

東京大学大学院総合文化研究科・教養学部

物理学教室

研究紹介

2013

素粒子理論

原子核理論

物性理論

粒子線物理学

陽電子消滅

量子光学・量子エレクトロニクス

表面・界面物理学

生物物理学

<http://physics.c.u-tokyo.ac.jp/>

はじめに

東京大学大学院総合文化研究科・教養学部物理学教室の研究活動を紹介します。当教室は、下に記した31名のスタッフから構成されており、約100名の大学院生と約20人の研究員・ポスドク・研究生が在籍しています。各教員は、研究者としての活発な活動のかたわら、学部の教育、及び、大学院総合文化研究科広域科学専攻、同理学系研究科物理学専攻の院生の研究指導の任にあたっています。当教室の特徴は、異なる研究グループ間、または、教員・院生間に垣根を作らず、学問上の広範な問題について日常的に盛んな議論が対等に行われていることです。これは教室創成時からの伝統であり、この開放的で自由な雰囲気は、当教室の活発な研究活動の原動力の一つとなっています。

各研究グループの活動は物理学の広い範囲をカバーしており、各メンバーは、それぞれの専門分野で国際的にも指導的立場で活躍しています。具体的な研究内容は、次ページ以下の紹介文を参照してください。なお氏名の後の項目は、居室、電話（直通）、e-mailアドレスの順となっています。

また、物理学教室のホームページ (<http://physics.c.u-tokyo.ac.jp>) では、各研究室の紹介、前期課程講義の紹介、談話会、セミナーの案内などを参照できます。

教室の構成メンバー

教授	池上高志 久我隆弘 吉岡大二郎	風間洋一 国場敦夫	加藤光裕 清水 明	川戸 佳 陶山 明	菊川芳夫 松井哲男
准教授	上野和紀 鳥井寿夫	大川祐司 福島孝治	加藤雄介 松田恭幸	斎藤晴雄	斎藤文修
講師	和田純夫				
助教	青木貴稔 澁谷憲悟 簀口友紀	奥田拓也 庄田耕一郎	木本哲也 竹内 誠	黒田直史 鳥居寛之	堺 和光 藤井宏次

目次

理論

素粒子理論.....	2
原子核理論.....	6
物性理論.....	8

実験

粒子線.....	14
陽電子消滅.....	15
量子光学・量子エレクトロニクス.....	17
表面・界面物理.....	19
生物物理.....	20

1. メンバー

スタッフは風間洋一、加藤光裕、菊川芳夫（以上教授）、大川祐司（准教授）、和田純夫（講師）、奥田拓也（助教）の6名。大学院生は、平成24年度で博士課程11名（うち日本学術振興会特別研究員（DC）5名、他大学からの研究受託学生1名）、修士課程5名の計16名が在籍している。参考のために大学院生の進路について簡単にふれておこう。最近20年間において本研究室で大学院を終えて博士号を取得した者の数は約40名である。そのうち1/2（この比率は全国的に見ても群を抜いて高い）の約20名が国内外の大学・研究所の教授、准教授、主任研究員、講師、助教（京大、東北大、東大、阪大、名大、筑波大、東工大、立教大、岡山光量子研究所、他多数、海外では米国 Maryland 大等）、約10名が国内外のポスドク・学振・COE 研究員などを務めて活発に研究・教育を行っている。その他の人も修士課程だけの修了者を含めて大多数が大学や企業の研究部門で活躍中である。

2. 研究室活動

学期中はほぼ毎週、国内外の研究者を招き様々な研究テーマについての発表を聞きメンバー全員によって討論するセミナー、及び研究室メンバーが最新の進展を紹介する文献紹介が開かれる。これらに加えて、研究室メンバー自身の研究発表とそれに対する討論、共通する課題についてのグループ勉強会等が適宜行なわれる。大学院生は、できるだけ早い時期からセミナーや文献紹介等に参加し議論に積極的に加わるように努めることが要求される。研究室の運営は、大学院生も役割の一部を分担してメンバー全員の協力のもとで行っている。

また、本研究室では長年にわたって海外の研究室（特に、米国 Brown 大学、MIT）と連携関係にあり共同研究を進めているほか、数年ごとに本研究室主催の国際研究集会を開催し、国内外の研究者との相互交流に力を注いでいる。

3. 研究分野

素粒子論は、言うまでもなく、可能な限りの極微のスケールにおける自然界の成り立ちを探求する学問であるが、現存する加速器による実験で調べることができるのは長さのスケールにして約 10^{-16} cm 程のところまでである。そしてここ30年程の間の急速な進展によって、このスケールまでの物理は「量子色力学」及び Weinberg-Salam の「電弱統一理論」と呼ばれるゲージ理論によって説明され得ることがほぼ確立されたと考えられている。従って、現在の素粒子論の理論的研究は、よりミクロなスケールにおける、重力をも含んだ統一理論の構築をめざしているといつてよい。この方向の最有力な試みとして、この20年位「超弦理論」が盛んに研究されてきている。しかし、一方、重力の問題を別にしたとしてもゲージ理論の非摂動的な理解に関しては、まだ未解決の多くの興味深い問題が山積していることも忘れてはならない。

超弦理論が統一理論として機能するためには、まだ幾多の基本的困難を克服しなければならないことは言うまでもないが、最近の双対性やブラックホールの解釈等に関する目覚ましい進展は、近い将来大きな発展が起こることを予感させるものがある。また、ゲージ理論の非摂動的構造に関してもここ10年ほどで大きな進展が起こっている。さらに、弦理論の進展によって、後者の問題が「ゲージ/重力対応」と呼ばれる対応関係の存在により、重力の問題とも直接に関係し、素粒子論の枠組みが弦理論によって融合統一される可能性が次第に認識されて来ている。本研究室における研究テーマはこうした素粒子理論研究の現状を反映しながら、超弦理論や格子ゲージ理論などを中心として量子宇宙論から凝縮系物理とも関連するテーマまでにわたる幅の広いものとなっている。

以下各スタッフの最近の研究テーマの概要を紹介する。

風間洋一

16 号館 321B 5454-6520
kazama@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

超弦理論、量子重力理論、量子場の理論等にわたって幅広い興味を持って研究しているが、現在特に力をいれているテーマは、自然界の統一理論の最有力候補である超弦理論、及びそれに関連した超対称ゲージ理論、の研究である。

1990 年代の半ば以降、超弦理論及び超対称ゲージ理論は「双対変換」あるいは「双対性」と呼ばれる非摂動的情報を含む変換性をてこにして飛躍的な発展を遂げてきた。特に超弦理論においては、それまで異なる理論と考えられてきた 5 種類の基本的な超弦模型が双対変換を通じて互いに関係しあっており、その背後にそれらを統一する 11 次元「M 理論」と呼ばれるより根源的な理論が見え始めて来た。こうした発展においては D-brane と呼ばれる（一般に）拡がりを持った非摂動的物体が中心的役割を果たしており、重力と相互作用してその周りの時空を歪めると同時に、その力学が超対称ゲージ理論で記述されるという二重の顔を持つ。これに関して、1997 年、ある種の曲がった時空中の閉じた弦の理論と、その時空の境界上で定義される共形不変なゲージ場の理論が等価であるという驚くべき仮説（「AdS/CFT 対応」あるいは「ゲージ/弦対応」と呼ばれる）が提唱された。この仮説は弦理論、ゲージ理論双方の深い理解にとって非常に本質的であり応用も広いため、以後主にゲージ理論側の研究を中心として精力的に研究され多くの（状況）証拠が得られてきたが、未だその本質的なメカニズムは捉えられていない。これを何とかして明らかにしたいというのが、現在の私のメインテーマであり、特に研究が遅れている曲がった時空中の弦理論の量子論的な理解を中心に研究を進めている。また同時にゲージ理論側の性質をより深く理解する研究も行っている。

現在追求している具体的なトピックとしては

- AdS/CFT の最も典型的な例として知られる反ドジッター空間中の超弦理論の量子化の問題、および対称性や可解性を最大限生かした新しい定式化の試み
- AdS/CFT 対応における最も基本的な対象の一つである相関関数を理論の可解性を利用した計算法を開発して深く理解すること

● 最大の超対称性を持つ 4 次元の $N = 4$ 超対称ヤン・ミルズ理論自体の性質の研究等がある。

加藤光裕

16 号館 322A 5454-6527
kato@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

(1) 超弦理論

超弦理論は自然界のすべての物質と相互作用、さらに時空構造をも統一的に記述しようとする野心的な理論である。初めに提唱されて以来、研究の爆発的な進展と着実な深化を繰り返して、当初の予想を遥かに超える豊かな構造と可能性が明らかにされてきた。最近では、その非摂動的な性質が次第に明らかになりつつあるだけでなく、より基本的な理論の定式化を見出せる可能性が出てきている。

私自身の研究は、こういった問題に対して、対称性の表現論や弦の場の理論などの様々な手法を用いて、弦理論・M理論におけるソリトン（Dブレーン）の記述の仕方や動力学的性質の解明、さらにより基本的定式化へ向けて非可換幾何学的観点からアプローチする等の研究を行っている。

