

物理学教室年次研究報告

2018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 |
| 2018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..... | 9 |
| 生体・構造物性物理学研究室..... | 11 |
| 素励起物理学研究室..... | 14 |
| 電子相関物理学研究室..... | 20 |
| レーザー量子物理学研究室..... | 25 |
| <u>宇宙・高エネルギー講座</u> | |
| 宇宙線物理学研究室..... | 28 |
| 高エネルギー物理学研究室..... | 36 |
| 重力波実験物理学研究室..... | 44 |
| 宇宙・素粒子実験物理学研究室..... | 51 |
| <u>基礎物理学講座</u> | |
| 素粒子論研究室..... | 55 |
| 数理物理研究室..... | 60 |
| 宇宙物理研究室..... | 66 |
| 原子核理論研究室..... | 70 |

平成 30 年度を振り返って

平成 30 年度は、学外で大きな災害がいくつか発生した。1 つは 7 月に西日本を中心に北海道や中部地方などの広範囲に被害が発生した豪雨によるものである。また、9 月 4 日には非常に強い台風 21 号が近畿地方を中心に甚大な被害をもたらした。もう 1 つは、9 月 6 日北海道で発生した震度 7 の地震によるものである。台風 21 号のとき、幸いにも物理学科教員、学生・院生がケガをしたという報告はなかったが、私の研究室の学生・院生の実家で、飛来物により壁に穴が空いたり、窓ガラスが粉碎されたりと事後処理に苦労したと聞いている。豪雨、強風、地震に伴う土砂崩れ、液状化などの災害も酷いものだが、広範囲に停電が長時間発生した。特に北海道内全域停電（約 300 万戸）では約 99% の復旧までに 50 時間かかり、西日本豪雨では約 100 万戸、台風 21 号では約 240 万戸が停電し、約 99% の復旧にそれぞれ 100 時間、120 時間を要したとされている。大阪市大杉本キャンパスでは、平成 29 年度に 1 号館前のワシントンヤシの木を安全管理の観点から伐採しており、台風によるこれらの倒木はなかったが、理学部学舎そばのメタセコイヤなど倒れた木は多数あった。また、私市にある理学部附属植物園では数十年にわたって育ててきた大木が多数根こそぎ倒れるなど多大な被害があった。台風接近に備え、事前に JR 以下鉄道各社が午前中で運行中止としたために大阪市大では 9 月 4 日は臨時休校・休業となる非常事態となった。

我々は普段の電力供給は当たり前として使っているが、広域停電などが発生したときは復旧には時間がかかることを前提にして、個人・世帯が何らかの準備をせねばならないことも痛感した。（万が一に備え、自宅で太陽光発電と蓄電池をセットで購入した）

学内では、痛ましい出来事が起こった。ひとりの学生の悲しい知らせである。理科選択コースで入学し 2 回生からは物理学科への進学を希望していた学生であった。1 回生向けの講義担当教員から一人ぽつんとしていると報告を受けていた。主任はその年の物理学科新入生の担任であり、学生の学生相談窓口となり、定期的に面談をして学生との繋がりを築いていくことが求められ、それは学生が卒業するまで継続する。しかし、まだ物理学科へ所属していない状況だったために、主任として何も出来なかったことが悔やまれる。

物理教室に関係することとしては、10 月 1 日に「南部陽一郎物理学研究所」

が開設され、12月に記念シンポジウムが開催された。同じく12月に、上海大学との合同研究会が開催された。学生・院生間の交流を深めるきっかけになることが期待される。

理学研究科として、新たに International Course（英語コース）を開設することになった。3専攻全てで院生として受け入れる体制を整えた。大学の真の意味の国際化となることを期待する。年度内の募集は準備の関係で行わず、2019年度の6月に募集することになった。

8年前にも主任を務めた。当時の年次報告を読み返すと、「教員に対するサバティカル制度が平成22年10月から始まった」とある。これまで物理教室では誰もこの制度を利用していない。せっかくの制度が無駄になっている。何らかの活用方法はないだろうか。また、「平成22年度4月より、後期博士課程研究奨学奨励金制度が理学研究科内で発足しました」ともあった。この制度があるから本学の後期博士課程に進学した院生が多数おり、十分機能していると思われる。

最後に、本年度年次報告作成にご尽力された常定芳基氏と矢野英雄氏に感謝いたします。

2018年度（平成30年度）物理学科主任

石川 修六

2018 年度 物理学教室 談話会

談話会委員：丸、中野、鐘本

第 1 回 新入生歓迎物理学教室談話会

日時 2018 年 4 月 10 日 15:30～

場所 学術情報総合センター10F 大会議室

講師 中尾 憲一 氏(大阪市立大学素粒子論研究室・教授)

題目 「ブラックホール!？」

第 2 回 物理学教室談話会

日時 2018 年 6 月 28 日 14:45～

場所 第 6 講義室 F205

講師 千葉 陽平 氏(大阪市立大学原子核理論研究室・物理学研究所・特任助教)

題目 「アイソスカラー型単遷移を用いた原子核のクラスター状態の探索」

第 3 回 物理学教室談話会

日時 2018 年 6 月 28 日 15:00～

場所 第 6 講義室

講師 緒方 一介 氏(大阪大学核物理研究センター・准教授)

題目 「離散化チャネル結合法を基軸とする天体核反応・核変換研究」

第 4 回 物理学教室談話会

日時 2018 年 7 月 18 日 16:30～

場所 第 6 講義室

講師 小林 達夫 氏(北海道大学素粒子論研究室・教授)

題目 「超弦理論から現実的素粒子像へ向けて」

第 5 回 物理学教室談話会

日時 2018 年 7 月 27 日 14:45～

場所 第 3 講義室

講師 藤田 佳孝 氏(大阪大学核物理研究センター・招聘教員)

題目 「原子核研究において「見える」量子力学」

第6回 物理学教室談話会

日時 2018年8月2日 11:00～

場所 第6講義室 F214

講師 Christian Enss 氏(Heidelberg 大学・教授)

題目 「Metallic Magnetic Calorimeters: A Novel Technology
for Neutrino Physics and Beyond」

第7回 物理学教室談話会

日時 2018年10月5日 16:30～

場所 理学部会議室(E108)

講師 竹内 一将 氏(東京大学・准教授)

題目 「非平衡ゆらぎのKPZ 普遍法則 -これは何か、何が驚きか、どこに行くのか-」

第8回 物理学教室談話会

日時 2018年12月19日 16:30～

場所 理学部会議室(E108)

講師 米徳 大輔 氏(金沢大学・数物科学系(物理) 教授)

題目 「ガンマ線バーストと重力波天文学」

第9回 2018年度 物理学教室研究発表会

日時 2018年12月26日 10:00～

場所 学術情報総合センター1F 文化交流室

第10回 物理学教室談話会

日時 : 2019年1月9日 16:30～

場所 : 理学部会議室(E108)

講師 : 栗木 雅夫 氏 (広島大学・教授)

題目 : 「リニアコライダー加速器の設計コンセプト」

第11回 修士論文発表会

日時 2019年2月1日 9:35～

場所 高原記念館 学友ホール

超低温物理学研究室

| | | |
|------|------|----------|
| 石川修六 | 教授 | 佐藤浩司(M2) |
| 矢野英雄 | 准教授 | 田邊博隆(M2) |
| 小原 颯 | 講師 | 濱崎康佑(M1) |
| 畑 徹 | 特任教授 | 松村 樹(M1) |

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、佐藤、濱崎）

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 μm ）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量子乱流から振動方向に放出される渦輪の検出時間を測定し、渦輪の放出は時間的にランダムであること、またある時間がたつと平均放出頻度が一定になることを明らかにした。②検出する最小渦輪サイズを0.8 μm から200 μm まで変化させて平均検出頻度を測定し、乱流生成エネルギーが150 pWのとき、検出頻度は最小渦輪サイズのべき乗則に従い、その指数が-1.6であることを明らかにした。この結果は、量子乱流の渦構造が自己相似性を持つことを示唆している。③乱流生成エネルギーが40 pWと1000 pWの場合にも同様の測定を行い、べき乗則の指数がそれぞれ-2.5と-1.5であることを明らかにした。この結果は、乱流生成エネルギーが増加すると指数が一定値に向かうことを示している。古典乱流でも乱流領域の構造にべき乗則が観測されることから、乱流の普遍的な性質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巨大渦の渦糸長密度測定（小原、矢野、松村）

流体力学は、粘性のない理想流体の流れを基礎とし、その渦についても詳しく調べられている。一方、粘性のない流体を実現する超流動ヘリウムは、その流れを作ることが難しく、理想流体の流れを実験的に研究する方法が限られている。我々は、超流動ヘリウム中でも回転する低温モーターを開発し、超流動流の新分野開拓を行っている。現在までのところ、①超流動回転流を利用する超流動ポンプを開発し、吸い込み流によって渦管をもつ巨大な超流動渦が誘起されることを発見した。これは吸い込み流が量子渦を集中させることを示す。②渦管の形状から、循環量子 κ の $10^4\sim 10^5$ に相当する渦であることを明らかにした。③超流動ヘリウムより軽い固体水素微粒子（直径11 μm ）を用い、巨大渦のparticle tracking velocimetry (PTV粒子像追跡流速計測)を行い、渦管壁直下の流れ場を可視化した。流れは、渦管をまわりながら超流動ポンプへ吸い込まれる、らせん運動を描くことを明らかにした。本年度は、モーターによって生成された巨大渦の中に、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。この減衰と可視化実験による巨大循環量子を比較すると、モーターによる回転流によって生成された量子渦糸密度は、これまでの回転冷凍機の実験よりも数倍程度大きな値を示していることになる。これらの結果は、超流動ヘリウムの動的状態についての新たな知見を与えるとともに、新分野開拓が期待で

きる成果である。

3. 回転する超流動ヘリウム3の研究（物性研、京大、福井大、岡山大との共同研究）
（石川、小原、木村）

並行平板間の狭い領域に閉じ込めた超流動ヘリウム3-A相での半整数量子渦の検出実験を行った。半整数渦の検出はNMR法で行った。これまでに、回転角速度が大きな場合に半整数渦に起因するとみられるNMR共鳴周波数の角速度依存性を観測した。しかし、回転角速度が小さい場合は逆の傾向であった。また回転角速度が大きな場合の周波数変化は理論予想より小さく、定量的な一致はなかった。考察より以下のことが明らかになった。無回転時の狭い隙間内のオーダーパラメーターが予想していた分布から少しずれていることがわかり、回転角速度が小さい場合には固有軌道角運動量の効果が半整数量子渦効果より大きいために、逆の傾向となることとわかった。回転角速度が大きな場合は、半整数量子渦と通常の位相渦とが共存していると考えられることで周波数変化量を理解できることがわかった。NMR共鳴周波数の変化は非局在なスピン波励起に起因するが、その非局在なスピン波励起は位相渦によって何ら影響を受けないからである。半整数渦が観測されただけでなく、巨視的な大きさの固有軌道角運動量の観測が出来たことを示している。

4. 毛細管中の超流動³Heのポーラー相探索（小原、石川、田邊）

コヒーレンス長の10倍程度(約1 μm)の太さの毛細管中の超流動³Heでは、クーパー対の運動がほとんど1次元的に制限されることで、バルクとは決定的に異なる特異な相が出現しうることが、古くから予言されていた。しかし、これまで実験上の困難から、その測定はほとんど行われてこなかった。すなわち、直径約1 μm で均一で長い構造体が存在しなかったこと、相の同定に必要なNMRの信号強度が極小であることが解っていたからである。本年度は、昨年度作成した増幅用低温アンプを用いて、検出コイルによるNMR信号強度の最適化を行った。また、毛細管としてフォトニック結晶ファイバを用いるが、これまでは無駄な肉厚が大きいため十分な充填率が確保できなかった。そこで、今年度、フッ酸をもちいてエッチングし、充填率を10%前後まで増加させることに成功した。毛細管中³Heの信号捕捉にむけて、測定システムを改良中である。

5. 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。

6. 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、全く新しく設計を行い、製作を完成させて性能テストに入った。昨年度、50mK止まりと報告したが、ノイズ対策と温度シールドの改良により、40m

Kまで到達できるようになった。ただ、希釈冷凍機はもっと下がっているにもかかわらず、温度計がノイズ等により浮いている可能性があることも分かってきた。そこで、より信頼できる温度計測のため、やや大型のセンサーとなるが磁気温度計の開発を行うこととした。

教育・研究業績

学術論文

1. Observation of the spiral flow and vortex induced by a suction pump in superfluid ^4He ;
H. Yano, K. Ohyama, K. Obara, and O. Ishikawa,
Journal of Physics: Conference Series, **969**, 012002(1–5) (2018).
2. 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, published online (2019)
(DOI: 10.1007/s10909-019-02143-4)
3. 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, published online (2019)
(DOI: 10.1007/s10909-019-02164-z)

国際会議講演

International Symposium on Quantum Fluids and Solids (QFS2018), University of Tokyo, Tokyo, Japan (25–31 July 2018)

1. H. Tanabe (Poster): Development of cryogenic C-MOS and pHEMT amplifiers
2. H. Yano (Poster): Vortex emission from quantum turbulence generated in superfluid ^4He
3. I. Matsumura (Poster): Vorticity of suction vortex observed by second sound in superfluid ^4He
4. K. Hamazaki (Poster): Vortex emission from turbulence produced by counterflow in superfluid ^4He
5. K. Sato (Poster): Power dependence of vortex emission generated by vibrating wire in He II
6. H. Yano (Talk): Vortex emission from quantum turbulence generated by vibrating wire in superfluid ^4He (Quantum turbulence workshop)

International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, Osaka City University, Osaka, Japan (December 12-13, 2018)

1. K. Obara (Poster): Vortex line density of superfluid suction vortex
2. K. Sato (Poster): Power dependence of vortex emission generated by vibrating wire in He II
3. K. Hamazaki (Poster): Vortex emission from turbulence produced by counterflow in superfluid ^4He

学会・研究会講演

1. 日本物理学会 2018年秋季大会 (同志社大学, 2018年9月9日~12日)
 - ① 佐藤浩司 (Talk): 超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーが作る量子乱流の渦構造 II
 - ② 濱崎康佑 (Talk): 超流動 ^4He 熱対向流による乱流生成と渦環放出
 - ③ 松村樹 (Talk): 第二音波で観測する吸い込み渦の渦糸長密度
2. 第17回低温工学・超伝導若手合同講演会 (関西学院大学, 2018年11月30日)
 - ① 佐藤浩司 (Talk): 超流動ヘリウム4中の振動ワイヤーがつくる量子乱流の渦構造
3. 日本物理学会第74回年次大会 (九州大学, 2019年3月14日~17日)
 - ① 濱崎康佑 (Talk): 超流動 ^4He 中の振動ワイヤーが生成する量子乱流の渦構造と異方性

学位論文

修士論文

1. 佐藤浩司：「振動ワイヤーがつくる超流動ヘリウム4量子乱流の渦構造」
2. 田邊博隆：「細い円筒内の超流動ヘリウム3に対するNMR実験技術の開発」

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」204万円
2. 石川修六：共同研究 株式会社ジェイテクト「熱音響冷凍システムの研究（2）」85万円
3. 矢野英雄：日本学術振興会・科学研究費基盤研究（B）
「超流動ヘリウム流れ場における量子渦の運動状態の研究」2018年度分 210万円
4. 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」2018年度分 180万円
5. 小原 顕：日本学術振興会・科学研究費基盤研究（C）
「毛細管中における超流動³Heポラー相の探索」2018年度分 110万円

受賞

1. 佐藤浩司：低温工学・超伝導若手奨励賞受賞 2018年11月30日（第17回低温工学・超伝導若手合同講演会）

その他

地域貢献

1. 畑・石川・矢野・小原：低温工学関西支部基礎技術講習会（2018年9月26日～28日）

光物性物理学研究室

鐘本勝一 准教授

岩本 晃典 (M2)

中橋 健太 (M1)

早川 雄人 (B4)

保地 滉介 (B4)

研究概要

1. 分光計測からの電流電圧特性機構の推定 (岩本、鐘本)

有機半導体は高輝度・軽量・フレキシブル等の特徴から、有機LEDなど様々な素子に応用されているが、その素子動作全般において電気伝導が深く関与している。そのキャリアの振る舞いを調べるために、ダイオード動作と同期させた分光計測を実施した。測定された分光信号の強度から素子動作時のキャリア量を推定し、さらには方形波電圧印加時に発生するStark信号の強度から素子の内部電場を推定することに成功した。それらを総合し、分光法を中心として得られたマイクロな情報から電流値を計算し、別途独立計測から得た電流値と比較した結果、分光計測の情報と電気計測情報を結びつけることに成功した。また、その分光法とESR測定を組み合わせることで、低電圧下ではキャリアと励起子の中間体である電子正孔対は動作素子中で蓄積して存在するものの、電圧増加とともにその電流に及ぼす寄与が減少することを明らかにした。

2. 有機半導体におけるスピン流計測 (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流が注目されている。中でも、強磁性金属のFMR遷移によるスピン流の発生 (スピンポンピング法) と逆スピンホール効果 (ISHE) によるスピン流の電氣的計測を組み合わせた手法が提案され、スピン流研究の進展が期待されている。本研究では、有機物質を用いたデバイスに対し、スピンポンピングに伴われる素子電流の変化を電流検出ESR (EDMR) で観測することを試みた。その結果、FMR遷移に伴い、強磁性金属電極から有機層を貫く電流の変化が観測されることを見出した。特にその電流は、電圧の向きに依存し、強磁性電極側から電子キャリアが注入される場合のみ起こることがわかった。そのことから、FMR遷移に伴い、有機層側にキャリアが注入されることが示唆された。

3. 分子性LEDに対するESR計測の実施 (早川、鐘本)

最近の我々の研究において、有機LEDが動作する際、キャリアと励起子の中間状態である電子正孔対が素子内で発生し、そのバイアス印加下の挙動が電流計測ESRや発光検出ESRで追跡できることがわかっている。これまでの研究では、有機LEDとしてポリマー型半導体を用いてきたが、今回、電子エネルギー準位をデザインした分子性半導体材料からなる分子性LEDを用いることで、安定した電子正孔対を生成させることを試みた。その結果、実際に電子正孔対の発生を示す発光検出ESRの信号計測に成功した。さらに、電子正孔対の距離を離すことで信号の強度が操作できることがわかった。

4. 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。今回、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。その結果、電圧を3V以上に上げると強い発光が観測され、その発生に伴われて、ホールキャリアの信号が観測されることがわかった。ただし発光が強くなると逆にそのホール信号は減少した。この結果は、発光時の励起子生成反応により起こるホール消失が、バイアス

印加によるホール増加を上回っていることを示している。これらの結果は、この分光計測が、電気化学発光セルの動作過程の研究に有効であることを裏付けている。

教育・研究業績

学術論文

1. Shuto Hatanaka, Keigo Kimura, Takayuki Suzuki, and Katsuichi Kanemoto, “Exploring the behavior of electron-hole pairs in working organic light emitting diodes” Physical Review Materials 2, 115201, (6pages) (2018).
2. 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).

学会記事

1. 鐘本勝一、「光・ESR計測による有機半導体素子物性の評価」電子スピンスイエンズ学会誌、31巻117-120 2018年

学会・研究会講演

1. 岩本晃典、鐘本勝一、「有機ダイオードにおける電流電圧特性とEDMR強度の関係」第57回電子スピンスイエンズ学会、北海道大学（2018. 11. 1-3）
2. 中橋健太、鐘本勝一、「有機半導体におけるスピン流発生時の素子電流測定」第57回電子スピンスイエンズ学会、北海道大学（2018. 11. 1-3）
3. 鐘本 勝一、畑中 秀人、岩本 晃典、「有機LED中の電子正孔対に対する電流検出及びEL検出磁気共鳴」第66回応用物理学会春季学術講演会、東京工業大学（2019. 3. 9-12）

学位論文

修士論文

1. 岩本晃典：「有機半導体素子における電気伝導過程の分光学的評価」

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」、370万円
2. 鐘本勝一（代表）、東燃ゼネラル石油研究奨励・奨学財団、「有機系太陽電池における素子動作過程の直接分光モニタリングの実現」、100万円
3. 鐘本勝一（代表）、大阪市立大学戦略的研究（基盤研究）「電子スピン共鳴による誘起電流を利用した新規エレクトロニクス技術の開発」、120万円
- 4.

