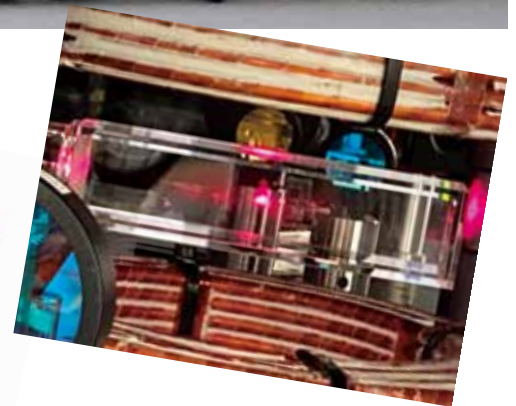
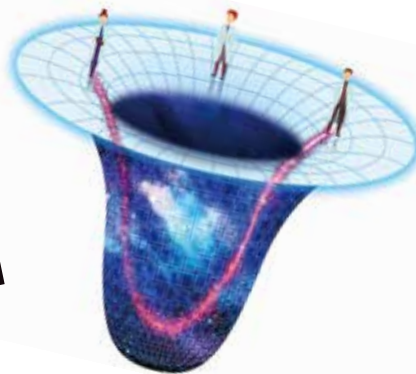
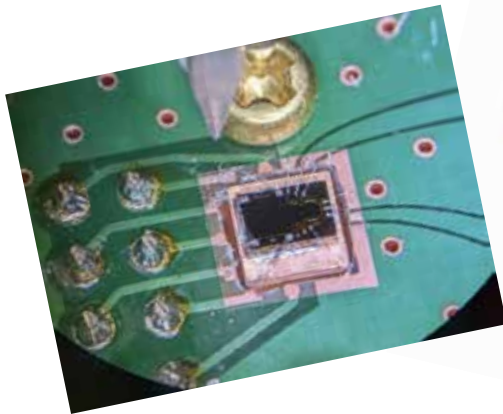
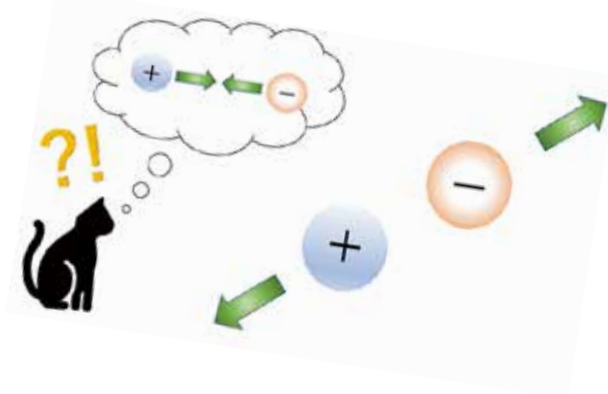




News Letter

極限宇宙
Extreme Universe **O2**

2023 Mar.



Contents

Annual Reports of Each Projects	A01/B01/B02/B03/C01/C02/C03/D01/D02
Outline of Each Publicly Offered Research Projects	
Keyword	What is the black hole information paradox? (Norihiro Iizuka)
Conference Reports	The 2nd ExU Annual Meeting/ExU School etc.
Research Highlight	Quantum cryptography and black-hole? (Tomoyuki Morimae) Entanglement structure of quantum many-body states and optimal tree tensor networks (Hiroshi Ueda & Kouichi Okunishi)

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)
- 03 2022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
- 12 公募研究紹介
E01班／E02班
- 20 トピックス：キーワード
ブラックホール情報損失問題とは何か？(飯塚 則裕)
- 22 若手国内循環プログラム報告
岩木 惇司／山本 和樹
- 24 2022年度 研究会報告
領域国際会議／第2回領域会議／領域スクール 他
- 28 2022年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧
- 30 トピックス：最近の研究から
量子暗号とブラックホール？(森前 智行)
量子状態が持つエンタングルメント構造と最適テンソルネットワークの構成(上田 宏・奥西 巧一)
- 32 2022年度 アウトリーチ・一般向け講演
- 33 Preface
Head Investigator (Tadashi Takayanagi)／Advisory Committee (Akio Hosoya)
- 35 Annual Reports of Each Projects
A01／B01／B02／B03／C01／C02／C03／D01／D02
- 44 Outline of Each Publicly Offered Research Projects
E01／E02
- 52 Topics : Keyword
What is the black hole information paradox? (Norihiro Iizuka)
- 54 Domestic Circulation Program for Young Researchers
Atsushi Iwaki／Kazuki Yamamoto
- 56 Conference Reports in FY2022
ExU-YITP International workshop／The 2nd ExU Annual Meeting／ExU School etc.
- 60 Conferences, Workshops and Seminars in FY2022
- 62 Topics : Research Highlight
Quantum cryptography and black-hole? (Tomoyuki Morimae)
Entanglement structure of quantum many-body states and optimal tree tensor networks (Hiroshi Ueda & Kouichi Okunishi)
- 64 Publications (Sep. 2021 - Sep. 2022)
- 67 お知らせ
今後の会議予定 Upcoming Conferences／論文等での Acknowledgment について
- 68 編集後記



極限宇宙の旅、本格開始

領域代表

高柳 匡 Tadashi Takayanagi

京都大学基礎物理学研究所 教授

時が経つのは早いもので、本領域が昨年度9月に誕生して、あっという間に1年が経過しました。コロナ禍は依然続くものの、海外渡航や対面の研究集会もコロナ前に戻りつつあります。そのおかげで、今年度9月には領域国際会議を京大基研にて、そして12月には領域会議を神戸国際会議場にて、ともに対面集会の形で開催することができました。オンライン参加と現地参加のハイブリッド形式で行いましたが、80名程度の現地参加者は久しぶりの対面での研究交流を満喫していました。



コロナ禍が始まって以来、初めての海外出張を今年度された方が多いのではと思いますが、私の場合は8月にロンドンのImperial Collegeで開催された重力理論の国際研究会でした。多くの領域メンバーも講演を行い、海外に本領域を紹介する良い機会にもなりました。また12月にはニューヨークで開催されたIt from Qubitサイモンズ共同研究の最後の年会で講演を行いました。It from Qubitは、サイモンズ財団が出資するアメリカを中心としたプロジェクトで2015年に開始されました。量子重力と量子情報の分野融合の先駆けとなり、非常に多くの成果を挙げて2022年に終了しました。It from Qubitを構成する17名のPIの多くは、本領域アドバイザーのMaldacena氏やMyers氏のような北米の著名研究者が多いですが、アジアから唯一のPIとして私も参画しておりました。本領域は、国際的にも標準になりつつある量子重力と量子情報の融合に加えて、さらなる起爆剤として物性理論と物性実験を融合するという野心的なプロジェクトです。2年目になって本格的に研究活動が多方面に広がってきておりますが、是非It from Qubitに負けないくらいの顕著な研究成果を挙げられるように、私も努力していきたいと思っておりますし、メンバーの皆様には卓越した研究プロジェクトの推進を大いに期待しております。



さて、この二年目では、大変多くの研究活動やイベントが目白押しでした。まず今年度から、第一期の公募研究がスタートしました。16名の公募研究代表者による、分野が量子情報、素粒子論、宇宙論、物性理論、物性実験と

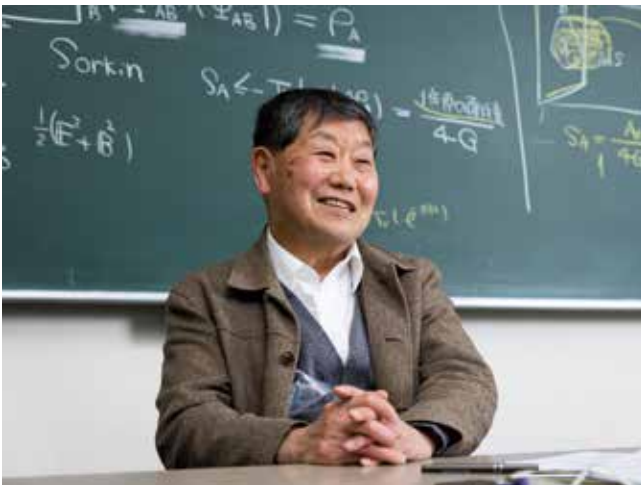
広がるバラエティーに富んだ研究提案で極限宇宙に挑んでいただいております。公募研究代表者によるオンラインセミナーもスタートさせました。16名のうち半数の8名が40歳以下の若手であり、本領域が若手研究者の飛躍する舞台となることを期待しております。また、本領域における研究推進の駆動力となる14名のポストドク研究員の全員が、今年度に着任いたしました。このうち8名が外国人というインターナショナルな構成となっております。12月に神戸で開催した領域会議では、ポストドク研究員や大学院生にポスター講演をしていただきましたが、シニアな研究者も交え、非常に活況を呈しておりました。彼らの今後の共同研究の成果が楽しみです。本領域ではこういった若手研究者の研究交流をサポートするために、若手循環プログラムを実施しております。本来の自分の研究分野とは異なる分野の研究グループに数週間滞在していただき、異分野融合研究を生み出すという趣旨です。今年度このプログラムを利用した8名の若手は皆さん、充実した研究交流を生み出しております。



また、この一年間はアウトリーチ活動も精力的に行いました。総括班のメンバーが中心に、ニュースレターの発行、領域Twitter、そして領域Youtubeチャンネルの開設を行いました。また、12月には、当領域主催でオンライン市民講演を行いました。一般市民の皆さんがどれだけ極限宇宙に関心を持っていただけるか、当初不安でしたが、実際には200名を超える方々が参加してくださり、講演後の質問タイムにも答えきれないほどのご質問をいただきました。参加者の皆様に感謝するとともに、極限宇宙市民講演を毎年の恒例イベントとしたいと考えております。



上記のように、メンバーの皆様のご尽力、そして外部から暖かく見守ってくださる多くの方々のおかげで、本領域の活動は二年目に入り、研究活動も本格稼働し、いよいよ佳境に入りつつあります。その様子は、本誌の各報告を是非ご覧ください。来年度はこの動きをより一層加速し、本領域の基礎となる研究成果を確立したいと思います。



情報とは何だろう？

領域アドバイザー

細谷 暁夫 Akio Hosoya

東京工業大学大学院 名誉教授

写真：日経サイエンス

1926年春に、ハイゼンベルクはベルリン大学のコロキウムで量子力学の講演をしたが、その後にアインシュタインと議論をしていて、その内容が「部分と全体」の中に書かれている(湯川秀樹序、山崎和夫訳 p102-107、みすず書房)。ハイゼンベルクの理論の中に原子の中の電子の軌道が全く登場しないことをアインシュタインは訝しく思ったのだ。ハイゼンベルクは「観測できる量だけで理論を構成する」ことを主張し、それこそがアインシュタインが1905年に発表した特殊相対論におけるマッハ的な考え方ではなかったか、と反論した。それに対して、アインシュタインは「そう言ったかもしれないが、それは間違っている」と言い、「理論があって初めて何が観測できるか決まる」と答えた。これは深い言葉だと思う。エントロピーはカルノーの理論があって初めて測定できる物理量となり、量子情報理論があってこそ量子情報量であるエンタングルメントエントロピーの測り方も決まる。

哲学の分類で言うと、素粒子論と宇宙論は存在論の範疇に入るが、量子力学の基本問題には測定という認識論がどうしても関わる。そもそも存在論と認識論はコインの表と裏のように、同じものの別の側面だろう。表を見ると裏が見えないが、裏を見ようとすると表が見えなくなる。一般相対性理論と量子力学の統合は、理論物理学の大目標であるとよく言われるが、それは物理学における存在論と認識論の統合とも言える。しかし、その両方を踏まえるには新たな見方が必要になり、それが情報だろうと大概の見当はつく。ベルの不等式の破れの実証により明らかになった量子もつれが、存在論的でもあり同時に認識論的でもあるので、コインの表でもなく裏でもない見えざる中身と例えてもあながち間違いではないように思う。

この分野について時代の流れを述べたいので個人的な思い出を書くことをお許し願いたい。

2000年度から2002年度科学研究費補助金(基盤(c(2)))で「時空の大域的因果構造と量子力学」、2003年度から2006年度は「ブラックホールと量子情報」というタイトルで科研費をいただいて研究していた。「極限宇宙」を先取りしているようなタイトルではあるが、実情はそうでもない。宇宙論の研究をすることで東工大にポストを得たけれども、1995年くらいから量子コンピュータに興味を持ち、量子情報技術研究会の設立に関わり、二足草鞋を履き、科研費申請も抱き合わせにせざるを得なかったのである。その頃、IOPから出版されている *Classical and Quantum Gravity* 誌の referee をしていて、量子力学的な情報理論の論文を拒否したことがあった。すると、編集者の一人で相対論と量子論の大家である Cris Isham から私の不見識を手厳しく批判するメールを貰い、量子情報がこれから重要になる研究テーマになることを諭された。確かに、ブラックホールの情報喪失問題などが既にあったが情報理論として取り組むべき問題であったのだ。それで次の科研費の申請のタイトルに「量子情報」を明示的に入れることにした。

それらが、ようやく理論物理学の主要なテーマになりつつあると思わせるのが、この極限宇宙の研究領域だと期待している。大学院生やポストドクが、このめざましく進展する分野の研究の流れの中で論文を発表していくのはやむを得ないことでもあり悪いことではない。しかし、テニユアを取った人たちは、この物理学の最も深い分野においては、本質問題に取り組んで新しい学説を発表する冒険をして欲しいと思う。



理論物理学のための量子情報理論基礎

【研究代表者】

森前 知行 (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)

【領域ポスドク(研究協力者)】

Arthur Parzygnat (名古屋大学情報学研究科・特任助教)

【研究協力者】

Andrew Darmawan (京都大学基礎物理学研究所・特定助教)

Michele Dall'Arno (京都大学基礎物理学研究所・特定助教)

山崎 隼太 (ウィーン大学・海外学振)

加藤 豪 (NICT 未来ICT研究所・研究マネージャー)

【ポスドク研究員】

Aditya Nema (名古屋大学情報学研究科・特任助教)

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。

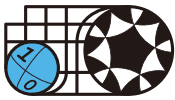
量子暗号：森前らは量子暗号理論における基礎的な研究にとりくんだ。特に、一方向性関数は古典暗号において最も基礎的な存在であるが、量子暗号の場合、必ずしもそうではないことを初めて証明した。量子暗号における最も基礎的な仮定は何かという問題は現在多くの研究者が注目しているものであり、そのような最も基礎的な仮定はブラックホールのパラドックスにも有益であることが分かっており、暗号だけでなく素粒子・宇宙の視点からも注目を集めている。また、森前らは従来 Proofs of quantumness には collision resistance が必要だろうと考えられていたが、それと独立な仮定である trapdoor permutation から初めて Proofs of quantumness を構成した。具体的な内容については本ニュースレター30ページに掲載の「最近の研究から」を参照いただきたい。

量子誤り訂正符号：中田らは量子誤り訂正符号を主なテーマとして、様々な観点から研究を行った。特に重要な研究成果は、1. ブラックホールの情報パラドクスを量子情報的に玩具モデル化した Hayden-Preskill プロトコルの復号手法の具体的な構築、2. 量子重力のホログラフィック双対とされる Sachdev-Ye-Kitaev 模型とその変形模型の時間発展を用いた量子誤り訂正の研究、3. 回路深さが低いランダム・クリフォード回路を用いた量子誤り訂正符号の性能評価、の三つである。1の研究では、量子論の相補性原理をうまく用いた復号化の手法を提案し、その手法を用いることで既存の解析結果を改善することに成功した。2では SYK 模型とその変形模型を量子誤り訂正の観点から解析し、非自明なクロスオーバー相を発見した。3では、これまで考えられていたよりも浅い量子回路で、ランダム・スタビライザー符号と呼ばれる高性能な量子誤り訂正符号を実現可能であることを示し、実機を用いた高性能な量子誤り訂正符号の実現に向けた成果を挙げた。

熱力学・統計物理：ブシェーミらは、主に量子情報科学と熱力学の新しい接点を確立することに重点を置いて研究活動を行ってきた。量子基礎、統計的推論、情

報理論、応用量子情報処理の4つの視点から研究をすすめた。量子力学の基礎では、熱力学第二法則がそれを満たす物理理論の数学的構造をどのように選択するのかを調べた。統計的推論の観点からは、近年、熱力学の基礎で重要な役割を果たすと主張されている「観測エントロピー」(observational entropy) と呼ばれる量の数学的性質を調べ、それが Petz Recovery Map の理論、すなわち量子論において統計的逆引きを行う唯一の道具と密接に関係していることを見出した。情報理論の文脈では、一方向有界古典通信に助けられた局所的な純度蒸留(local purity distillation assisted by one-way bounded classical communication)の問題を考察した。このシナリオは、量子情報理論における重要なプリミティブであり、2004年に Devetak 氏が i.i.d. asymptotic 設定において既に検討していたものであるが、ブシェーミはこれを finite block-length 領域に一般化した。応用面では、量子誤り訂正プロトコルを熱機関として捉え、その内部機構を詳細に研究し、熱力学的性能、情報理論的性能、論理性能の三重のトレードオフが存在することを明らかにした。

量子光学：ホモダイン測定は、光の量子状態を同定する際の最も基本的なツールの一つである。実際、ホモダイン測定は、量子テレポーテーションに必要な量子もつれや、量子鍵配送における秘密鍵などの量子非局所性の観測に用いられてきた。このような観測では、信号光とともに配送される局部発振光を用いてホモダイン測定が実装されるが、この実装における局部発振光は無限の強度を持つコヒーレント状態であることが前提とされる。しかしながら、伝送中に生じる雑音や悪意ある第三者の存在を想定すると、その前提は現実では満たされず、実装したことがホモダイン測定に対応しない、すなわち量子非局所性の確認実験の抜け穴となってしまう可能性がある。東らは、局部発振光に前提を置くことなしに、検証可能な形で、量子非局所性の確認を可能とするホモダイン測定の実装方法を提案した。この実装は、既存の実装法と本質的に変わらず、データ処理の変更のみで済む。それにも関わらず、本方式は、局部発振光由来の抜け穴が生じ得ないホモダイン測定の実装方法となっている。



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 (大阪大学理学研究科・助教)

[研究分担者]

宇賀神 知紀 (京都大学白眉センター・特定助教)

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 (神戸大学理学研究科・准教授)

[領域ポスドク (研究協力者)]

Sunil Kumar Sake (大阪大学理学研究科・研究員)

Nicolò Zenoni (大阪大学理学研究科・研究員)

[研究協力者]

玉岡 幸太郎 (日本大学文理学部・助教)

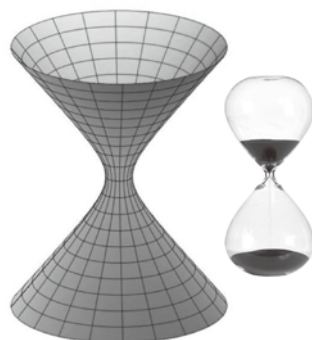
橋本 幸士 (京都大学理学研究科・教授)

前田 健吾 (芝浦工業大学工学部・教授)

ブラックホールの中で一体何がおこっているのか？ 研究計画B01班の目的は量子情報とゲージ重力対応の観点をを用いて、ブラックホールの物理に挑むことです。ゲージ重力対応は境界に住むゲージ理論が、バルクと呼ばれる創発される時空の重力理論と等価であることを主張します。B01班はここに量子情報／もつれの観点を加え、ブラックホール時空の創発、および内部時空の物理について境界のゲージ理論の観点から非摂動的に理解することを目指します。

量子もつれを表す典型的な指標であるエンタングルメントエントロピーはスピン系などの自由度が有限な系では完全に理解されていますが、連続的な場の理論では困難に直面します。特にゲージ理論の様な自由度が局所的でない理論では特にその定義自体ユニークではありません。本問題に対し、B01の飯塚は姉川氏(大阪大)とKabat氏との共同研究で昨年度提案した「砂時計法」という新しいエンタングルメントエントロピーの計算手法をゲージ理論に適用し、ゲージ理論のLOCCで蒸留可能なエンタングルメントエントロピーを[1]で計算することに成功しました。また飯塚は、B03の石橋氏(近畿大)、前田氏(芝浦工大)とともに、以前飯塚らが発見したアトラクター機構を示す極限ブラックホールにある種の不安定性を導入し、極限ブラックホールが、特異な極限ブラックホールになることも示しました[2]。B01の宇賀神は、川本氏(京大)、森氏(総研大)、鈴木氏(京大)、C01の高柳氏(京大)との共同研究でクエンチのホログラフィックなアプローチによる研究成果[3]の他に、加速膨張する閉じた宇宙のモデルである、ドシッ

hourglass prescription

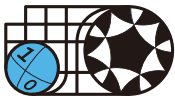


図：砂時計法

ター空間の量子情報理論的性質についての研究を行いました。B01の重森は弦理論におけるある種のブラックホールの微視的状态の一部として表される“superstratum”

と呼ばれるホライズンも特異点も持たない古典重力解をオービフォルドした空間上で解析する研究を行い通常のsuperstratumの構成と全く同様に理解できることを示しました。そのオービフォルドされたsuperstratumのエントロピーが通常のsuperstratumよりも少なく、ブラックホールのエントロピーを再現することはできないことも示しました(JHEPで出版予定)。B01の寺嶋は杉下氏(名大)との共同研究でAdS-Rindler時空の再構成法を再考し、ユニタリ性等により、正しいと信じられている、部分領域双対性、エンタングルメントウェッジ再構成、ホログラフィック誤り訂正等が量子重力効果のため成立しない可能性があることを主張しました[4]。また寺嶋は、鈴木氏(京大)との共同研究でホログラフィックなBCFTに対してモード展開を明示的に与え、バルク再構成を議論しました。さらに、BCFTが重力と結合できるなら、そのエネルギーテンソルが非自明な制約を満たすことを示しました[5]。野海はLau氏(神戸大)、滝井氏(神戸大)、玉岡氏(日本大)との共同研究でブラックホールの蒸発過程のユニタリ性の指標となる「ページ曲線」を対称性の視点から一般化し議論しました。ここでは電荷を持つブラックホールのトイモデルとして、ランダムに時間発展する量子ビットモデルを考え、保存電荷の各セクター内でエンタングルメントエントロピーがどう振る舞うべきかを議論しました[6]。また野海は、佐竹氏(神戸大)との共同研究で量子重力と無矛盾な理論モデルの判別条件の1つと期待されている「弱い重力予想」の理論検証を行いました。ブラックホールの熱力学を用いた先行研究をブラックブレンに拡張することで、一般の高次ゲージ対称性に対する弱い重力予想の証拠を与えました[7]。

[1] T. Anegawa, N. Iizuka and D. Kabat, Phys. Rev. D **106**, 085010 (2022).[2] N. Iizuka, A. Ishibashi and K. Maeda, JHEP **09**, 093 (2022).[3] T. Kawamoto, T. Mori, Y. Suzuki, T. Takayanagi and T. Ugajin, JHEP **05**, 060 (2022).[4] S. Sugishita and S. Terashima, JHEP **11**, 041 (2022).[5] Y. Suzuki and S. Terashima, JHEP **09**, 103 (2022).[6] P.H.C. Lau, T. Noumi, Y. Takii and K. Tamaoka, JHEP **10**, 015 (2022).[7] T. Noumi and H. Satake, JHEP **12**, 130 (2022).



人工量子物質による量子ブラックホールの解明

[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・特任准教授)

上西 慧理子 (慶應義塾大学理工学研究科・特任講師)

森 貴司 (理化学研究所創発物性科学研究センター・研究員)

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 (京都大学理学研究科・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・准教授)

高三 和晃 (東京大学理学系研究科・助教)

Juan Pablo Bayona Pena (京都大学理学研究科・技術補佐員)

計画研究B02の目的は、ブラックホールの量子論的側面の研究を、冷却原子実験と理論研究の連携により推進することです。制御性の高い人工量子物質である冷却原子系を用い、その非平衡ダイナミクスを実験室で解明します。ゲージ重力対応により、極限宇宙のブラックホールの本質に迫るとともに、関連した量子計算の手法を開拓し、理論研究を推進します。

本年度における冷却原子実験の進展として、中島と山下は、測定誘起相転移の観測や非時間順序相関関数の測定のための舞台となる光格子中の冷却リチウム(Li)原子実験系の構築を進め、 ${}^6\text{Li}$ (フェルミオン)および ${}^7\text{Li}$ (ボソン)のレーザー冷却(磁気光学トラップ)を実現しました(下図(a))。また ${}^6\text{Li}$ について、磁場フェッシュバハ共鳴により散乱長(原子間相互作用)を大きくした上で、光トラップ中で蒸発冷却を行い[1]、フェッシュバハ分子 ${}^6\text{Li}_2$ の Bose-Einstein凝縮を実現・観測しました(下図(b, c))。将来的な冷却原子実験を念頭においた理論研究として、高三と手塚は、非時間順序相関関数の測定で必要となるハミルトニアンの符号反転を、光格子中の冷却フェルミ原子に強い外場をかけ、原子のスピン自由度の相互作用が反強磁性から強磁性に変えることで実現することを提案しました[2]。また、段下と山本は、町田氏および笠松氏(近畿大)と、光格子中の2成分ボース気体について、モット絶縁体転移近傍で、超流動体が自己束縛した液滴を形成することを提案しました[3]。

開放量子系の基礎研究として、山本和樹氏および川上氏(京大)、中川氏および上田氏(東大)と手塚は、ベータ仮説法等の解析的手法と、数値的手法である密度行列繰り込み群を、それぞれ非エルミート系に拡張して

非エルミートXXZスピン鎖を解析し、相関関数の距離依存性が、複素朝永-ラッティンジャーパラメータで記述されることなどを明らかにしました[4]。森と白井氏(早大)は、Lindblad型の量子マスター方程式で記述される開放量子系のダイナミクスについて研究を進め、定常状態における物理量の自己相関関数に関する厳密な不等式を証明しました[5]。森は、速い周期駆動下での系の加熱率を、フロケハミルトニアンの高周波展開から評価する手法を開発しました[6]。また、開放量子系におけるフロケ状態に関するレビューを執筆しました[7]。

量子計算機による量子多体系の計算に関連する研究も行いました。手塚は、花田氏(サリー大)、Liu氏(シカゴ大)、Rinaldi氏(Quantinuum・理研)と、ボソン系を量子計算機でシミュレートする際のカットオフの影響を古典計算機で評価する手法を提案しました[8]。上西と森は、菅原氏および山本直樹氏(慶大)と、量子計算機のノイズを散逸とみたときの、非平衡定常状態の解析を行いました[9]。量子ブラックホールとホログラフィック対応をもつ量子系である Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型について、ランダムな全対全相互作用のほとんどを0としても(スパースSYK模型)元の模型と同様の良い性質を満たすことが最近提案され、量子計算機でのシミュレーションも行われています。そこで手塚は、Oktay氏(サリー大)および花田氏、Rinaldi氏、Nori氏(理研)と、スパースSYK模型で相互作用の大きさを定数に限った模型を数値的に調べ、固有値のランダム行列的な準位統計等、量子重力系と対応する系に期待される性質がみられることを示しました[10]。

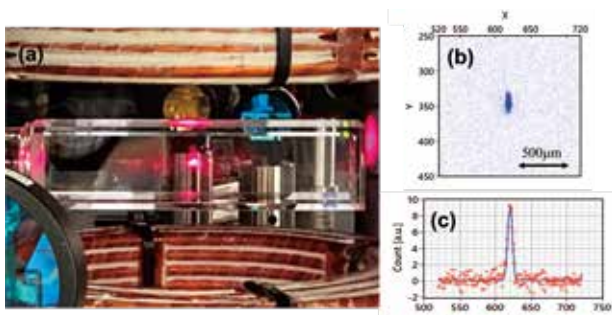


図 (a) 超高真空ガラスセル中で磁気光学トラップされた冷却 Li 原子集団。(b) Li_2 分子の Bose-Einstein凝縮の TOF イメージ (TOF=20ms) および (c) その1方向積算像。

[1] 日本物理学会2022年秋季大会。

[2] K. Takasan and M. Tezuka, arXiv:2111.03857.

[3] Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu, Phys. Rev. A **105**, L031301 (2022).

[4] K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. B. **105**, 205125 (2022).

[5] T. Mori and T. Shirai, arXiv:2212.06317.

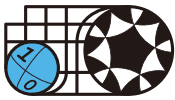
[6] T. Mori, Phys. Rev. Lett. **128**, 050604 (2022).

[7] T. Mori, Ann. Rev. Cond. Mat. Phys. **14** (2023) in press (arXiv:2203.16358).

[8] M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, arXiv:2212.08546.

[9] 日本物理学会 第77回年次大会(2022).

[10] M. Tezuka, O. Oktay, E. Rinaldi, M. Hanada, and F. Nori, Phys. Rev. B **107**, L081103 (2023).



量子情報を用いた量子ブラックホールの数理の解明

[研究代表者]

石橋 明浩 (近畿大学理工学部・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・准教授)

[領域ポスドク (研究協力者)]

松尾 善典 (近畿大学理工学部・研究支援者)

木下 俊一郎 (日本大学文理学部・博士研究員)

[研究協力者]

岡村 隆 (関西学院大学理学部・教授)

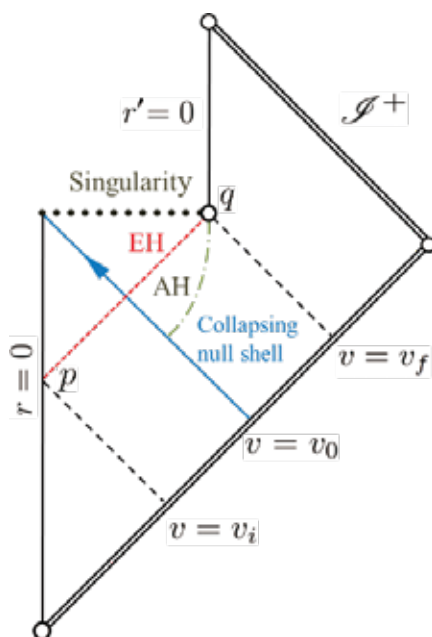
木村 元 (芝浦工業大学システム理工学部・教授)

野海 俊文 (神戸大学理学部・准教授)

私たちの宇宙にブラックホールが存在することは一般相対論の自然な帰結として予言され、現在では様々な観測により確かめられています。しかし、ブラックホールの熱力学的性質や、その内部にある「特異点」の解明には、一般相対論を拡張した量子重力理論が必要と考えられています。計画研究B03の目的は、一般相対論に量子情報理論を組み合わせることで、量子ブラックホールの謎を解明することです。

量子ブラックホールの謎の内でも特に重要な問題は、ホーキング放射によって蒸発するブラックホールのダイナミクスと、その際にブラックホールの情報がどうなるかです。こうした問題への一つのアプローチに、重力理論を物質の理論である場の量子論に置き換える「ゲージ重力対応」の方法があります。この方法を用いて、B03の石橋と前田は、蒸発するブラックホール時空(下図参照)においても、ある種のエネルギー不等式が成立することを示しました[1]。この新しいエネルギー不等式はブラックホールにまつわる様々な数理的諸定理の証明に活用されることが期待されます。

ゲージ重力対応におけるブラックホールで特に興味深いのが、温度が絶対零度の「極限ブラックホール」です。様々な極限ブラックホールが考えられるのですが、どれもこれも事象の地平面の周辺は同じ様な構造になっていることが判明し、そうした普遍的性質から量子重力に関する重要な示唆が得られると期待されています。B03の石橋と前田は、B01の飯塚とともに負の宇宙項をもつ極限ブラックホールの熱力学についてゲージ重力対応を用いて調べ、滑らかな極限ブラックホールよりも、



図：蒸発するブラックホールのペンローズ図

ある種の弱い特異点をもつものの方が熱力学的に安定であることを示しました[2]。

ブラックホールと量子情報理論に関して、B03の松尾は、ブラックホール周辺の輻射場について、これらの量子論的真空の持つエネルギーの時空への影響を考慮することで、量子情報理論における加法性予想が成立することを示しました[3]。また、ブラックホールの熱力学とカオスに関して、ブラックホールが高温で遷移すると考えられている高い励起状態の弦について、これまでに弦の不規則な散乱がカオス性を示しているとの指摘がなされていました。これについて松尾は共同研究者とともに、古典的散乱における過渡的カオスの解析手法を用いて解析しましたが、カオス性を示さないとの結果を得ました[4]。

計画研究B03では、実際の宇宙や物性系で起こり得る現象と量子ブラックホールとの関係を探る研究も行っています。B03の村田は共同研究者とともに、ゲージ重力対応における場の理論側の操作によって、対応するブラックホールの周りを周回する「星」を作る方法を提案しました[5]。いったん星ができると、その位置は場の理論の応答関数から観測することができます。作成された星のパラメータと場の理論に与える外場のパラメータの関係を調べることで、双対時空の計量に関する情報が抽出できることが分かりました。

近年、繰り込み群の手法を用いて一般相対論を非摂動的に量子化する「漸近安全量子重力」の試みが発展しています。この理論の枠組みにおいて、B03の石橋は共同研究者とともに、熱力学第1法則を指導原理とする量子補正を受けたブラックホールの新しい構成方法を提案し、量子ブラックホールの普遍的エントロピー公式を発見しました[6]。

[1] A. Ishibashi and K. Maeda, JHEP 03 (2022) 104

[2] N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, JHEP 09 (2022) 093

[3] Y. Matsuo, JHEP 06 (2022) 109

[4] K. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Yoda, JHEP 11 (2022) 147

[5] Y. Kaku, K. Murata, and J. Tsujimura, Phys. Rev. D 106 (2022) 2, 026002

[6] C-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, N. Ohta, and D. Yamaguchi, Phys. Rev. D 105 (2022) 10, 106026



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 (京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)

[海外研究協力者]

笠 真生 (Princeton大学・教授)

吉田 紅 (Perimeter研究所・教員)

[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 (釧路工業高等専門学校・創造工学科・講師)

北村 比孝 (立教大学理学部・特別研究員)

後藤 郁夏人 (京都大学基礎物理学研究所・学振特別研究員 (CPD))

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 (任期付))

宮地 真路 (名古屋大学 理学研究科 YLC 特任助教)

鈴木 健太 (立教大学理学部・助教)

Ali Mollabashi (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

Pawel Caputa (ワルシャワ大学・准教授)

Shan-Ming Ruan (京都大学基礎物理学研究所・ポスドク研究員)

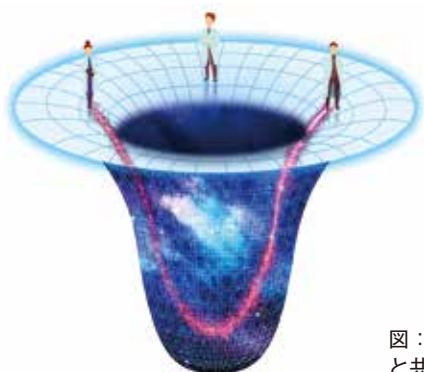
私たちの住んでいる宇宙がどのように誕生したのか解明するには、重力のミクロな理論である量子重力理論を理解する必要があります。計画研究C01の目的はこの理論物理学の有名な難問にゲージ重力対応と量子情報理論を組み合わせて挑むことです。

