

東京大学理学部

物理学科

進学案内資料

PHYSICS

2022



物理学科への招待

物理学専攻長、物理学科長 小形 正男

物理学を一生の仕事として何が一番うれしいかという点、すべてのことを原理原則に戻って自分の力で考えることができるという点です。もちろん、途中で完全には分からないところ、近似を用いなければならぬところもありますが、基本的にはこれまで先人が築き上げてきた巨大な学問体系に、自分なりの小さいかもしれませんが新しい一歩を付け加えるところに喜びがあります。

物理学は全ての自然科学の基盤であると同時に、自然科学の最先端にあって現在でもダイナミックに変化し続けています。20世紀には物質の成り立ちを探る原子核物理学や素粒子物理学が発展し、物質の構成要素が原子、原子核、素粒子と順次明らかになりました。磁性や電気伝導・超伝導のように、原子や電子が凝縮することで現れる性質を研究する物性物理学も生まれました。これらは半導体や磁気デバイス、レーザー技術と光通信、太陽光発電や蓄電池、医療用MRI、原子力利用など、現代社会を支える様々な産業技術につながっています。さらに20世紀末から今世紀にかけて開発された様々な実験・観測装置は、物理学に新たな展開をもたらしました。たとえば走査プローブ顕微鏡は物質表面の不均一な構造を、ハッブル宇宙望遠鏡はダークマターの存在を明らかにし、カミオカンデ、スーパーカミオカンデによってニュートリノ天文学の幕が開きました。アインシュタインの最後の宿題と言われた重力波もついに検出されました。最先端の物性計測と理論解析から、次元性やトポロジーで物質の性質が決定的に変わることも明らかになりました。非平衡物理、生物物理、量子情報、AIの利用なども大きく進展しています。物理学は今後も私たちの自然観をより豊かにし、未来社会を切り開く原動力となると考えています。

理学部物理学科ではこれまでの学問体系である量子力学、熱力学・統計力学、相対性理論、固体物理学等を学びますが、4年生の研究室配属や大学院共通講義では最先端の研究に触れて実践することができます。卒業生の多くは研究者を目指しますが、社会に出て物理として学んだ原理原則に立ち戻って問題を理解し解決するという能力を活かしている人も多くいます。

理学部物理学科には約40名の教授・准教授・講師が在籍しています。また大学院の物理学専攻は物理学科教員のほか、物性研究所、宇宙線研究所、カブリ数物連携宇宙研究機構など14の学内組織、さらには外部機関である高エネルギー加速器研究機構（KEK）、理化学研究所、宇宙科学研究所の教員も含めて、講師以上の教員数が130名を超える、世界でも最大規模の物理学の教育・研究拠点です。興味を持てる研究分野が、その中できっと見つかるはず。自然界の成り立ちや仕組みを理解したいという好奇心と探求心にあふれた方、曇りのない目と柔軟な発想で自然科学の新しい地平を切り拓きたい方、あるいは社会の課題解決に物理学を役立てたい方を、私たちは心から歓迎します。

東京大学理学部物理学科 教員一覧

氏名	専攻分野	研究内容
浅井祥仁	素粒子物理学実験	(1)世界最高エネルギー・LHC加速器を用いたアトラス実験において、標準理論を超えた新しい素粒子物理学を切り拓く研究:物質の質量の起源を担うヒッグス粒子の発見や、超対称性粒子の発見に向けた研究を行っている。ATLASグループの超対称性研究の責任者 (2)ボジトロニウムなどを用いた非加速器、小実験を通して、QEDの精密検証やAxionやDark Energyなど新しい素粒子現象の探索を行う。
蘆田祐人	物性理論・量子物理学	量子多体物理と量子光学の境界領域における理論的研究。
安東正樹	重力波物理学・相対論実験	宇宙を見る新しい目として重力波天文学の発展を目指す。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講師とともに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、これを用いて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、神経細胞内の物質輸送の分子機構の研究を通じて、細胞内のタンパク質分子重合体である微小管が構造相転移により輸送を制御していることを示してきました。また最近では、非平衡統計力学の揺らぎの定理を応用することで、細胞内での力学計測が進んでいます。このような物理学的なアプローチを通じて、生命とは何かという問いに迫りたいと考えています。
岡本 徹	物性物理学	低次元電子系を中心とした物性実験。液体ヘリウム温度から希釈冷凍機を用いた極低温にいたる温度領域において、半導体二次元電子系や金属単原子層膜を対象に、量子ホール効果や超伝導をはじめとする量子現象の解明や新奇現象の探索を行っている。特に強磁場中の電気伝導特性や走査トンネル顕微鏡を用いた電子状態の観察などに興味をもっている。
小形正男	物性理論	物性理論:凝縮系とくに量子現象が顕著に現れる多電子系の理論。強い相関のある電子系、高温超伝導の理論、磁性、有機伝導体などの低次元伝導体、メソスコピック系、軌道・スピン・電荷の複合した物質、従来と異なった新しい超伝導現象など。場の理論的手法、厳密解、くりこみ群、変分法、計算機シミュレーションなどの手法を用いる。
桂 法称	物性理論、統計力学	[物性理論] 相関の強い多体系(電子系, ボゾン系, スピン系, ...)における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性および新奇現象の理論的研究。平均場近似やスピン波理論などの従来の手法に加えて、場の理論や数理物理学的手法、数値的対角化などを組み合わせて多角的にアプローチする。 [統計力学] 古典・量子統計力学における可解模型の代数構造の研究、およびその量子情報・物性への応用。非線形現象・フラクタルなどの数理構造の解明。
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。
北川健太郎	物性物理学	固体中の電子が織りなす磁性や超伝導の新しい秩序形態の発見を目指している。アプローチとして新しい無機化合物結晶を探しだす他、最先端の複合極限環境下実験手法で物性を制御し新量子相を発現させている。後者では、極低温・超高压・強磁場下における精密な実験(磁場方向制御のマクロ及び核磁気共鳴測定)により固体中の磁性不安定点・量子臨界点近傍の物性を電子スピンの秩序構造とゆらぎの両面から明らかにした上で開拓していく。
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。
五神 真	光量子物理学	量子効果と多体効果に起因する新奇物質相の発現や非自明な光学現象を、物質科学と光科学の両面から追求する研究を主題とする。ミケルピン領域に至る低温技術と、遠赤外から軟X線にわたるコヒーレント光の発生と分光技術、ナノ加工技術を駆使して進めている。(1)励起子や電子正孔系の量子凝縮相と巨視的量子現象の解明 (2)レーザー加工を始めとする、光と物質の相互作用に起因する非平衡現象の学理構築 (3)人工ナノ・マイクロ構造を用いた光波制御 (4)光電子分光を用いた半導体光励起状態の解明

氏名	専攻分野	研究内容
小林研介	物性物理学	微細加工技術によって半導体や金属、超伝導体や強磁性体などを数ミクロンあるいはそれ以下のサイズの微小な素子にすると、バルクとは異なった性質が出現する。このような微小系で発現する物理現象を扱う分野をメソスコピック物理と呼ぶ。この分野の最大の特長は、量子現象を直接観測し制御できる点にある。私たちはメソスコピック素子における様々な現象、中でも、量子多体効果や非平衡現象に注目して研究を行っている。特に、高精度かつ定量的に量子輸送過程を観測・制御し、これまでに不可能であったような実験に挑むと同時に、新現象の発見を目指している。
酒井明人	強相関量子多体系	電子相関の強い多体系には未だ人類が手にしていない量子状態や素励起が数多く潜んでいる。それらを物質合成と低温物性測定を駆使して実験的に研究している。これまで行ってきた研究は、(i)強相関電子系の多極子秩序と重い電子超伝導、(ii)フラストレート磁性金属の量子臨界現象、(iii)ワイル半金属、ノーダルライン半金属、ラッティンジャー半金属におけるベリー位相効果(異常ネルンスト効果や異常ホール伝導率)等である。
酒井広文	最先端レーザー技術 を駆使した原子分子 物理学実験	最先端レーザー技術を駆使した原子分子物理学実験。(1)高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御とその応用、(2)非摂動的な高次非線形光学過程(多光子イオン化や高次高調波発生など)に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超高速現象、(3)軟X線領域の単一アト秒パルス発生とその偏光制御、及び原子分子中の電子の超高速ダイナミクスの制御への応用、(4)X線自由電子レーザー光を用いた分子構造とその超高速ダイナミクスの観測、(5)整形されたフェムト秒レーザーパルスによる原子分子中の量子過程制御。
島野 亮	光物性物理	テラヘルツ分光、レーザー分光を主な手法とする固体量子物性の研究。エキシトン、マグノン等の固体内素励起の観測による電子・スピン系の相転移ダイナミクスの解明や、光による多体電子系の量子相制御を目指している。具体的には、半導体の電子正孔系の絶縁体金属転移及び量子凝縮相の研究、低次元量子液体における磁気光学効果、超伝導体の光による相制御及び秩序変数の時空間ダイナミクスの観測、時間空間反転対称性が破れた系で量子効果により発現する特異な電気磁気光学の研究、非摂動論領域における光と物質との相互作用の解明など。
須藤 靖	宇宙物理学・太陽系 外惑星	宇宙物理学と太陽系外惑星に関する理論的および観測的研究。具体的な研究テーマは、多波長観測データをもとにした銀河団モデルの構築、ダークマターハローの非球対称性の統計的モデル、重力レンズ天文学、広域銀河探索によるダークエネルギーの性質の解明、銀河系ダスト減光地図の精密検証、スタッキング解析による遠方銀河の性質の特定、軟X線分光観測を用いたダークバリオン探索、太陽系外惑星系の角運動量の起源と進化、多重惑星系の力学進化。
高木英典	物性物理	固体、特に遷移金属酸化物中の絡み合う電子(相関電子)が創成するエキゾチックな量子凝縮相を現実の物質の中に探索・実現する。同時に相形成の物理を解明する。現在、高温超伝導、量子スピン液体、非自明なスピン・電荷秩序、トポロジカル絶縁体、などに具体的興味がある。舞台となる物質を自ら開拓すると同時に、電子輸送現象、熱物性、量子ビーム回折・散乱などのプローブを駆使して、ナノの世界での相関電子の静的・動的自己組織化構造を明らかにする。
竹内一将	非平衡物理学、実験 統計力学、ソフトマ ター、生物物理学	大自由度の非平衡現象を律する物理法則の理解を目指して、液晶、粉体などのソフトマターや、バクテリアなど微生物の集団を用いた実験研究を展開している。液晶実験では、乱流に伴う非平衡ゆらぎの普遍的統計法則や、位相欠陥ダイナミクスを主に研究している。生物実験は、微小流体デバイス等で実験系をデザインし、微生物集団がいかなる協同現象を示すか、それが物理法則として理解できるか等を調べている。個別の現象の理解はもとより、現象に依らない共通の物理法則を抽出すること、そのような俯瞰的な視点から物事を捉えることを目指し、研究室単位では他にも様々な対象を扱っている。
辻 直人	物性理論、非平衡量 子多体系	量子多体系における非平衡現象や非平衡物性、統計力学に興味をもって、物性物理の理論研究をしている。一見すると量子系を非平衡状態にすることで秩序が乱され、外から加えたエネルギーが熱に変わり、量子系の面白い性質が掻き消えてしまうように思われる。ところが近年、非平衡にすることで新たな秩序や物性が発現する例が次々に見つかっている。それらの現象を理解し、非平衡物性の可能性を広げていくことを目標にしている。
辻井直人	プラズマ物理学	核融合プラズマにおける波動物理。特に数値計算を用いた波動・粒子相互作用解析、高温プラズマの内部状態を診断するための計測器開発。江尻教授とともに相キャンパスのTST-2球状トカマクを用いた基礎プラズマ物理の実験的研究を行っている。また、QST(JT-60SA)、NIFS、京大(LATE)、九大(QUEST)と波動物理に関する共同研究を行っている。
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解明、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検証を目指します。また、建設が始まったハイパーカミオカンデにおける観測に向けた研究も行っています。

氏名	専攻分野	研究内容
中辻 知	量子物性・スピントロニクス	物性研究の大きな潮流を先導するのは、新しい概念の創造であり、それを具現する量子物質の発見です。この原動力となっているのが、理論的な洞察に基づいた物質探索とその合成であり、世界最高精度の物性測定技術です。私達の研究室では、こうした独自の量子物質とそのデバイス構造をデザインし、様々な環境での精密な物性及びスピントロニクス測定を自ら行うことで、新しい物理現象とその背後にある物理法則の解明を進めています。具体的には、トポロジカル量子物性、ワイル半金属、超伝導、量子スピン液体、反強磁性スピントロニクス、エネルギーハーベスティングなどの幅広い研究課題を研究室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、ストレンジジョークを含む量子多体系であるハイパー原子核の研究を推進している。主な研究拠点は1) 米国ジェファーソン研究所(JLab)、2) ドイツマインツ大学(MAMI)、3) 東北大学電子光学研究センター(ELPH)というストレンジジョ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において次世代プロジェクトとして準備が進んでいる高分解能高強度ビームライン(HIHR)における次世代の π 中間子ビームを用いたハイパー核実験を主導している。
能瀬聡直	生物物理学	脳神経系の生物物理。神経回路の作動原理を神経配線や活動様式に基づき細胞レベルで理解することを目標とし、モデル動物を用いた研究を行う。光制御による神経活動操作、カルシウムイメージングやパッチクランプ法による神経活動測定、コネクトーム解析(電子顕微鏡画像再構築による神経配線解析)などを総合的に適用することで、神経細胞間の入出力関係を実験的に明らかにし、神経回路による情報処理の仕組みを探る。
長谷川修司	表面物理学	半導体、金属、トポロジカル絶縁体などの結晶表面や、その上に形成される原子層、原子鎖やクラスターなどのナノメータスケール構造体について、原子配列、電子/スピン物性、機能特性などを多角的に研究する。具体的には電子バンド状態、電子・スピン輸送特性、光学応答、相転移などを、電子回折・顕微鏡、走査トンネル顕微鏡・分光法、光電子分光法、微視的4端子プローブ法、分子線エピタキシー法、集束イオンビーム加工法などの実験手法を駆使して研究する。1原子層の超伝導やキャリアの後方散乱の抑制などを最近発見した。
濱口幸一	素粒子理論	素粒子の標準理論のエネルギースケールを超えたところ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、超対称性理論を中心とした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。最新の素粒子実験や宇宙観測の結果にも注目して理論的研究に還元していきたいと考えています。
林 将光	物性物理	物質中の電子スピンと光が誘起する様々な現象を探求する「量子スピントロニクス/フォトニクス」に関する研究。スピン軌道相互作用が誘起する新たな物理現象の探索・解明を進め、将来的にスピンや光をコヒーレンスの高い格子振動や超伝導状態などと結合させ、量子技術に展開できる物理を見出す研究を行っている。
馬場 彩	宇宙物理学実験	宇宙は冷たく空っぽの世界に見えるが、実は熱く激しい天体現象が普遍的に存在することが分かってきた。我々はこれら超新星残骸やブラックホールといった激動天体からのX線・ガンマ線を人工衛星搭載検出器で観測し、宇宙の力学的進化・化学進化を探っている。世界各国のX線宇宙衛星の観測した天体データを解析するとともに、日本を主体としたX線宇宙衛星「XRISM」の開発や、超小型衛星を用いた偏光X線撮像計画cipherの立案、宇宙観測最後の窓であるMeVガンマ線観測計画GRAMSの開発などを行っている。
樋口秀男	生物物理学	当研究室では生体モータータンパク質を分子・細胞・個体の3つの階層からアプローチし、各階層の機能メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルを構築する。具体的な研究テーマは、1. 精製モーター1分子の3次元的な運動をA精度で解析し、Aレベルの運動メカニズムの解明を行う。2. 細胞内モーター分子の変位と力を3次元的に測定し、力学状態の時空間的变化を解析する。3. マウス内モーター分子の運動を解析し、個体内細胞の運動を明らかにする。4. 細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する。
福嶋健二	原子核理論	自然界の最も基本的な相互作用のひとつである『強い相互作用』の織り成す物理をさまざまな手法を用いて研究しています。強い相互作用するクォークとグルーオンが、パイ中間子や核子などハドロンを作り、多数のハドロンが集まって我々の身の回りの物質を構成しています。超高温・超高密度・強い外場(磁場・電場・重力場など)の中では、身近な物質からは想像もつかない面白い物性が『強い相互作用』の性質から導かれます。既知の理論から新奇現象を探る理論研究を目指しています。
古澤 力	生物物理学(理論/実験)	生物物理学: 適応・進化・発生・免疫といった多数の要素が関与するダイナミックな生物現象について、理論と実験の両面から解析する。計算機シミュレーション、理論解析、そして構成的生物学実験を統合し、個々の分子の詳細に依存しない普遍的な性質を切り出すことにより、生物システムの状態とその遷移を記述するマクロレベルの状態論の構築を目指す。
松尾 泰	素粒子理論	量子重力、超弦理論、場の量子論、可解な量子系、およびそれに関連する数物理学が主要な研究トピックスである。より具体的な最近のテーマとしては、M理論に現れるブレーンの定式化、それに関連する新しい対称性や幾何学、また、ゲージ理論や低次元可解模型に現れる無限次元対称性などがあげられる。
三尾典克	レーザー応用、光計測	レーザーとその応用に関する研究を進めています。レーザーの発明は1960年で、それ以来、基礎から応用まで大変、幅広く利用されています。また、現代社会を支える基盤技術としても極めて重要で、通信、情報処理、加工などでなくてはならないものとなっています。当研究室は、理学系研究科附属フotonサイエンス研究機構(IPST, http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/)に所属しており、光を使って学術の深化と産業への展開を目指しています。具体的には、レーザー加工など高出力のレーザー光と物質の相互作用やそれにかかわる様々な物理と技術の研究をしています。

氏名	専攻分野	研究内容
村尾美緒	量子情報(理論)	計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、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
山本 智	宇宙物理学、星間化学、分子分光学	国際共同大型ミリ波サブミリ波干渉計ALMAなどの最先端電波望遠鏡を用いて、恒星と惑星系が生まれる現場での物理過程と物質進化を研究している。また、将来の電波観測を支える検出器技術の開拓を進めている。
横山順一	宇宙論・重力波	初期宇宙論と重力波物理学。場の量子論、素粒子物理、一般相対論等の基礎理論を用いて初期宇宙の進化を再現する研究と、宇宙背景放射等の観測データから出発して初期宇宙の物理に還元する研究を並行して行っています。また、KAGRAの稼働にともない、重力波データ解析の基礎研究、また重力波を用いた宇宙論の研究を行っています。
横山将志	素粒子物理学実験	ニュートリノ振動を通じたCP対称性の破れや世代混合などの研究、および陽子崩壊の探索により、素粒子物理の大統一スケールでの物理法則を探る。スーパーカミオカンデや大強度陽子加速器J-PARCを使ったニュートリノ振動の研究や、次世代実験・ハイパーカミオカンデの建設に関わる研究を進めている。
吉田直紀	宇宙物理学	専門は数値宇宙論。大規模なコンピューターシミュレーションを用いて星や銀河、ブラックホールの形成とその共進化を明らかにすることを目指している。暗黒物質の素粒子的性質と宇宙の構造形成とは深く関わっている。様々な理論モデルに対してコンピューターシミュレーションにより定量的な予言を与え、豊富な観測データとの比較によって暗黒物質や暗黒エネルギーの正体に迫る。新たな計算手法の開発や超高速計算に取り組むとともに、機械学習を用いた大規模観測データ解析や超新星検出などデータサイエンスもすすめている。
Haozhao Liang	Nuclear theory	Our research mainly focuses on quantum many-body theories and the relevant interdisciplinary studies in nuclear physics, nuclear astrophysics, and cold-atom physics. Key topics include nuclear density functional theory (DFT), the structure of exotic nuclei, nuclear collective excitations, weak-interaction processes, r-process nucleosynthesis, quantum tunneling, few-body correlations, and so on.

