

# 物理学教室年次研究報告

2020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
2020年度物理教室談話会 .....	3
<b>研究報告</b>	
<u>物性物理学講座</u>	
超低温物理学研究室 .....	5
光物性物理学研究室 .....	8
生体・構造物性物理学研究室 .....	10
素励起物理学研究室 .....	13
電子相関物理学研究室.....	19
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 .....	31
高エネルギー物理学研究室 .....	38
重力波実験物理学研究室.....	45
宇宙・素粒子実験物理学研究室.....	52
<u>基礎物理学講座</u>	
素粒子論研究室.....	57
数理物理研究室.....	64
宇宙物理研究室.....	69
原子核理論研究室 .....	72

## 序

2020年度は、ほとんど全ての人々が新型コロナによって、これまでに体験したことのない急激な社会生活の変化に対応することを余儀なくされました。未曾有の出来事です。授業や会議、オープンキャンパス等、ほぼ全ての大学の活動が遠隔で行われ、学生と教員、事務職員の方々全員が、例年以上のエネルギーを必要としました。当初は遠隔での実施も覚悟していた大学院入試と学部入試は、対面で行うことができましたが、新型コロナに感染した受験者がいた場合への対応のために、例年よりも多くの人員が必要となり、専任教員だけでなく特任教員の皆様にも多大な協力をしていただきました。そういうことで、とても消耗したのですが、悪いことばかりでもなく、遠隔での仕事の処理に慣れて、通勤時間を節約できるようになったという側面もあります。

大阪市立大学と大阪府立大学の統合までに2年を切った忙しい年でもありました。新大学における物理学専攻のより具体的な制度設計に関する議論を始める必要がありました。議論をする前にまず市立大学と府立大学の教員同士がお互いを知ることが大切ですので、学問的な交流を目的とした談話会をできる限り数多く行う心積りでした。しかし、新型コロナの影響でその予定が完全に崩れ、前途の多難さを予感させました。このような状況でも、中野英一教授が中心となり、清矢良浩教授、荻尾彰一教授、丸信人准教授、常定芳基准教授らとともに運営して今年度もアインシュタイン-南部セミナーを開催できたこと、またこのセミナーで府立大の神吉一樹先生に招待講師を引き受けていただけたことは良かったと思います。

2019年度に博士号を取得された素励起物理学研究室出身の湯井悟志さん（現慶應大自然科学研究教育センター）が、第37回井上研究奨励賞と日本物理学会若手奨励賞（領域6）を受賞されました。また宇宙線物理学研究室の Rosa Mayta Palacios さんが第7回岡村賞（大阪市立大学女性研究者賞・博士研究員奨励賞）を受賞されました。物理学教室で学んだ若手研究者の活躍はとても喜ばしいことです。

この序には1年間の重要な出来事や印象に残った出来事を書くのが通例だと思いますが、2020年度を振り返ったとき、実は新型コロナ以外に印象に残っていることがありませんでした。それで、教室会議の資料を確認してみたのですが、新大学認可のための書類作成や制度設計、そして新型コロナ対策についての報告と審議がほぼ毎回ありました。あまりに思い出せることが少ないので、自身の認知症を疑ったりもしたのですが、やはり新型コロナに始まり新型コロナに終わった1年と言えそうです。2021年度に入って新型コロナ感染の状況は新型株の出現でむしろ悪化しているように思われますが、2020年度の経験で得た知識と技能を生かして、大学での学びと研究が滞ることの無いよう努力していきたい

ものです。

2020 年度（令和 2 年度）物理学科主任 中尾憲一



## 2020年度 物理学教室 談話会

談話会委員：森山，清矢，杉崎

### 第1回 新入生歓迎物理談話会

日時：2020年5月19日（動画公開）

実施方法：動画配信

講師：杉崎 満 氏（生体・構造物性物理学研究室・准教授）

講演題目：「生命と物理学：生きていくうえで量子力学なんてものが必要なのか？」

### 第2回 物理学教室談話会

日時：2020年12月10日 13:20～15:00

実施方法：遠隔双方向

講師：湊 太志 氏（日本原子力開発機構・原子力基礎工学研究センター研究員）

講演題目：「 $\beta$ 崩壊で切り込む核物理の最前線と応用」

### 第3回 物理学教室談話会

日時：2020年12月14日 15:15～16:30

実施方法：遠隔双方向

講師：水島 健 氏（大阪大学大学院基礎工学研究科・准教授）

講演題目：「トポロジカル超伝導・超流動における熱スピン輸送現象」

### 第4回 物理学教室談話会

日時：2020年12月15日 15:30～17:00

実施方法：遠隔双方向

講師：関口 雄一郎 氏（東邦大学理学部・准教授）

講演題目：「重力波で探る宇宙」

### 第5回 物理学教室談話会

日時：2020年12月17日 16:30～18:00

実施方法：遠隔双方向

講師：武田 淳 氏（横浜国立大学大学院工学研究院・教授）

講演題目：「サブサイクル近接場による極限時空間分光」

### 第6回 物理学教室研究発表会

日時：2020年12月25日 10:00～17:35

実施方法：遠隔双方向

第7回 物理学教室談話会

日 時：2021年1月20日 16:30～18:00

実施方法：遠隔双方向

講 師：越智 敦彦 氏（神戸大学・准教授）

講演題目：「エネルギーフロンティア実験に向けた粒子線測定器」

第8回 物理学教室談話会

日 時：2021年1月27日 13:20～15:00

実施方法：遠隔双方向

講 師：井田 大輔 氏（学習院大学・教授）

講演題目：「4次元時空にブラック・ストリングが存在しない理由」

第9回 修士論文発表会

日 時：2021年2月4日 09:25～18:00

実施方法：遠隔双方向

# 超低温物理学研究室

石川修六	教授	小泉成美(M2)
矢野英雄	准教授	
小原 颯	講師	
畑 徹	特任教授	

## 研究概要

### 1. 熱対向流が生成する超流動ヘリウム4の量子乱流（矢野、小泉）

超流動ヘリウム(<sup>4</sup>He)の超流動成分と常流動成分の対向流は、臨界速度を超えると流路内に量子乱流を生成する。対向流による量子乱流の研究は数多く行われているが、対向流乱流の渦の運動を観測する研究はまだ行われていない。本研究では、狭い流路内で生成した対向流乱流から放出される渦輪を、流路外に設置した渦輪検出器で検出頻度を調べることにより、流れに対する量子乱流の異方性を研究した。

直径0.2 mm長さ3 mmの流路端から0.39 mm離れた流路軸上に検出器（振動ワイヤー、直径2 μm）を設置し、また新たに対向流の向きを制御する方法を開発した。この装置による乱流生成から渦輪検出までの時間測定から、次のことを明らかにしている。①検出時間は指数分布し、渦輪の検出はランダムであることを見出した。②指数分布から平均検出頻度を見積もり、対向流速の増加に伴い検出頻度が増加すること、また速度350 mm/s以上で頻度が減少に転じることを見出した。③同じ対向流速で対向流の向きを変えて測定し、検出頻度が100~200倍変わることを見出した。④対向流中の渦輪の運動を調べ、検出器が検出する渦輪のサイズに流れに対する異方性があることを明らかにした。この結果を基に、熱対向流中の渦輪の運動が③の検出頻度の異方性と関係すること、また小さなサイズの渦輪ほど放出頻度が大きいと考察した。

### 2. 低温モーターで駆動する超流動ヘリウム4吸込渦（小原、矢野、松村）

流体力学では、渦度がゼロか非ゼロかによって「渦なし」と「渦あり」に分類される流れがあり、前者は教科書レベルでほとんど理解されていると考えて良い。また、後者のうち、外場によって駆動される強制回転は渦度が一様となるなど、学問としては解決済みである。しかし、何らかの要因により渦度が局所的に集中した領域を持つ渦については、いくつかのモデルが提唱されているものの、現実の渦を記述する理論は少ない。その代表例は垂直方向の吸込流があるときに発生する「吸込渦」（風呂桶の栓を抜いたときにできる渦）で、定性的には、微小な渦度を持つ「素渦」が渦定理にしたがって吸込口に集中させられることで巨大な渦になると理解されており、そのコア半径は吸込流の強さと粘性による渦度拡散のバランスで決まるとされているが、詳細は定かではない。そこで、我々は、超流動ヘリウムの吸込渦を用いた実験を行い、吸込渦の基本的な流れの性質を調べることにした。超流動では渦糸が実在し、渦糸がすべての渦度を担っており、その渦糸の密度を計る技術が確立されているからである。実験では当研究室で開発された超流動中で回転するモーターを用いて吸い込み流を生成し、光学観察と独自に開発した第1音波循環計測法を用いて循環を求めたところ、渦糸 $10^4 \sim 10^5$ 本相当の渦度をもつ渦であることが明らかになった。さらに、量子渦糸がどこにどのような密度で存在しているのか検証するため、巨大渦を横断する第2音波の吸収実験を行った。第2音波は超流体特有の音波の一つで、量子渦が存在するときには渦糸密度に比例した減衰を示す。実験の結果、回転流が強くなるほど大きな減衰が発生することが判った。この減衰と循環を比較することにより、モーターによる回転流によって生成された量子渦糸が回転軸中心の吸込穴程度の領域に吸い寄せられ、その回転数はモーター回転数の100倍

程度の高速になっていると見積もられることがわかった。これは、吸込流による圧縮効果の直接的な証拠であると言える。

### 3. 熱音響冷凍機の開発（石川）

熱音響冷凍機は、熱エネルギーと音波エネルギーの変換を利用した冷凍機である。薄膜付きのループ管型の熱音響冷凍機が本研究の特色である。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、直管での実験と矛盾しないものである。直管軸に沿った仕事流測定結果を「混在波モデル」で解析した。他端の条件によらずに、進行波成分は他端に向かって減少し、定在波成分は増加することが分かった。他端が薄膜ときに進行波成分がゼロとならないから有限な仕事流となることが分かった。金属端のときは進行波成分がゼロとなることから、薄膜によって進行波の減少が阻止されていることが分かった。進行波の減少を阻止する薄膜の役割がどのような機構によるかを明らかにするためには、減衰しながら進む圧力波と他端での反射係数の導入が重要であることが分かった。

### 4. 寒剤を用いない希釈冷凍機の開発（畑、矢野、小原、石川）

パルス管冷凍機が高額なため、より安価なGM冷凍機を用い、操作しやすいドライ希釈冷凍機の開発をめざし、一昨年度までは40 mKまでの冷却だったが、今年度は、いよいよパルス管冷凍機を用いた本格的な希釈冷凍機として10 mK以下を目指し、ついに15 mKまでの冷却に成功した。この温度域では従来の抵抗温度計ではカバーできないため磁気温度計の開発を進めた。その結果、キュリー則にきれいに乗る十分な感度を持った磁気温度計の開発に成功した。ただ、抵抗温度計も磁気温度計も温度定点が最低一つ必要となるため、試料中に超伝導転移温度をもつ超伝導体を組み込んだ自己校正可能な磁気温度計の開発へと発展させ、ついに完成させた。この種の自己校正型の温度計は世界に例がなく、今後の超低温での磁気温度計の一つのスタンダードになると思われる。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. Statistical laws and self-similarity of vortex rings emitted from a localized vortex tangle in superfluid  $^4\text{He}$ ;  
T. Nakagawa, S. Inui, M. Tsubota, and H. Yano,  
Physical Review B, **101**, 184515(1–8) (2020)  
(DOI: 10.1103/PhysRevB.101.184515)
2. Size Distribution of Emission Vortex Rings in Turbulence Induced by Vibrating Wire in Superfluid  $^4\text{He}$ ;  
H. Yano, K. Hamazaki, N. Koizumi, K. Sato, K. Obara, and O. Ishikawa,  
Journal of Low Temperature Physics, **201**, 18–24 (2020)  
(DOI: 10.1007/s10909-019-02285-5)

## 学会・研究会講演

1. 日本物理学会 2020 年秋季大会（オンライン開催，2020 年 9 月 8 日～11 日）
  - ① 小原顕 (Talk): 超流動吸込流による渦度の圧縮効果
  - ② 小泉成美 (Talk): 超流動ヘリウム 4 中の渦輪の運動状態
2. 日本物理学会第 76 回年次大会（オンライン開催，2021 年 3 月 12 日～15 日）
  - ① 矢野英雄 (Talk): 超流動ヘリウム対向流乱流の渦輪放出
  - ② 小原顕 (Talk): 超流動吸込渦のコア構造

## 学位論文

### 修士論文

1. 小泉成美：「超流動  $^4\text{He}$  の熱対向流が生成する量子乱流から放出された渦輪の運動」

## 研究助成金取得状況

1. 石川修六：共同研究 アルバック・クライオ株式会社「希釈冷凍機の開発」 1 1 5 万円
2. 小原顕：日本学術振興会・科学研究費基盤研究 (C)  
「超流動ヘリウムを用いた吸込渦形成機構の解明」 2 0 2 0 年度分 1 9 0 万円

## その他

### 地域貢献

1. 畑・石川：低温工学関西支部基礎技術講習会（2020 年 9 月 16 日～18 日）

# 光物性物理学研究室

鐘本勝一 准教授

保地 滉介 (M2)

高石 晃平 (M1)

但馬 直弥 (M1)

渡部 真也 (M1)

館 亮太 (B4)

福島 直人 (B4)

## 研究概要

### 1. 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が、中でもイオン液体による電気二重層を利用した電気化学発光セル (LEC) は、単純な素子構造でも高輝度なEL発光を与えることが知られており、実用に向けた応用展開に注目が集まっている。本研究では、LECの動作と直接結びつけた分光計測を実施することで、LEC内のp-ドープ及びn-ドープ層の成長過程を初めて明らかにした。また、LECの動作と同期させた時間分解分光計測を実施し、LECがバイアス印加とともに動作する過程の電子状態変化を直接計測することに成功した。その結果、電子のドープ過程は正孔よりも遅れ、それにより、ELがバイアス印加から少し遅れて発生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伝搬効果の検証 (高石、鐘本)

有機物質はスピン緩和時間が長いため、スピン情報の伝搬に有利だと考えられてきた。そのためスピン流の伝搬に有機半導体が用いられた研究が報告され、実際に、その伝播を示唆する結果が報告され、注目されてきた。本研究では、スピン量およびキャリア量を調整できる有機導体ポリマーを準備し、強磁性層内でのFMR励起により発生したスピン流が、有機層に対してどのような影響を与えるかについて、磁気共鳴法からの追跡を行った。その結果、強磁性層におけるFMR線幅が有機層との界面接触により減少し、さらには有機層のESR線幅がその界面接触により増加することが確認された。これは両層の間でスピン間の混合が発生することを示唆している。このスピン混合がスピン流生成と関係していると予想される。

### 3. 色素増感太陽電池における分光計測 (但馬、鐘本)

再生可能エネルギーの利用が求められる昨今において、太陽光エネルギーを直接電力へと変換可能な太陽電池は、再生可能エネルギーへの依存度を高める意味において重要な位置づけにある。中でも太陽電池における有機物質の利用は、柔軟な太陽電池の実現へとつながり、太陽電池の使用範囲を拡張させると期待されている。有機系太陽電池の一つである色素増感太陽電池では、色素が太陽光の光を吸収した後の酸化チタン層への光電子注入が、酸化還元イオンの酸化還元反応と並行して進行し、動作の理解が複雑化する。本研究では、太陽電池動作と直接結びつく分光計測系を構築し、その動作下における電子状態変化を追跡する計測系を確立させた。特に光電流の発生と同時に光を捕集する電極上にて光電子が蓄積することを実験的に実証した。

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

通常LEDでは電極から注入されたホールと電子が素子内で結合し、発光性励起子を生成することで動作する。電極には通常常磁性金属が用いられ、その場合、発光励起子のスピン依存反応は操作できない。しかし、強磁性金属を電極に用いると、そのスピン偏極によりスピン選択性の操作が可能になるかもしれない。この研究では、単層においても動作可能なイオン液体によるLECを用いることで単層LEDを作成し、強磁性電極を用いた場合のLED特性を調べた。さまざまな強磁性電極にてLEC作成を試みたが、パーマロイを強磁性層とする単層LECにて実際に動作することがわかった。ただし、素子寿命

が現状ではまだ短い。物性面では、強磁性層のFMR遷移により発光強度の一部が変化することがわかった。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. Iida Ayato, Kanemoto Katsuichi, “Time-Resolved Operando Spectroscopic Measurements for Organic Field-Effect Transistors”, ACS Applied Electronics Materials, vol.2, 1210-1217 (2020).
2. Kanemoto Katsuichi, Iida Ayato, Iwamitsu Kazunori, Higashiyama Kyohei, Kumazoe Hiroyuki, Akai Ichiro, “Origin of electric field response signals in gate modulation spectroscopy for organic field effect transistors”, Organic Electronics, vol.87, 105934 (2020).

### 学会・研究会講演

1. 保地滉介, 鐘本勝一, 米川文広「イオン液体LECの動作で誘起される分光信号の特性」応用物理学会 第81回応用物理学会秋季学術講演会 (2020. 9. 8)
2. 岩満一功, 東山享平, 熊添博之, 鐘本勝一, 赤井一郎「有機FETにおけるゲート誘起スペクトル解析のためのベイズ分光法III」日本物理学会・2020年秋季大会 (2020. 9. 10)
3. 高石晃平, 鐘本勝一, 鈴木貴之「強磁性金属/有機導体界面におけるスピン伝達」電子スピンスイエンズ学会、SEST2020年会 (2020. 11. 13)
4. 岩満一功, 東山享平, 熊添博之, 鐘本勝一, 赤井一郎「ベイズ分光を用いた有機FETのゲート電圧変調スペクトル解析とその成分選択」第76回日本物理学会・年次大会 (2021. 3. 12)

## 学位論文

### 修士論文

1. 保地滉介：「イオン液体を用いた電気化学発光セルの動作ダイナミクスの解明」

## 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」、110万円
2. 鐘本勝一（代表）、科学研究費補助金、挑戦的研究(萌芽)、「有機半導体におけるスピンの直接観測に向けた二重磁気共鳴計測手法の開発」、100万円

# 生体・構造物性物理学研究室

南後 守 特任教授  
杉崎 満 准教授

橋本 健人 (M2)  
山本 歩波 (M1)  
堀 雅樹 (B4)  
南 玲央 (B4)

## 研究概要

### 1. 緑藻の超解像度顕微測定（南，橋本，杉崎，南後）

高等植物や藻類，バクテリアなどが行う光合成は，光捕集や獲得した励起エネルギーの伝達を行うアンテナや，生体エネルギーの生産を行うために必要なアデノシン三リン酸（ATP）やNADPHを生産する光反応中心など，複数の光合成器官からなる．自然界において太陽光の強度は時間とともに大きく変化をするため，光合成生物は弱光環境下においては効率良いエネルギー生産を，強光環境下においては余剰エネルギーの生産を抑制する機構を備えている．特に酸素発生型生物においては，余剰エネルギーは活性酸素の発生につながるため，エネルギー生産量を調整する機構が必要となってくる．このような機構の代表として，アンテナ色素蛋白質複合体と反応中心の位置関係を調整するステート遷移が知られている．ステート遷移の概要としては，強光環境下においてアンテナから光反応中心へのエネルギー伝達を抑制するという理解をされているが，弱光環境下と強光環境下のそれぞれにおける詳細な位置関係は未だ明らかになっていない．このような研究が困難であるの理由は，太陽光の強度とともに時々刻々と変化するアンテナ色素蛋白質複合体と反応中心の位置を光の回折限界を超えた空間分解能で詳細に追跡する必要があるためである．

超解像度顕微鏡法は従来の光学顕微鏡の原理的な空間分解能の限界値（すなわち回折限界）を超えることができる手法として，過去20年ほどの間に急速に研究が進んできた．STORM, STED, PALM, GSDなど，超解像度顕微鏡法として開発された手法は非常に多岐にわたるが，その大多数は蛍光顕微鏡法の延長線上にあるため，試料を染色しその形状を高い空間分解能で観測することとなる．しかしながらクロロフィルやフィコビルンといった光合成色素分子は比較的高い量子収率で自家蛍光を発するため，試料を染色することなく，より自然に近い状態で，光合成色素蛋白質複合体の空間配置とその機能が同時観測可能になるものと期待できる．このような目論見の下で，超解像度顕微鏡を用いた藻類におけるステート遷移の直接観測に向けた研究を開始した．

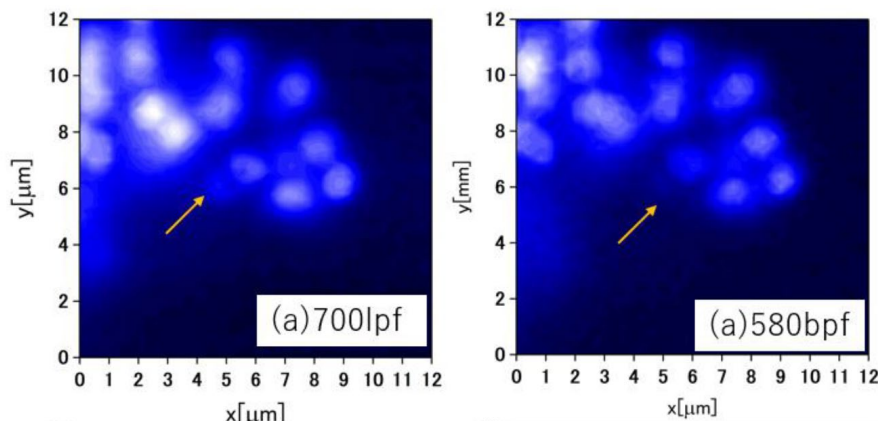


図1 *Gloeobacter violaceus*の共焦点顕微鏡蛍光画像．アンテナ色素蛋白質複合体（左）と反応中心（右）の蛍光強度分布が，個々のバクテリアにおいて異なる．



まず、藍藻の一種である *Gloeobacter violaceus* の共焦点顕微鏡観測を行ったところ観測波長により、その蛍光強度の空間分布が大きく異なることが分かった (図1) . これは、育成条件によりアンテナ色素蛋白複合体であるフィコビリゾームと反応中心の含有量が変化することを反映しているものと考えられる. 更に超解像度顕微鏡法である GSD (ground state depletion) 法を試したところ、フィコビリゾーム、および反応中心共に回折限界を超えた空間分解能による画像の取得に成功した. 今後、光学配置を含むさらなる実験パラメータの最適化を図ることにより空間分解能の向上を行うとともに、時間分解能の向上にも取り組んでいく予定である.

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

電磁波である光は振幅、振動数、位相によって特徴づけられる. 光により物性を探索する際には、旧来、振幅と振動数とその制御対象であり、位相を制御することは困難とされてきた. しかし1990年代の終わりころから波形成型技術が進歩し、振動数成分ごとに振幅と位相を制御したパルス光を物質に照射することが可能となってきた. その結果、光合成色素蛋白複合体のような巨大かつ複雑な物質群においても、光を用いてその機能の人為操作が可能になることが分かってきた. たとえば紅色光合成細菌の光捕集アンテナ色素蛋白複合体においては、これまでに、色素分子間の励起エネルギーの伝達効率の人為操作が達成されている. しかしこのような人為操作においては、用いられるパルス波形は非常に複雑なものとなり、機能変化をもたらす物理化学的背景を見抜くことが困難となる. そのため我々は、まずは周波数に対し位相や振幅に単調な変化を与えた場合に、光合成色素の応答がどのように変化していくかを調べた上で、段階的にその要素を組み合わせていくことにより、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. これまでの研究において、試料に照射するスペクトルの位相を周波数に対し連続的に変化させ、電子の励起状態の寿命やコヒーレントな分子振動の生成割合を制御することに成功している. さらに複雑な制御を行いその本質に迫るためには、発生させたパルス波形の正確な評価が重要となってくるため、その手法の確立が必要となってくる. そのため本年度は、スペクトル分解型の干渉計を新たに構築しパルスの評価方法について検討を行った (図2) . 現在までに基本的な動作の確認を終了しているが、正確な位相の決定を行うために、画像のコントラストを向上させるようにさらに改良を継続していく予定である.

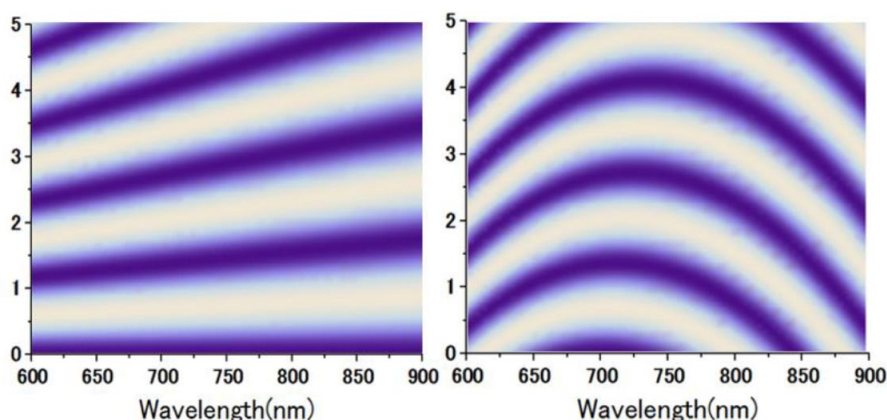


図2 光学素子による発生するスペクトラルチャープを干渉計により評価するためにシミュレーションを行った. チャープ量の増加に伴い左図から右図のように観測されるパターンが変化する.

