

京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

分科紹介
2022年度大学院入学試験案内
ローレンツ祭プログラム



編集・発行： 京都大学 大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻
URL： <http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/>
<http://www.kusastro.kyoto-u.ac.jp/index-j.html>
連絡先： 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町



目次

目次	1
ご挨拶	2
分科紹介	
物理学第一分野	3
E1: 固体量子物性	4
E1: 量子凝縮物性	5
E1: 低温物理学	6
E2: 量子光学・レーザー光学	7
E2: 光物性	8
E2: ナノ構造光物性(化研)	9
E3: 時空間秩序・生命物理学	10
E3: ソフトマター物理学	11
E3: 生体分子構造(複合研)	12
T1: 凝縮系理論	13-14
T1: 物性基礎論: 凝縮系物理(基礎研)	15
T2: 非線形動力学	16
T2: 流体物理学	17
T2: 相転移動力学	18
T2: 物性基礎論: 統計動力学(基礎研)	19
T2: 物性基礎論: 量子情報(基礎研)	20
プラズマ物性物理学	21
物理学第二分野	22
原子核・ハドロン物理学	23-24
素粒子物理学	25-26
宇宙線物理学	27-28
核放射物理学(複合研)	29
核ビーム物性学(複合研)	30
素粒子論: 物理学第二教室・素粒子論研究室	31-32
素粒子論: 基礎物理学研究所・素粒子論グループ	33-34
原子核論: 物理学第二教室・原子核理論研究室	35-36
原子核理論: 基礎物理学研究所・原子核理論グループ	37
天体核物理学: 物理学第二教室・天体核物理学研究室	38-39
天体核物理学: 基礎物理学研究所・宇宙グループ	40
ビーム物理学(化研)	41
宇宙物理学分野	42
太陽物理学	43
太陽・宇宙プラズマ物理学	44
恒星物理学	45
銀河物理学	46
理論宇宙物理学	47
大学院入試案内	49
ローレンツ祭	50-52

ご挨拶

本専攻は、物理学第一分野、物理学第二分野、および宇宙物理学分野の三分野からなっており、それぞれの分野で独自の研究を深めるとともに、境界・融合領域の開拓や新しい研究領域の創生にも力を注いでいます。歴史的には、本専攻からは湯川・朝永・小林・益川の4人のノーベル物理学賞受賞が物語るように、偉大な物理学的業績が輩出しています。また、今日この日にもそれらに匹敵する研究成果をあげるべく、多くの教員・若手研究者・院生が勉学と研究に励んでいます。

本専攻の理念および教育目標は、以下の通りです。

- 1) 未開拓の分野の探究や学問的創造を何よりも大切にする自由な学風の継承と発展、
- 2) 国内外に広く開かれた教育・研究活動、
- 3) 創造性豊かで、高い問題発見・解決能力を持つ人材の養成、
- 4) 国際的舞台で活躍できる研究者の養成、

このように、本専攻では最先端の研究を発信していくとともに、次世代の科学を担える独創的な研究者、さらには、物理学や宇宙物理学の研究経験を生かして、幅広く日本と世界の社会に貢献する人材の育成を目指して教育・研究に取り組んでいます。

本専攻の研究・教育の内容を、次ページ以降に、各分科ごとに詳細に紹介しています。

是非ご覧の上、ご意見・ご質問があれば大学院入試説明会やローレンツ祭の折や、直接に、私や他の各構成員へお寄せ下さい。

2021年 4月
京都大学大学院理学研究科
物理学・宇宙物理学専攻長
佐々 真一



Kyoto University
Graduate School of Science



E1: 固体量子物性 研究室

プロフィール：過去 10 年間の実績

修士課程入学者 (2012-2021) : 37 名 うち他大学出身者 : 4 名 (神戸大、琉球大、広島大)
 修士学位取得者 (2011-2020) : 32 名 うち進学 : 9 名 (別研究室進学 2 名含む)、就職 : 23 名 (過去 2 年 : 日立製作所、JFE スチール、オースビー、小松製作所、三菱電機、古河電工)
 博士学位取得者 (2011-2020) : 16 名 うち大学等研究機関 13 名 (助教 2 名、PD7 名、学振 PD 4 名)、企業 : 3 名

物理学第一分野

E1分科群：凝縮系物理学実験	
固体量子物性	4
量子凝縮物性	5
低温物理学	6
E2分科群：光量子物性実験	
量子光学・レーザー分光学	7
光物性	8
ナノ構造光物性 (化研)	9
E3分科群：複雑系実験	
時空間秩序・生命物理学	10
ソフトマター物理学	11
生体分子構造 (複合研)	12
T1分科群：量子物性理論	
凝縮系理論	13-14
物性基礎論：凝縮系物理グループ	15
T2分科群：統計物理・ダイナミクス	
非線形動力学	16
流体物理学	17
相転移動力学	18
物性基礎論：統計動力学 (基礎研)	19
物性基礎論：量子情報 (基礎研)	20
学部教育協力講座 プラズマ物性物理学	21

私たちは、固体中の電子が強く相互作用している**強相関電子系**を舞台とした多様な物性現象を研究しています。室温よりはるかに低い温度では物質は量子統計力学的効果に支配され、超伝導に代表される日常感覚とはかけ離れた現象が起こります。このような現象の発見や理解を目指して私たちは日々研究に励んでいます。前野悦輝 教授 石田憲二 教授 米澤進吾 准教授 北川俊作 助教



Research

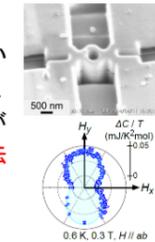
トポロジカル量子現象

凝縮系の波動関数の「形状(トポロジー)」に起因する新奇現象「**トポロジカル量子現象**」の研究を行っています。

トポロジカル超伝導体

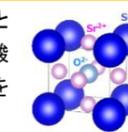
近年、超伝導波動関数が非自明なトポロジーを持つ「トポロジカル超伝導」の研究が進んでいます。我々の研究室では、 Sr_2RuO_4 をはじめとして、トポロジカル超伝導体の研究をしています。

最近では、例えば Sr_2RuO_4 微小リングにおいて**1/2の磁束量子化を観測しました**。また、 $\text{Cu}_4\text{Bi}_2\text{Se}_3$ において、超伝導ギャップ振幅が回転対称性を自発的に破る**ネマティック超伝導状態**の世界初の例を発見しました。



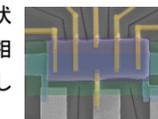
新物質合成

新奇現象の発見には自ら試料を作成することも重要です。最近では、アンチペロブスカイト酸化物という物質群で**初の超伝導体 $\text{Sr}_{3-x}\text{SnO}$** を発見しました。



電流印加下での新現象

我々は、物質に電流を流すことで新奇な状態を発現させることを目指しており、電子相関の強い様々な物質に対して電流を印加しながら物性測定を行っています。



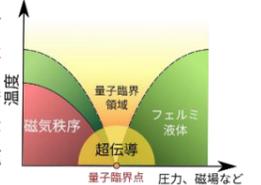
Education

ゼミナールでは、教科書の輪講を行います。担当者は文献に導出の示されていない式を解説したり、式の内容を噛み砕いて説明したりします。また、文章の内容を自分で図にしたり、簡単にしか触れていない内容を参考論文等を読んで掘り下げたりするなど、自分なりに教科書の内容を発展させて説明します。

コロキウムでは、興味ある題材について担当者が発表します。発表・議論は**英語**で行います。最新の研究内容が取り上げられることが多く、研究会さながらの激しい議論を交わすことも少なくありません。この経験は国際学会等の発表の場で活かされています。

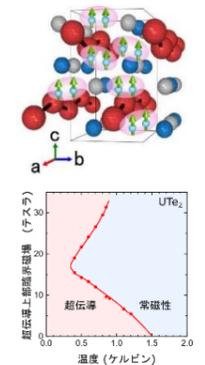
磁性と超伝導

これまで、超伝導は磁場で壊れるため磁性、特に強磁性とは相性が悪いと考えられてきました。近年、**強磁性と共存する超伝導**が発見され大きな注目を集めています。我々は核磁気共鳴法(NMR)を用いて微視的な立場から磁性と超伝導の関係を調べています。以下に我々が主に取り組んでいるテーマを紹介します。



ウラン系超伝導体

$\text{UGe}_2, \text{URhGe}, \text{UCoGe}$ は**強磁性と超伝導相が共存する唯一の物質群**です。我々は UCoGe で、超伝導が強磁性ゆらぎに起因するという新たな機構を初めて実験的に検証しました。また、最近発見された UTe_2 は強磁性にはならないものの強磁性超伝導と非常に近い特徴を持っています。我々は UTe_2 において**スピンの自由度が残った超伝導状態の実現**を示唆する結果を得ました。



ナノ粒子

金属粒子を小さくしていくと、元々連続的だったエネルギー準位が離散化します。これを**久保効果**もしくは、**量子サイズ効果**といいます。我々はサイズや磁場を系統的に変化させてこのエネルギー準位の離散化を実験的に明らかにしました。



E1: 量子凝縮物性 研究室

プロフィール：過去 16 年の実績

PD1 名 院生 博士 2 名 修士 10 名
 修士課程入学者：60 名 うち他大学出身者 11 名 (広大 3 名、立命館、同志社、青山学院、東工大 2 名、西安交通大、香港科技大、カンピナス州立大)
 博士課程入学者：19 名 うち他大学出身者 5 名 (東大 3 名、東工大、南京大)
 修士修了者の就職先：東芝 2 名、三菱電機 2 名、日立系列 4 名、キヤノン、リコー、ケイオプティコム、島津製作所、旭化成、ボストンコンサルティンググループ、ダイキン工業、ローム、NTT、キーエンス、日本 IBM、富士通 4 名、NEC、JFE、新日鉄、村田製作所、日本電産、他
 博士修了者の就職先：東大助教 4 名、東北大助教、名大助教、理研特別研究員、住友電工、高校教諭、昭和電工、東陽テクニカ、テルモ、他

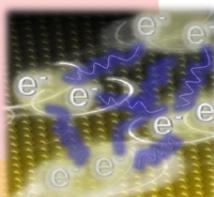
電子は素粒子の一つで、量子力学の授業で取り扱われているように、その性質はよく知られています。一方で、固体中の電子集団 (10^{23} 個) は、磁性や超伝導など、電子一つの性質からは想像もつかない様々な状態を示します。当研究室では、とくに電子間の相互作用が強い物質において、不思議な電子状態をいくつも発見・解明してきました。固体物理学は多くの実験的発見によって発展してきた分野です。皆さんも私たちと一緒に新現象を見つけませんか？



最近の主な研究テーマ

超伝導

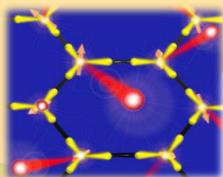
超伝導の現象として、電気抵抗ゼロやマイスナー効果がよく知られています。微視的には、相互作用により 2 つの電子が束縛状態を作っている状態です。電子間の相互作用に応じて様々な種類の超伝導状態があり、発見機構が解明されていない超伝導状態も多いです。本研究室では、銅酸化物・鉄系・重い電子系など様々な物質における超伝導体を研究してきました。



量子スピン液体

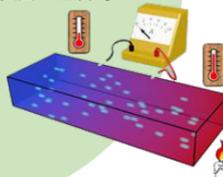
一般的な磁性体では絶対零度で、強磁性や反強磁性などの秩序状態をとることが知られています。しかしながら、特殊な結晶構造やスピン間相互作用が存在する系では、絶対零度でもスピンの揺らぎ秩序が存在しない「量子スピン液体」状態となることが知られています。

その励起は、スピノンやマヨラナなど様々な粒子で記述され、あたかもそれらの粒子が物質中を動き回っているように見えます。



トポジカル近藤絶縁体

近藤絶縁体は局在電子と伝導電子間の強い相関効果 (近藤効果) によってフェルミ準位にエネルギーギャップが開いた絶縁体です。この物質群は昔から知られていましたが、最近になっていくつかの近藤絶縁体で、絶縁体にも関わらず表面は金属的であるトポジカル絶縁体状態が発見されました。さらに本研究室では励起状態として、電気は運ばないのに熱は運ぶ不思議な粒子が現れることを発見しました。



低温熱測定

超伝導状態では電気抵抗がゼロになってしまうため、電気伝導からは電子状態を調べることができません。また、量子スピン液体やトポジカル近藤絶縁体で現れる粒子は電荷を持たないため、電気伝導測定では観測できません。本研究室では、これらの粒子の熱を運ぶ性質に着目して研究を行っています。独自に組み上げた装置と長年蓄積されたノウハウによって、極低温や高磁場など難しい条件下での熱伝導・比熱測定を行っています。



^3He 、 ^4He を用いた希釈冷凍機で極低温 (<100 mK) の熱伝導測定を行っている様子

薄膜作製・STM測定

結晶を原子数層分まで薄くすると、三次元物質とは異なる様々な興味深い現象が現れます。本研究室では分子線エピタキシー (MBE) 法によって重い電子系化合物の薄膜試料を作製し、さらに原子レベルの分解能を持つ走査型トンネル顕微鏡 (STM) による試料のその場観察に世界で初めて成功しました。現在ではパルスレーザー蒸着 (PLD) や物理的剥離等様々な手法を駆使して薄膜・デバイスの作製に取り組んでいます。

PLDで薄膜の蒸着を行っている様子



パルスレーザー蒸着の様子、光って見えるのはプラズマ化した蒸発粒子



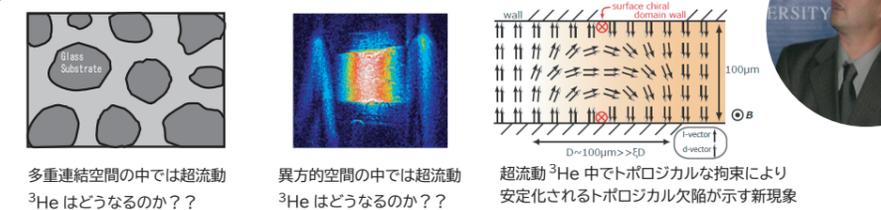
E1: 低温物理学 研究室

プロフィール：過去 20 年の実績

修士入学者 40 人中、他大学者は 6 人 (神大、立命、東工大、阪市大、吉林大)
 修士の学位取得者 36 人のうち 8 人が博士課程進学
 博士の学位取得者 8 人のうち 5 人が大学等の研究機関に就職

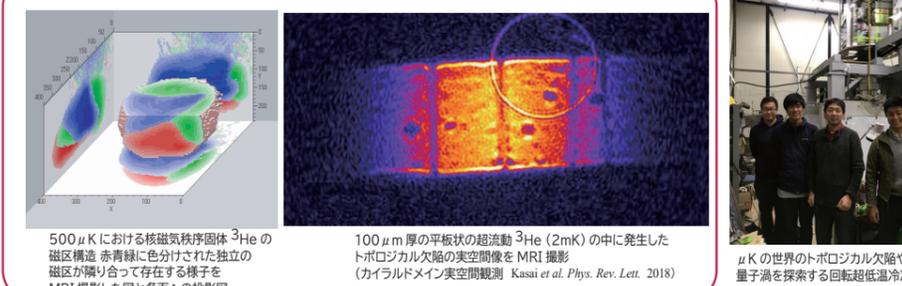
低温物理学研究室では、マイクロケルビン領域までマクロな物質を冷却する超低温生成技術を得意とし、絶対零度近傍において量子多体系が示す多彩な量子凝縮状態を実現し、量子多体現象についての本質的な知見の取得を目標とする研究を行っています。そのため個々の物質の詳細な特性を探索することよりも、シンプルな構成要素からなる物質を舞台として普遍的な物理現象を理解することに重きをおきます。その舞台としては液体・固体ヘリウムを主として使用しています。

ヘリウムにはフェルミオンのヘリウム3とボソンのヘリウム4とがあり、他の多くの物質で見られるように電子状態が物性の主役を果たすのではなく、原子そのものの量子統計性が主役を果たすという類い稀な物理系です。そのため通常は混ざり合ってしまう同位体のヘリウム3、4が絶対零度近傍では量子効果によって相分離したり、全く性質の異なる超流動相を形成する等の面白い現象の宝庫です。このシンプルな理想的物質系を舞台として、液体の超流動や固体の核磁気秩序などの巨視的波動関数で記述されるユニークな現象が研究の対象となりますが、近年では特に特殊形状空間 (低次元空間など) に閉じ込めることで引き起こされる巨視的波動関数の変化や境界面近傍で発現するユニークな素励起などが興味を集めています。



このようにユニークな物質系を対象として研究を進めるためには、オリジナルな実験技術を創造開発する力が鍵となります。核磁気共鳴 (NMR) やそれを発展させた磁気共鳴映像法 (MRI, MRSI)、低温電子回路や SQUID を用いた超高感度信号計測技術、high-Q 微小振動子測定など、他所ではマネの出来ないオリジナルな測定手段を自主開発することで、オンリーワン研究の道を邁進しています。

世界一クールな MRI 画像



500 μK における核磁気秩序固体 ^3He の磁区構造 赤青緑に色分けされた独立の磁区が隣り合っている様子を MRI 撮影した図と各面への投影図

100 μm 厚の平板状の超流動 ^3He (2mK) の中に発生したトポジカル欠陥の実空間像を MRI 撮影 (カイラルドメイン実空間観測 Kasai et al. Phys. Rev. Lett. 2018)

μK の世界のトポジカル欠陥や量子渦を探索する回転超低温冷凍機

超流動で遊ぼう

研究室訪問 随時 歓迎
 連絡先：佐々木 豊 教授
 sasaki@scphys.kyoto-u.ac.jp
 本部構内 今出川門のすぐ東
 総合研究 5 号館 307 号室

研究室では日頃からメンバー間の交流を大切にしています。一緒に食事に行ったり飲んだり、お花見や遠足に出かけたり、たまには一緒に徹夜実験したりする中で築かれる人間関係は研究室の宝です。ゼミやコロキウムに加え研究ミーティングでも日々積極的に議論し合います。個性的かつ話しやすいメンバーに恵まれた環境で世界に類を見ない研究を楽しみましょう。



世界唯一の超低温 MRI 装置

E2: 量子光学・レーザー分光学 研究室

プロフィール:

修士入学者 (H10-R3) : 80 名 (京都大学工学部 2 名、他大学 10 名)
 修士学位取得者 (H12-R2) : 71 名
 博士課程進学者 (H13-R2) : 24 名
 メーカー等の企業へ就職 (H13-R2) : 47 名
 博士の学位取得者 (H14-R2) : 22 名、准教授 5 名、助教 6 名 (東大 1、岡山大 1、学習院 1、早稲田 1、分子研 2)、
 博士研究員 10 名 (うち 4 名は企業) など。

● 研究内容紹介

近年レーザー光を用いた**中性原子の冷却・操作**技術は飛躍的に進歩し、原子系の極めて高度な制御が可能になり、その対象はいまや量子多体系、特に強相関系にまでおよんでいます。本研究室では、**新しいアプローチによる量子物性物理学の研究**として、希薄原子気体の**ボース・アインシュタイン凝縮**(BEC)やフェルミ原子の**フェルミ縮退**などの量子縮退状態を用いた実験的研究を行っています。

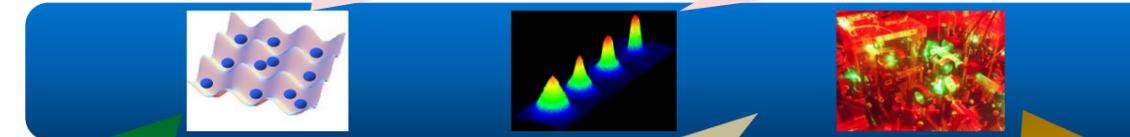
現在進行中の具体的な研究テーマは、以下の通りです。いずれも現在、活発に研究されている分野における、ユニークで新規性の高いものです。また、各テーマについて国内外の理論家と密接な共同研究を展開しています。

Quantum Simulation

超流動・絶縁体転移の様子。光格子を深くしていくと、原子の干渉パターンが消失していき、モット絶縁体が形成されていくのがわかります。

Quantum Computing

Rydberg atoms
長距離相互作用が働くプログラマブルな量子系を構築しています。



Quantum Gas Microscope

対物レンズ
Yb原子
266nm
光格子用ビーム (波長532nm)
2次元光格子中にトラップした原子の各々を高解像度レンズを通して独立に観測します。

Precision Measurement

複数の光学遷移の同位体シフトを精密に測定することにより、中性子と電子の間の力を媒介する**標準模型を超えた新粒子**を探索することができます。

陽子 中性子 電子 新粒子?

Ultracold Atomic Mixture

Li 電子 不純物 Er
光格子中のErとLiの混合系は、不純物系の量子シミュレーションを実現するのに理想的な系です。

● 研究テーマ紹介

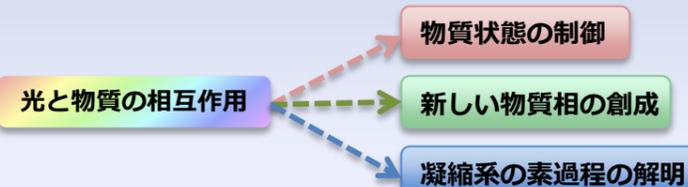
- **Quantum Simulation** - 光格子中ハバードハミルトニアンによる凝縮系物理の研究を行っています。特に高い**スピン自由度SU(6)**を有するフェルミオン系の量子磁性の研究、**孤立量子多体系の非平衡量子ダイナミクス**の研究、光格子中のフェルミオンを用いた**2軌道系の量子輸送**の研究、などを行っています。
- **Quantum Computation** - Rydberg状態と呼ばれる、電子が原子核から遠く離れた軌道に励起された状態を利用して数 μm に及び相互作用を作り出します。このような系を用いて、量子計算機が実現可能だと考えています。
- **Quantum Gas Microscope** - 光格子中の**単一格点観測**および制御を可能にする**原子イメージング・操作法**を開発します。特に、**SU(N) フェルミハバード模型の特異なスピン相関の直接検出**を目指しています。
- **Ultracold Atomic Mixture** - 特異な**エフィモフ3量体**の実現に向けエルビウム・リチウムの超低温原子混合系を研究しています。
- **Precision Measurement** - 複数の光学遷移の**同位体シフト**を精密に測定することにより、中性子と電子の間の力を媒介する、**標準模型を超えた新粒子**の探索が可能になります。特に、イッテルビウム原子は7種類の安定同位体が存在していて、この目的に最適で、光格子を用いた超精密な測定を計画しています。

E2: 光物性 研究室

プロフィール: 過去 10 年間の実績

院生 博士 5 名、修士 7 名、研究員 2 名、秘書 2 名
 修士課程入学者 37 名 うち他大学出身者 2 名 (北大、岡山大)
 修士学位取得者 36 名 うち博士課程進学者 17 名 (他研究室への進学 2 名を含む)、一般企業就職 19 名
 博士課程入学者 18 名 うち他大学出身者 2 名 (東大、アイルランド)
 博士学位取得者 13 名 うち助教 5 名、研究員 4 名、一般企業就職 2 名、その他 2 名

光物性研究室では、最先端の光技術を用いて、光と物質の相互作用により発現する新しい現象の探索や物質中の励起状態の素過程の解明に精力的に取り組んでいます。高強度テラヘルツ光、光励起半導体電子正孔系等を基軸に据えて、多種多様な研究を行っています。最近の研究テーマをいくつか紹介します。



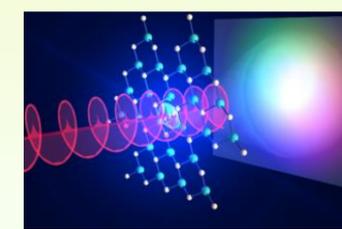
コヒーレントテラヘルツ光

テラヘルツ周波数帯($\sim 10^{12}\text{Hz}$)の電磁波である『テラヘルツ光』を用いた物性研究を行っています。可視光と電波の中間の光であるテラヘルツ光はフォノンや分子振動などの多様な現象と結びつき、多くの情報を提供します。軌道角運動量を持つビームである光渦、テラヘルツ光発生が可能な半導体デバイスである共鳴トンネルダイオードなど、新しい視点から光と物質の相互作用を探索しています。

光渦 共鳴トンネルダイオード
テラヘルツ領域の物理
・配向緩和
・励起準位
・分子振動
・プラズマ振動
・フォノン
THz
電波 1mm 100 μm 10 μm 1 μm 100nm 1nm 0.1nm