以上 44名

2022 年度 学部時間割

2022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	統計力学Ⅰ	物理学実験Ⅰ		
金	代数学XC	流体力学	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 計算科学概論	統計力学特論	現代物理学入門
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	量子計算科学(S2ターム)	生物物理学特論Ⅱ	化学物理学
	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 連続系アルゴリズム	物理学のための 科学英語特論
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	電子回路論	特別実験Ⅱ 理論演習Ⅱ		
木		固体物理学Ⅲ	特別実験Ⅱ 理論演習Ⅱ		
金	非平衡科学		普遍性生物学	重力波物理学	

2021 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 : 櫻井 博儀

1. 特殊相対性理論
 - 1.1 相対性原理
 - 1.2 ローレンツ変換
 - 1.3 速度の変換
 - 1.4 時空間の幾何学と時空のダイアグラム
 - 1.5 固有時間と時間の遅れ
 - 1.6 ローレンツ収縮
 - 1.7 相対論的エネルギーと運動量
 - 1.8 エネルギーと運動量のローレンツ変換と保存則
2. 電磁気学と特殊相対論
 - 2.1 スカラー・ベクトル・テンソル
 - 2.2 4元ベクトル

- 2.3 連続の方程式と4元電流
 - 2.4 4元ポテンシャルとローレンツゲージ
 - 2.5 一定速度で運動する点電荷がつくる電磁場
 - 2.6 電磁場テンソルと場のローレンツ変換
3. 電磁場内の電荷の運動
 - 3.1 場の中の粒子の運動方程式
 - 3.2 一様な静電場中の運動
 - 3.3 一様な静磁場中の運動
 - 3.4 一様な静電磁場中の運動
 - 3.5 電磁場のラグランジアン
 - 3.6 エネルギーと運動量の保存則
 - 3.7 点電荷の自己エネルギー

1.2 解析力学 : 横山 順一

- 0 力学とは何か
- 1 ニュートンの古典力学
- 2 力学のこれまでとこれから
- 3 ベクトルとスカラー
- 4 仮想仕事の原理・ダランベールの原理
- 5 ラグランジアンへの導出
- 6 運動を解くということの別の見方
- 7 汎関数と変分法
 - 7.1 汎関数
 - 7.2 変分法
 - 7.3 汎関数微分
- 8 最小作用の原理
 - 8.1 作用汎関数
 - 8.2 最小作用の原理
- 9 オイラーラグランジュ方程式の共変性
- 10 拘束条件の下での運動
 - 10.1 拘束条件
 - 10.2 ラグランジュの未定乗数法
 - 10.3 多数の拘束があるとき
- 11 対称性と保存則
 - 11.1 運動の積分
 - 11.2 運動量保存則
 - 11.3 エネルギー保存則
 - 11.4 空間の等方性と角運動量保存則
 - 11.5 ネーターの定理
- 12 ハミルトンの正準方程式
- 13 ルジャンドル変換
- 14 変分法による正準方程式の導出
- 15 正準変換
- 16 ポアソンの括弧式
 - 16.1 時間微分とポアソン括弧式
 - 16.2 ポアソン括弧式の諸性質
 - 16.3 ヤコビの恒等式
 - 16.4 運動の積分とポアソン括弧式
 - 16.5 正準変換に対する不変性
- 17 位相空間とリュウビルの定理
- 18 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
 - 18.1 終点座標の関数としての作用
 - 18.2 ハミルトンヤコビ方程式
- 19 電磁場中の荷電粒子の運動
- 20 断熱不変量
- 21 自然法則はなぜ時間二階微分方程式で表されるか
- 22 大団円 古典力学はなぜ最小作用の原理に従うか

1.3 量子力学 I : 諸井 健夫

1. イントロダクション

1.1 粒子と波

1.2 古典描像から量子描像へ

2. シュレディンガー方程式

2.1 シュレディンガー方程式と波動関数

2.2 確率解釈と物理量の期待値

2.3 不確定性関係

3. 1次元の束縛状態

3.1 1次元の箱に閉じ込められた粒子

3.2 井戸型ポテンシャル

4. 1次元の散乱

4.1 自由粒子の波動関数：平面波

4.2 散乱問題のいくつかの例

5. 量子力学の体系

5.1 エルミート演算子と物理量

5.2 波動関数の空間

5.3 ディラックの記法と演算子を用いた定式化

5.4 正準量子化

6. 調和振動子

6.1 調和振動子の量子論的扱い：演算子法

6.2 調和振動子の量子論的扱い：波動関数

6.3 応用：弦の量子化

1.4 物理実験学 : 山本 智, 北川 健太郎

1. 序論

1.1 現代物理と科学的手法

2. 物理量と単位

2.1 国際単位系 SI

2.2 各種の常用単位系とその変換

3. 誤差論

3.1 実験誤差

3.2 確率統計

4. 計測法

4.1 電磁波の計測

4.2 温度の計測

4.3 距離の計測

4.4 その他の計測

5. 実験の基礎技術

5.1 真空技術

5.2 エレクトロニクス

5.3 X線回折

6. データ解析と可視化

6.1 グラフ作成

6.2 非線形最小自乗法

6.3 逆問題

7. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

1.5 物理数学 I : 濱口 幸一

1. 複素関数論

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

2. 常微分方程式

2.1 定義と分類

2.2 線形微分方程式

2.3 一階微分方程式の解法の例

1.6 物理数学 II : 辻 直人

1. 偏微分方程式

1.1 導入

1.2 線形と非線形

1.3 重ね合わせの原理

1.4 2階の線形偏微分方程式の分類

1.5 境界条件

1.6 波動方程式

2. フーリエ級数

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

1.7 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；Science and Technology
- 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；Questions about the Universe
- 4. パラグラフ・リーディング；関係代名詞の制限用法・非制限用法；The Surprising Science of Our Sun
- 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；Tail of Comet
- 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；Fuel Cells
- 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；Hydrogen for Cars
- 8. 否定形を避けて、肯定形で書く、あいまいな表現をさげ、きっぱりと書く；冠詞；Hurricanes and Global Warming
- 9. 辞書の使い方、参考文献；短い簡潔な文を書く；Global Warming
- 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；What Computers Can Do
- 11. 通じる英語のしゃべり方 2；連結語を使う；Micro-Nano Technology
- 12. 通じる英語のしゃべり方 3；不必要な単語は省く；Nanoscience's Benefits and Risks
- 13. 英語口頭発表での注意点；日本人に多い間違いを直す；Fermat's Last Theorem
- 14. 元素記号・化学用語発音の仕方；実験ノート（研究ノート）の書き方；Scientific Fraud

2 3年生 S セメスター

2.1 電磁気学 II : 島野 亮

1. 電磁場の基本法則
 - 1.1 真空中の Maxwell 方程式
 - 1.2 微視場と巨視場
 - 1.3 分極と磁化
 - 1.4 連続媒体 (物質) 中の Maxwell 方程式
 - 1.5 電磁場とポテンシャル
 - 1.6 電磁場のエネルギー
 - 1.7 電磁場の運動量
 - 1.8 境界面での境界条件
2. 静電場
 - 2.1 静電場の方程式
 - 2.2 境界値問題とグリーン関数の方法
 - 2.3 極座標における境界値問題
 - 2.4 静電ポテンシャルの多重極展開
 - 2.5 誘電体
 - 2.6 静電エネルギー
 - 2.7 電気容量
3. 静磁場と定常電流
 - 3.1 静磁場の方程式とアンペールの法則
 - 3.2 磁性体の境界値問題
 - 3.3 回路のインダクタンス
 - 3.4 準定常電流
4. 電磁波
 - 4.1 真空中と物質中の電磁波
 - 4.2 波動方程式のグリーン関数
 - 4.3 電磁波の伝播
 - 4.4 電磁波の性質
 - 4.5 誘電関数の模型と性質
 - 4.6 導波路
 - 4.7 幾何光学

2.2 量子力学 II : 福嶋 健二

0. 量子力学 I の復習
 1. 対称性・ユニタリー変換・保存則
 2. 角運動量代数・スピン
 3. 角運動量の合成
 4. 磁場中のスピンの運動・Berry 位相
 5. 3次元球対称ポテンシャル中の量子力学
 6. 球面調和関数の性質
 7. 水素原子
 8. 時間に依存しない摂動
 9. 縮退のある場合の Brillouin-Wigner 摂動論
 10. 摂動計算の例 (Stark 効果・正常および異常 Zeeman 効果)
 11. 摂動展開の破綻と Borel 再和
 12. 時間に依存する摂動
 13. 断熱定理
 14. Ritz の変分原理
 15. WKB 近似と Euclid 時空での量子トンネル
 16. WKB 近似の応用: 摂動展開の漸近形と破綻
 17. Wigner 関数
 18. 経路積分法による量子化
 19. 経路積分法による調和振動子の解法
 20. ダイヤグラムによる摂動展開

2.3 現代実験物理学 I : 樋口 秀男, 酒井 明人

1. X 線による試料の同定
X 線の発生、構造解析、元素分析
2. 極限環境技術
真空、低温、磁場
3. 低温測定技術
比熱、磁化、電気抵抗、ホール効果、熱膨張
4. 電子構造及び磁気構造の決定手法
5. レーザー物理学
レーザー光学、画像処理、光学顕微鏡
6. 非平衡系物理学
ブラウン運動、生物の運動、生体分子の X 線構造解析

2.4 計算機実験 I : 藤堂 眞治

1. 実習環境整備

2. 計算機実験の基礎

2.1 数値誤差

2.2 ニュートン法

2.3 二分法

2.4 囲い込み法

2.5 行列演算

2.6 疑似乱数

2.7 複素数

2.8 ライブラリの利用

3. 常微分方程式

3.1 常微分方程式の初期値問題

3.2 Numerov 法

3.3 シンプレクティック積分法

4. 連立一次方程式

4.1 物理に現れる連立一次方程式

4.2 連立一次方程式の直接解法

4.3 連立一次方程式の反復解法

5. 行列の対角化

5.1 固有値問題

5.2 密行列の対角化

5.3 疎行列に対する反復法

5.4 逆反復法

5.5 変分法

5.6 特異値分解・一般化逆行列

5.7 最小二乗法による回帰分析

2.5 量子コンピューター実習：浅井 祥仁, 寺師 弘二

1. 量子コンピュータに触れる

1.1 量子計算の流れ

1.2 量子計算の概念

1.3 プログラミングと実習環境

2. 量子回路を書く

2.1 CHSH 不等式の検証

2.2 量子回路シミュレータ

2.3 回路の実装と実習

3. 量子コンピュータでの並列計算

3.1 さまざまな量子状態を作る

3.2 量子フーリエ変換

3.3 量子ダイナミクスシミュレーション

4. ショアのアルゴリズム

4.1 量子位相推定

4.2 位数を発見する量子回路

4.3 アルゴリズムの実装と実習

5. グローバーのアルゴリズム

5.1 非構造化データの探索

5.2 グローバー探索の量子回路

5.3 アルゴリズムの実装と実習

6. 変分法と変分量子固有値ソルバー

6.1 量子力学における変分法

6.2 変分量子固有値ソルバー法

6.3 変分量子回路を使った実習

7. 量子・古典ハイブリッド機械学習

7.1 機械学習とニューラルネットワーク

7.2 変分量子回路を使った機械学習

7.3 素粒子現象の探索への応用

7.4 アルゴリズムの実装と実習

2.6 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 基本事項

2.2 独立な部分からなる系

2.3 ゆらぎと大数の法則

2.4 連続変数の場合

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？

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 1：理想気体（高温）
 - 8.4 応用 2：表面吸着
- 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

2.7 流体力学：吉田 直紀

- 1. 流体力学の基礎方程式
 - 1.1 流れを表す物理量
 - 1.2 保存則とエネルギー方程式
- 2. 二次元の流れ
 - 2.1 流れ関数と複素ポテンシャル
 - 2.2 解析関数による流れの表現
 - 2.3 渦の運動
- 3. 圧縮性流体
 - 3.1 音波と特性曲線
 - 3.2 準一次元流
 - 3.3 衝撃波
- 4. 粘性流体の力学

- 4.1 ナビエ-ストークス方程式
- 4.2 ポアズイユの法則
- 4.3 乱流の生成
- 5. 波
 - 5.1 重力波と表面張力波
 - 5.2 非線型波動とソリトン
- 6. 流体の不安定性
- 7. プラズマ・電磁流体力学
- 8. ボルツマン方程式と運動論
 - 8.1 速度分布関数と局所熱平衡
 - 8.2 運動量輸送とストレステンソル
 - 8.3 モーメント方程式

3 3年生 A セメスター

3.1 光学：井手口 拓郎, 三尾 典克

- 1. イントロダクション
- 2. 真空中の光の性質
- 3. 等方媒質中の光の伝搬
- 4. 結晶光学
- 5. 回折
- 6. 干渉
- 7. 幾何光学
- 8. レーザー
- 9. ビーム光学
- 10. 光共振器
- 11. 光計測：分光、イメージングなど

3.2 量子力学 III：常行 真司

- 1. 電磁場中の荷電粒子
 - 1.1 電磁場中の古典荷電粒子

- 1.2 電磁場中の荷電粒子の量子力学
- 1.3 一様な磁場中の荷電粒子
- 1.4 Aharonov-Bohm 効果
- 1.5 スピンを持つ粒子と磁場の相互作用
- 2. 散乱問題
 - 2.1 2粒子の散乱
 - 2.2 散乱断面積
 - 2.3 散乱断面積の計算
 - 2.4 散乱状態の波動関数が満たす積分方程式
 - 2.5 Born 近似
 - 2.6 部分波と位相のずれ
 - 2.7 共鳴散乱
 - 2.8 同種粒子の散乱
 - 2.9 Lippmann-Schwinger 方程式 (散乱理論の形式論)
 - 2.10 固体中の電子散乱と擬ポテンシャル
- 3. 多体系の量子力学的扱い

- 3.1 ヘリウム原子
- 3.2 多電子原子
- 3.3 スピン軌道相互作用と微細構造
- 3.4 ボルン-オッペンハイマー近似 (断熱近似)
- 3.5 水素分子
- 3.6 ハートリー・フォック近似
- 4. 第二量子化
 - 4.1 数表示
 - 4.2 フェルミオン系
 - 4.3 ボソン系
 - 4.4 場の演算子
 - 4.5 第二量子化におけるハートリー・フォック近似
- 5. 相対論的量子力学
 - 5.1 Klein-Gordon 方程式
 - 5.2 Dirac 方程式
 - 5.3 Weyl 方程式
 - 5.4 Dirac 方程式の解

3.3 現代実験物理学 II : 日下 暁人, 山本 智

- 1. 実験物理学のための統計・解析手法
 - 確率分布と誤差の伝播
 - 推定量、Fisher 情報量と Cramér-Rao の限界
 - 最尤法
 - 区間推定
 - 時系列データとフーリエ解析
- 2. 宇宙観測における物理量の求め方
 - 距離、質量、温度の導出方法
- 3. 望遠鏡とその仕組み
 - 解像度を決める要因
 - 光・赤外線望遠鏡の仕組み
 - 電波望遠鏡の仕組み
 - 干渉計と開口合成
- 4. 粒子加速器
 - 加速器の歴史
 - 加速器の性能と限界
 - 衝突点検出器
- 5. 粒子・放射線検出器
 - 粒子と物質の相互作用
- 6. 超伝導検出器
 - 超伝導転移端センサー
 - SQUIDs
 - 量子センサーと量子非破壊測定
- 7. 光検出器
 - 光・赤外線検出器
 - フォトダイオード、CCD センサー、CMOS センサー
 - 線赤外線検出器
 - 電波検出器
 - ヘテロダイン検出の理論
 - SIS ミクサ、HEB ミクサ
- 8. 水素原子を巡って
 - 水素様原子の X 線スペクトルとその天体観測
 - 水素原子の超微細構造遷移とその天体観測
 - 水素原子のエネルギー準位と QED
 - 反水素原子の実験室実験
 - 陽子サイズの話

3.4 生物物理学 : 能瀬 聡直, 岡田 康志

- 1. 生物物理学とは
- 2. 遺伝と進化
- 3. 発生
- 4. 生体高分子の構造
- 5. 生体高分子の機能
- 6. 生物物理学研究の実例: 分子モーターの話
- 7. 神経科学概論
- 8. 神経細胞膜の電気的性質 1. 平衡電位と静止電位
- 9. 神経細胞膜の電気的性質 2. 活動電位と H-H 方程式

10. シナプス伝達

11. 神経ネットワークによる情報処理

12. 脳の可塑性と記憶

13. 遺伝子組換え技術、神経イメージング、光による神経活動操作

3.5 物理数学 III : 桂 法称

1. 群と対称操作

- 1.1 群の定義と例
- 1.2 点群と結晶点群

2. 群論の基本概念

- 2.1 部分群
- 2.2 共役類
- 2.3 不変部分群
- 2.4 因子群
- 2.5 準同型と同型

3. 有限群の表現

- 3.1 表現とは?
- 3.2 既約表現
- 3.3 指標
- 3.4 表現論の量子力学への応用

4. 対称群

- 4.1 対称群と交代群
- 4.2 対称群の共役類と既約表現

5. リー群

- 5.1 リー群とは?
- 5.2 行列間の距離
- 5.3 コンパクト線形リー群
- 5.4 リー群からリー代数へ

6. リー代数

- 6.1 リー代数の定義と具体例
- 6.2 リー代数の表現
- 6.3 半単純リー代数
- 6.4 ルートとウェイト

7. $SU(n)$ Hubbard 模型

3.6 固体物理学 I : 岡本 徹

1. 自由電子フェルミ気体 (復習)

