



極限宇宙の4年半を
振り返って

Looking back on Four and a
Half Years of Extreme Universe



受賞報告 Award Report

2025 Nishina Memorial Prize (仁科記念賞)

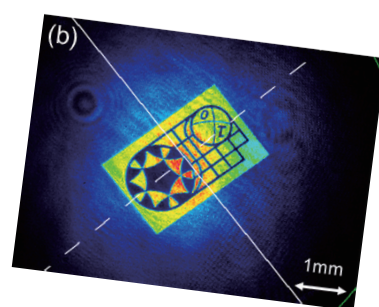
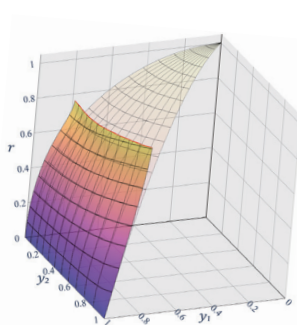
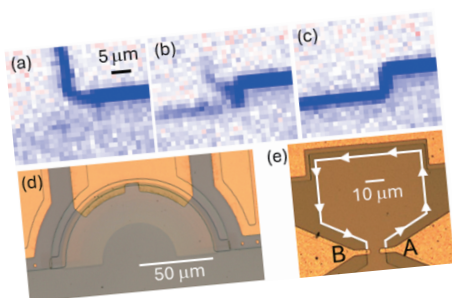
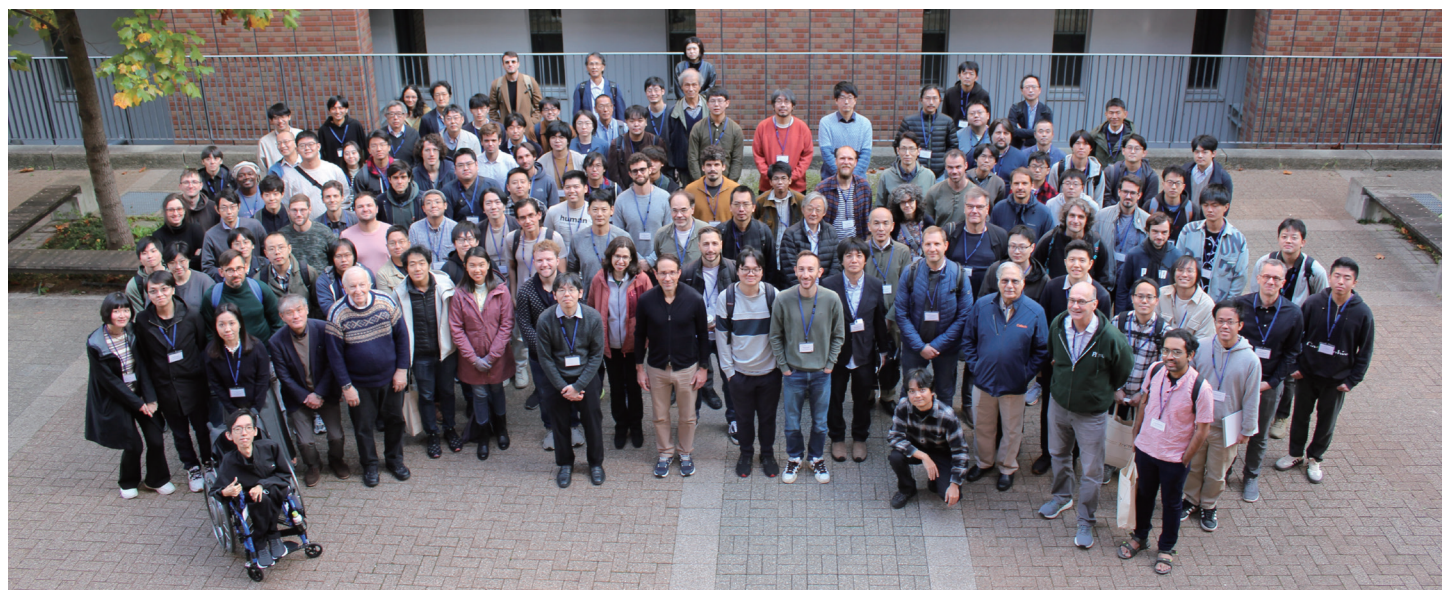
Prof. Hal Tasaki & Prof. Masaki Oshikawa

News Letter

極限宇宙
Extreme
Universe

05

2026 Mar.



Contents

Looking back on Four and a Half Years of Extreme Universe (X00 Management Group)

Annual Reports of Each Projects A01/B01/B02/B03/C01/C02/C03/D01/D02

Final Reports of Publicly Offered Research Projects

Conference Reports

The 5th ExU Annual meeting/ExU International Conference/
YITP workshop "Developments in Exploring Highly Entangled
Quantum Phases" etc.

Research Highlight

The Accelerating Universe: A Hub of Modern Physics
(Toshifumi Noumi)

Contents

- 01 巻頭言
領域代表より(高柳 匡)／領域アドバイザーより(細谷 暁夫)／領域アドバイザーより(井元 信之)
- 04 極限宇宙の4年半を振り返って(総括班)
- 10 2025年度 計画研究成果報告
A01班／B01班／B02班／B03班／C01班／C02班／C03班／D01班／D02班
- 19 受賞報告
2025年度 仁科記念賞：田崎 晴明 氏・押川 正毅 氏(奥西 巧一)
- 20 公募研究成果報告
E01班／E02班／E03班
- 31 2025年度 研究会報告
第7回領域スクール&第4回領域若手研究会／領域国際会議／第5回領域会議 他
- 34 2025年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧
- 36 若手循環プログラム報告
田嶋 大雅
- 37 トピックス：最近の研究から
国際都市「加速膨張宇宙」の魅力(野海 俊文)
- 38 2025年度 アウトリーチ・一般向け講演
- 39 Preface
Head Investigator (Tadashi Takayanagi)／Advisory Committee (Akio Hosoya)／
Advisory Committee (Nobuyuki Imoto)
- 42 Looking Back on Four and a Half Years of Extreme Universe (Management Group)
- 48 Annual Reports of Each Project
A01／B01／B02／B03／C01／C02／C03／D01／D02
- 57 Award Report
2025 Nishina Memorial Prize : Prof. Hal Tasaki & Prof. Masaki Oshikawa (Kouichi Okunishi)
- 58 Final Reports of Publicly Offered Research Projects
E01／E02／E03
- 69 Conference Reports in FY2025
The 7th ExU School & The 4th Young Researchers' Workshop of the ExU Collaboration／
ExU-YITP International workshop／The 5th ExU Annual Meeting etc.
- 72 Conferences, Workshops and Seminars in FY2025
- 74 Circulation Program for Young Researchers
Hiromasa Tajima
- 75 Topics : Research Highlight
The Accelerating Universe: A Hub of Modern Physics (Toshifumi Noumi)
- 76 Publications (Apr. 2024 - Dec. 2025)
- 81 お知らせ
5th ExU Annual Meeting Poster Presentation Awards／論文等でのAcknowledgmentについて
- 82 編集後記



極限宇宙の旅、果てしなく

領域代表

高柳 匡 Tadashi Takayanagi

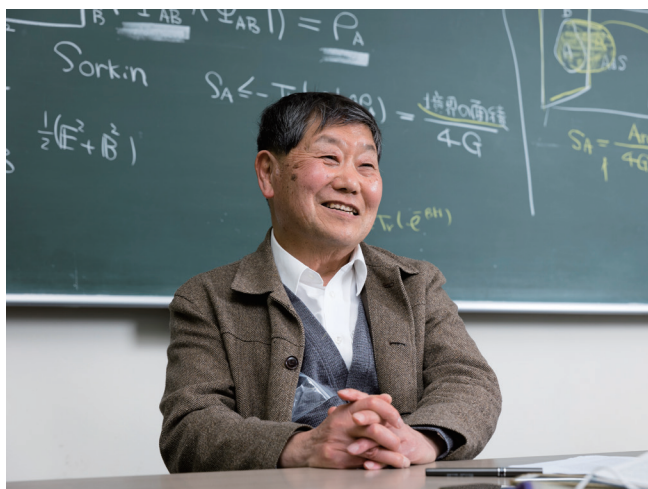
京都大学基礎物理学研究所 教授

極限宇宙の旅、いかがでしたでしょうか。領域が2021年9月に誕生してからもう4年半が過ぎ、ついに終了を迎えました。大きなプロジェクトの運営に不慣れであった私は、開始と同時に関連業務に忙殺されてしまいましたが、幸運にも本領域の素晴らしいメンバーに恵まれたおかげで、この領域の研究活動をなんとか良い方向へ運営できたようで、少しほっとしております。この4年半は、本当にあっという間でした。この領域を暖かく見守っていただき、多くの貴重なご意見や励ましをいただきましたアドバイザーの先生方には厚くお礼を申し上げます。また総括班の皆様には、毎月の総括班会議での様々な提案やアドバイス、また領域の各種活動を率先して実施いただき、非常に感謝しております。そして、各計画研究・公募研究の研究者の皆様には、大変優秀な研究成果を多方面へ展開いただき、本当にありがとうございました。お陰さまで、本領域が目標とする極限宇宙の三問題「空間の極限」「時間の極限」「物質の極限」のそれぞれについて、顕著な成果が多数得られ、領域開始時と比べると、今では物理学に対する考え方や手法も大きく変わってきたように思われます。本領域は量子情報と物理学の異分野融合が主目的ですが、皆様メンバーの努力のおかげで、異分野融合研究も活発に行われ、量子情報の知識や量子計算機・量子シミュレーターを利用した物理学の研究なども、今ではごく普通になっているように見えます。その意味でも、「学術変革」は十分起こったと言えるのではないのでしょうか。

1年を振り返ってみると、今年度も様々なイベントがありました。4月にはイタリア・トリエステのICTP研究所で、私はディラックメダルの授賞式に出席し、共同受賞者のCasini氏、Huerta氏、笠氏と一緒に受賞講演を行いました。冒頭の写真はその時のもので、ICTPのDabholkar所長(写真左)からメダルを授与いただきました。ユネスコから加納大使(写真右)もご出席くださり、長年の共同研究者と大変光栄な時を過ごしました。6月末には、本領域の若手研究会が愛知県伊良湖で開催されました。本領域では分野融合を念頭に置いた若手育成を重視してきて、これまで4回

の若手研究会を泉氏(C03)のリーダーシップのもと開催いただきました。今回で最後になってしまいました。このイベントで知り合った若手が近い将来、異分野融合研究のリーダーに成長していくことが楽しみです。10月末には、京大基研で、領域国際会議を開催しました。領域アドバイザーのMyers先生を始め、多数の著名研究者が海外からも集い、国内外より200名を超える研究者が現地出席し、大変活況を呈した国際集会となりました。そして、12月下旬には、最後の領域会議を愛媛県松山市で開催いたしました。本領域の最後を締めくくる集会となり、約100名の領域メンバーに現地出席いただきました。領域会議では、計画研究と公募研究双方の研究成果の集大成が披露され、優れた研究成果が想定以上に多数得られてきたことを実感すると同時に、異分野間の新しい共同研究も次々と生まれている様を見て、とても嬉しくなりました。また喜ばしいことに、今年度も領域メンバーの受賞も相次ぎました。中でも、押川氏(E02)が仁科記念賞を受賞され、領域会議の前日の夕方に開催した特別コロキウムにてご講演いただきました。また野海氏(B01)は西宮湯川記念賞を受賞されました。そのほかにも若手を中心に多くの顕著な受賞の報告がありました。受賞された皆様、誠におめでとうございます！

さて、本プロジェクトでは、例えば、ブラックホールの情報問題やドジッター宇宙やワームホール宇宙のホログラフィー原理の理解、そして、テンソルネットワークによる量子多体系の系統的な解析手法や量子計算機の効率的な利用法の開発など、極限宇宙の本質に迫る顕著な成果を多数得ることができました。しかし、極限宇宙の全貌解明にはまだほど遠く、正直なところ、このたび本プロジェクトを完了したことで、その最初の一步を明確に踏み出したという段階ではないかと思えます。今後は、本研究で芽生えた新しい共同研究が理論と実験の双方でさらに進展していくことで、ますます極限宇宙の真理が明らかになると期待しております。是非今後も、果てしない極限宇宙の旅にお付き合いください。



「次の問い」は立てられたか？

領域アドバイザー

細谷 暁夫 Akio Hosoya

東京工業大学(現 東京科学大学) 名誉教授

写真：日経サイエンス

学術変革A「極限宇宙」が今年度で終了と聞き、感慨深い。重力、量子、および情報を結びつける研究は、ブラックホールエントロピーあたりが始まりと思うが、本格化したのはRyu-Takayanagi以後と思う。それに端を発した研究がここまで大きな流れになるとは予想もしなかった。その詳細な総括は別途出版されると思うので、この記事ではその先について語りたい。



よく言われることだが、「問い」は「答え」より大切に、科学において特にそうである。「極限宇宙」のプロジェクトも一区切りついたところで、参加した研究者たちが各自得られた成果を総括して、次を構想しているだろう。もちろん、遠い目標として量子重力はあるが、もう少し手の届くところで考えて欲しい。私が言うまでもなく、研究者各自「問い」を胸中に持っていると思う。その「問い」をこのプロジェクトで一緒になった同志たちと語らって欲しい。それは、ホワイトボードで数式を書きながらでもいいし、アイデアの実験的検証の話になるかも知れない。さらには「情報」「時空」「実在」「認識」などについての哲学的なものでもよい。



その時に、100年前の量子力学誕生の頃、ボーア、アインシュタイン、ハイゼンベルグ、シュレーディンガーたちがしたような討論が参考になる。その様子は第1巻の巻頭言で引用したハイゼンベルグ著「部分と全体」湯川秀樹序、山崎和夫訳(みすず書房)の中にあるので、湯川秀樹の序文と合わせて読むことをお勧めする。序文にある通り、この本はプラトンの「対話篇」を意識して書かれている。ボーアやアインシュタインがソクラテスで、ハイゼンベルグがプラトンである。そのプラ

トンの「対話篇」のうち「メノン」の中で面白いやりとりがある。

若者：ソクラテスさん、私はなぜ質問することができるのでしょうか？そのことが分かっているならば、質問する必要はないし、分かっているなければ何を質問してよいかも分かりません。どっちにしても私は質問できないことになります。

ソクラテス：君が少しだけ分かっているのに十分に分かっていないから質問するのではないかね？

人は、より良い「問い」をするために学び、研究をするとも言える。問題を正しく立てること自体が、正しい答えに導くはずだから。



EPR論文の問いをベルが具体化し、アスぺらが検証に至った過程、またウィーラーの問題提起からホーキングの放射発見へと続いた議論も、「問い」が次の「問い」を生む典型である。



アドバイザーをしている関係で、領域会議に参加させてもらい研究発表を聞いて、すでにいくつか「問い」が、育っているように見受けられる。もちろん、その「問い」の内容は多様で、純粹に理論的なものから実証実験に肉薄するもの、さらには応用にまで手が届きそうなものもある。

それらの「問い」をぜひ聞いてみたい。



輝かしい「極限宇宙」の精神が引き継がれることを望む

領域アドバイザー

井元 信之 Nobuyuki Imoto

東京大学特命教授室 特命教授

学術変革領域研究Aの「極限宇宙」が終わろうとしている。この領域は素粒子・宇宙の領域と量子情報の領域、それにテンソルネットワークや物質科学から数学まで含む多種の領域を反応・融合させることにより、明治時代以降西洋に追いつくことが至上命題だった日本があまり得意として来なかった「分野の垣根を取り払う」ことを本格的にドライブする試みであった。「極限宇宙」が生み出した研究成果の数々が質・量ともに従来と一線を画す様相を見るにつけ、この「極限宇宙」領域の功績は賞賛し過ぎることはないと思われる。これは自らの業績がそもそも異分野融合の賜物である高柳教授、ならびに「極限宇宙」を積極的に盛り上げて来た参加研究者や協力者の方々の思いがコヒーレントに且つ切磋琢磨しつつ結ばれて来たものであり、そのような稀有の現象が起きているのを目の当たりにして来たアドバイザーの一人として、私は驚嘆するとともに幸福感を噛み締めている。

異分野融合を促進する方法として思い出すのは、ちょうど世紀の変わり目あたり、つまりかれこれ30～40年前に私がヨーロッパ(やアメリカ・カナダ)に足繁く通い、その中の一年間、イギリスに住み着いていた頃のことであるが、ちょうどそのころ量子コンピューター、量子暗号、量子通信の理論の片鱗が生まれ育ちつつあった。その時思ったのは、こういう新しい融合分野は量子物理と情報処理の両方に興味があり、理論と実用のどちらにも精通していなければ始められないはずで、彼らはどうやってそのようなコミュニティを作ることができたのだろうということであった。複数の分野に興味を持ち、情熱を維持する人たちが一定数いなければそんなことは出来ない筈である。その疑問をある現地の教授に(明快な答えが返って来ることを期待せずに)ぶつけたら、一つの組織論的な答えが返って来た。それは、EU(当時はECと呼ばれていた)の中ではポストドクを採用するとき、そのポストドク候補がそれまで一つの国(一つの研究室)にとどまって来たか、あるいは複数の国(複数の研究室)を渡り歩いて来たかに注目するからだ、という答えだった。そして渡り歩いて来たことを採用条件にするのだ、と言う。そうすると、その候補は専門が一つということではなく、二つ(あるいは三つ)の専門を身に付けていることになるので、その人は自然と分野融合の道に進むことになるのだ。

それだけではなく、EC内の国から国へと移動することも条件になっているので、言語も考え方も一つの国に凝り固まらなくなる、と言う。なるほど、そういう文化で育つと、量子物理と情報処理を融合することに躊躇などしないどころか楽しくて仕方がないだろうし、量子と情報以外の組み合わせでも同様なことが起こるだろう。この方法論は分野横断的な若手を育てるための組織論の方策と言える。かねてより複数の分野に興味を持ちがちな私は、この考え方にいたく共鳴し、まさかこんなに良い答えが返って来るとは想像していなかったもので、お酒の勢いもあって随分話し込んでしまったことを思い出す。

上記のポストドク採用の方策は分野融合の一つの効果的な方策には違いないが、一方、そのポストドク達が大成して若い層を育てるようになるのには時間がかかるので、自分の分野が固まりつつあるもう少しシニアな研究者達にも分野融合を促すことも重要であろう。何しろ若い人たちに影響力の大きい「指導者」なのであるから。これに対してはあまりいい方策が思いつかず今日まで来てしまった私は、アドバイザーの打診があったのをきっかけにこの学術変革の仕組みを知った。これは組織論というよりは異分野集合と解散を繰り返す形態であるが、「極限宇宙」でシニアな研究者達が「複数の分野を反応させる」様子を見てみると、若い人たちへの影響も大きく、タイムスケールとしても即効性があるだろうと思える。ECのポストドク採用の仕組みは個々の若手それぞれの中で時間をかけて分野融合を実現するものであるのに対し、学術変革の方は「中堅の指導者達がそれぞれの研究室に分野融合の価値観を持ち帰る」ことの即効性が特徴となりそうである。したがって、一つの学術変革の期間を終えた今、もし中堅やシニア層がそれぞれ元の分野に再び閉じこもってしまうようなことがあったとすれば勿体無い話であり、それでは科学技術全体として分野の融合を進めるイナシアは持続しないことになってしまう。

そうであるから、「学術変革」の期間中に分野融合のオデッセイを見事に周航し終えようとする「極限宇宙」のコミュニティは、それが規定の満期を迎える今、一層の飛躍に挑むべく新規なオデッセイに就航するよう目指すことを切に期待して止まない。



極限宇宙の4年半を振り返って

LOOKING BACK ON FOUR AND A HALF YEARS OF EXTREME UNIVERSE

学術変革領域「極限宇宙」も本年度で最終となります。総括班の皆様にこの4年半の領域や領域運営に関して振り返ってもらいました。



●高柳 匡 Tadashi Takayanagi

総括班 領域代表者(C01代表)
京都大学基礎物理学研究所・教授
(領域開始時：同上)

専門：素粒子論
担当：領域総括

本領域が誕生してからこれまでの4年半は、あっという間でした。おかげさまで、本領域は順調に進み、優れた研究成果が多方面に得られました。アドバイザーの先生方には、大所高所からのアドバイスと励ましを頂き、大変ありがたく思います。そして、不慣れな代表にもかかわらず、総括班の皆様には、領域活動を多

方向に積極的に展開していただき非常に感謝しております。コーディネーターの島田さんと山津さん、秘書の岡崎さんと佐伯さんには領域事務局を円滑に運営していただき大変感謝しております。皆様のご尽力で、研究会やコロキウムの開催による成果発信や動向把握、若手育成活動、異分野融合活動、ニュースレター、アウトリーチなど、考えつくほぼすべての活動を実施できました。この領域活動では、私自身も異分野との交流を通じて、異分野の共同研究者にも恵まれ、また異分野のコミュニティについても知見が広がりました。これは、私にとって非常に貴重な経験で大きな宝物です。本領域で生まれた量子情報と物理学の融合コミュニティが今後どのように発展するのか楽しみです。



●森前 智行 Tomoyuki Morimae

総括班 研究分担者(A01代表)
京都大学基礎物理学研究所・准教授
(領域開始時：同上)

専門：量子情報
担当：領域運営(ポストク公募・量子情報)

量子情報は量子の不思議な性質を情報処理に応用することにより、これまでにない高性能な情報処理技術を実現するというものであり、高速な計算を可能とする量子計算機や、安全な暗号を実現する量子暗号などの応用があります。しかし、それだけでなく、量子情報で得られた新しい知見やテクニックなどが理論物理に有用であることが分かっています。本領域ではそのように量子情報を通じて極限宇宙の物理を理解するという目的があり、本A01班においては、量子情報の研究そのものを推進するだけでなく、極限宇宙理解のた

めの言語を整備するという重要な役割がありました。4年半を振り返って、量子情報自体にも様々な進展があり、新しい言語がどんどん生み出されてきています。特に私がここ数年注力している量子暗号においては多くのブレイクスルーがあり、非常に面白い研究がなされてきています。量子暗号においては、計算量的な考え方や計算量的暗号の仮定が重要であり、それはこれまでの物理には無かったものであるため、物理にとっても面白い新しいアイデアを提供してきており、重要な成果も得られてきています。4年半の間に様々な成果を得ることができました。今後もこの領域で培った研究をベースとして、さらに量子情報および関連する物理の研究が発展していくことを望みます。



●中田 芳史 Yoshifumi Nakata

総括班 研究分担者(A01分担)
京都大学基礎物理学研究所・特定准教授
(領域開始時：東京大学光量子科学研究センター・助教)

専門：量子情報科学
担当：分野融合(領域コロキウム)

今回、本領域の研究活動・運営に参加させていただき、貴重な経験を積むことができました。この場を借りて感謝申し上げます。本領域に参加することで、素粒子から物性、宇宙に至るまで、自身の専門とはかなり遠い分野の話を聞く機会が増え、自身の知見と視野を格段に広げることができたように思います。これほど広範囲の物理に触れるのは学部生以来のことで、様々な最先端研究を耳にするたびに胸が躍り、物理の楽しさを再発見できたように思います。また、この領域を通じて、分野を超えた多くの研究者と知り合い交

流を深められたことは、今後の研究活動におけるかけがえのない財産となりました。総括班では、領域コロキウムを担当させていただきました。足掛け五年にわたる期間中、至らぬ点や試行錯誤も数多くありましたが、講演者を含む領域内外の多くの方々のご協力で、無事、継続的にこの企画を遂行することができました。改めて関わってくださった全ての皆様に感謝申し上げます。これまでの領域コロキウムは全て公式YouTubeで公開しています。動画の公開にあたっては、プライバシーの配慮や編集など、かなりの労力と時間がかかりましたが、貴重な講演と議論の記録を、研究資料として半永久的な形で残せたことはよかったと思っています。領域終了後も多くの方々が学術的な情報源として活用し、多くの研究者や学生の方々の学びと研究の一助となることを心より祈念しております。



●飯塚 則裕 Norihiro Iizuka
 総括班 研究分担者(B01代表)
 (台湾)国立清華大学・副教授
 (京都大学基礎物理学研究所・特任准教授)
 (領域開始時:大阪大学大学院理学系研究科・助教)
 専門:弦理論、量子重力理論
 担当:分野融合(企画)

極限宇宙プロジェクトにPIとして参加させていただいた4年半を振り返りますと、最大の収穫は人との出会いと共同研究の広がりでした。領域会議や国際研究会を通じて多くの若手研究者と議論し、分野を越えて多くのプロジェクトを立ち上げることができました。ふとした議論が研究の糸口となり、別の視点が加わって成果に結実する、それを幾度も経験できたことは、研究者として今後にわたって生き続ける財産です。また、招へいや国際研究会の機会により海外の研究者とも日常的に議論でき、本領域研究の国際的な展開をあ

らためて実感しました。加えて、量子情報の考え方にこれほど魅了されるとは自分でも予想外でした。ブラックホールの問題が、エンタングルメントや情報理論の言葉で再整理され、新しい見通しが得られていく過程は刺激に満ち、研究の動機そのものを更新してくれました。さらに、領域で得た量子情報の視点も踏まえ、ブラックホールの量子論に関する解説や教材としての整理・発信にも取り組んでいます。私自身、長年所属した大阪大学から台湾国立清華大学(京大基礎物理学研究所と兼任)へ移り、新しい環境で研究に集中できたことも追い風となり、本領域で得た交流を土台に若手との共同研究を論文として積み重ねられたことも励みになりました。今後も領域で培った共同研究の広がりを生かし、得られた知見を次の世代へとつなぐ研究と発信に努めたいと思います。最後にこのような挑戦の場を与えてくださった領域代表の高柳さんをはじめ、関係者の皆様に心より御礼申し上げます。



●手塚 真樹 Masaki Tezuka
 総括班 研究分担者(B02代表)
 京都大学大学院理学研究科・助教
 (領域開始時:同上)
 専門:凝縮系物理理論
 担当:若手支援・領域スクール

「新学術領域研究」にかわり始まった「学術変革領域研究(A)」の2回目の公募で、この領域は2021年9月に採択されました。特に国境を越えた人の行き来や、一室に多くの人を集めた行事が困難な中での開始となりました。総括班で、私は若手支援、中でも「領域スクール」を主に担当しました。分野や経験の異なる聴衆に伝わるよう準備し講義してくださった多数の講師、企画や運営に尽力いただいたスクール・若手研究会の世話人、意欲高く参加された参加者、という多くの方々に感謝しています。

日本物理学会の4回目のオンライン開催が迫る中、2022年3月初めの基研パナソニックホールで、扉をまだ寒い外気に開け放ってハイブリッド開催した初回のスクールは忘れがたいものとなりました。完全オンラインの第2回も領域内外から多くの人が集まりました。2022年度後半には渡航や集会が行いやすくなり、年末の神戸での第2回領域会議のあと、2月には初の若手研究会に埋め込む形で第3回スクールを行った。その後、領域国際会議の一部としてや、領域が共催する国際スクールとしての開催も実現しました。

以前にいくつか見知った新学術領域に比べると体感として短く、大きく盛り上がった中で領域の設定期間が終わりますが、従来の分野割りをまさに変革する形で、新しい発想や共同研究が現れています。領域の良い影響が長く続くことを願っています。また、今後もスクールを含めて「極限宇宙」を冠した分野間交流の場が作れるとよいと思います。



●中島 秀太 Shuta Nakajima
 総括班 研究分担者(B02分担)
 大阪大学量子情報・量子生命研究センター・准教授
 (領域開始時:京都大学白眉センター・特定准教授)
 専門:冷却原子実験
 担当:広報(ニュースレター)

私の専門は冷却原子実験という一般的には物性物理に分類される分野であり、これまでの研究も基本的には物性寄りのテーマでした。ただ個人的には、領域代表の高柳さんの別冊数理科学の本を読んでからゲージ・重力対応などにも興味は持っており、「こういう話題にも興味はあるのだけど」と折に触れて話をしていたところ、その甲斐があったのか、今回この領域に声をかけていただきました。それまでは実際にゲージ・重力対応などの話をまとめて聞く機会はなかったのですが、今回、この領域に参加して実際にそういった素粒

子・宇宙の理論研究をしている方々の話を聞き、また議論する機会を得られ、貴重な経験となりました。

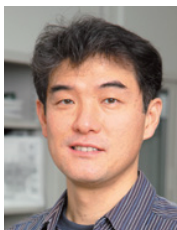
計画研究としては、B02班の実験担当として、冷却原子系という物性の舞台上、ブラックホール情報喪失問題を念頭に量子多体系での量子情報のダイナミクスを見ることを目標に実験を立ち上げて来ました。あいにく私の異動に伴い、実験装置の解体・引越があり、当初目指していた成果にはまだ道半ばというところですが、今は再立ち上げも完了し、これから実験として成果を出していきたいと考えています。

また総括班の一員としては、広報としていま皆さんがご覧になっているニュースレターの編集を担当しておりました。執筆者の皆様には、場合によってはタイトなメ切の中、ご執筆を引き受けて下さりましたこと、ここで改めてお礼申し上げます。ニュースレターを通じ、領域内外の方にこの分野の魅力を伝えられていれば幸いです。



極限宇宙の4年半を振り返って

LOOKING BACK ON FOUR AND A HALF YEARS OF EXTREME UNIVERSE



●石橋 明浩 Akihiro Ishibashi

総括班 研究分担者(B03代表)
名古屋大学大学院理学研究科・教授
(領域開始時: 近畿大学理工学部・教授)

専門: 一般相対論・重力
担当: 国際活動

悩ましいはずの申請書を、わくわくしながら書いていたことを思い出します。「極限宇宙」は、テーマの難しさ以上に、そこに挑む期待感の方がはるかに大きい、魅力的なプロジェクトだと感じていました。

総括班では国際活動の担当を仰せつかり、主に国際滞在型研究会の組織運営などに携わりました。貢献できたことは微々たるものでしたが、プロジェクトの進展に伴い、海外の研究者の間でも「極限宇宙」の話題が増えていくのを目の当たりにし、領域の国際的な認知の高まりを肌で感じることができました。国際会議の

場で注目の研究者に直接お声かけし、講演依頼をしたことも何度かありましたが、皆さんが快く引き受けてくださったことが印象に残っています。

私自身はB03班の研究代表者として、量子情報と量子ブラックホールをテーマに研究を進めました。実際にプロジェクトが始まると、他分野との垣根が想像より低くなっていることを感じる一方で、学際研究特有の興味の遠近感や焦点の合わせ方の難しさにも直面しました。しかし、領域全体の進展とともに、私自身の研究課題の捉え方が変化していくのを実感した5年間でもありました。この期間に得た研究のつばみと、領域を通じて根が絡まり始めた研究者の方々との交流を、これからも大切に育み、実らせていきたいと考えています。



●遊佐 剛 Go Yusa

総括班 研究分担者(C02代表)
東北大学大学院理学研究科・教授
(領域開始時: 同上)

専門: 物性実験
担当: 分野融合

計画段階のメールを見返すと、本領域に参加してからすでに6年経っていました。公募申請の準備段階で、各班の原稿を回し読みしながら、高柳さんを中心に「極限宇宙の“宇宙”ってなに?」「“創る”ってなに?」と、異分野融合ならではの視点で濃密な議論は、それまで未経験の非常に刺激的で楽しい時間でした。

私はC02班として、量子ホール系の実験研究と宇宙論の融合を目指してきました。領域会議では、ブラックホールやブレーンワールドといった、物性実験では全く登場しない概念を扱う専門家たちと、コーヒーを

片手に一対一で対話できる機会に恵まれました。内容が全然不明なこともありましたが、何気ない会話が深く心に残ったり、そこから共同研究が始まったりと、本領域の環境は研究の幅を広げてくれました。

物理的な実体を相手にする実験研究は、相応の準備期間を必要とするのでどうしても時間がかかります。領域会議のたびに、理論班からの論文の多さには圧倒されどおしでしたが、現在、ようやく成果が形になりつつある段階まで到達できたように思います。

私たちが現在使用している主力装置は、10年以上前の予算で導入したのですが、今なお現役で成果を生み出し続けています。本領域で整備された実験環境も、4年半で終わるわけではなく今後10年、20年と私たちや後に続く人たちの研究を支え続ける資産となるはずです。こうした長期的な視点での研究基盤の構築を可能にいただいたことに、感謝いたします。



●堀田 昌寛 Masahiro Hotta

総括班 研究分担者(C02分担)
東北大学大学院理学研究科・助教
(領域開始時: 同上)

専門: 量子情報
担当: 広報(責任者、アウトリーチ)

総括班では、4年半にわたり広報担当として活動してきました。主な取り組みとして、X(旧Twitter)アカウントおよびブログ記事プラットフォームであるnoteを活用し、「極限宇宙」に関する研究内容を理解するための基礎的事項について、一般の方にも理解しやすい形で継続的な情報発信を行いました。とりわけ、「万物は量子情報である」という考え方は一般には必ずしも馴染みのあるものではないため、その歴史的背景や基本的概念を解説しながら、投稿や記事を作成しました。また、極限宇宙公式Xアカウントのリポスト

を通じて、各時点における研究成果や受賞等のニュースを発信し、研究活動の可視化にも努めました。これらの取り組みにより、専門的知識を持たない層に対しても研究分野への関心を喚起することを目指しました。さらに、2025年には『数理科学』誌(サイエンス社)において、量子情報とエネルギー、ならびに時間の矢をテーマとした一般向け解説記事を執筆しました。本記事では、専門外の読者にも量子情報物理学の考え方や研究の意義が伝わるよう、数式の使用を極力控え、概念的な説明を重視しました。加えて、情報理論としての量子力学を学ぶことを目的とした単行本を共著で執筆しており、2026年4月に刊行予定です。さらに、2026年度中には量子情報物理学を主題とする新書の刊行を計画しており、今後も多様な媒体を通じて、「量子情報×物理学」をテーマとした研究成果の社会的還元と分野理解の一層の促進に継続して取り組んでいく所存です。



●白水 徹也 Tetsuya Shiromizu

総括班 研究分担者(C03代表)
名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授
(領域開始時：同上)

専門：一般相対論・宇宙論
担当：領域運営(成果とりまとめ)

東工大に私が着任した2002年に、細谷さんから今後量子情報研究に専念することを伝えられました。いま思うと種がまかれた瞬間だったのかもしれませんが。

本領域の出発点は笠・高柳公式にあったと理解しています。この公式が発表されたときの感動はいまでも忘れることができません。お隣の分野でしたが、当時在籍していた東工大で高柳さんにセミナーをして頂きました。その約15年後に関われることになったことは大変光栄なことでした。

高次元宇宙模型の一つであるブレーンワールドは

2000年前後に活発に研究が行われました。C03班の分担者全員が大学院生のころにその研究に携わった方々です。本領域の申請のころ、このブレーンワールドが笠・高柳公式を搭載した形でリバイバルしつつありました。ブラックホールの蒸発に伴う情報損失問題への解決への量子重力の模型として注目されていたわけです。C03班の役割はその基礎固めを担うことでした。そして、他班で勢いよく発展する研究を読み解き、C03班のスキルで切り込み展開する。その下地は今回の活動で達成できたと思います。後は誰かが耕して種をまき、育てる。そして、豊かな恵みが宿る。

総括班として成果のとりまとめを行いました。実際に行ったのは、中間報告においては、分量や体裁の調整ぐらいでさほど負担には感じませんでした。しかし、その書類作業から見えてくる各班の素晴らしく圧倒される業績は時代の変革を感じさせるものでした。新しい時代の幕開けです。



●泉 圭介 Keisuke Izumi

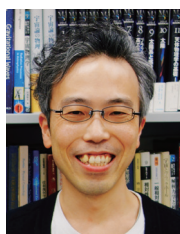
総括班 研究分担者(C03分担)
名古屋大学大学院多元数理科学研究科・准教授
(領域開始時：名古屋大学素粒子宇宙起源研究所・講師)

専門：宇宙論
担当：若手支援(若手研究会・若手滞在)

本学術変革「極限宇宙」の活動が始まった当初は、COVID-19がまだ十分に収束しておらず、研究者間の交流には難しさがありました。特に、私が担当した若手研究会については、オンライン開催では十分なコミュニケーションが得られないのではないかと心配していました。シニア研究者と異なり、まだ交流基盤を築いている途上にある若手研究者や学生にとっては、対面でのつながりがより重要であるという声も多く、何とか対面で開催できることを願っていました。幸いにも、2年目の末に開催した第一回目の若手研究会の頃には

感染状況が改善し、初回から対面で実施することができました。若手の皆さんが望んでいた交流の場が確保できただけでなく、その後は3年目以降に合宿形式の研究会も開催でき、朝から晩まで密に議論し合う機会を持つことができました。私自身にとっても、多くの若手研究者と直接議論し、大きな刺激を受けた貴重な時間となりました。

「極限宇宙」の活動では、研究面においても、私が専門とする宇宙分野の枠を超え、素粒子・物性・量子情報といった幅広い分野の研究者と議論する貴重な機会に恵まれました。量子情報についてはほとんど知識のない状態からのスタートでしたが、この計画を通して基礎から楽しく学ぶことができました。また、素粒子分野の研究者との共同研究にも発展し、自身の研究領域を広げる良い契機となりました。



●小林 努 Tsutomu Kobayashi

総括班 研究分担者(C03分担)
立教大学理学部・教授
(領域開始時：同上)

専門：宇宙論・相対論
担当：広報(ホームページ)

普段は重力の古典的な側面やインフレーションなどの宇宙論を研究していますので、この学変に加わらないかと話をいただいたときには、私でいいのか…?と思いながら参加させていただきました。10年ほど同じようなことばかり研究しており、研究の新しい方向性を探したいとも考えていましたので、せっかくの機会だから量子情報や物性のことを勉強しよう、と教科書を何冊か買って読んでみたりもしました。分野の垣根を越えた共同研究をしたいと望みつつも、結局そこまでは至らず5年間で終わってしまったことには悔い

が残ります。しかし、この学変でさまざまな研究のスタイルや考え方、問題意識に触れたことは、非常に刺激的で、今後につながる何かが得られたような気がしています。私は、宇宙物理のコミュニティの中ではおそらく現実の宇宙とはあまり関係のないことをやっているという立ち位置で、もっと現実の宇宙に近いことをやらなくてはいけないという圧を感じることもあるのですが、この学変の中では、相対的に十分現実の宇宙に近いことをやっているのではないか、と思えて、やはり物理として楽しいこと、物理の役に立つことをやるのがいいのだ、と考えるようになりました。

総括班としては、この学変始動時にロゴ作りに参加したぐらいしか貢献できていません。これまで物理の業界で美術愛好家のような人にあまり出会ったことがなかったのですが、これだけ異分野から多くの人が集まると、「美術班」を結成できるものなのですね。



極限宇宙の4年半を振り返って

LOOKING BACK ON FOUR AND A HALF YEARS OF EXTREME UNIVERSE



●西岡 辰磨 Tatsuma Nishioka

総括班 研究代表者(D01代表者)
大阪大学大学院理学研究・教授
(領域開始時：京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)
専門：素粒子論
担当：国際活動(海外派遣)

極限宇宙領域の四年半を振り返ってみると、私にとっては公私ともに変化に富んだ、あつという間の時間でした。発足当時は基礎物理学研究所におり、研究だけに集中できる環境にありましたが、その後大阪大学へ異動したことで、研究室の運営や学生の教育といった新しい役割も加わりました。当初は時間の使い方に工夫が必要な場面もありましたが、今ではこうした新しい経験の一つひとつが、自分を成長させてくれる貴重な糧になったと感じています。

また、領域の総括班では国際活動の一環として、若

手研究者の海外派遣を担当させていただきました。スタートしてからの二年間は、ちょうどコロナ禍と重なってしまい、思うように動けないもどかしさもありました。しかし、三年目頃からようやく派遣の募集が本格化し、若い研究者たちが次々と世界へ飛び出していく活気ある光景を目にすることができました。領域全体が大きく動き出していく様子を微力ながら支えられたことは、私にとっても非常に嬉しい経験でした。

この領域活動を通して、自分の専門を超えて多様な分野の最先端の研究動向に触れられたことは、何よりの財産です。ここでいただいた刺激や、分野の垣根を超えて繋がることができた皆様とのご縁は、これからの研究生活でも大切にしていきたいと思っています。領域終了後もみなさまと別の形で研究面での交流を続けさせていただければ幸いです。



●奥西 巧一 Kouichi Okunishi

総括班 研究分担者(D02代表)
大阪公立大学大学院理学研究科・教授
(領域開始時：新潟大学自然科学系・准教授)
専門：物性理論
担当：領域運営(公募研究)

早いもので極限宇宙が立ち上がって4年半が過ぎようとしています。総括班の活動では主に公募班セミナーと物性関係のセミナーの取りまとめを担当していましたが、多くの方々のご協力でスムーズに進めることができました。この場を借りてお礼申し上げたいと思います。また、公募研究の期間は2年間と短いにもかかわらず、公募班間や公募班と計画班をまたいだ興味深い研究を推進していただいたことは非常にうれしく思っています。さて、個人的な話題になりますが、極限宇宙に参加するきっかけは、2010年頃に物性で開催した

テンソルネットワーク(TN)に関連する研究会で、領域代表の高柳氏にエンタングルメントエントロピーの笠一高柳公式に関する講演を依頼したことです。当時から物性サイドのTNと量子情報分野との距離は近かったのですが、量子重力分野との繋がりには漠然としたイメージの域を脱しておらず、興味はあってもどう具体的な研究に昇華させれば良いのか決め手に欠く状態でした。その後、極限宇宙でのメンバーとの絡み合いを通じて、これならと思ったのがTree型TNのホログラフィックな側面の解析で、そのアイデアは電子相関で広く用いられる動的平均場理論にも拡張することができました。改めて時間軸をまたいだ思考のエンタングルメントが重要なのだと気づかされました。この3月で研究期間が終わりますが、極限宇宙で蒔いた異分野融合研究の種が本格的に花開くのはこれからです。そのニュースを聞くのを楽しみにしています。

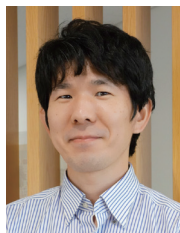


●堀田 知佐 Chisa Hotta

総括班 研究分担者(D02分担)
東京大学大学院総合文化研究科・教授
(領域開始時：同上・准教授)
専門：物性理論
担当：分野融合(理論)

高柳さんや奥西さんとお話しし、この領域にお誘いいただいて書類のやり取りをしたのは、ちょうど5年ほど前の年末だったと思います。その際、いろいろクリティカルな意見を申し上げたにもかかわらず、快く議論していただき、この領域の懐の深さを感じたことをよく覚えています。私は物質科学に最も近く、本領域の中心からはやや距離のある立場にあり、当初は皆さんがどのような発想や関心で研究されているのか見えない状態でした。そこから言葉の使い方や概念の意味といった基本的な部分を手がかりに理解を深め、

5年を経てようやく親しみを持てるようになったと感じています。量子状態の特徴を物性という舞台でいかに観測・制御できるかという視点で研究してきた私にとって、量子情報における操作論的な考え方はとりわけ新鮮で、強い刺激を受けました。直接的に具体問題へ落とし込むには至りませんでしたが、その影響で研究室ではテンソルネットワーク関連の研究に取り組む学生が増え、数値厳密解やダイナミクス、量子状態の純粋性など、予想もしなかった方向へ研究が広がりました。また総括班の分野融合担当として研究会やシンポジウムを開催しましたが、各会ごとにテーマを変え、普段接点のない研究者同士を集めて刺激的な議論ができたことも自分の研究にとって収穫でした。4年半の間に、極限宇宙が少しずつ物性分野で認知度を上げていったことを体感でき、何より通常であれば接点のなかった多くの方々と知り合えたことを有難く思います。



●上田 宏 Hiroshi Ueda

総括班 研究協力者(D02分担)
大阪大学量子情報・量子生命研究センター・准教授
(領域開始時：同上・特任准教授)

専門：物性理論

担当：分野融合(循環ミーティング)

私は当初、D02班の分担者の一人として本領域に参画していましたが、領域立ち上げ直後に循環ミーティングの運営を担当したことをきっかけに、翌年度からは総括班のメンバーとして活動することになりました。循環ミーティングは、領域内での知識交流を目的とした内輪向けのセミナーとして年に7回ほどのペースで開催し、全34回をオンラインで実施しました。初期はA～Dの大グループ単位で順に担当していましたが、研究期間の折り返し以降は、より気軽に参加できる雰囲気づくりを目指して、ランチミーティング形式の

チュートリアル講演を含む形へと発展させました。また、最後の3回は座談会形式とし、異分野間の共同研究のきっかけづくりや、分野横断的な創発を促す要因について議論する場を設けました。私はテンソルネットワーク形式を用いた計算物理を専門としていますが、これらの活動を通じて、これまで直接触れる機会の少なかった幅広い分野の成果に接し、多くの刺激を受けました。理解が追いつかない内容も少なくありませんでしたが、異なる視点や発想に触れることで、自らの研究を見つめ直す良い機会となりました。これらの取り組みが、少しでも皆さまの研究活動の発展に寄与できたなら幸いです。最後になりましたが、各班でコーディネータを務めてくださった皆さま、循環ミーティングで講演を引き受けてくださった皆さま、そして参加して活発な議論を展開してくださった皆さまに、この場を借りて心より感謝申し上げます。



●島田 英彦 Hidehiko Shimada

総括班 事務局
明石工業高等専門学校・准教授
(領域開始時：京都大学基礎物理学研究所・特定研究員(特任助教))

専門：素粒子論

担当：プログラムコーディネーター
(2022年4月-2024年3月)

2022年4月から2024年3月までの二年間、プログラムコーディネータとして本領域に携われたことは、私にとって非常に貴重な経験でした。

それまで素粒子分野の研究者として歩んできた身として、領域代表の高柳さんに声をかけていただいた際、研究補佐という職務に葛藤がなかったわけではありません。しかし、研究支援を通じ、「エンタングルメント」という軸に絡み合う様々な物理の最前線を間近で楽しめたことは、一人の物理屋として大きな糧となりました。空き時間に自由に研究する裁量をいただき、また、仕

事の進め方、何に気をつかうべきか、一から教えていただいた高柳さんには、深く感謝しております。

また、基研秘書室で向かい合わせのデスクに座り、タッグを組んだ領域秘書の岡崎さんにも深く感謝しております。私の苦手な部分を的確に補っていただいたお陰で、任務を全うできました。同室の渡邊さん、吉田さん、鶴原さん、八木さんにも、温かく見守っていただき支えていただきました。

実務を通じ、それまでの自分の研究活動が事務方の皆様の尽力に支えられていることを痛感しました。ルールを重んじなければならない事務部門と、自由を重んじる研究者の間で板挟みになり苦悩することも時にありましたが、私の介在によって領域の皆様の研究時間が少しでも確保できていたならば、これ以上の喜びはありません。



●山津 直樹 Naoki Yamatsu

総括班 事務局
京都大学基礎物理学研究所・特定研究員(特任助教)
(領域開始時：九州大学・学術研究員)

専門：素粒子物理学

担当：プログラムコーディネーター

極限宇宙領域コーディネーターとしての2年間、研究会運営を中心に、ニュースレター編集、ホームページやメーリングリストの管理、領域成果の取りまとめなど、幅広く領域運営に携わりました。研究会では、2024年9月の第3回領域若手研究会、及び、第六回極限宇宙スクール(北海道)、第4回「極限宇宙」領域会議(大阪)、2025年6月の第4回領域若手研究会(愛知)、2025年12月の第5回「極限宇宙」領域会議(松山)に現地参加し、事前準備から当日の参加者対応、議事進行まで一貫して担当しました。対面での運営を通じ、研

究者同士の交流や活発な議論を支えることの重要性を深く実感しました。

また、総括班会議や事務会議のオンライン調整、月例コロキウムのZoom手配や録画公開、謝金手続き、SNSでの周知なども担当し、日常的な領域運営を支えました。情報発信面では、ホームページの更新やニュースレター編集補助を通じて、領域の活動や成果を内外に伝える役割も果たしました。これらの経験を通じ、研究活動を支える運営の重要性を学ぶとともに、研究と運営の両面から領域に貢献する貴重な機会となりました。



理論物理学のための量子情報理論基礎

[研究代表者]

森前 智行 (京都大学基礎物理学研究所・准教授)

[研究分担者]

中田 芳史 (京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)

東 浩司 (NTT 物性科学基礎研究所・特別研究員)

Francesco Buscemi (名古屋大学情報学研究科・教授)

早川 龍 (京都大学基礎物理学研究所・白眉特定助教)

[領域講師(研究協力者)]

Andrew Darmawan (京都大学基礎物理学研究所・特定講師)

[研究協力者]

Michele Dall'Arno (豊橋技術科学大学・准教授)

山崎 隼太 (東京大学理学系研究科・助教)

加藤 豪 (NICT 未来ICT研究所・研究マネージャー)

A 班は量子情報理論の研究を遂行するとともに、物理の他の分野に応用できる量子情報の「言語」を発展させていくことを目指している。今年度は以下のような研究成果を得た。

量子超越性の暗号的特徴づけ：量子計算機は古典計算機より高速であることが期待されているが、真に高速であることはまだ厳密には証明されていない。量子計算の優位性を標準的な仮定に基づいて理論的に証明する研究は量子超越性理論と呼ばれており、これまで多くの研究が行われてきているが、これまで用いられてきた仮定は人工的なものや強力なものであった。今回、森前らは、量子暗号における最も基礎的な仮定であり、一方向性関数の自然な量子版である one-way puzzle の古典安全なものが、量子超越性と等価であることを証明した。この成果は、ことなる二つのものを世界で初めて結び付けたという理論的な面白さだけでなく、もし量子超越性が存在しなければ現在使われている全ての暗号が安全でなくなってしまうという、社会的にも重要な帰結をもつ。本成果は理論計算機科学のトップ国際会議である STOC2025 に採択された。

