があるなど、従来の原子に基づく量子系とは質的に異なる振る舞いも持つ。そこで、浮揚ナノ粒子と、レーザー冷却された原子とのハイブリッド量子系を実現し、その量子的な振る舞いを探る研究や、ナノ粒子の運動の量子性を近傍の原子を通じて検出する研究を進めている。

### (2) 浮揚超伝導微粒子による量子ビットの研究

超伝導量子ビットに基づく量子コンピュータの研究は、近年急速に進展し、大規模化しつつある。しかし、個々の量子ビットのコヒーレンス時間はまだ十分に長いとはいえず、それがどのような原因で制約されているのか、突き止めることも困難である。そこで、できるだけクリーンな環境にある、真空中に浮揚させた超伝導微粒子を用い、究極のコヒーレンス時間を探る研究を進めている。

### (3) 浮揚ナノ粒子の形状を探る研究

これまでの浮揚ナノ粒子に関する研究において、ナノ粒子の形状の真球からのずれが重心運動に重大な影響を及ぼすことがわかっている。ナノスケールの物体の形状は、一般に電子顕微鏡で観測されるが、レーザー等で捕捉された浮揚ナノ粒子に対して電子顕微鏡写真を撮ることは困難である。そこで、我々は、浮揚ナノ粒子に対し、原子イオン線を照射し、その反跳イオンを観察することで、ナノ粒子の形状やサイズを決定する新しい手法の開発に取り組んでいる。

### (4) 冷却原子気体を用いた研究

真空中の冷却原子気体は、磁場、重力、角加速度などの理想的な量子センサーとして、その応用に向けた研究が急速に進められている。当研究室では、冷却原子気体を用いた新たな研究を開始する予定である。

## 1 研究の背景

量子力学の世界では、系のミクロな情報を得ることの代償として、ハイゼンベルグの不確定性関係に起因する測定の反作用が量子ダイナミクスに本質的な影響を及ぼします。近年の原子・分子・光物理分野における革新的な実験技術の進歩により、大自由度の量子系 - 量子多体系 - を単一量子レベルで観測/制御することが可能となりました。ミクロな運動の詳細は観測/制御できないという仮定のもとに成立してきた従来の多体系の枠組みは、このような状況では破綻し、異なる一般原理に基づいた基礎学理の開拓が必要となります。

一方で、観測/制御下における量子系の研究は、これまで量子光学の分野で主として少数自由度系を対象に精力的にされてきました。本研究室では、これら二つの分野 - 量子多体物理と量子光学 - の境界領域における理論研究を行っています。

## 2 最近の研究テーマ

### ・非平衡開放系の物理

外界環境や観測者の影響下の物理系は「非平衡開放系」として記述されます。我々は非平衡開放系の基礎的側面に着目し、従来の枠組みを超えた新奇な物理現象の解明を目指しています。例えば、開放系のうち特に非エルミート系に着目し、量子臨界現象やトポロジカル物性などの枠組みを拡張することで、エルミート系に類のない新たな物理現象を探求しています。非ユニタリ系に特有な、量子測定で誘起される新しい相転移やダイナミクスの解明にも取り組んでいます。またアクティブマターなど古典非平衡系の対応現象も含め、量子から古典まで広く見据えた研究を行っています。

### ・非摂動開放系の物理

環境と強く結合した非摂動開放量子系では（上述のクラスの開放系とは異なり）ダイナミクスが本質的に非マルコフとなり、環境自由度まで陽に含めた記述が必要となります。これら非摂動開放量子系は、平衡領域では概ね理解が確立されています。一方、非平衡領域では、原子・分子・光分野の実験技術が目覚ましく進んでいるものの、理論的な理解はその解析の困難さ故に多くが未解明です。我々は、必要に応じて新たな手法開発も行

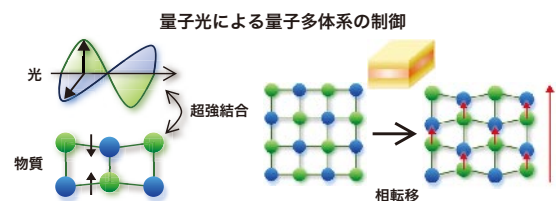
いつつ、これら非平衡強相関現象の解明を目指して研究を行っています。例えば、着目系と環境間の量子もつれを解く新しいユニタリ変換を構築し、一般の非摂動開放系に適用可能な解析手法を開発しています。これを応用し、従来の量子系では知られていない新奇な非平衡強相関現象が生じる可能性を指摘しています。

### ・量子光による量子多体系の制御

近年、外部自由度との相互作用を用いて量子多体系を制御する可能性が盛んに研究されています。特に、古典光を用いて過渡的な物性変化を探る研究がこれまで精力的に行われてきました。一方で「量子性を有した光」による量子多体系制御の可能性については多くが未開拓です。伝統的には、このような量子光-物質相互作用は人工量子ビットなど少数自由度の系を中心に研究されてきましたが、最近の実験技術の発展により固体などの多体系でも量子光-物質強結合が実現しつつあります。我々は、量子多体系と量子的な光を強く相互作用させることで、物質相の制御を行う可能性を探求しています。特に、これまでの研究が光-物質相互作用の強結合領域で正当化困難な仮定のもとになされてきたのに対し、我々は曖昧さの残る近似や仮定に頼らない理論の構築を目指しています。

## 3 今後の展開

量子多体物理と量子光学の融合により、物理学の新たなフロンティアを開拓してゆきます。近年取り組みつつある機械学習の手法も用い、基礎から応用まで幅広く見据えた研究を展開します。



量子性を有した光に基づく量子多体系の制御。共振器中に閉じ込められた真空電磁場の量子揺らぎと物質中の集団励起を超強結合させることで、無秩序相から秩序相への量子相転移が生じ得る。Phys. Rev. X 10, 041027 (2020) より転載。

# 安東研究室

安東 正樹 准教授 小森 健太郎 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。

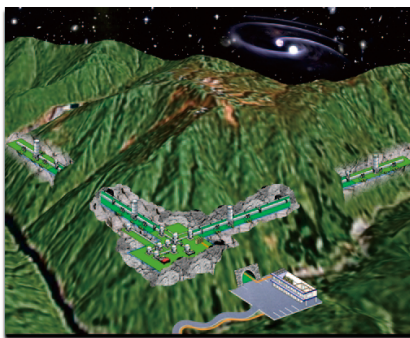
## 1. 重力波による新しい天文学・物理学

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現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。

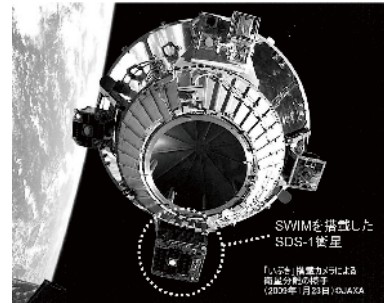
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらすことで、それらに直接迫る手段となる可能性をもっている。

## 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。米国の LIGO プロジェクトは、2015年9月にブラックホール連星の合体から放射される重力波信号を捕え、重力波を用いた新たな天文学が幕をあけた。本格的な天文学的知見を得るためには、複数台の望遠鏡で同時に信号を捕え、その位



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。

置や偏波を特定することが必要である。そのため、LIGO 以外にも世界各地で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、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA (かぐら) が岐阜県・神岡の地下サイトに建設され、2020年に観測運転を開始している。KAGRA も含めた国際観測ネットワークの形成により、「重力波天文学」で宇宙に対して新たな知見が得られると期待されている。

## 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 LISA 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/>

## 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。さらに、物理学と人工知能との融合を目指した研究も行っている。

## 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、孤立系がいかにか熱平衡状態に至るかという熱・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。

### 【非平衡・非エルミート・量子開放系】

近年、量子開放系における非平衡ダイナミクスおよび量子多体問題が注目を集めている。量子系のダイナミクスはシュレディンガー方程式によるユニタリなものや測定による非ユニタリなものに大別される。冷却原子気体においては量子気体顕微鏡を用いて多体波動関数を1原子のレベルで精密に測定することが可能であり、さらにコントロールされた散逸を導入することで非平衡開放系を研究することができる。このような系において量子測定の反作用が引き起こす非ユニタリダイナミクスが従来の多体物理をいかに変更するかという基本的な問題のみならず、より広い意味での非平衡開放系における普遍性や相構造を研究している。最近、私たちは、非平衡開放系の重要なクラスの一つである非エルミート系で実現するトポロジカル相の分類を行った。さらに、非エルミート系の数理をより一般の開放系へと適用することで、非平衡

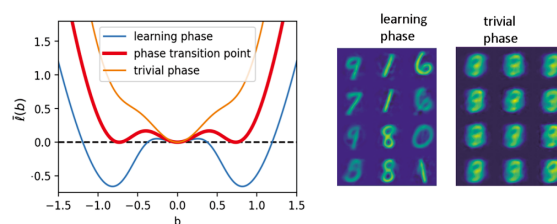
量子開放系の基礎理論の確立を目指している。最近の研究例としては、散逸によって誘起される量子磁性・開放系における超流動理論・開放量子多体系の基礎方程式のリーブ-ロビンソン限界による導出などがある。また、非平衡開放系の新たなプラットフォームとして、量子測定とフィードバック制御が重要な役割を果たす浮揚ナノ粒子の系に注目し、研究を展開している。

### 【量子論・統計力学と情報理論・人工知能の融合】

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。例えば、測定やフィードバック制御下での熱力学第二法則や揺らぎの定理の一般化は情報熱力学と呼ばれる分野を生み出した。これらの研究は、量子・熱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ものと期待される。他方で、機械学習や深層学習における情報処理のプロセスは、物理学や統計力学の概念と密接な関連がある(下図)。私たちは物理学の視点から機械学習の理解を深化させ、物理学と人工知能の融合を通じた新しい学問領域の創出を目指している。最近の研究では、グラフ上の進化ゲーム理論における非平衡ダイナミクスの研究や、開放量子多体系の定常状態の機械学習による探索などに取り組んでいる。

## 3 今後の展開

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



図：深層ニューラルネットワークの損失関数のランドスケープ。私たちは深層学習において統計力学の1次・2次相転移とのアナロジーを見出した。Phys. Rev. Research **5**, 043243 (2023) より転載。

# 江尻・辻井研究室

江尻 晶教授 辻井 直人准教授

## 1 プラズマ物理学と核融合科学の魅力

プラズマとは荷電粒子の集合である。各粒子は磁場、電場の中で複雑な軌道を描くだけでなく、電場と磁場を自ら生成し相互作用する。この相互作用により、種々の非線形現象が生まれる。一方、粒子の集合は衝突、拡散によって熱平衡状態に近づこうとするが、高温プラズマでは、衝突・拡散が小さく、熱平衡状態からはるかに離れた状態が容易に実現される。すなわち、プラズマは非線形非平衡系である。

核融合反応は、高エネルギーの原子核が衝突し、融合する反応であるが、原子核は正の電荷をもつため、原子核に数十 keV のエネルギーを持たせて衝突させることで核力の及ぶ距離まで近づける必要がある。このようなエネルギーでは、構成粒子は電離した原子核、イオン、電子から構成されるプラズマ状態になる。プラズマを理解し制御することで超高温状態を実現し、核融合反応を起こさせて、エネルギー源と利用することが核融合科学の目標である。

## 2 主な研究テーマ

当研究室は TST-2 球状トマカク型装置（図 1）を有しており、現在稼働中の国内のトマカク型装置では最も高温のプラズマを生成できる装置である。ここでは、主に 2 つのテーマで研究を行っている。

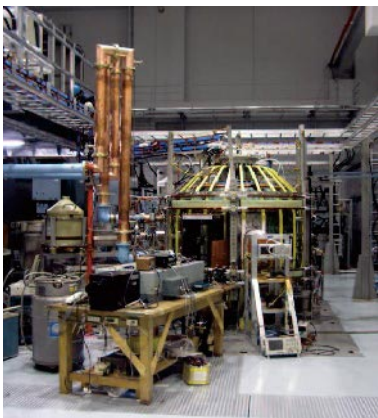


図 1：TST-2 装置

一つ目の研究テーマは、高周波波動による電流駆動である。高周波波動が特定の条件を満たすと

プラズマ中の電子を加速することができ、加速された電子は電流を担い磁場を生成し、トマカク配位を形成する。現在までに 27 kA の電流駆動に成功しているが、このような大電流の駆動には、種々の波動物理が関わっている。プラズマ中で存在可能な波は特定の条件を満たす必要があり、特に大きな密度勾配、磁場勾配をもつ核融合プラズマ中での波の励起と伝搬は複雑である。すなわち、波はプラズマから影響を受ける。逆に、波で加速された電子は、電流を担い、磁場生成を通してプラズマに大きな影響を与える。結果的に、波とプラズマと磁場は高度に自律的で非線形な系を構成する。このような系を理解し、最適化することがプラズマにおける波動物理の役割である。最適な波を効率よく励起するにはアンテナが重要であり、当研究室では、様々なタイプのアンテナ、世界で唯一のアンテナを開発してきた。図 2 に、現在用いられているアンテナの写真を示す。

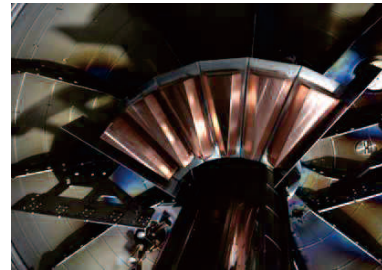


図 2：TST-2 装置内に設置されたアンテナの写真

二つ目の研究テーマは、球状トマカク配位である。名前の由来はプラズマの外形が球に近いためであるが、この配位は従来型のトマカクと比べて大きな磁場勾配を持つため、安定性、粒子軌道、波動伝搬にこれまでとは異なる特徴がある。これらの特徴は高圧力プラズマの実現を容易にする点で魅力的である。一方で、独特な不安定性を示すなどの短所もあり、未解明な部分も多々ある。これらの未解明な部分を明らかにすることは球状トマカク配位研究の重要なテーマである。また、さらに魅力的な配位の発見も可能ではないかと我々は考えており、より高度な形状制御を試みている。

## 1 我々の目標：生命とは何か

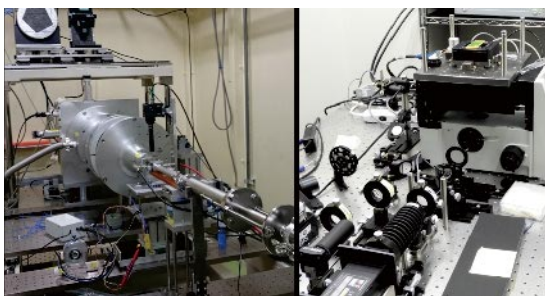
生命の基本単位は細胞だと考えられています。しかし、細胞の構成成分であるタンパク質や脂肪、核酸を混ぜ合わせただけでは、生命は生じません。生命とは何かを物理の言葉で理解することが、生物物理学の究極の目標です。

## 2 これまでの研究：見て、測って、物理する

私たちは、生命現象が営まれている現場を自分の目で見て考えるという姿勢を大事にし、世界最高速の超解像顕微鏡の開発など、独自のイメージング技術の開発と、それをを用いた生命現象の観察・計測、物理的理解を行ってきました。

たとえば、私たちはこれまで、タンパク質分子の1個1個が機能する様子を直接観察し、直接操作する技術を開発し、計測結果を利用して、理論モデルを構築・検証することで、タンパク質分子モーターがブラウン運動を整流するブラウンアンラッチ機構で動くことを世界で初めて示し、「マクスウェルの悪魔」の一種であることを明らかにしてきました。

