



# News Letter

極限宇宙  
Extreme Universe

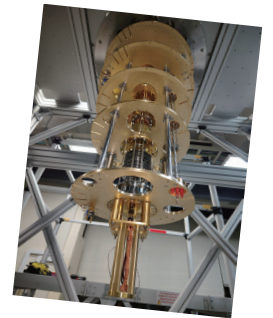
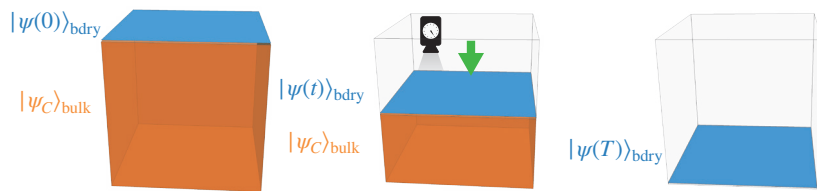
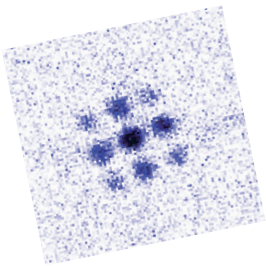
# 03

2024 Mar.



特別企画 Special Event

2学術領域合同座談会  
「『情報と物理学』の明日」



## Contents

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

Final Reports of Publicly Offered Research Project

Keyword

From the Singularity Theorem of Spacetime to the Brane World Universe (Tetsuya Shiromizu)

Conference Reports

The 3rd ExU Annual meeting/ExU-YITP Workshop etc.

Research Highlight

Lattice gauge theory simulation driven by measurement (Takuya Okuda & Hiroki Sueno)

Exploring holographic spacetimes (Shunichiro Kinoshita)

## Contents

- 01 巻頭言  
領域代表より(高柳 匡)／領域アドバイザーより(井元 信之)
- 03 2023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
- 20 トピックス：キーワード  
時空の特異点定理からブレンワールド宇宙まで(白水 徹也)
- 22 若手国内循環プログラム報告  
ピーダーセン 珠杏／濱中 秀有
- 24 2023年度 研究会報告  
領域国際会議(基研国際滞在型研究会) 他
- 28 2023年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧
- 31 トピックス：最近の研究から  
測定により駆動する格子ゲージ理論のシミュレーション(奥田 拓也・助野 裕紀)  
ホログラフィックな時空を探索する(木下 俊一郎)
- 33 Preface  
Head Investigator (Tadashi Takayanagi)／Advisory Committee (Nobuyuki Imoto)
- 35 Annual Reports of Each Project  
A01／B01／B02／B03／C01／C02／C03／D01／D02
- 44 Final Reports of Publicly Offered Research Projects  
E01／E02
- 52 Topics : Keyword  
From the Singularity Theorem of Spacetime to the Brane World Universe (Tetsuya Shiromizu)
- 54 Domestic Circulation Program for Young Researchers  
Juan William Pedersen／Shu Hamanaka
- 56 Conference Reports in FY2023  
ExU International workshop (YIPQS long-term workshop) etc.
- 60 Conferences, Workshops and Seminars in FY2023
- 63 Topics : Research Highlight  
Lattice gauge theory simulation driven by measurement (Takuya Okuda & Hiroki Sukeno)  
Exploring holographic spacetimes (Shunichiro Kinoshita)
- 65 Publications (Oct. 2022 - Mar. 2023)
- 68 特別企画：2 学術領域合同座談会  
「『情報と物理学』の明日」
- 80 2023年度 アウトリーチ・一般向け講演
- 81 お知らせ  
今後の会議予定 Upcoming Conferences／論文等での Acknowledgment について
- 82 編集後記





## 極限宇宙の旅、道半ば

領域代表

**高柳 匡** Tadashi Takayanagi

京都大学基礎物理学研究所 教授

この領域がスタートして1年半が経過しましたが、もうコロナ禍の影響もほぼなくなり、海外出張や海外からの研究者の招聘なども自由になり、以前の研究環境に戻ってきました。この一年、領域メンバーの皆様のご尽力とアドバイザーの先生の温かいご支援のおかげで、領域の研究活動も、国際的な面でも異分野融合の面でも大いに進展し、素晴らしい研究成果が多数生まれてきております。皆様は大変感謝しております。