高強度テラヘルツ光による非線形現象

テラヘルツから中赤外の周波数を持つ非常に高強度な光を固体に入射することにより、入射光の何倍もの周波数を持つ高次高調波という光が放射されます。我々は高強度レーザー光の偏光自由度を操作することで高調波発生を制御し、物質と光が強く結合した極端非線形応答、及びその起源となる高速な電子ダイナミクスに迫ります。



光励起半導体における電子正孔系のダイナミクス

半導体に光照射することで生成する電子と正孔のダイナミクスは、基礎物理のみならず、太陽電池や半導体レーザーなどへの応用にもつながる重要なテーマです。我々は電子と正孔の結合が強い物質である亜酸化銅やダイヤモンドを舞台に、精密な光学的手法を駆使することによって、多体の量子状態や励起子の非局所的な応答、拡散現象などを研究しています。

二次元電子系の非平衡ダイナミクス

当研究室では様々な二次元系における非平衡ダイナミクスの研究を行っています。最近では、テラヘルツ光を照射した量子ホール系では、より明瞭に量子ホール効果が発現することを明らかにしました。また、電子のバレー自由度(運動量)を光の偏光で制御できる単層遷移金属ダイカルコゲナイド(MoS₂等)や超伝導薄膜、磁性体薄膜などにおける励起ダイナミクスにも取り組んでいます。

光と物質の相互作用に興味がある皆さん、光物性研究室と一緒に新しい光科学を切り拓きませんか。見学・相談その他諸々、いつでも大歓迎です。

連絡先
 田中 耕一郎 kochan@scphys.kyoto-u.ac.jp
 中 暢子 naka@scphys.kyoto-u.ac.jp

E2: ナノ構造光物性 研究室 (化研)

プロフィール：過去 17 年の実績

修士課程入学者 29 名 現在 2 名在学中、うち他大学出身者 7 名 (筑波大、東工大、名大、阪大、UESTC)
 修士学位取得者 25 名 (博士課程進学者 9 名、他は一般企業などへ就職)
 博士課程入学者 9 名、現在 2 名在学中、学位取得者 6 名 (うち 4 名は大学など研究機関に就職)

“光”で探る・操るナノと量子の世界

半導体ナノ物質や特異な電子状態を持つ新規固体結晶と精緻な先端レーザー技術を融合することにより、光物質科学の深化と新しいフォトニクス技術の開発を目指しています。



宇治キャンパスです

研究テーマの紹介

- (1)量子ナノ構造やナノ粒子のキャリア多体効果と光エネルギー変換過程の研究
- (2)単一顕微分光による単一光子源・量子光物性の研究
- (3)ハロゲン化金属ペロブスカイト半導体の高効率太陽電池材料・デバイスの研究
- (4)レーザー強電場による固体中の電子状態の操作と高次高調波発生などの非線形光学現象の制御
- (5)メタマテリアル構造で増大したテラヘルツ (THz) 電場・磁場による物性制御
- (6)時間分解 THz-STM 技術の開発

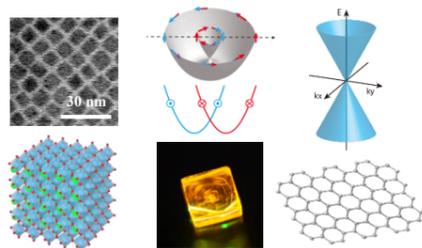


見学の希望や質問があれば 金光義彦 教授 kanemitsu[at]scl.kyoto-u.ac.jp
 広理英基 准教授 hirori[at]scl.kyoto-u.ac.jp
 お気軽にご連絡ください。 田原弘量 助教 tahara.hirokazu.7m[at]kyoto-u.ac.jp

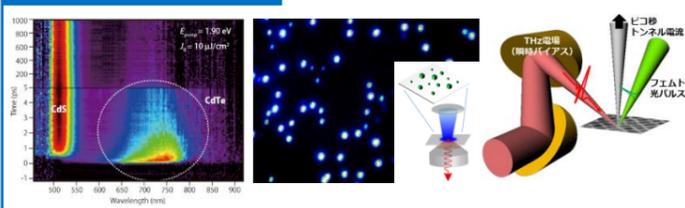
多彩なナノ構造物質 先端レーザー技術

新規な量子光物質

半導体を中心とした新規バルク結晶やナノ構造物質に現れる新しい物性や量子現象について、最先端のレーザー一分光法を用いた研究を行っています。超高速レーザー一分光や単一顕微分光を駆使することで、新しい光機能を有するナノ材料・太陽電池材料の物性解明や新しい光源 (量子光源・レーザーパルス光源) につながるフォトニクス技術の開発を目指しています。

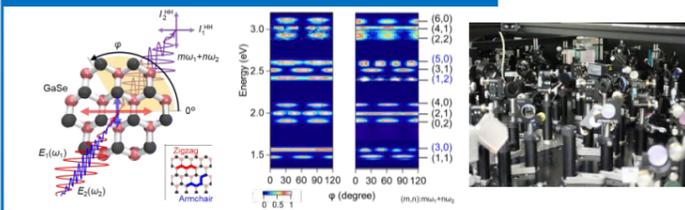


超高速ナノ分光



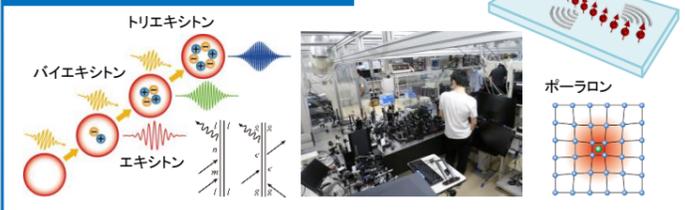
超高速レーザー一分光 (時間分解分光) と単一ノ粒子顕微分光 (空間分解分光) を合わせることで、ナノマテリアルの光物性や単一光子源などの量子光源に向けた量子物性を調べています。最先端のレーザーを駆使した光源開発や分光技術 (THz-STM など) の開発も行っています。

高強度極限非線形レーザー光学



高強度テラヘルツや中赤外パルス光を用いて、固体結晶からの高次高調波発生を調べています。入射光電場の整数倍の周波数をもった光が発生するため、赤外線からX線に至る幅広い波長の光源やアト秒 (10⁻¹⁸ 秒) パルス光源といった新たなフォトニクス技術開発も見据えて非線形な光と物質の相互作用の研究を行っています。

量子コヒーレント分光



物質中の素励起 (エキシトン、ポーラロン、マグノンなど) について精密観測を行っています。レーザー光によって強く励起することで相転移を引き起こしたり、位相のそろった量子状態 (コヒーレント状態) を形成することで、新規な量子光機能を探索しています。

E3: 時空間秩序・生命物理 研究室

プロフィール：過去 10 年間の進路状況

修士課程入学 13 名
 修士課程修了 10 名 (内部進学 3 名、企業就職 7 名)
 博士課程入学 8 名
 博士課程修了 6 名 (博士 5 名) (大学・研究機関 6 名)

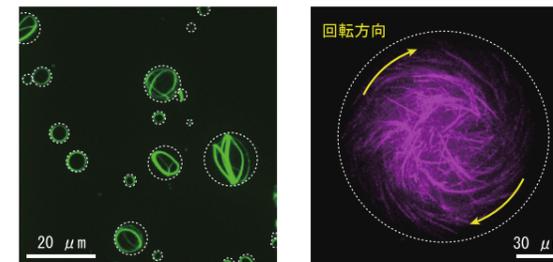
生き物らしさは何処から来るか?

この研究室はソフトマターや非線形・非平衡の物理、生命現象の物理を研究しています。敢えて一言で表すと、「生き物らしさは何処から来るか?」を研究しているラボであると言えます。何をもちて生き物らしいと感じるか、思ふかは、人の数だけ見方が異なるでしょう。その切り口の数だけ研究テーマがあります。生き物そのものを対象としたり、生き物らしさを抽出したモデル実験系で研究を行ったり、分子や相の物理化学的挙動から生命現象を説明しても良いでしょう。生き物から離れてソフトマターや非平衡系の課題に取り組むのもあります。我々は、生き物を研究する事を目的とはしていません。その様な非線形非平衡なシステムにおける物理学的な課題を解決・発見する事を主眼にしつつ、物理、すなわち物の理で理解できる分野を切り開いていく事を目的としています。

10年、20年後に新しい物理領域となるような研究分野と一緒に作って行こう、或いは自分が創る! という方々を歓迎します。



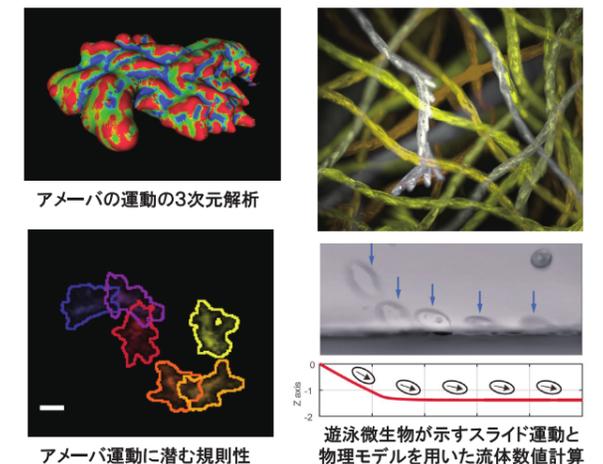
細胞の最小構成要素を封入した人工細胞を用いて、細胞運動や細胞分裂など、生命活動に本質的な機能が発現する仕組みの解明に取り組んでいます



細胞骨格が自発的につくるリング構造 (細胞分裂装置の再構成モデル) 回転する細胞骨格の渦状構造とそれに伴う細胞質の回転流動 (細胞質流動の再構成モデル)



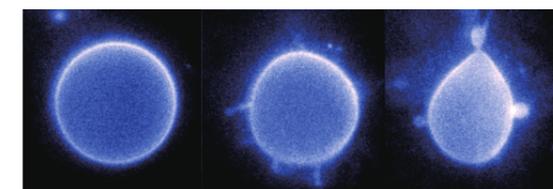
細胞はその運動によって自らを組織化させ、平衡系では見られない秩序形成や転移現象を示します



アメーバの運動の3次元解析 遊泳微生物が示すスライド運動と物理モデルを用いた流体数値計算

非平衡界面

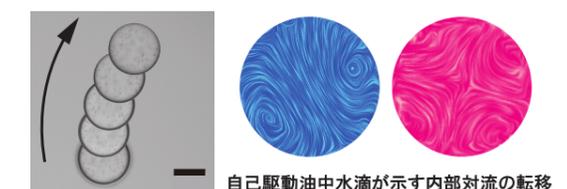
細胞の変形能を模した界面変形など、新奇な非平衡界面現象の実験に取り組んでいます



浸透圧による膜小胞の非平衡変形

アクティブマター

アクティブマターとは、自発的・自律的に運動する物体や、その集団挙動を指します



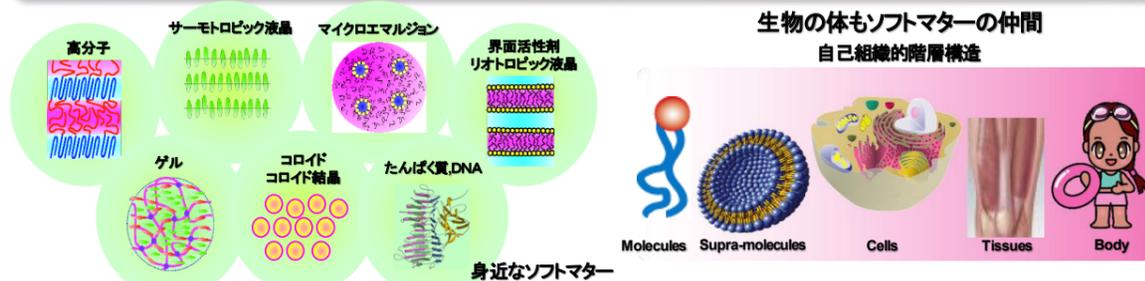
自己駆動油中水滴が示す内部対流の転移

E3: ソフトマター物理学 研究室

プロフィール：研究室創設以来 14 年の実績

修士課程：入学者 50 名 (他大学出身者 3 名)、在学者 9 名、修了者 40 名 (博士課程進学者 8 名、一般企業へ就職 32 名)
博士課程：入学者 12 名 (他大学出身者 3 名)、在学者 3 名、修了者 7 名 (大学等研究機関へ就職 3 名、一般企業へ就職 4 名)
PD：受け入れ計 4 名 (大学等研究機関へ就職 3 名、一般企業などへ就職 1 名)、在籍者 0 名

ソフトマターとは液晶や高分子、ゲル、コロイドや界面活性剤といったやわらかい物質の総称です。ソフトマターでは多数の異種分子が物質内部で自発的に秩序を形成し、さらにその秩序構造が階層的に積み重なって高次構造を作ります。やわらかいため外場に対する応答が大きく、階層構造内の自由度が複雑に交差結合した協同的運動モードを持ちます。液晶ディスプレイから生体構造まで多くの物質がソフトマターに属しています。



偏光・蛍光・位相差顕微鏡からX線回折装置、レーザー、放射光施設のμビームX線など、最先端の量子ビームを駆使し、ソフトマター内部のナノ構造を解明し、その物理的起源を研究しています。また、揺らぎ顕微鏡の開発や、マルチアングルリアルタイム分散関係測定法など新奇な測定法を提案・開発し、ソフトマターに内在する揺らぎとダイナミクス、動的な不均一性の一般的な理解を進め、新しいナノ構造の発見や輸送現象を実験的に研究。

空間と時間の階層構造スペクトロスコピー

2021.MAY

Diagram showing experimental setups for Nano space analysis and Macro time analysis, including X-ray diffractometer, 2D spectrometer, and various imaging techniques.

Summary of research themes: 等方秩序 (Isotropic order), フラストレーションに誘起される階層的構造形成 (Hierarchical structure formation induced by frustration), ミクロからマクロを紡ぐナノ科学の理解 (Understanding nanoscience from micro to macro), リオトロピックネマチック (Lyotropic nematic), 分子集合体形状が変化する新しいタイプの2次N相転移を発見 (Discovery of a new type of second-order N phase transition where molecular aggregate shape changes), 分子パルプ 物質拡散・伝播制御 (Molecular pulp: control of material diffusion and propagation).

Summary of research themes: 分子マニピュレータ (Molecular manipulator), 揺らぎ顕微鏡 (Fluctuation microscope), Slippery界面とフラットパネル (Slippery interface and flat panel), 液晶ナノセル内の相転移を利用したドラッグデリバリーシステムへの応用 (Application of phase transition in liquid crystal nanocells to drug delivery systems), μビーム・時分割X線 (μ-beam and time-resolved X-ray).

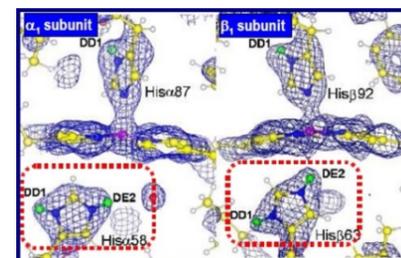
E3: 生体分子構造研究室 (複合研)

プロフィール：

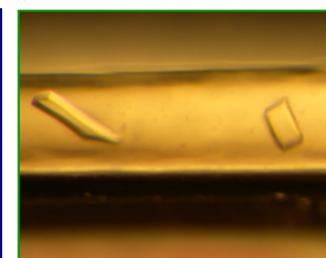
修士課程入学者：7名、うち他大学から4名 (神戸大、慶応大、立命館大、他)。
修士課程在籍者：1名
修士の学位取得者：6名 (うち1名博士進学後単位認定退学、1名海外大学院進学)。

森本Gr.: 生体分子構造研究分野

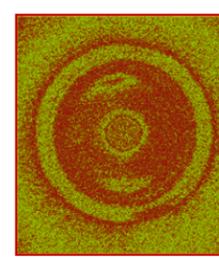
研究炉中心部において発生する定常的な熱中性子群は、一般的な結晶物質中の原子間隔に近い波長を持ち散乱された中性子線は干渉性を示します。大阪府泉南郡熊取町にある京都大学複合原子力科学研究所にある私たちの研究室ではこの特性を利用して結晶の物性や分子の構造研究を行っています。タンパク質分子は遺伝子情報の産物としてアミノ酸が重合した一本の鎖を形成し複雑な立体構造をとっています。この立体構造の構築とタンパク質分子の機能発現には、遺伝子には存在しない情報(水素原子・水分子の存在や水素結合など)の役割が大きいのです。そこで水素(または重水素)原子に対して相互作用しやすい中性子を用い、重水素ラベリングした構造を含め、構造機能相関を明らかにしています。結晶場でのタンパク質への基質導入による時分割測定・経時構造変化追跡など、構造に基づいたタンパク機能変化による産業・医療利用や薬剤、阻害剤複合体の結晶構造と物性研究、機能解析を行っています。大型放射光施設Spring-8を利用するとともに、日本原子力研究開発機構JRR-3M、J-PARCのバル中中性子源をはじめ海外施設(ANSTO,ORNL,PSI)を積極的に利用しています。



ヒト血液ヘモグロビン分子内で見られた重水素原子(緑で表示)と核密度分布(フーリエ)図



JAXAきぼう宇宙船内で得られたプロテアソーム粒子結晶微小重力結晶化・抗がん剤設計



ゲスト分子の配位によって起こる無配向高分子フィルムの自発配向

杉山Gr.: 粒子線物性学研究分野

生体高分子は溶液の熱揺らぎを利用して構造を形成し機能する。では「何故その構造を作るのか」「何故その動きをするのか」我々は物理の目で観測し、物理の手で解析することでこの基本原理の解明を目指しています!

物理の目：量子ビーム散乱法 (SAXS@熊取, QENS@J-PARC, SANS@ILL(フランス), NSE@NIST(米国))

物理の手：分子動力学計算による動態解析 (機能を生み出す運動の解明に成功!)

T1: 凝縮系理論 研究室

プロフィール：過去 13 年間の実績

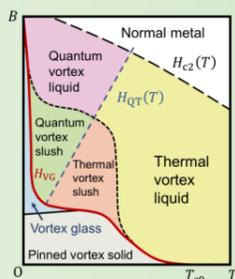
修士入学者 60 名中 他大学者は 15 名 (東大、阪大、東北大、筑波大、岡山大学、大阪府大、...)
 博士学位取得者 23 名の進路は、17 名が物理関係の研究機関、6 名が一般企業就職
 修士・博士卒生の就職先企業：web エンジニア、金融系、通信系、メーカー、....

凝縮系理論グループでは、量子力学効果が巨視的スケールで現れる「凝縮系」の理論研究を行っています。特に新奇な超伝導・超流動、非平衡量子現象、量子磁性といった現象を示す、強相関電子系、重い電子系、冷却原子気体、液体ヘリウム、ナノスケール量子系など様々な系を研究対象としています。以下に、最近の研究テーマをいくつか紹介します。

超伝導・超流動

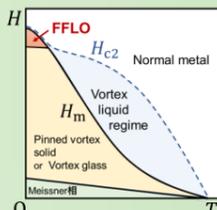
磁場下の超伝導状態

超伝導体は、温度の低下に伴い電気抵抗ゼロの超伝導状態 (マイスナー相) に相転移します。Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論により、超伝導は 2 電子の重心運動量ゼロの束縛状態のボーズ凝縮と表現され、その結果このマイスナー相は空間的に一様な状態となります。磁場中の超伝導体では、量子渦というトポロジカル励起が超伝導性を支配し、空間的に不均一な Vortex Matter という状態になります。1990 年代には銅酸化物超伝導体を舞台にして、この Vortex Matter とその原因となる超伝導揺らぎの物理 (右上図) が盛んに研究されました。一方、十分高磁場では Fermi 面のトポロジーに起因する別のタイプの不均一状態 (FFLO 状態) が生じる可能性があります。今世紀に入り、重い電子系や鉄 (Fe) 系超伝導体を舞台に、FFLO 状態と Vortex Matter のハイブリッドともいべき磁場下の超伝導現象 (右下図) が実現しており、我々はその理論の構築に取り組んでいます。

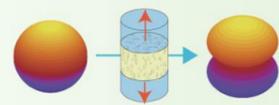


Bi系高温超伝導体の磁場-温度相図

平行磁場下の FeSe の磁場-温度相図 - Pauli 常磁性が強い系の例 -



ヘリウムにおける新奇超流動

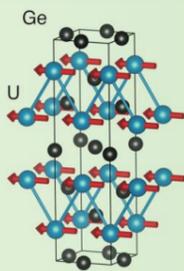


異方的媒質中での ³He ポラー超流動

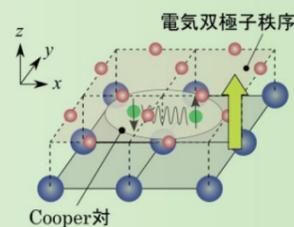
極低温下で、液体 ³He が p 波のスピン 3 重項 Fermi 超流動を示すことは以前から知られています。我々は、異方的な多孔質媒質中の液体 ³He では Polar 相という第 3 の超流動相が起こることを予言し、2015 年にロシアで行われた核磁気共鳴の実験においてこの超流動相の実現が確認されました。この相は、半整数量子渦 という理論的には古くから予言されていたトポロジカル励起が自然に生じるなど、新たな超流動現象が生まれる舞台となっていることが我々の研究から明らかになってきています。

磁気秩序・多極子秩序と超伝導

強磁性と超伝導が共存するのか、というテーマは凝縮系物理学において長く議論されてきました。強磁性は電子スピンの向きが揃って自発磁化を生む状態ですが、超伝導は内部磁化がゼロの完全反磁性という性質を持ちます。したがって強磁性と超伝導は相反する秩序状態と考えられてきましたが、この常識を覆す「強磁性超伝導体」 UGe₂ が 2000 年に発見され、超伝導研究者に大きな衝撃を与えました。このような例をはじめとして、近年ではより概念を広げた「磁気多極子秩序と共存する超伝導」の研究が精力的に行われています。さらに、ネマティック秩序などの「電気多極子秩序」も注目を集めるテーマの一つです。我々はこれら多極子秩序と超伝導の関係や起源、あるいは共存状態の性質を調査する理論研究に取り組んでいます。



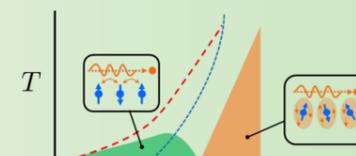
超伝導体 UGe₂ の結晶・磁気構造



電気双極子秩序と超伝導の共存

強相関電子系

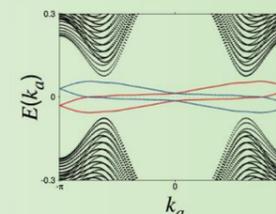
我々の身の周りには膨大な数の電子による多体系ですが、Bloch のバンド理論は電子の波の重ね合わせによって多体系を記述し、金属物性等の説明に成功しました。一方で、電子間の相互作用を無視できないケースも存在し、特に遷移金属化合物や希土類を含む化合物系などの局所的な性質を持った電子系において多く報告されています。これら電子相関効果の顕著な系の解明こそが「強相関電子系」の物理であり、そこには多体系ならではの豊かな物理が潜んでいます。例えば、近藤効果、多極子秩序、よりシンプルには磁性の発現など強相関電子系に特徴的な物理現象は無数に存在します。電子相関効果は、物質の結晶構造や電子の軌道自由度などに応じて変化するため、様々なモノを相手にする物性物理学においては、挑戦的かつ魅力的な分野の一つです。例えば、超伝導やトポロジカル相などは弱相関側の立場からアプローチされることの多いトピックですが、電子相関効果を通じてより多様な相の発現が近年の研究により明らかとなっています。また、強相関電子系において研究されるモデルに対しては、数理論理学や素粒子物理学の解析手法が適用可能であることから、物性物理のみならず他分野に共通するアイデアが秘められていることも興味深い点といえます。



