2017

進学案内資料

東京大学理学部物理学科

理学部物理学科への進学を考えている学生の皆さんへ

物理学とは、実験と理論を両輪にして、我々を取りまく森羅万象を一つ一つ解き明かして普遍的な法則や概念にまとめ上げていく学問です。七色の虹や美しい対称的な形の雪の結晶など身近な現象から、宇宙はどのようにしてでき、どうなってゆくのか、それを認識する我々という生命はどうやってできたのかなど、また最近では経済・社会現象までも含めて極めて多様な現象を対象とする学問です。

特に、物質の成り立ちを求めて、原子・分子、原子核、素粒子にいたる要素還元論的な物理学は大きな成功を収め、今や、質量の起源をも解明し、ダークマターなど未知の粒子にも迫ろうとしています。また、素粒子の世界が宇宙の始まりの理解につながることもまた大きな驚きです。一方、この要素還元論的な物理の方法を物理学の縦糸とすると、異なる現象の関係をつなぎ、物理学の対象を広げる横糸のような分野もまた重要です。例えば、熱力学や統計力学は、対象やスケールの違いを超えて様々な系に適用でき、それらの上に築かれた物性物理学、非平衡物理、生物物理、量子情報などでは、物理学の対象をさらに拡張しつつあります。このように、物理学の概念や手法は、縦横に網目のように絡み合いながら自然の理解を広げ、社会やテクニロジーにも影響を及ぼしながら、まさに現在進行形で「進化」しています。

当物理学科では、世界的にも卓越した物理学者である 70 名を超える教員が在籍し、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。さらに、４年時では研究室に所属して各専門分野での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。

物理学科では、物理学の知識やスキルを身に付けるだけでなく、その過程で、情報収集力や分析力、論理性、コミュニケーション力、計画性、忍耐力などを身に付けることができます。教員だけでなく優秀な同級生や先輩後輩との交流による切磋琢磨を通して、「自分で考え自分で道を切り拓いていける人間力」を身に付けることができると考えています。それらは、研究者に限らず、将来どんな知的職業についても必要とされる基礎力です。物理学科で、のびのびと学び、人間として成長して欲しいと願っています。

理学系研究科物理学専攻長・理学部物理学科長
長谷川 修司

7. 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越える新しい素粒子物理法則を探索している．J-PARCの大強度陽子加速器で発生させたニュートリノビームを使ってニュートリノの性質の精密測定を行っている．さらに，すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究も推進している．
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 Enegy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、量子情報、物性理論	冷却原子気体の理論(ボース・アインシュタイン凝縮、フェルミ超流動)、情報熱力学、量子情報・測定、物性理論
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、CHS装置(核融合研)、JFT-2M装置(原研)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的な手法に加えて、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。
Kathrin WIMMER	Experimental Nuclear Physics	Our research focuses the structure of radioactive nuclei. Exotic nuclei, far away from stability, show many interesting features which are not understood yet. We use direct reactions to populate states in the exotic nuclei and state-of-the-art experimental equipment. Employing various spectroscopic tools we can gain new information on the properties of exotic nuclei and therefore a deeper understanding on the underlying mechanisms.

氏名	専攻分野	研究内容
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すべき普遍的論理を、統計物理、力学系理論のウィングを広げながら、解明する、特に、部分(ミクロ)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にして宿るかにも興味がある。
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。
駒宮幸男	素粒子実験	(1)素粒子実験における国際的な次期基幹計画である電子・陽電子リニアコライダーILC計画の推進。ILCでの物理、測定器の検討。KEKのATF2での電子ビームサイズモニターの開発と測定。(2)最高エネルギーの相互衝突型加速器(コライダー)を用いた素粒子物理学実験。特にCERNにおけるコライダー(LEP及びLHC)を用いたヒッグスボゾンや超対称性粒子群などの探索。(3)粒子測定器の開発。特に冷中性子の地球の重力場中での量子効果測定と新短距離力探索のための検出器の研究開発とフランスILLでの実験。
酒井広文	最先端レーザー技術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。
佐野雅己	非線形物理学、ソフトマター、生物物理学	非線形非平衡系および生物物理:非平衡系の統計物理、非線形動力学とカオス、散逸系におけるパターン形成と動力学、乱流の統計則・巨視的構造、非平衡ソフトマター、アクティブマター、定量的な生命物理。
島野亮	光物性物理	テラヘルツ分光、レーザー分光を主な手法とする固体量子物性の研究。エキシトン、マグノン等の固体内素励起の観測による電子・スピン系の相転移ダイナミクスの解明や、光による多体電子系の量子相制御を目指している。具体的には、半導体の電子正孔系の絶縁体金属転移及び量子凝縮相の研究、低次元量子液体における磁気光学効果、超伝導体の光による相制御及び秩序変数の時空間ダイナミクスの観測、時間空間反転対称性が破れた系で量子効果により発現する特異な電気磁気光学の研究、非摂動論領域における光と物質との相互作用の解明など。
須藤 靖	宇宙物理学・太陽系外惑星	宇宙物理学と太陽系外惑星に関する理論的および観測的研究。具体的な研究テーマは、多波長観測データをもとにした銀河団モデルの構築、ダークマターハローの非球対称性の統計的モデル、重力レンズ天文学、広域銀河探査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査、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。
髙木英典	物性物理	固体、特に遷移金属酸化物中の絡み合う電子(相関電子)が創成するエキゾチックな量子凝縮相を現実の物質の中に探索・実現する。同時に相形成の物理を解明する。現在、高温超伝導、量子スピン液体、非自明なスピン・電荷秩序、トポロジカル絶縁体、などに具体的興味の中心がある。舞台となる物質を自ら開拓すると同時に、電子輸送現象、熱物性、量子ビーム回折・散乱などのプローブを駆使して、ナノの世界での相関電子の静的・動的自己組織化構造を明らかにする。

氏名	専攻分野	研究内容
高瀬雄一	プラズマ物理・核融合	プラズマは荷電粒子の集合体であり、非線形複雑系の典型例である。高温プラズマでは散逸が小さいので、熱平衡から遠い状態にある。また非線形性が顕著に現われ、それが発展して乱流状態が形成され、これらを介して複数の状態間で遷移を起こし、自ら構造を形成していく。高温プラズマは核融合発電に応用できるが、その実現はプラズマの振る舞いの物理的理解および制御にかかっている。本研究室では、TST-2球状トカマク装置のほか、国内外の大型核融合装置も使って高温プラズマ中の波動現象、不安定性、乱流等の研究を行っている。
立川裕二	場の量子論及弦理論	素粒子の世界を記述する場の量子論は、強結合領域でいろいろな面白い性質を示しますが、超対称性というボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性があると、この強結合領域が紙と鉛筆とすこしの計算機で理論的に調べることができ、それを主な研究対象にしています。超対称場の理論はまた超弦理論に埋め込むことによってより良く理解できるので、関連する超弦理論の研究も行っています。その過程で数学のいろいろな概念が自然に現れるのも興味深い点です。
常行真司	物性理論	第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算機シミュレーションは、観測や実験からは得られない物性情報を得たり、あるいは実験に先んじた予言を行うことを可能にする。当研究室では主にそのような計算物理学的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や2成分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。
藤堂眞治	計算物理	計算物理学：量子モンテカルロ法など最先端の計算物理学の手法を用いて、量子スピン系やボーズハバード系など強相関多体系における新奇な状態の探索と相転移・臨界現象の解明を目指す。また、テンソルネットワークなどの量子多体系に対する新たなシミュレーション手法開発や京コンピュータなど最先端スパコンの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代並列シミュレーションのためのオープンソースソフトウェアの開発も進めている。
中澤知洋	宇宙物理学実験	宇宙では、地上では実現し得ない、大規模で極限の高エネルギー現象が起きている。我々は自ら開発したX線・ガンマ線の観測装置を人工衛星に搭載し、ブラックホールや銀河団等の高エネルギー天体を観測することで、宇宙の天体進化を支配する物理を探っている。現在は軌道上の1ヶ月弱稼働した「ひとみ」衛星のデータ解析を進めると同時に次世代検出器の検討を進めている。研究活動では理研のMAXIグループ及びJAXA宇宙科学研究所と協力している。本年度より馬場・中澤研として運営し、中澤は直接学生を取らないため馬場先生を志望すること。
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にどのような物理があるのかに興味があり、自然界に存在するより基本的な統一理論を目指して研究しています。これまで私は、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なってきました。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	物性実験	電子スピンが誘起する物理に関する物性実験。金属超格子構造や酸化物・窒化物ヘテロ構造におけるスピン依存伝導や磁性、光応答などの物性研究を中心に行う。特に、スピンの流れである「スピン流」が生み出す新たな物理現象を探索・解明するとともに、スピン流を自在に制御できる機構を確立する。
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、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。2016年に打ち上げた宇宙X線衛星「ひとみ」は残念ながら運用停止したものの遺されたデータの解析を全力で行うとともに、「ひとみ」代替機、その先の宇宙高エネルギー衛星「FORCE」などの開発、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。

氏名	専攻分野	研究内容
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変化を解析する．3.マウス内モーター分子の運動を解析し，個体内細胞の運動を明らかにする．4.細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する．
福嶋健二	原子核理論	自然界の最も基本的な相互作用のひとつである『強い相互作用』の織り成す物理をさまざまな手法を用いて研究しています。強い相互作用するクォークとグルーオンが、パイ中間子や核子などハドロンを作り、多数のハドロンが集まって我々の身の回りの物質を構成しています。超高温・超高密度・強い外場（磁場・電場・重力場など）の中では、身近な物質からは想像もつかない面白い物性が『強い相互作用』の性質から導かれます。既知の理論から新奇現象を探る理論研究を目指しています。
福山 寛	低温物理学	低温物理学: (i) 超低温における量子液体・固体研究（超流動、超固体、核磁性、強相関効果、相転移現象など）。特にヘリウム単原子層膜の2次元量子物性。(ii) ディラック電子系の物性研究。特にグラフェンのエッジ状態、バンドギャップ制御、超伝導近接効果。(iii) 超低温の発生と測定技術の開発。比熱、核磁気共鳴、ねじれ振り子、走査トンネル顕微／分光、輸送現象測定など幅広い 実験手法を用いる。
藤森 淳	光電子分光、強相関電子物性	光電子分光、放射光分光を用いた固体電子物性の研究。強相関電子系、磁性半導体およびそれらの界面、ナノ構造の特異な物性の発現機構解明。高温超伝導、巨大磁気抵抗、金属−絶縁体転移、非フェルミ液体的振る舞いの解明を目指す。
古澤 力	生物物理学（理論/実験）	生物物理学:適応・進化・発生・免疫といった多数の要素が関与するダイナミッ クな生物現象について、理論と実験の両面から解析する。計算機シミュレーショ ン、理論解析、そして構成的生物学実験を統合し、個々の分子の詳細に依存しな い普遍的な性質を切り出すことにより、生物システムの状態とその遷移を記述す るマクロレベルの状態論の構築を目指す。
松尾 泰	素粒子理論	量子重力、超弦理論、場の量子論、可解な量子系、およびそれに関連する数理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。
宮下精二	統計力学、物性基礎論、磁性	強く相互作用する系が見せる協力現象の特徴を統計力学的な手法を用いて研究する。量子効果や相互作用の競合(フラストレーション)、ランダム性がなどのよる興味深い相転移・臨界現象の研究や、それぞれの系が示す動的な性質を、非平衡統計力学や量子ダイナッミクスの観点から調べていく。‘相互作用系のモデル化と制御’の観点から諸現象の積極的な把握を目指す。
村尾美緒	量子情報（理論）	計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、量子力学的に許されるすべての操作を自由に行うことができる装置として量子計算機をとらえる。そして、量子計算機を用いることで現れる量子力学的効果を解明することによって、情報と情報処理という操作論的な観点から量子力学への基盤的理解を深めるとともに、エンタングルメントなど量子力学特有の性質を情報処理、情報通信、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・素粒子論的宇宙論
山本 智	宇宙物理学、星間化学、分子分光学	電波、特にサブミリ波を用いて、星形成、分子雲形成、および銀河系の構造について観測的研究を進めている。そのために、富士山頂サブミリ波望遠鏡、18 cm可搬型サブミリ波望遠鏡の開発運用を行うとともに、国立天文台が推進する望遠鏡計画に参加している。特に、中性炭素原子が放つ波長0.6 mmのスペクトル線に着目して、星形成、分子雲形成の理解に新しい角度からアプローチしている。同時に、新しい星間物質を検出する目的で、実験室における分子スペクトルの研究も行っている。
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	ニュートリノ振動の発見により，ニュートリノの性質を詳細に調べることで宇宙から反物質が消えた謎を解く鍵が得られる可能性が拓けた。大強度陽子加速器J-PARCで作ったニュートリノビームや反ニュートリノビームを295km離れたスーパーカミオカンデで検出するT2K実験を進めている。また，今後の発展に向けてハイパーカミオカンデプロジェクトの推進や，新しいニュートリノ測定器の開発も行っている。

氏名	専攻分野	研究内容
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　45名

2017年度 学部時間割

平成29年（2017）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					
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		量子力学Ⅱ	物理学演習Ⅲ(量子力学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		流体力学	物理学演習Ⅳ(統計力学Ⅰ・電磁気学II)		

3年　Aセメスター

	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)	
水	生物物理学	固体物理学Ⅰ	物理学実験Ⅱ		
木		電磁気学Ⅲ	物理学実験Ⅱ		
金	現代実験物理学Ⅱ	統計力学Ⅱ	物理学演習Ⅵ(統計力学II・電磁気学III)		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		場の量子論Ⅰ	サブアトミック物理学	統計力学特論	生物物理学特論I
			計算科学概論		
火	応用数学XC	一般相対論	特別実験Ⅰ　理論演習Ⅰ		
水		量子光学	特別実験Ⅰ　理論演習Ⅰ		
木	物性物理学特論	固体物理学Ⅱ	特別実験Ⅰ　理論演習Ⅰ		
金	幾何学XC	宇宙物理学	プラズマ物理学	生物物理学特論II	

4年　Aセメスター

	1限	2限	3限	4限	5限
月	系外惑星	化学物理学	素粒子物理学	連続系アルゴリズム	
				場の量子論Ⅱ	
火	解析学XC	原子核物理学	重力波物理学		
			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		固体物理学III	特別実験Ⅱ　理論演習Ⅱ		
金		現代物理学入門	普遍性生物学		

