

量子科学の追究、そして新しい理工学への挑戦

日本大学

量子科学研究所

Institute of Quantum Science,
Nihon University

日本大学大学院 理工学研究科

量子理工学専攻

Graduate School of
Quantum Science and Technology,
Nihon University

量子科学研究所

量子科学の発展を目指して

Institute of Quantum Science, Nihon University

1957年に創設された日本大学原子力研究所は、日本大学の学術研究拠点のひとつとして、原子力の基礎および応用の研究を推進し、また同時に、理工学部および大学院理工学研究科の教育にも携わってきました。1992年、大学院理工学研究科内に量子理工学専攻が開設されたことに伴い、その大学院教育を主として担当するようになりました。その後、量子科学の基礎および応用の研究を中核とした科学研究の一層の充実・発展を目指して、2002年3月1日をもって、量子科学研究所に名称変更されました。

量子力学は、20世紀前半に登場し、今や自然界における数々の微視的な現象をも洞察する、極めて有用な学問として成長し続けています。本研究所の研究テーマは常に開拓者精神に富むものが選ばれており、創設時からの「核融合」「プラズマ科学」および「超伝導」に加えて、「加速器科学」および「量子光学」が実験的研究として行われています。理論的研究では、「素粒子物理」「計算物理」などの、独創性を要する先端的研究が行われています。以上を含む多くの研究には、理工学部のほか、医学部など本学関連学部からの兼任研究員、国内外の客員研究員が参加しています。

研究グループ	研究スタッフ	研究テーマ
加速器科学	早川 恭史（研究所・専攻兼任） 境 武志（研究所・専攻兼任）	加速器科学 加速器科学
プラズマ・核融合科学	渡部 政行（研究所・専攻兼任）	核融合科学
量子物性科学	井上修一郎（研究所・専攻兼任） 行方 直人（研究所・専攻兼任） 桑本 剛（研究所・専攻兼任）	量子光学 量子光学 原子光学
素粒子論	大谷 聡（研究所・専攻兼任）	素粒子論・量子論
非線形数値シミュレーション	長峰 康雄（研究所・専攻兼任）	計算物理学