(2) 場の量子論

非摂動的論的方法による場の量子論の諸性質の解明。弦理論における数学的構造とも密接に関連する共形場理論・超対称共形場理論の研究や、その他の非摂動的論的方法の開発。また、新しいタイプの格子や、非可換格子に基づく超対称ゲージ理論の構成的定式化にもとり組んでいる。

菊川 芳夫

16 号館 325A 5454-6544
kikukawa@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

素粒子の標準模型では、すべての素粒子は質量ゼロの場によって記述される。すなわち、ゲージ場はゲージ対称性によって、物質場（フェルミオン）はカイラル対称性によって、質量項が禁じられている。素粒子の質量は、これらの対称性が自発的に破れることにより有効的に生じる（ヒッグス機構）。質量の生成機構の解明を目指して、カイラルゲージ対称性とその実現に関する基礎的な研究を行っている。

(1) 格子ゲージ理論におけるカイラル対称性

近年、Ginsparg-Wilson 関係式を満足する、ゲージ共変で局所的な格子 Dirac 演算子が構成され、格子上で厳密なカイラル対称性を実現することが可能

になった。Ginsparg-Wilson 関係式に基づくカイラル対称性を、格子 QCD の数値的解析に応用する研究を行っている。

(2) カイラルゲージ理論の非摂動的な構成

素粒子の標準模型や Georgi-Glashow SU(5) モデルに代表される非可換群カイラルゲージ理論では、フェルミオン数(バリオン数)の生成、ゲージ対称性の力学的破れ、複合 massless フェルミオンの出現などの力学的可能性が指摘されている。Ginsparg-Wilson 関係式に基づく格子ゲージ理論の枠組みで、カイラルゲージ理論を構成的に定義し、その力学的性質を明らかにすることを目的として、研究を行っている。

(3) バリオン数生成過程の解析

Ginsparg-Wilson 関係式に基づく格子カイラルゲージ理論の定式化によれば、電弱相互作用を記述する Glashow-Weinberg-Salam 理論をゲージ不変に定式化することが可能である。この枠組みを用いて、バリオン数生成過程に関する基礎的な研究を行っている。

(4) その他

大川 祐司

16 号館 321A 5454-6538
okawa@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

主な研究テーマは弦理論、特に弦の場の理論という分野の研究を集中的に行っている。

一般相対性理論と量子力学をひとつの理論的な枠組みの中で矛盾なく記述することは、現代の理論物理学における最も重要な問題のひとつであるが、弦理論はこの難問に対する重要な手がかりを与えると期待されている理論である。しかし、弦理論は結合定数に関する摂動論としてしか定義されておらず、弦理論の非摂動的な定式化を求めて世界中で精力的な研究が行われている。

弦の場の理論は弦理論の非摂動的定式化に対するひとつのアプローチで、そのほかのアプローチと相補的な役割を果たしている。特に弦の広がり効果が重要である状況での弦理論の古典解の解析に威力を発揮してきた。

弦の場の理論の運動方程式は、無限種類の場が無数個の微分を含む非局所的な相互作用をしている非線形な方程式であり、その解析は通常の場の理論と比較して技術的にはるかに困難であるが、1986年に Witten によって構成された弦の場の理論の最初の解

析解が 2005 年に Schnabl によって構成され、それを契機に弦の場の理論の解析的手法が飛躍的に発展している。近年は米国マサチューセッツ工科大学のグループとの共同研究を中心に、弦の場の理論の解析的手法に関する研究を行ってきた。

過去の主な研究テーマとしては、M理論の行列模型、非可換幾何学に基づくゲージ理論などがあり、弦理論の非摂動的定式化に向けての様々なアプローチに幅広く興味を持っている。

和田純夫

16 号館 322B 5454-6537
wada@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

物理での主な関心は、多世界解釈を中心とした量子論の解釈問題にある。量子力学の確立からすでに 70 年以上が経っているが、まだ物理学者の間で量子力学の解釈について決着がついていない。しかしそれでも幾つかの流れが互いに近付きつつある。その中でも多世界解釈が、宇宙全体さえも原理的には量子論で扱われるはずであるとの立場から、きわめて有力な立場だと考えられる。

多世界解釈の立場では量子論は、概念的には確率と無縁になり、また人間の意識とも観測とも関係なく解釈できる。その結果、この世界を实在論的に見ることも可能になる。このことは物理においては特に量子宇宙論を考えるとときに重要だが、物理を越え近代科学と認識論との関係全体を見直すことを迫る問題でもある。今までやってきた研究をふまえて、物理学者の立場からの科学哲学的議論を進めていこうと考えている。

奥田 拓也

16 号館 325B 5454-6516
takuya@hep1.c.u-tokyo.ac.jp

(1) 超対称ゲージ理論 4次元の超対称ゲージ理論は、実験で検証できる素粒子模型の候補として、また深い数学的構造を持つ純理論的な研究対象として、理論物理学の中心的なテーマである。現時点での主な研究では、超対称ゲージ理論における非局所的演算子の相関関数を経路積分の localization 法にもとづき厳密に計算し、ゲージ理論の非摂動的な理解を深めている。超対称ゲージ理論は 2次元共形場理論や弦理論とも密接に関係している。ゲージ理論の非局所的演算子を定量的に理解することによって、これらの関連する理論も発展させつつある。

(2) 弦理論、ゲージ/重力対応、ブラックホールの物理 過去10年間の研究では、弦理論に関わる物理学の理論的な課題について広く研究してきた。特に過去十数年間で現代理論物理の最重要原理となった、「ゲージ理論と曲がった時空上の重力理論が同等」というゲージ/重力対応により、量子重力をゲージ理論を用いて解析することが可能である。これを用いてブラックホールの統計力学的な性質や弦の散乱を調べてきた。ブラックホールは Einstein 方程式の解として古典的に記述できるにも関わらず量子的な性質を持つため、われわれにとって量子重力理論への架け橋である。ゲージ/重力対応の直感的理解を深め、ブラックホールの物理を解明していきたい。

以上各スタッフの現時点での主要な研究課題を紹介したが、各スタッフは上記テーマ以外にもこれまで数多くの研究を手がけてきており、全世界的進展状況、新しい実験結果の出現等に柔軟に対応する姿勢をもって研究している。また各分野間は、互いにその研究方法や用いる数学的手法において密接に関連しており、広く討論がなされつつ研究が進められている。大学院生の研究テーマは、スタッフのそれとかならずしも直接重なる必要はなく、多くの場合大学院生の自主性によって選ばれている。我々スタッフ一同は大学院生が研究室活動、教員との真剣な討論、院生同士の自由で活発な議論や共同研究等を通じて、それぞれの分野で一人前の専門家として育っていくことを切望しつつ、緊密な協力のもとで指導を行っている。

原子核理論グループの現在の構成は、松井哲男(教授)、藤井宏次(助教)の2名の教員と院生3名(DC2名、MC1名)からなり、セミナー、文献会、勉強会等のグループ研究活動を一緒に行っている。

原子核は、我々の周りに唯一安定に存在するハドロン(クォークからできた複合粒子の総称)の自己束縛系であり、現在知られている四つの相互作用のうちの一つ(強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用)がその構造や運動に直接関わっている点でも、ユニークな研究対象である。また、約 10^{57} 個の核子の重力束縛系である中性子星も「巨大な原子核」として核理論の研究対象になっている。

最近の研究の重要な流れは、従来の核子の量子多体系としての原子核の記述をさらに一歩深め、より基本的な自由度であるクォークとその従う力学である量子色力学(QCD)から、核子や中間子のようなハドロンや原子核をクォーク多体系として理解することである。クォークは通常の条件下では個々のハドロンの中に「閉じ込め」られその自由度が直接関与する核現象は限られているが、高密度・高温の極限状態ではその自由度が顕在化し、ハドロン物質からクォーク物質への転移が起こることが予想される。そのような理論的予想を超高エネルギー原子核衝突の実験で検証しようという試みが、欧米で始まっている。核理論グループでは、現在、こうした新しい問題に焦点をあて、QCD素過程の問題からクォーク・ハドロン多体系の物性論的問題まで、様々なアプローチで研究を行っている。

松井哲男

16号館 323B 5454-6512
tmatsui@nt1.c.u-tokyo.ac.jp
<http://nt1.c.u-tokyo.ac.jp/tmatsui/>

高温・高密度のクォーク物質、その高エネルギー原子核衝突における生成と時空発展、そのシグナルの研究を行っている。

現在、米国のブルックヘブン国立研究所(BNL)では、RHIC(Relativistic Heavy-Ion Collider)によって原子核を超相対論的エネルギー(核子当たり100GeV)に加速して正面衝突させ、高温・高密度の物質をつくる実験が行われている。スイスにある欧州原子核研究機構(CERN)でも、2010年からLHC(Large Hadron Collider)をつかった更に高いエネルギー(核子当たり2TeV以上)での原子核衝突実験が始まっている。このような高エネルギーの原子核衝突では、最初に反応に関与する自由度は核子やハドロンではなく、その内部自由度(クォークやグルーオン)が直接関与し、原子核を構成するパートン集団が互いに通過した後、その背後にもたくさんのクォークやグルーオンがランダムに励起されてプラズマ状態になると考えられている。クォーク・グルオンプラズマは高温の初期宇宙において存在していた原始物質で、宇宙の