2016年度に行われた講義の概要

1　2年生 冬学期

1.1　電磁気学Ⅰ：早野 龍五

1. 特殊相対性理論
1.1 ニュートン力学とガリレイの相対性
1.2 ガリレイの相対性と電磁気
1.3 光速
1.4 ローレンツ変換
1.5 ローレンツ変換のいくつかの帰結
1.6 ユークリッド空間とミンコフスキー空間
1.7 4 元速度
1.8 エネルギー運動量ベクトル
1.9 4 元加速度と 4 元力
1.10 ローレンツ力
2. SI 単位系
2.1 SI 単位系と秒の定義の変遷
2.2 m の定義の変遷
2.3 kg 原器の問題点
2.4 kg 原器の廃止に向けて
3. 静電場
3.1 自然界の 4 つの力
3.2 クーロンの法則
3.3 重ね合わせの原理
3.4 保存力
3.5 電場、電気力線
3.6 Gauss の法則
3.7 静電エネルギー
3.8 Maxwell の応力
3.9 静電ポテンシャル
3.10 Laplace 方程式と Earnshaw の定理
3.11 Poisson 方程式
4. 静電場中の導体
4.1 導体
4.2 導体表面の電場
4.3 鏡映法
4.4 静電容量
4.5 平行平板コンデンサー
4.6 静電エネルギー
4.7 電流・電流密度
4.8 電荷の保存
4.9 電気伝導度
4.10 ジュール熱
4.11 キルヒホッフの法則と直流回路
5. 静磁場
5.1 磁気単極子は存在しない
5.2 ローレンツ力
5.3 直線電流が作る磁場
5.4 2 本の平行な直線電流に働く力
5.5 磁場の発散と回転
5.6 アンペールの法則
5.7 ベクトルポテンシャル
5.8 ゲージ
5.9 ビオ・サバールの法則
5.10 磁気エネルギー
6. 時間とともに変化する電磁場
6.1 磁場中を運動する導体棒
6.2 誘導電流
6.3 ファラデーの法則
6.4 インダクタンス
6.5 変位電流
6.6 Maxwell 方程式
6.7 真空中の Maxwell 方程式の解
6.8 ポインティングベクトル
6.9 電磁波の運動量
7. Maxwell 方程式の相対論的共変性
7.1 共変ベクトルと反変ベクトル
7.2 ローレンツ共変性とは
7.3 電磁テンソル
7.4 電磁テンソルのローレンツ変換
7.5 Maxwell 方程式の相対論的共変性
7.6 電磁テンソルとローレンツ力
8. 物質中の電磁場
8.1 誘電体と分極
8.2 電束密度、誘電率、分極率
8.3 物質中の静電場の法則
8.4 電場と電束密度の境界条件
8.5 磁性体
8.6 物質中の静磁場の法則
8.7 物質中の Maxwell 方程式
8.8 誘電体中の電磁波

1.2 解析力学 : 横山 順一

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

1. ラグランジュ形式
- **1.1** ラグランジアンの導出
- **1.2** 運動を解くということの別の見方
- **1.3** 汎関数と変分法
- **1.4** 最小作用の原理
- **1.5** オイラーラグランジュ方程式の共変性
- **1.6** 拘束条件の下での運動
- **1.7** 対称性と保存則

2. ハミルトン形式
- **2.1** ハミルトンの正準方程式
- **2.2** ルジャンドル変換
- **2.3** 変分法による正準方程式の導出
- **2.4** 正準変換
- **2.5** ポアソンの括弧式
- **2.6** 位相空間とリュービルの定理
- **2.7** ハミルトンヤコビ方程式

3. 展開
- **3.1** 電磁場中の荷電粒子の運動
- **3.2** 断熱不変量
- **3.3** なぜ自然法則は時間二階微分方程式で表されるのか
- **3.4** 大団円 : なぜ古典力学は最小作用の原理に従うのか

詳細版は
http://www.resceu.s.u-tokyo.ac.jp/~yokoyama/AM2016.html

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
- **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

1.4 物理実験学 : 福山 寛, 山本 智

自然科学の最先端は日々進化し、融合し続けている。その発展の礎には物理学の法則とそれを利用した新しい実験技術や装置の開発がある。物理学は実証科学であり、新しい物理概念は実験で検証される必要がある。また多くの物理法則が実験から見出されてきた。ここでは、物理学の発展に寄与した歴史的な実験から最先端の実験も紹介しつつ、物理実験に必要な基礎知識（単位、実験技術、誤差論、レポート作成法など）を講義する。

1. 序論
- **1.1** 物理実験の魅力（歴史的実験から最先端実験まで）

2. 単位
- **2.1** SI 基本単位の定義
- **2.2** 各種の常用単位系とその変換

3. 基礎物理定数と標準
- **3.1** 基礎物理定数（プランク定数、ボルツマン定数など）
- **3.2** 標準（時間、質量、電流、電圧、電気抵抗）

4. 基礎的な実験技術
- **4.1** 実験（真空、低温、磁場）
- **4.2** 実験環境と安全（実験室実験、フィールド実験、飛翔体実験など）

4.3 測定法（電気的・磁気的・熱的物性測定、X 線回折、分光測定など）

4.4 試料作成（単結晶、薄膜、ナノ構造など）

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の作成法と研究倫理

6.1 レポート・論文の目的と構成

6.2 研究倫理

1.5 物理数学 I ：常行 真司

1. 複素関数の性質
複素平面、複素関数、リーマン面、初等関数と収束半径、対数関数とべき乗関数、無限乗積

2. 複素関数の微分と正則性
コーシー・リーマンの関係式、調和関数

3. 複素積分
定義と性質、コーシーの積分定理

4. コーシーの積分公式とその応用
コーシーの積分公式、テーラー展開、ローラン展開、特異点と留数、解析接続、δ 関数と主値積分

5. 等角写像

6. ガンマ関数
ガンマ関数、スターリングの公式、漸近展開

7. フーリエ級数とフーリエ変換の基礎
固有関数展開、フーリエ級数、フーリエ変換

8. 常微分方程式
常微分方程式の基本概念、解の存在と一意性、1 階常微分方程式の初等的解法、定数係数をもつ 2 階の線形微分方程式の解法

1.6 物理数学 II：村尾 美緒

1. フーリエ級数・フーリエ変換とその応用

1.1 フーリエ級数

1.2 フーリエ変換

1.3 波動方程式

1.4 ラプラス方程式

1.5 ポアソン方程式

2. 直交多項式と特殊関数

2.1 直交多項式の一般論

2.2 エルミート多項式

2.3 ラゲール多項式

2.4 ラゲール陪多項式

2.5 ルジャンドル多項式

2.6 ルジャンドル陪関数

2.7 球面調和関数

2.8 ベッセル関数

2.9 超幾何関数

2.10 合流型超幾何関数

3. 回転群と角運動量演算子

3.1 回転群と角運動量の性質

2 3年生 夏学期

2.1 電磁気学 II：岡本 徹

1. 序論（基本法則）

1.1 真空中の電磁場の基本法則

1.2 物質中の Maxwell 方程式

1.3 電磁ポテンシャル

1.4 電磁場のエネルギー

1.5 電磁場の運動量

2. 静電場

2.1 基本方程式と境界条件

2.2 電荷分布による静電場

2.3 境界値問題

2.4 多重極展開

2.5 導体系の静電場

3. 静磁場と準静的な磁場

3.1 静磁場の基本方程式

3.2 Biot-Savart の法則
3.3 磁気双極子モーメント
3.4 物質の磁化
3.5 境界値問題
3.6 定常電流による磁場のエネルギー
3.7 準静的な磁場と電磁誘導
4. 電磁波
4.1 平面電磁波の基本的性質
4.2 屈折と反射
4.3 物質の交流電磁場応答

2.2 量子力学 II：立川 裕二

0. はじめに
1. 角運動量
1.1 軌道角運動量
1.2 角運動量演算子の固有状態
1.3 角運動量の固有状態を座標表示すると球面調和関数
1.4 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数
1.5 スピン
1.6 s=1/2 のとき：パウリ行列
2. 球対称ポテンシャル内での粒子
2.1 この章でやること
2.2 球対称ポテンシャルのとき、ハミルトニアンと角運動量は可換
2.3 動径方向
2.4 水素原子
3. スピンと磁気モーメント
3.1 一様磁場中のループ電流
3.2 角運動量と磁気モーメント
3.3 LS 結合
3.4 これまでの話を全部合わせると・・・
3.5 一様磁場中のスピン
4. 様々な近似法
4.1 摂動論（定常状態）
4.2 摂動論（時間発展）
4.3 準古典近似（WKB 近似）
5. 対称性と保存則
5.1 運動量 p は並進、角運動量 L は回転の生成子
5.2 ユニタリー演算子とエルミート演算子
5.3 対称性と保存則
5.4 保存量
5.5 対称性
6. オマケ

2.3 現代実験物理学 I ： （前半）北川 健太郎,（後半）樋口 秀男

1. 物性実験
1.1 極限環境技術
1.2 固体中の電子構造観測
1.3 磁気共鳴を用いた実験
1.4 X 線を用いた実験
2. 一般物理学
2.1 レーザー物理学と種々のレーザー
2.2 レーザー冷却
2.3 ブラウン運動とパワースペクトラム
2.4 生物物理学実験

2.4 流体力学：吉田 直紀

1. 完全流体の力学
2. 流れ関数と複素ポテンシャル, 渦の運動
3. 粘性流体および圧縮性流体：ナビエ-ストークス方程式
4. 流体の不安定性と乱流
5. 衝撃波と爆発現象
6. 宇宙流体力学と相対論的流体
7. 双曲型偏微分方程式と数値流体力学
8. 非線形波動
9. ボルツマン方程式と運動論

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 等重率の原理とミ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
　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

2.6　計算機実験 ： 藤堂 眞治

1. UNIX の基礎・C 言語・LaTeX・バージョン管理システム
2. 数値誤差・数値積分・ニュートン法
3. 常微分方程式
4. 連立一次方程式
5. 特異値分解・画像圧縮・回帰分析
6. 最適化問題
7. 乱数・モンテカルロ積分・マルコフ連鎖モンテカルロ
8. スパコンと計算物理

3　3年生 冬学期

3.1　物理数学 III: 上田 正仁

1. 群論の基礎
2. 表現論
3. リー群の基礎
4. リー群と多様体
5. 微分形式
6. ベクトル解析の諸公式の導出
7. 多様体上の積分
8. 閉形式と完全形式
9. 微分形式の応用

なお、講義ノートは下記を参照。
http://cat.phys.s.u-tokyo.ac.jp/lecture/MP3_16/maph3.pdf

3.2　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の波動関数
　1.2 第２量子化
　1.3 弦の量子化
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
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

3.3 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**
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 現代実験物理学 II：駒宮 幸男, 浅井 祥仁

1. 素粒子の基礎
2. 素粒子と物質の相互作用
3. 粒子加速器の原理とエネルギーフロンティア加速器 **LHC/ILC**
4. 粒子検出器：原理と最先端検出器 **ATLAS**
5. 実験データと統計処理／統計現象の扱い方
6. ヒッグス粒子の見つけ方
7. 超対称性粒子の探し方
8. 暗黒物質の探し方

3.5 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-ヴィーヒェ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

3.6 生物物理学：能瀬 聡直, 岡田 康志

1. 生物物理学とは
　生命とは何か、生物物理学の歴史・3 大課題
2. 遺伝と進化 **1**
　メンデル遺伝、セントラルドグマ、個体群動力学
3. 遺伝と進化 **2**
　集団遺伝学、中立説、分子進化
4. 生体高分子の構造と機能 **1**
　回折限界、X 線結晶回折
5. 生体高分子の構造と機能 **2**
　NMR、分子動力学計算
6. 生物物理学研究の実例 **1**
　発生現象の数理モデル化
7. 生物物理学研究の実例 **2**
　反応ネットワークのモデル化と進化の理論
8. 生物物理学研究の実例 **3**
　マクスウェルの悪魔と分子モーター
9. 脳神経科学序論
　脳神経系における情報の流れ、静止膜電位
10. 神経活動電位とホジキン・ハクスレー方程式
11. シナプス伝達
　神経伝達物質の種類と放出、量子仮説
12. 神経ネットワーク解析の方法論
　視覚系を例として
13. 脳の可塑性と記憶
　学習記憶のモデル、長期増強現象
14. 遺伝子工学を用いた脳研究
　光遺伝学、神経活動イメージング

3.7　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
- **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

4　4年生 夏学期

4.1　場の量子論 I：松尾 泰

1. 相対論的量子力学
- **1.1** Lorentz 変換とその表現
- **1.2** Klein-Gordon 方程式
- **1.3** Dirac 方程式
- **1.4** 対称性と保存量：Noether の定理
- **1.5** 第二量子化とその必然性

2. 場の量子化
- **2.1** 場の正準量子化
- **2.2** Klein-Gordon, Dirac 場の量子化
- **2.3** 電磁場の量子化
- **2.4** S 行列
- **2.5** 相互作用描像
- **2.6** Feynman 則

4.2　サブアトミック物理学： Kathrin Wimmer

1. Global properties of the nucleus
mass and binding energy

2. Radioactive decay

3. Particle accelerators

4. Particle and gamma-ray detectors

5. Scattering

6. Nuclear structure models

7. Nuclear astrophysics

8. Quarks and gluons, strong interaction

9. The standard model of particle physics

10. Neutrinos

4.3　一般相対論： 須藤 靖

1. 一般相対論の心：宇宙を知り世界を知る
- **1.1** 本講義について
- **1.2** 宇宙と世界はどちらが大きいか？
- **1.3** 物理屋的世界観
- **1.4** 自然界にあふれた不思議なこと
- **1.5** 地球に関する奇跡
- **1.6** 物理学における必然と偶然
- **1.7** 本質的なことはすべて誕生後３８万年の宇宙に刻まれている
- **1.8** 物理法則の階層性
- **1.9** 物理学の方法論

2. 4 次元時空とシュワルツシルド計量
- **2.1** 線素と計量
- **2.2** シュワルツシルド時空の性質

3. 一般相対性原理とその数学的表現
- **3.1** 特殊相対論の限界: 慣性系とは? 重力は“力”か?
- **3.2** 一般相対論の概念構成
- **3.3** 物理量の表現: ベクトル
- **3.4** 物理量の表現: 双対ベクトル
- **3.5** 物理量の表現: テンソル
- **3.6** まとめ: 物理量とテンソル