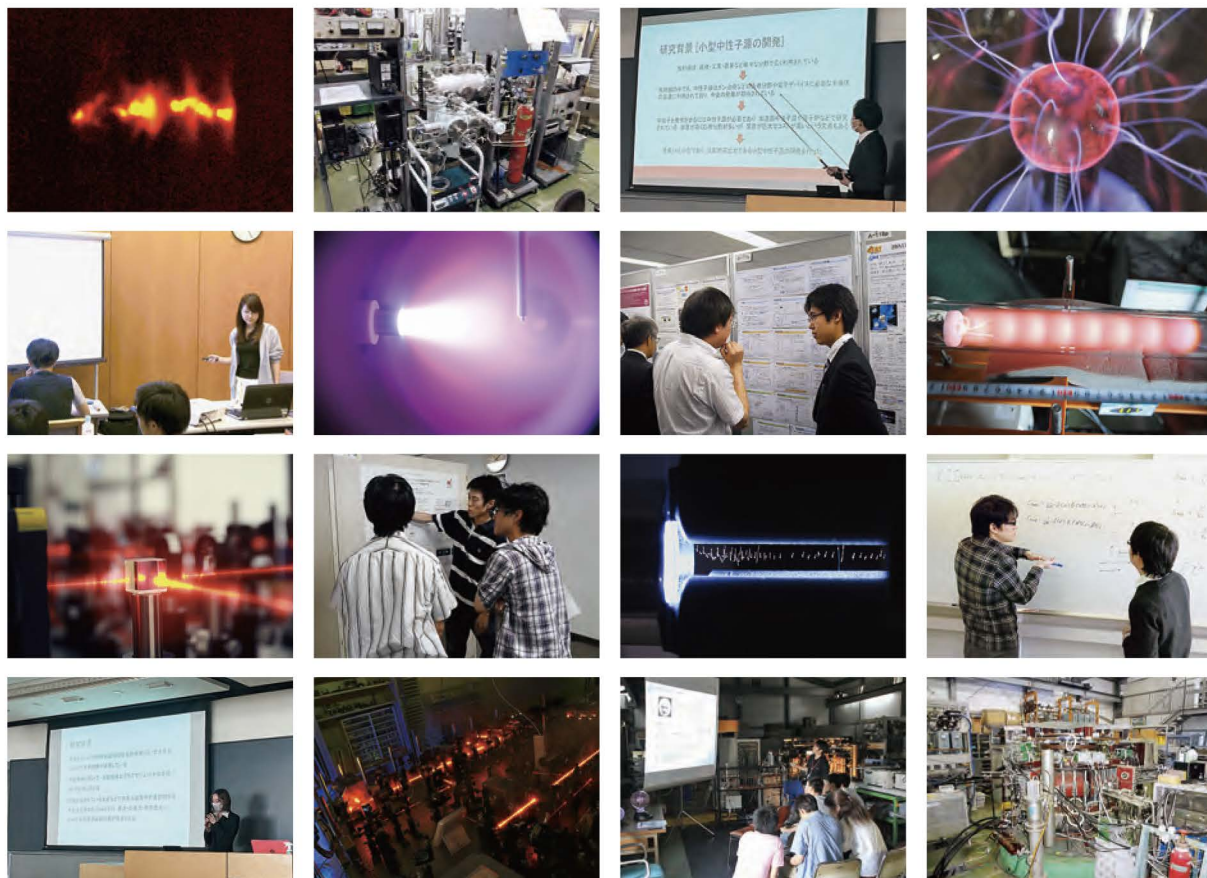
量子理工学専攻

量子の技術で未来を拓け

Graduate School of Quantum Science and Technology, Nihon University

物質科学の基礎理論である量子力学は、現在ではニュートン力学、電磁気学と並ぶ科学技術の第三の柱となりました。その応用はレーザーや超伝導技術に始まり、今後は高度医療、生命工学、量子情報、エネルギー科学など最先端の科学技術を切り拓こうとしています。つまり、量子力学を基礎とする「量子科学」は、現在の科学技術になくはない分野であり、また未来を切り拓く牽引的な分野なのです。

日本大学大学院理工学研究科量子理工学専攻は、量子力学のさらなる追究、また量子科学の新しい理工学への応用を主な目的として、1992年に開設されました。本専攻では、時代の要請に応じた新しい研究が日夜、繰り広げられています。研究のテーマが学際的なこともあり、本専攻には物理系の学生だけでなく、電気・電子工学系および機械・航空宇宙工学系の学生も在籍できます。本専攻は量子科学研究所の活動と密接な関連があり、配属された大学院生は、加速器・放射線科学、超伝導科学、量子光学、原子光学、核融合、プラズマ科学、素粒子論、場の量子論、非線形数値シミュレーション等、幅広い分野で量子科学にかかわる研究ができます。



学会・研究会での研究発表、専攻における研究生活、実験写真など



早川 境

加速器科学（早川恭史、境 武志）

研究拠点：理工学部船橋校舎電子線利用研究施設（LEBRA）

<http://www.lebra.nihon-u.ac.jp/index.html>

加速器グループは電子線利用研究施設（LEBRA）において、125MeV 電子線形加速器（リニアック）を基盤としたさまざまな研究開発に取り組んでいます。主要研究テーマとして自由電子レーザー（FEL）による赤外から可視領域の光源開発、パラメトリックX線放射（PXR）を利用したX線源開発、高強度コヒーレントテラヘルツ波光源開発を行っており、これらを基盤とした物質、生命、資源科学の広い学問分野を研究対象とする先端的な研究拠点が形成されています。光源・線源の開発を含めた加速器の高度化は、大学共同利用機関高エネルギー加速器研究機構（KEK）との共同研究を基盤として進められています。

