

《 表紙の図について 》

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。ニュートリノ反応によって生成された粒子が放つチェレンコフ光がリング状に見える。ミューオンニュートリノがニュートリノ振動によって変化した電子ニュートリノによる反応事象の候補。 (相原・横山研究室)

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

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



2013

進学案内資料
東京大学理学部物理学科

Faculty of Science & Graduate School of Science,
The University of Tokyo

理学部物理学科への進学を考えている学生の皆さんへ

物理学は、自然の仕組みに対する最善の理解とは何かを追究していく学問です。この世の中がどのような仕組みになっているのか、たとえば、物質は何からできているのか、宇宙の果てはどうなっているのか、生死とは何かなどは人類の普遍の関心事です。特に、個別の現象の観測に留まらず、その背後にある普遍性への探究が続けられてきました。そこでは、自然に真摯に向きあいその背後にある原理への何物にも縛られない自由な洞察と、そこから導出される多様な現象への理解における数学的厳密さが両輪となります。その結果得られた世界を貫く法則の体系は、古代のてこの原理に始まり、ニュートン力学、電磁気学、熱力学そして現代物理学と呼ばれる相対論、量子力学、統計力学、複雑系物理学という形にまとめられてきました。物理学の主要な目的は、知られていない普遍的な仕組みを明らかにすることであり、必ずしも直接的な対象自身が人々の役に立つことをめざしているわけではありません。しかし、正確な原理の理解は、知識を能動的なものとし、力学においては人類の月への到達、電磁気学では携帯電話やリモコンなどの魔法のような機器の実現、さらに、集団運動の普遍性への理解からは熱力学で導入されたエントロピーなる考え方が情報という量として、新しい自然現象の理解に役立ってきています。

物理学の立場で真摯に自然に向きあうには、これまでどのようなことが知られているのかを学び、その能動的な活用ができるようにならなくてはなりません。まずはそのための修行が必要となります。そこで物理学科では皆さんに、現在受け入れられている原理としての、量子力学、電磁気学、統計力学などを徹底的に学んでいただきます。そして、それらが実際にどのように現れるかを実験によって実体験してもらいます。また、これらの基礎的な物理学の習得とは相補的に、研究のフロンティアに触れる機会として、最新のテーマを学生向けに講演してもらう物理学コロキウムなど開催しています。3年冬学期の物理学ゼミナールは、少人数で先生を囲み、先端的なテーマに触れる良いチャンスです。さらに4年生特別実験・理論演習では、他学科が行っている卒業研究と同等の深い研究実体験がなされます。皆さんは、このような充実した物理学科における2年間の教育プログラムを通じて、卒業する頃には、現在人類が手にしている知識の基礎部分を会得しているはずです。そして、さらに大学院に進学すれば、そのフロンティアを実際に自ら推進する経験へと進むことになります。このような物理学的な思考法を身につける事は、決して狭い意味での研究職のみならず、より広い社会の様々な分野において本質的であることも強調しておきたいと思います。実際、企業、政治、行政、司法などの、直接物理学とは関係しないと思われる分野で、物理学科の学部あるいは大学院を終えた先輩達が大活躍しています。

物理学科には70名近くの教員が在籍し、現代物理学の広範な分野をカバーしています。現象を数少ない原理から考え抜くという姿勢のもと、異なる分野を探究している物理学教室メンバーは、一体として新たな物理学を開拓すべく協力して活動を進めています。皆、「我々こそは新しい物理の展開を切り開くフロンティアを担っている」という意気込みを持って物理に取り組んでいます。私たちとともにさらなる一步をめざす新たな仲間として、皆さんが物理学科に進学してくれることを心待ちにしています。

理学系研究科物理学専攻長
理学部物理学科長
宮下 精二

東京大学理学部物理学教員一覧

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
相原博昭	高エネルギー物理学	高エネルギー素粒子実験を専門としている。：高エネルギー加速器研究機構（KEK）のスーパーBファクトリー（SuperKEKB）を使った粒子・反粒子非対称性（CP非保存）や、B中間子やタウレプトンの稀崩壊の測定をもとに、素粒子の標準理論を超える新しい素粒子物理法則を探索している。J-PARCの大強度陽子加速器で発生させたニュートリノビームを使ってニュートリノの性質の精密測定を行っている。さらに、すばる望遠鏡を使ったダークエネルギーの研究も推進している。
青木秀夫	物性物理学理論	[A] 多体電子論、電子相関の物理：(1) 超伝導 [高温超伝導体、エキゾチック超伝導体における電子機構超伝導]。(2) トポロジカル系 [分数量子ホール効果とそのゲージ場の理論、整数量子ホール効果、グラフェン]。(3) 強磁性 [遍歴強磁性、平坦バンド強磁性]。[B] 上記のような新奇物性を実現する舞台としての、「物質設計」。[C] これらを具体的に扱う理論的方法論として、量子Monte Carlo法、密度行列繰り込み群、動的平均場、第一原理電子状態計算、など。[D] 非平衡における新奇な電子相関、トポロジカル物性の探索。
浅井祥仁	素粒子物理学実験	(1) 世界最高エネルギー・LHC加速器を用いたアトラス実験において、標準理論を超えた新しい素粒子物理学を切り拓く研究：物質の質量の起源を担うヒッグス粒子の発見や、超対称性粒子の発見に向けた研究を行っている。ATLASグループの超対称性研究の責任者 (2) ポジトロニウムなどを用いた非加速器、小実験を通して、QEDの精密検証やAxionやDark Energyなど新しい素粒子現象の探索を行う。
安東正樹	相対論実験	宇宙を見る新しい目として重力波天文学の実現を目指す。岐阜県・神岡の地下サイトで建設が進められている大型低温重力波望遠鏡 KAGRA(かぐら)の建設、および、将来の宇宙重力波望遠鏡DECIGOのための基礎開発研究を推進する。また、それらに用いられる最先端のレーザー干渉計技術を利用した、相対論検証実験や量子光学的手法を用いた精密計測研究も行う。
上田正仁	冷却原子気体、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）、量子情報・測定、物性理論
大塚孝治	原子核物理学理論	原子核を陽子や中性子などからなる量子多体系とし、その性質や存在限界を探究する原子核構造理論を研究している。働いている力が核力であることから来る特異な性質を解明し、最近研究が始まった不安定原子核（エキゾチック核）の姿を明らかにすることを旨とする。さらに、カオスやメソスコピック系など量子多体系のより一般的な面も研究している。
岡本 徹	物性物理学	半導体2次元電子系を中心とした低温物性実験。量子ホール効果などの強磁場下の現象の研究とともに、ウィグナー固体の磁性や金属・絶縁体転移、2次元超伝導などの電子相関やスピンが主役となる新しい量子現象の解明および探索を行っている。最近では劈開表面の2次元電気伝導の測定に成功しており、新しい研究領域を開拓しつつある。
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。
五神 真	光量子物理学	量子効果と多体効果に起因する新奇物質相の発現や非自明な光学現象を、物質科学と光科学の両面から追求する研究を主題とする。ミリケルビン領域に至る低温技術と、遠赤外から軟X線にわたるコヒーレント光の発生と分光技術、ナノ加工技術を駆使して進めている。(1) 励起子や電子正孔系の量子凝縮相と巨視的量子現象の解明 (2) 制御可能な非古典的光子源の開発とその高効率観察 (3) 電気四重極相互作用や磁気効果を含む、非局所・非線形光学効果の活用 (4) 次世代レーザー光源や分光手法の開拓。
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	レーザーを用い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中性分子のマニピュレーションとその応用、(2) 整形された超短光パルスによる原子分子中の量子過程制御、(3) 高次非線形過程（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、(4) レーザー誘起クーロン爆裂を用いた分子の構造とダイナミクス。
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。

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
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・宇宙論	宇宙論の理論的研究。具体的な研究テーマは、宇宙の構造形成の理論モデル、多波長観測による銀河団モデル、重力レンズ天文学、宇宙論的流体力学数値シミュレーション、高赤方偏移宇宙における一般相対論的效果、暗黒物質と天体との空間的バイアスの起源、銀河分布のバリオン振動を用いた暗黒エネルギーの性質の解明、軟X線分光を用いた暗黒バリオン探索、太陽系外惑星の観測および理論的研究。
高木英典	物性物理	固体、特に遷移金属酸化物中の絡み合う電子(相関電子)が創成するエキゾチックな量子凝縮相を現実の物質の中に探索・実現する。同時に相形成の物理を解明する。現在、高温超伝導、量子スピン液体、非自明なスピン・電荷秩序、トポロジカル絶縁体、などに具体的興味の中心がある。舞台となる物質を自ら開拓すると同時に、電子輸送現象、熱物性、量子ビーム回折・散乱などのプローブを駆使して、ナノの世界での相関電子の静的・動的自己組織化構造を明らかにする。
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。
谷口耕治	固体物理学	固体中における電子状態を対称性の観点から制御することを目指す。周期的に原子やスピンの配列した固体中は、等方的な真空と比べ対称性の破れた場であり、電子も特有の振る舞いを示す。特に、空間反転対称性の破れた場におけるスピン・軌道相互作用の顕在化に伴う、ラシバ効果、超伝導体における一重項・三重項クーパー対混合などの現象を持っている。薄膜や外場印加等の手段により人工的に空間反転対称性を破った場を形成し、アプローチを行う。
常行真司	物性理論	第一原理分子動力学法など基本原理に基づく計算機シミュレーションは、観測や実験からは得られない物性情報を得たり、あるいは実験に先んじた予言を行うことを可能にする。当研究室では主にそのような計算物理的手法を開発しながら、物性物理学の基礎研究を行っている。電子相関の強い系や2成分量子系を取り扱うための新しい第一原理電子状態計算手法の開発、超高圧下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。
中澤知洋	宇宙物理学実験	宇宙に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ます。我々は自ら開発したX線、ガンマ線の観測装置を衛星に搭載し、ブラックホールや銀河団などの高エネルギー天体を探ることで、新しい物理過程を発見し、宇宙の進化を支配する物理を探ることを目的にしています。現在は、私自身も関わった最新の「すざく」衛星を用いて観測研究を進めると同時に、感度を飛躍的に向上させた次世代のX線／ガンマ線の観測装置を開発しています。研究活動では、牧島研究室、および宇宙機構の科学本部と協力しています。
能瀬聡直	生物物理学	脳・神経系の生物物理。神経回路がいかんして形成され、どのような原理にもとづいて機能するのかを、細胞・分子レベルで理解することを目指し、モデル動物を用いた研究を行う。特に、シナプスについて、その形成と可塑性（神経活動に応じてシナプスの性質が変わること。記憶学習のもとであると考えられている）の仕組みを、バイオイメーjingやマイクロアレイなどの最新の実験技術を用いて探る。
長谷川修司	表面物理学	固体表面（主に半導体表面）上の1、2原子層、原子鎖やクラスター、その他、表面上で形成されるナノメータスケール構造体について、その構造物性・電子物性、機能特性などを多角的に研究する。具体的には、原子配列構造、電子状態、電子輸送特性、相転移、構造マニピュレーションなどを、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などの実験手法を駆使して研究する。さらには表面ナノサイエンス・テクノロジーのための新しい実験手法の開発も行う。
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でのどのような物理があるのかに興味があり、自然界に存在するより基本的な統一理論を目指して研究しています。現在は主に超対称性理論を軸にした現象論および素粒子論的宇宙論の研究を行っています。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。

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
早野龍五	高エネルギー原子核物理実験	エキゾティック原子(反陽子、中間子などを含む奇妙な原子)の分光による基本対称性の実験的研究。1) 反水素原子の研究、および反陽子ヘリウム原子の精密レーザー分光によるCPT対称性・物質・反物質の対称性-の精密検証(CERN研究所にて実施中)。2) 中間子原子の生成・分光による、「ハドロンの質量起源 - 原子核中でのカイラル対称性の部分回復」の研究(J-PARC研究所にて)。
樋口秀男	生物物理学	当研究室では生体モータータンパク質を分子・細胞・個体の3つの階層からアプローチし、各階層の機能メカニズムを解明すると同時に全体を俯瞰した生体運動の物理モデルを構築する。具体的な研究テーマは、1. 精製モーター1分子の3次元運動をÅ精度で解析し、Åレベルの運動メカニズムの解明を行う。2. 細胞内モーター分子の変位と力を3次元的に測定し、力学状態の時空間的变化を解析する。3. マウス内モーター分子の運動を解析し、個体内細胞の運動を明らかにする。4. 細胞の運動機能に普遍的な物理モデルを構築する。
福山 寛	低温物理学	低温物理学: (i) 超低温における量子流体・固体研究(超流動、核磁性、強相関効果、相転移現象など)。特にヘリウム3単原子層膜の2低次元物性。(ii) 超低温走査トンネル顕微鏡を使った電子物性研究(2次元電子系の量子ホール効果と電子局在, グラファイトの端状態、半導体量子ドット、スピン3重項の異方的超伝導。(iii) 超低温度の開拓と新しい低温技術の開発。核磁気共鳴、比熱、輸送現象測定その他、走査トンネル顕微鏡/分光法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。
牧島一夫	高エネルギー宇宙物理実験	中澤講師、ビッグバンセンター、JAXAなどと協力し、科学衛星により宇宙X線やガンマ線を観測的に研究している。2005年に打上げられた「すざく」では、世界最高の性能をもつ硬X線検出器を担当し、ブラックホール、中性子星とマグネター、磁気プラズマ現象、銀河団の宇宙論的進化、元素合成、粒子加速などを観測している。2014年に打ち上げ予定の後継機ASTRO-H衛星に向けては、「すざく」を大幅に上回る性能をもつ、2台の搭載装置の開発を進めている。
松尾 泰	素粒子理論	量子重力、超弦理論、場の量子論、可解な量子系、およびそれに関連する数理論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、弦の場の理論の手法を用いたDブレーンの研究、行列模型を用いた低次元量子重力の研究、量子重力の数学的な背景としての非可換幾何学の研究などがあげられる。
養輪 眞	非加速器素粒子物理学実験	みのわ研究室では、素粒子物理学のいろいろな未解決問題を解明するために、小型の反電子ニュートリノ検出器を開発して、原子炉の外側からニュートリノを検出する実験、超伝導電磁石を使って太陽の中心部で発生していると考えられる質量の小さな中性粒子アクシオンを宇宙空間をへだてた地球上で検出する実験のふたつの非加速器素粒子実験を行なっている。志願者は物理学に対する興味と学力だけではなく、実験技術に対する関心をも合わせて持っていることが要求される。
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ミッ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)	量子情報処理は、量子系の状態で表される「量子情報」を用いて古典の情報処理では不可能・不得意な情報処理の実行を目的とする。(例: 量子計算・量子暗号・量子通信) 量子情報処理の重要なリソース(資源)として量子系特有の非局所的相関であるエンタングルメントに注目し、特に多粒子間エンタングルメントの性質の理解と、これを積極的に利用した新たな量子情報処理システムの提案・実現に関する理論研究を行っている。
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。
横山将志	素粒子物理学実験	加速器を用いた素粒子実験。クォーク・レプトンのフレーバー構造や質量起源の探索。現在は特にJ-PARC加速器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(T2K)でのニュートリノのフレーバー構造の精密決定、さらにその後のレプトンセクターでのCP非保存の研究を目指している。前置ニュートリノ検出器でのニュートリノ反応の研究や、検出器アップグレードの検討を行う。将来の実験計画の立案、光検出器等を中心とした新型の粒子検出器の開発も継続的に行う。
吉田直紀	宇宙物理学	初期宇宙での星、銀河、ブラックホールの形成。暗黒物質の素粒子的性質。超並列計算機を用いた宇宙進化のコンピューターシミュレーション。

以上37名

2013年度 学部時間割

2 年冬学期

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月		電磁気学 I	解析力学・量子力学 I		
火					
水		物理実験学	物理学演習 II		
木		物理数学 I・物理数学 II		物理学演習 I	
金					

3 年夏学期

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月	理科教育法 III	電磁気学 II	物理学実験 I		
火	応用数学 XC	量子力学 II	物理学演習 III		
水		現代実験物理学 I	物理学実験 I		
木		流体力学	物理学実験 I		
金		統計力学 I	物理学演習 IV		