その他

受賞

1. 岩本晃典：第57回電子スピンスイエンズ学会にて優秀ポスター賞を受賞

生体・構造物性研究室

南後 守 特任教授
杉崎 満 准教授

三苦 重仁 (M1)
橋本 健人 (B4)

研究概要

1. ポルフィリン類の顕微分光法測定（橋本，杉崎，南後）

クロロフィルはポルフィリン環を持ち、高等植物の光合成系において光捕集や励起エネルギー移動、電荷輸送といった役割を担う。一方フタロシアニン自然界には存在しないが、ポルフィリンと類似の構造を持つこと、また熱的、化学的に安定であること、有機合成の収率が高いことなどの理由から、電子材料や触媒、特に人工光合成材料として注目されている。天然の光合成系が機能を発現し効率よいエネルギー輸送を実現するためには、その構成要素である色素が光合成膜蛋白中に正しく配列される必要がある。その機構を理解するためには、天然の状態でのエネルギー輸送を行っている様子をその場観測する方法論の確立が重要となってくる。ここで得られる知見は、天然の光合成系を模倣し人工光合成系を構築する際にも、有効に働くものと期待できる。このような目標を実現するために、ポルフィリン類の微視的光学応答を顕微鏡法により調べた。

フタロシアニン微粒子を顕微鏡下で観測した場合、長さ数 μm の針状の輝点が多数観測され、また個々の粒子の蛍光スペクトルは溶媒中に比べレッドシフトしていた。一方、クロロフィルの場合、数 μm の輝点に加え回折限界以下の輝点が多数観測された。これらの蛍光スペクトルは、前者が溶媒中のそれと比較しレッドシフトをしているのに対し、後者は溶媒中とほぼ同じピークエネルギーを持つことが分かった。また、回折限界程度の広がりを持つ輝点の中には、蛍光強度が時間とともに大きく揺らぐ、いわゆるランダムテレグラム現象を示すものが含まれることが分かった。以上のことから、大きな輝点は分子集団が会合体を形成した結果として現れた蛍光であり、また小さな輝点は非常に少数分子からの蛍光と考えられる。また、クロロフィルにおいて、高強度のレーザーを照射した際に基底状態の枯渇現象に伴う蛍光強度の減少が現れることも分かった。

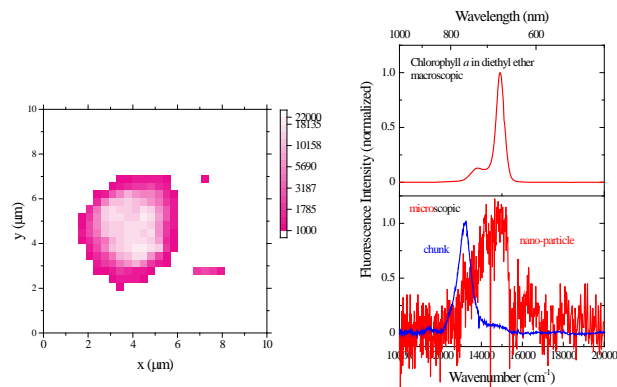


図1（左図）クロロフィル微粒子の顕微蛍光イメージ。試料の調製方法により、数 μm の大きな粒子から300nm以下の非常に小さな粒子となる。（右図）微粒子の顕微蛍光スペクトル。粒径が大きい場合、蛍光ピークが低エネルギー側に現れるが、粒径が小さくなるに従い、高エネルギー側にシフトする。

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，杉崎）

近年、光受容性蛋白質において、光を用いてその応答を制御するという試みが盛んになされている。たとえば光合成色素蛋白複合体においては、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ながら、所望の結果が得られるように最適化を図るという方法がとられる。

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、反応効率が変化した物理的な背景を説明することが難しくなるという問題がある。そこで我々は、まずは周波数に対し位相や振幅にシンプル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ていくことにより、前述の問題に対する答えを得るという試みを行っている。

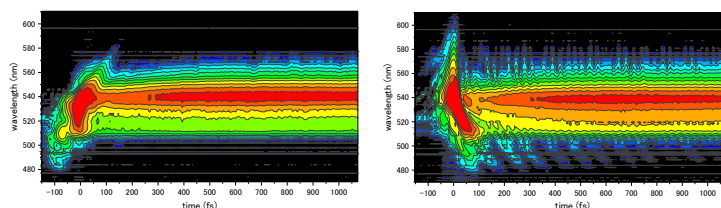


図2 光合成色素である β -カロテンの過渡回折信号の時間発展。励起光のチャープ量を変化させると、3次非線形光学応答が大きく変化する。右図において数10フェムト秒周期に現れる構造は、コヒーレント分子振動を表す。高エネルギー側に現れるコヒーレント分子振動の周期は、低エネルギー側のそれに比べほぼ2倍となっている。

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。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)連続的に変化させたところ、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コントロールできることが分かった。現在のところ、励起状態の寿命は、励起状態における振動緩和と誘導放出過程の競合によって決まるものと考えている。また、コヒーレントな分子振動の生成割合は振動モードによって異なることも分かった。研究成果の一部を、論文[2]として発表した。

3. 小型酸素センサーの開発 (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。この測定法においては、酸素濃度の変化に伴う酸素センサー試料の蛍光強度の変化を測定することとなるが、実際に医療現場で人体の酸素濃度測定を精度よく行うためには、たとえば患者が動いたために蛍光強度が変化した影響を取り除く必要が出てくる。また、試料の劣化に伴う蛍光強度の変化についても考慮しなくてはならない。このような問題を克服するために、酸素センサー試料のほかに基準となる蛍光物質が必要となる。そのため本年度は、無機物を中心いくつかの蛍光物質を用いた酸素センサー試料の試作を行うと主に、その作製方法や構造についても検討を行った。

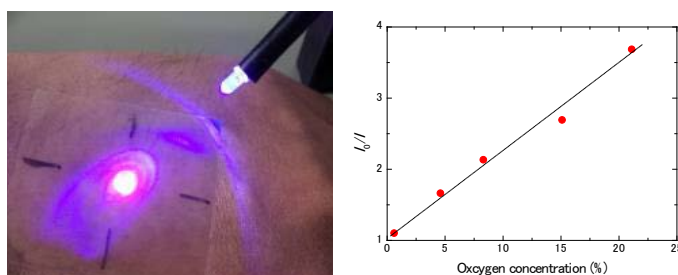


図3 (左図) 手の甲に貼り付けた酸素センサー試料の蛍光の様子。(右図) 酸素センサーの蛍光強度は周囲の酸素濃度に比例する。

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. 杉崎満, 南後守, 天尾豊, 「フタロシアニンおよびクロロフィルの顕微蛍光観測」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 同志社大学 京田辺キャンパス, 2018 年 9 月 9 日~12 日.
2. 三苫重仁, 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」, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年), 九州大学 伊都キャンパス, 2019 年 3 月 14 日~17 日.
3. 杉崎満, 橋本健人, 南後守, 天尾豊, 「クロロフィル *a* の顕微蛍光観測」, 日本物理学会 第 74 回年次大会(2019 年), 九州大学 伊都キャンパス, 2019 年 3 月 14 日~17 日.

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」 100万円.
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

湯井悟志 (D3:学振DC1)
韓 俊植 (M2)
乾 聡介 (M1)

C.-H. Hsueh (客員研究員)

研究概要

1. 乱流のエネルギーカスケードの観測 (坪田)

乱流は、エネルギースペクトルのコルモゴロフ-5/3則に代表されるような統計則に従う。そして3次元乱流の場合、エネルギーが低波数から高波数に流れるエネルギーカスケードによってこうした統計則が作られることが知られている。しかしこれまでこのようなエネルギーカスケードは古典乱流・量子乱流を通じて観測・確認されたことが無かった。ケンブリッジグループは、原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)を箱形ポテンシャルに閉じ込め振動を加えることで乱流を作り、Time of Flightで運動量分布が特徴的なべき則に従うことを観測した(N. Navon *et al.*, Nature 539, 72(2016))。我々はその続編として、エネルギーカスケードの観測に成功した。基本的なアイデアは図1のとおりである。当初BECを起こした粒子はポテンシャル障壁を超えることができない。しかし、乱流のカスケードが高波数に進行し、ポテンシャル障壁を超える運動エネルギーを持つ粒子が現れると、それは箱形ポテンシャルの外に出る。そうした粒子数ロスを観測し、エネルギーカスケードのフラックスを求めた。巨視的波動関数のGross-Pitaevskii(GP)方程式の数値計算を行い、こうした描像が正しいことを確認した。本研究は、イギリス・ケンブリッジ大学、東京大学との共同研究である。

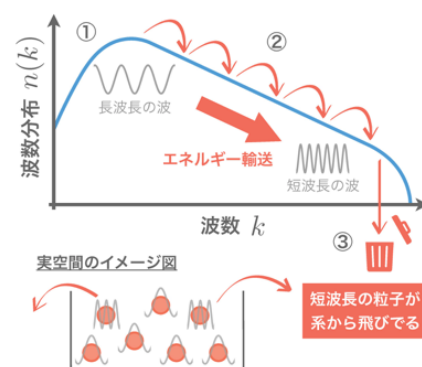


図1 エネルギーカスケード観測の機構

- ① BECの粒子が箱型ポテンシャルに閉じ込められている。これらの粒子は低波数を持つ。
- ② BECを振動させ乱流を作るとエネルギーカスケードが進行し低波数から高波数へエネルギーが流れる。
- ③ 粒子のエネルギーがポテンシャルを越えると箱から飛び出る。その粒子数を観測してエネルギーカスケードの観測に成功した。

2. 超流動ヘリウム表面における微粒子と量子渦の異常運動 (坪田、乾)

超流動ヘリウムの自由表面のプローブとして、微粒子を用いる研究は長い歴史がある。理化学研究所のグループは、表面上に捕獲された微粒子群の中で、異常な運動を起こす粒子が存在することを観測した(図2)。我々は、微粒子と量子渦の結合がこうした異常運動を起こすと考え、量子渦糸モデルに基づく数値計算を行った。典型的な状況を図3に示す。こうした状況で微粒子と量子渦の結合運動を調べると、確かに微粒子は観測されたような異常運動を行うことが示された。本研究はプレスリリースを行

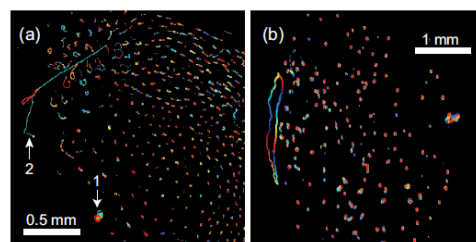


図2 観測された微粒子の運動。ほぼ静止している微粒子群の中に、長駆する微粒子が見られる。線は各微粒子の運動の道筋を示す。

い、日刊工業新聞その他で騒動された。本研究は、理化学研究所およびドイツ・コンスタンツ大学との共同研究である。

3. 2成分BECの量子渦の相分離(坪田、韓)

前年度に引き続き、2成分BECの量子渦の相分離について理論的・数値的に調べた。前年度に、成分間相互作用 g_{12} が大きくなると、2成分の量子渦が相分離を起こすことは見いだしていたが、その条件を詳細に調べた。その結果、図4に示すような相図であることがわかった。成分内相互作用 g に対し、 g_{12}/g が0.6より小さい時は、両成分はほぼ独立にOnsager渦と呼ばれる巨大渦を形成する。ところが、 g_{12}/g が0.6を超えると量子渦の相分離が起こる。この臨界値が何で決まるかを、渦間相互作用の考察から明らかにした。

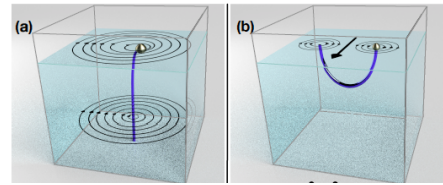


図3 液面の微粒子が量子渦(青い線)に捕獲された状態の模式図

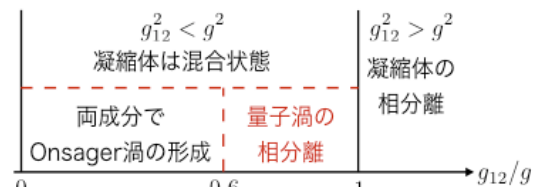


図4: g_{12} に依存した量子渦の集団構造の相図

4. スピノールBECにおける複合欠陥の実現(竹内)

冷却原子気体スピノール・ボース・アインシュタイン凝縮体において、ドメイン壁と半整数量子渦からなる複合体(複合欠陥)の直接観測に初めて成功した。この研究はソウル国立大学の実験グループとの共同研究であり、竹内が理論を一手に担った。この複合欠陥は量子クエンチによってBECを反強磁性相からポラー相へと相転移させることで生成される。複合欠陥の構造と安定性は2次ゼーマン効果によって特徴づけられる長さスケールで決まり、2次ゼーマン効果が小さいときに複合欠陥は比較的安定であることを明らかにした。

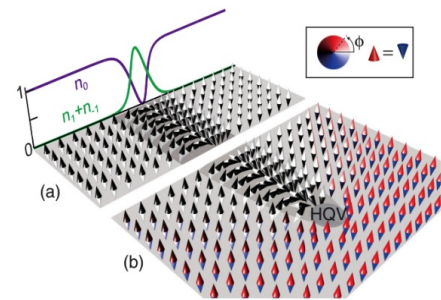


図. 理論的に解明された複合欠陥の構造. $m_z = 0$ 成分のドメイン壁の内部は、 $m_z = \pm 1$ 成分によって満たされており、ドメイン壁の端点には半整数量子渦(HQV)が存在する。

5. 離散的対称性の破れに伴うドメイン形成時の小さいドメインの内部構造(竹内)

離散的(Z_2)対称性の自発的破れを伴う相転移ダイナミクスにおけるドメインサイズ分布について、小さいドメインの統計的寄与を評価した。2次元系の秩序化過程および2成分超流体の相分離過程を想定し、ドメインの面積やドメイン壁の長さ、渦度の分布について、小さいドメインの内部構造の寄与は統計的に無視できることを解析的に示した。

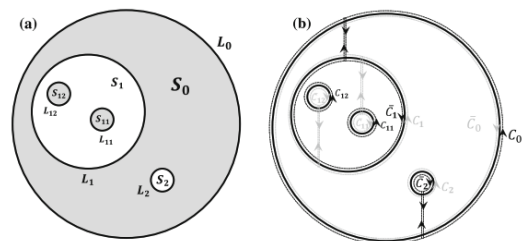


図. 円状のドメインの内部構造の概略図. 内部構造の寄与は面(S_j, S_{jk})の面積, 閉じた線(L_j, L_{jk})の長さ, および, 閉じた経路($C_j, C_{jk}, \bar{C}_j, \bar{C}_{jk}$)に沿った循環について積分を実行することで計算される。

教育・研究業績

学術論文

1. Nir Navon, Christoph Eigen, Jinyi Zhang, Raphael Lopes, Alexander L. Gaunt, Kazuya Fujimoto, Makoto Tsubota, Robert P. Smith, Zoran Hadzibabic
Synthetic dissipation and cascade fluxes in a turbulent quantum gas
Science (in press) (2019)
2. P. Moroshkin, P. Leiderer, K. Kono, S. Inui, and M. Tsubota
Dynamics of the Vortex-Particle Complexes Bound to the Free Surface of Superfluid Helium
Phys. Rev. Lett.122, 174502 (2019)
3. Junsik Han and Makoto Tsubota
Phase separation of quantized vortices in two-component miscible Bose-Einstein condensates in a two-dimensional box potential
Phys. Rev. A 99, 033607 (2019)
4. Che-Hsiu Hsueh, Russell Ong, Jing-Fu Tseng, Makoto Tsubota, and Wen-Chin Wu
Thermalization and localization of an oscillating Bose-Einstein condensate in a disordered trap
Phys. Rev. A 98, 063613 (2018)
5. Toshiaki Kanai, Wei Guo and Makoto Tsubota
Merging of Rotating Bose-Einstein Condensates
J. Low Temp. Phys. 195, 37(2019)
6. Seji Kang, Sang Won Seo, Hiromitsu Takeuchi, and Yong-il Shin
Observation of wall-vortex composite defects in a spinor Bose-Einstein condensate
Phys. Rev. Lett. 122, 095301 (2019)

国際会議会議録

1. Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota
Numerical Study on Entrance Length in Thermal Counterflow of Superfluid 4He
J. Low Temp. Phys. 196, 35(2019)
2. Hiromitsu Takeuchi
On the Internal Structure of Smaller Domains in Domain Coarsening Dynamics of Spontaneous Z_2 -Symmetry Breaking in Two Dimensions
J. Low Temp. Phys. 196, 314-320 (2018)

国際会議講演

1. [Invited] Hiromitsu Takeuchi
Length scale hierarchy in phase transition dynamics of spontaneous symmetry breaking in multi-component Bose-Einstein condensates
VORTEX DYNAMICS, TURBULENCE AND RELATED PHENOMENA IN QUANTUM FLUIDS, Natal, Brazil, 6.24-7.5 (2019)
2. H. Takeuchi, L. F. Cugliandolo, and M. Picco
Critical percolation in early-stage quench dynamics with spontaneous discrete symmetry breaking in a two-dimensional Continuum
StatPhys27: Internatinal Conference Statistical Physics, Buenos Aires, Argentina, July, 8-12 (2019)

3. H. Takeuchi

Domain-area distribution in phase-separating two-component Bose-Einstein condensates
StatPhys27: International Conference Statistical Physics, Buenos Aires, Argentina, July, 8-12
(2019)

QFS2019: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Edmonton, Canada, August 7-13,
2019

4. Makoto Tsubota (Plenary)

Hydrodynamics and turbulence in quantum fluids

5. Sousuke Inui, Makoto Tsubota

Formation of localized vortex tangle around a spherical heat source in superfluid helium

6. Tomo Nakagawa, Sousuke Inui, Makoto Tsubota, Hideo Yano

Statistical laws and self-similarity of a vortex tangle emitted from a vortex tangle in superfluid
4He

7. Yuto Sano, Makoto Tsubota, Kazuya Fujimoto, Nir Navon

Anisotropy of wave-turbulent cascades in a quantum gas

8. Satoshi Yui, Hiromichi Kobayashi, Makoto Tsubota

Elementary process of coupled dynamics between quantized vortex and normal fluid in superfluid
4He

9. Hiromichi Kobayashi, Satoshi Yui, Makoto Tsubota

Energy transfer caused by coupled dynamics between quantized vortices and normal fluid in
superfluid 4He

Quantum Turbulence Workshop, Edmonton, Canada, August 11, 2019

10. S. Inui, M. Tsubota

Formation of localized vortex tangle around a spherical heat source in superfluid Helium

11. S. Yui, H. Kobayashi, M. Tsubota

Energy transfer caused by coupled dynamics between quantized vortices and normal fluid in
superfluid 4He

12. Makoto Tsubota (Invited)

Hydrodynamics and turbulence in quantum fluids

Workshop “Turbulence of all kinds”, Nambu Yoichiro Institute of Theoretical and Experimental
Physics (NITEP), Osaka City University, Osaka, April 25-26, 2019.

13. Makoto Tsubota (Invited)

Recent topics of quantum hydrodynamics and turbulence

Physics of Cold Atom Gases: Ordered and Chaotic Aspects, Institute of Advanced Studies of the
University of Sao Paulo, University of Sao Paulo, Brazil, April 15-18, 2019.

Quantum Turbulence: Cold Atoms, Heavy Ions, and Neutron Stars, Institute for Nuclear Theory,
University of Washington, USA, March 18-29, 2019.

14. Makoto Tsubota (Invited)

Recent topics of quantum hydrodynamics and turbulence

15. Junsik Han

Phase separation of quantized vortices in two-component miscible Bose-Einstein condensates in a
two-dimensional box potential

16. Sosuke Inui

Formation of localized vortex tangle around a hot spot in superfluid 4He

International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in
Physics, Osaka, December, 12-13, 2018

17. J. Han, M. Tsubota

Vortex phase separation in two-component Bose-Einstein condensates

18. S. Inui, M. Tsubota, P. Moroshkin, P. Leiderer, K. Kono

Dynamics of fine particles due to quantized vortices on the surface of superfluid 4He

学会・研究会講演

1. 坪田誠

Recent topics in quantum turbulence

第5回 量子渦と非線形波動、東京理科大学、2018. 12. 6

2. [Invited] 竹内宏光

相分離する2成分超流体の秩序化過程

研究会「超流動³HeおよびスピノールBECにおけるトポロジカル相・励起」, 近畿大学, 東大阪キャンパス, 12. 22-23 (2018)

日本物理学会、2018年秋季大会、同志社大学、2018. 9. 10

3. 乾聡介、坪田誠、Peter Moroshkin、Paul Leiderer、河野公俊

超流動⁴Heにおける微粒子の量子渦による異常運動

4. 韓俊植、坪田誠

2成分Bose-Einstein凝縮体中での量子渦の相分離

学位論文

博士論文

1. 湯井悟志

「超流動⁴Heにおける非一様量子乱流の理論的研究」

修士論文

1. 韓俊植

「2次元2成分Bose-Einstein 凝縮体中の量子渦のダイナミクスと集団構造の形成」

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」

180万円

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. 湯井悟志：日本学術振興会特別研究員奨励費

「超流動ヘリウム⁴の量子乱流における2流体結合ダイナミクスの理論的研究」

60万円

受賞

1. 乾聡介が、日本物理学会(領域6)の学生優秀発表賞を受賞した。

2. 湯井悟志が、QFS2019: International Conference on Quantum Fluids and Solids, でポスター賞を受賞した。

その他

1. 坪田誠：市民特別セミナー2018 講演会「宇宙の謎を解く鍵 -南部先生が見つけたもの-」
～南部陽一郎大阪市立大学特別栄誉教授ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念～
「量子乱流-今よみがえるダ・ヴィンチのメッセージ-」
2. 学術論文 2 の研究のプレスリリースを行い、日刊工業新聞等で報道された。
3. ネットサイト「リケラボ」(<https://www.rikelab.jp>)で坪田のキャリアが紹介された。

電子相関物理学研究室

小栗 章 教授 毛見拓郎 (M2) 一町 ほのか (M1)
西川 裕規 講師 堤 和彦 (M2) 和氣 康平 (B4)
寺谷 義道 (D3) 橋本 将史 (M1) 魚住 柚月 (B4)

研究概要

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、2014年度から大阪大学理学研究科小林研介教授代表の科研費基盤(S)の研究に参加し、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して、実験グループと密接に連携した共同研究を進めている。

研究の概要は次の通りである：[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・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し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] 伝導電子系にそれぞれ結合している2つの局在軌道が反強磁性的に相互作用している系では、その反強磁性的相互作用による2つの局在軌道間の局所的な反強磁性秩序相と伝導電子によるKondo効果が競合する。ここで反強磁性的相互作用が、ある臨界値より大きいと、局所的な反強磁性秩序の方が実現するという量子相転移が存在する。電子正孔対称性がある場合は、局所的な反強磁性相の基底状態への局在軌道の寄与はゼロであるが、この系に磁場を印加すると、両相で局在軌道の寄与がゼロでないFermi液体で記述できる基底状態が量子臨界点を挟んで存在することになる。我々はこの量子臨界点を挟んでLuttinger-Friedel総和則が整数性を伴って破れることを見出した。これは自己エネルギーの周波数微分（電子相関効果）を含むLuttinger積分が半整数値をとる事と同値である。この研究では、系を繰り込まれた摂動論と数値繰り込み群で解析した。繰り込まれたパラメータを用いてLuttinger-Friedel総和則による局在軌道中の電子数と、数値繰り込み群から直接的に計算した電子数を比較した。その結果、高磁場相では2つの電子数はよく一致するが、低磁場相においては、総和則による電子数は一様に一定の（半）整数性を持ってずれていることを見出した。この整数性により、この量子臨界点はトポロジカルな性質を持ち、系のパラメータの変化に対して量子臨界点は安定に存在でき、Luttinger積分が電子相関由来のトポロジカル不変量の役割を果たすことを指摘した。
- [6] 4重量子ドット上のLieb磁性とNagaoka強磁性のスピン状態が、これらに接続した2つの電子溜の伝導電子によるKondo効果でどのように遮蔽するのかを研究した。4重量子ドットのパラメータ空間で、スピントリプレット状態であるLiebフェリ磁性と、スピントレット状態であるNagaoka強磁性の領域と量子状態を詳細に研究した上で、その状態へのKondo効果の影響を研究した。各磁性状態の量子状態を反映して、Kondo効果による遮蔽は2段階で起こる領域と1段階で起こる領域があることを見出し、この系が多彩な振る舞いをすることを明らかにした。

教育・研究業績

学術論文

1. Rui Sakano, Akira Oguri, Yunori Nishikawa, and Eisuke Abe. “Bell-state correlations of quasiparticle pairs in the nonlinear current of a local Fermi liquid”, Phys. Rev. B **99**, 155106 (2019), 7 pages.
2. Yunori Nishikawa, Oliver J. Curtin, Daniel J. G. Crow and Alex C. Hewson. “Magnetic field induced quantum criticality and the Luttinger sum rule”, Phys. Rev. B **98**, 104419 (2018), 5 pages.
3. 小栗 章、“近藤効果・ゼロ次元 Fermi 流体の非線形量子輸送”, 日本物理学会誌 **73**, No. 11, 750-751 (2018).
4. 阪野 壘、小栗 章、“非平衡状態にある近藤効果(その1) 非平衡グリーン関数入門”, 『固体物理』 **53**, No. 6, 279-303 (2018) [ISSN:04544544].