Uhlmann 変換を実現する量子アルゴリズムの提唱：量子情報の理論研究で根源的な役割を果たす定理の一つが Uhlmann の定理である。その定理は、「混合状態間の忠実度 = それらの純粋化状態間の忠実度を最大化したもの」を示唆するものであり、その抽象的な形にも関わらず数多くの応用を持つことが知られている。その定理に現れるユニタリは Uhlmann 変換と呼ばれている。これまではそのユニタリの存在性は知られていたものの、Uhlmann 変換を実現する具体的な量子アルゴリズムに関しては、ほとんど研究が進んでいなかった。そのような背景において、中田らは、量子特異値変換と呼ばれる強力な量子アルゴリズムや密度行列指数化アルゴリズムを組み合わせることで、Uhlmann 変換を実現する量子アルゴリズムを構成し、その計算量を明らかにした。さらに、そのアルゴリズムを用いることで、忠実度推定と呼ばれるタスクの計算量を大幅に改善することにも成功した。

トポロジーと量子計算複雑性：計算複雑性とトポロジーは、物理において基礎的な概念となっているが、早川は、「トポロジーにまつわる量子的な複雑性」を明らかにするために研究を行なった。まず、量子多体系のトポロジカル相を解明するために重要な量である、

ベリー位相を推定する問題が BQP 完全となることを示した。この結果は、量子計算機のトポロジカル相への応用が有望であることを、計算量的な観点から示した初めての結果である。また、早川らは、トポロジカルデータ解析 (TDA) における問題に MA 完全となる問題があることを示した。MA は、古典計算のモンテカルロ法などで検証可能な問題であり、TDA における量子／古典計算複雑性の境界の理解に貢献した。

量子力学における情報の因果構造と操作的意味：ブシェミらは、量子確率過程における情報の「回復 (revival)」を精密に分類し、従来同一視されがちであった非マルコフ性の指標を因果的観点から再定式化した。特に、環境からの実際の情報逆流を伴わない「非因果的回復 (noncausal revival)」と、真に因果的な情報バックフロー (genuine information backflow) とを区別し、量子条件付き相互情報量を用いた完全な特徴付けを与えた。この区別により、真の非マルコフ性のみを資源とする凸な資源理論の構成が可能であることを示した。一方、観測と推論の観点から、マクロな記述と量子統計の関係を統一的に扱う枠組みを構築した。観測エントロピーを一般化し、「観測的欠損 (observational deficit)」を導入することで、量子状態がどの程度マクロな観測から遡及不能であるかを定量化した。これにより、量子統計的十分性、ベッツ回復写像 (Petz recovery map)、バイズ逆推定が自然に統合され、マクロ性を自由資源とする微視性の資源理論が確立された。さらに、観測制約下での量子相関として観測ディスコードを定義し、その消失条件を情報回復可能性として特徴付けた。量子推論の基礎に関しては、最小変化原理 (principle of minimum change) に基づく量子バイズ則を定式化し、量子過程全体を対象とした最適化問題としてベッツ回復写像を導出した。これは、量子状態のみならず量子チャネルを含む推論の更新則に操作的根拠を与えるものであり、量子統計推論と量子情報処理の橋渡しとなる。さらに、量子通信プロトコルの研究として、ポートベース量子テレポーテーションを多受信者状況に拡張する「ポートベース量子テレクローニング」を提案した。従来必要であった受信側での補正操作を不要とし、一般化された測定を用いることで、特定の条件下では単純なクローン後レポート法を上回る性能を示した。これは、分散量子情報処理やプログラマブル量子操作への新たな応用可能性を示すものである。

量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明

【研究代表者】

飯塚 則裕 (国立清華大学物理学系・副教授／京都大学基礎物理学研究所・特任准教授)

【研究分担者】

宇賀神 知紀 (立教大学理学部・准教授)

重森 正樹 (名古屋大学理学研究科・教授)

寺嶋 靖治 (京都大学基礎物理学研究所・助教)

野海 俊文 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

【領域ポスドク (研究協力者)】

宮田 晃宏 (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

Sunil Kumar Sake (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

Nicolò Zenoni (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

【研究協力者】

西田 充宏 (弓削商船高等専門学校・助教)

本計画研究では、量子情報理論の視点を用いてブラックホールおよび量子重力の基礎構造を解明することを目的とし、研究を推進しました。

まず飯塚は西田らと共に、genuine multi-entropy と呼ばれる新しい多体系エンタングルメント指標を体系的に構築し、ホログラフィーにおいては二体のものつれのみでは不十分であり、真に多体系的な量子もつれが本質的な役割を果たすことを示しました[1]。具体的には、 q 体の多体系エンタングルメントにのみ反応する Genuine Multi-entropy (以下 GM と省略) を定義し、二体の相関では捉えることのできない多体系の情報構造を抽出する枠組みを与えました。ブラックホール蒸発過程においては、この GM が Page 時刻以降に本質的に寄与することを明らかにしました。またホログラフィック状態において、GM が小さな補正ではなく普遍的に $O(1/G_N)$ の大きさをもち存在することを定量的に示しました(図)。

さらに飯塚は Lin、西田らと共に、GM の一般構成を整数分割と結びつけることにより、それらが新たなエンタングルメント指標を与えることを明確にしました[2]。加えて、飯塚は西田、宮田らと共に、量子回復可能性の指標である Markov gap を多体系へ拡張し、バルク再構成における幾何学的障害を捉える multipartite Markov gap を導入しました[3]。さらに Lin と共に、保存量を持つ系における symmetry-resolved GM を通じて、対称性の存在下においても多体系エンタングルメントが豊富に存在することを示しました[4]。これらの結果は、ブラックホール内部再構成における多体系量子相関の役割を明確にするものです。

重森は、ブラックホール・マイクロステートの微視的構造に関する一連の研究を行いました。D1-D5 系における滑らかなマイクロステート幾何に対して三中心解による有効記述を与え、複雑な超重力解や世界面解の本質的特徴を簡潔に捉えられることを示しました[5]。さらに、対称積 CFT に対する新しい超対称指数を提案し、ブラックホール閾値近傍の状態構造を精密に分類しました[6]。

寺嶋は、有限 N 効果とブラックホール近傍物理に焦点を当てた研究を行いました。AdS₄/CFT₃ におけ

るバルク波束の性質を解析し、主要な $1/N$ 補正を明らかにしました[7]。また、有限ではあるものの大きな N において、AdS-Rindler 領域で再構成されたバルク演算子が指数的大増大を示し、 $\ln N$ スケールで大 N 展開が破綻することを示唆しました[8]。

宇賀神は、閉じたローレンツ宇宙における非摂動量子重力の予言可能性について検討を行い、部分可観測性の観点から、縮約密度行列を通じて古典的可観測量および確率解釈が自然に現れることを示しました[9]。

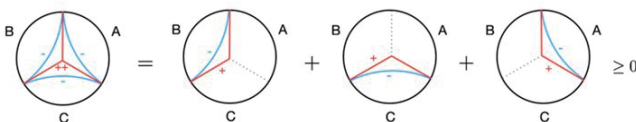
野海は、宇宙論およびブラックホールにおける因果性・単調性制約について統一的な研究を行いました。FLRW 宇宙におけるホログラフィック・エンタングルメントエントロピーを計算し、強部分加法性が成立するための幾何学的条件を同定しました[10]。また、非線形電磁気学における因果性要求から、極限ブラックホールの質量電荷比およびエントロピー密度に新たな単調性を導きました[11]。

Sake は de Sitter 時空における JT 重力の正準量子化を詳細に解析し、時間の問題やヒルベルト空間の構成を明確化するとともに、拡張模型や York 時間に基づく波動関数の定式化を通じて、de Sitter ホログラフィーとエントロピー理解に新たな枠組みを与えました[12, 13]。

Zenoni は AdS₃ における渦糸解および渦毛をもつブラックホール解を解析し、二重トレース境界条件の下での相構造やホーキング-ページ型転移、Little-Parks 周期性を明らかにし、ホログラフィック超伝導体とブラックホール物理の関係を解明しました[14]。

宮田は二次元ホログラフィック CFT における局所演算子クエンチ後のエンタングルメントダイナミクスを解析し、ユニタリ・非ユニタリ時間発展の違いがエンタングルメント成長に本質的影響を与えることを示すと同時に、重力双対として時空依存ホライズンを持つブラックブレン解を明らかにしました[15]。

- [1] N. Iizuka and M. Nishida, Phys. Rev. D **112**, 026011 (2025).
- [2] N. Iizuka et al., Phys. Rev. D **112**, 066014 (2025).
- [3] N. Iizuka et al., JHEP **10**, 148 (2025).
- [4] N. Iizuka and S. Lin, Phys. Rev. D **113**, 026016 (2026).
- [5] I. Bena et al., JHEP **12**, 130 (2025).
- [6] M. R. Hughes and M. Shigemori, arXiv:2509.19425.
- [7] N. Tanahashi et al., JHEP **06**, 214 (2025).
- [8] S. Terashima, arXiv:2508.11592.
- [9] Y. Nomura and T. Ugajin, JHEP **10**, 166 (2025).
- [10] T. Noumi et al., JHEP **08**, 115 (2025).
- [11] Y. Abe et al., arXiv:2505.23483.
- [12] I. Dey, et al., arXiv:2501.03148 [hep-th].
- [13] O. Parrikar and S. K. Sake, arXiv:2505.19231 [hep-th].
- [14] R. Auzzi et al., JHEP **06**, 201 (2025).
- [15] W. Mao, et al., arXiv:2512.18781 [hep-th].



図：genuine multi-entropy の三体成分 GM (3) が常に非負であることを示す幾何学的分解の概念図。

人工量子物質による量子ブラックホールの説明

[研究代表者]

手塚 真樹 (京都大学理学研究科・助教)

[研究分担者]

中島 秀太 (大阪大学 QIQB・准教授)

上西 慧理子 (慶應義塾大学理工学研究科・特任講師)

森 貴司 (慶應義塾大学理工学研究科・准教授)

山本 大輔 (日本大学文理学部・准教授)

[領域ポスドク (研究協力者)]

山下 和也 (大阪大学 QIQB・特定研究員)

Giacomo Marmorini (日本大学文理学部・研究員)

[研究協力者]

段下 一平 (近畿大学理工学部・教授)

高三 和晃 (東京大学理学系研究科・助教)

山本 和樹 (東京科学大学理学院・助教)

Tanay Pathak (京都大学理学研究科・特定研究員)

Abhik Kumar Saha (京都大学理学研究科・特定研究員)

Juan Pablo Bayona Pena (ボローニャ大学/INFN・大学院生)

中島と山下が担当する冷却原子実験は、実験室引越に伴う実験系の再立ち上げが完了し、今年度は非時間順序相関関数 (OTOC) 測定と測定誘起相転移観測に向けた実験系の大幅なアップグレードを行いました。OTOC 測定を実行するには、光格子系の Hubbard ハミルトニアンを高速かつ精密に制御することが不可欠ですが、ホッピング t の符号反転を可能にする Floquet 光格子を実現するための高速 PZT 周期駆動ミラー系と、原子間相互作用 U の大きさを符号も含めて高速に制御する Feshbach コイル系の製作とテストを行い、十分な性能を持つことを確認しました。これらをテスト系において分解能を確認した高分解能光学系、および高感度冷却 EMCCD カメラとあわせて冷却リチウム (Li) 原子系に組み込む作業を完了し、光格子中の量子気体におけるハミルトニアン制御の実証に向けて実験を進めています。さらに、光格子中の量子気体に対する局所操作および任意形状の光ポテンシャル構築を可能とするデジタルマイクロミラーデバイス (DMD) を用いた空間光変調器 (DMD-SLM) を導入し、テスト系において任意の光パターン生成を生成できることを確認しました (図 1)。また冷却効率を向上させるための Li 原子に対する D1 gray molasses 冷却の光学系の構築も進めており、これらの成果を春の日本物理学会において発表予定です [1]。

Bayona-Pena と森は、花井氏 (現東京科学大)、早川氏 (京大基研) と、開境界条件のもとでの不変量で捉えられる開放量子系のトポロジカル相転移が、非エルミート/リウビアン表皮効果が存在する場合でも、周期的境界条件下の系のダイナミクスで観測できることを、周期的な開放フェルミオン系のエンタングルメントスペクトルのクエンチダイナミクスから示しました [2]。

白井氏 (早大) と森は、非順序相関関数を離散切断ウィグナー近似 (DTWA) により計算する方法を開発し、

長距離相互作用をもつスピン系での量子情報の広がり方を明らかにしました [3]。また、池内氏 (慶大) と森は、系全体で散逸のある量子多体系の時間発展の計算に用いられる普遍リンドブラッド方程式について、厳密なエラー上限を求め、熱力学極限で長時間にわたりエラーが抑えられる条件を明らかにしました [4]。

上西らは、複雑なダイナミクスを特徴づけるトポロジカルデータ解析において、ダイナミクスをある超対称ハミルトニアンの固有値スペクトルとして再解釈する手法を開発しました。IBM の量子計算機での量子位相測定から、スペクトルギャップの最小点とカオスの発現の対応などを実証しました [5]。

手塚らは、一般に 4 個 (以上) のフェルミオンの全対称相互作用をもつ Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型の量子計算機での実装コストが大きいことに関し、これを回避しつつ強いカオス性を示す複数の模型を提案しました [6]。

木下氏 (B03)、村田氏 (B03) と山本は、インフレーション宇宙における場の理論に対応するスピン系を考え、これと相互作用する 1 個のスピンを Unruh-DeWitt 検出器としたときに、応答がスピン系の大きさとともに場の理論のものに漸近することを示しました [7]。

また、今川氏 (日大)、村田氏 (B03) と山本は、量子臨界スピン系で現れる、AdS/CFT 対応から着想を得た、粒子が周期系の反対側に突然テレポートしたように見える時空局在応答について、数値解析を進めました。系に加える摂動が、連続極限における局所密度場に対応する演算子と結合した場合に限り、この現象が現れることから、AdS 時空の物理との対応のより強い証拠を得ました [8]。

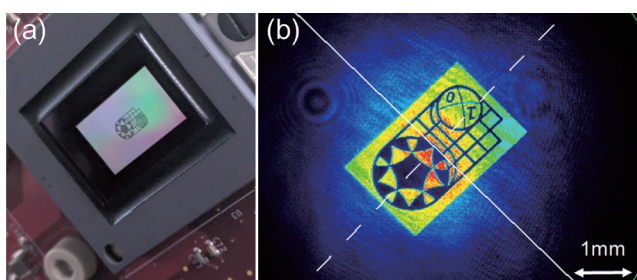


図 1 : (a) DMD および (b) DMD により生成された光学パターン。

[1] 山下和也, 中島秀太, 日本物理学会2026年春季大会.

[2] P. Bayona-Pena, R. Hanai, T. Mori, and H. Hayakawa, Phys. Rev. B **111**, L140303 (2025).

[3] T. Shirai and T. Mori, Phys. Rev. B **112**, 014309 (2025).

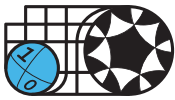
[4] T. Ikeuchi and T. Mori, Phys. Rev. B **112**, 094309 (2025).

[5] H. Yamauchi, S. Kanno, Y. Sato, H. Tezuka, Y. Shimada, E. Kaminishi, N. Yamamoto, arXiv:2511.23169.

[6] M. Hanada, S. van Leuven, O. Oktay, and M. Tezuka, Phys. Rev. E **113**, 014217 (2026).

[7] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii, Phys. Rev. Research **7**, 043135 (2025).

[8] D. Imagawa, K. Murata, D. Yamamoto, Phys. Rev. B **113**, 014311 (2026).



量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明

【研究代表者】

石橋 明浩（名古屋大学大学院理学研究科・教授）

【研究分担者】

前田 健吾（芝浦工業大学工学部・教授）

村田 佳樹（日本大学文理学部・教授）

【領域ポスドク（研究協力者）】

松尾 善典（名古屋大学理学部・特任准教授）

松井 宏樹（日本大学文理学部・ポスドク研究員）

【研究協力者】

岡村 隆（関西学院大学理学部・教授）

木村 元（芝浦工業大学システム理工学部・教授）

野海 俊文（東京大学・准教授）

木下 俊一郎（金沢工業大学基礎教育部・准教授）

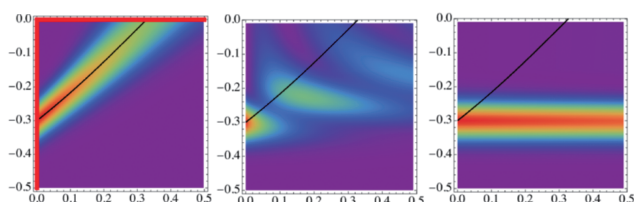
ブラックホールは、天体の重力崩壊による地平面の形成からホーキング放射による蒸発の過程を通して、時空のダイナミクスと量子情報を結びつける極限的な構造です。計画研究班B03では、こうした量子ブラックホールの数理的な基本性質の解明を目指しています。

石橋・前田・岡村は、ゲージ重力対応に基づいて定式化した「ホログラフィック半古典アインシュタイン方程式」を用いて、平坦時空やドジッター時空の安定性解析を行いました。その結果、AdS時空と合わせて最も基本的である極大対称時空が、強い量子効果により不安定化し得ることを示しました[1]。さらに前田は、この手法を3次元と5次元の回転ブラックホールに適用し、ブラックホール内部のコーシー地平面の量子的不安定性と、その次元依存性を明らかにしました[2]。この成果は、量子的な観点から宇宙検閲官仮説を検証する成果です。また、前田はC03の吉田らとともに、高階微分を含む重力理論において臨界ブラックホールから摂動的にワームホール解を構築できないことを示し、高次曲率項を含む一般の重力理論におけるワームホール形成に強い制限を与えました[3]。石橋は共同研究者らとともに、漸近安全量子ブラックホールの研究で培った手法を宇宙モデルに応用し、非等方な膨張宇宙の漸近的振る舞いを考察しました。そして、量子効果が膨張宇宙の等方化を促進するという結果を示し、いわゆる「宇宙無毛定理」に対する漸近安全量子重力理論の枠組みでの知見を得ました[4]。松尾と石橋は共同研究者とともに、ホーキング効果の最終過程において予見される「ブラックホールから弦の集合体への相転移」の可能性を、重力の反作用を解析的に取り込める2次元重力モデルを用いて検討しました[5]。石橋と前田は、B01の飯塚やD01の西岡らとともに、重力の振る舞いを規定する様々なエネルギー条件と量子情

報理論の関係について包括的な総説を行いました[6]。

B03班では、物性系とブラックホール物理との関係を明らかにすることを目的とする研究も行っています。村田は、B02の山本および共同研究者と連携し、スピン系と曲がった時空中の場の理論との対応関係について研究を進めました[7,8]。その結果、スピン系における磁場および最近接交換結合を適切に時空間依存させることにより、連続極限において任意に曲がった(1+1)次元時空中の場の理論を実現できることを示しました。本研究は、ブラックホール時空やインフレーション時空に特有の熱的性質を、スピン系を用いた実験によって検証できる可能性を示すものであり、重力と物性をつなぐ新たな研究基盤を与える成果です。

また、村田と松井は共同研究者とともに、ブラックホール内部における量子重力効果の解析を行いました[9]。ブラックホール内部を記述するKantowski-Sachs計量を用いて量子化を行い、Wheeler-DeWitt(WDW)方程式をガウス型波束を初期条件として解きました。その結果、量子効果が小さい場合には、波束のダイナミクスが古典解を良く再現することを確認しました。一方で、量子効果が顕著となるパラメータ領域では、波束の時間発展が古典解から大きく逸脱することを発見しました(図参照)。さらに、この量子効果により、ブラックホール内部における特異点形成までの時間が延長されることを示しました。本研究は、量子重力効果がブラックホール特異点問題に与える影響を具体的に明らかにする重要な成果といえます。



図：左図から右図へと、表面重力が強くなるとともに、波束（色付き分布）が古典軌道（曲線）からずれる様子が分かります。

- [1] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, JHEP 04 (2025) 167
- [2] R. Hamaki and K. Maeda, Phys. Rev. D 111 (2025) 8, 084021
- [3] T. Kanai, K. Maeda, and D. Yoshida, 2511.21017 [gr-qc]
- [4] C-M. Chen, A. Ishibashi, R. Mandal, and N. Ohta, Class. Quant. Grav. 42 (2025) 235008
- [5] A. Ishibashi, Y. Matsuo, A. Tanaka, 2506.09586 [hep-th]
- [6] N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda, H. Nakayama, T. Nishioka, 2509.01286 [hep-th]
- [7] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto and R. Yoshii, Phys. Rev. Res. 7 (2025), 023197
- [8] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto and R. Yoshii, Phys. Rev. Res. 7 (2025), 043135
- [9] T. Chiba, H. Matsui and K. Murata, Phys. Rev. D 113, 026017



量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論

[研究代表者]

高柳 匡 (京都大学基礎物理学研究所・教授)

[研究分担者]

奥山 和美 (信州大学理学部・教授)
杉本 茂樹 (京都大学理学研究科・教授)
関野 恭弘 (拓殖大学工学部・教授)
疋田 泰章 (大阪工業大学・特任教授)

[海外研究協力者]

笠 真生 (Princeton大学・教授)
吉田 紅 (Perimeter研究所・教員)
Pawel Caputa (ストックホルム大学・准教授)
Ali Mollabashi (IPM研究所(イラン)・助教)
Shan-Ming Ruan (北京大学・助理教授)
魏子夏 (Harvard大学・Junior Fellow, Harvard Society of Fellows)

[領域ポスドク(研究協力者)]

Jonathan Harper (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

[研究協力者]

上床 隆裕 (香川高等専門学校・一般教育科・講師)
北村 比孝 (立教大学理学部・特別研究員)
後藤 郁夏人 (大阪大学理学部・助教)
酒井 一博 (明治学院大学法学部・准教授)
宮下 翔一郎 (早稲田大学理工学術院・講師)
宮地 真路 (理化学研究所 数理創造研究センター・上級研究員)
鈴木 健太 (東京大学広域科学専攻・相関基礎科学系・助教)
森 崇人 (京都大学基礎物理学研究所・学振特別研究員)
楠亀 裕哉 (九州大学高等研究院・准教授)
中山 泰晶 (NTTコミュニケーション科学基礎研究所・ポスドク研究員)
Peng-Xiang Hao (清華大学/京大基研・ポスドク研究員)
川平 将志 (神戸大学院理学研究科物理学専攻・ポスドク研究員)

計画研究C01は、重力理論と場の量子論を等価に関係させる「ホログラフィー原理」とその「量子情報」との関係を利用して、ゲージ重力対応を掘り下げることで、宇宙創成を説明する基礎理論の解明を目指しております。

C01のHarperと高柳は、大学院生の川本、中村、前田と共同で、通過可能なワームホール時空の量子情報的な解釈を与えました[1,2]。ゲージ重力対応において、通過可能なワームホールは、二つの共形場理論に相互作用を導入すると実現できますが、これが時間的エンタングルメントによるものであることを見出しました。また、非ユニタリーな共形場理論の組を用いることで、相互作用なしで、通過可能なワームホールを実現できるという新しい構成法を与えました。

C01のHarperと高柳は、海外研究協力者のMollabashiと大学院生の田耕と共同で、マルチエントロピーと呼ばれる多体量子エンタングルメントを測る量を数値的に解析し、Isingモデルと自由スカラー場の1次元量子臨界点における特徴的な振る舞いを明らかにしました[3]。Isingモデルについては、二次元共形場理論の解析的計算から予言される公式と一致しますが、自由スカラー場の結果は、非コンパクト性からその公式の例外となることを見出しました。

C01の高柳は、大学院生の小原、神田、藤木と共同で、境界を持つ空間上の共形場理論に対するホログラフィー原理であるAdS/BCFT対応を用いて、低次元宇宙の量子重力理論の新しいモデルを構築し、分類しました[4]。このモデルでは、AdS/BCFT対応で現れる世界の果てプレーン上にスカラー場を導入することで、ダイナミカルに膨張や収縮する宇宙を実現し、ホログラフィー原理を用いて量子重力効果を古典的な重力理論で解析することができるという利点を持っています。

次に、C01の奥山は、2重スケール極限を取ったSYKモデル(DSSYK)の様々な側面についての研究を行いました。特に、[5]ではDSSYKのホログラフィック双対としてド・ジッター時空を得る方法について研究しました。DSSYKの固有値分布の高エネルギー側の端を拡大する極限を取ることで、ド・ジッター時空上のJT重力が得られることがわかりました。

そして、C01の疋田は、大学院生の津田、DESY所属の

Harris、Schomerusと共同で、3次元反ドジッター背景におけるDプレーンとそのゲージ重力対応に関する研究を行いました。超弦理論に双対な対称積オービフォルドモデルを解析し、Dプレーンに対応するインターフェイスの分類を行いました[6]。そのインターフェイスを記述する境界状態を具体的に構成し、Dプレーンに束縛された開弦の分配関数を再現することを確認しました。

一方、C01の関野は、ドジッター空間のホログラフィック双対理論は観測者の事象の地平面上で定義されるという立場に立って、SYKモデルにより双対理論を構成しました。Susskindとの論文[7]では、「平坦空間極限」に対応する2重スケール極限がSYKモデルで存在することを示すとともに、QCDで平坦時空極限にあたる強結合極限が存在する条件を明らかにしました。宮下、Susskindとの論文[8]では、ドジッター空間の地平面付近の領域が't Hooftモデル(1+1次元QCD)で記述されることを提案しました。

また、C01の杉本は、[9]において、QCDにおいてバリオンが存在する系のエネルギー・運動量テンソルをホログラフィー原理を用いて解析し、核子内のエネルギー密度、圧力、せん断力の分布などを求めました。また、QCDにおける量子異常をホログラフィー原理を用いて精密に解析する方法を提案し、QCDにおける離散的な軸性対称性とフレーバー対称性に関する混合量子異常が正しく再現されることを[10]において示しました。

- [1] J. Harper, T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, arXiv: 2512.13800.
- [2] T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, JHEP 04 (2025) 086.
- [3] J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and K. Tasuki, Phys. Rev. Res. 7, 043194 (2025).
- [4] K. Fujiki, H. Kanda, M. Kohara and T. Takayanagi, JHEP 03 (2025) 135.
- [5] K. Okuyama, JHEP 08 (2025) 181.
- [6] S. Harris, Y. Hikida, V. Schomerus and T. Tsuda, JHEP 12 (2025) 114.
- [7] Y. Sekino and L. Susskind, JHEP 10 (2025) 137.
- [8] S. Miyashita, Y. Sekino and L. Susskind, JHEP 11 (2025) 107.
- [9] S. Sugimoto and T. Tsukamoto, PTEP 2025, 8 (2025) 083B01.
- [10] M. Akhond and S. Sugimoto, arXiv: 2503.19492.



量子ホール系による量子宇宙の実験

【研究代表者】

遊佐 剛（東北大学理学研究科物理専攻・教授）

【研究分担者】

柴田 尚和（東北大学理学研究科物理専攻・教授）

堀田 昌寛（東北大学理学研究科物理専攻・助教）

米倉 和也（東北大学理学研究科・准教授）

【海外研究協力者】

Vadimir Umansky（イスラエルワイツマン研究所・上級主任研究員）

【研究協力者】

間野 高明（物質・材料研究機構・主任研究員）

山本 一博（九州大学大学院理学院物理学・教授）

南部 保貞（名古屋大学理学研究科物理素粒子宇宙物理学専攻・准教授）

堀田 知佐（東京大学大学院総合文化研究科・准教授）

中山 和則（東北大学理学研究科・准教授）

山口 幸司（九州大学大学院システム情報科学・特任助教）

佐々木 健一（NTT 物性科学基礎研究所・主任研究員）

高三 和晃（東京大学理学系研究科・助教）

杉山 祐紀（東京大学物性研究所・特任研究員）

ニコラス ムーア（東北大学理学研究科物理専攻・助教）

本研究では宇宙創成の初期段階で現れる「量子宇宙」と理論的に等価な物理系を、研究室レベルの物性実験系で実現し、理論検証のための豊かな「遊び場」を提供することを目指しています。舞台となるのは、極低温強磁場下で発現する量子ホール系であり、その試料端（エッジ）を伝搬する励起が、 $(1+1)$ 次元の量子宇宙と数式的に等価であるという理論に基づき研究を進めています。

昨年度までに、独自技術である時間-空間分解ストロボフォトルミネッセンス (PL) 顕微鏡（時間分解能 300ps、空間分解能 $<1\mu\text{m}$ ）を用いて、エッジ励起の経路制御および複数経路をまたぐ伝播の直接観察に成功し、その成果を論文にまとめました[1]。一方、この論文で使用したデバイスは、 $(1+1)$ 次元の系が、一様等方に膨張するものではなかったため、今年度は半導体プロセスを最適化し、エッジ経路が同心円状に膨張・収縮可能なデバイスの作製に成功しました[2]。

これらエッジの研究として並行して進めてきたのが、バルク領域における励起現象の解明です。前年度より進めていたバルク励起の直接観察についても、バルクマグネトプラズモン描像による議論として論文にまとめました[3]。さらに、このバルク励起とエッジ励起に関する知見を統合することで、新たに $(1+1)$ 次元時空における伝搬のショートカット「ワームホール (wormhole)」様構造を持つデバイスを設計作製しました。この実験では、地点 A で励起した信号が、エッジを経由するよりも早く、バルク領域を伝播して地点 B に到達したことが示唆されるデータが得られました[4]。

以上のような光学的アプローチに加え、本年は、納

品時からトラブル続きだった最低到達温度 5mK の希釈冷凍機を用いた電気測定も推進しました。従来はエッジと静電結合した電極の電圧の時間変化によりエッジ励起を測定していましたが、この方法では「クロストーク」と呼ばれる電磁波ノイズがエッジ励起の信号強度を大幅に上回る点が、長年の課題でした。今年度は電圧ではなくオーミック電極により直接電流を測定することで、このクロストークを排除することに成功しました[5]。クロストークを克服したことは、量子宇宙の実験的検証を精密化する上で不可欠な技術基盤の完成を意味し、現在本格的な測定を開始したところです。

堀田氏は、遊佐実験グループとともに量子ホール系のエッジ電流とバルク励起の論文を連名で発表し[3]、量子エネルギーテレポーテーションを用いて、量子バッテリーの新しい量子特性を発見しました[6]。

柴田氏らはエニオンの生成とトラップを実現するための精密な量子多体計算を行いました。エニオンはラフリン状態といった量子液体状態の中の素励起として現れるため、その制御にはクーロン相互作用と量子揺らぎの効果の理解が必要になります。本年度は量子効果の精密計算が可能な DMRG (Density Matrix Renormalization Group) 法を用いて、その生成とトラップに必要な局所ポテンシャルの構造を調べ、分数電荷と整数電荷の励起の切り替えがポテンシャルの空間構造を変えるだけであることを明らかにしました。

米倉氏らは、ヘテロティック超弦理論におけるブレーンの研究を進めました。ブレーンは超弦理論において極めて重要な対象で、米倉氏らが行った先行研究では、ヘテロティック超弦理論において新しい種類のブレーンが発見されました。論文[7]では、そのブレーンの詳細な性質が調べられています。特に、近地平線極限 (near horizon limit) を記述する世界面共形場理論 (worldsheet CFT) が導出され、そこに現れる非自明なトポロジ的性質が明らかにされました。論文[8]では、対応するブラックブレーン解が数値計算によって構成され、throat 領域の存在といった、期待される性質を備えていることが示されています。

[1] Y. Jeong *et al.*, in preparation.

[2] Y. Jeong *et al.*, A17, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[3] Q. France *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135**, 066203 (2025).

[4] T. Karezaki *et al.*, A23, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[5] K. Sugizaki *et al.*, A22, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[6] M. Hotta and K. Ikeda, Quan. Inf. Proc. **24**, 186 (2025).

[7] J. Kaidi, Y. Tachikawa, K. Yonekura, JHEP 03 (2025) 211.

[8] M. Fukuda, S. Kobayashi, K. Watanabe, K. Yonekura, JHEP 05 (2025) 043.

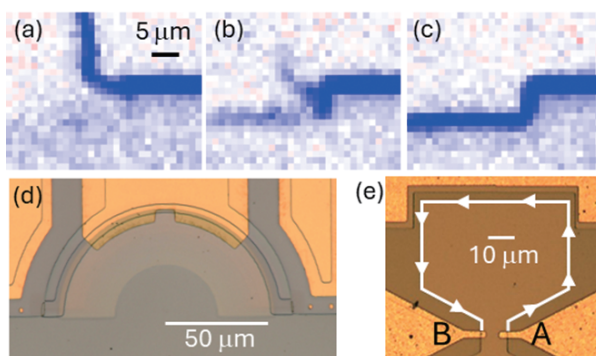


図1：(a) - (c) ストロボPL顕微鏡によるエッジ励起の伝搬の様子。青い領域が $\nu = 1/3$ 分数量子ホール状態のエッジ励起に対応（温度 40mK、磁場 14T）。(d) $(1+1)$ 次元の一様等方膨張・収縮が可能なデバイスの例と (e) ワームホール様構造を持つデバイスの光学顕微鏡像。



量子情報を用いた量子宇宙の数理とその応用

[研究代表者]

白水 徹也 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授)

[研究分担者]

泉 圭介 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・准教授)

小林 努 (立教大学理学部・教授)

棚橋 典大 (京都大学大学院理学研究科・特定准教授)

野澤 真人 (大阪工業大学工学部・准教授)

吉野 裕高 (大阪公立大学大学院理学研究科・准教授)

[領域ポスドク(研究協力者)]

吉田 大介 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・特任助教)

[研究協力者]

山田 澄生 (学習院大学理学部・教授)

本班では宇宙の始まりやその加速膨張の起源の解明、そしてブラックホール内部の構造の基礎研究に関して、高次元および4次元時空の両面から取り組んでいます。

棚橋は、弦理論と重力理論における様々な問題に適用可能な汎用的数値解析手法を機械学習に基づいて開発しました[1]。また、寺嶋靖治氏(B01班)らと協力し、境界CFTにおける波束を用いてAdSブラックホール時空を解析する手法についても研究を行いました[2]。

吉田はC01、B03班の学生との共同研究により、一般相対論に基づく荷電ワームホールの形成過程を理論的に定式化しました[3]。

泉および吉田は、B03班の学生とともに、重力ソリトン形式を用いて、負のエネルギーを持つファントムスカラー場によって支えられた静的かつ正則な多重ワームホールを記述する厳密解を構成しました[4]。

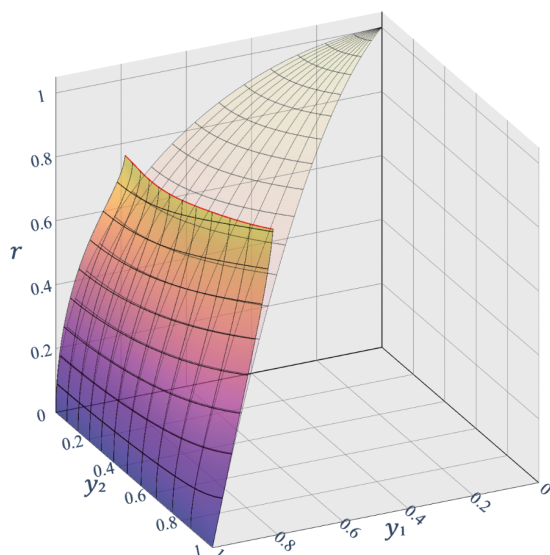
野澤は解生成の観点から、測地線が変数分離可能なBenenti型計量に着目しKerr-Schild変換の一般論を展開しました。これにより $N=2$ の超重力理論において、漸近的AdSの荷電回転ブラックホールの新たな解を構成することに成功しました[5]。

小林はダークエネルギーの有効場理論において、球対称崩壊モデルを用いた非線形の構造形成の解析を行い、ダークマターハロー数密度の有効場理論パラメータへの依存性を明らかにしました[6]。

吉野は正則ブラックホールが蒸発する時空の大域的構造の数学的分類を、極限ブラックホールに近づく場合に極めて一般的な仮定の下で行い、情報喪失問題が解決される場合があることを示しました[7]。

白水、泉、吉野はこれまで特殊な時間一定面で定式化された重力検知面をより一般の場合への拡張を念頭に光測地線束に関する幾何学量を用いて再定式化を行い、さらに重力検知面で覆われる領域のサイズに対して準局所的に成り立つ不等式などを示すことに成功しました[8]。

今年度、2026年1月26日から28日に国際研究会「Nagoya workshop on general relativity」(参加者数：59名)、3月16、17日に小研究会「第三回一般相対論と幾何」(参加者数：72名)を名古屋大学にて開催しました。前者は幾分コアな一般相対論研究者を集結させたもので、その前の週に開催されB03と本班も運営に対して寄与した「The 34th workshop on General Relativity and Gravitation」(参加者数：300名弱)と相補的な位置づけのものです。本領域における様々なイベントにも参加して下さったバルセロナ大学のEmpanan教授やアドバイザーである細谷教授らも出席され、本班活動の総括ともなりました。後者は数学系の参加者が物理系よりも上回る会となり、異分野交流を通じて今後新たな潮流が生まれることが期待されます。特に、本領域の重要な要素となっている笠-高柳面ならびにその拡張されたものに関する数学的な研究が展開される予兆を感じることができた会となりました。



図：機械学習に基づく新数値手法で構成したAdS時空中の極小曲面の例

- [1] K. Hashimoto, K. Kyo, M. Murata, G. Ogiwara, N. Tanahashi, Mach. Learn.: Sci. Technol. 7 015013
- [2] N. Tanahashi, S. Terashima, S. Yoshikawa, arXiv:2601.04647
- [3] Y. Koga, R. Maeda, D. Saito, K. Uemichi and D. Yoshida, arXiv:2505.20040
- [4] Y. Makita, K. Izumi, D. Yoshida and K. Uemichi, Class. Quant. Grav. 42, no.17, 175024 (2025)
- [5] M. Nozawa, T. Torii, arXiv:2510.06561
- [6] T. Takadera, T. Hiramatsu, T. Kobayashi, JCAP 07 006 (2025)
- [7] K. Sueto, H. Yoshino, arXiv:2508.21315
- [8] T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, Y. Tomikawa, PTEP 2026 013E01 (2026)



場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ

【研究代表者】

西岡 辰磨 (大阪大学大学院理学研究科・教授)

【研究分担者】

伊藤 悦子 (京都大学基礎物理学研究所・准教授)

奥田 拓也 (東京大学大学院総合文化研究科・助教)

本多 正純 (理化学研究所・数理創造プログラム (iTHEMS)・上級研究員)

松尾 泰 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

【領域ポスドク(研究協力者)】

Dongsheng Ge (大阪大学大学院理学研究科・特任研究員)

Pratik Nandy (理化学研究所数理創造プログラム・特別研究員)

【研究協力者】

鈴木了 (Shing Tung Yau Center of Southeast University, Professor)

永野 廉人 (東京大学素粒子物理国際研究センター・特任助教)

丸吉 一暢 (成蹊大学理工学部・准教授)

山崎 雅人 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

吉田 豊 (明治学院大学 法学部 消費情報環境法学科・専任講師)

松本 祥 (大阪公立大学 教育推進課・研究員)

Atis Yosprakob (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

西岡(研究代表者)は大学院生の川畑・安藤とともに、Narain型2次元共形場理論(CFT)における Z_N 対称性のゲージ化の研究を行いました[1]。特にサブシステム符号とよばれる一般的な量子誤り訂正符号から構成できるボソンのCFTに対してこのゲージ化を適用することで、分数スピンをもつパラフェルミオンのCFTを系統的に構成する手法を開発しました。

また、西岡は大学院生の中山とともに、一般的な拡張をもつ欠損演算子入りCFTの重力双対な新たなホログラフィックモデルを構成しました[2]。このモデルはAdS/BCFTモデルとして知られる境界付きCFTの重力双対の拡張となっており、欠損演算子に対応してAdS時空内にEnd of the Worldプレーンとよばれる時空の端が導入されています。さらにこのモデルの中で欠損演算子上に局所化されたくりこみ群の流れを調べ、欠損演算子入りCFTで成り立つと予想されている欠損C定理が成立することを示しました。

伊藤(研究分担者)は、昨年度まで取り組んでいた1+1次元系から発展させ、2+1次元のゲージ理論に対するハミルトン形式の場の理論研究を進めました。特に、テンソルネットワークを用いたゲージ不変なProjected Entangled Pair States(Gauged PEPS)の構成や、 Z_2 ゲージ理論におけるトポロジカルエンタングルメントの数値的解析を行いました。

また、基研の中山・松本・小名木らとともに、共形不変性を持たないスケール不変な繰り込み群固定点に対する数値的研究も実施しました[3]。

奥田(研究分担者)は、研究代表者の西岡、大学院生の川畑・矢萩との共著論文[4]において、可換Chern-Simons理論にトポロジカル境界条件を課すことで、フェルミオンのCFTが現れる仕組みを解析しました。この構成にはコードCFTのフェルミオンの拡張が含まれます。さらに、Johnson-Freydが研究した超対称頂点作用素代数に対応するChern-Simons理論を基にして、超対称CFTを導くフェルミオンのトポロジカル境界条件を分類しました。また研究協力者の丸吉・ピーダーセン・鈴木・山崎・吉田らとともに執筆した論文[5]が、Journal of Physics A Best Paper Prize 2025を受賞しました。

本多(研究分担者)は場の量子論・量子計算・物性・量子重力について幅広く研究を行いました。場の量子論については、研究協力者の松本・Yosprakobらとともに4次元SU(2)ヤンミルズ理論の数値シミュレーションを行い、相構造に関する仮説に対して肯定的な

結果を得ました[6,7]。また、量子計算によりゲージ理論におけるエネルギースペクトルを計算する方法についての研究を行いました[8]。物性に関する研究においては、大学院生の中西・嶋守らとともに葉層構造に関するGodbillon-Vey不変量と呼ばれるものを用いて新たな場の量子論を提案し、フラクトンとの関連性を議論しました[9]。量子重力に関する研究では、Picard-Lefschetz理論をJackiw-Teitelboim重力理論に応用し、その量子宇宙論的な側面を議論しました[10]。上記の研究に関連して、12件の研究会招待講演、9件の研究会開催、1件のアウトリーチ活動、2件の解説記事の執筆を行いました。

松尾(研究分担者)は非可換ホール効果と非可換エニオンに関連する研究を継続しました。前年度に対応する可解系を記述する新しいCalogeroモデルを提案し、そのスペクトルを調べましたが、今年度は関連するspin Calogero-Sutherland可解模型の一般化の導出、系を記述する無限次元対称性(Affine Yangian対称性)構造の明確化についての研究を行いました。また、提唱した可解模型のプレーンを用いた定式化など弦理論的な視点の導入を行いました。

また今年度も、D01班主催のスクール「New computational methods in quantum field theory 2026」を1月26日から28日の三日間、理化学研究所和光キャンパスにて開催しました。今回は英語での開催で、全国から約40名の参加がありました。講師は春名純一氏(阪大)、日高義将氏(京大基研)、沼澤宙朗氏(東大)の3名をお招きし、量子誤り訂正、ハミルトニアン形式による格子ゲージ理論の定式化、開放量子系に関する入門的講義を行っていただきました。また7名の参加者によるトークも行われ、大変活気のある議論が行われました。この5年間スクールを継続して開催することで、当該分野に参入する学生、若手が増えたことを実感しています。極限宇宙領域は今年度で終了とはなりますが、今後も別の形でこのようなスクールや研究会の開催を続けていければと思います。

[1] K. Ando *et al.*, JHEP 02, 058 (2026).

[2] H. Nakayama and T. Nishioka, Accepted in JHEP (2026).

[3] E. Itou *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 134409 (2025).[4] K. Kawabata *et al.*, JHEP 05, 105 (2025).[5] K. Maruyoshi *et al.*, J. Phys. A **56**, 165301 (2023).[6] M. Hirasawa *et al.*, JHEP 05, 009 (2025).[7] M. Hirasawa *et al.*, PoS LATTICE2024, 407 (2025).

[8] D. Ghim and M. Honda, PoS QCHSC24, 265 (2025).

[9] H. Ebisu *et al.*, Phys. Rev. D **112**, 025010 (2025).[10] M. Honda *et al.*, Phys. Rev. D **111**, 12 (2025).



量子情報を用いた量子多体系の制御とテンソルネットワーク

【研究代表者】

奥西 巧一（大阪公立大学理学研究科・教授）

【研究分担者】

上田 宏（大阪大学量子情報・量子生命研究センター・准教授）

桂 法称（東京大学大学院理学研究科・准教授）

堀田 知佐（東京大学大学院総合文化研究科・教授）

原田 健自（京都大学情報学研究科・助教）

【領域ポスドク(研究協力者)】

尾崎 壮駿（東京大学総合文化研究科）

深井 康平（東京大学理学研究科）

【研究協力者】

西野 友年（神戸大学理学研究科・准教授）

引原 俊哉（群馬大学理工学府・准教授）

大久保 毅（東京大学大学院理学研究科・特任准教授）

古谷 峻介（埼玉医科大・講師）

Yosprakob, Atis（京都大学基礎物理学研究所）

計画研究D02班は、テンソルネットワーク(TN)法やその数理的背景の解明を元に、量子多体系の織り成す多彩なダイナミクスの理解や量子計算との橋渡しを実現し、極限宇宙の分野横断的研究を進展させることを目指して立ち上がりました。これが最後の報告となります。今年度は、代表者の奥西と領域PDとして活躍したYosprakobが異動し、深井が新領域PDとして東大に着任するなど、動きの激しい幕開けとなりました。一方で、当初に掲げた目的に対する重要な進展が得られるとともに、短期間ながら可積分性や物性系についての新たな発展も生まれています。以下では、今年度の主要な結果のいくつかを紹介したいと思います。

主要課題のTNとホログラフィーの関係では、昨年度までにベータ格子型TNに対するホログラフィックくりこみ群の構造の明確化や、双曲格子モデルにおけるループ構造による非自明なスケール次元の実現を示しましたが、それに続く一手として、今年度はベータ格子の電子系にグリーン関数を用いた定式化を援用して、物性における動的平均場理論のホログラフィー的な側面を明らかにしました[1]。一方、量子計算とTNという観点から、元領域PDのYosprakobと奥西らが、フェルミ粒子系にクリフォードゲートを組み込んだ密度行列くりこみ群(DMRG)アルゴリズムも構成しました[2]。上田らは、これまでに開発してきた樹状TN構造最適化を非専門家でも実行できるようにするための数値計算ライブラリTTNOptを開発し[3]、さらに希薄粒子系の解析に特化した数値計算ライブラリQS3をランダム量子回路ベンチマーク計算に転用し、非クリフォード回路を含んだ100量子ビット級の量子回路忠実性の調査手続きを構築しました[4]。今後の応用展開も期待されます。また、原田らは、樹状TN中のテンソル成分を正に限定することで、データ分布を樹状TNで近似する生成モデルを提案しました。テンソル要素が正であるため、ボルンマシンと違ってネットワーク中の構造も統計的關係と解釈することができます。さらに、非負行列分解と最小相互情報量原理を利用した樹状TNの構造最適化を組み合わせ、データに内在する統計的因果関係をネットワーク構造として抽出可能なことを示しました[5]。TN経路で機械学習の物理的解釈を可能にした成果と言えます。

量子多体ダイナミクスの観点からは、桂らは漸近的

量子多体傷跡状態と呼ばれる非熱的なダイナミクスを示す状態が量子多体傷跡状態を基底状態とする仮想的なハミルトニアンで低エネルギー励起として系統的に記述できることを示しました[6]。領域PDの深井は、桂と連携して乱れないp体マヨラナSYKモデルが可積分であること、またその可積分性は量子イジング鎖のそれと軌を一にすることを明らかにしました[7]。さらに、乱れないp体マヨラナSYKモデルの全エネルギー固有値および固有状態の厳密な導出にも成功しています。一方、堀田らは、系の両端に物理的な浴をつけてほぼ無限系に近い状態を作り出す手法を開発し、この手法を使って量子多体実時間発展の計算を行いました[8]。また、尾崎と堀田は、LiVS2という物質において格子のダイナミカルな歪みと軌道秩序が相競合を生み出す系におけるダイナミクスの計算を行い、相境界近傍において、従来型の核生成機構とは異なった時間変化に伴う秩序形成の仕組みを見出しました。とくに、熱平衡状態とは別の対称性をもった部分秩序を経由して秩序が形成される過程と、その背後にあるエネルギーランドスケープを捉えることに成功しています[9]。

さて、4年半を振り返ると、D02班として当初目指した方向に沿った形で研究はおおよそ計画通りに進めることが出来たとともに、いくつか次のステップにつながる研究の芽や、異分野の連携研究の指針も得ることが出来たと感じています。これも、研究分担者をはじめ、極限宇宙の多くのメンバーに支えて頂いた結果です。この場を借りて、ご協力いただいた多くの方々に感謝したいと思います。

[1] K. Okunishi and A. Koga, arXiv: 2509.19704

[2] A. Yosprakob, W.-L., Tu, T. Okubo, K. Okunishi, and D. Kim, arXiv: 2510.04164

[3] R. Watanabe, H. Manabe, T. Hikihara and H. Ueda, Comput. Phys. Commun. **319**, 109918 (2026).

[4] T. Kaneda, K. Fujii, and H. Ueda, arXiv:2505.10820 (PRR, in press).

[5] Katsuya O. Akamatsu, K. Harada, T. Ohkubo and N. Kawashima, arXiv:2504.06722. (MLST, in press)

[6] M. Kunimi, Y. Kato and H. Katsura, Phys. Rev. Res. **7**, 043107 (2025).

[7] K. Fukai and H. Katsura, arXiv:2511.03460.

[8] S. Shimozone and C. Hotta, arXiv:2512.07923.