## 3. 小型酸素センサーの開発 (橋本, 杉崎, 南後)

生体組織の酸素や二酸化炭素など濃度を非侵襲にリアルタイムで検出することは、細胞生物学や医療の分野において重要な課題となっている. 生体組織中の酸素濃度を見積もる

方法の一つとして、ポルフィリン誘導体やルテニウム錯体等の発光測定による酸素濃度測定法が知られている。一般的このような物質を用いた酸素センサーは、錯体をポリマー中に分散させて作製され、その性能はStern-Volmer係数によって評価される。最近我々の行った研究において、Stern-Volmer係数を決定する要因はマトリックスそのものの性質に加え、マトリックスの形状や次元性に依存することが分かってきた。また、試料形状を工夫することにより酸素に対する応答速度が向上することも明らかになった。更に、酸素センサーフィルム特性の経時変化の測定を行うとともに、簡単に酸素濃度を測定するための小型分光器を作製しその基本動作を確認した。

## 教育・研究業績

### 学会・研究会講演

1. 橋本健人, 南玲央, 村上明男, 南後守, 天尾豊, 杉崎満, 「*Gloeobacter violaceus* の超解像度顕微鏡観測」, 日本物理学会 第 76 回年次大会 (2021 年), オンライン開催, 2021 年 3 月 12 日~15 日.

## 学位論文

### 修士論文

1. 橋本健人: 「非線形光学過程が超解像度顕微鏡法に及ぼす影響」

## 研究助成金取得状況

1. 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」100万円.
2. 杉崎満: 公益財団法人小柳財団, 研究助成金「分子レベルの局所的酸素濃度測定技術の確立」100万円.

# 素励起物理学研究室

坪田 誠 教授  
竹内 宏光 講師

韓 俊植(D2)  
乾 聡介(D1)  
岡崎佳純(M2)  
佐野融人(M2)  
中川 朋(M2)  
浅川研太(M1)  
楊 維燦(M1)

## 研究概要

### 1. 2成分ボース・アインシュタイン凝縮体における量子渦対消滅と再帰現象 (坪田、韓)

2次元ボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)の量子流体力学において、量子渦対の生成と消滅は、基本的な素過程である。単成分のBECでは、渦対の消滅は、散逸か触媒渦が無いと起こらないことが知られている。ここでは、2成分のBECの渦対の運動をグロス・ピタエフスキー方程式により調べ、2成分間相互作用が十分に強い時、散逸や触媒渦が無くても、渦対の消滅が起こることを示した(図1)。特に、最初成分1に渦対を配置すると、それが消滅した後、成分2にテレポーテーションのように渦対が現れ、その後、両成分の間で渦対の受け渡しを行う再帰現象を見出した。これは、渦対の消滅によって、非圧縮性エネルギーから音波の生成に伴い変換された圧縮性エネルギーが、再びフォーカスして非圧縮性エネルギーとなり渦対を作るといふ、自明でない現象である。この現象は系のサイズや相互作用パラメータに依存し、その詳細を調べた。

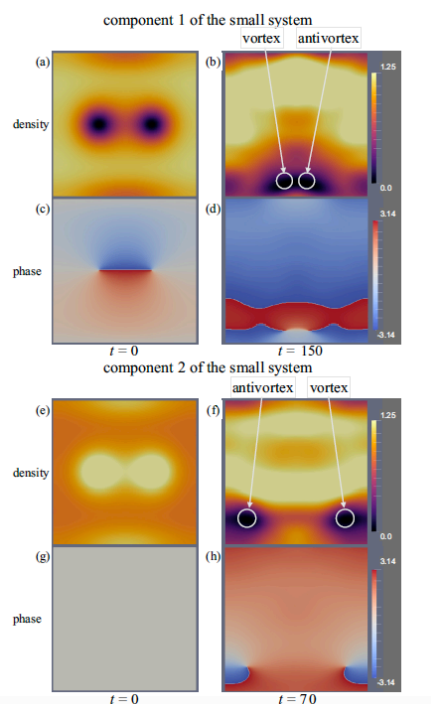


図1 2成分BECにおけす渦対消滅-生成の再帰現象。最初成分1に存在する渦対が消えると成分2に渦対が現れ、両成分が渦対の受け渡しを行う。

### 2. 超流動<sup>4</sup>Heにおける吸い込み渦(坪田、乾、中川)

大阪市大の超低温実験グループは、容器内の超流動<sup>4</sup>Heをモーターで回転させることで、吸い込み渦を実現させるという興味深い実験を行った(K.Obara et al., Phys. Rev. Fluids 6, 064802(2021))。この実験に動機づけられて、量子渦糸モデルを用いて、吸い込み渦形成のダイナミクスを調べた。実験で観測された現象は非常に複雑なので、上部の自由界面付近、中央部のバルク部分、下部のモーター付近に分けて解析を行った。特にポイントは、高い量子数を持つ巨大量子渦がどのように形成されるかである。図2は、中心部の

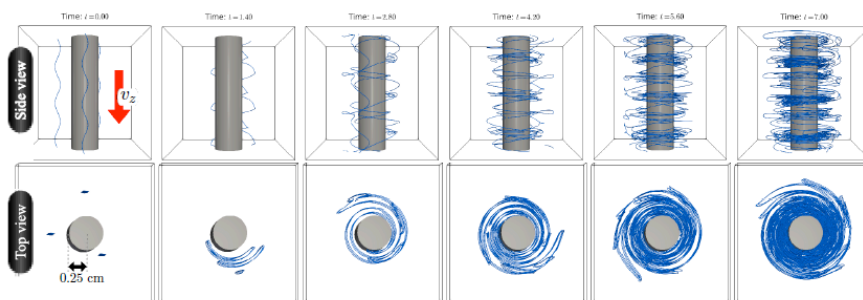
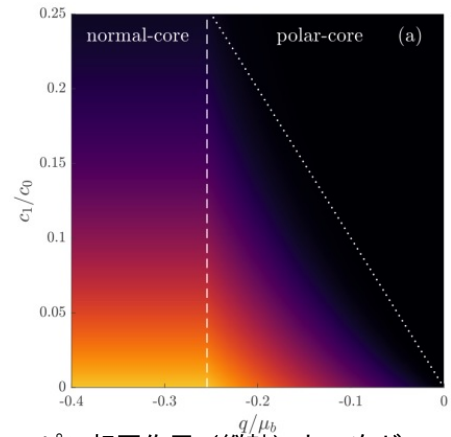


図2 超流動<sup>4</sup>Heにおこる吸い込み渦形成のダイナミクス。中央部の巨大渦(Giant vortex)に周辺の量子渦がからみつく様子が見て取れる。

巨大量子渦に、周囲の量子渦が引き込まれる様子を  
示している。この巨大量子渦を観測すべく、その拡散を  
議論し、拡散係数から巨大量子渦の量子数を見積もる  
方法を議論した。

### 3. ネマチックスピン渦の内部状態の相図とその不安定性 (竹内)

スピノールBECの反強磁性相におけるネマチックスピ  
ン流をもつネマチックスピン渦について、その内部構  
造の相図と安定性およびその不安定ダイナミクスを理  
論・数値的に明らかにした。この研究以前には、ネマ  
チックスピン渦は不安定であると考えられていたが、  
安定なパラメータ領域が存在することが初めて明らか  
になった(右図)。得られた成果は米国学会誌Phys. Rev.  
Aに論文として掲載された。なお、本研究はニュージ  
ーランドのオタゴ大学との国際共同研究による。



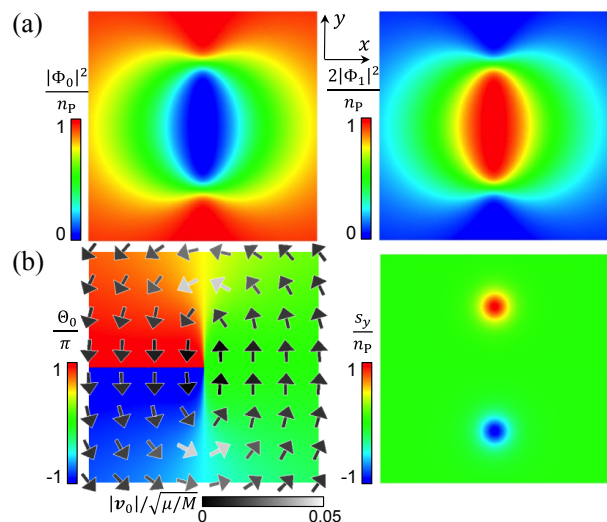
スピン相互作用(縦軸)と2次ゼーマン効果(横軸)を変化させたときのネマチックスピン渦の内部構造および安定性の相図。中央の破線の左側と右側のパラメータ領域で定常状態の内部構造が異なる。背景の黒い領域は渦が動的に安定となるパラメータ領域を示す。

### 4. S=1スピノールBECのPolar相におけるソリトンの相図 (竹内)

スピン自由度をもつ冷却ボース原子超流体であるスピノールBECのPolar(P)相におけるソリトンの内部状態を、2次ゼーマン効果とスピン相互作用を変数として振って理論・数値的に調べ、その相図を明らかにした。スピノールBECのP相では、変数の変化に応じて違う変数領域のバルクで実現するような状態(anti-ferromagnetic (AF) 状態, broken-axisymmetry (BA) 状態, ferromagnetic (F) 状態, Normal (N) 状態) が内部状態として現れることがわかった。この結果は実験的な検証が望まれるとともに、ソウル国立大学の実験グループによって実現された複合欠陥の動的振る舞いを部分的に説明するものである。得られた成果は国際会議 Laser Physicsおよび米国物理学会の分科会(DAMOP)にて発表済みであり、学術論文として米国物理学会誌Physical Review Researchに掲載された。なお、本研究は台湾の国立彰化師範大学および英国ニューキャッスル大学との国際共同研究によって得られた。

### 5. 量子楕円渦の理論的発見 (竹内)

冷却Na原子気体のスピン自由度を持つボース・アインシュタイン凝縮体(スピノールBEC)において、量子楕円渦と呼ばれる新奇な位相欠陥を理論的に発見した。本研究の目的は、韓国のソウル国立大学のY. Shin教授の実験グループとの国際共同研究[Phys. Rev. Lett. 122, 095301 (2019)]で発見された渦とドメイン壁の複合体(複合欠陥)の基本的な性質を理論的に解明することである。自発的対称性の破れを伴う相転移によって複合欠陥は生じるが、その非平衡ダイナミクスにおいてそれは不安定な状態であるとされ、最終的には何の変哲もない量子渦に分解されるものと予想されていた。ところが、このような複雑な構造が平衡状態においてもさえも維持されることが本研究により見出され、量子渦のジョーコフスキー変換として物理的に



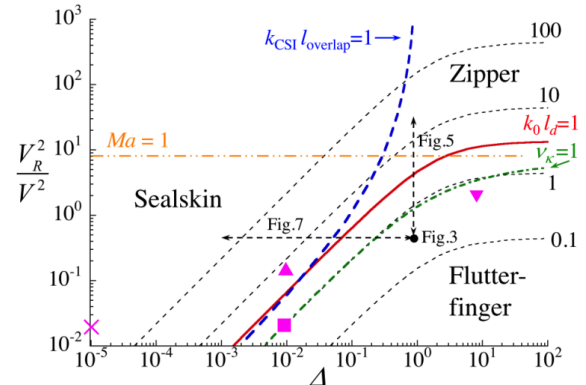
量子楕円渦の断面(数値計算結果) : (a)  $m = 0$ 成分の波動関数 $\Phi_0$ (左)と $m = \pm 1$ 成分の波動関数 $\Phi_1$ (右)の分布。(b)は $\Phi_0$ の位相(左)およびスピン密度の横成分(右)の分布。(b)の矢印は楕円状の超流動速度場を表している。



解釈できることを明らかにした（上図）．得られた成果は日本物理学会および米国物理学会の分科会（DAMOP）等で報告し，米国物理学会誌Physical Review Lettersに学術論文として掲載された．

## 6. 量子ケルビン・ヘルムホルツ不安定性のパターン形成の相図（竹内）

相分離した2成分BECでは位相欠陥としてドメイン壁が実現する．ドメイン壁に沿って相対速度を持つとき，量子ケルビン・ヘルムホルツ不安定性（KHI）が起こることが以前から知られていたが，そこで起こるパターン形成について系統的理解は得られていなかった．本研究では，相対速度とドメイン壁の厚みをパラメータとしてパターン形成の相図を求めた（右図）．二つのパラメータに応じて典型的に3種類のパターン形成が起こることが明らかになった．得られた成果は日本物理学会等で報告し，米国物理学会誌Physical Review Aに学術論文として掲載が決定している．なお，本研究は近畿大学の笠松准教授の研究グループとの共同研究である．



相分離した2成分BEC中の量子KHIにおけるパターン形成の相図．縦軸と横軸はそれぞれ相対速度( $V_R$ )と界面の厚み( $l_d$ )を特徴づけるパラメータ( $\Delta$ )に対応する．破線はウェーバー数( $We$ )の等値線を示す．

## 7. S=1スピノールBECのPolar相における量子渦の相図（竹内）

スピン自由度をもつ冷却ボース原子超流体であるスピノールBECのPolar (P)相における量子渦の内部状態を，2次ゼーマン効果とスピン相互作用を変数として振って理論・数値的に調べ，その相図を明らかにした．スピノールBECのP相では，変数の変化に応じて違う変数領域のバルクで実現する状態（anti-ferromagnetic (AF) 状態，broken-axisymmetry (BA) 状態，ferromagnetic (F) 状態，Normal (N) 状態）が内部状態として現れることがわかった．この結果は実験的な検証が望まれるとともに，ソウル国立大学の実験グループによって実現された複合欠陥の動的振る舞いを部分的に説明するものである．得られた成果は学術論文として米国物理学会誌Physical Review Aに掲載が決定している．

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. Sosuke Inui, Tomo Nakagawa, and Makoto Tsubota  
Bathtub vortex in superfluid  $^4\text{He}$   
Phys. Rev. B.102, 224511 (2020)
2. Junsik Han and Makoto Tsubota  
Annihilation and recurrence of vortex-antivortex pairs in two-component Bose-Einstein condensates  
Phys. Rev. A. 103, 053313(2021)
3. 湯井悟志、小林宏充、坪田誠  
量子乱流状態における超流動の2流体模型—量子渦と熱励起成分の相互作用が引き起こす奇妙な現象  
日本物理学会誌、第76巻第1号、pp28-31、2021
4. I-Kang Liu, Shih-Chuan Gou, Hiromitsu Takeuchi  
Phase Diagram of Solitons in the Polar Phase of a Spin-1 Bose-Einstein Condensate  
Phys. Rev. Research 2, 033506 (2020)

5. Andrew P. C. Underwood, D. Baillie, P. Blair Blakie, and H. Takeuchi  
Properties of a nematic spin vortex in an antiferromagnetic spin-1 Bose-Einstein condensate  
Phys. Rev. A 102, 023326 (2020)
6. Hiromitsu Takeuchi  
Quantum Elliptic Vortex in a Nematic-Spin Bose-Einstein Condensate  
Phys. Rev. Lett. 126, 195302 (2021)
7. Haruya Kokubo, Kenichi Kasamatsu, and Hiromitsu Takeuchi  
Pattern formation of quantum Kelvin-Helmholtz instability in binary superfluids  
Phys. Rev. A, in press (2021); arXiv:2104.13539
8. Hiromitsu Takeuchi  
Phase diagram of vortices in the polar phase of spin-1 Bose-Einstein condensates  
Phys. Rev. A, in press (2021); arXiv:2011.10342

### 国際会議講演

1. Sosuke Inui  
Dynamics of Localized Vortex Tangle in Superfluid 4He  
Quantized Vortices and Nonlinear Waves, Online workshop, February 18-19, 2021.
2. Junsik Han, Makoto Tsubota  
Annihilation and Recurrence of Vortex-Antivortex Pairs in Two-Component Bose-Einstein Condensates  
29th ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP, JULY 19-23, 2021
3. Yuto Sano, Makoto Tsubota  
Emergent Isotropy in a Matter-Wave Turbulent Cascade  
29th ANNUAL INTERNATIONAL LASER PHYSICS WORKSHOP, JULY 19-23, 2021
4. Hiromitsu Takeuchi  
Quantum elliptic vortex in the polar phase of a spin-1 Bose-Einstein condensate  
52nd Annual DAMOP Meeting, American Physical Society, 5.31–6.4 (2021)
5. I-Kang Liu, Shih-Chuan Gou, Hiromitsu Takeuchi  
Phase Diagram of Solitons in the Polar Phase of a Spin-1 Bose-Einstein Condensate  
52nd Annual DAMOP Meeting, American Physical Society, 5.31–6.4 (2021)

### 学会・研究会講演

(日本物理学会、2021年年次大会、2021.3.12-15)

1. 小久保治哉、笠松健一、竹内宏光  
超流動界面で生じるケルビン・ヘルムホルツ不安定性の量子・古典クロスオーバー
2. 竹内宏光  
半整数量子渦の分類とスピンの BEC における楕円渦
3. 湯井悟志、小林宏充、坪田誠、横田理央  
超流動 4He の熱対向流：常流体乱流が量子乱流に与える影響
4. 中川朋、乾聡介、坪田誠  
超流動 4He 量子渦タングルにおける自己相似構造の形成
5. 佐野融人、坪田誠  
ボース凝縮体における乱流の異方性とその波数依存性
6. 韓俊植、坪田誠  
2成分 Bose-Einstein 凝縮体中の渦の対消滅と再帰現象による対称性の回復

日本物理学会、2021 年年次大会、2021.3.12

(日本物理学会、2020 年秋季大会、2020.9.8-11)

7. 小林宏充、湯井悟志、坪田誠  
超流動  $4\text{He}$  における常流体の速度変動
8. 中川朋、乾聡介、坪田誠  
超流動  $4\text{He}$  の量子渦タングルのフラクタル次元
9. 乾聡介、中川朋、坪田誠  
超流動  $4\text{He}$  の吸い込み渦と量子渦の分布
10. 小久保治哉、笠松健一、竹内宏光  
対向流をもつ相分離した 2 成分ボース凝縮体における界面の非線形ダイナミクス
11. 乾聡介  
局所量子渦タングルのダイナミクス  
ヘリウム・オンラインセミナー 2021.6.18
12. H. Takeuchi  
Novel topological defects in pseudo-nematic superfluids  
FYR02 QLC meeting(online meeting), Dec, 22 (2020)
13. H. Takeuchi  
Non-axisymmetric vortices in spinor Bose-Einstein condensates with a nematic-spin order  
TQFT 2020: KEK 理論センター研究会 「熱場の量子論とその応用」 (online meeting), Aug, 24-26 (2020)

## 学位論文

### 修士論文

1. 岡崎佳純  
「Bose-Einstein 凝縮体における Faraday waves : 不安定性と非線形ダイナミクス」
2. 中川朋  
「超流動ヘリウムの量子乱流における統計則および自己相似性の数値的研究」
3. 佐野融人  
「原子気体ボース・アインシュタイン凝縮体における乱流の異方性」

## 研究助成金取得状況

1. 坪田誠 : 科研費基盤研究(B)  
「量子流体力学と量子乱流の研究」  
280万円
2. 乾聡介 : 特別研究員奨励費  
「超流動ヘリウムにおける量子流体力学と量子乱流の理論的および数値的研究」  
90万円
3. 韓俊植 : 特別研究員奨励費  
「二成分冷却原子気体における量子渦のダイナミクスと量子乱流の示す統計則」  
90万円
4. 竹内宏光 : 科研費基盤 (B) (分担)  
「2 原子種ボース凝縮体の相分離過程の可視化と動的スケーリング仮説の実験的検証」  
35万円

## その他

### 受賞

1. 本研究室のOBの湯井悟志(現慶應義塾大学)が、日本物理学会の「第15回若手奨励賞 領域6」、  
ならびに第37回井上研究奨励賞を受賞した。
2. 竹内宏光が、2020年の教員活動表彰「若手教員の教育研究活動」を受賞した。
3. 坪田誠が、教員活動表彰「特別表彰」、を受賞した。

### プレスリリース・解説記事

1. 竹内宏光  
「従来の認識を覆す発見！！自発的対称性の破れによって生じた謎の物体を解明」  
プレスリリース：<https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/2021/210524>  
マイナビニュース：<https://nordot.app/770631039420039168?c=388701204576175201>
2. Hiromitsu Takeuchi  
RESEARCH HIGHLIGHTS  
ANNUAL REPORT 2018-2019, NITEP, p.9-10  
URL: [https://www.nitep.osaka-cu.ac.jp/docs/NITEP\\_2018-2019.pdf](https://www.nitep.osaka-cu.ac.jp/docs/NITEP_2018-2019.pdf)

### その他

1. 竹内宏光：日本物理学会 代議員



# 電子相関物理学研究室

小栗 章 教授 堤 和彦 (D2) 和氣 康平 (M2) 寺杣 快仁 (B4)  
西川 裕規 講師 橋本 将史 (D1) 小林 良輔 (M1) 本山 海司 (B4)  
柳澤 優介 (B4)

## 研究概要

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

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

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

この研究のさらなる発展を現在進めており、三体非線形感受率を軌道数  $N$  の大きな極限から計算する  $1/(N-1)$  展開による計算も実施し、数値くりこみ群が適用できる  $N = 4, 6, 8$  などでは両者を比較し、電子間相互作用が大きい場合には良く一致することを示した。2020年度には、この結果の一部と非線形電流ノイズの振る舞いを総合的に論じた我々の論文は、Phys. Rev. Lett. 誌に掲載された。また、小林研介教授の実験グループでは、カーボンナノチューブ量子ドットにおける近藤状態を介した非線形応答電流・電流ノイズの精密測定に成功している。我々は、共同研究を通し理論と実験の比較し、量子ドット系の輸送係数の測定から実験的に三体非線形感受率を決定し、磁場中の量子ゆらぎの効果に関する新たな知見を得た。この結果は、最近、Nature Communications 誌に掲載された。

我々はまた、超伝導に接続された量子ドット系に関する研究では、量子相転移およびクローサーオーバーの問題に加え、複数の常伝導リードが接続された系で見られる交差アンドレーエフ散乱による非局所伝導に与える電子相関に関する問題に取り組んできた。この研究は、株式会社先端力学シミュレーション研究所の田中洋一氏および NTT 物性科学基礎研究所の山田康博氏との共

同研究で多端子系の近藤効果との競合を詳細に調べている．特に、三角形三重量子ドット系のアンドレーエフ散乱の Fermi 流体領域における振る舞いについて進展があり、解析を進めている．

## 研究内容の詳細

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

最近の研究テーマ：[1] カーボンナノチューブ、および2重量子ドットにおけるSU(4)近藤状態とSU(2)近藤状態のクロスオーバーと量子相転移に関する数値くりこみ群(NRG)による研究．[2] 超伝導体と接合された量子ドット系におけるAndreev散乱、Josephson位相、長岡強磁性、近藤効果の競合、および量子相転移・クロスオーバーに関する研究．[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き、 $1/(N-1)$  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  $\omega$  の有限な領域における振る舞いを含めた、より広いエネルギー範囲を視野にいたれた拡張を行っている。その成果のひとつとして、高エネルギー領域の振る舞いに関して発展が挙げられる：我々は熱的場の理論の拡張された Hilbert 空間に対応する Liouville-Fock 空間を用い、Anderson 模型の非平衡 Green 関数が高バイアスの極限における厳密解を導出し、高エネルギー領域における相互作用する電子系のダンピング効果が非エルミート有効ハミルトニアンによって決定されることを示した。このような逆の極限から、有限バイアス領域への拡張についても検討を進めている。

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

特に最近、電子-正孔非対称な Anderson 不純物模型の Green 関数の低エネルギーにおける漸近形を、厳密に求めることに成功した：近藤効果の低エネルギー領域では、輸送係数に Fermi 流体に特徴的な振動数  $\omega$ 、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  $\omega^2$ ,  $T^2$ ,  $(eV)^2$  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  $\omega^2$ ,  $T^2$ ,  $(eV)^2$  の項の係数の厳密な表式が、不純物準位を占有する電子数のゆらぎに関する 3 体の非線形感受率によって完全に決定されることを示した。我々の研究では、関連論文 [C. Mora et al., Phys. Rev. B **92**, 075120 (2015)] で現象論的に展開された議論に微視的かつより一般的な証明を与え、さらに実部を決定するために必要な 3 体の相関関数の表式と独立な成分の数を明らかにした。これらの結果によって、電子-正孔非対称な場合における輸送係数の系統的な計算を行うことが可能になった。さらに、熱伝導  $T^2$  項に現れ多体効果、およびの非線形電流ゆらぎへを含めた理論の拡張も行っている。