LEBRAはユーザー利用実験の設備を整えた国内有数のFEL施設として、共振器型連続波長可変FELでは世界的にも短い波長領域である $0.4\sim 6\mu\text{m}$ の近赤外FELを供給しています。また、PXRによる連続波長可変X線源実用化という世界で初の試みに成功し、波長選択性と単色性を備えた $4\sim 34\text{keV}$ のコヒーレントなX線が得られています。テラヘルツ光源開発では産業技術総合研究所と共同研究を行い、波長範囲は $0.1\sim 2\text{THz}$ 、強度は国内の加速器広帯域テラヘルツ光源としては、最大強度となるマクロパルス（ $5\mu\text{s}$ ）当たり 1mJ に達しています。

LEBRAは大学付置の中規模施設ながら赤外からX線領域にわたる波長可変単色光源を実現しており、特にPXRを用いた研究では、従来では大型放射光施設以外では実施が困難であったX線吸収端微細構造（XAFS）分析や回折強調型位相コントラストイメージング（DEI）、小角散乱イメージング（SAXS）などの応用測定が行われ、国内のみならず世界的にもユニークな存在となっています。実際にさまざまな分野の応用研究へ赤外光やX線、テラヘルツ波を供給しており、理工系だけでなく医学・歯学などの生命科学分野の研究者や学生の研究にも利用されています。このように学際的な研究者の交流の場ともなっており、多岐にわたる研究が可能となっています。

また、加速器の高性能化に関する研究も重要なテーマであり、クライストロンなどの高周波装置や非破壊型ビームモニターといった加速器にとって重要な装置の改良や開発、あるいは制御システムやデータベースの構築、それに伴うソフトウェアの開発などを精力的に進めています。加速器には放射線源という側面もあるため、放射線検出器・モニタリングシステムの開発といったことも研究テーマになっています。また実験的な研究に加え、ビーム加速原理やFEL、PXRに関する理論的な研究やシミュレーションコード開発といったことも重要なテーマとなっています。

メイン加速器と独立したテーマとして、クライオ高周波電子銃の研究開発が挙げられます。高純度の銅空洞を温度 20K まで冷却し動作させることで、常伝導でありながら電力効率の高いコンパクトで高性能な電子源の実現を目指し、高周波電子銃の開発を進めています。この開発に関連して現在、海外における放電頻度の実験から、低温冷却空洞ではさらに高電界が期待できることが示唆されています。これは空洞表面における放電頻度に関して提唱されている、電界による金属結晶内転移移動に基づくモデルに定性的に一致しており、今後の高エネルギー加速器の研究開発にも大きな影響をもたらす可能性があります。

主な研究テーマ

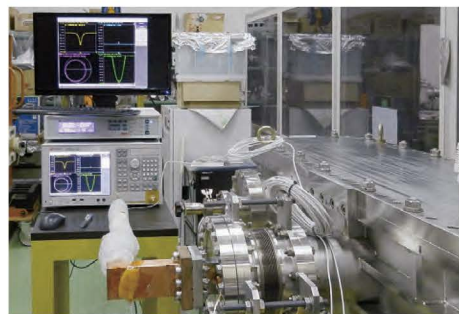
- 高性能電子線形加速器の研究開発
- ビームモニター・加速器制御システムの研究開発
- 自由電子レーザー（FEL）の研究（実験・シミュレーション）
- FEL高調波生成に関する研究
- パラメトリックX線放射（PXR）によるX線源の研究開発
- コヒーレントX線の応用に関する研究
- 高強度テラヘルツ波光源の研究開発
- 放射線測定システムの研究開発
- クライオ高周波電子銃の研究開発
- 各種光源・線源の高度利用に関する研究



