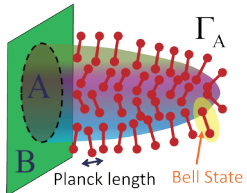


News Letter

極限宇宙 Extreme Universe 04

2025 Mar.



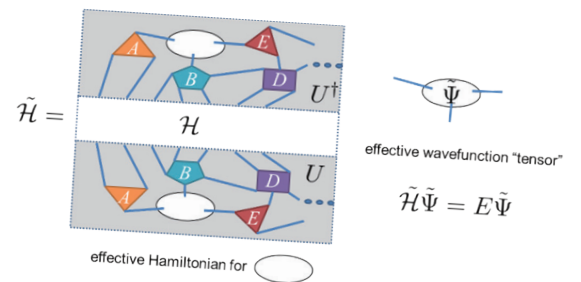
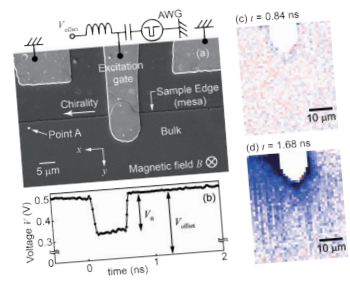
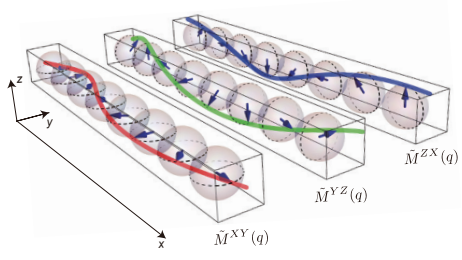
$$S_A = \text{Min}_{\Gamma_A} \left[\frac{\text{Area}(\Gamma_A)}{4G_N} \right]$$

[Ryu-Takayanagi 2006]



受賞報告 Award Report

2024 ICTP Dirac Medal
 Prof. Tadashi Takayanagi & Prof. Shinsei Ryu



Contents

Annual Reports of Each Projects	A01/B01/B02/B03/C01/C02/C03/D01/D02
Outline of Each Publicly Offered Research Projects	
Keyword	Tensor networks and diagrams (Kouichi Okunishi)
Conference Reports	The 4th ExU Annual meeting/ExU International Conference/JPS Annual Meeting symposium session etc.
Research Highlight	Unraveling Quantum 'States' with Spirals (Daisuke Yamamoto) The Relationship Between Energy in a Closed Region, Surface Area, and Gravitational Field on Its Surface (Keisuke Izumi)

Contents

- 01 巻頭言
領域代表より(高柳 匡)／領域アドバイザーより(笠 真生)
- 03 2024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 公募研究成果報告
E01班／E02班／E03班
- 23 受賞報告
2024年度 ICTP ディラックメダル：高柳 匡 氏・笠 真生 氏(西岡 辰磨)
- 24 トピックス：キーワード
テンソルネットワークとダイヤグラム(奥西 巧一)
- 26 2024年度 研究会報告
第4回領域会議／領域国際会議／日本物理学会領域共催シンポジウム 他
- 30 2024年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧
- 33 若手循環プログラム報告
宮下 翔一郎
- 34 トピックス：最近の研究から
量子の「状態」を螺旋(らせん)で解き明かす(山本 大輔)
閉じた領域内のエネルギーと表面での重力の強さや表面積との関係(泉 圭介)
- 36 2024年度 アウトリーチ・一般向け講演
- 37 Preface
Head Investigator (Tadashi Takayanagi)／Advisory Committee (Shinsei Ryu)
- 39 Annual Reports of Each Project
A01／B01／B02／B03／C01／C02／C03／D01／D02
- 48 Outline of Each Publicly Offered Research Projects
E01／E02／E03
- 59 Award Report
2024 ICTP Dirac Medal : Prof. Tadashi Takayanagi & Prof. Shinsei Ryu
- 60 Topics : Keyword
Tensor networks and diagrams (Kouichi Okunishi)
- 62 Conference Reports in FY2024
The 4th ExU Annual Meeting／ExU International Conference／JPS Annual Meeting symposium session etc.
- 66 Conferences, Workshops and Seminars in FY2024
- 69 Circulation Program for Young Researchers
Shoichiro Miyashita
- 70 Topics : Research Highlight
Unraveling Quantum 'States' with Spirals (Daisuke Yamamoto)
The Relationship Between Energy in a Closed Region, Surface Area, and Gravitational Field on Its Surface
(Keisuke Izumi)
- 72 Publications (Apr. 2023 - Mar. 2024)
- 75 お知らせ
今後の会議予定 Upcoming Conferences／論文等での Acknowledgment について
- 76 編集後記



極限宇宙の旅、さらなる飛躍へ

領域代表

高柳 匡 Tadashi Takayanagi

京都大学基礎物理学研究所 教授

時は経つのが早いもので、本領域が誕生してからもう3年が過ぎました。「極限宇宙」プロジェクトは、量子情報の物理学への応用を目的としておりますが、この研究の方向性は多岐にわたり、研究を進めれば進めるほど、より先に深遠で多様な世界が広がっていき、3年間はあっという間であったというのが私の印象でした。領域メンバーの皆さんはいかがお感じでしょうか？



おかげさまで、今年度も多方面に充実した研究成果が得られましたが、9月に大阪大学で開催した領域会議で印象深かったものの一つが、量子情報と物性実験の融合研究の進展です。これは計画研究の優れた成果とともに、第二期公募研究で物性実験の研究者に多数参画いただいていることも大きいです。特にエンタングルメント・エントロピーやエンタングルメント・スペクトラムといった量子多体系や重力理論の物理学でも重要な量子情報的な量を冷却原子実験などで測定する新しい手法が、計画研究B02の山本さん、公募研究の小沢さんや素川さんたちによって開拓されております。こういった量は、ホログラフィー原理を通じて、量子宇宙のダイナミクスに直結しますので、その測定が将来、量子多体系に対して比較的自由に行われるようになると、量子重力理論のシミュレーションが本格的に視野に入ります。10月に沖縄科技大で開催した領域国際会議でも、物性実験を用いた極限宇宙の研究が盛り上がっていました。極限宇宙の研究を新しいステージに導く、大変ワクワクする方向性です。

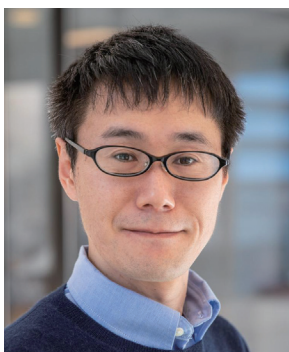


私個人も今年は、ICTPのディラック・メダルという理論物理学における著名な国際賞を、領域アドバイザーの笠さん、そして同じ分野の研究者であるCasiniさん、Huertaさんと共同受賞するという、極めて名誉な出来事があり、大変うれしく思っております。私にとって生涯の共同研究者である笠さんには、受賞の理由となったホログラフィー原理に基づくエンタングルメント・エントロピーの幾何学公式を始め、その後多くの素晴らしい共同研究をさせていただいており、心より感謝しております。笠さんとの共同研究は、二人

が米国サンタバーバラのKITP研究所のポスドク研究員である時に始まりました。今から約20年前の2005年のクリスマス休暇の時に、二人でデスバレーやセコイア国立公園へドライブ旅行に出かけた際の会話などから、このホログラフィック・エンタングルメントの研究が生まれたことが、今でも大変懐かしく思い出されます。この当時は量子情報理論について理論物理学の研究者が耳にする機会もほとんどなく、私自身もこの研究を行った際に、量子情報の考え方がこれほどまでに物理学の本質と結びつくことは想定しておりませんでした。その意味でもIt from Qubitや極限宇宙といった研究の方向性が、今では海外・国内を問わずメジャーになっていることに隔世の感を覚えると同時に、これまでこの異分野融合の開拓に貢献され、この潮流を支えてこられた領域の皆様を始め、世界中の研究者の方々に感謝している次第です。



また今年度は本領域の中間評価が行われ、無事A評価を頂くことができました。報告書作成の際にコメントを頂戴いたしましたアドバイザーの先生方、また作成にご協力いただいたメンバーの皆様にお礼を申し上げます。この報告書を元に本領域のデータ(2024年6月時点)を振り返りますと、まず領域の研究代表者や分担者の数は、一期と二期の公募研究も含め、計81名という大所帯に成長いたしました。研究協力者も含めると、領域メンバーは約200名に及び、この中に若手(院生やポスドク)が約100名含まれます。メンバーの研究分野も量子情報、素粒子、宇宙、物性の各分野に比較的均等に広がり、異分野融合を実現する上で望ましい構成と言えます。研究成果も、領域メンバーの皆様の素晴らしい研究活動のおかげで、論文出版が360本超、国際集会の招待講演も240回超に達し、若手を中心に20件を超える学術賞を受賞しております。また30人を超える領域メンバーが栄転・昇進されたことも大変喜ばしい限りです。これらの原動力となる領域の皆様、素晴らしい研究活動に心より感謝しております。さて、本領域もあと残すところ約1年となってしまいましたが、是非残された時間で「極限宇宙の旅」を思う存分、楽しみましょう。



「極限宇宙」とディラックの美しさ：新たな発見への期待

領域アドバイザー

笠 真生 Shinsei Ryu

プリンストン大学物理学科 教授

令和3年(2021年)に始動した「極限宇宙」プロジェクトも、今年(令和7年、2025年)は節目の年となる。私は、国外アドバイザーとして、研究会やリモートでのイベントを通じ、このプロジェクトに参加させていただいている。このプロジェクトは、時空、物質、そして情報という現代物理学の根幹をなす分野を横断し、量子物理に関連する非常に広範なテーマを網羅している。その多岐にわたる取り組みは、物理学の最前線を探求するものであり、特筆すべきは、このプロジェクトが、分野間の隔たりが課題とされる昨今において、分野の垣根を越えたコラボレーションを実現している点である。このような試みは、物理学全体の一体感や共通の目標を再認識させるだけでなく、新たな発見と視野を切り開く可能性を秘めている。このようなコラボレーションがさらに広がり、物理学の発展に寄与することを期待したい。

この度、領域代表の高柳匡氏と共にディラックメダルを受賞することとなり、大変光栄に思う。これも、高柳氏をはじめ、私を支えてくれた同僚や学生たち、そしてこれまで共に研究を行ってきた多くの人々のおかげである。この場を借りて感謝の気持ちを述べさせていただく。

ディラックは私のヒーローの一人であり、ディラックの名を冠した賞を受けることの重みを実感している。私がディラックの名前を知ったのは、おそらく「百億の昼と千億の夜」(光瀬龍、萩尾望都)に登場する「ディラックの海」が最初である。この小説・漫画をいつ読んだのかは明確に記憶していないが、おそらく中高校生の頃であろう。その後、物理学を専攻し、物性物理学を研究するようになり、グラフェンやトポロジカル絶縁体などを通して、ディラックの海を日常的な研究対象とすることになるとは、その当時は想像もしなかつ

た。物性物理学の観点からも、ディラック電子系がこまでの隆盛を迎えるとは予想できなかっただろう。また、トポロジカル物性で重要なチャーン数は、ディラックの磁気モノポールの研究を礎としている。ディラックの海と磁気モノポールの関係は現在では標準的な事実となっているが、ディラック自身がこの事実を意識していたかは興味深い問題である。いずれにせよ、これらの重要な概念には、ディラックの名が冠されている。

一方で、ディラックが量子エンタングルメントについてどのような考えを持っていたのかについて調べてみたが、直接的な言及は見つからなかった。しかし、ディラックの業績が量子物理の基礎を成していることに疑いはない。言うまでもなく、ディラックのブラケット記法やデルタ関数なしには量子力学は語れない。

ディラックは、理論の美しさにこだわったことでも有名である。個人的には、美しさだけが物理理論の価値ではないと思うが、優れた理論の多くが非常に美しいのもまた事実であると思える。おそらくは、我々が物事を理解したと感ずることと、ある種の美しさの間には関係があるのだろう。冒頭で述べた、物理学の一体感の根幹にも、ディラックの言うところ美しさがあるのかもしれない。また、ディラックは、自分の考案したディラック方程式から「正の電荷を持った陽子」の存在が導き出されることを、理論の欠陥であると考えていたそうだが、のちに陽電子が実際に発見されると、「方程式は私より賢かった」と語ったと言われる。「極限宇宙」の探究から、ディラック理論のように、美しく、そして賢い理論が誕生し、さらには陽電子の発見に匹敵するような素晴らしい発見が生まれることを期待したい。



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)

早川 龍 (京都大学基礎物理学研究所・白眉特定助教)

[領域講師]

Andrew Darmawan (京都大学基礎物理学研究所・特定講師)

[研究協力者]

Michele Dall'Arno (豊橋技術科学大学・准教授)

山崎 隼太 (東京大学理学系研究科・助教)

加藤 豪 (NICT 未来ICT 研究所・研究マネージャー)

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

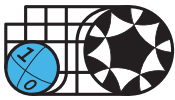
量子超越性理論：量子計算機は古典計算機より高速であることが期待されているが、真に高速であることはまだ厳密には証明されていない。計算量理論における標準的な仮定から、量子計算の優位性を証明する研究は量子超越性理論と呼ばれており、これまで多くの研究が行われてきているが、ベースとなる仮定が人工的なものであったり、強い仮定であった。今回、森前らは、暗号理論における最も基礎的な仮定である一方向性関数の存在から、初めて量子超越性を証明した。これまでのランダム量子回路やボソンサンプリングなどの非ユニバーサルモデルで示されてきた量子超越性にはある問題が #P 困難であるという人工的な仮定を導入しているが、それと比較して、本成果は、これまで暗号理論で長らく研究されてきた最も基礎的な仮定から量子の超越性を初めて証明した成果である。本成果は暗号のトップ国際会議 Crypto2025 に採択された。

量子ランダム性の計算量複雑性：量子系におけるランダムなユニタリ時間発展は、量子情報処理の非常に有用なリソースであるだけでなく、量子重力や量子カオスを深く理解するための重要な手がかりを与えるものである。しかし、その重要性にもかかわらず、ランダムなユニタリ時間発展に関する計算量的な研究はほとんど行われてこなかった。中田らは、この方向性における重要な一歩として、与えられたユニタリ時間発展がどの程度のランダム性を有するかを評価するための計算複雑性に関する研究を行った。特に、ランダム性の性質を検証するための量子アルゴリズムを提案し、その上で、量子計算機を用いてもランダム性の検証が本質的に困難であることを示した。この結果は、量子カオスやここ数年で急激に注目されている量子多体系において創発するランダム量子状態を効率的に検証する一般的なアルゴリズムが存在しないことを示唆するもので、それぞれの問題に特化したアルゴリズムを開発する必要性があることが判明した。

量子情報科学と熱力学：ブシェミらは、エントロピー

を基本的な架け橋として統一し、量子システムにおける測定、フィードバック制御、情報の力学を研究した。特に、情報熱力学の第二法則の普遍的な妥当性を調査し、熱力学と一致するすべてのフィードバックおよび消去プロトコルに適用できることを示した。また、古典的および量子統計力学を統合する概念である「観測エントロピー」(observational entropy) に焦点を当て、ベッツの理論とランダムなユニタリ時間発展により、孤立系における一般的な増加を実証した。さらに、観測エントロピーは、特定のシステムにおける一様事前分布の限界を克服するために、一般化された量子事前分布を導入することで拡張され、このアプローチは、量子ベイズ逆推定を統合し、エントロピーの解釈と運用範囲を拡大する。「量子統計的テスト領域」(quantum statistical testing region) の計算上の課題も、量子モデルと変換の比較を容易にする新しい円錐近似法によって解決した。量子相関を再現するために必要な古典的リソースを定量化する「シグナリング次元」(signaling dimension) は、一般化された確率論の中で検討され、解析的およびアルゴリズムの手法が得られた。これはまた、リソース理論と量子情報処理の関係を明らかにするものでもある。最後に、「仮想量子放送」(virtual quantum broadcasting) において、エルミート保存写像が仮想状態の放送をどのように実現するかを示した。

量子通信：量子インターネットは、世界中の任意のクライアント間での量子通信を可能にするだけでなく、量子センシングや量子コンピュータなどへの応用も期待できる。その要素技術は、クライアントの距離に依らず、彼らに定数エラーの量子もつれを効率的に分配することである。これは現実的には、現在のインターネットのように、複数の量子ネットワークにまたがって実現されるべきである。東らは、クライアントに定数エラーの量子もつれを、彼らの距離に依らず供給するための実用的な方法を提案した。この方法は、最小コストアグリゲーションとネットワーク連結という2つの新しい概念を組み合わせるに基づき、自己組織化する複数の量子ネットワークをネットワーク化することで、世界規模の量子インターネットを実現するためのプロトコル設計の基礎となる。



量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明

[研究代表者]

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

[研究分担者]

宇賀神 知紀 (立教大学理学部・准教授)
重森 正樹 (名古屋大学理学研究科・教授)
寺嶋 靖治 (京都大学基礎物理学研究所・助教)
野海 俊文 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

[領域ポスドク (研究協力者)]

宮田 晃宏 (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)
Sunil Kumar Sake (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)
Nicolò Zenoni (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

[研究協力者]

姉川 尊徳 (米子工業高等専門学校・助教)
西田 充宏 (弓削商船高等専門学校・助教)
前田 健吾 (芝浦工業大学工学部・教授)

飯塚は研究協力者の西田と[1]で、エンタングルメントエントロピーの拡張であるRenyiエントロピーのレプリカ指数 n に対する対数特異点が量子カオスの指標となりうることを提案した。具体例としては2次元共形場理論において、AdS/CFT対応により3次元ブラックホールに双対なカオスな状態では対数特異点が実際に存在するが、自由場理論などカオスではない様な状態ではそのような特異点が存在しないことも具体的に示した。また、協力研究者の姉川、Kabatと共に[2]で、ホログラフィーに現れるラーゼン行列量子力学模型にて、行列の数 D を大きくとり、 $1/D$ 展開によって2点相関関数を計算した。特に2点関数の縮退したpoleが $1/D$ 補正によりエネルギー順位が $1/\sqrt{D}$ だけ分割されることを見出した。

飯塚は西田と共に[3]で、Penington-Shenker-Stanford-Yang (PSSY) モデルと呼ばれる2次元量子重力理論と飯塚-奥田-Polchinski (IOP) 行列量子力学模型の間に1対1の対応関係があることを、シュインガーダイソン方程式、ファインマン図、パラメータを比較することにより示した。またこの関係性を用い、IOP模型のnon-planar補正の結果を用いて、2次元量子重力モデルであるPSSY模型のエンタングルメントエントロピーの非摂動補正となる $\exp(-S)$ 補正を具体的に評価することに成功した。ここで S はブラックホールのエントロピーである。また、西田、Linとともに[4]で、蒸発するブラックホールとそのホーキング輻射の多体エンタングルメント構造を調べた。具体的には輻射を、より細か部分群に分割し、これらのマルチエントロピーと呼ばれる新しい物理量を調べた。また、ブラックホールのマルチエントロピー曲線と呼ぶものを定義し、ブラックホールの蒸発中にマルチエントロピーがどのように変化するかを調べた。このブラックホールマルチエントロピー曲線はページ曲線の多体系への自然な一般化である。このマルチエントロピー曲線から、ホーキング輻射間の量子もつれがどのように時間変化をするのかについて明らかにした。

飯塚は領域ポスドクのSake、Zenoniらと共に[5]で、Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型、およびそのSYK模型に現れる乱数の数を減らしたスパースSYK模型において、異なるマジョラナフェルミオン間のエンタングルメントエントロピーについて詳細に調べ、それらがホログラフィック状態に対して成り立つ既知のエントロピー不等式をすべて満たすことを発見した。また、飯塚と領域ポスドクのSakeは[6]で2次元JT重力におけるケンタウルス時空を調べた。ケンタウルス時空は漸近的にAdS時空である

が、内部では別のAdS幾何を持ち、両者の間にはド・ジッター時空をもつような時空である。このような混合形状の内部時空をもつ場合、双対だと考えられる境界の場の理論での状態密度をバルク内部の作用から逆に計算し、内部ド・ジッター時空の存在により、境界の理論の状態密度が、単なるAdS時空の場合に比べて、予想外にも減少することを発見した。

領域ポスドクのSakeは[7]でDey、Trivediらと共にド・ジッター時空における2次元JT重力の正準量子化について、時間の問題やヒルベルト空間の構築など、いくつかの側面を拡張し調べた。また、ホログラフィーの側面やド・ジッター時空のエントロピーについても考察を深めた。

領域ポスドクのZenoniは[8]で、Aguilar-Gutierrez、Baiqueraとド・ジッター時空における膨張領域とブラックホール内部の両方を探る様々な幾何学的量(量子複雑性)の時間発展を研究し、ブラックホールの存在が、ド・ジッターで現れる「超高速」成長を遅くすることを発見した。

野海はC03班の泉と吉田との共著論文[9]で、裸の特異点は存在しないとする「宇宙検閲官仮説」の検証を行った。特に、宇宙の暗黒セクターのトイモデルとなる複数種類の保存電荷が存在する系において、非極限ブラックホールに対しては、量子補正を考慮しても宇宙検閲官仮説が成り立つことを示した。また、B03班の前田、C03班の吉田らとの共著論文[10]で、重力のエントロピーのある種の凸性を予言する「quantum focusing 予想」の立場から高階微分重力理論の適用なエネルギースケールについて議論した。

また野海は指導大学院生の西井らとの共著論文[11]では、量子開放系の記述に有用なSchwinger-Keldysh形式を応用することで、重力理論における散逸系の有効場理論の構成法を整備し、宇宙論やブラックホール熱力学への応用を議論した。

[1] N. Iizuka *et al*, JHEP 10 (2024) 043

[2] T. Anegawa *et al*, Phys.Rev.D **111**, 025003 (2025)

[3] N. Iizuka *et al*, JHEP 12 (2025) 212

[4] N. Iizuka *et al*, arXiv:2412.07549

[5] N. Iizuka *et al*, arXiv:2409.16641

[6] N. Iizuka, S. K. Sake, arXiv:2501.02614

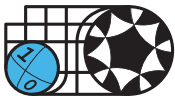
[7] I. Dey *et al*, arXiv:2501.03148

[8] S. E. Aguilar-Gutierrez *et al*, JHEP 05(2024) 201

[9] K. Izumi *et al*, Phys.Rev.D **110**, 044008 (2024)

[10] T. Kanai *et al*, Phys.Rev.D **110**, 084037 (2024)

[11] P. H. C. Lau *et al*, arXiv:2412.21136



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 (大阪大学量子情報・量子生命研究センター・准教授)

上西 慧理子 (慶應義塾大学理工学研究科・特任講師)

森 貴司 (慶應義塾大学理工学研究科・准教授)

山本 大輔 (日本大学文理学部・准教授)

[領域ポストドク (研究協力者)]

山下 和也 (大阪大学量子情報・量子生命研究センター・特任研究員)

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)

山本 和樹 (東京科学大学院物理学系・助教)

Tanay Pathak (京都大学基礎物理学研究所・湯川特別研究員)

Juan Pablo Bayona Pena (京都大学基礎物理学研究所・大学院生)

中島と山下が担当する冷却原子実験は、中島の異動に伴い、前年度の2月に全ての実験装置を解体し、京都大学から大阪大学へ移動しました。そのため、本年度はまず解体した装置の再構築を進めました。現在までにフェルミオン同位体 ${}^6\text{Li}$ について、レーザー冷却、磁場フェッシュバツハ共鳴による原子間相互作用制御を用いた光トラップ中での蒸発冷却、およびフェッシュバツハ分子 ${}^6\text{Li}_2$ の Bose-Einstein 凝縮まで復旧をはたしています。ボソン同位体 ${}^7\text{Li}$ についてもレーザー冷却と光トラップへの導入が確認できています。光格子用光学系も再構築し、pulsed latticeによる運動量キックの方法を用いた光格子の周期性に基づく原子波回折パターンも再確認できています。また再構築の際に、真空度改善のための超高真空槽の再ベキング、レーザー冷却光源の改良、およびOTOC測定に向けた高速磁場制御に対応可能な新規電源装置の導入など装置のアップグレードを並行して進め、測定誘起相転移の観測や非時間順序相関関数(OTOC)の測定を本格的に開始するための準備を進めています。

中田芳史氏(A01)と手塚は、重力系とホログラフィック対応する Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型をはじめとする量子多体系のダイナミクスについて、スクランプリング(量子誤り訂正の実現)を操作論的に特徴づける Hayden-Preskill の思考実験を数値的に検証しました。量子カオスのダイナミクスが必ずしもスクランプリングではないこと、系によっては、スクランプリングの性質の有無に関するクロスオーバーを情報の復元精度で特徴づけることができることを示しました[1]。Pratik Nandy 氏(D01領域PD)、Tanay Pathak 氏(京大基研)と手塚は、非エルミート SYK 模型における特異値の準位統計を解析しました[2]。手塚らは、SYK 模型とディラックフェルミオンが結合した系のエンタングルメントダイナミクスの解析も行いました[3]。

上西と森は、冷却原子系における非平衡ダイナミクスと量子計算手法の開拓に関連し、変分量子アルゴリズムにおける確率的勾配法の最適化過程を解析しました。揺動散逸定理を用いて、ノイズの大きさに対する鞍点や局所解からの脱出時間を評価しました[4]。

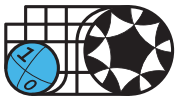
森は、開放量子系のリウビリアンギャップについて、弱散逸極限と熱力学的極限の非可換性を明らかにしま

した[5]。それに基づき、量子多体系の長時間挙動のカオス性を意味する量子ルエル・ポリコット共鳴の存在を示し、孤立量子系の熱平衡化と開放量子系の弱散逸極限の関係を明らかにしました。

山本は、村田佳樹氏(B03)らとともに、AdS/CFT 対応から着想を得た量子スピン系の新たな応答現象を理論的に示しました[6]。これは、AdS時空の境界から反対側の境界へ伝搬する光の軌道が、CFT側では粒子があたかも系の反対側に突然テレポートしたように見えるという現象を利用したものです。また、フラットバンドの存在によって系の緩和ダイナミクスが阻害される現象の解析と冷却原子系での実験提案[7]や、固体磁性物質において圧力印加によって量子性をコントロールする物性実験の解析[8]なども行いました。

山本と Marmorini は、人工量子物質において量子状態の密度行列を実験的に測定する方法である量子状態トモグラフィの理論研究を推進し、置換対称化された密度行列から得られる量子情報量の研究[9]や、スパイラルに捻じれた観測基底を用いた新たな効率的量子状態トモグラフィ法の開発などを行いました[10]。詳しくは34ページ『最近の研究から』記事もご覧ください。

- [1] Y. Nakata and M. Tezuka, Phys. Rev. Research **6**, L022021 (2024).
- [2] P. Nandy, T. Pathak, and M. Tezuka, Phys. Rev. B **111**, L062021 (2025).
- [3] P. H. C. Lau, C.-T. Ma, J. Murugan, and M. Tezuka, Phys. Lett. B **853**, 138702 (2024).
- [4] E. Kaminishi, T. Mori, M. Sugawara, and N. Yamamoto, arXiv:2406.09780.
- [5] T. Mori, Phys. Rev. B **109**, 064311 (2024).
- [6] M. Bamba, K. Hashimoto, K. Murata, D. Takeda, and D. Yamamoto, Phys. Rev. D **109**, 126003 (2024).
- [7] K. Gondaira, N. Furukawa, and D. Yamamoto, JPSJ **93**, 074004 (2024).
- [8] K. Nihongi, T. Kida, D. Yamamoto, Y. Narumi, J. Zaccaro, Y. Kousaka, K. Inoue, Y. Uwatoko, K. Kindo, and M. Hagiwara, JPSJ **93**, 084704 (2024).
- [9] Y. Miyazaki, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, Phys. Rev. A **110**, 052422 (2024).
- [10] G. Marmorini, T. Fukuhara, and D. Yamamoto, arXiv:2411.16603.



量子情報を用いた量子ブラックホールの数理解明

[研究代表者]

石橋 明浩 (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・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 (東京大学・准教授)

ブラックホールは時空曲率の極限である一方、通常物質のように熱的な性質をもっています。こうした一見、相容れない2つの描像はどう捉えればよいのでしょうか？これ迄の研究によれば、その答えはブラックホールを本質的に量子的物体と見なすことです。しかし、この見方は「ブラックホール情報喪失問題」というより根源的な問いを提起しました。つまり、一般相対論にしたがえばブラックホール内部は原理的に見えないはずですが、量子情報の観点からは内部は見えないわけではなさそうです。こうした量子ブラックホールの一見、大きく食い違う2つの描像はどう捉えればよいのでしょうか？B03の研究目的は、量子ブラックホールの基本性質の理解です。

こうした研究の近年の進展には、量子エネルギー条件(QNEC)や量子収束条件(QFC)などの不等式の提案や、量子情報の視点からホーキング放射がブラックホールの情報を含んでいるとする「アイランド予想」があります。松尾は昨年、アイランド形成後の蒸発ブラックホールでQFCが成立することを示しましたが、量子効果の時空への反作用を十分に取り入れることができていませんでした。そこで石橋・松尾・田中は、2次元モデルであれば解析的に反作用を扱えることに着目し、半古典アインシュタイン方程式を解くことで、蒸発する量子ブラックホール上でQFCが確かに成り立つことを証明しました[1]。

QFCは古典的収束定理の量子版として知られており、これまでの様々な検証からその予想の正しさが支持されています。B03の前田とB01班の野海は共同研究者らと、QFCが正しいと仮定し、高次の曲率項を含む高次元重力理論において、その理論が有効なスケールを解析的に導くことに成功しました[2]。また、1点では破れていても、この有効スケールで平均化された膨張率を用いることによってQFCが成立する具体例を示しました。

アイランド公式に関して松尾は、ブラックホールの詳細によらず一般的に、定常ブラックホールにおいてはホーキング放射がブラックホールの事象の地平面の内部だけでなくわずかに外側の領域の情報を持つのに対して、蒸発中のブラックホールでは地平面内部の情報しか持たないことを示しました[3]。

ブラックホール熱力学は、定常ブラックホールが少

数のパラメーターで完全に特徴付けられるという「一意性定理」と結びついています。しかし量子効果を考慮した場合にはブラックホールは「量子毛」といった新たな自由度を持ちうる可能性があります。石橋・松本・米尾は、完全流体の形式に仮定した「毛」を静的ブラックホールが持ち得る条件を明らかにしました[4]。

半古典問題に関して石橋・前田・岡村は、ホログラフィー原理に基づく半古典アインシュタイン方程式を用いて、3次元AdS時空の動的および熱力学的不安定性を示しました[5]。この不安定性は、従来知られていたものと異なり、AdS時空の極大対称性の破れを意味する点で興味深い結果です。

計画研究B03では、ブラックホールの量子的性質を物性系を通じて探る研究を進めています。村田と木下は共同研究者とともに、曲がった時空における場の理論を量子スピン系でシミュレーションする手法を提案しました[6]。この研究では、2次元の曲がった時空上の場の理論が、1次元リング上のスピンモデルの連続極限として実現できることを示しました。スピン系のパラメーターを調整することで、一般の曲がった時空に対応する場の理論を再現可能です。例えば、膨張宇宙における場の理論は、スピン系において時間依存の磁場を持つ横磁場イジングモデルに対応します。この対応関係を利用することで、スピン系を用いた宇宙膨張による粒子生成のシミュレーションが可能となります。実際、スピン系で計算された生成粒子数が、場の理論の結果を誤差範囲内で再現することを確認しました。さらに、重力崩壊によるブラックホール生成にも応用できるため、スピン系を用いたホーキング放射の実験的検証が期待されます。

[1] A. Ishibashi, Y. Matsuo, and A. Tanaka, JHEP 09 (2024) 126

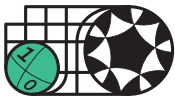
[2] T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, and D. Yoshida, Phys. Rev. D 110, 084037 (2024)

[3] Y. Matsuo, 2407.20921 [hep-th]

[4] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, JHEP 02 (2024) 146

[5] A. Ishibashi, S. Matsumoto, and Y. Yoneo, Class. Quantum Grav. 41 (2024) 8, 085010

[6] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, and R. Yoshii, 2410.07587 [hep-th]



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)

Pawel Caputa (ストックホルム大学・准教授)

Ali Mollabashi (IPM研究所(イラン)・助教)

Shan-Ming Ruan (Vrije Universiteit Brussel・ポスドク研究員)

魏 子夏 (Harvard大学・Junior Fellow, Harvard Society of Fellows)

[領域ポスドク(研究協力者)]

Jonathan Harper (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

[研究協力者]

上床 隆裕 (香川高等専門学校・一般教育科・講師)

北村 比孝 (立教大学理学部・特別研究員)

後藤 郁夏人 (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)

宮地 真路 (京都大学基礎物理学研究所・助教)

鈴木 健太 (東京大学広域科学専攻・相関基礎科学系・助教)

森 崇人 (京都大学基礎物理学研究所・学振特別研究員)

楠亀 裕哉 (九州大学高等研究院・准教授)

中山 泰晶 (NTTコミュニケーション科学基礎研究所・ポスドク研究員)

Peng-Xiang Hao (清華大学/京大基研・ポスドク研究員)

計画研究C01は、重力理論と場の量子論の等価性を与える「ホログラフィー原理」と「量子情報」の関係を利用して、宇宙創成を説明するミクロな理論の解明を目指しております。

まず、C01の高柳、Harperと大学院生の神田、田耕は、量子情報で基本的な不等式として知られる「強劣加法性」から、「1次元量子臨界点における境界の自由度はエネルギーが下がるにつれて単調に減少する」というg定理と呼ばれる性質を幾何学的に導出することに成功しました[1]。ホログラフィー原理を適用すると、g定理は通過可能なワームホールを禁止することも分かり、この研究成果から量子情報の不等式が、量子重力の時空の幾何学構造に制限を与えることも示されました。また、C01の高柳、Harperと大学院生の津田は、二体の量子相関を測るエンタングルメント・エントロピーを、多体間の量子相関へ拡張したマルチ・エントロピーと呼ばれる量を場の量子論で計算する手法を初めて与えました[2]。この量は、ホログラフィー原理を通じて、反ドジッター時空内で交差する複数の極小曲面の面積の和として計算できることが予想されていますが、本研究では、重力理論の解析で予想されるマルチ・エントロピーの相転を共形場理論の解析からも見出すことに成功し、ホログラフィー原理と量子情報の対応関係を多体相関へ拡張する糸口を与えました。

次に、C01の奥山は、2重スケール極限を取ったSYK模型(DSSYK)におけるベビー宇宙の生成演算子を研究しました[3]。DSSYKのヒルベルト空間の恒等演算子は、ベビー宇宙の生成演算子の線形結合で表されることがわかりました。これを用いると、DSSYKのTFD状態がベビー宇宙の生成演算子2つの双線形な式で展開でき

ます。これは、ER=EPRの具体的実現と思えます。

一方、C01の関野は、ホログラフィー原理に基づくドジッター宇宙の研究を行いました[4]。量子重力理論は一人の観測者がアクセスできる自由度を用いて構成されるべきであるという仮説に基づき、観測者の事象の地平面上で定義されたDSSYK模型がドジッター宇宙を記述していると考えます。地平面内部の半古典的な現象を記述するには、微視的理論の長さのスケールがドジッター半径に比べて小さい極限をとる必要があります。AdS/CFT対応ではその極限の解析は非常に難しいですが、DSSYKではその極限が自然に存在することをSusskindとの共著論文で指摘しました。

また、C01の杉本は Armoni, Pyszkowski, Weissman と共同で、ホログラフィー原理に基づくQCDのモデルにおいてメソンの散乱振幅を記述する研究を行いました[5]。ホログラフィックな記述における時空の曲率半径が弦の長さのスケールに比べて大きいときには、メソンの高エネルギーの散乱振幅を平坦な時空における開弦の散乱振幅を用いて近似的に求めることができることを示し、特に漸近的にAdSであるような背景を仮定すると、ハドロンの散乱に対して成立すると期待されるエネルギー依存性を正しく再現することを示しました。

そして、C01の疋田は、Schomerus (DESY) と共同で、ゲージ重力対応の一例の証明を行いました[6]。3次元反ドジッター背景上でNSNS電束しかない場合、弦理論は原理的には解くことができます。また、弦理論の高エネルギー極限近傍は、対応する場の理論の弱結合に当たります。これらの事実をうまく利用することで、この弦の高エネルギー極限を用いたゲージ重力対応が導出できることを示しました。弦の摂動論の全次数で成り立つ強力な結果です。

[1] J. Harper, H. Kanda, T. Takayanagi and K. Tasuki, Phys. Rev. Lett. **133**, 031501 (2024).

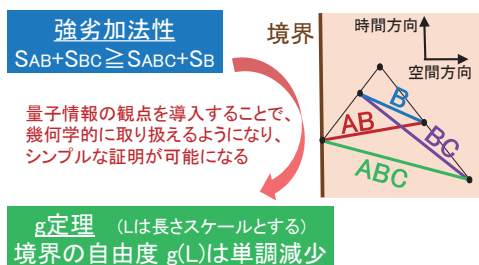
[2] J. Harper, T. Takayanagi and T. Tsuda, SciPost Phys. **16** (2024), no.5, 125.

[3] K. Okuyama, JHEP **10** (2024) 249.

[4] Y. Sekino, L. Susskind, arXiv:2501.09423

[5] A. Armoni, B. Pyszkowski, S. Sugimoto and D. Weissman, arXiv: 2412.17784.

[6] Y. Hikida and V. Schomerus, JHEP **06** (2024) 071.



図：g定理のエンタングルメント・エントロピーに基づく証明[1]の概念図



量子ホール系による量子宇宙の実験

[研究代表者]

遊佐 剛 (東北大学理学研究科物理専攻・教授)

[研究分担者]

柴田 尚和 (東北大学理学研究科物理専攻・教授)

堀田 昌寛 (東北大学理学研究科物理専攻・助教)

米倉 和也 (東北大学理学研究科・准教授)

[海外研究協力者]

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

[研究協力者]

間野 高明 (物質・材料研究機構・主任研究員)

山本 一博 (九州大学大学院理学研究院物理学科・教授)

南部 保貞 (名古屋大学理学研究科物理素粒子宇宙物理学専攻・准教授)

堀田 知佐 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

中山 和則 (東北大学理学研究科・准教授)

山口 幸司 (ウオータルー大学・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)

高三 和晃 (東京大学理学系研究科・助教)

杉山 祐紀 (東京大学物性研究所・特任研究員)

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、つまりトイモデル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た際に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、昨年度より継続して(1+1)次元膨張/収縮宇宙を模したエッジの試料を作製し、昨年度までにはほぼ完成した、時間分解能が数100psのストロボスコープ顕微鏡を用いて、量子ホール系エッジの膨張収縮をダイナミカルに行いながら、実空間実時間でイメージングを行い、古典膨張/収縮を示唆するような測定結果が得られつつある段階にまで到達することができました[1]。量子ホール系はエネルギーギャップのないエッジとエネルギーギャップのあるバルクによって構成されトポロジカル的に堅牢であることが知られています。本年はエッジとバルクの両方を電気的に励起できる電極を取り付けた試料に対して、2/3分数量子ホール状態にあるエッジとバルクの励起に関する研究を進め、バルク励起のふるまいについて研究を行いました[2]。バルクとエッジは切り離せない関係にあり、エッジは(1+1)次元の宇宙に対応しているのに対しバルクはそれより高次元の(2+1)次元です。そのため、量子ホール系のバルクとエッジの実験的研究は、ゲージ重力対応やブレーンワールドとの関連性からも、非常に興味深いものです。

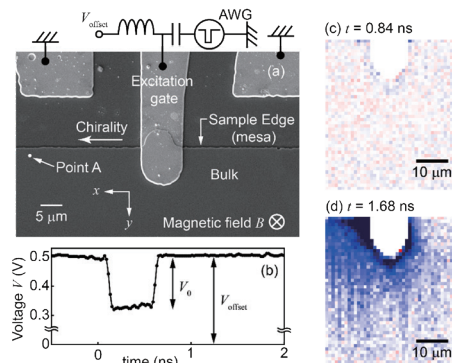


図1 : (a)測定デバイスの励起ゲート付近の電子顕微鏡写真(b)典型的な励起電圧波形(c)(d)発光エネルギーシフトの実空間マッピング像(c)は励起後0.84ナノ秒後の様子(d)は1.68ナノ秒後の様子。青い色の領域がエッジとバルク励起に対応。

高温プラズマとレーザーで構成可能な動的鏡系の実験は、ブラックホールから出るホーキング輻射の物性アナロジーとして重要ですが、堀田昌寛氏を中心に、そのホーキング粒子の純粋化パートナーは鏡の加速停止で発生する衝撃波ではないことを理論的に示しました[3]。また量子重力への応用も最近議論される、マクロ実在論のレゲット=ガウゲ不等式に対して、確率ベクトルを用いた新しい定式化を行いました。また機械学習を用いて解析をしました[4]。

柴田氏を中心に DMRG (Density Matrix Renormalization Group) 法と TDVP (Time Dependent Variational Principle) 法の改良を進め、これまでよりも大きな系で長時間の時間発展の解析を行っています。改良した計算法によりエッジに沿って伝搬する励起の伝搬速度の見積もりが可能になり、エッジに加えるポテンシャルの時間変化とエッジ状態の応答の定量的な解析ができるようになりました。また、分数量子ホール状態からの素励起として出現するエニオンの生成やトラップを可能にする不純物ポテンシャルの大きさや形状についての解析も行っています。

米倉氏は超弦理論における時空のトポロジーに関する新たな制限を発見しました[5]。タイプ IIB 超弦理論に存在する D3 プレーン上にはフェルミオンやゲージ場が住んでいますが、それらは微妙な非摂動的アノミーを持っていることが知られていました。そのアノミーは、ラモン場のディラック量子化を修正することによってキャンセルする必要があります。しかしながらこの研究において、時空のトポロジーによってはそのようなキャンセルができない場合があることを発見しました。そのような時空は矛盾を生じてしまうので、タイプ IIB 超弦理論で禁止される必要があります。この新たな制限は従来の方法では全く見ることができない非自明なものです。

- [1] Y. Jeong et al., Quantum Extreme Universe, Matter, Information, and Gravity (2024).
- [2] Q. France, Y. Jeong, A. Kamiyama, T. Mano, K. Sasaki, M. Hotta, G. Yusa, arXiv:2502.01052.
- [3] Y. Osawa, K.-N. Lin, Y. Nambu, M. Hotta, and P. Chen, Phys. Rev. D **110**, 025023 (2024).
- [4] M. Hotta, and S. Murk, Phys. Rev. A **109**, 062224 (2024).
- [5] K. Yonekura, JHEP 07 (2024) 112.



