

《 図について 》

左)超解像顕微鏡でみたミトコンドリア外側表面:

図の左上側は従来の顕微鏡像で、右下側が我々の開発した超解像顕微鏡による像。
ミトコンドリアの外側表面の膜の複雑な動態が世界で初めて観察された。

右)チリアタカマ高地に建設中のSimons Array望遠鏡群(手前):

138 億年を経て今もお地球に降り注ぐ光(電波)である「宇宙背景放射」を
最先端の電波望遠鏡で精密測定することを目指している(写真:Mark Devlin)。

2019
進学案内資料
東京大学理学部物理学科

2019

進学案内資料

東京大学理学部物理学科

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

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



大きな夢と、実現する力と、少しの勇気を身につけて

物理学専攻長、物理学科長 山本 智

現在、世界は経験したこともないさまざまな課題に直面し、容易に先を見通せない時代を迎えつつあります。今、大学生という最も成長できる年齢にある皆さんが、この時代を生き抜くために求められていることは、原点に立ち戻って課題を整理し、その本質を見抜き、それを解決に導く力を身につけることです。実は、これはまさに物理学の方法論です。物理学は、実験と理論を両輪に、我々を取りまく森羅万象の本質を一つ一つ解き明かし、普遍的な法則や概念にまとめ上げてきました。この方法論は、物理学自体を常に深化させるとともに、天文学、地球科学、化学、生物学などの理学の分野のみならず、工学、情報学や経済学の分野にまで対象を広げてきました。今や、物理学はありとあらゆる科学の基礎とそれらの発展を支えていると言ってもよいでしょう。同時に、物事を原点から論理的に考える力は、科学の世界のみならず、現代社会のあらゆる分野で求められていることでもあります。

19世紀末から発展してきた近代物理学は、さまざまな実験事実をもとに、物質が分子や原子からなることを突き止め、さらに原子核を構成する素粒子を発見してきました。21世紀に入り、質量の起源をも解明し、ダークマター、ダークエネルギーの正体にも迫ろうとしています。今や物質の成り立ちの探求は、宇宙の始まりとつながりつつあります。一方、熱力学や統計力学は、対象やスケールの違いを超えて多様な系を理解する上で大きな役割を果たし、その上に物性物理学、非平衡物理、生物物理、量子情報などの世界が大きく発展しつつあります。また、レーザーを駆使した光子サイエンスは、極低温物理の世界を革新し、超精密な時計を実現し、アインシュタインの最後の宿題である重力波の検出を成功させました。このように物理学は大きく発展しつつありますが、常に一つの謎が解決すると、また新たな謎が生まれてきます。自然はそれほど深いものです。

物理学科では、世界的にも卓越した物理学者である40名近くの教授・准教授・講師が在籍し、物理学の広い分野をカバーして教育・研究を行っています。学部3・4年時では、量子力学、統計力学、電磁気学、相対論など物理学の基礎となる講義だけでなく、充実した実験カリキュラムも用意されており、理論・演習・実験をバランスよく学ぶことができます。4年時には研究室に所属して最前線の研究に触れる機会もあり、大学院での研究へとつながっています。

物理学科での学びで、ぜひ大きな「夢」を育んでください。ぜひ、自分が成し遂げたいことを見つけてください。充実したカリキュラムで鍛えた強い「力」と少しばかりの「勇気」をもって、その「夢」に向かって自分の道を切り開いて行ってください。私たち物理学科の教員は、そのような皆さんを全力で応援します。

東京大学理学部物理学科 教員一覧

氏名	専攻分野	研究内容
相原博昭	高エネルギー物理学	高エネルギー素粒子実験を専門としている。高エネルギー加速器研究機構(KEK)のスーパーBファクトリー(SuperKEKB)を使った粒子・反粒子非対称性(CP非保存)や、B中間子やタウレプトンの稀崩壊の測定をもとに、素粒子の標準理論を超える新しい素粒子物理法則を探索している。J-PARCの大強度陽子加速器で発生させたニュートリノビームを使ってニュートリノの性質の精密測定を行っている。さらに、すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究も推進している。
浅井祥仁	素粒子物理学実験	(1)世界最高エネルギー・LHC加速器を用いたアトラス実験において、標準理論を超えた新しい素粒子物理学を切り拓く研究:物質の質量の起源を担うヒッグス粒子の発見や、超対称性粒子の発見に向けた研究を行っている。ATLASグループの超対称性研究の責任者(2)ポジトロニウムなどを用いた非加速器、小実験を通して、QEDの精密検証やAxionやDark Energyなど新しい素粒子現象の探索を行う。
安東正樹	重力波物理学・相対論実験	宇宙を見る新しい目として重力波天文学の発展を目指す。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。
井手口拓郎	光科学	先端レーザー光源を用いた光科学。特に、光周波数コムなどの超短パルスレーザーを駆使した超高速分光計測や、顕微イメージング手法を開発している。これらの手法は、物理学のみならず、化学、生物学、医学、薬学、マテリアル科学等の分野での強力なツールとなり、新しい研究分野を創出する可能性を持つ。また、光技術とナノ工学、マイクロ流体工学などを融合することで、新しい異分野融合型研究の創出を目指している。
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(ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ超流動)、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。当研究室は高瀬教授とともに、TST-2球状トカマク装置(東大)を用いて実験を行っている。さらに、LHD装置(核融合研)、QUEST装置(九大)との共同研究も行っている。
岡田康志	生物物理学	当研究室では、超解像顕微鏡など最先端のイメージング技術を開発し、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、場の理論や数理論理学的手法、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。
金子邦彦	複雑系生命科学、普遍生物学、非線形動力学	生命システムがみたくべき普遍的論理を、統計物理、力学系理論のウイングを広げながら、解明する、特に、部分(マイクロ)からなる全体(マクロ)が決まらないと部分の性質が決まらない「複雑系」の視点をふまえて、複製、適応、発生、分化、進化などの普遍法則を探り出す。一方で、大自由度力学系の中に、生命らしい性質や認知過程の基盤がいかんして宿るかにも興味がある。

氏名	専攻分野	研究内容
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たす他、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・超高圧・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の検出を目指す。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、ニュートリノ)の正体を探る。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。
酒井広文	最先端レーザー技術を駆使した原子分子物理学実験	最先端レーザー技術を駆使した原子分子物理学実験。(1)高強度レーザー電場を用いた気体分子の配列・配向制御とその応用、(2)非摂動論的高次非線形光学過程(多光子イオン化や高次高調波発生など)に代表される高強度レーザー物理や原子分子中の超高速現象、(3)軟X線領域の単一アト秒パルス発生とその偏光制御、及び原子分子中の電子の超高速ダイナミクスの制御への応用、(4)X線自由電子レーザー光を用いた分子構造とその超高速ダイナミクスの観測、(5)整形されたフェムト秒レーザーパルスによる原子分子中の量子過程制御。
櫻井博儀	原子核物理学実験	重イオン原子核実験 重イオン核反応を用いて不安定核のビームを生成し、安定線から遠く離れたエキゾチック原子核の特異な性質・現象を調べる。研究テーマは、1)高速RIビームを用いた新手法の開発による不安定核の核構造、ダイナミクスの研究、2)RIビーム開発と核存在限界の探索、3)重イオン核反応の反応機構、等である。実験は主に理化学研究所加速器研究施設・不安定核ビーム生成装置を用いて行っている。
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、などに具体的興味のある中心がある。舞台となる物質を自ら開拓すると同時に、電子輸送現象、熱物性、量子ビーム回折・散乱などのプローブを駆使して、ナノの世界での相関電子の静的・動的自己組織化構造を明らかにする。
高瀬雄一	プラズマ物理・核融合	プラズマは荷電粒子の集合体であり、非線形複雑系の典型例である。高温プラズマでは散逸が小さいので、熱平衡から遠い状態にある。また非線形性が顕著に現われ、それが発展して乱流状態が形成され、これらを介して複数の状態間で遷移を起こし、自ら構造を形成していく。高温プラズマは核融合発電に応用できるが、その実現はプラズマの振る舞いの物理的理解および制御にかかっている。本研究室では、TST-2球状トカマク装置のほか、国内外の大型核融合装置も使って高温プラズマ中の波動現象、不安定性、乱流等の研究を行っている。
竹内一将	非平衡物理学、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、大腸菌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、乱流相転移や成長過程に伴う非平衡ゆらぎの普遍的統計法則を中心に研究しているが、これに限らない。生物実験は、微小流体デバイスで実現する均一な条件下で、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に主な関心がある。その他、非平衡の物理法則に関わる興味深い問題に広くアンテナを張り、新しいテーマにも積極的に取り組むことにしている。
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、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。

氏名	専攻分野	研究内容
藤堂眞治	計算物理・物性理論	モンテカルロ法などの確率的手法、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、統計的機械学習など計算物理学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スピン系やボーズハバード模型などの強相関系から現実の物質にいたるまで、量子多体系に特有のさまざまな状態、相転移現象、ダイナミクスの解明を目指す。最先端スーパーコンピュータの能力を最大限に活かすための並列化手法の研究、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。
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	物性物理学	電子スピンの関与する物性物理に関する研究。スピン軌道相互作用が生み出す新たな物理現象の探索・解明と、電子スピンと光、格子振動や機械運動、超伝導状態などが強く結合した量子状態の実現を目指す。量子情報の基盤技術に展開できる物性研究を行います。
馬場 彩	宇宙物理学実験	宇宙は冷たく空っぽの静かな世界に見えるが、実は熱く激しい天体现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、地上や宇宙空間の望遠鏡で観測し、宇宙の力学的進化・化学的進化を探っている。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、日本を主体とした宇宙高エネルギー衛星「XRISM」「FORCE」の開発や超小型衛星を用いた偏光X線観測計画の立案、超高エネルギーガンマ線望遠鏡CTA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次元運動をÅ精度で解析し、Åレベルの運動メカニズムの解明を行う。2.細胞内モーター分子の変位と力を3次元的に測定し、力学状態の時空間的变化を解析する。3.マウス内モーター分子の運動を解析し、個体内細胞の運動を明らかにする。4.細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する。
福嶋健二	原子核理論	自然界の最も基本的な相互作用のひとつである『強い相互作用』の織り成す物理をさまざまな手法を用いて研究しています。強い相互作用するクォークとグルーオンが、パイ中間子や核子などハドロンを作り、多数のハドロンが集まって我々の身の回りの物質を構成しています。超高温・超高密度・強い外場(磁場・電場・重力場など)の中では、身近な物質からは想像もつかない面白い物性が『強い相互作用』の性質から導かれます。既知の理論から新奇現象を探る理論研究を目指しています。
福山 寛	低温物理学	低温物理学: (i) 超低温におけるヘリウムの量子物性。特に単原子層ヘリウム膜を舞台とした量子スピン液体や超流動量子液晶など新奇な量子相の正体を、NMR、比熱、流れの測定から解明する。(ii) カーボンナノマテリアルの電子物性。特にグラフェンのスピン偏極エッジ状態やカーボンナノチューブのランダムネットワークにおける朝永・ラッティンジャー状態などを、極低温での走査トンネル分光や輸送現象の測定から解明する。
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。

氏名	専攻分野	研究内容
松尾 泰	素粒子理論	量子重力、超弦理論、場の量子論、可解な量子系、およびそれに関連する数理論理学が主要な研究トピックスである。より具体的な最近のテーマとしては、M理論に現れるブレーンの定式化、それに関連する新しい対称性や幾何学、また、ゲージ理論や低次元可解模型に現れる無限次元対称性などがあげられる。
村尾美緒	量子情報 (理論)	計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえる。そして、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果を解明することによって、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深めるとともに、エンタングルメントなど量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などへ応用するための理論的研究を行っている。
諸井健夫	素粒子論・宇宙論	素粒子理論・素粒子論の宇宙論
山本 智	宇宙物理学、星間化学、分子分光学	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も進めている。
湯本潤司	光物性、量子エレクトロニクス	結晶、金属等の凝縮系に高強度レーザー光が照射されると、物質内の電子や原子は、励起状態に遷移するだけでなく、脱離現象も起こす。このような現象は、非線形、非平衡、開放系の物理として扱う必要があり、最も難しい課題のひとつである。この現象を、フェムト秒の時間分解能で、更に、フェムト秒からマイクロ秒の10桁以上の時間スケールで追及し、その知見をレーザー加工などへ発展させる。
横山将志	素粒子物理学実験	素粒子物理学の実験的研究。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に向けた研究を進めている。
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の稼働を控え、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。
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。

以上 39名

2019年度 学部時間割

2019年度

2年 A semester

	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) 物理数学 II (A2ターム)	物理学演習 I		
金					

3年 S semester

	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		統計力学 I	物理学実験 I		
金	幾何学XC	流体力学	物理学演習 IV (統計力学 I S2ターム)		

3年 A semester

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

4年 S semester

	1限	2限	3限	4限	5限
月		一般相対論	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	場の量子論 I	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		固体物理学 II	特別実験 I 理論演習 I		
金	プラズマ物理学 幾何学XC	宇宙物理学	自然計算 量子計算科学	生物物理学特論 I	

4年 A semester

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

2018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: 相対性原理、ローレンツ変換、速度の変換、時空間の幾何学と時空のダイアグラム、固有時間と時間の遅れ、ローレンツ収縮、相対論的エネルギーと運動量、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: スカラー・ベクトル・テンソル、4元ベクトル、連続の方程式と4元電流、4元ポテンシャルとローレンツゲージ、一
3. 電磁場内の電荷の運動: 場の中の粒子の運動方程式、一様な静電場中の運動、一様な静磁場中の運動、一様な静電磁場中の運動、電磁場のラグランジアン、エネルギーと運動量の保存則、点電荷の自己エネルギー