[9] 論文準備中



受賞報告

AWARD REPORT

●2025年度 仁科記念賞

田崎 晴明 氏(学習院大学・教授)

押川 正毅 氏(東京大学物性研究所・教授、「極限宇宙」公募研究)

本年度、田崎晴明氏(学習院大学理学部)と本領域公募班の押川正毅氏(東京大学物性研究所)が共同で仁科記念賞を受賞されることになりました。受賞理由は「量子スピン系の数理解的研究」であり、 $S=1$ 反強磁性ハイズンベルク鎖の基底状態に関するハルデン予想とそれに関連する数理解的研究への継続的かつ本質的な貢献が評価されました。その内訳には、今日 AKLT 模型として広く知られる Affleck-Kennedy-Lieb-田崎模型の数理的に厳密な解析とハルデン状態の特徴づけ、Kennedy-田崎(KT)変換とその一般化による隠れたトポロジカル秩序の解明、ハルデン状態と対称性により保護されたトポロジカル(SPT)秩序との関係の明確化、Lieb-Schultz-Mattis 定理による整合条件の高次元空間への一般化など、実に多彩で豊かな内容が含まれています。これらの仕事今日の量子多体系の理解の礎として重要であることはもちろんですが、今回の受賞で特に感慨深く思うのは、ハルデン予想という一点から出発した理論がその後、量子情報、テンソルネットワーク、SPT 秩序、トポロジカル場の理論など理論物理学の様々な分野へと大きく羽を広げていく様子が展望できるとともに、量子多体系研究の面白さ、醍醐味が凝縮されていると改めて気づかされたことです。本質的な貢献をされてきたお二人の受賞は、ある意味当然と感じられる方も多いかと思います。

極限宇宙でも昨年2月6日に田崎氏と押川氏をジョイントコロキウムにお招きし、ハルデン系の初期から最新の研究に至るまで足掛け30年余りに及ぶ壮大なストーリーをお話いただきました。個人的なことですが、2024年9月頃にお二人の共通の共同研究者である Ian Affleck 氏の訃報に接した際、一つの時代の節目のように感じられ、ハルデン予想に端を発する理論物理学の発展を振り返る企画ができればと思い、セミナーを依頼したのがきっかけでした。元祖ハルデン予想問題が熱気を帯びていた頃を知らない若い世代にも有益なレビューを含め、最先端までカバーするという少々無茶なお願いをしたのですが、お二人とも快く引き受けてくださいました。シンプルながら謎めいた現象から出発して奥深く、かつ一般的で広がりのある理論を緻密に展開するという、理論物理学者なら一度は夢見るような研究の姿が伝わってくるお話で、老若男女を問わず大いに盛り上がりしました。また、押川氏の講演の際には、必ずしも自信作の引用が伸びるわけではないので直近の評価に一喜一憂せず努力を続けることも

必要だという旨の若手向けのアドバイスをされていたのも印象的でした。そういえば、KT 変換の一般化に関する論文が出版されたのは1992年ですが、引用数が急速に伸び始めたのは2010年以降です。もちろん当時から重要な結果ではありましたが、その有用性が認識され、広がりを見せるまでには20年弱の時間が必要だったとも言えます。なかなか真似のできることはないのかもしれませんが、本質を見抜く先見性に独創性を加え、理論を深化させる思考を不断に続けてこられたということだと思います。長年にわたりそのような研究を体現していただいたお二人の受賞は、同じく量子多体系を研究する者として大変喜ばしい限りです。

押川氏はこの3月より日本を離れて米国オハイオ州立大へと異動されます。この記事が皆さんの手元に届く頃には国内が少し寂しくなっているかもしれませんが、SNS等のネットワーク上での距離はそんなに変わらないようにも思います。新天地でのご活躍を願っております。

(文責：奥西巧一)

Extreme Universe Collaboration
The 3rd public COLLOQUIUM
February 6th (Thu.) ONLINE
TALK 17:00 - 19:00 (JST)
February 6th (Thu.) 8:00 - 10:00 (UTC)
ONLINE CHAT TIME
19:00 - 20:00 (JST)
Registration required (click [HERE](#))
Extreme Universe, JAPAN
Part I **Prof. Hal Tasaki**
Gakushuin University
Haldane conjecture, valence-bond picture, SPT phases, and all that in quantum spin chains
Part II **Prof. Masaki Oshikawa**
ISSP, The University of Tokyo
Symmetry-Protected Topological phases and Duality
In memory of Prof. Ian Affleck
2025

図：昨年2月に開催された極限宇宙オンラインコロキウムのポスター



量子物質中でのToric code相の探求

[研究代表者]

水上 雄太(東北大学大学院理学研究科・准教授)

本研究は、量子誤り訂正コードの情報担体となる素励起を実現しうる量子状態を、現実の物質を対象として探索することを目的とした。具体的には、量子誤り訂正コードであるトーリックコード状態を、理論模型に留まらず、現実の物質中で探索することを目指した。トーリックコードに対応する状態として、Kitaev模型においてKitaev相互作用のボンド異方性が大きな状態で現れるA相が知られている。しかし、相互作用の異方性を実験的に精密制御することは困難であり、物質中においてA相を実現することは一般に難しい。近年、A相が実現する可能性が議論され、例えば高磁場を印加したKitaev模型において対応する状態が実現することが理論的に提案されている[1]。これまで12テスラ以下のバルク状態においては、我々のグループにより6回対称の磁場角度依存性を持つ熱励起が観測されており、Kitaev模型における相互作用の異方性が小さい場合に実現されるB相により良く説明される[2]。本研究においては、Kitaev候補物質に対して12テスラを超える高磁場領域において、熱励起異方性および磁気励起異方性の測定を行った。その結果、12

テスラ程度以上においては熱励起異方性が急激に減少し、6回対称性がほぼ消失することを見出した。これは、高磁場状態において励起構造が変化していることを示している。さらに、磁気トルク測定により磁気励起の角度依存性を調べた結果、低磁場磁性相ではノコギリ波的な磁場角度依存性が見られ、これは磁気ドメインの挙動により説明される。一方、高磁場非磁性相においては、ノコギリ波が正弦波的挙動へと変化することを観測した。以上の高磁場における熱および磁気的振る舞いは、単純なKitaev模型のB相では説明できない。これらの振る舞いについて熱力学的な解析を行い、A相の可能性も含めた新たな量子状態の可能性を議論した[3]。

[1] M. O. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Res. **3**, 023189 (2021).[2] O. Tanaka *et al.*, Nat. Phys. **18**, 429–435 (2022). K. Imamura *et al.*, Sci. Adv. **10**, eadk3539 (2024).[3] R. Ohno *et al.*, in preparation.

計算科学から見る量子性：量子マジックによる誤り耐性量子計算と量子多体系の解析

[研究代表者]

高木 隆司(東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

本研究では、量子計算の本質的な量子性としての「量子マジック」および関連する非クリフォード性、非ガウス性を、量子リソース理論の枠組みで体系的に定式化し、その定量化・比較手法と計算科学的意味づけを与えることを目指した。従来、クリフォードゲートのみ量子回路は古典的に効率的にシミュレーション可能であることが知られており、量子重ね合わせやエンタングルメントだけでは計算優位を保証しないことが示唆されている。量子マジックは、クリフォード回路では生成不可能な要素として機能し、普遍量子計算を実現するための鍵となるリソースである。

本研究による主な成果を2つ紹介する。第一に、離散量子系と連続変数系を関連づける解析により、マジック性と非ガウス性の定量的な関係を明らかにした[1]。離散系に定義される非クリフォード性と連続変数系に定義される非ガウス性の間には類似の振る舞いが見られることは認識されていたものの、その2つが具体的にどの様に定量的に結びついているのかは分かっていなかった。本研究では、Gottesman–Kitaev–Preskill (GKP) 符号化を用いることで、離散量子ビット系におけるマジック性と連続変数系の非ガウス性を共通の枠

組みで扱う方法を提案した。これにより、量子マジックの概念をこれまで以上に広いクラスの量子システムに適用可能とし、従来のリソース理論を超える一般性と実装可能性のある理論的基盤を構築した。

第二に、非ガウス性の定量化指標と、これに基づく古典シミュレーション複雑性との関係を明らかにした[2]。非ガウス性のリソース理論を拡張して、非ガウス性を評価する「Gaussian rank」「Gaussian extent」といった量を定義するとともに、これらが非ガウス状態の古典シミュレーションコストを定量的に反映することを示した。これにより、計算可能性の観点から量子状態の量子性を比較・評価する理論基盤を与えた。

これらの成果は、量子計算資源としてのマジックおよび非ガウス性を理論的に確立するものであり、量子コンピューティングや量子シミュレーションにおけるリソース評価と計算性能の原理的限界を理解するための新たな解析手法としての応用が考えられる。

[1] O. Hahn, G. Ferrini, and R. Takagi, PRX Quantum **6**, 010330 (2025)[2] O. Hahn, R. Takagi, G. Ferrini, and H. Yamasaki, Quantum **9**, 1881 (2025)



量子多体系における物理的に自然な t-design の生成法の実用化に向けた研究

[研究代表者]

尾張 正樹 (静岡大学情報学部・准教授)

t-design に基づくランダムユニタリ変換は、様々な量子情報処理で必須であり、また、量子多体系研究においても重要である。しかし、従来の t-design 生成プロトコルは量子コンピュータ向けに設計されており、量子多体系上での実装が困難である。前回の研究では、量子制御理論を用い、小さな部分系へのランダム操作のみで全体系に t-design を生成する手法を提案した。ここでは、前回の公募研究で構築した t-design の生成手法とそれを応用した間接制御を用いた変分量子アルゴリズムの実装法の実用化に向けた基礎研究を行った。

近年実用化が模索されている中間規模量子 (NISQ) デバイスはノイズに弱く、量子エラー訂正も実装困難である。そのため、近年は、NISQ デバイスにも適用可能な、観測結果の後処理によって計算結果の誤差を抑える量子エラー緩和 (QEM) と呼ばれる手法が注目されている。一方で、前回の公募研究における間接制御を用いた変分量子アルゴリズムの実装法の提案により、外部アクセスされる量子ビットの数を減らすことで、ノイズの軽減が可能であることが示唆された。よって、これらの2つの手法を同時に用いることで、よりノイ

ズの影響を取り除けることが期待できる。本研究では、XY スピン鎖に対する間接制御 VQE において量子エラー緩和を実装するための研究を行い、特定の Y ゲート操作を許可することで、Zero-Noise Extrapolation 法によるエラー軽減が可能であることを示した。

前回の公募研究で提案した量子多体系上での t-design の実用性を評価する上で、この手法が速度の点で優れていることを示すことは重要である。そのためには、量子多体系を制御することで、目的のユニタリ変換を実装するために最低限必要な時間、すなわち最小制御時間を求める必要がある。本研究では、Baker-Campbell-Hausdorff の公式を応用することで、最小制御時間を求めるための新たな手法を提案した。さらに、この新たな手法を Lee らによって提案された手法と組み合わせることで、量子多体系上で t-design を達成するための最小平均制御時間の上限を計算可能であることを示した。



磁気共鳴による開放量子多体系の量子カオスと秩序形成

[研究代表者]

清水 康弘 (静岡大学理学部・教授)

多体の量子エンタングルメントをとまなうトポロジカル秩序は、凝縮電子系の量子スピン液体や量子ホール状態において現れる。実験的にそのようなトポロジカル秩序を開拓するために、サイト選択的かつ局所的なプローブである核磁気共鳴 (NMR) を用いた研究課題に取り組んできた。対象とする量子スピン液体は、主に強いフラストレーションやスピン軌道相互作用をもつ系において現れると期待される。異方的な三角格子系においては、フラストレーションによってスピン相関が一次元鎖方向にゆっくりと成長するため、朝永-ラッティンジャー液体的な臨界現象がみられる。NMR から得られる核スピン格子緩和率 $1/T_1$ は、そのような臨界現象を特徴づけるラッティンジャーパラメータ K_σ を求めることができる。 $1/T_1$ 測定から得られた K_σ (~ 0.5) および局所帯磁率測定から得られたウィルソン比 ($R \sim 2.5$) は、一次元反強磁性ハイゼンベルク模型で理論的に得られているものと一致した [1]。ただし、 K_σ は反強磁性秩序に向かう臨界ゆらぎに敏感であり、計測に用いた原子サイトに依存した。これは、ジャロシンスキー-守谷相互作用によるものと考えられる。用

いた ^{35}Cl 核スピン ($I = 3/2$) のコヒーレンス時間は極めて長く ($T_2 \sim 10$ ms)、離散時間結晶とよばれる周期的な π パルスに対する応答現象を示した。同様の現象は、異方的なスピン励起をもつキタエフ量子スピン液体の候補物質においても観測された。

量子ホール状態は、近年様々なディラック半金属とよばれる線形分散と低い状態密度をもつ系で観測されている。NMR は強磁場下でディラックフェルミオンの運動が量子化される様子を観測する上でも有効な手段である。特に、スピン軌道相互作用の強い系では、スピン分裂したランダウ準位が形成され特異な磁気励起がみられる [2]。二次元面内に磁場を印可した場合、 $1/T_1$ は温度の冪で減衰するが、二次元面に垂直方向に磁場をかけると低温で量子ホール状態となり、 $1/T_1$ は一定値を示した。この結果は、ディラックフェルミオンの量子化で期待されるものと一致しており、より高磁場下で完全スピン分極した状態での実験が望まれる。

[1] D. Nguyen *et al.* Phys. Rev. B 111, 064423/1-11 (2025).[2] M. Kumazaki *et al.* arXiv:2508.07820.



スパイラル観測基底を用いた光格子中量子多体系の量子状態トモグラフィ

[研究代表者]

小沢 秀樹 (早稲田大学先進理工学部応用物理学学科・客員研究員)

一般にN量子ビット系の量子状態に対しては、局所的に異なるPauli行列の全組み合わせの1体かN体までの多体相関をすべて計測することができれば、原理的にはその密度行列を再構築することが可能である(量子状態トモグラフィ)。しかし、そのような局所的に異なる基底での観測セットアップを実現するためには単一量子ビットレベルでの緻密かつ効率的な操作が必要となる。本研究では、レーザー冷却を用いた中性原子系を用いて効率的な量子状態トモグラフィの実現を目標とした。

初年度は空間位相変調器と対物レンズを用いた波長759 nmの光ピンセット配列(3×3)に171イッテルビウム(Yb)原子を導入し、単一原子からの発光観測まで行った。これにより171Yb原子を量子ビットとして用いる実験の下地を整えた。171Ybは核スピン1/2をもち、量子ビットとして有力候補の一つである。また、励起状態として長寿命な準安定状態(3P0)をもち、これを用いたスピン分解観測が可能である。さらに、3P0状態から通信波長帯の遷移(3Dx)があり、これを用いた量子ネットワークへの応用が理論提案されている。

171Yb原子をトラップする光ピンセットの波長759 nmは、3P0状態に対して魔法波長であり、超狭線幅遷移を利用するために必要である。

第二年度は556 nmレーザーを用いた大域的なスピン操作の実装、および578 nmレーザーを用いて3P0状態への超狭線幅遷移の観測を行った。光ポンピングにより、核スピンを偏極(=量子ビットの初期化)し、ラマン光による核スピン間のラビ振動(=Xゲート)を起こした後、ブラスト光による破壊的なスピン分解観測を行った。さらに、非破壊的なスピン分解観測のための578 nmレーザーの周波数安定化、および171Yb原子に対する共鳴周波数探索を行い、ラビ振動を観測した。

現在は局所的なスピン操作のために、556 nmおよび578 nmを用いた単一サイトアドレッシングの実装を進めている。また578 nmの励起効率を改善するために、ラマンサイドバンド冷却も準備している。これらを実験装置に組み込み、効率的な量子状態トモグラフィの実現・評価を進めていく。



テンソル繰り込み群による場の理論におけるエンタングルメント・エントロピーの研究

[研究代表者]

藏増 嘉伸 (筑波大学計算科学研究センター・教授)

テンソル繰り込み群(TRG)は、テンソルネットワーク(TN)スキームにおけるLagrangian形式に基づく数値的手法であり、テンソルネットワークで表現された多体問題の高精度解析を可能にする。TRG法はモンテカルロ法に比べて、(i)符号問題や複素作用問題が存在しないこと、(ii)計算コストの体積依存性が対数的であること、(iii)Grassmann数を直接扱えること、(iv)分配関数(または密度行列)そのものを直接計算可能であること、などの優位性を持っている。われわれは、長期的プロジェクト(本申請内に限定されない)として、TRG法を様々な種類の量子場理論に応用することにより、素粒子物理の非摂動的現象を研究している。

(1+1)次元 θ 項入りU(1)ゲージHiggsモデルにおいてLüscherのadmissibility条件を課したU(1)ゲージ作用を採用した場合、 θ 項によって符号問題が生じると同時にトポロジ凍結問題と呼ばれる一種のエルゴード問題が引き起こされる。われわれは、テンソル繰り込み群を用いて $\theta = \pi$ における臨界終点 M_c を決定し、さらにそれが理論的に予想されている2次元Isingモデルのユニバーサリティクラスに属することを示した。これにより、TRG法がモンテカルロ法に

おける符号問題とトポロジ凍結問題を同時に解決していることが実証された[1]。

(3+1)次元低温高密度2カラーQCD(QC₂D)の強結合極限は、長期的目標である有限密度QCDに取り組む前の実証実験の機会を与えてくれる。われわれは、カイラル凝縮 $\langle\bar{\chi}\chi\rangle$ 、ダイクォーク凝縮 $\langle\chi\chi\rangle$ 、クォーク数密度 $\langle n \rangle$ を化学ポテンシャル μ の関数として計算することにより、このモデルのゼロ温度における相構造を解明することに成功した(図1参照)[2]。本研究は、TRG法を(3+1)次元のQCD-likeな理論に応用した世界初の成功例であり、(3+1)次元有限密度QCDの相構造研究に向けて大きな一歩である。

[1] S. Akiyama and Y. Kuramashi, JHEP 09, 086 (2024).

[2] Y. Sugimoto, S. Akiyama, and Y. Kuramashi, Phys. Rev. D **113**, 034503 (2026).

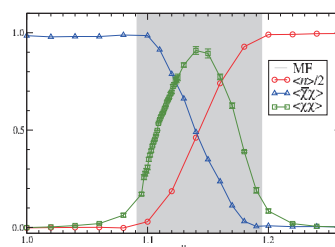


図1: クォーク質量 $m=1.0$ における $\langle\bar{\chi}\chi\rangle$ 、 $\langle\chi\chi\rangle$ 、 $\langle n \rangle$ の μ 依存性。格子サイズは 1024^4 。グレーの縦帯は平均場近似(MF)によって予想される $\langle\chi\chi\rangle \neq 0$ の領域を表す。



量子エンタングルメントから創発する物理の研究

[研究代表者]

沼澤 宙朗 (東京大学物性研究所・助教)

本研究では、多大な量子エンタングルメントを持った量子多体系の物理を理論的に調べることで、量子重力および物性系の性質を解明しようという目標で研究を行ってきた。特に、(1)時空間変調のある共形場理論とその重力双対(2)フェルミ流体のボソン化と物性及び非臨界弦理論への応用(3)量子ホール系の非平衡状態を用いた膨張時空上のシミュレーションの研究で成果を挙げることができた。

- (1) 1次元量子系における時空間変調がある場合の量子エンタングルメントを調べた。まず1+1次元の共形場理論において、サイン2乗変形による量子クエンチを調べた[1]。共形対称性によって、このクエンチは局所クエンチと呼ばれる、局所励起をされた場合の一樣系の時間発展と結びついていることがわかった。さらに、より一般の非一樣なハミルトニアンにおける量子クエンチを考えた[2]。一般の非一樣なハミルトニアンの元では、境界から不連続な寄与があることが判明した。さらに、周期駆動を用いることで非一樣なハミルトニアンの逆時間発展を構成する方法を与えた[3]。
- (2) フェルミ面のボソン化の問題において作用角変数を用いることで、2次元フェルミ流体の系統的な解析

手法を与えた。これを用いて、2次元フェルミ流体の電子の生成演算子をボソン化で記述する方法を与え、フリーデル振動の共形場理論に基づいた理解を与えた[4]。また、非臨界M理論へ応用し有効理論の構築手法を与え[5]、同じ手法が超弦理論の理解にも応用できることがわかった。

- (3) 量子ホール系の非平衡状態を用いることで、膨張宇宙上の共形場理論をシミュレーションをすることができる。我々は膨張するエッジを持つ量子ホール系のバルクの性質を調べ、膨張率の空間変調に応じてバルクのエネルギー運動量テンソルにトポロジカルな重力応答の寄与があることを発見した[6]。

- [1] J. Kudler-Flam, M. Nozaki, T. Numasawa, S. Ryu, M. T. Tan, JHEP **08** (2024).
- [2] X. Liu, A. McDonald, T. Numasawa, B. Lian, S. Ryu, Phys. Rev. Lett. **134**, 220404 (2025).
- [3] B. Lapierre, T. Numasawa, T. Neupert, S. Ryu, Phys. Rev. B **112**, 104317 (2025).
- [4] T. Numasawa, M. Oshikawa, work in progress.
- [5] P. Jefferson, T. Numasawa, work in progress.
- [6] Y. Sugiyama, T. Numasawa, arXiv:2506.20338 [cond-mat.mes-hall]



量子開放系のダイナミクスとエンタングルメント

[研究代表者]

川畑 幸平 (東京大学物性研究所・准教授)

近年、孤立平衡系に対する従来の物理の枠組みを越えて、非平衡開放系で実現される新しい物理に関心が集まっている。しかし、非平衡開放系の量子物理は、重要な問題でさえも、依然として理解が乏しい。私は、非平衡開放系で現れる多彩な物性現象をはじめとして、物理の新しい基礎を確立することを目指している。とくに、極限宇宙では、量子開放系のダイナミクスとエンタングルメントを探究し、量子開放系の相や秩序を記述する一般的な基礎理論の構築に努めてきた。2年間の公募研究期間で、とくに以下のような研究成果を収めた。

- (I) 量子エンタングルメントは、量子情報処理において重要となるだけでなく、孤立平衡系の量子相を特徴づけるうえで本質的な役割を果たすことが知られてきた。その一方で、非平衡開放系で現れる量子相におけるエンタングルメントの役割は未解明である。われわれは、非エルミート5状態Potts模型について、複素なエンタングルメントエントロピー(擬エントロピー)が、複素な中心電荷によって特徴づけられる非ユニタリー共形場理論から導かれるスケーリングを示すことを明らかにした[1]。

- (II) 孤立量子系のカオスは、量子統計力学を基礎づけ

ると同時に、ブラックホールの物理にも重要であり、物性物理と高エネルギー物理の両方で関心を集めてきた。他方で、量子開放系のカオスは、多くが未解明である。われわれは、量子開放系のカオスを基礎づける非エルミートランダム行列について、有効的な場の理論(非線形シグマ模型)を構築し、全38対称性クラスについて普遍性クラスを分類した[2,3]。

(III) 近年、量子測定に誘起された非平衡相転移が、量子開放系に特有の新しい相転移として注目を集めている。しかし、多くの先行研究は個別の具体例にもとづくものであり、その普遍的理解は得られていない。われわれは、量子測定下の自由フェルミオン系について、有効的な場の理論にもとづいてその対称性とトポロジーを記述する一般理論を構築し、非ユニタリーダイナミクスを記述する普遍的な確率方程式を導出した[4,5]。

- [1] H. Shimizu and K. Kawabata, Phys. Rev. B **112**, 085112 (2025).
- [2] A. Kulkarni, K. Kawabata, and S. Ryu, J. Phys. A **58**, 225202 (2025).
- [3] Z. Chen, K. Kawabata, A. Kulkarni, and S. Ryu, Phys. Rev. B **111**, 054203 (2025).
- [4] Z. Xiao, T. Ohtsuki, and K. Kawabata, Phys. Rev. Lett. **134**, 140401 (2025).
- [5] Z. Xiao and K. Kawabata, arXiv:2412.06133.



混合状態トポロジカル相の理論的探求

[研究代表者]

押川 正毅 (東京大学物性研究所・教授)

絶対零度(基底状態)における量子相の分類は、トポロジカル相の発見と理論の発達によって大きく進展した。一方、より一般的な量子状態は密度行列で表される混合状態である。そこで、混合状態の量子相の分類が最近の重要な課題となっている。量子純粋状態の対称性は、ユニタリー変換の下での状態ベクトルの不変性として定式化される。混合状態においては、同じユニタリー変換を密度行列の左右から作用させることができる。そのため、ユニタリー変換を左または右の一方に作用させたときの密度行列の不変性(「強い対称性」と、左右同時に作用させたときの密度行列の不変性(「弱い対称性」)を区別して論じることができる。なお、強い対称性を持つ混合状態は必然的に弱い対称性も持つ。このとき、通常対称性の自発的破れと同様に、強い対称性が弱い対称性に自発的に破れる現象(Strong-to-Weak Spontaneous Symmetry Breaking, SWSSB)を考えることができる。

本研究では、密度行列を高次元の状態ベクトルとして解釈する「純粋化」の観点から、SWSSBが純粋化された状態における対称性に保護されたトポロジカル(Symmetry-Protected Topological, SPT)相に対応することを示した。特に、SWSSBの指標となる Rényi

-2相関関数は、純粋化された状態における「奇妙な相関関数」(strange correlator)に対応することを示した[1]。このように、混合状態には純粋状態には存在しない概念や相が見出されるが、これらを探求する上でも、純粋状態の理解は有益である。さらに、詳細は省略するが、この成果に関連するいくつかの研究を行った[2,3]。

また、1次元の量子臨界状態における測定誘起エンタングルメントや、同状態を量子計算の「魔法資源」として定量化する Stabilizer Rényi Entropy を、共形場理論の境界条件によって評価することに成功した[4,5]。これらの研究では、研究代表者による過去の共形場理論についての研究成果が重要な役割を果たしている。本研究は、量子多体系の統計力学と量子情報理論が交差する新たな研究分野においても場の理論が強力な手法であることも示している。

- [1] P. Sala *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 155150 (2024).
- [2] Y. You and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **110**, 165160 (2024).
- [3] P. Sala *et al.*, arXiv:2506.10076, accepted for publication in Quantum Science and Technology (2026).
- [4] M. Hoshino *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 155143 (2025).
- [5] M. Hoshino *et al.*, Phys. Rev. X **16**, 011037 (2026).



曲がった時空における量子もつれの物理：パートナー公式の応用

[研究代表者]

南部 保貞 (名古屋大学大学院理学研究科・准教授)

パートナー公式は、量子系において着目するモードを純粋化するモード(パートナーモード)の空間的「形」を具体的に与える方法を提供する。本研究では、地平面を伴う時空における量子もつれ構造とパートナー公式及びその応用によって得られる性質を用いることで、以下の問題に取り組んだ。

1. 動的鏡模型における情報喪失回復の仕組み [1]

Hawking 輻射に対するパートナーモードを真空揺らぎに帰するシナリオでは、情報の最終状態において出現しうる高エネルギーのバースト放出を回避できると考えられている。一方で、このようなバースト放出が、Hawking 輻射の純粋化に必然的に伴って生じるという指摘も存在する。本研究では、この点を検証するため、パートナー公式に基づいてパートナー粒子の空間プロファイルを解析した。その結果、バースト放出は純粋化そのものとは無関係であることを示した。

2. de Sitter 宇宙における情報量の上限 [2]

de Sitter 宇宙が保有しうる情報量は、地平面の面積

で決まるエントロピーによって上限づけられていると考えられている。しかし、インフレーション宇宙が eternal 相にある場合、この上限が破られる可能性が指摘されてきた。本研究では、de Sitter 時空における super-horizon mode に対してエンタングルメント・エントロピーが情報エントロピーに等価である性質を用い、stochastic approach に基づく解析を行った。その結果、適切に重みづけされた確率分布を用いることで、エントロピー上限の破れは生じないことを示した。

- [1] Y. Osawa, K-N Lin, Y. Nambu, M. Hotta, P. Chen
“Final burst of the moving mirror is unrelated to the partner mode of analog Hawking radiation”, Phys. Rev. D **110**, 025023 (2024).
- [2] H. Tajima and Y. Nambu
“Stochastic inflation and entropy bound in de Sitter spacetime”, Phys. Rev. D **111**, 106009 (2025).



強結合理論と弦理論の新たな半古典領域と時空の創発

[研究代表者]

渡邊 真隆（東京大学大学院理学系研究科・助教）

量子重力理論を定式化し、その普遍性を半古典重力理論によらず理解することを目的として研究を行いました。特に、量子重力理論の量子性を直接理解するため、重力定数が小さい半古典的極限を取ることなく物理量の計算を行う手法を開発しました。

具体的には、場の量子論の新たな解析手法である large charge 展開と AdS/CFT 対応を組み合わせることで量子重力理論にアプローチしました。蒸発するブラックホールから量子的な情報がどのように逃げ出するかを理解することは現代物理学において重要な問題です。ホログラフィック原理を用いれば、重力理論の最も量子的な領域は高次元かつ強結合の共形場理論を用いた等価な記述があることが知られています。よって、私はこの問いに答える一手として、このような共形場理論において量子情報的な諸量を計算しました。

特に large charge 展開を用いることで、既存の手法では不可能だった計算を行うことができました。例えば、 $U(1)$ 大域対称性が存在する理論において、電荷を持つ量子もつれの量が、巨大電荷の極限である普遍的な定数に収束することを証明しました。このような

新たな手法やその様々な拡張を通して今後も研究を進めます。

加えて非平衡系の研究も行いました。特に、ホログラフィー対応を用いて量子重力理論と対応付けられる実験可能な系に興味を持ち、研究しています。具体的には、2次元重力理論である Jackiw-Teitelboim 重力理論とそのある種の変形である理論と、ASEP (Asymmetric Simple Exclusion Process) と呼ばれる確率論的な箱玉系や、その連続極限である KPZ (Kardar—Parisi—Zheng) 方程式との対応を書き下しました。これが何かより深い対応関係のもと量子重力理論に対する新たなアプローチに発展するかは現在研究中です。



曲がった時空上の相互作用する場の赤外極限から探る極限宇宙

[研究代表者]

田中 貴浩（京都大学大学院理学研究科・教授）

本研究では、宇宙論的摂動論における赤外発散の除去可能性の議論を発展させる。また、ブラックホール蒸発における場の相互作用の効果についても調べる。これらの課題から、「曲がった時空の場の理論における、赤外発散に関わる物理に対する示唆を得ること」を目指す。

研究実績としては、宇宙初期におけるスカラー場やゲージ場が生成する摂動の大域的な進化を非線形に解析するための有力な手法である δN 形式を拡張し、より包括的な理論的枠組みを構築した。まず、従来スカラー型摂動に限られていた δN 形式を、ベクトル・テンソル型を含むように一般化し、これを $g \delta N$ 形式と名付けた。 $U(1)$ ゲージ場を例に、この新しい枠組みの具体的な適用方法を示し、重力波の2つの線形偏波モードの振幅が異なる条件を導出するなどの知見を得た。さらに、従来の δN 形式が前提とする「空間微分項の無視」が破れるモデルにおいて、空間的曲率を各 FLRW パッチに割り当てることでこの勾配補正を取り入れる新たな拡張形式を提案した。これにより、曲率摂動の大域的な進化を正確に記述できることを示し、

非ガウス性に関する議論も行った。これら一連の成果は、初期宇宙論における非線形摂動理論の深化に寄与するものであり、観測宇宙論との接続にも大きな展望を開くものである。

加えて、相互作用がある場に関するホーキング放射に関する研究も進めてきた。この研究では、これまでに ϕ^4 理論でも赤外発散が存在するという指摘があったが、この問題が視点を変えて捉えることにより、赤外発散は存在しないことを形式的に示すことに成功し、この成果を領域会議で発表した。その後、十分に強結合の場においては非摂動的なふるまいが現れる可能性についての研究を進めている。

その他にも、回転ブラックホール周囲の超放射不安定性を量子論的に定式化し、Kerr ブラックホール背景における質量スカラー場の正準量子化を通じて、ボソン雲の成長を曲がった時空の量子場理論の枠組みで一貫して記述した。また、粒子数やエネルギー・角運動量の時間発展が初期状態に依存しないことを示し、ホーキング放射やブラックホールスピンへの反作用などを統一的に理解した。



ホーキング放射で生成されるグラビトンの量子性

[研究代表者]

菅野 優美 (九州大学大学院理学研究院・准教授)

強重力場におけるグラビトンの量子性を調べるため、連星ブラックホールが放つ重力波を量子力学的に定式化した。従来、重力波は古典的な波として扱われてきたが、量子力学が自然記述の基本枠組みであることを踏まえると、重力波も量子論の枠組みで記述する必要がある。

本研究では量子光学の手法を応用し、連星ブラックホールからの重力波を、古典波に最も近い量子状態であるコヒーレント状態として表した。さらに相互作用ハミルトニアンの高次効果を解析し、重力波が古典論では現れないスクイーズド状態を生成し得ることを示した。LIGOが2015年9月14日に初検出した重力波データを用いてスクイージングの程度を見積もったところ、スクイージングパラメータは 10^{-4} 程度と非常に小さいことが分かった[1]。

一方、宇宙が過去にインフレーションを経験している場合、インフレーションで生成された原始重力波は強くスクイーズド状態になる。この原始重力波が連星ブラックホールと相互作用すると、生成される重力波はコヒーレント・スクイーズド状態になる。見積もり

の結果、この場合のスクイージングパラメータは最大で約30まで大きくなり得ることを示した[2]。量子光学では、コヒーレント・スクイーズド状態はサブポアソン統計を示し、ハンブリー・ブラウンとトゥイス(HBT)干渉計による強度相関測定で量子性を検出できる。そこで、この量子的重力波が現れる振動数領域を評価し、LIGO-Virgo-KAGRAで量子性を検証し得る振動数領域にあることを示した[2]。将来HBT干渉計などにより強度相関が測定可能になれば[3]、重力波の量子性の検証に加えてインフレーション理論の有力な証拠となり、未発見のグラビトンの検出にも繋がる可能性がある。

[1] Sugumi Kanno, Jiro Soda and Akira Taniguchi, Phys. Rev. Lett. **136**, 061404 (2026).

[2] Sugumi Kanno, Jiro Soda and Akira Taniguchi, arXiv:2510.23326 [gr-qc]

[3] Sugumi Kanno, Hiroki Matsui and Shinji Mukohyama, Phys. Rev. D **111**, 104077 (2025).



量子制御・量子もつれ・双対性に基づくトポロジカル相と相転移の研究

[研究代表者]

古川 俊輔 (慶應義塾大学理工学部・准教授)

対称性によって保護されたトポロジカル(SPT)相の概念が提案されてから15年ほど経ち、その特徴付けや分類についての一般論が大きく発展しました。ボソン(スピン)系に対しては、対称性群の射影表現および群コホモロジーの考え方によって詳細な分類表が与えられました。しかし、具体的な系の中で多様なSPT相がどの領域で現れ、秩序相とどう競合し、どのような相転移を示すのかは、まだ大きく未開拓な領域です。

SPT相と秩序相の競合を調べるための指針として、双対性に着目しました。スピン1/2梯子系においては、桁上のスピンの交替成分とカイラリティを入れ替える双対性が2種類存在します。これらの双対性は、2体相互作用とカイラリティ型4体相互作用を入れ替える役割を持ちます。この2種類の相互作用を含む梯子模型を考え、有効場の理論と双対変換を組み合わせた解析計算と密度行列繰りこみ群などによる数値計算により、基底状態の相図を決定しました[1]。その結果、Haldane(トポロジカル)相、桁シングレット(自明)相、ダイマー秩序相、スカラー・カイラル秩序相が複雑に競合する豊かな相図を得ました。また、Haldane相、

桁シングレット相は、スピン、ダイマー、カイラリティなどの異なる自由度の相関が支配的となる複数の領域に分かれることを明らかにしました。

量子情報処理のプロトコルに量子物性の考え方を取り入れることで、新たな多量子ビット制御法につながることが期待されます。その例として、量子通信におけるエンタングルメント・スワッピングの量子多体状態への拡張に取り組みました。具体的には、2組のスピン梯子状態(それぞれ脚1と2、脚3と4上で定義される)に対し、脚2と3の間でBell測定と事後選択を繰り返すことで、脚1と4上に新たなスピン梯子状態が形成されます。つまり、測定によって脚間エンタングルメントが組み替えられます。2組のスピン梯子状態として種々のSPT相、自明相を用いるとき、測定後のスピン梯子状態がトポロジカルな合成則によって定まることを行列積状態表現と場の理論により示しました。

[1] M. Fontaine and S. Furukawa, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 124710 (2024)



量子情報量で解き明かす量子宇宙と特異点の物理

[研究代表者]

玉岡 幸太郎 (日本大学文理学部物理学科・准教授)

本研究では、ホログラフィー原理 (AdS/CFT 対応) を背景として、ブラックホール内部に関する諸問題に対し、量子情報理論の観点からアプローチする研究を行った。

まず、ブラックホール内部に存在する曲率特異点の情報が、どのような量子情報量に反映されるのかを明らかにするため、時間的エンタングルメント [1] に着目した。その結果、曲率特異点を持つブラックホール時空においては、解析接続された極小曲面が特異点近傍に接近することで、時間的エンタングルメントが特異点の存在に鋭敏に応答することを示した [2]。

次にブラックホール内部に現れる特別極値面 [3] に双対な量子状態の性質を詳細に解析した。その結果、この量子状態が任意の二分割に対して最大エンタングルメントを示す絶対最大エンタングル状態 (AME 状態) であることを、ホログラフィックな n 次 Rényi エントロピーが Rényi 指数 n に依存しないことを通じて示した [4]。このような状態は、ある種のランダム状態によって良く近似されることが知られている。さらに、ブラックホール内部のヒルベルト空間が、CFT の自由度を超

える大きな次元を持つ理由を明らかにした。これは、ブラックホール外部における時間方向が内部では空間方向に転じるため、双対な理論が必然的に無限体積の系となることに起因する。この結果により、ブラックホール内部を非等長な量子誤り訂正符号として記述する近年の理論的枠組み [5] に対して、重力理論の立場から具体的な裏付けを与えることができた。

さらに最近の進展として、多体エンタングルメントを定量化する指標である多体エントロピー [6] を用いた解析を行なった。その結果、ブラックホール外部および内部の状態が Haar ランダム状態によって良く近似できることを、多体エンタングルメントのレベルで明確に示すことに成功した [7]。

- [1] K. Doi *et al.*, Phys.Rev.Lett. **130**, 031601 (2023).
- [2] T. Anegawa and K. Tamaoka, JHEP 10, 182 (2024).
- [3] T. Hartman, and J. Maldacena, JHEP 05, 014 (2013).
- [4] T. Anegawa and K. Tamaoka, Phys.Rev.Lett. **135**, 261601 (2025).
- [5] C. Akers *et al.*, JHEP 06, 155 (2024).
- [6] A. Gadde *et al.*, Phys.Rev.D **106**, 126001 (2022).
- [7] T. Anegawa, S. Suzuki and K. Tamaoka, [arXiv:2512.21037 [hep-th]].



テンソルネットワーク法を用いた非平衡系に現れる量子スピン液体の探索

[研究代表者]

金子 隆威 (上智大学理工学部機能創造理工学科・特任准教授)

公募研究の2年間に於いて、テンソルネットワークに基づく数値計算手法によって強くエンタングルした量子多体系の基底状態および量子状態のダイナミクスを多数明らかにすることができた。ここでは、4つの成果を抜粋して紹介する。

- (1) ニューラルネットワーク量子状態はエンタングルメントが体積則に従う状態の記述も禁止されておらず、テンソルネットワーク状態よりも広いクラスに属する量子状態の記述が得意だと信じられている。しかし、膨大なパラメータ数のために最適化が困難であり、局所解に捉われやすい。良い初期条件から最適化することが重要で、その初期条件をテンソル分解した行列積状態から構成する方法を提案した [1]。
- (2) テンソルネットワーク法により、相互作用の空間異方性を制御した際の正方格子 $SU(4)$ Heisenberg 模型の基底状態を調べた。無限 projected entangled pair states (iPEPS) を用いた計算で、 $SU(4)$ singlet 状態から Néel 秩序・Valence Bond Crystal 秩序が共存した状態への1次転移を見出した [2]。 $SU(N)$ Heisenberg 模型のスピン相関の成長は N が大きいほど光格子中の冷却原子系で測定しやすいため、実

験における相転移の観測が期待される。

- (3) 光格子中の冷却原子系におけるエンタングルメントのダイナミクスの実験観測に動機付けられて、電荷密度波状態から相互作用のないボゾン系へクエンチした際のエンタングルメントの時間発展を以前、解析的に求めた [3]。しかし、行列のパーマネント計算に指数時間のコストが必要で、約50サイトまでの計算しかできなかった。パーマネントを乱数サンプリングで評価することで100サイト以上の系の計算を可能にした [4]。
- (4) 量子スピン液体を実現する Kitaev ハニカム模型の Rydberg 原子集団を用いたデジタル量子シミュレーション実験に動機付けられて、反強磁性状態を Kitaev ハニカム模型のハミルトニアンで時間発展した際の磁性を iPEPS で調べた。相互作用の逆数程度の時間スケールまでの時間発展で磁化が単調現象する振る舞いを見出した。

- [1] R. Kaneko and S. Goto, Phys. Rev. B **112**, 155163 (2025).
- [2] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A **110**, 023326 (2024).
- [3] D. Kagamihara *et al.*, Phys. Rev. A **107**, 033305 (2023).
- [4] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A **111**, 032412 (2025).



大規模数値計算と実物質データで切り開くランダム量子フラストレート系の新奇磁性現象

[研究代表者]

下川 統久朗 (沖縄科学技術大学院大学量子理論ユニット・スタッフサイエンティスト)

「量子もつれ」は、今後の社会を支える量子技術の発展に不可欠な概念である。その発展に資するため、物性物理学の立場からは、物質に現れる多様な量子状態がどのような量子もつれを内包するかを明らかにすることが重要である。本研究では、近年の量子情報分野の進展により整備された実験的に測定可能な量子もつれ測定に着目し、大規模数値計算と実物質の実験データを組み合わせて研究を進めてきた。

より具体的には、 $S=1/2$ 三角格子系の候補物質である YbZnGaO_4 、 $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$ 、 KYbSe_2 を対象として研究を行った。 YbZnGaO_4 および $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$ では量子スピン液体状態の実現が期待されている一方で、過去の研究ではランダムネス由来の状態が生じうる可能性も指摘されており、真に量子スピン液体が実現しているかを検証する方法が求められていた。また KYbSe_2 は極低温で長距離秩序を示すものの、動的構造因子には非自明な量子臨界性が報告されており、その起源を説明する理論的裏付けが強く求められていた。

これらの課題に対し、本研究では量子フィッシャー情報(QFI)を用いて多体量子もつれを定量化した。具

体的には、オブザーバブルとしてスピン演算子のフーリエ成分を採用し、動的構造因子と直接結びつく形でQFIを評価することで、実験でアクセス可能な多体量子もつれの指標を構成した。富岳を用いた大規模数値計算により、 $S=1/2$ 三角格子磁性体における量子スピン液体状態とランダムシングレット状態では、QFIの温度スケールが定性的に異なることを明らかにした。加えて、3物質で報告されているQFIの温度スケールを数値的に再現することに成功し、 YbZnGaO_4 と $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$ における量子スピン液体状態の実現可能性を強く支持した。さらに KYbSe_2 についても、動的構造因子に現れる量子臨界指数を再現し、実験で観測された臨界的応答の理解に理論的基盤を与えた。一方で、フラストレーションが強い量子系に対しては、従来のスピン相関に基づく指標のみでは十分に特徴付けられない場合がある。現在は、実験的可観測性に配慮しつつ、より広いクラスの量子状態へ適用可能な量子もつれ検出手法の拡張に取り組んでいる。



ハミルトニアン形式による格子QCDの新展開

[研究代表者]

日高 義将 (京都大学基礎物理学研究所・教授)

本研究の究極的な目標は、超高密度ハドロン物質および非平衡系における量子色力学(QCD)を理解することである。これらの極限条件下にあるQCDは、初期宇宙の進化や高エネルギー重イオン衝突、中性子星内部構造の理解において本質的な役割を果たす。一方で、有限密度や実時間発展を含む系では符号問題のため、従来の格子QCD計算には原理的な困難が存在してきた。本研究では、この問題を回避し得る理論的枠組みとして、ハミルトニアン形式に基づくゲージ理論に着目した。

本研究では、トポロジカル量子場理論を出発点とし、そのヒルベルト空間における基底選択に基づいて双対的な理論記述を導出した。ゲージ不変な基本演算子として、一次元的物体であるWilsonループと、余二次元的物体であるGukov-Witten演算子に着目し、これらがなす代数構造に基づいて理論を構成した。格子ゲージ理論におけるゲージ不変ヒルベルト空間は、トポロジカル量子場理論に欠陥を導入し、Gukov-Witten演算子が終端する境界条件を課すことで得られる空間として理解できる。

このヒルベルト空間の基底として、Wilsonループ演算子のネットワークを用いるものと、Gukov-Witten演算子のネットワークを用いるものの二つを考えることができ、両者が互いに双対な関係にあることを明らかにした。前者を基底として選択した場合には、従来の格子ゲージ理論が再現され、特にハミルトニアン形式におけるKogut-Susskindのハミルトニアン格子ゲージ理論が導出される。一方、後者を基底として選択した場合には、共役類を接続のラベルとして持つ双対格子上の物質場と結合したゲージ理論が得られる。この双対性は、可換群において知られているKramers-Wannier双対性を非可換群へ一般化したものと位置づけられる。

本研究で得られた成果は、格子ゲージ理論をトポロジカルな観点から再解釈する理論的枠組みを与えるものである。今後は、本研究で確立した定式化を高次元へ拡張するとともに、双対記述を用いた有限密度系や非平衡系への応用を進めることで、QCDの非摂動的な理解へと発展させることが期待される。



素粒子模型における量子ブラックストリングの研究

[研究代表者]

濱田 雄太 (高エネルギー加速器研究機構・助教)

量子重力理論では、グローバル対称性はブラックホールの蒸発過程の考察と矛盾するため、許されない、という考えが支持されている。cobordism予想はこれを数学的に定式化する枠組みで、スピン構造などを固定したときに計算されるcobordism群が非自明だと、理論は互いに連続変形でつながらないセクターを持ち、実質的にグローバル対称性を持つことになってしまう。そこで予想は、cobordismが自明化されるブレーンが存在するべきだと考える。すなわち、cobordismは「量子重力理論にどんなブレーンが存在するか」を調べる道具になる。

関連して、本研究の成果は次の通りである。[1,3]では、9次元と8次元の超対称ヘテロティック弦理論における非超対称ブレーンを系統的に分類した。まず、理論のcharge格子に付随する外部自己同型を用いて時空ゲージ群の非連結成分を同定した。そこからcobordism予想により予言される非超対称のcodimension-2ブレーンを同定した。これは、非超対称E8ヘテロティック弦理論におけるmaximal gauge enhancementの点を同定することにもなっている。

加えて、[2]では、素粒子標準模型において、cobordism予想から予言されるストリング状の物体を重力方程式の解として構成した。物体はフェルミオンに対して周期的境界条件を出すモノドロミーとして特徴付けられる。重力解を構成する際に重要なのは、標準模型粒子のカシミアエネルギーの存在である。ブラックストリング解は、これに支えられた物体として解釈でき、解の張力とホーキング温度も評価した。ブラックストリング解の安定性の解析と、ヘテロティック弦理論における非超対称ブレーン解の構成に関する研究を今後進行予定である。

[1] Yuta Hamada, Arata Ishige, JHEP 01(2025)141

[2] Yu Hamada, Yuta Hamada, Hayate Kimura, Phys.Rev.D 111(2025)12

[3] Yuta Hamada, Arata Ishige, Yuichi Koga, arXiv: 2505.15144.



冷却原子気体・量子シミュレータを用いた多体状態のエンタングルメント測定

[研究代表者]

素川 靖司 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

本公募研究課題では、プログラム可能な冷却原子量子シミュレータを開発し、量子多体系におけるエンタングルメント構造を実験的に解明することを目指した研究を進めている。具体的には、エンタングルメント・スペクトルやエンタングルメント・エントロピーなどの情報を抽出する測定手法を確立・実装することで、トポロジカル秩序相の同定や量子臨界現象におけるスケールリング則などの検証、従来の秩序変数では捉えられない量子相を実験的に特徴付けることを目指している。これまでに、大規模かつ精密な原子制御を可能にする量子プラットフォーム実現に向けた研究開発や単一原子量子ビットのユニタリ操作手法の研究開発を行った。

量子プラットフォームの構築においては、無欠損な単一冷却原子アレイを生成するために、回折限界性能を有する高NA光学系を構築し、空間位相変調器を用いて任意の光ピンセットアレイを生成することに成功した。さらに、高出力・近赤外ファイバーレーザーを音響光学偏向器によって用いて偏向制御することで、大規模かつ動的制御が可能な2次元正方格子状の光ピンセットアレイを実現した。

また、多体状態を読み出す際に重要となる、個々の原子量子ビットに対する局所ユニタリ操作技術に関しても研究開発を進めた。音響光学偏向器を用いて、単一原子を微小距離だけ輸送し、その前後でラマン遷移レーザーの光パルスを照射することで個別制御を実現する手法について検討を進め、基本設計を完了した。レーザー光は一樣に照射するため、従来の個別照射で課題となるクロストーク等の問題を解決でき、堅牢な量子操作が可能になると期待される。また、この制御手法を用いてRényiエンタングルメント・エントロピーを測定する方法について、実験の制御シーケンスにまで落とし込んだ。さらに、従来の完全状態トモグラフィと比べて大幅に測定コストを抑制できるランダム測定プロトコルを用いて、縦磁場量子イジング模型のRényiエントロピーを推定した場合に、どの程度のシステムサイズまでなら測定が現実的であるか、検証を行った。

以上の成果は、プログラム可能なアナログ量子シミュレータを用いて量子多体系を構築し、エンタングルメント構造を実験的に明らかにするために必要な基盤技術となる。



トポロジカル量子スピン液体における量子エンタングルメント

[研究代表者]

末次 祥大（東京大学大学院工学系研究科・准教授）

本公募研究では、強い量子揺らぎと幾何学的フラストレーションにより特異な量子多体状態が実現すると期待されるカゴメ反強磁性体に着目し、量子スピン液体および磁化プラトー状態の実験的解明を目的として研究を進めた。特に、理想的なスピン1/2カゴメ格子を有し、不純物効果が大幅に抑制された新しい量子スピン液体候補物質 $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ (YCOB) を主対象とし、強磁場磁化測定、磁気トルク測定、比熱測定、磁気熱量効果測定などを組み合わせた包括的な研究を行った。

まず、最大57 Tまでの強磁場磁化測定により、飽和磁化の1/3および1/9に対応する明瞭な磁化プラトーを観測することに成功した。特に、これまで理論的には予言されてきたものの実験的検証が困難であった1/9磁化プラトーを明確に捉え、その温度依存性からスピンギャップの存在を実証した。これらの結果はYCOBが理想的なカゴメ反強磁性体の研究舞台であることを示すとともに、カゴメ反強磁性体における純粋に量子力学的起源を持った磁場誘起秩序相の存在を示す重要な成果である[1]。

さらに、極低温・低磁場領域における高感度磁気トルク測定から、ゼロ磁場量子スピン液体状態におけるスピンギャップの大きさは、仮に存在したとしても磁気相互作用のエネルギースケールの1/500以下であることを明らかにした。また、約60 Tまでの強磁場磁気熱量効果測定では、1/9および1/3磁化プラトー状態においてスピンギャップが形成されていることを支持する結果が得られた[2]。

本研究成果は、カゴメ反強磁性体の量子スピン液体および磁化プラトー状態の基底状態に重要な知見を与えるものであり、強相関量子物質における量子エンタングルメントの実験研究を大きく前進させた。

[1] S. Suetsugu et al., Phys. Rev. Lett. 132, 226701 (2024).