膨張・冷却によってハドロンの集団へと進化したと考えられているが、原子核衝突の場合にも、非常に短い時間にハドロンに崩壊すると予想される。従って、クォーク・グルオンプラズマが実際にできたことを検証する為にも、その生成から崩壊までの時空発展の過程を理論的に理解することが重要な研究課題である。この問題を、場の量子論から、(相対論的)流体力学、運動論、統計力学等の様々な手法を用いて研究している。

最近では、カイラル相転移の非平衡量子場ダイナミクス、バリオン生成におけるクォーク対相関の効果、ハンブリーブラウン-ツイス2粒子強度干渉における平均場の効果など、プラズマのハドロン化とその後の凍結課程に関係した問題を院生と一緒に研究している。これらは、RHICの実験で観測された、ハドロンの強い異方的集団流や、バリオンの異常生成、ハンブリーブラウン-ツイス干渉法によって観測された中間子発生源の形状などの理論的解釈を目指した研究である。また、クォーク・グルオンプラズマ生成のシグナルとして注目されてきた J/ψ 粒子の生成抑圧が、RHICの実験や最近のLHCの実験でも報告されているが、その系統的な理解にむけた研究や、プラズマ中での制動輻射への多重散乱効果(ランダ

ウ・ポメランチュク・ミグダル効果)のボルツマン方程式の応用、アルカリ金属原子の希薄ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の問題とクォーク・グルオンプラズマの問題の共通性にも興味をもっている。

藤井宏次

16号館 323A 5454-6511
hfujii@phys.c.u-tokyo.ac.jp

量子色力学 QCD は低エネルギーで強結合性を持ち、クォーク・グルオンという“基本粒子”から陽子・中性子さらには原子核という多体系を構築する非摂動的なダイナミクスの解明は重要かつ難解な基本課題として立ちはだかっている。

最近の研究課題は、

- 有限温度やバリオン数密度などを外部環境変数にした QCD 熱力学系の性質の考察。特に QCD

臨界点近傍の動的モードの性質。また、有限密度格子シミュレーションに関連する符号問題にも興味がある。

- クォーク・グルオン プラズマ (QGP) 生成を意図した超高エネルギー原子核衝突実験を睨んで、観測量と QGP の物性に関連した問題。
- 加速器から宇宙線に渡る超高エネルギーハドロン(原子核)反応過程、特に入射ハドロン(原子核)波動関数と、反応直後の時間発展の理論的な記述。関連する非平衡場の理論の話題。

などである。基礎となる理論的道具や概念は、有効模型や摂動論、有限温度密度ゲージ理論、格子 QCD、非平衡統計力学など等多岐にわたる。学問的基礎知識のグレードアップや最近の研究動向のアップデートを狙って、院生との共同の勉強会を適宜開催したい。

駒場の原子核理論研究室は、日本の核多体問題研究の先駆者であった故野上茂吉郎先生以来の伝統ある研究室で、この分野で多くのすぐれた研究者を世に出してきた。研究対象や手法は大きく変化してきているが、学生と教員の自由闊達な研究室活動から新しい原子核研究をリードする若手研究者が更に多く育ってほしいと願っている。

物性理論グループは、吉岡大二郎、清水明、池上高志、国場敦夫(以上教授)、加藤雄介、福島孝治(以上准教授)、簀口友紀、堺和光(以上助教)、の8名の教員と約30名の大学院生、研究員が幅広い研究活動を行っている。以下、氏名、専攻分野、現在の研究内容の順に各教員が研究内容を紹介する。

吉岡大二郎

16号館 221B 5454-6526
daijiro@toki.c.u-tokyo.ac.jp
<http://sola.c.u-tokyo.ac.jp/>

物性理論

固体中を相互作用しながら、量子力学に従って動き回る伝導電子の集団が示す性質には想像を絶するものがある。これらの奇妙で興味深い現象を、量子統計力学を用いて解明することが研究の中心である。現在の研究テーマの主なものは、分数量子ホール効果、有機伝導体、グラフィーンなどであり、これらは物性物理研究の最先端として、世界的に活発な研究が行われている。これらを、場の理論の方法と計算物理学の方法を併用して調べている。以下で、より詳しく説明しよう。

(1) 分数量子ホール効果

現代科学技術の花形、半導体電子回路の中では、2次元電子系が実現している。この2次元電子系に強磁場をかけ、ヘリウム温度に冷やすと、量子ホール効果(1985年ノーベル賞)という現象が観測される。このうち特に分数量子ホール効果(1998年ノーベル賞)といわれるものは、電子間の相互作用のために起こる現象である。この現象の解明の過程では、分数量子統計に従う粒子などの新しい概念が導入され、本質的な部分は明らかにされてきた。しかし、依然として研究すべきことは多い。例えば、2枚の2次元面を接近して作った2層系といわれる構造では、実験により次々と様々な新しい現象が発見されているし、ある状況では非可換統計に従う粒子が実現する可能性が指摘され、量子計算への応用を視野に入れた研究も行われている。この系の理論的解明は、吉岡研の中心的な研究テーマである。

(2) 有機伝導体

有機分子で作られた結晶は非常に強い異方性を持っており、準1次元や準2次元の系を作ることが

出来る。しかもその性質は分子を色々といじることによって、ある程度好きなように変えることが出来、10K程度の転移温度を持つ超伝導体も作られている。このような系で期待される様々な現象の研究を行っている。

(3) グラフィーン

グラファイトは炭素の蜂の巣格子が積み重なってできているが、その1枚だけの2次元結晶がグラフィーンである。2004年に実現され、活発な研究が行われている(2010年ノーベル賞)。フェルミ準位付近の電子状態が線形の分散関係(質量のないディラック粒子と同じ)を持つ半金属であり、この特殊な分散関係を持つ物質の研究は興味深い。グラフィーンの2層系も存在するし、グラフィーンを丸めて筒状にしたものがカーボンナノチューブである。

なお、吉岡は2015年3月に定年を迎えるので新たな大学院生の指導は行わない。

清水 明

16号館 223A
shmz@as2.c.u-tokyo.ac.jp
<http://as2.c.u-tokyo.ac.jp/>

物性基礎論・量子物理学

物性基礎論・量子物理学を中心に、物理学の基礎的・原理的問題を研究している。

物性基礎論というのは、マクロ系の物理の基礎理論のことである。その名の由来は、ある統計力学の大家が、(物理的には無意味な)単なるモデル計算や形式論(応用数学)が蔓延していることを嘆いて、「統計力学の中で、そういうものを除いた、物理的に意味のある部分を物性基礎論と呼ぼう」と提唱したものである。当研究室では、この意味の物性基礎論を研究しており、たとえば、(i)量子統計力学の全く新しい定式化(アンサンブルもボルツマンの公式も分配関数も使わない)とその応用(従来は計算できなかった系も統計力学的性質が計算できる)、(ii)非平

衡状態の応答理論の普遍的性質の発見、(iii) 多体相互作用のあるメゾスコピック系の輸送理論の新しい定式化、などの成果をあげている。

量子物理学というのは、昔は単に「量子論を使う物理」という意味だったが、近年になって、量子論そのものの本質的な性質を、対象を限定せずに研究する分野を意味するようになった。[それに対して他の多くの分野では、まず(一群の)対象系があり、量子論を道具として使って対象系の物理的性質を研究する。]当研究室では、特に、自由度が巨大な量子系を対象とした量子物理学を研究しており、たとえば、(i)「マクロに異なる状態の重ね合わせ」の一般的定義の提唱、(ii)ベルの不等式の一般化による、そのような状態の検出法の理論的提唱、(iii)マクロ量子状態の安定性の一般論と相転移との関係の解明、(iv)量子計算機における異常なマクロ量子状態の役割の解明、などの成果をあげている。

面白いことに、以上に述べた、物性基礎論と量子物理学とは、一見すると全くちがう分野に見えるが、深いところで繋がっていて、一方で論じていた問題が他方の基礎的問題を解く鍵になったりする。そういう発見をしていくことも重要なテーマになっている。

このように、当研究室は、原理的・基本的な問題を研究する研究室である。研究の進め方は、具体例を研究しながら一般論を探る。研究手法は、研究テーマに応じて選ぶので、特定の手法にも、解析計算か数値計算かということにも、こだわらない。詳しい情報は、清水研ホームページ(「清水研」で検索すると楽)をご覧ください。

池上高志

16号館 324B 5454-6535
ikeg@sacral.c.u-tokyo.ac.jp
<http://sacral.c.u-tokyo.ac.jp>

非線形複雑系の科学

コンピュータによる実験的シミュレーションの解析を中心として、広く生命の理論(1)について研究しているところです。中心となるテーマは現在2つあり、ひとつはオートポイエシスの理論で、もうひとつは認知現象の理論です。