ゲージ重力対応は量子重力理論を量子臨界点にある物質の理論(共形場理論)として表すことを可能にしますが、よく理解されているのは宇宙定数が負の反ドジッター宇宙の重力理論の場合(AdS/CFT対応)に限られてきました。一方、現実の宇宙は、宇宙定数が正でドジッター宇宙に近いと考えられています。C01の高柳、疋田、瀧とD01の西岡は、3次元ドジッター宇宙に対応する物質の理論を、2次元共形場理論として初めて構成しました[1]。この成果はPhysical Review Letter誌に掲載され、Editor's Selectionに選ばれ、アメリカ物理学会の一般向け雑誌Physicsでも取り上げられました(下図参照)。C01の疋田らはさらに、この新しい対応を用いて、インフレーション中の密度揺らぎに関係するドジッター宇宙の相関関数を計算しました[2]。

そのほかにもゲージ重力対応を従来の適用範囲を超えて拡張する研究をC01では活発に行ってきました。ゲージ重力対応では、境界のない空間におかれた共形場理論(CFT)を通常考えますが、ブラックホール情報問題などで、境界のある空間における共形場理論(BCFT)に対するゲージ重力対応の重要性が増してきました。このような拡張はAdS/BCFT対応と呼ばれ、高柳が2010年に発見したものです。C01の鈴木(健太)

と高柳は、これにブレーンワールドを組み合わせて、共形場理論における空間の境界が、その境界から広がる反ドジッター宇宙の重力理論と等価になるというIsland/BCFT対応が得られることを量子情報量の解析などから見出しました[3]。その後、ブレーンワールドの専門家が揃うC03の泉、白水、棚橋と共同で、エネルギー運動量テンソルの振る舞いを決定することに成功し、高次元BCFTに対してこの新しい対応を検証しました[4]。また、C01の関野、北村、宮下は「弦のビット」描像に基づく超弦理論により、現在でも理解が乏しい弱結合ゲージ理論に関するゲージ重力対応を、Dpブレーンの場合も含めて、導出することに成功しました[5]。

C01では未だ解明されていないAdS/CFT対応の起源を量子情報理論やゲージ理論から探る研究も行っております。C01の奥山は、初田氏(立教大)と共同で、N=4超対称ヤンミルズ理論の積分された4点関数のラージN展開を解析し、バルクのD3ブレーンに対応する非摂動補正が現れることを明らかにしました[6]。C01の杉本は、藤田氏(中山大)、八田氏(BNL)、植田氏(成蹊大)と共同で、ゲージ重力対応に基づいて核子の重力形状因子を計算する方法を開発し、それを用いて核子のD項と呼ばれる量を見積りました[7]。また、C01のHarperは、量子ビットの集合体として時空を記述する手法(Bit threads)を多体相関を取り入れられるように改良しました[8]。



図：ドジッター宇宙と共形場理論

[1] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki, Phys. Rev. Lett. **129**, 041601 (2022)

[2] H. Y. Chen and Y. Hikida, Phys. Rev. Lett. **129**, 061601 (2022)

[3] K. Suzuki and T. Takayanagi, JHEP **06**, 095 (2022)

[4] K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi and N. Tanahashi, JHEP **10**, 050 (2022)

[5] T. Kitamura, S. Miyashita and Y. Sekino, PTEP **2022**, 043B03 (2022)

[6] Y. Hatsuda and K. Okuyama, JHEP **11**, 086 (2022)

[7] M. Fujita, Y. Hatta, S. Sugimoto and T. Ueda, PTEP **2022**, 093B06 (2022)

[8] J. Harper, JHEP **09**, 239 (2022)



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学専攻・教授)

[研究分担者]

柴田 尚和 (東北大学理学研究科物理学専攻・教授)

堀田 昌寛 (東北大学理学研究科物理学専攻・助教)

米倉 和也 (東北大学理学研究科物理学専攻・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研究院物理学科・教授)

南部 保貞 (名古屋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・准教授)

中山 和則 (東北大学理学研究科・准教授)

山口 幸司 (ウォータールー大学・日本学術振興会海外特別研究員)

佐々木 健一 (NTT 物性科学基礎研究所・主任研究員)

渡邊 賢人 (東北大学大学院理学研究科・特任研究員)

本研究では量子宇宙(宇宙創成の初期段階で現れる宇宙)と理論的に等価な物理系、つまりトイ模型としての量子宇宙を、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。舞台は半導体中の二次元電子を極低温強磁場下において発現する量子ホール系で、その試料端に現れるエッジが(1+1)次元の量子宇宙と等価であるという理論に基づいています。

今年度は(1+1)次元の曲がった時空における場の理論を定式化することで、エッジのダイナミクスを解析し、膨張するエッジがJackiw-Teitelboim (JT)重力モデルを含む、2次元のdilaton重力モデルの膨張宇宙シミュレーターとしてみなせることを示しました。その応用として、膨張エッジ領域に形成されるfuture de Sitterの地平面から、Gibbons-Hawking温度でのアナログHawking放射をシミュレートすることが可能であることも指摘しました[1]。

実際の実験を行うためには、大きく分けて(1)任意波形発生器、オシロスコープやスペクトラムアナライザのような室温部に設置された測定機器、(2)極低温強磁場を実現する超伝導マグネット付き冷凍機、(3)量子宇宙と等価な物理系の発現する半導体デバイス、の三要素が必要となります。本研究では最低温度5mKの希釈冷凍機を用いてトイ模型としての量子宇宙を半導体中で実現する予定ですが、まだ希釈冷凍機が納品されていないため、今年度は(3)の半導体デバイスやそれを実装するためのプリント基板などの設計や試作に多くのリソースを割きました(図1)。任意波形発生器を導入し、膨張を行うための電極である膨張ゲートと、遠方の銀河からくる光を模した正弦波(最高20GHzまで)を励起するための励起ゲートに対して、20psの精度で位相制御された任意波形を同時に発生することが可能となりました。半導体デバイスを700個程度試作し、既存の温度1.2Kや4Kの冷凍機を用いて基礎的特性を調べました。従来から問題になっていた、量子ホールエッジを介さずに直接励起ゲートから検出ゲートへ光速で伝搬

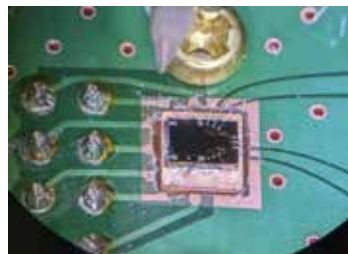


図1：典型的な量子宇宙を模した半導体デバイスとそれを実装するプリント基板

するクロストーク信号について知見を深めました。エッジの伝搬を可視化するツールとしてpump-probe反射ストロブ測定により、時間分解能を従来の数100ps[2]から数psへ向上させた実時間イメージングを行うことに成功しました[3]。

理論的な側面として、堀田昌寛氏を中心に曲がった時空におけるテスト粒子の測地線を用いたメトリック検出器のためのディープラーニングの概念的問題を検討しました[4]。またユニバーサルだが非相加的保存則の一つであるエネルギー保存則によって、生じる限界について探索し、エネルギー保存則を満たす散乱過程を使った量子測定のエラーの下限を示しました[5]。

柴田氏を中心にDMRG(Density Matrix Renormalization Group)法を用いて、分数量子ホール状態のエッジを数値計算によって解析しました。今年度から基底状態だけでなくTDVP(Time-Dependent Variational Principle)法を用いて時間発展に関する解析を開始しました。TDVPは新しく開発された時間依存の変分原理で、長距離相関が存在する場合でも時間発展を計算することが可能です。この方法を用いて、エッジのポテンシャルが急峻に変化する際に現れる分数量子ホール状態の電子密度を追跡することで、時間変化する特性を調べているところです。

米倉氏を中心に超弦理論におけるGreen-Schwarz mechanismを非摂動的なレベルで研究しました[6,7]。[6]では、8次元時空の場合での具体的な計算を行いました。[7]では一般的なヘテロティック超弦理論でのアノマリーの構造の体系的な研究を行いました。さらに[8,9]では初期宇宙における宇宙ひも(cosmic string)が、純粋なヤン-ミルズ理論から現れることができることを議論し、その性質を高次対称性、電磁双対やホログラフィー原理などから議論しました。さらに宇宙ひもからの重力波を計算し、それが将来実験で観測可能であることを示しました。

[1] M. Hotta et al., Phys. Rev. D **105**, 105009 (2022).

[2] A. Kamiyama et al., Phys. Rev. Research **4**, L012040 (2022).

[3] A. Kamiyama, et al., arXiv:2212.05507.

[4] R. Katsube, w-H. Tam, M. Hotta, Y. Nambu, Phys. Rev. D **106**, 044051 (2022).

[5] R. Katsube, M. Ozawa, M. Hotta, arXiv:2211.033433.

[6] Y. Lee, K. Yonekura, arXiv:2203.12631.

[7] K. Yonekura, arXiv:2207.13858.

[8] M. Yamada, K. Yonekura, arXiv:2204.13123.

[9] M. Yamada, K. Yonekura, arXiv:2204.13125.



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 (名古屋大学素粒子宇宙起源研究所・講師)

小林 努 (立教大学理学部・教授)

棚橋 典大 (中央大学理工学部・助教)

野澤 真人 (大阪工業大学工学部・講師)

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)

佐合紀親 (京都大学/大阪公立大学・研究員)

[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。

C01班のメンバーが進展させたAdS/BCFT対応の高次元版について解析を行いました。この対応関係は高次元宇宙モデルであるブレーンワールド系とAdS/CFT対応の設定との接合系とみなすことができます。泉、白水、棚橋は線形化されたEinstein方程式を適切な境界条件のもとで解き、CFTのエネギー運動量テンソルを求めることでAdS/BCFTの正当性を確認することができました[1]。

時空の正エネギー定理は時空の安定性を保証します。この証明の高次元定式化を白水と研究協力者のSoligonとで試みました[2]。具体的には、仮想の高次元時空の中の極小曲面で実現される4次元の模擬宇宙を考えます。そして、その模擬宇宙の全エネギーが我々の宇宙の全エネギーよりも小さくなることを示し、非負であることを証明しました。高次元時空における極小曲面は量子情報と笠-高柳公式を通じて密接な関係があることが知られていますので、本領域の根幹に関わる基礎の提供となることを期待しています。

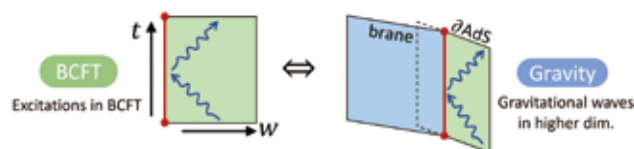
吉田はPenroseの重力崩壊に対する特異点定理を巧みに膨張宇宙に適用することで、宇宙に量子重力などの効果により初期特異点が存在せず、重力が光に対して引力的にふるまう場合、観測する外側の領域は有限の体積を持ち、そのサイズには観測される領域の膨張率で決まる上限が存在することを示しました[3]。

ブラックホール観測から強重力場に対する一般相対論の検証が進んでいます。そこで、研究協力者の天羽とともに泉、白水、吉野は観測者が存在すると考えられる時空の無限遠方近傍における光の軌道について解析を行いました[4]。これまでの研究では視線方向に直交する方向に発する光の軌道に焦点をあてていましたが、今回はわずかに内向きに発する光も含めた場合について扱いました。その結果、一般にはすべての光

が無限遠方に到達し、観測できるわけではないことがわかりました。天羽はこれらの一連の研究の発表が評価され日本物理学会学生優秀発表賞などを受賞しています。一方、強弱に寄らず重力を検知する面(重力検知面)の提案、並びにその面積不等式の証明が泉を中心になされていました。研究協力者の李とともに泉、白水、吉野はそのさらなる拡張を行い4つのタイプの面を提案し、それぞれの不等式への角運動量、重力波、物質の寄与について取り込むことに成功しました[5]。またこの研究に触発され、加速膨張宇宙におけるブラックホールの面積上限の精査を行いました[6]。この結果は、原理的に原始ブラックホールのサイズが想定したものよりも小さくなることを示唆しています。

宇宙背景輻射の揺らぎの観測から重力理論へ制限を与える研究も小林が行いました[7]。2つのテンソルモードをもち、余分なスカラーモードが存在しない一般的な修正重力理論において宇宙論的摂動論を扱い、宇宙背景輻射の揺らぎの数値コードを活用した理論計算を行いました。その結果、理論のパラメータに太陽系や重力波伝搬よりも強い制限が得られることを示しました。

その他、野澤がブレーンワールドにおけるブラックホール解の構成に応用することを念頭に超重力理論の新しい解の構成を行いました[arXiv:2211.06517]。また、佐合はブラックホールからの重力波の摂動論に関する教科書の執筆を行い[8]、平行して重力波観測から量子重力の兆候の可能性を探るべく、ブラックホール近傍での境界条件の変更が波形に与える影響を調べています。



AdS/BCFT と braneworld

- [1] K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi and N. Tanahashi, JHEP **10**, 050 (2022).
- [2] T. Shiromizu and D. Soligon, Eur. Phys. J. Plus **137**, 103 (2022).
- [3] K. Nomura and D. Yoshida, Phys. Rev. D **106**, 124016 (2022).
- [4] M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino and T. Shiromizu, Phys. Rev. D **106**, 084007 (2022).
- [5] K. Lee, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino and Y. Tomikawa, Phys. Rev. D **106**, 064028 (2022).
- [6] T. Shiromizu, K. Izumi, K. Lee and D. Soligon, Phys. Rev. D **106**, 084014 (2022).
- [7] T. Hiramatsu and T. Kobayashi, JCAP **07**, 040 (2022).
- [8] 中野・佐合、理論物理の探求「重力波・摂動論」朝倉書店 (2022).



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 (理化学研究所数理創造プログラム・上級研究員)

奥田 拓也 (東京大学大学院総合文化研究科・助教)

本多 正純 (京都大学基礎物理学研究所・助教)

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 (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

【研究協力者】

猪谷 太輔 (慶應義塾大学 自然科学研究教育センター・研究員)

居石 直久 (慶應義塾大学・訪問研究員)

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

田島 裕之 (東京大学大学院理学系研究科・助教)

筒井 翔一郎 (理化学研究所数理創造プログラム・客員研究員)

土居 孝寛 (大阪大学核物理研究センター・特任助教)

永野 廉人 (東京大学素粒子物理国際研究センター・特任研究員)

松本 祥 (理化学研究所数理創造プログラム・特別研究員)

丸吉 一暢 (成蹊大学理工学部・准教授)

山崎 雅人 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・教授)

吉田 豊 (明治学院大学 法学部 消費情報環境法学科・助手)

素粒子や量子多体系の物理現象は場の量子論で記述されます。計画研究D01班の目標は量子的な振る舞いを示す物質のダイナミクスを量子情報理論の視点から理解することです。

場の量子論には素粒子のような点粒子だけでなく拡がりをもつ演算子も許容します。後者の存在は相構造やダイナミクスに大きく影響しますが、その性質は点粒子に比べるとまだ良く理解されていません。西岡は拡がりのある演算子の存在する共形場理論では拡がりのある演算子が点粒子に対して鏡のような役割を果たし、点粒子の相関関数を決定する際に電磁気学の鏡像法に似た手法が適用できることを示しました。また境界や線演算子の存在する $O(N)$ ベクトル模型の臨界点は共形対称性を持ちますが、その振る舞いをいくつかの自然な公理から決定できることを示しました [1]。

量子誤り訂正は誤り耐性を持つ量子計算機を実装する上で必要不可欠な技術ですが、その数学的構造は様々な研究分野に現れます。西岡と奥田はある種の非二進数の量子誤り訂正符号から $(1+1)$ 次元共形場理論を構成する新たな方法を提唱しました [2]。

量子計算機は古典計算機では困難な物理系を効率的にシミュレートできると期待されています。Schwinger模型はQCDによく似た特徴を持つ $(1+1)$ 次元ゲージ理論です。通常電荷の正負が同じ粒子の間には斥力、正負が反対の粒子の間には引力が働きますが、伊藤と本多は電荷が反対の粒子間に斥力が働く状況(図1)を数値シミュレーションにより実現することに成功しました [3]。この結果はPTEPのEditor's Choiceに選ばれました。奥田は境界がある系でのSchwinger模型の局所物理量をボゾン化と密度行列繰り込み群により

調べました [4]。伊藤と本多はテンソルネットワーク法によりcharge-q Schwinger模型を調べ、離散カイラル対称性と1-form対称性の間の't Hooftアノマリーがどのように実現されているかを数値的に調べ、理論的な予言と一致することを示しました [5]。

現在、様々な量子計算機が実際に運用されていますが、ノイズのため計算エラーが無視できません。このようなエラーを見積もるため、奥田、丸吉、鈴木、山崎、吉田はXXXスピン鎖の可積分な Trotter 化を量子コンピュータ実機で実装して保存チャージのノイズによる減衰を観測し、減衰率をベンチマークとして用いることを提案しました [5]。また奥田と助野は観測型量子計算の手法による格子ゲージ理論の量子シミュレーションを定式化し、そこで用いるリソース状態のSPT相としての性質を明らかにしました [6]。

他にも本多はミレニアム問題の1つであるリーマン予想の主張が、弦理論と超対称ゲージ理論におけるある物理量に関する条件に同等であることを示しました。また、フラクトン相に密接に関連する部分系対称性を持った様々な場の量子論を構成し、真空構造・双対性・'t Hooftアノマリーなどの基本的な性質を調べました [7]。Nandyは量子情報の拡散速度の指標となる開放量子系で演算子の時間発展をKrylov複雑性とよばれる情報量を使って調べました [8]。

またD01班主催のサマースクールを開催しました。詳細は研究会報告をご覧ください。

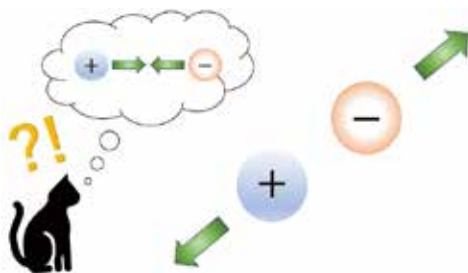


図1：通常では電荷の正負が反対の粒子には引力が働くが(左)、逆に斥力が働く状況が起こりうる(右)

- [1] T. Nishioka, Y. Okuyama, S. Shimamori, Phys. Rev. D **106**, L081701 (2022), arXiv:2212.04076, 2212.04078.
- [2] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, arXiv:2212.07089.
- [3] M. Honda, E. Itou, Y. Kikuchi, Y. Tanizaki, PTEP **2022**, 033B01 (2022).
- [4] T. Okuda, arXiv:2210.00297
- [5] M. Honda, E. Itou, Y. Tanizaki, JHEP **11**, 141 (2022).
- [5] K. Maruyoshi, T. Okuda, J. W. Pedersen, R. Suzuki, M. Yamazaki, Y. Yoshida, arXiv:2208.00576.
- [6] H. Sueno, T. Okuda, arXiv:2210.10908.
- [7] M. Honda, T. Yoda, arXiv: 2203.17091; M. Honda, T. Nakanishi, arXiv:2212.13006.
- [8] A. Bhattacharya, P. Nandy, P. P. Nath, H. Sahu, JHEP **12**, 081 (2022); B. Bhattacharjee, S. Sur, P. Nandy, Phys. Rev. B **106**, 205150 (2022).



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 (新潟大学自然科学系・准教授)

[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)]

古谷 峻介 (東京大学総合文化研究科)

Yosprakob, Atis (新潟大学理学部)

[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)

量子多体問題の精密な解析は物性系で発現する多彩な現象を理解する上で本質的なだけでなく、物理学の様々な分野が関わる極限宇宙の分野横断的な研究にとっても鍵となる役割を果たします。計画研究D02班の目標は、本領域でも重要なキーワードとなるテンソルネットワーク(TN)の発展と量子多体問題・ダイナミクスの定量的・数理的な理解を得ることです。今年度は、領域PDとして4月に古谷氏が、10月にYosprakob氏が東大および新潟大にそれぞれ着任し、若手主導の研究もスタートしました。12月末の時点でTNの招待レビュー論文[1]も含め、計21本の論文(含プレプリント)を公表することができました。ここでは、それらの成果からハイライトをいくつかピックアップして紹介したいと思います。

TNは量子多体状態の系統的な記述法と実践的な数値計算アルゴリズムを提供します。今年度、奥西・上田・原田および引原・西野は、Tree TNと呼ばれるクラスのTN法のネットワーク構造の最適化原理の解明と実践的アルゴリズムの開発[2]に成功しました。その具体的な内容は本ニュースレター31ページに掲載の「最近の研究から」に詳しく述べられておりますので、そちらをご参照ください。離散系のネットワーク構造は連続系の幾何学に対応することから、これまで手付かずであった最適ネットワーク構造の決定法の提示は、ゲージ重力対応の観点からも興味深いかもしれません。また、原田・大久保らも同様のTree TNのネットワーク構造最適化法を機械学習の問題へ拡張しており、今後の多角的な発展に繋がる研究成果といえます。

多彩な物性系の示す特徴的な現象の普遍的な理解と一般化のためには、量子多体問題の背後にある数理構造に立脚した精密な解析がしばしば重要な役割を果たします。最近、量子傷跡状態という特異な量子ダイナミクスを示す状態が注目を集めていますが、桂らはスピンレスフェルミ粒子系や多成分ハバード模型で背後にある代数的構造をもとに、量子傷跡状態が系統的に構成できることを示しました[3]。また、ごく最近、桂はクリーン極限の超対称SYK模型の厳密解を構成することにも成功しています。SYK模型は量子情報のスクランプリングやブラックホールの情報喪失の問題でも注目を集めています。格子模型の超対称性の破れ[4]との関連も興味深く、分野をまたいだ研究展開にも

繋がりそうです。一方、堀田らはサイン2乗変形という有限系から効率よくバルクの情報を引き出すテクニックと平均場近似を組み合わせ、反対称Rashba型スピン軌道相互作用を持つハバード模型に長周期スピン密度波やストライプ秩序等が存在することを見出し、その相図を決定しました[5]。これに加え、カゴメ格子系等においてスピン軌道相互作用の誘起する有効SU(2)ゲージ場により、カイラル対称性を持つバンド構造が発現することも明らかにしています[6]。また、堀田と原田が協力し、横磁場イジング模型の動的相関がグラウバー型の量子モンテカルロ法により抽出できることを示しました[7]。さらに、領域PDの古谷は、対称性に守られたトポロジカル秩序とギャップレス励起が共存する1次元量子スピン模型を提案[8]するとともに、桂・堀田とともに量子ダイナミクスのフィードバック制御の研究も行っており、今後の進展が期待されます。

上記のように、D02班内の連携研究は順調な進展を見せています。他方、異分野間の連携も始動しており、上田はB02班の山本やE02班の下川と協力して、低粒子数極限に対する大規模厳密対角化パッケージQS³の高度化も進めました[9]。また、10月着任のYosprakobのバックグラウンドは格子ゲージ理論で、TNを組み合わせた研究を立ち上げています。これまで蒔いてきた分野間連携の種から、チラホラと芽が出てきました。来年度は若手も交えて、他班との連携研究の加速もめざしたいところです。

- [1] K. Okunishi, T. Nishino, and H. Ueda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 062001 (2022) [invited review].
- [2] K. Okunishi, H. Ueda, and T. Nishino, arXiv:2210.11741; T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, and T. Nishino, *Phys. Rev. Research* **5**, 013031 (2023).
- [3] K. Tamura and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **106**, 144306 (2022); M. Nakagawa, H. Katsura, and M. Ueda, arXiv:2205.07235.
- [4] H. Katsura and T. Nakayama, *JHEP* **2022**, 72 (2022).
- [5] M. Kawano and C. Hotta, *Phys. Rev. Research* **4**, L012033; M. Kawano and C. Hotta, arXiv:2208.09902.
- [6] H. Nakai and C. Hotta, *Nature Comm.* **13**, 579 (2022); H. Nakai, M. Kawano, and C. Hotta, arXiv:2208.07171.
- [7] C. Hotta, T. Yoshida, and K. Harada, arXiv:2209.11599.
- [8] Y. Hidaka, S. C. Furuya, A. Ueda, and Y. Tada, *Phys. Rev. B* **106**, 144436 (2022); S. C. Furuya and K. Morita, arXiv:2207.02485.
- [9] H. Ueda, S. Yunoki, and T. Shimokawa, *Comput. Phys. Commun.* **277**, 108369 (2022).



対称性と情報幾何に基づく量子重力・量子物性の探求

近年、量子情報理論における最重要分野の一つであるリソース理論において、対称性が量子力学的過程にもたらす影響を包括的に解析する分野が急速に開拓されつつある。Resource theory of asymmetryと呼ばれるこの分野では、「対称性を守るダイナミクス」と、「対称性に対応する保存量に関する量子揺らぎ」を組み合わせることで、どのような量子過程が実現可能で、どのようなものが不可能かを判別することを目標としている。最近、私はこのresource theory of asymmetryの対象領域で成立する複数のトレードオフを発見した(PRL2018, QIP2020, PRL2021等)。現在、さらにそれを統一・拡張する試みを行い、ある程度まで成功している。本研究計画では、この統一構造をさらに深化・発展させつつ応用し、量子重力および物性理論において有用な定理を複数見出すことを目標としている。

現時点までに得られている成果として、対称性・不可逆性・量子性の間に普遍的に存在するトレードオフ構造があげられる。このトレードオフ構造を持つ物理的メッセージは以下二つである。1. 大域的対称性が存在する時、その対称性に対応する保存量を局所的に変化させようとする局所的ダイナミクスは不可逆性を生む。2. しかし、この不可逆性は、量子的なコヒーレンスによって和らげることが出来る。このトレードオフ関係は、量子測定・誤り訂



●研究代表者

田島 裕康 Hiroyasu Tajima

電気通信大学大学院情報理工学研究所・助教

JST さきがけ研究者(兼務)

1987年 愛知県生まれ

2015年 3月東京大学大学院博士課程修了

2020年 4月より現職(電通大)

2020年 11月より現職(さきがけ)

正符号・量子計算ゲートの実装・量子熱力学・量子重力などへの、幅広い応用を持つ。例えば、測定への制限であるWigner-Araki-Yanase (WAY) 定理、誤り訂正符号への制限であるEastin-Knill定理、ユニタリーゲート実装への制限であるunitary WAY定理などを、全て統一・拡張できる。また、量子重力への応用として、量子ブラックホールのqubitモデルであるHayden-Preskill (HP) モデルに適用することで、ブラックホールからの古典および量子的な情報脱出に対し、エネルギー保存則がどのように影響するかの一般的なバウンドを与える。例えば、 m ビットの古典情報の内、平均して何ビットが回復不能になるか、などを、HPモデルの範囲の中で厳密に議論することが可能になる。今後はこのような結果を、どんどん拡張・応用することを目指していく。



量子制御理論に基づく量子多体系における物理的に自然なt-designの生成法の研究

ランダムユニタリ変換は、量子情報処理における中心的な技法の一つである。初期の量子情報処理研究では、ユニタリ群上の正則不変測度であるHaar測度に基づくランダムユニタリ変換が用いられていた。しかし、Haar測度に基づくランダムユニタリ変換の実装には、量子ビット数に対して指数関数的に多い量子ゲートが必要であることが認識された。そのため、Haar測度を近似する測度であるユニタリt-designが、注目を浴びている。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るのみならず、近年、量子カオス系を近似する手法や、環境系のマルコフ化を生じさせる手法としても重要であることが分かってきた。しかし、従来のt-designの生成プロトコルは、量子コンピュータ上で効率的に動作する多項式時間アルゴリズムとして設計されているため、量子多体系上で実装する事は困難である。そのため、本研究はマルコフ化などへの応用を念頭に、量子多体系において従来手法よりも物理的に自然なt-designの生成方法を発見することを目的とする。まず、量子制御理論の手法を応用することで、完全に制御可能な量子系において全体系のダイナミクスが必ずt-designとなるようなランダムな制御法が存在することを証明する。量子多体系では、制限された自由度にのみ外部からラ



●研究代表者

尾張 正樹 Masaki Owari

静岡大学情報学部・准教授

1979年 大阪府生まれ

2007年 3月東京大学大学院博士課程修了

2016年 10月より現職

ンダムな作用が加わるという状況を想定する事が自然である。そこで、上記で存在が証明されたランダム制御法を用いる事で、性質が良くわかっている1次元や2次元のスピンの系において、小さな部分系へのランダムなユニタリ変換により、全体系のt-designが達成されることを示す。さらには、得られた新たなt-designの生成法の量子情報処理への応用を目指す。特にt-designの生成法を元にしてパラメトリック量子回路を作成することで、一部にのみアクセスすることで変分量子アルゴリズムが実行可能な新たな量子多体系デバイスの考案を目指す。



量子情報理論的手法による1次元テンソルネットワークの数理的解析

テンソルネットワークは、量子多体系の状態や演算子を少ないパラメータで効率よく記述する方法で、本領域においても量子多体系のダイナミクスやホログラフィー原理の解析において活躍しています。テンソルネットワークの利用は近年物理学の様々な領域に波及していますが、1次元ネットワークのような比較的シンプルな場合においても、基礎理論には未解明の部分が多々あるのが現状です。

本公募研究では、MPOと呼ばれる1次元テンソルネットワークが、どのような量子状態を記述できるかを明らかにします。1次元系の量子状態を表すテンソルネットワークには大きくMPSとMPOの2つが知られています(他にもMERAというものがありますがここでは割愛します)。このうち、MPSで効率よく表せる量子状態は、1次元系の低温状態(基底状態)と一致することが理論的に知られています。このことは、MPSが低温状態の記述に適しているということだけでなく、それ以外の状態を表現するのにMPSは適していない、というMPSの表現能力の限界をも示しています。それに対し、MPOは1次元系の高温状態を記述するのに適したテンソルネットワークです。しかし、MPOによって記述される状態には、こうした高温状態以外の状態も含まれることが知られており、い



●研究代表者

加藤 晃太郎 Kohtaro Kato

名古屋大学情報学研究所・助教

1990年 静岡県生まれ

2017年 3月東京大学大学院博士後期課程修了

2021年 6月より現職

たいMPOにどこまでの量子状態が含まれるのかは明らかになっていません。テンソルネットワークの記述範囲の問題はMPSを除き具体的には分かっておらず、本公募研究ではその第一歩としてMPOを対象としてこの未解決問題に取り組みます。

また、本公募研究の対象とする1次元テンソルネットワークは、2次元スピン系の物理とも関係していることが指摘されています。2次元非臨界系の低温状態では、その物理的性質が系の境界の1次元系に反映されることが知られており、この境界の1次元状態がMPOによって記述されるためです。本公募研究の後半では、こうした2次元系と1次元系の「ホログラフィー」的対応にも取り組んでいく予定です。



NMRを用いた非平衡量子多体システム構築および量子情報制御

核スピンと電子スピンの間には、超微細相互作用とよばれるMHz~GHzのエネルギースケールの微小な磁気的な相互作用がはたらく。そのため核スピンは、物性を担う電子の運動をひっそりと見守るだけであるが、超微細相互作用には電子構造や対称性に関わる極めて多くの情報が含まれている。私たちの研究グループでは、核磁気共鳴(NMR)を用いて、この超微細相互作用を紐解くことで、凝縮量子系の局所的な対称性の破れの形態や低エネルギー励起構造を調べている。対象としている物質は、古典的な相転移の枠組みに属さない、量子ホール効果や量子スピン液体などの巨視的な量子エンタングルメントを有する系である。これらは、誤り耐性量子演算において重要となる分数統計性のエニオンが素励起を担うと考えられ、その根拠を得るべく実験研究に取り組んでいる。近年、これまで2次元系でしか起こらないと考えられてきた量子ホール効果が、ディラック電子系とよばれる極めて移動度の高いバルク結晶において実現したことで、NMRによる磁性研究が可能となっている。実際、量子化されたディラック・フェルミオンの振る舞いを強磁場・極低温のNMR実験により観測している。一方、量子スピン液体は、電荷のない絶縁体であるが、スピン励起にギャップのある系では、量子ホール系同様の長距離量



●研究代表者

清水 康弘 Yasuhiro Shimizu

名古屋大学理学部・講師

1977年 兵庫県生まれ

2005年 3月京都大学大学院博士課程修了

2011年 4月より現職

子エンタングルメントのトポロジカル秩序をもつ。これまでに、いくつかのフラストレート物質においてNMR測定から量子スピン液体を示唆する結果を得てきた。果たして、核スピンは電子系の量子もつれにどのように関与しうるのであろうか？本プロジェクトでは、これらの巨視的量子状態と核スピン系とが結合した非平衡量子系を創出することで、量子情報を読み解く新たな課題に挑む。



冷却リユードベリ原子を用いたグラフ状態の生成と測定型量子計算への応用

本研究では、量子誤り訂正や測定型量子計算のリソースとして重要な「グラフ状態」と呼ばれる多体エンタングルメント状態を、冷却リユードベリ原子が持つ相互作用を用いて、自然な時間発展により生成する実験を行う。

局所的に集光されたレーザー光を用いて冷却原子を1個1個個別にトラップし任意の配列に並べる「光ピンセット配列」と呼ばれる技術を用いて、量子ビット配列を構築することができる。また、原子をリユードベリ状態と呼ばれる高エネルギー状態に励起することで、原子間に長距離相互作用を誘起することができる。

本研究では、光ピンセット配列中に捕捉された冷却ルビジウム原子を、パルスレーザーによりリユードベリ状態へと励起し、原子間にイジング型長距離相互作用を誘起し時間発展をさせることで、原子配列に対して一斉に大規模なエンタングルメントを生成し、グラフ状態を作る。冷却原子実験では一般に連続波レーザーを用いるが、本研究ではパルスレーザーを用いて原子間相互作用の時間スケールと比較して短時間で励起することで、相互作用を無視し一斉にリユードベリ状態へ励起することができ、その後一斉に原子間の相互作用を誘起できる。これは、個々の量子ビットペアに対して2量子ビットゲートを実行し、順を追ってエ



●研究代表者

富田 隆文 Takafumi Tomita

自然科学研究機構分子科学研究所・特任助教

1992年 奈良県生まれ

2019年 3月京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻博士後期課程修了

2019年 4月より現職

ンタングルメントを形成する従来の方式とは異なる。グラフ状態生成に最適なりユードベリ電子状態や状態操作、グラフ形状を明らかにする。個別にアドレス可能な1量子ビットゲート操作を実装し、生成した状態の忠実度を検証する。