国際会議講演

1. Akira Oguri, and Yoshimichi Teratani, “Higher-order Fermi-liquid corrections for thermoelectric transport through an Anderson impurity”, American Physical Society March Meeting (March 4-8 2019, Boston, USA).
2. Yoshimichi Teratani, and Akira Oguri, “Fermi liquid corrections for non-equilibrium transport through an $SU(N)$ Anderson impurity with arbitrary electron fillings”, American Physical Society March Meeting (March 4-8 2019, Boston, USA).
3. Rui Sakano, Yunori Nishikawa, Akira Oguri, and Eisuke Abe, “A measurable form of Bell’s correlation of spin currents across a double dot in the Kondo regime”, American Physical Society March Meeting (March 4-8 2019, Boston, USA).
4. Akira Oguri, “Fermi liquid theory for non-equilibrium Kondo effect”, Shanghai University – Osaka City University Symposium on Physics (December 27-28, 2018, Osaka City University).
5. Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, “Three body correlations in non-equilibrium current through $SU(N)$ Anderson impurity”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics (December 12, 2018, Osaka City University).
6. Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, Rui Sakano, “Effects of asymmetric couplings and bias voltages on nonlinear transport of a local Fermi liquid”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics (December 12, 2018, Osaka City University).
7. Takuro Kemi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, “Fermi-liquid corrections to nonlinear transport through Anderson impurity at finite magnetic fields”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics (December 12, 2018, Osaka City University).
8. Kazuhiko Tsutsumi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, Rui Sakano, “Effects of asymmetric couplings and bias voltages on nonlinear transport of a local Fermi liquid”, Shanghai University – Osaka City University Symposium on Physics (December 27-28, 2018, Osaka City University).
9. Takuro Kemi, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, “Fermi-liquid corrections to nonlinear transport through Anderson impurity at finite magnetic fields”, Shanghai University – Osaka City University Symposium on Physics (December 27-28, 2018, Osaka City University).

学会・研究会講演

1. 寺谷義道, 小栗章, 「SU(N)Anderson 不純物の非平衡電流におけるフェルミ流体効果: 3体相関の数値くりこみ群による研究」, 日本物理学会 (2019.3. 14-17 九州大)
2. 堤和彦, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘, 「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」, 日本物理学会 (2019.3. 14-17 九州大)
3. 毛見拓郎, 寺谷義道, 小栗章, 「磁場中の非平衡電流および熱伝導に対するフェルミ流体効果の局所電子数依存性」, 日本物理学会 (2019.3. 14-17 九州大)
4. 阪野壘, 小栗章, 「3 端子量子ドットに生成されたベル状態」, 日本物理学会 (2019.3. 14-17 九州大)
5. 寺谷義道, 小栗章, 「電子正孔非対称な多軌道 Anderson 模型の 3 体相関」, 科学費基盤 (S) ”メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の微視的理解とその制御” 研究会 (2018.11.22-23 東大物性研)
6. 小栗章, 寺谷義道, 阪野壘, 「多軌道・電子-正孔非対称 Anderson 不純物に対する高次 Fermi 液体補正 II」, 日本物理学会 (2018.9. 9-12 同志社大)
7. 寺谷義道, 小栗章, 「N 重に縮退した準位を持つ Anderson 不純物の高次 Fermi 液体補正: $1/(N-1)$ 展開と NRG による研究」, 日本物理学会 (2018.9. 9-12 同志社大)
8. 秦徳郎, 荒川智紀, Lee Sanghyun, 小林研介, Meydi Ferrier, Raphaëlle Delagrangé, Richard Deblock, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘, 「近藤効果における 3 体相関の実験的検出」, 日本物理学会 (2018.9. 9-12 同志社大)

学位論文

修士論文

1. 毛見 拓郎: 磁場中の量子不純物系の熱電気輸送係数に対する高次フェルミ流体効果
2. 堤 和彦: 非平衡近藤系の低エネルギー状態に与えるトンネル結合およびバイアス電圧の非対称性の効果

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」 90 万円 (直接経費)
2. 小栗章 (分担): 学術振興会・基盤研究 (S) 「メゾスコピック系における非平衡スピン輸送の微視的理解とその制御」 90 万円 (直接経費)

海外出張および海外研修

1. 西川 裕規: 英国インペリアル・カレッジ・ロンドン、2019 年 2 月 28 日 ~ 2019 年 3 月 21 日、研究打ち合わせ
2. 小栗 章: アメリカ合衆国、2019 年 3 月 3 日~2018 年 3 月 10 日、APS March meeting (Boston) 出席・発表
3. 寺谷 義道: アメリカ合衆国、2019 年 3 月 3 日~2018 年 3 月 10 日、APS March meeting (Boston) 出席・発表

レーザー量子物理学研究室

井上 慎 教授 長谷秀秋(M2) 谷澤昂樹(B4)
加藤宏平 特任助教 大前真秀(M1)
小林一平(M1)
Janek Fleper
(特別研修学生)

研究概要

1. 2原子種同時ボース・アインシュタイン凝縮の実現 (加藤、井上)

前年度にルビジウム原子のボース・アインシュタイン凝縮体の生成には成功していたので、本年度最初の実験課題は、カリウム原子のボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の実現であった。光源を用意してカリウム原子のレーザー冷却も行い、磁気トラップ中にてルビジウム原子による協同冷却を行うことで、2原子種の同時縮退に成功した。原子数は2原子種ともに約 5×10^4 個程度で、以降の実験には十分の大きさであった。カリウム原子とカリウム原子の間、及びカリウム原子とルビジウム原子の間にはフェッシュバハ共鳴があるため、相互作用を制御した量子縮退気体の実験が可能になった。続いての課題は、原子気体を磁気トラップから光トラップへ移行することである。特に光トラップへの移行のタイミングを工夫することでBEC中の原子数の揺らぎを低減できる予定である。

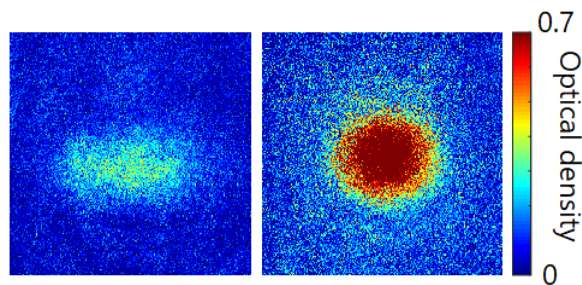


図 1 2原子種の同時BEC。

左はカリウム原子(TOF 21.7ms)、右はルビジウム原子(TOF 25.4ms)の吸収像。

イメージのサイズは $356\mu\text{m} \times 356\mu\text{m}$

2. 箱型ポテンシャルの生成 (Fleper、加藤、井上)

混合量子縮退の研究では、通常の調和型のトラップではなく、原子気体の密度が一樣になる箱型のトラップ(Box trap)を使用する予定であり、その開発に着手した。箱型トラップの形状は混合BECの相分離の様子や量子渦の直接観測を行う為に、水平方向はBECの回復長より十分大きな直径 $60\mu\text{m}$ 程度の円筒状の閉じ込めにする一方、鉛直方向は2原子種に働く重力の違いからくる位置のずれを無視できるように強く閉じ込めることに決定した。ポテンシャルの生成には、斥力を及ぼす正に離調したレーザー光を用い、鉛直方向からはリング型に整形したビーム、水平方向からは浅い角度で交差する斜め光格子を組み合わせる事に決定した。

トラップ光の波長は 755nm に決定した。波長の選定には、半導体レーザーが使用可能な波長域であること、実験装置のガラスセルの透過波長域であることを考慮した。光散乱レートが気になるが、数秒程度の実験には支障がないことを計算により確認した。トラップ光の形状の作成には当初デジタル・ミラー・デバイス(Digital Mirror Device, DMD)の使用を試みたが、回折を使うために光の利用効率が悪く(\sim 数%程度)、十分な斥力ポテンシャルが得られないことが分かった。従って、水平面内の閉じ込めにはアキシコンレン

ズを用いて作成したリング状のビームを用いることとした。テスト系で一様なトラップの生成を確認した。原子のトラップに必要なパワーを得るために、外部共振器半導体レーザーの出力をテーパ型増幅器で増幅する事にした。

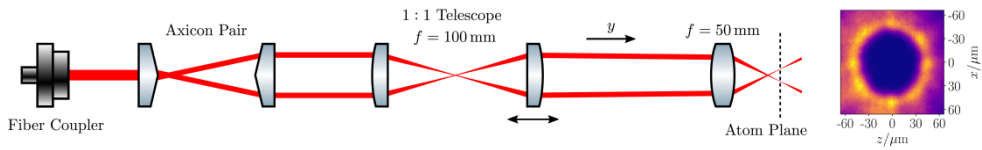


図 2 アキシコンを用いたリングビームの生成方法 (左図) とテストイメージ (右図)

3. ガスセルを用いたラビ周波数の空間イメージング (長谷、加藤、井上)

ボース・アインシュタイン凝縮体をはじめとする冷却原子の実験において、 π パルスなどの強力な電磁波 (ラジオ波、マイクロ波) による原子核スピンの制御は非常に重要である。電磁波が強ければ強いほど、高速にスピンを反転することができ、無駄な原子ロスやデコヒーレンスを防ぐことができる。電磁波を放射するアンテナの設計は非常に重要であるが、近距離での放射パターンは周囲の導体による干渉などもあり簡単ではない。そこで本研究課題では、原子気体を用いて電磁波の強度パターンの可視化を試みた。ガラスセル中に閉じ込められた常温の原子気体を用いたマイクロ波の強度の可視化には先行研究がある。光ポンピングしたルビジウム原子の原子核スピンのラビ振動 (6.8GHz) の照射によってラビ振動の様子を空間的に分解して観測したものである。しかし超微細構造分裂が小さいカリウムのような原子の原子核スピンの制御には、周波数の低いラジオ波が必要である。マイクロ波と同じ方法でラジオ波を可視化しようとすると、ドップラーシフトによって光ポンピングが無効化され、信号を得ることができない。本研究では偏光を用いてこの問題を解決することに成功した。

実験に用いたカリウム原子の超微細構造分裂は約450MHzである。D1線に円偏光を照射すると、電子スピンと原子核スピンの揃った状態に光ポンピングすることが可能である。この状態を始状態として、ラジオ波を照射すると、原子核スピンのラビ振動がD1線の吸収として観測できる。得られたラビ振動数を空間分解して観測することによって、アンテナからの放射パターンの像を得ることに成功した。

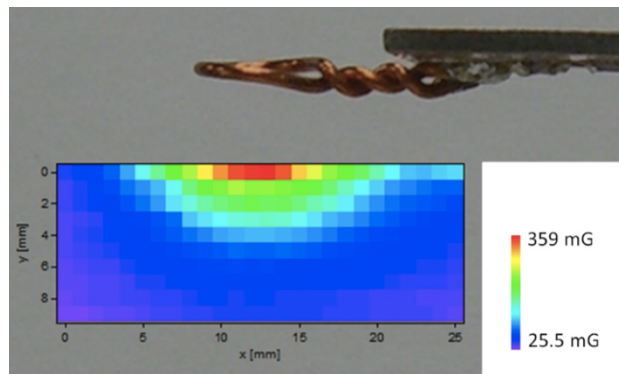


図 3 : 得られたラジオ波の強度分布

4. 位相コントラストイメージングに用いる位相板の評価 (大前、加藤、井上)

量子縮退気体のダイナミクスを観測するには位相コントラストイメージング法が極めて強力である。位相コントラストイメージングでは、位相板と呼ばれる中央に凹みのついたガラス板を使って光の位相をシフトさせるのだが、定量的なイメージングの為にはそのシフトが正確に $\pi/2$ かどうか重要である。実際に位相コントラストイメージングの系を組んで位相シフトの定量的評価を行った。

教育・研究業績

国際会議講演

1. Shin Inouye (invited), "Efimov resonances in an ultracold mixture" QFS2018: International Conference on Quantum Fluids and Solids, Tokyo, July 25-31, 2018.
2. Shin Inouye (invited), "What can we do with a quantum degenerate mixture?", Nambu Symposium 2018, Osaka City University, Dec. 13, 2018.

学会・研究会講演

1. K. Kato, Yujun Wang, J. Kobayashi, Paul S. Julienne and S. Inouye, "Isotopic shift of atom-dimer Efimov resonances in K-Rb mixtures", Poster presentation at ICAP 2018: The 26th International Conference on Atomic Physics, Barcelona, Spain, July 22-27, 2018.
2. 井上慎(招待): 「冷却原子における共鳴散乱: フェッシュバハ共鳴とエフィモフ共鳴」原子衝突学会第43回年会、京都大学宇治キャンパス、2018年10月14日.
3. K. Kato, Yujun Wang, J. Kobayashi, Paul S. Julienne and S. Inouye, "Isotopic shift of atom-dimer Efimov resonances in K-Rb mixtures", Poster presentation at Nambu Symposium 2018, Osaka City University, Dec. 13, 2018.
4. Shin Inouye (invited) "Ultracold atomic gas", Shanghai University - Osaka City University Symposium on Physics, Osaka City University, Dec. 27, 2018.
5. Shin Inouye (invited) "Exploring Feshbach resonance with cold atoms", 第3回物質階層を横断する会, 理研、2019年2月12日

その他

1. 井上慎: 「レーザー冷却の原理と応用」2018年11月7日 大阪市立大学工作技術センターにて講演

学位論文

修士論文

1. 長谷秀秋: 「カリウム原子気体を用いたラジオ波強度の空間イメージング」

研究助成金取得状況

1. 井上慎: 科研費・基盤研究(B)「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」728万円

海外出張および海外研修

1. 井上慎: バルセロナ (スペイン)、2018年7月22-27日、ICAP 2018: The 26th International Conference on Atomic Physics 出席・発表 (ポスター)
2. 加藤宏平: バルセロナ (スペイン)、2018年7月22-27日、ICAP 2018: The 26th International Conference on Atomic Physics 出席・発表 (ポスター)

その他

1. 井上慎: 四天王寺中学校からの実験室見学受け入れ (2018年12月16日)

宇宙線物理学研究室

| | | |
|---------------------|------------------|-----------|
| 荻尾彰一 (教授) | MAYTA, Rosa (D2) | 松宮弘幸 (B4) |
| 常定芳基 (准教授) | 織田浩行 (M2) | |
| KIM, Jihyun (博士研究員) | 尾村勇吾 (M2) | |
| 多米田裕一郎 (客員研究員) | 藤田慧太郎 (M2) | |
| 大嶋晃敏 (客員准教授) | 田上裕太 (M1) | |
| 小島浩司 (客員教授) | 中井慧 (M1) | |
| 林嘉夫 (名誉教授、特任教授) | 藤原亮太 (M1) | |

研究概要

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

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。2018 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)
- (b) TA 実験の地表検出器における気象観測システムの開発 (織田)

これらの成果は日本物理学会、国際会議 UHECR2018 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)

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 年度には後述の (a) の作業を経て、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。2018 年度は特に以下の研究課題に取り組んだ。

- (a) TALE 実験 大気蛍光望遠鏡からのトリガー信号によって地表検出器アレイのデータ収集を行なうトリガーシステム（ハイブリッドトリガー）の開発と実装、観測開始（藤原）。
- (b) TALE 実験 大気蛍光望遠鏡のためのイベント再構成ソフトウェアの開発（藤田）
- (c) TALE 実験 地表検出器アレイのためのイベント再構成ソフトウェアの開発（田上）。
- (d) TA×4 実験 地表検出器アレイの境界トリガーシステムの開発（松宮）。

これらの成果は日本物理学会、国際会議 UHECR2018 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）

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いており、データ解析が進められている。その成果は国際会議 UHECR2018 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た。宇宙空間に銀河は均一に分布しているわけではなく、銀河は、銀河団・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）といった大規模構造を作って不均一に存在していることが知られている。おとめ座銀河団から伸びる既知のフィラメントと最高エネルギー宇宙線の到来方向との方向相関を調べて、ホットスポットとフィラメントとの間に相関があることを見つけた。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、伝播計算へと研究が進展している。この成果は国際会議 UHECR2018 で報告され、また論文として出版された（下記学術論文番号 11）

5. 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、2017 年度までの観測器の運用はきわめて順調であり、その成果として 2018 年度には 5 編の学術論文（下記学術論文番号 6 から 10）として公表した。

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 $10^{15\sim 16}$ 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。2018 年度に、ALPACA 建設予定地においてインフラストラクチャーの建設が始まった。2019 年内に電力、水道、フェンス、実験小屋等の整備が完了予定である。また、2019 年度に設置予定の ALPAQUITA 実験（ALPACA 実験の地表空気シャワー観測装置の約 1/5 規模、約 16,000 m²）で使用する 1m² プラスチックシンチレーション検出器関連の物品が 2018 年 11 月に横浜港から搬出され、2018 年 12 月にチリのアリカに到着した。その後、陸路を経由して 2019 年 2 月にラパスに到着した。その他、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・タタ基礎研究所による日印国際共同実験「GRAPES-3 空気シャワー実験」では、インド・タミルナドゥ州のウーティー（標高 2,200 m）において、地表空気シャワーアレイによる銀河宇宙線の観測をおこなっている。新しい時間計測システムの導入以後（2013 年以降）のデータに関して再解析をおこなっている。宇宙線による月の影が確認できており、空気シャワーの角度決定精度の大幅に向上できる見通しである。また、雨期を避けて、新ミュオン検出器の増設工事も進んでいる。比例計数管の組み上げがほぼ完了し、現在は、吸収層の建設と建屋構造部分の建設に移っている。また、大気ガンマ線観測のための大型 NaI 検出器を用いた定常観測が始まった。本年度は、大嶋が 8 月に約 1ヶ月間、タタ基礎研究所（ムンバイ）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・ウーティー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 ミュオン検出器の高統計・高角度精度を活かし、約 70 GV の銀河宇宙線の連続観測を通して太陽圏の研究をおこなっている。本年度は、宇宙線の伝播を特徴付ける平均自由行程を実験的に決定し、その結果を論文として公表した（文献番号 12）。また、2014 年 12 月に観測されたミュオン強度の変動と電場計のデータについて評価し、雷雲中に 13 億ボルトの電位が存在することを明らかにした。結果は、2019 年 3 月に論文（文献番号 13）として公表した。本年度は、大阪市立大学の川上三郎名誉教授と小島が、8 月の約 3 週間、タタ基礎研究所（ムンバイ）に滞在し、論文について打ち合わせをおこなった。

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。2018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、検出器シミュレーションを開発し、検出効率などを見積もった。これらの成果を、UHECR2018、日本物理学会などで報告した。

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トレンジクォーク体 (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。2018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。本試験観測の結果は日本物理学会で報告された。

教育・研究業績

学術論文

1. R. U. Abbasi, *et al.*, “Search for correlations between arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays detected by the Telescope Array experiment and a flux pattern from nearby starburst galaxies”, *Ap. J.*, **867**, L27 (2018)
2. R. U. Abbasi, *et al.*, “The Cosmic-Ray Energy Spectrum between 2 PeV and 2 EeV Observed with the TALE detector in monocular mode”, *Ap. J.*, **865**, 74 (2018)
3. R. U. Abbasi, *et al.*, “Evidence of Intermediate-Scale Energy Spectrum Anisotropy of Cosmic Rays $E > 10^{19.2}$ eV with the Telescope Array Surface Detector”, *Ap. J.*, **862**, 91 (2018)
4. R. U. Abbasi, *et al.*, “Depth of Ultra High Energy Cosmic Ray Induced Air Shower Maxima Measured by the Telescope Array Black Rock and Long Ridge FADC Fluorescence Detectors and Surface Array in Hybrid”, *Ap. J.*, **858**, 76 (2018)
5. R. U. Abbasi, *et al.*, “Study of muons from ultra-high energy cosmic ray air showers measured with the Telescope Array experiment”, *Phys. Rev. D*, **98**, 022002 (2018)
6. O. Adriani, *et al.*, “Energy Spectrum of Cosmic-Ray Electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, *Phys. Rev. Lett.*, **119**, 181101 (2018)
7. O. Adriani, *et al.*, “On-orbit operations and offline data processing of CALET onboard the ISS”, *Astropart. Phys.*, **100**, 29 (2018)
8. O. Adriani, *et al.*, “Extended Measurement of Cosmic-ray Electron and Positron Spectrum from 11 GeV to 4.8 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”, *Phys. Rev. Lett.*, **120**, 261102 (2018)
9. O. Adriani, *et al.*, “Search for GeV Gamma-Ray Counterparts of Gravitational Wave Events by CALET”, *Ap. J.*, **863**, 160 (2018)
10. O. Adriani, *et al.*, “Characteristics and Performance of the CALorimetric Electron Telescope (CALET) Calorimeter for Gamma-Ray Observations”, *Ap. J. Suppl.*, **238**, 5 (2018)
11. J. Kim, *et al.*, “Filaments of galaxies as a clue to the origin of ultrahigh-energy cosmic rays”, *Science Advances*, **5**(1), eaau8227 (2019)

