

PHYSICS  
2026

東京大学理学部

物理学科

進学案内資料



# 物理学科へのいざない

物理学専攻長、物理学科長 上田 正仁

物理学は森羅万象の自然現象を少数の原理から統一的に理解しようと試みる学問分野です。黙して語らぬ自然と実験を通じて対話を重ね、再現性のある現象を原理に立ち返って定量的に理解する学問ということもできます。数学は人間の自由な発想のもとに理論を構築できるのに対し、物理学は論理的に可能な無限の可能性の中から自然が選択する唯一の法則を洞察することが求められます。自然が選択した法則は、時に最も単純で美しく、時には「事実は小説より奇なり」を地で行くかのごとくです。マイクロコスモス、マクロコスモスという言葉がありますが、物理学はミクロな素粒子・原子核からマクロな宇宙までの広大なスケールを統一的に記述します。アインシュタインはそこに人知を超越した“spirit”を感じたといわれます。

物理学は2つの異なる思想の下に発展しました。その一つは還元主義で、物質の構成要素を原子、原子核、クォークへと分解し、よりミクロな世界の法則を追究してきました。もう一つは創発主義とも呼ぶべきもので、多数の粒子が集まった結果発現するマクロな現象を探求してきました。宇宙の始まりを理解するためにはミクロな法則を発見する必要がありますが、現在の宇宙の豊かな構造の発現機構を理解するためには多数の粒子が相互作用することから生まれる多体効果を解明する必要があります。同じことは物質世界にも当てはまります。超伝導や超流動に代表されるように同じ物質であっても温度が下がるにつれて個々の粒子の性質からは想像できない様々な量子相が発現します。物理学教室の先輩である南部陽一郎博士はこの発現機構—自発的対称性の破れ—が素粒子レベルでも本質的な役割を果たすことを指摘されました。

ニュートリノ研究でノーベル賞をとられた小柴昌俊博士は「ニュートリノ研究は役に立たないし、儲かりもしないよ」とおっしゃいました。ところが、純粹な知的好奇心から発見された新原理は現代文明を支える革新的デバイス原理へと発展しました。一般相対論はGPSの基礎学理となり、量子論からトランジスタやレーザーが生まれ、さらに、統計物理学の考え方に基づくニューラルネットワークの集団的理解は現代のAI技術へと発展しました。

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。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15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有数の教育・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、電磁気学、固体物理学と関連する実験技術などを学びます。4 年生の特別実験・理論演習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。また、機械学習の基礎とそれが物理学へどう応用されているかも学びます。卒業生の多くは大学院に進学し研究者を目指しますが、物理学科で培った原理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社会で活躍している人も数多くいます。

物理学の研究は未知の自然現象の探求であり、実験から得られるデータはデータセンターには存在せず、AI から学ぶことができません。そのような自然の成り立ちや仕組みを自らの頭で理解したいという好奇心と探求心にあふれた方、柔軟な発想で自然科学の新しい地平を切り拓きたい方、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。また、レーザー冷却された原子によるセンシング・ハイブリッド量子系の開発にも取り組んでいます。
蘆田祐人	物性理論・量子物理学	量子多体物理と量子情報/光学の境界領域における理論的研究。
有田亮太郎	物性理論	非経験的手法に基づく物性物理学の研究を行う。様々な物質に対する計算から得られた知見をもとに、非自明な電子状態に由来する特異物性を理論的に予言、設計することを目指す。より長期的には、新しい設計指針や指導原理の確立を理論物理学上の新概念の発見につなげることをねらっている。精度の高い物質設計を可能にする新しい計算法論の開発にも積極的に取り組む。
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。
桂 法称	物性理論、統計力学	相関の強い量子多体系において現れる多彩な相の理解や、新奇現象の予言を目指して理論的研究を行っている。従来から議論されてきた基底状態や低エネルギー励起についての研究だけでなく、開放量子系や孤立量子系の非平衡ダイナミクスの研究にも力を入れている。また古典および量子統計力学における可解模型の、特にその背後にある代数的構造に関する数理物理学的研究も進めている。
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。

氏名	専攻分野	研究内容
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・観測的宇宙論	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。
小西邦昭	光物性物理学、レーザー応用	最先端の微細加工技術を用いてナノおよびマイクロスケールの超微細な人工構造を作製し、これらの人工物質と光との相互作用から生じる新たな物理現象の解明と、その光制御への応用に取り組んでいる。また、新しい微細構造作製技術であるレーザー加工技術も研究の対象とし、光物性物理学の視点から「なぜ光でものは壊れるのか」という根本的な問いに迫るとともに、最新のレーザー光を駆使した微細三次元構造作製の新手法の開発も進めている。
小林研介	量子計測・量子物性	結晶中に存在するスピン欠陥量子センサを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(量子センシング)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系現象を可視化することを目指している。
酒井明人	物性実験(特に強相関係、量子磁性体、トポロジカル磁性体など)	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。そのような特異な量子状態を実験的に実現するため、新物質合成と低温物性測定を駆使して研究を行っている。最近行っている研究としては、(i)多極子による非従来型超伝導と異常金属状態、(ii)トポロジカル磁性体における巨大異常ネルスト効果、(iii)トポロジカルなフラットバンドを持つ系における強相関効果などがある。
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。
杉田有治	生物物理学・計算物理学	物理学の基礎理論と機械学習等の情報科学を組み合わせた新しい計算手法やマルチスケールモデルを開発し、次世代スーパーコンピュータを用いた大規模・高速な分子動力学シミュレーションを行う。このソフトウェア基盤を用いて、分子モーターや酵素反応、膜タンパク質、DNA/RNAとの複合体などの生体分子系の分子機能や、多数の生体分子で混雑している細胞内環境における様々な生命現象を解析する。また、理論・計算と様々な実験・計測との密接な共同研究を通して、生体分子の動的な構造と相互作用から細胞機能をボトムアップ的に理解し、予測する。
鈴木大介	原子核物理学実験	陽子・中性子の量子多体系である原子核・核物質を研究対象とし、極微から宇宙へと広がる現代核物理の課題に取り組んでいます。特に短寿命な放射性同位体(RI)に注目し、原子核における創発現象、核物質の性質と中性子星内部構造の関係、宇宙での元素合成機構の解明を目指しています。主に理化学研究所仁科センターRIビームファクトリー、フランス国立重イオン加速器研究所(GANIL)などの先端加速器施設においてRIビームを駆使した実験研究を進めています。
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	伝統的な熱統計力学の対象と異なり、熱平衡から遠く離れた非平衡状態で現れる新規現象を実験的に開拓し、その統計力学を作っていくことを目指している。具体的には、液晶、粉体、コロイドなどのソフトマター系やバクテリアなどの微生物集団を題材に、非平衡特有の集団現象、非平衡ゆらぎの普遍的な統計法則、トポロジカル欠陥のダイナミクスや、アクティブマターの開拓など、様々な研究を展開している。個別の現象の理解はもとより、現象に依らない普遍的な物理法則を非平衡系に対して抽出すること、それをもって非平衡特有の新規現象を記述する普遍的な法則体系を構築していくことを目標にしている。

氏名	専攻分野	研究内容
張 奕勤	ナノマテリアル物性物理学	二次元や一次元のナノマテリアルを舞台に、対称性を制御した人工構造を用いて量子物性の研究を行う。結晶構造の対称性はその物質が示す物性を決める重要なパラメーターの一つである。グラフェンやカーボンナノチューブなどの低次元ナノマテリアルは、人工的に様々な対称性を持った構造を作り出すことができる。極低温や高磁場における量子輸送特性の評価や顕微分光測定を通し、新たな量子物性の探索と創出を目指す。
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にしている。
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的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や2成分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、超高压下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。
藤堂眞治	計算物理・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。
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内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、ストレンジネス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) 東北大学先端量子ビーム科学センター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におけるストレンジネス核物理実験の推進、および次世代プロジェクトとして準備が進んでいる高強度高分解能ビームライン(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。

氏名	専攻分野	研究内容
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で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。日本を主体としたX線宇宙衛星「XRISM」をはじめとする宇宙X線衛星の観測データを用いた研究と同時に、硬X線撮像分光計画superHERO、ガンマ線計画GRAMSやCOSIなど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。
村尾美緒	量子情報(理論)	計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえる。そして、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果を解明することによって、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深めるとともに、エンタングルメントなど量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、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
山崎雅人	素粒子理論、超弦理論、量子重力、数理論	私の研究分野は理論物理学、特に素粒子理論や数理論物理学です。場の量子論や量子重力、超弦理論について幅広く研究しており、素粒子現象論、宇宙論、純粋数学、量子情報、物性理論や統計力学といった関連分野との境界領域でも研究を行っています。
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	スーパーカミオカンデ、J-PARC加速器、および建設中のハイパーカミオカンデなどの大規模施設を使って素粒子物理の研究をしている。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、大統一スケールでの物理法則を探ることを目指す。

氏名	専攻分野	研究内容
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。
寄田浩平	素粒子物理学実験・宇宙物理学実験	世界最高エネルギーの加速器(LHC@CERN)を駆使し、素粒子の標準理論の精密検証とそれを超える未知粒子や新現象の探索を行っている。同時に、独自の検出技術を使った宇宙暗黒物質の探索や、深層学習・量子技術等の先端技術の応用研究にも取り組んでいる。素粒子と宇宙の垣根を超えたアプローチで新物理の発見を目指している。
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 41名



# 2026 年度 学部時間割



2026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Ⅱ)	
	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			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		現代物理と機械学習	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	



## 2025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 : 日下 暁人

### 1. 特殊相対性理論

- 1.1 物理法則の対称性
- 1.2 Lorentz 変換
- 1.3 Michaelson–Morley の実験
- 1.4 Lorentz 変換の性質
- 1.5 時空のダイアグラムと timelike vs. spacelike

### 2. 相対論的力学

- 2.1 運動方程式の対称性 再考
- 2.2 Lorentz 変換に対称な運動方程式
- 2.3 テンソル・共変・反変
- 2.4 記法
- 2.5 いくつかの例

### 3. 電磁気学

- 3.1 Maxwell 方程式
- 3.2 Lorentz 力
- 3.3 四元電流密度
- 3.4 静電場: Coulomb の法則と Gauss の法則
- 3.5 静磁場: Ampère の法則・Biot–Savart の法則・Fleming の法則
- 3.6 静電磁場の Lorentz 変換

### 4. ポテンシャル

- 4.1 静電ポテンシャル
- 4.2 ベクトルポテンシャル
- 4.3 静的でない電磁場のポテンシャル

### 5. 電磁場中の荷電粒子の運動

- 5.1 復習: 運動方程式とローレンツ力
- 5.2 一様な静電場中の運動
- 5.3 一様な静磁場中の運動
- 5.4 粒子加速器
- 5.5 一様な静電磁場中の運動
- 5.6 非一様な静磁場中の運動・閉じ込め

### 6. 電磁場のエネルギーと流れ

- 6.1 エネルギー密度
- 6.2 電磁波のエネルギー
- 6.3 エネルギーの湧き出し
- 6.4 エネルギーの流れと Poynting の定理
- 6.5 下準備: 連続体の運動方程式
- 6.6 電磁場の運動量と運動量保存
- 6.7 電磁場のエネルギー・運動量テンソル

## 1.2 解析力学 : 横山 順一

### 0. 序論

- 0.1 力学とは何か
- 0.2 ニュートンの古典力学
- 0.3 力学のこれまでとこれから
- 0.4 ベクトルとスカラー
- 0.5 仮想仕事の原理・ダランベールの原理

### 1. ラグランジュ形式

- 1.1 ラグランジアン の導出
- 1.2 運動を解くということの別の見方
- 1.3 汎関数と変分法
  - 1.3.1 汎関数
  - 1.3.2 変分法
  - 1.3.3 汎関数微分
- 1.4 最小作用の原理
  - 1.4.1 作用汎関数
  - 1.4.2 最小作用の原理
- 1.5 オイラーラグランジュ方程式の共変性

### 1.6 拘束条件の下での運動

- 1.6.1 拘束条件
- 1.6.2 ラグランジュの未定乗数法
- 1.6.3 多数の拘束があるとき
- 1.7 対称性と保存則
  - 1.7.1 運動の積分
  - 1.7.2 運動量保存則
  - 1.7.3 エネルギー保存則
  - 1.7.4 空間の等方性と角運動量保存則
  - 1.7.5 ネーターの定理

### 2. ハミルトン形式

- 2.1 ハミルトンの正準方程式
- 2.2 ルジャンドル変換
- 2.3 変分法による正準方程式の導出
- 2.4 正準変換
  - 2.4.1 一般の正準変換
  - 2.4.2 無限小正準変換
- 2.5 ポアソンの括弧式

- 2.5.1 時間微分とポアソン括弧式
- 2.5.2 ポアソン括弧式の諸性質
- 2.5.3 ヤコビの恒等式
- 2.5.4 運動の積分とポアソン括弧式
- 2.5.5 正準変換に対する不変性
- 2.6 位相空間とリュービルの定理
- 2.7 終点座標の関数としての作用とハミルトンヤコビ方程式
  - 2.7.1 終点座標の関数としての作用
  - 2.7.2 ハミルトンヤコビ方程式

### 1.3 量子力学I：常行 真司

- 1. イントロダクション：古典力学から量子力学へ
  - 1.1 黒体放射とエネルギー量子の発見 (Planck, 1900)
  - 1.2 光電効果 (Einstein, 1905)
  - 1.3 原子のエネルギー準位の量子化 (Bohr, 1913)
  - 1.4 コンプトン効果 (Compton, 1923)
  - 1.5 ド・ブROI仮説と物質波 (de Broglie, 1923)
- 2. シュレディンガー方程式
  - 2.1 伸縮しない弦の横波の波動方程式
  - 2.2 電子の波動方程式 (シュレディンガー方程式)
  - 2.3 波束の運動と群速度
  - 2.4 ポテンシャルがある時のシュレディンガー方程式
  - 2.5 波動関数の規格化と確率解釈
  - 2.6 時間に依存しないシュレディンガー方程式
  - 2.7 確率解釈と物理量の期待値
  - 2.8 量子力学の古典極限
- 3. 1次元の束縛状態
  - 3.1 一般的性質
  - 3.2 無限に深い井戸型ポテンシャル
  - 3.3 有限の深さの井戸型ポテンシャル

### 1.4 物理実験学：鈴木 大介

- 1. 序論
  - 1.1 物理学と科学的手法
- 2. 物理量と単位
  - 2.1 国際単位系 SI
  - 2.2 「キログラム」の定義改訂
  - 2.3 「秒」の標準と時系
- 3. 誤差論
  - 3.1 誤差と不確かさ

### 3. 展開

- 3.1 電磁場中の荷電粒子の運動
- 3.2 断熱不変量
- A. 補遺 (進捗状況によっては割愛されます)
  - A.1 剛体
  - A.2 基底ベクトルによるベクトルの展開
  - A.3 オイラー角
  - A.4 独楽の運動
- 4. 自然法則はなぜ時間二階微分方程式で表されるか
- 5. 大団円：古典力学はなぜ最小作用の原理に従うか

- 3.4 調和振動子
- 4. 1次元の散乱と非束縛状態
  - 4.1 ポテンシャル障壁による散乱
  - 4.2 有限深さの井戸型ポテンシャルの非束縛固有状態
  - 4.3 波動関数の規格化
  - 4.4 波動関数の時間発展
- 5. 量子力学の体系
  - 5.1 物理量の演算子と期待値
  - 5.2 エルミート演算子
  - 5.3 演算子の行列表示
  - 5.4 表現行列のユニタリ変換
  - 5.5 演算子の交換関係と表現行列
  - 5.6 ディラックのブラ-ケット記法
  - 5.7 時間発展演算子
  - 5.8 シュレディンガー描像
  - 5.9 ハイゼンベルク描像
  - 5.10 正準交換関係と正準量子化
  - 5.11 調和振動子と生成・消滅演算子

- 3.2 頻度主義的誤差論の基礎
- 3.3 母集団と確率分布
- 3.4 標本集団と最尤法
- 3.5 推定と検定
- 3.6 回帰法
- 3.7 不確かさの評価の実践
- 3.8 ベイズ主義的誤差論
- 4. 計測技術

4.1 計測技術の一般論

4.2 距離の計測

4.3 温度の計測

4.4 真空技術

## 1.5 物理数学 I : 濱口 幸一

### 1. 複素関数

1.1 この章の目標

1.2 準備

1.3 複素関数とその微分、正則関数

1.4 複素積分

1.5 テイラー展開、ローラン展開と留数、留数定理

1.6 一致の定理と解析接続

1.7 発展的話題：部分分数展開、 $\Gamma$ 、 $B$ 、 $\zeta$ 、など

### 2. 常微分方程式

2.1 ベキ級数展開による 2 階斉次微分方程式の解法

2.2 定義と分類

2.3 線形微分方程式

2.4 一階微分方程式の解法の例

## 1.6 物理数学 II : 松尾 泰

### 1. Fourier 級数と Fourier 変換

1.1 Fourier 級数

1.2 Fourier 変換

### 2. Fourier 級数・変換を用いた偏微分方程式の解法

2.1 偏微分方程式の分類

2.2 Poisson 方程式

2.3 熱伝導方程式

2.4 波動方程式

2.5 Green 関数

### 3. 直交多項式

3.1 分類

3.2 直交多項式の存在と一意性

3.3 Rogrigues の公式

3.4 直交多項式が満たす微分方程式

3.5 規格化因子

3.6 母関数

3.7 漸化式

### 4. 直交多項式と対称性

4.1 調和振動子と Hermite 多項式

4.2 Legendre 陪関数

4.3 球面調和関数と角運動量代数

### 5. Bessel 関数

5.1 基本的な性質

5.2 波動関数と Bessel 関数

5.3 Bessel 関数の直交性

5.4 積分表示と漸近形

### 6. 超幾何関数

6.1 微分方程式の級数解と確定特異点

6.2 超幾何関数

6.3 Riemann の P 関数と特異点の合流

6.4 積分表示

6.5 接続公式

## 1.7 物理学演習 I (電磁気学 I, 物理数学 I, II) : 日下 暁人、濱口 幸一、松尾 泰、高橋 昂、永田 夏海

1.

