

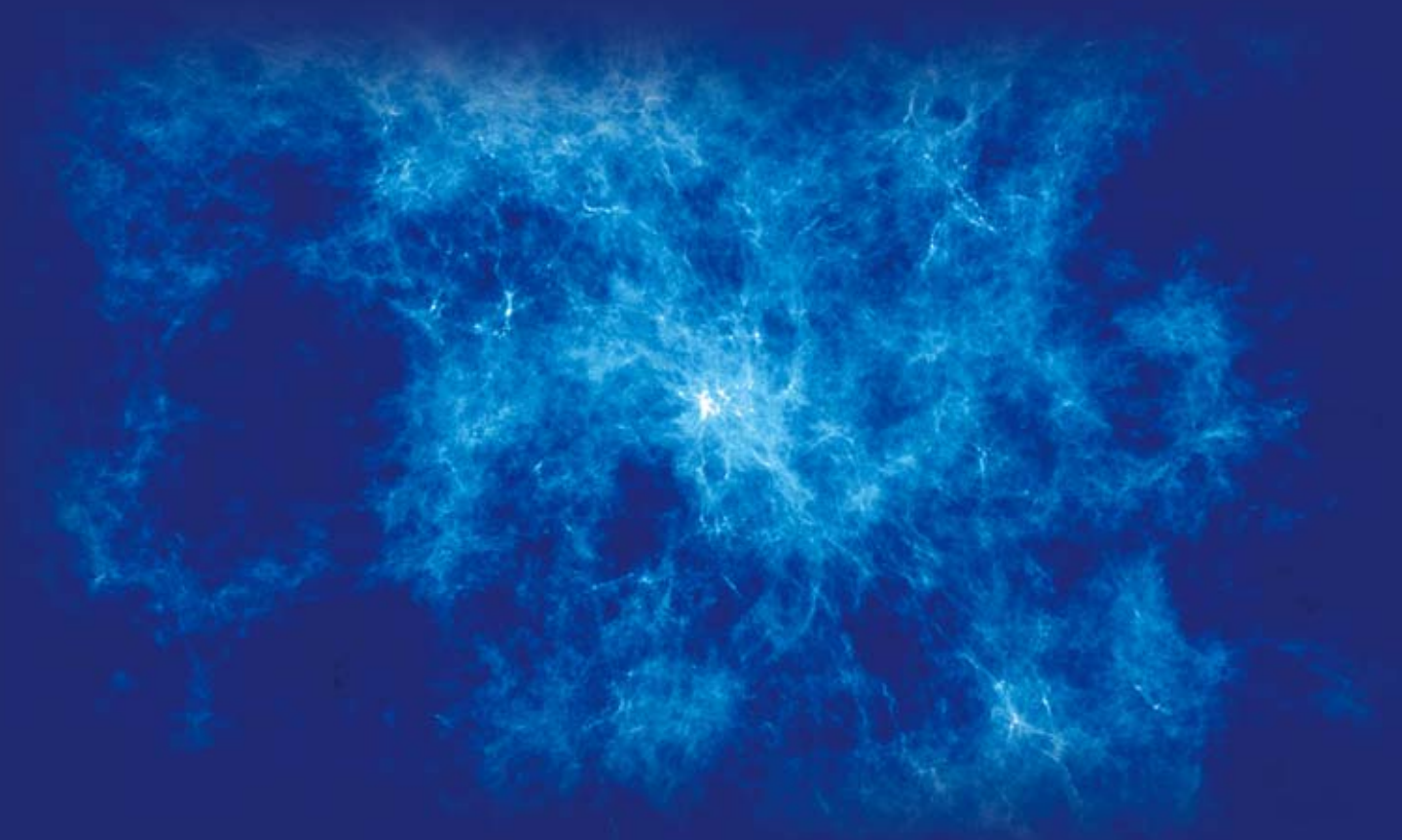
《 表紙の図について 》

コンピューターシミュレーションから得られた、宇宙初期での暗黒物質の分布。図は短辺がおよそ10万光年に相当し、色の明るい部分は暗黒物質の密度が高い場所を表す。中央付近のもっとも密度の高い部分では宇宙最初の星が生まれつつある。(吉田研究室)

 **2012 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

<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

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科教員一覧

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。
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。
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
内田慎一	固体物理学・高温超伝導	電子はスピンと電荷をもつ素粒子であるが、高温超伝導体を代表とする強相関電子系では、スピンと電荷が見かけ上分離したり、電荷の融合 (超伝導)、スピンの融合 (スピンギャップ) により新しい秩序/対称性をもった電子相を自己組織的に形成する。このような電子のダイナミクスと電子がつくり出す新奇な電子相を、電子輸送現象、遠赤外分光、光電子分光、STM、ミュオン緩和など様々なスペクトロスコーピー手法を用いて研究し、高温超伝導機構の解明、室温超伝導実現を目指している。
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目指す。さらに、カオスやメゾ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。

東京大学理学部物理学科教員一覧

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
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。
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。
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。
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。
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。

東京大学理学部物理学科教員一覧

氏名	専攻分野 (日本語)	研究内容 (日本語)
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効果、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査、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、などに具体的興味を中心がある。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、ラシュバ効果、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に関心を持っている。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、超高压下など極限条件下の結晶構造探索と物性予測、固体表面の構造・電子状態・化学反応機構、水素を含む固体の量子効果、強誘電体の電子物性などが主要な研究テーマである。
坪野公夫	相対論実験	宇宙を見る新しい目「重力波天文学」の実現に向けての研究に取り組んでいる。三鷹に建設した300m基線長レーザー干渉計 (TAMA300) を用いた重力波観測およびそのデータ解析を行っている。さらに将来計画として、キロメートルクラスのレーザー干渉計 (LCGT) や、宇宙空間で衛星を用いた重力波検出器 (DECIGO 計画) の実現を目指している。その他、相対論の基礎実験 (空間等方性の検証) や熱雑音の研究などを行っている。

東京大学理学部物理学科教員一覧

氏名	専攻分野(日本語)	研究内容(日本語)
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。神経回路がいかにして形成され、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標とし、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、バイオイメージングやマイクロアレイなどの最新の実験技術を用い探る。
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トル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。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。
早野龍五	高エネルギー原子核物理実験	エキゾチック原子（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）。
原田崇広	非平衡統計物理学、生物物理学	平衡から遠く離れた系の一般的な性質に興味があります。特に、系の自発的な振る舞い（揺らぎ）や、外部からの操作に対する応答などから系内部の情報を抽出するにはどうしたらいいか、ということを考えています。対象としては、コロイド分散系、生体高分子・タンパク質分子機械、および細胞などを扱っていて、非平衡統計力学などの理論と、光学トラップなどのマニピュレーション技術、および細胞培養やイメージングなどを組み合わせて研究を行っています。
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。

東京大学理学部物理学科教員一覧

氏名	専攻分野 (日本語)	研究内容 (日本語)
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、量子重力の数学的背景としての非可換幾何学の研究などがあげられる。
蓑輪 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なく、実験技術に対する関心をも合わせ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)	量子情報処理は、量子系の状態で表される「量子情報」を用いて古典的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。

東京大学理学部物理学科教員一覧

氏名	専攻分野 (日本語)	研究内容 (日本語)
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 39 名

2012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	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	場の量子論 I	サブアトム物理学	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		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	

2011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 : 常行 真司、上田正仁

- | | |
|-------------------------------------|------------------------|
| 1. ニュートンの法則からラグランジュ形式へ | 5.2 ハミルトニアンと位相空間 |
| 1.1 ニュートンの法則 | 5.3 正準方程式 |
| 1.2 ガリレイ変換 | 5.4 正準変換と母関数 |
| 1.3 オイラー-ラグランジュ方程式 | 5.5 正準変換の例 |
| 1.4 一般化座標と拘束条件 | 5.6 ポアソン括弧式 |
| 1.5 ダランベールの原理 | 5.7 ハミルトン-ヤコビの方程式 |
| 2. 最小作用の原理 | 5.8 リウヴィルの定理 |
| 2.1 最小作用の原理 | 6. 量子力学の基礎 |
| 2.2 オイラー-ラグランジュ方程式の導出 | 6.1 アインシュタイン・ド・ブロイの関係式 |
| 2.3 自由粒子のラグランジアン | 6.2 シュレーディンガー方程式 |
| 2.4 相互作用する質点からなる孤立系のラグランジアン | 6.3 重ね合わせの原理 |
| 3. 対称性と保存則 | 6.4 オブザーバブル |
| 3.1 時間の一様性 → エネルギー保存則 | 6.5 対称性と保存則 |
| 3.2 空間の一様性 → 運動量保存則 | 6.6 ヒルベルト空間と状態ベクトル |
| 3.3 空間の等方性 → 角運動量保存則 | 7. 波動関数の解釈 |
| 3.4 循環座標 | 7.1 コペンハーゲン解釈 |
| 3.5 ネーターの定理 | 7.2 多世界解釈 |
| 4. さまざまなラグランジアン : 回転座標系、電磁場、摩擦のある系論 | 7.3 観測問題 |
| 4.1 回転座標系とコリオリ力 | 8. 時間発展と表示 |
| 4.2 ローレンツ力 | 8.1 シュレーディンガー表示 |
| 4.3 摩擦のある系 | 8.2 ハイゼンベルグ表示 |
| 5. ハミルトン形式と正準変換 | 8.3 相互作用表示 |
| 5.1 ルジャンドル変換 | 9. 不確定性関係 |
| | 9.1 ハイゼンベルグの不確定性関係 |
| | 9.2 非可換観測量の同時測定 |
| | 9.3 一般の非可換観測量の間の不確定性関係 |