3 年冬学期

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月		物理数学 III	物理学実験 II		
火	解析学 XC	量子力学 III	物理学ゼミナール	物理学演習 V	
水	固体物理学 I	現代実験物理学 II	物理学実験 II		
木		電磁気学 III	物理学実験 II		
金	生物物理学	統計力学 II	物理学演習 VI		

4 年夏学期

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月	理科教育法 III	場の量子論 I	サブアトムック物理学	統計力学特論	
火	応用数学 XC	一般相対論	特別実験 I / 理論演習 I		
水	宇宙物理学	プラズマ物理学	特別実験 I / 理論演習 I		
木		固体物理学 II	特別実験 I / 理論演習 I		
金		量子光学	計算モデル論	生物物理学特論	

4 年冬学期

	1 限	2 限	3 限	4 限	5 限
月		化学物理学	素粒子物理学	連続系アルゴリズム	
火	解析学 XC	原子核物理学	特別実験 II / 理論演習 II		
水		固体物理学 III	特別実験 II / 理論演習 II		
木	物性物理学特論	電子回路論	特別実験 II / 理論演習 II		
金		現代物理学入門		場の量子論 II	

2012年度に行われた講義の概要

学部講義概要

1 2年生 冬学期

1.1 電磁気学Ⅰ：駒宮幸男

- | | |
|------------|-----------------------|
| 1. 特殊相対性理論 | 5. 電磁誘導と Maxwell の方程式 |
| 2. 相対論的運動学 | 6. 電磁場中での荷電粒子の運動方程式 |
| 3. 電場 | 7. 準定常電磁場と交流理論 |
| 4. 磁場 | 8. 相対論的な電磁気学の形式 |

1.2 解析力学・量子力学Ⅰ：須藤 靖, 相原博昭

- | | |
|------------------------------|-----------------------------|
| 1 物理学的世界観 | 7.9 運動量 |
| 2 最小作用の原理からニュートンの法則へ | 8 時間に依存しないシュレーディンガー方程式と一次元系 |
| 3 対称性と保存則 | 8.1 定常状態 |
| 4 ハミルトン形式と正準変換 | 8.2 井戸型ポテンシャル |
| 5 電磁場の古典論 | 8.3 一次元調和振動子 |
| 6 黒体輻射とエネルギー量子 | 8.3.1 代数的解法 |
| 7 量子力学への導入 | 8.3.2 解析的解法 |
| 7.1 光の量子（フォトン） | 8.4 デルタ関数ポテンシャル |
| 7.2 ドブロイの物質波 | 9 3 量子力学の定式化 |
| 7.3 ボーアの原子模型 | 9.1 線形代数の復習と定義の確認 |
| 7.4 ハミルトン・ヤコビ方程式と電子波 | 9.2 関数空間 |
| 7.5 波束（wave packet） | 9.3 量子力学の基本原則 |
| 7.6 波動関数と不確定性原理 | 9.4 時間発展演算子 |
| 7.7 ファインマンの経路積分とシュレーディンガー方程式 | 9.5 シュレーディンガー表示とハイゼンベルグ表示 |
| 7.8 確率解釈 | 9.6 不確定性原理の一般形 |

1.3 物理実験学：藤森 淳, 酒井 広文

- | | |
|----------------|-------------------|
| 1. 序論（物理実験の魅力） | 2.2 代表的な物理量の単位 |
| 2. 単位 | 2.3 各種の常用単位系とその変換 |
| 2.1 SI 基本単位の定義 | 3. 各種の計測法 |

- 3.1 レーザーの基礎と光の計測
出力の測定、パルス幅の測定、超高速ストリークカメラ、強度相関法
- 3.2 放射線の計測
放射線の基礎、放射線と物質の相互作用、放射線検出器
- 4. 実験の基礎技術

- 4.1 実験環境技術
真空、低温、磁場、強電場
- 4.2 試料作製技術
- 5. 誤差論
実験誤差、確率統計、最小二乗法
- 6. 実験レポートや論文を書く上での注意事項

1.4 物理数学 I : 小形正男

1. 複素関数

- 1.1 物理学における複素数
- 1.2 複素関数と Riemann 面
- 1.3 初等関数と収束半径

2. 複素関数の微分と正則性

- 2.1 複素微分
- 2.2 Cauchy-Riemann の関係式
- 2.3 調和関数

3. Cauchy の積分公式とその応用

- 3.1 複素積分の定義と Cauchy の積分定理
- 3.2 主値積分
- 3.3 Cauchy の積分公式と Taylor 展開
- 3.4 Laurent 展開
- 3.5 解析接続

4. 等角写像

- 4.1 正則関数と等角（共形）写像
- 4.2 共形変換の応用

5. Γ 関数

- 5.1 Γ 関数
- 5.2 鞍点法
- 5.3 Γ 関数の無限乗積表示と Hankel 表示
- 5.4 Stirling の公式
- 5.5 ζ 関数

6. Fourier 級数と Sturm-Liouville 理論

- 6.1 Fourier 級数と Fourier 変換
- 6.2 固有関数展開
- 6.3 δ 関数の Fourier 変換

1.5 物理数学 II : 立川 裕二

1. 偏微分方程式とフーリエ変換

- 1.1 偏微分方程式
- 1.2 熱伝導方程式
- 1.3 波動方程式
- 1.4 ポアソン方程式
- 1.5 ラプラシアンと特殊関数

2. 特殊関数

- 2.1 直交関数系／直交多項式としての特殊関数

2.2 ベッセル関数

- 2.3 直交多項式 (ルジャンドル、ラゲール、エルミート)
- 2.4 球面調和関数

3. 回転対称性

- 3.1 回転群と角運動量
- 3.2 回転群と球面調和関数
- 3.3 回転群と四元数

2 3年生 夏学期

2.1 電磁気学 II : 高瀬 雄一

1. Maxwell 方程式

- 1.1 微視的描像と巨視的描像
- 1.2 電磁場とポテンシャル

2. 静電場

- 2.1 誘電体
- 2.2 境界値問題の解法

2.3 Laplace 方程式の一般解

2.4 Green 関数

3. 静磁場

3.1 磁性体

3.2 境界値問題の解法

3.3 強磁性体

4. 準静的問題

4.1 電磁誘導

4.2 電磁場の拡散

4.3 表皮効果

4.4 渦電流

5. 電磁場の保存則

5.1 Poynting の定理

5.2 インピーダンス

6. 物質中の電磁波

6.1 誘電率と屈折率

6.2 分散と吸収

6.3 プラズマ中の波動

6.4 群速度

6.5 波束の拡散

6.6 因果律

2.2 量子力学 II : 浜口 幸一

1. 3次元空間でのシュレディンガー方程式

1.1 極座標による3次元のシュレディンガー方程式

1.2 球対称ポテンシャル内の粒子のシュレディンガー方程式

1.3 角度成分

1.4 動径成分

2. スピン

2.1 スピン自由度の存在

2.2 スピン

2.3 $s=1/2$ のとき : パウリ行列

2.4 スピンと磁気モーメント

2.5 角運動量の合成と Clebsch-Gordan 係数

3. 対称性と保存則

3.1 保存量

3.2 対称性

3.3 連続対称性の生成子と保存量

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 WKB 近似

2.3 現代実験物理学 I : (前半) 江尻 晶 (後半) 福山 寛

前半は、物理実験 I、II の理解を深めることを目的に、歴史的な実験も紹介しつつ、基礎的な物理実験技術とその原理を主に解説する。後半は、物性物理学分野の実験技術とその物理について、歴史的な実験や最先端技術の紹介も交えながら回折する。

物理実験技術の基礎とその原理 (江尻担当)

1. 回路

1.1 アナログ回路の雑音、応答

1.2 雑音との戦いの歴史

2. 真空

2.1 真空の歴史

2.2 真空を作る、測る

2.3 真空容器、表面洗浄

2. 可視赤外分光

3.1 分光の歴史

3.2 各種分光法と性能

3.3 光束、立体角、レンズ

3.4 PMT と Photo Diode

物性実験技術とその物理 — 物質の多様性を探る (福山担当)

4. 極限実験環境の実現と計測

緒高真空、極低温、強磁場など

2. 物性測定法とその原理

粒子線回折、走査プローブ、熱測定、磁気測定、伝導度測定など

2.4 流体力学 I : 佐野 雅己

1. 連続体の力学

2. 様々の流れと流体運動の記述

3. 流体力学の基礎方程式

4. 完全流体の運動

5. 粘性流体の運動

6. 低レイノルズ数と高レイノルズ数の流れ

7. 流れの安定性、カオス

8. 乱流

2.5 統計力学 I : 宮下 精二

1. 熱力学 (復習として行う)

1.1 熱力学の基本概念

1.2 熱力学第一法則

1.3 熱力学第二法則

1.4 熱力学第三法則

1.5 熱力学関数

2. 統計力学の手法

2.1 小正準集団

2.2 正準集団

2.2 大正準集団

3. 量子統計力学

3.1 量子統計力学

3.2 黒体輻射

3.3 量子磁性体

3.4 理想フェルミ気体

3.5 理想ボース気体

3 3年生 冬学期

3.1 物理数学 III : 松尾 泰

1. 群論

1.1 物理学と対称性

1.2 基礎概念

1.3 指標とその直交性

1.4 点群

1.5 分子振動への応用

1.6 同一粒子の取り扱い

1.7 リー群とリー代数

1.8 回転群とスピノル

2. 微分形式

2.1 外積代数

2.2 微分形式とその基本的な性質

2.3 ベクトル解析との関係

2.4 電磁気学への応用

2.5 積分定理

3.2 量子力学 III : 大塚 孝治

1. 散乱問題

1.1 散乱断面積

1.2 ポテンシャルによる散乱

1.3 グリーン関数による散乱振幅の計算

1.4 ボルン近似

1.5 量子論での断面積と光学定理

1.6 ボルン近似の成り立つ場合

1.7 拡がりのあるポテンシャル源による散乱

1.8 量子論での断面積と光学定理

2. 部分波展開による散乱問題

2.1 部分波展開と位相のずれ

2.2 低いエネルギーでの散乱

2.3 部分波展開による断面積

2.4 共鳴散乱

2.5 クーロン散乱

3. 同種粒子系

3.1 同種粒子とは

3.2 多数の同種粒子から成る系

3.3 スレーター行列式とパウリの排他律

3.4 ボソンから成る系

3.5 フェルミオンの第2量子化

3.6 第2量子化による物理量の表現

3.7 2体演算子の第2量子化による表現

3.8 ハートリー・フォック法

3.9 原子の中の電子系の構造

3.3 固体物理学 I : 島野 亮

1. 固体の凝集機構

- 1.1 水素分子 (ハイトラー-ロンドン モデル)
- 1.2 ファン・デル・ワールス結合
- 1.3 金属結合
- 1.4 共有結合
- 1.5 イオン結合
- 1.6 水素結合

2. 結晶構造

- 2.1 単位格子
- 2.2 ブラベー格子
- 2.3 逆格子
- 2.4 X 線回折
- 2.5 ブリリュアン・ゾーン

3. 自由電子気体

- 3.1 状態密度
- 3.2 フェルミエネルギー
- 3.3 電子気体の比熱
- 3.4 静電遮蔽

4. 周期ポテンシャル中の電子

- 4.1 ブロッホの定理
- 4.2 ほとんど自由な電子の近似
- 4.3 空格子の近似

4.4 強束縛近似

4.5 フェルミ面

4.6 バンド構造と金属・絶縁体

5. 結晶中の電子の運動

- 5.1 結晶運動量
- 5.2 一様電場下での電子の運動-有効質量近似-
- 5.3 正孔
- 5.4 ブロッホ振動

6. 金属

- 6.1 電気伝導-ドルーデモデル-
- 6.2 ボルツマンの輸送方程式
- 6.3 ホール効果
- 6.4 磁場中における軌道の量子化

7. 半導体

- 7.1 電子と正孔の統計
- 7.2 不純物ドーピング
- 7.3 pn 接合

8. 固体の光学応答

- 8.1 ドルーデモデル、ローレンツモデル
- 8.2 フレンケル励起子
- 8.3 ワニエ-モット励起子

3.4 現代実験物理学 II : 横山 将志, 中澤知洋

1. 素粒子・原子核実験の方法論

2. 単位系とスケール

- 2.1 自然単位系
- 2.2 エネルギーと距離のスケール

3. 相対論的運動学

- 3.1 相対論的エネルギー・運動量
- 3.2 粒子の生成, 崩壊

4. 反応断面積と遷移確率

- 4.1 反応断面積
- 4.2 Fermi's golden rule
- 4.3 ラザフォード散乱
- 4.4 形状因子

5. 粒子加速器

- 5.1 静電加速器
- 5.2 線形加速器
- 5.3 サイクロトロン
- 5.4 シンクロトロン

6. 宇宙物理実験概要

6.1 宇宙物理実験学イントロダクション

6.2 現代の宇宙物理実験

7. 荷電粒子・光子の相互作用と検出器

- 7.1 粒子と光子の検出の基礎
- 7.2 荷電粒子と物質の相互作用
- 7.3 高エネルギー荷電粒子の検出器
- 7.4 光子と物質の相互作用
- 7.5 高エネルギー光子の検出器

8. 実験データの統計学

- 8.1 イントロダクション
- 8.2 実験データの扱いの基礎
- 8.3 重要な統計分布
- 8.4 統計モデルの応用
- 8.5 誤差の伝搬
- 8.6 パラメータ推定
- 8.7 モンテカルロ法
- 8.8 確率論と誤差の基礎的な考え方

3.5 電磁気学 III : 内田 慎一

1. 電磁波の放射

1.1 電磁・遅延ポテンシャル (Mawell 方程式の一般解、ローレンツゲージ)

1.2 双極子放射

2. 光学

2.1 電磁波の反射・屈折・回折 (Huygens の原理)

2.2 空洞共振器・導波路 (電磁波の制御・デバイス)

3. 荷電粒子の運動と電磁波

3.1 運動する荷電粒子がつくる電磁場

3.2 相対論的運動がつくる電磁波 (軌道放射・チェレンコフ放射)

3.6 生物物理学 : 樋口秀男、能瀬聡直

生物物理学は物理学的な観点や手法を用い、生命現象の基本原則を究明することを目指す研究領域であり、その対象は、蛋白質や核酸などの分子レベルから脳・神経系の機能などの高次の生命現象まで多岐にわたっている。本講義では、その基礎的な概念、手法を解説するとともに、最近のトピックスについても紹介する。以下のような内容を予定している。

1. 生物物理学とは

2. 遺伝情報の流れ

3. 蛋白質の構造と機能

4. 細胞内タンパク質のダイナミクス

5. 遺伝子操作技術

6. ゲノム科学とバイオインフォマティクス

7. バイオイメーjing、生体分子計測

8. 脳・神経系の生物物理

3.7 統計力学 II : 青木 秀夫

1. 相転移

1.1 秩序パラメータと対称性の破れ

1.2 二次相転移と Ginzburg-Landau 理論

1.3 相転移における臨界指数と空間次元

2. 同種粒子系の統計力学

2.1 有限温度における Fermi 気体

2.2 有限温度における Bose 気体

2.3 多体問題と平均場近似

2.4 Bose-Einstein 凝縮と超伝導

3. 非平衡統計力学への序論

3.1 輸送現象と Boltzmann 方程式

3.2 線形応答理論

4 4 年生 夏学期

4.1 場の量子論 I : 諸井 健夫

1. 相対論的量子力学

1.1 Klein-Gordon 方程式

1.2 Dirac 方程式

1.3 対称性と保存量 : Noether の定理

2. 場の量子化

2.1 Klein-Gordon 場の量子化

2.2 Dirac 場の量子化

2.3 電磁場の量子化

4.2 統計力学特論 : 常行 真司

1. 相転移と臨界現象

1.1 相と相図

- 1.2 相転移
- 1.3 臨界現象
- 1.4 スケール変換と繰り込み群
- 1.5 イジング模型とそれに関連した模型

2. 平均場理論

- 2.1 平均場理論、平均場近似
- 2.2 平均場理論の臨界指数
- 2.3 Landau 理論
- 2.4 三重臨界点のランダウ理論
- 2.5 無限レンジ模型
- 2.6 ベーテ (Bethe) 近似
- 2.7 相関関数
- 2.8 平均場理論の適用限界
- 2.9 動的臨界現象