1.1 リーマン球面

1.2 正則関数の性質

1.3 Michelson-Morley の実験

2.

その場 Galilei 変換

2.1 Julia 集合・Mandelbrot 集合

2.2 収束半径

2.3 速度の合成と超光速運動

3.

その場 収束円上の挙動

3.1 複素微分と吸引的不動点・周期点

3.2 コーシーの積分公式の応用

3.3 Lorentz 変換

4.

その場 2次元流体

- 4.1 複素多項式の性質
- 4.2 孤立特異点とローラン展開
- 4.3 Lorentz 収縮に関するパラドックス
- 5.
  - その場 1 ローラン展開
  - その場 2 留数定理の応用
  - 5.1 解析接続
  - 5.2 留数積分 (実積分への応用 I)
  - 5.3 留数積分 (分岐線がある場合)
  - 5.4 粒子の崩壊
- 6.
  - その場 反陽子生成
  - 6.1 定積分の計算
  - 6.2 ベータ関数
  - 6.3 Lorentz 変換の一般論
- 7.
  - その場 中心極限定理

- 7.1 鞍点法
- 7.2 熱伝導方程式 (拡散方程式)
- 7.3 斜交座標系における反変・共変ベクトル
- 8.
  - その場 電磁場テンソル
  - 8.1 2次元 Laplace 方程式の境界値問題
  - 8.2 自己共役微分演算子と Green 関数
  - 8.3 電磁場の Lorentz 変換
- 9.
  - その場 Chebyshev 多項式
  - 9.1 Hermite 多項式
  - 9.2 電磁ポテンシャルと対称性
- 10.
  - その場 ルジャンドル多項式
  - 10.1 空洞共振器と Bessel 関数
  - 10.2 電磁波中の荷電粒子の相対論的運動

## 1.8 物理学演習 II (解析力学、量子力学 I) : 横山 順一、常行 真司、田島 裕之、森脇 可奈

- |   |   |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>1. 解析力学           <ul style="list-style-type: none"> <li>1.1 運動エネルギー、位置エネルギーと仮想仕事</li> <li>1.2 一般化座標</li> <li>1.3 振り子の運動</li> <li>1.4 汎関数の極値問題</li> <li>1.5 二重振り子</li> <li>1.6 ばねの振動</li> <li>1.7 ビリアル定理</li> <li>1.8 ラグランジュ未定乗数法</li> <li>1.9 保存量</li> <li>1.10 時間に陽に依存するラグランジアン</li> <li>1.11 分子振動</li> <li>1.12 対称性と保存量</li> <li>1.13 電磁場中の荷電粒子の運動 (サイクロトロン共鳴等)</li> <li>1.14 正準変換を用いた方程式積分</li> <li>1.15 ポアソン括弧</li> <li>1.16 ハミルトン-ヤコビ方程式</li> <li>1.17 リウビルの定理</li> <li>1.18 古典可積分系</li> </ul> </li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>2. 量子力学           <ul style="list-style-type: none"> <li>2.1 黒体放射</li> <li>2.2 ボーアの量子模型</li> <li>2.3 デバイ模型</li> <li>2.4 波動方程式からシュレーディンガー方程式の導出</li> <li>2.5 シュレーディンガー方程式</li> <li>2.6 2重スリットを通過する電子線</li> <li>2.7 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</li> <li>2.8 デルタ関数型ポテンシャル</li> <li>2.9 エネルギー固有状態</li> <li>2.10 波束を用いた波動関数の記述</li> <li>2.11 シュレーディンガー方程式と波束</li> <li>2.12 粒子の反射</li> <li>2.13 2重デルタ関数型ポテンシャル障壁の透過と反射</li> <li>2.14 ブロッホの定理</li> <li>2.15 線形ポテンシャルとエアリー関数</li> <li>2.16 ベイカー-キャンベル-ハウスドルフの公式</li> </ul> </li> </ul> |
|---|---|

## 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け，きっぱりと書く；冠詞；The Story of Silent Spring
9. 機械翻訳を用いた英語論文作成法と注意点，辞書の使い方；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；Our Galaxy
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； unnecessary 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. 導波路と光回路

### 2.2 物理学実験 I: 全実験担当教員

1. 放射線：鈴木 大介、中桐 洸太、北村 徳隆
2. 真空技術：岡本 徹、栢富 龍一
3. X 線回折：島野 亮、吉川 尚孝
4. エレクトロニクス I：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：諸井 健夫

1. 球対称ポテンシャルを持つシュレディンガー方程式
  - 1.1 3次元におけるシュレディンガー方程式
  - 1.2 球対称なポテンシャルの扱い
  - 1.3 球面調和関数
  - 1.4 動径方向波動関数の扱い
  - 1.5 3次元井戸型ポテンシャル
  - 1.6 水素原子
  - 1.7 Rydberg 原子
2. 角運動量
  - 2.1 角運動量の満たす交換関係
  - 2.2 角運動量と空間回転
  - 2.3 角運動量の固有状態
  - 2.4 角運動量の合成
  - 2.5 行列を使った角運動量の表現
  - 2.6 スピン
3. 摂動論

- 3.1 時間に依らない摂動
- 3.2 時間に依る摂動

- 3.3 WKB 近似

## 2.4 物理学演習 III (量子力学 II、電磁気学 II) : 山本 新、高三 和晃

### 1. 量子力学

- 1.1 ブラ・ケットと波動関数、ガウスの波束
- 1.2 不確定性関係と最小不確定状態、スピン演算子
- 1.3 空間反転とパリティ演算子、周期的ポテンシャル
- 1.4 時間反転対称性と時間反転演算子、角運動量の合成と量子スピン系
- 1.5 球面調和関数、スピンの回転と SU(2) 群
- 1.6 合流型超幾何関数、3次元調和振動子の極座標表示
- 1.7 一定の電場における一次元調和振動子、時間に依存しない摂動 (三準位系)
- 1.8 電場中の水素原子、非等方的摂動
- 1.9 ある時刻から一定値をとる摂動、周期的に振動する摂動

- 1.10 時間に依存した外場を持つ調和振動子、2電子原子系の基底状態 (変分法)

- 1.11 WKB 近似と Hawking 温度

### 2. 電磁気学

- 2.1 ベクトル解析
- 2.2 磁気単極子とゲージ変換
- 2.3 鏡像法
- 2.4 境界条件下の Green 関数
- 2.5 Maxwell の応力
- 2.6 Laplace 方程式と多重極展開
- 2.7 ベクトルポテンシャルと磁気双極子
- 2.8 電流の作る磁場
- 2.9 静磁場と磁性体
- 2.10 準定常電流と表皮の厚さ
- 2.11 虹の原理

## 2.5 現代実験物理学 I : 江尻 晶、岡田 康志

### 1. 電気回路

フィルター、インピーダンス、雑音、演算増幅器

### 2. 真空

真空度、真空装置、電子管

### 3. 光計測基礎

光源、検出器、光の性質、回折・干渉、レーザー

### 4. 歴史的実験

重力定数、流体実験、ブラウン運動

### 5. 顕微鏡光学系の基礎

幾何光学、結像理論

### 6. 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

### 7. 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

### 8. 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

### 9. 顕微鏡のデジタルトランスフォーメーション

コンピューショナル・マイクロコピー

## 2.6 計算機実験 I : 藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀麿

### 1. 計算機実験の基礎

- 1.1 講義・実習の概要
- 1.2 環境整備
- 1.3 数値誤差
- 1.4 ニュートン法
- 1.5 二分法

- 1.6 囲い込み法

### 2. 常微分方程式

- 2.1 常微分方程式の初期値問題
- 2.2 陽解法と陰解法
- 2.3 Numerov 法
- 2.4 固有値問題

## 2.5 シンプレクティック積分法

### 3. 連立一次方程式

- 3.1 物理に現れる連立一次方程式
- 3.2 連立一次方程式の直接解法
- 3.3 連立一次方程式の反復解法

## 4. 行列の対角化

- 4.1 密行列の対角化
- 4.2 疎行列に対する反復法
- 4.3 特異値分解
- 4.4 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：寺師 弘二, 吉岡 信行

### 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. 超伝導量子コンピュータの仕組みと操作

- 2.1 回路量子電磁力学の基礎を学ぶ
- 2.2 超伝導量子ビットとは
- 2.3 量子ビットの操作と読み出し

### 3. 超伝導量子コンピュータの実機環境

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

### 4. 量子回路の実装

- 4.1 Qiskit の基本構造を学ぶ
- 4.2 量子計算のプログラミング
- 4.3 実習：シミュレータ・実機での実行

### 5. 超並列計算機としての量子コンピュータ

- 5.1 量子フーリエ変換による足し算
- 5.2 量子系のダイナミクスシミュレーション
- 5.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展

### 6. エラー抑制の基礎

- 6.1 量子計算におけるエラー

### 6.2 外挿法によるエラー抑制

- 6.3 実習：ハイゼンベルグモデルの時間発展におけるエラー抑制

### 7. エラー抑制の応用

- 7.1 量子多体計算に特有のエラーとそのエラー抑制
- 7.2 実習：ハイゼンベルグモデルの基底状態におけるエラー抑制

### 8. エラー訂正

- 8.1 エラー訂正とは
- 8.2 小規模な量子誤り訂正符号
- 8.3 大規模な量子誤り訂正符号

### 9. ショアのアルゴリズム

- 9.1 量子位相推定とは
- 9.2 アルゴリズム本体を学ぶ
- 9.3 実習：シミュレータでの実行

### 10. 量子位相推定とエネルギー固有値問題

- 10.1 物理モデル
- 10.2 時間発展シミュレーションと位相推定
- 10.3 実習：シミュレータでの固有値推定

### 11. グローバーのアルゴリズム

- 11.1 アルゴリズムを幾何学的に学ぶ
- 11.2 量子振幅推定
- 11.3 実習：シミュレータと実機での実行

## 2.8 統計力学 I：竹内 一将

### 1. 統計力学とは何か？

- 1.1 ミクロとマクロ
- 1.2 統計力学の分類
- 1.3 熱力学の復習
- 1.4 統計力学の基本精神

### 2. 準備 1：確率論

- 2.1 用語・定義
- 2.2 独立な部分からなる系

### 3. 準備 2：量子論

- 3.1 量子力学の復習・確率的な系との対応

### 3.2 状態数

### 4. 平衡統計力学の基礎

- 4.1 平衡状態とは何か？
- 4.2 等重率の原理とミクロカノニカル分布
- 4.3 古典系のミクロカノニカル分布
- 4.4 平衡状態への緩和
- 4.5 カノニカル分布（導入）
- 4.6 カノニカル分布の性質

### 5. カノニカル分布の応用

- 5.1 理想気体

- 5.2 相互作用する気体（古典系）
- 5.3 調和振動子
- 5.4 常磁性とスピン系
- 6. 結晶の比熱
  - 6.1 古典論
  - 6.2 Einstein モデル
  - 6.3 Debye モデル
- 7. 黒体放射（輻射）
  - 7.1 熱放射の普遍性
  - 7.2 空洞放射

- 8. グランドカノニカル分布
  - 8.1 導入
  - 8.2 性質
  - 8.3 応用：理想気体（高温）
- 9. 量子理想気体
  - 9.1 多粒子系の量子力学
  - 9.2 量子理想気体の平衡状態
  - 9.3 状態密度
  - 9.4 理想 Fermi 気体
  - 9.5 理想 Bose 気体

## 2.9 流体力学：江尻 晶, 馬場 彩

- 0. 様々な流体
- 1. 流体の基礎方程式
  - 1.1 流体を特徴づける量
  - 1.2 連続の式
  - 1.3 力
  - 1.4 運動方程式
  - 1.5 エネルギー方程式
  - 1.6 粒子の方程式から流体の方程式へ
  - 1.7 渦度と渦度方程式
- 2. 関数による流れの表現
  - 2.1 ポテンシャル流
  - 2.2 複素速度ポテンシャル
  - 2.3 等角写像とクッタ・ジュークフスキー変換
- 3. 粘性流
  - 3.1 レイノルズ数
  - 3.2 ストークス近似
  - 3.3 一様等方乱流
  - 3.4 コルモゴロフ則の問題点と改良

- 4. 水波
  - 4.1 長い波
  - 4.2 表面波
  - 4.3 表面張力波
- 5. 不安定性
  - 5.1 分類と安定性解析
  - 5.2 ケルビン・ヘルムホルツ不安定性
  - 5.3 レイリー・テイラー不安定性
- 6. 拡散とブラウン運動
  - 6.1 拡散方程式とランダムウォーク
  - 6.2 ブラウン運動
  - 6.3 ランジュバン方程式
  - 6.4 揺動散逸定理
- 7. その他
  - 7.1 分子粘性と乱流粘性
  - 7.2 電磁流体
  - 7.3 揚力

## 2.10 物理学演習 IV (統計力学 I、II)：桂 法称、竹内 一将、横溝 和樹、渡邊 光

- 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. 波の波動
  - 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：横山 将志、神谷 好郎
2. メスバウアー効果：日下 暁人、高倉 理
3. 加速器実験：中村 哲、永尾 翔、藤田 真奈美
4. 低温：小林 研介、佐々木 健人
5. 自動計測制御：張 奕勁、河口 真志
6. 量子演算入門：中辻 知、酒井 明人
7. 相転移：竹内 一将、荻田 裕也
8. レーザー：相川 清隆、川崎 拓也
9. 生物物理学：川口 喬吾、光山 隼史
10. 顕微鏡光学系：岡田 康志、池崎 圭吾、榎 佐和子
11. ブラウン運動：安東 正樹、小森 健太郎

#### 3.2 光学：小西 邦昭, 井手口 拓郎

1. イントロダクション
2. マクスウェル方程式と電磁波
3. 偏光
4. 等方的媒質中の光の伝搬
5. 金属の光学応答
6. 光の反射と屈折
7. 結晶光学
8. 回折
9. 干渉
10. 幾何光学
11. ガウスビーム光学
12. 光共振器
13. レーザー
14. 最先端の光学研究