- 1.1 電子密度とフェルミエネルギー
- 1.2 状態密度

2. 1次元周期ポテンシャル中の電子

- 2.1 ポテンシャルが小さい場合の近似
- 2.2 ブロッホの定理
- 2.3 エネルギーと波数の関係の表示形式
- 2.4 1本のバンド中の状態数
- 2.5 金属と絶縁体
- 2.6 クローニッヒ・ペニーのモデル

3. 結晶構造

- 3.1 空間格子と単位胞
- 3.2 空間格子の分類
- 3.3 代表的な結晶構造
- 3.4 結晶中の方位や面の表記法
- 3.5 結晶の成り立ち

4. 逆格子

- 4.1 逆格子とは
- 4.2 回折による結晶構造解析

5. 結晶中の電子状態

- 5.1 ブロッホの定理とブリルアン・ゾーン

5.2 ポテンシャルが小さい場合

- 5.3 束縛が強い場合の近似
- 5.4 グラフェンの電子状態
- 5.5 カーボンナノチューブの電子状態

6. 格子振動

- 6.1 格子振動とは
- 6.2 同種原子の1次元格子モデル
- 6.3 2種類の原子からなる1次元格子モデル
- 6.4 3次元格子の振動
- 6.5 フォノンと量子数の熱平均値
- 6.6 格子比熱と Debye の近似

7. 電子の運動

- 7.1 電子の速度
- 7.2 運動方程式
- 7.3 有効質量
- 7.4 磁場中の運動

8. 金属中の伝導電子

- 8.1 比熱
- 8.2 交流電場と伝導電子
- 8.3 電気伝導と散乱機構
- 8.4 ボルツマン方程式と輸送現象

9. 半導体

- 9.1 電子と正孔
- 9.2 不純物ドーピング
- 9.3 p-n 接合

- 9.4 電界効果トランジスタ
- 9.5 ヘテロ接合

3.7 電磁気学 III : 浅井 祥仁

- 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 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
- 6. 電磁波と重力波

3.8 統計力学 II : 小形 正男

- 1. 相転移
 - 1.1 秩序パラメータと対称性の破れ
 - 1.2 二次相転移
 - 1.3 平均場近似
 - 1.4 Landau 理論
 - 1.5 相転移における臨界指数と空間次元

- 1.6 スケーリング理論とくりこみ群のアイデア
- 2. 線形応答理論
 - 2.1 時間に依存しないときの線形応答
 - 2.2 時間に依存するときの線形応答
 - 2.3 具体例：帯磁率、電気伝導度
 - 2.4 輸送現象

3.9 計算機実験 II : 藤堂 眞治

- 1. マルコフ連鎖モンテカルロ
 - 1.1 乱択アルゴリズム
 - 1.2 物理過程のシミュレーション
 - 1.3 疑似乱数・ヒストグラム
 - 1.4 モンテカルロ積分
 - 1.5 多体系の統計力学
 - 1.6 数え上げ
 - 1.7 マルコフ連鎖モンテカルロ
- 2. 偏微分方程式
 - 2.1 偏微分方程式の境界値問題
 - 2.2 偏微分方程式の初期値問題
 - 2.3 有限差分法
 - 2.4 クランク・ニコルソン法
- 3. 多体系の量子力学
 - 3.1 偏微分方程式の初期値問題
 - 3.2 対角化による解法
 - 3.3 横磁場イジング模型

- 3.4 多体量子系の時間発展
- 3.5 量子コンピュータ
- 3.6 疎行列ベクトル積
- 4. 少数多体系・分子動力学
 - 4.1 常微分方程式の初期値問題
 - 4.2 ベルレ法
 - 4.3 シンプレクティック積分法の一般論
 - 4.4 分子動力学法
 - 4.5 長距離ポテンシャルの計算
 - 4.6 ビリアル定理
 - 4.7 温度の制御
- 5. 最適化問題
 - 5.1 最適化問題
 - 5.2 最急降下法と勾配降下法
 - 5.3 共役勾配法
 - 5.4 勾配の計算
 - 5.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法

5.6 量子アニーリングとシミュレーテッドアニーリング

5.7 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
2. 数理基礎 (1)
3. 数理基礎 (2)
4. 回帰と分類 (1)
5. 回帰と分類 (2)
6. ガウス過程 (1)
7. ガウス過程 (2)
8. プログラミング相談会
9. 多層ニューラルネット (1)
10. 多層ニューラルネット (2)
11. 主成分分析と因子分析
12. クラスタ分析
13. 敵対的生成ネットワーク
14. アンサンブル学習

4.2 場の量子論 I：松尾 泰

1. 準備
 - 1.1 自然単位系
 - 1.2 ローレンツ変換
 - 1.3 相対論的古典力学
 - 1.4 第二量子化
2. 相対論的場の方程式
 - 2.1 Klein-Gordon 方程式
 - 2.2 Dirac 方程式
 - 2.3 場のローレンツ変換
3. 対称性と保存則
 - 3.1 Euler-Lagrange 方程式
 - 3.2 ネーターの定理
 - 3.3 例
4. 場の正準量子化
 - 4.1 スカラー場
 - 4.2 Causality と Feynman 伝搬関数
 - 4.3 Dirac 場
 - 4.4 電磁場
5. 相互作用と摂動展開
 - 5.1 相互作用描像と Dyson 展開
 - 5.2 S 行列、Feynman 則、Wick の定理
 - 5.3 崩壊率と散乱断面積
6. 量子補正概論
 - 6.1 ループ振幅
 - 6.2 くりこみ理論

4.3 サブアトムック物理学：横山 将志

1. イントロダクション
2. サブアトムックな世界の歩き方
3. サブアトムックな世界の探り方
4. 反粒子
5. 量子電磁力学 (QED)
6. 弱い相互作用
7. 加速器
8. ストレンジネスと CP 非保存
9. ニュートリノ
10. 原子核とハドロン
11. 電弱統一理論

4.4 計算科学概論：大久保 毅 ほか 6 名

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. 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題
4. 大規模疎行列ソルバー入門
5. 高性能プログラミングと性能測定

4.5 統計力学特論：押川 正毅

1. Phase transitions and spontaneous symmetry breaking
2. Landau-Ginzburg model and scalar field theory
3. Scaling and concept of renormalization group
4. Perturbative renormalization group equa-

4.6 現代物理学入門：Haozhao Liang, 酒井 明人

1. Frontiers of nuclear many-body theories
2. Nuclear density functional theory (DFT)
3. Discussion on nuclear DFT
4. Towards ab initio nuclear DFT
5. Path-integral formalism
6. Functional renormalization group (FRG)
7. FRG and DFT

4.7 一般相対論：須藤 靖

1. 4次元時空とシュワルツシルト計量
 - 1.1 線素と計量
 - 1.2 シュワルツシルト時空の性質
2. 一般相対性原理とその数学的表現
 - 2.1 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
 - 2.2 一般相対論の概念構成
 - 2.3 物理量の表現: ベクトル
 - 2.4 物理量の表現: 双対ベクトル
 - 2.5 物理量の表現: テンソル
 - 2.6 まとめ: 物理量とテンソル
3. 測地線の方程式
 - 3.1 重力場のもとでの粒子の運動方程式
 - 3.2 ニュートン理論との対応
4. 重力場の方程式
 - 4.1 マッハの原理と重力場の方程式
 - 4.2 エネルギー運動量テンソル
 - 4.3 アインシュタイン方程式への道
 - 4.4 ニュートン理論との対応
 - 4.5 宇宙定数

- 6.1 連続体の並列有限要素法解析入門
- 6.2 構造解析アプリケーションによる CAE 実践
7. 格子スピン模型の計算科学

tion and epsilon expansion

5. Large-N expansion
6. Lower critical dimensions and Mermin-Wagner theorem
7. Classical and quantum critical phenomena

8. ベリー位相
9. 局面上の平行移動
10. ベリー位相と量子物性
11. 量子ホール系
12. トポロジカル絶縁体
13. ワイル半金属

- 4.6 変分原理による定式化
5. シュワルツシルト時空とブラックホール
 - 5.1 球対称重力場の計量
 - 5.2 シュワルツシルト解導出の概略
 - 5.3 シュワルツシルト半径と事象の地平線
 - 5.4 シュワルツシルトブラックホールのまわりの質点の運動
 - 5.5 一般相対論の古典的検証
 - 5.6 水星の近日点移動の計算
 - 5.7 光線の曲がり角の計算
 - 5.8 ブラックホール天文学
6. 重力波
 - 6.1 アインシュタイン方程式の弱場近似と重力波
 - 6.2 重力波の平面波解
 - 6.3 重力波の四重極近似解
 - 6.4 重力波によるエネルギー損失率
 - 6.5 連星系からの重力波
 - 6.6 調和振動子からの重力波
 - 6.7 重力波の直接検出

4.8 系外惑星：須藤 靖, 相川 祐理

1. 惑星と恒星
 - 1.1 太陽系から銀河宇宙へ
 - 1.2 宇宙観の広がりとは太陽系外惑星
 - 1.3 太陽系天体の典型的スケール
 - 1.4 惑星の明るさ
 - 1.5 天体の光度と等級
 - 1.6 主系列星のスペクトル型とハビタブルゾーン
2. 物理法則と天体
 - 2.1 天体形成史
 - 2.2 宇宙の階層構造
 - 2.3 物理法則と初期条件
 - 2.4 ガス惑星の質量
 - 2.5 恒星の質量
3. 系外惑星発見史
 - 3.1 系外惑星発見前史
 - 3.2 太陽系外惑星発見の歴史
 - 3.3 ケプラー探査機と系外惑星探査の進展
4. 系外惑星検出法
 - 4.1 系外惑星の直接検出
 - 4.2 ケプラー問題と軌道要素
 - 4.3 系外惑星の間接検出
5. 系外惑星系の統計
 - 5.1 惑星パラメータの分布
 - 5.2 惑星パラメータ間の相関
 - 5.3 惑星の存在率
 - 5.4 ハビタブル惑星の存在率
 - 5.5 多重惑星系
 - 5.6 自転公転角
6. 原始太陽系形成と林モデル
 - 6.1 惑星形成の概略: コア集積モデル
 - 6.2 最小質量太陽系モデル – 林モデル –
7. 原始惑星系円盤
 - 7.1 輻射輸送の基礎事項
 - 7.2 円盤の組成と質量分布
 - 7.3 円盤の温度分布
 - 7.4 質量降着円盤
8. 微惑星仮説
 - 8.1 ダスト粒子の opacity
 - 8.2 ダストの沈殿と合体成長
 - 8.3 Radial Drift
 - 8.4 微惑星形成
 - 8.5 微惑星集積
 - 8.6 ガス惑星形成
9. 円盤観測と惑星系形成理論
 - 9.1 リンゲール空隙構造
 - 9.2 ガス散逸過程
 - 9.3 円盤質量分布と惑星系の多様性

4.9 量子光学：酒井 広文

1. 原子と放射の相互作用
 - 1.1 時間に依存する Schrödinger 方程式
 - 1.2 相互作用ハミルトニアン
 - 1.3 遷移速度
 - 1.4 B 係数の表式
 - 1.5 光学 Bloch 方程式
 - 1.6 Rabi 振動
 - 1.7 放射広がり
 - 1.8 飽和広がり
 - 1.9 放射減衰を伴う Rabi 振動
 - 1.10 衝突広がり
 - 1.11 Doppler 広がり
 - 1.12 合成吸収線の形状
2. 電磁場の量子化
 - 2.1 古典電磁場のポテンシャル論
 - 2.2 Coulomb ゲージ
 - 2.3 自由古典場
 - 2.4 量子力学的調和振動子
 - 2.5 場の量子化
 - 2.6 場の交換の性質
 - 2.7 零点エネルギー
 - 2.8 モード位相演算子
 - 2.9 単一モード個数状態の物理的性質
 - 2.10 コヒーレント光子状態
 - 2.11 単一モードコヒーレント状態の物理的性質
3. 量子化した場と原子との相互作用
 - 3.1 原子の多極モーメント
 - 3.2 多極相互作用ハミルトニアン
 - 3.3 電気双極子近似
 - 3.4 原子ハミルトニアンの第 2 量子化

- 3.5 光子の吸収速度と放出速度
- 4. レーザーの基礎
 - 4.1 光共振器のモード
 - 4.2 光共振器の安定性
 - 4.3 発振条件
 - 4.4 波動方程式に基づくレーザー理論

- 4.5 各種のレーザー
 - 4.5.1 3準位レーザーと4準位レーザー
 - 4.5.2 固体レーザー
 - 4.5.3 気体レーザー
 - 4.5.4 色素レーザー
 - 4.5.5 半導体レーザー

4.10 固体物理学 II : 中辻 知

- 1. 強束縛近似とバンド構造
 - 1.1 Bloch の定理
 - 1.2 強く束縛された電子の近似
 - 1.3 グラフェンと Dirac 方程式
- 2. 幾何学と Berry 位相
 - 2.1 曲面の曲率と平行移動
 - 2.2 量子系への拡張
- 3. 固体中の Berry 位相と電子運動
 - 3.1 磁場中の電子の運動と Aharonov-Bhom 効果
 - 3.2 異常速度と異常ホール効果
 - 3.3 二準位系
 - 3.4 量子ホール効果

- 3.5 Weyl 半金属
- 4. Mott 絶縁体と Hubbard 模型
 - 4.1 Mott 転移
 - 4.2 Hubbard Model
 - 4.3 超交換相互作用
 - 4.4 遷移金属反強磁性体
- 5. 超伝導
 - 5.1 超伝導現象
 - 5.2 第一種超伝導体と第二種超伝導体
 - 5.3 電子と格子振動の相互作用
 - 5.4 Cooper pair

4.11 プラズマ物理学 : 江尻 晶

- 1. 様々なプラズマ
 - 1.1 様々なプラズマ
 - 1.2 プラズマを特徴づける量
 - 1.3 サハの熱電離平衡
 - 1.4 衝突時間
 - 1.5 電気抵抗
 - 1.6 プラズマ中のスケール
 - 1.7 デバイ遮蔽
- 2. 単一粒子の軌道
 - 2.1 サイクロトロン運動、ラーマ運動
 - 2.2 各種のドリフト
 - 2.3 ミラー配位と断熱不変量
 - 2.4 種々の磁場配位と粒子軌道
- 3. 衝突と拡散
 - 3.1 衝突時間
 - 3.2 電気抵抗
 - 3.3 拡散とランダムウォーク
 - 3.4 拡散係数と閉じ込め時間
- 4. 電磁流体としてのプラズマ
 - 4.1 電磁流体方程式

- 4.2 MHD 方程式のまとめ
- 4.3 抵抗の役割と磁力線の凍結
- 4.4 MHD 発電, MHD 加速
- 4.5 磁気再結合
- 5. 平衡と安定性
 - 5.1 プラズマの圧力と磁場の圧力
 - 5.2 円柱プラズマの平衡
 - 5.3 トーラスプラズマの平衡
- 6. 不安定性
 - 6.1 不安定性の分類
 - 6.2 不安定性の例
 - 6.3 交換不安定性の成長率の導出
 - 6.4 トマカクにおける良い曲率、悪い曲率
- 7. プラズマ中の波
 - 7.1 波動の分類と取り扱い方
 - 7.2 電磁場中の粒子の運動
 - 7.3 誘電率と誘電テンソル
 - 7.4 屈折率と分散式
 - 7.5 分散式の解と様々な波
- 8. 波と粒子の相互作用
 - 8.1 ランダウ減衰

8.2 トランジットタイム減衰

8.3 サイクロトロン減衰

9. プラズマ物理と核融合

4.12 宇宙物理学：馬場 彩

1. 万有引力の法則から見る宇宙と天体

2. 電磁波の法則から見る宇宙と天体

3. 星の基礎物理

4. 星の進化と終末

5. 縮退星（白色矮性と中性子星）とブラックホール

6. 膨張宇宙の性質

7. 初期の宇宙

8. 宇宙の超高エネルギー現象

9. 宇宙観測の今

4.13 生物物理学特論 I：古澤 力, 岡田 真人, 伊藤 創祐

1. 錯視図形と三次元視覚世界の再構成

2. Marr の三つのレベル

3. 運動知覚のダイナミクス

4. パターン認識のダイナミクス

5. リガンド-受容体の結合に関する統計力学

6. 生化学反応のキネティクス

7. ブラウン運動と分子モーター

8. バクテリアの情報処理

9. 生命の起源に関する理論と実験

10. 生態系の安定性に関する理論と実験

11. 進化プロセスに関する理論と実験

12. 免疫システムに関する理論と実験

4.14 化学物理学：高木 英典

1. 原子（イオン）の電子状態

1.1 水素原子の 1 電子波動関数

1.2 多電子原子（イオン）の電子状態と周期表

1.3 電子間相互作用と多重項

1.4 孤立イオンの磁性

1.5 Hartree-Fock 近似

1.6 群論

1.7 配位子場とイオンの電子状態

2. 分子の電子状態

2.1 水素分子

2.2 分子軌道

2.3 分子振動

5 4年生 A セメスター

5.1 素粒子物理学：田中 純一, 大谷 航

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. Path integral formulation of quantum mechanics
 - 1.1 Bosonic system
 - 1.2 Two-state system
2. What is quantum field theory for?
3. S-matrix etc., and how to compute them
 - 3.1 S-matrix, decay rate, and cross section
 - 3.2 LSZ reduction formula
 - 3.3 Time-ordered correlation function and Feynman rule
 - 3.4 Other quantities of interest in QFT
4. Scattering processes at the leading order
 - 4.1 Vector field propagator
 - 4.2 $e^+ + e^-$ to $\mu^+ + \mu^-$ cross section
 - 4.3 Crossing symmetry and elastic scattering
 - 4.4 Compton/Thomson scattering
5. Introduction to 1-loop computation
6. Bound states

- 6.1 Bethe-Salpeter equation
- 6.2 Hydrogen atom spectroscopy in QED
- 6.3 Bethe-Salpeter wavefunction in a QFT process
7. Unitarity
 - 7.1 Partial wave unitarity
 - 7.2 Optical theorem
8. Low-energy effective field theory
9. Path integral formulation in quantum field theory
 - 9.1 Repeating the derivation
 - 9.2 Partition function, free-energy, effective potential (formal)
 - 9.3 Background field method
 - 9.4 Imaginary time formalism (thermal field theory)
 - 9.5 Real time formalism (Schwinger Keldysh formalism)