9.4 時間とエネルギーの不確定性関係

10. 簡単な例

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. 単位

2.1 SI 基本単位の定義

2.2 代表的な物理量の単位

2.3 各種の常用単位系とその変換

3. 各種の計測法

3.1 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

1.4 物理数学 I : 小形正男

1. 複素関数の性質

1.1 複素数の物理学における意義

1.2 複素関数とリーマン面

1.3 初等関数と収束半径

1.4 対数関数

2. 複素関数の微分と正則性

2.1 微分可能性

2.2 コーシー・リーマンの関係式

2.3 調和関数

2.4 解析関数

3. 複素積分

3.1 定義といくつかの性質

3.2 コーシーの積分定理

3.3 留数

3.4 定積分への応用

4. コーシーの積分定理の応用

4.1 コーシーの積分公式とテイラー展開

4.2 ローラン展開

1.5 物理数学 II : 浜口幸一

講義の目標・概要 量子力学や電磁気学など物理学一般に広く用いられる数学的道具・手法を解説する。

1. 偏微分方程式と Fourier 変換

10.1 調和振動子

11.2 トンネル効果と量子反射

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

4.3 孤立特異点と留数

4.4 解析接続

4.5 δ 関数と積分の主値

5. 等角写像とその応用

5.1 写像としての正則関数

5.2 等角写像の例

5.3 ポテンシャル問題への応用

6. ガンマ関数とベータ関数

6.1 ガンマ関数の解析的性質

6.2 無限乗積表示とハンケル表示

6.4 漸近展開と鞍点法 : Stirling の公式

6.5 ベータ関数

6.6 ディガンマ関数、 ζ 関数

7. フーリエ変換と Sturm-Liouville の理論

7.1 汎関数微分

7.2 フーリエ級数とフーリエ変換

7.3 固有関数展開

7.4 δ 関数のフーリエ変換

波動方程式、熱伝導方程式など

2. 特殊関数論

ベッセル関数、ルジャンドル多項式、超幾何関数など

3. 角運動量の代数的性質 : 回転群

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 : 初田 哲男

1. 3次元空間でのシュレーディンガー方程式

- 1.1 3次元のシュレーディンガー方程式, 動径運動量・角運動量
- 1.2 角運動量演算子とその性質
- 1.3 方向量子化の直感的描像
- 1.4 球面調和関数とその性質
- 1.5 動径シュレーディンガー方程式, 動径量子数と主量子数
- 1.6 水素原子のエネルギー準位, Rydberg 定数と種々の系列
- 1.7 水素原子の動径波動関数とラゲール多項式
- 1.8 ビリアル定理
- 1.9 3次元調和振動子

2. スピン

- 2.1 スピンとパウリ行列、スピン波動関数
- 2.2 ゼーマン効果
- 2.3 一様磁場中でのスピンのラーモア才差運動
- 2.4 スピン共鳴

3. 角運動量、対称性と保存則

- 3.1 角運動量の合成則と Clebsch-Gordan 係数
- 3.2 ウィグナー・エッカルトの定理
- 3.3 空間回転、空間並進、空間反転とその生成子
- 3.4 スピン波動関数の変換性
- 3.5 時間反転, Wigner の定理と反ユニタリー演算子

4. 様々な近似法

- 4.1 Rayleigh-Ritz の変分法
- 4.2 Rayleigh-Schroedinger の摂動論
- 4.3 Brillouin-Wigner (BS) の摂動論
- 4.4 縮退のある場合の摂動論
- 4.5 水素原子の Stark 効果 (基底状態の場合)
- 4.6 水素原子の Stark 効果 (2s,2p 状態の場合)
- 4.7 時間依存の摂動論とフェルミの黄金律
- 4.8 WKB 法と接続公式
- 4.9 ガモフの透過因子、ボーア・ゾンマーフェルトの量子化条件

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

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

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

- 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

5. 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

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

- 2.2 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 リー群とリー代数

- 1.7 回転群とスピノル
- 1.8 $SU(3)$ の表現とクォーク模型

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

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

4. 経路積分

- 4.1 経路積分の考え方
- 4.2 シュレーディンガー方程式の導出

3.3 固体物理学 I : 島野 亮

1. 固体の凝集機構

- 1.1 ファン・デル・ワールス結合
- 1.2 金属結合
- 1.3 共有結合
- 1.4 イオン結合
- 1.5 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 ブロッチの定理

- 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 バンド構造と金属・絶縁体

5. 結晶中の電子の運動

- 5.1 有効質量
- 5.2 群速度
- 5.3 一様電場下でのブロッチ電子の運動
- 5.4 正孔

6. 金属と半導体

- 6.1 金属とフェルミ面
- 6.2 電気伝導
- 6.3 ホール効果
- 6.4 電子と正孔の統計
- 6.5 真性半導体のキャリア密度
- 6.6 ドープされた半導体のキャリア密度

3.4 現代実験物理学 II : 早野龍五, 横山 将志

素粒子・原子核・宇宙物理学実験の測定法の基礎を学ぶ

1. なぜ実験するのか

2. 素粒子標準理論に至る道

3. 単位系, 相対論的運動学, 断面積, 寿命

4. 粒子と物質の相互作用と粒子検出器

5. 加速器

6. 誤差と統計処理

3.5 電磁気学 III : 蓑輪 眞

1. 電磁波概説

1.1 電磁波のエネルギーと運動量

2. 電磁波の伝播

2.1 電磁波の反射・屈折・回折

2.2 Brewster 角

2.3 Evanescent 場

2.4 導波管

2.5 空洞共振器

2.6 光ファイバー

2.7 プラズマ中の電磁波

3. 電磁波の放射

3.1 遅延ポテンシャル

3.2 双極子放射

3.3 アンテナ

4. 荷電粒子の放射する電磁波

4.1 Lienard-Wiechert のポテンシャル

4.2 シンクロトロン軌道放射

4.3 チェレンコフ放射

4. 電磁気学と特殊相対論

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 電磁場の相対論的取り扱い

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

2. 特殊相対性理論

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 サブアトム物理学 :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

4.3 宇宙物理学 : 須藤 靖

1. 宇宙物理学とは

- 1.1 窮理学
- 1.2 寺田寅彦語録
- 1.3 自然界の論理構造
- 1.4 宇宙物理学とは何か

2. 自然界のスケール

- 2.1 物理定数の次元とスケール
- 2.2 自然界の特徴的スケール

3. 宇宙の階層構造

- 3.1 地球：惑星
- 3.2 太陽：恒星
- 3.3 太陽系
- 3.4 太陽系外惑星
- 3.5 天の川：我々の銀河系
- 3.6 銀河
- 3.7 銀河群
- 3.8 銀河団
- 3.9 銀河宇宙
- 3.10 宇宙の階層構造のまとめ

4. 物理法則と天体

- 4.1 物理法則と初期条件
- 4.2 木星型（ガス）惑星
- 4.3 地球型（岩石）惑星
- 4.4 恒星（主系列星）
- 4.5 白色矮星
- 4.6 中性子星
- 4.7 銀河
- 4.8 銀河団
- 4.9 宇宙の階層と基本物理法則

5. 恒星

- 5.1 光度と等級
- 5.2 黒体輻射と色指数
- 5.3 ポリトロープ星
- 5.4 ヘルツシュプリング・ラッセル図
- 5.5 元素の起源

6. コンパクト天体

- 6.1 白色矮星
- 6.2 中性子星

4.4 プラズマ物理学 : 牧島 一夫

1. プラズマ物理学の意義
2. 磁場の無いプラズマ
3. 単一荷電粒子の運動
4. プラズマの運動方程式

5. 磁気プラズマ中の電流

6. 磁気プラズマの平衡と安定性

7. プラズマ中の波動：磁場の無い場合

8. プラズマ中の波動：磁場のある場合

4.5 固体物理学I：内田 慎一

1. バンド理論と結晶結合（基底状態）

- 1.1 ブロッド電子、結晶運動量、電子と正孔
- 1.2 バンド理論、金属と絶縁体、周期表
- 1.3 半導体、化合物半導体
- 1.4 結晶結合

2. 固体の励起状態と物性

2.1 電子-正孔対励起

2.2 外場に対する応答

3. 金属の安定性・不安定性

3.1 フェルミ液体

3.2 金属の不安定性、磁性・超伝導

4.6 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

2.3 量子化された輻射場と物質の相互作用

3. トピックス

5 4年生 冬学期

5.1 現代物理学入門：村尾 美緒、溝川貴司

1. エンタングルメントと量子情報

- 1.1 概論
- 1.2 量子情報を学ぶために必要な量子力学の復習
- 1.3 エンタングルメント
- 1.4 LOCCとエンタングルメントの定性的・定量的解析
- 1.5 量子情報処理とエンタングルメントの関連
- 1.6 量子テレポーテーションと量子テレクローニング

1.7 測定ベース量子計算と量子鍵配布

2. 強相関電子論

- 2.1 バンド理論、電子ガス、1電子近似
- 2.2 多重項構造、配位子場理論
- 2.3 モット絶縁体でのスピン・軌道の秩序と無秩序
- 2.4 強相関金属での電子質量増大（重い電子系）
- 2.5 スピン・電荷・軌道揺らぎと超伝導

5.2 素粒子物理学：浅井祥仁

1. 単位系、概論

2. クォークモデル

3. Dirac 方程式

4. Dirac 方程式とスピン

5. 反応の運動学

6. 不連続対称性

7. 連続対称性

8. ゲージ原理

9. 隠れた対称性とヒッグス機構

5.3 生物物理学特論：樋口 秀男 北尾彰朗 野口博司

1. 蛋白質と膜の生物物理学

1.1 蛋白質及び膜の生物物理学とは

- 1.2 蛋白質立体構造決定の方法
- 1.3 蛋白質のダイナミクスと折れ畳み
- 1.4 蛋白質のシミュレーションとデザイン
- 1.5 生体膜の構造と機能

- 1.6 膜曲面の熱力学
- 1.7 膜の相転移
- 1.8 赤血球のダイナミクス

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

6. 核力の基礎

7. アイソスピン対称性

8. 集団運動

9. 核分裂、核融合、放射線

5.6 物性物理学特論 : 長谷川修司 小森文夫

固体物理の知識を前提にして、固体表面の物理を、基礎概念から最新のトピックスを交えて解説する。

1. 概論

- 1.1 表面科学とは
- 1.2 歴史
- 1.3 表面科学とナノテクノロジー

2. 表面の原子配列

- 2.1 表面再構成・緩和
- 2.2 動的過程
- 2.3 実験手法 ; 回折法、顕微鏡法

3. 表面電子状態

- 3.1 表面状態
- 3.2 トポロジカル表面状態

3.3 実験手法 ; (逆) 光電子分光法、トンネル分光法、電子エネルギー損失分光法

4. 走査プローブ顕微鏡

- 4.1 原理
- 4.2 表面構造観察
- 4.3 局所電子状態・表面バンドの観測
- 4.4 原子マニピュレーション

5. 表面電子輸送

- 5.1 表面空間電荷層
- 5.2 表面状態伝導

6. 表面超薄膜磁性

- 6.1 近藤効果
- 6.2 磁性超薄膜成長

5.7 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 ボーデ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—アラン分散