また、同様のアプローチを脊椎動物の胎児（初期胚）に適用し、流体力学に基づく解析・考察によって、左右対称な卵細胞からどのようにして左右非対称な身体（たとえば心臓が左にある）が生じるかという発生学の長年の基本問題（生物学的な対称性の破れ）を解決し、教科書を書き換える成果を得ました。



左：放射光実験施設 SPring-8 での実験の様子  
右：構築中の顕微鏡光学系

## 3 最近の研究：「生きている」の物理的意味

これまでタンパク質分子（酵素）の研究は、試験管の中（in vitro といいます）で行われてきました。しかし、細胞の中は、様々なタンパク質分子が満員電車のような密度で詰め込まれた混雑状態にあります。そのような混雑環境で、タンパク質分子は in vitro と同様に振る舞うのでしょうか？

そこで、細胞の中でタンパク質分子1個1個が時に拡散し、時に細胞内の構造物と結合して機能する様子をリアルタイムに直接見ることが出来る顕微鏡を構築し、計測を行っています。すると、生きた細胞の中でのタンパク質分子の反応速度と in vitro での反応速度が異なること、死んだ細胞の中では、環境の混雑具合は変わらないのに、反応速度が in vitro に近づくことなどが分かってきました。「生きている」細胞は特別なのです！

その結果はどのような物理学で理解されるべきでしょうか？ 従来は、熱力学・統計力学を用いて、酵素の濃度、基質の濃度、反応による自由エネルギー変化などが議論されてきました。では、酵素分子1個が基質分子1個と反応するとき、「濃度」や「自由エネルギー」などの熱力学量は何を意味するのでしょうか？ このような小数分子系に対する非平衡物理学の理論が2000年頃から発展してきました。この新しい理論的枠組みを用いて、生きている細胞と死んだ細胞の違いが説明できるのではないかと期待して研究を進めています。

## 4 今後の展開：未知のフロンティア

このように、独自の発想で開発した顕微鏡を用いて細胞を観察すると、そこにはまだ誰も見たことがない世界が広がっていて、細胞の中は従来の教科書に描かれているものとは全く異なる未知の世界であることを実感させられます。私たちと共に、自分の手で実験し、自分の目で見て、自分の頭で考えることで、未知の世界を探求し、前人未踏のフロンティアを切り拓いてみませんか？

研究室ホームページ：

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

## 1. 二次元の世界の電子

「二次元の世界」といってもアニメやゲームの話ではありません。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います。私たちの研究室では、半導体の界面や表面を使って電子を「二次元の世界」に閉じ込めて、その集団的振る舞いを研究しています。

## 2. 半導体表面の二次元電子系と量子ホール効果

これまで、二つのノーベル物理学賞が二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二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二次元電子系の研究を行っています。

図1 (a) に表面二次元系で観測された量子ホール効果の実験例を示します。図1 (b) のように、InSbへき開表面に微量の鉄原子を蒸着することによって二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、「二次元の世界」だけで見られる現象です。

界面の二次元系とは対照的に、表面ではマイクロプローブで直接“触れる”楽しみがあります。走査トンネル顕微鏡を用いると、構造観察だけではなく、トンネル電流の電圧依存性から電子状態密度スペクトルを調べることができます。図1 (c) の  $B = 10$  T のグラフは図1 (a)(b) と同じ試料でランダウ準位を観測した結果です。

上記の研究のほかに、半導体界面の二次元電子系における電子間相互作用・磁性・量子相転移の研究や、原子一個分程度の厚さの金属薄膜の超伝導・磁性の研究なども行っています。詳細については <http://dolphin.phys.s.u-tokyo.ac.jp> をご覧ください。

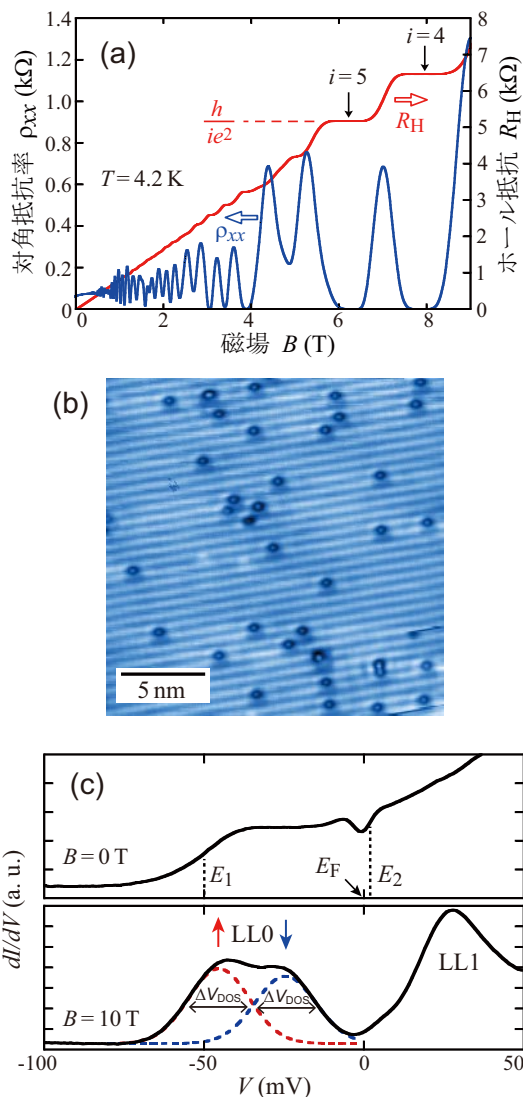


図1：(a) 二次元電子系における量子ホール効果。(b) STM 像。ランダムな黒丸が Fe 原子。(c) 同一試料で測定されたランダウ準位。



# 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、各自がほとんど独立して研究を行っている。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、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

### (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、強相関または強いスピンゆらぎ・電荷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) 新しいトポロジカル状態

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ており、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。たとえば、ディラックノーダルラインなどの新しいトポロジカル物質の開拓、軌道帯磁率の一般論、カイラルソリトン格子のダイナミクスの問題などがある。

### (3) 固体中のディラック電子

グラフェンや、ある種の有機導体、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では、これまでにない新しい現象が現れると予想される。最近、ディラック電子と量子電磁気学との対応を用い、興味ある物性を開拓すべく研究を行っている。

### (4) 熱応答に関する理論

熱エネルギーは物質中において様々な形態で運ばれる。我々の研究室では、特異な電子状態・磁気秩序での熱伝導形態を見極め、微視的な点からの熱応答理論の構築を行っている。また、温度差が電圧に変換される現象(ゼーベック効果)の理論開拓も行っている。

ホームページ <https://sites.google.com/hosi.phys.s.u-tokyo.ac.jp/homepage>

## 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、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・原則から出発して理解したいと考えている。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す。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。

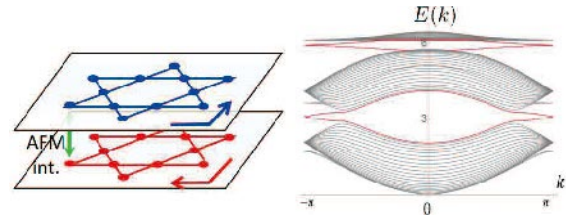
### ●統計力学

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っており、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. マグノンのトポロジカル相

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、電気的に中性な粒子（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、電気的に中性な素励起（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実際に観測されている。また、最近では電子系におけるトポロジカル絶縁体の、マグノン系における対応物を理論的に提案し、そのような系のトポロジカル不変量による特徴づけに成功している。



(左) カゴメ格子上的強磁性体2層が反強磁性的に結合した系。(右) マグノンのバンド構造。赤線は、境界に局在したエッジ状態を示す。

### 2-2. Fermi/Bose-Hubbard 模型の研究

Hubbard 模型は、古くは固体中の相互作用する電子を記述する理想化された模型として、近年では光格子中の原子を記述する基礎的な模型として、重要な役割を果たしてきた。この模型は単純であるが、その基底状態や熱力学的性質を調べることは大変難しく、一次元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や長岡強磁性の  $SU(n)$  対称性のある場合への拡張を行った。また、最近では、鏡映正值性の応用やスピン自由度を持つ Bose-Hubbard 模型に関する研究も行っている。

### 2-3. 量子多体傷跡状態

孤立量子多体系の熱化の機構は統計力学の基礎に関わる問題として長年調べられてきた。現在、熱化を説明する仮説として固有状態熱化仮説 (ETH) が知られており、多くの量子多体系で成立することが確認されている。一方で近年、ETH が成り立たない例外的な系も発見されており、そのような系を系統的に構成する方法が盛んに調べられている。本研究室では Onsager 代数と呼ばれる数学的構造を用いることで、熱化を示さない量子多体傷跡状態と呼ばれる非可積分系のエネルギー固有状態を無限に構成できることを示した。

### 2-4. その他

フラストレート伝導系とホール効果/Kitaev 系/トポロジカル絶縁体・超伝導体/非線形応答/トポロジカル欠陥/格子フェルミオン系と超対称性/パラフェルミオン系/量子開放系/非エルミート量子系

## はじめに

我々の研究室では、統計力学にもとづいて情報通信や機械学習など情報科学に現われるさまざまな問題に取り組んでいます。とはいえ、これだけでは何をやっているかイメージしにくいかもしれません。以下では、どういった観点から研究を行っているのかについてももう少し詳しく説明します。

## ミクロとマクロをつなぐ

簡単な例として、気体について考えてみましょう。高校でも習いますが、理想気体では圧力を  $p$ 、体積を  $V$ 、絶対温度を  $T$  とすると平衡状態において状態方程式  $pV = nRT$  が成り立ちます ( $n, R$  はそれぞれ物質質量, 気体定数)。現代人である我々は気体が分子という小さな粒子の集合体であることをほぼ疑いなく受け入れています。ところで、集合体ではなくその構成要素である気体分子に目を向けると、古典系ではそれらは  $\vec{F} = m\vec{a}$  という運動方程式に従うはずですが (量子系ではシュレディンガー方程式)。同じものを見ているのに、これでは見方によって対象を支配する方程式が異なってしまうこととなります。これら2つの方程式がどうやって矛盾なく両立しているのか? こうした問題に取り組んでいるのが統計力学です。

## More is different (量は質を変える)

気体は気体分子の集合体と書きましたが、このような見方はほとんどすべての物事に当てはまります。物質の究極の構成要素は素粒子ですが、それらがどのように集まって我々の社会ができていくかを大雑把に表現してみると

素粒子→原子→分子→細胞→生体組織  
→生体→社会→...

といった階層性があることがわかります。では、一番左に位置する素粒子の支配法則が解き明かされれば右側に位置するすべての物事がわかるようになるのでしょうか? ここは意見が分かれるポイントですが、おそらく不可能でしょう。なぜなら、階層が一つ上がる毎に下の階層の理論では予想もつかない現象が上の階層で生じ得ることを統計力学の考察は示しているからです。物性物理学の泰斗 P.W. Anderson はこのことを More is different (量は質を変える) と言い表しています。

## 我々の研究：情報科学でも More is different

物事をその構成要素に分解して理解しようとする科学の方法は還元論とよばれます。還元論の根底には階層性の連関の中で下部の理論さえ構築できれば上部のことはわかる (はず) とする考えがあります。こうした観点からすると More is different は否定的な結論です。でも悪いことばかりではありません。More is different は階層毎に質の異なる法則が成り立ってもよい、ということを示唆しているからです。たとえば、情報科学では組み合わせ問題が沢山現れますが、それらをそのまま解いたり分析したりすることは、しばしば、絶望的に難しい作業になります。ところが、問題のアンサンプルや問題サイズを無限に大きくした極限を考えると、記述の階層が変わることにより、そのまま解いた場合にはわからなかった問題の性質や解き方が見えてくることがあります。我々の研究室でもっばらこうした研究を行っています。

## これまでの研究から

複数の頂点とそれらを結ぶいくつかの辺で構成された図形はグラフと呼ばれます。グラフが与えられた際に、任意の辺についてその両端に位置する2つの頂点のうち少なくとも片方が含まれるような頂点の集合  $V$  のうち要素数  $|V|$  が最小になるものを求める「最小頂点被覆問題」は代表的な組み合わせ問題です。この問題に対し、我々はグラフのコミュニティ構造 (内部と外部とで結合密度が異なる複数の部分グラフに分かれる構造) を変化させると、解空間の構造に複数の相転移が生じることを明らかにしました (図1)。

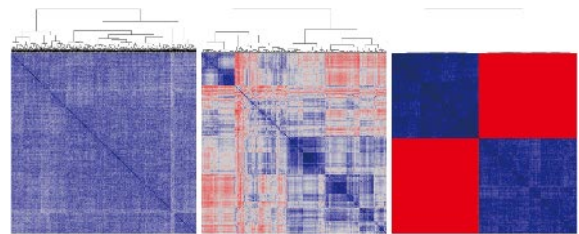


図1：2つのコミュニティからなるグラフにおける局所最小解間のハミング距離。コミュニティ内外の結合密度を変化させると解空間の構造が2回質的に変化する。PRE 100, 062101 (2019) より転載。

わたしたちの研究室では、多様な生命現象の仕組みを物理学的な視点から解明することを目指しています。特に現在は多細胞現象や細胞分化現象、それを支える細胞内の多分子現象に興味があり、細胞観察実験から機械学習、数値計算や理論構築まで、あらゆる手段を使って研究しています。

## 1 これまでの研究

ヒトを含む多細胞生物の中の組織では、細胞が常に動き回り、また新生され続けているなど、非平衡な状況で自律的に現象が生じています。これまでにわたしたちは、こうした多細胞の動態を培養皿状で観察してその中に新たな物理現象を見出したり、実際の動物の組織の観察からモデルとよく合う現象を見つけたりしてきました。

**【細胞集団運動とトポロジー】** わたしたちは、マウスの神経幹細胞の培養系に着目し、細胞が培養皿上において自発的に向きをそろえあう様子や、そのパターンの中でも激しい自発運動を続けていること、それにより理想に近いアクティブネマティック系としての性質を示すことを明らかにしてきました。特に神経幹細胞の集団運動では、局所的に細胞の集団の流れが生じるばかりでなく、細胞が集積しやすい場所や離散しやすい場所があり、それが細胞の配列場のトポロジカル欠陥になっていることを見つけました (図)。

より最近では、神経幹細胞をマイクロパターン上の閉じた空間内で培養することにより、そのパターンの端でキラリティのある細胞流が自発的に生じることを発見しました。理論モデルや数値シミュレーションにより、このパターンの端で見られる細胞集団の挙動が、物性系におけるトポロジカル端状態と似ていることもわかってきました。

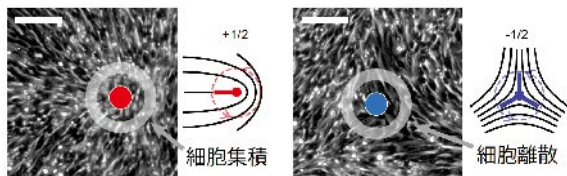


図: 神経幹細胞はトポロジカル欠陥付近で集まったり離散したりする。スケールバーは 100  $\mu\text{m}$ 。参考: Kawaguchi, Kageyama, Sano, Nature 545, 327–331 (2017)。

**【細胞多体系とマクロ非平衡系】** 近年の網羅的な細胞プロファイリング技術や高解像度のライブ観察技術の発展にもかかわらず、組織内での細胞動態を支配するルールを推定することは依然として困難です。例えば哺乳類の成体の皮膚では細胞が絶えず失われていますが、それが幹細胞の細胞分裂により補われるしくみはほとんど分かっておらず、歴史的にさまざまな説が唱えられてきました。