Doniach 相図
局在電子と伝導電子との結合の大きさ J によって、磁性相や重い電子系が実現する

トポロジカル絶縁体・超伝導体

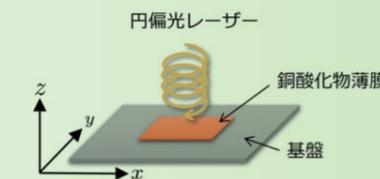
物質中の電子が持つトポロジーは、輸送現象や電磁気学を理解する上で極めて重要です。例えば、量子 Hall 効果は、単位電場が印加されたときに垂直方向に流れる電流 (Hall 係数) が絶縁体中で $e^2/h \times (\text{整数値})$ に量子化する現象です。この整数値は Chern 数と呼ばれ、物質中の電子のトポロジーを反映する量の一つです。このような整数値の量、すなわちトポロジカル数が有限の値を持つ絶縁体や超伝導体はトポロジカル絶縁体・トポロジカル超伝導体と呼ばれ、試料の表面付近にギャップレス励起を持つことが知られています。物質中の非自明なトポロジーは、電気磁気分極率や熱 Hall 伝導率といった輸送量にも直接現れます。このようなトポロジカルな側面からの物質の理解は未完了であり、新たなトポロジカル相の提案・候補物質の探索などが重要な課題です。また、電気分極をはじめとした「物質中の電磁気学」における基本的な量を計算する上で、トポロジカル相の研究で用いられる概念が非常に有効であることがわかっています。特に、電気四極子・磁気四極子といった高次の多極子モーメントを物質中で計算する手法は近年になってようやく開発され、今なお研究が続く分野です。我々の研究グループでは、エキゾチックなトポロジカル絶縁相・超伝導相の提案や、磁気多極子の計算手法の提案などの研究を行っています。



メビウス型トポロジカル超伝導の表面状態

非平衡量子現象

近年の実験技術の向上と理論手法の進歩に支えられ、物性物理学における非平衡現象の重要性が増しています。平衡系での転移温度以上でも超伝導に類似した振る舞いが見られる「光誘起超伝導」や、平衡系には存在しない非平衡系特有の物質相である「フロック・トポロジカル相」や「離散時間結晶」など興味深い非平衡現象が多数報告されています。また、非平衡状態を積極的に活用して物性をコントロールすることを目指した研究も盛んに行われています。例えば、レーザー光などによる周期駆動を用いて望みの系を作り出す手法は「フロック・エンジニアリング」と呼ばれ、冷却原子気体においては標準的な手法として確立されつつあります。しかし、急速に理解が発展している一方で、全く新しい現象が発見されたり、理論的な未解決問題が多数残されていたりと、非平衡物理は物性物理学のフロンティアであり続けています。我々の研究グループでは、光を照射した固体物質系や冷却原子気体などの人工量子系を舞台に、量子多体系における非平衡現象の理解、及び、新たな物性制御の方法提案を目指して研究を行っています。近年では、銅酸化物薄膜におけるレーザー誘起トポロジカル超伝導、冷却原子気体におけるレーザー誘起近藤効果などの新しい現象を見出しました。



レーザー誘起トポロジカル超伝導の模式図

T1: 物性基礎論：凝縮系物理グループ

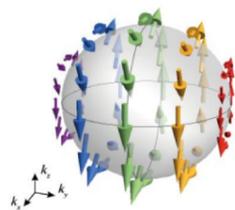
プロフィール：過去 12 年の実績

修士課程入学者 23 名 うち他大学出身者 14 名 (大阪大、慶応大、東北大、北海道大、千葉大、神戸大、岡山大)
 修士学位所得者 19 名 うち博士課程進学者 13 名 他は一般企業に就職
 博士学位所得者 8 名 うち国立の研究機関 4 名 他は一般企業に就職

凝縮系物理の研究対象は、粒子の量子性が顕著な低温における物質の示す性質である。スピンを持つ電子の間に働く電磁相互作用と純粋な量子効果であるフェルミ統計性などが組合わさることで、物質は金属や絶縁体、磁石や超伝導体になったりと様々な表情を見せる。本研究室では、強相関電子系の量子輸送現象や励起ダイナミクス、低次元磁性体やフラストレーションを持つ系の量子現象、トポロジカル絶縁体・超伝導体における新奇なトポロジカル量子現象などについて、場の理論や大規模数値計算等の手法を駆使して研究を行っている。

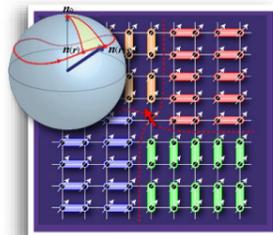
Topological Matter

トポロジカル絶縁体・超伝導体など波動関数のトポロジーで特徴づけられる物質群は、ディラック励起やマヨラナ励起など従来の物質群には存在しない励起状態を有する。我々は、トポロジカル場の理論やK理論などの数理的手法を用いて、可能なトポロジカル物質の分類、および新奇なトポロジカル量子現象の予言を行っている。



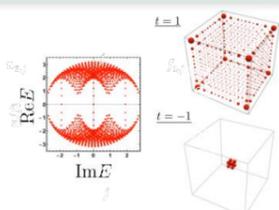
Frustrated Spin

フラストレートした低次元量子スピン系はトポロジカル秩序など、創発的自由度が活躍する特異な量子相の宝庫である。場の理論や数値計算を駆使しながら、スピン液体状態・ダイマー状態などの基底状態の解明や磁場中でのポーズ・アインシュタイン凝縮、新奇な秩序状態などの研究を行っている。



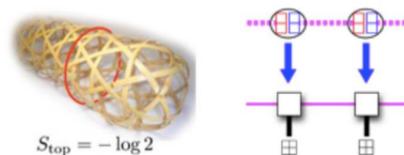
Non-Hermitian Physics

凝縮系理論の最も基本的な考察対象であるハミルトニアンは、従来エルミート演算子 (行列) として扱われてきた。一方、近年注目される開放量子系の分野では、実効的なハミルトニアンが非エルミート性を持つ事に起因し、従来の枠組みでは捉えられない新奇物理現象を示す例が次々に報告されている。我々は、非エルミート演算子のスペクトル理論の持つトポロジカルな性質に着目する事で、既知の非エルミート現象の再解釈や新奇非エルミート現象の提案を行っている。



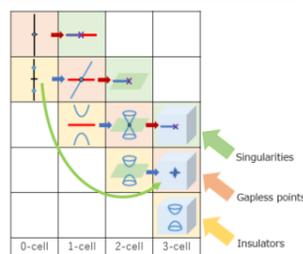
Entanglement

エンタングルメントは量子情報や物性物理学、場の理論等の分野にわたる重要な概念である。密度行列繰り込み群 (DMRG) やtime-evolving block decimation (TEBD) などのテンソルネットワークに基づく数値計算手法はエンタングルメントを利用しており、またトポロジカル秩序においてもエンタングルメントは本質的な役割を果たしている。我々は、数値計算と解析的手法の両面から低次元量子スピン系・電子系の理論研究を行っている。



Topological band theory

固体中の自由電子の量子力学的な状態は、波数空間上の波動関数として記述される。物質表面に金属状態を持つようなトポロジカル絶縁体・超伝導体や、ワイル半金属のような新奇な金属状態は波数空間のトポロジーにより特徴付けられる。空間群の存在下におけるバンド・トポロジーを系統的に調べるための強力なツールとして、代数トポロジーにおけるスペクトル系列がある。スペクトル系列に基づいた物質探索手法の提案などを行っている。



T2: 非線形動力学 研究室

プロフィール：佐々研 (東大) および佐々グループ (京大) における 2010-2020 の集計

修士入学 21 人 (東大 5、京大 8、阪大 2、九大 2、名大 1、東北大 1、北大 2)
 修士学位 19 人 (進学 9、日本経済新聞、予備校講師、ソフト会社等)
 博士進学 9 人 (内部 9)
 博士学位 10 人 (大学・研究所 10)

研究テーマ

非平衡系における創発現象

原子分子の集まりが生物を構成しているのは紛れもない事実である。生物が示す機能が物質科学の概念とどのように関わっているのだろうか。そのためには、微視的な構成要素がたくさん集まって巨視的なシステムをつくるとき、微視的な記述にはない概念や量がマクロなレベルで創発する機構を探索する必要がある。平衡系の場合には、一般的枠組みとして統計力学が確立しているため、創発の理解は統計力学の中の問題になる。ところが、非平衡系の場合には、現象の解明と同時に新しい理論的枠組みの構築が必要になる。そのような方向の研究として、近年は、**熱伝導下での気液共存やずり流動下での2次元長距離秩序**の研究に注力している。これらの現象では、平衡の近くであっても平衡状態からの非平衡性に関する素朴な摂動展開が破綻し、**平衡極限が特異的**になっている。ゆらぎの理論、熱力学の拡張理論、数値実験などを使って理論的解析を進めている。

ゆらぎの理論から生物機能評価へ

分子モーターなど生体内にある小さな機械は、ゆらぎを伴いながら働いている。このような小さい機械でも熱力学第2法則を満たさないといけないが、それは平均値に対する不等式として表現されることになる。ところが、ゆらぎの部分まで含めると、その不等式を生み出す「普遍的な不等式」が存在することが分かっている (ゆらぎの定理)。その発見に刺激を受けて、様々な普遍的な関係式が見いだされおり、それらにもとづいて生物機能評価を行う研究をすすめている。近年では、情報論的不等式にもとづいてゆらぎの理論を再構築する研究をすすめている。



タイトル: Fluctuation-response inequality out of equilibrium (平衡から離れたところでのゆらぎと応答の不等式) 著者: Andreas Dechant and Shin-ichi Sasa
 掲載誌: Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 図: はちのん書局製本制作 Hayasun Science Manga Studio (2020)

その他

ここ数年の間に行った佐々グループが関わった「その他の特徴的な研究課題」は以下のとおりである。

○微視的な可逆力学系と巨視的な不可逆現象の関係を**ランダムネスの理論**にもとづいて議論した。

○オンサーガの理想乱流理論にもとづく解析により、量子乱流の理論的解析および**気液臨界点近くでの新しいタイプの乱流**が生じることを提案した。

○時間依存ハミルトン系において、時間に関する非一様な並進に対する対称性に関する**ネーター不変量として熱力学エントロピー**を特徴づけた。

T2：流体物理学 研究室

プロフィール：過去 12 年間（2009 年度～ 2020 年度）の実績

修士課程入学者 21 名、うち他大学出身者 6 名
 修士学位取得者 19 名、うち 6 名博士課程進学、残り 13 名は一般企業などに就職
 博士学位取得者 4 名、うち 1 名は大学等の研究機関に就職、残り 3 名は一般企業に就職

我々の身の周りの水や空気の動きは絶えず複雑に変化していき、同じ姿をとることは二度とないように見えます。しかし、積乱雲といえば誰にでも共通なイメージがありますし、紅茶に牛乳をいれてかきまぜるときの混合の様子にしても典型的なイメージがあります。つまり、流体の運動は複雑といっても、場面ごとに典型的な発展をしていくと言えます。

ある条件が満たされると、流体が常に同じ挙動を示すという事は、経験則となり設計や制御にいかされるようになっていきます。流体の経験則の代表例としては、パイプに水をながす際に生じる乱流抵抗がパイプ中心の流速のどのような関数になるかというものがあります。こうした経験則を、基礎的な保存則や方程式から理解したいとこだわるのが流体物理学のテーマのひとつです。

流体物理学の基礎となる流体のダイナミクスを記述する方程式は、約200年前に得られているにもかかわらず、現在でも最も難解な方程式のひとつとして知られています。役にたつ厳密解を求めることは、ほぼ不可能に近いために、コンピュータを用いて現実的で複雑な解を求めることが有力な方法となっています。コンピュータによって得られた解を分析(可視化、統計解析)することで経験則自身の検証やその背後にある物理にせまるわけです。

このページに示したふたつの図は、コンピュータシミュレーションによって気体と液体がどのように相互作用していくかを調べた結果を示しています。

右上の図では、流体を構成する分子が見えはじめる時空間のスケールにおいて小さな泡が形成維持されるダイナミクスを分析しています。

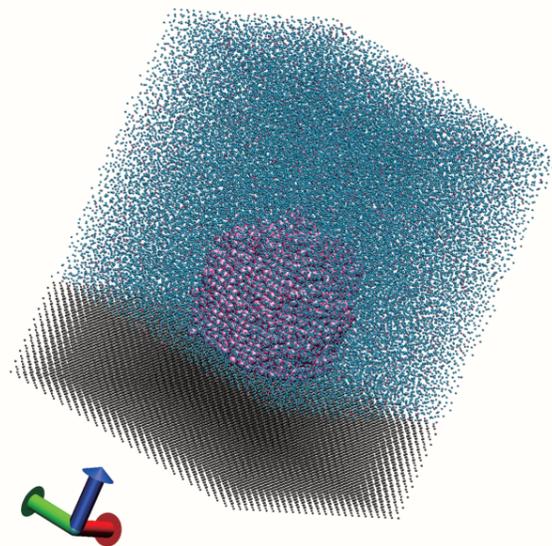


図1: 分子動力学シミュレーションの可視化画像例
 細かい球で示されているのが各分子、中央に示されている領域が解析によって抽出された気泡領域です。

一方、左下の図では、扱うスケールが大きく異なり、乱流状態の海洋が温室効果ガスをどのように吸収しているかのダイナミクスを分析しています。

いずれの研究も、実験や観測で知られている経験則を基に、その検証や基礎にある物理をコンピュータを援用して説明しようとする試みの例です。従来の常識に変更をせまるような新しい発見につながることもあります。

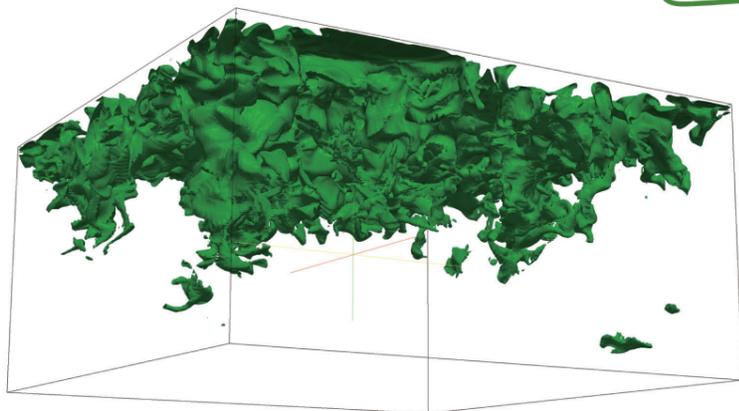


図2: 界面付近での乱流のシミュレーション結果の可視化画像例
 吸収された温室効果ガスの濃度場の等値面をひとつ選んで示しています。

実際、重要な経験則のうち「なぜそんなのか？」が基礎方程式から理解されているものは非常に少ないのが現状です。また、経験則自体に洗練の余地があるものも多数ありますし、経験則すら得られていない魅力的な現象も少なくありません。

複雑で魅力的な現象を大胆な理論で説明してみたい人、コンピュータが好きな人の挑戦を待っています！

T2：相転移動力学 研究室

プロフィール：過去 14 年間の実績

修士課程入学者 14 名 京大以外からの出身者 5 名（農工大、名工大、東北大、神戸大、東工大）
 修士学位取得者 12 名
 博士学位取得者 6 名（博士号取得者の進路は、大学教員 4 名、企業 2 名）

相転移・相分離の動力学、パターン形成の動力学などを中心的なテーマに研究しています。また、高分子・液晶・コロイドといったソフトマターの物性研究も行っています。これらは、流動など外場に対して大きな応答を示すため、非平衡非線形物理の重要な研究対象です。動的モデルの構築とともに対象としては特に境界領域にあるもの未開拓なものに重点を置いています。また、実験グループとの共同研究も積極的に進めていきたいと考えています。

相転移ダイナミクス

相転移現象を用いた微粒子の駆動

動物や微生物などは外力が働かなくても、自発的に動き回ることができる。非平衡下における相転移現象を利用した新しい微粒子の駆動機構の開発を行っている。

図：二成分流体中のヤス粒子のイメージ図（上）。局所的に加熱することで、相分離を起こし、マランゴニ効果によって粒子を駆動する。粒子周りの温度場（左下）、温度場（右下）。

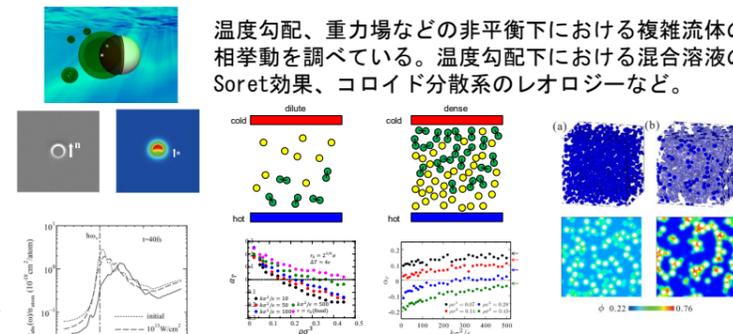
量子ダイナミクス

X線自由電子レーザー照射下の固体における電子ダイナミクスや非線形光学現象を、量子統計力学で説明する。

図：リチウムのK殻電子励起にともなう吸収スペクトルの変化。

外場下における非平衡現象

温度勾配、重力場などの非平衡下における複雑流体の相挙動を調べている。温度勾配下における混合溶液のSoret効果、コロイド分散系のレオロジーなど。



左図：温度勾配下におけるダイマー・モノマー混合系の振る舞い。分子の内部自由度（ダイマーの結合力）、密度などを変えることで、Soret係数が大きく変化することを見出した。右図：水・油混合溶液中に、親水性コロイドを添加し、せん断流動を与えたときの凝集構造。

ソフトマターのモデリング

電解質高分子に対する溶媒和の効果

DNAなどの電解質高分子の水溶液にアルコールなどを添加すると高分子が沈殿することが知られている。通常、溶媒の混合比は均一であると考えられているが、ぬれ・静電相互作用により、それは自明ではない。メソスコピックな描像に基づき、電解質高分子の混合溶媒中での振る舞いを研究している。

右図：混合溶媒中での電解質高分子の様子。温度を変えることにより、高分子鎖の形状が変化している。（上図：相分離点から遠い場合、下図：相分離点に近い場合。）

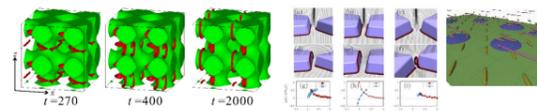
高分子溶液の粘弾性相分離現象

高分子溶液は、通常とは異なる相分離様式（粘弾性相分離）を示すことが知られている。高分子鎖の絡み合い、高分子と溶媒の相互作用などを考慮した分子動力学シミュレーションにより、その物理的な機構の解明に努めている。

図：高分子溶液の粘弾性相分離における相分離パターン（時間発展の様子）。高分子鎖の長さを変えてシミュレーションを行った。

液晶系に見られる非線形・非平衡流動

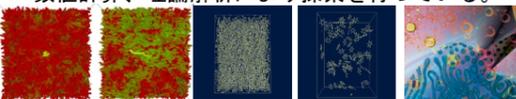
ネマチック液晶は流動場下において、液晶特有の流動特性を示す。バルク中の振る舞いはよく調べられてきたが、狭い空間に閉じ込められた場合はよく分かっていない。多孔質中で安定化されたトポロジカル欠陥、有限のアンカリング強度を持つ壁、という点に着目し研究を行っている。



左図：多孔質（緑）に閉じ込められた液晶のトポロジカル欠陥（赤）の構造。液晶を流すと欠陥の組み換えが起こるが、その活性化エネルギーの高さにより、系は複雑な非線形・非平衡流動を示す。中図：異方的な形状を持つ粒子の周りのトポロジカル欠陥の様子。欠陥構造は複数の（準）安定構造を持つことがあるが、その間の遷移により、複雑な非平衡状態が実現される。右図：不均一アンカリング界面の模式図。

ソフトマター混合系

異なる対称性を持つソフトマターを混合すると新奇な状態が発現することがある。そのような系を数値計算、理論解析により探索を行っている。



左図：液晶・高分子混合系。転移点近傍で温度を変えると液晶秩序の出現に伴い高分子の形状が変化する。中図：all atom分子動力学シミュレーションによる不純物を含む液晶相のスナップショット（右は不純物のみを抽出）。右図：液晶・アルコール混合系の相分離パターン。

T2：物性基礎論：統計動力学（基礎研）

プロフィール：過去 13 年間の実績

修士課程入学者：12 名 うち他大学出身者 8 名（東大、阪大、九大、千葉大、立命館大、バンドン工科大など）
 修士学位取得者：12 名 うち博士課程進学 7 名、他院博士課程進学 2 名、他は一般企業等就職
 博士学位取得者：9 名 うち大学研究機関 4 名、他は一般企業等就職

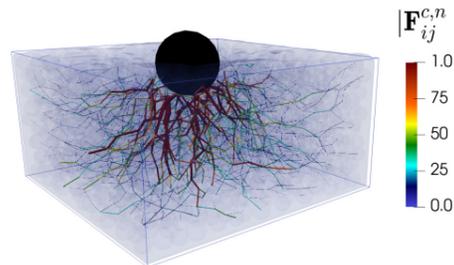
研究内容

非平衡系の統計力学を基礎物理学研究所で研究しています。マクロな系の輸送（ジャミング転移、レオロジー等）の他、非ガウス系、量子輸送、統計力学の基礎等を研究テーマにしています。

古典多体系

高密度懸濁液のレオロジー

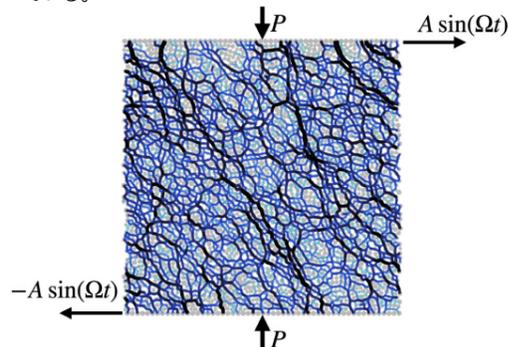
粒子が高密度懸濁液に衝突する際の跳ね返りと沈み込みを数値的に研究している。粒子から底部境界まで粒子間接触が発達した際に跳ね返りが生じる。



粒子(黒球)と接触粒子網(線)。接触粒子網は球からの力の伝搬を指す。

定圧粉体系の降伏と密度変化

定圧粉体系に対し振動剪断を与え、粒子軌道の再帰性に関わる降伏転移と系の密度変化について研究を行っている。

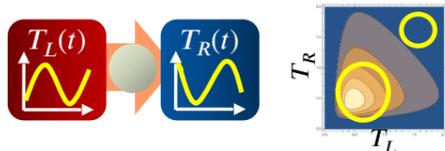


振動剪断中の粒子(丸)と粒子接触網(線)のスナップショット。

開放系

幾何学的ポンプ

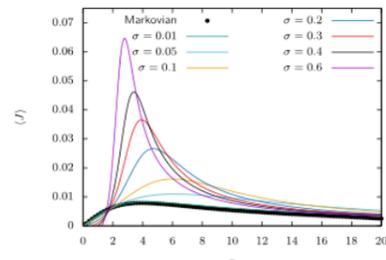
確立過程系のパラメータを周期的にゆっくりとコントロールすると、パラメータの平均バイアスがゼロでも幾何学的効果で平均カレントが存在することが知られている。当研究室では、カレント分布の非ガウス性や、有限操作速度における非断熱効果、熱機関としての効率とパワーのトレードオフ関係などを明らかにした。



(左)イメージ図 (右)スピンボソン系でのパラメータ空間での曲率、領域内の曲率に応じてカレントの大きさが変わる。

非マルコフ性

確率過程の瞬時の状態が現在の状態のみに依存すると仮定するマルコフ近似が主に用いられてきた。当研究室では非平衡系を用いて熱浴の非マルコフ性がどのような影響を与えるかの研究を行っている。



Sinitsyn-Nemenman系における幾何学ポンプカレントの非マルコフ効果。系の記憶の長さ(σ)を大きくすることでカレントが著しく増加することがわかった。

T2：物性基礎論：量子情報（基礎研）

プロフィール：2019 年 4 月から新たに設置された研究室です。

修士課程入学者：3 名
 博士課程入学者：1 名

本研究室では、量子計算理論・量子暗号理論の研究を行っています。特に、

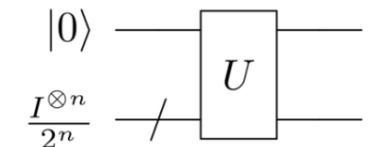
- (1)量子計算理論:量子計算はどのくらい古典計算より高速なのか、量子計算は何ができて何ができないのか、といった量子計算の原理的な問題に量子計算量理論からアプローチする。
- (2)量子暗号理論:量子を使うことによりこれまでにない新しい様々な暗号的タスクを実現する。特にブラインド量子計算や量子計算の検証、量子ゼロ知識証明、耐量子暗号のハイブリッドなど。