前者は人工生命の研究に代表される、構成論的な生命の理解を探るものです。フォンノイマンから始まった自己複製の理論はコンピュータのPC化と高速化によって進みました。特に自己複製子どうしの相互作用、化学反応による細胞の生成、オープンエンドな進化の理論、最近では自己組織化するホメオスタシス(2)などの研究や、自律的に運動を開始する油滴の化学実験をすすめています(3)。

一方後者の認知現象の理論に関しては、自律性という観点(4)から認知過程を議論しています。たとえば、カオスがつくる知覚のダイナミクスや、相互作用する2つの主体がつくり出す運動の構造(5)をシミュレーションにより調べています。

いくつかの論文は、URL <http://sacral.c.u-tokyo.ac.jp/~ikeg> より入手可能です。

- 1) 池上高志、動きが生命をつくる(青土社 2006)
- 2) Ikegami, T and Suzuki, K, From Homeostatic to Homeodynamic Self, BioSystems, 91 (2008) 388-400.
- 3) Hanczyc, M., Toyota, T., Ikegami, T., Packard, N. and Sugawara, T. "Chemistry at the oil-water interface: Self-propelled oil droplets" J. Am. Chem. Soc.; (2007); 129(30) pp 9386 - 9391;
- 4) Ikegami, T., Simulating Active Perception and Mental Imagery with Embodied Chaotic Itinerancy, J. Consciousness Studies Vol.14 (2007) ppp.111-125.
- 5) たとえば、Iizuka, H. and T. Ikegami, Adaptability and Diversity in Simulated Turn-taking Behavior Artificial Life 10 (2004) pp.361-378.

国場敦夫

16号館 302A 5454-6536
atsuo@gokutan.c.u-tokyo.ac.jp

可積分系, 数理物理

可積分系は古典力学, 量子多体系, 非線形波動, 統計力学, 場の理論等に出現します. 2次元イジング模型のスピン-スピン相関関数はスケール極限でパンルベ超越方程式をみたす. ハードヘキサゴン模型の局所状態密度はロジャース・ラマヌジャン恒等式に関連したモジュラー関数になる. ベーテ仮説に

よるスピン系の状態の数え上げはコストカ多項式の q -2 項係数による明示式を与える。共形場理論の中心電荷はダイロガリズム関数の特殊値の和に一致する。量子非調和振動子のストークス係数やスペクトル行列式の間量子群の表現に付随する関数方程式が成立する。1次元ハイゼンベルグ模型の近接スピン相関はリーマンゼータ関数の特殊値により表される、... などなど。

このような現象は、夜空の星、野原に咲く花などとはまた別の、自然が魅せるもう一つの美しさです。その研究は、自然が垣間見せる数理的世界の個性の探求といえるでしょう。還元主義への批判は久しくありますが、還元にこだわらない広い意味での普遍的な原理「普遍性の探求」こそが理論物理のなかで最も崇高な営みであるという理解は健在です（物理におけるブルバキズム?）でもそれと対極の「個性の探求」も楽しい。可積分性を司る対称性は、麗しく具体的な模型を介してどのような姿をみせてくれるのか。物理的な動機や価値と数学的な麗しさが微妙に均衡する接点として独自の存在価値と魅力を持った分野です。

可積分系のなかでも僕が関心のある題材のキーワードとしてはソリトン、可解格子模型、角転送行列、ベータ仮説、ヤン・バクスター方程式、アフィン・リー環、量子群、結晶基底、フェルミ公式、箱玉系、ソリトン・セルオートマトン、逆散乱法、超離散化、クラスター代数、3次元反射方程式などがあげられます。興味のある方は

URL <http://maildbs.c.u-tokyo.ac.jp/~kumiba/atsuo/indexLP.html>

や、以下の一般向けの記事を参照ください。

- 1) 「ベータ仮説と組合せ論」朝倉書店 (2011)。
- 2) 「ベータ仮説とヤング図形」数理科学，サイエンス社 (2007) 1月号。
- 3) 「箱玉系と三つの R」数理科学，サイエンス社 (2003) 9月号。
- 4) 「C.N. ヤンとヤン・バクスター方程式」数学セミナー，日本評論社 (1999) 11月号。
- 5) 「可解格子模型」，数理物理への誘い，江沢洋 編 遊星社 (1994) 48-64。

加藤雄介

16号館 301B 5454-6534
yusuke@phys.c.u-tokyo.ac.jp

物性理論

超伝導現象、超流動現象や低次元相関電子系など、量子現象が重要な役割を果たす物性を理論的に研究している。そのために量子多体系の理論（場の理論） 数値計算、可解模型などの手法を用いる。一方、物理現象としてマクロなものも対象とするので、統計力学、運動論、熱力学、相転移の理論、電磁気学を駆使することにもなる。マクロな物理現象をミクロな立場から理論的に解明することが本研究室の主な目的である。

物性という具体的なものの研究を通して、かえって個別のもの（物質）を超えた普遍的な性質が見えてくるのが物性物理の研究の面白いところである。そして「普遍的構造を垣間見るための窓」として物性物理というものをとらえたとき、超伝導現象、超流動現象や低次元相関電子系ほど相応しいものはないと思う。

(1) 超伝導渦系の物理

第二種超伝導体とよばれるあるクラスの超伝導体に磁場を掛けると磁束量子を単位として、磁場が物質内に侵入する。磁力線が束になって物質内に存在するといったイメージである。この量子磁束のまわりに渦状に超伝導電流が流れているので、量子磁束は渦系（うずいと）とも呼ばれる。渦の中心はクーパー対の波動関数の位相の特異点になっており、渦系は超伝導体における「トポロジカルな欠陥」である。ゼロ抵抗などの超伝導体の特性の安定性は、準粒子などの素励起ではなく渦系の振る舞いによって支配される。「トポロジカルな欠陥が凝縮状態の安定性を支配する」というのは超伝導には限らない。固体の硬さをきめているのは転位（dislocation）であり、強磁性体の磁化の安定性を決めるのは磁壁（domain wall）の運動であり、ネマティック相の液晶においては回位（disclination）がそれに対応する。このことは超伝導の研究が凝縮状態における一般的性質を調べるための「窓」になり得ることを示唆している。

この1, 2年は「非従来型超伝導体」（unconventional superconductors）と呼ばれる系における渦系のダイナミクスを研究している。「非従来型」というのは、クーパー対の波動関数が等方的ではないという意味であり、高温超伝導もこれに属する。渦系のマクロな運動方程式の導出、渦系内における準粒子の量子力学的束縛状態（アンドレーーフ束縛状態）とその散乱現象の解析、そのミクロな散乱振幅と渦

系のマクロな輸送係数との関連を調べてきた。

(2) 低次元相関電子系

系のバンド構造、結晶構造から1次元物質、2次元物質とみなせるものが多数存在する。これらを低次元物質という。空間の自由度が制限されているため、電子間相互作用の効果が低次元物質において大きな役割を果たす。相互作用は、超伝導その他すべての相転移の源である。そのことから低次元物質が豊かな物性を含んでいることがわかってきた。

1次元相関電子系では、電子が、電荷をもちスピンをもたない素励起(ホロン)とスピンをもち電荷をもたない素励起(スピノン)に分裂することがある。また分数量子ホール系と呼ばれる強磁場下での2次元電子系においては電子が $e/3$ の電荷をもつ準粒子に分裂する。そしてこれらの素励起はボソンでもフェルミオンでもない統計性(分数統計)に従うことがわかっている。

この数年間、そのような分数統計に従う素励起をもつ1次元相関電子系の可解模型を研究し、熱力学的性質、動力学的性質(グリーン関数の厳密解)を調べてきた。最近分数量子ホール系のグリーン関数の数値的研究を行っている。分数電荷をもつ素励起の存在に対応して、特異な構造がグリーン関数に現れることがわかってきた。

(3) ボース・アインシュタイン凝縮系冷却原子気体におけるボース・アインシュタイン凝縮相の実現(1995)や、液体ヘリウムにおける固体超流動を示唆する実験(2003)により、ボース系に関する研究は新たな展開を見せている。われわれは、凝縮体の上の準粒子が低エネルギー極限で任意のポテンシャル障壁を完全透過する「異常トンネル効果」や、超流動状態の安定性に関するランダウの議論の一般化、固体超流動状態におけるジョセフソン効果に関する理論的研究を行っている。

研究における情報交換は、研究室内外での日常的な議論、指導教員との一対一のセミナーのほか、吉岡研究室との合同のランチセミナー(週一回の研究進捗状況報告会)、学内外の研究者を招いての物性セミナー(物性理論グループ有志で運営)で行われる。