量子情報を用いた量子宇宙の数理とその応用

[研究代表者]

白水 徹也 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授)

[研究分担者]

泉 圭介 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・准教授)

小林 努 (立教大学理学部・教授)

棚橋 典大 (京都大学大学院理学研究科・特定准教授)

野澤 真人 (大阪工業大学工学部・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)

[研究協力者]

山田 澄生 (学習院大学理学部・教授)

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

棚橋はB03班研究員の木下との共同研究で、相対論的な視点から物性理論の解析を行うことにより、差動回転を伴う物性系においてはスピン流が誘起されるという新たな性質を発見しました[1]。この研究はPhys. Rev. B誌におけるEditor's Suggestionに採択されました。今後、AdS/CFTの観点による考察が期待されます。

吉田はB01、B03班メンバーとの共同研究で、エンタングルメントエントロピーを含む一般化エントロピーの増大率に関する「量子焦点予想」を一般相対論に高次曲率補正を含めたクラスの理論で検証し、増大率の空間平均について量子焦点予想が成り立つことを明らかにしました[2]。

吉野は余剰次元の半径がゼロになるとKaluza-Kleinバブルという空間の裂け目ができ、広がってゆく現象に注目しました。そして、そのバブルとブラックホールの衝突を数値シミュレーションするための初期条件を設定する数値手法を開発しました[3]。一方、野澤は歪・回転がゼロとなる光的測地線束を許す時空である宇宙定数を含むEinstein-Maxwell系のRobinson-Trautman解の超対称性について解析を行いました。そして、超対称解の完全分類を行い、計量、ゲージ場、Killingスピノルをあらわに構成し、裸の特異点のみが許されることを明らかにしました[4]。これらの研究

はバルク時空の基礎を与えるものです。

SU(2)ゲージ場と結合したアクション場によるインフレーションモデルには、宇宙背景輻射スケールで原始重力波の過剰生成問題がありましたが、小林は重力場との非最小結合により一般にこの問題を回避可能であることを指摘しました[5]。

泉、白水、吉田、吉野らは、ブラックホール外部であるが強重力場中で定義された緩捕捉面について、低速回転するブラックホール時空において具体的に面を特定しました[6]。また、泉、白水、吉野らは、重力の強弱に関わらず重力を検知する面(重力検知面)に対する不等式に電磁場の効果を取り入れました[7]。そして、ブラックホールと同様に、極限電荷が存在することを示しました。重力検知面に関する一連の研究は、本誌の「最近の研究から」にまとめられています。

今年度はB03班と協力し、近畿大学にて12月2日から12月6日まで開催された一般相対論と重力に関する国際会議(JGRG33)の運営に貢献しました。国内外から235名の参加者が集結しました。さらに、8月16日から18日に研究会「理論で迫るブラックホール宇宙と時空特異点」(参加者数:30名)を琵琶湖コンファレンスセンターにて、11月18、19日に小研究会「第二回一般相対論と幾何」(参加者数:85名)を名古屋大学にて、開催しました。後者においては、Mario Micalef氏による極小曲面に関する数学的基礎の招待講演が行われました。これは本領域の中心の一つでもあるホログラフィックエンタングルメントエントロピーに対する笠高柳公式と密接に関係のあるもので、今後の研究の一助になることが期待されています。加えて、2025年2月12、13日に研究会「SUPERGRAVITY」(参加者:16名)を大阪工業大学にて行いました。

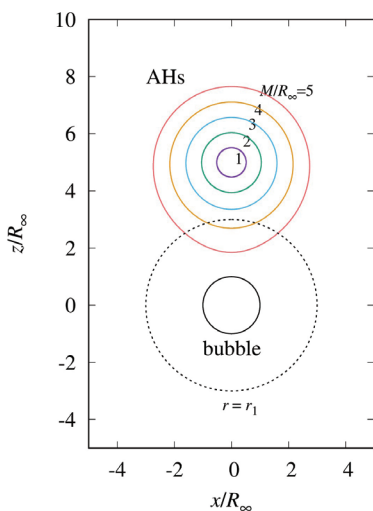


図1: 数値的に計算したバブルとブラックホールが存在する空間。ブラックホールの地平面の位置をいくつかの質量に対して示している。

- [1] T.Funato, S.Kinoshita, N.Tanahashi, S.Nakamura and M.Matsuo, Phys. Rev. B **111**, L060403 (2025).
- [2] T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, D. Yoshida, Phys. Rev.D **110**, 084037(2024).
- [3] H. Yoshino, arXiv:2501.11642[gr-qc].
- [4] M. Nozawa, JHEP **10**, 201(2024).
- [5] T. Murata and T. Kobayashi, JCAP **10**, 044 (2024).
- [6] K.Izumi, T.Shiromizu, D.Yoshida, Y.Tomikawa and H.Yoshino, PTEP2024, 113E02 (2024).
- [7] K.Lee, K.Izumi, T.Shiromizu, H.Yoshino and Y.Tomikawa, Phys. Rev. D **110**, 124051 (2024).



場の量子論のダイナミクスへの量子情報的アプローチ

[研究代表者]

西岡 辰磨 (大阪大学大学院理学研究科・教授)

[研究分担者]

伊藤 悦子 (京都大学基礎物理学研究所・准教授)

奥田 拓也 (東京大学大学院総合文化研究科・助教)

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

松尾 泰 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

[領域ポスドク(研究協力者)]

Dongsheng Ge (大阪大学大学院理学研究科・特任研究員)

Pratik Nandy (理化学研究所・数理創造プログラム (iTHEMS)・特別研究員)

[研究協力者]

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

永野 廉人 (東京大学素粒子物理国際研究センター・特任助教)

松本 祥 (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

丸吉 一暢 (成蹊大学理工学部・准教授)

山崎 雅人 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

吉田 豊 (明治学院大学 法学部 消費情報環境法学科・専任講師)

西岡(研究代表者)は Ge(研究協力者)と大学院生の嶋守らとともに、 $(3-\epsilon)$ -次元の $O(N)$ 模型に空間的に局所化されたくりこみ群の流れを考えることで、表面演算子と千演算子の二つの異なる次元をもつ欠損演算子から構成される複合欠損演算子の非自明な具体例を初めて構成しました[1]。

また、西岡は大学院生の川畑、安藤らとともに、サブシステム符号とよばれる一般的な量子誤り訂正符号から、Narain 型の $(1+1)$ 次元共形場理論を構成する様々な手法を開発しました[2]。さらに Z_2 対称性をゲージ化することでフェルミオン型共形場理論を構成し、サブシステム符号から得られる超対称性を持つ共形場理論を発見しました。

伊藤(研究分担者)と松本(研究協力者)は、昨年度の研究で、ハミルトン形式を用いたゲージ場理論における複合演算子のスペクトル計算法を従来法から拡張し、符号問題が生じるパラメータ領域でも計算可能にしました。具体的には、フェルミオンが2種類含まれる Schwinger モデルにトポロジカル θ 項を加え、複合粒子のスペクトルにおける θ 依存性を高精度で解析することに成功しました[3]。さらに、伊藤は[4]において、Schwinger モデルのハミルトニアンを大規模なユニタリ行列に埋め込み時間発展を行う「Black-encoding法」を提案し、従来の Trotter 分解法などとの計算量の比較を行いました。

奥田(研究分担者)は、高次対称性の SPT 状態の適応的測定によりある種の格子ゲージ理論の量子シミュレーションを実現できることを以前に示していましたが、[5]では Parayil Mana、大学院生の助野らとともに SPT 状態とシミュレートされる理論の間で anomaly inflow と呼ばれる現象が起きることを明らかにしました。[6]では anomaly inflow が、CSS 符号の構造を持つ(多くのフラクトン系を含む)一般的な格子模型と対応する SPT 状態の間で起こることを示しました。また奥田は藤井、藤倉、菊川、ピーダーセンとともにシュウィンガー模型を VUMPS という手法で調べ、臨界質量を従来より二桁高い精度で決定しました[7]。

本多(研究分担者)は、大学院生の中西、嶋守らとともに場の量子論・宇宙・物性・量子計算など幅広く研究を行いました。まず、フラクトンに関連する格子模型と場の量子論の関係を系統的に議論しました[8、9、10]。

特に[8]では、通常の格子模型からフラクト的な格子模型を系統的に作り出す方法を議論し、プレス発表を行いました。宇宙に関連する研究[11、12、13]では、主にリサーチエンス理論の量子宇宙論への応用を議論しました。特に[11]では、宇宙の初期状態についての長年の論争を前進させる結果を得て、プレス発表を行いました。場の量子論については、松本らとともに4次元 SU(2)ヤンミルズ理論の相構造[14]、量子計算によりエネルギースペクトルを得る方法の研究を行いました[15]。上記の研究に関連して、6件の研究会招待講演、8件の研究会開催、2件のアウトリーチ活動を行いました。

松尾(研究分担者)は非可換ホール効果に関連する研究を継続しました。前年度に対応する可解系を記述する新しい Calogero 模型を提案し、そのスペクトルを調べましたが、今年度は関連する可解模型の系統的な導出、系を記述する対称性(Yangian 対称性)などについての研究を行いました。また、AGT 対応などの関係でゲージ理論や M 理論のプレーン配位などの考察、Jain などにより提案されている量子ホール効果の励起状態の考察などを行いました。

また今年度も、D01 班主催のスクール「場の理論の新しい計算方法2024」を東京大学駒場キャンパスにて開催しました。詳細は研究会報告をご覧ください。

- [1] D. Ge, T. Nishioka, S. Shimamori, JHEP **02**, 012(2025).
- [2] K. Ando, K. Kawabata, T. Nishioka, JHEP **11**, 125 (2024).
- [3] E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, JHEP **09**, 155 (2024).
- [4] K. Sakamoto, H. Morisaki, J. Haruna, E. Itou, K. Fujii and K. Mitarai, Quantum **8**, 147 (2024).
- [5] T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sukeno, Phys. Rev. Research. **6**, 043018 (2024).
- [6] T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sukeno, SciPost Phys. **17**, 113 (2024).
- [7] H. Fujii, K. Fujikura, Y. Kikukawa, T. Okuda, J. W. Pedersen, arXiv:2412.03569.
- [8] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, Phys. Rev. Research. **6**, 023166 (2024).
- [9] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, JHEP **09**, 061 (2024).
- [10] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, S. Shimamori, arXiv: 2408.05048.
- [11] M. Honda, H. Matsui, K. Okabayashi, T. Terada, Phys. Rev. D **110**, 8 (2024).
- [12] M. Honda, H. Matsui, K. Numajiri, K. Okabayashi, arXiv: 2412.20398.
- [13] M. Honda, R. Jinno, K. Tokeshi, JCAP **12**, 044 (2024).
- [14] M. Hirasawa, M. Honda, A. Matsumoto, J. Nishimura, A. Yosprakob, arXiv:2412.03683.
- [15] D. Ghim and M. Honda, PoS LATTICE2023, 213 (2024).



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)]

Yosprakob, Atis (新潟大学理学部)

尾崎 壮駿 (東京大学総合文化研究科)

[研究協力者]

西野 友年 (神戸大学理学研究科・准教授)

引原 俊哉 (群馬大学理工学府・准教授)

大久保 毅 (東京大学大学院理学研究科・特任准教授)

古谷 峻介 (埼玉医科大・講師)

計画研究D02班では、テンソルネットワーク(TN)法やその数理的背景の解明を軸に、量子多体系のダイナミクスが織り成す多彩な物理現象の理解を構築し、さらに、極限宇宙の分野横断的な研究を進展させることをめざしています。今年度は、従前から継続的に行っている研究が着実に進展するとともに、量子スピン系物質の物性解明に大きく貢献する結果も得られています。以下では、今年度の主要な結果のいくつか紹介したいと思います。

まずTNとホログラフィーの関係において、昨年度、奥西はC01班の高柳とともに、ベータ格子のような樹状TNがホログラフィックくりこみ群の構造を持ち、 p -adic AdS/CFTとして解釈できることを示しました。次のステップとして、奥西は西野とともに双曲格子模型に対して外縁に沿ったスピン相関関数を計算し、臨界現象に本質的なループ構造により非自明なスケール次元が実現することを示しました。これにより、エンタングルメントくりこみ群(MERA)の解明が一歩進んだこととなります。領域PDのYosprakobは、指標展開によるTNの構成をSU(N)ゲージ理論に一般化し、実際にテンソルくりこみ群に実装することに成功しました[2]。今後の応用展開も期待されます。一方、量子計算とTNという観点から、上田らは、樹状TNの構造最適化を進展させ、MERAを内包するループ構造入りのTN(量子回路)に対する逐次構造最適化法を提案しました[3]。さらに、TNに基づいた複素ベクトルの量子回路表現化アルゴリズムの一般化を図り、量子古典ハイブリッド型の機械学習アルゴリズムへの応用を行いました[4]。また、原田らは、量子的生成モデルの一種であるボルンマシンに対する、最小相互情報量原理に基づく樹状TNの構造最適化法の特徴について研究を進めました。特に、ランダムパターン、手描き文字画像、株価の変動率などを例に、この手法がデータに内在する関係性をネットワーク構造として抽出可能なことを示しました[5]。機械学習におけるTN構造の理解も着実に進んでいるといえます。

量子多体ダイナミクスの観点から、桂らは量子傷跡状態と呼ばれる特異なダイナミクスを示す状態をもつフェルミオン系、および量子スピン系の新たな構成法を提案しました[6]。また、空間1次元の系でありな

が基底状態において、連続対称性の自発的破れを示すフラストレーションフリー模型を無数に構成できることを明らかにしました[7]。尾崎は、桂と連携してクリーン極限のマヨラナSYK模型の動的および熱力学的性質を調べ[8]、特に有限温度で、非時間順序相関関数が時間発展の初期で指数関数的な増大を示すことを明らかにしています。一方、堀田らは、与えられたモデルがフラストレーションフリーのクラスに属するか否かを判別し、その厳密解を構築するクラスタ射影MPS法を開発しました[9]。実際に、この手法をf電子系に対応する1次元量子スピン模型に用い、量子リフシット多重臨界点の存在を発見して注目を集めるとともに、toric codeや他の2次元系にも適用できることも示しています。また、1次元中性イオン性転移を示す有機物質を念頭に、有限温度の古典グラウバーダイナミクスを調べ、強相関系における拡散型の伝導が相転移近傍で増大することも明らかにしました[10]。

領域PDとしてTNと格子場理論の融合研究を推進してきたYosprakobが、4月よりJST CREST研究員として京都大学基礎物理研究所に異動することが決まりました。共同研究は継続する一方、後任の領域PDの人選も進みつつあります。新たな研究体制で学術変革領域の最後の1年間に望めることに、大いに期待しています。

- [1] K. Okunishi and T. Nishino, PTEP **2024**, 093A02 (2024).
- [2] A. Yosprakob and K. Okunishi, arXiv:2406.16763.
- [3] R. Watanabe and H. Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 033259 (2024).
- [4] A. Nakayama, H. Morisaki, K. Mitarai, H. Ueda, and K. Fujii, arXiv:2408.03000.
- [5] K. Harada, T. Ohkubo, and N. Kawashima, arXiv:2408.10669.
- [6] M. Nakagawa, H. Katsura and M. Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).; K. Sanada, Y. Miao, and H. Katsura, arXiv:2411.01270.
- [7] H. Watanabe, H. Katsura, and J. Y. Lee, Phys. Rev. Lett. **133**, 176001 (2024).
- [8] S. Ozaki, and H. Katsura, Phys. Rev. Research **7**, 013092 (2025).
- [9] H. Saito, and C. Hotta, Phys. Rev. Lett. **132**, 166701 (2024). [Editor's suggestion]; H. Saito, and C. Hotta, Phys. Rev. Research **7**, 013086 (2025).
- [10] Y. Sakai, and C. Hotta, Phys. Rev. B **110**, 174306 (2024).



量子物質中での Toric code 相の探求

膨大な数の電子からなる電子集団においては、電子の間の相互作用によって全く新しい性質を持つ素励起が出現することがあります。量子スピン液体における分数励起はその代表例の一つで、多数の電子スピンの量子エンタングルメントによって、新規な素励起が創発します。例えば、Kitaev量子スピン液体においてはエニオンが現れ、これはトポジカル量子計算への応用が期待されております。このような素励起は、もとの電子とは異なり必ずしも電荷を持たないため、私は熱測定というアプローチによりその検出や、性質の解明を行っております。特に、分数統計性を反映するエントロピーや比熱、熱輸送係数の精密計測を、新規素励起が期待される量子スピン液体やトポジカル超伝導のバルク単結晶に対して実施しております。近年では、Kitaev量子スピン液体においてエニオンを担うマヨラナ励起の存在を磁場中の精密なエントロピーおよび比熱測定から調べております。磁場中のKitaev量子スピン液体においては、磁場の方向によってマヨラナ粒子の励起量が大きく変化することが当初のKitaevの論文により期待されておりました。磁場中でエントロピーや比熱の精密測定を行うことで、この性質を実験的に観測することに成功しました。

本課題では、これまでに確立したエントロピーおよ



●研究代表者

水上 雄太 Yuta Mizukami

東北大学大学院理学研究科物理学専攻・准教授

JST 創発的研究支援事業 創発研究者(兼務)

1987年岐阜県生まれ

2014年3月京都大学大学院理学研究科博士後期課程中退

2016年3月博士(理学)(京都大学)

2022年4月から現職(東北大学)

2024年10月から現職(JST 創発的研究支援事業 創発研究者)

び熱の精密計測を基軸として、物質中の量子エンタングルメント状態を熱測定という観点から探ることを目指します。特に、Kitaev量子スピン液体における、エニオンによる量子誤り訂正のモデルである toric code を物質中で探求することに取り組みます。本研究を実施することで、現実存在する物質を舞台としたエントロピーや熱といったバルク量測定から、量子情報へアプローチする足掛かりを築きたいと考えております。



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

量子計算や量子多体系の性質を理解する上で、量子力学の特徴的な量を抜き出すことは不可欠である。量子性を特徴づける量として、従来の研究では主に量子重ね合わせや量子エンタングルメントに焦点が当たってきたが、量子情報科学の台頭によって「計算」や「シミュレーション」といった操作が量子系と結びついたことにより、何が「量子的」なのかという問題がより非自明になってきている。特に、クリフォードゲートと呼ばれるクラスのみ量子ゲートからなる量子回路は、古典コンピュータで効率的にシミュレートできてしまうことが知られている。そしてこのクリフォードゲートは、容易に量子重ね合わせとエンタングルメントを作れてしまう。つまり、計算科学の視点から見ると量子重ね合わせやエンタングルメントは必要な量子的性質の一部しか反映しておらず、量子計算のアドバンテージを考える上では「クリフォードゲートによって作れない量」が本質的に重要になることが示唆される。

クリフォードゲートにより生成することができない状態は「マジック状態」と呼ばれ、量子計算の文脈でクリフォード回路を万能量子計算に押し上げるものとして研究されてきた。これまでの研究は、マジック状態を用いてどの様に万能量子計算を実行するかという構成的な部分に主眼が置かれていたが、量子マジックをエン



●研究代表者

高木 隆司 Ryuji Takagi

東京大学総合文化研究科広域科学専攻関連基礎科学系・准教授

2020年9月マサチューセッツ工科大学Ph.D.課程修了

2023年4月から現職

タングルメントの様に一つの量子特徴量として扱うには、量子状態やゲートがどれだけ「非クリフォードゲート性」を持っているかを定量的に扱う枠組みが必要である。

本研究の目標は、量子マジックという量子計算の文脈で自然に創発する量を新たな量子性として確立し、それを量子情報処理の解析や物理系の新たな理解の推進に応用することで、計算科学の視点による新たな量子性のプローブを提供する研究を開拓、推進することである。特に、(1)量子リソース理論の枠組みを発展・適用することによる量子マジックを定量的に扱う理論的枠組みの確立(2)マジック量を解析することによる誤り耐性量子計算における情報処理の性能の究極性能の分析(3)量子多体系の計算リソースとしての量子性の量子マジック量を用いた解析等を目指す。



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

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。一方、従来の t-design の生成プロトコルは、量子コンピュータ上の効率的なアルゴリズムとして設計されており、量子多体系上で実装する事は困難である。前回の公募研究では、量子制御理論の手法を応用する事で、量子多体系の小さな部分系へのランダムな作用のみで、全体系に t-design が発生させる手法を考案した。

本研究では、前回の公募研究で得られた間接制御を用いた t-design 生成プロトコルの収束スピードが、系の大きさや t に対して実用的なスケールを示す事を明らかにする。そのために、我々のプロトコルが実用的な収束スピードを持つことの傍証を得ることを一つ目の目的とする。具体的には、量子制御理論における最短制御時間を求める



●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

2015年10月から現職

手法を応用することで、収束スピードの質の良い下限を求めることを目指す。また、ノイズの存在する現実的な量子多体系でも、間接制御のみを用いてノイズに対処する方法が存在する事を示す事を二つ目の目的とする。そのために、間接制御を用いたノイズ緩和法を開発することで、本手法を応用した量子多体系上の変分量子アルゴリズムを、現実的なノイズ環境下においても適応可能にすることを目指す。

このように、本研究では、ありふれた量子多体系の中で自然な物理現象として t-design が起こり得ることを示す。これにより、本研究は量子多体系の熱化・平衡化に対する将来的な研究の進展に貢献すると共に、スピン鎖などの通常の量子多体系をランダムアクセスにより近似的な量子カオス系に変換する簡便な方法を与える。



磁気共鳴による開放量子多体系の量子カオスと秩序形成

核磁気共鳴(NMR)は、量子演算システムとして有用であるが、これまでは孤立分子系などに限定された研究が行われてきた。本研究では、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に着目し、電子系を介した核スピン間の長距離量子エンタングルメントを用いた新たな量子制御システムを開拓する。従来、物性研究に用いられる NMR は、核スピンと電子スピンの間にはたらく超微細相互作用を通して局所磁場を計測する手段として用いられている。これまでに当研究室でも、さまざまなトポロジカル量子系の計測を行い、その低エネルギー励起の性質を明らかにしている。特に、Kitaev 量子スピン液体においては、誤り耐性量子演算に有用な分数統計性のエニオンや分数励起のマヨラナフェルミオンが素励起を担うと考えられ、実際我々はその根拠となる異方的な低エネルギー励起の観測に成功している。純度の高い量子スピン液体状態においては、電子スピン励起にギャップが生じるため、長時間に渡りコヒーレントな核スピン制御が可能である。最近我々は、周期的な摂動を加えること、数百ミリ秒に及ぶ核スピンの離散時間結晶の創出に成功している。同様の振る舞いは、光格子や超伝導量子ビットなどの実用的な量子情報システムでも計測されている。本研究を通して安



●研究代表者

清水 康弘 Yasuhiro Shimizu

静岡大学理学部・教授

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

2024年4月から現職

定な量子磁性体において長時間の量子制御が実現すれば、画期的に汎用性が向上する新たなシステムを提供することができる。さらに本研究では開放巨視的量子系の量子エンタングルメントを計測し、それを利用した新たな量子現象の開拓に取り組んでいる。具体的には、量子状態トモグラフィ計測、および量子傷や量子カオスといった量子多体系に特有の現象が挙げられる。本プロジェクトにおいて、エンタングルメント・エントロピー計測や多体局在理論といった多方面からの理論的提案を頂くことで新奇な量子現象を生み出すきっかけにしたい。



スパイラル観測基底を用いた光格子中量子多体系の量子状態トモグラフィ

一般に N 量子ビット系の量子状態に対しては、局所的に異なる Pauli 行列の全組み合わせの1体から N 体までの多体相関をすべて計測することができれば、原理的にはその密度行列を再構築することが可能である(量子状態トモグラフィ)。しかし、そのような局所的に異なる基底での観測セットアップを実現するためには単一量子ビットレベルでの緻密な操作が必要となる。また、このような全通りの観測値の数は系のサイズに対して指数関数的に増大する(N 量子ビットに対して 4^N 個)ため、スケーラブルな方法のためには何らかの工夫が必要となる。イオントラップ系や光量子ビット系などの局所レベルで高制御な人工量子系では、実際に $N \leq 8$ 程度までの量子状態トモグラフィが成功している。対向的なレーザー照射による周期ポテンシャル(光格子)中に充填した中性原子気体の系は $N \geq 105$ の非常に大規模な系を用意でき、量子気体顕微鏡を用いることで単一格子点レベルでの数相関関数の観測が可能のため、特に物性系の量子シミュレーションの舞台として有用である。一方で、格子点間隔が光の波長程度なこともあり、単一格子点レベルでの局所操作を多数行うことが技術的に簡単ではないため、相関関数の計測は大域的な対角基底($Z \otimes N$)もしくは $\pi/2$ パルスの照射による大域的な非対角基底($X \otimes N$)での観測に



●研究代表者

小沢 秀樹 Hideki Ozawa

早稲田大学先進理工学部応用物理学科・客員研究員

1990年栃木県生まれ

2018年3月京都大学大学院博士後期課程修了

2024年11月から現職

ほぼ限られている。そこで本研究では、人工量子系に対する大域的な操作のみで可能な量子状態トモグラフィ法を開発する。具体的には、 $\pi/2$ パルスによる大域的な基底変換と磁場勾配の短時間印加による(場所に依存した)歳差運動を組み合わせることで、 $O(3 \times 2^{n_q})$ 個のピッチ q でスパイラル状に捻じれたような直交観測基底を得る。因子3はスパイラルの軸方向(X, Y, Z)に起因し、 n_q は異なるピッチ q の値の数である(例えば π/N ずつ異なるピッチを用いる場合は $n_q=2N$ 個となる)。因子 2^n は多体相関関数を測る際に「その格子点を含むか含まないか」の因子であり、量子気体顕微鏡では1回の実験で 2^n 個の観測値が得られる。つまり、全体の測定回数は $3n_q$ の多項式個数で済むためスケーラブルである。



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

テンソルネットワーク(TN)スキームとは、多体問題をTN形式によって定式化し、高精度解析を行う一群の理論的・計算手法的枠組みであり、2000年代以降分野を超えて急速な発展を遂げてきた。テンソル繰り込み群(TRG: Tensor Renormalization Group)法は、TNスキームにおけるラグランジアン形式に基づくアプローチであり、2007年に物性物理学分野で提案された計算手法であるが、われわれは長期的研究課題(本申請課題に限らない)として、TRG法の素粒子物理学への応用に取り組んでいる。TRG法は、モンテカルロ法などの既存の数値アルゴリズムと異なり、(i)符号問題・複素作用問題がないこと、(ii)計算コストの体積依存性が対数的であること(格子体積 V に対する計算コスト $\propto \ln V$)、(iii)グラスマン数を直接扱えること、(iv)分配関数そのものを計算できること、などの魅力的な特徴を有している。われわれは、TNスキームの利点を活用することによって、有限密度QCDの相構造や強い相互作用におけるCP問題など、符号問題のために従来のモンテカルロ法では解析が困難であった課題に対して、新たな研究の展開を目指している。

最近、われわれはTRG法を用いて $(1+1)$ 次元 $O(3)$ 非線形シグマモデルにおけるフォンノイマン型およびレンニ型のエンタングルメントエントロピーの計算に成功し、それらの漸近的スケーリングの振る舞いからセントラル



●研究代表者

藏増 嘉伸 Yoshinobu Kuramashi

筑波大学計算科学研究センター・教授

1968年山口県生まれ

1995年3月東京大学大学院博士後期課程修了

2013年4月から現職

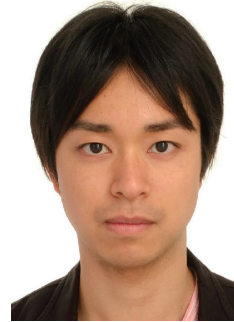
チャージを決定した。また、フォンノイマンエントロピーと n 次のレンニエントロピーが、 $n \rightarrow 1$ において一致するかどうかの検証も行った。本申請課題では、2つの研究の方向性を考えている。一つは高次元(3次元以上)モデルにおけるエンタングルメントエントロピーの計算である。われわれは、エンタングルメントエントロピーの面積則に興味を持っており、3次元のモデルを用いた検証を予定している。もう一つは、有限密度系におけるエンタングルメントエントロピーの研究である。経路積分形式では、有限化学ポテンシャルの導入が複素作用問題を引き起こしてしまうため通常のモンテカルロ法によるアプローチは忌避されているが、TRG法には複素作用問題がないため、有限密度系におけるエンタングルメントエントロピーの性質解明が期待されている。



量子エンタングルメントから創発する物理の研究

エンタングルメントは、古典物理には存在しない重要かつ興味深い性質です。特に、量子コンピュータの分野では根本的な役割をするものになっています。近年、この量子エンタングルメントは量子重力と物性物理の双方を理解する上で必要不可欠になりつつあります。例えば、量子重力では時空は量子エンタングルメントから創発すると期待されています。また、物性理論でも、エンタングルした物質は、通常物質では実現し得ない非自明な性質を生み出します。このように、多数の基本的な構成要素がエンタングル状態になることで思いがけない物理的性質が創発します。本研究では両者を統一的に理解するため、量子エンタングルメントから創発する物理的理解を目指していきます。

特に、物性と量子重力の文脈で共通して重要になることのひとつは、ゲージ対称性が量子エンタングルメントから生じることです。素粒子の標準理論では、相互作用は全てゲージ理論で書かれているぐらいゲージ対称性は重要なものです。物性ではスピン液体や高温超伝導の文脈でもゲージ理論の記述法が用いられており、量子誤り訂正符号とも密接に関係しています。一方量子重力では、一般相対論そのものが時空のゲージ対称性に基づいて書かれています。近年になってエンタングルメント状態からはゲージ対称性が生じるということが理解される



●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課程修了

2022年4月から現職

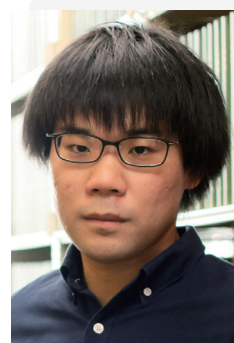
ようになってきました。このようにエンタングルメントは自然界がなぜゲージ対称性でうまく記述できているかに一つの理解の仕方を与えてくれます。

本研究では、まず対称性に着目すると、物性物理と量子重力における量子エンタングルメントとゲージ対称性の役割に統一的視点が与えられることに着目して、量子エンタングルメントから創発するゲージ対称性の統一的理解を目指します。それを通じることで、エンタングルした物質から生じうる奇妙な準粒子の理解と量子重力における対称性の理解を目指し、それらの間の関係を探索します。また、対称性を超えてダイナミクスをも視野に入れることで、通常物質の理解からエキゾチックな物質相まで、素粒子の標準理論から量子重力までを対象に、エンタングルメントから創発する物理の解明を目指します。



量子開放系のダイナミクスとエンタングルメント

近年、孤立平衡系に対する従来の物理の枠組みを越えて、非平衡開放系で実現される新しい物理に関心が集まっている。しかし、非平衡開放系の量子物理は、重要な問題でさえも、依然として理解が乏しい。私は、非平衡開放系で現れる多彩な物性現象をはじめとして、物理の新しい基礎を確立することを目指している。とくに、極限宇宙では、量子開放系のダイナミクスとエンタングルメントを探究し、量子開放系の相や秩序を記述する一般的な基礎理論を構築したい。具体的には、とくに重要だと考える以下の3点の問題に取り組む。(I)量子エンタングルメントは、量子情報処理において重要となるだけでなく、孤立平衡系の量子相を特徴づけるうえで本質的な役割を果たすことが知られてきた。その一方で、非平衡開放系で現れる量子相におけるエンタングルメントの役割は未解明である。(II)孤立量子系のダイナミクスのカオスの振舞いは、量子統計力学を基礎づけると同時に、ブラックホールの物理にも重要であり、物性物理と高エネルギー物理の両方で関心を集めてきた。他方で、量子開放系のダイナミクスの普遍的な振舞いは、多くが未解明である。(III)近年、量子測定に誘起された非平衡相転移が、量子開放系に特有の新しい相転移として注目を集めている。しかし、多くの先行研究は個別の具体例にもとづくも



●研究代表者

川畑 幸平 Kohei Kawabata

東京大学物性研究所・准教授

1994年兵庫県生まれ

2022年3月東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了

2023年7月から現職

のであり、その普遍的な理解は得られていない。とくに、孤立量子系の平衡相転移とは異なって、場の量子論にもとづく理解は確立していない。

これらの問題に取り組むことで、量子開放系の相や秩序を一般的なかたちで記述し、予言する、包括的な理論体系を構築する。今後の革新的な発展が期待される量子技術分野において、量子開放系の理解はさらに重要性を増していくと期待されるが、本研究はその新しい基礎を築く。物性物理・高エネルギー物理・量子情報の理論を統合することで非平衡開放系の新しい量子物理を切り開き、量子情報と物理の架橋を目指す。

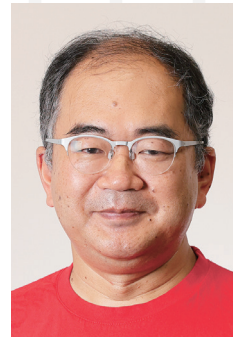


混合状態トポロジカル相の理論的探求

量子多体系の普遍的な性質を探求している。量子多体系の基底状態は「量子相」として分類されるが、特に局所的な状態の単純なテンソル積で書ける量子状態は自明な相に属する。しかし、系の対称性によって自明な相が禁止される(Lieb-Schultz-Mattis型定理)場合があり、非自明な量子状態を実現するための指導原理となる。また、対称性の存在により、多彩なトポロジカル相が出現することがある。格子模型に代表される量子多体系の普遍的な性質の研究は、場の理論の研究と表裏一体の関係にあり、量子多体系に関する一般的な制約は特に場の理論における量子異常との関係が深く、この観点からの研究も行っている。

場の理論は、量子多体系におけるダイナミクスの解明においても強力な手法であり、たとえば場の理論に基づく非線形光学応答の研究を行っている。一方、非線形伝導度に関する周波数和則など、格子模型に対する厳密な普遍的法則の導出も行っており、このような法則と場の理論の比較あるいは組み合わせに興味を持っている。

これらの量子多体系に関する研究は、これまで基底状態および低エネルギー励起状態が主な対象となっていたが、最近では開放量子系や非平衡状態に研究を広げている。開放量子系における混合状態を記述する密度行列は、倍の自由度を持つ量子系の純粋状態に対応付け



●研究代表者

押川 正毅 Masaki Oshikawa

東京大学物性研究所・教授

1968年広島県生まれ

1995年12月東京大学博士(理学)

2006年4月から現職

ることができる。純粋状態に関するこれまでの知見を応用することで、混合状態における「強い対称性」の「弱い対称性」への自発的破れの系統的解析を行った。今後、混合状態特有の量子相や量子現象の解明を行っていく予定である。このような開放量子系における研究では、量子情報的な観点ますます重要になると考えている。

量子多体系に対する観測の効果を考察する際にも、場の理論が強力な手法となる。特に、基底状態における観測は、場の理論に対する境界条件として定式化できる場合がある。これを応用して、最近、2つの量子スピン鎖の間に観測によって誘起される量子エンタングルメントを境界を持つ共形場理論に基づいて解明した。このような、量子多体系の物理・量子情報・場の理論が交差する領域の研究を推進していく。



曲がった時空中における量子もつれの物理：パートナー公式の応用

パートナー公式は、量子系において着目するモードを純粋化するモード(パートナーモード)の「形」を具体的に与える方法を提供する。本研究では、地平面を伴う時空中における量子もつれ構造とパートナー公式によって得られるパートナーの空間プロファイルの振舞いに着目して、次の2つの内容を研究目標に据える：

1. 時空構造(地平面構造)と量子もつれの関係を、パートナー公式から得られるモードの形、及びそれらの重なり具合を用いて定性的かつ統一的に理解する手法を探求する。具体的には量子場における空間的局所モードに対するパートナーモードに着目し、パートナー公式を応用することで、量子もつれ構造の可視化、時空構造ともつれ構造の関係性の理解、さらにはパートナー公式を用いることで求まるパートナーモードの空間プロファイルを直接用いた情報論的諸量の評価(情報共有の構造、情報散逸の目安であるスクランプリング時間等)を行う。
2. 量子ホール(QH)系を用いた量子もつれ計測の実験提案：QH系のエッジ・モードは理想的な量子的カイラルスカラー場として実現され、場の持つ量子もつれの関与する様々な基礎実験場としての応用が期待できる。本研究では量子もつれと時空構造が関与する状況を中心として、QH系で実現可能ないくつかの量子基礎実験の提案を行う(文献[1][2])。特に、地平面を持つ時空に置



●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月から現職

いて現れるHawking輻射とそのパートナー間の量子もつれ構造を中心に据え、時空の情報量に関連する実験提案をする。これは情報損失問題の状況を、実験室内で実現して実験測定を行うことに相当する。また、量子基礎論の問題として、モードに対する時間相関とモードのプロファイルに着目し、QH系の量子場の励起を用いたレグレット・ガーグ不等式(時間方向のBell不等式)の実験提案を行う。

- [1] M. Hotta, Y. Nambu et al., “Expanding edges of quantum Hall systems in a cosmology language: Hawking radiation from de Sitter horizon in edge modes”, Phys. Rev. D, 105 (2022), 105009.
 [2] Y. Nambu and M. Hotta, “Analog de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge”, Phys. Rev. D, 107 (2023) 085002.



