

物理学教室年次研究報告

2019年度

大阪市立大学 大学院理学研究科・理学部

物理学教室

目次

序	1
2019年度物理教室談話会	3
研究報告	
<u>物性物理学講座</u>	
超低温物理学研究室	5
光物性物理学研究室	8
生体・構造物性物理学研究室	10
素励起物理学研究室	14
電子相関物理学研究室	18
レーザー量子物理学研究室	24
<u>宇宙・高エネルギー物理学講座</u>	
宇宙線物理学研究室	31
高エネルギー物理学研究室	39
重力波実験物理学研究室	47
宇宙・素粒子実験物理学研究室	54
<u>基礎物理学講座</u>	
素粒子論研究室	60
数理物理研究室	68
宇宙物理研究室	73
原子核理論研究室	77

序

この年次報告ではその年の主任が1年を振り返って序文を書く慣わしになっています。2019年に物理学科主任を勤めた井上が1年間の報告をさせていただきます。乱文ご容赦ください。

就任したときにある程度覚悟していたつもりでしたが、予想通り大変な1年間ではありました。一番大変だったのは、人事案件の多さです。実に7件もの人事を扱いました。その過半数は新大学に関わるもので、着任が3年から4年先という難しいものでした。具体的な選考作業は選考委員会が行っています。必ずやこれらの人事が、新大学の物理学科をより強くする結果につながるものと信じています。

人事の件で言及した通り、大阪市大と大阪府大の統合にむけた準備は着々と進んでいます。2019年4月にはまず、大学の運営母体である法人が統合され、我々の名称は「公立大学法人大阪 大阪市立大学」となりました。新大学設置申請にむけた書類作りも進んでいます。2022年4月には、新大学の理学部の新入生が杉本キャンパスに入学してくる予定です。新大学の新入生が始めから勉学に集中できる環境を整えることは非常に重要です。それまでに準備すべきことはたくさんありますが、市大・府大一致団結し、力を合わせて乗り越えていきましょう。

年度内に発令された人事もあります。10月1日付で宇宙・高エネルギー物理学講座の中野英一准教授が教授に昇進されました。おめでとうございます。中野氏は6月にも「学長重点分野・サイテーションで最も顕著な実績を有する者」として教員活動表彰されており、2重の喜びとなりました。他にも教室メンバーは各所で表彰されています。11月には坪田誠教授が流体科学研究賞（東北大学流体科学研究所）の受賞者に選ばれました。10月には竹内宏光講師と佐藤弘一特任講師が2019年度南部陽一郎記念若手奨励賞の受賞者に選ばれました。他にも多くの大学院生が学会で表彰されています。

9月には今年も教員・学生が共に泊まり込みで物理を議論する「アインシュタ

インセミナー」を開催しました。年々議論が活発になる様子を見るのは楽しいものです。新たな伝統の芽生えを感じます。

ここで“来年度はさらなる飛躍を！”と書いて締めくくりたいところでしたが、年度末に社会全体をショックな出来事が覆いました。新型コロナウイルスの世界的流行です。2020年度前期の授業は全て遠隔授業になることが決まりました。果たしてこの状況下で従来と変わらない教育の質を保証できるのか、研究を進めることができるのか、誰にも分かりません。

不安の中での次の主任へのバトンタッチになってしまったとはいえ、曲がりなりにも1年間を完走できたのは一重に物理学教室の皆さんのお力添えの賜物だったと思います。この場を借りてお礼申し上げます。

最後にこの年次報告の作成にご尽力いただいた有馬正樹氏、常定芳基氏、矢野英雄氏に感謝します。

2019年度(令和元年度)物理学科主任

井上 慎

2019 年度 物理学教室 談話会

談話会委員：丸、常定、鐘本

第 1 回 新入生歓迎物理学教室談話会

日時 2019 年 4 月 16 日 15:30～

場所 学術情報総合センター10F 大会議室

講師 常定 芳基 氏(大阪市立大学宇宙線物理学研究室・准教授)

題目 「平成から XX へ：物理学の 30 年とこれからの 30 年」

第 2 回 物理学教室談話会

日時 2019 年 6 月 27 日 13:30～

場所 学術情報総合センター1F 文化交流室

講師 佐藤 弘一 氏(大阪市立大学原子核理論研究室・特任講師)

題目 「原子核の大振幅集団運動とその微視的記述」

講師 Kim Jihyun 氏(大阪市立大学宇宙線物理学研究室・博士研究員)

題目 「Ultra-high-energy cosmic rays and a clue to their origin」

講師 堀越 宗一 氏(大阪市立大学レーザー量子物理学研究室・特任准教授)

題目 「様々な量子系に化ける極低温の原子・分子」

第 3 回 物理学教室談話会

日時 2019 年 9 月 3 日 15:30～

場所 理学部会議室(E108)

講師 原田 知広 氏(立教大学・教授)

題目 「Primordial black hole formation in the matter-dominated phase of the Universe: recent results」

第 4 回 物理学教室談話会

日時 2019 年 10 月 7 日 15:30～

場所 第 9 講義室

講師 平野 琢也 氏(学習院大学理学部・教授)

題目 「損失のあるスピノール BEC におけるコヒーレンス形成」

講師 柴田 康介 氏(学習院大学理学部・助教)

題目 「高感度な BEC 磁力計の開発」

第 5 回 物理学教室談話会

日時 2019 年 10 月 16 日 16:00～

場所 理学部会議室(E108)

講師 浅野 泰寛 氏(北海道大学工学研究院・准教授)

題目 「分散の無いアンドレーエフ束縛状態と奇周波数クーパー対」

第 6 回 物理学教室談話会

日時 2019 年 12 月 17 日 15:15～16:55

場所 理学部会議室(E108)

講師 窪 秀利 氏(京都大学・准教授)

題目 「ガンマ線で見える高エネルギー宇宙」

第 7 回 2019 年度 物理学教室研究発表会

日時 2019 年 12 月 26 日 9:00～

場所 学術情報総合センター10F 大会議室

第 8 回 物理学教室談話会

日時 2020 年 1 月 15 日 15:30～

場所 F205

講師 吉見 彰洋 氏(岡山大学・准教授)

題目 「レーザー励起可能な ^{229}Th 原子核の極低エネルギー励起準位の研究とその応用」

第 9 回 修士論文発表会

日時 2020 年 2 月 6 日 9:00～

場所 学術情報総合センター1F 文化交流室

超低温物理学研究室

石川修六	教授	濱崎康佑(M2)
矢野英雄	准教授	松村 樹(M2)
小原 颯	講師	小泉成美(M1)
畑 徹	特任教授	

研究概要

1. 振動物体が生成する超流動ヘリウム4の量子乱流の統計的性質（矢野、濱崎、小泉）

超流動ヘリウム4は、秩序変数が振幅と位相からなる量子凝縮相である。その流れが作る渦は、秩序変数が零の状態を芯として、循環が量子化される量子渦となる。循環の量子化のために流れの乱れは量子渦のもつれとして現れ、超流動では、渦度0の流れと量子渦のみで構成される最もシンプルな量子乱流が実現する。したがって、量子乱流の性質は、乱流中の渦運動や乱流からの渦輪放出に反映する。

我々は、超流動ヘリウム中で振動ワイヤー（直径 $2.5 \mu\text{m}$ ）が生成する量子乱流からワイヤーの振動方向に放出される渦輪について、乱流生成から渦輪検出までの時間分布とその渦輪サイズ依存性を測定し、次のことを明らかにしている。①検出する渦輪の直径は、超流動中の常流体成分と量子渦との相互摩擦係数を α 、生成器－検出器間距離を L として、 $D = 2\alpha L$ 以上に制限される。乱流生成エネルギー 150 pW について、 $D: 0.83 \mu\text{m} \sim 211 \mu\text{m}$ の範囲で飛行時間は指数分布に従い、それぞれの D に対する平均検出頻度を見積もった。② L を固定し α を変化させると、検出頻度は $D^{-1.7}$ に比例し、渦輪放出頻度は渦輪直径に対して自己相似性を持つことを見いだした。③ α を固定し L を変化させた検出頻度と比較し、同じ制限直径 D に対して、検出頻度は α とともに増加することを見いだした。④相互摩擦は、乱流の構造と渦輪の飛行に影響すると考えられる。生成される渦輪形状に対してその飛行の相互摩擦の影響を考察し、同じ D では相互摩擦の影響が小さいことを示した。このことより③の結果は、相互摩擦の乱流構造に与える影響であると考えられる。
2. 低温モーターで駆動する超流動ヘリウム4吸込渦（小原、矢野、松村）

流体力学では、渦度 $\omega = \text{rot } \mathbf{v}$ がゼロか非ゼロかによって「渦なし」と「渦あり」に分類される流れがあり、前者は教科書レベルでほとんど理解されていると考えて良い。また、後者のうち、外場によって駆動される強制回転は渦度が一樣となるなど、学問としては解決済みである。しかし、何らかの要因により渦度が局所的に集中した領域を持つ渦については、いくつかのモデルが提唱されているものの、現実の渦を記述する理論は少ない。その代表例は垂直方向の吸込流があるときに発生する「吸込渦」（風呂桶の栓を抜いたときにできる渦）で、定性的には、微小な渦度を持つ「素渦」が渦定理にしたがって吸込口に集中させられることで巨大な渦になると理解されており、そのコア半径は吸込流の強さと粘性による渦度拡散のバランスで決まるとされているが、詳細は定かではない。そこで、我々は、超流動ヘリウムの吸込渦を用いた実験を行い、吸込渦の基本的な流れの性質を調べることにした。超流動では渦糸が実在し、渦糸がすべての渦度を担っており、その渦糸の密度を計る技術が確立されているからである。実験では当研究室で開発された超流動中で回転するモーターを用いて吸込み流を生成し、光学観察と独自に開発した第1音波循環計測法を用いて循環を求めたところ、渦糸 $10^4 \sim 10^5$ 本相当の渦度をもつ渦であることを明らかにした。さらに、量子渦糸がどこにどのような密度で存在しているのか検証するため、巨大渦を横断する第2音波の吸収実験を行った。第2音波は量子液体特有の音波の一つで、量子渦が存在するときには渦糸密度に比例し

た減衰を示す。実験の結果、回転流が強くなるほど大きな減衰が発生することが判った。この減衰と循環を比較することにより、モーターによる回転流によって生成された量子渦糸が回転軸中心の直径 10 mm 程度の領域に吸い寄せられ、その回転数はモーター回転数の 100 倍程度の高速になっていると見積もられることがわかった。これは、吸込流による圧縮効果の直接的な証拠であると言える。

3. 熱音響冷凍機の開発 (石川)

熱音響冷凍機は、熱エネルギーと音波エネルギーの変換を利用した冷凍機である。薄膜付きのループ管型の熱音響冷凍機が本研究の特色である。今年度はこの薄膜の役割を明らかにするために、ステンレスの直管の一端にスピーカーを配置した音響装置を製作し、他端を開放端、閉端、薄膜としたときの共鳴周波数での管に沿った圧力変動、仕事流を調べた。これらの実験より、薄膜は小さな音圧に対しては開放端的な振る舞いをし、大きな音圧に対しては閉端的な振る舞いをする結果を得た。この結果の一部が昨年度の結果と異なる。昨年度は測定中にスピーカーが破損していた可能性がある。実際のループ管型熱音響冷凍機での圧力変動は大きな音圧に相当する。これまでの解析より、ループ管型熱音響冷凍機の薄膜では常に圧力変動が極大であることがわかっている。これは閉端的な振る舞いであり、今回の直管での実験と矛盾しないものである。他端が薄膜のときの直管軸に沿った仕事流測定を解析するために、我々が提案した定在波モデルに基づく解析を行った。薄膜での反射係数を導入し、この係数が仕事流を説明することを提案した。

4. 寒剤を用いない希釈冷凍機の開発 (畑、矢野、小原、石川)

パルス管冷凍機が高額なため、より安価なGM冷凍機を用い、操作しやすいドライ希釈冷凍機の開発をめざし、昨年度は 40 mK までの冷却に成功した。今年度は、いよいよパルス管冷凍機を用いた本格的な希釈冷凍機として 10 mK 以下を目指すこととなったので、従来の抵抗温度計ではカバーできない数 mK まで測定可能な磁気温度計の開発を進めた。その結果、キュリー則にきれいに乗る十分な感度を持った磁気温度計の開発に成功した。ただ、抵抗温度計も磁気温度計も温度定点が最低一つ必要となるため、試料中に超伝導転移温度をもつ超伝導体を組み込んだ自己校正可能な磁気温度計の開発へと発展させる予定である。この種の温度計は世界に例がない。

教育・研究業績

学術論文

1. Vortex Emission from Quantum Turbulence Generated by Vibrating Wire in Superfluid ^4He ;
H. Yano, K. Sato, K. Hamazaki, R. Mushiake, K. Obara, and O. Ishikawa,
Journal of Low Temperature Physics, **196**, 184–189 (2019)
(DOI: 10.1007/s10909-019-02143-4)
2. Observation of Second Sound Attenuation Across a Superfluid Suction Vortex;
I. Matsumura, K. Ohyama, K. Sato, K. Obara, H. Yano, and O. Ishikawa,
Journal of Low Temperature Physics, **196**, 204–210 (2019)
(DOI: 10.1007/s10909-019-02164-z)
3. Size Distribution of Emission Vortex Rings in Turbulence Induced by Vibrating Wire in Superfluid ^4He ;
H. Yano, K. Hamazaki, N. Koizumi, K. Sato, K. Obara, and O. Ishikawa,
Journal of Low Temperature Physics, published online (2019)
(DOI: 10.1007/s10909-019-02285-5)

国際会議講演

International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2019), University of Alberta, Edmonton, Alberta, Canada (7-13 August 2019)

1. H. Yano (Poster): Size distribution of emission vortex rings of turbulence induced by vibrating wire in superfluid ^4He
2. K. Obara (Poster): Observation of second sound attenuation across a macroscopic rotational flow
3. T. Nakagawa and H. Yano (Poster): Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a vortex tangle in superfluid ^4He
4. H. Yano (Talk): Size Distribution of Emission Vortex Rings of Turbulence Induced by Vibrating Wire in Superfluid ^4He (Quantum turbulence workshop)
5. K. Obara (Talk): Observation of second sound attenuation across a macroscopic rotational flow (Quantum turbulence workshop)

Turbulence of all kinds, Osaka City University, Osaka, Japan (7-9 January 2020)

1. H. Yano (Invited Talk): Vortex Emission from Quantum Turbulence Induced in Superfluid ^4He
2. K. Obara (Poster): Attenuation of Second Sound across Macroscopic Rotational Flow
3. N. Koizumi (Poster): Vortex Emission from Turbulence Produced in Thermal Counterflow of Superfluid ^4He

学会・研究会講演

1. 日本物理学会 2019 年秋季大会 (岐阜大学, 2019 年 9 月 10 日~13 日)
 - ① 松村樹 (Talk): 第二音波で観測する吸い込み渦の渦糸長密度 II
 - ② 小泉成美 (Talk): 超流動ヘリウム 4 熱対向流による量子乱流から放出される渦輪観測
2. 日本物理学会第 75 回年次大会 (名古屋大学, 2020 年 3 月, 現地開催は中止)
 - ① 松村樹 (Web 公開): 超流動 ^4He の巨視的回転流の測定

学位論文

修士論文

1. 濱崎康佑: 「超流動乱流が生成する渦輪と常流動成分との相互摩擦効果」
2. 松村 樹: 「超流動吸い込み渦の量子渦糸分布」

研究助成金取得状況

1. 石川修六: 共同研究 アルバック・クライオ株式会社「希釈冷凍機の開発」 1 8 7 万円
2. 石川修六: 共同研究 株式会社ジェイテクト「熱音響冷却システムの研究」 8 6 万円
3. 矢野英雄: 日本学術振興会・科学研究費挑戦的研究 (萌芽)
「超流動ヘリウムの量子渦集中と巨大渦の研究」 2 0 1 9 年度分 1 4 0 万円

その他

地域貢献

1. 畑・石川・小原: 低温工学関西支部基礎技術講習会 (2019 年 9 月 24 日~26 日)

光物性物理学研究室

鐘本勝一 准教授

中橋 健太 (M2)

保地 滉介 (M1)

高石 晃平(B4)

渡部 真也 (B4)

研究概要

1. 高強度マイクロ波励起下におけるスピンドラ物性 (中橋、鐘本)

近年、電子スピン角運動量の伝播を意味するスピンドラが注目されている。中でも、強磁性金属のFMR遷移によるスピンドラの発生 (スピンドラポンピング法) と逆スピンドラホール効果 (ISHE) による起電力計測を組み合わせた手法が提案され、スピンドラ研究の進展が期待されている。本研究では、強磁性金属層と常磁性金属層からなる金属二層構造素子に対して高強度のマイクロ波照射によるスピンドラ生成を行い、誘起されるスピンドラ物性の評価を行った。その結果、高強度マイクロ波照射下では、スピンドラ生成による起電力スペクトルの線型が歪み、線幅が増大することがわかった。この線幅増大は、強磁性金属単層でも観測されたため、強磁性金属のスピンドラ緩和時間が高強度照射により短くなったと結論された。特に、その緩和時間の減少により、常磁性層への伝搬効率が減少することを明らかにした。

2. イオン液体発光素子に対する分光計測 (保地、鐘本)

近年イオン液体を用いた素子系に注目が集まっている。素子内にイオン液体が存在する場合、電極との界面にイオン液体による電気二重層が形成され、素子内の分子が強電場を受け、特異な物性が発現される。我々は、ポリマー有機半導体とイオン液体の混合物からなる電気化学発光セルを作成し、その動作状態における分光計測を行った。まず、発光開始前の電圧では、ホールに由来する信号が観測された。同時に、ホールのキャリアが強い電場を受けていることを示唆するStark信号も観測した。続いて、電圧を発光開始電圧まで上げると、発光輝度の上昇とともに、ホールの信号が減少することが観測された。それは、発光に伴い、素子内に滞在するホールの密度が減少したことを示す。発光輝度と分光信号は非常によく相関することが確認された。分光計測の有効性を裏付けた結果と言える。

3. 有機半導体におけるスピンドラ伝搬効果の検証 (高石、鐘本)

有機物質は、スピンドラ緩和時間が長いこと、スピンドラ情報の伝搬に有利だと考えられてきた。そのためスピンドラの伝搬に有機半導体を用いられた研究が報告され、実際に、その伝播を示唆する結果が報告され、注目されてきた。本研究では、実際に有機物質がどの程度伝搬効果があるのか検証を行った。方法としては、強磁性金属の上に有機層を成膜し、続いてスピンドラを受け取る常磁性金属層を配置することで、有機層を経由したスピンドラ由来の起電力を目指した。その結果、実際に金属層で起電力は検出された。一方で、その起電力は小さく、強磁性層単独でも同程度の起電力が観測された。そのため、有機層における起電力は、強磁性層における起電力との電気的な結合に過ぎず、スピンドラを伝搬させるとは言えないことがわかった。

4. スピンドラ偏極LEDの実現に向けた強磁性電極LECの作成 (渡部、鐘本)

通常LEDでは電極から注入されたホールと電子が素子内で結合し、発光性励起子を生成することで動作する。その電極には通常常磁性金属が用いられ、その場合、発光励起子のスピンドラ依存反応は操作できない。しかし、強磁性金属を電極に用いると、そのスピンドラ偏極によりスピンドラ選択性の操作が可能になるかもしれない。一方で実際には、通常のLEDでは電極と発光サイト間の距離が長いこと、スピンドラ状態が維持されずスピンドラ依存物性は観測されない。この研究ではイオン液体によるLECを用い、積層膜の数を最小化する

ることで、強磁性電極LEDの作成に取り組んだ。本年は主に、安定な素子動作のための条件の最適化に専念したが、強磁性電極を用いて実際に強いLEC発光を観測することに成功した。

教育・研究業績

学術論文

1. Katsuichi Kanemoto, Shuto Hatanaka, Takayuki Suzuki, “Correlation between bias-dependent ESR signals and magnetic field effects in organic light emitting diodes”, Journal of Applied Physics, vol.125, 125501 (7pages) (2019).
2. Iwamoto Kousuke, Hayakawa Yuto, Hatanaka Shuto, Suzuki Takayuki, Kanemoto Katsuichi, “Electron-hole pairs generated in the crystalline phase of polymer diodes studied by electrically detected magnetic resonance techniques”, Journal of Physical Chemistry C, vol.123, 26116-26123 (2019).

総説記事

1. 鐘本勝一、鈴木貴之「有機半導体素子に対するEDMRおよびODMR」、学会誌「応用物理」、89巻25-29 2020年1月号

学会・研究会講演

1. 鐘本勝一、「有機半導体素子における磁場効果と磁気キャパシタンス」日本磁気学会第24回研究会 磁気キャパシタンス効果の新展開 (2019. 7. 29) (招待)
2. 保地滉介, 鐘本勝一、「イオン液体LECの動作で誘起される分光信号の特性」応用物理学会 2019年秋季学術講演会 (2019. 9. 18)
3. 中橋健太, 鐘本勝一, 鈴木貴之、「高強度マイクロ波パルス照射下における逆スピンホール効果」応用物理学会 2019年秋季学術講演会 (2019. 9. 18)
4. 鐘本勝一, 飯田彬斗「Gate変調分光と電流の同時時間分解計測によるOFET動作過程の評価」応用物理学会 2019年秋季学術講演会 (2019. 9. 19)
5. K. Kanemoto, K. Iwamoto, S. Hatanaka, T. Suzuki, ”Origin of Electrically-Detected Magnetic Resonance Signals in Organic Semiconductor Diodes”13th Japanese-Russian International Workshop on Open Shell Compounds and Molecular Spin Devices (2019.11.10) Invited
6. 鐘本勝一, 飯田彬斗「高強度マイクロ波パルス照射下における逆スピンホール効果」電子スピンスイエンス学会年会2019 (2019. 11. 7)
7. 鐘本勝一, 中橋健太, 鈴木貴之「高強度パルス μ 波励起による逆スピンホール効果の特性」日本物理学会 第75回年次大会、(2020. 3. 16)

学位論文

修士論文

1. 中橋健太：「高強度マイクロ波誘起スピンポンピング下におけるスピン流物性の探求」

研究助成金取得状況

1. 鐘本勝一（代表）、科学研究費補助金、基盤研究(B)（一般）「ESR誘起電流による有機素子の新規スピンプローブ技術の開拓」、140万円
2. 鐘本勝一（代表）、科学研究費補助金、挑戦的研究(萌芽)、「有機半導体におけるスピンの直接観測に向けた二重磁気共鳴計測手法の開発」、290万円
3. 鐘本勝一（代表）、大阪市立大学戦略的研究（基盤研究）「有機半導体系におけるスピンの直接ダイナミクス計測の実現」、100万円

生体・構造物性物理学研究室

南後 守 特任教授
杉崎 満 准教授

三苫 重仁 (M2)
橋本 健人 (M1)
山本 歩波 (B4)
上田 智也 (B4)

研究概要

1. 緑藻の超解像度顕微測定（橋本，杉崎，南後）

高等植物やバクテリアが持つ光合成器官において（バクテリア）クロロフィルは，エネルギー生産を行う一連の過程において，光捕集，励起エネルギー伝達，電子伝達といった役割を果たしている．光捕集過程に着目してみると，その応答時間や波長は生物種だけでなくそれらの生育環境によって異なり，それが光捕集アンテナ複合体の多様性に繋がっているものと考えられる．このような多様性の結果現れる機能は，クロロフィル分子の配向や分子間距離によって変化するため，光捕集蛋白複合体の構造を知ることは非常に重要である．そのため，クロロフィル分子が機能している様子を，なるべく高い空間分解能で観測するための手法の獲得が望まれる．超解像度顕微鏡法は従来の光学顕微鏡の原理的な空間分解能の限界値（すなわち回折限界）を超えることができる手法として，過去20年ほどの間に急速に研究が進んできた．STORM, STED, PALM, GSDなど，超解像度顕微鏡法として開発された手法は非常に多岐にわたるが，その大多数は蛍光顕微鏡法の延長線上にあるため，試料を染色しその形状を高い空間分解能で観測することとなる．しかしながら前述のクロロフィル分子は高い量子収率で自家蛍光を発するために，試料を染色することなく，より自然に近い状態で，光合成色素蛋白複合体の空間配置とその機能が同時観測可能になるものと期待できる．このような目論見の下で，高等植物の超解像度顕微鏡観測に取り組んでいる．

前年までの研究により，超解像度顕微鏡法としてSTED (stimulated emission depletion) 法を用いるとアンチストークス蛍光が顕著に現れ，空間分解能の向上が難しいことが分かっていた．そのため本年度は，クロロフィルの三重項電子状態の寿命についておおよその値が分かっていることから，GSD (ground state depletion) 法を試した．糸状性緑藻の葉緑体における代表的な測定結果を図1に示す．作製した顕微鏡を共焦点配置で用いた場合，ほぼ

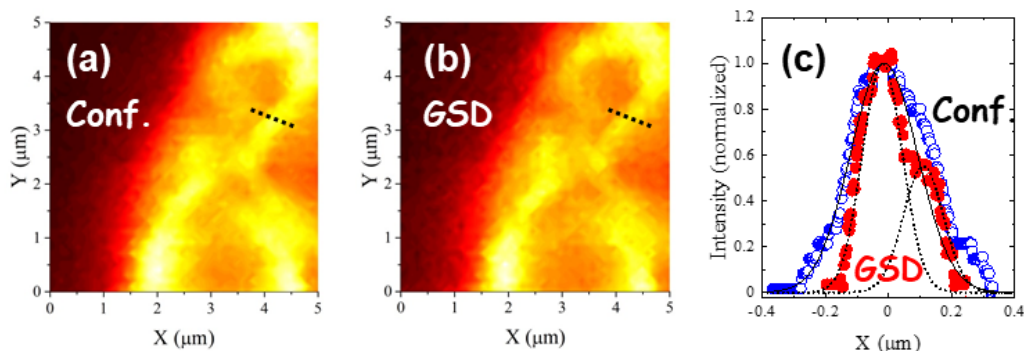


図1 糸状性緑藻の (a) 共焦点蛍光顕微画像と (b) GSD超解像度蛍光顕微画像. (c) それぞれの顕微鏡法によって得られた顕微画像の点線に沿った蛍光強度. 共焦点顕微鏡法を用いた場合，空間分解能はほぼ回折限界の300 nmほどであるが，超解像度顕微鏡法を用いると100 nmほどとなり，近接した2つの蛍光ピークを構成する色素の存在を知ることが可能となる．

理論限界値の空間分解能を達成していることが確認できた。試料の同一の観測領域をGSD法に切り替えて観測を行うと、空間分解能の向上が見られた。空間分解能は、照射するレーザー光の強度やタイミングに大きく依存する。現在のところ、100 nm程度の空間分解能が達成できている。本研究結果は、試料を染色することなく光合成色素の超解像度顕微鏡画像の取得に成功した、世界的に見ても数少ない例の一つである。今後、光学配置を含むさらなる実験パラメータの最適化を図ることにより空間分解能の向上を行うとともに、時間分解能の向上にも取り組んでいく予定である。

2. 光合成色素における電子と振動の励起状態に及ぼすチャープの影響（三苦，山本，杉崎，南後）

1990年代の終わりころから、周波数成分ごとに振幅と位相を制御したパルス光を物質に照射することにより、物質の応答を人為操作することが可能であることが分かってきた。対象物質として、当初は小さな分子が用いられていたが、2000年代に入ると、光合成色素蛋白複合体のような巨大かつ複雑な物質群においても、その機能の人為操作が実現されるようになってきた。たとえば紅色光合成細菌の光捕集アンテナ色素蛋白複合体においては、これまでに、色素分子間の励起エネルギーの伝達効率の人為操作が達成されている。このような人為操作においては、反応効率を観測しながらその値が上昇、もしくは減少するように、超短パルス光を構成する位相と振幅を周波数ごとに少しずつ変化させ、所望の結果が得られるように最適化を図るといった方法がとられる。その結果として得られるパルス波形は非常に複雑なものとなり、反応効率に変化した物理的な背景本質を見抜くことが困難となる。そこで我々は、まずは周波数に対し位相や振幅に単調な変化を与えた場合に、光合成色素の応答がどのように変化していくかを調べた上で、段階的にその要素を組み合わせることで、前述の問題に対する答えを得るといった試みを行っている。

電子の励起状態やコヒーレントな分子振動を生成し、その時間発展を追跡するためには超短パルスが必要となるため、そのスペクトルは周波数的に広がりを持つ。図2に示すように、試料に照射するスペクトルの位相を周波数に対し（すなわちチャープ量を）連続的に変化させ、電子の励起状態の寿命やコヒーレントな分子振動の生成割合を制御することに成功した。本研究では特に三次非線形光学応答に注目するため、時間差をつけた超短パルス光を試料に照射することとなる。この時間差についても制御をすると、溶媒と溶質の間の相互作用の大きさを変化させることができることも分かった。

3. 小型酸素センサーの開発（上田，橋本，杉崎，南後）

生体組織の酸素や二酸化炭素など濃度を非侵襲にリアルタイムで検出することは、細胞生物学や医療の分野において重要な課題となっている。生体組織中の酸素濃度を見積もる方法の一つとして、ポルフィリン誘導体やルテニウム錯体等の発光測定による酸素濃度測定法が知られている。近年、ポルフィリン誘導体において、酸素量に加えグルコース濃度の同時測定が可能であることが知られるようになったが、その詳細な機構については依然

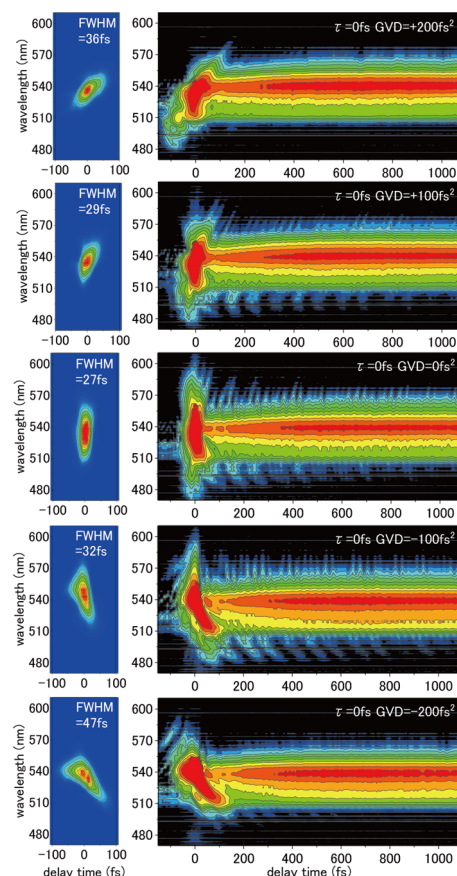


図2（右図）光合成色素である β -カロテンの過渡回折信号の時間発展。励起光のチャープ量を変化させると、電子状態の寿命や、コヒーレント分子振動の発生効率を変化させることが可能となる。（左図）励起光の試料への到達時間の周波数成分依存性。

として不明である。ポルフィリン誘導体をポリマー中に分散させると電子のトラップ準位が形成され、ポルフィリン誘導体の酸素濃度に対する応答が経時変化を示すことが分かっている。酸素濃度の算出を正しく行うためには経時変化を考慮した補正が必要となる。また、人体に装着する際には装置の小型化が必要となってくるが、その際に熱雑音により装置の応答のリニアリティが悪くなることも分かってきた。本年度は、このような影響を除去するための補正係数の決定を行った。一方、ポルフィリン誘導体を用いて抗体染色を行うことにより、細胞小器官レベルの空間分解能で酸素濃度のマッピングを行うための予備実験を開始した。その結果、ほぼ回折限界である300 nmの空間分解能を達成できること確認した。

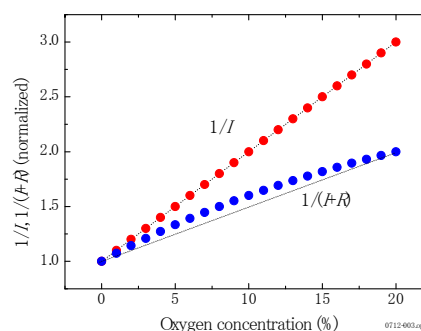
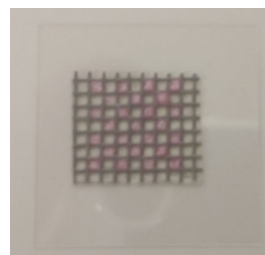


図3 (上図) 酸素センサーフィルム試作品. 赤色の領域にポルフィリン誘導体を分散させ、白色の領域に基準物質を分散させてある。(下図) 酸素センサーフィルムを用いた酸素濃度算出の際にノイズが及ぼす影響の一例. 理想的な場合、フィルムの応答はよく知られた線形のStern-Volmerの関係式で説明することができるが、散乱光によるノイズが重畳すると非線形な応答となる。

教育・研究業績

学術論文

1. H. Emura, T. Noji, M. Kondo, Y. Amao, and M. Sugisaki, "Anti-Stokes fluorescence from chlorophyll *a*," J. Phys.: Conf. Ser. **1220** (2019) 012043/1-4.
2. S. Ooi, S. Mitoma, M. Nango, Y. Amao, and M. Sugisaki, "Transient grating spectroscopy of β -carotene pumped with spectrally chirped pulses," J. Phys.: Conf. Ser. **1220** (2019) 012045/1-4.