定速度で運動する点電荷がつくる電磁場電磁場テンソルと場のローレンツ変換

1.2 解析力学 : 常行 真司

1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ
 - 1.1 ニュートンの法則
 - 1.2 ガリレイ変換
 - 1.3 オイラー-ラグランジュ方程式
 - 1.4 一般化座標と拘束条件
 - 1.5 ダランベールの原理
 - 1.6 ホロノーム系に対するラグランジュ方程式
2. 最小作用の原理
 - 2.1 最小作用の原理
 - 2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出
 - 2.3 自由粒子のラグランジアン
 - 2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン
 - 2.5 ラグランジュ未定乗数法と拘束条件
3. 対称性と保存則
 - 3.1 時間の一様性 → エネルギー保存則
 - 3.2 空間の一様性 → 運動量保存則
 - 3.3 空間の等方性 → 角運動量保存則
 - 3.4 循環座標
 - 3.5 ネーターの定理
4. さまざまなラグランジアン
 - 4.1 回転座標系とコリオリ力
 - 4.2 ローレンツ力
 - 4.3 摩擦のある系
5. ハミルトン形式と正準変換
 - 5.1 ルジャンドル変換
 - 5.2 ハミルトニアンと位相空間
 - 5.3 正準方程式
 - 5.4 正準変換と母関数
 - 5.5 正準変換の例
 - 5.6 正準変換の条件
 - 5.7 無限小変換
 - 5.8 ポアソン括弧式
 - 5.9 ポアソン括弧式と正準方程式
 - 5.10 ポアソン括弧式と無限小変換
 - 5.11 ハミルトン-ヤコビの方程式
 - 5.12 リウヴィルの定理
6. 補遺
 - 6.1 相対論における解析力学
 - 6.2 分子動力学法

1.3 量子力学 I : 福嶋 健二

1. 量子力学の導入
 - 1.1 歴史的背景
 - 1.2 古典・量子運動方程式
2. 1次元 Schrödinger 方程式
 - 2.1 変数分離
 - 2.2 1次元束縛問題
 - 2.3 1次元散乱問題
 - 2.4 半古典 (WKB) 近似
3. 調和振動子
 - 3.1 1次元調和振動子の解法 I (生成消滅演算子)
 - 3.2 1次元調和振動子の解法 II (Sturm-Liouville 固有値問題)
 - 3.3 1次元調和振動子の解法 III (WKB 近似)

- 3.4 3次元調和振動子
- 3.5 コヒーレント状態、スクイーズド状態
- 4. 相対論的量子力学入門

1.4 物理実験学：酒井 広文, 藤森 淳

- 1. 序論 (物理実験の魅力)
- 2. 単位
 - 2.1 SI 基本単位の定義
 - 2.2 代表的な物理量の単位
 - 2.3 各種の常用単位系とその変換
- 3. 各種の計測法
 - 3.1 レーザーの基礎と光の計測
 - 3.2 放射線の基礎とその計測

1.5 物理数学 I：松尾 泰

Part I 複素関数論

- 1. 無限和と収束性
- 2. 複素関数
- 3. 正則関数の基本的な性質
- 4. 多価関数とリーマン面
- 5. 複素積分：応用例
- 6. デルタ関数
- 7. 部分分数展開、無限積表示

1.6 物理数学 II：吉田 直紀

- 1. フーリエ級数とフーリエ変換
 - 1.1 フーリエ級数展開
 - 1.2 フーリエ変換
 - 1.3 離散フーリエ変換
- 2. 偏微分方程式
 - 2.1 波動方程式
 - 2.2 熱伝導方程式
 - 2.3 ラプラス方程式とポアソン方程式

1.7 物理のための科学英語基礎：小野 義正

- 1. The DNA Controversy, 動詞の適切な時制、科学英語とは、日本人英語の欠点と改善策
- 2. Molecular Computers, 句読点の使い方、直接翻訳するな、和文和訳せよ、物主構文

- 4.1 電子スピンの歴史的背景
- 4.2 Pauli 方程式
- 4.3 Dirac 方程式

- 4. 実験の基礎技術
 - 4.1 実験環境技術
 - 4.2 試料作製技術
- 5. 誤差論
 - 5.1 実験誤差
 - 5.2 確率統計
 - 5.3 実験データの解析
- 6. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

- 8. ガンマ関数・ベータ関数・ゼータ関数、解析接続
- 9. 漸近展開と最急降下法
- 10. 等角写像

Part II 常微分方程式論

- 1. 解の存在と一意性
- 2. 積分により可解な微分方程式の例
- 3. 線形微分方程式
- 4. Laplace 変換

- 2.4 ラプラス変換
- 3. 直交多項式と特殊関数
 - 3.1 エルミート多項式
 - 3.2 ラゲール多項式
 - 3.3 ルジャンドル多項式
 - 3.4 ベッセル関数
 - 3.5 超幾何関数
 - 3.6 スツルム-リュウビル型固有値問題

- 3. Hurricanes and Global Warming, 文頭・数字の書き方、英語の基本は三拍子、パラグラフ・ライティング
- 4. Viruses Old and New, 関係代名詞の制限用法・

- 非制限用法、パラグラフ・リーディング
- 5. The Names of Living Things, 並列構造で書く、読みやすい英語 (論文) を書く
- 6. Fermat's Last Theorem, 数字・記号の表現法。起承転結はやめよう、日本語の構造 vs. 英語の構造
- 7. Nanoscience's Benefits and Risks, 名詞、「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
- 8. Time and the Brain, 冠詞、否定形をやめて、肯定形で書く、あいまいな現をさけ、きっぱりと

2 3年生 S セメスター

2.1 電磁気学 II：岡本 徹

- 1. 静電場
 - 1.1 基本法則
 - 1.2 電荷分布と静電場
 - 1.3 物質があるときの静電場
 - 1.4 境界値問題
- 2. 静磁場と準静的な磁場
 - 2.1 基本法則
 - 2.2 磁気双極子モーメント
 - 2.3 物質の磁化
 - 2.4 境界値問題

2.2 量子力学 II：上田 正仁

- 1. シュレディンガー方程式の性質
- 2. 角運動量
- 3. スピン
- 4. 対称性と保存則

2.3 現代実験物理学 I：岡田 康志, 北川 健太郎

- 1. 生細胞イメージングの物理的基盤、幾何光学と顕微鏡の基礎
- 2. 結像光学系とフーリエ変換
- 3. 顕微鏡の分解能限界と電顕、X 線結晶構造解析 (タンパク質)
- 4. 顕微鏡光学系 1.(位相差顕微鏡、微分干渉顕微鏡)
- 5. 顕微鏡光学系 2.(蛍光顕微鏡、共焦点顕微鏡)
- 6. 顕微鏡光学系の応用 (1 分子イメージング、光ビ

- 書く
- 9. The Neanderthals and Us, 短い簡潔な文を書く。辞書の使い方、参考文献
- 10. The Cold Fusion Dispute, 受動態を避けて能動態で書く、通じる英語のしゃべり方 1
- 11. The K-T Boundary, 連結語を使う、通じる英語のしゃべり方 2
- 12. Detecting and Deflecting Asteroid, 不必要な単語は省く、通じる英語のしゃべり方 3
- 13. Scientific Fraud, 元素記号、化学用語の音の仕方、英語口頭発表での注意点

- 2.5 準静的な磁場と電磁誘導
- 3. Maxwell の方程式と保存則
 - 3.1 物質中の Maxwell 方程式
 - 3.2 電磁ポテンシャル
 - 3.3 電磁場のエネルギー
 - 3.4 電磁場の運動量
- 4. 電磁波
 - 4.1 平面電磁波の基本的性質
 - 4.2 反射と屈折
 - 4.3 物質の交流電場に対する応答

- 5. 摂動論
- 6. 準古典近似
- 7. 観測過程
- 8. EPR のパラドックス

- ンセット)
- 7. 生体分子モーターの動作機構とブラウン運動
- 8. X 線結晶構造解析 (無機)
- 9. X 線を用いた実験
- 10. 極限環境技術の原理とその応用、発生方法 I (真空、低温)
- 11. 極限環境技術の原理とその応用、発生方法 II (圧力、磁場)

- 12. 電子の運動・軌道を利用した物性実験
- 13. スピンを利用した物性実験 I

2.4 流体力学：江尻 晶

- 1. 様々な流体
- 2. 流体の基礎方程式
 - 2.1 流体を特徴づける量
 - 2.2 連続の式
 - 2.3 力と運動方程式
 - 2.4 エネルギー方程式
 - 2.5 粒子の方程式から流体の方程式へ
 - 2.6 渦度と渦度方程式
- 3. 関数による流れの表現
 - 3.1 ポテンシャル流
 - 3.2 複素速度ポテンシャル

2.5 統計力学 I：桂 法称

- 1. 統計力学とは何か？
- 2. 確率論からの準備
- 3. 量子論からの準備
- 4. カノニカル分布と平衡統計力学
 - 4.1 平衡状態とは何か？
 - 4.2 等重率の原理とマイクロカノニカル分布
 - 4.3 カノニカル分布
 - 4.4 熱力学との関係
- 5. カノニカル分布の応用
 - 5.1 理想気体
 - 5.2 調和振動子

2.6 計算機実験 I：藤堂 眞治

- 1. UNIX の基礎
 - 1.1 UNIX コマンド
 - 1.2 C 言語プログラミング
 - 1.3 Gnuplot によるグラフ作成
 - 1.4 LaTeX による文書作成
- 2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法
- 3. 常微分方程式
 - 3.1 初期値問題と境界値問題

- 14. スピンを利用した物性実験 II、核磁気共鳴法

- 3.3 揚力
- 4. 粘性流
 - 4.1 Reynolds 数
 - 4.2 ストークス近似
 - 4.3 一様等方乱流と Kolmogorov 則
 - 4.4 フラクタルによる乱流の表現
- 5. 水波
 - 5.1 長い波
 - 5.2 表面波
- 6. 不安定性

- 5.3 常磁性と関連するモデル
- 5.4 古典的な粒子の系
- 6. 結晶の比熱
 - 6.1 アインシュタイン・モデル
 - 6.2 デバイ・モデル
- 7. グランドカノニカル分布
- 8. 量子理想気体の統計力学
 - 8.1 多粒子系の量子力学 (同種粒子の扱い)
 - 8.2 理想フェルミ気体
 - 8.3 理想ボース気体
 - 8.4 ボース・アインシュタイン凝縮

- 3.2 Euler 法・Runge-Kutta 法
- 3.3 陽解法と陰解法
- 3.4 Numerov 法
- 3.5 シンプレクティック積分法
- 4. 連立一次方程式
 - 4.1 物理に現れる連立一次方程式
 - 4.2 ガウスの消去法・LU 分解
 - 4.3 逆行列の求め方

- 4.4 LAPACK の利用

- 4.5 反復解法

- 5. 固有値問題

- 5.1 行列の性質・べき乗・指数関数

- 5.2 Jacobi 法・Givens 法・Householder 法

- 5.3 疎行列に対する反復法・べき乗法・Rayleigh-Ritz の方法・Lanczos 法

- 5.4 特異値分解・一般化逆行列

- 5.5 行列の低ランク近似

- 5.6 最小二乗法

講義資料は、<https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures> で公開。

3 3年生 A セメスター

3.1 光学：井手口 拓郎, 湯本 潤司

- 1. 光学入門
- 2. 幾何光学
- 3. 波動光学
- 4. 回折、フーリエ光学
- 5. 偏光光学
- 6. ビーム光学

- 7. 電磁波光学
- 8. 光の統計性
- 9. 光増幅器
- 10. 導波光学 (平面導波路)
- 11. 導波光学 (光ファイバー)

3.2 物理数学 III：立川 裕二

- 1. 群の基本的な性質
 - 1.1 群の定義と例
 - 1.2 群の作用と軌道
 - 1.3 群の同型、部分群
 - 1.4 準同型と正規部分群
- 2. 群に関する幾つかの話題
 - 2.1 $SO(3)$ の有限部分群について
 - 2.2 結晶群の話
 - 2.3 $SO(3)$ と $SU(2)$ の関係
 - 2.4 古典群の話

- 2.5 有限群の話
- 3. 群の表現
 - 3.1 可換群の場合
 - 3.2 有限群の場合
 - 3.3 コンパクト連続群の場合
 - 3.4 リー代数とルート系、その分類
- 4. 雑多な話題
 - 4.1 スピノル表現によるイジング模型の解法
 - 4.2 Monstrous Moonshine の話

3.3 量子力学 III：諸井 健夫

- 1. 同種粒子
 - 1.1 同種粒子からなる多体系：ボース粒子
 - 1.2 同種粒子からなる多体系：フェルミ粒子
 - 1.3 第 2 量子化
- 2. 電磁場中の荷電粒子
 - 2.1 ゲージ対称性とシュレディンガー方程式
 - 2.2 磁場中の荷電粒子

- 2.3 ランダウ準位
- 2.4 アハラノフ・ボーム効果
- 3. 散乱
 - 3.1 散乱断面積
 - 3.2 グリーン関数
 - 3.3 ボルン近似
 - 3.4 部分波展開と位相のずれ

3.4 生物物理学：岡田 康志, 樋口 秀男

1. 生命とは何か、生命誕生と遺伝情報
2. タンパク質の構造と安定性
3. タンパク質の 1 分子機能
4. 筋肉運動の分子論
5. エネルギー生産系
6. 細胞内の分子たち
7. 人体の分子による制御

3.5 固体物理学 I：小形 正男

1. 概要と復習
量子力学、統計力学、原子構造など
2. 原子から分子・固体へ
3. 周期ポテンシャル中の電子とエネルギーバンド
4. 電子物性、電子比熱、DOS

3.6 電磁気学 III：安東 正樹

1. 電磁波の基礎
 - 1.1 自由電磁場とその性質
2. 電磁波の放射
 - 2.1 遅延ポテンシャルと先進ポテンシャル
 - 2.2 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

3.7 現代実験物理学 II：浅井 祥仁, 馬場 彩

1. 実験における統計・誤差
2. 放射線と物質の反応基礎
3. 相対論

3.8 統計力学 II：宮下 精二

1. 相互作用がある系での統計力学
 - 1.1 相転移現象
 - 1.2 平均場近似
 - 1.3 転送行列
 - 1.4 臨界現象の普遍性とスケーリング
2. 非平衡統計力学

8. 神経科学概論
9. 細胞膜の電気的性質 1. 平衡電位と静止電位
10. 細胞膜の電気的性質 2. 活動電位と H-H 方程式
11. 細胞膜の電気的性質 3. ケーブル理論と伝導速度
12. シナプスと可塑性
13. チャンネル、ポンプ、レセプター
14. 神経細胞の生物物理学