強結合理論と弦理論の新たな半古典領域と時空の創発

量子重力理論を定式化し、その普遍性を半古典重力理論によらず理解することを目的として研究を行っています。このために、量子重力理論に潜む、半古典重力理論とは全く異なる新たな半古典領域を探索しています。また、このような半古典領域を活用して、ニュートン定数を小さくするにつれて半古典重力理論が量子重力理論からどのように創発するかを調べています。特に、半古典重力理論は何らかの意味で量子論の古典的アンサンブル平均から発生することが知られていますが、これが超弦理論などの指導原理からどのように生まれるかを理解することが目標です。この研究によって量子重力理論に対する新たなアプローチを完成し、同時に強結合理論のより深い理解から物性理論や原子核理論へのフィードバックを可能にしたいと考えています。

私が現在特に注力しているのが場の量子論の新たな解析手法である large charge 展開と AdS/CFT 対応を組み合わせることで量子重力理論にアプローチする方向性です。Large charge 展開とは、一般に連続的対称性を持つ強結合場の理論に適用できる手法で、理論に存在する巨大電荷 Q を持つ物理量を $1/Q$ 展開で計算する手法です。一方、AdS/CFT 対応において、半古典重力理論は系の自由度 N を巨大にする large- N 極限を用いて解析できますが、large charge 展開はそのような



● 研究代表者

渡邊 真隆 Masataka Watanabe

名古屋大学情報学研究所複雑系科学専攻・助教

1992年大阪府生まれ

2019年3月東京大学大学院博士後期課程修了

2023年6月から現職

large- N 展開とは無関係に利用できるため、これら二つのシナジーによって上記の目標が達成できると考えています。

加えて非平衡系の研究も行っています。2次元重力理論である Jackiw-Teitelboim 重力理論に AdS/CFT 対応によって対応する SYK 模型と呼ばれる 1次元模型が存在します。SYK 模型は、少しの変形によって量子群の対称性を持つ double-scaled SYK 模型と呼ばれるものになることが知られています。一方、非平衡系の分野では箱玉系と呼ばれる数理論理のモデルがよく研究されており、これが量子群の対称性を持つこともよく知られています。現在、これら二つの関係を詳しく調べることで、量子重力理論に対する新たなアプローチを探索中です。



曲がった時空上の相互作用する場の赤外極限から探る極限宇宙

本研究の核心をなす学術的「問い」は、「曲がった時空の場の理論における、赤外発散の寄与に着目することで重要な物理に対する示唆を見出すこと」である。ここで具体的に 1) 宇宙論的摂動論における赤外発散の除去可能性にもとづく拡張重力理論の選別と 2) ブラックホール蒸発における場の相互作用の効果の二つの課題を追求する。

1) に関して、我々はインフレーションにおける赤外発散の問題に対する一つの答えとして、真に観測可能な量に基づく相関関数の計算手法を提示したが、分野の共通認識には至っていない。また、その中で、赤外発散を避けるためには拡張重力ではない一般相対論の枠組みの中でも宇宙論的摂動の初期条件として特別な条件を課す必要があることを明らかにしてきた。この知見を用いて、拡張された重力理論における宇宙モデルに対する制限を与えることで、我々の知見の有用性を示す。

2) に関しては、ブラックホール蒸発の物理を考える際においてもループ補正を考えると赤外発散が表れることが報告されている。このことはブレーンブラックホールが古典的に蒸発しないということとも符合すると考えられたが、その後の研究でこの赤外発散が紫外発散の適切な除去を行っていないために表れている



● 研究代表者

田中 貴浩 Takahiro Tanaka

京都大学大学院理学研究科・教授

1968年日本生まれ

1995年3月京都大学大学院博士課程修了

2014年4月から現職

ことが判明してきた。より具体的には4次元の理論において摂動論的な意味で $\lambda \phi^4$ 理論に赤外発散が存在しないことはすでにわかった。本研究では、非摂動の効果を取り入れる計算に発展させ、地平線近傍で新たな相の出現が生じないかを確かめる。新たな相が出現する場合には、地平線近傍でのエネルギー運動量テンソルの期待値の計算に拡張し、その反作用として時空のダイナミクスにどのような影響を与えるかを追求する。

これらは、曲がった時空の場の理論で扱うことのできる低エネルギーの有効場理論の枠内で、上記のような極限的な問題に迫ることを可能にする新機軸を与える課題である。



ホーキング放射で生成されるグラビトンの量子性

宇宙の構造形成を引き起こす重力源は暗黒物質だと分かっているものの、未だに直接検出されていません。最近、インフレーション後に自己重力で潰れてできる原始ブラックホールが、暗黒物質であるという説が有力になっています。本研究の目的は、原始ブラックホールからのホーキング放射の量子性を検出することです。これは原始ブラックホールからのホーキング放射を証明することにもなります。

本研究では、量子情報理論の最近の発展を、原始ブラックホールに応用し、ホーキング放射として生成される透過性の高い重力波の量子性(グラビトン)の検出を目指します。

具体的には、高次の量子コヒーレンスを検出する方法として、ハンブリー・ブラウンとトゥイスの強度干渉計を利用することを考えます。この干渉計は、振幅の相関を測定する従来のヤングの干渉計とは異なり、強度相関を測定することにより、古典論と量子論の違いを区別できるという利点を持っています。この強度干渉を粒子数の統計的な性質と結びつけることによって、実際に重力波の量子性を測定することが可能になります。この手法を、ホーキング放射に応用し、原始ブラックホールから生成された重力波が量子性を示す振動数領域を予言することを目指します。



●研究代表者

菅野 優美 Sugumi Kanno

九州大学大学院理学研究院・准教授

2006年3月京都大学大学院博士後期課程修了

2020年9月から現職

また、かつて花粉から出た微粒子が水中でブラウン運動をすることから、その周りにある水分子が間接的に発見されました。そこで、原始ブラックホールで生成されたグラビトンと相互作用する巨視的量子物体の古典化(量子デコヒーレンス)を観測することで、グラビトンを間接的に発見することを目指します。具体的には、量子制御されたマイケルソン干渉計を用いたテーブルトップ実験を想定し、その腕の端に吊り下げられたエンタングルした鏡(巨視的量子物体)が、環境のホーキング放射のノイズによって、量子デコヒーレンスを起こすことに着目します。このデコヒーレンス時間を予言し、実際に測定されれば、グラビトンを間接的に検出できたこととなります。



量子制御・量子もつれ・双対性に基づくトポロジカル相と相転移の研究

対称性によって保護されたトポロジカル(SPT)相の概念が提案されてから15年ほど経ち、その特徴付けや分類について的一般論が大きく発展しました。ボソン(スピン)系に対しては、対称性群の射影表現および群コホモロジーの考え方によって詳細な分類表が与えられました。しかし、新しく予言されたSPT相が具体例の中でどのような領域で現れ、秩序相とどのように競合し、相転移を示すのかについては、まだ大きく未開拓な領域です。

このような具体例の研究を推進するにあたり、重点を置きたい考え方が双対性です。最近、スピン梯子系を対象にスピン・カイラリティ双対性を利用することで、互いに双対な2つのSPT相と2つの秩序相が複雑に競合する相構造を見出しました。一般に双対変換によって局所的ないし非局所的に自由度を変換することで、SPT相同士、またはSPT相と秩序相を結びつけることができます。また、結びつけられた相の間の転移が自己双対点で起こり、そこでは双対変換が臨界状態の持つ対称性になりますので、臨界点の普遍性クラスを同定する鍵となります。自己双対点を含む模型を意識的に調べることで、SPT相と秩序相の競合が詳細に調べられるモデル・ケースを構築していきたいと思えます。



●研究代表者

古川 俊輔 Shunsuke Furukawa

慶應義塾大学理工学部物理学科・専任講師

1980年茨城県生まれ

2007年3月東京工業大学大学院博士後期課程修了

2019年4月から現職

また、トポロジカル状態や相転移を実現できる新たなデバイスとして、クラウド利用できる量子コンピュータにも注目しています。テンソル積状態で表現されるトポロジカル状態は、量子ゲート操作を組み合わせることで実現でき、ストリング相関などのトポロジカルな性質を特徴づける物理量を測定することができます。その際、実機特有のノイズについては、量子誤り抑制を援用することでその影響を抑えることができると期待されます。現在までにノイズを取り入れたシミュレーションにて検証を行っており、今後、実機での実証に取り組みたく思います。一次元ではストリング相関は転送行列で古典的に計算できる一方、二次元以上ではその計算は非自明であり、量子コンピュータの優位性が期待されます。

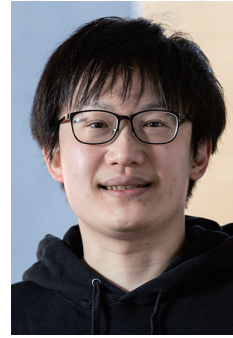


量子情報量で解き明かす量子宇宙と特異点の物理

本研究の目標は、ブラックホール内部の古典的および量子論的側面を、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。量子重力理論を定式化する方法として現在有力なものが「ホログラフィー原理(特に、AdS/CFT対応)」という考え方で、近年の進展の多くで中心的な役割を果たしてきました。一方で、ブラックホールの内側をホログラフィー原理で記述する方法はよく分かっていない点が多く、より理解を深める必要がある段階にあります。特に、「ブラックホール内部の特異点はホログラフィーの観点からどのように記述されるか」を理解することは重要な問題の1つです。

私は、この問題を理解するための第一歩として「古典的な特異点の情報は、双対な量子状態のどのような側面に反映されているか」を明らかにすることを目標に現在研究を行なっています。より具体的には、「どのような量子情報量がブラックホールの特異点をプローブできるか」という問題に取り組んでいます。このテーマは、直接的にはB班の研究テーマと関連が深い内容です。また、特異点の物理が重要になると期待



●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

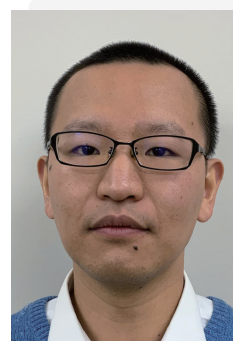
される他の状況としては、C班の研究テーマと関連がある初期宇宙が考えられます。ゆくゆくは、この問題をより広範な文脈で考えていければと考えています。

本学術変革の公募研究に採択していただくのは、ありがたいことにこれが2回目ですが、今回は新しいコラボレーションの機会に恵まれ、当初想定していなかった新しい研究の方向性を見いだすことができました。今回も上述のテーマに限らず、極限宇宙でのコラボレーションを通して、様々な観点から量子重力の問題を考えていきたいです。



テンソルネットワーク法を用いた非平衡系に現れる量子スピン液体の探索

対称性の自発破れは現代物理学における重要な概念だが、平衡系でこの枠組みに捉われない量子的現象が近年多数報告されている。絶対零度まで任意の対称性の自発破れの起こらない絶縁体である量子スピン液体はとりわけ興味深いものの1つであり、エンタングルメントがこの量子状態の特徴付けに役立つ。一方で、非平衡系で量子スピン液体に類似した状態がどう存在するかは非自明な問題であり、それを解決できると熱平衡化の機構、非平衡系における量子相転移の特徴、非平衡系でのエンタングルメントの役割に関する理解が一層深まる。しかし、現状では主に、平衡系で存在する量子スピン液体の類似物を開放量子系で厳密に構成する先行研究がわずかにあるのみである。今後、厳密な手法では取り扱えない領域を高精度数値手法で精査することが望ましい。平衡系で使用されてきたテンソルネットワーク法は量子スピン液体の探索に最適な手法の1つである。本研究では、テンソルネットワーク法により孤立量子系や Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad 方程式で書けるような散逸のある開放量子系のダイナミクスを計算することで、非平衡系に特有な量子スピン液体的な状態の探索・特徴付けを試みる。その結果を元に、これらの状態を実験で実現するためのセットアップに関する提案を行う予定である。



●研究代表者

金子 隆威 Ryui Kaneko

上智大学理工学部機能創造理工学科・特任准教授

1986年東京都生まれ

2014年3月東京大学大学院博士課程修了

2024年4月から現職

非平衡系で新奇な量子状態を探索する足がかりとして、これまでに平衡系で特異な量子状態が実現する可能性を2次元テンソルネットワーク法で探った。とくに、ブラケット型の相互作用の異方性のある正方格子SU(4) Heisenberg 模型において、異方性の強さを制御した際の基底状態を求めた。異方性が強い領域でSU(4) singlet 基底状態を、異方性が弱い領域で反強磁性 Néel 秩序と valence bond crystal 秩序が共存するような対称性の自発的に破れた基底状態を先行研究と矛盾しない形でそれぞれ見出し、異方性が中間の領域で両者の間に1次転移が生じることを確認した。これらの量子状態・相転移を冷却原子系の実験で確認する方法も提案した [1]。

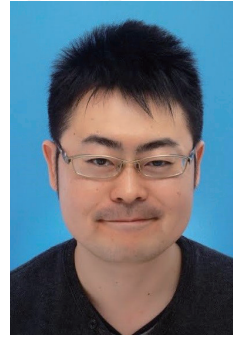
[1] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A 110, 023326 (2024).



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

「量子もつれ」は、今後の現代社会を支える量子技術の発展に欠かせない重要な概念である。物性物理の分野でも量子状態の量子もつれ特性を調べるために entanglement entropy (EE) を用いた理論研究が盛んに行われてきた。その結果、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。それゆえに実物質が持つ特異な量子もつれ特性を炙り出す実験的研究には遅れが生じていた。

そこで本研究では近年の量子情報の発展に伴い開発された、実験的に測定可能な種々の量子もつれ測度に着目する。申請者は第一期目の公募研究において三角格子磁性体における量子スピン液体とランダムネスが支配的な液体相との間の実験的識別問題への応用に取り組み、quantum Fisher information density という多体量子もつれをスピンドYNAMICSから評価することが可能な量子もつれ測度での解決法を提案した。二期目ではこの理論提案を具体的に実物質データによ



●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月から現職

て検証することが強く望まれている。またランダムネスが支配的な液体相と多体局在現象との関連性を調べることも興味深いテーマである。富岳をはじめとした大型計算機を用いて得られる大規模数値計算データと研究協力者の高精度な実物質データを組み合わせる形で、特に「ランダムネス」、「量子ゆらぎ」、「フラストレーション」などの量子もつれ特性を大きく変容しうる要素が加わった量子スピン系に現れる新奇な磁性現象に焦点を当て、その特異な量子もつれ特性を実験と理論の協奏によって明らかにする。



ハミルトニアン形式による格子QCDの新展開

本研究は、極限状況下における量子色力学(QCD)の理解、特に非平衡系および高密度系におけるQCD(非平衡QCD、高密度QCD)の理解を目指すものです。これらは、宇宙初期において、素粒子であるクォークやグルーオンのプラズマ状態から、我々の身の回りの物質を構成する陽子や中性子などのハドロンへの相転移過程や、中性子星の内部で実現されると考えられる高密度ハドロン状態の解明において、重要な役割を果たします。従来の研究では、非平衡QCD系での超短時間の熱化メカニズムや、高密度状態におけるハドロンからクォーク物質への相転移がどのように起こるかといった、多くの未解決の問題が存在します。これらの系は、非摂動的解析手法である格子QCDのモンテカルロ法が符号問題のため、うまく機能しません。符号問題とは、モンテカルロ法での経路積分の重みが複素数となり、正確な統計的平均が取れない問題です。その結果、非平衡QCDや高密度QCDのシミュレーションが困難となっています。本研究では、この問題を克服するため、ハミルトニアン形式に基づく新しいアプローチを用います。ハミルトニアン形式をコンピュータ上で扱うには、有限次元ヒルベルト空間への正則化や、ゲージ不変な物理状態をどのように構成するかといった技術的な課題があります。これに対し、我々は



●研究代表者

日高 義将 Yoshimasa Hidaka

京都大学基礎物理学研究所・教授

1977年福岡県生まれ

2005年3月東京大学大学院博士課程修了

2024年4月から現職

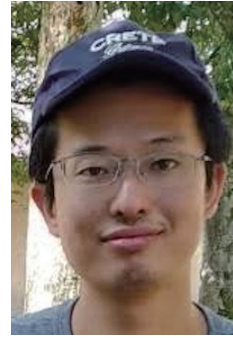
量子群変形的手法およびストリングネットワークというトポロジカルな手法を用いて、ハドロンやクォークの自由度を有効的に扱います。これにより、非平衡QCDの時間発展や高密度QCDの相構造の解析を進めることが可能となります。さらに、ハミルトニアン形式の利点として、波動関数を直接得られるため、非平衡および高密度QCDにおけるエンタングルメント構造の理解も可能となります。これらを活用することで、非平衡QCDにおける場の理論特有の熱平衡化メカニズムや、高密度QCDにおけるハドロンからクォーク物質への相転移過程における量子的性質を詳細に解析し、理解を深めることが期待されます。



素粒子模型における量子ブラックストリングの研究

ブラックホールの情報喪失問題の解決や量子重力理論の定式化は、素粒子物理学における未解決の大問題です。本公募研究は、現実の宇宙に対応する量子重力理論の定式化へと近づくため、素粒子標準模型とその拡張理論に基づく量子ブラックストリング解を探求することを目的としています。

本公募研究の具体的な目標は以下の3点にまとめられます。第一に、素粒子標準模型に基づく量子ブラックストリング解を具体的に導き、その存在を確立することです。量子ブラックストリング解は、カシミアエネルギーによる量子効果を取り入れることで存在する空間一次元に広がった物体であり、ブラックホールの中でも極限的な物体です。私は、正の宇宙項、ゼロ宇宙項、負の宇宙項を持つ場合を考察し、解を具体的に構成することを目指します。また、ホログラフィー原理を通じてブラックストリング解に対応する共形場理論を探求し、現実世界の量子重力理論の定式化に貢献することを狙っています。これにより、量子情報の観点から空間と時間の極限的な構造を理解するための理論的基盤を提供します。さらに、ブラックストリング解が初期宇宙において果たす役割や、重力波の生成に関する研究を進め、量子ブラックストリング解の宇宙論的意義を探求します。



●研究代表者

濱田 雄太 Yuta Hamada

高エネルギー加速器研究機構・助教

1989年神奈川県生まれ

2016年3月京都大学大学院博士後期課程修了

2022年4月から現職

第二に、その量子情報の性質を明らかにし、特にブラックストリングが持つエントロピーや蒸発過程に関する解析を行います。ブラックホールの情報問題は、量子情報の視点から新たな進展が見られており、この進展で得られた知見をブラックストリングにも適用することで、より深い理解が期待されます。

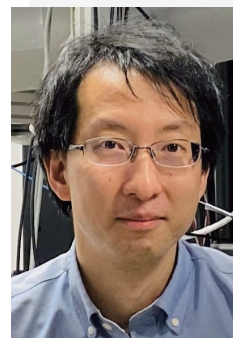
第三に、ブラックストリングがより基本的理論であるタイプIIBやヘテロ超弦理論で存在する可能性を調べます。量子重力理論の候補である超弦理論の観点からは10次元あるいは11次元の超重力理論を考えるのが自然であり、そこでの様々なブラックブレン解の可能性を調べ上げます。



冷却原子気体・量子シミュレータを用いた多体状態のエンタングルメント測定

レーザー冷却により生成された超高真空中の冷却原子気体は、クリーンかつ孤立した量子系として扱え、コヒーレント時間が長くだけでなく、原子間相互作用の制御などを含め非常に高い制御性を有しています。それ故に、冷却原子気体はハバード模型や量子スピン系などの強相関係の振る舞いを実験的に調べる量子シミュレーションのプラットフォームとして著しく発展してきました。強相関量子相を理解するためには、量子シミュレーションで実現された状態を特徴付ける測定が不可欠であり、冷却原子系ならではの様々な測定手法が開発されてきました。

近年、多体系のエンタングルメント構造が、トポロジカル秩序相やエキゾチックな量子相を特徴付ける重要な物理量であることが理論的に示唆されていますが、実験的な検証はチャレンジングな課題です。本研究では、プログラム可能な冷却原子量子シミュレータを用いて、量子スピンモデルの基底状態におけるエンタングルメント構造を、量子変分学習により実験的に明らかにすることを目指します。本研究の特長は、冷却原子系の有する高い制御性を利用して、変分ハミルトニアンのパラメータを最適化することで、エンタングルメント・ハミルトニアンを物理系の多体ハミルトニアンとして実現することにあります。エンタングルメント・



●研究代表者

素川 靖司 Seiji Sugawa

東京大学大学院総合文化研究科・准教授

1983年東京都生まれ

2012年3月京都大学大学院博士後期課程修了

2023年4月から現職

ハミルトニアンを物理系のハミルトニアンとして実現できれば、レーザー分光により直接、エンタングルメント・スペクトルを測定することも可能になります。本手法の妥当性が確立できれば、冷却原子を用いた量子シミュレーションにおいて、多体量子状態のエンタングルメント構造を決定する手法として広く適用でき、量子スピンモデルに限らず、トポロジカル秩序相におけるLi-Haldane予想の検証、多体局在状態をはじめ、様々な強相関量子相の理解と特徴付けに応用できると期待されます。



トポロジカル量子スピン液体における量子エンタングルメント

トポロジカル絶縁体の発見以来、凝縮系物理学においてトポロジーという概念が量子物性の理解に大きな役割を果たすようになった。物質中の電子のトポロジカルな性質は連続的変形の下で保持されるため不純物などの摂動に強く、例えば量子ホール効果などのマクロな量子化現象や非散逸な電気伝導が現れる。最先端の研究では、この概念が超伝導体や量子スピン系などの電子相関の強い系と結合した「強相関トポロジカル系」が焦点となっている。このような強相関トポロジカル系では長距離の量子エンタングルメントにより特徴づけられたトポロジカル秩序状態が実現する。例えば、強く相互作用する局在スピンの絶対零度においても秩序化・凍結せずに揺らいでいる量子スピン液体では、局在スピンのスピノンやマヨラナ粒子などといった本来の電子が持つ自由度とは全く異なる自由度で記述される準粒子励起へと分数化し、有限のエンタングルメントエントロピーを持つトポロジカル秩序状態が現れる。このトポロジカル量子スピン液体状態では、マヨラナ粒子やエニオン粒子などといったトポロジカル量子計算の鍵となる準粒子励起が創発するため、応用的な観点からも重要性が高い。

本研究ではカゴメ量子スピン液体候補物質の $YCu_3(OH)_{6.5}Br_{2.5}$ やキタエフ量子スピン液体候補物質 α - $RuCl_3$



● 研究代表者

末次 祥大 Shota Suetsugu

京都大学理学研究科物理学・宇宙物理学専攻・助教

1991年名古屋生まれ

2020年3月東京大学大学院博士課程修了

2020年7月から現職

をターゲットに強磁場下の磁気測定および熱輸送測定を行う。これらの実験を通してカゴメ反強磁性体の $1/9$ プラトー状態やキタエフ量子スピン液体のトーリックコード相などといったトポロジカル秩序相への磁場誘起相転移を検出し、どのようなトポロジカル秩序相を実現しているかまで明らかにする。本研究を通じて、強相関物質中の量子エンタングルメントといった新たな実験研究の舞台を開拓することを目指す。



短焦点レーザー航跡場電子加速によるウンルー効果検証に向けた高加速度場形成

慣性系からみると基底状態である真空場が、一様加速している観測者にとってその加速度に比例した温度をもつ熱浴に見えるウンルー効果が場の量子論から予想されている。加速度系から見えるウンルー効果は、等価原理から重力場のホーキング放射との深い関連性が指摘されている。しかし、ウンルー効果は現在の高周波電子加速器における 100MV/m 程度の加速度場では 1K 以下で観測が困難である。一方、それより3桁高い 100GV/m 程度が実現可能なレーザー航跡場電子加速は、長距離加速させエネルギーゲインを得るために集光強度が抑えられる長焦点光学系を用いてきたが、その検証は液体窒素温度程度以下で依然厳しい。本研究では、より高加速度場が必要となるウンルー効果検証のために、従来と異なる短焦点光学系のレーザーを用いて、局所的ながらより高い集光強度で検証が現実味を帯びる 10TV/m を超える高加速度場を実現させる方法を提案する。

レーザー航跡場による電子加速は、電子密度の疎密で生じる電場によって加速される。屈折率はプラズマ中の電子密度の関数であるため、航跡場の電子密度勾配すなわち屈折率変動はレーザー光によってプローブすることができる。 40fs の駆動レーザーのパルス幅程度で振動する電子の密度勾配を観測するためには、そ



● 研究代表者

近藤 康太郎 Kotaro Kondo

量子科学技術研究開発機構関西量子科学研究所・主任研究員

1982年神奈川県生まれ

2009年3月東京工業大学大学院博士後期課程修了

2016年4月から現職

れより短い sub-10-fs 程度のプローブレーザーが必要となる。航跡場を駆動する高強度レーザーの一部を分岐して得たプローブ光に非線形光学効果である自己位相変調を用いて波長を広帯域化し、分散補償をすることで、 sub-10-fs 程度の極短パルスプローブレーザーを得ることができる。シャドウグラフ法より電子密度変調に対して感度の高いシュリーレン法を用いた加速度場の診断系を開発し、 sub-10-fs 程度のプローブ光でレーザー航跡場の電子疎密変調を横方向から計測し、短焦点光学系で実現される高い加速度場を評価する。



受賞報告

AWARD REPORT

●2024年度 ICTP ディラックメダル

高柳 匡 氏(京都大学基礎物理学研究所・教授、「極限宇宙」領域代表)

笠 真生 氏(プリンストン大学・教授、「極限宇宙」領域アドバイザー)

本領域の領域代表である高柳匡氏(京都大学基礎物理学研究所教授)と領域アドバイザーである笠真生氏(プリンストン大学教授)が、2024年度ICTP ディラックメダルを受賞されました。受賞理由は、「量子重力と場の量子論における量子エントロピーに関する卓越した洞察」に基づくものです。特に、両氏の名を冠した「笠-高柳公式」の発見と、その後の一連の革新的な研究により「量子力学や情報理論と時空構造や重力の幾何学との間に存在する魅力的かつ深遠な関係性」を明らかにした点が高く評価されました。日本人によるICTPディラックメダルの受賞は、1986年の南部陽一郎博士以来の快挙であり、この偉業は両氏が理論物理学の発展にどれほど多大な貢献をされたかを物語っています。

「笠-高柳公式」は、ホログラフィー原理に基づき、場の量子論におけるエンタングルメント・エントロピーを重力理論における特定の曲面の面積と結びつけるものです。特に、ブラックホールの事象の地平面の面積が熱力学的エントロピーを与えるとする Bekenstein-Hawking 公式と類似していますが、古典的な情報ではなく量子的な情報が時空の幾何学的性質と関係することを示唆している点が大きな違いです。量子多体系から時空が創発するためには量子情報が本質的な役割を果たすことを明らかにしたことで、「笠-高柳公式」はホログラフィー原理の仕組みの解明に大きなブレークスルーを引き起こしました。また近年、ブラックホール情報損失問題の解決に向けて重要な役割を果たしているアイランド公式も、「笠-高柳公式」に量子重力の効果を自然な形で取り込むことによって得られたもの

です。さらに、この公式に基づきテンソルネットワークや量子誤り訂正符号とホログラフィー原理の関係性が認識され、量子重力研究に大きな発展をもたらすとともに、物性物理、量子情報を含む様々な方面へ影響を与え続けています。

思い返しますと「笠-高柳公式」の論文が出た2006年3月は、私が修士2年になる直前で、修論のテーマとして AdS/CFT 対応の勉強に取り組み始めた頃でした。4月になると高柳さんが研究室に助教として着任されて、その論文についてのセミナーを行いました。当時は今ほど素粒子論分野に量子情報理論が浸透しておらず、私がエンタングルメント・エントロピーという言葉聞いたのもこのときが初めてだったと思います。その後、幸いにも高柳さんに指導していただく機会に恵まれ、この分野を牽引される様子を間近で拝見することができました。また高柳さん、笠さんとの共同研究の機会では、お二人の分野の垣根を越えた物理に対する見識の深さと、互いの強みを引き出す連携の素晴らしさに感銘を受けました。特にお二人との議論を通して、高柳さんと笠さんの間に築かれた信頼関係とその温かな人間性を感じました。異なる専門分野を背景に持ちながら、互いを尊重し、それぞれの視点を統合することで、新たな知見を創出していく姿勢は、私を含め多くの研究者に大きな刺激と励みとなっています。

改めて、高柳氏と笠氏のご受賞を心よりお祝い申し上げますとともに、お二人のますますのご活躍と、本領域のさらなる発展を祈念いたします。

(文責：西岡辰磨)

DIRAC MEDAL 2024

Abdus Salam with P.A.M. Dirac
Cambridge University, 1965

ICTP The International Centre for Theoretical Physics
IAEA UNESCO

$S_A = \text{Min}_{\Gamma_A} \left[\frac{\text{Area}(\Gamma_A)}{4G_N} \right]$
[笠-高柳 2006]

プラシク長 ベル状態

図左：2024年度 ICTP ディラックメダル受賞者アナウンスページより (<https://www.ictp.it/news/2024/8/ictp-announces-2024-dirac-medallists>)。右から2人目が笠氏、右端が高柳氏。図右：笠-高柳公式。



テンソルネットワークとダイアグラム

極限宇宙では量子情報分野の発展を媒介にした素粒子・宇宙・物性などの多様な物理分野にわたる融合研究の展開をめざしていますが、その交点に位置する重要なキーワードの一つが、テンソルネットワーク(TN)です。TNとは、ひとことで言ってしまえば、非常に多くの自由度が複雑に絡み合う量子多体状態を、小さなテンソルに分解・ネットワーク状に再結合して表現する系統的な記述法、および、その近似的な数値計算技法を指しますが、異分野融合のキーワードということは、その説明の切り口も色々あるということになります。TNにおける最適化と量子エンタングルメントの関係や基本的なテンソルの操作については、すでに十分な解説[1]やパッケージ[2]等もあることから、ここでは、スタンダードなものとは少し異なる観点からその理論構造を論じてみたいと思います。

TN法の解説を開くと、理屈より先にまず目に飛び込んでくるのが、多様なダイアグラムだと思えます。図1はいくつかの典型的な例になりますが、 $1+1$ 次元系なら行列積状態(MPS)、 $2+1$ 次元ならPEPS/TPSとか呼ばれる状態、 $1+1$ 次元の量子臨界系なら階層構造をもつMERAがよく見かけるものだと思います。個々の色付シンボルがテンソルを、そこから延びる脚がそのテンソルに係る自由度を表しています。これらの例では、基本的に対象となる量子多体系の性質や格子の形状を反映したネットワーク構造を持ちますが、TNを量子計算の古典計算機による近似計算に用いる場合は、一般に、そのネットワーク構造は複雑になることが多いです。いずれにしても、複雑に絡み合うテンソルの脚の縮約を、テンソルの間の結線により直感的にとらえられるので、ダイアグラムは大いにTNの理解の助けになるとともに、ミスの混入防止にも役立ち、広く用いられるようになりました[3]。ただし、適当に分解するだけでは計算精度を担保できる良いTNにはなりません。量子多体系や量子回路に埋め込まれたエンタングルメントを指標にネットワーク構造やテンソルの最適化を実装する必要があるのですが、図中の例に対しては多くの人の検証を経た定評のあるアルゴリズムが構成されています。

さて、一方で、理論物理学において、似たようなダ

イアグラムを使って効率よく計算を行うツールとして、やはりファインマン図形を避けて通ることはできません。とくに量子多体問題においては、複雑な摂動計算の一般項を規則に従って図形を並べることで視覚的に表すことができるとともに、その図形の個々のパーツも粒子の伝搬や散乱を表すので物理的な意味も非常に掴みやすくなります。非摂動効果が強調される場面も多いですが、それでもファインマン図形を使った物理的プロセスの理解は、量子多体系の記述に基本的な役割を果たしてきたといえます。ファインマン図形もTNのダイアグラムも、複雑な多体効果を系統的に記述するために便利に用いられているわけですが、違いはどこにあるのでしょうか？両者を対比しながら考察することは、TNの特徴を理解する上で大変有益です。

まず、ファインマン図形の方ですが、これはハミルトニアン(もしくはラグランジアン)を書き下せば、その非摂動項と摂動項の関係ですべての図形が自動的に規定されてしまいます。非摂動項が自由粒子で、その相互作用による散乱とそれを繋ぐ伝搬関数の組み合わせで図形を表し、相関関数という期待値レベルの物理量を計算することが通常です。さらに、Wilson型くりこみ群では高エネルギーのモードの部分和を取りながら徐々に作用を変形し、エネルギースケールに応じた準粒子や有効相互作用の表現を追いかけていきますが、現れる図形という意味では、結局、準粒子描像にもとづいた表現で、「粒子の相互作用項→対応する図形」の順で規定されてしまうことになります。すなわち、図形中にTNと同様なパーツが並びますが、ネットワークの形状そのものは自由に操れるわけではありません。また、くりこみ群変換の中には、基底を組み替える際に変分的要素が入らないことも押さえておくべき点です[4]。

TNでは上記の順序が逆転します。まずネットワークを準備し、その後でネットワーク中の個々のテンソルを変分最適化することになります。例えばMPSや、より一般に樹状テンソルネットワーク(TTN)では、波動関数を特異値分解することで得られる特異値を指標として“最良”な基底を系統的に構成することが可能です。特異値分解を用いたやり方は部分系間のエンタ

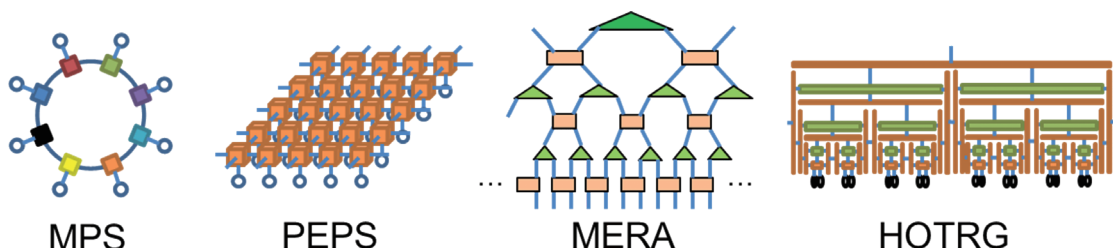


図1：典型的なテンソルネットワーク図形の例

グルメントエントロピーの最大化と言い換えることもできます。ネットワーク中の各所で最適な基底が変遷するため“粒子の散乱”のような直感的に分かりやすい表現になりませんが、特異値が部分系の間にもたがベル対のおおよその分布に相当することから、量子情報分野との関係性がより明確になります。さらに、図2のように、テンソルを部分的にくり抜いたテンソルネットワークを裸のスピンから穴に現れる補助自由度への変換 U とみなすと、ハミルトニアン H に対する固有値問題を、有効ハミルトニアン \tilde{H} と、くり抜いた穴にはまる“波動関数テンソル” $\tilde{\Psi}$ の変分問題に書き換えることができます。このため、TNにはくりこみ群的な粗視化された補助自由度への変換という思想が常につきまといまふ。実際に密度行列くりこみ群(DMRG)では \tilde{H} の対角化を経由して U を逐次的に構成したため、“RG”が冠された経緯があります。しかし、スケール変換をとまなう Wilson 型くりこみ群変換として解釈するには、ネットワークに階層性が必要です。図1中のMPSでは、ネットワークが線形に延びるだけでスケール性は変わらないので、Wilson 型のくりこみ群と直接的な対応をつけることはできません。DMRGの初期ではこの点についての理解が不十分だったため混乱が生じました。一方で、MERAやHOTRGはスケール階層性のあるネットワークを持つため、固定点テンソルのスペクトルを解析することでスケール次元等も系統的に評価できます[5]。いずれせよ、見たい物理を表現するために柔軟にネットワークの形を選んだうえで、個々のテンソルの変分最適化を行い、最良な表現基底を実装できる点が、TNが本質的に優れた非摂動論的手法といえる所以です。

以上、ファインマン図形とTNのダイヤグラムを対比して紹介してきました。既存のネットワーク構造がおもに経験的に構成されたのに対し、今後は、最適ネットワーク構造の決定原理の解明が重要になると考えられます。実際にTTNレベルではエンタングルメントエントロピー最小化原理を使った最適ネットワークの構

成アルゴリズムが提案されています。また、ネットワーク = 離散系の幾何学です。量子重力との対応という意味においてもTNの構造最適化は鍵になると考えられます。一方で、TN法はファインマン図形のような粒子的描像によるシンプルな物理過程の理解にはあまり向いていません。図2の $\tilde{\Psi}$ から延びる脚を眺めてもその意味が直ぐに汲み取れることは稀です。改善のためには、TNダイヤグラムとファインマン図形と関係性の解明は必要と思われまふが、まだ系統的な考察は少ないようです。両者とも近似が入らなければ厳密な量子多体系の表現です。その統合的な理解は物理学にとっても重要になるのではないかと予想しています。

- [1] 例えは U. Schollwock, Ann. Phys. **326**, 96 (2011), K. Okunishi, H. Ueda, T. Nishino, J. Phys. Soc. Jpn. **91**, 062001 (2022). “Density Matrix and Tensor Network Renormalization” T. Xiang, Cambridge Univ. Press (2023) など。
- [2] 代表的なパッケージとしては、ITensor, TeNPy, TeNeS(国産) などがある。ネットで検索すればよい。
- [3] 初めてTNにダイヤグラムを用いたのは西野、阿久津、筆者らで、1995年頃です。ただし、イジング模型のようにサイト共有型表現だったので広くは流通しませんでした。量子多体系には、辺共有(パーテックス)型表現の方が都合良く、現在はこちらの流儀が一般的です。また、量子多体系分野ではテンソルの脚をくりこまれた補助自由度と解釈しますが、量子情報分野では同じ補助自由度を実効的なベル対と解釈することが多いようです。
- [4] ハバード・ストラトノビッチ変換により有効的な準粒子に書き換えることも多いですが、有効作用の形自体は物理的洞察による決め打ちで、現れる図形も基本的に固定されてしまいまふ。ただし、準粒子基底は自己無同着に決定するので、(おそらく紫外極限での)変分最適化が入り込んでいまふ。
- [5] 有限の補助自由度数で求めたスケール次元の精度は、スケール階層性に加えてネットワーク形状の詳細に依存しまふ。例えはHOTRGのようなTTNでは階層性を持ちまふが、その指数は古典的です。1 + 1次元のMERAはそのループ構造によりエンタングルメントエントロピーの対数補正を満たし、臨界現象を正しく記述できます。

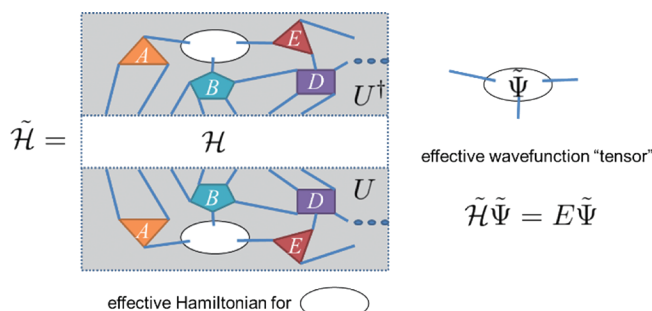


図2：穴あきテンソルネットワークとくりこまれた有効ハミルトニアン固有値問題



● 執筆者紹介
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



● 第4回領域会議

2024年9月25 - 28日, 大阪大学南部ホール+オンライン

第4回領域会議は、2024年9月25日から28日にかけて大阪大学南部ホールで開催されました。会場には約100名の領域メンバーが、オンラインでは領域内外から約40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、講演後やコーヒープレイクなどを利用して活発な議論が行われました。

25日の冒頭では、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。

今回の会議では8つの研究計画班の代表者がはじめに約15分の研究成果を報告した後、各班のメンバーによる約45分のセミナー講演が行われました。成果報告では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。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。

セミナーの内容は以下の通りです。森前智行(A01, 京大基研)は、量子暗号理論と古典暗号理論の違いを紹介し、pseudo random state generation, one-way state generator, EFI pairの間の関係性と、量子暗号理論の物理への応用について議論しました。重森正樹(B01, 名古屋大)は、ストリング理論におけるエンタングルメントエントロピーとブラックホールエントロピーの関係性について議論しました。山本大輔(B02, 日大)は、spiral quantum state tomographyを用いた量子多体系のエンタングルメントエントロピーの測定法に関する成果を発表しました。前田健吾(B03, 芝浦工大)は、ホログラフィー原理を用いたAdS時空の不安定性に

関する研究を報告しました。疋田泰章(C01, 京大基研)は、3次元AdS時空上の張力のない弦を用いたAdS/CFT対応の証明を説明しました。米倉和也(C02, 東北大)は、場の量子論と弦理論におけるアノマリーに関する成果を報告しました。泉圭介(C03, 名古屋大)は、マクスウェル場のある重力理論における面積不等式に関する研究を紹介しました。本多正純(D01, 理研)は、量子宇宙論におけるリサージェンス理論の応用に関する研究を発表しました。奥西巧一(D02, 新潟大)は、双曲空間上のIsing模型とホログラフィー原理の関係性についての研究成果を紹介しました。

また、公募研究班全22名が15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。25日と27日には計33名によるゴングショーとポスター発表も行われました。ポスドク研究員に加え、多くの大学院生も発表を行い、ポスター会場では各所で熱気のある議論が交わされていました。

28日には、異分野交流を促進する新たな試みとして、パネルディスカッションが行われました。パネルディスカッションでは、各分野から選ばれた5名のパネリスト(中田芳史(A01, 京大基研)、宇賀神知紀(B01, 立教大)、中島秀太(B02, 阪大QIQB)、棚橋典大(C03, 京大)、上田宏(D02, 阪大QIQB))が中心となり、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について意見を交わしました。