5.3 原子核物理学 : 今井 伸明

1. Introduction of nuclear physics
 - 1.1 General properties of nucleus
 - 1.2 Units
 - 1.3 Discoveries of radioactive isotope/proton/neutron
2. Nuclear force
 - 2.1 Binding energy
 - 2.2 Size of a nucleus
 - 2.3 Wavefunction of deuteron
3. Bulk Properties of Nuclei
 - 3.1 Scattering theory
 - 3.2 Phase shift and nuclear potential
 - 3.3 Equation of state of the nuclear matter
 - 3.4 Alpha decay

4. Microscopic Models of Nuclear Structure
 - 4.1 Hartree-Fock single particle Hamiltonian
 - 4.2 Deformed single particle state
 - 4.3 Spherical Shell model
5. Nuclear reaction
 - 5.1 Compound nuclear reaction
 - 5.2 Direct reaction
 - 5.3 Optical model
6. Recent Topics
 - 6.1 Nuclear astrophysics
 - 6.2 Super heavy element
 - 6.3 Memorial of Prof. A. Arima, Interaction Boson model

5.4 現代物理と機械学習 : 蘆田 祐人

1. Introduction
2. Quantum mechanics review
 - 2.1 Fundamental concepts
 - 2.2 Ensembles
 - 2.3 Distance measures
3. Theory of quantum measurement and

open systems

- 3.1 Positive operator-valued measure
- 3.2 Kraus operators
- 3.3 Bayesian inference and quantum measurement
- 3.4 Continuous quantum measurement

- 4. Foundations of quantum optics
 - 4.1 Quantization of the electromagnetic field
 - 4.2 Bosonic Gaussian states
 - 4.3 Fermionic Gaussian states
 - 4.4 Superconducting qubits
- 5. Quantum light-matter interaction
 - 5.1 Quantized electrodynamics Hamiltonian
 - 5.2 Long wavelength approximation
 - 5.3 Introduction to Cavity/Waveguide QED
- 6. Machine learning and quantum science

- 6.1 Supervised learning
- 6.2 Unsupervised learning
- 6.3 Black-box optimization
- 7. Reinforcement learning
 - 7.1 Motivating example
 - 7.2 Markov decision process
 - 7.3 Value-based search
 - 7.4 Deep Q-learning
 - 7.5 Policy-based search
 - 7.6 Black-box optimization in deep RL

5.5 電子回路論：安東 正樹

- 1. 電磁場と電気回路
- 2. 線形システムと回路網
- 3. 伝達関数と過渡応答
- 4. 増幅回路とフィードバック制御

- 5. 分布定数回路と信号伝送
- 6. 雑音と信号
- 7. 離散信号とデジタル信号
- 8. デジタル回路とデジタル信号処理

5.6 固体物理学 III：林 将光

- 1. 量子ホール効果
 - 1.1 ホール効果
 - 1.2 半導体ヘテロ構造
 - 1.3 ランダウ準位
 - 1.4 確率流密度
 - 1.5 整数量子ホール効果
 - 1.6 グラフェン
 - 1.7 相対論的量子ホール効果
 - 1.8 ボーア・ゾンマーフェルト量子条件
 - 1.9 ベリー位相
- 2. トポロジカル絶縁体
 - 2.1 TKNN 公式
 - 2.2 空間・時間反転対称性
 - 2.3 量子異常ホール効果

- 2.4 端状態
- 2.5 量子スピンホール効果
- 2.6 Z_2 指数
- 2.7 ランダウアー・ブティカ公式と端伝導
- 3. 磁性とスピン流
 - 3.1 交換相互作用
 - 3.2 強結合モデル
 - 3.3 ハバードモデル
 - 3.4 ストナー条件
 - 3.5 スピンフィルタリング効果
 - 3.6 スピンゲージ場
- 4. 超伝導
 - 4.1 クーパー対

5.7 非平衡科学：伊藤 創祐

- 1. 序論
 - 非平衡とは、確率のダイナミクス、定常状態と平衡状態
- 2. 確率過程
 - Markov 連鎖、Chapman-Kolmogorov 方程式、マスター方程式、Fokker-Planck 方程式、Onsager-Machlup 関数、Langevin 方程式
- 3. ゆらぎの熱力学

- 流れと力、熱力学第二法則、非平衡定常状態での熱力学と Kirchhoff の法則、線形不可逆熱力学と Onsager 相反関係、Fokker-Planck 方程式における熱力学第二法則、
- 4. 情報量とゆらぎの熱力学
 - Shannon エントロピーと微分エントロピー、Kullback-Leibler ダイバージェンス、Fisher 情報行列、情報理論における不等式、エントロ

ピー生成と Kullback-Leibler ダイバージェンス、揺らぎの定理、詳細釣り合い条件におけるエントロピー生成率と Kullback-Leibler ダイバージェンス、熱力学第二法則と平衡状態の安定性

5.8 普遍性生物学：古澤 力, 金子 邦彦

1. 生命システムのマクロ状態理論の可能性

1.1 基本的性質：多様性、活動性、ロバストネス、可塑性

1.2 階層整合性：定常成長系の普遍法則

2. 化学反応から複製細胞へ

生命における「非平衡性」、少数性制御、区画化、成長のマクロ法則と相（付録：人工複製系構築実験について）

3. 細胞の適応

揺らぐ成長系の帰結、ノイズによる環境依存アトラクター選択

4. 細胞ホメオスタシスと適応

触媒量制御、多自由度適応系

5. 細胞の記憶：動的記憶とガラス

5. 力学系と安定性

確率過程とパラメータの力学系、レート方程式、化学熱力学と平衡状態の安定性、非線形性と不安定な固定点、非線形性と分岐

6. 細胞分化と発生過程の不可逆性

マクロ現象論、分化多能性の表現、相互作用による内部状態の分岐、分化能の喪失とリプログラミング

7. 表現型の進化 (I)

進化揺動応答関係、ノイズによる分散と遺伝分散の関係、安定性の進化

8. 表現型の進化 (II)

適応進化におけるルシャトリエ原理

9. 発生—進化対応

10. 多様性の進化

表現型変化の遺伝的固定, 共生、種分化、多様性の進化

11. まとめと展望：生物普遍性の現象論へ

5.9 重力波物理学：Kipp Cannon, 都丸 隆行

1. Introduction to General Relativity

1.1 Motivation

1.2 Spaces

1.3 Linear Gravity

2. Orbiting Binary System

2.1 Metric Perturbation

2.2 Time Evolution

2.3 Energy Balance

2.4 Time to Coalescence

2.5 Newtonian Chirp

2.6 Extra Comments

3. Detection of Gravitational Waves (Tomaru)

3.1 Philosophical Introduction

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

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

3.4 Laser Interferometric Gravitational Wave Detector

3.5 Noises in Gravitational Wave Detector

4. Gravitational-Wave Signal Identification

4.1 Choosing a Detector

4.2 Neyman-Pearson Criterion

4.3 Neyman-Pearson Lemma

4.4 Time Series as a Vector

4.5 The Fourier Transform as a Unitary Linear Operator

4.6 Gaussian Random Variables

4.7 Karhunen-Loève Theorem

4.8 Matched Filter

5. Gravitational-Wave Astronomy

5.1 Parameter Estimation and Bayes' Theorem

5.2 Compact Object Merger Rates

5.10 物理学のための科学英語特論：小野 義正

1. 英語論文作成の概要 1

科学・技術英語論文の概要、科学・技術英語と

- は、論文査読報告（英文が悪い）：理由と対策、分かってもらえる英語論文は「英語の発想」で（Leggett's Trees）日本人英語が通じない理由と対策（脱日本的発想）、英語論文執筆の鉄則、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

英語論文執筆の鉄則（つづき）：結論を先に、理由を後に、英語の基本は三拍子（パラグラフ構造）、「起承転結」 vs. 「序論・本論・結論」、否定文を避けて肯定文で書く、日本語では明確な表現を避けるが、英語でははっきりと言い切る、「英語活用メモ」をつくり、英借文する；読みやすい英語論文を書く
 3. 英語論文の構成と作法 1

効率のよい論文執筆の進め方、よい英語論文の書き方、日本人英語の脱却ポイント、英語論文執筆の基本的な注意、英語論文の構成（IMRAD方式）、英語論文執筆のフローチャート、英語論文の構成項目の書き方（表題、著者と所属、抄録、略語）
 4. 英語論文の構成と作法 2

英語論文の構成項目の書き方（つづき）（序論、本論、結果、考察、結論、謝辞、引用文献、図と表）、辞書の使い方
 5. 作文技術 1

文頭、数字（アラビア数字とアルファベットを書き分けする）、用語の統一、リスト項目の一貫性（並列構造で書く）、つづりの統一（英国式か米国式か）、短い、簡潔な文を書く、受動態を避け、能動態を使う、修飾する節や句は修飾対象のすぐ近くに、文意を明確にする言葉（連結語）を使う
 6. 作文技術 2

不必要な単語を省く、日本人に多い間違いを直す、自動詞と他動詞の取り違い、動名詞と不定詞の使い方、よく使われる略語、注意すべき単語
 7. 文法的事項 1

動詞の適切な時制、主語を明確に（懸垂分詞を避ける）、冠詞の使い方、名詞の使い方、和製英語、スペリングに注意
 8. 文法的事項 2

前置詞、句読法、数字・数式の表現ほう、記号の読み方、元素記号の読み方、参考書
 9. 論文投稿と査読者対策
 10. 英語プレゼンの概要

プレゼンテーションとは、プレゼンテーション（口頭発表）の心構え、プレゼンテーションのプランニング、英語プレゼンテーションの構成、スライドの効果的な使い方、標準スライド
 11. 英語の構造としゃべり方

英語の構造、講演用英語表現 vs. 論文用英語表現、わかってもらえる英語のしゃべり方、うまく聞こえる発音のコツ、カタカナ英語に注意、分かってもらえる英語のしゃべり方
 12. 発表のマナー・テクニック

原稿は読むべきか、読んでではないか、聞いてわかる原稿。メモ作成上の注意、発表練習（リハーサル）、発表時のマナー・テクニック、Non-verbal Communication, PC（パソコン）によるプレゼンの注意、プレゼンテーション当日のコツ（まとめ）
 13. 英語プレゼンの実際

口頭発表での決まり文句（最初の挨拶）、プレゼンの流れと決まり文句、個々のスライドの説明、図隊的な図表の説明、数字・数式・記号の読み方、グラフ表現・図形
 14. 質疑応答・ポスターセッション

質疑応答（Q&A）の心構えと指針、質問が聞き取れなかったとき、質問に答えられないとき、ポスターセッションの利点、わかりやすいポスターと発表の技術、プレゼンでの注目点と評価のポイント、チェックリスト、Hints for Successful Conference, 参考書補遺：国際会議用アブストラクトの執筆手順、Professional Self Introduction

各研究室の研究活動内容

浅井研究室

浅井祥仁 教授 石田明 助教

1 研究の背景

この研究室は、素粒子研究をエネルギーフロンティア加速器と小型テーブルトップ実験の両側から研究を行うユニークな研究室です。素粒子を使って、時空や真空をさぐることをテーマに幅広く研究を行っています。

2 最近の研究テーマ

(A) ヒッグス粒子の発見と超対称性粒子研究：世界最高エネルギー LHC での素粒子研究；

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

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

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

アクシオンなどの軽い未知の素粒子探索、レプトン世界の CP 破れの探索やポジトロニウム（電子と陽電子で構成される世界で一番軽い原子）を



LHC 加速器の写真

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

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



Spring8 と SACLA: 世界最強強度 X 線実験装置

3 今後の展開

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

1 研究の背景

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

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

2 最近の研究テーマ

・非平衡開放系の物理

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

・非摂動開放系の物理

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

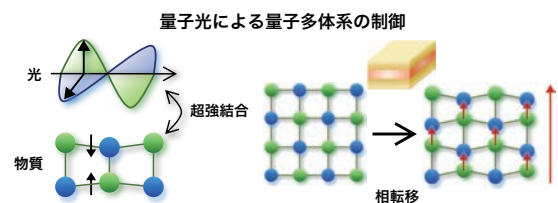
いつつ、これら非平衡強相関現象の解明を目指して研究を行っています。例えば、着目系と環境間の量子もつれを解く新しいユニタリ変換を構築し、一般の非摂動開放系に適用可能な解析手法を開発しています。これを応用し、従来の量子系では知られていない新奇な非平衡強相関現象が生じる可能性を指摘しています。

・量子光による量子多体系の制御

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

3 今後の展開

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



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

安東研究室

安東 正樹 准教授 道村 唯太 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。

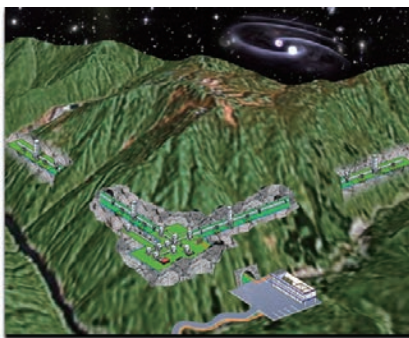
1. 重力波による新しい天文学・物理学

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。

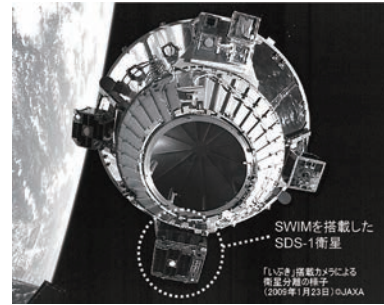
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらすことで、それらに直接迫る手段となる可能性をもっている。

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、孤立系がいかに熱平衡状態に至るかという統計力学の基本的問題を研究することもできる。私たちは冷却原子気体を題材に、様々な量子多体物理の解明を目指して研究に取り組んでいる。

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

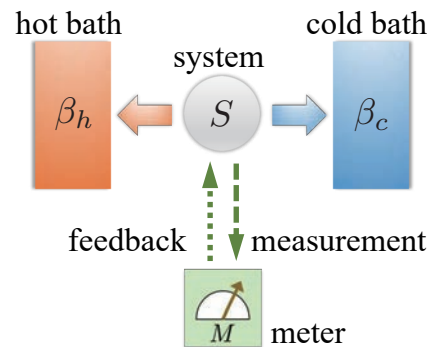
き起こす磁性・超流動・臨界現象の基礎の確立も目指している。今後、冷却原子気体は非平衡量子開放系や統計力学の基礎原理を検証する舞台として、様々な分野にまたがる学際的な研究に発展していくものと期待される。

【量子論・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、量子力学固有の相関である量子もつれを用いた熱機関、量子測定における情報の流れなどの研究に取り組んでいる（下図）。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。私たちは最近、物理学の視点から機械学習の理解に取り組み、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：測定・フィードバック制御下の熱機関の概念図。私たちはこのような状況に対して成立する熱力学的不確定性関係を導出し、最近の実験結果を説明することに成功した。Phys. Rev. Lett. **125**, 140602 (2020) より転載。

江尻・辻井研究室

江尻 晶教授 辻井 直人講師

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。

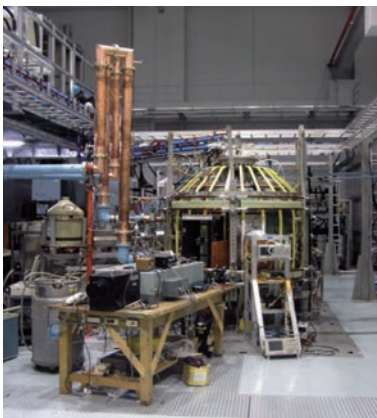


図 1：TST-2 装置

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。

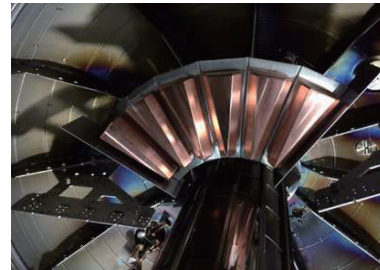


図 2：TST-2 装置内に設置されたアンテナの写真

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

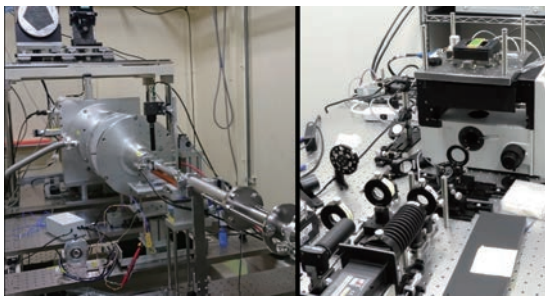
生命の基本単位は細胞だと考えられています。しかし、細胞の構成成分であるタンパク質や脂肪、核酸を混ぜ合わせただけでは、生命は生じません。生命とは何かを物理の言葉で理解することが、生物物理学の究極の目標です。

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ンアンラッチ機構で動くことを世界で初めて示し、「マクスウェルの悪魔」の一種であることを明らかにしてきました。

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



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

3 最近の研究：「生きている」の物理的意味

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

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

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

4 今後の展開：未知のフロンティア

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

研究室ホームページ：

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

1. 二次元の世界の電子

「二次元の世界」といってもアニメやゲームの話ではありません。分子、原子、電子、原子核などのミクロな粒子の性質がわかっているにもかかわらず、その集合状態の諸性質を解明することは容易ではありません。「物性物理学」が対象とするのは、こうしたマクロな物質中に見られる諸現象であり、磁性や超伝導などがなじみ深いかと思います。私たちの研究室では、半導体の界面や表面を使って電子を「二次元の世界」に閉じ込めて、その集団的振る舞いを研究しています。

2. 半導体表面の二次元電子系と量子ホール効果

これまで、二つのノーベル物理学賞が二次元電子系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、電流方向だけでなく、電流および磁場に直交する方向に電圧（ホール電圧）が生じます。この現象はホール効果として知られていますが、ホール電圧と電流の比、すなわちホール抵抗が完全に量子化された値（物理定数 h/e^2 を整数または分数で割った値）を示すのが量子ホール効果です。これは、電子の運動エネルギーが強磁場中ではランダウ準位と呼ばれるとびとびの値に量子化されることから生じる、「二次元の世界」だけで見られる現象です。