4. 測地線の方程式
- **4.1** 重力場のもとでの粒子の運動方程式

4.2 ニュートン理論との対応

5. 重力場の方程式

5.1 マッハの原理と重力場の方程式

5.2 エネルギー運動量テンソル

5.3 アインシュタイン方程式への道

5.4 ニュートン理論との対応

5.5 宇宙定数

5.6 変分原理による定式化

6. シュワルツシルド時空とブラックホール

6.1 球対称重力場の計量

6.2 シュワルツシルド解の導出

6.3 シュワルツシルド半径と事象の地平線

6.4 シュワルツシルドブラックホールの周りの質点の運動

6.5 一般相対論の古典的検証

6.6 水星の近日点移動の計算

6.7 光線の曲がり角の計算

6.8 ブラックホールは観測できるか? エディントン光度

6.9 天文学的ブラックホール

7. 重力波

7.1 アインシュタイン方程式の弱場近似

7.2 重力波の平面波解

7.3 測地線偏差の方程式

7.4 重力波の検出原理

7.5 線形化されたアインシュタイン方程式の遅延解と重力波の四重極近似解

7.6 円運動する連星系からの重力波振幅の定性的評価

7.7 重力波によるエネルギー損失率

7.8 連星パルサーからの重力波

4.4 宇宙物理学: 中澤 知洋

学部で学ぶ力学、電磁気学、相対論などを用いて、宇宙そのものや天体の特性を物理の言葉で理解することを目的とする。恒星や銀河、中性子星やブラックホール、ビッグバン宇宙とその中での物質進化を、観測の最前線を交えつつ議論する。

1. 重力と天体

1.1 重力とケプラー回転

1.2 自己重力系の基礎

2. 電磁放射の基礎

2.1 黒体放射

2.2 光子ガスの熱力学

3. 星の物理学

3.1 星の熱力学

3.2 主系列星のパラメータスケーリング

3.3 星の内部の核反応

4. 星の進化と終末

4.1 星の進化

4.2 電子縮退した星：白色わい星

4.3 核子縮退した星：中性子星

5. ビッグバン宇宙論

5.1 膨張宇宙の記述と宇宙論パラメータ

5.2 物質の起源と宇宙の熱史

5.3 ビッグバンにおける元素合成

5.4 宇宙の晴れ上がり

4.5 プラズマ物理学： 江尻 晶

1. 様々なプラズマ

2. プラズマの特徴

3. サイクロトロン運動

4. 単一粒子の軌道

5. ミラー磁場と断熱不変量

6. 種々の磁場配位と軌道

7. 衝突

8. 電気抵抗

9. 衝突と拡散

10. 電磁流体力学（MHD）方程式

11. MHD の応用

12. 平衡

13. 安定性

14. プラズマ中の波動

4.6 固体物理学 II：長谷川 修司

1. 固体物理 I の復習

1.1 自由電子気体
状態密度, 静電遮蔽, 電子比熱

1.2 バンド構造
Bloch の定理, ブリルアン領域, バンドギャップ, フェルミ面

1.3 電子輸送
Drude formula, 移動度, Bloch wave, バンド分散, 有効質量, 正孔, ボルツマン方程式, carrier scattering

1.4 半導体
半導体・金属・絶縁体, 直接遷移・間接遷移, 真性半導体, doping, ホール効果, 金属絶縁体転移, pn junction/ rectifying function, 太陽電池

1.5 格子振動
音響フォノンと光学フォノン, 格子振動の量子化, 格子比熱, 熱伝導

2. 超伝導

2.1 歴史

2.2 マイスナー効果, ロンドン方程式

2.3 メカニズム, クーパー対, BCS 理論

2.4 超伝導電流と臨界電流, 磁束の量子化

2.5 ジョセフソン効果, BEC

3. 磁性

3.1 常磁性と反磁性

3.2 交換相互作用

3.3 強磁性のバンドモデル

3.4 局在スピンモデル

3.5 磁気デバイス

4. 量子現象

4.1 低次元量子系

4.2 量子ホール効果

4.3 金属絶縁体転移

4.4 スピン軌道相互作用

4.5 トポロジカル物質

4.7 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 定常状態におけるレーザー発振

4.6 各種のレーザー

4.6.1 3 準位レーザーと 4 準位レーザー

4.6.2 固体レーザー

4.6.3 気体レーザー

4.6.4 色素レーザー

4.6.5 半導体レーザー

4.8 生物物理学特論 : 樋口 秀男, 酒井 邦嘉, 陶山 明

1. 生体の機能
2. 脳・心・言語の関係
3. 普遍文法と言語獲得装置
4. 再帰性が生み出す構造
5. 自然言語処理（人工知能入門）
6. 脳イメージングの基礎
7. **DNA** コンピュータの基本原理
8. **DNA** コンピュータの物理的基礎
9. 超並列計算による **NP** 完全問題の解法
10. 生命科学への応用
11. 材料科学への応用
12. 細胞内蛋白質機能のイメージング
13. 個体内細胞の役割の多様性

4.9 統計力学特論 : 常次 宏一

1. 相転移と自発的対称性の破れ
2. ランダウ理論
3. いくつかの重要な概念
転送行列、高温展開と双対性
4. 揺らぎとランダウ・ギンツブルグ理論
5. ガウシアン理論と相関関数
6. スケーリング
7. 繰込み群のアイデア
8. ϕ^4 模型の波数空間繰込み群
ε 展開、Wilson-Fisher 固定点
9. 連続対称性
10. 非平衡現象入門
ボルツマン方程式、衝突積分、H 定理

5 4年生 冬学期

5.1 化学物理学 : 藤森 淳

1. 原子の電子状態
1.1 一電子状態
1.2 多電子原子
1.3 周期律
2. 分子の電子状態
2.1 水素分子・二原子分子
2.2 ベンゼン等の分子
2.3 金属錯体

5.2 素粒子物理学: 横山 将志

1. Introduction
2. Basic Concepts
3. Experimental Tools
4. Decay and Cross Sections
5. Dirac Equation
6. Quantum Electrodyamics (QED)
7. Weak Interactions
8. Electroweak Theory
9. Quark Model and QCD
10. Quark Mixing and CP Violation
11. Neutrino Oscillation

5.3 場の量子論 II : 渡利 泰山

1. introduction

2. S-matrix, Feynman rule, loop expansion
incl. spectral representation, LSZ formula.

3. tree-level scattering processes
incl. polarization, non-relativisitic limit, Mott scattering, Compton/Thomson scattering

4. bound states
incl. Bethe-Salpeter eq., fine and hyperfine structure

5. unitarity

6. low-energy effective theory

7. path integral
incl. imaginary time and Keldysh formalism

8. introduction to 1-loop computation

9. Borel resummation

5.4 原子核物理学 ： 大塚 孝治

1. 原子核のスケールと単位
2. 原子核の大きさと密度
3. 原子核の質量と結合エネルギー
4. フェルミガス模型
5. 平均ポテンシャル
6. 調和振動子ポテンシャル
7. 殻構造
8. シェルモデル、アイソスピンと核力
9. 原子核の形
10. 原子核の崩壊と放射線
11. エキゾチックな原子核

5.5 固体物理学 III ： 高木 英典, 吉岡 孝高

1. 光物性物理学
1.1 屈折率と比誘電率、分散関係
1.2 誘電体の比誘電率の古典論
1.3 ポラリトン
1.4 金属・ドープ半導体の光学応答
1.5 光学遷移と半導体の線形光学応答
1.6 励起子とボース・アインシュタイン凝縮
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

5.6 電子回路論 : 勝本 信吾

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
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
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
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
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

7. ディジタル信号とディジタル回路

7.1 ディジタル信号序論

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簡単化

7.5 A-D/D-A コンバータ

7.6 ディジタルフィルター

7.7 ハードウェア記述言語：HDL

5.7 現代物理学入門： 馬場 彩, 林 将光

1. 高エネルギー宇宙物理学 (担当: 馬場)

1.1 高エネルギー宇宙物理学とは

1.2 プラズマからの放射の基礎

1.3 宇宙に存在するプラズマ

1.4 宇宙線の概要と発見の歴史

1.5 宇宙線加速の原理と加速現場

1.6 コンパクト星に関する話題

1.7 高エネルギー宇宙物理学の歴史と検出器開発

2. スピン物性物理学 (担当: 林)

2.1 物性物理基礎

2.2 磁性

2.3 量子効果

2.4 スピン移行トルク

2.5 スピン流

2.6 スピン依存伝導

2.7 トポロジカル物質

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

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. 発生ー進化対応

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, 生駒 大洋

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？

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

各研究室の研究活動内容

相原・横山研究室

相原 博昭 教授　横山 将志 准教授　小貫 良行 助教

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

1 スーパー B ファクトリーでの物理

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

当研究室は，CP 対称性の破れの起源を説明する理論として提唱された小林益川理論を，最先端加速器 B ファクトリーを使って検証した．小林益川理論は 2008 年ノーベル物理学賞に輝いたが，当研究室では，さらにその先を見据え，次世代加速器スーパー B ファクトリーを使って，超対称性理論など現在の素粒子理論の先にある，より根源的な素粒子物理の解明を目指した実験を遂行しようとしている．Belle II（ベルツー）と呼ばれるこの実験に向けて，現在加速器と測定装置の大幅な改良作業を行っている（図 1，2）．

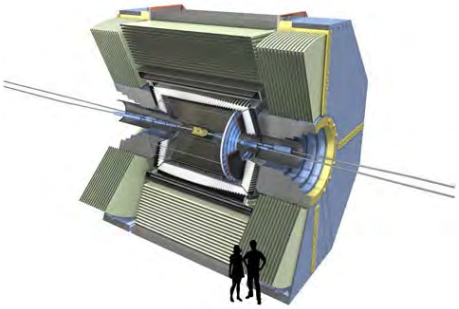


図 1. Belle II（ベルツー）測定装置の完成予想図．

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

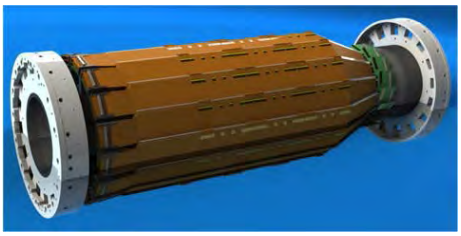


図 2. 当研究室で製作する，Belle II 測定装置心臓部の半導体粒子検出器の完成予想図．

2 ニュートリノビームを使った物理

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

また，クォークと同じようにニュートリノでも CP 対称性が破れていることが予想されている．もしこの予想が正しければ，ニュートリノは，ビッグバンから始まった宇宙における物質創成の歴史，すなわち，宇宙の進化において重要な役割を果たした可能性がある．ニュートリノ振動実験は，ニュートリノと宇宙進化の関わりを解明するための実験でもある．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開始している．

しかし，CP 対称性の破れを確実に測定するため

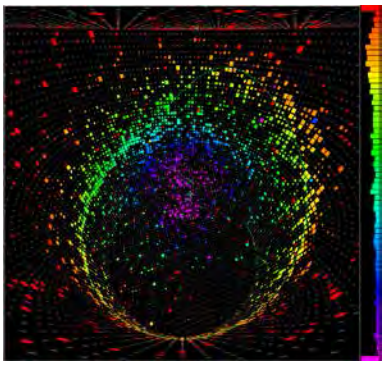


図 3. スーパーカミオカンデ検出器でとらえた，加速器ニュートリノビームによるニュートリノ反応事象．粒子が放つチェレンコフ光がリング状に見えている．

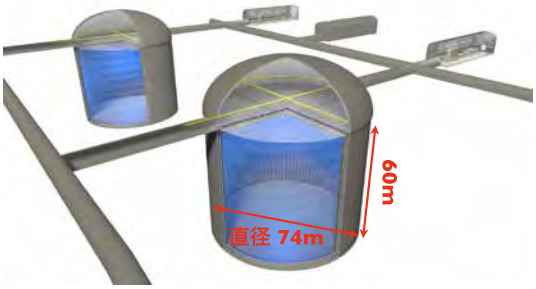


図 4. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図．高さ 60m，直径 74m のタンク 2 つに超純水を満たす．水中で発生した高速の粒子が発するチェレンコフ光を，内壁に取付けた多数の光センサーで検出する．

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．通常の物質や輻射（光）だけが存在している宇宙では，宇宙の膨張は減速する一方である．膨張を加速させるためには，重力とは異なり，宇宙全体に対して斥力として働

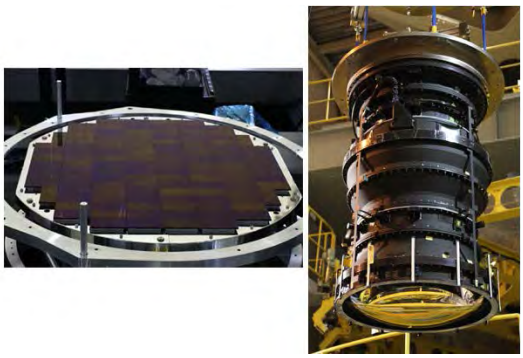


図 5. 完成した 928 メガピクセル CCD カメラ (左)．現在はすばる望遠鏡に取付けられている (右)．

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

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

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

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 月についに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（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。

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．

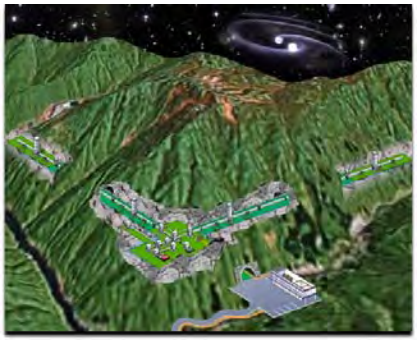
1．重力波による新しい天文学・物理学

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

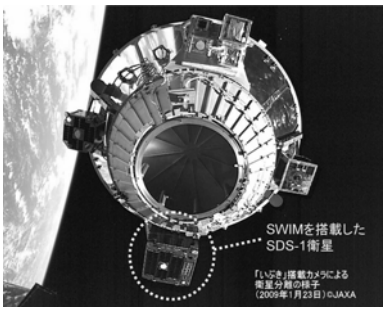
物理学や天文学の大きな目標の 1 つは，宇宙のはじまり・進化と未来，そして，私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう．重力波は，新しい宇宙の姿を私たちにもたらすことで，それらに直接迫る手段となる可能性をもっているのである．

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 2018 年頃には，本格的な「重力波天文学」が始まることが期待されている．



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.