#### 3.3 量子力学 III：辻 直人

1. 電磁場中の荷電粒子の量子力学
  - 1.1 量子力学の復習
  - 1.2 電磁場中の荷電粒子
  - 1.3 一様磁場中の粒子
  - 1.4 一様磁場と一様電場中の粒子
  - 1.5 Aharonov-Bohm 効果
  - 1.6 Berry 位相
  - 1.7 スピンを持つ粒子
2. 散乱問題
  - 2.1 散乱断面積
  - 2.2 散乱断面積の量子力学的な扱い
  - 2.3 散乱状態の波動関数が満たす方程式
  - 2.4 Born 近似
  - 2.5 部分波展開
  - 2.6 共鳴散乱
  - 2.7 Coulomb 散乱
  - 2.8 Lippmann-Schwinger 方程式
3. 多粒子の量子力学
  - 3.1 2粒子の量子力学
  - 3.2 N粒子の場合
  - 3.3 ヘリウム原子
  - 3.4 多電子系
4. 第二量子化
  - 4.1 調和振動子の復習
  - 4.2 多数の調和振動子
  - 4.3 第二量子化の記法
  - 4.4 ボソン場の演算子
  - 4.5 フェルミオンの扱い
  - 4.6 フェルミオン場の演算子

### 3.4 現代実験物理学 II : 馬場 彩、横山 将志

1. 粒子と物質の相互作用
2. 粒子検出器と粒子加速器
3. 統計の基礎・実験データの解析と誤差評価
4. 相対論的運動学
5. 宇宙物理学概要
6. 宇宙物理実験で使われる光子検出原理
7. 宇宙物理実験で使われる光子以外の手段

### 3.5 物理学演習 V : 辻 直人, 安東 正樹, 桂 法称, 加藤 ちなみ, 福田 朝

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 Aharonov-Bohm 効果
  - 1.7 Lyman- $\alpha$  遷移
  - 1.8 Born 近似
  - 1.9 磁場中の原子
  - 1.10 合流型超幾何関数
  - 1.11 一様磁場中の荷電粒子の縮退度
  - 1.12 放物線座標
  - 1.13 Coulomb 散乱
  - 1.14 平面波の展開公式
  - 1.15 水素分子
  - 1.16 同種類のフェルミ粒子 2 個からなる系
  - 1.17 同種粒子の散乱
  - 1.18 球対称調和振動子型ポテンシャルのもとでの  $N$  粒子系
  - 1.19 同種粒子の多体系と第二量子化
  - 1.20 Berry 位相とホール伝導度
  - 1.21 Bogoliubov 変換
  - 1.22 フェルミオン系と Kramers 縮退
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 電磁場中での荷電粒子の運動
  - 2.4 原子の電気双極子モーメント
  - 2.5 古典的な原子・分子模型と光ピンセット
  - 2.6 遅延ポテンシャル
  - 2.7 振動する電荷からの放射
  - 2.8 Lienard-Wiechert ポテンシャル
  - 2.9 Larmor の公式
  - 2.10 磁気双極子放射とパルサー
  - 2.11 同軸ケーブル
  - 2.12 導波管
  - 2.13 電磁場の Lorentz 共変形
  - 2.14 ロンドン方程式
3. 統計力学
  - 3.1 2次元イジング模型
  - 3.2 線形応答理論
  - 3.3 Langevin 方程式

### 3.6 生物物理学 : 能瀬 聡直, 川口 喬吾

1. 生命現象のミクロとマクロ : 分子から個体への階層性
2. 遺伝情報の流れ・タンパク質の構造と機能
3. 細胞の構造と機能、細胞内相分離現象
4. 多細胞現象の理論と実験
5. パターン形成
6. 確率過程とスケールリング
7. アクティブマターとトポロジー
8. 組み換え DNA 技術とゲノム科学
9. 個体発生と細胞の多様化
10. 個体レベルで起こる生命現象の可視化と操作
11. 脳神経系における情報の流れ
12. 神経活動電位の生成とシナプス伝達
13. 神経ネットワークによる情報処理と脳高次機能
14. 脳の可塑性と記憶

### 3.7 物理数学 III : 山崎 雅人

1. 群の定義、部分群、群の同型、直積、巡回群
2. 中国剰余定理、有限アーベル群の分類、正二面体群、軌道分解、Lagrange の定理、正規部分群、商群
3. 準同型定理、置換群、ケーリーの定理
4. 群の集合への作用
5. 群の線型表現、ユニタリー表現、表現の直積、既約表現と可約表現
6. 群の表現の既約分解の例
7. Schur の補題、指標の直交性
8. 表現の既約分解への応用、テンソル積表現
9. 点群と指標表、量子力学の対称性とユニタリー演算子、テンソル演算子、対称性からの選択則と既約分解
10. 回転群  $O(3)/SO(3)$ 、オイラー角、実射影空間、無限小生成演算子と交換関係
11. リー群とリー環の一般論、リー群とリー環の対応、具体例
12.  $U(n)$  と  $SU(n)$ 、リー群とリー代数の関係、リー代数の直和、イデアル、商
13. Lie 代数の表現、随伴表現、Cartan-Weyl 基底、 $SU(3)$  のルート系、quark 模型、Gellman-Okubo 公式

### 3.8 固体物理学 I : 小林 研介

1. 固体物理学とは
  - 1.1 電子の発見から量子テクノロジーまで
  - 1.2 固体物理学とは
  - 1.3 エネルギースケール
2. 物質の凝集機構
  - 2.1 結合（凝集）
  - 2.2 共有結合
  - 2.3 イオン結合
  - 2.4 金属結合
  - 2.5 ファン・デル・ワールス結合
  - 2.6 水素結合
  - 2.7 元素の周期表
3. 結晶構造
  - 3.1 原子の周期的配列
  - 3.2 ブラベ格子
  - 3.3 結晶構造の分類
  - 3.4 結晶構造の例
  - 3.5 ミラー指数
  - 3.6 準結晶と非晶質
4. 逆格子
  - 4.1 逆格子の定義
  - 4.2 ブリルアンゾーン
  - 4.3 結晶による回折
5. 格子振動とフォノン
  - 5.1 1次元系の格子振動
  - 5.2 3次元系の格子振動
  - 5.3 フォノン
  - 5.4 格子比熱
  - 5.5 熱伝導
6. 自由電子論
  - 6.1 自由電子モデル
  - 6.2 電子比熱
  - 6.3 ドルーデモデル
  - 6.4 ボルツマン方程式
  - 6.5 電気抵抗の温度依存性
  - 6.6 ウィーデマン・フランツ則
  - 6.7 プラズマ振動
  - 6.8 様々なフェルミ気体
7. バンド理論
  - 7.1 強束縛モデル
  - 7.2 ほとんど自由な電子モデル
  - 7.3 金属と絶縁体
  - 7.4 プロッホの定理
  - 7.5 バンド構造の例
  - 7.6 多電子系の記述
  - 7.7 結晶中の電子の運動方程式
  - 7.8 ホール（正孔）
  - 7.9 Hall 効果
8. 半導体
  - 8.1 固有半導体
  - 8.2 不純物ドーピング
  - 8.3 不純物半導体のキャリア密度
  - 8.4 半導体における電気伝導
  - 8.5 pn 接合
  - 8.6 ショットキー接合
  - 8.7 半導体技術の現在
9. 展望

### 3.9 電磁気学 III : 安東 正樹

#### 1. 電磁波の基礎

##### 1.1 自由電磁場とその性質

#### 2. 電磁波の放射

##### 2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル

##### 2.2 双極子近似

##### 2.3 遅延ポテンシャルの多重極展開

#### 3. 荷電粒子の出す電磁波

##### 3.1 リエナール-ヴィーヘルトのポテンシャル

##### 3.2 運動する荷電粒子の作る電磁波

##### 3.3 制動放射

##### 3.4 点電荷による電磁波の散乱

##### 3.5 チェレンコフ放射

#### 4. 電磁波の伝播

##### 4.1 導波管

##### 4.2 空洞共振器

##### 4.3 電磁波の回折

#### 5. 電磁場の角運動量

### 3.10 統計力学 II : 桂 法称

#### 1. 相転移と臨界現象

##### 1.1 相転移, 臨界現象とは何か?

##### 1.2 強磁性 Ising 模型

##### 1.3 摂動論と平均場理論

##### 1.4 Landau 理論

##### 1.5 連続対称性をもつ系

##### 1.6 量子古典対応

##### 1.7 スケーリング仮説

##### 1.8 くりこみ群

#### 2. 線形応答理論

##### 2.1 応答現象

##### 2.2 Boltzmann 方程式

##### 2.3 久保公式

##### 2.4 固体物性への応用

#### 3. 確率過程

##### 3.1 ランダムウォークと拡散方程式

##### 3.2 Brown 運動

##### 3.3 マスター方程式

### 3.11 計算機実験 II : 藤堂 眞治、石河 孝洋、諏訪 秀磨

#### 1. モンテカルロ法

##### 1.1 講義・実習の概要

##### 1.2 乱択アルゴリズム

##### 1.3 物理過程のシミュレーション

##### 1.4 モンテカルロ積分

##### 1.5 多体系の統計力学

##### 1.6 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 量子回路シミュレーション

#### 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 1次元の最適化(復習)

##### 4.3 最急降下法と勾配降下法

##### 4.4 共役勾配法

##### 4.5 勾配の計算

##### 4.6 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法

##### 4.7 シミュレーテッドアニーリング

##### 4.8 最適化手法の比較

## 4 4年生 S セメスター

### 4.1 機械学習概論：樺島 祥介

1. 導入, 数理基礎 (1)
2. 数理基礎 (2)
3. 回帰と分類 (1)
4. 回帰と分類 (2)
5. カーネル法 (1): ガウス過程
6. カーネル法 (2): サポートベクトルマシン
7. 多層ニューラルネットワーク (1)
8. 多層ニューラルネットワーク (2)
9. 主成分分析と因子分析
10. クラスタ分析
11. 敵対的生成ネットワーク
12. 拡散モデル
13. トランスフォーマー

### 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 サブアトムック物理学：中島 康博

#### 1. サブアトムックの世界の概観

#### 2. 素粒子物理学入門

- 2.1 粒子の種類と相互作用
- 2.2 量子電磁気学

#### 2.3 弱い相互作用

#### 2.4 電弱統一理論

#### 2.5 ニュートリノ

#### 3. 原子核物理学入門

- 3.1 原子核の基本的性質
- 3.2 原子核の構造
- 3.3 核子の内部構造・クォークモデル

- 4. 素粒子・原子核と宇宙物理
  - 4.1 宇宙での元素合成
  - 4.2 ニュートリノ天文学

#### 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
- 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)

#### 4.5 統計力学特論：川島 直輝

- 1. Phase transitions, critical phenomena and universality
- 2. Mean-field theory, variational principle, and Landau expansion
- 3.  $\phi^4$  model and Ornstein-Zernike form
- 4. Ginzburg criterion
- 5. Migdal-Kadanoff approximation
- 6. Fixed-point and scaling operators
- 7. Critical phenomena and renormalization group
- 8. Operator product expansion
- 9. Perturbative renormalization group
- 10. Wilson-Fisher fixed point
- 11. Some Applications
- 12. Berezinski-Kosterlitz-Thouless Transition
- 13. Renormalization group in tensor network representation
- 14. Other topics

#### 4.6 現代物理学入門：有田 亮太郎、山崎 雅人

- 1. 物質中の創発現象
- 2. 第一原理電子状態計算
- 3. スピン密度汎関数理論、密度汎関数摂動論、超伝導密度汎関数理論
- 4. 強相関系の低エネルギー有効模型導出
- 5. 室温超伝導への挑戦
- 6. 機能磁性体の探索
- 7. 物理学の階層構造、量子重力の動機と次元解析
- 8. ブラックホールの熱力学
- 9. 余剰次元
- 10. 超弦理論の導入
- 11. 弦の相互作用、量子重力としての超弦理論
- 12. 超弦理論とブラックホールのエントロピー、ホログラフィー

#### 4.7 一般相対論：仏坂 健太

- 1. 特殊相対論の復習  
重力赤方偏移の実験、ローレンツ変換
- 2. 測地線方程式と粒子の運動  
測地線方程式の導出、ニュートン極限、シュヴァルツシルト時空上での運動、重力レンズ
- 3. 重力場の方程式  
アインシュタイン方程式の導出
- 4. 膨張宇宙論
- フリードマン方程式、宇宙の熱史、ビッグバン元素合成
- 5. ブラックホール・中性子星  
シュヴァルツシルト解、カー解、TOV 方程式、中性子星
- 6. 重力波  
重力波の方程式、重力波の伝播、重力波の生成、コンパクト連星合体からの重力波

## 4.8 量子光学：相川 清隆

1. 量子力学の基礎
2. 電磁場の量子化
3. 光の量子状態
4. 量子干渉効果
5. 原子の構造
6. 原子と光の相互作用
7. レーザーの発生
8. 原子のレーザー冷却
9. 原子のレーザー捕捉
10. 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮
11. アインシュタイン-ポドロスキー-ローゼン相関
12. 量子光学の巨視的物体への応用
13. 光共振器による物体の運動の冷却

## 4.9 固体物理学 II：長谷川 修司

1. 物性物理学とノーベル賞
  - 1.1 超伝導・超流動のノーベル賞
  - 1.2 半導体のノーベル賞
  - 1.3 低次元系・トポロジカル系のノーベル賞
2. 半導体
  - 2.1 バンド分散とバンドギャップ
  - 2.2 真性半導体と不純物半導体
  - 2.3  $pn$  接合とトランジスタ
3. 格子振動と比熱
  - 3.1 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
  - 3.2 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
  - 3.3 熱伝導
    - ・ 熱伝導率
    - ・ 熱電効果
    - ・ Wiedemann-Franz の法則
4. 超伝導
  - 4.1 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
  - 4.2 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 規程状態とマイスナー効果
  - 4.3 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
5. スピンと磁性
  - 5.1 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
  - 5.2 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
  - 5.3 対称性
    - ・ 対称性の破れとスピン分裂
    - ・ スピン軌道相互作用
    - ・ ラッシュバ効果
    - ・ トポロジカル絶縁体

## 4.10 プラズマ物理学：辻井 直人

1. Introduction
  - 1.1 Plasma parameter and Debye length
2. Particle orbits
  - 2.1 ExB drift, curvature and grad-B drift
  - 2.2 Magnetic moment, mirror trap and loss cone
  - 2.3 Polarization drift
  - 2.4 General inhomogeneous B-field
3. Collision operator
  - 3.1 Fokker-Planck collision operator
  - 3.2 Collision times, beam relaxation

#### 4. Magneto-hydrodynamics (MHD)

- 4.1 MHD equation, frozen-in law
- 4.2 1D and 2D-axisymmetric equilibrium, 1D stability

#### 5. Kinetic theory

- 5.1 Kinetic equation and H-theorem
- 5.2 Gyro-kinetic theory, drift-kinetic theory

#### 6. Transport

#### 6.1 Transport coefficients

- 6.2 Transport in a magnetized plasma: classical theory, neo-classical theory

#### 7. Waves

- 7.1 Dielectric tensor, cold plasma waves
- 7.2 Landau damping: kinetic theory of waves
- 7.3 Quasilinear diffusion: wave-particle interactions

### 4.11 宇宙物理学：吉田 直紀

#### 1. 星の進化

- 1.1 元素の起源
- 1.2 星の構造
- 1.3 星内部のエネルギー輸送
- 1.4 熱核融合
- 1.5 ヘリウム燃焼とトリプルアルファ反応
- 1.6 白色矮星
- 1.7 中性子星とブラックホール

#### 2. 観測的宇宙論

- 2.1 標準宇宙モデル
- 2.2 宇宙の熱史
- 2.3 銀河形成と大規模構造
- 2.4 超巨大ブラックホール
- 2.5 ダークマター
- 2.6 将来の観測計画

### 4.12 生物物理学特論 II：川口 喬吾、伊藤 創祐、野口 博司

#### 1. 生命現象と非平衡系（イントロ）

- 1.1 生物系のモデリングと解析手法
  - 1.2 言語モデルの利用と実験
  - 1.3 生物知の物理学に向けて
- #### 2. 力学系と神経活性のモデリング
- 2.1 連想記憶とホップフィールドネットワーク

#### 2.2 生成モデル

- 2.3 Langevin ダイナミクスと拡散モデル

#### 3. 生体膜の構造と機能

- 3.1 曲面の物理、膜小胞の形状
- 3.2 曲率誘導タンパク質による膜変形
- 3.3 赤血球、血流

### 4.13 化学物理学：酒井 明人

#### 1. 水素型原子

#### 2. 多電子原子

- 2.1 スピン角運動量
- 2.2 Hartree 近似
- 2.3 Hartree-Fock 近似
- 2.4 Hartree-Fock 方程式
- 2.5 Hartree-Fock 方程式の意味
- 2.6 LS 多重項
- 2.7 スピン軌道相互作用

#### 3. 群論入門

- 3.1 群の定義

#### 3.2 結晶点群

- 3.3 積表
- 3.4 群の表現
- 3.5 指標の表
- 3.6 可約表現の既約化

#### 4. 結晶場

- 4.1 結晶場ハミルトニアン
- 4.2  $d$  電子系の結晶場と磁性
- 4.3  $f$  電子系の結晶場と磁性

#### 5. 孤立原子を越えた取り扱い

- 5.1 水素分子

## 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 : Simeon Hellerman

1. Basic ideas of QFT
2. Computations in perturbation theory and introduction to the Feynman functional

integral

3. QFT beyond perturbation theory

### 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 固体物理学 III : 有田 亮太郎

- 1. 物質中の相互作用
- 2. 物質の応答
- 3. フェルミ液体論
- 4. 絶縁体の磁性
- 5. 金属の磁性

- 6. 近藤効果
- 7. 超伝導体の性質
- 8. BCS 理論
- 9. 整数量子ホール効果

## 5.6 非平衡科学 : 伊藤 創祐

### 1. Stochastic processes

Probability, Markov chains, Markov processes, Chapman–Kolmogorov equation, Master equation, Kramers–Moyal expansion, Fokker–Planck equation, Brownian motion, Onsager–Machlup function, Langevin equation, Ito/Stratonovich integral, Kramers equation

### 2. Stochastic thermodynamics

Flux and force, entropy production rate, the

second law of thermodynamics, the first law of thermodynamics, the detailed balance condition and the local detailed balance condition, Linear irreversible thermodynamics, Onsager reciprocal relations.