3. くりこみ群とスケーリング

- 3.1 スケール変換と固定点
- 3.2 パラメータ空間と変換則
- 3.3 固定点付近の流れ
- 3.4 スケーリング則

- 3.5 相関関数のスケーリング則
- 3.6 スケーリング則によるデータ解析
- 3.7 有限サイズスケーリング
- 3.8 クロスオーバー
- 3.9 動的スケーリング則

4. くりこみ群の実際

- 4.1 1次元 Ising 模型
- 4.2 2次元三角格子のブロック・スピン変換
- 4.3 2次元での部分和
- 4.4 Migdal-Kadanoff 近似
- 4.5 ϕ^4 模型
- 4.6 ε 展開

5. Kosterlitz-Thouless 転移

- 5.1 Peierls の議論
- 5.2 XY 模型の下部臨界次元
- 5.3 Mermin-Wagner の定理
- 5.4 Kosterlitz-Thouless 転移
- 5.5 渦対のエネルギー
- 5.6 Villain 模型

4.3 サブアトムック物理学 :早野龍五

学部・大学院共通講義として新設されたこの講義は、原子核物理学と素粒子物理学の入門として位置づけられる。

1. 原子核の大局的性質

- 1.1 原子核の安定性
- 1.2 原子核による電子の散乱
- 1.3 原子核の形状
- 1.4 準弾性散乱

2. 核子の性質

- 2.1 核子による電子散乱
- 2.2 核子の深部非弾性散乱

3. 標準模型

- 3.1 クォーク, グルオンと強い相互作用
- 3.2 弱い相互作用の現象論

4. サブアトムック物理の研究手段

- 4.1 加速器
- 4.2 放射線と物質の相互作用
- 4.3 放射線検出器

4.4 宇宙物理学: 牧島 一夫

1. 宇宙を理解する基礎

- 1.1 多体系と自己重力系
- 1.2 電磁放射

2. 星とその物理学

- 2.1 自己重力系としての星
- 2.2 星の力学と熱力学
- 2.3 星内部の原子核反応
- 2.4 星の進化と終末

3. フェルミオンの縮退圧で支えられた星

- 3.1 電子縮退と白色わい星
- 3.2 核子縮退と中性子星

4. ビッグバン宇宙論

- 4.1 膨張宇宙の記述
- 4.2 宇宙論パラメータと暗黒エネルギー
- 4.3 宇宙の誕生と初期進化
- 4.4 宇宙初期の素粒子と、軽元素の合成
- 4.5 宇宙の「晴れ上がり」と天体形成

4.5 量子光学：五神 真

1. 光と物質

- 1.1 誘電媒質中の電磁波
- 1.2 2 準位原子と光の相互作用
- 1.3 非線形光学とレーザー

2. 光の量子論

- 2.1 輻射場の量子性
- 2.2 輻射場の量子状態とその観測
- 2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

5 4年生 冬学期

5.1 現代物理学入門：高木 英典，吉田 直紀

1.

- 1.1 電子相関
- 1.2 金属-絶縁体転移
- 1.3 フェルミ液体論
- 1.4 量子臨界点と非フェルミ液体の出現
- 1.5 電荷秩序と軌道秩序
- 1.6 超伝導
- 1.7 銅酸化物の高温超伝導

1.8 鉄系高温超伝導体

1.9 興味あるエキゾチック超伝導体

2. 天体形成論

- 2.1 標準宇宙モデル
- 2.2 膨張宇宙と銀河形成、進化
- 2.3 ダークマターの性質
- 2.4 ダークエネルギーと宇宙の加速度的膨張
- 2.5 星の進化とブラックホール形成
- 2.6 将来の観測計画

5.2 素粒子物理学 I：浅井祥仁

1. 単位系、概論

2. クォークモデル

3. Dirac 方程式：反物質、スピン

4. 反応の運動学

5. 不連続対称性

6. 連続対称性

7. ゲージ原理

8. 電磁相互作用

9. 弱い相互作用

10. 隠れた対称性とヒッグス機構

5.3 生物物理学特論：豊島近、新井宗仁、樋口秀男

1. 蛋白質の生物物理学

- 1.1 生体内のタンパク質機能とは。
- 1.2 蛋白質や生体膜とはどのようなものか。そこで働いている原理は何か。
- 1.3 蛋白質はイオンをどのように見分け、使い分けるか
- 1.4 蛋白質はどのようにして反応を触媒するかー酵素反応の構造生物学
- 1.5 蛋白質はエネルギーをどのように変換し、利用するか
- 1.6 蛋白質はどのようにして立体構造を形成する

のか

- 1.7 蛋白質の構造と機能を予測する
- 1.8 蛋白質のダイナミクスと機能発現
- 1.9 蛋白質と病気の関わり
- 1.10 蛋白質の進化とデザイン
- 1.11 蛋白質 1 分子の機能をいかに測定し、理解するか。
- 1.12 細胞内蛋白質機能をイメージングしてわかること。
- 1.13 個体内蛋白質の役割の多様性

5.4 固体物理学 II : 岡本 徹

1. 格子振動

1.1 フォノン

1.2 デバイ模型

1.3 比熱と諸物性

2. 金属および半導体における輸送現象

2.1 電気伝導

2.2 半導体中の電子と正孔

2.3 熱電効果と熱伝導

2.4 半導体デバイス

3. 低次元電子系の量子現象

3.1 量子ホール効果

3.2 メゾスコピック伝導

4. 磁性

4.1 反磁性と常磁性

4.2 スピン間相互作用

4.3 磁気秩序

4.4 磁気デバイス

5. 超伝導と超流動

5.1 マイスナー効果

5.2 BCS理論

5.3 ジョセフソン効果

5.4 超流動

5.5 原子核物理学 : 櫻井博儀

1. 原子核の大きさと密度

2. 原子核の質量と遷移

3. フェルミガスと平均ポテンシャル

4. 調和振動子模型と魔法数

5. 殻模型と集団運動

6. 核力の基礎とアイソスピン対称性

7. 放射線

5.6 電子回路論 : 坪野 公夫

1. 線型応答系

1.1 フーリエ変換

1.2 ラプラス変換

1.3 出力の積分表示

1.4 伝達関数

1.5 線型系と因果律

2. 信号と雑音の処理

2.1 パワースペクトル

2.2 自己相関関数

2.3 最適フィルター

2.4 積算平均効果

3. MATLAB 入門

3.1 コマンド入力の基本

3.2 行列の作り方

3.3 演算

3.4 グラフィックス

4. デジタル信号処理

4.1 有限時間データであるための効果

4.2 離散時間データである効果

4.3 デジタル信号のパワースペクトル

4.4 z 変換

4.5 デジタルフィルター

5. 回路の安定性

5.1 ナイキストの安定条件

5.2 ボード線図とナイキスト線図による安定性判別法

5.3 フィードバック系の特性

5.4 フィードバック系の補償

6. 低雑音回路

6.1 増幅器の雑音

6.2 A/D 変換の基礎

6.3 周波数安定性ーアラン分散

5.7 化学物理学 : 山本 智

1. 原子の電子構造とスペクトル

1.1 水素原子と水素様原子

1.2 多電子系 1 : ヘリウム原子

1.3 多電子系 2 : ハートリー・フォック法による取

扱い

1.4 組立の原理

1.5 スピン軌道相互作用、LS 結合、jj 結合

1.6 原子スペクトル

2. 分子の対称性と群論

2.1 点群の分類

2.2 対称操作の行列表現

2.3 既約表現と可約表現

2.4 指標表による表現の簡約

2.5 直積の表現

2.6 群論の応用例

3. 分子の電子構造

3.1 核と電子の運動の分離

3.2 原子価結合法と分子軌道法

3.3 二原子分子の電子状態

3.4 非経験的分子軌道法計算

3.5 配置間相互作用

3.6 近似的分子軌道法

3.7 分子軌道と化学反応

4. 分子スペクトルの概要

4.1 回転スペクトル

4.2 振動スペクトル

4.3 電子スペクトル

4.4 光解離、前期解離、光イオン化

5. 分子間相互作用

5.1 配光力、誘起力

5.2 分散力

5.3 分子間力の現れ

5.3 ファン・デル・ワールス分子とクラスター

5.4 分子間力と化学反応

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 B ファクトリーを使った実験やそのアップグレード、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 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。

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

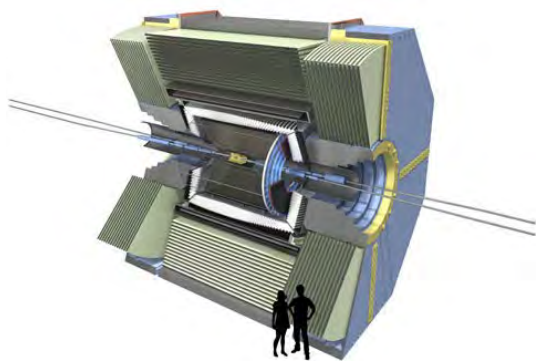


図 1. Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図。

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計画している。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。

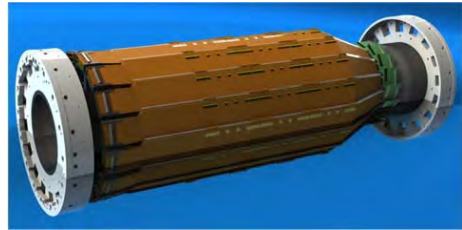


図 2. 当研究室で製作する、Belle II 測定装置心臓部の半導体粒子検出器の完成予想図。



図 3. 半導体粒子検出器の試作の様子。微細な配線をワイヤボンディングでつなぐ。

2 ニュートリノビームを使った物理

B ファクトリーの実験では、素粒子クォークの研究を行ってきたが、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 でニュートリノのビームを作り、これを約 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、ニュートリノが神岡まで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。これによって、素粒子のより根源的な性質が明らかになる。T2K 実験と呼ばれるこの実験で、

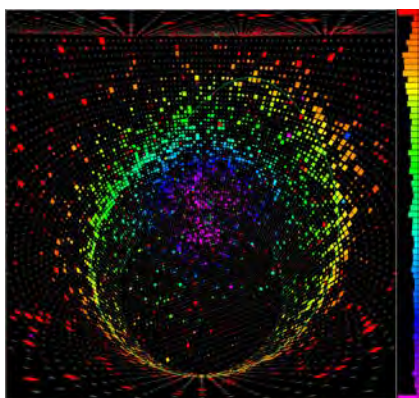


図4. スーパーカミオカンデ検出器でとらえた、加速器ニュートリノビームによるニュートリノ反応事象。ニュートリノ反応によって生成された粒子が放つチェレンコフ光がリング状に見えている。ミューオンニュートリノがニュートリノ振動によって変化した電子ニュートリノによる反応事象の候補。

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の兆候を得た。今後、さらに確実な証拠を得るために実験を推進していく。

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。ニュートリノでCP対称性が破れていることを確かめるためには、現行の実験よりもさらに高統計・高精度の実験を行う必要がある。当研究室では、このような次世代の実験のための装置として、現行のスーパーカミオカンデの約20倍の大きさを持つニュートリノ検出器、「ハイパーカミオカンデ」検出器の実現のための研究を進めている。ハイパーカミオカンデ検出器は、ニュートリノのCP非対称性測定に加え、素粒子の大統一理論で预言されている陽子崩壊の探索や、超新星からのニュートリノ検出などを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

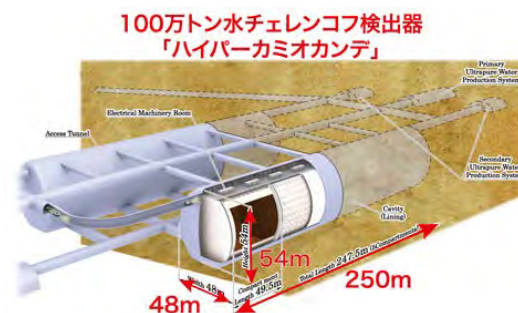


図5. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。縦横約50m、長さ約250mのタンク2つに計100万トンの超純水を満たす。

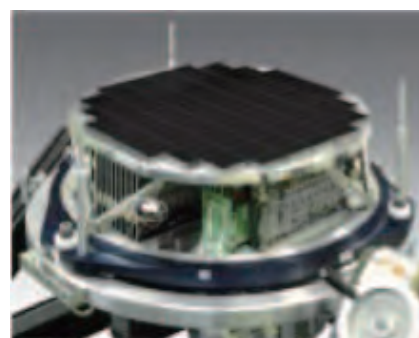


図6. 完成した928メガピクセルCCDカメラとフロントエンドエレクトロニクス。現在はすばる望遠鏡に取付けられている。今後ダークエネルギーの研究のための観測を行う。

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索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。素粒子物理と宇宙論と呼ばれる宇宙の進化を研究する分野との関わりはますます深くなってきた。今後、この学際的分野をおおいに発展させていきたい。

1. 物性物理学理論、特に多体効果とは？

Powers of Ten という本を見たことがあるだろうか。超銀河団から始まり、十倍ずつ拡大して見てゆき、クォークに至る、という本であるが、その中心をなす十数ページを舞台としているのが物性物理学である。そこでは巨視的な系の性質を微視的な基本原理から理解したり、新奇な現象を予言したりする。主役は電子であり、電子がクーロン斥力のために強く相互作用しているために発生するとんでもなく面白い現象（**電子相関効果**）が1980年代から続々と発見された — 高温超伝導、分数量子ホール効果が代表である。

2. 超伝導の電子機構

「ゲージ対称性」が破れた巨視的量子現象である超伝導（2008年ノーベル賞の南部理論も、超伝導における対称性の自発的破れに導かれた）は20世紀初頭に発見され、普通は、結晶格子の振動の量子に媒介された電子間引力から発生する。ところが高温超伝導体では、電子間斥力から超伝導が発生する。青木研究室では、この**電子機構超伝導**の基礎理論から始まり、発生する温度を高める（究極的には室温超伝導！）にはどうしたら良いか、といった予言まで試みている。2008年には鉄の化合物である新高温超伝導体（図1）、2010年には芳香族としては初めての有機超伝導が共に日本で発見されたが、青木研究室ではこれらの超伝導に対する世界に先駆けた理論を構築した。

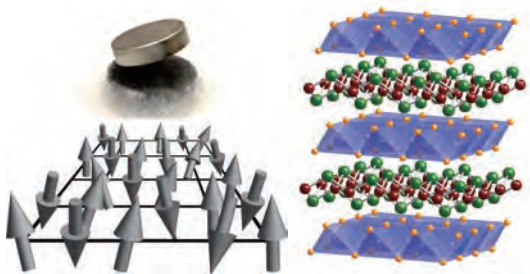


図1. 左：高温超伝導体が「ゲージ対称性の破れ」のために磁気浮上している様子と、高温超伝導体の理論的模型、矢印は電子スピン。右：最近我国で発見された鉄化合物高温超伝導体の結晶構造。

3. 量子ホール効果

量子ホール効果は、2次元空間を走る電子に強磁場をかけた系で起き、ホール伝導度が e^2/h (e は素電荷、 h はプランク定数) という量の整数倍に量子化される（1985年ノーベル賞）。その後、さらに奇妙な分数量子ホール効果が発見され、超伝導・超流動とは別のゲージ対称性破れが起きている（1998年ノーベル賞）。さらに最近では、**グラフェン**（炭素原子一層からなる蜂の巣格子）で奇妙な量子ホール効果が発見され、2010年のノーベル賞が授与された。青木研究室では、量子ホール効果の初期からグラフェンまで主要テーマの一つとしている。

3. 物質設計・非平衡

「面白い物質で面白い物理現象」ということを開拓するための**物質設計**も目指している。超伝導や強磁性も含め、基礎理論と現実物質（無機および有機）という両輪からの設計を深めている。さらに、最近では、様々な系における新奇な**非平衡現象**（図2）も調べている。詳しいことに興味がある諸君は、別冊数理科学「場の理論」、別冊数理科学「現代物理の展開—発見と創造のドラマ」（以上サイエンス社）、「ボース・アインシュタイン凝縮から高温超伝導へ」（日本評論社）、「超伝導入門」（裳華房）などを参照。

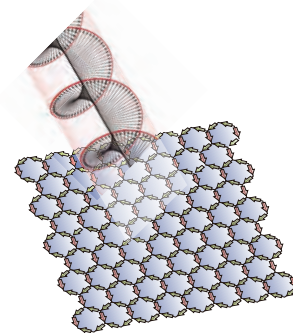


図2. 非平衡効果の一つとして、グラフェン（炭素の蜂の巣格子）に円偏光した強いレーザーを照射すると、直流のホール電流が予言される。

安東研究室

安東 正樹 准教授 麻生 洋一 助教

わたしたちの研究室では「相対論実験」とよばれる分野を研究しています。中でも特に、「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、重力波とその観測技術に関する研究を精力的に推し進めています。