電子線利用研究施設



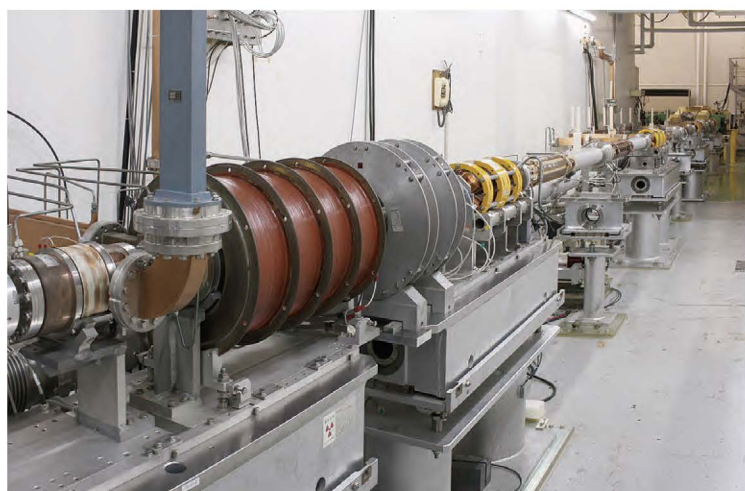
加速器コントロール室



クライオ高周波電子銃装置



電子ビームライン



125MeV 電子線形加速器



量子光学（井上修一郎、行方直人）

研究拠点：理工学部駿河台校舎 7 号館 2 階 722A 室・722B 室

井上

行方

量子光学グループは、光の量子力学的な性質や光と物質との相互作用を理解し、それに基づく新しい技術の開発を実験的に行っています。主要研究テーマとして、単一光子や量子もつれ光子対などの発生および検出、それら技術を利用した情報通信技術（量子 ICT）や可視化（イメージング）技術の開発を進めています。これらは、情報、医療、エネルギーなどさまざまな領域において社会課題を解決します。例えば、

- (1) 将来のどんな技術でも解読できない情報安全保障
 - (2) 低電力による大容量情報伝送、大規模計算・シミュレーター
 - (3) 超高感度かつ高分解な生体光イメージング
- を実現します。

量子光学グループは、超伝導単一光子検出器や独自開発の半導体単一光子検出器、さらには産業技術総合研究所と共同開発した超伝導転移端センサを用いた光子数識別器（同時に光子が何個入射したかが測れる）を有しており、近赤外領域（とくに通信波長帯～1550nm）の光子を高効率、低雑音として高速に検出することができます。

また、通信波長帯の時間相関光子対系やそれを用いた伝令付き単一光子源（HSPS）、そして直交偏光量子もつれ光子対源も実現しています。とくに、HSPS は90%を超える識別不可能性と伝令に対する単一光子存在確率0.5（単一モードファイバー出力）を達成しています。

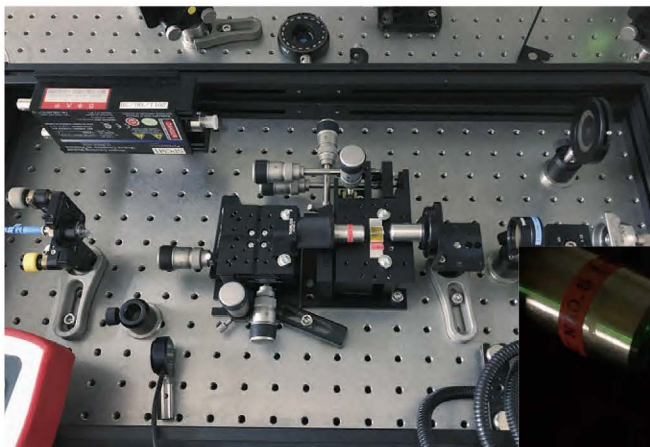
以上の光子検出技術や量子光源は当グループで取り組んでいる、量子 ICT や量子イメージング技術の研究開発すべての基礎となっています。

量子 ICT に関する研究においては、量子鍵配送長距離化に必須となる量子中継の要素技術や、フォトンクスやプラズモニクスによる誤り訂正なし中規模量子計算・シミュレーター（NISQ）の研究開発にとくに力を入れています。

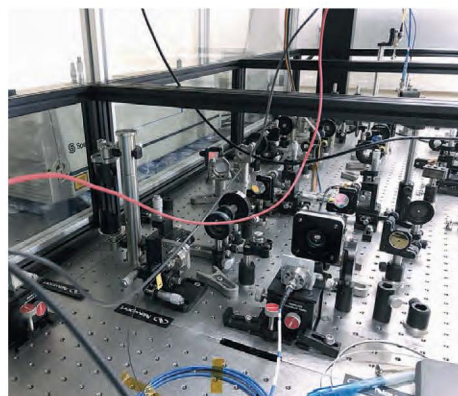
量子イメージングに関する研究においては、量子光源の持つ量子性や、光子検出器が提供する究極的な近赤外領域光感度、光子数識別器が提供する光子数・エネルギー分解能を活かし、より高感度に、より精密に、そしてより深部構造を可視化できるイメージング技術の創成を目指しています。