5.8 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

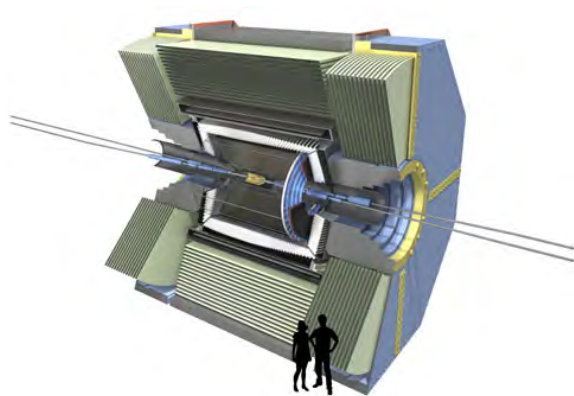


図1. Belle II (ベルツー) 測定装置の完成予想図。

川理論は2008年ノーベル物理学賞に輝いた。さらに、当研究室は、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。

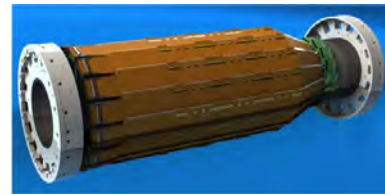


図2. 当研究室で製作する、Belle II 測定装置心臓部の半導体粒子検出器の完成予想図。

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う。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、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

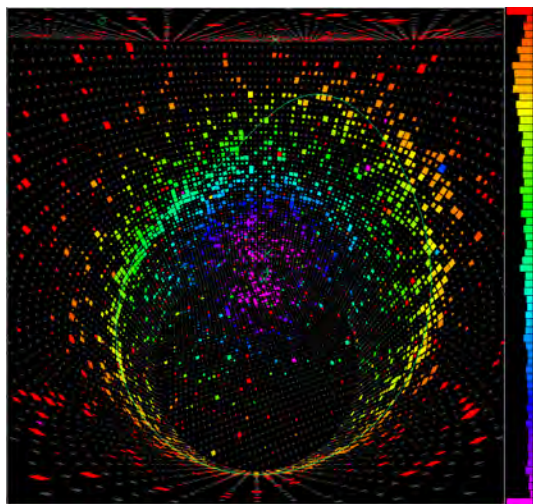


図 3. スーパーカミオカンデ検出器でとらえた、加速器ニュートリノビームによるニュートリノ反応事象。ニュートリノ反応によって生成された粒子が放つチェレンコフ光がリング状に見えている。ミューオンニュートリノがニュートリノ振動によって変化した電子ニュートリノによる反応事象の候補。色はそれぞれの光電子増倍管に信号が検出された時間を表す。

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 非対称性測定だけでなく、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おり、物質階層はわずか 4% を占めるのみであり、かつ、宇宙は現在、加速膨張しているという驚くべき発見をもたらした。通常物質や放射（光）だけが存在している宇宙では、宇宙の膨張は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

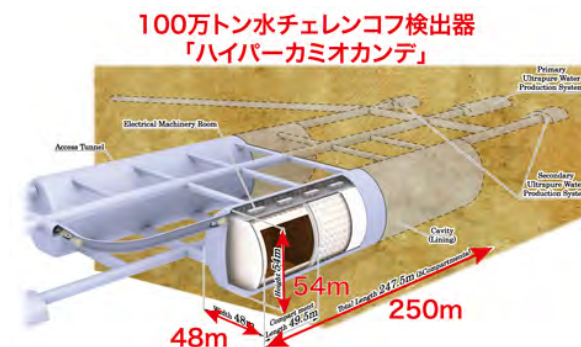


図 4. ハイパーカミオカンデ検出器の概念図。縦横約 50m、長さ約 250m のタンク 2 つに計 100 万トンの超純水を満たす。水中で発生した高速の粒子が発するチェレンコフ光を、内壁に取付けた多数の光センサーで検出する。

して働く存在が必要であり、これがダークエネルギーである。ダークエネルギーは、アインシュタインの一般相対論に取って代わる新たな物理法則の存在を意味しているかもしれない。ダークエネルギーの研究は、時空の構造とその究極の構成要素を探求する素粒子物理学のメインテーマとなりつつある。この不思議なエネルギー、ダークエネルギーの研究は、現在のところ加速器実験では不可能で、天文観測によって行う必要がある。当研究室では、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。

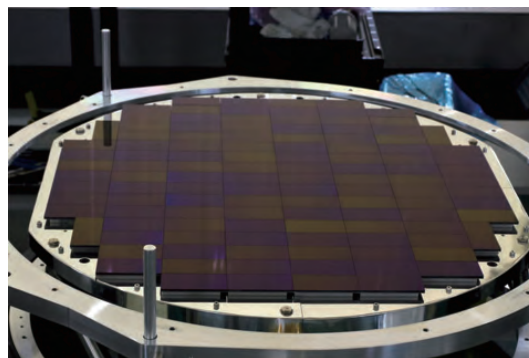


図 5. 完成した 928 メガピクセル CCD カメラ。すばる望遠鏡に取付け、ダークエネルギーの研究のための観測を行う。

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。

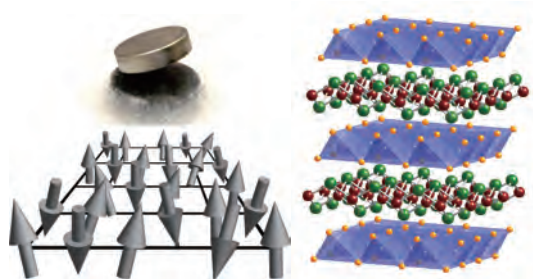


図1. 左：高温超伝導体が「ゲージ対称性の破れ」のために磁気浮上している様子と、高温超伝導体の理論的模型、矢印は電子スピン。右：最近我国で発見された鉄化合物高温超伝導体の結晶構造。

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、別冊数理学「場の理論」、別冊数理学「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。

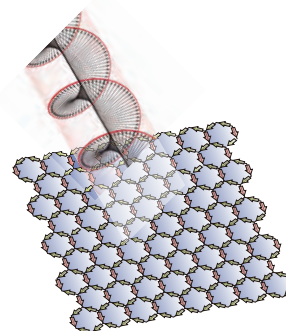


図2. 非平衡効果の一つとして、グラフェン（炭素の蜂の巣格子）に円偏光した強いレーザーを照射すると、直流のホール電流が予言される。

浅井研究室

浅井祥仁 准教授

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) 世界最高エネルギー LHC での素粒子研究; 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) であり重心系エネルギー 8TeV (2年後は 14TeV) の世界最高エネルギーで素粒子実験が行われている。標準理論と呼ばれる現在の素粒子物理の枠組みは、高いエネルギー (不確定性原理を考えれば、より小さな領域) では正しくないことが分かっており、この LHC で「より本質的な枠組み」の発見が期待されている。

南部先生が考えた自発的対称性のやぶれで我々の世界が「質量」を持っていると考えられている。真空はカラではなく、ヒッグス粒子に満たされおり、粒子がこのヒッグス粒子とぶつかって質量が生じていると思われている。このヒッグス粒子の兆候を 2011 年の研究でとらえた。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。これから非常に exciting な時になるとおもわれる。

また 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) を用いた量子電磁気学の検証など幅広く行っている。



LHC 加速器の写真

下の写真はポジトロニウムの微細構造定数を精密測定する為にミリ波発生源 (ジャイロトロン) を開発し、世界ではじめてポジトロニウムの遷移の観測に成功した。



ミリ波発生源 (ジャイロトロン)

3 今後の展開

LHC でまもなく、ヒッグスや超対称性が見つかり、新しい素粒子研究の時代が始まる。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制御性を利用して、量子多体問題、ナノ系の熱力学、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求が可能である。例えば、光で作られる結晶（光格子）を用いると理想化された状況下で高温超伝導のような強い相互作用をする系の性質を調べることができる。また、ボースノヴァとよばれる超新星爆発に類似した非平衡現象、キブル機構という宇宙初期の相転移の研究も可能である。私たちはこのような系におけるボース・アインシュタイン凝縮やフェルミ超流動の研究を行っている。

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。ユニタリティ極限では、原子の種類などの物の性質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おり、高温超伝導のメカニズムの問題や原子核物理の問題とも深い関連がある。また、ホモトピー理論などの数理物理の手法を用いて、凝縮相における渦や単極子などのトポロジカル励起の性質の解明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、非可換ゲージ場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。

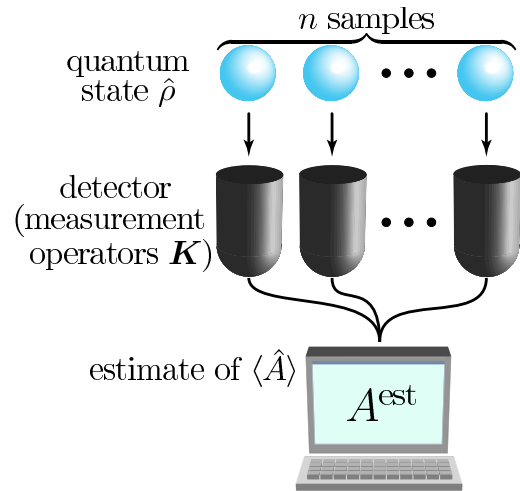
【量子論および統計力学と情報理論の融合】

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取り組み、誤差や擾乱の情報論的定式

化(右図参照)を通じて、これまで予想されていた交換関係による下限は達成されず、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。他にも、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。さらに、それらの情報幾何を用いた統一的な記述にも関心がある。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、統計力学が幅広い系で成立しているという事実は、系の統計力学的性質が系の詳細な情報に依らないことを示しており、統計力学はなぜ成立するのか、という統計力学の基礎付けの解明にも、情報が一つのキーワードになると私たちは考えている。