### 3. Dynamical systems

Fixed points and stability, Cumulants and moments, nonlinearity, bifurcations, Limit cycles

## 5.7 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

## 5.8 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

## 5.9 物理学のための科学英語特論：小野 義正

### 1. 英語論文作成の概要 1

- 1.1 科学・技術英語 (Scientific Writing in English) とは
- 1.2 論文審査報告 (英文が悪い)：理由と対策
- 1.3 わかってもらえる英語論文は「英語の発想で」(Leggett's Trees)
- 1.4 日本人英語が通じない理由と対策 (脱日本的発想)
- 1.5 直接翻訳はするな⇒「和文和訳して、簡潔な物主構文へ」

### 2. 英語論文作成の概要 2

- 2.1 結論を先に理由を後に
- 2.2 英語の基本は三拍子 (パラグラフ構造)
- 2.3 「起承転結」から「結論が先」(序論・本論・結論)のエッセイへ
- 2.4 否定文を避けて肯定文で書く
- 2.5 「英語活用メモ」を作り英借文する

### 3. 英語論文の構成と作法 1

- 3.1 効率のよい英語論文執筆の進め方
- 3.2 よい英語論文の書き方
- 3.3 日本人英語の脱却ポイント
- 3.4 英語論文執筆の基本的な注意
- 3.5 英語論文の構成 (IMRAD 方式)
- 3.6 英語論文のフローチャート
- 3.7 英語論文の各項目の書き方 1 (表題, 著者と所属, 抄録, 略語の使用方法)

### 4. 英語論文の構成と作法 2

- 4.1 英語論文の各項目の書き方 2 (序論, 本論, 結果, 考察, 結論, 謝辞, 引用文献, 図と表)

### 4.2 機械翻訳を用いた英語論文作成法

### 5. 作文技術 1

- 5.1 文頭, 数字の使い分け
- 5.2 用語の統一
- 5.3 リスト項目の一貫性 (並列構造で書く)
- 5.4 つづりの統一
- 5.5 短い簡潔な文 (Simple Sentences) を書く
- 5.6 受動態を避け能動態を使う
- 5.7 修飾する節や句は修飾対象のすぐ近くに
- 5.8 文意明確にする言葉 (連結語) を使う

### 6. 作文技術 2

- 6.1 不必要な単語を省く
- 6.2 日本人に多い間違いを直す
- 6.3 自動詞と他動詞の取り違え
- 6.4 動名詞と不定詞の使い方
- 6.5 よく使われる略語
- 6.6 注意すべき単語

### 7. 文法的事項 1

- 7.1 動詞の適切な時制
- 7.2 主語を明確に
- 7.3 冠詞の使い方
- 7.4 名詞の使い方
- 7.5 和製英語に注意
- 7.6 スペリングに注意

### 8. 文法的事項 2・論文投稿

- 8.1 前置詞の使い方
- 8.2 注意すべき句読法

- 8.3 論文投稿の注意点
- 8.4 審査報告書と論文修正の考え方（査読者対策）
- 8.5 参考書
- 8.6 レポートのフォーマット
- 9. プレゼン 1：英語プレゼンの概要
  - 9.1 プレゼンテーションとは
  - 9.2 プレゼンテーション（口頭発表）の心構え
  - 9.3 プレゼンテーションのプランニング
  - 9.4 英語プレゼンテーションの構成
  - 9.5 スライドの効果的な使い方
  - 9.6 標準スライド
- 10. プレゼン 2：英語の構造としゃべり方
  - 10.1 英語の構造（わかりやすい英語表現）
  - 10.2 講演用英語表現 vs. 論文用英語表現
  - 10.3 わかってもらえる英語のしゃべり方
  - 10.4 うまく聞こえる発音のコツ
  - 10.5 カタカナ英語 (False Friends) に注意
  - 10.6 わかってもらえる英語のしゃべり方（事前準備）
- 11. プレゼン 3：発表のマナー・テクニック
  - 11.1 原稿は読むべきか読んでではないか
  - 11.2 聞いてわかる原稿・メモ作成上の注意
  - 11.3 発表練習（リハーサル）
  - 11.4 発表時のマナー・テクニック
  - 11.5 Non-verbal Communication
  - 11.6 プレゼンテーション当日のコツ
- 12. プレゼン 4：英語プレゼンの実際
  - 12.1 口頭発表の決まり文句：最初の挨拶
  - 12.2 プレゼンの流れと決まり文句
  - 12.3 個々のスライドの説明
  - 12.4 具体的な図表の説明
  - 12.5 数字・数式・記号の読み方
  - 12.6 グラフ表現
  - 12.7 図形
  - 12.8 言い回しの工夫
- 13. プレゼン 5：質疑応答・ポスターセッション・まとめ
  - 13.1 質疑応答 (Q&A) の心構え・指針
  - 13.2 質問が聞きとれなかったとき・質問に答えられないときの対応
  - 13.3 ポスターセッションの利点・発表の技術
  - 13.4 プレゼンの注目点と評価のポイント
  - 13.5 チェックリスト
  - 13.6 Hints for a Successful Conference
  - 13.7 参考書
  - 13.8 補遺 1：国際会議用アブストラクトの執筆手順
  - 13.9 補遺 2：Professional Self-Introduction

# 相川研究室

相川 清隆 准教授 小田部 壮達 特任助教 川崎 拓也 助教

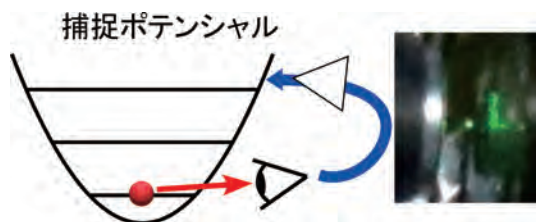
## 1 研究の背景：浮揚オプトメカニクス

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) 量子スクイーミングの実現

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、中性ナノ粒子の運動量観測を行う独自の技術を応用し、ナノ粒子の運動に関する量子

スクイーミングを世界で初めて実現した。このような状態は、浮揚させた巨視的物体において初めて生み出された非古典的な状態であり、今後、巨視的物体の量子性を探る上で鍵となる技術である。

## 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、原子に基づく量子系とは質的に異なる振る舞いを持つ。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を進めている。

### (2) 浮揚ナノ粒子系における情報熱力学の探究

古典的な領域から量子的な領域まで、幅広い温度範囲の振る舞いを探ることが可能な浮揚ナノ粒子系は、情報とエネルギーの関係を探る情報熱力学の実験的な舞台として最適である。特に、量子基底状態付近においては、従来の実験系では見られない振る舞いが期待される。また、複数のナノ粒子を冷却する新しい装置を開発し、それらの間に相互作用を導入する研究を進めている。

### (3) 浮揚ナノ粒子の量子的振る舞いを探る研究

浮揚ナノ粒子を量子基底状態付近へと冷却することは可能となったが、実際に量子力学に基づく波としての振る舞いなど、非古典的な振る舞いの観測ははまだ実現されていない。そのため、当研究室で初めて実現した、浮揚ナノ粒子の飛行時間法を利用して、非古典的な状態を生成・観測する研究を進めている。

### (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、冷却原子気体を高速な電場センサとして利用する研究を進めている。

## 4 もっと詳しく知りたい方へ

研究室への見学を歓迎します。

連絡先：aikawa@phys.s.u-tokyo.ac.jp

研究室 Web サイト：

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

## 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、これまで主として量子情報/光学分野で少数自由度系を対象に精力的に行われてきました。本研究室では、これらの分野 - 量子多体物理と量子情報/光学 - の境界領域における理論研究を行っています。特に、量子測定理論・量子情報・繰り込み群・トポロジー・場の理論・機械学習などの考え方/手法も援用しながら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。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。

### ・量子測定と相転移・臨界現象

量子系を測定すると、観測者が情報を獲得することの代償として、量子状態が不可逆的に変化します。このような測定に伴う影響を「測定の反作用」と呼びます。我々は測定の反作用によって引き起こされる、非ユニタリ系に特有な新しい相転移や臨界現象の解明に取り組んでいます。特に、量子情報、場の理論、くりこみ群などの考え方を組み合わせ、理論研究を行っています。最近では量

子多体系が持つ量子計算リソースの解析にも応用されるなど、これらの研究は量子計算分野にも広がりを見せています。

### ・量子光による量子多体系の制御

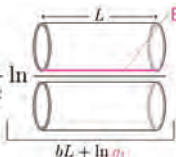
近年、外部自由度との相互作用を用いて量子多体系を制御する可能性が盛んに研究されています。特に、古典光を用いて過渡的な物性変化を探る研究がこれまで精力的に行われてきました。一方で「量子性を有した光」による多体系制御の可能性については多くが未開拓です。我々は、多体系と量子的な光を強く相互作用させることで、物質相の制御を行う可能性を探求しています。特に、これまでの研究が光-物質相互作用の強結合領域で正当化困難な仮定のもとになされてきたのに対し、我々は曖昧さの残る近似や仮定に頼らない理論の構築を目指しています。

### ・物理と機械学習

近年、物理で培われてきた知見をもとに、新しい人工知能モデルを提案する研究が活発化しつつあります。我々は、くりこみ群の考え方を援用し、粗視化プロセスの逆変換により、ノイズをデータに変換する生成モデルの研究に取り組んでいます。画像生成やタンパク質構造決定など実用的な課題への応用も目指しています。

## 3 今後の展開

量子多体物理と量子情報/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知見も取り入れ、基礎から応用まで幅広く見据えた研究を展開します。



$$M_\alpha(\psi) = \frac{1}{1-\alpha} \ln \frac{L}{bL + \ln g_1} - (\ln 2)L$$

図：量子多体系が持つ量子リソースにおける普遍性。臨界状態が有する量子計算リソース（“量子魔法”）が、共形場理論で予言される普遍的な性質を示す。Hoshino, Oshikawa, Ashida, Phys. Rev. X (2026) より転載。

# 有田研究室

有田亮太郎教授 北村泰晟助教

## 1 研究の背景

本研究室では、非経験的手法に基づく物性物理学の研究を行っています。様々な物質に対する計算から得られた知見をもとに、非自明な電子状態に由来する特異物性を理論的に予言、設計することを目指しています。長期的には、新しい設計指針や指導原理の確立を理論物理学上の新概念の発見につなげることを考えています。精度の高い物質設計を可能にする新しい計算法論の開発にも積極的に取り組んでいます。

## 2 最近の研究テーマ

物質中の電子相関に由来する現象に興味を持って研究を進めています。以下は最近の研究例です。

### (1) 超伝導体の研究

新しい超伝導体の予言、設計は固体物理学における最大の難問の一つです。20世紀初頭のKamerlingh Onnesの水銀における超伝導の発見以来、理論がその存在を予言し、実験がそれを確認したという経緯をたどった超伝導物質はほとんど存在しませんでした。しかしながら近年、この事情が少しずつ変わってきています。この中で超伝導体を第一原理的に計算する方法の開発がこの潮流を作るうえで決定的に重要な役割を果たしています。本研究室では超伝導体の転移温度の第一原理計算法の開発と応用に取り組んできました。最近では超伝導状態を特徴づける磁場侵入長やコヒーレンス長など、どんな教科書にも載っているものの、これまで定量的な計算が難しかった量の計算法の開発にも挑戦しています。フォノン以外の機構によって生じる非従来型超伝導体の研究や、新しい超伝導体の探索、設計も重要な課題です。

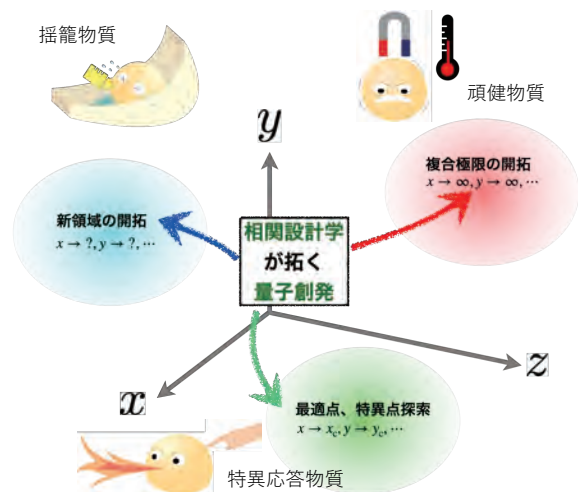
### (2) 磁性体の研究

磁性体ではそのスピンの配置によって多様な物性が発現します。本研究室ではどの物質でどの磁気構造が実現するかを予測する方法の開発や数十Åに及ぶ巨大なトポジカル磁気構造を持つ物質の電子状態の計算法の開発、群論に基づく磁性体の分類や非線形応答の計算などに取り組んでいます。実験グループとの共同研究も積極的に行っています。

## 3 今後の展開

電子、原子ひとつひとつは全く個性のない存在ですが、その組み合わせにより、物質中では（超伝導や機能磁性など）驚くべき性質、機能が発現します。これを量子創発現象と呼びます。

量子創発現象の研究の舞台は広大です。量子創発現象の無限の可能性はセレンディビティに頼ったアプローチでは探索しきれません。我々にはこの広大無辺の空間を探索するための地図が必要です。地図があれば、我々ほどの方向に豊穡な未開拓領域があり、どの極限に進むべきかを知ることができます。注目する現象、物質の応答にとっての最適点を特定することもできます。本研究室ではこの地図を作成する枠組み、すなわち相関設計学の構築を目指しています（下図参照）。



長期的な目標としては新しいクラスの物質群、現象を見つけたいと思っています。特に応用分野への波及効果があり、かつ物性物理学における新概念を育む舞台となる物質を探索したいと思っています。より具体的には高温、強磁場、擾乱などに耐える頑健物質、超巨大応答、超高速応答を示す特異応答物質、新法則、新原理、新現象発見の揺籃地となりうる揺籠物質などをターゲットとしています。