5. 格子振動とフォノン、格子比熱
6. 固体中電子のダイナミクス
7. 金属と伝導電子
電気伝導、熱電効果などの輸送係数

- 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

4. 断面積と崩壊率
5. 加速器実験装置
6. マルチメッセンジャー宇宙物理学実験

- 2.1 線形応答理論
- 2.2 オンサーガーの相反定理
- 2.3 久保公式
- 2.4 マスター方程式
- 2.5 ランジェバン方程式

3.9 計算機実験 II：藤堂 眞治

1. 対角化と量子力学
 - 1.1 二重井戸ポテンシャル
 - 1.2 積分による解法
 - 1.3 二分法
 - 1.4 対角化による解法
 - 1.5 解析計算による次元削減
2. モンテカルロと統計力学
 - 2.1 多体系の統計力学
 - 2.2 モンテカルロ積分
 - 2.3 疑似乱数
 - 2.4 マルコフ連鎖モンテカルロ
3. 行列の方法・分子動力学と統計力学

講義資料は、<https://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/ja/lectures> で公開。

4 4年生 S セメスター

4.1 場の量子論 I：濱口 幸一

1. Introduction

- 1.1 Course objectives
- 1.2 Quantum Mechanics and Quantum Field Theory
- 1.3 Notation and convention
- 1.4 Various fields
- 1.5 Plan
- 1.6 Hilbert space and Hamiltonian of (infinitely) many particles
- 1.7 About homework problems (and the grade)

2. Scalar (spin 0) Field

- 2.1 Lagrangian and Canonical Quantization of Scalar Field
- 2.3 Equation of motion (EOM)
- 2.4 Solution of the EOM
- 2.4 Commutation relations of a and a^\dagger
- 2.5 a^\dagger and a are the creation and annihilation operators
- 2.6 Vacuum state, one-particle state and n-particle state

3. Lorentz transformation, Lorentz group and its representations

- 3.1 Lorentz transformation of coordinates
- 3.2 Infinitesimal Lorentz transformation and generators of Lorentz group (in the 4-vector basis)

- 3.1 数え上げ
- 3.2 転送行列法
- 3.3 C 言語における行列・LAPACK の利用
- 3.4 分子動力学法
4. 最適化
 - 4.1 最適化問題
 - 4.2 ニュートン法
 - 4.3 囲い込み法
 - 4.4 最急降下法・勾配降下法・共役勾配法
 - 4.5 Nelder-Mead の滑降シンプレックス法
 - 4.6 シミュレーテッド・アニーリング

3.A Other (disconnected) Lorentz transformations

- 3.3 Lorentz transformation of scalar field
- 3.4 Lorentz transformations of other fields, and representations of Lorentz group

3.5 Spinor Fields

3.6 Spinor bilinears

4. Fermion (spin 1/2) Field

- 4.1 Lagrangian
- 4.2 Dirac equation and its solution
- 4.3 Quantization of Dirac field

5. Interacting Scalar Field

- 5.1 Outline: what we will learn
- 5.2 S-matrix, amplitude $M \Rightarrow$ observables (σ and Γ)
- 5.3 Interacting Scalar Field: Lagrangian and Quantization
- 5.4 What is $\phi(x)$?
- 5.5 In/out states and the LSZ Reduction Formula
- 5.6 Heisenberg field and Interaction picture field
- 5.7 a and a^\dagger (again)
- 5.8 $\langle 0|T(\phi(x)\cdots)|0\rangle = ?$
- 5.9 Wick's theorem
- 5.10 Summary, Feynman rules, examples

4.2 サブアトム物理学：相原 博昭

1. Elementary Particle Physics

- 1.1 Species of elementary particles
- 1.2 Interactions and gauge bosons
- 1.3 Relativistic kinematics
- 1.4 Particle and anti-particles
- 1.5 Structures of subatomic particles
- 1.6 Gauge theory and electroweak unified theory
- 1.7 Higgs mechanism/ Higgs physics

2. Nuclear Physics

- 2.1 Hadrons and quarks

4.3 一般相対論：横山 順一

1. 序論 等価原理と一般相対性原理

- 1.1 等価原理
- 1.2 一般相対性原理
- 1.3 一般相対論の物理世界

2. 数学的準備

- 2.1 スカラーとベクトル
- 2.2 双対空間
- 2.3 テンソル
- 2.4 計量テンソル
- 2.5 内積とテンソルの縮約
- 2.6 微分
- 2.7 計量テンソルの共変微分とクリストッフェル記号
- 2.8 リーマンの曲率テンソル

3. 曲がった時空の物理

- 3.1 曲率テンソル
- 3.2 重力場中の自由粒子の運動方程式
- 3.3 ニュートン極限
- 3.4 測地線と測地線偏差
- 3.5 ビアンキの恒等式
- 3.6 対応原理
- 3.7 正準エネルギー運動量テンソル
- 3.8 曲がった時空におけるエネルギー運動量テンソル

4.4 宇宙物理学：須藤靖・馬場彩

1. 宇宙物理学とは

- 1.1 「宇宙物理学」 \approx 「天体物理学」 \neq 「宇宙論」 \neq

- 2.2 Nuclear force
- 2.3 Structure of nuclei
- 2.4 Nuclear reactions

3. Nuclear Energy

- 3.1 Nuclear fission
- 3.2 Nuclear fusion
- 3.3 Nuclear reactors
- 3.4 Breeder reactors

4. Particle Accelerators

5. Nuclear Medicine

3.9 エネルギー運動量テンソルの現象論的定義

4. 一般相対論

- 4.1 アインシュタイン方程式
- 4.2 作用原理

5. 球対称時空

- 5.1 球対称真空解
- 5.2 重力による時間の遅れと光の赤方偏移
- 5.3 シュバルツバルト時空における粒子の運動
- 5.4 水星の近日点移動
- 5.5 光線の屈曲
- 5.6 シャピーロ遅延

6. ブラックホール

- 6.1 シュバルツシルトブラックホール
- 6.2 事象の地平線
- 6.3 座標系について

7. 重力波

- 7.1 弱重力下の線形化したアインシュタイン方程式
- 7.2 摂動変数のゲージ自由度
- 7.3 重力波の伝播
- 7.4 重力波の放出

8. 宇宙論

- 8.1 宇宙原理とロバートソン・ウォーカー計量
- 8.2 ルメートル・フリードマン宇宙

「天文学」

- 1.2 世界は法則に支配されているか

1.3 物理学における必然と偶然

1.4 世界を知るための天文学

2. 自然界のスケールと宇宙の階層

- 2.1 物理定数が世界のスケールを決める
- 2.2 自然界の特徴的スケール
- 2.3 宇宙の階層構造
- 2.4 宇宙の年表

3. 物理法則と宇宙

- 3.1 物理法則と初期条件
- 3.2 木星型（ガス）惑星
- 3.3 恒星（主系列星）
- 3.4 宇宙の階層と基本物理定数

4. 宇宙史

4.5 固体物理学 II：林 将光

1. バンド理論

- 1.1 強束縛近似
- 1.2 グラフェン
- 1.3 ディラック方程式
- 1.4 クラインパラドックス
- 1.5 半導体

2. 伝導

- 2.1 ホール効果
- 2.2 2次元電子系
- 2.3 ランダウ準位

4.6 量子光学：島野 亮

1. 光の放出と吸収

- 1.1 電磁場のモード密度、電磁場のエネルギー
- 1.2 黒体放射、プランクの熱放射式
- 1.3 自然放出と誘導放出
- 1.4 光の吸収

2. 電磁場と二準位系との相互作用（半古典論）

- 2.1 双極子近似、回転波近似
- 2.2 ラビ振動
- 2.3 密度行列
- 2.4 光ブロッホ方程式
- 2.5 縦緩和と横緩和

4.1 一様等方宇宙モデル

4.2 ビッグバン元素合成

4.3 宇宙の中性化とマイクロ波背景輻射

4.4 宇宙の組成と暗黒成分

5. 星の一生

5.1 主系列星

5.2 縮退星

5.3 超新星爆発とその残骸

6. 宇宙の高エネルギー現象

6.1 降着天体

6.2 宇宙線

7. 宇宙を観測する機器の原理

2.4 整数量子ホール効果

3. 磁性

- 3.1 交換相互作用
- 3.2 ハバードモデル
- 3.3 ストナー強磁性
- 3.4 スピン流

4. 超伝導

- 4.1 クーパー対
- 4.2 BCS 超伝導

3. 電磁場の量子論

- 3.1 自由場の量子化
- 3.2 光子数状態
- 3.3 コヒーレント状態
- 3.4 スクイーズド状態
- 3.5 ウィグナー関数

4. 非線形光学の基礎

- 4.1 古典振動子モデル
- 4.2 非線形分極と非線形感受率
- 4.3 二次の非線形光学効果
- 4.4 位相整合

- 4.5 光パラメトリック過程
- 5. レーザーの基礎
- 5.1 光共振器のモード

- 5.2 光共振器の安定性
- 5.3 発振条件
- 5.4 各種レーザー

- 7. 生体膜の構造と機能
- 8. 曲面の物理、表面張力、濡れ
- 9. 生体膜のシミュレーション
- 10. 赤血球、血流

- 11. 枯渇力
- 12. 生体内の運動と機能
- 13. 細胞内の運動
- 14. マウス個体内の分子の運動

4.7 プラズマ物理学：高瀬 雄一

- 0. プラズマとは
 - 1. 単一荷電粒子の運動
 - 1.1 一様電磁場中の粒子ドリフト
 - 1.2 非一様磁場中の粒子ドリフト
 - 1.3 時間変化する電磁場中の粒子ドリフト
 - 2. 流体としてのプラズマ
 - 2.1 プラズマの流体方程式
 - 2.2 流体方程式と粒子ドリフトの関係
 - 2.3 一流体電磁流体力学
 - 2.4 電磁流体力学的平衡
 - 3. プラズマ中の衝突過程
 - 3.1 完全電離と非完全電離プラズマ

- 3.2 完全電離プラズマ中の衝突
- 3.3 プラズマの拡散
- 4. 流体プラズマ中の波動
 - 4.1 非等方分散媒体中の小振幅波動
 - 4.2 磁場のないプラズマ中の波動
 - 4.3 磁場のあるプラズマ中の波動
- 5. 流体プラズマの不安定性
- 6. プラズマの運動論
 - 6.1 ヴラソフ方程式
 - 6.2 プラズマ波動の運動論的効果
 - 6.3 速度空間不安定性と非線形理論

4.11 現代物理学入門：日下 暁人, 竹内 一将

- 1. 宇宙背景放射観測で探る初期宇宙と宇宙進化
 - 1.1 観測的宇宙論の最前線 - 未知の物理への扉
 - 1.2 ビッグバン宇宙論と標準モデル
 - 1.3 宇宙背景放射の物理とその歴史
 - 1.4 宇宙背景放射観測の最前線
 - 1.5 最先端プロジェクトに見る方法論
 - 1.6 多様な宇宙論へのアプローチ
 - 1.7 新しい物理を切り開くための新技術・観測的宇宙論の未来

- 2. 非平衡に普遍性はあるか？ - 吸収状態転移の例 -
 - 2.1 プロローグ (平衡)
 - 2.2 プロローグ (非平衡)
 - 2.3 吸収状態転移の基礎 (現象)
 - 2.4 吸収状態転移の実験
 - 2.5 吸収状態転移の理論
 - 2.6 乱流転移
 - 2.7 吸収状態転移と対称性
 - 2.8 吸収状態転移と保存則

5 4年生 A セメスター

5.1 化学物理学：山本 智

- 1. イントロダクション
- 2. 分子の形と対称性
- 3. 分子の電子状態
- 4. 分子分光
- 5. 分子間力
- 6. 化学反応
- 7. トピックス

5.2 素粒子物理学：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

5.3 場の量子論 II：筒井 泉

- 1. 電磁場とその量子化
 - 1.1 実スカラー場の量子論 (復習)
 - 1.2 複素スカラー場と保存則
 - 1.3 局所対称性とゲージ原理
 - 1.4 電磁場
 - 1.5 量子電磁力学
- 2. 非可換ゲージ理論
 - 2.1 古典場と非可換ゲージ群
 - 2.2 ゲージ変換と対称性
 - 2.3 量子化

4.8 統計力学特論：川島 直輝

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

4.9 計算科学概論：大久保 毅 ほか6名

- 1. スーパーコンピュータと並列プログラミング
- 2. 高性能計算機のアーキテクチャ
- 3. 高性能プログラミングと性能測定
- 4. 大規模疎行列ソルバー入門
- 5. 格子スピン模型の計算科学
 - 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. 大規模疎行列固有値問題と量子多体問題

4.10 生物物理学特論 II：樋口 秀男, 能瀬 聡直, 野口 博司

- 1. 序論
- 2. 脳神経系における情報の流れ
- 3. 脳情報処理の素子としてのニューロンの機能
- 4. 神経ネットワーク研究の方法論：細胞から個体へ
- 5. 神経活動の測定と操作
- 6. 脳の可塑性と記憶

- 2.4 ゲージ変換とトポロジー
- 2.5 経路積分と Theta 項
- 3. 発散と繰り込み
- 3.1 正則化

- 3.2 繰り込み
- 3.3 繰り込み可能性
- 3.4 繰り込み群

- 2.4 4 端子 (2 端子対) 回路
- 2.5 端子対回路の諸定理
- 2.6 双対性
- 2.7 受動素子と能動素子

- 6.2 増幅器の雑音
- 6.3 変調とアナログ信号伝送
- 6.4 離散化信号

5.4 原子核物理学 : Kathrin Wimmer

- 1. Global properties of the nucleus
- 2. Stability and decay
- 3. Particle accelerators
- 4. Detectors
- 5. Nucleon-nucleon interaction
- 6. Nuclear models
- 6.1 single-particle properties

- 6.2 collective excitations
- 7. Nuclear reactions
- 8. Nuclear astrophysics
- 8.1 hydrogen and helium burning
- 8.2 synthesis of heavy elements
- 9. Super heavy elements
- 10. Hartree Fock theory for nuclei

- 3. 伝達関数と周波数応答・過渡応答
- 3.1 受動素子 2 端子回路の伝達関数
- 3.2 2 端子受動素子回路
- 3.3 受動素子回路の過渡応答

- 7. デジタル信号とデジタル回路
- 7.1 デジタル信号序論
- 7.2 論理ゲート
- 7.3 論理ゲートの実装
- 7.4 論理演算の回路化と単純化

5.5 固体物理学 III : 北川 健太郎, 高木 英典

- 1. 磁性
- 1.1 孤立イオンの磁性、結晶場
- 1.2 原子間相互作用
- 1.3 スピン波
- 1.4 ハバード模型
- 1.5 遍歴磁性
- 1.6 量子スピン磁性とフラストレーション