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

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

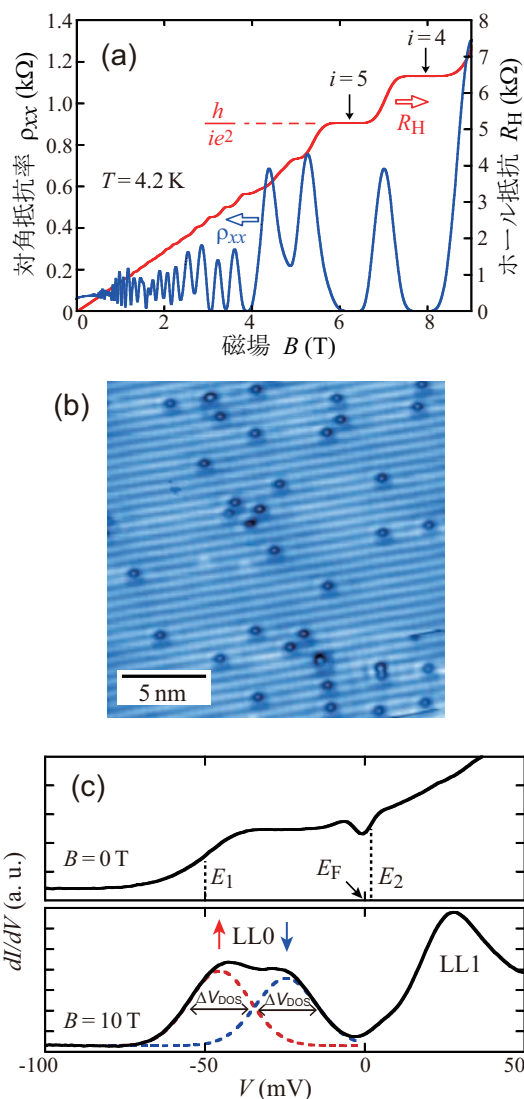


図1 : (a) 二次元電子系における量子ホール効果。(b) STM 像。ランダムな黒丸が Fe 原子。(c) 同一試料で測定されたランダウ準位。

小形研究室

小形 正男 教授、松浦 弘泰 助教

小形研究室では、物性物理学に関する理論的研究を行っている。

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

我々の研究室で扱っている対象は、金属・絶縁体・超伝導・超流動などで、とくに量子効果が目に見える効果として現れるものに興味を持って研究している。通常の金属中の電子に関しても、フェルミ縮退という極めて量子力学的な状態にあり、さらにクーロン相互作用によって1つの電子の運動が他の電子に強く相関を持ちつつ運動するという『強相関』の状態になっている。またスピンによって生じる強磁性(磁石)なども古典力学の範囲内では理論的に理解できないものであり、純粋に量子力学的効果によるものであることが簡単に示される。これらの問題とくに強い相関を持つ電子系などを理論的にどのように取り扱ったらよいかという問題は、長年にわたる理論物理学の未解決の問題になっている。従って、強相関の問題の解明のための新しい手法を開発し、そのもたらす特異な物性を明らかにすることができれば、本質的に新しい物理の一分野を開拓することに繋がると考えている。

研究室としては、毎週のセミナーがある以外には、各自がほとんど独立して研究を行っている。自分でこれは面白そうだという問題があれば、それを取り上げて日夜徹底的に考える。ただし、よい問題を探し出すのが最も重要であり、その人のセンスが問われるところである。研究に用いる手法

は問題に応じてさまざま、問題に適した新しい手法を開発して用いることになる。具体的には、場の理論的手法、厳密解、変分法、計算機シミュレーションなどの方法を組み合わせて用いている。

最近の研究テーマ

(1) 高温超伝導

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

(2) 新しいトポロジカル状態

スピン軌道相互作用が効いているような物質で新しい量子状態が生まれており、これについても微視的な観点からの理論を構築している。たとえば、ディラックノーダルラインなどの新しいトポロジカル物質の開拓、軌道帯磁率の一般論、カイラルソリトン格子のダイナミクスの問題などがある。

(3) 固体中のディラック電子

グラフェンや、ある種の有機導体、Bi(ビスマス)において、電子の運動が相対論的量子力学におけるディラック方程式と全く同じ形式で記述される。こうした固体中のディラック電子では、これまでにない新しい現象が現れると予想される。最近、ディラック電子と量子電磁気学との対応を用い、興味ある物性を開拓すべく研究を行っている。

(4) 熱応答に関する理論

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

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

1 研究の概要

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

●物性理論

物質の見せる多彩な相や相転移・臨界現象を、個々のミクロな構成要素に関する情報だけから説明することは一般には難しいが、なるべく単純な原理・原則から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したい。同時に新しい理論的手法の開発も積極的に行いたいと考えている。

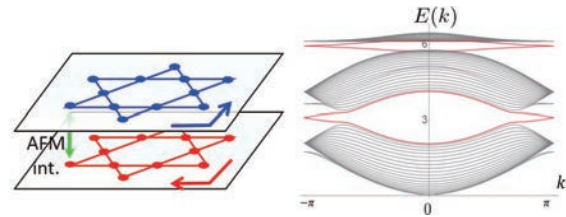
●統計力学

古典・量子統計力学や場の理論における可解なモデルの解けるメカニズムに興味を持って研究を行っている。多くの場合、これらの背後には何らかの代数構造が潜っており、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、電氣的に中性な粒子（たとえば光子やフォノン）では起こらないと考えられる。しかし、本研究室では磁性体においてスピン間の相互作用（Dzyaloshinskii-守谷相互作用）が、電氣的に中性な素励起（マグノン）に仮想的な磁場として働き、ホール効果を引き起こすことを世界に先駆けて理論的に提案した。このマグノンのホール効果は、熱流のホール効果として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モデルとして、近年では光格子中の原子を記述する基礎的なモデルとして、重要な役割を果たしてきた。この模型のハミルトニアンは単純であるが、その基底状態や熱力学的性質を調べることは通常困難であり、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、鏡映正値性の応用やスピン自由度を持つ Bose-Hubbard 模型における基底状態の磁性やトポロジカルな性質に関する研究も行っている。

2-3. 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/量子スピン系とエンタングルメント/トポロジカル欠陥、ソリトン/格子フェルミオン系と超対称性の破れ/パラフェルミオン系/量子多体傷跡状態/量子開放系/非エルミート量子系

3 これからの研究

マグノンや量子スピン系などのボゾン系のトポロジカル相について、特に電子系との違いに着目して調べていきたい。また、近年注目されている機械学習の、物性物理・統計力学への応用を積極的に進めている。更に、非平衡系や散逸系のダイナミクスについても興味を持っており、特に可解モデルの観点からの研究を、意欲的に行いたいと考えている。

はじめに

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

ミクロとマクロをつなぐ

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

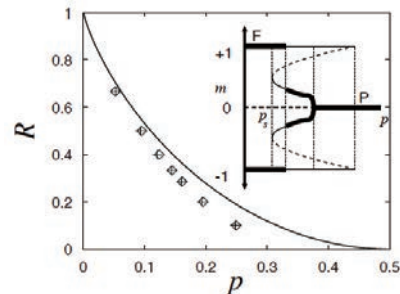
といった階層性があることがわかります。では、一番左に位置する素粒子の支配法則が解き明かされれば右側に位置するすべての物事がわかるようになるのでしょうか? ここは意見が分かれるポイントですが、おそらく不可能でしょう。なぜなら、階層が一つ上がる毎に下の階層の理論では予想もつかない現象が上の階層で生じ得ることを統計力学の考察は示しているからです。物性物理学の泰斗 P.W. Anderson はこのことを More is different (量は質を変える) と言い表しています。

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、問題のアンサンプルや問題サイズを無限に大きくした極限を考えると、記述の階層が変わることにより、そのまま解いた場合にはわからなかった問題の性質や解き方が見えてくることがあります。我々の研究室でもつばらこうした研究を行っています。

これまでの研究から

表現に冗長性 (無駄) を持たせることで情報にノイズ耐性を与える誤り訂正符号は情報化社会を支える重要な基盤技術です。意外かもしれませんが、数式のレベルでは、一般に、誤り訂正符号は特殊な格子上で定義されたイジング模型 (磁性体の数値モデル) とそっくりな形をしています。我々は、この類似性にもとづいて、低密度パリティ検査符号とよばれる高性能な誤り訂正符号の性能を物理の相転移概念をもちいて詳細に分析する方法を与えました。また、そうした相転移描像にもとづいた公開鍵暗号も提案しています。



低密度パリティ検査符号の性能評価。通信路ノイズの大きさ p を変化させると誤り訂正成功/失敗の相転移 (挿入図) が生じる。準安定解が消失するスピノーダル点が現実的時間での、熱力学的相転移点が原理的な誤り訂正限界をそれぞれ与える。YK et al, PRL 84, 1355 (2000)より転載

宇宙の始まりと進化の謎に迫る

ビッグバン宇宙論によれば、宇宙は、高温高密度の原始宇宙から始まり、膨張・冷却を経て現在に至るとされる。では、そもそも高温高密度の原始宇宙はどうやって作り出されたのだろうか？そして、宇宙の進化は何に支配されているのだろうか？我々は、宇宙最古の光である「宇宙背景放射」の観測を通じて、これらの謎を解き明かすことを目指す。宇宙最古の光「宇宙背景放射」高温高密度の原始宇宙は、膨張・冷却を経て、宇宙創成からおおよそ38万年後によく光が直進できるようになる。この瞬間を宇宙の晴れ上がりと呼び、このとき発生して138億年を経て今もなお地球に降り注ぐ光(電波)が、「宇宙背景放射」である。これを最先端の電波望遠鏡で精密測定し、原始の宇宙と宇宙進化を解き明かすことが当研究室の研究テーマである。宇宙創成から 10^{-32} 秒後に何が起きたのか インフレーション仮説によれば、宇宙創成 10^{-32} 秒の間に時空の加速度的膨張が起き、高温高密度の原始宇宙が作られた。この仮説の決定的証拠となるのが重力場の量子ゆらぎに起因する「原始重力波」であり、これが宇宙背景放射に特殊なパターンを刻印する。我々が探索するこのパターンが検出されれば、インフレーション宇宙論を証明するだけでなく、重力の量子化の確認という、現代物理学における一大ブレイクスルーとなる。

“暗黒宇宙”の解明に向けて 我々は、宇宙背景放射の精密測定を通して未知の粒子の探索と宇宙進化メカニズムの解明も目指している。地球に届く過程で、宇宙背景放射は「暗黒物質」による重力レンズ効果の影響を受ける。この効果を測定することで、宇宙進化を探り、それに影響を及ぼす「ニュートリノ」の質量を測定することが出来る。また、すばる望遠鏡などの観測と組み合わせて、現在の宇宙膨張を支配する「暗黒エネルギー」の正体を探る。さらに、「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が存在する可能性があり、それが宇宙初期の膨張過程に及ぼす微弱な影響を測定することで、その探索を行う。

国際共同実験

当研究室では、国際共同実験である Simons Array、さらに次世代の Simons Observatory へ参画し、本

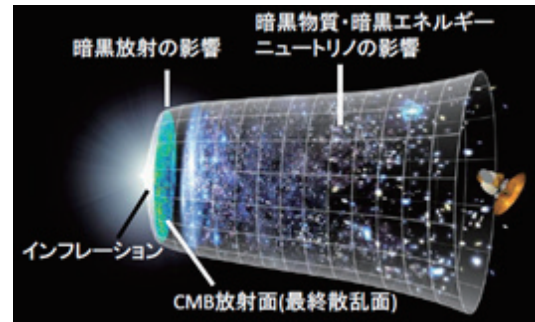


図1：宇宙進化の模式図。横軸が時間で、左側が宇宙初期、右が現在である。(Credit: NASA / WMAP science team)

分野における先端研究を行なう。Simons Array は2019年1月に観測を開始した3台の望遠鏡群である(図2)。Simons Observatory はそれを更に拡張し、2023年の観測開始を目指す。

最先端技術を用いた研究

多くの実験物理学の分野でそうであるように、我々の分野においても、先端技術が新しい物理を牽引してきた。当研究室では、低温・超伝導技術を駆使して、次世代実験に向けた高感度検出器の研究開発を進める。また、宇宙背景放射のデータ解析においては高性能計算(High-Performance Computation)システムの使用が不可欠であり、そのための並列コンピューティング技法を用いたソフトウェア開発を行う。さらに、超伝導・量子技術を用いた暗黒物質探索など、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：チリアタカマ高地に建設中の Simons Array 望遠鏡群(手前)。

1 光物理学の展開

光とは何かという問いは、永く人々を捉えてきた。19世紀後半に電磁気学が、20世紀には現代物理学の柱となる量子論、相対論が完成し、光の物理学が一旦完成した。しかし、1960年のレーザーの発明によりもたらされた、強くかつコヒーレントな光が、光の物理学の様相を一変させた。可視光は、テレビやFM放送で使われる超短波帯の電波に比べ周波数は7桁も高く、その位相や振幅の自在な制御は不可能であった。しかし、半導体エレクトロニクス技術とレーザー技術の融合により、これが完全に制御可能となった。この革新により、アト秒(10^{-18} 秒)という超短パルス光を発生する技術が確立してきている。これは、従来は”瞬間”現象として捉えられてきた電子の量子準位間の”遷移”の様子を追跡可能とする。また、16桁以上の周波数純度を持つレーザー光も実現しつつある。これは、”一秒”を定義する高精度の時間基準を与え、物理基本定数の恒常性や一般相対論の効果等、物理学の土台を精密に検証可能とする。

当研究室では、このようなレーザーの革新によって始まった新しい物理学の研究に取り組んでいる。例えばレーザー光をもとに発生させた短波長紫外光源と、世界でもトップクラスのエネルギー分解能を有する飛行時間型角度分解光電子分光装置を組み合わせて、物質の非占有バンド構造測定などを進めている。また高いパルスエネルギーを持つ光源を用いた高次高調波発生技術を利用し、応用上も重要な極端紫外光領域における物質の高精度屈折率測定技術の開発などを進めている。これらは、いずれも広い分野の新しい技術の扉を開くものと期待されている。

またレーザーの飛躍的発展は、金属、ガラス等、材料の高速な切断や融着を可能にし、産業として重要な技術に成長している。”切断”や”融着”は数百年以上の歴史を持つが、物理現象として捉えると、原子結合の切断、同種あるいは異種の原子同士の結合が基本となる。よりミクロな視点では”非線形”、”非平衡”、”開放系”という、現代物理学の最先端の課題に到達する。当研究室では物質科学、レーザー物理、微細加工技術や分析技術を駆使し、これらの現象を光と物質の相互作用として明らか

にする。さらに産業界が直面する技術課題に対して、学理の構築を通じた解決を目指している。

2 光で創る巨視的量子現象

レーザーから出てくる光子集団のエントロピーが非常に小さいことを巧みに利用すると、物質を瞬時に極低温に冷却できる。この手法を用いて、半導体中に光励起した電子系を対象として巨視的量子状態を創る実験を進めている。量子統計性と物質に内在する相互作用との競合や、ボース・アインシュタイン凝縮等の量子力学的な相転移に着目し、量子論の本質に迫ることを目指している。現在100 mK台の極低温下での半導体のレーザー光励起と、中赤外プローブ光の導入という世界でもユニークな実験を行い半導体中の光励起した電子系における巨視的量子凝縮相の探求を進めている。

3 時空間の対称性制御による新しい量子光学

最新の加工技術を駆使すると、光・電磁波の波長より小さいスケールの人工構造を作ることができる。このようなナノ構造を適切に設計することにより、自然界の物質にない光学特性を示す”人工材料”を創り出せる。当研究室では、最先端の微細加工技術、レーザー加工技術、3Dプリンティング、3次元電磁波解析といったツールを駆使し、局所及び大域的な対称性制御の物理という観点からフォトンを自在に操るための新原理探索とその実証を進めている。現在、テラヘルツから真空紫外までの広い波長領域を対象に、人工キラル構造や、三重回転対称構造によるフォトン捜査の学理の探求を進めるとともに、フォトンサイエンス研究機構の活動を通じた産業界への展開も進めている。

参考

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

小林研究室

小林 研介 教授 佐々木 健人 助教

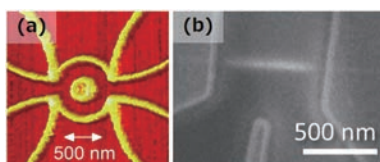
1 研究の背景

物理学の世界では、20世紀前半に量子力学という新しい学問が打ち立てられました。量子力学によって、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、ガラスがなぜ透明なのか、金属がなぜ光を反射するのか、なぜ電気を流すのか、さらには、鉄がどうして磁石になるのかなどを理解できるようになったのです。さらに、近年、ナノテクノロジーの発展によって「ナノ物理学」と呼ばれる分野が生まれました。この分野は、「量子力学に基づいて自然現象を理解する」だけでなく、「量子力学を利用して自然現象を制御する」ことも目標としています。この分野に挑戦することは、量子力学のもたらす新しい可能性を探求することと言えるでしょう。

ナノ物理学では、「メゾスコピック系」と呼ばれる微小な固体素子（電子回路部品）を用いた研究が活発に行われています。その多くは、半導体や金属薄膜を微細加工して作られる極小の電子回路で、典型的な大きさは1ミクロン（髪の毛の太さの約100分の1）以下です。しかし、それらはいくつかの外部パラメータによって制御できるように設計されている点で、「小さな実験室」とみなすことができます。代表例を図(a)(b)に示します。このような研究は、量子コンピュータ・スピントロニクス・トポロジカル物性などの幅広い観点から、現在、世界的に盛んに行われています。

2 最近の研究テーマ

私たちは、メゾスコピック系の性質を調べる手法として、「電流ゆらぎ」に注目してきました。電流ゆらぎは、通常の電流値では得られない、非平



典型的なメゾスコピック素子。(a) 電子波干渉計。
(b) カーボンナノチューブ人工原子。

衡状態に対する情報を与えてくれます。私たちは、数年にわたる技術開発によって、世界最高レベルの感度を持つ測定系を構築し、様々なメゾスコピック系に適用してきました。

代表的な成果として、量子系における「ゆらぎの定理」に関する実験があります。この定理は1990年代に発見されたもので、非平衡現象を記述するための新しい指導原理です。私たちは、電子の波動性が顕著に現れる電子波干渉計 [図 (a)] における電流ゆらぎ測定を通じて、この定理が量子系においても成立することを初めて実証しました。

また、私たちは、電子を一個ずつ制御可能な人工原子 [図 (b)] において、ただ一つの電子からなる理想的な近藤効果を実現しました。電流ゆらぎ測定を行い、理論との精密な比較によって、強相関極限の量子液体が実現されていることを実証しました。この成果は、非平衡量子多体系において行われたこれまでで最も精密な実験と言えます。

3 今後の展開

私たちは「ゆらぎ」に注目することで、新現象を見出すとともに、実験と理論を精密に比較できる精密物性物理学を開拓してきました。現在、新しい取り組みとして、ダイヤモンド中の格子欠陥の一つである NV センタを用いてメゾスコピック系の性質を調べる研究を推進しています。NV センタは、量子力学の原理に基づいて磁場を超高感度に測定できる量子センサとなります。NV センタを用いてメゾスコピック系の磁気的な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ています。