最後のセッションでは、アドバイザーの細谷暁夫氏(東工大)および井元信之氏(東大特命教授)から、本領域の研究および弱値や多分割エンタングルメントエントロピーなどの関連性や展望と、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:西岡辰磨)



領域会議の集合写真

● 領域国際会議 “Quantum Extreme Universe: Matter, Information and Gravity”

2024年10月21 - 25日, 沖縄県恩納村 OIST

2024年10月21 - 25日の5日間で国際会議を開催しました。国内外から160名を超える参加者が一同に集まり、量子情報、量子重力、そして量子物質に関連する最新の成果発表および活発な議論が行われました。この会議は沖縄県恩納村にある沖縄科学技術大学院大学(OIST)で開かれました。OISTでは優れた若手研究者の育成を目指し毎年OIST主催のワークショップを開催しており、今回の会議はExUとOISTの共催として運営されました。

口頭講演は合計50件(招待講演24件、一般口頭講演26件)、またポスター講演も69件ありました。そのトピックはブラックホール、ホログラフィー、量子カオス、量子コンピューティング、冷却原子、格子QCD、エンタングルメントおよびその実験的検出など多岐に渡り、これら全てに精通している人はそういないと思われます。それでも会場となったシドニー・プレナールルーム(定員150名)は、初日の朝から立ち見の人が現れるほど盛況で、またオンライン聴講希望者も100名を超えており、それ故にたとえ講演中であつたとしても講演者と聴講者の間で質疑応答が活発に行われていたのが印象的でした。

またセッションの間に設けられたコーヒープレイクやランチタイム中に多くの方々がコーヒーやスナックを片手に、会場前に用意された黒板の前などで熱い議論を交わしていたことも触れておきたい点です。異なる分野の方の講演を理解することは非常に難しく、しばしば基本的な用語の意味やコンセプトに立ち返る形で講演者の協力の下で講演内容を丁寧に紐解いて行く作業が必要となります。この作業を行う時間も十分に設けられていたこともこの会議の特色で、私自身も参加者の1人として異分野の方々との議論を存分に楽しむことが出来ました。

数多くある講演の中で、個人的には特に multi entropy

や tripartite entanglement などの新しい量子もつれ測度の最近の発展とその応用に強く興味を惹かれました。これらの測度を用いた量子多体系研究はそれほど多く行われていないため、今後は異分野間での更なる共同研究に繋がる機運を強く感じました。まだまだ理解出来ていない点は多いのですが、本会議で得られた知見を自身の研究にも活かして行きたいと思います。

会議3日目の午後にはエクスカージョンとバンケットが設けられました。エクスカージョンの選択肢は恩納村の美しい海と珍しい魚を鑑賞出来るブセナマリンパークコース、沖縄の文化と歴史を感じ取ることが出来る琉球村・座喜味城コース、そして沖縄のトロピカルな植生が楽しめる石川岳ハイキングコースの3つです。少し天気が下り坂となったようですが、参加者は道中で議論の続きもしながら思い思いにそれぞれのコースを楽しんだと聞いています。バンケットは名護市にあるオリエンタルホテルで行われ、沖縄料理をベースとした美味しい食事が振舞われ、参加者同士の親睦を更に深めてくれたと思います。この会議をきっかけとした沢山の新しい共同研究が芽生えれば世話人の1人としてとても嬉しいです。

最後に今回の会議の運営に携わって頂いた私以外の世話人の方々、そして現地で裏方として絶え間なく働いて下さったOISTのworkshop sectionおよびQubits and Spacetime Unitの方々にお礼を申し上げたいと存じます。

なお口頭講演を録画したものが会議website上で公開されているのでまた聞き直してみたい方々はご参考にしてください。<https://groups.oist.jp/exu-oist/recorded-talks>

(文責：下川統久朗)



写真1：会議初日の様子



写真2：エクスカージョンの様子(ブセナマリンパーク)

(写真提供 左：宮崎優希氏(青山学院大)

右：尾崎壮駿氏(東大))





● 第6回領域スクール & 第3回領域若手研究会

2024年9月12 - 15日, 北海道グランドパーク小樽

日本物理学会年次大会の直前に、第6回領域スクールと第3回領域若手研究会を開催しました。今回のスクールでは、領域外から難波亮氏(理研)をお招きし、領域メンバーの中田芳史氏(京大基研、A01班)、野海俊文氏(東大、B01班)、金子隆威氏(上智大、E02班)の3名の講師を加えて、下記の講義を行っていただきました。今回の講義ではスクール参加者を若手(学生、及び、博士研究員)に絞ることで、各分野の基礎的なことについての質問しやすい雰囲気を作り、他分野の基礎を若手のレベルに合わせて学べる環境を整えました。この目的のため、あえてオンライン配信は行わないことにしました。その結果、スクール参加者と講師が濃密に議論しあえる場を提供することができました。4名の講師に加え、約70名の若手が参加しました。今回のスクールでは、各講師に1時間の講義を2コマ行っていました。講義はすべて英語で行われました。

難波亮氏(理研)の講義「Introduction to cosmology - How do we “sense” our Universe?」では、宇宙論の基礎について講演をしていただきました。前半の講義では、一般相対性理論の説明から入り、その後、宇宙膨張について観測の歴史とそれを支える理論についての解説をしていただきました。後半の講義では、宇宙マイクロ波背景放射の観測の歴史と理論的發展についての説明をしていただきました。その後、重力波に関して、ブラックホール合体により生じる重力波の観測と、今後の重力波観測計画についての概略を説明していただきました。

中田芳史氏(京大基研、A01班)の講義「Introduction to Quantum Information Theory」では、量子情報理論の基礎について講演をしていただきました。前半の講義では、量子情報理論を形作る公理系の説明をしていただきました。各公理の数理的表現と、それらの公理がもつ物理的意味について解説していただきました。後半の講義では、量子情報分野でどのような研究が行われているかについての具体的なイメージを掴むために、量子計算や量子通信、量子暗号、物理との関係分

野における研究課題を概観していただきました。

野海俊文氏(東大、B01班)の講義「AdS to dS」では、ド・ジッター時空中の理論と反ド・ジッター時空中の理論の関係性について講演をしていただきました。まず、ド・ジッター時空と反ド・ジッター時空の幾何学的構造と対称性についての説明をしていただきました。その後、ド・ジッター時空中の量子論のレビューを行い、宇宙初期インフレーションとの関係性の説明がありました。最後に、ド・ジッター時空中と反ド・ジッター時空中の理論の類似性、及び、違いについて解析していただきました。

金子隆威氏(上智大、E02班)の講義「Condensed matter physics: from magnetism to quantum spin liquid」では、遍歴電子系や局在スピ系に現れるフラストレート磁性体や量子スピン液体についての講演をしていただきました。前半の講義では、結晶中の電子を第二量子化することで得られるハバード模型の概観から始め、平均場近似や強結合極限近似を用いたハバード模型の解析法を紹介していただきました。後半の講義では、キタエフ・ハニカム模型を用いた具体的な解析手法について解説をしていただきました。

領域スクールに加えて、第3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設け、異分野間の共同研究のきっかけを作ることを目指としています。今回は約70名が参加し、若手の交流が行われました。ポスター発表では、若手同士の交流に加え、スクールの講師の方々に、若手へ個々に研究のアドバイスをしていただきました。ポスター発表時以外にも、懇親会に加え、昼食・夕食などの時間にも、参加者同士の交流がありました。

最後に、泉(スクール・若手研究会世話人代表、C03)がスクールと若手研究会の総括コメントを行い、第6回領域スクールと第3回領域若手研究会の閉会となりました。

(文責：泉圭介)



写真1：難波亮氏による講義の様子



写真2：集合写真

●日本物理学会 領域共催シンポジウム

「量子多体系におけるダイナミクス研究の進展： 極限宇宙の物理法則を探る」

2024年9月17日、北海道大学

日本物理学会 第79回年次大会でこのたび領域1、3、8、11合同で、本プロジェクト共催のシンポジウムを企画した。領域の主テーマの一つである量子ダイナミクスについて、物性の観点から最近どのような取組が行われているかを総括して紹介しようという趣旨である。

最初に求氏から、量子リザーブローピングの研究の紹介があった。これは量子リザーブ計算(ニューラルネット)の逆を行く考えで、系の端をいじることでクエンチダイナミクスにおいて系の情報が時間とともに伝播していく様子を可視化することができるという提案だった。多くの聴衆に目新しく刺激的だったようで、後ほど著者の大学院生からも反響が大きかったと聞いた。次いで基礎論の観点から森氏が熱化と長時間緩和の特徴づけについて明解な話が展開され、若手研究者が楽しんでいる様子が見えた。原田氏と金子氏は量子系のダイナミクスの計算手法の最近の発展を、特に原田氏には私のリクエストに応じて周辺分野の研究の解説もしていただいた。このあたりの話をまとめて聞く機会はなかなかないため、量子ダイナミクスを触ったことがある理論研究者にとっては貴重な情報だったと思う。休憩をはさんで、田村氏が2次元ボーズ原子気体をボックスに閉じ込めたときに、実際にどのような構造が実験的に観測されるのかの話があった。実体のあるダイナミクスの画を見せてもらったのは特に印象的だった。また山本氏と小沢氏の実験理論ペアで、量子トモグラフィに関するon-goingな研究のエッセンスが紹介された。これはスパイラルスピン演算子の期待値をいくつか観測し、そのスパースな観測情報から、本来ならば膨大な情報をもとにしか得られない密度行列を再構築するという考え方である。

量子多体状態を構築しその性質を見たり時間発展を追ったりする際に、どれくらい簡便かつ物理的にリーズナブルに必要な情報を減らせるかがボトルネックとなる。特に有限温度やダイナミクスでは、系を特徴づける量子相関あるいはエンタングルメントが急激に増大していく中で、何らかの手立てなしにまともな計算をすることは容易ではない。物性の問題の多くは実は単純な近似でうまくいくことも多いのだが、一方で未解決の難題や、現代的な量子論的な問題を物性で扱おうとしたときには、避けては通れない課題である。誰もが参加できる学会シンポジウムで、まとまった話がきけたことは私自身も刺激になったし、何より盛況で聴衆の年齢層が若く、大学院生、若手から多くの質問がでて活発に盛り上がり休憩時間が無くなりかかってしまったこと、楽しく講演していただけたことを含め、この企画をしてよかったと思った。企画段階で相談に乗っていただいた手塚さん、山本さんにもお礼申し上げる。(文責：堀田知佐)

●大学院生向けスクール

「場の理論の新しい計算方法2024」

2024年12月17 - 20日、東京大学駒場IIキャンパス + オンライン

2022年・2023年に引き続き、極限宇宙D01班主催のスクール「場の理論の新しい計算方法2024」を、今回は東京大学駒場IIキャンパスで開催しました。大学院生・ポストドクを主な対象としていますが、スクールのシリーズであるためかトピックが高度化してきており、今回はやや玄人向けの話が多かった印象です。

参加者は現地が25名、オンラインは約30名でした。様々な媒体を通じて告知したこともあり、参加者のバックグラウンドは素粒子論・物性理論・実験にまたがる多様なものとなりました。

講師は中田芳史さん、永野廉人さん、古川俊輔さんにお願しました。中田さんには、ブラックホールから量子情報を取り出す仕組みをモデル化した「ハミルトニアン系の Hayden-Preskill プロトコル」の解説をしていただきました。中田さんは自身の教科書でも Hayden-Preskill プロトコルを扱っており、講義では独自の視点から直観的な解釈を示されました。永野さんには、量子回路を用いて構築したコスト関数を用いて機械学習を行う「量子機械学習」について入門的な内容を分かりやすく解説していただきました。永野さんが素粒子物理国際研究センターで行なっている、量子機械学習や場の理論の量子シミュレーションに関する研究を踏まえた内容でした。古川さんには「量子多体系における測定と場の理論」というテーマで講義をしていただきました。いくつかの関連するトピックによる準備を経て、実験系やスピン模型での測定結果を境界のある共形場理論で記述する理論をわかりやすく説明されました。また、松本祥さん、鄭潤賢さん、古川裕貴さんによる一般講演も行われました。

広い分野にまたがる発展的な内容の講義・講演となりましたが、活発な質疑応答や議論がなされ、参加者にとって大きな刺激となったようです。スクールが今後の研究に役立つことを期待しています。

(文責：奥田拓也)



中田芳史氏による講義の様子



2024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24回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年4月19日

講演者: Robert Koenig教授(Technical University of Munich)

タイトル: Quantum fault-tolerance and locality



第25回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年5月13日

講演者: Robert Wald教授(University of Chicago)

タイトル: The Entropy of Dynamical Black Holes



第26回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年7月10日

講演者: 柚木 清司 教授(理化学研究所)

タイトル: Quantum many-body dynamics in digital quantum computers



第1回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年10月16日

講演者: 寺師 弘二 教授(東京大学)

タイトル: Quantum Algorithm and Qubit Technology Applications for Particle Physics



第2回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年12月20日

講演者: Roberto Emparan教授(University of Barcelona)

タイトル: Quantum Black Holes as Holograms



第3回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年2月6日

講演者1: 田崎 晴明 教授(学習院大学)

タイトル: Haldane conjecture, valence-bond picture, SPT phases, and all that in quantum spin chains

講演者2: 押川 正毅 教授(東京大学)

タイトル: Symmetry-Protected Topological phases and Duality



第4回公開極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2025年3月8日

講演者: Geoffrey Penington氏(University of California, Berkeley)

タイトル: What's inside a black hole?



● 領域セミナー

第21回領域循環ミーティング

開催日: 2024年4月21日

講演者1: 桑原 知剛 氏(RIKEN)

タイトル: Clustering of conditional mutual information and quantum Markov structure at arbitrary temperatures

講演者2: 若桑 江友里 氏(名古屋大学)

タイトル: Exact exponent for atypicality of random quantum states

第22回領域循環ミーティング

開催日: 2024年5月24日

講演者1: 村田 佳樹(B03)

タイトル: Quasinormal mode spectrum of the AdS black hole with the Robin boundary condition

講演者2: Nicolò Zenoni(B01)

タイトル: Multipartite information in (sparse) SYK

第23回領域循環ミーティング

開催日: 2024年7月23日

講演者1: 高柳 匡(C01)

タイトル: How do we feel holography in Quantum Systems?

講演者2: 杉本 茂樹(C01)

タイトル: On holographic unification of meson and photon

講演者3: 奥山 和美(C01)

タイトル: Recent developments in double-scaled SYK

第24回領域循環ミーティング

開催日: 2024年10月10日

講演者1: 堀田 昌寛(C02)

タイトル: Tutorial Talk

講演者2: 水上 雄太(E01)

タイトル: Bulk detection of topological phases in quantum spin liquids

第25回領域循環ミーティング

開催日：2024年11月5日

講演者1：小林 努(C03)

タイトル：Tutorial on quantum fluctuations from inflation

講演者2：田中 貴浩(E02)

タイトル：g δ N and extended δ N formalism

第6回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2024年11月7日

講演者1：沼澤 宙朗(E02)

タイトル：Sine Square Deformation (SSD) and Möbius deformations

講演者2：川畑 幸平(E02)

タイトル：Non-Hermitian Topology in Hermitian Topological Matter: Wannier Localizability and Detachable Topological Boundary States

第26回領域循環ミーティング

開催日：2024年12月23日

講演者1：本多 正純(D01)

タイトル：Introduction to fracton topological phases

講演者2：中西 泰一(D01)

タイトル：Foliation Matter Phase and Godbillon-Vey Invariant

第7回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2024年12月24日

講演者1：尾張 正樹(E01)

タイトル：On algebraic analysis of Baker-Campbell-Hausdorff formula for Quantum Control and Quantum Speed Limit

講演者2：高木 隆司(E01)

タイトル：Virtual quantum resource distillation

第27回領域循環ミーティング

開催日：2025年1月21日

講演者1：桂 法称(D02)

タイトル：Frustration-free systems and beyond

講演者2：尾崎 壮駿(D02)

タイトル：Disorder-free Sachdev-Ye-Kitaev models: Integrability and a precursor of chaos

第28回領域循環ミーティング

開催日：2025年2月17日

講演者1：森前 智行(A01)

タイトル：Quantum cryptography without one-way functions

講演者2：早川 龍(A01)

タイトル：Quantum computational complexity in the analysis of topology of higher-order networks

第8回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2025年3月11日

講演者1：渡邊 真隆(E02)

タイトル：SYK model and interacting particle systems

講演者2：濱田 雄太(E02)

タイトル：Investigating 9d non-supersymmetric branes/strings from supersymmetric strings

●研究会&ワークショップ

iTHEMS-YITPワークショップ：

Bootstrap, Localization and Holography

開催期間：2024年5月20日-24日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

研究会“理論で迫るブラックホール宇宙と時空特異点”

開催期間：2024年8月16日-18日

開催場所：琵琶湖コンファレンスセンター

第3回領域若手研究会、及び、第六回極限宇宙スクール

開催期間：2024年9月12日-15日

開催場所：北海道グランドパーク小樽

第4回「極限宇宙」領域会議

開催期間：2024年9月25日-28日

開催場所：大阪大学

Focus Week on Non-equilibrium Quantum Dynamics

開催期間：2024年9月30日-10月4日

開催場所：Kavli IPMU



極限宇宙国際会議

“Quantum extreme universe : matter, information and gravity”

開催期間：2024年10月21日-25日

開催場所：OIST, 沖縄

第二回一般相対論と幾何

開催期間：2024年11月18日-19日

開催場所：名古屋大学

The 33rd workshop on general relativity and gravitation in Japan

開催期間：2024年12月2日-6日

開催場所：近畿大学

場の理論の新しい計算方法2024

開催期間：2024年12月17日-20日

開催場所：東京大学

Recent Developments in Black Holes and Quantum Gravity

開催期間：2025年1月20日-24日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

SUPERGRAVITY

開催期間：2025年2月12日-13日

開催場所：大阪工業大学

Quantum Gravity and Information in Expanding Universe

開催期間：2025年2月17日-21日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所



● 報告者

宮下 翔一郎 Shoichiro Miyashita

国立東華大学理工学院物理学科 博士研究員 (C01)

受入教員 Stanford Institute for Theoretical Physics, Stanford University, Leonard Susskind 教授

受入期間 2024年11月7日～2024年11月21日

AdS/CFT 対応に代表されるように、ホログラフィ原理は時間的境界がある時空の量子重力に対する理解を深めるために有用な考え方です。例えば、笠-高柳公式は境界理論の量子エンタングルメントが半古典時空の幾何と関係していることを明らかにしたり、ブラックホールの情報損失問題に関しても、ページ曲線をバルク側で導出する際にホログラフィが重要な役割を果たしたりしました。しかし、現実の宇宙には時間的な境界は存在しないと思われるため、ホログラフィ原理という強力な道具を、我々の宇宙の量子論的性質を探ることに用いることができるかはよく分かっていません。そのような道具が我々の宇宙の理解に全く役に立たないとするのは、不自然だと考える研究者も多く、これまで我々の宇宙、もしくはそのトイモデルとして dS 時空にホログラフィを適用しようとする試みが数多くされてきました。

近年、Stanford 大学の Leonard Susskind 氏は、低次元 dS 時空 (dS) と無限温度で double scaling 極限を取った Sachdev-Ye-Kitaev モデル (DSSYK ∞) とのホログラフィック対応「dS/DSSYK ∞ 対応」を提唱しました。これは、dS 時空の static patch のホライズンを近似的な時間的境界とみなし、そこに境界理論である DSSYK ∞ が存在するとする予想です。AdS/CFT 対応のように確立した対応関係では現状まだありませんが、dS のホライズンを時間的境界とした場合に期待される hyperfast scrambling や、dS 時空の半古典極限を取った際に起こる separation of scales など、dS 時空のいくつかの性質が、DSSYK ∞ の性質と非自明に整合的であるという点で注目されている対応関係です。現在、私はこの対応関係に興味を持っており、Stanford 大学に滞在している関野恭弘氏、および立教大学の北村比孝氏と共同研究しています。

今回の滞在では、dS/DSSYK ∞ 対応の提唱者である Susskind 氏と直接議論することで、考え方や計算手法を学び、研究を推進することを目的として、Stanford 大学に 2 週間の研究滞在をしました。今回の滞在のほとんどの時間は、Susskind 氏、Stanford 大学の Adel Rahman 氏、関野氏、北村氏との議論に費やし、考え方や計算手法を学びつつ、dS/DSSYK ∞ 対応を確立するための課題について話し合いました。主に議論した内容は、「相関函数の対応関係」と「QCD と DSSYK ∞ の類似性」についてです。前者については、通常の AdS/CFT 対応のような相関函数の対応関係がまだ分かっていないため、それがどのようなものなのかを検討しました。対称性に関する議論から、(複素) DSSYK ∞ 側の電荷の相関函数と、バルク側で 3 次元

dS 中の有質量ゲージ場の相関函数が対応すると期待されていましたが、実際には一致しないことが確認されました。これまでは、バルク側は 3 次元 dS の s-wave セクターだと考えられていましたが、この不一致は、3 次元 dS の s-wave セクターの仮定を棄却し、2 次元ディラトン dS を対応させる必要があることを示唆しています。2 次元ディラトン重力では、有質量ゲージ場とディラトンの結合は一意に決まらないため、その自由度を用いることで DSSYK ∞ 側の相関函数と一致させられる可能性がある、という結論に至りました。後者については、Susskind 氏が一昨年論文で提唱した large N QCD と DSSYK ∞ の類似性をより正確にし、dS/DSSYK ∞ の理解を深めることを目的としました。先の論文での議論を推し進めた結果、Rindler 時空での有限温度 QCD のダイナミクスと、dS 時空でのダイナミクス、および DSSYK ∞ のダイナミクスに対応関係がある可能性が浮かび上がりました。また、それに関連して、DSSYK ∞ で $O(N)$ singlet の演算子が、dS/DSSYK ∞ の文脈において dS 時空中を伝播する自由度に対応すると予想され、矛盾なく対応するかを現在確認しています。

また、CFT に TTbar 等の変形を施した場の理論と、境界が無遠慮ではなく、ある cut-off された位置にある重力理論のホログラフィについて研究している Eva Silverstein 氏とも話をする機会があり、現在私が行っている cut-off AdS に関する研究について議論しました。Cut-off AdS 側の分配函数の計算が、TTbar 変形した CFT と cut-off AdS の対応において、現在 UV cutoff として認識されている “shock singularity” を超えた領域にも対応が存在する可能性を示唆していることがわかりました。この点についても、現在その方向性で研究を進めています。

最後になりましたが、本滞在を勧めてくださった関野氏、本滞在を受け入れてくださった Susskind 氏、そして海外若手派遣プログラムを通じてこのような機会をくださった高柳匡氏をはじめ、本学術変革領域研究のオーガナイザーの方々、および事務手続きを担当してくださった岡崎淳子氏に深く感謝申し上げます。



写真 1 : Stanford 大学構内



量子の「状態」を螺旋(らせん)で解き明かす

物体の「状態」を測定するとはどういうことか。例えば、走る車の状態を知るには、速度を測るのが一つの方法だ。車が静止しているのか、時速60キロで走っているのか、それとも時速120キロか。速度は車の状態を決める重要な要素である。さらに、車が現在どこを走っているのか、つまり位置もまた状態の一部である。車の状態は速度や位置だけでなく、温度、色など、さまざまな要素から成り立っている。

このように、物体の「状態」は、位置、速度、エネルギー、電気抵抗などの「物理量の組み合わせ」によって定まる。我々はこれらの物理量を、目や耳、触覚などを通じて知覚することもあれば、スピードメーターや電流計といった装置を使って測ることもできる。そして、測定を通じて物体の状態を知ること、その後の動きや変化を予測できる。実際、古典物理学におけるニュートンの運動方程式は、物体の現在の位置と速度、さらに加わる力をもとに未来の動きを予測する方程式である。

しかし、極微の量子力学の世界では、こうした『状態=物理量の組み合わせ』という考え方が通用しない。量子力学では、物体の「状態」とは直接測定できる物理量ではなく、「波動関数」と呼ばれる数学的な関数で表現される抽象的な概念となる。このとき、物理量を測定した結果は確率的になるが、その測定値の確率分布を“間接的に”決めているのが波動関数である。量子力学の基礎方程式であるシュレディンガー方程式は、物理量の変化を直接予測するものではなく、波動関数の変化を予測するための方程式になっている。ちなみに、情報理論を統合した量子情報理論では、状態を考える際に環境との相互作用や情報の欠落を考慮する必要があり、波動関数による状態の表現は「密度行列」という形式に拡張される。

さて、量子系における物体の状態、すなわち波動関数や密度行列を、確率的に変化してしまう物理量の測定値からどのように知ればよいのだろうか。例えば、歪んだサイコロがあったとしよう。1から6までのどの目が出るかの確率分布は歪み具合によって決まっているはずだが、実際にサイコロを転がして2の目が出たとしても、各目の出現確率はその一度の試行からは分からない。歪んだサイコロの性質を知るためには、何回もサイコロを転がして、その出た目の割合を見て

統計的に推測するしかない。

量子系の「状態」を知るためにも、同じように何度も何度も物理量を測定し、その測定結果から波動関数(または密度行列)を推測していく必要がある。このような作業を『量子状態トモグラフィー(QST)』と呼ぶ。サイコロの場合は6つの目が出る割合を測ればよいだけだが、量子系には重ね合わせや量子もつれといった特異な性質があるため、必要な測定項目は指数関数的に増加する。また、測定によって量子状態は変化するという性質があるため、測定を行うたびに同じ状態を準備し直さなければならない。これにより、量子系が大きくなるにつれて必要な測定回数やデータ処理の計算量が急増するため、量子状態の完全な決定(full QST)は実験的にも計算的にも困難である。

我々の研究[1]では、量子磁性体で観測される螺旋スピ構造にヒントを得て、新しいQST法を開発した。例えば多数の量子ビットから成る多体系の状態を知りたい場合、従来のQSTでは個別の量子ビットをX、Y、Zの3方向にそれぞれバラバラに回転させて測定する必要があった。このような測定の組み合わせは膨大であり、個別に操作するための複雑な回転装置が必要になる。そこで我々の方法では、強度勾配を持つ磁場を一度に加えると、量子ビットが各々異なる角度で回転し、螺旋状にねじれた構造での測定が可能になることを利用し、煩雑な個別操作を排除した(図1)。磁場勾配の強度や印加時間を変えることで異なる螺旋構造での測定結果を収集し、さらに圧縮センシングを行うことで量子系の「状態」を高効率に推測する。これが我々の提案する『螺旋(スパイラル)QST』である。

論文[1]では、この方法の有用性を数値実験で確認し、エンタングルメント・エントロピーなどの重要な量子情報量の測定にも応用できることを示している。量子状態を解き明かすことは、単なる技術的な挑戦にとどまらず、宇宙の仕組みを根本から理解するための挑戦でもある。本手法により、様々な量子プラットフォームでの量子状態推測が可能となり、新しい物質の設計や宇宙のシミュレーション研究などへの応用が期待される。螺旋 QST をはじめとする新たな量子測定法の発展は、次世代の量子科学・技術の礎となり、より広範な科学技術の革新を支えていこう。

[1] G. Marmorini, T. Fukuhara, D. Yamamoto, arXiv:2411.16603(論文投稿中)

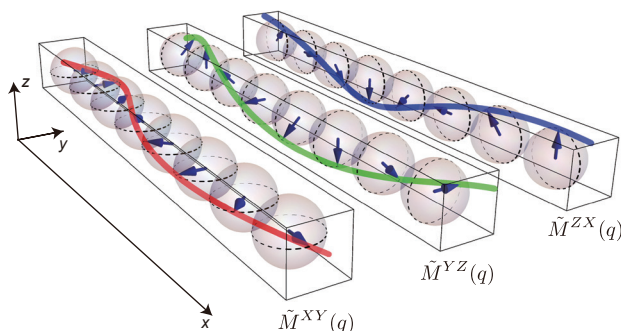


図1：螺旋 QST での測定に用いる螺旋構造（3種類の螺旋面）



●執筆者紹介

山本 大輔 Daisuke Yamamoto

日本大学文理学部 准教授

1983年埼玉県生まれ

2010年3月早稲田大学大学院博士後期課程修了

2021年4月から現職



閉じた領域内のエネルギーと表面での重力の強さや表面積との関係

物の表面とその内部を関係づける法則の中で、最もシンプルなものの一つがガウスの法則であろう。ガウスの法則では、閉じた領域の表面を貫く電場の強さの情報から、その中に含まれる電荷の総和を知ることができる。この法則は、電場を表すポアソン方程式が発散方程式になっていることに起因する。ニュートンの重力理論もポアソン方程式で表されており、領域表面の重力の強さから電場と同じような解析ができる。しかし、ニュートンの重力理論は重力が弱い場合に使われる近似理論であり、厳密な解析には一般相対論を用いる必要がある。その方程式であるアインシュタイン方程式は、ポアソン方程式とは異なり複雑だ。そのため、ガウスの法則は成り立たない。

重力場を作るのは、質量(またはエネルギー)である。質量とエネルギーは本質的に同じものである。詳細な説明は省略するが、一般相対論ではある領域内の質量を正確に定義することが難しい。一方、重力源から十分に離れると重力は弱くなり、ニュートンの重力理論を使うことができ、この理論を使って質量が定義できる。重力源から十分に離れた無限大の半径を持つ球面で重力源を囲むと、囲んだ領域は空間全体と考えられる。このように定義した質量は、空間全体に存在する全質量の総和となる。ある特定の領域に質量 m があるとすると、これは空間全体の質量 M の一部である。質量は常に正の値を取るため、 $M \geq m$ が成り立つであろう。ある領域の質量 m は厳密に定義できないが、空間全体の質量 M より小さいとして扱うことにしよう。

ブラックホールのエントロピーは、地平面と呼ばれるブラックホール表面の面積に比例する。この地平面面積は時間経過とともに増加する。ブラックホールが形成されると、時間変化のない状態(定常状態)に漸近するであろう。このとき、ブラックホールの唯一性定理からその性質が特定される。定常状態の地平面面積 A_f は、空間全体の質量 M と $M \geq (c^2/2G)\sqrt{A_f/4\pi}$ の関係が成り立つ。ここで、 c は光速、 G は万有引力定数だ。面積増大則から、定常状態になる前の面積 A は最終状態の面積 A_f より小さくなる。以上より、 $M \geq (c^2/2G)\sqrt{A/4\pi}$ を得る。面積 A の地平面を持つブラックホールは、最低限 $(c^2/2G)\sqrt{A/4\pi}$ のエネルギーを持つことを示している。この不等式はペンローズ不等式と呼ばれ、特定の条件下で厳密に証明されている。ペンローズ不等式は、ブラックホールの表面積(表面の情報)と、その内部に最低限必要とされる質量(内部の情報)を関係づけている。

私が白水、吉野らと行った研究[1, 2]では、ペンローズ不等式をブラックホールだけでなく他の物質にも適用できるよう、その一般化を行った。ブラックホールの特徴を幾何学量で表し、それを重力の強さを表す1

つのパラメータ α を用いて一般化した。 α は $-1/2 < \alpha < \infty$ の範囲を取る定数であるが、定義は複雑なので省略する。 $\alpha \rightarrow -1/2$ ととると、重力源から十分に離れた領域(弱重力領域)に対応し、 α が無限大の極限は地平面(強重力領域)を表す。我々の論文では、考えている領域の表面上どこにおいても重力の強さがあるパラメータ α よりも大きいとき、その表面をパラメータ α の「重力検知面」と定義し、この面の面積 A に対して次の不等式が成り立つことを示した：

$$M \geq \frac{(1+2\alpha)c^2}{(3+4\alpha)G} \sqrt{\frac{A}{4\pi}}$$

α を無限大にとる地平面を表す極限では、この不等式は前述のペンローズ不等式に一致する。

最新の研究[3]では、電場の効果を考慮した不等式を導出した。パラメータ α の重力検知面の内側に電荷 Q が存在し、重力検知面の外には電荷がないと仮定する。この場合、重力検知面に対して次の不等式が成り立つことを示した：

$$M \geq \frac{(1+2\alpha)c^2}{(3+4\alpha)G} \sqrt{\frac{A}{4\pi}} + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 c^2} \sqrt{\frac{4\pi}{A}}$$

ここで、 ϵ_0 は真空の誘電率である。右辺第二項の効果により、質量 M と面積 A を固定した状況では電荷の大きさ $|Q|$ に上限が存在する。これは、同じ電荷を持つ物質は反発するため電荷粒子をある領域内に集めるにはエネルギーが必要となり、面積 A の重力検知面内にエネルギー M で集められる電荷 $|Q|$ に上限がある、ということを表している。ブラックホールの場合($\alpha \rightarrow \infty$)、ブラックホール電荷の上限という既知の結果に一致する。ブラックホール電荷の上限は、ブラックホールの思考実験において重要な役割を果たしており、そういった思考実験を重力検知面に拡張する研究が今後の面白いテーマとなるだろう。

- [1] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu and H. Yoshino, PTEP **2021**, no.8, 083E02 (2021)
- [2] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu and H. Yoshino, PTEP **2023**, no.4, 043E01 (2023)
- [3] K. Lee, K. Izumi, T. Shiromizu, H. Yoshino and Y. Tomikawa, Phys. Rev. D **110**, no.12, 124051 (2024)



● 執筆者紹介

泉 圭介 Keisuke Izumi

名古屋大学大学院多元数理科学研究科 准教授

1981年岐阜県生まれ

2009年3月 京都大学大学院理学研究科博士課程修了

2024年4月から現職

2024年4月から現職



2024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3回 市民講演会

開催日：2024年12月14日

場所：オンライン (Zoom) 開催

対象：一般市民 約200名

講演者1：飯塚 則裕 (B01)

タイトル：「思考実験とブラックホールと量子論」

講演者2：奥西 巧一 (D02)

タイトル：「物質中に広がる小宇宙—スピンで見る物質と量子情報の世界—」



●アウトリーチ活動・一般向け講演

ローレンツ祭特別講義

『強い力と弦理論』

開催日：2024年6月14日

媒体/団体：京都大学大学院理学研究科物理学・宇宙物理学専攻

対象：大学生

講演者：杉本 茂樹 (C01)

金曜天文講話オンライン

『弦理論と宇宙のはじまり』

開催日：2024年8月2日

媒体/団体：花山宇宙文化財団

対象：一般市民 約50名

講演者：杉本 茂樹 (C01)

日本物理学会「第23回オンライン物理講話」

『量子エンタングルメントから創発するホログラフィック宇宙』

開催日：2024年9月8日

媒体/団体：日本物理学会

対象：一般市民 約470名

講演者：高柳 匡 (C01)

理化学研究所 [和光地区] 一般公開 2024 講演会

『量子コンピュータで宇宙の始まりを探る』

開催日：2024年10月5日

媒体/団体：理化学研究所

対象：一般

講演者：本多 正純 (D01)

一般向け公開講座「量子の世界～物質・宇宙・コンピュータ～」

『量子の科学と未来の社会：量子コンピュータ入門』

開催日：2024年10月19日

媒体/団体：日本大学文理学部

対象：一般 約60名

講演者：山本 大輔 (B02)

令和6年度「西宮湯川記念科学セミナー」

『極限宇宙の謎に迫る』

開催日：2024年12月7日

媒体/団体：西宮市

対象：一般 約240名

講演者：白水 徹也 (C03)

ブラックホール研究の最前線2025

『理論で解説！ブラックホールとは何か？』

開催日：2025年1月11日

媒体/団体：朝日カルチャーセンター

対象：一般 約30名

講演者：白水 徹也 (C03)



Journey to the extreme universe, another leap forward

Head Investigator

Tadashi Takayanagi

Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto University

Time flies, and three years have already passed since the ExU project was born. In this collaboration, aiming at interdisciplinary subjects which bridge quantum information and physics, it looks to me that the research directions are diverse, and the further we advance our research, the more profound and diverse the world becomes. How do you feel about it?



One of the most impressive developments which was reported in the annual meeting held at Osaka University in September was about condensed matter experiments in the light of quantum information theoretic ideas. In particular, new methods for measuring quantum information quantities such as entanglement entropy and entanglement spectrum, which are also important in the physics of quantum many-body systems and gravity theory, have been pioneered by Daisuke Yamamoto in B02, and Hideki Ozawa and Seiji Sugawa in the publicly offered research. At the international ExU workshop held at OIST, Okinawa in October, research developments in similar directions attracted much attention. This is a very exciting direction that will lead the study of the extreme universe to a new stage.

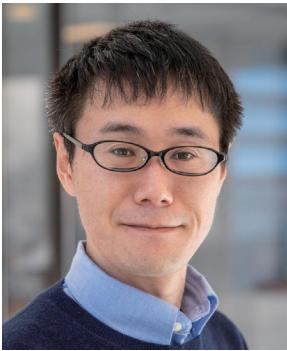


This year, I was very honored to receive the Dirac Medal from ICTP, a prominent international prize in theoretical physics, jointly with Shinsei Ryu, who is one of international advisors of this ExU project, and also with Horacio Casini and Marina Huerta. I am deeply grateful to Shinsei, who has been a lifelong collaborator of mine, for the many wonderful collaborations we have had since then, including the discovery of holographic entanglement entropy formula. My collaboration with Shinsei began when we were both post-doctoral researchers at the KITP in UC Santa Barbara. It was a great memory for me that our collaboration started when we went on a road trip to Death Valley and Sequoia National Park during our Christmas vacation in 2005, almost 20 years ago from now. At that time, theoretical physicists rarely heard about quantum information theory, and I myself did not expect that the idea of quantum information would be so deeply connected to fundamental aspects of physics. In that sense, I am feeling a sense of a different world now that research directions such as “It from Qubit” and “Extreme Universe” have become a major

research trend both in Japan and abroad. At the same time, I am very grateful to numerous excellent researchers around the world, who have made significant contributions to this interdisciplinary field.



In addition, the interim evaluation of this field was conducted this year, and we were able to receive an “A” grade. We would like to express our gratitude to our advisory committee members for their valuable comments, and to all the members who helped us in the preparation of the report document. Looking back at the data of this project (as of June 2024) based on this report, the total number of PIs and CoIs has now reached 81, including those who participate(d) in the first and second phases of the publicly offered research. The total number of ExU members is approximately 200, including about 100 young researchers (graduate students and post-doctoral fellows). The research fields of the members are relatively evenly spread among the fields of quantum information, high energy, cosmology, and condensed matter, which provides a desirable composition for realizing interdisciplinary fusion. We have published more than 360 papers, given more than 240 invited lectures at international conferences, and received more than 20 academic awards. We are also very pleased to announce that more than 30 members have already been promoted to higher positions. I would like to express my sincere appreciation for the outstanding research activities of the members of this field, who are the driving force behind all of the above. Now, we have only about one year left in this ExU collaboration, and I hope all of you will fully enjoy your journey to the Extreme Universe as much as you can, during the remaining time.



“Extreme Universe” and Dirac’s Beauty: Anticipating New Discoveries

Advisory Committee member

Shinsei Ryu

Department of Physics, Princeton University

The “Extreme Universe” project, launched in 2021 (Reiwa 3), reaches a milestone this year, 2025 (Reiwa 7). As an international advisor, I have had the privilege of participating in this project through workshops and remote events. This project spans a wide range of themes related to quantum physics, encompassing the foundational aspects of modern physics—quantum spacetime, matter, and information.

The project’s multifaceted efforts probe the frontiers of physics, and notably, it succeeds in fostering cross-disciplinary collaboration despite the challenges of bridging gaps between fields, a pressing issue in today’s academic landscape. Such endeavors not only reinforce a sense of unity and shared purpose within the broader physics community but also hold the potential to unlock new discoveries and perspectives. I hope to see these collaborations grow further, contributing to the advancement of physics as a whole.

It is a tremendous honor to receive the Dirac Medal alongside Professor Tadashi Takayanagi, the principal investigator of this project. This achievement is a result of the support from colleagues, students, and many others who have collaborated with me over the years. I would like to take this opportunity to express my heartfelt gratitude to them all.



Dirac has always been one of my heroes, and receiving an award named after him carries profound significance for me. I first encountered Dirac’s name in the context of the “Dirac Sea,” as depicted in *Ten Billion Days and One Hundred Billion Nights* (Hyakuoku no Hiru to Senoku no Yoru), a novel and manga by Ryu Mitsuse and Moto Hagio. Though I cannot recall precisely when I read it, it must have been during my middle or high school years. Later, as I pursued a career in physics and began researching condensed matter physics, I could never have imagined that concepts like the Dirac Sea would become part of my everyday research through topics like graphene and topological insulators. Even from the perspective of condensed matter physics, the rise of Dirac electronic

systems to their current prominence would have been difficult to foresee. Additionally, the Chern number, one of the most fundamental concepts of topological materials, has its foundation in Dirac’s work on magnetic monopoles. The connection between the Dirac Sea and magnetic monopoles is now a well-established fact, though whether Dirac himself recognized this link remains an intriguing question. Regardless, these critical concepts bear Dirac’s name, underscoring their importance.