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．光スクイージ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/

Kathrin Wimmer 研究室

Kathrin Wimmer 講師

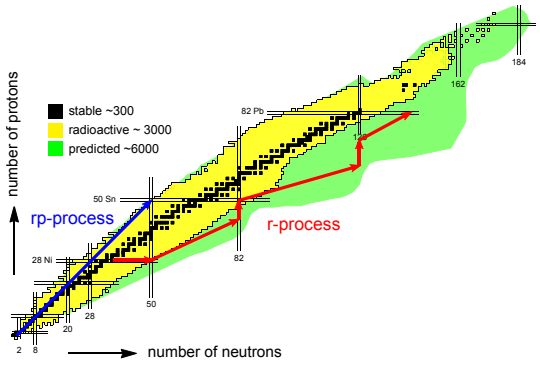
Atomic nuclei are the carrier of almost all visible mass in the universe. Nuclei also provide the fuel powering stars and nuclear reactions produce all naturally occurring chemical elements. Despite this fundamental role of nuclei in the universe, their structure and dynamics cannot yet be satisfactorily described on the basis of the fundamental strong interaction.

In our research group we address a number of open questions in this interesting field of science:

- What is the origin of the elements on the cosmos?
- What is the nature of the nuclear force?
- How do simple patterns arise in complex nuclei?

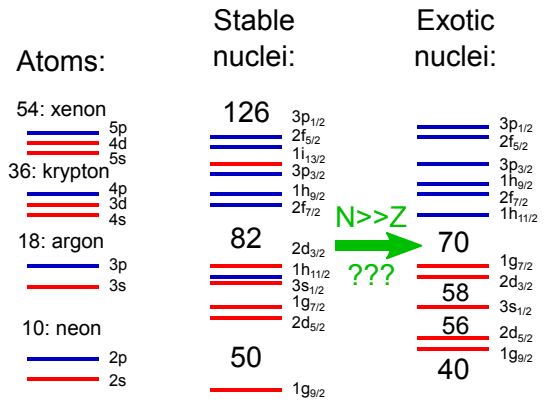
1 The origin of the elements

The Big Bang only created hydrogen and helium nuclei, all other elements were created in stars or stellar explosions like supernovae or X-ray bursts. However the reactions creating the heavy elements involve nuclei whose properties are completely unknown so far and only theoretical models exist. New experiments are therefore needed to get a better understanding of the origin of elements.



2 New magic numbers

One of the major successes in the description of the properties of atomic nuclei was the introduction of the nuclear shell model. For certain numbers of protons or neutrons, the so-called magic numbers, discontinuities occur, for example in the nucleon separation energies. In analogy to the successful atomic shell model, these magic numbers were interpreted as closed shell configurations, similar to the noble gases. In exotic nuclei however, far away from the stable isotopes, several experimental as well as theoretical investigations found evidence that the shell structure of atomic nuclei can change. In order to understand the underlying causes for the migration of nuclear shells, sensitive experimental methods are of paramount importance to investigate rare isotopes far from stability.



3 Shape coexistence

An atomic nucleus can exhibit eigenstates with different shapes, a unique behavior of the many-body quantum system. This phenomenon, called shape coexistence, is manifested in several regions of the nuclear chart and many experiments to investigate it have been performed. Nevertheless the underlying microscopic origin of this interesting feature is not known to date. We focus our research in particular on the single-particle properties of nuclei, trying to find out under what conditions the shape of the nucleus is round like a soccer ball or deformed like an American football.

Our research focuses the structure of radioactive nuclei. We use direct reactions to populate states in the exotic nuclei and state-of-the-art experimental equipment. Experiments using the most exotic nuclei available allow us to get some first information on the properties of hithero unknown nuclei. Detailed studies of nuclei closer to stability are crucial to constrain theoretical models. Nuclear physics is very international field, we collaborate with groups at several leading research institutions, in Japan and abroad. Our experiments are performed at world leading radioactive beam facilities such as the RIBF (JAPAN), NSCL (USA) and TRIUMF (Canada).

For more information about the group and current research projects visit:
http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/wimmer/

上田研究室

上田正仁教授　古川俊輔助教

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

【冷却原子気体】

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

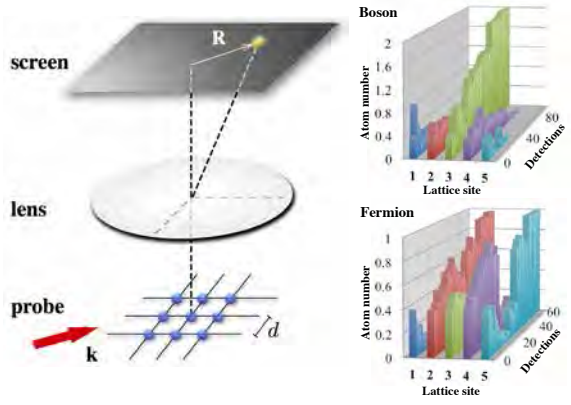
最近の研究では、相互作用が強い極限（いわゆるユニタリティ極限）における原子系の普遍的な性質の解明に取り組んでいる。ユニタリティ極限のフェルミ気体には原子種に依らない普遍的熱力学が観測され、高温超伝導や中性子星との類似性からも興味深い問題を提供している。ユニタリティ極限近傍では自己相似性を持った三体束縛状態であるエフィモフ状態も観測され、くりこみ群の流れが周期性を持ったリミット・サイクルのユニークな具体例としてその普遍性を研究している。また、系の大局的性質を捉えるトポロジーの概念を応用して、凝縮相における渦や単極子の性質の解明や、人工ゲージ場のもとでの量子ホール状態の研究にも取り組んでいる。今後は、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。最近、私たちは、量子測定理論を応用することで、光格子中の冷却原子の位置を高精度に測定する方法を提案した（右下図参照）。弱いプローブ光で得た像であっても、原子位置のベイズ推定を行うことで回折限界を超えた分解能が達成されることを示した。また、測定やフィードバック制御を伴うもとでの揺らぎの定理や熱力学第二法則の一般化、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も取り組んでいる。これらの研究は、量子揺らぎや測定の反作用が無視できない微小非平衡系の研究の基礎を与えると期待される。他方で、熱力学におけるエントロピー増大則も系の乱雑さの単調増加性として情報論的に捉えられると期待される。私たちは最近、情報論的エントロピーを応用して、エントロピー増大則の統計力学からの基礎づけに取り組んでいる。

3 今後の展開

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



左図: 光格子にトラップされた冷却原子の撮像。プローブ光が原子により散乱された後、レンズにより集光されスクリーンに像を結ぶ。得られた像から原子位置が推定される。右図: 量子測定理論により追跡した多原子の波束の実時間収縮過程。パウリの排他律により、ボソン（右上）よりもフェルミオン（右下）の方が波束の収縮が速く起こる。このような解析を応用する事で、原子位置の測定が回折限界を超えた分解能で行える。Physical Review Letters **115**, 095301 (2015) より転載。

岡田研究室

岡田 康志教授　榎 佐和子助教　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。**生きているという状態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。

私たちは、タンパク質などの分子機械がどのように機能することで生命現象が営まれているかを計測し、理解することで、その秘密に迫りたいと考えています。

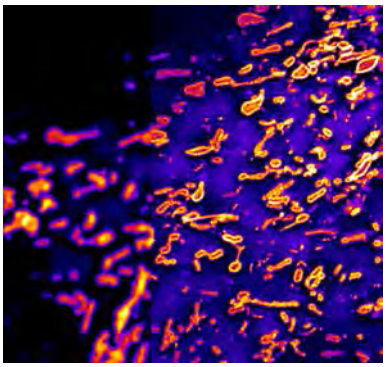
2 これまでの研究：百聞は一見に如かず

そのために、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ています。

そこで、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、さらには直接操作することを目的として、X 線結晶回折、クライオ電子顕微鏡、蛍光一分子計測など様々な方法を利用し、時に自ら方法論の開発から行うことで計測を行ってきました。そして、その結果を利用して、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巧実に整流することで方向性のある動きを実現する機構を解明してきました。

また、同様のアプローチをマウスやウサギなどの胎児 (初期胚) に適用して、生きた初期胚を直接観察する方法論を開発しました。その結果、体表面に生えている線毛運動が引き起こす流れが身体構造の左右対称性を破る最初のイベントであることが示されました。ヒトやその他の脊椎動物の内臓は、心臓が左側にあり、肝臓が右側にあるなど左右非対称な配置であることが知られていますが、左右対称な卵細胞からどのようにして左右非対称性が生み出されるかは全く不明でした。私たちの発見により、発生学の長年の基本問題の一つが解決し、教科書を書き換える成果となりました。更に、定量計測と理論計算によって、その流体力学的な機構の解明にも成功しました。

最近では、細胞の中でタンパク質が集合して形成する 100nm 程度の微細構造が生命機能を実現する現場を直接観察することを目標として、世界最高速の超解像顕微鏡の開発に成功しました。また、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ています。このような新しい顕微鏡を用いて細胞を観察すると、細胞の中は従来の教科書に描かれている細胞像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。



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。

3 今後の展開：未知のフロンティア

ボーアやシュレーディンガーは、量子物理学の次のフロンティアとして「生命とは何か」と問いました。その際、生きた対象を分析する困難さために生命の理解に到達するのに必要な何か基本的な特性の理解が欠けているのだと論じました。それから 80 年近くが経過し、計測技術は大幅に進歩しました。生きた細胞の中で分子が働く様子を定量的に計測することは、もはや夢物語ではありません。

前人未踏のフロンティアが目の前に拡がっています。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/

岡本研究室

岡本 徹 准教授　枡富 龍一 助教

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中に見られる諸現象であり、磁性や超伝導などがなじみ深いかと思います。私たちの研究室では、半導体の界面や表面を使って電子を「二次元の世界」に閉じ込めて、その集団的振る舞いを研究しています。

2. 半導体表面の二次元電子系と量子ホール効果

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

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

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

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。

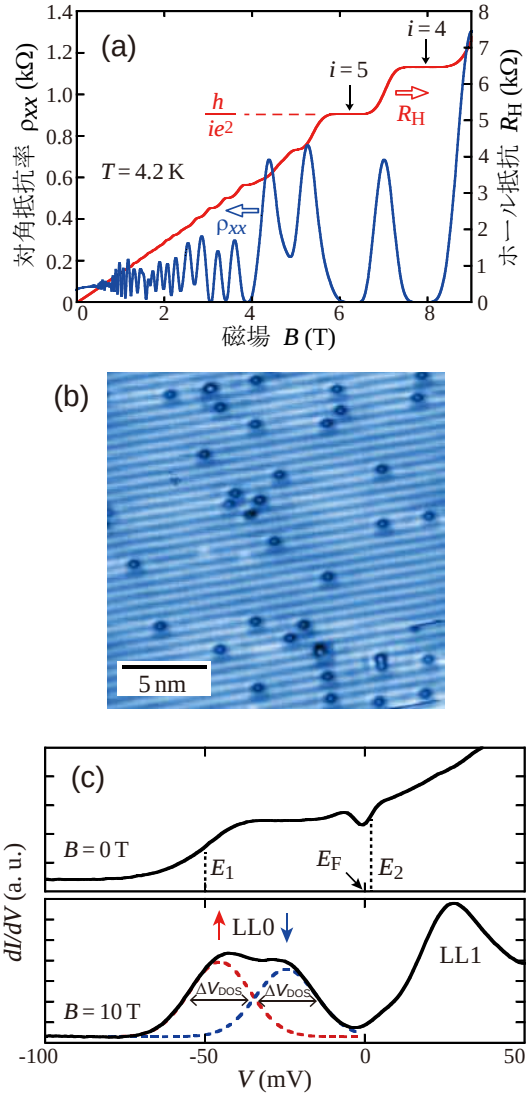


図 1 ：(a) 二次元電子系における量子ホール効果。(b) STM 像。ランダムな黒丸が Fe 原子。(c) 同一試料で測定されたランダウ準位。

小形研究室

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

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

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

最近の研究テーマ

以下、例として現在研究室で行なわれている研究のいくつかを挙げる。

(1) 高温超伝導

高温超伝導という通常の金属と全く異なった特異な性質を、強相関または強いスピンゆらぎ・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、カイラル磁性のダイナミクス、新しいトポロジカル物質の開拓、スピンホール効果と軌道帯磁率との関連性、スピン軌道相互作用がある場合のディラック電子の超伝導、スピン流の微視的な定義の問題などについても研究を行っている。

(3) 固体中のディラック電子

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

(4) 低次元有機伝導体に関する理論

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

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

桂研究室

桂 法称 准教授　赤城 裕 助教

1 研究の概要

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

●物性理論

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

●統計力学

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

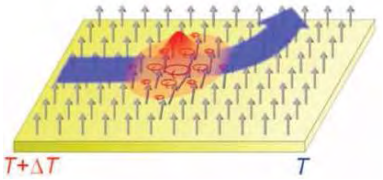
2 最近の研究テーマ

2-1. マグノンの熱ホール効果

ホール効果は、古典的には磁場中の荷電粒子に働くローレンツ力によって引き起こされる効果で、電気的に中性な粒子 (たとえば光子やフォノン) では起こらないと考えられる。しかし、本研究室では磁性体においてスピン間の相互作用（Dzyaloshinskii-守谷相互作用）が、電気的に中性な素励起 (マグノン) に仮想的な磁場として働き、ホール効果を引き起こすことを世界に先駆けて理論的に提案した。このマグノンのホール効果は、熱流のホール効果としてパイロクロア構造を持つ強磁性体 $Lu_2V_2O_7$ などの物質において実際に実験的に観測されている。また理論的には、この現象の背景には電子系での量子ホール効果やトポロジカル絶縁体と共通の構造がある。

2-2. Fermi/Bose-Hubbard 模型の研究

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



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

2-3. その他

フラストレート磁性体とマルチフェロイクス/5d 遷移金属酸化物と量子スピンホール効果/フラストレート伝導系とトポロジカルホール効果/Rydberg 原子系とハードスクエア模型/量子スピン系とエンタングルメント/Berry 位相と Lieb-Schultz-Mattis の定理/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/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調べていきたい。また、超伝導や RVB(resonating-valence-bond) 状態などが、電子間相互作用によりどのように発現するかを解明したい。可解模型を含む量子多体系の数理的な側面に関する研究も、意欲的に行いたいと考えている。