- 2. 相関電子の超伝導
- 2.1 電子相関
- 2.2 モット絶縁体と磁性
- 2.3 フェルミ液体論
- 2.4 金属絶縁体転移
- 2.5 層状銅酸化物の高温超伝導
- 2.6 異方的超伝導

- 4. 増幅回路
- 4.1 増幅回路と系の制御
- 4.2 OP アンプ
- 4.3 トランジスタ
- 4.4 電場効果トランジスタ
- 5. 分布定数回路
- 5.1 伝送路
- 5.2 伝送路の伝播現象
- 5.3 S 行列 (S パラメタ)
- 5.4 シュレディンガー方程式と LC 伝送路
- 6. 信号, 雑音, 波形解析
- 6.1 ゆらぎ

- 7.5 A-D/D-A コンバータ
- 7.6 デジタルフィルタ
- 7.7 ハードウェア記述言語: HDL
- 8. ニューラルネットワーク (NN)
- 8.1 フィードフォワード NN と多層パーセプトロン
- 8.2 制限ボルツマンマシン
- 8.3 畳み込み NN
- 8.4 FPGA と NN

5.6 重力波物理学 : Kipp Cannon, Raffaele Flaminio

- 1. Review of general relativity and gravitational waves
- 2. Astrophysical sources of gravitational waves

- 3. Signal identification and interpretation
- 4. Gravitational-wave detectors
- 5. Gravitational wave astronomy: recent results

5.7 電子回路論 : 勝本信吾

電子回路は、直接の物理的には電磁場を人間の役に立つように飼いならす工夫である。一方、線形応答、信号・雑音(ゆらぎ)、制御、など、メタなレベルでの極めて一般的な概念が活躍する小宇宙でもある。この講義では、これらの上位概念を紹介するとともに、これを電磁場を使って実現するための物質科学のような泥臭い話まで、物理学ならではの広い視野を提供する。

- 1. 電磁場と電子回路
- 1.1 この講義について
- 1.2 電子回路とは
- 1.3 2 端子素子
- 1.4 回路図
- 1.5 抵抗器

- 1.6 キャパシタ
- 1.7 インダクタ
- 2. 線形回路序論
- 2.1 線形システムと電子回路
- 2.2 電源
- 2.3 回路網

5.8 普遍性生物学 : 金子 邦彦, 古澤 力

- 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

- 1. 回路の線形応答と伝達関数
- 2. 増幅回路
- 3. 雑音と信号処理
- 4. デジタル回路とデジタル信号処理

- 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. 発生一進化対応
- 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 系外惑星 : 須藤 靖, 相川 祐理

- 1. 物理定数と世界の安定性
- 1.1 宇宙と世界はどちらが大きいかな?
- 1.2 天体形成史
- 1.3 宇宙の階層構造
- 1.4 物理法則と初期条件

- 1.5 ガス惑星の質量
- 1.6 恒星の質量
- 1.7 宇宙の階層と基本物理定数
- 1.8 物理学における必然と偶然
- 1.9 世界を知るための天文学

- 2. 系外惑星検出史
 - 2.1 系外惑星発見数
 - 2.2 太陽系外惑星検出方法のまとめ
 - 2.3 太陽系外惑星発見の歴史
 - 2.4 プロキシマ・ケンタウリの周りのハビタブル惑星
- 3. 系外惑星系の軌道進化と古在効果
 - 3.1 古在効果とは
 - 3.2 惑星形成の標準シナリオ: コア集積モデル
 - 3.3 重力2体問題
 - 3.4 ケプラー問題とハミルトン・ヤコビ方程式
 - 3.5 重力3体問題と永年摂動
 - 3.6 古在効果
 - 3.7 潮汐作用
- 4. 惑星内部

- 4.1 太陽系の惑星 (概観)
- 4.2 内部構造の基礎
- 4.3 ホットジュピター
- 4.4 クールジュピター
- 4.5 スーパーアースとミニネプチューン
- 5. 惑星大気
 - 5.1 太陽系の惑星 (概観)
 - 5.2 大気構造の基礎
 - 5.3 大気透過観測
 - 5.4 大気放射観測
- 6. 惑星系の多様性と起源
 - 6.1 巨大惑星
 - 6.2 小規模惑星
 - 6.3 恒星タイプ依存性

5.10 物理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. 科学英語とは、日本人英語の欠点と改善策、直接翻訳はするな、和文和訳せよ、英語活用メモをつくり英借文する
- 2. 英語論文作成の概要 2. 英語の発想で書く (Leggett's Trees)、英語の基本は三拍子、起承転結はやめよう、読みやすい論文を書く、結論を先に、理由を後に、否定文を避けて肯定文で書く
- 3. 英語論文の構成と作法 1. 効率のよい英語論文執筆の進め方、よい英語論文の書き方、基本的な注意、英語論文の構成 (IMRAD方式)、英語論文の各項目の書き方 1 (表題、著者と所属、著者抄録)
- 4. 英語論文の構成と作法 2. 英語論文の各項目の書き方 2 (序論、本論、結果、考察、結論、謝辞、引用文献、図と表)、辞書の使い方
- 5. 作文技術 1. 文頭、数字の使い分け、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、簡潔な文を書く、受動態を避け能動態を使う、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え、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、冠詞の使い方、名詞の使い方、和製英語に注意、スペリングに注意
- 8. 文法的事項 2. 前置詞、句読法、数字・数式の表現法、記号の読み方、元素記号、参考書
- 9. 英語プレゼンの概要. プレゼンテーション (口頭発表) とは、プレゼンの心構え、英語プレゼンの構成、スライドの効果的な使い方、標準スライド
- 10. 英語の構造としゃべり方. 英語の構造、英語のしゃべり方、発音のコツ、和製 (カタカナ) 英語に注意、わかってもらえる英語のしゃべり方 (事前準備)
- 11. 発表のマナー・テクニク. 原稿は読むべきか、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・テクニク、Non-verbal Communication、プレゼン当日のコツ
- 12. 英語プレゼンの実際. 最初の挨拶、プレゼンの流れと決まり文句、図表の説明、数字・数式・記号の読み方、グラフ表現、図形
- 13. 質疑応答・ポスターセッション. 質疑応答 (Q&A) の心構え・指針、質問が聞きとれなかったとき・答えられないときの対応、ポスターセッションの利点・発表の技術、プレゼンの注目点と評価のポイント、チェックリスト、Hints for a Successful Conference、参考書
- 14. (補遺) 論文投稿と査読者対策

各研究室の研究活動内容

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

1 スーパー B ファクトリーでの物理

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

当研究室は、CP 対称性の破れの起源を説明する理論として提唱された小林益川理論を、最先端加速器 B ファクトリーを使って検証した。小林益川理論は 2008 年ノーベル物理学賞に輝いたが、当研究室では、さらにその先を見据え、次世代加速器スーパー B ファクトリーを使って、超対称性理論など現在の素粒子理論の先にある、より根源的な素粒子物理の解明を目指した実験を遂行しようとしている。Belle II (ベルツー) と呼ばれるこの実験に向けて進めてきた加速器と測定装置の大幅な



図 1. Belle II (ベルツー) 測定装置。



図 2. 当研究室で製作した、Belle II 測定装置の心臓部にあたる半導体粒子検出器。

改良作業もようやく終わり (図 1, 2), いよいよデータ収集がスタートした。

B ファクトリーは B 中間子の他に τ レプトンも大量に生産する e^+e^- ファクトリーでもある。荷電レプトンの稀崩壊は、新物理を探索するための有力な手段の一つであると考えられている。当研究室では、B 中間子と τ レプトンの研究によって新物理を探求している。

2 ニュートリノビームを使った物理

J-PARC 加速器では、電荷を持たない、クォークとは別種の素粒子である「ニュートリノ」の実験を行っている。ニュートリノは、既知の素粒子のうちで性質が最も調べられていないものの一つであり、現在の素粒子理論を越えた物理の手がかりを秘めていると考えられている。J-PARC で作ったニュートリノのビームを、約 300km 離れた岐阜県の神岡にあるニュートリノ検出器 (スーパーカミ

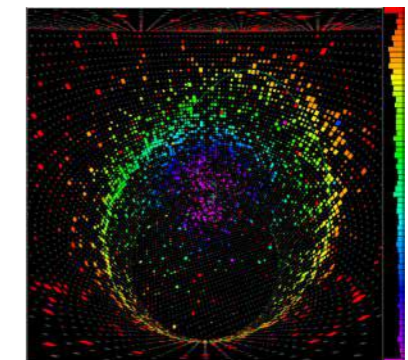


図 3. スーパーカミオカンデ検出器でとらえた、295km 離れた加速器からのニュートリノが反応した事象。チェレンコフ光がリング状に見える。

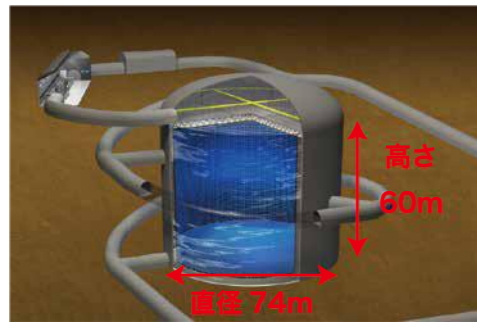


図4. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。高さ60m、直径74mのタンクに超純水を満たし、チェレンコフ光を検出することで多様な現象を捉える。

オカンデ)に打ち込み、ニュートリノが飛んで行く間に別の種類のニュートリノに変わる様子(ニュートリノ振動)を観測する。T2K実験と呼ばれるこの実験で、我々はこれまで確認されていなかった種類のニュートリノ振動を発見した(図3)。

また、クォークと同じようにニュートリノでもCP対称性が破れていることが予想されている。もしこの予想が正しければ、ニュートリノは、ビッグバンから始まった宇宙における物質創成の歴史、すなわち、宇宙の進化において重要な役割を果たした可能性がある。ニュートリノ振動実験は、ニュートリノと宇宙進化の関わりを解明するための実験でもある。現在、T2K実験ではニュートリノビームと反ニュートリノビームでの測定を用いて、ニュートリノのCP対称性の破れの探索を進めており、その兆候らしきものを捕まえつつある。

しかし、CP対称性の破れを確実に測定するためには、さらに高統計・高精度の実験を行う必要がある。当研究室では、次世代実験のための装置として、現行のスーパーカミオカンデよりもさらに一桁大きく高性能なハイパーカミオカンデ検出器(図4)を実現させるべく研究を行っている。ハイパーカミオカンデ検出器は、素粒子の大統一理論で予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も世界最高感度で行うことのできる、宇宙と素粒子の分野にわたる幅広い研究を行うための実験装置である。

3 すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究

近年の宇宙論観測は、宇宙の約23%と73%は、それぞれダークマターとダークエネルギーによって占められていて、物質はわずか4%を占めるのみであり、かつ、宇宙は現在、加速膨張しているという驚くべき発見をもたらした。通常物質や放射(光)だけが存在している宇宙では、宇宙の膨張は

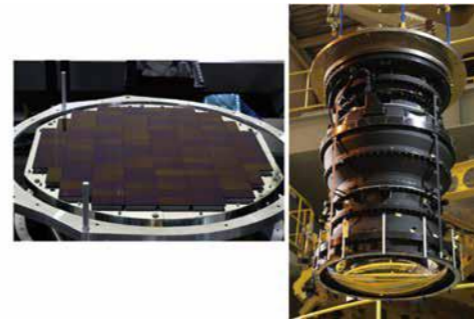


図5. 完成した928メガピクセルCCDカメラ(左). 現在はすばる望遠鏡に取付けられている(右).

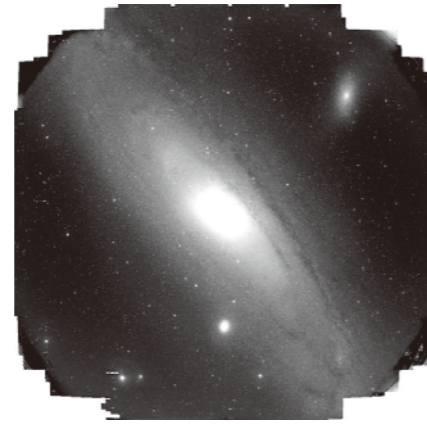


図6. 試験観測で得られたアンドロメダ銀河M31の画像。拡大すると、230万光年かなたのM31の星々が一個々々分離して見分けられる。

減速する一方である。膨張を加速させるためには、重力とは異なり、宇宙全体に対して斥力として働く存在が必要であり、これがダークエネルギーである。ダークエネルギーは、アインシュタインの一般相対論に取って代わる新たな物理法則の存在を意味しているかもしれない。ダークエネルギーの研究は、時空の構造とその究極の構成要素を探求する素粒子物理学のメインテーマとなりつつある。

この不思議なエネルギー、ダークエネルギーの研究は、現在のところ加速器実験では不可能で、天文観測によって行う必要がある。当研究室では、すばる望遠鏡に搭載した928メガピクセルCCDカメラ(図5)を使ったイメージング(図6)により、ダークエネルギー、原始ブラックホール、活動銀河核の研究を進めている。素粒子物理と宇宙論と呼ばれる宇宙の進化を研究する分野との関わりはますます深くなってきた。今後、この学際的分野をおおいに発展させていきたい。

1 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(THz波)の光源開発や検出器開発を行っている。



Spring8 と SACLA: 世界最強強度 X 線実験装置

3 今後の展開

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

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

1. 重力波による新しい天文学・物理学

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

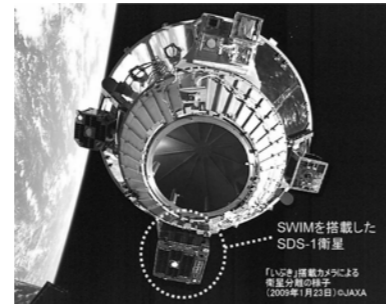
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらし、それらに直接迫る手段となる可能性をもっているのである。