主な研究テーマ

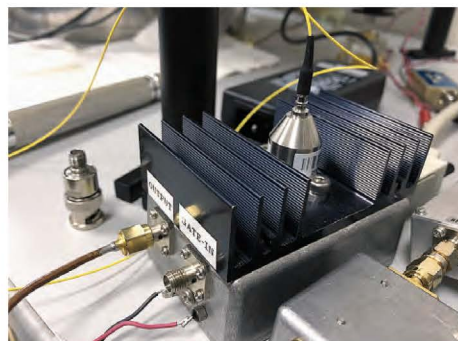
- 通信波長帯量子もつれ光源の開発と高度化
- 量子中継技術に関する研究
- 伝令付帯単一光子複製に関する研究
- 光量子状態バッファに関する研究
- 単一光子検出器・光子数識別器の開発
- 光による誤り訂正なし中規模量子計算・シミュレーターの研究
- 量子モードゲートを基礎としたイメージング技術の開発
- 機械学習を用いた量子光学サブシステムの開発



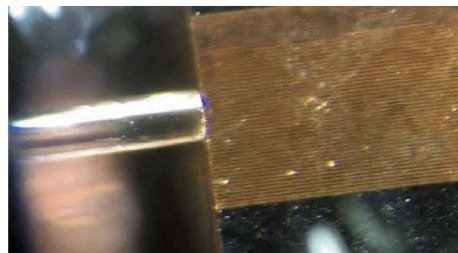
PPLN 導波路を用いた周波数上方変換系



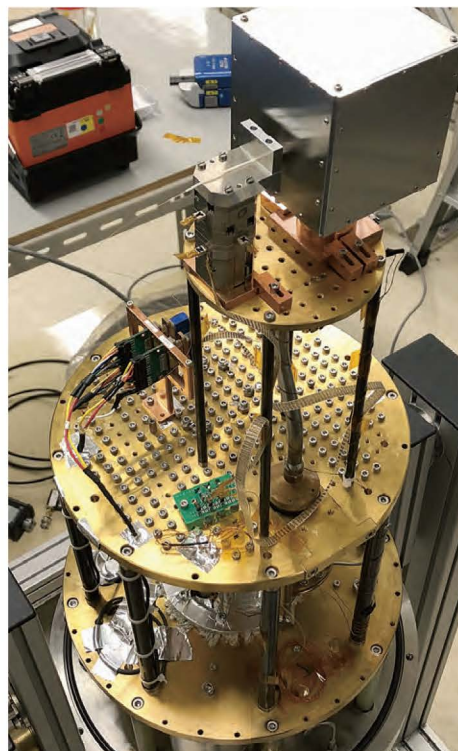
識別不可能性を有する通信波長帯時間相関光子対発生系



正弦電圧ゲート動作 InGaAs/InP-SPAD による単一光子検出器



プラズモニク集積量子ウォーク回路



超伝導転移端センサ



核融合科学（渡部政行）

研究拠点：理工学部船橋校舎物理実験 A 棟付属棟、理工学部駿河台校舎 8 号館 2 階 823F 室
<http://atras2.phys.cst.nihon-u.ac.jp/index.html>

渡部

中性子線を用いた癌の治療やコンクリート構造物の非破壊検査など、中性子科学の広い普及のためコンパクトで操作性の高い中性子源の開発を行っています。中性子は原子核を構成する電荷を持たない中性の粒子です。われわれが考案する中性子源は、リング電極を用いたプラズマ放電型の中性子線源です（図 1 参照）。この方式ではリング陰極と 2 つの陽極との間に数十 kV の負電圧を印加することで重水素ガスをプラズマ化し、プラズマ中の重水素原子核を陰極リング中心部に加速・収束させ、衝突させることで「核融合反応」を起こします。これまで 106 個／秒程度の高速中性子の発生を確認しており、現在、中性子発生数のさらなる向上を目的とした研究を進めています。