- [5] 我々は、反強磁性的相互作用で結合した2つの Anderson 模型の磁気的量子臨界現象において、Luttinger-Friedel 総和則の半整数性を伴った破れとその解釈（Luttinger 積分が量子臨界点で隔てられた2つの相を区別する電子相関由来のトポロジカル不変量になること）について既に研究してきた。この現象は、その物理的設定の普遍性と理論の形式性の観点から、固体電子系を含むその他の強相関電子系に対してもある程度の普遍性を持って存在すると期待できる。そこでこの普遍性を示すために、次に挙げる系の量子相転移を対象にして Luttinger-Friedel 総和則の半整数性を伴う破れを見出すことを試み研究継続している；「磁性的相互作用で結合した2, 3, 4軌道量子不純物系（多軌道なので Lieb フェリ磁性など多彩な磁性状態の局所版が考察可能）での、近藤効果と磁性秩序の競合」、「異方的な強磁性相互作用で結合した2軌道量子不純物系の、異方的強さの競合」、「軌道間斥力で結合した2軌道量子不純物系の、近藤効果と局所電荷秩序の競合」、「軌道間引力で結合した2軌道量子不純物系の、近藤効果と局所クーパーペアの競合」。2020年度は「異方的な強磁性相互作用で結合した2軌道量子不純物系の、異方的強さの競合」についての研究を進めた。またこの現象の理論的な理解のため、現象論的な方法（特異な散乱問題）と多体理論的な方法（粒子数と化学ポテンシャルの関係等）の2つのアプローチで研究している。
- [6] 4重量子ドット上の Lieb 磁性、Nagaoka 強磁性状態と、これらに接続された電子溜（リード線）からの伝導電子による Kondo 効果の研究を継続して行った。2020年度は特に4重量子ドット上の Lieb 磁性を利用して、これを通した電流の制御等の考察を行うため、広範囲のパラメータ領域に対する計算（特に相互作用依存性）を実行した。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. “Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid”, Tokuro Hata, Yoshimichi Teratani, Tomonori Arakawa, Sanghyun Lee, Meydi Ferrier, Richard Deblock, Rui Sakano, Akira Oguri, and Kensuke Kobayashi, *Nat. Commun.* **12**, 3233 (2021) [7 pages]
2. Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, Tokuro Hata, Tomonori Arakawa, Meydi Ferrier, Kensuke Kobayashi, and Akira Oguri, “Field-induced SU(4) to SU(2) Kondo crossover in a half-filling nanotube dot: spectral and finite-temperature properties”, *Phys. Rev. B* **102**, 165106 (2020) [23 pages].
3. Yoshimichi Teratani, Rui Sakano, and Akira Oguri, “Fermi liquid theory for nonlinear transport through a multilevel Anderson impurity”, *Phys. Rev. Lett.* **125**, 216801 (2020) [6 pages]

### 国際会議講演

1. Yoshimichi Teratani, and Akira Oguri, “Effects of three-body correlations on nonlinear current noise through an N-level Anderson impurity: NRG and large N studies”, Yoshimichi Teratani, Akira Oguri, and , Rui Sakano, American Physical Society March Meeting (March 15-19, 2021, ONLINE)
2. Akira Oguri, “Fermi liquid theory for nonequilibrium Kondo effect”, 10th WorkShop on Semiconductor/Superconductor Quantum Coherence effect and Quantum information (December 17-18, 2020, ONLINE)

## 学会・研究会講演

1. 非平衡近藤効果の Fermi 流体論：三体相関による補正,  
小栗章,  
日本物理学会 (2021.3. 12-15, オンライン開催)
2. 非対称なトンネル結合を持つ SU(4) 量子ドット系における 3 体 Fermi 流体補正,  
堤和彦, 寺谷義道, 阪野壘, 小栗章,  
日本物理学会 (2021.3. 12-15, オンライン開催)
3. 斥力 U 無限大不純物 Anderson 模型における高次 Fermi 流体補正,  
和氣康平, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,  
日本物理学会 (2021.3. 12-15, オンライン開催)
4. 三重量子ドット系における非局所 Andreev 散乱の数値くりこみ群による研究,  
橋本将史, 寺谷義道, 小栗章, 山田康博, 田中洋一,  
日本物理学会 (2021.3. 12-15, オンライン開催)
5. 非平衡近藤系における準粒子衝突積分と電流ノイズの微視的 Fermi 流体論,  
小栗章, 寺谷義道, 阪野壘,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
6. N 個の局在準位を持つ量子ドットを透過する電流および電流揺らぎに表れる非線形 Fermi 流  
体補正,  
寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
7.  $1/(N-1)$  展開による SU(N) Anderson 不純物模型の解析：非平衡輸送に対する 3 体相関の効  
果,  
寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
8. 電子正孔非対称な量子ドットにおける非線形電流の磁場依存性に関する近藤スケーリング,  
堤和彦, 寺谷義道, 小栗章, 阪野壘,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
9. 三角形三重量子ドット系における非局所 Andreev 散乱と近藤効果,  
橋本将史, 寺谷義道, 小栗章, 山田康博, 田中洋一,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
10. bipartite-4 重量子ドット系のコンダクタンスの相互作用依存性,  
徳田将志, 西川裕規,  
日本物理学会 (2021.3. 12-15, オンライン開催)
11. 量子不純物系の量子臨界現象と Luttinger-Friedel 総和則：トポロジカル不変量としての Lut-  
tinger 積分,  
西川 裕規,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)
12. 4 重量子ドットにおける Lieb フェリ磁性に対する近藤効果とコンダクタンス,  
徳田将志, 西川裕規,  
日本物理学会 (2020.9. 8-11, オンライン開催)

## その他

1. 阪野壘、小栗章、寺谷義道、  
“無数の電子の協力現象「量子液体」 – 人工原子×数理的アプローチで、その隠された性質

に迫る”,  
アカデミストジャーナル (ONLINE:2021.3.4)  
<https://academist-cf.com/journal/?p=15521>

2. 英語プレスリリース (2020.12.24)、  
Theory describes quantum phenomenon in nanomaterials;  
Eurek Alert !,  
[https://www.eurekalert.org/pub\\_releases/2020-12/ocu-tdq122320.php](https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-12/ocu-tdq122320.php)
3. 国内プレスリリース (2020.11.18)、  
数理的手法を用いて成功！～ナノスケール物質に生成された量子多体状態の普遍的性質を解明～  
<https://www.osaka-cu.ac.jp/ja/news/2020/201118>

## 学位論文

### 修士論文

1. 和氣 康平: 不純物 Anderson 模型の強相関  $U=\infty$  極限における高次フェルミ流体補正

## 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」 80 万円 (直接経費)

## 海外出張および海外研修

# レーザー量子物理学研究室

井上慎	教授	谷澤昂樹 (M2)	木下晃瑠 (B4)
堀越宗一	特任准教授	小林一平 (M1)	船波寛史 (B4)
加藤宏平	特任助教	京谷隆正 (M1)	

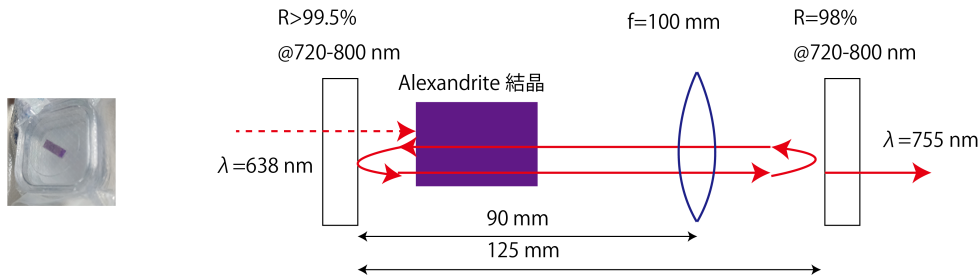
## 研究概要

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

我々は K 原子と Rb 原子からなる混合ボース凝縮体の系を用いた非平衡ダイナミクスの観測を目指している。フェッシュバハ共鳴を用いることで粒子間の相互作用を示すパラメータである、散乱長を自在に制御することができる。これによって、例えば二種のボース凝縮体を混合状態にして重ね合わせた後、急激に相互作用を変化（クエンチ）させることで相分離を開始させるといった実験が容易に実現可能である。クエンチによって生じたドメインがどの様に成長するかは非常に興味深い問題である。例えばこの成長過程で、ドメインの大きさ分布を時刻ごとにリスケールすると、どの時刻でも変わらず普遍的な関数に帰着することが期待されており、これを動的スケーリング仮説と呼ぶ。この仮説はイジング模型 やねじれネマチック液晶といった物性系の相転移だけにとどまらず、初期宇宙といった広大なスケールの相転移にまで同様に当てはまると期待されており、普遍的な非平衡現象として非常に興味深い。

相分離現象を観測するうえで、ボース凝縮体を捕獲する光トラップの非一様性は密度の非一様性に帰着し、実験結果の解析を複雑にする。特に我々の様に異原子種の混合系を用いる場合は、共鳴波長の違いを利用した各原子種の個別操作が可能である一方で、質量の違いによるトラップ位置のずれや各原子が感じるトラップポテンシャルの違いによりボース凝縮体のオーバーラップが小さくなってしまいうという問題がある。そこで我々は、斥力の光ポテンシャルを用いて原子を光のない領域に閉じ込める、いわゆる箱型トラップを実装することにした。特に重力方向を強く閉じ込めた二次元箱型トラップを実現することで、ボース凝縮体同士のオーバーラップを最大化した、一様混合系を実現する。

箱型トラップの作成には、当初半導体レーザーを用いていたが、利用する波長（755 nm 付近）が発振波長の端にある為、利用できる出力は 100-200mW 程度に留まる。そこで出力の増大（数 W 程度）を目指しアレキサンドライト結晶（図 1）を用いた半導体励起固体レーザーの開発を行った。これにより、トラップ領域の拡大や閉じ込めポテンシャルによる原子間相互作用の制御等が可能になる。実際にレーザーを作成する前にまず、レーザー共振器の設計を行った。共振器の設計には励起レーザーの吸収によって結晶の温度が上昇し、屈折率が変化する熱レンズ効果を考慮する事が重要である。NeYVO4 結晶を用いた先行研究では熱レンズ効果を積極的に活用した共振器の設計が報告されているが、アレキサンドライト結晶を用いたレーザーの作成はまだ報告が少ないため、熱レンズ効果が想定よりも強く働きすぎる懸念がある。従ってレーザー発振モードの焦点付近に結晶を置くことで熱レンズ効果に余り影響を受けない共振器を設計した。現在結晶の特性評価やレーザー共振器の構築に取り組んでいる。



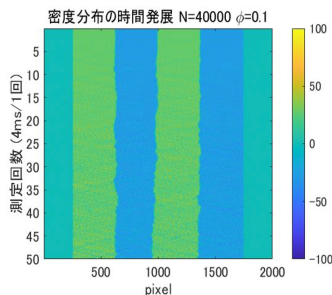
Alexandrite 結晶

レーザー共振器の設計

## 2. 位相コントラストイメージングの測定の反作用の解析(船波、井上、加藤)

ボース・アインシュタイン凝縮をはじめとする冷却原子気体の実時間観測においては、位相コントラストイメージング法がよく用いられる。この方法では原子の共鳴周波数から数百 MHz 離調したプローブ光を用いて、原子気体によるプローブ光の吸収ではなく、位相のシフト量を測定する。もしプローブ光の吸収が完全に無視できてしまえば、位相コントラストイメージングのハミルトニアンは量子非破壊測定を構成するため、「非破壊イメージングである」と言える。もちろん、非破壊であっても量子系から情報を得ているため、測定の反作用は存在するが、通常の BEC の実験においてはこの「イメージングによる反作用」は重視されてこなかった。イメージングに使う光の強度の設定には、「非共鳴でもわずかに残る吸収の影響が小さいこと」「BEC が超放射を起こさないこと」が重視されてきた。

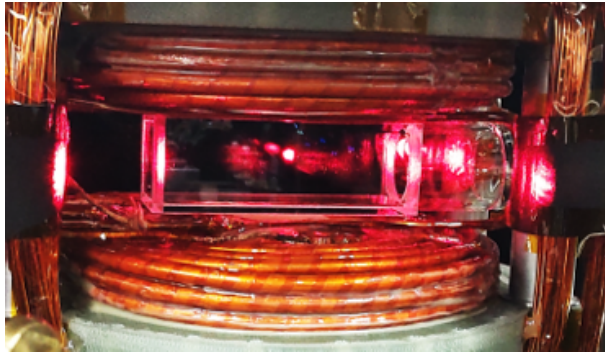
しかし近年、弱測定の理論を位相コントラストイメージングに応用し、数値計算で「測定の反作用」を評価する方法が NIST の Spielman らのグループによって開発された。本方法を用いると、プローブ光の非共鳴の吸収による原子気体のエネルギーの上昇と、測定の反作用による多成分 BEC のドメイン壁の移動を数値計算で同時に評価できる。我々は本方法を箱型ポテンシャルに閉じ込められた多成分ボース凝縮体に応用した。本研究成果は卒業研究発表および南部・アインシュタインセミナーで発表された。



## 3. 冷却リチウム 6 原子実験の立ち上げ(堀越)

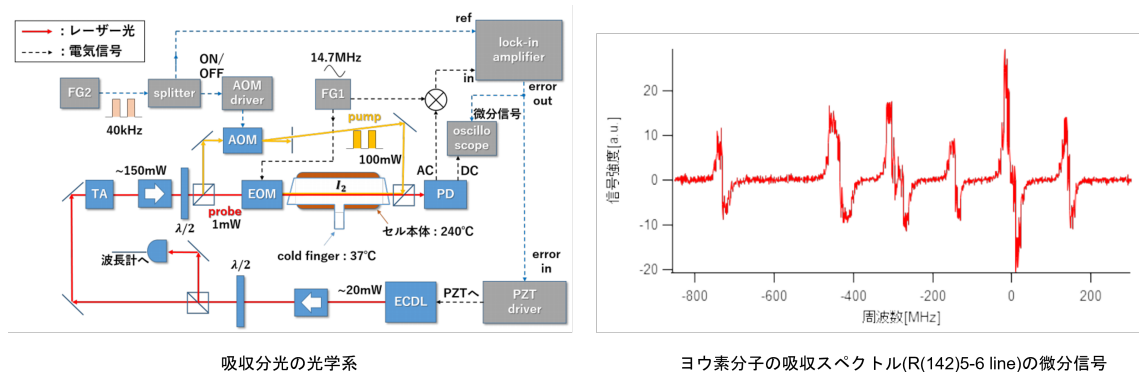
リチウム 6 原子は粒子間相互作用が外部磁場で制御可能なフェルミ粒子であり、量子シミュレーションとしての応用が期待されている。実際我々はこれまで散乱長が非常に大きいフェルミ粒子系をリチウム 6 原子系で実現し、その物性研究や中性子星への応用を進めてきた。現在我々は新たな量子シミュレーションとして弱く束縛しているフェルミ対から成る量子多体系の物性研究、スピンインバランス系を用いた負符号問題に対する実験的アプローチ、また量子クラスターを用いた多原子分子への光会合等に向けて実験装置の開発を進めている。2020 年度はレーザー冷却実験の真空系、光学系、制御系、観測系などの開発が済み、下の写真のように約  $10^8$  個のリチウム 6 原子を  $900\mu\text{K}$  にまで冷却することに成功した。今後光トラップへ移行し蒸発冷却を行うことでフェルミ超流動状態が実現できる。





#### 4. ヨウ素安定化半導体レーザーシステムの開発(谷澤、堀越)

リチウム原子のレーザー冷却やその内部状態の操作には670nm領域のレーザー光源が必要になる。これまでではリチウムオーブンを作成しリチウム原子の吸収分光によりレーザー光の周波数を安定化しているが、リチウムオーブンは寿命があるために定期的な原子の充填が必要であることや、リチウム原子の吸収近傍の周波数のみでしか周波数を安定化できないという問題がある。そこで我々は振動回転スペクトルが671nm帯に多く存在しメンテナンスフリーで半永久的に用いることができるヨウ素セルを用いた半導体レーザーの安定化システムを開発した。下左図が分光システムの光学システムであり、ヨウ素のわずかな吸収を捉えるためにロックイン検波を導入した。下右図が実際観測された吸収スペクトルの微分信号である。我々はこの微分信号を用いて半導体レーザーの周波数を安定化しリチウム原子のレーザー冷却を実現した。本研究成果は日本物理学会2020年秋季大会で報告した。



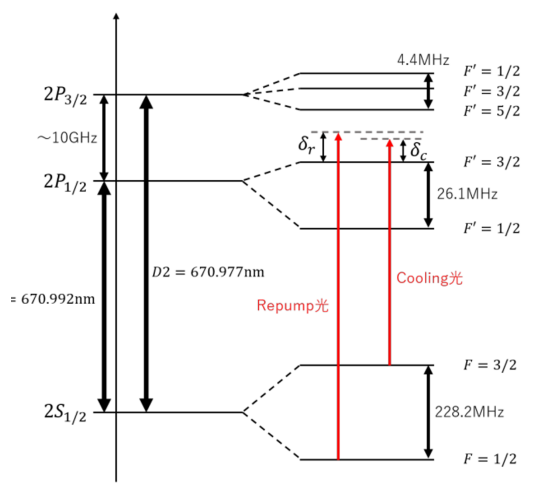
吸収分光の光学系

ヨウ素分子の吸収スペクトル(R(142)5-6 line)の微分信号

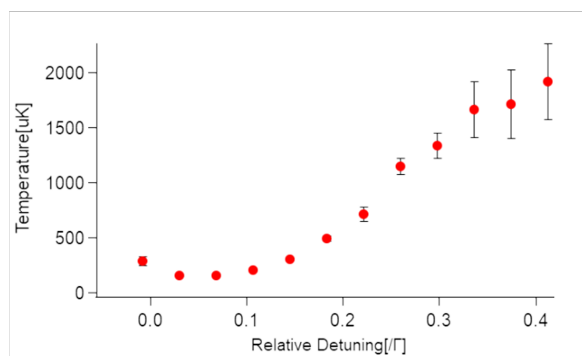
#### 5. グレーモラセスによるリチウム6原子の冷却(谷澤、堀越)

冷却原子生成の手段として一般的に用いられる磁気光学トラップ (以下 MOT) にはドップラー冷却限界温度と呼ばれる冷却の理論的下限值が存在する。その冷却限界温度以下にまで冷却できる方法として偏光勾配冷却と呼ばれる方法が存在する。偏光勾配冷却は多くのアルカリ原子に対して原子の共鳴周波数よりも低い周波数 (負の離調) の光を用いる方法が使われてきたが、リチウム6原子は内部構造の理由からこの手法は適用できない。しかし従来とは逆の、正の離調の光を用いるグレーモラセス冷却という手法を用いることによりリチウム6原子に対しドップラー冷却限界以下に冷やすことが可能になる。特に本手法は光トラップ中でも働くことが見込まれ、これまでの実験手順に比べて最終的に得られる超流動状態のフェルミ原子の数を大きく改善できる可能性がある。これは実験の S/N を向上できるだけでなく、より低温のフェルミ粒子系を実現できる点で極めて重要である。本研究ではグレーモラセス冷却の導入にあたって、MOT との両立が可能であり冷却に適した周波数、強度を持った光を用意できる光学系を設計、及び実装した。冷却手順として MOT、Compression MOT、Gray Molasses Cooling を行い、各段階における原子数、温度、位相空間密度などを評価した。下左図にリチウム6原子のエネルギー準位図を示した。グレーモラセス冷却は電子基底状態の2つの超微細構造から、 $2P_{1/2}$  への D1 線を用いる。これら Cooling 光と Repump 光の離調 ( $\delta_c, \delta_r$ ) を最適化することによりグレーモラセス冷却を実現する。下右図がグレーモ

ラセス冷却が実現されている実験データの一例である。横軸は相対離調 ( $\delta_c - \delta_r$ ) を示しており、この実験データは  $\delta_c = 30\text{MHz}$  で固定している。D1 線の線幅は  $\Gamma/2\pi \sim 6\text{MHz}$  であり、その線幅以下で冷却温度が変化していることからグレーモラセス冷却が働いていることが確認できた。本研究ではグレーモラセス冷却で  $164\mu\text{K}$  まで冷却できたが、更なる条件出して  $100\mu\text{K}$  以下にまで冷却できることが見込まれる。本研究成果は修士論文にまとめられた。



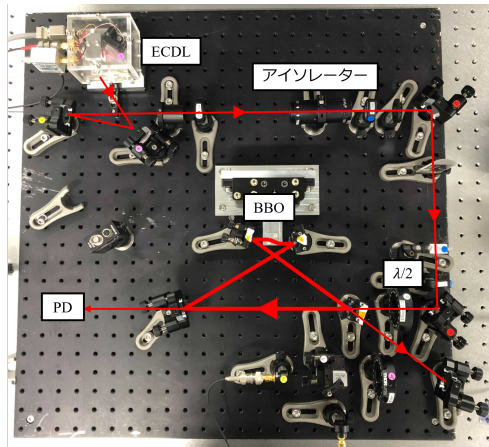
リチウム6原子のエネルギー構造



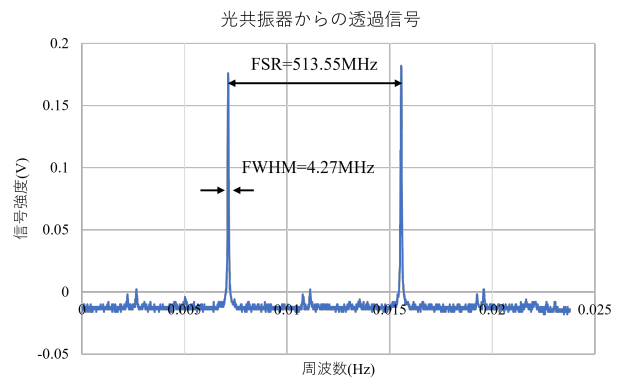
グレーモラセス冷却の相対離調依存性

## 6. 二次高調波発生による 323nm 光源の開発(木下、堀越)

一般的なリチウム原子のレーザー冷却は  $2S \rightarrow 2P$  遷移を用い、線幅  $5.9\text{MHz}$  で決まる冷却限界温度は  $140\mu\text{K}$  である。 $2S \rightarrow 3P$  遷移は  $159\text{kHz}$  という狭い線幅を有しており、この遷移を用いると冷却限界温度を  $18\mu\text{K}$  まで下げることができ、後の光トラップへの移行効率を大きく改善できる。また、分光データの少ない  $2S-3P$  から成る分子状態の精密分光や、内部状態の光操作による実吸収由来の悪影響を軽減することも望まれる。そこで我々は  $2S \rightarrow 3P$  遷移のための  $323\text{nm}$  の光源開発に着手した。 $323\text{nm}$  で直接レーザー発振する半導体レーザーが存在しないため、 $646\text{nm}$  のレーザー光を非線形結晶 BBO で二次高調波発生 (SHG) させる手法を選択した。BBO 結晶による SHG の変換効率が小さいため、Bow-tie 型のエンハンスメント共振器を用いた SHG システムの設計を行った。特に長期的な安定度が実現できる共振器の設計指針で行い、その条件下で変換効率が最大となる条件出しを数値的に行った。下左図が本設計に従い配置されたエンハンスメント共振器であり、共振器内に BBO 結晶を配置している。下右図が基本波を共振器に結合させたときの透過スペクトルであり、レーザー光の周波数を掃引することで観測している。本研究により共振器としての安定度は確認された。今後共振器長の安定化と、テーパアンプを用いた基本波のパワー増幅を行うことにより、 $323\text{nm}$  の発生が実現される。本研究成果は新学術「クラスター階層」第2回検出器ワークショップで報告した。



エンハンスメント共振器中BBO結晶を用いたSHGの光学系



左図のフォトディテクター(PD)で観測した共振器の透過スペクトル

## 教育・研究業績

### 国際学会・研究会講演

1. Shin Inouye, “Measurement of the Variation of Electron-to-Proton Mass Ratio Using Ultracold Molecules Produced from Laser-Cooled Atoms”, 51st Annual Meeting of the APS Division of Atomic, Molecular and Optical Physics, 2020/6/3, オンライン開催. (招待講演)
2. Shin Inouye, “Measurement of the Variation of Electron-to-Proton Mass Ratio Using Ultracold Molecules Produced from Laser-Cooled Atoms”, SNP and CLUSHIQ Seminar, 2020/12/11, オンライン開催. (招待講演)
3. Munekazu Horikoshi, “Ultracold AMO experiment for quantum few-body and many-body”, SNP and CLUSHIQ Seminar, 2020/6/22, オンライン開催. (招待講演)

### 国内学会・研究会講演

1. 堀越 宗一：「冷却原子で探る普遍的な少数・多体物理」 Hokkaido Nuclear Theory Group School 2021, 2021/2/15, オンライン開催.
2. 堀越 宗一：「BBO 結晶を用いた二次高調波発生による 323nm レーザー光源の準備」 新学術「クラスター階層」第2回検出器ワークショップ, 2020/12/21, オンライン開催.
3. 堀越 宗一：「分子形成時における角運動量の合成とそれに伴う磁気モーメント・電気双極子モーメントの変化」 第8回「物質階層を横断する会」, 2020/12/18, オンライン開催.
4. 谷澤昂樹, 堀越宗一, 加藤宏平, 井上慎：「ヨウ素安定化 671nm 外部共振器型半導体レーザーの実現と冷却リチウム原子実験への応用」, 2020 年日本物理学会秋季大会, 10aA2-6, 2020 年 9 月 10 日、オンライン開催.
5. 谷澤昂樹：「ヨウ素分子安定化 671nm ECDL の実現と冷却 Li 原子実験への応用」, 第2回冷却原子研究会「アトムの会」, 2020 年 9 月 28 日、オンライン開催.