1. 重力波による新しい天文学・物理学

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

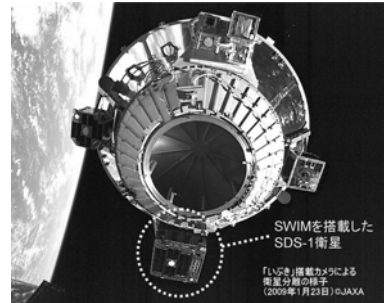
物理学や天文学の大きな目標の1つは、宇宙のはじまり・進化と未来、そして、私たちの宇宙を支配する究極の法則を理解することであろう。重力波は、新しい宇宙の姿を私たちにもたらし、それらに直接迫る手段となる可能性をもっているのである。

2. 重力波天文学の幕あけ

重力波の存在は、一般相対性理論の帰結の1つとして、1916年にアインシュタインによって予言された。また、連星パルサー (PSR1913+16) の公転周期減少を観測することにより、重力波の存在は間接的には証明されている（1993年ノーベル物理学賞 ハルスとテイラー）。しかし、重力波の効果は非常に微弱であり、これまでに重力波の直接



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。

検出に成功した例はない。

現在世界各地では、新しい「重力波天文学」を目指して、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2017年頃には、重力波の直接検出が実現され、「重力波天文学」が幕を開けることが期待されている。

3. 重力波研究のひろがり

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

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

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

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

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。

2 最近の研究テーマ

(A) ヒッグス粒子の発見： 世界最高エネルギー LHC での素粒子研究;

2012 年 7 月についてヒッグス粒子が発見された。この研究に東京大学素粒子物理国際研究センターと当研究室はこの重要な成果をあげてきている。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。これからヒッグス粒子や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）を用いた高精度の量子電磁気学の検証、新しい光を



LHC 加速器の写真

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

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



Spring8 と SACLA: 世界最強強度 X 線実験装置

3 今後の展開

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

1 研究の背景

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個の単位で精密に制御・観測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、ナノ・スケールの熱力学、統計力学の基本原理解明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原子気体は、原子間相互作用の強さを含むほとんどすべての物質パラメータを自在に変化させることができる究極の人工量子物質であり、様々な物理現象に共通する普遍的な法則の探究が可能である。例えば、極低温で実現される巨視的量子現象であるボース・アインシュタイン凝縮のダイナミクスには、超新星爆発や宇宙初期の相転移とも類似した現象が現れる。また、原子気体の時間発展を正確に追うことで、孤立系がいかに熱平衡状態に至るかという統計力学の基礎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、多様な物理現象の基礎的理解の進展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）におけるフェルミ超流動体の性質の解明に取り組んでいる。ユニタリティ極限では、原子の種類などの詳細によらない普遍的な性質を示すようになると予想されている。この問題は、高温超伝導のメカニズムや原子核物理の問題とも深い関連がある。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。

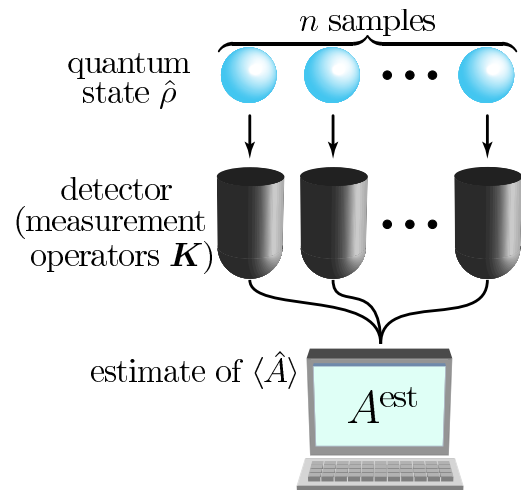
【量子論および統計力学と情報理論の融合】

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付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研究分野の構築を目指している。最近私たちは、量子論の基礎に深く関係するハイゼンベルグの不確

定性関係について、誤差や擾乱の情報論的定式化(右図参照)に基づく研究を行った。その結果、これまで予想されていた交換関係による不確定性の積の下限は達成されず、より厳しい下限が存在する事を示し、その下限を達成する測定方法を具体的に構築することに成功した。また、測定過程における波束の収縮のダイナミクスとそれに伴う情報量の変化を記述する理論的手法の構築、量子もつれを用いた量子フィードバック制御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重力波検出などの超精密測定が必要となる分野への応用につながると期待される。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付けに取り組んでいる。

3 今後の展開

物理・情報(認識)・数学を広い観点から捉え、分野の枠にとらわれずにファンダメンタルな物理につながると私たちが信じるテーマを探索する。



量子測定による量子状態についての情報の抽出過程。量子測定の誤差を定量化するためには、測定結果からどのような情報がどれだけ得られるかが重要となる。その情報量は量子状態の推定の精度によって与えられる。推定の精度が高ければ、測定によって得られる情報量が多く、測定誤差は小さい。一方、推定の精度が低ければ、得られる情報量は少なく誤差は大きい。Physical Review A **84**, 042121 (2011) より転載。

大塚研究室

大塚孝治 教授 阿部喬 助教

1 研究の背景

原子の中心には原子核がある。原子核の半径は原子の半径の約 10 万分の 1 で、ミクロな原子よりさらに小さく、原子核は超ミクロな世界となる。原子核の中には物質＝エネルギーがびっしりと詰まっている。原子核は陽子と中性子で構成され、陽子と中性子は総称して「核子」と呼ばれる。核子同士は「核力」と呼ばれる「強い相互作用」によって結合し原子核は量子論的な塊になっている。原子核の中では陽子や中性子がいろいろな軌道の上を動いている。核子は核力のために互いに引っばったり反発したりして、そのため核子は絶えず軌道を変えているが、全体としてはまとまっているちょっと不思議な世界である。このように複数の核子から構成される量子多体システムである原子核の構造、それが引き起こす反応を理論的に研究しているのが我々の研究室である。さらには、核力そのものも、完全には分かっていないので研究の対象である。

2 最近の研究テーマ

地球上に自然にある物質を構成している原子核は安定核と呼ばれ、陽子と中性子の数が大体等しくなっている。陽子と中性子が強い引力で一体となって多体系を構成しているので、安定しており、寿命が無限か非常に長い。

宇宙には陽子と中性子がひどくずれている不安定核というものが存在し、それが、超新星爆発など物質誕生プロセスの謎を解き明かす鍵になっている。不安定核はその名に違わず存在時間が非常に短く、また、陽子数と中性子数のアンバランスに起因する安定核には見られない特異な性質を数多く持っている。その不安定核が持つ性質を解明し、その存在限界をさぐるのが最近の大きな研究テーマである。それには様々な理論手法が用いられる。我々のグループにより、約 20 年前に「モンテカルロ殻模型」という計算手法が提案され、それまでは巨大な計算機を用いても実行不可能とされてきた理論計算が可能になった。モンテカルロ殻模型に基づくシミュレーションにより、ある与えられた陽子数と中性子数の原子核が球形や楕円形になったりすることを示すことができる。その例が下の図に示されており、ネオン 28 という不安

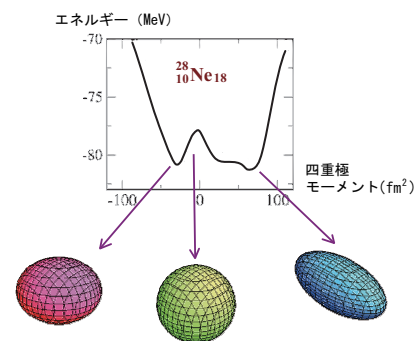
定原子核がそのエネルギーによって球になったり、楕円になったりするの分かる。

1949 年にメイヤーとイェンゼンが原子核の殻モデルを発表して、「魔法数」について説明した。魔法数とは、陽子や中性子の個数が魔法数 (2,8,20,50 などが安定核の魔法数) になった時に原子核が特別な安定性を得るものである。一方、核力の特徴的な成分であるテンソル力などのために、不安定核の「魔法数」は安定核のものから変わり得る事を我々の研究室で発見した。そのために、上で示した 20 が魔法数でなくなり、16 が取って代わることがある、などを世界で初めて示してきた。

原子核に中性子を加えていくと、それ以上には加えられない限界に達する。この存在限界の解明は原子核物理学の基本課題の一つである。最近、この課題に、3 体力が極めて重要で明瞭な役割を果たしていることを発見した。通常、力は 2 個の間に働くものであり、3 個の間に働く力は珍しく、それが決定的な役割を果たしていることは予想されていなかった。その顕著な例として、酸素原子核の存在範囲が異常に狭いのは何故か、という長年の謎を解決した。

3 今後の展開

不安定核の物理は始まったばかりで、新しい現象やデータが出つつある。様々な理論手法を用い、或いは創りだして、それらを予言したり、解析したりしながら、原子核の真の姿を探り、核力の隠された性質を研究している。



図の説明： 陽子 10 個、中性子 18 個からなる不安定核、ネオン 28 の形状の理論的予言。3 種類の形が比較的低いエネルギーで出現する。

小形研究室

小形正男教授 松浦弘泰助教

小形研究室では、物性物理学に関する理論的研究を行っている。

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

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

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

研究室としては、毎週のセミナーがある以外には各自ほとんど勝手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、強相関または強い超伝導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) 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た。科研費のホームページは<http://www.kookai.pc.uec.ac.jp/dirac/>

(3) 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る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可能であり、これについても研究している。

(4) 新しい超伝導体

日本で作られた鉄を含む新しい超伝導体や、水和 Na_xCoO_2 という物質は、高温超伝導体と似た構造をしているが、新しいタイプの超伝導である可能性がある。これらの物質における超伝導発現のメカニズムを、従来の考え方と異なる新しい観点から理論的に探求している。

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

岡本研究室

岡本 徹 准教授 榎富 龍一 助教

1. はじめに

分子、原子、電子、原子核などのミクロな粒子の性質がわかっているにもかかわらず、その集合状態の諸性質を解明することは容易ではありません。「物性物理学」が対象とするのは、こうしたマクロな物質中に見られる諸現象であり、磁性や超伝導などがなじみ深いと思います。私たちの研究室では、半導体に作られた「2次元電子」の集団的振る舞いを研究しています。

2. へき開表面に作られた2次元電子系

これまで、2つのノーベル物理学賞が2次元電子における発見に対して与えられています。いずれも半導体デバイスの中に閉じ込められた界面2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2次元電子系の研究を始めました。界面の2次元系とは対照的に、「表面2次元電子系」には(1)さまざまな種類の原子の乗せることで“いじれる”、(2)マイクロプローブで直接“触れる”、といった楽しみがあります。

右図に表面2次元系で初めて観測された量子ホール効果の実験例を示します。InAs へき開表面に微量の銀を蒸着することによって2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、2次元系だけで見られる現象です。

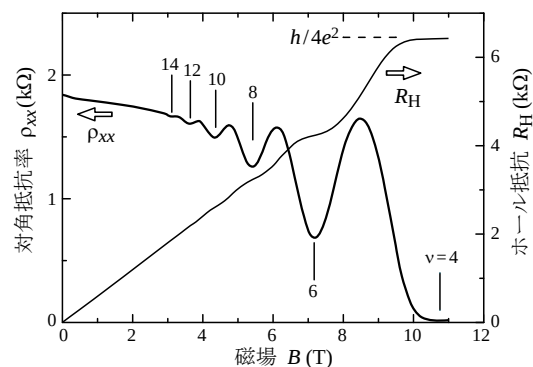
最近では、絶縁体基板のへき開面上に原子一個分程度の厚さの金属薄膜を作り、超伝導・磁性などの研究も行っています。

3. 避けあう電子とスピン

2次元に閉じこめられた電子の間には、クーロン反発力が働いています。電子間クーロンエネルギーは、電子が三角格子状に規則正しく並んだときに最も低くなりますが、量子力学的な波としての性質が強いために問題は単純ではありません。自由に動ける電子気体と三角格子を組んだ固体との中間に相当する液体状態を考える必要があります。ハミルトニアンは簡単にかけられるのですが、多体系の固有状態を理論的に求めることは簡単ではなく、実験屋の出番になります。こうした電子間の相互作用が強い系においては、量子統計を通じて電子のスピンが顔を出してきます。

私たちの研究室では、超伝導コイルを用いた強磁場装置を用いて電子状態やスピンを制御し、極低温下における2次元世界の電子の性質を調べています。具体的には、(1)液体⇄固体の間の相転移と両相におけるスピン状態、(2)分数量子ホール効果、(3)イジング量子ホール強磁性体間の相転移、などに関連した研究を行っています。

詳細およびその他の研究テーマについては
<http://dolphin.phys.s.u-tokyo.ac.jp> をご覧ください。



InAs 劈開表面で観測された量子ホール効果

五神研究室

五神真教授 吉岡孝高助教

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完成し、光は電磁波であることが見いだされ、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、光の物理学は一旦完成した。しかし、1960年のレーザーの発明により齎された全く異なる光—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。可視光の周波数は $10^{14} \sim 10^{15}$ ヘルツで、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、光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、レーザー光を波として完全に制御可能となった。この革新により、アト秒(10^{-18} 秒)というとても短い短パルス光を発生する技術が生まれつつある。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”を、リアルタイムに追跡可能とする。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の検証や一般相対論の効果の検証など物理学の土台を精密に検証するツールとなる。

五神研究室では、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。現在、理化学研究所の協力を得て本郷キャンパスに新しいコヒーレント光源施設“フォトンリング施設”の整備を進めている。この施設は、テラヘルツ領域から軟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ものである。この光源を用いると、アト秒スケールの超高速現象や、強い光子場での量子現象など、まだ人類が見たことのない世界を見ることが出来る。これらは、物理学の新しい境地を開くとともに、医療・バイオあるいはエネルギーなど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。

2 光で創る巨視的量子現象

五神研究室のもう一つの研究課題は、光を用いて物質を極低温な状態とし、そこに生じる巨視的な量子現象を探索することである。可視光の光子は温度に換算すると数万度という高いエネルギーを持つが、一方で、レーザーから出てくる光子集

団は非常にエントロピーが小さい。従って、光を巧みに制御して物質に照射すると、瞬時に極低温にすることができる。この手法を用いて、真空中に捕獲された原子気体、半導体中で光により励起され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、ボース・アインシュタイン凝縮をはじめとする量子力学的な相転移などをクローズアップし、量子論の本質に迫ることを目指している。高い安定性を有するレーザー光源と物質系の挙動を完全に理解するための最先端の分光技術開発を精力的に進めている。現在100mKという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、リチウム同位体原子を用いたフェルミ粒子系の巨視的な量子凝縮相の探索などを進めている。このような巨視的な量子系が放射する光の量子統計性も重要な課題であり、このための量子光学的計測手法の開発も進めている。

3 時空間の対称性制御による新しい量子光学

半導体超LSI作製に用いる最新の微細加工技術を駆使すると、光の波長より遙かに小さいナノスケールの人工構造を作ることができる。このようなナノスケール構造をうまく設計すると、自然界とは全く異なる光学特性を示す“人工材料”を作ることが出来る。“透明マント”の実現も夢ではない。五神研究室では、最先端の微細加工技術、3次元電磁波解析といった最新の支援ツールを駆使して、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“人工キラル構造”、金属ワイヤをロスなく伝わる光波、三角格子によるフォトン角運動量変換などの研究を進めている。

参考

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

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 が稼働し、2012 年 7 月には、ヒッグス粒子と見られる新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（チャームクォーク）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 での実験でこれらの詳細研究を行なう。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