福島孝治

16号館 221A 5454-6513

hukusima@phys.c.u-tokyo.ac.jp

<http://www.dbs.c.u-tokyo.ac.jp/~fukushima/>

統計物理・物性理論

広く一般に相転移のようなマクロな系に顕著に現れる協力現象に興味をもっている。特に、ランダム系と呼ばれる「乱れ」が重要な役割をする物理特性を統計力学的な観点から理論的に研究している。ランダム系ではたびたび同時に解消できない複数の拘束条件がエネルギーの中に現れる。つまり、あちらをたてればこちらがたたない状況がミクロ状態で起きてしまう。このとき、ソコソコな状態が非常に多数存在する。このソコソコな状態(準安定状態)の構造をよく理解したいと考えている。複雑な準安定状態構造の普遍的な性質やそこでのダイナミクスは統計物理として面白い問題である。そのような問題は多岐にわたっており、例えば、ガラスやタンパク質などの複雑な物理系や学習理論、最適化問題等の統計・応用数学モデルなどがある。例えば、問題を解く際の難しさはこうした準安定状態の構造の複雑さに関係しているように思える。最近の具体的な研究例は以下のとおりである。

(1) ランダム系の統計力学的研究

現実の系では欠陥等の何らかの意味で均一な系を乱すランダムさが存在する。そのランダムさのある確率分布に従うとすると、統計力学の方法では与えられたランダムさの元で熱浴に接するミクロ変数(例えばスピン)はまた確率変数になる。つまり、二重の平均操作が必要になる。このようなランダム系の相転移現象は、均一系とはかなり異なる性質を示すことが分かってきている。そのような系の相転移現象を調べたり、スピンのもつガラスらしい性質(壊れやすさやゆっくり緩和すること)を研究している。また、ランダム系の統計力学の数理構造は、最適化問題や統計的学習理論など様々な問題と等価であることがわかり、その物理特性も調べている。

(2) 計算物理手法の開発

多体系の非摂動的手法の一つとして、モンテカルロ法や分子動力学法等の計算物理の方法がある。ただ単に既存の方法を応用するだけでなく、新しい考えを取り入れた計算手法の開発やその応用方法に取り組んでいる。これまで計算できなかったことが、計算できるようになると少しだけ世界が広がった気がする。そのような数値計算を目指している。実験をしないとなかなか見てきたように理解するのは難しいが、それでも計算機の中で「見てきた雰囲気」を

味わうことはできるはずで、そのための工夫を凝らした方法の開発を目指している。

簀口友紀

16号館 202A 5454-6543
mino@phys.c.u-tokyo.ac.jp

物性理論（特に低温物理）

不活性元素であるヘリウムは、球対称ポテンシャルで相互作用する単純な系でありながら、様々な物性を示す。不純物もコントロールしやすい。基底状態とその線形素励起、超流動、量子化された渦などは、古くからの有名な研究テーマであり、完成度の高い研究が既に存在する。従って、一次相転移や巨視的量子トンネリング、そしてコヒーレント状態（または流体力学近似）からのズレ、といった基礎のフロンティアを広げる場合の確かな舞台を提供する。現在は主に、以下のテーマについて研究を行っている。

1) 多重連結のあるヘリウム薄膜の超流動

物体に吸着したヘリウム4の薄膜は、数原子層という、きわめて薄いものであっても、低温で超流動を示す。温度の上昇とともに、超流動密度は単調に減少するが、フラットな薄膜では、ある有限温度 (T_c) で、超流動密度が突然消失する、いわゆる、Kosterlitz-Thouless (KT) 転移が起きる。これは、温度によって、渦糸（薄膜であるため、渦「点」）が多数励起し、 T_c で、互いに逆方向の回転を持った渦の対が、解離を起こすことによるものと理解されている。

多孔質ガラスや、金属微粒子の焼結体といった、多孔質媒質中では、吸着ヘリウム薄膜は、多重に連結して、ネットワーク状の超流動薄膜を実現する。この系は、孔径以下のスケールでは二次元であるが、孔径以上のスケールでは三次元であり、そのことを反映して、超流動転移において、二次元と三次元のクロスオーバーが観測されている。一般に、500 Å以上の孔径の多孔質媒質についてはKT転移が観測され、それ以下では徐々にKT転移の特徴が消え、三次元特有のラムダ転移に近づくのである。

さて、この系での理論的興味は、KT転移のメカニズムが、孔系の減少とともに、どのように変化していくかにある。渦の「芯」の大きさは数Åなので、いずれの場合も渦の励起は起こっていると考えなければならない。したがって、多くの分岐を持った、ネットワーク状の膜（多重連結膜）上に励起する渦

の相関を考えなくてはならない。これは、しかしながら、大きさ1の渦を囲う閉じたループ上を循環する超流動流は、いつも1に量子化されなくてはならないという条件から、直ちに遠方で一次的に（距離に比例して）強く引き合わなくてはならないことが示せる。この「閉じこめ力」は、孔径に逆比例して大きくなる。孔径が小さい場合、これによって渦対の解離は起こりにくくなり、KT転移からラムダ転移へのクロスオーバーが起こると考えられる。

以上のシナリオでは、ラムダ転移点で、KT転移のような、渦対の解離が起こって「いない」ことを示したにすぎない。ラムダ転移点では、どのようなメカニズムで、超流動転移が起こっているのだろうか？このことに関して、物性研究所の久保田グループで非常に滑らかに回転する冷却機が完成し、それを用いて新たに発見されたエネルギー散逸の機構に興味を持っている。

2) 量子核生成

過加圧した超流体において、その固化の初期では、小さな固体の粒が量子揺らぎによって生成されているらしいことが実験的に示されているが、その粒が球対称に成長して固体への転移が起こるといふ、いわゆるCahn-Hilliardモデルによれば、転移に必要な時間は、観測される時間よりもけた違いに大きい。同様のパラドクスは、超流動ヘリウム3のA相-B相転移、超流動ヘリウム4中の量子渦の生成や、減圧下での泡生成においても指摘され、一次相転移と関連した重要な問題として、現在大きなトピックとなっている。

3) 超流動ヘリウム4の準安定相

上記2)に関して、最近超流動ヘリウム4の固化に関する状態方程式を提案した。それに従えば、超流動ヘリウム4は、融解圧(25気圧)を優に越えて、実に140気圧に至るまで準安定状態として存在する。これに関してパリのエコールノルマル・シュペリール(ENS)のバリバーらは、収束音波を用いた独創的な実験を開始し、最大で融解圧上100気圧を、1マイクロ秒実現したが、固体核は現れなかった。いずれにせよ、融解圧以上に広大な領域の準安定超流動相が存在することは確かであり、そこでの物性はまだ調べられていない。たいへん面白い物理があると思う。このような高密度の超流動体を調べるため、現在ミラノ大学の量子シミュレーションのグループと共同研究をしている。

堺 和光

16号館 203A 5454-6549
sakai@gokutan.c.u-tokyo.ac.jp

統計力学

1次元量子系や2次元古典系の統計物理学を、主に厳密解や場の理論などの解析的な手法によって研究しています。

温度や磁場などのパラメーターがある値をとるとき、比熱や帯磁率などが発散する、いわゆる臨界現象を示す系は数多く存在します。ところが、1次元系などの低次元系の場合、これらの現象を解析しようにも、強い量子的な揺らぎのため、平均場近似や摂動論的な方法が使えなくなってしまいます。

1次元量子系には、ハイゼンベルク模型やハバード模型など、臨界現象を示し、かつ、厳密に解ける模

型があります。これらの模型の解析から得られる理解は、臨界現象で広く期待されるユニバーサリティーを通して現実の系に重要な知見を与えます。一方、臨界点では、系に共形不変性が成りたつと考えられています。とくに2次元(1+1次元)の場合、共形変換の生成子がなす代数は無有限次元となって理論に強い制約が課され、相関関数などが厳密に記述されます。これらの厳密解や共形場理論は、1次元量子系の研究に欠かせない強力な手法となっています。

最近では、こうした厳密解や場の理論の手法を熱伝導や電気伝導などの系の輸送特性や動的な性質の研究に広げ、顕著な量子効果による興味深い現象を明らかにしています。また、2次元確率過程を臨界現象と関連づけて統一的な理解を目指す方法にも興味を抱いています。

粒子線実験グループ

准教授	松田 恭幸	16号館 222A	5454-6514	matsuday@phys.c.u-tokyo.ac.jp
助教	鳥居 寛之	16号館 102	5454-6545	torii@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp
助教	黒田 直史	16号館 102	5454-6515	kuroda@radphys4.c.u-tokyo.ac.jp
特任教授	山崎 泰規	16号館 102	5454-6515	yasunori@phys.c.u-tokyo.ac.jp

反陽子、多価イオン、ミュオン、短寿命原子核、陽電子などのエキゾチックな粒子を含む原子物理・原子衝突過程の研究を進めている。これには、反水素や反陽子原子の生成と CPT 対称性テストといった基礎研究、原子物理的手法による短寿命原子核の核構造決定等の応用研究、コヒーレントな共鳴励起現象を用いた高速多価イオンの分光と強い電場下での量子電磁力学的効果 (high-Z QED 効果) の観測、多価イオンと固体表面の相互作用に関わる表面の改質・分析、自己組織化帯電現象を利用したナノビーム生成と生細胞照射への応用などを含む。以上を実現するため、反陽子蓄積装置、反水素発生装置等を新たに開発するとともに、CERN の反陽子減速器 (AD)、放射線医学総合研究所の重イオンシンクロトロン (HI-MAC)、ドイツ重イオン研究所 (GSI) の蓄積リング (ESR) 等の加速器施設をフルに活用している。以下に研究テーマの例を示す。