4 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。

研究室の見学はいつでも歓迎です。お気軽にご連絡ください (kensuke@phys.s.u-tokyo.ac.jp)。

酒井広文研究室

酒井 広文 教授 峰本 紳一郎 助教

1. はじめに

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

2. 研究テーマ

相互に関連する以下のテーマを中心に研究を進めている。

(1) 回転量子状態を選別した分子の配向制御

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

(2) 全光学的分子配向制御技術の高度化

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

(3) 分子内電子の立体ダイナミクスの研究

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

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

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

3. 研究活動

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

4. メッセージ

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

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

●学部学生向けの解説

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

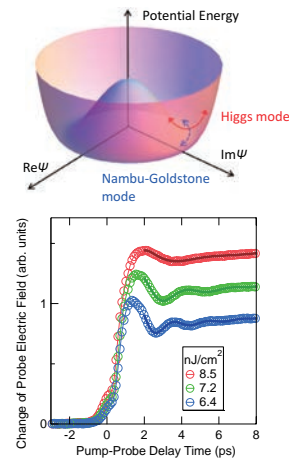
固体中では多数の電子が相互作用することによって、量子力学効果が巨視的なスケールで現れることがある。超伝導はその代表例で、一個の電子の運動を考えている限りは予想もつかない面白い現象が発現する。当研究室では、レーザー光を用いた最先端光技術を駆使して、光で物質中に巨視的な量子状態を創り出す、或いは自在に制御することを目標として、様々な量子物質の研究を進めている。最近の主なトピックスを以下に挙げる。

1) 超伝導のヒッグスモードの観測

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

2) 光による超伝導体の制御

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



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

3) トポロジカル物質の光応答と量子操作

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

より詳しくは研究室ホームページ:

<http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/index.htm> をご参照ください。

宇宙理論研究室

須藤 靖 教授 藤澤 幸太郎 特任助教
吉田 直紀 教授 森脇 可奈 助教 Tilman Hartwig 助教

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

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

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

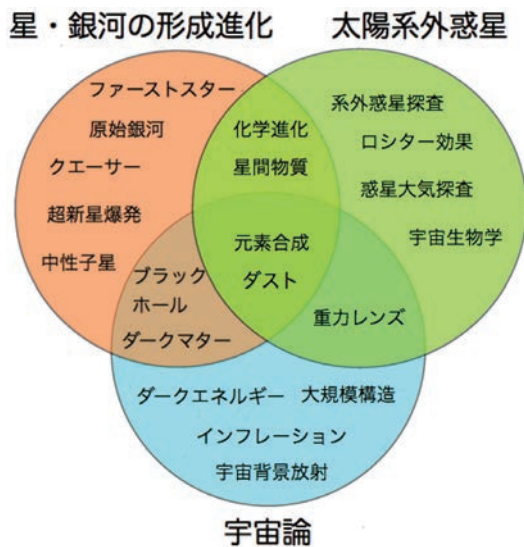


図1: 宇宙理論研究室で行われている研究テーマの概念図。3つの分野が有機的に結びついていることが分かる。

1 最近の主な研究テーマ

1.1 宇宙論

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理

1.2 星・銀河の形成進化

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

コンピューターの性能向上の速度は著しく、数年前には不可能であった計算が次々と実行可能になり、宇宙最初の星の誕生の様子やブラックホールの形成進化のような複雑な問題にもチャレンジできるようになった。近い将来のエクサフロップス

級のコンピューター利用を視野に入れながら、超並列計算機や専用計算機をもちいてマルチスケール・マルチフィジクス現象の統合シミュレーションを目指している。

1.3 太陽系外惑星

第2の地球は存在するか。荒唐無稽にも聞こえかねないこの疑問に対して、現在の天文学は確実に科学的に迫りつつある。1995年の初発見以来、太陽系外惑星はすでに3000個以上の惑星が検出されている。初期に検出された系外惑星のほとんどは木星型（ガス）惑星だったが、2009年3月に打ち上げられたケプラー衛星を始めとする観測手段の進歩で、地球程度の質量を持つ惑星も検出されるようになった。とすれば、それら遠方の地球型惑星に生命の兆候をいかにして見出すか、まさに「第2の地球は存在するか」という問いに答える日が現実のものとなりつつある。これは、物理学のみならず、天文学、地球惑星学、生物学などを総動員して取り組むべき、まさに理学部横断的な研究テーマである。

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

2 今後の展開

2014年3月からハワイ島にある口径8.2メートルのすばる望遠鏡を用いた Hyper Suprime-Cam サーベイが始まった。これは、高性能の新型カメラを用いて何百万個もの銀河の画像解析から宇宙のダークマターの分布を割り出し、その時間進化からダークエネルギーの性質に迫ろうという野心的な計画であり、5年にわたって観測が続けられる。その後には、Prime Focus Spectrograph と呼ばれる、大規模な多天体分光装置による宇宙論サーベイも計画されている。カブリ数物連携宇宙研究機構、国立天文台、プリンストン大学などと連携しながら初期データの解析などに加わっていく予定である。

近年、重力波やニュートリノといった新たなメッセージャーを Hyper Suprime-Cam などを用いた電磁波サーベイ観測と組み合わせる全粒子時間軸天文学の発展がめざましい。これを意識し、ブラックホールや中性子星の誕生や合体といった爆発的

突発現象の系統的理解を目指した研究にも取り組んでいる。また、機械学習や人工知能を用いて膨大な観測データから超新星を検出・分類したり、ダークマターの3次元分布を正確に求めるといったデータサイエンスにも取り組んでいる。

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

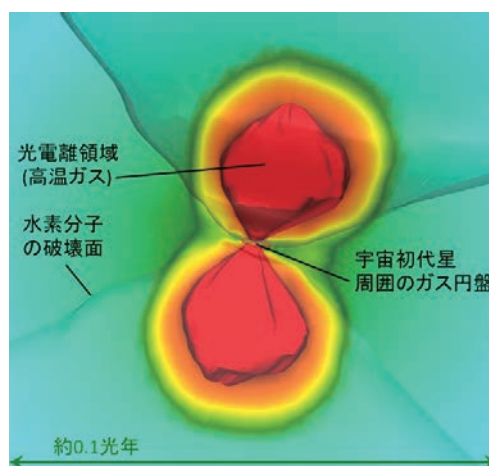


図2: 宇宙初代星形成の3次元数値シミュレーション。中心星放射により高温ガスが生じている様子。

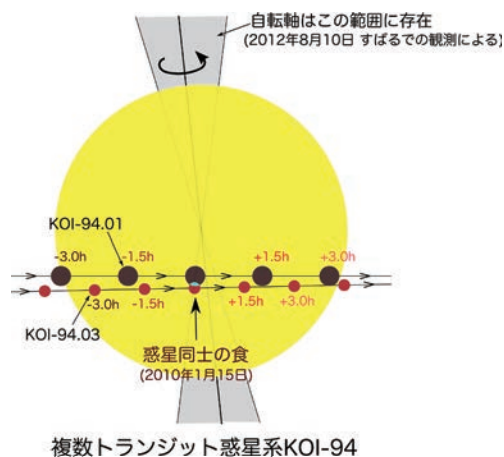
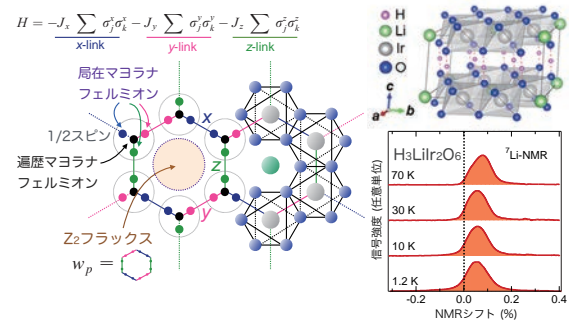


図3: すばる望遠鏡の観測により明らかにされた系外惑星系 KOI-94 の概念図。系外惑星同士の食を史上初めて観測した。

私たちの目にする固体の多くは 1 cm^3 あたり 10^{23} 個程度の原子から構成されており、構成原子の最外殻軌道を占める電子が主にその性質を決めています。単純には最外殻軌道が電子で満たされていると絶縁体、そうでないと金属となります。実際には、後者の場合でも電子の間にはクーロン力を通じた斥力が働いており、互いに避けよう（電子相関）とします。電子相関によって、電子はドロドロした電子の液体状態や電子が局在した電子固体（モット絶縁）状態などの電子相を構築します。このような状況では、電流の担い手である電荷に加えて、電子スピンや軌道運動のモーメントに起因する磁性が顔を出します。電子相関の効果は軌道の広がり小さい d 軌道や f 軌道を最外殻軌道とする遷移金属元素（Co, Fe, Ni など）や希土類元素（La, Nd, Gd など）で顕著です。遷移金属元素や希土類元素と言うと磁石が思い浮かびますが、その背景にあるのは電子相関です。電子相関は、電子を局在させるだけでなく、結晶格子の次元性（一次元、二次元）や対称性（幾何学的フラストレーションやトポロジカルな効果）の助けを借りて、電荷、スピン、軌道の自由度が絡み合ったさらに複雑な電子相を創り出します。このようなエキゾチックな電子相として、強い斥力のもとで出現する非従来型の超伝導や、スピンや軌道磁気モーメントの織りなす量子スピン液体などが挙げられます。これらの電子相は、しばしば特徴的な電荷、スピン、軌道、およびそれらの複合励起で特徴づけられ、それらはマヨラナフェルミオンやスピノンといった準粒子として振る舞います。高木・北川研究室では、電子相関が強く働く遷移金属化合物や希土類化合物を主な舞台として、このようなエキゾチックな電子相と準粒子を設計、探索しています。ここではそのなかの例を紹介します。

(1) 新しい量子スピン液体とKitaef系物理

多体量子スピン物理において、絶対零度まで磁性スピンが量子的に絡み合った状態、量子スピン液体の実現はマイルストーンです。量子スピン液体は一次元スピン模型では理論も実験も共に確立されていますが、二次元以上ではそうではありません。Kitaef蜂の巣格子模型では、スピンハミルトニアンをマヨラナフェルミ準粒子として一体



Kitaef模型とイリジウム酸化物スピン液体

問題に帰着した厳密解が得られます（図1）。さらに、マヨラナ粒子を操作することができればトポロジカル量子計算も可能とされています。ただし実際には、そのような研究に適したKitaef物質はみつかりません。Kitaef物質を創るには、非従来型の異方的相互作用を導入する必要があります。スピン-軌道相互作用が大きいイリジウム酸化物、4f 電子系などに対する実現性が提唱されてきました。当研究室では、Kitaef模型の初の実証例を目指してイリジウム酸化物 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ に着目し、磁化率、比熱、核磁気共鳴測定において少なくとも 50 mK まで液体であり続ける量子液体物質であることを明らかにしました。また、第一原理計算データベースの探索と、経験的な結晶合成技術を組み合わせて物質開発を進めています。現在は、実際に4年生の特別実験で新しく見つかった希土類化合物を量子スピン液体候補として研究しています。

(2) 超高压下の新しい超伝導相研究

最近、超高压下（1 万気圧以上）の実験技術の進展に伴い、新しい超伝導体が発見されてきています。以前は磁石としての性質が強すぎて超伝導になるとは思われていなかった Mn, Cr 化合物もそれらの一つです。当研究室では、独自に開発した最先端の超高压下磁化測定、核磁気共鳴測定技術を持っており、10 万気圧程度の圧力下でこれらのメカニズムを調べています。磁化測定で大まかに磁性状態を把握し、核磁気共鳴法を用いて超伝導相と磁性相がどのように競合または共存して現れるかを精密に測ることで研究しています。

1 非平衡な世界の物理法則を探る

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

2 竹内研究室のテーマ

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

2.1 液晶が紡ぐ非平衡法則とトポロジカル欠陥

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

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

2.2 微生物集団の統計法則を探る

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

2.3 他にもいろいろ

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

3 もっと詳しく知りたい方へ

百聞は一見に如かず。ぜひ見学に来てください。竹内の連絡先はこちら：kat@kaztake.org
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)

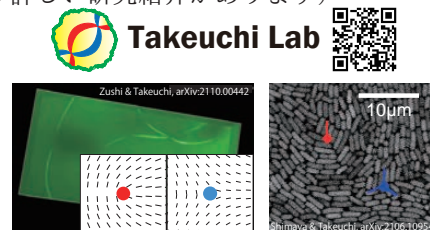


図1 (左): 液晶トポロジカル欠陥の可視化。
図2 (右): 大腸菌集団に生じるトポロジカル欠陥。

辻研究室

辻直人 准教授

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（図参照）。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観測されました。さらに、銅酸化物高温超伝導体などの強相関電子系に対してもヒッグスモードの研究を進めています。

(2) η ペアリング超伝導

励起状態で超伝導が起こる例として η ペアリング超伝導が知られています。 η ペアリング超伝導ではクーパー対が有限の重心運動量を持ち、固体電子系の典型的なモデルであるハバード模型の厳密な固有状態となっています。高いエネルギーを持っているにも関わらず超伝導を示すことから、レーザー光などによって非平衡状態で超伝導を誘起で

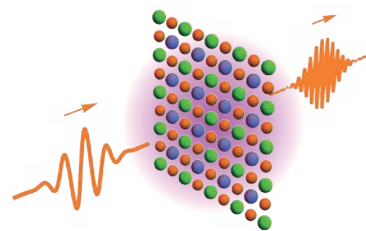
きるメカニズムとして注目されています。固体中では電子は電荷を持つことから電磁場との結合を無視することができません。電磁場と η ペアリング状態が結合すると、電子間相互作用が引力のときはタキオン不安定性、斥力のときはプラズマ不安定性が存在することがわかりました。このため、電子系で η ペアリング状態が作られたとしても非常に短寿命になることが予想されます。

(3) 非時間順序・揺動散逸定理

非時間順序相関関数は $\langle A(t)B(t')A(t)B(t') \rangle$ のように通常の時間順序に従わない相関関数のことを指し、量子多体系のカオスの性質（量子バタフライ効果）や量子情報の非局所化（information scrambling）を反映する新たな指標として期待されています。これらの相関関数の間に、揺動散逸定理の高次拡張と呼べるような一般的な関係式が見つかりました。通常の揺動散逸定理が平衡状態のゆらぎと線形応答係数の間を結ぶ関係式になっているのに対し、非時間順序揺動散逸定理は量子多体系の scrambling の性質と非線形応答係数の間を結ぶ関係式になっています。

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。



超伝導体などの固体電子系にレーザー光を照射して非線形効果によって高調波が発生する様子。

研究室ホームページ:

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

常行研究室

常行真司教授 明石遼介助教

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、いわば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、近年その応用範囲は大きな広がりを見せています。

2 最近の研究テーマ

現状の第一原理電子状態計算手法には、基礎となる電子状態理論や実際の計算量の問題で、様々な適用限界があることが知られています。そこで当研究室では、これまで取り扱うことのできなかつた物質群や物性のシミュレーションが可能な新しい基礎理論の構築と、実際のシミュレーションに使えるプログラム開発を行いながら、物性物理学の理論研究を行っています。とくに高温超電導体のような電子相関の強い系を正しく取り扱うための相関波動関数を用いた電子状態計算手法、経験パラメータを用いずに超伝導転移温度を精密に予測する手法、AI・データ科学と第一原理計算を組み合わせる複雑な結晶構造を理論的に予測する手法は、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。

最近3年間の具体的な研究テーマ：

[新しい方法論の開発]

- ・相関波動関数理論を用いた電子状態計算手法

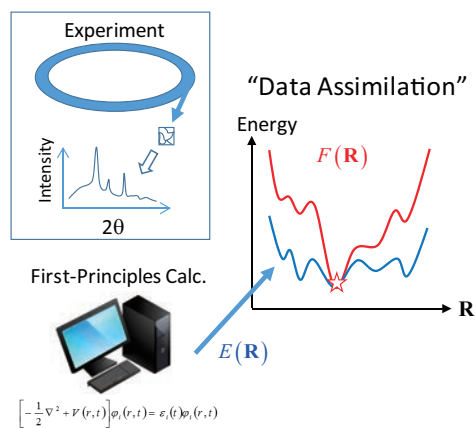
- ・超伝導密度汎関数理論
- ・データ同化構造探索手法
- ・レーザー加工のトランススケールシミュレーション手法
- ・熱伝導率・熱膨張率計算の計算手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

- ・水素を含むイオン伝導体
- ・新しい超伝導物質
- ・アモルファス半導体材料
- ・熱電材料
- ・非熱的レーザー加工の基礎理論

3 今後の展開

化学、地球惑星科学、生物学など異分野との境界には、物性物理学としては未開の広大な領域が広がっています。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：ベイズの定理により、不完全な実験データを利用して結晶構造探索を加速する、データ同化構造探索手法の概念図

研究室ホームページ

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

1 研究の背景

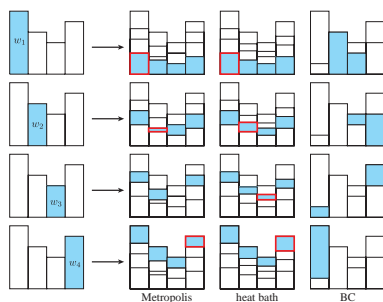
現代のスーパーコンピュータの計算能力をもってしても、多体のシュレーディンガー方程式を完全に解くことはできません。そこで、対称性や量子相関など、もとの方程式の中に含まれている物理的に重要な性質を失うことなく、シミュレーションを実行しやすい形へ表現しなおすことが、計算物理における重要な鍵となります。

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。

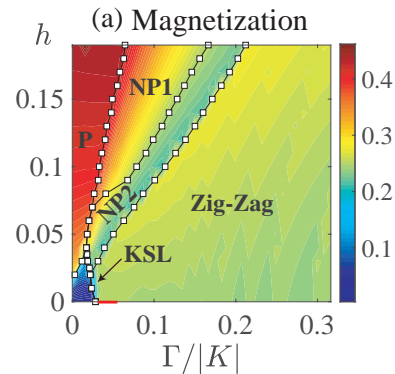
2 最近の研究テーマ

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のためのテンソルネットワークの手法、量子マスター方程式の方法、新しい最適化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。



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Kitaev模型の基底状態

2.2 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、第一原理電子状態計算と実験の「データ同化」による結晶構造推定にも取り組んでいます。

2.3 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、スピンの互いに傾いた非共線的な秩序が生じます。また、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ダ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Kitaev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。

2.4 量子コンピュータ基礎理論

近年、ゲート型量子コンピュータは急速に進歩しています。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の開発とその並列化を進めています。

藤堂研究室ホームページ:

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

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革新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)] 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。