日下 研究室

日下 暁人 准教授

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？そして、宇宙の進化は何に支配されているのだろう？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、宇宙創成からおよそ 38 万年後にようや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ークスルーとなる。

“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。

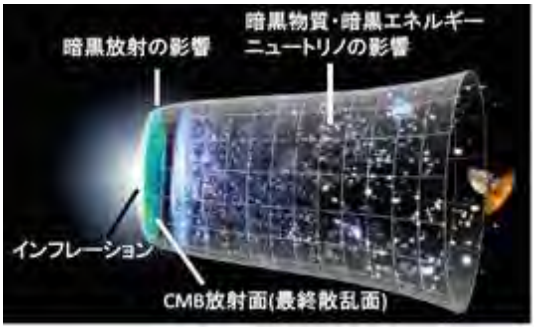


図 1 : 宇宙進化の模式図。横軸が時間で、左側が宇宙初期、右が現在である。

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 2018 年初頭に観測開始を予定し、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)。

五神－湯本-井手口研究室

湯本潤司教授　井手口拓郎講師　森田悠介助教

1 光物理学の展開

光とは何かという問いは、永く人々を捉えてきた。19 世紀後半に電磁気学が、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齎された、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 ”の整備を進めている。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、テラヘルツから紫外の広い波長領域を対象に、人工キラル構造や、三回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」　イリューム, 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

駒宮研究室

駒宮幸男 教授　神谷好郎 助教

1 最高エネルギー加速器を用いた素粒子物理学

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

2 革新的な中小実験や測定器開発研究の推進

大学院生や若い研究者が大型国際実験の舞台にデビューするには、物理や測定器の基礎的な知識を十分に身に付け実験全体を見渡せる広い視野をもつことが必要である。このため、本質的な物理に迫る中小実験や測定器の開発を行なうことによって基礎的なトレーニングを行なっている。人の歩く速度くらいの超低エネルギー中性子 (超冷中性子) を高さ 100 μm のスリットに通すと、地球の重力で量子力学的束縛状態となり鉛直方向に約 10 μm 間隔で疎密の縞ができる。この中性子の位置を μm 以下の精度で測定する為、CCD の表面に ^{10}B を中性子→荷電粒子コンバータとして蒸着した測定器を開発し、グルノーブルの ILL で実験を行ない、2014 年世界で初めてサブミクロンの精度で重力による量子束縛状態の疎密の縞を観測する事に成功した。更に、新しいアイデアに基づく測定器開発研究を適宜実施する。

3 国際リニアコライダー ILC の推進と開発研究

LHC のような陽子･陽子の衝突実験に比べ、e^+e^- の実験はバックグラウンドが圧倒的に低くクリーンで素過程が直接見えヒッグス粒子の詳細研究などが可能である。しかし、円形の e^+e^- コライダーではシンクロトロン放射によってエネルギーが急速に失われるため、e^+e^- を向かい会わせて直線的に加速して正面衝突させるエネルギー欠損のないリニアコライダーが圧倒的に有利である。このため、世界では ILC の開発を行なっており、本研究室は ILC のビームサイズをレーザー干渉によって高精度に測る機器 (新竹モニター) の研究開発を行ない、世界一絞られた電子ビームが出る KEK の ATF2 でビーム試験を行なっている。ここでは世界記録の約 40 nm のビームサイズを測定している。この研究は、ハードウエアが好きな大学院生が中心となって KEK と協力して行なっている。また、ILC 実験で最も重要な検出器の一つである電磁カロリメータの開発を、平成 24 年度から新たに始めた。

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

「国際リニアコライダー ILC」の検出器概観

酒井広文研究室

酒井　広文　教授　　峰本　紳一郎　助教

1. はじめに

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

2. 研究テーマ

相互に関連する以下のテーマを中心に研究を進めている。

(1) 回転量子状態を選別した分子の配向制御

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

(2) 全光学的分子配向制御技術の高度化

当研究室は、レーザー光を用いてミクロの世界の分子を操る研究で世界の先頭を走っている。直線偏光したレーザー電場と静電場を併用して有極性分子の頭と尻尾も区別した配向制御の実現に成功したのを始めとし、レーザー光の偏光を楕円とし、非対称コマ分子の 3 次元配向制御にも成功した。最近は、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。また最近は、搬送波包絡位相の制御された数サイクルパルスも利用可能である。本研究室では、(2) で述べた他のグループでは容易に用いることのできない配向した分子試料を用いることにより、光の 1 周期以内で発現する上記の諸現象に関する「分子内電子の立体ダイナミクス」を明らかにする研究を進めている。

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

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

3. 研究活動

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

4. メッセージ

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

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

●学部学生向けの解説

(1) 酒井広文、Journal of the Vacuum Society of Japan（真空）Vol. 53, No. 11, 668-674 (2010).

(2) 酒井広文、日本物理学会誌、Vol. 61、No. 4、263-267（2006).

櫻井研究室

櫻井博儀教授　新倉潤助教

1 研究の背景

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

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

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

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

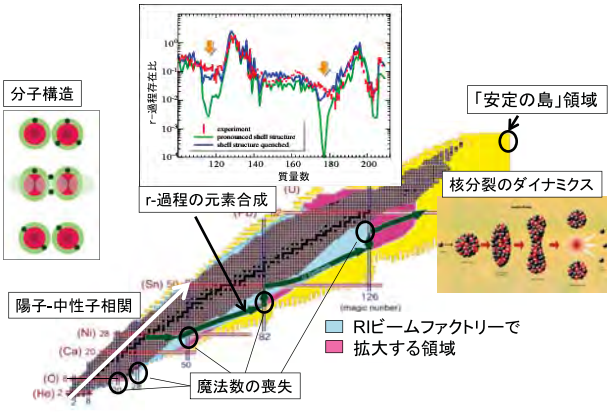
2 最近の研究テーマ

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

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

3 今後の展開

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



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

佐野研究室

佐野雅己教授　平岩徹也助教

非平衡開放系の物理

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

1 非平衡統計力学

平衡系や，平衡から少しだけずれた系に関しては，それを扱う一般的な理論の枠組みはほぼ完成されている．それに対して，系が平衡から大きく離れていて，駆動力と系の応答との間に線形関係が成り立たないような場合には，まだ極めて限定的な理論しか得られていない．そこで，平衡から遠く離れた系における揺らぎの性質に関する知見を得ていくことは，非平衡系に対する一般的な理論の枠組みを探っていく上で重要なステップになると考えている．我々は、新しい実験技術を用いて，非平衡における新しい法則を探求している [(1)]．

2 非線形動力学・自己組織化

システムに注ぎ込むエネルギーや物質の流れを増加させてゆくと、次々と新たな運動状態や空間構造が現れて、転移を繰り返し、しかも各転移は物質や系によらない普遍的な性質を持つことが明らかになっている．例えば、非線形力学系は分岐点近傍での繰り込み的な性質により、系固有の方程式によらず、普遍的な法則に従う。分岐が集積するカオスへの転移はその典型である．また、大自由度の非平衡系の相転移現象は、臨界点で相関長が発散するため、やはり系の詳細によらない、しかも平衡のものとは異る普遍法則に従うことが明らかとなりつつある [(2)]．我々は、流体や液晶などのソフトマターの非平衡状態の実験を通して、空間自由度や系の対称性により現れる様々な自己組織化やその崩壊のメカニズムを探っている．

3 生命システムの物理 [(3)]

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

参考資料

1) C. H. ベネット／ B. シューマッカー,「マクスウェルの悪魔現る」, 日経サイエンス 2011 年 11 月号,　「情報をエネルギーに変換することに成功！」 https://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2010/42.html
2)「乱流発生の法則を発見」, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2016/4602/
3)「ミクロ粒子を遠隔操作：最適な制御から見えてきた微生物の遊泳戦略」, http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/info/5290/

島野研究室

島野 亮 教授　松永 隆佑 助教

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のと同様に、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。

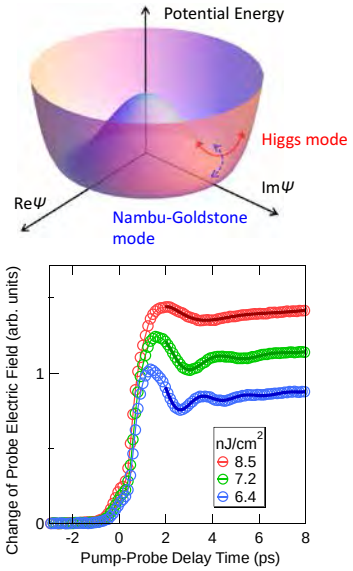
２）光による超伝導のヒッグスモードの観測

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）があっ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。）

宇宙理論研究室

須藤 靖　教授　大栗 真宗 助教
吉田 直紀 教授　樫山 和己 助教

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

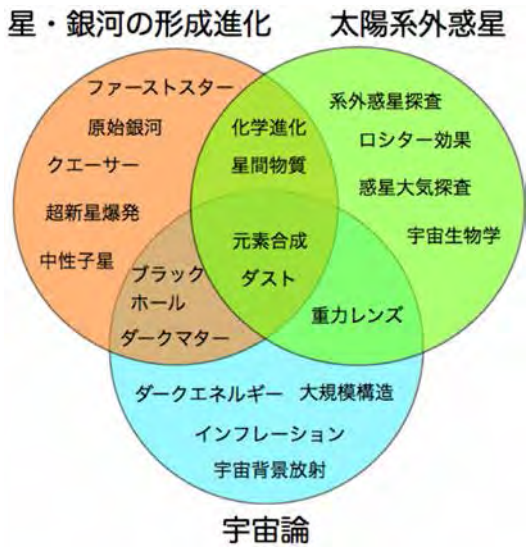


図 1: 宇宙理論研究室で行われている研究テーマの概念図。３つの分野が有機的によく結びついていることが分かる。

1 最近の主な研究テーマ

1.1 宇宙論

1916 年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、ハッブルによる宇宙膨張の発見（1929 年）、ガモフによるビッグバン理論の提案（1946 年）、宇宙マイクロ波背景放射の発見 (1965 年) を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。宇宙の加速度的膨張が発見されたのはつい最近のことである。多くの観測データを組合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の 7 割がダークエネルギー、2 割 5 分がダークマター、そして残りの約 5 パーセントが通常の元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。2013 年には、宇宙マイクロ波背景放射の精密観測衛星プランクによる 1 年以上の観測成果が公表され、標準モデルの正しさを裏付ける強固なデータが得られるに至っている。しかしながら、標準モデルがいかに正しいとはいえ、宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという点は驚くべき事実であり、宇宙・素粒子物理学のみならず、さらにより広く 21 世紀科学に対して根源的な謎を突きつけている。

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

1.2 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、同サーベイ観測によって最遠方の超新星爆発を捉る準備を進めている。宇宙初期に生まれたのはどのような星だったのかを超新星爆発の観測から探ることができるかもしれない。

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。

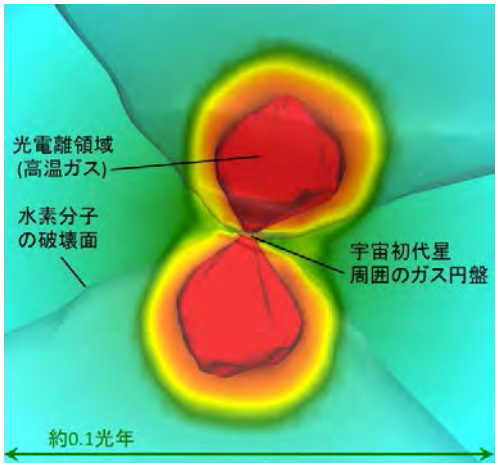


図 2: 宇宙初代星形成の 3 次元数値シミュレーション。中心星放射により高温ガスが生じている様子。

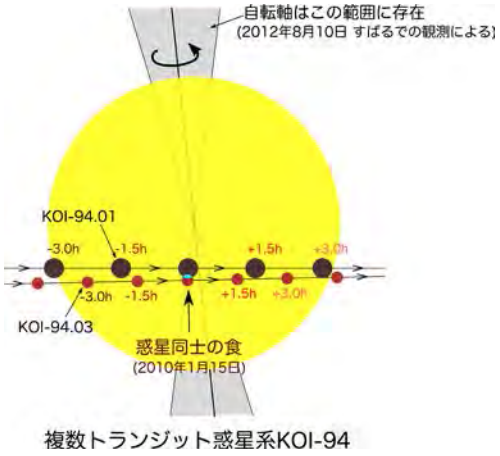
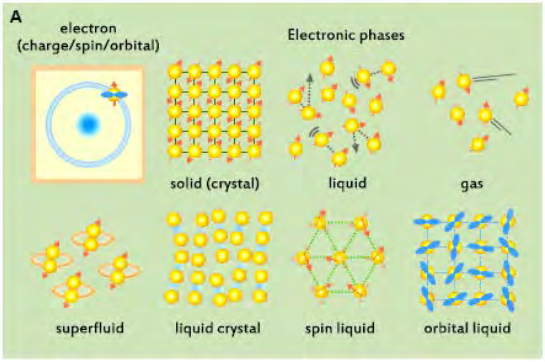


図 3: すばる望遠鏡の観測により明らかにされた系外惑星系 KOI-94 の概念図。系外惑星同士の食を史上初めて観測した。

高木・北川研究室

高木英典教授　北川健太郎講師　太田奈緒香助教

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が小さく、電子はクーロン相互作用により強く相関する。相関電子は、その相互作用を通じて電子液体・電子液晶と呼ばれる相を形成する。相関電子では電荷、スピン、軌道 (縮退する軌道のどれを選ぶか) の自由度がしばしば顔を出し、電荷液晶状態、スピン液体状態といった多彩な状態が出現する。新しい状態を創りだすために試料合成、薄膜形成、超高圧・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。



相関電子が形成する様々な電子相

(1) 超伝導機構の解明と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 (Ru,Rh)P の擬ギャップ臨界点での超伝導、パウリ極限を破る高い臨界磁場を誇る Ta_2PdS_5 などを発見した。

(2) 量子スピン液体の探索

反強磁性的に相互作用するスピンを三角格子上に置くと、幾何学的にすべての結合を満たすことができない。この効果は幾何学的フラストレーションと呼ばれ、磁気秩序を著しく妨げる。この効果と量子効果の協奏により、ある種の三角形を基本とする格子上では絶対零度でも磁気秩序を示さない量子スピン液体と呼ばれる状態が基底状態となると指摘された。当研究室はハイパーカゴメ構造を有するイリジウム酸化物 $Na_4Ir_3O_8$ が磁性体であるにも関わらず極低温まで磁気秩序を示さないことを発見し、量子スピン液体状態が実現していることを提唱した。また量子計算の分野でよく知られる Kitaev 模型のモデル物質として、ハイパーハニカム格子 β-Li_2IrO_3 を見い出し理論実験両面から注目を集めている。