学会・研究会講演

1. 橋本健人, 関荘一郎, 川上恵典, 藤井律子, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「緑藻の超解像度顕微蛍光観測」, 日本物理学会 第75回年次大会(2020年), 名古屋大学 東山キャンパス, 2020年3月16日~19日.
2. 三苦重仁, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「波形成型した励起光を用いた β -カロテンの四光波混合信号II」, 日本物理学会 第75回年次大会(2020年), 名古屋大学 東山キャンパス, 2020年3月16日~19日.
3. 橋本健人, 関荘一郎, 川上恵典, 藤井律子, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「緑藻の超解像度顕微蛍光観測」, 第30回光物性研究会(2019), 京都大学 宇治キャンパス, 2019年12月13日~19日.
4. 三苦重仁, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「チャープパルスを用いた β -カロテンの四光波混合信号」, 第30回光物性研究会(2019), 京都大学 宇治キャンパス, 2019年12月13日~19日.
5. 橋本健人, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「クロロフィル *a* の顕微蛍光観測 II」, 日本物理学会 2019年秋季大会, 岐阜大学 柳戸キャンパス, 2019年9月10日~13日.

学位論文

修士論文

1. 三苦重仁: 「 β -カロテンにおけるチャープパルスを用いた電子および振動ダイナミクスの制御」

研究助成金取得状況

1. 杉崎満：学術振興会・基盤研究B「3パルス超解像度顕微鏡の開発とそれを用いた光合成初期過程の可視化」85万円.
2. 杉崎満：株式会社カテラ，共同研究費「小型酸素（バイオ）センサーの開発」216万円.

素励起物理学研究室

坪田 誠 教授
竹内 宏光 講師

韓 俊植 (D1)
乾 聡介 (M2)
岡崎佳純 (M1)
佐野融人 (M1)
中川 朋 (M1)

研究概要

1. 超流動⁴Heにおける2流体結合ダイナミクス：常流動速度場の異方的ゆらぎ（坪田）

超流動ヘリウムの流体力学は、2流体モデルにより記述される。2流体モデルとは、1941年にLandauによって提案され、非粘性の超流体と粘性を持つ常流体が温度に依存した比で混合したとするモデルである。2流体モデルは、超流動ヘリウムや、超伝導、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)などの物理を理解するのに大成功をおさめた、低温物理学における標準的モデルである。しかし、2流体の運動を連立させて解く試みは、非常に簡単な場合を除いて、ほとんど行われたことがなかった。我々は、超流動成分を量子渦糸モデルで、常流動成分をナビエ・ストークス方程式により記述し、両者を相互摩擦で結びつけた大規模計算を行っている。ここでは、熱

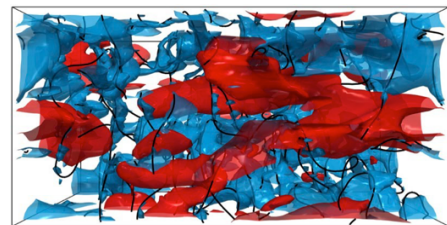


図1 2流体結合ダイナミクスで得られた量子乱流。黒い曲線は渦糸（量子渦の芯）であり、赤い領域は常流動流が平均速度より速い領域を、青い領域は常流動流が遅い領域を示す。

対向流中での常流体速度場の計算を行い、速度場の異方的なゆらぎを確認した。これは、アメリカのグループの最近の観測結果と符合する。この成果はプレスリリースを行い、日本経済新聞（2020年5月4日付）、日刊工業新聞（2020年7月16日付）で報道された。

2. ボース凝縮体を舞台に、回転する流体から静止する流体への新奇な角運動量輸送機構を発見（坪田）

回転する流体と静止している流体を接触させると、回転する流体の動きが静止している流体に伝わり、やがて静止している流体も回転し始めることは想像できる。極低温状態の量子流体では量子渦と呼ばれる渦が回転を担うため、接触を行った場合、回転する流体から静止している流体に量子渦が侵入することで動きが伝わる。しかし、回転する流体の動きがワインのコルク抜きのような形状のソリトン

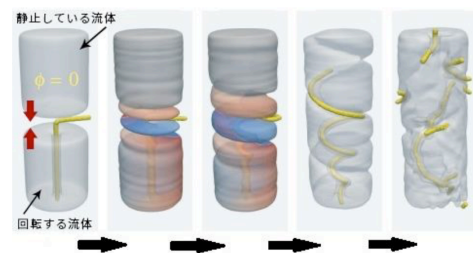


図2 回転する流体から静止する流体への角運動量輸送機構の概念図。

を形成し、それが静止流体に侵入して角運動量を輸送する新奇な機構を見いだした。この機構は、重力波の観察で注目される中性子星の衝突や、銀河形成の母体となる暗黒物質の成長などの宇宙スケールの現象にも関係すると考えられる。

3. 局所量子乱流が放出する渦輪の統計則 (坪田、中川、乾)

大阪市大超低温物理学研究室は超流動⁴He中で振動ワイヤーを用いた実験を行い、自己相似則に関連する、興味深い二つの統計則を観測した。第1の統計則は、量子乱流から放出される渦輪の観測がポアソン過程に従うことであり、第2の統計則は放出渦輪のサイズと振動数の間にべき則が成り立つというものである。我々は、この実験結果を再現すべく、量子渦糸モデルを用いて、局所量子乱流を作り、そこから放出される渦輪の統計則を調べた。局所タングルの生成過程・成長する条件を明らかにし、実験と定性的に一致する統計則を得た。

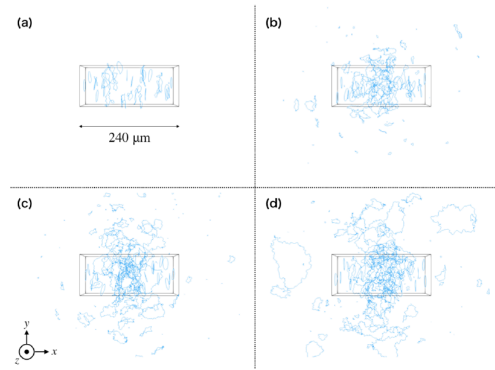


図3 局所量子渦タングルの形成とそこから放出される渦輪。

4. 局所熱源周りに形成される量子乱流 (坪田、乾)

超流動⁴He中で球状熱源が有る場合、その周りに球対称かつ非一様な熱対向流が形成され、それにより局所的量子渦タングルが形成されることが期待される。量子渦糸モデルを用いて局所タングル形成の機構を調べた。この研究は、超流動⁴Heを冷媒に用いた場合の、不可避免的に出現する局所熱源による熱伝導の降下や、超流動³He中での中性子照射によりミニ・ビッグバンを作るKibble-Zureck機構の検証などに大きな知見を与えることになる。

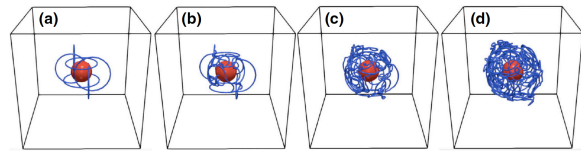


図4 局所熱源周りに形成される量子渦タングル。

5. 冷却フェルミ原子超流体のBEC・BCSクロスオーバーにおけるダークソリトンの不安定性 (竹内)

冷却フェルミ原子超流体におけるダークソリトンの不安定性が、粒子間相互作用を変調させることによってどのように様変わりするのかを理論・数値的に明らかにした。冷却ボース原子超流体におけるダークソリトンの不安定性は、「スネーク不安定性」と呼ばれており、ソリトンが不安定化して蛇のように曲がりくねった後に量子渦が生成される現象として知られている。我々が明らかにした現象は、フェルミ超流体において、相互作用が有効的に斥力となるBEC領域ではスネーク不安定性と同様な挙動が確認できるが、引力となるBCS側では蛇のようなパターンは消失し、超電導で知られるジョセフソン結合が非一様に起こることで直接的に量子渦が生成される。我々はこれをジョセフソン不安定性と名付けた。

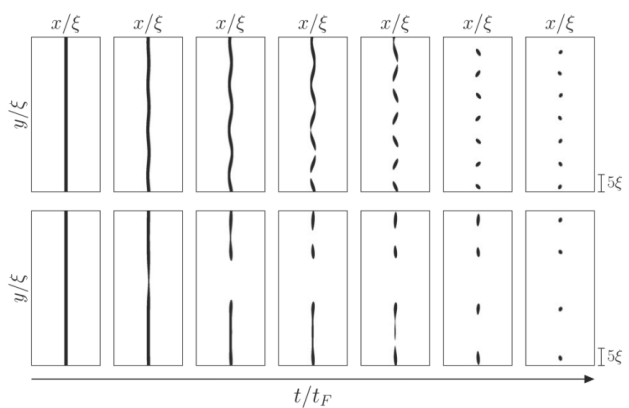


図5. 冷却フェルミ原子超流体におけるダークソリトンの不安定化のダイナミクスの数値計算結果. 上行に相互作用が有効的に斥力となるBEC領域でのスネーク不安定性の様子を, 下行には相互作用が引力となるBCS領域でのジョセフソン不安定性の様子を示す. 黒い領域は秩序変数の振幅が小さい場所を表している.

教育・研究業績

学術論文

1. Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota, and Wei Guo
Fully Coupled Two-Fluid Dynamics in Superfluid ^4He : Anomalous Anisotropic Velocity Fluctuations in Counterflow
Phys. Rev. Lett.124, 155301 (2020)
2. Toshiaki Kanai, Wei Guo, Makoto Tsubota, and Dafei Jin
Torque and Angular-Momentum Transfer in Merging Rotating Bose-Einstein Condensates
Phys. Rev. Lett.124, 105302 (2020)
3. Tomo Nakagawa, Sosuke Inui, Makoto Tsubota, and Hideo Yano
Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a localized vortex tangle in superfluid ^4He
Phys. Rev. B 101, 184515 (2020)
4. Sosuke Inui and Makoto Tsubota
Spherically symmetric formation of localized vortex tangle around a heat source in superfluid ^4He
Phys. Rev. B 101, 214511 (2020)
5. Abhay Shastry, Sosuke Inui, and Charles A. Stafford
Scanning Tunneling Thermometry
Phys. Rev. Applied.13, 024065 (2020)
6. Wout Van Alphen, Hiromitsu Takeuchi, and Jacques Tempere
Crossover between snake instability and Josephson instability of dark solitons in superfluid Fermi gases
Physical Review A 100, 023628 (2019)
7. Nir Navon, Christoph Eigen, Jinyi Zhang, Raphael Lopes, Alexander L. Gaunt, Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota, Robert P. Smith, and Zoran Hadzibabic
Synthetic dissipation and cascade fluxes in a turbulent quantum gas
Science 366, 382 (2019)

国際会議講演

1. [Invited] Makoto Tsubota
Quantum Turbulence
ICFD2019: Internatinal Conference on Flow Dynamics, Tohoku University, Sendai, Japan, November, 6-8,2019
 2. I.-K. Liu, S.-G. Gou, and H. Takeuchi
Phase Diagram of Solitons in a Spin-1 Polar Bose-Einstein Condensate
28th International Laser Physics Workshop, Gyeongju, South Korea, 7. 8-12 (2019)
 3. W. Van Alphen, H. Takeuchi, S. N. Klimin, and J. Tempere
Decay of Giant Vortices and Solitons in a Superfluid Fermi Gas
28th International Laser Physics Workshop, Gyeongju, South Korea, 7. 8-12 (2019)
- Turbulence of all kinds, Osaka City University, Japan, January 7-9, 2020.
4. Hiromitsu Takeuchi
Instability of a Doubly Quantized Vortex in Uniform Superfluids at Zero Temperature

5. Junsik Han
Space structure of quantized vortices in imbalanced two-component Bose-Einstein condensates
6. Sosuke Inui
Formation of localized vortex tangle around a spherical heat source in a superfluid
7. Yuto Sano
Anisotropy of Turbulent Cascades in a Quantum Gas
8. Tomo Nakagawa
Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a vortex tangle in superfluid 4He

学会・研究会講演

日本物理学会、2020年年次大会、名古屋大学、2020. 3. 18

1. 湯井悟志、小林宏充、坪田誠
超流動 4He における常流体間のエネルギー輸送：再結合と渦輪
2. 乾聡介、中川朋、坪田誠
超流動 4He の吸い込み渦における giant vortex の安定性
3. 韓俊植、坪田誠
非対称 2 成分 Bose-Einstein 凝縮体中の量子渦の空間構造
4. 佐野融人、坪田誠
ボース凝縮体における乱流の異方性とその振動外力依存性
5. 小久保治哉、笠松健一、竹内宏光
対向流をもつ相分離した 2 成分ボース凝縮体における界面の非線形ダイナミクス

学位論文

修士論文

1. 乾聡介
「超流動⁴Heにおける微粒子と量子渦のダイナミクス及び局所量子渦糸タングルの形成」

研究助成金取得状況

1. 坪田誠：科研費基盤研究(C)
「超流体・常流体完全結合ダイナミクス」
80万円
2. 竹内宏光：科研費基盤研究(C)
「多成分超流体における秩序化過程のパーコレーションと動的統計則」
60万円
3. 竹内宏光：科研費基盤 (B) (分担)
「散乱長の時空間制御で開拓する量子縮退気体の新奇な非平衡ダイナミクス」
10万円
4. 竹内宏光： 科研費 国際共同研究加速基金(国際共同研究強化(A))
「フェルミ超流体における自発的対称性の破れの動的理論」
1,160万円

受賞

1. 坪田誠が、流体科学研究賞を受賞した。
2. 佐野融人が、日本物理学会領域 1 学生優秀発表賞を受賞した。
3. 岡崎佳純が、理系大学院生英語プレゼンテーションコンテストに参加し準優勝した。
4. 竹内宏光が、2019年度南部陽一郎記念若手奨励賞を受賞した。

電子相関物理学研究室

小栗 章 教授 堤 和彦 (D1) 和氣 康平 (M1) 小林 良輔 (B4)
西川 裕規 講師 一町 ほのか (M2) 魚住 柚月 (B4) 高橋 雅大 (B4)
寺谷 義道 (博士研究員) 橋本 将史 (M2) 田原 克樹 (B4)

研究概要

我々が研究している量子不純物系は、軌道数、磁場やゲート電圧などの外場による不純物準位など多くの実験的に制御可能なパラメータを持ち、超伝導と近藤効果の競合なども含め、多彩な量子状態が実現される。我々は、高次フェルミ流体補正に現れる非線形感受率を通した3体ゆらぎの効果に関して、広いパラメータ空間の一部分を調べてきた。2019年度は、電子正孔対称性や時間反転対称性を持たない、多軌道の量子ドット系に対して、非線形電流ゆらぎ・電流ノイズに対する高次フェルミ流体補正に関する微視的なFermi流体論を確立し論文を投稿した。特に、非平衡定常状態におけるKeldysh形式の4点バーテックス関数の低エネルギーにおける振る舞いを明らかにした。また、小林研介教授（東大理、阪大理）の実験グループとの共同で輸送現象を通した強相関電子系の低エネルギー量子状態の研究を進め、論文の準備を進めた。

我々の研究の主題である近藤効果は、希薄磁性合金系において電気抵抗の温度変化に現れる極小現れる現象として知られているものである。その本質は、金属中の伝導電子と磁性不純物に局在した量子スピンが強く結合した多体量子状態を形成することにあり、凝縮系物理学の重要な基礎概念の一つとなっている。また、その舞台は多方面に広がり、今日では量子ドット、冷却原子気体などの様々な系で研究の対象となっている。近藤効果の低エネルギー領域の性質は、LandauのFermi流体論の精神を受け継いだゼロ次元的な場の理論により記述される。最近、量子ドット系では非平衡電流および電流ノイズの高感度測定によって、Fermi流体を特徴づけるパラメータの決定が可能になってきた。それに伴い、従来の理論では十分でなかった非線形応答、および電子励起と正孔励起の非対称性まで含めた輸送係数の高次体補正に関する検討が必要になっていた。

我々が2017年度に出版した“Higher-order Fermi-liquid corrections ...”と題した3編論文は、1970年代からの懸案であった問題を、多体量子論・場の理論的アプローチから微視的に解決したものである。我々は、電子正孔対称性や時間反転対称性がない場合に低エネルギーにおける輸送係数の温度変化およびバイアス電圧による変化が、量子不純物系の基底状態における電子占有数の線形感受率と三体非線形感受率によって決定されることを多体量子論から微視的に証明した。加えて、非線形感受率を数値くりこみ群を用いて精度良く求め、輸送係数の磁場依存性に見られるスケールリングおよび局在電子数の変化に対する依存性明らかにした。また、2019年度に投稿した我々の最新の論文では、これをさらに発展させ、電流に印加電圧の3次の項が現れる非線形応答領域における多軌道系の非平衡電流および電流ノイズの絶対零度における厳密な公式を導き、近藤効果によるスケールリング則が電流ノイズに対しても成立することを示した。

この研究のさらなる発展を現在進めており、三体非線形感受率を軌道数 N の大きな極限から計算する $1/(N-1)$ 展開による計算も実施し、数値くりこみ群が適用できる $N=4,6,8$ などでは両者を比較し、電子間相互作用が大きい場合には良く一致することを示し、さらに2020年3月の日本物理学会およびアメリカ物理学会で発表する予定であった（残念ながら両学会ともコロナウィルスの感染拡大により中止になった）。また、小林研介教授の実験グループでは、カーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤状態を介した非線形応答電流・電流ノイズの精密測定に成功している。我々は、共同研究を通し理論と実験の比較し、量子ドット系の輸送係数の測定から実験的に三体非線形感受率を決定し、磁場中の量子ゆらぎの効果に関する新たな知見を得た。この結果は、日本物理学会で発表し、論文は現在投稿中である。

超伝導に接続された量子ドット系に関する研究では、量子相転移およびクローズオーバーの問題に加え、複数の常伝導リードが接続された系で見られる交差アンドレーエフ散乱による非局所伝導に与える電子相関に関する問題に取り組んできた。この研究は、株式会社先端力学シミュ

レーション研究所の田中洋一氏および NTT 物性科学基礎研究所の山田康博氏との共同研究で多端子系の近藤効果との競合を詳細に調べている。2019 年度には学会発表を行い、論文準備中である。

研究内容の詳細

以下、より詳細に研究の概要を述べる。本研究室では、固体中の電子系が織りなす多彩な量子状態に関する理論研究を行っている。主として、カーボンナノチューブや半導体ヘテロ接合の量子井戸などの微細加工により作成された量子ドットおよび関連するナノ物質系を対象とし、磁性や電気伝導などの物性に与える電子間相互作用の効果を、場の量子論や数値・計算物理学的な方法を駆使した研究を進めている。特に、多重量子ドットや複数の軌道を持つ量子不純物系の量子相転移や近藤効果、量子ゆらぎ、および超伝導体と接続された量子ドット系におけるクーパー対と電子間斥力の競合などについて調べている。また、小林研介教授（東大理、阪大理）の実験グループと連携し、カーボンナノチューブ量子ドットの近藤効果と非平衡電流ゆらぎに関する共同研究を行っている。

最近の研究テーマ：[1] カーボンナノチューブ、および 2 重量ドットにおける SU(4) 近藤状態と SU(2) 近藤状態のクロスオーバーと量子相転移に関する数値くりこみ群 (NRG) による研究。[2] 超伝導体と接合された量子ドット系における Andreev 散乱, Josephson 位相, 長岡強磁性, 近藤効果の競合, および量子相転移・クロスオーバー移に関する研究。[3] 多数の局在軌道を持つ量子ドット系の低エネルギー状態, および非平衡定常状態に対する有効理論の定式化とスペクトル関数, および高バイアス極限からの展開に関する研究。[4] 不純物 Anderson 模型を用いた非平衡近藤効果の低エネルギー Fermi 流体領域に関する研究。[5] 量子不純物系に於ける量子相転移と Luttinger-Friedel 総和則に関する研究。[6] 4 重量量子ドット上の Lieb 磁性と Nagaoka 強磁性と近藤効果の競合に関する研究。以下に, [1]~[6] について, 詳細を記す。

- [1] 多数の軌道を持つ量子不純物系では, 局在準位を占有する電子間のクーロン斥力, Hund 結合, および混成する連続スペクトルを持った伝導電子チャンネル数により, SU(4) 対称性などを持った多彩な Kondo 状態や, 非 Fermi 流体状態が実現される。本研究室では, 多方面からこれらの系の量子相転移・クロスオーバーに関する研究を進めている:

カーボンナノチューブ量子ドットに関して, 小林研究室 (大阪大学) と共同を進めている。この系では, ナノチューブの軸回りを左右に回る電子軌道による軌道縮退のため, 局在電子軌道はスピン自由度を含めて 4 重に縮退している。高精度の非平衡電流およびノイズの測定から低エネルギーの Fermi 流体状態を特徴づけるパラメータである Wilson 比が決定され, 結果は Anderson 模型に基づく理論計算とよく一致することを実験・理論の協力により明らかにした。測定に用いた量子ドットでは印加するゲード電圧に応じて SU(4) および SU(2) のどちらも実現されるが, どちらの場合もコンダクタンスおよび電流ノイズの実験と対応する数値くりこみ群による計算結果には良い一致が見られ, 低エネルギー領域における Fermi 流体的振る舞いを矛盾なく説明できることが分かった。また, 局在電子軌道の占有数が 2 個の付近では SU(4) 近藤状態に磁場を印加した場合に, 磁場中においてもコンダクタンスに近藤効果に特有である平坦なゲード電圧依存性が観測された。実験と理論との総合的な比較から, 観測に用いられたカーボンナノチューブ量子ドットでは軌道のゼーマン分裂とスピンゼーマン分裂が同程度の大きさで相殺し, 磁場中でも 2 重縮退が残り得ることが分かった。これらの結果は, 実験は磁場の増大による SU(4) から SU(2) 近藤状態へのクロスオーバーを観測したものと解釈できることを示している。さらに, コンダクタンスの温度依存性に関する理論と実験の比較, およびスペクトル関数に対する理論計算を含めた総合的な検討を進めている。

- [2] 超伝導体との接合系に関する研究では, 単一量子ドット系に加え, 超伝導リードと常伝導リードからなる 3 端子に接続された 3 角形 3 重量量子ドットに関する研究を行っている。これらの系の基底状態は, 超伝導リードとの接続により変化し, Josephson 位相, Andreev 散乱,

および近藤効果が競合する多彩な変化を見せる。3 角形 3 重量子ドットでは、スピン一重項基底状態と 2 重項基底状態の間の準位交差が起り得る。これは局在電子軌道の縮退、あるいは長岡強磁性に起因する高スピン状態に起因し伝導電子による局所モーメントの完全遮蔽と不完全遮蔽の量子相転移として現れる。我々は、それぞれの量子相の中にも、クロスオーバーを通じて基底状態の性質のことなるいくつかの領域が現れることを見出した。さらに、クーパー対の量子のもつれ、および交差 Andreev 散乱に起因する非局所電気伝導などについても研究を進めている。我々の理論研究は、平衡・動的性質を、数値くりこみ群および Green 関数を求める拡張（完全基底系密度行列と自己エネルギーを併用した NRG）等を用いた精密な方法を用いたものである。

- [3] 電子相関の解明には、問題を取り扱う理論・定式化の発展も欠くことができない。我々は、軌道縮退のある量子不純物・量子ドットを記述する代表的なモデルである $SU(N)$ 対称性を持つ Anderson 模型に関して、 $1/(N-1)$ 展開という方法を定式化した。ここで、 N は軌道縮退数である。量子不純物系では従来 N が大きな場合からの解析的なアプローチとして、Non-Crossing Approximation(NCA) などが用いられてきたが、それらは不純物電子と伝導電子との混成項 v の摂動展開に基づくものである。我々の展開法は電子間斥力 U の摂動展開に基づく、 $1/(N-1)$ のゼロ次は Hartree-Fock 近似、 $1/(N-1)$ の 1 次で Random Phase Approximation(RPA)、 $1/(N-1)$ の 2 次からスピンや電荷の量子ゆらぎによる電子相関効果が系統的に記述される。我々は、これまで $1/(N-1)$ の 2 次までの計算を行い数値くりこみ群なども併用し低エネルギーの振る舞いを調べ、この方法の有効性を示した。

また発展として、振動数 ω の有限な領域における振る舞いを含めた、より広いエネルギー範囲を視野にいたれた拡張を行っている。その成果のひとつとして、高エネルギー領域の振る舞いに関して発展が挙げられる：我々は熱的場の理論の拡張された Hilbert 空間に対応する Liouville-Fock 空間を用い、Anderson 模型の非平衡 Green 関数が高バイアスの極限における厳密解を導出し、高エネルギー領域における相互作用する電子系のダンピング効果が非エルミート有効ハミルトニアンによって決定されることを示した。このような逆の極限から、有限バイアス領域への拡張についても検討を進めている。

- [4] 相互作用する電子系の低エネルギーの性質は、Fermi 流体や Tomonaga-Luttinger 流体、あるいは Majorana 励起などを含む、量子多体系の基底状態の波動関数の特徴によって決定される。これらの普遍的な振る舞いがエネルギーの上昇に伴いどのような変化を示すかは、低エネルギー励起量子状態の性質が強く反映される。我々は、低エネルギー Fermi 流体状態に関する微視的理論の、電子正孔対称性がない場合に対する拡張を進めている。

特に最近、電子-正孔非対称な Anderson 不純物模型の Green 関数の低エネルギーにおける漸近形を、厳密に求めることに成功した：近藤効果の低エネルギー領域では、輸送係数に Fermi 流体に特徴的な振動数 ω 、温度 T 、バイアス電圧 eV に対する 2 乗の依存性が見られる。この依存性には準粒子間相互作用の効果が、二通りの寄与を通して現れる。一つは散乱による準粒子のダンピング、もう一つは準粒子エネルギーの補正であり、それぞれ自己エネルギー $\Sigma^r(\omega, T, eV)$ の虚部、実部に対応する。虚部の振る舞いは良く知られているが、実部の ω^2 , T^2 , $(eV)^2$ の項の係数についてはこれまで厳密なことは分かっていなかった。我々の研究では、この問題に対する完全な解答を与えた [Phy. Rev. Lett. **120**, 126802 (2018)]。より詳細に述べると、Ward 恒等式等の場の量子論の方法を用いて、実部の ω^2 , T^2 , $(eV)^2$ の項の係数の厳密な表式が、不純物準位を占有する電子数のゆらぎに関する 3 体の非線形感受率によって完全に決定されることを示した。我々の研究では、関連論文 [C. Mora et al., Phys. Rev. B **92**, 075120 (2015)] で現象論的に展開された議論に微視的かつより一般的な証明を与え、さらに実部を決定するために必要な 3 体の相関関数の表式と独立な成分の数を明らかにした。これらの結果によって、電子-正孔非対称な場合における輸送係数の系統的な計算を行うことが可能になった。さらに、熱伝導 T^2 項に現れ多体効果、およびの非線形電流ゆらぎへを含めた理論の拡張も行っている。

- [5] 我々は、反強磁性的相互作用で結合した2つの Anderson 模型の磁氣的量子臨界現象において、Luttinger-Friedel 総和則の半整数性を伴った破れとその解釈（Luttinger 積分が量子臨界点で隔てられた2つの相を区別する電子相関由来のトポロジカル不変量になること）について既に研究してきた。この現象は、その物理的設定の普遍性と理論の形式性の観点から、固体電子系を含むその他の強相関電子系に対してもある程度の普遍性を持って存在すると期待できる。そこでこの普遍性を示すために、次に挙げる系の量子相転移を対象にして Luttinger-Friedel 総和則の半整数性を伴う破れを見出すことを試み研究継続中である；「磁性的相互作用で結合した2, 3, 4軌道量子不純物系（多軌道なので Lieb フェリ磁性など多彩な磁性状態の局所版が考察可能）での、近藤効果と磁性秩序の競合」、「異方的な強磁性相互作用で結合した2軌道量子不純物系の、異方的強さの競合」、「軌道間斥力で結合した2軌道量子不純物系の、近藤効果と局所電荷秩序の競合」、「軌道間引力で結合した2軌道量子不純物系の、近藤効果と局所クーペーペアの競合」。またこの現象の理論的な理解のため、現象論的な方法（特異な散乱問題）と多体理論的な方法（粒子数と化学ポテンシャルの関係等）の2つのアプローチで研究を開始した。
- [6] 4重量子ドット上の Lieb 磁性、Nagaoka 強磁性状態と、これらに接続された電子溜（リード線）からの伝導電子による Kondo 効果の研究を継続して行った。これに関連して、4重量子ドット上の Nagaoka 強磁性状態が実現できたとする近年の実験について理論解析を行った。また4重量子ドット上の Lieb 磁性を利用して、これを通した電流の制御等の考察を行い、そのための研究を準備し継続中である。

教育・研究業績

学術論文

1. “Quantum Noise in Carbon Nanotubes as a Probe of Correlations in the Kondo Regime”, *J. Low Temp. Phys.* (special issue for the 50th anniversary of JLTP) (2019) [34 pages], <https://doi.org/10.1007/s10909-019-02232-4>, Meydi Ferrier, Raphaëlle Delagrangé, Julien Basset, Hélène Bouchiat, Tomonori Arakawa, Tokuro Hata, Ryo Fujiwara, Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Akira Oguri Kensuke Kobayashi, and Richard Deblock.
2. Yoshimichi Teratani, and Akira Oguri, “Three Body Correlations in a Non-equilibrium Current through an SU(N) Anderson Impurity at Arbitrary Fillings”, *JPS Conf. Proc.* 30, 011175 (2020), 6 pages.
3. Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, and Rui Sakano, “Effects of Tunnel-coupling Asymmetries on Fermi-liquid Transport through an Anderson Impurity”, *JPS Conf. Proc.* 30, 011174 (2020), 6 pages.
4. Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Tokuro Hata, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Kensuke Kobayashi, and Akira Oguri, “Field-induced SU(4) to SU(2) Kondo crossover in a half-filling nanotube dot: spectral and finite-temperature properties”, arXiv:2003.12715.
5. Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, and Akira Oguri, “Fermi liquid theory for nonlinear transport through a multilevel Anderson impurity”, arXiv:2001.08348
6. 非平衡状態にある近藤効果 (その2) 近藤効果入門 1; 『固体物理』 55, No. 2, 47–54 (2020) [ISSN:04544544] / 阪野 暁, 小栗 章.