On the other hand, I have yet to find any direct remarks from Dirac concerning quantum entanglement. Nonetheless, his contributions form the very bedrock of quantum physics. It is impossible to discuss quantum mechanics without referencing Dirac’s bra-ket quantum mechanics and his introduction of the delta function.



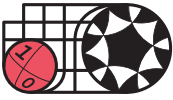
Dirac is also renowned for his insistence on the beauty of theoretical constructs. Personally, I do not believe that beauty alone defines the value of a physical theory, but it is undeniable that many outstanding theories possess remarkable elegance. Perhaps there is a connection between our sense of understanding and a certain type of beauty. This notion of beauty might also underlie the unity of physics I mentioned earlier.



It is said that Dirac initially regarded the implication of his equation—predicting the existence of positively charged protons—as a flaw in his theory. When the positron was subsequently discovered, however, he famously remarked, “The equation was smarter than I was.”



I hope that the exploration of the “Extreme Universe” project will yield theories as beautiful and smart as Dirac’s and discoveries as profound as the positron.



Quantum information for theoretical physics

[Principal Investigator]

Tomoyuki Morimae (YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yoshifumi Nakata (YITP, Kyoto University)

Koji Azuma (NTT)

Francesco Buscemi (Nagoya University)

Ryu Hayakawa (YITP, Kyoto University)

[ExU Lecturer]

Andrew Darmawan (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Michele Dall'Arno (Toyoashi University of Technology)

Hayata Yamasaki (Tokyo University)

Go Kato (NICT)

Team A aims to advance research in quantum information theory while also developing the “language” of quantum information that can be applied to other fields of physics. This year, the team has achieved the following research results:

Quantum Supremacy Theory: Quantum computers are expected to outperform classical computers in speed, but this advantage has not yet been rigorously proven. Research that attempts to prove the superiority of quantum computing based on standard assumptions in computational complexity theory is called quantum supremacy theory. Many studies have been conducted in this field, but previous assumptions have been either artificial or overly strong. In this study, Morimae et al. were the first to prove quantum supremacy based on the existence of one-way functions, which are the most fundamental assumption in cryptography. Previous demonstrations of quantum supremacy using random quantum circuits or boson sampling relied on artificial assumptions, such as the #P-hardness of some problems. In contrast, this study is groundbreaking because it proves quantum supremacy based on a fundamental assumption that has been extensively studied in cryptography. This result has been accepted for presentation at Crypto 2025, a top international cryptography conference.

Computational Complexity of Quantum Randomness:

Random unitary evolution in quantum systems is not only a highly useful resource for quantum information processing but also a key to understanding quantum gravity and quantum chaos. However, despite its importance, little research has been done on the computational complexity of random unitary evolution. As a significant step in this direction, Nakata et al. studied the computational complexity of evaluating how much randomness a given unitary evolution possesses. They proposed a quantum algorithm to verify randomness and demonstrated that even with a quantum computer, verifying randomness is fundamentally difficult. This result suggests that a general algorithm for efficiently verifying emergent random quantum states in quantum many-body systems and quantum chaos does not exist, emphasizing the need for problem-specific algorithms.

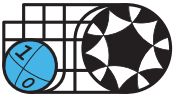
Quantum Information Science and Thermodynamics:

Buscemi et al. studied measurement, feedback control, and the dynamics of information in quantum systems by unifying them through entropy as a fundamental bridge. They investigated the universality of the second law of information thermodynamics and demonstrated its applica-

bility to all feedback and erasure protocols that are consistent with thermodynamics. The study also focused on observational entropy, a concept that integrates classical and quantum statistical mechanics. Using Petz’s theorem and random unitary evolution, they provided a general demonstration of entropy increase in isolated systems. Furthermore, they extended observational entropy by introducing generalized quantum prior distributions to overcome the limitations of uniform prior distributions. This approach integrates quantum Bayesian inference, expanding both the interpretation and operational scope of entropy.

Additionally, they addressed the computational challenges of the quantum statistical testing region by introducing a new conic approximation method, which facilitates comparisons between quantum models and transformations. The concept of signaling dimension, which quantifies the classical resources required to reproduce quantum correlations, was analyzed within the framework of generalized probabilistic theories, leading to new analytical and algorithmic techniques. This work also clarifies the relationship between resource theory and quantum information processing. Finally, they studied virtual quantum broadcasting, showing how Hermitian-preserving maps can realize broadcasting of virtual quantum states.

Quantum Communication: The quantum internet is expected to enable quantum communication between arbitrary clients worldwide and has potential applications in quantum sensing and quantum computing. A key technology for this is the ability to efficiently distribute entangled quantum states between clients with a constant error, regardless of their distance. In practice, this requires quantum communication across multiple interconnected quantum networks, similar to the current classical internet. Higashi et al. proposed a practical method to provide clients with constant-error quantum entanglement independent of their distance. Their approach is based on two novel concepts: Minimum-cost aggregation and Network connectivity. By utilizing self-organizing multiple quantum networks, this method establishes a foundational protocol for realizing a global-scale quantum internet.



Quantum Black Holes from Quantum Information

[Principal Investigator]

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

[Co-Investigator]

Toshifumi Noumi (The University of Tokyo)

Masaki Shigemori (Nagoya University)

Seiji Terashima (Kyoto University)

Tomonori Ugajin (Rikkyo University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Akihiro Miyata (YITP, Kyoto University)

Sunil Kumar Sake (YIYP, Kyoto University)

Nicolò Zenoni (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

Takanori Anegawa (Yonago College)

Mitsuhiro Nishida (Yuge College)

Kengo Maeda (Shibaura Institute of Technology)

Iizuka and Nishida in [1] proposed that the logarithmic singularities of the Renyi entropy of local-operator-excited states for replica index n can be a sign of quantum chaos. Additional evidence that there are always logarithmic singularities of the Renyi entropy in holographic CFTs, but no such singularities in free and rational CFTs are shown.

Iizuka, Anegawa, Kabat in [2] considered the thermal behavior of a large number of matrix degrees of freedom in the planar limit. They work in $0+1$ dimensions, with D matrices, and use $1/D$ as an expansion parameter. This can be thought of as a non-commutative large- D vector model. They compute a thermal two-point correlator to $O(1/D)$ and find that the degeneracy present at large D is lifted, with energy levels split by an amount $\sim 1/\sqrt{D}$. This implies a timescale for thermal dissipation $\sim \sqrt{D}$.

Iizuka and Nishida in [3] developed a correspondence between the PSSY model and the IOP matrix model by comparing their Schwinger-Dyson equations, Feynman diagrams, and parameters. Applying this correspondence, they resum specific non-planar diagrams involving crossing in the PSSY model by using a non-planar analysis of a two-point function in the IOP matrix model.

Iizuka, Nishida, Lin investigated in [4] the multi-partite entanglement structure of an evaporating black hole and its Hawking radiation by dividing the radiation into finer subsystems. Using the multi-entropy of these configurations, they define a black hole multi-entropy curve, which describes how the multi-entropy changes during the black hole evaporation. This black hole multi-entropy curve is a natural generalization of the Page curve since the multi-entropy reduces to the entanglement entropy for the bi-partite case. The multi-entropy represents the secret entanglement between Hawking particles.

Iizuka, Mukherjee, Sake, and Zenoni in [5] found that the entanglement entropy between different Majorana fermions for the thermal state in Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model and its sparsified version satisfies all the known entropy inequalities which hold for holographic states.

Iizuka and Sake explored in [6] a Centaur geometry in JT gravity, which is an asymptotically AdS spacetime but in the IR admits a dS bubble with another AdS geometry in the deep IR. They calculated the density of states of the putative boundary dual for such mixed geometries by evaluating the on-shell action and showing that the degrees of freedom in the IR reduce due to the IR modification corresponding to the dS bubble.

Sake et al in [7] extended some aspects about the canonical quantization of JT gravity in de Sitter space, including the problem of time and the construction of a Hilbert space. They then extended this discussion to other

two dimensional models obtained by changing the dilaton potential, along with comments pertaining to Holography and the entropy of de Sitter space.

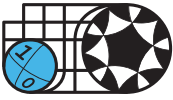
Zenoni et al in [8] studied the time evolution of various geometric quantities that probe both the expanding region and the interior of a black hole in de Sitter spacetime, finding that the presence of a black hole slows down the “hyperfast” growth, which is manifest in empty de Sitter.

Noumi, in a paper [9] coauthored with Izumi and Yoshida of the C03 group verified the cosmic censor conjecture, which states that naked singularities do not exist. In particular, they showed that the cosmic censorship conjecture holds for non-extreme black holes in systems with multiple types of conserved charges, which are toy models for the dark sector of the universe, even when quantum corrections are taken into account.

Noumi, in a joint paper with Maeda of Group B03 and Yoshida of Group C03 [10], derived the cutoff length scale of the quadratic gravity in $d \geq 5$ dimensional spacetime by demanding that the quantum focusing conjecture for the smeared quantum expansion at the classical level.

Noumi and his graduate advisor Nishii et al, in a co-authored paper [11], developed an effective field theory for dissipative systems in gravity theory by applying the Schwinger-Keldysh formalism, which is useful for describing quantum open systems, and discussed its applications to cosmology and black hole thermodynamics.

- [1] N. Iizuka et al, JHEP 10 (2024) 043
- [2] T. Anegawa et al, Phys.Rev.D **111**, 025003 (2025)
- [3] N. Iizuka et al, JHEP 12 (2025) 212
- [4] N. Iizuka et al, arXiv:2412.07549
- [5] N. Iizuka et al, arXiv:2409.16641
- [6] N. Iizuka, S. K. Sake, arXiv:2501.02614
- [7] I. Dey et al, arXiv:2501.03148
- [8] S. E. Aguilar-Gutierrez et al, JHEP 05(2024) 201
- [9] K. Izumi et al, Phys.Rev.D **110**, 044008 (2024)
- [10] T. Kanai et al, Phys.Rev.D **110**, 084037 (2024)
- [11] P. H. C. Lau et al, arXiv:2412.21136



Understanding quantum black holes through the study of artificial quantum matter

[Principal Investigator]

Masaki Tezuka (Kyoto University)

[Co-Investigator]

Shuta Nakajima (QIQB, Osaka University)

Eriko Kaminishi (Keio University)

Takashi Mori (Keio University)

Daisuke Yamamoto (Nihon University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Kazuya Yamamoto (QIQB, Osaka University)

Giacomo Marmorini (Nihon University)

[Research Collaborators]

Ippei Danshita (Kindai University)

Kazuaki Takasan (University of Tokyo)

Kazuki Yamamoto (Institute of Science Tokyo)

Tanay Pathak (YITP, Kyoto University)

Juan Pablo Bayona Pena (Kyoto University)

Following Nakajima's transfer, all experimental equipment was dismantled and moved from Kyoto University to Osaka University in February of the previous year. Therefore, in this year, Nakajima and Yamashita first proceeded to reconstruct the experimental setups. We have restored the laser cooling and evaporative cooling in an optical trap with control of atomic interaction via magnetic Feshbach resonance and achieved Bose-Einstein condensation of the Feshbach molecule $^6\text{Li}_2$. We also confirmed laser cooling and loading into the optical trap of the bosonic ^7Li atoms. The optical lattices have also been reconstructed and we reconfirmed the atomic wave diffraction patterns using the momentum kick with a pulsed lattice. In parallel with these reconstructions, the equipment has been upgraded by re-baking the UHV chamber to improve the vacuum level, improving the laser cooling laser source, and introducing a new power supply unit capable of high-speed magnetic field control which is required for the out-of-time-ordered correlator (OTOC) experiments. These preparations and upgrades are underway to start experiments on measurement-induced phase transitions and OTOC.

Yoshifumi Nakata (A01) and Tezuka numerically examined the Hayden-Preskill thought experiment, which operationally characterizes scrambling (the realization of quantum error correction) in the dynamics of quantum many-body systems, including the Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model, which holographically corresponds to gravity. They showed that quantum chaos dynamics is not necessarily scrambling, and demonstrated a case where the crossover between the presence and absence of scrambling can be characterized by the accuracy of information recovery [1]. Pratik Nandy (D01), Tanay Pathak (YITP) and Tezuka analyzed the level statistics of singular values in the non-Hermitian SYK model [2]. Tezuka and collaborators also analyzed the entanglement dynamics when the SYK model is coupled to Dirac fermions [3].

Kaminishi and Mori analyzed the optimization process of stochastic gradient methods in variational quantum algorithms, in relation to the development of non-equilibrium dynamics and quantum computing methods in cold atom systems. Using the fluctuation-dissipation theorem, they evaluated the escape time from a saddle point or a local solution with respect to the magnitude of noise [4].

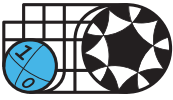
Mori clarified the non-commutativity between the weak dissipation limit and the thermodynamic limit for the Liouvillian gap of an open quantum system [5]. Based on this, he demonstrated the existence of the quantum Ruelle-Pollicott resonance, which indicates the chaotic nature of the long-term behavior of a quantum many-body system,

and clarified the relationship between the thermal equilibrium of an isolated quantum system and the weak dissipation limit of an open quantum system.

Yamamoto, together with Yoshiki Murata (B03) and others, theoretically demonstrated a new response phenomenon in a quantum spin system inspired by the AdS/CFT correspondence [6]. This utilizes the phenomenon that the trajectory of light propagating from the boundary of AdS space-time to the opposite boundary appears as if the particle suddenly teleported to the opposite side of the system on the CFT side. He also analyzed the phenomenon in which the existence of a flat band inhibits the relaxation dynamics of the system and proposed a cold atom experiment [7], and analyzed a condensed matter experiment in which the quantum nature of solid magnetic materials is controlled by applying pressure [8].

Yamamoto and Marmorini have conducted theoretical research into quantum state tomography, a method for experimentally measuring the density matrix of quantum states in artificial quantum materials, and have studied the quantum information content obtained from permutation-symmetrized density matrices [9] and developed a new efficient quantum state tomography method using a spirally twisted observation basis [10]. For more details, please see the article "Research Highlight" on page 70.

- [1] Y. Nakata and M. Tezuka, *Phys. Rev. Research* **6**, L022021 (2024).
- [2] P. Nandy, T. Pathak, and M. Tezuka, *Phys. Rev. B* **111**, L060201 (2025).
- [3] P. H. C. Lau, C.-T. Ma, J. Murugan, and M. Tezuka, *Phys. Lett. B* **853**, 138702 (2024).
- [4] E. Kaminishi, T. Mori, M. Sugawara, and N. Yamamoto, arXiv:2406.09780.
- [5] T. Mori, *Phys. Rev. B* **109**, 064311 (2024).
- [6] M. Bamba, K. Hashimoto, K. Murata, D. Takeda, and D. Yamamoto, *Phys. Rev. D* **109**, 126003 (2024).
- [7] K. Gondaira, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *JPSJ* **93**, 074004 (2024).
- [8] K. Nihongi, T. Kida, D. Yamamoto, Y. Narumi, J. Zaccaro, Y. Kousaka, K. Inoue, Y. Uwatoko, K. Kindo, and M. Hagiwara, *JPSJ* **93**, 084704 (2024).
- [9] Y. Miyazaki, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *Phys. Rev. A* **110**, 052422 (2024).
- [10] G. Marmorini, T. Fukuhara, and D. Yamamoto, arXiv: 2411.16603.



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 (Tokyo University)

Black holes are an extremal limit of spacetime curvature, nevertheless, they possess thermodynamic features just like ordinary materials. How can we reconcile these two views of classical black holes? The answer is to regard black holes as fundamentally quantum mechanical objects. However, this view has raised a deeper question called the “black hole information paradox.” The interior of a black hole cannot be seen according to general relativity, whereas it must be visible from the quantum information theoretic viewpoint. How can we reconcile these two views of quantum black holes? The aim of B03 group is to understand the fundamental nature of quantum black holes.

Some recent advances in tackling the above issue are the quantum null energy condition (QNEC) and the quantum focusing conjecture (QFC), as well as the “island proposal” from quantum information theory that Hawking radiation contains information of a certain region inside the black hole. Matsuo showed last year that QFC holds during the Hawking process even after the island formation. However, in that study, quantum effects on the geometry of evaporating black holes have not been fully taken into account. Ishibashi, Matsuo, and Tanaka revisited this problem in two dimensions and showed that QFC indeed holds by solving the semiclassical Einstein equations analytically [1].

Maeda, with Noumi in B01 and other collaborators, examined QFC in gravity theories with higher derivatives [2]. They derived the cutoff length scale of the quadratic gravity in higher dimensional spacetime by demanding that QFC for the smeared quantum expansion holds at the classical level. The cutoff scale has a different dependence on the spacetime dimension depending on the sign of the coupling constant of the quadratic gravity. We also give a concrete example of spacetime in which the QFC holds when the quantum expansion is smeared over a scale larger than our cutoff scale, although it is violated before the smearing.

Matsuo showed that the island region extends slightly outside the event horizon in the case of stationary black holes but is hidden by the horizon in the case of evaporating black holes, independent of other details of the black hole [3].

When considering quantum effects, black holes may put on some form of quantum hair around the event horizon. Ishibashi, Matsumoto, and Yoneo [4] clarified the conditions that determine whether static black holes can have hair in the form of perfect fluid.

Ishibashi, Maeda, and Okamura showed dynamical and thermodynamic instability of three-dimensional AdS geometry, by solving the holographic semiclassical Einstein

equations [5]. The instability found in this study is new and implies the breakdown of the maximal symmetry of AdS spacetimes.

B03 group also conducts research to explore the quantum properties of black holes using condensed matter systems. Murata and Kinoshita, along with their collaborators, proposed a method to simulate quantum field theory (QFT) in curved spacetimes using quantum spin systems [6]. This study demonstrated that QFT in two-dimensional curved spacetimes can be realized as the continuum limit of a spin model on a one-dimensional ring. By tuning the parameters of the spin system, it is possible to reproduce QFT in general curved spacetimes. For instance, QFT in an expanding universe corresponds to the transverse-field Ising model with time-dependent magnetic fields in the spin system. This correspondence enables the simulation of particle production caused by cosmic expansion using spin systems. Indeed, the particle production rate calculated from the spin system was shown to reproduce the QFT results. Furthermore, this approach can be extended to phenomena such as black hole formation through gravitational collapse, paving the way for potential experimental verification of Hawking radiation using spin systems.

[1] A. Ishibashi, Y. Matsuo, and A. Tanaka, JHEP 09 (2024) 126

[2] T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, and D. Yoshida Phys. Rev. D 110, 084037 (2024)

[3] Y. Matsuo, [2407.20921 [hep-th]]

[4] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, JHEP 02 (2024) 146

[5] A. Ishibashi, S. Matsumoto, and Y. Yoneo, Class. Quantum Grav. 41 (2024) 8, 085010

[6] S. Kinoshita, K. Murata, D. Yamamoto, and R. Yoshii, 2410.07587 [hep-th]



Quantum Cosmology from Quantum Information

[Principal Investigator]

Tadashi Takayanagi (YITP, Kyoto University)

[Co-Investigator]

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

[International Research Collaborators]

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

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Jonathan Harper (YITP, Kyoto University)

[Research Collaborators]

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

The purpose of C01 group is to understand the description of the microscopic quantum universe in the light of deep relationships between holographic principle and quantum information.

Harper, Kanda, Tasuki and Takayanagi in C01 succeeded in geometrically deriving a property called the g-theorem, which states that “the degrees of freedom of the boundary at a 1D quantum critical point decreases monotonically as the energy scale decreases” from the strong subadditivity, which is a fundamental inequality in quantum information theory [1]. Via the holographic principle, they also found that the g-theorem prohibits traversable wormholes, which shows that quantum information inequalities impose restrictions on the geometrical structure of spacetimes in quantum gravity.

Harper, Tsuda and Takayanagi in C01 gave the first method to calculate a quantity called multi-entropy in quantum field theory. This quantity extends the entanglement entropy to quantum correlations between many bodies [2]. Via holography, this quantity is predicted to be equal to a sum of the areas of multiple minimal surfaces intersecting in an anti de-Sitter spacetime. They succeeded in finding the phase transitions of multi-entropy predicted from the gravity dual. This work provided a clue to extend the correspondence between holography and quantum information to many-body correlations.

Okuyama in C01 studied baby universe operators in double-scaled SYK (DSSYK) model [3]. He found that the identity operator on the Hilbert space of DSSYK can be expanded as a linear combination of the baby universe operators. It follows that the TFD state of DSSYK is written in terms of the bi-linear combination of the baby universe operators, which can be thought of as a concrete realization of the idea of ER=EPR.

Sekino in C01 studied de Sitter universe based on Holographic principle [4]. Based on the hypothesis that a theory of quantum gravity should be formulated using the degrees of freedom that can be accessed by a single observer, it is assumed that DSSYK model defined on the event horizon of an observer describes de Sitter universe. In order to describe semi-classical phenomena inside the horizon, one should take the limit in which the length scale of the microscopic theory is small compared to the de Sitter radius. In AdS/CFT correspondence, such a limit is known to be very difficult to analyze, but in this paper by Sekino with Susskind (Stanford University), it is pointed out that such a limit naturally exists in DSSYK.

Sugimoto in C01, in collaboration with Armoni (Swansea University), Pyszkowski (YITP), and Weissman (APCTP), studied meson scattering amplitudes in a model of QCD based on the holographic principle [5]. When the curvature radius of the background in the holographic description is large compared to the string length scale, it was shown that the high-energy meson scattering amplitudes can be approximately obtained by using the open string scattering amplitudes in flat spacetime. In particular, assuming that the background is asymptotically AdS, the energy dependence expected to hold for the scattering amplitudes of hadrons is successfully reproduced.

Hikida in C01 gave a proof of an example of gauge-gravity correspondence in collaboration with Schomerus (DESY) [6]. In case of 3-dimensional anti-de Sitter space with NSNS flux, string theory can be solved in principle. In addition, the string theory at high-energy corresponds to the weak coupling regime of its dual field theory. Making use of these facts, we derived a gauge-gravity correspondence involving the high-energy regime of string theory. This is a powerful result that holds for all orders in string perturbation theory.

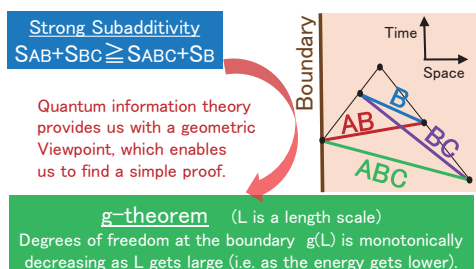
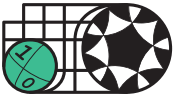


Fig. Geometric proof of g-theorem based on entanglement entropy [1]

- [1] J. Harper, H. Kanda, T. Takayanagi and K. Tasuki, Phys. Rev. Lett. **133**, 031501 (2024).
- [2] J. Harper, T. Takayanagi and T. Tsuda, SciPost Phys. **16** (2024), no.5, 125.
- [3] K. Okuyama, JHEP **10** (2024) 249.
- [4] Y. Sekino, L. Susskind, arXiv:2501.09423
- [5] A. Armoni, B. Pyszkowski, S. Sugimoto and D. Weissman, arXiv: 2412.17784.
- [6] Y. Hikida and V. Schomerus, JHEP06 (2024) 071.



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 (The University of Electro-Communications)

Kenichi Sasaki (NTT Basic Research Laboratories)

Kento Watanabe (Department of Physics, Tohoku University)

Kazuaki Takasan (Department of Physics, University of Tokyo)

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

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.

In this year, we have continued to fabricate devices that simulate a (1+1)-dimensional expansion/contraction universe, and have performed real-space and -time imaging while dynamically expanding and contracting the quantum Hall edge using a stroboscopic microscope with a time resolution of a few 100 ps, which was almost completed by last year. We have reached a stage where we obtain signals which can be related to the classical expansion/contraction of the edge [1]. It is known that quantum Hall systems are topologically robust, consisting of the gapless edge and a bulk with an energy gap. This year, we have been studying the edge and bulk excitations using the $\nu = 2/3$ fractional quantum Hall state with electrodes that can electrically excite both the edge and bulk, and we have studied the behavior of the bulk excitations [2]. The bulk and the edge are inseparable and the bulk of the (1+1)-dimensional universe is of higher dimension (2+1) than the (1+1)-dimensional universe. So, it is important to study the bulk and edge of quantum Hall systems experimentally, in relation to the gauge-gravity correspondence and the connection to the brane world.

Experiments on dynamic mirror systems, which can be constructed using high-temperature plasmas and lasers, are

crucial as physical analogies for Hawking radiation emitted from black holes. Hotta and his collaborators have theoretically demonstrated that the purification partners of Hawking particles are not generated by shock waves arising from the accelerated deceleration of the mirrors [1]. Furthermore, Hotta and Murk proposed a new formulation of the Leggett-Garg inequality for macrorealism, recently discussed in the context of quantum gravity applications, using probability vectors and analyzed it through machine learning [2].

Shibata and his team are working to improve the DMRG (Density Matrix Renormalization Group) and TDVP (Time Dependent Variational Principle) methods to analyze the time evolution of larger systems over long periods of time. The improved calculation methods make it possible to estimate the propagation speed of excitations along edges, and quantitatively analyze the time evolution of the potential applied to the edge and the response of the edge state. They are also analyzing the size and shape of the impurity potential that enables the generation and trapping of anyons that appear as elementary excitations from fractional quantum Hall states.

Yonekura has found a new constraint on the topology of string theory [5]. On a D3-brane in Type IIB string theory, there are fermions and gauge fields. It was known that these fields have subtle nonperturbative anomalies. The anomalies must be cancelled by a modification of Dirac quantization of Ramond fields. However, in this work, it is found that there are cases in which such a cancellation is impossible, depending on the topology of spacetime. Those spacetime topologies would lead to inconsistency and hence they are forbidden as a spacetime of Type IIB string theory. This new constraint is very nontrivial and cannot be seen by traditional methods.

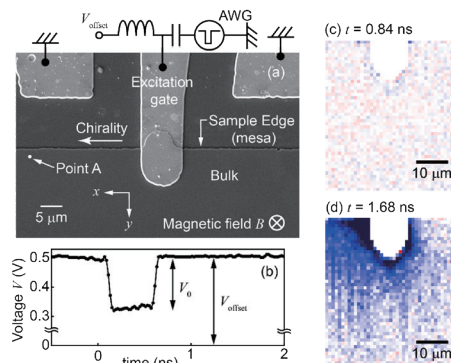


Fig. 1 (a) Scanning electron microscope image of a typical device. (b) Voltage waveform applied to the excitation gate. (c)(d) Real-space mapping of the PL energy shift captured for $t =$ (a) 0.84 and (b) 1.68. Blue regions correspond to the edge and bulk excitation.

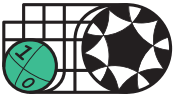
[1] Y. Jeong et al., Quantum Extreme Universe, Matter, Information, and Gravity (2024).

[2] Q. France, Y. Jeong, A. Kamiyama, T. Mano, K. Sasaki, M. Hotta, G. Yusa, arXiv:2502.01052.

[3] Y. Osawa, K.-N. Lin, Y. Nambu, M. Hotta, and P. Chen, Phys. Rev. D **110**, 025023 (2024).

[4] M. Hotta, and S. Murk, Phys. Rev. A **109**, 062224 (2024).

[5] K. Yonekura, JHEP **07** (2024) 112



Gravitation and cosmology: principles and applications based on quantum information

[Principal Investigator]

Tetsuya Shiromizu (Nagoya University)

[Co-Investigator]

Keisuke Izumi (Nagoya University)

Tsutomu Kobayashi (Rikkyo University)

Masato Nozawa (Osaka Institute of Technology)

Norihiro Tanahashi (Kyoto University)

Hirotaaka Yoshino (Osaka Metropolitan University)

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Daisuke Yoshida (Nagoya University)

[Research Collaborators]

Sumio Yamada (Gakushuin University)

In this group, we are performing fundamental research on the origins of the universe, its accelerated expansion, and the internal structure of black holes, examining these topics from both higher-dimensional and four-dimensional spacetime perspectives.

Tanahashi, in collaboration with Kinoshita, a researcher in Group B03, has discovered a novel property: the induction of spin current in materials with differential rotation. This was achieved by analysing condensed matter theory from a relativistic perspective [1]. This research was selected as an Editor's Suggestion in *Phys. Rev. B*. Consideration from the AdS/CFT perspective is expected.

Yoshida, in joint research with members of Groups B01 and B03, examined the "quantum focusing conjecture" related to the growth rate of generalised entropy, including entanglement entropy, in theories of general relativity incorporating higher-order curvature corrections. Then, he showed that the quantum focusing conjecture holds for the spatially averaged growth rate [2].

Yoshino focused on the phenomenon where spatial ruptures, Kaluza-Klein bubbles, form as the radius of the extra dimension approaches zero and expands. Yoshino developed numerical techniques for setting initial conditions to simulate collisions between such bubbles and black holes [3]. Meanwhile, Nozawa analysed the supersymmetry of the Robinson-Trautman solutions of the Einstein-Maxwell system with a cosmological constant, which admit null geodesic congruences with zero shear and rotation. He achieved a complete classification of supersymmetric solutions, explicitly constructing the metrics, gauge fields, and Killing spinors, and demonstrated that only naked singularities are allowed [4]. These studies provide fundamental insights into bulk spacetime.

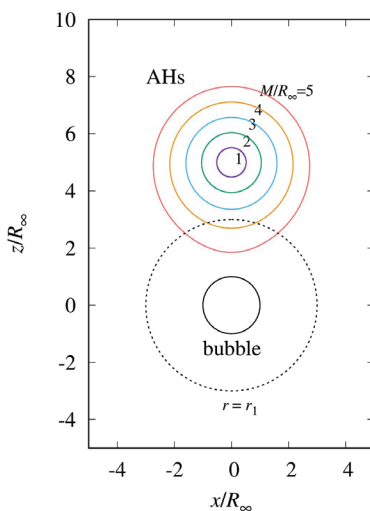


Fig. Numerically computed spacetime containing a bubble and a black hole. The locations of the black hole horizons are shown for various masses.

In the context of inflation models involving axion fields coupled to $SU(2)$ gauge fields, Kobayashi pointed out that the problem of excessive primordial gravitational wave generation at cosmic microwave background scales can generally be avoided by incorporating non-minimal coupling with the gravitational field [5].

Izumi, Shiromizu, Yoshida, Yoshino, and others identified loosely trapped surfaces defined in the strong gravitational field regions outside black hole for slowly rotating black hole [6]. Additionally, Izumi, Shiromizu, and Yoshino incorporated the effects of electromagnetic fields into inequalities for attractive gravity probe surfaces (AGPS, surfaces that detect gravitational strength regardless of its magnitude) [7]. They also showed the existence of extreme charges, similar to those in black holes. This series of studies on AGPSs has been summarised in the journal's "Recent Research Highlights" section.

This year, with Group B03, we contributed to the organisation of the 33rd workshop on General Relativity and Gravitation in Japan (JGRG33), held at Kindai University from December 2 to December 6. The workshop was attended by 235 participants from both Japan and abroad. Additionally, we hosted a workshop titled "Exploring Black Hole Universes and Spacetime Singularities" at the Biwako Conference Centre from August 16 to 18 (30 participants) and a mini-workshop titled "The Second Workshop on General Relativity and Geometry" at Nagoya University on November 18 and 19 (85 participants). The latter featured an invited lecture by Mario Micalef on the mathematical foundations of minimal surfaces, which is closely related to the Ryu-Takayanagi formula for holographic entanglement entropy—a central topic in this Extreme Universe project—and is expected to contribute to future research. Furthermore, on February 12 and 13, 2025, we hosted the "SUPERGRAVITY" (16 participants) workshop at Osaka Institute of Technology.

- [1] T.Funato, S.Kinoshita, N.Tanahashi, S.Nakamura and M.Matsuo, *Phys. Rev. B* **111**, L060403 (2025).
- [2] T. Kanai, K. Maeda, T. Noumi, D. Yoshida, *Phys. Rev.D* **110**, 084037(2024).
- [3] H. Yoshino, arXiv:2501.11642[gr-qc].
- [4] M. Nozawa, *JHEP* **10**, 201(2024).
- [5] T. Murata and T. Kobayashi, *JCAP* **10**, 044 (2024).
- [6] K.Izumi, T.Shiromizu, D.Yoshida, Y.Tomikawa and H. Yoshino, *PTEP* **2024**, 113E02 (2024).
- [7] K.Lee, K.Izumi, T.Shiromizu, H.Yoshino and Y.Tomikawa, *Phys. Rev. D* **110**, 124051 (2024).



Quantum information theoretic approach to the dynamics of quantum field theory

[Principal Investigator]

Tatsuma Nishioka (Osaka University)

[Co-Investigators]

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

[ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

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

[Research Collaborators]

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

Nishioka (PI), along with Ge (Collaborator) and graduate student Shimamori, considered the renormalization group flow localized in space in the $(3-\epsilon)$ -dimensional $O(N)$ model. They constructed the first explicit example of composite defect operators consisting of defect operators with two distinct dimensions: surface operators and line operators [1].

Additionally, Nishioka, in collaboration with graduate students Kawabata and Ando, developed various methods to construct Narain-type $(1+1)$ -dimensional conformal field theories from general quantum error-correcting codes known as subsystem codes [2]. By gauging the Z_2 symmetry, they constructed fermionic conformal field theories and discovered supersymmetric conformal field theories derived from subsystem codes.

Ito (Co-I) and Matsumoto (Collaborator) extended the traditional methods for calculating the spectra of composite operators in gauge field theory using the Hamiltonian formalism. They made calculations possible even in parameter regions where the sign problem arises. Specifically, they added a topological θ -term to the Schwinger model with two types of fermions and successfully analyzed the θ -dependence of the composite particle spectrum with high precision [3]. Furthermore, in [4], Ito proposed the “Black-Encoding method,” which embeds the Hamiltonian of the Schwinger model into a large unitary matrix for time evolution, and compared its computational efficiency with conventional methods such as Trotter decomposition.

Okuda (Co-I) had previously shown that quantum simulations of certain lattice gauge theories could be realized through adaptive measurements of higher symmetry-protected topological (SPT) states. In [5], along with Parayil Mana and graduate student Sukeno, he clarified that a phenomenon called anomaly inflow occurs between SPT states and the simulated theories. In [6], it was demonstrated that anomaly inflow occurs generally between lattice models (many of which include fracton systems) with CSS code structures and their corresponding SPT states. Additionally, Okuda, in collaboration with Fujii, Fujikura, Kikukawa, and Pedersen, investigated the Schwinger model using the VUMPS method, achieving a two-order-of-magnitude improvement in the accuracy of the critical mass determination [7].

Honda (Co-I), together with graduate students Nakanishi and Shimamori, conducted extensive research spanning quantum field theory, cosmology, condensed matter physics, and quantum computation. First, they systematically discussed the relationship between lattice models related to fractons and quantum field theories [8, 9, 10]. Notably, in [8], they proposed a systematic method to generate fractonic lattice models from conventional lattice models and held a press release. In cosmology-related research [11, 12, 13], they primarily explored the application of resurgence theory to

quantum cosmology. In particular, [11] provided results that advanced a long-standing debate on the initial state of the universe, accompanied by a press release. Regarding quantum field theory, Honda, along with Matsumoto and others, studied the phase structure of four-dimensional $SU(2)$ Yang-Mills theory [14] and investigated methods to obtain the energy spectrum via quantum computation [15]. In connection with the above research, they gave six invited talks, organized eight workshops, and conducted two outreach activities.

Matsuo (Co-I) continued research related to the noncommutative Hall effect. Building on last year’s proposal of a new Calogero model describing the associated integrable system and its spectral properties, this year, they focused on the systematic derivation of related integrable models and the symmetries describing the system (e.g., Yangian symmetry). Additionally, they explored topics related to gauge theories and brane configurations in M-theory through the AGT correspondence and investigated the excited states of the quantum Hall effect as proposed by Jain and others.

This year, the D01 group also hosted the school “New Computational Methods in Field Theory 2024” at the University of Tokyo Komaba Campus. For details, please refer to the workshop report.

- [1] D. Ge, T. Nishioka, S. Shimamori, *JHEP* **02**, 012(2025).
- [2] K. Ando, K. Kawabata, T. Nishioka, *JHEP* **11**, 125 (2024).
- [3] E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, *JHEP* **09**, 155 (2024).
- [4] K. Sakamoto, H. Morisaki, J. Haruna, E. Itou, K. Fujii and K. Mitarai, *Quantum* **8**, 147 (2024).
- [5] T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sukeno, *Phys. Rev. Research* **6**, 043018 (2024).
- [6] T. Okuda, A. Parayil Mana, H. Sukeno, *SciPost Phys.* **17**, 113 (2024).
- [7] H. Fujii, K. Fujikura, Y. Kikukawa, T. Okuda, J. W. Pedersen, *arXiv:2412.03569*.
- [8] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, *Phys. Rev. Research* **6**, 023166 (2024).
- [9] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, *JHEP* **09**, 061 (2024).
- [10] H. Ebisu, M. Honda, T. Nakanishi, S. Shimamori, *arXiv:2408.05048*.
- [11] M. Honda, H. Matsui, K. Okabayashi, T. Terada, *Phys. Rev. D* **110**, 8 (2024).
- [12] M. Honda, H. Matsui, K. Numajiri, K. Okabayashi, *arXiv:2412.20398*.
- [13] M. Honda, R. Jinno, K. Tokeshi, *JCAP* **12**, 044 (2024).
- [14] M. Hirasawa, M. Honda, A. Matsumoto, J. Nishimura, A. Yosprakob, *arXiv:2412.03683*.
- [15] D. Ghim and M. Honda, *PoS LATTICE2023*, 213 (2024).



Tensor Networks and Quantum Many-Body Systems from Quantum Information

[Principal Investigator]

Kouichi Okunishi (Niigata University)

[Co-Investigator]

Hiroshi Ueda (IQIB, Osaka University)

Hosho Katsura (The University of Tokyo)

Chisa Hotta (The University of Tokyo)

Kenji Harada (Kyoto University)

[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Atis Yosprakob (Niigata University)

Soshun Ozaki (The University of Tokyo)

[Research Collaborators]

Tomotoshi Nishino (Kobe University)

Toshiya Hikihara (Gumma University)

Tsuyoshi Okubo (The University of Tokyo)

Shunsuke Furuya (Saitama Medical University)

The main targets of the D02 research group focus on developing the tensor network (TN) method and its mathematical foundations for a better understanding of intriguing phenomena arising from the dynamics of quantum many-body systems. Our goal is also to advance interdisciplinary research associated with the ExU collaboration. This year, we have made steady progress in our research and also proposed a novel matrix-product-state (MPS) based method relevant to quantum spin materials. Below, we would like to highlight some of our key findings.

First, in terms of the relationship between TN and holography, last year, Okunishi and Takayanagi from the C01 group showed that a tree-like TN, such as a Bethe lattice, has a holographic renormalization group structure and can be interpreted as a p-adic AdS/CFT. As a next step, Okunishi and Nishino calculated the spin correlation function along the outer edge for a hyperbolic lattice model and demonstrated that a non-trivial scaling dimension is realized by the loop network structure essential to the critical phenomenon, implying steady progress in elucidating the multiscale entanglement renormalization ansatz (MERA). The ExU PD, Dr. Yosprakob, generalized the construction of TN by character expansion to SU(N) gauge theories and actually implemented it in the tensor renormalization group [2]. Future applications are expected. Meanwhile, from the perspective of quantum computing and TN, Ueda et al. proposed a sequential structural optimization for loop-structured TNs (quantum circuits) that include MERA [3] by developing the structural optimization of tree-like TNs. Furthermore, they generalized the quantum circuit representation algorithm for complex vectors based on TN and applied it to a hybrid quantum-classical machine learning algorithm [4]. Also, Harada et al. investigated the properties of a tree-like TN structure optimization method based on the minimum mutual information principle for quantum generative models called Born machines. In particular, their research demonstrated that the structural optimization method extracts the relationships inherent in the data, such as random patterns, hand-drawn character images, stock price fluctuations, etc., as a network structure [5]. Our understanding of TN structures in machine learning is also steadily improved.