2. 重力波天文学の幕あけ

重力波の存在は、一般相対性理論の帰結の1つとして、1916年にアインシュタインによって予言された。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げた。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、岐阜県・神岡の地下サイトで、大型低温重力波望遠鏡 KAGRA(かぐら)の建設が進められている。これらの干渉計では、重力波信号の直接観測に十分な感度が実現される見込みであり、本格的な観測が開始される2020年頃には、本格的な「重力波天文学」が始まることを期待されている。

3. 重力波研究のひろがり

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

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

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

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

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

【冷却原子気体】

真空中にトラップされた極低温の原子気体は、原子間相互作用の強さを含むほとんどすべての物質パラメータ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、孤立系がいかに関熱平衡状態に至るかという統計力学の基本的問題を研究することもできる。私たちは冷却原子気体を題材に、様々な量子多体物理の解明を目指して研究に取り組んでいる。

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

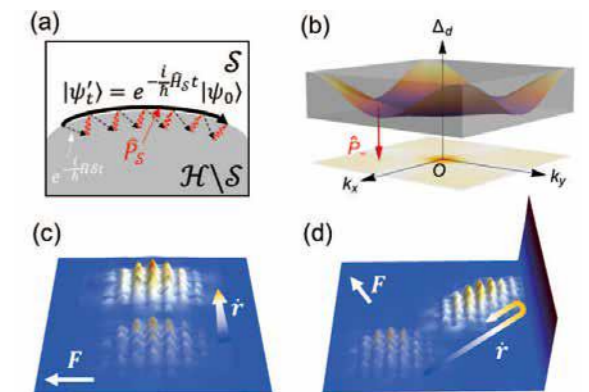
【量子論および統計力学と情報理論の融合】

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

論と量子論・統計力学を融合することで新たな学問分野の構築を目指している。例えば、測定やフィードバック制御を伴うもと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、ハイゼンベルグの不確定性関係の情報論的定式化、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。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と期待される。最近私たちは、測定の反作用により状態が凍結する量子ゼノ効果を応用し、系の状態を特定の部分空間に拘束し続けることで、非自明なダイナミクスを実現できることを提案した。特に、人工的に散逸を導入した冷却原子系において、ホール効果や再帰的反射が起きることを示した(右下図)。他方で、熱力学におけるエントロピー増大則も系の乱雑さの単調増加性として情報論的に捉えられると期待される。私たちは最近、情報論的エントロピーを応用して、エントロピー増大則の統計力学からの基礎づけに取り組んでいる。

3 今後の展開

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



ゼノ・ホール効果。(a) 測定の反作用や散逸により、状態は特定の部分空間 S に拘束されながら、有効ハミルトニアン $\hat{H}_S = \hat{P}_S \hat{H} \hat{P}_S$ により時間発展する。(b) 光格子中の冷却原子系に人工的に散逸を導入することで、波数空間中で粒子を非自明なペリ-曲率を持つ低エネルギー・バンドに拘束できる。このとき、粒子の実空間運動において、(c) ホール効果(外場 F の垂直方向への運動)および(d) 再帰性反射(入射方向への反射)が起きる。Phys. Rev. Lett. **118**, 200401 (2017) より転載。

1 我々の目標：生命とは何か

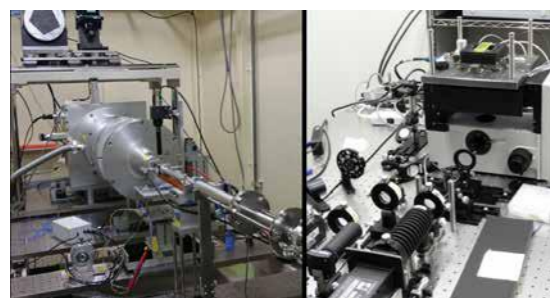
生命の基本単位は細胞だと考えられています。しかし、細胞の構成成分であるタンパク質や脂肪、核酸を混ぜ合わせただけでは、生命は生じません。生命とは何かを物理の言葉で理解することが、生物物理学の究極の目標です。

2 これまでの研究：見て、測って、物理する

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

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

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



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

3 最近の研究：「生きている」の物理的意味

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

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

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

4 今後の展開：未知のフロンティア

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

研究室ホームページ：

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

1. 二次元の世界の電子

「二次元の世界」といってもアニメやゲームの話ではありません。分子、原子、電子、原子核などのミクロな粒子の性質がわかっても、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と思います。私たちの研究室では、半導体の界面や表面を使って電子を「二次元の世界」に閉じ込めて、その集団的振る舞いを研究しています。

2. 半導体表面の二次元電子系と量子ホール効果

これまで、二つのノーベル物理学賞が二次元電子における発見に対して与えられていますが、いずれも半導体デバイスの中に閉じ込められた界面二次元電子系の電気抵抗に関するものでした。これに対して最近私たちの研究室では、極低温・超高真空下でへき開して得られた表面に微量の金属原子を乗せることによって作られる二次元電子系の研究を行っています。

図1 (a) に表面二次元系で観測された量子ホール効果の実験例を示します。図1 (b) のように、InSb へき開表面に微量の鉄原子を蒸着することによって二次元電子を誘起しました。磁場中におかれた物質に電流を流すと、電流方向だけではなく、電流および磁場に直交する方向に電圧（ホール電圧）が生じます。この現象はホール効果として知られていますが、ホール電圧と電流の比、すなわちホール抵抗が完全に量子化された値（物理定数 h/e^2 を整数または分数で割った値）を示すのが量子ホール効果です。これは、電子の運動エネルギーが強磁場中ではランダウ準位と呼ばれるとびとびの値に量子化されることから生じる、「二次元の世界」だけで見られる現象です。

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

左記の研究のほかに、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> をご覧下さい。

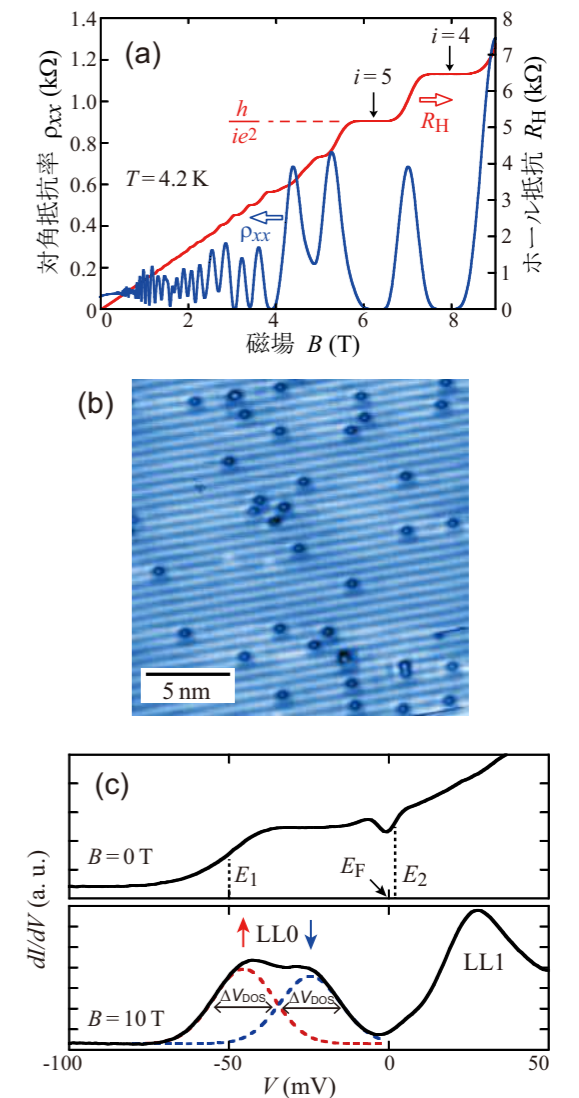


図1：(a) 二次元電子系における量子ホール効果。(b) STM 像。ランダムな黒丸が Fe 原子。(c) 同一試料で測定されたランダウ準位。

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ところに興味の根源がある。物質という日常的なものの中に、いろいろな可能性が含まれており、実験によって検証できる奇妙な(予想外な)現象をミクロに理解することを通して、新しい法則や概念を見出すことを目標にしている。

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

研究室としては、毎週のセミナーがある以外には、各自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で、問題に適した新しい手法を開発して用いることになる。具体的には、場の理論的手法、厳密解、変分法、計算機シミュレーションなどの方法を組み合わせて用いている。

最近の研究テーマ

(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。より具体的には、相互作用する多体系(電子系、ボゾン系、スピン系、…)における磁性・強誘電性・量子ホール効果・超伝導などの物性の発現するメカニズムの解明、新奇現象の理論的な提案を目指したい。同時に新しい理論的手法の開発も積極的に行いたいと考えている。

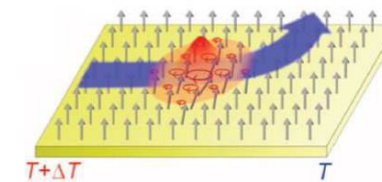
●統計力学

古典・量子統計力学や場の理論における可解なモデルの解けるメカニズムに興味を持って研究を行っている。多くの場合、これらの背後には何らかの代数構造が潜っており、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. マグノンの熱ホール効果

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



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

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

2-3. その他

マルチフェロイクス/フラストレート伝導系とホール効果/Kitaev 物質/乱れのあるトポロジカル絶縁体・超伝導体/機械学習の物性物理・統計力学への応用/量子スピン系とエンタングルメント/Berry 位相と Lieb-Schultz-Mattis の定理/トポロジカル欠陥、ソリトン/一次元量子系のサイン二乗変形/格子フェルミオン系と超対称性の破れ

3 これからの研究

スピン系やボゾン系のトポロジカル相における、熱ホール効果などの輸送現象を(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、特に可解モデルなどの数理的な観点からの研究を、意欲的に行いたいと考えている。

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。当研究室は2017年度新設の若い研究室であり、共に研究室を創り、最先端の物理に挑む意欲とエネルギーに溢れた学生を歓迎する。

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、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。

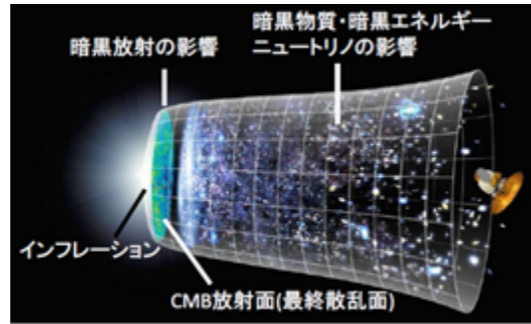


図1：宇宙進化の模式図。横軸が時間で、左側が宇宙初期、右が現在である。

次世代実験

当研究室では、国際共同実験である Simons Array、さらに次世代の Simons Observatory へ参画し、本分野における先端研究を担う。Simons Array は2019年1月に観測を開始し、最終的には22,000の超伝導検出器を擁する3台の望遠鏡群である(図2)。Simons Observatory はそれを更に拡張し、2021年の観測開始を目指す。

最先端技術を用いた観測研究 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。



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つつある。これは、従来は”瞬間”現象として捉えられてきた電子の量子準位間の”遷移”の様子を追跡可能とする。また、16桁以上の周波数純度をもつレーザー光も実現しつつある。これは、“一秒”を定義する高精度の時間基準を与え、物理基本定数の恒常性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。例えば現在、理化学研究所の協力を得て本郷キャンパスに、THzから軟X線にわたる広い波長領域のコヒーレント光ビームを発する“フォトンリング施設”の整備をし、これによりアト秒領域の超高速現象や、強い光子場での量子現象等、人類が未踏の世界に到達できる。物理学の新境地を拓き、医療・バイオあるいはエネルギー等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。

さらに新たな取り組みとして、バイオイメージングやリモートセンシング等における革新的手法の研究にも着手し始めている。光の特性を深く理解し、巧みに操ることにより、従来技術の限界を超える性能や新しい機能を持つ計測手法を創出する研究を行っている。

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、真空中に捕獲した原子気体、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100mK代の極低温下での半導体のレーザー照射という世界でもユニークな実験や、Li同位体原子を用いたフェルミ粒子系の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

最新の微細加工技術を駆使すると、光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うまく設計すると、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、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に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、テラヘルツから紫外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操作の研究を進めている。

参考

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

1. はじめに

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

2. 研究テーマ

相互に関連する以下のテーマを中心に研究を進めている。

(1) 回転量子状態を選別した分子の配向制御

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

(2) 全光学的分子配向制御技術の高度化

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

(3) 分子内電子の立体ダイナミクスの研究

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

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

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

3. 研究活動

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

4. メッセージ

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

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

●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).