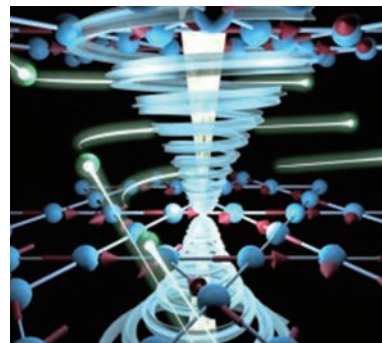


図1 Mn_3Sn の磁気構造とワイル点の概念図

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

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

中村研究室

中村 哲 教授

1 研究の背景

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

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

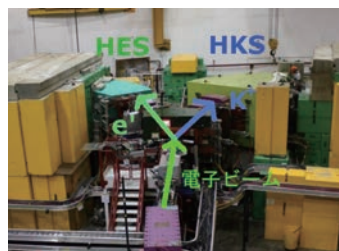
近年の重力波観測の成功や、これまで超新星爆発で生じると考えられてきた重い元素の合成における役割において、宇宙で最も密度の高い物質である中性子星が注目を集めている。重力波観測、中性子星観測望遠鏡などの巨視的観測が長足の進歩を遂げ中性子星の質量や半径に関して研究が進んでいる現状において、中性子星の深部という低温、高密度状態がどのようなメカニズムから生じているのかを解明することが、高密度ハドロン物質の物性を理解するために極めて重要である。様々な条件下で実施できる地上の加速器実験による微視的研究の重要性はますます増している。我々はクォーク多体系であるバリオン、バリオン多体系である(ハイパー)原子核、そ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

2 最近の研究テーマ

(1)電子ビームを用いたハイパー核精密分光

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

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



HKS と HES。総計 300 トン以上の巨大電磁石からなる

(2)電磁生成したハイパー核の崩壊 π^- 中間子分光

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

(3)実光子を用いたストレンジネス核物理研究

東北大学電子光物理学研究センター ELPH の実光子標識化ビームを用いて、 $^3,^4_\Lambda\text{H}$ 等の軽いハイパー核の寿命測定実験やラムダ粒子と中性子の終状態相互作用の研究を進めている。

3 今後の展開

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

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

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



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

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

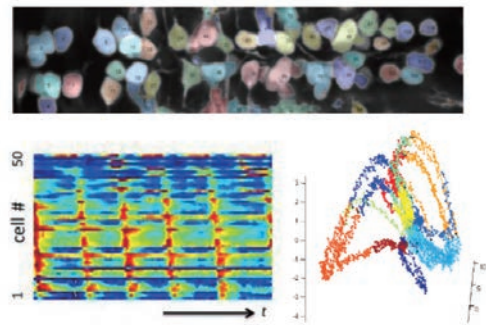


図1：カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞(上)の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する(左下、赤色が活動状態を示す)。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を3次元空間内で可視化することもできる(右下)。

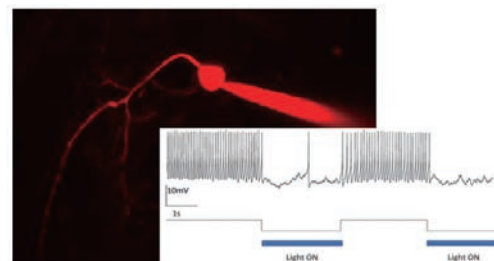


図2：パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射(light ON)により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。

長谷川研究室

長谷川 修司 教授 秋山 了太 助教

1 表面・ナノ物理学とは

当研究室が専門としている表面・ナノ物理学とは、物質表面やナノメートルスケール構造に特有な物性、現象を研究する分野で、従来の固体物理学には無い考え方や手法を使う。例えば、結晶表面の最上層での原子には、結合する原子が片側には存在しないので、そのままでは不安定なため、表面近傍の原子が並び替えを起こして、結晶内部では見られない特殊な原子配列（表面超構造）を作って安定化する。また、物質内部と異なり、表面では空間反転対称性が破れており、その結果、特殊な電子状態が形成されたり、電子のスピン向きによって電子エネルギー準位が分裂したりする。そのため、全く新しい物性を示すことがあり、今までに無いナノスケールの低次元物性物理の舞台となる。この分野はナノテクノロジーやスピントロニクスと呼ばれる応用分野とも直結している。ナノメートルスケールの極微細な人工構造を物質表面上で作り、そこで電流やスピンの流れを利用したデバイスに応用しようという研究も盛んに行われている。表面・ナノ物理学は、さまざまな分野に関連する学際的分野である。

2 当研究室では

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

3 最近の話題

シリコン結晶の表面上に銀原子を1原子層だけ付着させて、1原子層厚さの金属を作ることができる。そこでは電子が自由に動き回っている。その表面を6 Kに冷却して、走査トンネル顕微鏡で観察した結果が図1である。非常に細かな規則的な点列は、銀原子である。この他に(A)で示した原子ステップ端や(B)で示した直線的な境界の近傍では縞模様が見えるが、これは、表面上を動いて

いる電子の波が境界で反射されるためにできる定在波である。防波堤にぶつかった水が水面上にさざ波を作るように、「電子の海」でもさざ波ができていることを示している。ただし、その波長は3 nm程度の極微の波であり、物理学の基礎として習う量子力学が教える電子の波動性が直接見えている。画面中央やや右上の小さな領域では、さざ波が同心円状に広がっている。周囲の境界がポテンシャル障壁となって電子を閉じ込めている。まさに量子力学のポテンシャル井戸の演習問題を実際の物質で実現していることになる。

このように結晶表面1原子層だけに自由電子が存在すると、電気伝導度も高いはず。当研究室では、1原子層や数原子列の幅の原子鎖の電気伝導度を測定するために、極細の針を使った4探針電気伝導測定法を開発した。図2は、直径10 nm程度のカーボンナノチューブを針として利用し、外側2本の針から電流を流し込み、内側2本の針で電圧降下を測定しているときの電子顕微鏡写真である。針と針の間隔は数十 nmまで小さくできる。最近では磁性の針を用いて電子スピンの流れを検出している。極微の物質はマクロなスケールとは違った性質を示すことがわかってきた。

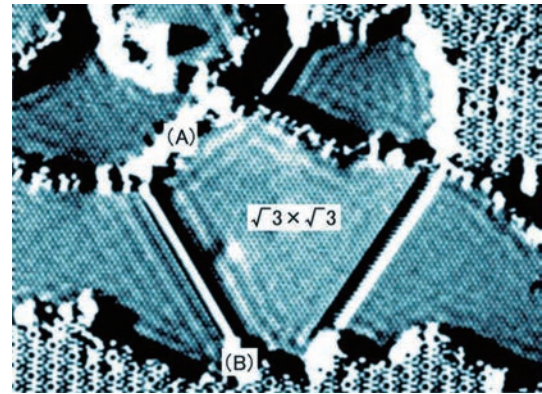


図1. 電子の海のさざなみ

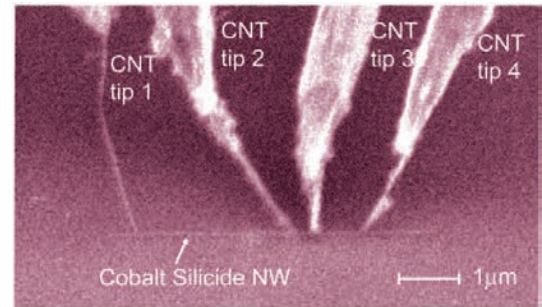


図2: ミクロな針を使った4探針電気伝導測定

1 研究概要

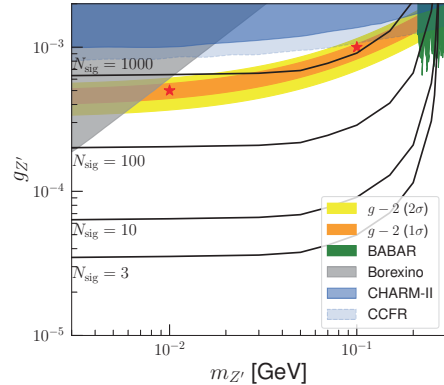
私たちの研究室では、標準模型を超える物理の解明を目指して、素粒子物理の理論的研究を行っています。

素粒子の標準模型は現在知られている高エネルギー実験の結果のほとんどを矛盾なく説明する事が出来ており、その地位を確固たるものにしていきます。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の物質（主にバリオン）から成っている事が分かっています。しかし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（ ~ 100 GeV）がそれに比べて何故そんなに小さいのかが謎のままです（「階層性問題」）。また強い相互作用を記述する QCD における「strong CP 問題」も標準模型に残された最重要問題の一つです。ニュートリノ質量の起源も分かかっていません。以上の点からも、標準模型を超えたより基本的な理論が（典型的にはエネルギー 100 GeV \sim 1 TeV 以上のところに）存在し、それが標準模型の諸問題を解決しているのではないかと広く考えられています。

これまで私たちは、超対称性理論やその他の標準模型を超える物理の枠組みにおいて、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



図：ミューオン異常磁気能率に動機づけられた $U(1)_{\mu-\tau}$ 模型を MUonE 実験で探索する手法を提案した論文 (arXiv: 2109.10093) より転載。

い実験・観測手法を提案するような研究も行っています。

2 最近の研究テーマ

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

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

3 Web ページ

素粒子論研究室：

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

個人のページ：

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

林研究室

林 将光 准教授 河口 真志 助教

1 研究の背景

電子は「電荷」と自転に相当する角運動量「スピン」を持っています。今日の半導体エレクトロニクスは電子の「電荷」を制御することで大きく発展してきました。一方、電子の「スピン」が生み出す物性、物理は未解明なところが多く、ただその様相は多彩です。たとえば、物質中の電子スピン間の相互作用によって、磁性や超伝導などが発現します。一方、表面の電子状態がバルクと比べて異なる「トポロジカル絶縁体」では、表面だけにスピンの向きに依存した散逸のない電子の流れ「スピン流」が生成され、その特異な伝導が量子演算などに利用できるとして注目されています。このように、固体中では電子が持つスピンの非常に重要な役割を果たしています。一方で光もまた、電子と同様、スピンを有しており、主に情報通信や分光測定などで利用されています。本研究室では、物質中の電子スピンと光が誘起するさまざまな現象を探求する「量子スピントロニクス/フォトニクス」の研究を行っています。

2 最近の研究テーマ

(1) スピン軌道相互作用とスピン流物性

スピン流とは、スピンの向きによって電子の移動する方向が異なる電子の流れを指します。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ずることになります。スピン軌道相互作用が大きい物質に電流を流すと、「スピンホール効果」によってスピン流が生成できることが最近

の研究で明らかになりました。本研究室ではスピンホール効果などによってスピン流が生成される物理の解明と、スピン流が生み出す新たな物性の探索を行っています。特に、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では、新たな現象が次々と見つかり、今後の展開が期待されます。

(2) トポロジカル物質と光スピン変換現象

特異な結晶構造を持つ物質や異種物質間の界面、表面では、電子のスピンの向きが移動方向と結合した電子状態が発現することがあります。これらの物質に例えば円偏光を照射すると、スピンの向きが揃ったキャリアが励起・移動するので、スピン偏極した光起電流が発生することが知られています。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。本研究室では、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っています。

(3) コヒーレント複合粒子の生成

量子技術の発展に伴い、物質中の異なる自由度を組み合わせる新たな複合粒子を生成する研究が活発化しています。本研究室ではスピンや光をコヒーレンスの高い格子振動や超伝導状態などと結合させ、量子技術に展開できる物理の探索を行っています。

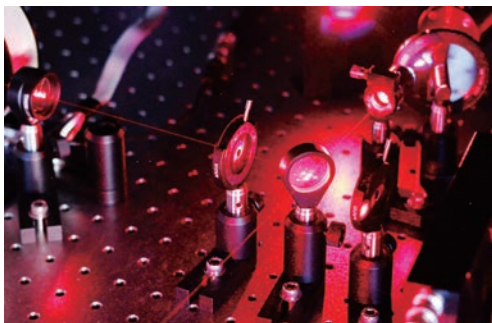


図 1. 光学系実験設備の写真。

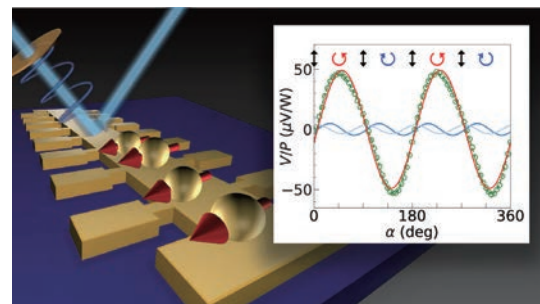


図 2. 光スピン変換現象の模式図と実験結果。

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 (4×10^9 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。

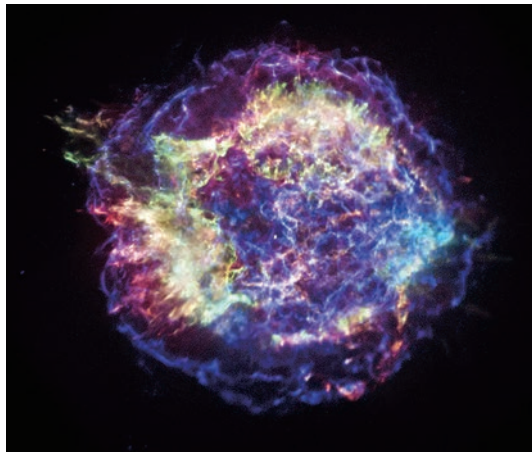


図 1:「Chandra」衛星で見た超新星残骸 Cassiopeia A の X 線画像。1682 年に爆発した星の残骸が、現在も 4000 km s^{-1} で膨張を続けている。放射は主に爆発でまき散らされたシリコンや鉄などからの特性 X 線 (赤、緑) やほぼ光速まで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射 (青) である。

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、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) などの観測を進めている。また、2016 年 2 月 17 日に打ち上げた「ひとみ」衛星は残念ながら運用停止したものの、その開発と立ち上げ運用、そして観測では中心的役割を果たし、現在残された観測データの解析に全力を挙げている。「ひとみ」が運用されたのは短期間ではあったが、その間に取得されたデータは設計通りの性能が達成されたことを示した。例えば、銀河団中のガスが考えられていたよりずっと静かだったこと、銀河団中の化学汚染が従来の観測結果とは違い太陽組成に近かったことなど、多くのインパクトのある成果を生みつつある。現在は、「ひとみ」衛星の分光機能に特化した XRISM 衛星計画に参加し、2022 年度の打ち上げに向けて開発を進めている。

また XRISM の先の将来を見据え、cipher 計画と GRAMS 実験を主導している。cipher 計画は世界初の硬 X 線撮像偏光観測を目指し、数十センチサイズの超小型衛星で打ち上げ予定である。また GRAMS は、暗黒物質の測定とともに宇宙観測に残された最後の未開の窓である MeV ガンマ線帯域を観測する計画で、装置の中心部である液体アルゴン検出器の開発を進めている。これらの衛星が打ちあがった暁に見られる「予想もしていなかった宇宙」が非常に楽しみである。

HP: <http://energetic-universe.phys.s.u-tokyo.ac.jp/>

「生体分子・細胞・個体の1分子生物物理学」

生物物理学とは、物理学や物理化学を用いて生物の基本原則の理解を目指す学問であり、原子・分子スケールから個体や生態系までの全階層を対象としています。その中で、樋口研は、原子・分子・細胞・個体の各階層に注目し、物理工学、生化学、細胞生物学、基礎医学などとも密接に関係して研究を展開しています（図）。具体的な研究テーマを以下に説明します。

1 精製されたタンパク質のメカニズムの解明

生命活動を司る高分子（タンパク質、DNA、RNA）は卓越した機能を有しているのですが、そのサイズは数ナノメートルしかなく、まさに“高性能ナノマシン”です。我々研究室では、小胞輸送や筋収縮、細胞分裂を司るモータータンパク質の運動メカニズムの解明と細胞の動的な骨格であるアクチンと微小管の物理化学的ダイナミクスの解析を行い、定量的な結果を元に理論的な解析も行っています。

2 培養細胞機能の分子レベルの研究

我々の体を守る免疫細胞や我々を脅かすがん細胞はアメーバ様の活発な運動を行います。この運動それ自身がおもしろいだけでなく、運動は細胞の免疫機能や転移能とも関連しています。細胞内のどのような分子が運動に寄与するのか、細胞内ではどのような輸送形態が存在するのか、など細胞の機能の根源に迫りつつ分子機構の解明を行っています。この研究の他に細胞の情報伝達、細胞社会の乱れたガン細胞の診断方法の研究も手がけております。

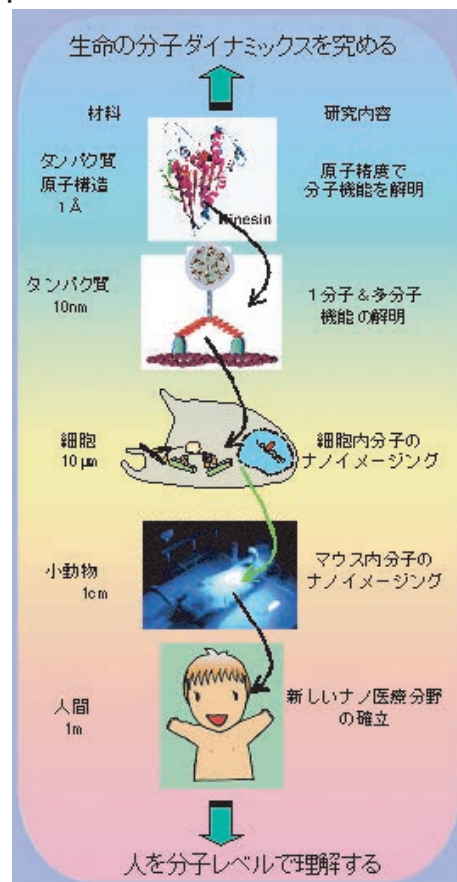
3 マウス内の細胞の分子機能の理解

細胞実験において用いる培養細胞は、限られた細胞をプラスチックの上で育てるので、マウスなどの個体内の環境とは大きく異なります。した

がって、我々は、生きたマウス内の細胞や分子を観察する方法を開発し、細胞や分子の真の機能を探求してきました。現在は、マウスを傷つけることなく個々の細胞や1分子を観察する方法を開発し、がん化メカニズム・免疫細胞・筋肉の運動メカニズムを調べています。これらの研究が将来分子生物学や基礎医学と合流することで新しい学問に発展することが期待されています。

4 運動機能の普遍的な物理モデル

細胞内の小胞の運動過程は様々なタイプの揺らぎに支配されています。例えば「方向のランダム性」と「反応のランダム性」時間と空間とともに変化しますので、これらの寄与を小胞の運動に取り入れた物理モデルの構築をおこなっています。これらを基礎として、細胞の運動と形の関係やタンパク質分子な運動を理論化する試みを進めています。