◆量子スプレマシー理論

量子計算は古典計算よりも本当に高速なのでしょうか？実は計算量理論の標準的な定義ではまだ量子計算が古典計算より高速であるかどうかは分かっていません。本研究室では、古典計算量理論の仮定に基づいて量子計算が古典計算より高速であることを理論的に示す研究(量子スプレマシー理論)を行ってきました。量子スプレマシーはユニバーサルな量子計算機を作らなくても実現できることが理論的に示されているため、超電導や光などを使って実際に実現しようとしている実験も最近多くあります。また、ユニバーサル量子計算機をどんどん弱めていったときに、どこまで行ったら古典計算になるのかを調べることは、量子と古典の境界はどこにあるのかという、理論物理学者たちが長年にわたり興味を持つテーマに計算機科学の視点からアプローチするという基礎物理としても重要な研究ともいえます。

◆量子暗号プロトコル

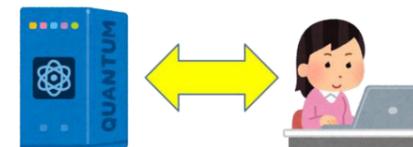
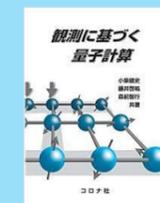
暗号というと、秘密にメッセージを送ることを思い浮かべる人も多いと思いますが、実はそれだけでなく暗号には様々なタスクがあります。(例えば、電子署名は、メッセージ自体は秘密にはなっていません。)量子には不確定性原理やNo-cloningといった不思議な性質がありますが、それらをうまく使って様々な新しい暗号タスクを実現するのが量子暗号プロトコルの研究です。例えば、偽造できないお金を作るという量子マネーや、クラウド量子計算のセキュリティを守る暗号プロトコル(ブラインド量子計算、量子計算の検証)、計算結果が正しいこと以外は何も情報を漏らさないという量子ゼロ知識証明などがあります。本研究室では、計算内容を秘密にしたまま量子計算を委託するブラインド量子計算や、局所ハミルトニアンに基づき量子計算の検証プロトコルについて研究を行ってきました。最近では、耐量子暗号ももちいたハイブリッド量子暗号プロトコルの構築にも興味があります。



研究内容に興味のある方はお気軽に tomoyuki.morimae@yukawa.kyoto-u.ac.jp までどうぞ。

量子計算理論の参考書:

- Nielsen and Chuang, Quantum Computation and Quantum Information
- Vidick and Watrous, Quantum proofs
- 観測に基づく量子計算 小柴、藤井、森前
- 量子計算理論 森前



プラズマ物性物理学 (学部協力講座)

プロフィール：過去 10 年間

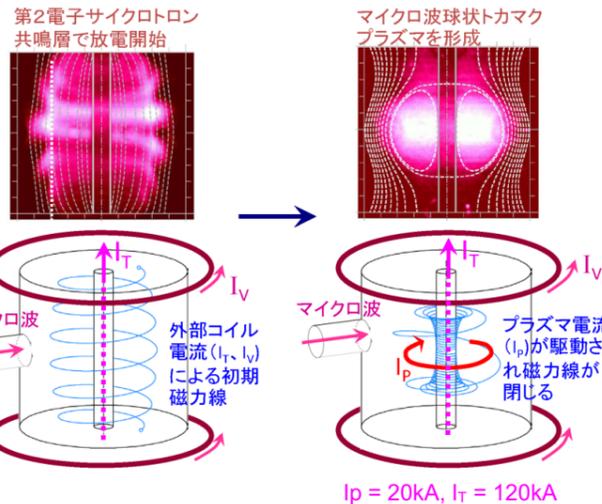
修士課程入学者 32 名 うち他大学出身者 17 名 (大阪大学、同志社大学、京都工芸繊維大学、中央大学、他)
 博士課程入学者 4 名 他は一般企業 (三菱重工、日立、IHI、マイクロン等) に就職
 博士学位取得者 2 名 (国立研究機関 1 名、一般企業 1 名)

プラズマはアボガドロ数的な大量の荷電粒子(イオンや電子)がマクロスケールで飛び交う電離気体であり、外部から加えられた場(電場、磁場、重力場)だけでなく、自分自身が運動することによって生成する自己場の影響も受けながら集団として複雑な非線形発展をしてゆきます。当研究室のLATE装置では、マイクロ波により生成されたプラズマが自己形成してゆく物理過程を実験的、理論的に研究しています。これらの研究は将来の小型核融合炉心形成への応用が期待されています。

マイクロ波による球状トカマクの形成

～ 自発的トロイダル電流発生を介したトラスプラズマの自己形成 ～

外部コイルによる螺旋状の磁力線構造に100 kWレベルのマイクロ波を入射すると、初めは電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 層近傍に磁力線に沿った螺旋状のプラズマが発生しますが、やがて、自発的にプラズマ中に環状電流 (プラズマ電流、 I_p) が発生して、閉じた球状プラズマが自己形成されます。



プラズマ電流は?

マイクロ波により一方向に運動する高速電子群が形成されることにより運ばれます。

電流の方向は?

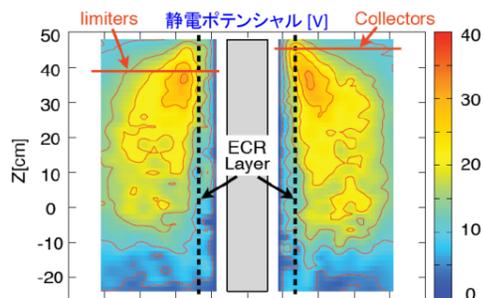
外部コイル (I_v) の作る磁場との平衡を満たす向きのみが自発的に成長して、選択されます。

その意義は?

この方式を核融合プラズマの起動に適用できれば、従来の誘導起動法で用いる中心ソレノイドが不要となるため、将来の核融合発電炉の劇的な簡素化が可能となります。当研究室では、小型のLATE装置において本方式が原理的に可能であることを実証しました。現在、他研究機関と協力し大型装置への適応を積極的に進めています。

単純トロイダル磁場中の電子サイクロトロン共鳴プラズマ

～ 自発的静電ポテンシャルを介したプラズマの自己形成 ～



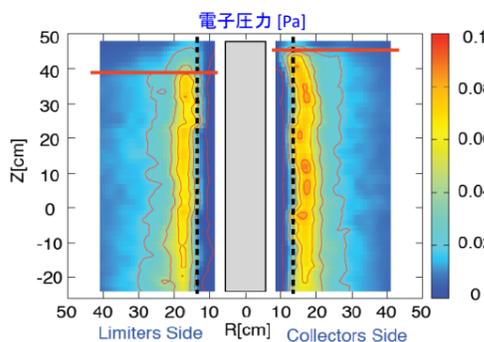
単純なトロイダル磁場中に、1kWレベルのマイクロ波を入射すると、電子サイクロトロン共鳴 (ECR) 層近傍に縦に伸びたプラズマが生成・維持されます。このとき、プラズマ中には左図に示すような静電ポテンシャル分布が自発的に形成され、電子とイオンの流れを自己調節することで、プラズマが維持されます。

単純トロイダル磁場中では

磁場の勾配・湾曲により電子は下向き、イオンは上向きにドリフトするため、上下方向に荷電分離を生じます。

自発的な静電ポテンシャルの形成により

等ポテンシャル面に沿ったドリフト運動 ($E \times B$ ドリフト) が生じ、これによりイオンと電子の流れが自己調節され、プラズマ圧力は左図に示すように上下方向にほぼ一定となります。さらに、この機構により荷電分離が抑えられて、プラズマの電気的中性が保たれます。電荷密度の偏りはわずか 10^{-5} %という驚異的なオーダーです。



物理学第二分野

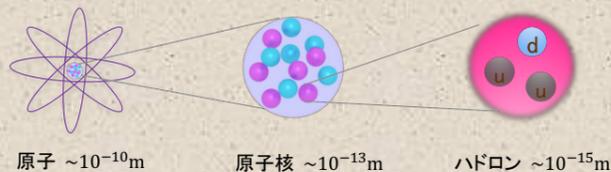
原子核・ハドロン物理学	23-24
素粒子物理学	25-26
宇宙線物理学	27-28
核放射物理学 (複合研)	29
核ビーム物性学 (複合研)	30
素粒子論：物理学第二教室・素粒子論研究室	31-32
素粒子論：基礎物理学研究所・素粒子論グループ	33-34
原子核理論	35-36
原子核理論：基礎物理学研究所・原子核理論グループ	37
天体核物理学：物理学第二教室・天体核物理学研究室	38-39
天体核物理学：基礎物理学研究所・宇宙グループ	40
ビーム物理学 (化研)	41

原子核・ハドロン物理学 研究室

プロフィール：過去 11 年の実績

修士課程入学者：54 名（男性 47 名・女性 7 名 / 内他大学出身者 3 名：立命館大、神戸大、佐賀大）
 博士課程入学者：32 名
 卒業後の進路：住重、トヨタ、ローム、三菱 UFJ 銀行、関電、イノベーションなど

フェトメートル (10^{-15} m) の世界への挑戦



私たちは物質の基本要素である、
・原子核
・ハドロン
 を通じて「強い相互作用」の基本的な性質の研究を行っています。

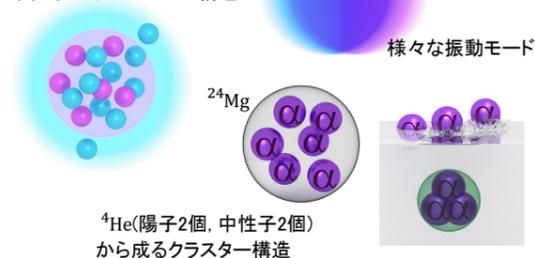
原子核・ハドロン物理学に関する多様なテーマを、様々な大型実験施設を用いて研究する特色ある研究室です。
 ・世界最高クラスの大強度陽子ビームを誇る J-PARC
 ・世界最高性能の放射光を用いることができる SPring-8
 ・世界最高分解能の検出器と最高品質のビームで核構造研究を行う RCNP
 ・世界最大強度のRIビームを生成できる RIBF
 実験装置の建設も伴っていますので、自分の作った装置で新しい実験を行いたい人には最適です。

ドイツ GSI, アメリカ JLab など国外の施設も

原子核

原子核を形成する陽子・中性子などの核子や、核子を形成するクォーク間に働く強い力は、量子色力学による説明が進んでいます。様々な原子核の構造を調べることで、有限量子多体系である原子核のダイナミクスの解明や、核物質の基本的性質の解明を目指しています。

中性子過剰核での
 中性子スキンやハロー構造



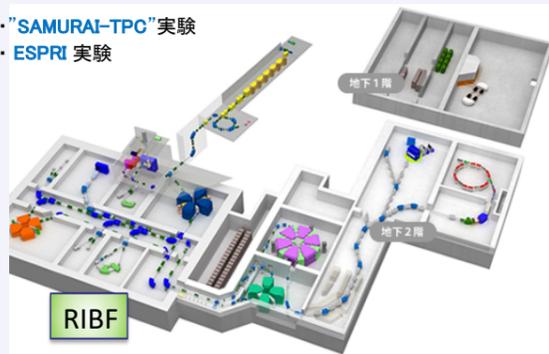
様々な振動モード

^4He (陽子2個、中性子2個)から成るクラスター構造

ESPRI, SAMURAI @ RIKEN RIBF (RI Beam Factory)

理化学研究所のRIBFでの不安定核ビームを用いて、中性子星の基本的性質に関係した原子核物質の状態方程式の解明を目指しています。

- ・"SAMURAI-TPC"実験
- ・ESPRI 実験



ESPRI (2013~)

陽子弾性散乱を用いて不安定核の核子密度分布を測定し、核子多体系での核子間相互作用を記述することを目的として活動しています。例えば、中性子過剰核の中性子スキンの情報から、状態方程式にアプローチしています。また、不安定核という天然には存在しない原子核の実験のための、固体水素標的や重粒子検出器などの新しい装置の開発も進めています。

SAMURAI-TPC (2016~)

1. 多種粒子検出器SAMURAI スペクトロメーター (運動量分析器)
 2. 三次元飛跡検出器TPC
 3. 中性子検出器NEBULA
- を組み合わせ、数百MeVの重イオン衝突による荷電 π 中間子を用いて行う、国際共同研究です。



クラスター原子核、天体核反応 @ RCNP (Research Center for Nuclear Physics)

大阪大学核物理研究センター(RCNP)ではリングサイクロトロンからの世界最高品質ビームと高分解能運動量分析器Grand Raidenを用いた散乱実験を行い、
 ・様々な原子核の共鳴状態の精密測定
 ・クラスター凝縮状態の探索
 などを行っています。

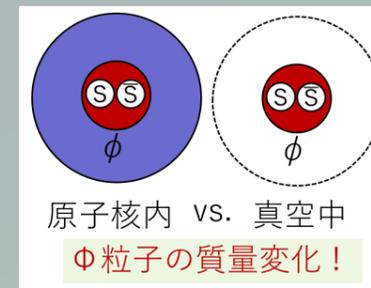
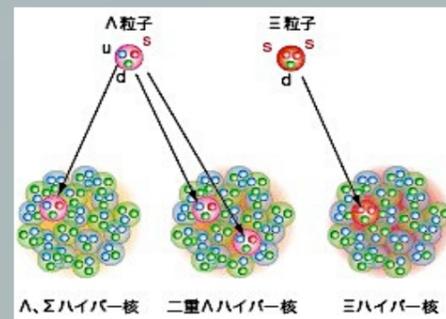
例えば、高温条件下での ^{12}C 原子核の生成に寄与する ^{12}C の高励起状態の γ 崩壊確率の測定を目指しています。新しい結晶であるGAGG ($\text{Gd}_3\text{Al}_2\text{Ga}_3\text{O}_{12}$)を用いた陽子検出器や0.5mm厚の薄型固体水素標的の開発をすることにより、反応確率 10^{-7} 以下のレアイベントに迫ります。他にも、これまで検出困難であった低エネルギー荷電粒子をとらえるために、新しく粒子の飛跡を3次元的に検出できるTPC検出器そのものを標的とする検出器(アクティブ標的)の開発も行っています。



宇宙での元素合成で重要となる様々な天体核反応へのアプローチ

ストレンジクォークで探る物質世界 @ J-PARC (日本) / JLab (アメリカ) / FAIR (ドイツ)

地球上にある物質の原子核は、素粒子であるアップ (u)、ダウクォーク (d) が「強い相互作用」で結合した核子で構成されます。しかし、自然界にはその他のクォークを含む物質も存在します。例えば、非常に高密度状態であると考えられている中性子星の内部では u、d クォークよりもわずかに重い「ストレンジクォーク s」が安定的に存在していると考えられています。私たちのグループでは s クォークを含んだ原子核 (ハイパー核) やハドロンを地上で人口的に一瞬作り出しその性質を調べることで、より一般的な「強い相互作用」の理解や「物質質量獲得の起源」等を実験的に研究しています。

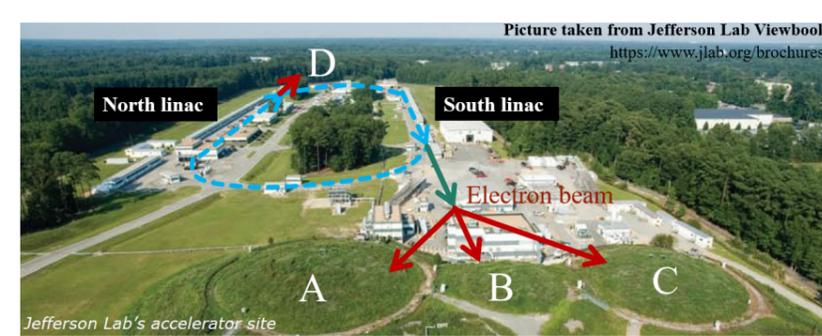


J-PARC/JLab/FAIR の先端加速器と最新の測定装置と技術を駆使してハイパー核を測定し、地球中の物質に発現する強い相互作用の性質とは異なる、特徴的な未知の「強い力」の性質の解明を目指す。

原子核内外における s クォークを含む粒子の生成を大型精密装置で測定し、密度環境に依存する質量変化の明確な信号の初観測を目指す。



J-PARC @茨城県東海村、日本



JLab @ニューポートニューズ市、VA、アメリカ

π 中間子原子研究 @ RIBF / RCNP

中間子と原子核の多体系の研究の中で最も歴史が古く、また最も確立している系は、負 π 中間子が原子核の周りを回る π 中間子原子です。電子と比べて π 中間子は 270 倍近く重いため、 π 中間子の軌道半径は原子核半径と同程度にまで小さくなります。そのおかげで、 π 中間子と原子核の間に働く強い相互作用に関する情報を引き出すことが可能となります。

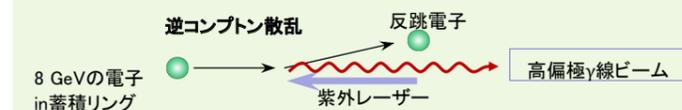
私たちは RIBF と RCNP において、 π 中間子原子の生成・観測実験を行っています。



π 中間子原子

LEPS / LEPS2 実験 @ SPring-8 (日本)

LEPS グループは高輝度放射光施設 SPring-8 において、逆コンプトン散乱による光子 (γ 線) ビームを用いた光生成反応の測定から、ハドロン物理学の研究を行っています。



主な研究対象は、
 ・ペンタクォーク候補の Θ^+ 粒子
 ・メソン・バリオン分子状態と予想される $\Lambda(1405)$
 といった存在そのものが注目を浴びているエキゾチックな粒子の探索や性質研究です。
 さらに、2014 年度からは新しいビームラインで LEPS2 ソレノイドスペクトロメーター系の開発を進めています。

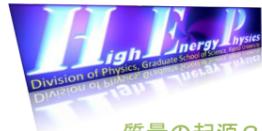


詳細はこちら: <https://www.nh.scphys.kyoto-u.ac.jp/>

素粒子物理学 研究室

プロフィール：過去 10 年の実績

修士入学者 46 名 (うち 他大学 8 名)
修士学位取得者 35 名 (当研究室博士課程進学: 23 名 / 外部へ進学または就職: 12 名)
博士学位取得者 17 名 (研究機関就職: 16 名 / 一般企業就職: 1 名)



高エネルギー物理学研究室(素粒子物理学研究室)は、実験を通して物質の構成要素である素粒子や時空の性質、起源を解明することを目指しています。

質量の起源?
大統一理論?
超対称性?
ニュートリノはCPを破るか?
宇宙におけるCPの破れの起源は? etc...

高エネルギーフロンティア → LHC(ヨーロッパ) : ATLAS実験
強度フロンティア(稀な事象の探索) → J-PARC(茨城県) : T2K実験
コズミックフロンティア → スーパーカミオカンデ実験、CMB偏光観測実験
その他にも、ハイパーカミオカンデや超高分解能高圧キセノン検出器など
将来計画のための研究も数多く行っています。

いずれの実験も今後数年以内に結果が期待されており、

新しい物理の発見に立ち会えるチャンス!

AXEL実験

未発見の現象 $0\nu\beta\beta$ の探索で

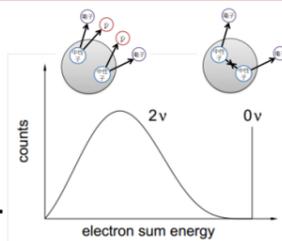
ニュートリノと宇宙の謎に迫る!!

ニュートリノは未だ謎の多い素粒子です。私たちはその謎を探るため、高エネルギー分解能・飛跡再構成能力を持った検出器の開発によりニュートリノを伴わない二重崩壊($0\nu\beta\beta$)を捉えようとしています。

ニュートリノが軽いのはなぜ?
宇宙に反物質が少ないのはなぜ?
そんな疑問に答えることを目指しています。

2020年にキセノン検出器としては世界最高レベルのエネルギー分解能達成!

現在180Lの高圧XeTPCで試験中!
今後は大型化と独自のアイデアによって世界最高感度の達成を目指します。
私たちが一緒にニュートリノと宇宙の謎を探ってみませんか?



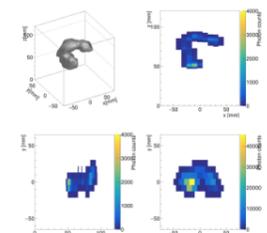
2v $\beta\beta$ (左)と0v $\beta\beta$ (右)の現象を観測したい



高圧ガスXeTPC



学生が中心となって開発!



180L検出器で捉えた γ 線の飛跡
高エネルギー分解能・立体的な飛跡再構成

宇宙背景放射観測実験

宇宙最古の光「宇宙背景放射」(CMB)の精密観測によって、宇宙創成を支配した物理法則の解明を目指しています! 原始重力波をCMB偏光の特殊なパターンとして検出した際には、宇宙インフレーション仮説と重力の量子化の決定的証拠となります。

またCMBの精密観測により宇宙背景ニュートリノの絶対質量・世代数、ダークマターの研究も可能です。Ground BIRD、Simons Array・Simons Observatory Collaborationでは国内外の実験を装置開発とデータ解析で牽引します。

さらにミリ波を用いたダークマターの探索も行っています!



Ground BIRD



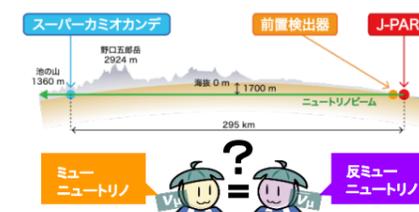
Simons Obs.