### 研究室のホームページ：

<https://arita-lab.t.u-tokyo.ac.jp/index.html>

# 安東研究室

安東 正樹 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。

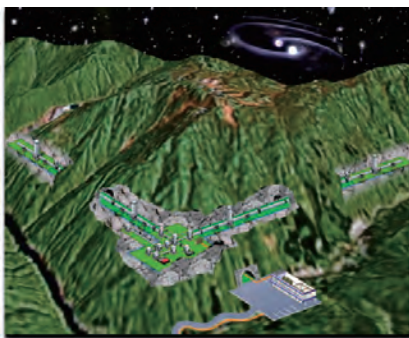
## 1. 重力波による新しい天文学・物理学

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现象の中心部を直接観測することを可能にする。またそれにより、地上の実験で再現することが困難な極限状態（高エネルギー、高密度、強重力場、強磁場）の現象を調べ、物理学のフロンティアを切り拓くことも期待されている。

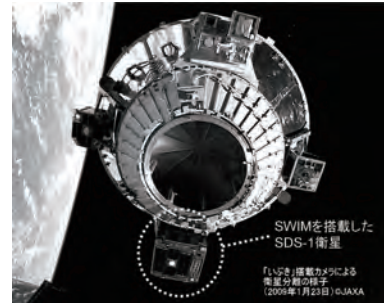
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらすことで、それらに直接迫る手段となる可能性をもっている。

## 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(右下図)。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。具体例として、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

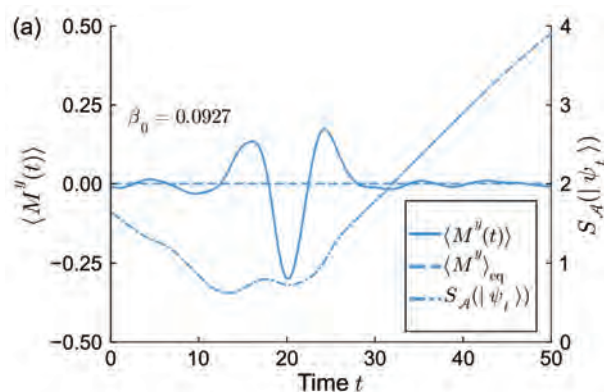
数理をより一般の開放系へと適用することで、非平衡開放量子多体系の基礎理論の確立を目指している。また、非平衡開放系の新たなプラットフォームとして、量子測定とフィードバック制御が重要な役割を果たす浮揚ナノ粒子の系に注目し、研究を展開している。

### 【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。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。

## 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：量子イジング鎖における磁化の時間発展(実線)。初期状態の取り方を工夫することによって、一旦は熱平衡値(破線)に達したかと思われる物理量が過渡的に熱平衡値からずれる「バースト」が起る。arXiv:2602.09665 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。

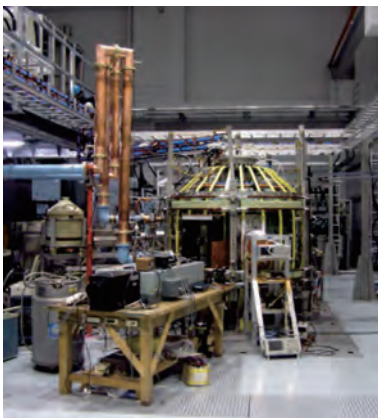


図 1：TST-2 装置

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。

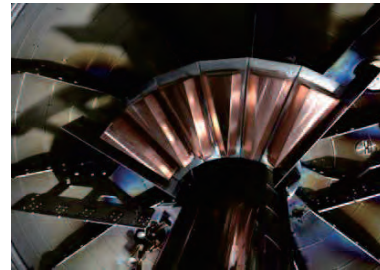


図 2：TST-2 装置内に設置されたアンテナの写真

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。

# 岡田研究室

岡田 康志 教授 榎 佐和子 特任助教 池崎 圭吾 助教

## 1 我々の目標：生命とは何か

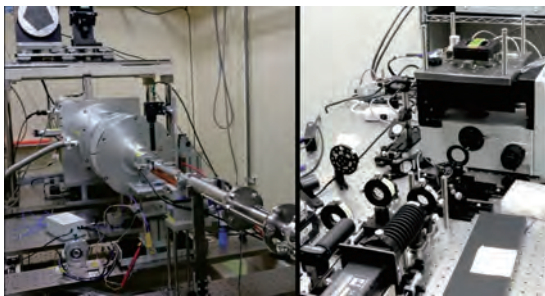
生命の基本単位は細胞だと考えられています。しかし、細胞の構成成分であるタンパク質や脂肪、核酸を混ぜ合わせただけでは、生命は生じません。生命とは何かを物理の言葉で理解することが、生物物理学の究極の目標です。

## 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ニアンラチェット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。

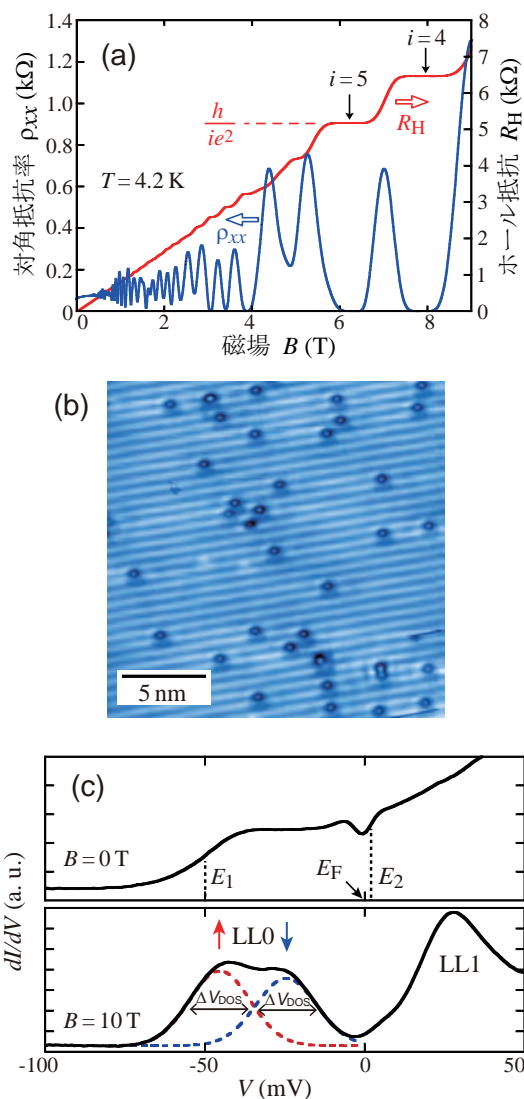


図1：(a) 二次元電子系における量子ホール効果。(b) STM 像。ランダムな黒丸が Fe 原子。(c) 同一試料で測定されたランダウ準位。

## 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。

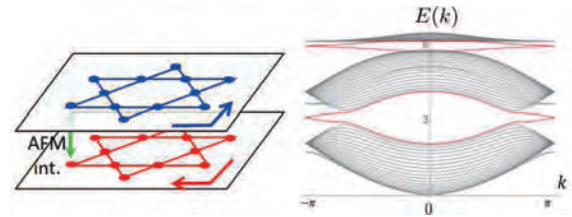
### ●統計力学

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) カゴメ格子上の強磁性体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ふことになります。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、問題のアンサンブ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。我々の研究室でもつばらこうした研究を行っています。

## 最近の研究から

複数のパターンを記憶・想起できる「連想記憶モデル」は、2024 年のノーベル物理学賞の対象にも選ばれた、現代の AI 技術を支える重要な基本モデルです。本モデルにおいて、神経素子 (ニューロン) を「非単調な入出力特性を持つ関数」に置き換えることで性能が大幅に向上することは知られていましたが、その定量的な評価については長年未解明のままでした。今回我々は、モデルの提案から 30 余年の時を経て、その性能を詳細に解明することに成功しました (図 1)。

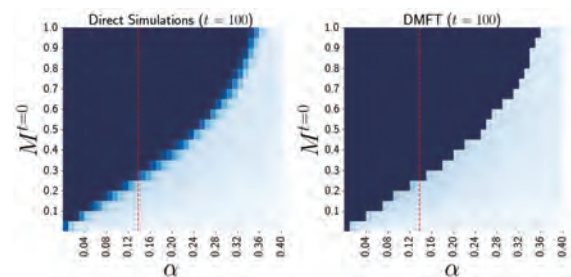


図 1：非単調ニューロンモデルに対する想起成功条件。(左) 実験結果。(右) 理論解析による結果。YK and Mimura, JSTAT (2026) 014002 より転載。

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。

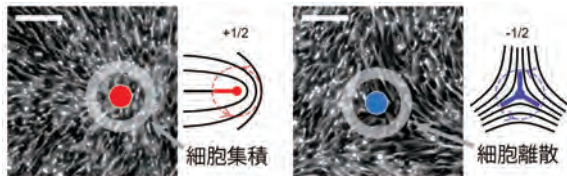


図: 神経幹細胞はトポロジカル欠陥付近で集まったり離散したりする。スケールバーは 100  $\mu\text{m}$ 。参考: Kawaguchi, Kageyama, Sano, Nature 545, 327–331 (2017)。

**【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。

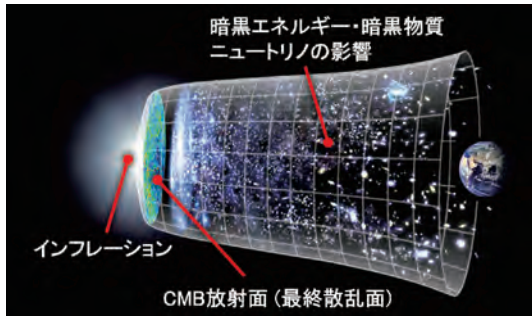


図1: 宇宙進化の模式図。横軸が時間で、左側が宇宙初期、右が現在である。(Original Image Credit: NASA / WMAP science team)

## 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」の質量の測定や、「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、宇宙背景放射の偏光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 Observatory へ参画し、本分野における先端研究を行なう。Simons Observatory は世界最先端の宇宙背景放射観測のための望遠鏡群であり、2024年に観測をはじめた。現在、日本グループが主導し、4台目の小口径望遠鏡を開発している(図2)。

## 超伝導技術・量子センサ技術を用いた研究

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。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・高周波重力波探索実験に向けて、研究開発を進めるなど、これまでになく全く新しい研究の方向性も模索している(図2)。

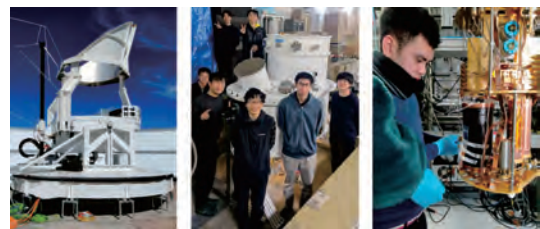


図2: 左: 南米チリ・アタカマ高地に建設中の小口径望遠鏡。中: 京都大学で開発中のレシーバ。右: 強磁場中の超伝導キャビティの実験。

## 研究室ホームページ:

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

# 小西研究室

小西 邦昭 准教授 櫻井 治之 助教

## 1 小西研究室について

レーザーは、発明から現在までの60年間の間に驚異的な技術的發展を遂げ、情報通信、情報処理、ディスプレイ、レーザー加工、量子技術など、現代社会を支える基盤技術となっています。小西研究室では、最先端の微細加工技術で作製するナノおよびマイクロスケールの超微細な人工構造と光との相互作用によって生じる新たな物理現象を探索し、レーザーを含む光の制御技術に新たな展開をもたらすことを目指しています。このような微細構造を実現するレーザー加工技術も研究対象とし、光物性物理学に基づいて、「なぜ光でもものは壊れるのか」という、レーザー加工の学理を探究するとともに、最先端のレーザーを駆使した微細三次元構造作製のための新手法の開発も進めています。

これらの研究は、実際の産業界の課題解決に直結することも多く、国内外の研究室や企業とも積極的に共同研究を進めています。

## 2 最近の研究テーマ

### 人工ナノ構造の光物理学の探求と光制御への応用

我々は現在、光の波長よりもはるかに小さなナノスケールの構造を、金属や半導体で自在に作製する手法を手にかけています。このような光の波長よりも小さな人工ナノ構造は、新たな物理現象の発現の場となるとともに、人が設計したナノ構造の「形」で光との相互作用を自在に操作する新しい光制御を可能とし、メタマテリアルやメタサーフェスと呼ばれています。我々は、このような人工微細構造における新現象の探索とそのメカニズム解明および応用を進めています。最近、波長が200 nm以下の真空紫外領域(図1)や、周波数1THz近傍のテラヘルツ領域など、制御手法の開発が求められる周波数領域を研究対象としています。

### レーザーによるマイクロ三次元構造の創成

近年のレーザー技術の進歩による高強度かつ高安定な超短パルスレーザーを用いて、単に物体の穴あけや切断を行うのみならず、他の方法では作製が困難なミクロンオーダーの微細3次元構造を作製することが可能になってきています。このようにして作製した構造は、ミリ波、テラヘルツ波等の電磁波よりも小さいため、新たな電磁波制御

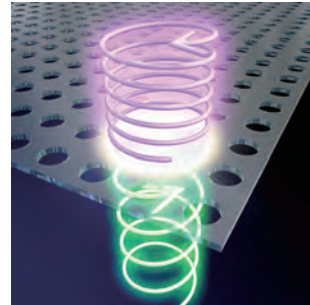


図1: 人工ナノ構造からの真空紫外円偏光発生

のための機能性材料として活用できます。本研究では、このようなレーザーを用いた3次元構造作製技術の開発を進め、電波天文学や、次世代無線技術など、様々な分野への応用を進めています。

### レーザー加工の原理解明

物質に対して強いレーザー光を当てて生じるレーザー加工は現在の産業を支える重要な基盤技術となっています。一方、このような超短パルスレーザーでなぜ物質の破壊が生じるのか、その原理についてはいまだに未解明な点が多くあります。その問いに答えるべく、最先端の光制御技術と計測手法(図2)を開発し、それらを駆使した研究を進めています。本研究によって、光と物質の非線形相互作用の極限であるレーザーによる物質破壊メカニズムの解明と、それによってレーザー加工技術のさらなる進化につなげていくことを目指します。

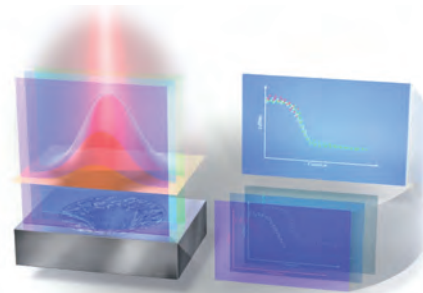


図2: フェムト秒レーザー加工原理解明に向けた新技術の創出

小西研HP: <https://www.kkns.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/>

# 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

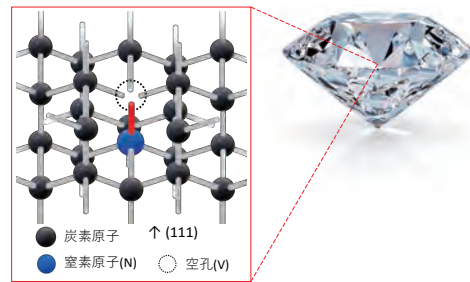


図 ダイヤモンド結晶とその内部に存在する NV 中心の概念図。

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。

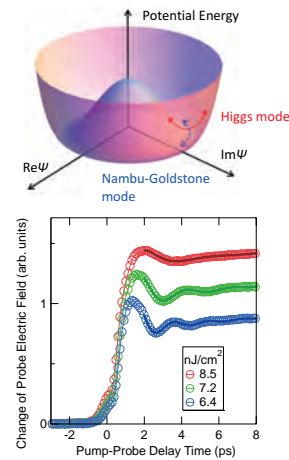
固体中では多数の電子が相互作用することによって、量子力学効果が巨視的なスケールで現れることがある。超伝導はその代表例で、一個の電子の運動を考えている限りは予想もつかない面白い現象が発現する。当研究室では、レーザー光を用いた最先端光技術を駆使して、光で物質中に巨視的な量子状態を創り出す、或いは自在に制御することを目標として、様々な量子物質の研究を進めている。最近の主なトピックスを以下に挙げる。