わたしたちは、生きたマウスの上皮幹細胞を 1 週間にわたり観察したデータを解析し、分化によって生じた穴に隣接する幹細胞が分裂によりその穴を埋めるというルールを発見しました。この研究では、細胞数の時空間ゆらぎの解析が運命の相互作用を見つけることに役立ちましたが、その背景には voter model などのマクロ非平衡系のモデルの知見がありました。また最近では、このような組織内での細胞間相互作用の複雑なルールをモデルを仮定せずに推定する手法として、多細胞動態を時空間的なグラフで表現し、それをグラフニューラルネットにより学習する方法を考案しました。

## 2 最近の研究とこれから

通説に反する現象や思いがけない発見に比較的当たりやすいのが生命科学実験の醍醐味ですが、一方で自身で実験をしなくともすでに膨大な量のデータにアクセスできてしまう現状もあります。大量のデータと向き合い、最終的に良い理論研究を行うには、機械学習の手法を活用することが今後一層重要になっていくと思われます。

**【細胞内相分離の普遍的理論構築】** 細胞内には膜による仕切りがなくとも自発的に生じる液滴があり、それらが区画としてさまざまな機能を発揮しています。これらの液滴がなぜ混ざり合わずに多数が共存できているのかを説明する理論を、細胞内局在を示すアミノ酸配列を予測するための機械学習の助けにより構築しています。

**【ゲノム配列と進化】** 生物の形態は多様ですが、ゲノム配列などの基礎的情報からそれを予測することはまだできません。すでに多様な種について得られたゲノムデータを、古くより集められてきた形態の情報と突き合わせることで、ゲノムから形態を予測し、その背後にあるクロマチン動態などのメカニズムを推定する枠組みを作っています。

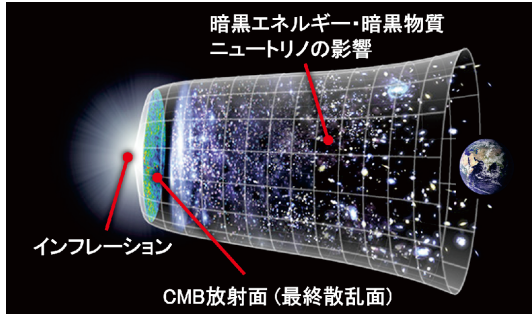


図1: 宇宙進化の模式図。横軸が時間で、左側が宇宙初期、右が現在である。(Original Image Credit: NASA / WMAP science team)

## 宇宙の始まりと進化の謎に迫る

ビッグバン宇宙論によれば、宇宙は、高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却を経て現在に至るとされる。では、そもそも高温高密度の原始宇宙はどうやって作り出されたのだろうか？そして、宇宙の進化は何に支配されているのだろうか？我々は、宇宙最古の光である「宇宙背景放射」の観測を通じて、これらの謎を解き明かすことを目指す。

**宇宙最古の光 “宇宙背景放射”** 高温高密度の原始宇宙は、膨張・冷却を経て、宇宙創成からおおよそ38万年後によく光が直進できるようになる。この瞬間を宇宙の晴れ上がりと呼び、このとき発生して138億年を経て今もなお地球に降り注ぐ光(電波)が、「宇宙背景放射」である。これを最先端の電波望遠鏡で精密測定し、原始の宇宙と宇宙進化を解き明かすことが当研究室の研究テーマである。

**宇宙創成から  $10^{-32}$  秒後に何が起きたのか** インフレーション仮説によれば、宇宙創成  $10^{-32}$  秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」であり、これが宇宙背景放射に特殊なパターンを刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレイクスルーとなる。

**“暗黒宇宙”の解明に向けて** 我々は、宇宙背景放射の精密測定を通して未知の粒子の探索と宇宙進

化メカニズムの解明も目指している。地球に届く過程で、宇宙背景放射は「暗黒物質」による重力レンズ効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇宙進化を探り、それに影響を及ぼす「ニュートリノ」の質量を測定することができる。さらに、すばる望遠鏡などの銀河観測とCMB観測を組み合わせた暗黒物質分布の観測や、「暗黒放射」と呼ばれるニュートリノのように軽く相互作用の弱い未知の粒子の探索も行っている。また、暗黒物質や暗黒エネルギーの正体ともなり得る仮想粒子「アクシオン」は、宇宙背景放射の変更を回転させる効果がある。この偏光の回転を精密観測することで、アクシオン探索を行っている。

## 国際共同実験

当研究室では、国際共同実験であるSimons Array、さらに次世代のSimons Observatoryへ参画し、本分野における先端研究を行なう。Simons Arrayは2019年1月に観測を開始した望遠鏡群である。Simons Observatoryはそれを更に拡張し、2024年の本格開始を目指している(図2)。

## 先端技術を用いた研究

多くの実験物理学の分野でそうであるように、我々の分野においても、先端技術が新しい物理を牽引してきた。当研究室では、低温・超伝導技術を駆使して、次世代実験に向けた高感度検出器やマイクロ波偏光観測の研究開発を進めている。さらに、超伝導量子ビットによる量子計測技術を利用した暗黒物質探索実験に向けて、研究開発を進めるなど、これまでになかった全く新しい研究の方向性も模索している。



図2: チリアタカマ高地に建設中のSimons Observatory望遠鏡群。2024年に本格観測開始を迎える。

# 小林研究室

小林 研介 教授 佐々木 健人 助教

## 量子力学と物性物理学

物理学の世界では、20世紀前半に量子力学という新しい分野が打ち立てられました。量子力学のおかげで、それ以前にはよく分からなかった原子・分子や光の性質など、私たちの身の回りにある自然の成り立ちを精密に理解できるようになりました。例えば、なぜガラスが透明なのか、なぜ金属が光を反射し電気を流すのか、さらには、なぜ鉄が磁石になるのかなどを定量的に理解できるようになったのです。このように物質の性質を理解し、さらに可能であれば制御することを目指す分野を物性物理学と呼びます。

物性物理学では、超伝導や磁性など数多くの電子が量子力学的に織りなす多彩な現象を扱います。1980年代以降のナノテクノロジーの発展により、**メゾスコピック系の物理学**という分野が生まれてきました。この分野では、半導体や金属、超伝導体や強磁性体などから作られる極小の電子回路（＝メゾスコピック系）を用いて物質の様々な性質を制御します。現在では電子一個の持つ電荷やスピンの観測と制御などが可能となっており、量子コンピュータ・量子計測等の様々な**量子テクノロジー**の可能性が広がってきました。

## 私たちのねらい：量子計測

量子力学を用いることによって、それ以前には到底不可能であったような超精密な測定が可能になります。量子力学の原理を用いたこのような精密測定技術を**量子計測（量子センシング）**と呼びます。私たちは研究室一丸となって量子計測の開発に取り組んでいます。

中でも、**ダイヤモンド NV 中心**を量子センサとして用いる量子計測が有望視されています。NV 中心とはダイヤモンド結晶の中に安定して存在する格子欠陥の一種です。図に示すように、となり同士の2個の炭素原子が窒素 (Nitrogen) と原子空孔 (Vacancy) のペアに置き換わった構造をしており、内部に独特の量子準位を持ちます。

近年の研究により、NV 中心内の電子スピンや原子核スピンの量子状態が極めて長く保持されることが分かってきました。現在、NV 中心を用いた量子コンピューティングや量子通信の研究が盛んに

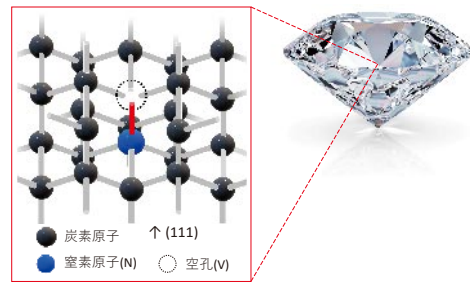


図 ダイヤモンド結晶とその内部に存在する NV 中心の概念図。

行われています。一方、その高い潜在能力を使えば、新しい測定技術を開発することができるはずです。実際、NV 中心内の量子準位の精密測定によって NV 中心が感じている磁場や温度を超高精度で測定することが可能なのです。この点で NV 中心を原子サイズの単一量子スピンセンサと呼ぶことができます。私たちはこの技術をメゾスコピック系に適用し、物質の磁性や電流分布や熱輸送などをあたかも顕微鏡で観察するかのように観測したいと考えています。これが私たちが現在取り組んでいる**単一量子スピン顕微鏡**の開発です。私たちの目標は量子力学の原理を用いて精密物性測定を行う新分野を確立し、これまで誰も見たことがないものを可視化することです。

量子計測を用いて物質の性質を探求していくことは世界的にも始まったばかりの試みであり、大きな発展が期待されます。この先には、非平衡輸送・スピングラス・トポロジカル端状態・永久電流など、物理学にとって重要で魅力的な数多くのテーマが横たわっています。

## もっと詳しく知りたい方へ

教科書をほんの一步踏み出すと世の中は驚きと発見に満ちています。物理学の基本原理に興味のある方・現実の物質を相手に超精密な実験をしたい方・新しい測定技術を開発したい方・「世界で初めて」に挑戦したい方、一緒に研究しませんか。意欲に満ちた皆さんの積極的な挑戦に期待します。ともに考え、議論し、実験を工夫することによって、一緒に新しい物理学を切り拓いていきましょう。

# 酒井広文研究室

酒井 広文 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ミ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](mailto: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).

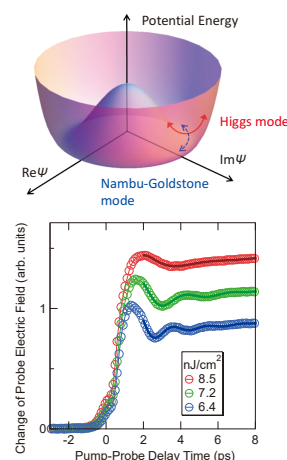
固体中では多数の電子が相互作用することによって、量子力学効果が巨視的なスケールで現れることがある。超伝導はその代表例で、一個の電子の運動を考えている限りは予想もつかない面白い現象が発現する。当研究室では、レーザー光を用いた最先端光技術を駆使して、光で物質中に巨視的な量子状態を創り出す、或いは自在に制御することを目標として、様々な量子物質の研究を進めている。最近の主なトピックスを以下に挙げる。

## 1) 超伝導のヒッグスモードの観測

目に見える超伝導現象の例として、磁気浮上の実験がある。これは磁束が超伝導体中に侵入できず、欠陥のまわりに固定されてしまうことによる。電磁波が超伝導体に入ることができないことに起因しているが、これは見方を変えると、本来質量ゼロであった光子が超伝導体中では質量を持つようになることに対応する。この事情は実は、相互作用を媒介するゲージボソンに質量を与える素粒子のヒッグス機構と似ている。ヒッグス機構は2012年にヒッグス粒子の発見によって実証された。となると、超伝導でもヒッグス粒子に相当する粒子(振動)があってしかるべきである。この振動は超伝導という秩序のさざ波のようなものであり、ヒッグスモードと呼ばれる。模式的には図に示すワインボトルの底の様なポテンシャル上での超伝導の秩序変数の動径方向の振動に相当する。その存在は約50年前に理論的に予言されていたが、2013年我々は最先端のレーザー技術を用いてその明確な観測に世界で初めて成功した。現在、このヒッグスモードの観測を通して、銅酸化物高温超伝導や鉄系超伝導体などの非従来型超伝導体の性質を調べる研究を展開している。

## 2) 光による超伝導体の制御

物質に光を照射すると通常は温度が上昇し、低温で発現する超伝導のような量子現象は消失する。しかし、巧みに制御されたレーザー光を用いると、温度上昇を避けて量子相を操作することが可能である。我々は超伝導に注目して、様々な光の技術を駆使して、光照射により超伝導を增強したり、超伝導転移温度よりもはるかに高い温度で常伝導状態を超伝導状態に変えてしまう研究を進め、高温超伝導体の謎に迫ろうとしている。



(上) 超伝導体の自由エネルギーの模式図。動径方向の振動がヒッグスモード。(下) 超伝導体 NbTiN のヒッグスモードの実時間観測。縦軸は超伝導秩序変数に相当する量。

## 3) トポロジカル物質の光応答と量子操作

前述のヒッグスモードの例に見るように、素粒子物理学と物性物理学には多くの共通する概念が存在する。最近、その舞台として著しい進展を遂げているのがトポロジカル物質の研究である。炭素原子一層から成る物質、グラフェン中の電子はあたかも質量がゼロで、運動エネルギーが運動量に比例するという奇妙な性質を持つ。その運動は相対論的量子力学に基づくディラック方程式に従うことからディラック電子と呼ばれる。さらにワイル半金属と呼ばれるトポロジカル物質では、ディラック電子が持つスピンの縮退が解けて、電子は右巻き、左巻きの自由度を持ったカイラルなフェルミ粒子に姿を変える。この奇妙な電子の特徴は電気伝導や光応答に反映され、応用上も興味深い性質をもたらす。我々はレーザー光を用いてこのトポロジカル物質の性質を調べ、さらにディラック電子をワイルフェルミオンに瞬時に変化させるなど、トポロジカル物質を量子力学的に操作する研究を行っている。

より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。

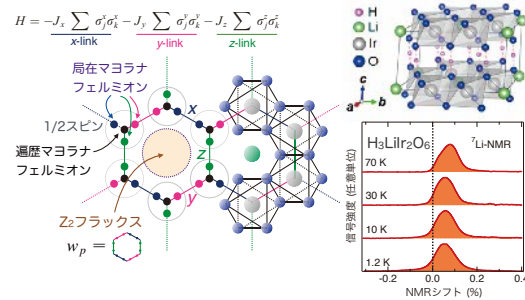


私たちの目にする固体の多くは  $1 \text{ cm}^3$  あたり  $10^{23}$  個程度の原子から構成されており、単純には構成原子の最外殻軌道が電子で満たされていると絶縁体、そうでないと金属となります。実際には、後者の場合でも電子の間にはクーロン力を通じた斥力が働いており、互いに避けよう（電子相関）とします。電子相関によって電子は空間的に局在する傾向にあり、ドロドロした電子の液体状態や電子が局在した電子固体状態（モット絶縁相）などの電子相を構築します。このような状況では、電荷に加えて、電子スピンや軌道運動のモーメントに起因する磁性が顔を出します。電子相関の効果は角運動量の大きな d 軌道や f 軌道を最外殻軌道とする遷移金属元素や希土類元素で顕著で、電子間の実効的なクーロン斥力エネルギーが電子の運動エネルギーを凌駕することもしばしばです。電子相関は、軌道が完全に満たされていない金属を磁性絶縁体に変えるだけでなく、結晶格子の低次元性や対称性（幾何学的フラストレーションやトポロジカル効果）の助けを借りて、電荷の自由度やスピンや軌道の自由度が絡み合ったさらに複雑な電子相を創り出します。エキゾチックな電子相は、しばしば特徴的な電荷、スピン、軌道（複合）励起で特徴づけられ、それらはマヨラナフェルミオンやスピノンといった準粒子として振る舞います。このようなエキゾチックな電子相として、強い斥力のもとで出現する非従来型の超伝導や、量子スピン液体などが挙げられます。

高木研究室では、電子相関が強く働く化合物を主な舞台として、このようなエキゾチックな電子相と準粒子を設計、探索しています。

## (1) 新しい量子スピン液体とキタエフ系物理

多体量子スピン物理におけるマイルストーンは、絶対零度まで磁性スピンが量子的に絡み合った状態、量子スピン液体の実現です。量子スピン液体は一次元スピン模型では理論も実験も共に確立されていますが、二次元以上ではそうではありません。当研究室では、キタエフ模型の初の実証例を目指して 2 次元蜂の巣格子イリジウム酸化物  $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$  に着目し、磁化率、比熱、核磁気共鳴測定において少なくとも 50 ミリケルビンまで液体であり続ける量子液体物質であることを明らかにし