1 研究の背景

自然界には4つの相互作用があることはご存知でしょう。「電磁気力」、「重力」は身近なものです。弱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 β 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。

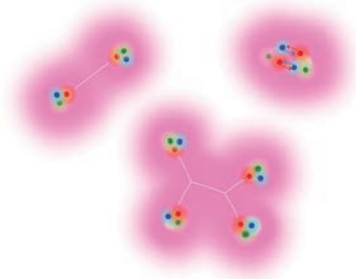
4つの相互作用のなかで、強い相互作用は、自然界の成り立ちを考えるうえで最も本質的な役割を果たします。強い相互作用を媒介するグルーオン、そして強い相互作用をうけるクォークの非摂動的なダイナミクスが解ければ、多くのことを純粋に理論から説明、予言できます。陽子や中性子といった核子はクォーク3つの束縛状態だと言われています。けれども核子の質量 $\sim 940\text{MeV}$ のうち、(ヒッグス由来の)クォーク質量は 10MeV 程度しかありません。ほとんどの質量はクォークとグルーオンの相互作用エネルギーで説明されるのです。

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 θ 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。実は、陽子や中性子が高密度でつまった状態、核物質がどのようにクォークへと転化していくのか、理論的にまだ分かっていないのです。我々は最近、量子パーコレーションによるクォーク物質への転化メカニズムを提唱しました。



上図は相互作用の雲をまとった陽子、中性子のイラストです。高密度では多くの粒子が同時に相互作用に関与し、雲が次第に成長することによってクォーク非閉じ込めが起こると考えています。

また、陽子や中性子をトポロジ的な巻付きで表現するスカーミオンという理論形式を用いて、スカーミオン結晶がどのようにクォーク物質に融けていくのか調べたりもしています。

3 今後の展開

現代の高エネルギー原子核理論は壮大な学問です。マイクロからマクロまで守備範囲が広く、またカイラル物質やトポロジ的な特徴付けなど普遍的な概念に満ち溢れています。今後はQCDで培った知見を光物性など他分野へ輸出していくことも視野に入れていきます。

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

i) 進化実験を用いた適応進化ダイナミクスの解析

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

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

ii) 多細胞生物における不可逆な分化過程の解析

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

3 今後の展開

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

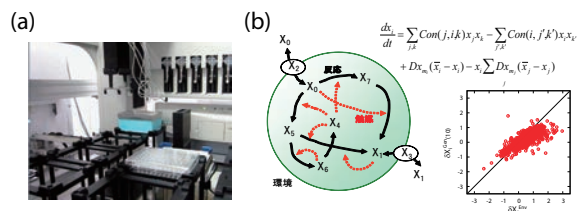


図 (a) ラボオートメーションを用いた進化実験システムの外観。 (b) 進化シミュレーションの一例。

1 M理論

本研究室の主要な研究テーマである超紐理論は、素粒子の相互作用として現在知られている4つの力の統一理論として、また唯一可能な一般相対論の量子論として活発に研究されている。現在矛盾のない超紐理論は5種類知られており、それぞれ10次元で定義されているが、90年代後半にこれらの5種類の理論は結合定数に関する強弱双対性と呼ばれる対称性で結びついており、一つの根本的な理論の様々なパラメータ領域における実現であると理解されるようになった。この基本理論はM理論と呼ばれており、11次元で定義される量子化された膜の理論であると考えられている。M理論はまだ定式化も明らかになっていないが、その存在を仮定すると弦理論やゲージ理論の双対性を幾何学的に理解できるのではないかと考えられている。M理論にはM2、およびM5ブレーンと呼ばれる2次元あるいは5次元に広がった膜のようなものが基本的な励起として存在していると予想されている。これらのブレーンの定式化や性質の解明を研究室の一つの研究目標にしている。

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

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

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

2 低次元可解模型を用いたゲージ理論の解析

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

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

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

1 研究の背景

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

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

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

2 最近の研究テーマ

現在、当研究室では下記のようなテーマを中心に研究を進めています。

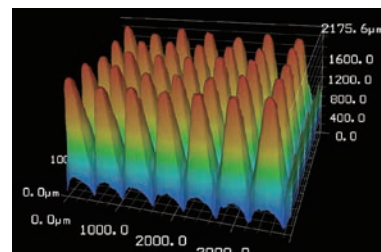
レーザー加工技術の開発

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

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

の極めて短いレーザーを空気中で集光すると、非線形効果でビームの伝搬が大きく変わってしまいます。これは当然、加工結果にも影響を及ぼします。我々は、このような空気と光との複雑な非線形現象の物理を明らかにすることで、フェムト秒レーザー加工技術のさらなる高性能化に取り組んでいます。

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



レーザー加工で作成したモスアイ構造

3 今後の展開

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

¹<http://www.ipst.s.u-tokyo.ac.jp/>

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

³R. Takaku *et al.*, Opt. Express **29** (25), 41745-41765 (2021).

村尾研究室

村尾美緒 教授

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

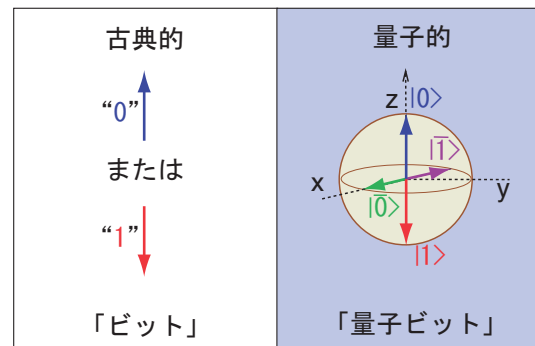
計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメント^注など量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させていることが特徴である。

最近では、量子ネットワークでつながった小規模量子計算機からなる分散型量子情報処理の研究や、量子計算機と乱択アルゴリズムを併用した量子系の測定・操作アルゴリズム、エンタングルメントを用いた量子計算の並列化と因果性の解析、トポロジカルな量子系におけるエンタングルメントや量子相関の解析、関数型量子プログラミングに向けた高階量子演算の定式化と解析、量子学習の枠組みによる因果関係の考察など、多岐にわたるテーマを関連づけながら研究を進めている。

量子情報は数学・計算機科学・情報工学とも関連が深いため、物理のみならず幅広い視野をもって研究することが望まれる。量子情報では、いわゆ

る『物理的直感』に反する現象も多く、先入観を排して論理のみに基づいて緻密に証明を詰めることが重要となる一方で、発想の転換によって新たな手がかりをつかむ発想力や独創性も不可欠である。このため、異なる背景を持つ国内外の様々な研究者との議論を通じて効率良く研究を進める場合が多い。

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



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

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

研究室ホームページ:

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

諸井研究室

諸井 健夫 教授 福田 朝 助教

1. はじめに

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

- 新たな素粒子理論の構築とその検証方法の探求
- 素粒子現象を記述する場の理論の理解
- 初期宇宙の理解と宇宙進化のシナリオの構築

2. 研究の背景

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

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

3. 研究内容

素粒子物理学や初期宇宙論の研究には、場の理論や重力理論についての理解と、素粒子実験や宇宙観測実験についての知識とが要求されます。それらを総合的に研究しつつ、テラスケール以上のエネルギーにおける素粒子理論を確立し、その知見を用いて正しい初期宇宙像を構築することが、本研究室における活動の目標です。

テラスケール以上の物理を考える上で重要なことのひとつに、ヒッグス粒子の理解があります。LHC 実験はヒッグス粒子を発見しましたが、その性質については未知の部分が多く残されています。ヒッ

グス粒子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ことは重要です。今後 LHC 実験によるヒッグス粒子の性質の精密測定が進むこともあり、ヒッグス粒子に関する理論的研究は、現在力を入れている研究のひとつです。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。真空の崩壊、特に真空の崩壊の場の理論に基づく理解も、現在取り組んでいるテーマのひとつです。

また、標準理論を超える新たな物理が必要とされる理由のひとつとして、暗黒物質の存在が挙げられます。様々な宇宙観測から暗黒物質の存在は確定的と言えますが、その素粒子論的性質はまだ理解できていません。特に素粒子標準模型の粒子の中には暗黒物質となり得る粒子は存在しません。暗黒物質を素粒子論的な観点から理解しようとするとき、素粒子標準模型の拡張は不可欠です。本研究室では、暗黒物質を含むような素粒子模型の新たな可能性について探求しています。また、暗黒物質探査の新たな実験・観測的手法についても研究を行っており、素粒子実験や天体観測に基づく手法に加え、マグノンや物性系アクシオンなどの物性系素励起を用いた暗黒物質探査の新たな可能性についても研究を進めています。

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

素粒子論研究室ホームページ:

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

個人のホームページ:

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

1 はじめに

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

2. 星形成領域の観測的研究

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

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

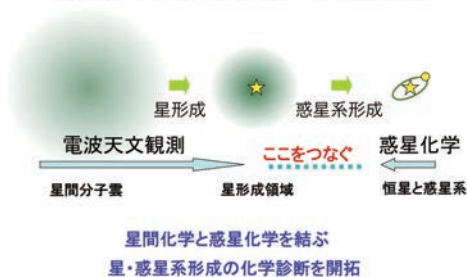
一方で、星形成領域の化学組成には天体ごとのバリエーションがあることを見出した。その最も端的な例は、おうし座の L1527 である。そこでは星形成領域ではほとんど見られない炭素鎖分子が豊富に存在する。これは、原始星近傍において、星間塵からの CH_4 の蒸発が引き金となって爆発的に炭素鎖分子が生成しているものと見られる。これを Warm Carbon Chain Chemistry (WCCC) と名付けた。一方、この天体では HCOOCH_3 のような複

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

3. テラヘルツ・ヘテロダインセンシングへの挑戦

サブミリ波領域での観測研究とともに、さらに周波数の高いテラヘルツ帯（1 THz - 3 THz）における観測技術の開拓を進めている。そのために、専用装置を使って数 100 nm のマイクロブリッジ構造をもつ超伝導ホットエレクトロン・ポロメーター (HEB) ミクサ素子の開発を行っている。現在のところ、NbTiN を超伝導物質に用いた導波管型 HEB ミクサにおいて、0.8 THz 帯で 350 K、1.5 THz 帯において 490 K の世界最高水準の受信機雑音温度を達成している。超伝導薄膜の改良や素子構造の最適化を通して、一層の性能向上を追求している。この受信機をチリのアタカマ砂漠にある ASTE 10 m サブミリ波望遠鏡に搭載し、1.5 THz 帯にある CH , HD_2^+ , H_2D^+ などの基本的分子を観測することにより、星形成から惑星系形成に至る化学進化を探求することを目指している。すでに試験搭載に成功しており、科学運用に向けた準備を進めている。

星間分子雲から惑星系への物質進化



横山順一研究室

横山 順一 教授 鎌田 耕平 助教

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、宇宙理論研究の須藤研究室・吉田研究室と協力して行っています。

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

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

2 最近の研究の概要

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

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

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

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

3 今後の展望

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

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

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

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

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

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

横山将志・中島研究室

横山 将志 教授 中島 康博 准教授 中桐 洸太 助教

1 研究の概要

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

これら世界最先端の実験設備を使って、自分たちの手で素粒子や宇宙の謎を実験的に解き明かすことが、我々の目標である。

2 スーパーカミオカンデ

スーパーカミオカンデは、直径約 40 m、高さ約 42 m の円筒形の水槽内に約 11,000 本の 50 cm 径光電子増倍管を備えた、世界最大の地下ニュートリノ観測および陽子崩壊探索実験装置である (図 1)。我々は、2020 年夏にレアアースの一種であるガドリニウムを加え、SK-Gd として新たな観測を開始した。ガドリニウムは中性子捕獲効率が極めて高く、また捕獲後にスーパーカミオカンデでも検出可能な比較的高いエネルギーのガンマ線を放出する。これにより、ニュートリノ反応の測定感度が飛躍的に向上した。

SK-Gd で可能になる多数の研究の中でも、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、

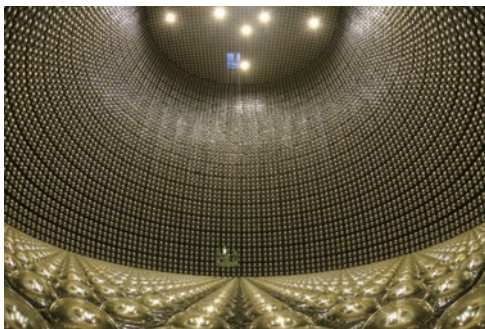


図 1. スーパーカミオカンデ検出器の内部。

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

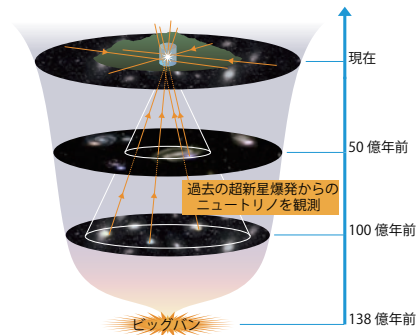


図 2. 超新星背景ニュートリノ。過去の宇宙の歴史の中で起こった超新星爆発により生成されたニュートリノが蓄積し、現在の宇宙に漂っている。

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

スーパーカミオカンデは 1996 年の運転開始以降、長い歴史を持つ測定器であるが、我々は継続して装置や解析手法の改良を行い、世界のニュートリノ研究を牽引してきた。さらに、2022 年にはガドリニウムを追加で導入することで更なる高感度化を実現する予定である。今後も新生 SK-Gd において新たな観測に挑戦してゆく。

3 T2K 実験

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

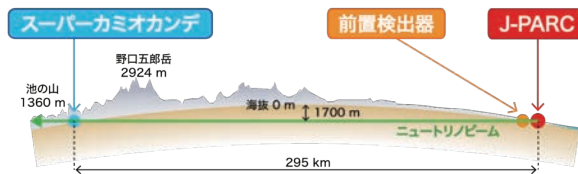


図 3. T2K 実験の概要図。J-PARC からのニュートリノビームを 295 km 離れたスーパーカミオカンデで観測し、ニュートリノ振動現象を研究する。

T2K 実験では、ニュートリノと反ニュートリノでのミューオン型から電子型への遷移確率の差異を見ることで、物質と反物質の性質の違い (CP 対称性の破れ) を観測することができる。

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

CP 対称性の破れの測定やニュートリノ振動パラメータの精密測定のためには、ニュートリノと原子核の反応やニュートリノビームの強度を正しく理解し、測定の系統誤差を小さくすることが重

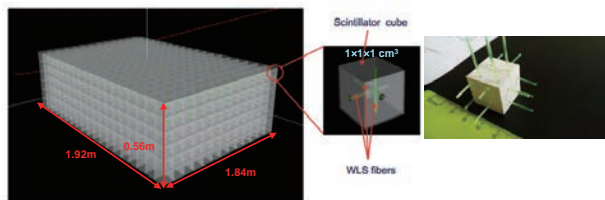


図 4. 新ニュートリノ検出器のひとつ、SuperFGD の概念図。1×1×1 cm³ のプラスチックシンチレータ約 200 万個により、検出器内部で起きたニュートリノ反応の詳細な情報を捉える。

要である。T2K 実験では振動前のニュートリノを J-PARC 敷地内に設置した前置検出器で測定し、これらの系統誤差削減に役立っている。我々の研究室は、ニュートリノ反応をさらに精密に測定するために、この前置検出器をより高性能な装置 (図 4) にアップグレードするプロジェクトを提案し、中心グループのひとつとして推進している。

4 ハイパーカミオカンデ

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

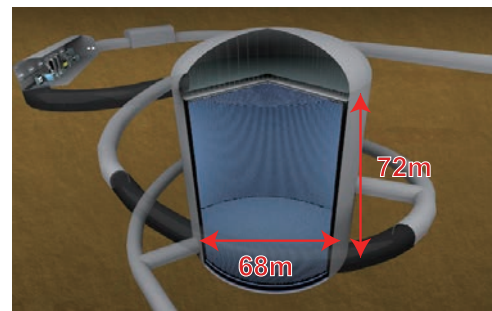


図 5. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。

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

ハイパーカミオカンデの建設は 2020 年に始まり、2027 年の運転開始に向けて準備を進めている。スーパーカミオカンデのものよりも光検出効率、電荷分解能、時間分解能などの性能がそれぞれ 2 倍改善した、高性能光電子増倍管の大量生産も開始された。我々の研究室では、検出器の建設計画全体を取りまとめ国際共同実験を牽引することに加え、光電子増倍管の性能検査や、較正方法の確立など、検出器の性能を最大に引き出すための開発研究を行う。また、T2K 実験での経験をもとに、新たな前置検出器の設計開発も行う。陽子崩壊、加速器ニュートリノ、超新星ニュートリノ、太陽ニュートリノなど、幅広い物理を対象に研究を進め、次世代のサイエンスを切り拓くことを目指している。

1 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

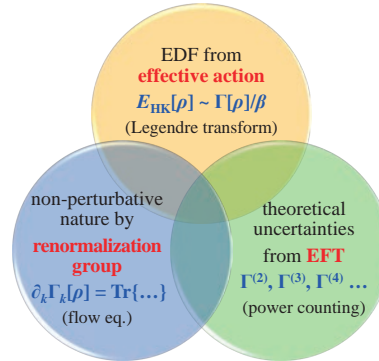
Consistent nuclear database for astrophysical nucleosynthesis study

- Nuclear mass and β -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.

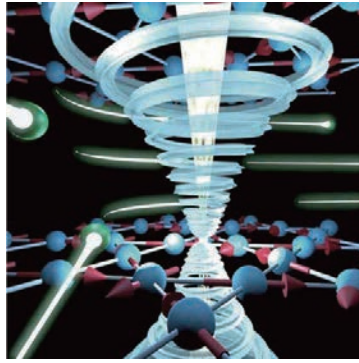
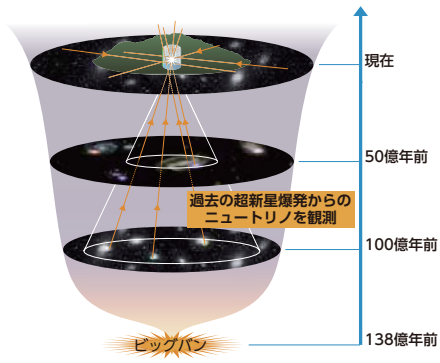


ab initio nuclear DFT oriented by QFT.

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.



【図について】

左) 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、「超新星背景ニュートリノ」として現在の宇宙に漂っている。スーパーカミオカンデではこの世界初観測を目指している。

右) Mn_3Sn で実現している実空間のカイラル反強磁性秩序と波数空間のワイル点の概念図。電子はワイル点から生ずる波数空間の仮想磁場（ベリー曲率）を感じて横方向の伝導現象（ホール効果やネルンスト効果）を示す。

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/>