(3) 幾何学的フラストレーション格子上の電荷液体

スピネル酸化物 LiV_2O_4 では、V の原子価が 3.5 ＋と半整数で、1:1 の V^{3+} と V^{4+} が、強いフラストレーション効果で知られるパイロクロア格子上に存在する。クーロンエネルギーの観点から、スピン系と同様に電荷配列のフラストレーションが生じる。量子スピン液体の電荷版である LiV_2O_4 の基底状態が、電子の有効質量が 100 を超える重い電子状態であることを実験的に示した。

(3) スピン軌道相互作用誘起の新奇電子相の開拓

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

(4) **固体中の 3 次元ディラック電子の創成**

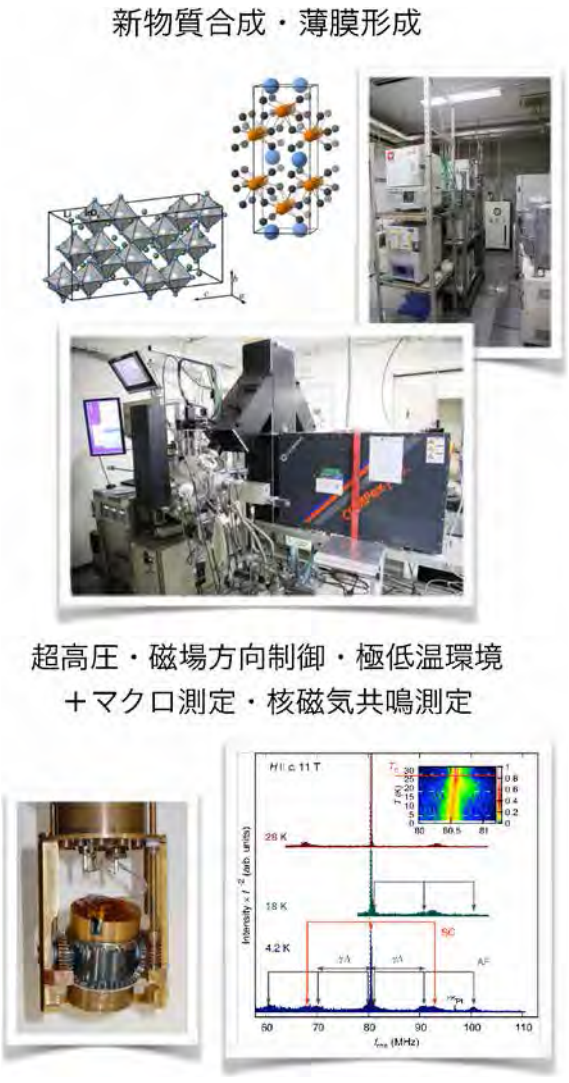
グラフェン中の 2 次元ディラック電子はよく知られているが、電子軌道の波動関数の対称性と結晶構造の対称性の協奏によって、3 次元のディラック電子が形成され得る。小形研究室によって理論的にアンチペロブスカイトと呼ばれる物質群に 3 次元ディラック電子が形成されることが提唱された。これを実験的に検証し、実験的に得られる電子有効質量が自由電子の 2%しかないディラック電子の存在が確認された。すべての電子が最低 Landau 量子効果の検証や Weyl 半金属への展開などを進めている。

(5) **薄膜超格子構造を用いた新奇電子相の創成**

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

(6) **超高圧・極低温・精密磁場制御環境の開発と核磁気共鳴測定による量子相転移の研究**

核磁気共鳴（NMR）実験としては未到達の多重極限環境の構築を行い、超高圧下で起こる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圧域 [4 万気圧以上] の極低温において、初の NMR 測定環境を構築している。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。



新電子相探索の為の実験環境

高瀬・江尻研究室

高瀬雄一教授　江尻晶准教授　辻井直人助教

1 研究の背景

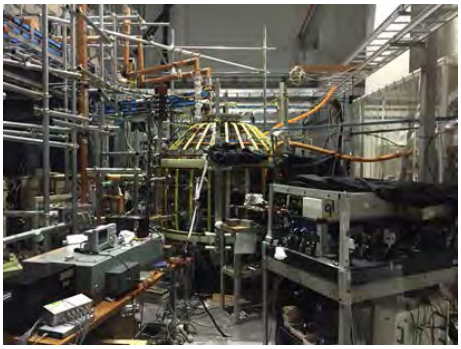
我々の研究グループでは、将来のエネルギー源としての核融合の実現を念頭においた高温プラズマ実験を行っています。プラズマは非線形・非熱平衡・複雑系の典型例であり、プラズマ中では様々な集団現象が起こります。プラズマを制御するには、その複雑なふるまいの物理的理解が不可欠です。核融合プラズマの研究は過去 30 年ほどでめざましく進歩し、次のステップとして国際協力により、核融合反応による出力がプラズマ加熱入力の 10 倍程度となる「燃焼プラズマ」実験装置、ITER（国際熱核融合実験炉）の建設が始まりました。また近年の計測技術の進歩に伴い、物理現象を高時間・空間分解能で精密に計測することが可能となり、その結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

2 最近の研究テーマ

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

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圧下の結晶構造，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った物質群や物性のシミュレーションが可能な新しい基礎理論の構築と，実際のシミュレーションに使えるプログラム開発を行いながら，物性物理学の理論研究を行っています．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「トランスコリレイティッド法」

・第一原理非調和格子模型の構築と熱伝導計算への応用

・超伝導密度汎関数理論

・大規模系のエネルギースペクトル計算手法

・物質構造探査手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

・H_2S 高圧相の高温超伝導

・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．

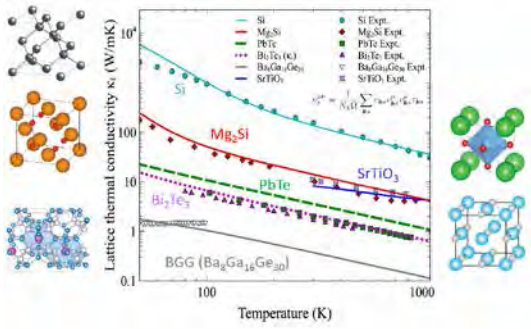


図: 様々な物質の熱伝導の温度依存性実測値 (線) と、第一原理非調和格子模型による計算値 (シンボル)。

藤堂研究室

藤堂眞治 准教授　大久保 毅 特任講師　諏訪秀麿 助教

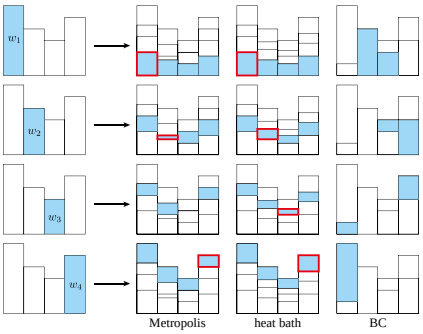
1 研究の背景

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、統計的機械学習による推論などの手法を駆使し、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や相転移現象の解明を目指しています。また、最先端スパコンの能力を活かすための並列化手法の研究、次世代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 強相関系のための新しいシミュレーション手法の開発

量子モンテカルロ法における「連続虚時間ループアルゴリズム」の任意のスピンの大きさを持つ系への拡張や、長距離相互作用系に対するオーダー N 法、幾何学的カーネル構成法、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など、数々の新手法を開発しています。



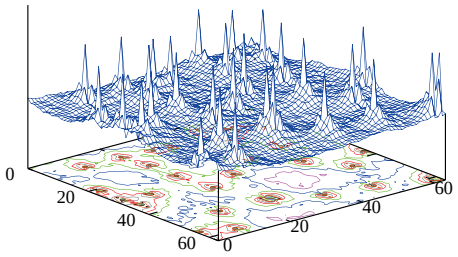
モンテカルロ法における幾何学的カーネル構成法

2.2 スピンギャップ状態とトポロジカルな秩序

低次元の量子反強磁性体においては、強い量子ゆらぎのため、熱ゆらぎの全くない基底状態においてさえもスピンは古典的なネール状態を取ることはできず、お互いに強くゆらいだスピンギャップ状態となっています。 当研究室では、量子モンテカルロ法を用いて、スピンギャップ状態をもつ量子反強磁性体の性質を解析し、スピンギャップ状態間の量子相転移の臨界現象を調べています。また、スピンギャップ状態を特徴付ける新たな秩序変数を提案し、量子相転移現象の解明を試みています。

2.3 量子磁性体のランダムネス誘起量子相転移

非磁性スピンギャップ基底状態においては、量子効果とランダムネスがお互いに競合し、ランダムネスにより長距離秩序が誘起されるという興味深い現象が観測されています。当研究室では、これらの量子相転移におけるランダムネスのタイプによる効果の違いを詳細に調べました。また、ランダム量子系に特有のスローダイナミクス現象についても研究を行っています。



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

2.4 統計的機械学習と物性物理への応用

さまざまな機械学習手法の統計力学の立場から解析し、その原理や性質を明らかにしています。また、機械学習手法をもちいた相転移現象の解析、シミュレーションと実験のデータ同化による物質構造推定などにも取り組んでいます。

2.5 オープンソースソフトウェア開発

量子磁性体・電子系など強相関量子格子模型のシミュレーションためのオープンソースソフトウェアALPS、計算物質科学シミュレーションパッケージMateriApps LIVE!など、様々なライブラリやアプリケーションプログラムの開発・公開を進めています。

藤堂研究室ホームページ:
`http://exa.phys.s.u-tokyo.ac.jp/`

能瀬研究室

能瀬聡直 教授　高坂洋史 講師

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。

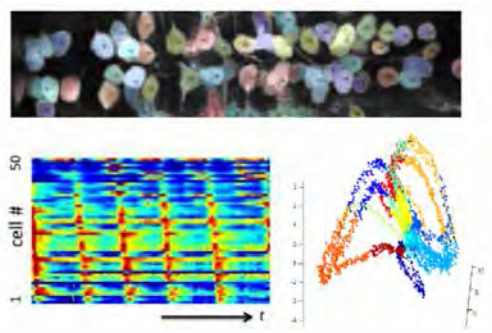


図１：カルシウムイメージングによる神経活動の解析。神経組織内の多数の細胞（上）の活動をイメージングデータから自動抽出し時間経過に伴う変化を系統的に解析する（左下、赤色が活動状態を示す）。クラスタリング解析や次元縮約により回路全体の状態変化を 3 次元空間内で可視化することもできる（右下）。

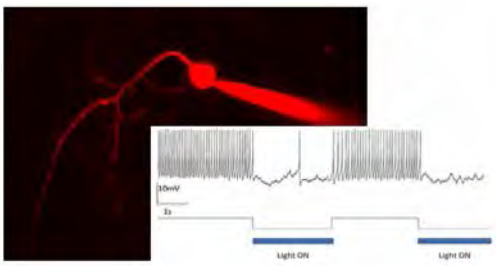


図２：パッチクランプ法による神経活動測定と光遺伝学による操作。微小電極を神経細胞に注入することで、その活動を電気信号として取得できる。さらに光遺伝学と組み合わせると、他の細胞群の活動操作が測定中の神経細胞の活動に与える影響を調べることができる。この図の場合、光照射 (light ON) により、スパイク生成が抑制されることから、操作対象の神経細胞が抑制的な入力を与えていることが分かる。

長谷川研究室

長谷川 修司 教授　　高山 あかり 助教　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タ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、電子のスピンの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。ナノメータ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拡がっている。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。

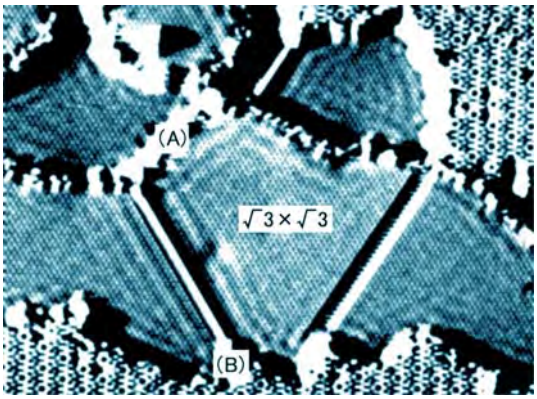


図１．電子の海のさざなみ

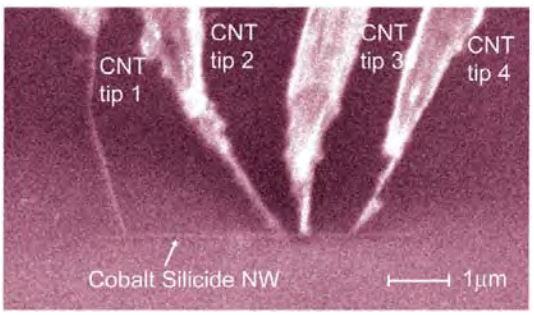


図２：ミクロな針を使った４探針電気伝導測定

浜口研究室

浜口幸一准教授　永田夏海助教

1 研究概要

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

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

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

また標準模型には理論的も不自然な点、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（$\sim$ 100 GeV）がそれに比べて何故そんなに小さいのかが謎のままです。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 $\sim$ 1 TeV 以上）により基本的な理論が存在し、それが標準模型の不自然さを解決しているのではないかと考えてきました。

標準模型を超えた物理の候補として私が特に興味を持っているのが、超対称性理論です。超対称性理論は、(i) 標準模型の不自然さの問題を解決する (ii) 暗黒物質の正体を説明出来る (iii) 標準模型ではバラバラだった 3 つの相互作用の強さが高エネルギーで 1 つに統一され「大統一理論」の予言を再現する、などの特長があります。また、重力も含めた究極の統一理論の最有力候補である超弦理論も超対称性の存在を要求しています。

これまで私は、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なってきました。

2 実験・観測との関連

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

• Planck 衛星による宇宙背景輻射の温度ゆらぎの測定により標準宇宙論が詳細に検証されるようになり、インフレーションに関する定量的な情報も明らかになって来ています。• 2015 年より世界最高エネルギーの衝突実験・LHC が再稼働しました。2017 年以降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 暗黒物質をターゲットとした直接探索実験の感度も近年飛躍的に向上しています。