そのような中、本領域と京大基研の共催で国際滞在型研究会を昨年秋、5週間にわたり開催し、延べ400人を超える現地参加者を迎え、大盛況な異分野融合イベントとなりました。この研究会には海外からも大勢の研究者が参加し、著名研究者から大学院生まで量子情報と物理学の融合分野を研究する幅広い出席者に恵まれました。そこで、領域会議もこの国際滞在型研究会中に開催しましたが、領域メンバーに加え、海外の研究者からも多くの反響やアドバイスを頂くことができ、本領域をより多くの方に知っていただく良い機会となりました。この研究会ではポストドクや大学院生など若手研究者の活躍も印象的でした。若手は注目すべき研究発表や講演中の鋭い質問やコメントで、研究会を大いに盛り上げてくれました。



本領域の核心である量子情報と物理学の異分野融合に関しても目覚ましい発展が各方面にありました。その1例を簡単に紹介したいと思います。2006年に笠と私が量子エンタングルメントとAdS/CFT対応の関係を見出して以来、量子情報と量子重力の境界領域において大きな潮流が生まれ、2009年にSwingleがテンソルネットワークとAdS/CFT対応の関係を提唱し、その後2014年に、Almheiri、Dong、Harlowによって量子誤り訂正符号とAdS/CFT対応の関係、また同年にSusskindによって量子計算複雑性とAdS/CFT対応の関係が提唱されました。2019年になると、蒸発するブラックホールに対して量子エンタングルメントを正しく計算する画期的手法をPeningtonらが発見し、ホーキング輻射からブラックホール内部の情報を回復できる強い証拠が得られました。ごく最近では、量子暗号とブラッ

クホールとの深い関係性が注目を集め、今年度の国際滞在型研究会でも大きな話題となりました。前述の通り、量子エンタングルメントの計算からホーキング輻射から蒸発前のブラックホール内部の情報を回復できることが分かります。しかし実際にその回復を量子計算機で行った場合にどの程度難しいのかと考えてみると、現実には実行できないほど、つまり指数関数的に難しいことが分かります。逆に見ると、その情報は外部から解読できないように、ホーキング輻射に量子情報として埋め込まれており、量子暗号とみなせるというわけです。また関連して、AdS/CFT対応は、量子計算機よりもずっと早く困難な問題を解くことができるように(一見)思えるという興味深い指摘もされています。本領域でも量子情報が専門の森前氏(A01班)らが量子重力をヒントに量子暗号に関して素晴らしい研究成果を挙げており、滞在型研究会では量子暗号の講義もしていただきました。また、量子情報が専門の中田氏(A01班)と物性理論が専門の手塚氏(B02班)による異分野融合研究で、ブラックホールからの情報回復に関係する量子誤り訂正符号と量子カオス性の関係に迫る素晴らしい研究成果が生まれています。今後の発展が注目されます。



また、理論家と実験家の研究交流を促進する領域イベントとして、東大駒場で研究会「極限宇宙ワークショップ～実験と理論の協奏に向けて」が開催されました。極限宇宙の理論をテーブルトップの実験装置で検証することは本領域の重要テーマとなっております。分野が異なり普段はなかなか交流する機会のない理論家と実験家が気さくに討論することで、新たな研究の方向性が次々と生み出されていけばと思います。実験而言えば、C02班の希釈冷凍機が東北大の遊佐研に納入されました。量子ホール系による極限宇宙のシミュレーション実験の結果が出るのが待ち遠しいです。



最後に、昨年度と今年度の2年間にわたり、計画研究ではカバーできない多角的な視点から領域の研究を推進していただいた第1期公募研究の代表者の皆様に感謝させていただきたいと思います。来年度からは第2期公募研究がスタートです。