加えて、周辺に存在する他の原子に対して影響を及ぼさない個別局所原子観測を実装し、生成したグラフ状態をリソースとした測定型量子計算への応用可能性を探る。



量子もつれに基づいた強相関開放量子系でのトポロジカル物性の探索

凝縮系では波動関数のトポロジカルに非自明な構造を持つ量子相の研究が急速に発展しており、系の詳細によらない特異な物性が明らかとなってきました。その典型例がトポロジカル絶縁体です。そこではバルクのトポロジカルな構造に起因して、摂動に対し安定なギャップレス状態が試料の境界に発現します。また最近では、非エルミート行列によって記述される非平衡開放量子系などのトポロジカルな物性が注目を集めています。そこでは、例外点や非エルミート表皮効果といった非エルミート性とトポロジーが絡み合った通常の系には見られない新奇な物性が数多く報告されています。本課題では極限宇宙という視点で開放量子系を系統的に解析することで、非エルミート性が本質的に効いた異常物性の探索やダイナミクスの解析を行います。

冷却原子系ではその高い制御性により散逸と強相関効果の両方を実験で導入可能となりつつあります。そこでは、強相関効果が本質的に効いた新奇な非エルミートトポロジカル現象が期待されます。本課題では特にこのような量子系を念頭にダイナミクスを解析することで、強相関効果と非エルミートトポロジーが絡み合った新奇物性の探索や、実験での観測にむけた提案を目指します。



●研究代表者

吉田 恒也 Tsuneya Yoshida

京都大学・准教授

1986年 奈良県生まれ

2014年 3月京都大学大学院博士後期課程修了

2022年 10月より現職

また、本領域の他班の方々と協力しながら、極限宇宙という視点で研究を行うことで学際的な研究展開も目指します。



量子情報理論及び物性理論からの量子重力理論へのアプローチ

一般相対論と量子力学は20世紀における物理学の大きな成果であるが、その融合である量子重力は未完の理論である。本研究では、量子重力を量子情報及び物性理論の立場から研究する。それを通じて量子力学と一般相対論がどのように統合されていくかを研究し、時空が量子系から創発するメカニズムを明らかにする。また、そのような無矛盾な量子重力から生じる低エネルギー有効理論が満たすべき制限を、量子情報及び物性理論の側面から研究し明らかにする。その上で、この記述が我々の時空や宇宙、素粒子に対してどのような予言を与えるかを解明していく。また物性理論における量子情報や、非平衡領域における相構造を解明し、それらの結果を量子重力の問題に応用していく。

具体的には、「[A]量子通信路と時空の関係および時間方向の創発」、「[B]量子情報から導かれる量子重力の沼地条件」、「[C]物性における創発現象と量子情報、および量子重力への応用」を研究することで、上記の問題を解明する。

[A]では、SYK 模型と呼ばれる強結合系の量子解放系ダイナミクスの研究から始め、超弦理論での実現をもつ AdS/CFT における量子解放系ダイナミクスの理解へと繋



●研究代表者

沼澤 宙朗 Tokiro Numasawa

東京大学物性研究所・助教

1990年 東京都生まれ

2017年 3月京都大学大学院博士後期課程修了

2022年 4月より現職

げる。これにより、未だよく理解されていない時間の創発や非ユニタリーCFTの重力双対の理解を目指す。[B]では、量子重力のSwampland条件を量子情報やトポロジカル相の観点から理解することを目指す。Swamplandは量子重力が与える低エネルギー有効理論への制限であるが、ブラックホール熱力学による議論が用いられることが多い。本研究では、量子重力においてより根本的な条件である量子情報や量子エンタングルメントに基づく制限の導出や考察を行う。[C]では、物性系における創発ゲージ理論を量子情報の観点から調べることで、創発時空の性質の理解を目指す。創発ゲージ場は物性系においてよく現れるが、重力もゲージ場であるからこの点で類似性がある。本研究では創発ゲージ場を伴う系の量子情報量を調べることで、この類似性を通じて量子重力の理解を目指す。



テンソルネットワークの素粒子物理学への応用

テンソルネットワーク(TN)法とは元々、物性物理学分野における量子多体系の問題を効率よく解くための変分法の一つとして提案されたが、その後、様々な改良が加えられ、現在その応用は素粒子論、量子情報、量子化学など多くの分野へ広がっている。私自身は、TN法を素粒子論の理論的基礎である場の理論に応用する研究を行っている。特に、従来法であるモンテカルロ法では「符号問題」のために攻略することが難しい物理系にTN法を適用することで、これまで得ることができなかったダイナミクスを第一原理計算から取得することを目標としている。符号問題があるが興味深い例としては、有限バリオン数密度の量子色力学(QCD)、実時間経路積分、格子カイラルゲージ理論、超対称格子模型、トポロジー項が入った系などが挙げられるが、本研究ではトポロジー項が入ったCP(1)模型の相構造解析を行っている。この模型はQCDのトイモデルとして知られており、それを解析することでQCDの知見が得られると期待されているが、現在CP(1)模型の相構造自体の大局的な理解については混沌とした状況となっており、より洗練したTN法を用いることで最終決着をつけたいと考えている。

TN法には符号問題がないという利点がある一方で、高次元系(3次元以上)に適用した場合その計算コスト



●研究代表者

武田 真滋 Shinji Takeda

金沢大学理工研究域・准教授

1978年 大阪府生まれ

2005年 10月筑波大学大学院博士課程修了

2018年 12月より現職

が激増してしまうという問題が残されており、現実世界は3+1次元であるため素粒子物理学においては不可避の問題である。この問題を解く鍵となるのが情報圧縮の方法である。例えば、環境効果や局所相関を取り入れたもの、あるいは確率的に主要な寄与を選び出す方法など様々なアイデアがこれまでに提案されている。本研究ではこのような知見を織り交ぜながら、高効率な高次元用粗視化アルゴリズムの開発を目指している。



くりこみ群に基づくテンソルネットワークにおける時空の創発の研究

時空の創発は量子重力理論の本質的な性質であると考えられる。そこでは、量子エンタングルメントが大きな役割を果たすことが認識されつつある。ゲージ重力対応は時空の創発を具現する典型的な例である。本研究は、ゲージ重力対応において、くりこみ群に基づいて連続的なテンソルネットワークを構成することにより、量子エンタングルメントによる時空の創発の機構を探究し、量子重力理論の構築へ向けて前進することを目的とする。

MERAやHaPPYコードやランダムテンソルネットワークなどのテンソルネットワーク模型におけるネットワークは、境界上の理論からエンタングルメントエントロピーを通じて創発した離散的な空間であると解釈されるため、これらの模型は時空の創発の研究において重要である。ここで、連続的な空間の創発を得るためには、連続的なテンソルネットワーク模型を構築する必要があると考えられる。

MERAの連続版であるcMERAは、自由場の理論の場合には変分法を用いて構成することができる。ゲージ重力対応の観点からは、強結合の相互作用がある場の理論について、cMERAを構成することが望まれるが、変分法によるアプローチは試行関数の選択の面から難しい。MERAにおけるネットワークの階層はくり



●研究代表者

土屋 麻人 Asato Tsuchiya

静岡大学理学部物理学科・教授

1966年 埼玉県生まれ

1995年 3月東京大学大学院博士課程修了

2016年 8月より現職

こみ群のスケールと解釈され、これがバルクの方向に対応することから、cMERAの構成は波動関数のスケール依存性を得ることと等価であると考えられる。本研究では、くりこみ群に基づくcMERAの構成を追求する。特に、厳密くりこみ群とMERAの経路積分版とみなせるテンソルくりこみ群に着目する。

まず、波動関数に対する厳密くりこみ群を定式化することによって、非摂動的に波動関数を解析することを可能にする。さらに、格子理論に対するテンソルくりこみ群の連続極限をとることにより、波動関数のスケール依存性を数値的に調べる手法も確立する。これらを用いて構成した連続的なテンソルネットワークにおいて、重力のダイナミクスを引き出すことにより、量子エンタングルメントによる時空の創発の機構を探究する。



インフレーション宇宙モデルにおける量子もつれ構造と情報スクランプリング

確率的インフレーションの方法は、加速膨張する宇宙におけるスカラー場(インフラトン場)の短波長量子ゆらぎ(ハッブル地平線長さより短い成分)がc数の白色雑音とみなせることを用いて、長波長成分に対する確率微分方程式(ランジュバン方程式)を導出する取り扱いである。この方法を用いると、インフレーション宇宙の量子的発展は古典的なBrown粒子の運動と同じ形に表現できる。インフラトン場の長波長成分に対する確率微分方程式は、現象論的な考え方に基づいて導出されたものであるが(Aryal & Vilenkin 1987, Starobinsky 1988)、この方程式を用いて評価されるゆらぎの多点関数は、非線形相互作用がある場合にも場の理論を用いて得られる結果と一致することが知られている。よってこの方法はインフレーション宇宙における大域的な量子効果を有効的に取り入れたものになっていると考えられ、膨張宇宙における場の理論の赤外発散の問題と漸近対称性の観点からその正当性が議論されている。またインフラトン場の背景時空に対する反作用効果を簡単に取り入れることができるため、非ガウスの及び非線形な計量ゆらぎを取り扱うことが可能であり、原始ブラックホール形成のシナリオ提案等においても活用されている。インフラトン場をBrown粒子とみなす確率的描像に基づく、大域的には加速膨張が永遠に終了しない状況が実現する(エターナル・インフレーション相)。この相の実現はインフラトン場のパラメータに依存しており、その値に応じて相が変わる構造となっている。古典的にはハッブル地平線スケールでは、宇宙は一様なフリードマン宇宙として表現することができ、それ以上の大スケールでは独立なフリードマン宇宙が空間的に貼り合わされている描像となる。確率的インフレーション



●研究代表者

南部 保貞 Yasusada Nambu

名古屋大学大学院理学研究科・准教授

1961年 高知県生まれ

1989年 5月広島大学大学院博士後期課程修了

1995年 4月より現職

の方法に基づいてインフレーション宇宙の大域的空間構造を考えると、各空間点ごとに膨張率の異なるフリードマン宇宙が貼り合わされたものとなり、大域的には非一様で複雑な時空構造が実現することとなる。

確率的インフレーションのモデルでは、量子効果としては短波長の量子ゆらぎによる状態変化の効果を取り入れている。しかしながら、ハッブル地平線以上の大スケール空間相関は手で落とす取り扱いとなっており、量子論の重要な性質である量子もつれの効果はモデルの中には取り入れられてない。量子もつれの効果を取り入れた場合に、量子的インフレーション宇宙の描像はどのようなものになるのだろうか？すなわちインフレーション宇宙に対する古典Brown粒子の描像はどのように変わるのか？また量子もつれの導入に伴い生じる情報スクランプリングは、宇宙の保有しうる情報量の振る舞いにどのような影響を与えるのか？そして宇宙の古典化現象と関係があるのだろうか？以上の「問い」に対する手がかりをこの研究を通して得たい。



Jackiw-Teitelboim 重力理論に立脚した量子重力理論の研究

わたしの主な研究分野は素粒子論における超弦理論です。超弦理論は自然界に存在する4つの力、電磁気力、弱い力、強い力、重力を統一的に記述できる究極理論の有力候補と考えられています。超弦理論の研究にはいろいろな研究テーマがありますが、わたしが興味を持って研究しているのは、ゲージ理論と重力(弦)理論の双対性(等価性)です。この双対性の雛型となる実現例は、Maldacenaという人によって提唱された反ド・ジッター(Anti-de Sitter, AdS)空間上における重力(弦)理論と共形対称性を持つ場の理論(Conformal Field Theory, CFT)の等価性です。この等価性はホログラフィー原理の実現例の一つですが、この原理がどのように発現するのか、その基礎的な機構は未だに解明されていません。

わたしは、この機構に対して、双対性の背後に存在する可積分構造に基づいた数理物理的な解析、弦のカオス的な運動や乱流的な振る舞い、ゲージ理論におけるカオス的な散乱などの観点から研究を進めています。本領域の主題である量子情報理論とこれらのテーマの関係について理解することは非常に重要な研究課題です。

わたしの公募研究の課題は、量子情報理論とホログラフィー原理の解明を目指して、Jackiw-Teitelboim



●研究代表者

吉田 健太郎 Kentaroh Yoshida

京都大学理学研究科・講師

1975年 愛知県生まれ

2003年 3月京都大学大学院博士課程修了

2022年 5月より現職

重力理論と呼ばれる2次元重力にディラトンの結合したトイモデルを詳細に解析することです。ディラトンのポテンシャルにはいろいろな選択肢がありますが、わたしたちの先行研究によって、sinh型の場合にはLiouville重力理論というよく知られた理論と等価になることが分かりました。この研究を推し進めることで、量子情報理論との関係、量子重力理論における基礎的な自由度の解明の糸口を探りたいと考えています。



重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論模型の構築

宇宙論や曲がった時空上の場の量子論の理論研究を行なっています。数年前に量子力学のテキスト執筆の手伝いを行ったことをきっかけに、量子力学の基礎論や量子情報理論といったテーマにも興味を持つようになり、現在は重力の量子力学的性質の検証に関わるテーマを中心に研究をしています。「重力が量子力学の枠組みに従うかどうか」という問いを改めて見直すこのテーマは、古くはファインマンやペンローズの奥深い考察の歴史があり、最近の量子情報や量子技術の発展とも関連する非常に興味深いテーマと感じています。重力相互作用が作り出す量子もつれが関心事の一つですが、それが持つ量子重力理論への意義や、それを実験で検証できるかどうかを明らかにするための理論研究も行なっています。量子力学系がどのように重力相互作用をするのかといった点に着目しますが、重力は非常に弱いので、なるべく質量の大きな物体の量子状態を実現する必要があります。そのようなマクロな物体の量子状態を実現するためにオプトメカ系は重要な役割をすると考えています。オプトメカ系とは、光学キャビティの一端を鏡振動子とし、キャビティ光と相互作用させる力学系です。それらを組み合わせてマイケルソン干渉計とした装置は重力波検出の原理となっており、関連する研究や技術が発展しています。



●研究代表者

山本 一博 Kazuhiro Yamamoto

九州大学大学院理学研究院物理学部門・教授

1967年 岡山県生まれ

1994年 3月広島大学大学院博士課程修了

2019年 4月より現職

計画した公募研究では、将来の重力の量子力学的性質の検証とマクロな物体の量子状態の理論予言を目的として、ビーム模型と呼ばれる懸架型鏡振動子のオプトメカ系の理論模型の構築を行なっています。ビーム模型に基づいてオプトメカ鏡振動子の振動ノイズと散逸の特徴、光学系のフィードバック制御による量子制御を行った場合の量子状態の理論予言を行う計画です。



量子情報で繋ぐブラックホールのマイクロ・マクロ描像の研究

本研究の目標は、ブラックホールおよびワームホールの量子論的（マイクロな）側面を、ホログラフィー原理と量子情報理論の観点から理解することです。

宇宙空間の極限的な状況であるブラックホールは、今現在まで「量子重力理論」を理解する上での試金石の役割を果たしてきています。特に近年、ブラックホールの内側と外側の世界を“つなぐ”ワームホールが発見され、有名な「ブラックホールの情報喪失問題」の解決に向けて大きな進展がありました。この進展は主に半古典的な描像（マクロな視点）に基づく理解で、量子論的な描像（マイクロな視点）に戻ると、依然として不明瞭な点・問題点が存在することが指摘されています。

私は「ブラックホールや付随するワームホールがどのようなマイクロ構造を持っているか？」や「マイクロな視点とマクロな視点の関係を補完する方法はないか？」を明らかにすることで、このような量子重力の重要な問題の理解を進めることができると期待しています。直接的にはB班の研究テーマと関連が深い内容です。

より具体的には、「(1) ワームホールを記述する量子状態(の候補)たちのマイクロ/マクロな性質を、量子



●研究代表者

玉岡 幸太郎 Kotaro Tamaoka

日本大学文理学部 物理学科・助教

1990年 兵庫県生まれ

2019年 3月大阪大学大学院博士後期課程終了

2021年 4月より現職

情報量の観点から明らかにすること]、「(2) 巨視的ワームホールを微視的なモノへ“分解”する量子操作とその影響を明らかにすること」を目標として現在研究を行っています。興味深いことに、これらのテーマはC班やD班の研究テーマとも深い関わりがあり、この極限宇宙のコラボレーションで新しい研究の方向性を探っていきたいと考えています。また、「(3) ミクロなワームホールの存在が宇宙の対称性などの物理へどのような示唆を与えるか」についても取り組んでいきたいと考えています。



量子フラストレート磁性体におけるエンタングルメントウィットネス

量子もつれの概念は近年非常に大きな注目を集めている。特に entanglement entropy (EE) を用いた理論的研究が盛んに行われた結果、量子スピン液体やトポロジカル秩序などといった量子系に現れる特異な状態を理解する上で、またはテンソルネットワーク法などの新しい数値計算手法の開発を進める上でも量子もつれの概念は本質的に重要であることが明らかにされている。一方で冷却原子系や光学系などの少数系における例を除いて EE を実験的に直接測定することは非常に困難であることも知られている。そこで本研究では one tangle, concurrence, quantum Fisher information などの所謂 entanglement witnesses (EWs) と呼ばれる量子もつれ測度に着目する。これらは磁性体分野では馴染み深いスピン間の相関関数や動的構造因子で書き下すことが可能であることから中性子散乱実験などとも親和性が高いことが知られている [1-4]。本研究では量子スピン液体状態やランダムシングレット状態などと言った、極低温でも磁気秩序が見られないが故にこれらの状態を特徴づけるポジティブな実験的証拠を捉えることが難しい量子状態を研究対象とする。これらの特異な量子状態が上記の EWs によって特徴づけられるかどうかを数値的に明らかにすることで、候補物質におけるこれら量子状態の実験的検出法や制御



●研究代表者

下川 続久朗 Tokuro Shimokawa

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

1984年 和歌山県生まれ

2012年 3月兵庫県立大学博士後期課程修了

2021年 12月より現職

法に繋がる理論的指針を構築することを目指す。

- [1] L. Amico et al, Phys. Rev. A **69**, 022304 (2004).
- [2] W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **80**, 2245 (1998).
- [3] P. Hauke et al, Nat. Phys. **12**, 778 (2016).
- [4] P. Laurell, et al, Phys. Rev. Lett. **127**, 037201 (2021).



孤立量子系の非エルゴード性に由来する新奇量子多体現象の研究

本公募研究では孤立量子系の熱平衡化に関する問題に取り組む。近年の量子技術の進展により、冷却原子気体、Rydberg原子、イオントラップ、超伝導量子ビット系などのほとんど孤立した量子系が実験できるようになった。それに伴い孤立多体系を十分時間発展させた後、熱平衡状態になるのかという点を実験的に調べられるようになった。実際に多くの研究がなされ、固有状態熱化仮説(ETH)を系が満たすと熱平衡化することがわかった。ただし、ETHを実際に系が満たすかという数学的証明はまだなく、未解決問題となっている。一方でETHを満たさない非エルゴード系と呼ばれる系も存在することが知られている。典型例は可積分系やAnderson局在、多体局在を起こす系であるが、最近理論的にも実験的にも新しいタイプの非エルゴード系が見つかった。例えば、quantum many-body scar状態と呼ばれる特別な固有状態を持つ系や、Hilbert space fragmentationというある種のkinetic constraintを有し、その結果熱平衡化が妨げられているような系がある。本公募研究ではこれらの発見に触発され、非エルゴード性に由来した新しい量子多体現象の発見、探索を行う。特に、Hilbert space fragmentationを先行研究とは異なり運動量空間で考える。素朴に考えると、Hilbert space fragmentationを運動量空間で起こ



●研究代表者

國見 昌哉 Masaya Kunimi

東京理科大学理学部第一部 物理学科・助教

1986年 北海道生まれ

2014年 東京大学大学院博士課程修了

2022年 4月より現職

すと、永久流状態が出現することが期待できる。本研究では運動量空間のHSFに誘起された永久流状態の性質の研究や、新奇非平衡量子多体現象の発見、新しい非エルゴード機構の発見を目指す。また、ここで得た研究成果を実験で実装するためのスキームの開発、提案を行う予定である。



次世代観測で探る原始ブラックホールの蒸発における量子性の理論的研究

宇宙初期におこったとされるインフレーションは大スケールで約10万分の1の大きさの曲率(密度)ゆらぎを量子的に作りました。また、同時に宇宙重力波背景放射も生成します。これまでのCMBの観測により曲率ゆらぎに起因する温度ゆらぎが発見されたように今後は重力波に起因するB-mode偏光を観測しインフレーションを検証することが期待されています。最近そうした宇宙初期から存在する重力波を観測した可能性があるとというニュースが報じられました。NANOGrav共同実験が複数のパルサーが周期的に出す電波のシグナルの相関を12年半の間観測したところナノヘルツ帯の電波に有意な変調を観測したというものです。もし背景重力波が存在するなら時空を伸び縮みさせるため、その正確なパルサーの電波の周期を変更してしまうのです。今回の観測値は宇宙初期のインフレーションが直接つくる重力波に比べて7桁以上も大きいものでした。一方、観測的に許されるインフレーションが作る小さなスケールの曲率(密度)ゆらぎ δ が大きかった場合(例えば $\delta \sim 0.3$)、2次的な非線形効果を通して小スケールに極めて多くの重力波が作られる可能性があります。我々は論文(Kohri and Terada, arXiv:2009.11853)において、この2次的重力波背景放射により観測が説明できることを指摘しました。さら



●研究代表者

郡 和範 Kazunori Kohri

高エネルギー加速器研究機構・准教授

1970年 兵庫県生まれ

2000年 3月東京大学大学院博士課程修了

2014年 2月より現職

に上記の大きな密度ゆらぎは宇宙初期につぶれて太陽質量程度のブラックホールになることが予想されます。このブラックホールは天体起源のものと区別して原始ブラックホールと呼ばれます。この説を検証するための方法にも実は重力波が用いられます。それら原始ブラックホールが宇宙初期に連星を形成し現在合体しつつあります。その時に発する重力波を近い将来LIGO-Virgo-Indigo-KAGRA共同実験が連携して見つける可能性があるのです。将来の重力波実験を用いて初期宇宙のインフレーションを検証し原始ブラックホールを発見する日がまもなく来ると期待されます。



ブラックホール情報損失問題とは何か？

ブラックホールの情報損失問題とは、70年代にホーキングが主張した「ブラックホールが蒸発する」ということに端を発する問題で、以来長く研究者を悩ませてきた問題である。本稿ではこの何が問題なのか？をなるべく平易な言葉でかつ本質をできるだけクリアーに解説してみたいと思う。

1. そもそもブラックホールとは？

ブラックホールとは一言で言うと、アインシュタイン方程式の「真空解」である。アインシュタイン方程式は、およそ100年前にアインシュタインが提案した式で、ある場所の物質(エネルギー=質量)によりその場所の空間がどのように曲がるか？を記述する式である。アインシュタインは重力が時空のまがりによってもたらされるものと看破し、この方程式を基礎原理に基づいて提唱した。ここから非常に変な物質の存在を仮定すれば、非常に変な時空を生み出すことができるのは明らかであろう。しかしブラックホールはそうではない。「真空解」である。いま空間のとある一点にのみ質量があり、その周りの広大な領域には何も物質がないとしよう。その場合、質量のある一点を除けば、時空には何もない。この場合のアインシュタイン方程式の解を真空解と呼ぶ。真空とは「古典的には何もない」と思ってもらってよい。この(一点を除き)空間に何もなくても必ず存在する解、それがブラックホール解である。どんな物質がこの世に存在するかに全く依存せず、時空があれば普遍的に存在するものなのである。故に理論家は非常にブラックホールに興味を持っている。

2. ブラックホールの構造

次にこのブラックホール解がどのような時空を記述するかについて述べよう。ややこしい計量(metric)など言わずに直感的に説明するため次の例えで説明してもらいたい(少し読者の想像力を要する)。皆さんは動く歩道を知っておられると思う。空港などでゲートに向かう時長い通路を歩くときに使うあれである。しかし普通の動く歩道ではない「世にも奇妙な動く歩道」があると想像してもらいたい。これは普通の動く歩道とは全く異なる。どう違うかというまず、すごく長い。そして幅も広い。故に普通の動く歩道と違い、途中で外に出られないと仮定してもらいたい。この動く歩道の乗り口をA、降り口をBとしよう。いまこの降り口Bで火事が起こっている。非常に高温で燃えているので、降り口Bで動く歩道を降りた瞬間に焼かれて皆死んでしまうと想像してもらいたい。そう聞くと誰もこの歩道に乗りたくないと思うのだが話を続けよう。この奇妙な動く歩道、さらに特徴があって、動く歩道の速度がどんどん速くなっている

のである。乗り口Aでは歩道は時速5km(およそ人の歩く速度)で動いているのであるが、乗っていると速度がどんどん上がっていく。時速10km、20km、30km、…とどんどん速くなる。降り口B付近では時速100kmにもなっていると想像してもらいたい。この奇妙な動く歩道にあなたがいま間違っただけで乗ってしまったとしよう。でも心配ご無用。もし仮にあなたが時速30kmで走れるのであれば、間違っただけで乗っても、すぐ乗り口Aまで走って戻れば無事降りられるであろう。乗り口A付近ではたった時速5kmで歩道は動いているのだから、その差、時速25kmで戻れる。乗ってしまったからもう少し進んでいても、もちろん大丈夫。しかし動く歩道が時速30kmを超えてしまうともうダメだ。あなたが最高速度の時速30kmで乗り口Aに戻ろうと思っても、動く歩道がそれ以上の速度でBに向かっているのだからあなたはもう乗り口Aに戻れない。残念だがあなたはBまで運ばれて焼け死ぬしかない。この動く歩道の速度が時速30km時点の手前があなたが引き返すことのできるぎりぎりであることがわかんと思う。この時速30kmの地点をH=地平線と呼ぼう。このH、地平線はあなたが乗り口Aに戻るための限界である。もしあなたが燃えない宝石などのカバンを持っていたとしよう。時速30km地点を超えて動く歩道にのっていたらあなたはBについて焼け死んでしまうが、あなたの持っていた宝石も同様である。宝石はBに蓄えられていく。降り口Bは火事がおこっていて人が死ぬなど尋常ではない地点なので特異な点、特異点=Bと呼ぼう。まとめると、奇妙な動く歩道に乗ってしまった人は地平線=Hを超えるともう乗り口Aに戻ってこられない。地平線Hを超えてしまった人、およびその人の持っている宝石は降り口Bに蓄えられる。地平線=Hには、宝石はない。宝石はBに集積される。どこまで奇妙な動く歩道について述べたが、実はブラックホールも全く同じ構造をもっている。この世で最速である光でさえ、有限の速度を持っているからだ。それはあなたが時速30kmの有限の速度でしか走れないのと同じである。光もブラックホールの地平線を超えると、もう外に戻ってこられない。またブラックホールに吸い込まれた光が運んでいる情報はブラックホールの中心にある特異点に蓄えられる。特異点と地平線は離れた場所にあり、地平線には情報は無い。情報は全て特異点にある。

3. ブラックホールの量子論

ここまではブラックホール時空がどんな構造をもっているかを奇妙な動く歩道のアナロジーから解説した。次にこの地平線をもつ時空に量子論を適用するとどうなるかを述べる。量子論は直感的に説明するのが難しいが

その特徴の一つに「不確定性」がある。古典的には、どこに、どんな速度、どんな加速度でいると断定できるが量子論では同時に全て決定できない。不確定性がある。量子論で真空(=古典的になにもない)を考えると、実は何もないのではなく粒子数が不確定になっている。真空から粒子がペアになってでてきては、ペアになって消えるということを繰り返している。このペアで生成された粒子の対は本学術変革の肝のひとつである「量子もつれ」を持っている。量子もつれをもったペアの粒子が生まれては消えるというのを繰り返しているのである。ペアの一つが正のエネルギー ($E>0$) 粒子で、もうひとつが負のエネルギー ($E<0$) 粒子だとしよう。負のエネルギー粒子 ($E<0$) は存在しないので正のエネルギー粒子 ($E>0$) とくっついて消えようとする。しかし地平線近傍だが少し外で生まれたペアの粒子対のうち、負のエネルギー粒子のみがブラックホールに入って正のエネルギー粒子がそのまま外にいればどうなるであろうか? 負のエネルギー粒子は存在できないがブラックホールに吸い込まれた場合、単にブラックホールの質量を下げるだけで何も矛盾はない。もしこれが逆(正のエネルギー粒子がブラックホールに入って負のエネルギー粒子が外に取り残される)なら話は別である。外に一人取り残された負のエネルギー粒子は存在できないので相方である正のエネルギー粒子を求めてブラックホールに入るしかない。このように非常に大雑把な議論であるがブラックホールの地平線があれば、そこから正のエネルギー粒子を取り出すことができる。これがブラックホールの蒸発である。量子もつれの観点から述べるならば、真空の波動関数の(地平線の内側と外側の)量子もつれから、地平線の内側が見えないことによりtrace outして、外側のみ密度関数を得ると、純粋状態ではなく、統計力学で扱う有限温度をもった混合状態になるということである。つまりブラックホールの地平線がブラックホールが温度をもって蒸発する起源である。ブラックホールの蒸発は地平線でおこっている。

4. なぜ情報が損失するという結論になるのか?

話が長くなってきたのでまとめよう。奇妙な動く歩道で見たように、地平線は引き返せる限界であるが、そこに情報は無い。情報はすべてそこから離れた特異点に蓄えられてある。しかしブラックホールの蒸発は地平線があるからで、地平線で起こっている。ここから次の結論が得られる。情報が蓄えられているブラックホールの中心にある特異点から離れた場所にある地平線に情報は無いが、ブラックホールの蒸発が地平線で起こっている以上、ブラックホールの蒸発で出てくる粒子はブラックホールに吸い込まれた粒子と無関係、となる。つまり、

ブラックホールを構成する粒子の波動関数の情報は失われる(これがホーキングの議論の肝である。結局、ブラックホールという「時空構造」を認めると、地平線と特異点の違いを生み出し、両者が異なる場所であることが情報が失われる起源である。

5. 真実は?

量子論を信奉する読者はただちに、ブラックホールの蒸発は量子論に則るはずと言うであろう。故にブラックホールの内部で特異点や地平線の違いがない。情報は特異点のみに蓄えられず地平線近傍まで蓄えられているはずである。と主張するかもしれない。その可能性もある。しかしそうだとするならばブラックホールの輻射はたんなる石炭の輻射と一見変わらない。地平線を石炭の表面だと考えれば同じである。しかしブラックホールの解が予言する時空構造は、地平線と特異点を異なる場所として予言しており、それを量子論の観点から劇的な変更をするのは容易ではない。もちろんアインシュタイン方程式は古典論であり量子論ではない。しかし太陽の質量の何万倍以上の質量のブラックホールはその地平線の面積は地球より大きい。我々が地球の表面で曲がった時空の量子論を適用して矛盾もないなら、そのような巨大なブラックホールの地平線近傍で曲がった時空の量子論が適用できると考えるのが自然である。ブラックホールの情報損失問題は、もし量子論の原理が適用されブラックホールの情報が損失されないのであれば、それは同時にアインシュタインの予言した一般相対論、およびそれに基づく曲がった時空の量子論が大いなる変更を受けるべきであるという非常に衝撃的な結論を引き起こす。と同時に、この問題を研究者が議論することによって、量子もつれと創発する時空やホログラフィーという新しい理論物理の概念が生みだされた。ブラックホールの情報損失問題は我々弦理論の研究者にとって思考のための肥やしなのである。

参考文献

- [1] S. W. Hawking, Commun. Math. Phys. **43**, 199 (1975).
- [2] J. D. Bekenstein, Phys. Rev. D **7**, 2333 (1973).
- [3] S. D. Mathur, Class. Quant. Grav. **26**, 224001 (2009).