今後数年間で標準模型を超えた物理に対する貴重な情報が増えてくるでしょう。

3 これまでの研究

• LHC で見つかったヒッグス粒子の質量（$\sim$ 125 GeV）とミューオンの異常磁気能率を同時に説明出来る超対称性模型の構築および解析、

• 超弦理論、高次元理論に内在するモジュライ粒子が存在する時の初期宇宙論の研究、

• 超対称性理論・超重力理論が自然界に存在する事を検証する鍵を握る粒子「グラビティーノ」を実験的に検出する方法の提案・解析、およびそれに関連した初期宇宙論の研究、

• 宇宙のバリオン非対称性を説明するシナリオ（特に非常に小さなニュートリノ質量の起源と関連したシナリオ）の研究、など

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

4 研究室ホームページ:

素粒子論研究室

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

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質な「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。

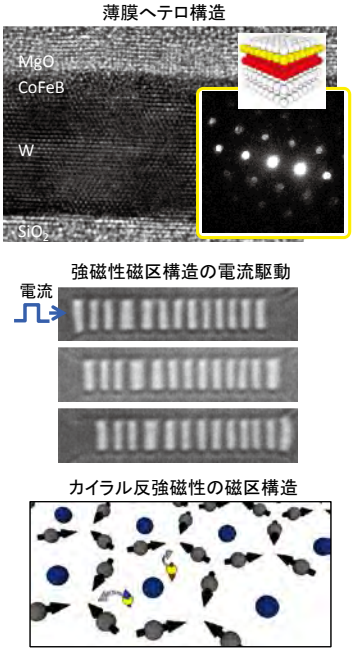
2 最近の研究テーマ

(1) スピン流物理

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。スピン流が生成できると、例えば強磁性体（磁石）の磁化の向きを制御することが可能になり、情報記憶技術に応用できることが期待されます。当研究室では、スピン流のより本質的な側面に迫まれるよう、研究を行っています。スピン流は、散逸無しで流れるのか（抵抗を受けないのか）、さらには電荷の流れである電流と同じように、スピン流を作る、流す、ためる、測ることができるのか、といったことに答えを出せる実験を行っています。これらの研究を通して、将来的にはスピン電池やスピントランジスタ、超スピン流などを探求する研究に展開できることを期待しています。

(2) 薄膜ヘテロ構造とスピン軌道相互作用

最近、スピン軌道相互作用が大きい金属や半導体などに電流を流すと、スピンホール効果などによって電流と直交する方向に巨大なスピン流が生成されることが明らかになってきました。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っており、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発現することが最近わかってきました。このような界面で発現するスピン軌道相互作用はバルクのそれよりも格段に大きい場合があり、その機構解明が重要な研究課題となっています。当研究室では構造反転対称性が破れた人工物質（ABC 積層構造など）を原子レベルで制御し、界面の電子状態やスピン軌道相互作用を自在に操作することで、電子のスピンが誘起する新たな物理現象を探求しています。



（上）薄膜ヘテロ構造の断面図、（中）カイラル磁区構造が電流パルスで平行移動する様子、（下）カイラル反強磁性の磁区構造とスピン流生成の模式図。

馬場・中澤研究室

馬場 彩 准教授　中澤 知洋 講師

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。

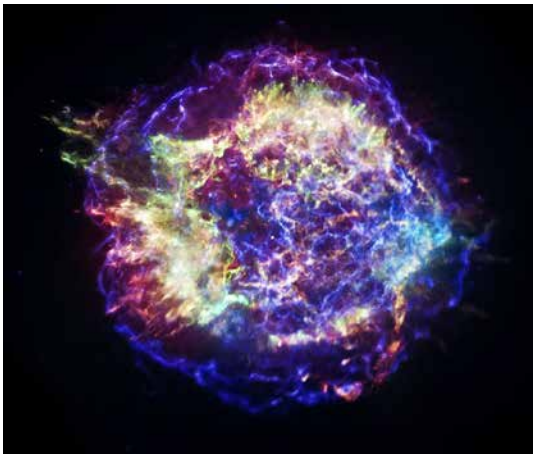


図 1:「Chandra」衛星で見た超新星残骸 Cassiopeia A の X 線画像。1682 年に爆発した星の残骸が、現在も 4000 km s^{-1} で膨張を続けている。放射は主に爆発でまき散らされたシリコンや鉄などからの特性 X 線 (赤、緑) やほぼ光速まで加速された高エネルギー電子からのシンクロトロン放射 (青) である。

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 (図 2 参照、後述)、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代替機 XARM 衛星計画に参加し、2020 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や、地上や小型衛星で実現する新たな装置の開発・実験も進めている。

[最近の研究テーマのうち代表的なもの]

1. 「ひとみ」でペルセウス座銀河団中心部を観測し、銀河団中の高温ガスの発する高階電離した鉄からの輝線がドップラー効果でほとんど拡がっていないことを発見した。これは、銀河団中の高

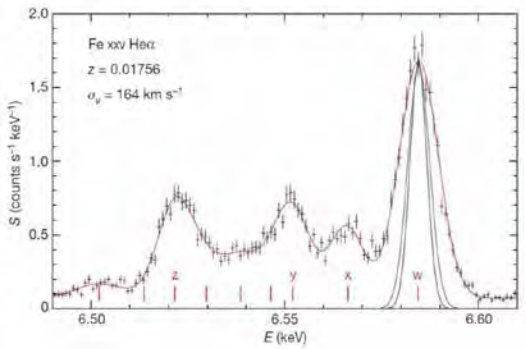


図 2 :「ひとみ」衛星で見たペルセウス銀河団中心部からの鉄輝線スペクトル。ガスが中心部に重力で落ち込む運動で乱流が起こっていれば、ドップラー効果で輝線幅は拡がっているはずであるが、実際はほとんど拡がっていなかった (Figure 2 of Hitomi collaboration, 2017, Nature, 535, 117)。

温ガスが重力で中心部に落ち込んでいるにも関わらずその時にほとんど乱流が起こっていない「どろどろの状態」であることを示す重要な結果である (図 2 参照、Hitomi collaboration, 2017, Nature, 535, 117)。

2. 旧来の X 線宇宙衛星が、銀河団高温ガスから暗黒物質起源の 3.5 keV 輝線を発見したいう報告を、「ひとみ」ペルセウスデータで退け、この質量の暗黒物質に厳しい上限値をつけた。
3. 星程度の重さのブラックホールと銀河中心に存在する 100 万-1 億太陽質量程度の巨大ブラックホールの関係は未だに解明されていない。その中間程度の質量を持つ可能性のある ultra-luminous X-ray sources (ULX) を系統的に探査し、そのスペクトルが二つの状態を時間ごとに遷移していることを示唆した。これは ULX が数十から数百太陽質量のブラックホール、つまり中間質量ブラックホールであることを示している。中間質量ブラックホールは近年重力波観測でも発見されており、非常に注目度の高い天体である。
4. 宇宙線を効率よく加速している超新星残骸 RCW86 を「すざく」衛星で系統的に mapping し、密度が薄い領域でより電子の加速最高エネルギーが高いことを示した。これは、宇宙線加速の起こる環境に対する初めての観測的示唆である。
5. 中性子星と普通の星の連星である Aql X-1 という天体が明るくなり、降着円盤が発達する瞬間を捉えた。そして、そのスペクトルが降着円盤からの黒体放射、中性子星表面からの黒体輻射、そして高温電子からの散乱成分で説明できることを確認した。
6. 2 つの銀河団が合体する初期段階にある天体に着目、二つの銀河団の間に発生したプラズマ内衝撃波を角分解能に優れた「Chandra」衛星で詳細に観測した。その結果、衝撃波の境界が 7 kpc と非常に急峻であることを確認した。
7. (地上) 新潟県で冬期雷雲からのガンマ線観測を進め、雷雲からのガンマ線を多数検出。その放射が強くビーミングしていること、ときに陽電子が大量に生成されていることを発見した。さらには金沢市・小松市・能登地方などで観測装置を多数配置することで、雷雲ガンマ線放射領域のサイズなどを測定する実験を始めている。

3 今後の展開

「ひとみ」衛星の遺した観測データの解析を行いながら、XARM 計画が創出可能なサイエンスを予想し、衛星計画の実現を目指した開発・試験を行なう。「すざく」や「Chandra」といった旧来の衛星のデータも蓄積されてきており、今後は個々の天体の議論から系統的な探査に研究対象が変わっていくであろう。また、その先を見据え、硬 X 線で 10 秒角の撮像能力を世界で初めて目指す FORCE 計画 (図 3 参照)、MeV ガンマ線帯域で現在までの達成感度を一桁向上させる CAST 計画などを主導的に行なう。X 線高分光を目指すヨーロッパの Athena 計画、アメリカの Lynx 計画、数百 GeV 以上の超高エネルギーガンマ線で 1000 天体検出を目指す CTA 計画などにも参加し、それぞれのサイエンス検討と開発を行なう予定である。

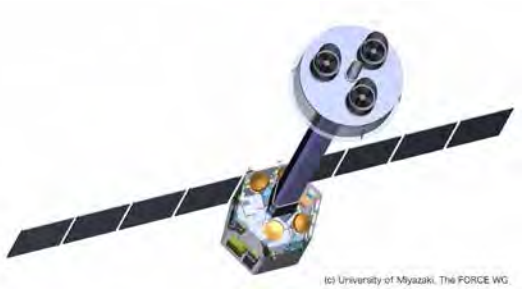


図 3: 次世代硬 X 線撮像衛星計画 FORCE の概念図。伸展式望遠鏡の焦点面に硬 X 線撮像分光器を搭載予定である。

研究室ホームページ

http://www-utheal.phys.s.u-tokyo.ac.jp/wordpress/

樋口研究室

樋口秀男 教授　　茅 元司 助教

「生体分子・細胞・個体の１分子生物物理学」

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理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ターしかなく，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

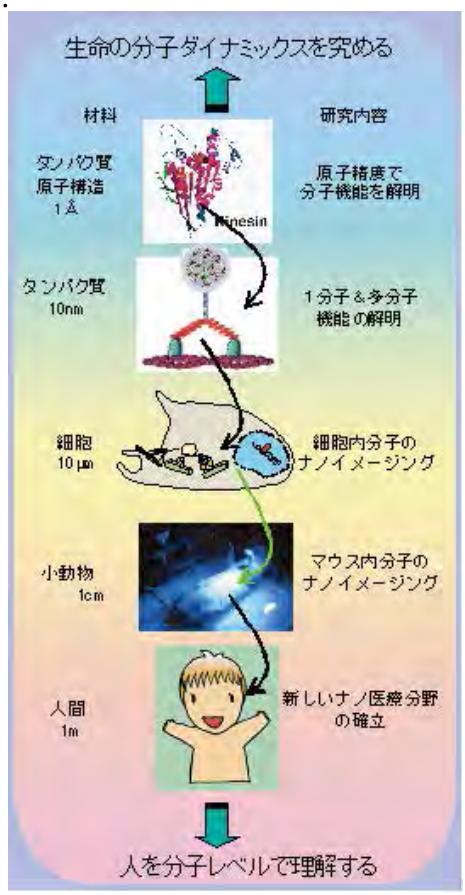
我々の体を守る免疫細胞や我々を脅かすがん細胞はアメーバー様の活発な運動を行います．この運動それ自身がおもしろいだけでなく，運動は細胞の免疫機能や転移能とも関連しています．細胞内のどのような分子が運動に寄与するのか，細胞内ではどのような輸送形態が存在するのか，など細胞の機能の根源に迫りつつ分子機構の解明を行っています．この研究の他に細胞の情報伝達，細胞社会の乱れたガン細胞の診断方法の研究も手がけております．

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．



福嶋研究室

福嶋 健二 教授　山本 新 助教

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

実時間粒子生成: 場の量子論の『真空』は空っぽではなく、いつでも粒子・反粒子の量子揺らぎで満ちています。電場や重力場など外から刺戟を加えると、これらの揺らぎが実粒子として出てくる現象が理論的に予言されています。このような非平衡量子現象を非摂動的に解析することは、現代の物理学の大きな挑戦課題のひとつです。我々は確率過程量子化法や格子シミュレーション等、様々なアプローチを駆使して、この難問に取り組んでいます。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。『負符合問題』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。

福山研究室

福山 寛 教授　松井 朋裕 助教

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。超流動・超伝導や磁性はその代表例である。量子効果の正体は不確定性原理に基づく零点振動なので、物質を構成する粒子が軽いほど大きい。また空間次元を下げると粒子間相互作用が減るので、相対的に量子効果が大きくなる。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 2 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索している。

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 ^{4}He と、スピン 1/2 をもつ中性フェルミ粒子の ^{3}He という、2 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。また、混合させた系も実現できる。

^{3}He の低密度単原子層固体では、新奇な磁性状態としていま注目を集めている「量子スピン液体」の研究を進めており、最近、重要な実験事実が得られた。スピン座標の “量子液体” とも言えるこの新奇な磁気基底状態は、三角格子の幾何学的フラストレーションと 2〜6 体の多粒子がサイクリックに位置交換するリング交換相互作用の競合がもたらしており、これまで知られているもの (マグノンなど) とはまったく異なる磁気素励起をもつことが分かってきた。

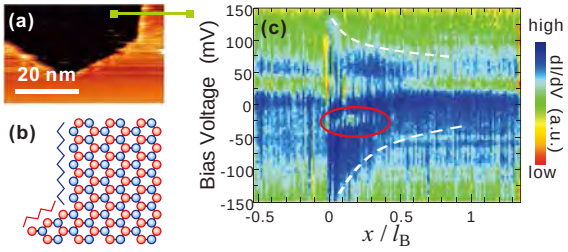
2. グラフェンの端近傍の電子状態

グラフェン中の電子/正孔は、質量ゼロのディラック・フェルミ粒子として振舞い、様々な興味深い物性を示す。グラフェンは、高い熱伝導率や電気伝導率、強靭でしなやかな力学特性をもつことから、次世代エレクトロニクス素材としても大いに期待されている。