[2] S. Suetsugu et al., arXiv:2407.16208 (2024).



短焦点レーザー航跡場電子加速によるウンルー効果検証に向けた高加速度場形成

[研究代表者]

近藤 康太郎（量子科学技術研究開発機構関西量子科学研究所・主任研究員）

慣性系の観測者からは基底状態の真空であっても、一様加速している観測者からはその加速度に比例した温度の熱浴が見えるウンルー効果は、場の量子論が予測する観測者に依存した現象である。そして、加速度系から見えるウンルー効果は、等価原理から重力場のホーキング放射と深く結びついており、ウンルー効果およびその量子もつれ構造を実験的に明らかにすることは量子重力・量子情報からも関心の高い「情報損失問題」への手がかりとなる。しかし、ウンルー効果は一般に高い加速度が必要とされ、高周波粒子加速器を含めた従来手法ではその検証が困難である。本研究では、従来レーザー航跡場加速とは異なる短焦点光学系を用いることで、局所的ながらより高い集光強度で高加速度場を実現させる方法を提案する。

近年大型化が進む現実的な高強度レーザーを基にした短焦点光学系を用いることで、レーザープラズマの粒子軌道シミュレーションからウンルー効果の検証が現実味を帯びる10 TV/mを超える加速度場が実現することが示されたが、実験的に高い加速度場を評価する上で超短パルスプローブおよび駆動レーザーの安定・

高度化の課題を抱えている。そこで、我々はQST関西研にある高強度レーザーJ-KAREN-Pに大型アクロマティックレンズを用いた像転送系を導入すること等により、レーザーの空間分布の安定・高品質化を保つとともに、レーザーエネルギーをこれまでより最大60%程度増大させることを実現した。現在は高加速度場評価に向けて、その高度化したレーザーを用いた超短パルスプローブの開発を進めている。

一方で、ウンルー効果の実験的検証には量子場の真空における非局所相関する量子エンタングルメント構造を明らかにすることが重要であるが、そのためには曲がった時空での場の量子論的アプローチが有効と考えられる。極限宇宙メンバーとの連携を開始し、大域的な加速電子の運動軌跡等に着眼しながら、その量子エンタングルメント構造を明らかにしていく。今後はその理論的な指標を基にウンルー効果の実験的検証を進める予定である。



●第7回領域スクール & 第4回領域若手研究会

2025年6月30日 - 7月4日, 休暇村伊良湖

第7回領域スクールおよび第4回領域若手研究会を開催しました。今回は宿泊型施設を利用し、若手研究者同士が密に交流できる環境を整えました。スクールでは、領域メンバーである下川続久朗氏(OIST、E02班)、高木隆司氏(東京大学、E01班)、吉田大介氏(名古屋大学、C03班)、渡邊真隆氏(東京大学、E02班)の4名を講師としてお招きし、下記の講義を行っていただきました。講義はあえてオンライン配信を行わず、参加者を学生および博士研究員に限定することで、基礎的内容についても気軽に質問しやすい雰囲気を作成し、他分野の基礎を若手のレベルに合わせて学べる場を設けました。その結果、参加者と講師の間で活発かつ濃密な議論が交わされました。4名の講師に加え、約70名の若手研究者が参加しました。今回のスクールでは、各講師に1時間の講義を2コマ担当していただき、講義はすべて英語で行われました。

下川続久朗氏(OIST)の講義「Frustrated Magnetism: From Fundamentals to Frontiers」では、フラストレート磁性体および量子スピン液体の基礎と最新動向について講演していただきました。前半では、磁性の歴史的背景やスピンモデルの紹介を通じて、フラストレーションの概念とそれによって生じる非自明なスピン配置や磁性秩序の抑制について、専門外の聴衆にも分かりやすく解説していただきました。後半では、量子ゆらぎの強い系で実現する量子スピン液体の概念を中心に、実験的・理論的な近年の進展や、現在も解明が進められている未解決問題について紹介していただきました。

高木隆司氏(東大)の講義「Introduction to Quantum Resource Theories」では量子リソース理論の基礎から応用までを概観していただきました。はじめに量子状態・量子チャンネル・エントロピーの復習を行い、エンタングルメントのリソース理論を例にリソース量の定義と量子相対エントロピーによる評価方法を説明していただきました。続いて量子熱力学のリソース理論の観点からサーモメジャライゼーションによる状態変換条件、仕事の抽出・形成コストについて解説いた

しました。最後に量子計算のリソースである“マジック”の理論を紹介し、マジック状態蒸留やTゲート合成の最適性、リソース量の評価方法について触れ、リソース理論の多様な応用可能性を示していただきました。

吉田大介氏(名大多元)による講義「Introduction to the Causal Structure of Spacetime」では、時空の因果構造を理解する上で重要な「ペンローズ図」について、豊富な具体例を交えながら初学者にも分かりやすく講演していただきました。前半では、物体の運動が因果的であるとは何かという点を、高校物理から特殊相対論へ橋渡ししながら解説いただきました。後半では、ブラックホール時空などの因果構造を理解するためのペンローズ図の描き方とその解釈を丁寧に説明いただきました。また、星の崩壊モデルとしての動的ブラックホール時空を例に、事象の地平面の面積が減少しないという面積定理について解説していただきました。

渡邊真隆氏(東京大学)の講義「Entanglement entropy in field theory」では、場の理論におけるエンタングルメントエントロピー(EE)の基礎的事項についてご講義いただきました。前半では、スピン系におけるEEの導入から始まり、経路積分を用いたレニーエントロピーの表式について解説いただきました。後半では、主に2次元共形場理論におけるEEの性質と計算方法が取り上げられ、共形対称性の導入および場の理論の繰り込み群フローの概念に触れた後、最終的にはc定理の証明まで紹介していただきました。

スクールに併せて開催した領域若手研究会は、異なる分野の若手研究者が交流し、異分野共同研究のきっかけを作ることを目的としています。今回は約70名が参加し、そのうち約40名が口頭発表を行いました。講演に加え、懇親会、昼食・夕食の時間にも活発な交流が行われました。

最後に、泉(スクール・若手研究会世話人代表、C03)が総括を行い、第7回領域スクールおよび第4回領域若手研究会は盛況のうちに閉会しました。

(文責：泉圭介)

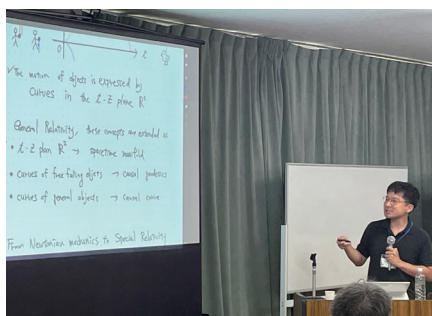


写真1：吉田大介氏による講義の様子



写真2：集合写真



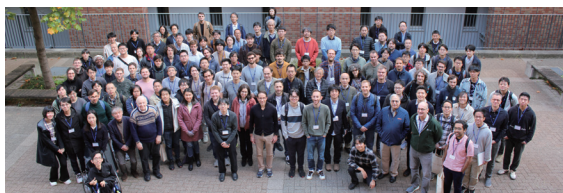
2025年度 研究会報告

CONFERENCE REPORTS IN FY2025

●領域国際会議「Extreme Universe 2025」

2025年10月27日 - 11月1日, 京都大学基礎物理学研究所+オンライン

2025年10月27日から11月1日まで、領域国際会議を京大基研にて開催した。本領域のテーマである量子情報と物理学の融合に関して、海外の著名研究者も多数招聘し、約200名の研究者が参加した大規模な国際集会となった。量子情報の分野では、BrakerskiやWalterによる、計算量を考慮した量子エンタングルメント理論の最新研究が報告され、森前(A01)やMaは量子暗号や擬ランダムユニタリーの実現法に関する成果を発表した。KarchやMayやRuanは量子計算複雑性のゲージ重力対応への応用に関して講演した。量子重力の分野では、まず、Myers(領域アドバイザー)が量子エンタングルメントと重力理論における散乱現象の関係に関して、Tonniがモジュラーハミルトニアン(ゲージ重力対応に関して、それぞれ成果を発表した。飯塚(B01)とHarper(C01)は多体量子エンタングルメントを測る量のゲージ重力対応に関して発表した。そして、Boussoは一般の時空に対しての量子エンタングルメントとホログラフィー原理の新しい対応を提唱した。また、宇宙の波動関数や重力の経路積分と微視的状态のランダム平均の関係、閉じた宇宙における観測者やホログラフィー原理と言った量子重力の根幹に関する研究が最近話題となっており、Balasubramanian、de Boer、Engelhardt、魏(C01)、Hörn、宮地(C01)、野村、Trivedi、Wadia、Yangと多くの講演者が様々な視点でこの問題を議論した。さらに、Albert Einstein MedalとDirac Medalを今年受賞されたWaldによる量子エンタングルメントとメモリー効果の関係に関する講演があった。石橋(B03)は、ゲージ重力対応を利用した重力理論の安定性の解析に関して、大下はブラックホールからの重力波における量子重力効果に関して、成果報告した。量子情報を念頭においたテンソルネットワーク法に関して、Banuls、岩木(D02)、Jahn、堀田(D02)、蔵増(E02)、奥西(D02)、Qinから多角的な成果の発表があった。そして、物性実験の分野では、Joshiはモジュラーハミルトニアンをイオントラップ実験で測定した成果、遊佐(C03)は、量子ホール効果を用いた宇宙膨張の実験成果、について報告した。本領域プロジェクトの研究成果を広く世界に発信し、海外の研究者による最先端の進展を包括的に把握できる貴重な国際集会となった。(文責：高柳匡)



集合写真

●第5回領域会議

2025年12月26 - 28日, ホテルアイスル松山(愛媛県松山市)+オンライン

2025年12月26日から28日までの3日間、第5回「極限宇宙」領域会議が、愛媛県松山市のホテルアイスル松山にて開催されました。本会議は、本領域研究の最終年度となる2025年度の締めくくりとして位置づけられ、領域内の研究者、大学院生、ポスドクを中心に多数の参加者が集い、これまでの研究成果の総括と今後の発展に向けた活発な議論が行われました。また、本会議の前日である12月25日には、押川正毅氏(E02・東大物性研)の第71回仁科記念賞受賞を記念した特別コロキウムが開催されました。

会議の冒頭では、高柳匡(領域代表・京大基研)が登場し、領域の組織構成や研究目的を改めて説明しました。あわせて、これまでの研究成果やアウトリーチ活動の概要、若手研究者支援事業の進捗、今後の行事予定などについて報告が行われ、領域全体の活動を俯瞰する機会となりました。

研究発表では、9つの研究計画班がそれぞれ30分の発表を行いました。前半では研究代表者が各計画班の研究成果を俯瞰的に紹介し、後半では代表者や分担者、領域ポスドクが特に注目すべき最新の研究成果を報告しました。また、公募研究班の代表者による10分間の講演では、本領域に参画してから約2年弱にわたる研究成果が紹介されました。これらの発表を通じて、研究計画班間や公募研究班との連携による異分野融合型研究の進展が数多く示され、本領域の特色が改めて明確となりました。

ポスター発表も盛況を博し、ポスドクや大学院生が自身の研究成果を発表する場として、会場各所で熱心な議論が交わされました。自由闊達な意見交換を通じて新たな着想や将来的な共同研究の芽が生まれるなど、若手研究者にとって貴重な交流の機会となりました。優れたポスター発表に対しては表彰も行われ、研究意欲の向上につながりました。

会期を通じて、素粒子物理、宇宙物理、物性物理、量子情報が有機的に結びつき、融合研究が着実に深化してきたことが確認されました。本会議をもって、極限宇宙領域研究は最終年度にふさわしい集大成を迎え、将来の研究展開へとつながる新たな一歩を踏み出しました。(文責：山津直樹)



集合写真

●基研研究会「高次にもつれた量子相探索の展開」

2025年9月1-3日, 京都大学基礎物理学研究所

2025年9月1-3日 基礎物理学研究所で極限宇宙とアシメトリ量子という二つの学変の合同ワークショップ「高次にもつれた量子相探索の展開」を開催した。切欠は鬼丸さんと、いつか合同で何かやりましょうと常々話しかけていたこと、極限宇宙も物性分野に認知度が上がり、より踏み込んで異分野交流の機会があってもよいと思ったことである。実際には内容は物性の研究会そのもので参加者も物性関係者であるが、物性といってもおそらく高エネルギー分野の方々が思うよりずっと物性という分野は広く、極限宇宙の物性関係者とアシメトリの関係者は異分野とっていいほど違う。

合同ワークショップの核となる概念であるエンタングルメントが、量子状態の性質を分類し、その本質をとらえるために欠かせないという考え方は、極限宇宙に限らず物質科学においても特に2010年ごろから急速に浸透している。しかし多体系の複雑な物性を研究するには、実験でも理論でも多くの工夫を要するいわゆるコスパが悪い問題である。今回、緩く関連しあう、いずれも根が深いこうした諸問題をそれぞれの視点から掘り下げ、果敢に独自の的方法論でチャレンジする30-40代の研究者を集めて会議を行ったことには大きな意義があったと思う。まず話題は、f電子系の電子構造計算、多極子の理論、量子スピン系の摂動論開発、スピン液体や電気磁気効果をターゲットとするフラストレート系の実験、非線形応答や局所揺らぎをとらえる構造解析など、多種多様であったが、それゆえに自分以外にも流行りにいたずらに乗らず、独自性の高い研究を追求しようとする研究者がたくさんいることを互いが認識して刺激しあう場になった。今回、40分程度の講演枠であったため研究の動機からテクニカルな側面を含めてじっくり話をきくことができた。

また懇親会では普段、縦割りで知り合う機会が少なかった研究者同士が新たな知己を得て、それぞれの悩みや将来への展望をざっくばらんに語りあう心温まる風景も見受けられた。特に何人か参加者からものすごく面白かったと直接言ってもらえたのがありがたかったと思う。開催にあたって鬼丸さん、大槻さん、及び高柳さんには大変お世話になったのでこの場を借りてお礼申し上げる。(文責：堀田知佐)



集合写真

●New computational methods in quantum field theory 2026

2026年1月26-28日, 理研和光キャンパス

2022-2024年度に引き続き、D01班主催のスクール“New computational methods in quantum field theory 2026”を、理化学研究所和光キャンパスで開催しました。これまでのスクールは日本語で開催してきたのに対して、今回は英語による開催を行いました。開催形式は対面で参加者は約50名でした。今回はこれまでとは異なり多くの外国人研究者の参加がありました。

講師は春名純一さん、日高義将さん、沼澤宙朗さんにお願いしました。春名さんには“Introduction to Quantum Error Correction”というタイトルで講義をしていただきました。文字通り量子誤り訂正の入門で、限られた時間内で量子誤り訂正の基礎から始めて、トーリックコードのような比較的新しい話まで分かりやすく解説してくださいました。

日高さんには“Introduction to Hamiltonian Lattice Gauge Theory”というタイトルで格子ゲージ理論のハミルトニアン形式について解説いただきました。このトピックは解析が煩雑なため専門外からは敷居の高いトピックでしたが、講義では始めに関連する量子力学の模型で本質的な構造を説明してからゲージ理論の説明をするというスタイルを取り、敷居を下げた鮮やかな解説をしてくださいました。

沼澤さんには“Open Majorana system”というテーマで講義をしていただきました。講義はマヨラナフェルミオンの基礎や量子カオスとの関係から始め、最終的に開放系における対称性の量子異常と系の性質との関係など、高度な内容に踏み込みました。

また、参加者7名(藤倉浩平さん・藤村晴伸さん・Dongsheng Geさん・Dongwook Ghimさん・Peng-Xiang Haoさん・前野怜太さん・田耕健也さん)による一般講演も行われました。

広い分野にまたがる内容の講義・講演の合間には、参加者の間で活発な質疑応答や議論がなされました。本スクールが今後の皆様の研究に役立てば幸いです。

(文責：
本多正純)



集合写真



2025年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧

CONFERENCES, WORKSHOPS AND SEMINARS

● 領域コロキウム

第5回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年4月30日

講演者: Ángela Capel Cuevas 教授
(University of Cambridge)

タイトル: The Many Faces of Quantum Entropy - From Divergence Measures to Conditional Independence



第6回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年6月6日

講演者: Gary Horowitz 教授 (University of California, Santa Barbara)

タイトル: Spacetime Singularities and Black Holes



第7回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年9月30日

講演者: Alexander Altland 教授 (University of Cologne)

タイトル: Late time quantum chaos in two-dimensional gravity



第8回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年10月25日

講演者: Hong Liu 教授 (Massachusetts Institute of Technology)

タイトル: Entanglement, von Neumann algebras, and the emergence of spacetime



第9回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年12月18日

講演者: 藤井啓祐 教授 (大阪大学)

タイトル: OTOC spectroscopy: detecting quantum advantage of quantum chaos through the lens of quantum algorithms



第10回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2026年2月6日

講演者: Stefan Hollands 教授 (University of Leipzig)

タイトル: Negative Energy

共催: 名古屋大学高等研究院および素粒子宇宙起源研究所 (KMI)



● 領域セミナー

第29回領域循環ミーティング

開催日: 2025年4月22日

講演者1: 重森 正樹 (B01)

タイトル: Topics in black hole microstates in string theory

講演者2: Marcel Hughes (名古屋大学)

タイトル: Beyond the monotone elliptic genus in AdS_3/CFT_2

第9回領域学際セミナー

開催日: 2025年5月23日

講演者1: 南部 保貞 (E02)

タイトル: Entanglement partner and monogamy

講演者2: 近藤 康太郎 (E03)

タイトル: High acceleration field with tightly focused laser wakefield acceleration for investigation of the Unruh effect

第30回領域循環ミーティング

開催日: 2025年6月5日

講演者1: 森 貴司 (B02)

タイトル: Introduction to open quantum systems

講演者2: Juan Pablo Bayona Pena (京都大学)

タイトル: Topological Entanglement Spectrum Crossings as a Probe of non-Hermitian Bulk-Boundary Correspondence

第10回領域学際セミナー

開催日: 2025年6月19日

講演者: 田中 貴浩 (E02)

タイトル: Axion cloud evolution with self-interaction

第31回領域循環ミーティング

開催日: 2025年7月10日

講演者1: 石橋 明浩 (B03)

タイトル: Quantum null energy conditions and quantum focusing

講演者2: 松尾 善典 (B03)

タイトル: Quantum focusing conjecture and the Page curve

第11回領域学際セミナー

開催日: 2025年7月22日

講演者: 日高 義将 (E02)

タイトル: Hamiltonian Lattice Gauge Theory via Topological Quantum Field

第32回領域循環ミーティング

開催日：2025年10月14日

講演者1：山本 大輔 (B02)

講演者2：村田 佳樹 (B03)

タイトル：Spacetime-localized response in quantum critical spin systems : Insights from holography, Spin systems as quantum simulators of quantum field theories in curved spacetime, & Spin systems as quantum field theories in inflationary universe : A study with Unruh-DeWitt detectors

第33回領域循環ミーティング

開催日：2025年11月19日

講演者1：上田 宏 (D02)

講演者2：御手洗 光祐 (大阪大学)

タイトル：Deep Variational Quantum Eigensolver : A Divide-And-Conquer Method for Solving a Larger Problem with Smaller Size Quantum Computers & Explicit quantum surrogates for quantum kernel models

第34回領域循環ミーティング

開催日：2026年1月19日

講演者1：中田 芳史 (A01)

講演者2：手塚 真樹 (B02)

タイトル：Hayden-Preskill recovery in Hamiltonian systems

●研究会&ワークショップ

2025 YITP Logical Gates for Encoded Qubits Workshop

開催期間：2025年4月7-18日

開催場所：京都大学

Black Holes, Quantum Chaos, and Quantum Information

開催期間：2025年4月26-30日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

基研研究会「非摂動的場の理論の進展と今後の課題2025」

開催期間：2025年5月22-23日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

Quantum Connections: Linking Information, Gravity, and Many-Body Physics

開催期間：2025年6月24-28日

開催場所：UTOP Ubless Hotel

第4回領域若手研究会

開催期間：2025年6月30日-7月4日

開催場所：休暇村伊良湖

基礎物理学研究所短期研究会 高次にもつれた量子相探索の展開

開催期間：2025年9月1-3日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

領域国際会議“Extreme Universe 2025”

開催期間：2025年10月27日-11月1日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

ISSP Workshop: Topology, Entanglement, and Dynamics in Quantum Many-Body Systems (TEDQMB)

開催期間：2025年12月22日

開催場所：東京大学物性研究所

第5回「極限宇宙」領域会議

開催期間：2025年12月25-28日

開催場所：ホテルアイスル松山

Nagoya Workshop on General Relativity

開催期間：2026年1月26-28日

開催場所：名古屋大学

New computational methods in quantum field theory 2026

開催期間：2026年1月26-28日

開催場所：理化学研究所

第3回一般相対論と幾何

開催期間：2026年3月16-17日

開催場所：名古屋大学



● 報告者

田嶋 大雅 Hiromasa Tajima

名古屋大学大学院 理学研究科 博士後期課程 1 年

指導教員 名古屋大学大学院理学研究科 南部保貞 准教授(E02)

受入教員 立教大学 理学部物理学科 宇賀神知紀 准教授(B01)

受入期間 2025年10月 5 日～2025年12月 6 日

今回の滞在では、世界的に盛んに研究されているホログラフィックな双対性を駆使した重力理論の研究の手法や知見を学び、自身の研究の幅を手法や共同研究という意味でも広げることが目的である。そこで、この手法を用いた研究が盛んに行われている立教大学へ長期間の滞在をすることを決めた。私が興味を持っているのは宇宙初期における重力に関してである。宇宙初期にはインフレーションと呼ばれる指数関数的な宇宙膨張が起きた時期があったと考えられている。特に、このシナリオは宇宙マイクロ波背景放射の観測ともよく合っていることが報告されている。また、インフレーション中の特に空間膨張の特徴的なスケールよりも長い長さスケールにおいては、量子効果が重力へ作用することになる。このため、重力からの反作用がもたらす量子情報的な性質が着目されている。そして、重力が強く働く時期には、重力が存在することに起因する情報のダイナミクスが現れると期待される。私はこれまでの研究において膨張する宇宙における情報のダイナミクスの特徴を具体的なモデルで調べてきた。そこで、重力の存在に起因する情報のダイナミクスに対してさらなる調査を行うため、私はホログラフィックな理論の双対性に着目し、これらの手法の扱い方、考え方などを学び、応用していきたいと考えている。立教大学理論物理学研究室はこのような手法を実際にブラックホールや膨張時空である de Sitter 時空などへと応用して重力の量子情報的な性質を研究している宇賀神准教授や森助教が所属しており、私のこれからの研究活動の幅を広げていくことができると考えた。

立教大学ではホログラフィックな双対性である AdS/CFT 対応や AdS/BCFT 対応、そして dS ホログラフィーなどに関する様々な議論に参加させていただいたり、議論を持ちかけさせていただいたりした。そ



写真 2：宇賀神研での議論の様子
左から宇賀神先生、筆者



写真 1：
宇賀神先生（左）と筆者（右）

れぞれの話題では、バルクの Anti de Sitter 時空や de Sitter 時空の情報がどのように境界の理論に対応しているのか、はたまた、その逆に、境界の理論の情報からどのようにバルクの情報が構成されているのかなどの共同研究を行なった。これらの話題はホログラフィックな双対性のその詳細に踏み込んでいくことで、重力の性質を掴むものであり、これまでの私が扱ってこなかった方向性であった。そのため、これらの話題をキャッチアップしていくことを主軸に置きつつ、自身のできることを探して研究活動を行なった。また、これまで自身の触れてこなかった内容の議論や知識、そして、全く違うアプローチによる研究題材の発見の過程を通して研究に対する新しい視座を得ることができた。加えて、現在の最先端における重力と量子情報、ホログラフィーの状況について知見を深めることができた。

非常にありがたいことに滞在中も滞在中に参加させていただいた議論に引き続き参加させていただき運びとなった。そのため、まずは滞在中に生まれた共同研究を遂行し、ますます議論を重ねていきたいと考えている。そして、本滞在の経験と共同研究をもとに、この分野の研究を推し進めていきたいと考えている。

最後に、今回の若手循環プログラムをオーガナイズしていただいた方々に感謝の意を表したいと思います。まず、私の滞在について快く承諾して、滞在中も本滞在が有意義になるように尽力していただいた宇賀神准教授に多大なる感謝の意を表明します。また、忙しい中でも議論の相手をしていただいた森助教にも感謝申し上げます。さらに立教大学では快く歓迎していただいたスタッフや学生の皆さんにも非常に助けていただきましたので感謝申し上げます。特に、学生の堀越さんと志賀くんと石川くんには滞在中は日頃から研究についての議論や質問などの相手をしていただけて非常に感謝しています。加えて、滞在中に快く研究の議論に参加をさせていただいた日大の玉岡准教授、京大の宮田さん、東大の沼澤助教、渡邊助教、そして、本プログラムを通じて素晴らしい経験をさせていただいた高柳教授、事務の岡崎さんをはじめとする本学術変革領域研究のオーガナイザー、およびスタッフの皆様方、それから本プログラムへの参加について背中を押してくださった指導教員の南部准教授に感謝申し上げます。



国際都市「加速膨張宇宙」の魅力

極限宇宙プロジェクトには様々な時空が登場します。重すぎて光すら出てこれない天体を表すブラックホール時空、ホログラフィー原理の研究で中心的役割を果たしてきた反ド・ジッター時空、宇宙の歴史を記述する膨張時空などなど。みなさんはどの時空が好きですか？私は加速膨張宇宙を表すド・ジッター時空(de Sitter時空；dS時空)が一番好きです。本稿では、自身の研究をまじえながら、その魅力を伝えたいと思います。

まずはdS時空の定義から始めましょう。dS時空は最もシンプルな加速膨張宇宙のモデルで、その線要素は $ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2(dx^2 + dy^2 + dz^2)$, $a(t) = e^{Ht}$ で与えられます。ただし、 $a(t)$ は宇宙の大きさを表すスケール因子、 H は膨張率を表す定数(ハッブル定数)で、宇宙が指数関数的に膨張していることを表しています。線要素や計量に馴染みがない方は「膨張率 H で指数関数的に膨張する時空」とだけ理解していただければ十分です。

ではなぜdS時空が面白いのか？精密観測に裏付けられた現代宇宙論によると、現在の宇宙が加速膨張していることが知られています。また、宇宙初期には「インフレーション」と呼ばれる加速膨張期があり、その膨張エネルギーが物質のエネルギーに転換されることで、ビッグバンが起きたと広く考えられています。つまり、加速膨張宇宙を理解することは、宇宙の始まりと現在・未来を理解することに他なりません。dS時空は、これら加速膨張宇宙を記述する時空であり、宇宙論で最も重要な時空の1つであると言えます。

dS時空の重要性は宇宙論にとどまりません。例えば、初期宇宙のインフレーションは、地上の加速器では到達できないエネルギー領域で発生したと考えられており、超高エネルギー物理学の重要な実験場になりうると期待されています。実際、我々の論文[1]では、宇宙マイクロ波背景放射などで測定される原始宇宙の密度ゆらぎの相関関数を用いて、標準模型を超える未知の素粒子を探索する手法を提案しました。特に、密度ゆらぎの3点関数に現れる特有の振動パターンから、インフラトンと結合する未知の新粒子の質量を決定できることを示しました。これは、地上の加速器実験において、共鳴シグナルを用いて素粒子の質量を決定するのに対応しており、宇宙観測によって未知の素粒子の特性を調べる可能性を示しています。このような考え方は今では「宇宙論的加速器物理学」と呼ばれています。大変光栄なことに、この分野を開拓してきた業績で第40回西宮湯川記念賞を今年度受賞いたしました。

dS時空が高エネルギーフロンティアの研究に繋がることを述べましたが、その背後の物理は非平衡統計力学とも密接に関連しています。そもそも、インフレーション宇宙は激しく膨張しているので、極限的な非平衡現象であると言えます。興味深いことに、ブラックホールが温度を持つと同様、dS時空が膨張率 H に比例す

る温度を持つことが1970年代から知られています。インフレーション宇宙の膨張率 H は 10^{13} GeVにも迫ると考えられており、この事実は、インフレーション宇宙が超高温状態にあったことを示唆しています。超高温の熱浴の中で、超高エネルギーの素粒子が互いに衝突や散乱、崩壊を繰り返し、その痕跡が初期宇宙の観測データに刻まれる。これが宇宙論的加速器物理学の研究を行う際に基礎となる物理的直感です。

さて、温度の概念があるならば、エントロピーを考えるのも自然でしょう。やはりブラックホールと同様に、dS時空も地平面(加速膨張に起因する因果的境界面)の面積で定まるエントロピーを持つことが古くから知られています。結果として、極限宇宙プロジェクトのキーワードの1つである「ホログラフィー原理」をdS時空で理解しようという試みも近年盛んに議論されています(より詳細はニュースレター第1号の正田氏の記事を参照)。私自身も、dS時空を含む、より一般の膨張宇宙でホログラフィー原理をどのように定式化したら良いか？というテーマの論文を今年度発表しています[2]。

さらに、地平面の外側は(内側にいる)我々から観測できないので、dS時空の物理は量子開放系的な側面も持ちます。このような事情もあり、近年の宇宙論研究では、開放系や量子情報の視点も幅広く用いられています。私自身の今年度の研究においても、例えば論文[3]では、宇宙論への応用を念頭に、開放系における有効場理論の方法を重力系に拡張しました。また、論文[4]では、量子もつれの観点から、dS時空上の有効場理論の整合性条件を議論しました。

このように、加速膨張宇宙を表すdS時空は、「宇宙の始まりと現在・未来」を記述する重要な時空であると同時に、宇宙論、素粒子物理、量子重力、非平衡統計力学、量子情報など幅広い研究分野が交差する「物理学有数の国際都市」であると言えます。私がdS時空を好きな理由はここにあります。みなさんも一緒に加速膨張宇宙を研究しませんか？

- [1] T. Noumi, M. Yamaguchi and D. Yokoyama, JHEP 06 (2013), 051.
- [2] T. Noumi, F. Sano and Y. Suzuki, JHEP 08 (2025), 115.
- [3] P. H. C. Lau, K. Nishii and T. Noumi, JHEP 02 (2025), 155.
- [4] Q. Cai, T. Inada, M. Ishikawa, K. Nishii and T. Noumi, arXiv:2507.00850 (accepted by JHEP).



●執筆者紹介

野海 俊文 Toshifumi Noumi

東京大学大学院総合文化研究科 准教授

1986年神奈川県生まれ

2013年3月東京大学大学院博士後期課程修了

2023年4月から現職



● アウトリーチ活動・一般向け講演

『宇宙膨張と一般相対論』

開催日: 2025年4月19日、5月17日、6月14日

媒体/団体: 朝日カルチャーセンター

対象: 一般

講演者: 白水 徹也(C03)

第26回 京都大学情報学シンポジウム「社会情報学と物理学の融合で拓く知のフロンティア」

『理論と観測をつなぐ物理学: 格子QCDと量子計算の最前線』

開催日: 2025年7月28日

媒体/団体: 京都大学情報学シンポジウム

対象: 一般 約500人

講演者: 伊藤 悦子(D01)

金曜天文講話オンライン

『量子論と相対論(超入門)』

開催日: 2025年8月1日

媒体/団体: 京都大学大学院理学研究科附属天文台、
一般財団法人花山宇宙文化財団、京都大学大学院理学研究科宇宙物理学教室

対象: 一般市民

講演者: 杉本 茂樹(C01)

『タイムマシーン学』

開催日: 2025年10月5日、12日

媒体/団体: Tokyo FM ラジオ出演(日曜大学
supported by 日本大学)

対象: 一般

講演者: 村田 佳樹(B03)

『量子の世界-素粒子から宇宙まで-』

開催日: 2025年10月23日

媒体/団体: 青森県立青森高等学校

対象: 高校生21名

講演者: 柴田 尚和(C02)



Journey to the Extreme Universe, Forever

Head Investigator

Tadashi Takayanagi

Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto University

It has been four and a half years since this collaboration was established in September 2021, and we have finally completed it now. Being inexperienced in managing large projects, I was overwhelmed with related tasks from the very start. However, I am relieved that, thanks to the great members, we managed to steer the research activities in a positive direction. These four and a half years truly flew by. I extend my deepest gratitude to the advisory committee members who warmly supported this program and provided us with many valuable opinions and kind encouragement. I am also immensely thankful to the members of the management team for their valuable proposals and advice, as well as for taking the lead in implementing the program's various activities. And to all the researchers in this collaboration, thank you very much for developing truly outstanding research results across many fields. Thanks to your efforts, we have achieved numerous significant results for each of the three fundamental problems of the extreme universe: the extreme limit of space, time, and matter. While the primary goal of this research area is the interdisciplinary fusion of quantum information and physics, thanks to the efforts of all members, interdisciplinary research has been very successful. Research in physics utilizing knowledge of quantum information and quantum computers/quantum simulators now appears quite common. In this sense, it is fair to say that “transformation of research” has indeed occurred.

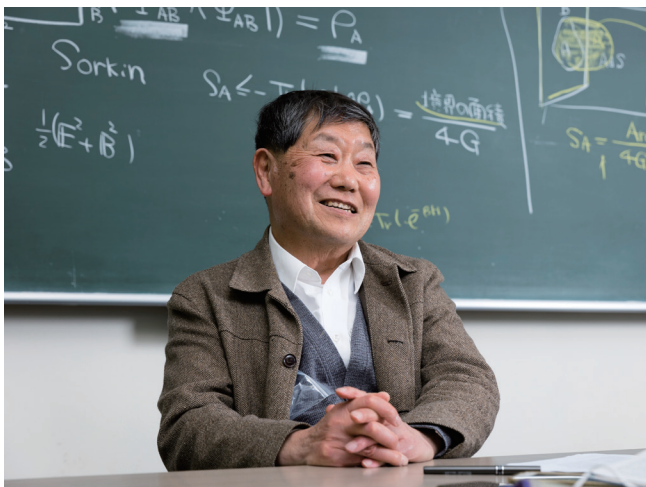


Looking back over the past year, there were various events. In April, I attended the Dirac Medal award ceremony at the ICTP in Trieste, Italy, and gave an award lecture alongside my co-recipients, Casini, Huerta, and Ryu. The photo above is from that occasion, where I received the medal from the ICTP Director Dabholkar (left in photo). Ambassador Kano (right in photo) from UNESCO also kindly attended, and it was a great honor to spend time with great colleagues. At the end of June, the Young Researchers Workshop was held in Inago, Aichi. We have placed great emphasis on nurturing young researchers with an eye toward interdisciplinary research, and we have held four such workshops to date under the leadership of Izumi (C03). Although this was the final one, we look forward to seeing the young researchers who met at these events grow into leaders of interdisciplinary research in the

near future. In late October, we held an international conference at YITP, Kyoto University. Numerous distinguished researchers, including our advisor Myers, gathered from overseas. More than 200 researchers attended in person from both Japan and abroad, making it a highly successful international gathering. Finally, in late December, we held the final annual meeting in Matsuyama, Ehime. This meeting marked the conclusion of our collaboration, with approximately 100 ExU members attending in person. Here, the culmination of research results from each research group was presented. It was gratifying to see not only that more outstanding research outcomes than anticipated had been reported, but also that new collaborative research projects across different fields were continuously emerging. Moreover, this year many of our colleagues won remarkable awards. Notably, Oshikawa (E02) received the Nishina Memorial Prize and gave a lecture at the special colloquium held prior to the annual meeting. Noumi (B01) was awarded the Nishinomiya Yukawa Memorial Prize. In addition, there are many other outstanding awards are reported in this collaboration. Congratulations to all the award recipients!



Now, in this project, we have achieved numerous significant results towards the extreme universe. Examples include understanding the black hole information problem, the holographic principle in de Sitter and wormhole universes, and developing systematic computational methods for quantum many-body systems using tensor networks, as well as efficient utilization of quantum computers. However, we are still far from comprehending the full picture of the extreme universe. Going forward, I expect that the new collaborative research sparked by this collaboration will advance further in both theory and experiment, revealing ever more truths about the extreme universe. Let us continue to enjoy this journey to the extreme universe !



Has the “Updated Question” Been Posed?

Advisory Committee member

Akio Hosoya

Professor emeritus at Tokyo Institute of Technology
(Institute of Science Tokyo)

Photo ©Nikkei Science (日経サイエンス)

Hearing that the *Transformative Research Area A: Extreme Universe* project is coming to an end this fiscal year fills me with deep emotion. Research that connects gravity, quantum theory, and information perhaps began around the time of black hole entropy, but I believe it truly took off after Ryu–Takayanagi. I never imagined that the line of research it inspired would grow into something of this scale. Since I expect that a detailed summary will be published elsewhere, in this article I would like to speak about what lies ahead.



It is often said that questions are more important than answers—especially in science. Now that the *Extreme Universe* project has reached a turning point, I imagine that the participating researchers are each distilling their own results and conceiving the next steps. Of course, quantum gravity stands as a distant goal, but I hope they will think about something a bit more within reach. Needless to say, each researcher already carries a “question” within. I hope they will discuss those questions together with the colleagues they met through this project. Such conversations may take place while writing equations on a whiteboard, or they may turn into discussions about experimentally probing an idea. They may even be philosophical, touching on “information,” “spacetime,” “reality,” or “knowledge.”



At such moments, the discussions held a century ago at the birth of quantum mechanics—among Bohr, Einstein, Heisenberg, Schrödinger, and others—are worth revisiting. Their exchanges can be found in *Physics and Philosophy* (Japanese edition: *Bubun to Zentai*, translated by Kazuo Yamazaki, with a preface by Hideki Yukawa, Misuzu Shobo), which I quoted in the preface to Volume 1. I recommend reading it along with Yukawa’s preface. As stated there, the book was written with Plato’s “dialogues” in mind. Bohr and Einstein play the role of Socrates, and

Heisenberg plays Plato. In Plato’s “Meno,” one finds an interesting exchange:

Young man: “Socrates, how is it that I am able to ask questions? If I already understand something, there is no need to ask; but if I do not understand it, I do not even know what to ask. In either case, it seems I cannot ask a question.”

Socrates: “Is it not because you understand a little, but not enough, that you ask?”

One could say that we learn and conduct research in order to ask better questions. Formulating a problem correctly should itself lead to the correct answer.



The process by which Bell concretized the question posed in the EPR paper, and by which Aspect and others eventually tested it, as well as the chain of inquiry that extended from Wheeler’s questions to Hawking’s discovery of radiation—both are classic examples of how one question begets another.



As part of my role as an adviser, I have attended the research area meetings and listened to the presentations, and it seems to me that several “questions” are already beginning to take shape. Naturally, their content is diverse: some are purely theoretical, some verge on experimental verification, and some even appear close to practical applications.

I would very much like to hear those questions.



May the Spirit of the Resplendent “Extreme Universe” Be Carried Forward

Advisory Committee member

Nobuyuki Imoto

Senior Professor at The University of Tokyo

The “Extreme Universe” project, part of the Grants-in-Aid for Transformative Research Areas (A), is now reaching the end of its term. This project aimed to bring together and integrate various fields, including elementary particle physics, cosmology, quantum information, tensor networks, materials science, and mathematics. It is a serious attempt to “break down disciplinary barriers,” something Japan has not been particularly good at since the Meiji Era, when catching up with the West was its primary objective. Observing the sheer quality and quantity of research results produced by “Extreme Universe” project over the past five years, which stand in a league of their own compared to conventional standards, I believe its achievements cannot be praised highly enough. This success is the result of the vision of Prof. Takayanagi — whose famous work is a quintessence of interdisciplinary fusion — and the aspirations of the participating researchers and collaborators who have actively invigorated the project. Their efforts have remained coherent while being refined through mutual competition. As an advisor who has witnessed this rare phenomenon firsthand, I am filled with both marvel and a profound sense of joy.

Regarding on methods to promote interdisciplinary fusion, I recall a time about 30–40 years ago when I frequently visited Europe, North America, and Canada, and also spent a year in the UK. At that time, the theories of quantum computing, quantum cryptography, and quantum communication were just beginning to emerge. I wondered then “how were they able to build such a community? Such a new, hybrid field surely requires individuals interested in both quantum physics and information processing, well-versed in both theory and application.” It would never have been possible without a certain critical mass of people possessing diverse interests and sustained passion. When I posed this question to a local professor (without expecting a clear answer), I received a very interesting organizational perspective. He explained that in the EU (then the EC), when hiring postdocs, particular emphasis is placed on whether the candidate has stayed in one country (one research lab) or moved between multiple countries and research labs. In fact, they made this mobility a condition for hiring. Consequently, a candidate would naturally acquire two or even three areas of expertise rather than just one, leading them instinctively toward interdisciplinary paths. Furthermore, since they were required to move

between countries within the EC, their language and way of thinking would not become rigid within a single national framework. Indeed, growing up in such a culture, one wouldn’t hesitate to fuse quantum physics with information science; it would be an exhilarating endeavor. The same would apply to any combination beyond quantum and information. This can be described as an organizational strategy for nurturing cross-disciplinary young talent. As someone who has always tended toward multiple interests, I resonated deeply with this idea. I remember how we talked at length, fueled by the excitement of the conversation and perhaps a little alcohol, never imagining I would receive such a profound answer.

While this postdoc recruitment strategy is undoubtedly effective, it takes time for those postdocs to mature and begin mentoring the next generation. Therefore, it is equally vital to encourage interdisciplinary fusion among more senior researchers whose fields are already established because they are the “leaders” who wield significant influence over the youth. So, I had struggled with finding a good solution for how to encourage senior leaders to do more interdisciplinary research — without particular result. Fortunately, however, I was asked to serve as an advisor and learned about the structure of this “Transformative Research Area.” Rather than a gradual organizational shift, this model involves repeated cycles of interdisciplinary assembly and dispersal. Seeing the senior researchers in Extreme Universe reacting multiple fields together, I feel it has a significant influence on young people and offers immediate efficacy. While the EC postdoc system realizes fusion within individuals over time, the Transformative Research Area model is characterized by the immediacy with which “mid-career leaders bring the values of interdisciplinary fusion back to their respective laboratories. And therefore, now that a period of academic transformation has ended, it would be a waste if the middle and senior classes were to re-confine themselves to their original fields, and then the momentum to promote the integration of fields in science and technology as a whole would not be sustained. With this in mind, I earnestly hope that the “Extreme Universe” community—having so magnificently navigated its interdisciplinary odyssey—will not see this scheduled conclusion as an end, but will instead aim to set sail on a new odyssey, striving for even greater heights.



Looking Back on Four and a Half Years of Extreme Universe

The Transformative Research Area “Extreme Universe” will conclude this fiscal year. We asked the members of the Management Group to look back on the past four and a half years of the Research Area.



● Tadashi Takayanagi

X00 Head Investigator (C01 PI)
Affiliation : YITP, Kyoto University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Particle Physics
Role in Management Group : Supervision of Management

The past four and a half years after this collaboration was initiated, have flown in an instant. Thanks to all members' support, the collaboration has progressed steadily, yielding a wealth of research outcomes across diverse fields. We are deeply grateful to our advisory committee members for their valuable guidance and encouragement from a broad perspective. Despite my inexperience as representative, I am immensely thankful to

all management members for actively expanding the area's activities in multiple directions. I extend my deepest gratitude to coordinators and secretaries for their seamless management of the ExU office. Through everyone's dedicated efforts, we were able to implement nearly every conceivable activity: announcing research findings and tracking recent trends through workshops and colloquia, nurturing young researchers, fostering interdisciplinary collaboration, producing newsletters, and conducting outreach. Through these activities, I myself have benefited greatly from research exchanges with other fields. I have been fortunate to collaborate with researchers from different disciplines and have gained valuable insights into their communities. This has been an incredibly valuable experience and is now a great treasure for me. I am excited to see how the interdisciplinary community between quantum information and physics, born via this collaboration, will develop in the future.



● Tomoyuki Morimae

X00 Co-Investigator (A01 PI)
Affiliation : YITP, Kyoto University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Quantum Information
Role in Management Group : Management

Quantum information seeks to realize unprecedented, high-performance information processing technologies by applying the mysterious properties of quantum mechanics to information processing. Its applications include quantum computers, which enable fast computation, and quantum cryptography, which provides secure communication. However, its significance is not limited to such applications: it has also become clear that new insights and techniques developed in quantum information are highly useful for theoretical physics.

In this research area, our goal has been to understand the physics of the extreme universe through quantum information. In particular, Team A01 was expected not only to advance

research in quantum information itself, but also to play the important role of developing and refining the “language” needed to deepen our understanding of physics under extreme conditions.

Looking back over the past four and a half years, there have been many advances within quantum information, and new theoretical frameworks and languages have continued to emerge. In quantum cryptography, to which I have devoted particular effort over the past several years, there have been many breakthroughs, and a great deal of exciting research has been carried out. Quantum cryptography relies heavily on computational complexity and the assumptions of computational cryptography. Since these ideas were not traditionally present in physics, they have provided physics with fascinating new concepts, and they have also led to important results.

Over these four and a half years, we have been able to achieve a variety of outcomes. Building on the research cultivated within this area, I hope that quantum information and related fields of physics will continue to develop further in the future.



● Yoshifumi Nakata

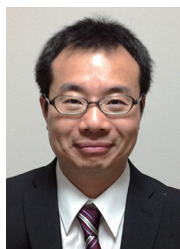
X00 Co-Investigator (A01 Col)
Affiliation : YITP, Kyoto University
Affiliation at the start of this Research Area : Photon Science Center, The University of Tokyo
Specialized field : Quantum Information Science
Role in Management Group : Interdisciplinary Activity

I am deeply grateful for the opportunity to have participated in the research and administration of the Extreme Universe project. Joining this initiative was a great opportunity to learn various cutting-age research topics over the entire spectrum of physics, ranging from elementary particle physics, condensed matter physics, and cosmology, including experiments as well. While most of these areas are quite distant from my current research focus, which is basically about the theory of quantum information, hearing talks and engaging in the stimulating discussions on such a wide array of topics was a wonderful experience that reminded me of my undergraduate days and rekindled my passion for physics. It was truly inspiring and

helped me significantly broaden my scientific perspectives.

Through my involvement in this initiative, I successfully forged many valuable connections with diverse researchers across multiple disciplines. This network is, without any doubt, an extremely valuable and irreplaceable asset for my future research career and collaborative opportunities.

Apart from the direct research activities, I was responsible for organizing the Extreme Universe colloquium series as a member of administrative team. I am proud that all the colloquium talks were successfully executed thanks to the exceptional quality of our excellent speakers and the enthusiasm of our wonderful participants. I would like to express my sincere acknowledgment and deep gratitude to every single person who contributed to and joined the colloquium series. All the recorded colloquium talks are now freely available on the official YouTube channel of the Extreme Universe project. I sincerely hope that these valuable materials will continue to serve as a high-quality academic resource and contribute significantly to the future development of interdisciplinary research for many years to come.



● Norihiro Iizuka

X00 Co-Investigator (B01 PI)
Affiliation : National Tsing Hua University (YITP, Kyoto University)
Affiliation at the start of this Research Area : Osaka University
Specialized field : String Theory, Quantum Gravity
Role in Management Group : Interdisciplinary Activity

Looking back on the past four and a half years as a PI in the Extreme Universe project, the greatest reward for me has been the people I met and the breadth of collaborations that emerged. Through meetings and international workshops, I had sustained discussions with many young researchers and was able to launch projects that cut across subfields. Quite often, a brief exchange became the starting point of a new project, an unexpected viewpoint entered, and the work crystallized into concrete results. This experience will remain a lasting asset for me as a researcher.

Through frequent international meetings, I also interacted with many overseas colleagues on a regular basis, which

renewed my appreciation of the project's international reach. Another personal surprise was how deeply I became fascinated by the ideas of quantum information. Seeing black hole problems reorganized in the language of entanglement and information theory and discovering that genuinely new quantum measures can be useful was immensely stimulating and reshaped my research motivation.

Building on the quantum information viewpoint fostered in the project, I have also been writing educational material on the quantum theory of black holes (in Japanese). My move from Osaka University to National Tsing Hua University in Taiwan (while also holding a joint position at the Yukawa Institute, Kyoto University) provided a fresh environment to focus on research and helped me translate discussions with young collaborators into a steady stream of papers.

Going forward, I hope to leverage this network and contribute to research and communication that carry these insights to the next generation. Finally, I sincerely thank the project leader, Takayanagi-san, and all members involved for this invaluable opportunity.



● Masaki Tezuka

X00 Co-Investigator (B02 PI)
Affiliation : Kyoto University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Condensed Matter Theory
Role in Management Group : Supporting young scientists; ExU Schools

Replacing the funding program “Scientific Research on Innovative Areas” (SRIA), “Transformative Research Areas (A)” started in FY2020, and our “Extreme Universe” (ExU) Collaboration was selected in September 2021. ExU began amid challenges, particularly regarding cross-border travel and events having large numbers of people together. As a part of the Management Group, I was in charge of supporting young researchers, particularly the “ExU Schools”. My gratitude goes to the many people involved: the numerous lecturers who prepared and delivered lectures for audiences with diverse fields and experience; the school co-organizers and Young Researchers’ Workshops (YRW) organizers who worked hard;

and the enthusiastic participants.