### 主催研究会

1. 第2回冷却原子研究会「アトムの会」 (井上、堀越、加藤), 2020 年 9 月 28 日-29 日, オンライン開催.
2. 第8回「アトムの会」オンラインセミナー (井上、堀越、加藤), 2020 年 10 月 9 日, オンライン開催.

3. 第7回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年9月17日，オンライン開催。
4. 第6回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年8月26日，オンライン開催。
5. 第5回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年8月6日，オンライン開催。
6. 第4回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年7月28日，オンライン開催。
7. 第3回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年7月2日，オンライン開催。
8. 第2回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年6月16日，オンライン開催。
9. 第1回「アトム一会」オンラインセミナー（井上、堀越、加藤），2020年6月5日，オンライン開催。

## 研究助成金取得状況

1. 堀越宗一：新学術領域研究(研究領域提案型)計画研究 代表 「物質の階層変化および状態変化に伴う普遍的物理」  
2020年度: 18,720千円(直接経費: 14,400千円、間接経費: 4,320千円)
2. 井上慎：科研費 基盤研究(B) 代表  
(研究分担者: 竹内宏光、藤本和也(名古屋大学)、加藤宏平)  
「2原子種ボース凝縮体の相分離過程の可視化と動的スケーリング仮説の実験的検証」  
2020年度: 6,630千円(直接経費: 5,100千円、間接経費: 1,530千円)
3. 加藤宏平：科研費 若手研究 代表  
「強い閉じ込めポテンシャル中の普遍的な少数分子状態の観測と安定化法の探索」  
2020年度: 2,340千円(直接経費: 1,800千円、間接経費: 540千円)

# 宇宙線物理学研究室

荻尾彰一	教授	尾村勇吾 (D2)	福島涼 (M1)
常定芳基	准教授	藤田慧太郎 (D2)	有村龍平 (B4)
Jihyun Kim	研究員	松宮弘幸 (M2)	岩崎葵 (B4)
Rosa Mayta Palacios	研究員	佐藤光希 (M1)	西岡美咲 (B4)
多米田裕一郎	客員講師	荒井優斗 (M1)	
大嶋晃敏	客員准教授	木村優介 (M1)	
小島浩司	客員教授	津田涼輔 (M1)	

## 研究概要

1. 宇宙線望遠鏡実験 (Telescope Array 実験、TA 実験) (荻尾、常定、Kim, Mayta、藤田、尾村、松宮、佐藤、荒井、木村、津田、福島、有村、岩崎、西岡)

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しい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  $700 \text{ km}^2$  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 9 年分の観測データを用いた解析では、宇宙のある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を与えると期待されている。

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安定稼働のための作業にも積極的に参加している。2020 年度は特に以下の研究課題に取り組んだ。

- (a) 大気蛍光望遠鏡のためのデータ解析 (藤田)
  - (b) 超高エネルギー宇宙線の到来方向分布解析、特に銀河「フィラメント」との相関解析 (Kim)
  - (c) 空気シャワー最前面の粒子到来時間および「厚み」の距離・方向依存性解析 (Mayta)
  - (d) 超高エネルギー宇宙線の到来方向分布解析、特に銀河座標系での周期解析 (木村)
2. TA×4 実験、TALE 実験 (荻尾、常定、Kim, Mayta, 藤田、尾村、松宮、佐藤、荒井、津田、有村、岩崎、西岡)

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。今年度は TA×4 の検出器設置が完了し、定常的なデータ取得と解析が始まった。

また同時に、TA 実験の感度を  $10^{17}$  eV 以下に拡張し、 $10^{17}$  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、2015 年度に予算が認められた。

本研究室は TALE 実験の代表研究機関であり、2020 年度は、研究室全体で TA 実験、TALE 実験のリモート運用を継続しつつ、特に以下の研究課題に取り組んだ。

- (a) TA × 4 実験のサブアレイ境界に落ちたシャワーイベントをトリガーしてデータ取得するための「境界トリガー」の開発と性能評価（松宮）。
- (b) TALE 実験地表検出器アレイと大気蛍光望遠鏡による同時検出事象のデータ解析プログラムの開発、性能評価（藤田）
- (c) TALE 実験地表検出器アレイのためのデータ解析プログラムの開発、アレイの性能評価（佐藤）
- (d) TALE 実験地表検出器アレイで観測される  $10^{18}$  eV 領域宇宙線のシャワー面形状の研究（有村）
- (e) TALE 実験のハイブリッド観測感度をさらに低エネルギーに拡張するために追加設置される地表検出器配置の検討と性能評価（岩崎）

### 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、福島、津田）

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 年度から観測がスタートしており、宇宙線のエネルギースペクトルと原子核組成決定のためのデータ解析が進められている。

### 4. 銀河系宇宙線の伝播のシミュレーション研究（西岡、常定）

銀河系宇宙線は、超新星残骸で加速されて高いエネルギーを獲得し、銀河磁場でみだされた星間空間を長い時間かけて複雑な経路をたどりながら伝播していると考えられている。宇宙線伝播は拡散で記述されると一般に考えられてはいるが、銀河磁場の影響によって非等方的な拡散をしているはずである。本研究室では、非等方的な場合の宇宙線拡散のモデルを構築することに成功し、銀河系内の超新星の発生率、銀河系内の空間分布や星間空間での相互作用を考慮した解析的伝播計算を行い、地球で観測される宇宙線のエネルギースペクトルと原子核組成がどのようになるかを予測した。この結果は、TALE による観測結果と直接比較できることが期待される。

### 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、観測が始まった。



宇宙線・宇宙電子検出器、ガンマ線バースト現象を捉えるための専用検出器 (CGBM) は順調に稼動しており、データ解析が進められている。2020 年度は宇宙線炭素原子核・酸素原子核を分離してのエネルギースペクトルを得ることに成功するなど、画期的な成果をあげた。

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

エネルギーが  $10^{15}\sim 10^{16}$  eV 程度の宇宙線は、エネルギースペクトルに折れ曲がりが存在し、さらに銀河系内の超新星残骸などにおける加速の最高エネルギーと考えられていることもあって非常に重要なエネルギー領域である。このエネルギーの宇宙線は地表 (海拔 0m) には到達しないため、高山で観測を行う必要がある。この実験は南米アンデス山脈の 5,000 m 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、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 4,800 m の高原において新たな宇宙線観測プロジェクトを立ち上げることが現地のサンアンドレス大学とも合意された。全メンバーの投票によって、プロジェクト名は ALPACA と決定した。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 4,800 m 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。2020 年度には検出器設置場所のインフラ整備、観測小屋が完成し、検出器の設置もはじまった。

#### 7. GRAPES-3 実験による空気シャワー観測とミューオン観測 (小島、林、大嶋)

2020 年 2 月～3 月にインド側共同研究者 (S.K.Gupta 氏と P.K.Mohanty 氏) が日本に滞在し研究打合せを行なった。一方、新型コロナウイルスの世界的流行により、3 月中に予定していた日本側研究者 (大嶋・小島) によるインド渡航が取りやめになった。2020 年度に入ってから、引き続き国内外での新型コロナウイルスの流行が治まらなかったため、ほぼ全ての共同研究活動が影響を受け計画通りに進めることができなかった。本研究における主要協力機関であるインド・タタ基礎研究所においては、インド全土におよぶ都市封鎖が長期に亘ったこと、とくに GRAPES-3 のあるタミルナドゥ州 Ooty への侵入が著しく制限され、インド側共同研究者でさえも観測施設に行くことが困難な状況が続いたため、建設中のミューオン検出器の工事も滞った。2020 年度は、このような状況であったが、オンラインによるグループミーティングは随時行なわれており、データ解析に関する打合せと、実験進捗の報告がそれぞれ週 1 回程度で行なわれている。また、以下に示す学術論文の発表と各種学会・研究会での発表を行なった。

#### 8. 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を目的として TA 実験の拡張計画である TA × 4 実験が開始したように、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 (CRAFT, Cosmic Ray Air Fluorescence Fresnel-lens Telescope) を多米田が主導し開発している。2020 年度は、宇宙線空気シャワー再構成手法の開発を進め、シャワージオメトリーとエネルギーを決定することができることを示した。また、再構成の決定精度向上を目的とした検出器構成の最適化を進めている。これらの成果は、日本物理学会 2020 年秋季大会, 第 76 回年次大会などで報告された。

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

宇宙には暗黒物質の存在が確実視されており、様々な実験により暗黒物質の探索が行われているが、未だ発見には至っていない。本研究では、暗黒物質の候補の一つである Nuclearite

の探索を行っている。Nuclearite とは、マイクロサイズのスレンジクォーク体 (SQM) が電子を捕獲し電氣的に中性化したものであり、宇宙開闢の時期や中性子同士の衝突などで生成されると考えられている。2020 年度は、TA 実験サイトへの定常設置を目的に電力時給システムを設計し、日本国内において稼働試験を行っている。また、遠隔操作システムの開発も進めている。これらの成果は、日本物理学会などで報告された。

## 教養論文研究業績

1. "Search for point sources of ultra-high energy photons with the Telescope Array surface detector", *MNRAS*, **492**, 3984 (2020)
2. "Search for Ultra-High-Energy Neutrinos with the Telescope Array Surface Detector", *JETP*, **152**, 282 (2020)
3. "Observation of the Origin of Downward Terrestrial Gamma-Ray Flashes", *J. Geophys. Res.*, **125**, 031840 (2020)
4. "CALET on the International Space Station: the first three years of observations", *Physica Scripta*, **95**, 074012 (2020)
5. "Search for a large-scale anisotropy on arrival directions of ultrahigh-energy cosmic rays observed with the Telescope Array Experiment", *Astrophys. J. Lett.*, **898**, L20 (2020)
6. "Evidence for a Supergalactic Structure of Magnetic Deflection Multiplets of Ultra-High Energy Cosmic Rays", **899**, 86 (2020)
7. "Using Deep Learning to Enhance Event Geometry Reconstruction for the Telescope Array Surface Detector", *Machine Learning: Science and Technology*, **2**, 015006 (2020)
8. "Measurement of the proton-air cross section with Telescope Array 's Black Rock Mesa and Long Ridge fluorescence detectors, and surface array in hybrid mode", *Phys. Rev. D*, **102**, 062004 (2020)
9. "Direct Measurement of the Cosmic-Ray Carbon and Oxygen Spectra from 10 GeV/n to 2.2 TeV/n with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station", *Phys. Rev. Lett.*, **125**, 251102 (2020)
10. "Simulation of atmospheric pressure dependence on GRAPES-3 particle density", M. Zuberi *et al.*, *Experimental Astronomy* **49**, 61–71 (2020)
11. "The angular resolution of GRAPES-3 EAS array after improved timing and shower front curvature correction based on age and size", V.B.Jhansi *et al.*, *Journal of Cosmology and Astroparticle Physics*, **07** (2020)024
12. "Energy sensitivity of the GRAPES-3 EAS array for primary cosmic ray protons", B.Hariharan *et al.*, *Experimental Astronomy*, **50**, 185–198 (2020)

## 国際会議講演

1. 尾村勇吾： "NICHE detector and analysis results", Connecting high-energy astroparticle physics for origins of cosmic rays and future perspectives, Kyoto University, Japan, December 2020
2. 藤田慧太郎： AAPPS-DACG Workshop 2020, Latest results from Telescope Array Experiment on the Ultra High Energy Cosmic Rays, 2020/11/09



## 学会・研究会講演

1. 佐藤光希：「TA 実験 343：TALE-SD によるエネルギー決定精度の評価」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日、オンライン開催
2. Rosa Mayta Palacios, 「TA 実験 346：Time structure analysis of extensive air showers using the Telescope Array Data」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日、オンライン開催
3. 藤田慧太郎：「TA 実験 348：TALE 実験大気蛍光望遠鏡を用いた単眼観測によるデータの解析」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日、オンライン開催
4. 尾村勇吾：「TA 実験 351：jNICHE - TA サイトにおける空気チェレンコフ光観測による観測データ解析結果」、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 9 月 14 日、オンライン開催
5. 荒井優斗：「TA 実験 355：TALE 実験全体報告 6」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 13 日、オンライン開催
6. 藤田慧太郎：「TA 実験 356：TALE 実験ハイブリッド観測によるデータの解析」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 13 日、オンライン開催
7. 佐藤光希：「TA 実験 357：TALE-SD アレイで測定された 2nd knee 領域宇宙線のエネルギースペクトル」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 13 日、オンライン開催
8. 津田涼輔：「TA 実験 363：DNN による j-NICHE 空気シャワーイベント再構成」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月 13 日、オンライン開催
9. 多米田裕一郎：「超高エネルギー宇宙線地上観測将来計画」、2020 年度第 1 回 CRC 将来計画タウンミーティング、2020 年 9 月 18 日、オンライン
10. 多米田裕一郎：「Simple FD Array for UHECR Observation」、第四回 空気シャワー観測による宇宙線の起源探索勉強会、2021 年 3 月 23 日、オンライン
11. 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 (25)」、日本物理学・秋季大会、2020 年 9 月、オンライン開催
12. 大嶋晃敏：「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」、2020 年度東京大学宇宙線研究所共同利用研究成果発表会、2021 年 2 月、オンライン開催
13. 小島浩司：「GRAPES-3 宇宙線望遠鏡観測により得られた宇宙線強度異方性天球面 2 次元構造について」、令和 2 年度年度 ISEE 合同研究会、2021 年 2 月、オンライン開催
14. 大嶋晃敏：「GRAPES-3 大気ミュオン観測による宇宙天気研究」、令和 2 年度年度 ISEE 合同研究会、2021 年 2 月、オンライン開催
15. 大嶋晃敏：「GRAPES-3 型ミュオンテレスコープを用いた宇宙天気研究」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催
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 (26)」、日本物理学会第 76 回年次大会、2021 年 3 月、オンライン開催

## 受賞など

1. 藤田慧太郎：日本物理学会学生優秀発表賞（宇宙線・宇宙物理領域）、日本物理学会 2020 年秋季大会、2020 年 10 月 10 日
2. Rosa Mayta Palacios: 第 7 回大阪市立大学女性研究者奨励賞（岡村賞）、2020 年 12 月 24 日

## その他

1. 荻尾彰一：小中学生サマーラボ 講師
2. 荻尾彰一：大阪府立泉北高校 高大連携講座 講師
3. 荻尾彰一、常定芳基、多米田裕一郎：宇宙を学べる大学合同説明会、2020 年 9 月 20 日

## 学位論文

### 修士論文

1. 松宮弘幸：「TAx4 実験のための境界トリガーシステムの開発」

## 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による超高エネルギー宇宙線の源と伝播の統一的解釈」、代表、2,807 万円
2. 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、38 万円
3. 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、590 万円
4. 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  $\gamma$  線・宇宙線観測のための空気シャワー実験」、代表、300 万円
5. 多米田裕一郎：大阪電気通信大学エレクトロニクス基礎研究所特定共同研究 「次世代最高エネルギー宇宙線観測用検出器開発と検出器校正システムの構築」、代表、249 万 8 千円
6. 多米田裕一郎：東京大学宇宙線研究所共同利用研究 「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、54 万円
7. 多米田裕一郎：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」、分担、104 万円
8. 多米田裕一郎：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」、分担、100 万円
9. 多米田裕一郎：科研費・基盤研究 (B) 「高速で飛翔する暗黒物質と太陽系外起源流星の探索」、分担、90 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 「宇宙線をプローブとした太陽風と IMF の断層撮像的観測」：43 万円
11. 大嶋晃敏：東京大学宇宙線研究所共同利用研究費 「大型ミュオンテレスコープによる銀河宇宙線強度の観測」：40 万円

## 海外出張および海外研修

1. コロナ禍のためなし

## その他

1. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所 客員教授
2. 荻尾彰一：東京大学宇宙線研究所 運営委員
3. 荻尾彰一：宇宙線研究者会議 (CRC) 実行委員長
4. 荻尾彰一：ICRC2023 組織委員長
5. 荻尾彰一：ISVHECRI2020 科学プログラム委員
6. 常定芳基：宇宙線研究者会議 (CRC) 実行委員
7. 常定芳基：東京大学宇宙線研究所 共同利用研究運営委員
8. 常定芳基：CRC 将来計画検討小委員会 副委員長

9. 常定芳基：ICRC2023 総務委員
10. 多米田裕一郎:日本物理学会大阪支部委員 (会計担当)
11. 多米田裕一郎:国際会議 ICRC2023, LOC
12. 多米田裕一郎:CRC 事務局書記

# 高エネルギー物理学研究室

清矢 良浩 教授	池内 響輝 (M2)	植松 泰智 (M1)	安達 智則 (B4)
山本 和弘 准教授	小幡 拓也 (M2)	高安 咲妃 (M1)	長谷 和哉 (B4)
手島 菜月 特任助教	小向 倅平 (M2)	西崎 勁矢 (M1)	山本 達也 (B4)
	本條 貴司 (M2)		

## 研究概要

### 1. 長基線ニュートリノ振動実験（清矢，山本，手島，小幡，本條，高安，西崎）

今年度も昨年度に引き続き，長基線ニュートリノ振動実験 T2K を継続した．実験への加速器からのビーム供給は 2021 年 3 月に行われ，陽子ビーム強度は 515 kW を安定して取り出せようになった．データ総量は  $3.68 \times 10^{21}$  POT (Protons On Target :  $\pi$  中間子生成標的に照射した陽子数) に達し，その内訳はニュートリノモードで  $2.05 \times 10^{21}$  POT，反ニュートリノモードで  $1.63 \times 10^{21}$  POT である．その内データ解析に使われているのは，ニュートリノモードで  $1.97 \times 10^{21}$  POT，反ニュートリノモードで  $1.63 \times 10^{21}$  POT のデータである．なお，ニュートリノ振動データ解析は  $\nu_\mu$  あるいは  $\bar{\nu}_\mu$  が消失する現象と， $\nu_e$  あるいは  $\bar{\nu}_e$  が出現する現象のデータを同時にフィットを行ったり，原子炉ニュートリノ実験の結果をフィットの入力に加えるなどを行った総合的なものである．図 1 は  $\sin^2 \theta_{23}$  と  $\Delta m_{32}^2$  (Normal Ordering の場合. Inverted Ordering の場合は， $|\Delta m_{32}^2|$ ) の許容範囲である．Normal Ordering 及び Inverted Ordering とはニュートリノの質量階層性を示し，ニュートリノの質量固有状態  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$  の質量に対して， $m_1 < m_2 < m_3$  の場合を Normal Ordering と呼び， $m_3 < m_1 < m_2$  の場合を Inverted Ordering と呼ぶ．振動パラメータの最尤値は Normal Ordering の場合， $\sin^2 \theta_{23} = 0.553$ ， $\Delta m_{32}^2 = 2.485 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$ ，Inverted Ordering の場合， $\sin^2 \theta_{23} = 0.558$ ， $|\Delta m_{31}^2| = 2.456 \times 10^{-3} [\text{eV}^2]$  となっており， $\nu_2$  と  $\nu_3$  の間の混合角  $\theta_{23}$  は最大混合 ( $\theta_{23} = \pi/4$ ) と無矛盾であるが，多少  $\pi/4$  より大きい値が好まれてるようである．

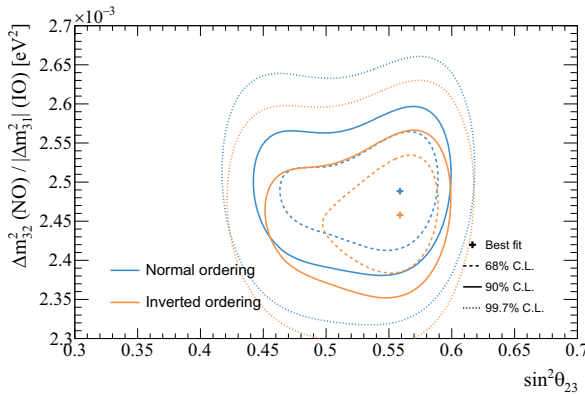


図 1：ニュートリノ振動パラメータ  $\sin^2 \theta_{23}$  と  $\Delta m_{32}^2$  (Normal Ordering) または  $|\Delta m_{31}^2|$  (Inverted Ordering) の測定結果．

一方，図 2 は  $\sin^2 \theta_{13}$  と  $\delta_{\text{CP}}$  の Normal Ordering での許容範囲である． $\delta_{\text{CP}}$  はニュートリノの CP 対称性の破れを示すパラメータとして測定が急がれている量である．現在の最尤値は Normal Ordering の場合  $\sin^2 \theta_{13} = 2.19 \times 10^{-2}$ ， $\delta_{\text{CP}} = -1.97$  となり，Inverted Ordering の場合  $\sin^2 \theta_{13} = 2.20 \times 10^{-2}$ ， $\delta_{\text{CP}} = -1.44$  となっている．また，原子炉ニュートリノ実験の結果を使わない T2K 実験だけの結果は原子炉ニュートリノ実験の結果を使った場合と比べて， $1\sigma$  よりもよい精度で無矛盾である．また， $\delta_{\text{CP}}$  の最尤値が最大の破れ，す

なわち  $-\pi/2$  に近くなっていることも注目すべき点である。CP 非保存の実験的証明や質量階層性の解明にはさらに高い信頼度が必要であり、より高精度の測定を目指す必要がある。

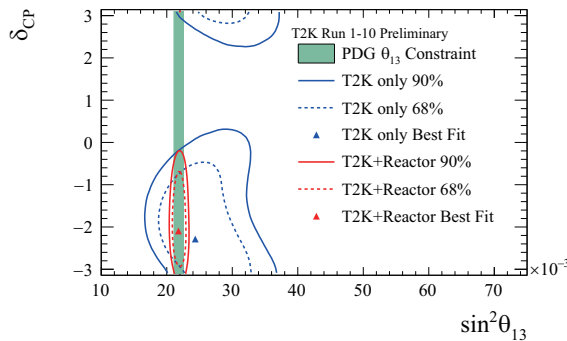


図2: ニュートリノ振動パラメータ  $\sin^2 \theta_{13}$  と  $\delta_{CP}$  の許容範囲。緑の帯は原子炉ニュートリノ実験の結果である。

次に電子ニュートリノ-核子散乱断面積測定の結果を述べる。T2K 実験の1つの大きな目標は  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  振動の測定であるが、これには主に2つのバックグラウンド源がある。1つはニュートリノビームに基から含まれている  $\nu_e$  および  $\bar{\nu}_e$  成分であり、2つ目は後置検出器(スーパーカミオカンデ)での中性カレント  $\pi^0$  生成反応である。ここでは、 $\pi^0$  が荷電カレントの  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$  反応に見えてしまうことが起こる。そこで、これらのバックグラウンドを見積もるために  $\nu_e(\bar{\nu}_e)$ -核子散乱断面積の直接測定を前置検出器を用いて行った。事象選択を行って質の良い電子生成事象または陽電子生成事象を選び出し、電子(陽電子)の運動量と散乱角度を測定した。これによって  $d\sigma/dE$  及び、 $d\sigma/d(\cos(\theta))$  を計算した結果が図3である。図中で FHC とあるが、これは Forward Horn Current の略で、ニュートリノモードのときであり、また RHC は Reversed Horn Current の略で、反ニュートリノモードのときを意味する。データと比較するためのモンテカルロシミュレーションは、NEUT, GENIE, NuWro を用いたが、どれもデータと無矛盾であった。

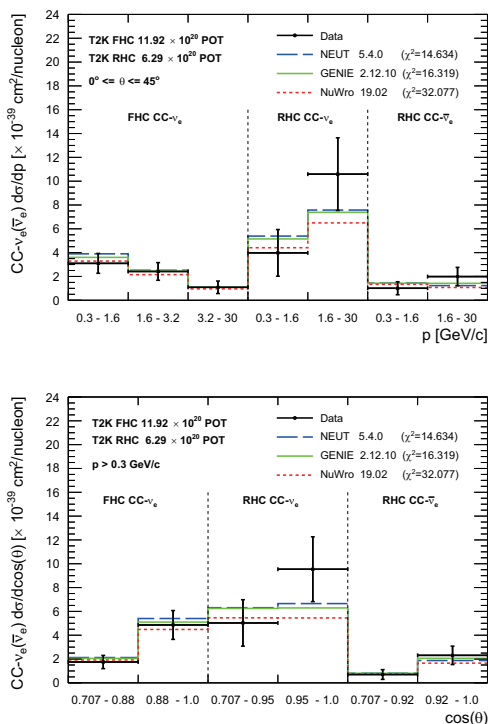


図3: ニュートリノ-核子散乱断面積の測定結果。上図:  $d\sigma/dp$  の測定結果。下図:  $d\sigma/d\cos(\theta)$  の測定結果。

ニュートリノ振動解析における標的原子核の違いによって生じ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) を用いた実験プロジェクトを今年度も継続した。現在は得られたデータの解析を行いながら、検出器の理解および解析アルゴリズムの最適化を進めているところである。