我々は、2004 年に、グラフェンのジグザグ端に局在する電子状態 (zz-ES) の存在を走査トンネル分光 (STS) 測定から見いだした。zz-ES はバンド幅が狭く、ゼロエネルギーつまりフェルミエネルギーに現れるのでスピン偏極しやすい。そのため、スピントロニクス応用の観点から、確実に水素終端され原子レベルで幾何学的によく揃ったジグザグ端の実現が、世界中で試みられている。最近我々は、グラファイト表面を水素プラズマ中で熱処理することで選択的にジグザグ端で囲まれた単原子深さの六角形ナノピットを大量に作成する技術を開発したことで、従来とは桁違いに詳細にジグザグ端の性質を調べる実験手段を手に入れることができた。例えば、グラフェンに面直磁場を印加すると通常の半導体 2 次元電子系では見られないゼロエネルギーの離散準位 (最低ランダウ準位：LL0) が現れるが、ほとんど同じエネルギーをもつ zz-ES と LL0 がジグザグ端近傍でどのように相関するのかを調べている (図参照)。

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) 下で作動する走査トンネル顕微鏡 (STM) の 2 つの主力装置を中心に、比熱、NMR、ねじれ振り子、STM/STS、電気伝導、帯磁率、表面微細加工など、多彩な実験手法を用いる一方、低温センター、NTT 基礎研、信州大など学内外の実験や理論グループと共同研究を進めている。



グラフェンのジグザグ端の STM 像 (a) と、そのポンチ絵 (b)。(c) ジグザグ端を垂直に横断する直線（図 (a) 緑線）上で測定した微分トンネルコンダクタンス (電子状態密度に比例) のカラーマッピング。赤丸はジグザグ端に局在した電子状態 (zz-ES) で、ランダウ準位 (右側の明るい縞) は白い破線領域より端に近づくと減衰する。横軸はエッジの位置をゼロとして磁気長 (l_B) で規格化された長さ。

藤森研究室

藤森 淳 教授　芝田悟朗 助教

1 研究の背景

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

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

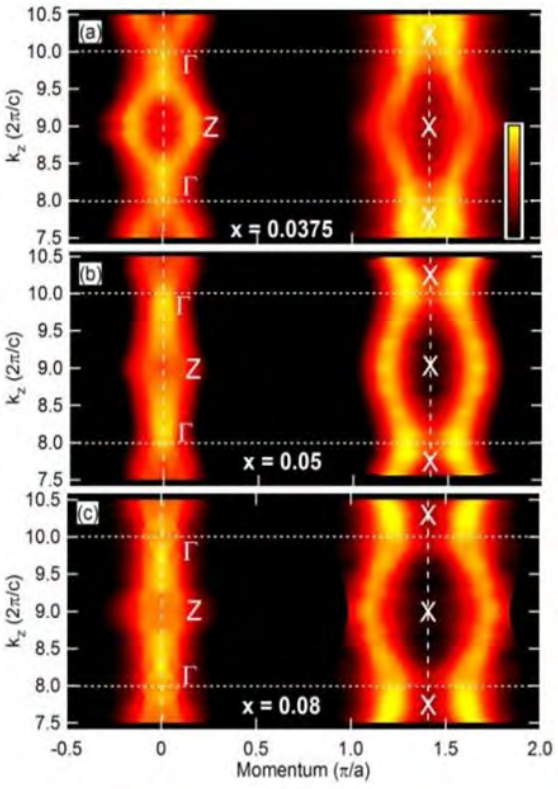
実験は本郷キャンパスの実験室光源の他に，電子加速器から放出される放射光を用いておこなっている．放射光を用いた実験と装置開発を，つくばの高エネルギー加速器研究機構，スタンフォード放射光研究所，台湾放射光，SPring-8 などの放射光実験施設で行っている．また，国内外の物質開発研究グループ，放射光研究グループとの共同研究を積極的に行っている．

2 最近の研究テーマ

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

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

3) 強相関酸化物ヘテロ界面　遷移金属酸化物は，巨大磁気抵抗，金属－絶縁体転移，軌道秩序などの多様な物性を示し，基礎科学的に重要なばかりでなく，機能性材料として期待され，利用されはじめている．とくに，異なった遷移金属酸化物が接合した界面は，両者にない全く新しい物性を示すことがある．これらの物質に対して高精度の光電子分光実験および軟 X 線吸収分光を行い電子構造の解明を行うとともに，新たな物性の探索を行っている．



図の説明：光電子分光で見た鉄系高温超伝導体 $Ba(Fe_{1-x}Ni_x)_2As_2$ のフェルミ面の断面図．フェルミ面とは，電子の運動量空間において，電子が占有する領域と占有しない領域を分ける境界で，オレンジ色部分が実験で観測されたフェルミ面を示す．化学組成によってフェルミ面が系統的に変化している．

古澤研究室

古澤力 教授

1 研究の背景

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

2 最近の研究テーマ

i) 進化実験を用いた適応進化ダイナミクスの解析

適応進化のダイナミクスを定量的に解析し、その振る舞いを理解することを目的として、様々な環境下での大腸菌の進化実験と、その過程における表現型と遺伝子型の解析を行っています。我々が開発したラボオートメーションを用いた進化実験システムは、数百系列の独立した進化実験を全自動で維持することを可能としています（図 a）。こうした実験から、適応進化の過程において、高次元の表現型空間（例えば遺伝子発現量を軸とした空間）とゲノム配列空間において、大腸菌の状態がどのように広がっていくか、その軌跡を観察することが出来ます。その解析から、大腸菌の状態遷移がどのように記述されるか（何次元の空間で描けるか？）、環境適応・エピジェネティクス記憶・そして進化といった様々な時間スケールを持つダイナミクスはどのように関係しているかを明らかにします。また、細胞モデルの進化シミュレーションを用いて（図 b）、どのようなマクロ状態量によって適応進化過程を記述すべきかを明らかにします。こうした結果を統合し、生物システムの安定性と可塑性を記述する細胞状態遷移理論を構築を目指します。

ii) 多細胞生物における不可逆な分化過程の解析

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

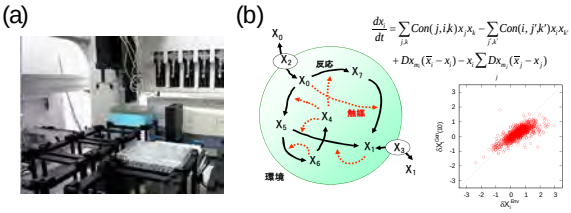


図 (a) ラボオートメーションを用いた進化実験システムの外観．(b) 進化シミュレーションの一例．

松尾研究室

松尾泰准教授

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次元的あるいは５次元的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は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。

宮下研究室

宮下精二教授、森貴司助教

1 研究テーマ

統計力学、物性理論：具体的には
(1) 相転移臨界現象の統計力学、
(2) 協力現象の動的性質、非平衡統計物理、
(3) 量子ダイナミクス、
などが主なテーマ。研究テーマとして「相互作用現象のモデリングと制御」をあげている。ここで相互作用現象とは造語で、多体の要素が相互作用している系での協力現象といった意味のつもりである。このテーマについて統計力学的な研究を進め、いろいろな系でのおもしろい現象の機構解明やより新しい現象の発見、さらにはその背後にある普遍的な物理原理の探求をめざしている。

2 最近の研究テーマ

2-1. 新しいタイプの相転移、協力現象

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

また、スピンクロスオーバー物質や電荷移動物質の系では、電子状態の変化によって基本構成単位の体積が変化し、そのための弾性エネルギーによって生じる実効的長距離相互作用によって新しいタイプの協力現象が現れる。これらの系に現れる新しいタイプの相、あるいは相転移の発見、その機構解明を進めている。また、統計力学基礎論の観点からも、実効的長距離相互作用が、短距離相互作用しあう多粒子系からいかにして生じるかは非自明な難問であるが、一種の準安定状態でのみ実効的長距離力が生じうることを示した。

2-2. 非平衡現象の統計物理学

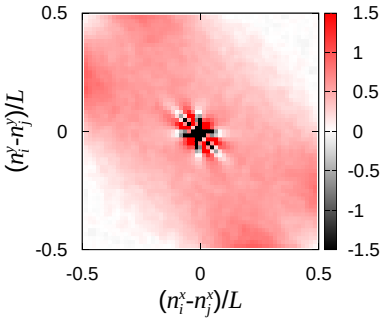
相転移に伴う系の状態変化である動的臨界現象や、外場や外圧、温度変化、さらには光照射などによって引き起こされる系のミクロ・マクロの実時間ダイナミクスも興味深いものであり、たとえば、スピンクロスオーバー系の光誘起磁気相転移の磁化スイッチング機構や、キャビティー内の原子集団が光子と相互作用することによって示す optical bistability や Dicke 転移などの協力現象について研究を進めている。

2-3. 量子ダイナミクス

動的外場のもとでの系の量子運動、特に、量子干渉によって生じる Non-trivial resonance 現象、ナノ磁性での量子ダイナミクスにおける非断熱遷移機構、また熱浴との相互作用で起こる Magnetic Foehn 現象、量子トラップによる粒子移送、格子操作による量子磁性制御などを明らかにしてきた。このような外場の変化によって状態を断熱的、非断熱的にコントロールすることにより、量子力学ならではの量子情報処理の新しい機構の基礎研究の開拓を目指している。

さらに、周期外場の下で、系がどのような定常状態に向かうかについても研究を進めている。この問題は、非平衡統計力学にとっても、また強い光を物質に当てることで平衡状態では見られない新奇な物性を非平衡状態で実現しようという近年の活発な研究にとっても重要な基礎的課題である。

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



短距離の弾性相互作用から生じた実効的長距離相互作用。遠くまで相互作用が伝わっていることがわかる。

村尾研究室

村尾美緒 教授　添田彬仁 助教

1 量子情報とは

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

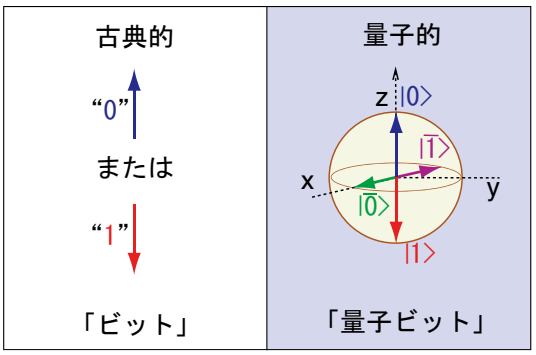
2 当研究室では

計算アルゴリズムや情報処理を効率よく実行するための装置としてだけではなく、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、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証明を詰めることが重要となる一方で、発想の転換によって新たな手がかりをつかむ発想力や独創性も不可欠である。このため、異なる背景を持つ国内外の様々な研究者との議論を通じて効率良く研究を進める場合が多い。

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



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

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

研究室ホームページ:
http://www.eve.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexj.htm

諸井研究室

諸井 健夫 教授　　中山 和則 助教

1. はじめに

本研究室では、素粒子物理学、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、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な課題です。今後 LHC 実験によりヒッグス粒子についての精密測定が進むということもあり、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、テラスケール以上で現れると期待される新粒子に、超対称性と呼ばれる対称性が予言する「超対称粒子」があります。本研究室では、超対称性を持つ理論の構造を理解し、超対称粒子が自然界で果たす役割を明らかにすることにも力をいれています。さらに、超対称理論に基づく宇宙進化のシナリオの構築についても研究を進めています。無論、超対称理論以外にも、標準理論を超えた素粒子理論の可能性は様々考えられます。テラスケールより高いスケールの物理に関して、新たな可能性を探り、その検証方法を探求することは、今後ますます重要となります。併せて、新たな素粒子理論に基づく宇宙進化のシナリオについてもさらに理解を深めていく予定です。

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

山本研究室

山本智教授　渡邉祥正助教

1 はじめに

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

2．星形成領域の観測的研究

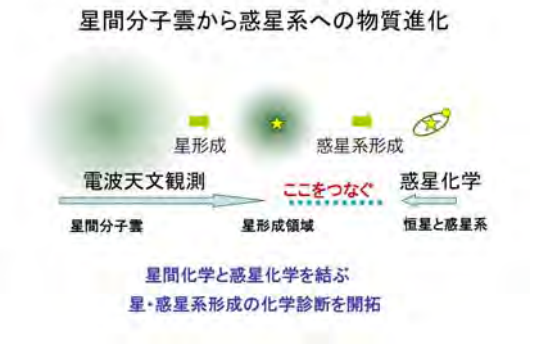
国内外のミリ波サブミリ波望遠鏡を用いて、近傍星間分子雲中の星形成領域の観測研究を行っている。とくに、星形成から惑星系形成に至る物質進化に着目し、化学組成をもとに銀河系内外の星・惑星形成過程を探る新しい手段を開拓している。

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、$HCOOCH_3$ 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、$HCOOCH_3$ 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・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, 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。



横山順一研究室

横山 順一 教授　須山 輝明 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になります。

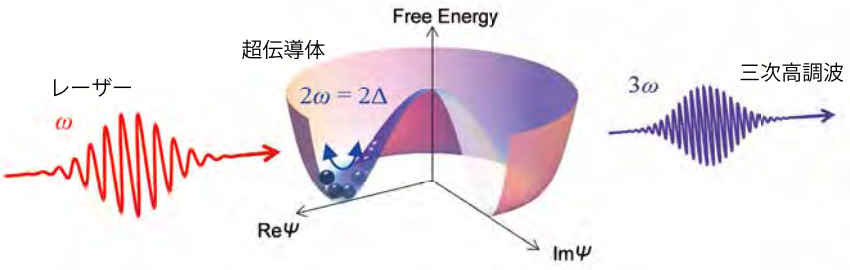
3 今後の展望

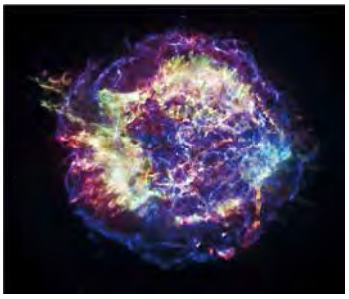
私たちは、宇宙を観測する新たな手段として、重力波に注目しています。宇宙マイクロ波背景放射の偏光を高精度で観測できるようになると、インフレーション時代に量子的に生成した重力波の痕跡を見いだすことができるようになります。それによって、インフレーションがいつ起こったかがわかるようになります。

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、伊藤洋介助教) 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/





《 図について 》

左)超伝導体のヒッグスモードと光との相互作用:

超伝導という場(Ψ)の中では質量ゼロの光子が質量を獲得する。この超伝導体にレーザー光(周波数ω)を照射すると、場(Ψ)の集団励起(ヒッグスモード)が励起され、ヒッグスモードとレーザー光が共鳴して3次高調波(3ω)を発生することが明らかになった。

右)「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。

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/