## 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強化したり、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。

## はじめに

全ての生物は細胞という基本単位を持っています。さらに細胞の内部にはタンパク質や核酸、脂質分子など様々な生体分子が高濃度で存在しています。このような複雑な環境で生体分子がどのように働いているのかを微視的（ミクロ）な観点で理解することが私たちの研究室の目標です。

## 計算手法と分子モデルの開発

古典力学や統計力学などを基礎とした計算機シミュレーション、特に、分子動力学計算はミクロな観点で様々な分子系のダイナミクスを調べる有力な手法です。しかし、従来の手法は細胞内環境における生体分子ダイナミクスと機能の関係を調べるには非力であり、より効率的な計算手法と新しい分子モデルの開発が必要でした。私たちは、物理学の基礎理論に基づく計算アルゴリズムやマルチスケール分子モデルなどを開発し、プログラムをスーパーコンピュータなどに最適化することで、従来は困難であった広い時空間の解析を実現しました。さらに、機械学習を組み合わせた効率化やベイズ統計を用いたデータ同化により実験データをシミュレーション中で利用する新しいアプローチも開拓しています。我々の開発した計算手法や分子モデルは GENESIS (<https://mdgenesis.org>) というフリーソフトウェアに導入され、広く公開しています。

## 生体分子の構造・ダイナミクス・機能

タンパク質や核酸などの立体構造はこれまで X 線結晶構造解析や NMR、電子顕微鏡などの実験によって決定されてきました。近年、AlphaFold に代表される機械学習アルゴリズムが急速に発展し、高い精度での立体構造予測が可能になりました。しかし、細胞内環境における生体分子の機能を理解するためにはその立体構造だけではなく、その柔らかい動き（ダイナミクス）や他の分子との相互作用に関する情報も必要です。これらを機械学習で予測する研究も発展していますが、まだまだ基礎となるデータが不足しているため、分子動力学シミュレーションとともに活用することが重要です。私たちはこれまで、ポンプやチャネルなどの膜

タンパク質、ATP 加水分解によって駆動される分子モーター、新型コロナウイルス表面に存在するスパイクタンパク質などに関するシミュレーションを行い、実験だけではわからない多く知見を得ることができました。さらに一分子計測などの最先端の実験と連携することで生体分子の機能に関係する分子機構を解明することができます。

## 細胞内環境における分子間相互作用

細胞内部には核や小胞体、ゴルジ体などのオルガネラが存在することは古くから知られています。しかし、近年、細胞内分子混雑環境において液液相分離と呼ばれる現象が発見されました。これにより、天然変性タンパク質や RNA を多く含む膜のないオルガネラという流動性に富んだ構造体が形成・消滅を繰り返しているのです。この構造体は凝縮体や液滴とも呼ばれ、シグナル伝達などの多数のタンパク質が関わる反応が生じるプラットフォームとして働いていることや、パーキンソン病などの神経変性疾患に至る凝集体形成の前駆体である可能性などが議論されています。私たちは独自の計算手法を用いて「富岳」などのスーパーコンピュータ上でシミュレーションを行い、液滴の形成と消滅の過程に関する新たなメカニズムの解明に貢献しています。

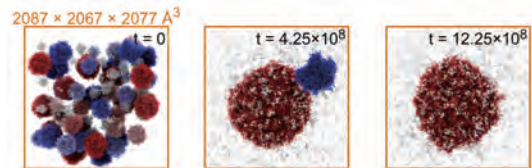


図. 液滴形成の分子動力学シミュレーション

## おわりに

計算科学を用いた生物物理学研究の面白さは、新しいアイデアに基づく研究が従来は困難であった課題を一気に解決できる点です。タンパク質立体構造が機械学習によって高精度で予測可能になったことはわかりやすい例の一つです。私たちはこれからも新しい計算手法や分子モデルを開発し、生命の謎に迫っていきたいと思います。

# 鈴木研究室

鈴木 大介准教授 北村 徳隆助教

当研究室は原子核物理（実験）の研究室です。地上には存在しない短寿命の放射性同位体（Radioactive Isotope; RI）に注目し、先端加速器施設においてRIビームを用いた実験を進めています。原子核における創発現象、中性子星内部構造、宇宙での元素合成機構など、極微から宇宙へと広がる現代核物理の課題に取り組んでいます。

## 1 研究の背景

原子核物理は、強い相互作用に支配される量子多体系を探究する学問分野です。本研究室が対象とする原子核・核物質は、陽子と中性子（総称して核子）からなる量子多体系です。これらは  $ud$  クォークのみが関与するため一見シンプルな系に見えますが、実際には核力や多体相関が複雑に絡み合う量子多体問題であることが知られています。量子色力学（QCD）から直接その性質を導くことはいまだ困難であり、原子核の構造やダイナミクスの多くは未解明のまま残されています。

この研究を大きく発展させたのが、重イオンRIビーム施設です。光速の約10~70%まで加速したRIビームを用いることで、地上には存在しない超短寿命の原子核の性質を量子散乱によって調べることができます。特に、世界初の第三世代施設である理化学研究所RIビームファクトリー（RIBF）の稼働により、研究対象は安定核にとどまらず、極端に中性子や陽子の多いエキゾチック原子核や、天体環境における核物質・原子核反応へと大きく広がりました。本研究室では、RIビームを駆使した核分光・核反応実験を通して、量子多体物理から宇宙元素合成に至る幅広いテーマの研究を進めています。

## 2 最近の研究テーマ

【1. エキゾチック原子核の構造】陽子数と中性子数がアンバランスなエキゾチック原子核では、従来の核構造モデルでは説明できない新しい創発現象が現れます。これらの多くは地上に存在しないRIであるため、その性質はほとんど分かっていません。私たちはRIビームを用いた散乱断面積や電磁遷移強度の精密測定により、未知の原子核構造の解明に取り組んでいます。

【2. 核物質と中性子星】原子核を構成する核子が無限に集まった状態は「核物質」と呼ばれます。

その性質は中性子星の内部構造や質量の限界を決定する重要な要素であり、現代核物理と天体物理の共通の重要課題です。私たちはRIビームを用いた重イオン衝突実験や核応答測定を通して、核物質の性質を実験的に調べています。

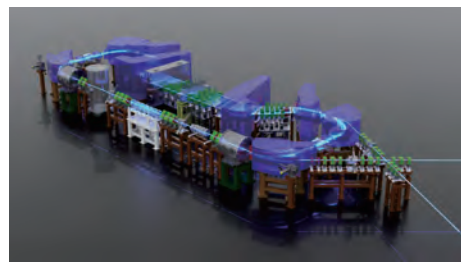
【3. 宇宙における重元素の起源】鉄より重い元素は太陽のような恒星内部の核融合では生成されず、その起源は長年の謎とされています。私たちは特に、近年提唱された、超新星爆発時に発生するニュートリノ風によって駆動される核反応シナリオを検証するため、RIBFのOEDOビームラインを用いた実験研究を進めています。

## 3 国際研究拠点

RIBFで実験を行うほか、フランスやカナダ等の海外施設でも研究を進めています。実験は10~30人程度の機動性の高いチームで行われます。国際共同研究として世界中の研究者と協力しながら進めています。

## 4 今後の展開

RIBFでは次世代プロジェクト「RIBF高度化計画」が進んでいます。本計画では「荷電変換リング」と呼ばれる世界初の革新的加速器技術を実現し、ビーム強度の大幅な向上を目指しています。本研究室も高度化計画に積極的に協力しています。特に次世代RIBFで開拓することが可能となる重元素RIの領域において、量子物理の最難題の一つである核分裂現象に関わる研究を推進したいと考えています。



荷電変換リング (理研仁科センター提供)

研究室ホームページ

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



## 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)

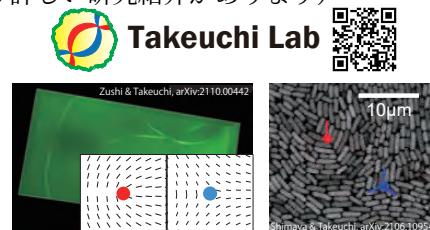


図1 (左)：液晶トポロジカル欠陥の可視化。  
図2 (右)：大腸菌集団に生じるトポロジカル欠陥。

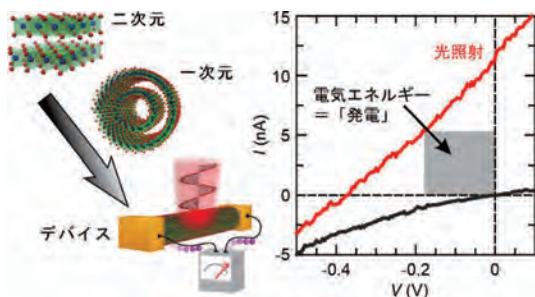
## 1 対称性とナノマテリアル

物質の構造が持つ対称性は、物性を決定づけるパラメーターの一つです。一般的には原子の組み合わせと組成比によって安定な結晶構造が決まるので、例えば三次元の鉄球を変形するのが困難なように、後から対称性だけを変化させることはできません。しかし、二次元のアルミホイルであれば容易に折り曲げられ、丸めて一次元の構造を作ることができます。また、表裏の違いに着目すると、同じ枚数でも重ね方によって違いが生じます。

ただし、アルミホイルのように肉眼で見える大きさの物質では次元性の違いによる量子力学的効果は出現しません。量子物性への影響を調べるためには、 $1\text{ nm} = 10^{-9}\text{ m}$  程度までサイズを小さくする、すなわちナノマテリアルを用いる必要があります。我々の研究室では、二次元を中心としたナノマテリアルの持つ構造制御の自由度を活かし、未知の量子物性を示す材料の探索や新奇な機能性の開拓を目指して研究を行っています。

## 2 最近の研究テーマ

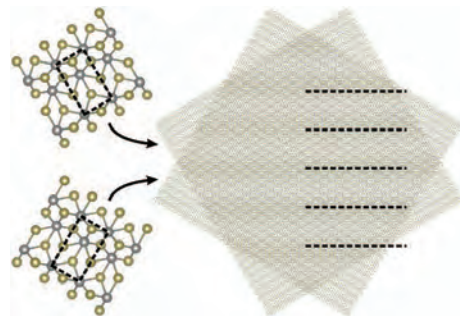
対称性に支配された現象として、例えば光を吸収して電流を発生させる**バルク光起電力効果**があります。これは、光の交流電場から直流電流を生み出す非線形応答の一種です。潤滑剤として身の回りにある  $\text{MoS}_2$  などの遷移金属ダイカルコゲナイドは、二次元のままでは出現しませんが、チューブ状の一次元にすると突如バルク光起電力効果が出現します。将来的な太陽電池への応用を視野に、より高効率な物質の探索や発電メカニズムの解明を進めています。



図：ナノチューブ構造におけるエネルギー変換

また、二次元物質は厚さ方向には未結合手がなく van der Waals 力で重なっているため  $1\text{ nm}$  という厚さでも安定して存在しますが、この特徴を活かすと、格子定数を気にせずに人工的に重ね合わせることができます (**van der Waals 積層**)。レースカーテンを二枚重ねると干渉模様が現れるように、二次元物質を重ねるとモアレ超格子と呼ばれる長周期構造が出現します。局所的な原子配列が長周期で変化しているために現れる構造です。原子配列の違いによる静電ポテンシャルの変化を伴うため、元の二次元物質とは全く異なる量子状態を作り出すことができます。

我々の最近の研究で、特定の条件では原子配列の変化が一方方向のみに制限される**一次元モアレ超格子**が出現することを見出しました。現在、一次元的な周期ポテンシャルが二次元電子状態の量子物性に与える影響の探索を進めています。



図：一次元モアレ超格子

## 3 張研究室について

新しい構造や現象を自分の手で作り出せることがナノマテリアルの強みです。また、対称性を制御する自由度が加わることで物性現象の本質をより詳しく知ることができます。「ナノマテリアル」と一括りにされがちですが、実際には多種多様な物質が存在し発現する量子物性も千差万別です。自分だけの道を作りたい方、モノ作りが好きな方、よかったら一緒に研究しませんか？ここで紹介しきれなかった研究テーマもありますので、張研究室のホームページも是非ご覧ください：

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

# 辻研究室

辻直人 准教授 今井渉平 特任助教

## 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ト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。リフシット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) 量子電磁場と結合した強相関電子系

光と物質を微小な共振器中に閉じ込めると、光の量子的な性質を保ったまま光と物質の相互作用を強くすることができます。このような量子電磁場と物質が強く結合した系では、物質や光の性質が大きく変化することがあります。特に、電子同士の相互作用が強い強相関電子系と量子電磁場が結合した系でどのような現象が起こるかは、まだ十分には理解されていません。そこで量子相転移を起こす強相関電子系と量子電磁場が結合した模型に注目し、量子相転移が起こる領域において光子数が極大になったり極小になったりする特異な振る舞いが現れることを明らかにしました。

## 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。

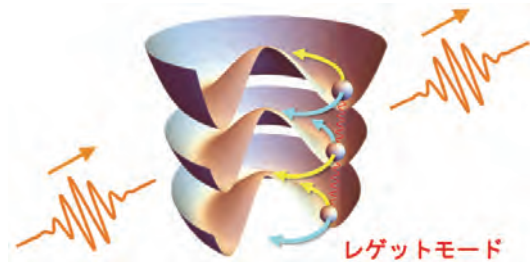


図: マルチバンド超伝導体のレゲットモードを媒介した光応答の概念図。

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

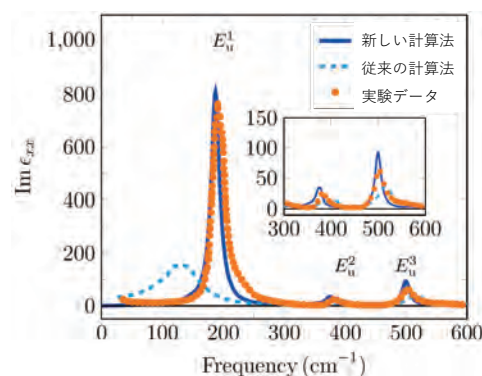
- 電子相関が強い系のための、相関波動関数理論に基づく電子状態計算手法

[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。

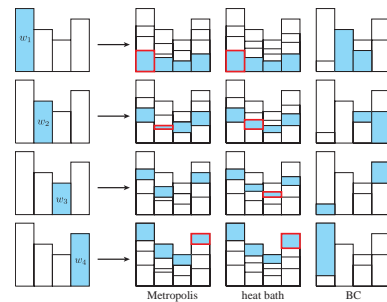
## 2 最近の研究テーマ

### 2.1 強相関係のためのシミュレーション手法

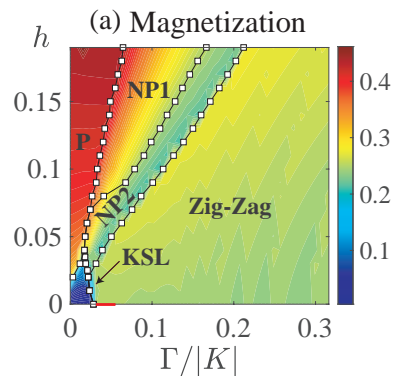
非局所更新法量子モンテカルロ法、連続空間量子モンテカルロ法、長距離相互作用系に対するオーダー  $N$  法、幾何学的カーネル構成法に加え、フラストレートした量子磁性体やフェルミ粒子系のためのテンソルネットワークの手法、テンソルネットワークとモンテカルロ法の融合手法などの開発も進めています。また、強相関量子格子模型シミュレーションのためのオープンソースソフトウェア ALPS、HΦ、TeNeS、計算物質科学シミュレーションパッケージ MateriApps LIVE! など、さまざまなソフトウェアの開発・公開を進めています。

### 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 福島章雄 特任教授 井土宏 特任准教授  
Hanshen Tsai 特任助教 Mingxuan Fu 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
  - 量子スピンの磁気単極子、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。