国際会議講演

1. Yoshimichi Teratani, and Akira Oguri, “Three body correlations in a non-equilibrium current through an $SU(N)$ Anderson impurity at arbitrary fillings”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (September 23-28, 2019, Okayama, Japan).
2. Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, and Rui Sakano, “Effects of Tunnel-coupling Asymmetries on Fermi-liquid Transport through an Anderson Impurity”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (September 23-28, 2019, Okayama, Japan).
3. Akira Oguri, and Yoshimichi Teratani, “Higher-order Fermi-liquid corrections for thermoelectric transport through an Anderson impurity”, International Conference on Strongly Correlated Electron Systems 2019 (September 23-28, 2019, Okayama, Japan).
4. Akira Oguri, Yoshimichi Teratani, and Rui Sakano, “Fermi-liquid corrections to non-equilibrium Keldysh vertex functions for an Anderson impurity model”, American Physical Society March Meeting (March 2-6 2020, Denver, USA) [COVID-19 のため開催中止].
5. Yoshimichi Teratani, and Akira Oguri, “Role of non-linear susceptibilities in non-equilibrium transport through an N-level Anderson impurity model away from half-filling”, American Physical Society March Meeting (March 2-6 2020, Denver, USA) [COVID-19 のため開催中止].
6. Rui Sakano, Akira Oguri, and Mikio Eto, “Bell-state correlation in electric currents through lead electrodes connected to a quantum dot”, American Physical Society March Meeting (March 2-6 2020, Denver, USA) [COVID-19 のため開催中止].

学会・研究会講演

1. Anderson 不純物における非線形電流の磁場依存性に関する近藤スケールリングに与えるトンネル結合の非対称性の効果,
堤和彦, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,
日本物理学会 (2020.3. 16–19 名古屋大)
2. 三重量子ドット系の近藤領域における Andreev 散乱と非局所伝導度 II,
橋本将史, 寺谷義道, 小栗章, 山田康博, 田中洋一,
日本物理学会 (2020.3. 16–19 名古屋大)
3. $SU(N)$ Anderson 模型の非線形感受率の $1/(N-1)$ 展開 II,
一町ほのか, 寺谷義道, 小栗章,
日本物理学会 (2020.3. 16–19 名古屋大)
4. N 軌道 Anderson 不純物模型における 3 体相関の非平衡電流およびノイズに対する効果,
寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,
日本物理学会 (2020.3. 16–19 名古屋大)
5. 電子正孔非対称な量子ドットにおける電流ゆらぎの Fermi 液体補正,
小栗章, 寺谷義道, 阪野壘,
日本物理学会 (2019.9. 10–13 岐阜大)
6. 磁場中の Anderson 不純物の非線形応答に対するトンネル結合の非対称性の効果,
堤和彦, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,
日本物理学会 (2019.9. 10–13 岐阜大)
7. $SU(N)$ Anderson 不純物の非平衡電流におけるフェルミ流体効果 II,
寺谷義道, 小栗章,
日本物理学会 (2019.9. 10–13 岐阜大)

8. 三端子量子ドットの端子間のエンタングルメント,
阪野塁, 小栗章, 江藤幹雄,
日本物理学会 (2019.9. 10-13 岐阜大)
9. SU(N) Anderson 模型の非線形感受率の $1/(N-1)$ 展開,
一町ほのか, 寺谷義道, 小栗章,
日本物理学会 (2019.9. 10-13 岐阜大)
10. 三重量子ドット系の近藤領域における Andreev 散乱と非局所伝導度,
橋本将史, 寺谷義道, 小栗章, 山田康博, 田中洋一,
日本物理学会 (2019.9. 10-13 岐阜大)

学位論文

1. 寺谷 義道：多軌道量子ドットにおける近藤効果および非平衡フェルミ流体状態に関する理論的研究

修士論文

1. 橋本将史：超伝導体を接合した量子ドット系における非局所的輸送現象
2. 一町ほのか：N 重に縮退した準位をもつ量子ドット系における非平衡電流の $1/(N-1)$ 展開

研究助成金取得状況

1. 小栗章 (代表)：学術振興会・基盤研究 (C) 「メゾ・ナノスケール系における量子凝縮相の多電子相関と電流ゆらぎに関する理論的研究」60 万円 (直接経費)

海外出張および海外研修

1. 小栗 章：アメリカ合衆国，2020 年 3 月 1 日～2020 年 3 月 8 日，
APS March meeting (Denver, USA) 出席・発表
(新型コロナウイルス感染拡大のため学会開催および出張中止)
2. 寺谷 義道：アメリカ合衆国，2019 年 3 月 3 日～2020 年 3 月 8 日，
APS March meeting (Denver, USA) 出席・発表
(新型コロナウイルス感染拡大のため学会開催および出張中止)

レーザー量子物理学研究室

井上慎	教授	Janek Fleper(特別研修学生)	小林一平 (M1)
堀越宗一	特任准教授	大前真秀 (M2)	京谷隆正 (B4)
加藤宏平	特任助教	谷澤昂樹 (M1)	河野皓平 (B4)

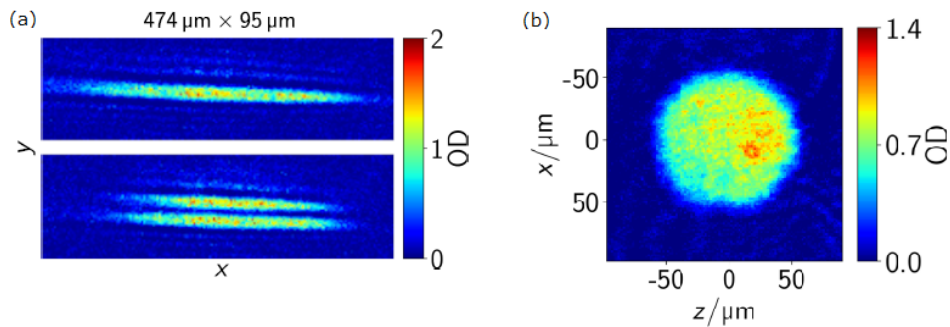
研究概要

1. 混合ボース凝縮体の非平衡ダイナミクスの観測へ向けた2次元箱型トラップの開発 (井上、加藤、Fleper)

水と油の相分離は日常に目にする興味深い現象の一つである。目に見えない分子のミクロの性質が、液体全体のマクロの振る舞いを決定している。では、液体が超流動を示したらどうなるだろう？分子の間の相互作用を自在に変えられたら相分離の様子は全く異なるものになるのだろうか？その様な疑問に答える為に、我々はカリウム原子とルビジウム原子の混合ボース凝縮体の系を立ち上げた。フェッシュバハ共鳴を用いることで粒子間の相互作用を示すパラメータである、散乱長を自在に制御することができる。これによって、例えば2種のボース凝縮体を混合状態にして重ね合わせた後、急激に相互作用を変化させることで相分離を開始させるといった実験が容易に実現可能である。混合ボース凝縮体の相分離過程の直接観測が本研究の第一の目標である。

相分離過程を正確にとらえる為に、我々は通常用いられる調和型トラップではなく、原子の密度分布が様な箱型トラップを用いることにした。特に重力方向には強く閉じ込めた2次元箱型トラップにすることで、2原子種の質量の違いに起因したトラップ位置のずれを抑制することができる。2次元箱型トラップは水平方向を閉じ込めるリング状トラップと垂直方向を閉じ込めるシート状トラップを組み合わせることによって実現した。原子の共鳴から正に離調した光を用いることによって、斥力ポテンシャルを発生させる。この様にする事で原子は光強度がゼロの所に閉じ込められるので、原子密度が様なトラップを実現できる。

前年度までに、テスト系によって所望のポテンシャル形状が得られることを確認済みである。今年度はまず調和型トラップからシート状トラップへの原子の導入を行った。シート状トラップは斜めに照射した2本の光の干渉によって出来たパターンを利用するが、2本の光の位相差の変化によって干渉パターンが動き、原子が複数の層に導入されてしまうという問題があった。観測は鉛直方向から行う為、イメージの重なりを防ぐためには、その中の一層に確実にトラップすることが重要である。従って各回ごとに光の強度分布を観測し、光の位相差を調整するフィードバックシステムを導入することにした。下図(a)は水平方向から観測したシート状トラップへの原子の移行時の吸収イメージング画像である。光の位相を適切に調整することで、2層にまたがってトラップされていた原子((a)下図)が一層だけにトラップ((a)上図)されていることが観測できる。さらにリング状トラップを組み合わせることで実際に2次元箱型トラップへ原子を導入することに成功した。下図(b)に垂直方向からの吸収イメージング画像を示す。実験前の懸念事項は、レーザー光自体のほんの少しのトラップの傾きの変化によって原子の偏り具合が毎回変化してしまうことであったが、密度分布は各回毎に安定しており問題ないことが分かった。また密度のわずかな不均一性はリング状トラップの不完全性に起因していることが分かり、今後の改善が期待できる。また、トラップ寿命は1s以上あることが確認され、非平衡ダイナミクスの観測に十分な寿命があることが分かった。



2. 混合ボース凝縮体の非破壊観測システムの開発(井上、加藤、大前)

ボース凝縮体の観測方法は、原子の共鳴光をプローブ光に用いた吸収撮像法が一般的であるが、これは基本的には破壊測定であり、混合ボース凝縮体の非平衡物理をリアルタイムで観測するような、ダイナミクス観測には余り適していない。このような観測には、共鳴から大きく離調をとった光を用いることによって、ボース凝縮体の破壊を極力抑えた位相コントラストイメージング法が適している。位相コントラストイメージング法では、原子による光の位相変化を読み取ることによって、光の吸収に頼らずに原子集団の密度分布を決定することができる。今年度は実際に位相コントラストイメージング法に用いるプローブ光の光源の開発とボース凝縮体生成装置への実装を行った。光源の周波数の安定化にはレーザー冷却に用いる原子の共鳴光との光ビートを観測することで、共鳴光との周波数差・位相差を測定し、それをフィードバックすることによって安定化する光位相同期法を用いた。今回フィードバックシステムに従来用いていたアナログ素子ではなく、周波数帯域の広いデジタル素子を用いることによって、堅牢かつ、1GHzの範囲にわたって周波数を調整可能な光源の実現に成功した。これによって、用途に応じて原子の破壊の程度と信号強度を自由に設定できるようになった。また、実際に位相コントラストイメージングを用いた原子の連続撮像に成功した。

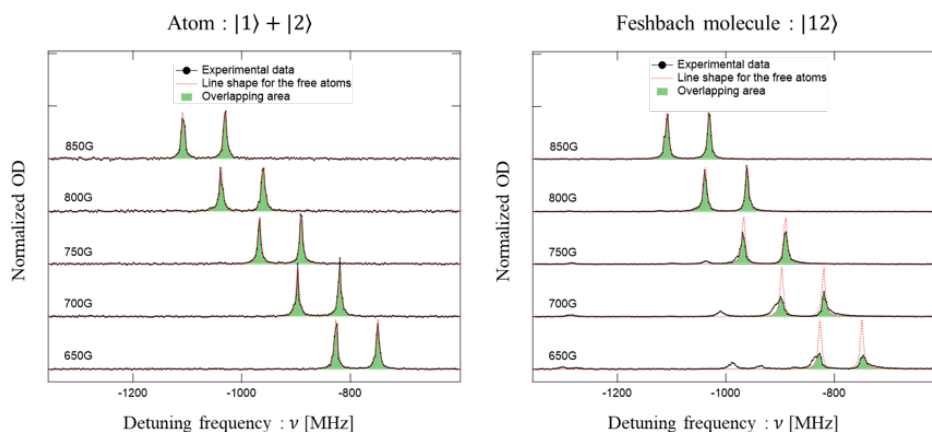
3. フェッシュバッハ分子の吸収分光(堀越)

クォークから原子・分子に至る過程で、基本粒子が複合粒子へ、複合粒子が基本粒子となりさらに大きな複合粒子を形成する過程が幾度も起きる。しかし複合粒子の形成過程に関する基礎物理は、物質科学として基礎であるにも関わらず定量的に扱うのが極めて難しい問題である。もしその複合粒子の形成過程を連続的に変化でき中間状態を準備できたとしたら、基本粒子間の相互作用がどのように複合粒子間の相互作用に連続的に変化するのか、基本粒子からなる多体系の物性がどのように複合粒子からなる多体系の物性に变化するのか、また複合粒子を形成し始めると何の観測量がどのように変化するか理解できる。

冷却原子系はこの難問を紐解く理想的な実験系である。フェッシュバッハ共鳴で散乱長を制御することにより、非束縛状態から束縛状態（フェッシュバッハ分子）へ連続的に変化できる。この量子系を多角的に調べ尽くすことにより、複合粒子形成に関する基礎物理を抑えることができる。例えば我々はフェルミ粒子である ${}^6\text{Li}$ 原子を用いているが、その状態方程式からはフェッシュバッハ分子間の相互作用や、フェルミオンの性質がボース粒子系へ変化していく様子を捉えることができる。まず我々は、フェッシュバッハ分子から成る量子多体系の精密測定を実現するため、吸収分光の手法を用いフェッシュバッハ分子サイズに依存した光学応答の研究を進めた。

我々はフェッシュバッハ磁場中で、 ${}^6\text{Li}$ 原子の2つの内部状態 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ の混合状態を用意し、その2つの内部状態が束縛しない実験条件と、フェッシュバッハ分子に束縛する実験条件で吸収分光実験を行い、フェッシュバッハ分子のサイズに依存した吸収スペクトルの変化の様子を捉えた。ここでフェッシュバッハ分子のサイズは分子の平均直径であり、散乱長に等しい。下図に原子と分子の吸収スペクトルの比較を示した。黒線が実験データであり、赤の点線が孤立原子の理論曲線である。フェッシュバッハ共鳴磁場は832Gaussであり、それよりも低磁場に進むほどフェッシュバッハ分子のサイズが小さくなり、共鳴磁場より大きい磁場では束縛せず原子状態に相当する。実験データは非束縛の場合は理論曲線と全ての磁

場で一致しているが(左のグラフ)、フェッシュバツハ分子を形成している場合、その分子のサイズが小さくなるにつれて理論曲線から大きくずれていく様子を捉えた(右のグラフ)。この実験結果は明確に、複合粒子のサイズがプローブレーザー光の波長以下になると、分子としての遷移が可能になり粒子の電気双極子に変化を受けていることを示している。また本測定により、冷却原子を測定しているレーザー周波数での吸収強度がフェッシュバツハ分子のサイズが小さくなるにつれ抑制される事が判明した。これは冷却原子の粒子密度を定量的に測定する際に重要となる。この実験により今後の量子多体系の物性測定の準備が整ったと言っても過言ではない。



4. 時間変化する散乱長を用いたユニタリーフェルミ領域の体積粘性率の測定(堀越)

トラップ中の冷却原子気体は平均粒子間距離が分子間力で決まる相互作用レンジよりも十分離れている希薄な気体である。しかしフェッシュバツハ共鳴で散乱長を増大させることにより、平均自由行程をトラップ中の気体のサイズよりも十分小さくすることができ、流体力学に従う流体の振る舞いを示す。物理として重要な点は、流体のパラメータである粘性率とミクロな相互作用との因果関係を理解することである。粘性率には等方的な体積変化に対し働く体積粘性率と、非等方的な体積変化に対し働くせん断粘性率がある。これまでせん断粘性率の測定が完全流体の観点で、重イオン衝突におけるQGPの振る舞いや、ユニタリーフェルミ気体(散乱長が無限に発散しているフェルミ気体)の拡散の振る舞い等で研究されてきた。一方で体積粘性率の測定は、等方的に体積変化を与えるのが難しい点や、散乱長が大きい領域では体積粘性率がせん断粘性率に対して小さな値を持つことから積極的に進められてこなかった。しかし体積粘性率は粒子間の近距離相関の情報を反映し、ミクロな相互作用とマクロな流体のパラメータを結びつける非常に重要な物理量である。

我々は東京工業大学の西田氏の理論提案に従い、時間変化する散乱長をフェルミ原子に与え、そのエネルギー上昇から体積粘性率を決定する実験を進めている。この手法はトラップされている気体に対し体積変化は与えないが、この系を特徴付ける長さスケールが散乱長しかないため、その時間変化があたかも体積変化をしている場の中に粒子が存在しているような効果を与え、その結果体積粘性率が粒子系にエネルギー上昇を与える。トラップ系が非等方であっても、体積粘性率の効果のみが現れるのが大きな特徴である。予備実験は済んでおり、我々は散乱長の時間変調の長さに依存してエネルギー上昇が線形に上昇することを確認している。2019年度の国際会議での議論で、散乱長の変調周波数依存を調べることで動的体積粘性率を実験で決定できるという意見を頂いた。そのため散乱長を幅広い周波数で変調できる電源を導入し、系統的に実験データを取得する準備を整えた。

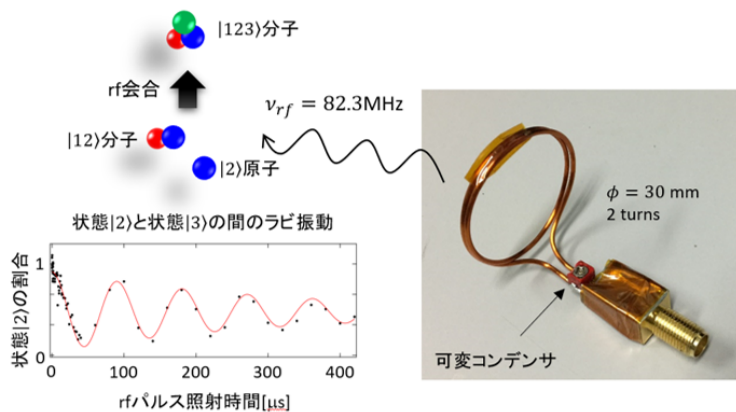
5. 高強度 rf パルスを用いたエフィモフトライマーの高速生成(堀越)

レーザー光を用いた多原子分子の量子操作はAMO物理学の挑戦の1つであり、我々が行った電子/陽子質量比の時間変化の測定のような基礎物理の検証から量子化学の範囲まで、分

子の基礎研究の応用範囲は広い。これまで冷却原子実験で二原子分子の量子操作の研究は大きく進展しているが、三原子分子以上の量子操作は実験と理論の困難さから研究例が少ない。

我々は上記のフェッシュバッハ分子の吸収分光実験により、大きな散乱長で束縛しているフェッシュバッハ分子を用いることにより、高効率で励起分子へ光励起できることを発見した。そこで我々は、大きな散乱長で束縛しているエフィモフトライマーに注目し、この三体の波動関数にレーザー光を照射することにより、三原子分子の励起状態に光励起できると考えており、世界初の多原子分子の量子操作を目指して研究を進めている。フェッシュバッハ分子に対してエフィモフトライマーの難しい点は、その寿命の短さである。フェッシュバッハ分子の寿命は1秒以上あるのに対し、エフィモフトライマーは $100\mu\text{s}$ 程度しかない。そのためエフィモフトライマーを用いて三原子分子に光励起するためにはその寿命以下の速さで高速に生成する必要がある。実験では下図のように、 ${}^6\text{Li}$ 原子の内部状態 $|1\rangle$ と $|2\rangle$ から成るフェッシュバッハ分子 $|12\rangle$ と $|2\rangle$ の内部状態の混合系をトラップ中に用意し、rfパルスを与え $|2\rangle$ を $|3\rangle$ に内部励起すると同時に $|123\rangle$ のエフィモフトライマー状態に束縛する。そのため、高速にエフィモフトライマーを生成するためには、 $|2\rangle$ から $|3\rangle$ へのラビ周波数をエフィモフトライマーの寿命よりも十分早くする必要がある。

そこで我々は $|2\rangle$ から $|3\rangle$ への共鳴周波数 $\nu_{rf} = 82.3\text{ MHz}$ にインピーダンス整合するアンテナを用意し、50Wのrfアンプを用いて状態 $|2\rangle - |3\rangle$ 間のラビ振動の測定を行った。実験結果は以下のグラフに示した通り、 $50\mu\text{s}$ 程度で内部状態が $|2\rangle$ から $|3\rangle$ へ遷移している様子が確認できる。しかし现阶段ではエフィモフトライマーの寿命とほぼ同程度であるため、さらなるrfパルスの高強度化を進める必要がある。また、rf強度を増強させるとレーザーシステムに影響を及ぼすこともわかり、アース対策やノイズ対策の必要性も認識した。さらにエフィモフ状態を生成するには、冷却原子を調和ポテンシャルに閉じ込めるより、箱型のポテンシャルに閉じ込めたほうが効率が上がることも議論を重ねることで認識できた。これらの改善を行うことで高速なエフィモフトライマー生成が可能になり、三原子分子の量子操作への道が開ける。



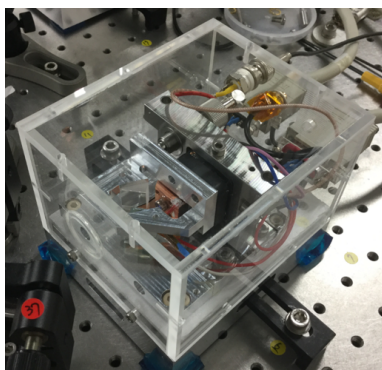
6. 磁気的フェッシュバッハ共鳴の光学操作へ向けたレーザーシステムの開発(堀越、谷澤)

磁気的フェッシュバッハ共鳴は、外部磁場によるゼーマン効果で分子ポテンシャル間の結合が変化し、その分子ポテンシャルで相互作用している粒子間の散乱特性が外部磁場に依って変化する共鳴散乱現象である。我々はフェルミ粒子である ${}^6\text{Li}$ 原子間の散乱長を磁気的フェッシュバッハ共鳴を用いて制御し、BCS-BECクロスオーバーにおける強相関フェルミ粒子系の物性研究や、中性子星や希薄中性子物質の量子シミュレーション実験を行ってきた。近年、レーザー光で分子ポテンシャルに操作を加えることにより磁気的フェッシュバッハ共鳴の光学操作が可能になり、散乱パラメータである散乱長と有効長の独立操作による次世代量子シミュレーションへの応用が期待されている。

磁気的フェッシュバッハ共鳴に関わる ${}^6\text{Li}$ 原子の分子状態をレーザー光で操作するためには、 100GHz 程度の幅広い周波数範囲で発振波長を調整でき、 1MHz 以下の絶対周波数安定度を

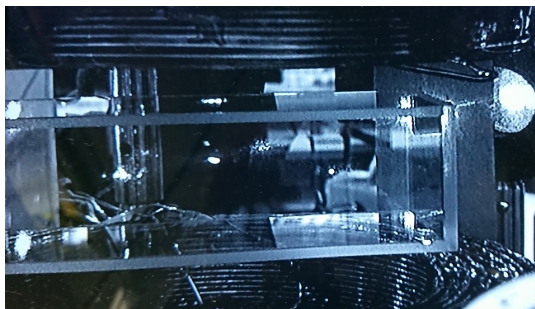
有するレーザー光源が必要である。この光源の条件を満たすため、ヨウ素セルで安定化された外部共振器型半導体レーザー (ECDL) の開発を進めている。ヨウ素分子はリチウム分子の吸収波長帯に多くの吸収線が存在するため、 ${}^6\text{Li}$ の様々な分子状態に対しレーザー光の周波数を安定化するに適している。

2019 年度はモードホップフリー領域が広い ECDL の開発を進め、下図に示したプロトタイプの ECDL で性能評価を行った。発振周波数の安定度は十分であるが、モードホップフリーに関しては改善点が見つかり改良を進めている。開発したレーザー光でヨウ素のドップラー吸収まで確認し、飽和分光による絶対周波数の安定化を進めている。



7. 専門物理学実験用 Rb 原子のレーザー冷却装置の開発(井上、加藤、京谷、河野)

2020 年度より、本研究室は専門物理学実験の 1 テーマを担当することになった。従って、実際にレーザー冷却を体験できるように Rb 原子のレーザー冷却装置の開発を行った。具体的には、Rb 原子の各超微細構造の共鳴周波数に安定化されたレーザー光源の開発、外部環境からの断熱の為に真空槽の実装、冷却された原子を集める為に磁気光学トラップの構築等を行った。下図に実際にレーザー冷却された Rb 原子の蛍光観測の様子を示す。装置は常に稼働しており、いつでも常温の原子を即座に $100\mu\text{K}$ 程度まで冷却するレーザー冷却が体験できるようになっている。



8. 冷却分子による電子陽子質量比の時間変化の観測(井上)

井上が東京大学在籍時に当時の小林淳助教（現京都大学特定准教授 兼 JST さきがけ専任研究者）と行った「冷却分子を用いた電子陽子質量比の時間変化の観測」の論文が Nature Communications 誌から出版された (Nature Communications **10**, 3771 (2019))。さらに「極低温分子を使い電子と陽子の質量比の不変性の検証に成功—レーザー冷却を利用し、分子分光による検証精度の世界記録を更新—」と題して 2019 年 8 月 21 日に京都大学と大阪市立大学共同のプレスリリースが行われ、「電子と陽子の質量比 不変性検証に成功 京大と大阪市大」と題して科学新聞の 2019 年 9 月 13 日版の第 1 面に掲載された。



その他

1. 理学棟 C101 へ実験装置の移設(堀越)

2020年2月17日に堀越の実験装置を東京大学から理学棟 C101 に移設した。

教育・研究業績

学術論文

1. “Measurement of the variation of electron-to-proton mass ratio using ultracold molecules produced from laser-cooled atoms” J. Kobayashi, A. Ogino and S. Inouye, Nature Communications **10**, 3771 (2019).

国際学会・研究会講演

1. Munekazu Horikoshi, “Cold Atom Experiments for Cold High-Energy Physics”, HKUST IAS Focused workshop on “Quantum simulation of novel phenomena with ultracold atoms”, 2019/5/7, Hong Kong, China. (招待講演)
2. Takahiro Tsumori, Munekazu Horikoshi, Keisuke Fujii, Yusuke Nishida, Junji Yumoto, Makoto Kuwata-Gonokami, “Measurement of bulk viscosity of ultracold Fermi gas in the unitary regime”, 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, 2019/5/29, Milwaukee, USA.
3. Yiping Chen, Munekazu Horikoshi, Kosuke Yoshioka, Makoto Kuwata-Gonokami, “Spontaneously Created Attractive Bose-Einstein Condensates and Their Critical Behaviors”, 50th Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics APS Meeting, 2019/5/30, Milwaukee, USA.
4. Munekazu Horikoshi, “The equation of state for Fermi gases in the unitary regime”, International Conference of Strongly Correlated Electron Systems (SCES2019), 2019/9/27, Okayama Convention Center, Japan. (招待講演)
5. Munekazu Horikoshi, “Study of excited cluster states using Feshbach molecules”, ECT* workshop “Universal physics in Many-Body Quantum Systems - From Atoms to Quarks”, 2019/10/7, Trento, Italy. (招待講演)
6. Munekazu Horikoshi, “Universal optical response for Feshbach molecules”, International Symposium on Clustering as a Window on the Hierarchical Structure of Quantum Systems (CLUSHIQ2020), 2020/1/24, Spa & Resort Ryotiku Bettei in Beppu city, Japan.

国内学会・研究会講演

1. 堀越 宗一：「様々な量子系に化ける原子・分子」 大阪市立大学理学研究科談話会，2019/6/27，大阪市立大学.
2. Janek Fleper, Kohei Kato, and Shin Inouye：「Dual species BEC in a 2D-box potential」 日本物理学会 2019 年秋季大会，2019/9/13，岐阜大学
3. 堀越 宗一：「冷却原子量子シミュレーションのクラウド利用に向けて」 新学術領域「クラスター階層」「量子ビーム応用」合同検出器ワークショップ，2019/9/21，東北大学。（招待講演）
4. 堀越 宗一：「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」 日本物理学会 第 75 回 年次大会，2020/3/16，名古屋大学（現地開催中止、発表は成立）.

主催研究会

1. 第 1 回冷却原子研究会「アトムの会」（井上、堀越、加藤），2019 年 9 月 18 日（水）、19 日（木）、20 日（金），レクターレ熱海桃山.