1 研究の背景

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

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

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

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

2 最近の研究テーマ

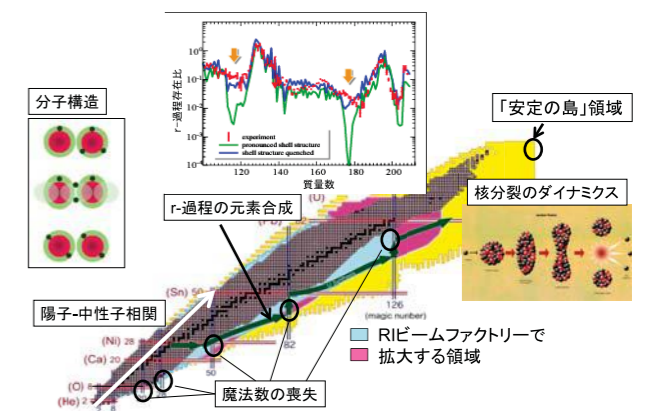
不安定核は重イオン加速器で加速された重イオンビームを標的核に衝突させ、「破碎・分裂」させることによって生成する。この破碎・分裂片は重イオンビームとほぼ同じ速度で飛行し、ビーム（不安定核ビーム）として得ることができる。我々は現在、理化学研究所・RIビームファクトリー（RIBF）で得られる不安定核ビームを用いて実験を行っている。RIBFで供給される不安定核ビームの生成領域、収量はともに世界一であり、この強力なビームを最大限活用した新しい実験手法をゲリラ的に開発・展開し、不安定核の新しい現象・性質を実

験的に見出すことが当研究室の信条である。

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

3 今後の展開

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



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

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、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、レーザー光を用いた最先端光技術を駆使して多体の量子効果によって発現する物理現象を調べている。最近の主なトピックスを以下に挙げる。

1) 半導体中に光でつくる量子凝縮相

半導体に光を照射すると、結晶中を自由に動ける伝導電子と価電子の抜け殻である‘正孔’ができる。正孔は正の電荷を持った粒子として結晶中を動き回る。電子と正孔が近づくと、互いのクーロン引力によって束縛し合い水素原子のような状態(粒子)、エキシトンになる。エキシトンは整数スピンを持ち、ボース粒子のように振る舞うため、極低温でボース-アインシュタイン凝縮を起こす。このエキシトンを高密度にすると、極低温の金属中で電子同志が対(クーパー対)を組み超伝導になると同様に、電子と正孔が対を組み、量子凝縮状態になることも予測されている。量子効果により生じるこれら未知の物質相の解明を目指して研究を進めている。

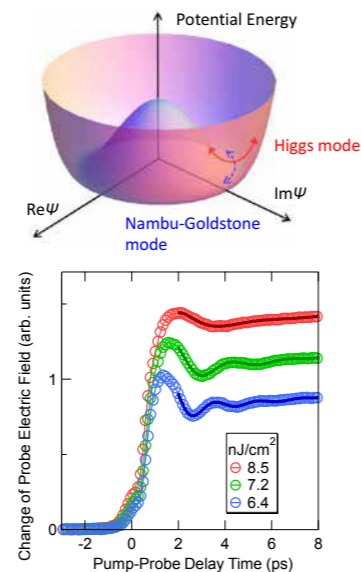
2) 光による超伝導のヒッグスモードの観測

超伝導体中では質量ゼロの光子が質量を持つようになる。この事情は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。となると、超伝導でもヒッグス粒子に相当する粒子(ヒッグスモード)があつてしかるべきである。実はこれは超伝導を担うクーパー対の密度の振動に対応し、模式図に示すワインボトルの底の様なポテンシャル上で超伝導の秩序変数が動径方向に振動することに相当している。その存在は約50年前に理論的に予言されていたが、我々は2013年に最先端のレーザー技術を用いてその明確な観測に初めて成功した。現在はヒッグスモードの性質を調べることやその光との相互作用、超伝導体の隠れた対称性や競合する秩序の解明、マクロな量子状態を超高速度で光制御する研究へと展開している。

3) 強相関電子系の光応答と相制御

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

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



(上) 超伝導体の自由エネルギーを秩序変数の関数として示した模式図。動径方向の振動をヒッグスモードと呼ぶ。(下) 超伝導体 NbTiN で観測されたヒッグスモードの実時間観測。

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プリ数物連携宇宙研究機構はもちろん、国内外の他研究機関とも積極的に共同研究を実行しており、常に開かれた研究室を目指している。

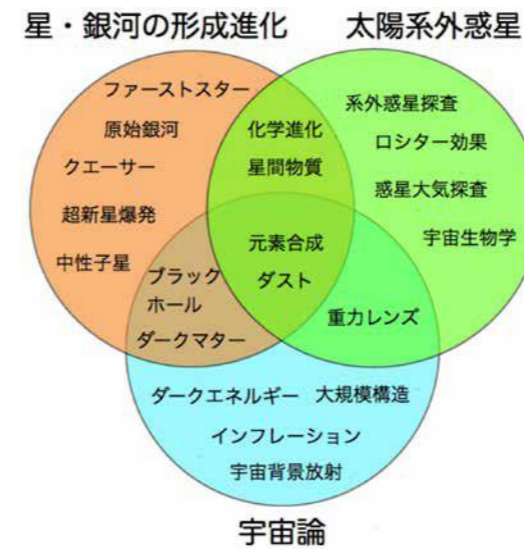


図1: 宇宙理論研究室で行われている研究テーマの概念図。3つの分野が有機的によく結びついていることが分かる。

1 最近の主な研究テーマ

1.1 宇宙論

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

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

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

1.2 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ンジャーを 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。

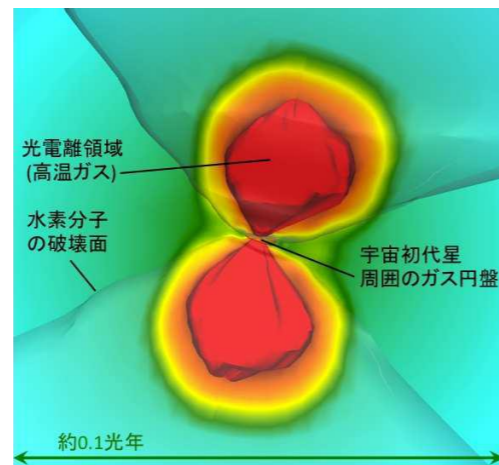


図2: 宇宙初代星形成の3次元数値シミュレーション。中心星放射により高温ガスが生じている様子。

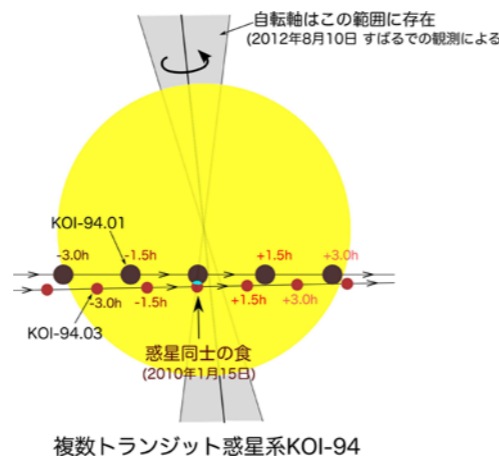
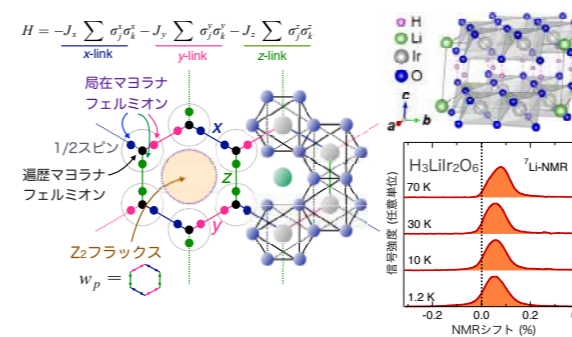


図3: すばる望遠鏡の観測により明らかにされた系外惑星系 KOI-94 の概念図。系外惑星同士の食を史上初めて観測した。

高木・北川研究室

高木英典教授 北川健太郎講師 平岡奈緒香助教

固体中の電子多体系が示す新奇な量子電子相の探索と相形成のメカニズム解明の研究を推進している。遷移金属化合物中の伝導や磁性を支配するのは遷移金属元素の d, f 軌道を占める電子である。 d, f 軌道は空間的拡がり小さく、電子はクーロン相互作用により強く相関する。相関電子は、その相互作用を通じて電子液体・電子液晶と呼ばれる相を形成する。相関電子では電荷、スピン、軌道（縮退する軌道のどれを選ぶか）の自由度がしばしば顔を出し、電荷液晶状態、スピン液体状態といった多彩な状態が出現する。新しい状態を創り出すために試料合成、薄膜形成、超高压・強磁場・極低温複合極限環境を駆使し、詳細を明らかにするためにマクロな測定とミクロな測定の両面からアプローチしていく。以下に具体的なプロジェクトの例を挙げる。



Kitaev 蜂の巣格子模型とイリジウム酸化物スピン液体

(1) 超伝導機構の解明とエキゾチック超伝導の開拓

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

(2) 新しい量子スピン液体とKitaev系物理

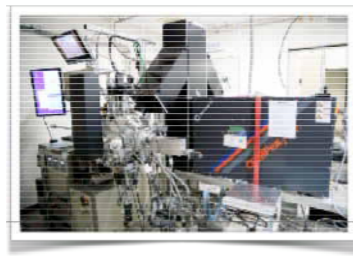
多体効果としての量子スピン物理におけるマイルストーンは、絶対零度まで磁性スピンが量子的に揺らいだ状態、スピン液体の実現である。10年前にKitaevによって二次元の蜂の巣格子でスピン液体の厳密解が理論的に示されてからこのKitaev蜂の巣格子模型量子スピン液体の実現が盛んに模索されてきた。量子スピン液体は一次元では確立されているが、二次元以上ではこれまでの実験報告例である三角格子物質等では格子模型に厳密解が存在せず、近似解を絞り込むために必要な特徴的な素励起（準粒子）の研究さえ困難であった。当研究室では、Kitaev模型の初の実証例を目指して2次元蜂の巣格子イリジウム酸化物 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ に着目し、磁化率、比熱、核磁気共鳴測定において少なくとも50 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た。このスピン液体の発見は東京大学よりプレスリリース（18年2月）されている。

Kitaev 蜂の巣格子模型では、量子スピンに対して非従来型の異方的相互作用を導入する必要があるが、スピン軌道相互作用が大きい Ir 酸化物、 $4f$ 電子系などに対する実現性が提唱されてきており、当研究室ではそれらの蜂の巣格子物質開発に注力してきた。この模型ではスピンハミルトニアンを2種のマヨラナフェルミ粒子として表現し直すことにより一体問題に帰着した厳密解が得られる（図1）。さらに、マヨラナ粒子を操作することができればトポロジカル量子コンピューティングも可能とされる。ただし実際には、 $\text{H}_3\text{LiIr}_2\text{O}_6$ を含むハニカム Ir 酸化物は純粋なKitaev物質ではなく、量子スピン液体の実現は上記の一例のみである他、未だに二種のマヨラナ励起を確実に捉えた報告はない。当研究室では、次の研究段階としてこの新種のマヨラナ素励起の正体をつきとめるべく、より純良な結晶を用いた量子液体研究を推進している。原理的には、局所的なマヨラナ粒子の挙動は理論的に予測可能であり、局所磁化率を核磁気共鳴法によりイメージング可能である。現在は、この目標を実現するために、超高压下を含む先進的な磁化率、核磁気共鳴測定を通じてKitaev系の研究を推進している。

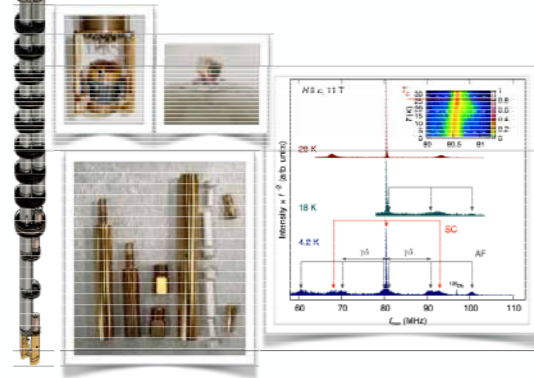
(2) スピン軌道相互作用誘起の新奇電子相の開拓

遷移金属酸化物における電子相探索の舞台は、これまで最も電子相関の強い3d遷移元素からなる複合酸化物であった。ところが最近、相関効果の弱い5dイリジウム酸化物でもモット絶縁体状態になる例が次々と見つかり、大きな謎が投げかけられた。我々は、層状5dイリジウム酸化物Sr₂IrO₄について、Irの強いスピン軌道相互作用により最外殻の5d電子が軌道自由度をほぼ完全に回復した状態($J_{\text{eff}} = 1/2$ 状態)にあることを明らかとし、スピン軌道相互作用誘起のモット電子固体状態の出現を提唱した。新奇な電子固体におけるスピン、電荷、軌道の素励起を探るべく非弾性共鳴X線散乱の実験を進めている。

新物質合成・薄膜形成



超高压・磁場方向制御・極低温環境
+磁化測定・核磁気共鳴測定



新電子相探索の為の実験環境

(3) 固体中の3次元ディラック電子の創成

グラフェン中の2次元ディラック電子はよく知られているが、電子軌道の波動関数の対称性と結晶構造の対称性の協奏によって、3次元のディラック電子が形成され得る。小形研究室によって理論的にアンチペロプスカイトと呼ばれる物質群に3次元ディラック電子が形成されることが提唱された。これを実験的に検証し、実験的に得られる電子有効質量が自由電子の2%しかないディラック電子の存在が確認された。すべての電子が最低Landau状態を取った際に現れる、非従来型の量子輸送や磁性の検出を目指している他、Weyl半金属への展開などを進めている。

(4) 薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の創成

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

(5) 超高压・極低温・精密磁場制御環境における磁性測定技術開発による新量子相の研究

核磁気共鳴(NMR)実験と磁化測定としては未到達の多重極限環境の構築を行い、超高压下で起こる新量子相実現と量子相転移の研究を行なっている。これまで全く磁性・超伝導の微視(ミクロ)的詳細が測定されていなかった超高压域[4万気圧以上]の極低温において、初のNMR測定環境と精密磁化測定技術を構築している。さらに精密単結晶2軸回転の手法を組合せ、新超伝導体・量子スピン液体・3次元ディラック電子の詳細をマクロ測定とNMR測定の両面から明らかにしていく実験を進めている。

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

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

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

3 今後の展開

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



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

1 熱力学が通用しない世界の物理法則を探る

私たちが目にできる大きさの物質や現象のうち、基礎原理となる物理法則が理解できているものはどれくらいあるでしょう。熱力学や、それに裏打ちされた統計力学は、熱平衡状態、つまり一定様な環境下で行きつく素朴な状態については、深く強力な物理法則の存在を教えてくださいました。一方で、ふと周りを見回すと、自然現象には熱平衡状態にないものが無数にあります。水や空気は、地球規模で巨大な対流を起こしています。空や大地は、様々な模様で彩られています。そして生物。動植物や微生物は生態系を作り、群れたり集合したり、様々な活動をしています。私たちの体内の生体分子も、様々な連携プレーで生命を支えています。そもそも、生き物とは何なのでしょう。

このような非平衡現象を理解したいと思ったとたん、通常の熱力学や統計力学の世界から足を踏み出すことになります。非平衡を支配する物理法則や概念はどのくらいあるのでしょうか。普遍的な体系は存在するのでしょうか。それを探る学問分野が、非平衡物理学です。

2 最近の研究テーマ

竹内研究室では、非平衡現象に潜む物理法則の理解を目指して、液晶などのソフトマター、流体や生物等にまたがる様々な課題を、主に実験によって研究しています。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 液晶乱流を使った非平衡の普遍的な法則の探求