- 超低速反陽子による反水素原子の生成と CPT 対称性テスト: 反陽子の捕捉効率を二桁近く改善した反陽子トラップを用い、これまでより数桁低い数百 eV の超低速単色パルスビームとして取り出す装置 MUSASHI や、コンパクトな陽電子トラップを開発してきた。現在、偏極した冷たい反水素原子 (\bar{H}) の大量合成に有利と考えられるカスプトラップ法の開発を続けており、反水素原子の高効率合成に成功したところである。今後、基底状態反水素原子の超微細分裂の高分解能マイクロ波分光を通じた CPT 対称性テストを進める。
- 反陽子の衝突過程の研究: 数十から数百 eV の反陽子ビームとヘリウムなどの超音速原子ガスジェット標的とを交叉させ、超低速反陽子の関わる原子衝突過程 (イオン化および反陽子原子 ($\bar{p}A^+$) の

生成) を研究している。膨大な反陽子消滅信号から、反応の信号を選び分ける検出法も、大変興味深い開発要素となっている。

- 低速短寿命原子核の生成とその核構造研究: “RF カーペット” による高効率低速短寿命原子核生成法を開発した。原子物理的手法を用いて不安定原子核の核構造研究を進めるとともに、反陽子 - 短寿命原子核原子の生成と荷電パイオン分布測定を通じて短寿命原子核の核表面構造研究を進める。
- 干渉性共鳴励起: 高速のイオンが結晶を通り抜けると結晶場から周期的相互作用をうける。この周期的摂動に伴う擬似光子を用いて多価イオンの分光実験を進め、high-Z QED 効果や超微細構造を高い精度で決定する。さらに短寿命不安定核の核構造研究への応用を計画している。現在、GSI 研究所においてウランなど重元素のリチウム様多価イオンを用いた高分解能実験の準備を進めている。
- ガラスキャピラリーを用いたナノイオンビーム生成と生細胞サージェリー: 液相中へのナノビームの打ち込み技術を開発した。これにより、顕微鏡下での生細胞内小器官の位置選択的照射を初めて可能とした。さらに、多価イオンの絶縁体標的への照射実験により、ガラス表面の絶縁体-導体遷移などこれまで知られていなかった現象を見出した。
- 偏極低速ミュオンビームの生成: ミュオニウム原子をレーザー共鳴イオン化することによって、これまでの 1000 ~ 10 万分の 1 の運動エネルギーしか持たない偏極低速ミュオンビームを生成する手法を開発した。このビームを用いて多層膜などの低次元物質系の磁性研究を進めると共に、さらなる生成効率の向上を目指して開発を続けている。

准教授	齋藤晴雄	16号館 201A	03-5454-6548	saitou@youshi.c.u-tokyo.ac.jp
准教授	齋藤文修	3号館 110	03-5454-6959	fsaito@positronium.c.u-tokyo.ac.jp
助教	澁谷憲悟	16号館 228A	03-5454-6540	shibuken@youshi.c.u-tokyo.ac.jp

A) 齋藤晴雄研究室 (齋藤・澁谷)

16号館 228A室, 15号館 B04, B11室
<http://positron.c.u-tokyo.ac.jp>

はじめに ポジトロニウム (Ps) は電子 (e^-) とその反粒子である陽電子 (e^+) の結合状態であり、水素より千倍も軽いエキゾチックな「原子」です。極めてシンプルな系でありながら、少し立ち入ると未知の物理現象が顔をのぞかせる奥深さが魅力です。

私たちの研究では、 e^- と e^+ が対消滅する際に発生する線を手掛かりとして、Ps や e^+ 、あるいは消滅相手の e^- に関する謎を解きながら、新しい物理を明らかにしています。

近年、物理学実験は大規模化の傾向にあり、ともすれば全体像や個人の寄与が見えにくくなっています。私たちの研究では、装置の組み立てからデータ解析までを一人一人が担当するので、大学院生でもその装置に関して世界中の誰よりも詳しくなることが出来ます。また、サイエンスの進歩に個人がどれだけ寄与したかが明確なので、二年間じっくりと取り組みれば、理系を修めた人間として胸を張る自信がつく研究室です。

以下に、研究テーマの例を紹介します。

Ps の新しい反応 e^- と e^+ はスピンを持ち、磁気的には小さな棒磁石のようなものです。この棒磁石は量子力学的な存在なので、Ps には、 e^- と e^+ のスピンの平行な状態 () か反平行の状態 () しか存在しません。前者をオルソ - ポジトロニウム (o-Ps)、後者をパラ - ポジトロニウム (p-Ps) と呼びます。p-Ps の寿命は約 125 ps ですが、o-Ps の寿命はそれよりも 1,000 倍以上も長く 142 ns です。

ところで、 e^+ はどこから手に入れるのでしょうか？ e^+ は ^{22}Na 等の原子核から β^+ 壊変にともなって出てきます。放出された e^+ は、近くの原子や分子と相互作用を繰り返しながら熱化し、あるものは近くにある多数の e^- の一つと直ちに対消滅し、又あるものは Ps を形成して一定の寿命を経たのち対消滅し

ます。Ps の形成率は e^+ が入射した物質の種類によります。

Xe ガス中では Ps 形成率が異常に低いことが知られていましたが、その原因は長らく不明でした。本研究室において、Ps に磁場をかけて o-Ps の三重縮退を解いて挙動を調べたところ、o-Ps が Xe に衝突した際に、スピン軌道相互作用によって寿命の短い p-Ps にスピン転換をしていることが分かりました。つまり、Ps の形成率が低かったのではなく、予想外の経路で o-Ps が消滅していたのです。現在、この新しい反応機構について更に研究を進めています。

量子電磁気学の検証 朝永やファインマンらによって確立された量子電磁気学は、 e^- や e^+ をはじめとするレプトンの性質を、高い精度で予言することに成功しました。Ps は純粋にレプトン同士からなる原子なので、その精度検証に適した系です。

そこで、o-Ps と p-Ps のエネルギー差 (超微細構造エネルギー：約 0.84 meV) を、最新の計算結果と実験結果で比べてみると、有意な食い違いがあることが知られており、計算と実験の両面で精度の向上が綿々と続けられています。

私たちは、磁場中における o-Ps の歳差運動 (首振り運動) を精密に測定し、その周波数から超微細構造エネルギーを求めるというアプローチで、この問題に取り組んでいます。

新しい装置の開発 私たちは、近年進歩の著しいデジタル処理技術を、いち早く線の信号処理に取り入れ、実験面の精度を飛躍的に向上させました。

従来の Ps の寿命測定装置の時間分解能は 200 ~ 250 ps 程度でしたが、私たちは、放射線検出器からの信号をデジタルオシロスコープで記録し、計算機で的確にノイズを除去しながら解析するという手法で、100 ~ 150 ps 程度の分解能を実現しました。

現在は、この寿命測定装置と電磁石を組み合わせた装置 (これでスピン転換を発見した) や、線のエネルギーを精密に測定する検出器と組み合わせた

装置など、新しい実験系を順々に開発して、Ps や e^+ の新しい物理を明らかにしています。

技術的な応用 上記の世界最高精度の時間分解能を持った陽電子寿命測定装置に対して、国内外から引き合いがあるため、ベンチャー企業の立ち上げも検討しています。また、線検出器やデジタル信号処理技術はPET（陽電子断層撮像装置）などの医療機器開発にも応用ができます。更に、磁場中におけるPsの歳差運動の周波数は局所磁場に依存するため、新しい材料分析装置として可能性があります。

おわりに 出身の大学・学部を問わず、院生募集中です。入試は広域システム科学系を受験して下さい。実験は主に15号館内で行っていますので、いつでも見学が可能です。ご連絡やご相談をお待ちしています。なお、被ばく量は自然放射線よりも少なく、個人モニターの検出限界未満なので、ご心配なく。

B) 斎藤文修研究室（斎藤）

3号館 110室, 15号館 B04室

はじめに 陽電子が電子と対消滅して放出される消滅線を計測して、固体表面や気体原子分子の研究を行っている。陽電子が物質中の電子と対消滅すると、ほぼ mc^2 (m は電子の質量, c は光速) のエネルギーをもった2本の線が放出されます。この線の角度分布、エネルギー、放出時刻等を測定して、消滅相手の電子と電子の周囲の物質に関する情報を得ることができます。陽電子は一部の物質中で、水素原子の陽子が陽電子に置き換わった水素状の原子であるポジトロニウムを形成します。陽電子の消滅がこのように周囲の状況に依存して大きく異なるので解釈は複雑ですが、物質研究の非常に敏感な手法といえます。

気体中におけるポジトロニウムの消滅率の測定 シリカ・ナノ粒子の3次元ネットワーク物質（シリカエアロゲル）を利用して、ポジトロニウムを効率よく生成し、ポジトロニウムと気体原子・分子との相互作用の研究を行っています。この方法では、これまで測定できなかった飽和蒸気圧の小さな気体についてもポジトロニウムとの相互作用を研究することができます。様々な気体についてポジトロニウムのピックオフ消滅、化学消滅の測定を予定しています。