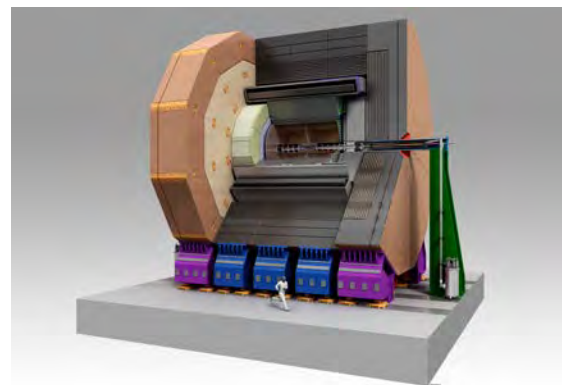
大学院生や若い研究者が大型国際実験の舞台にデビューするには、物理や測定器の基礎的な知識を十分に身に付け実験全体を見渡せる広い視野をもつことが必要である。このため、本質的な物理に迫る中小実験や測定器の開発を行なうことによって基礎的なトレーニングを行なっている。人の歩く速度くらいの超低エネルギー中性子（超冷中性子）を高さ $100\mu\text{m}$ のスリットに通すと、地球の重力で量子力学的束縛状態となり鉛直方向に約 $10\mu\text{m}$ 間隔で疎密の縞ができる、この中性子の位置を μm 以下の精度で測定する為、CCD の表面に ^{10}B を中性子 $\rightarrow$ 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、昨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て、 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^- を向かい合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精密に測る機器（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 37 nm のビームサイズ測定を目指している。これにはハードウェアが好きな大学院生が中心となって KEK と協力して研究している。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、この測定器のエキスパートであるイギリス人のポスドクを中心として、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 准教授 峰本 紳一郎 助教

1. はじめに

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

2. 研究テーマ

相互に関連する以下のテーマを中心に研究を進めている。

(1) 回転量子状態を選別した分子の配向制御

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

(2) 全光学的分子配向制御技術の高度化

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

(3) 分子内電子の立体ダイナミクスの研究

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

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

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

3. 研究活動

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

4. メッセージ

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

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

●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・スキンの発見など）が軽い核の領域で見出されつつある。これらの成果は「魔法数」や「飽和性」といった核構造、核物質の従来の基本概念を揺るがしており、不安定核は原子核物理学の新しい展開をもたらす研究対象である。

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

以上の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た大きな発展を期待できる分野である。

2 最近の研究テーマ

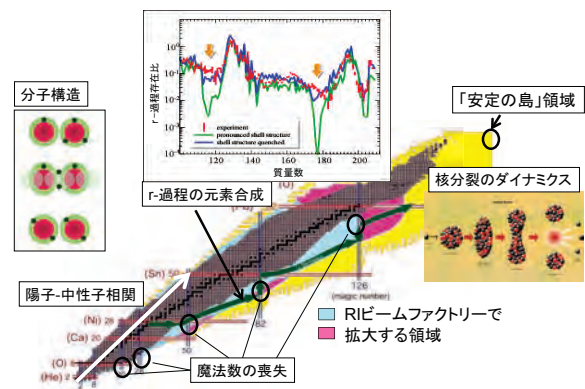
不安定核は重イオン加速器で加速された重イオンビームを標的核に衝突させ、「破碎・分裂」させることによって生成する。この破碎・分裂片は重イオンビームとほぼ同じ速度で飛行し、ビーム（不安定核ビーム）として得ることができる。我々は現在、理化学研究所・RIビームファクトリー（RIBF）で得られる不安定核ビームを用いて実験を行っている。RIBFで供給される不安定核ビームの生成領域、収量はともに世界一であり、この強力なビームを最大限活用した新しい実験手法をゲリラ的に開発・展開し、不安定核の新しい現象・性質を実

験的に見出すことが当研究室の信条である。

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

3 今後の展開

核構造研究に加え、核反応研究を新しい軸として研究展開し、前人未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。

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、系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、系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。

2 非線形動力学・自己組織化

系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なることが普遍法則に従うことが明らかとなりつつある。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

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、細胞運動のメカニズムや、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。



島野研究室

島野 亮 准教授 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、レーザー分光法を中心とする最先端光技術を駆使して、様々な物質系を対象に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。特に、光で物質中に巨視的な量子状態をつくりだす、あるいは自在に制御することを目標として研究を進めている。最近のトピックスは以下のとおり。

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’が生成される。正孔も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と同様の状態（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していくと、ある程度の密度になったところで構成粒子である電子と正孔に解離してしまう。この状態では、電子と正孔は電荷を持った自由な粒子として動き、系全体は金属になる。高密度の電子と正孔を十分低温にすると、今度は電子と正孔がまた対をつくりそれが凝縮することも理論的に予測されている。超伝導では電子同志が対（クーパー対）になるが、今の場合には電子と正孔の対凝縮である。量子効果により生じるこれら未知の物質相の実現と、その性質の解明を目指して研究を進めている。

2) 光による超伝導体の相制御

超伝導体に光を照射すると、通常は試料の温度が上がり超伝導は壊れてしまう。ところが、超伝導を担うクーパー対を壊すのに必要な最低のエネルギー程度の波長の光を瞬時に照射すると、超伝導のマクロ波動関数の振幅を振動させることができる。この振動は、素粒子のヒッグスボソンとのア

ナロジーからヒッグスモードと呼ばれている。ヒッグスモードを観測しその性質を調べることにより、光により超伝導体を超高速でコヒーレントに制御する研究を進めている。

3) 非摂動論領域での光と物質の相互作用現象

非常に強い光電場のもとでは光と物質の相互作用を摂動論では扱えなくなり、光照射によって電子状態が劇的に変化すると考えられている。ところが実際には、非常に強い光を照射すると固体の温度は上昇し最後は破壊されてしまうため、このような領域の研究は困難であった。しかし、最近になって、光パルスの制御技術が格段に進歩し、前述の超伝導の光制御の例のように光パルスを巧みに用いると、物質を破壊せずに非平衡な状態を実現することが可能になってきた。我々は、高強度のテラヘルツ波パルスなどの光源開発と物性研究両面から、新物質相の探求と新規光学現象の解明を進めている。

4) 強相関電子系の光応答

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。電荷とスピンの結合していると、電場によるスピンの励起や磁場による電気分極の誘起といった、通常習う電磁気学では無視されている効果が巨大化する場合がある。当研究室では、光やテラヘルツ波を用いてこの強相関電子系の性質を調べている。さらに、光をうまく物質に照射して、電荷、スピン、格子間の相互作用のバランスを崩すことで、背後に隠れた物質相を解き明かす研究を進めている。

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/toppage_j.htm をご参照ください。

宇宙理論研究室

須藤 靖 教授 樽家 篤史 助教
吉田 直紀 教授 細川 隆史 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連携機構はもちろん、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。

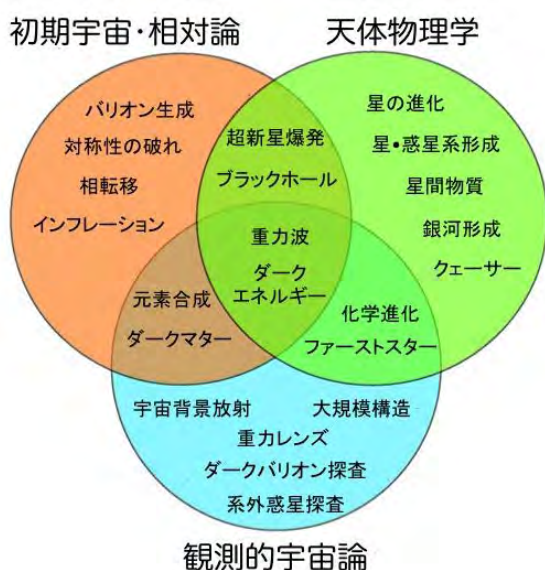


図1: 宇宙物理学全体概念図。この中で我々の研究室では現在、ダークマター、ダークエネルギー、ダークバリオン、宇宙背景放射、大規模構造、重力レンズ、系外惑星などを中心に研究している。

1 最近の主な研究テーマ

1.1 観測的宇宙論

1916年のアインシュタインによる一般相対論の構築によって始まった自然科学としての宇宙論は、

ハッブルによる宇宙膨張の発見(1929年)、ガモフによるビッグバン理論の提案(1946年)、宇宙マイクロ波背景放射の発見(1965年)を通じて、理論と観測の双方からの進展を受け現在の標準宇宙論に至る。宇宙の加速度的膨張が発見されたのはつい最近のことである。多くの観測データを組み合わせることで、宇宙の全エネルギー密度の7割がダークエネルギー、2割5分がダークマター、そして残りの約5パーセントが通常の元素、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。この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 数値宇宙論

スーパーコンピューターシミュレーションを用いた「数値宇宙論」によって、宇宙が開闢以来どのように進化し、その中で多様な天体がどのように生まれてきたのかを解明する研究も進めている。

例えば最近では、数値シミュレーションを用いて、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を明らかにした。さらに、宇宙の大規模構造による重力レンズ現象を研究するため、新しい統計解析の手法を導入し、次世代の広視野宇宙探査によってダークエネルギーの性質を正確に定める方法を開発した。また、スローンデジタルスカイサーベイという国際共同プロジェクトの観測結果とコンピュータシミュレーションを組み合わせ、銀河に付随するダークマターの分布を明ら

かにした。

コンピュータの性能向上の速度は著しく、数年前には不可能であった計算が次々と実行可能になり、天体形成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。荒唐無稽にも聞かぬこの疑問に対して、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2000個以上の惑星候補が検出されている。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の発見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。

この問いに対して、我々の研究室では、ロス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いった系外惑星の”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

2013年からは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-PrimeCamサーベイが始まる。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、その時間進化から今度は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、今後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。また、同サーベイ観測によって最遠方の超新星爆発を捉えようと準備を進めている。宇宙初期に生まれたのはどのような星だったのか、超新星爆発の観測から直接証拠をつかめる

かもしれない。

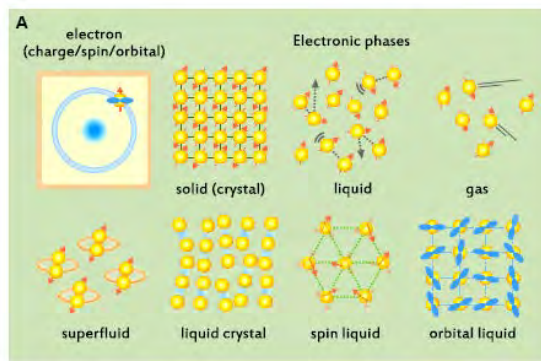
一方で、既存の枠にとらわれない独創的なテーマの開拓をも目指しており、宇宙マイクロ波背景放射の偏光観測による背景重力波の検出や、重力波観測を用いた重力理論の検証など、次世代宇宙論を担う新たな研究テーマにも取り組んでいる。

また、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。

高木・谷口研究室

高木英典教授 谷口耕治講師

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。遷移金属酸化物中の伝導や磁性を支配するのは遷移金属元素の d 軌道を占めていた電子である。d 軌道の空間広がりが小さいが故、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独立に振る舞うがゆえに、電荷液晶状態、スピン液体状態と言った多彩な状態が出現する。高温超伝導現象も相関電子が示す多彩な顔の一つであり、電子相の融解や相競合が、超伝導発現の本質であるとされている。以下に具体的なプロジェクトの例を挙げる。

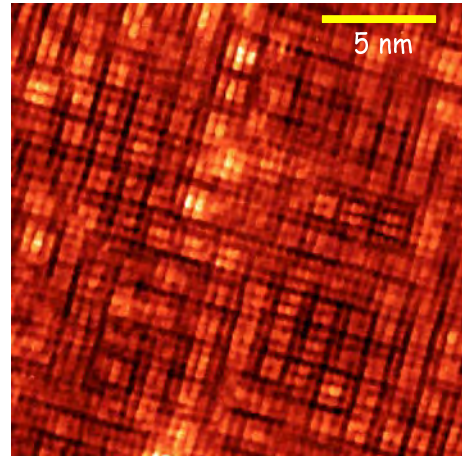


相関電子が形成する様々な電子相

(1) 超伝導機構の解明と開拓

新奇な超伝導体の開拓と高温超伝導機構解明の研究を推進している。これまで銅酸化物超伝導において、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、当研究室は貢献してきた。ここから超伝導機構に切り込むべく、新しいアプローチを模索している。これらの研究と並行して面白い超伝導体の設計と探索に尽力している。ここ 1, 2 年だけでも (Ru,Rh)P の擬ギャップ臨界点での超伝導の発見、スピン軌道相互作用の効果でパウリ極限を破る高い臨界磁場を誇る Ta_2PdS_3 、半金属ながら強結合超伝導を示す SrPt_3P などを

発見した。



擬ギャップ相で発見された電子結晶（STM 像）
（原子（輝点）と異なる周期で電子が結晶化）

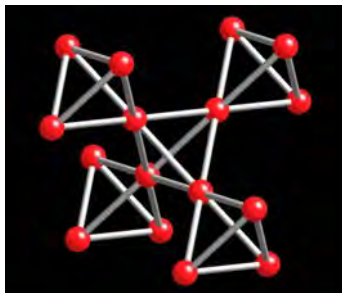
(2) 量子スピン液体の探索

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反強磁性的にすることができない。この効果は幾何学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とが知られている。この効果と量子効果の協奏により、ある種の三角系を基本とする格子上では絶対零度でも長距離の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。量子スピン液体を現実の物質実現することは、磁性物理学の長年の夢であった。当研究室は、広範な物質探索の中で、ハイパーカゴメ構造を有するイリジウム酸化物 $\text{Na}_4\text{Ir}_3\text{O}_8$ に着目した。この物質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、と結論した。この物質は有機物三角格子磁性体とともに、最も確からしい量子スピン液体での一つであるとされ、期待されるスピNFL フェルミ面、隠れたカイラル秩序の存在の検証を目指して、理論的実験的研究が現在世界的規模で盛んに進められている。

最近では Kitaev 型スピン液体と呼ばれる新しいタイプのスピン液体の探索も進んでいる。

(3) 幾何学的フラストレーション格子上の電荷液体

LiV_2O_4 スピネル酸化物では、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、 V^{3+} と V^{4+} は隣り合おうとするので、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になっていることを実験的に示した。さらにその起源が電子相関とフラストレーションの協奏にあることを、光学応答を用いたエネルギー階層の検討から明らかにした。これまでに知られる近藤効果メカニズムとは異なる、新たな重い電子形成メカニズムの登場である。



フラストレーションを生じるパイロクロア格子

(4) 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。重い 5d 遷移金属元素を含む酸化物は軌道の空間的な広がりが大きいために、相関効果が弱くモット絶縁体（電子固体）状態は生じないとされてきた。ところが、最近に 5d Ir 遷移金属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。

電子バンド幅の 2eV に比肩する 0.5eV の重元素に特徴的なスピン軌道相互作用による軌道運動状態の復活がその起源との作業仮説のもと、層状 5d イリジウム酸化物 Sr_2IrO_4 について、軌道放射光を用いた共鳴磁気 X 線回折実験を SPring-8 放射光施設を用いて行った。その結果 Ir の L 吸収端の共鳴選択則から、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 ($J_{1/2}$) にあることが明らかとなった。この事実は、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意味する。新奇電子相の実証に加えて、共鳴磁気 X 線回折の新しい利用法の提示によ

り、放射光科学にも大きなインパクトを与えた。

(5) 巨大電子エントロピーの設計と熱電変換技術への応用

多自由度系の特徴を反映して、相関電子はしばしば極めて高いエントロピーを有する。このエントロピーを電流として運ぶことにより高効率の熱電変換が原理的に可能となる。このような原理に基づいて、新規熱電変換材料の探索を進めている。高エントロピーの特徴は運動量空間では平坦バンドとして表れる。これに着目して、バンド計算を用いた設計を並行して進めている。このアプローチによりスピネル酸化物からなる新規熱電材料を開発した。

(6) 空間反転対称性の破れた電子系の電気磁気相関

固体中というのは、原子やスピンの周期的に配列し対称性が破れた場であり、等方的な真空中とは異なった電気磁気相関現象が観測される。これまで、スピン配列により空間反転対称性が破れた絶縁性の電子系において、電束密度や磁束密度の時間変化を必要としない、固体特有の巨大電気磁気効果の存在を明らかにしてきた。一方、伝導性の電子系においても、空間反転対称性の破れた場では、スピン・軌道相互作用による一重項―三重項クーパー対混合状態の超伝導のような新奇な電子状態が期待され注目を集めている。このようなユニークな電子状態を実現し、その電気磁気相関を明らかにする為、元から対称性の破れた物質に留まらず、外場等により人工的に対称性の破れた場を作り出すというアプローチにも現在取り組まつつある。