ある種の液晶は、電圧をかけると対流を起こし、様々な対流パターンが自己組織的に出現したり、乱流状態を示したりします。我々は、この乱流の成長過程が、「KPZ クラス」と呼ばれる成長現象の普遍的な法則を明瞭に示すことを発見しました(図1)。我々の実験は、KPZ クラスの様々な予言を検証できる現状唯一の手段であり、成長現象を支配する新たな統計法則の発見などに注力しています。また、液晶乱流の状態変化の際は、「非平衡相転移」

の普遍的な統計法則が出現します。当研究室は、非平衡相転移や成長現象の普遍的な法則の実験研究に主導的な役割を果たしています。

2.2 微小流体実験による細胞集団の物理原理の探求

細菌や培養細胞などの集団は、様々な協同現象を示します。これは生物学として重要なだけでなく、非平衡の多体問題としても大変魅力的です。従来の実験系は、高密度の細胞集団を一様環境下で培養し続けることが困難でしたが、我々は微小流体実験技術により、そのような系を実現しました。これにより、高密度の細胞集団が示す協同現象を考える最も単純な条件下で計測し、物理の問題として扱う出発点に立てます。例えば、図2は、二種類の大腸菌のみを培養した人工的な生態系の様子です。ここで生じる複雑な棲み分けパターンを物理の言葉で理解できるのでしょうか？

2.3 他にもいろいろ

上に挙げた2つのメインテーマのほか、研究室では現在、大自由度のカオス現象を扱う解析手法の開発や、多粒子系の運動可逆性に関する相転移の実験研究などに取り組んでいます。これからも、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することを心がけています。

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

- その他、以下の資料等が参考になると思います。
- 研究室ウェブサイト <http://lab.kaztake.org>
- 竹内のブログ <http://kat.officialblog.jp>

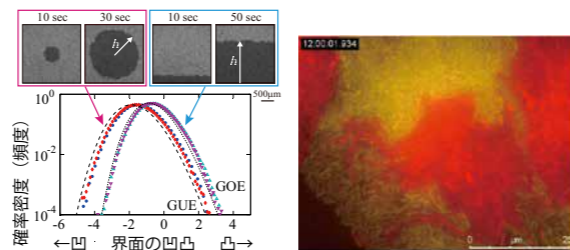


図1 (左)：液晶乱流の成長現象で発見した KPZ 普遍法則。界面の凹凸の分布が、普遍的な理論曲線に従っている。図2 (右)：均一環境で観察した、二種類の大腸菌集団の棲み分けの様子。

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、原子間相互作用の非調和性を定量的に扱うことで熱電材料やナノ構造体の熱伝導の第一原理に基づき計算する手法は、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]

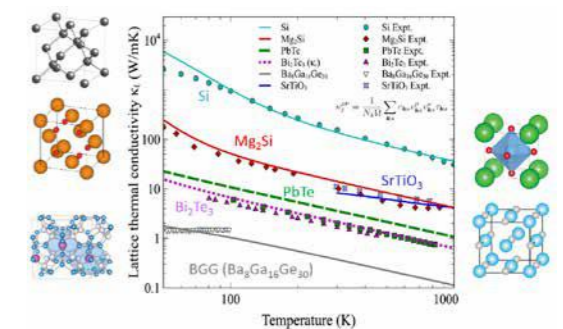
- ・波動関数理論に基づく多体電子状態計算手法「トランスコレイティッド法」
- ・第一原理非調和格子模型の構築と熱伝導計算への応用
- ・超伝導密度汎関数理論
- ・大規模系のエネルギースペクトル計算手法
- ・物質構造探査手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

- ・H₂S 高压相の高温超伝導
- ・酸化物中の不純物水素の電子状態
- ・ネオジム磁石の保磁力に結晶粒界が及ぼす影響
- ・クラスレート型熱電材料
- ・新しい強誘電体材料

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

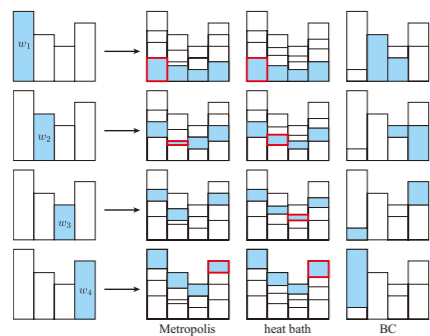
1 研究の背景

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、もとの方程式の中に含まれる、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確率的手法、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。

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、 $H\Phi$ 、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

2.2 統計的機械学習の物性物理への応用

計算手法の開発と同時に、物質への応用も積極的に研究しています。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

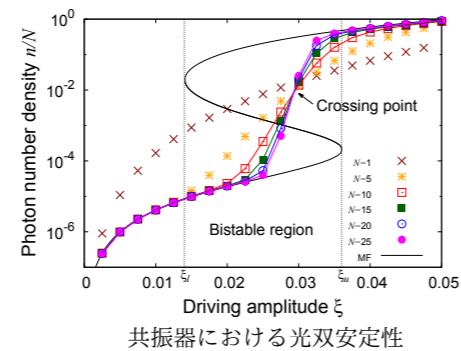
注目されています。これらの系のダイナミクスを機械学習に基づいて効率的に計算する手法を開発し、実験家との共同研究を通じて、新しい物質の物理を解明しています。また、第一原理電子状態計算と実験の「データ同化」による結晶構造推定にも取り組んでいます。

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、スピンが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ドダイナミクス法を用いて古典フラストレートスピン系のトポロジカル相転移の可能性やトポロジカル励起のダイナミクスを調べています。また、テンソルネットワーク法を用いて、カゴメ格子スピン模型やハニカム格子キタエフ模型に現れる量子スピン液体状態の性質も調べています。

2.4 新奇的な非平衡・非定常状態

レーザー照射の下で現れる光双安定性のような非平衡系における動的な協力現象を大規模な数値計算により解析しています。多数のフォトンと多数の二準位原子の自由度からなる量子マスター方程式の時間発展演算子の固有値・固有状態から、平衡系での一次相転移との類似性や相違点について研究を行っています。また、非エルゴード性を示す古典調和振動子系を提案し、系における注目粒子の振る舞いを、分子動力学計算、厳密対角化、解析計算を用いて調べ、近年注目されている異常拡散と非エルゴード性との関連を議論しています。



藤堂研究室ホームページ:

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

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

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

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

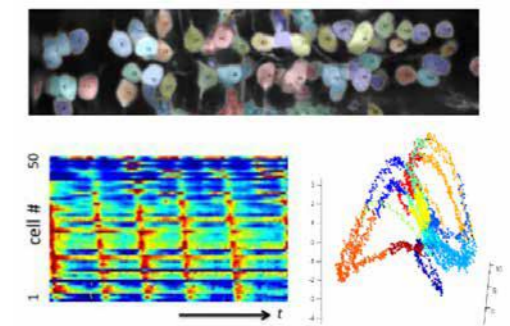


図1: カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞(上)の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する(左下、赤色が活動状態を示す)。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を3次元空間内で可視化することもできる(右下)。

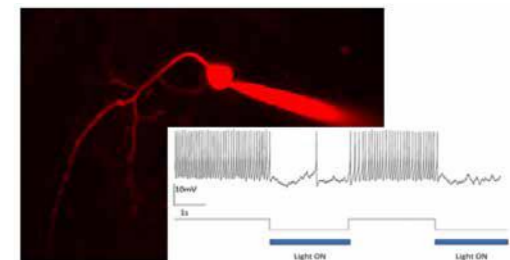


図2: パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射(light ON)により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。

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」でもさざ波が起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。

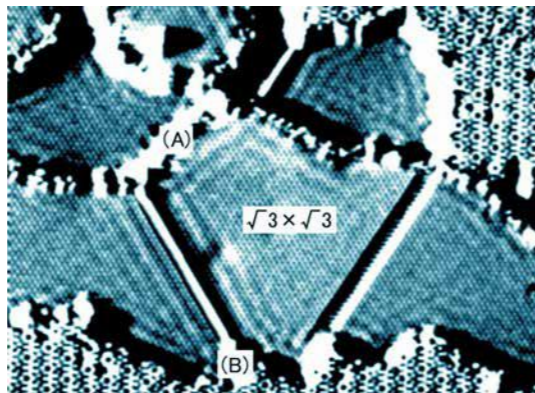


図1. 電子の海のさざなみ

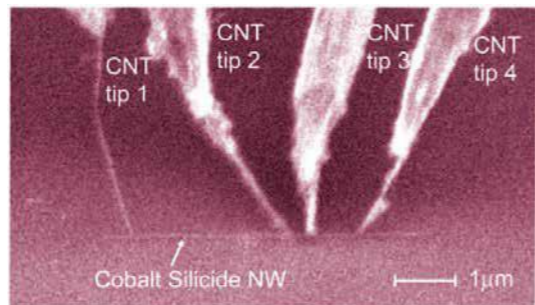


図2: ミクロな針を使った4探針電気伝導測定

1 研究概要

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

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

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

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

標準模型を超えた物理の候補として私が興味を持っている枠組みの一つが、超対称性理論です。超対称性理論は、(i)標準模型の不自然さの問題を解決する(ii)暗黒物質の候補を含む(iii)標準模型ではバラバラだった3つの相互作用の強さが高エネ

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

これまで私は、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。

2 実験・観測との関連

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

- Planck衛星による宇宙背景輻射の測定により標準宇宙論が詳細に検証され、インフレーションに関する定量的な情報も明らかになってきました。
- 2015年より世界最高エネルギーの衝突実験・LHCが再稼働しました。今後も新たな結果が出てくることが期待されます。
- 暗黒物質探索(特にWIMP検出を狙った直接探索実験)の感度も近年飛躍的に向上しています。
- $0\nu\beta\beta$ 実験や、ミューオン異常磁気能率実験にも注目しています。

3 これまでの研究

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

4 研究室ホームページ:

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

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、いわゆる「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向きが非常に重要な役割を果たしています。当研究室では、物質中の電子スピンが誘起するさまざまな現象を探求し、背後にある物理を解明できるよう研究を行っています。

2 最近の研究テーマ

(1) 薄膜ヘテロ構造とスピン軌道相互作用

スピン軌道相互作用が大きい物質を組み合わせた薄膜ヘテロ構造では、これまでにない新たな現象が次々と見つかり、注目されています。たとえば、異種金属間や金属・酸化物の界面では、その電子状態に起因したスピン軌道相互作用が発現し、垂直磁気異方性や、カイラルスピン構造を誘起するジャロシンスキー・守谷型の交換相互作用が

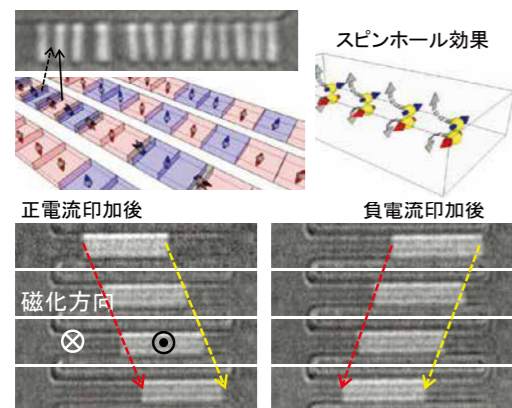


図1. カイラル磁区構造がスピンホール効果によって電流で平行移動の様子を磁気光学顕微鏡を用いて観察した様子。

発現することが最近わかってきました。また、トポロジカル絶縁体やワイル半金属もスピン軌道相互作用が重要な役割を果たしています。私たちは原子レベルで積層を制御したヘテロ構造を作製し、スピン軌道相互作用を変調できる物理を探求しています。

(2) スピン流生成とその物性

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。研究室では、スピンホール効果などによるスピン流が生成される物理と、スピン流が生み出す新たな物性に関する実験を行っています。

(3) 光誘起スピン制御

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、スピンの向きが電子の移動方向と結合したバンド構造が発現することがあります。これらの物質に円偏光を照射すると、スピン流などの分極したキャリアを生成できることが予測されています。私たちは擬2次元構造や異種物質間の界面における光誘起キャリアの生成機構を調べ、量子情報技術に利用できる光誘起スピン制御の研究を行っています。



図2. 光誘起スピン制御を調べるための光学系。

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、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。

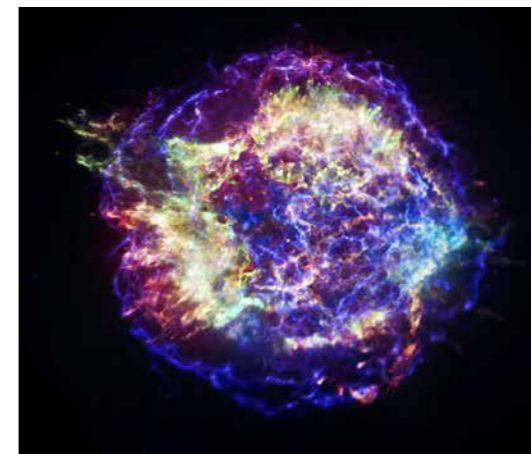


図1: 「Chandra」衛星で見た超新星残骸 Cassiopeia A の X 線画像。1682年に爆発した星の残骸が、現在も 4000 km s^{-1} で膨張を続けている。放射は主に爆発でまき散らされたシリコンや鉄などからの特性 X 線(赤、緑)やほぼ光速まで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射(青)である。

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)などでの観測を進めている。また、2016年2月17日に打ち上げた「ひとみ」衛星は残念ながら運用停止したものの、その開発と立ち上げ運用、そして観測では中心的役割を果たし、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。

今後は、「ひとみ」衛星の分光機能に特化した XRISM 衛星計画に参加し、2021年度の打ち上げに向けて開発を進める。また我々のグループは、光子エネルギーが 10 keV を超える硬 X 線の検出器開発を得意とし、「すざく」硬 X 線検出器、「ひとみ」の硬 X 線撮像検出器の開発では JAXA 宇宙科学研究所とともに中心的な役割を果たしており、軟ガンマ線検出器の開発にも大きく参画している。光子エネルギーが 10 keV 以下の軟 X 線だけでなく、硬 X 線も合わせて広いエネルギー帯域を観測できることで、宇宙の高エネルギー現象の理解を大きく進めることができる。さらに、次の衛星を目指した観測装置の開発も進めている。

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ックスの解析を行い、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。