I will not forget the first school held in hybrid style, a few weeks before the fourth consecutive Physical Society of Japan semiannual meeting in the online style, with the doors to the YITP Panasonic Hall were kept open in the chilly early-March air. The second, fully online ExU School also drew many people from both within and outside ExU. It became easier to travel and hold meetings in the second half of FY2022. Following our second annual meeting in Kobe, we held the third ExU School as part of the first YRW. Later, we held schools as part of an ExU International Conference and as an international school co-hosted by ExU.

Compared to some of the “SRIAs” I have known, the funding period of our ExU Collaboration feels shorter in duration and is finishing amid much excitement in the new ideas and interdisciplinary projects innovating beyond conventional fields. I hope that the Collaboration has a lasting positive impact and that stages of interdisciplinary exchange, including schools, can be set up also in the future with the “Extreme Universe” title.



● Shuta Nakajima

X00 Co-Investigator (B02 Col)
Affiliation : QIQB, The University of Osaka
Affiliation at the start of this Research Area : Kyoto University
Specialized field : Cold Atom Experiment
Role in Management Group : Public Relations (Newsletter)

My specialty is cold atom experiments, which are generally classified under condensed matter physics, and my research has primarily focused on this field. However, after reading Prof. Takayanagi’s textbook, I became interested in topics such as the gauge-gravity correspondence. I mentioned this interest to my colleagues sometimes, and perhaps because of that, I was invited to participate in this Research Area.

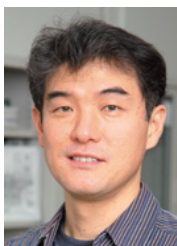
Before joining, I hadn’t had the opportunity to learn about gauge-gravity correspondence and related topics in depth. This Research Area has given me the chance to discuss these topics with theorists of elementary particles and cosmology, which has been a valuable experience.

As a Co-Investigator and experimentalist of Group B02, I have launched experiments. Our goal is to observe the dynamics of quantum information in quantum many-body systems using the cold atomic system, keeping in mind the black hole information loss problem. Unfortunately, due to my transfer from Kyoto Univ. to Univ. of Osaka, the experimental apparatus had to be disassembled and relocated. While we are still halfway to the results we initially aimed for, the setup has been rebuilt, and we are looking forward to producing results through our experiments.

As a member of the Management Group, I was responsible for editing the newsletters you are reading as part of our outreach efforts. I would like to take this opportunity to express my sincere gratitude once again to all the contributors who agreed to write articles, sometimes under tight deadlines. I hope this newsletter has helped convey the appeal of this field to people both within and outside our Research Area.



Looking Back on Four and a Half Years of Extreme Universe



● Akihiro Ishibashi

X00 Co-Investigator (B03 PI)
Affiliation : Nagoya University
Affiliation at the start of this Research Area : Kindai University
Specialized field : General Relativity and Gravitation
Role in Management Group : International activities

I still remember writing the application with a sense of excitement, even though it was a difficult task that would normally make me feel reluctant. I felt that the “Extreme Universe” project was truly attractive because the anticipation of the challenge was much greater than the difficulty of the themes.

In Management Group, I was in charge of International Activities, mainly organizing international workshops. Although my own contributions were small, I was able to personally feel the growing international recognition of this project. As the project progressed, I noticed more overseas researchers talking about “Extreme Universe.” When I met prominent researchers at international conferences and invited them to speak, I was glad

that they all readily accepted.

As the PI of Group B03, I conducted research on quantum information and quantum black holes. Once the project started, I felt that the barriers between different fields were lower than expected. At the same time, I faced the difficulties of interdisciplinary research, such as the different distances of interest and the challenge of where to focus. However, as the project moved forward, I realized that my own way of looking at research topics had changed over these five years. I hope to continue developing the buds of research I found during this period. I also want to maintain the connections with other researchers that began to take root through this project, and eventually turn these experiences into real fruit.



● Go Yusa

X00 Co-Investigator (C02 PI)
Affiliation : Tohoku University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Condensed matter experiment
Role in Management Group : Interdisciplinary activity

Looking back at the emails from the planning stage, six years have already passed since I joined this research area. During the preparation for the public call for proposals, the experience of having intense discussions centered around Takayagi-san—asking questions like “What is the ‘universe’ in Extreme Universe?” or “What does ‘extreme’ mean?” while circulating drafts from each group—was a uniquely stimulating and enjoyable time unlike anything I had experienced before.

As part of the C02 group, I have aimed to fuse experimental research on quantum Hall systems with cosmology. At the annual meetings, I valued the opportunity for one-on-one discussion over coffee with experts dealing with concepts like

black holes and brane worlds— notions that never appear in condensed matter experiments. Although there were times when the content was completely obscure, casual conversations left a deep impression on me or led to the start of collaborative research, and the environment provided by this ExU expanded the scope of my research.

Experimental research, which deals with physical entities, requires a corresponding preparation period and inevitably takes time. At every annual meeting, I was consistently overwhelmed by the sheer volume of papers produced by the theory groups, but I feel that we have finally reached a stage where our results are taking shape.

The main equipment we currently use was introduced with a research budget from over 10 years ago, yet it remains active and continues to produce results. The experimental environment established in this area should not end after four and a half years but will similarly become an asset that supports our research and those who follow for the next 10 or 20 years. I am grateful for being enabled to build a research foundation from such a long-term perspective



● Masahiro Hotta

X00 Co-Investigator (C02 Col)
Affiliation : Tohoku University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Quantum Information
Role in Management Group : Public Relations

For four and a half years, I served as a member of the public-relations sector, engaging in outreach activities aimed at making research on the “Extreme Universe” accessible to a broad audience. My primary responsibility was the continuous dissemination of information that would help non-specialists understand the fundamental concepts underlying this research field. To achieve this, I utilized the X (formerly Twitter) platform and the blog service note to provide clear and approachable explanations of relevant topics. I produced posts and articles that carefully explained its historical development and basic principles, emphasizing conceptual understanding rather than technical details. In addition, by reposting content from the

official Extreme Universe X account, I shared timely updates on research achievements, awards, and related news. In 2025, I further contributed to public engagement by authoring an expository article for general readers in the journal *Mathematical Sciences*. This article focused on quantum information and energy, as well as the arrow of time. In addition, I am co-authoring a textbook designed to introduce quantum mechanics from the perspective of information theory. I am also planning the publication of a new popular science book on quantum information physics. Through these activities, I remain committed to promoting the societal dissemination of research results in this field and to further enhancing public understanding of quantum information physics through diverse media.



● Tetsuya Shiromizu

X00 Co-Investigator (C03 PI)
Affiliation : Nagoya University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : General relativity and cosmology
Role in Management Group : Management

When I joined Tokyo Institute of Technology in 2002, Prof. Hosoya informed me that he intended to devote himself fully to quantum information research. Looking back now, that moment may have been when the first seeds were quietly sown. I understand the true starting point of this research area to lie in the Ryu–Takayanagi formula. I still vividly remember the sense of excitement when this formula was first proposed. We were fortunate to host a seminar by Takayanagi at Tokyo Tech.. That I would become directly involved with this line of research some fifteen years later is something I consider a great honor.

Braneworld scenarios, one class of higher-dimensional universe models, were actively studied around the year 2000.

All members of Group C03 were engaged in this research during their graduate student years. At the time of preparing the proposal for this research area, braneworld models were experiencing a revival, now equipped with the Ryu–Takayanagi formula.

The role of Group C03 was to establish a theoretical foundation for this revival. Our task was not only to build the basics, but also to carefully read and interpret the rapidly advancing results produced by other groups, and then to develop them further using the particular expertise of C03. I believe that this groundwork has been successfully accomplished through our activities.

As a member of the management group, I compiled the overall outcomes. My contribution to the interim report was mainly limited to adjusting length and format, which was not burdensome. However, this process revealed the outstanding achievements of each group and conveyed a strong sense of transformation—a clear beginning of a new era.



● Keisuke Izumi

X00 Co-Investigator (C03 Col)
Affiliation : Nagoya University
Affiliation at the start of this Research Area : KMI, Nagoya University
Specialized field : Cosmology & Relativity
Role in Management Group : Young Scientist Support

At the beginning of “*Extreme Universe*,” research activities still faced many difficulties due to the ongoing impact of COVID-19, and interactions among researchers were far from easy. I was particularly concerned about the young researchers' workshop that I was in charge of, as I feared that an online format would not allow for sufficient communication. Unlike senior researchers, who already have established networks, young researchers and students are still in the process of building their connections, and many expressed the need for face-to-face interaction. I therefore strongly hoped that we would be able to hold the workshop in person. Fortunately, by the time we held the first young researchers' workshop toward the end of the

second year, the infection situation had improved, and we were able to conduct it in person from the very start. This not only provided the kind of interactive environment that young participants had been hoping for, but also enabled us to organize residential workshops from the third year onward, where discussions could continue intensively from morning until night. For me personally, having the chance to speak directly with many young researchers was highly stimulating and an invaluable experience.

In terms of research, “*Extreme Universe*” also gave me the opportunity to engage in discussions beyond my own field of expertise, cosmology, with researchers in particle physics, condensed matter physics, and quantum information. I began with almost no background in quantum information, but through this project I was able to learn its foundations with great enjoyment. Moreover, the interactions within the project led to collaborative research with colleagues in particle physics, providing a valuable opportunity to broaden my own research horizons.



● Tsutomu Kobayashi

X00 Co-Investigator (C03 Col)
Affiliation : Rikkyo University
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Cosmology and Relativity
Role in Management Group : Public Relations (Website)

I usually work on classical aspects of gravity and on cosmology, including inflation. When I was invited to join the “*Extreme Universe*” project, I honestly wondered whether I was the right person for it. Nevertheless, I decided to participate. I had been working on similar topics for nearly a decade and was hoping to explore a new research direction. Taking this opportunity seriously, I tried to learn about quantum information and condensed matter physics by reading several textbooks. Although I had hoped to engage in interdisciplinary collaborations that would cross disciplinary boundaries, I was ultimately unable to reach that stage, and the five years passed quickly. This is something I still regret. Even so, being exposed to diverse

research styles, ways of thinking, and problem awareness through this program was extremely stimulating, and I feel that it will influence my future work. Within the astrophysics community, I am often regarded as working on topics not very directly connected to the real Universe, and I sometimes feel pressure to focus on more phenomenological issues. However, within this ExU team, I came to feel that my work is, relatively speaking, quite close to the real Universe. This experience reinforced my belief that it is important to pursue research that is intellectually enjoyable and genuinely useful as physics.

As a member of the management group, my concrete contributions were limited, apart from participating in the creation of the project logo. Still, it was a pleasure to discover that bringing together researchers from diverse fields even made it possible to form an unexpected “art team.”



Looking Back on Four and a Half Years of Extreme Universe



● Tatsuma Nishioka

X00 Co-Investigator (D01 PI)
Affiliation : The University of Osaka
Affiliation at the start of this Research Area :
YITP, Kyoto University
Specialized field : Particle Physics
Role in Management Group : International Activities

Looking back at the four and a half years of the “Extreme Universe” project, it has been a whirlwind of change for me, both personally and professionally. At the project’s inception, I was at the Yukawa Institute for Theoretical Physics, an environment where I could focus solely on my research. However, my subsequent move to the University of Osaka introduced new responsibilities, such as management and education. While balancing these roles was challenging at first, I now feel that each of these new experiences has been a valuable asset to my growth.

In the management group, I was in charge of the international program for dispatching young researchers abroad. For the first

two years, our activities were stalled due to the COVID-19 pandemic, which was quite frustrating. However, starting around the third year, the program finally gained momentum. Witnessing the energy of young researchers venturing out into the world was a truly rewarding experience, and I am glad I could play a part in supporting the dynamic growth of the entire research area.

The opportunity to learn about cutting-edge research across diverse fields through this project has been my greatest treasure. Although the project concludes this fiscal year, I will continue to cherish the inspiration I received and the connections I made across different disciplines. Even after the project ends, I sincerely hope to keep in touch and continue our research collaborations in new and different ways. Thank you for everything over these past five and a half years, and I look forward to working with you all again in the future.



● Kouichi Okunishi

X00 Co-Investigator (D02 PI)
Affiliation : Osaka Metropolitan University
Affiliation at the start of this Research Area :
Niigata Univ.
Specialized field : Condensed matter theory
Role in Management Group : Management

It has already been four and a half years since the launch of the Extreme Universe (ExU) project. My role in the management team at ExU was to organize seminars for publicly offered research projects and those related to condensed matter physics. Thanks to the generous support of many colleagues, these activities proceeded smoothly, and I would like to take this opportunity to express my sincere gratitude. I was also delighted to see fascinating collaborations between the publicly offered research groups and planned research ones, despite the short two-year duration of the publicly offered research period. On a more personal note, my involvement with the ExU project dates back to around 2010, when I invited Prof. Takayanagi, the repre-

sentative of the project, to give a talk on the Ryu-Takayanagi formula for entanglement entropy at a workshop on tensor networks (TN) organized within the condensed matter community. At that time, TNs had a close connection to quantum information physics, but their relationship with quantum gravity remained vague and largely conceptual; I lacked a clear path to translate my interest into concrete research. Through interactions with the ExU members, I could find a possible direction for analyzing the holographic aspects of tree-type TNs, the essence of which was also extended to the dynamical mean-field theory widely used in strongly correlated electron systems. I then re-realized that the entanglement of thought across time axes was essential for our research activity. Although the research period will conclude this March, the seeds of interdisciplinary fusion through the ExU are just beginning to bloom. I look forward to hearing the new discoveries that lie ahead.



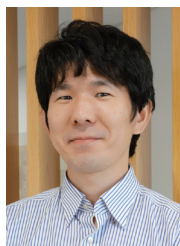
● Chisa Hotta

X00 Co-Investigator (D02 Col)
Affiliation : The University of Tokyo
Affiliation at the start of this Research Area :
Ditto
Specialized field : Condensed Matter theory
Role in Management Group : Interdisciplinary Activity

I believe it was about five years ago, toward the end of the year, that I first discussed with Takayanagi-san and Okunishi-san and exchanged several ideas about this collaboration, and I remember being quite impressed about the open-minded and constructive attitude of this project. My own background lies closest to materials science and is somewhat far from the core of this project, and I was not much aware of the motivations or even the terminology used by the core members. Starting from very basic elements attached to key concepts, I gradually pieced things together, and after five years I have finally developed a sense of familiarity with the field.

My research has focused on understanding how the quantum

states can be observed or controlled in condensed matter in nature. From this perspective, the operational viewpoint of quantum information theory was fresh and intellectual. Although I did not directly translate these ideas into concrete calculations, they strongly influenced both me and my group. The number of students working on tensor-network-related topics increased substantially, leading to unexpected research directions such as numerically exact solutions, quantum dynamics, and concepts related to the purity of quantum states. These developments would not have occurred without the connections provided by this research area. As a member responsible for interdisciplinary integration in the coordinating team, I organized several workshops and symposia with distinct themes. Bringing together researchers who rarely interact led to stimulating discussions that were also beneficial for myself. Over this period, I saw how the ExU program gradually became visible within the condensed matter community. Above all, I am grateful for the opportunity to meet many researchers with whom I would otherwise have had virtually no contact.



● Hiroshi Ueda

X00 Collaborator (D02 Col)
Affiliation : QIQB, The Univ. of Osaka
Affiliation at the start of this Research Area : Ditto
Specialized field : Condensed Matter
Role in Management Group : Interdisciplinary Activity

I initially joined this ExU as one of the co-investigators in Group D02. Shortly after the project was launched, I took on the responsibility of organizing the Circular Meetings, which later led me to become a member of the General Management Group from the following fiscal year. The Circular Meetings were held approximately seven times a year, with a total of 34 online sessions, serving as internal seminars for knowledge exchange among members of the project. In the early phase, the meetings rotated among the four major groups (A–D), but from the midpoint of the project, we shifted to a more informal and accessible style by introducing tutorial talks during lunchtime sessions.

In the final three meetings, we adopted a roundtable format, providing a platform for open discussions on how interdisciplinary collaborations can be initiated and what factors promote such cross-disciplinary creativity. My own specialty lies in computational physics, particularly in the study of tensor-network methods, and through this activity I had the valuable opportunity to encounter a wide range of research topics that I would not normally engage with directly. While many of these subjects were beyond my immediate expertise, they were intellectually stimulating and encouraged me to reexamine my own research from new perspectives.

I sincerely hope that these efforts have, in some way, contributed to the progress of everyone's research. Finally, I would like to express my deep gratitude to all the coordinators in each group, the speakers who generously accepted invitations to present, and all the participants who engaged in lively discussions throughout the series.



● Hidehiko Shimada

X00 Administrative Office
Affiliation : National Institute of Technology, Akashi College
Affiliation at the start of this Research Area : YITP, Kyoto University
Specialized field : Particle Theory
Role in Management Group : Program Coordinator (2022.4–2024.3)

From April 2022 to March 2024, I served as a Program Coordinator for the Extreme Universe project. That was a truly valuable experience for me.

Having spent my career as a researcher in particle physics, I did have mixed feelings when the Project Leader, Prof. Tadashi Takayanagi, first kindly told me about the opportunity to work as the coordinator. However, through my work, I was able, as a physicist, to appreciate cutting-edge research in various fields of physics closely connected together with the idea of “entanglement.” I am deeply grateful to Prof. Takayanagi for allowing me to continue my own research when there was time, and also for teaching and training me from the basics on how to handle the

necessary jobs as a coordinator.

I would also like to express my deep gratitude to the Extreme Universe secretary, Ms. Okazaki, with whom I worked at facing desks in the YITP secretary office. She understood my weaknesses very well and supported me in many ways. It would not have been possible to fulfill my duties if it were not for her ability and dedication. I would like to thank also Mr. Watanabe, Mr. Yoshida, Ms. Tsuruhara, and Ms. Yagi in the same office for their warm guidance and constant support.

Through this role, I realized how much my own past research activities had been supported by the hard work of administrative staff. Sometimes I had hard times, feeling as if I were being “sandwiched” by the strict regulations of administrative departments and the “reasonable” thinking of researchers (which, in fact, I often agreed with personally). It would be my greatest pleasure if my work helped in providing the project members more time to do their own research.



● Naoki Yamatsu

X00 Administrative Office
Affiliation : YITP, Kyoto University
Affiliation at the start of this Research Area : Kyushu University
Specialized field : Particle Physics
Role in Management Group : Program Coordinator

For two years, I served as the Program Coordinator for the Extreme Universe, supporting a wide range of program management activities. My main responsibilities included organizing research meetings, assisting with newsletter production, managing the website and mailing lists, and compiling the achievements of research groups. I participated in several on-site events, including the 3rd young researchers' workshop of the ExU Collaboration & the 6th “Extreme Universe” School in Hokkaido, the 4th ExU Annual Meeting in Osaka (September 2024), the 4th young researchers' workshop of the ExU Collaboration in Aichi (June 2025), and the 5th ExU Annual Meeting in Matsuyama (December 2025). I was involved

in all stages of these events—from preparation and logistics to participant support and session facilitation—which gave me a deep appreciation for the importance of fostering communication and active discussion among researchers.

In addition, I coordinated online meetings for the steering committee and administrative groups, and managed the program's monthly colloquia by arranging Zoom sessions, posting recordings, handling honorarium procedures, and promoting events via social media, supporting the day-to-day management of the program. In terms of information dissemination, I also regularly updated the website and assisted with newsletter editing to communicate the program's activities and achievements to both internal and external audiences. Through these experiences, I gained valuable insight into the critical role of administrative support in facilitating research activities, and they provided me with an important opportunity to contribute to the program from both research and operational perspectives.



Quantum information for theoretical physics

[Principal Investigator]

Tomoyuki Morimae (YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yoshifumi Nakata (YITP, Kyoto University)

Koji Azuma (NTT)

Francesco Buscemi (Nagoya University)

Ryu Hayakawa (YITP, Kyoto University)

[ExU Lecturer (Research Collaborators)]

Andrew Darmawan (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)

Hayata Yamasaki (Tokyo University)

Go Kato (NICT)

Group A aims to conduct research in quantum information theory while also developing the “language” of quantum information that can be applied to other areas of physics. In the current fiscal year, the following research results were obtained.

A Cryptographic Characterization of Quantum Supremacy:

Quantum computers are expected to be faster than classical computers; however, it has not yet been rigorously proven that they are truly faster. Research that aims to theoretically establish the advantage of quantum computation based on standard assumptions is known as quantum supremacy theory, and many studies have been conducted in this area. Nevertheless, the assumptions used so far have tended to be artificial or overly strong.

In this work, Morimae et al. prove that the classical security of the one-way puzzle—the most fundamental assumption in quantum cryptography and a natural quantum analogue of one-way functions—is equivalent to quantum supremacy. This result is theoretically intriguing in that it is the first in the world to connect two previously disparate concepts. Moreover, it has an important societal implication: if quantum supremacy did not exist, then all cryptographic systems currently in use would become insecure. This work has been accepted to STOC 2025, one of the top international conferences in theoretical computer science.

Quantum algorithms for Uhlmann’s transformation:

Uhlmann’s theorem, which states that the fidelity between two mixed states equals the maximum fidelity between their purifications, is one of the fundamental theorems in the theoretical research of quantum information. Despite its abstract statement, it is practically useful, with applications ranging from quantum algorithms to communication. The unitary that appears in the theorem is commonly referred to as the Uhlmann transformation. While the theorem indicates the existence of such a transformation, little was known about the quantum algorithm for achieving it. Nakata et al. proposed quantum algorithms for the Uhlmann transformation by cleverly using the quantum singular value transformation and matrix exponentiation, and revealed its complexity. Using our algorithm for the Uhlmann transformation, we have also shown that the circuit complexity of the fidelity estimation task can be drastically improved.

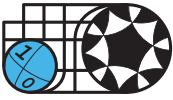
Topology and Quantum computational complexity:

Computational complexity and topology are both fundamental concepts in physics. Hayakawa presented several results to facilitate a better understanding of “Quantum computational complexity in topology.” First, Hayakawa demonstrated that the problem of estimating the Berry phase, a fundamental quantity in topological phases of matter, is BQP-complete. These results imply that

topological phases are a promising application of quantum computing. Moreover, Hayakawa showed MA-completeness for a problem in Topological Data Analysis (TDA). This result strengthens the understanding of the boundary of quantum/classical complexity in TDA.

Causal Structure and Operational Meaning of Information in Quantum Mechanics:

Buscemi et al. precisely classified the “revival” of information in quantum stochastic processes and reformulated commonly used measures of non-Markovianity—often previously conflated—from a causal perspective. In particular, they distinguished “noncausal revival,” which does not involve an actual backflow of information from the environment, from genuine information backflow that is truly causal, and provided a complete characterization in terms of quantum conditional mutual information. This distinction shows that it is possible to construct a convex resource theory in which only genuine non-Markovianity constitutes a resource. From the viewpoint of observation and inference, they also developed a unified framework for relating macroscopic descriptions to quantum statistics. By generalizing observational entropy and introducing the notion of an “observational deficit,” they quantified the extent to which a quantum state is irretrievable from macroscopic observations. This led to a natural unification of quantum statistical sufficiency, the Petz recovery map, and Bayesian retrodiction, thereby establishing a resource theory of microscopicality in which macroscopicity is treated as a free resource. Furthermore, they defined observational discord as a form of quantum correlation under observational constraints and characterized its vanishing in terms of information recoverability. Regarding the foundations of quantum inference, they formulated a quantum Bayesian rule based on the principle of minimum change and derived the Petz recovery map as the solution to an optimization problem defined over entire quantum processes. This provides an operational justification for update rules in quantum inference that apply not only to quantum states but also to quantum channels, thereby bridging quantum statistical inference and quantum information processing. In addition, as part of their research on quantum communication protocols, they proposed “port-based quantum telecloning,” which extends port-based quantum teleportation to multi-receiver scenarios. By eliminating the need for corrective operations on the receiver side and employing generalized measurements, the protocol can outperform the conventional clone-and-then-teleport approach under certain conditions. This result points to new potential applications in distributed quantum information processing and programmable quantum operations.



Quantum Black Holes from Quantum Information

[Principal Investigator]

Norihiro Iizuka (National Tsing Hua University and YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Toshifumi Noumi (The University of Tokyo)

Masaki Shigemori (Nagoya University)

Seiji Terashima (Kyoto University)

Tomonori Ugajin (Rikkyo University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Akihiro Miyata (YITP, Kyoto University)

Sunil Kumar Sake (YITP, Kyoto University)

Nicolò Zenoni (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Mitsuhiro Nishida (Yuge College)

In this research project, we aimed to elucidate the physics of black holes and the fundamental structure of quantum gravity from the perspective of quantum information theory. We pursued this goal by investigating multipartite entanglement, holography, and causality constraints.

Iizuka, together with Nishida and collaborators, developed *genuine multi-entropy* (GM), a class of entanglement measures designed to isolate irreducible multipartite quantum entanglement beyond bipartite correlations [1].

Using this framework, they showed that bipartite entanglement alone is insufficient in holography; multipartite entanglement is generically nonzero and of order $O(1/G_N)$ in holographic states, demonstrating that such multipartite correlations are a fundamental and ubiquitous feature rather than a small correction. They also showed that genuine multipartite entanglement becomes relevant only after the Page time in black hole evaporation

Furthermore, Iizuka, together with Lin and Nishida, established a general construction of GM by relating it to integer partitions and clarified that these provide new entanglement measures [2]. In addition, Iizuka, together with Nishida and Miyata, extended the Markov gap, an indicator of quantum recoverability, to multipartite systems and introduced the multipartite Markov gap, which captures geometric obstructions to bulk reconstruction [3]. Moreover, in collaboration with Lin, Iizuka investigated symmetry-resolved GM in systems with conserved quantities, showing that multipartite entanglement remains abundant even in the presence of symmetries [4]. These results clarify the role of multipartite quantum correlations in quantum error correction and black hole interior reconstruction.

Shigemori conducted studies on the microscopic structure of black hole microstates. For smooth microstate geometries in the D1–D5 system, he provided effective descriptions in terms of three-center solutions [5]. He further proposed a new supersymmetry index for symmetric product CFTs, enabling a classification of state structures near the black hole threshold beyond the conventional modified elliptic genus [6].

Terashima focused on finite- N effects and near-horizon black hole physics. He analyzed bulk wave packets in

AdS₄/CFT₃ and clarified leading $1/N$ corrections [7]. He also showed that, at large but finite N , reconstructed bulk operators in the AdS–Rindler region exhibit exponential growth, suggesting a breakdown of the large- N expansion at the scale $\ln N$ [8].

Ugajin investigated predictability in nonperturbative quantum gravity in a closed Lorentzian universe, showing that classical observables and probabilistic interpretations emerge through reduced density matrices [9].

Noumi pursued a unified study of causality and monotonicity constraints in cosmology and black hole physics, including holographic entanglement entropy in FLRW universes and monotonicity for extremal black holes in nonlinear electrodynamics [10, 11].

Sake analyzed the canonical quantization of JT gravity in de Sitter space and proposed a framework based on York time [12, 13].

Zenoni analyzed black holes with vortex-hair in AdS₃ and their phase structure under double-trace boundary conditions [14].

Miyata studied entanglement dynamics after local operator quenches in 2D holographic CFTs and identified black brane duals with time-dependent horizons [15].

Through these results, the project advanced our understanding of black holes, holography, and quantum gravity, highlighting multipartite entanglement as a key organizing principle.

[1] N. Iizuka and M. Nishida, Phys. Rev. D **112**, 026011 (2025).

[2] N. Iizuka *et al.*, Phys. Rev. D **112**, 066014 (2025).

[3] N. Iizuka *et al.*, JHEP **10**, 148 (2025).

[4] N. Iizuka and S. Lin, Phys. Rev. D **113**, 026016 (2026).

[5] I. Bena *et al.*, JHEP **12**, 130 (2025).

[6] M. R. Hughes and M. Shigemori, arXiv:2509.19425.

[7] N. Tanahashi *et al.*, JHEP **06**, 214 (2025).

[8] S. Terashima, arXiv:2508.11592.

[9] Y. Nomura and T. Ugajin, JHEP **10**, 166 (2025).

[10] T. Noumi *et al.*, JHEP **08**, 115 (2025).

[11] Y. Abe *et al.*, arXiv:2505.23483.

[12] I. Dey, *et al.*, arXiv:2501.03148 [hep-th].

[13] O. Parrikar and S. K. Sake, arXiv:2505.19231 [hep-th].

[14] R. Auzzi *et al.*, JHEP **06**, 201 (2025).

[15] W. Mao, *et al.*, arXiv:2512.18781 [hep-th].

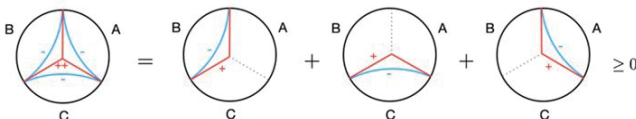
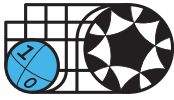


Figure: A schematic illustration of the geometric decomposition demonstrating that the tripartite component of genuine multi-entropy, $GM^{(a=3)}$, is always non-negative.



Understanding quantum black holes through the study of artificial quantum matter

[Principal Investigator]

Masaki Tezuka (Kyoto University)

[Co-Investigator]

Shuta Nakajima (QIQB, Osaka University)

Eriko Kaminishi (Keio University)

Takashi Mori (Keio University)

Daisuke Yamamoto (Nihon University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Kazuya Yamamoto (QIQB, Osaka University)

Giacomo Marmorini (Nihon University)

[Research Collaborators]

Ippei Danshita (Kindai University)

Kazuaki Takasan (University of Tokyo)

Kazuki Yamamoto (Institute of Science Tokyo)

Tanay Pathak (Kyoto University)

Abhik Kumar Saha (Kyoto University)

Juan Pablo Bayona Pena (University of Bologna / INFN)

Following the laboratory relocation, Nakajima and Yamashita completed the reconstruction of the cold atom experiment setup and performed a major upgrade of the experimental system this fiscal year. This upgrade was performed for the purpose of measuring out-of-time-ordered correlator (OTOC) and observing measurement-induced phase transitions. In order to perform OTOC measurements, it is essential to control the Hubbard Hamiltonian of the optical lattice system with both rapidity and precision. A high-speed PZT-driving mirror system was constructed and tested, enabling the realization of a Floquet optical lattice capable of sign reversal of the hopping term t . In addition, a Feshbach coil system was developed for high-speed control of the interatomic interaction U , including its sign. It was confirmed that both systems demonstrated satisfactory performance. These components have been integrated into an ultracold lithium (Li) atom system, in conjunction with a high-resolution optical system whose resolution was verified in a test setup and an EMCCD camera. Experiments are currently underway to demonstrate Hamiltonian control in the quantum gas within the optical lattice. Furthermore, a spatial light modulator employing a digital micromirror device (DMD) was introduced, thereby enabling local manipulation of the quantum gas in the optical lattice and construction of arbitrary optical potential for atoms. The experimental system demonstrated its capacity to produce arbitrary light patterns (see Fig.1). Concurrently, we are developing an optical system for D1 gray molasses cooling of Li atoms, with the objective of enhancing cooling efficiency. The results of this study will be presented at the JPS spring meeting [1].

Bayona-Pena and Mori, in collaboration with Ryo Hanai (Science Tokyo) and Hisao Hayakawa (YITP), considered topological phase transitions of open quantum systems, captured by open boundary conditioned invariants, and showed that they can be observed in the dynamics of a system under periodic boundary conditions, even in the presence of non-Hermitian/Liouillian skin effect, from the quench dynamics of entanglement spectrum in a periodic open quantum fermionic system [2].

Tatsuhiko Shirai (Waseda University) and Mori

developed a method for calculating non-order correlation functions using the discrete truncated Wigner approximation (DTWA), revealing how quantum information spreads in spin systems with long-range interactions [3]. Furthermore, Teruhiro Ikeuchi (Keio University) and Mori calculated a rigorous error upper bound for the universal Lindblad equation, which is used to calculate the time evolution of quantum many-body systems with dissipation throughout the system, and clarified the conditions under which errors are suppressed for long times in the thermodynamic limit [4].

In topological data analysis to characterize complex dynamics, Kaminishi and collaborators developed a method to reinterpret the dynamics as the eigenvalue spectrum of a supersymmetric Hamiltonian. Quantum phase measurements on an IBM quantum computer demonstrated a correspondence between the minimum of the spectral gap and the onset of chaos [5].

The Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model, with four (or more) fermions with all-to-all interactions, is expensive to implement on a quantum computer. Tezuka and collaborators proposed several models that exhibit strong chaos while reducing this cost [6].

Shunichiro Kinoshita (B03), Keiju Murata (B03), and Yamamoto considered a spin system corresponding to the field theory in an inflationary universe, and showed that when a single spin interacting with this system is introduced as an Unruh-DeWitt detector, the response asymptotically approaches that of the field theory as the size of the spin system increases [7].

Daichi Imagawa (Nihon University), Keiju Murata (B03) and Yamamoto conducted a numerical study of the localized spacetime response in quantum critical spin systems, where a particle appears to suddenly teleport to the other side of the periodic system, inspired by the AdS/CFT correspondence. This phenomenon appears only when the perturbation applied to the system is coupled to an operator corresponding to the local density field in the continuum limit, providing stronger evidence for the correspondence with AdS spacetime physics [8].

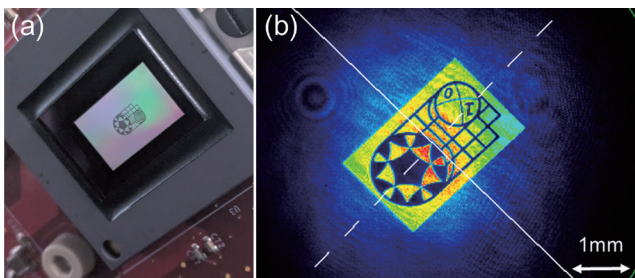
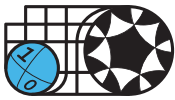


Fig.1 : (a) DMD and (b) an optical pattern generated by the DMD.

- [1] K. Yamashita and S. Nakajima, JPS 2026 Spring Meeting.
- [2] P. Bayona-Pena, R. Hanai, T. Mori, and H. Hayakawa, Phys. Rev. B **111**, L140303 (2025).
- [3] T. Shirai and T. Mori, Phys. Rev. B **112**, 014309 (2025).
- [4] T. Ikeuchi and T. Mori, Phys. Rev. B **112**, 094309 (2025).
- [5] H. Yamauchi, S. Kanno, Y. Sato, H. Tezuka, Y. Shimada, E. Kaminishi, N. Yamamoto, arXiv:2511.23169.
- [6] M. Hanada, S. van Leuven, O. Oktay, and M. Tezuka, Phys. Rev. E **113**, 014217 (2026).
- [7] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii, Phys. Rev. Research **7**, 043135 (2025).
- [8] D. Imagawa, K. Murata, D. Yamamoto, Phys. Rev. B **113**, 014311 (2026).



Black Holes and Singularities from Quantum Information

[Principal Investigator]

Akihiro Ishibashi (Nagoya University)

[Co-Investigator]

Kengo Maeda (Shibaura Institute of Technology)

Keiju Murata (Nihon University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Yoshinori Matsuo (Nagoya University)

[Research Collaborators]

Takashi Okamura (Kwansei Gakuin University)

Gen Kimura (Shibaura Institute of Technology)

Toshifumi Noumi (Tokyo University)

Shunichiro Kinoshita (Kanazawa Institute of Technology)

[Post-doc Fellows]

Hiroki Matsui (Nihon University)

Black holes are extreme structures that connect spacetime dynamics with quantum information, from their formation by gravitational collapse to their eventual evaporation via Hawking radiation. The purpose of B03 group is to clarify the basic mathematical properties of such quantum black holes.

Ishibashi, Maeda, and Okamura analyzed the stability of flat spacetime and de Sitter spacetime by using the “Holographic Semiclassical Einstein Equations” based on the gauge/gravity duality. The results showed that even the maximally symmetric---thus most fundamental---spacetimes can become unstable due to strong quantum effects [1]. Maeda applied this holographic semiclassical method to rotating black holes in 3 and 5 dimensions, and revealed that the Cauchy horizon inside such a black hole can generally be quantum mechanically unstable. This result tested the cosmic censorship conjecture from a quantum mechanical perspective [2]. Maeda and Yoshida in C03 group and a collaborator studied the fact that in gravitational theories involving higher order derivatives, wormholes cannot in general be built perturbatively from extremal black holes, thereby placing a strong constraint on wormhole formation within higher curvature gravity theories [3]. Ishibashi and collaborators applied methods from their study of asymptotic safe quantum black holes to Bianchi-I anisotropic cosmological models. They found, in particular, that quantum effects in general accelerate the isotropization of the universe. This provides important insights into the “Cosmological No-Hair Theorem” within the framework of asymptotically safe quantum gravity [4]. In order to explore the possibility of a phase transition from a black hole into a bound state of fundamental strings as a final stage of black hole evaporation, Matsuo, Ishibashi, and a collaborator studied a self-gravitating string configuration and its quantum effects in two-dimensional dilaton gravity which accounts for gravitational backreaction [5]. In particular, they obtained an analytic expression of the solution describing such a string configuration and studied in detail the geometric aspects of the solution.

Ishibashi and Maeda, along with Iizuka in B01, Nishioka in D01, and a collaborator, published a comprehensive

review, which explores the relationship between quantum information and the various “energy conditions” that govern how gravity behaves, both in classical and quantum regimes [6].

In B03, we also conduct research with the aim of elucidating the relationship between condensed matter systems and black hole physics. Murata, in collaboration with Yamamoto in B02, and other collaborators, investigated the correspondence between spin systems and quantum field theories in curved spacetime [7, 8]. We demonstrated that by appropriately introducing spacetime-dependent magnetic fields and nearest-neighbor exchange couplings in spin systems, quantum field theories in arbitrarily curved (1+1)-dimensional spacetimes can be realized in the continuum limit. This study suggests the possibility of experimentally investigating thermal properties characteristic of black hole spacetimes and inflationary spacetimes by using spin systems, and provides a new research framework connecting gravity and condensed matter physics.

In addition, Murata and Matsui, together with collaborators, analyzed quantum gravitational effects inside black holes [9]. We performed a canonical quantization based on the Kantowski-Sachs metric describing the black hole interior and solved the Wheeler-DeWitt (WDW) equation with a Gaussian wave packet as the initial condition. We found that when quantum effects are small, the wave packet dynamics closely reproduce the corresponding classical solutions. In contrast, in parameter regimes where quantum effects become significant, the time evolution of the wave packet deviates substantially from the classical behavior (see Figure). Furthermore, we showed that these quantum effects lead to an extension of the time required for singularity formation inside black holes. This work constitutes an important result that concretely elucidates the impact of quantum gravitational effects on the black hole singularity problem.

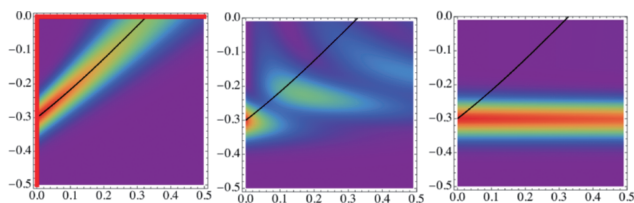


Fig: From left to right, as the surface gravity increases, the wave packet (colored distribution) deviates from the classical trajectory.

- [1] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, JHEP 04 (2025)167
- [2] R. Hamaki and K. Maeda, Phys. Rev. D 111 (2025) 8, 084021
- [3] T. Kanai, K. Maeda, and D. Yoshida, 2511.21017 [gr-qc]
- [4] C-M. Chen, A. Ishibashi, R. Mandal, and N. Ohta, Class. Quant. Grav. 42 (2025) 235008
- [5] A. Ishibashi, Y. Matsuo, A. Tanaka, 2506.09586 [hep-th]
- [6] N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda, H. Nakayama, T. Nishioka, 2509.01286 [hep-th]
- [7] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto and R. Yoshii, Phys. Rev. Res. 7 (2025), 023197
- [8] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto and R. Yoshii, Phys. Rev. Res. 7 (2025), 043135
- [9] T. Chiba, H. Matsui and K. Murata, Phys. Rev. D 113, 026017



Quantum Cosmology from Quantum Information

[Principal Investigator]

Tadashi Takayanagi (YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yasuaki Hikida (YITP, Kyoto University)
 Kazumi Okuyama (Shinshu University)
 Yasuhiro Sekino (Takushoku University)
 Shigeki Sugimoto (Kyoto University)

[International Research Collaborators]

Shinsei Ryu (Princeton U., USA)
 Beni Yoshida (Perimeter Institute, Canada)
 Pawel Caputa (Stockholm University, Sweden)
 Ali Mollabashi (IPM Institute for Research in Fundamental Sciences, Iran)
 Shan-Ming Ruan (Peking University)
 Zixia Wei (Harvard University, USA)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Jonathan Harper (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Kanato Goto (YITP, Kyoto U./Princeton U. USA)
 Tomotaka Kitamura (Rikkyo University)
 Shoichiro Miyashita (Waseda University)
 Kazuhiro Sakai (Meiji Gakuin University)
 Takahiro Uetoko (National Institute of Technology, Kagawa College)
 Masamichi Miyaji (Riken, iTHEMS)
 Kenta Suzuki (The University of Tokyo)
 Takato Mori (Rikkyo University)
 Yuya Kusuki (Kyushu University)
 Yasuaki Nakayama (NTT Communication Science Laboratories)
 Peng-Xiang Hao (Tsinghua University/YITP, Kyoto U.)
 Masashi Kawahira (Kobe University)

The purpose of C01 group is to develop the fundamental principle of gauge/gravity duality to understand the origin of the Universe in the light of deep relationships between holographic principle and quantum information.

Harper, Kawamoto, Maeda, Nakamura and Takayanagi in C01 provided a quantum information interpretation of traversable wormhole spacetimes [1, 2]. It is known that traversable wormholes can be realized in gauge-gravity dualities by introducing an interaction between two conformal field theories. They found that this phenomenon arises from time-like entanglement. To show this, they introduced a generalized density matrix and clarified that its non-Hermitian property is equivalent to possessing time-like entanglement. Furthermore, they provided a new construction of traversable wormholes: a pair of non-unitary conformal field theories can be dual to a traversable wormhole without any interaction.

Harper, Mollabashi, Tasuki and Takayanagi in C01 numerically analyzed a quantity called multi-entropy, which measures multi-partite quantum entanglement [3]. They revealed characteristic behaviors at quantum critical points in one dimension for the Ising model and the free scalar field. For the Ising model, the results agree with formulas predicted by analytical calculations of two-dimensional conformal field theory. However, for the free scalar field, they found that non-compactness leads to a novel exception to these formulas.

Fujiki, Kanda, Kohara, and Takayanagi in C01 constructed and classified a new class of models for quantum gravity in low-dimensional universes using the AdS/BCFT correspondence, a holographic principle for conformal field theories on spaces with boundaries [4]. This model has the advantage of realizing dynamically expanding and contracting universes by introducing scalar fields on end-of-the-world branes appearing in the AdS/BCFT correspondence, and allows quantum gravity effects to be analyzed in classical gravity theory using the holographic principle.

Okuyama in C01 conducted research on various aspects of the double-scaled SYK model (DSSYK). In particular, in [5], he studied how to obtain de Sitter spacetime as a holographic dual of DSSYK. By zooming in on the high-energy edge of the eigenvalue spectrum of DSSYK, it was found that de Sitter JT gravity is obtained from DSSYK.

Hikida and Tsuda in C01, together with Harris and Schomerus at DESY, studied D-branes in three-dimensional anti-de Sitter backgrounds and their interpretation in the holographic dual theory. By analyzing the symmetric product orbifold model dual to the superstring theory, they classified interfaces corresponding to D-branes [6]. They explicitly constructed the boundary states describing these interfaces and confirmed that these states reproduce the partition functions of the dual open strings stretched between the D-branes.

Sekino in C01 studied a holographic dual description for de Sitter space in terms of SYK model defined on the event horizon of an observer. In paper [7] with Susskind, they showed that the double-scaled limit, which corresponds to the flat-space limit in the bulk, exists in SYK. They also clarified the conditions for the existence of the flat-space limit in QCD. In paper [8] with Miyashita and Susskind, they proposed that the region near the horizon can be described by the 't Hooft model ((1+1)-dimensional QCD).

Sugimoto in C01 analyzed the energy-momentum tensor of a system with a baryon in QCD using the holographic principle, and determined the distributions of energy density, pressure, and shear forces etc. inside the nucleon [9]. He also proposed a method for precisely analyzing quantum anomalies in QCD using the holographic principle, and demonstrated that the mixed anomalies associated with discrete axial symmetry and flavor symmetry in QCD are correctly reproduced [10].

- [1] J. Harper, T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, arXiv: 2512.13800.
- [2] T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura and T. Takayanagi, JHEP 04 (2025) 086.
- [3] J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and K. Tasuki, Phys. Rev. Res. 7, 043194 (2025).
- [4] K. Fujiki, H. Kanda, M. Kohara and T. Takayanagi, JHEP 03 (2025) 135.
- [5] K. Okuyama, JHEP 08 (2025) 181.
- [6] S. Harris, Y. Hikida, V. Schomerus and T. Tsuda, JHEP 12 (2025) 114.
- [7] Y. Sekino and L. Susskind, JHEP 10 (2025) 137.
- [8] S. Miyashita, Y. Sekino and L. Susskind, JHEP 11 (2025) 107.
- [9] S. Sugimoto and T. Tsukamoto, PTEP 2025, 8 (2025) 083B01.
- [10] M. Akhond and S. Sugimoto, arXiv: 2503.19492.



Quantum cosmology experiments in quantum Hall systems

[Principal Investigator]

Go Yusa (Department of Physics, Tohoku University)

[Co-Investigator]

Naokazu Shibata (Tohoku University)

Masahiro Hotta (Tohoku University)

Kazuya Yonekura (Tohoku University)

[International Research Collaborators]

Vladimir Umansky (Weizmann Institute of Science)

[Research Collaborators]

Takaaki Mano (National Institute for Materials Science)

Kazuhiro Yamamoto (Department of Physics, Kyushu University)

Yasusada Nambu (Department of Physics, Nagoya University)

Chisa Hotta (Graduate School of Arts and Sciences, University of Tokyo)

Kazunori Nakayama (Department of Physics, Tohoku University)

Koji Yamaguchi (Department of Informatics, Kyushu University)

Kenichi Sasaki (NTT Basic Research Laboratories)

Kazuaki Takasan (Department of Physics, University of Tokyo)

Yuki Sugiyama (The Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo)

J. Nicholas Moore (Department of Physics, Tohoku University)

In this research, we aim to realize, within a laboratory-scale condensed-matter experimental system, a physical platform that is theoretically equivalent to the “quantum universe” appearing in the very early stages of cosmogenesis, thereby providing a rich experimental “playground” for testing fundamental theories. Our stage is the quantum Hall system that emerges under ultralow temperatures and strong magnetic fields. The study is based on the theoretical framework that excitations propagating along the sample edge are mathematically equivalent to a (1+1)-dimensional quantum universe.

Up to last year, using our original space–time-resolved stroboscopic photoluminescence (PL) microscope (temporal resolution of 300 ps and spatial resolution better than 1 μm), we succeeded in controlling the propagation paths of edge excitations and directly observing their propagation across multiple paths. These results were summarized in a paper [1]. However, this device did not realize a uniformly and isotropically expanding (1+1)-dimensional system. Therefore, in the current year, we optimized the semiconductor process and successfully developed new devices in which the edge paths can expand and contract concentrically [2].

In parallel, we have also pursued an understanding of excitation phenomena in the bulk region. The direct observation of bulk excitations, which had been underway since the previous year, was compiled into a paper based on a bulk magnetoplasmon picture [3]. Furthermore, by integrating the insights gained from both bulk and edge excitations, we newly designed and fabricated a device with a “wormhole”-like shape in an effective (1+1)-d spacetime. Experiments using this device yielded data suggesting that a signal excited at point A reached point B earlier by shortcutting through the bulk region, rather than following the original path along the edge [4].

In addition to these optical approaches, this year we also

promoted electrical measurements using a dilution refrigerator with a base temperature of 5 mK, which had suffered from persistent technical issues since its installation. Conventionally, edge excitations were detected by measuring the time evolution of the voltage at electrodes capacitively coupled to the edge. However, a longstanding problem with this method was that electromagnetic noise, referred to as “crosstalk,” significantly exceeded the intrinsic signal strength of the edge excitations. Now, we successfully eliminated this crosstalk by measuring current instead of voltage [5]. Overcoming the crosstalk issues represents the completion of an essential technical foundation for the precise experimental verification of quantum-universe physics.

Hotta, together with the experimental group, co-authored papers on edge currents and bulk excitations in quantum Hall systems [3], and also discovered new quantum properties of quantum batteries by using quantum energy teleportation [6].

Shibata et al. performed precise quantum many-body calculations to realize the creation and trapping of anyons. Since anyons appear as elementary excitations in quantum liquid states such as the Laughlin state, it is necessary to accurately treat the effects of Coulomb interactions and quantum fluctuations. In this study, they investigated the structure of the local potential required for the creation and trapping of anyons using the density matrix renormalization group (DMRG) method, which can precisely calculate quantum effects. As a result, they found that it is possible to switch between fractional and integer charge excitations simply by changing the spatial structure of the potential.

Yonekura and collaborators have been studying branes in heterotic string theories. Branes are very important dynamical objects in string theory. In a previous work of Yonekura and collaborators, a new type of branes has been found in heterotic string theories. In [7], the detailed properties of the branes have been studied. In particular, the worldsheet CFTs describing the near horizon limit have been derived, and their nontrivial topological properties are revealed. In [8], black brane solutions corresponding to the branes have been obtained by numerical calculations. They are shown to have expected properties such as the existence of the throat region.

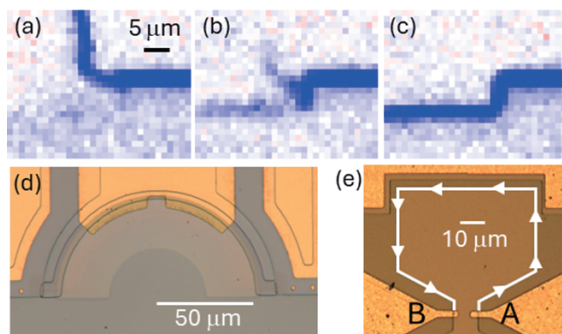


Fig. 1 (a–c) Edge excitations observed using stroboscopic PL. The blue regions correspond to edge excitations of the $\nu=1/3$ fractional quantum Hall state (temperature 40 mK, magnetic field 14 T). (d, e) Optical micrographs of (d) a device that enables uniform and isotropic expansion and contraction of the effective (1+1)d spacetime, and (e) a device featuring a wormhole-like structure.