● 執筆者紹介

飯塚 則裕 Norihiro Iizuka

大阪大学理学系研究科物理学専攻助教

1998年 東京大学卒業

2003年 コロンビア大学大学院PhD取得

タタ研究所(インド)、サンタバーバラ カブリ

理論物理学研究所(アメリカ)、CERN(欧州)等

の研究員を経て2014年より現職



●報告者

岩木 惇司 Atsushi Iwaki

東京大学大学院総合文化研究科 博士後期課程2年生

指導教員 東京大学大学院総合文化研究科 堀田知佐 教授 (D02)

受入教員 神戸大学大学院理学研究科 西野友年 准教授 (D02)

受入期間 2022年7月3日(日)~7月16日(土)



神戸大の西野先生(右)と私。

テンソルネットワークは特定の構造を持つ情報を効率よく記述するための技術である。特にテンソルを1次元的に繋いだものは行列積状態(MPS)と呼ばれ、エンタングル面積則に従う量子状態を扱うことを得意としている。物性物理学ではMPSは密度行列繰り込み群(DMRG)の変分関数として驚異的な精度で1次元量子多体系の基底状態を表現することに成功した。その後の研究でMPSは有限温度のギブス状態を記述するのにも有効であることが、数値計算と解析計算の両面から示されている。一方でギブス状態のほかに熱平衡を表す状態として、典型的な純粋状態=TPQ状態が提案されたが、こちらはエンタングルメント体積則に従うためMPSによる記述が難しいと考えられていた。私はこれまでの研究で、両端に補助系をつけたMPSを導入することでTPQ状態を表現できることを実証した。その成果から、1次元の有限温度を計算する簡便な手法としてTPQ-MPS法を開発した。以下では、TPQ-MPS法のさらなる理解と拡張を目指して、若手循環プログラムを通して行った研究について報告する。

7月上旬の2週間、私は神戸大学の西野先生の元に滞在した。西野先生はテンソルネットワークの専門家である。DMRGを始めとしたテンソルネットワーク手法が物性物理学に積極的に応用され始めた1990年代において、角転送行列繰り込み群法(CTMRG)を定式化し、転送行列DMRGを開発するという先駆的な研究をされている。今回の滞在では、MPSの典型性に関する最近の私の研究成果について議論し、西野先生からテンソルネットワークの応用例について教授いただきながらCTMRGを実装した。CTMRGはダイマーカー



OISTのマティアスさん(左)と私。

バリングや有限温度古典系への応用を始めとして、最近では2次元量子系を扱うPEPSの縮約にも用いられる強力な手法である。計算を実行できたのは2次元正方向格子の古典イジング模型のエネルギーという最も簡単な例だけだったが、積極的に今後の研究に活用したいと考えている。実装に際してテンソルネットワークライブラリであるITensor.jlを用いたのだが、今回の経験はのちにTPQ-MPSのコードを最適化するのに役に立った。西野先生からはテンソルネットワーク以外にも特殊な古典スピン模型などの話を伺い、独創的な研究者の世界観を肌で感じた。

10月から11月にかけての4週間、OISTのマティアスさん(Gohlke Matthias)が私の所属する堀田研究室に滞在し共同研究を行った。マティアスさんはTPQ-MPSを実装し1次元の横磁場イジング模型に適用した。我々は互いの数値計算結果を比較して、有限温度へのアプローチについての詳細な議論を行った。その過程で、マティアスさんはTPQ-MPSのエネルギーが厳密なものよりわずかに小さくなることを数値計算によって発見し、私はそれがボンド次元の切り捨てに起因していることを簡単に解析的に示した。TPQ-MPSに対する理解が一段と深まったと思う。コロナ禍のためオンラインの研究会などに参加する機会の少なかった私にとっては、初めて他の研究室の方と本格的に共同研究をする機会になった。まだまだ英語でのコミュニケーションに慣れないところもあったが、互いの意見を積極的に議論するのは有意義な時間だった。

我々の見ているマクロな世界は、多数の粒子が量子力学に従って複雑に運動しているミクロな世界に比べて至極単純である。統計力学は2つの世界を結び付けてくれるが、このような膨大な情報圧縮がどのような原理で起こっているのかについては未解明な部分が多い。テンソルネットワークは、洗練された数値計算の技術というだけでなく、ミクロからマクロの情報圧縮の仕方を提示してくれる理論形式でもある。今後もテンソルネットワークを通して量子物質についての理解を深めていきたい。

最後に、私の滞在を受け入れてくださった西野先生に感謝いたします。また、このような貴重な機会を与えてくださった若手循環プログラムにもお礼申し上げます。



● 報告者

山本 和樹 Kazuki Yamamoto

京都大学大学院理学研究科 博士後期課程3年生

指導教員 京都大学大学院理学研究科 川上 則雄 教授

受入教員 東京大学大学院理学系研究科 桂 法称 准教授 (D02)

受入期間 2022年12月11日(日)~12月24日(土)

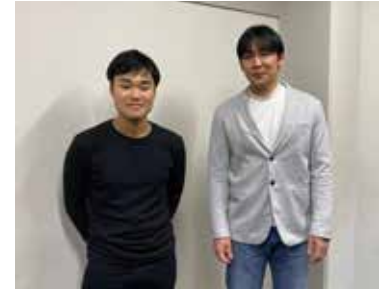


写真2 赤城先生との写真

近年、駆動散逸多体系や非エルミート量子系に代表されるように、開放量子系が実験的にも理論的にも活発に研究されています。特に、冷却原子系におけるパラメータの高い制御性により、開放量子系に特有の新しい量子相の観測が可能になりました。このような実験の進歩に触発されて、最近では非エルミート量子系の研究が活発に行われています。また近年、本学術変革領域研究『極限宇宙の物理法則を創る』の最重要課題の一つである、エンタングルメントエントロピーの観点からも非エルミート系の研究が盛んに行われています。私はこのような研究を鑑みて、開放量子系やその有効的記述である非エルミート量子多体系は、エンタングルメントエントロピーを調べる上での興味深い対象系となり、「極限宇宙」の解明への道を開く鍵となるのではないかと考えています。東京大学の桂研究室は数理的なアプローチにより数多くの研究結果を挙げている世界最先端の研究室ですが、近年では非エルミート系、および、量子開放系の厳密解などの研究も行っています。そこで、そのような系を取り扱うための具体的なアプローチや考え方などについてさらに学ぶために、私は桂研究室に約2週間の研究滞在を行いました。

まず印象に残ったのは、研究室で行われたグループセミナーです。桂先生のご厚意でセミナーでの講演の機会を頂きましたので、私も講演者の一人として参加させて頂きました。そこでは具体的に、散逸下朝永・ラッティンジャー液体の普遍的性質についての私の最近の研究 [1, 2] について話しました(写真1)。セミナー

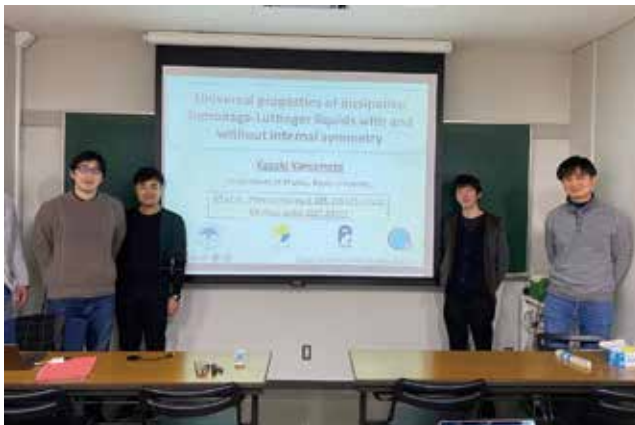


写真1 桂グループセミナーにて
桂先生、私、田村さん、吉田さん(左から右)

は約1時間半続きました。長時間のセミナーでさぞみなさん疲れているのではと思ったのですが、たくさんの質問をいただき、充実したディスカッションを行うことができました。特に、エンタングルメントエントロピーの非エルミート量子系への一般化に関する議論なども行い、非常に意義のあるものとなりました。

また、今回の研究訪問を通じて、現在桂先生の研究室で行われている研究についても多くのことを学ぶことができました。たとえば、開放量子系における長時間の緩和ダイナミクスに関連したリウビリアンギャップの研究や、非可積分モデルに部分的に可積分性を組み込むことによって引き起こすことができる量子傷跡状態の研究、および多成分(いわゆる $SU(N)$) フェルミハバードモデルでの厳密解に関する研究などです。これらの研究対象は、現在私の研究グループで扱っているものとはかなり異なるものであり、研究分野を広げるための多くのインスピレーションと動機を与えてくれました。また、桂先生の研究室の学生たちの熱意にも非常に感銘を受けました。私は来年3月に博士課程を修了しますが、その後も研究活動を続けるので、今後も桂研究室のグループメンバーとますます議論を重ねていきたいと思っています。

最後に今回の若手循環プログラムをオーガナイズしてくださった方々に感謝の意を表し、この報告書のまとめとしたいと思います。まず、私の滞在を受け入れ、有意義な議論の機会を与えてくださった桂先生に感謝申し上げます。また滞在中日々交流と貴重な議論の時間をいただいた、赤城先生(写真2)、そしてポスドクや研究室の大学院生の方々にも感謝申し上げます。最後になりましたが、若手循環プログラムを通じてこのような素晴らしい機会を与えてくださった高柳先生、手塚先生、事務の岡崎さんをはじめ、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に感謝申し上げます。

[1] K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **105**, 205125 (2022)

[2] K. Yamamoto and N. Kawakami, Phys. Rev. B **107**, 045110 (2023)



● 第2回領域スクール

2022年7月4-12日, オンライン (Zoom)

領域スクールは、本領域での分野融合研究を推進するため、関連分野の複数の講演者による講義を開催することで、各分野の考え方、研究動向や問題点や課題等の情報を共有することを目的としています。本年3月(2021年度末)にハイブリッド形式で開催した初回に続き、2回目となる今回は完全オンラインで開催しました。

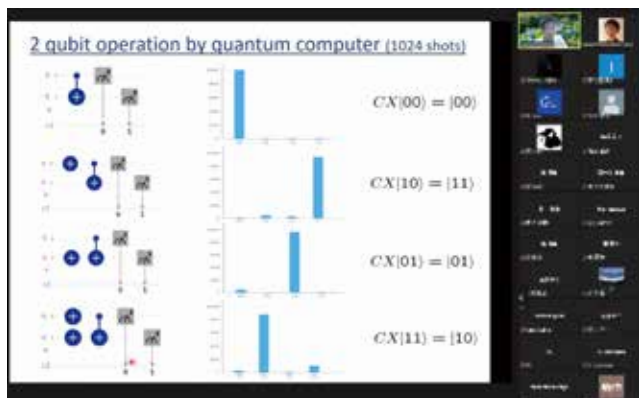
飯塚則裕氏(B01代表)の講義「ゲージ重力対応入門」では、QCD(量子色力学)や、前回南部氏(公募研究E02)の講義で扱われた一般相対論の知識を前提に、ラーゼンゲージ理論と量子重力理論としての超弦理論の双対性についての解説が行われました。

上田宏氏(D02)の講義「テンソルネットワーク法の基礎」では、最も基本的なテンソルネットワーク(TN)状態で、離散格子上の1次元量子多体系/2次元古典統計模型の解析を得意とする行列積状態(MPS)を題材に、TN法の基本的な計算原理やその最適化手続きについて解説されました。さらに、エンタングルメントエントロピーの観点からMPSと相補的な性質を持つTN状態を生成するマルチスケールエンタングルメント繰り込み仮説(MERA)のレビューが行われました。

本多正純氏(D01)の講義「量子計算の場の量子論への応用」は、IBM Quantum Experienceの利用法も含む量子計算の基礎と、量子計算のスピンのシミュレーションへの応用についての解説から始まりました。連続的場の量子論・および格子場の量子論に関する入門的な解説のあと、場の量子論のシミュレーションについて本多氏らの研究成果も含めて解説されました。

参加登録者は300名を超えました。学期中であることも考慮し、登録者には録画を視聴可能としました(一部は領域のYouTubeチャンネルで公開予定)。リアルタイムの参加者からは多くの質問があり、活発な議論が交わされました。

(文責：手塚真樹)



オンラインでの講義の様子

● 領域国際会議(基礎研究会)

“Quantum extreme universe from quantum information”

2022年9月24-30日, 京都大学基礎物理学研究所+オンライン

2022年9月26-30日に研究会“Quantum extreme universe from quantum information”が京都大学基礎物理学研究所と学術変革領域A「極限宇宙」の共催で、対面(基研パナソニックホール)+オンラインのハイブリッド形式で行われた。この研究会は量子情報理論の理論物理各分野(素粒子、物性、宇宙)への応用を主題としたものであった。本研究会では国内外から合計25件の招待講演(国外研究者の講演はオンラインで、国内研究者の講演は主に対面で行われた)と、28件のショートトーク、さらに13件のオンラインポスター発表があった。本研究会の最終的な参加登録者は、オンライン参加を含め500人程度であった。

招待講演の中でも特にIASのWitten氏からは、ドシッター空間上の von Neumann 代数についての最近の自身の研究についての報告があった。ドシッターホライズンを含む座標、いわゆる static patch 上には、場の量子論と同様 type III 代数が付随すると考えるのが自然だが、これが重力の効果で type II₁ 代数になる、という主張がなされた。これは static patch 上の最大エントロピーがドシッターホライズンの Bekenstein-Hawking エントロピーで与えられる、という事実とコンシステントである。講演では各タイプの von Neumann 代数の分類の紹介のあと、ドシッター空間のような閉じた宇宙では観測者の存在とその重力を考慮に入れないと意味のある代数が作れないという議論があり、この観測者のエネルギーが下からバウンドされているとすると、この代数が type II₁ 代数になるという結果が導かれた。この結果はドシッター空間上の static patch 上の密度行列が、flat spectrum を持つという予想を数学的に厳密に裏付けている、と解釈できる。

(文責：宇賀神知紀)



基礎物理学研究所前での集合写真

● YITP 国内ワークショップ

「場の理論の新しい計算方法 -量子計算とテンソルネットワークに関するサマースクール-」

2022年9月12-16日, 京都大学基礎物理学研究所+オンライン

京都大学基礎物理学研究所主催、極限宇宙のD01班共催により2022年9月12日から16日までの5日間「場の理論の新しい計算方法2022」というサマースクールが開催されました。

近年、量子コンピュータ並びにその周辺の理論的・技術的発展により、素粒子・原子核分野においても「場の理論の新しい計算方法」に注目が集まっています。特にゲート型量子計算機をターゲットとする量子アルゴリズムやテンソルネットワーク法による計算法は、行列模型・量子重力・量子エンタングルメント・符号問題の生じる場の理論など、従来の計算法では原理的困難があるために、その物理現象が未だ不明な理論に対する新たなアプローチとして有望視されています。

このサマースクールでは、大学院生とポスドクを主な対象とし、量子計算とテンソルネットワーク分野の日本語による密な講義・演習を(原則)対面形式で実施しました。特に演習を通じた即戦力となれる人材育成と新しい共同研究の立ち上げを目標としました。まだ論文になっていないような最先端の内容の講義や、即座に研究につながるシミュレーションコードのシェアも行われ、若い研究者がこの分野に参入する障壁が下がったように思います。参加者からの質問も非常に多く有意義なものとなりました。このスクール参加を機に新しい共同研究が立ち上がり、分野の発展につながることを期待されます。

(文責：伊藤悦子)



講義風景

● 公募研究キックオフ

2022年10月31日-11月1日, オンライン(Zoom)

今年度より「極限宇宙」領域では、実験2件を含む計16件の公募研究を新たに迎えることになりました。量子情報を鍵とした物理学の融合的研究展開という、本学術変革領域の特徴を反映し、様々な研究背景を持つ興味深い研究の提案が集まりました。公募研究は形式上E班という形でまとまっていますが、これには分野の近い計画班との関係に縛られることなく、多彩な分野をまたいだ自由な研究展開を実現してほしいという思いが込められています。

公募研究の採択決定は6月後半でしたが、その後の簡単な説明会を経て10月31日、11月1日にキックオフミーティングが開催されました。公募研究の代表者の方々はもちろん、本領域のメンバーや研究協力者がオンライン空間に集まり、各公募研究の背景と計画についての発表、および、質疑応答が行われました(写真はZoom上の参加者のスナップショット)。その内容は、量子情報の基礎的理論、量子重力、ブラックホール、インフレーション宇宙、重力の量子性検出、スピン系物性、そして冷却原子気体や核磁気共鳴実験など、非常に多岐にわたり、本領域の懐の深さを実感するものとなりました。このキックオフが提案内容の詳細を共有する初の機会でしたので、一件30分の持ち時間でその全容を伝えることは、なかなか難しい要請だったかもしれませんが、異分野融合の趣旨に合わせ、分野外の参加者も意識した発表をさせていただけたと感じております。そのことも反映してか、質疑応答の時間に非常に活発な議論があり、常に休憩時間に大きく食い込むほどの盛り上がりでした。参加者の公募研究への関心の高さや期待の大きさが感じられたと思います。提案内容は物理的に興味深いことはもちろん、計画研究と相補的な側面も随所に見受けられ、今後の本領域における研究展開の層の厚みを増すことに繋がると期待されます。それぞれの研究課題の進展とともに、計画班との相互作用による研究の一層の飛躍を期待したいと思います。

(文責：奥西巧一)





● 第2回領域会議

2022年12月26-28日, 神戸コンベンションセンター+オンライン

第2回領域会議は、2022年12月26日から28日にかけて神戸国際会議場で開催されました。会場には約90名の領域メンバーが、オンラインでは領域内外から約80名が参加しました。会議では、量子情報・宇宙・物性物理・素粒子とそれらの分野間の融合研究について、実験から理論まで最新の研究成果が発表され、講演後やコーヒーブレイクなどを利用して活発な議論が行われました。

初めに、高柳匡(領域代表, 京大基研)が領域の組織構成や目的を説明し、今年度の研究・アウトリーチ成果の概要、今後の行事予定について報告しました。新しく領域に加わったポスドク研究員や、公募研究班のメンバーも紹介されました。

26日と27日には、研究計画班代表者が各25分の講演を行い、研究成果を報告しました。異なる研究計画班や公募研究班との間の異分野融合の共同研究成果も多数報告されました。また、公募研究班全16名が10分の講演を行い、現在までの成果と今後の展望を説明しました。計29点のポスター発表も行われました。新任のポスドク研究員全員に加え、多くの大学院生がポスター発表などを行いました。ポスター会場では熱気のある議論が各所で交わされていました。

28日には、主にセミナー講演が行われました。会議全体で、各研究計画班から選ばれた9人の講演者が、各40分の講演を行いました。セミナーでは、最新の成果の発表に加え、他分野に向けた質問や新たな異分野融合研究の可能性など、様々な興味深いテーマが提示されました。

森前智行(A01, 京大基研)は、量子暗号理論、特に pseudo random state generation に関する成果を紹介

し、ブラックホール情報問題との関係を議論しました。奥山和美(C01, 信州大)は、JT重力理論に対応するランダム行列理論のスペクトル形状因子のプラトーと呼ばれる性質を摂動的に理解する成果を説明しました。宇賀神知紀(B01, 京大基研)は、ドジッター宇宙の量子情動的側面について成果を報告しました。村田佳樹(B02, 日大)は、回転するブラックストリングの超放射不安定性の研究を報告しました。手塚真樹(B02, 京大)は、SYK模型の量子情報理論的な性質についての成果を発表しました。柴田尚和(C02, 東北大)は、量子ホール系の量子エンタングルメントの解析についての成果を報告しました。奥田拓也(D01, 東大総文)は、量子計算機を用いて可解スピン鎖をシミュレートしノイズを評価する研究を発表しました。小林努(C03, 立教大)は、インフレーション・ダークエネルギー・修正重力理論を統一的に扱う枠組みとしてホルンデスキ理論についての研究を紹介しました。上田宏(D02, 阪大QIQB)は、最適化されたツリーテンソルネットワークを生成する研究成果を紹介し、ホログラフィー原理を通じた重力理論との異分野融合研究について議論が行われました。

最後のセッションでは、文部科学省学術調査官の南野彰宏氏(横浜国立大)により学術調査官の役割などについてご説明いただきました。また、2023年度に領域講師として着任予定の Andrew Darmawan(京大基研)は、量子誤り訂正についての成果を報告しました。最後に、アドバイザーの井元信之氏(東大特命教授)から、関連する研究分野の様々な未解決問題についての展望と、この領域の将来や更なる異分野交流に期待するコメントをいただき、閉会となりました。

(文責：島田英彦、高柳匡)



領域会議の集合写真

●第3回領域スクール & 第一回領域若手研究会

2023年2月13-17日, 名古屋大学多元数理科学研究科+(スクールのみ)オンライン

本年度7月に開催した第2回領域スクール(24頁参照)に続き、第3回領域スクールを開催しました。今回のスクールでは、領域外から福原武氏(理研)、ルガルフランソワ氏(名大多元)、横山修一郎氏(名大理)をお招きし、下記の講義を行っていただきました。COVID-19の影響による名古屋大学多元数理科学研究棟509室の定員制限のため、対面での参加は若手研究会参加者約60名に限りましたが、オンライン設備を用いたハイブリッド形式での講義を行い、140名のオンライン参加者と共に活発な質疑応答が交わされました。今回の講義は、すべて英語で行われました。

福原武氏(理研)の講義「Experimental study of quantum many-body systems with ultracold atoms」では、光格子を用いた量子多体系実験について、スライドを用いて解説していただきました。前半では、原子冷却の手法の説明から始まり、光格子を用いた超流動/モット絶縁体転移の実現、具体的な実験結果を用いた光格子の量子状態の観測方法、単一サイトアドレッシングを用いた原子配置の設定方法などを解説していただきました。後半では前半で説明した技法を用いた量子状態の発展を追う具体的な実験結果を、1原子系から多体系までの様々な実験について紹介していただきました。

ルガルフランソワ氏(名大多元)の講義「Introduction to Quantum Algorithms」では、量子情報理論の基礎的な定理の証明を板書により解説していただきました。1回目の講義では、量子情報理論で用いる記法を説明し、量子テレポテーションの概念を解説していただきました。2回目の講義では、指定された値を探索する問題を解くグローバーのアルゴリズムの紹介をしていただきました。最後の講義では、量子フーリエ変換の説明の後、固有値推定アルゴリズムについて解説していただきました。

横山修一郎氏(名大理)の講義「Standard inflationary cosmology」では、まず板書により標準ビッグバン宇宙模型の解説をしていただきました。その後、標準ビッグバン宇宙模型の問題点を解消するインフレーション宇宙の解説があり、様々なインフレーション模型の紹介をしていただきました。宇宙の密度揺らぎを用いることでインフレーション模型を検証できるという説明の後、宇宙の密度揺らぎの進化の概要をスライドで解説いただき、インフレーション期に量子的に生成される宇宙の密度揺らぎの生成を、板書により具体的に解説していただきました。

領域スクールに加えて、第一回領域若手研究会を行いました。領域若手研究会は、異なる分野の若手間の交流の場を毎年設け、異分野間の共同研究のきっかけを作ることを目標としています。今回はCOVID-19の影響による会場の定員制限がありましたが、定員制限の上限である約60名が参加し、若手の交流が行われました。

第一回である今回の若手研究会では、全員の研究・専門分野を互いに把握できることを目指し、参加者全員が発表を行いました。各人3分間の口頭発表に加え、合計10時間以上に及ぶポスター議論の時間を設けました。会議の終了予定時間を1時間以上超える議論が毎日自主的に行われていました。また、会場となった多元数理科学研究科の教員など名古屋大学の教員・研究員・学生が飛び入りでポスター議論に参加し、領域メンバーの枠を超えた分野間交流が行われました。

最後に、高柳匡氏(領域代表)から、スクールで講義された分野の領域における役割を説明していただき、若手に向けた激励の言葉をいただいた後、第3回領域スクールと第一回領域若手研究会の閉会となりました。(文責：泉圭介)



福原氏による講義



集合写真



2022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回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年4月25日
講演者: 早田 次郎 教授 (神戸大学)
タイトル: Graviton search with quantum information and quantum sensing



第6回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年5月23日
講演者: 齊藤 圭司 教授 (慶應義塾大学)
タイトル: Information dynamics in the long-range interacting systems



第7回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年6月8日
講演者: Sandip P. Trivedi 教授 (TIFR)
タイトル: Entanglement in Matrices, Gauge Theories and Spacetime



第8回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年7月14日
講演者: Paolo Perinotti 教授 (パヴィア大学)
タイトル: When does a system affect another? Causal influence vs signalling



第9回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年10月14日
講演者: Netta Engelhardt 教授 (MIT)
タイトル: The Black Hole Information Paradox: a Resolution on the Horizon?



第10回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年11月18日
講演者: Antonio Miguel Garcia-Garcia 教授 (上海交通大学)
タイトル: Wormholes, Sachdev-Ye-Kitaev model and universal dynamics in dissipative quantum chaotic matter



第11回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年12月16日
講演者: Seok Kim 教授 (ソウル大学)
タイトル: Black holes and quantum gravity



第12回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年1月24日
講演者: Jens Eisert 教授 (ベルリン自由大学)
タイトル: Linear growth of quantum circuit complexity



第13回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年2月24日
講演者: 田中 貴浩 教授 (京都大学)
タイトル: Pathology in WKB wave function for tunneling assisted by gravity



第14回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年3月16日
講演者: Monika Aidelsburger 教授 (ミュンヘン大学)
タイトル: Quantum simulation with ultracold atoms - from Hubbard models to gauge theories



● 領域セミナー

第4回領域循環ミーティング

開催日: 2022年4月26日
講演者1: 本多 正純 (D01)
タイトル: Towards Quantum Simulation of "Extreme Universe"
講演者2: 奥西 巧一 (D02)
タイトル: A statistical Mechanical model on the Cayley tree network and a holographic tensor network

第5回領域循環ミーティング

開催日: 2022年5月13日
講演者1: 松浦 孝弥 (A01)
タイトル: Linear optical formation of Raussendorf-Harrington-Goyal lattice concatenated with the Gottesman-Kitaev-Preskill code
講演者2: 東 浩司 (A01)
タイトル: Do black holes store negative entropy?

第6回領域循環ミーティング

開催日: 2022年6月27日
講演者1: 手塚 真樹 (B02)
タイトル: Quantum error correction in Sachdev-Ye-Kitaev-like models
講演者2: 石橋 明浩 (B03)
タイトル: Averaged null energy conditions and holography

第7回領域循環ミーティング

開催日: 2022年7月21日
講演者1: 堀田 昌寛 (C02)
タイトル: Expanding Edges of Quantum Hall Systems in a Cosmology Language - Hawking radiation from de Sitter horizon in edge modes
講演者2: 棚橋 典大 (C03)
タイトル: Brane Dynamics of Holographic BCFTs

極限宇宙領域セミナー

開催日：2022年9月5日

講演者：松尾 信一郎 氏(名古屋大学)

タイトル：Willmore functionalの性質

第8回領域循環ミーティング

開催日：2022年9月21日

講演者1：Pratik Nandy (D01)

タイトル：Complexity in the Sachdev-Ye-Kitaev

model(s): some analytic results

講演者2：堀田 知佐 (D02)

タイトル：Pure and mixed states in quantum many-

body systems

第9回領域循環ミーティング

開催日：2022年10月28日

講演者1：早川 龍 (A01)

タイトル：Quantum topological data analysis

講演者2：Arthur Parzygnat (A01)

タイトル：A tutorial on time symmetry and quantum

Bayes' rules

第10回領域循環ミーティング

開催日：2022年11月25日

講演者1：寺嶋 靖治 (C01)

タイトル：AdS/CFT in operator formalism

講演者2：前田 健吾 (C03)

タイトル：Extremal Attractor Black Holes in AdS

第1回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2023年2月22日

講演者1：玉岡 幸太郎 (E02)

タイトル：SYK Lindbladian

講演者2：沼澤 宙朗 (E02)

タイトル：Non-equilibrium dynamics of black holes

induced by inhomogeneous quantum quenches

第11回領域循環ミーティング

開催日：2023年3月17日

講演者1：魏 子夏 (C01)

タイトル：Counting atypical black hole microstates
from entanglement wedges

講演者2：野澤 真人 (C03)

タイトル：Obstruction tensors for black holes

● 研究会 & ワークショップ

APCTP Focus Program “Numerical Methods in Theoretical Physics 2022”

開催期間：2022年5月16日-20日

開催場所：韓国 APCTP およびオンライン

第2回 極限宇宙スクール

開催期間：2022年7月4日-12日

開催場所：オンライン

基研研究会 場の理論の新しい計算方法2022—量子計 算とテンソルネットワークに関するサマースクール

開催期間：2022年9月12日-16日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

研究会 “Workshop on General Relativity, Cosmology, and Black Hole Information Paradox”

開催期間：2022年9月21日-23日

開催場所：名古屋大学およびオンライン

領域国際会議(基研研究会) “Quantum extreme universe from quantum information”

開催期間：2022年9月26日-30日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

第1回領域若手集中講義「量子場理論で理解する低次 元系の磁性」

講演者：古谷 峻介 氏(東京大学, D02班)

開催期間：2022年10月11日-13日

開催場所：東京大学駒場キャンパスおよびオンライン

研究会 “Third Kyoto Workshop on Quantum Information, Computation, and Foundations”

開催期間：2022年10月17日-21日

開催場所：オンライン

研究会「時空の漸近構造、赤外発散、重力波」

開催期間：2022年12月18日

開催場所：名古屋大学およびオンライン

第2回「極限宇宙」領域会議

開催期間：2022年12月26日-28日

開催場所：神戸コンベンションセンターおよびオンライン

第3回 極限宇宙スクール

開催期間：2023年2月13日-17日

開催場所：名古屋大学およびオンライン

第1回 領域若手研究会

開催期間：2023年2月13日-17日

開催場所：名古屋大学



量子暗号とブラックホール？

原子や分子などのミクロな世界は量子論という物理理論で説明される。量子論は量子もつれや量子的重ね合わせ、不確定性原理などの不思議な現象にあふれている。この不思議な現象をうまく使ってこれまでにならぬ高性能な情報処理を実現するのが量子情報である。特に、計算への応用(量子計算)や、暗号への応用(量子暗号)が知られている。今回はこの量子暗号に関する話である。

暗号というと秘密にメッセージを伝える技術のことを思い浮かべる人が多いであろう。しかし、暗号ができるのはそれだけではない。例えば、電子署名というものがある。紙の文章に対し、「これはたしかに私が書いた書類です」ということを証明するために、はんこを押したり署名を書いたりするが、電子的なファイルについてはどうすればよいだろうか？電子的なファイルについても偽造できない署名をつけることができる技術が電子署名である。これは、ファイルの文章自体は秘密になっていなくて誰でも読めるので、メッセージを秘密にしているわけではない。このほかにも、コミットメントやゼロ知識証明、疑似乱数、多者間計算といったように、様々なタスクが実現可能である。

暗号で重要となるのはもちろん、安全性である。暗号において安全性には2種類のタイプがある。一つは情報理論的安全性というものであり、もう一つは計算量的安全性というものである。前者は攻撃者がどんなに強力な計算ができて安全、というものである。後者はある問題(例えば素因数分解など)が難しいという仮定の上で成り立つ安全性であり、攻撃者の計算能力には制限があると仮定する。明らかに前者のほうが望ましい安全性である。なぜなら、後者の場合、将来計算機が発達したり、新たな高速アルゴリズムが見つかってしまうと、安全性が破れてしまうかもしれないからである。(実際、素因数分解は量子計算機では解くことができる!)しかしながら、前者はいろいろな制限がある。例えば、秘密にメッセージを送る場合、暗号化に使う鍵の長さが送りたいメッセージの長さよりも長くないといけない。また、そもそも電子署名やコミットメント等の様々なタスクは情報理論的安全は不可能であることが知られている。そのため、後者の計算量的安全な暗号も非常によく研究され、使われている。

計算量的安全な暗号の場合、先ほど述べたように、なんらかの仮定が必要である。どんな仮定なのだろうか？実は、古典的暗号(つまり量子を使わない暗号)の場合、一方向性関数というものをもっとも基礎的であるということがすでに分かっている。一方向性関数 f というのは、 x から $f(x)$ を計算するのは簡単だが、 $f(x)$ から x を計算するのは難しいような関数である。古典

のほぼ全ての暗号タスクはこの一方向性関数が存在しないと、存在しないことが知られている。したがって、一方向性関数は古典的暗号において最も基礎的な存在なのである。

では、量子暗号の場合はどうなるだろうか？つまり、量子状態を送受信したり、量子計算をしたりできるような場合の暗号を考えると、最も基礎的な仮定はなんだろうか？やはり一方向性関数なのだろうか？最近、著者と山川高志氏(NTT、京大基研特任准教授)は、量子暗号においては一方向性関数が必ずしも最も基礎的な存在ではないことを示した[1]。我々は、様々な量子暗号タスクが、一方向性関数なしでも存在する可能性があることを示した。

これにより、「では、量子暗号における最も基礎的な仮定は何なのか？」という重要な open problemが生じた。面白いことに、この open problem に挑戦する過程で生まれたものが、ブラックホールのパラドックスの説明に役立つことが指摘された[2]。ブラックホールのパラドックスを解くためには、エンタングルメントが隠れていて、原理的には取り出せるけど、取り出すのに非常に時間がかかる、ということを示したいらしい。Brakerskiは、一方向性関数に代わる、量子暗号の最も基礎的な存在と期待できる概念をうまく使って、実際に、原理的には取り出せるけど、取り出すのに非常に時間がかかるような隠れたエンタングルメントを構成してみせた。

量子情報は量子を使って高性能な情報処理技術を実現する学問であり、応用的、工学的な研究であるが、実は、このように、基礎物理にも重要な役割を果たし得る。本プロジェクトはまさに、そのような、「量子情報の言葉を使って極限宇宙の物理を解明する」ことを目指している。

[1] T. Morimae and T. Yamakawa, CRYPTO2022

[2] Z. Brakerski, arXiv:2211.05491.



●執筆者紹介

森前 智行 Tomoyuki Morimae

京都大学基礎物理学研究所 准教授

1981年岐阜県生まれ

2009年3月 東京大学大学院博士後期課程修了

2021年3月から現職



量子状態が持つエンタングルメント構造と最適テンソルネットワークの構成

極限宇宙に関連した量子多体状態の様々な様相を効率よく、統一的に記述する理論的枠組みとして、テンソルネットワーク(TN)が大きな期待を集めている。TNでは、有効自由度間の関係性を表すテンソルをネットワーク状に配して縮約することで量子多体状態を記述し、その図形表現は量子多体状態に埋め込まれたエンタングルメント構造の視覚的な理解を提供する。これまで、対象となる物理系の特性とネットワーク形状が適合したTNが提案されるたびに、物理学の理解に新たな視点が付け加えられてきた。テンソル積状態と測定型量子計算、エンタングルメントくりこみ仮説とAdS/CFTとの関係は現在でもホットな話題の一つだ。

上記の確立したTN状態は、一様系の熱力学的極限を念頭に物性系に対する深い洞察の下で洗練されてきた。しかし、系に非一様性が入ると、最適TNの構築は一般に直感の効かない難問へと変貌する。しかも、Tree TN(TTN)という図形表現にループを含まないクラスに限っても、可能なTTNの数は、Nサイト系に対して $(2N-5)!!$ にもなり、最適なTNを全探索で得ることは非現実的だ。本研究では、空間構造を持つ一般の量子多体系を記述するTTNを設計するための指導原理と具体的な構成アルゴリズムを提示することを目指した。

TTNは、基本的にアイソメトリという3脚のテンソルを樹状に組んだネットワークにより構成される(図1参照)。このTTN中のテンソルの脚を一本切断することが、波動関数全体を2分割することに相当する。通常、TN法ではテンソルの脚の自由度を有限に保つ切断近似を行うが、その際に大きなエンタングルメントエントロピー(EE)を担う脚に切断を入れると計算精度が大きく損なわれる。我々は、有限系の厳密な基底状態波動関数を、「状態数の切断によるEEの損失を最小化すること」を指導原理に部分系に分割していくトップダウン型のやり方で、最適なTTN構造が構成できることを示した[1]。例えば、自由境界の反強磁性ハイゼンベルグ鎖において後述する論文[2]と一致するTNが得られたほか、 $N=64$ の正方格子のモデルに対しても、厳密なTTN分割を参照することで既存のTTNより変分エネルギーが下げられることが分かった。有限系ではあるが、TTN構成の指導原理を厳密に検証できた意義は大きい。

実用的な側面を考

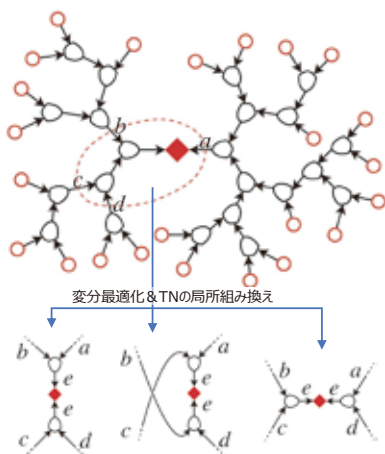
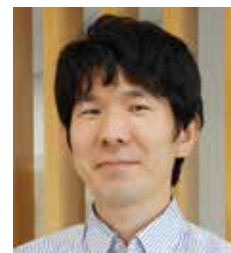


図1: TTN状態とTNの局所組み換え

えれば、既存のTN法に、ネットワーク形状の自動最適化も組み込みたいところだ。例えば、ランダムスピン鎖に対する実空間くりこみ群として有名なSDRGは、熱力学的極限でランダムシングレット状態に厳密に漸近するが、定量的なレベルではネットワーク形状はおろかアイソメトリそのものの最適化も不十分である。その改善には、有限系の密度行列くりこみ群と同様にTNを構成する各テンソルを逐次的に最適化する「スイープ更新」を導入する必要がある。図1の赤丸で示される物理的自由度に対するTTN状態は、アイソメトリ(卵型)を逐次的に縮約し、最後に2つの部分系間のEEを決定する特異値(赤菱形)を組み込むことで得られる。我々の提案したアルゴリズムではまず、赤菱-卵型-卵型(赤点線領域)の3つ組の局所テンソルを形成するための4本の有効自由度(a-d)に対するハミルトニアンを構築後、その基底状態を求める。そして、その状態に対して3パターンの特異値分解を全て実行し、最もEEが小さくなるような分解を選択することでネットワーク形状の局所組み換えとアイソメトリの更新を同時に実現する。TN全体に対してこの作業をスイープすることで大域的なエンタングルメント構造に適したTNを得るというボトムアップ的な戦略だ。実際に、論文[2]では非一様な階層構造を持つ量子スピン鎖に対して、行列積状態から完全バイナリ型TTNへの構造最適化に成功した。

これらの成果は、ランダム系や量子化学系の基底状態探索の高度化のみならず、与えられた量子状態を効率よく量子回路化することにも資すると考えられている。また、離散系のネットワーク形状は連続系の幾何学に対応する。最適TN構造の決定はゲージ重力対応の意味でも興味深いかもしれない。

[1] K. Okunishi, H. Ueda, T. Nishino, Prog. Theor. Exp. Phys., **2023**, 023A02 (2023)
 [2] T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, T. Nishino, Phys. Rev. Research **5**, 013031 (2023)



●執筆者紹介

上田 宏 Hiroshi Ueda

大阪大学量子情報・量子生命研究センター
准教授

1984年大阪府生まれ

2011年9月 大阪大学大学院博士後期課程修了

2022年4月から現職



奥西 巧一 Kouichi Okunishi

新潟大学理学部 准教授

1971年大阪府生まれ

1999年3月 大阪大学大学院博士後期課程修了

2011年2月から現職



2022年度 アウトリーチ・一般向け講演

OUTREACH / PUBLIC LECTURES

●「極限宇宙」市民講演会

第1回 市民講演会

開催日：2022年11月26日

場所：オンライン (Zoom) 開催

対象：当講演会に関心のある全ての方

講演者1：森前智行 (A01)

タイトル：「量子情報：量子計算と量子暗号」

講演者2：高柳 匡 (C01・領域代表)

タイトル：「量子情報から極限宇宙へ：量子ビットから創発する宇宙」



●アウトリーチ活動・一般向け講演

NHK文化センター名古屋 宇宙講座「宇宙と物質の起源」

『弦理論とはなにか』

開催日：2022年5月18日

媒体/団体名：NHK名古屋

対象：一般市民

講演者：重森正樹 (B01)

中日文化センター講座「宇宙の始まりに迫る」

『ホログラフィーとは何か』

開催日：2022年5月22日

媒体/団体名：栄 中日文化センター

対象：一般市民

講演者：重森正樹 (B01)

土曜日オンライン講座「量子の世界と未来」

開催日：2022年5月28日

媒体/団体名：八千代松陰学園

対象：高校1-3年生 (中学生) 40名

講演者：山本大輔 (B02)

大阪府立天王寺高校「京都大学研修会」

『原子のレーザー冷却で探る「量子」-炎色反応から量子コンピュータまで-』

開催日：2022年6月3日

媒体/団体名：大阪府立天王寺高校、京都大学

対象：高校2年生 10名

講演者：中島秀太 (B02)

日本学術振興会「サイエンス・ダイアログ」事業 『Low-Dimensional Electron Physics』

開催日：2022年10月7日

媒体/団体名：東京都立戸山高等学校

対象：高校1~2年生 20~30名

講演者：J. Nicholas Moore (C02)

新潟大学量子研究センター講演会

『スピンで見る物質中のエンタングルメントの世界』

開催日：2022年11月3日

媒体/団体名：新潟大学量子研究センター

対象：高校生・一般 70名

講演者：奥西巧一 (D02)

Saturday Afternoon Physics 2022

『原子核・素粒子の世界への旅立ち-素粒子と対称性-』

開催日：2022年11月12日

媒体/団体名：大阪大学

対象：高校生 約100名

講演者：西岡辰磨 (D01)

日本学術会議公開シンポジウム「物理学のアプローチ が開く世界とその展開」

『量子ビットから生まれる宇宙』

開催日：2022年11月20日

媒体/団体名：日本学術会議物理学委員会

対象：一般市民

講演者：高柳 匡 (C01)

京都大学11月祭本部講演

『量子情報から創発する宇宙-理論物理学の究極の姿か?』

開催日：2022年11月22日

媒体/団体名：京都大学11月祭事務局

対象：一般市民

講演者：高柳 匡 (C01)

●領域 Youtube チャンネル

2022年12月開設

<https://www.youtube.com/@extremeuniverse4346>





Extreme Universe travel begins in earnest

Head Investigator

Tadashi Takayanagi

Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto University

Time flies, and a year has passed in the blink of an eye since the birth of this project. Although Covid-19 still affects Japan, overseas travel and face-to-face meetings are returning to their pre-corona levels. Thanks to these, we were able to hold an international meeting in September, 2022 in Kyoto, and the annual meeting in December in Kobe, both in the form of face-to-face meetings. We held a hybrid format of online and on-site participation, and 80 participants enjoyed the first face-to-face research exchange in a long time.