12. H. Kojima, *et al.*, " Measurement of the radial diffusion coefficient of galactic cosmic rays near the Earth by the GRAPES-3 experiment ", *Phys. Rev. D*, **98**, 022004 (2018)
13. B. Hariharan, *et al.*, " Measurement of the Electrical Properties of a Thundercloud Through Muon Imaging by the GRAPES-3 Experiment", *Phys. Rev. Lett.*, **122**, 105101(2019)

国際会議会議録

1. D. Bergman, Y. Tsunesada, J. Kzirmanic, Y. Omura : "NICHE: Air-Cherenkov observation at the TA site", Proceedings of UHECR2018, EPJ Web of Conferences, 210 (2019), 10.1051/epjconf/201921005001
2. Y. Tameda, *et al.*, " Detection of ultra-high energy cosmic ray air showers by Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel lens Telescope for next generation ", EPJ Web of Conferences, 210, 06004 (2019), 10.1051/epjconf/201921006004
3. T. Tomida, Y. Tameda, *et al.*, "Development of the calibration device using UAV mounted UV-LED light source for the fluorescence detector ", EPJ Web of Conferences, 210, 05015 (2019), 10.1051/epjconf/201921005015

国際会議講演

1. Y. Tsunesada (招待講演), "Latest results from TA", *AMS Days at La Palma*, 2018年4月9-12日(発表日4月10日, La Palma, スペイン)
2. S. Ogio (招待講演), "Telescope Array experiment", *International Symposium on Very High Energy Cosmic Ray Interaction (ISVHECRI) 2018*, 2018年5月21-25日(発表日5月23日), 名古屋, 日本
3. Y. Tsunesada (招待講演), "Recent Results from The Telescope Array Experiment", *QCD at Cosmic Energies VIII*, リガ, ラトビア 2018年6月(地震のため渡航不能となり、Skype参加で講演)
4. S. Ogio (招待講演), "Latest results and current status of the Telescope Array experiment", *Very High Energy Phenomena in the Universe (VHEPU) 2018*, 2018年8月13-18日(発表日8月14日), Quy Nhon, ベトナム
5. Jihyun Kim, "A Close Correlation between TA Hotspot UHECR Events and Local Filaments of Galaxies and its Implication", *Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) 2018*, 2018年10月8-12日(発表日10月10日), パリ, フランス
6. 多米田裕一郎: "Detection of ultra-high energy cosmic ray air showers by Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel-lens Telescope for next generation", *Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) 2018*, 2018年10月8-12日(発表日10月12日), パリ, フランス
7. R. Mayta (ポスター), "Air Shower Structure measured with the Telescope Array Surface Detectors", *Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) 2018*, 2018年10月8-12日, パリ, フランス
8. S. Ogio (ポスター), "TALE surface detector array and TALE hybrid system", *Ultra High Energy Cosmic Rays (UHECR) 2018*, 2018年10月8-12日, パリ, フランス
9. S. Ogio (招待講演), "Latest results and current status of the Telescope Array experiment", *Pierre Auger Observatory international collaboration meeting 2018*, 2018年11月11日, マラルグエ, アルゼンチン
10. S. Ogio (招待講演), "Future plans of ultra high energy cosmic ray observations", テレスコープアレイ実験10周年記念国際シンポジウム, 2018年12月19日, 柏, 日本

11. Y. Tsunesada, “Exploring ultra high energy universe with Telescope Array”, 南部陽一郎先生ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念国際シンポジウム, 2018 年 12 月 12, 13 日 (発表日 12 月 13 日), 大阪, 日本
12. R. Fujiwara, K. Fujita and Y. Tanoue (ポスター), “Ultra-high-energy cosmic ray measurement, TALE experiment”, 南部陽一郎先生ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念国際シンポジウム, 2018 年 12 月 12, 13 日, 大阪, 日本
13. Y. Omura and K. Nakai (ポスター), “NICHE: High-Energy Cosmic Ray Observation by Detecting Air Cherenkov Light”, 南部陽一郎先生ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念国際シンポジウム, 2018 年 12 月 12, 13 日, 大阪, 日本

学会・研究会講演

1. R. Mayta : 「Shower Structure Analysis with Telescope Array Surface Detector data」、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 14-17 日、信州大学松本キャンパス
2. 藤田慧太郎 : 「モンテカルロシミュレーションによる TA と TALE による FD 複眼観測の性能評価」、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 14-17 日、信州大学松本キャンパス
3. 大嶋晃敏 : 「GRAPES-3 実験における新ミューオン検出器の建設の現状について」、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 14-17 日、信州大学松本キャンパス
4. 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」、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 14-17 日、信州大学松本キャンパス
5. 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 (21)」、日本物理学会 2018 年秋季大会、2018 年 9 月 14-17 日、信州大学松本キャンパス
6. 織田浩行 : 「VHDL について」、アインシュタインセミナー、2018 年 9 月 20-22 日、大津
7. 藤田慧太郎 : 「広エネルギー宇宙線観測 TALE 実験」、アインシュタインセミナー、2018 年 9 月 20-22 日、大津
8. 荻尾彰一 (招待講演) : 「テレスコープアレイ実験ー最高エネルギー宇宙線研究の最前線ー」、宇宙素粒子若手の会、2018 年 10 月 5 日、東京大学柏キャンパス
9. 大嶋晃敏 : 「大型ミューオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」、平成 30 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、2017 年 12 月 21 日、東京大学柏キャンパス
10. 小島浩司 : 「内部太陽圏における 銀河宇宙線強度と太陽風速度の関係」、H30 年度 ISEE シンポジウム (日本語セッション) ISEE 研究集会「太陽圏・宇宙線関連の共同研究成果報告会」、2019 年 2 月 28 日、名古屋大学
11. 藤原亮太 : 「TALE 実験全体報告 4」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学
12. 藤田慧太郎 : 「TALE 実験大気蛍光望遠鏡を用いた単眼観測およびハイブリッド観測によるデータの解析」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学
13. 多米田裕一郎 : 「CRAFT 実験 6 : 自動観測システムによる試験観測報告」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学
14. 大嶋晃敏 : 「GRAPES-3 空気シャワーアレイ拡張の現状について」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学
15. 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 (2)」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学
16. 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 (22)」、日本物理学会第 74 回年次大会、2019 年 3 月 14-17 日、九州大学

その他

1. 荻尾彰一：春の市大授業、2018年4月29日
2. 荻尾彰一：宇宙を学べる大学合同説明会、2018年6月10日
3. 荻尾彰一：理学部教員による大阪市大職員向け研修会、2018年12月5日

学位論文

修士論文

1. 織田浩行：TA 実験の地表検出器における気象観測システムの開発
2. 尾村勇吾：NICHE 実験検出器アレイの設置と高エネルギー宇宙線初観測
3. 藤田慧太郎：TALE 実験 大気蛍光望遠鏡の再構成ソフトウェアの開発

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で探る超高エネルギー宇宙線源の進化」、代表、1,260万円
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、170万円
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、650万円
4. 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
5. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費「TALE 実験用地表検出器開発と性能試験」、代表、55万円
6. 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
7. 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、100万円
8. 大嶋晃敏：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費 42万円
9. 多米田裕一郎：東京大学地震研究所共同利用研究費「汎用宇宙線計測用信号読出回路の開発」、代表、75万円
10. 小島浩司：名古屋大学宇宙地球環境研究所国際研究助成 43万2千円

海外出張および海外研修

1. 常定芳基：ラパルマ（スペイン）、2018年4月9 - 12日、AMS Days at La Palma に参加・招待講演
2. 藤田慧太郎：米国ユタ州、2018年6月3 - 21日、TA 実験グループ全体ミーティング出席、宇宙線観測
3. 荻尾彰一：米国ユタ大学、2018年6月4 - 9日、TA 実験グループ全体ミーティング出席
4. Rosa Mayta：イルクーツク（ロシア）、2018年7月11 - 22日、ISSAP-Baikal Summer School 2018 に参加
5. 大嶋晃敏：タタ基礎研究所（インド）、2018年8月3日 - 9月1日

6. 多米田裕一郎：米国ユタ大学ほか、2018年8月5日 - 9月11日、宇宙線観測および望遠鏡の較正事件の実施
7. 荻尾彰一：Quy Nhon（ベトナム）、2018年8月11 - 19日、VHEPU2018に参加・招待講演
8. 小島浩司：タタ基礎研究所（インド）、2018年8月15日 - 9月5日
9. 荻尾彰一：ベルギー自由大学、2018年9月2 - 5日、TA 実験グループ全体ミーティング出席
10. 藤原亮太：米国ユタ州、2018年9月3 - 23日、TALE 実験建設
11. 織田浩行：米国ユタ州、2018年9月3 - 23日、TALE 実験建設
12. 尾村勇吾：米国ユタ州、2018年9月6 - 27日、NICHE 実験宇宙線観測
13. 常定芳基、米国ユタ州、2018年9月7-27日、TA 実験、NICHE 実験観測シフト
14. 藤田慧太郎：米国ユタ州、2018年9月30日 - 10月23日、TA 実験宇宙線観測
15. Rosa Mayta：パリ（フランス）、2018年10月4 - 14日、UHECR2018に参加・研究発表
16. 荻尾彰一：パリ（フランス）、2018年10月7 - 14日、UHECR2018に参加・研究発表
17. Jihyun Kim：パリ（フランス）、2018年10月7 - 14日、UHECR2018に参加・研究発表
18. 多米田裕一郎：パリ（フランス）、2018年10月7 - 14日、UHECR2018に参加・研究発表
19. Jihyun Kim：UNIST（韓国）、2018年10月30日 - 11月1日、共同研究打ち合わせ
20. 荻尾彰一：マラルグエ（アルゼンチン）、2018年11月9 - 13日、Auger 実験グループ全体ミーティングに参加・招待講演
21. 藤原亮太：米国ユタ州、2019年1月7 - 29日、TAx4 実験建設
22. Jihyun Kim：米国ユタ州、2019年1月22日 - 2月16日、TA 実験宇宙線観測
23. 中井慧：米国ユタ州、2019年1月22日 - 2月23日、NICHE 実験、TA 実験宇宙線観測
24. 尾村勇吾：米国ユタ州、2019年2月15日 - 3月16日、NICHE 実験、TA 実験宇宙線観測
25. 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

その他

1. 常定芳基：日本物理学会大阪支部委員（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 OC
4. 荻尾彰一：国際会議 ISVHECRI2018 IAC, LOC
5. 大嶋晃敏：国際会議 ISVHECRI2018 LOC
6. 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
7. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所 運営委員
8. 荻尾彰一：宇宙線研究者会議 (CRC) 実行委員
9. 常定芳基：CRC 将来計画検討小委員会 副委員長
10. 大嶋晃敏：CRC 事務局総務
11. 小島浩司：CRC 事務局総務補佐

高エネルギー物理学研究室

| | | | |
|-----------|------------|-------------|------------|
| 清矢 良浩 教授 | 金 賢一 (D3) | 久木田 直哉 (M2) | 足立 真尋 (B4) |
| 山本 和弘 准教授 | 手島 菜月 (D3) | 田中 慎也 (M2) | 小幡 拓也 (B4) |
| | | 吉中 晴香 (M2) | 小向 倅平 (B4) |
| | | 高橋 拓也 (M1) | 本條 貴司 (B4) |

研究概要

1. 陽子・反陽子衝突型加速器を用いた素粒子実験 (清矢, 山本)

米国フェルミ国立加速器研究所の陽子・反陽子衝突型加速器テバトロンと汎用素粒子検出器CDFによって得られたデータの解析を引き続き遂行した。データ取得自身は2011年9月末に終了しており、解析に使用できるデータ量は最終的に 10 fb^{-1} である。今年度の主な成果の一つとして $X(5568)$ と呼ばれる新しい中間子状態、いわゆるエキゾチック中間子の探索を取り上げる。これについては、テバトロン加速器を用いたもう一つの実験グループ D0 が 2016年に発見を主張⁽¹⁾したものの、その後、ヨーロッパの LHC 加速器を用いた LHCb, CMS, ATLAS 実験のいずれにおいてもその存在を確認できなかったという状況にある。CDF もその探索を行ったので、その内容を簡単に説明する。

探索した崩壊過程は

$$X(5568) \rightarrow B_s^0 \pi^\pm, B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi, J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-, \phi \rightarrow K^+ K^-$$

である。ここで、 B_s^0 は b クォークの反クォーク (\bar{b}) と s クォークで構成される中間子、 J/ψ は c と \bar{c} で構成される中間子、 ϕ や K^\pm は軽い u, d, s のクォーク・反クォークで構成される中間子である。崩壊後の $B_s^0 \pi^\pm$ に含まれるクォークの種類から考えると、仮に $X(5568)$ が存在するとした場合、4種類のクォーク・反クォーク (例えば $\bar{b}sud$) で構成される粒子となり、ハドロン組成の通常モデルでは説明ができないことになる。まず図 1 に D0 の結果を示す。これは崩壊によって生成され、検出器によってその運動量が測定された 5 つの粒子 ($\mu^+ \mu^- K^+ K^- \pi^\pm$) によって再構成した親粒子の不変質量分布である。これを見ると $5568 \text{ MeV}/c^2$ のあたりにピークがあるのがわかる。統計的有意性は 3.9σ と評価された。一般に、この程度の有意性では発見を主張しないのであるが、SN比を上げるために B_s^0 と π^\pm の間に、ある種の簡単な幾何学的条件を入れると 5.1σ になったのである。ただ、この条件は不変質量分布にバイアスを与えることが認

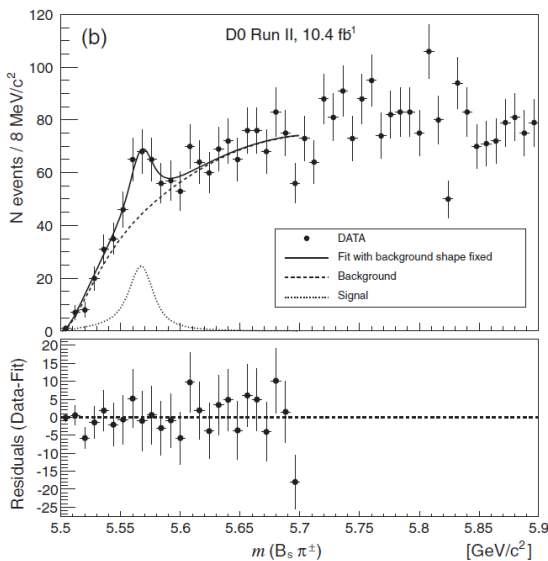


図 1: D0 による $B_s^0 \pi^\pm$ の不変質量分布。黒い点がデータ。実線はフィットした結果。粗い破線はバックグラウンド、細かい破線は $X(5568)$ が存在すると仮定した場合に期待される分布。下のプロットはデータとフィットの差。

⁽¹⁾ Phys. Rev. Lett. **117**, 022003 (2016)

識されており、CDF の解析ではその適用を避けた。図 2 が CDF の結果であり、LHC と同様に信号の存在は確認できなかった。現在のところ、さらなる確認が必要ということで、その存在の真否については保留になっている。

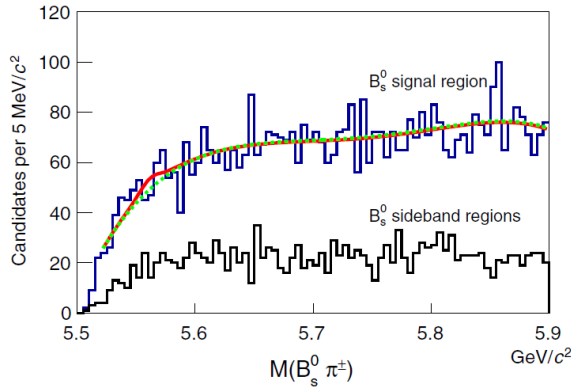


図 2: CDF による $B_s^0 \pi^\pm$ の不変質量分布. 上に分布しているヒストグラムがデータ. 赤色の実線は, 信号が存在している可能性を考慮してフィットした結果. 緑色の破線は, 信号が無いものと仮定してフィットした結果. 下に見えるヒストグラムは, B_s^0 の再構成において, その質量領域をあえて B_s^0 からずらした場合に得られる分布. 解析上の何らかの系統的な影響でピークが生じたりしないことを確認している.

2. 長基線ニュートリノ振動実験 (清矢, 山本, 金, 久木田, 田中, 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. 昨年度 10 月から開始したミューオン反ニュートリノ ($\bar{\nu}_\mu$) ビームモードでのデータ取得を 5 月末まで継続し, ビームタイムを一旦終了した. その後, 6 月からはスーパーカミオカンデの補修作業を開始した. ニュートリノモードのデータ総量は約 1.5×10^{21} POT (Protons On Target: パイオン生成標的に照射した陽子数) となり, 一方, 反ニュートリノモードについては約 1.7×10^{21} POT に到達した. ここでは, 2017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 0.8×10^{21} POT を用いたニュートリノ振動解析結果を述べる. これは, ν_μ あるいはその反粒子がニュートリノ振動により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. 図 3 は, ニュートリノ振動現象を記述する二つのパラメータの測定結果を示している. 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ある. 横軸の $\sin^2 \theta_{23}$ は振動の大きさ, 縦軸の Δm_{32}^2 あるいは Δm_{13}^2 は振動の速さに関するパラメータである. 図中の Normal あるいは NO (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おり, 逆に ν_3 が最も軽い場合は Inverted Ordering (IO) と呼ばれる. Normal Ordering の場合のベストフィットの結果は $\sin^2 \theta_{23} = 0.526^{+0.032}_{-0.036}$, $\Delta m_{32}^2 = 2.463^{+0.071}_{-0.070} \times 10^{-3} \text{ eV}^2/c^4$ である. この図からわかるように, θ_{23} は $\pi/4$ よ

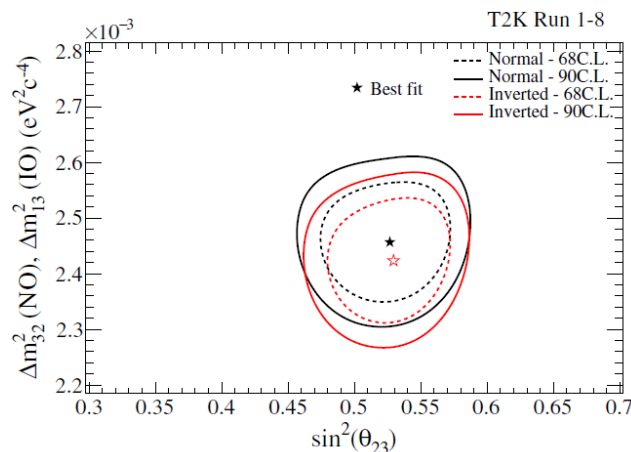


図 3: ニュートリノ振動パラメータ $\sin^2 \theta_{23}$ と Δm_{32}^2 あるいは Δm_{13}^2 の測定結果. 黒色は Normal Ordering の結果, 赤色は Inverted Ordering の結果である. 点線と実線は, それぞれ 1σ と 90% (1.6σ) に対応する統計的信頼度の領域. 星印はベストフィットの値を示している.