(7) イオン - 電子複合物性の開拓

近年、環境・エネルギー問題から蓄電技術への関心が高まっている。その一つがよく知られたリチウム二次電池である。これらでは、遷移金属化合物が電極に用いられるが、現状ではイオンに焦点を当てた物質設計が大半であり、意外なことに物性を支配する電子構造の観点からの議論は乏しい。これに対し我々は、電子軌道のヤーンテラー効果の強さを考慮した電極材料探索を行い、充放電時の格子歪みを 1 % 以下に抑制したモデル的物質を見出した。最近では、p-d 軌道混成の観点からマグネシウム等の多価イオンを用いる新しい二次電池の開拓にも取り組んでいる。固体物理の立場から電池を理解する研究が一つの目標である。

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、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日本原子力研究開発機構の 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 球状トカマク装置、英国カラム研究所の MAST 球状トカマク装置における高ベータ化実験、電流駆動実験、マイクロ波を用いた新計測法の開発など、国際共同研究も活発に実施しています。

3 今後の展開

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



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

1 研究の概要

素粒子間の相互作用は電磁場の拡張である非可換ゲージ場で記述されます。ですから、その研究は実験結果を解釈する上で当然重要ですが、理論上の性質自体にも興味深い点が種々あります。現実世界を記述している非可換ゲージ理論は、出発点のラグランジアンは簡単なものの、量子効果が大きいいため具体的な計算を遂行するのは非常に困難で、多人数の共同研究でスーパーコンピュータを使って、ということになります。ボゾンとフェルミオンを入れ替える対称性である超対称性を導入すると、ボゾンからとフェルミオンからの量子効果はかなり打ち消しあって、紙と鉛筆と個人のパソコンでかなり細かいところまで調べることが出来ます。これが主な研究対象の一つです。

また、超対称ゲージ理論は自然に超弦理論に埋め込むことが出来、その性質を直接反映しますので、超弦理論自体の性質を調べることも主要な研究目的です。通常の場合の量子論は相対論的粒子を量子化したものですが、そのかわりに相対論的弦を量子化することを考えると、時空 10 次元で超対称な時のみ矛盾無く定式化でき、さらに量子重力を自動的に含みます。無矛盾な定式化は 5 種類あることが 80 年代半ばより知られていますが、11 次元の膜の理論である M 理論を用いて全ての定式化は等価であることが 90 年代半ばに認識されました。これを弦理論の双対性といいます (図 1)。この双対性を超弦理論に埋め込まれた超対称ゲージ理論に適用することで、純粋にゲージ理論のみを考えていただけでは理解することが難しい性質を見いだすことができ、その結果は超弦理論を離れて、その他の数理解物理の分野、また数学とも深い関係を持つことが知られています。

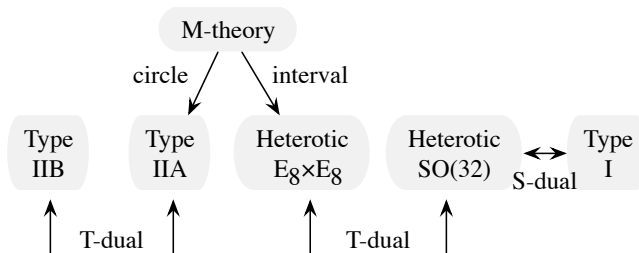


図 1: 超弦理論の双対性

これらの課題について、本郷の素粒子論の研究室の皆さんと共に、また、柏の素粒子論グループ、駒場の素粒子論研とも密接に連絡を保ちつつ研究を行っています。

2 最近の研究テーマ

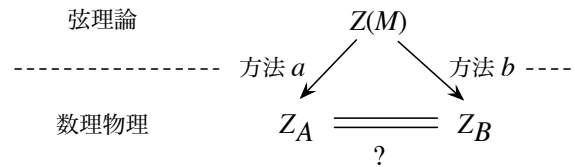


図 2: 弦理論からの「不思議な関係」の導出

前節で述べたように、弦理論内の与えられた系 M を調べる際には、深いところでは等価けれども一見しただけでは異なる記述 a, b を使うことが出来ます。その記述をそれぞれ追求すると、超弦理論を必要としない数理解物理での系 A, B を得ることが出来ます (図 2)。その際、系 A と系 B は全く違うもののように思えるのですが、分配関数等を調べると実は一致してしまうということが起こります。これは出発点と同じ系 M であったことを思えば当たり前ですが、このようにしてこれまで知られていなかった不思議な関係が弦理論から得られることがしばしばあります。最も著名なのは 90 年代初頭にみつかったミラー対称性ですが、数年前みつけたものとして、 A として四次元のゲージ理論、 B として二次元の共形場理論を取ったときの対応があり、最近はこのについて研究を進めています。興味のあるかたは、日本語で解説を書きましたので <http://jp.arxiv.org/abs/1108.5632> をご参照ください。

3 これから

ここに書いたことに限らず、ゲージ理論、超弦理論の面白いテーマであればどんな内容でもやってみたいと思っておりますので、意欲的な方に研究室に来てもらえたらと思います。

常行研究室

常行真司教授 合田義弘助教

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ある。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る。

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礎的情報と量子力学の基礎方程式から出発し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**研究手法である。そのため実験や観測が難しい原子レベルでのダイナミクス、固体中の欠陥や微量不純物が生み出す物性、実験室での実現が困難な超高压下の結晶構造、自然界には存在しない新しい物質や材料、次世代半導体素子やナノサイエンスの基礎研究など、近年その応用範囲は大きな広がりを見せている。

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る。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る。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、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、超伝導転移温度の計算手法は、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る。

最近3年間の具体的な研究テーマには、下記のようなものがある。

[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
- ・物質構造探索手法

[第一原理電子状態計算を用いた物性研究]

- ・半導体/金属ヘテロ界面の磁性発現
- ・固液界面に生じる電気二重層とそのキャパシタンス
- ・酸化物中の不純物水素の電子状態
- ・結晶磁気異方性と保磁力
- ・クラスレート型熱電材料

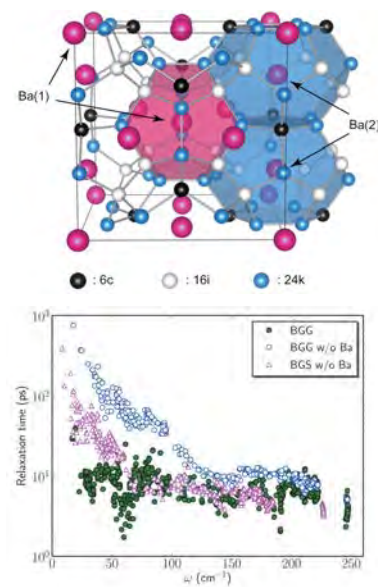


図:I型クラスレート構造(上)と格子振動モード(振動数 ω)の緩和時間の計算値(下)。Ba原子を取り除いたモデル(BGG w/o Ba, BGS w/o Ba)の緩和時間に比べ、Baを含むBGG($\text{Ba}_8\text{Ga}_{16}\text{Ge}_{30}$)の緩和時間は低周波数側で減少しており、Ba原子のラットリング振動の効果が大きいことがわかる。

脳・神経系は多数の神経細胞がシナプスという構造を介して連絡した複雑な回路です。このなかを細胞の電気的な興奮状態（神経インパルス）が伝わるのが、脳機能の基本であると考えられていますが、その実体はほとんど謎のままです。一体、どのような回路の中を、どのようにインパルスが伝わることでより高度な情報処理が可能になるのでしょうか？この問いに答えるためには、私達は次の2つのアプローチで研究を進めています。1. 回路を構成する神経細胞を個々に同定し、その配線パターンを可視化する（＝回路の設計図の解明）。2. 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（＝回路の作動原理の探索）。脳・神経系はあまりに複雑であるため、このような研究は従来困難でした。しかし、最近の技術進展により、生きた生物個体のなかで個々の神経細胞を可視化したり、その神経活動の様子を測定したりすることが可能になってきました。また、個体内の特定の神経細胞の活動を人工的に活性化したり、不活化したりすることも可能になってきました。私達は、こうした新技術が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、神経回路の設計図と作動原理を探っています。配線パターンの分かっているモデル神経回路において、個々の神経細胞の活動をリアルタイムに追跡することで、神経回路の情報処理の仕組みを明らかにすることが私達の目標です。

研究テーマ

1 神経回路の設計図の解明

神経回路の働きを知るには、まず、その構成要素であるひとつひとつの神経細胞が、回路内でどのように配線しているのか（どのような軸索配線を介して、どのような細胞とシナプス結合しているのか）を明らかにする必要があります。脳神経系内には無数の神経細胞が存在しますが、驚くべき事に、個々の神経細胞はその中で間違いなく自分の相手を見つけだします。脳の配線の大部分は先天的（遺伝的）に決定しているのです。私達は、この背景にある遺伝子（分子）機構を探り、発生過程において、神経細胞が特定の標的細胞と結合する仕組みを明らかにしました。また、動物個体内で設計図に従って進行するシナプス形成過程の可

視化に成功しました。

2 神経回路の作動原理を探る

上記の研究により、個々の神経配線が形成される仕組みが明らかになってきました。最近、研究をさらに回路レベルに発展させ、複数の神経配線からなる神経回路が、どのようにして形成され、機能するのかを調べています。この背景には、イメージング、光制御、遺伝子工学の発展があり、これらを組み合わせることで、生物個体内の多数の神経細胞の活動をリアルタイムで測定したり、光照射により、特定の神経細胞の活動を任意のタイミングで操作したりすることが可能になってきました。私たちの研究室ではこのような新技術を利用し、生きた個体のなかで、神経回路を構成する個々の神経細胞の活動をモニターしたり（図1）、その活動に活性化、不活化といった摂動を加えることに成功しています。このような実験により得られた回路のダイナミクスや応答特性と数理モデル解析とを組み合わせることにより、神経回路がどのような原理で作動しているのかを探っています。

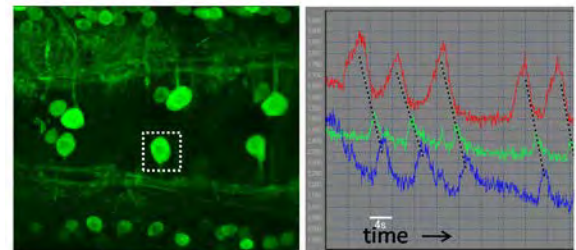


図1 生きた個体のなかで個々の神経細胞の活動を測定する。遺伝子操作を用いて、中枢神経系内の特定の細胞に Ca^{2+} 濃度感受性蛍光タンパク質を発現した。左図に示すように、個々の神経細胞を可視化した上で、その一個一個（例として一つを白点線で囲った）の神経活動を測定できる（神経が活動すると Ca^{2+} 濃度が上昇するので、 Ca^{2+} 濃度の変動は神経細胞の指標となる）。右図は3つの神経細胞の活動の様子を測定したもの。

長谷川研究室

長谷川 修司 教授 平原 徹 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、固体表面やナノメートルスケールに特有な構造、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、結晶表面最上層の原子には、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、表面近傍の原子だけ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、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、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。最近では、マスコミなどで取りざたされているナノテクノロジーと呼ばれる分野とも直結し始めている。つまり、原子や分子1個1個を自由自在に操作して、ナノメートルスケールの極微細な人工構造を物質表面上に構築し、そこで起こる現象を利用したデバイスに応用しようという研究が盛んに行われている。表面物理学は、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 長谷川修司著「見えないものをみる」（東京大学出版会、2008年）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ることが、我々の研究によって明らかにされてきた。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。よく見ると非常に細かな規則的な点列に気付くが、これが規則的に並んだ銀原子に対応している。また、(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。これは、上述の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なのである。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になる。ただし、その波長は3 nm程度なので、極微の波である。物理学の基礎として習う量子力学がいう電子の波動性を直接見ていることになる。画面中央やや右上の小さな領域では、さざ波が同心円状に広がっている。周囲の境界がポテンシャル障壁となって電子を閉じ込めているわけで、まさに量子力学のポテンシャル井戸の演習問題を直接見ていることになる。

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、当然、電気伝導度も高いはずである。当研究室では、1原子層の電気伝導度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、マイクロな針を4本使った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探針として利用し、外側2本の探針から電流を流し込み、内側2本の探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。探針間隔は数十 nm まで小さくできる。

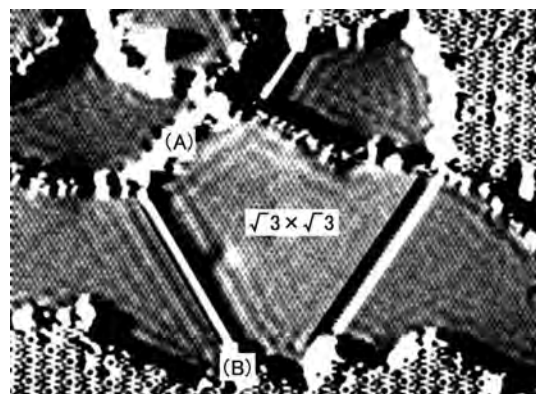


図1. 電子の海のさざなみ

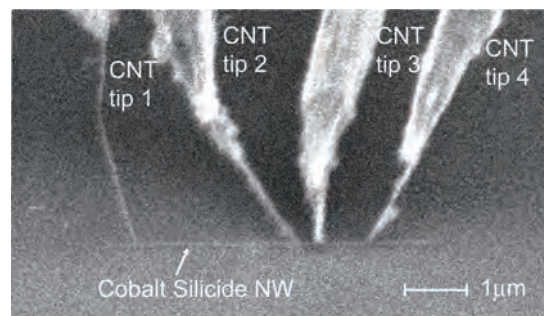


図2：マイクロな針を使った4探針電気伝導測定

浜口研究室

浜口幸一准教授 遠藤基助教

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。しかしながら標準模型には理論的に不自然な点、不完全に見える点があり、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。特に、自然界の基本的なスケールが非常に高いエネルギースケール（素朴にはプランクスケール $\sim 10^{18}$ GeV 近辺）にあるであろう事を考えると、標準模型の電弱対称性の破れのスケール（ ~ 100 GeV）がそれに比べて何故そんなに小さいのかが謎のままです。したがって（私も含めた）多くの素粒子物理研究者は、標準模型を超えたところ（エネルギーで言えば 100 GeV $\sim$ 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はずだと考えています。

またこれと関連して、初期宇宙の進化の解明にも興味を持っています。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、やはり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。

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、主に超対称性理論の枠組みの中で素粒子の現象論的研究、素粒子論の宇宙論への応用的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。

- 2015 年より、世界最高エネルギーの衝突実験・LHC が再稼働します。超対称性理論が本当に正しければ、LHC で検証される可能性は十分にあります。LHC の実験結果が何であれ、標準模型を超えた物理に対する貴重な情報を与えてくれる事は間違いありません。

- 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ますます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重要な情報も次々と明らかになって来ています。

3 これまでの研究

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

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

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

- 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>

個人のページ

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

早野研究室

早野龍五 教授 鈴木隆敏 助教

1 奇妙な原子

早野研究室では、**反水素**（反陽子と陽電子でできた反原子）、**反陽子ヘリウム**（ヘリウム原子核のまわりを反陽子と電子がまわっている原子）、 **π 中間子原子**、 **K 中間子原子**（原子核のまわりを π^- 中間子や K^- 中間子がまわっている原子）など、さまざまな奇妙な原子（エキゾチック原子）を研究し、物理学の基本的な対称性を研究しています。

2. 反陽子の重さを量る - 理科年表にも出ています
素粒子の標準理論では、粒子と反粒子の間に *CPT* と呼ばれる対称性があり、その結果、粒子・反粒子の質量は等しいとされますが、これを高精度実験で確かめることが「宇宙から消えた反物質の謎」などと関連して、非常に重要になってきました。

私たちは最近、**反陽子ヘリウム**原子の精密なレーザ分光実験を行い、その遷移周波数が反陽子と電子の質量比に比例することを利用して、反陽子質量を陽子質量に迫る精度で決定することに成功しました。その結果は既に知られている陽子の質量と 10 桁まで一致し、*CPT* 対称性が高精度で検証されました。また、逆に *CPT* 対称性を仮定すると、この結果から基礎物理定数が決定できます。実際、現在の理科年表に載っているリュードベリ定数や陽子・電子質量比には、私たちの実験結果が反映されています。