My first overseas trip after the Covid-19 started, was an International Conference on Gravity Theory held at Imperial College in London in August, 2022. Many of our members also gave lectures, and it was a good opportunity to introduce our project to the rest of the world. In December, I also gave a talk at the final annual meeting of the It from Qubit Simons collaboration in New York, which is a US-based project funded by the Simons Foundation and started in 2015. Many of the 17 PIs who make up It from Qubit are prominent researchers in North America, such as Prof. Maldacena and Prof. Myers, who are advisors to our project at the same time. I also joined in It from Qubit as the only PI from Asia. Our extreme universe collaboration is an ambitious project to combine not only quantum gravity and quantum information, which is becoming an international standard, but also condensed matter theory/experiments. I am looking forward to seeing the members of this project achieve outstanding achievements as the It from Qubit collaboration did.



In this second year of this project, we have had many research activities and events. First of all, the Publicly Offered Research has started this year, with 16 Principal Investigators challenging the extreme universe with a wide variety of research proposals in the fields of quantum information, particle theory, cosmology, condensed matter theory, and experimental condensed matter physics. We have also started online seminars by the Principal Investigators, and we hope that this program will become a stage for young researchers to make a great leap forward. In addition, all of the 14 post-doctoral researchers who are the driving force of each research project were appointed. At

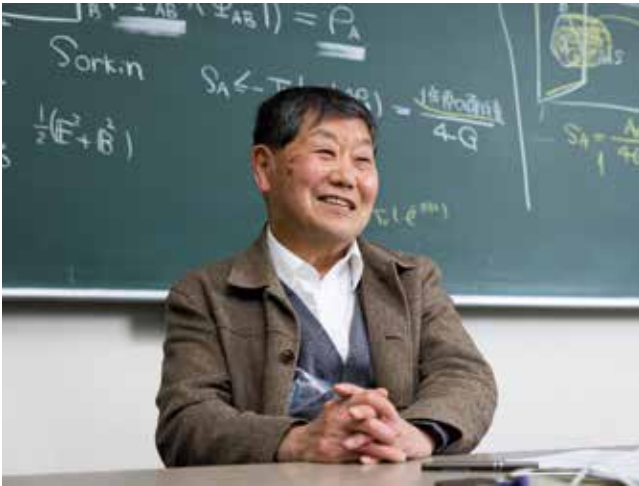
the conference held in Kobe in December, the post-doctoral fellows and graduate students gave poster lectures, which were very well received by the audience, including senior researchers. I look forward to seeing the results of their future collaborations. In order to support research exchanges among young researchers like this, we prepared the Young Researchers Circulation Program. The purpose of this program is to create interdisciplinary research by having young researchers stay for a few weeks in a research group in a field different from their own. The eight young researchers who have taken advantage of this program this year have all produced fruitful research exchanges.



In addition, outreach activities have been conducted vigorously during the past year. We have published a newsletter, launched a Twitter site and a Youtube channel. Moreover, in December, we hosted an online public lecture. At first, we were worried about how much the general public would be interested in our project, but in fact, more than 200 people participated, and we received more questions than we could answer during the Q&A session. We would like to thank all the participants and hope to make the public talk an annual event.



As mentioned above, owing to the efforts of our members and many people who warmly watch over us from the outside, in this second year, our research activities are getting accelerating in a significant way. Please take a look at the various reports in this issue to learn more about our activities. In the coming year, we hope to further promote these activities and establish the research results that will serve as the foundation in this collaboration.



Advisory Committee member

Akio Hosoya

Professor emeritus at Tokyo Institute of Technology

Photo ©Nikkei Science (日経サイエンス)

It is 1926 Spring when Heisenberg gave a talk on quantum mechanics in the colloquium of Berlin University and then had a long discussion with Einstein on the observables in physical theories. The conversation is described in “Der Teil und das Ganze”. Einstein was not happy about the quantum theory in which the trajectory of electron in an atom has no role. Heisenberg countered that physical theory has to be constructed only by observed quantities. The electron trajectory has not been observed and remarked that this is exactly the same attitude that Einstein himself took in the famous paper on special relativity of 1905 in the spirit of Mach. “Probably I said something like that, but it is definitely wrong” said Einstein and continued “the theory determines what is to be observed” I think this is a deep statement. Indeed we can measure entropy only on the basis of Carnot’s thermodynamics. Similarly the entanglement degree can be estimated only through quantum information theory.



Let me be a bit philosophical. Roughly speaking, particle physics and cosmology are ontic, while the foundation of quantum mechanics is epistemic. I guess the ontic and the epistemic views seem like the two sides of a coin. To understand the whole, we need something invisible between which relate objects and experiences. I would say, it is information. Philosophy can motivate us but we physicists need a mathematically formulated theory to unify the ontic physics of particle/cosmology and epistemic quantum mechanics in which information entropy is an observed quantity.

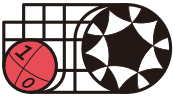


From 2000 through 2002, I was awarded JSPS grant under the title “Global Spacetime Structure and Quantum Mechanics” and then from 2003 through 2005 under the title “Black Hole and Quantum Information”. These sound like predecessors of the present JSPS project of Extreme Universe. However, in reality they were not. I was given a professor position at Tokyo Tech to work in relativistic cosmology in late 1990’s but also got interest in quantum

computation inspired by Shor’s algorithm of factoring. I chose the title of grant so that published papers include both fields. At that time I was a referee of the British Journal “Classical and Quantum Gravity” from IOP. After sending very negative review report to a submitted paper, I promptly received an e-mail from Cris Isham the editor, which criticizes my ignorance on information theory and opened my eye to the promising field of quantum information science. I decided the next grant title to explicitly include quantum information.



Nowadays quantum information becomes an active field in theoretical physics. Many interesting works have been published especially since the seminal paper by Ryu and Takayanagi. It is not a bad idea to follow this trend for young PhD students and Postdocs. However, it is my hope that people who have tenure challenge epoch-making ideas because this is such a promising field.



Quantum information for theoretical physics

[Principal Investigator]

Tomoyuki Morimae (YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yoshifumi Nakata (YITP, Kyoto University)

Koji Azuma (NTT Basic Research Laboratories)

Francesco Buscemi (Nagoya University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Arthur Parzygnat (Nagoya University)

[Research Collaborators]

Andrew Darmawan (YITP, Kyoto University)

Michele Dall'Arno (YITP, Kyoto University)

Hayata Yamasaki (University of Vienna)

Go Kato (Advanced ICT Research Institute, NICT)

[Post-doc fellow]

Aditya Nema (Nagoya University)

Group A aims to carry out research on quantum information theory and to develop a "language" of quantum information that can be applied to other areas of physics. The following research results were obtained this year.

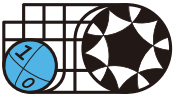
Quantum cryptography: Morimae et al. worked on fundamental research in quantum cryptography. In particular, they proved for the first time that one-way functions, which is the most fundamental element in classical cryptography, is not necessarily so in quantum cryptography. The question of what is the most fundamental assumption in quantum cryptography is currently the focus of many researchers, and such a most fundamental assumption has been found to be beneficial for the black hole paradox, attracting attention not only from the viewpoint of cryptography but also from the viewpoint of elementary particles and the cosmology. Morimae et al. have also constructed the first Proofs of quantumness from trapdoor permutation, an assumption independent of collision resistance, which was conventionally thought to be necessary for Proofs of quantumness. Details of this result are separately described in "Recent Research" on page 62 in the present newsletter.

Quantum error-correcting codes: Nakata et al. studied quantum error correction (QEC) from various perspectives. Particularly important results are 1. to propose a concrete decoder of the Hayden-Preskill protocol, which is an information-theoretic toy model of the black hole information paradox, 2. to investigate quantum error correction in a family of Sachdev-Ye-Kitaev models, which are known as holographic dual to quantum gravity, and 3. to analyze the performance of quantum error correcting codes (QECCs) generated by shallow random Clifford circuits. In the result 1, Nakata and collaborators provided a general construction of decoders based on the complementarity principle. It was shown that the decoder improves previous results about the recovery error in the protocol. In 2, a non-trivial crossover was found in a variant of Sachdev-Ye-Kitaev model, which is characterized by a change of the error correcting ability. In 3, it was numerically shown that shallow random Clifford circuits can generate the near-optimal QECCs.

Thermodynamics and Statistical Physics: The research activities in Nagoya University's group have mostly focused on establishing new connections between quantum information science and thermodynamics. Our research activities considered four different viewpoints: quantum foundations, statistical inference, information theory, and applied quantum information processing. From the viewpoint of quantum foundations, we investigated how the second law of thermodynamics selects the mathematical

structure of physical theories that satisfy it. From the viewpoint of statistical inference, we studied the mathematical properties of the quantity called "observational entropy", which has been recently argued to play an important role in the foundations of thermodynamics, and found that it is closely related with the theory of Petz recovery maps, namely, the only known tool to perform statistical retrodiction in quantum theory. In the context of information theory, we considered the problem of local purity distillation assisted by one-way bounded classical communication. This scenario, which constitutes an important primitive in quantum information theory, was already considered by Devetak in 2004 in the i.i.d. asymptotic setting, but we generalized it to the finite block-length regime, for which, however, we had to design a completely new coding technique. From an applicative viewpoint, we studied the inner detailed mechanisms of quantum error correction protocols, seen as thermal engines, and discovered that a triple tradeoff exists between the thermodynamic, information-theoretic, and logic performance of the protocol.

Quantum optics: The homodyne detection is one of the most basic tools for identifying the quantum state of light. It has been used to detect useful non-local properties, such as entanglement for the quantum teleportation and distillability of a secret key in quantum key distribution. The detection scheme employs a local oscillator (LO) pulse that is usually transmitted along with the signal pulses. The LO pulse is presumed to be a coherent state with an infinite intensity. However, it is difficult in practice to hold this presumption owing to noise in the optical transmission channels or an intervention by a malicious third party. As a result, the implementation may no longer be the homodyne detection, and those outcomes may merely disguise successful detection of a non-local property. In the work [G. Kato et al., arXiv:2212.10958 (2022)], we propose a scheme that works as the homodyne detection to detect the non-local properties of light in a verifiable manner, without any presumption for the LO pulses. This scheme is essentially based on the same setup as the conventional implementation for the homodyne detection. This result contributes to close any possible loophole in the homodyne detection caused by the deviation from the ideal LO pulses.



Quantum Black Holes from Quantum Information

[Principal Investigator]

Norihiro Iizuka (Osaka University)

[Co-Investigator]

Toshifumi Noumi (Kobe University)

Masaki Shigemori (Nagoya University)

Seiji Terashima (YITP, Kyoto University)

Tomonori Ugajin (The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Sunil Kumar Sake (Osaka University)

Nicolò Zenoni (Osaka University)

[Research Collaborators]

Kotaro Tamaoka (Nihon University)

Koji Hashimoto (Kyoto University)

Kengo Maeda (Shibaura Institute of Technology)

What exactly is going on inside a black hole? The goal of B01's research project is to understand the physics of black holes using the perspectives of quantum information and gauge-gravity correspondence. The gauge-gravity correspondence asserts that the gauge theory living at the boundary is equivalent to the gravity in the emergent spacetime (which is called a bulk). The B01 group aims to understand the emergence of black hole spacetime and the physics behind the horizon from the viewpoint of gauge theory of boundaries and quantum entanglement perspective in a non-perturbative manner.

Entanglement entropy, a typical measure of quantum entanglement, is fully understood for systems with finite degrees of freedom such as spin systems. However, situation is different in quantum field theories. Especially for gauge theories where there are non-local degrees of freedom due to the global Gauss law constraint, the definition of entanglement entropy itself is not unique. To understand the entanglement in gauge theories more, Iizuka in B01 applied a new method of calculating entanglement entropy, called the 'hourglass prescription', which was proposed last year in collaboration with Anegawa and Kabat, to gauge theories. He and his collaborators succeeded in calculating the extractable entanglement entropy in gauge theories, which can be distilled by LOCC [1]. Iizuka, together with Ishibashi and Maeda in B03, also studied a certain instability in the extremal black holes. An extremal black hole exhibits an 'attractor mechanism', which was previously discovered by Iizuka et al. He showed that extreme black holes become generically p.p. singular extremal black holes [2]. Ugajin in B01, with Kawamoto, Mori, and Suzuki and Takayanagi in C01, studied the holographic local operator quenches in [3]. Ugajin also studied quantum information properties of de Sitter space, a model of an accelerating expanding closed universe. Shigemori in B01 studied the classical gravity solution without horizon or singularity, called "superstratum," which can be regarded as microscopic state of a black hole in

hourglass prescription

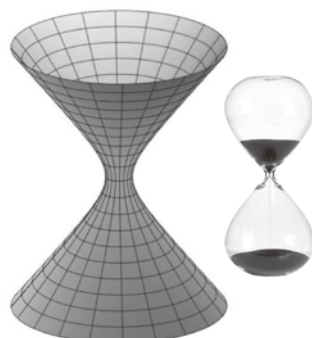
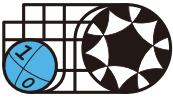


Fig. Hourglass prescription

string theory, and analyzed it in orbifolded space. Then he has shown that it can be understood in exactly the same way as the usual configuration of the superstratum. Terashima in B01, in collaboration with Sugishita re-considered the bulk reconstruction method of the AdS-Rindler spacetime, and argued that the entanglement wedge reconstruction, which are believed to be correct, may not hold due to quantum gravity effects [4]. Terashima also discussed bulk reconstruction by explicitly giving mode expansions for holographic BCFT in collaboration with Suzuki. Furthermore, he showed that if the BCFT couples to gravity, its energy tensor satisfies a nontrivial constraint [5]. Noumi in B01, in collaboration with Lau, Takii, and Tamaoka, generalized the "Page curve," a measure of unitarity of the black hole evaporation process, from a symmetry perspective. As a toy model of a black hole with electric charge, he considered a quantum bit model with random time evolution and discussed how the entanglement entropy should behave within each sector of conserved charge [6]. In collaboration with Satake, Noumi also conducted a theoretical verification of the "weak gravity conjecture," which is expected to be one of the discriminating conditions for theoretical models consistent with quantum gravity. By extending a previous study using black hole thermodynamics to black branes, they provided evidence for the weak gravity conjecture for general higher-order gauge symmetry [7].

- [1] T. Anegawa, N. Iizuka and D. Kabat, *Phys. Rev. D* **106**, 085010 (2022).
- [2] N. Iizuka, A. Ishibashi and K. Maeda, *JHEP* **09**, 093 (2022).
- [3] T. Kawamoto, T. Mori, Y. Suzuki, T. Takayanagi and T. Ugajin, *JHEP* **05**, 060 (2022).
- [4] S. Sugishita and S. Terashima, *JHEP* **11**, 041 (2022).
- [5] Y. Suzuki and S. Terashima, *JHEP* **09**, 103 (2022).
- [6] P.H.C. Lau, T. Noumi, Y. Takii and K. Tamaoka, *JHEP* **10**, 015 (2022).
- [7] T. Noumi and H. Satake, *JHEP* **12**, 130 (2022).



Understanding quantum black holes through the study of artificial quantum matter

[Principal Investigator]

Masaki Tezuka (Kyoto University)

[Co-Investigator]

Shuta Nakajima (Osaka University)

Eriko Kaminishi (Keio University)

Takashi Mori (RIKEN)

Daisuke Yamamoto (Nihon University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Kazuya Yamamoto (Kyoto University)

Giacomo Marmorini (Nihon University)

[Research Collaborators]

Ippei Danshita (Kindai University)

Kazuaki Takasan (University of Tokyo)

Juan Pablo Bayona Pena (Kyoto University)

The aim of planned research B02 is to promote the study of the quantum aspects of black holes through the collaboration of cold atom experiments and theoretical research. Using cold atom systems, which are highly controllable artificial quantum matter, we experimentally elucidate their non-equilibrium dynamics. The gauge-gravity correspondence will allow us to approach the nature of black holes in the Extreme Universe. We also develop techniques for related quantum computations and conduct theoretical research.

As for the progress in cold atom experiments in this fiscal year, Nakajima and Yamashita have constructed a cold lithium (Li) atom experimental system in an optical lattice as a platform for observing measurement-induced phase transitions and for measuring out-of-time-order correlation functions (OTOCs), and performed laser cooling (magneto-optical trapping) of ${}^6\text{Li}$ (fermions) and ${}^7\text{Li}$ (bosons) (Fig. (a)). Furthermore, evaporative cooling of ${}^6\text{Li}$ in an optical trap has been performed by enhancing the interatomic interaction via magnetic Feshbach resonance [1] and Bose-Einstein condensation of ${}^6\text{Li}_2$ Feshbach molecules has been realized and observed (Fig. (b,c)). With future realization in cold atom experiments in mind, Takasan and Tezuka theoretically proposed to realize the sign change of the Hamiltonian for measuring OTOCs by applying strong external field on cold fermionic atoms in an optical lattice and turning interaction between spin degrees of atoms from antiferromagnetic to ferromagnetic [2]. Also, Danshita and Yamamoto, in collaboration with Yoshihiro Machida and Kenichi Kasamatsu (Kindai Univ.), proposed for two-component Bose gas in an optical lattice that a superfluid forms a self-bound droplet near the Mott insulator transition [3].

As a study of fundamentals of open quantum systems, a collaboration consisting of Kazuki Yamamoto, Tezuka, and Norio Kawakami (Kyoto Univ.), and Masaya Nakagawa and Masahito Ueda (Univ. of Tokyo) analyzed non-hermitian XXZ spin chains by extending analytical methods including the Bethe ansatz as well as the numerical density-matrix

renormalization group to non-hermitian systems, and found that for weak dissipation the dependence of the correlation functions on distance is described by the complex-valued Tomonaga-Luttinger parameter, among other universal properties [4]. Mori and Tatsuhiko Shirai (Waseda Univ.) continued their study on the dynamics of open quantum systems described by the Lindblad-type quantum master equation, and proved a rigorous inequality for autocorrelation functions of physical quantities in the steady state [5]. Mori developed a method to evaluate the heating rate of the system under fast periodic driving from the high-frequency expansion of the Floquet Hamiltonian [6]. He also authored a review on Floquet states in open quantum systems [7].

We also carried out research related to the computation of quantum many-body systems using quantum computers. In collaboration with Masanori Hanada (Univ. of Surrey), Junyu Liu (Univ. of Chicago), and Enrico Rinaldi (Quantinuum and RIKEN), Tezuka proposed a method to evaluate, by using classical computers, the effect of cut-offs in simulating bosonic systems with quantum computers [8]. Kaminishi and Mori, with Michi-hiko Sugawara and Naoki Yamamoto (Keio Univ.), analyzed the non-equilibrium steady states, regarding the noise of the quantum computers as dissipation [9]. For the Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model, a quantum system with holographic correspondence to a quantum black hole, a simplified version, the sparse SYK model, with most of the random all-to-all interactions switched off has been proposed as satisfying favorable features of the original model, and simulated in quantum computers. Tezuka, in collaboration with Onur Oktay (Univ. of Surrey), Masanori Hanada, Enrico Rinaldi, and Franco Nori (RIKEN), showed numerically that even if the magnitude of the interaction parameter is restricted to a constant, the sparse SYK model exhibits properties expected for a quantum system corresponding to quantum gravity, such as random matrix-like level statistics of the eigenvalues [10].

[1] 2022 Autumn Meeting of the Physical Society of Japan.

[2] K. Takasan and M. Tezuka, arXiv:2111.03857.

[3] Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu, Phys. Rev. A **105**, L031301 (2022).

[4] K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. B. **105** (2022) 205125.

[5] T. Mori and T. Shirai, arXiv:2212.06317.

[6] T. Mori, Phys. Rev. Lett. **128**, 050604 (2022).

[7] T. Mori, Ann. Rev. Cond. Mat. Phys. **14** (2023) in press (arXiv:2203.16358).

[8] M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, arXiv:2212.08546.

[9] 2022 Annual Meeting of the Physical Society of Japan.

[10] M. Tezuka, O. Oktay, E. Rinaldi, M. Hanada, and F. Nori, Phys. Rev. B **107**, L081103 (2023)

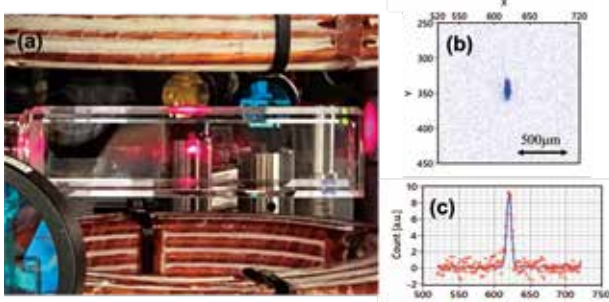
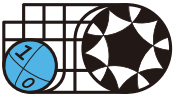


Fig. (a) Magneto-optical trapping of cold Li atoms in UHV glass cell. (b) TOF image of Bose-Einstein condensation of Li_2 molecules (TOF=20ms) and (c) its one-directional integrated image.



Black Holes and Singularities from Quantum Information

[Principal Investigator]

Akihiro Ishibashi (Kindai University)

[Co-Investigator]

Kengo Maeda (Shibaura Institute of Technology)

Keiju Murata (Nihon University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Yoshinori Matsuo (Kindai University)

Shunichiro Kinoshita (Nihon University)

[Research Collaborators]

Takashi Okamura (Kwansei Gakuin University)

Gen Kimura (Shibaura Institute of Technology)

Toshifumi Noumi (Kobe University)

Our universe is full of black holes. One of their very mysterious features is that black holes possess, at least theoretically, thermodynamic properties such as temperature and entropy, just like ordinary materials. Furthermore black holes can quantum mechanically emit thermal radiation (known as Hawking radiation). Such quantum aspects of black holes have raised questions concerning over general relativity and quantum information. The main aim of Project B03 is to understand fundamental nature of quantum black holes by developing new approach to quantum gravity by incorporating quantum information into general relativity.

One of the most powerful approaches toward problems along this line is the “gauge-gravity correspondence” which enables us to understand quantum aspects of matter and gauge fields in terms of classical gravity. Ishibashi and Maeda [1] in B03 studied the evolution of evaporating black holes due to Hawking radiation by using the gauge-gravity correspondence (see figure below). They found that even in the evaporating black hole geometry, there still holds a certain type of positive energy inequality. This new energy inequality is expected to be used to show various theorems concerning quantum black holes.

A particularly interesting class of black holes is the one consisting of “extremal black holes” with zero Hawking temperature. Such black holes show a very interesting phenomena, called the “attractor mechanism” where several moduli fields are drawn to fixed values at the event horizon with values determined only by the charges of the black holes. Ishibashi and Maeda, collaborated with Iizuka in B01, studied flows of extremal black holes with attractor mechanism and clarified their thermodynamic stability by using the gauge-gravity correspondence [2].

As for quantum information and black holes, Matsuo in B03 studied the

quantum information of the radiation around black holes [3]. He found that the additivity conjecture in quantum information theory is satisfied if the back reaction to geometries from quantum vacuum states is taken into account. Matsuo and his collaborators studied the chaoticity of highly excited strings to which black holes are expected to transit at high temperatures. Although it was proposed that the erratic behavior in the string scattering indicates chaoticity of highly excited strings, they found that no sign of transient chaos can be seen in scattering amplitudes of highly excited strings by using the transient chaos analysis for classical scattering [4].

One of the main purposes of Project B03 is to understand holographic relationships between black holes and various phenomena occurring in astrophysical and condensed matter systems. Murata in B03 and his collaborators proposed a method to create a star orbiting in an asymptotically AdS spacetime in the context of the gauge-gravity correspondence [5]. They showed that once the star is created, its position can be observed from the response function. They studied the relationship between the parameters of the created star and those of the source, and showed that information regarding the AdS bulk can be extracted from the observation of stellar motion inside the AdS spacetime.

The asymptotic safety scenario is a unique approach to formulating quantum gravity, in which the functional renormalization group method is utilized. Ishibashi in B03 and his collaborators explored thermodynamic property of quantum black holes in the context of the asymptotic safety scenario. They made a new proposal for constructing asymptotic safe quantum black holes based on the black hole thermodynamic laws and found a universal formula for the entropy of quantum black holes [6].

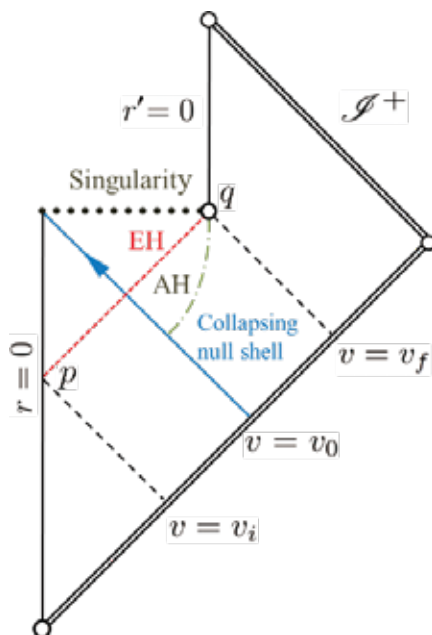


Fig. An evaporating black hole

- [1] A. Ishibashi and K. Maeda, JHEP 03 (2022) 104
- [2] N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, JHEP 09 (2022) 093
- [3] Y. Matsuo, JHEP 06 (2022) 109
- [4] K. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Yoda, JHEP 11 (2022) 147
- [5] Y. Kaku, K. Murata, and J. Tsujimura, Phys. Rev. D 106 (2022) 2, 026002
- [6] C-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, N. Ohta, and D. Yamaguchi, Phys. Rev. D 105 (2022) 10, 106026



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 Univ., USA)

Beni Yoshida (Perimeter Institute, Canada)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Jonathan Harper (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Kanato Goto (YITP, Kyoto University)

Tomotaka Kitamura (Rikkyo University)

Shoichiro Miyashita (Waseda University)

Kazuhiro Sakai (Meiji Gakuin University)

Takahiro Uetoko (National Institute of Technology, Kushiro College)

Masamichi Miyaji (Nagoya University)

Kenta Suzuki (Rikkyo University)

Ali Mollabashi (YITP, Kyoto University)

Pawel Caputa (Warsaw University, Poland)

Shan-Ming Ruan (YITP, Kyoto University)

To understand how the universe we live is created, it is necessary to understand the microscopic theory of gravity, namely, quantum gravity. The objective of Project C01 is to tackle this famous conundrum in theoretical physics by combining gauge/gravity correspondence with quantum information theory.

The gauge-gravity correspondence allows us to express the difficult theory of quantum gravity as a theory of matter at a quantum critical point (conformal field theory). However, so far it has been well understood only in the case of gravity in an anti-de Sitter space with a negative cosmological constant (i.e. AdS/CFT). The real universe, on the other hand, is believed to be similar to de Sitter space with a positive cosmological constant. Hikida, Taki and Takayanagi in C01 and Nishioka in D01 constructed the first examples of two-dimensional conformal field theory dual to a three-dimensional de Sitter space [1]. This result was published in *Physical Review Letter* and was selected as Editor's Selection, and was also featured in *Physics*, a general interest journal published by the American Physical Society (see figure below). Using this new correspondence, Hikida et.al. in C01 succeeded to calculate the correlation function of the de Sitter Universe, which is related to the density fluctuations during inflation [2].

In addition, we have actively been working on extending the gauge-gravity correspondence beyond the standard AdS/CFT. Though in gauge/gravity correspondence, we usually consider conformal field theories (CFT) on a compact space without boundary, recent studies of black hole information problems often employ the gauge gravity

correspondence to CFTs on spaces with boundaries (BCFTs). Such an extension is called the AdS/BCFT correspondence, which was discovered by Takayanagi in 2010. Kenta Suzuki and Takayanagi in C01 have noted that a new correspondence, called Island/BCFT, derived from the AdS/BCFT, in two-dimensional BCFTs by analyzing the entanglement entropy, a fundamental quantity in quantum information theory [3]. Subsequently, in collaboration with Izumi, Shiromizu, and Tanahashi in C03, experts of the brane-world theory, we successfully determined the behavior of the energy-momentum tensor and verified the Island/BCFT in higher dimensional BCFTs [4]. Sekino, Kitamura, and Miyashita in C01 succeeded in deriving the gauge/gravity correspondence for weak coupling gauge theories, including those appear in Dp-branes, by superstring theory based on a "string bit" picture [5].

Despite the fact that the gauge-gravity correspondence (AdS/CFT correspondence) in the anti-de Sitter universe has been studied for a long time, its fundamental principle is still not understood. Okuyama in C01, in collaboration with Hatsuda (Rikkyo U.) analyzed the large- N expansion of the integrated four-point function of the $N=4$ supersymmetric Yang-Mills theory and found that the non-perturbative corrections corresponding to the D3 branes in the bulk appear [6]. Sugimoto in C01, together with Fujita (Sun Yat-Sen U.), Hatta (BNL) and Ueda (Seikei U.), developed a formalism to calculate gravitational form factors of a nucleon based on the gauge/gravity correspondence, and computed the nuclear D-term [7]. Harper in C01 also improved a method for describing space-time as a collection of qubits, called Bit threads, so that multi-partite entanglement can be incorporated [8].

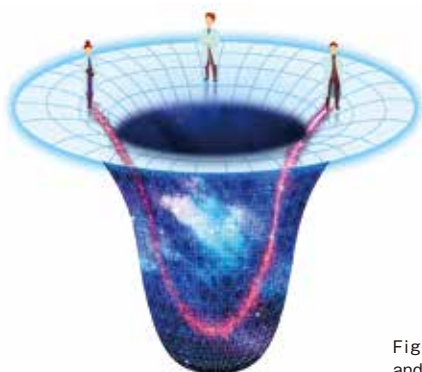
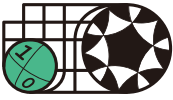


Fig. de Sitter Space and CFT

- [1] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 041601 (2022)
- [2] H. Y. Chen and Y. Hikida, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 061601 (2022)
- [3] K. Suzuki and T. Takayanagi, *JHEP* **06**, 095 (2022)
- [4] K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi and N. Tanahashi, *JHEP* **10**, 050 (2022)
- [5] T. Kitamura, S. Miyashita and Y. Sekino, *PTEP* **2022**, 043B03 (2022)
- [6] Y. Hatsuda and K. Okuyama, *JHEP* **11**, 086 (2022)
- [7] M. Fujita, Y. Hatta, S. Sugimoto and T. Ueda, *PTEP* **2022**, 093B06 (2022)
- [8] J. Harper, *JHEP* **09**, 239 (2022)



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 (University of Waterloo)
Kenichi Sasaki (NTT Basic Research Laboratories)
Kento Watanabe (Department of Physics, Tohoku University)

In this research project we are working on implementing quantum cosmology experiment in the laboratory as a toy model which is a theoretically equivalent physical system to the early universe. In this way we seek to provide a rich playground for verification of quantum cosmology theory. To do this we are using quantum Hall (QH) systems, which are created when a two-dimensional electron system is exposed to low temperatures and high magnetic fields. Our theory is that the edges of these QH systems are equivalent to a (1+1)-dimensional quantum universe.