りも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 4 は、ニュートリノにおける粒子・反粒子対称性 (CP 対称性) の破れを表すパラメータの測定結果である。CP の破れは $\sin \delta_{\text{CP}}$ で表されるので $|\delta_{\text{CP}}| = 0$ あるいは π の場合は CP 対称性が成立していることになる。縦軸はフィットの尤度であり、値が小さいほどデータとモデルの一致が良いことを表す。統計的信頼度 2σ の範囲も示してあり、Normal Ordering の場合は $-2.99 < \delta_{\text{CP}} < -0.59$, Inverted Ordering の場合は $-1.18 < \delta_{\text{CP}} < -1.01$ である。昨年度の結果と同様、いずれの場合においても CP 保存は領域外にあるので、 2σ の統計的信頼度において CP 保存が排除されている。また、質量階層性については Normal Ordering の方がデータによって支持されているようである。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、より高精度の測定が重要である。

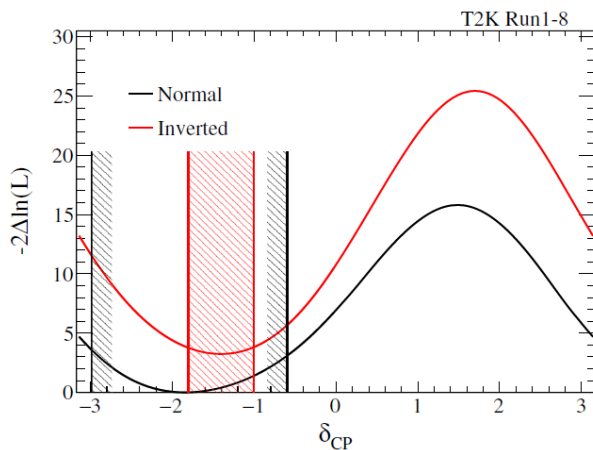


図 4: CP 対称性の破れを表すパラメータの測定結果。縦軸は尤度を反映する量であり、小さい値ほどデータとの一致が良いことを表す。斜線で囲まれた範囲は 90% の統計的信頼度を表す。

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 は、前置検出器ホールの地下 2 階にインストールされた検出器群を示しており、水を標的とした WAGASCI 水モジュール (中央) の前には既存のプラスチック標的検出器、後ろにはミューオン検出器としての役割をもつ既存の鉄標的モジュールが置いてある。今年度は、昨年度 10 月から今年度 5 月末までに取得した反ニュートリノビームデータを用いて、反ニュートリノと水あるいは炭化水素の荷電カレント反応断面積測定を行った。これは世界初の成果であり、得られた結果の一部を挙げると



図 5: インストールされたニュートリノ検出器。手前は既存のプラスチック標的検出器 (Proton Module), 次に WAGASCI 水標的検出器, その後ろにミューオン検出器として使用する既存の鉄標的検出器 (INGRID)。

$$\sigma_{\text{H}_2\text{O}}^{\bar{\nu}_\mu} = [1.082 \pm 0.068 (\text{stat.}) \pm_{-0.128}^{+0.145} (\text{syst.})] \times 10^{-39} \text{ cm}^2 \cdot \text{nucleon}^{-1}$$

$$\sigma_{\text{CH}}^{\bar{\nu}_\mu} = [1.096 \pm 0.054 (\text{stat.}) \pm_{-0.117}^{+0.132} (\text{syst.})] \times 10^{-39} \text{ cm}^2 \cdot \text{nucleon}^{-1}$$

である。また、これらの結果は、理論予想と矛盾が無かった。

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 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オン検出器を配置する比較的大規模なものである。大角度で生成されたミュオンを検出するために横に置かれるミュオン飛程検出器、Side Muon Range Detector (SMRD)，は鉄とプラスチックシンチレータのサンドイッチ構造をもつ。昨年度 11 月に 1 台目の組み立てを行ったが、今年度 6 月に 2 台目を完成させた。今年度の 1 月にはフルセットアップの完成に向け、図 5 の検出器群の再配置と SMRD 等のインストールを開始した。図 6 はその様子を示している。今後は読み出しシステムのインストー



図 6: WAGASCI フルセットアップインストールの様子。手前は最初に建設された WAGASCI 水標的検出器，次にプラスチック標的検出器 (Proton Module)，その次に昨年度建設した 2 台目の WAGASCI 水標的検出器，その後ろにミュオン検出器が設置されている。両脇に立っているのが Side Muon Range Detector である。手前の WAGASCI モジュールは水の注入のために傾けてある。

ルや検出器コミッショニングを行う予定である。一方、SMRD のモンテカルロシミュレーションの構成や検出器の宇宙線テストとの比較、読み出しエレクトロニクスの時間分解能評価とミュオンの運動方向判別の検討などを行った。

3. 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, 吉中, 高橋, 足立, 小向)

原子核に束縛された負ミュオンが電子に直接的に転換する過程、いわゆるミュオン・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ところである。昨年度に、ミュオン・電子転換過程に対する最も大きな背景事象である束縛ミュオン軌道上崩壊 (decay-in-orbit, 略して DIO) の測定を、J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) にあるミュオンビームライン (D ライン) を用いて行ったが、今年度は、この測定に対応するモンテカルロシミュレーションを整備する等の詳細なデータ解析を進めた。昨年度の報告と同様、図 7 にそのセットアップを示す。写真上部に見えるミュオンビーム出口直後にカーボン等の標的を置き、標的内に生成されたミュオン原子からの DIO 由来の電子を、電磁石 (写真中央付近の青色) の上流と下流に 2 台の MWPC を配置して検出する。ちなみに、カーボン等の比較的軽い原子の DIO 測定はこれまでに行われていないため、世界初の測定という意義もある。図 8 は、カーボン標的内で静止した正電荷ミュオンの崩壊によって生成された電子の運動量分布を、モンテカルロシミュレーションと比較したものである。これら電子の最大運動量は運動学的に 52.5 MeV/c と知られており、分布の高運動量側のエッジに対応しているため、運動量測定の際正にも使用できる。データとモンテカルロシミュレーションは矛盾がなく、データの理

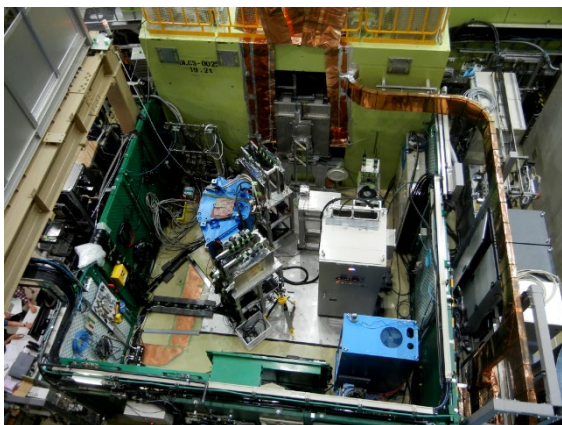


図 7: J-PARC MLF の ミューオンビームライン (D ライン) の D2 エリアにおいて行ったミューオン軌道上崩壊測定実験のセットアップ.

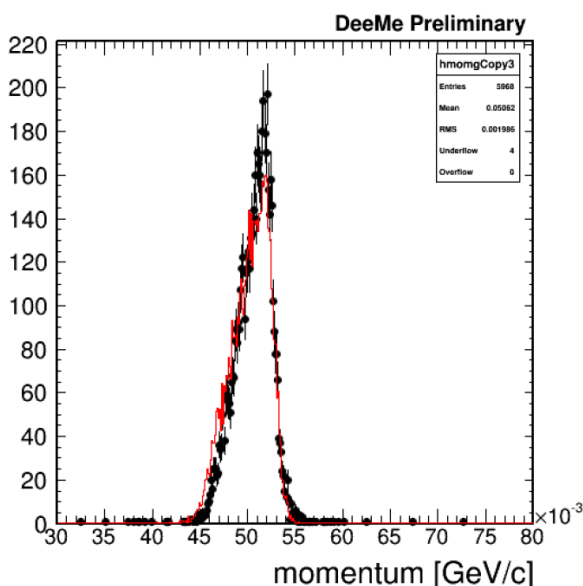


図 8: 運動量スペクトロメータによって再構成された正電荷の電子の運動量分布. カーボン標的内で静止した正電荷ミューオンの崩壊により生成された電子を検出している. 黒い点はデータ, 赤色のヒストグラムはモンテカルロシミュレーション.

解が進んでいることがわかる. 引き続き, DIO の運動量分布測定に向けて, 系統誤差の評価等により詳細な解析を行っていく. 一方, DIO 測定データのその他の較正については, 時間原点の決定, MWPC 読み出しシステム全体の同期をとるための時間補正, パルス波高におけるオフセット補正等を完成させた. さらに, 今年の 3 月には, カーボン標的のみを用いた高統計 DIO 測定を, 昨年度と同じ MLF D2 エリアで行った. これにより, 理論スペクトルの検証を高精度で行うことが可能となる. また, 小型のプラスチックシンチレータ+ファイバー読み出しカウンターを用いてミューオンビームプロファイルの測定も行い, ビームプロファイルが運動量測定に与える影響を調べる基礎データを取得した.

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は, より高いガス増幅率と MWPC の安定動作の両立のため, 充填ガスの種類や混合比の最適化を進めている. また, MWPC 3 台を直線的に並べ, 磁場の影響を除いた場合の電子検出位置分解能の測定なども行った. これらの研究・開発・測定には京都大学複合原子力研究所 (KURNS) の電子線形加速器を用いた.

実験計画が実現に向けて進捗する中, ビームライン完成に向け, 電磁石等のコンポーネントの最終的な配置を決定するため, モンテカルロシミュレーション等による最適化も進めた. また, MWPC に対する HV コントロールシステムの改良も行った.

教育・研究業績

学術論文

1. T. Aaltonen, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto, D. Yamato *et al.* (CDF Collaboration) : “Search for the Exotic Meson $X(5568)$ with the Collider Detector at Fermilab”, *Physical Review Letters* **120**, 202006 (2018).
2. K. Abe, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (Hyper-Kamiokande Proto-Collaboration) : “Physics potentials with the second Hyper-Kamiokande detector in Korea”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2018**, 063C01 (2018).
3. T. Aaltonen, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto, D. Yamato *et al.* (CDF Collaboration) : “Tevatron Run II combination of the effective leptonic electroweak mixing angle”, *Physical Review D* **97**, 112007 (2018).
4. K. Abe, Y. Azuma, J. Harada, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “Measurement of inclusive double-differential ν_μ charged-current cross section with improved acceptance in the T2K off-axis near detector”, *Physical Review D* **98**, 012004 (2018).
5. N. M. Truong, Y. Seiya, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* : “Real-Time Lossless Compression of Waveforms Using and FPGA”, *IEEE Transactions On Nuclear Science* **65**, 2650 (2018)
6. K. Abe, Y. Azuma, J. Harada, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “Characterization of nuclear effects in muon-neutrino scattering on hydrocarbon with a measurement of final-state kinematics and correlations in charged-current pionless interactions at T2K”, *Physical Review D* **98**, 032003 (2018).
7. T. Aaltonen, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto, D. Yamato *et al.* (CDF Collaboration) : “Search for standard-model Z and Higgs bosons decaying into a bottom-antibottom quark pair in proton-antiproton collisions at 1.96 TeV”, *Physical Review D* **98**, 072002 (2018).
8. K. Abe, Y. Azuma, J. Harada, T. Inoue, H. Kim, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “Search for CP Violation in Neutrino and Antineutrino Oscillations by the T2K Experiment with 2.2×10^{21} Protons on Target”, *Physical Review Letters* **121**, 171802 (2018) 【Editors’ Suggestion, Featured in Physics】 .
9. N. Kawamura, F. Morimoto, Y. Seiya *et al.* : “New concept for a larger-acceptance general-purpose muon beamline”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2018**, 113G01 (2018).
10. T. Aaltonen, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto, D. Yamato *et al.* (CDF Collaboration) : “Measurement of the differential cross sections for W -boson production in association with jets in $p\bar{p}$ collisions at $\sqrt{s} = 1.96$ TeV”, *Physical Review D* **98**, 112005 (2018).
11. T. Aaltonen, T. Okusawa, Y. Seiya, K. Yamamoto, D. Yamato *et al.* (CDF Collaboration) : “Search for Higgs-like particles in association with bottom quarks in proton-antiproton collisions”, *Physical Review D* **99**, 052001 (2019).

プロシーディングス

1. 手島 菜月 : “DeeMe experiment to search for muon to electron conversion at J-PARC MLF”, The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact2017), 2017年9月25日～30日, Uppsala, Sweden, PoS NuFact2017, 109 (2018).
2. 金 賢一 : “Measurement of neutrino interaction ratio between water and hydrocarbon using a new detector with a 3D grid structure” (poster), The 19th International Workshop on Neutrinos from Accelerators (NuFact2017), 2017年9月25日～30日, Uppsala, Sweden, PoS NuFact2017, 155 (2018).

国際会議講演等

1. 金 賢一 : “Measurement of neutrino interactions on water and hydrocarbon with a 3D-grid detector in the WAGASCI experiment” (poster), The 28th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (NEUTRINO2018), 2018年6月4日～9日, Heidelberg, Germany.

2. 手島 菜月 : "Muon-electron conversion experiments at J-PARC" (招待講演), The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2018), 2018年9月24日~28日, Vondelkerk, Amsterdam, Netherlands.
3. 手島 菜月 : "Development of the detectors for the DeeMe experiment" (poster), The 15th International Workshop on Tau Lepton Physics (TAU2018), 2018年9月24日~28日, Vondelkerk, Amsterdam, Netherlands.

学会・研究会講演等

1. 吉中 晴香 : 「J-PARC MLF ミューオンビームによる標的照射データを用いた μ -e 転換過程探索実験 DeeMe の読み出しエレクトロニクス of 較正と MWPC のヒットデータ解析」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日~17 日, 信州大学 松本キャンパス.
2. 田中 慎也 : 「J-PARC WAGASCI プロジェクトにおける横方向ミューオン飛跡検出器の性能評価」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日~17 日, 信州大学 松本キャンパス.
3. 手島 菜月 : 「 μ -e 転換過程探索実験 DeeMe に用いられる高レート耐性 MWPC の性能評価と充填ガス最適化」, 日本物理学会 2018 年秋季大会, 2018 年 9 月 14 日~17 日, 信州大学 松本キャンパス.
4. 久木田 直哉 : 「T2K-WAGASCI プロジェクトにおける横方向ミューオン飛跡検出器の運動方向識別能力の評価」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日~17 日, 九州大学 伊都キャンパス.
5. 手島 菜月 : 「ミューオン電子転換過程探索実験 - DeeMe - : 準備状況 (11)」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日~17 日, 九州大学 伊都キャンパス.
6. 金 賢一 : 「水標的格子型検出器 WAGASCI を用いた T2K off-axis 角 1.5 度における反ニュートリノ荷電カレント反応断面積の測定結果」, 日本物理学会第 74 回年次大会, 2019 年 3 月 14 日~17 日, 九州大学 伊都キャンパス.

学位論文

卒業論文

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」
2. 小向 倅平 : 「ミューオン原子生成標的からのミューオン軌道上崩壊測定用カウンターの製作と性能評価」

修士論文

1. 久木田 直哉 : 「Performance of muon range detector for neutrino-nucleus interaction cross section measurements」
2. 田中慎也 : 「新ニュートリノ検出器 WAGASCI における横方向ミューオン飛跡検出器の製作及び大角度領域におけるニュートリノ反応のシミュレーション」
3. 吉中 晴香 : 「J-PARC MLF ミューオンビームによる標的照射を用いたミューオン・電子転換過程探索実験 DeeMe の読み出しエレクトロニクス of 較正」

博士論文

1. 金 賢一 : 「Measurement of Charged-Current Cross Sections on Water and hydrocarbon at an Off-Axis Angle 1.5 Degrees Using the T2K Anti-Neutrino Beam」
2. 手島 菜月 : 「Development of the Detectors for the Muon-to-Electron Conversion Search」

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：160万円，間接経費：48万円。
2. 清矢 良浩：基盤研究（A）「革新的な実験手法を用いたミュオン・電子転換過程探索の進展」（分担），直接経費：200万円，間接経費：60万円。
3. 清矢 良浩：基盤研究（C）「次世代型ミュオン・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。

その他

1. 清矢 良浩：「宇宙の起源解明への挑戦 - 素粒子物理学入門 -」，大阪市立大学文化交流センター講座：《温故知新》，2018年6月12日，大阪市立大学文化交流センター。
2. 清矢 良浩：教育活動表彰：学長重点事項分野（サイテーションで最も顕著な実績を有する者），2018年6月25日。
3. 清矢 良浩：南部陽一郎大阪市立大学特別荣誉教授ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念国際シンポジウム運営委員
4. 清矢 良浩：「神の粒子ヒッグスの登場」，南部陽一郎大阪市立大学特別荣誉教授ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念市民特別セミナー，2018年12月16日，大阪市立大学田中記念館。
5. 清矢 良浩：「宇宙の神秘探求が人類いもたらすもの」，第 1 回市大・府大合同万博2025パビリオン構想フォーラム勉強会「飛び立て宇宙へ！」，2019年1月31日，あべのメディックス。

重力波実験物理学研究室

| | |
|--------------|-------------|
| 神田 展行 (教授) | 田中 一幸 (D3) |
| 伊藤 洋介 (准教授) | 宮本 晃伸 (D3) |
| 澤田 崇広 (特任講師) | 佐々井 穂花 (M2) |
| 土田 怜 (博士研究員) | 富上 由基 (M1) |
| | 山東 咲海 (B4) |
| | 杉本 元気 (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基線長 3km のレーザー干渉計を設置し、重力波の観測を目指している。(図 1)。

KAGRA 計画は東大宇宙線研究所をホストとした大型共同研究である。本件研究室は 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。KAGRA は 2016 年 3 月-4 月の常温鏡での試験運転 ‘iKAGRA’ に引き続き、2017 年は年度末の低温鏡によるマイケルソン干渉計動作に向けてインストールを続け、2017 年 3 月には片方の鏡を冷やしての動作を行った。その後、2018 年 4,5 月には、‘bKAGRA phase-1’ として運転を行った。

2018 年度は、本研究室はデータ転送系とデータ解析そしてキャリブレーション関連を中心に KAGRA に貢献した。

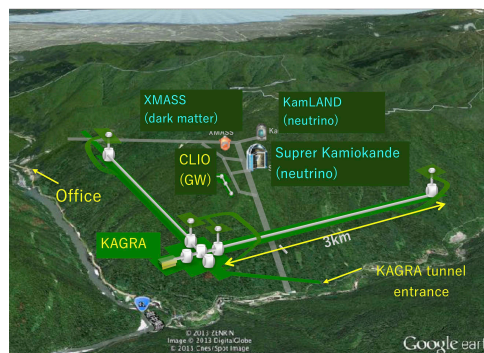


図 1: 大型低温重力波望遠鏡 KAGRA 概略図

KAGRA データ転送系の開発・実装・運用 (神田、土田、佐々井)

重力波観測では、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。連星中性子星合体や超新星などの重力波源は、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。重力波観測が速やかにイベント検出を報告することで、こうした別の放射の追観測が可能となる。複数の観測によるマルチメッセンジャー天体観測は、重力波観測の典型的な恩恵であり、また波源天体の詳しいサイエンスを得るための方法として、重力波初観測以来大いに注目を浴びている。

KAGRA は国際重力波観測網において波源方向の決定などにおいて期待されているが、その役目を果たすには米国 LIGO、欧州 Virgo と観測データを共有して解析する必要がある。また追観測にイベント速報を出すために、データ交換は可能な限り低遅延で行う必要がある。そのため、我々は LIGO, Virgo と協力して、重力波データの低遅延での共有を進めた。図 2 にその概略を示す。KAGRA 検出器サイト(岐阜県神岡鉱山)で生成された較正データ(後述:重力波信号の再構成と較正(澤田))を、東大宇宙線研(柏)に設置した低遅延共有用計算サーバに送信する。低遅延共有用計算サーバでは、LIGO, Virgo の同様のデータを受け取り、同時に KAGRA のデータを送信する。これらのデータは時

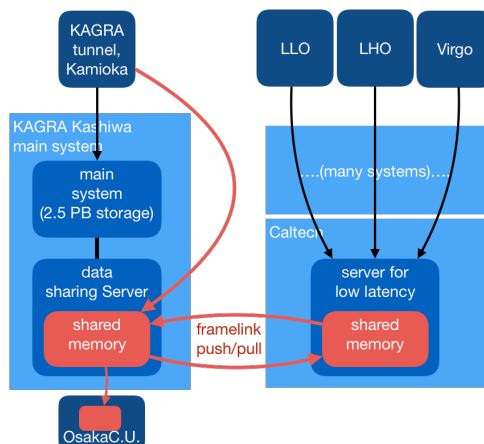


図 2: KAGRA と海外実験のデータ共有概略図

系列の 1sec 単位のデータである。サーバでは共有メモリ上に保持し、逐次更新してゆく。2018 年は以上の仕組みを実装し、較正計算を含む KAGRA サイトから柏への遅延は 3 秒間程度、LIGO, Virgo からの遅延は 6 ~ 13 秒程度で動作した。このデータ共有は 2018 年 6 月から試験的におこなわれ、その後常時稼働状態となっている。また次に述べる大阪市立大学における重力波データ解析システムへも 2019 年度前半には低遅延データの送信を行う予定である。

重力波データ解析システムの整備・増強（神田、伊藤）

我々は、KAGRA および来年度 (2019 年度) 以降には LIGO, Virgo の観測データを解析し、重力波イベントの探索や波源の物理的諸性質を探る。そのために、重力波データ解析システム (ORION クラスタと呼称。図 3) の整備・増強をおこなった。

この解析システムは Linux を OS とする複数台のサーバからなるクラスタ計算機である。従前から有していたクラスタ計算機は、導入時に仮想プライベートネットワークによるリモートサイト間の統合環境の構築が目的の一つであったこともあり、2つのクラスタに別れて構成されていた。その経験は KAGRA のデータ転送系の主要部に用いられ、一定の役目を終えた。そこで、データ解析の性能強化に特化すること、および、LIGO などの最新のソフトウェアを用いるために、クラスタを 1 つに統合し、最新 OS (Scientific Linux 7 系) にアップデートする整備をおこなった。同時に計算能力を増強するために、計算ノードを追加した。ORION クラスタ全体で、総 CPU コア数 920、データストレージ容量 324 TB となり、KAGRA の占有する国内クラスタでは最大の計算能力を有する。

なお、このクラスタの増強・整備は、科研費 (基盤 (S) 代表: 神田、新学術領域研究 (分担: 伊藤、神田) 基盤 (S) (代表: 茂山 (東大理) 分担: 伊藤)) を用いて行った。これらの研究における KAGRA データ解析を行う。



図 3: 市大の重力波データ解析システム: ORION クラスタ

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。

また、東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターの桑潤哉、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示す研究をおこなっている。本研究結果はデータ解析グループとしては初の KAGRA 全著者論文として投稿中である。

重力波信号の再構成と較正（澤田）

基線長 3km のレーザー干渉計型重力波検出器 KAGRA（岐阜県神岡鉱山）は、重力波による空間の歪み変動（2点間の距離変動）をレーザー光によって精密測定することで重力波を観測する装置である。レーザー干渉計の出力ポートの光の変動は、光検出器により電圧信号として検出された後、デジタル信号に変換され記録される。事前に精密測定した検出器の応答特性を用い、このデジタル信号から元の重力波信号を低遅延で再構成する「低遅延パイプライン」を作成し、低遅延解析を行う日本及び世界の各地にデータを高速転送できるようにした。

また重力波観測において、干渉計感度のみならず測定により得られる重力波信号の波形の精度も重要となってくる。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、その光の輻射圧を利用して主鏡を揺らす装置（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。

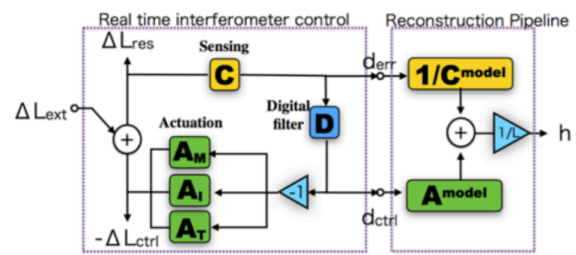


図 4: KAGRA の制御と重力波信号再構成の簡略図

レーザー干渉計型重力波検出器における遷移波形解析（土田）

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出可能な非常に高い感度を有している。そのため、重力波のみではなく他の外的要因による興味深い信号が検出される可能性がある。この「外的要因」のひとつとして考えられるのが、レーザー干渉計の鏡への暗黒物質の衝突である。暗黒物質が鏡に衝突すると、一時的に振り子の運動や鏡の変形が誘起され、干渉計の腕の長さがわずかに変化する。この変位が十分に大きければ、暗黒物質由来の信号がレーザー干渉計型重力波検出器によって検出されることが期待できる。

そこで我々は、暗黒物質衝突による鏡の変位の大きさを見積もった。その結果、相対的に薄い（半径が大きい）鏡であれば、検出器の感度と比較して大きな信号を得られることが示された。また、レーザー干渉計型重力波検出器による 1 年間の観測時間を通して、暗黒物質衝突による信号が 1 度も検出されなかった場合には、暗黒物質と通常の物質との間の相互作用断面積に与えられる上限値がこれまでの制限よりも厳しくなる可能性が見出された。