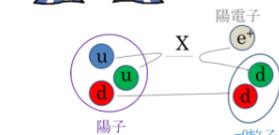
DOSUE-RR

T2K/SK・HK (ニュートリノ) グループ

T2K実験は、茨城県東海村にある陽子加速器から生成されたニュートリノビームを、280 m下流にある前置検出器 ND280と、295 km離れた岐阜県神岡町にある Super Kamiokande(SK)で観測し、ニュートリノ振動のパラメータ測定を行う実験です。CP位相角 δ_{CP} と呼ばれるパラメータが $0, \pi$ からズれていることはレプトンのCP対称性の破れを意味し、物質に対して反物質が少ない宇宙の説明になる可能性があります(レプトジェネシス機構)。



Super Kamiokande(SK)は、陽子崩壊の観測を目的に建設された水 Cherenkov 検出器です。陽子崩壊の観測は最も直接的な GUT の証明になります。大量の水はニュートリノの標的にもなり大気ニュートリノや超新星背景ニュートリノ、加速器ニュートリノの観測に用いられます。また、陽子崩壊への更なる感度の向上を目的として、SKの約10倍の有効体積を持つ Hyper Kamiokande(HK) 建設の計画が進行しています。



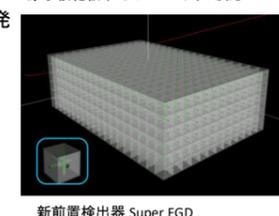
現在SKでは、ガドリニウム(Gd)の注入が完了し、超新星背景ニュートリノに対する感度が向上することが期待されます。

- 京都大学の研究
・超新星爆発の探索とモデルの検証を行う
・近傍超新星爆発の観測のためのデータ取得システムの改善・性能評価
・大気ニュートリノの観測によってニュートリノ質量の階層性を調べる
・エネルギー・時間分解能を改善したHKのための新型光検出器の性能評価

T2K実験では、ニュートリノのCP対称性の破れを 3σ (99.7%) の確度で確かめることを目的とし、データの誤差低減のための研究が行われています。

京都大学の研究

- ・ビームアップグレードにより短期間で統計誤差を削減する
・高い位置分解能を持つ新型検出器を開発し、ニュートリノ反応をより詳細に観測することで反応モデルを理解する(WAGASCI / Baby MIND, NINJA)
・1 cm角のシンチレータ 200万個からなる新前置検出器 Super FGD の建設により、振動前のニュートリノをより高精度で測定する



ATLAS グループ



● ATLAS 実験とは

スイス・フランスの国境にある CERN の LHC 加速器を用いて世界最高エネルギーで陽子同士を衝突させ、衝突地点に設置された大型汎用検出器 ATLAS を用いて物理事象を観測する実験です。2012年には標準模型で唯一未発見であったヒッグス粒子を発見しました。その後は、ヒッグス粒子の精密測定や超対称性などの標準理論を越えた新しい物理事象の探索を精力的に行っています。

● ATLAS 実験の現状

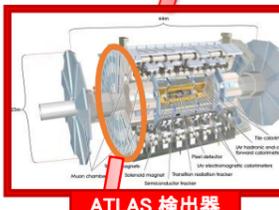
現在 LHC では、2022年からのさらに高いエネルギー(13 TeV → 14 TeV)での運転に向けたアップグレードが行われており、ATLAS 検出器についてもこれに対応するための改良を行っています。また2027年からのさらなる大統計を目指したアップグレードの準備も並行して進めています。

● 学生の活躍

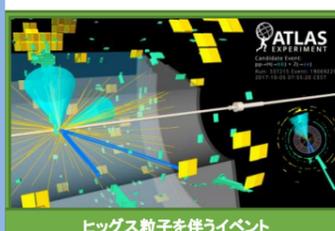
ATLAS 実験は大規模な国際共同実験ですが、学生一人ひとりが新物理を発見するために活躍しています。京都 ATLAS グループでは主にミュオン検出器(TGC)とそれを用いたデータ取得の改良に関する研究を行っています。教員や他の研究者と議論しながら研究し、現場での作業やミーティングの最前線で活躍しています。



LHC 加速器(直径約 9 km)



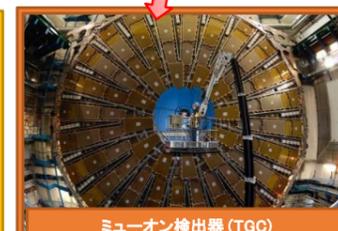
ATLAS 検出器



ヒッグス粒子を伴うイベント



学生が活躍する現場での作業



ミュオン検出器 (TGC)

宇宙線 研究室

プロフィール：過去 10 年の実績

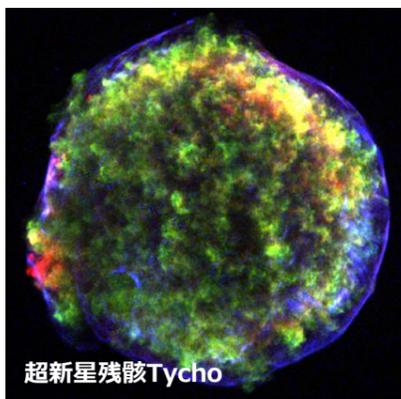
修士課程入学者) X線：19名 ガンマ線：30名
修士学位取得者) X線：17名 ガンマ線：25名 うち博士進学 19名、一般企業等に就職 23名
博士学位取得者) X線：7名 ガンマ線：3名 うち研究機関に7名、一般企業等に就職 3名

X線観測衛星の開発とそれを用いた観測研究

宇宙にある天体の多くは X線を放出しています。超新星残骸や銀河団、ブラックホールの降着円盤などはすべて X線で明るく輝いています。それらの正体は、宇宙の極限環境でしか実現し得ない高温のプラズマや粒子加速といった高エネルギー現象の物理によるものです。我々のグループは、人工衛星に搭載する検出器を自ら開発し、観測した天体の X線を解析することで宇宙の高エネルギー現象の解明するということを目指して研究を行っています。

X線観測衛星を用いた観測的研究

2005年に打ち上げた X線天文衛星「すざく」には、我々、京大 X線グループが開発した X線 CCDカメラが搭載されています。我々は「すざく」衛星を用いて銀河系中心領域や超新星残骸などを観測し、数多くの成果を挙げています。それだけでなく、NASAが打ち上げた Chandra衛星や ESAが打ち上げた XMM-Newtonなど、様々な衛星も用いて天体の研究をしています。



超新星残骸 Tycho

超新星残骸

星が一生を終える際に起こした超新星爆発の後に残った天体が超新星残骸です。我々のグループは超新星残骸の X線観測によって星の内部における重元素合成、衝撃波における宇宙線加速などを明らかにしてきました。右図に示した超新星残骸 W44では「すざく」のデータから一般的な超新星残骸では生成しない過電離プラズマを発見しました。このことは X線を放射する高温プラズマの進化過程を解明する上で重要なヒントを持っていると考えられます。

ひとみ衛星 (2016/2/17 打ち上げ) と後継機の開発

我々は 2016年2月17日に日本の次期 X線天文衛星「ひとみ」を打ち上げました。「ひとみ」には4種類の観測機器が搭載されており、京大グループはそのうちの1つである Soft X-ray Imager (SXI) と呼ばれる X線 CCDカメラの開発を主導しました。残念ながら「ひとみ」は事故のため運用停止となってしまいましたが、短い運用期間の間に優れた成果をあげています。その一つが、ペルセウス銀河団の観測です。「ひとみ」に搭載された検出器は、X線のエネルギーを精密に分解して強度を測定することができます。物質が運動しているとドップラー効果によって X線のエネルギーは変化するので、輝線の幅を測定することで物質がどれくらい運動しているかがわかります。ペルセウス銀河団の中心にあるブラックホール周辺からは強いジェットが噴き出しており、銀河団内の物質と激しく衝突しているのですが、銀河団物質の乱流が意外なほど小さいことが初めて明らかになりました。ブラックホールの活動を解明するための重要なヒントになると思っています。この研究成果は 2016年7月に科学雑誌「Nature」に掲載されました。このような優れた成果から 2022年に後継機となる XRISM の打ち上げが予定されています。それに向けて再び京大グループが中心となり SXI の改良や実験を行っています。

「ひとみ」衛星

「ひとみ」打ち上げ

ブラックホール

銀河団高温物質

「ひとみ」SXS 従来の X線検出器

次世代 X線天文衛星 FORCE へ向けた検出器開発

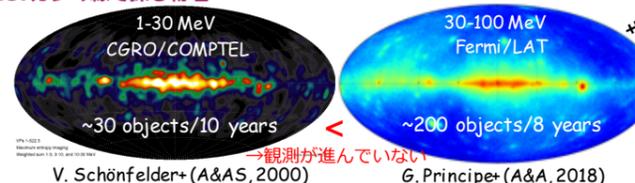
我々は、未発見のブラックホール (BH) の探査のために 2020年代に打ち上げを予定する、X線天文衛星「FORCE」を推進しています。打ち上げた衛星で未発見の BH から放出される高いエネルギー帯域の X線を観測することで、宇宙の形成過程の解明に迫ります。FORCE に搭載する X線 CMOS イメージセンサーの開発を、京大グループが中心となって様々な機関と共同で行っています。

「FORCE」衛星

京大グループが中心となって開発している X線 CMOS 検出器

SMILE-宇宙 MeV ガンマ線観測気球実験

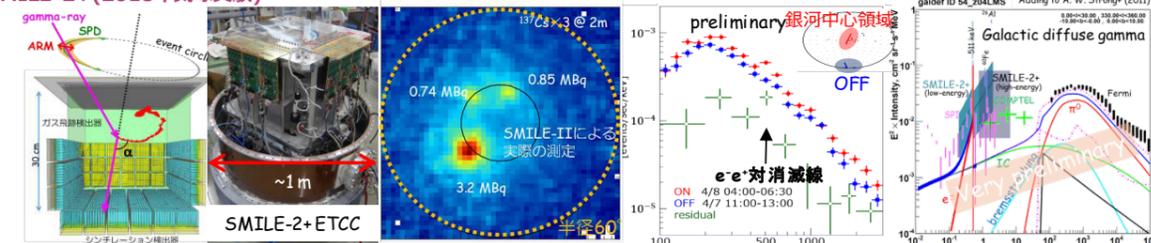
MeV ガンマ線で探る物理



- サイエンスターゲット
- 元素合成
 - 粒子加速
 - 強い重力場 Etc.
- SNR: 放射性同位体
銀河面: ^{26}Al ・電子陽電子対消滅線
ジェット (AGN): シンクロトロン+逆コンプトン
Black hole: 降着円盤, π^0
ガンマ線パルサー, 太陽フレア

V. Schönfelder+ (A&AS, 2000) →観測が進んでいない
G. Principe+ (A&A, 2018)
数百keVから数十MeVまでのMeV領域は核ガンマ線のエネルギー帯域であり、元素合成過程や星間での物質循環についての情報を得られる。だが、MeVガンマ線は散乱優位で集光による観測が難しく、天文学最後の未開拓分野である。

SMILE-2+ (2018年気球実験)



2018年4月7日に豪州アリススプリングスにて我々が独自に開発したガンマ線望遠鏡: ETCCの撮像能力実証を目的とした気球観測を行った。電子陽電子対消滅線の有意な超過を検出! 銀河中心領域とくに星雲からのガンマ線強度は他観測と無矛盾。

SMILE-3 (将来計画)



次期長期気球実験SMILE-3で~5-10倍感度を上げる為に装置開発を行っている。

次世代型 GeV-TeV ガンマ線望遠鏡: CTA計画

宇宙での高エネルギー天体現象の理解・ダークマター探索・宇宙線起源の解明には、GeV-TeVガンマ線の観測が必要不可欠である。我々は現在運用されているMAGIC望遠鏡のデータ解析に加え、次世代計画であるCTA計画の装置開発・データ解析をメインに研究を進めている。

カメラ組み立て作業

CTA 23m口径望遠鏡 初号機

現在試験観測中

焦点面カメラ

焦点面カメラに搭載している光検出器モジュールを日本グループが開発

サイエンスターゲット

- 巨大ブラックホール+相対論的ジェット
- 超新星残骸
- ガンマ線バースト
- パルサー (中性子星)
- 宇宙線起源の解明
- ダークマターの探索

試験観測でパルサー星雲からのガンマ線信号を検出

CTA北サイト@スペイン完成予想図

CTA計画: 31か国が参加する国際共同計画で南・北サイトに計約百台の望遠鏡を設置

最高エネルギー宇宙線: FAST実験

10の20乗eV(1億TeV)ものエネルギーを持つ宇宙線はそのとてつもないエネルギーが故に宇宙磁場に曲げられにくく、到来方向を特定できれば発生源・発生メカニズムに迫ることができる。我々は最高エネルギー宇宙線の検出感度を一桁向上させるFAST実験を通して、次世代の天文学を拓くべく研究している。

@アルゼンチン

@北アメリカ

FAST 1 FAST 2 FAST 3

最高エネルギー宇宙線の到来方向異方性?

宇宙線が大気に入射したときに発生する空気シャワーを利用して観測

宇宙線望遠鏡

核放射物理学 研究室

プロフィール：2002年度以降の実績

修士過程入学者 14名 うち他大学出身者 3名
 修士学位取得者 12名 進路：博士課程進学者 5名、一般企業 7名
 博士過程進学者 6名 うち他大学院出身者 1名
 博士学位取得者 4名 進路：研究機関 3名、一般企業 1名

原子核の共鳴を用いた超高分解能ガンマ線の利用研究を展開しています！

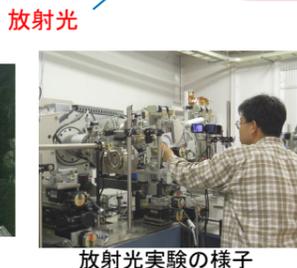
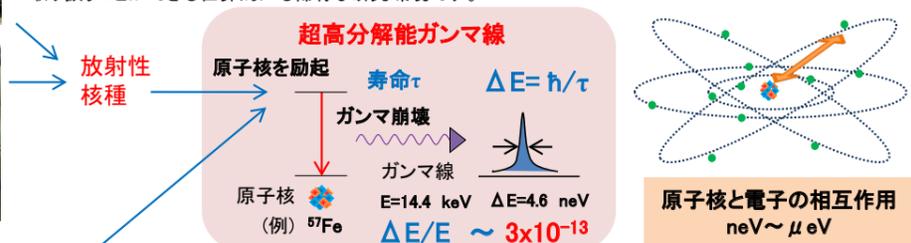


原子核から放出されるガンマ線のエネルギー幅は崩壊の寿命で決まるため、非常に狭いエネルギー幅を持つものがあります。この超高分解能ガンマ線を利用して、新しい分光法の開発とその利用研究を行っています。

京都大学複合原子力科学研究所の特徴

京大原子炉(KUR)の中性子照射や、線型加速器を用いて様々な放射性核種を生成することができます。複合原子力科学研究所は多様な核種の線源を生成して、取り扱うことができる世界的にも稀有な研究環境です。

超高分解能エネルギー分光



放射光実験の様子

メスbauer分光

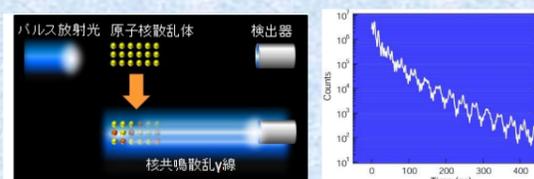
超高分解能ガンマ線の共鳴を使うと、原子核を取り囲む電子が原子核へ与える非常に小さな影響を観測することができます。このことを利用して原子核を通じた物質の電子状態を知る方法がメスbauer分光です。電子状態の測定だけでなく、原子核パラメータの測定や、ごくわずかなエネルギー変化の検出など様々な分野への応用ができます。

放射光核共鳴散乱

SPring-8などの大型放射光施設による高輝度・高指向性のX線(放射光)を利用して原子核を励起する実験は、核共鳴散乱と呼ばれています。核共鳴散乱を用いて、従来できなかった全く新しい分光法の開発を行っています。

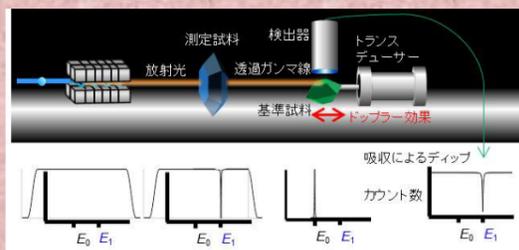
放射光利用で広がる新しい分光法

ガンマ崩壊過程の応用研究



単一原子核のガンマ崩壊は指数関数的に崩壊します。しかし、原子核集団をパルス放射光で励起した場合のガンマ崩壊の時間スペクトルは指数関数とは異なる場合があります。ガンマ崩壊の短寿命化(スピードアップ)現象や、干渉による複雑な強度の変調を観測することができます。これらの現象は、まだよくわかっていない事項もあり、ガンマ崩壊の基礎過程の研究やこれを用いた応用研究、また、ガンマ崩壊を制御することによって可能となる新たな研究分野の開拓を行っています。

放射光核共鳴吸収分光法



放射光はエネルギーが可変であるため、多様な核種の励起エネルギーに合わせて原子核を励起させることができます。放射光によりこれまで測定が難しかった核種のメスbauer分光を可能にする手法を開発しました。新しい核種の実験実現への挑戦や、これを可能にするための新規検出器系の開発、また、これを用いた様々な物質の応用研究などにも取り組んでいます。

新しい分光法の開発

超高分解能エネルギー分光

新たな実験手法???

核放射物理学研究室では、これまでに不可能であった測定を可能にする新たな手法の開発に取り組んでいます。これまでに、原子の振動状態(フォノン)が観測できる非弾性核共鳴散乱、ソフトマターのダイナミクスを観測可能な時間領域干渉計などの、新しい手法の開発に成功しています。これまでの既存の手法にとらわれず、新たな分野を開拓していく意欲のある学生を募集しています。

複合原子力科学研究所の研究室の見学や、研究内容に関する質問についても随時受け付けています。詳細は研究室ホームページ、または北尾(kitao@rii.kyoto-u.ac.jp)までお問い合わせください。

核ビーム物性学 研究室

プロフィール：過去約20年の実績

修士入学者 11名 うち他大学から7名 (九大、阪大、明治大、神戸大、関西学院大、茨城大)
 修士学位取得者 9名 うち博士課程進学者 5名、一般企業に就職 3名、独立法人研究機関に就職 1名
 他大学からの博士課程編入者 2名 (新潟大、阪大)
 博士学位取得者 3名 (大学、独立法人研究機関、一般企業に就職)

5MW研究用原子炉を用いた不安定核ビームの生成と、それを使った原子核物理と物性物理分野にまたがる学際研究

核ビーム物性学とは

『核ビーム物性学』とは、放射性イオンビームを用いて行う原子核物理と物性物理にまたがった学際領域の研究分野です。我々の研究室では、放射性イオンビームをつくる装置として京都大学研究用原子炉に附設されたオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL)を使っています。また、KEK和光原子核科学センター(KEK WNSC)での研究にも参加しています。核分光による原子核の研究では、励起状態の原子核から放出される放射線を計測し、スピン・パリティや磁気モーメント、電気モーメントを測定して原子核の構造を調べるとともに、不安定核ビームの強度の増強や利用核種の領域拡大のための装置開発や放射線検出器の開発(名古屋大学との共同研究)も行っています。また、原子核の磁気モーメント、電気モーメントは物性物理の研究に用いることもできます。KUR-ISOLを使うと、物性物理で重要な、希土類元素の原子核を物質に注入することも特徴です。このように不安定核ビームを武器として原子核・物性という枠を超えた研究を進めようというのが核ビーム物性学です。

最近の研究の仕事

原子核構造の研究 中性子過剰核である¹³²Iの第一励起準位の半減期と磁気モーメントについて、東北大グループとの共同研究で高純度の核ビームを得る技術と高時間分解能の計測技術を組み合わせ測定に成功しました。また、¹⁴⁰Ceの第三励起準位の磁気モーメントの測定にも成功しました。そしてKEK-WNSCとの共同研究では¹⁹⁹Ptの磁気モーメントの測定にも成功しました。このほか、ミュオンを利用した研究として、不安定核ミュオン原子の実現に向けたKEKグループとの基礎研究や、新たな非破壊元素分析法に関して大阪大学等と共同研究を行っています。

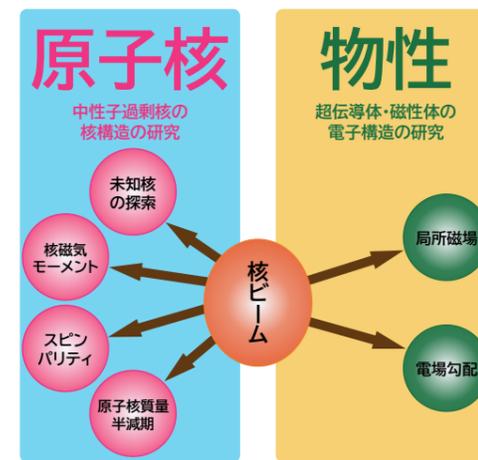
物性研究 不純物の存在により興味ある物性を示す半導体 ZnOに導入された第13族の元素(Al, Inなど)不純物の存在状態の研究や、上述の¹⁴⁰Ceを用いた鉄中でのCeとHeの相互作用及び複合体形成に関する研究など、放射性原子核プローブによる物性研究をしています。また、直径1μm未満の極めて微細な気泡であるウルトラファインバブルの中に中性子照射で不安定核を生成し、これをプローブとしてウルトラファインバブルの内部圧力の測定に初めて成功しました。

その他 実験で必要になる加速器や計測器の制御に関する研究開発を進めており、その技術をもとにKURAMA (Kyoto University RAdiation Mapping System)の開発をしました。

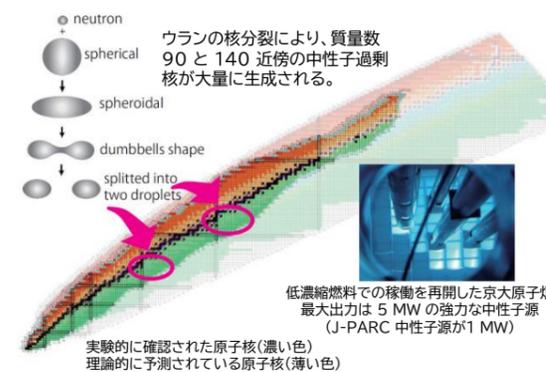
京都大学複合原子力科学研究所のおもしろさ

京都大学複合原子力科学研究所は関西空港の近く、大阪府泉南郡熊取町にあります。原子炉を研究・利用する医学・生物学・工学・物理学・化学・材料物性・建築・地震学他様々な分野の研究者が集まっており、小さな理系総合大学です。そこで分野を超えて協力しながら原子炉を維持・運用して自分たちの研究を進めることで、思いもよらなかった新たな研究が生まれています。そんな既存の物理の枠にとらわれない場所で研究してみたい人にはお勧めの環境です。東電福島第一原発の事故では、京都大学複合原子力科学研究所の様々な分野の研究者が協力して事故対応に貢献しています。KURAMAも我々の計測・制御技術を基に、様々な研究者の専門知識が活かされています。

詳細は研究室Webページをご覧ください



核ビーム物性学の世界。不安定核ビームを軸に原子核・物性の両分野にまたがる研究をしている



低濃縮燃料での稼働を再開した京大原子炉 最大出力は5 MWの強力な中性子源 (J-PARC 中性子源が1 MW)

核図表と核分裂による不安定核の生成



核ビームを作り出すオンライン同位体分離装置(KUR-ISOL)

素粒子論 研究室

プロフィール：過去5年間の実績

修士入学者 19名 うち他大学は5名（大阪市大1名、慶應大2名、静岡大1名、東北大1名）
 修士学位取得者 18名 うち博士課程進学者13名、一般企業就職は5名
 博士学位取得者 12名 博士卒業後は、研究機関などに7名、一般企業就職は6名

1. 素粒子論研究室の概要

万物を構成する最小単位を素粒子と呼びます。素粒子論研究室では、素粒子を用いて記述される自然界の最も基本的な物理法則を解明するため、理論・実験あるいは物理・数学といった垣根を越えて様々な分野の研究者と議論を交わしながら、個々が独自に研究を進めています。

素粒子論は、日常とかけ離れていて、あまり実感が持てない分野であると感じる人も多いと思います。確かに、素粒子の多くが高エネルギーの加速器内で発見されてきました。しかながら、私たちの日常に見かける物理現象の根底にある物理法則は、加速器内の現象を作り出す物理法則と同じです。そして、一見身の回りの現象と関係ないように思われる素粒子ですが、まさに素粒子論の研究を通して、それが実際の物理現象といかに結びついているのかが明らかにされてきたのです。

これからの素粒子論がどのように発展するのかは誰にも分かりません。次世代の素粒子論をつくるために、どの物理に注目し、どの方策を取れば良いのか、様々な可能性が残されています。そのため、素粒子論は幅広い研究領域を持つ特徴があります。

私たちの世界には、未だに分からないことがたくさん残っています。しかし、これらの問題を解決して、私たちの世界を記述する1つの理論を打ち立てる段階に素粒子論は来ていると感じています。素粒子論研究室では、この時代にあって第一線で研究を進めることに責任を持ちながら、私たちの世界に正しい描像を与えるために日々研究活動を続けています。

2. 論文速報風景

毎週水曜日の午後、研究室メンバー全員が集まって、論文速報とセミナーをしています。論文速報では、博士学生以上が持ち回りで最近公開された論文を紹介し、全員で議論しています。セミナーでは、他大学の研究者を招いて、研究内容を約1時間にわたって紹介して頂いています。

この研究室行事を通じて、素粒子論業界の流行を知るだけでなく、論文を読むだけではなかなか身につかない論理性や着眼点を養うことができます。また、この場から新しい研究の構想が生まれることも少なくありません。

研究室全体としての主な行事は、この毎週水曜日の午後だけです。残りの時間は、特に拘束はありません。各自が自己の裁量で、活発に議論しながら自由に研究をしています。



論文速報風景。発表者の書いた式の内容について、皆で考察している場面。右上には、かつて本研究室に在籍していた4人のノーベル物理学賞受賞者の肖像写真が飾られている。

3. 入学後と進路

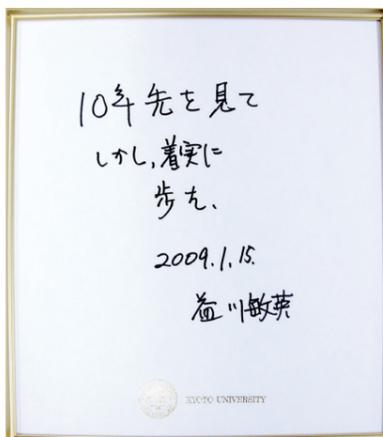
修士1回次は、物理学第二分野の同期学生と同室になります。ゼミ漬けの生活を1年間送り、素粒子理論研究に必要な知識を基礎から積み上げると同時に、分野を横断する広い視野を身につけます。また、修士1回次から研究を始める人もいます。

修士1回次の10月から、素粒子論研究室に席が配置されます。

修士2回次の4月に、興味を持っている研究内容に関連した論文紹介をしてもらいます。その内容をテーマに、修士論文の研究を行う人が多いようです。11月に行われる研究室内の修士論文中間発表会までには、ある程度の見通しが立っていることが求められます。必要であれば、スタッフのサポートも受けられます。

博士課程に進むと、本格的に研究活動が始まります。本研究室は人数が多く、多様な知識を持つ人々がいます。また、既存の研究に囚われない新しい発想を受け入れる風土があり、あなたの独自性のある研究が実現できる場所があります。