また、宇宙空間における人工衛星等のための推進源として、電磁加速型電気推進ロケットおよび電熱加速型電気推進ロケットの開発を行っています（図 3 参照）。電気推進ロケットでは高速のプラズマ流を生成し、その反作用として推力を得ます。プラズマの熱的な性質（電熱加速型）や、電磁気学的な性質（電磁加速型）を利用して高速なプラズマ流を作り出しています。とくに、擬火花放電を利用した耐久性の高い電気推進ロケットの開発を進めています。

その他、プラズマウインドウを電子供給源に応用した電子ビームの開発では、これまで難しかった電子供給部と電子加速部の気圧差を保ちながら、放電で生成したプラズマから電子ビームを引き出すことに成功しました。本研究室では、プラズマ放電を応用した中性子源、電気推進ロケット、電子ビーム源など、さまざまなプラズマを利用した応用研究を展開しています。

主な研究テーマ

- 核融合反応を用いた小型中性子源の開発
- プラズマ電気推進ロケットの開発
- プラズマ放電を利用した電子ビーム源に関する研究
- イオントラップを用いた荷電粒子の捕捉に関する研究
- MHD ダイナモ現象の理解に関する研究

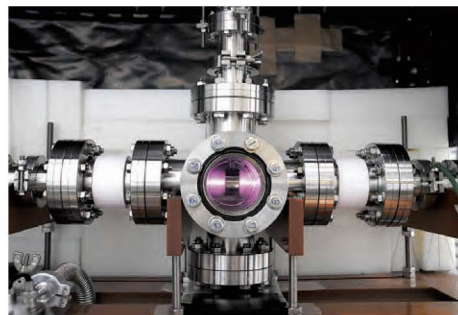


図 1 リング電極を用いた D-D 核融合型小型中性子源



図 2 中心部で核融合反応が起こっている



図 3 電磁加速型電気推進ロケット



原子光学（桑本 剛）

研究拠点：理工学部船橋校舎 6 号館 1 階 611 室・2 階 621D 室
<http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/~kuwamoto/>

桑本

本研究室では、原子気体のレーザー冷却技術やレーザーによる原子制御技術を駆使して、ルビジウム (Rb) 原子気体のボース・アインシュタイン凝縮体 (BEC) を生成し、Rb 原子 BEC を「量子メモリ」に応用するプロジェクトを進めています。

安全性が極めて高い通信方式である「量子通信（量子暗号）」の実用化研究が世界的に盛んに研究されていますが、現状の運用距離は 100km 程度と限定的です。大規模量子通信ネットワークを構築するためには「量子中継器」の実用化が必須であり、これには量子情報を運ぶ担い手である光子をいったん保存するためのデバイスである量子メモリが必要となります。量子メモリの候補はいくつかありますが、BEC は、高密度・極低温という特性から高効率で長時間の光子保存が期待できる有望な量子メモリ候補のひとつです。

本研究室では 2008 年に BEC の生成に成功しています。現在、量子メモリ研究に特化した実験システムとして、磁場とレーザーを巧みに組み合わせたハイブリッドトラップによる BEC 生成の研究を進めています。また、量子光学研究室の行方先生と協力して BEC 量子メモリに保存する「偏光量子もつれ光子対」の発生システムの構築も行います。