T2K 実験において、ニュートリノビームは炭素標的に 30GeV の陽子を衝突させて生成した荷電パイ中間子が、ミュニュートリノとミュオンに崩壊することによって生成される。この崩壊は 2 体崩壊であるので、ミュニュートリノとミュオンには強い相関があり、ミュオンを測定することでミュニュートリノの状態を間接的ではあるがリアルタイムに知ることができる。それを行っているのがミュオンモニターであり、現行では PIN フォトダイオードとガスイオンチェンバーのハイブリッドであるが、今後のビームの大強度化に向けて放射線耐性の高い装置に置き換える必要がある。その候補されているものが、電子増倍管 (EMT) で、メタルパッケージの小型光電子増倍管の光電面のところにアルミニウムを蒸着したものである。この装置が検出器として動作することは昨年度までに確認されており、現在は信号の安定性を確認しているところである。そのデータを得るために、東北大学電子光理学研究センター (ELPH) において電子ビームを照射してテスト実験を行った。実験では EMT で確認されている信号の初期不安定性のデータや電子ビームの大強度にして J-PARC の現在の強度の 5 年分や 10 年分にあたるビームを照射し、放射線耐性を調べるデータを取得した。現在データ解析中である。

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

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 (H ライン) の建設を, J-PARC の物質・生命科学実験施設 (MLF) において進めている。

H ライン完成後直ちにビーム運転調整を行う予定であるが, ビームの強度や粒子組成測定のために必要なビームプロファイルモニターの開発を行った。この検出器はピラミッド型のアクリルを用いたチェレンコフカウンターであり, ビーム中の電子を検出する。図 4 に製作した検出器を示す。京都大学複合原子力研究所 (KURNS) の電子線型加速器を用いたビームテストを 11 月に行い, 電子検出が可能であることを確認するとともに性能評価のためのデータを取得した。図 5 は検出器応答のビーム強度依存性である。これに関連し, 4 年生には, ビーム強度モニターカウンターの波形解析に基づいた電子ビーム強度の較正を行ってもらった。

2019 年 3 月に, ミュオン・電子転換過程に対する最大の背景事象である束縛ミュオン軌道上崩壊 (decay-in-orbit = DIO) の高統計測定を, MLF にあるミュオンビームライン (D ライン) を用いてカーボン標的に対して行ったが, 今年度も, そのデータ解析を継続した。また, MLF の陽子ビーム 1 次炭素標的内で生成されるミュオン原子生成量を, これまでより詳細なモンテカルロシミュレーションを構築して再評価した。

DeeMe 実験では, 大量の荷電粒子 (バースト) が検出器に到来した後,  $1 \mu\text{s}$  程度の遅延タイミングで飛来する電子を検出する必要がある。光センサー MPPC を読み出しに用いたシンチレーティングファイバー飛跡検出器がそのような測定に適用可能かどうかの検討も行っている。バーストによってシンチレーティングファイバーで生成される光は大量になるが, これまでの研究の結果, 大光量に対する MPPC の応答には非常に長時間のテールが存

在し、単一遅延荷電粒子の検出が困難であることが分かっている。そこで、バースト到来時は MPPC をオフの状態にしておき、バースト直後に素早く逆バイアス電圧を印加することによりテールを抑制できるかを調べることにした。そのために、図6に示したようなスイッチング回路を試作した。これは 500 ns 以内に約 70 V の逆バイアス電圧を印加することができるように設計されている。この回路を用いて KURNS においてビームテストを行ったところ、テールの形状には変化が見られず、その抑制には寄与しないことが判明した。引き続き、テールの生成メカニズムの理解やその抑制方法について検討していく。

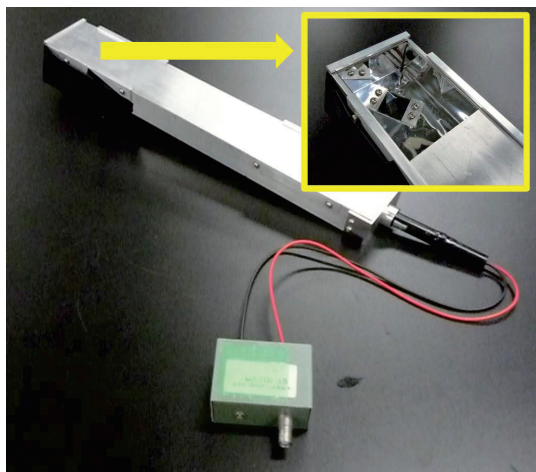


図4: ビームプロファイルモニター用チェレンコフカウンター。黄色の枠内の写真に映っているピラミッド型アクリルは、底面が 2 cm × 2 cm で高さが 1 cm である。

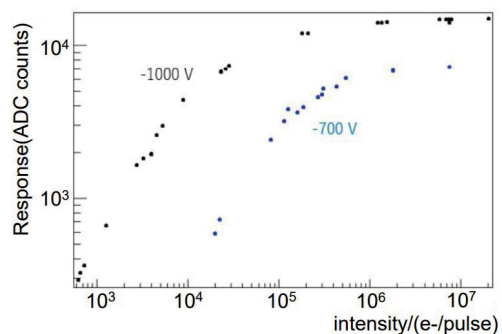


図5: ビームプロファイルモニター用チェレンコフカウンターのビーム強度依存性。

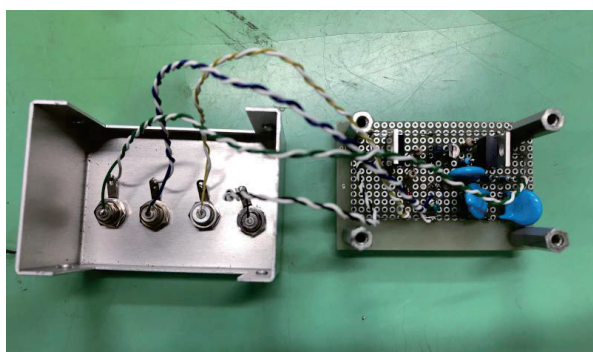


図6: MPPC 逆バイアス電圧スイッチング回路。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. K. Abe, H. Kim, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, K. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration): “Constraint on the matter-antimatter symmetry-violating phase in neutrino oscillations”, *Nature* **580**, 339–344 (2020).

2. K. Abe, H. Kim, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, K. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “ Search for Electron Antineutrino Appearance in a Long-Baseline Muon Antineutrino Beam ”, *Physical Review Letters* **124**, 161802, (2020).
3. K. Abe, T. Honjo, H. Kim, T. Kobata, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ First combined measurement of the muon neutrino and antineutrino charged-current cross section without pions in the final state at T2K ”, *Physical Review D* **101**, 112001 (2020).
4. K. Abe, T. Honjo, H. Kim, T. Kobata, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ Simultaneous measurement of the muon neutrino charged-current cross section on oxygen and carbon without pions in the final state at T2K ”, *Physical Review D* **101**, 112004 (2020).
5. K. Abe, H. Kim, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, K. Yamamoto *et al.* (T2K Collaboration) : “ First measurement of the charged current  $\bar{\nu}_\mu$  double differential cross section on a water target without pions in the final state ”, *Physical Review D* **102**, 012007 (2020).
6. K. Abe, T. Honjo, H. Kim, T. Kobata, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “ Measurement of the charged-current electron (anti-)neutrino inclusive cross-sections at the T2K off-axis near detector ND280 ”, *Journal of High Energy Physics* **2020**, 114 (2020).
7. K. Abe, T. Honjo, T. Kobata, T. Okusawa, Y. Seiya, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “ T2K measurements of muon neutrino and antineutrino disappearance using  $3.13 \times 10^{21}$  protons on target ”, *Physical Review D* **103**, L011101 (2021).
8. K. Abe, T. Honjo, H. Kim, T. Kobata, N. Kukita, T. Okusawa, Y. Seiya, S. Tanaka, N. Teshima, K. Yamamoto *et al.* (The T2K Collaboration) : “ Measurement of  $\bar{\nu}_\mu$  and  $\bar{\nu}_\mu + \nu_\mu$  charged-current cross-sections without detected pions or protons on water and hydrocarbon at a mean anti-neutrino energy of 0.86 GeV ”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2021**, 043C01 (2021).
9. N. Teshima, H. Ikeuchi, K. Komukai, Y. Seiya, K. Yamamoto *et al.* : “ Development of a multiwire proportional chamber with good tolerance to burst hits ”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A* **999**-165228, 1–9 (2021).

#### 学会・研究会講演等

1. 清矢 良浩 : 「ミュオン電子転換過程探索実験 –DecMe– : 準備状況 (14)」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 8 日 ~ 11 日, 熊本大学 (新型コロナウイルスにより現地開催中止, オンライン開催) .
2. 手島 菜月 : 「J-PARC MLF D2 エリアにおけるミュオン軌道上崩壊の運動量スペクトルの解析」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日, 筑波大学 (新型コロナウイルスにより現地開催中止, オンライン開催) .
3. 小幡 拓也 : 「T2K-WAGASCI 実験による大角度方向ミュオン検出器と中心部 CH 標的検出器を用いた飛跡再構成」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日, 筑波大学 (新型コロナウイルスにより現地開催中止, オンライン開催) .
4. 池内 響輝 : 「J-PARC MLF ビーム標的中に生成されるミュオン炭素原子数の評価」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日, 筑波大学 (新型コロナウイルスにより現地開催中止, オンライン開催) .
5. 小向 倅平 : 「パルスビームラインのためのビームプロファイルスキャン装置の開発」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日, 筑波大学 (新型コロナウイルスにより現地開催中止, オンライン開催) .



6. 本條 貴司：「T2K 実験ミュオンモニターに用いる新型検出器・電子増倍管の電子ビーム照射試験による性能評価」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020 年 9 月 14 日 ~ 17 日, 筑波大学 (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
7. 山本 和弘：「ミュオン電子転換過程探索実験 –DeeMe– : 準備状況 (15)」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日 ~ 15 日, 東京大学 駒場キャンパス (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
8. 本條 貴司：「T2K 実験ミュオンモニターに用いる電子増倍管の放射線耐性試験 (1) : 試験の概要」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日 ~ 15 日, 東京大学 駒場キャンパス (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
9. 植松 泰智：「MPPC 読み出しプラスチックシンチレーティングファイバー系の大強度ビームに対する応答の測定」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日 ~ 15 日, 東京大学 駒場キャンパス (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
10. 高安 咲妃：「T2K-WAGASCI 実験の大角度散乱ミュオン検出器のシミュレーションにおける光量および検出効率のパラメータ調整」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日 ~ 15 日, 東京大学 駒場キャンパス (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
11. 手島 菜月：「J-PARC MLF D2 エリアにおけるミュオン軌道上崩壊の運動量スペクトルの解析」, 日本物理学会第 76 回年次大会, 2021 年 3 月 12 日 ~ 15 日, 東京大学 駒場キャンパス (新型コロナにより現地開催中止, オンライン開催)。
12. 植松 泰智：「MPPC 読み出しプラスチックシンチレーティングファイバー系の大強度ビームに対する応答の測定」, アインシュタイン・南部セミナー (大阪市立大学理学部物理学科主催), 2021 年 3 月 18 日 ~ 19 日, オンライン開催。

## その他

1. 小幡 拓也：”Hit detection efficiency of Wall MRDs”, WAGASCI meeting, 2020 年 5 月 14 日, オンライン開催。
2. 清矢 良浩 (小向 倅平)：”Beam Profile Monitor”, The 9th DeeMe Collaboration meeting, 2020 年 12 月 24 日, オンライン開催。
3. 植松 泰智：”Measurement of response to high intensity beams of MPPC readout plastic scintillating fiber system”, The 9th DeeMe Collaboration meeting, 2020 年 12 月 24 日, オンライン開催。
4. 手島 菜月：”DIO Analysis”, The 9th DeeMe Collaboration meeting, 2020 年 12 月 24 日, オンライン開催。

## 学位論文

### 卒業論文

1. 安達 智則, 長谷 和哉, 山本 達也：「DeeMe 実験用 MWPC のビームテストにおける照射電子数の較正」

### 修士論文

1. 池内 響輝：「J-PARC MLF ミュオン生成標的中に生成されるミュオン炭素原子数の評価」
2. 小幡 拓也：「WAGASCI 実験における大角度散乱ミュオン検出器の性能評価及びシミュレーションの構築」
3. 小向 倅平：「パルスビームラインのためのビームプロファイルスキャン装置の開発」
4. 本條 貴司：「T2K 実験ミュオンモニターに用いる新検出器の開発」

## 研究助成金取得状況

1. 清矢 良浩：新学術領域研究「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」計画研究 A02 「加速器ニュートリノビームで探る素粒子の対称性」(分担)，直接経費：250 万円，間接経費：75 万円，次年度への繰越 62 万円。
2. 清矢 良浩：基盤研究 (A) 「革新的な実験手法を用いたミューオン・電子転換過程探索の進展」(分担)，直接経費 (前年度繰越金)：77 万円，間接経費：0 万円。
3. 清矢 良浩：基盤研究 (C) 「次世代型ミュー粒子・電子転換過程探索実験に向けたファイバー飛跡検出器の開発」(代表)，前年度から：674,427 円，直接経費：40 万円，間接経費：12 万円，次年度へ (延長)：353,664 円

## その他

1. 清矢 良浩：日本物理学会素粒子実験領域副代表，2020 年 4 月 1 日～2021 年 3 月 31 日。
2. 山本 和弘：教員活動表彰：学長重点事項 (サイテーション) 分野，2020 年 11 月 25 日
3. T2K Collaboration：Nature **580**, 339–344 (2020) の論文が Nature の “10 remarkable discoveries of 2020” の一つに選出された。
4. 清矢 良浩：日本物理学会代議員，2021 年 3 月 31 日～2023 年 3 月 31 日。

# 重力波実験物理学研究室

神田 展行 (教授)	武田 芽依 (D1)
伊藤 洋介 (准教授)	大橋 朋弥 (M1)
澤田 崇広 (特任講師)	小林 佑一朗 (M1)
土田 怜 (学振特別研究員 PD)	藤本 悠也 (M1)
Darkhan Tuyenbayev (博士研究員)	森末 希 (M1)
横田 晴香 (秘書)	清田 泰成 (B4)
	福永 勇 (B4)
	守内 一馬 (B4)

## 研究概要

### 大型低温レーザー干渉計型重力波望遠鏡 KAGRA

KAGRA は岐阜県神岡鉱山内に建設された基線長 3km のレーザー干渉計型重力波検出器である。2020 年 2 月から 2020 年 4 月にかけて観測運転を行い、このときの最高感度では中性子星観測レンジで約 970kpc であった。当該観測期間は重力波国際観測網の観測期間に予定されていたが、コロナウイルス流行の影響を受けて観測期間が短縮された。その中で KAGRA はドイツの GEO600 干渉計と同時観測を行うことができ、その観測を “O3-GK” とし、共同でのデータ解析なども行われている。図 1 は KAGRA の感度曲線の推移である。

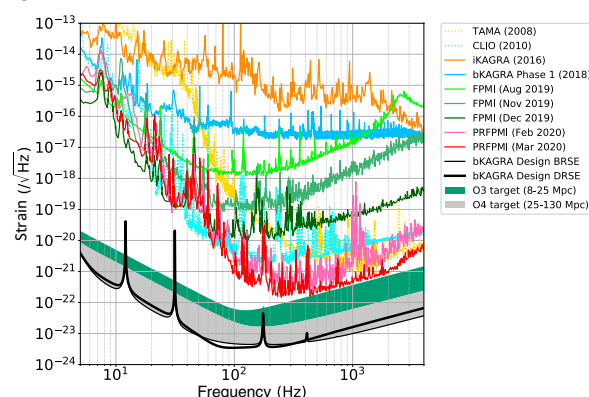


図 1: KAGRA の感度曲線

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。

Prog. Theor. Exp. Phys. 2020, 05A101 [3] より Fig.10 を転載。

重力波観測は、ブラックホールや中性子星といったコンパクトかつ高密度の天体や、超新星爆発といった高エネルギー天体現象の解明すると期待される。重力波と同時に電磁放射（可視光、赤外、X 線、ガンマ線など）やニュートリノ放射が期待される天体現象については、特に天体深部から放射される重力波の観測によって早い段階での観測情報や多面的な情報が得られる。マルチメッセンジャー天体観測として注目を浴びている研究である。またブラックホール時空や一般相対論の検証といった基礎物理学的な研究でもある。天体起源の重力波観測では、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。そのため国際的な観測網が望まれ、KAGRA は米国 LIGO、欧州 Virgo と協定を結んだ。本研究室での研究のいくつかも国際観測網への貢献となっている。

2020 年度は、上述の O3-GK 観測の解析にも不可欠である KAGRA の較正データについて、本研究室は重要な貢献を行い、正式にコラボレーション内でリリースできた。またその他にも KAGRA のデータ関連を中心に多くの研究を行った。

### KAGRA のデータ転送・保管・国際観測網とのデータ共有（神田）

KAGRA の干渉計本体は岐阜県の神岡鉱山にあるが、観測運転時のデータ量は約 630TB/年程度になり、それらを処理する計算機や共同研究が解析するために、観測データは東大宇宙線研究所（柏市）にある主データサーバに転送、保管される。共同研究者はそこでデータを利用するか、あるいは “Tier” と称するデータ配送階層に属する国内外の共同研究サイトへ部分的なデータを配送している。我々の研究室はこのデータ配送・保管系の開発を行ってきた。

図2はKAGRAのデータ蓄積量および単位時間あたりのデータ量である。

大阪市立大学はデータ配送系の構築時から組み込まれていたこともあり、Tier-0.5として低遅延データとバルクデータ（ただしバルクデータについては3ヶ月程度しか保持しない）を受け取っている。KAGRAは海外の重力波観測実験であるLIGO（米）、Virgo（欧州）と観測データの共有を行なっている。特に重力波が現れる、主干渉計信号を時空の歪みに換算した時系列信号 $h(t)$ については数秒～10数秒の低遅延で共有されている。大阪市立大学の計算機クラスターにも、最も遅延の大きいVirgoでも15秒程度、KAGRAについては3.5秒で共有されている。

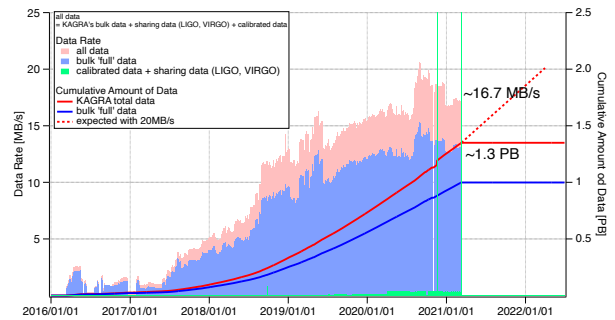


図2: KAGRAのデータ量

棒グラフは単位時間あたりのデータ量。赤：KAGRA 制御系全データ、青：KAGRA の高遅延の‘full’とする分、緑：KAGRA の較正データおよびLIGO, Virgo の共有データ。線グラフは累積データ量。赤、青は棒グラフと同じ。点線は予定。)

## 重力波検出器における独立成分解析（伊藤）

東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターの糸潤哉、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。また2020年度はLIGO Virgo KAGRAの第4次観測 (O4) に向けてICAを含むデータ解析および数値相対論のシミュレーションに占有的に使うための合計5376コアを有する大規模計算機クラスターの仕様を決定し、21年3月に東京大学ビッグバン宇宙国際研究センターに設置した。

## 重力波信号の再構成と較正（澤田）

レーザー干渉計型重力波検出器は、重力波による空間歪みの変動をレーザー光により精密測定する装置である。重力波による空間歪みは干渉計を構成する2本の「腕」の長さをそれぞれ変化させるが、干渉計を構成する「鏡」には電磁アクチュエーターが取り付けられており、鏡の位置がずれた時に正しい位置（動作点）に戻す力を加えるようフィードバック制御を行う。鏡が動作点からどれだけ動いたかというエラー信号、及びアクチュエーターへのフィードバック信号を用いて、検出器応答特性を考慮して時系列重力波信号 $h(t)$ を再構成する。この $h(t)$ 再構成処理をデータ取得から数秒程度で行う「低遅延パイプライン」、及びより高度な較正を行う「オフライン・パイプライン」をそれぞれ作成し、2020年4月に実施されたKAGRAと独国GEO600との同時観測“O3GK”にて運用した。得られた $h(t)$ 信号は日本及び世界各地の大学・研究所等へとデータ転送され、重力波のデータ解析に用いられた。

## ラプラス変換を用いた重力波データ解析（土田）

ブラックホールや中性子星の連星合体では、「インスパイラル期」と呼ばれる、連星が半径を縮めながら円運動を行う時期があり、この時期を経たのちに2つの星が合体する。そしてその最終段階として、合体によって形成されたブラックホールが準固有振動と呼ばれる運動をする。これらのそれぞれのフェーズで特徴的な重力波を放出するわけだが、その中で準固有振動から萌出される重力波は、複数の固有振動モードをもつ減衰正弦波となる。そして各モードの特徴的なパラメータである「固有振動数」と「減衰時間」は、ブラックホールの「質量」と「回転」に対応するため、これらのパラメータは非常に重要な役割を果たす。本研究では、ラプラス変換を用いて重力波データを解析することにより、上記パラメータの高精度抽出を達成し、一般相対性理論の検証を行うことを目的とする。

いま標的としているような減衰正弦波に対してラプラス変換を実行すれば、各モードにおけるパラメータは、複素平面上での特異点として現れる。そこで、これらの特異点をデータ解析によってあぶり出すべく、「数值的に」ラプラス変換を実行するコードを作成した。数値的なラプラス変換では、一般的なラプラス変換の解析式で生じる無限大の発散を回避することが可能であるが、実質的な値の急激な増加は避けられない。この点を改善すべく改良をおこなった結果、ほぼ期待通りの結果を得ることができた。また、本標的のような遷移型の信号を長時間のデータから探り当てるために、データを短い時間に区切ってラプラス変換を実行するという「短時間ラプラス変換」を用いることにより、波形の時間的发展を追跡可能となるよう工夫した、上記の結果について、学会にて報告した。今後、より詳細な議論を追加し、結果をまとめた論文を学術雑誌に投稿する予定である。

## Hilbert Huang 変換を用いた重力波データ解析（武田）

重力崩壊型超新星爆発 (CCSN) 由来の重力波のような、複数のモードが混在し短時間で周波数が急変する非定常な信号は、時間・周波数領域で展開することで複数のモードの存在やその特徴を解析する。これらは主に基底波形の時間・周波数領域における分布を解析する手法が用いられているが、時間と周波数の分解能にトレードオフの関係が存在し細かい構造や統計量の調査には不向きである。そこで本研究ではその欠点を補う Hilbert-Huang 変換 (HHT) に着目し、その有用性を検証した。HHT は信号の時間・周波数領域での骨組構造、すなわち各時刻各周波数で振動する波の存在を抜き出す手法であり、周波数は分解したモードの位相の時間微分で定義される。よって分解能の問題は存在しない。HHT で Kuroda et. al の 3D-GR 数値シミュレーションモデル SFHx から得られた重力波を解析したところ、定在降着衝撃波不安定 (SASI) モードの構造を得ることに成功した。SASI とは未だ明確でない CCSN の爆発メカニズムに起因する流体力学不安定現象であり、爆発前の星の内部に発生した衝撃波を非球対称に歪ませることで爆発を促すと知られているが、その発生条件や進化過程は研究途上である。SASI が発生すると星の中心に形成される原始中性子星が振動・変形して重力波が放射され、その周波数は星内部での衝撃波の位置の指標となり、値や時間変動率は、観測から爆発過程を知るための鍵となる。そこで、HHT を用いた周波数の解析手法の提案と Kuroda et. al のシミュレーションで発生した SASI 由来の重力波の平均周波数は約 130Hz、時間変動は一定と統計的に導いた。本研究は CCSN の SASI 由来の重力波解析に HHT が有用であることを明らかにしたものであり、学術雑誌に投稿中である。

## ARIMA モデルを利用した重力波検出器のノイズ除去への応用（藤本）

重力波観測において非ガウス性ノイズは重力波信号よりも大きく、長年にわたりノイズの除去に向けた研究が行われてきた。現在では重力波を観測できるまでにノイズが除去されるようになったが、依然として特に低周波ではノイズは重力波信号よりも 2,3 ケタ程大きく、データ解析に向けたさらなるノイズの除去が必要である。また現在データ解析手法として主に使われている matched filter 手法は、既知の重力波波形にしか対応しておらず、波形が判明していない重力波に対しては解析できないという問題点がある。以上の理由により、重力波観測においてデータ解析の研究は重要であり、既存手法の改善や新手法の構築などが求められる。

本研究では Autoregressive model (AR モデル)、moving average model (MA モデル)、integrated model (I モデル) や、これらを組み合わせた ARMA モデル、ARIMA モデルといった時系列解析手法を用いてデータ解析を行った。この手法は、観測データ全体に対して上記のモデルを用いてノイズ推定を行い、観測データから引く事で重力波信号のみを取り出すものである。この解析手法を用いた先行研究により、100Hz 以下の周波数帯においてノイズ感度が改善されたほか、既存の解析手法に比べ SN 比が上昇したという結果が出ている。またこの手法は重力波波形が判明している必要がなく、汎用性が高いと考えられる。今回この先行研究の追試を行い、この手法が新たな重力波解析手法として有用であることを確認してきた。この先の展望として、この解析手法を応用し未発見の連続重力波の探索を行うつもりである。