CPT 対称性を更に高精度で検証する上で有望なのが、反水素原子です。通常の水素原子では、すでに遷移周波数を実に 15 桁に迫る超高精度で分光することが可能であるため、反水素原子を大量に生成して高精度分光を行えば、*CPT* 対称性の検証精度が飛躍的に高まると期待されます。

私たちは最近、加速器で発生させた反陽子と、放射線源から集めた陽電子とを反応させ、反水素原子を大量に生成することに世界で初めて成功し、夢の実現に一步近づきました。現在は分光をめざして研究を進めています。なお、これらの研究はスイスの CERN 研究所で行っています。

2. 中間子原子が解き明かす質量の起源

南部先生が予言された「自発的対称性の破れが粒子質量の起源である」という理論の実験的検証は、現在の重要課題の一つです。素粒子の標準理論で

は、真空中に凝縮したヒッグス粒子によってクォークや電子などが質量獲得されるとされ、LHC でヒッグスを探索する実験が今年開始されますが、ヒッグスだけでは物質質量の大部分を占める陽子や中性子の質量起源は説明できません。

陽子や中性子はクォーク三個から構成されますが、それらクォーク三個の質量を足しても、たかだか陽子質量の 2% にも達しません。陽子の質量は、真空中に（ヒッグスに加え）「クォーク対が凝縮」し、カイラル対称性というものが破れたことに起因すると考えられています。

理論予想では、原子核中でのクォーク凝縮の強度は、真空中よりも減少するとされており、その検出器として私たちが用いているのが中間子です。私たちは最近、加速器を用いて原子核と π 中間子（湯川秀樹が予言）が束縛した **π 中間子原子** を生成し、そのエネルギー準位を測定することで、クォーク凝縮強度の変化量を求めることに初めて成功しました。 **π 中間子原子**の研究は、私たちがドイツの GSI 研究所で開拓したのですが、その後、理化学研究所に最新の RIBF 加速器が完成し、日本でも実験ができるようになりました。

3. 福島県での活動

福島原発事故に関連し、ホールボディーカウンターによる内部被ばくの測定精度の向上や、除染に関連したリアルタイム線量計の開発などを行なっています。

早野研に関する理学系研究科プレスリリース等
ホームページ:

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

- | | |
|------------|-----------------------------------|
| リガクル 01 | 原子番号マイナス 1
-反陽子の質量を高精度に計測する- |
| 2013/03/06 | 早野龍五教授、GENCO 賞を受賞 |
| 2011/10/30 | 「理学が拓く未来」 反物質 |
| 2008/11/13 | 早野龍五「反陽子ヘリウム原子の研究」
により仁科記念賞を受賞 |
| 2008/07 | 反陽子を使って基礎物理定数を測る
(理学部ニュース掲載) |
| 2007/11/03 | 堀博士のヨーロッパ 若手研究者賞受賞 |
| 2006/10/12 | 反物質と物質の「化学反応」の観測 |
| 2006/ 6/ 9 | 反陽子の質量を 10 桁の精度で測定 |

福山研究室

福山 寛 教授 松井 朋裕 助教

極低温下で起こる超流動、超伝導、強相関効果、磁気フラストレーション、量子ホール効果などさまざまな量子現象を実験的に研究しています。特に、原子の中で最も量子効果が強いヘリウム 3(^3He) やヘリウム 4(^4He) の運動を 2 次元空間に閉じ込めた系の性質を調べています。量子効果の起源は、ハイゼンベルクの不確定性原理による零点振動エネルギーで、これが粒子間の引力エネルギーと同程度あるいはそれ以上になった系を量子系あるいは量子物質とよび、低温で上記のような驚くべき現象を示します。また、炭素の単原子層 (2 次元シート) であるグラフェンのもつ特異な電子物性も調べています。

1. 2 次元の量子物質

粒子には電荷やスピン (磁性の起源) などの他に“統計性”という属性があり、量子物質の低温の性質は統計性で決まります。これにはフェルミ統計とボース統計の 2 種類あって、 ^3He は電子と同じフェルミ統計に従い、スピンも $1/2$ という同じ量子数を持ちますが電気的には中性です。一方、 ^4He は ^3He とまったく同じ粒子間相互作用 (レナード・ジョーンズ型) をもつのですがボース統計に従うスピン 0 の粒子です。ですから、 ^3He と ^4He の性質を比較したり、ときには両者を組み合わせることで、統計性や磁性をさまざまに制御することができます。また、ナノスケールで平坦なグラファイト表面に ^3He や ^4He を数 K (ケルビン) 以下で低温吸着させると、理想的な単原子層膜を簡単に作れます。こうして空間次元を 3 から 2 に下げると、隣接原子数が減って粒子間引力が弱まるので量子効果をより強くできるのです。

その一例に、最近、私たちが発見した 2 次元 ^3He の自己凝縮現象があります。3 次元の ^3He は 3 K で液化する典型的なフェルミ液体ですが、その 2 次元系は絶対零度でも液化しない量子気体だとずっと信じられてきました。ところが、その熱容量を超低温度まで精密に測定したところ、 0.6 nm^{-2} (1 平方ナノメートルあたり原子 0.6 個) という超低密度の液体になっていることが分かりました (図 (a))。これは自然界で最も希薄な液体として話題となりましたが、従来の理論計算の再検証を促し、より

低温で起こるであろう未発見の超流動転移の探索につながる成果です。

この他、 ^4He の低密度の 2 次元固体相に注目して、結晶の周期性と超流動性が共存する「超固体」状態発見のための探索実験も行っています。超固体は、物質の新しい第 5 の状態として、理論的な研究が活発に行われています (他の 4 つは気体、液体、超流体、固体状態)。

2. ナノスケールの電子物性

グラフェンは表面を様々な物質で修飾したり、ナノスケールに加工することで、そのユニークな物性を操作でき、世界中で活発な研究が進んでいます。例えば、ハニカム構造をもつグラフェン表面に一定周期で原子や分子を吸着させるとバンドギャップ (エレクトロニクス応用に欠かせない性質) を誘起できる可能性があり、私たちはその検証実験を進めています。図 (b) は、グラファイト上にクリプトン (Kr) 原子が低密度で低温吸着したとき、3 つのハニカムのうちの 1 つの“中心”に Kr 原子が吸着することを初めて実空間観測した走査トンネル顕微鏡 (STM) 像です。

一方、グラフェンの端の幾何学にはジグザグ型とアームチェア型の 2 種類ありますが、私たちはジグザグ端だけに電子が特異な局在状態を作ることを見出しました。ジグザグ端を両端にもつグラフェンの幅をナノリボン状に狭くできれば、両端の局在電子スピンの反強磁性的に反対方向を向くと予測されており、その検証と磁場制御を目指した研究を行っています。

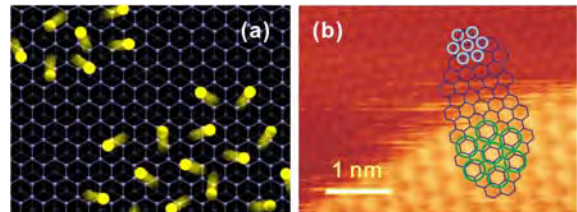


図 : (a) グラファイト表面で 2 次元 ^3He が自然界で最も低密度の液滴を形成するイメージ図。(b) Kr が島状の 2 次元固体 (画面右下) を形成した様子を実空間で捉えた STM 像。

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」

我々の研究室では生体運動や細胞分裂や神経の物質輸送に関与する生体モータータンパク質を原子・分子・細胞・個体の4つの階層からアプローチし、各階層の動的（ダイナミクス）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の構築を行っている。具体的な研究テーマを以下に述べる。

1 Å精度の1分子運動解析

我々は蛍光でラベルされたモーター分子の3次元運動を、1msの時間分解能で~2nmの位置精度で測定する世界最高精度の装置を開発し、ステップ様の運動を検出した。今後は精度を数Åに高めてモータータンパク質1分子の運動を解析し、モーター分子が熱揺らぎとATPのエネルギーをどのように利用して、Åオーダーの構造変化を10nmオーダーのステップ運動に変換するのかを明らかにする。

2 細胞内モーター分子の3次元力学状態

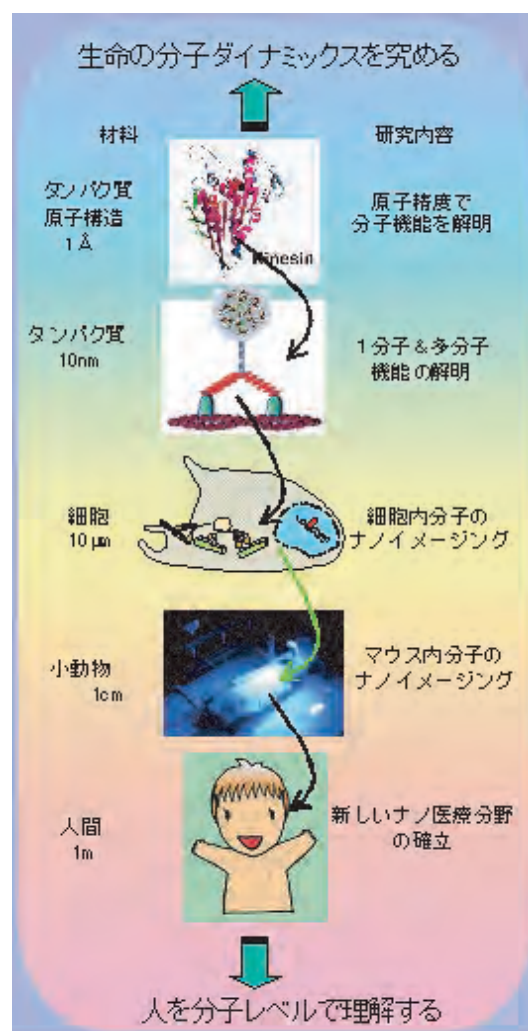
細胞内には運動を障害する構造体や制御タンパク質が存在するため、培養細胞内モーター分子の運動を短時間解析した我々の結果が示すように、細胞内運動はかならずしも精製分子と同じではない。そこで現在は細胞内のモーター分子あるいはそれが運搬する小胞の3次元的位置および力を長時間測定して、モーター分子の多様な運動の全体像を明らかにしている。

3 マウス内1分子運動

個体は多数の細胞が立体的に相互作用しホルモン等の制御を受けているので、生体内運動機能全体を知りたいければ、個体を用いなければならない。我々は、これまでに生きたマウス個体内を運動する蛍光でラベルされたタンパク質の位置を~30nm精度で追跡することに成功し、タンパク質の挙動を分子レベルで解析できた。今後は、3次元位置精度を数nmまで改良し、細胞全体の運動と細胞内モーター分子の3次元運動を測定する。

4 運動機能の普遍的な物理モデル

細胞内をモーター分子によって輸送される小胞は、短時間では方向性のあまりない運動であることが我々の研究でわかった。ブラウン運動をしたり、一方向に動いたり、停止したり、方向を変えるなどである。ところが、長時間経過すると小胞は核の周りに集まるといった方向性のある輸送を達成した。小胞の運動を理解するために、我々は短時間の部分運動と長時間の全体運動を繋ぐ物理モデルの構築を行っている。



研究概要図

藤森研究室

藤森 淳 教授 岡崎浩三 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．

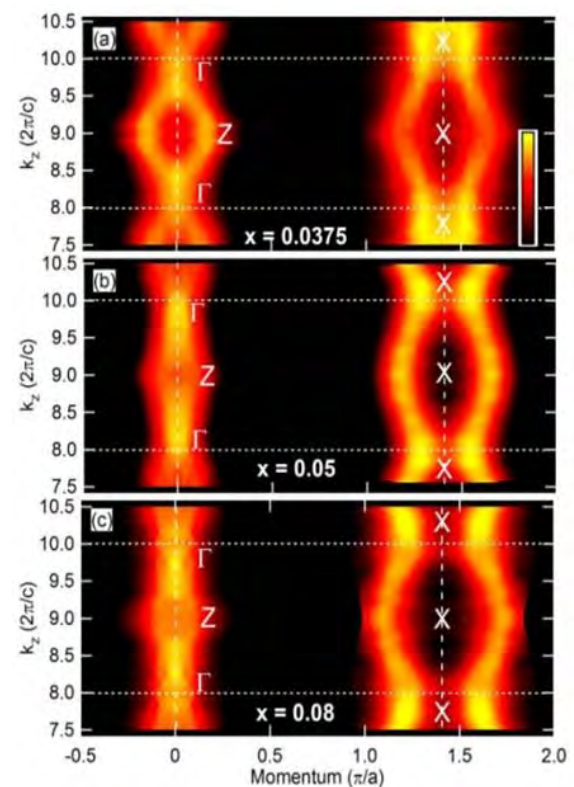
2 最近の研究テーマ

i) 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をドーピング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．

ii) 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，両者には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．

iii) 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ピングした磁性半導体，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．



図の説明：光電子分光で見た鉄系高温超伝導体 $\text{Ba}(\text{Fe}_{1-x}\text{Ni}_x)_2\text{As}_2$ 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．

牧島研究室 + 中澤研究室

牧島 一夫 教授 中澤 知洋 講師

1. 研究の背景

私たち2研究室は協力し、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、宇宙の高エネルギー現象を観測的に研究している。物理教室内の関連研究室、同じ研究科内のビッグバン宇宙国際研究センターや天文学専攻、JAXA、理化学研究所、米国NASAなどの研究機関、国内外の大学などと、広い共同研究を展開している。

宇宙では、新しい物理法則を探求し、また既知の物理法則をより深く理解する上で、手掛かりとなる魅力的な現象が数多く見られる。宇宙を満たす暗黒エネルギーの正体は何か。ブラックホールの角運動量は実測できるか。中性子星の超強磁場はいかに保持されるか。ビッグバンで誕生した宇宙は、なぜ一様から非一様へ進化したのか、など。

X線やガンマ線は、エネルギーの集中に伴い放射されるため、天体の速い運動や回転、強い重力場、強磁場、超高温、加速現象などを探る絶好の手段となる。たとえば銀河団をX線で見ると図1のように、数千万度の高温電離ガスから、広がったX線が放射されている。この電離ガスは、宇宙で知られている「見える」物質のうち最も卓越し、しかもそれが散逸せず重力で閉じ込められていることから、これら銀河団には、「見える」物質の数倍に達する暗黒物質が存在すると結論される。



図1：可視光(写真；白い点の多くは銀河)およびX線(等高線)で見た、「みなみのさんかく座」銀河団の画像。大きさは、ほぼ満月と同じ。

宇宙のいろいろな場所で、荷電粒子が超高エネルギーにまで加速されており、それらは宇宙線として地球に降り注いでいる。宇宙線そのものは宇宙磁場で曲げられてしまうが、同時に作られるX線やガンマ線は直進できるため、それらを用いると加速現場を「見る」ことが可能となる。



図2：「すざく」衛星を搭載した、M5型ロケット6号機の打ち上げ。2007年7月10日、鹿児島県内之浦より(JAXA提供)。

2. 最近の研究テーマ

X線やガンマ線は大気で吸収・散乱されるため、大気圏外からの観測が不可欠である。我々は現在、2005年に打ち上げられた、宇宙航空研究開発機構(JAXA)のX線衛星「すざく」(図2)を用い、研究を進めている。ここに搭載された硬X線検出器(HXD)は、私たちがJAXA、理化学研究所、広島大、埼玉大、スタンフォード大などと共に10年がかりで開発した装置で、10-600 keVのエネルギー域で史上屈指の感度をもつ。図3に、「すざく」で得たさまざまな天体のX線スペクトルを示す。我々は、「頼るべきは、自分たちの作った装置の出すデータ、基礎物理学、そして科学的想像力である」との信念に基づき、以下のように世界をリードする独創的研究を展開している。