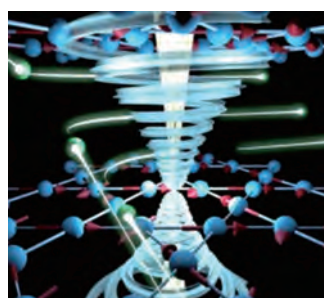


図1  $Mn_3Sn$  の磁気構造とワイル点の概念図

## 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一そのために、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      藤田 真奈美 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量子、つまりハドロン多体系の物性物理学であるといえる。

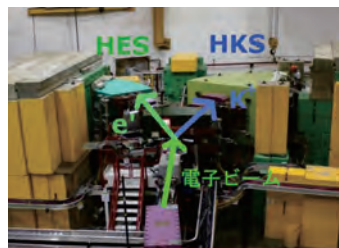
近年の重力波観測の成功や、これまで超新星爆発で生じると考えられてきた重い元素の合成における役割において、宇宙で最も密度の高い物質である中性子星が注目を集めている。重力波観測、中性子星観測望遠鏡などの巨視的観測が長足の進歩を遂げ中性子星の質量や半径に関して研究が進んでいる現状において、中性子星の深部という低温、高密度状態がどのようなメカニズムから生じているのかを解明することが、高密度ハドロン物質の物性を理解するために極めて重要である。様々な条件下で実施できる地上の加速器実験による微視的研究の重要性はますます増している。我々はクォーク多体系であるバリオン、バリオン多体系である(ハイパー)原子核、そして巨視的な核物質である中性子星まで大きなスケールが $10^{19}$ 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、広い質量領域におけるハイパー核分光や三軸非対称原子核の形をラムダ粒子をプローブとして内側から測る実験、そして次節で説明する崩壊 $\pi$ 中間子分光の次世代実験を進めている。



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、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JLabにおいてさらに発展させるための準備をしている。

### (3)実光子を用いたストレンジネス核物理研究

東北大学先端量子ビーム科学研究センター(RARiS)の標識化実光子ビームを用いて、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。

### (4)中間子を用いたストレンジネス核物理研究

大強度陽子加速器施設J-PARCにおける大強度中間子ビームを用いたストレンジネス核物理の研究を進めている。電子ビームを用いた実験と組み合わせ荷電対称性の破れの研究や、ストレンジクォークを2つ含んだハイパー核の研究を進める。

## 3 今後の展開

上記の先端加速器施設におけるストレンジネス核物理研究を展開すると同時に、J-PARCハドロンホール拡張計画で新設す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。

先端加速器研究施設における国際共同実験で活躍を希望する諸君を歓迎する。

<https://www.nex.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>  
[satoshi.nakamura@phys.s.u-tokyo.ac.jp](mailto: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により、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。

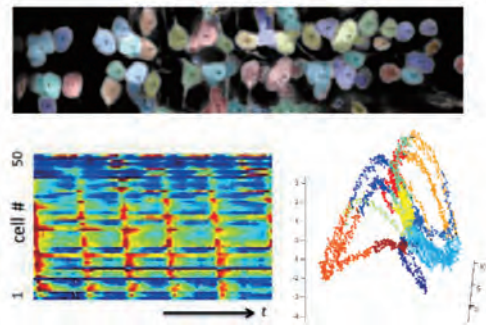


図1：カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞(上)の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する(左下、赤色が活動状態を示す)。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を3次元空間内で可視化することもできる(右下)。

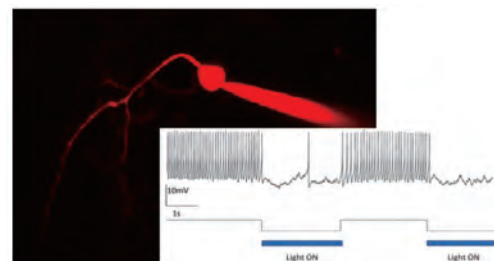


図2：パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射(light ON)により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。

## 1 研究概要

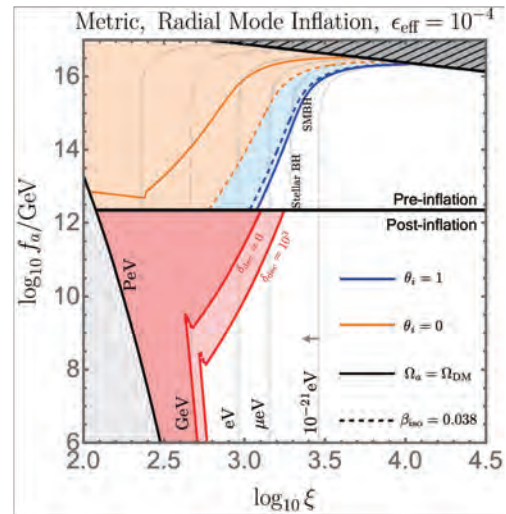
私たちの研究室では、標準模型を超える物理の解明を目指して、素粒子物理の理論的研究を行っています。

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っています。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



図：最近の論文 (arXiv:2411.07713) より転載。暗黒物質の候補として、Axion-like particle (ALP) という軽い粒子が注目されています。本論文では、ALP の質量が重力インスタントン（ワームホール）によって決まるシナリオを考え、その宇宙論的生成機構を調べ、暗黒物質として存在しうることを示しました。

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的研究。
- 宇宙の物質反物質非対称性を説明するシナリオの研究、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 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。

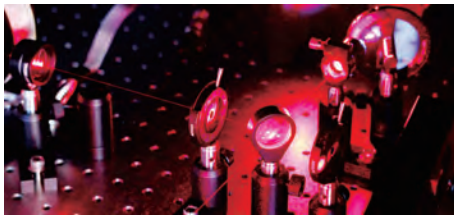


図 1. 光学系実験設備の写真。

## 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)

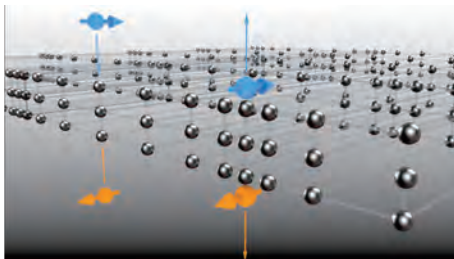


図 2. 原子の運動からスピン流が発生する様子を模式的に表した図。参照: Kawada *et al.*, Sci. Adv. (2021)

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。

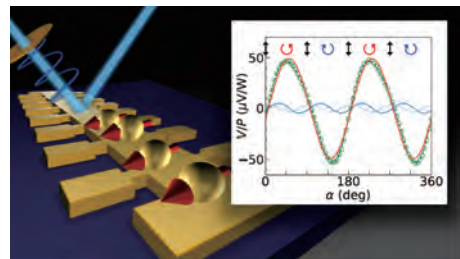


図 3. 円偏光を物質に照射し、スピンの向きが揃った電子の流れが生み出される様子。参照: Hirose *et al.*, Appl. Phys. Lett (2018)

### (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。

## 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。

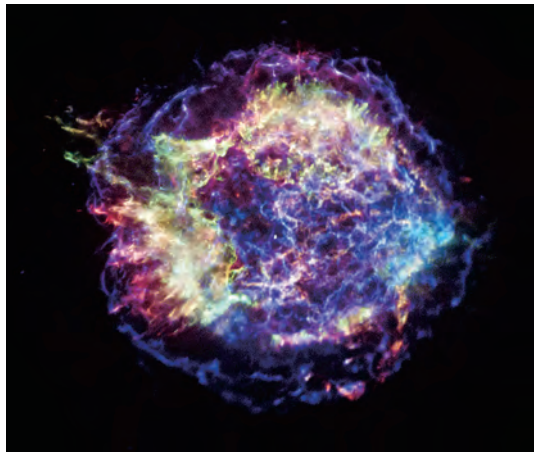


図 1: 「Chandra」衛星で見た超新星残骸 Cassiopeia A の X 線画像。1682 年に爆発した星の残骸が、現在も  $4000 \text{ km s}^{-1}$  で膨張を続けている。放射は主に爆発でまき散らされたシリコンや鉄などからの特性 X 線 (赤、緑) やほぼ光速まで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射 (青) である。

## 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。直近では X 線分光機能が従来の 30 倍優れた XRISM 衛星計画に参加し、2023 年 9 月 7 日に無事打ち上げを成功させた。すでに多数の Nature 論文を含む多くの成果を挙げており、本研究室も Nature 論文責任著者を含む論文を複数出している。

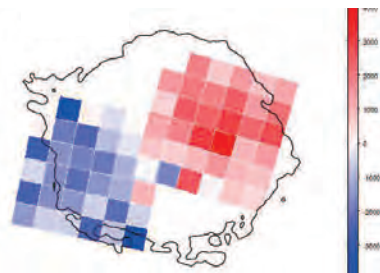


図 2: Cassiopeia A のドップラー偏移マップ。右上は我々から遠ざかる方向に、左下は近づく方向に膨張している (Bamba et al. 2025)。

また XRISM の先の将来を見据え、cipher 計画や GRAMS 実験、superHERO 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。superHERO 実験は硬 X 線帯域での高空間分解能観測を目指す実験で NASA と共同で 2028 年気球実験を目指し、東大内での実験に加え NASA にもたびたび訪問し実験を続けている。これらの計画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。ね。「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。

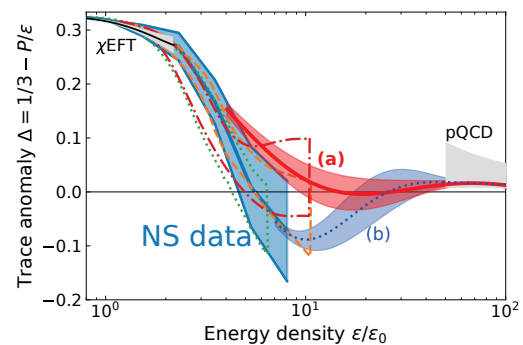
強い相互作用の基礎理論は量子色力学(QCD)と呼ばれ、長年に亘って研究されてきました。トポロジ的に非自明な励起や $\theta$ 真空構造など、今日では物性分野でも常識となっている物理は、半世紀近く前にQCD研究からもたらされたものです。最近では右巻き(スピンと運動量が平行な相関を持つ)、左向き(反平行な相関を持つ)粒子の性質、すなわちカイラル物質の性質が物性分野でも大きな話題となっていますが、カイラル物質およびカイラル量子異常はまさにQCD研究者が半世紀近く取り組んできたテーマです。

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に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。

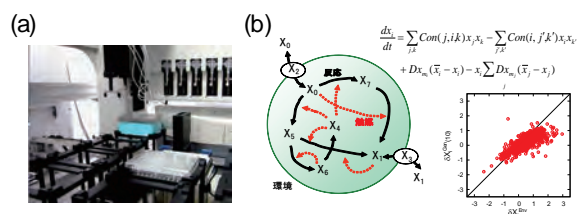


図 (a) ラボオートメーションを用いた進化実験システムの外観. (b) 進化シミュレーションの一例.

# 村尾研究室

村尾美緒 教授 吉田智治 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準位系の状態で記述される「量子ビット」を基本単位とする（図参照）。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として近年注目を集めている。量子情報処理の例としては、量子計算、量子暗号、量子計測等が提案されている。

## 2 当研究室では

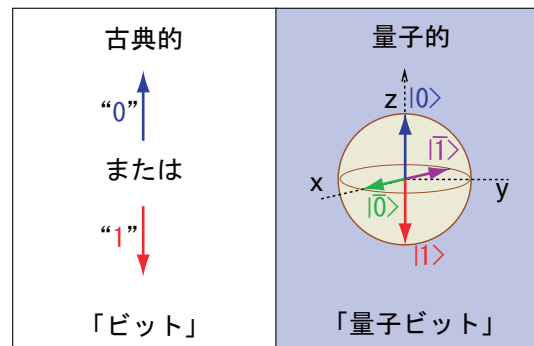
計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメント<sup>注</sup>など量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させていることが特徴である。

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、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計算の定式化と解析、高階量子計算による量子学習・量子制御・量子シミュレーションの量子アルゴリズム構築など、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、特に素粒子標準模型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。標準模型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

素粒子標準模型は、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、標準模型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、むしろ標準模型に内在する「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、素粒子標準模型の枠内での説明は不可能です。これらの謎を解明し、正しい宇宙理論を構築するためにも、標準模型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、素粒子標準模型を超え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。

素粒子標準模型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、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・観測の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使われる量子ビットを用いた暗黒物質探査実験、さらには量子ビットの量子性や量子エラー訂正といった技術を利用した暗黒物質検出の大幅な感度向上の研究を進めています。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考察を行っています。

本研究室で取り組んでいる他の重要なテーマとして、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。特に、ヒッグス粒子や電弱真空の性質を精密に理解し、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、本研究室が力を入れているテーマのひとつです。また、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。特に近年は、真空の崩壊の場の理論に基づく理解に取り組んでいます。

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、アクシオン模型など、素粒子標準模型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>

# 山崎研究室

山崎 雅人 教授      渡邊 真隆 助教

## 1 研究室の概要

本研究室は、素粒子理論の中でも特に**超弦理論**、**量子場の理論**、**量子重力**や関連した**数理物理**を研究しています。

超弦理論や量子場の理論における数理的な研究を得意とし、最先端の数学を駆使して物理学を切り開くと同時に、物理学から新しい数学を生み出してきました。

また、狭い意味での素粒子理論にとらわれることなく、**分野の垣根を超えた研究**に果敢に挑戦し、**幅広い研究テーマ**を扱ってきました。その研究領域は素粒子現象論、格子ゲージ理論、宇宙論、量子情報、統計力学、物性理論に及びます。また純粋数学の研究も行い、東大数理科学研究科の学生も研究室に所属しています。

## 2 最近の研究テーマの例

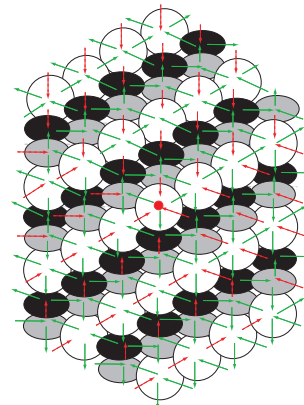
本研究室の研究テーマは多岐にわたりますが、ここではその一部を紹介します。

### 【超対称場の理論の数理】

超弦理論においてDブレーンを考えると超対称場の理論が得られますが、これらの理論から得られる数学的構造を超弦理論の双対性などを絡めて物理的に研究し、新しい物理/数学を生み出します。特に、位相的場の理論の代表例であるチャーン＝サイモンズ理論やその一般化について一連の研究があるほか、超対称場の理論から得られる結び目/多様体の不変量、幾何の数え上げ不変量、可積分系、頂点作用素代数などについて研究してきました。また、場の理論そのものを数学的に定式化しようとする研究や、場の理論をスーパーコンピューターで解こうとする研究も行っています。

### 【量子重力の基本原則と宇宙論的帰結】

超弦理論は量子重力の理論でもあり、ホログラフィーやブラックホールの情報喪失問題、量子重力についての沼地予想などを精密に議論する舞台となっています。また、こうした量子重力効果の手がかりを実験/観測から探る研究も行っており、超弦理論と素粒子現象論/宇宙論の橋渡しを目指しています。



図：量子重力において創発する空間を現した結晶融解の統計力学模型。数学的にはカラビ＝ヤウ空間の数え上げ不変量を与える。

【**一般化された対称性**】近年対称性の概念が拡張されており、高次対称性、部分系対称性、また群からフージョン圏に一般化された圏論的対称性やそれらの組み合わせについて場の理論/格子系の双方において研究を行ってきました。またこうした対称性についての一般論をクオークの閉じ込めや物質の相の分類に応用する研究も行っています。

【**量子シミュレーション、古典／量子機械学習**】現在及び将来の量子コンピューターの応用として、量子場の理論や量子スピン系のシミュレーションやそのためのアルゴリズムを開発し、実機も用いています。また素粒子実験の新物理探索や超弦理論の真空探索のためにGPUを用いて古典／量子機械学習を行っています。