研究助成金取得状況

1. 堀越宗一：新学術領域研究 (研究領域提案型) 計画研究 代表 「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」
2019 年度: 18,720 千円 (直接経費: 14,400 千円、間接経費: 4,320 千円)
2. 井上慎：科研費 基盤研究 (B) 代表 「散乱長の時空間制御で開拓する量子縮退気体の新奇的な非平衡ダイナミクス」
2019 年度: 4,030 千円 (直接経費: 3,100 千円、間接経費: 930 千円)

宇宙線物理学研究室

荻尾彰一 (教授)	MAYTA, Rosa (D3)	荒井優斗 (B4)
常定芳基 (准教授)	尾村勇吾 (D1)	佐藤光希 (B4)
KIM, Jihyun (博士研究員)	藤田慧太郎 (D1)	福島涼 (B4)
多米田裕一郎 (客員研究員)	田上裕太 (M2)	
大嶋晃敏 (客員准教授)	中井慧 (M2)	
小島浩司 (客員教授)	藤原亮太 (M2)	
林嘉夫 (名誉教授、特任教授)	松宮弘幸 (M1)	

研究概要

1. 宇宙線望遠鏡実験 (Telescope Array (TA) 実験) (荻尾、常定、Mayta)

エネルギー 10^{18} eV 以上の「超高エネルギー宇宙線」をターゲットとした国際共同研究で、この宇宙における最も激烈な粒子加速現象の起源を解明することを目的とし、米国ユタ州の砂漠に建設された有効検出面積約 700 km^2 の北半球最大の装置を用いて 2008 年 3 月から定常観測を行っている。

宇宙線は荷電粒子であるため宇宙空間では磁場の影響を受けるため直進せず、地球への到来方向から起源天体の方向を同定することが難しいが、最高エネルギー領域宇宙線は直進性が高いため、高統計での観測を行えば宇宙線到来方向分布の「異方性」が見えてくることが期待されている。これまでの TA 実験の 10 年分の観測データを用いた解析では、おおくま座領域において宇宙線の到来数が他と比べて有意に多い「ホットスポット」の存在が示唆されており、観測データのさらなる蓄積と解析が進められている。また TA から見て宇宙の「北」の領域から到来する宇宙線と、「南」から到来する宇宙線ではエネルギースペクトルが異なるかもしれないという解析結果も得られており、宇宙線の起源天体分布と伝播機構に対するヒントが得られるとの期待から、より統計精度をあげるべく観測が進められ、さらに次項で述べる拡張が行われている。

本研究室は実験装置の設計・開発から現在まで研究グループの主力として本実験に参加している。データ解析を推し進めるほか、観測シフトや検出器の改良・安定稼働のための作業にも積極的に参加している。2019 年度は特に以下の研究課題に取り組んだ。

- (a) 空気シャワー面の厚さ・曲面形状の測定。それらの一次エネルギー・距離および方向依存性の研究 (Mayta)

これらの成果は日本物理学会、第 36 回宇宙線国際会議 (米国・ウイスコンシン大学マディソン校) などで発表された。

2. TA×4 実験、TALE 実験 (荻尾、常定、藤田、田上、藤原、松宮、荒井、佐藤)

前述のように、宇宙線の起源天体を直接同定するためには、高統計、すなわち観測データの蓄積が最も重要である。そのため、TA 実験の有効検出面積を 4 倍に拡大する「TA×4 計画」が提唱され、2015 年度に予算が認められた。2018 年度には、計画全体のほぼ半数、257 台の地表検出器と 4 台の大気蛍光望遠鏡の設置を完了し、実験装置としての稼働を開始した。

また、TA 実験のエネルギーしきい値を 10^{16} eV 以下にまで下げ、 10^{16} eV から 10^{20} eV までの 4 桁におよぶ広いエネルギー範囲での宇宙線のエネルギースペクトルと化学組成の精密測定を目指す「TALE 計画」が立案され、これも 2015 年度に予算が認められた。2017 年度には地表検出器の設置を完了し、2018 年 11 月から本格定常観測を継続している。

本研究室は TALE 実験の代表研究機関であり、また TA×4 実験の主力推進機関でもある。2019 年度は特に以下の研究課題に取り組んだ。

- (a) TALE ハイブリッド実験による 10^{17} eV 領域宇宙線観測と観測精度の評価 (藤原)
- (b) TALE 実験大気蛍光望遠鏡 (FD) のためのイベント再構成ソフトウェアの開発 (藤田)
- (c) TALE 地表検出器 (SD) アレイによる 10^{17} eV 領域宇宙線観測とエネルギー決定法の研究、精度評価 (田上)
- (d) TA×4 実験 SD アレイの境界トリガーシステムの開発 (松宮)
- (e) TALE 実験ハイブリッド検出器における SD-FD の時間差の測定の準備 (荒井)
- (f) シミュレーションによる TALE 実験 SD アレイの有効検出面積の評価 (佐藤)

これらの成果は日本物理学会、第 36 回宇宙線国際会議、国際会議 TAUP2019 (日本・富山) などで発表された。

3. TA 実験サイトにおけるチェレンコフ光観測：NICHE 実験 (常定、尾村、中井、福島)

TA 実験で観測対象としている最高エネルギー宇宙線は、銀河系内にはその起源となりうるような天体 (エネルギー 10^{18} eV にまで粒子加速が可能な天体) が見当たらず、その起源は銀河系外にあると考えられている。一方、数としては圧倒的に多いそれ以下のエネルギーの宇宙線の起源は銀河系内にあると考えられており、例えば超新星残骸における粒子加速が有効に働くという理論予測は大方の研究者から支持されている。ただし銀河系内天体が宇宙線をどこまで加速することができるのかという問題は未解決であり、「低エネルギー = 銀河系内、高エネルギー = 銀河系外」という現在の理解はどこに境界があるのかははっきりしていない。これを解決する鍵になるのは、宇宙線の原子核組成の解明であり、銀河系内天体であれば電荷が大きく加速されやすい重い原子核が多いはずであるが、銀河系外起源であれば長い距離を伝播する間に破碎反応によって壊れてしまい軽い原子核が多いと考えられている。これを観測的に決定するために、TA サイトに低エネルギー宇宙線観測に適した「空気チェレンコフ光検出器」を設置するのが本研究で進める NICHE 実験である。2017 年度からスタートした定常観測は順調に続けられており、データ解析が進められている。2019 年度は宇宙線エネルギー・組成を決定するためのモンテカルロシミュレーションとデータ解析ソフトウェアの開発、PMT2 次元均一性の測定、に重点を置いた。それらの成果は日本物理学会、第 36 回宇宙線国際会議、国際会議 TAUP2019 (日本・富山) で報告された。

4. 最高エネルギー宇宙線到来方向と近傍の宇宙大規模構造との相関 (Kim)

57EeV 以上の宇宙線到来方向分布には、25 度程度の角度スケールの異方性の兆候が見えている (TA 実験が 2014 年に発表した。最高エネルギー宇宙線が過剰に到来する「ホットスポット」と呼ばれている)。しかし、このホットスポットと既知の天体との相関がないこと、近傍で最も大きな銀河団であるおとめ座銀河団の方向にはこのような到来方向集中が見られないことなどが問題となっている。この 2 つの問題を一挙に解決するアイデアとして、宇宙の大規模構造に着目し、おとめ座銀河団から伸びる既知のフィラメント (銀河団と銀河団に間に線状に伸びる銀河の集団) と TA 実験 11 年分の最高エネルギー宇宙線の到来方向との方向相関を調べ、その有意度を 4.4σ と評価した。さらにフィラメント内への最高エネルギー宇宙線の閉じ込め条件から銀河団中の磁場強度約 $3 \mu\text{G}$ 、フィラメント中は約 20 nG とする宇宙線伝播モデルを提案した。これらの成果は日本物理学会、第 36 回宇宙線国際会議 (米国・ウイスコンシン大学マディソン校) で報告された。

5. 国際宇宙ステーションにおける宇宙線観測 (常定)

国際宇宙ステーションにおける宇宙線観測 (常定) 全宇宙線フラックスのうち約 1% は電子・陽電子成分が占める。高エネルギーの電子・陽電子は銀河磁場中ではシンクロトロン放射によりすみやかにエネルギーを失うため、もし地球で高エネルギーの電子・陽電子が観測されれば、その起源天体は地球の近傍に存在しているはずである。宇宙線の加速源として超新星残骸が有力視されていることを考え合わせると、地球で観測される高エネルギー電子の起源は「若くて近傍」の超新星残骸に限られることになり、候補天体はかなり絞られる。したがって宇宙線の起源天体同定は、原子核成分よりもまず電子成分でなされるかもしれない。この

ような動機のもと、宇宙線電子成分の検出器に最適化された検出器 CALET (CALorimetric Electron Telescope) の開発が行われ、2015年8月19日に種子島宇宙センターから H-IIB ロケット 5号機 (HTV5) によって打ち上げられ、国際宇宙ステーション (ISS) の日本実験施設「きぼう」に設置され、2019年度までの観測器の運用はきわめて順調であり、その成果は Physical Review Letter 誌の論文や国際会議において公表された。

6. 南米ボリビアの高地における宇宙線観測 (常定、小島、大嶋、荻尾、Mayta)

エネルギーが $10^{15}\sim 10^{16}$ eV 程度の宇宙線は、エネルギースペクトルに折れ曲がりが存在し、さらに銀河系内の超新星残骸などにおける加速の最高エネルギーと考えられていることもあって非常に重要なエネルギー領域である。このエネルギーの宇宙線は地表 (海拔 0m) には到達しないため、高山で観測を行う必要がある。この実験は南米アンデス山脈の 5000m 級の山において宇宙線を観測するもので、ボリビア・ラパスから近いチャカルタヤ山宇宙線観測所で行われてきた。実験は 1960 年代から行われていたが、装置の老朽化、人的資源の枯渇などにより 2015 年にいったん打ち切ることが決定された。その上で、現地のサンアンドレス大学の他に、新たに東京大学宇宙線研究所、神奈川大学、日本大学などの研究者が加わり、チャカルタヤ山中腹の高度 4800m の高原において新たな宇宙線観測プロジェクト「ALPACA 実験」を立ち上げた。この実験では、宇宙線原子核成分のみならず、宇宙ガンマ線を捉えることを目的としている。ガンマ線は原子核や電子成分とは異なり宇宙磁場の影響を全く受けずに直進するので起源天体を同定できる可能性が高い。この実験の強みは、高度 4800m というガンマ線観測所としては世界最高高度に位置する装置を南半球に設置することであり、銀河中心を含む我々の銀河系の広い領域を見渡しガンマ線観測を行うことにある。2019 年度には、ALPACA 建設予定地において電力、水道、フェンス、実験小屋等インフラストラクチャーの建設が完了し、検出器の製作と設置も開始した。プロトタイプである ALPAQUITA 空気シャワー観測装置の性能評価をするためにモンテカルロシミュレーションや ALPAQUITA に地下ミュオン観測装置の一部を加えたケースを想定したモンテカルロシミュレーションが進行中である。

7. インド・ウーティにおける空気シャワーアレイを用いた宇宙線観測 (小島、林、大嶋)

本研究室とインド・タタ基礎研究所は、インド・タミルナドゥ州の Ooty (標高 2,200 m) において、日印国際共同実験「GRAPES-3 空気シャワー実験」による銀河宇宙線の観測をおこなっている。現在、2013 年に導入した新型時間計測手法で取得したデータの解析をおこなっている。これにより、空気シャワーの到来方向決定精度が大幅に向上した。一方、新ミュオン検出器の増設工事も進んでおり、比例計数管の組み上げ、吸収層と建屋の建設がほぼ完了し、現在は屋内での電源・ネットワーク網の施設と回路の設置作業が行なわれている。本年度は、大嶋が 12 月から 1 月にかけて約 3 週間、インド・ウーティに滞在し、空気シャワー解析に関する議論を現地スタッフとおこなった。

8. インド・ウーティにおける大面積ミュオン検出器を用いた宇宙線観測 (小島、林、大嶋)

GRAPES-3 のミュオン検出器を、ミュオン望遠鏡として用いることで、約 100 GV の銀河宇宙線を観測し、宇宙天気観測につながる太陽圏内における宇宙線の異方性の研究を行っている。本年度は、2 月から 3 月にかけて約 1ヶ月間、タタ基礎研究所の S.K.Gupta 氏と P.K.Mohanty 氏が日本に滞在し、宇宙線の黄道面に垂直な流れ (Swinson flow) と太陽活動の関係について議論を行なった。なお、3 月中に予定していた小島らによるインド渡航は、新型コロナウイルスの流行により中止となった。

9. 次世代の超高エネルギー宇宙線観測用大気蛍光望遠鏡の開発 (CRAFT 実験)(多米田)

最高エネルギー領域の宇宙線観測のための拡張実験として、TA 実験の拡張計画である TA × 4 実験が建設中であるように、最高エネルギー領域の宇宙線観測には非常に大規模な観測装置が必要となる。TA × 4 実験により、宇宙線の到来方向のホットスポットの存在が確立され、天源天体が見つければ、宇宙線による天文学が可能となり、宇宙線観測装置にはさらなる大規模化が求められることになる。こうした将来の大規模化を見据えて、現在低コ

ストで建設が可能な大気蛍光望遠鏡 (CRAFFT, Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel-lens Telescope) を多米田が主導し開発している。2019年度は、CRAFFT 検出器による完全自動観測システムの構築を目的に、電力自給、自動観測、および望遠鏡保護システムを開発し、試験した。また、宇宙線空気シャワーの再構成手法を開発し、CRAFFT 検出器によるモノ観測、およびステレオ観測によってジオメトリが決定できることを実証した。これらの成果は、第36回宇宙線国際会議、日本物理学会などで報告された。

10. 高感度 CMOS カメラシステムによる高速飛翔暗黒物質と流星の探索 (多米田)

宇宙には暗黒物質の存在が確実視されており、様々な実験により暗黒物質の探索が行われているが、未だ発見には至っていない。本研究では、暗黒物質の候補の一つである Nuclearite の探索を行っている。Nuclearite とは、マイクロサイズのスレンジクォーク体 (SQM) が電子を捕獲し電氣的に中性化したものであり、宇宙開闢の時期や中性子同士の衝突などで生成されると考えられている。2019年度は、多米田、および甲南大学とトリノ大学の共同研究者等と TA 実験サイト内の3箇所に超高感度 CMOS カメラを設置し、8,9月に試験観測を行った。これらの成果は、第36回宇宙線国際会議、日本物理学会などで報告された。

教育・研究業績

学術論文

1. J. Kim, *et al.*, “Filaments of galaxies as a clue to the origin of ultrahigh-energy cosmic rays”, *Sci. Adv.*, 5, eaau8227 (2019)
2. R. U. Abbasi, *et al.*, “Mass composition of ultrahigh-energy cosmic rays with the Telescope Array Surface Detector data”, *Phys. Rev. D*, 99, 022002 (2019)
3. R. U. Abbasi, *et al.*, “Constraints on the diffuse photon flux with energies above 1018 eV using the surface detector of the Telescope Array experiment”, *Astropart. Phys.*, 110, 8-14 (2019)
4. O. Adriani, *et al.*, “Direct Measurement of the Cosmic-Ray Proton Spectrum from 50 GeV to 10 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, *Phys. Rev. Lett.*, 122, 181102 (2019)
5. G. Abdellaoui, *et al.*, “Ultra-violet imaging of the night-time earth by EUSO-Balloon towards space-based ultra-high energy cosmic ray observations”, *Astropart. Phys.*, 111, 54-71 (2019)
6. Y. Tameda, T. Tomida, M. Yamamoto, H. Iwakura, D. Ikeda, K. Yamazaki, “Air shower observation by a simple structured Fresnel lens telescope with a single pixel for the next generation of ultra-high-energy cosmic ray observatories”, *PTEP*, 2019, 043F01 (2019)

国際会議会議録

1. C. Calle, *et al.*, “A new high energy gamma-ray observatory in the southern hemisphere: The ALPACA experiment”, *J. of Conference Series*, Vol. 1468, 012091 (2020)
2. K. Fujita, R. Fujiwara, S. Ogio and Y. Tanoue for the Telescope Array collaboration, “MC study for TALE Hybrid detector”, *J. of Conference Series*, Vol. 1468, 012091 (2020)
3. Y. Omura, D. R Bergman, J. F Krizmanic, K. Nakai and Y. Tsunesada, “NICHE detector and operations”, *J. of Conference Series*, Vol. 1468, 012091 (2020)
4. Y. Asaoka, *et al.*, “CALET results after three years on the International Space Station”, *J. of Conference Series*, Vol. 1468, 012091 (2020)

5. S. Ogio for the Telescope Array collaboration, "Highlights from the Telescope Array experiment", PoS(ICRC2019)013 (2019)
6. S. Ogio for the Telescope Array collaboration, "Telescope Array Low energy Extension (TALE) Hybrid", Proc. of ICRC2019, PoS(ICRC2019)375 (2019)
7. T. Abu-Zayyad for the Telescope Array collaboration, "TALE FD Cosmic Rays Composition Measurement", Proc. of ICRC2019, PoS(ICRC2019)169 (2019)
8. J. Kim, D. Ryu, S. Roh, J. Ha and H. Kang, "Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in the Magnetized Cosmic Web", PoS(ICRC2019)315 (2019)
9. R. Mayta Palacios, Y. Tsunesada and S. Ogio, "Time structure analysis of extensive air showers using the Telescope Array Data", PoS(ICRC2019)347 (2019)
10. T. Sako, *et al.*, "ALPACA air shower array to explore 100TeV gamma-ray sky in Bolivia", PoS(ICRC2019)779 (2019)
11. D. Bergman, J.F. Krizmanic, K. Nakai, Y. Omura and Y. Tsunesada, "First Results from NICHE and the NICHE-TALE Hybrid Detector", PoS(ICRC2019)189 (2019)
12. Y. Omura, K. Nakai, Y. Tsunesada, D. R Bergman and J. F Krizmanic, "NICHE detector and operations", PoS(ICRC2019)379 (2019)
13. Y. Tameda, "The status and performance of Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope (CRAFFT) for the next generation UHECR observatory", PoS(ICRC2019) (2019) 435.
14. F. Kajino, *et al.*, "Study for Moving Nuclearites and Interstellar Meteoroids using High Sensitivity CMOS Camera", PoS(ICRC2019) (2019) 525.
15. F. Bisconti, *et al.*, "EUSO-TA ground based fluorescence detector: analysis of the detected events", PoS(ICRC2019)197 (2019)

著書

1. 常定芳基 (共著)、「現代の天文学 17、宇宙の観測 3 (第2版) 高エネルギー天文学」、(日本評論社、2019年)
2. 荻尾彰一 (共著)、「宇宙物理学ハンドブック」、(朝倉書店、2020年)

国際会議講演

1. (招待講演) S. Ogio, "Highlights from the Telescope Array experiment", 20th Anniversary of the Foundation of the Pierre Auger Observatory, Malargue, Mendoza, Argentina, 2019年11月14日
2. (ポスター) K. Fujita, R. Fujiwara, S. Ogio, and Y. Tanoue for the Telescope Array collaboration, "MC study for TALE Hybrid detector", Topics on Astrophysics and Underground Physics 2019 (TAUP2019), 富山, 日本, 2019年9月9日
3. (ポスター) Y. Omura, K. Nakai, Y. Tsunesada, D.R. Bergman and J.F. Krizmanic for the Telescope Array collaboration, "NICHE detector and operations", Topics on Astrophysics and Underground Physics 2019 (TAUP2019), 富山, 日本, 2019年9月9日
4. (招待講演) S. Ogio for the Telescope Array collaboration, "Highlights from the Telescope Array experiment", The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, USA, 2019年7月23日
5. (口頭発表) Jihyun Kim, "Propagation of Ultra-high-energy Cosmic Rays in the Magnetized Cosmic Web", The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, USA, 2019年7月23日

6. (口頭発表) S. Ogio for the Telescope Array collaboration, "Telescope Array Low energy Extension(TALE) Hybrid", The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, USA, 2019年7月23日
7. (ポスター) Y. Omura, K. Nakai, Y. Tsunesada, D.R. Bergman and J.F. Krizmanic for the Telescope Array collaboration, "NICHE detector and operations", The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, USA, 2019年7月23日
8. (ポスター) R. Mayta for the Telescope Array collaboration, "Analysis of Air Shower Structure Measured with The Telescope Array Surface Detector", The 36th International Cosmic Ray Conference (ICRC2019), Madison, USA, 2019年7月23日
9. (招待講演) S. Ogio, "Recent progress in observations of Ultra High Energy Cosmic Rays", JSPS ワシントン支部 Science in Japan Forum, Washington D.C., USA, 2019年6月7日
10. (招待講演) S. Ogio, "Telescope Array Experiment in the Multi-messenger Astrophysics Era", LHAASO Scientific Observation and Multi-messenger Astronomy workshop, Chengdu, China, 2019年4月26日

学会・研究会講演

1. 田上裕太、荻尾彰一、他：「TA 実験 333：TALE 実験全体報告 5」、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020年3月16日
2. Jihyun KIM、他：「TA 実験 338: Correlation analysis between TA UHECRs and filaments of galaxies connected to the Virgo cluster」、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020年3月16日
3. 田中公一：「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について (4)」、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020年3月16日
4. 小島浩司：「大面積高精度 muon 望遠鏡による方位別宇宙線強度変動の研究 (24)」、日本物理学会第 75 回年次大会、名古屋大学、2020年3月16日
5. 大嶋晃敏：「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」、令和元年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、東京大学、2019年12月14日
6. 尾村勇吾：「TA 実験サイトにおける空気チェレンコフ光観測」、第 4 回宇宙素粒子若手の会秋の研究会、名古屋大学、2019年10月17日
7. 藤田慧太郎、荻尾彰一、他：「TA 実験 330：TALE 実験ハイブリッド検出器の性能評価」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019年9月19日
8. 尾村勇吾、中井慧、常定芳基、他：「TA 実験 331：jNICHE -TA サイトにおけるチェレンコフ光観測稼働状況と観測データ解析結果」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019年9月19日
9. 大嶋晃敏：「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019年9月17日
10. 田中公一：「GRAPES-3 実験における大型 NaI 検出器の導入について (3)」、日本物理学会 2019 年秋季大会、山形大学、2019年9月17日

その他

1. 荻尾彰一：小・中学生サマーラボ「ポテチの容器で宇宙線を見よう」、2019年8月20日

学位論文

修士論文

1. 田上裕太：「TALE 地表検出器アレイによる宇宙線エネルギーの決定」
2. 中井慧：「NICHE 実験のための宇宙線エネルギーと組成解析ソフトウェアの開発」
3. 藤原亮太：「TALE ハイブリッド実験の観測精度の評価とトリガーシステムの開発」

博士論文

1. Rosa Mayta Palacios：The time structure of extensive air showers of ultrahigh energies with the Telescope Array

研究助成金取得状況

1. 荻尾彰一：科学研究費補助金（科研費）・基盤研究 (S) 「広エネルギー領域の精密測定による超高エネルギー宇宙線の源と伝播の統一的解釈」、代表、3,207 万円
2. 常定芳基：科研費・基盤研究 (A) 「テレスコープアレイによる超高エネルギー宇宙線のエネルギースペクトル異方性の研究」、代表、200 万円
3. 荻尾彰一：科研費・特別推進研究 「拡張テレスコープアレイ実験 - 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍極限宇宙」、分担、130 万円
4. 荻尾彰一：科研費・基盤研究 (C) 「空気シャワーモデル直接比較のための多チャンネル粒子弁別測定」、分担、110 万円
5. 常定芳基：科研費・特別推進研究 「拡張テレスコープアレイ実験 - 最高エネルギー宇宙線で解明する近傍極限宇宙」、分担、290 万円
6. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費 「TALE ハイブリッド実験による 10 の 17 乗 eV 領域宇宙船の研究」、代表、40 万円
7. 常定芳基：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費 「ボリビア・チャカルタヤ山宇宙線観測所における高エネルギー γ 線・宇宙線観測のための空気シャワー実験」、代表、320 万円
8. 多米田裕一郎：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費 「次世代の超高エネルギー宇宙線観測のためのフレネルレンズ型大気蛍光望遠鏡の開発研究」、代表、50 万円
9. 多米田裕一郎：大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所特定共同研究 「次世代最高エネルギー宇宙線観測用検出器開発と検出器校正システムの構築」、代表、249.5 万円
10. 多米田裕一郎：東京大学地震研究所共同利用研究費 「汎用宇宙線計測用計測制御装置の開発」、代表、69.4 万円
11. 大嶋晃敏：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費、代表、42 万円
12. 小島浩司：名古屋大学宇宙地球環境研究所国際研究助成、代表、43.2 千円

海外出張および海外研修

1. Jihyun Kim：米国・ユタ州、2019 年 3 月 22 日 - 4 月 13 日、TA 実験宇宙線観測
2. 荻尾彰一：中国・成都、2019 年 4 月 23 日 - 28 日、LHAASO Scientific Observation and Multi-messenger Astronomy workshop に参加・招待講演
3. 藤田慧太郎：米国・ユタ州、2019 年 5 月 21 日 - 6 月 25 日、TA 実験宇宙線観測
4. 荻尾彰一：米国・ワシントン、米国・ソルトレークシティ、2019 年 6 月 6 日 - 14 日、JSPS ワシントン支部で招待講演、TA 実験国際全体会議に参加

5. Rosa Mayta, 尾村勇吾、Jihyun Kim、多米田裕一郎、荻尾彰一：米国・マディソン、2019年7月25日 - 8月1日、ICRC2019に参加・研究成果発表・招待講演
6. 多米田裕一郎:米国・ユタ州、2019年8月15日 - 9月13日、TA 実験宇宙線観測、CRAFT望遠鏡の較正、研究打ち合わせ（ユタ大学）
7. 藤田慧太郎、田上裕太：米国ユタ州、2019年8月22日 - 9月18日、TALE 実験宇宙線観測
8. 荻尾彰一：米国・ユタ州、2019年9月5日 - 15日、TALE 実験宇宙線観測、TA 実験研究打ち合わせ（ユタ大学）
9. 藤田慧太郎：米国・ユタ州、2019年10月20日 - 11月9日、TA 実験宇宙線観測
10. 荻尾彰一：アルゼンチン・マラルグエ、2019年11月11日 - 11月19日、Auger 実験 20周年記念国際会議・記念式典参加、招待講演
11. 尾村勇吾、藤田慧太郎、田上裕太、中井慧、藤原亮太、Jihyun Kim、常定芳基、荻尾彰一：韓国・平昌、2019年12月8日 - 12日、TA 実験国際全体会議
12. 大嶋晃敏：インド・ウーティ、2019年12月21日 - 2020年1月2日、タタ基礎研究所において宇宙線観測実施
13. 常定芳基：米国・ユタ州、2020年2月16日 - 2月25日、NICHE 実験研究打ち合わせ（ユタ大学）
14. 藤田慧太郎、藤原亮太：米国・ユタ州、2020年2月18日 - 3月5日、TALE 実験宇宙線観測

その他

1. 常定芳基：日本物理学会大阪支部役員（会計担当）
2. 荻尾彰一：日本物理学会代議員
3. 常定芳基：国際会議 TAUP2019 組織委員会委員
4. 常定芳基、荻尾彰一：国際会議 ICRC2023 準備委員会委員
5. 常定芳基：大阪大学核物理研究センター 研究計画検討委員
6. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所 運営委員
7. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所 客員教授
8. 荻尾彰一：宇宙線研究者会議 (CRC) 実行委員長
9. 常定芳基：CRC 将来計画検討小委員会 副委員長

高エネルギー物理学研究室

清矢 良浩 教授	高橋 拓也 (M2)	植松 泰智 (B4)
山本 和弘 准教授	小幡 拓也 (M1)	高安 咲妃 (B4)
手島 菜月 特任助教	小向 倅平 (M1)	松原 光明 (B4)
	本條 貴司 (M1)	

研究概要

1. 長基線ニュートリノ振動実験 (清矢, 山本, 手島, 小幡, 本條)

T2K 実験を始めとするニュートリノ物理の実験的研究を継続した。4 月から開始予定であったミューオンニュートリノ (ν_μ) ビームモードでのデータ取得は、加速器電磁石の故障により中止となった。程なく加速器は復旧したが、ニュートリノ実験へのビーム供給は 11 月から再開され、翌年 2 月まで行われた。陽子ビーム強度 515 kW を安定して取り出せるようになり、ニュートリノモードのデータ総量は約 2.0×10^{21} POT (Protons On Target : π 中間子生成標的に照射した陽子数), 一方, ミューオン反ニュートリノ ($\bar{\nu}_\mu$) モードについては約 1.7×10^{21} POT に到達している。ここでは, 2018 年 5 月までのニュートリノモードのデータ約 1.5×10^{21} POT と反ニュートリノモードのデータ約 1.6×10^{21} POT を用いた解析結果を述べる。これは, ニュートリノ振動により ν_μ あるいはその反粒子が消失する現象と電子ニュートリノ (ν_e) あるいはその反粒子が出現する現象を同時に解析した総合的なものである。データ解析によって得られたニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 の 2 次元許容範囲を図 1 に示す。このパラメータは簡単にいえば ν_μ がタウニュートリノ (ν_τ) に変化する現象を記述するもので, 横軸の $\sin^2 \theta_{23}$ は振動の強さ, 縦軸の Δm_{32}^2 は振動の速さに関するパラメータである。これらはニュートリノ振動により ν_μ が消失する現象の測定から得ることができる。図の上を書いてある Normal Ordering とは, 質量固有状態のニュートリノの質量階層性を表しており, ν_τ 成分を最も多く含む質量固有状態 (ν_3) が最も重い場合を指している。逆に ν_3 が最も軽い場合を Inverted Ordering と呼ぶ。各パラメータの最尤値は $\sin^2 \theta_{23} = 0.541$, $\Delta m_{32}^2 = 2.47 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ である。この図から分かるように, T2K 実験は $\sin^2 \theta_{23}$ に関して世界最高精度の測定を行っている。また, $\sin^2 \theta_{23}$ については最大混合である 0.5 ($\theta = \pi/4$) と無矛盾であるが, やや 0.5 より大きい可能性がデータによって好まれているようである。

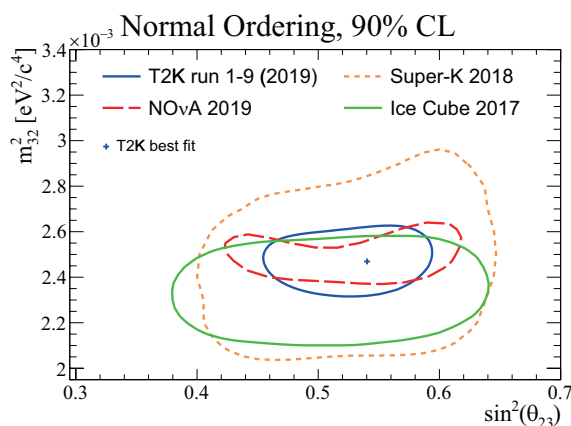


図 1: ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 の測定結果. 青色が T2K の結果. 他の実験の結果も示している.