博士課程修了後は、半数が素粒子論研究を続ける道に進みます。博士の一般企業就職については、研究で培った論理的思考力を武器にする人もいれば、研究の合間に就職に向けた知識を独学で習得する人もいます。研究と就職、どちらの道に進んだとしても、それぞれの分野で活躍している卒業生がたくさんいます。あなたの未来につながる選択として、ぜひ素粒子論研究室を考えてみて下さい。



2008年度ノーベル物理学賞を受賞した益川さんが、記念に研究室に寄せたサイン。

4. 現象論研究

現象論研究は、素粒子実験や宇宙観測実験の結果と整合性が取れた、現実的な素粒子モデルを構築することを目的としています。

現在の素粒子論では、加速器実験で観測されているTeVスケールまでの物理は、場の理論を用いて記述される「標準模型」により精度良く説明できています。しかし、標準模型の枠内では説明できない暗黒物質の存在や標準模型が持つ構造（階層性）の起源、あるいは初期宇宙におけるインフレーションの機構など、未だ多くの問題が残されており、それらを解決する新しいモデルが必要とされています。

標準模型を越える物理を説明する新しいモデルは既に数多く提案されていますが、近年ではCERNにおけるヒッグス粒子の発見を始め、標準模型の確かさが強固になる一方で、超対称粒子などの期待されていた新物理の証拠は見つかっていません。このような状況で、依然としてある諸問題を解決するべく、これまでにない新しい発想や着眼点が求められています。

そして、よいモデルとは予言力の強いモデルであり、それは少数のパラメータから多くの現象を説明できるものを指します。僅かなモデルの拡張から可能な限り多くの問題を解決しようという試みもなされています。

(以下研究例)

- ・ ヒッグス粒子に関連した高エネルギー理論の探索
- ・ 暗黒物質、ニュートリノ質量を説明するモデルの構築
- ・ 複数の未解決問題に答える最小限のモデル拡張
- ・ プランクスケールの物理と階層性問題の解決に向けた研究
- ・ 超弦理論の構成から作られる、現象論的に有用なモデルの解析
- ・ 新理論の実験的検証方法の考案

5. 理論研究

プランクスケールと呼ばれる、とても小さい長さスケールの物理を説明するためには、重力を量子論的に扱う「量子重力理論」が必要であると考えられています。そして、量子重力理論では物質と時空が統一的に記述されることが期待されています。理論研究における大きな目標の1つは、この量子重力理論の定式化です。

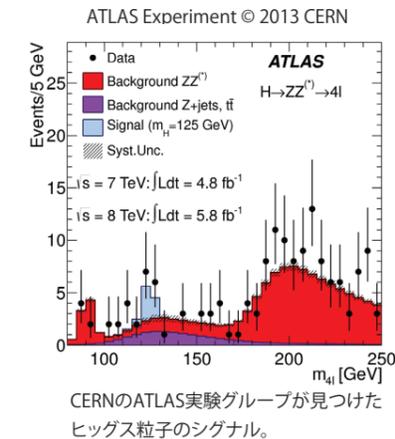
標準模型と重力を統一する理論の有力候補として「弦理論」があります。これは世界の基本要素を空間1次元方向に広がった弦であると仮定するものです。

弦理論の仮定は単純ですが、ここから生まれる物理は多彩です。もし本当に弦理論の仮定が正しければ、私たちの時空が4次元である理由など今までの理論では説明が難しかった根本的な問題も一気に解決できる可能性があります。しかし現状では、弦理論の非摂動論まで含めた定式化は完成していません。そのため、弦理論の持つ性質を様々な方法で理解しながら、弦理論の全貌を解き明かそうとしています。

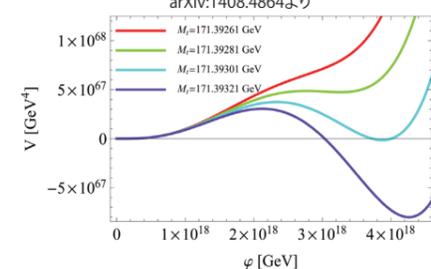
また、弦理論だけでなく、場の理論の研究も盛んに行われています。特に、場の理論の非摂動的側面は、未だに理解されていない部分が多く残されており（カラー電荷のとじこめ、QCD相図、標準模型のパラメータのUVでの振る舞いなど）、理論研究における中心的な課題の1つになっています。素粒子論研究室では、QCD相図の解明に向けて数値計算の新しいアルゴリズムを開発したり、プランクスケールまでの物理を繰り込み群を用いて解析するなど、この方面でも多種多様な研究を行っています。

(以下研究例)

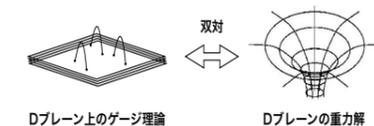
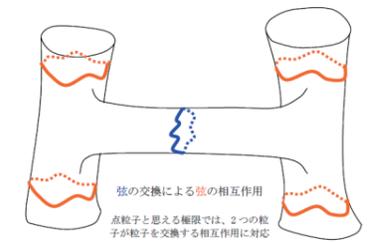
- ・ 行列模型による超弦理論の非摂動的定式化と、時空の創発の解明
- ・ 弦の場の理論を用いた、非摂動的定式化
- ・ 弦理論の構成から現れる、ゲージ理論と重力理論の対応
- ・ 超弦理論の可積分変形
- ・ 非可換ゲージ理論の解析
- ・ 膜の量子論の研究
- ・ 厳密くりこみ群の手法の開発
- ・ 符号問題の解決に向けた研究



CERNのATLAS実験グループが見つけたヒッグス粒子のシグナル。



標準模型のヒッグス粒子が感じるポテンシャル。物質の質量次第で性質が大きく異なる。



Dブレーン上のゲージ理論とDブレーンの重力解。ある種のゲージ理論が、より高次元の重力理論と双対関係にある。

基礎物理学研究所 素粒子論グループ

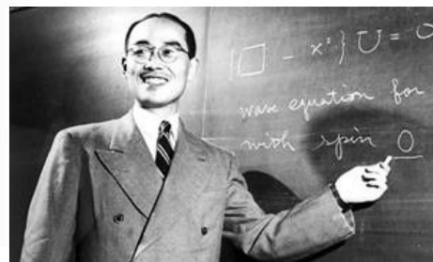
プロフィール：2010年度以降の学生のデータ

修士課程入学者 35名 修士課程在学中9名、他大学出身者23名
 (北大、東北大、東大、東工大、信州大、名大、阪大、大阪市大、神戸大、広島大、慶応大、早稲田大、九州大、茨城大)
 修士学位取得者 24名 うち博士課程進学者20名、他は一般企業へ就職
 博士課程入学者 24名 博士課程在学中5名
 博士学位取得者 20名 研究機関などへ14名、他は一般企業へ就職



湯川記念館(1952-)と湯川博士の銅像

基礎物理学研究所は、湯川秀樹博士の日本人初のノーベル物理学賞受賞を記念して設立され、湯川博士は初代所長を務めました。以降も、2008年にノーベル賞を受賞した益川敏英博士(第7代所長)をはじめとする著名な物理学者が歴代の所長に就任していません。



湯川秀樹博士(1949)

本研究所では、年に複数回の国内・国際研究会が開催されるため、国内外から集まる参加者たちと議論・交流する機会も多くあります。また、数日から数ヶ月間の滞在者を受け入れる制度があり、所外の研究者との共同研究も盛んです。

研究紹介

素粒子物理学の目的は、物質の最小構成要素とそれを支配する自然法則の解明にあります。標準模型は、現在確立している最も基本的な素粒子の理論ですが、万物の究極理論と考えるには不十分な問題があります。本研究グループでは、標準模型を超えた、自然界の統一的な基本法則の解明を目指しています。

超弦理論

Superstring Theory

現在のところ、自然界は大きさのない点粒子である素粒子によって記述されると考えられていますが、重力を量子論として矛盾なく取り込むことができないなどの理論的な困難があることが知られています。この問題を解決する理論として最も有望視されているのが、超弦理論と呼ばれる理論です。これは素粒子が点ではなくひも状をしているという仮説に基づく理論で、重力を矛盾なく含み、あらゆる物質とそこに働く力を統一的に記述する大変美しい理論です。

本研究グループでは、超弦理論を通じて素粒子の性質の統一的理解や宇宙誕生の謎の解明を目指す研究、量子重力理論の研究、超弦理論の理論的な構造を解明する研究、重力とゲージ理論の等価性(ホログラフィー原理)の研究など、様々な研究がなされています。特に近年では超弦理論を数学、原子核理論、物性理論、量子情報理論、ブラックホールの研究などの幅広い分野へ応用する研究も盛んに行われており、本研究グループでも活発な議論がなされています。



Quantum Gravity

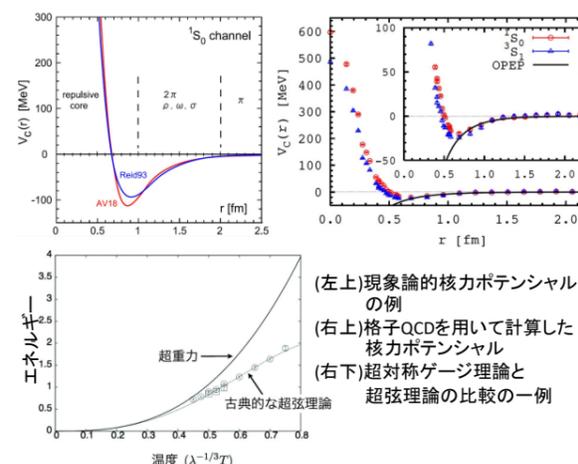
量子重力

一般相対性理論は、重力の古典論としては大きな成功を収めている一方で、物理学の基礎理論の一つである量子論との整合的な定式化がなされていません。それらを統一する量子重力理論は、時空間の本質的理解による新たな自然観や、宇宙の創成やブラックホールなどの強重力領域の物理学を記述する基礎理論として新たな宇宙像を与えると期待されています。本研究グループでは、時空を物理的実体とする模型(例:テンソル模型)や、非可換時空間、超弦理論などによる研究が行われています。



非摂動的な場の理論

Non-perturbative Field Theories



(左上)現象論的核力ポテンシャルの例
 (右上)格子QCDを用いて計算した核力ポテンシャル
 (右下)超対称ゲージ理論と超弦理論の比較の一例

場の量子論は素粒子の振る舞いを記述する枠組みで、無限自由度の量子力学として定式化されます。弱結合では摂動論が有効ですが、クォークとグルーオンの力学を記述するQCDなどの強結合の理論の解析には格子空間に理論を定義する格子上の場の理論を用いた数値計算が威力を発揮します。モンテカルロシミュレーションを用いた格子QCDでは、クォークの束縛状態であるハドロン質量などを計算する事が可能です。最近では、陽子や中性子の間に働く核力(湯川博士はこれを説明するために π 中間子を導入した)などのハドロン間相互作用が計算できるようになっています。

数値的な手法は、超弦理論の非摂動的性質を調べる事にも使われるようになってきています。また数値解析だけでなく、超対称性を持つ系の研究を通じた場の理論の非摂動的な側面の解明も試みられています。

Phenomenology

現象論

素粒子論は現在、大きな転換期を迎えつつあります。ヒッグス粒子を発見したLHC実験は、再稼働して標準模型を超える新たな物理現象への手がかりを得ることが期待されています。また高エネルギー宇宙線の観測、ダークマター探索、宇宙マイクロ波背景放射の精密測定なども含め、標準模型を超える物理を探るアプローチは多岐にわたっています。現象論は、標準模型とそれを超越する物理法則を解明するために、実験や観測から得られる事実に基づき、ボトムアップ的な視点を軸として具体的な理論を構成・解析し、研究を行う分野です。例えば、超対称性や余剰次元を用いた理論について、実験・観測をうまく説明するモデルの構築、及び既存のモデルの内容と観測データとの詳しい照合などが行われています。



(左)LHC (右)ATLAS実験
 写真提供: CERN ATLAS実験グループ <http://atlas.kek.jp/>



スタッフ陣が充実しているのに加え、PDの人数が多く、活気のある研究室です。

2020年12月 遠足にて

原子核理論：物理学第二教室・原子核理論研究室

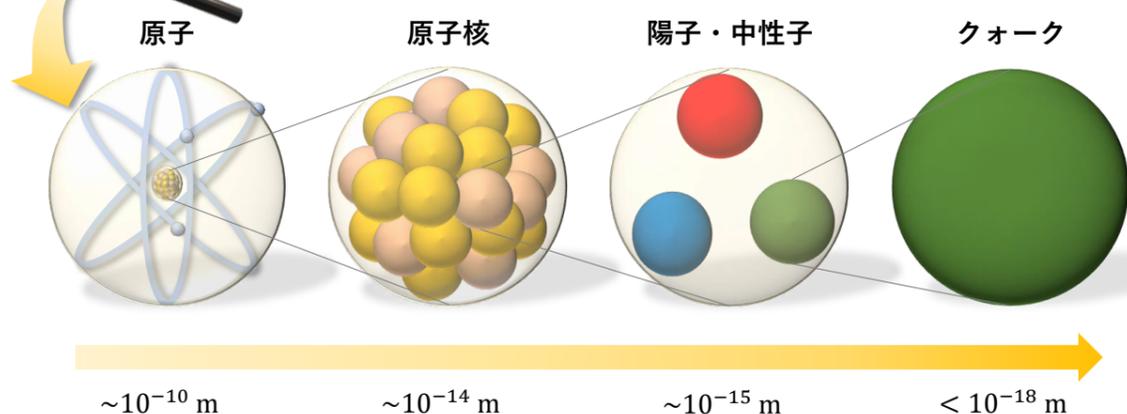
プロフィール：過去 10 年の実績

修士課程入学者 28 名
 修士学位取得者 26 名 うち博士課程進学者 21 名、他は一般企業に就職
 博士学位取得者 21 名 うち大学などの研究機関 12 名、他は一般企業に就職

この研究室に関するワードを抽出しました。何か気になるものはありますか？



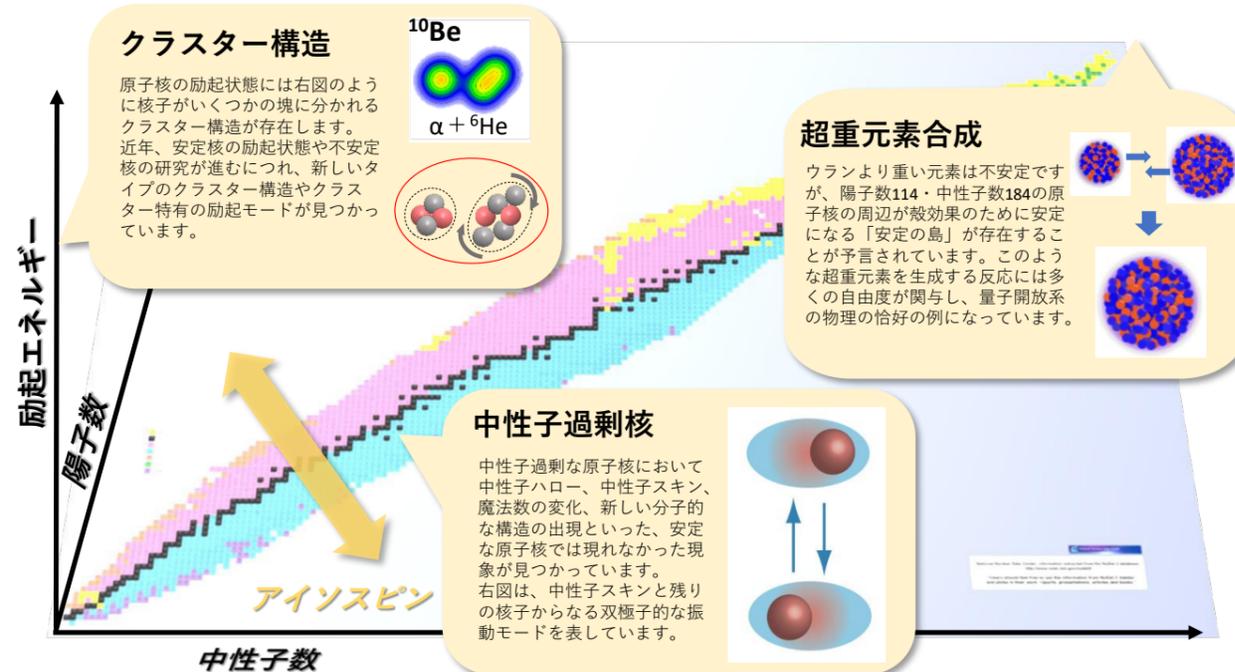
あらゆる物質は原子により構成されています。原子の中心に存在するものが原子核で、その周りを電子が覆っています。原子核は陽子や中性子（核子）から構成され、核子はさらにクォークによって構成されていると考えられています。これらクォークから構成される粒子は強い相互作用をし、ハドロンと呼ばれます。原子核はハドロンから構成される有限量子多体系であり、ここでは様々な物理現象が姿を見せます。



- ✓ 私たちの研究室では原子核・ハドロンの構造や動力学、高温高密度でのクォーク・ハドロン物質の諸性質など、「強い相互作用」に基づく物理現象の理論的研究を2つのグループ（核多体、クォーク・ハドロン）に分かれて行なっています。
- ✓ 核多体系グループでは、フェルミオンである核子の集合体としての原子核に現れる様々な現象を研究することで、有限量子多体系の不思議を解明しています。
- ✓ クォーク・ハドロングループでは、強い相互作用の基礎理論である量子色力学(QCD)に基づいてハドロンの性質や極限状態の物質の性質を理論的に研究しています。

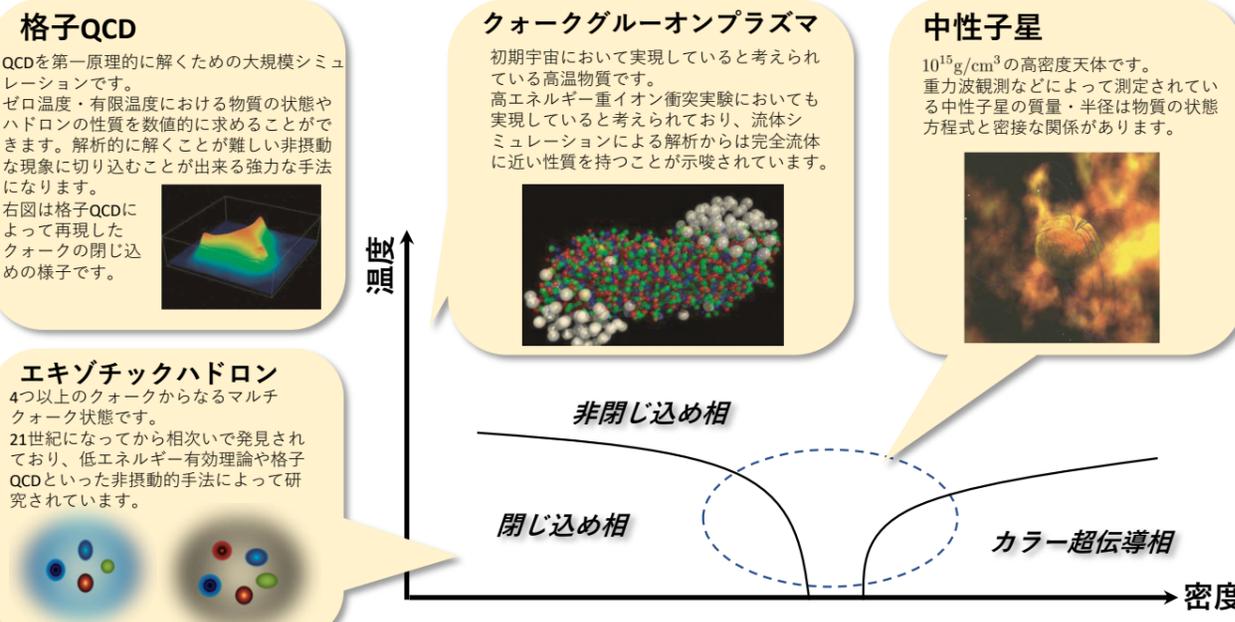
核多体系グループ

核多体系グループでは、強い相互作用をする有限量子多体系に現れる多様な現象を研究しています。近年の実験技術の進歩に伴い、研究対象が安定核の基底状態や低励起状態に留まらず、高励起状態、中性子過剰核やハイパー核へと飛躍的に広がっています。



クォーク・ハドロングループ

クォーク・ハドロングループでは、物質の極限状態であるクォーク・グルーオンプラズマ（高温極限）や中性子星（高密度極限）の系統的な研究を行ったり、「強い相互作用」の基礎理論である量子色力学 (QCD) に基づいた第一原理計算（格子QCD）などを用いて、ハドロンの構造や動力学を下部構造であるクォークとグルーオンのレベルから理解しようとしています。



エキゾチックハドロン
 4つ以上のクォークからなるマルチクォーク状態です。21世紀になってから相次いで発見されており、低エネルギー有効理論や格子QCDといった非摂動的手法によって研究されています。

原子核理論：基礎物理学研究所 原子核理論グループ

プロフィール：過去6年間の実績(2015-2021年度)

修士入学者 6名(他大学より1名)
 修士学位取得者 7名(進学6名、企業就職1名)
 博士学位取得者 4名(PD2名、企業就職2名)

「原子を甲子園球場とすると原子核はその中央に置かれた1円玉だ」というたとえ話は原子核の大きさをわかりやすく伝えるためによく使われます。スタンドにいる私たちの目にはそれは取るに足らない小さな点ですが、マウンドに紛れ込んだアリから見ればそれは不思議な模様をした大きな円盤です。同じように、原子核は私たちには想像もつかないくらい小さいけれど有限の大きさをもっています。

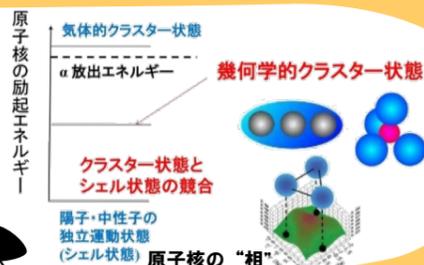


私たちは、大きくわけて3つのテーマに沿った研究を進めています

- 多くの核子から構成される原子核の構造や反応
- QCD真空に生じる創発的な現象としてのハドロン
- 量子色力学(QCD)に基づく高温・高密度核物質とクォーク・グルーオン・プラズマ

核子多体系

中性子過剰核において、様々な異なった構造が励起エネルギーの関数としてどう表れるかを研究。原子核反応、超重核生成なども研究。



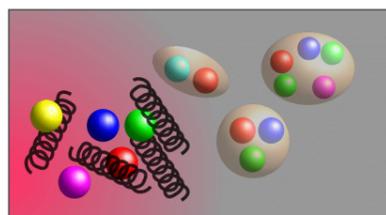
QCDとハドロン

クォークとグルーオンはハドロン内部にのみ観測され、単独で取り出したものはいない。クォークとグルーオンからなる量子多体系を基本理論(QCD)とし、その真空に生じる創発的な現象としてハドロンを理解することを目指す。



高密度核物質とクォーク・グルーオン・プラズマ

実験的に生成が可能になった、クォークとグルーオンからなるQCD物質の性質や、通常のハドロン物質との間の相転移を、QCD有効模型や輸送理論等を用いて研究。



クォーク・グルーオンからハドロンへ



各人がこれらの研究テーマに沿ってそれぞれ研究を行っていますが、それらはアリの巣のように互いに密接に関連し、クォーク・グルーオンのような小さな世界から、中性子星のような大きな世界にまで広がっています。

基礎物理学研究所では、日ごろから国内・国外で活動している研究者を招へいし、最先端の研究活動の様子を聞くことができます。彼ら彼女らと議論を行い、理解を深め、さらにそこから共同研究がはじまることもあります。もちろん私たち自身も、世界各国にある研究所や大学などの研究機関へ出かけ、国内・国外を問わず世界で活躍しています。このように、世界の最先端で活躍している研究者と接する機会が多くあります。

また、大学院教育は物理学第二教室の原子核理論研究室と協力して行っています。

天体核物理学：物理学第二教室 天体核物理学研究室

プロフィール：過去9年間の実績

修士入学者 24名中、他大学からの進学は7名(慶應大、東大、東邦大、名大、立教大)
 修士学位取得者 22人 うち博士課程進学者18人、企業等就職者3人、他分野へ転出1人
 博士学位取得者 20人 うち14人が研究機関、企業等就職者6人