## ガンマ線バースト観測網を外部トリガーとした重力波観測信号モニターの開発（大橋）

中性子星連星合体を源とする重力波はガンマ線バーストとのマルチメッセンジャー観測が期待されている。初の中性子星連星合体からの重力波となった2017年8月17日の重力波観測（GW170817）では同方向からのガンマ線バーストが重力波観測によって導かれる合体時刻の1.7秒後に観測されている。また、このようにガンマ線バーストが観測された際にはGamma-ray Burst Coordinates Network(GCN)という、観測の際の位置情報を記録するシステムによって、観測されたガンマ線バーストに関連する情報の研究機関などへの提供が行われている。

本研究では、このGCNによってもたらされるガンマ線バーストの観測時刻を外部トリガーとして用いることによって重力波観測とガンマ線観測を結びつけることを目的とした、重力波観測信号モニターの製作を行った。このモニターではガンマ線バーストの観測時刻周辺64秒を短時間フーリエ変換を用いた時間周波数解析を重力波観測信号に対して行い、その結果を表示するようになっている。今後はこのGCNを外部トリガーとした重力波観測信号モニターを大阪市立大学のKAGRA低遅延データのモニターに搭載する準備と機械学習を用いた時間周波数図の画像判定による重力波の有無の判定機能の搭載、解析手法の高度化や高速化を検討している。

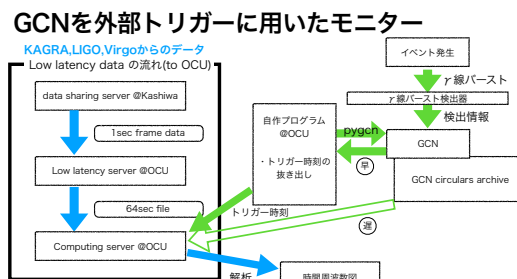


図3: GCNを外部トリガーに用いたモニターの流れ

## Q変換を用いた重力波データ解析（小林）

ブラックホールや中性子星の連星が合体する際に生じる重力波は、時間発展する波形をもとにいくつかのフェーズに分けることができる。その最終フェーズでは連星合体により形成されたブラックホールが、ブラックホール準固有振動と呼ばれる特徴的な運動をすることで重力波を放出している。このフェーズの重力波は形成されたブラックホールの質量や角運動量によって波形が決まるため、重要な情報を含んでいる。

本研究では、Q変換と呼ばれる時間-周波数領域での信号解析により、準固有振動から生じる重力波の解析を行うために必要なパラメータについて検討し、学会にて報告した。これからの予定として、大阪市大で開発中のwebモニターへの追加を検討している。

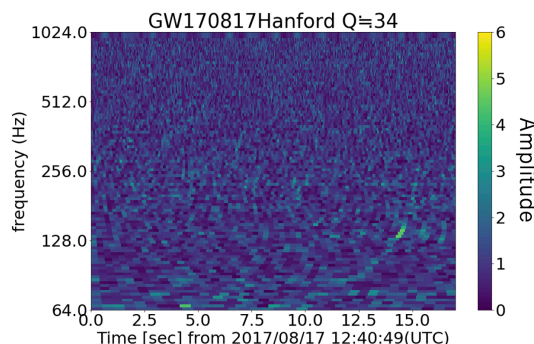


図4: GW170817 (Hanford) のQ変換によるスペクトログラム

Q変換で作成したGW170817イベント付近のスペクトログラム。

## KAGRAの較正データのガウス性・安定性評価（森末）

重力波望遠鏡KAGRAより得られたデータを解析し、ノイズのガウス性・安定性の評価を行った。ノイズの時間変化がガウス分布でない場合、バックグラウンド起因の偽物の重力波が観測されやすくなり、ノイズレベルが大きい時、重力波信号が見えにくくなる。これらの頻度等を調べるため、ノイズのガウス性や感度の安定性を調べた。手法としては、較正データを用いてASD(Amplitude Spectrum Density)を計算し、ガウス性・安定性を評価したい周波数毎にASDの時間変化のデータを作成する。ガウス性は、このデータに対してヒストグラムをとり、Kolmogorov-Smirnov検定等を用いる。安定性は、平均値等のパラメータを用いて評価した。解析対象は、2020/4/7-21の間に観測された較正データであり、総データサイズは約79GBでKAGRAのデータサーバーに格納されている。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “An arm length stabilization system for KAGRA and future gravitational-wave detectors”, *Class. Quantum Grav.*, 37 (2020) 35004, DOI: 10.1088/1361-6382/ab5c95
2. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “Application of the independent component analysis to the iKAGRA data”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, Volume 2020 (2020) Issue 5, 053F01, DOI: 10.1093/ptep/ptaa056
3. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “Overview of KAGRA: Detector design and construction history”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2020) ptaa125, DOI: 10.1093/ptep/ptaa125
4. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “Overview of KAGRA: KAGRA science”, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, (2020) ptaa120, DOI: 10.1093/ptep/ptaa120
5. B. P. Abbott 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 Rev Relativ.*, 23 (2020) Article number:3, DOI: 10.1007/s41114-020-00026-9
6. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “The status of KAGRA underground cryogenic gravitational wave telescope”, *Journal of Physics: Conference Series*, 1342 (2020) 12014, DOI: 10.1088/1742-6596/1342/1/012014
7. Takafumi Ushiba et al., “Cryogenic suspension design for a kilometer-scale gravitational-wave detector”, *Class. Quantum Grav.*, 38, 2021, 85013, DOI: 10.1088/1361-6382/abe9f3
8. T. Enoto et al., “NinjaSat: an agile CubeSat approach for monitoring of bright x-ray compact objects”, *Proceedings of the SPIE*, Volume 11444, id. 114441V 20 pp. (2020), DOI:10.1117/12.2561152
9. T. Akutsu et al.(KAGRA Collaboration), “Vibration isolation systems for the beam splitter and signal recycling mirrors of the KAGRA gravitational wave detector”, *Classical and Quantum Gravity*, Volume 38, Issue 6, id.065011, 33 pp (2021), DOI:10.1088/1361-6382/abd922
10. LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration, “Upper Limits on the Isotropic Gravitational-Wave Background from Advanced LIGO’s and Advanced Virgo’s Third Observing Run”, arXiv:2101.12130 (2021)
11. LIGO Scientific Collaboration, Virgo Collaboration, and KAGRA Collaboration, “Search for anisotropic gravitational-wave backgrounds using data from Advanced LIGO’s and Advanced Virgo’s first three observing runs”, arXiv:2103.08520 (2021)

### 学会・研究会講演

1. Yousuke Itoh, “Public data schedule”, The 25th KAGRA Face-to-Face meeting in remote style (August 20-22, 2020)
2. Yousuke Itoh, “Status of CW”, KAGRA 2020 May Telecon, 27 (Wed) - 28 (Thur) May 2020
3. Nobuyuki Kanda, on behalf of KAGRA collaboration, “Status of KAGRA”, The 14th International Conference on Gravitation, Astrophysics and Cosmology (ICGAC14), 2020/8/17
4. T. Sawada, KAGRA collaboration, “KAGRA-Calibration at O3GK”, 2020 LIGO-Virgo-KAGRA Collaboration Meeting, 2020/9/14

5. 小林佑一朗, KAGRA collaboration, 「時間-周波数領域でのブラックホール準固有振動重力波の解析」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/16
6. 大橋朋弥, KAGRA collaboration, 「ガンマ線バースト観測網を外部トリガーとした重力波観測信号モニターの開発」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/16
7. 武田芽依, KAGRA Collaboration, 「Hilbert-Huang 変換を用いた過渡的な重力波信号のリアルタイム解析」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/16
8. 澤田崇広, KAGRA collaboration, 「KAGRA 観測運転における低遅延パイプライン」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/15
9. 神田展行, 土田怜, 伊藤洋介, 澤田崇広, 「ラプラス変換を利用した新しい重力波解析手法」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/16
10. 土田怜, 神田展行, 伊藤洋介, 澤田崇広, 「重力波波形に対するラプラス変換による解析の適用と性能評価」, 日本物理学会 2020 年秋季大会, 2020/9/16
11. T. Sawada, KAGRA collaboration, “Report from Operations”, The 26th KAGRA Face-to-Face Meeting, 2020/12/17
12. Mei Takeda, KAGRA Collaboration, “Application of Hilbert-Huang Transform to real-time analysis of transitional gravitational-waves”, The 26th KAGRA Face-to-Face meeting, 2020/12/17
13. M. Takeda, Y. Watanabe, Y. Hiranuma, R. Negishi, K. Oohara, N.Kanda, T.Kuroda, K.Kotake, K.Sakai, Y. Sakai, T. Sawada, H. Takahashi, T. Takiwaki, S. Tsuchida, K. Hayama, T. Yokozawa, “Data analysis of GWs from core-collapse supernova with Hilbert-Huang Transform”, The 7 th KAGRA international workshop, 2020/12/18
14. 武田芽依, 渡邊幸伸, 平沼悠太, 根岸諒, 大原謙一, 神田展行, 黒田仰生, 固武慶, 酒井一樹, 坂井佑輔, 澤田崇広, 高橋弘毅, 滝脇知也, 土田怜, 端山和大, 横澤孝章, 「Hilbert-Huang 変換を用いた重力崩壊型超新星爆発由来の重力波データ解析」, 新学術「地下宇宙」第7回超新星ニュートリノ研究会 (2021 年), 2021/1/7
15. 土田怜, 神田展行, 伊藤洋介, 澤田崇広, KAGRA Collaboration, 「短時間ラプラス変換を用いた重力波波形の解析と信号探索」, 第76回年次大会 (2021 年), 2021/3/15
16. 小林佑一朗, KAGRA collaboration, 「時間周波数領域での重力波観測信号解析の比較モニターの開発」, 第76回年次大会 (2021 年), 2021/3/15
17. 森末希, KAGRA collaboration, 「KAGRA O3GK の較正データの安定性・ガウス性評価」, 第76回年次大会 (2021 年), 2021/3/15
18. 武田芽依, 渡邊幸伸, 平沼悠太, 根岸諒, 大原謙一, 神田展行, 黒田仰生, 固武慶, 酒井一樹, 坂井佑輔, 澤田崇広, 高橋弘毅, 滝脇知也, 土田怜, 端山和大, 横澤孝章, 「Hilbert-Huang 変換を用いた重力崩壊型超新星爆発由来の重力波データ解析」, 日本天文学会 2021 年春季年会, 2021/3/19

## 学位論文

### 卒業研究

1. 清田 泰成 「重力波検出器の周波数帯域の決定方法」
2. 福永 勇 「ヒルベルト変換によるブラックホールの準固有振動の解析」
3. 守内 一馬 「ニューラルネットワークを用いた中性子星の潮汐変形率の推定」



## 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 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)
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 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)
4. 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)
5. 科学研究費助成事業 基盤研究 (S) 「重力波宇宙物理学の包括的研究」 (代表：横山順一 (東大理)、分担：伊藤洋介ほか、2020-2024 年度)
6. 科学研究費助成事業 「重力波データ抽出方法の開発：新たな解析手法および分散型コンピューティングの導入」 (代表：真貝 寿明 (大阪工業大学情報科学部)、分担：伊藤洋介ほか、2019-2023 年度)
7. 令和 2 (2020) 年度学術研究動向調査等に関する委託研究・研究題目：「数物系科学 (とくに素粒子、宇宙物理、天文) 分野に関する学術研究動向及び学術振興方策- 大型実験・観測装置と研究組織に注目した分野の動向 -」 (研究担当者：神田展行)
8. 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究 「KAGRA データ転送・保管系の構築 (6)」 (代表：神田展行、2020 年度)
9. 東京大学宇宙線研究所 共同利用研究 「KAGRA データを低遅延国際重力波探索網へ組み込むための共同研究推進」 (代表：澤田崇広、2020 年度)

## その他

1. 2020 年度オープンキャンパス オンラインでの演示実験授業担当, 2020 年 8 月 (伊藤、神田)
2. 神田展行：日本学術振興会システム研究センター 数物系科学主任研究員, 2020 年度
3. 神田展行：宇宙線研究者会議 (COSMIC RAY RESEARCHERS CONGRESS) 運営委員, 2020/4/1-2021/3/30
4. 伊藤洋介：Japan Gravitational Wave Consortium 運営委員、2018/9/1-2020/8/31
5. 第 13 回 「“宇宙 (天文) を学べる大学” 合同進学説明会」, 2020/9/20, YouTube LIVE によるオンライン開催。大阪市立科学館ほかと主催。幹事および運営 (神田、伊藤)

# 宇宙・素粒子実験物理学研究室

中野英一 教授	中 祐介 (M2)	柿花愛恵 (M1)	飯田貴之 (B4)
岩崎昌子 准教授		久野彰浩 (M1)	加藤睦代 (B4)
			楠本泰徳 (B4)

## 研究概要

### 1. Belle II 国際共同実験. (中野, 岩崎, 中, 柿花, 楠本)

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を行っている.

2019 年度末 3 月から phase 3 と呼ばれる, 崩壊点検出器を組み込んだ本格的な電子・陽電子衝突実験を開始した. 今年度, 論文を公表した (論文 1, 2) .

### 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)

高エネルギー加速器研究機構の KEKB 加速器を用いた Belle 国際共同実験に参加している. Belle 実験はすでにデータ収集を終えたが, 大量データを用いて, CP 対称性の破れの検証や B 中間子の稀崩壊の測定, チャームクォーク対生成事象,  $\tau$  レプトン対生成事象, QCD の研究等, 高統計のデータを利用した研究を行なっている. 今年度, 論文を公表した (論文 3-20) .

### 3. 機械学習の適応研究 (岩崎, 中, 久野, 飯田, 加藤)

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

#### ● ILC 実験用電磁カロリメータエネルギー較正 (岩崎, 中)

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

- KEK Linac加速器運転調整(岩崎, 久野)

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による開発を行い、機械学習(変分オートエンコーダー, VAE)を用いた次元削減を行うことで、 $O(1000)$ の加速器運転パラメータを2次元で表現し、加速器状態の可視化に成功した。また、直近データを使用した機械学習により、最適値を予測する手法を開発した。結果を国内学会・研究会で発表した。

- 深層学習を用いた次元削減の基礎研究(岩崎, 飯田, 加藤)

MNIST データサンプルを用いて、深層学習を用いた特徴量抽出と次元削減の基礎研究を行った。結果を卒業論文にまとめた。

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

#### 4. ガスを用いた荷電粒子検出器の基礎研究(中野, 柿花, 楠本)

- CDC 読み出し回路に用いる ASIC の開発 (中野, 柿花)

Belle II 測定器の CDC の読み出し電子回路には発熱の問題や放射線による損傷のため、将来的には置き換えが計画されており、それにむけた ASIC の開発を進めている。現状の CDC 読み出し回路には ASD にカスタム ASIC と市販品の FADC を用いているが、消費電力低減を目的として ASD と FADC を共に搭載した ASIC の開発を進めている。

- 空間電荷効果に関する基礎研究 (中野, 楠本)

ガスを用いた荷電粒子検出器の代表的なものとして比例計数管が挙げられる。比例計数管の特徴の一つに空間電荷効果がある。これは比例計数管のアノードワイヤー近傍に、ガス増幅を起こす際に生成された正イオンが滞留してアノードワイヤー近傍の電場を弱めてガス増幅が期待通りに行われずガス増幅率が低下する現象である。

空間電化効果が比例計数管への荷電粒子の入射頻度に依存することはよく知られており、定量的な測定も行われているが、アノードワイヤー近傍に滞留する正イオンの電荷量の影響は定量的な評価は少ないため、空間電化効果の電荷量依存性について研究し卒業論文にまとめた。

#### 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、近畿大学、東京都立産業技術研究センターとの共同研究を行っており、読み出しプログラム、制御プログラムの開発を担当した。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. “Search for an Invisibly Decaying  $Z'$  Boson at Belle II in  $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^- (e^\pm \mu^\mp)$  Plus Missing Energy Final States”, (BelleII Collaboration), Phys. Rev. Lett. 124, 141801 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevLett.124.141801.
2. “Search for Axionlike Particles Produced in  $e^+e^-$  Collisions at Belle II”, (BelleII Collaboration), Phys. Rev. Lett. 125, 161806 (2020), DOI: 10.1103/PhysRevLett.125.161806.
3. “Measurement of Branching Fraction and Search for CP Violation in  $B \rightarrow \phi \phi$ ”, K. S. Mohanty, A. B. Kaliyar, V. Gaur, G. B. Mohanty, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 103, 052013 (2021 March 29), Belle preprint 2020-20, KEK Preprint 2020-37, arXiv:2101.07753 [hep-ex]
4. “Measurement of time-dependent CP violation parameters in  $B^0 \rightarrow K^0_S K^0_S K^0_S$  decays at Belle”, K. H. Kang, H. Park, T. Higuchi, K. Miyabayashi, K. Sumisawa, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 103, 032003 (2021 February 8), Belle preprint 2020-17, KEK Preprint 2020-34, arXiv:2011.00793 [hep-ex]
5. “Search for lepton-number- and baryon-number-violating tau decays at Belle”, D. Sahoo, G. B. Mohanty, K. Trabelsi, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 111101 (24 December 2020), Belle preprint 2020-16, KEK Preprint 2020-33, arXiv:2010.15361 [hep-ex]
6. “Search for transitions from  $\Upsilon(4S)$  and  $\Upsilon(5S)$  to  $\eta b(1S)$  and  $\eta b(2S)$  with emission of an  $\omega$  meson”, P. Oskin, R. Mizuk, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 092011 (2020 November 30). Belle preprint 2020-15, KEK Preprint 2020-17, arXiv:2009.11720 [hep-ex]
7. “Study of Electromagnetic Decays of Orbitally Excited  $\Xi_c$  Baryons”, J. Yelton, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 071103(R) (2020 October 26). Belle preprint 2019-07, KEK Preprint 2020-6, arXiv:2009.03951 [hep-ex]
8. “Test of lepton flavor universality and search for lepton flavor violation in  $B \rightarrow K \ell \ell$  decays” S. Choudhury, S. Sandilya, K. Trabelsi, A. Giri, et al. (Belle Collaboration), published in JHEP 2103, 105 (2021 March 10). Belle preprint 2020-11, KEK Preprint 2020-12, arXiv:1908.01848 [hep-ex]
9. “Search for a doubly-charged DDK bound state in  $\Upsilon(1S, 2S)$  inclusive decays and via direct production in  $e^+e^-$  collisions at  $\sqrt{s} = 10.520, 10.580, \text{ and } 10.867 \text{ GeV}$ ”, Y. Li, S. Jia, C. P. Shen, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 112001 (2020 December 1). Belle preprint 2020-10, KEK Preprint 2020-11, arXiv:2008.13341 [hep-ex]
10. “Measurement of Branching Fractions of  $\Lambda_c^+ \rightarrow \eta \Lambda \pi^+, \eta \Sigma^0 \pi^+, \Lambda(1670) \pi^+, \eta \Lambda \pi^+, \text{ and } \eta \Sigma(1385)^+$ ”, J. Y. Lee, K. Tanida, Y. Kato, S. K. Kim, S. B. Yang, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 103, 052005 (2021 March 15). Belle preprint 2020-12, KEK Preprint 2020-14, arXiv:2008.11575 [hep-ex]
11. “Evidence for  $X(3872) \rightarrow J/\psi \pi^+\pi^-$  produced in single-tag two-photon interactions”, Y. Teramoto, et al. (Belle Collaboration), published in PRL 126, 122001 (2021 March 23). Belle preprint 2020-08, KEK Preprint 2020-7, arXiv:2007.05696 [hep-ex]
12. “Dalitz analysis of  $D^0 \rightarrow K^-\pi^+\eta$  decays at Belle”, Y. Chen, L. Li, W. Yan, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 012002 (2020 July 6). Belle preprint 2020-04, KEK Preprint 2019-60, arXiv:2003.07759 [hep-ex]

13. “Search for  $B_0$  Decays to Invisible Final States ( $+\gamma$ ) at Belle”, Y. Ku, P. Chang, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 012003 (2020 July 8). Belle preprint 2020-03, KEK Preprint 2019-59, arXiv:2004.03826 [hep-ex]
14. “Evidence for a vector charmonium-like state in  $e^+e^- \rightarrow D_s+D_{s2}(2573)^- + c.c.$ ”, S. Jia, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 101, 091101(R) (2020 May 12) Belle preprint 2020-05, KEK Preprint 2020-1, arXiv:2004.02404 [hep-ex]
15. “Study of  $B \rightarrow pp\pi\pi$ ”, K. Chu, M. Z. Wang, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 101, 052012 (2020 March 25), Belle preprint 2019-16, KEK Preprint 2019-23, arXiv:1912.05999 [hep-ex]
16. “First search for the  $\eta c_2(1D)$  in B decays at Belle”, K. Chilikin, et al. (Belle Collaboration), published in JHEP 2005, 034 (2020 May 08). Belle preprint 2020-02, KEK Preprint 2019-58, arXiv:2003.08335 [hep-ex]
17. “Update of inclusive cross sections of single and pairs of identified light charged hadrons”, R. Seidl, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 101, 092004 (2020 May 13). Belle preprint 2020-01, KEK Preprint 2019-56, arXiv:2001.10194 [hep-ex]
18. “Measurement of the charm-mixing parameter  $y_{CP}$  in  $D_0 \rightarrow K_S^0 \omega$  decays at Belle”, M. Nayak, et al. (Belle Collaboration), published in PRD 102, 071102(R) (2020 October 19), Belle preprint 2019-22, KEK Preprint 2019-52, arXiv:1912.10912 [hep-ex]
19. “Observation of the radiative decays of  $\Upsilon(1S)$  to  $\chi c_1$ ”, P. Katrenko, et al. (Belle Collaboration), published in PRL 124, 122001 (2020 March 26), Belle preprint 2019-21, KEK Preprint 2019-43, arXiv:1910.10915 [hep-ex]
20. “Measurement of  $R(D)$  and  $R(D^*)$  with a semileptonic tagging method”, G. Caria, P. Urquijo, et al. (Belle Collaboration), published in PRL124, 161803 (2020 April 24) Belle preprint 2019-18, KEK Preprint 2019-40, arXiv:1910.05864 [hep-ex]

## 学会・研究会講演

### 学会、研究会等

1. “Application of the Machine Learning to the collider experiments”, Masako Iwasaki, International Workshop on Future Linear Colliders (LCWS 2021) 2021年3月17日 招待有り
2. “強化学習を用いた KEK Linac 加速器運転調整システムの開発”, 久野彰浩, 岩崎昌子, 他6名, 日本物理学会第76回年次大会 2021年3月14日
3. “ILC が切り拓く機械学習とその応用”, 岩崎 昌子, 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 15 日 招待有り
4. “機械学習を用いた ILC SiD 測定器電磁カロリメータエネルギー較正の開発(3)”, 中 祐介, 岩崎昌子, 他 10 名, 日本物理学会 2020 年秋季大会 2020 年 9 月 14 日
5. “強化学習を用いた KEK Linac 運転調整のための準備研究”, 久野 彰浩, 岩崎 昌子, 他 6 名, 第 17 回日本加速器学会年会 2020 年 9 月 4 日

## 学位論文

### 修士論文

1. 中 祐介「機械学習を用いた ILC SiD 実験用電磁カロリメータのエネルギー較正手法の開発」

## 卒業研究

1. 飯田貴之，加藤睦代「加速器実験への機械学習の適用研究：特徴量抽出と次元削減を用いた文字分類」
2. 楠本泰徳「比例計数管における空間電荷効果の研究」

## 研究助成金獲得状況

1. 「機械学習を用いた物理学実験データ処理技術の開発」，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：2020年7月- 2021年3月，代表者：岩崎昌子
2. 「素粒子・原子核実験および関連分野への深層学習の適用と発展」，山田科学振興財団 研究援助，研究期間：2019年10月- 2021年3月，代表者：岩崎昌子

## その他

1. 大阪大学 RCNP 研究プロジェクト「加速器実験および関連分野への深層学習の適用と進化」，2018年5月-2021年4月（岩崎：代表）
2. 南部陽一郎生誕100周年記念 企画展示「ほがらかに」，運営参加・支援（岩崎），大阪市科学館 2021年1月 - 2021年3月
3. 南部-アインシュタインセミナー，世話人代表（中野），オンライン開催 2021年3月

# 素粒子論研究室

中尾憲一 教授	山中真人(特任助教)	大迫壺成(M2)
丸信人 准教授	佐合紀親(博士研究員)	小林大航(M1)
	鈴木良拓(博士研究員)	番場康太郎(M1)
	高橋一麻(D3)	丸尾洋平(M1)
	岡林一賢(D2)	本村拓海(M1)
	大川瞭(D1)	
	鈴木光世(D1)	
	廣瀬拓哉(D1)	
	矢田貝祥貴(D1)	