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求する。



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。

内田研究室

内田 慎一 教授 掛下 照久 助教

1 最近の研究テーマ

Cu 酸化物で発見された高温超伝導は、1986 年の発見以来 20 年以上に及ぶ膨大な量の研究にも拘らず、その発現機構は解明されておらず、物理学最大の謎の 1 つであり続けている。また、その超伝導臨界温度 T_c も 1993 年に 135K を記録して以来上昇が止まっている。高温超伝導体は反強磁性を示す絶縁体に正孔/電子をドーピングすることにより発現する。しかし、ドーピングにより実現するのは d 波対称性のクーパー対が凝縮した超伝導相だけではなく、スピングラス相、ストライプ相等多様である。これらを総称して「擬ギャップ相」と呼んでいる。「高温超伝導宇宙」の「ダークマター」ともいうべきものである。発現機構の解明、 T_c の向上を目標として、高温超伝導における「擬ギャップ」の役割、超伝導秩序との競合、共存関係を多様なスペクトロスコーピーを駆使して研究している。

2 高温超伝導体中の未知の「宇宙」

通常の超伝導体では、極めて多数の電子対（クーパー対）が均一に分布することによりその位相を揃え（コヒーレントになり）、超伝導を発現する。クーパー対の半径が極端に短く、その数も少ない高温超伝導体中で電子対がどのようにコヒーレンスを獲得するのか、また電子がクーパー対を形成しないときにできる「擬ギャップ相」の正体を STM プロブで探っている（米国コーネル大との共同研究）。これまでにわかったことは、
・ 高温超伝導状態は均一な状態ではなく、ナノメートルスケールで不均一な状態である。
・ 不均一性の原因であり、超伝導と競合している「擬ギャップ相」には電子状態密度の周期的変化を伴う別の秩序が存在している。

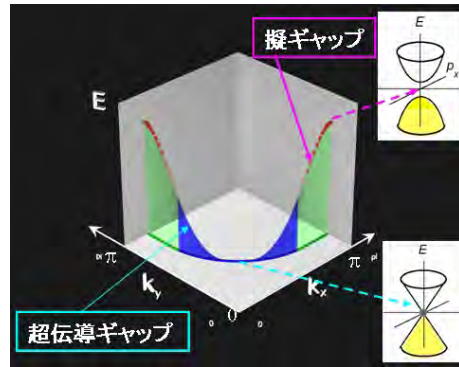
3 高温超伝導体中の「素粒子」

超伝導体中のクーパー対を分離させると電子ではなく準粒子と呼ばれる「素粒子」が出てくる。高温超伝導体の準粒子には振る舞いを異にする 2 種類があることがわかってきた。2 種類の準粒子のダイナミクスを探り、様々な秩序とどのようにかかわっているかを調べている。

- ・ 2 種類の準粒子のうちギャップをもたない（質量のない）準粒子は結晶全体に広がっており、この準粒子からみれば高温超伝導状態は均一である。
- ・ ギャップをもつ（質量をもつ）準粒子は「擬ギャップ相」の形成にかかわっていると同時に、不均一性の原因になっている。

4 今後の展開

研究の最終目標は、高温超伝導機構の解明と室温超伝導の可能性を明らかにすることである。現在でもメカニズムが未解明なのは、「擬ギャップ相」の正体と役割が充分分かっていないことに加え、上記 2 種類の準粒子、フォノンやマグノンなどの素励起が複雑にからみ合って高温超伝導という「構造」が形成されていることにある。先ず、「擬ギャップ相」の正体を解明すること、次に高温超伝導発現における役割を明らかにすることが今後の課題である。これらは、室温超伝導実現への 1 つの道でもある。



高温超伝導体中のノード準粒子、アンチノード準粒子と超伝導ギャップ、擬ギャップ

大塚研究室

大塚孝治 教授

1 研究室の概要

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、マイクロな原子よりさらに小さく、原子核は超マイクロな世界となる。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。さらには、核力そのものも、研究の対象である。核力には 2 個の粒子の間に働くもの（2 体力）に加えて、3 個の粒子の間に働く 3 体力もある。

2 最近の研究テーマ

地球上に自然に存在す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。

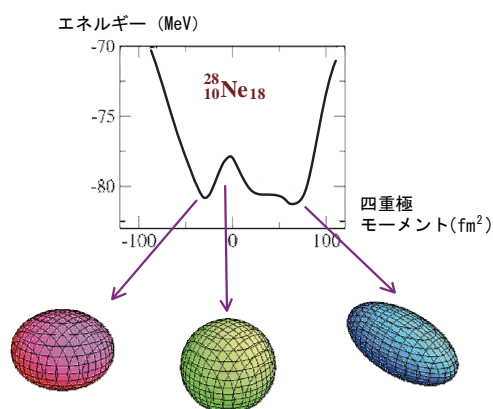
一方、宇宙では陽子数と中性子数が大きくずれている不安定核が作られ、超新星爆発など物質誕生プロセスの謎を解き明かす鍵になっている。不安定核はその名に違わず存在時間が非常に短く、また、陽子数と中性子数のアンバランスに起因して、安定核には見られない特異な性質を数多く持っている。その不安定核が持つ性質を解明し、その存在限界をさぐるのが最近の大きな研究テーマである。それには様々な理論手法が用いられる。我々のグループにより、約 10 年前に「モンテカルロ殻模型」という計算方法が提案され、それまでは巨大な計算機を用いても実行不可能とされてきた理論計算が可能になった。モンテカルロ殻模型に基づくシミュレーションにより、陽子数と中性子数を決めてやれば、その原子核が球形や楕円形になったりすることを予言することができる。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

子核がエネルギーが異なる様々な量子状態をとる事ができ、それらは球や楕円の形になっているのが分かる。

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」を提唱した。魔法数とは、陽子数や中性子数が魔法数（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世界で初めて理論的に示した。そのために、例えば、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。

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 の形状の理論的の予言。3 種類の形が比較的低いエネルギーで出現する。

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かと思えます。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が、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。

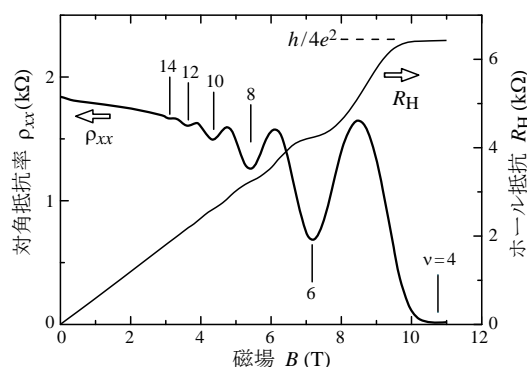
最近では、InAsに鉄の乗せた系におけるスピンのガラス状態を調べる研究なども行っています。

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の顔を出してきます。

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

小形研究室

小形 正男 教授

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、それを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られている。

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。とくに反強磁性という磁性状態と超伝導状態との相関関係に着目して調べている。

(2) 朝永・ラッティンジャー液体の理論

1次元電子系では朝永・ラッティンジャー液体という通常の金属状態と異なった状態になると理論的に予想されている。1次元における厳密解や共形場理論などの数物理的な方法と数値計算などを組み合わせて新しい状態の可能性を追求している。とくに1次元的に閉じ込められた電子に関しては、電荷とスピンという2つの自由度が、それぞれ独立にコヒーレントな波として運動する『スピン・電荷分離』と呼ばれる特異な現象が予測されている。

(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。その場合の、電荷密度波・スピン密度波の理論や金属-絶縁体転移について調べている。

(4) 新しい超伝導体

2008年に日本で作られたFeAsを持つ超伝導体や、水と 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>

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 が完成し、2010 年から重心系衝突エネルギー 7 TeV で稼働し、質量の起源＝ヒッグス粒子や、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、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。国際的な現状認識は、現在はまさに最高エネルギー加速器によって素粒子物理学の新たなパラダイムが拓かれる「革命前夜」である。一方、宇宙に眼を転ずれば、「暗黒エネルギー」と「暗黒物質」が宇宙のエネルギー組成の殆どを占めている事が分かってきた。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。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、初期の重要なデータ解析を行っている。当研究室は、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超低温エネルギー中性子（超冷中性子）は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 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、ILL(グルノーブル) で実験を

行なっている。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。

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。



「リニアコライダー」の鳥瞰図

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、長く人々を捉えてきた課題である。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、これによって光の物理学は完成した。しかし、1960年のレーザーの発明によって、全く異なる光—強くかつコヒーレントな光—を手にする事となり、光の物理学の様相は一変した。可視光は 10^{14} ~ 10^{15} ヘルツで、テレビやFM放送で使っている超短波帯の電波に比べ、周波数は7桁も高い。そのため、光の位相や振幅を自在に制御することは不可能であった。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できるようになった。この革新により、アト秒(10^{-18} 秒)というとてつもなく短いパルス光を発生する技術が生まれつつある。これを用いると、従来は”瞬間”現象としてしか捉えられなかった電子の量子準位間の”遷移”を、リアルタイムで追跡することが可能になる。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ると共に、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 光で創る固体の量子現象

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とし、そこに生じるマクロスコピックな量子現象の探求である。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の集団は非常にエントロピーが小さい。従って、光を巧みにコントロールして物質に照射すると、瞬時に極低温に冷却することが可能である。この手法を用いて、原子気体、半導体中の電子系を対象とした実験を進めている。量子統計性と物質に内在する相互作用との競合、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。このような目的に必要な、高い安定性を持つレーザーや新しい分光技術の開発も併せて進めている。さらに、光によって創られたこの巨視的な量子系が輻射場とどのように結合し、どのような光を放射するのかということも重要な課題である。新しい量子光学計測手法を開発し、光の量子統計性の特徴を追跡する実験に取り組んでいる。