[1] Y. Jeong *et al.*, in preparation.

[2] Y. Jeong *et al.*, A17, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[3] Q. France *et al.*, Phys. Rev. Lett. **135**, 066203 (2025).

[4] T. Karezaki *et al.*, A23, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[5] K. Sugizaki *et al.*, A22, 5th ExU Annual Meeting (2025).

[6] M. Hotta and K. Ikeda, Quan. Inf. Proc. **24**, 186 (2025).

[7] J. Kaidi, Y. Tachikawa, K. Yonekura, JHEP 03 (2025) 211.

[8] M. Fukuda, S. Kobayashi, K. Watanabe, K. Yonekura, JHEP 05 (2025) 043.



Gravitation and cosmology: principles and applications based on quantum information

[Principal Investigator]

Tetsuya Shiromizu (Nagoya University)

[Co-Investigator]

Keisuke Izumi (Nagoya University)

Tsutomu Kobayashi (Rikkyo University)

Masato Nozawa (Osaka Institute of Technology)

Norihiro Tanahashi (Kyoto University)

Hiroataka Yoshino (Osaka Metropolitan University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Daisuke Yoshida (Nagoya University)

[Research Collaborators]

Sumio Yamada (Gakushuin University)

In this research group, we address fundamental problems concerning the origin of the Universe and its accelerated expansion, as well as the internal structure of black holes, from both higher-dimensional and four-dimensional spacetime perspectives.

Tanahashi developed a versatile numerical analysis framework based on machine learning, applicable to a wide range of problems in string theory and gravitational theory [1]. In addition, in collaboration with Terashima (Group B01) and others, he studied a method for analysing AdS black hole spacetimes using wave packets in boundary conformal field theories (CFTs) [2].

Through joint work with students from Groups C01 and B03, Yoshida theoretically formulated the formation process of charged wormholes within the framework of general relativity [3].

Izumi and Yoshida, together with a student from Group B03, constructed exact solutions describing static and regular multiple wormholes supported by a phantom scalar field with negative energy, using the gravitational soliton formalism [4].

From the viewpoint of solution generation, Nozawa focused on Benenti-type metrics, in which the geodesic equations are separable, and developed a general theory of Kerr–Schild transformations. This led to the successful construction of new asymptotically AdS charged rotating black hole solutions in $N=2$ supergravity [5].

Kobayashi analysed non-linear structure formation in the effective field theory of dark energy using spherically symmetric collapse models, and clarified the dependence of the dark matter halo number density on the parameters of the effective field theory [6].

Yoshino carried out a mathematical classification of the

global structure of spacetimes describing evaporating regular black holes under extremely general assumptions in the limit approaching extremal black holes, demonstrating that the information loss problem may be resolved in certain cases [7].

Shiromizu, Izumi, and Yoshino reformulated gravitational probe surfaces—previously defined only on special time-slicing hypersurfaces—using geometric quantities associated with null geodesic congruence, with the aim of extending the formulation to more general situations. They further succeeded in deriving quasi-local inequalities for the size of regions foliated by such gravitational probe surfaces [8].

In the current fiscal year, we organised the international workshop “*Nagoya Workshop on General Relativity*” at Nagoya University from 26 to 28 January 2026 (59 participants), and the domestic workshop “*The Third Workshop on General Relativity and Geometry*” on 16–17 March (72 participants). The former brought together a focused group of core researchers in general relativity and was designed to be complementary to “*The 34th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*”, held in the previous week (nearly 300 participants), to which Group B03 and our group also contributed organisationally. Distinguished researchers, including Professor Emparan (University of Barcelona), who participated in several events within this research area, and Professor Hosoya, an advisory member of the project, attended the meeting, making it a fitting culmination of this group’s activities. The latter workshop saw a larger number of participants from the mathematics community than from physics, and is expected to stimulate new directions through interdisciplinary exchange. In particular, the meeting provided a strong indication that mathematical studies of the Ryu–Takayanagi surfaces and their extensions—key elements of this research area—are likely to develop further in the near future.

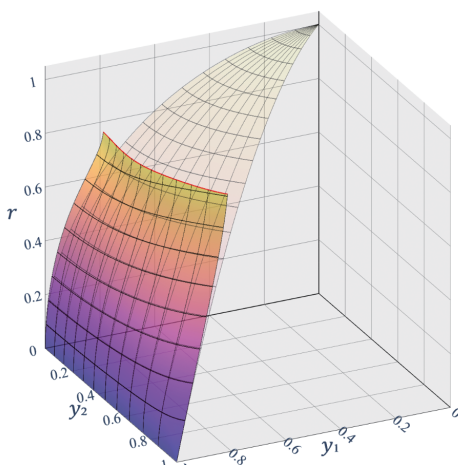


Figure: An example of a minimal surface in AdS spacetime obtained via a machine-learning-based approach.

- [1] K. Hashimoto, K. Kyo, M. Murata, G. Ogiwara, N. Tanahashi, *Mach. Learn.: Sci. Technol.* **7** 015013
- [2] N. Tanahashi, S. Terashima, S. Yoshikawa, arXiv:2601.04647
- [3] Y. Koga, R. Maeda, D. Saito, K. Uemichi and D. Yoshida, arXiv:2505.20040
- [4] Y. Makita, K. Izumi, D. Yoshida and K. Uemichi, *Class. Quant. Grav.* **42**, no.17, 175024 (2025)
- [5] M. Nozawa, T. Torii, arXiv:2510.06561
- [6] T. Takadera, T. Hiramatsu, T. Kobayashi, *JCAP* **07** 006 (2025)
- [7] K. Sueto, H. Yoshino, arXiv:2508.21315
- [8] T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, Y. Tomikawa, *PTEP* **2026** 013E01 (2026)



Quantum information theoretic approach to the dynamics of quantum field theory

[Principal Investigator]

Tatsuma Nishioka (University of Osaka)

[Co-Investigators]

Masazumi Honda (iTHEMS, RIKEN)
Etsuko Itou (YITP, Kyoto University)
Yutaka Matsuo (University of Tokyo)
Takuya Okuda (University of Tokyo)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Dongsheng Ge (University of Osaka)
Pratik Nandy (iTHEMS, RIKEN)

[Research Collaborators]

Akira Matsumoto (Osaka Metropolitan University)
Kazunobu Maruyoshi (Seikei University)
Lento Nagano (ICEPP, University of Tokyo)
Ryo Suzuki (Southeast University)
Masahito Yamazaki (University of Tokyo)
Yutaka Yoshida (Meiji Gakuin University)
Atis Yosprakob (YITP, Kyoto University)

Nishioka (PI), in collaboration with graduate students Kawabata and Ando, conducted research on the gauging of Z_N symmetries in Narain-type 2D Conformal Field Theory (CFT) [1]. In particular, they developed a method to systematically construct parafermionic CFTs with fractional spins by applying this gauging technique to bosonic CFTs, which can be constructed from general quantum error-correcting codes known as subsystem codes.

Furthermore, Nishioka and a graduate student Nakayama constructed a new holographic model dual to CFTs with defects of arbitrary dimensions [2]. This model serves as an extension of the gravity dual for CFTs with boundaries (the AdS/BCFT model), where “End of the World” branes are introduced within the AdS spacetime to correspond to the defect operators. They further investigated renormalization group (RG) flows localized on these defect operators within the model and demonstrated the validity of the defect C-theorem, which is conjectured to hold in CFTs with defect operators.

Ito (Co-I) advanced research on field theory in the Hamiltonian formulation for 2+1D gauge theories, building upon her work on 1+1D systems from the previous year. Specifically, she worked on the construction of gauge-invariant Projected Entangled Pair States (Gauged PEPS) using tensor networks and performed numerical analysis of topological entanglement in Z_2 gauge theory. Additionally, in collaboration with Nakayama, Matsumoto, and Onagi from YITP, she conducted numerical studies on scale-invariant RG fixed points that do not possess conformal invariance [3].

Okuda (Co-I) analyzed the mechanism by which fermionic CFTs emerge by imposing topological boundary conditions on abelian Chern-Simons theory, in a joint paper [4] with PI Nishioka and graduate students Kawabata and Yahagi. This construction includes fermionic extensions of code CFTs. Furthermore, based on Chern-Simons theory corresponding to the supersymmetric vertex operator algebras studied by Johnson-Freyd, he classified the fermionic topological boundary conditions that lead to supersymmetric CFTs. Additionally, the paper [5], co-authored with research collaborators Maruyoshi, Pedersen, Suzuki, Yamazaki, and Yoshida, was awarded the Journal of Physics A Best Paper Prize 2025.

Honda (Co-I) conducted broad research across quantum field theory (QFT), quantum computing, condensed matter physics, and quantum gravity. Regarding QFT, he performed numerical simulations of 4D SU(2) Yang-Mills theory with research collaborators Matsumoto and Yosprakob, obtaining positive results for hypotheses concerning the phase structure [6, 7]. He also conducted

research on methods for calculating energy spectra in gauge theories using quantum computing [8]. In the field of condensed matter, he proposed a new QFT using the Godbillon-Vey invariant related to foliated structures with graduate students Nakanishi and Shimamori and discussed its connection to fractons [9]. In quantum gravity research, he applied Picard-Lefschetz theory to Jackiw-Teitelboim gravity and discussed its quantum cosmological aspects [10]. Related to these studies, he delivered 12 invited talks at workshops, organized 9 workshops, engaged in one outreach activity, and authored two review articles.

Matsuo (Co-I) continued research related to the non-abelian Hall effect and non-abelian anyons. While he had proposed a new Calogero model describing solvable systems in the previous year and investigated its spectrum, this year he focused on deriving generalizations of the related spin Calogero-Sutherland solvable models and clarifying the infinite-dimensional symmetry (Affine Yangian symmetry) structures that describe these systems. He also introduced string-theoretic perspectives, such as the formulation of the proposed solvable models using branes.

In addition, the D01 group hosted the school “New computational methods in quantum field theory 2026” from January 26th to 28th at the RIKEN Wako Campus. This event was held in English and attracted approximately 40 participants from across Japan. We invited three lecturers: Junichi Haruna (University of Osaka), Yoshimasa Hidaka (YITP, Kyoto University), and Tokiro Numasawa (University of Tokyo), who provided introductory lectures on quantum error correction, the Hamiltonian formulation of lattice gauge theory, and open quantum systems. The school also featured talks by seven participants, leading to highly vibrant discussions. Through the continuous organization of this school over the past five years, we have felt a tangible increase in the number of students and young researchers entering this field. Although the “Extreme Universe” project concludes this fiscal year, we hope to continue organizing such schools and workshops in other forms in the future.

- [1] K. Ando *et al.*, JHEP 02, 058 (2026).
- [2] H. Nakayama and T. Nishioka, Accepted in JHEP (2026).
- [3] E. Itou *et al.*, Phys. Rev. B **112**, 134409 (2025).
- [4] K. Kawabata *et al.*, JHEP 05, 105 (2025).
- [5] K. Maruyoshi *et al.*, J. Phys. A **56**, 165301 (2023).
- [6] M. Hirasawa *et al.*, JHEP 05, 009 (2025).
- [7] M. Hirasawa *et al.*, PoS LATTICE2024, 407 (2025).
- [8] D. Ghim and M. Honda, PoS QCHSC24, 265 (2025).
- [9] H. Ebisu *et al.*, Phys. Rev. D **112**, 025010 (2025).
- [10] M. Honda *et al.*, Phys. Rev. D **111**, 12 (2025).



Tensor Networks and Quantum Many-Body Systems from Quantum Information

[Principal Investigator]

Kouichi Okunishi (Osaka Metropolitan University)

[Co-Investigator]

Hiroshi Ueda (QIQB, The University of Osaka)

Hosho Katsura (The University of Tokyo)

Chisa Hotta (The University of Tokyo)

Kenji Harada (Kyoto University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Soshun Ozaki (The University of Tokyo)

Kohei Fukai (The University of Tokyo)

[Research Collaborators]

Tomotoshi Nishino (Kobe University)

Toshiya Hikihara (Gumma University)

Tsuyoshi Okubo (The University of Tokyo)

Shunsuke Furuya (Saitama Medical University)

Atis Yosprakob (Kyoto University)

About five years ago, the D02 project was launched to clarify the theoretical backgrounds of the tensor network (TN) method to develop its practical algorithms and the mathematical foundations of quantum many-body dynamics from quantum information perspectives, enabling the advancement of interdisciplinary research in ExU collaboration. Here is our final report. This academic year began with significant changes: the principal investigator, Okunishi, and former ExU PD Yosprakob left Niigata University, while Fukai joined the University of Tokyo as a new ExU PD. However, we made steady yet significant progress toward our original goals and also achieved novel developments in integrability and condensed-matter systems in a short period. Below, we summarize highlights of our main results.

Regarding the relationship between TN and holography, we already established the holographic renormalization-group structure for Bethe-lattice-type TNs, and moreover, the nontrivial scaling dimensions arising from the loop network structure of the hyperbolic-lattice Ising model. This year, we have elucidated interesting holographic structures embedded in the dynamical mean-field theory developed for strongly correlated electron systems, in which quantum fluctuations are appropriately accounted for via a Green's function formulation [1]. From the quantum computing and TN viewpoints, the ExU PD Yosprakob and Okunishi constructed a density-matrix renormalization group (DMRG) algorithm that incorporates Clifford gates into fermionic systems [2]. Moreover, Ueda et al developed a numerical library, **TNOpt**, to make the previously developed TN structural optimization more accessible to nonexperts [3]. Also, they established a benchmarking procedure to investigate quantum-circuit fidelity at a scale of ~ 100 qubits, including non-Clifford gates, by updating the **QS3** package, specialized for dilute-particle systems, to support random quantum-circuit benchmark calculations [4]. These developments hold promise for future applications. Meanwhile, Harada and collaborators proposed a generative model that approximates data distributions using the tree TN by restricting tensor components to be nonnegative, enabling the statistical interpretation of the TN structure, in contrast to usual Boltzmann machines [5]. Then, combining a minimum mutual information principle with structural optimization of the tree TN, they have successfully extracted statistical causal relations inherent in data as network structures. This result enables a physical interpretation of machine learning via TNs.

From the perspective of quantum many-body dynamics, Katsura and collaborators showed that a class of asymptotic

quantum many-body scar states exhibiting non-thermal dynamics can be systematically described as low-energy excitations of an effective Hamiltonian whose ground states are quantum many-body scar states [6]. Moreover, the ExU PD Fukai, in collaboration with Katsura, established the integrability of the disorder-free p-body Majorana SYK model, which can be attributed to that of the quantum Ising chain [7]. They also succeeded in deriving the exact full energy eigenvalues and eigenstates of the disorder-free p-body Majorana SYK model. Meanwhile, Hotta and collaborators developed a new matrix-product-state method to compute the real-time evolution of a bulk quantum many-body system by attaching physical baths to both ends of the system to approximate an infinite system [8]. In addition, Ozaki and Hotta investigated the dynamical behavior of a real material, LiVS₂, which involves competing dynamical lattice distortions and orbital order, and then found a novel order-formation mechanism associated with a characteristic dynamics distinct from the conventional nucleation processes based on the thermal state. Indeed, they clarified that such novel order formation occurs via a partial order originating from the different symmetry from the thermal equilibrium state, and characterized its underlying energy landscape [9].

Finally, looking back over the past five years, research in D02 has progressed broadly as planned. Moreover, we identified several seeds for next-step studies in quantum many-body physics and guidelines for further interdisciplinary collaborations. Such progress was made possible by the many members of the Extreme Universe collaboration. Here, I want to express my gratitude to the many people who supported and cooperated with us.

[1] K. Okunishi and A. Koga, arXiv: 2509.19704

[2] A. Yosprakob, W.-L. Tu, T. Okubo, K. Okunishi, and D. Kim, arXiv: 2510.04164

[3] R. Watanabe, H. Manabe, T. Hikihara and H. Ueda, Comput. Phys. Commun. **319**, 109918 (2026).

[4] T. Kaneda, K. Fujii, and H. Ueda, arXiv:2505.10820 (PRR, in press).

[5] Katsuya O. Akamatsu, K. Harada, T. Ohkubo and N. Kawashima, arXiv:2504.06722. (MLST, in press)

[6] M. Kunimi, Y. Kato and H. Katsura, Phys. Rev. Res. **7**, 043107 (2025).

[7] K. Fukai and H. Katsura, arXiv:2511.03460.

[8] S. Shimozone and C. Hotta, arXiv:2512.07923.

[9] in preparation



Award Report

2025 Nishina Memorial Prize

Prof. Hal Tasaki (Gakushuin University)

Prof. Masaki Oshikawa (Institute for Solid State Physics, University of Tokyo, Extreme Universe E02)

In 2025, Prof. Hal Tasaki (Faculty of Science, Gakushuin University) and Prof. Masaki Oshikawa (ISSP, University of Tokyo), who is a member of the E02 group in the Extreme Universe collaboration, were awarded the Nishina Memorial Prize. The award recognizes their “Theoretical and mathematical studies of quantum spin systems,” encompassing continuous and significant contributions to the theoretical and mathematical understanding of the Haldane conjecture regarding the ground state of the $S=1$ antiferromagnetic Heisenberg chain, such as the mathematically rigorous analysis and characterization of the Affleck–Kennedy–Lieb–Tasaki (AKLT) model, widely known today, the elucidation of hidden topological order through the Kennedy–Tasaki (KT) transformation and its generalizations, clarification of the relationship between the Haldane state and symmetry-protected topological (SPT) order, and the generalization of consistency conditions via the Lieb–Schultz–Mattis theorem to higher-dimensional spaces. These are not only fundamental to our current understanding of quantum many-body systems but also demonstrate how the theoretical landscape, initiated by the Haldane conjecture, has broadened into various fields of theoretical physics, including quantum information, tensor networks, SPT order, and topological field theory. Also, this award reminds us of how attractive the developments of physics linked to the Haldane system are. It is widely accepted by many that these two researchers truly deserve this recognition for their essential contributions.

In the Extreme Universe collaboration, we had invited Profs. Tasaki and Oshikawa to our online colloquium on February 6 last year, where they shared with us the grand story spanning over 30 years, from the early to the contemporary research on the Haldane system. My motivation for arranging this ExU colloquium was to hear about the passing of their common collaborator, Ian Affleck, around September 2024, which sounded to me like a memorial milestone in the field. Then I believed it would be meaningful to organize a seminar reviewing the development of theoretical physics stemming from the Haldane conjecture. Both professors kindly accepted a somewhat ambitious request to cover a valuable review for younger generations unfamiliar with the original excitement around the Haldane conjecture and their recent cutting-edge studies. Their talks conveyed the dreamlike story of theoretical physics research: starting from a simple yet mysterious phenomenon and evolving into deep, general, broad, and precise theories, which greatly excited audiences of all ages and backgrounds. Also memorable was Prof. Oshikawa’s advice to young researchers during his talk, emphasizing the importance of continuing efforts without being swayed by short-term citation counts, since not all of one’s best work necessarily gains immediate recognition. For instance, his early paper on the generalization of the

KT transformation was published in 1992, but its citations began to rise rapidly after 2010. Of course, it was a significant result from the beginning, but it took nearly 20 years for its usefulness to be widely recognized. In other words, this reflects his foresight in discerning the essence, originality, and continuous deepening of theory, which may be hard to emulate. Again, I am very pleased with their long-standing commitment to the research of quantum spin systems.

Prof. Oshikawa moved to Ohio State University in the United States in March. By the time this article reaches the readers, we will have missed him in Japan; however, the distance on social networks and other online platforms has not changed much. We wish him great success in his new environment.

(Reported by Kouichi Okunishi)

Extreme Universe Collaboration
The 3rd public COLLOQUIUM
February 6th (Thu.) ONLINE
TALK 17:00 - 19:00 (JST)
February 6th (Thu.) 8:00 - 10:00 (UTC)
ONLINE CHAT TIME
19:00 - 20:00 (JST)
Registration required (click HERE)
Extreme Universe, JAPAN
Part I **Prof. Hal Tasaki**
Gakushuin University
Haldane conjecture, valence-bond picture, SPT phases, and all that in quantum spin chains
Part II **Prof. Masaki Oshikawa**
ISSP, The University of Tokyo
Symmetry-Protected Topological phases and Duality
2025
In memory of Prof. Ian Affleck

Fig: Poster for ExU public online colloquium held in February 2025.



Search for toric code phase in quantum matter

[Principal Investigator]

Yuta Mizukami (Department of Physics, Tohoku University)

The purpose of this study was to explore quantum states in real materials that can host elementary excitations serving as information carriers for quantum error-correcting codes. Specifically, we aimed to search for the toric code state, a quantum error-correcting code, not only within theoretical models but also in actual materials. As a state corresponding to the toric code, the so-called A phase of the Kitaev model is known to emerge in the regime where the bond anisotropy of the Kitaev interaction is large. However, experimentally achieving precise control of interaction anisotropy is highly challenging, and realizing the A phase in real materials is therefore generally difficult.

In recent years, the possibility of realizing the A phase has been discussed, and for example, it has been theoretically proposed that a corresponding state can be realized in the Kitaev model under a high magnetic field [1]. In bulk systems below 12 T, our group has previously observed thermally excited states exhibiting a sixfold symmetric magnetic-field angular dependence, which are explained by the B phase realized in the Kitaev model with small interaction anisotropy [2].

In the present study, we performed measurements of the anisotropy of thermal excitations and magnetic excitations in a Kitaev candidate material in high magnetic fields

exceeding 12 T. As a result, we found that above approximately 12 T, the anisotropy of thermal excitations is drastically reduced and the sixfold symmetry almost completely disappears. This indicates a change in the excitation structure in the high-field state. Furthermore, by investigating the angular dependence of magnetic excitations through magnetic torque measurements, we observed a sawtooth-like magnetic-field angular dependence in the low-field magnetic phase, which can be explained by the behavior of magnetic domains. In contrast, in the high-field nonmagnetic phase, the sawtooth-like behavior evolves into a sinusoidal dependence.

The thermal and magnetic behaviors observed in the high-field regime cannot be explained by the B phase of the simple Kitaev model. We performed a thermodynamic analysis of these behaviors and discussed the possibility of a novel quantum state in the high-field regime, including the potential realization of the A phase [3].

[1] M. O. Takahashi *et al.*, Phys. Rev. Res. **3**, 023189 (2021).

[2] O. Tanaka *et al.*, Nat. Phys. **18**, 429–435 (2022); K. Imamura *et al.*, Sci. Adv. **10**, eadk3539 (2024).

[3] R. Ohno *et al.*, in preparation.



Computational quantumness: Analysis of fault-tolerant quantum computation and quantum many-body systems via quantum magic

[Principal Investigator]

Ryuji Takagi (Department of Basic Science, The University of Tokyo)

In this project, we aimed to systematically formulate “quantum magic,” as an essential form of quantum nonclassicality in quantum computation, together with the related notions of non-Cliffordness and non-Gaussianity, within the framework of quantum resource theories. Our goal was to provide quantitative measures, comparison methods, and a clear computational interpretation of these resources. It is well known that quantum circuits composed solely of Clifford gates can be efficiently simulated on classical computers, indicating that quantum superposition and entanglement alone do not guarantee a computational advantage. Quantum magic functions as an element that cannot be generated by Clifford circuits and serves as a key resource for realizing universal quantum computation.

We highlight two main achievements of this research. First, by analyzing the relationship between discrete-variable quantum systems and continuous-variable systems, we clarified a quantitative connection between magic and non-Gaussianity [1]. While it had been recognized that non-Cliffordness defined in discrete systems and non-Gaussianity defined in continuous-variable systems exhibit similar qualitative behavior, their precise quantitative relationship had remained unclear. In this work, we proposed a unified framework that connects magic in qubit

systems and non-Gaussianity in continuous-variable systems via the Gottesman–Kitaev–Preskill (GKP) encoding. This approach extends the concept of quantum magic to a much broader class of quantum systems and establishes a theoretical framework with greater generality and practical relevance than conventional resource theories.

Second, we elucidated the relationship between quantitative measures of non-Gaussianity and the complexity of classical simulation based on them [2]. By extending the resource theory of non-Gaussianity, we introduced measures such as the Gaussian rank and Gaussian extent, and demonstrated that these quantities quantitatively capture the classical simulation cost of non-Gaussian states. This provides a theoretical foundation for comparing and evaluating the nonclassicality of quantum states from the perspective of computational tractability.

Taken together, these results establish magic and non-Gaussianity as well-defined quantum computational resources and offer new analytical tools for understanding resource requirements and fundamental performance limits in quantum computing and quantum simulation.

[1] O. Hahn, G. Ferrini, and R. Takagi, PRX Quantum **6**, 010330 (2025)

[2] O. Hahn, R. Takagi, G. Ferrini, and H. Yamasaki, Quantum **9**, 1881 (2025)



Practical applications of t -designs generation methods in quantum many-body systems

[Principal Investigator]

Masaki Owari (Faculty of Informatics, Shizuoka University)

Random unitary transformations based on t -designs are essential for various tasks in quantum information processing and are also important in the study of quantum many-body systems. However, conventional protocols for generating t -designs are designed for quantum computers and are difficult to implement on quantum many-body systems. In our previous work, we proposed a method to generate t -designs on the entire system by applying random operations only to a small subsystem, using techniques from quantum control theory. In this study, we conducted foundational research toward the practical implementation of the t -design generation method developed in the previous work, as well as implementation schemes for variational quantum algorithms using indirect control based on this method.

Near-term intermediate-scale quantum (NISQ) devices, for which practical realization is currently being explored, are highly susceptible to noise, and the implementation of quantum error correction is challenging. Consequently, quantum error mitigation (QEM) techniques, which suppress errors in computational results through post-processing of measurement outcomes and are applicable to NISQ devices, have recently attracted significant attention. On the other hand, the implementation scheme for

variational quantum algorithms using indirect control proposed in our previous project suggests that noise can be reduced by decreasing the number of qubits directly accessed from outside the system. Therefore, combining these two approaches is expected to further mitigate the effects of noise. In this work, we investigated the implementation of quantum error mitigation in indirectly controlled VQE for an XY spin chain and demonstrated that error mitigation via the zero-noise extrapolation method is possible by allowing specific Y -gate operations.

To evaluate the practicality of the t -design generation method on quantum many-body systems proposed in the previous project, it is important to demonstrate that this approach is advantageous in terms of speed. To this end, it is necessary to determine the minimum time required to implement a target unitary transformation by controlling a quantum many-body system, namely, the minimum control time. In this study, we proposed a new method for determining the minimum control time by applying the Baker–Campbell–Hausdorff formula. Furthermore, by combining this new method with the approach proposed by Lee *et al.*, we showed that it is possible to compute an upper bound on the minimum average control time required to achieve t -designs in quantum many-body systems.



Magnetic resonance formation of quantum chaos and order in open quantum many-body systems

[Principal Investigator]

Yasuhiro Shimizu (Department of Physics, Shizuoka University)

Topological order with many-body quantum entanglement emerges on quantum spin liquid and quantum Hall state for condensed matters. We have experimentally explored such materials with nuclear magnetic resonance (NMR) as a site-selective local probe. Quantum spin liquid is found in the presence of strong frustration and spin-orbit coupling. In an anisotropic triangular lattice, the spin correlation is renormalized into one-dimensional chain, giving rise to the Tomonaga-Luttinger liquid behavior. We determine the Luttinger parameter ($K_\sigma \sim 0.5$) from the nuclear spin-lattice relaxation rate $1/T_1$ and the Wilson ratio ($R \sim 2.5$) from the local spin susceptibility, consistent with the theoretical calculation on the one-dimensional antiferromagnetic Heisenberg model [1]. The Luttinger parameter is enhanced for the atomic site sensitive to antiferromagnetic fluctuations toward long-range magnetic order through the Dzyaloshinskii-Moriya interaction. The extremely long coherence time T_2 of the ^{35}Cl nuclear spin (~ 10 ms) allows us to create a discrete time crystal, which is robust against the perturbation of the rf π pulse and the long interaction time, as required for the quantum computation. The similar behavior was observed in a quantum spin liquid state of Kitaev magnet with a honeycomb lattice, where the spin gap opened depending

on the field orientation, as expected for the Majorana fermions.

The quantum Hall effect has been recently observed in the bulk Dirac semimetals with the linear energy dispersion and low density of states. We demonstrated that NMR is useful to determine the location of chemical potential and spin-polarized Landau levels of two-dimensional Dirac fermions under magnetic field [2]. $1/T_1$ decays with the power law of temperature, $\sim T^3$, for an in-plane magnetic field, as expected for spin excitation of Dirac fermions. As the system enters the quantum Hall regime, $1/T_1$ becomes independent of temperature under the out-of-plane field, indicating the condensation of spin excitation into the narrow Landau level under strong spin-orbit coupling. The spin excitation is strongly suppressed by two orders of magnitude when the chemical potential is located between the Landau levels. We also observed an indication of the quantum oscillation in the spin excitation, consistent with that observed in the transport measurement. Further NMR experiments at high magnetic fields and using double resonance will be reported soon.

[1] D. Nguyen *et al.* Phys. Rev. B 111, 064423/1–11 (2025).

[2] M. Kumazaki *et al.* arXiv:2508.07820.



Quantum state tomography of many-body systems in an optical lattice via spiral bases

[Principal Investigator]

Hideki Ozawa (Department of Applied Physics, Waseda University)

In general, for an N-qubit system, it is possible to reconstruct its density matrix if one can measure all many-body correlations up to all combinations of locally different Pauli matrices (quantum state tomography). However, such an observational setup on a locally different basis would require elaborate manipulations at the single qubit level. In addition, the number of such measurements grows exponentially with the size of the system (4^N for N qubits), making it challenging to implement a scalable method. In this research, we aimed at the realization of an efficient quantum state tomography by using laser-cooled neutral atoms.

In the first year, we successfully loaded 171Ytterbium (Yb) atoms into a 3-by-3 tweezer array created by a spatial light modulator and a high-NA objective lens. We also observed the fluorescence of single atoms in the tweezer after inducing light-assisted collision. This means that we laid the foundation for experiments using 171Yb as qubits. 171Yb is one of the most promising candidates for qubits, partly because of its 1/2 nuclear spin and partly because of its long-lived metastable state (3P0), which can be used for spin-resolved imaging. Moreover, theoretical proposals suggest that the telecom band transitions from 3P0 to 3Dx states of Yb can be used for quantum network applications.

The wavelength of the tweezer laser is chosen to be 759 nm, which is magic for the 3P0 state and enables the narrow line transition.

In the second year, we implemented global spin manipulation with a 556 nm laser and observed a narrow line transition from the 1S0 to the 3P0 state with a 578 nm laser. After the nuclear spin is polarized by optical pumping (Qubit initialization), we apply a fast Raman beam that induces Rabi oscillation of 2 MHz between the nuclear spins (X gate). Then we measure one of the spin components destructively by blasting it. Toward non-destructive spin-resolved imaging, we stabilized the frequency of the 578 nm laser, identified the atomic resonance, and observed Rabi oscillations of 50 kHz.

At present, we are preparing the site-addressing beam of 556 nm and 578 nm for local spin manipulation. In addition, we are constructing Raman sideband cooling to improve the excitation probability to the 3P0 state. By implementing these techniques, we will perform and evaluate efficient quantum state tomography.



Entanglement Entropy in Quantum Field Theories with Tensor Renormalization Group

[Principal Investigator]

Yoshinobu Kuramashi (Center for Computational Sciences, University of Tsukuba)

The Tensor Renormalization Group (TRG), which is based on the lagrangian formalism in the Tensor Network (TN) scheme, is a numerical approach to make a high precision analysis of the many body problems with the TN representation. The TRG method has fascinating advantages over the Monte Carlo method: (i) no sign problem and no complex action problem, (ii) logarithmic volume dependence of computational cost, (iii) direct treatment of Grassmann numbers, (iv) direct measurement of the partition function (or density matrix) itself. In our long-term project (not restricted to this proposal) we investigate non-perturbative phenomena in particle physics applying the TRG method to various types of quantum field theories.

The (1+1)-dimensional U(1) gauge-Higgs model with a θ term, whose U(1) gauge action is constrained by the Lüscher's admissibility condition, causes the sign problem as well as the topological freezing problem, which is a kind of the ergodicity problem. We have successfully determined the critical endpoint M_c at $\theta=\pi$ and show that it belongs to the two-dimensional Ising universality class as expected theoretically. This indicates that the TRG method can provide us a simultaneous solution of the sign problem and the topological freezing problem in the Monte Carlo approach [1].

The (3+1)-dimensional cold and dense two-color QCD (QC₂D) in the strong coupling limit serves as a good testbed before exploring the long-term goal of finite density QCD. We have succeeded in clarifying the phase structure of this model at zero temperature limit by calculating the chiral condensate ($\bar{\chi}\chi$), the diquark condensate ($\chi\chi$) and the quark number density (n) as a function of the chemical potential μ (see Fig. 1) [2]. This is the first successful application of the TRG method to a (3+1)-dimensional QCD-like theory and a big step toward the investigation of the phase structure of the (3+1)-dimensional finite density QCD.

[1] S. Akiyama and Y. Kuramashi, JHEP 09, 086 (2024).

[2] Y. Sugimoto, S. Akiyama, and Y. Kuramashi, Phys. Rev. D **113**, 034503 (2026).

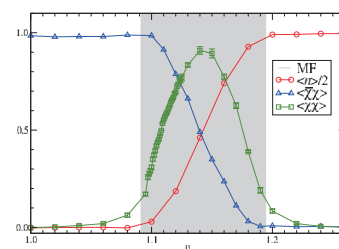


Figure 1: μ dependence of $\langle \bar{\chi}\chi \rangle$, $\langle \chi\chi \rangle$ and $\langle n \rangle$ at quark mass $m=1.0$ with a lattice size of 1024^4 . Vertical gray band denotes the $\langle \chi\chi \rangle \neq 0$ region predicted by the mean field (MF) analysis.



Emergent physics from quantum entanglement

[Principal Investigator]

Tokiro Numasawa (Institute for Solid State Physics, University of Tokyo)

In this project, we have theoretically investigated quantum many-body systems with large quantum entanglement, aiming to elucidate fundamental aspects of quantum gravity and strongly correlated condensed matter systems. In particular, we have obtained results in the following directions: (1) conformal field theories with spacetime modulation and their gravitational duals; (2) bosonization of Fermi liquids and its applications to condensed matter systems and non-critical string theory; and (3) simulation of expanding spacetimes using nonequilibrium quantum Hall systems.

- (1) We studied quantum entanglement in one-dimensional quantum systems with spacetime modulation. In 1+1-dimensional conformal field theory, we analyzed quantum quenches induced by the sine-square deformation (SSD) [1]. Using conformal symmetry, we showed that this quench is equivalent to a local quench, namely the time evolution of a uniform system with a local excitation. We further investigated quantum quenches in more general inhomogeneous Hamiltonians [2], and demonstrated that discontinuous contributions originating from the boundaries arise in such systems. Moreover, we constructed a method to realize effective time-reversal dynamics of inhomogeneous Hamiltonians by employing periodic driving [3].
- (2) In the problem of bosonization of the Fermi surface, we introduced action-angle variables to develop a

systematic analytical framework for two-dimensional Fermi liquids. Using this approach, we constructed a bosonized representation of the electron creation operator and provided a conformal field theory interpretation of Friedel oscillations [4]. We further applied this framework to non-critical M-theory to construct effective field theories [5], and found that the same method can also be applied to deepen the understanding of superstring theory.

- (3) By utilizing nonequilibrium quantum Hall systems, it is possible to simulate conformal field theories in expanding spacetimes. We investigated the bulk properties of quantum Hall systems with expanding edges and discovered that spatial modulation of the expansion rate induces a topological gravitational response in the bulk energy-momentum tensor [6].

- [1] J. Kudler-Flam, M. Nozaki, T. Numasawa, S. Ryu, M. T. Tan, *JHEP* **08** (2024).
- [2] X. Liu, A. McDonald, T. Numasawa, B. Lian, S. Ryu, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 220404 (2025).
- [3] B. Lapierre, T. Numasawa, T. Neupert, S. Ryu, *Phys. Rev. B* **112**, 104317 (2025).
- [4] T. Numasawa, M. Oshikawa, work in progress.
- [5] P. Jefferson, T. Numasawa, work in progress.
- [6] Y. Sugiyama, T. Numasawa, arXiv:2506.20338 [cond-mat.mes-hall]



Dynamics and entanglement in open quantum systems

[Principal Investigator]

Kohei Kawabata (Institute for Solid State Physics, University of Tokyo)

In recent years, there has been growing interest in novel phenomena realized in open quantum systems far from equilibrium, going beyond the traditional framework of physics developed primarily for closed quantum systems at equilibrium. Yet, even fundamental questions in the physics of open quantum systems remain incompletely understood. My overarching aim is to establish new foundations by elucidating the diverse condensed matter phenomena that emerge under nonequilibrium open conditions. In the Extreme Universe project, I have pursued a unified theoretical understanding of open quantum dynamics and entanglement, with the goal of formulating general principles that characterize phases and order in open quantum systems. Over the past two years, our research has achieved the following results.

(I) Quantum entanglement is not only central to quantum information processing but also plays an essential role in characterizing quantum phases. However, the role of entanglement in phases emerging in open quantum systems has remained largely unexplored. We have studied the non-Hermitian five-state Potts model and demonstrated that complex-valued entanglement entropy (or equivalently, pseudo-entropy) exhibits scaling behavior predicted by a nonunitary conformal field theory with a complex central charge [1]. This result provides a concrete and quantitative bridge between non-Hermitian many-body physics and universal data of nonunitary conformal field theory.

(II) Quantum chaos in closed systems underpins quantum statistical mechanics and is also deeply connected to black

hole physics, attracting sustained attention across both condensed matter and high energy communities. By contrast, chaos in open quantum systems is far less understood. We have constructed an effective field-theoretical description based on nonlinear sigma models for non-Hermitian random matrices that capture chaotic behavior in open quantum systems, and classified the associated universality classes across all the 38 symmetry classes [2,3]. This framework offers a systematic route to universal spectral diagnostics beyond Hermitian settings.

(III) Measurement-induced phase transitions have recently emerged as a distinctive class of dynamical phase transitions unique to open quantum systems. However, much of the existing literature is built on case-by-case analyses, and a genuinely universal understanding has remained elusive. For monitored free fermions, we have developed a general theory that describes symmetry and topology within an effective field-theoretical approach, and derived universal stochastic equations governing the resulting nonunitary dynamics [4,5].

- [1] H. Shimizu and K. Kawabata, *Phys. Rev. B* **112**, 085112 (2025).
- [2] A. Kulkarni, K. Kawabata, and S. Ryu, *J. Phys. A* **58**, 225202 (2025).
- [3] Z. Chen, K. Kawabata, A. Kulkarni, and S. Ryu, *Phys. Rev. B* **111**, 054203 (2025).
- [4] Z. Xiao, T. Ohtsuki, and K. Kawabata, *Phys. Rev. Lett.* **134**, 140401 (2025).
- [5] Z. Xiao and K. Kawabata, arXiv:2412.06133.



Theoretical exploration of mixed-state topological phases

[Principal Investigator]

Masaki Oshikawa (Professor, Institute for Solid State Physics, University of Tokyo)

The classification of quantum phases at absolute zero temperature (i.e., in the ground state) has advanced dramatically through the discovery of topological phases and the subsequent development of their theoretical framework. Meanwhile, more general quantum states are mixed states described by density matrices. Therefore, the classification of quantum phases of mixed states has recently become a central issue. For a pure quantum state, symmetry is formulated as the invariance of the state vector under a unitary transformation. For a mixed state, the same unitary transformation can act on a density matrix from the left and from the right. This makes it possible to distinguish and discuss (i) invariance of the density matrix when the unitary acts only on either the left or the right (“strong symmetry”), and (ii) invariance when it acts on both sides simultaneously (“weak symmetry”). A mixed state with the strong symmetry necessarily also has the weak symmetry. In this setting, analogous to the standard concept of spontaneous symmetry breaking, one can consider a phenomenon in which strong symmetry is spontaneously broken down to weak symmetry (Strong-to-Weak Spontaneous Symmetry Breaking, SWSSB).

In this work, from the viewpoint of “purification,” which interprets a density matrix as a state vector in a higher-dimensional Hilbert space, we showed that SWSSB corresponds to a symmetry-protected topological (SPT)

phase in the purified state. In particular, we demonstrated that the Rényi-2 correlation function, which serves as a diagnostic of SWSSB, corresponds to the “strange correlator” in the purified state [1]. In this way, mixed states reveal concepts and phases that do not exist for pure states; at the same time, understanding pure states remains a useful basis for exploring them. In addition, although details are omitted here, we carried out several related studies [2,3].

We also succeeded in evaluating measurement-induced entanglement in one-dimensional quantum critical states, as well as the Stabilizer Rényi Entropy that quantifies such states as a “magic resource” for quantum computation, using boundary conditions of conformal field theory [4,5]. In these studies, the principal investigator’s previous results on conformal field theory played an important role. This research also demonstrates that field-theoretic methods are powerful tools in an emerging area where the statistical mechanics of quantum many-body systems and quantum information theory intersect.

[1] P. Sala *et al.*, Phys. Rev. B **110**, 155150 (2024).

[2] Y. You and M. Oshikawa, Phys. Rev. B **110**, 165160 (2024).

[3] P. Sala *et al.*, arXiv:2506.10076, accepted for publication in Quantum Science and Technology (2026).

[4] M. Hoshino *et al.*, Phys. Rev. B **111**, 155143 (2025).

[5] M. Hoshino *et al.*, Phys. Rev. X **16**, 011037 (2026).



Entanglement in curved spacetimes: application of partner formula

[Principal Investigator]

Yasusada Nambu (Graduate School of Science, Nagoya University)

The partner formula provides a concrete method to determine the spatial “shape” of the mode (the partner mode) that purifies a given mode of interest in a quantum system. In this study, we focus on the structure of quantum entanglement in spacetimes with horizons and on the behavior of the spatial profiles of partner modes obtained from the partner formula, and we address the following issues.

1. Mechanism of information recovery in the moving mirror model [1]

In scenarios where the partner modes of Hawking radiation are attributed to vacuum fluctuations, it has been argued that high-energy burst emissions, which could appear in the final state of the system, can be avoided. On the other hand, it has also been suggested that such burst emissions necessarily accompany the purification of Hawking radiation. To examine this issue, we analyzed the spatial profiles of partner particles based on the partner formula. We show that the burst emission is unrelated to the purification process itself.

2. Upper bound on information content in de Sitter spacetime [2]

It is widely believed that the amount of information that can be stored in a de Sitter universe is bounded by the entropy determined by the area of its horizon. However, it has been suggested that this bound may be violated if the inflationary universe enters an eternal phase. Using the property that, for super-horizon modes in de Sitter spacetime, the entanglement entropy is equivalent to the information entropy, we analyzed this problem within the stochastic approach. We demonstrate that, when appropriately weighted probability distributions are employed, no violation of the entropy bound occurs.

[1] Y. Osawa, K-N Lin, Y. Nambu, M. Hotta, P. Chen

“Final burst of the moving mirror is unrelated to the partner mode of analog Hawking radiation”, Phys. Rev. D **110**, 025023(2024).

[2] H. Tajima and Y. Nambu

“Stochastic inflation and entropy bound in de Sitter spacetime”, Phys. Rev. D **111**, 106009(2025).



Spacetime, unconventionally emergent

[Principal Investigator]

Masataka Watanabe (Department of Physics, The University of Tokyo)

My research during the period focused on the analysis of Quantum Gravity using new universal methods of analysis. In particular, I developed a method of computing physical quantities in Quantum Gravity outside of the usual semi-classical regime where the Newton constant is small, hoping for a better understanding of the truly quantum nature of Quantum Gravity.

Towards this goal, I set out to compute various quantum information theoretic quantities in strongly-coupled conformal field theories in higher dimensions. I also related it to observables in Quantum Gravity outside of the semi-classical regimes using holographic principles. This turned out to be a very non-trivial problem; As is always the case with strongly-coupled theories, computation of physical quantities is difficult.

My main achievement is the development of a new method allowing for such a computation. I used an idea of the effective field theory, in particular a relatively new method called the large charge expansion to compute charge-refined version of the entanglement entropy in three dimensional strongly-coupled conformal field theories with $U(1)$ global symmetry. In particular, I was able to prove that the amount of charged Bell pairs in such conformal field theories asymptotes to a constant in the limit of large

charge. The constant in fact turned out to be universal across a very broad class of (actually infinitely many) conformal field theories. The work constituted the first ever analytic handle towards quantum information theoretic quantities of strongly-coupled, higher dimensional conformal field theories from first principles. I hope the method can be used to study further interesting nature of quantum gravity in future research.

In addition, I focused on realizing Quantum Gravity in real-world systems through the holographic principle. Concretely, I studied a certain system of two-dimensional gravity called Jackiw-Teitelboim (JT) gravity, and a certain deformation thereof. I related them to, perhaps surprisingly, to a system of stochastic process called the ASEP (asymmetric simple exclusion process), and its continuous limit, the KPZ (Kardar—Parisi—Zheng) equation. The result is still at the level of mathematical connections, utilizing the power of underlying quantum group structure in ASEP as well as in the deformation of JT gravity. It is under current investigation whether the correspondence comes from a much deeper connections which result in a novel approach to Quantum Gravity.



Extreme Universe from the infrared limit of interacting fields in curved space

[Principal Investigator]

Takahiro Tanaka (Department of Physics, Kyoto University)

This research aims to advance our understanding of infrared (IR) contributions in quantum field theory on curved spacetime, with particular emphasis on the treatment of IR divergences in cosmological perturbation theory and on the role of field interactions in black hole evaporation. By focusing on the physical implications of IR behavior, this project seeks to extract robust insights into fundamental phenomena in curved spacetime.

As major research achievements, we developed extended theoretical frameworks to describe the nonlinear, large-scale evolution of perturbations in the early universe. Specifically, we generalized the δN formalism—originally formulated for scalar perturbations—to include scalar, vector, and tensor modes, and called it the generalized δN ($g\delta N$) formalism. Applying this formalism to models with $U(1)$ gauge fields, we demonstrated its practical implementation and derived new results. We also extended the δN formalism to incorporate gradient corrections, which are typically neglected but become important in scenarios beyond slow-roll inflation, such as ultra-slow-roll models. By assigning a homogeneous spatial curvature to each FLRW patch, this extension enables an accurate description of the evolution of the comoving curvature perturbation. These developments contribute to a deeper understanding

of nonlinear cosmological perturbation theory.

In parallel, we investigated Hawking radiation in interacting quantum field theories. While previous studies suggested the presence of IR divergences in ϕ^4 theory, we demonstrated that such divergences are absent when the problem is formulated appropriately, and we further explored the emergence of nonperturbative effects in strongly coupled regimes.

In addition, we developed a fully quantum-mechanical formulation of black hole superradiance by canonically quantizing a massive scalar field on a Kerr black hole background. This approach shows that the growth of boson clouds is independent of the initial quantum state and provides a unified description of superradiance, Hawking radiation, and the adiabatic backreaction on black hole spin.



The quantum nature of gravitons generated by Hawking radiation

[Principal Investigator]

Sugumi Kanno (Department of Physics, Kyushu University)

To investigate the quantum nature of gravitons in strong gravitational fields, we formulated gravitational waves emitted by binary black holes within a quantum-mechanical framework. Gravitational waves have traditionally been treated as classical waves; however, since quantum mechanics is the fundamental framework for describing nature, gravitational waves should also be described in quantum terms.

In this study, applying techniques from quantum optics, we represented gravitational waves from binary black holes as coherent states - the quantum states closest to classical waves. We then analyzed higher-order effects of the interaction Hamiltonian and showed that gravitational waves can, in principle, generate squeezed states that do not appear in a purely classical treatment. Using the gravitational-wave data first detected by LIGO on September 14, 2015, we estimated the degree of squeezing and found that the squeezing parameter is extremely small, of order 10^{-4} [1].

On the other hand, if the Universe underwent inflation in the past, primordial gravitational waves produced during inflation would be in a strongly squeezed state. When such primordial gravitational waves interact with a binary black hole system, the resulting gravitational waves become co-

herent-squeezed states. Our estimates show that, in this case, the squeezing parameter can become as large as about 30 at maximum [2]. In quantum optics, coherent-squeezed states exhibit sub-Poissonian statistics, and their quantumness can be detected through intensity-correlation measurements using a Hanbury-Brown-Twiss (HBT) interferometer. We therefore evaluated the frequency range in which such quantum gravitational waves would appear and showed that it lies within the frequency band where LIGO-Virgo-KAGRA could test their quantum nature [2]. If intensity correlations become measurable in the future - for example, with an HBT interferometer [3] - this would not only enable tests of the quantum nature of gravitational waves, but could also provide strong evidence for inflationary theory and potentially lead to the detection of the as-yet-undiscovered graviton.

- [1] Sugumi Kanno, Jiro Soda and Akira Taniguchi, *Phys. Rev. Lett.* **136**, 061404 (2026).
- [2] Sugumi Kanno, Jiro Soda and Akira Taniguchi, *arXiv:2510.23326 [gr-qc]*
- [3] Sugumi Kanno, Hiroki Matsui and Shinji Mukohyama, *Phys. Rev. D* **111**, 104077 (2025).



Investigation of topological phases and transitions via quantum control, quantum entanglement, and duality

[Principal Investigator]

Shunsuke Furukawa (Faculty of Science and Technology, Keio University)

Since the concept of symmetry-protected topological (SPT) phases was proposed approximately 15 years ago, general theories regarding their characterization and classification have advanced significantly. For bosonic (spin) systems, detailed classification tables have been established based on the projective representations of symmetry groups and group cohomology. However, it remains a largely unexplored frontier to determine in which regions various SPT phases emerge within specific systems, how they compete with ordered phases, and what types of phase transitions they undergo.