## 3 今後の展開

超弦理論の世界は研究の進展が早く、私自身の将来の研究も未知のところがありますが、物理学の基本原則や根源的な問題にはほとんど変化がないのもまた事実であり、基礎に戻って粘り強く考えることも重要です。新たに研究室に参加される皆さんと一緒に、そのような研究のプロセスを楽しんでいけたらと思っています。

[ホームページ, YouTube]

<https://member.ipmu.jp/masahito.yamazaki/index.shtml>

<https://www.youtube.com/@masahito.yamazaki>

# 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/>

## 1 研究の背景

素粒子の大統一理論が予言する陽子崩壊の探索を当初の主目的として建設されたカミオカンデは、超新星爆発からのニュートリノの観測に成功し、2002年に小柴昌俊先生のノーベル物理学賞受賞へとつながった。さらに、後継実験であるスーパーカミオカンデでニュートリノ振動の決定的証拠を得たことで、2015年には梶田隆章先生がノーベル物理学賞を受賞した。本研究室では、これらの成果をさらに発展させ、素粒子や宇宙の謎を自分たちの手で実験的に解き明かすための研究を推進している。

## 2 最近の研究テーマ

現在は、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、スーパーカミオカンデ(図1)を利用して、素粒子物理・宇宙素粒子物理の実験・観測を行っている。

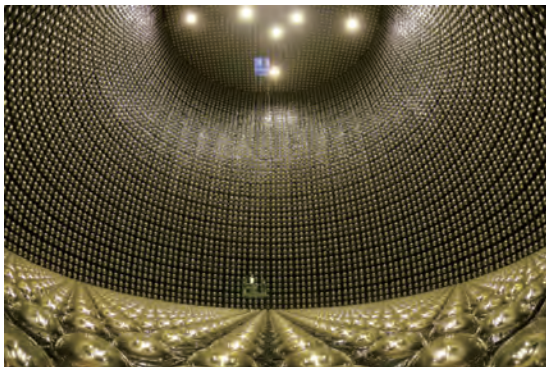


図1. スーパーカミオカンデ検出器の内部。

### 2.1 ニュートリノ振動の研究

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 でミューニュートリノビームを人工的に作り出し、295 km 離れた岐阜県飛騨市のスーパーカミオカンデで観測して、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2)。

すべての素粒子には、同じ質量で電荷などの量子数が正反対の「反粒子」が存在する。宇宙初期には粒子と反粒子は同数生まれたはずだが、現在の宇宙には反粒子はほとんど残っていない。この謎を解く鍵と期待されるのが、ニュートリノにおける CP 対称性の破れである。ニュートリノと反

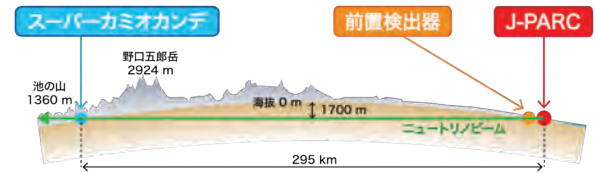


図2. T2K 実験の概要図。J-PARC からのニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動現象を研究する。

ニュートリノそれぞれでニュートリノ振動を測定し、比較することで、CP 対称性が破れているか検証できる。

ニュートリノ振動の精密測定には、生成されたニュートリノビームのエネルギースペクトルや原子核との反応断面積を正確に理解し、系統誤差を抑えることが不可欠である。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、これらの不定性の低減に取り組んでいる。我々の研究室は、この前置検出器を高性能化するアップグレード計画を提案し、主導してきた。新たに設計・設置した、ニュートリノ反応の標的と検出器を兼ねる装置の心臓部とも言える SuperFGD 検出器(図3)を使って、データ収集と解析を進めている。

T2K 実験のこれまでの成果により、CP 対称性の破れを示唆する兆候が現れつつある。今後さらにデータを蓄積し、解析手法を高度化することで、その決定的な発見を目指している。

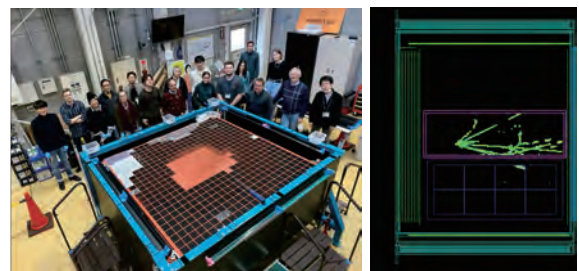


図3. (左) 本研究室の大学院生が世界中の研究者とともに開発・建設した SuperFGD 検出器。(右) SuperFGD 検出器中で記録したニュートリノ反応事象を可視化した図。左側から入射したニュートリノが検出器中で反応し、生成された荷電粒子の飛跡が見えている。

## 2.2 超新星背景ニュートリノの探索

スーパーカミオカンデは稼働開始から 30 年を迎えるが、我々は継続的な改良を重ねることで新たな研究を可能にしてきた。2020 年夏には、レアアースの一種であるガドリニウムを純水に溶解し、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、捕獲後に検出しやすい比較的高エネルギーのガンマ線を放出するため、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、新たな物理の探索が可能となった。

SK-Gd で可能となる多様な研究の中でも、我々はとりわけ、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、宇宙の歴史の中で起こった数多くの超新星爆発によって生成され、それらが蓄積して現在の宇宙に満ちていると考えられているニュートリノである（図 4）。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。これにより、宇宙の星形成の歴史や超新星爆発のメカニズム、さらにはニュートリノの性質そのものを解明する手がかりを得ることを目指している。

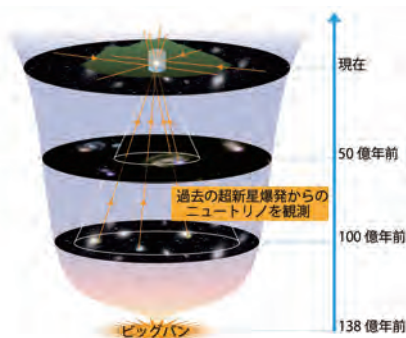


図 4. 超新星背景ニュートリノ。過去の宇宙の歴史の中で起こった超新星爆発により生成されたニュートリノが蓄積し、現在の宇宙に漂っている。

## 2.3 陽子崩壊の探索

初代のカミオカンデを建設した当初の目標は、陽子崩壊の探索であった。もし発見できれば、 $10^{16}$  GeV という超高エネルギーでの大統一理論の直接の証拠となる。これまで蓄積したデータと最新鋭のデータ解析手法を駆使して、今も探索を続けている。

## 2.4 ニュートリノ反応を理解するための原子核実験

ニュートリノ反応の精密測定や、稀な事象の発見のためには、ニュートリノ反応に付随する原子核の反応過程を精密に理解することが重要である。

そこで我々は、ニュートリノ反応で生成される高い励起状態の酸素原子核の生成および脱励起過程の精密測定を目指し、理化学研究所における酸素ビーム実験（図 5）を推進している。数年以内に予定されているデータ取得に向け、現在実験の準備を進めている。

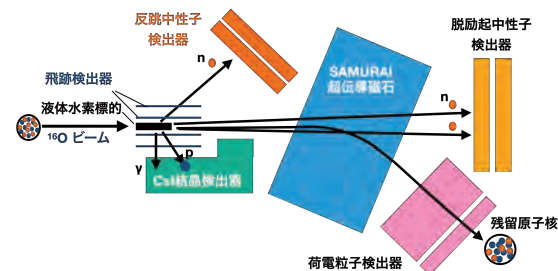


図 5. 酸素原子核実験の模式図。

## 3 今後の展開

スーパーカミオカンデの長年にわたる成果を礎に、さらに飛躍的な進展を生み出すため、我々はさらに一桁大きくより高性能な装置を建設するハイパーカミオカンデ計画を提案し、推進してきた。ハイパーカミオカンデは、今後数十年にわたり、宇宙と素粒子に関する幅広い分野で世界最高水準の研究を切り拓く中核的施設となる。



図 6. 掘削が完了したハイパーカミオカンデ空洞。

我々の研究室は、検出器建設計画全体を取りまとめ、国際共同実験を牽引するとともに、光電子増倍管の性能評価や較正手法の確立、電子回路の試験など、装置の性能を最大限に引き出すための研究開発を進めてきた。2025 年 7 月には、検出器を設置する超巨大地下空洞の掘削が完了し（図 6）、2028 年度の運転開始を目指して建設が本格化している。世界で唯一無二の装置を自らの手で築き上げ、その潜在力を最大限に引き出すことで、新たな時代のサイエンスを切り拓くことに挑戦していく。

## 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。

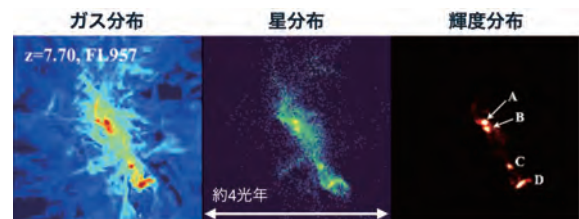


図 1. コンピュータシミュレーションによって得られた宇宙年齢 7 億年の頃の銀河の様子。

## 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。

# 寄田研究室

寄田 浩平 教授 木村 真人 助教

## 1 研究の背景

本研究室は、素粒子物理学における「**新物理の実験的発見**」を目指している。世界最高エネルギーの加速器を駆使し、素粒子標準理論を超える未知粒子や新現象の探索を主軸に置きながら、宇宙の暗黒物質の正体解明にも独自の技術で取り組んでいる。素粒子と宇宙の垣根を超えた探究を柔軟かつ自由な発想で推進しているのが特徴である。

ヒッグス粒子発見を経た今、次に現れる新しい粒子や現象は、確実に標準理論を超える新物理に直結しているものの、その決定的な糸口はまだ掴めていない。これは素粒子と宇宙の新たな描像を切り拓く“世紀の大チャンス”である。その鍵が高エネルギー現象の奥深くに潜むのか、(多種の?)宇宙暗黒物質が握っているのか、いまだ誰も答えを持っていない。この分野は、単に「物質と相互作用の解明」という素粒子の世界に留まることなく「時空構造の根本的な理解」や宇宙の起源から終焉までを包括する究極の自然法則へと踏み込む新たな学問に進化しつつある。まさに未踏の領域が広がる「チャンスの宝庫」といえる。

本研究室は(素粒子・宇宙) × (国内・国外) × (大規模・小規模) という多層的な視点を持ち、各々を深く掘り下げながらも複眼的に研究を推進し、自然界の基本原理を実験的に探求している。

## 2 最近の研究テーマ

(1) **素粒子実験の王道：ATLAS/LHC 実験**  
欧州 CERN における大型ハドロン加速器 (LHC) の衝突に設置された ATLAS 実験は、世界最高エネルギーの陽子・陽子コライダー実験である (図 1)。

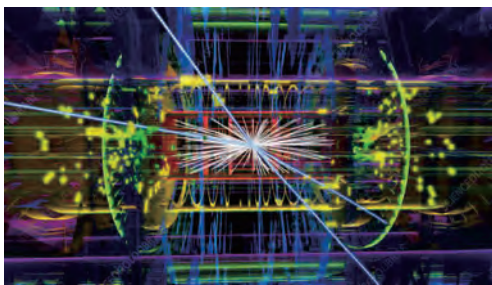


図 1：ATLAS/LHC 実験の事象例 (©CERN)

ヒッグスセクターの詳細解明、電弱対称性の破れやテラスケールに潜む新物理の探索を大統計データを駆使して行っている。特に実験の肝である大量に生成される飛跡の検出とその専門技術を用いた新しい探索空間の開拓を通じて、未知の物理現象の発見を主眼に置いて推進している。

### (2) 独自技術で迫る宇宙暗黒物質の探索

学生主体の独自技術で作った液体アルゴン TPC 検出器を気球搭載し、宇宙空間の暗黒物質の反応から生成される宇宙線反重陽子を世界初観測することを目指した実験を展開している。2023 年度には JAXA における気球工学試験に成功、2024 年度には J-PARC の反陽子ビーム照射試験 (図 2) を行うなど、着々と「宇宙暗黒物質の発見」に向けた研究を推進している。

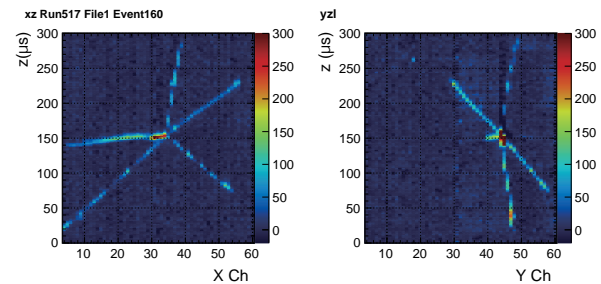


図 2：反陽子と液体アルゴンの反応@ J-PARC

### (3) 先端技術を用いた新規性の高い開拓研究

加速器実験や宇宙線観測を深化させるべく、先端深層学習を駆使した粒子識別、(量子)アニーリング技術を活用した飛跡検出、さらには次世代加速器として注目されているミュオンコライダーの技術検討や物理解析の研究も推進している。

## 3 今後の展開

LHC 実験は増強され、高輝度 LHC として 2030 年前半からさらにパワフルになって稼働する。ここでの最前線での素粒子研究はもちろん、さらに将来を見据えた次世代コライダー実験の構想を、既存の論理に捕らわれない自由な発想で探求し、その実現に向けた展開を図る。同時に宇宙暗黒物質探索や先端技術の開拓も行う。究極的には人類全体の自然観の地平線をさらに押し広げ、新たな問いに挑むための知の道を切り拓きたいと考えている。

## 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

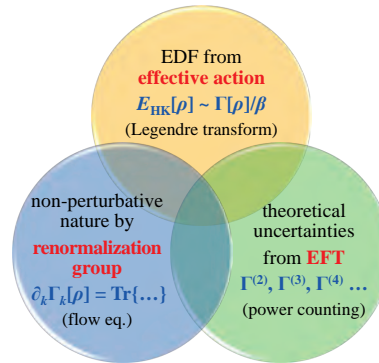
### Consistent nuclear database for astrophysical nucleosynthesis study

- 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.

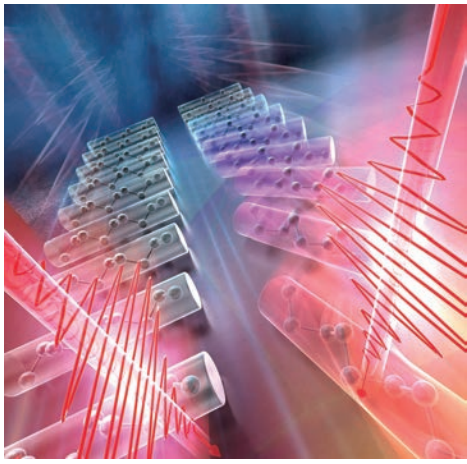
### A long-term dream: Microscopic understanding of quantum many-body tunneling

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.

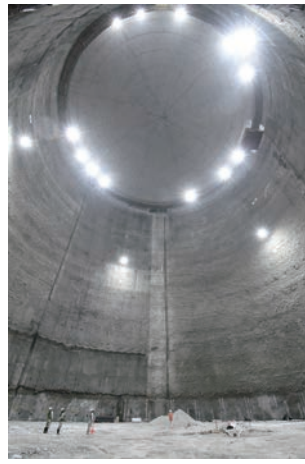
*Will modern QFT help? Will machine learning and quantum computing help?* These are questions for young students with dreams.







ピコ秒のパルスレーザーを使って、テルル (Te) 結晶の螺旋軸 (異方性軸) の向きを制御する模式図。パルスレーザーの偏光と直交する方向に螺旋軸の向きが揃うことが明らかになった。光を使って結晶の異方性を自在に制御できるため、メタレンズ作製などに応用できることが期待される。(物理学科 林研究室)



掘削が完了したハイパーカミオカンデの空洞。スーパーカミオカンデの約8倍の有効体積を誇る次世代の宇宙・素粒子実験施設。2028年の観測開始を目指し、建設が進められている。写真提供：東京大学宇宙線研究所・神岡宇宙素粒子研究施設。(物理学科横山・中島研究室)

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/>