この結果は、レーザー干渉計型重力波検出器が「暗黒物質検出器」としても有用であることを示唆しているように見えるが、実データを解析する際には雑音との区別が必要であり、一筋縄ではいかない。ただしこれについては、遷移波形信号の抽出を効率よく行うべく我々が考案した「定期的存在するコヒーレントな雑音を除去するための解析手法」が役立つのではないかとわれ、現在その効果を考察中である。

なお、これらの研究は超新星爆発などによる遷移「重力波」波形の解析にも応用可能であることが見込まれ、当然のことながら重力波研究の発展に貢献するものであり、今後の進展に期待がかかるものである。

KAGRA における光輻射圧較正レーザー照射位置測定のための画像解析（富上）

重力波検出器 KAGRA では干渉計の較正に光輻射圧較正装置 (Photon Calibrator, 以下 PCal) を使用している。これは干渉計鏡に二本の較正レーザーを照射し、光の輻射圧で鏡を揺らすことで、干渉計の較正を行うものである。PCal は干渉計の較正において非常に重要な役割を担うが、二つの問題が生じる。一つは干渉計鏡の回転を誘発する可能性である。二本の PCal レーザーがそれぞれ干渉計鏡の非対称な位置に照射されることで、鏡の回転を誘発する。二つ目の問題は、干渉計鏡の弾性変形である。PCal レーザーは干渉計鏡へ直接照射されるため、鏡の弾性変形を生じ

させうる。これは二本のレーザーの照射位置を鏡の固有振動の節にすることで抑えることが可能であるが、長時間の運転の間に照射位置の変動を抑える必要がある。

上記の問題に対処するため、干渉計鏡上の PCal レーザーの照射位置を測定する必要がある。そこで画像解析を用いたレーザー位置測定システムの開発に取り組んだ。望遠レンズとカメラを用いて干渉計鏡を撮影し、その撮影画像をレーザーと干渉計鏡の本体部分に分けて解析することで照射位置を算出する。鏡の縁とビーム輝点を画像解析により求め、さらにその解析を自動化した。この測定を定期的に行うことで、レーザー照射位置の変動を検出することが可能となった。

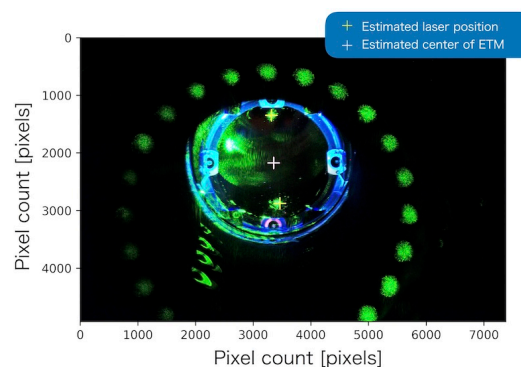


図 5: PCal レーザー照射位置の測定

教育・研究業績

学術論文

1. KAGRA collaboration, “KAGRA: 2.5 generation interferometric gravitational wave detector”, Nature Astronomy volume 3, pages35-40 (2019)
DOI: <https://doi.org/10.1038/s41550-018-0658-y>
2. Abbott, B. P. et al. (KAGRA Collaboration, LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration), “Prospects for observing and localizing gravitational-wave transients with Advanced LIGO, Advanced Virgo and KAGRA”, Living Reviews in Relativity (2018) 21: 3.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s41114-018-0012-9>
3. Yuki Inoue, Sadakazu Haino, Nobuyuki Kanda, Yujiro Ogawa, Toshikazu Suzuki, Takayuki Tomaru, Takahiro Yamanmoto, and Takaaki Yokozawa, “Improving the absolute accuracy of the gravitational wave detectors by combining the photon pressure and gravity field calibrators”, Phys. Rev. D 98, 022005 (2018),
DOI: <https://doi.org/10.1103/PhysRevD.98.022005>
4. 酒井一樹, 神田展行, 大原謙一, 山本尚弘, 宮川治, 佐々木幸次, 植木聡史, 高橋弘毅, “大型低温重力波望遠鏡 KAGRA におけるデータ自動転送システムの開発と性能評価“, 電子情報通信学会論文誌 B, Vol.J101-B No.9, pp.818-827 (2018).
DOI: <https://doi.org/10.14923/transcomj.2017JBP3064>
5. “Construction of KAGRA: an underground gravitational-wave observatory”, T Akutsu et al., the KAGRA collaboration, Progress of Theoretical and Experimental Physics, Volume 2018, Issue 1, 1 January 2018, 013F01,
DOI: <https://doi.org/10.1093/ptep/ptx180>

学会・研究会講演

1. 富上由基, “KAGRA 重力波観測実験と Photon Calibrator の鏡位置モニター系の開発”, アインシュタインセミナー 2018 年度
2. 土田怜, “重力波検出器 KAGRA における伝達関数測定とモデル作成”, 日本物理学会 2018 年秋季大会
3. Satoshi Tsuchida, “The estimation for systematic errors of transfer functions on the bKAGRA phase-1 operation”, GWPAW2018(Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop)
4. Satoshi Tsuchida, “The transfer functions and estimation for their systematic errors on the bKAGRA phase-1 operation”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics
5. 澤田崇広, “Exclusive Drell-Yan experiment at J-PARC for studying proton GPDs”, The 2nd workshop on Parton Distribution Functions and Lattice QCD
6. 澤田崇広, “bKAGRA phase 1 における較正精度の見積もり”, 日本物理学会 2018 年秋季大会
7. N.Kanda on behalf of KAGRA collaboration, “KAGRA data management : Toward Phase-II and O3”, 4th KAGRA International Workshop
8. Nobuyuki Kanda (Osaka City U.) on behalf of the KAGRA collaboration, “Status of KAGRA”, LSC-Virgo Meeting
9. 神田展行, KAGRA collaboration, “キャリアレーションの系統誤差効果を考慮した KAGRA シミュレーションデータ”, 日本物理学会 2018 年秋季大会
10. N.Kanda on behalf of KAGRA collaboration, “Status of KAGRA toward the observation in 2019-2020”, SNeGW 2018 (Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures)
11. Takahiro Sawada, “Gravitational Wave Telescope KAGRA, Signal Reconstruction and Calibration”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics
12. Akinobu Miyamoto, “Gravitational wave astronomy using distant binary black hole mergers”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics
13. 宮本晃伸, “bKAGRA phase1 における重力波波形注入試験 (2)”, 日本物理学会 2018 年秋季大会
14. 宮本晃伸, 衣川智弥, 神田展行, “第三世代重力波検出器を用いた観測による種族 III 星の間接的な存在証明について”, 日本物理学会第 74 回年次大会
15. 神田展行, KAGRA collaboration, “KAGRA のデータ配送と国際重力波観測ネットワークのデータ共有”, 日本物理学会第 74 回年次大会
16. 澤田崇広, KAGRA collaboration, “KAGRA における光輻射圧を用いた重力波波形注入試験”, 日本物理学会第 74 回年次大会
17. 土田怜, KAGRA Collaboration, “KAGRA シミュレーションデータの作成と性能評価”, 日本物理学会第 74 回年次大会
18. 富上由基, KAGRA Collaboration, “KAGRA における光輻射圧較正レーザー照射位置測定のための画像解析”, 日本物理学会第 74 回年次大会

学位論文

博士論文

1. 宮本 晃伸 : 重力波観測による大質量ブラックホール連星起源の研究 (Study on origins of massive black hole binaries using gravitational wave observations)

修士論文

1. 佐々井 穂花 : 重力波による連星の質量パラメータ決定精度の研究 (Study on accuracy of mass parameters of coalescing binary stars using gravitational wave)

卒業研究

1. 山東咲海 : 重力波信号の画像解析
2. 杉本元気 : 超光速粒子からのチェレンコフ重力波

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. 平成 30 年度学術研究動向調査等に関する委託研究・研究題目: 「粒子、原子核、宇宙線および宇宙物理に関連する実験分野に関する学術研究動向 - マルチメッセンジャー天体観測のもたらす知見-」 (研究担当者: 神田展行)

海外出張および海外研修

1. 神田展行,
“LIGO software meeting”, California Institute of Technology, USA, 6/11-17, 2018
2. 神田展行, 伊藤洋介,
“The 4th KAGRA International workshop”, Ewha Womans University, Seoul, Korea, 6/29-30, 2018
3. 神田展行, 澤田崇広,
“LSC-Virgo Meeting”, Maastricht, the Netherlands, 9/3-10, 2018
4. 神田展行, 土田怜, 佐々井穂花,
“Gravitational Wave Physics and Astronomy Workshop”, University of Maryland, USA, 11/30-12/5

主催、共催の研究会

1. SNeGW ν 2018 (Deciphering multi-Dimensional nature of core-collapse SuperNovae via Gravitational-Wave and neutrino signatures, 富山国際会議場, 2018/10/8-10)
2. 19th KAGRA Face to Face meeting, Osaka-City University, 2018/05/18-20

その他

1. 2018 年度オープンキャンパス 体験授業担当, 2018/8/4-5 (伊藤、神田、富上)
2. 2018 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!」、2018/8/4-5 (神田、伊藤、富上)
3. 神田展行: 日本学術振興会システム研究センター 数物系科学専門研究員
4. 伊藤洋介: 名古屋大学セミナー、“Status of KAGRA and gravitational wave data analysis”、名古屋大学、2018/05/30
5. 伊藤洋介: 大阪市立大学理論グループセミナー、“Status of KAGRA and gravitational wave data analysis”、大阪市立大学、2018/5/25
6. 神田展行・伊藤洋介: 「重力波で探る宇宙 (富田林高校生による研究室見学)」、2018/8/1
7. 伊藤洋介: 「全国同時七夕講演会 2018・重力波で探る宇宙」、大阪市立科学館、2018/7/8
8. 伊藤洋介: Japan Gravitational Wave Consortium 運営委員、2018/9/1-2020/8/31

宇宙・素粒子実験物理学研究室

| | | | |
|------|-----|-----------|-----------|
| 中野英一 | 准教授 | 岸田直也 (M1) | 片山 翼 (B4) |
| 岩崎昌子 | 准教授 | 城庵 颯 (M1) | 中 祐介 (B4) |
| | | 山村晴菜 (M1) | 森川滉己 (B4) |

研究概要

1. Belle II 国際共同実験. (中野, 岩崎, 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.

前年度末から始まった phase 2 と呼ばれる運用で電子と陽電子の初衝突事象を4月に観測した (図 1). phase 2 での運転は7月に終え, この間に収集したデータを用いて CDC の校正を行い, さらに CDC のシミュレーションやデータ解析に必要なソフトウェア開発を進め, 3月からは崩壊点検出器を組み込んで phase 3 と呼ばれる本格的な実験を開始した.

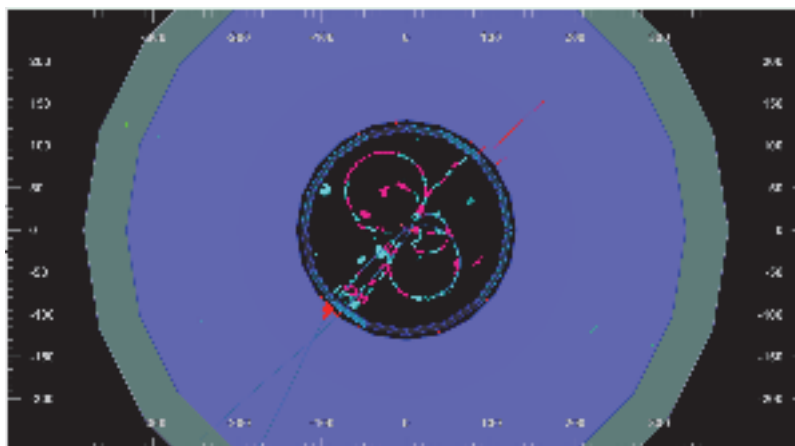


図1 Belle II の初衝突事象のイベントディスプレイ

6月には KEK に Belle II 実験に参加する各機関の代表者を招いての記念式典が挙行され, 大阪市立大学からは, 鈴木学長補佐と岩崎が出席した.

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, 大阪大学, 奈良女子大学と共催した[14]. この勉強会には約 40 名が参加し, Belle II 実験で目指す物理, SuperKEKB 加速器, Belle II 測定器の解説などを行った[2].

また、国際ワークショップにおいてBelleII実験の現状報告(招待講演[1]), SuperKEKB加速器の現状報告[4]を行った。

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, 森川)

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立ち上げ、大阪大学RCNP研究プロジェクトとして採択された[13]。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。結果を研究会・学会で発表した。[5, 7]

- ILC実験用電磁カロリメータエネルギー較正 (岩崎, 森川)

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。この手法により、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。結果を研究会・学会で発表し、また、卒業研究としてまとめた[6, 8, 10]。

- 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ている。Linac加速器の実運転データを取得し、そのデータをもとに開発を行っている。

機械学習の適応研究に関して、学内研究助成金の獲得[12], 国際ワークショップの開催と講演を行った[3, 18]。

4. EPICSを用いた機器制御の開発 (岩崎, 中)

シングルボードコンピュータ(RPi3)を用いて、大学研究室内に、分散型機器制御システムを構築した。分散型機器制御の実装は、EPICSを用いて行った。GPIOポートを用いて、

I2C通信により温度センサーを制御するシステムを構築, デバイス制御プログラムを作成し, 温度センサーのモニタリング, 制御を行った. 結果を卒業研究にまとめた[9].

5. 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.

6. 希ガスをを用いない検出器の研究開発. (中野, 片山)

数年前に他分野の学術誌で報告されたが, これまでに高エネルギー物理学実験に使用されていなかった混合ガスをこの分野で使用可能か検証を行った. 前年度に引き続き, ガスを用いた検出に広く使われる希ガスと炭化水素ガスの組み合わせを使用しないガス検出器の開発を進め, 窒素と二酸化炭素の組合せが有望であることを確認し, その結果を卒業研究としてまとめた[11].

教育・研究業績

学術論文

学会・研究会講演

1. “Belle II Status and Prospects”, 岩崎昌子, Asian Linear Collider Workshop 2018, 2018年5月
2. 「BelleII日本人グループの紹介」, 岩崎昌子, 関西B実験4年生・M1対象勉強会, 2018年6月
3. “Machine Learning Application for Experimental Particle Physics : Activities in Osaka”, 岩崎昌子, Osaka-Groningen Mini Workshop : Data Science and Nuclear / Elementary Particle Physics, 2018年12月
4. “The SuperKEKB Accelerator : Construction and Operations”, 岩崎昌子, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 2018年12月
5. “R&D of the Flavor-tag Method based on Machine Learning for High Energy Experiments”, 岸田直也, 岩崎昌子, 他4名, The 2nd KMI school (KMI school 2019) 2019年02月
6. “R&D of The Energy Calibration based on Machine Learning for the SiD ECL”, 森川滉己, 岩崎昌子, 他5名, The 2nd KMI school (KMI school 2019) 2019年02月
7. 「機械学習を用いたフレーバー識別用ツールの開発」, 岸田直也, 岩崎昌子, 他4名, 日本物理学会第74回年次大会 2019年03月
8. 「機械学習を用いたSiD測定器電磁カロリメータエネルギー較正の開発」, 岩崎昌子, 森川滉己, 他5名, 日本物理学会第74回年次大会 2019年03月

学位論文

卒業研究

9. 中祐介：EPICSを用いたネットワーク分散型機器制御の開発
10. 森川滉己：機械学習を用いた ILC SiD ECL エネルギー較正
11. 片山翼：希ガスをを用いないチェンバーガスの研究

研究助成金獲得状況

12. 「素核物理学実験における深層学習の適用研究：データ解析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：2018年6月 - 2019年3月 代表者：岩崎昌子

その他

13. 大阪大学RCNP研究プロジェクト採択「加速器実験および関連分野への深層学習の適用と進化」, 代表者：岩崎昌子, 2018年5月
14. 関西 B 実験 4 年生・M1対象勉強会, 大阪大学, 【研究会主催, 世話人】岩崎昌子, 2018年6月
15. 研究室見学：大阪府立高津高等学校 体験型進路学習（GLHS事業）
【講師】岩崎昌子, 2018年11月12日
16. ” Osaka-Groningen Mini Workshop: Data Science and Nuclear / Elementary Particle Physics”, 大阪大学, 【研究会主催, 世話人】岩崎昌子, 2018年11月
17. 市民特別セミナー2018講演会「宇宙の謎を解く鍵 -南部先生が見つけたもの-」
【司会】岩崎昌子, 2018年12月16日
18. 第15回MPGD研究会, 京都大学, 【世話人】中野英一, 2018年12月

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(M1) |
| 丸信人 准教授 | 根岸宏行(博士研究員) | 鈴木光世(M1) |
| | 高橋一麻(D1) | 廣瀬拓哉(M1) |
| | 芦田尊(M2) | 藤岡奈央(M1) |
| | 大野木嵩智(M2) | 矢田貝祥貴(M1) |

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。また、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2018年度に行われた研究は以下の通りです。

1. ゲージ・ヒッグス統一模型が予言するダークマターの研究 (丸)

ゲージ・ヒッグス統一模型では、階層性問題を解決するためにヒッグス場を高次元ゲージ場の余剰空間成分に同一視する。この設定では、ヒッグス粒子と同じ量子数をもつ $SU(2)_L$ 2重項ベクトル場が模型によらずに必ず存在する。本研究では、このベクトル場の第一カルツァ・クライン励起モードがダークマターになる可能性を研究した。ダークマターの安定性は、カルツァ・クラインパリティで保証される。ダークマター残存量密度は、通常のWIMPと同様にダークマター質量が1TeVオーダーであれば説明できる。高次元ゲージ対称性の構造から、 $SU(2)_L$ 2重項ダークマターはヒッグス場およびZボソン場と直接相互作用しないことがわかり、直接探索地下実験からの制限を回避できることを示した。この研究は、岡田宣親氏(アラバマ大)、岡田里見氏(山形大)との共同で進められた(論文1)。

2. ゲージ・ヒッグス統一模型における電弱対称性の破れとヒッグス場の質量 (丸)

ゲージ・ヒッグス統一模型では、ヒッグスポテンシャルは古典的に生成されず量子効果によって生成される。電弱ゲージ対称性の破れ $SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$ およびヒッグス粒子の質量125GeVを説明するためには、模型のフェルミオン場としてどのような表現を採用するかが非自明で、高次元場だけで構成すると複雑になる傾向がある。本研究では、境界ブレーン上にしか局在しないフェルミオン場も導入して、比較的シンプルな表現のフェルミオン場で、電弱対称性の破れが実現し、ヒッグス場の質量を説明する模型を構築した(論文2)。また、リニアコライダー実験で重要になるヒッグス場の3点自己相互作用結合定数をこの模型から導出し、標準模型からの予言と比較して70%ずれることを予言した(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。

3. 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)

丸は先行研究において、5次元ゲージ・ヒッグス統一理論を大統一理論へ拡張し、ゼロ質量フェルミオン場として、標準模型クォーク・レプトンのみを含む5次元バルクフェル

ミオンを構成した。しかし、この模型では一部の湯川相互作用が許されずフェルミオン質量が説明できないことが欠点であった。本研究では、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模型を構築し、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（論文4）。

4. Gravastar形成とブラックホールの観測可能性（中尾）

ブラックホールは、その外側に物理的影響を永遠に及ぼさない領域として定義される。我々の宇宙にブラックホールが存在しうることを一般相対論は予言し、またブラックホールの存在がいくつかの観測によって強く示唆されている。それゆえ多くの論文にブラックホールの存在が観測的に確認可能であるかのような記述が見られる。この研究では、ブラックホール擬似天体（観測的にブラックホールと区別がつかない天体）の候補の一つである gravastar (gravitational vacuum condensation star)の形成過程を記述する有効モデルを考案し、ブラックホールの存在が観測的に確認不可能であることを具体的に示した。この研究は、柳哲文氏（名古屋大学）と原田知広氏（立教大学）と共同で進められた。

5. ブラックホール形成過程の観測可能性（高橋、吉野、中尾）

一般相対論は、大質量星等の重力崩壊によってブラックホールが我々の宇宙に形成されることを予言する。一方、遠方の観測者にとってブラックホールが形成されるまでにかかる時間は無限に長く、ブラックホールが形成される瞬間を我々は観測することができないことも一般相対論は予言する。我々が観測できるのは重力崩壊を永遠に続ける物体なのである。それゆえに、単色放射あるいは黒体放射をしながら重力崩壊する球対称星がどのように観測されるかをray-tracing法によって詳しく調べた。多くの相対論研究者が「重力崩壊する星が放出する一つ一つの光子の受ける赤方偏移が時事刻々強くなり、観測装置の検出限界を超えるので、最終的にその星が観測できなくなる」と考えているが、この解析によって「赤方偏移を受けない光子は常に存在するが、単位時間あたりに放出される光子数が時事刻々減少していくことによって重力崩壊する星は検出不可能になる」ことが明らかにされた。

6. 非常に大きなスケールの宇宙の非一様性が宇宙背景放射の偏光に与える影響（根岸）

宇宙論の標準モデルでは巨視的にみると宇宙は等方一様であることを作業仮説として採用している。しかし、観測的に宇宙の一様性を確認することは難しく宇宙は非常に大きなスケールで見ると非一様である可能性がある。一様性を検証するためには多様な観測量を用いることが重要であるが、これまでの宇宙の非常に大きなスケールの非一様性についての研究では宇宙背景放射の偏光B-modeはほぼ用いられていなかった。その理由は非常に大きなスケールの非一様性の影響を考慮して宇宙背景放射の偏光を理論予言することが時空の対称性が低いために数学的に難しいからである。本研究では非常に大きなスケールの非一様性の振幅が小さいと仮定し摂動的に扱うことで、非常に大きなスケールの非一様性の影響を考慮して重力波により作られる宇宙背景放射の偏光 B-modeの振る舞いを調べた。結果として、観測的に許される振幅の非常に大きなスケールの断熱的な非一様性が存在してもLitebirdなどの次世代宇宙背景放射観測実験で観測できないほど非一様性の影響は小さいことを明らかにした。この結果はLitebirdで大スケールの宇宙背景放射の偏光B-modeが観測された場合にはそれはインフレーション由来の偏光であることを強く示唆することを意味する。