## キタエフ蜂の巣格子模型とイリジウム酸化物スピン液体

ました。キタエフ蜂の巣格子模型では、スピンハミルトニアンをマヨラナフェルミ準粒子として一体問題に帰着した厳密解が得られます（図1）。さらに、マヨラナ粒子を操作することができればトポロジカル量子コンピューティングも可能とされています。ただし実際には、そのような研究に適した良いキタエフ物質はみつかっていません。キタエフ物質を創るには、非従来型の異方的相互作用を導入する必要があり、スピン-軌道相互作用が大きいイリジウム酸化物、4f 電子系などに対する実現性が提唱されてきました。当研究室ではそれらの蜂の巣格子物質を第一原理計算データベースによる近代的な物質探索と、経験的な結晶合成を組み合わせることで開発しています。現在は、実際に 4 年生の特別実験で新しく見つかった希土類化合物を量子スピン液体候補として研究しています。

## (2) 超高压下の新しい超伝導相研究

最近、超高压下（1 万気圧以上）の実験技術の進展に伴い、全く新しい超伝導体が発見されてきています。以前は磁石としての性質が強すぎて超伝導になるとは思われていなかった Mn, Cr 化合物もそれらの一つです。そのような変わった超伝導（磁気量子臨界点近傍の超伝導）では、超伝導相が現れる直前にどのような磁性状態になっているか、また、超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるか？という研究が重要になります。当研究室では、最先端の超高压下磁化測定技術を持っており、10 万気圧程度の圧力下でこれらを研究しています。

## 1 非平衡な世界の物理法則を探る

熱力学や、それに裏打ちされた統計力学は、熱平衡状態、つまり一定一様な環境下で行きつく素朴な状態については、深く強力な物理法則の存在を教えてくださいました。一方で、ふと周りを見回すと、自然現象には熱平衡状態にないものが無数にあります。水や空気は、地球規模で巨大な対流を起こしています。空や大地は、様々な模様で彩られています。そして生物。私たちの体内では、生体分子が様々な連携プレーで細胞機能を支えており、細胞は協同して組織を作り、それが組み合わさって生命個体ができています。そうした個体が集って集団となり、様々な種が絡み合う生態系をなしています。これらはすべて、非平衡な状況で相互作用する自由度が数多く集まった結果、マクロスケールで非自明な性質が発現している典型例と言えるでしょう。これだけ魅力的な現象が散見されるにも拘らず、非平衡現象を扱う物理法則は発展途上にあり、その構築は現代科学に課された大きな未解決問題と言えます。

## 2 竹内研究室のテーマ

竹内研究室では、非平衡現象が織りなす統計物理法則の理解を目指して、液晶、粉体、コロイドなどのソフトマター、バクテリアなどの生命材料を活用して、実験研究を展開しています。個別の現象の理解はもとより、現象に依らない共通の物理法則を抽出すること、そのような俯瞰的な視点から物事を捉えることを目指し、研究室単位では比較的多彩な問題を扱っているのが特徴です。以下、現在取り組んでいる主なテーマを紹介します。

### 2.1 液晶が紡ぐ非平衡法則とトポロジカル欠陥

液晶とは、棒のような分子が向きを揃えた状態を指します。すなわち、液晶の特徴はその配向秩序にあります。実際は図1挿図のように、向きが整合しない特異点が生じることがよくあります。このような点は「トポロジカル欠陥」と呼ばれ、液晶に限らず物理の諸分野で重要な役割を担ってきました。液晶の1つの強みは、様々な対象を光で観察できることにあり、トポロジカル欠陥も例外ではありません。我々は最近、3次元空間における線状トポロジカル欠陥の運動観察手法を提案し

(図1)、欠陥動力学の重要な性質を明らかにしました。我々はまた、こうしたトポロジカル欠陥の集団が示す非平衡相転移や非平衡界面ゆらぎの普遍法則などの研究を展開しており、数理模型や量子スピン系などとの興味深い関係が生まれています。

### 2.2 微生物集団の統計法則を探る

普通の物質が多くの分子からできているように、生き物のように「自ら動く粒子」「増殖する粒子」の集団を、一種の物質と考えることはできるでしょうか。実は最近、こうした研究が世界中で展開されており、「アクティブマター」という分野が生まれました。我々は、バクテリアなどの微生物集団を観察して、アクティブマターの液体状態、液晶状態、ガラス状態など、様々な非平衡相を探求し、理解を進めています。特に、微小流体実験技術などを使い、制御された条件下で細胞集団を観察して、集団に生まれる秩序状態や、非平衡ゆらぎの統計法則を調べています。例えば、大腸菌などの棒状の細菌は、向きが揃った液晶的配向秩序を示し、トポロジカル欠陥も現れます(図2)。我々は、それが細胞流動や細菌の集団成長に役割を担っていることを見出しました。

### 2.3 他にもいろいろ

研究室では他にも、「実験統計力学」をテーマに、ソフトマターや生命材料を使った様々なテーマが走っています。研究室メンバーの興味に応じて、出来るかもしれない面白そうな新テーマに積極的に挑戦していくことをモットーとしています。

## 3 もっと詳しく知りたい方へ

百聞は一見に如かず。ぜひ見学に来てください。竹内の連絡先はこちら：[kat@kaztake.org](mailto:kat@kaztake.org)  
研究室ウェブサイト：<http://labjp.kaztake.org>  
(より詳しい研究紹介があります)

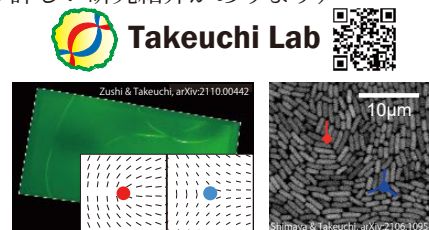


図1 (左)：液晶トポロジカル欠陥の可視化。  
図2 (右)：大腸菌集団に生じるトポロジカル欠陥。

## 1 非平衡量子多体系の世界

本研究室では、量子多体系における非平衡現象や非平衡物性、統計力学に興味をもって物性物理の理論研究をしています。

量子多体系の舞台として、固体中で相互作用する電子の集団（強相関電子系）、レーザーによってトラップされて極低温まで冷却された原子の集団（冷却原子系）などがあります。それらに外から力を加えたり振動させたりすることで非平衡状態にすると何が起きるのでしょうか？一見すると非平衡にすることで秩序が乱され、外から加えたエネルギーが熱に変わって、量子系の面白い性質が掻き消えてしまうように思われます。ところが、非平衡にすることで平衡状態では実現できなかった秩序や物性が発現する例が実験的、理論的に見つかってきています。それらの現象を理解し非平衡物性の可能性を広げていくことを目標にしています。

## 2 最近の研究テーマ

### (1) 超伝導体のヒッグスモード

超伝導体には、秩序パラメーターの振幅の振動に対応する集団励起モードが存在することが知られています。素粒子であるヒッグス粒子との類似からヒッグスモードと呼ばれています。ヒッグスモードは電氣的・磁氣的に中性なため、光などの外場と相互作用させて直接励起することがこれまで困難でした。しかし、高強度のテラヘルツ光を用いることで、非線形光学応答を介してヒッグスモードと電磁場を結合させることができます。この結合は、実際に超伝導体 NbN にテラヘルツ光を照射した実験により三次高調波の共鳴として観測されました。さらに、より高次の高調波で現れるヒッグスモード共鳴について研究を進めています。

### (2) 超伝導体のレゲットモード

これまでは超伝導秩序と光の結合が弱く、特殊な状況を除いて超伝導秩序は光と非線形な応答しか示さないと考えられていました。ところが最近、マルチバンド超伝導体に注目すると超伝導秩序が光に対して線形に応答する場合があることがわかってきました。一般に、超伝導体の自由エネルギーにリフシッツ不変量と呼ばれる対称操作で変化し

ない不変量が存在すると超伝導秩序が光に線形で応答します。リフシッツ不変量が現れるかどうかは群論によって分類することができます。特に、超伝導秩序の集団励起モードのうちバンド間の超伝導秩序の位相の差が振動するレゲットモードを媒介して超伝導秩序が光に対して線形に応答することがわかります（図を参照）。

### (3) 非従来型超伝導ペアリングを持った量子多体傷跡状態

孤立量子多体系において量子多体傷跡状態と呼ばれる例外的なエネルギー固有状態が存在すると、非平衡下でも熱化が抑制できて超伝導相関などを長時間保てることわかってきています。我々は、従来から知られていた傷跡状態の一種である  $s$  波の超伝導  $\eta$  ペアリング状態を非従来型のペア対称性に拡張する一般的な構成法を提案しました。これによって、任意の次元における任意の二部格子で系統的に  $p$  波、 $d$  波、 $f$  波などのペアリング状態を傷跡状態に持つ理論モデルを構成できるようになりました。

## 3 今後の展開

量子多体系の非平衡状態の中には、いまだに見つかっていない新奇な状態が数多く存在すると考えられます。それらを探し求めて非平衡量子多体系のフロンティアを開拓していきます。

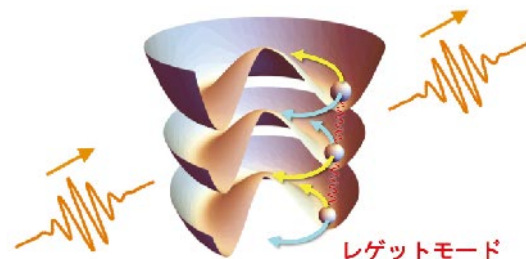


図: マルチバンド超伝導体のレゲットモードを媒介した光応答の概念図。

研究室ホームページ:

<https://dyn.phys.s.u-tokyo.ac.jp/home>

# 常行研究室

常行真司教授 石河孝洋特任助教

## 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す。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ます。

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本情報から、量子力学の基礎方程式を用いて物質の構造物性や電子物性を非経験的に計算できる、定量的な**予言力のある**研究手法です。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、近年その活躍の場は大きな広がりを見せています。

## 2 最近の研究テーマ

当研究室では、新しいシミュレーション手法の開発と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ます。とくにAI・データ科学と第一原理計算を組み合わせるデータ同化手法や、結晶の格子振動の非調和効果を定量的に取り扱う手法は、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ます。

[新しい方法論の開発]

- 不完全な粉末回折実験データを利用して結晶構造探索を加速するデータ同化手法
- 格子振動の非調和効果を取り入れた複素誘電率計算手法
- 超伝導転移温度の非経験的な計算手法
- 超短パルスレーザーによる非熱的レーザー加工のシミュレーション手法

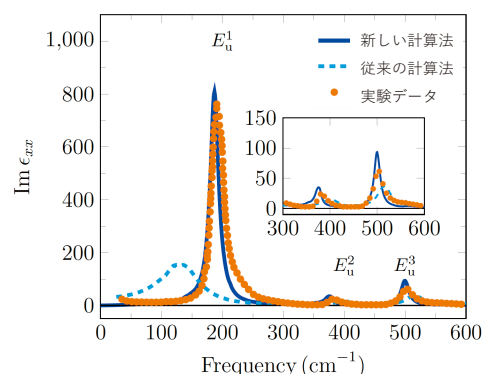
- 電子相関が強い系のための、相関波動関数理論に基づく電子状態計算手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

- 水素を含む超イオン伝導体のイオン伝導機構
- 新しい超伝導物質
- 結晶の熱物性(熱伝導率、熱膨張率)
- 非熱的レーザー加工の物理機構

## 3 今後の展開

材料科学、化学、地球惑星科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ます。また実社会に必要とされる新材料の研究は、物性物理学者にとって魅力的な研究テーマの宝庫です。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の研究に寄与したいと考えています。



図：格子振動の非調和効果が大きいことで知られるTiO<sub>2</sub>結晶のテラヘルツ領域の複素誘電率。従来の計算法(破線)にくらべ、格子振動の非調和効果をより良く取り入れた新しい計算法(実線)は、実験データ(点)と良く一致することがわかる。

## 研究室ホームページ

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

## 1 研究の背景

最先端のスーパーコンピュータの計算能力をもってしても、多体のシュレーディンガー方程式を完全に解くことはできません。そこで、対称性や量子相関など、もとの方程式の中に含まれている物理的に重要な性質を失うことなく、シミュレーションを実行しやすい形へ表現しなおすことが、計算物理における重要な鍵となります。

藤堂研究室では、モンテカルロ法などのサンプリング手法、経路積分に基づく量子ゆらぎの表現、特異値分解やテンソルネットワークによる情報圧縮、統計的機械学習の手法などを駆使し、量子スピン系から現実の物質にいたるまで、さまざまな量子多体系に特有の状態、相転移現象、ダイナミクスの解明を目指しています。さらに、量子コンピュータの基礎理論や量子機械学習アルゴリズムの研究、次世代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・公開も進めています。

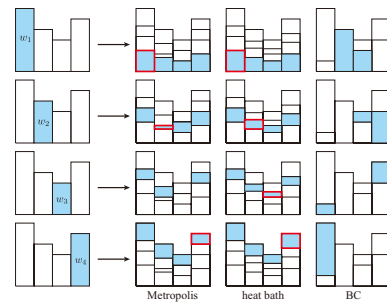
## 2 最近の研究テーマ

### 2.1 強相関係のためのシミュレーション手法

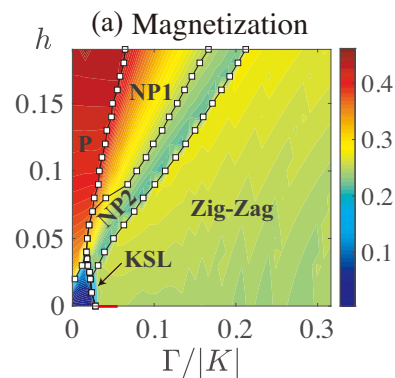
非局所更新法量子モンテカルロ法、連続空間量子モンテカルロ法、長距離相互作用系に対するオーダー  $N$  法、幾何学的カーネル構成法に加え、フラストレートした量子磁性体やフェルミ粒子系のためのテンソルネットワークの手法、テンソルネットワークとモンテカルロ法の融合手法などの開発も進めています。また、強相関量子格子模型シミュレーションのためのオープンソースソフトウェア ALPS、HΦ、TeNeS、計算物質科学シミュレーションパッケージ MateriApps LIVE! など、さまざまなソフトウェアの開発・公開を進めています。

### 2.2 フラストレートスピン系の新奇秩序

相互作用にフラストレーションが存在するスピン系では、強いスピン揺らぎの結果、絶対零度まで磁気秩序が生じない「スピン液体」状態が実現することもあります。モンテカルロ法やスピンドイナミクス法を用いた古典フラストレートスピン系の研究や、テンソルネットワーク法を用いたハニカム格子キタエフ模型に現れる量子スピン液体状態の研究を行っています。



モンテカルロ法における幾何学的カーネル構成法



テンソルネットワークによるキタエフ模型の基底状態

### 2.3 統計的機械学習の物性物理への応用

近年、電子の電荷・スピン・軌道の自由度が複雑に絡み合う 5d 電子系が大きく注目されています。これらの系のダイナミクスを機械学習に基づいて効率的に計算する手法を開発し、実験家との共同研究を通じて、新しい物質の物理を解明しています。また、深層学習における学習の振る舞いを統計物理学的な観点から解明する研究も進めています。

### 2.4 量子コンピュータアルゴリズム

量子コンピュータの実用化むけて、ハードウェアだけでなく量子アルゴリズムや量子回路のデザイン、つまり「量子ソフトウェア」の開発も重要です。量子回路の新しい最適化手法や量子機械学習手法の研究、テンソルネットワークに基づく量子コンピュータのシミュレータや量子誤り訂正手法の開発などを進めています。

藤堂研究室ホームページ:

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

# 中辻・酒井明人研究室

中辻知 教授 酒井明人 講師 肥後友也 特任准教授 井土宏 特任准教授  
田中克大 特任助教 Hanshen Tsai 特任助教

## 1 はじめに

今、物性分野で重要な発見が相次いでいます。これまでの磁性や超伝導、スピントロニクスといった分野が、トポロジーという概念によって、再び見直され整理・統合され、多くの新しい物理や現象の発見に繋がっています。また、素粒子論で発達した概念が物性分野の実験で初めて確認されたり、宇宙論・量子情報の技術が量子液体や超伝導の研究でブレークスルーをもたらしたりと、既存の分野を超えた新しい視点での研究が物性分野に変革をもたらしています。こうした大きな潮流を先導しているのは、実は、新しい概念を具現する量子物質の発見です。その原動力は、物性の深い理解に基づいた物質探索とその合成であり、世界最高精度の物性測定技術です。私たちが生み出す量子物質は新しい物理概念を提供し基礎分野で世界を先導するだけでなく、その驚くべき機能性ゆえに産業界からも注目を集めています。これらの独自の量子物質を用いて、様々な環境での精密測定を自ら行うことで、新しい物性とその背後にある物理法則の解明を目指しています。

## 2 主な研究テーマ

1. 物質中の相対論的粒子及び新規量子現象
  - ワイル粒子とカイラル異常
  - 量子スピナイスの磁気単極子、フォトン
2. トポロジカル磁性体の室温量子伝導
  - ワイル反強磁性体のスピントロニクス
  - ベリー曲率と熱・光巨大応答
3. 強相関電子系における量子相転移
  - 多極子揺らぎによる異常金属相・高温超伝導

## 3 最近の研究から

- トポロジカル反強磁性体におけるベリー位相効果  
ベリー曲率は量子ホール系における整数（チャーン数）に相当する量であり、垂直方向の量子伝導を誘起します。その端緒はTKNN公式(Thouless-Kohmoto-Nightingale-den Nijs)として知られ、Thoulessはこの功績で2016年にノーベル物理学賞を受賞しています。一方、異常ホール効果はゼロ磁場で発現するホール効果であり、同様のベリー曲率機

構による理解が進んでいたものの、19世紀の発見以来、強磁性体でしか観測例がありませんでした。その中、我々は磁性体  $Mn_3Sn$  を用い、世界で初めて反強磁性状態において巨大異常ホール効果を観測しました [Nature (2016)]。この物質は強磁性体の1/1000の磁化しか持たないため、ベリー曲率が極端に大きくなる機構の解明が課題でした。そこで、ベリー曲率は波数空間の仮想磁場であり、ワイル点を源として現れることに着目し、電子状態の解明やカイラル異常の研究を行い、物質中に磁気ワイルフェルミオンがいることをその世界初の例として明らかにしました [Nat. Mater. (2017)]。これらの現象はすべて室温で現れることから、巨大な磁気熱電効果 [Nat. Phys. ('17,'18), Nature ('20), Nat. Commun. ('21), Sci. Adv. ('22)] や、反強磁性スピントロニクス [Nature ('19, '20, '22, '23)] などエネルギーハーベスティング及びスピントロニクス分野に波及しています。

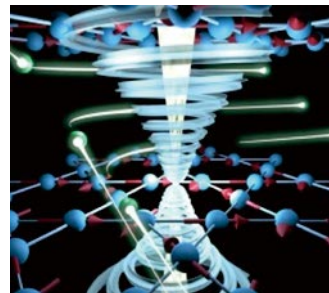


図1  $Mn_3Sn$  の磁気構造とワイル点の概念図

## 4 おわりに

私たちは、新入生の方には研究を通じて「創造性」と「発信力」を身に付けていただきたいと思っています。学生の方は、躍動的な分野の潮流を感じながら、オリジナルな発想のもとに研究を進め、時に世界の第一線の共同研究者と協力する—そのために、我々の持つ「国際拠点ネットワーク」や世界最高の「研究環境」と分野の垣根を超える「研究連携スキーム」を利用していただければと思っています。理学の基礎の力で世界を変える、そのような意気込みのある方をお待ちしています。

研究室 HP <https://nakatsuji-lab.phys.s.u-tokyo.ac.jp>

# 中村研究室

中村 哲 教授 永尾 翔 助教

## 1 研究の背景

我々は、大型粒子加速器を駆使し、核子(陽子、中性子)に加えてストレンジクォークを含むハイペロンから構成されるハイパー原子核実験を推進することで、強い相互作用をする量子多体系の理解を目指した近代的な原子核物理学の研究を展開している。

原子核物理学は、我々の周りにある物質が一体何からどのように構成されるのか、という人類にとって根源的な問に挑戦し続けてきた。ラザフォードによる原子核の発見、その構成要素としての核子の振る舞いの研究から、現在ではそれらの内部構造であるクォーク、グルーオンのダイナミクスまで原子核物理学の研究領域は広がっている。現在の原子核物理学とは強い相互作用する粒子、つまりハドロン多体系の物性物理学であるといえる。

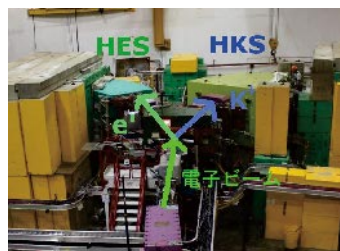
近年の重力波観測の成功や、これまで超新星爆発で生じると考えられてきた重い元素の合成における役割において、宇宙で最も密度の高い物質である中性子星が注目を集めている。重力波観測、中性子星観測望遠鏡などの巨視的観測が長足の進歩を遂げ中性子星の質量や半径に関して研究が進んでいる現状において、中性子星の深部という低温、高密度状態がどのようなメカニズムから生じているのかを解明することが、高密度ハドロン物質の物性を理解するために極めて重要である。様々な条件下で実施できる地上の加速器実験による微視的研究の重要性はますます増している。我々はクォーク多体系であるバリオン、バリオン多体系である(ハイパー)原子核、そして巨視的な核物質である中性子星まで大きさスケールが $10^{19}$ も異なる物質を強い相互作用の第一原理である量子色力学(QCD)を基盤として統一的に理解するべく、実験的な研究を進めている。

## 2 最近の研究テーマ

### (1)電子ビームを用いたハイパー核精密分光

米国ジェファーソン研究所(JLab)において、我々は大型高分解能K中間子スペクトロメータ(HKS)、高分解能電子スペクトロメータ(HES)を開発し、 $(e, e'K^+)$ 反応を用いたラムダハイパー核分光法を創始、発展させてきた。現在、同位体濃縮した $^{40,48}\text{Ca}$ 標的を用いて、太陽質量の2倍もの重い中

性子星がなぜ潰れてブラックホールにならずに存在できるかを理解するためにラムダ粒子を含む3体力のアイソスピン依存性を調べようとしている。また、 $^{208}\text{Pb}$ 標的を用いた最も重いラムダハイパー核や $^3\text{He}$ 標的を用いた軽いラムダハイパー核の実験準備も同時に進めている。



HKS と HES。総計 300 トン以上の巨大電磁石からなる

### (2)電磁生成したハイパー核の崩壊 $\pi^-$ 中間子分光

我々はドイツのマインツ大学の MAMI 加速器施設において、電磁生成したラムダハイパー核の崩壊から生じる  $\pi^-$  中間子を測定して、親ハイパー核の質量を精密測定する新手法を創始した。この手法を用いて最も単純なラムダハイパー核であるにも関わらずその質量と寿命に関する実験結果が同時に理解できない  $^3_\Lambda\text{H}$  の謎の解明に挑戦している。

### (3)実光子を用いたストレンジネス核物理研究

東北大学電子光物理学研究センター ELPH の実光子標識化ビームを用いて、 $^3_\Lambda\text{H}$  等の軽いハイパー核の寿命測定実験やラムダ粒子と中性子の終状態相互作用の研究を進めている。

## 3 今後の展開

上記に示した電子加速器施設におけるハイパー核、ストレンジネス核物理研究を展開すると同時に、東海にある大強度陽子加速器施設 J-PARC のハドロンホール拡張計画を推進する。そこに新設される運動量分散整合技術を用いたビームライン HIHR において世界最高精度のラムダハイパー核反応分光実験を絨毯爆撃的に実施する「ハイパー核工場」を実現する。

JLab, MAMI, ELPH におけるハイパー核国際共同研究や、J-PARC で目指す新しい実験施設における最高分解能ハイパー核反応分光実験に興味のある諸君を歓迎する。

<https://www.nex.phys.s.u-tokyo.ac.jp/satoshi.nakamura@phys.s.u-tokyo.ac.jp>



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。

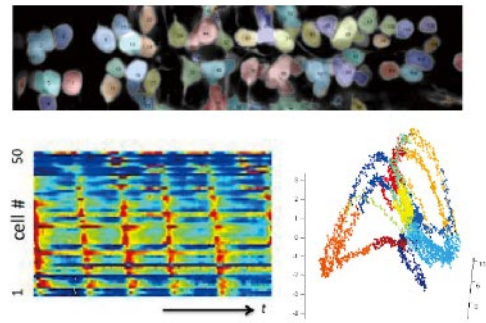


図1：カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞(上)の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する(左下、赤色が活動状態を示す)。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を3次元空間内で可視化することもできる(右下)。

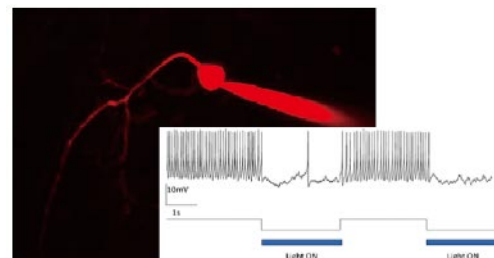


図2：パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射(light ON)により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。



# 長谷川研究室

長谷川 修司 教授    秋山 了太 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構造に特有な物性、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、表面では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、電子のスピン向きによって電子エネルギー準位が分裂したりする。そのため、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。この分野はナノテクノロジーやスピントロニクスと呼ばれる応用分野とも直結している。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で作成し、そこで電流やスピンの流れを利用したデバイスに応用しようという研究も盛んに行われている。表面・ナノ物理学は、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、超伝導体、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「見えないものをみる」（長谷川修司著、東京大学出版会）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っている。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、銀原子である。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ることを示している。ただし、その波長は3 nm程度の極微の波であり、物理学の基礎として習う量子力学が教える電子の波動性が直接見えている。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。まさに量子力学のポテンシャル井戸の演習問題を実際の物質で実現していることになる。

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、電気伝導度も高いはず。当研究室では、1原子層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、極細の針を使った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針として利用し、外側2本の針から電流を流し込み、内側2本の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。針と針の間隔は数十 nmまで小さくできる。最近では磁性の針を用いて電子スピンの流れを検出している。極微の物質はマクロなスケールとは違った性質を示すことがわかってきた。

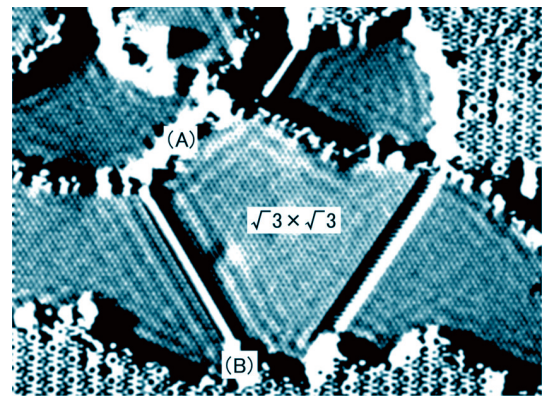


図1. 電子の海のさざなみ

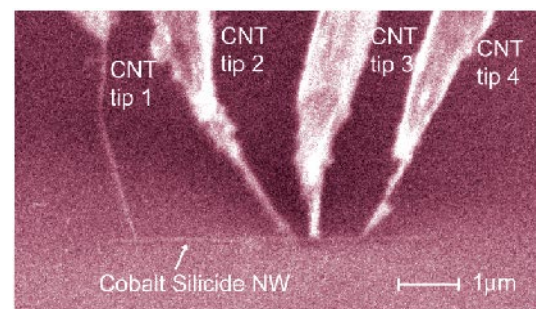


図2：マイクロな針を使った4探針電気伝導測定

## 1 研究概要

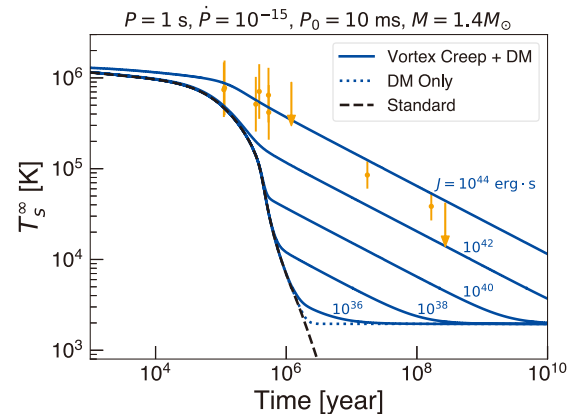
私たちの研究室では、標準模型を超える物理の解明を目指して、素粒子物理の理論的研究を行っています。

素粒子の標準模型は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おり、その地位を確固たるものになっています。しかし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 69 %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。例えば、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（ $\sim 100$  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（「階層性問題」）。また強い相互作用を記述する QCD における「strong CP 問題」も標準模型に残された最重要問題の一つです。ニュートリノ質量の起源も分かかっていません。以上の点からも、標準模型を超えたより基本的な理論が（典型的にはエネルギー  $100$  GeV  $\sim 1$  TeV 以上のところに）存在し、それが標準模型の諸問題を解決しているのではないかと広く考えられています。

これまで私たちは、標準模型を超える物理の模型構築、現象論的研究、初期宇宙論への応用といった研究を行ってきました。また、最新の素粒子実験や宇宙観測の結果を模型構築に反映させたり、新しい実験・観測手法を提案するような研究も行っ



図：中性子星における暗黒物質による加熱効果と、中性子星自身による内部加熱（超流動渦糸の運動による内部摩擦がもたらす加熱）の影響を調べた論文 (arXiv: 2309.02633) より転載。

ています。

## 2 最近の研究テーマ

ここ数年間で研究室メンバーが取り組んでいる研究テーマのいくつかを挙げておきます。

- 暗黒物質の模型構築およびその実験・観測による検証に関する研究。
- 中性子星の温度観測や超新星の観測を用いた素粒子新物理（暗黒物質、アクシオン）探索の研究。
- 大統一理論模型の構築と陽子崩壊予言。
- strong CP 問題に動機づけられたアクシオン模型の模型構築やその宇宙論の研究。
- 宇宙のバリオン非対称性を説明するシナリオ（特に小さなニュートリノ質量の起源と関連した Leptogenesis シナリオ）の研究。
- ミューオンの異常磁気能率の標準模型予言値と実験値の乖離に動機づけられた素粒子模型の構築および現象論的研究、など。

## 3 Web 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>

# 林研究室

林 将光 准教授 河口 真志 助教

## 1 研究の背景

物性物理学において、電子がもつ角運動量「スピン」は磁性や電気伝導、光応答や超伝導など、多くの局面で重要な働きをすることが知られています。電子や光子、物質中の素励起であるフォノン(格子振動)やマグノン(磁気励起)など、スピンを持つ粒子や波動は物質の中でどのように躍動し、どのような物性を誘起するのか。これらの疑問に答え、スピンの物理学を確立することが林研の目標です。