次に, 電子ニュートリノと反電子ニュートリノ出現現象測定の状況を図 2 に示す。電子

ニュートリノ出現現象については、ニュートリノ振動が無かった場合に予測される観測事象数 15.3 に対して 90 事象が観測されており、これは電子ニュートリノ出現現象の確たる証拠である。一方、反電子ニュートリノ出現現象に関しては、ニュートリノ振動が無かった場合に予測される事象数 6.4 に対して実際に観測されている事象数は 15 であり、反電子ニュートリノ出現の観測を主張するにはもう少し統計量が必要である。図 3 は $\sin^2 \theta_{13}$ および $\sin^2 \theta_{23}$ とニュートリノの CP 位相角との間の許容領域を示す図である。CP の破れは $\sin \delta_{CP}$ で表されるので $|\delta_{CP}| = 0$ あるいは π の場合は CP 対称性が保存されていることになる。原子炉ニュートリノ実験の結果を取り入れて δ_{CP} の最尤値は、Normal Ordering の場合に $-1.89^{+0.70}_{-0.58}$, Inverted Ordering の場合に $-1.38^{+0.48}_{-0.54}$ を得た。また、 3σ の統計的信頼水準で δ_{CP} の取り得る値の半分近くを排除することに世界で初めて成功し、 δ_{CP} の許容範囲は Normal Ordering の場合に $-3.41 < \delta_{CP} < -0.03$, Inverted Ordering の場合に $-2.54 < \delta_{CP} < -0.32$ である。Normal Ordering の場合は $\delta_{CP} = 0$ を 3σ で排除し、Inverted Ordering の場合は $\delta_{CP} = 0$ および π の両方を 3σ で排除している。また、 δ_{CP} の最尤値が最大の破れ、すなわち $-\pi/2$ に近くなっていることも注目すべき点である。CP 非保存の実験的証明や質量階層性の解明にはさらに高い信頼度が必要であり、より高精度の測定を目指す必要がある。

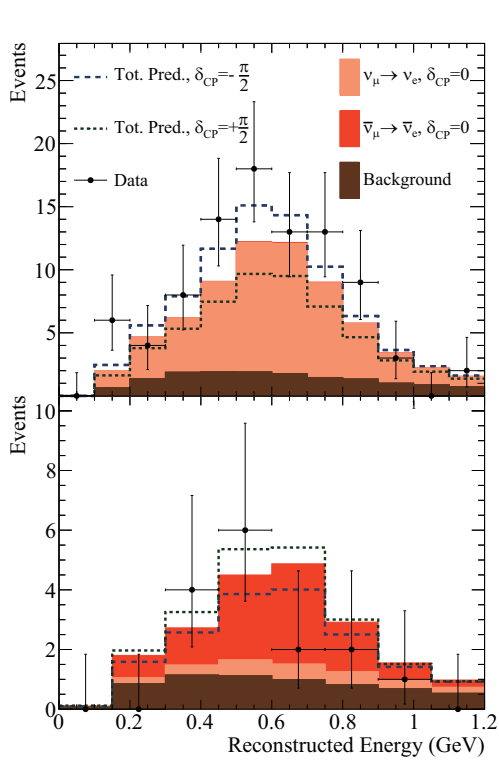


図 2: T2K 実験で得られた電子ニュートリノの再構成エネルギー分布 (上図) と反電子ニュートリノの再構成エネルギー分布 (下図)。

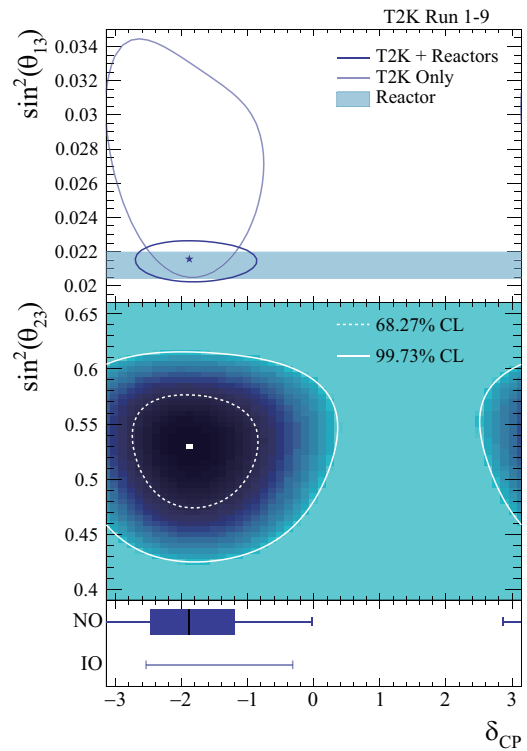


図 3: T2K 実験で得られた $\sin^2 \theta_{13}$ と δ_{CP} の許容領域 (上図) と $\sin^2 \theta_{23}$ と δ_{CP} の許容領域 (中図), および許容領域を δ_{CP} 軸へ統計的に射影した図 (下図)。

ここからは、少し趣の変わった解析として、2017 年 5 月までのニュートリノモードのデータ約 1.2×10^{21} POT とミューオン反ニュートリノ ($\bar{\nu}_\mu$) モードのデータ約 0.6×10^{21} POT を用いて行った重いニュートリノの探索結果について述べる。ニュートリノセクターのフレーバー構成 (粒子構成) の全容は謎に包まれているが、ある種の理論モデルでは右巻きニュートリノの混合により、重いマヨラナニュートリノ, N , の存在が結論されるものもあ

る．今回の解析では $140 \text{ MeV}/c^2$ から $493 \text{ MeV}/c^2$ の範囲内の質量をもつ重いニュートリノを探索した．生成反応は K^\pm 中間子の崩壊

$$K^\pm \rightarrow \ell_\alpha^\pm N, \quad \alpha = e, \mu$$

であり，崩壊過程は

$$N \rightarrow \ell_\alpha^\pm \pi^\mp, \quad N \rightarrow \ell_\alpha^\pm \ell_\beta^\mp \bar{\nu}_\gamma, \quad \beta = e, \mu, \quad \gamma = e, \mu, \tau$$

を考えている．探索には ND280 と呼ばれる前置検出器を使用した．二つの荷電粒子を検出した事象に対して適切な運動学的な制限を課し， π^\pm 生成を伴う通常のニュートリノ反応等の背景事象を抑制した．最終的には候補となる事象は検出されず，フレーバー固有状態のニュートリノに混合する大きさの上限値を導いた．電子ニュートリノに対する結果を図4に示す．

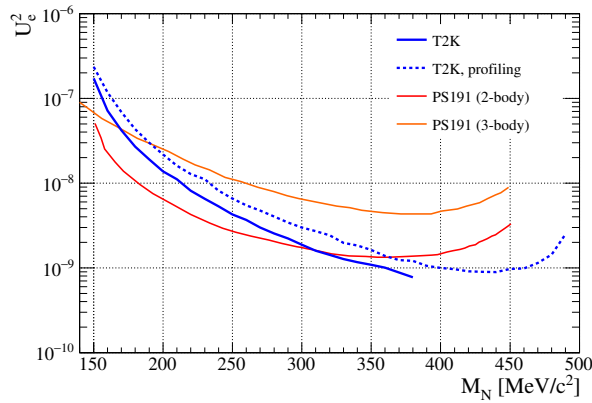


図4：重いニュートリノが電子ニュートリノに混合する大きさの上限値（90%の統計的信頼水準）．横軸は重いニュートリノの質量．青い実線が今回の結果．青い点線は，未知数である他のフレーバーへの混合に対する扱いを単純化し，それらの寄与が無いものと仮定した場合の結果．カバーされている質量領域の違いは，解析に $K^\pm \rightarrow \mu^\pm N$ の生成反応が寄与するか否かによって生じる（ K^\pm と μ^\pm の質量差は約 $388 \text{ MeV}/c^2$ である）．赤・橙の実線は CERN で行われた実験の結果．

ニュートリノ振動解析における系統誤差の抑制を目的とした新しい前置ニュートリノ検出器 WAGASCI (WATER-GRID-AND-SCINTILLATOR) を中心とする実験プロジェクトを今年度も継続した．WAGASCI 検出器はプラスチックシンチレータを格子状に組み上げた構造をしており，入射ニュートリノビームに対して大角度に散乱する事象の検出効率が高い．図5に示すように，WAGASCI プロジェクトにおける検出器のフルセットアップは，2台の WAGASCI 水標的検出器を中心としてプラスチック標的検出器や後方および横方向にミューオン検出器を配置する比較的大規模なものである．今年の4月にこれらの設置を完了し，検出器コミッションングを行いつつ，11月から遂にデータ取得を開始した．現在は得られたデータを解析しながら検出器の理解を進めている．

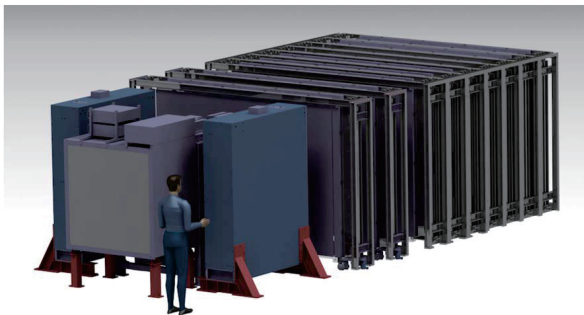


図5：WAGASCI プロジェクトの全検出器群設置の概略図．2台の WAGASCI 水標的検出器，プラスチック標的検出器，後方および横方向にミューオン検出器を配置している．

ニュートリノビームは、 π 中間子がミューオンとミューオンニュートリノへ二体崩壊することによって生成される。崩壊直後のミューオンを検出することにより、間接的にニュートリノビームの方向と強度をリアルタイムで監視することができる。現在のミューオンモニターは He ガスチェンバーとシリコン PIN フォトダイオードを使用しているが、今後のビームの大強度化に向けて、それに対応した新しい検出器を設置する必要がある。そこで、電子増倍管 (Electron-Multiplier Tube = EMT) と呼ばれる新しい検出器 (図 6) の研究・開発を進めている。EMT は PMT の光電面をアルミニウムに置き換えたもので、放射線耐性が高いと期待される。11 月に、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) において電子ビームを照射してテストを行い、信号を初めて確認した (図 7)。また、大強度ビームに対する安定性も確認された。今後は、応答線形性等の検出器性能の詳細について理解を進める予定である。

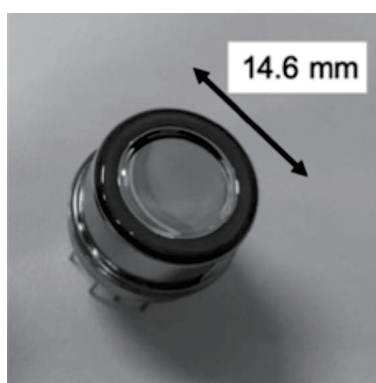


図 6: 電子増倍管 (Electron Multiplier Tube)。

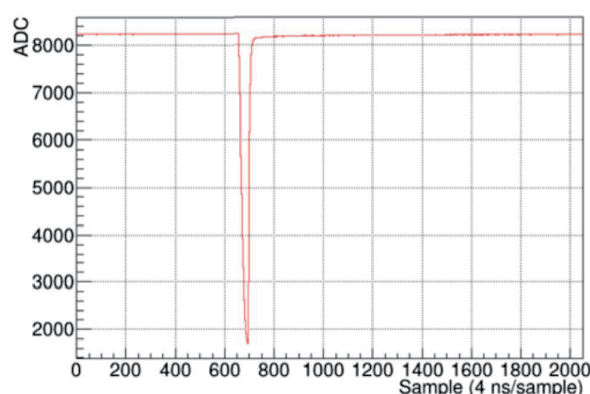


図 7: 大強度電子ビームに対する EMT の出力波形。

2. 荷電レプトンフレーバー非保存過程探索実験 (清矢, 山本, 手島, 高橋, 小向, 植松, 高安, 松原)

原子核に束縛された負ミューオンが電子に直接的に転換する過程、いわゆるミューオン・電子転換過程を探索する実験 DeeMe の立ち上げを引き続き遂行した。電子を検出する multi-wire proportional chamber (MWPC) や信号読み出しエレクトロニクス等の開発は基本的には終了しており、検出器の更なる高精度化を図りながら実験で使用するビームラインの建設を進めている。我々が独自に開発した高電圧 (HV) スイッチング型 MWPC は、HV のオン・オフを 25 Hz で繰り返し、加速器運転と同期してガス増幅をダイナミックにコントロールする斬新なものである。その高度化について、今年度も、より高いガス増幅率と MWPC の安定動作の両立を目指して充填ガスの種類や混合比の最適化を進めた。特に、アルゴン・イソブタン混合ガスに R-134a (CH_2FCF_3) やメチラール ($\text{C}_3\text{H}_8\text{O}_2$) を添加する場合について、京都大学複合原子力研究所 (KURNS) の電子線型加速器を用いたビームテストを 7 月と 11 月に行い、検出効率、位置分解能、大量の荷電粒子照射後の遅延ノイズの影響等の評価のためのデータを取得した。図 8 は、エネルギー 30 MeV の電子の飛跡に対して MWPC によって再構成された飛跡位置のずれを示す。この分布には多重散乱の影響も含まれているため、MWPC 固有の位置分解能を評価するためには、モンテカルロシミュレーション (MC) 等を用いた詳細な検討が必要であるが、要求される位置分解能は十分に得られている。

昨年度末の3月に、ミューオン・電子転換過程に対する最大の背景事象である束縛ミューオン軌道上崩壊 (decay-in-orbit = DIO) の高統計測定を、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) にあるミューオンビームライン (D ライン) を用い、カーボン標的に対して行ったが、今年度は、そのデータ解析を開始した。MWPC の性能についての、より詳細な理解を得ることを中心に解析を進めた。その他に、ビームライン電磁石の電流値最適化とそれを反映した単一事象感度の再評価、ビームプロファイル測定ロボットの制御システム構築、MLF の陽子ビーム 1 次炭素標的内で生成されるミューオン原子生成量の再評価に向けた MC の整備等を行った。また、光センサー MPPC を読み出しに用いたシンチレーティングファイバー飛跡検出器の製作を検討するために、大光量に対する MPPC の応答の研究やビームデータの解析等を 4 年生に行ってもらった。

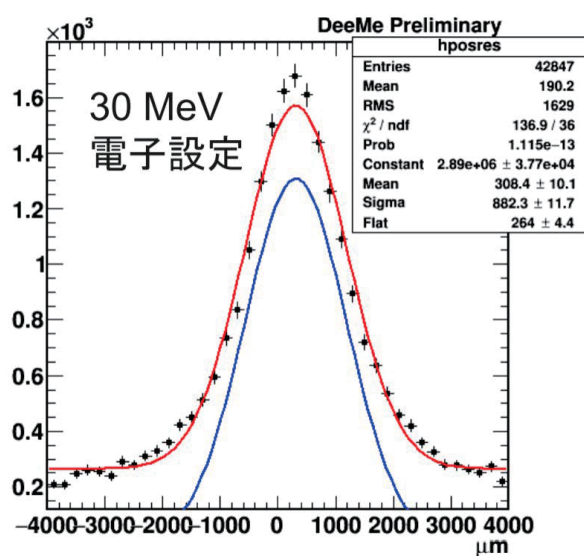


図 8: エネルギー 30 MeV の電子の飛跡に対して MWPC によって再構成された飛跡位置のずれ。電子の多重散乱の影響も含まれている。赤はガウス分布+定数ノイズによるフィット。青はフィットによって得られたガウス分布を示している。

教育・研究業績

学術論文

1. K. Abe, Y. Azuma, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Search for light sterile neutrinos with the T2K far detector Super-Kamiokande at a baseline of 295 km ”, *Physical Review D* **99**, 071103-R (2019). [Editors' Suggestion]
2. K. Abe, Y. Azuma, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Search for neutral-current induced single photon production at the ND280 near detector in T2K ”, *Journal of Physics G: Nuclear and Particle Physics* **46**, 08LT01 (2019).
3. K. Abe, Y. Azuma, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Search for heavy neutrinos with the T2K near detector ND280 ”, *Physical Review D* **100**, 052006 (2019).
4. K. Abe, Y. Azuma, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Measurement of the muon neutrino charged-current cross sections on water, hydrocarbon and iron, and their ratios, with the T2K on-axis detectors ”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2019**, 093C02 (2019).

5. K. Abe, H. Kim, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Measurement of neutrino and antineutrino neutral-current quasielastic-like interactions on oxygen by detecting nuclear deexcitation γ rays ”, Physical Review D **100**, 112009 (2019).
6. K. Abe, Y. Azuma, J. Harada, T. Inoue, H. Kim, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Measurement of the muon neutrino charged-current single π^+ production on hydrocarbon using the T2K off-axis near detector ND280 ”, Physical Review D **101**, 012007 (2020).

国際会議講演等

1. 手島 菜月 : “Performance Evaluation of the Detectors for the DeeMe Experiment” (poster), The 3rd International Conference on Charged Lepton Flavor Violation (CLFV2019), 2019 年 6 月 17 日 ~ 19 日, Fukuoka International Congress Center, Fukuoka, Japan.
2. 金 賢一 (現 千葉大学大学院 理学研究院 特任研究員) : “Measurement of Charged Current anti-neutrino cross-section on water and hydrocarbon with limited acceptance at 1.5 deg off axis with the T2K beam” (poster), The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP), 2019 年 7 月 10 日 ~ 17 日, Ghent, Belgium.
3. 手島 菜月 : “Status of the DeeMe Experiment, an Experimental Search for μ -e Conversion at J-PARC MLF” (招待講演), The 21st International Workshop on Neutrinos From Accelerators (NuFact2019), 2019 年 8 月 26 日 ~ 31 日, The Grand Hotel, Daegu, Korea.
4. 本條 貴司 : “Development of New Muon Monitors for J-PARC Neutrino Beam Line” (招待講演), The 11th International Workshop on Neutrino Beams (NBI2019), 2019 年 10 月 22 日 ~ 25 日, Fermilab, Batavia, IL, USA.

学会・研究会講演等

1. 小幡 拓也・本條 貴司 : 「WAGASCI フルセットアップ測定に向けた GEANT4 シミュレーションの構成」(ポスター), 第 9 回 高エネルギー物理 春の学校 2019 年 5 月 17 日 ~ 19 日, 滋賀県大津市北小松 湖邸滋びわこクラブ.
2. 山本 和弘 : 「ミュオン電子転換過程探索実験 -DeeMe- : 準備状況 (12)」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 10 日 ~ 13 日, 岐阜大学 柳戸キャンパス.
3. 高橋 拓也 : 「 μ -e 転換過程探索実験 DeeMe に用いられる高レート耐性 MWPC の 充てんガス最適化」, 日本物理学会 2019 年秋季大会, 2019 年 9 月 17 日 ~ 20 日, 山形大学 小白川キャンパス.
4. 池内 響輝 : 「DeeMe 実験概要」, アインシュタイン・南部セミナー, 2019 年 9 月 25 日 ~ 27 日, KKR ホテルびわこ.
5. 本條 貴司 : 「T2K 実験の概要」アインシュタイン・南部セミナー, 2019 年 9 月 25 日 ~ 27 日, KKR ホテルびわこ.
6. 本條 貴司 : 「T2K 実験ミュオンモニターのための新型検出器・電子増倍管の電子ビーム照射試験」, 第 26 回東京大学素粒子物理国際研究センターシンポジウム, 2020 年 2 月 16 日 ~ 19 日, 長野県下高井郡山ノ内町志賀高原蓮池 志賀レークホテル.
7. 小幡 拓也 : 「T2K-WAGASCI 実験のニュートリノ微分断面積測定における大角度方向ミュオン検出器の性能評価」, 日本物理学会 2020 年年次大会, 2020 年 3 月 16 日 ~ 19 日, 名古屋大学 東山キャンパス (新型コロナにより現地開催中止. スライド提出により講演成立.).
8. 小向 倅平 : 「パルスビームラインのためのビームプロファイルスキャン装置の開発」, 日本物理学会 2020 年年次大会, 2020 年 3 月 16 日 ~ 19 日, 名古屋大学 東山キャンパス (新型コロナにより現地開催中止. スライド提出により講演成立.).

9. 手島 菜月：「J-PARC MLF D2 エリアにおけるミューオン軌道上崩壊の運動量スペクトル測定」，日本物理学会 2020 年年次大会，2020 年 3 月 16 日～19 日，名古屋大学 東山キャンパス（新型コロナにより現地開催中止．スライド提出により講演成立．）．
10. 本條 貴司：「T2K 実験ミューオンモニターのための新型検出器・電子増倍管の電子ビーム照射試験 (2)：電子増倍管の性能評価」，日本物理学会 2020 年年次大会，2020 年 3 月 16 日～19 日，名古屋大学 東山キャンパス（新型コロナにより現地開催中止．スライド提出により講演成立．）．

その他

1. 小幡 拓也：”Side-MRD MC”，T2K Collaboration Meeting, 2019 年 7 月 23 日～27 日，Ecole Polytechnique, Palaiseau, France.
2. 手島 菜月：”MWPC Development Overview”，The 8th DeeMe Collaboration meeting, 2019 年 12 月 17 日，Tokai, Ibaraki, Japan
3. 手島 菜月：”DIO Analysis Plan for 2019 Data”，The 8th DeeMe Collaboration meeting, 2019 年 12 月 17 日，Tokai, Ibaraki, Japan
4. 高橋 拓也：”Optimization of filling gas for MWPCs with high rate tolerance used in DeeMe”，The 8th DeeMe Collaboration meeting, 2019 年 12 月 17 日，Tokai, Ibaraki, Japan
5. 小向 倅平：”Development of beam profile scanner”，The 8th DeeMe Collaboration meeting, 2019 年 12 月 17 日，Tokai, Ibaraki, Japan
6. 高橋 拓也・池内 響輝：”History of H-Line Optics Study”，The 8th DeeMe Collaboration meeting, 2019 年 12 月 17 日，Tokai, Ibaraki, Japan
7. 本條 貴司：”MUMON EMT 2019 Beam Test Results + 2020 Beam Test Plan”，T2K Collaboration meeting, 2020 年 3 月 19 日～4 月 3 日，Tokai, Ibaraki, Japan.

学位論文

卒業論文

1. 植松 泰智・高安 咲妃：「大強度光に対する MPPC の応答」
2. 松原 光明：「シンチレーションファイバーと MPPC を用いた荷電粒子の検出」

修士論文

1. 高橋 拓也：「 μ -e 転換仮定探索実験 DeeMe に用いられる高レート耐性 MWPC の充填ガス最適化および単一事象感度の評価」

研究助成金取得状況

1. 清矢 良浩：新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」計画研究 A02 「加速器ニュートリノビームで探る素粒子の対称性」（分担），直接経費：250 万円，間接経費：75 万円．
2. 清矢 良浩：基盤研究（A）「革新的な実験手法を用いたミューオン・電子転換過程探索の進展」（分担），直接経費：250 万円，間接経費：75 万円．
3. 清矢 良浩：基盤研究（C）「次世代型ミュー粒子・電子転換過程探索実験に向けたファイバー飛跡検出器の開発」（代表），直接経費：80 万円，間接経費：24 万円．

海外出張および海外研修

1. 金 賢一 : Ghent, Belgium, 2019 年 7 月 10 日 ~ 17 日, The European Physical Society Conference on High Energy Physics (EPS-HEP), ポスター発表.
2. 山本 和弘 : Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 2019 年 7 月 23 日 ~ 27 日, T2K Collaboration Meeting, 出席
3. 小幡 拓也 : Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 2019 年 7 月 23 日 ~ 27 日, T2K Collaboration Meeting, 出席・発表
4. 本條 貴司 : Ecole Polytechnique, Palaiseau, France, 2019 年 7 月 23 日 ~ 27 日, T2K Collaboration Meeting, 出席
5. 手島 菜月 : The Grand Hotel, Daegu, Korea, 2019 年 8 月 26 日 ~ 31 日, The 21st International Workshop on Neutrinos From Accelerators (NuFact2019), 招待講演
6. 本條 貴司 : Fermilab, Batavia, IL, USA, 2019 年 10 月 22 日 ~ 25 日, The 11th International Workshop on Neutrino Beams (NBI2019), 招待講演

その他

1. CDF Collaboration : ヨーロッパ物理学会高エネルギー物理学賞 ("For the discovery of the top quark and the detailed measurements of its properties")

重力波実験物理学研究室

神田 展行 (教授) 富上 由基 (M2)
伊藤 洋介 (准教授) 大橋 朋弥 (B4)
澤田 崇広 (特任講師) 小林 佑一朗 (B4)
土田 怜 (博士研究員) 津田 涼輔 (B4)

研究概要

大型低温レーザー干渉計型重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は岐阜県神岡鉱山内に建設された基線長 3km のレーザー干渉計型重力波検出器である (図 1)。2019 年度には、低温鏡、ファブリ=ペロー=マイケルソン干渉計、パワーサイクリングを組み込んだ状態で動作し、2020 年 2 月からは観測運転を開始し (図 2)、最高感度では中性子星観測レンジで約 970kpc であった。

KAGRA 計画は東大宇宙線研究所を宿主とした大型共同研究である。本研究室は KAGRA において、データ取得・転送系、データ解析 (重力波イベントの探索、検出器診断)、キャリブレーションなどを担い、計画の中核となる機関として研究活動を行なっている。

重力波観測は、ブラックホールや中性子星といったコンパクトかつ高密度の天体や、超新星爆発といった高エネルギー天体現象の解明すると期待される。重力波と同時に電磁放射 (可視光、赤外、X 線、ガンマ線など) やニュートリノ放射が期待される天体現象については、特に天体深部から放射される重力波の観測によって早い段階での観測情報や多面的な情報が得られる。マルチメッセンジャー天体観測として注目を浴びている研究である。またブラックホール時空や一般相対論の検証といった基礎物理学的な研究でもある。

天体起源の重力波観測では、複数台の、かつ設置場所が離れた検出器を必要とする。その理由は、地球上の離れた多地点での観測の時間差 (位相差)、振幅比、偏極特性から、重力波源の方向を推定するためである。また、雑音相関のない独立した検出器によって偽イベントの誤認を抑制することも理由である。方向特定のためには重力波の波長に比して十分に離れた検出器が必要であり、必然的に国際的な観測網が望まれる。KAGRA は米国 LIGO、欧州 Virgo と協定を結んだ。本研究室での研究のいくつかも国際観測網への貢献となっている。

KAGRA および国際重力波観測における低遅延データ共有 (神田)

KAGRA が国際重力波観測網の低遅延データ共有に接続し、KAGRA のデータを連続的に送信するとともに、LIGO, Virgo の低遅延データを受け取る仕組みを構築した。この仕組みは大阪市立大学の計算機クラスターにも実装し、常時稼働させている。これによって、国際重力波観測網のデータを、最も遅延の大きい Virgo でも 15 秒程度、KAGRA については 3.5 秒でアクセスできるようになった。図 3 は、KAGRA, LIGO, Virgo 検出器から、大阪市大のクラスタ計算機までの遅延量の履歴 (2020 年 2~3 月中旬) である。KAGRA のデータは後述の「重力波信号の再構成と較正」で説明されるリアルタイムで計算された較正信号であり、遅延量には計算時間も含まれている。

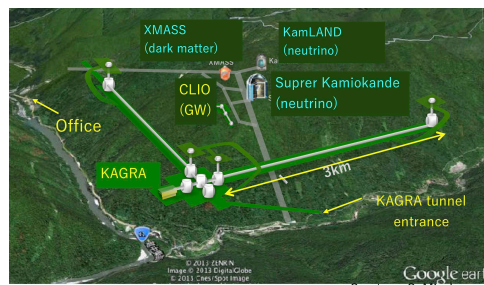


図 1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 概略図



図 2: 観測開始を喜ぶ共同研究者

2020 年 2 月 25 日, KAGRA 制御室にて。

<http://www.icrr.u-tokyo.ac.jp/news/8613/>
より転載。

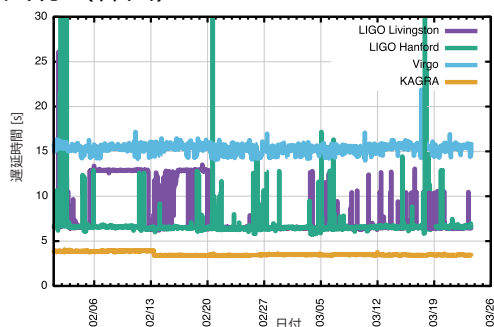


図 3: 国際観測網データの遅延時間履歴

連続波データ解析 (伊藤)

伊藤は、「文部科学省 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型) 平成 29~令和 3 年度 Gravitational wave physics and astronomy: Genesis (重力波物理学・天文学: 創世記) 領域番号: 2905」の計画研究 B01: 「中性子星を含む連星、パルサー、マグネターからの重力波による宇宙物理学の研究 (代表: 田越秀行・東京大学准教授)」の研究分担者である。本計画研究において伊藤は、単独中性子星からの重力波の検出コードの開発をおこなっている。KAGRA のサイエンスに関する議論として、低周波数 (~100Hz)、中間周波数 (100Hz-500Hz)、高周波数 (500Hz~) における可能な重力波源と期待されるサイエンスを提示し、低周波で感度の良い LIGO/Virgo 重力検出器に対して中間周波数-高周波数で感度を良くすることで LIGO/Virgo に伍する結果を得るべきとの報告をまとめた。

重力波検出器における独立成分解析 (伊藤)

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターの糸潤哉、関口豊和、横山順一、森崎宗一郎氏らと、独立成分解析 (Independent Component Analysis: ICA) を iKAGRA データに適用して連続波探索におけるその有用性を示す研究をおこなった。本研究結果はデータ解析グループとしては初の KAGRA 全著者論文として Progress of Theoretical and Experimental Physics で発表した [4]。

重力波信号の再構成と較正 (澤田)

レーザー干渉計型重力波検出器は、重力波による空間歪みの変動をレーザー光により精密測定することで重力波を観測する装置である。重力波による空間歪みは干渉計を構成する 2 本の「腕」の長さをそれぞれ変化させるが、干渉計を構成する「鏡」にはアクチュエーターが取り付けられており、鏡の位置がずれた時に正しい位置 (動作点) に戻す力を加えるよう制御される。精密測定した検出器応答特性を考慮し、鏡が動作点からどの方向にどれだけずれたかというエラー信号及びアクチュエーターへ与えるフィードバック信号から時系列の重力波信号 $h(t)$ を再構成する。KAGRA にてこの再構成処理を低遅延で行う「Low Latency パイプライン」を作成・運用し、再構成された $h(t)$ 信号を日本及び世界各地へデータ転送した。この信号は重力波事象の検出等に用いられる。また、重力波観測において、干渉計の感度のみならず再構成された重力波信号の波形の精度も重要である。そこで干渉計の主鏡に外部から強度変調させたレーザー光線を打ち込み、その光の輻射圧により主鏡を揺らす装置 (Photon Calibrator と呼ばれる) の準備を進め、擬似的な重力波波形を干渉計へ試験注入することで検出や解析の能力を評価、またデータ較正を行えるシステムの構築を行った。

KAGRA 低遅延データのモニター開発 (土田、大橋、小林)

大阪市立大学には KAGRA によって取得されたデータが低遅延で転送されている。この低遅延データを素早く解析し重力波の痕跡を探すことは、重力波解析の足がかりとなるだけでなく、電磁波観測などとのマルチメッセンジャー観測を行う上でも重要である。いち早くイベント速報を共有し、追観測を行うことで重力波・電磁波発生源の位置や性質などの物理学および天文学的に重要な情報を、より高い精度で推定することが可能になるからである。

そこで我々は低遅延データを即座に解析するとともに、その結果を容易に確認可能にするためのウェブモニターを開発した。モニターには、(1) 低遅延データの時系列波形、(2) 周波数空間での振幅スペクトル、(3) 信号を短時間フーリエ変換することにより得られた時間・周波数平面図、そして (4) 中性子星連星の観測可能距離 (インスパイラルレンジと呼ばれる) の 4 つの情報が表示されるように設定した。またこのモニターは毎分自動で更新されるように稼働しており、解析結果の即時導出だけでなく、そもそも取得データが正しく転送されているかといった確認についても、コマンド入力などの手作業をすることなく簡単に行うことができるようになった。現在、よ