This year we have developed a theory using expanding edges as simulators for the quantum universe, and have formulated a quantum field theory in (1+1)-dimensional curved spacetimes to analyze the edge dynamics [1]. We have also shown that the expanding edges can be regarded as expanding universe simulators of two-dimensional dilaton-gravity models, including the Jackiw-Teitelboim gravity model. As an application, we pointed out that our theoretical setup might simulate the emission of analog Hawking radiation with the Gibbons-Hawking temperature from a future de Sitter horizon formed in the expanding edge region [1].

Our experimental system comprises three components: (1) instruments that are operated at a room temperature, such as an arbitrary wave generator, oscilloscope, and spectrum analyzer; (2) a refrigerator with a superconducting magnet that creates an extreme environment; and (3) semiconductor devices that allow us to achieve an equivalent physical system to the quantum universe. We plan to build a 5-mK system using a dilution refrigerator; however, the refrigerator have not been delivered yet, so we are focusing most of our resources on designing and fabricating semiconductor devices and printed circuit boards for the refrigerator. The arbitrary waveform generator we introduced this year can generate two sets of phase-controlled waveforms with 20-ps accuracy, which are applied to the expansion gate to expand the edge and a sine wave equivalent to the light from distant galaxies (up to 20 GHz). We have fabricated about 700 devices and tested them at 1.2 or 4 K using our existing refrigerator. We analyzed the crosstalk signal that directly propagates between the excitation and

detection gates by the speed of light. As a visualization tool, we have developed a new pump-probe reflection stroboscope and microscopy, which improved the time resolution from a few 100 ps [2] to a few ps [3].

On the theoretical side, Hotta et al. considered the conceptual issues of deep learning for metric detectors using test particle geodesics in curved spacetimes [4]. We also explored the limitation incurred by the energy conservation law, which is universal but is one of the non-additive conservation laws. We present a lower bound for the error of a quantum measurement using a scattering process satisfying the energy conservation law [5].

Shibata et al. have numerically analyzed the edge state of the fractional quantum Hall (FQH) state by using the density matrix renormalization group (DMRG) method. From this year we started the analysis on the time evolution using the time-dependent variational principle (TDVP) method, not only the ground state. TDVP is a recently developed method that allows us to calculate time evolution even in the presence of long-range interactions. Using this method, we are investigating the dynamic properties by tracking changes in the electron density of the FQH state that occur when the edge potential is abruptly changed.

Yonekura and coauthors have studied the Green-Schwarz mechanism in string theory at the nonperturbative level [6, 7], performing explicit computations in the case of 8-dimensional spacetimes [6] and studying the structure of anomalies of general heterotic string theories systematically [7]. They also argued that cosmic strings in the Universe can be produced from pure Yang-Mills theories [8, 9]. Properties of the strings are studied by the methods of generalized symmetry, electric-magnetic duality, and holography. They also computed the gravitational wave signals and found that they could potentially be observed in future experiments.

[1] M. Hotta et al., *Phys. Rev. D* **105**, 105009 (2022).

[2] A. Kamiyama et al., *Phys. Rev. Research* **4**, L012040 (2022).

[3] A. Kamiyama et al., arXiv:2212.05507.

[4] R. Katsube, w-H. Tam, M. Hotta, Y. Nambu, *Phys. Rev. D* **106**, 044051 (2022).

[5] R. Katsube, M. Ozawa, M. Hotta, arXiv:2211.033433.

[6] Y. Lee, K. Yonekura, arXiv:2203.12631.

[7] K. Yonekura, arXiv:2207.13858.

[8] M. Yamada, K. Yonekura, arXiv:2204.13123.

[9] M. Yamada, K. Yonekura, arXiv:2204.13125.



Fig. 1 A typical semiconductor device for quantum universe experiment and printed circuit board for the refrigerator.



Gravitation and cosmology: principles and applications based on quantum information

[Principal Investigator]

Tetsuya Shiromizu (Nagoya University)

[Co-Investigator]

Keisuke Izumi (KMI, Nagoya University)
Tutomu Kobayashi (Rikkyo University)
Masato Nozawa (Osaka Institute of Technology)
Norihito Tanahashi (Chuo University)
Hirotaka Yoshino (Osaka Metropolitan University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Daisuke Yoshida (Nagoya University)
Norichika Sago (Kyoto University/Osaka Metropolitan University)

[Research Collaborators]

Sumio Yamada (Gakushuin University)

In our group, we are working on the basic research for the birth of the Universe and the origin of the acceleration of the Universe, as well as for the interior of black holes from the perspective of higher and four dimensional spacetimes.

We analyzed the higher dimensional version of AdS/BCFT correspondence developed by the members of the C01 team. This correspondence can be regarded as a joint system between the braneworld, which is a higher dimensional model, and the setting of AdS/CFT. Izumi, Shiromizu, and Tanahashi solved the linearized Einstein's equations under appropriate boundary conditions and obtained the stress-energy tensor of the CFT. This work confirms the further validity of AdS/BCFT [1].

The positive energy theorem guarantees the stability of a spacetime. A higher dimensional formulation of this proof was attempted by Shiromizu and his colleague Soligon [2]. Specifically, we consider a higher dimensional hypothetical spacetime and construct the four dimensional universe in such a way that it becomes a minimal surface. It was demonstrated that the total energy of the hypothetical universe is smaller than that of our universe, and pointed out that it is non-negative. Minimal surfaces in higher-dimensional spacetime are known to be closely related to quantum information via the Ryu-Takayanagi formula. We hope that the present work will provide a foundation for the research of this area.

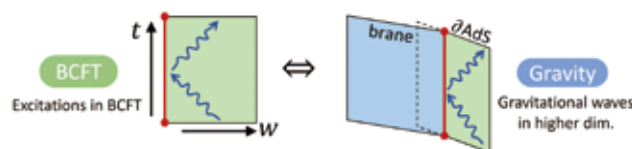
By applying Penrose's singularity theorem for gravitational collapse to the expanding universe, Yoshida showed that the size of the universe is finite and its upper bound is determined by the expansion rate of the observed region [3], provided that gravity is attractive and there is no initial singularity of the universe due to effects such as quantum gravity.

Observations of black holes have advanced the verification of general relativity in strong gravitational region. Izumi, Shiromizu and Yoshino, along with research collaborator Amo, analyzed the trajectory of light near null infinity which can be identified as the orbit of a distant observer [4]. Previous studies have focused on the trajectory of light rays emitted in a direction orthogonal to the line-of-sight direction, but this time we dealt with the

case in which light rays emitted slightly inward are also taken into account. As a result, it turns out that not all light rays reach null infinity. Amo's series of research presentations have been highly evaluated, and he has received the Student Presentation Award of the Physical Society of Japan. Izumi has proposed a surface that detects gravity regardless of its strength (attractive gravity probe surface, AGPS) and proved its area inequality. Generalizing this idea, Izumi, Shiromizu, Yoshino and research collaborator Lee have proposed four different types of surfaces and successfully incorporated the contributions of angular momentum, gravitational waves, and matter to each inequality [5]. Inspired by this research, we have also investigated the upper limit of area for black holes in the accelerating universe [6]. This result suggests that, in principle, the size of primordial black holes becomes smaller than expected.

Kobayashi was able to give new theoretical constraints on modified theories of gravity from observations of cosmic microwave background (CMB) [7]. We investigated the cosmological perturbations in a general modified gravitational theory with two tensor modes and no extra scalar modes, and performed theoretical calculations including the numerical code of CMB fluctuations. As a result, it was shown that the theoretical parameters can be constrained more severely than those obtained from the solar system tests and gravitational wave observations.

In addition, Nozawa constructed a new solution of supergravity theory bearing in mind the application to the construction of black hole solutions in the braneworld [arXiv:2211.06517]. Sago wrote a textbook on perturbation theory of gravitational waves from black holes [8]. In order to explore the possibility of signs of quantum gravity from gravitational wave observations, we are investigating the effects of changes in boundary conditions on the waveforms near black holes.



AdS/BCFT and braneworld

- [1] K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi and N. Tanahashi, JHEP **10**, 050 (2022).
- [2] T. Shiromizu and D. Soligon, Eur. Phys. J. Plus **137**, 103 (2022).
- [3] K. Nomura and D. Yoshida, Phys. Rev. D **106**, 124016 (2022).
- [4] M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino and T. Shiromizu, Phys. Rev. D **106**, 084007 (2022).
- [5] K. Lee, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino and Y. Tomikawa, Phys. Rev. D **106**, 064028 (2022).
- [6] T. Shiromizu, K. Izumi, K. Lee and D. Soligon, Phys. Rev. D **106**, 084014 (2022).
- [7] T. Hiramatsu and T. Kobayashi, JCAP **07**, 040 (2022).
- [8] 中野・佐倉、理論物理の探求「重力波・摂動論」朝倉書店 (2022).



Quantum information theoretic approach to the dynamics of quantum field theory

[Principal Investigator]

Tatsuma Nishioka (Osaka University)

[Co-Investigator]

Masazumi Honda (YITP, Kyoto University)

Etsuko Itou (iTHEMS, RIKEN)

Yutaka Matsuo (University of Tokyo)

Takuya Okuda (University of Tokyo)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Dongsheng Ge (Osaka University)

Pratik Nandy (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Takahiro Doi (RCNP, Osaka University)

Daisuke Inotani (Keio University)

Kazunobu Maruyoshi (Seikei University)

Akira Matsumoto (iTHEMS, RIKEN)

Lento Nagano (ICEPP, University of Tokyo)

Naohisa Sueishi (Keio University)

Ryo Suzuki (Southeast University)

Hiroyuki Tajima (University of Tokyo)

Shouchiro Tsutsui (iTHEMS, RIKEN)

Masahito Yamazaki (KIPMU, University of Tokyo)

Yutaka Yoshida (Meiji Gakuin University)

Physical phenomena of elementary particles and quantum many-body systems are described by quantum field theory. The goal of group D01 is to understand the dynamics of matter exhibiting quantum behavior from the viewpoint of quantum information theory.

Quantum field theory allows not only point particles such as elementary particles but also extended operators called defects. The existence of the latter has a significant impact on phase structure and dynamics, but their properties are still not as well understood as those of point particles. Nishioka showed that in conformal field theories, defects play a mirror-like role with respect to point particles, and a method similar to the mirror method in electromagnetism can be applied to determine the correlation functions of point particles. It is also showed that the critical points of the $O(N)$ vector model with boundary and line operators have conformal symmetry, but their behavior can be determined from a natural set of axioms [1].

Quantum error correction is an essential technique for implementing fault-tolerant quantum computers, but its mathematical structure appears in various research fields. Nishioka and Okuda proposed a new way to construct a (1+1)-dimensional conformal field theory from certain non-binary quantum error correcting codes [2].

Quantum computers are expected to efficiently simulate physical systems that are difficult to simulate with classical computers. The Schwinger model is a (1+1)-dimensional gauge theory with features similar to QCD. Normally, a repulsion force acts between particles with the same positive and negative charges and an attractive force acts between particles with opposite positive and negative charges, but Ito and Honda have succeeded in realizing a situation where a repulsion force acts between particles with opposite charges (Figure 1) through numerical quantum simulations [3]. This result was selected as Editor's Choice of PTEP. Okuda investigated the local

physics of the Schwinger model in a system with boundaries using bosonization and the density matrix renormalization group [4]. Ito and Honda studied the charge- q Schwinger model by tensor network method and showed how the 't Hooft anomaly between discrete chiral and 1-form symmetries is realized numerically, consistent with the theoretical prediction [5].

Various quantum computers are currently in practice, but due to noise, computational errors cannot be ignored. To estimate such errors, Okuda, Maruyoshi, Suzuki, Yamazaki, and Yoshida implemented integrable Trotterization of the XXX spin chain on an actual quantum computer, observed the decay of the conserved charge due to noise, and proposed using the decay rate as a benchmark [5]. Okuda and Sukeino formulated a quantum simulation of lattice gauge theory using measurement-based quantum computation methods and clarified the properties of the resource states used in the simulation as SPT phases [6].

Honda showed that the Riemann conjecture, one of the Millennium problems, is equivalent to the conditions on certain physical quantities in string theory and supersymmetric gauge theory. He also constructed various quantum field theories with subsystem symmetries closely related to the fracton phase and investigated fundamental properties such as vacuum structure, duality, and the 't Hooft anomaly [7]. Nandy investigated the time evolution of operators in open quantum systems using the Krylov complexity, which is a measure of the speed of quantum information diffusion [8].

Our group organized a summer school this year. Details are available in the meeting report.

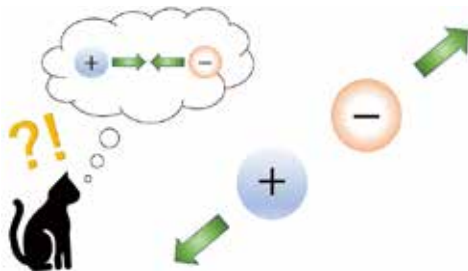


Figure 1 Under normal circumstances, particles with opposite positive and negative charges are attracted to each other (left), but the opposite situation, repulsion, can occur (right).

- [1] T. Nishioka, Y. Okuyama, S. Shimamori, *Phys. Rev. D* **106**, L081701 (2022), arXiv:2212.04076, 2212.04078.
- [2] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, arXiv:2212.07089.
- [3] M. Honda, E. Itou, Y. Kikuchi, Y. Tanizaki, *PTEP* **2022**, 033B01 (2022).
- [4] T. Okuda, arXiv:2210.00297
- [5] M. Honda, E. Itou, Y. Tanizaki, *JHEP* **11**, 141 (2022).
- [5] K. Maruyoshi, T. Okuda, J. W. Pedersen, R. Suzuki, M. Yamazaki, Y. Yoshida, arXiv:2208.00576.
- [6] H. Sukeino, T. Okuda, arXiv:2210.10908.
- [7] M. Honda, T. Yoda, arXiv: 2203.17091; M. Honda, T. Nakanishi, arXiv:2212.13006.
- [8] A. Bhattacharya, P. Nandy, P. P. Nath, H. Sahu, *JHEP* **12**, 081 (2022); B. Bhattacharjee, S. Sur, P. Nandy, *Phys. Rev. B* **106**, 205150 (2022).



Tensor Networks and Quantum Many-Body Systems from Quantum Information

[Principal Investigator]

Kouichi Okunishi (Niigata University)

[Co-Investigator]

Hiroshi Ueda (QIQB, Osaka University)

Hosho Katsura (The University of Tokyo)

Chisa Hotta (The University of Tokyo)

Kenji Harada (Kyoto University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Shunsuke Furuya (The University of Tokyo)

Atis Yosprakob (Niigata University)

[Research Collaborators]

Tomotoshi Nishino (Kobe University)

Toshiya Hikihara (Gumma University)

Tsuyoshi Okubo (The University of Tokyo)

The research group D02 aims to develop studies on the tensor network (TN), which is an essential tool for quantitatively analyzing quantum many-body systems, and to gain the deeper understanding of various interesting phenomena in condensed matter systems by shedding a light on the underlying entanglement and mathematical structures. The resulting insight about TNs and quantum many-body systems is expected to be a key to the interdisciplinary types of extreme universe collaboration. This year, Dr. Furuya and Dr. Yosprakob were appointed as ExU PDs at the University of Tokyo and Niigata University in April and October, respectively. As of the end of December, we have published 21 papers (including preprints), including an invited review paper on the TN [1]. Here, we would like to introduce some research highlights.

The TN provides a systematic and theoretical framework for describing quantum many-body states and practical numerical algorithms. Recently, Okunishi, Ueda, and Harada, with Hikihara and Nishino, succeeded in elucidating the optimization principle of the network structure for so-called Tree TN and developing a practical TN algorithm that is easy to apply to a wide class of quantum spin systems[2]. Details of this result are separately described in “Recent Research” on page 63 in the present newsletter, and thus we omit the explanation. Here we note that since the network structure of a discrete system corresponds to the geometry of a corresponding continuous system, determining the optimal network structure may help us understand more about the Gauge/gravity correspondence. Also, Harada, Okubo, et al. extended the similar network structure optimization of the Tree TN to the machine learning problem. We hope these results promote further studies of similar topics in other research areas related to TN.

In condensed matter physics, precise analysis of quantum many-body problems based on their underlying mathematical structure often plays an essential role in the universal understanding of various phenomena. Recently, quantum scar states, which exhibit peculiar quantum dynamics, have attracted much attention from theoretical and experimental viewpoints. Katsura et al. systematically constructed a series of quantum scar states for a spinless fermion model and a multicomponent Hubbard model based on the insight into their underlying algebraic structure[3]. Also, Katsura succeeded in constructing an exact solution for the clean limit of a supersymmetric SYK model. In this ExU collaboration, the SYK model is one of the most important models associated with quantum information scrambling and black hole information loss. Further developments in the physics

of the SYK, like the relation with a lattice version of the supersymmetry breaking [4], are also interesting across various research fields. On the other hand, Hotta et al. combined a sine-squared deformation -a technique modifying the form of the Hamiltonian which has been studied in various ways by the D02 members- with the mean-field approximation and successfully determined the quantum many-body phases of long spatial periods for the Hubbard model with antisymmetric Rashba-type spin-orbit coupling [5]. Hotta and another collaborator also clarified that band structures with chiral symmetry appear due to the effective SU(2) gauge field induced by the spin-orbit interaction in the Kagome lattice [6]. Hotta and Harada developed a collaboration on the quantum dynamics for transverse-field Ising models using the Glauber-type quantum Monte Carlo method [7]. Meanwhile, Furuya proposed a novel one-dimensional quantum spin model in which symmetry-protected topological order and gapless excitation coexist [8]. Furuya also launched joint research on feedback control of quantum dynamics with Katsura and Hotta.

One may thus find that the research collaboration within the D02 group is progressing smoothly. In addition, some cross-disciplinary collaborations have started; For instance, Ueda has developed a large-scale exact diagonalization package QS³ for the low particle number limit in cooperation with Yamamoto of the B02 group and Shimokawa of the E02 group [9]. Yosprakob, who joined in October, has a background in lattice gauge theory and launched a new research project on the tensor renormalization group. Next year, we would like to accelerate collaborative research with young researchers and other groups.

- [1] K. Okunishi, T. Nishino, and H. Ueda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 062001 (2022) [invited review].
- [2] K. Okunishi, H. Ueda, and T. Nishino, arXiv:2210.11741; T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, and T. Nishino, *Phys. Rev. Research* **5**, 013031 (2023).
- [3] K. Tamura and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **106**, 144306 (2022); M. Nakagawa, H. Katsura, and M. Ueda, arXiv:2205.07235.
- [4] H. Katsura and T. Nakayama, *JHEP* **2022**, 72 (2022).
- [5] M. Kawano and C. Hotta, *Phys. Rev. Research* **4**, L012033; M. Kawano and C. Hotta, arXiv:2208.09902.
- [6] H. Nakai and C. Hotta, *Nature Comm.* **13**, 579 (2022); H. Nakai, M. Kawano, and C. Hotta, arXiv:2208.07171.
- [7] C. Hotta, T. Yoshida, and K. Harada, arXiv:2209.11599.
- [8] Y. Hidaka, S. C. Furuya, A. Ueda, and Y. Tada, *Phys. Rev. B* **106**, 144436 (2022); S. C. Furuya and K. Morita, arXiv:2207.02485.
- [9] H. Ueda, S. Yunoki, and T. Shimokawa, *Comput. Phys. Commun.* **277**, 108369 (2022).



Exploration of quantum gravity and quantum matter based on symmetry and information geometry

In recent years, Resource Theory of Asymmetry (RTA) has been rapidly developing a comprehensive analysis of the effects of symmetry on quantum mechanics. RTA treats quantum operations which are covariant with respect to given symmetry as *free operations*, and defines the quantum fluctuation of conserved quantity corresponds to the given symmetry as *resource*. Recently, I found several trade-off relations in RTA (PRL2018, QIP2020, PRL2021, etc.). The goal of this project is to unify and extend the trade-off relations and apply them to find several useful theorems in quantum gravity and condensed matter theory.

The results obtained to date include a universal trade-off structure between symmetry, irreversibility, and quantum coherence. This trade-off particularly reveals that (1) under a global symmetry, any attempt to induce local dynamics that change the conserved quantity will cause inevitable irreversibility, and (2) such irreversibility could be mitigated by quantum coherence. This relation admits broad applications including measurement, error-correction, gate implementation, thermodynamics, and black hole physics. For example, we apply our relation to black hole physics and obtain a universal lower bound on how many bits of classical information thrown into a black hole become unreadable under the Hayden-Preskill model with the energy conservation law. This particularly shows that when the black hole is large enough, under suitable encoding, at



● Principal Investigator

Hiroyasu Tajima

Graduate School of Informatics and Engineering The University of Electro-Communications assistant professor/JST PRESTO researcher

Born in Aichi, 1987

Graduated from the University of Tokyo in March 2015

Current position

since April 2020 (The University of Electro-Communications)

since November 2020 (JST PRESTO)

least about $m/4$ bits of the thrown m bits will be irrecoverable until 99 percent of the black hole evaporates. In the future, I aim to extend and apply these results more and more.



Study of physically natural method to generate t-design in quantum many-body systems based on quantum control theory

Random unitary transformation is one of the central techniques in quantum information processing. In early stages of quantum information processing research, random unitary transformation based on Haar measure is used. Here, Haar measure is a regular invariant measure on the unitary group. However, it was recognized that the implementation of the random unitary transformation based on the Haar measure requires exponential time. Therefore, unitary t-design, a measure that approximates the Haar measure, has attracted much attention. A t-design are not only essential for various quantum information processing, but have recently been found to be important as a method for approximating quantum chaotic systems and for Markovizations of environmental systems.

Existing t-design generation protocols are designed as polynomial-time algorithms that work efficiently on a quantum computer. However, it difficult to implement them on a quantum many-body system. In this project, we are focus on finding a physically more natural way to generate t-designs in quantum many-body systems than existing methods, with applications such as Markovianization and quantum chaos in mind. First, by applying the techniques of quantum control theory, we prove the existence of a random control method such that the random dynamics of the whole system is t-design in a fully controllable quantum system. In a quantum many-body system, it is natural to assume a situation in which a random action is externally applied



● Principal Investigator

Masaki Owari

Faculty of Informatics, Shizuoka University Associate Professor

Born in Osaka, 1979

Graduated from the University of Tokyo in March 2007

Current position since October 2016

only to the restricted degrees of freedom. Therefore, by using the random control method proved above, we show that t-design of the whole system can be achieved by random unitary transformations to small subsystems in well-known one-dimensional and two-dimensional spin systems. Furthermore, we aim to apply the obtained new t-design generation method to quantum information processing. In particular, by creating parametric quantum circuits based on the new method, we aim to devise a new quantum many-body device that can perform variational quantum algorithms by accessing only a part of the system.



Information-theoretical analysis of one-dimensional tensor network

Tensor networks are an efficient representation to describe quantum many-body states or operators with a small number of parameters. They are widely used in ExU researches too, to analyze the dynamics of quantum many-body systems and the holography principle. The use of tensor networks has been spreading to various fields of physics in recent years, but even in relatively simple cases such as one-dimensional (1D) networks, there are still many unresolved aspects in the theoretical foundation.

In this publicly offered research, we will clarify what kind of quantum states can be described by 1D tensor networks, called MPO. In 1D systems, two major types are known: MPS and MPO (there is also another type called MERA, but we do not discuss it here). It is theoretically known that the quantum states that can be efficiently represented by MPS coincide with the low-temperature states (ground states) of 1D systems. This indicates not only that MPS is suitable for describing low-temperature states, but also that MPS is not suitable for describing other states, which is a limitation of MPS's expressive capability. In contrast, MPO is a tensor network suitable for describing thermal states in 1D systems. However, it is known that the states described by MPO include states beyond that, and it is not clear to what exactly the physical states described by MPO. The problem of the description range of tensor networks is not well understood except for MPS, and this research will tackle this unsolved problem for MPO as a



● Principal Investigator

Kohtaro Kato

Graduate School of Informatics, Nagoya University Assistant Professor

Born in Shizuoka, 1990

Graduated from the University of Tokyo in March 2017

Current position since June 2021

first step.

Interestingly, MPO is also related to the physics of 2D spin systems. It has been pointed out that the physical properties of 2D noncritical systems at low temperatures are reflected in the 1D system at the boundary of the system. The 1D state at the boundary is described by MPO, so we plan to address the "holographic" correspondence between such 2D low-temperature states and 1D thermal states in the latter half of this proposal.



Development of quantum many body system out-of-equilibrium and quantum information control with NMR

Nuclear spins weakly interact with electron spins through hyperfine interactions in the energy scale of MHz-GHz. The hyperfine interactions include a variety of information associated with the electronic structure and symmetry. Our research group utilizes nuclear magnetic resonance (NMR) as the local probe of symmetry breaking and low energy excitation in condensed quantum matters by determining and solving the hyperfine interaction. Our target materials are the system having macroscopic quantum entanglements such as quantum Hall effects and quantum spin liquids without showing conventional long-range orders. These states can carry anyons with fractional statistics, which are important for the fault-tolerant quantum computation. Our aim is to observe such an emergent quasiparticle by NMR spectroscopy. Although the quantum Hall effect has been realized only on two-dimensional systems, the recent discovery of three-dimensional Dirac semimetals having linear energy dispersion opens the door for magnetic studies by NMR etc. Indeed, we have observed the quantized motion of Dirac fermions in the NMR relaxation rates at high fields and low temperatures. In quantum spin liquids, there is no electric charge carrier but spin excitation. It has a topological order with the long-range quantum entanglement for a gapped spin liquid case analogous to the quantum Hall regime. We have found some candidate materials exhibiting as quantum spin liquid in frustrated spin systems. Can nuclear spins mediate the long-range en-



● Principal Investigator

Yasuhiro Shimizu

Department of Physics, Nagoya University Associate Professor

Born in Hyogo, 1977

Graduated from Kyoto University in March 2005

Current position since April 2011

tanglement of electrons? In this project, we will develop the new open quantum many-body system by combining the macroscopic quantum states and nuclear spins, which is useful to read out the quantum information.



Generation of graph states using cold Rydberg atoms and the application to measurement-based quantum computation

In this research, we will perform an experiment to generate many-body entanglement states, called “graph states,” which are important resources for quantum error correction and measurement-based quantum computation, via natural time evolution with the interaction between cold Rydberg atoms.

In the cold-atom experimental platform, it is possible to construct a qubit array with the optical tweezers array technique, where locally focused laser beams are used to trap each atom individually and arrange them in an arbitrary shape. Long-range interactions can also be induced between atoms by exciting them to a highly-excited electronic state called a Rydberg state. In this experiment, we produce a large-scale entanglement over the atomic qubit array and generate the graph state via a time evolution under the long-range Ising interaction between atoms.

We excite cold Rubidium atoms trapped in an optical tweezers array to the Rydberg state by pulsed lasers, which induce Ising-type long-range interactions between the atoms and time evolution to generate large-scale entanglement over the atomic qubit array, creating the graph state. By using pulsed lasers to excite the atoms in a short time compared to the time scale of the atomic interactions, we can ignore the Rydberg interactions during the excitation, subsequently inducing interactions between the atoms simultaneously, while continuous wave lasers are generally used in the Rydberg excitation. This is different from the



● Principal Investigator

Takafumi Tomita

National Institutes of Natural Sciences,
Institute for Molecular Science
Research Assistant Professor

Born in Nara, 1992

Graduated from Kyoto University in
March 2019

Current position since April 2019

conventional method of performing two-qubit gates for each individual qubit pair and forming entanglement sequentially. We investigate the optimal Rydberg electronic states, state manipulations, and graph geometries for graph state generation. We characterize the fidelity of the generated states by combining single-site addressing single-qubit gate operations.

In addition, we implement individual local measurement that does not affect other atoms in the neighborhood, and explore the possibility of using the generated graph states as a resource for measurement-based quantum computation.



Search of topological phenomena in correlated open quantum systems based on quantum entanglement

In this decade, topological aspects of condensed matters have extensively studied. In topological phases, such as topological insulators, topologically nontrivial properties induce gapless boundary modes robust against perturbations. In addition to the above significant developments, non-Hermitian systems, such as open quantum systems, attract much interest recently. For such systems, a variety of novel phenomena (e.g., the emergence of exceptional points and the non-Hermitian skin effect) are reported due to the interplay between the non-Hermiticity and the topology. In my project, I address analysis of topological open quantum systems in terms of extreme universe.

In particular, recent developments of technology allow us to experimentally tune dissipation and correlations for cold atoms. In these systems, interplay between strong correlations and non-Hermitian topology would trigger off novel phenomena unique to strongly correlated open quantum systems. I particularly analyze these open quantum systems in search of exotic non-Hermitian topological phenomena. Furthermore, I address theoretical proposals how to experimentally observe such novel phenomena for cold atoms.

By communicating other researcher of extreme universe, I also address the above project from the interdisciplinary viewpoint.



● Principal Investigator

Tsuneya Yoshida

Kyoto University Associate Professor

Born in Nara, 1986

Graduated from Kyoto University in
March 2014

Current position since October 2022



An approach to quantum gravity from quantum information theory and condensed matter theory

General relativity and quantum mechanics are the most important developments in physics in the 20th century. However, quantum gravity, which is the combination of relativity and quantum mechanics, is still not fully understood yet. In this research, we study quantum gravity from the perspective of quantum information and condensed matter physics. Through that, we study how quantum mechanics and general relativity are combined and how spacetime emerges from quantum mechanical systems. Furthermore, we study the implication of quantum gravity on low energy effective theory through the lens of quantum information and condensed matter theory. Based on that, we study how quantum gravity gives predictions for our spacetime and universe as well as elementary particles. We also analyze the quantum information structure in condensed matter and quantum phases out of equilibrium and apply these results to problems in quantum gravity.

More specifically, we study “[A]application of quantum channels and open quantum systems to quantum gravity”, “[B]Quantum information and the Swampland program”, “[C]Quantum information aspects of emergence and phases in condensed matter systems”.

In [A], we study open dynamics in the SYK model and then generalize to the top-down AdS/CFT. Based on those, we understand the emergence of time and the dual of



● Principal Investigator

Tokiro Numasawa

Institute for Solid State Physics, the University of Tokyo Assistant Professor

Born in Tokyo, 1990

Graduated from Kyoto University in March 2017

Current position since April 2022

non-unitary theories, which are not well understood. In [B], we aim to understand the swampland program in the language of quantum information theory. Beyond the black hole thermodynamics, we derive the swampland conditions by quantum information approach and quantum entanglement, which are more basic properties in quantum gravity. In [C], we study quantum information structures in emergent gauge fields from condensed matter (spin systems) like Lifshitz gravity, fracton topological order. Emergent gauge fields are ubiquitous in condensed matter systems. Since gravity is also a gauge field, they are similar in that sense. Through the understanding of quantum information properties in the system with emergent gauge fields, we try to understand quantum gravity.



Application of tensor networks to elementary particle physics

Tensor network (TN) method was originally proposed as a variational method to solve quantum many-body system in the condensed matter physics. At present, various improvements have been made on the method, and its applications have spread to many fields such as elementary particle physics, quantum information, and quantum chemistry. I am particularly interested in applying the TN method to quantum field theory, which is a theoretical foundation of elementary particle physics. My final goal is to obtain the dynamics of the theory, which are difficult to capture with the Monte Carlo method due to the sign problem, from first principle computation using the TN method. Interesting physical systems inherent the sign problem include QCD with finite baryon density, real-time path integral, lattice chiral gauge theory, lattice SUSY, and system having a topological theta term. Currently I am working on revealing a phase structure of CP (1) model with the topological term, which is known as a toy-model of QCD. Although it is expected that the knowledge of QCD can be obtained by analyzing the model, at present the phase structure of CP(1) itself is under debate. Thus, I would like to draw a final conclusion by using a more sophisticated TN method.

While the TN method has no sign problem, it still has a problem of drastic increase in computational cost when applied to higher dimensional system. A key to solve the problem is how to compress the information of tensor. Various ideas have been proposed so far, such as incorpo-



● Principal Investigator

Shinji Takeda

Kanazawa University, College of Science and Engineering Associate Professor

Born in Osaka, 1978

Graduated from University of Tsukuba in October 2005

Current position since December 2018

rating environment effects and local correlations, or a stochastic method. In this project, I aim to develop a highly efficient coarse-graining algorithm for high dimensional system by interweaving such knowledge.



Study of emergence of spacetime in tensor network based on the renormalization group

The emergence of space-time is considered to be an essential feature of quantum gravity. It has been recognized that quantum entanglement plays a crucial role there. The gauge/gravity correspondence is a typical example in which the emergence of space-time is realized. The purpose of this project is to make progress in the construction of quantum gravity by studying continuum tensor networks based on the renormalization group in the gauge/gravity correspondence.

Tensor networks models such as the MERA, the HaPPY code and the random tensor network are important in the studies of the emergence of space-time, since the models give networks that can be interpreted as discrete spaces emerging from boundary theories through entanglement entropy. Here it is needed to construct continuum tensor network models to obtain the emergence of continuum space.

The cMERA, a continuum analog of the MERA, is constructed in free field theories by using the variational method, while the variational method seems difficult to apply to interacting theories. Since the layers in the network of the MERA can be interpreted as the scale of renormalization group, which corresponds to the bulk direction, constructing the cMERA is considered to be equivalent to obtaining the scale dependence of wave functionals. In this project, we study the construction of continuum tensor networks based on renormalization group. In particular, we



● Principal Investigator

Asato Tsuchiya

Department of Physics, Shizuoka University Professor

Born in Saitama, 1966

Graduated from the University of Tokyo in March 1995

Current position since August 2016

focus on the exact renormalization group and the tensor renormalization group, which can be viewed as a path-integral formulation of the MERA.

We construct the exact renormalization group for wave functionals in quantum scalar field theories, which enables nonperturbative analyses of the wave functionals. We also develop a numerical method to examine the scale dependence of the wave functionals by taking the continuum limit of the tensor renormalization group for lattice field theories. We construct the continuum tensor networks by using these methods and extract the dynamics of gravity from the networks to study the emergence of space through quantum entanglement.



Quantum entanglement and information scrambling in inflationary models

Stochastic approach of inflation treats the quantum inflaton field as a classical stochastic variable. The basic equation of this approach is the Langevin equation for the long wavelength modes of the inflaton field with the stochastic noise from the short wavelength inflaton fluctuations. Hence the evolution of the inflation field has the similar behavior as a Brownian particle. This approach can effectively include large-scale non-linear quantum fluctuations and its validity is discussed from the IR structure of quantum fluctuations in de Sitter spacetime.

Based on the stochastic picture of inflation, there appears the eternal phase in which inflation never terminates due to quantum fluctuations. The realization of the eternal phase depends on parameters of the inflaton potential, and in the eternal phase, the global structure of inflationary spacetime becomes inhomogeneous and very complicated.