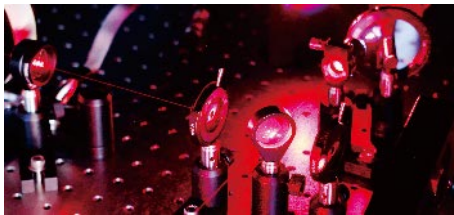


図1. 光学系実験設備の写真。

## 2 最近の研究テーマ

### (1) スピン流物性

スピンの向きが揃った電子が同じ方向に動く「スピン流」と呼ばれる電子の流れが存在します。たとえば、上向きのスピンを持った電子は右向きに、下向きの電子は左向きに動いたとき、右から左にスピン流が生じることになります。スピン流は電流と違って散逸がなく(つまりスピン流を流してもエネルギーを消費しない)、電荷ではなくスピン角運動量を運搬します。本研究では、スピン流を作ってその流れを操り、スピン角運動量を物質に入れ込んで、スピンの向きが物性に与える影響を明らかに

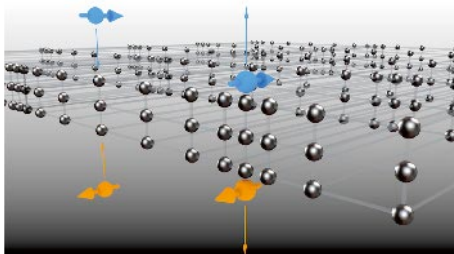


図2. 原子の運動からスピン流が発生する様子を模式的に表した図。参照: Kawada *et al.*, *Sci. Adv.* (2021)

します。特に、電子のスピンの向きと運動方向を結合する「スピン軌道相互作用」が大きい物質を原子層レベルで組み合わせた人工ヘテロ構造を舞台にスピン流の物性の研究を行います。

### (2) 非線形光学効果

光子もまた電子と同様、スピン角運動量をもっています。光子のスピンは「右回り」と「左回り」円偏光の2状態として現れます。物質の電子状態と光の相関に関する研究は古くからありますが、近年発見されたトポロジカル絶縁体やワイル半金属など、特異な電子状態を有する物質の光応答は未知の物理が多く、研究が活発化しています。本研究では、トポロジカル物質を含む人工ヘテロ構造において、電子スピンと光の相関に着目し、光が誘起する新たな物性や機能性を見出す研究を行います。特に最近、レーザーなどを使って特に強い円偏光を物質に照射すると、物質中の電子の状態が大きく変わることが理論的に提唱されており(Floquet理論)、本研究では高強度円偏光が誘起する不思議な電子状態を探求します。

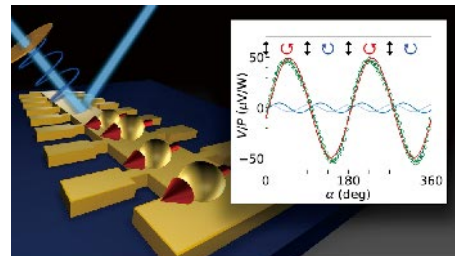


図3. 円偏光を物質に照射し、スピンの向きが揃った電子の流れが生み出される様子。参照: Hirose *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* (2018)

### (3) 強結合量子

電子、光子、フォノン、マグノンなど物質中の粒子や波動はお互いと結合することが知られています。結合強度が大きくなると、2つの特性を合わせた新たな状態が現れます。粒子や波動間の結合に関する研究は近年、量子技術応用を念頭に活発化しており、本研究では強結合状態を実現できる条件を解明し、量子力学に本質に迫る研究を行います。

# 馬場研究室

馬場 彩 准教授 萩野浩一 助教

## 1 研究の背景

我々は、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、ブラックホール・中性子星・超新星残骸・銀河団といった、宇宙の高エネルギー現象の観測的研究を進めている。

有史以来、宇宙は静かで空っぽな冷たい世界だと考えられてきた。その世界観が大きく変わったのが、1962年に偶然始まった X 線天文学である。X 線は数百万度から数億度という超高温のプラズマや、ほぼ光速にまで加速された高エネルギー粒子、超強磁場の環境などから放射されるため、宇宙が実は熱く激しい世界であることを示した (例: 図 1)。近年だけでも、電子のサイクロトロン共鳴エネルギーがその静止質量を超えるほどの強磁場 ( $4 \times 10^9$  T) を持つ極強磁場中性子星、銀河中心に潜む超巨大ブラックホール、宇宙最大の天体である銀河団を満たす莫大なプラズマをその放射冷却から守る巨大な未知の加熱源の存在など、これまで想像もしなかった意外性に満ちたものが発見されている。

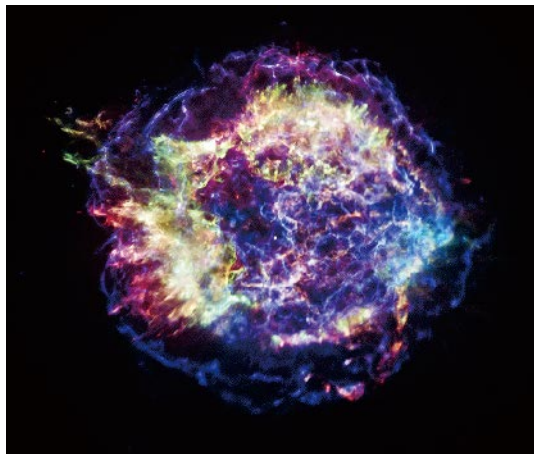


図 1: 「Chandra」衛星で見た超新星残骸 Cassiopeia A の X 線画像。1682 年に爆発した星の残骸が、現在も  $4000 \text{ km s}^{-1}$  で膨張を続けている。放射は主に爆発でまき散らされたシリコンや鉄などからの特性 X 線 (赤、緑) やほぼ光速まで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射 (青) である。

## 2 最近の研究テーマ

宇宙からの X 線は地球大気で吸収されるため、気球や人工衛星を飛ばしてこれを観測するしかない。我々は、NASA や ESA と協力・競争しつつ、JAXA 始め国内の多くの研究機関と連携して、宇宙 X 線衛星の開発とこれを用いた宇宙観測を進めてきた。現在は、2005 年に打ち上げた日本の「すざく」衛星、アメリカの「Chandra」衛星 (1999 年打ち上げ) や「NuSTAR」衛星 (2012 年打ち上げ)、ヨーロッパの「XMM-Newton」衛星 (2000 年打ち上げ) などでの観測を進めている。また、2016 年 2 月 17 日に打ち上げた「ひとみ」衛星は残念ながら運用停止したものの、その開発と立ち上げ運用、そして観測では中心的役割を果たした。現在は、「ひとみ」衛星の分光機能に特化した XRISM 衛星計画に参加し、2023 年 9 月 7 日に無事打ち上げに成功、データ解析を始めつつある。



図 2: GRAMS 実験に向けた気球工学実証実験。早朝に北海道大樹町から放球された。

また XRISM の先の将来を見据え、cipher 計画と GRAMS 実験を主導している。cipher 計画は世界初の硬 X 線撮像偏光観測を目指し、数十センチサイズの超小型衛星で打ち上げ予定である。また GRAMS は、暗黒物質の測定とともに宇宙観測に残された最後の未開の窓である MeV ガンマ線帯域を観測する計画で、装置の中心部である液体アルゴン検出器の開発を進めている。2023 年 7 月には北海道大樹町での工学実証気球実験にも成功した。これらの衛星が打ちあがった暁に見られる「予想もしていなかった宇宙」が非常に楽しみである。  
HP: <http://energetic-universe.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

## 1 研究の背景

自然界には4つの相互作用があることはご存知でしょう。「電磁気力」、「重力」は身近なものです。 「弱い相互作用」にはあまり馴染みがないかもしれませんが、例えば真空中で中性子は $\beta$ 崩壊して陽子に変化します。それでは「強い相互作用」はどうでしょうか？原子核を構成する陽子の電磁気的な反発力を凌駕し、原子核を原子核たらしめている力が、強い相互作用です。

4つの相互作用のなかで、強い相互作用は、自然界の成り立ちを考えるうえで最も本質的な役割を果たします。強い相互作用を媒介するグルーオン、そして強い相互作用をうけるクォークの非摂動的なダイナミクスが解ければ、多くのことを純粋に理論から説明、予言できます。陽子や中性子といった核子はクォーク3つの束縛状態だと言われています。けれども核子の質量 $\sim 940\text{MeV}$ のうち、(ヒッグス由来の)クォーク質量は $10\text{MeV}$ 程度しかありません。ほとんどの質量はクォークとグルーオンの相互作用エネルギーで説明されるのです。

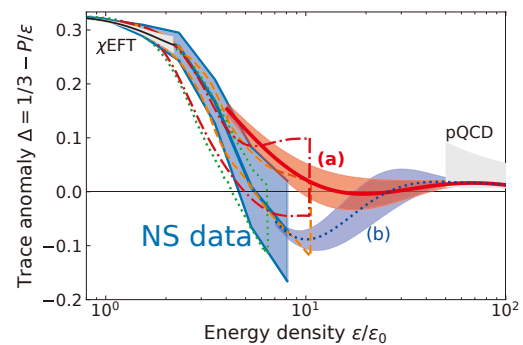
強い相互作用の基礎理論は量子色力学(QCD)と呼ばれ、長年に亘って研究されてきました。トポロジ的に非自明な励起や $\theta$ 真空構造など、今日では物性分野でも常識となっている物理は、半世紀近く前にQCD研究からもたらされたものです。最近では右巻き(スピンと運動量が平行な相関を持つ)、左向き(反平行な相関を持つ)粒子の性質、すなわちカイラル物質の性質が物性分野でも大きな話題となっていますが、カイラル物質およびカイラル量子異常はまさにQCD研究者が半世紀近く取り組んできたテーマです。

このように現代的な原子核物理学は「原子核」という言葉のイメージを遥かに超えた広く深い学問分野なのです。完成した理論を持っている、ということが、その理論が内包する物理現象を知っているとは限らない、という当たり前のことを、他のどの分野よりも実感できます。面白いことにQCDは「漸近的自由」という特別な性質によって、4つの相互作用のなかで唯一破綻のない、予言能力の極めて高い理論となっています。極論すれば、理論自身を指導原理として理論研究できる唯一の分野、とも言えます。

## 2 最近の研究テーマ

我々のグループはQCDにまつわる物理を、現象論から純理論的な側面まで幅広く研究しています。少し例をあげると、中性子星の内部の状態方程式は、中性子星の構造を考えるうえでも、また超新星爆発のメカニズムの解明や連星中性子星系からの重力波の解析のためにも不可欠なものです。原理的にはQCDから導かれるものですが、その計算は困難を極め、まだ世界の誰も成功していません。我々はこの難問に機械学習まで含めた様々な角度からアプローチしています。

我々は最近、機械学習で推定した状態方程式から、スケール不変性の指標となる量を提唱し、中性子星内部ではスケール不変性が急速に回復していることを発見しました。この発見に対して、何故そうなるべきなのか、世界中で様々な議論が沸き起こっています。



上図の縦軸 $\Delta$ はスケール不変性の指標、横軸がエネルギー密度。中性子星内部はまだデータが少なく、内挿の仕方によって(a)や(b)のシナリオがあるが、いずれにしても $\Delta$ が急速に小さくなる。

## 3 今後の展開

現代の高エネルギー原理核理論は壮大な学問です。マイクロ(陽子のサイズ $\sim \text{fm}$ )からマクロ(中性子星のサイズ $\sim \text{km}$ )まで守備範囲が広く、 $10^{18}$ ものスケールの異なる物理がひとつのQCDという理論で支配されています。またカイラル物質やトポロジ的な特徴付け(インスタントン)など普遍的な概念を発展させてきた学問分野でもあります。今後は米国Brookhaven国立研究所のEIC実験に向けた理論研究も推進していく予定です。

## 1 研究の背景

生物はこの世界においてありふれた存在ですが、その振る舞いは驚きに満ちています。例えば、個々の細胞は環境から栄養を取り込み、それを変換することにより自らと同じ構造を複製し、また多細胞生物の発生過程では、一つの受精卵からの増殖と分化により複雑な細胞社会が構築されます。ヘテロな分子の集合である生物システムが、どのようにしてこうした複雑な秩序を生み出すのでしょうか？ 生物システムは一般に、分子数の揺らぎや外部からの摂動に対して安定性を持つ一方で、適応進化の過程に見られるように高い可塑性を持ちます。この安定性と可塑性はどのようにしてシステムで共存しているのでしょうか？ 実験技術の進展は、遺伝子・タンパク質・代謝物質といった構成要素の詳細を明らかにしつつありますが、そうした分子レベルでの理解と、自己複製や発生過程、そして適応や進化の過程といった多数の分子が関わるマクロレベルの現象には、大きなギャップが横たわっています。本研究室の目標は、計算機シミュレーション、理論解析、そして構成的生物学実験を駆使することにより、多数の要素が相互作用する生物ダイナミクスを記述し、理解するためのマクロレベルの生物物理学を創ることです。適応・進化・発生といった様々な現象について、個々の分子の詳細に依存しない普遍的な性質を切り出し、生物システムの状態とその遷移を記述する理論体系の構築を試みています。

## 2 最近の研究テーマ

### i) 進化実験を用いた適応進化ダイナミクスの解析

適応進化のダイナミクスを定量的に解析し、その振る舞いを理解することを目的として、様々な環境下での大腸菌の進化実験と、その過程における表現型と遺伝子型の解析を行っています。我々が開発したラボオートメーションを用いた進化実験システムは、数百系列の独立した進化実験を全自動で維持することを可能としています (図 a)。こうした実験から、適応進化の過程において、高次元の表現型空間 (例えば遺伝子発現量を軸とした空間) とゲノム配列空間において、大腸菌の状態がどのように広がっていくか、その軌跡を観察することが出来ます。その解析から、大腸菌の状

態遷移がどのように記述されるか (何次元の空間で描けるか?)、環境適応・エピジェネティクス記憶・そして進化といった様々な時間スケールを持つダイナミクスはどのように関係しているかを明らかにします。また、細胞モデルの進化シミュレーションを用いて (図 b)、どのようなマクロ状態量によって適応進化過程を記述すべきかを明らかにします。こうした結果を統合し、生物システムの安定性と可塑性を記述する細胞状態遷移理論を構築を目指します。

### ii) 多細胞生物における不可逆な分化過程の解析

多細胞生物の発生過程において、分化能を持つ細胞 (例えば ES 細胞) からそれを失った細胞への状態遷移はしばしば不可逆性を持ちます。では、この不可逆な分化過程はどのような状態量によって記述されるのでしょうか？ 計算機シミュレーションによる理論研究によって、自発的揺らぎに代表されるダイナミクスの複雑さが分化能に関与していることが示唆されていますが、その不可逆性をどのようなマクロレベルの状態量で記述し、また遺伝子発現ネットワークなどのマイクロレベルの状態とどのような対応が存在するか、明らかになったとは言い難いのが現状です。そこで本研究では、幹細胞の 1 細胞レベルでの発現時系列解析や様々な大規模データと、それらデータに基づく細胞シミュレーションを融合させることにより、分化過程における不可逆性を表す状態論の構築を試みています。

## 3 今後の展開

上で述べた例の他にも、解析すべき現象は多くあります。確立された手法はありませんが、高次元のデータとの格闘を通じて、生物システムを理解する新たな枠組みを作りたいと考えています。

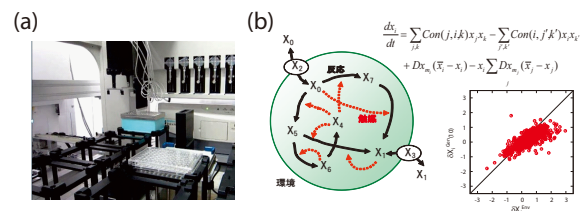


図 (a) ラボオートメーションを用いた進化実験システムの外観。 (b) 進化シミュレーションの一例。

## 1 M理論

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。M理論はまだ定式化も明らかになっていないが、その存在を仮定すると弦理論やゲージ理論の双対性を幾何学的に理解できるのではないかと考えられている。M理論にはM2、およびM5ブレーンと呼ばれる2次元あるいは5次元に広がった膜のようなものが基本的な励起として存在していると予想されている。これらのブレーンの定式化や性質の解明を研究室の一つの研究目標にしている。