り詳細なデータ解析手法による結果も反映させるべくモニターの性能向上を行っており、今後も継続して開発を続けていく予定である。

レーザー干渉計によるダークマター探索の検討（土田）

暗黒物質の有力候補のひとつである WIMPs は、通常の物質と弱く相互作用するため、稀にはあるがレーザー干渉計型重力波検出器の鏡に衝突すると考えられる。その衝突により励起される「鏡を懸架する振り子の振動」や「鏡の弾性振動」から生じる信号は非常に小さいものであると予想されるが、KAGRA などのレーザー干渉計型重力波検出器は、 10^{-21} 程度の微小な変位でも検知可能な高い感度を有しており、このような微弱信号をも取得可能であることが期待される。

下記の『業績：学術論文1』では、十分に重く、かつ相対的に薄い（半径が大きい）鏡を有するレーザー干渉計型重力波検出器に暗黒物質が衝突するケースを仮定し、その衝突による信号の大きさを解析的計算により見積った。そこで得られた結果を用いて、暗黒物質と通常の物質との相互作用断面積に与えられる制限について考察した（図4）。これにより、暗黒物質の質量が軽い（ $\lesssim 0.2$ GeV）とき、これまでよりも厳しい制限を与えられる可能性があることが示唆された。

本研究は遷移型重力波波形の解析にも応用可能であることが見込まれ、今後の重力波研究の発展にも貢献するものである。

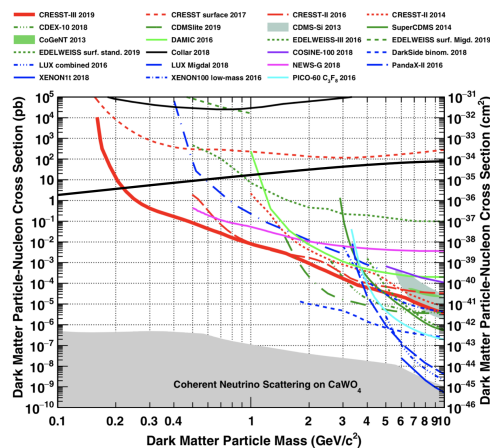


図4: 暗黒物質と通常の物質との相互作用断面積の上限値。黒色の太い実線が我々の考察により得られた結果。

Einstein Telescope を用いた原始ブラックホール仮説に関する研究（富上）

現在までに 20~30 太陽質量のブラックホール連星合体からの重力波が多数観測されている。ところが、これらは通常の恒星進化による形成で説明することは難しく、その起源が謎となっている。本研究では、大質量ブラックホール連星の起源として、インフレーション期に形成された原始ブラックホールを想定し、欧州で検討されている重力波検出器将来計画 Einstein Telescope (ET) によってこの仮説を検証できるかどうかを検討した。先行研究による原始ブラックホールの質量分布と宇宙論的赤方偏移 z 分布のモデルを用い、また暗黒物質からの制限を考慮して、原始ブラックホール連星の合体率を推定した。この合体率に従う数値シミュレーションを行い、ET における検出数、観測される質量や赤方偏移分布を推定した。その結果、ET による観測では 1 年間あたり約 25000 個の原始ブラックホール連星合体からの重力波の観測が期待されると推定した。さらに、種族 I、II、III 星起源と原始ブラックホール起源では、赤方偏移分布に違いが現れることを定量的に見積もり、有限な期間内での観測を想定して尤度比解析を用いて議論した。その結果、原始ブラックホール連星モデルが正しい場合に、種族 I、II、III 星起源のブラックホール連星しか存在しないという仮説を 90% 以上の確率で棄却するには、ET によるブラックホール連星合体の検出数が数百個あればよいと推定した。

教育・研究業績

学術論文

1. Satoshi Tsuchida, Nobuyuki Kanda, Yousuke Itoh, Masaki Mori,
“Dark matter signals on a laser interferometer”,
Phys. Rev. D 101, 023005, arXiv:1909.00654
DOI 10.1103/PhysRevD.101.023005
2. “Space gravitational-wave antennas DECIGO and B-DECIGO”,
Seiji Kawamura et al.,
International Journal of Modern Physics D, Volume 28, Issue 12, id. 1845001
3. KAGRA Collaboration (T. Akutsu et al.),
“An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors”,
Class. Quantum Grav. 37 (2020) 035004
DOI: 10.1088/1361-6382/ab5c95
4. KAGRA Collaboration (T. Akutsu et al.),
“Application of the independent component analysis to the iKAGRA data”,
Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2020, Issue 5, May 2020, 053F01
DOI: 10.1093/ptep/ptaa056
5. KAGRA collaboration, “First cryogenic test operation of underground km-scale gravitational-wave observatory KAGRA”,
Class.Quant.Grav. 36 (2019) no.16, 165008,
DOI: 10.1088/1361-6382/ab28a9
6. KAGRA Collaboration (Y. Akiyama et al.),
“Vibration isolation system with a compact damping system for power recycling mirrors of KAGRA”,
Classical and Quantum Gravity, Volume 36, Issue 9, article id. 095015 (2019)., arXiv:1901.03053
DOI: 10.1088/1361-6382/ab0fcb
7. Akira Watanabe, Takahiro Sawada, Mei Huang,
“Extraction of gluon distributions from structure functions at small x in holographic QCD”,
Phys. Lett. B 805, 135470 (2020)., arXiv:1910.10008
DOI: 10.1016/j.physletb.2020.135470
8. COMPASS Collaboration (R. Akhunzyanov et al.),
“Transverse extension of partons in the proton probed in the sea-quark range by measuring the DVCS cross section”,
Phys. Lett. B793, 188 – 194 (2019)., arXiv:1802.02739
DOI: 10.1016/j.physletb.2019.04.038
9. COMPASS Collaboration (M.G. Alexeev et al.),
“Measurement of P_T -weighted Sivers asymmetries in leptonproduction of hadrons”,

Nucl. Phys. B940, 34 – 53 (2019)., arXiv:1809.02936
DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2018.12.024

10. SeaQuest Collaboration (C. A. Aidala et al.),
“The SeaQuest spectrometer at Fermilab”,
Nucl. Instrum. Meth. A930, 49 – 63 (2019)., arXiv:1706.09990
DOI: 10.1016/j.nima.2019.03.039

学会・研究会講演

1. 神田展行、KAGRA collaboration, KAGRA データ転送・保管系の観測運転に向けた構築と整備, 日本物理学会 2019 年秋季大会
2. Nobuyuki Kanda, on behalf of the KAGRA collaboration, KAGRA Data Tier, 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, September 9 (Mon.) - September 13 (Fri.), 2019
3. Satoshi Tsuchida, Nobuyuki Kanda, Yousuke Itoh, Masaki Mori, Dark matter signals on laser interferometer, 16th International Conference on Topics in Astroparticle and Underground Physics, September 9 (Mon.) - September 13 (Fri.), 2019
4. 澤田崇広, KAGRA collaboration, 重力波望遠鏡 KAGRA における重力波信号再構成と較正, 日本物理学会 2019 年秋季大会
5. 大原謙一, KAGRA Collaboration, KAGRA 観測運転に向けたデータ解析計算機資源とソフトウェアの整備, 日本物理学会 2019 年秋季大会
6. 武田芽依, 渡邊幸伸, 平沼悠太, 大原謙一, 神田展行, 黒田仰生, 固武慶, 酒井一樹, 坂井佑輔, 澤田崇広, 高橋弘毅, 滝脇知也, 土田怜, 端山和大, 横澤孝章, Hilbert-Huang 変換を用いた, 重力崩壊型超新星爆発の SASI モードからの重力波に対するデータ解析, 日本物理学会 2019 年秋季大会
7. 糸潤哉, 関口豊和, 森崎宗一郎, 伊藤洋介, 横山順一, KAGRA collaboration, 独立成分解析による KAGRA データの雑音除去, 日本物理学会 2019 年秋季大会
8. Yuki Tomigami, et al., Toward a verification of existence of primordial black holes using gravitational wave observation, Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop 2019
9. 土田怜, KAGRA Collaboration, KAGRA 観測運転におけるデータ転送・保管システムの運用状況, 日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年)
10. 武田芽依, 渡邊幸伸, 平沼悠太, 根岸諒, 大原謙一, 神田展行, 黒田仰生, 固武慶, 酒井一樹, 坂井佑輔, 澤田崇広, 高橋弘毅, 滝脇知也, 土田怜, 端山和大, 横澤孝章, Hilbert-Huang 変換を用いた, 重力崩壊型超新星爆発の SASI 由来の重力波解析, 日本物理学会第 75 回年次大会 (2020 年)
11. Yousuke Itoh, “Status of KAGRA”, the 29th workshop on Japan General Relativity and Gravitation (JGRG29), Kobe Univ., 25-29 Nov. 2020.

その他

1. 高原文郎, 家正則, 小玉英雄, 高橋忠幸 編 (共著、神田展行ほか), 「宇宙物理学ハンドブック」, 朝倉書店, ISBN978-4-254-13127-7 C3542
2. 安東 正樹, 白水 徹也, 浅田 秀樹, 石橋 明浩, 小林 努, 真貝 寿明, 早田 次郎, 谷口 敬介 編 (共著、伊藤洋介ほか) 「相対論と宇宙の事典」, 朝倉書店, ISBN978-4254131284

学位論文

修士論文

1. 富上 由基：Einstein Telescope を用いた原始ブラックホール仮説に関する研究 (A study on a hypothesis of Primordial Black Hole using the Einstein Telescope)

卒業研究

1. 大橋朋弥：マルチメッセンジャー観測のための重力波モニターの開発に向けて
2. 小林佑一朗：ブラックホール準固有振動と、その時間-周波数空間での信号
3. 津田涼輔：AI は重力波を見分けられるか - 連星合体重力波への機械学習による認識、またその定量的評価 -

研究助成金取得状況

1. 科学研究費助成事業 基盤研究 (S) 「重力波観測時代に臨む較正標準化とデータ解析高精度化」 (代表：神田展行、2017-2021 年度)
2. 科学研究費助成事業 「パルサーからの重力波の探索」 (代表：伊藤洋介、2015-2019 年度)
3. 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「重力波物理学・天文学：創世記」 計画研究 B01 「中性子星を含む連星, パルサー, マグネターからの重力波による宇宙物理学の研究」 (代表：田越秀行 (東大宇宙線研)、分担：伊藤洋介ほか、2017-2021 年度)
4. 科学研究費助成事業 新学術領域研究 (研究領域提案型) 「重力波物理学・天文学：創世記」 計画研究 C01 「重力波天文学で解き明かす超新星爆発の物理」 (代表：固武 慶 (福岡大理)、分担：神田展行ほか、2017-2021 年度)
5. 科学研究費助成事業 基盤研究 (S) 「高速掃天観測による連星中性子星合体现象の研究」 (代表：茂山俊和 (東大理)、分担：伊藤洋介ほか、2016-2020 年度)
6. 科学研究費助成事業 「多波長重力波宇宙物理学の開拓」 (代表：横山順一 (東大理)、分担：伊藤洋介ほか、2015-2019 年度)
7. 科学研究費助成事業 「重力波データ抽出方法の開発：新たな解析手法および分散型コンピューティングの導入」 (代表：真貝 寿明 (大阪工業大学情報科学部)、分担：伊藤洋介ほか、2019-2023 年度)
8. 令和 2 (2019) 年度学術研究動向調査等に関する委託研究・研究題目：「数物系科学 (とくに素粒子、宇宙物理、天文) 分野に関する学術研究動向及び学術振興方策- 素粒子・宇宙物理・天文学の分野間連携における新たな潮流と展開 -」 (研究担当者：神田展行)
9. 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究 「KAGRA データ転送・保管系の構築 (5)」 (代表：神田展行、2019 年度)
10. 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究 「重力波望遠鏡 KAGRA の重力波信号再構成と較正に関する研究」 (代表：澤田崇広、2019 年度)

海外出張および海外研修

1. 神田展行, 澤田崇広
“ LVC Meeting, September 2019”, 2-5 September, Copernicus Conference Centre, Warsaw, POLAND
2. 澤田崇広
“ 研究打ち合わせ”, 2019 年 12 月 23-27 日 中央研究院 (台湾)、および 国立中央大学 (台湾)

外国人研究者受け入れ

1. Darkhan Tuyenbayev, Academia SINICA (Taiwan), 2020/1/14-2/10
2. Evan Goetz, University of British Columbia (UK), 2020/2/13

主催、共催の研究会

1. 2019年度第1回CRC将来計画タウンミーティング(通算第16回), 2019年12月20日(金) 21日(土), 於けるグランキューブ大阪(大阪 中之島)

その他

1. 2019年度オープンキャンパス 体験授業担当, 2019/8/10-11(伊藤、神田)
2. 神田展行: 日本学術振興会システム研究センター 数物系科学主任研究員, 2019年度
3. 神田展行: 宇宙線研究者会議(COSMIC RAY RESEARCHERS CONGRESS) 運営委員, 2019/4/1-2020/3/30
4. 伊藤洋介: Japan Gravitational Wave Consortium 運営委員, 2018/9/1-2020/8/31
5. 第12回「宇宙(天文)を学べる大学」合同進学説明会, 2019/6/9, 於ける大阪市立科学館, 幹事および現地運営(神田、伊藤)

宇宙・素粒子実験物理学研究室

中野英一	教授	岸田直也 (M2)	中 祐介 (M1))	久野彰浩 (B4)
岩崎昌子	准教授	城庵 颯 (M2)		柿花愛恵 (B4)
		山村晴菜 (M2)		松岡洋佑 (B4)

研究概要

1. Belle II 国際共同実験. (中野, 岩崎, 岸田, 城庵, 山村)

高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の SuperKEKB 加速器を用いた Belle II 国際共同実験を行なっている. Belle II 実験は, SuperKEKB 加速器を用いて電子・陽電子対消滅反応によって大量に生成される B 中間子対の崩壊過程から, CP 対称性の破れの検証や B 中間子の稀崩壊の測定などを目的とした国際共同実験である. 大阪市立大学の研究グループは Belle II 測定器の中央飛跡検出器 (CDC) を担当しており, CDC に関わるソフトウェアの開発, および, CDC 内の電子のドリフトをシミュレーションして CDC の挙動の詳細な解析を行っている. (論文 6)

前年度末 3 月から phase 3 と呼ばれる, 崩壊点検出器を組み込んだ本格的な電子・陽電子衝突実験を開始し, 10 月に最初の論文 (論文 17) を公表したのち, 12 月に最初の物理論文を投稿した.

さらに, 大阪大学中之島センターにおいて開催された, 主に関西地区の大学 4 年生, 修士 1 年の大学院生を対象にした Belle II 実験の勉強会を共催した. この勉強会には約 40 名の参加者があり, Belle II 実験で目指す物理, SuperKEKB 加速器, Belle II 測定器の解説などが行われた.

2. KEK B ファクトリー加速器による素粒子実験 (Belle 実験). (中野, 岩崎, 岸田)

高エネルギー加速器研究機構の KEKB 加速器を用いた Belle 国際共同実験を行なっている. 大阪市立大学の研究グループは Belle 測定器の最も外側に位置する K_L 中間子/ μ 粒子検出器 (KLM) の読み出しおよび μ 粒子同定を担当している. Belle 実験は, KEKB 加速器を用いて電子・陽電子対消滅反応によって大量に生成される B 中間子対の崩壊過程から, CP 対称性の破れの検証や B 中間子の稀崩壊の測定などを目的とした国際共同実験である. また, チャームクォーク対生成事象や, τ レプトン対生成事象, 高統計のデータを利用して共鳴状態の探索を行なっている. また, QCD の研究も行っている.

3. 機械学習の適応研究 (岩崎, 岸田, 城庵, 中, 久野)

原子核・素粒子実験では大量のデータを取り扱うが, この大量データを, より効率的に, 学術的結果へ導くためには, 近年発展が著しい深層学習の適応が, 有効だと考えられる. 約 20 名, 研究機関 10 機関で構成される原子核・素粒子実験分野研究者, 原子核理論研究者, 情報科学研究者による深層学習研究グループを組織し (代表, 岩崎), 大阪大学 RCNP 研究プロジェクト,

および大阪大学 IDS 学際プロジェクトとして研究を進めている。このプロジェクトにおいて、大阪市大は、以下の研究を進めている。

- Belle・ILC実験でのフレーバー識別・信号識別(岩崎, 岸田)

深層学習を用いた、フレーバー識別・信号識別手法を開発した。Low-level dataを取り扱う手法を開発し、識別性能を向上した。結果を国際学会、国内学会・研究会で発表し、修士論文としてまとめた。

- KEK Linac加速器運転調整(岩崎, 城庵)

KEK 加速器と共同で、機械学習を導入した KEK Linac 加速器雲梯調整手法の開発を進めた。Linac 加速器の実運転データによる開発を行い、機械学習により、加速器運転パラメータの最適値を予測する手法を開発した。結果を国内学会・研究会で発表し、修士論文としてまとめた。

- ILC実験用電磁カロリメータエネルギー較正(岩崎, 中)

オレゴン大学、スタンフォード大学と共同で、機械学習を用いた、電磁カロリメータ(サンプリング型カロリメータ)のエネルギー較正方法を開発した。Middle-level data を取り扱う手法を開発し、エネルギー較正での非線形性と粒子依存性を解消させることができた。結果を国際学会、国内学会・研究会で発表した。

- 深層学習を用いた識別・回帰と強化学習の基礎研究(岩崎, 久野)

MNIST データサンプル、および自作したデータシミュレータによる飛跡シミュレーションデータを用いて、深層学習を用いた識別・回帰の基礎研究を行った。また、強化学習のための基礎研究も行い、卒業論文にまとめた。

機械学習の適応研究に関して、学内・学外研究助成金を獲得し、国際学会、国内学会、研究会において講演を行った。

4. マイクロパターン・ガスディテクター (MPGD) の研究開発(中野)

薄型で2次元読み出しを行なえるガス検出器の1つであるガス電子増倍器 (GEM) の他分野への応用をはかる目的で、高エネルギー加速器研究機構、杏林大学、近畿大学との共同研究を行ない、He ベースガスを用いた物質量が少ない GEM の開発、中性粒子測定用 GEM の開発を進め、GEM の応答を理解するために荷電粒子と検出器の反応をシミュレートするプログラム (GEANT4) や電場計算プログラム (Maxwell) と検出器シミュレーションプログラム (Garfield) を用いた GEM のシミュレーションを行なっている。

5. CO₂ をクエンチャーとするチェンバーガスの研究(中野, 柿花, 松岡)

Belle II 実験の中央飛跡検出器 (CDC) では、He と C₂H₆ の混合ガスを使用しているが、長期間、高頻度に荷電粒子を検出する環境下では炭化水素のポリマーが検出器を

構成するワイヤー表面に蓄積する懸念がある。そのため、炭化水素系のガスの代わりにポリマー生成の恐れがない CO₂ の使用の検討を進めた。その結果、He/CO₂ でも、ドリフト速度、ガス増幅率等は He/C₂H₆ と同等の性能が得られることが分かったが、He の使用量が増えることが分かった。これらの結果を卒業研究としてまとめた。

教育・研究業績

学術論文

1. The Belle II Physics Book, Belle-II Collaboration· E. Kou(Orsay, LAL) (ed.) et al.
Published in: PTEP 2019 (2019) 12, 123C01, PTEP 2020 (2020) 2, 029201 (erratum)
2. Search for the $B \rightarrow Y(4260)K, Y(4260) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$ decays, Belle Collaboration· R. Garg(Panjab U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 99 (2019) 7, 071102
3. Evidence for the decay $B^0 \rightarrow pp^- \pi^0$, Belle Collaboration· B. Pal(Brookhaven Natl. Lab.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 99 (2019) 9, 091104
4. Search for $X(3872)$ and $X(3915)$ decay into $\chi_{c1}\pi^0$ in BB decays at Belle, Belle Collaboration· V. Bhardwaj(IISER, Mohali) et al.
Published in: Phys.Rev.D 99 (2019) 11, 111101
5. Transverse momentum dependent production cross sections of charged pions, kaons and protons produced in inclusive e^+e^- annihilation at $\sqrt{s} = 10.58$ GeV, Belle Collaboration· R. Seidl(RIKEN BNL) et al.
Published in: Phys.Rev.D 99 (2019) 11, 112006
6. Calibration and alignment of the Belle II central drift chamber, T.V. Dong(Sokendai, Tsukuba and KEK, Tsukuba), S. Uno(Sokendai, Tsukuba and KEK, Tsukuba), M. Uchida(Tokyo Inst. Tech.), H. Ozaki(Sokendai, Tsukuba and KEK, Tsukuba), N. Taniguchi(KEK, Tsukuba) et al.
Published in: Nucl. Instrum. Meth. A 930 (2019) 132-141
7. Measurement of branching fraction and final-state asymmetry for the $B^0 \rightarrow KS^0 \pi^\pm$ decay, Belle Collaboration· Y.T. Lai(KEK, Tsukuba) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 1, 011101
8. Evidence for $B^+ \rightarrow hcK^+$ and observation of $\eta_c(2S) \rightarrow pp^- \pi^+\pi^-$, Belle Collaboration· K. Chilikin(Lebedev Inst.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 1, 012001
9. Search for $B^0 \rightarrow X(3872) \gamma$, Belle Collaboration· P.-C. Chou(Taiwan, Natl. Taiwan U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 1, 012002
10. First measurements of absolute branching fractions of the Ξ_{cc}^+ baryon at Belle, Belle Collaboration· Y.B. Li(Peking U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 3, 031101
11. Search for $\Omega(2012) \rightarrow K \Xi(1530) \rightarrow K \pi \Xi$ at Belle, Belle Collaboration· S. Jia(Beihang U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 3, 032006]
12. Measurement of the CKM matrix element $|V_{cb}|$ from $B^0 \rightarrow D^* - \ell + \nu \ell$ at Belle, Belle Collaboration· E. Waheed(Melbourne U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 5, 052007

13. Observation of a new structure near 10.75 GeV in the energy dependence of the $e^+e^- \rightarrow \Upsilon(nS) \pi^+\pi^-$ ($n = 1, 2, 3$) cross sections, Belle Collaboration· R. Mizuk(Lebedev Inst. and Moscow, MIPT) et al.
Published in: JHEP 10 (2019) 220
14. Observation of $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau e^+e^-$ and search for $\tau^- \rightarrow \pi^- \nu_\tau \mu^+\mu^-$, Belle Collaboration· Y. Jin(Tokyo U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 7, 071101
15. First measurement of the CKM angle ϕ_3 with $B^\pm \rightarrow D(KS^0 \pi^+\pi^- \pi^0)K^\pm$ decays, Belle Collaboration· P.K. Resmi(Indian Inst. Tech., Madras) et al.
Published in: JHEP 10 (2019) 178
16. Azimuthal asymmetries of back-to-back $\pi^\pm - (\pi^0, \eta, \pi^\pm)$ pairs in e^+e^- annihilation, Belle Collaboration· H. Li(Indiana U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 9, 092008
17. Measurement of the integrated luminosity of the Phase 2 data of the Belle II experiment, Belle-II Collaboration· F. Abudinén(INFN, Trieste) et al.
Published in: Chin.Phys.C 44 (2020) 2, 021001
18. Observation of the Radiative Decays of $\Upsilon(1S)$ to χ_{c1} , Belle Collaboration· P. Katrenko(Moscow, MIPT and Landau Inst.) et al.
Published in: Phys.Rev.Lett. 124 (2020) 12, 122001
19. Observation of a vector charmoniumlike state in $e^+e^- \rightarrow D_s+D_{s1}(2536)^- + c.c.$, Belle Collaboration· S. Jia(Beihang U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 11, 111103
20. Search for $B^+ \rightarrow \mu^+\nu_\mu$ and $B^+ \rightarrow \mu^+N$ with inclusive tagging, Belle Collaboration· M.T. Prim(KIT, Karlsruhe, EKP) et al.
Published in: Phys.Rev.D 101 (2020) 3, 032007
21. Measurements of the Branching Fractions $\mathcal{B}(B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm})$ ($B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm}$), $\mathcal{B}(B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm})$ ($B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm}$) and $\mathcal{B}(B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm})$ ($B^{\pm} \rightarrow \Upsilon \bar{\Upsilon} \Lambda_c^{\pm}$), Belle Collaboration· Y. Li(Beihang U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 100 (2019) 11, 112010
22. Study of $B \rightarrow p\bar{p} \pi^+ \pi^-$, Belle Collaboration· K. Chu(Taiwan, Natl. Taiwan U.) et al.
Published in: Phys.Rev.D 101 (2020) 5, 052012
23. Update of inclusive cross sections of single and pairs of identified light charged hadrons, Belle Collaboration· R. Seidl(RIKEN BNL) et al.
Published in: Phys.Rev.D 101 (2020) 9, 092004

学会・研究会講演

学会、研究会等

1. 「Recent results of leptonic B decays in Belle」, 中野英一, Bファクトリー物理勉強会 第22回ミーティング(名古屋大学 2019年7月)
2. 「素粒子実験への機械学習の適用」, 岩崎昌子, 関西B実験4年生・M1対象勉強会(大阪大学 2019年7月)
3. 「機械学習を使用したKEK Linac 加速器運転調整システムの開発」, 城庵 颯, 岩崎昌子, 他6名, 第16回日本加速器学会年会(京都大学 2019年8月)
4. 「荷電粒子検出器用ASICの性能評価」, 山村晴菜^A, 中野英一^{A, B}, 宇野彰二^C, 宮原正也^C, 阪市大理^A, 阪市大NITEP^B, KEK^C, 日本物理学会秋季大会(山形大学 2019年9月)

5. 「Belle 実験における $B^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊過程の研究—機械学習を用いた新しい解析手法の開発—」, 岸田直也^A, 岩崎昌子^{A, B, C, E}, 石川明正^D, 中島悠太^E, 武村紀子^E, 長原一^E, 中野貴志^C, 他 Belle Collaboration, RCNP 深層学習プロジェクトグループ, 阪市大理^A, 阪市大南部研^B, 阪大 RCNP^C, 高エ研^D, 阪大 IDS^E, 日本物理学会秋季大会 (山形大学 2019 年 9 月)
6. 「機械学習を使用した KEK Linac 加速器運転調整システムの開発」, 城庵颯^A, 岩崎昌子^{A, B, C, E}, 佐藤政則^{D, E}, 佐武いつか^D, 中島悠太^E, 武村紀子^E, 長原一^E, 中野貴志^{C, E}, 阪市大理^A, 阪市大南部研^B, 阪大 RCNP^C, 高エ研^D, 阪大 IDS^E, 日本物理学会秋季大会 (山形大学 2019 年 9 月)
7. 「B Leptonic Decay」, Eiichi Nakano, 2019 Lattice X Intensity Frontier Workshop (BNL, Sep. 2019)
8. 「B Leptonic Decays: Results at Belle and prospects at Belle II」, Eiichi Nakano, Brookhaven Forum 2019: Particle Physics and Cosmology in the 2020's (BNL, Sep. 2019)
9. 「R&D of the flavor-tag method based on Machine Learning for high energy experiments」, N. Kishida, M. Iwasaki, et. al., International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2019), 2019 年 10 月
10. 「Application of the Machine Learning to the collider experiments」, M. Iwasaki, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2019), 2019 年 10 月
11. 「R&D of the Energy Calibration for the SiD EM Calorimeter based on Machine Learning」, M. Iwasaki, Y. Naka, et. al., The 3rd edition of the Calorimetry for High Energy Frontier conf. (CHEF 2019), 2019 年 11 月
12. 「機械学習を用いた ILC SiD 測定器電磁カロリメータエネルギー較正の開発(2)」, 中祐介^A, 岩崎昌子^{A, B, C, D}, J. Strube^E, J. Brau^F, A. Steinhebel^F, M. Breidenbach^G, 武村紀子^D, 中島悠太^D, 長原一^D, 阪市大理^A, 阪市大 NITEP^B, 阪大 RCNP^C, 阪大 IDS^D, PNNL^E, U. Oregon^F, SLAC^G, 日本物理学会大 75 回年次大会 (オンライン開催 2020 年 3 月)
13. 「ILC が切り拓く機械学習とその応用」, 岩崎昌子^{A, B, C, D}, 阪市大理^A, 阪市大 NITEP^B, 阪大 RCNP^C, 阪大 IDS^D, 日本物理学会大 75 回年次大会 (オンライン開催 2020 年 3 月)

学位論文

修士論文

1. 岸田直也「 $B^0 \rightarrow \gamma \gamma$ 崩壊過程の探索—機械学習を用いた解析手法の開発—」
2. 城庵 颯「機械学習を使用した KEK Linac 加速器運転調整システムの開発」
3. 山村晴菜「Belle II CDC 信号処理モジュールのアップグレードに向けた ADC 評価用基盤の開発および性能評価」

卒業研究

1. 柿花愛恵, 松岡洋佑「CO₂ をクエンチャーとして用いるチェンバーガスの研究」
2. 久野彰浩「加速器実験への機械学習の適用研究: 深層学習を用いた識別・回帰と強化学習の基礎研究」

研究助成金獲得状況

1. 「素粒子物理学実験への深層学習の適用研究 —物理データ解析技術および加速器制御技術の開発—」, 大阪市立大学 戦略的研究(基盤研究), 研究期間: 2019年4月-2020年3月, 代表者: 岩崎昌子
2. 「物理学実験への深層学習の適用研究: データ処理技術開発および教育教材開発」, 文部科学省: 文部科学省補助事業「ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ(牽引型)」, 研究期間: 2019年7月-2020年3月, 代表者: 岩崎昌子

3. 「素粒子・原子核実験および関連分野への深層学習の適用と発展」, 山田科学振興財団 研究援助, 研究期間: 2019年10月- 2021年3月, 代表者: 岩崎昌子

受賞

1. 中野英一: 教員活動表彰 (学長重点事項分野)
2. 岩崎昌子: 第6回女性研究者奨励賞・特別賞[岡村賞]

その他

1. 大阪大学 RCNP 研究プロジェクト「加速器実験および関連分野への深層学習の適用と進化」, 2018年5月-2021年4月 (岩崎: 代表)
2. 第14回女子中高生のための関西科学塾: 講演「素粒子実験を知ろう -巨大加速器でつくるミニ宇宙-」, 大阪市立大学, 2019年7月 (岩崎)
3. Belle II Japan 合同大学院説明会 2019, 大阪大学中之島センター, 2019年7月 (岩崎: 世話人)
4. 2019年度市大理科セミナー担当, 授業「ポテチの容器で宇宙線を見よう!」, 2019年8月 (中野, 岩崎, 岸田, 城庵, 中)
5. 「国際研究プロジェクトとその研究者たち」東北大学 研究推進・支援機構 知の創出センター, 東北大学大学院理学研究科, 2019年10月 (岩崎)
6. Heavy Flavor Workshop 2019, かんぼの宿富田林, 2019年11月, ワークショップ主催 (岩崎: 世話人代表)
7. マイクロパターンガス検出器 (MPGD) & アクティブ媒質 TPC 合同研究会 理化学研究所, 2019年12月 (中野: 世話人)
8. 「物理学×データビリティサイエンス」, IDS シンポジウム「阪大で始めるビッグデータ共創」, 大阪大学, 2020年1月 (岩崎: 講演)
9. 大阪市立大学専門家講座 (理学コース《ミクロとマクロをつなぐ物理学》) 素粒子実験で探る宇宙の成り立ち 大阪市立大学文化交流センター 2020年2月18日 (中野)
10. 大阪市立大学女性研究者支援室 2019年度ロールモデル, 文部科学省補助事業「ダイバーシティ研究環境実現イニシアティブ(牽引型)」, 2020年3月 (岩崎)
11. (株) アプライド HPC 導入インタビュー, WEB 掲載, 2020年3月 (岩崎)