ポリマーのイオン照射効果の研究 低速陽電子ビームを用いて、表面から数ミクロンの深さまでのイオン照射ポリマーの改質効果を研究している。イオン照射によってポリマー表面は電気的絶縁体から良導体に変化するので、半導体デバイスへの応用が期待されています。

金属微粒子表面でのポジトロニウムの消滅 直径がナノメータの超微粒子は、体積に比した表面積の割合が大きく、興味深い性質を示すことから機能性材料として利用されています。シリカ超微粒子で生成したポジトロニウムを用い、金属微粒子・超微粒子の表面物性の研究手法を開発しています。具体的には、触媒の研究への応用を考えています。

ナノ切削による表面・薄膜の機械的特性測定法の開発 材料表面や薄膜の機械的特性の評価は、半導体デバイス、MEMS などの高密度化を実現するうえで重要です。ナノ切削を行いながら切削抗力の水平成分と垂直成分を測定し、表面・界面の機械的特性を評価する方法と装置の開発を行っています。

おわりに 新しい分野に挑戦する院生を募集しています。ご連絡やご相談をお待ちしています。

教授	久我隆弘	16号館 223B	5454-6530	kuga@phys.c.u-tokyo.ac.jp
准教授	鳥井寿夫	16号館 224A	5454-6757	ytorii@phys.c.u-tokyo.ac.jp
助教	青木貴稔	16号館 B07	5454-6525	aoki@phys.c.u-tokyo.ac.jp
助教	竹内 誠	16号館 121	5454-6550	takeuchi@phys.c.u-tokyo.ac.jp

我々のグループでは、原子・分子スケールの物質とレーザーを利用した、いわゆる分光学的手法を用い、物理現象の本質に迫る研究を行っています。以下に、現在取り組んでいる主なテーマを紹介します。

(1) 量子縮退気体の研究

レーザーを用いて気体原子を冷却または捕獲する「レーザー冷却」という研究分野は、1980年代後半から飛躍的に発展し、1995年にはマクロな数の原子が量子力学的に許される最低エネルギー状態を占めるボース・アインシュタイン凝縮 (BEC) が実現されました。BECは原子間相互作用が制御できる理想的な量子凝縮系として、またはコヒーレントな物質波 (原子レーザー) として、理論と実験を問わず多くの研究者の興味を引き続け、現在では原子物理学、凝縮系物理学、量子光学などを取り込む大きなサブフィールドを形成しています。また近年では、量子縮退分子の生成や、極低温フェルミ原子気体の物理もホットなトピックスになっています。液体ヘリウムや超伝導体といった凝縮系では、粒子間相互作用が極めて大きく、また制御が困難であるのに対し、冷却原子気体では「フェッシュバハ共鳴」と呼ばれる現象を利用して磁場による原子間相互作用の制御や分子の生成が可能である点が大きな魅力となっています。

我々は世界最高の性能を誇るルビジウム原子の BEC 生成装置を保有し、最近ではルビジウム原子に加えてリチウム 6 原子 (フェルミオン) およびストロンチウム原子 (ボゾンおよびフェルミオン) も同時にレーザー冷却できる装置を開発しました。現在進めている研究テーマを以下に紹介します。

- 冷却原子系
フェッシュバハ共鳴、強相関原子系の研究
ボース粒子系、フェルミ粒子系、ボース・フェルミ混合系などの量子縮退気体の研究
- 冷却分子系
極低温分子の生成、分子の新しい量子相の研究

- 素粒子と量子エレクトロニクスが融合した新領域
電子の永久電気双極子モーメント (EDM) 探索 (東北大学 CYRIC 酒見研との共同研究)
- BEC と X 線が融合した新領域
SPring-8 における BEC と X 線レーザーとの相互作用の研究 (理化学研究所 石川研との共同研究)

(2) コロイド状量子ドットを用いた量子光学

コロイド状量子ドット (QD) は、 10^2 個程度の原子で構成される直径 3 nm 程度の CdSe 半導体結晶微粒子で、湿式化学合成技術により大量生産されています。室温動作、ガラス表面等に吸着可能、サイズ制御により波長選択可能 (通信波長帯を含む) といった利点があり、量子閉じ込め効果のおかげで QD1 個が単一光子源として機能します。

久我研究室ではガラス表面に QD を低密度分布させ、QD1 個からの単一光子放出 (アンチバンチング) を確認し、スペクトルを測定しました。単一光子源を簡便に構築した画期的な成果として、この研究を行った修士課程の学生に対して、平成 23 年度広域科学専攻奨励賞が授与されました。

今後は光の波面を制御できる空間光変調器を用いて、複数の QD からの単一光子放出をシングル空間モードに集光し、量子暗号の多チャンネル化への応用等を研究していきます。さらに、可干渉性の高い単一光子を得るため、QD や中性原子気体を用いた共振器量子電磁気学系 (Cavity Quantum Electrodynamics; Cavity QED) の構築も目指しています。

(3) 各種レーザー分光技術の開発

- 偏光分光による半導体レーザーの線幅狭窄
レーザーの線幅を狭窄化する最も有効な手段として、機械的に安定な光共振器との周波数や平均位相のずれを測定する方法 (Pound Drever Hall 法; PDH 法) が知られています。ドップラーフリー配置で行う原子気体に対する偏光分光が PDH 法と

等価であることを理論的に示し、様々な原子気体・半導体レーザーを用いて実験で検証しています。

- 光ファイバー端面の凹面化

ガラス平面に適切な条件でCO₂レーザーパルス照射すると、従来の研磨精度限界に匹敵する、表面粗さが非常に小さい凹面を形成できます。この方法で光ファイバーの端面を凹面化し、Cavity QED に用いるファブリー・ペロー共振器、レーザートラッピング、共焦点顕微鏡としての利用を目指します。

- 原子位相ロック

現在の原子時計では、発振器とのラムゼー干渉の結果を射影測定で読み出して、発振器の周波数を安定化しています。ラムゼー干渉の結果を量子力学的な弱い測定で読み出せば、発振器の周波数安定度が改善する可能性があります(原子位相ロック)。この提案を原理実証するため、Coherent Population Trapping に基づくルビジウム原子時計を開発する予定です。

(4) 物理学温故知新

光(電磁波)に関する古い時代の実験を現代の技術で再現し、学問の本質についての理解を深めると同時に、新たな技術・応用について模索しています。これまで、国立科学博物館の展示物(フィゾーの歯車による光速度測定)の技術指導、駒場の自然科学博物館でのフォーコーの回転鏡による光速度測定実験などへの協力、光モラセスに対するハンバリー-ブラウンとトゥイスの二光子相関実験を行いました。1、2年生向けの基礎実験の新種目開発にも深く関与しており、これまでに、電気伝導度測定(すでに基礎物理学実験からは外れている)、ケーター可逆振子、減衰振動・強制振動を開発しました。

「来たれ、研究者の卵！」

我々のグループでは、卒業大学・経験を問わず学生を幅広く受け入れています。平日10:30-18:00を基本スケジュールとし、学位取得を目標として自主性に基いて研究を進めてもらいます。また、グループとして週1回それぞれ2時間程度、セミナーまたは専門書の輪読会や、研究の打ち合わせを行っています。詳細のご相談に応じますので、ご連絡をお待ちしております。

我々はシリコンなどの半導体で実用化されている電界効果トランジスタという電子デバイスを固体の電子物性研究と組み合わせることで、薄膜・界面に新しい電子機能を発現させる研究に取り組んでいます。

(1) 電場誘起による新しい超伝導体の開発

超伝導体は極低温でエネルギーの消費なしに電気を流せる材料であり、とくに比較的高温で超伝導を示す高温超伝導体は環境・エネルギー問題を解決する切り札として期待されています。我々は新しい電界効果トランジスタである電気二重層トランジスタを用いることで絶縁体への超伝導の電場誘起に初めて成功し、さらにこの手法を応用することで酸化物半導体 KTaO_3 に初めて超伝導を見出しました。現在、この研究をさらに進展させ、新しい超伝導材料の発見につなげようとしています。

液体窒素の沸点である 77 K を超える温度で超伝導になる銅酸化物高温超伝導体は「化学ドーピング」という材料開発手法によって実現しました。この手法では電気を流さない絶縁性母材料に不純物を混ぜることで電気伝導を担う伝導キャリア（電子、ホール）を化学的に作り出し、新しい超伝導体を作り出します。しかし、化学的に「ドーピング」に適した材料でしか超伝導を開発できないということが欠点でした。電界効果トランジスタは静電場という物理的な場によって、物質の化学的な性質によらずに伝導キャリアを作り出すことができます。我々はこの手法により今までにない高温超伝導体を実現できると考え、研究を進めています。