3 ナノ時空間構造を用いた非自明な光学現象

近年の微細加工技術の進歩により、光の波長よりはるかに小さな人工構造を設計・作製できるようになっている。このようなナノスケールの構造体は従来の電磁気学の常識を覆す光学現象を引き起こすことが明らかになってきた。五神研究室では、最先端の微細加工技術を駆使して、従来とは違った新しい量子光学現象の研究を進めている。最近、自然放出を円偏光状態にする“人工キラル”という構造の発見や、物質の特異な対称性を利用した、テラヘルツ磁気放射の制御などに成功している。

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. <http://www.gono.t.u-tokyo.ac.jp/>

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

(3) 分子内電子の立体ダイナミクスの研究

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

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

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

3. 研究活動

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

4. メッセージ

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

●当研究室に関する情報は、ホームページ (<http://light.phys.s.u-tokyo.ac.jp/indexj.html>) 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 矢向健太郎助教

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た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。

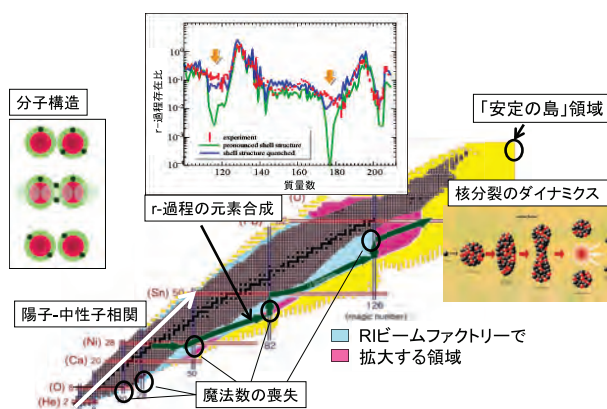
実験手法は従来の教科書的手法とは異なるスタイルをとる。伝統的な手法は実験室系で静止している原子核を対象としてきたが、不安定核ビームを用いた場合は、調べたい原子核が高速の約60%で運動しており、これに適した新しい実験手法を確立することが肝要である。このような不安定核ビームを用いた実験研究は始まったばかりで歴史が浅い。これまで逆運動学的特徴を生かした新手法を開発してきたが、これをもとに、「魔法数の問題」、「核内の核子相関」、「原子核の分子構造」などに関連した核構造の研究を行っている。r-過程での元素合成過程についても未知核の半減期測定などを行っており、新しい成果を挙げつつある。

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。

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・原田研究室

佐野雅己教授 原田崇広講師、竹内一将助教

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いくらかでも見つかる。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、極め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。構造のない状態から出発して、自発的に秩序構造が形成される現象は、宇宙スケールの現象から、我々が日常的に経験する物理現象に至るまで、随所に見られる。これは、系が熱平衡状態ではなく、系を貫くエネルギーや物質の流れが存在して、系が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。一方で、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場合もある。例えば、我々の心臓を構成する多数の心筋細胞の興奮と拍動、闇夜に舞う蛍の集団の発光、金属表面で起こる化学反応、基板上で発振している電子回路などは、一見して全く異なる系であるが、その挙動の質的な側面はよく似ており、実際に、ある理想的な条件下ではこれらの系の時間発展を同じ方程式で記述できることが知られている。このような種類の普遍性を基本にして、一見異なる様々な現象を横断的・統一的に理解していこう、というのが非平衡開放系を研究するための重要な指針となっている。こうした観点からの非平衡系の研究が、まとまった学問分野として認識されるようになったのは、比較的最近の事である。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まだ多く残されている。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、平衡から少しだけ離れた系に関しては、それを扱うための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。これは、近年飛躍的に研究が進んだ問題であるが、我々はこの問題に対して、非平衡状態における系の揺らぎと応答との関係に着目して研究を進めている。最近、我々は、熱運動する粒子に対して観測とフィードバック操作を行うことで、自由エネルギーを取り出す、いわゆるマックスウェルの悪魔に相当する実験を行い、情報が自由エネルギーに変換可能であることを初めて実証した。このような実験を可能にするためには、ナノメーター、ピコニュートンの精度での計測が必要である。我々は、レーザーピンセットを用いて、非平衡における新しい法則を探求している。

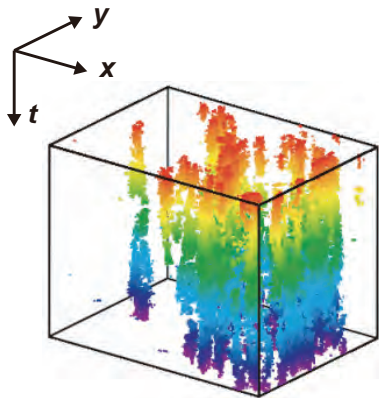


マックスウェルの悪魔の原理で階段を上る粒子の概念図

この他にも、微小な系にレーザー光によってエネルギーを注入することで、新規な非平衡状態を作り出し、それを用いて微小物体を操作する新しいレーザートラップの原理を発見した。こうした研究を進めるためには、新しい実験手法と、それを解析するための新しい理論の開発が不可欠であり、挑戦しがいのある研究課題である。

2 非線形動力学・自己組織化

開放系に注ぎ込むエネルギーまたは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、転移を繰り返し、しかもそれらの転移は物質や系によらない普遍的な性質を持つことが最近の研究により明らかになってきた。例えば、非線形力学系は分岐点近傍での繰り返り込み的な性質により、系に固有な方程式によらず、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、臨界点において相関長が発散するため、やはり系の詳細によらない普遍性を示す。しかも、これらの非平衡相転移は平衡のものとは異なる普遍性クラス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流動が作る様々のパターンなどの実験を通して、非線形動力学という共通した枠組みで解析を行っている。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。

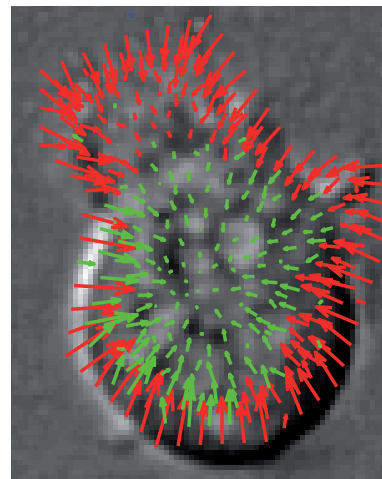


液晶対流系の乱流状態における Directed Percolation 転移

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。これまでも、物理学で発展された計測手法を、生命を構成する様々な部品に適用することによって、生命システムの物質的な成り立ちを明らかにしようとする研究は大きく進んできた。しかしその一方で、多種多様なそれらの

部品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解明に関しては、物理学からの貢献はかなり限られたものに留まっている。これは、生命システムが、膨大な種類の分子（ただしそれぞれの個数はそれほど多くない）から構成された、極めてヘテロかつ揺らぎの大きな系であることに起因している。生命システムの持つこのような性質は、均質な構成要素が無限個集まった系の解析を得意としてきた統計力学などの手法をそのまま適用することを困難にする。また、生命現象を扱う場合には、「デザイン」や「機能」、「情報」などと言った、従来の物理学ではあまり正面から扱われなかった概念にも取り組む必要がある。したがって、生命をシステムとして扱うための枠組みを、物理学に基づいて構築していくことは、極めてチャレンジングなテーマと言える。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、細胞内ダイナミクスの可視化、細胞運動のメカニズムや、細胞機能の揺らぎの計測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。



単一細胞が発生する応力分布の3次元測定：細胞運動の理解へ向けて実験と数理モデル化を行っている。

島野研究室

島野 亮 准教授 松永隆佑 助教

島野研究室では光物性物理学と呼ばれる分野の研究をしている。固体中では多数の電子が存在することによって、量子力学効果がマクロなスケールで現れることがある。超伝導はその代表例だが、一個の電子の運動を考えている限りは予想もできない面白い現象が発現することが物性物理学研究の大きな魅力でもある。当研究室では、テラヘルツ分光や超短パルスレーザー分光といった先端レーザー分光法を主な実験手法として、広範な物質系を対象にその光学的性質の観測から量子物性研究を進めている。特に、光でマクロな量子状態をつくりだす、あるいは制御することを目標として以下にあげるような研究を進めている。

1) 半導体中に光でつくる量子凝縮相

半導体に適当な波長の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“正孔”が生成される。この電子と正孔は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。エキシトンはボース粒子のように振舞うため、極低温でボースアインシュタイン凝縮を起こすことが理論的に予測されている。光を強くしてエキシトンを高密度にすると、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乖離してしまう。この乖離した状態は電子(正孔)の気体であり金属的に振舞うが、この状態を密度を保ったまま十分低温にすることができれば、今度は多数の電子と正孔が量子力学的に束縛しあった新たな絶縁体状態になると考えられている(数学的にはこれは超伝導を記述する方程式と同等)。量子力学効果によって生じるこれら“量子凝縮相”の実現とその性質の解明を目指し、テラヘルツ分光・レーザー分光技術を駆使して研究を進めている。

2) 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。通常、非常に強い光を照射すると物質は熱により破壊されてしまうが、超短パルスの光に対しては、物質を破壊せずにこの特殊な状況を実現することが可能になる。このような強光電場領域での新規光学現象の探求を、高強度のテラヘルツ波パルスなどの

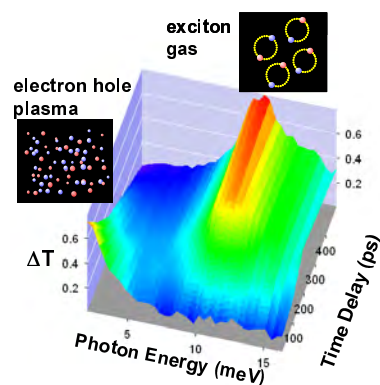
光源開発と物性研究両面から進めている。

3) 強相関電子系のテラヘルツ分光

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。この系は、電荷、スピン、格子間の相互作用のバランスの結果として多彩な基底状態が現れる。興味深いのは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である。電荷とスピンの強い結合は、電場によるスピンの励起や磁場による電荷の移動といった通常の物質中の電磁気学では無視されている効果をもたらす場合がある。当研究室では、特殊な光「テラヘルツ波」を用いてこの強相関電子系の奇妙な性質を明らかにするとともに、光による新たな物質相の生成を目指した研究を進めている。