上記 2 つの実験システムを組み合わせ、実用的な量子メモリの開発を行っていきます。

主要な研究テーマ

- 原子ボース・アインシュタイン凝縮体の量子メモリへの応用
- ルビジウム原子に吸収可能な量子もつれ光子対の生成

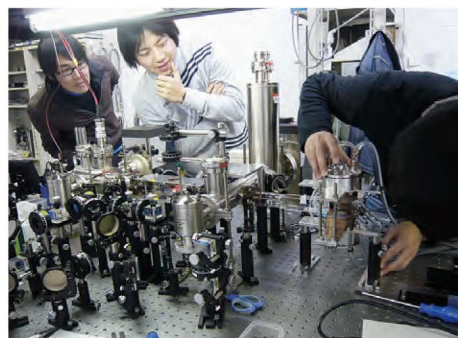


図 1 Rb 原子のレーザー冷却装置



図 2 レーザー冷却された Rb 原子集団



素粒子論・量子論（大谷 聡）

研究拠点：理工学部駿河台校舎 8 号館 2 階 823D 室

<http://aries.phys.cst.nihon-u.ac.jp>

大谷

本研究室では、自然界における最も基本的な粒子である素粒子（電子、光子、クォーク、ニュートリノなど）が持つさまざまな性質を研究しています。また、量子科学の基礎である量子力学と場の量子論も重要な研究テーマにしており、純粋に理論的・数理的なテーマから実際の物理現象に関わるテーマまで、幅広い観点から多彩な研究を行っています。

素粒子論は、物質と力の究極の姿を明らかにすることを主要な研究目的にしています。また、そのために必要な理論体系を整備し、それを量子効果に関わるいろいろな現象の説明と理解に役立てることも研究目的のひとつです。本研究室では、これらに沿った研究に加えて、量子論の諸問題や数理解物理学に関する研究にも積極的に取り組んでいます。大学院では、素粒子論や量子論の研究を進めていく過程で、数学、物理学、量子科学の諸分野を勉強することができ、自然科学全般を高い視点から見ることができますようになります。また、研究を通じて得られる高度な論理的思考力と語学を含む基礎学力、そして学会・研究会発表で身につくプレゼンテーションのノウハウは、就職後においても大いに役立つスキルになります。

本研究室には、日大出身者だけでなく他大学出身者も在籍し、熱心に勉強・研究に取り組んでいます。修士課程や博士課程の修了生は、大学・短大、大手民間企業、高校などに就職し、各分野で大いに活躍しています。学部の卒業研究生も積極的に受け入れており、学生自身が自由に研究テーマを選択して卒業論文を仕上げています。

主な研究テーマ

- 経路積分に基づく量子論の記述
- 繰り込み群の基礎と応用
- 共形場理論の相関関数
- 量子多体問題

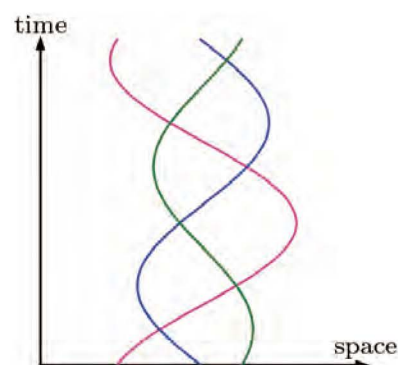


図1 トポロジ的に非自明な3粒子世界線

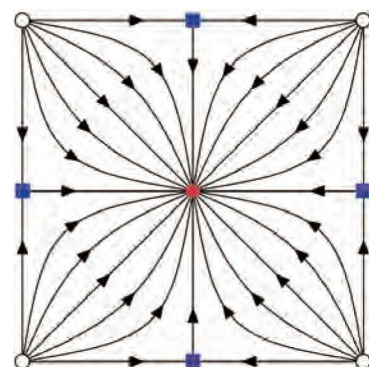


図2 量子点状相互作用の繰り込み群の軌道



計算物理学（長峰康雄）

研究拠点：理工学部駿河台校舎 8 号館 2 階 823B 室

<http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/labo/r05.html>

長峰

本研究室では、主に核融合に向けたプラズマ物理学分野を対象にし、計算機シミュレーションを駆使した研究を行っています。とくに高効率でコンパクトな磁場閉じ込め核融合炉を指向した低アスペクト比トーラス閉じ込め方式において、プラズマの磁気流体力学的（MHD）平衡と不安定性に関する数値シミュレーション研究を進めています。また、プラズマ中の乱流現象に伴う輸送（異常輸送）に関する研究なども行っています。

核融合プラズマ以外では、新しい計算科学手法として数値解析アルゴリズムや計算機システムの研究も行っています。最近の高性能グラフィックボードを活用した数値計算（GPGPU）の応用も積極的に進めています。