## 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2020年度に行われた研究は以下の通りです。

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

素粒子標準模型を超える物理の兆候が全く現れず階層性問題を再考察するちょうどよい機会である。標準模型がプランクスケールまで正しいとすると、ヒッグス場の質量がプランクスケールに比べて軽い説明をしなければならない。背景磁場コンパクト化における高次元ゲージ場のスカラー場の質量に対する量子補正が相殺されることが6次元QEDで示されていた。昨年度の研究で我々は、6次元ヤン・ミルズ理論においても同様の相殺機構が働くことを示した。2020年度の研究では、昨年度の研究をゲージ不変な高次元演算子まで拡張し、上記の相殺機構が次元6の演算子を考慮して成り立つことを示した(論文1)。相殺機構は、次元6演算子だけでなく、次元4演算子との混合も寄与するため非自明である。

### 2. Cosmological collider physicsにおけるX, Yゲージボソンによる非ガウス性の研究(丸、大川)

時間並進不変性の破れによるNGボソンをインフラトンとみなし、インフラトンの有効場の理論により、インフラトンの相関関数を計算する手法をcosmological collider physicsと言う。インフレーション期にハッブルスケールオーダーの重い場が存在すると、インフラトンの3点相関関数(非ガウス性)に寄与することが知られている。我々は、大統一理論におけるX, Yゲージボソンからの非ガウス性の寄与を計算し、宇宙観測による検証可能性を論じた(論文2)。特に、弦理論から導かれる大統一理論からのX, Yゲージボソンについては、プランク衛星観測データによって、排除されることを予言した。

### 3. グラディエントフローによる超対称理論の研究 (丸, 鈴木)

超対称理論を格子上で扱うのは一般に困難である。その解決のために、グラディエントフロー法が注目されている。先行研究では超対称性を持たない理論や簡単な超対称理論について議論がなされている。本研究では物質場と相互作用する、より一般的な4次元  $N=1$  超対称 QCD に対して超対称フロー法の構成を進めている。本年度は超対称 QCD の相関関数を1次のレベルで摂動計算し、対数発散のみであることを確認した。また、超対称 QCD に対して繰り込み定数の表式も得た。さらに、超対称 QCD に対する超対称フロー方程式の逐次近似解を求め、フロー相関関数の摂動計算を進めている。これらの結果は、フロー理論の摂動論と等価な摂動級数を与える (4+1) 次元作用 (昨年度の成果) とともに、「フロー場の相関関数には余計な紫外発散が一切現れない」というフロー法の強力な性質の証明に重要な役割を果たす。この研究は、加堂大輔氏 (2020年度当時国立清華大学NCTS, 2021年度同志社大学) と浮田尚哉氏 (筑波大学計算科学研究センター) と共同で進められた。

### 4. 荷電レプトンフレーバー非保存過程の精密解析 (山中) 素粒子物理における標準理論は異なる荷電レプトン間を繋ぐ相互作用を含まない。言いかえると、異なるレプトン間の遷移過程は、発見だけで未知の素粒子模型を示唆する証拠となり、その検証活動は模型構造の解明に多大な寄与となる。荷電レプトンフレーバー非保存過程は、新粒子を生成・検出といった直接的なものでなく、量子干渉等を通じて未知の模型を探り出す間接的なプローブである。そのため、荷電レプトンフレーバー非保存相互作用の型ごとに予期される反応を精度良く理解し、他型の相互作用との分別に備えなくてはならない。今年度行った研究では、ミューオン、電子、フォトン2つから成る演算子に注目した。この演算子がミューオン原子中にてミューオン-電子転換をもたらすことを我々は見出し、その反応率を定式化・算出した。帰結として、この演算子を検証するうえで最も高感度な反応過程がミューオン-電子転換であることを示した。さらに、異なる原子核でミューオン原子を用意し、原子核ごとにミューオン-電子転換率を測定することで、他型の荷電レプトンフレーバー非保存相互作用との分別が可能であることを定量的に示した。この研究は Sacha Davidson 氏 (Montpellier University)、久野良孝氏 (大阪大)、上坂優一氏 (九州産業大) との共同で進められた (論文 3)。

### 5. ブラックホール・シャドウ=重力崩壊体の像

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

#### (A) 自由落下する観測者のみるブラックホール・シャドウ (中尾)

ブラックホール・シャドウが光源からの光をブラックホールが遮ることによってできるシルエットでないことの証拠は、ブラックホールに向かって自由落下している観測者は、ブラックホールの外にいるときだけでなく、ブラックホール内に入ったのちもブラックホール・シャドウを観測するという事実である。2019年度 M2 の藤岡氏と宇宙・重力研究室の吉野氏との共同研究で、重力崩壊体の像であるブラックホール・シャドウがどのように見えるかを光線追跡法によって理論的に計算した。2020年度はシャドウだけではなく、星のような光源がブラックホールの外側に等方的に分布する状況で、ブラッ



クホールに向かって自由落下する観測者の見る光景を計算し、その観測者がいつブラックホールに入ったかを確認することは不可能であることを示した。

(B) 自由落下的に重力崩壊しない星の像 (高橋, 中尾)

この研究テーマも宇宙・重力研究室の吉野氏と協力して研究を進めた。重力崩壊する塵状物質から成る球対称の物体が表面から光やニュートリノを放射していると仮定して、輝度やスペクトルの時間変化から重力崩壊体の光球面やニュートリノ球面の運動を推定する手法の確立を目指す。ニュートリノに関しては有質量の効果によって、エネルギーによる到来時刻の差が存在するために、エネルギー流速の時間的減衰に質量依存性が現れる。その性質に着目して、超新星爆発残骸の重力崩壊からのニュートリノ観測によって、ニュートリノの質量を測定できることが Beacom 達によって指摘されているが、彼らの解析では、重力崩壊モデルが単純化されており、ニュートリノ振動の効果も考慮されていない。本研究ではこの2点の改良も目指し、現在も進行中である。

6. 重力崩壊過程に伴う粒子生成 (岡林, 中尾)

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

7. ブラックホール摂動法を用いた重力波源の研究 (佐合)

コンパクト天体からなる連星系は重力波観測において最も重要なターゲットである。LIGO グループが重力波直接観測に初めて成功して以降、50以上のコンパクト天体連星合体イベントが観測されている。今後、さらに多くのイベントを精度よく観測できるようになれば、ブラックホールの精密な観測や一般相対論の検証などが可能になると期待される。そのためには、観測器の感度改善に加えて、連星から放出される重力波理論波形の精密な予測が不可欠である。本研究では、ブラックホールを周回する粒子で連星をモデル化し、重力場と粒子の運動を摂動論的に扱う「ブラックホール摂動法」を用いて、連星の軌道進化と放出される重力波波形を精度よく予測することを目指す。

8. 高次元極限におけるプロブ近似の研究 (鈴木)

高次元極限においてはブラックブレーンのダイナミクスがホライズン面上の流体的な有効方程式に帰着し、解析が容易になる。コンパクトなブラックホールのダイナミクスもブラックブレーンの有効理論の枠組みで記述できることがわかってきた。そのためにはコンパクトなホライズンはプロブと呼ばれるブレーン上のガウス分布に読み替えられる(プロブ近似)。このプロブ近似を用いて、コンパクトなブラックホール同士の変形・衝突や相互作用などの研究を行なった。

## 教育・研究業績

### 著書

該当無し

### 学術論文

1. T. Hirose and N. Maru, “Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Yang-Mills Theory in Flux Compactification with Higher Dimensional Operators”, Journal of Physics G 48 (2021) 5, 055005.
2. N. Maru and A. Okawa. “Non-Gaussianity from X, Y gauge bosons in Cosmological Collider Physics”, 2101.10634 [hep-ph].
3. S. Davidson, Y. Kuno, Y. Uesaka, M. Yamanaka: “Probing  $\mu e \gamma \gamma$  contact interactions with  $\mu \rightarrow e$  conversion”, Phys. Rev. D102 (2020) no.11, 115043.
4. N. Sago in KAGRA Collaboration (246 名), “Overview of KAGRA : KAGRA science”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021, 05A103 (2021).
5. K. Izumi, N. Sago et al., “The current status of contribution activities in Japan for LISA”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2021, 05A106 (2021).
6. N. Sago, T. Tanaka, “Gravitational wave echoes induced by a point mass plunging to a black hole”, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2020, 123E01 (2020).
7. H. Nakano, R. Fujita, S. Isoyama, N. Sago, “Scope out multiband gravitational-wave observations of GW190521-like binary black holes with space gravitational wave antenna B-DECIGO”, Universe, 7, 53 (2021).
8. T. Andrade, R. Emparan, A. Jansen, D. Licht, R. Luna, R. Suzuki, “Entropy production and entropic attractors in black hole fusion and fission”, JHEP, 08, 098 (2020).
9. R. Suzuki, “Black hole interactions at large D: brane blobology”, JHEP, 02, 131 (2021).

### 国際会議会議録

該当無し

### 国際会議・研究会講演

1. 矢田貝祥貴: “Fermion Mass Hierarachy in Grand Gauge-Higgs Unification with Localized Gauge Kinetic Terms”, Higgs as a Probe of New Physics 2021 (HPNP2021), 2021年3月26日, Osaka University, Osaka (online)
2. 中尾憲一: “On gravastar formation: What can be the evidence of a black hole?”, YITP molecule type workshop “Dynamic instrong gravit universe”, 2018 年 9 月 6 日, 京都大学基礎物理学研究所
3. M. Yamanaka : “Theories for Muon to Electron Conversion”, 33rd COMET Collaboration Meeting & Integration Workshop, 2021年2月24日, J-PARC
4. M. Yamanaka : “Probing  $\mu e \gamma \gamma$  contact interactions with  $\mu \rightarrow e$  conversion”, KEK Theory Meeting on Particle Physics Phenomenology (KEK-PH2021), 2021 年3月24日, 高エネルギー加速器研究機構(KEK)
5. M. Yamanaka : “Detailed analysis of lepton flavor violating deep-inelastic scattering by (pseudo-)scalar mediator”, Higgs as a Probe of New Physics (HPNP2021), 2021年3月27日, 大阪大学
6. R. Suzuki, “Brane blobology in large D effective theory”, Online JGRG Workshop 2020, Nov 2020.

7. K. Okabayashi, “Particle creation and its robustness from a horizonless compact object”, Online JGRG Workshop 2020, Nov 2020.
8. K. Okabayashi, “Particle creation and its robustness from a horizonless compact object”, Strings and Fields 2020, Nov 2020.

### 国内学会・研究会講演

1. 廣瀬拓哉: “Cancellation of One-loop Corrections to Scalar Masses in Flux Compactification with Higher Dimensional Operators”, 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン, 2021年3月(口頭)
2. 大川瞭: “Cosmological Collider PhysicsにおけるX, Y ゲージボソンによる非Gauss性への寄与”, 日本物理学会 第76回年次大会, オンライン, 2021年3月(口頭)
3. 大川瞭: “Non-Gaussianity from X, Y gauge bosons in Cosmological Collider Physics”, Einstein-Nambu セミナー 2020, オンライン開催, 2021年3月(口頭).
4. 矢田貝祥貴: “局在するゲージ場の運動項込みの大統一ゲージ・ヒッグス統一モデルとフェルミオンの質量階層性”, 日本物理学会 2020年度秋季大会, 2020年9月14日
5. 中尾憲一: “ブラックホール再考” [招待講演], 理論懇シンポジウム, リモート開催 by 名古屋大学, 2020年12月23日
6. 中尾憲一: “特異点とブラックホール: 宇宙検閲官仮説” [招待講演], 第76回日本物理学会年次大会 シンポジウム「ロジャーペンローズと相対論」リモート開催 by 名古屋大学 2021年3月12-15日
7. 中尾憲一: “2020年ノーベル物理学賞: ペンローズ氏の研究について” [招待講演], 2021/3/25-26 ブラックホール磁気圏研究会 @ リモート開催 by 名古屋大学
8. 佐合紀親: “カー時空の非束縛軌道を運動する粒子からの重力波”, 第76回日本物理学会年次大会, リモート開催 by 名古屋大学 2021年3月12-15日
9. 佐合紀親: “ブラックホールからの重力波とその反響現象”, The 4th workshop on “Mathematics and Physics in General Relativity”, ハイブリッド開催(Zoom+大阪市立大) 2021年3月
10. 鈴木良拓: “Black Ripples, Dumbbells and Flowers at large D”, 第76回日本物理学会年次大会, リモート開催 by 名古屋大学 2021年3月12-15日.

### その他

#### 【一般講演】

1. 丸信人: 「素粒子の世界」, 大阪府高齢者大学校, 2021年2月1日, 22日, 3月8日, 大阪助産師会館にて3週連続講義

#### 【セミナー講演】

2. 丸信人: 「余剰次元の基礎とゲージ・ヒッグス統一モデル」, 瀬戸内サマーインスティテュート2020 (SSI2020)(オンライン), 2020年9月10日, 11日 広島大学
3. 矢田貝祥貴: 「局在するゲージ場の運動項込みの大統一ゲージ・ヒッグス統一モデルとフェルミオンの質量階層性」, 素粒子論研究室セミナー, 2020年11月20日, 金沢大学
4. 矢田貝祥貴: 「Fermion mass hierarchy in grand gauge-Higgs unification with localized gauge kinetic terms」, 素粒子論研究室セミナー, 2021年2月24日, 名古屋大学
5. 中尾憲一, 2020/12/9 @名古屋大学KMIコロキウム, 「On black hole shadow」

#### 【ポスター発表】

6. 矢田貝祥貴: “Fermion Mass Hierarchy in Grand Gauge-Higgs Unification”, HPNP2019-The 4<sup>th</sup> International Workshop on “Higgs as a Probe of New Physics 2019”, 2019年2月18日-22日, 大阪大学

#### 【プレスリリース】

7. 丸信人, 矢田貝祥貴: 「ゲージ・ヒッグス統一模型の大統一模型へ拡張した理論を構築し、クォーク・レプトンの質量階層性を再現することに成功」, 2020年10月

## 学位論文

### 修士論文

1. 大迫壱成: 「ゲージ・ヒッグス統一模型におけるダークマターの残存量」

### 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・ヒッグス統一模型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」 (研究代表者) 直接経費50万円, 間接経費15万円
2. 丸信人: 日本学術振興会科学研究費補助金・基盤(C) 「超対称フローが導く数値超対称性の新展開」 (研究分担者) 直接経費5万円
3. 山中真人: 文部科学省 数学・理論物理の協働・共創による新たな国際的研究・教育拠点 「暗黒物質と宇宙定数をプローブとした根源的素粒子模型の追究」, 350,000円
4. 山中真人: 学術変革領域研究 (A) 「マルチメッセンジャーで探る重いダークマター」, 55,380,000円
5. 鈴木光世: 公益財団法人日本科学協会笹川科学研究助成 「グラディエントフローによる超対称理論への新たなアプローチ」 25万円 (2020年度分採用)
6. 鈴木良拓: 若手研究18K13541 (平成30～令和3年度) 「高次元極限を用いた高次元重力理論におけるブラックホールダイナミクスの理論的研究」 (研究機関: 大阪市立大学)

## 海外出張および海外研修

該当無し

## 外国人研究者招聘

該当無し

## その他

1. 中尾憲一: 日本物理学会代議員
2. 中尾憲一: 神戸大学・テニユア審査外部委員
3. 丸信人: 素粒子論グループ事務局

4. 山中真人：国内研究会 ``素粒子現象論研究会2020" 世話人
5. 矢田貝祥貴：日本学生支援機構 第1種奨学金 修士課程時貸与分の全額返還免除
6. 鈴木光世：日本学生支援機構 第1種奨学金 修士課程時貸与分の半額返還免除
7. 鈴木光世：公益財団法人 小野奨学会 給付型奨学金（年72万円）
8. 鈴木光世：一般財団法人 高橋誠悦育英会 給付型奨学金（年10万円）

# 数理物理研究室

糸山 浩司 (教授)	森山 翔文 (准教授)	大田 武志 (特任准教授)	吉岡 礼治 (研究員)
清重 一輝 (D3)	中島 爽太 (D2)	古川 友寛 (D2)	矢野 勝也 (D2)
神林 聡 (M2)	古賀 勇一 (M2)	中西 智暉 (M1)	潘 敏 (M1)
佐々木 照 (B4)	田村 悠陽 (B4)	村上 由三 (B4)	

## 研究概要

### 1. M2 ブレーンと量子代数曲線 (森山)

M 理論の M2 ブレーンは、超対称チャーン-サイモンズ理論により記述される。その分配関数は、M2 ブレーンの特性を反映して、非常に特徴的な  $3/2$  乗則 (エアリー関数性) を満たす。その特性を再現する枠組みとして、本来の理論の局所化により得られる行列模型よりも、量子代数曲線の方がより適していると考えられる。

本研究ではデルペッツォ幾何という種数 1 の代数曲線に着目し、代数曲線に作用する例外群のワイル群やその量子化の特徴をヒントに、代数曲線の量子化を実行した。その結果、これまで困難とされていた  $E_{6,7,8}$  の量子代数曲線の明示的な表示を得ることができた。特に  $E_8$  の量子代数曲線の構築は長年問題だった。さらに本研究では、明示的にワイル群不変性を尊重する形式を構築し、先行研究で導入した暫定的な規則に統一的な説明を与えた。

### 2. 量子曲線とブレーン遷移 (古川, 森山, 中西)

超対称チャーン-サイモンズ理論が M2 ブレーンを記述することは、直交する NS5 ブレーンや  $(1, k)5$  ブレーンを含む、1 次元円周上の D3 ブレーンの配位から、双対性を経て説明された。このブレーン配位が興味深いブレーン遷移を持つことは、既にハナニー-ウィッテンの解析により知られていた。しかし、書き換えによって得られた量子曲線が非常に巨大な例外群のワイル群を持つことから、ハナニー-ウィッテンのブレーン遷移を超えたブレーン遷移が得られるのではないかと期待されていた。実際、著者を含む先行研究において、それぞれの 5 ブレーンを 2 枚含む系を  $D_5$  量子曲線に埋め込み、 $D_5$  ワイル群をブレーン遷移に読み替えることにより、新たなブレーン遷移が提唱されていた。

しかし、そのブレーン遷移は、ブレーン配位全体に対する対称性であり、ハナニー-ウィッテンのブレーン遷移のように、隣接するブレーンに対する対称性の形では表されていなかった。そこで、本研究では、新しいブレーン遷移に対する知見を得るために、NS5 ブレーンを 2 枚、 $(1, k)5$  ブレーンを 4 枚含む、 $E_7$  量子曲線の場合に解析を拡張した。このとき、 $E_7$  量子曲線の縮退による困難を乗り越えることにより、 $E_7$  の場合も新しいブレーン遷移を読み取ることができた。さらに、その結果を先行研究の  $D_5$  の場合の結果と比較することにより、局所的なブレーン遷移の規則を提案し、提案の整合性を確認した。

### 3. クラス S 理論の頂点作用素代数 (清重)

4 次元  $\mathcal{N} = 2$  超共形場理論の  $1/4$ BPS セクターには 2 次元の頂点作用素代数の構造が入ることが知られている。特に点付きリーマン面でラベルされるようないわゆる「クラス S 理論」については、この対応は 2 ボルディズムの圏から頂点作用素代数の圏への自然な関手の存在を意味しており、物理だけでなく数学においても注目されている。このクラスの代数のうち、種数が 0 または 1 のリーマン面に対応するものについては詳しく調べられているが、種数が 2 以上のリーマン面に対応するものについては不明な点が多かった。

このような状況の中、本研究では種数 2 のクラス S 理論の最も簡単な例について、対応する頂点作用素代数を具体的に構成することに成功した。この成果はより一般のクラス S 理論に対応する代数を特定するための大きな足掛かりになると期待される。特にここで構成された代数は、4 次元/2 次元対応の一般論から予想されるものよりも大きな自己同型群を持っており、その由来や 4 次元における物理的意味についての重要な研究テーマを提示した。

4. Argyres-Douglas 理論と関連するユニタリ行列模型の臨界現象（糸山、矢野）

対数項含むポテンシャルを持つユニタリ型行列模型の最低次の臨界点は  $(A_1, A_3)$  Argyres-Douglas 理論と対応することが知られている。本研究では一般的なコサイン型のポテンシャルに関連する  $k = 1, 2, 3, \dots$  次臨界点について考え、スケーリング演算子を構成し、それらの期待値やスケーリング次元を摂動されたストリング方程式から決定した。また、これらの演算子の次元が  $(A_1, A_{4k-1})$  Argyres-Douglas 理論のクーロンブランチ演算子の次元と一致することを確認した。

5. ヘテロティック interpolating 模型のマージナル変形と宇宙定数の指数関数的抑制（糸山、中島）

interpolating 模型と呼ばれるストリング模型では、無質量のフェルミオンとボゾンの自由度が等しければ、宇宙定数の値を指数関数的に抑制できることが知られている。本研究では、 $D$  次元コンパクト化された interpolating 模型のマージナル変形を考え、宇宙定数の抑制の条件を満たすようなモジュライの配位を調べた。特にツイストされている方向の Wilson line モジュライに注目し、 $Spin(32)/Z_2$  ヘテロティック模型と  $E_8 \times E_8$  ヘテロティック模型において、ゲージ対称性が特定の群に拡大する場合に宇宙定数の指数関数的抑制が可能であることを明らかにした。

6. Twisted コンパクト化における Wilson line によるゲージ対称性の拡大（糸山、古賀、中島）

余剰次元を Twisted コンパクト化した場の量子論に Wilson line を導入することで、弦理論で見られるゲージ対称性の拡大という現象は場の量子論でも実現できることを指摘した。特に、任意の次元コンパクト化したヘテロティック超重力理論から読み取った場を用いて、上記の糸山、中島による interpolating 模型の解析で得られているゲージ対称性の拡大のパターンを再現し、ゲージ対称性が拡大するモジュライの配位において 1 ループ有効ポテンシャルが極値をとることを示した。

7. Static force potential of a non-Abelian gauge theory in a finite box in Coulomb gauge（古川、石橋、糸山、神林）

有限体積の Box において、クーロンゲージを用いて 2 つの外部電荷間の相互作用エネルギーを議論した。その際、境界条件として周期的境界条件とツイスト境界条件を考えた。本研究では、ツイスト境界条件が相互作用エネルギーに与える影響を議論すると共に、1-loop までの相互作用エネルギーを長距離展開と短距離展開の 2 つの展開方法を用いて解析した。その結果、長距離展開からは漸近的自由性やエーリングポテンシャルを確認することができ、その結果は Box の体積無限大の極限で、よく知られた結果に一致する。また、短距離展開においては、漸近的自由性に関与していると期待できる違いが、非可換ゲージ理論と可換ゲージ理論に現れることを明らかにした。

8. テンソル模型における Op/FD/dessin 対応（糸山、吉岡）

異なるランクのテンソル模型間に Op/FD 対応が成り立つことを示した。ここで Op/FD 対応とはランク  $r$  模型の演算子とランク  $r - 1$  模型の Feynman 図の間の 1 対 1 対応である。この対応により、テンソル模型の全ての演算子は、ランクが一つ下のテンソル模型に現れる Feynman 図でラベル付けされることが明らかになった。さらに  $r = 3$  の場合、この関係は dessin (d'enfant) と呼ばれるグラフとの 1 対 1 対応を含んだ Op/FD/dessin 対応に拡大されることを実証した。dessin とは、2 次元の向き付け可能な閉曲面上に埋め込まれた、2 色の頂点とそれらを繋ぐ辺からなるグラフである。

## 教育・研究業績

### 著書

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

## 学術論文

1. T. Furukawa, S. Moriyama and Y. Sugimoto, “Quantum Mirror Map for Del Pezzo Geometries,” *J. Phys. A* **53**, no.38, 38 (2020) doi:10.1088/1751-8121/ab93fe [arXiv:1908.11396 [hep-th]].
2. N. Amburg, H. Itoyama, A. Mironov, A. Morozov, D. Vasiliev and R. Yoshioka, “Correspondence between Feynman diagrams and operators in quantum field theory that emerges from tensor model,” *Eur. Phys. J. C* **80**, no.5, 471 (2020) doi:10.1140/epjc/s10052-020-8013-8 [arXiv:1911.10574 [hep-th]].
3. H. Itoyama and S. Nakajima, “Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models,” *Nucl. Phys. B* **958**, 115111 (2020) doi:10.1016/j.nuclphysb.2020.115111 [arXiv:2003.11217 [hep-th]].
4. S. Moriyama, “Spectral Theories and Topological Strings on del Pezzo Geometries,” *JHEP* **10**, 154 (2020) doi:10.1007/JHEP10(2020)154 [arXiv:2007.05148 [hep-th]].
5. K. Kiyoshige and T. Nishinaka, “The Chiral Algebra of Genus Two Class  $\mathcal{S}$  Theory,” *JHEP* **02**,199 (2021) doi:10.1007/JHEP02(2021)199 [arXiv:2009.11629 [hep-th]].
6. T. Furukawa, S. Moriyama and T. Nakanishi, “Brane transitions from exceptional groups,” [arXiv:2010.15402 [hep-th]].
7. T. Furukawa, K. Ishibashi, H. Itoyama and S. Kambayashi, “Static force potential of a non-Abelian gauge theory in a finite box in Coulomb gauge,” *Phys. Rev. D* **103**, no.5, 056003 (2021) doi:10.1103/PhysRevD.103.056003 [arXiv:2011.13331 [hep-th]].
8. H. Itoyama and S. Nakajima, “Marginal deformations of heterotic interpolating models and exponential suppression of the cosmological constant,” *Phys. Lett. B* **816**, 136195 (2021) doi:10.1016/j.physletb.2021.136195 [arXiv:2101.10619 [hep-th]].
9. H. Itoyama, T. Oota and K. Yano, “ Multicritical points of unitary matrix model with logarithmic potential identified with ArgyresDouglas points,” *Int. J. Mod. Phys. A* **35**, 2050146 (2020) doi:10.1142/s0217751x20501468 [arXiv:1909.10770 [hep-th]].
10. H. Itoyama and K. Yano, “Theory space of one unitary matrix model and its critical behavior associated with Argyres-Douglas theory,” [arXiv:2103.11428 [hep-th]].