天体核研究室では日々、宇宙の謎を解き明かすための理論的な研究を進めています。その研究対象は宇宙の構造から星の形成過程まで多岐に渡ります。これらの研究対象は互いに関連しているため、天体核研究室の構成員は自分の研究対象を狭めることなく幅広く研究を行うことが奨励されています。日本国内および海外の研究者とも協力的に研究を進めており、合同のゼミや共同研究も盛んに行われています。とりわけ、基礎物理学研究所の宇宙グループとは教育・研究の両面で密接に協力しています。私たちの研究は主に重力、宇宙論、天体物理学に大別することができます。以下ではこの3つの分野について簡単に紹介します。

重力

アインシュタインは、およそ100年前にニュートンの重力理論に代わる新しい基礎理論、一般相対論を提唱しました。一般相対論が予言する“ブラックホール”は興味深い研究対象の1つです。ブラックホール解も最初の発見から100年が経ちましたが、未解決問題も数多く残されています。近年では超弦理論などの高次元時空の理論に動機付けられた重力理論も研究されています。本研究室では様々な角度から4次元および高次元でのブラックホールや重力理論について研究してきました。

一般相対論は時空の歪みを伝える重力波(時空のさざ波)の存在も予言しました。重い物体が速く運動するとき、より大きな振幅の重力波が放出されます。2015年9月、アメリカの重力波検出器LIGOは、重力波信号の初検出に成功しました。太陽に30倍ほどの重さのブラックホール二つが合体し、最終的に一つのブラックホールになる際に放出された重力波信号でした。2017年8月には連星中性子星の合体に伴う重力波を検出し、その後、合体に伴う電磁波信号が様々な波長帯で観測されました。得られた重力波、電磁波のデータを詳細に解析することで、ブラックホール、中性子星等の強重力場の探査、一般相対論以外の重力理論の検証など全く新しい研究が新たに展開しています。

日本では、低温鏡技術を採用した重力波検出器KAGRAが完成し、2020年2月下旬から4月上旬にかけて観測運転を行いました。現在はさらなる性能向上に向けたアップデート作業が続けられています。重力波の関連分野は、物理学において最もホットな研究分野の一つです。天体核研究室では重力波に関連する様々な理論的研究が活発に行われています。重力波の波形から、波源となった天体の情報(質量やスピンなど)をどのように効率よく引き出すのかといったデータ解析面での検討も進められています。



ブラックホール-ブラックホール連星の合体(イメージ)

宇宙論

宇宙論とは宇宙そのものの来し方行く末を明らかにしようとする研究分野です。その現代的な研究は、1920年代の一般相対性理論に基づいた膨張宇宙論にはじまりました。1940年代にビッグバン宇宙論が提唱され、高温高密度の初期宇宙の名残として軽元素の生成の説明と宇宙マイクロ波背景放射(CMB)の存在の予言に成功しました。1980年代にはインフレーションシナリオが登場し、宇宙初期の加速膨張により現在の宇宙の持つ高い平坦性、一様性に合理的な説明がもたらされたと共に、星や銀河といった構造の種としての原始揺らぎの性質についての予言が得られました。このように構築されてきた宇宙理論と、現在までに得られた種々の観測的証拠によって、「標準宇宙モデル」(一様かつ等方であって通常の物質に加えダークマターと宇宙項とから構成される宇宙モデル)は既に確立されたかに見えます。

天体核物理学：基礎物理学研究所 宇宙グループ

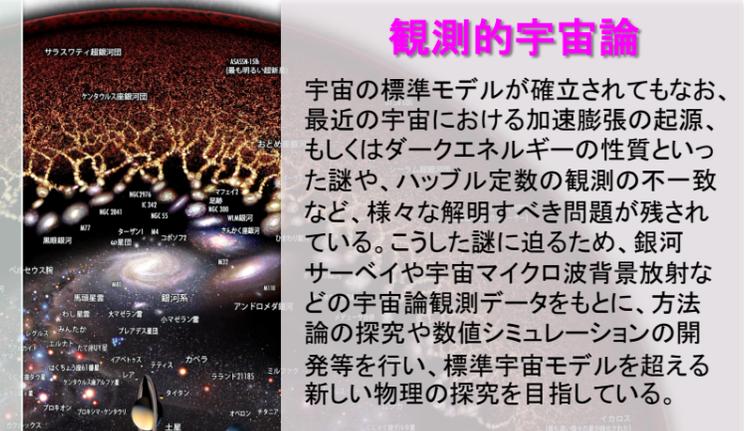
プロフィール：過去13年間の実績

修士課程入学 25名 うち他大学出身者 5名 (東大、阪大、東邦大、海外)
 修士学位取得者 22名 うち博士課程進学者 17名、一般企業就職 5名
 博士学位取得者 12名 うち研究分野 8名、一般企業就職 4名

宇宙や素粒子の世界に見られる極限的な構造を、一般相対論と素粒子論を両輪に、天文観測データ、素粒子実験データ、計算機シミュレーション等を駆使して解明し、現代的な宇宙観・物質観・天体形成構造論の確立を目指す。

高エネルギー天体物理

宇宙では地上実験を遥かに超える高エネルギー、強重力、高密度、強磁場が実現されており、そこでは日常的に高エネルギー天体物理現象が繰り広げられている。近年、光子に加え重力波・ニュートリノ・宇宙線宇宙を探る多粒子(マルチメッセンジャー)の時代が到来し、一般相対論、量子論、統計力学、電磁気学、流体力学などさまざまな物理理論を駆使して、高エネルギー天体現象全般に渡る新しく面白い謎に挑戦している。

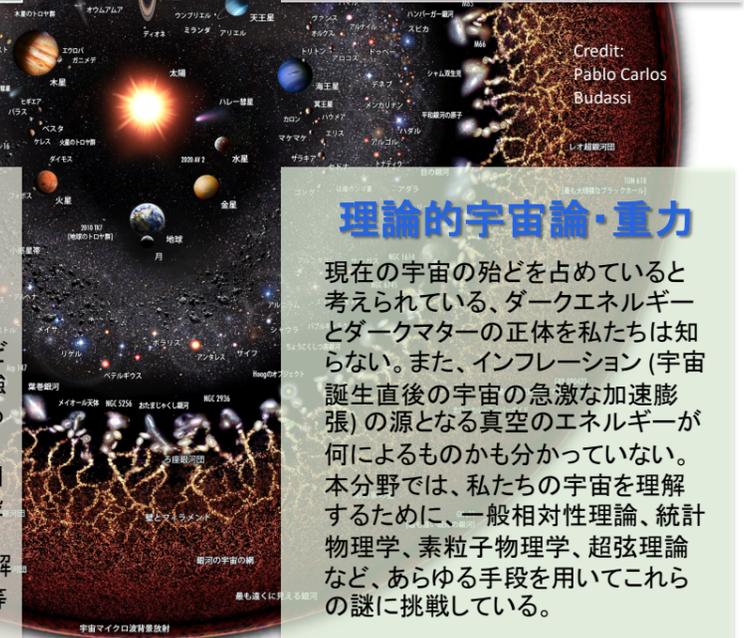


観測的宇宙論

宇宙の標準モデルが確立されてもお、最近の宇宙における加速膨張の起源、もしくはダークエネルギーの性質といった謎や、ハッブル定数の観測の不一致など、様々な解明すべき問題が残されている。こうした謎に迫るため、銀河サーベイや宇宙マイクロ波背景放射などの宇宙論観測データをもとに、方法論の探究や数値シミュレーションの開発等を行い、標準宇宙モデルを超える新しい物理の探究を目指している。

重力波宇宙物理学・数値相対論

2015年Advanced LIGOにより重力波が検出され、重力波を用いた新しい天文学が始まった。ブラックホールや中性子星などの相対論的天体同士の衝突のような、強重力場のもとでの複雑な現象を理解するためのアプローチに、一般相対論と数値シミュレーションを組み合わせた、数値相対論がある。本研究所では、数値的一般相対論の手法を用いてアインシュタイン方程式を解き、重力波源の運動状態の解明および重力波の波形の導出すること等を研究対象としている。



理論的宇宙論・重力

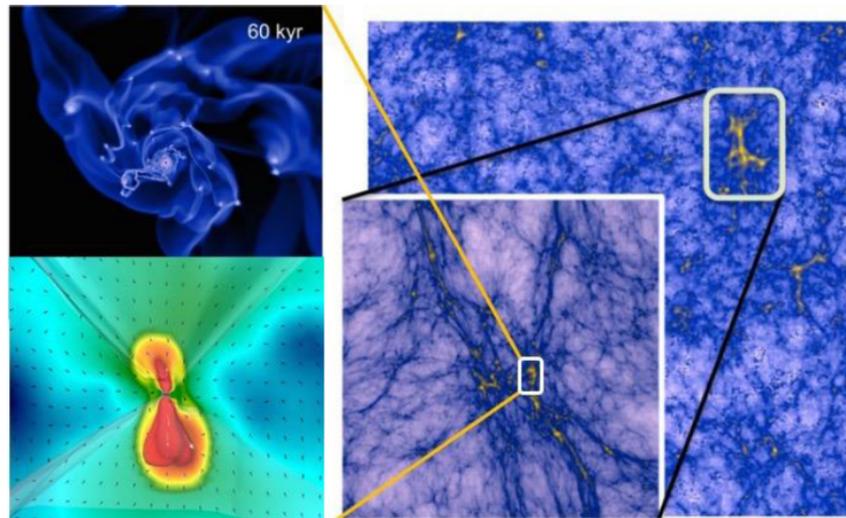
現在の宇宙の殆どを占めていると考えられている、ダークエネルギーとダークマターの正体を私たちは知らない。また、インフレーション(宇宙誕生直後の宇宙の急激な加速膨張)の源となる真空のエネルギーが何によるものかも分かっていない。本分野では、私たちの宇宙を理解するために、一般相対性理論、統計物理学、素粒子物理学、超弦理論など、あらゆる手段を用いてこれらの謎に挑戦している。

天体物理学

天体物理学は基礎物理学を用いて宇宙における種々の構造の起源・進化を研究する学問です。多様な天体対象を扱うのに、あらゆる物理学の知識を総動員して挑みます。我々の研究室では基本的に自ら興味を持ったテーマを自由に研究することができますが、最近では特に初期宇宙における天体形成の研究が活発に行われています。

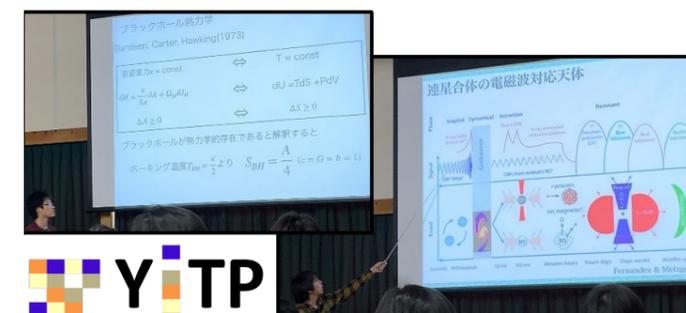
ビッグバンから始まる現代宇宙論の標準的な描像では、宇宙138億年の歴史のある時点で宇宙最初の星(初代星)が誕生したはずですが、宇宙論から初期条件が非常に高い精度で定まっているため、その後の天体(星)形成の詳細を理論的に予測することが出来ず。現在広く受け入れられている理論予想では、ビッグバンから数億年後に、太陽の100倍程度の質量を持つ大質量星として初代星が誕生すると言われています。この初代星誕生の時期は未だ現在の観測の届かない遠方宇宙に相当しますが、世界中で計画されている将来の大望遠鏡と観測機器の多くが、まだ見ぬ初代星をそのターゲットにしています。何とかその姿や痕跡を捉えようと、世界中の研究者が挑戦を続けているのです。

今著しい進展を遂げつつある重力波天文学も例外ではありません。これまでに複数例の太陽の数十倍の質量を持つブラックホール連星からの重力波が観測されましたが、その起源のひとつとして初代星が挙げられています。重力波の観測例はこれから数年間で爆発的に増加するのが確実です。重力波という全く新しい観測手段を通じて、様々な未知の天体現象の実像が初めて明らかになるのです。特に、重力波と関連の深いブラックホールや中性子星連星の形成と合体現象、宇宙最大の爆発現象であるガンマ線バーストなどは大きな注目を集め、今まさに分野が大きく拓けようとしています。我々の研究室では重力波をひとつの軸としつつ、重力、宇宙論の両分野とも連携しながら天体物理学の研究が進んでいます。

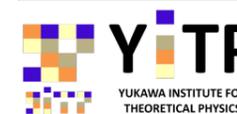


宇宙の大規模構造と初代星の形成(シミュレーション)

ぜひ天体核研究室で一緒に研究しましょう！



中間発表会の様子



日本全国の優秀な研究者が集う研究所、世界的な研究者が滞在する研究所、それが京都大学基礎物理学研究所です。本研究所では、様々な日本人、外国人招聘プログラムを持っており、ノーベル賞クラスの外国人研究者も数多く訪れています。また、外国人の研究者や留学生との交流の機会が多いため、日本に居ながらにして自然と国際性をはぐむことができます。興味をお持ちになった方は、基研HP (<http://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/>)をご覧ください。

ビーム物理学 研究室

プロフィール：過去 16 年間の実績

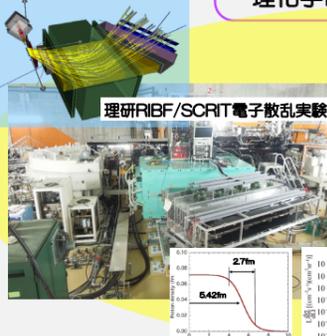
修士入学者 22 名中 他大学 8 名 (千葉大、東京理科大、神戸大、立命大、茨城大)

修士学位取得者 18 名 (博士課程進学者 8 名、一般企業就職 10 名)

博士学位取得者 12 名 (研究機関 8 名、一般企業就職 4 名)

加速器と加速器を用いた不安定原子核研究装置の要素技術開発を行うとともに、それを用いた不安定核物理研究を行う。扱う量子ビームは、電子ビーム (100~300MeV)、重イオンビーム (keV/u~200MeV/u)。理化学研究所・仁科加速器科学研究センターとの連携により、これらのビームの生成、加速、蓄積等のビーム取扱い技術を組み合わせて、蓄積リング内で引き起こされる散乱や核反応などを通して不安定原子核の構造および反応研究を実施する。

理化学研究所仁科加速器科学研究センターとの共同研究



電子弾性散乱による短寿命不安定原子核の陽子(電荷)密度分布

電子散乱は、原子核の基本構造を明らかにしてきた古典的手法であるが、不安定核の電子散乱は、今ようやく実現できる時代が来た。理研RIBFの「SCRIT施設」は、世界初で唯一の不安定原子核の電子散乱実験施設である。電子蓄積リング中で、100~300MeVの電子ビーム軸上にISOL (ERIS)から取り出された僅かな量の不安定原子核をトラップし、電子が不安定核に衝突して弾性散乱するときの角度分布を測定する。その分布から原子核の陽子(電荷)密度分布を決める。特に原子核の表面付近の構造を明らかにする。加速器から、不安定核生成技術、検出器技術などの、全ての要素技術開発を行う。



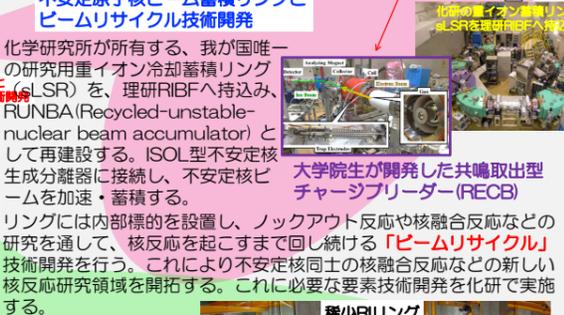
RUNBAファシリティ at 理研RIBF

RUNBA (Recycled-Unstable Nuclear Beam Accumulator) は、不安定原子核を蓄積・再加速するための装置である。京大の加速器を理研RIBFに建設し、大学院生が開発した共鳴取出型チャージリーダー(RECB)を用いて、不安定原子核を蓄積・再加速する。



Rビームファクトリー (埼玉県和光市)

Rビームファクトリーは、理研RIBFに建設された質量精密測定のための専用蓄積リングである。元素合成過程(r-プロセス)の解明を目指して、中性子過剰核を中心に、特に生成量の少ない同位体の質量を測定する。R3には、BigRIPS (飛行同位体分離器) で目的のRIが発生した瞬間に入射キッカーを作動させるISSI (isotope-selectable self-triggered injection) 技術が投入され、その1粒子だけを蓄積する。また磁場構造は、サイクロトロンと同様だが、少し超高精度で調整された等時性を持つ。入射1ms後に取り出し、周回周期を1ppmの精度で測定することで、たった1イベントであっても、質量が1ppmで決定される。



不安定原子核電子散乱実験施設

不安定原子核電子散乱実験施設は、理研RIBFに建設された電子散乱実験施設である。電子蓄積リング中で、100~300MeVの電子ビーム軸上にISOL (ERIS)から取り出された僅かな量の不安定原子核をトラップし、電子が不安定核に衝突して弾性散乱するときの角度分布を測定する。その分布から原子核の陽子(電荷)密度分布を決める。特に原子核の表面付近の構造を明らかにする。加速器から、不安定核生成技術、検出器技術などの、全ての要素技術開発を行う。

宇治キャンパス化学研究所での研究



宇治キャンパス化学研究所 加速器施設

化学研究所・先端ビームナノ科学センターには、電子、陽子加速器と、それらの蓄積リングがあり、これらの加速器群とその形態を、理研と連携して、不安定核物理学研究の用途に適するよう再編する。

加速器施設の再編

重イオン蓄積リング (sLSR) を理研へ移動させた跡地を利用して、電子ビームドライブのISOL (不安定核生成分離器) を建設し、電子蓄積リング (KSR) を、再設計して改造する。

ISOL型不安定核生成分離器の建設と利用

100MeV電子ビームを標的物質に打ち込み、制動放射光子による (γ, n) 、 (γ, p) 反応を用いて、不安定核を生成し、質量を分離する装置。やがて、標的物質をウランにして、光核分裂反応を用いて、不安定核を生成することを目指す。

RI・RI核反応研究のためのRI標的の開発

理研で実施するビームリサイクル技術のための蓄積リング内部標的として、ISOLから取り出した不安定核を高密度でトラップする装置を開発、建設する。

電子蓄積リングとRI標的を組み合わせた光核反応研究

改造したKSRにRI標的を挿入し、蓄積電子ビームを衝突させることによって、超前方非弾性散乱を用いて γ 線 (光) 吸収反応 (γ^*, n) 、 $(\gamma^*, 2n)$ を起こさせ、不安定核のE1巨大共鳴の研究を行う。

宇宙物理学分野

太陽物理学	43
太陽・宇宙プラズマ物理学	44
恒星物理学	45
銀河物理学	46
理論宇宙物理学	47

目次・分科一覧

ご挨拶

分科紹介
物理学第一分野

分科紹介
物理学第二分野

分科紹介
宇宙物理学分野

大学院入試案内

ローレンツ鏡

太陽物理学 研究室

プロフィール：過去5年間の実績（括弧内は前々年度までの太陽・宇宙プラズマグループ所属もしくは委託研究生人数）

修士課程入学者 16(4)名
 修士号取得者 15(7)名中 博士課程進学 8(5)名
 博士号取得者 7(6)名中 研究機関 4名、官公庁 1名、民間企業 2名



附属天文台・太陽観測グループ

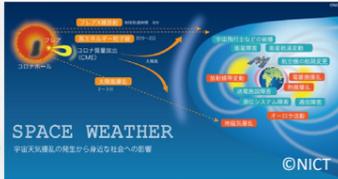
宇宙プラズマを「測る」新しい目を開拓して、
 太陽活動の謎に挑みませんか？

私たちが普段何気なくその恩恵に預かっている太陽は、宇宙に無数に存在する恒星の最も身近な例であり、その性質を詳細に観測できる唯一の恒星です。太陽が放つ光は、**温度や磁場**といった太陽の様々な情報を秘めています。これらの関係性を解明し、**太陽で起こる物理を明らかにすることが太陽物理学の目的のひとつ**です。そしてその関係性を他の多数の恒星の観測と照らし合わせ、**恒星物理の知見を広げることも可能**です。さらに、太陽を構成するプラズマは、**地上では再現できない大規模なプラズマ実験室**としての側面を持っています。



また太陽活動は、惑星間空間から地球の高層大気に至る、太陽・地球環境の変動の源です。太陽の突発現象に由来する短期的な変動は「**宇宙天気**」と呼ばれ、航空機や人工衛星を多用し、宇宙へと活動の場を広げる現代社会に無視できない影響を与えます。太陽活動の長期変動による影響は「**宇宙気候**」と呼ばれ、これまでに地球の大きな気候変動に関わってきたことが知られています。

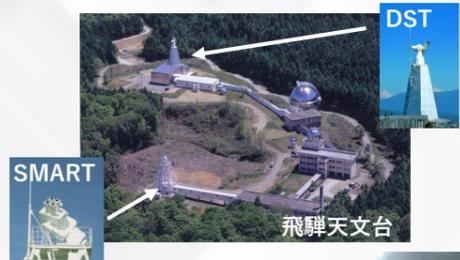
このように、太陽を研究することは、**太陽現象そのものを解明する重要性**に加え、遠くの星を見る天文学から惑星間空間、地球環境、そしてプラズマの物理学に至るまで、**非常に広範な分野との有機的なつながりを知るという重要性**を持ちます。私たちは様々な分野と連携し、研究を進めています。



飛騨天文台の望遠鏡

ドームレス太陽望遠鏡 (DST) 世界最大級の波長分散を誇る偏光分光観測装置を用いて太陽のスペクトルを得ることにより、太陽表面の磁場や速度場を詳細に診断することができます。

太陽磁場活動望遠鏡 (SMART) 太陽全面の高時間分解観測により、太陽フレアやフィラメント噴出などの大規模な活動現象をモニターし、それらのメカニズムを研究しています。噴出現象は、惑星間空間や地球磁気圏に多大な影響を与える可能性があります。これらの物理機構の解明や発生予測(宇宙天気予報)は、重要な研究課題です。



飛騨天文台での装置開発

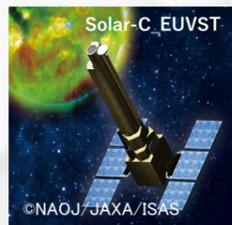
既存の装置を用いた観測だけでなく、新しい装置の開発を通して飛騨天文台が誇る望遠鏡の能力をさらに引き出すことで、世界の太陽研究に貢献しています。

- ・ユニバーサルチューナブルフィルター(UTF)の開発 (画像1)
- ・DST偏光分光観測装置の開発
- ・SMART-TEM偏光キャリブレーション
- ・機械学習を用いた太陽イベントの自動検出技術の開発

次世代の太陽観測装置



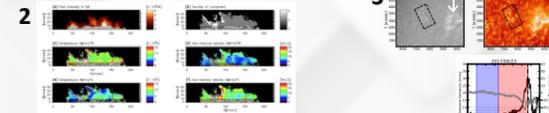
2021年に科学観測を開始する大口径望遠鏡、**DKIST (Daniel K. Inouye Solar Telescope)**、「ひので」後継機として2026年の打ち上げを目指す**Solar-C EUVST**など、次世代の太陽観測を担う大型機器の開発から利用まで、太陽観測グループは様々な場面で最新の太陽観測をサポートしています。DKISTによるこれまでにない高解像度な観測と、DSTの広視野を生かした観測を組み合わせ、太陽面の現象をマルチスケールで理解することが期待されます。また、Solar-C EUVSTによる紫外線分光データと、SMARTやDSTによる磁場データとの組み合わせは、太陽大気構造の緻密な理解を可能にするでしょう。飛騨天文台は、次世代の太陽観測にもなくてはならない重要な拠点です。



DSTやSMARTを用いた研究

- DST**
- ・プロミネンスの温度診断 (画像2)
 - ・太陽フレアに伴う、彩層発光スペクトルの解析
 - ・太陽紫外線放射の再現

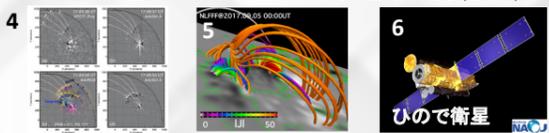
- SMART**
- ・フィラメント噴出の前駆運動、コロナ質量放出との関係 (画像3)
 - ・太陽フィラメント噴出と恒星の質量噴出の比較
 - ・アーチフィラメントシステムの形成過程
 - ・彩層プラズマ噴出を伴う小規模な増光現象の統計解析
 - ・太陽大気中の音波伝搬と磁場の関係