研究室ホームページ:

http://thz.phys.s.u-tokyo.ac.jp/toppage_j.htm



Si中に光パルスでつくられた電子正孔ガスから、準粒子“エキシトン”が形成される様子を約1兆分の1秒のシャッタースピードの時間分解テラヘルツ分光で捉えたもの。

宇宙理論研究室

須藤 靖 教授 吉田 直紀 教授 樽家 篤史 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、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。

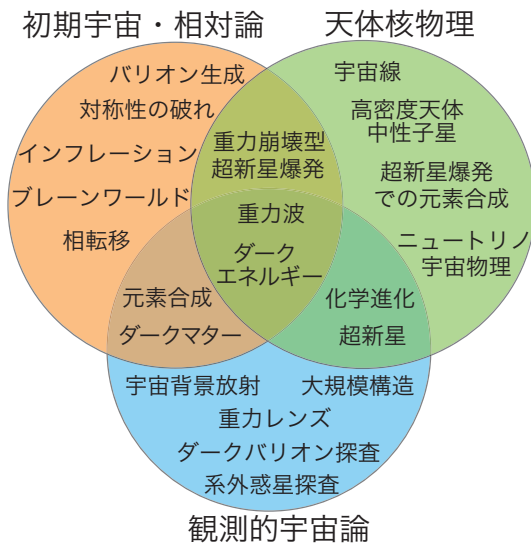


図 1: 宇宙物理学全体の概念図。この中で我々の研究室では現在、ダーク物質、ダークエネルギー、ダークバリオン、宇宙背景放射、大規模構造、重力レンズ、系外惑星などを中心に研究している。

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3/4がダークエネルギー、1/5がダーク物質、残りの約4パーセントが通常元素、という結論が得られている。これが宇宙の「標準モデル」である。しかしながら宇宙の主成分の正体が全く理解されていないという驚くべき事実は、宇宙・素粒子物理学のみならず、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、ダーク物質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物質の分布を明らかにした。

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、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

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、PFSという、大規模な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。

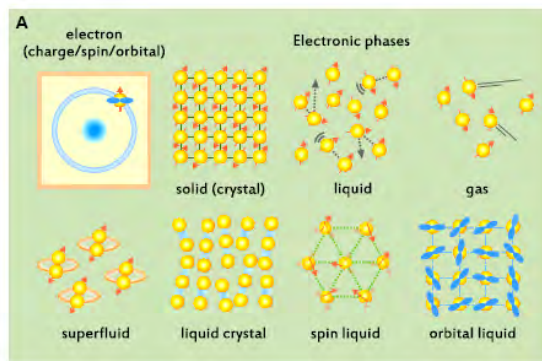
また、系外惑星の分野は今まさに黎明期といったところであり、観測、理論共に著しい進展を見せている。今後数年～数十年で計画されているさまざまな規模の将来計画とも合わせて、異形の系外惑星たちはどのようにしてできたのか、地球の

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 軌道の空間拡がり小さいが故、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。

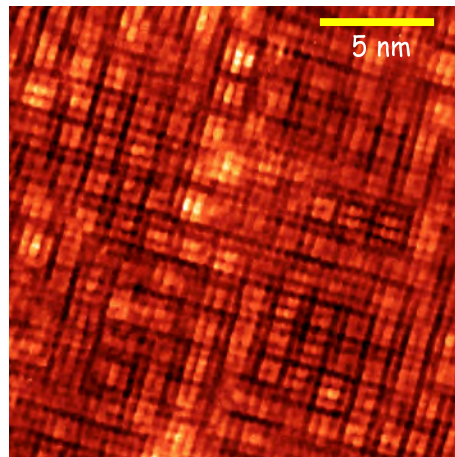


相関電子が形成する様々な電子相

(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 Ta₂PdS₃、半金属ながら強結合超伝導を示す SrPt₃P など

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の上に置くと、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 Na₄Ir₃O₈ に着目した。この物質が磁性体であるにもかか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、期待されるスピンフェルミ面、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

LiV₂O₄ 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 V³⁺ と V⁴⁺ 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、V³⁺ と V⁴⁺ 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 LiV₂O₄ 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、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 Sr₂IrO₄ 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（磁場による電気分極の変化等）の存在を明らかにしてきた。一方、超伝導相のような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・軌道相互作用により一重項-三重項クーパー対混合のような新奇な電子状態が期待され、近年注目を集めている。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、薄膜や外場等により人工的に空間反転対称性の破れた場を作り出すというアプローチに現在取り組んでいる。

(7) 電子構造の観点からの電池設計

近年、深刻な環境・エネルギー問題から蓄電技術への関心が高まっている。その一つがリチウムイオン等を用いる二次電池である。これらでは、遷移金属酸化物等が電極に用いられるが、現状ではイオンの性質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してい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の物質を見出した。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を目指している。

高瀬・江尻研究室

高瀬雄一教授 江尻晶准教授

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てゆきます。これらの研究および、上述の国内および国際共同研究をとおり、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。

立川研究室

立川裕二准教授

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、量子効果が大きいと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、その他の数理論理の分野、また数学とも深い関係を持つことが知られています。

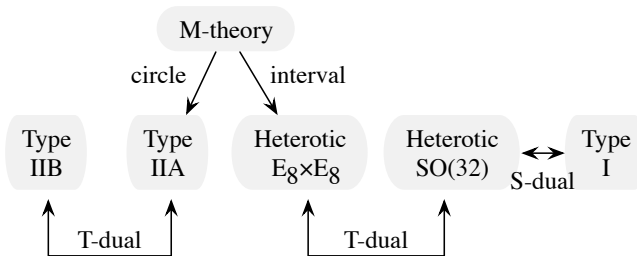


図 1: 超弦理論の双対性

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

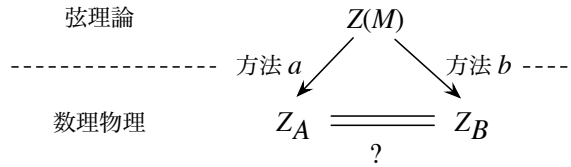


図 2: 弦理論からの「不思議な関係」の導出

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論理での系 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連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、最近はこのこと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よう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

・大規模な生体物質のための電子状態計算手法FMO-LCMO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]

・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

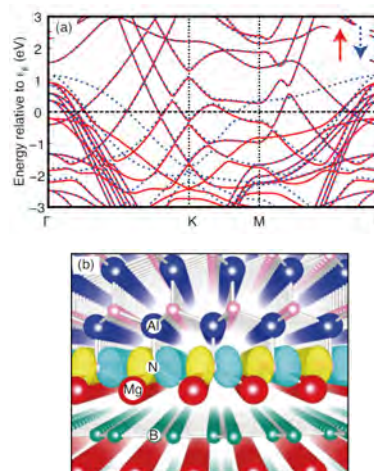
・強誘電体(BaTiO₃他)の欠陥構造と電子状態

・希薄窒化物 GaNP の光学伝導度

・結晶磁気異方性と保磁力

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る。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を開拓したいと考えている。



図：理論予測された AlN/MgB₂ 界面のスピンスplit。上向きスピンと下向きスピンのバンド構造 (a) と、界面付近の結晶構造と分極した上向きスピンの波動関数 (b)。 (Y. Gohda and S. Tsuneyuki, Phys. Rev. Lett. 106, 047201 (2011).)

坪野研究室

坪野 公夫 教授 麻生 洋一 助教

われわれの研究室では「実験相対論」とよばれる分野を研究しています。その中でも、「重力波天文学」を切り拓くことが現在の中心テーマであり、重力波に関する研究を精力的に推し進めています。これについてこちらから説明します

1 宇宙の壮大なドラマ

夜空の星を見ると、どれも静かに輝き、永遠に変わらぬ安定した運行を続けているように思えます。しかし実際にはこの宇宙のどこかでは、絶え間なく壮絶な星のドラマが繰り広げられているのです。太陽の100万倍もの質量をもったブラックホールが太陽程度の星を飲み込んだり、ブラックホールや中性子星同士が衝突・合体するということも日常的に起きています。

2 重力波で見る宇宙

太陽より重い星では、その生涯の最後に壮絶な大爆発を起こして死滅します。これが超新星爆発であり、その後にはブラックホールや中性子星が残されます。しかし残念ながら、これまでの光をはじめとする天文学の手段では、これらの宇宙で繰り広げられるビッグイベントを詳細に知ることはできません。これは、観測手段である電磁波が、周囲のガスや塵によって吸収・散乱されてしまい、地球に届かないためです。これに対して重力波は透過性が非常によいため、他の手段では見ることができない星や銀河の中心核付近の内部の情報を伝えてくれます。つまり、これまでの電磁波を用いた伝統的な観測によって得られる情報と、「重力波天文学」によって明らかにされるであろう宇宙の姿は完全に相補的な関係にあります。将来的には、宇宙の誕生直後の様子も重力波により明らかにされ、人類は全く新しい宇宙像を手に入れるかもしれないと期待されています。

3 重力波検出実験の現状

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ではあるが証明されています (テイラー (J. Taylor) & ハルス (R. Hulse) 1993 年ノーベル物理学賞)。しかし残念ながら、まだどこでも重力波の直接観測には成功していません。日本では世界に先駆けて三鷹にある国立天文台のキャンパスに片腕 300m の L 字型のレーザー干渉計 TAMA300 を建設し、銀

河近傍からの重力波検出をめざして 2000 年から観測を続けています。その後、世界でも大型レーザー干渉計の開発が進み、アメリカでは 4km の基線長をもったレーザー干渉計 (LIGO) が 2 基稼動しています。ヨーロッパでもイタリア・フランス連合の VIRGO (基線長 3km) とドイツ・イギリス連合の GEO (基線長 600m) が重力波観測を開始しています。TAMA300 は、今後も世界的な重力波観測ネットワークの中で重要な位置を占めることになります。