Although the stochastic approach of inflation includes quantum effect as the short wavelength random noise, it does not take into account of quantum entanglement, which is a key property of quantum systems. The purpose of this research project is to investigate effect of quantum entanglement on the stochastic picture of inflation. For this purpose, we will employ a qubit model of inflation with quantum entanglement and investigate evolution of entanglement structure of this model. We will also investigate “information” of this model to understand emergence of “classical property” in the stochastic inflation.



● Principal Investigator

Yasusada Nambu

Graduate School of Science, Nagoya University Associate Professor

Born in Kochi, 1961

Graduated from Hiroshima University in May 1989

Current position since April 1995



Study of quantum theory of gravity based on the Jackiw-Teitelboim gravity theory

My main research area is superstring theory in elementary particle theory. Superstring theory is considered to be a leading candidate for the ultimate theory that can uniformly describe the four forces that exist in nature: electromagnetic force, weak force, strong force, and gravity. There are various research themes in string theory research, but I am interested in the duality (equivalence) between gauge theory and gravity (string) theory. This duality is realized by the gravitational (string) theory on the Anti-de Sitter (AdS) space and the field theory with conformal symmetry (Conformal Field Theory, CFT) equivalence. This duality was originally proposed by Maldacena. This equivalence is one of the realization examples of the holographic principle, but the basic mechanism of how this principle is realized has not yet been elucidated.

For this mechanism, I have applied mathematical and physical analysis based on the integrable structure that exists behind the duality, chaotic motion and turbulent behavior of strings, and chaotic scattering in gauge theory. We are conducting research from this perspective. It is a very important research topic to understand the relationship between quantum information theory, which is the subject of this research area, and these themes.

The subject of my publicly offered research is to analyze the Jackiw-Teitelboim gravity, a toy model in which dilaton is coupled to two-dimensional gravity, in order to clarify quantum information theory and the holographic principle.



● Principal Investigator

Kentaroh Yoshida

Faculty of Science, Kyoto University
Lecturer

Born in Aichi, 1975

Graduated from Kyoto University
March 2003

Current position since May 2022

There are various choices for the dilaton potential, and our previous research has shown that the sinh-type potential leads to the well-known Liouville gravity. By promoting this research, I would like to explore the relationship with quantum information theory and the clues to clarify the fundamental degrees of freedom in quantum gravity.



Theoretical modeling of optomechanical pendulum for testing quantumness of gravity

My research focuses on themes related to the verification of the quantum mechanical properties of gravity. This theme, which revisits the question of whether the gravity follows the framework of quantum mechanics or not, has a long history of deep consideration by Feynman and Penrose, and is a very interesting theme that is related to recent developments in quantum information and quantum technology. Quantum entanglement caused by gravitational interaction is one of the main interests, and I am also conducting theoretical research to clarify its significance for quantum gravity theory and whether it can be verified experimentally. We focus on how a quantum mechanical system interacts through gravity, but since gravity is very weak, it is necessary to realize the quantum state of a macroscopic object. Optomechanical systems play an important role in realizing the quantum states of such macroscopic objects. An optomechanical system is a mechanical system with one end of an optical cavity as a mirror oscillator that interacts with the cavity light. The Michelson interferometer, which combines them, is used in gravitational wave detection, and related research and technology are developing. In the proposal of my research, we are constructing a theoretical model of an optomechanical system with a suspended mirror oscillator called a beam model for the purpose of realizing the quantum state of macroscopic objects and verifying the quantum mechanical properties of gravity in the future. Based on the beam



● Principal Investigator

Kazuhiro Yamamoto

Kyushu University, Department of
Physics Professor

Born in Okayama, 1967

Graduated from Hiroshima University
in March 1994

Current position since April 2019

model, we plan to make theoretical predictions of the noise and dissipation to characterize optomechanical mirror oscillators, and of the quantum state when quantum control is performed by feedback control with continuous measurement.



Mesoscopic picture of black holes from quantum information

The goal of this publicly offered research is to understand the quantum (microscopic) aspects of black holes and wormholes in terms of holographic principles and quantum information theory.

Black holes have been playing a crucial role to understand the quantum aspects of gravity. In particular, the recent discovery of microscopic wormholes (so-called replica wormholes) associated with black holes has made significant progress toward solving the famous black hole information loss puzzle. This progress is mainly based on the semi-classical (macroscopic) picture, while the quantum (microscopic) picture is still unclear and problematic.

I am now studying “What microscopic properties of the wormholes play an important role?” and “Is there any way to complement the relationship between the micro and macroscopic pictures of wormholes?”. These questions are directly related to the research of Group B.

More specifically, my current research plans are to (1) clarify the microscopic and macroscopic properties of candidate quantum states that describe the microstructure of wormholes in terms of quantum information theoretic quantities and (2) study the quantum operations that “decompose” macroscopic wormholes into microscopic ones and their effects on the wormhole geometries. Interest-



● Principal Investigator

Kotaro Tamaoka

Department of Physics, College of Humanities and Sciences, Nihon University Assistant Professor

Born in Hyogo, 1990

Graduated from Osaka University in March 2019

Current position since April 2021

ingly, these topics are closely related to the research of Group C and D, so I am very excited to join this Extreme Universe collaboration which will lead to new research directions. I am also interested in studying “(3) implications of such microscopic wormholes to physics such as symmetries”.



Entanglement Witness in Quantum Frustrated Magnets

Quantum entanglement has attracted a great deal of attention in recent years. In particular, theoretical studies using entanglement entropy (EE) have revealed that quantum entanglement is important for understanding unique and exotic states in quantum systems, such as quantum spin liquids and topological order. In addition, the concept of quantum entanglement has been shown to be intrinsically important for the development of new numerical methods, such as tensor network methods. On the other hand, it is known that it is challenging to measure EE directly experimentally, except for a small number of systems such as cold atoms or optical systems. Our study focuses on so-called entanglement witnesses (EWs) such as one tangle, concurrence, and quantum Fisher information. These can be written in terms of spin-spin correlation functions and dynamical spin structure factors, which are familiar in the field of magnetism, and are known to be accessible with some experimental techniques such as neutron scattering experiments [1-4]. We focus on quantum states such as quantum spin liquid states and random singlet states, which do not exhibit magnetic orders even at very low temperatures, and for which positive experimental evidence characterizing them is difficult to obtain. Our main purpose of this study is to clarify numerically whether the above EWs can characterize these unique quantum states. We also aim to establish theoretical guidelines that will lead to experimental detection and control methods of



● Principal Investigator

Tokuro Shimokawa

Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University Theory of Quantum Matter Unit Staff scientist

Born in Wakayama, 1984

Graduated from University of Hyogo in March 2012

Current position since December 2021

the exotic quantum states in candidate materials.

[1] L. Amico et al, Phys. Rev. A **69**, 022304 (2004).

[2] W. K. Wootters, Phys. Rev. Lett. **80**, 2245 (1998).

[3] P. Hauke et al, Nat. Phys. **12**, 778 (2016).

[4] P. Laurell, et al, Phys. Rev. Lett. **127**, 037201 (2021).



Study of novel quantum many-body phenomena originating from non-ergodicity in isolated quantum systems

In this publicly offered research, I will study nonergodicity in isolated quantum systems.

The issue of thermalization in isolated quantum many-body systems has become a realistic problem thanks to the developments of various quantum simulators such as cold atoms or molecules in optical lattices, Rydberg atoms in optical tweezers, trapped ions, and superconducting qubits. According to previous studies, if a system satisfies the eigenstate thermalization hypothesis (ETH), the system will thermalize after a long-time evolution. However, to prove the ETH is an unsolved problem. It is also known that some systems do not satisfy the ETH. These systems are called nonergodic systems. Typical examples of nonergodic systems are quantum integrable systems, Anderson localized systems, and many-body localized systems. Recently, quantum many-body scarred systems and Hilbert space fragmented systems have been found as novel ergodicity-broken systems. Inspired by these findings, I will explore novel quantum-many-body phenomena originating from the nonergodicity in isolated quantum systems. In particular, I will study the Hilbert space fragmentation in momentum space, which is different from the previous works. If the Hilbert space fragmentation occurs in the momentum space, we can naively expect that persistent-current states emerge. I will study the nature of the persistent current induced by the Hilbert space fragmentation in momentum space. I also would like to find novel



● Principal Investigator

Masaya Kunimi

Department of physics, Tokyo University of Science Assistant Professor

Born in Hokkaido, 1986

Graduated from the University of Tokyo in March 2014

Current position since April 2022

nonequilibrium quantum many-body phenomena and discover a new nonergodic mechanism. In addition to this research, I plan to develop and propose schemes for the experimental implementation of my results obtained in this project.



Theoretical research on methods to measure quantum natures of evaporating primordial black holes by using future observations

Inflation, which is believed to have occurred in the early universe, created quantum curvature (density) perturbations with a magnitude of approximately one part per hundred thousand on a large scale. At the same time, it also produces the cosmic gravitational wave background radiation. As temperature fluctuations caused by curvature perturbations were discovered by previous CMB observations, it is expected to observe B-mode polarization caused by gravitational waves in the future to verify inflation. Recently, the NANOGrav Collaboration reported the possibility of observing gravitational waves that have existed since the beginning of the universe: the NANOGrav experiment has observed significant modulation of radio waves in the nanohertz band over a 12.5 year period by correlating the signals of periodically emitted radio waves by multiple pulsars. If background gravitational waves exist, they stretch and contract space-time, thus modifying the periodicity of the radio waves of those precise pulsars. The observed value was more than seven orders of magnitude larger than the gravitational waves directly created by inflation in the early universe. On the other hand, if the observationally allowed curvature (density) fluctuations δ on small scales produced by inflation can be large (e.g., $\delta \sim 0.3$). Then, it is possible that an extremely large number of gravitational waves are produced on small scales through second-order nonlinear effects. In our paper (Kohri and Terada, arXiv:2009.11853), we pointed out that this sec-



● Principal Investigator

Kazunori Kohri

KEK Associate Professor

Born in Hyogo, 1970

Graduated from the University of Tokyo in March 2000

Current position since February 2014

ond-order gravitational wave background radiation can explain the observations. Furthermore, the above large density fluctuations are expected to collapse in the early universe to form a black hole of solar mass. This black hole is called a primordial black hole (PBH) to distinguish it from the one of astronomical origin. In fact, gravitational waves are also used as a method to verify this model. These PBHs formed a binary star in the early universe and are now merging. The LIGO-Virgo-Indigo-KAGRA collaboration may find the gravitational waves emitted at that time near future. Thus, the future gravitational wave experiments will soon be used to verify inflation in the early universe and discover PBHs.



What is the black hole information paradox?

The black hole information paradox is a paradox that started with Hawking's assertion in the 1970s that black holes evaporate, and has long plagued researchers ever since. In this article, I will explain the essence of the paradox as simple as possible.

1. What is a black hole?

In a nutshell, a black hole is a vacuum solution of Einstein's equations. Einstein's equation is an equation proposed by Einstein about 100 years ago, which describes how matter at a certain location bends the space-time around that. Einstein's viewpoint is that gravity is caused by the curvature of space-time. Given this, it might be obvious that assuming the existence of very strange matter, very strange spacetime can be produced. But a black hole is such a type. A black hole solution is a vacuum solution. To see what it means, suppose that there is massive object only one point in space, but there is no matter in the vast region around it. The solution of Einstein's equations in this case is the vacuum solution, since there is nothing in space (except for one point). You can think of the vacuum as nothing, at least classically. The vacuum solution always exists since you just need empty space. Therefore, it exists universally if there is space-time. This universality is one of the reasons why black holes are interesting.

2. The spacetime structure of a black hole

Next, let us discuss the black hole spacetime structure. To explain this intuitively, without mentioning complicated objects like 'metric', let me use the following analogy (which requires a little bit imagination of the readers). You are probably familiar with moving sidewalks, which are the ones you use when you walk down a long corridor to get to the gate at several airports. However, I would like you to imagine that there is a "very strange moving sidewalk", which is a completely different from ordinary ones. First of all, it is very long and wide. Therefore, unlike ordinary moving sidewalks, you cannot get out of this moving sidewalk in the middle. Let me call the entrance to the moving sidewalk as entrance A, and the exit as B. Furthermore, imagine that a fire is burning at the exit B. The fire is burning so hot, so imagine that everyone will be burned to death the moment they get off the moving sidewalk at Exit B. By hearing that, nobody would want to ride on this sidewalk, but let's continue. This strange moving sidewalk has an additional feature: the speed of the moving sidewalk is getting faster and faster. At the entrance A, the sidewalk is moving at a speed of 5 kilometers per hour (about the speed of a person walking), but as one keeps riding, the speed of moving sidewalk keeps increasing, to 10 km/h, to 20 km/h, to 30 km/h, and so on. The speed reaches more than 100 km/h near the exit B. Imagine that by mistake, you have just taken a wrong ride on this strange moving sidewalk. But don't worry. If you can run at 30 km/h, even if you get on the moving sidewalk, you will be able to get off safely by running right back to the exit A. The sidewalk is moving at only 5 km/h near entrance A, so you

can get back at a speed of 25 km/h to A. Of course, it would be OK to go a little further. But once the speed of moving sidewalk exceeds 30 km/h, you have no bright future. Even if you try to return to the entrance A at the maximum speed of 30 km/h, you can no longer return to A, because the speed of moving sidewalk is faster than you. In this case you have no choice than being carried to exit B and burned to death. You can immediately see that there is a no-return point, it is when the speed of the moving sidewalk is the 30 km/h. Let's call this 30 km/h point as H = horizon. The horizon, H is the no-return point to the entrance A for you. Suppose you were carrying a bag of non-flammable gems. If you were on a moving sidewalk going over the H , horizon, you will be carried over to exit B, but so would the gems you were carrying. The gems would be stored at the exit B. Let's call the exit B a singular point, it is an unusual (singular) point because a fire is burning, and people are dying. In summary, a person who gets on this strange moving sidewalk cannot come back to the entrance A once she or he crosses the horizon H . Then that person is carried to the exit B. There are no gems at horizon H . The gems are accumulated at exit B. So far, we have talked strange moving sidewalk but in fact, a black hole has the same structure. Even light, which is the fastest thing in the world, has a finite speed. It is just like you can only run at a finite speed of 30 km/h. Once light crosses the horizon of a black hole, it cannot come back out. Also, the information carried by light sucked into a black hole is stored at the singularity which is at the center of the black hole. The singularity and the horizon are different points and far apart, and there is no information at the horizon. All the information is at the singularity.

3. Quantum effects in a black hole

So far, we have explained what structure black hole spacetime has from the analogy of a strange moving sidewalk. Next, I will describe what happens when quantum theory is applied to a spacetime with this horizon. Quantum theory is difficult to explain intuitively, but one of its characteristics is uncertainty. Classically, we can determine where we are, at what speed, and with what acceleration, but in quantum theory one cannot determine all of these at the same time. There is uncertainty. In quantum theory, when we consider the vacuum (i.e., classically, there is nothing), there is something. Particles repeatedly emerge from the vacuum in pairs and then disappear in pairs. The pairs of particles produced in such pairs have quantum entanglement, one of the key words of this projects. Pairs of particles with quantum entanglement are repeatedly created and then disappear. Suppose one of the pairs has a positive energy, and the other has a negative energy. The negative energy particle can not exist and tries to disappear by sticking with the positive energy particle. But what happens if only the negative energy particle of the pair, born near but a little outside, enters the black hole and the positive energy particle remains outside? If the negative energy particle is sucked into the black hole, it simply lowers the

mass of the black hole and there is no contradiction. If this were reversed (a positive energy particle enters the black hole and a negative energy particle is left outside), it would be a different story. The negative energy particle left alone outside cannot exist, so it has no choice but to enter the black hole in search of its counterpart, the positive energy particle. Even though this is a very rough argument, the point I want to emphasize is that if there is a black hole horizon, positive energy particles can be extracted from a black hole. This is the evaporation of the black hole. From the viewpoint of quantum entanglement, the density matrix of the vacuum wave function (inside and outside the horizon) is entangled. However, if we trace out inside of the horizon due to the invisibility, we obtain the density matrix of the outside, and that is a mixed state, instead of pure state. In this way, the existence of the horizon is the origin of black hole evaporation. The evaporation of a black hole takes place at the horizon.

4. Why do we conclude that information is lost?

As we saw with the strange moving sidewalk, the horizon is the limit to which we can turn back, but there is no information there. All information is stored in a singularity which is away from the horizon. But the evaporation of the black hole is happening at the horizon. Since there is no information at the horizon, the positive energy particles produced at the horizon are apparently uncorrelated to the particles sucked into the black hole at the singularities. In other words, the information about the wave function of the particles that make up the black hole is apparently lost. This is the crux of Hawking's argument. Admitting the space-time structure of a black hole creates a difference between the horizon and the singularity, and the fact that the two are different places is the one of the origins of the information loss paradox.

5. What is the truth?

Readers who adhere to quantum theory will immediately say that the evaporation of a black hole should follow the principles of quantum theory; information should be stored not only at the singularity, but also near the horizon. I would say this is possible, however if so, then the radiation of a black hole is essentially the same as the one of a simple coal, by regarding the horizon as the surface of a coal. Of course, the Einstein's equation is a classical theory, not a quantum theory. But a black hole with a huge mass, say 2000 times more than solar mass, has a huge horizon area, which is as large as the surface of the earth. Since the curvature of such a gigantic black hole horizon is as tiny as the surface of our earth, we believe that quantum theory of curved spacetime must be consistent at the horizon. The black hole information paradox leads to the very shocking conclusion that if the principles of quantum theory work, then the prediction of the spacetime structure, should undergo a major change behind the black hole horizon even though it is curved only mildly. Through the gauge/gravity correspondence, we understood better about black holes

from outside. But the real challenge is to understand what is going on behind the black hole horizon. The black hole information paradox is one of the great thought experiments in physics.

References

- [1] S. W. Hawking, *Commun. Math. Phys.* **43**, 199 (1975).
- [2] J. D. Bekenstein, *Phys. Rev. D* **7**, 2333 (1973).
- [3] S. D. Mathur, *Class. Quant. Grav.* **26**, 224001 (2009).



● Author Information

Norihiro Iizuka

Department of Physics, Osaka University,
Assistant Professor

Undergrad at the University of Tokyo in
1998

PhD at Columbia University in 2003

Current position since 2014



Domestic Circulation Program for Young Researchers

● Reporter

Atsushi Iwaki

Department of Basic Science, The University of Tokyo, 2nd-year PhD student

Academic Supervisor Prof. Chisa Hotta, The University of Tokyo (D02)

Host Supervisor Prof. Tomotoshi Nishino, Kobe University (D02)

Duration of Stay July 3 2022 ~ July 16 2022



Prof. Nishino (right) and me.

Tensor networks provide a specific representation for a set of data that obey certain class of entanglement structure. The simplest among them is a one-dimensional (1D) tensor trains referred to as matrix product states (MPSs), that can handle quantum states with the entanglement area law. In condensed matter physics, the ground state of a 1D quantum many-body system can be calculated with remarkable accuracy using MPSs as a variational function for the density matrix renormalization group (DMRG). Furthermore, it is demonstrated both numerically and analytically that MPSs can be used to describe finite-temperature Gibbs states. There is another expression of thermal equilibrium replacing the maximally mixed Gibbs state called a thermal pure quantum (TPQ) state. Since the TPQ state is known to have the entanglement volume law, describing it using MPS was apparently out of scope. However, in my earlier work, I succeeded in developing the TPQ-MPS method; a straightforward expression of TPQ state using a new type of MPS that attaches auxiliary site at both edges. The reason for practically overcoming the upper bound of entanglement is that the auxiliaries help the system not to “feel” the bound of the entanglement from the edges. During the two periods of research visits of “Domestic Circulation Program for Young Researchers”, one is of myself and other is of Matthias Gohlke, I made several developments and gained deeper understanding of the TPQ-MPS method.

I visited Prof. Nishino at Kobe University for two weeks in July 2022. Prof. Nishino is a specialist of tensor networks who invented the transfer matrix DMRG and the corner transfer matrix renormalization group (CTMRG) in the 1990s. We discussed a lot about my recent research on the typicality of MPS during my visit. Supervised by Prof. Nishino, I implemented CTMRG, which is an effective tool



Mattias (left) and me.

for dimer covering, 2D classical systems at finite temperatures, and more recently, contraction of PEPS, which represents the ground states of 2D quantum systems. I ran the simplest example—the energy of the classical Ising model on a 2D square lattice—but it helped me later on to utilize ITensor.jl, a tensor network library. Based on this experience, I was further able to optimize the code for the TPQ-MPS method. Along with addition to tensor networks, I had many scientific communications with Prof. Nishino, where I got an entrée to his very unique and deep understanding on the quantum and classical phases of matter related to spin models and other topics.

October 2022, Gohlke Matthias from OIST visited Hotta group for a month, and during this visit, we started our collaboration. He applied the TPQ-MPS method to a 1D transverse field Ising model. We compared our numerical results to one another and discussed how we could improve our approach in detail. He discovered numerically that the TPQ-MPS energy is a little lower than the exact value, and I briefly demonstrated analytically that this is due to the truncation of the bond dimension. Because of the COVID19 crisis, I had little chance to participate in on-site meetings, and this was my first opportunity to work with a researcher from another laboratory. Even though I was still getting acclimated to speaking English, it was an important time for us to actively debate physics.

The world we see is macroscopic and classical, and is far simpler than the many body systems of elementary particles following quantum mechanics which we are studying. Statistical mechanics helps to connect the rule of these two worlds, which may correspond to high and low temperature, respectively. However, how the information is compressed during the interpolation from low to high temperatures is not at all simple, and most of the things still remain unknown. I believe that tensor networks are a powerful numerical tool as well as a theoretical framework that provides a way of compressing data from the microscopic to the macroscopic scale, and hope to disclose part of the knowledges on this issue during my research career.

Finally, I cordially appreciate Prof. Nishino for welcoming me. I would also like to thank “The Domestic Circulation Program for Young Researchers” for giving me these valuable opportunities.



Domestic Circulation Program for Young Researchers

● Reporter

Kazuki Yamamoto

Department of Physics, Kyoto University, D3

Academic Supervisor Prof. Norio Kawakami, Kyoto University

Host Supervisor Prof. Hosho Katsura, The University of Tokyo (D02)

Duration of Stay December 11 2022 ~ December 24 2022

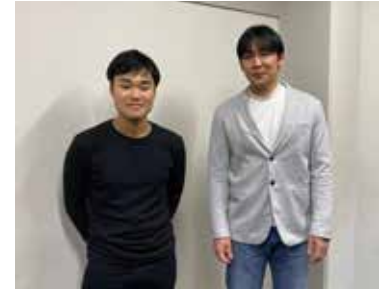


Photo 2. Photo with Prof. Akagi

In recent years, open quantum systems have been actively studied both experimentally and theoretically, as exemplified by driven-dissipative many-body systems and non-Hermitian (NH) quantum systems. In particular, high controllability of ultracold atoms has enabled observations of novel quantum phases unique to open quantum systems. Such experimental progress has facilitated investigations of NH quantum systems. Recently, NH systems have been actively investigated from the perspective of the entanglement entropy, which is one of the most important topics in the Grant-in-Aid for Transformative Research Area, Extreme Universe. Thus, I think that open quantum systems including NH quantum many-body systems may give an interesting playground to investigate the entanglement entropy and can pave the way to elucidate the “extreme universe”.

I am particularly interested in open quantum systems, where the system is coupled to an environment and the system feels the loss of particles. I have studied the universal properties in NH quantum systems with particular interest. Moreover, I have dealt with NH quantum critical phenomena by using the generalization of exact results on the basis of the conformal field theory and the Bethe ansatz approach to a system with complex-valued interactions [1, 2]. As Prof. Katsura’s group in the University of Tokyo is one of the most active research group that studies exact results in NH and open quantum systems, I have stayed in the laboratory for about two weeks to learn more about the detailed techniques to study such systems.

One thing that left me an impression is the group seminar held in the laboratory. As Prof. Katsura kindly gave me a chance to talk in the seminar, I have joined it as one of the speaker. I have talked about my recent research [1, 2] on universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids with and without internal symmetry (Photo 1). The



Photo 1. Photo at Katsura Group Seminar
Prof. Katsura, me, Mr. Tamura, Mr. Yoshida (From left to right)

seminar lasted for one hour and a half. Though I thought people there could be tired if they have heard such a long seminar, they gave me a lot of questions, and we have spent a fulfilling time on scientific discussions. In particular, discussions about the generalization of the entanglement entropy to NH systems were very interesting.

Throughout the research visiting, I have also learnt a lot of things regarding the studies currently engaged in Prof. Katsura’s laboratory. For example, the Liouvillian gap that is related to the long-time relaxation dynamics in open quantum systems, quantum scars that can be caused by the partial integrability embedded in a nonintegrable model, and exact results in multicomponent (so called $SU(N)$) Hubbard models etc. These research areas are rather different from the one that I am currently dealing with in my research group and gave me a lot of inspirations and motivations to broaden my research subjects. I was also really impressed by the enthusiasm of the students in Prof. Katsura’s laboratory. As I will graduate my Ph.D. course in next March and still keep on engaging in academia, I want to keep on discussions with members in Prof. Katsura’s group more and more.

I want to summarize this report by thanking people who have organized this research visiting. First of all, I am grateful to Prof. Katsura for accepting my stay and giving me an opportunity to have fruitful discussions. I would also thank to Prof. Akagi (Photo 2), Postdocs, and graduate students in the laboratory for interactions and valuable discussions during the stay. Last but not least, I would appreciate Prof. Takayanagi, Prof. Tezuka, the secretary Ms. Okazaki, and all of the organizers and staffs in the Grant-in-Aid for Transformative Research Area, Extreme Universe, for making this nice opportunity through the junior researcher visiting program.

[1] K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda, and N. Kawakami, Phys. Rev. B **105**, 205125 (2022)

[2] K. Yamamoto and N. Kawakami, Phys. Rev. B **107**, 045110 (2023)



● The 2nd ExU School

4 - 12 July 2022, Online (Zoom)

The aim of this school is to facilitate interdisciplinary research efforts by hosting lectures by multiple researchers in related research fields. This will serve to share viewpoints from different fields as well as latest information on relevant research and open issues, for fruitful discussions and collaborations between researchers having different research backgrounds, including graduate students, from both within and outside the “Extreme Universe” collaboration. This time, all lectures were in the Japanese language.

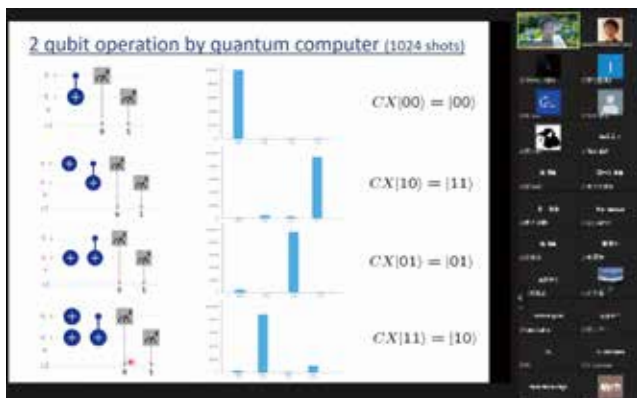
Norihiro Iizuka (B01) explained, in his lecture “introduction to gauge/gravity correspondence”, the duality between the large- N gauge theory and superstring theory as quantum gravity theory, based on the knowledge on general relativity discussed in the lecture by Yasusada Nambu (E02) at the previous school.

The lecture by Hiroshi Ueda (D02) “fundamentals of tensor network methods” focused on the matrix product state (MPS), which is the most basic tensor network (TN) state and is suited for analysis of one-dimensional quantum many-body systems and two-dimensional classical statistical models on discrete lattices, for explaining the basic mechanism for computation in TN methods and the procedure to optimize the TN. Furthermore, a review on multi-scale entanglement renormalization ansatz (MERA), which has complementary features to MPS, from the viewpoint of entanglement entropy.

Masazumi Honda (D01) started his lecture “application of quantum computation to quantum field theory” by explaining the fundamentals of quantum computation including how to use IBM Quantum Experience and the application of quantum computation to simulation of spin systems. After the introductory explanation on continuous quantum field theory and quantum field theory on lattices, he discussed simulations of quantum field theories including the results by himself and his collaborators.

This second school was held in the pure online style, with more than 300 registrations. Many questions were raised from the online participants, followed by active discussions.

(Reported by Masaki Tezuka)



Online lecture via Zoom

● ExU-YITP International workshop

“Quantum extreme universe from quantum information”

26 - 30 September 2022, YITP, Kyoto Univ. + Online

On September 26–30, 2022, the workshop “Quantum extreme universe from quantum information” was held in a hybrid format of face-to-face (YITP Panasonic Hall) and online, jointly organized by Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, and the Scientific Transformation Area A “Extreme Universe”. The meeting was held in a hybrid format of face-to-face (at the Panasonic Hall YITP) and online. The theme of this workshop was applications of quantum information theory to various fields of theoretical physics (high energy and condensed matter theory, and cosmology). The workshop featured a total of 25 invited talks from Japan and abroad (international talks were given online and domestic talks were given mainly at the actual venue), 28 short talks, and 13 online poster presentations. The final number of registered participants was about 500, including online participation.

Among the invited talks, Edward Witten from IAS gave a talk on his own recent work on von Neumann algebra on de Sitter space. It is natural to think that on the so-called static patch of de Sitter space, there is a type III algebra associated as is true for quantum field theory without gravity. However he claimed that this algebra becomes a type II_1 algebra once we include the effect of gravity. This is consistent with the fact that the maximum entropy on the static patch is given by the Bekenstein-Hawking entropy of the de Sitter horizon. After the introduction of the classification of the von Neumann algebras of each type, he argued that in a closed universe, like de Sitter space, a meaningful algebra cannot be constructed without taking into account the presence of an observer and its gravitational effects. Then if this observer's energy is bounded from below, it follows that this algebra is a type II_1 algebra. This result can be interpreted as a mathematically rigorous statement of the conjecture that the density matrix on the static patch on de Sitter space has a flat spectrum.

(Reported by Tomonori Ugajin)



Conference photo in front of YITP

● **YITP Summer school**
“A novel numerical approach to quantum field theories”
- quantum computing and tensor network -
12 - 16 September 2022, YITP, Kyoto Univ. + Online

A five-day summer school entitled "A novel numerical approach to quantum field theories" was held from September 12 to 16, 2022, hosted by the Institute for Fundamental Physics, Kyoto University, and co-sponsored by D01, the Extreme Universe.

In recent years, with the theoretical and technological development of quantum computers and their surroundings, new computational methods in field theory have been attracting attention in the fields of high energy and nuclear physics. Quantum algorithms and tensor network methods have shown promise as new computational methods for theories whose physical phenomena are still unknown due to the sign problem of conventional methods.

In this summer school, mainly for graduate students and post-doctoral fellows, dense lectures and exercises in the fields of quantum computation and tensor networks were conducted in Japanese in a face-to-face format. Through the exercises, we aimed to educate students to become immediately competitive and to start up new collaborative research projects. The lectures included cutting-edge content that has not yet been published, and the sharing of simulation codes that can immediately lead to research, which seems to have lowered the barrier for young researchers to start research in this field. It is hoped that participation in this school will lead to the launch of new collaborative research and the development of the field.

(Reported by Etsuko Itou)



YITP Summer School

● **Kickoff meeting of publicly offered research projects**

31 October - 1 November 2022, Online (Zoom)

In this extreme universe (ExU) project, we have 16 new publicly-offered research projects (Kobo-Kenkyu in Japanese) including two experiment proposals. The main aim of the ExU is to develop novel interdisciplinary research in physics associated with quantum information. Reflecting this key feature of ExU, several interesting research proposals are gathered from various research fields in physics. The publicly-offered research projects are formally organized as Group E apart from the planned research groups labeled by ABCD, but this is based on our hope to realize research developments across a variety of fields without being bounded by the planned research projects with similar backgrounds.

The acceptance of the publicly offered research project was in the latter half of June. After a briefing session in July, the representatives of the projects as well as members of the ExU and their collaborators came together for the kickoff meeting in the online space on Oct. 31st and Nov. 1st, where we enjoyed detailed explanations of their research backgrounds and plans with active discussions (The photo at the bottom is a snapshot of participants during the kickoff meeting via Zoom). The meeting was the first opportunity to share the details of the proposals. Thus, 30min talk might not be enough to explain them to participants from various fields. However, we think that all presentations, taking into account the purpose of our interdisciplinary research collaboration, were well organized for people with different backgrounds. Actually, active discussions after the talks were often extended into break times, which suggests the research proposals have attracted high-level interest and expectation from the participants. The proposals consist of a wide variety of research topics such as basic theory of quantum information, quantum gravity, black holes, inflation universe, detection of the quantum nature of gravity, quantum spin systems, ultra-cold atomic gas, and nuclear magnetic resonance experiments. Of course, they are physically important and, moreover, complementary to the planned research in the ExU project. We look forward to the success of each proposal and further advances in the ExU research through the positive interaction between the publicly offered research projects and the planned research groups in the ExU collaboration.

(Reported by Kouichi Okunishi)





● The 2nd ExU Annual Meeting

26 - 28 December 2022, Kobe Convention Center + Online

The ExU second annual meeting was held at Kobe Convention Center from Dec. 26th to 28th, 2022. About 90 ExU members attended in person and about 80 participants joined online. The latest research results from experiments to theories in the fields of quantum information, cosmology, condensed matter, elementary particles and interdisciplinary areas were presented. Active discussions were held after the presentations and during coffee breaks.

The meeting began with Tadashi Takayanagi (Head Investigator; YITP, Kyoto University) providing the overview of the organisation and objectives of the ExU collaboration. He reported on the research and outreach achievements of this fiscal year, as well as future events. Newly joined postdocs and members of the publicly offered research projects were also introduced.

On the 26th and 27th, representatives of research groups gave 25-minute presentations and reported on their research achievements. Many interdisciplinary research results between different research groups and publicly offered research groups were reported. All 16 members of the publicly offered research groups gave 10-minute presentations and explained their current achievements and future prospects. There were also 29 poster presentations, with all the new postdoctoral researchers and many graduate students participating. The poster session was filled with energetic discussions.

The 28th was primarily dedicated to seminar presentations. Nine speakers, chosen from each research group, gave 40-minute presentations throughout the conference. The seminar not only featured the presentation of the latest research but also included questions for researchers in other fields and proposals for new interdisciplinary research.

Tomoyuki Morimae (A01; YITP, Kyoto) presented results on the pseudo-random state generation in quantum cryptography and discussed its relation with the black hole information problem. Kazumi Okuyama (C01, Shinshu University) explained his derivation, via perturbative

methods, of the plateau of the spectral form factor of the random matrix theory corresponding to the JT gravity. Tomonori Ugajin (B01; YITP, Kyoto) discussed the quantum information aspects of the de Sitter universe. Yoshiki Murata (B02; Nihon U.) presented results on the superradiant instability of rotating black strings. Masaki Tezuka (B02; Kyoto U.) presented his studies of the quantum information theoretical properties of SYK models. Naokazu Shibata (C02; Tohoku U.) explained his analysis of quantum entanglement in quantum Hall systems. Takuya Okuda (D01; U. Tokyo) presented research on simulating solvable spin-chains using quantum computers, evaluating the noise involved in such a computation. Tsutomu Kobayashi (C03; Rikkyo U.) presented his research on Horndeski's theory which is a framework for unifying inflation, dark energy and modified gravity theories. Hiroshi Ueda (D02; IQIB, Osaka) presented research on generating optimised tree tensor networks and discussed its relevance to quantum gravity through the holographic principle.