## 国際会議会議録

1. Sanefumi Moriyama, “Nambu brackets, Chern-Simons theories, quantum curves and M2-branes”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics*.

## 国際会議開催

1. 国際研究集会 “Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory 2021”, 2021/03/22-2021/03/25, Osaka City University & zoom. Organized by H. Itoyama, K. Maruyoshi and T. Oota
2. 国際研究集会 “Space-time topology behind formation of micro-macro magneto-vortical structure manifested by Nambu mechanics” (南部力学がつなぐ時空トポロジーとマイクロ・マクロ渦磁場構造形成), 2020/09/28-2020/10/01, Osaka City University & zoom. Organized by K. Fukumoto, H. Itoyama, C. Matsuoka



## 国際会議講演

1. Sanefumi Moriyama, “Nambu brackets, Chern-Simons theories, quantum curves and M2-branes”, 国際研究集会 “Space-time topology behind formation of micro-macro magnetovortical structure manifested by Nambu mechanics” (南部力学がつなぐ時空トポロジーとミクロ・マクロ渦磁場構造形成), 2020/09/28-2020/10/01 (発表日 2020/10/01), Osaka City University & zoom.
2. Sanefumi Moriyama, “M2-branes: Integrability & Weyl Group”, The 27th Osaka City University International Academic Symposium “Mathematical Science of Visualization, and Deepening of Symmetry and Moduli”, 2021/03/21-2021/03/26 (発表日 2021/03/22), Osaka City University & zoom.
3. Takeshi Oota, “Critical points of matrix models, and their connection with the supersymmetric gauge theories”, 国際研究集会 “Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory 2021”, 2021/03/22-2021/03/25 (発表日 2021/03/23), Osaka City University & zoom.
4. Kazuki Kiyoshige, “The Chiral Algebra of Genus Two Class S Theory”, 国際研究集会 “Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory 2021”, 2021/03/22-2021/03/25 (発表日 2021/03/24), Osaka City University & zoom.
5. Reiji Yoshioka, “Cut & Join and Op/FD/dessin correspondence”, 国際研究集会 “Randomness, Integrability and Representation Theory in Quantum Field Theory 2021”, 2021/03/22-2021/03/25 (発表日 2021/03/25), Osaka City University & zoom.

## 学会・研究会講演

1. 糸山浩司, “Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models”, 素粒子現象論研究会、大阪市立大学学術情報センター、hybrid, 2020年11月28日
2. 糸山浩司 “Enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in heterotic interpolating models” 京都大学素粒子論研究室セミナー、online, 2021年3月3日
3. H. Itoyama, “Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models”, seminar delivered on Sept 31, 2020, online, Liverpool U., UK
4. 糸山浩司, 中島爽太, “Stability, enhanced gauge symmetry and suppressed cosmological constant in 9D heterotic interpolating models”, 日本物理学会, 2020年秋季大会.
5. 矢野勝也, 糸山浩司, “ユニタリ行列模型と関連する1群のN=2ゲージ理論”, 日本物理学会, 2020年秋季大会.
6. 糸山浩司, A. Mironov, A. Morozov, 吉岡礼治, “Cut & join operations and dessins”, 日本物理学会, 2020年秋季大会.
7. 古川友寛, 森山翔文, 杉本裕司, “Quantum mirror map for del Pezzo geometries”, 日本物理学会, 2020年秋季大会.
8. 古川友寛, 石橋啓一, 糸山浩, 神林聡, “Static force potential of non-abelian gauge theory at a finite box in Coulomb gauge”, 日本物理学会, 第76回年次大会.
9. 古川友寛, 森山翔文, 中西智暉, “例外群を用いたブレーン遷移の解析”, 日本物理学会, 第76回年次大会.
10. 糸山浩司, 古賀勇一, 中島爽太, “Interpolating heterotic modelの有効理論におけるゲージ対称性の拡大”, 日本物理学会, 第76回年次大会.

11. 森山 翔文, “高次元超重力理論の古典解への示唆”, The 4th workshop on “Mathematics and Physics in General Relativity”, 2021/03/20-21 (発表日 2021/03/20), 大阪市立大学 & zoom.

## その他

1. 糸山 浩司 ”理論物理学志望の英語習得作戦と海外生活”, 2020年10月8日甲南大学国際言語文化センターで講演
2. 糸山 浩司 ”南部博士と素粒子物理学”, 南部陽一郎生誕100周年記念 スペシャルナイト「物理学者・南部陽一郎と宇宙」 で講演 大阪市立科学館 online 及び youtube 配信 2021年1月23日

## 学位論文

### 修士論文

1. 神林 聡, “クーロンゲージでの非可換ゲージ理論における静的な力のポテンシャル (Static force potential in non-abelian gauge theory in Coulomb gauge)”.
2. 古賀 勇一, “内挿ヘテロティック模型の相互作用 (Interactions of Interpolating heterotic models)”.

### 博士論文

1. 清重 一輝, “The Associated Chiral Algebra of Genus Two Class S Theory (種数 2 class S 理論に対応するカイラル代数)”.

## 研究助成金取得状況

1. 糸山 浩: 日本学術振興会・基盤研究 (C) 「行列・テンソル模型で探るゲージ理論・ランダム幾何学に於ける可積分性の出現」(代表),
2. 森山 翔文, “弦理論の非摂動論的な効果の解析から、M 理論の地図の解明へ”, 2019-2022 (継続).
3. 清重一輝: 学術振興会・特別研究員奨励費「4次元超共形場理論に於ける物理的制限に関する研究
4. 古川 友寛, “ABJM 行列模型における可積分構造”, 2020年度 2021年度 (継続)
5. 糸山 浩司: 大阪市立大学戦略的研究(重点研究)「「渦」の縦糸と「物理」の横糸で紡ぐ非平衡・不安定系の学理の構築」(代表) 700万円

## その他

1. 森山 翔文, 「宇宙の始まりは? 宇宙の果ては? 素粒子の究極理論を目指す」, 大阪市立大学同窓会報 “有恒”, 2021年第21号 22-23.
2. 糸山 浩司、南部陽一郎生誕100周年記念事業 企画展示 ほがらかに ー南部陽一郎の人生と研究ー 2021年1月13日ー3月28日、主催: 大阪市立大学南部陽一郎物理学研究所、大阪市立科学館、丸・清矢・岩崎と協力して NITEP 側世話人を務めた。

# 宇宙物理研究室

石原 秀樹	教授	吉野 裕高(数学研究所研究員)	松野 皐 (D3)
浜端 広充	准教授	友田健太郎(数学研究所研究員)	安積 伸幸(D2)
		森澤 理之(数学研究所研究員)	遠藤 洋太(D1)
		松野 研(数学研究所研究員)	神原 亮介(M2)
		小川 達也(数学研究所研究員)	大倉 靖央(M2)
		加藤 亮(数学研究所研究員)	奥谷 健太(M1)
			小久保裕貴(M1)
			佐田 彩夏(M1)

## 研究概要

### <重力理論分野>

宇宙物理（重力）グループは、アインシュタインの一般相対性理論を基礎として、宇宙における強い重力場を伴う物理的現象を重点的に研究している。素粒子論研究室とはコロキウムを共同開催し、研究・教育も協力して行っている。2020年度に行った研究を以下にまとめる。

- 2つの複素スカラー場とゲージ場の系の非トポロジースリトン（小川，遠藤，加藤，石原）

複素スカラー場，Higgsスカラー場，U(1)ゲージ場および重力場からなるモデルでの非トポロジースリトン星の数値計算による解析を行った。一般相対論的重力場と結合したスリトン星のコンパクト指標である(質量 $\times 2$ )/(半径)が0.5を上回るようなコンパクトな解も存在することがわかった。

1つのパラメーターで特徴づけられた解の線形摂動を解析し，安定，不安定が切り替わるパラメーターの値を求めることができた。
- ブラックホール時空中における宇宙ひもの摂動（神原，小川，石原）

Schwarzschild 時空中で定常回転するストリング解は，平坦な時空中の定常回転するストリングの解のうち2つを選び，それらをブラックホールの赤道面で接続したものになっている。この中で，最も単純なものは，螺旋状の形状を保ちながら回転する2つのヘリカル解を赤道面でつないだものである。

この解に対して，ひもの変形の線形摂動を解析をした。摂動はストリングの世界面上の波動として伝播するが，その波動方程式はブラックホール赤道面近傍だけで大きく変形している。この波動方程式の散乱問題を考え，反射係数の振動数依存性より，ブラックホールの質量などの情報が得られることを見出した。
- 超流動渦と重力のアナロジー（大倉，小川，石原）

重力場中の光の伝播は流体中を伝播する音波と類似性がある。ここで，流体の密度場や速度場は，時空の計量に対応させることができ，流体中の音波が従う方程式は曲がった時空中における波動方程式に対応する。

超低温実験グループでは，液体ヘリウムの超流動巨大渦が実現されている。このモデルとして回転する軸対称定常流を考え，角度方向の流速のみをもつモデルと動径内向きの流速と角度方向の流速をもつモデルを考察した。ここで，音波に対して短波長近似を用い，音の軌道を考察した。音の軌道は巨大渦からの効果を受けて湾曲することを示した。また，渦芯の近傍に，音の円軌道が現れることを明らかにした。これらの現象を用いて巨大渦中の音の干渉実験での検証可能性を検討している。

#### 4. Beltramiベクトル場と電磁場および重力場 (松野阜, 石原)

ベクトル場の回転 (rot) が自分自身に比例する場であるBeltramiベクトル場に注目して電流とMaxwell方程式およびEinstein方程式の連立系の厳密解を調べた. このとき3次元の部分空間は接触空間で, Beltramiベクトル場はReebベクトルとなり, このベクトル場がKillingベクトルになる場合, この空間は準佐々木空間となる.

Reebベクトルが時間的になる場合は厳密解としてGoedel宇宙が得られ, 空間的な場合には歪んだEinsteinの静的宇宙が得られることを明らかにした.

#### 5. 時空中の光子の運動に関する一般論 (天羽将也 (京大基研), 泉圭介 (名大), 富川祥宗 (松山大), 吉野, 白水徹也 (名大))

空間中の任意の閉曲面上の重力場の強さを特徴づける新しい概念 (Attractive Gravity Probe Surface) を提案し, その面積がある不等式を満たすことを共形流とよばれる技術を使って証明した. また, 遠方で動径座標に接するように飛ばした光子の挙動を一般的に調べた. 高次元時空においてはその光子は光的無限遠に到達するが, 4次元時空においてはそれが必ずしも成り立たない可能性があることを示した.

#### 6. ブラックホール磁気圏による高周波重力波の生成 (斎藤海秀 (神戸大), 早田次郎 (神戸大), 吉野)

ブラックホール磁気圏において降着円盤から放射されるX線がブラックホールまわりを旋回するときに, 磁場との相互作用により重力波に変換される過程を考察した. 無数の銀河中心からそのような重力波が放射されるため, 地球では宇宙背景重力波として届く. その背景重力波のエネルギー密度を計算し, 観測可能性を議論した.

### <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, より一般的な解を見いだすべく, 導出した単純化された方程式系に基づいた研究を継続中である.

#### 2. Firehose不安定の非線形発展 (浜端)

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

#### 3. 大振幅Alfvén波のパラメトリック不安定 (浜端)

大振幅Alfvén波はMHD方程式の厳密解の一つで, そのパラメトリック不安定について数多くの研究がなされている. 大振幅Alfvén波の解はMHDの極限ではVlasov方程式の厳密解でもあるが, そのパラメトリック不安定についてはほとんど研究がない. 昨年度に引き続き, 大振幅のAlfvén波のパラメトリック不安定への運動論的效果についての研究を継続中である.

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. “Variety of nontopological solitons in a spontaneously broken  $U(1)$  gauge theory: Dust balls, shell balls, and potential balls”,  
Hideki Ishihara, Tatsuya Ogawa,  
Phys.Rev.D 103 (2021) 12, 123029.
2. “Loosely trapped surface and dynamically transversely trapping surface in Einstein-Maxwell system”,  
Kangjae Lee, Tetsuya Shiromizu, Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, and Yoshimune Tomikawa,  
Prog. Theor. Exp. Phys. (2020) 103E03.
3. "Light deflection by squashed Kaluza-Klein black holes in a plasma medium", Ken Matsuno,  
Published in: Phys.Rev.D 103 (2021) 4, 044008.
4. "Area bound for surfaces in generic gravitational field",  
Keisuke Izumi, Yoshimune Tomikawa, Tetsuya Shiromizu, Hirotaka Yoshino  
Prog. Theor. Exp. Phys. (に投稿中, arXiv:2010.03860[gr-qc]).

### 国際会議発表

1. Hirotaka Yoshino, Keisuke Izumi, Tetsuya Shiromizu, Yoshimune Tomikawa  
“Dynamically Transversely Trapping Surfaces in a Kerr spacetime”,  
Online JGRG workshop 2020 (2020年11月23～24日)

### 学会・研究会講演

1. 吉野裕高, 泉圭介, 白水徹也, 富川祥宗  
“強重力場を特徴付ける新しい概念の提案”  
The 4th workshop on Mathematics and Physics in General Relativity,  
大阪市立大学杉本キャンパス & Online zoom (2021年3月20日)
2. 吉野裕高, 早田次郎  
“アクシオン場とブラックホール磁気圏について”  
ブラックホール磁気圏研究会 2021, Online zoom (2021年3月25日)

### その他

1. 石原秀樹  
高津高校 「体験型進路学習 ポスターセッション」 講評, (11月12日)

## 学位論文

### 修士論文

1. 神原 亮介  
“ブラックホール時空中で定常回転する南部-後藤ストリング”  
(Stationary Rotating Nambu-Goto Strings in a Black Hole Spacetime)
2. 大倉 靖央  
“超流動体の巨大渦と重力場の類似性”  
(Giant Vortices in a Superfluid and Gravitational Analogy)

## 研究助成金取得状況

1. 吉野裕高 科研費基盤研究 (C) (代表)  
「超弦的アクシオンが引き起こす重力波現象の理論的探査」

# 原子核理論研究室

有馬正樹 教授	緒方一介 准教授 <sup>(※)</sup>	福村健太 (M2)
千葉陽平 特任助教	(※ 阪大とのクロスアポイントメント)	宮下直斗 (M2)
沈相仁 特任助教	櫻木弘之 教授/副学長	瀧川将 (UG4)
		山本昌幸 (UG4)
		大垣内宇宙 (UG4)

## 研究概要

1. 量子化されたスキルム模型によるデルタ共鳴の研究 (福村、有馬)  
カイラル対称性の非線形表現を用いたスキルム模型を量子化してバリオン構造の研究に応用した。特に本研究ではデルタ共鳴に着目した。この解析において重要なのは、ソリトンに伴うゼロモードと $\pi$ 中間子場のゆらぎの効果を考慮することである。「デルタ共鳴は $\pi$ 中間子と核子の束縛状態か？あるいは独立した一つの粒子か？」という未解決の問題について、一つの模型の枠組みの中で考察することができた。そして、デルタ共鳴が核子のように独立した粒子として存在する可能性を強く示唆する結論を得た。
2. カイラル対称性と低エネルギー定理について (宮下、有馬)  
カイラル対称性が自発的に破れることにより、ハドロンが関わる種々の興味深い現象が引き起こされる。そして低エネルギー定理として知られる関係式があらわれる。ハドロン物理学を研究する上で、これらの事柄を理解することは大変重要である。本研究では、カイラル対称性の基本から始めて、この対称性の存在が原因で発生する現象の解析までを、系統的に網羅し、その解説を試みた。特に「対称性が自発的に破れる」ことの本質的な意味を十分に理解することに力点を置いた。
3. 核子ノックアウト反応を用いた原子核の一粒子構造 (魔法数) の研究 (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歪曲波インパルス近似で分析することにより、質量数50付近の中性子過剰核で発言する魔法数の変化を明らかにした。また、 $^{24}\text{O}$ は二重魔法核として知られているが、これにただ1つ陽子が加わった原子核である $^{25}\text{F}$ の中では、 $^{24}\text{O}$ の魔法性が著しく失われることを見出した。
4. 非弾性散乱の微視的チャンネル結合模型による分析 (緒方・千葉・櫻木)  
 $\alpha$ 粒子または陽子を用いて原子核を励起させる反応を分析することにより、様々な原子核に発現する $\alpha$ クラスター構造や回転バンド構造を明らかにした。
5. 弱結合原子核の分解特性の記述とその応用 (緒方)  
弱く束縛したと原子核が分解する反応の分析を通じて、 $^6\text{He}$ および $^{10}\text{B}$ の2中性子ハロー構造を明らかにした。また、分解効果を陽に取り入れた重陽子の核データライブラリを構築し、公表した。
6. 中性子場中での核反応の記述 (緒方)  
中性子星合体時など、背景中性子が周辺に存在する環境において、原子核による中性子捕獲過程の反応確率が変化し得ることを示した。

7. 原子核内に存在する  $\alpha$  クラスターの実証研究 (緒方)  
原子核に陽子をぶつけ、飛び出してくる  $\alpha$  粒子を観測し、これを反応理論の結果と比較することにより、原子核の中に存在している  $\alpha$  粒子の数を決定した。特に、比較的重い原子核(錫同位体)の中には確かに  $\alpha$  粒子が存在していることを初めて確定させた。
8. 原子核の四重極励起によるクラスター状態生成機構の解明 (千葉)  
原子核が四重極励起によってクラスター状態を生成する機構を  $^{24}\text{Mg}$  について検証し、基底状態におけるクラスター相関が不可欠であることを明らかにした。
9. 3 体クラスター状態における相関の解析 (千葉、山本)  
原子核の微視的波動関数から 3 体クラスター波動関数を取り出し、クラスター間の相対運動の相関を解析することで構造を明らかにした。具体的には  $^{12}\text{C}$  のホイール状態は  $2\alpha$  相関が強く、単純な  $3\alpha$  凝縮状態ではないことを示した。また、ホイール状態の構造は相互作用依存性が強いことを明らかにした。
10. 重いバリオンの生成反応を用いたハドロン内部構造の研究 (沈)  
陽子とパイ中間子などを衝突させ、軽いクォーク(u、d クォーク)の対消滅と重いクォーク(s、c クォーク)の対生成の結果、重い中間子と重いバリオンが生成される反応を理論的に記述し、反応の散乱断面積と重いバリオンの間の生成比を計算して、今後行われる実験の結果を予測し、ハドロンの構造が散乱断面積や生成比に与える影響を調べる。

## 教育・研究業績

### 学術論文

1. T. L. Tang *et al.*: “How different is the core of  $^{25}\text{F}$  from  $^{24}\text{O}_{\text{g.s.}}$ ?”, *Physical Review Letters* **124**, 212502 (2020).
2. Y. S. Neoh, M. Lyu, Y. Chazono, and K. Ogata: “Effect of the repulsive core in the proton-neutron potential on deuteron elastic breakup cross sections”, *Physical Review C* **101**, 054606 (2020).
3. K. J. Cook *et al.*: “The halo structure of the neutron-dripline nucleus  $^{19}\text{B}$ ”, *Physical Review Letters* **124**, 212503 (2020).
4. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “Transition properties of low-lying states in  $^{28}\text{Si}$  probed via inelastic proton and alpha scattering”, *Physical Review C* **101**, 064607 (2020).
5. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “Properties of  $K^\pi=0^+_{11}$ ,  $K^\pi=2^-$ , and  $K^\pi=0^-_{11}$  bands of  $^{20}\text{Ne}$  probed via proton and alpha inelastic scattering”, *Physical Review C* **101**, 064308 (2020).
6. K. Ogata and C. A. Bertulani: “Nuclear medium effect on neutron capture reactions during neutron star mergers”, *Journal of Physics G* **47**, 095101 (2020).
7. Y. Kanada-En'yo, Y. Shikata, Y. Chiba, and K. Ogata: “Neutron dominance in excited states of  $^{26}\text{Mg}$  and  $^{10}\text{Be}$  probed by proton and alpha inelastic scattering”, *Physical Review C* **102**, 014607 (2020).
8. Y. Kubota *et al.*: “Surface localization of the dineutron in  $^{11}\text{Li}$ ”, *Physical Review Letters* **125**, 252501 (2020).
9. M. L. Cortes *et al.*: “ $N=32$  shell closure below calcium: Low-lying structure of  $^{50}\text{Ar}$ ”, *Physical Review C* **102**, 064320 (2020).
10. T. Aumann *et al.*: “Quenching of single-particle strength from direct reactions with stable and rare-isotope beams”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* **118**, 103847 (2021).
11. S. Nakayama *et al.*: “JENDL/DEU-2020: deuteron nuclear data library for design studies of accelerator-based neutron sources”, *Journal of Nuclear Science and Technology* **58**, 805 (2021)

12. Y. Sun *et al.*: “Three-body breakup of  ${}^6\text{He}$  and its halo structure”, *Physics Letters B* **814**, 136072 (2021).
13. J. Tanaka *et al.*: “Formation of alpha clusters in dilute neutron-rich matter”, *Science* **371**, 260 (2021).
14. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “Probing negative-parity states of  ${}^{24}\text{Mg}$  probed via proton and alpha inelastic scattering”, *Physical Review C* **103**, 024603 (2021).
15. Y. Chazono, K. Yoshida, K. Yoshida, and K. Ogata: “Proton induced deuteron knockout reaction as a probe of an isoscalar proton-neutron pair in nuclei”, *Physical Review C* **103**, 024609 (2021).
16. Z. Yang *et al.*: “Quasifree neutron knockout reaction reveals a small s-orbital component in the Borromean nucleus  ${}^{17}\text{B}$ ”, *Physical Review Letters* **126**, 082501 (2021).
17. M. M. Juhasz *et al.*: “First spectroscopic study of  ${}^{51}\text{Ar}$  by the  $(p,2p)$  reaction”, *Physics Letters B* **814**, 136108 (2021).
18. Y. Kanada-En'yo and K. Ogata: “Microscopic coupled-channel calculation of proton and alpha inelastic scattering to the  $4^+_{1}$  and  $4^+_{2}$  states of  ${}^{24}\text{Mg}$ ”, *Progress of Theoretical and Experimental Physics* **2021**, 043D01 (2021).
19. S. Watanabe, T. Matsumoto, and K. Ogata: “A practical method for decomposing discretized breakup cross sections into components of each channel”, *Physical Review C* **103**, L031601 (2021).
20. Y. Taniguchi, K. Yoshida, Y. Chiba, Y. Kanada-En'yo, M. Kimura, and K. Ogata: “Unexpectedly enhanced alpha-particle preformation in  ${}^{48}\text{Ti}$  probed by the  $(p,p\alpha)$  reaction”, *Physical Review C* **103**, L031305 (2021).
21. F. Browne *et al.*: “Pairing forces govern population of doubly magic  ${}^{54}\text{Ca}$  from direct reactions”, *Physical Review Letters* **126**, 252501 (2021).

### 国際会議講演

1. K. Ogata: “Knockout-reaction with RIB”, A3F-CNS Summer School 2020, August 17th-21st, 2020, online. (invited lecture)
2. S.-I. Shim : “Pion induced productions for the study of heavy baryons”, The 8th APFB Conference, March 1st-5th, 2021, online.

### 学会・研究会講演

1. 緒方一介: 「Some note on the correspondence between nuclear clustering and scattering observables」, 第5回クラスター階層領域研究会, 2020年9月24日-25日, オンライン.
2. 緒方一介: 「1次元モデルを用いた多段階直接過程の空間的可干渉性の分析」, 「時間階層進化として捉える原子核反応」研究会, 2020年10月8日, オンライン.
3. 緒方一介: 「1次元モデルを用いた多段階直接過程の空間的デコヒーレンスの分析」, 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月12日-15日, オンライン.
4. 千葉陽平: 「反対称化分子動力学における粒子空孔励起状態の積分表示を用いた ${}^{24}\text{Mg}$ のE2遷移強度分布の評価・解析」, 日本物理学会第76回年次大会, 2021年3月12日-15日, オンライン.
5. 沈相仁: 「レッジ粒子交換とインスタントン相互作用を用いた重いバリオンの生成」, 日本物理学会2020年秋季大会, 2020年9月14日-17日, オンライン.

### 学位論文

#### 修士論文

1. 福村健太: 「スキルム模型によるデルタ共鳴の研究」 (A study of the Delta resonance in the Skyrme model)
2. 宮下直人: 「カイラル対称性と低エネルギー定理」 (Chiral symmetry and the low-energy theorem)