To investigate the competition between SPT and ordered phases, we focused on duality as a guiding principle. In spin-1/2 ladder systems, there exist two types of dualities that swap the staggered components of spins on the rungs with their chirality. These dualities serve to exchange two-body interactions with four-body chirality interactions. We considered a ladder model incorporating these two types of interactions and determined the ground-state phase diagram through analytical calculations—combining effective field theory with duality transformations—and numerical simulations, such as the density matrix renormalization group [1]. As a result, we obtained a rich phase diagram where the Haldane (topological) phase, the rung

singlet (trivial) phase, the dimer-ordered phase, and the scalar chiral ordered phase compete in a complex manner. Furthermore, we revealed that the Haldane and rung-singlet phases are subdivided into multiple regions where correlations of different degrees of freedom—such as spin, dimer, and chirality—become dominant.

Incorporating concepts from quantum many-body physics into quantum information processing protocols is expected to lead to new methods for multi-qubit control. As an example, we worked on extending entanglement swapping—a key concept in quantum communication—to quantum many-body states. Specifically, for two sets of spin-ladder states (defined on legs 1 & 2 and legs 3 & 4, respectively), performing repeated Bell measurements and post-selection between legs 2 and 3 results in the formation of a new spin-ladder state on legs 1 and 4. In other words, the measurement rearranges the entanglement between the legs. By using various SPT and trivial phases as the initial states, we demonstrated through matrix product state representations and field theory that the resulting spin-ladder state is determined by topological composition rules.

- [1] M. Fontaine and S. Furukawa, *J. Phys. Soc. Jpn.* **93**, 124710 (2024).



Quantum Universe and Singularity from Quantum Information

[Principal Investigator]

Kotaro Tamaoka (Department of Physics, Nihon University)

In this research, motivated by the holographic principle (the AdS/CFT correspondence), we studied various problems related to black hole interiors from the perspective of quantum information theory.

First, in order to investigate which quantum information measures can capture the presence of curvature singularities inside black holes, we focused on timelike entanglement entropy [1]. We showed that, in black hole spacetimes with curvature singularities, analytically continued minimal surfaces approach the vicinity of the singularity, causing the timelike entanglement to respond sensitively to its presence [2]. Furthermore, we demonstrated that in certain setups multiple complex saddle points contribute simultaneously, providing explicit examples in which the conventional assumption of a single dominant saddle point in holographic analyses breaks down.

Based on these insights, we next carried out a detailed analysis of the quantum state dual to the special extremal slice that appears inside black holes [3]. We rigorously showed that this state is an absolutely maximally entangled (AME) state, exhibiting maximal entanglement for any bipartition, by demonstrating that the holographic n -th Rényi entropy is independent of the Rényi index n [4]. Such a state can be well approximated by a certain class of random states in the semiclassical limit. We further clarified

that the Hilbert space associated with the black hole interior naturally acquires an effectively large dimension that exceeds the degrees of freedom of the boundary theory. This feature originates from the fact that the timelike coordinate outside the black hole becomes a spacelike one inside the horizon, implying that the dual theory necessarily describes an infinite-volume system. As a result, we were able to provide concrete gravitational support for recent theoretical frameworks that describe black hole interiors as non-isometric quantum error-correcting codes [5].

As a more recent development, we have also investigated the multipartite entanglement structure of such black hole interior states, using multi-entropy [6] as a quantitative measure of multipartite entanglement. We found that both exterior and interior black hole states can be well approximated by Haar-random states at the level of multipartite entanglement [7].

[1] K. Doi *et al.*, Phys.Rev.Lett. **130**, 031601 (2023).

[2] T. Anegawa and K. Tamaoka, JHEP 10, 182 (2024).

[3] T. Hartman, and J. Maldacena, JHEP 05, 014 (2013).

[4] T. Anegawa and K. Tamaoka, Phys.Rev.Lett. **135**, 261601 (2025).

[5] C. Akers *et al.*, JHEP 06, 155 (2024).

[6] A. Gadde *et al.*, Phys.Rev.D **106**, 126001 (2022).

[7] T. Anegawa, S. Suzuki and K. Tamaoka, [arXiv:2512.21037 [hep-th]].



Tensor network study of quantum spin liquids in nonequilibrium systems

[Principal Investigator]

Ryui Kaneko (Department of Engineering and Applied Sciences, Sophia University)

During the two years of the publicly funded research project, we elucidated numerous ground states and quantum state dynamics of strongly entangled quantum many-body systems using numerical methods based on tensor networks. Here, we highlight four selected achievements:

- (1) Neural network quantum states allow for describing states whose entanglement follows a volume-law scaling. They are well-suited for representing a broader class of quantum states compared to tensor network states. However, due to the enormous number of parameters, optimization is challenging and prone to getting trapped in local minima. It is crucial to optimize from good initial wave functions. We proposed a method for constructing such initial states from tensor decomposed matrix product states [1].
- (2) Using tensor network methods, we investigated the ground state of the square-lattice SU(4) Heisenberg model under controlled spatial anisotropy of interactions. Calculations using infinite projected entangled pair states (iPEPS) revealed a first-order transition from an SU(4) singlet state to a state where Néel order and Valence Bond Crystal order coexist [2]. Since it is easier to measure the growth of spin correlations of SU(N) Heisenberg models using ultracold atoms in

optical lattices when N is sufficiently large, we anticipate experimental observation of such a phase transition.

- (3) Motivated by experimental observations of entanglement dynamics of ultracold atoms in optical lattices, we analytically derived the time evolution of entanglement following a quench from a charge-density-wave state to a non-interacting bosonic system [3]. However, computing matrix permanents requires exponential time cost, limiting calculations to about 50 sites. By evaluating permanents through random sampling, we enabled computations for systems with over 100 sites [4].
- (4) Inspired by digital quantum simulation experiments using Rydberg atom arrays to realize quantum spin liquids in the Kitaev honeycomb model, we investigated magnetism during the time evolution of an antiferromagnetic state under the Kitaev honeycomb Hamiltonian using iPEPS. We found that magnetization exhibits a monotonic decrease over time scales on the order of the inverse interaction strength.

[1] R. Kaneko and S. Goto, Phys. Rev. B **112**, 155163 (2025).

[2] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A **110**, 023326 (2024).

[3] D. Kagamihara *et al.*, Phys. Rev. A **107**, 033305 (2023).

[4] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A **111**, 032412 (2025).



Novel magnetic phenomena in frustrated random spin systems via large scale computations and real material data

[Principal Investigator]

Tokuro Shimokawa (Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University)

Quantum entanglement is an indispensable concept for the development of quantum technologies that may support future society. From the perspective of condensed-matter physics, an important role is to elucidate what kinds of entanglement are embedded in the diverse quantum states realized in materials. In this research, we have focused on experimentally accessible entanglement measures that have been established through recent advances in quantum information, and we have promoted studies by combining large-scale numerical computations with experimental data from real materials.

More specifically, we investigated the $S = 1/2$ triangular-lattice candidate materials YbZnGaO_4 , $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$, and KYbSe_2 . While a quantum spin-liquid state has been anticipated for YbZnGaO_4 and $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$, earlier studies suggested that randomness-induced states may also emerge; thus, methods to verify whether a genuine spin liquid is realized have been strongly sought. In addition, although KYbSe_2 exhibits long-range order at ultralow temperatures, its dynamical structure factor has been reported to show nontrivial quantum-critical behavior, calling for a solid theoretical underpinning of its origin.

To address these issues, we quantified multipartite entanglement using the quantum Fisher information (QFI). Spe-

cifically, by choosing the Fourier components of spin operators as observables and evaluating QFI in a form directly linked to the dynamical structure factor, we constructed an experimentally accessible indicator of many-body entanglement. Large-scale computations on Fugaku revealed that the temperature scaling of QFI differs qualitatively between quantum spin-liquid states and random-singlet states in $S = 1/2$ triangular-lattice magnets. Furthermore, we succeeded in reproducing numerically the experimentally reported temperature scaling of QFI for all three materials, thereby strongly supporting the realization of a quantum spin-liquid state in YbZnGaO_4 and $\text{YbZn}_2\text{GaO}_5$. For KYbSe_2 , we also reproduced the quantum-critical exponent appearing in the dynamical structure factor, providing a theoretical basis for understanding the quantum criticality. On the other hand, for more strongly frustrated quantum systems, indicators based solely on conventional spin correlations may not be sufficient to characterize the relevant quantum states. We are currently working to extend entanglement-detection frameworks so that they remain compatible with experimental observables while being applicable to a broader class of quantum states.



New Development of Lattice QCD in Hamiltonian Formalism

[Principal Investigator]

Yoshimasa Hidaka (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

The ultimate goal of this study is to understand quantum chromodynamics (QCD) in dense hadronic matter and in nonequilibrium systems. QCD under extreme conditions plays a crucial role in understanding the evolution of the early universe, high-energy heavy-ion collisions, and the internal structure of neutron stars. However, for systems involving finite density and real-time dynamics, conventional lattice QCD calculations have faced fundamental difficulties due to the sign problem. In this work, we address this issue by focusing on gauge theories formulated in the Hamiltonian formulation as an alternative theoretical approach.

In this study, we start from topological quantum field theory and derive dual descriptions of gauge theories based on the choice of basis in the corresponding Hilbert space. We focus on gauge-invariant fundamental operators, namely Wilson loops, which are one-dimensional objects, and Gukov–Witten operators, which are codimension-two objects, and construct the theory based on the algebraic structure generated by these operators. We show that the gauge-invariant Hilbert space of lattice gauge theory can be understood as a space obtained by introducing defects into a topological quantum field theory and imposing boundary conditions such that Gukov–Witten operators can terminate

on these defects.

We demonstrate that there are two natural choices of basis for this Hilbert space: one based on networks of Wilson loop operators and the other based on networks of Gukov–Witten operators, and that these two descriptions are dual to each other. When the former basis is chosen, the conventional lattice gauge theory is recovered, in particular leading to the Hamiltonian lattice gauge theory formulated by Kogut and Susskind. When the latter basis is chosen, one obtains a gauge theory coupled to matter fields defined on a dual lattice, with conjugacy classes serving as labels for the connections. This duality can be regarded as a generalization of the Kramers–Wannier duality, well known for Abelian groups, to the case of non-Abelian gauge groups.

The results obtained in this work provide a theoretical framework for reinterpreting lattice gauge theory from a topological perspective. Future directions include extending the present formulation to higher dimensions and applying the dual descriptions developed here to finite-density and nonequilibrium systems, with the aim of achieving a non-perturbative understanding of QCD under extreme conditions.



Quantum black strings in particle physics models

[Principal Investigator]

Yuta Hamada (High Energy Accelerator Research Organization)

It is widely supported that exact global symmetries are not allowed in quantum gravity, since they conflict with considerations of black-hole evaporation. The cobordism conjecture provides a mathematical framework to formalize this idea: if one computes an appropriate cobordism group after fixing additional structures such as a spin structure and finds it to be nontrivial, then the theory would contain sectors that cannot be connected by continuous deformations, effectively behaving as if it possessed a global symmetry. The conjecture therefore posits that there should exist branes whose presence trivializes the relevant cobordism groups. In this sense, cobordism serves as a tool to investigate what kinds of branes must exist in a consistent theory of quantum gravity.

Relatedly, our results are as follows. In Refs. [1,3] we systematically extracted and classified non-supersymmetric branes of supersymmetric heterotic string theory in nine and eight dimensions. First, we identify the disconnected components of the spacetime gauge group by using outer automorphisms associated with the charge lattice of the theory. From this, and guided by the cobordism conjecture, we identify the non-supersymmetric codimension-two branes that are predicted to exist. This analysis also amounts to classifying the points of maximal gauge

enhancement in the non-supersymmetric E8 heterotic string theory.

In addition, in Ref. [2] we construct, within the Standard Model of particle physics, a string-like object predicted by the cobordism conjecture as an explicit solution of the gravitational field equations. This object is characterized by a monodromy that imposes periodic boundary conditions for fermions. A crucial ingredient in constructing the gravitational solution is the presence of Casimir energy from Standard Model particles. The resulting black string solution can be interpreted as an object supported by this Casimir energy, and we also evaluate its tension and Hawking temperature. As future work, we plan to analyze the stability of the black string solution and to pursue the explicit construction of non-supersymmetric brane solutions in heterotic string theory.

[1] Yuta Hamada, Arata Ishige, JHEP 01(2025)141

[2] Yu Hamada, Yuta Hamada, Hayate Kimura, Phys.Rev.D 111(2025)12

[3] Yuta Hamada, Arata Ishige, Yuichi Koga, arXiv: 2505.15144.



Measuring Quantum Entanglement of Many-Body States in a Cold-atom Quantum Simulator

[Principal Investigator]

Seiji Sugawa (Department of Basic Science, The University of Tokyo)

In this research project, we are developing a programmable cold-atom quantum simulator with the primary goal of experimentally elucidating the entanglement structure inherent in quantum many-body systems. Specifically, we aim to establish and implement measurement protocols capable of extracting key information, such as entanglement spectra and entanglement entropy, directly from physical systems. By utilizing these measurements, we seek to probe topological ordered phases, verify scaling laws in quantum critical phenomena, and characterize quantum phases that defy description by conventional order parameters.

So far, we have made the following progress in developing a quantum platform that enables large-scale, high-precision atomic control, as well as in establishing unitary operation techniques for single-atom qubits.

Firstly, regarding the construction of the quantum platform, we have designed and built a high-numerical-aperture optical system exhibiting near diffraction-limited performance to generate defect-free single cold-atom arrays. By imprinting phase patterns onto the spatial mode of the laser using a spatial light modulator, we successfully generated arbitrary optical arrangement patterns. Furthermore, by introducing a high-power near-infrared fiber laser and manipulating its beam deflection via a two-dimensional acousto-optic deflector, we have realized large-scale, dynamically controllable two-dimensional

atomic arrangement patterns.

Secondly, regarding quantum control techniques for single atoms, we have developed a method to perform robust local quantum operations for single atoms. The approach utilizes an acousto-optic deflector to rapidly transport single atoms by microscopic distances (approximately one micron). By applying Raman transition laser pulses before and after this displacement under uniform laser irradiation, arbitrary quantum control can be imparted to individual atomic qubits. This design effectively resolves issues such as crosstalk, which is often a challenge in conventional individual addressing, thereby enabling robust quantum operations. In addition, we have developed a concrete control sequence to experimentally implement measurement on Rényi entanglement entropy utilizing the aforementioned atomic control technique. Furthermore, we evaluated the measurement costs for the longitudinal-field quantum Ising model using a random measurement protocol, which significantly reduces overhead compared to conventional full quantum state tomography, and estimated the feasible system size.

These achievements constitute essential foundation required to construct quantum many-body systems via a large-scale programmable cold-atom simulator and to experimentally clarify their entanglement structures.



Quantum entanglement in topological quantum spin liquids

[Principal Investigator]

Shota Suetsugu (Department of Applied Physics, The University of Tokyo)

In this project, we investigated exotic quantum many-body states emerging from strong quantum fluctuations and geometric frustration in kagome antiferromagnets (AFMs), with a particular focus on quantum spin liquids and magnetization plateau states. The spin-1/2 kagome Heisenberg antiferromagnet is widely believed to host highly entangled quantum spin liquid states and quantum magnetization plateau states. However, the exact nature of these ground states has remained largely elusive. To address these long-standing issues, we focused on $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ (YCOB), a recently discovered kagome AFM candidate that consists of a two-dimensional perfect kagome lattice of Cu^{2+} ions ($S = 1/2$). We performed a comprehensive experimental study combining high-field magnetization measurements, magnetic torque measurements, specific heat measurements, and magnetocaloric effect measurements.

High-field magnetization measurements up to 57 T revealed clear magnetization plateaus at 1/3 and 1/9 of the saturation moment of Cu^{2+} ions. In particular, we observed a clear 1/9 magnetization plateau, whose existence had been theoretically discussed but had not been experimentally verified in any insulating spin-1/2 quantum antiferromagnet. The temperature dependence of the magnetization in these plateau regions provides clear evidence for the formation of a spin gap. These results establish YCOB as an ideal platform for realizing and exploring magnetization plateau states in kagome AFMs.

Furthermore, ultra-sensitive magnetic torque measurements performed in the low-temperature and low-field regime revealed that the intrinsic magnetic susceptibility arising from the kagome layers remains nearly temperature-independent down to the lowest measured temperature of 160 mK. This behavior implies that the spin excitations in the zero-field quantum spin liquid state are either gapless or characterized by an extremely small spin gap, less than approximately 1/500 of the dominant exchange interaction energy scale. These findings provide crucial insights into the nature of the zero-field ground state of the kagome AFMs.

High-field magnetocaloric effect measurements performed in magnetic fields up to approximately 60 T revealed clear entropy reductions associated with the 1/9 and 1/3 magnetization plateaus. These thermodynamic signatures further support the formation of spin gaps in these plateau states, indicating a reconstruction of the quantum many-body ground state driven by magnetic-field-induced quantum phase transitions.

These results provide decisive experimental insights into both zero-field quantum spin liquid states and field-induced magnetization plateau states in kagome AFMs. This work significantly advances experimental studies of quantum entanglement in strongly correlated quantum materials.

[1] S. Suetsugu et al., Phys. Rev. Lett. 132, 226701 (2024).

[2] S. Suetsugu et al., arXiv:2407.16208 (2024).



High acceleration field generation by short focused laser wake field acceleration to investigate the Unruh effect

[Principal Investigator]

Kotaro Kondo (Kansai Institute for Photon Science, National Institutes for Quantum Science and Technology)

Even when a quantum field is in its vacuum state as seen by an inertial observer, an uniformly accelerated observer perceives a thermal bath with a temperature proportional to the acceleration. This is an effect known as the Unruh effect, which is an observer-dependent phenomena predicted by quantum field theory. The Unruh effect observed in an accelerated frame is deeply connected to Hawking radiation in a gravitational field by the equivalence principle. Consequently, experimental investigation of the Unruh effect and its associated quantum entanglement structure is of great interest from the perspectives of quantum gravity and quantum information, as it may provide valuable insights into the black hole information paradox. However, the Unruh effect generally requires extremely high accelerations, making its experimental verification challenging with conventional approaches, including particle accelerators using oscillating radio frequency fields. In this study, we propose a novel method for realizing high-acceleration fields by employing a tightly focused laser optical system, which enables significantly enhanced local field intensities and, consequently, much higher accelerations than achievable with conventional techniques.

Recent studies have shown that the use of the tightly focused laser optical systems based on realistic high intensity lasers, whose performance have significantly advanced in recent years, enables the realization of acceleration fields exceeding 10 TV/m, a regime in which experimental verification of the Unruh effect becomes increasingly feasible.

These results are shown based on particle-in-cell simulations in laser-plasma interactions.

However, the experimental evaluation of such extremely high acceleration fields faces significant challenges, including the requirements for a highly stable and advanced driving laser and an ultrashort-pulse probe. To address these issues, we have introduced an image-relay optical system using large achromatic lenses into the high-intensity laser facility J-KAREN-P at KPSI, QST. This upgrade has enabled us to maintain both the stability and high spatial quality of the laser beam while simultaneously increasing the delivered laser energy by up to approximately 60% compared to previous operational conditions. At present, we are developing ultrashort-pulse probe schemes utilizing this upgraded laser system, aiming toward precise evaluation of high-acceleration fields.

On the other hand, experimental verification of the Unruh effect requires elucidation of the nonlocal quantum entanglement structure in the quantum vacuum state. For this purpose, a quantum field-theoretic approach in curved spacetime is expected to be particularly effective. We have therefore initiated collaborations with other members of the “Extreme Universe” project, focusing on global aspects of accelerated electron trajectories and related observables, in order to clarify the associated quantum entanglement structure. Based on these theoretical insights, we plan to advance the experimental verification of the Unruh effect in future studies.



● The 7th ExU School & The 4th Young Researchers' Workshop of the ExU Collaboration

30 June - 4 July 2025, KYUKAMURA IRAGO

We held the 7th ExU school and the 4th young researchers' workshop of the ExU Collaboration. This year, we used a residential facility, providing an environment in which young researchers could interact closely with one another. For the school, we invited four project members as lecturers: Tokuro Shimokawa (OIST, Group E02), Ryuji Takagi (The University of Tokyo, Group E01), Daisuke Yoshida (Nagoya University, Group C03), and Masataka Watanabe (The University of Tokyo, Group E02). The lectures were intentionally not delivered online. By limiting participation to students and postdoctoral researchers, we aimed to create an atmosphere where basic questions could be asked freely and to provide an opportunity for young researchers to learn the fundamentals of other fields at an appropriate level. As a result, active and intensive discussions took place between participants and lecturers. In addition to the four lecturers, approximately 70 young researchers participated. Each lecturer gave two one-hour lectures, and all lectures were delivered in English.

Tokuro Shimokawa (OIST) gave a lecture titled "Frustrated Magnetism: From Fundamentals to Frontiers," covering both basic concepts and recent progress in frustrated magnets and quantum spin liquids. In the first half, he introduced the historical background of magnetism and spin models, and explained the concept of frustration and its consequences in an accessible manner. In the second half, he focused on quantum spin liquids emerging from strong quantum fluctuations, presenting recent theoretical and experimental developments, as well as currently open questions in the field.

Ryuji Takagi (University of Tokyo) gave a lecture titled "Introduction to Quantum Resource Theories," covering quantum resource theories from fundamentals to applications. The lecture began with a review of quantum states, quantum channels, and entropies, introducing entanglement as a resource and explaining its quantification using quantum relative entropy. The discussion then moved to quantum thermodynamics, covering thermo-majorization, state transformation conditions, work extraction, and formation cost. Finally, the theory of "magic" as a resource in quantum computation was introduced, including magic

state distillation and the optimality of T-gate synthesis, illustrating how resource theories can be applied across various areas in quantum information.

Daisuke Yoshida (Nagoya University) gave a lecture titled "Introduction to the Causal Structure of Spacetime," which mainly focused on how to understand the causal structure of spacetime using Penrose diagrams. In the first half, he explained the concept of causality with examples from elementary physics and special relativity. In the second half, he outlined how to draw and interpret Penrose diagrams, which are useful tools for understanding the causal structure of certain spacetimes. Finally, by carefully examining the Penrose diagram of a dynamical black hole spacetime as an example, we came to understand the area theorem, which states that the area of a black hole's event horizon cannot decrease.

Masataka Watanabe (University of Tokyo) gave a lecture titled "Entanglement Entropy in Field Theory" which is about the fundamentals of entanglement entropy (EE) in field theory. In the first half of the lecture, he began with an introduction to EE in spin systems and explained the expression for Renyi entropy using path integrals. In the latter half, he primarily explained the properties and calculation methods of EE in two-dimensional CFT. Specifically, after introducing conformal symmetry and the RG flow in field theory, he presented the proof of the c-theorem in the end.

The 4th young researchers' workshop of the ExU, held alongside the School, aimed to facilitate interaction among young researchers from different fields and to provide opportunities for initiating interdisciplinary collaborative research. Approximately 70 participants attended, of whom around 40 gave oral presentations. In addition to the presentations, active exchanges took place during lunch and dinner, as well as during the school banquet.

Finally, Keisuke Izumi (Representative of the organizer, C03) delivered a closing summary, marking the successful conclusion of the 7th ExU School & the 4th young researchers' workshop of the ExU Collaboration to a close. (Reported by Keisuke Izumi)

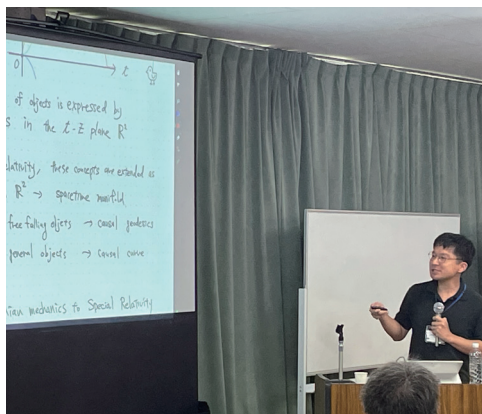


Photo1: Lecture by Daisuke Yoshida

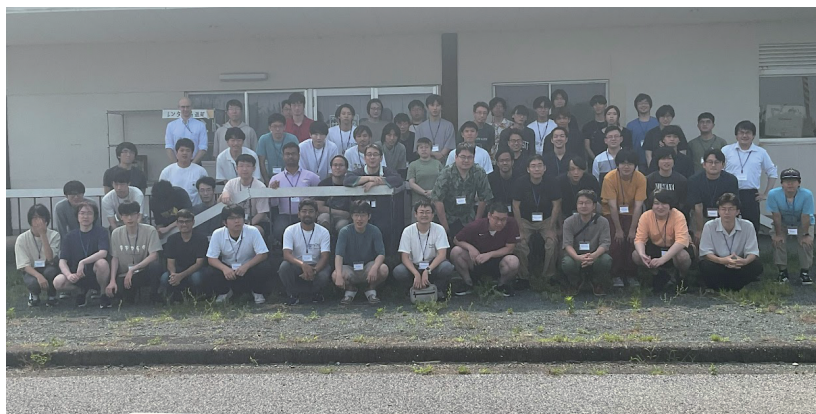


Photo2: Group Photo

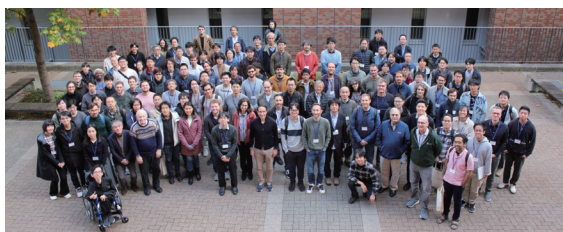


● ExU-YITP International workshop “Extreme Universe 2025”

27 October - 1 November 2025, YITP, Kyoto Univ. + Online

From October 27 to November 1, 2025, an international conference was held at YITP, Kyoto U. With around 200 participants, this became a major event with many renowned researchers invited from various foreign countries, aiming at progress of integrating quantum information and physics. In the field of quantum information, Brakerski and Walter reported on the latest research in quantum entanglement theory considering computational complexity. Morimae (A01) and Ma presented results on quantum cryptography and methods for realizing pseudo-random unitaries. Karch, May, and Ruan gave talks on the application of quantum computational complexity to gauge-gravity correspondence. In quantum gravity, Myers (our international advisor) presented results on the relationship between quantum entanglement and scattering phenomena in gravity, while Tonni reported on the interpretation of modular Hamiltonians from holography. Iizuka (B01) and Harper (C01) presented on holographic calculation of multi-partite quantum entanglement. Furthermore, Bousso proposed a new correspondence between quantum entanglement and the holographic principle for general spacetimes. Furthermore, research concerning fundamental aspects of quantum gravity—such as the relationship between the wave function of the universe, gravitational path-integral, and random averages of microscopic states; observers in closed universes; and the holographic principle—has recently gained attention. Balasubramanian, de Boer, Engelhardt, Wei (C01), Hörn, Miyaji (C01), Nomura, Trivedi, Wadia, and Yang discussed this problem from various perspectives. Furthermore, Wald, who received the Albert Einstein Medal and Dirac Medal this year, explained the relationship between quantum entanglement and the memory effect. Ishibashi (B03) reported on the analysis of the stability of gravitational theories using gauge-gravity duality, while Oshita reported on quantum gravity effects in gravitational waves from black holes. Regarding tensor network methods with quantum information in mind, multifaceted results were presented by Banuls, Iwaki (D02), Jahn, Hotta (D02), Kuramashi (E02), Onishi (D02), and Qin. In condensed matter experiments, Joshi reported on the measurement of the modular Hamiltonian in ion trap experiments, and Yusa (C03) presented experimental results on cosmic expansion using the quantum Hall effect. This valuable international meeting served to widely announce the research achievements in this project and comprehensively grasp the cutting-edge progress made by overseas researchers.

(Reported by Tadashi Takayanagi)



● The 5th ExU Annual Meeting

26 - 28 December 2025,

Hotel Aisul Matsuyama, Ehime + Online

The 5th “Extreme Universe” Annual Meeting was held from December 26 to 28, 2025, at Hotel Aisul Matsuyama, marking the final-year culmination of the Transformative Research Areas (A) project, “*Extreme Universe*.” Researchers, graduate students, and postdoctoral fellows gathered to review the project’s accomplishments and discuss future directions. Also, on December 25, the day before the meeting, a special colloquium was held to commemorate Prof. Masaki Oshikawa (E02; University of Tokyo) receiving the 71st Nishina Memorial Prize.

At the opening, Prof. Takashi Takayanagi (Director of Extreme Universe Collaboration; YITP, Kyoto University) outlined the project’s structure, research goals, scientific achievements, outreach activities, early-career support programs, and upcoming events, providing participants with a comprehensive overview of the project.

Nine research groups delivered 30-minute presentations. Principal investigators summarized overall progress, while co-investigators and postdocs highlighted particularly notable recent results. Representatives of publicly offered groups also gave 10-minute talks on research conducted during nearly two years of participation in the project. These sessions emphasized interdisciplinary collaborations, linking different groups and showcasing the project’s distinctive interdisciplinary character.

The poster session provided an active forum for postdocs and graduate students, generating lively discussions and fostering new ideas and potential collaborations. Outstanding posters were recognized with awards, further encouraging early-career researchers.

Throughout the meeting, the integration of particle physics, cosmology, condensed matter physics, and quantum information was evident, with interdisciplinary research steadily deepening. The fifth annual meeting thus celebrated the project’s accomplishments while setting the stage for future research directions and international collaborations.

(Reported by Naoki Yamatsu)



Group Photo

● YITP workshop “Developments in Exploring Highly Entangled Quantum Phases”

1 - 3 September 2025, YITP, Kyoto Univ.

From September 1 to 3, 2025, we held a joint workshop entitled “Developments in Exploring Highly Entangled Quantum Phases” at the Yukawa Institute for Theoretical Physics. This workshop brought together two research programs, Extreme Universe and Asymmetric Quantum.

The original impetus came from my long-standing conversations with Dr. Onimaru, and during that time, the Extreme Universe program has gradually become visible within the condensed matter community, and we felt that it was timely to create a more in-depth opportunity for interdisciplinary exchange.

In practice, the scientific content of the meeting was very much that of a condensed matter workshop, and most participants were researchers in condensed matter physics. However, even within condensed matter, the field is far broader than as being viewed from the high-energy physics community, and the researchers belonging to the two projects are at further distances than people might imagine.

The core concept of the meeting, the “entanglement”, is now recognized as a key to classify quantum phases of matter and space. Nevertheless, the study of complex many-body phenomena requires substantial ingenuity in both experiment and theory, and remains demanding.

We believe that the meeting was very successful in that it brought together researchers in their 30s and 40s, tackling these challenges from diverse perspectives and methodologies. The topics covered had a great variety, ranging from electronic structure calculations in f-electron systems, theories of multipoles, and the development of perturbative approaches to quantum spin systems, to experiments on frustrated systems targeting spin liquids and magnetoelectric effects, as well as structural analyses probing nonlinear responses and local fluctuations.

Precisely because of this diversity, the workshop became a stimulating one, where the participants could recognize and encourage one another as researchers striving for originality rather than simply following prevailing trends. With lecture slots of approximately 40 minutes, speakers were able to discuss their motivations in depth, including technical aspects of their work.

Our banquet included many heartwarming scenes, providing opportunities to interact across conventional field boundaries.

Finally, I would like to take this opportunity to express my sincere gratitude to Dr. Onimaru, Dr. Ohtsuki, and Dr. Takayanagi for their invaluable support in organizing this workshop. (Reported by Chisa Hotta)



Group Photo

● New computational methods in quantum field theory 2026

26 - 28 January 2026, RIKEN Wako Campus

Following the 2022–2024 fiscal years, we organized the D01 team school “New Computational Methods in Quantum Field Theory 2026” at the RIKEN Wako Campus. While our previous schools were conducted in Japanese, the school this year was held in English. The event was held in person and had about 50 participants. In contrast to the previous years, there were many foreign participants.

We invited Dr. Junichi Haruna, Dr. Yoshimasa Hidaka and Dr. Tokiro Numasawa as the lecturers. Dr. Haruna delivered lectures entitled “Introduction to Quantum Error Correction”. The lecture was literally an introductory course on quantum error correction. Within the limited time, he clearly explained the basics on quantum error corrections and also covered relatively recent topics such as the toric code.

Dr. Hidaka gave lectures titled “Introduction to Hamiltonian Lattice Gauge Theory” which is about the Hamiltonian formulation of lattice gauge theory. Although this topic is technically intricate and often thought as hard to learn by non-experts, in this lecture, he first explained the essential structures using related quantum-mechanical models and then proceeded to gauge theory, offering an wonderful and accessible presentation.

Dr. Numasawa presented lectures on “Open Majorana System”. Starting from the basics of Majorana fermions and their connection to quantum chaos, he finally explained advanced topics such as the relationship between anomalies of symmetries in open systems and their resulting physical properties.

We also held contributed talk session by seven participants (Dr. Kohei Fujikura, Mr. Harunobu Fujimura, Dr. Dongsheng Ge, Dr. Dongwook Ghim, Dr. Peng-Xiang Hao, Mr. Ryota Maeno and Mr. Kenya Tako).

Between lectures and talks about a wide range of topics, participants actively enjoyed Q&A sessions and discussions. We hope that this school will be useful for future research. (Reported by Masazumi Honda)



Group Photo



Conferences, Workshops and Seminars in FY2025

● Extreme Universe Colloquium

5th Public Extreme Universe Colloquium

Date: April 30th, 2025

Speaker: Prof. Ángela Capel Cuevas
(University of Cambridge)

Title: The Many Faces of Quantum Entropy -
From Divergence Measures to Conditional Independence



6th Public Extreme Universe Colloquium

Date: June 6th, 2025

Speaker: Prof. Gary Horowitz (University of
California, Santa Barbara)

Title: Spacetime Singularities and Black
Holes



7th Public Extreme Universe Colloquium

Date: September 30th, 2025

Speaker: Prof. Alexander Altland
(University of Cologne)

Title: Late time quantum chaos in two-di-
mensional gravity



8th Public Extreme Universe Colloquium

Date: October 25th, 2025

Speaker: Prof. Hong Liu (Massachusetts
Institute of Technology)

Title: Entanglement, von Neumann algebras,
and the emergence of spacetime



9th Public Extreme Universe Colloquium

Date: December 18th, 2025

Speaker: Prof. Keisuke Fujii (The University
of Osaka)

Title: OTOC spectroscopy: detecting
quantum advantage of quantum chaos through the lens
of quantum algorithms



10th Public Extreme Universe Colloquium

Date: February 6th, 2026

Speaker: Prof. Stefan Hollands (University
of Leipzig)

Title: Negative Energy

Co-organized by Nagoya University Institute for
Advanced Research (IAR) and Kobayashi-Maskawa
Institute for the Origin of Particles and the Universe
(KMI)



● Extreme Universe Seminar

29th Extreme Universe Circular Meeting

Date: April 22nd, 2025

Speaker 1: Masaki Shigemori (B01)

Title: Topics in black hole microstates in string theory

Speaker 2: Marcel Hughes (Nagoya University)

Title: Beyond the monotone elliptic genus in AdS_3/CFT_2

9th Extreme Universe Interdisciplinary Online Seminar

Date: May 23rd, 2025

Speaker 1: Yasusada Nambu (E02)

Title: Entanglement partner and monogamy

Speaker 2: Kotaro Kondo (E03)

Title: High acceleration field with tightly focused laser
wakefield acceleration for investigation of the Unruh
effect

30th Extreme Universe Circular Meeting

Date: June 5th, 2025

Speaker 1: Takashi Mori (B02)

Title: Introduction to open quantum systems

Speaker 2: Juan Pablo Bayona Pena (Kyoto University)

Title: Topological Entanglement Spectrum Crossings
as a Probe of non-Hermitian Bulk-Boundary Corre-
spondence

10th Extreme Universe Interdisciplinary Online Seminar

Date: June 19th, 2025

Speaker: Takahiro Tanaka (E02)

Title: Axion cloud evolution with self-interaction

31st Extreme Universe Circular Meeting

Date: July 10th, 2025

Speaker 1: Akihiro Ishibashi (B03)

Title: Quantum null energy conditions and quantum
focusing

Speaker 2: Yoshinori Matsuo (B03)

Title: Quantum focusing conjecture and the Page curve

11th Extreme Universe Interdisciplinary Online Seminar

Date: July 22nd, 2025

Speaker: Yoshimasa Hidaka (E02)

Title: Hamiltonian Lattice Gauge Theory via
Topological Quantum Field

32nd Extreme Universe Circular Meeting

Date: October 14th, 2025

Speaker 1: Daisuke Yamamoto (B02)

Speaker 2: Keiju Murata (B03)

Title: Spacetime-localized response in quantum critical spin systems: Insights from holography, Spin systems as quantum simulators of quantum field theories in curved spacetime, & Spin systems as quantum field theories in inflationary universe: A study with Unruh-DeWitt detectors

33rd Extreme Universe Circular Meeting

Date: November 19th, 2025

Speaker 1: Hiroshi Ueda (D02)

Speaker 2: Kosuke Mitarai (University of Osaka)

Title: Deep Variational Quantum Eigensolver: A Divide-And-Conquer Method for Solving a Larger Problem with Smaller Size Quantum Computers & Explicit quantum surrogates for quantum kernel models

34th Extreme Universe Circular Meeting

Date: January 13th, 2026

Speaker 1: Yoshifumi Nakata (A01)

Speaker 2: Masaki Tezuka (B02)

Title: Hayden-Preskill recovery in Hamiltonian systems

● Conferences & Workshops

2025 YITP Logical Gates for Encoded Qubits Workshop

Date: April 7th - 18th, 2025

Venue: Kyoto University

Black Holes, Quantum Chaos, and Quantum Information

Date: April 26th - 30th, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Yukawa Institute for Theoretical Physics Workshop

“Recent Progress and Future Issues in Non-Perturbative Field Theory 2025”

Date: May 22nd - 23rd, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

Quantum Connections: Linking Information, Gravity, and Many-Body Physics

Date: June 24th - 28th, 2025

Venue: UTOP Ubless Hotel

The 4th young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration

Date: June 30th - July 4th, 2025

Venue: Kyukamura Irago

Yukawa Institute for Theoretical Physics Short-Term Workshop

“Developments in Exploring Highly Entangled Quantum Phases”

Date: September 1st - 3rd, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

ExU International Conference “Extreme Universe 2025”

Date: October 27th - November 1st, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University

ISSP Workshop: Topology, Entanglement, and Dynamics in Quantum Many-Body Systems (TEDQMB)

Date: December 22nd, 2025

Venue: The Institute for Solid State Physics, The University of Tokyo

The 5th ExU Annual Meeting of the Extreme Universe Collaboration

Date: December 25th - 28th, 2025

Venue: Hotel Aisul Matsuyama

Nagoya workshop on General Relativity

Date: January 26th - 28th, 2026

Venue: Nagoya University

New computational methods in quantum field theory 2026

Date: January 26th - 28th, 2026

Venue: RIKEN

GRGeo3

Date: March 16th - 17th, 2026

Venue: Nagoya University



● Reporter

Hiromasa Tajima

Department of Physics, Nagoya University, D1

Academic Supervisor Prof. Yasusada Nambu, Nagoya University (E02)

Host Supervisor Prof. Tomonori Ugajin, Rikkyo University (B01)

Duration of Stay 5 October 2025 ~ 6 December 2025

During this stay, I studied theoretical approaches to gravity based on holographic duality. This research area is one of the central research topics at Rikkyo University and is closely related to my own research. For this reason, I undertook a long-term stay at Rikkyo University in order to deepen my understanding of holographic methods and their applications to gravitational physics. My research focuses on gravity in the early universe. It is widely believed that, during this period, the universe underwent an exponential expansion known as inflation. The inflationary scenario successfully matches the result of observations of the cosmic microwave background. In this context, gravitational effects play a fundamental role and cannot be neglected. On length scales larger than the characteristic scale of spatial expansion, quantum effects are expected to significantly influence gravitational dynamics. As a consequence, the backreaction of gravity on quantum degrees of freedom becomes important, and the behavior of quantum information is strongly affected by gravitational effects. Since such effects are unavoidable during inflation, understanding the dynamics of information in the presence of gravity is an essential problem. Prior to this stay, I investigated the dynamics of information during inflation using concrete theoretical models. During my stay at Rikkyo University, I aimed to further develop this line of research by incorporating approaches based on holographic duality. Associate Professor Ugajin and Assistant Professor Mori are experts in the application of holographic duality, and discussions with them provided valuable insights that contributed to the advancement of my research.

With the support of the faculty members, I was able to participate in several discussions related to holographic duality, including the AdS/CFT correspondence, the AdS/BCFT correspondence, and dS holography. In addition to joining existing discussions, I sometimes initiated new discussions on these topics during my stay. Each discussion

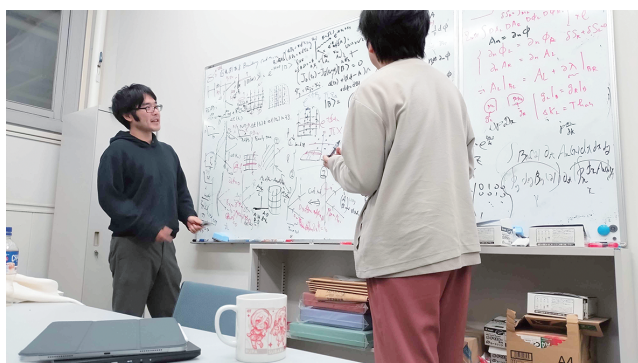


Photo2 Discussion at Ugajin group
left to right: Prof. Ugajin, me.



Photo1
Prof. Ugajin (left) and me (right).

focused on understanding how the correspondence between bulk gravitational theories and boundary quantum field theories is realized, in order to extract essential features of gravity. Since I had limited prior experience with holographic approaches, I carefully studied the relevant theoretical background and reviewed previous research papers. I also actively asked questions during discussions with the faculty members. Through these continuous efforts, I was able to deepen my understanding of holography and its role in the study of quantum aspects of gravity.

The faculty members at Rikkyo University kindly agreed to allow me to continue participating in academic discussions and collaborative research even after the conclusion of this stay. As an initial step following the stay, I plan to actively engage in these collaborative activities and maintain close communication with the researchers at Rikkyo University. Through continued discussions and joint research efforts, I aim to further develop my research on gravity and deepen my understanding of its quantum aspects. These ongoing collaborations are expected to play an important role in advancing my future research and strengthening long-term academic connections.

Finally, I would like to express my sincere gratitude to all those involved in the “Domestic Circulation Program for Young Researchers.” I am deeply grateful to Associate Professor Ugajin for kindly accepting me, providing continuous support that made this stay meaningful, and offering valuable advice on my research. I would also like to thank Assistant Professor Mori for giving me many opportunities for discussion despite his busy schedule. I sincerely appreciate the faculty members and students at Rikkyo University for their warm welcome. In particular, I am very grateful to Mr. Horikoshi, Mr. Shiga, and Mr. Ishikawa for their daily support during my stay, as well as for many helpful discussions related to my research. I would also like to thank Associate Professor Tamaoka at Nihon University, Dr. Miyata at Kyoto University, Assistant Professor Numasawa, and Assistant Professor Watanabe at the University of Tokyo for agreeing to participate in discussions on future collaborative research. Lastly, I am extremely grateful to Professor Takayanagi and Secretary Ms. Saeki for providing me with this valuable opportunity through the program. I would also like to thank my supervisor, Associate Professor Nambu, for encouraging and supporting my participation in this program.



The Accelerating Universe: A Hub of Modern Physics

The ExU project focuses on a variety of spacetimes: black hole spacetimes, anti-de Sitter (AdS) spacetime that has played a central role in the context of holography, and expanding spacetimes that describe the history of our universe. Which spacetime is your favorite? I love de Sitter (dS) spacetime, which describes an accelerating universe. In this article, I would like to share what makes dS spacetime so fascinating, while introducing some of my own recent research.

Let us begin with the definition of dS spacetime. De Sitter spacetime is the simplest model of an accelerating universe, and its line element is given by

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + a(t)^2 (dx^2 + dy^2 + dz^2), \quad a(t) = e^{Ht},$$

where $a(t)$ is the scale factor that characterizes the size of the universe, and H is a constant expansion rate (the Hubble parameter). The scale factor grows exponentially, indicating that the universe undergoes accelerated expansion. If you are not familiar with metrics or line elements, it is perfectly fine to simply think of dS spacetime as “a spacetime that expands exponentially with expansion rate H .”

Then, why is dS spacetime interesting? According to modern cosmology, supported by precise observations, our current universe is undergoing accelerated expansion. Moreover, it is widely believed that the early universe experienced another phase of accelerated expansion called inflation. The energy driving inflation was eventually converted into the energy of matter, which triggered the Big Bang. This shows that understanding accelerating universes is essential for understanding both the origin of the universe and its present and future evolution. De Sitter spacetime provides a theoretical framework to describe such accelerating universes, and it is therefore one of the most important spacetimes in cosmology.

The importance of dS spacetime is not limited to cosmology. For example, inflation in the early universe is expected to have taken place at energy scales far beyond what can be reached by particle accelerators, and it may serve as an experimental arena for high-energy physics. In our paper [1], we proposed a method to search for new particles beyond the Standard Model by using correlation functions of primordial density fluctuations measured through observations such as the cosmic microwave background. In particular, we showed that the mass of an unknown new particle coupled to the inflaton can be determined from a characteristic oscillatory pattern appearing in the three-point function of density fluctuations. This is analogous to how one determines particle masses in collider experiments using resonance signals, and it suggests that cosmological observations may probe the properties of unknown elementary particles. This line of research is now known as *Cosmological Collider Physics*. I am deeply honored to have received the 40th Nishinomiya Yukawa Memorial Prize this year for pioneering contributions to this field.

While I have explained how dS spacetime connects to the high-energy frontier, the underlying physics is also closely related to nonequilibrium statistical physics. Since the inflationary universe expands rapidly, it can indeed be regarded as an extreme nonequilibrium phenomenon. Interestingly, it has been known since the 1970s that dS

spacetime has a temperature proportional to its expansion rate H , much like black holes have a temperature. The expansion rate during inflation is believed to be as high as $H \sim 10^{13}$ GeV, which suggests that the inflationary universe had an extremely high temperature. In such a hot universe, high-energy particles collide, scatter, and decay, leaving their imprints in observational data of the early universe. This is the basic physical intuition behind Cosmological Collider Physics.

Once we have the notion of temperature, it is natural to consider entropy as well. Again, similarly to black holes, dS spacetime is known to possess an entropy determined by the area of its horizon (a causal boundary arising from accelerated expansion). As a result, it has become increasingly active in recent years to discuss how the holographic principle—one of the key concepts in the ExU project—can be understood in dS spacetime (see also the article by Prof. Hikida in Newsletter No. 1 for more details). In this context, I have also published a paper this year [2] on how to formulate the holographic principle in more general expanding universes, including dS spacetime.

Furthermore, since the region outside the horizon cannot be observed by us, who live inside the horizon, the physics of dS spacetime also has aspects of an open quantum system. Motivated by this perspective, recent research in cosmology has increasingly incorporated ideas from open systems and quantum information. In my own research this year, for example, we developed the effective field theory approach for open systems coupled to gravity with cosmological applications in mind [3]. In another work [4], we discussed consistency conditions of effective field theory in dS spacetime from the viewpoint of quantum entanglement.

In this way, de Sitter spacetime, which describes an accelerating universe, is not only crucial for understanding the origin, present, and future of the universe, but also serves as a hub where many research areas intersect—including cosmology, particle physics, quantum gravity, nonequilibrium statistical physics, and quantum information. It is, so to speak, one of the major “international cities” in physics. This is why I love dS spacetime. Welcome to this exciting research frontier of accelerating universes!

- [1] T. Noumi, M. Yamaguchi and D. Yokoyama, JHEP 06 (2013), 051.
- [2] T. Noumi, F. Sano and Y. Suzuki, JHEP 08 (2025), 115.
- [3] P. H. C. Lau, K. Nishii and T. Noumi, JHEP 02 (2025), 155.
- [4] Q. Cai, T. Inada, M. Ishikawa, K. Nishii and T. Noumi, arXiv:2507.00850 (accepted by JHEP).