In the final session, the Senior Scientific Research Specialist (SSRS) Akihiro Minamino (Yokohama National U.) explained the roles of SSRS. Andrew Darmawan (YITP, Kyoto) who will become the ExU lecturer reported on his research in quantum error correction. Finally, our advisor, Nobuyuki Imoto (Project Prof. U. Tokyo) gave a perspective on various unsolved problems and encouraged our collaboration for further achievements and advancing interdisciplinary research.

(Reported by Hidehiko Shimada and Tadashi Takayanagi)



Conference photo

● The 3rd ExU School & The 1st young researchers' workshop of the ExU Collaboration

13 - 17 February 2023, Dept. of Math in Nagoya U. + Online (only for school)

Following the second school held in July 2022 (see page 56), the third ExU School was held. In this third school, we invited Takeshi Fukuhara (RIKEN), François Le Gall (Nagoya Univ.), and Shuichiro Yokoyama (Nagoya Univ.) to give lectures. Due to COVID-19, face-to-face participation was limited to the participants of the young researchers' workshop. The lectures were given in a hybrid format using online facilities, and 140 online participants attended also. Lively discussions were formed between the onsite and the online participants. All lectures were given in English.

Takeshi Fukuhara (RIKEN) gave slide presentations with the title "Experimental study of quantum many-body systems with ultracold atoms." The topics in the first half of the lecture include the atom-cooling technique, the realization of superfluid to Mott insulator transition in optical lattices, and the method to set the desired atom configurations using single-site addressing. In the second half of the lecture, he introduced concrete experimental results of quantum-state dynamics using the techniques explained in the first half, from single-atom systems to many-body systems.

François Le Gall (Nagoya Univ.) gave black-board lectures with the title "Introduction to Quantum Algorithms." In the first lecture, he explained the notation used in quantum information theory and the concept of quantum teleportation. In the second lecture, he introduced the Grover's algorithm for solving the problem of searching for a specified value. In the last lecture, after explaining the quantum Fourier transform, he explained the eigenvalue estimation algorithm.

Shuichiro Yokoyama (Nagoya Univ.) gave three lectures with the title "Standard inflationary cosmology." He first explained the standard Big Bang Universe model on blackboards. Then, he explained the idea of an inflationary universe that solves the shortcomings of the standard Big Bang Universe model, and introduced various inflationary models. After explaining that the density fluctuations of the

universe can be used to verify the inflationary model, he gave an overview of the evolution of the density fluctuations of the universe with slides and explained the generation of quantum density fluctuations of the universe during the inflationary period on blackboards.

In addition to the ExU school, "the first young researchers' workshop of the ExU Collaboration" was held. The aim of the workshop is to provide a forum for young researchers in different fields to interact with each other and to create opportunities for collaborative research between different fields. Although the capacity of the venue was limited this time due to COVID-19, approximately 60 people, which was the upper limit of the capacity, attended the meeting, and exchanges among young researchers took place.

In this first young researchers' workshop, all participants gave presentations in order to understand each other's research and areas of expertise. In addition to each person's 3-minute oral presentation, there was a total of over 10 hours of poster discussion time. Discussions exceeding the scheduled conference end time by more than an hour were held spontaneously each day. In addition, faculty members, researchers, and students from Nagoya University, where the conference was held, jumped in to participate in the poster discussions, and interdisciplinary exchanges were promoted beyond the boundaries of the ExU project members.

Finally, Tadashi Takayanagi (Head investigator, C01 PI, YITP) explained the roles of the fields lectured at this school in the ExU project and gave words of encouragement to the young researchers, after which the third ExU school and the first young researchers' workshop were closed.

(Reported by Keisuke Izumi)



Lecture by T. Fukuhara



Group Photo



Conferences, Workshops and Seminars in FY2022

● Extreme Universe Colloquium

5th Extreme Universe Colloquium

Date: April 25th, 2022

Speaker: Prof. Jiro Soda (Kobe University)

Title: Graviton search with quantum information and quantum sensing



6th Extreme Universe Colloquium

Date: May 23rd, 2022

Speaker: Prof. Keiji Saito (Keio University)

Title: Information dynamics in the long-range interacting systems



7th Extreme Universe Colloquium

Date: June 8th, 2022

Speaker: Prof. Sandip P. Trivedi (TIFR)

Title: Entanglement in Matrices, Gauge Theories and Spacetime



8th Extreme Universe Colloquium

Date: July 14th, 2022

Speaker: Prof. Paolo Perinotti (Pavia University)

Title: When does a system affect another? Causal influence vs signalling



9th Extreme Universe Colloquium

Date: October 14th, 2022

Speaker: Prof. Netta Engelhardt (MIT)

Title: The Black Hole Information Paradox: a Resolution on the Horizon?



10th Extreme Universe Colloquium

Date: November 18th, 2022

Speaker: Prof. Antonio Miguel Garcia-Garcia (Shanghai Jiao-Tong University)

Title: Wormholes, Sachdev-Ye-Kitaev model and universal dynamics in dissipative quantum chaotic matter



11st Extreme Universe Colloquium

Date: December 16th, 2022

Speaker: Prof. Seok Kim (Seoul National University)

Title: Black holes and quantum gravity



12th Extreme Universe Colloquium

Date: January 24th, 2023

Speaker: Prof. Jens Eisert (Freie Universität Berlin)

Title: Linear growth of quantum circuit complexity



13th Extreme Universe Colloquium

Date: February 24th, 2023

Speaker: Prof. Takahiro Tanaka (Kyoto University)

Title: Pathology in WKB wave function for tunneling assisted by gravity



14th Extreme Universe Colloquium

Date: March 16th, 2023

Speaker: Prof. Monika Aidelsburger (LMU München)

Title: Quantum simulation with ultracold atoms - from Hubbard models to gauge theories



● Extreme Universe Seminar

4th Extreme Universe Circular Meeting

Date: April 26th, 2022

Speaker 1: Masazumi Honda (D01)

Title: Towards Quantum Simulation of “Extreme Universe”

Speaker 2: Kouichi Okunishi (D02)

Title: A statistical Mechanical model on the Cayley tree network and a holographic tensor network

5th Extreme Universe Circular Meeting

Date: May 13th, 2022

Speaker 1: Takaya Matsuura (A01)

Title: Linear optical formation of Raussendorf-Har-rington-Goyal lattice concatenated with the Gottesman-Kitaev-Preskill code

Speaker 2: Koji Azuma (A01)

Title: Do black holes store negative entropy?

6th Extreme Universe Circular Meeting

Date: June 27th, 2022

Speaker 1: Masaki Tezuka (B02)

Title: Quantum error correction in Sachdev-Ye-Kitaev-like models

Speaker 2: Akihiro Ishibashi (B03)

Title: Averaged null energy conditions and holography

7th Extreme Universe Circular Meeting

Date: July 21st, 2022

Speaker 1: Masahiro Hotta (C02)

Title: Expanding Edges of Quantum Hall Systems in a Cosmology Language - Hawking radiation from de Sitter horizon in edge modes

Speaker 2: Norihiro Tanahashi (C03)

Title: Brane Dynamics of Holographic BCFTs

Extreme Universe Seminar

Date: September 5th, 2022

Speaker: Prof. Shinichiroh Matsuo (Nagoya University)

Title: Properties of Willmore functionals

8th Extreme Universe Circular Meeting

Date: September 21st, 2022

Speaker 1: Pratik Nandy (D01)

Title: Complexity in the Sachdev-Ye-Kitaev model(s): some analytic results

Speaker 2: Chisa Hotta (D02)

Title: Pure and mixed states in quantum many-body systems

9th Extreme Universe Circular Meeting

Date: October 28th, 2022

Speaker 1: Ryu Hayakawa (A01)

Title: Quantum topological data analysis

Speaker 2: Arthur Parzygnat (A01)

Title: A tutorial on time symmetry and quantum Bayes' rules

10th Extreme Universe Circular Meeting

Date: November 25th, 2022

Speaker 1: Seiji Terashima (C01)

Title: AdS/CFT in operator formalism

Speaker 2: Kengo Maeda (C03)

Title: Extremal Attractor Black Holes in AdS

1st Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

Date: February 22nd, 2023

Speaker 1: Kotaro Tamaoka (E02)

Title: SYK Lindbladian

Speaker 2: Tokiro Numasawa (E02)

Title: Non-equilibrium dynamics of black holes induced by inhomogeneous quantum quenches

11th Extreme Universe Circular Meeting

Date: March 17th, 2023

Speaker 1: Zixia Wei (C01)

Title: Counting atypical black hole microstates from entanglement wedges

Speaker 2: Masato Nozawa (C03)

Title: Obstruction tensors for black holes

● Conferences & Workshops

APCTP Focus Program "Numerical Methods in Theoretical Physics 2022"

Date: May 16th - 20th, 2022

Venue: APCTP, Korea and online

2nd Extreme Universe School

Date: July 4th - 12th, 2022

Venue: Online

YITP Summer School: A novel numerical approach to quantum field theories

Date: September 12th - 16th, 2022

Venue: YITP, Kyoto Univ.

Workshop on General Relativity, Cosmology, and Black Hole Information Paradox

Date: September 21st - 23rd, 2022

Venue: Nagoya Univ. and online

Extreme Universe International Workshop "Quantum extreme universe from quantum information"

Date: September 26th - 30th, 2022

Venue: YITP, Kyoto Univ. and online

1st Extreme Universe Intensive Lecture by Young Researcher, "Understanding Magnetism of Low-dimensional Systems from Quantum Field Theory" by Shunsuke Furuya (U. Tokyo, D02 group)

Date: October 11th - 13th, 2022

Venue: Univ. Tokyo and online

"Third Kyoto Workshop on Quantum Information, Computation, and Foundations"

Date: October 17th - 21st, 2022

Venue: Online

"Workshop on asymptotic structure of spacetime, IR divergence, gravitational wave"

Date: December 18th, 2022

Venue: Nagoya Univ. and online

Second Annual Meeting of the Extreme Universe Collaboration

Date: December 26th - 28th, 2022

Venue: Kobe Convention Center and online

3rd Extreme Universe School

Date: February 13th - 17th, 2023

Venue: Nagoya Univ. and online

The 1st young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration

Date: February 13th - 17th, 2023

Venue: Nagoya Univ.



Quantum cryptography and black-hole?

The microscopic world of atoms and molecules is explained by a physical theory called quantum theory. Quantum theory is full of mysterious phenomena such as quantum entanglement, quantum superposition, and the uncertainty principle. Quantum information is the realization of unprecedented high-performance information processing by making good use of these mysterious phenomena. In particular, quantum information is known for its application to computation (quantum computation) and cryptography (quantum cryptography). In this article, I would like to talk about quantum cryptography.

Many people may think of cryptography as a technology for conveying messages in secret. However, that is not all that cryptography can do. For example, there is the digital signature. One can stamp a seal or write a signature on a paper document to prove that “this is indeed a document written by me”. The technology that makes it possible to put a signature on an electronic file that cannot be forged is an electronic signature. This does not make the message secret, since the text of the file itself is not secret and can be read by anyone. Various other tasks can also be realized, such as commitment, zero-knowledge proofs, pseudorandom numbers, and multiparty computation.

What is important in cryptography is, of course, security. There are two types of security in cryptography. One is information-theoretic security, and the other is computational security. The former is secure no matter how powerful the attacker’s computation is. The latter is based on the assumption that a certain problem (e.g., prime factorization) is difficult and that the attacker’s computational power is limited. Clearly, the former is the more desirable security. In the latter case, the security may be broken if computers are developed or a new fast algorithm is found in the future. (In fact, prime factorization can be solved by a quantum computer!) However, the former has various limitations. For example, when sending a message secretly, the length of the key used for encryption must be longer than the length of the message to be sent. In addition, various tasks such as digital signatures and commitments are known to be information-theoretically infeasible in the first place. Therefore, the latter type of computationally secure cryptography is also very well studied and used.

As mentioned earlier, some assumptions must be made in the case of computationally secure cryptography. What assumptions? Actually, it is already known that in the case of classical cryptography (i.e., cryptography without quantum), the most fundamental assumption is one-way functions. A one-way function f is such that it is easy to compute $f(x)$ from x , but difficult to compute x from $f(x)$. Almost all classical cryptographic tasks do not exist without one-way functions. Thus, one-way functions are the most fundamental element in classical cryptography.

So what happens in quantum cryptography? In other

words, what is the most fundamental assumption for cryptography where quantum states can be transmitted and received, and quantum computation can be performed? Are they still one-way functions? Recently, the author and Takashi Yamakawa (NTT, visiting Associate Professor, YITP) showed that one-way functions are not necessarily the most fundamental element in quantum cryptography [1]. This raises an important open problem: “What, then, is the most fundamental assumption in quantum cryptography?” Interestingly, it was recently pointed out [2] that what emerged in the process of challenging this open problem helps explain the black hole paradox. In order to solve the black hole paradox, we want to show the existence of hidden entanglements that can be retrieved in principle but would be very time-consuming to retrieve; Brakerski has successfully used a concept that can be expected to replace one-way functions to construct such hidden entanglement.

Quantum information is the study of using quantum to realize high-precision information processing technology, and although it is an applied and engineering research, it can actually play an important role in fundamental physics in this way. This project aims to do such a thing: to use the language of quantum information to understand the physics of the extreme universe.

[1] T. Morimae and T. Yamakawa, CRYPTO2022

[2] Z. Brakerski, arXiv:2211.05491.



● Author Information

Tomoyuki Morimae

Yukawa Institute for Theoretical Physics
Kyoto University,
Associate Professor

Born in Gifu, 1981

Graduated from the University of Tokyo
in March 2009

Current position since January 2021



Entanglement structure of quantum many-body states and optimal tree tensor networks

The tensor network (TN) provides the unified theoretical framework for efficiently describing quantum many-body states and plays a crucial role in precisely analyzing various physics in the extreme universe collaboration. In particular, the diagrammatic representation visualizes the nontrivial entanglement structure among effective degrees of freedom embedded in the quantum many-body state. Thus, developing novel TNs with suitable network geometry often gives rise to a new perspective for our understanding of quantum physics. For instance, the relation of tensor product states with the measurement-based quantum computation and the fascinating connection of the multi-scale entanglement renormalization ansatz to AdS/CFT has attracted much interest from theoretical physics and quantum information.

So far, the above TN states have been constructed for bulk uniform systems in condensed matter physics based on careful theoretical considerations. For general non-uniform systems, however, the situation turns intrinsically nontrivial. For example, even if we restrict our argument to the tree TN (TTN)---a class of TNs containing no loop structure in its diagrammatic representation, the number of possible TTNs is $(2N-5)!!$, with N being the number of sites. This enormous degree of freedom disturbs our intuitive understanding of the TN states. How can we design the TTN for general quantum many-body states with inhomogeneous spatial structures? The main aim of our study is to construct a practical algorithm to determine the optimal network structure of the TTN together with an appropriate guiding principle.

The TTN generally comprises a tree-like network of three-leg tensors called isometries (see Fig. 1). An essential property of the TTN is that cutting a link in the network gives a bipartition of the entire wavefunction, implying that every tensor leg in the network carries the corresponding entanglement entropy (EE). If the tensor leg with a large EE is truncated, the accuracy of the resulting TN state will be seriously spoiled. In Ref. [1], we thus introduce the guiding principle of “minimizing the maximum loss of the EE due to the truncation” to decompose the exact ground-state wavefunction of an $N=16$ -site system into subsystems recursively. We then demonstrate that this top-down approach successfully generates an optimal TTN for the target wavefunction; for example, we obtained the optimal TTN consistent with the procedure in Ref. [2] for antiferromagnetic Heisenberg chain of $N=16$ with open boundaries. We also construct a variational TTN for the square-lattice model of $N=64$ spins by referring to the result for $N=16$, which yields improved variational energy compared to the conventional TTNs.

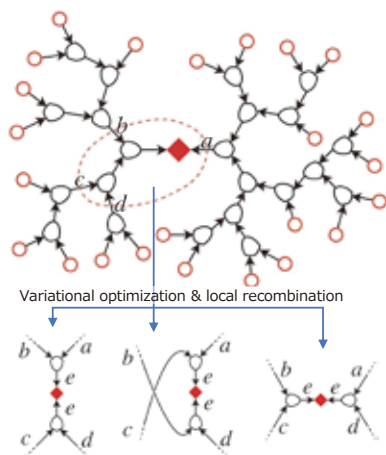


Figure 1: TTN states and local recombination of TNs.

From the practical viewpoint, we also try to implement an automatic optimization algorithm of the network geometry into a conventional TTN method. For random spin systems, a real-space renormalization group called SDRG is often used to obtain an asymptotically exact random singlet state in the thermodynamic limit. However, the optimization of the network shape and the isometry itself is insufficient at the quantitative level in the SDRG algorithm. Therefore, it is necessary to introduce a “sweep update,” which sequentially optimizes each tensor contained in the TN, like the finite-size algorithm in the density matrix renormalization group. As depicted in Fig. 1, a TTN state for the physical spin degrees of freedom (red circles) is illustrated as a contraction of isometries (ovals) and the singular values (red diamond) at the center bond. In our algorithm, we first construct the Hamiltonian for the four effective degrees of freedom (a-d) and calculate its ground-state wavefunction. We then perform three possible patterns of singular value decompositions and adopt the one carrying the smallest EE as the optimal tensors. These realize the simultaneous update of the isometries and their connectivity in the red-dotted region. By sweeping the entire TTN by repeating this process, we can obtain the optimal TTN suitable for the global entanglement structure. Using this bottom-up construction strategy, we have achieved structural optimization from an initial matrix product state to the perfect binary TTN for quantum spin chains with non-uniform hierarchical structures [2].

These results are expected to be relevant to the variational optimization problem for such non-uniform systems as random spin systems and quantum chemistry, as well as the efficient quantum circuit encoding of a given quantum state. In addition, the network geometry of a discrete system corresponds to the geometry in the corresponding continuous system. The present approaches may also be interesting regarding gauge-gravity correspondence.

- [1] K. Okunishi, H. Ueda, T. Nishino, *Prog. Theor. Exp. Phys.*, **2023**, 023A02 (2023)
 [2] T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, T. Nishino, *Phys. Rev. Research* **5**, 013031 (2023)

Author Information

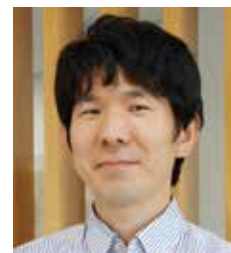
Hiroshi Ueda

Center for Quantum Information and Quantum Biology, Osaka University
Associate Professor

Born in Osaka, 1984

Graduated from the Osaka University in September 2011

Current position since April 2022



Kouichi Okunishi

Faculty of Science Department of Physics, Niigata University Associate Professor

Born in Osaka, 1971

Graduated from the Osaka University in March 1999

Current position since February 2011





Publications (Sep. 2021-Sep. 2022)

Project A01

“Guesswork of a quantum ensemble”

M. Dall’Arno, F. Buscemi, and T. Koshiba, *IEEE Trans. Inform. Theory* **68**, 3139 (2022)

“Thermodynamic Constraints on Quantum Information Gain and Error Correction: A Triple Trade-Off”

A. Danageozian, M. M. Wilde, and F. Buscemi, *PRX Quantum* **3**, 020318 (2022)

“Divide-and-conquer verification method for noisy intermediate-scale quantum computation”

Y. Takeuchi, Y. Takahashi, T. Morimae, and S. Tani, *Quantum* **6**, 758 (2022)

“Optimal supplier of single-error-type entanglement via coherent-state transmission”

K. Azuma, N. Imoto, and M. Koashi, *Phys. Rev. A* **105**, 062432 (2022)

“On quantum states over time”

J. Fullwood and A. J. Parzygnat, *Proc. R. Soc. A* **478**, 20220104 (2022)

Project B01

“Holographic Local Operator Quenches in BCFTs”

T. Kawamoto, T. Mori, Y. Suzuki, T. Takayanagi, and T. Ugajin, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 60 (2022), collaboration with [C01](#)

“Flows of extremal attractor black holes”

N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 93 (2022), collaboration with [B03](#)

“On the dynamics in the AdS/BCFT correspondence”

Y. Suzuki and S. Terashima, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 103 (2022)

“A comment on a fine-grained description of evaporating black holes with baby universes”

N. Iizuka, A. Miyata, and T. Ugajin, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 158 (2022)

Project B02

“Metastability associated with many-body explosion of eigenmode expansion coefficients”

T. Mori, *Phys. Rev. Research* **3**, 043137 (2021)

“Heating Rates under Fast Periodic Driving beyond Linear Response”

T. Mori, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 050604 (2022)

“Quantum droplet of a two-component Bose gas in an optical lattice near the Mott insulator transition”

Y. Machida, I. Danshita, D. Yamamoto, and K. Kasamatsu, *Phys. Rev. A* **105**, L031301 (2022)

“Topological Lifshitz Transitions, Orbital Currents, and Interactions in Low-dimensional Fermi Gases in Synthetic Gauge Fields”

C.-H. Huang, M. Tezuka, and M. A. Cazalilla, *New J. Phys.* **24**, 033043 (2022)

“Numerical evidence for a Haagerup conformal field theory”

T.-C. Huang, Y.-H. Lin, K. Ohmori, Y. Tachikawa, and M. Tezuka, *Phys. Rev. Lett.* **128**, 231603 (2022)

“Universal properties of dissipative Tomonaga-Luttinger liquids: A case study of a non-Hermitian XXZ spin chain”

K. Yamamoto, M. Nakagawa, M. Tezuka, M. Ueda, and N. Kawakami, *Phys. Rev. B* **105**, 205125 (2022)

“Linear Flavor-Wave Analysis of SU(4)-Symmetric Tetramer Model with Population Imbalance”

Y. Miyazaki, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 073702 (2022)

“Supersolid Devil’s Staircases of Spin-Orbit-Coupled Bosons in Optical Lattices”

D. Yamamoto, K. Bannai, N. Furukawa, and C. A. R. Sá de Melo, *Phys. Rev. Research* **4**, L032023 (2022)

Project B03

“The averaged null energy condition on holographic evaporating black holes”

A. Ishibashi and K. Maeda, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 104 (2022)

“Running Newton coupling, scale identification, and black hole thermodynamics”

C.-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, N. Ohta, and D. Yamaguchi, *Phys. Rev. D* **105**, 106026 (2022)

“Entanglement entropy and vacuum states in Schwarzschild geometry”

Y. Matsuo, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 109 (2022)

“Flows of extremal attractor black holes”

N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 93 (2022), collaboration with [B01](#)

Project C01

“Holographic moving mirrors”

I. Akal, Y. Kusuki, N. Shiba, T. Takayanagi, and Z. Wei, *Class. Quantum Grav.* **38**, 224001 (2021)

“Correlator correspondences for Gaiotto-Rapčák dualities and first order formulation of coset models”

T. Creutzig and Y. Hikida, *J. High Energ. Phys.* **2021**, 144 (2021)

- “Page curve from dynamical branes in JT gravity”
K. Okuyama and K. Sakai, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 87 (2022)
- “Rotating strings and particles in AdS: Holography at weak gauge coupling and without conformal symmetry”
T. Kitamura, S. Miyashita, and Y. Sekino, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 043B03 (2022)
- “FZZ-triality and large $N=4$ super Liouville theory”
T. Creutzig and Y. Hikida, *Nucl. Phys. B* **977**, 115734 (2022)
- “Holographic local operator quenches in BCFTs”
T. Kawamoto, T. Mori, Y. Suzuki, T. Takayanagi, and T. Ugajin, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 60 (2022), collaboration with [B01](#)
- “Holographic complexity in dS_{d+1} ”
E. Jørstad, R. Myers, and S.-M. Ruan, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 119 (2022)
- “CFT duals of three-dimensional de Sitter gravity”
Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, and Y. Taki, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 129 (2022), collaboration with [D01](#)
- “BCFT and Islands in Two Dimensions”
K. Suzuki and T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 95 (2022)
- “On the Page curve under final state projection”
I. Akal, T. Kawamoto, S.-M. Ruan, T. Takayanagi, and Z. Wei, *Phys. Rev. D* **105**, 126026 (2022)
- “Holography in de Sitter Space via Chern-Simons Gauge Theory”
Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, and Y. Taki, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 041601 (2022), collaboration with [D01](#)
- “Three-dimensional de Sitter holography and bulk correlators at late time”
H.-Y. Chen and Y. Hikida, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 061601 (2022)
- “Zoo of holographic moving mirrors”
I. Akal, T. Kawamoto, S.-M. Ruan, T. Takayanagi, and Z. Wei, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 296 (2022)
- “t Hooft expansion of $SO(N)$ and $Sp(N)$ $N=4$ SYM revisited”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 64 (2022)
- “Perfect tensor hyperthreads”
J. Harper, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 239 (2022)

Project C02

- “Expanding Edges of Quantum Hall Systems in a Cosmology Language — Hawking Radiation from de Sitter Horizon in Edge Modes”
M. Hotta, Y. Nambu, Y. Sugiyama, K. Yamamoto, and G. Yusa, *Phys. Rev. D* **105**, 105009 (2022)
- “Real-time and -space visualization of excitations of the $\nu=1/3$ fractional quantum Hall edge”
A. Kamiyama, M. Matsuura, J. N. Moore, T. Mano, N. Shibata, and G. Yusa, *Phys. Rev. Research* **4**, L012040 (2022)
- “Deep learning metric detectors in general relativity”
R. Katsube, W.-H. Tam, M. Hotta, and Y. Nambu, *Phys. Rev. D* **106**, 044051 (2022)
- “Global anomalies in 8d supergravity”
Y. Lee and K. Yonekura, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 125 (2022)
- “Spin helices in GaAs quantum wells: Interplay of electron density, spin diffusion, and spin lifetime”
S. Anghel, A. V. Poshakinskiy, K. Schiller, G. Yusa, T. Mano, T. Noda, and M. Betz, *J. Appl. Phys.* **132**, 054301 (2022)

Project C03

- “Uniqueness of static spacetime with conformal scalar in higher dimensions”
K. Izumi, Y. Tomikawa, and T. Shiromizu, *Phys. Rev. D* **104**, 104025 (2021)
- “Refined inequalities for loosely trapped surface and attractive gravity probe surface”
K. Lee, T. Shiromizu, and K. Izumi, *Phys. Rev. D* **105**, 044037 (2022)
- “Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity II: curvature, photon surface and dynamically transversely trapping horizon”
M. Amo, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, and Y. Tomikawa, *Phys. Rev. D* **105**, 064074 (2022)
- “Dynamical stability and filamentary instability in holographic conductors”
S. Ishigaki, S. Kinoshita, and M. Matsumoto, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 50 (2022)
- “Testing gravity with the cosmic microwave background: constraints on modified gravity with two tensorial degrees of freedom”
T. Hiramatsu and T. Kobayashi, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2022**, 040 (2022)
- “Four types of attractive gravity probe surfaces”
K. Lee, T. Shiromizu, K. Izumi, H. Yoshino, and Y. Tomikawa, *Phys. Rev. D* **106**, 064028 (2022)



Project D01

“Replica wormholes and capacity of entanglement”

K. Kawabata, T. Nishioka, Y. Okuyama, and K. Watanabe, *J. High Energ. Phys.* **2021**, 227 (2021)

“Negative string tension of higher-charge Schwinger model via digital quantum simulation”

M. Honda, E. Itou, Y. Kikuchi, and Y. Tanizaki, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 033B01 (2022)

“CFT duals of three-dimensional de Sitter gravity”

Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, and Y. Taki, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 129 (2022), collaboration with C01

“Holography in de Sitter Space via Chern-Simons Gauge Theory”

Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi, and Y. Taki, *Phys. Rev. Lett.* **129**, 041601 (2022), collaboration with C01

Project D02

“Sine-square deformation applied to classical Ising models”

C. Hotta, T. Nakamaniwa, and T. Nakamura, *Phys. Rev. E* **104**, 034133 (2021)

“Ferromagnetism out of charge fluctuation of strongly correlated electrons in κ -(BEDT-TTF)₂Hg(SCN)₂Br”

M. Yamashita, S. Sugiura, A. Ueda, S. Dekura, T. Terashima, S. Uji, Y. Sunairi, H. Mori, E. I. Zhilyaeva, S. A. Torunova, R. N. Lyubovskaya, N. Drichko, and C. Hotta, *npj Quantum Mater.* **6**, 87 (2021)

“Dimensional reduction in quantum spin-1/2 system on a 1/7-depleted triangular lattice”

R. Makuta and C. Hotta, *Phys. Rev. B* **104**, 224415 (2021)

“Optical selection rules of the magnetic excitation in the S=1/2 one-dimensional Ising-like antiferromagnet BaCo₂V₂O₈”

S. Kimura, H. Onishi, A. Okutani, M. Akaki, Y. Narumi, M. Hagiwara, K. Okunishi, K. Kindo, Z. He, T. Taniyama, and M. Itoh, *Phys. Rev. B* **105**, 014417 (2022)

“Exact eigenstates of extended SU(N) Hubbard models: Generalization of η -pairing states with N-particle off-diagonal long-range order”

H. Yoshida and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **105**, 024520 (2022)

“Perfect flat band with chirality and charge ordering out of strong spin-orbit interaction”

H. Nakai and C. Hotta, *Nat Commun* **13**, 579 (2022)

“Energy Scale Deformation on Regular Polyhedra”

T. Eguchi, S. Oga, H. Katsura, A. Gendiar, and T. Nishino, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 034001 (2022)

“Exact solutions of few-magnon problems in the spin-S periodic XXZ chain”

N. Wu, H. Katsura, S.-W. Li, X. Cai, and X.-W. Guan, *Phys. Rev. B* **105**, 064419 (2022)

“Quantum-inspired search method for low-energy states of classical Ising Hamiltonians”

H. Ueda, Y. Otsuka, and S. Yunoki, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 044005 (2022)

“Sine-square deformed mean field theory”

M. Kawano and C. Hotta, *Phys. Rev. Research* **4**, L012033 (2022)

“Deep Variational Quantum Eigensolver: a divide-and-conquer method for solving a larger problem with smaller size quantum computers”

K. Fujii, K. Mizuta, H. Ueda, K. Mitarai, W. Mizukami, and Y. O. Nakagawa, *PRX Quantum* **3**, 10346 (2022)

“Quantum spin solver near saturation: QS³”

H. Ueda, S. Yunoki, and T. Shimokawa, *Comput. Phys. Commun.* **277**, 108369 (2022)

“Developments in the Tensor Network -- from Statistical Mechanics to Quantum Entanglement”

K. Okunishi, T. Nishino, and H. Ueda, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 062001 (2022)

“Symmetry-protected quantization of complex Berry phases in non-Hermitian systems”

S. Tsubota, H. Yang, Y. Akagi, and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **105**, L201113 (2022)

“Spontaneously broken supersymmetric fracton phases with fermionic subsystem symmetries”

H. Katsura and Y. Nakayama, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 72 (2022)

“Supercooled Jahn-Teller glass”

K. Mitsumoto, C. Hotta, and H. Yoshino, *Phys. Rev. Research* **4**, 033157 (2022)

“Purity of thermal mixed quantum states”

A. Iwaki and C. Hotta, *Phys. Rev. B* **106**, 094409 (2022)

“Observation of thermodynamics originating from a mixed-spin ferromagnetic chain”

H. Yamaguchi, S. C. Furuya, S. Morota, S. Shimono, T. Kawakami, Y. Kusanose, Y. Shimura, K. Nakano, and Y. Hosokoshi, *Phys. Rev. B* **106**, L100404 (2022)



今後の会議予定 Upcoming Conferences

●領域会議 Annual Meeting

Date : 11 September 2023 (Held during YIPQS long-term workshop)

Venue : YITP, Kyoto

●領域国際会議 ExU International Workshop

YIPQS long-term workshop

“Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity (QIMG2023)”

Date : 4 September-6 October 2023

Venue : YITP, Kyoto

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~qimg2023/>

●領域スクール ExU School

The 18th Kavli Asian Winter School on Strings, Particles and Cosmology

Date : 5-14 December 2023

Venue : YITP, Kyoto

●領域メンバー主催研究会 Other workshops

APCTP Focus Program “Numerical Methods in Theoretical Physics 2023”

Organizers : Anosh Joseph, Dong-Hee Kim, Jae Dong Noh, Dario Rosa, Masaki Tezuka, Junggi Yoon

Date : 10-14 July 2023

Venue : APCTP, Korea and Online

<https://www.nmtp2023.apctpstring.com/>

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。

公募研究(第1期)については21H051XY→22H052XY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2年度目に入り、領域としての活動が本格的に始まりました。それを反映して、ニュースレターの内容も大きく変わりました。まず昨年度の計画研究紹介ページが本年度からは成果報告ページに変わりました。さらに、本年度から開始された公募研究の紹介ページや、領域の若手育成プログラムである「若手国内循環プログラム」に参加した学生自身による報告記事、領域のアウトリーチ活動の紹介ページ、またこの領域の成果である領域開始から1年間(2021年9月~2022年9月)に出版された論文リストなどの新しい記事も増え、ページ数にして昨年度比1.5倍と読み応えのあるものとなりました。また「研究会報告」記事は昨年度から日英1ページずつ増えていますが、昨年度は現地の様子を写した写真が領域スクール・領域会議の1ページのみであったのに対し、今年度では半数以上の報告で写真が掲載されています。ハイブリッド形式を取り入れつつ、研究の世界も徐々にコロナ前に戻りつつあることを、編集を通じて感じたとこです。

また、ニュースレターは本領域のアウトリーチ活動の重要な一端ですが、今年度から本学術領域のアウトリーチ活動の新たな試みとして、領域公式のYouTubeチャンネルが開設されました。URL情報については本ニュースレターp.32のアウトリーチ報告記事またはこの裏表紙をご覧ください(下のQRコードから開ける本領域公式HPの「成果・アウトリーチ」ページからも開くことができます)。このYouTubeチャンネルでは今後、本領域主催のスクールや研究会、領域コロキウム(講義)の講演動画がアップロードされていく予定です。本ニュースレターとこのYouTubeチャンネルが、本領域の魅力を少しでも伝えられることを願いつつ、ニュースレター第2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, Twitter & YouTube!

本領域ウェブサイトおよびTwitter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(講義)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

領域Twitterアカウント

@ExUniverseja



極限宇宙 NewsLetter 02 2023 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2号

発行日: 令和5年3月25日

発行: 「極限宇宙」総括班

編集: 中島秀太〈協力: 総括班「美術班」(石橋明浩、小林努、中田芳史、堀田知佐)〉

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 mail: extuniv-office@yukawa.kyoto-u.co.jp