From the viewpoint of quantum many-body dynamics, Katsura et al. proposed a new method for constructing fermion and quantum spin systems that exhibit peculiar dynamics called quantum scar states [6]. Katsura also showed that it is possible to create an infinite number of frustration-free models that exhibit spontaneous breaking of continuous symmetry in the ground state, even though they are one-dimensional systems [7]. In collaboration with

Katsura, Ozaki, ExU PD investigated the dynamical and thermodynamic properties of the Majorana SYK model in the clean limit [8] and clarified that, in particular, at finite temperature, the out-of-time ordered correlation function shows an exponential growth in the early time evolution. Meanwhile, Hotta et al. developed the cluster-projected MPS method, determining whether a given model falls into the frustration-free category and constructing its exact solution [9]. In particular, this method was applied to a one-dimensional quantum spin model corresponding to an f-electron system, leading to the discovery of a quantum Lifshitz multicritical point, which attracted significant attention. Furthermore, the method was shown to be applicable to toric codes and other two-dimensional systems. In addition, Hotta investigated the classical Glauber dynamics at finite temperatures in organic materials that exhibit a one-dimensional neutral-ionic transition and revealed that diffusive conduction in a strongly correlated system increases near the phase transition point [10].

Dr. Yosprakob, promoting interdisciplinary research in TN and lattice field theories, will move to YITP at Kyoto University in April as a JST CREST researcher. While our partnership will continue, we are also in the process of selecting a new ExU PD. We have high hopes for further developments in the final year of our collaboration.

[1] K. Okunishi and T. Nishino, PTEP **2024**, 093A02 (2024).

[2] A. Yosprakob and K. Okunishi, arXiv:2406.16763

[3] R. Watanabe and H. Ueda, Phys. Rev. Research. **6**, 033259 (2024).

[4] A. Nakayama, H. Morisaki, K. Mitarai, H. Ueda, and K. Fujii, arXiv:2408.03000.

[5] K. Harada, T. Ohkubo, and N. Kawashima, arXiv:2408.10669.

[6] M. Nakagawa, H. Katsura and M. Ueda, Phys. Rev. Research **6**, 043259 (2024).; K. Sanada, Y. Miao, and H. Katsura, arXiv: 2411.01270.

[7] H. Watanabe, H. Katsura, and J. Y. Lee, Phys. Rev. Lett. **133**, 176001 (2024).

[8] S. Ozaki, and H. Katsura, Phys. Rev. Research **7**, 013092 (2025).

[9] H. Saito, and C. Hotta, Phys. Rev. Lett. **132**, 166701 (2024). [Editor's suggestion]; H. Saito, and C. Hotta, Phys. Rev. Research **7**, 013086 (2025).

[10] Y. Sakai, and C. Hotta, Phys. Rev. B **110**, 174306 (2024).



Search for toric code phase in quantum matter

In many-body electron systems, elementary excitations with new properties can emerge due to interactions between electrons. Fractional excitations in quantum spin liquids are one of the examples, in which quantum entanglement of a large number of electron spins leads to the emergence of such novel excitations. In Kitaev quantum spin liquids, for example, anyons appear, which are expected to have applications in topological quantum computation. Since such elementary excitations do not necessarily have charge unlike the original electrons, I resort to a thermal measurement approach to detect them and to elucidate their properties. In particular, I perform precise measurements of entropy, specific heat, and heat transport coefficient, which reflect fractional statistics, on bulk single crystals of quantum spin liquids and topological superconductors, where novel elementary excitations are expected. Recently, we have investigated the existence of Majorana excitations, which form anyon excitations in Kitaev quantum spin liquids, by precise entropy and specific heat measurements in a magnetic field. In the Kitaev quantum spin liquid in a magnetic field, it was expected by the original Kitaev paper that the amount of excitation of the Majorana particle changes significantly depending on the direction of the magnetic field. We have succeeded in observing this property experimentally by making precise measurements of entropy and specific heat in a magnetic field.

In this project, I try to explore quantum entanglement



● Principal Investigator

Yuta Mizukami

Department of Physics, Tohoku University
Associate Professor/
JST FOREST

Born in Gifu, 1987

Graduated from Kyoto University in
March 2016

Current position

since April 2022 (Tohoku University)

since October 2024(JST)

states in materials from the viewpoint of thermal measurements, based on the entropy and heat measurements we have established so far. In particular, I will try to explore the toric code, a model of quantum error correction by anyons, in materials. By conducting this research, I hope to establish basement for approaching quantum information from bulk quantity measurements such as entropy and heat on real materials.



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

Understanding distinctive quantum features is essential for studying quantum computation and the properties of many-body quantum systems. Previous studies have mostly focused on quantum superposition and entanglement as key quantum properties. However, with advancements in quantum information science, involving operations like “computation” and “simulation,” identifying what makes a system fundamentally “quantum” has become more complex. For example, circuits composed solely of Clifford gates can be efficiently simulated by classical computers, even though they can create superposition and entanglement. This suggests that these properties alone are insufficient to capture the full essence of quantum computation's advantages.

A significant property beyond what Clifford gates can generate is known as “quantum magic.” Magic states enable Clifford circuits to achieve universal quantum computation. While earlier studies emphasized the constructive aspect of using magic states for universal computation, here we aim to treat quantum magic as a fundamental quantum resource akin to entanglement. This requires a framework to quantify the “non-Cliffordness” of quantum states and gates.

The goals of this project is to establish quantum magic as a new quantum characteristic that naturally emerges in the context of quantum computation and to apply it to the analysis of quantum information processing and the deeper understanding of physical systems. Specifically, this study



● Principal Investigator

Ryuji Takagi

Department of Basic Science, The
University of Tokyo
Associate Professor

Graduated from Massachusetts Institute
of Technology in September 2020

Current position since April 2023

aims to (1) develop and apply a theoretical framework for quantifying quantum magic using the framework of quantum resource theory, (2) analyze the ultimate performance limits of fault-tolerant quantum computation by evaluating magic states, and (3) explore the use of quantum magic as a resource for studying the quantum properties of many-body systems.



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

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 the previous public research, we proposed a method to generate t-design on a quantum many-body system only by random unitary transformations to small subsystems. In this research, we will clarify that the convergence speed of the t-design generation protocol using indirect control obtained in the previous public research shows practical scaling with respect to the size of the system and t. To this end, the first goal is to obtain supporting evidence that our protocol has a practical convergence speed. Specifically, we aim to obtain a good lower bound on the convergence speed by applying a



● 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 2015

method for finding the shortest control time in quantum control theory. Our second goal is to find a way to apply the protocol in realistic noisy quantum many-body systems using only indirect control. To this end, we aim to develop an error mitigation technique using indirect control, and to make variational quantum algorithms on quantum many-body systems applicable even in realistic noisy environments.

In this way, this research shows that t-design can occur as a natural physical phenomenon in common quantum many-body systems. This research will contribute to future research on the thermalization and equilibration of quantum many-body systems, and will also provide a simple method for converting ordinary quantum many-body systems such as spin chains into approximate quantum chaotic systems using random access.



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

Nuclear magnetic resonance (NMR) is useful as quantum information processing system, while the research so far has been limited to isolated molecular systems. In this study, we focus on systems with macroscopic quantum entanglement, such as the quantum Hall effect and quantum spin liquids, and develop a new quantum system using long-range quantum entanglement between nuclear spins. Condensed-matter NMR has been utilized as a local magnetic probe through hyperfine interactions. Our NMR group has also performed measurements on various topological quantum systems and clarified the properties of their low-energy excitations. In particular, Kitaev quantum spin liquids host anyons or Majorana fermions with fractional statistics as elementary excitations, which are useful for error-tolerant quantum computing. Indeed, we have succeeded in observing anisotropic low-energy excitations that evidence the existence of Majorana fermions. In a highly pure quantum spin liquid state, a gap opens in the electron spin excitation, making it possible to control nuclear spins coherently over a long period of time. Recently, we have succeeded in creating discrete-time crystals of nuclear spins that last for hundreds of milliseconds by applying periodic perturbations. Similar behavior has also been observed in practical quantum information systems such as optical lattices and superconducting qubits. If long-term quantum control of stable quantum magnetic materials can be achieved through this research, it will



● Principal Investigator

Yasuhiro Shimizu

Department of Physics, Shizuoka University
Professor

Born in Hyogo, 1977

Graduated from Kyoto University in March 2005

Current position since April 2024

provide a new system with dramatically improved versatility. Furthermore, we are working on measuring the quantum entanglement of open macroscopic quantum systems and developing new quantum phenomena. Specifically, it includes quantum state tomography measurements and phenomena unique to quantum many-body systems such as quantum scratches and quantum chaos. Through this project, we hope to receive theoretical proposals from various fields, such as entanglement entropy measurements and many-body localization theory, which will serve as an opportunity to create novel quantum phenomena.



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

In general, for an N -qubit system, it is possible to reconstruct its density matrix if one can measure all many-body correlations up to all combinations of locally different Pauli matrices (quantum state tomography). However, such an observational setup on a locally different basis would require elaborate manipulations at the single qubit level. In addition, the number of such measurements grows exponentially with the size of the system (4^N for N qubits), which requires some ingenuity for a scalable method. In artificial quantum systems with high controllability, such as ion trap and optical qubit systems, quantum state tomography up to about $N \lesssim 8$ has been successful. Systems of neutral atomic gases in periodic potentials (optical lattices) can prepare large systems of $N \gtrsim 10^5$, and quantum gas microscopy can be used to observe number correlation functions at the single-site level. This is especially useful as a stage for quantum simulations of condensed matter systems. Since the lattice spacing is about the wavelength of light, it is technically challenging to perform many local operations at the single-site level, and the measurement of correlation functions is almost limited to observations in the global diagonal basis ($Z \otimes N$) or the global off-diagonal basis ($X \otimes N$) by $\pi/2$ pulses. In this study, we develop a quantum state tomography method that can be performed only with global manipulations on artificial quantum systems. Specifically, by combining the global basis transformation via $\pi/2$ pulses and the (posi-



● Principal Investigator

Hideki OzawaDepartment of Applied Physics, Waseda University
Visiting Researcher

Born in Tochigi, 1990

Graduated from Kyoto University in March 2018

Current position since November 2024

tion-dependent) precession by a short-time magnetic field gradient, we obtain an orthogonal observable basis that looks like a spiral twisting with a pitch q of $O(3 \times 2^N n_q)$. Factor 3 is due to the axial direction of the spiral (X, Y, Z), and n_q is the number of different pitch q values (e.g., $n_q = 2N$ when using pitches that differ by π/N). Factor 2^N is whether a lattice site is included or not when measuring the many-body correlation function. The number of measurements is scalable since it only requires $3n_q$ number of polynomials.



Entanglement Entropy in Quantum Field Theories with Tensor Renormalization Group

The Tensor Network (TN) scheme, which shows rapid development across various fields since 2000s, is a theoretical or numerical approach to make a high precision analysis of the many body problems with the tensor network formulation. In our long-term research project (not restricted to this proposal) we apply the TN scheme to elementary particle physics focusing on the tensor renormalization group (TRG) method in the path-integral formalism, which was originally proposed in the field of condensed matter physics in 2007. The TRG method has fascinating advantages over the conventional numerical algorithms including the Monte Carlo method: (i) no sign problem and no complex action problem, (ii) logarithmic volume dependence of computational cost (computational cost in proportion to $\log(V)$ with V the system size), (iii) direct treatment of Grassmann numbers, (iv) direct measurement of the partition function itself. We explore new frontier of research subjects with the TN scheme, such as, the phase structure of the finite density QCD and the strong CP problem, where the conventional Monte Carlo approach is not allowed to access due to the sign problem.

Recently we have succeeded in measuring the von Neumann and Rényi types of entanglement entropies for the (1+1)-dimensional $O(3)$ nonlinear sigma model using the tensor renormalization group method. The central charge is determined from the asymptotic scaling properties of both entropies. We have also examined the consistency



● Principal Investigator

Yoshinobu KuramashiCenter for Computational Sciences,
University of Tsukuba
Professor

Born in Yamaguchi, 1968

Graduated from the University of Tokyo in March 1995

Current position since April 2013

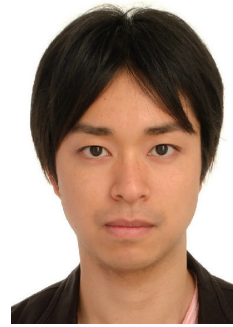
between the von Neumann entropy and the n th-order Rényi entropy with $n \rightarrow 1$. In this proposal we have a plan of two research directions. One is to calculate the entanglement entropies of the higher-dimensional models. We are interested in the area law of the entanglement entropies, which is to be investigated using three dimensional models. The other is to study the entanglement entropies at finite density. In the path-integral formalism an introduction of the finite chemical potential causes the complex action problem, which prohibits the standard Monte Carlo approach. The TRG method, as being free from the complex action problem, is qualified to explore the properties of the entanglement entropies at finite density.



Emergent physics from quantum entanglement

Entanglement is an important and intriguing property that does not exist in classical physics. In particular, it plays a fundamental role in quantum computers. In recent years, quantum entanglement has become indispensable for understanding both quantum gravity and condensed matter physics. For example, in quantum gravity, spacetime is expected to emerge from quantum entanglement. Additionally, in condensed matter theory, entangled matters exhibit nontrivial properties that cannot be realized in ordinary matters. Thus, when many fundamental degrees of freedom become entangled, unexpected physical properties emerge. In this research, to achieve a unified understanding of both fields, we aim to understand the physics that emerges from quantum entanglement.

In particular, one of the key aspects that become important in both the contexts of condensed matter and quantum gravity is that gauge symmetry arises from quantum entanglement. In the Standard Model of elementary particles, gauge symmetry is so crucial that all interactions are described by gauge theories. In condensed matter physics, gauge-theoretical descriptions are employed in contexts such as spin liquids and high-temperature superconductivity and are closely related to quantum error-correcting codes. On the other hand, in quantum gravity, general relativity itself is formulated based on the gauge symmetry of spacetime. Recently, it has come to be understood that gauge symmetry can emerge from entangled states. In this way, entanglement provides a way to



● Principal Investigator

Tokiro Numasawa

ISSP, University of Tokyo
Assistant Professor

Born in Tokyo, 1990

Graduated from Kyoto University in
March 2017

Current position since April 2022

understand why the natural world can be effectively described using gauge symmetry.

In this research, by focusing on symmetry, we aim for a unified understanding of the gauge symmetry that emerges from quantum entanglement, noting that this provides a unified perspective on the roles of quantum entanglement and gauge symmetry in both condensed matter physics and quantum gravity. Through this approach, we seek to understand the peculiar quasiparticles that can arise from entangled materials and the symmetries in quantum gravity, exploring the relationships between them. Furthermore, by extending our focus beyond symmetry and kinematics to dynamics, we aim to elucidate the physics that emerges from entanglement, encompassing everything from the understanding of ordinary matters to exotic phases of matter, and from the Standard Model of elementary particles to quantum gravity.



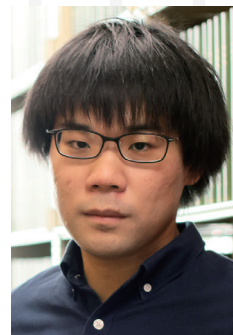
Dynamics and entanglement in open quantum systems

In recent years, there has been growing interest in the new physics realized in open systems far from equilibrium, beyond the conventional frameworks applied to isolated systems at equilibrium. However, quantum physics in open systems remains poorly understood, even with respect to key unresolved issues. My goal is to establish new foundational principles of physics, focusing on the rich variety of physical phenomena that emerge in open systems far from equilibrium. In Extreme Universe, I aim to explore the dynamics and entanglement of open quantum systems and construct a general theoretical framework for their phases and order. Specifically, I intend to address the following three critical issues:

(I) Quantum entanglement, while playing a crucial role in quantum information processing, has also been recognized as essential for characterizing quantum phases of matter. However, the role of entanglement in open quantum systems remains unclear.

(II) The chaotic behavior of the dynamics of isolated quantum systems has not only provided a foundation for quantum statistical mechanics but has also garnered significant attention in black hole physics, bridging condensed matter and high energy physics. However, the universal behavior of dynamics in open quantum systems remains largely unexplored.

(III) Recent studies have highlighted nonunitary dynamical phase transitions induced by quantum measure-



● Principal Investigator

Kohei Kawabata

Institute for Solid State Physics,
University of Tokyo
Associate Professor

Born in Hyogo, 1994

Graduated from the University of Tokyo
in March 2022

Current position since July 2023

ments as a new class of phase transitions unique to open quantum systems. However, many existing studies are based on specific cases, and a general, universal understanding has yet to be developed. Unlike phase transitions in isolated quantum systems, the understanding of such phenomena based on quantum field theory remains unestablished.

Tackling these issues, I aim to develop a comprehensive theoretical framework that generally describes and predicts phases and order of open quantum systems. This work lays the foundation for understanding open quantum systems, which should become increasingly crucial in the rapidly advancing field of quantum technology. By integrating condensed matter physics, high energy physics, and quantum information science, this research seeks to open new avenues in open quantum physics and bridge the gap between physics and quantum information science.

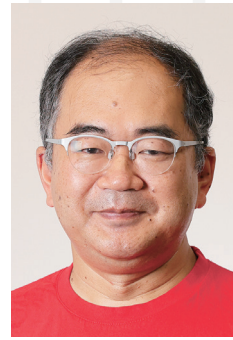


Theoretical exploration of mixed-state topological phases

I am exploring the universal properties of quantum many-body systems. The ground states of quantum many-body systems can be classified into quantum phases. Interestingly, in some cases, trivial phases are forbidden by the symmetries of the system (Lieb-Schultz-Mattis-type theorem), providing a guiding principle for realizing non-trivial quantum phases. Furthermore, the presence of symmetry can lead to a variety of topological phases. Investigation of the universal properties of quantum many-body systems, such as those represented by lattice models, is inseparable with that of the field theory. In particular, general constraints on quantum many-body systems are often related to quantum anomalies in field theory.

Field theory is also a powerful tool for understanding the dynamics of quantum many-body systems. I have studied nonlinear optical responses based on field-theory methods. On the other hand, I have also derived rigorous universal constraints for lattice models, such as sum rules for nonlinear conductivities. I am interested in comparing and combining these two approaches to quantum dynamics.

Most of my research on quantum many-body systems in the past was about the ground states and low-energy excitations. However, recently my work has been extended to open quantum systems and non-equilibrium states. The density matrix describing mixed states in open quantum systems can be mapped to a pure state of a quantum system with doubled degrees of freedom. Based on our knowledge



● Principal Investigator

Masaki Oshikawa

Institute for Solid State Physics,
University of Tokyo
Professor

Born in Hiroshima, 1968

Graduated from University of Tokyo in
December 1995

Current position since April 2006

on the pure quantum states, I have conducted a systematic analysis of the spontaneous breaking of a “strong symmetry” into “weak symmetry” in mixed states. I am aiming to further uncover quantum phases and phenomena unique to mixed states. In this context, perspectives from quantum information theory will be of increasing importance.

Field theory also serves as a powerful tool to describe the effects of measurements on quantum many-body systems. In particular, measurements on the ground state can sometimes be formulated in terms of boundary conditions in field theory. Utilizing the boundary conformal field theory, recently I have elucidated measurement-induced quantum entanglement between two quantum spin chains. I intend to advance my study further at the intersection among quantum many-body physics, quantum information, and field theory.



Entanglement in curved spacetimes: application of partner formula

The partner formula provides a method for concretely giving the “shape” of a mode (partner mode) that purifies a mode of interest in a quantum system. In this study, we focus on the behavior of the quantum entanglement structure in space-time with a horizon and the spatial profile of the partner obtained by the partner formula, and set the following two research goals:

1. We explore a method for qualitatively and unifiedly understanding the relationship between the space-time structure (horizontal structure) and quantum entanglement using the mode shape obtained from the partner formula and their degree of overlap. Specifically, we focus on the partner mode for a spatially localized mode in a quantum field, and by applying the partner formula, we visualize the quantum entanglement structure, understand the relationship between the space-time structure and the entanglement structure, and further evaluate various information-theoretic quantities directly using the spatial profile of the partner mode obtained by using the partner formula.
2. Proposal of an experiment for quantum entanglement measurement using a quantum Hall (QH) system: The edge modes of the QH system are realized as ideal quantum chiral scalar fields, and are expected to be applied as a field for various fundamental experiments involving entanglement of quantum fields. We propose several quantum fundamental experiments that can be



● 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

realized in the QH system, focusing on situations involving quantum entanglement and space-time structures. In particular, we focus on Hawking radiation that appears in a space-time with a horizon and the quantum entanglement structure between its partners, and propose an experiment related to the information content of space-time. This corresponds to realizing the situation of the information loss problem in the laboratory and performing experimental measurements. In addition, as a problem of quantum fundamentals, we focus on the time correlation for modes and the mode profile, and propose an experiment for the Leggett-Garg inequality (Bell inequality in the time direction) using the excitation of a quantum field in the QH system.



Spacetime, unconventionally emergent

My current big goal is to formulate quantum theory of gravity and to understand its universality without relying on unjustified intuitions coming from semi-classical gravity. To achieve this, I have been studying completely new semi-classical regime of gravity different from the ordinary semi-classical gravity theory. I study the emergence of spacetime, as one lowers the Newton constant, by using such new semi-classics. In particular, I am interested in the emergence of mysterious classical ensemble averaging present in semi-classical gravity, which obstructs to be seen as a normal quantum theory – I would like to study this from first principles such as String Theory.

What I have focused much recently is to study quantum gravity by using the large charge expansion in terms of the AdS/CFT correspondence. The large charge expansion is a relatively new method of analysing strongly-coupled field theories, and computes physical quantities related to operators at large charge Q , in the $1/Q$ expansion. On the other hand, the semi-classical limit of theories in terms of AdS/CFT is reached via the large- N limit – Therefore, connecting these two independent limits will be fruitful in achieving the big goal mentioned earlier.

I also study non-equilibrium systems. The SYK model is a quantum mechanical model of N fermions randomly interacting with one another, and is known to be dual to a two-dimensional theory of gravity known as the Jackiw-Teitelboim gravity. By taking a certain double-scaling



● Principal Investigator

Masataka Watanabe

Department of Complex Systems
Science, Graduate School of
Informatics, Nagoya University
Assistant Professor

Born in Osaka, 1992

Graduated from the University of Tokyo
in March 2019

Current position since June 2023

limit of the SYK model, it is known that the model has a certain quantum symmetry. Now, it is well-known to experts that certain driven-diffusive lattice gas systems have the same quantum symmetry. By studying the relationship between the two, I am looking for new directions of studying quantum gravity.



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

The academic ‘question’ at the heart of this work is ‘to find important implications for physics by focusing on the contribution of infrared divergences in curved spacetime field theories’. Here we specifically pursue two issues: 1) *the selection of extended gravity theories based on the removability of IR divergences in cosmological perturbation theory, and 2) the effect of field interactions on black hole evaporation.*

With regard to 1), we have presented a method for computing correlation functions based on truly observable quantities as one answer to the problem of infrared divergence in inflation, but it has not reached a common understanding in the field. In the course of our work, we have also shown that special conditions must be imposed as initial conditions for cosmological perturbations even in the framework of general relativity, which is not extended gravity, in order to avoid infrared divergence. We use this finding to demonstrate the usefulness of our findings by providing restrictions on cosmological models in extended theories of gravity.

With regard to 2), it has been reported that infrared divergence is also manifested when loop corrections are considered in the physics of black hole evaporation. This was thought to be consistent with the fact that brane black holes do not evaporate classically, but subsequent studies have shown that this IR divergence appears due to a lack of proper removal of the UV divergence. More specifically,



● Principal Investigator

Takahiro Tanaka

Graduate School of Science, Kyoto
University
Professor

Born in Japan, 1968

Graduated from Kyoto University in
March 1995

Current position since April 2014

we have already found that there is no IR divergence in the $\lambda\phi^4$ theory in a perturbative sense in the four-dimensional theory. In this study, we develop the calculations to incorporate non-perturbative effects and ascertain whether the emergence of a new phase near the horizon occurs. If a new phase does emerge, we extend the calculation to the expectation value of the energy-momentum tensor near the horizon, and seek its reaction effects on the dynamics of the spacetime.

These researches provide a novel opportunity to approach the above-mentioned extreme problems within the framework of low-energy effective field theories that can be treated in curved spacetime field theories.



The quantum nature of gravitons generated by Hawking radiation

Dark matter is known to be the gravitational source responsible for the formation of cosmic structures, but it has not been directly detected yet. Recently, the idea that primordial black holes, formed by collapsing under their own gravity after inflation, could be dark matter has become widely discussed. The goal of this study is to detect the quantum nature of Hawking radiation from primordial black holes, which would also confirm the existence of Hawking radiation itself.

In this research, I apply recent advances in quantum information theory to study primordial black holes. Specifically, I aim to detect the quantum nature of gravitational waves generated as Hawking radiation, which propagate through the Universe almost without obstruction.

To do this, I propose using a Hanbury Brown and Twiss intensity interferometer. Unlike traditional interferometers, which measure amplitude correlations, this device measures intensity correlations. This makes it easier to distinguish between classical and quantum effects. By linking intensity measurements to the statistical behavior of particles, we can measure the quantum properties of gravitational waves. This method will be applied to Hawking radiation, and I aim to predict the frequency range where gravitational waves from primordial black holes exhibit quantum properties.

Additionally, just as the random motion of minute particles ejected from pollen in water helped us indirectly



● Principal Investigator

Sugumi Kanno

Department of Physics, Kyushu University
Associate Professor

Graduated from Kyoto University in March 2006

Current position since September 2020

discover water molecules, I aim to indirectly detect gravitons by observing how macroscopic quantum objects lose their quantum properties (decoherence) when interacting with gravitons from the surroundings. To do this, I consider a tabletop experiment using a quantum-controlled Michelson interferometer. In this setup, mirrors (macroscopic quantum objects) at the ends of the interferometer's arms would lose their quantum state due to noise from gravitons originating from Hawking radiation in the environment. By predicting the decoherence time and verifying whether the experimental time matches the prediction, I could prove the existence of gravitons.



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

It has been about 15 years since the concept of symmetry-protected topological (SPT) phases was proposed, and significant progress has been made in understanding their characterization and classification. For bosonic (spin) systems, a detailed classification table has been provided based on the ideas of the projection representations of symmetry groups and group cohomology. However, a major unexplored area remains regarding where newly predicted SPT phases emerge in specific examples, how they compete with ordered phases, and what types of phase transitions occur between them.

In advancing the study of such specific examples, one key concept we would like to focus on is duality. Recently, using spin–chirality duality in a spin-ladder system, we have discovered a complex phase structure in which two dual SPT phases and two dual ordered phases compete with each other. In general, dual transformations can link SPT phases or connect SPT phases with ordered phases by transforming degrees of freedom either locally or non-locally. Additionally, phase transitions between linked phases occur at self-dual points, where the dual transformation represents the symmetry of the critical state, making it a key to identifying the universality class of the critical point. By investigating models that include self-dual points, we aim to construct model cases in which the competition between SPT and ordered phases can be examined in depth.

Moreover, as a new device that can realize topological



● Principal Investigator

Shunsuke Furukawa

Department of Physics, Keio University
Assistant Professor

Born in Ibaraki, 1980

Graduated from Tokyo Institute of Technology in March 2007

Current position since April 2019

states and phase transitions, we are also focusing on cloud-accessible quantum computers. Topological states represented by tensor product states can be realized by combining quantum gate operations, and physical quantities that characterize topological properties, such as string correlations, can be measured. In this case, quantum error mitigation is expected to suppress the effects of noise inherent to real devices. Simulations incorporating noise have been conducted so far, and we plan to move forward with experimental validation on real devices. In one dimension, string correlations can be calculated classically using transfer matrices, whereas in two dimensions and above, such calculations are non-trivial, making quantum computers highly advantageous in this regard.



Quantum Universe and Singularity from Quantum Information

The goal of this publicly offered research is to understand the classical and quantum aspects of black hole interior in terms of holographic principles and quantum information theory.

The black holes have been playing a key role in understanding the quantum aspects of gravity. AdS/CFT correspondence, a concrete realization of the holographic principle, is a prospective way to formulate quantum gravity in AdS, and it has played a central role in most of the recent progress. On the other hand, there are many aspects of the holographic principle that are not well understood, such as how to describe the interior of black holes using the holographic principle, and we are still at the stage where we need to deepen our understanding of the holographic principle itself. In particular, understanding “how the singularity inside of the black hole is described from the holographic point of view” is one of the most important problems.

As a first step to understanding this problem, I am working to clarify “what aspects of the quantum state (on the boundary) are reflected in the information of the spacetime singularity”. More specifically, I am working on what quantum information theoretic quantities can probe the singularity of black holes. This topic is directly related to the research theme of Group B. Another situation where the physics of singularities becomes important is in the very early stage of the universe, which is related to the research



● 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

theme of Group C. Eventually, I hope to consider the above issues in a broader context.

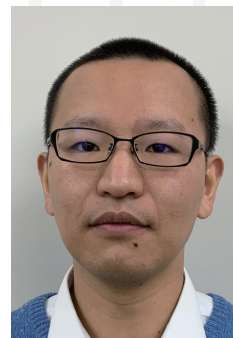
This is the second time that I have joined the ExU Collaboration as a member of the publicly offered research group. The last time I was blessed with new opportunities for collaboration, and I was able to find new research directions that I had not initially envisioned. This time, again, I would like to consider the issue of quantum gravity from various perspectives through collaboration in the ExU.



Tensor network study of quantum spin liquids in nonequilibrium systems

Spontaneous symmetry breaking is a pivotal concept in modern physics. However, several quantum phenomena do not follow this framework in equilibrium systems. Among these, quantum spin liquids, insulating states without spontaneous symmetry breaking even at zero temperature, are particularly intriguing, and entanglement plays a crucial role in characterizing these quantum states. On the other hand, it is a non-trivial question of how states analogous to quantum spin liquids could exist in nonequilibrium systems. Solving this question would deepen our understanding of thermalization mechanisms, the characteristics of quantum phase transitions in nonequilibrium systems, and the role of entanglement in such systems. However, to date, there have only been limited studies that rigorously construct analogs of equilibrium quantum spin liquids in open quantum systems. Examining parameter regions that cannot be handled by exact methods using high-precision numerical techniques is desirable. The tensor-network methods, which have been used in equilibrium systems, are one of the optimal tools for exploring quantum spin liquids. In this research, we attempt to examine and characterize quantum spin liquid-like states unique to nonequilibrium systems by calculating the dynamics of isolated quantum systems and open quantum systems with dissipation described by the Gorini-Kossakowski-Sudarshan-Lindblad equation using tensor-network methods. We aim to propose setups for realizing these states in experiments based on the numerical results.

As a step toward exploring novel quantum states in nonequi-



● Principal Investigator

Ryui Kaneko

Department of Engineering and Applied Sciences, Faculty of Science and Technology, Sophia University Specially Appointed
Associate Professor

Born in Tokyo, 1986

Graduated from the University of Tokyo in March 2014

Current position since April 2024

librium systems, we have recently investigated the possibility of realizing exotic quantum states in equilibrium systems using two-dimensional tensor-network methods. We specifically search for the ground states of the square lattice SU(4) Heisenberg model with plaquette-type interactions, controlling the strength of the spatial anisotropy. We have found an SU(4) singlet ground state in the strong anisotropy region and a symmetry-broken ground state in the weak anisotropy region with coexisting anti-ferromagnetic Néel order and valence bond crystal order; both of them are consistent with previous studies. Furthermore, we have confirmed that a first-order transition occurs between the two phases in the intermediate anisotropy region. We have also proposed methods for experimentally observing these quantum states and phase transitions in ultracold-atom systems [1].

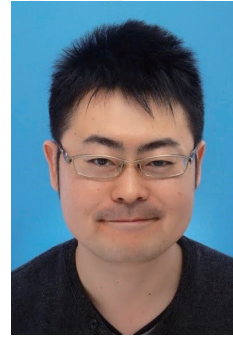
[1] R. Kaneko *et al.*, Phys. Rev. A 110, 023326 (2024).



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

Quantum entanglement is a critical concept for the advancement of quantum technologies that will support the future of modern society. In the field of condensed matter physics, theoretical studies using entanglement entropy (EE) have been actively conducted to investigate the quantum entanglement properties of exotic quantum states. These studies have revealed that the concept of quantum entanglement is fundamentally important for understanding exotic states, such as quantum spin liquids and topological order, as well as for advancing new numerical methods like tensor network methods. On the other hand, it is well known that measuring EE experimentally is extremely challenging, except in a few cases involving small systems, such as cold atom and optical systems. As a result, experimental research aimed at uncovering the unique quantum entanglement properties of real materials has lagged behind.

In this study, we focus on various experimentally-accessible entanglement measures that have been developed alongside recent advances in the field of quantum information. In the first term of the publicly offered research project, we tackled an identification problem between quantum spin liquids and randomness-dominated liquid phases in triangular lattice magnets. We proposed as a possible that using the quantum Fisher information density, an entanglement measure that enables the evaluation of multipartite entanglement from spin dynamics. In this second term, it is strongly desired to



● 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

validate this theoretical proposal with real material data. Investigating the connection between randomness-dominated liquid phases and many-body localization phenomena is also a compelling theme.

By combining large-scale numerical data obtained using supercomputers like Fugaku with high-precision experimental data provided by our research cooperators, we aim to shed light on the exotic quantum entanglement properties that emerge in quantum spin systems influenced by elements such as “randomness,” “quantum fluctuations,” and “frustration” through the synergy of experiment and theory.



New Development of Lattice QCD in Hamiltonian Formalism

This research aims to deepen our understanding of Quantum Chromodynamics (QCD) under extreme conditions, particularly focusing on out-of-equilibrium and high-density QCD.

This understanding is crucial for elucidating the phase transition from quark-gluon plasma, which existed in the early universe, to hadrons like protons and neutrons that constitute the matter around us. It is also essential for understanding the high-density hadronic matter thought to exist inside neutron stars.

Conventional studies have encountered unresolved issues, such as the early thermalization mechanisms in non-equilibrium QCD and the phase transition from hadronic to quark matter. These systems present significant challenges for lattice QCD simulations using the Monte Carlo method due to the “sign problem,” where the path integral weights become complex, preventing accurate statistical averaging. As a result, simulating nonequilibrium and high-density QCD is extremely difficult.

To overcome these obstacles, this study proposes a novel approach based on the Hamiltonian formalism. Implementing the Hamiltonian formalism on a computer involves technical challenges such as regularization into finite-dimensional Hilbert spaces and the construction of gauge-invariant physical states. To address these challenges, we utilize techniques involving quantum group deformations and topological methods like string networks to effectively



● Principal Investigator

Yoshimasa Hidaka

Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University Professor

Born in Fukuoka, 1977

Graduated from the University of Tokyo in March 2005

Current position since April 2024

handle the degrees of freedom for hadrons and quarks. This enables us to analyze the time evolution in nonequilibrium QCD and the phase structure in high-density QCD.

Furthermore, a key advantage of the Hamiltonian formalism is its ability to directly obtain wavefunctions, allowing for the exploration of entanglement structures in both nonequilibrium and high-density QCD.

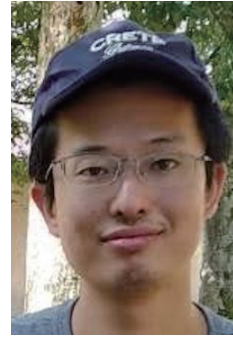
By employing these methods, we aim to gain a detailed understanding of thermalization mechanisms in nonequilibrium QCD and the quantum properties of phase transitions from hadronic matter to quark matter in high-density QCD, thus providing new insights into these complex phenomena.



Quantum black strings in particle physics models

The specific goals of this research proposal can be outlined in three main objectives. First, I aim to derive and establish the existence of quantum black string solutions within the framework of the Standard Model of particle physics. Quantum black string solutions represent extreme objects, extending along one spatial dimension, which arise due to quantum effects such as Casimir energy. These solutions are unique in their nature, standing apart from ordinary black holes due to their extended structure. I plan to investigate cases with positive, zero, and negative cosmological constants and work towards constructing these solutions explicitly. Furthermore, through the holographic principle, I aim to explore the corresponding conformal field theory that describes these black string solutions. By doing so, this research will contribute to the broader understanding and formulation of quantum gravity theories in realistic physical settings. Ultimately, this will provide a theoretical framework to understand the extreme behavior of space and time, particularly from the perspective of quantum information theory. Additionally, I will examine the role that quantum black string solutions play in the early universe and explore their potential in generating gravitational waves, thereby probing their cosmological significance.

Second, this research will delve into the quantum informational aspects of black strings, particularly focusing on their entropy and evaporation processes. The black hole



● Principal Investigator

Yuta Hamada

High Energy Accelerator Research Organization
Assistant Professor

Born in Kanagawa, 1989

Graduated from Kyoto University in March 2016

Current position since April 2022

information paradox has recently seen significant breakthroughs when approached from the perspective of quantum information theory, and applying these insights to black strings promises deeper insights into their behavior.

Finally, I will investigate the possibility of black strings existing in more fundamental theories, such as type IIB and heterotic string theory. Since string theory naturally extends to 10 or 11 dimensions, I will study various black brane solutions within these higher-dimensional supergravity frameworks. This exploration could potentially shed light on new and exotic solutions in quantum gravity theories.

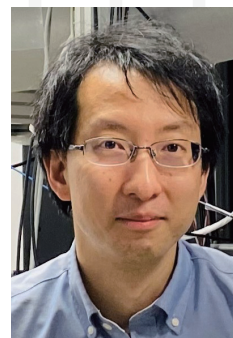


Measuring Quantum Entanglement of Many-Body States in a Cold-atom Quantum Simulator

Ultracold atomic gases produced by laser cooling in ultra-high vacuum provide a clean and isolated quantum system with long coherence times and high controllability. Quantum simulators based on these atomic systems have significantly advanced the experimental study of strongly correlated systems, such as the Hubbard model and quantum spin systems.

To understand the strongly correlated quantum phases realized in quantum simulations, it is crucial to characterize the many-body quantum states by measurements. Recent theoretical studies have highlighted the importance of the entanglement structure in characterizing topologically ordered phases and exotic quantum phases. However, the experimental measurement of entanglement in many-body systems remains challenging, regardless of the physical system.

This research project aims to experimentally probe the ground state entanglement structure of quantum spin models using programmable quantum simulators based on ultracold atomic gases via variational algorithm. The key of this approach is to exploit the high degree of freedom in ultracold atomic systems to implement entanglement Hamiltonians as many-body Hamiltonians of the physical system by optimizing the variational Hamiltonian parameters. Once the entanglement Hamiltonian is realized as a physical Hamiltonian, spectroscopic measurements can be used to measure the entanglement spectrum.



● Principal Investigator

Seiji Sugawa

Graduate School of Arts and Sciences,
The University of Tokyo
Associate Professor

Born in Tokyo, 1983

Graduated from Graduate School of Science, Kyoto University in March 2012

Current position since April 2023

Once the validity of this method is established, it can be widely applied to determine the entanglement structure of many-body quantum states in quantum simulations using ultracold atoms. Beyond quantum spin models, this technique could be applied to various strongly correlated quantum phases, including the verification of the Li-Haldane conjecture in topologically ordered phases, the study of many-body localized states.



Quantum entanglement in topological quantum spin liquids

Since the discovery of topological insulators, topology has become a fundamental concept in understanding quantum properties in condensed matter physics. The topological properties of electrons in materials are preserved under continuous deformation, making them resistant to perturbations like impurities. This leads to macroscopic quantum phenomena and dissipationless electrical conduction such as the quantum Hall effect.

Current research focuses on strongly correlated topological systems, where topological concepts intersect with strongly correlated electron systems like superconductors and quantum spin systems. These systems exhibit topological order characterized by long-range quantum entanglement. A prime example is quantum spin liquids, where strongly interacting localized spins continue to fluctuate without long-range orders or freezing even at absolute zero temperature. In these systems, localized spins fractionalize into quasiparticle excitations like spinons and Majorana fermions, which possess degrees of freedom entirely different from the original electrons. These states feature finite entanglement entropy and topological order. The emergence of quasiparticle excitations like Majorana fermions and non-Abelian anyons in topological quantum spin liquids is particularly significant for potential applications in topological quantum computing.