● Author Information

Toshifumi Noumi

Graduate School of Arts and Sciences,
the University of Tokyo
Associate Professor

Born in Kanagawa, 1986

Graduated from the University of Tokyo
in March 2013

Current position since April 2023



Project A01

- "The signaling dimension in generalized probabilistic theories"
M. Dall'Arno, A. Tosini, F. Buscemi, Quant. Inf. Comput. 24, 5&6, 411–424, (2024)
- "Low-depth random Clifford circuits for quantum coding against Pauli noise using a tensor-network decoder"
A. S. Darmawan, Y. Nakata, S. Tamiya, H. Yamasaki, Phys. Rev. Res., 6, 023055, (2024)
- "Hayden-Preskill Recovery in Hamiltonian Systems"
Y. Nakata and M. Tezuka, Phys. Rev. Research, 6, L022021, (2024), collaboration with **B02**
- "Tight conic approximation of testing regions for quantum statistical models and measurements"
M. Dall'Arno and F. Buscemi, Phys. Lett. A, 526, 129959, (2024)
- "Observational entropy with general quantum priors"
G. Bai, D. Šafránek, J. Schindler, F. Buscemi, and V. Scarani, Quantum, 8, 1524, (2024)
- "Generic increase of observational entropy in isolated systems"
T. Nagasawa, K. Kato, E. Wakakuwa, and F. Buscemi, Phys. Rev. Research, 6, 043327, (2024)
- "Universal validity of the second law of information thermodynamics"
S. Minagawa, M.H. Mohammady, K. Sakai, K. Kato, and F. Buscemi, npj Quantum Information, 11, 18, (2025)
- "Networking quantum networks with minimum cost aggregation"
K. Azuma, npj Quantum Information, 11, 51, (2025)
- "Do black holes store negative entropy?"
K. Azuma, S. Subramanian, and G. Kato, Prog. Theor. Exp. Phys., 2025, 05, 053A01, (2025)
- "Causal and Noncausal Revivals of Information: A New Regime of Non-Markovianity in Quantum Stochastic Processes"
F. Buscemi, R. Gangwar, K. Goswami, H. Badhani, T. Pandit, B. Mohan, S. Das, M.N. Bera, PRX Quantum, 6, 020316, (2025)
- "Port-based telecloning of an unknown quantum state"
R. Okada, K. Kato, F. Buscemi, Phys. Rev. A, 111, 052408, (2025)
- "Quantum Bayes' rule and Petz transpose map from the minimum change principle"
G. Bai, F. Buscemi, V. Scarani, Phys. Rev. Lett., 135, 090203, (2025)
- "Computational complexity of unitary and state design properties"
Y. Nakata, Y. Takeuchi, M. Kliesch, A. Darmawan, PRX Quantum, 6, 030345, (2025)
- "Enhancing distillability of secret keys with entanglement distillation and classical advantage distillation"
S. Sun, K. Goodenough, D. Bhatti, K. Azuma, and D. Elkouss, Phys. Rev. A, 112, 052602, (2025)
- "Macroscopicity and observational deficit in states, operations, and correlations"
T. Nagasawa, E. Wakakuwa, K. Kato, F. Buscemi, Rept. Prog. Phys., 88, 117601, (2025)
- "Certified Everlasting Secure Collusion-Resistant Functional Encryption, and More"
T. Hiroka, F. Kitagawa, T. Morimae, R. Nishimaki, T. Pal, T. Yamakawa, Eurocrypt2024, (2024)
- "Revocable Quantum Digital Signatures"
T. Morimae, A. Poremba, and T. Yamakawa, TQC2024, (2024)
- "Unconditionally Secure Commitments with Quantum Auxiliary Inputs"
T. Morimae, B. Nehoran, and T. Yamakawa, Crypto2024, (2024)
- "Quantum Public-Key Encryption with Tamper-Resilient Public Keys from One-Way Functions"
F. Kitagawa, T. Morimae, R. Nishimaki, T. Yamakawa, Crypto2024, (2024)
- "Certified Everlasting Secure Collusion-Resistant Functional Encryption, and More"
T. Hiroka, F. Kitagawa, T. Morimae, R. Nishimaki, T. Pal, T. Yamakawa, Eurocrypt2024, (2024)
- "Quantum advantage from one-way functions"
T. Morimae and T. Yamakawa, Crypto2024, (2024)
- "Quantum advantage from one-way functions"
T. Morimae and T. Yamakawa, TQC2024, (2024)
- "One-wayness in quantum cryptography"
T. Morimae and T. Yamakawa, TQC2024, (2024)
- "Quantum Unpredictability"
T. Morimae, S. Yamada, T. Yamakawa, Asiacrypt2024, (2024)
- "A New World in the Depths of Microcrypt: Separating OWSGs and Quantum Money from QEFID"
A. Behera, G. Malavolta, T. Morimae, T. Mour, T. Yamakawa, Eurocrypt2025, (2025)
- "A Simple Framework for Secure Key Leasing"
F. Kitagawa, T. Morimae, T. Yamakawa, Eurocrypt2025, (2025)
- "Cryptographic Characterization of Quantum Advantage"
T. Morimae, Y. Shirakawa, T. Yamakawa, STOC2025, (2025)

Project B01

- "Krylov complexity as an order parameter for deconfinement phase transitions at large N "
T. Anegawa, N. Iizuka, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2024, 04, 119, (2024)
- "Holographic complexity of the extended Schwarzschild-de Sitter space"
S. E. Aguilar-Gutierrez, S. Baiguera, N. Zenoni, J. High Energ. Phys., 2024, 05, 201, (2024)
- "Out-of-time-ordered correlators in the IP matrix model"
N. Iizuka, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2024, 05, 026, (2024)
- "Wave packets in AdS/CFT correspondence"
S. Terashima, Phys. Rev. D, 109, 106012, (2024)
- "Conformal field theory on TTbar-deformed space and correlators from dynamical coordinate transformations"
S. Hirano, M. Shigemori, J. High Energ. Phys., 2024, 07, 190, (2024)
- "Gravitational Positivity for Phenomenologists: Dark Gauge Boson in the Swampland"
K. Aoki, T. Noumi, R. Saito, S. Sato, S. Shirai, J. Tokuda, M. Yamazaki, Phys. Rev. D, 110, 016002, (2024)
- "Gedanken experiments to destroy a black hole by a test particle: Multiply charged black hole with higher derivative corrections"
K. Izumi, T. Noumi, D. Yoshida, Phys. Rev. D, 110, 044008, (2024), collaboration with **C03**
- "Logarithmic singularities of Renyi entropy as a sign of chaos?"
N. Iizuka, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2024, 10, 43, (2024)
- "Cutoff scale of quadratic gravity from quantum focusing conjecture"
T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, D. Yoshida, Phys. Rev. D, 110, 084037, (2024), collaboration with **B03** and **C03**
- "A note on the non-planar corrections for the Page curve in the PSSY model via the IOP matrix model correspondence"
N. Iizuka, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2025, 12, 212, (2025)
- "Dissipation in the 1/D expansion for planar matrix models"
T. Anegawa, N. Iizuka, D. Kabat, Phys. Rev. D, 111, 025003, (2025)
- "Gravitational EFT for dissipative open systems"
P. H. C. Lau, K. Nishii, T. Noumi, J. High Energ. Phys., 2025, 02, 155, (2025)
- "Black Hole Multi-Entropy Curves - secret entanglement between Hawking particles"
N. Iizuka, S. Lin, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2025, 03, 37, (2025)
- "Multiparticle information in sparse SYK models"
N. Iizuka, A. Mukherjee, S. K. Sake, N. Zenoni, J. High Energ. Phys., 2025, 04, 194, (2025)
- "Solitonic vortices and black holes with vortex hair in AdS₃"
R. Auzzi, S. Bolognesi, G. Nardelli, G. Tallarita, N. Zenoni, J. High Energ. Phys., 2025, 06, 201, (2025)
- "Holographic description of bulk wave packets in AdS₃/CFT₂"
N. Tanahashi, S. Terashima, S. Yoshikawa, J. High Energ. Phys., 2025, 06, 214, (2025), collaboration with **C03**
- "Genuine multi-entropy and holography"
N. Iizuka, M. Nishida, Phys. Rev. D, 112, 026011, (2025)
- "Note on a centaur geometry -- probing IR de Sitter spacetime holography"
N. Iizuka, S. K. Sake, Phys. Rev. D, 112, 026020, (2025)
- "Bulk reconstruction and gauge invariance"
S. Sugishita, S. Terashima, Phys. Rev. D, 112, 046003, (2025)
- "Holographic entanglement entropy in the FLRW universe"
T. Noumi, F. Sano, Y. K. Suzuki, J. High Energ. Phys., 2025, 08, 115, (2025)
- "More on genuine multi-entropy and holography"
N. Iizuka, S. Lin, M. Nishida, Phys. Rev. D, 112, 066014, (2025)
- "Multiparticle Markov Gaps and Entanglement Wedge Multiway Cuts"
N. Iizuka, A. Miyata, M. Nishida, J. High Energ. Phys., 2025, 10, 148, (2025)
- "Stretched horizon dissipation and the fate of echoes"
S. Terashima, J. High Energ. Phys., 2025, 10, 147, (2025)
- "Effective Microstructure"
I. Bena, R. Dulac, E. J. Martinec, M. Shigemori, D. Turton and N. P. Warner, J. High Energ. Phys., 2025, 12, 130, (2025)

Project B02

- "Hayden-Preskill Recovery in Hamiltonian Systems"
Y. Nakata, M. Tezuka, Phys. Rev. Research, 6, L022021, (2024), collaboration with **A01**
- "On the backreaction of Dirac matter in JT gravity and SYK model"
P.H.C. Lau, C.-T. Ma, J. Murugan, M. Tezuka, Phys. Lett. B, 853, 138702, (2024)
- "Engineering of a Low-Entropy Quantum Simulator for Strongly Correlated Electrons Using SU(N)-Symmetric Cold Atom Mixtures"
D. Yamamoto and K. Morita, Phys. Rev. Lett., 132, 213401, (2024)
- "A model of randomly-coupled Pauli Spins"
M. Hanada, A. Jevicki, X. Liu, E. Rinaldi, M. Tezuka, J. High Energ. Phys., 2024, 05, 280, (2024)

“Spacetime-localized response in quantum critical spin systems: Insights from holography”
M. Bamba, K. Hashimoto, K. Murata, D. Takeda, and D. Yamamoto, *Phys. Rev. D*, **109**, 126003, (2024), collaboration with **B03**

“Accelerated Decay due to Operator Spreading in Bulk-Dissipated Quantum Systems”
T. Shirai and T. Mori, *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 040201, (2024)

“Dynamics of Interacting Bosons on the Sawtooth Lattice with a Flat Band”
K. Gondaira, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93**, 074004, (2024)

“Rényi entropy of the permutationally invariant part of the ground state across a quantum phase transition”
Y. Miyazaki, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *Phys. Rev. A*, **110**, 052422, (2024)

“Field-Induced Quantum Phase Transitions in the Pressure-Tuned Triangular-Lattice Antiferromagnet CsCuCl₃”
K. Nihongi, T. Kida, D. Yamamoto, Y. Narumi, J. Zaccaro, Y. Kousaka, K. Inoue, Y. Uwatoko, K. Kindo, and M. Hagiwara, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93**, 084704, (2024)

“Probing quantum chaos through singular-value correlations in sparse non-Hermitian SYK model”
P. Nandy, T. Pathak, M. Tezuka, *Phys. Rev. B*, **111**, L060201, (2025), collaboration with **D01**

“Spin systems as quantum simulators of quantum field theories in curved spacetime”
S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, Ryosuke Yoshii, *Phys. Rev. Research*, **7**, 023197, (2025), collaboration with **B03**

“Entanglement Spectrum Dynamics as a Probe for Non-Hermitian Bulk-Boundary Correspondence in Systems with Periodic Boundaries”
P. Bayona-Pena, R. Hanai, T. Mori, H. Hayakawa, *Phys. Rev. B*, **111**, L140303, (2025)

“Strong Markov dissipation in driven-dissipative quantum systems”
T. Mori, *J. Statist. Phys.*, **192**, 1, 1, (2025)

“Quantum master equation for many-body systems: Derivation based on the Lieb-Robinson bound”
K. Shirai, M. Nakagawa, T. Mori, M. Ueda, *Phys. Rev. B*, **111**, 184311, (2025)

“Out-of-time-order correlator computation based on discrete truncated Wigner approximation”
T. Shirai and T. Mori, *Phys. Rev. B*, **112**, 014309, (2025)

“Error Bounds on the Universal Lindblad Equation in the Thermodynamic Limit”
T. Ikeuchi and T. Mori, *Phys. Rev. B*, **112**, 094309, (2025)

“Spin systems as quantum field theories in inflationary universe: A study with Unruh-DeWitt detectors”
S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii, *Phys. Rev. Research*, **7**, 043135, (2025), collaboration with **B03**

Project B03

“Spacetime-localized response in quantum critical spin systems: Insights from holography”
M. Bamba, K. Hashimoto, K. Murata, D. Takeda, D. Yamamoto, *Phys. Rev. D*, **109**, 126003, (2024)

“Geometrical origin of the Kodama vector”
S. Kinoshita, *Phys. Rev. D*, **110**, 044056, (2024)

“Quantum focusing conjecture in two-dimensional evaporating black holes”
A. Ishibashi, Y. Matsuo, A. Tanaka, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 09, 126, (2024)

“Cutoff scale of quadratic gravity from quantum focusing conjecture”
T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, D. Yoshida, *Phys. Rev. D*, **110**, 084037, (2024)

“Quantum Improved Regular Kerr Black Holes”
C.-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, N. Ohta, *Chin. J. Phys.*, **92**, 766, (2024)

“Spin systems as quantum simulators of quantum field theories in curved spacetimes”
S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii, *Phys. Rev. Research*, **7**, 023197, (2025), collaboration with **B02**

“Universal structure of islands in evaporating black holes”
Y. Matsuo, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 03, 068, (2025)

“Spin current generation due to differential rotation”
T. Funato, S. Kinoshita, N. Tanahashi, S. Nakamura, M. Matsuo, *Phys. Rev. B*, **111**, L060403, (2025), collaboration with **C03**

“The higher dimensional instabilities of AdS in holographic semiclassical gravity”
A. Ishibashi, K. Maeda, T. Okamura, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 04, 167, (2025)

“Spin systems as quantum field theories in inflationary universe: A study with Unruh-DeWitt detectors”
S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, R. Yoshii, *Phys. Rev. Research*, **7**, 043135, (2025), collaboration with **B02**

“Semiclassical rotating AdS black holes with quantum hair in holography”
R. Hamaki, K. Maeda, *Phys. Rev. D*, **111**, 084021, (2025)

“Chiral symmetry breaking and restoration by helical magnetic fields in AdS/CFT”
M. Berenguer, J. Mas, M. Matsumoto, K. Murata, A. V. Ramallo, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 05, 048, (2025)

“Kaluza-Klein monopole with scalar multiplet hair”
T. Ishii, K. Murata, K. Sugawara, *Phys. Rev. D*, **112**, 104062, (2025)

“Bianchi-I cosmology with scale dependent G and Λ in asymptotically safe gravity”
C.-M. Chen, A. Ishibashi, R. Mandal, N. Ohta, *Class. Quant. Grav.*, **42**, 235008, (2025)

Project C01

“Solvable limit of ETH matrix model for double-scaled SYK”
K. Okuyama, T. Suyama, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 04, 94, (2024)

“Engineering Perturbative String Duals for Symmetric Product Orbifold CFTs”
Y. Hikida, V. Schomerus, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 06, 71, (2024)

“Doubled Hilbert space in double-scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 04, 091, (2024)

“Semiclassical saddles of three-dimensional gravity via holography”
H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki, T. Uetoko, *Phys. Rev. D*, **110**, 026018, (2024)

“Multi-entropy at low Renyi index in 2d CFTs”
J. Harper, T. Takayanagi, T. Tsuda, *SciPost Phys.*, **2024**, 16, 125, (2024)

“More on doubled Hilbert space in double-scaled SYK”
K. Okuyama, *Phys. Lett. B*, **855**, 138858, (2024)

“The semi-classical saddles in three-dimensional gravity via holography and mini-superspace approach”
H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki, T. Uetoko, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 07, 283, (2024)

“g-theorem from Strong Subadditivity”
J. Harper, H. Kanda, T. Takayanagi, K. Tasuki, *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 031501, (2024)

“Probing de Sitter Space Using CFT States”
K. Doi, N. Ogawa, K. Shinmyo, Y. Suzuki, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 02, 093, (2025)

“Baby universe operators in the ETH matrix model of double-scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 10, 249, (2024)

“Thermodynamics of the Einstein-Maxwell system”
S. Miyashita, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 04, 83, (2024)

“Thermodynamics of the 3-dimensional Einstein-Maxwell system”
S. Miyashita, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 06, 134, (2024)

“Thermal pseudo-entropy”
P. Caputa, B. Chen, T. Takayanagi, and T. Tsuda, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 01, 3, (2025)

“Non-perturbative corrections in the semi-classical limit of double-scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 06, 044, (2025)

“Brane Cosmology from AdS/BCFT”
K. Fujiki, H. Kanda, M. Kohara, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 03, 135, (2025)

“Traversable AdS Wormhole via Non-local Double Trace or Janus Deformation”
T. Kawamoto, R. Maeda, N. Nakamura, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 04, 086, (2025)

“AdS gravaster and bulk-cone singularities”
H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Koga, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 07, 199, (2025)

“Holographic tensor network for double-scaled SYK”
A. Armoni, B. Pyszkowski, S. Sugimoto, D. Weissman, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 05, 221, (2025)

“Double-Scaled SYK, QCD, and the Flat Space Limit of de Sitter Space”
Y. Sekino, L. Susskind, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 10, 137, (2025)

“Holographic Interfaces in Symmetric Product Orbifolds”
S. Harris, Y. Hikida, V. Schomerus, T. Tsuda, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 12, 114, (2025)

“Many Phases in a Hairy Box in Three Dimensions”
S. Miyashita, *Universe*, **11**, 208, (2025)

“Finite N Bulk Hilbert Space in ETH Matrix Model for double-scaled SYK”
M. Miyaji, S. Mori, K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 08, 084, (2025)

“Bulk Reconstruction of Scalar Excitations in Flat/CCFT₂ and the Flat Limit from (A) dS₃/CFT₂”
P. Hao, K. Shinmyo, Y.-k. Suzuki, S. Takahashi, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 11, 054, (2025)

“Essay: Emergent Holographic Spacetime from Quantum Information”
T. Takayanagi, *Phys. Rev. Lett.*, **134**, 240001, (2025)

“Multi-entropy and the Dihedral Measures at Quantum Critical Points”
J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi, K. Tasuki, *Phys. Rev. Research*, **7**, 043194, (2025)

“Entanglement Suppression Due to Black Hole Scattering”
K. Doi, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 12, 039, (2025)

“Flat space holography via AdS/BCFT”
P. Hao, N. Ogawa, T. Takayanagi, T. Waki, *J. High Energ. Phys.*, **2025**, 10, 159, (2025)



“High-energy fixed-angle meson scattering and the constituent counting rule in holographic QCD”

A. Armoni, B. Pyszkowski, S. Sugimoto, D. Weissman, J. High Energ. Phys., **2025**, 05, 221, (2025)

“Energy-Momentum Tensor and D-term of Baryons in Top-down Holographic QCD”

S. Sugimoto, T. Tsukamoto, Prog. Theor. Exp. Phys., **2025**, 08, 083B01, (2025)

“Many Phases in a Hairy Box in Three Dimensions”

S. Miyashita, Universe **2025**, 11, 208 (2025)

“DSSYK at infinite temperature: the flat-space limit and the 't Hooft model”

S. Miyashita, Y. Sekino, L. Susskind, J. High Energ. Phys., **2025**, 11, 107, (2025)

Project C02

“Probability vector representation of the Schrödinger equation and Leggett-Garg-type experiments”

M. Hotta and S. Murk, Phys. Rev. A, **109**, 062224, (2024)

“Constraints on the topology of Type IIB string theory”

K. Yonekura, J. High Energ. Phys., **2024**, 07, 112, (2024)

“Final burst of the moving mirror is unrelated to the partner mode of analog Hawking radiation”

Y. Osawa, Kuan-Nan Lin, Yasusada Nambu, Masahiro Hotta, and Pisin Chen, Phys. Rev. D, **110**, 025023, (2024)

“Remarks on Mod-2 Elliptic Genus”

Y. Tachikawa, M. Yamashita, K. Yonekura, Commun. Math. Phys., **406**, 16, (2025)

“On nonsupersymmetric heterotic branes”

J. Kaidi, Y. Tachikawa, K. Yonekura, J. High Energ. Phys., **2025**, 03, 211, (2025)

“Black p-branes in heterotic string theory”

M. Fukuda, S. K. Kobayashi, K. Watanabe, K. Yonekura, J. High Energ. Phys., **2025**, 05, 043, (2025)

“Enhancing spin diffusion in GaAs quantum wells: The role of electron density and channel width”

B. W. Grobecker, A. V. Poshakinskiy, S. Anghel, T. Mano, Y. Takahashi, G. Yusa and M. Betz, J. Appl. Phys., **137**, 183902, (2025)

“Large θ angle in two-dimensional large N CP^{N-1} model”

T. Sugeno, Y. Yokokura, K. Yonekura, J. High Energ. Phys., **2025**, 05, 232, (2025)

“Electrically induced bulk and edge excitations in the fractional quantum Hall regime”

Q. France, Y. Jeong, A. Kamiyama, T. Mano, K. Sasaki, M. Hotta, G. Yusa, Phys. Rev. Lett., **135**, 066203, (2025)

“Residual Errors after Quantum Annealing in the Axial Next Nearest Neighbor Ising Model: Impact of Critical Points and Modulated Correlation”

H. Hasegawa, N. Shibata, J. Phys. Soc. Jpn., **94**, 094004, (2025)

Project C03

“PPN meets EFT of dark energy: Post-Newtonian approximation in higher-order scalar-tensor theories”

J. Saito, Z. Yao, T. Kobayashi, J. Cosmol. Astro. Phys., **2024**, 06, 40, (2024)

“Gedanken Experiments to Destroy a Black Hole by a Test Particle: Multiply Charged Black Hole with Higher Derivative Corrections”

K. Izumi, T. Noumi, D. Yoshida, Phys. Rev. D, **110**, 044008, (2024), collaboration with **B01**

“Generalisation of Conformal-Disformal Transformations of the Metric in Scalar-Tensor Theories”

E. Babichev, K. Izumi, K. Noui, N. Tanahashi, M. Yamaguchi, Phys. Rev. D, **110**, 064063, (2024)

“Cutoff Scale of Quadratic Gravity from Quantum Focusing Conjecture”

T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, D. Yoshida, Phys. Rev. D, **110**, 084037, (2024), collaboration with **B01** and **B03**

“Loosely trapped surface for slowly rotating black hole”

K. Izumi, T. Shiromizu, D. Yoshida, Y. Tomikawa, H. Yoshino, Prog. Theor. Exp. Phys., **2024**, 11, 113E02, (2024)

“Supersymmetry of the Robinson-Trautman solution”

M. Nozawa, J. High Energ. Phys., **2024**, 10, 201, (2024)

“Attractive gravity probe surface in Einstein-Maxwell system”

K. Lee, K. Izumi, T. Shiromizu, H. Yoshino, Y. Tomikawa, Phys. Rev. D, **110**, 124051, (2024)

“Removing naked singularities in static axially symmetric spacetimes by patching with flat spacetimes”

D. Saito, D. Yoshida, Phys. Rev. D, **111**, 024031, (2025)

“Spin current generation due to differential rotation”

T. Funato, S. Kinoshita, N. Tanahashi, S. Nakamura, M. Matsuo, Phys. Rev. B, **111**, L060403, (2025), collaboration with **B03**

“Initial data for a black string and a Kaluza-Klein bubble: Space-dependent compactification radius”

H. Yoshino, Phys. Rev. D, **111**, 084048, (2025)

“Gravitomagnetic tidal response of relativistic stars in partially screened scalar-tensor theories”

T. Kobayashi, Phys. Rev. D, **111**, 8, 084053, (2025)

“The first law and weak cosmic censorship for de Sitter black holes”

D. Yoshida, K. Yoshimura, Class. Quant. Grav., **42**, 11, 115008, (2025)

“Holographic Description of Bulk Wave Packets in AdS_4/CFT_3 ”

N. Tanahashi, S. Terashima, S. Yoshikawa, J. High Energ. Phys., **2025**, 06, 214, (2025), collaboration with **B01**

“Spherical collapse in DHOST theories and EFT of dark energy”

T. Takadera, T. Hiramatsu, T. Kobayashi, J. Cosmol. Astro. Phys., **2025**, 07, 006, (2025)

“Multi-sheet wormholes in the gravitational soliton formalism”

Y. Makita, K. Izumi, D. Yoshida, K. Uemichi, Class. Quant. Grav., **42**, 17, 175024, (2025)

“Consistency between bulk and boundary causalities in asymptotically anti-de Sitter spacetimes”

L. Fu, K. Izumi, D. Yoshida, J. High Energ. Phys., **2025**, 10, 184, (2025)

“Apparent horizons associated with dynamical black hole entropy”

H. Furugori, K. Nishii, D. Yoshida, K. Yoshimura, Phys. Rev. D, **112**, 104049, (2025)

Project D01

“Foliated BF theories and Multipole symmetries”

H. Ebisu, M. Honda and T. Nakanishi, Phys. Rev. B, **109**, 165112, (2024)

“Calogero model for the non-Abelian quantum Hall effect”

J. E. Bourguin and Y. Matsuo, Phys. Rev. B, **109**, 155158, (2024)

“Mass spectrum of spin-one hadrons in dense two-color QCD: Novel predictions by extended linear sigma model”

D. Suenaga, K. Murakami, E. Itou and K. Iida, Phys. Rev. D, **109**, 074031, (2024)

“Narain CFTs from quantum codes and their Z_2 gauging”

K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, J. High Energ. Phys., **2024**, 05, 133, (2024)

“Multipole and fracton topological order via gauging foliated SPT phases”

H. Ebisu, M. Honda and T. Nakanishi, Phys. Rev. Research, **6**, 023166, (2024)

“Boundary-induced transitions in Mobius quenches of holographic BCFT”

A. Bernamonti, F. Galli and D. Ge, J. High Energ. Phys., **2024**, 06, 184, (2024)

“Anomaly inflow for dipole symmetry and higher form foliated field theories”

H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi and S. Shimamori, J. High Energ. Phys., **2024**, 09, 061, (2024)

“End-to-end complexity for simulating the Schwinger model on quantum computers”

K. Sakamoto, H. Morisaki, J. Haruna, Etsuko Itou, Keisuke Fujii, Kosuke Mitarai, Quantum, **8**, 1474, (2024)

“DMRG study of the theta-dependent mass spectrum in the 2-flavor Schwinger model”

E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, J. High Energ. Phys., **2024**, 09, 155, (2024)

“Lattice study on finite density QC2D towards zero temperature”

K. Iida, E. Itou, D. Suenaga, K. Murakami, J. High Energ. Phys., **2024**, 10, 022, (2024)

“Resurgence in Lorentzian quantum cosmology: No-boundary saddles and resummation of quantum gravity corrections around tunneling saddle points”

M. Honda, H. Matsui, K. Okabayashi and T. Terada, Phys. Rev. D, **110**, 083508, (2024)

“Anomaly inflow, dualities, and quantum simulation of abelian lattice gauge theories induced by measurements”

T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sueno, Phys. Rev. Research, **6**, 043018, (2024)

“Anomaly inflow for CSS and fractonic lattice models and dualities via cluster state measurement”

T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sueno, SciPost Phys., **17**, 4, 113, (2024)

“Scale setting and hadronic properties in the light quark sector with 2+1-flavor Wilson fermions at the physical point”

T. Aoyama, T. M. Doi, T. Doi, E. Itou, Y. Lyu, K. Murakami, T. Sugiura (HAL QCD Collaboration), Phys. Rev. D, **110**, 094502, (2024)

“Quantum subsystem codes, CFTs and their Z_2 -gaugings”

K. Ando, K. Kawabata, T. Nishioka, J. High Energ. Phys., **2024**, 11, 125, (2024)

“Exactly solvable stochastic spectator”

M. Honda, R. Jinno and K. Tokeshi, J. Cosmol. Astro. Phys., **2024**, 12, 44, (2024)

“Localized RG flows on composite defects and C-theorem”

D. Ge, T. Nishioka, S. Shimamori, J. High Energ. Phys., **2025**, 02, 012, (2025)

“Evidence of a CP broken deconfined phase in 4D $SU(2)$ Yang-Mills theory at $\theta = \pi$ from imaginary θ simulations”

M. Hirasawa, M. Honda, A. Matsumoto, J. Nishimura and A. Yosprakob, J. High Energ. Phys., **2025**, 05, 009, (2025)

“Monte Carlo study on Heisenberg model with local dipolar interaction”

E. Itou, A. Matsumoto, Y. Nakayama, T. Onagi, Phys. Rev. B, **112**, 134409, (2025)

“Fermionic CFTs from topological boundaries in abelian Chern-Simons theories”

K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, S. Yahagi, J. High Energ. Phys., **2025**, 05, 105, (2025)

Project D02

- “Weak ergodicity breaking with isolated integrable sectors”
H. Katsura, C. Matsui, C. Paletta, B. Pozsgay, *Phys. Rev. Research*, **7**, 023099, (2025)
- “Dynamical dimerization and subdiffusive transport of strongly correlated neutral-ionic systems coupled to lattices”
Y. Sakai, C. Hotta, *Phys. Rev. B*, **111**, 214307, (2025)
- “Edge-Edge Correlations without Edge-States: η -clustering State as Ground State of the Extended Attractive SU(3) Hubbard Chain”
H. Yoshida, N. Heinsdorf, H. Katsura, *Phys. Rev. A*, **111**, 063307, (2025)
- “Spinor ice correlation in flat-band electronic states on kagome and pyrochlore lattices with spin-orbit coupling”
H. Nakai, M. Udagawa, C. Hotta, *Phys. Rev. B*, **111**, 235154, (2025)
- “Scan calculation of the density of states: Real-space cluster perturbation theory applied to the inhomogeneous Hubbard model in one dimension”
K. Matsuki, C. Hotta, K. Asano, *Phys. Rev. B*, **112**, 045146, (2025)
- “Spin amplitude wave due to dipole-quadrupole hybridization in spin-1 pyrochlore magnets”
H. Nakai, C. Hotta, *Phys. Rev. B*, **112**, 054401, (2025)
- “A brief note on the G_2 Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki chain”
H. Katsura, D. Schuricht, *SciPost Phys. Core*, **8**, 052, (2025)
- “Fate of Bosonic Topological Edge Modes in the Presence of Many-Body Interactions”
N. Heinsdorf, D. G. Joshi, H. Katsura, and A. P. Schnyder, *Phys. Rev. Lett.*, **135**, 146702, (2025)
- “Improving the accuracy of the tree-tensor network approach by optimization of network structure”
T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, T. Nishino, *Phys. Rev. B*, **112**, 134427, (2025)
- “Spin Nernst and thermal Hall effects of topological triplons in quantum dimer magnets on the maple-leaf and star lattices”
N. Esaki, Y. Akagi, K. Penc, H. Katsura, *Phys. Rev. B*, **112**, 134435, (2025)
- “Orbital Magnetism in Honeycomb Ladder”
T. Mizoguchi, S. Ozaki, H. Matsuura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 114704, (2025)
- “Systematic construction of asymptotic quantum many-body scar states and their relation to supersymmetric quantum mechanics”
M. Kumimi, Y. Kato, H. Katsura, *Phys. Rev. Research*, **7**, 043107, (2025)
- “TTNOpt: Tree tensor network package for high-rank tensor compression”
R. Watanabe, H. Manabe, T. Hikihara, H. Ueda, *Comput. Phys. Commun.*, **319**, 109918, (2025)
- “Orbital paramagnetism without density of states enhancement in nodal-line semimetal $ZrSiS$ ”
S. Ozaki, H. Matsuura, I. Tateishi, T. Koretsune, M. Ogata, *Phys. Rev. B*, **112**, L161118, (2025)
- “SU(3) Fermi-Hubbard gas with three-body losses: symmetries and dark states”
A. Marche, A. Nardin, H. Katsura, L. Mazza, *Phys. Rev. Research*, **7**, 043124, (2025)
- “Quantum Phase Transition and Magnetic Excitation in the $S = 1/2$ Ising-like Antiferromagnetic Chain $CsCoCl_3$ in Transverse Magnetic Fields”
S. Kimura, H. Onishi, Y. Narumi, K. Okunishi, M. Hagiwara, K. Kindo, and H. Kikuchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 124703, (2025)

Project E01

- “Coherence Length of Electronic Nematicity in Iron-Based Superconductors”
Y. Kageyama, A. Onishi, C. Bareille, K. Ishida, Y. Mizukami, S. Ishida, H. Eisaki, K. Hashimoto, T. Taniuchi, S. Shin, H. Kontani, and T. Shibauchi, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **93**, 103702, (2024)
- “Lifting of Gap Nodes by Disorder in Tetragonal $FeSe_{1-x}S_x$ Superconductors”
T. Nagashima, K. Ishihara, K. Imamura, M. Kobayashi, M. Roppongi, K. Matsuura, Y. Mizukami, R. Grasset, M. Konczykowski, K. Hashimoto, T. Shibauchi, *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 156506, (2024)
- “Black Box Work Extraction and Composite Hypothesis Testing”
K. Watanabe, R. Takagi, *Phys. Rev. Lett.*, **133**, 250401, (2024)
- “Bridging Magic and Non-Gaussian Resources via Gottesman-Kitaev-Preskill Encoding”
O. Hahn, G. Ferrini, R. Takagi, *PRX Quantum*, **6**, 010330, (2025)
- “Field-Angle-Resolved Specific Heat in $Na_2Co_2TeO_6$: Evidence against Kitaev Quantum Spin Liquid”
S. Fang, K. Imamura, Y. Mizukami, R. Namba, K. Ishihara, K. Hashimoto, and T. Shibauchi, *Phys. Rev. Lett.*, **134**, 106701, (2025)
- “Thermodynamic signatures of diagonal nematicity in $RbFe_2As_2$ superconductor”
Y. Mizukami, O. Tanaka, K. Ishida, A. Onishi, Y. Kageyama, M. Tsujii, R. Ohno, N. Kimura, T. Mitsui, S. Kitao, M. Kurokuzu, M. Seto, S. Ishida, A. Iyo, H. Eisaki, K. Hashimoto, T. Shibauchi, *PNAS Nexus*, **4**, pgaf060, (2025)
- “Gibbs-preserving operations requiring infinite amount of quantum coherence”
H. Tajima, R. Takagi, *Phys. Rev. Lett.*, **134**, 170201, (2025)

- “Progress in chromatic calorimetry concept: validating techniques for energy resolution and particle discrimination”
D. Arora, M. Salomoni, Y. Haddad, V. Zablouil, M. Doser, M. Owari, E. Auffray, J. of Instrumentation, **20**, P06019, (2025)
- “Quasiparticle interaction originating from Bogoliubov Fermi surfaces under pressure in 18%-S substituted FeSe studied via NMR”
Z. Yu, X. Shen, K. Nakamura, K. Inomata, K. Matsuura, Y. Mizukami, S. Kasahara, Y. Matsuda, T. Shibauchi, Y. Uwatoko, N. Fujiwara, *Scientific Reports*, **15**, 29824, (2025)
- “Classical simulation and quantum resource theory of non-Gaussian optics”
O. Hahn, R. Takagi, G. Ferrini, H. Yamasaki, *Quantum*, **9**, 1881, (2025)
- “Symmetric channel verification for purifying noisy quantum channels”
K. Tsubouchi, Y. Mitsuhashi, R. Takagi, No Yoshioka, *PRX Quantum*, **6**, 040310, (2025)
- “Search for Quantum-Tricritical-Point in Antiferromagnet $CeRu_2(Si_{1-x}Ge_x)_2$ ”
H. Shinya, F. Ito, N. Kabeya, Y. Mizukami, N. Kimura, *J. Phys. Soc. Jpn.*, **94**, 124705, (2025)

Project E02

- “Universal hard-edge statistics of non-Hermitian random matrices”
Z. Xiao, R. Shindou, and K. Kawabata, *Phys. Rev. Research*, **6**, 023303, (2024)
- “Inhomogeneous quenches as state preparation in two-dimensional conformal field theories”
M. Nozaki, K. Tamaoka, M. T. Tan, *Phys. Rev. D*, **109**, 126014, (2024)
- “Efficient Simulation of Low Temperature Physics in One-Dimensional Gapless Systems”
Y. Kusuki, K. Tamaoka, Z. Wei, Y. Yoneta, *Phys. Rev. B*, **110**, L041122, (2024)
- “Large violation of Leggett-Garg inequalities with coherent-state projectors for a harmonic oscillator and chiral scalar field”
T. Hirotani, A. Matsumura, Y. Nambu, K. Yamamoto, *Phys. Rev. A*, **110**, 022217, (2024)
- “Channel attention for quantum convolutional neural networks”
G. Budiutama, S. Daimon, H. Nishi, R. Kaneko, T. Ohtsuki, Y. Matsushita, *Phys. Rev. A*, **110**, 012447, (2024)
- “Local operator quench induced by two-dimensional inhomogeneous and homogeneous CFT Hamiltonians”
W. Mao, M. Nozaki, K. Tamaoka, M. T. Tan, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 07, 200, (2024)
- “Final burst of the moving mirror is unrelated to the partner mode of analog Hawking radiation”
Y. Osawa, K.-N. Lin, Y. Nambu, M. Hotta, P. Chen, *Phys. Rev. D*, **110**, 025023, (2024)
- “Deci-Hz gravitational waves from the self-interacting axion cloud around a rotating stellar mass black hole”
H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka, H. Yoshino, *Phys. Rev. D*, **110**, 044002, (2024)
- “Integrability of large-charge sectors in generic 2D EFTs”
M. Watanabe, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 08, 166, (2024)
- “Hawking-Page and entanglement phase transition in 2d CFT on curved backgrounds”
A. Miyata, M. Nozaki, K. Tamaoka, M. Watanabe, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 08, 190, (2024)
- “Ground-state phase diagram of the SU(4) Heisenberg model on a plaquette lattice”
R. Kaneko, S. Goto, and I. Danshita, *Phys. Rev. A*, **110**, 023326, (2024)
- “Bridging two quantum quench problems — local joining quantum quench and Möbius quench — and their holographic dual descriptions”
J. Kudler-Flam, M. Nozaki, T. Numasawa, S. Ryu, M. T. Tan, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 08, 213, (2024)
- “System-environment entanglement phase transitions”
Y. Ashida, S. Furukawa, M. Oshikawa, *Phys. Rev. B*, **110**, 094404, (2024)
- “Surface criticality in the mixed-field Ising model with sign-inverted next-nearest-neighbor interaction”
Y. Nakamura, R. Kaneko, and I. Danshita, *Phys. Rev. A*, **110**, 033319, (2024)
- “Tensor renormalization group study of $(1+1)$ -dimensional U(1) gauge-Higgs model at $\theta = \pi$ with Lüscher’s admissibility condition”
S. Akiyama, Y. Kuramashi, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 09, 086, (2024)
- “On perturbation around closed exclusion processes”
M. Watanabe, *SciPost Physics*, **17**, 3, 092, (2024)
- “Second-Order Coherence as an Indicator of Quantum Entanglement of Hawking Radiation in Moving-Mirror Models”
M. Tomonaga, Y. Nambu, *Phys. Rev. D*, **110**, 105004, (2024)
- “Black Hole Singularity and Timelike Entanglement”
T. Anegawa, K. Tamaoka, *J. High Energ. Phys.*, **2024**, 10, 182, (2024), collaboration with **B01**
- “Self-interacting axion clouds around rotating black holes in binary systems”
T. Takahashi, H. Omiya, T. Tanaka, *Phys. Rev. D*, **110**, 104038, (2024)



- “Strong lensing of gravitational waves with modified propagation”
H. Takeda, T. Tanaka, Phys. Rev. D, **110**, 104050, (2024)
- “Quantum phase transition of (1+1)-dimensional O(3) nonlinear sigma model at finite density with tensor renormalization group”
X. Luo, Y. Kuramashi, J. High Energ. Phys., **2024**, 11, 144, (2024)
- “Phase diagram of a spin-1/2 Heisenberg ladder with a chirality-chirality interaction”
M. Fontaine, S. Furukawa, J. Phys. Soc. Jpn., **93**, 124710, (2024)
- “Extending the Hamiltonian formulation of particle motion in perturbed Kerr spacetime to various time parametrizations”
T. Kakehi, T. Tanaka, Phys. Rev. D, **110**, 124031, (2024)
- “Enumerating 6D supergravities with $T \leq 1$ ”
Y. Hamada, G. J. Loges, J. High Energ. Phys., **2024**, 12, 167, (2024)
- “Non-Hermitian Topology in Hermitian Topological Matter”
S. Hamanaka, T. Yoshida, and K. Kawabata, Phys. Rev. Lett., **133**, 266604, (2024)
- “Hawking radiation in quantum Hall system with an expanding edge: Application of anomaly method”
R. Yoshimoto, Y. Nambu, Phys. Lett. A, **529**, 130100, (2025)
- “Critical endpoints of three-dimensional finite density SU(3) spin model with tensor renormalization group”
X. Luo, Y. Kuramashi, J. High Energ. Phys., **2025**, 07, 036, (2025)
- “High-field magnetism of the spin-1/2 two-leg-ladder antiferromagnet Cu(DEP)Cl₂ under high pressure”
T. Morimoto, E. Morikawa, K. Nihongi, T. Kida, Y. Narumi, Z. Honda, S. Furukawa, Y. Uwatoko, K. Kindo, M. Hagiwara, J. Phys. Soc. Jpn., **94**, 024701, (2025)
- “Multifractality of the many-body non-Hermitian skin effect”
S. Hamanaka and K. Kawabata, Phys. Rev. B, **111**, 035144, (2025)
- “Forecasting long-time dynamics in quantum many-body systems by dynamic mode decomposition”
R. Kaneko, M. Imada, Y. Kabashima, T. Ohtsuki, Phys. Rev. Research, **7**, 013085, (2025)
- “Swampland bounds on magnetized extra dimensions”
Y. Hamada, M. Takeuchi, J. High Energ. Phys., **2025**, 01, 136, (2025)
- “Investigating 9d/8d non-supersymmetric branes and theories from supersymmetric heterotic strings”
Y. Hamada, A. Ishige, J. High Energ. Phys., **2025**, 01, 141, (2025)
- “6D large charge and 2D Virasoro blocks”
J. J. Heckman, A. Sharon, and M. Watanabe, Phys. Rev. D, **111**, 045002, (2025)
- “Field theory of non-Hermitian disordered systems”
Z. Chen, K. Kawabata, A. Kulkarni, and S. Ryu, Phys. Rev. B, **111**, 5, 054203, (2025)
- “Gravitational entanglement witness through Einstein ring image”
Y. Kaku, Y. Nambu, Phys. Rev. D, **111**, 046026, (2025)
- “Entanglement entropy dynamics of non-Gaussian states in free boson systems: random sampling approach”
R. Kaneko, D. Kagamihara, and I. Danshita, Phys. Rev. A, **111**, 032412, (2025)
- “Universal Stochastic Equations of Monitored Quantum Dynamics”
Z. Xiao, T. Ohtsuki, and K. Kawabata, Phys. Rev. Lett., **134**, 140401, (2025)
- “Stochastic inflation and entropy bound in de Sitter spacetime”
H. Tajima, Y. Nambu, Phys. Rev. D, **111**, 106009, (2025)
- “Acceleration-induced radiation from a qudit particle detector model”
G. Yoshimura, Y. Osawa, Y. Nambu, Phys. Rev. D, **111**, 105012, (2025)
- “Non-linear sigma models for non-Hermitian random matrices in symmetry classes AI[†] and AII[†]”
A. Kulkarni, K. Kawabata, and S. Ryu, J. Phys. A: Math. Theor. **58**, 225202, (2025)
- “Hanbury-Brown-Twiss interferometry and quantum nature of primordial gravitational waves in Hořava-Lifshitz gravity”
S. Kanno, H. Matsui, S. Mukohyama, Phys. Rev. D, **111**, 104077, (2025)
- “Inhomogeneous Quantum Quenches of Conformal Field Theory with Boundaries”
X. Liu, A. McDonald, T. Numasawa, B. Lian, S. Ryu, Phys. Rev. Lett., **134**, 220404, (2025)
- “Black String in the Standard Model”
Y. Hamada, Y. Hamada, H. Kimura, Phys. Rev. D, **111**, 125009, (2025)
- “Witnessing Disorder in Quantum Magnets”
S. Sabharwal, T. Shimokawa and N. Shannon, Phys. Rev. Research, **7**, 023271, (2025)
- “Magnetic excitations from the hexagonal spin clusters in the S = 1/2 distorted honeycomb lattice antiferromagnet Cu₂(pymca)₂(ClO₄)”
M. Matsuda, A. I. Kolesnikov, Z. Honda, T. Shimokawa, S. Inoue, Y. Narumi, M. Hagiwara, Phys. Rev. B, **111**, 224430, (2025)
- “Complex entanglement entropy for complex conformal field theory”
H. Shimizu and K. Kawabata, Phys. Rev. B, **112**, 085112, (2025)
- “Non-Hermitian Hopf insulators”
D. Nakamura and K. Kawabata, Phys. Rev. B, **112**, 075134, (2025)
- “Non-Hermitian Origin of Detachable Boundary States in Topological Insulators”
D. Nakamura, K. Shiozaki, K. Shimomura, M. Sato, and K. Kawabata, Phys. Rev. Lett., **135**, 096601, (2025)
- “K-theory classification of Wannier localizability and detachable topological boundary states”
K. Shiozaki, D. Nakamura, K. Shimomura, M. Sato, and K. Kawabata, Phys. Rev. B, **112**, 075152, (2025)
- “Parity violation in photon quasinormal modes of black holes”
S. Kanno, J. Soda, A. Taniguchi, Phys. Rev. D, **112**, 063525, (2025)
- “Hopf Bifurcation of Nonlinear Non-Hermitian Skin Effect”
K. Kawabata and D. Nakamura, Phys. Rev. Lett., **135**, 126610, (2025)
- “Floquet engineered inhomogeneous quantum chaos in critical systems”
B. Lapiere, T. Numasawa, T. Neupert, S. Ryu, Phys. Rev. B, **112**, 104317, (2025)
- “Seeding neural network quantum states with tensor network states”
R. Kaneko, S. Goto, Phys. Rev. B, **112**, 155163, (2025)
- “Toward graviton detection via photon-graviton quantum state conversion”
T. Ikeda, Y. Kaku, S. Kanno, J. Soda, Phys. Rev. D, **112**, 103504, (2025)
- “Inflation models selected by the swampland distance conjecture with the Lyth bound”
Y. S. Furuta, Y. Hamada, K. Kohri, Phys. Rev. D, **112**, 103517, (2025)
- “Exceptional second-order topological insulators”
Y. Tanaka, D. Nakamura, R. Okugawa, and K. Kawabata, Phys. Rev. B, **112**, 245302, (2025)
- “Adaptive Interpolating Quantum Transform: A Quantum-Native Framework for Efficient Transform Learning”
G. Budiutama, S. Daimon, H. Nishi, R. Kaneko, T. Ohtsuki, Y.-i. Matsushita, Phys. Rev. A, **112**, 062410, (2025)
- “Holographic Absolutely Maximally Entangled States in Black Hole Interiors”
T. Anegawa, K. Tamaoka, Phys. Rev. Lett., **135**, 261601, (2025), collaboration with [B01](#)
- Project E03**
“Emergent Spin-Gapped Magnetization Plateaus in a Spin-1/2 Perfect Kagome Antiferromagnet”
S. Suetsugu, T. Asaba, Y. Kasahara, Y. Kohsaka, K. Totsuka, B. Li, Y. Zhao, Y. Li, M. Tokunaga, Y. Matsuda, Phys. Rev. Lett., **132**, 226701, (2024)



5th ExU Annual Meeting Poster Presentation Awards

田耕 健也 Kenya Tasuki (YITP, Kyoto Univ.)

Field : Particle Physics / Poster #: A6

Title : Multi-entropy at Quantum Critical Points

新名 宏太朗 Kotaro Shinmyo (YITP, Kyoto Univ.)

Field : Particle Physics / Poster #: A8

Title : Entropic Interpretation of Einstein Equation in dS/CFT

吉田 大介 Daisuke Yoshida (Nagoya Univ.)

Field : Cosmology / Poster #: A13

Title : Apparent Horizons Associated with Dynamical Black Hole Entropy

深井 康平 Kohei Fukai (Univ. Tokyo)

Field : Condensed Matter Theory / Poster #: A16

Title : Integrability in the SYK model

鄭 潤賢 Yunhyeon Jeong (Tohoku Univ.)

Field : Condensed Matter Experiment / Poster #: A17

Title : Challenge for expansion of quantum Hall edge universe

論文等での Acknowledgment について

本領域の研究費によって得られた成果を出版される際には、以下の例文にありますような謝辞をお願いいたします。ただし末尾のXYは各計画研究の課題番号で変わります。課題番号は、計画研究A01班：21H05183、B01班：21H05184、B02班：21H05185、B03班：21H05186、C01班：21H05187、C02班：21H05188、C03班：21H05189、D01班：21H05190、D02班：21H05191です。

(1) This work was supported by MEXT KAKENHI Grant Number 21H051XY.

(2) This work was supported by MEXT KAKENHI Grant-in-Aid for Transformative Research Areas A “Extreme Universe” No.21H051XY.

なお、複数の計画研究にまたがる成果は、それら全てと総括班(21H05182)にも謝辞をお願いします。

また公募研究(第2期)については21H051XY→24H009XYと読み替えて下さい。

(各公募研究者の課題番号は公募研究ページ各研究者の研究タイトル右上の数字をご確認下さい)

編集後記

2021年9月にスタートした本学術変革領域も今年度で終わり、このニュースレターもこの第5号が最終号となります。ニュースレター責任者としては、最終号まで無事に刊行できたことにまず安堵しております。今回は最終号の企画として、総括班の皆様はこの4年半を振り返る文章を書いていただきました。そちらの記事でも何名か言及されていますが、本学術領域開始時はまだ新型コロナウイルス感染症の流行が収束しておらず、本領域最初の領域スクール・領域会議は京大基研での人数を制限したハイブリッド開催でした。本号の表紙上の写真はその時の集合写真で、本年度の京大基研での領域国際会議の写真(表紙中央)と比較すると、この4年半という時間での社会の変化と、本領域の発展がお分かりいただけるのではと思います。

また本年度は、本領域公募班の押川正毅氏と、領域コロキウムでもご講演いただいた田崎晴明氏が、仁科記念賞を共同で受賞されました。これを記念して今号でも「受賞報告」記事を奥西巧一氏に執筆いただきました。記事でも言及されている両氏による極限宇宙オンラインコロキウム(The 3rd Public ExU Online Colloquium)の動画は下記の本領域YouTubeで公開されています。受賞報告記事と合わせ、是非ご覧いただければと思います。こうした貴重な講演動画と共に、本ニュースレターが、領域終了後も多くの研究者や学生の方々の学びと研究の一助となることを心より祈念しつつ、ニュースレター第5号の編集後記とさせていただきます。(文責：中島秀太)

Please follow our Web site, X & YouTube!

本領域ウェブサイトおよびXアカウントでは、研究会情報、研究成果、アウトリーチ情報などを発信しています。また領域公式YouTubeチャンネルでは本領域主催のスクールや研究会、領域コロキウムの講演動画が公開されています。ぜひご覧ください。

領域ウェブサイト：

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/>

極限宇宙



extreme universe japan



領域YouTubeチャンネル



@extremeuniverse4346

(URL情報：<https://www.youtube.com/@extremeuniverse4346>)

領域Xアカウント



@ExUniverseja (URL情報：<https://x.com/exuniverseja>)



極限宇宙 NewsLetter 05 2026 Mar.

学術変革領域研究(A) 極限宇宙の物理法則を創る
Transformative Research Areas (A) The Natural Laws of Extreme Universe

学術変革領域研究(A)「極限宇宙の物理法則を創る—量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」
ニュースレター第5号

発行日：令和8年3月24日

発行：「極限宇宙」総括班

編集：中島秀太〈協力：事務局 山津直樹〉

領域事務局：京都大学 基礎物理学研究所内 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

E m a i l : extuniv-office@yukawa.kyoto-u.co.jp