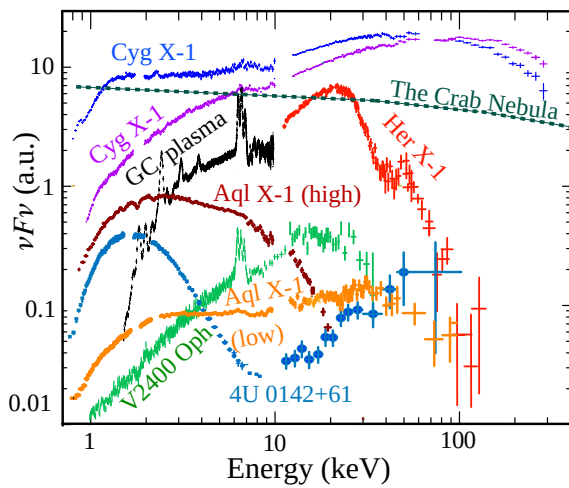


図3:「すざく」で観測した、さまざまな天体のX線スペクトル。エネルギー 10 keV 以上は HXD のデータ。

1. 「はくちょう座 X-1」(図3の Cyg X-1) などのブラックホール連星、多くの銀河の中心にある巨大ブラックホール、弱磁場の中性子星(図3 Aql X-1)などを観測した結果、それらの重力場に落ち込むガスは、平たい円盤と、それを取り囲む温度およそ 10 億度の高温コロナとを形成することがわかった。
2. 質量降着する白色わい星 (V2400 Oph など) のX線スペクトルを、「すざく」により精密に測定し、これら電子の縮退圧で支えられた星の質量推定に成功した。また銀河面に沿って広がる謎の「銀河面X線放射」は、多数の白色わい星の集合であることを明らかにした。
3. 質量降着する強磁場中性子星では、電子サイクロトロン共鳴による吸収線が見られる(図3の Her X-1 では ≈ 40 keV)。我々はこれを用い約 20 個の中性子星の磁場を精密に測定し、その値が $(1-5) \times 10^{12}$ G に揃うことを発見した。これらの強磁場は、中性子の核磁気整列による強磁性の発現かもしれない。
4. 「マグネター」は、通常のパルサーよりさらに強い磁場 (10^{14-15} G) をもつ特殊な中性子星で、磁気エネルギーの解放によりX線を放射している。「すざく」で得たそれらのスペクトル(図3の 4U 0142+61 など)は、星表面からの黒体放射成分 (< 10 keV) と、奇妙な硬X線 (> 10 keV) 成分とから成る。我々は後者が、超強磁場中における量子電磁気学的な過程で作られていると考えている。
5. 宇宙の「見える」物質の大半は図1のように、広大な銀河間空間を満たす、数万度～1億度の電離ガスとして存在する。このガスに働く

未知の加熱機構を、我々はプラズマ物理学の立場で解明しつつある。また図3の「GC(銀河中心) plasma」のように、これら宇宙プラズマのスペクトルには、重元素の特性輝線が見られ、元素分析に利用できる。

6. 太陽フレア、超新星爆発、高速回転パルサー(図3 Crab Nebula)、ブラックホールから噴射するジェットなど、極限環境で起きる粒子加速を研究している。地上実験では、雷雲から強いガンマ線が放射されることも発見した。

3. 次期衛星 ASTRO-H の開発

「すざく」後継機の *ASTRO-H* (図4) は、重量 2.7 t、全長 14m の大型衛星で、2015 年に H2A ロケットで打ち上げ予定である。同衛星は、世界最高のX線分光精度と広いエネルギー帯域を誇る高エネルギー宇宙実験室として国際的に注目を集め、米欧からの協力も得て開発が進んでいる。宇宙初期に形成された巨大ブラックホールの探索、ブラックホール近傍での相対論的効果の実測、元素合成シナリオの構築、中性子星の磁性の起源解明、最高エネルギー宇宙線の加速現場の特定とエネルギー非等分配過程の研究など、*ASTRO-H* を用いた観測は、「すざく」の成果をさらに拡大し、宇宙物理学に大きな進展をもたらすと期待される。

我々は *ASTRO-H* に向け、JAXA、名古屋大、広島大、スタンフォード大、早稲田大、フランス国立宇宙センターなどと協力し、「すざく」HXD 装置を発展させた、硬X線撮像検出器 (HXI) および軟ガンマ線検出器 (SGD) の開発製作を担当している。



図4: 2015 年打ち上げ予定の *ASTRO-H* 衛星の想像図 (JAXA 提供)。

1 M理論とは

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。

2 M理論の難しい点

M理論は基本的な役割を果たす一方で、理論自体の定義がまだはっきりしていないという困難を持つ。その最も典型的なものとしてM理論に現れるブレーンの内部自由度があげられる。

通常の粒子を複数個集めるとその自由度は粒子の数に比例する。一方超紐理論のブレーン（Dブレーンと呼ばれる）をN枚集めたときの自由度は N^2 のオーダーであることが知られていた。この自由度は行列のサイズをNとしたときの行列要素の個数であり、Dブレーンの自由度が行列を用いた非可換ゲージ理論で書かれていることが理解されている。

一方、M理論のブレーンは2次元と5次元の2種類のブレーンがあることがわかっており、それぞれM2ブレーン、M5ブレーンと呼ばれている。これらのブレーンをN枚集めたときに自由度がどのようになるのかについて、様々な計算がなされてきたが、M2ブレーンについては $O(N^{3/2})$ 、M5ブレーンについては $O(N^3)$ という変わったスケーリングになることが知られていた。このような内部自由度は通常の行列では書けないので、定式化が難しかった。

3 南部括弧式を用いた M2 ブレーンの定式化

この行列に変わる自由度については、南部陽一郎氏が1973年に提唱した南部括弧式を用いることがよいことが2007年にBaggerとLambertにより発見された。通常の行列に対しては交換関係 $[T^a, T^b] = f^{ab}_c T^c$ を用いて対称性が定義されるが、

南部氏はそれを一般化された3-代数と呼ばれるものの $[T^a, T^b, T^c] = f^{abc}_d T^d$ に拡張した。これまでこの3-代数については詳しいことが数学的に知られていなかったが、BaggerとLambertはM2ブレーンが2枚ある場合の3-代数の構造を明らかにしたのである。当研究室ではこのBagger-Lambertの発見を受け3-代数の数学的研究を行い、一般にN枚M2ブレーンが存在する場合のモデルの提案や、Nが無限大の極限でM2ブレーンの理論を用いてM5ブレーンの定式化が行えることなどを具体的に示した。

4 M5 ブレーンの定式化へのアプローチ最近理解が急速に進んだM2ブレーンに比べて、重複したM5ブレーンの定式化は難点が多い。我々のグループでは非可換gerbeと呼ばれる2000年代に発展した一般化された幾何学的概念を、M5ブレーン適用することにチャレンジしている。今のところM5ブレーンをあらかず6次元時空の一つの空間次元をコンパクト化した場合に閉じた形でゲージ不変な作用を書くことができることを理解されており、現在はそこに超対称性を組み込むことに取り組んでいる。

5 ゲージ理論の双対性への応用

以上の流れとは多少異なるが、4次元の超対称ゲージ理論の双対性や分配関数の研究を2次元のリーマン面の幾何学に帰着して理解できるというSeiberg-Witten理論が以前より活発に研究されてきたが、最近より精密な対応、すなわち4次元理論の分配関数と2次元の戸田方程式系の相関関数が一致するという予想が大きな注目を集めている。M5ブレーンがしめる6次元空間を4次元と2次元に分けそれぞれの理論の間の橋渡しとしてM理論を用いることができるのではないかと予想がなされている。当研究室でも2次元理論の $W(1+\infty)$ 代数と呼ばれる無限次元対称性とその量子変形がこの対応関係の背後にあると考え、研究を進めている。最終的には以前謎めいているM5ブレーンの性質の解明に結びつけたいと考えている。

1 加速器を使わない素粒子実験

素粒子の実験的研究の分野は、大型の高エネルギー加速器を使った研究が主流であった。しかし、加速器の大型化の技術的限界や、研究グループの巨大化に伴うさまざまな問題を考えると、加速器という手法に捕らわれない自由な発想による研究が必要になってきたと思われる。我々の研究室では、次にあげるようなさまざまな「非加速器素粒子実験」を計画し、実行してきた。

2 最近の研究

右上の図に示すのは、当研究室のアクシオンヘリオスコープ（愛称 Sumico）¹と呼ぶ太陽観測装置である。

素粒子の強い相互作用は量子色力学によってうまく記述されていると考えられているが、そのままでは有効ラグランジアンに CP 対称性を破る項が現れて実験事実と反するという「強い力の CP 問題」が残されている。アクシオン模型においては大局カイラル $U(1)$ 擬対称性を導入し、それが自発的に破れる時、 CP 対称性を破る項を相殺することでこの問題を解決する。それに伴って生まれる擬南部 Goldstone 粒子がアクシオンである。

アクシオンを探すさまざまな試みが行なわれているが、我々は、太陽内部で黒体放射の光子が陽子や電子の電磁場でアクシオンに転換して発生していると考えられている、いわゆる太陽アクシオンを地上で検出する実験を行なっている。この実験では、超伝導磁石による強磁場を用意して太陽から飛来したアクシオンを再び光子 (X 線) に転換して検出する。これまでの観測の結果ではアクシオンは発見されておらず、アクシオンと二つの光子の結合定数にきびしい制限をつけている。この制限の一部は直接観測によるものとしては世界最高の感度である。

また、右下の図は、現在開発中の可搬型の反電子ニュートリノ検出器 PANDA(Plastic Anti-Neutrino



理学部一号館に設置されているアクシオンヘリオスコープ Sumico

Detector Array) である。原子炉中での核分裂反応によって発生する核分裂破砕片のベータ崩壊により、反電子ニュートリノが発生する。厳重な遮蔽により、通常の放射線は原子炉格納容器の外には漏れてこないが、反電子ニュートリノはほとんど遮蔽されることなく外部に出てくる。この反電子ニュートリノを検出することにより、原子炉の運転・停止や熱出力などの運転状況を知ることが可能である。われわれは、関西電力大飯発電所において、トラックに積んだ試作器による測定を行い、原子炉からの反電子ニュートリノの検出に成功した。

国際原子力機関 (IAEA) が、核不拡散のための原子力活動の監視業務 (保障措置) の新しい手段として、原子炉のすぐ横で駐車したまま原子炉の運転状況をモニターできるようにすることを目指している。



PANDA deployed in the van beside the reactor building of Ohi Power Station in Fukui, Japan.

¹理学部ホームページ内「望遠鏡物語」
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ken/telescope/04.html> を参照

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性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、秩序変数が多数の縮退を持つ系、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。

最近のテーマとして、スピנקロスオーバー物質や電荷移動物質の系の相転移について研究している。そこでは、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。特に、長距離相互作用がある場合には、系の振る舞いが、系全体の大きさに依存するマクロ的な新しいタイプのダイナミクスを示すことがわかり、その特徴の統計力学的性質についても調べている。

2-2. 非平衡現象の統計物理学

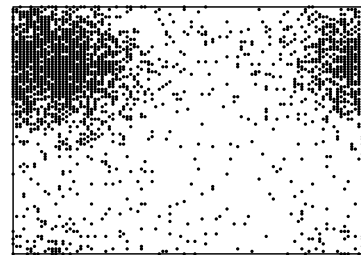
相転移に伴う系の状態変化である動的臨界現象や、外場や外圧、温度変化、さらには光照射などによって引き起こされる系のミクロ・マクロの実

時間ダイナミクスも興味深いものであり、たとえば、スピנק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、相互作用が長距離の場合に系が示す動的振る舞いの研究も進めている。また、拡散現象などに関する数理物理学的研究や、平衡状態の実現機構など統計力学の基礎的な性質についても研究を進めている。

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 Foeht 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、キャビティ内に閉じ込められた原子集団、あるいはスピン集団が光子との相互作用によって示す、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。そこでは、外場による駆動、散逸機構、そして量子力学的干渉によって様々な新規現象が出現する。

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。



r^{-1} の長距離相互作用を持つ系で、粒子数を固定した場合に現れる不均一状態 T. Mori: Phys. Rev. E84, 031128 (2011) より転載。

村尾研究室

村尾美緒 准教授 添田彬仁 助教

1 量子情報とは

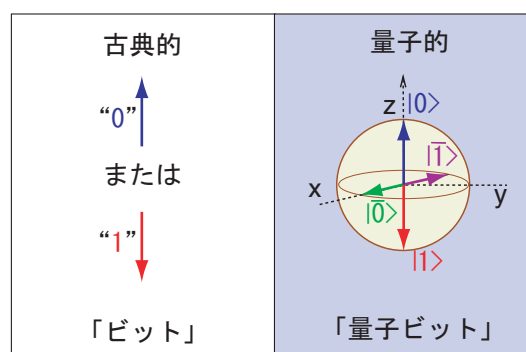
当研究室は、物理学の中でも最も新しい分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報は、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット」を基本単位とする（図参照）。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違いの情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として近年注目を集めている。量子情報処理の例としては、量子コンピューティング、量子暗号、量子テ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

2 当研究室では

量子力学を情報と情報処理の観点から理解・応用することを目的とし、多粒子間エンタングルメント^注の性質の理解と、これを積極的に利用した新たな量子情報処理プロトコルの提案・実現に関する研究を行っている。また、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併用した量子系のシミュレーション、量子系の情報を量子測定によって効率的に読み出すための量子トモグラフィ法の研究など、量子情報に関して多岐にわたる理論研究を行なっている。

ところで、量子情報分野のほとんどの成果は過去20年間に行われたものであり、物理学の他の分野に比べて研究者の平均年齢は非常に若く、20代で有名な教科書を書いた人(Nielsen)もいるくらいである。研究の第一線へ出るまでに必要な知識量は多くはないため、柔軟な発想力があればこの分野の研究をはじめて数年で世界レベルの研究を行うことも可能である。量子情報は数学・計算機科学・情報工学とも関連が深いので、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。また、研究発展が著しいため、国際的なネットワークに参加して議論を通じて効率よく研究を進める必要がある。

当研究室では、柔軟な発想で本質を探究する能力・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。アインシュタインをも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、なかでも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：

- 素粒子模型の構築とその実験的検証方法の探求
- 素粒子現象を記述する場の理論の理解
- 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（約 1TeV 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きつと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、さらには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、素粒子標準模型の枠内での説明は不可能です。これらの謎を解明し、正しい宇宙模型を構築するためにも、標準理論を超える理論が不可欠です。

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が必要となると共に、素粒子実験や宇宙観測実験についての知識が要求されます。それら幅広い研究を総合的に進めつつ、テラスケール以上のエネルギースケール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大きな目標です。

テラスケール以上のエネルギースケールで現れる素粒子模型として、特に興味深いのは「超対称

模型」と呼ばれる模型です。超対称模型にはボソン（スピンが整数の粒子）とフェルミオン（スピンが半奇数の粒子）がペアとなって現れるため、この模型は超対称粒子と呼ばれる新しい粒子の存在を预言します。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し得る役割を明らかにすることは、重要な研究内容のひとつです。また、超対称模型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。例えば、超対称粒子のうちで最も軽い粒子は安定になることが知られていますが、その粒子は宇宙暗黒物質の極めて有力な候補です。

無論、超対称模型以外にも、標準理論を超えた素粒子模型の可能性は様々考えられます。テラスケールより高いエネルギー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、興味深い研究対象です。それと併せて、新たな素粒子模型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。

ヨーロッパの陽子型加速器（LHC）は現在多くの成果を出しつつあり、特に素粒子標準模型の最後の未発見粒子であったヒッグス粒子の発見を果たしました。また、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、暗黒物質の直接及び間接検証実験、PLANCK 実験をはじめとする宇宙背景放射の観測、高エネルギー宇宙線の観測など、LHC 以外の実験や観測も数多く進められています。今後、様々な実験の結果が次々と明らかになってきます。それらの素粒子実験や宇宙観測を視野に入れた理論的研究は、高いエネルギースケールの物理や初期宇宙の様相を明らかにする上で今まで以上に重要となると考えており、今後さらに研究を進めたいと考えています。

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/>

個人のページ

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

山本研究室

山本智教授 坂井南美助教 渡邊祥正助教

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、化学組成をもとに星・惑星系形成過程を探る新しい手段を開拓している。

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

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

複雑な有機分子は見られない。このような化学組成のバリエーションは、主に星ができるまでの時間スケールの違いを反映しているものと考えられ、化学組成をもとに星形成の物理過程を探る新しい手段として注目されている。また、星形成領域の化学組成のバリエーションは、将来形成される惑星系にも伝わると考えられる。その伝播のメカニズムの解明は、太陽系の起源の理解につながる重要な課題であり、現在、南米チリで建設が進んでいる ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array) 望遠鏡によって、大きく研究が進むであろう（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、2013 年度から科学運用を行う。

星間分子雲から惑星系への物質進化