7. ブラックホールの高次元極限に関する研究（鈴木）

ブラックホールの高次元極限に関する研究を行った。特に、位相の異なる高次元ブラックホール解の系列同士が解空間上特異な解を経て合流する様子を高次元極限を用いて研

究した。コンパクト化された時空における局所ブラックホール解とブラックストリング解については、実際にこれらが合流すること、予想されていた通り特異な解が局所的に錘状自己相似構造を持つことなどを解析的に明らかにすることができた。また、より一般には、位相変化が起こる領域の物理はRicci flow方程式に支配されることがわかった。本研究はバルセロナ大学Roberto Emparan教授との共同研究であり、翌年7月にJHEP誌より出版された。

教育・研究業績

著書

該当無し

学術論文

1. N. Maru, N. Okada and S. Okada, “SU(2)_L Doublet Vector Dark Matter from Gauge-Higgs Unification”, Physical Review D98 (2018) no.7, 075021.
2. Y. Adachi and N. Maru, “Revisiting Electroweak Symmetry Breaking and the Higgs Boson Mass in Gauge-Higgs Unification”, Physical Review D98 (2018) no.1, 015022.
3. Y. Adachi and N. Maru. “Triple Higgs Boson Coupling in Gauge-Higgs Unification”, arXiv: 1809.02748 [hep-ph].
4. N. Maru and Y. Yatagai, “Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification”, arXiv: 1903.08359 [hep-ph] (To appear in Progress of Theoretical and Experimental Physics).
5. K. Nakao, C-M Yoo, T. Harada: “Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?”, Physical Review D99, 044027 (2019).
6. H. Negishi: “The gravitational wave background induced by nonlinear interactions between isotropic inhomogeneities and anisotropic inhomogeneous density perturbations,” arXiv:1807.04902 [astro-ph.CO]

国際会議会議録

1. 高橋一麻： “Imaging of gravitational collapsing star by numerical simulation”, International workshop JGRG28 (<http://www-tap.scphys.kyoto-u.ac.jp/jgrg/pastjgrg.html>)

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. 中尾憲一: “On gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?”, YITP molecule type workshop “Dynamic in strong gravit universe”, 2018年9月6日, 京都大学基礎物理学研究所
4. 高橋一麻： “Imaging of gravitational collapsing star by numerical simulation”, International workshop JGRG28, 2018年11月6日, 立教大学池袋キャンパス
5. 鈴木良拓: “Large D limit of Conifold horizons”, HEP-Seminar, ICCUB, University of Barcelona

国内学会・研究会講演

1. 丸信人, 岡田宣親, 岡田里見: “SU(2)_L Doublet Vector Dark Matter from Gauge-Higgs Unification”, 日本物理学会秋季大会, 2018年9月14日-17日, 信州大学 松本キャンパス
2. 丸信人, 矢田貝祥貴: “大統一ゲージヒッグス統一模型におけるフェルミオンの質量階層性”, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月14日-17日, 九州大学 伊都キャンパス
3. 丸信人: “Dark Matter in Gauge-Higgs Unification (招待講演)”, the 22nd regular meeting of the New Higgs Working Group (NHWG22), 2018年5月11日-12日, 南部ホール, 大阪大学 豊中キャンパス
4. 丸信人: “ヒッグスの物理 (招待講演)”, ILC summer camp, 2018年9月9日-12日, 国民宿舎 大城, 山口県
5. 廣瀬拓哉: “6次元magnetic fluxの有効場理論と量子補正 (review)”, 第64回原子核三者夏の学校, 2018年8月6日-11日, 白子温泉 ホテル ニュー・カネイ, 千葉県
6. 中尾憲一: “Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?”, 第12回ブラックホール磁気圏研究会, 2019年3月3日, 愛知教育大学
7. 中尾憲一: “Gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?” (招待講演), 2nd Workshop on Mathematics and Physics in General Relativity, 2019年3月24日, 摂南大学
8. 根岸宏行: 「宇宙背景放射の偏光を用いた宇宙の非一様性への制限」, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月14日, 九州大学 伊都キャンパス

その他

【一般講演】

1. 丸信人: 「物理学からの異次元ワールドへのお誘い」, 夢ナビライブ, 2018年6月16日, インテックス大阪にて講演
2. 丸信人: 「素粒子の世界」, 大阪府高齢者大学校, 2018年6月25日, 7月2日, 7月9日, 大阪市教育会館にて3週連続講義
3. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, オープンキャンパス体験入学講義, 2018年8月4日-5日, 大阪市立大学にて講演
4. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, 出張講義, 2018年9月3日, 西宮市立西宮高等学校にて講演
5. 丸信人: 「素粒子物理が解き明かす質量の起源」, 朝日新聞「プロフェッサービジット」企画出張講義, 2018年10月18日, 熊本学園大学附属高等学校にて出張講義
6. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, 模擬講義, 2018年11月8日, 大阪市立大学にて和歌山信愛高等学校高校生来学のもと講演.
7. 丸信人: 「異次元ワールドへのお誘い」, 模擬講義, 2018年11月16日, 三田学園高等学校

【セミナー講演】

8. 丸信人: 「Basics of Gauge-Higgs Unification」 「Dark Matter in Gauge-Higgs Unification」, 素粒子論研究室セミナー, 2018年10月26日, 北海道大学
9. 丸信人: 「Dark Matter in Gauge-Higgs Unification」, 素粒子論研究室セミナー, 2018年11月6日, 大阪大学
10. 丸信人: 「D項による超対称性のダイナミカルな破れ」, 素粒子論研究室セミナー, 2018年11月9日, 奈良女子大学

【ポスター発表】

11. 矢田貝祥貴: “Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics,

- 2018年12月12-13日, Media Center, Osaka City University
12. 矢田貝祥貴: “Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification”, HPNP2019-The 4th International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2019”, 2019年2月18日-22日, 大阪大学
 13. 大川瞭: “Scalar and tensor fluctuations during inflation (review)”, 第64回原子核三者夏の学校, 2018年8月6日-11日, 白子温泉 ホテル ニュー・カネイ, 千葉県
 14. 矢田貝祥貴: “Electroweak symmetry breaking and fermion masses from extra dimensions (review)”, 第64回原子核三者夏の学校, 2018年8月6日-11日, 白子温泉 ホテル ニュー・カネイ, 千葉県

学位論文

修士論文

1. 大野木高智: 「ゲージ・ヒッグス統一モデルにおける $H \rightarrow Z\gamma$ の崩壊」
2. 芦田尊: 「円筒対称時空における C-energy Flux の解析」

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

海外出張および海外研修

該当なし

外国人研究者招聘

1. Jose M.M. Senovilla [バスク大学 (Universidad del País Vasco), スペイン] : “What is the surface of a black hole?”, 宇宙物理 (重力) ・素粒子論コロキウム, 2018年11月2日, 大阪市立大学

その他

1. 中尾憲一: 日本物理学会 宇宙線・宇宙物理領域副代表
2. 中尾憲一: 日本物理学会代議員
3. 中尾憲一: 日本物理学会 宇宙線・宇宙物理領域 若手奨励賞選考委員長
4. 中尾憲一: 日本物理学会 宇宙線・宇宙物理領域 学生優秀発表賞審査員
5. 中尾憲一: 日本物理学会 ジュニアセッション審査員
6. 中尾憲一: 論文5がPhysical Review D Highlightに選出
7. 丸信人: 素粒子論グループ 素粒子メダル奨励賞選考委員

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) | 杉本 裕司 (研究員) | 清重 一輝 (D1) |
| 石橋 啓一 (M2) | 中島 爽太 (M2) | 古川 友寛 (M2) |
| 矢野 勝也 (M2) | 大倉 靖央 (B4) | 神林 聡 (B4) |
| 古賀 勇一 (B4) | | |

研究概要

1. $N_f = 2$ SU(2) 超対称ゲージ理論と関連する離散パルヴェ方程式とその二重スケーリング極限 (糸山浩司、大田武志、矢野勝也)

ある種の超対称ゲージ理論は、行列模型と密接な関係をもつことが知られている。われわれは、 $N_f = 2$ SU(2) 超対称ゲージ理論が、あるユニタリー行列模型と対応することを明らかにした。それは、Gross-Witten-Wadia ユニタリー行列模型の一つの一般化で、ポテンシャルに対数項を加えた模型である。行列模型のスペクトル曲線と、ゲージ理論の Seiberg-Witten 曲線が同型であることを示した。行列模型の分配関数がパルヴェ III 方程式のタウ関数であることを直交多項式の方法を用いて明らかにした。また、行列模型の二重スケーリング極限が、ゲージ理論側では、Argyres-Douglas 超共形固定点への極限に対応することを見出した。

2. Rainbow tensor 模型の更なる進展 (糸山浩司、吉岡礼治)

前年度の進展を踏まえ、糸山・吉岡は measure の有限変換から生じる一般化された cut operation を導入し、Aristotelian model の level 5, 及び level 6 のすべての operator を生成することに成功した。

3. tensor 模型における一般化された character の導入 (糸山浩司)

糸山は Mironov, Morozov と協力して tensor 模型における Schur character の拡張を提案し、その state counting における有用性について考察した。通常の Young diagram のみが登場する拡張のみならず、Young tableau も登場する定義も提案した。

4. nonsupersymmetric string model における enhanced gauge symmetry と cosmological constant の問題 (糸山浩司、中島爽太)

10d heterotic string model 群で唯一 susy を持たず、tachyon free である $S0(16) \times S0(16)$ model の 9d への Z_2 twist 及び 1 個の Wilson line を伴うコンパクト化に於いて、gauge 対称性の拡大と宇宙項の指数 suppression が同時に起きる場合を one-loop level までで見つけた。また Z_N orbifold 上での超弦振幅」を考察し、非線り込み定理を示した。

5. 量子曲線による超対称チャーンスイモンズ行列模型の解析 (久保尚敬、森山翔文、野坂朋生)

M2 ブレーンは超対称チャーンスイモンズ理論により記述される。最大の超対称性を保つ超対称チャーンスイモンズ理論が ABJM 理論であり、これには様々な拡張がある。著者らの先行研究によれば、IIB 弦理論の描像における NS5 ブレーンや $(1, k)5$ ブレーンをそれぞれ 2 枚に増やした (2,2) 模型は $D_5 = so(10)$ デルペッツォ曲線により記述され、ランク変形がない場合に $so(10)$ 表現が部分代数 $so(8)$ に破れることが知られていた。本研究では、曲線の量子化の概念を導入することにより、この対称性の破れを説明した。つまり、 D_5 デルペッツォ量子曲線における D_5 作用を同定し、さらに D_5 曲線における (2,2) 模型を同定することにより、破れずに残る対称性について解析を行い、部分代数を再現した。

6. ABJM 行列模型の二点関数と二次元戸田格子可積分階層 (古川友寛、森山翔文)

ABJM 理論において超対称性を半分保つウィルソンプラック演算子を挿入した一点関数は、超対称理論の局所化公式により計算され、無限次元経路積分が有限次元の ABJM 行列模型の

一点関数に帰着される。また、先行研究により、この行列模型はいわゆるシフトジャンベリ性を持ち、それをを用いてジャンベリ性やヤコビ-トウルディ性など可積分性を示唆する性質を導出できることや、この一点関数のシフトジャンベリ性の“完全化”により自然に二点関数に到達することが知られていた。本研究で、この二点関数のシフトジャンベリ性は、ソリトン方程式に現れる可積分性と等価な性質であることを示した。より詳しく内容を述べると、次のようになる。佐藤幹夫ら京都学派の結果によれば、ソリトン方程式が可積分性を持つのは無限個の方程式と整合性を持つためであり、この整合性は行列式のプリュッカー関係式、さらに、自由フェルミオンの演算子積展開を用いて定式化できる。本研究では、ABJM 行列模型の二点関数のシフトジャンベリ性と、二次元戸田格子可積分階層の自由フェルミオン形式が、完全に等価であることを示した。

7. 周期的鎖状幾何の量子ミラー曲線 (木村太郎、杉本裕司)

ミラー曲線は非コンパクトなカラビ-ヤウ多様体上の B 模型位相的弦理論を議論する上で有用である。これを求める方法の一つとして、量子ミラー曲線は 1 枚のプレーンが挿さった位相的弦理論の分配関数に作用すると 0 を与える、という事実が利用できる。本研究では上述の事実を用いて、 N 個の \mathbb{P}^1 が鎖状に繋がった幾何、およびそれをコンパクト化した幾何の 2 種類を考え、それらの量子ミラー曲線が (楕円) 超幾何微分演算子によって特徴付けられることを示した。さらに無限に伸びる鎖状幾何と周期的鎖状幾何の間に関係があることを指摘し、それが 5 次元ゲージ理論と 6 次元ゲージ理論の関係を意味することを議論した。

8. 滑らかなクエンチにおける対数ネガティビティと相互情報量の動力学 (藤田浩之、西田充宏、野崎雅弘、杉本裕司)

平衡状態にない量子状態がどのように熱化するかを理解するための量子系として、 $1+1$ 次元における滑らかなクエンチを持つ時間依存するハミルトニアンを考え、熱化を測る物理量として対数ネガティビティと相互情報量の時間発展を数值的に、様々なプロトコルで計算した。クエンチは時間経過に従って緩やかに減少し、十分時間が経った時に質量が 0 になるものと、ある時刻で質量が 0 になるが、十分時間が経過すると、初期状態の質量と同じになるようなものを調べた。その結果、十分時間が経過した時に質量項がゼロであれば系は平衡状態に達し、一方で有限であれば、どちらの物理量も振動することを示し、さらにそれらの結果が準粒子描像で説明できることを議論した。

9. 位相的弦幾何 (佐藤松夫、杉本裕司)

超弦理論の摂動論的振幅は弦幾何理論に対してある極限をとることで導出できる。これより、弦幾何理論は超弦理論の非摂動論的定式の候補として挙げられる。ただし、その数学的構造は極めて複雑であり、弦幾何理論から直接非摂動効果を取り出す計算は未だに実行されていない。そこで本研究では、非摂動効果を比較的簡単に取り出すための第一段階として、位相部分に制限した弦幾何理論、位相的弦幾何理論を定義し、それに対して同様の極限をとることで位相的弦理論の摂動論的振幅を導出できることを示した。さらに、位相的弦幾何理論の作用が完全 Q 形式で書けることを示し、局所化の手法が適用可能であることを議論した。

10. 4次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論における 演算子積展開の選択則 (清重一輝、西中崇博)

4次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形場理論にはラグランジアンによって記述が知られていないものが多数存在しており、そのような場の理論ではファインマン・ダイアグラム等の摂動論的解析は不可能である。そこで我々は演算子積展開による解析において一般的な状況でどの程度の拘束が可能であるかを議論した。我々は 4次元 $\mathcal{N} = 2$ 超共形代数の性質のみを用いて、BPS-multiplet に関する 3 点関数を BPS 条件のもと計算して解析的に解くことができた。我々の解析ではいくつかの 3 点関数には自明な解だけしか存在しないことを見出すことができた。3 点関数が自明な解をもつような演算子積において展開には決して現れないため、これらの選択規則として読み替えることが可能である。更に得られた結果をより抽象的なルールが存在していると予想し、現在知られている選択規則をすべて再現することができた。

教育・研究業績

学術論文

1. Hiroshi Itoyama, Takeshi Oota, Katsuya Yano, “Discrete Painleve system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, *Physics Letters* **B789** (2019) 605-609, [arXiv:1805.05057 [hep-th]].
2. H. Itoyama, A. Mironov, A. Morozov, “From Kronecker to tableau pseudo-characters in tensor models”, *Phys. Lett.* **B 788** (2019) 76-81, [arXiv:1808.07783 [hep-th]].
3. H. Itoyama, T. Oota, Katsuya Yano, “Discrete Painleve system associated with Unitary matrix model”, *Journal of Physics: Conference Series* **1194** (2019) no.1, 012050 “The 32nd International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics (Group32)”
4. Taro Kimura, Yuji Sugimoto, “Quantum mirror curve of periodic chain geometry”, *Journal of High Energy Physics* **1904** (2019) 147, [arXiv:1810.01885 [hep-th]].
5. Naotaka Kubo, Sanefumi Moriyama, Tomoki Nosaka, “Symmetry Breaking in Quantum Curves and Super Chern-Simons Matrix Models”, *Journal of High Energy Physics* **1901** (2019) 210, [arXiv:1811.06048 [hep-th]].
6. H. Itoyama, T. Oota, Katsuya Yano, “Discrete Painleve system for the partition function of $N_f = 2$ SU(2) supersymmetric gauge theory and its double scaling limit”, arXiv:1812.00811 [hep-th], *Journal of Physics* **A** on line <https://doi.org/10.1088/1751-8121/ab3f4f> and to appear in journal.
7. Hiroyuki Fujita, Mitsuhiro Nishida, Masahiro Nozaki, Yuji Sugimoto, “Dynamics of logarithmic negativity and mutual information in smooth quenches”, arXiv:1812.06258 [hep-th].
8. Kazuki Kiyoshige, Takahiro Nishinaka, “OPE Selection Rules for Schur Multiplets in 4D $\mathcal{N} = 2$ Superconformal Field Theories”, *Journal of High Energy Physics* **1904** (2019) 060, [arXiv:1812.06394 [hep-th]].
9. Tomohiro Furukawa, Sanefumi Moriyama, “ABJM Matrix Model and 2D Toda Lattice Hierarchy”, *Journal of High Energy Physics* **1903** (2019) 197, [arXiv:1901.00541 [hep-th]].
10. Matsuo Sato, Yuji Sugimoto, “Topological String Geometry”, arXiv:1903.05775 [hep-th].
11. Hiroshi Itoyama, Reiji Yoshioka, “Generalized cut operation associated with higher order variation in tensor models”, *Nuclear Physics* **B945** (2019) 114681, [arxiv:1903.10276 [hep-th]].

学会誌解説

1. 森山翔文, 野坂朋生, “M理論の地図が見えてきた”, 日本物理学会誌「最近の研究から」, 2019年74巻1号 p.34-39.

集中講義

1. 大田武志, “Matrix model, CFT and SUSY gauge theory”, 高エネルギー加速器機構, 2018/11/19-2018/11/21.
2. 大田武志, “Matrix model, supersymmetric gauge theory and Painleve equation”, NITEP Lecture Series, 2019/01/17, 2019/01/19.

国際会議講演

1. H. Itoyama, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, The 32nd International Colloquium on Group Theoretical Methods in Physics (Group32), Czech Technical University in Prague, Czech, 9 July 2018
2. H. Itoyama, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, 20 August, 2018, talk delivered at the workshop on duality, integrability and matrix model, Lebedev Physics Institute, Moscow, invited talk.
3. H. Itoyama, “More on Cut and Join Operator Ring in Rainbow (Aristotelian) Tensor Model”, Moscow, 25 August, 2018, talk delivered at the workshop on duality, integrability and matrix model, Institute of Information and Transmission Problem(IITP), Moscow, invited talk
4. H. Itoyama, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, Non-Perturbative Methods in Field Theory and String Theory - in memory of Alexei Zamolodchikov -, Kyoto University, 22 October, 2018, invited talk
5. H. Itoyama, “Cut and Join Operator Ring in Tensor Model”, OIST Mini Symposium “Holographic Tensors” OIST, 2 November, 2018, invited talk
6. H. Itoyama, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, East Asia Joint Symposium on Fields and Strings 2018, KIAS, 5 November, 2018, invited talk

学会・研究会講演

1. Sanefumi Moriyama, “One-Point Functions in ABJM Matrix Model”, String Math 2018, 東北大学, 2018/06/18-2018/06/22, ポスター発表.
2. Yuji Sugimoto, “Refined geometric transition and qq -characters”, String Math 2018, 東北大学, 2018/06/18-2018/06/22, ポスター発表.
3. Yuji Sugimoto, “Refined geometric transition and qq -characters”, Strings 2018, 沖縄科学技術大学院大学, 2018/06/25-2018/06/29, ポスター発表.
4. 糸山浩司, “場の量子論のすすめ”, 2018年7月14日, セミナー、文京区本郷東京大学工学研究科
5. H. Itoyama, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory”, 2018年7月25日 セミナー、京都大学素粒子論研究室
6. 石橋啓一 “ $\mathcal{N} = 4$ SYM 理論における $1/2$ BPS Wilson loop の真空期待値”, 原子核三者若手夏の学校, 千葉, ポスター発表.
7. Yuji Sugimoto, “Refined geometric transition and qq -characters”, Recent Developments in Gauge Theory and String Theory, 慶應義塾大学, 2018/09/18-2018/09/20.
8. ○糸山浩司, 大田武志, 矢野勝也, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory, I”, 日本物理学会, 2018年秋季大会, 信州大学, 2018/09/14-2018/09/17.
9. 糸山浩司, 大田武志, ○矢野勝也, “Discrete Painlevé system and the double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory, II”, 日本物理学会, 2018年秋季大会, 信州大学, 2018/09/14-2018/09/17.