素粒子論研究室

中尾憲一	教授	鈴木良拓(博士研究員)	大川瞭(M2)
丸信人	准教授	根岸宏之(博士研究員)	鈴木光世(M2)
山中真人	特任助教	高橋一麻(D2)	廣瀬拓哉(M2)
		岡林一賢(D1)	藤岡奈央(M2)
			矢田貝祥貴(M2)
			大迫壺成(M1)
			田村春菜(B4)
			原智也(B4)
			番場康太郎(B4)

研究概要

人類によるマイクロ世界の認識は、物質→分子→原子→電子と原子核、原子核→ハドロン→クォークと進んできました。電子は6種類確認されているレプトンと呼ばれるグループに属し、クォークも6種類確認されています。また、これらの素粒子の間に働く相互作用(重力、電磁気力、弱い力、強い力)を媒介するゲージ場の存在も確認されています。近年、唯一の未発見粒子であったヒッグス粒子も発見されました。素粒子論研究室では、素粒子標準模型を超える物理の現象論、特に超対称性や高次元に基づいた現象論の研究に力を入れています。まら、宇宙論やブラックホール、そして重力崩壊による時空特異点の形成などに注目して、強い重力場の物理に関する研究を行っています。

素粒子論研究室において2019年度に行われた研究は以下の通りです。

1. 背景磁場コンパクト化における高次元ゲージ場のスカラー場質量に対する量子補正の研究(丸、廣瀬)

素粒子標準模型を超える物理の兆候が全く現れず階層性問題を再考察するちょうどよい機会である。標準模型がプランクスケールまで正しいとすると、ヒッグス場の質量がプランクスケールに比べて軽い説明をしなければならない。背景磁場コンパクト化における高次元ゲージ場のスカラー場に対する量子補正が相殺されることが6次元QEDで示されていた。その理由は、このスカラー場がコンパクト空間の並進に対するNGボソンになるためである。そこで我々は、6次元ヤン・ミルズ理論においても同様の相殺機構が働くことを示した(論文1)。ゲージ場やゴースト場の寄与も考慮するので、非自明な結果が得られた。

2. ゲージ・ヒッグス大統一理論におけるフェルミオン質量階層性の研究(丸、矢田貝)

先行研究において、5次元ゲージ・ヒッグス統一理論を大統一理論へ拡張し、クォーク・レプトンを4次元境界上に局在させ、5次元バルク場との相互作用で全ての湯川相互作用が生成できるモデルを構築し、トップクォーク以外のクォーク・レプトンの質量を説明し、かつ電弱対称性の破れを実現し、ヒッグス場の質量を説明できることを示した。本研究では、トップクォーク質量の実現のために、ブレーンに局在したゲージ場の運動項を導入し、クォーク・レプトンの質量階層性、電弱対称性の破れ、ヒッグス場の質量を再現することに成功した(論文2)。これらを満たしつつ、ゲージ場の運動項による電荷普遍性の破れが抑制されるパラメタ領域を発見した。

3. 有限温度ゲージ・ヒッグス統一モデルにおける強い電弱1次相転移についての研究 (丸)

電弱スケールでバリオン数を生成するためには、強い電弱1次相転移を実現しなければならない。標準モデルではヒッグス場の質量と矛盾なく強い電弱1次相転移を実現できないことが知られている。本研究では、標準モデルを超える物理の1つであるゲージ・ヒッグス統一モデルにおいて、強い電弱1次相転移の可能性を研究した。特に、先行研究でフェルミオン質量階層性、電弱対称性の破れ、ヒッグス場の質量を再現するモデルを用い、有限温度ポテンシャルを解析したが、転移温度がQCDスケールとなり現実的でないことを明らかにし、モデルの拡張が必要であることを示した(論文3)。この研究は、安達裕樹氏(松江高専)との共同で進められた。

4. 荷電レプトンフレーバー非保存過程 (ミュオン原子中における $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$) の精密解析 (山中)

素粒子物理における標準理論は異なる荷電レプトン間を繋ぐ相互作用を含まない。言い換えると、異なるレプトン間の遷移過程は、発見だけで未知の素粒子モデルを示唆する証拠となり、その検証活動は模型構造の解明に多大な寄与となる。荷電レプトンフレーバー非保存過程は、新粒子を生成・検出といった直接的なものでなく、量子干渉等を通じて未知の模型を探り出す間接的なプローブである。そのため、1つでも多くの反応過程を相互検証することが望まれる。こういった背景の下、先行研究において、新規レプトンフレーバー非保存過程 (ミュオン原子中におけるミュオンと軌道電子が相互作用し2つの電子へ遷移) を考案した。今年度の研究では、偏極させたミュオンで生成したミュオン原子を始状態としたとき、考案したレプトンフレーバー非保存過程の終状態の挙動を丁寧に解析した。偏極ミュオンがもたらす終状態運動量分布の独特な振舞いを他の情報と組み合わせることで、レプトンフレーバー非保存相互作用の性質を特定可能であることを明らかにした。この研究は久野良孝氏(大阪大)、佐藤丈氏(埼玉大)、佐藤透氏(大阪大)、上坂優一氏(埼玉大)との共同で進められた(論文4)。

5. ブラックホール・シャドウについて

M87銀河の中心方向を既存の電波望遠鏡を用いて撮影するとブラックホール・シャドウと呼ばれる像が得られると理論的に予言されていたが、2019年にEvent Horizon Telescope Collaborationによって遂にブラックホール・シャドウが撮影され、科学者の世界だけでなく広く一般に大きな注目を浴びることとなった。そのときにブラックホール・シャドウはブラックホールのシルエットであり、その意味で「ブラックホールの直接観測」という説明を見かけることがあったが、厳密に言えばブラックホールが光源からの光を遮ることによってできるシルエットではない。シルエットのように見える黒い像は、重力崩壊してブラックホールになるであろう物体の像である。Schwarzschild時空やKerr時空のような真空の時空の場合のブラックホール・シャドウはホワイトホールの像である。その観点から以下の理論的研究を行った。

(A) 自由落下する観測者のみるブラックホール・シャドウ (藤岡, 中尾)

ブラックホール・シャドウは光源からの光をブラックホールが遮ることによってできるシルエットでないことの証拠は、ブラックホールに向かって自由落下している観測者は、ブラックホールの外にいるときだけでなく、ブラックホール内に入ったのちもブラックホール・シャドウを観測するという事実である。宇宙・重力研究室の吉野氏と協力して、重力崩壊体の像であるブラックホール・シャドウがどのように見えるかを光線追跡法によって理論的に計算した。現在は論文執筆中である。

(B) 衝突するブラックホールのブラックホール・シャドウ (岡林, 中尾)

Nitta, Chiba, SugiyamaやYumoto, Nitta, Chiba, Sugiyamaらは衝突する2体のブラックホールのブラックホール・シャドウを理論的に計算し、最終的にブラックホール・シャドウは衝突合体すると結論した。しかし、ブラックホール・シャドウはブラ

ックホールのシルエットではなくホワイトホールの像であることから、ブラックホール・シャドウが衝突合体するかどうかは非自明な問いであり、今後の観測を正確に理解する上で重要な問題である。宇宙・重力研究室の安積氏と協力して、我々は光源から2体のブラックホールの間を通過して観測者に達する光が常に存在することを示し、ブラックホール・シャドウは衝突合体しないことを示した（論文6）。

(C) 自由落下的に重力崩壊しない星の像（高橋，中尾）

この研究テーマも宇宙・重力研究室の吉野氏と協力して研究を進めている。重力崩壊する塵状物質から成る球対称の物体が表面から光やニュートリノを放射していると仮定して、輝度やスペクトルがそのように時間変化し最終的にブラックホール・シャドウとして観測されるかを光線追跡法で調べて学術雑誌に発表した（論文5）。現在は、塵状物質ではなく圧力のある物質から成る球対称物体の場合に同様の解析を行なっている。

6. 重力崩壊過程に伴う粒子生成（岡林）

重力崩壊の末にブラックホール (BH) が形成される過程で量子論的な場の時間発展を考えると、Hawking放射と呼ばれる熱平衡分布の粒子が生成されることが理論的に予言されている。この放射はブラックホールの事象の地平面の存在が原因であり、ブラックホールに特有の現象だと考えられていた。しかし、重力崩壊している物体がブラックホールにならない場合でも、それが事象の地平面のサイズに十分近づくまで重力崩壊するならば、その過程で熱放射のスペクトルの粒子が生成されることがBarceloらによる先行研究によって明らかにされた。すなわち、熱放射のスペクトルの粒子生成はブラックホール時空に特有な現象ではないことが明らかになったのである。事象の地平面の存在しないコンパクト天体が重力崩壊で形成されるとき、量子論的に生成される粒子の流速を計算し、その流速の時間変化に特徴的なピークが現れることが明らかにされている。しかし、先行研究で用いられたコンパクト天体は、内部が真空の球殻モデルであり、非現実的であるという問題があった。そこで立教大学の原田氏と協力して、コンパクト天体の内部が真空でないより一般的な構成を持つときの熱放射の研究を進め、流速の特徴的なピークが普遍的であることを示した。現在は論文を執筆中である。

7. ブラックホール近傍で起きる高エネルギー衝突（岡林）

最大回転するブラックホール (BH) の近傍で起きる粒子衝突を考えると、衝突時に 10^{19} GeV 以上のエネルギースケールに到達可能であるため、BH 近傍の衝突過程は量子重力理論の兆候を捉えることができると期待されている。この衝突によって生成された粒子が遠方に脱出するとき重力赤方偏移の影響を受けるため、我々が観測するときはその効果を考慮する必要がある。観測されるエネルギーが入射粒子よりも大きいとき、入射粒子は衝突を通して BH の回転エネルギーを引き抜いたと解釈される。この衝突過程によるエネルギーの引き抜きを議論するとき、先行研究では衝突する粒子は自転をしないと仮定されてきた。しかし、粒子は自転していることが普通であり、その影響は強重力場において大きくなるため、BH の周りで起きる衝突を議論する際には自転の影響を考慮するべきである。そこで早稲田大学の前田氏と協力し、衝突粒子に自転を加味して、観測されるエネルギーを解析した。（論文7）

8. 高次元極限における解の位相転移のリッチフローによる解析（鈴木）

カルツァクライン時空中の静的ブラックホール解にはコンパクト化方向に巻き付いたブラックストリング相と、巻き付かず球状に局在化したブラックホール相とが存在し、特異点を含む臨界解を通じて互いに変形し合うことが数値計算などにより示されている。このような時空解の解空間上の位相変化はMyers-Perry解からブラックリング解への転移など、高次元時空においては普遍的に存在すると予想されるが、その臨界解の特異性から数値解析によるアプローチは困難である。我々は高次元極限において、この位相転移問題が低次元リッチフローの解析に帰着することを発見し、ブラックストリング/ブラックホール転移については実際

に2次元リッチフローの既知の解を用いて、特異な臨界解を含む解析的な記述を得た(論文8)。

9. 高次元極限における剛体回転解 (鈴木)

高次元極限においてはMyers-Perry解のバーモード不安定から分岐するブラックバーのような非軸対称な回転解が安定的に存在することができる。これは重力波放射によるエネルギーの損失が次元数について指数関数的に抑えられているためである。本研究では2+1次元ブラックブレーンの高次元有効方程式を、剛体回転仮定のもと、摂動法や数値解析によって解くことで、既知のMyers-Perry解やブラックバー解の不安定のオフセットから分岐する非軸対称解を含む様々な変形解を求めた(論文9)。

教育・研究業績

著書

該当無し

学術論文

1. T. Hirose and N. Maru, "Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification", *Journal of High Energy Physics* 08 (2010) 054.
2. N. Maru and Y. Yatagai, "Improving Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification with Localized Gauge Kinetic Terms", arXiv: 1911.03465 [hep-ph].
3. Y. Adachi and N. Maru. "Strong First Order Electroweak Phase Transition in Gauge-Higgs Unification at Finite Temperature", *Physical Review D* 101 (2020) 3, 036013.
4. Y. Kuno, J. Sato, T. Sato, Y. Uesaka, M. Yamanaka, "Momentum distribution of electron pair from the charged lepton flavor violating process $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$ in muonic atoms with polarized muon", *Phys. Rev. D* **100**, no. 7, 075012 (2019).
5. Hirotaka Yoshino, Kazuma Takahashi, and Ken-ichi Nakao, "How does a collapsing star look?" *Phys. Rev. D* 100, 084062 (2019), [arXiv:1908.04223[gr-qc]].
6. Kazumasa Okabayashi, Nobuyuki Asaka, Ken-ichi Nakao, "Do black hole shadows merge?", arXiv:2003.07519, accepted for publication in *Phys.Rev.D* (2020).
7. Kazumasa Okabayashi, Kei-ichi Maeda, "Maximal Efficiency of Collisional Penrose Process with Spinning Particles II", *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, Volume 2020, Issue 1, January 2020, 013E01, (2020).
8. R. Emparan and R. Suzuki, "Topology-changing horizons at large D as Ricci flows", *JHEP* 1907, 094 (2019), [arXiv:1905.01062 [hep-th]].
9. D. Licht, R. Luna and R. Suzuki, "Black Ripples, Flowers and Dumbbells at large D", *JHEP* 04, 108 (2020) [arXiv:2002.07813 [hep-th]].

国際会議会議録

1. Y. Uesaka, M. Takeuchi and M. Yamanaka, "Charged Lepton Flavor Violation Searches by Lepton-Nucleus Scattering, $\mu N(eN) \rightarrow \tau X$," *JPS Conf. Proc.* 26, 021021 (2019).
2. J. Sato, Y. Uesaka, Y. Kuno, T. Sato and M. Yamanaka, "Distinguishing muon LFV effective couplings using $\mu^- e^- \rightarrow e^- e^-$," *PoS NuFACT* **2018**, 126 (2019).

国際会議・研究会講演

1. 丸信人: “Dark Matter in Gauge-Higgs Unification”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 2018年12月12日-13日, Media Center, Osaka City University, Osaka
2. 丸信人: “Dark Matter in Gauge-Higgs Unification”, SHU-OCU Symposium on Physics, 2018年12月27日, Media Center, Osaka City University, Osaka
3. M. Yamanaka : “Asymmetry of matter/antimatter in the universe from a quantum interference effect”, 15th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering, 2019年5月3日, ギリシャ国ロードス市
4. M. Yamanaka : “Relic Abundance in a Secluded Dark Matter Scenario with a Massive Mediator”, 25th Regular Meeting of the New Higgs Working Group, 2019年5月11日、大阪大学
5. M. Yamanaka : “Big-bang nucleosynthesis and Leptogenesis in CMSSM”, Summer Institute 2019, 2019年8月22日、Gangneung (韓国)
6. M. Yamanaka : “New Process for Charged Lepton Flavor Violation Searches: $\mu^-e^- \rightarrow e^-e^-$ in a Muonic Atom”, New Developments of Muon Precision Physics, 2019年11月28日、KEK
7. M. Yamanaka : “Selecting $\mu \rightarrow e$ Conversion Targets to distinguish Lepton Flavour-Changing Operators”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2020), 2020年2月20日、KEK
8. M. Yamanaka : “Big-bang nucleosynthesis with long-lived charged massive particle”, Ryukyus International Symposium of Theoretical and Computational Science (RIS-TCS 2020), 2020年3月22日、琉球大学
9. T. Hirose : “Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification”, “Strings and Fields 2019”, 2019年8月20日, (poster session), YITP
10. T. Hirose : “Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification”, “KEK Theory workshop 2019”, 2019年12月5日 (poster session), KEK
11. M. Suzuki: “On perturbation theory of supersymmetric gradient flow in $N = 1$ SQCD”, “Strings and Fields 2019”, 2019年8月22日, (poster session), YITP
12. M. Suzuki : “On UV-finiteness of supersymmetric gradient flow in $N = 1$ SQCD”, “KEK Theory workshop 2019”, 2019年12月5日 (poster session), KEK
13. 中尾憲一 : “What can be observed in strong gravity field?; Especially on black holes”, General Meeting of Indian National Science Academy, at CSIR-National Institute of Oceanography, Goa, India, 16-18 Dec. 2019.
14. 中尾憲一 : “What can be observed in strong gravity field?; Especially on black holes”, International Workshop on Astrophysics and Cosmology, at CHARUSAT, Gujarat India, 20-24 Dec. 2019.
15. 中尾憲一 : “Gravastar Formation; What can be the evidence of a black hole?”, International Workshop on Astrophysics and Cosmology, at CHARUSAT, Gujarat India, 20-24 Dec. 2019.
16. 岡林一賢 : “Robustness of particle creation in a formation of a compact object”, The 2nd Toyama International Symposium on "Physics at the Cosmic Frontier" (PCF2020), Toyama University, 2020/3/7.
17. 岡林一賢 : “Collisional Penrose process in ISCO”, The OIST Workshop “Quantum and Gravity in Okinawa” 2019.
18. 鈴木良拓 : “Merging horizons at large D ”, 22nd International Conference on General Relativity and Gravitation (GR22), Valencia, Spain, 7-12 July, 2019.

19. 鈴木良拓: "Large D limit of General Relativity: Near-boundary structure and Ricci flow", Seminar, CENTRA, Lisbon, 6 Feb. 2020.

国内学会・研究会講演

1. 山中真人: 「荷電レプトンフレーバー」, 第一回ニュートリノ若手研究会「ニュートリノ振動とフレーバー物理」, 2019年6月11日, 名古屋大学
2. 山中真人: 「Selecting $\mu \rightarrow e$ Conversion Targets to distinguish Lepton Flavour-Changing Operators」 日本物理学会2019年秋季大会, 2019年9月17日, 山形大学
3. 山中真人: 「Selecting $\mu \rightarrow e$ Conversion Targets to distinguish Lepton Flavour-Changing Operators」 素粒子物理学の進展 2019, 2019年7月31日, 京都大学
4. 山中真人: 「素粒子標準理論入門」, Flavor Physics Workshop 2019, 2019年11月19日, 大阪府富田林市
5. 廣瀬拓哉: 「Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification」 基研研究会「素粒子物理学の進展 2019」, 2019年8月1日 (ポスター), 京都大学基礎物理学研究所
6. 廣瀬拓哉: 「Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification」 基研研究会「Strings and Fields 2019」, 2019年8月20日 (ポスター), 京都大学基礎物理学研究所
7. 廣瀬拓哉: "Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification", 日本物理学会秋季大会, 2019年9月17日-20日, 山形大学 小白川キャンパス
8. 廣瀬拓哉: 「階層性問題について」アインシュタイン・南部セミナー, 2019年9月25日, KKRホテルびわこ
9. 廣瀬拓哉: "Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification", 素粒子現象論研究会2019, 2019年11月23, 24日 (ポスター), 大阪市立大学
10. 鈴木光世: 「N=1 SQCD における超対称フロー法の構成法と摂動論」, 基研研究会「素粒子物理学の進展 2019」, 2019年8月1日 (ポスター), 京都大学基礎物理学研究所
11. 鈴木光世: 「超対称グラディエントフロー法の確立に向けた摂動論」, 2019年度原子核三者若手夏の学校, 2019年8月7日 (ポスター), 白浜荘
12. 鈴木光世: "N=1 SQCDにおける超対称フロー摂動論について", 日本物理学会秋季大会, 2019年9月17日-20日, 山形大学 小白川キャンパス
13. 鈴木光世: 「場の量子論の対称性と超対称グラディエントフロー法」アインシュタイン・南部セミナー, 2019年9月25日, KKRホテルびわこ
14. 鈴木光世: 「SQCDにおける超対称フロー法とその対称性について」素粒子現象論研究会2019, 2019年11月23, 24日 (ポスター), 大阪市立大学
15. 矢田貝祥貴: "大統一ゲージ・ヒッグス統一理論におけるフェルミオン質量階層性", ニュートリノ振動とフレーバー物理, 2019年6月11日, 名古屋大学
16. 矢田貝祥貴: "大統一ゲージ・ヒッグス統一理論におけるフェルミオン質量階層性", 基研研究会「素粒子物理学の進展 2019」, 2019年8月1日 (ポスター), 京都大学基礎物理学研究所
17. 矢田貝祥貴: "大統一ゲージ・ヒッグス統一理論と質量階層性問題", Flavor Physics Workshop 2019, 2019年11月19日, かんぼの宿富田林
18. 矢田貝祥貴: 「Improving Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification with Localized Gauge Kinetic Terms」素粒子現象論研究会2019, 2019年11月23, 24日 (ポスター), 大阪市立大学

19. 大川瞭: 「インフレーションを用いた素粒子標準模型を超える物理の検証(Cosmological Collider Physics)」アインシュタイン・南部セミナー, 2019年9月25日, KKRホテルびわこ
20. 中尾憲一, 岡林一賢, 安積信幸: 「Merger of black hole shadows?; What do we observe?」, Genesis Area Workshop & Group A Camp, 2020年1月11-13日 @湖邸滋びわこクラブ.
21. 鈴木良拓: 「Topology-changing horizons at large D as Ricci flows」, 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 2019年9月17-20日
22. 鈴木良拓: 「Bumpy Black holes, Black Flowers and Black Dumbbells」, 特異点研究会, 秋田大学, 2019年12月26-28日
23. 高橋一麻: 「数値計算による重力崩壊過程にある星の撮像」, 日本物理学会秋季大会, 山形大学, 2019年9月17-20日
24. 岡林一賢, 安積信幸, 中尾憲一: 「衝突するブラックホール・シャドウの観測不可能性」, 日本物理学会第75回年次大会, 名古屋大学, 2019年9月17-20日.
25. 岡林一賢, 安積信幸, 中尾憲一: 「衝突するブラックホール・シャドウの観測不可能性」, 第21回特異点研究会, 秋田県立大学, 2019年12月.

その他

【一般講演】

1. 丸信人: 「素粒子の世界」, 大阪府高齢者大学校, 2019年6月17日, 24日, 7月1日, 大阪市教育会館にて3週連続講義
2. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, 夢ナビライブ, 2019年7月24日, インテックス大阪にて講演
3. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, 出張講義, 2019年9月2日, 西宮市立西宮高等学校にて講演
4. 丸信人: 「素粒子の世界」, はびきの市民大学連続講義, 2019年11月9日, 16日, 30日, 12月14日, 2020年1月25日, 2月8日

【セミナー講演】

5. 丸信人: 「Basics of Gauge-Higgs Unification」 「Dark Matter in Gauge-Higgs Unification」 「Collider Physics in Gauge-Higgs Unification」, 素粒子論研究室セミナー, 2019年6月7日, 名古屋大学
6. 丸信人: 「Dark Matter in Gauge-Higgs Unification」, 数理物理・素粒子論研究室セミナー, 2019年7月23日, 大阪市立大学
7. 丸信人: 「Fermion Dark Matter in Gauge-Higgs Unification」, 素粒子論研究室セミナー, 2019年7月24日, 京都大学
8. 廣瀬拓哉: 「Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory with Flux Compactification」, 素粒子論研究室セミナー, 2019年12月13日, 北海道大学
9. 鈴木良拓: "Topology-changing horizons at large D as Ricci flow", 多弦セミナー, 名古屋大学, 2019年6月4日

学位論文

修士論文

1. 大川瞭: 「インフレーションにおける非ガウス性を用いた大統一理論の検証に向けて」
2. 鈴木光世: 「 $N=1$ SQCDにおける超対称フロー摂動論について」
3. 廣瀬拓哉: 「背景磁場を含む6次元理論におけるスカラー場の質量補正の相殺機構」

4. 藤岡奈央:「ブラックホールに自由落下する観測者が見るブラックホール影」
5. 矢田貝祥貴:「大統一ゲージ・ヒッグス統一モデルにおけるフェルミオンの質量階層性」

博士論文

該当無し

研究助成金取得状況

1. 丸信人: 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(C)「ゲージ・ヒッグス統一モデルからの宇宙物理への予言とプランクスケール物理への拡張」直接経費50万円, 間接経費15万円
2. 丸信人: 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(C)(分担)「超対称フローが導く数値超対称性の新展開」直接経費5万円
3. 山中真人: 学術振興会・若手研究(B)「銀河内外のX線やガンマ線で探る縮退質量スペクトルを擁する素粒子モデル」70万円
4. 山中真人: 日本科学協会海外発表促進助成「量子干渉効果を通じた宇宙の物質・反物質非対称」20万円
5. 鈴木光世: 公益財団法人日本科学協会笹川科学研究助成「グラディエントフローによる超対称理論への新たなアプローチ」25万円(2019年年度に申請, 2020年度分採用)

海外出張および海外研修

1. 中尾憲一: CSIR-National Institute of Oceanography, Goa, India, 2019年12月16-18日, General Meeting of Indian National Science Academy, at CSIR-National Institute of Oceanography, Goa, Indiaにて成果発表.
2. 中尾憲一: CHARUSAT, Gujarat India, 2019年12月20-24日, International Workshop on Astrophysics and Cosmologyにて成果発表.
3. 山中真人: ギリシャ国ロードス、2019年5月1-8日、15th International Conference of Computational Methods in Sciences and Engineering 出席・招待講演
4. 山中真人: 韓国Gangneung、2019年8月1日~9月30日、Summer Institute 2019 出席・講演
5. 山中真人: 仏国Montpellier University、2020年1月22-31日、Montpellier Universityにてセミナー講演・Davidson教授と共同研究(大阪市立大学国際交流促進事業による渡航)

外国人研究者招聘

該当なし

その他

1. 中尾憲一: 日本物理学会 宇宙線・宇宙物理領域代表, 日本物理学会代議員
2. 丸信人: 素粒子論グループ事務局
3. 山中真人: 国内研究会 ``素粒子現象論研究会2019" 世話人
4. 山中真人: 国際研究会 ``Ryukyus International Symposium of Theoretical and Computational Science (RIS-TCS 2020)" 世話人

数理物理研究室

糸山 浩司 (教授) 森山 翔文 (准教授) 大田 武志 (特任准教授) 吉岡 礼治 (研究員)
清重 一輝 (D2)
石橋 啓一 (D1) 中島 爽太 (D1) 古川 友寛 (D1) 矢野 勝也 (D1)
神林 聡 (M1) 古賀 勇一 (M1)
川平 将志 (B4) 神田 行宏 (B4) 中西 智暉 (B4)

研究概要

1. 量子曲線とブレーン遷移 (森山)

M2 ブレーンの分配関数の理解は、M 理論の理解に繋がると考えられている。M2 ブレーンを記述する理論は、直交する NS5 ブレーンや $(1, k)5$ ブレーンを含む、1 次元円周上の D3 ブレーンの配位から、双対性を経て構築された。近年の発展により、M2 ブレーンの分配関数は、書き換えにより量子論的に拡張した代数曲線に帰着することがわかった。本研究により、それぞれの 5 ブレーンを 2 枚含む系は、 $so(10)$ 量子代数曲線に埋め込まれた。

このとき同じ枠組みで議論するため、標準的な順番でないブレーン配位に対して、ブレーン交換を通じて標準的な順番に帰着させる必要がある。ブレーン交換の前後において、Hanany-Witten 効果により、それぞれの 5 ブレーン間の D3 ブレーンの枚数が変化することが知られていた。本研究では、ブレーン交換を禁止する区間を設定する必要があることを指摘し、その必要性に解釈を与えた。それは、Hanany-Witten 効果は左右のブレーン電荷の保存として理解されるが、円周をある区間で切断し線分に変換してから、初めて左右の区別が意味をなすためである。このような区間の設定は、力学における慣性系の設定や、幾何学における座標近傍系の設定に似ている。

ブレーン交換を通じて、3 次元の相対ランクの自由度を、 $so(10)$ 代数曲線の 5 次元自由度に埋め込むことが可能になる。さらにもう一度、 $so(10)$ 曲線の対称性をブレーン交換に翻訳することにより、Hanany-Witten 効果を超えた未知の双対性を発見することができた。

2. デルペッツォ幾何における量子ミラー写像 (古川, 森山)

$so(10)$ 量子曲線に対して、量子 A 周期からミラー写像を計算することにより、M2 ブレーンの解析に必要なケミカルポテンシャルの再定義を理解した。このとき、群構造を尊重して群指標により結果を記述すると、各次数において BPS 指数に現れる表現と同じ表現が現れることを発見した。

3. interpolating 模型におけるモジュライの安定性の解析と小さな宇宙定数の実現可能性 (糸山, 中島)

interpolating 模型は、超対称性を持たないにもかかわらず宇宙定数を指数関数的に小さくすることが可能なストリング模型として知られている。Wilson line によって変形された interpolating 模型の 1-loop 有効ポテンシャルを計算することで、ゲージ対称性の拡大のパターンやモジュライが安定となる条件を明らかにした。また、宇宙定数が指数関数的に小さくなるようなモジュライ空間の点をいくつか発見した。

4. tensor 模型における一般化された指標の発展 (糸山)

前年度提案した tensor 模型における一般化された指標の応用を更に考察した。これを用いて、tensor 模型の gaussian average に関する所謂 superintegrability を論じた。

5. 演算子-ファインマン図-dessin d'enfant 対応 (糸山, 吉岡)

ランク r テンソル模型における singlet 演算子 (Op) とランク $(r-1)$ テンソル模型のファインマン図 (FD) との露わな 1 対 1 対応を確立した。この Op/FD 対応は、演算子の Gaussian 平均の対応としても実現可能である。特に $r=3$ の場合には数学でよく知られた Grothendieck's dessin d'enfant との triality を形成する。また任意の時空次元での場の理論の同様な模型にも成り立つこともあわせて示した。

6. 対数型ポテンシャルを持つユニタリー行列模型の臨界点と Argyres-Douglas 超共形固定点の同定 (糸山, 大田, 矢野)

$\hat{A}_{2k,2k}$ 理論に対応するユニタリー行列模型に注目し、その臨界点が $\hat{A}_{2k,2k}$ 理論の Argyres-Douglas 超共形固定点と一致することを示した。また、 $k=2$ の場合にダブルスケーリング極限を取ることで、2つのスケーリング関数が従う常微分方程式を導出し、行列模型が (A_1, A_7) Argyres-Douglas 理論と対応することを示した。

教育・研究業績

著書

1. 森山翔文, 「M 理論と行列模型 –超対称チャーン-サイモンズ理論が切り拓く数理物理学–」 (サイエンス社, 2020 年) .