4 重力波研究のこれから、KAGRA、DECIGO

次の目標は、確実に重力波を検出できるだけの感度をもった検出器の開発・建設です。日本では、低温利用の高感度レーザー干渉計 (KAGRA) 計画が 2010 年度の「最先端研究基盤事業」プログラムの一つに選ばれていよいよプロジェクトが始動しました。スーパーカミオカンデのある神岡鉱山に基線長 3km をもった高感度レーザー干渉計を建設します。KAGRA は 200Mpc 離れた場所で起きた連星合体からの重力波を検出できる感度をもち、実現すれば 1 年に 0.2 から 20 個の重力波イベントを記録するはずですが、また、将来的には重力波検出は宇宙空間に飛び出て行くことになるでしょう。われわれは、そのための準備を既に始めています。日本が狙っているのは、NASA/ESA の LISA 計画 (基線長 500 万 km の宇宙空間レーザー干渉計) が目標としている 1mHz 帯と、地上の検出器がカバーする 10Hz 以上のちょうど中間に位置する 0.1Hz 周辺の周波数帯をターゲットにした DECIGO 計画です。この帯域は宇宙論が予言するような重力波源をとらえるのに最適な領域であり、将来的にはこれにより初期宇宙に対する手がかりが得られるであろうと期待されています。

研究室の HP :

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

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に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。

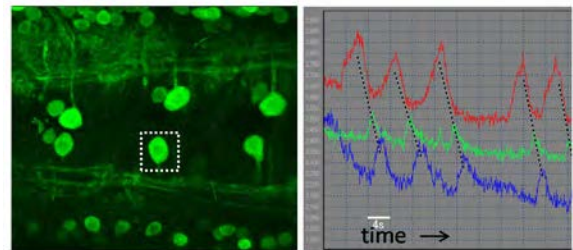


図1 生きた個体のなかで個々の神経細胞の活動を測定する。遺伝子操作を用いて、中枢神経系内の特定の細胞に Ca^{2+} 濃度感受性蛍光タンパク質を発現した。左図に示すように、個々の神経細胞を可視化した上で、その一個一個（例として一つを白点線で囲った）の神経活動を測定できる（神経が活動すると Ca^{2+} 濃度が上昇するので、 Ca^{2+} 濃度の変動は神経細胞の指標となる）。右図は3つの神経細胞の活動の様子を測定したもの。

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、結晶の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わを起こして、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。その結果、表面1原子層だけに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。最近では、結晶表面での空間対称性の破れに起因するトポロジカル表面状態の研究が盛んに行われている。さらに原子や分子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も行われている。このように、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、半導体や金属の結晶表面を対象として、原子配列、電子状態、相転移、電子輸送、質量輸送、素励起、表面磁性などをテーマに多角的に実験研究を進めている。そのため、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、磁気光学カー効果装置などの超高真空装置を備え、各学生が複数の装置を使いこなして研究を進めている。詳しい研究内容は、ホームページ <http://www-surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp/top.html> 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、そこでは電子が自由に動き回る。その表面を走査

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が規則的に並んだ銀原子である。(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であり、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。

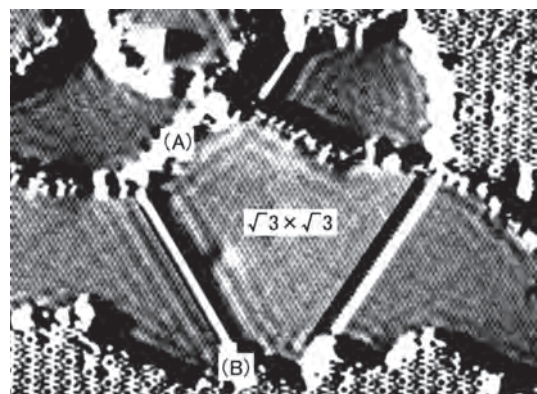


図1. 電子の海のさざなみ

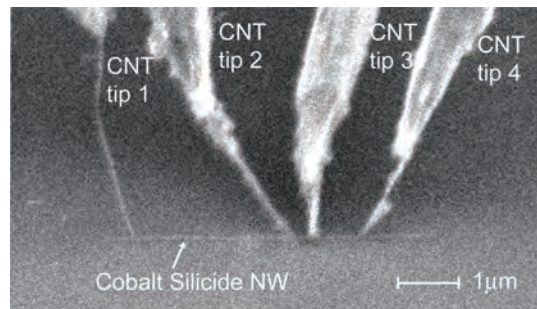


図2: ミクロな針を使った4探針電気伝導測定

浜口研究室

浜口幸一准教授 遠藤基助教

1 研究概要

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。

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 75% が暗黒エネルギー、約 20% が暗黒物質、約 4% 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。

- 現在、世界最高エネルギーの衝突実験・LHC が稼働しています。LHC では標準模型で唯一発見されていない粒子、ヒッグス粒子がまもなく発見されると期待されています。また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。

- WMAP 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非常に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きました。

3 これまでの研究

- LHC で示唆されている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モデルの構築および解析、
- 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。現在はこれに K 中間子と原子核の束縛状態の研究も加え、物質質量起源の解明を目指しています。 π 中間子原子の研究は理化学研究所の RIBF 加速器で、 K 中間子原子の研究は東海に最近完成した J-PARC 加速器で行っています。

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

- 2011/ 7/28 反物質に新たな光を当てる
- 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
- 2004/ 8/26 奇妙な原子核の発見

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。

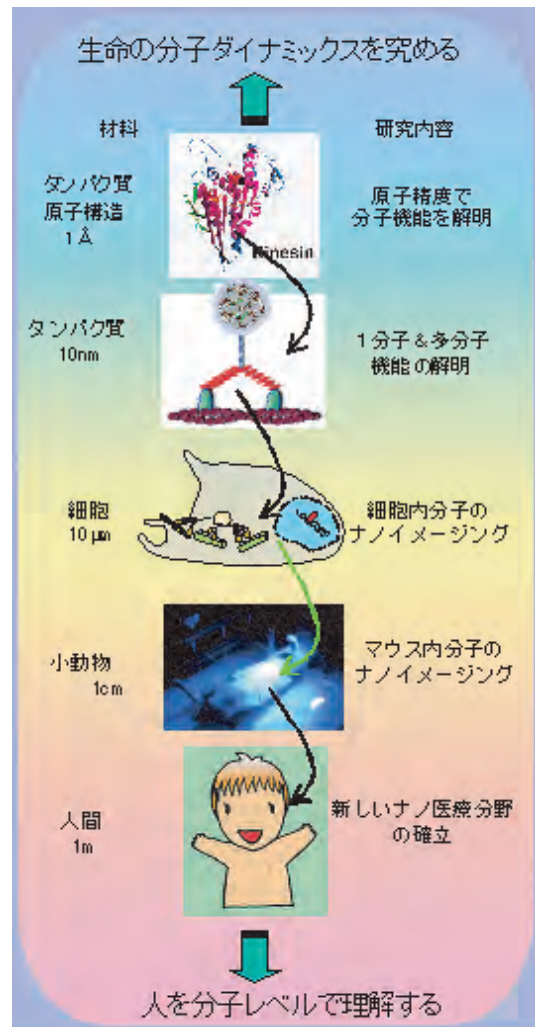
3 マウス内1分子運動

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

福山研究室

福山 寛 教授 松井 朋裕 助教

福山研究室では、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、極低温で発現する様々な量子多体現象を実験的に研究しています。

1 2次元量子液体・固体

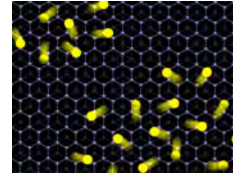
原子スケールで平坦なグラファイト基板の上にヘリウム $3(^3\text{He})$ やヘリウム $4(^4\text{He})$ 原子を物理吸着させると、理想的な単原子層膜を作ることができます。 ^3He は電子と同じフェルミ統計に従うスピン $1/2$ のフェルミ粒子で、 ^4He はボース統計に従うスピン 0 のボース粒子ですから、この系は2次元量子多体系の理想的な物質です。

その極低温での性質は多彩に密度変化します。例えば、低密度の ^4He 流体相はマクロなコヒーレンスをもつ2次元の超流動現象を示します。一方、高密度の ^3He 固体相では、隣接する2個以上の原子がトンネル交換することで、ギャップレスピン液体状態など新奇な磁性が生まれます。最近では、それまで液化しないと考えられていた ^3He の2次元系が、3次元系の $1/10$ という超低密度で液化することを見出しました。また、 ^4He の一番低密度の固体相では、結晶の周期性と超流動性が共存する「超固体」状態が実現している可能性を見つけました。超固体は、物質の気体、液体、超流体、固体に次ぐ第5の状態として、現在、活発な研究がなされています。

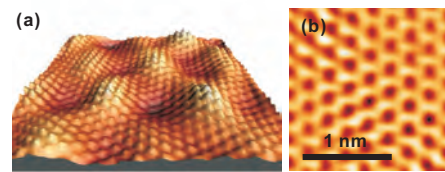
私達はこうした2次元量子液体・固体の研究を、 $100\ \mu\text{K}$ という超低温度から室温まで6桁に至る幅広い温度域で、熱容量、核磁気共鳴、ねじり振子の測定から調べています。超低温の実現には核断熱消磁冷凍機や無冷媒希釈冷凍機を用います。加えて、極低温で動作する低速電子線回折装置の開発も行っています。

2 ナノスケールの電子物性

グラファイトは炭素のシートが重なり合った層状物質ですが、その単原子層シートをグラフェンと呼びます。グラフェンの伝導を担う電子や正孔は質量ゼロの相対論的ディラック粒子として振る舞うので、基礎物理の観点から非常に興味深い物質ですが、既存の半導体より高い移動度をもち、構造的にも柔軟かつ丈夫なので、次世代のデバイス



グラファイト上に吸着した単原子層の ^3He は、 $1\ \text{K}$ 以下の極低温で $0.6\ \text{nm}^{-2}$ という低密度の液滴を形成する。



SiC表面に合成したグラフェン試料。(a) $5\ \text{nm}$ 四方のSTM像では、炭素原子のハニカム構造の他に基板との整合性に起因する凹凸が見える。(b) より狭い $1.8\ \text{nm}$ 四方のSTM像。