10. 佐藤松夫, ○杉本裕司, “位相的弦幾何”, 日本物理学会, 2018 年秋季大会, 信州大学, 2018/09/14-2018/09/17.
11. 石橋啓一, 「4 次元 $N = 4$ Super Yang-Mills 理論における Wilson loop」, アインシュタインセミナー 2018 年度, KKR ホテルびわこ, 2018/09/26-2018/09/28.
12. 古川友寛, 「ソリトン方程式の基礎」, アインシュタインセミナー 2018 年度, KKR ホテルびわこ, 2018/09/26-2018/09/28.
13. 清重一輝, 「理論の空間入門」, アインシュタインセミナー 2018 年度, KKR ホテルびわこ, 2018/09/26-2018/09/28.
14. Sanefumi Moriyama, “Integrability in Super Chern-Simons Matrix Model”, SIDE13 (Symmetries and Integrability of Difference Equations), 福岡, 2018/11/11-2018/11/17.
15. Yuji Sugimoto, “Topological Strings and Condensed Matter Physics”, Symposium on String Theory, Field Theory, and Cosmology, Huzhou, 2018/11/23-2018/11/25.
16. Takeshi Oota, “Matrix model, supersymmetric gauge theory, and discrete Painleve equation”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 大阪市立大学, 2018/12/12-2018/12/13.
17. Kazuki Kiyoshige, “Selection Rules for Schur Multiplets in 4D $N=2$ Superconformal Field Theories”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 大阪市立大学, 2018/12/12-2018/12/13, ポスター発表.
18. Katsuya Yano, “Multicritical behavior of Unitary matrix model with logarithmic potential”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 大阪市立大学, 2018/12/12-2018/12/13, ポスター発表.
19. Tomohiro Furukawa, “ABJM Matrix Model and 2D Toda Lattice Hierarchy”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, 大阪市立大学, 2018/12/12-2018/12/13, ポスター発表.
20. Sanefumi Moriyama, “Symmetry Breaking in Quantum Curves & Super Chern-Simons Matrix Models”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, One-day workshop for QFT and string theory, 大阪市立大学, 2018/12/14.
21. 糸山浩司, ”南部陽一郎先生の物理とその魅力“ 2018 年 12 月 16 日 南部陽一郎先生ノーベル物理学賞受賞 10 周年記念シンポジウム 市民セミナー 2018、大阪市立大学杉本キャンパス、田中記念館大ホール
22. Yuji Sugimoto, “Open topological string on (periodic) chain geometry”, String Theory and Quantum Field Theory, Fudan University, 2019/03/11 - 2019/03/15.
23. 糸山浩司, ○大田武志, 矢野勝也, “Discrete Painlevé system and double scaling limit of the matrix model for irregular conformal block and gauge theory, III”, 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.
24. ○古川友寛, 森山翔文, “ABJM 行列模型と 2D 戸田格子階層”, 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.
25. 糸山浩司, 大田武志, ○矢野勝也, “Log 項をもつユニタリ型行列模型”, 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.
26. 糸山浩司, ○中島爽太, “Z3 オービフォルドの諸側面”, 改題 ” Twisted compactification with Wilson line of non-supersymmetric heterotic string” 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.
27. ○清重一輝, 西中崇博, “4 次元 $N=2$ 超共形場理論における選択規則”, 日本物理学会, 第 74 回年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.

28. 佐藤松夫, ○杉本裕司, “位相的弦幾何理論の局所化に向けての解析”, 日本物理学会, 第 74 回 年次大会, 九州大学, 2019/03/14-2019/03/17.
29. 大田武志, “Matrix models, supersymmetric gauge theories, and Painleve equations”, The 2nd Workshop on ”Mathematics and Physics in General Relativity”, 2019/03/23-2019/03/24.

修士論文

1. 石橋 啓一: 「4 次元 $\mathcal{N} = 4$ U(N) 超対称 Yang-Mills 理論における 1/2 BPS 円形 Wilson loop の真空期待値の $1/N$ 展開」
2. 中島 爽太: 「 \mathbb{Z}_N orbifold 上での超弦振幅」
3. 古川 友寛: 「ABJM 行列模型と 2 次元戸田格子階層」
4. 矢野 勝也: 「行列模型による超対称ゲージ理論の解析」

研究助成金取得状況

1. 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」80万円
2. 杉本裕司: 学術振興会・特別研究員奨励費「位相的弦理論の非摂動的定式化の研究」80万円

海外出張および海外研修

1. 糸山浩司: July, 8-14, 2018 Czech Technical University in Prague, Czech 国際会議出席・講演
2. 糸山浩司: August, 19-27, 2018, Lebedev Physics Institute and Institute of Information and Transmission Problem(IITP), Moscow, 国際研究集会出席・講演
3. 糸山浩司: November, 4-10, 2018, KIAS, Seoul, Korea, 国際会議出席・講演
4. 杉本裕司: 中国科学技術大学、2018年10月8日～2019年3月16日、研究遂行のための長期滞在

その他

1. 糸山 浩司: 2018年12月12-14日 南部陽一郎先生ノーベル物理学賞受賞10周年記念シンポジウム及び市民セミナー 2018年12月16日 を責任者として実施した。
2. 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
3. 糸山 浩司: Workshop ”Topological Field Theories, String theory and Matrix Models 2018” August 20- August 25, Moscow, Russia を共催

宇宙物理研究室

| | | | |
|-------|-----|------------|------------|
| 石原 秀樹 | 教授 | 吉野 裕高 | 小川 達也 (D4) |
| 浜端 広充 | 准教授 | (数学研究所研究員) | 松野 皐 (D1) |
| | | 森澤 理之 | 安積 伸幸 (M2) |
| | | (数学研究所研究員) | 中井 悠二 (M2) |
| | | 松野 研 | 遠藤 洋太 (M1) |
| | | (数学研究所研究員) | |

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。2018年度に行った研究を以下にまとめる。

1. 余等質1の紐の可積分性（古池（慶応大）、森澤、石原）

Nambu-Gotoの方程式で記述される相対論的な紐の運動は、幾何学的な対称性を課すことによって、運動方程式を対称性の方向に射影した空間上の測地線方程式で記述される。この紐を余等質1の紐という。

本年度は、与えられた時空において、可能なすべての余等質1の紐の方程式が可積分であるような時空を余等質1可積分（C1 integrable）と名付け、時空の対称性の詳細な性質として考えられることを提案した。

2. 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、石原）

2つの複素スカラー場とゲージ場からなる局所的なU(1)対称性が自発的に破れているような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。系は対称性の仮定により有限自由度の力学系に帰着し、その停留点を結ぶバウンス解が大きな質量をもつQボールを記述することが明らかになった。

3. AdS 時空でのRiemann沈めこみ（松野皐、石原）

AdS時空には幾何学的対称性を表す多くのKillingベクトルが存在する。Killingベクトルを1つ選ぶと、それに沿ったRiemann沈めこみ（射影）が定義でき、自然な計量（射影計量）が導入できる。

これは、AdS時空をファイバーバンドルとみなす多様性の研究で、底空間に特異点が現れる場合と現れない場合がある。特異点が現れる場合のいくつかは底空間がブラックホール構造をもつことがわかった。また、いくつかのパラメーターで特徴づけられる正則なファイバーバンドルの族が得られることがわかった。

4. ブラックホール連星系の周りの光の束縛軌道（安積、石原）

最大に帯電したブラックホールにはEinstein-Maxwell方程式の厳密解として、静的な多体系を表すものが存在する。その解の内、2体系を回転座標系に乗せることによって近似的に連星ブラックホールを構成し、その時空での光の束縛軌道を解析した。ブラックホール連星の回転角速度と2体間距離の変化によって、光の軌道は摂動を受け、パラメーター共鳴現象が現れることを明らかにした。

5. Kerr ブラックホールの周りの光の束縛軌道 (伊形, 石原)

Kerr ブラックホールの周りのヌル測地線を Carter定数を用いて解析すると, 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ことがわかる. ホライズンタイプのヌル測地線の軌道半径は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, ホライズン半径に漸近し, ブラックホールを周回する光線束の断面積が増大しないことがわかった. これは, ブラックホールを周回する光線による像が暗くならないことを意味し, 観測可能性を示唆する. これらの軌道を観測できる方向などを解析中である.

6. プラズマ中の円筒対称/球対称非線形密度波による荷電粒子の加速(松野研(大阪物療大), 高橋(愛知教育大), 政田(愛知教育大), 石原)

プラズマ中の非線形平面密度波は逓減摂動報によってKdV方程式で記述されることが知られている. これを円筒対称, および球対称系に拡張すると, 時間とともに, 半径が縮み, 密度振幅が半径の逆べき則に従って大きくなるような波動解が存在する. この円筒対称/球対称ソリトンが元のプラズマ流体の方程式系でも現れるかを数値シミュレーションによって確かめた.

また, 放射状の磁場の中でのプラズマ密度波による荷電粒子の加速機構を提案した.

<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, これまでとは異なったアプローチを試み, 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得られた.

また, 自己重力のある非理想の成層流体中で, 温度勾配によりつくられる対流力が存在する場合の HALL MHD 方程式の非線形磁気流体波の厳密解についても研究中である. 2次元および並進対称性を持つ解については, より一般的な厳密解を見いだすべく研究中である. 軸対称性を持つ厳密解は特別な場合であるが見出されており, helical 対称性を持つ解についても見出すべく検討中である.

2. Firehose不安定の非線形発展 (浜端)

昨年度に引き続き, 空間非一様性の効果を取り入れた firehose 不安定の非線形発展の数値解析を 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, 中井)

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. 崩壊型不安定性については, 運動論的效果により不安定となる波数領域が広がり, その成長率は電子の温度が相対的に大きい方が大き

くなることを明らかにした。また、変調型不安定性については、崩壊型不安定とは異なり、プラズマ β が大きくなるに従いその最大成長率は大きくなり、また不安定となる波数領域が広がることを明らかにしている。更に、太陽風のような β が1程度のプラズマでは変調型不安定性が卓越することを明らかにしている。本研究におけるこれらの結果は、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る。

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等への応用についても検討中である。

教育・研究業績

学術論文

1. “Cohomogeneity-one-string integrability of spacetimes”
Yoshiyuki Morisawa, Soichi Hasegawa, Tatsuhiko Koike, Hideki Ishihara
Class.Quant.Grav. 36 (2019) no.15, 155009
2. “Homogeneous Balls in a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory”
Hideki Ishihara, Tatsuya Ogawa,
Phys.Rev. D99 (2019) no.5, 056019
3. “Charge Screened Nontopological Solitons in a Spontaneously Broken U(1) Gauge Theory”
Hideki Ishihara, Tatsuya Ogawa
PTEP 2019 (2019) no.2, 021B01
4. “Particle acceleration by ion-acoustic solitons in plasma”
Hideki Ishihara, Ken Matsuno, Masaaki Takahashi, Syuto Teramae.
Phys.Rev. D98 (2018) no.12, 123010
5. “Rigidly Rotating String Sticking in a Kerr Black Hole”
Takahisa Igata, Hideki Ishihara, Masataka Tsuchiya, Chul-Moon Yoo
Phys.Rev. D98 (2018) no.6, 064021

国際会議発表

1. Hideki Ishihara, T.Igata, M.Tsuchiya, and C.M.Yoo
“Rigidly Rotating Strings in a Kerr Black Hole”
The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity, Rome July.1-7 2018
2. Tatsuya Ogawa, and Hideki Ishihara
“Charge screened non-topological solitons”
The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity, Rome July.1-7 2018
3. S.Matsuno, and H. Ishihara
“Black holes submmmerged in AdS”
The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity, Rome July.1-7 2018
4. Tatsuya Ogawa, Hideki Ishihara
“Charge Screened Boson Stars”
The 28th JGRG Workshop, 11/5-9 2018, Rikkyo University
5. Hideki Ishihara, Matsuno, Takahashi
“Particle acceleration by ion-acoustic solitons in plasma”
The 28th JGRG Workshop, 11/5-9 2018, Rikkyo University
6. Takahisa Igata
“Bright edge of a near extremal Kerr black hole shadow”
The 28th JGRG Workshop, 11/5-9 2018, Rikkyo University

学会・研究会講演

1. 松野研(大阪物療大), 石原秀樹, 高橋真聡(愛知教育大)
“プラズマ中の密度波ソリトンによる荷電粒子加速”
日本物理学会秋季大会 (信州大学 2018年9月14日～17日)
2. 小川達也, 石原秀樹
“Charge Screened Boson Stars”
日本物理学会秋季大会 (信州大学 2018年9月14日～17日)
3. 松野臯, 石原秀樹
“時空の境界条件と大域的キリングベクトル場”
日本物理学会第74回年次大会(九州大学伊都キャンパス2019年3月14日～17日)
4. 森澤理之, 古池達彦, 石原秀樹
“準最大対称時空中の余等質1ストリングの可積分性について”
第20回特異点研究会 (九州大学西新プラザ 2019年 1月12日～14日)
5. 安積伸幸, 石原秀樹
“連星ブラックホールを表す時空中の光の軌道の解析”
ブラックホール磁気圏研究会2019 (愛知教育大学 2019年3月2日～4日)
6. 石原秀樹, 松野研, 政田洋平, 高橋真聡
“ソリトンによる粒子加速”
ブラックホール磁気圏研究会2019 (愛知教育大学 2019年3月2日～4日)

その他

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15日)

学位論文

修士論文

1. 安積 伸幸
連星ブラックホールを表す時空中の光の軌道の解析
(Analysis of Photon Orbits in a Spacetime Describing a Binary Black Hole)
2. 中井 悠二
大振幅Alfvén波のパラメトリック不安定性の運動論
(Kinetic theory of the parametric instability of large-amplitude Alfvén waves)

研究助成金取得状況

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」

海外出張および海外研修

1. Hideki Ishihara
The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity, Rome July.1-7 2018
2. Tatsuya Ogawa
The 15th Marcel Grossman meeting on General Relativity, Rome July.1-7 2018

原子核理論研究室

| | | | |
|------|------|------------|--------------|
| 有馬正樹 | 准教授 | 加納弘喬(M2) | 緒方一介 |
| 佐藤弘一 | 特任講師 | 豊山日向(M2) | (クロスアポイントメント |
| 千葉陽平 | 特任助教 | 福村健太(UG4) | 教員) |
| | | 宮下直斗(UG4) | 櫻木弘之 |
| | | 大垣内宇宙(UG4) | (理事兼副学長) |

研究概要

1. 量子化されたスキルム模型における π 中間子場と核子スピンとの相互作用 (加納、有馬)
本研究では、核子や π 中間子の性質を理解する手段としてスキルム模型を活用するために、スキルム模型の量子化を考察した。これまで独立な自由度として扱われていたソリトンに伴うゼロモードと π 中間子場のゆらぎについて、本研究ではそれらの間に存在する相互作用の影響を含めて議論した。数値計算の結果、この相互作用の影響はとても大きいことが示された。そして、スキルム模型を量子化して π 中間子・核子散乱などの定量的な解析をするためには、この相互作用を取り入れることが重要であることを示した。
2. SU(3) スキルム模型における η 中間子と核子の相互作用 (豊山、有馬)
ハドロンが従う SU(3) \times SU(3) カイラル対称性をもとにしてスキルム模型を理解しようと試みた。その際、カイラル対称性が自発的に破れることを考慮して、その 8 重項に属する中間子を考慮した。本研究で示したのは、古典解として非自明な配位になるのは π 中間子場だけであること、である。ヘッジホッグ配位を SU(3) に拡張した場合、 π 中間子以外では η 中間子に対してのみ非自明な古典解の可能性が示唆される。しかし、運動方程式の解析から、エネルギーが有限になる解は存在しないことが示された。
3. 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。本来、ダイナミクスに寄与するにも関わらず、断熱近似に基づく従来の理論では取り込まれていなかった断熱展開の高次項を取り込んだ新しい理論を提案し、可解模型を用いて理論の有効性を示した (論文 1)。
4. 集団模型に基づく核反応計算 (佐藤、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、 $A=150$ 領域の S_{m} 同位体における変形相転移を想定し、 ^{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。
5. 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、不安定原子核 ^{76}Ni の一粒子構造を特定した。
6. α 移行反応および α ノックアウト反応を用いた原子核のクラスター構造研究 (緒方)
原子核から α 粒子を叩き出す反応と原子核に α 粒子を移行する(吸収させる)反応を分析することにより、それらの反応が原子核中に発達する α クラスター構造とどのように対応するかを明らかにした。

7. α 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）
 α 粒子の非弾性散乱断面積と原子核の励起状態に現れるクラスター構造の対応関係を、 ^{24}Mg を例に微視的構造・反応論を用いて調べ、歪曲波や多重散乱による断面積への効果を明らかにした。
8. ^{24}Mg のクラスター構造研究（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、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴が現れる ^{24}Mg の励起状態の構造を調べ、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ 分解敷居値エネルギーに多数の $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター共鳴が現れることを微視的構造論により初めて明らかにした。

教育・研究業績

学術論文

1. K. Sato: “Adiabatic approach to large-amplitude collective motion with the higher-order collective-coordinate operator”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*, 2018, 103D01 (2018).
2. K. Yoshida, K. Ogata, and Y. Kanada-En'yo: “Investigation on alpha clustering through knockout reaction”, *Physical Review C* **98**, 024614 (2018).
3. S. Takeuchi et al.: “Coulomb breakup reactions of $^{93,94}\text{Zr}$ in inverse kinematics”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2018**, 013D02 (2018).
4. Y. Kikuchi, K. Ogata, T. Hayakawa, S. Chiba: “Azimuthal angle distributions of neutrons emitted from the $^9\text{Be}(\gamma, n)$ reaction with linearly polarized gamma rays”, *Physical Review C* **98**, 064611 (2018).
5. Z. Elekes et al.: “Nuclear structure of ^{76}Ni by (p,2p) reaction”, *Physical Review C* **99**, 014312 (2019).
6. T. Fukui, Y. Kanada-En'yo, K. Ogata, T. Suhara, Y. Taniguchi: “Investigation of spatial manifestation of alpha clusters in ^{16}O via alpha-transfer reactions”, *Nuclear Physics A* **983**, 38 (2019).

国際会議講演

1. K. Sato : “Adiabatic approach to large-amplitude collective motion with the higher-order collective-coordinate operator”, Tsukuba-CCS workshop on "microscopic theories of nuclear structure and dynamics", 2018年12月10–12日, Center for Computational Science, Tsukuba University, Japan
2. K. Sato : “Adiabatic approach to large-amplitude collective motion with the higher-order collective-coordinate operator”, Recent Advances in Nuclear Structure Physics 2018(RANSP2018), 2018年11月29日–12月3日, YITP, Kyoto University, Japan
3. K. Ogata: “Some nuclear astrophysical studies with the Continuum-Discretized Coupled-Channels method (CDCC)”, ECT* workshop on Indirect Methods in Nuclear Astrophysics, Trento, Italy, November 5-9, 2018. (invited talk)
4. K. Ogata: “Microscopic reaction theory to probe several faces of nuclei”, International Symposium in Honor of Professor Nambu for the 10th Anniversary of his Nobel Prize in Physics, Osaka City University, December 12-13, 2018.
5. Y. Chiba: “Isoscalar transitions and decay properties of ^{24}Mg studied with antisymmetrized molecular dynamics”, State of the Art in Nuclear Cluster Physics”, Texas, USA, May 13-18, 2018.
6. Y. Chiba, M. Kimura: “Isoscalar monopole and dipole transitions as probe for clustering”, 10th International Conference on Direct reactions with Exotic Beams, Matsue, Japan, June 4-8, 2018.

7. Y. Chiba: “Probing cluster states of ^{24}Mg by alpha inelastic scattering”, The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, Huizhou, China, November 18-23, 2018.
8. Yohei Chiba: “Probing cluster states of ^{24}Mg by α -inelastic scattering”, NITEP One-day Workshop “Recent Advances in nuclear cluster physics”, Osaka, Japan, March 5, 2019.

学会・研究会講演

1. 佐藤弘一: 「集団模型に基づく遷移密度の記述」NITEP 研究会「微視的理論でつなぐ散乱観測量と核構造」2019年3月 大阪市立大学梅田サテライト
2. 佐藤弘一: 「高次の集団座標演算子を入れた大振幅集団運動への断熱的アプローチ」日本物理学会第74回年次大会 2019年3月 九州大学
3. Koichi Sato, “Adiabatic approach to large-amplitude collective motion with the higher-order collective-coordinate operator” The fourth workshop on many-body correlations in microscopic nuclear model 2018年8月 尖閣荘(新潟県佐渡市)
4. 緒方一介: 「クラスター構造の実証に向けたいくつかの取り組み」, 基研研究会「Threshold Rule 50」, 2018年10月3日-5日, 京都大学基礎物理学研究所.
5. 緒方一介: 「原子核のクラスター構造の実証に向けた取り組み」, 新学術領域研究「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」キックオフシンポジウム, 2018年11月19日-20日, 東京工業大学. (招待講演)
6. K. Ogata: “Some nuclear astrophysical studies with CDCC”, Korea-Japan symposium on unstable nuclei and nuclear astrophysics, the 74th annual JPS meeting, March 14-17, 2019, Kyushu University.
7. 緒方一介, 千葉陽平, 櫻木弘之: 「 ^{24}Mg の α 非弾性散乱断面積と単極子強度分布の対応」, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月14日-17日, 九州大学.
8. 千葉陽平: 「sd殻核におけるクラスター構造とアイソスカラー型遷移」, 基研研究会「Threshold Rule 50」, 2018年10月3日-5日, 京都大学基礎物理学研究所.
9. 千葉陽平, 緒方一介, 櫻木弘之: 「 α 非弾性散乱とクラスター励起モード」, NITEP研究会「微視的理論でつなぐ散乱観測量と核構造」, 2019年3月28日, 大阪市立大学.
10. 千葉陽平: 「 ^{24}Mg における $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ クラスター回転帯と崩壊モード」, 日本物理学会 第74回年次大会, 2019年3月14-17日, 九州大学.

その他

1. K. Ogata: “Some recent attempts for probing several faces of nuclei”, Seminar at the University of Seville, Jan. 14, 2019.
2. K. Ogata, “Cross sections and spin polarization observables in exclusive and inclusive knockout reactions”, the 746th ASRC Seminar, JAEA, Feb. 21, 2019.

学位論文

修士論文

1. 加納弘喬: 「量子化されたスキルム模型における π 中間子場と核子スピンとの相互作用」
2. 豊山日向: 「SU(3)スキルム模型における η 中間子と核子の相互作用」

研究助成金取得状況

1. 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」117万円.

海外出張および海外研修

1. 緒方一介：ドイツ・ダルムシュタット工科大学, 2018年7月29–8月5日, EMMI workshop on Direct Reactions and Nuclear Structure, 出席
2. 緒方一介：イタリア ECT*, 2018年11月4–12日, ECT* workshop on Indirect Methods in Nuclear Astrophysics, 出席・発表
3. 緒方一介：スペインセビーリャ大学, 2019年1月7日–21日, 原子核反応理論研究に関する議論(1月14日にセミナーを実施)
4. 千葉陽平: Hotel Galvez & Spa, 2018年5月13-18日, State of the Art in Nuclear Cluster Physics, 出席・発表
5. 千葉陽平: Sheraton Bailuhu Resort, 2018年11月18-21日, The 10th Chiba-Japan Joint Nuclear Physics Symposium, 出席・発表