In this project, the research focuses on experimental studies of candidate materials, specifically the kagome



● Principal Investigator

Shota Suetsugu

Department of Physics, Kyoto University
Assistant Professor

Born in Nagoya, 1991

Graduated from the University of Tokyo
in March 2020

Current position since July 2020

quantum spin liquid $\text{YCu}_3(\text{OH})_{6.5}\text{Br}_{2.5}$ and the Kitaev quantum spin liquid $\alpha\text{-RuCl}_3$, using high-field magnetic and thermal transport measurements. These experiments aim to detect field-induced phase transitions to topological ordered phases, such as the $1/9$ plateau state in kagome antiferromagnets and the toric code phase in Kitaev quantum spin liquids. The goal is to fully characterize the nature of these topological ordered phases and establish new experimental frameworks for studying quantum entanglement in strongly correlated materials.



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

Quantum field theory predicts the Unruh effect, which states that the quantum vacuum state is a thermal radiation state for a uniformly accelerated observer and that the radiation temperature is proportional to the acceleration. The Unruh effect is intrinsically related to the Hawking radiation by the equivalence principle. However, the Unruh effect is difficult to observe the temperature less than 1 K for acceleration fields of about 100 MV/m realized by a radio-frequency accelerator. On the other hand, laser wakefield electron acceleration (LWFA) can achieve 100 GV/m, which is three orders of magnitude higher than it. LWFA has used long-focus optics to achieve long-range acceleration and energy gain, but the verification of the Unruh effect is still difficult because that is less than the liquid nitrogen temperature. In this study, we propose a new method for verifying the Unruh effect, which requires a higher acceleration field, using a short-focus optics to realize a localized but higher focused intensity and a higher acceleration field beyond 10 TV/m.

In LWFA, electron is accelerated by a longitudinal electron density gradient. Since the refractive index is a function of the electron density in the plasma, the electron density gradient of the wake field can be probed by a laser. To estimate the density gradient of electron which is oscillating with about 40 fs of a driving laser pulse width, a shorter probe laser such as sub-10-fs is required. A spectral broadening caused by self-phase modulation with chromatic



● Principal Investigator

Kotaro Kondo

Kansai Institute for Photon Science,
National Institutes for Quantum Science
and Technology
Senior Researcher

Born in Kanagawa, 1982

Graduated from Tokyo Institute of
Technology in March 2009

Current position since April 2016

dispersion compensation gives us to the ultra-short pulse probe laser. We will develop the probe laser system with a Schlieren method, which is more sensitive to the electron density modulation than the shadowgraph method, to evaluate the acceleration field in the LWFA.



Award Report

2024 ICTP Dirac Medal :

Prof. Tadashi Takayanagi (YITP, Kyoto University, ExU Head Investigator)

Prof. Shinsei Ryu (Princeton University, ExU Advisory Committee)

Prof. Tadashi Takayanagi (Professor at YITP, Kyoto University), the Head Investigator of the Extreme Universe project, and Prof. Shinsei Ryu (Professor at Princeton University), the advisory member of this area, have been awarded the 2024 ICTP Dirac Medal. The award cites “their insights on quantum entropy in quantum gravity and quantum field theories.” In particular, the discovery of the “Ryu-Takayanagi formula,” named after both scholars, and a series of subsequent groundbreaking studies have been highly commended for revealing “a fascinating and deep connection between quantum mechanics and information theory on one hand, and the geometry of space-time and gravity on the other.”

This marks a remarkable achievement as the first ICTP Dirac Medal awarded to Japanese researchers since Prof. Yoichiro Nambu received it in 1986. This milestone stands as a testament to the profound contributions of both scholars to the advancement of theoretical physics.

The “Ryu-Takayanagi formula” is rooted in the holographic principle and links the entanglement entropy in quantum field theory to the area of a geometrical surface in gravitational theory. While similar to the Bekenstein-Hawking formula, which relates the area of the event horizon of a black hole to thermodynamic entropy, the Ryu-Takayanagi formula clarifies the distinguished role of quantum information that underlies the spacetime structure. By demonstrating the essential role of quantum information in the emergence of spacetime from quantum many-body systems, the Ryu-Takayanagi formula has led to major breakthroughs in understanding the holographic principle.

Moreover, the “island formula,” which plays a key role in resolving the black hole information paradox, was derived by incorporating quantum gravity effects into the Ryu-Takayanagi formula in a natural manner. Building on this framework, the relationship between holography, tensor networks, and quantum error-correcting codes has been

identified, driving significant advancements in quantum gravity research. These insights continue to exert a broad influence across various disciplines of physics, including condensed matter physics and quantum information science.

The Ryu-Takayanagi formula was proposed in March 2006. This is the time when I was about to enter the second year of my master’s program and had started to study the AdS/CFT correspondence as my thesis topic. In the April, Prof. Takayanagi joined our group as an assistant professor and gave a seminar on his latest work. At that time, quantum information theory had yet to be recognized to particle physicists as it does today, and it was my first time to learn about “entanglement entropy.” I was fortunate to have a guidance of Prof. Takayanagi thereafter and observe his leadership and achievements in this growing field up close.

During collaborations with both Prof. Takayanagi and Prof. Ryu, I was deeply impressed by their profound insight into physics that transcends disciplinary boundaries and their exceptional ability to bring the best out of each other. Particularly memorable was the trust they built between them and their warm personalities. The attitude of creating new knowledge by respecting each other and integrating their perspectives, despite having different professional backgrounds, has been a great inspiration and encouragement to many researchers including myself.

Once again, I extend my heartfelt congratulations to Prof. Tadashi Takayanagi and Prof. Shinsei Ryu on this well-deserved recognition and express my hopes for their continued success and the further development of this area.

(Reported by Tatsuma Nishioka)



Fig. Left: ICTP Announces 2024 Dirac Medallists (<https://www.ictp.it/news/2024/8/ictp-announces-2024-dirac-medallists>). Prof. Shinsei Ryu is second from right and Prof. Tadashi Takayanagi is far right. Fig. Right: Ryu-Takayanagi formula



Tensor networks and diagrams

The Extreme Universe project aims to develop interdisciplinary research across various fields of physics, such as elementary particle physics, cosmology, and condensed matter physics, inspired by the rapid development of quantum information physics. One of the most important keywords at the nexus of such various fields is tensor network (TN), which provides a theoretical framework of systematic description and practical numerical calculation techniques of quantum many-body state by decomposing a large number of highly entangled physical degrees of freedom into a network of small size tensors. The fact that TN can be a keyword for interdisciplinary fusion implies that we have various viewpoints to explain it. There are already a lot of review articles [1] and packages [2] for the basics of TN and its practical algorithms, so here I would like to discuss its theoretical structure from a slightly different perspective than the standard ones.

When one opens a literature on TN, the first thing that catches your eye may be various diagrams. Figure 1 shows some typical examples: the matrix product state (MPS) for 1+1D systems, the state called PEPS/TPS for 2+1D systems, and the MERA with a hierarchical structure for 1+1 dimensional quantum critical systems. In the figure, each colored symbol represents a tensor, and the legs extending from it represent the associated degrees of freedom. For condensed matter problems, the network structure basically reflects the properties of the target system and the shape of the lattice, while for classical simulation problems of quantum circuits, the network structure tends to be more complex. In any case, the diagram visualizing the contraction of the complicated network of tensors enables us to understand the structure of TN intuitively and also helps prevent mistakes[3]. Of course, in order to construct a good TN, we need to optimize the network structure and tensor elements simultaneously, referring to the entanglement embedded in a target quantum system. For the TNs in Fig.1, the practical algorithms have already been established after verification by many trials and errors.

On the other hand, we already know that the Feynman diagram is an indispensable theoretical tool enabling efficient perturbative treatments of quantum many-body systems, where the diagram generated by the Feynman rule plays an essential role in grasping the physical meaning of elementary processes of particle propagation and scattering

behind the complex many-body problems. Both Feynman and TN diagrams are effectively used to describe complex many-body effects systematically, but what is the difference between them? Comparing them is very instructive in understanding the essential features of TN.

For the case of the Feynman diagram, given the Hamiltonian (or Lagrangian), all the diagrams are automatically determined by the relationship between the non-perturbative and perturbative terms. The non-perturbative term usually defines the propagator of free particles, which connect vertices representing scattering of them due to the interaction term. Then, physical properties are often extracted from correlation functions at the level of expectation value. In the context of Wilson-type renormalization groups, the action is gradually deformed by taking partial sums of higher-energy modes, where effective couplings of quasi-particles and effective interactions flow toward fixed points depending on the energy scale. However, it should be noted that the shape of diagrams is completely determined in the order of “particle interaction terms \rightarrow corresponding diagrams” on the basis of the quasi-particle picture. Although diagram pieces in the network are quite similar to those in TNs, the shape of the network itself cannot be freely manipulated. It is also important to note that no variational optimization of the quasiparticle basis is included in the renormalization group transformation [4].

In TN, the above order is inverted. First, a network is prepared, and then each tensor in the network is variationally optimized. For example, in MPS, or more generally in tree-like tensor networks (TTNs), it is possible to systematically construct the “best” basis using the singular value decomposition (SVD) of the wave function. The SVD approach can also be interpreted as maximizing entanglement entropy between subsystems. Since the optimal basis is different at each tensor leg in the network, it’s hard to see an intuitive physical interpretation like particle scattering. However, the singular values correspond to the approximate distribution of Bell pairs across the subsystems, making the relationship with the quantum information field more explicit. As shown in Figure 2, on the other hand, if we consider a TN with a hole of a tensor as a transformation U from bare spins to auxiliary degrees of freedom emerging at the hole, we can rewrite the eigenvalue problem for the Hamiltonian H as a variational problem for the effective

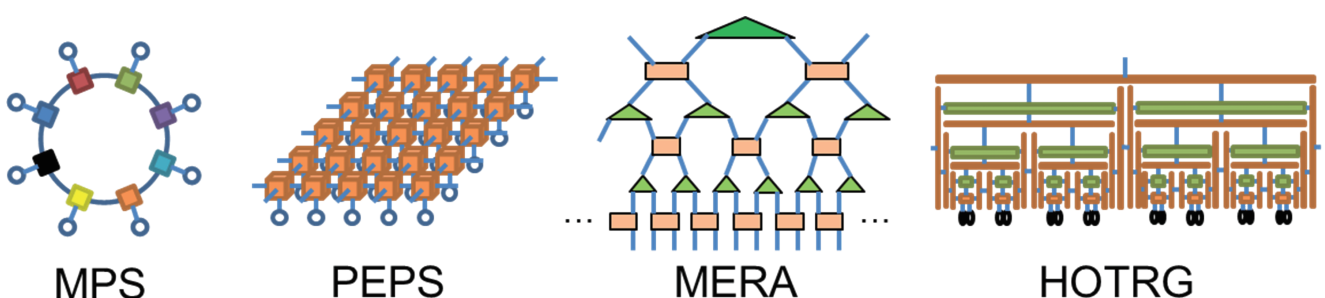


Fig. 1: Typical examples of tensor network diagrams

Hamiltonian \tilde{H} and the “wave function tensor” $\tilde{\Psi}$ that plugs into the hole. Thus, the TN is always accompanied by the renormalization-group-like idea of transforming to coarse-grained auxiliary degrees of freedom. In fact, in the density matrix renormalization group (DMRG), U is constructed iteratively via diagonalizations of \tilde{H} , which is why “RG” was assigned to DMRG. However, we should note that a hierarchical network structure is required to interpret the corresponding TN as a Wilson-type renormalization group transformation with a scale transformation. The network extends linearly for the MPS, so it cannot be directly associated with the Wilson renormalization group. In the early days of DMRG, confusion arose about whether it was of the Wilson-type because its theoretical background as an MPS was not fully understood. On the other hand, MERA and HOTRG have networks with a hierarchical structure, so the scaling dimensions can be systematically evaluated by analyzing the spectrum of the fixed-point tensor [5]. Anyway, we can flexibly choose the shape of its network to represent the physics we want to see and then perform variational optimization of each tensor to realize the best representation basis. This is why the TN can be an efficient non-perturbative method for quantum many-body problems.

To summarize, we have explained the features of the TN diagram compared to the Feynman diagram. So far, such well-established TN network structures in Fig.1 have been empirically constructed. The network corresponds to the geometry of discrete systems. The structural optimization of TNs is expected to play a key role in discussing its connection to quantum gravity. In this sense, it will be essential to clarify the principle of determining the optimal network structure for further developments of the TN. In fact, a structural optimization algorithm of the TTN was recently proposed based on the minimization principle of entanglement entropy. On the other hand, unlike Feynman diagrams, the TN method may not be suitable for extracting simple physical processes with a particle-like depiction. Even if we look at the legs from $\tilde{\Psi}$ in Fig. 2, it is not easy to understand their physical meaning immediately. Clarifying the relationship between TN and Feynman diagrams will be necessary, but systematic consideration has not yet been given. This point will also become essential for interdisciplinary research of physics associated with the TN in the near future.

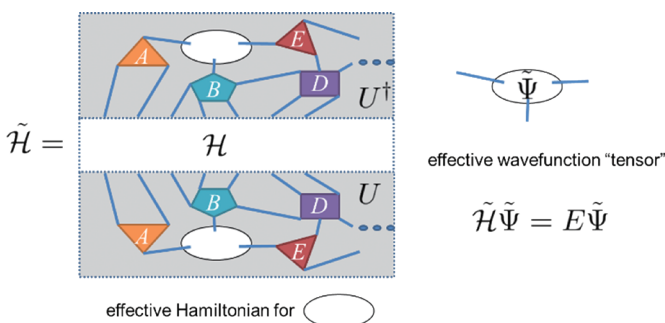


Fig. 2: A tensor network with a hole and the eigenvalue problem for the effective Hamiltonian

[1] U. Schollwöck, *Ann. Phys.* **326**, 96 (2011), K. Okunishi, H. Ueda, T. Nishino, *J. Phys. Soc. Jpn.* **91**, 062001 (2022). “Density Matrix and Tensor Network Renormalization” T. Xiang, Cambridge Univ. Press (2023).

[2] For example, ITensor, TeNPy, TeNeS, etc. They are easy to find on the internet.

[3] The diagram representation of TN was introduced by Nishino, Akutsu, and the author around 1995. However, it was not widely used because a site-sharing representation like the Ising model was employed. The edge-sharing (vertex) representation convenient for quantum many-body systems is now more standard. Also, in the community of quantum many-body systems, tensor legs are interpreted as renormalized auxiliary degrees of freedom, while in the quantum information field, the same auxiliary degrees are often interpreted as effective Bell pairs.

[4] Also, the bare field variable is often rewritten into an effective quasiparticle by the Hubbard-Stratonovich transformation. In this case, the resulting Feynman diagram is also determined by the relationship between the free and interaction terms for the effective quasiparticle. However, it should be noted that a variational optimization is involved only once, probably in the ultraviolet limit, since the quasiparticle basis is determined self-consistently.

[5] The accuracy of the scale dimension obtained with a finite bond dimension depends on the details of the network geometry. For example, the HOTRG has a hierarchical network, but its exponent is classical. The 1+1 dimensional MERA satisfies the logarithmic correction of the entanglement entropy due to its loop structure and thus can correctly describe critical phenomena.



● Author Information

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



● The 4th ExU Annual Meeting

25 - 28 October 2024, Osaka University, Nambu hall + Online

The 4th Area Meeting was held from September 25 to 28, 2024, at Nambu Hall, Osaka University. Approximately 100 area members attended in person, while about 40 participants joined online from both inside and outside the area. The meeting featured presentations of the latest research results, ranging from experiments to theory, on quantum information, cosmology, condensed matter physics, particle physics, and interdisciplinary fusion research between these fields. Active discussions were held during and after the presentations, as well as during coffee breaks.

At the beginning of the meeting on the 25th, Tadashi Takayanagi (Head Investigator, YITP, Kyoto) explained the organizational structure and objectives of the ExU collaboration. He reported on the research and outreach achievements of this fiscal year, and upcoming events. Postdoctoral researchers and members of the newly joined public research groups were also presented.

In this meeting, the PIs of the eight research groups first gave approximately 15-minute reports on the research outcomes of each group, followed by about 45-minute seminar presentations by members of each group. Many reports on collaborative research outcomes between different research groups and public research groups were presented, highlighting interdisciplinary fusion. In addition to presenting the latest results, the seminars featured questions directed at other fields and suggestions for new interdisciplinary fusion research.

The seminar topics were as follows: Tomoyuki Morimae (A01, YITP, Kyoto) presented the differences between quantum cryptography theory and classical cryptography theory, discussing the relationships between pseudo-random state generation, one-way state generators, EFI pairs, and the application of quantum cryptography theory to physics. Masaki Shigemori (B01, Nagoya) discussed the relationship between entanglement entropy and black hole entropy in string theory. Daisuke Yamamoto (B02, Nihon) presented results on the measurement methods for the entanglement entropy of quantum many-body systems using

spiral quantum state tomography. Kengo Maeda (B03, Shibaura Institute of Technology) reported on the study of the instability of AdS spacetime using the holographic principle. Yasuaki Hikida (C01, YITP, Kyoto) explained the proof of the AdS/CFT correspondence using tensionless strings in three-dimensional AdS spacetime. Kazuya Yonekura (C02, Tohoku) reported on results related to anomalies in quantum field theory and string theory. Keisuke Izumi (C03, Nagoya) presented research on area inequalities in gravitational theories with Maxwell fields. Masazumi Honda (D01, RIKEN) presented research on the application of resurgence theory in quantum cosmology. Koichi Okunishi (D02, Niigata) presented research on the relationship between the Ising model on hyperbolic space and the holographic principle.

Additionally, all 22 members of the public research groups gave 15-minute presentations, explaining their current results and future prospects. On the 25th and 27th, a total of 33 members participated in a gong show and poster presentations. Many graduate students, in addition to postdoctoral researchers, gave presentations, and lively discussions were held in the poster venue.

On the 28th, a new attempt to promote interdisciplinary exchange was made in the form of a panel discussion. The panelists, including Yoshifumi Nakata (A01, YITP, Kyoto), Tomonori Ugajin (B01, Rikkyo), Shuta Nakajima (B02, IQB, Osaka), Norihiro Tanahashi (C03, Kyoto), and Hiroshi Ueda (D02, IQB, Osaka), exchanged opinions on various interesting topics, such as questions directed at other fields and new possibilities for interdisciplinary fusion research.

In the final session, advisors Akio Hosoya (Tokyo Institute of Technology) and Nobuyuki Imoto (Project Prof. U. Tokyo) provided comments on the research of this area, the relevance and prospects of topics such as weak values and multipartite entanglement entropy and encouraged our collaboration for further achievements and advancing interdisciplinary research.

(Reported by Tatsuma Nishioka)



Conference photo

● ExU International Conference “Quantum extreme universe: matter, information and gravity”

21 - 25 September 2024, Onna-son, Okinawa, OIST

From October 21 to 25, 2024, we hosted a five-day international conference that brought together over 160 participants from around the world. The conference featured presentations on the latest developments and lively discussions related to quantum information, quantum gravity, and quantum matter. It was held at the Okinawa Institute of Science and Technology Graduate University (OIST) in Onna Village, Okinawa, a venue renowned for its commitment to nurturing young researchers through annual workshops. This conference was co-organized by ExU and OIST.

The program included 50 oral presentations (24 invited talks and 26 contributed short talks) and 69 poster presentations, covering a wide range of topics such as black holes, holography, quantum chaos, quantum computing, cold atoms, lattice QCD, quantum entanglement, and its experimental detection in real materials. Few attendees were likely familiar with all these topics, yet the Sidney Brenner Lecture Theater room (with a capacity of 150) was so packed that even on the first day early morning, some attendees had to stand. Additionally, more than 100 participants joined online. The lively Q&A between speakers and attendees, even during the presentations, left a lasting impression.

Another notable aspect of the conference was the animated discussions during coffee breaks and lunchtime. Participants, often with coffee or snacks in hand, gathered in front of blackboards placed near the venue to engage in debates. Understanding presentations from different fields could be challenging, often requiring a return to the basics of terminology and concepts. Ample time was allocated for this process, allowing participants to unpack and discuss the content with the cooperation of the speakers. As a participant myself, I thoroughly enjoyed these cross-disciplinary exchanges.

Among the many presentations, I was particularly

fascinated by recent developments in new entanglement measures, such as multi-entropy and tripartite entanglement, and their applications. Research on quantum many-body systems using these measures is still in its infancy, so that I strongly sensed the potential for future interdisciplinary collaborations. While there is still much I do not fully understand, I am eager to apply the insights gained from this conference to my own research.

On the afternoon of the third day, an excursion and banquet were held. Participants could choose from three options: the Busena Marine Park course, which featured views of Onna Village’s stunning coastline and unique fish; the Ryukyu Village and Zakimi Castle course, offering a glimpse into Okinawa’s culture and history; and the Ishikawa Mount Hiking course, showcasing Okinawa’s tropical nature. Despite slightly declining weather, attendees reportedly enjoyed their chosen activities while continuing discussions along the way. The banquet, held at the Oriental Hotel in Nago City, featured a variety of nice dishes inspired by Okinawan cuisine, fostering further camaraderie among participants. As one of the organizers, I would be delighted if this conference inspires many new collaborations.

Finally, I would like to express my gratitude to my fellow organizers, the OIST workshop section, and the Qubits and Spacetime Unit, whose behind-the-scenes efforts ensured the conference’s success.

Recordings of the oral presentations are available on the conference website for those interested in revisiting the talks: <https://groups.oist.jp/exu-oist/recorded-talks>.

(Reported by Tokuro Shimokawa)



Photo 1: First day of the conference



Photo 2: Scenes in an excursion [Busena Marine park].
Left: provided by Mr. Yuki Miyazaki (Aoyama Gakuin Univ.)
Right: provided by Dr. Soshun Ozaki (Univ. of Tokyo)





● The 6th ExU School & The 3rd young researchers' workshop of the ExU Collaboration

12 - 15 September 2024, Grand Park Otaru

Just before the annual meeting of the Physical Society of Japan, we held the 6th ExU school and the 3rd young researchers' workshop of the ExU Collaboration. For the school, we invited Ryo Namba (RIKEN) from outside of ExU Collaboration, and additionally had three lecturers from the ExU Collaboration: Yoshifumi Nakata (YITP, Group A01), Toshifumi Noumi (Univ. Tokyo, Group B01) and Ryui Kaneko (Sophia Univ., Group E02). By offering the lectures only to young researchers (students and post-doctoral researchers) attending the young researchers' workshop, we created an atmosphere in which they could easily ask questions about the fundamentals of each field and learn the basics of other fields at the level of young researchers. For this purpose, we purposely decided not to broadcast the lectures online. As a result, we were able to provide an environment where participants and lecturers could engage in intensive discussions. More than 70 young researchers participated in addition to the four lecturers. In this school, each lecturer gave two one-hour lectures. All lectures were given in English.

Ryo Namba (RIKEN) gave a lecture on the basics of cosmology in his lecture "Introduction to cosmology - How do we "sense" our Universe?". In the first half of the lecture, he started with an explanation of general relativity, and then gave an account of the history of observations and the theories about the expansion of the universe. In the second half of the lecture, he explained the history of observations and theoretical development of the cosmic microwave background radiation. Then, regarding gravitational waves, he outlined the observation of gravitational waves produced by black hole mergers and future plans for gravitational wave observation.

Yoshifumi Nakata (YITP, Group A01) gave a talk on the fundamentals of quantum information theory in his lecture "Introduction to Quantum Information Theory". In the first half of the lecture, he explained the axiom system that forms quantum information theory. He explained the mathematical expression and the physical meaning of each axiom. In the second half of the lecture, he gave an overview of specific topics dealt with in research on quantum information theory, such as quantum computation,

communication, cryptography, and physics-related topics.

Toshifumi Noumi (Univ. of Tokyo, Group B01) gave the lecture "AdS to dS" on the relationship between theories on de Sitter spacetime (dS) and theories on anti-de Sitter spacetime (AdS). First, he explained the geometric structure and symmetry of dS and AdS. Then, he reviewed the quantum theory on dS and explained its relation to the cosmic inflation of the early universe. Finally, he explained the similarities and differences between theories on dS and AdS.

Ryui Kaneko (Sophia Univ., Group E02) gave a talk on frustrated magnetism and quantum spin liquids appearing in itinerant electron systems and localized spin systems in his lecture "Condensed matter physics: from magnetism to quantum spin liquid". In the first half of the lecture, he started with an overview of the Hubbard model obtained by second quantization of electrons in crystals and introduced methods for analyzing the Hubbard model using the mean-field approximation and the strongly coupled limit approximation. In the latter half of the lecture, he explained specific analysis methods using the Kitaev honeycomb model.

In addition to the ExU School, we held the 3rd young researchers' workshop of the ExU Collaboration. The aim of the workshop is to provide an opportunity for young researchers in different fields to interact with each other and to create opportunities for collaborative research between different fields. More than 70 people attended this workshop, and the young researchers has interactions with each other. During poster presentations, in addition to the interaction among young researchers, lecturers of the ExU school gave individual research advice to the young researchers. In addition to the poster presentations, participants also interacted with each other during lunch and dinner, as well as during the school banquet.

Finally, Keisuke Izumi (Representative of the organizer, C03) made summary comments on the ExU School & the young researchers' workshop, bringing the 6th ExU School & the 3rd young researchers' workshop of the ExU Collaboration to a close.

(Reported by Keisuke Izumi)

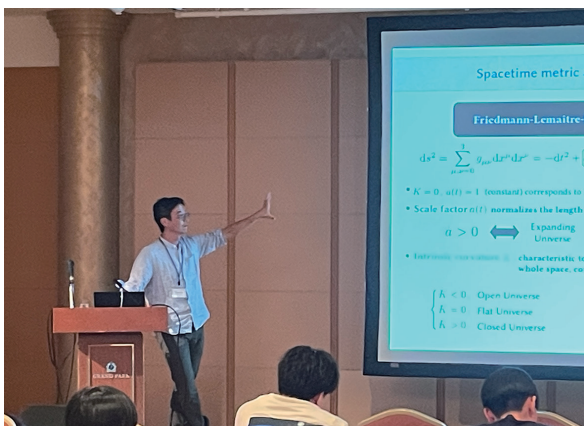


Photo1: Lecture by Ryo Namba



Photo2: Group Photo

● JPS Annual Meeting symposium session “Progress in dynamics research in quantum many-body systems: probing the physical laws of the extreme universe”

17 September 2024, Hokkaido Univ.

Let me introduce our co-joint symposium at the 79th JPS meeting on Sep.2024. This symposium aimed to provide a comprehensive overview of recent progress in the field of quantum dynamics, one of the three main themes of ExU project, from the perspective of condensed matter physics.

The first talk was by Prof. Motome on quantum reservoir probing. This approach, which contrasts with traditional quantum reservoir computing, involves manipulating the edges of a system to visualize how information propagates and through which channels during quench dynamics. I suppose this topic was very fresh to most audiences, as I received a message later from the PhD student in Motome group about how people became excited. The second talk by Prof. Mori was about thermalization and long-time relaxation, a topic that attracted many young researchers engaged in statistical mechanics. Then, Dr. Harada and Dr. Kaneko discussed recent advances in computational methods for quantum system dynamics. At my request, Dr. Harada also gave a very comprehensive review of many other technical methods developed very recently, which inspired people working on quantum dynamics including me. After a break, Dr. Tamura spoke about experimental observations of the structures formed when two-dimensional Bose atomic gases are confined in a box. The actual realization and detection of characteristic fluid dynamics were impressive. This was followed by a collaborative experimental-theoretical presentation by Dr. Yamamoto and Dr. Ozawa on their ongoing research in quantum tomography. They introduced an innovative approach using compressed sensing to reconstruct density matrices, which would normally require massive amounts of data, by measuring sparse expectation values of spiral spin operators.

A recurring bottleneck in constructing and analyzing quantum many-body states, including their characterization or tracking their time evolution is how efficiently and reasonably one can reduce the information to the minimum required. When the quantum correlations and entanglement grows rapidly with space and time, the calculation too often fails, and to find a path to overcome this problem is in high demand. It was nice to have variants of speakers to get together and present the topic which was not discussed much in JPS. The symposium drew young audiences, including many graduate students and early-career researchers. Their active engagement with numerous questions and lively discussions made the event vibrant and nearly overran the allotted break times. The speakers also seemed to enjoy delivering their talks, making this symposium a rewarding experience overall. Many thanks to Dr. Tezuka and Dr. Yamamoto for their support.

(Reported by Chisa Hotta)

● School “A novel numerical approach to quantum field theories 2024”

17 - 20 December 2024, The University of Tokyo Komaba II Campus + Online

Following the events in 2022 and 2023, the Extreme Universe D01 team hosted the school “A novel numerical approach to quantum field theories 2024”, held this year at The University of Tokyo Komaba II Campus. While primarily aimed at graduate students and postdoctoral researchers, the topics in this series have become increasingly advanced, and this year’s content leaned toward more expert-level discussions.

The school had 25 in-person participants and approximately 30 online attendees. Thanks to widespread promotion through various platforms, the participants came from diverse backgrounds, including particle physics, condensed matter theory, and experimental fields.

The invited lecturers were Yoshifumi Nakata, Rento Nagano, and Shunsuke Furukawa. Prof. Nakata provided an explanation of the Hayden-Preskill protocol in Hamiltonian systems, which models the mechanism for extracting quantum information from black holes. Drawing on his own textbook where he covers the Hayden-Preskill protocol, he presented an intuitive interpretation from a unique perspective. Prof. Nagano delivered an accessible introduction to quantum machine learning, focusing on constructing cost functions using quantum circuits. His lecture incorporated insights from his research at the International Center for Elementary Particle Physics, which involves quantum machine learning and quantum simulation of field theories. Prof. Furukawa lectured on “measurements and field theory in quantum many-body systems”. After covering several preparatory topics, he explained a theoretical framework for describing measurement results in experimental systems and spin models using boundary conformal field theory. Additionally, general talks were given by Sho Matsumoto, Yunhyeon Jeong, and Yuki Furukawa.

The lectures and presentations covered advanced topics spanning a wide range of fields. Despite the challenging material, lively discussions created a stimulating environment for participants. It is hoped that this school will contribute significantly to their future research endeavors.

(Repeated by Takuya Okuda)



A novel numerical approach to quantum field theories 2024



Conferences, Workshops and Seminars in FY2024

● Extreme Universe Colloquium

24th Extreme Universe Colloquium

Date: April 19th, 2024

Speaker: Prof. Robert Koenig (Technical University of Munich)

Title: Quantum fault-tolerance and locality



25th Extreme Universe Colloquium

Date: May 13th, 2024

Speaker: Prof. Robert Wald (University of Chicago)

Title: The Entropy of Dynamical Black Holes



26th Extreme Universe Colloquium

Date: July 10th, 2024

Speaker: Prof. Seiji Yunoki (RIKEN)

Title: Quantum many-body dynamics in digital quantum computers



1st Public Extreme Universe Colloquium

Date: October 16th, 2024

Speaker: Prof. Koji Terashi (University of Tokyo)

Title: Quantum Algorithm and Qubit Technology Applications for Particle Physics



2nd Public Extreme Universe Colloquium

Date: December 20th, 2024

Speaker: Prof. Roberto Emparan (University of Barcelona)

Title: Quantum Black Holes as Holograms



3rd Public Extreme Universe Colloquium

Date: February 6th, 2025

Speaker 1: Prof. Hal Tasaki (Gakushuin University)

Title: Haldane conjecture, valence-bond picture, SPT phases, and all that in quantum spin chains

Speaker 2: Prof. Masaki Oshikawa (University of Tokyo)

Title: Symmetry-Protected Topological phases and Duality



4th Public Extreme Universe Colloquium

Date: March 8th, 2025

Speaker: Prof. Geoffrey Penington (University of California, Berkeley)

Title: What's inside a black hole?



● Extreme Universe Seminar

21st Extreme Universe Circular Meeting

Date: April 21st, 2024

Speaker 1: Tomotaka Kuwahara (RIKEN)

Title: Clustering of conditional mutual information and quantum Markov structure at arbitrary temperatures

Speaker 2: Eyuri Wakakuwa (Nagoya U.)

Title: Exact exponent for atypicality of random quantum states

22nd Extreme Universe Circular Meeting

Date: May 24th, 2024

Speaker 1: Keiju Murata (B03)

Title: Quasinormal mode spectrum of the AdS black hole with the Robin boundary condition

Speaker 2: Nicolò Zenoni (B01)

Title: Multipartite information in (sparse) SYK

23rd Extreme Universe Circular Meeting

Date: July 23rd, 2024

Speaker 1: Tadashi Takayanagi (C01)

Title: How do we feel holography in Quantum Systems ?

Speaker 2: Shigeki Sugimoto (C01)

Title: On holographic unification of meson and photon

Speaker 3: Kazumi Okuyama (C01)

Title: Recent developments in double-scaled SYK

24th Extreme Universe Circular Meeting

Date: October 10th, 2024

Speaker 1: Masahiro Hotta (C02)

Title: Tutorial Talk

Speaker 2: Yuta Mizukami (E01)

Title: Bulk detection of topological phases in quantum spin liquids

25th Extreme Universe Circular Meeting

Date: November 5th, 2024

Speaker 1: Tsutomu Kobayashi (C03)

Title: Tutorial on quantum fluctuations from inflation

Speaker 2: Takahiro Tanaka (E02)

Title: $g\delta N$ and extended δN formalism

6th Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

Date: November 7th, 2024

Speaker 1: Tokiro Numasawa (E02)

Title: Sine Square Deformation (SSD) and Möbius deformations

Speaker 2: Kohei Kawabata (E02)

Title: Non-Hermitian Topology in Hermitian Topological Matter: Wannier Localizability and Detachable Topological Boundary States

26th Extreme Universe Circular Meeting

Date: December 23rd, 2024

Speaker 1: Masazumi Honda (D01)

Title: Introduction to fracton topological phases

Speaker 2: Taiichi Nakanishi (D01)

Title: Foliation Matter Phase and Godbillon-Vey Invariant

7th Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

Date: December 24th, 2024

Speaker 1: Masaki Owari (E01)

Title: On algebraic analysis of Baker-Campbell-Hausdorff formula for Quantum Control and Quantum Speed Limit

Speaker 2: Ryuji Takagi (E01)

Title: Virtual quantum resource distillation

27th Extreme Universe Circular Meeting

Date: January 21st, 2025

Speaker 1: Hosho Katsura (D02)

Title: Frustration-free systems and beyond

Speaker 2: Soshun Ozaki (D02)

Title: Disorder-free Sachdev-Ye-Kitaev models: Integrability and a precursor of chaos

28th Extreme Universe Circular Meeting

Date: February 17th, 2025

Speaker 1: Tomoyuki Morimae (A01)

Title: Quantum cryptography without one-way functions

Speaker 2: Ryu Hayakawa (A01)

Title: Quantum computational complexity in the analysis of topology of higher-order networks

8th Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

Date: March 11th, 2025

Speaker 1: Masataka Watanabe (E02)

Title: SYK model and interacting particle systems

Speaker 2: Yuta Hamada (E02)

Title: Investigating 9d non-supersymmetric branes/strings from supersymmetric strings

● Conferences & Workshops

iTHEMS-YITP Workshop:

Bootstrap, Localization and Holography

Date: May 20th - 24th, 2024

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto Univ.

The 3rd young researchers' workshop of the Extreme Universe Collaboration & The 6th "Extreme Universe" School

Date: September 12th - 15th, 2024

Venue: Grand Park Otaru in Hokkaido

The 4th ExU Annual Meeting of the Extreme Universe Collaboration

Date: September 25th - 28th, 2024

Venue: Osaka Univ.

Focus Week on Non-equilibrium Quantum Dynamics

Date: September 30th - October 4th, 2024

Venue: Kavli IPMU

ExU International Conference

"Quantum extreme universe: matter, information and gravity"

Date: October 21st - 25th, 2024

Venue: OIST, Okinawa



The 33rd workshop on general relativity and gravitation in Japan

Date: December 2nd - 6th, 2024

Venue: Kindai Univ.

A novel numerical approach to quantum field theories 2024

Date: December 17th - 20th, 2024

Venue: Univ. of Tokyo

Recent Developments in Black Holes and Quantum Gravity

Date: January 20th - 24th, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto Univ.

SUPERGRAVITY

Date: February 12th - 13th, 2025

Venue: Osaka Institute of Technology

Quantum Gravity and Information in Expanding Universe

Date: February 17th - 21st, 2025

Venue: Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto Univ.



● Reporter

Shoichiro Miyashita

National Dong Hwa University, Department of Physics, Postdoctoral fellow (C01)

Host Supervisor Stanford Institute for Theoretical Physics, Stanford University, Prof. Leonard Susskind

Duration of Stay November 7 2024 ~ November 21 2024

As shown by the AdS/CFT correspondence, holography is a very useful tool to deepen our understanding of quantum gravity when space-time has time-like boundaries. For example, the Ryu-Takayanagi formula uncovered the relationship between the geometry of the semiclassical bulk and the quantum entanglement on the boundary theory and holography played an important role when the island formula was first proposed, which is used to derive the Page curve on the gravity side. However, we still do not know whether we can use such a powerful tool to understand the quantum properties of our universe, since it does not seem to have time-like boundaries. Not a few researchers have thought that it is unnatural if holography is completely useless for understanding our universe and there have been many attempts to apply holography to our universe, or dS spacetime as a toy model of it.

Recently, Prof. Susskind proposed the dS/DSSYK ∞ correspondence, which states that a certain low dimensional dS spacetime (dS) corresponds to the double-scaled Sachdev-Ye-Kitaev model at infinite temperature (DSSYK ∞). In this correspondence, we consider the stretched horizon of a static patch as an approximate time-like boundary and think that DSSYK ∞ lives on the boundary. Although this is not yet a concrete correspondence, it has passed the non-trivial tests, such as that both sides exhibit hyperfast scrambling and separation of scales. Currently, I am interested in this correspondence and am investigating it with Prof. Sekino and Dr. Kitamura.

The purpose of this visit is to promote our research by discussing it with Prof. Susskind and I stayed at Stanford University for two weeks. I spent almost all the time of this visit in the discussion with Prof. Susskind, Dr. Rahman, Prof. Sekino, and Dr. Kitamura. The main topics of the discussion are the correspondence of correlation functions and the similarity between QCD and DSSYK ∞ . For the former, we examine what it would be like since we still do not know the concrete relationship on correlation functions like the AdS/CFT correspondence. By a symmetry argument, it was expected that there would be a correspondence between a correlation function of the massive vector field in the 3-dim. dS spacetime and that of the charge operator of the complex DSSYK ∞ theory. However, we found that there is none. This may mean that we should consider the 2-dim. dS JT gravity as the bulk side instead of the s-wave sector of the 3-dim. dS spacetime. We concluded that it might be possible to reconcile the discrepancy by using the freedom of the choice of the coupling between the massive vector and the dilaton since it is not uniquely determined in the 2-dim dS JT gravity. For the latter, we try to make more precise the relation between the large N QCD and DSSYK ∞ , which was proposed some years ago by

Prof. Susskind. As a result, we found that there is a possibility of a correspondence between the dynamics of QCD in the Rindler spacetime, that of DSSYK ∞ , and that of quanta in dS spacetime. In this context, it is conjectured that O(N) singlets in DSSYK ∞ correspond to the propagating degrees of freedom in the dS spacetime. We are now investigating this possibility.

I also had a chance to talk with Prof. Silverstein, who is investigating the correspondence between cut-off gravity theories and the field theories deformed from CFTs by some operators, such as \overline{TT} . We discussed my research on cut-off AdS. We found that my calculations on the partition function on cut-off AdS imply the possibility that there exists the correspondence between the \overline{TT} deformed CFT and the cut-off AdS exists beyond the shock singularity. I am now carefully investigating this possibility.

Finally, I would like to express my deepest gratitude to Prof. Sekino for recommending this stay, Prof. Susskind for accepting this stay, Prof. Takayanagi and the other organizers of the Grant-in Aid for Transformative Research Areas A “Extreme Universe”, for providing me with this opportunity through the Oversea Visiting Program for Young Researchers, and Ms. Okazaki for handling the administrative procedures.



Photo 1: Stanford University campus



Unraveling Quantum ‘States’ with Spirals

What does it mean to measure the “state” of an object? For example, to understand the state of a moving car, one way is to measure its speed. Is the car stationary, moving at 60 km/h, or at 120 km/h? Speed is an essential factor in determining the state of the car. Furthermore, knowing the car’s current location, that is, its position, is also a part of its state. The state of the car consists of various elements, not just speed and position, but also temperature, color, and other factors.

In this way, the “state” of an object is defined by a combination of physical quantities such as position, speed, energy, and electrical resistance. We perceive these physical quantities through our senses, such as sight, hearing, and touch, or measure them using instruments like speedometers and ammeters. By obtaining knowledge about an object’s state through measurement, we can predict its future motion and changes. In fact, Newton’s equations of motion in classical physics are equations that predict an object’s future movement based on its current position, velocity, and the forces acting on it.