このうち2次元の膜、M2ブレーンについては当研究室で数年前に盛んに研究され大きな研究成果が得られた。2次元膜は3次元のゲージ理論で記述されると考えられていたが、非可換ゲージ対称性を共形対称性を保ちつつどのように導入すべきかがその当時の主な関心事であったが、BaggerとLambertにより最大の超対称性をもつChern-Simons理論が提案された。この理論はその対称性が通常のリー群ではなく3つの生成子から代数を構成する3代数と呼ばれるもので1970年代に南部陽一郎氏により提案された南部括弧式と呼ばれるものに関連する。当研究室ではその代数を分類することによりその当時知られていなかった多くの模型を考案することに成功した。

最近の研究のフォーカスは5次元のブレーンの方に移行している。このブレーンの上には超対称性により自己対称2形式場と呼ばれるものが存在することが知られている。通常のゲージ理論では1形式場により非可換ゲージ対称性が記述されるが、2形式場でどのようにして非可換ゲージ対称性を実現するのかが非自明な問題である。最近、当

研究室で提案された模型ではそのような対称性の導入に成功し、M5ブレーンの一つの模型として考察している。現在、超対称性との関係、自己双対場の作用の問題点、ゲージ理論の双対性との対応などを考察中である。

## 2 低次元可解模型を用いたゲージ理論の解析

2000年代以降、超対称ゲージ理論と低次元可解模型の対応関係が注目を集めてきた。まず、重力とゲージ理論の双対性を検証するため、両方の理論で厳密に計算できる量を比較するという考え方で、非常に長い鎖状に並んだゲージ理論の演算子の列を1次元のスピン鎖と解釈し、異常次元の計算をスピン鎖上で定義される可解模型のハミルトニアンのスペクトルと同一視し、Bethe仮説などを用いた解析が盛んに行われた。

一方、ここ5~6年、同じく超対称ゲージ理論の分配関数が2次元可解場の理論(Liouville方程式など)の相関関数と同一視できるのではないかと提案がなされそれに関連して2次元共形場理論と長距離相関を持つ1次元系(Calogero系)などとの関連が物理と数学の境界領域として盛んに研究された。

当研究室では後者の対応関係の証明を行うため、数学者により提案された非線形無限次元対称性の研究を行っている。これはVirasoro代数やその高階スピンの拡張であるW代数とこの新しい対称性が同等であることを示すことに成功した。また、Bethe仮説などの可解格子系の技術を2次元共形場に応用してスピン鎖の自由度を場の自由度に置き換えるような新しい可解模型について研究を進めている。

## 1 研究の背景

この研究室は、レーザーとその応用に関する研究を行うことを目的としている研究室です。レーザーの発明は1960年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く利用されています。また、現代社会を支える基盤技術としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などでなくてはならないものとなっています。また、2015年に初めて観測された重力波でも、最先端の光技術が駆使されており、学術と社会を結ぶ架け橋となっています。

当研究室は、理学系研究科附属フォトンサイエンス研究機構 (IPST)<sup>1</sup>に所属しており、上述のように、光を使って学術の深化と産業への展開を目指しています。IPSTには当研究室以外に多くのメンバーが所属しており、全員が密接に連携して、研究と教育を進めています。

また、文部科学省のQ-Leap事業<sup>2</sup>など多くの研究プロジェクトを推進しており、関連する学内研究室、学外研究機関との共同研究も行っています。

## 2 最近の研究テーマ

現在、当研究室では下記のようなテーマを中心に研究を進めています。

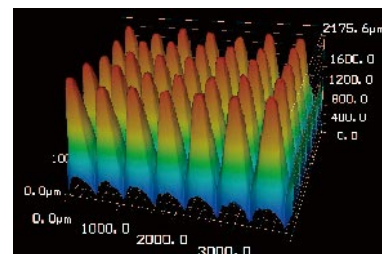
### レーザー加工の学理の解明とその応用

レーザーを使って、切断、溶接、切削などの加工を行うことをレーザー加工と呼びます。この分野はレーザー光源の進歩により、高出力の紫外光が利用できるようになり、また、パルス幅や波長などがかなり自由に制御できるようになってきて、新しい加工が可能になってきました。しかし、実際に起きている現象は、非平衡、開放系で、レーザー光と物質の相互作用も摂動的な考え方では説明できない領域にあります。この現象の理解を進めて、応用への展開を進めていくことがこの研究の目的です。

当研究室では、近年産業応用が盛んに進められている、フェムト秒レーザー加工に注目して研究を進めています。フェムト秒レーザーは、パルス幅が電子系から格子系への熱緩和時間 (~ps) よりも短いため、加工領域周辺への熱影響のない「非熱加工」が可能です。一方で、そのようなパルス幅の

極めて短いレーザーを空気中で集光すると、非線形効果でビームの伝搬が大きく変わってしまいます。我々は、このような空気中での光電場の非線形伝搬をシミュレーションによって明らかにすることで、高強度のフェムト秒レーザーによる加工穴形状を定量的に予測することに成功しました<sup>3</sup>。

また、フェムト秒レーザー加工技術を、アルミナやサファイアなどの誘電体の3次元マイクロ加工へと応用する研究も行なっています。例えば高出力レーザー加工を利用して、「モスアイ構造」という、光の波長よりも小さなピラミッド型の微細構造を300 μm径もの範囲に渡って施し、ミリ波の反射率が1%以下の赤外吸収フィルターの作製に成功しました(下図)。実際に加工されたフィルターはアメリカのグリーンバンク望遠鏡で観測を行うMUSTANG2 レシーバーへ搭載され、熱源となる大気や望遠鏡自体からの赤外線放射を抑えながら、ミリ波帯域の光の信号を高感度で捉えることが可能となりました<sup>4</sup>。これらの研究は、東京大学国際高等研究所カブリ数物連携宇宙研究機構 (Kavli IPMU) と共同して進めています。



レーザー加工で作製したモスアイ構造

## 3 今後の展開

これまで、新しいレーザーが開発されると、新しいことができるようになってきました。それは、産業応用だけでなく、基礎科学の研究も同様です。光が空間を広がりながら進むように、その魅力を生かして、広がりのある研究を進め、俯瞰力のある研究者を育てていきたいと思えます。

<sup>3</sup>R. Yamada *et al.*, Opt. Express **31** (5), 7363-7382 (2023).

<sup>4</sup>R. Takaku *et al.*, Opt. Express **29** (25), 41745-41765 (2021).

<sup>1</sup><http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/>

<sup>2</sup>URL: <https://www.jst.go.jp/stpp/q-leap/#>



# 村尾研究室

村尾美緒 教授 山崎隼汰 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ような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2単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、量子計測等が提案されている。

## 2 当研究室では

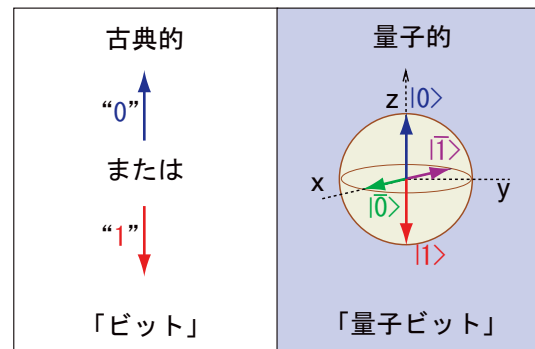
計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメント<sup>注</sup>など量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させていることが特徴である。

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を併用した量子系の測定・操作アルゴリズム、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や量子相関の解析、関数型量子プログラミングに向けた高階量子演算の定式化と解析、量子学習の枠組みによる因果関係の考察など、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。

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緻密に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・英語で議論を深めるための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 福田 朝 助教

## 1. はじめに

本研究室では、素粒子物理学、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：

- 新たな素粒子理論の構築とその検証方法の探求
- 素粒子現象を記述する場の理論の理解
- 初期宇宙の理解と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（数 TeV 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、標準理論を内包する未知の理論（素粒子標準模型を超える物理）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、宇宙初期に起きたと考えられるインフレーションなどについて、素粒子標準理論の枠内での説明は不可能です。これらの謎を解明し、正しい宇宙理論を構築するためにも、標準理論を超える新たな物理が不可欠です。

## 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理解と、素粒子実験や宇宙観測実験についての知識とが要求されます。それらを総合的に研究しつつ、テラスケール以上のエネルギー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目標です。

テラスケール以上の物理を考える上で重要なことのひとつに、ヒッグス粒子および電弱対称性の破れの物理の理解があります。ヒッグス粒子や電弱真空の性質を精密に理解してそこに含まれるテ

ラスケールの物理の情報を抜き出すという研究は、本研究室が現在力を入れているテーマのひとつです。例えば、LHC 実験により測定されたヒッグス粒子の質量は、我々の住んでいる「真空」が実は不安定である可能性を示唆しています。真空の崩壊の場の理論に基づく理解は、本研究室で現在進めている研究内容のひとつです。

また、標準理論を超える新たな物理が必要とされる理由のひとつとして、暗黒物質の存在が挙げられます。様々な宇宙観測から暗黒物質の存在は確定的とも言えますが、その素粒子論的性質はまだ理解できていません。特に素粒子標準模型の粒子の中には暗黒物質となり得る粒子は存在しません。暗黒物質を素粒子論的な観点から理解しようとするとき、素粒子標準模型の拡張は不可欠です。本研究室では、暗黒物質を含む素粒子模型の新たな可能性について探求しています。また、暗黒物質探査の新たな実験・観測的手法についても研究を行っています。例えば、量子コンピュータに利用される量子ビットを用いた暗黒物質探査実験を提案し、その量子性を利用することで暗黒物質検出の大幅な感度向上が期待できることを指摘しました。また、高エネルギー加速器を用いた暗黒物質粒子の検出、特に最近では  $\mu$  粒子を用いた加速器での暗黒物質粒子検出についても研究を進めています。

これから先、数年から 10 年の間には、様々な高エネルギー実験・宇宙観測の結果が得られると期待されています。LHC 実験やフレーバー・CP の破れに関する実験、宇宙背景放射の観測、暗黒物質の探査実験、高エネルギー宇宙線の観測など、様々な実験の結果は、素粒子物理学の理解に重要な知見を与えるでしょう。また理論的には、超対称性、大統一理論、アクシオンモデルなど、標準理論を超える新たな物理の可能性が様々提唱されています。本研究室では、それらを視野に入れつつ、素粒子理論・場の理論・宇宙論について、今後も研究を進めていきます。

素粒子論研究室ホームページ:

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

個人のホームページ:

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

# 横山順一研究室

横山 順一 教授

## 1 はじめに

当研究室は理学系研究科附属ビッグバン宇宙国際研究センター初期宇宙論部門に所属し、宇宙論の理論的研究と重力波データ解析の研究、ならびにそれらに関連した基礎物理学理論の研究を行っています。研究室は理学部4号館6階にあります。日頃の研究室活動は、宇宙理論研究室の須藤研究室・吉田研究室と協力して行っています。

宇宙物理学はその対象が極めて多岐にわたっているのみならず、方法論も多様であり、非常に学際的な体系をなしています。私たちは、素粒子物理学、一般相対性理論、曲がった時空の場の量子論などの基礎物理学を駆使して宇宙の諸階層の現象の本質的な理解にせまる研究を、観測と密接な関わりのもとで遂行しています。

宇宙論の究極的な目的は、宇宙がその量子的創生から138億年を経た多様な階層構造を持つ今日の姿にどのようにして進化してきたか、を明らかにすることであるといえます。私たちは基礎物理学理論から出発して、演繹的・トップダウン的に宇宙の進化を記述するモデルを構築する研究、宇宙マイクロ波背景放射や宇宙の大規模構造等の観測データから出発し、それをもとに初期宇宙の進化に迫る、帰納的・ボトムアップ的研究の双方を駆使して、そのような目的を果たすべく、研究を推進しています。

## 2 最近の研究の概要

現在の宇宙は、数百億光年のスケールにわたって一様・等方的であり、星・銀河・銀河団・超銀河団、といった豊かな階層構造に満たされているにもかかわらず、ユークリッド幾何学が成り立つような平坦な空間を持っています。このことは、ビッグバンからはじまる膨張宇宙論のように動的に進化する宇宙論のもとでは大きなナゾです。万有引力が働く限り、宇宙膨張は減速的であるため、私たちが住んでいるような大きな宇宙をビッグバンから作ることはできないからです。このような根源的な問題に解答を与えてくれるのが、宇宙がその進化の極初期に指数関数的加速膨張を経験した、というインフレーション宇宙論です。

今日、宇宙マイクロ波背景放射をはじめとした精細な宇宙論的観測データが数多く得られるよう

になってきましたが、インフレーション宇宙論の基本的予言は、こうした全ての観測データと見事に一致しています。その一方で私たちの宇宙を作るもとになったインフレーション的宇宙膨張を起こした具体的なメカニズムについては、まだよくわかっていません。

こうした状況の下、私たちは、動的不安定性を含まない最も一般的なインフレーション宇宙モデルを構築することに成功しました。これは、単一の量子場によって起こる、これまで知られている全てのインフレーションモデルを包含するものであり、これによってさまざまなモデルを観測と比較検討する際のシームレスな枠組みを与えられたこととなります。

## 3 今後の展望

私たちは、宇宙を観測する新たな手段として、重力波に注目しています。宇宙マイクロ波背景放射の偏光を高精度で観測できるようになると、インフレーション時代に量子的に生成した重力波の痕跡を見いだすことができるようになります。それによって、インフレーションがいつ起こったかがわかるようになります。

一方1ヘルツ以上の周波数の重力波を超高精度で観測できるようになると、初期宇宙の熱史、すなわちいつインフレーションが終わってビッグバンがおこったか、を測定することができるようになります。しかしそのためには、DECIGOと呼ばれる3機の人工衛星からなる宇宙レーザー干渉計が実現しなければなりません。

重力波の実験的研究は、そのような遠大な計画に取り組む前に、まずは直近に完成する地下重力波検出器KAGRAによる重力波検出を成功させなければなりません。そのような観点から、私たちは重力波データ解析の基礎研究とその実装に乗り出しましたが、このテーマはビッグバン宇宙国際研究センターに新規開設された重力波データ解析部門(Kipp Cannon教授)にも引き継がれ、今日に至っています。

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/top.php>

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/eucd/>

<http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/>

# 横山将志・中島研究室

横山 将志 教授 中島 康博 准教授 中桐 洸太 助教

## 1 研究の概要

本研究室では、素粒子物理・宇宙素粒子物理に関する実験・観測を行っている。現在は特に、**スーパーカミオカンデ実験**、およびスーパーカミオカンデと大強度陽子加速器 J-PARC を使ったニュートリノ振動実験 (**T2K 実験**) を推進している。同時に、スーパーカミオカンデで行ってきた研究を引き継ぎさらに発展させるべく、その後継として、より大きく、かつ高性能化した大型水チェレンコフ検出器、**ハイパーカミオカンデ**の建設を進めている。また、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の電子・陽電子衝突型加速器スーパー B ファクトリーを使った **Belle II 実験**にも参加している。