(2) スピントロニクスへの電界効果デバイスの展開

電子回路の消費電力は真空管からバイポーラトランジスタ、そして現在の CMOS 型電界効果トランジスタへと世代が変わるにつれて劇的に減少し、現代の情報化社会をもたらしました。この省電力化は電界効果（コンデンサへの電荷蓄積）という電力消費の

ないスイッチング手法によって実現したものです。一方、現代のパソコンの省電力化で大きな問題になっているのがハードディスクです。可動部が多いこと、電磁石を用いた古典的な方法で磁気記録を行っていることの両面から電力消費が大きな問題となっています。この問題を本質的に解決する手法として、物質のスピンを電子的に制御するスピントロニクスが注目されています。たとえば強磁性を示す半導体では伝導キャリアの濃度が増えるとともに常磁性から強磁性へと物性の変化が起きることが知られています。このような物質にトランジスタを組み合わせれば、外部から電圧を与えることでエネルギーをほとんど消費せずに磁氣的性質を変化させることができます。我々は室温で強磁性を示す半導体 Co:TiO_2 に電気二重層トランジスタを構築することで、室温での常磁性から強磁性へのスイッチングに成功しています。また、ほかの材料へも研究を広げることで、たとえば薄膜界面での強電場によってスピンと電荷の相互作用の強さを制御するデバイスを作りたいと考えています。

(3) 薄膜による大面積単結晶基板の作製

電子デバイスを用いた物性研究の基礎になるのが高品質の単結晶薄膜の作成技術です。シリコンや GaAs , GaN 、それにサファイア（酸化アルミニウム）など産業で応用されているいくつかの材料では数十 cm の半径の大きな単結晶の塊（バルク単結晶）が工業的に生産され、基板として用いられています。我々はバルク単結晶をつくるのが難しい物質へも研究対象を広げるため、パルスレーザー堆積法（PLD 法）により 1 μm 以下の厚さの薄膜の形で単結晶を作製しています。この手法はターゲットの組成をそのまま薄膜へ転写することができるため、銅酸化物超伝導体や酸化物半導体など複雑な組成をもつ物質でも単結晶が作製可能です。今後も様々な物質の高品質単結晶の作製に取り組み、さらに多くの物質に研究対象を広げていきます。

教授	川戸 佳	16号館 320	5454-6517	kawato@phys.c.u-tokyo.ac.jp
教授	陶山 明	16号館 327A	5454-6528	suyama@dna.c.u-tokyo.ac.jp
助教	木本哲也	16号館 330	5454-6363	kimoto@phys.c.u-tokyo.ac.jp
助教	庄田耕一郎	16号館 329B	5454-6529	shohda@genta.c.u-tokyo.ac.jp

脳生物物理学、分子細胞生物物理、量子生物物理、分子生物物理学、数理生物物理学

A) 脳生物物理学 (川戸・木本)

16号館 320, 319, 330 室
<http://glia.c.u-tokyo.ac.jp>

脳での精神現象を担う高次情報変換を生物物理学と分子細胞生物学で解明する研究を行っている。神経情報伝達に伴う電気信号、Ca²⁺信号、ニューロステロイド信号など情報の受信・変換・発信メカニズムを解析する。脳は論理的と言うよりも、感情的なコンピュータであり、脳海馬の記憶学習は感情・精神に強く依存している。感情・精神を制御する伝達物質のニューロステロイドは記憶学習を制御する。電気生理・顕微光イメージングなどの計測法を縦軸、分子細胞生物学を横軸として、研究している。具体的には現在以下のようなことを研究している。

1. 記憶学習中枢の海馬で合成される脳ニューロステロイドは全く新しいモジュレータであり、グルタミン酸受容体に働き、記憶・学習機能を変動させる。多電極を用いた電気生理とレーザー顕微システムを用いて、神経ネットワークや単一神経シナプスの交信機構を解析。シナプス形態を数理的に自動可視化解析するソフトウェア開発。情報変換は、受容体蛋白・細胞膜・細胞の各レベルで解析。
2. 脳神経シナプスで局所的に合成されるニューロステロイドが記憶学習をモジュレーションする機構を海馬で解析。高次脳機能においては、女性・男性ホルモンは性ホルモンではなく、ニューロステロイドの代表であり、神経成長因子として働き、精神現象も制御している。これらは認知症やアルツハイマー症を治す効果がある。また適度なストレスで出るストレスステロイドは精神抑うつを引き起こさず、むしろ神経を活性化する。KOマウスや遺伝子改変マウスを用いた解析も行っている。以上のことは神経内分泌学を革新し神経シナプス分泌学を創生することに通じる。

3. 海馬でのニューロステロイド合成酵素と受容体からなるネットワークの遺伝子解析。雄の脳の方が雌の脳より女性ホルモンを多く合成するので、雄の神経回路が出来上がるのです。記憶中枢でも雄雌の違いを成立させる要因。
4. 遺伝子工学・蛋白質工学などで受容体や蛋白を発現した人工脳細胞を用いての上記研究。
5. 脳型コンピュータのアルゴリズムを見つけることを目指した研究。神経シナプス3次元配線の自動解析法の開発を進めている。

B) 情報分子の生物物理学 (陶山・庄田)

<http://dna.c.u-tokyo.ac.jp/>

生物は、DNA分子にコードされた遺伝情報を生体分子の分子反応によって処理することにより機能し、進化してきた。その仕組みを新しい計測方法や高速コンピュータを利用して解明するとともに、その仕組みに学ぶことにより、DNAコンピュータ、DNAナノデバイス、DNAナノマシンを開発する研究を行っている。具体的には以下のような研究が進行している。

1. 自律型DNAコンピュータと人工生命システム
DNAコンピュータはDNA分子反応を利用した超並列分子コンピュータである。NP完全問題など電子コンピュータでは解くことが非常に困難なクラスに属する問題を解くための超並列コンピュータとして約10年前に誕生した。当研究室では、DNAコンピュータの電子コンピュータにはない特徴、すなわち、計算素子の大きさがナノスケールと非常に小さいこと、生体高分子に対する直接的なインターフェースを有していることに着目し、DNAに書き込まれたプログラムにしたがって一定温度の下で自律的に動

作する、細胞内に持ち込むことが可能なほど小さな、自律型DNA コンピュータ (RTRACS と命名) の開発を行っている。

RTRACS は遺伝子診断や遺伝子治療のための画期的な技術であるだけでなく、生命体のように進化、学習することが可能な人工生命システムでもある。特に、RTRACS を直径 $1\mu\text{m}$ 程度のリポゾーム内に取り込んだシステムは、反応容器が小さいために分子数の離散性が影響する細胞内の反応システムのモデル実験系として適している。RTRACS を用いた実験とシミュレーションにより、生命体における細胞内反応の仕組みの本質を明らかにする研究を行っている。

2. 遺伝子ネットワーク

ゲノムDNA 上には、何百、何千、何万という多数の遺伝子が存在している。発生・分化・老化、脳の機能などは、これら多数の遺伝子のネットワークを解析することによりはじめて明らかにすることができる。当研究室では、DNA コンピューティング技術を利用して、多数の遺伝子の mRNA や非コード RNA (ncRNA) の発現パターンの空間的・時間的变化を高精度、高感度で同時計測するための新しい方法を開発している。そして、その方法により得られた発現データと、ゲノム・プロジェクトによりデータベース化された多数の発現データを解析することにより、生命現象を遺伝子ネットワークのレベルで解明する研究を行っている。

自律的 DNA コンピュータである RTRACS と無細胞タンパク質翻訳系を結合すると、試験管の中に人工的な遺伝子ネットワークを構築することができる。このシステムは天然の遺伝子

ネットワークを研究するためのモデル実験系として優れているだけでなく、試験管内での分子進化により高機能のタンパク質を創製するための反応系として利用が可能である。細胞に害を与えるために細胞を用いた分子進化システムでは創製できないような新しいタンパク質を創製する研究を行っている。

3. DNA ナノデバイスと DNA ナノマシン

DNA や RNA は、他の生体高分子に比べると、その特異性の高い分子認識を設計して制御することが容易である。当研究室ではこの特徴を利用して、無機材料では達成が困難な超高密度の記憶と超並列の動作が可能な DNA メモリデバイスの開発を行っている。

DNA メモリは情報を記憶するだけでなく、ナノスケールでのプログラム可能な自己集合にも利用できる。DNA メモリにナノ粒子や機能分子を書き込むことにより、これらをナノスケールで自在に自己組織化してナノデバイスやナノマシンを構築する研究を行っている。最終的には、DNA 分子に記憶させた動作プログラムにより自律的に動作する、DNA ナノデバイスや DNA ナノマシンの実現を目指している。

また、DNA メモリは多数のイメージ情報を同時に記録するためのデバイスとしても利用できる。組織切片中の多種類の mRNA や ncRNA、さらに蛋白質分子の空間分布を同時に記録するための分子イメージング・プレートの開発を進めている。これにより、生命体の複雑な遺伝子ネットワークの解明が飛躍的に進むことが期待されている。

なお、当研究室は (1) 理学系研究科物理学専攻、(2) 総合文化研究科広域科学専攻生命環境科学系の 2 専攻から大学院学生を受け入れている。