学術論文

1. H. Itoyama, T. Oota and K. Yano, “Discrete Painlevé system for the partition function of $N_f = 2$ $SU(2)$ supersymmetric gauge theory and its double scaling limit,” J. Phys. A: Math. Theor. **52** (2019), 415401 doi:10.1088/1751-8121/ab3f4f [arXiv:1812.00811 [hep-th]].
2. H. Itoyama and S. Nakajima, “Exponentially suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in heterotic interpolating models,” PTEP **2019** (2019) no.12, 123B01 doi:10.1093/ptep/ptz123 [arXiv:1905.10745 [hep-th]].
3. N. Kubo and S. Moriyama, “Hanany-Witten Transition in Quantum Curves,” JHEP **12** (2019), 101 doi:10.1007/JHEP12(2019)101 [arXiv:1907.04971 [hep-th]].
4. T. Furukawa, S. Moriyama and Y. Sugimoto, “Quantum Mirror Map for Del Pezzo Geometries,” [arXiv:1908.11396 [hep-th]], accepted for publication in JPA.
5. H. Itoyama, A. Mironov and A. Morozov, “Tensorial generalization of characters,” JHEP **12** (2019), 127 doi:10.1007/JHEP12(2019)127 [arXiv:1909.06921 [hep-th]].
6. H. Itoyama, T. Oota and K. Yano, “Multicritical points of unitary matrix model with logarithmic potential identified with Argyres-Douglas points,” [arXiv:1909.10770 [hep-th]].
7. H. Itoyama, A. Mironov and A. Morozov, “Complete solution to Gaussian tensor model and its integrable properties,” Phys. Lett. B **802** (2020), 135237 doi:10.1016/j.physletb.2020.135237 [arXiv:1910.03261 [hep-th]].
8. N. Amburg, H. Itoyama, A. Mironov, A. Morozov, D. Vasiliev and R. Yoshioka, “Correspondence between Feynman diagrams and operators in quantum field theory that emerges from tensor model,” Eur. Phys. J. C **80**(2020),5,471 doi:10.1140/epjc/s10052-020-8013-8 [arXiv:1911.10574 [hep-th]].
9. H. Itoyama and S. Nakajima, “Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models,” Nuc. Phys. B **958**, 2020, 115111 doi:10.1016/j.nuclphysb.2020.115111 [arXiv:2003.11217 [hep-th]].

国際会議会議録

1. H. Itoyama, T. Oota and K. Yano, “Discrete Painlevé system associated with Unitary matrix model,” J. Phys.: Conf. Ser. **1194** (2019), 01250 [9 pages] doi:10.1088/1742-6596/1194/1/012050.

国際会議開催

1. International symposium “New Trends in Integrable Systems 2019”, Sept. 9-20, 2019, Media Center, OCU
<https://indico2.riken.jp/event/3020/>
2. NITEP one year anniversary conference/workshop series: “Turbulence of all kinds”, Jan. 7-9, 2020, Media Center, OCU
<https://sites.google.com/view/toak2/>

国際会議講演

1. Sanefumi Moriyama, “Symmetry Breaking in Quantum Curves & Super Chern-Simons Matrix Models”, talk delivered at YITP Workshop “Strings and Fields 2019”, Kyoto University, 2019/08/19-2019/08/23.
2. R. Yoshioka, “Operator, Feynman diagram and dessin”, Moscow, 26 August, 2019, talk delivered at the workshop on duality, integrability and matrix model, Institute of Information and Transmission Problem(IITP), Moscow, invited talk.
3. H. Itoyama, “Progress in Rainbow(Aristotelian) Tensor Model”, Moscow, 31 August, 2019, talk delivered at the workshop on duality, integrability and matrix model, Institute of Information and Transmission Problem(IITP), Moscow, invited talk.
4. T. Oota, “Unitary matrix model, supersymmetric gauge theory, and Painleve system”, talk delivered at Workshop “New Trends in Integrable Systems 2019”, Osaka City University, 12 September 2019, invited talk.
5. Sanefumi Moriyama “Hanany-Witten Transition in Quantum Curves”, talk delivered at Workshop “New Trends in Integrable Systems 2019”, Osaka City University, 19 September 2019, invited talk.
6. H. Itoyama, “Exponentially Suppressed Cosmological Constant with Enhanced Gauge Symmetry in Heterotic Interpolating Models”, East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2019, NCTS, Chinghua U. Shin-Chu, 30 October, 2019, invited talk.
7. Sota Nakajima, ”Exponentially suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in interpolating heterotic models,” Conference on Recent Development in Strings and Gravity, Corfu Summer Institute, Corfu, Greece, 13 September, 2019.

学会・研究会講演

1. H.Itoyama, “Successes and challenges in quantum field theory”, colloquium delivered on May 31, 2019 at USTC, Hefei, China.
2. H.Itoyama, “Exponentially Suppressed Cosmological Constant in Heterotic String Models Revisited”, delivered on May 30, 2019 at USTC, Hefei, China.
3. 中島爽太, “Exponentially suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in interpolating heterotic models,” 2019/7/16, セミナー, KEK.
4. 中島爽太, “Exponentially suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in interpolating heterotic models,” 2019/8/2, 基研研究会 素粒子物理学の発展 2019, YITP.
5. 糸山浩司, 大田武志, 矢野勝也, “ユニタリー行列模型の臨界点に関して”, 日本物理学会, 山形大学キャンパス, 2019年9月18日.
6. 糸山浩司, 中島爽太, “Exponentially suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in heterotic interpolating models”, 日本物理学会, 山形大学キャンパス, 2019年9月19日.

7. 糸山浩司, 吉岡礼治 et al, “Operators, Feynman Diagrams and Dessin”, 日本物理学会, 山形大学キャンパス, 2019年9月19日.
8. Sanefumi Moriyama, “ABJM Matrix Model and 2D Toda Lattice Hierarchy”, KEK Theory Seminar,
9. Sota Nakajima, “Stability and enhanced gauge symmetry in heterotic interpolating models”, 2020/2/6, Workshop “Branes, supergravity and string phenomenology,” KEK.
10. 糸山浩司, 吉岡礼治 et al, “Correspondence between Feynman diagrams and operators in quantum field theory that emerges from tensor model”, 日本物理学会, 名古屋大学キャンパス, 2020年3月16日, cancelled.
11. 糸山浩司, 中島爽太, “Suppressed cosmological constant with enhanced gauge symmetry in heterotic interpolating models”, 日本物理学会, 名古屋学キャンパス, 2020年3月18日, cancelled.
12. 糸山浩司, 中島爽太, “Stability analysis and enhanced gauge symmetry in heterotic interpolating models”, 日本物理学会, 名古屋学キャンパス, 2020年3月18日, cancelled.
13. 森山翔文, “量子曲線とワイル群”, 日本数学会, 2020年3月17日, cancelled.

研究助成金取得状況

1. 糸山 浩: 日本学術振興会・基盤研究(C)「行列・テンソル模型で探るゲージ理論・ランダム幾何学に於ける可積分性の出現」(代表) 150万円+45万円,
2. 森山翔文: 日本学術振興会・基盤研究(C)「弦理論の非摂動論的な効果の解析から、M理論の地図の解明へ」(代表) 70万円+21万円,
3. 清重一輝: 学術振興会・特別研究員奨励費「4次元超共形場理論に於ける物理的制限に関する研究」70万円
4. 古川友寛: 学術振興会・特別研究員奨励費「ABJM 行列模型における可積分構造」90万円
5. 糸山 浩司: 大阪市立大学戦略的研究(重点研究)「「渦」の縦糸と「物理」の横糸で紡ぐ非平衡・不安定系の学理の構築」(代表) 750万円

海外出張および海外研修

1. 糸山浩司: May 28-June 1, 2019, USTC, Hefei, China, 講演及び学部大学院生向けのコキウム講演
2. 中島爽太: 10-16 September, 2019, Conference on Recent Development in Strings and Gravity, Corfu Summer Institute, Corfu, Greece, 国際会議出席・講演
3. 糸山浩司, 吉岡礼治: 26-31 August, 2019, Workshop and School “Topological Field Theories, String theory and Matrix Models - 2019” Moscow, Russia, 国際会議出席・講演
4. 糸山浩司: October 24-Nov 2, 2019, 台湾清華大学、東海大訪問、”East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2019”, NCTS, Chinghua U. 講演

その他

1. 森山翔文, 「あいつ今何してる?(テレビ朝日)」取材協力, 2019年12月11日放映.
2. NITEP one year anniversary conference/workshop series: “Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory”.

<https://sites.google.com/view/rirt/home> March 26 (Thu) - 28 (Sat), 2020, 学術情報センター、COVID-19の影響を考慮し、開催中止

3. 研究集会名: 場の量子論最前線講義 Speaker: V. P. Nair (The City College of New York)
<https://indico.nitep.osaka-cu.ac.jp/event/50/> 2020年3月24日(火)・25日(水)、学術情報センター、COVID-19の影響を考慮し、中止
4. 糸山浩司: 学振2国間交流事業(ロシアとの共同研究: 代表 栗田英資)メンバー
5. 糸山浩司 Workshop and School Topological Field Theories, String theory and Matrix Models 2019 2019, August 26- August 31 を共催

宇宙物理研究室

石原 秀樹	教授	吉野 裕高(数学研研究員)	松野 阜 (D2)
浜端 広充	准教授	友田 健太郎(数学研研究員)	安積 伸幸(D1)
		森澤 理之(数学研研究員)	遠藤 洋太(M2)
		松野 研(数学研研究員)	神原 亮介(M1)
		小川 達也(数学研研究員)	大倉 靖央(M1)

研究概要

<重力理論分野>

宇宙物理（重力）グループは、アインシュタインの一般相対性理論を基礎として、宇宙における強い重力場を伴う物理的現象を重点的に研究している。素粒子論研究室とはコロキウムを共同開催し、研究・教育も協力して行っている。2019年度に行った研究を以下にまとめる。

- 2つのスカラー場とゲージ場の系の非トポロジーソリトン（小川，遠藤，石原）
複素スカラー場，Higgsスカラー場，U(1)ゲージ場および重力場からなるモデルでの非トポロジーソリトン解（Qボール）の数値計算による解析を行った。(1)力学系の停留点を遷移する3種類のバウンス解で記述されるソリトン解が存在することがわかった。(2)一般相対論の重力場と結合したソリトンは，ソリトンの質量のスカラー場の質量スケール依存性に不連続な転移がみられることがわかった。
- Kerr ブラックホールの周りの光の束縛軌道と偏光（伊形（立教大），高橋（愛教大），石原）
Kerr ブラックホールの周りのヌル測地線の束縛軌道はホライズンタイプとカージオイドタイプの2タイプに分類することができるが，Kerrブラックホールの回転パラメーターを最大にする極限で，ホライズンタイプのヌル測地線の軌道半径はホライズン半径に漸近する。この軌道に沿っての偏光ベクトルの伝播はKilling テンソルと共形Killingテンソルで決定される。このことを用いて，軌道に沿っての偏光ベクトルの回転角度を解析した。
- ブラックホールへのプラズマの降着（松野研，高橋（愛教大），政田（愛教大），石原）
ブラックホールへの流体の落下は，Bondiを始めとして多くの研究がある。電離しているイオン・電子プラズマが定常落下する場合，重力，圧力勾配，電磁力の大小によって，密度，速度分布のふるまいが変わる。このときの定性的振る舞いを解析した。イオンと電子の2流体においてそれぞれの圧力勾配の差によって分極が起り，ブラックホールが帯電する可能性を見出した。
- 佐々木空間と電磁場および重力場（松野阜，石原）
3次元佐々木空間では，ねじれたベクトル場であるReebベクトルがKillingベクトルになっている。このReebベクトルのローテーションは自分自身に比例するので，このベクトルに沿った電流によってこのベクトルに沿った磁場が作られる。また，このベクトルに沿って電荷は測地運動することが可能なので，全体としてMaxwell-電流系として解になっている。さらに，この磁場と電流のエネルギー・運動量テンソルを源としたEinstein方程式の解を作ることも成功した。

5. 動的横捕捉面の導入と伸張フープ仮説 (吉野, 泉 (名古屋大), 白水 (名古屋大), 富川 (名古屋大))

球対称静的時空ではブラックホール近傍で光子が円運動をするが, その位置は光子球面と呼ばれる. 我々は光子球面を動的な時空に拡張する「動的横捕捉面」を導入した. この面は, 面上の任意の点から横方向に放った光子の振る舞いを用いて定義される. そして次のことを明らかにした. (1) 動的横捕捉面の面積は, ある仮定のもとで同じ質量の球対称時空の光子球面の面積で上から制限される; (2) 2体ブラックホール系などの具体例で簡便に計算できる; (3) 見かけの地平面形成を与えるフープ仮説と同様に, 系の周囲の長さが同じ質量の球対称時空の光子球面の周囲以下になったときに動的横捕捉面が形成される (伸張フープ仮説). 以上のことから動的横捕捉面は強重力場の性質を理解するための有用な概念を与える.

<流体・プラズマ物理分野>

1. HALL MHD方程式に対する非線形磁気流体波の厳密解 (浜端)

昨年度に引き続き HALL 効果を考慮した MHD 方程式に対する非線形磁気流体波の厳密解について, より一般的な2次元, 並進対称性, 軸対称性および helical 対称性を持つ解を見いだすべく検討中である.

更に, 昨年度からこれまでとは異なったアプローチを試みており, Hall MHD 方程式に対する非線形磁気流体波を記述する単純化された方程式系が導出された. 得られた方程式から, 平面波解 (1次元解) から3次元解, 2次元解, 円筒座標での並進対称解が既に得られている. 更に, もっと一般的な解が得られることが期待され, 検討中である.

2. Firehose不安定の非線形発展 (浜端)

昨年度に引き続き, 温度異方性によって生ずる firehose 不安定の非線形発展への空間非一様性の効果の数値解析を CGL 方程式に基づいて行いつつある. 更に, 波動・粒子共鳴相互作用等の運動論的效果を考慮するため, Vlasov 方程式に基づく理論解析および数値シミュレーションについても検討中である.

3. 大振幅 Alfvén波のパラメトリック不安定 (浜端)

大振幅 Alfvén波は MHD 方程式の厳密解の一つで, そのパラメトリック不安定について数多くの研究がなされている. 大振幅 Alfvén波の解は MHD の極限では Vlasov 方程式の厳密解でもあるが, そのパラメトリック不安定についてはほとんど研究がない.

昨年度に引き続き, 大振幅の Alfvén波のパラメトリック不安定への運動論的效果についての研究を Vlasov 方程式に基づいた線形解析によって行っている. 解析の結果, 従来から知られていた崩壊型不安定性の他, 運動論的效果により新たに変調型不安定性と呼ぶべき不安定性が存在し得ることを明らかにした. 新たに発見された変調型不安定性は太陽風プラズマなどでは, 崩壊型不安定性より卓越することが明らかとなった. 本研究におけるこれらの新たな結果は, 今後太陽中の Alfvén波の理解を深めていく上で重要な結果をもたらしたものであると考えられ, 更に, 検討を加えているところである. また, パラメトリック不安定の非線形発展に関する数値シミュレーションについても検討中で, コード開発に取り掛かっており, 太陽風プラズマの加熱や加速等の理解にも重要な結果をもたらすものと期待される.

教育・研究業績

学術論文

1. “Observability of spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes”,
Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Yu Yasunishi,
Phys.Rev. D100 (2019) 4, 044058.
2. “Formation of dynamically transversely trapping surfaces and the stretched hoop conjecture”,
Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa,
PTEP 2020 (2020) 5, 053E01, Prog. Theor. Exp. Phys. (2020) 053E01.
3. “Transversely trapping surfaces: Dynamical version”,
Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa,
PTEP 2020 (2020) 2, 023E02

国際会議発表

1. Hideki Ishihara, and Takahisa Igata
"Can We Observe Spherical Photon Orbits In Near-Extremal Kerr Black Holes?"
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center
2. Tatsuya Ogawa, Hideki Ishihara
"Charge Screened Boson Stars In A Spontaneous Broken U(1) Gauge Theory"
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center
3. Hirotaka Yoshino, Kazuma Takahashi, and Ken-ichi Nakao,
"Let us watch a collapsing star: How does it look?"
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center
4. Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, and Ken-ichi Nakao,
"Dynamically Transversely Trapping Surfaces"
The 29th JGRG workshop, 11/25--29, 2019, Kobe University
5. Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Masaaki Takahashi,
"Polarization distribution on the edge of a black hole shadow"
The 29th JGRG workshop, 11/25--29, 2019, Kobe University
6. Tatsuya Ogawa, Hideki Ishihara
"Charge Screened Boson Stars In a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory"
The 29th JGRG workshop, 11/25--29, 2019, Kobe University
7. Ken Matsuno, Hideki Ishihara, Masaaki Takahashi, and Youhei Masada
"Particle acceleration by ion-acoustic solitons in plasma in a magnetic field"
The 29th JGRG Workshop, 11/5-9 2018, Kobe University

学会・研究会講演

1. 伊形尚久(立教大), 石原秀樹, 安西悠
"Can we observe spherical photon orbits in near-extremal Kerr black holes?"
日本物理学会2019年秋季大会 (山形大学 2019年9月17日~20日)
2. 吉野裕高, 泉圭介(名古屋大), 白水徹也(名古屋大), 富川祥宗(名古屋大)
"強重力場を特徴付ける面の新しい定義とその性質"
日本物理学会2019年秋季大会 (山形大学 2019年9月17日~20日)
3. 吉野裕高, 小玉英雄(京都大)
"スカラー場の超放射について"
BZ77研究会2019, 名古屋大学東山キャンパス (2019年12月7日~8日)
4. 吉野裕高, 泉圭介(名古屋大), 白水徹也(名古屋大), 富川祥宗(名古屋大)
"Dynamically Transversely Trapping Surfaces"
第21回特異点研究会 (秋田, カレッジプラザ 2019年12月26日~28日)

5. 吉野裕高, 小玉英雄 (京都大)
“回転ブラックホール周辺での有質量スカラー場の不安定成長：自己相互作用の効果,”
日本物理学会第75回年次大会 (名古屋大学 2020年3月16日～19日)
6. 伊形尚久(立教大), 石原秀樹, 高橋真聡 (愛教大)
“ブラックホールシャドウの外縁部上の偏光パターンと重力ファラデー回転”,
日本物理学会第75回年次大会 (名古屋大学 2020年3月16日～19日)

その他

1. 石原秀樹
高津高校 「体験型進路学習 ポスターセッション」講評, (11月14日)

学位論文

修士論文

1. 遠藤 洋太
ボソン星の安定性解析 -数値的手法-
(Stability Analysis of Boson Stars -Numerical Method-)

研究助成金取得状況

1. 石原秀樹 科研費基盤研究 C(代表)
「最大回転ブラックホールのホライズン近傍における対称性と物理現象」
2. 吉野裕高 科研費基盤研究 (C) (代表)
「超弦的アクシオンが引き起こす重力波現象の理論的探査」

海外出張および海外研修

1. Hideki Ishihara
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center
2. Tatsuya Ogawa
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center
3. Hiroataka Yoshino
GR 22 and Amaldi 13 conference, 7/7--12, 2019, Valencia conference center

原子核理論研究室

有馬正樹 准教授	緒方一介 准教授 ^(※)	福村健太 (M1)
佐藤弘一 特任講師	(※ 阪大とのクロスアポイントメント)	宮下直斗 (M1)
千葉陽平 特任助教	櫻木弘之 教授／副学長	川口真穂 (UG4)
		翁長拓人 (UG4)
		大垣内宇宙 (UG4)

研究概要

1. 量子化されたスキルム模型におけるバリオン構造の研究 (福村、宮下、有馬)
本研究では、カイラル対称性を表現した非線形有効模型であるスキルム模型を量子化し、それをバリオン構造研究に応用するための考察をした。これまで、ソリトンに伴うゼロモードと π 中間子場のゆらぎに関わる効果について考察を重ねてきた。その中で得られた成果を応用して、 Δ 共鳴などの構造解析への適用や、低エネルギー定理との関係を明らかにすることを目指している。
2. 核子ノックアウト反応を用いた原子核の一粒子構造研究 (緒方)
理化学研究所で測定された、陽子標的による1核子ノックアウト反応を微視的反応模型で分析することにより、中性子過剰核の魔法数を明らかにした。特筆すべき成果として、 ^{78}Ni が極めて安定な二重魔法数核であることを示したことが挙げられる。
3. α ノックアウト反応および非弾性散乱を用いた原子核のクラスター構造研究 (緒方・千葉・櫻木)
原子核から α 粒子を叩き出す反応と、原子核に α 粒子または陽子をぶつけて励起させる反応を分析することにより、様々な原子核の基底状態や励起状態に発現する α クラスター構造を明らかにした。
4. ボロミアン核に発現するフェッシュバッハ共鳴の予言と実証 (緒方)
 ^9Li コアと2つの中性子からなる代表的ハロー核である ^{11}Li の励起状態にフェッシュバッハ共鳴が存在することを理論的に予言し、この描像に基づいてカナダのTRIUMFで測定された ^{11}Li の陽子非弾性散乱データの説明に成功した。人為的に相互作用を操作することなく ^{11}Li の構造計算を行った上で、複素スケーリング法を用いて共鳴状態の特定を行ったことで、 ^{11}Li の共鳴の存在がほぼ確定したと考えられる。
5. 原子核の大振幅集団運動の微視的理論 (佐藤)
超流動原子核の大振幅集団運動の微視的理論を構築すべく、断熱的時間依存集団座標(ASCC)法という時間依存平均場理論に基づいて研究を行った。最近提案した、従来の理論の問題点を克服した新たな理論を3準位模型に適用し、理論的・数値的解析に取り組んだ。
6. 集団模型に基づく核反応計算 (佐藤、千葉、緒方、櫻木)
原子核の大振幅変形混合の核反応による観測可能性を議論するため、5次元集団ハミルトニアンに基づく簡単な集団模型を提案した。ここでは、 ^{154}Sm を例にとり、(1)球形、(2)プロレート変形、(3)球形-プロレート遷移領域、の3つの場合に遷移密度を求め、微視的チャンネル結合計算を行うことで、弾性・非弾性陽子散乱の微分断面積を計算した。大振幅の変形混合によって微分断面積の回折パターンが変化しうることを示した。また、遷移密度を完全に微視的に計算するための定式化を行い、簡単な相互作用を用いてテスト計算を行った。

7. 炭素燃焼過程に寄与するクラスター状態の構造研究（千葉）
恒星内で起きる炭素燃焼過程で重要な役割を果たす、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター状態が現れる ^{24}Mg の励起状態の構造を微視的構造論である反対称化分子動力学に基づき研究した。その結果、観測されている ^{24}Mg のスペクトルの再現に成功した。また、 α 崩壊幅・ ^{12}C 崩壊幅を微視的構造論により初めて予言した。
8. 原子核の渦励起モードの研究（千葉）
原子核の低励起状態を生成する励起モードとして近年着目されている、渦励起モードへのクラスター構造の寄与を反対称化分子動力学を用いて調べた。その結果、 ^{24}Mg の低励起の1状態が渦励起モードを持つことを明らかにし、また、渦励起モードと α クラスター構造が結合することを示した。
9. 3体クラスター構造の微視的解析手法の開発（千葉）
原子核の微視的波動関数から3体クラスター波動関数を近似なしに取り出す手法を開発した。 ^{12}C のホイール状態に適用し、 3α クラスター波動関数が微視的モデルとクラスターモデルとで質的に異なりことを明らかにした。また、 2α クラスター相関の強さとホイール状態の半径に強い相関があることを指摘した。

教育・研究業績

学術論文

1. R. Taniuchi *et al.*: “ ^{78}Ni revealed as a doubly magic stronghold against nuclear deformation”, *Nature* **569**, 53 (2019).
2. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “ α scattering cross sections on ^{12}C with microscopic coupled-channel calculation”, *Physical Review C* **99**, 064601 (2019).
3. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “First microscopic coupled-channels calculation of α inelastic cross sections off ^{16}O ”, *Physical Review C* **99**, 064608 (2019).
4. M. Lyu, K. Yoshida, Y. Kanada-En'yo, and K. Ogata: “Direct probing of the cluster structure in ^{12}Be via α -knockout reaction”, *Physical Review C* **99**, 064610 (2019).
5. K. Sato, T. Furumoto, Y. Kikuchi, K. Ogata, and Y. Sakuragi: “Large-amplitude quadrupole shape mixing probed by the (p,p') reaction: a model analysis”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2019**, 101D01 (2019).
6. S. Chen *et al.*: “Quasifree Neutron Knockout from ^{54}Ca Corroborates Arising N=34 Neutron Magic Number”, *Physical Review Letters* **123**, 142501 (2019).
7. K. Yoshida, Y. Chiba, M. Kimura, Y. Taniguchi, Y. Kanada-En'yo, and K. Ogata: “Quantitative description of the $^{20}\text{Ne}(p,p\alpha)^{16}\text{O}$ cross section for probing the surface α amplitude”, *Physical Review C* **100**, 044601 (2019).
8. T. Matsumoto, J. Tanaka, and K. Ogata: “Borromean Feshbach resonance in ^{11}Li studied via $^{11}\text{Li}(p,p')$ ”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2019**, 123D02 (2019).
9. M. L. Cortés *et al.*: “Shell evolution of N=40 isotones towards ^{60}Ca : First spectroscopy of ^{62}Ti ”, *Physics Letters B* **800**, 135071 (2019).
10. N. T. T. Phuc, K. Yoshida, and K. Ogata: “Toward a reliable description of (p,pN) reactions in the distorted-wave impulse approximation”, *Physical Review C* **100**, 064604 (2019).
11. I. Tanihata and K. Ogata: “Soft giant resonance in two neutron halo nucleus ^{11}Li ”, *European Physical Journal A* **55**, 239 (2019).
12. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “Microscopic calculation of inelastic proton scattering off ^{18}O , ^{10}Be , ^{12}Be , and ^{16}C for study of neutron excitation in neutron-rich nuclei”, *Physical Review C* **100**, 064616 (2019).

13. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: "Cluster structures and monopole transitions of ^{14}C ", *Physical Review C* **101**, 014317 (2020).
14. Y. Sun *et al.*: "Restoration of the Natural $E(1/2_1^+) - E(3/2_1^+)$ Energy Splitting in Odd-K Isotopes Towards $N=40$ ", *Physics Letters B* **802**, 135215 (2020).
15. T. Lokotko *et al.*: "Shell structure of the neutron-rich isotopes $^{69,71,73}\text{Co}$ ", *Physical Review C* **101**, 034314 (2020).
16. Y. Chiba and M. Kimura, "Hoyle-analogue state in ^{13}C studied with antisymmetrized molecular dynamics", *Physical Review C* **101**, 024317 (2020).

国際会議議事録

1. Z. Yang *et al.*: " α -clustering in heavy nuclei $^{112-124}\text{Sn}$ probed with $(p,p\alpha)$ reaction", *JPS Conf. Proc.* **31**, 011019 (2020) [Proceedings of the 15th International Workshop on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15)].
1. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: " α inelastic scattering cross sections off ^{12}C with microscopic coupled-channel calculation", *JPS Conf. Proc.* **31**, 011040 (2020) [Proceedings of the 15th International Workshop on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG15)].

国際会議講演

1. K. Ogata: "Direct reaction studies for revealing static and dynamical properties of nuclear systems I", Workshop on Challenges in Direct Nuclear Reactions, Beihang University, Beijing, China, August 19-21, 2019. (invited talk)
2. K. Ogata: "Direct reaction studies for revealing static and dynamical properties of nuclear systems II", Workshop on Challenges in Direct Nuclear Reactions, Beihang University, Beijing, China, August 19-21, 2019. (invited talk)
3. K. Ogata: "Description of (p,pN) , $(p,p\alpha)$, and (p,pd) reactions", 4th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beams: QFS-RB 19, Maresias, Brazil, October 13-18, 2019. (invited talk)
4. K. Ogata: "Direct reactions for populating excited states of a nuclear system", RCNP workshop on RI-beam Spectroscopy by Innovative Gaseous Active Targets, RCNP, Osaka University, December 19-20, 2019. (invited talk)
5. Y. Chiba, "Description of collective and cluster excitations with antisymmetrized molecular dynamics", International workshop for graduate students and young physicists on nuclear physics, Peking University, Beijing, China, November 22-25, 2019. (invited talk)

学会・研究会講演

1. NGUYEN Tri Toan PhucA, 吉田数貴, 緒方一介: 「酸素同位体に対する核子ノックアウト反応断面積の系統分析」, 日本物理学会2019年秋の分科会, 2019年9月17日-20日, 山形大学.
2. 緒方一介: 「1次元モデルを用いた多段階直接過程の空間的可干渉性の分析」, 日本物理学会第75回年次大会, 2020年3月16日-19日, 名古屋大学. (現地開催なし)
3. 佐藤弘一, 古本猛憲, 千葉陽平, 緒方一介, 櫻木千典: 「 (p,p') 反応における変形混合効果の微視的解析」, 日本物理学会第75回年次大会, 2020年3月16日-19日, 名古屋大学. (現地開催なし)
4. 佐藤 弘一: 「大振幅集団運動の微視的理論のこれまでとこれから」, 第3回若手放談会: エキゾチック核物理の将来、理研神戸キャンパス、2020年2月19-21日 (招待講演)

5. Koichi Sato: “A possible observation of large-amplitude quadrupole shape mixing by nuclear reaction”, The fifth workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model 尖閣荘 (新潟県佐渡市), 2019年8月
6. 千葉陽平: 「 ^{24}Mg のアイソスカラー双極励起強度とクラスター励起」, 日本物理学会2019年秋の分科会, 2019年9月17日-20日, 山形大学.
7. Yohei Chiba: “Description of cluster correlation and strength function with antisymmetrized molecular dynamics”, The fifth workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model 尖閣荘 (新潟県佐渡市), 2019年8月
8. 千葉陽平: 「反対称化分子動力学を用いた3体クラスター構造の解析」, 日本物理学会第75回年次大会, 2020年3月16日-19日, 名古屋大学. (現地開催なし)

その他

1. 緒方一介: 「原子核反応論入門」, NITEPレクチャーシリーズ第4回, 2019年6月6日・12日, 大阪市立大学梅田サテライト.

研究助成金取得状況

1. 佐藤弘一: 大阪市立大学ふるさと寄付金を財源とした「グローバル人材育成事業」2019年度南部陽一郎記念若手奨励賞副賞 研究奨励費 50万円
2. 千葉陽平: 学術振興会・研究活動スタート支援「 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 共鳴の構造及びその炭素燃焼過程への寄与の解明」 90万円

海外出張および海外研修

1. 緒方一介: 中国・北京航空航天大学, 2019年8月18-8月22日, Workshop on Challenges in Direct Nuclear Reactions, 出席・発表
2. 緒方一介: ブラジル・マレシアスビーチホテル, 2019年10月11-22日, 4th International Workshop on Quasi-Free Scattering with Radioactive-Ion Beams: QFS-RB 19, 出席・発表
3. 千葉陽平: 中国・北京大学 2019年11月21-11月26日, International workshop for graduate students and young physicists on nuclear physics, 出席・発表

その他

1. 佐藤弘一: 大阪市立大学ふるさと寄付金を財源とした「グローバル人材育成事業」2019年度南部陽一郎記念若手奨励賞 受賞 (2019年10月)
「原子核の大振幅集団運動の微視的理論」に関する研究に対して
(副賞: 研究奨励費 50万円)