幅広い手法を用いたアプローチ

日本の太陽観測衛星「ひので」をはじめとする多くの観測装置のデータを用いた研究や、数値計算によるモデリングなど、飛騨天文台の観測装置以外にもあらゆる手段を用いて研究を進めています。

- ・フレアに伴う衝撃波(モートン波)の解析 (画像4)
- ・太陽高エネルギー粒子とコロナ質量放出の統計解析
- ・コロナ磁場数値モデリングを用いたフレア発生機構の解明 (画像5)
- ・non-LTE輻射輸送コードの開発
- ・深層学習を用いたフレア発生予測
- ・太陽ジェット現象におけるFIP効果の時間・空間的変動 (画像6)



太陽・宇宙プラズマ物理学 研究室

プロフィール：

(2021年度) 修士課程入学者 1名、修士号取得者 1名 (就職)、博士号取得者 2名 (国内研究機関 1名、就職 1名)、博士課程在籍 1名、修士課程在籍 0名

ここ6年間の動向

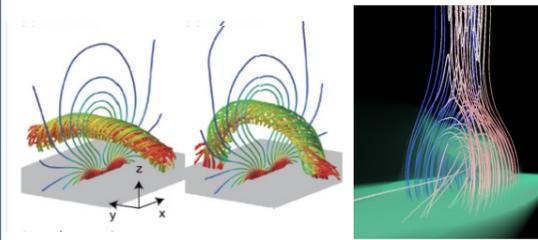
修士課程入学者 6名 (他大学出身者 0名)、うち修士号取得 6名 (博士課程進学 4名、一般企業就職 2名)
 博士課程進学者 6名 (他大学出身者 0名)、うち博士号取得者 4名 (海外研究機関 1名、国内研究機関 2名、一般企業就職 1名)



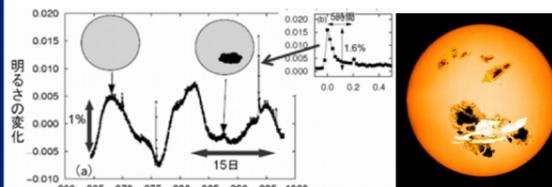
京都大学大学院 理学研究科 附属天文台 太陽・宇宙プラズマグループ

プラズマと磁場の織り成す天体現象を解明する

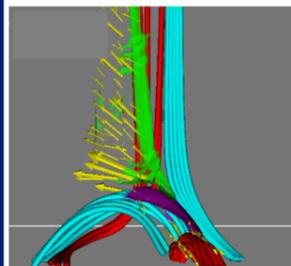
このグループでは、数値計算(シミュレーション)などを用い、**プラズマ(電磁流体)と磁場との相互作用**について、その**基礎物理過程から関連する天体現象まで**、**統一的に理解**することを目指して研究しています。



太陽フレアのシミュレーション。磁力線の上昇がフレアを誘発する(左図)。フレアで解放された膨大なエネルギーによってプラズマの温度が急上昇し、磁力線に沿って灼熱のループ構造が形成される(右図)。



太陽型星のスーパーフレアの明るさの時間変化(ケプラー衛星の観測データ) (左図)と、太陽型星のスーパーフレアの想像図(右図)。巨大な黒点群でスーパーフレア(白色)が起こっている。



MHDのスケール普遍性から存在が予想される極小のジェット状構造の形成機構を調べたシミュレーション。

宇宙では、**フレアと呼ばれる爆発現象や、高速なジェット現象など、膨大なエネルギーが短時間で解放され、物質の運動・熱エネルギーに変換される様子**が観測されています。そのエネルギー源は何か、背景の物理機構は何か、という問いに対して、「**プラズマと磁場との相互作用**」というのはしばしば極めて重要なアイデアとなります。なぜなら宇宙を満たす物質は大概プラズマ状態にあり、一方磁場は、そうした物質と相互作用して天体の大局的な構造を形成し、その過程で莫大なエネルギーを蓄積するからです。こうした現象は「**電磁流体力学(Magneto-Hydro-Dynamics; MHD)現象**」によって記述され、それらいわゆる「**MHD現象**」の理解は、天文学において非常に大きな意味を持つのです。

太陽は、そのMHD現象を間近で観測できるという点でも**天文学的に極めて重要な天体**です。最新の観測衛星をもってすれば、太陽表面上の数kmの構造を識別することが可能です。そうした詳細かつ豊富な観測データを背景として、太陽研究が天文学全体の発展に貢献した例は枚挙に暇がありません。とりわけ、実際に観測されるような

複雑な現象から物理的本質を究明するために、**数値計算(シミュレーション)**は強力なツールとなってきました。

また、2012年、我々のグループはケプラー衛星の観測データを用いて、太陽によく似た恒星で**スーパーフレア**(最大級の太陽フレアより10倍以上の規模のフレア)が起きていることを世界で初めて発見しました。しかし、スーパーフレアは発生機構が太陽フレアと同じものかさえわかっていません。このような未知の天体の性質を解明するには、実際に**観測**を行いデータを集めることが**必須**となります。

そこで我々のグループは、数値計算・観測の両方の手法を用い、「**太陽フレア**」や「**黒点形成**」など、太陽で見られるMHD現象を、「**磁気リコネクション**」や「**ダイナモ**」など、プラズマと磁場の相互作用の素過程から、**統一的・体系的に理解**することを目指しています。また得られた知見を、スーパーフレアなどの遠く離れた天体現象の解明に応用することにも取り組んでいます。

恒星物理学 研究室

プロフィール：過去5年間の実績

修士課程入学者 15名中 4名が他大学出身
修士号取得者 15名中 9名が博士課程進学、6名が就職
他大学からの博士課程編入者1名(大教大)
博士号取得者 7名中 5名が大学などの研究職、2名が就職

上田グループ (X線観測)

恒星質量ブラックホール

約10太陽質量以上の大質量星は、進化の最終段階に超新星爆発を起こし、恒星質量ブラックホールを形成します。恒星質量ブラックホールは、他の星と連星系をなすことで、ブラックホール連星となり、強い光を放射します。この光を観測することによって、強重力場における物理に迫ります。



©AstroArts

超高光度赤外線銀河

活動銀河核と関連の深い天体として特に重要なものが、赤外線で極めて明るく輝く超高光度赤外線銀河です。この天体は進化途中の銀河として注目されています。最新X線天文衛星NuSTARなどを用いた観測により、一部の超高光度赤外線銀河中心には埋もれた活動銀河核が存在することが発見されています。



©NASA

このグループでは、**ブラックホールの多波長観測**を行っています。主に**恒星質量・超巨大質量ブラックホール**を観測することにより、これらがどのように形成され、進化してきたのかを研究しています。

超巨大質量ブラックホール

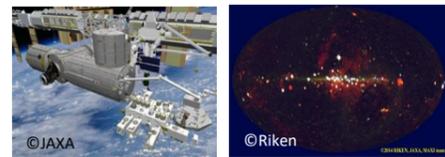
銀河中心には、太陽質量の約100万-10億倍の超巨大質量ブラックホールが普遍的に存在すると考えられています。この超巨大質量ブラックホールへと、質量が降着することによって、銀河中心が輝く現象が活動銀河核です。この活動銀河核を調べることによって、銀河中心の超巨大質量ブラックホールが、どのように形成され、銀河進化に影響を与えたのかを解明します。



©Princeton

全天X線監視装置MAXI

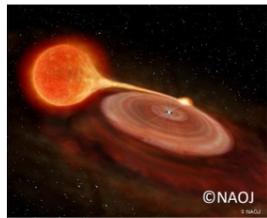
2009年7月、全天X線監視装置MAXIが国際宇宙ステーション「きぼう」に設置されました。私たちの研究室はこのMAXIのプロジェクトに携わっています。打ち上げから12年が経ち、X線天体発見・最新X線全天カタログの作成等様々な成果が得られています。



©JAXA

©Riken

激変星



激変星は、突発的に増光する天体で、白色矮星と晩期型主系列星の連星系です。晩期型星から流れるガスが白色矮星の周りに降着円盤を形成し、この降着円盤上での状態変化が様々な変動を引き起こします。この激変星を観測することによって、降着円盤の物理や星の進化の最終段階の解明に迫っていきます。



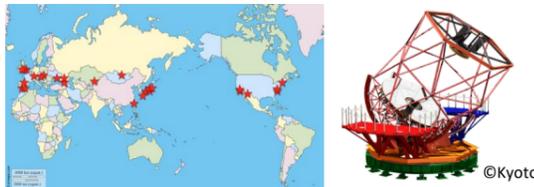
(2015年6月17日の可視画像データ)

X線新星

2015年6月、ブラックホール連星「はくちょう座V404星」が26年ぶりにアウトバーストを起こしました。今まで、ブラックホール近傍からの規則的な放射エネルギーの変動はX線でのみ観測されていました。しかし、私たちはそのような規則的な変動を**可視光**で捉えることに**世界で初めて**成功しました。研究成果はイギリスの科学雑誌「Nature」に掲載されました。

国際協力観測・京大岡山せいめい望遠鏡

私たちは、京都大学屋上40cm望遠鏡での観測に加え、国際協力観測網(VSNET)を主導しており、各国の望遠鏡をつなぎ、大規模な連続観測を行っています。また、**京都大学岡山天文台3.8mせいめい望遠鏡**を用いた突発天体の観測も精力的に行っています。



野上・加藤グループ (可視光観測)

このグループでは、**突発天体の可視光観測**を行っています。激変星・X線新星・スーパーフレア星などを観測し、これらの現象の物理に迫ろうとしています。

銀河物理学 研究室

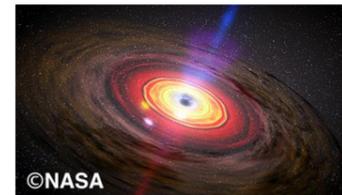
プロフィール：過去6年間の実績 (2016年度-2021年度入学)

修士課程入学者 16名中、他大学出身者0名
修士号取得者 14名中、博士後期課程進学者7名、民間企業就職者7名
博士号取得者 3名中、研究職就職者1名、民間企業就職者2名

当グループは、主に**銀河やクエーサーの観測的研究と観測装置の開発**を行なっています。

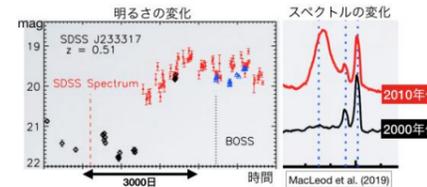
銀河・クエーサー

クエーサーの時間変動

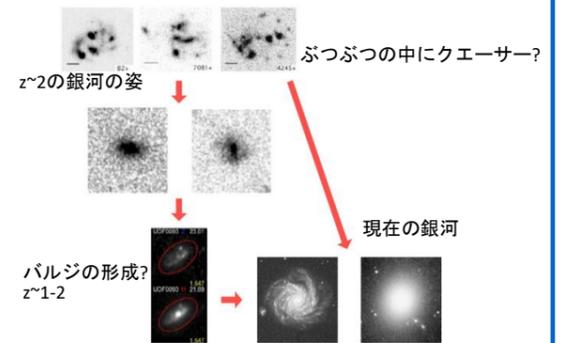


©NASA

宇宙に無数に存在する銀河の中心には、一般的に超巨大ブラックホールがあるとされています。そのようなブラックホールのうち非常に明るく輝く天体がクエーサーです。クエーサーの明るさやスペクトルの時間変動を観測することでクエーサーの構造を調査しています。



銀河・クエーサーの形成と進化



赤方偏移(z)1-3(宇宙が始まって20-60億年)は、銀河やクエーサーが最も活発に成長していた宇宙の激動進化期です。すばる望遠鏡やALMAを用いてこの時代の銀河進化の様子に迫り、円盤銀河や楕円銀河はいつどのようにできたのか、クエーサーはいつどこでできたのか等について研究を行っています。

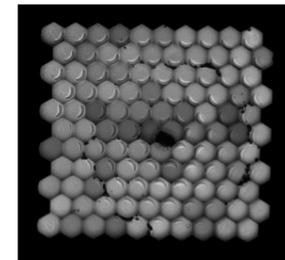
観測装置

せいめい3.8m望遠鏡

東アジア地域最大となる、主鏡口径3.8mの望遠鏡が2019年2月から観測を開始しました。軽量で高速駆動が可能なトラス構造や、世界的にも新しい分割鏡による主鏡など、自主開発技術が多く盛り込まれたユニークな望遠鏡です。望遠鏡の開発・運用を行っているメンバーの多くが当グループに所属していて、望遠鏡に取り付ける観測装置の開発も行なっています。



面分光装置 KOOLS-IFU



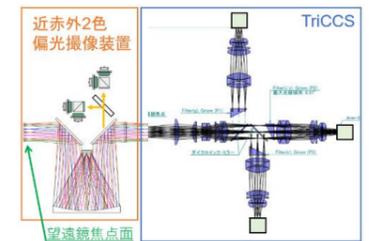
117本の光ファイバーにより、天体の様々な部分のスペクトルを同時取得できる装置です。銀河・クエーサーや重力波源などの突発天体の分光観測を目指します。

極限補償光学装置 SEICA



太陽系外にある木星型惑星の直接撮像を目指して、地球大気による像のボケを補正するための極限補償光学装置SEICAを開発しています。

可視3色高速撮像分光装置TriCCS + 近赤外2色偏光撮像装置



可視光の3波長帯での撮像観測と、近赤外の2波長帯での偏光観測を同時に行える装置です。突発天体や星間磁場などの観測を目指しています。

理論宇宙物理学 研究室

プロフィール：過去6年間の実績 (2016-2020年、2021年入学)

修士課程入学者 23名中、他大学出身者6名 (山口大、東北大、北京大(中国)、大阪市大、大阪大)

修士号取得者 19名中、博士後期課程進学者14名、就職者5名

博士号取得者 11名中、7名が大学など研究機関へ

目次
・ 分科紹介

ご挨拶

分科紹介
物理学第一分野

分科紹介
物理学第二分野

分科紹介
宇宙物理学分野

大学院入試案内

ローレンツ変換

ブラックホール 超新星爆発 惑星形成論 理論と観測

幅広い視野・柔軟な発想

ブラックホール降着円盤の理論

重力波放射
ジェット(噴出流)
ニュートリノ・電磁波放射
磁場
輻射場
電磁流
粒子加速
降着流
複雑な時間変動



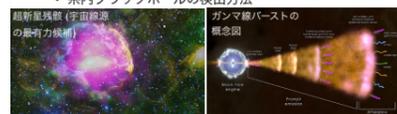
嶺重慎 教授



川中宣太 特定准教授

理論高エネルギー天文学

- 主な研究テーマ
- ・ 銀河系内宇宙線の起源
 - ・ 宇宙線原子核・電子・陽電子スペクトルの起源
 - ・ 超新星残骸?パルサー?新星?
 - ・ ブラックホール天文学
 - ・ 宇宙最大の爆発・ガンマ線バーストの中心エンジン
 - ・ 活動銀河核のX線スペクトル
 - ・ 系内ブラックホールの検出方法



恒星進化と超新星爆発の理論と観測
恒星進化と超新星爆発、宇宙の化学進化や物質循環の未解明問題に迫る。

流体シミュレーション
核反応計算
恒星進化計算
NASA/CXC/SAO
星間物質
超新星
地上・宇宙望遠鏡による多波長観測



前田啓一 准教授



Herman Lee 講師

超新星残骸の理論研究 宇宙の粒子加速器と高エネルギー輻射源

X線で光る衝撃波
粒子加速の現場
数百~数千万度の高温を持つ爆発した星の残骸
高エネルギーガンマ線
宇宙線の起源に繋がるか?

世紀を超える謎・宇宙線の起源に挑む(宇宙衝撃波粒子加速理論)
超新星残骸たちは銀河に彷徨う宇宙線をいかにして作っているのか?
爆発した星々における探偵業(多波長観測・流体シミュレーション)
超新星残骸に残る豊富な情報から星の進化と超新星爆発の仕組みを探る

惑星と生命の起源と進化

惑星形成論
太陽系形成標準理論「京都モデル」
惑星系はいかにして作られるのか?
太陽系は普遍的な惑星系なのか?

ハビタブルプラネット
次々と見つかる太陽系外の惑星たち
生命を宿す惑星の条件とは?
「第二の地球」は存在するのか?

天文学・地球惑星科学・生命科学を統合した総合学問



佐々木貴教 助教

宇宙物理学教室理論グループでは、宇宙物理学の様々な問題に対して理論的側面からのアプローチを行っています。研究手法は、アイデアと紙と鉛筆だけのものから、コンピューターシミュレーション、さらに時には観測家と共同して観測計画の立案や、実際に観測を行ったりと様々です。

2022 年度京都大学大学院理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻 修士課程大学院入試説明会

- 開催日時 2021 年 5 月 8 日(土) 9:30-12:20
(午後は Zoom による研究室紹介を行う研究室があります。)
- 開催方式 Zoom にて開催します。参加登録方法については下記 URL の院試情報のページをご参照ください。
<http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/education/inshi/index.html>
- 内容
 - 9:30-9:35 本専攻の概要について 専攻長
 - 9:35-10:05 修士課程入試について 副専攻長
 - 10:05-10:45 物理学第一分野の各分科の説明
 - 10:45-10:55 休憩
 - 10:55-11:35 物理学第二分野の各分科の説明
 - 11:35-11:50 宇宙物理学分野の各分科の説明
 - 11:50-12:20 Q&A

試験情報

願書受付

2021 年 6 月 28 日(月)～7 月 2 日(金) 17 時必着

大学院修士課程入学試験における英語外部試験 (事前受験)の導入延期のお知らせ

2021年度大学院修士課程入学試験(2020夏に実施)より、物理学・宇宙物理学専攻においては、TOEFL-iBTかTOEIC Listening & Readingのいずれかの外部英語試験のスコアレポートの提出で英語の筆答試験に代える予定にしていたが、新型コロナウイルス感染拡大防止対応として2020年夏に実施の入学試験には導入しませんでした。2021年夏に実施の入学試験についても 状況は不確かであり、英語外部試験の導入は見送ることになりました。

募集要項や過去問などさらに詳しい情報は：

<http://www.scphys.kyoto-u.ac.jp/education/inshi/>
<http://www.sci.kyoto-u.ac.jp/ja/admissions/ms.html>
にて随時更新予定ですので、こちらをご覧ください。

ローレンツ祭へようこそ

Lorents Festival 2021 online

5.15 (sat)

京都大学大学院 理学研究科 物理学・宇宙物理学専攻

9:30~18:30

<http://www2.scphys.kyoto-u.ac.jp/lorentz/>



GRADUATE
SCHOOL OF
FACULTY OF
SCIENCE
KYOTO UNIVERSITY

ローレンツ祭プログラム詳細

開催スケジュール

2021年5月15日(土)に開催されるローレンツ祭のスケジュールは次の通りです。すべてオンライン (ZOOM) 開催となっています。

- 09:30~09:55 専攻長ご挨拶 (佐々 真一)
- 10:00~12:00 特別講義 (高須 洋介、窪 秀利、野上 大作)、意見交換会
- 13:00~18:30 研究室紹介

参加申し込みや質問フォームへの投稿などはすべてウェブサイトから行いますので、下記URLの更新情報を御覧ください。
<http://www2.scphys.kyoto-u.ac.jp/lorentz/>
 ※特別講義および研究室紹介の各内容は続きをご覧ください。

物理学第一分野

研究室名	内容	ページ
固体量子物性	スタッフおよび学生によるスライドを用いた研究紹介	4
量子凝縮物性	教員による研究室全体の紹介 (5分)、WEBカメラで実際の装置を見せながら、各研究グループの院生による研究内容の紹介 (20分) を行ったのち、質疑応答 (5分) を行う予定です。	5
低温物理学	研究室紹介	6
量子光学・レーザー分光学	前半20分: PowerPointを用いた研究室紹介 後半10分: Virtual Lab Tour	7
光物性	1. 所属メンバーの研究内容紹介 2. コアタイム・ゼミなどの日常の様子紹介 3. その他、質問に回答	8
ナノ構造光物性 (化研)	スライドでの研究紹介 学生などによる質問への回答など	9
時空間秩序・生命物理学	Powerpoint等で研究内容を紹介します。簡単な実験やラボツアーの要素もあります。残りの時間で質問を受け付けます。	10
ソフトマター物理学	司会 高西 准教授 4~5分 山本 教授の話 20分ほど 実験のムービー (コレステリック、強誘電) 残り時間で質疑応答	11
生体分子構造 (複合研)	パワーポイントによる研究室紹介を行います。 なお、生体分子構造 (複合研) は2つの研究グループから成りますので、30分を半分に分けて、それぞれのグループが15分ずつ紹介を行う予定です。	12
凝縮系理論	・柳瀬教授によるスライドを用いた研究紹介(20~30 min) ・学生による研究室紹介・質疑応答(40~30 min)	13,14
物性基礎論: 凝縮系物理 (基礎研)	・スタッフによるスライドを用いた研究室紹介 ・質疑応答	15
非線形動力学	事前にgoogle formで募集した質問に30分のコアタイムを用いて答えます。 コアタイム以外の時間に教員、博士課程の学生の研究内容を発表します。	16
流体物理学	シミュレーションデモ等と研究紹介	17
相転移動力学	学生によるスライドを用いた研究紹介、質疑応答	18
物性基礎論: 統計動力学 (基礎研)	研究室での現在進行中の研究テーマの紹介のみならず、過去のメンバーの研究テーマや就職先等を紹介する予定です。	19
物性基礎論: 量子情報 (基礎研)	未定	20
プラズマ物性物理学	マイクロ波球状トカマクプラズマ装置の紹介と研究室案内	21

特別講義及び意見交換会

3名の先生方のオンライン講義(zoom)を行います(各30分)。続いて意見交換会のコーナーを設けます。

高須 洋介	「レーザー冷却と量子縮退原子: 量子シミュレーター・量子計算への応用」	10:00~10:30
窪 秀利	「極限宇宙を探る~ガンマ線天文学最前線~」	10:30~11:00
野上 大作	「太陽が我々にもたらすもの: 恵み? or 脅威?」	11:00~11:30
意見交換会	「学部教育に物申す!」	11:30~12:00

物理学第二分野

研究室名	内容	ページ
原子核・ハドロン物理学	・研究室全体の説明 ・各グループの説明 メンバー、研究内容、院生生活など スライドによる研究内容の説明 各実験施設とzoomで接続、オンラインで見学	23,24
素粒子物理学	ZOOM上でのスライドを用いた研究室紹介	25,26
宇宙線物理学	各グループの研究内容紹介	27,28
核放射物理学 (複合研)	1. 研究室メンバーの紹介 2. 研究内容の紹介 3. 映像を使った研究室の案内 4. その他質疑応答	29
核ビーム物性学 (複合研)	教員と院生による研究室紹介	30
素粒子論: 物理学第二教室・素粒子論研究室	スライドを用いて素粒子論研究室の紹介を行い、その後は参加者の質問にお答えする時間を設ける予定です。	31,32
素粒子論: 基礎物理学研究所・素粒子論グループ	・学生による研究室紹介 ・教員による研究紹介	33,34
原子核論: 物理学第二教室・原子核理論研究室	はじめにスライドで研究紹介を行い、その後は自由時間とし、参加者からの質問に答えます。 進路や院試の相談など何でも歓迎です。	35,36
原子核論: 基礎物理学研究所・原子核理論グループ		37
天体核物理学: 物理学第二教室・天体核物理学研究室	院生による研究室紹介	38,39
天体核物理学: 基礎物理学研究所・宇宙グループ		40
ビーム物理学 (化研)	・研究室全体の紹介 ・大学院生の研究活動紹介 ・Q&A	41

宇宙物理学分野

研究室名	内容	ページ
太陽物理学	浅井 歩准教授によるzoom講演 (30分)、質疑応答および院生との懇談 (30分)	43
太陽・宇宙プラズマ物理学	野上准教授による研究室紹介 (30分)、残り30分院生による質疑応答。 なお、新教授が5/7までに着任した場合は、新教授が研究室紹介を行う。	44
恒星物理学	発表内の時間構成: 可視グループ 30分、X線グループ 30分 発表形式: スライドをもちいたzoom講演	45
銀河物理学	太田耕司教授によるzoom講演 (30分)、質疑応答 (30分)	46
理論宇宙物理学	ハーマン・リー講師によるzoom講演(30分) 引き続きzoom上で前田准教授による分野の紹介と院生込みでの質疑応答(30分)	47

MEMO

MEMO