応用が期待されている新物質でもあります。ところが、バンドギャップがないというデバイス応用上の致命的な欠点(高い消光比が得られない)もあります。

私達はグラフェン表面を様々な物質で修飾することで期待できる新奇な2次元電子状態を研究しています。例えば、グラフェン表面に一定周期で原子や分子を吸着させることでバンドギャップを誘起する可能性を検証しています。また、超伝導金属のナノクラスターを島状蒸着することで、グラフェン内に2次元系特有の超伝導状態が近接効果で誘起されることを見出しました。一方、ナノクラスター上では、マクロな抵抗測定で観測されるよりも高い温度から超伝導の“種”が成長する様子も観測されています。

これらの実験は、走査トンネル顕微/分光法(STM/S)や電気伝導度測定を通じて行っています。特に、前者は、超低温($30\ \text{mK}$)、高磁場($13\ \text{T}$)、超高真空($10^{-8}\ \text{Pa}$ 以下)という多重極限環境下で、物質表面の電子状態をナノメートルの空間分解能をもって測定できる世界的にもユニークな装置です。

藤森研究室

藤森 淳 教授 吉田鉄平 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。

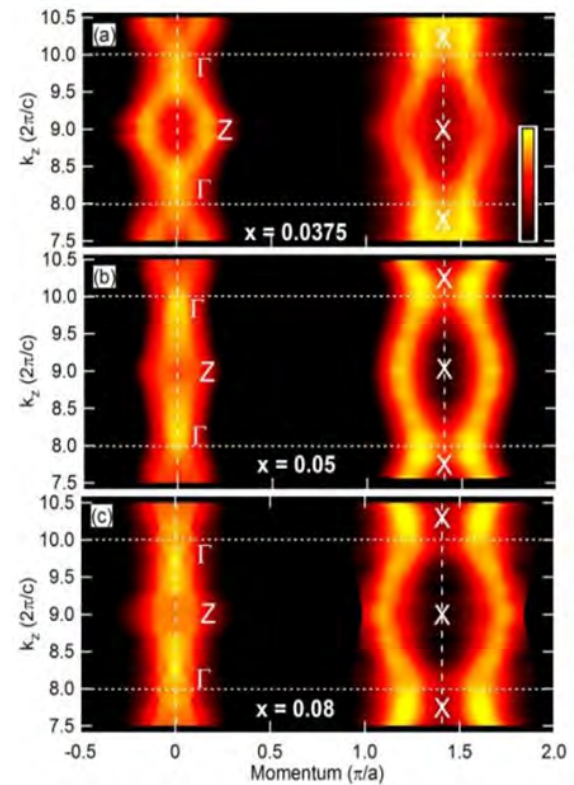
2 最近の研究テーマ

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ブ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ブした磁性半導体、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。

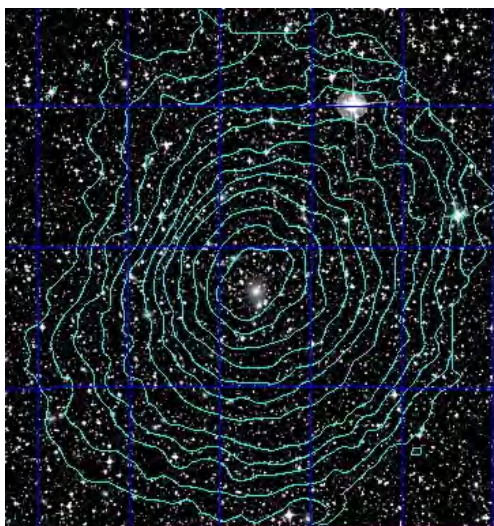


図1：可視光(写真；白い点の多くは銀河)およびX線(等高線)で見た、「みなみのさんかく座」銀河団の画像。大きさは、ほぼ満月と同じ。

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。

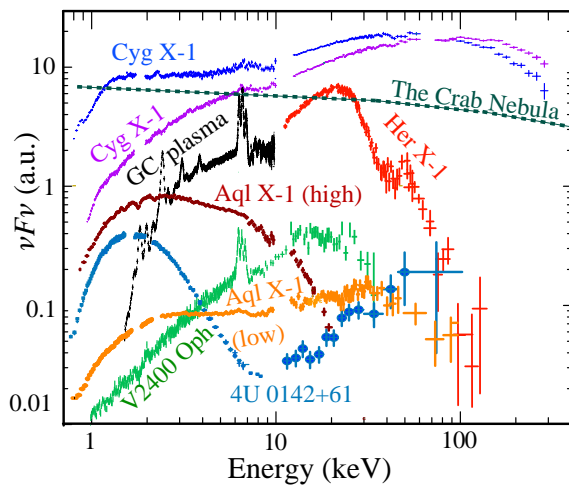


図3: 「すざく」で観測した、さまざまな天体のX線スペクトル。エネルギー10 keV以上はHXDのデータ。

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、それをとり囲む温度およそ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、2014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、埼玉大、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: 2014年打ち上げ予定のASTRO-H衛星の想像図(JAXA提供)。

松尾研究室

松尾泰准教授 河野輝彦助教

1 M理論とは

素粒子論の目標は、素粒子という物質の究極像の解明にある。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超紐理論が、本研究室の中心的な研究課題である。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、根本的には一つの理論の様々なパラメータ領域を表現していることが理解されてきた。この理論は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ル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 $[T^a, T^b, T^c] = f^{abc}_d T^d$ 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年代に数学で発展した一般化された幾何学を、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ブレーンをあらゆる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提案しており、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いう予想がなされている。当研究室でも2次元理論のW(1+infinity)代数と呼ばれる無限次元対称性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。

衰輪研究室

衰輪 眞 教授 井上慶純 助教

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、当研究室のアクションヘリオスコープ（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。アクショ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 粒子がアクションである。

アクションを探る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ョ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ョ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ョンを再び光子 (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ョンは発見されておらず、アクショ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ョンヘリオスコープ 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断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開始した。

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。



車載可搬型反電子ニュートリノ検出器 PANDA

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、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。

また、スピנק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、その機構解明を行う。特に、長距離相互作用がある場合には、通常核生成 (nucleation) と呼ばれる局所秩序破壊が抑制され、新しいタイプのダイナミクスを示す。上述の弾性エネルギーによるもの場合には物体の形状に依存した巨視的核生成なる新奇な機構を発見した。このような、長距離相互作用系での厳密な統計力学的性質についても調べ、ミクロカノニカル集団では、平均場描像が破れ、一様性が不安定化する領域があることを明らかにした。このように長距離相互作用は、従来の短距離

系では知られていない性質があり、新しい統計力学の展開として解明を進めている。

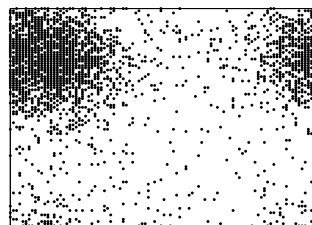
2-2. 非平衡現象の統計物理学

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マイクロ・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。

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、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。

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 Peter S. Turner 助教

1 量子情報とは

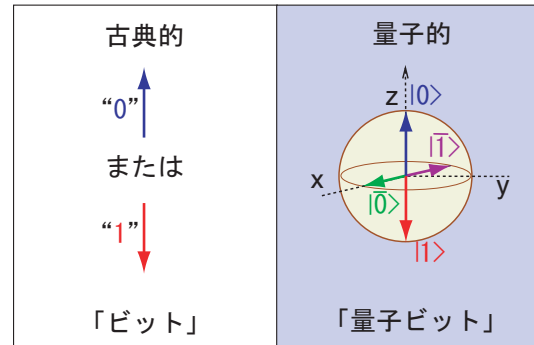
当研究室は、物理学の中でも最も新しい分野の一つである量子情報の理論的研究を行っている。量子情報は、0と1からなる2進数の「ビット」を基本単位とするような古典力学的な状態で表される従来の情報（古典的情報）に対して、0と1のみならず0と1の任意の重ね合わせ状態を取ることができるような量子力学的な状態で表される情報を指し、量子2準位系の状態で記述される「量子ビット」を基本単位とする（図参照）。量子情報を用いると古典情報とはクラスの違う情報処理が可能となるため、古典情報処理の限界を超えるブレークスルーの候補として近年注目を集めている。量子情報処理の例としては、量子コンピューティング、量子暗号、量子テレ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

- 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

などがあげられます。

2. 研究の背景

素粒子標準理論は、これまで行われてきたテラスケールまでの高エネルギー実験の結果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っと標準理論には含まれない未知の粒子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、標準理論を超える物理は不可欠です。

3. 研究内容

標準理論に内在する様々な問題を解決し得る素粒子模型として特に興味を持っているのは、「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予言します。超対称性を持つ理論の構造を理解すると共に、超対称粒子が自然界でどのような役割を果たしているのかを明らかにするため、本研究室では精力的に研究を進めています。

そこではまず、超対称粒子の質量の起源（即ち、超対称性の破れの起源）を理解することが必要になります。超対称粒子の質量の起源についてはこれまでもいくつかの可能性が指摘されていますが、未だ満足のできる説明は出ていません。しかし超対称模型を構築するためには、超対称性の破れの問題を避けて通ることはできません。さらに、超対称模型は、正しい宇宙模型を構築する上でも極めて重要な役割を果たすと考えられます。例えば、超対称模型に含まれる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、その粒子が宇宙暗黒物質となるシナリオについては、我々を含む多くの研究者が興味を持っています。

一方、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、これからますます重要となるでしょう。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たいと考えています。

ヨーロッパの陽子型加速器（LHC）は素粒子標準模型を超える物理のシグナルを発見すべく本格的に稼働を開始し、現在多くの成果を出しつつあります。また、 B -中間子やニュートリノといった粒子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偏光揺らぎの観測、高エネルギー宇宙線の観測といった、LHC 以外の実験や観測も数多く進められています。様々な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られ、今後一層力を入れていく研究テーマのひとつとなるでしょう。

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

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。

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 (写真) 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 HEB ミクサにおいて、0.8 THz 帯で 400 K、1.5 THz 帯において 570 K の世界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。



本研究室のクリーンルームに設置された超伝導 HEB ミクサ素子製造装置群