However, in the microscopic world of quantum mechanics, the concept of ‘state = a combination of physical quantities’ does not hold. In quantum mechanics, the “state” of an object is not a directly measurable physical quantity but rather an abstract concept expressed as a mathematical function called the “wavefunction.” In this case, measurement results of physical quantities become probabilistic, and the wavefunction indirectly determines the probability distribution of these measured values. The Schrödinger equation, the fundamental equation of quantum mechanics, does not directly predict the change in physical quantities but rather describes the evolution of the wavefunction. Furthermore, in quantum information theory, which integrates information theory into quantum mechanics, the concept of state must consider interactions with the environment and information loss. As a result, the representation of the state via the wavefunction is extended to the “density matrix” formulation.

Now, how can we determine the state of a quantum system, i.e., the wavefunction or density matrix, from the probabilistic measurement results of physical quantities? Consider a biased die. The probability distribution of each face appearing, from 1 to 6, should be determined by the degree of bias. However, rolling the die once and obtaining a result of, say, 2 does not immediately reveal the probability distribution of all outcomes. To understand the nature of the biased die, one must roll it multiple times and

statistically infer the distribution based on the frequency of each outcome.

Similarly, to determine the “state” of a quantum system, we need to repeatedly measure physical quantities and infer the wavefunction (or density matrix) from the obtained measurement results. This process is called Quantum State Tomography (QST). In the case of a die, one only needs to measure the frequency of six outcomes, but in quantum systems, due to unique properties such as superposition and entanglement, the number of required measurements increases exponentially. Additionally, measurement in quantum mechanics alters the quantum state, meaning that the same state must be prepared anew for each measurement. As a result, as quantum systems grow in size, the required number of measurements and computational complexity increase dramatically, making full QST experimentally and computationally challenging.

In our research [1], we developed a novel QST method inspired by the spiral spin structures observed in quantum magnetic materials. When determining the state of a large system composed of many qubits, conventional QST requires each qubit to be individually rotated in the X, Y, and Z directions for separate measurements. This results in an enormous number of measurement combinations and necessitates complex rotation apparatus for individual control. In contrast, our method eliminates the need for such intricate operations by applying a magnetic field with an intensity gradient. This causes the qubits to rotate at different angles, enabling measurements in a twisted, spiral structure (Figure 1). By varying the strength of the field gradient and the application duration, we can collect measurement data for different spiral structures. Applying compressed sensing techniques to this data allows for an efficient inference of the quantum system’s “state.” This is our proposed Spiral QST method.

In our paper [1], we demonstrate the effectiveness of this method through numerical experiments and show that it can be applied to measure important quantum informational quantities such as entanglement entropy. Unraveling quantum states is not merely a technical challenge but also a fundamental pursuit to understand the workings of the universe. Our approach enables quantum state estimation across various quantum platforms, potentially contributing to the design of new materials and simulations of cosmological phenomena. The advancement of novel quantum measurement techniques, including Spiral QST, will lay the foundation for next-generation quantum science and technology, supporting broader scientific and technological innovations.

[1] G. Marmorini, T. Fukuhara, D. Yamamoto, arXiv.2411.16603.

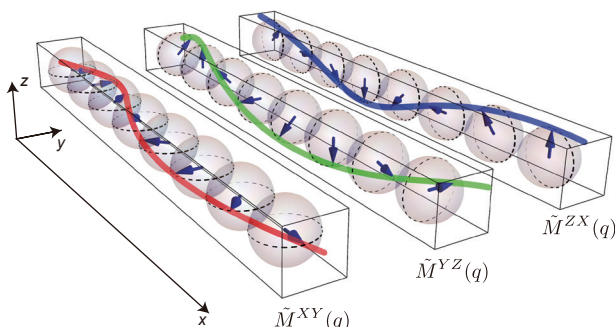


Figure 1: Spiral structures used in measurements for Spiral QST (three types of spiral planes).



● Author Information

Daisuke Yamamoto

College of Humanities and Sciences,
Nihon University
Associate Professor

Born in Saitama, 1983

Graduated from Waseda University in
March 2010

Current position since April 2021



The Relationship Between Energy in a Closed Region, Surface Area, and Gravitational Field on Its Surface

One of the simplest laws that relates the surface and the interior of an object is Gauss's law. According to Gauss's law, the amount of charge inside a closed region can be determined from the electric field passing through its surface. This is because the equation for the electric field is the Poisson equation, which is a type of divergence equation. Newton's theory of gravity is also expressed by the Poisson equation and can be analyzed in a similar way using the gravitational field on the surface. However, Newton's theory of gravity is an approximation in weak gravity, and a more precise analysis requires general relativity. The equation in general relativity, known as the Einstein equation, is more complicated than the Poisson equation, and as a result, Gauss's law does not directly apply.

The source of a gravitational field is mass (or energy). Mass and energy are equivalent. While a detailed explanation is omitted here, in general relativity, it is difficult to precisely define the mass within a given region. When one is far enough from the gravitational source, the gravitational field weakens, and Newton's theory of gravity can be used, allowing for the definition of mass. If a spherical surface with an infinite radius surrounds the gravitational source, the enclosed region can be considered as the entire space. The mass defined in this way represents the total mass of the entire space. If a particular region contains a mass m , it is a part of the total mass M of space. Since mass always takes a positive value, we have $M \geq m$. While the mass m in a region cannot be precisely defined, we can treat it as smaller than the mass M of the entire space.

The entropy of a black hole is proportional to the area of its surface, called the horizon. The horizon area increases over time. Once a black hole is formed, it will asymptotically approach a stationary state, meaning it will no longer depend on time. The uniqueness theorem for black holes determines the final state and its properties. The area A_f of horizon of stationary black holes satisfies the inequality $M \geq (c^2/2G)\sqrt{A_f/4\pi}$, where M is the mass of the entire space, c is the speed of light and G is the gravitational constant. According to the area increase law, the area A of horizon will be smaller than that in the final stationary state A_f , and we ultimately obtain $M \geq (c^2/2G)\sqrt{A/4\pi}$. This inequality, known as the Penrose inequality, shows that a black hole with a horizon area A is shown to have at least $(c^2/2G)\sqrt{A/4\pi}$ energy, and has been rigorously proven under certain conditions. The Penrose inequality relates the surface area of a black hole (surface information) to the minimum mass required inside it (internal information).

In our research with Shiromizu, Yoshino, and others [1, 2], we generalized the Penrose inequality. We expressed the features of black holes in terms of geometric quantities and generalized them using a parameter α , which represents the strength of gravity. The parameter α is a constant that takes values in the range $1/2 < \alpha < \infty$. For $\alpha \rightarrow -1/2$, it corresponds to a region sufficiently far from the gravitational source (weak-gravity region), and as α approaches

infinity, it represents the black hole horizon (strong-gravity region). We defined an "attractive gravity probe surface (AGPS)" with α for a surface at any point on which the gravitational strength is greater than the parameter α , and we showed that the following inequality holds for the area A of the AGPS with α :

$$M \geq \frac{(1 + 2\alpha)c^2}{(3 + 4\alpha)G} \sqrt{\frac{A}{4\pi}}$$

In the limit where α approaches infinity, which represents the black hole horizon, this inequality coincides with the aforementioned Penrose inequality.

In the latest research [3], we derived an inequality that includes the effect of the electric field. Assuming that an electric charge Q exists only inside the AGPS with α , and that no charge exists outside this surface, we showed that the following inequality holds for the AGPS with α :

$$M \geq \frac{(1 + 2\alpha)c^2}{(3 + 4\alpha)G} \sqrt{\frac{A}{4\pi}} + \frac{Q^2}{8\pi\epsilon_0 c^2} \sqrt{\frac{4\pi}{A}}$$

where ϵ_0 is the vacuum permittivity. Due to the second term on the right-hand side, for fixed mass M and area A , there is an upper limit on the magnitude $|Q|$ of the charge. This indicates that, since repulsive forces act between particles with the same charge, energy is required to accumulate charged particles in a given region, and thus, there is an upper limit on the charge $|Q|$ that can be collected within the AGPS of area A . In the case of black holes ($\alpha \rightarrow \infty$), this upper limit coincides with the known result for the maximum charge of a black hole, which plays an important role in gedanken experiments. Its extension to AGPS will be an interesting topic for future research.

- [1] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu and H. Yoshino, PTEP **2021**, no.8, 083E02 (2021)
- [2] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu and H. Yoshino, PTEP **2023**, no.4, 043E01 (2023)
- [3] K. Lee, K. Izumi, T. Shiromizu, H. Yoshino and Y. Tomikawa, Phys. Rev. D **110**, no.12, 124051 (2024)



Author Information

Keisuke Izumi

Graduate School of Mathematics,
Nagoya University
Associate Professor

Born in Gifu, 1981

Graduated from Kyoto University in
March 2009

Current position since April 2024



Project A01

“Generation of a time-bin Greenberger-Horne-Zeilinger state with an optical switch”
H.-P. Lo, T. Ikuta, K. Azuma, T. Honjo, W.J. Munro, H. Takesue, *Quantum Science and Technology* **8**, 035003 (2023)

“Observational entropy, coarse-grained states, and the Petz recovery map: information-theoretic properties and bounds”
F. Buscemi, J. Schindler, D. Šafránek, *New Journal of Physics* **25**, 053002 (2023)

“Axioms for retrodiction: achieving time-reversal symmetry with a prior”
A. J. Parzygnat and F. Buscemi, *Quantum* **7**, 1013 (2023)

“From time-reversal symmetry to quantum Bayes’ rules”
A. Parzygnat and J. Fullwood, *Phys. Rev. X Quantum* **4**, 020334 (2023)

“Unifying different notions of quantum incompatibility into a strict hierarchy of resource theories of communication”
F. Buscemi, K. Kobayashi, S. Minagawa, P. Perinotti, A. Tosini, *Quantum* **7**, 1035 (2023)

“Classical computation of quantum guesswork”
M. Dall’Arno, F. Buscemi, T. Koshiba, *Quantum Information and Computation* **23**, 9–10, 721–732 (2023)

“Maxwell’s Demon walks into Wall Street: Stochastic thermodynamics meets expected utility theory”
A.F. Ducuara, P. Skrzypczyk, F. Buscemi, P. Sidajaya, V. Scarani, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 197103 (2023)

“Quantum repeaters: From quantum networks to the quantum internet”
K. Azuma, S.E. Economou, D. Elkouss, P. Hilaire, L. Jiang, H.-K. Lo, and I. Tzitrin, *Rev. of Mod. Phys.* **95**, 045006 (2023)

“SVD Entanglement Entropy”
A.J. Parzygnat, T. Takayangi, Y. Taki, Z. Wei, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 12, 123 (2023), collaboration with **C01**

“A complete and operational resource theory of measurement sharpness”
F. Buscemi, K. Kobayashi, S. Minagawa, *Quantum* **8**, 1235 (2024)

“Virtual quantum broadcasting”
A.J. Parzygnat, J. Fullwood, F. Buscemi, G. Chiribella, *Phys. Rev. Lett.* **132**, 110203 (2024)

“The signaling dimension in generalized probabilistic theories”
M. Dall’Arno, A. Tosini, F. Buscemi, *Quantum Information and Computation* **24**, 5–6, 411–424 (2024)

“Low-depth random Clifford circuits for quantum coding against Pauli noise using a tensor-network decoder”
A. S. Darmawan, Y. Nakata, S. Tamiya, H. Yamasaki, *Phys. Rev. Research* **6**, 023055 (2024)

Project B01

“Stability of Hairy Black Holes in Shift-Symmetric Scalar-Tensor Theories via the Effective Field Theory Approach”
Justin Khoury, Toshifumi Noumi, Mark Trodden, Sam S. C. Wong, *J. Cosmol. Astro. Phys.* **2023**, 04, 035 (2023)

“Finite energy sum rules for gravitational Regge amplitudes”
T. Noumi, J. Tokuda, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 06, 32 (2023)

“Late time behavior of n-point spectral form factors in Airy and JT gravities”
T. Anegawa, N. Iizuka, K. Okuyama, K. Sakai, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 07, 47 (2023), collaboration with **C01**

“Is Action Complexity better for de Sitter space in Jackiw-Teitelboim gravity?”
T. Anegawa, N. Iizuka, S. K. Sake, N. Zenoni, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 06, 213 (2023)

“Volume complexity of dS bubbles”
R. Auzzi, G. Nardelli, G. P. Ungureanu, N. Zenoni, *Phys. Rev. D* **108**, 26006 (2023)

“Shock waves and delay of hyperfast growth in de Sitter complexity”
T. Anegawa, N. Iizuka, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 115 (2023)

“Flows of Rotating Extremal Attractor Black Holes”
N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 177 (2023), collaboration with **B03**

“Black hole extremality in nonlinear electrodynamics: a lesson for weak gravity and Festina Lente bounds”
Y. Abe, T. Noumi, K. Yoshimura, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 09, 24 (2023)

“Phenomenological Motivation for Gravitational Positivity Bounds: A Case Study of Dark Sector Physics”
T. Noumi, S. Sato, J. Tokuda, *Phys. Rev. D*, **108**, 56013 (2023)

“The local SYK model and its triple scaling limit”
T. Anegawa, N. Iizuka, S. K. Sake, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 160 (2023)

“Krylov complexity in the IP matrix model”
N. Iizuka, M. Nishida, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 10, 65 (2023)

“Krylov complexity in the IP matrix model II”
N. Iizuka, M. Nishida, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 96 (2023)

“Sparse random matrices and Gaussian ensembles with varying randomness”
T. Anegawa, N. Iizuka, A. Mukherjee, S. K. Sake, S. P. Trivedi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 234 (2023)

“JT Gravity in de Sitter Space and the Problem of Time”
K. K. Nanda, S. K. Sake, S. P. Trivedi, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 145 (2024)

“Exact Non-Abelian Supertubes”
R. Nemoto, M. Shigemori, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 03, 52 (2024)

Project B02

“Quantum and classical Floquet prethermalization”
W.W. Ho, T. Mori, D.A. Abanin, E.G.D. Torre, *Ann. of Phys.* **454**, 169297 (2023)

“Symmetrized Liouvillian Gap in Markovian Open Quantum Systems”
T. Mori and T. Shirai, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 230404 (2023)

“Thermal Ising transition in two-dimensional SU(3) Fermi lattice gases with population imbalance”
H. Motegi, G. Marmorini, N. Furukawa, D. Yamamoto, *Phys. Rev. Research* **5**, L022056–1–6 (2023)

“Local operator entanglement in spin chains”
E. Mascot, M. Nozaki, M. Tezuka, *SciPost Phys. Core* **6**, 4, 070–1–32 (2023)

“Estimating truncation effects of quantum bosonic systems using sampling algorithms”
M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, M. Tezuka, *Mach. Learn.: Sci. Technol.* **4**, 4, 045021–1–13 (2023)

“Designing nontrivial one-dimensional Floquet topological phases using a spin-1/2 double-kicked rotor”
Y. Koyama, K. Fujimoto, S. Nakajima, Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. Research* **5**, 043167–1–17 (2023)

“Liouvillian-gap analysis of open quantum many-body systems in the weak dissipation limit”
T. Mori, *Phys. Rev. B* **109**, 064311 (2024)

Project B03

“A stationary black hole must be axisymmetric in effective field theory”
S. Hollands, A. Ishibashi, H.S. Reall, *Commun. Math. Phys.* **401**, 2757–2791 (2023)

“Superradiance and black resonator strings encounter helical black strings”
O.J.C. Dias, T. Ishii, K. Murata, J.E. Santos, B. Way, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 05, 41 (2023)

“Semiclassical Einstein equations from holography and boundary dynamics”
A. Ishibashi, K. Maeda, T. Okamura, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 05, 212 (2023)

“Fluid model of black hole/string transition”
Y. Matsuo, *Phys. Rev. D* **107**, 126003 (2023)

“No-Go Theorems for Hairy Black Holes in Scalar- or Vector-Tensor-Gauss-Bonnet Theory”
S. Matsumoto, *Class. Quant. Grav.* **40**, 175011 (2023)

“Note on the time dilation of charged quantum clocks”
T. Chiba, S. Kinoshita, *Phys. Rev. D* **108**, 44036 (2023)

“Flows of Rotating Extremal Attractor Black Holes”
N. Iizuka, A. Ishibashi, K. Maeda, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 177 (2023), collaboration with **B01**

“Phase Structure of Quantum Improved Schwarzschild-(Anti)de Sitter Black Holes”
C.-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, N. Ohta, *Class. Quant. Grav.* **40**, 215007 (2023)

“Shooting null geodesics into holographic spacetimes”
S. Kinoshita, K. Murata, D. Takeda, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 10, 74 (2023)

“Krylov complexity and chaos in quantum mechanics”
K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 40 (2023), collaboration with **C03**

“Stark effect and dissociation of mesons in holographic conductor”
S. Ishigaki, S. Kinoshita, M. Matsumoto, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 128 (2023)

“Quantum focusing conjecture and the Page curve”
Y. Matsuo, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 12, 50 (2023)

“Boundary driven turbulence on string worldsheet”
T. Ishii, K. Murata, K. Yoshida, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 01, 73 (2024), collaboration with **E02**

“Quasinormal mode spectrum of the AdS black hole with the Robin boundary condition”
S. Kinoshita, T. Kozuka, K. Murata, K. Sugawara, *Class. Quant. Grav.* **41**, 55010 (2024)

“Symmetry breaking of 3-dimensional AdS in holographic semiclassical gravity”
A. Ishibashi, K. Maeda, T. Okamura, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 146 (2024)

“Turbulence on open string worldsheets under non-integrable boundary conditions”
T. Ishii, R. Kitaku, K. Murata, C.-M. Yoo, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 149 (2024)

“A note on no-hair properties of static black holes in four and higher dimensional spacetimes with cosmological constant”
A. Ishibashi, S. Matsumoto, Y. Yoneo, *Class. Quant. Grav.* **41**, 85010 (2024)

Project C01

- “Spectral form factor in the tau-scaling limit”
K. Okuyama, K. Sakai, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 04, 123 (2023)
- “Timelike entanglement entropy”
K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi, Y. Taki, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 05, 52 (2023)
- “Correlators of double scaled SYK at one-loop”
K. Okuyama, K. Suzuki, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 05, 117 (2023)
- “Complex saddles of three-dimensional de Sitter gravity via holography”
H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki, T. Uetoko, *Phys. Rev. D* **107**, L101902 (2023)
- “High temperature expansion of double scaled SYK”
K. Okuyama, *Phys. Lett. B* **843**, 138036 (2023)
- “Late time behavior of n-point spectral form factors in AdS and JT gravities”
T. Aneqawa, N. Iizuka, K. Okuyama, K. Sakai, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 07, 47 (2023), collaboration with [B01](#)
- “Gluing AdS/CFT”
T. Kawamoto, S.-M. Ruan, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 07, 80 (2023)
- “End of the world brane in double scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 53 (2023)
- “Complex saddles of Chern-Simons gravity and dS3/CFT2 correspondence”
H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki, T. Uetoko, *Phys. Rev. D* **108**, 66005 (2023)
- “Discrete analogue of the Weil-Petersson volume in double scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 09, 133 (2023)
- “A half de Sitter holography”
T. Kawamoto, S.-M. Ruan, Y.-K. Suzuki, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 10, 137 (2023)
- “SVD Entanglement Entropy”
A.J. Parzygnat, T. Takayanagi, Y. Taki, Z. Wei, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 12, 123 (2023), collaboration with [A01](#)
- “Statistical Mechanics Approach to the Holographic Renormalization Group: Bethe Lattice Ising Model and p-adic AdS/CFT”
K. Okunishi and T. Takayanagi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2024**, 013A03 (2023), collaboration with [D02](#)
- “Pseudo entropy under joining local quenches”
K. Shinmyo, K. Tasuki, T. Takayanagi, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 111 (2024)
- “Matter correlators through a wormhole in double-scaled SYK”
K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 147 (2024)
- “Negativity and its capacity in JT gravity”
K. Okuyama, T. Tachibana, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 02, 183 (2024)
- “Entanglement Phase Transition in Holographic Pseudo Entropy”
H. Kanda, T. Kawamoto, Y.-k Suzuki, T. Takayanagi, K. Tasuki, Z. Wei, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 03, 60 (2024)
- “End of the world branes from dimensional reduction”
S. Sugimoto, Yu-ki Suzuki, *J. High Energ. Phys.* **2024**, 03, 165 (2024)

Project C02

- “Analog de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge”
Y. Nambu, M. Hotta, *Phys. Rev. D* **107**, 85002 (2023)
- “Thermal Transport Imaging in the Quantum Hall Edge Channel”
J. N. Moore, A. Kamiyama, T. Mano, G. Yusa, *Europhys. Lett.* **142**, 16004 (2023)
- “Dynamics of the fractional quantum Hall edge probed by stroboscope measurements of trions”
A. Kamiyama, M. Matsuura, J.N. Moore, T. Mano, N. Shibata, G. Yusa, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 202103-1-5 (2023)
- “Entanglement partners and monogamy in de Sitter universes”
Y. Nambu, K. Yamaguchi, *Phys. Rev. D* **108**, 45002 (2023)
- “The QCD phase diagram in the space of imaginary chemical potential via ’t Hooft anomalies”
S.K. Kobayashi, T. Yokokura, K. Yonekura, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 132 (2023)
- “Nonsupersymmetric Heterotic Branes”
J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa, K. Yonekura, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 121601 (2023)
- “Dark baryon from pure Yang-Mills theory and its GW signature from cosmic strings”
M. Yamada, K. Yonekura, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 09, 197 (2023)

Project C03

- “Attractive gravity probe surfaces in higher dimensions”
K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 043E01 (2023)
- “Ostrogradsky mode in scalar-tensor theories with higher-order derivative couplings to matter”
A. Naruko, R. Saito, N. Tanahashi, D. Yamauchi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 053E02 (2023)

- “Cosmological gravity probes: connecting recent theoretical developments to forthcoming observations”
S. Arai, K. Aoki, Y. Chinone, R. Kimura, T. Kobayashi, H. Miyatake, D. Yamauchi, S. Yokoyama, K. Akitsu, T. Hiramoto, S. Hirano, R. Kase, T. Katsuragawa, Y. Kobayashi, T. Namikawa, T. Nishimichi, T. Okumura, M. Shiraishi, M. Shirasaki, T. Sunayama, K. Takahashi, A. Taruya, J. Tokuda, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 20E+02 (2023)
- “Hairy black holes in AdS with Robin boundary conditions”
T. Harada, T. Ishii, T. Katagiri, N. Tanahashi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 06, 106 (2023)
- “Impact of multiple modes on the evolution of self-interacting axion condensate around rotating black holes”
H. Omiya, T. Takahashi, T. Tanaka, H. Yoshino, *J. Cosmol. Astro. Phys.* **2023**, 06, 16 (2023)
- “Wormhole C-metric”
M. Nozawa, T. Torii, *Phys. Rev. D* **108**, 64036 (2023)
- “Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity. IV. Null-access theorem for generic asymptotically flat spacetime”
M. Amo, K. Izumi, M. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, *Phys. Rev. D* **107**, 124050 (2023)
- “Consistency of higher derivative couplings to matter fields in scalar-tensor gravity”
T. Ikeda, K. Takahashi, T. Kobayashi, *Phys. Rev. D* **108**, 44006 (2023)
- “Evaporation of a nonsingular Reissner-Nordström black hole and information loss problem”
K. Sueto, H. Yoshino, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 103E01 (2023)
- “Attractive gravity probe surface with positive cosmological constant”
T. Shiromizu, K. Izumi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 103E02 (2023)
- “Boundary Conditions for Constraint Systems”
K. Izumi, K. Shimada, K. Tomonari, M. Yamaguchi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 103E03 (2023)
- “Krylov complexity and chaos in quantum mechanics”
K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 40 (2023), collaboration with [B03](#)
- “Entropy Bound and a Geometrically Nonsingular Universe”
T. Kanai, K. Nomura, D. Yoshida, *Phys. Rev. D* **108**, 104024 (2023)
- “Black hole perturbations in spatially covariant gravity with just two tensorial degrees of freedom”
J. Saito, T. Kobayashi, *Phys. Rev. D* **108**, 104063 (2023)
- “Attractive gravity probe surface, positivity of quasi-local mass and Arnowitt-Deser-Misner mass expression”
T. Shiromizu, K. Izumi, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2024**, 013E01 (2023)
- “Robinson-Trautman solutions with scalar hair and Ricci flow”
M. Nozawa, T. Torii, *Class. Quant. Grav.* **41**, 65016 (2024)
- “Weak-field regime of scalar-tensor theories with an instantaneous mode”
T. Kobayashi, T. Hiramoto, *Phys. Rev. D* **109**, 64091 (2024)

Project D01

- “Narain CFTs from qudit stabilizer codes”
K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, *SciPost Phys. Core* **6**, 35 (2023)
- “Measurement-based quantum simulation of Abelian lattice gauge theories”
H. Sukeno and T. Okuda, *SciPost Phys.* **14**, 5, 129 (2023)
- “Borel resummation of secular divergences in stochastic inflation”
M. Honda, R. Jinno, L. Pinol and K. Tokeshi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 060 (2023)
- “Krylov complexity in large-q and double-scaled SYK model”
B. Bhattacharjee, P. Nandy, T. Pathak, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 08, 99 (2023)
- “Wall-crossing for vortex partition function and handsaw quiver variety”
R. Ohkawa, Y. Yoshida, *J. of Geometry and Physics* **191**, 104904 (2023)
- “Anomalous diffusion in a randomly modulated velocity field”
N. Aibara, N. Fujimoto, S. Katagiri, Y. Matsuo, Y. Matsuoka, A. Sugamoto, K. Yokoyama, T. Yumibayashi, *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simul.* **125**, 107342 (2023)
- “Supersymmetric conformal field theories from quantum stabilizer codes”
K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, *Phys. Rev. D* **108**, 81901 (2023)
- “Calculating composite-particle spectra in Hamiltonian formalism and demonstration in 2-flavor QED_{1+1d}”
E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 11, 231 (2023)
- “On Krylov complexity in open quantum systems: an approach via bi-Lanczos algorithm”
A. Bhattacharya, P. Nandy, P. P. Nath, H. Sahu, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 12, 66 (2023)
- “Entanglement Rényi entropy and boson-fermion duality in the massless Thirring model”
H. Fujimura, T. Nishioka, S. Shimamori, *Phys. Rev. D* **108**, 125016 (2023)



“Narain CFTs from nonbinary stabilizer codes”

Y. Alam, K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, S. Yahagi, J. High Energ. Phys. **2023**, 12, 127 (2023)

“Operator dynamics in Lindbladian SYK: a Krylov complexity perspective”

B. Bhattacharjee, P. Nandy and T. Pathak, J. High Energ. Phys. **2024**, 01, 94 (2024)

“5d SCFTs and their non-supersymmetric cousins”

M. Akhond, M. Honda and F. Mignosa, SciPost Phys. **16**, 036 (2024)

“Chemical potential (in)dependence of hadron scatterings in the hadronic phase of QCD-like theories and its applications”

K. Murakami, E. Itou and K. Iida, J. High Energ. Phys. **2024**, 02, 152 (2024)

Project D02

“Spin-orbit coupled Hubbard skyrmions”

R. Makuta, C. Hotta, Phys. Rev. Research **6**, 23133 (2023)

“Neural Network Approach to Scaling Analysis of Critical Phenomena”

R. Yoneda, K. Harada, Phys. Rev. E **107**, 44128 (2023)

“Magnetic Excitation in the $S = 1/2$ Ising-like Antiferromagnetic Chain CsCoCl₃ in Longitudinal Magnetic Fields Studied by High-field ESR Measurements”

S. Kimura, H. Onishi, K. Okunishi, M. Akaki, Y. Narumi, M. Hagiwara, K. Kindo, H. Kikuchi, J. Phys. Soc. Jap. **92**, 94701 (2023)

“Uncovering hidden chiral symmetry in nonbipartite kagome and pyrochlore lattices with spin-orbit coupling by the Wilson loop”

H. Nakai, M. Kawano, C. Hotta, Phys. Rev. B **108**, L081106 (2023)

“Flat-band ferromagnetism in the SU(N) Hubbard and Kondo lattice models”

K. Tamura, H. Katsura, J. of Phys. A: Math. Theor. **56**, 39, 395202 (2023)

“A new picture of quantum tunneling in the real-time path integral from Lefschetz thimble calculations”

J. Nishimura, K. Sakai, A. Yosprakob, J. High Energ. Phys. **2023**, 09, 110 (2023)

“Quantum many-body scars in spin models with multibody interactions”

K. Sanada, Y. Miao, H. Katsura, Phys. Rev. B **108**, 155102 (2023)

“GrassmannTN: a Python package for Grassmann tensor network computations”

A. Yosprakob, SciPost Phys. Codebases **20** (2023)

“Translational symmetry broken magnetization plateau of the $S=1$ antiferromagnetic Heisenberg chain with competing anisotropies”

T. Sakai, K. Okamoto, K. Okunishi, M. Hashimoto, T. Houda, R. Furuchi, H. Nakano, Phys. Rev. B **108**, 174435 (2023)

“Thermal pure matrix product state in two dimensions: Tracking thermal equilibrium from paramagnet down to the Kitaev honeycomb spin liquid state”

M. Gohlke, A. Iwaki, C. Hotta, SciPost Phys. **15**, 206 (2023)

“A new technique to incorporate multiple fermion flavors in tensor renormalization group method for lattice gauge theories”

A. Yosprakob, J. Nishimura, K. Okunishi, J. High Energ. Phys. **2023**, 11, 187 (2023)

“Statistical Mechanics Approach to the Holographic Renormalization Group: Bethe Lattice Ising Model and p-adic AdS/CFT”

K. Okunishi, T. Takayanagi, Prog. Theor. Exper. Phys **2024**, 013A03 (2023), collaboration with **C01**

“Jordan decomposition of non-Hermitian fermionic quadratic forms”

S. Kitahama, H. Yoshida, R. Toyota, H. Katsura, J. of Stat. Mech.: Theor. and Exper. **2024**, 13101 (2024)

“Magnon thermal Hall effect via emergent SU(3) flux on the antiferromagnetic skyrmion lattice”

H. Takeda, M. Kawano, K. Tamura, M. Akazawa, J. Yan, T. Waki, H. Nakamura, K. Sato, Y. Narumi, M. Hagiwara, M. Yamashita, C. Hotta, Nature Comm. **15**, 2304.08029 (2024)

“Deriving quantum spin model for a zigzag-chain ytterbium magnet with anisotropic exchange interactions”

H. Saito, H. Nakai, C. Hotta, J. Phys. Soc. Jpn. **93**, 3, 34701 (2024)

“Exact hole-induced SU(N) flavor-singlets in certain $U=\infty$ SU(N) Hubbard models”

K.-S. Kim and H. Katsura, Phys. Rev. Research **6**, 13307 (2024)

Project E01

“Switching the function of the quantum Otto cycle in non-Markovian dynamics: heat engine, heater and heat pump”

M. Ishizaki, N. Hatano, H. Tajima, Phys. Rev. Research **5**, 2, 23066 (2023)

“Smooth Metric Adjusted Skew Information Rates”

K. Yamaguchi, H. Tajima, Quantum **7**, 1012 (2023)

“Fisher information matrix as a resource measure in the resource theory of asymmetry with general connected-Lie-group symmetry”

D. Kudo, H. Tajima, Phys. Rev. A **107**, 6, 62418 (2023)

“Beyond i.i.d. in the Resource Theory of Asymmetry: An Information-Spectrum Approach for Quantum Fisher Information”

K. Yamaguchi, H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 200203 (2023)

“Universal sampling lower bounds for quantum error mitigation”

R. Takagi, H. Tajima, M. Gu, Phys. Rev. Lett. **131**, 210201 (2023)

“Wigner-Araki-Yanase theorem for continuous and unbounded conserved observables”

Y. Kuramochi, H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 210602 (2023)

Project E02

“Analog de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge”

Y. Nambu and M. Hotta, Phys. Rev. D **107**, 85002 (2023)

“Entanglement Phase Transition Induced by the Non-Hermitian Skin Effect”

K. Kawabata, T. Numasawa and S. Ryu, Phys. Rev. X **13**, 21007 (2023)

“Direct Measurement of the Cosmic-Ray Helium Spectrum from 40 GeV to 250 TeV with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”

O. Adriani et al, the CALET collaboration, Phys. Rev. Lett. **130**, 171002 (2023)

“On SYK traversable wormhole with imperfectly correlated disorders”

T. Nosaka, T. Numasawa, J. High Energ. Phys. **2023**, 04, 145 (2023)

“Z2 Non-Hermitian skin effect in equilibrium heavy-fermions”

S. Kaneshiro, T. Yoshida, and R. Peters, Phys. Rev. B **107**, 195149 (2023)

“Charge-Sign Dependent Cosmic-Ray Modulation Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station”

O. Adriani et al, the CALET collaboration, Phys. Rev. Lett. **130**, 211001 (2023)

“A symmetry-protected exceptional ring in a photonic crystal with negative index media”

T. Isobe, T. Yoshida, and Y. Hatsugai, Nanophotonics **12**, 2335 (2023)

“All-mode renormalization for tensor network with stochastic noise”

E. Arai, H. Ohki, S. Takeda, and M. Tomii, Phys. Rev. D **107**, 114515 (2023)

“Entanglement partners and monogamy in de Sitter universes”

Y. Nambu and K. Yamaguchi, Phys. Rev. D **108**, 45002 (2023)

“Dynamical quantum phase transitions in SYK Lindbladians”

K. Kawabata, A. Kulkarni, J. Li, T. Numasawa, S. Ryu, Phys. Rev. B **108**, 75110 (2023)

“Higher-order topological heat conduction on a lattice for detection of corner states”

T. Fukui, T. Yoshida, and Y. Hatsugai, Phys. Rev. E **108**, 24112 (2023)

K. Kawabata, A. Kulkarni, J. Li, T. Numasawa, and S. Ryu

“Symmetry of Open Quantum Systems: Classification of Dissipative Quantum Chaos” Phys. Rev. X Quantum **4**, 030328 (2023)

“Effects of Heat Conduction on Blocking off the Super-Eddington Growth of Black Holes at High Redshift”

N. Kawanaka and K. Kohri, Astrophys. J. **955**, 67 (2023)

“Interaction-induced Liouvillian skin effect in a fermionic chain with a two-body loss” S. Hamanaka, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B **108**, 155114 (2023)

“Primordial non-Gaussianity fNL and anisotropies in scalar-induced gravitational waves”

J.-P. Li, S. Wang, Z.-C. Zhao, K. Kohri, J. Cosmol. Astro. Phys. **10**, 56 (2023)

“Direct Measurement of the Spectral Structure of Cosmic-Ray Electrons+Positrons in the TeV Region with CALET on the International”

O. Adriani et al, the CALET collaboration, Phys. Rev. Lett. **131**, 191001 (2023)

“Quantum uncertainty of gravitational field and entanglement in superposed massive particles”

Y. Sugiyama, A. Matsumura, and K. Yamamoto, Phys. Rev. D **108**, 10, 105019 (2023)

“Liouville Theory and the Weil-Petersson Geometry of Moduli Space”

S.M. Harrison, A. Maloney, T. Numasawa, J. High Energ. Phys. **2023**, 11, 227 (2023)

“Persistent-current states originating from the Hilbert space fragmentation in momentum space”

M. Kunimi and I. Danshita, Phys. Rev. A **108**, 063316 (2023)

“Classical gravitational effect on the standard quantum limit of finite-size optical lattice clocks in estimating gravitational potential”

F. Nishimura, Y. Kuramochi, K. Yamamoto, Phys. Rev. A **108**, 6, 63112 (2023)

“Boundary driven turbulence on string worldsheet”

T. Ishii, K. Murata and K. Yoshida, J. High Energ. Phys. **2024**, 01, 73 (2024), collaboration with **B03**

“Quantum many-body scars in the Bose-Hubbard model with a three-body constraint”

R. Kaneko, M. Kunimi, and I. Danshita, Phys. Rev. A **109**, L011301 (2024)

“Spatial deformation of many-body quantum chaotic systems and quantum information scrambling”

K. Goto, T. Guo, T. Nosaka, M. Nozaki, S. Ryu, K. Tamaoka, Phys. Rev. B **109**, 54301 (2024)

“Violation of the two-time Leggett-Garg inequalities for a coarse-grained quantum field”

M. Tani, K. Hatakeyama, D. Miki, Y. Yamasaki, and K. Yamamoto, Phys. Rev. A **109**, 32213 (2024)

“Quantum signature of gravity in optomechanical systems with conditional measurement”

D. Miki, A. Matsumura, and K. Yamamoto, Phys. Rev. D **109**, 64090 (2024)



今後の会議予定 Upcoming Conferences

● 領域会議 The 5th ExU Annual Meeting

Date : 25-28 December 2025

Venue : Hotel Sunroute Matsuyama, Matsuyama

● 領域国際会議 ExU International Conference

Date: 27 October - 1 November 2025

Venue : YITP, Kyoto University

● 領域若手研究会 The 4th Young Researchers' Workshop of the ExU Collaboration

Date : 30 June - 4 July 2025

Venue : Kyukamura Irigo, Aichi

論文等での Acknowledgment について

本領域の研究費によって得られた成果を出版される際には、以下の例文にありますような謝辞をお願いいたします。ただし末尾のXYは各計画研究の課題番号で変わります。課題番号は、計画研究 A01班：21H05183、B01班：21H05184、B02班：21H05185、B03班：21H05186、C01班：21H05187、C02班：21H05188、C03班：21H05189、D01班：21H05190、D02班：21H05191です。

(1) This work was supported by MEXT KAKENHI Grant Number 21H051XY.

(2) This work was supported by MEXT KAKENHI Grant-in-Aid for Transformative Research Areas A “Extreme Universe” No.21H051XY.

なお、複数の計画研究にまたがる成果は、それら全てと総括班(21H05182)にも謝辞をお願いします。

また公募研究(第2期)については21H051XY→24H009XYと読み替えて下さい。

(各公募研究者の課題番号は公募研究ページ各研究者の研究タイトル右上の数字をご確認下さい)

編集後記

2021年9月にスタートした本学術変革領域も4年度目に入り、このニュースレターも第4号を数えるところとなりました。第1号発行からはちょうど3年が経過したところで、第1号の時点では大学院生だった人が学位を取り、特任助教や特任研究員になってこの領域の研究協力者として参画するようになってきました。また本年度は本学術領域の公募研究の第2期が始まりました。本号には、第1期の時と同様に各公募研究の紹介記事が掲載されていますが、第1期と比較すると研究者の数も研究分野も増えており、本記事が領域内の共同研究のきっかけとなればと思います。

また本年度は、本学術領域の領域代表である高柳匡氏と、領域アドバイザーである笠真生氏が、国際理論物理学センター (ICTP) から「ディラック・メダル」を授与されました。本誌にも書かれています通り、日本人のICTPディラック・メダルの受賞は、1986年の南部陽一郎博士以来の快挙となります。これを記念して、今号の巻頭言では高柳氏と笠氏の両氏にコメントをいただき、また西岡辰磨氏には受賞理由や研究の経緯に触れた「受賞報告」記事を執筆していただきました。是非ご一読いただければと思います。

巻頭言にもありますように、領域の開始以来、ディラック・メダルのみならず、若手を中心に本領域の関係者が20件を超える学術賞を受賞しているとのこと。本領域からまたディラック・メダル級の研究が生まれることを願いつつ、ニュースレター第4号の編集後記とさせていただきます。(文責：中島秀太)

Please follow our Web site, X & YouTube!

本領域ウェブサイトおよびXアカウントでは、研究会情報、研究成果、アウトリーチ情報などを発信しています。また領域公式YouTubeチャンネルでは本領域主催のスクールや研究会、領域コロキウムの講演動画が公開されています。ぜひご覧ください。

領域ウェブサイト :

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

極限宇宙



extreme universe japan



領域YouTubeチャンネル



@extremeuniverse4346

(URL情報: <https://www.youtube.com/@extremeuniverse4346>)

領域Xアカウント



@ExUniverseja (URL情報: <https://x.com/exuniverseja>)



極限宇宙 NewsLetter 04 2025 Mar.

Extreme Universe

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4号

発行日: 令和7年3月26日

発行: 「極限宇宙」総括班

編集: 中島秀太 (協力: 事務局 山津直樹)

領域事務局: 京都大学 基礎物理学研究所内 〒606-8502 京都市左京区北白川追分町

E m a i l: extuniv-office@yukawa.kyoto-u.co.jp