大学院生はこれらの研究テーマを通して、計算機やプログラミングに関する高度なスキルを身につけ、卒業後はソフトウェア関連の企業や研究所でさまざまな活躍をしています。また、卒研生については、研究室のテーマにこだわらず、本人の意志によりテーマを決めて、計算機を利用した問題に取り組んでいます。

主な研究テーマ

- 低アスペクト比トーラスプラズマにおける MHD 平衡と不安定性に関する研究
- 核融合プラズマにおける乱流輸送と閉じ込めに関する研究
- 計算機シミュレーションにおける数値アルゴリズムと計算機システムの研究
- GPGPU を活用した数値シミュレーション研究

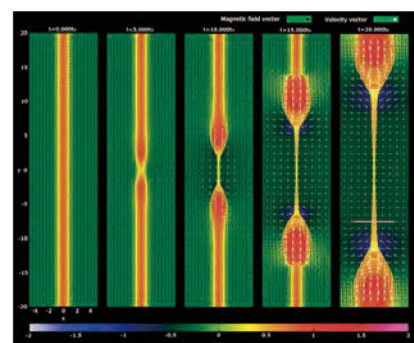


図1 磁気リコネクションの数値解析

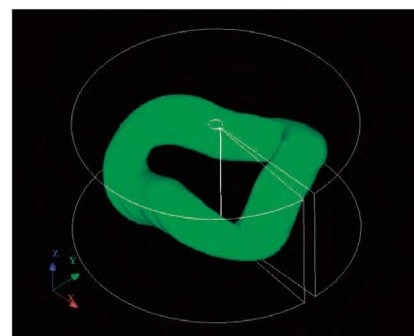
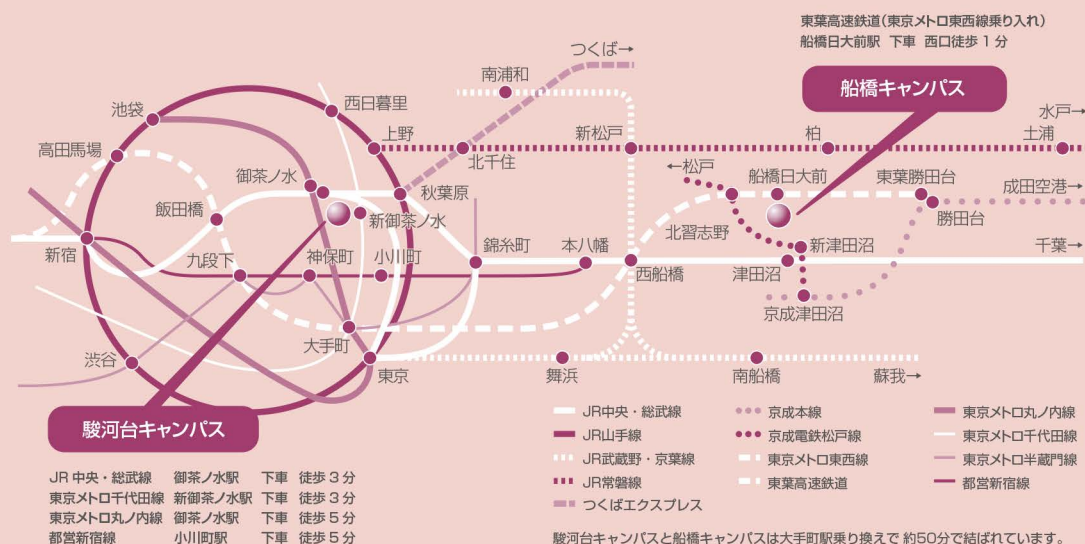


図2 プラズマの磁気流体シミュレーション



日本大学

量子科学研究所

Institute of Quantum Science, Nihon University

〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 Tel. 03-3259-0899

<http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/institute/>

E-mail: cst.iqs-office@nihon-u.ac.jp



日本大学大学院 理工学研究科

量子理工学専攻

Graduate School of Quantum Science and Technology, Nihon University

〒101-8308 東京都千代田区神田駿河台1-8-14 Tel. 03-3259-0899

<http://www.quant-ph.cst.nihon-u.ac.jp/quantum/>

E-mail: cst.iqs-office@nihon-u.ac.jp