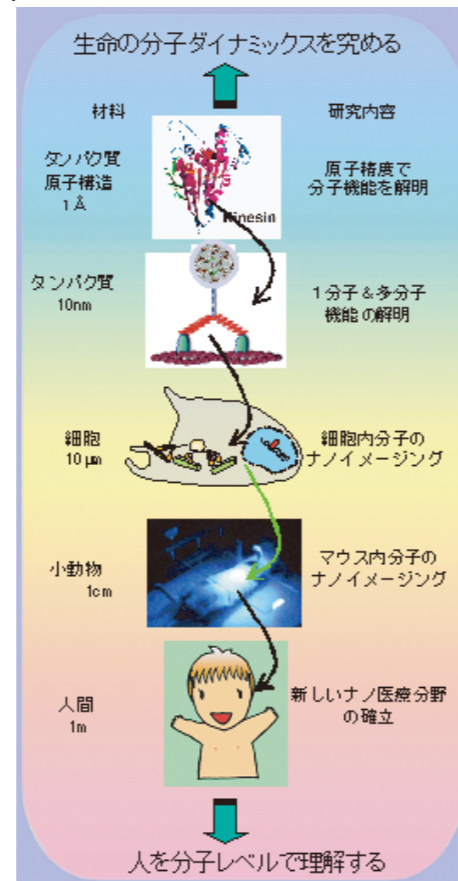
3 マウス内の細胞の分子機能の理解

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

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

2 最近の研究テーマ

実時間粒子生成: 場の量子論の『真空』は空っぽではなく、いつでも粒子・反粒子の量子揺らぎで満ちています。電場や重力場など外から刺激を加えると、これらの揺らぎが実粒子として出てくる現象が理論的に予言されています。このような非平衡量子現象を非摂動的に解析することは、現代の物理学の大きな挑戦課題のひとつです。我々は確率過程量子化法や格子シミュレーション等、様々なアプローチを駆使して、この難問に取り組んでいます。このような研究は、RHICやLHCで研究されている『クォーク・グルーオン・プラズマ』の初期時空発展を解明するために重要です。高密度物質の性質: 中性子星内部や中間エネルギーでの重イオン衝突実験では、原子核内部の密度よりもさらに高密度状態が実現しています。このような標準核密度を越えた物質については、理論の不定性が大きく、まだ解明されていない謎がたくさん残されています。『負符号問題』と呼ばれる数値計算の原理的困難に対して、数学的手法の基礎研究や、現象論を援用して取り組んでいます。特に高密度で期待されるエキゾチックな自由度(ダイ

クォーク等)に興味を持って、J-PARCで検証可能な新奇物理現象を探索しています。また、中性子星のような高密度・強磁場中では、QCD真空そのものが変化したり、外場がQCD真空の性質と量子異常を介して結び付いたりします。このような特異な現象を中性子星の性質と結びつける研究も行っています。

外部重力場中のQCD物性: 外部電磁場と同じように、強い外部重力場もQCDの性質に大きな変更を与えます。このため、ブラックホール近傍や膨張系、回転系では、平坦な時空では見られない未知のQCD現象が起こる可能性が秘められています。特に、QCDの非摂動性に起因した現象は理論的に興味深い対象です。我々は、曲がった時空の格子シミュレーションなどの非摂動的手法を取り入れることによって、外部重力場中のQCD物性の解明を目指しています。

3 今後の展開

RHICやLHCで精力的に研究されてきたクォーク・グルーオン・プラズマに加え、最近ではより中間エネルギーの重イオン衝突実験によって低温・高密度領域を走査する実験的試みが、RHIC、FAIR、NICA、J-PARC等の加速器施設で予定されています。様々な理論的困難はありますが、このような実験計画に対して具体的な提言をすることが高温高密度QCD理論の急務です。特にダイクォーク探求はQCD黎明期から今日まで続く、QCD・ハドロン物理研究の積年の課題と言えましょう。

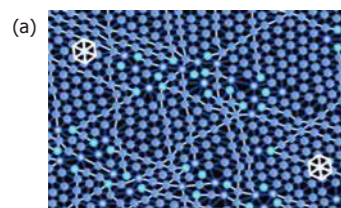
よりアカデミックなレベルで、第一原理理論であるQCDそのものへの興味も尽きません。最近ではいわゆるゲージ・重力対応によって、QCDのある極限(強結合・カラー数無限大)における非摂動的性質を詳細に調べられるようになってきました。まだQCDの解法としては発展途上段階ですが、高次元時空を利用したQCDの定式化は、徐々にひとつの分野として確立しつつあります。我々の研究している汎関数繰り込み群や確率過程量子化法も、高次元的な理論形式になっているので、見掛けは違うけれど何らかの繋がりを見出せるかも知れないと期待しています。

極低温になると乱雑な熱雑音に隠されていた量子効果が顕わになり、物質の個性を反映した多彩な量子現象が出現する。我々は、単原子層の液体・固体ヘリウム (He) や炭素原子の2次元シートであるグラフェンなど、できるだけ純粋かつ単純な低次元物質が示す多彩な量子現象を極低温まで調べ、凝縮系物理学の新概念を探求している。

1 2次元ヘリウムの新奇な量子相

Heには、核スピン0の中性ボース粒子である⁴Heと、スピン1/2をもつ中性フェルミ粒子である³Heという、ふたつの安定同位体がある。両者は同じ粒子間相互作用をもつものの異なる量子統計に従うため、それらの液体や固体は低温で大きく異なる性質を示す。我々は原子スケールで平坦なグラファイト表面に物理吸着して得られる単原子層の2次元Heに注目し、そこに実現している新奇な基底状態について調べている。

2次元Heは、その面密度によって原子間の相互作用が大きく変化し、様々な量子相が実現する。ごく低面密度では、理論予測に反してHeがパドル状の液体相をなすことが、詳細な比熱測定から明らかになった。また低面密度の整合固体(C3相)は、量子性が非常に強く、ほとんど溶けかかった固体のようで、これまで知られていない磁気素励起をもつ新種の量子スピン液体状態を見出した。更に高面密度域には、三角格子の回転対称性をもつものの絶対零度でも格子欠陥が流動する量子ヘキサティック状態(図a)を示唆する実験結果を得た。これは「量子液晶」という新たな量子相と考えられる。現在、比熱測定による量子相の決定と、ねじれ振子による超流動性の観測を同時に行える装置を使って、その超流動相すなわち「超液晶」状



(a) 量子ヘキサティック相の概念図。

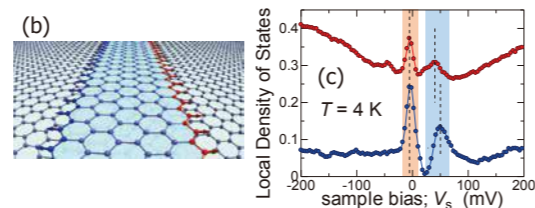
態の検出実験を進めている。

2 グラフェンのスピン偏極ジグザグ端状態

グラフェンにはふたつの等価な副格子が存在するが、ジグザグ型の試料端ではその対称性が破れる。そのため、ジグザグ端で挟まれたナノリボン(ZGNR)では、図(b)の様に同じ端内では強磁性的に、二つの端間では反強磁性的に電子がスピン偏極して局在すると予想されている。我々はグラファイトやグラフェンを水素プラズマ中で熱処理することで、純度の高いジグザグ端を大量に作成する技術を開発した。得られたZGNRの走査トンネル分光(STS)では、スピン偏極状態とされるダブルピーク状の局所状態密度が観測された(図(c))。現在は、ナノリボン幅、外部磁場、温度を変えたときの端磁性の相転移(スイッチング)の検証実験を進めている。

3 実験手法と共同研究

自作の核断熱消磁冷却装置(到達温度50 μK)と、超低温(30 mK)・高磁場(13 T)・超高真空(10⁻⁸ Pa以下)下で作動する多機能走査プローブ顕微鏡という2つの主力装置を中心に、比熱、核磁気共鳴(NMR)、ねじれ振子、走査トンネル顕微/分光(STM/S)、電気伝導、表面微細加工など、多彩な実験手法を用いて研究を進めている。また、小型で連続冷却可能な核断熱消磁冷凍機や、液体ヘリウム寒剤循環型のSTM装置など、新たな低温実験技術の開発も進めている。



(b) スピン分極したz-GNRの概念図と(c)ジグザグ端上で測定した局所状態密度。(b)の左(右)端上のものを青(赤)色で示す。V_s = 0, 50 mV付近のピークがスピン偏極状態に対応している。

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

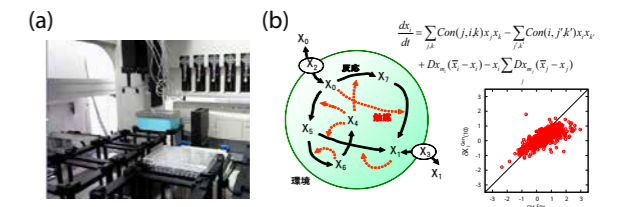
態遷移がどのように記述されるか(何次元の空間で描けるか?)、環境適応・エビジェネティクス記憶・そして進化といった様々な時間スケールを持つダイナミクスはどのように関係しているかを明らかにします。また、細胞モデルの進化シミュレーションを用いて(図b)、どのようなマクロ状態量によって適応進化過程を記述すべきかを明らかにします。こうした結果を統合し、生物システムの安定性と可塑性を記述する細胞状態遷移理論を構築を目指します。

ii) 多細胞生物における不可逆な分化過程の解析

多細胞生物の発生過程において、分化能を持つ細胞(例えばES細胞)からそれを失った細胞への状態遷移はしばしば不可逆性を持ちます。では、この不可逆な分化過程はどのような状態量によって記述されるのでしょうか? 計算機シミュレーションによる理論研究によって、自発的揺らぎに代表されるダイナミクスの複雑さが分化能に関与していることが示唆されていますが、その不可逆性をどのようなマクロレベルの状態量で記述し、また遺伝子発現ネットワークなどのミ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モデル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は非自明な問題である。最近、当

研究室で提案されたモデルではそのような対称性の導入に成功し、M5ブレーンの一つのモデル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という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 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イ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

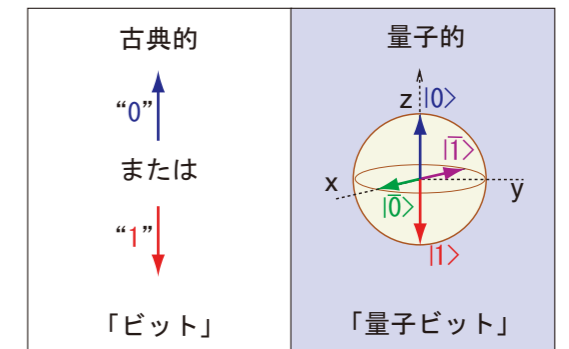
計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけでなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえ、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果に関する理論的研究を行っている。我々の研究は、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深める、という基礎科学的なアプローチと、エンタングルメント^注など量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、精密測定、精密操作などに役立てる、という応用科学的なアプローチの相乗効果によって発展させていることが特徴である。

最近、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に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>

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。上記の内容に関連するテーマ全般を研究対象としていますが、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、さらに高いエネルギースケールには標準理論を内包する未知の理論が存在すると考えています。これは根拠の無い期待ではなく、むしろ標準理論に内在する「不自然さ」を解消するためにどうしても必要なことなのです。

宇宙の進化を理解する上でも多くの謎が残されています。例えば宇宙暗黒物質の起源、宇宙に反物質がほとんど存在しない理由、宇宙初期に起きたと考えられるインフレーションのメカニズムなどについて、素粒子標準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理論が不可欠です。

3. 研究内容

素粒子物理学や初期宇宙論の研究には、場の理論や重力理論についての深い理解と、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の主要なテーマのひとつに、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、今後素粒子物理学を進める上でますます重要となりますが、この点については本研究室でも研究を進めています。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。真空の安定性や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。

テラスケールより高いスケールの物理に関して、新たな可能性を考え、その検証方法を探求することも、今後ますます必要性を増すこととなります。特に、標準理論を超える物理と宇宙進化上での諸問題（暗黒物質の起源、インフレーションの物理、宇宙の物質・反物質の非対称性の起源など）との関連や、標準理論を超える物理の背後にある対称性（超対称性、Peccei-Quinn 対称性、フレーバー対称性など）について、さらに理解を深めていきたいと考えています。また、LHC 実験等、現在稼働中の実験についてはもちろん、現在議論が始まっている国際線型加速器（ILC）や LHC 実験の 10 倍近いエネルギーを可能とする将来のハドロン加速器（FCC）についても、それらから素粒子の性質についてどのような情報が得られるかに関して理論的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 実験やニュートリノや荷電レプトンのフレーバーの破れに関する実験、宇宙背景放射の観測、暗黒物質の直接及び間接検証実験、高エネルギー宇宙線の観測など、様々な実験の結果は、テラスケール以上の未知の物理を理解する上での重要な知見を与えることでしょう。本研究室では、それらの素粒子実験や宇宙観測を視野に入れつつ、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 程度と非常に低く、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。

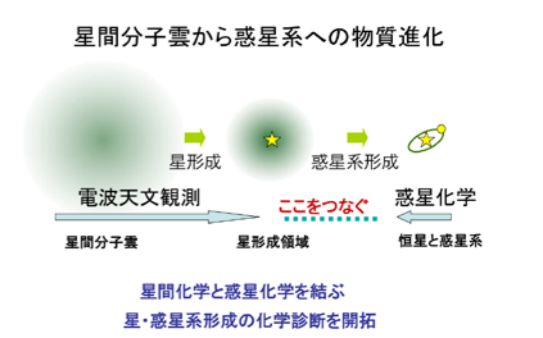
星形成の研究では、その「始まり」を観測的に捉えることが重要な課題である。誕生する星の質量や形態（単独、連星など）は初期段階で決定されるからである。その目的のために、HCOOCH₃ などの星間分子としては複雑な有機分子の観測を進めている。そのような有機分子は、星形成以前には存在しないが、星形成とともに星間塵の氷マントルの蒸発が関与して生成される。従って、これらの分子の検出により、星形成の「始まり」を捉えることができる。事実、非常に若い原始星 NGC1333 IRAS4B において、HCOOCH₃ のスペクトルを検出することができた。

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 CH₄ 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 HCOOCH₃ 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・ボロメーター (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, HD₂⁺, H₂D⁺ 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。



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、宇宙理論研究室の須藤研究室・吉田研究室と協力して行っています。

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

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

2 最近の研究の概要

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

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

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

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

3 今後の展望

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

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

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