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が、我々の目標である。

## 2 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、直径約 40 m、高さ約 42 m の円筒形の水槽内に約 11,000 本の 50 cm 径光電子増倍管を備えた、世界最大の地下ニュートリノ観測および陽子崩壊探索実験装置である (図 1)。我々は、2020 年夏にレアアースの一種であるガドリニウムを純水中に溶解させ、SK-Gd として新たな観測を開始した。ガドリニウムは中性子捕獲効率が極めて高く、また捕獲後に、検出が容易な比較的高エネルギーのガンマ線を放出する。これにより、中性子を伴うニュートリノ反応の測定感度が飛躍的に向上した。2022 年にはガドリニウムを追加で導入し、更なる高感度化を実現した。

SK-Gd で可能になる多数の研究の中でも、とり

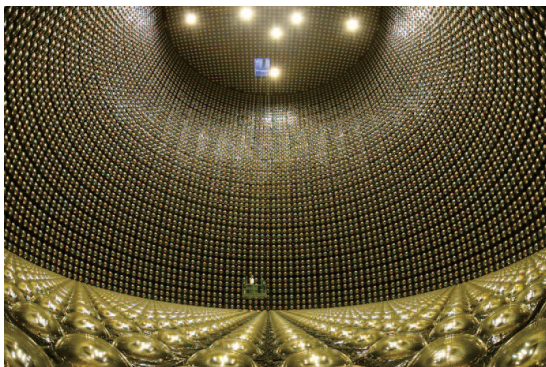


図 1. スーパーカミオカンデ検出器の内部。

わけ、未発見の超新星背景ニュートリノの世界初観測を目指している。超新星背景ニュートリノとは、過去の宇宙の歴史の中で起こった超新星爆発により生成され、それが蓄積し現在の宇宙に漂っていると考えられているニュートリノである (図 2)。しかし、期待される事象数は年間数個と極めて小さく、これまでのスーパーカミオカンデではノイズに埋もれて観測できなかった。SK-Gd では、ニュートリノ反応と同時に放出される中性子を同時計測することで、ノイズを飛躍的に低減する。これを観測することで、宇宙の星形成の歴史、超新星爆発のメカニズム、そしてニュートリノ自身の性質を解明する手がかりを得ることを目指している。

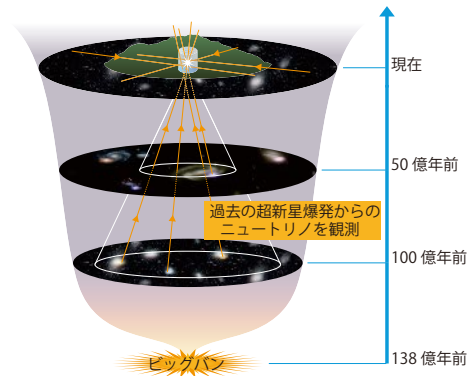


図 2. 超新星背景ニュートリノ。過去の宇宙の歴史の中で起こった超新星爆発により生成されたニュートリノが蓄積し、現在の宇宙に漂っている。

太陽ニュートリノ、大気ニュートリノおよび T2K ビームニュートリノを用いたニュートリノ振動の測定も SK-Gd で継続している。特に、大気ニュートリノおよび T2K ビームニュートリノにおいては、中性子を用いたより精密なニュートリノ反応の分類が可能となった。さらに、素粒子大統一理論で予言されている陽子崩壊についても、SK-Gd では大気ニュートリノによる背景事象を低減し、更なる高感度での探索を行う。

スーパーカミオカンデは 1996 年の運転開始以降、長い歴史を持つ測定器であるが、我々は継続して装置や解析手法の改良を行い、世界のニュートリノ研究を牽引してきた。今後も新生 SK-Gd において新たな観測に挑戦してゆく。

### 3 T2K 実験

T2K (Tokai-to-Kamioka) 実験は、茨城県東海村にある大強度陽子加速器施設 J-PARC で人工的に作り出したミューニュートリノビームを 295 km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデに向けて発射し、ニュートリノが別の種類のニュートリノに変化するニュートリノ振動という現象を高精度で観測する実験である (図 3)。



図 3. T2K 実験の概要図。J-PARC からのニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動現象を研究する。

すべての素粒子には、同じ質量を持ち電荷等の量子数が正反対の「反粒子」がそれぞれ存在する。宇宙創生時には粒子と反粒子は対となって同じ数生じたはずであるが、現在の宇宙は反粒子がほとんどなく粒子のみで構成されている。宇宙から反粒子が消えてしまった謎は、素粒子物理学の大きな課題の一つである。この謎を解くための鍵を、まだ発見されていないニュートリノでの CP 対称性の破れが握っている可能性がある。我々は、このニュートリノでの CP 対称性の破れの発見に向けて、T2K 実験で世界の研究を主導している。

CP 対称性の破れの測定やニュートリノ振動パラメータの精密測定のためには、ニュートリノと原子核の反応やニュートリノビームの強度を正しく理解し、測定の系統誤差を小さくすることが重要である。T2K 実験では振動前のニュートリノを J-PARC 敷地内に設置した前置検出器で測定し、これらの系統誤差削減に役立っている。我々の研究

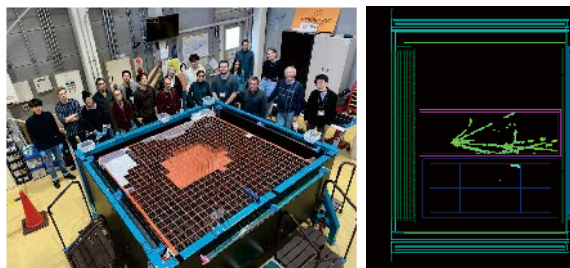


図 4. (左) 本研究室の大学院生が世界中の研究者とともに開発・建設を行なった SuperFGD 検出器。(右) SuperFGD 検出器中で記録したニュートリノ反応事象を可視化した図。左側から入射したニュートリノが検出器中で反応し、生成された荷電粒子の飛跡が見えている。

室は、ニュートリノ反応をさらに精密に測定するために、前置検出器をより高性能な装置にアップグレードするプロジェクトを提案し、中心グループのひとつとして推進してきた。2023 年には新しい検出器を J-PARC の実験施設に設置し、測定を開始した (図 4)。今後、ニュートリノおよび反ニュートリノビームでの測定データを蓄積し、ニュートリノの性質を明らかにしていく。

### 4 ハイパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、1996 年の運用開始から 25 年経った今もなお、SK-Gd や T2K 実験により新たな実験手法を生み出し、研究の地平を切り拓き続けている。しかしながら、その成果を足掛かりとして、さらに飛躍的な進展を生み出すためには、より高統計・高精度の実験が必要となる。



図 5. 掘削が完了したハイパーカミオカンデ空洞ドーム部での共同研究者の集合写真。

ハイパーカミオカンデ検出器 (図 5 右上) は、我々がそのような次世代実験のために提案してきた、現行のスーパーカミオカンデよりもさらに一桁大きく、高性能な装置である。ハイパーカミオカンデでは、ニュートリノ振動の研究、素粒子の大統一理論で预言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、宇宙と素粒子にわたる幅広い分野で世界最高の研究が可能となる。

ハイパーカミオカンデの建設は 2020 年に始まり、2027 年の運転開始を目指して準備が進んでいる。2023 年 10 月には空洞上部のドーム部の掘削が完了した (図 5)。我々の研究室では、検出器の建設計画全体を取りまとめ国際共同実験を牽引することに加え、光電子増倍管の性能検査や、較正方法の確立など、検出器の性能を最大に引き出すための開発研究を行う。また、T2K 実験での経験をもとに、新たな前置検出器の設計開発も行う。陽子崩壊、加速器ニュートリノ、超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノなど、幅広い物理を対象に研究を進め、次世代のサイエンスを切り拓くことを目指している。

## 1 研究の背景

宇宙は、微視的な物理過程から巨視的な現象にわたる多くの要素が複雑に絡まりあった物理系であり、研究テーマは多岐にわたっています。こうした研究の共通のゴールは、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解明することです。

私たちの研究室では、他波長の宇宙観測データとコンピュータシミュレーションや機械学習を用いた宇宙の研究を行っています。コンピュータ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りました。近い将来のエクサフロップス級のコンピュータ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ます。また、次世代の広域宇宙サーベイ観測で得られる膨大なデータを効率よく解析するため、機械学習など新しい解析手法の研究にも取り組んでいます。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に加え、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を行っています。

## 2 最近の主な研究テーマ

宇宙論と銀河・星・惑星系の形成進化についての研究をすすめています。宇宙進化の大枠が判明したことで、コンピュータシミュレーションによりさまざまな理論モデルに対して定量的な予言を与え、観測データとの比較により暗黒物質や暗黒エネルギーの正体、天体の形成進化過程を探る研究が可能になっています。

近年の宇宙論的観測データから、暗黒エネルギー、暗黒物質、通常元素を構成要素とした宇宙の「標準モデル」が確立されました。宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、21世紀科学全体に対して根源的な謎を突きつけています。私たちの研究室では、大規模な観測データから宇宙の暗黒成分の正体を読み解くため理論的な研究を行っています。具体的には、暗黒物質分布や銀河分布の

大規模構造、宇宙マイクロ波背景放射の観測データを統計解析することにより宇宙の成り立ちを明らかにすることを目指しています。

最近の大型地上望遠鏡や衛星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数多く発見されています。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、といったテーマの研究を行っています。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す。

近年の大型地上観測からは、生まれたばかりの恒星の周りにガスやダストから成る円盤が存在することが分かりました。こうした原始惑星系円盤がどのような進化を遂げるかなどについても、コンピュータシミュレーションによって探っています。

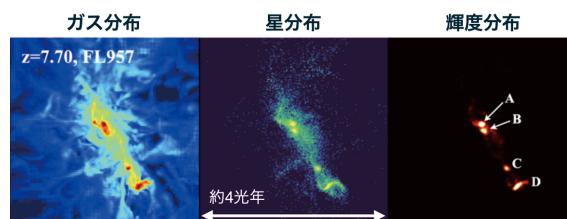


図 1. コンピュータシミュレーションによって得られた宇宙年齢 7 億年の頃の銀河の様子。

## 3 今後の展開

James Webb 宇宙望遠鏡やすばる望遠鏡の多天体分光装置 Prime Focus Spectrograph など、今後さまざまな観測装置により、宇宙の進化を探る鍵となるデータが大量に得られます。天文学教室や Delft 大学などとの連携のもと、超伝導分光撮像装置 TIFUUN を用いた広領域輝線探査観測計画も始動しており、我々の研究室は統計データ解析や理論と観測の直接比較を行います。

計算手法の開発という面では、将来的に量子コンピュータを利用しより高速な計算を行うことを目指し、新しい計算手法の開発にも取り組んでいます。

## 1 Research background

Atomic nuclei, composed of protons and neutrons, represent one fundamental hierarchy of matter. As famous for Nihonium (Element 113), Japan is one of the world-leading countries in nuclear physics. Questions like

- *How many different kinds of nuclei exist in the Universe?*
- *Where and how are they created?*
- *How can human being make the best and safe use of nuclei?*

motivate us for chasing deep understandings of nuclear properties.

Theoretical studies in nuclear physics are not trivial at all, because each atomic nucleus is a quantum system, a many-body system, a finite system, as well as an open system. In addition, in atomic nuclei, three fundamental interactions out of four—the strong, weak, and electromagnetic interactions—interplay each other in a large range of time and energy scales with the co-existence of single-particle and collective characteristics.

Because of these unique features, although microscopic nuclear theories could be traced back to, e.g., the Nobel Prize work of Yukawa, there still exist tons of open questions in this field.

## 2 Recent research themes

In particular, during the past decades, thanks to the significant progress in quantum many-body theories and the worldwide exponential increase of computational powers, microscopic nuclear theories are gradually established, including the *ab initio* approach, cluster method, shell model, density functional theory (DFT), and so on.

The main research theme in our group is nuclear DFT, which aims at understanding both ground-state and excited-state properties of thousands of nuclei in a consistent and predictive way. Among the microscopic nuclear theories, now, even in the visible future, only DFT is applicable to almost the whole nuclear chart.

Research themes in the recent 3 years:

### Microscopic foundation of nuclear DFT

- Functional Renormalization Group and DFT
- Inverse Kohn-Sham method and density functional perturbation theory
- Nucleon finite-size effects on nuclear binding

- Relativistic *ab initio* calculations for finite nuclei

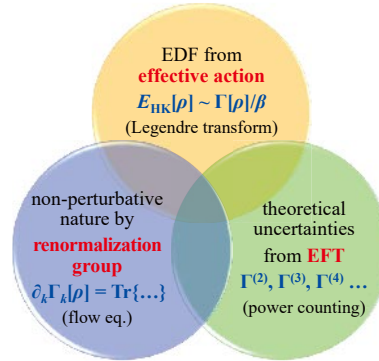
### Consistent nuclear database for astrophysical nucleosynthesis study

- Nuclear mass and  $\beta$ -decay half-life predictions with Bayesian approaches
- Influence of nuclear mass uncertainties on radiative neutron-capture rates

## 3 Future perspectives

### A mid-term goal: *Ab initio* nuclear DFT

One of our goals in the coming years is to develop an *ab initio* nuclear DFT, starting from realistic nuclear force. Oriented by quantum field theory (QFT), our ideas include (i) the energy density functional will be derived from the effective action with Legendre transform, (ii) the non-perturbative nature of nuclear force will be handle by the renormalization group with flow equations, and (iii) the theoretical uncertainties will come with the idea of effective field theory with proper power counting, as illustrated here.

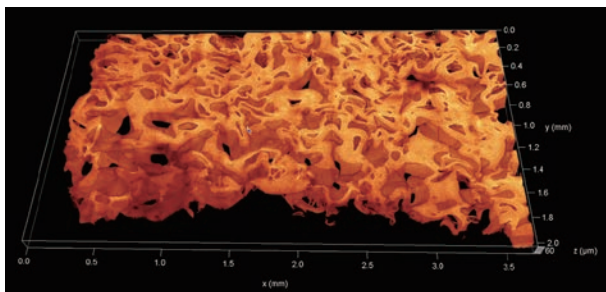


*ab initio* nuclear DFT oriented by QFT.

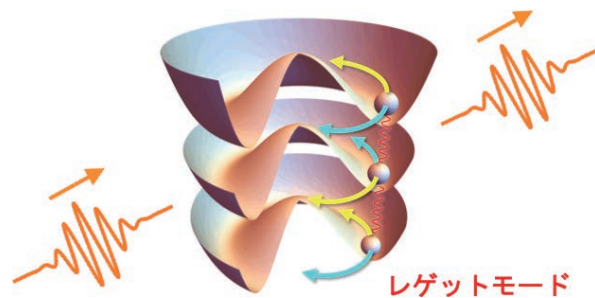
### A long-term dream: Microscopic understanding of quantum many-body tunneling

Nuclear fission and fusion, which critically depend on the properties of quantum many-body tunneling, are still among the most long-standing and most challenging problems in nuclear physics. The relevant studies are crucial not only for nuclear physics but also for the element cycling in astrophysical nucleosynthesis, the treatment of long-lived fission products by nuclear power plants.

*Will modern QFT help? Will machine learning and quantum computing help?* These are questions for young students with dreams.



PEGゲルの相分離を観察した3次元顕微鏡像。PEGを蛍光分子で修飾することで、均一な濃度だったゲルが疎な相と密な相に分離する様子を表している。（物理学科岡田研究室と工学部酒井研究室との共同研究）



マルチバンド超伝導体のレゲットモードを媒介した光応答の概念図。各バンドの自由エネルギー面上を球で示した秩序変数が互い違いの方向に円周に沿って運動し、入射光の振幅に比例した振幅の光が放出される。（物理学科辻研究室）

東京大学理学部物理学科

〒113-0033 東京都文京区本郷7-3-1

TEL : 03-5841-4242 (代表) FAX : 03-5841-4153

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