## 素粒子と宇宙の謎... 仮説と検証の極致

領域アドバイザー

井元 信之 Nobuyuki Imoto

東京大学特命教授室 特命教授

この学術変革領域研究 A「極限宇宙」の領域アドバイザーの打診を高柳先生から受けたとき、私は少々たじろいだ。この領域に集まるのは当代きっての最高頭脳の人達ばかりだからだ。しかし私の内なる声が「この人達と交流したくないのか？」と囁くので、喜んでお引き受けした。もとより私は教養学部から学部進学を選択に迫られていた50年ほど前、理学部物理学科と工学部物理工学科の選択に悩んだ。その頃初めて見たホログラムの奥に見える立体像を見たとき「3次元情報が2次元乾板に記録されるとはどういうことなのだろう」と思った。そこで物理工学科なら、同じ校舎の数理工学科と計測工学科の講義、たとえば情報理論、確率論、プログラミング、計測工学、精密測定、連想記憶、神経回路網が履修できたので、物理工学科で量子力学や統計力学や流体力学を学ぶとともに理物の相対論の講義も入れ、全部の時限をこれらの授業で埋めた。修士1年のとき、レーザーによる実ホログラムや架空物体の計算機ホログラムを何度も製作し、立体像の三次元像と乾板上の干渉縞が持つ情報量は大雑把には似たようなものになるという感触を得たところで、ホログラムは指導していた卒論生の研究に譲り、修士2年目はもっと定量分析ができる再帰結像現象(電子を使ったものが後年 Quantum Carpet と呼ばれていた)の研究に移行し修士論文を書いた。電電公社(現NTT)に就職してからはQND測定の研究を行い、日立のISQM会議に出入りし、1年間の英国滞在中は Zeilinger、Bohm、Peierls、Deutsch、Bennett 等の面々と討論させていただいた。

中でも驚いたのは Bohm が有名な教科書(標準的なコペンハーゲン流)を上梓した翌年突然発表した「非局所隠れた変数の理論」だ。非局所なので信じられなかったが2時間対談した。この対極にある Deutsch は多世界論者で、使う干渉計(量子ゲート)が量子状態をコヒーレントに分割して他の多宇宙に送って計算してもらい、最後に合波し干渉させるとパラレル処理した結果がこの世に現れる、と言っていたので、その指数的計算力 up を Bohm は説明できるのかと訊きたかったが、訊く前に亡くなってしまった。一方 Peierls はコ

ペンハーゲン解釈派で「Bohm 理論も多世界解釈も要らん！全てきちんと計算できるので十分」と言う。印象的だったのは、Bohm が亡くなる前に言っていたが「私は自説が一番正しいと言うつもりはない。少なくとも非局所隠れた変数は観測にかからない。観測にかかる量が相対論を破るわけには行かないからね。しかし物理は仮説を呈示しないと進歩がないだろう」と。その意味では量子と古典の壁を動かして古典を追い払ったのが多世界解釈、量子力学を追い払ったのが Bohm 理論で、どちらかに閉じればそれぞれ整合性がある。そう思うとコペンハーゲン流の「被観測系は量子力学で可逆発展、観測器は非可逆な射影で古典量に落とす」という継ぎはぎ解釈は、どこまでがユニタリ発展で書いてどこからが不可逆な射影をもたらすのか、仮説でもいいから述べる必要があるのではないか。「測定器は事実上逆行させられない拡散過程を含む」と言うことも考えてみたが、法則としては曖昧さが残る。

仮説と言え、自習しているとどこまでが確立したことでどこからが仮説か気になることがある。たとえば、空間の次元が光子質量 = 0 の要請から9次元になり、そのうち6次元がコンパクト化によりプランク長レベルに丸まって、大規模な空間は3次元だけ残るとい話がある。その9次元になる所で、 $1 + 2 + 3 + \dots = -1/12$  という、 $\zeta(z)$  を  $z = -1$  に解析接続して得られる式を使うが、これは時空の等角写像と関係があるらしい。しかしこれ以外の結果になる理論はないのだろうか？ また丸められる6次元空間はグラスマン座標ということだが、光子の話をしている時に？ など。まだまだ勉強し足りないことが山ほどある。

さて、この「極限宇宙」の各種イベントには可能な範囲で参加して来たが、領域運営が極めて周到にかつ整然と進められていることに驚いた。この「極限宇宙」で見聞きする成果は、理論から実験まで他に類を見ないほど多様で深い総合科学の成果ばかりで、進歩・変貌が目覚ましい分野であることがひしひしと感じられる。これからの皆さんのご活躍を楽しみにしたい。





## 理論物理学のための量子情報理論基礎

## [研究代表者]

森前 智行 (京都大学基礎物理学研究所・准教授)

## [研究分担者]

中田 芳史 (京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)

東 浩司 (NTT 物性科学基礎研究所・特別研究員)

Francesco Buscemi (名古屋大学情報学研究科・教授)

## [領域ポスドク(研究協力者)]

Arthur Parzygnat (名古屋大学情報学研究科・特任助教)

## [研究協力者]

Andrew Darmawan (京都大学基礎物理学研究所・特定講師)

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)

## [ポスドク研究員]

Aditya Nema (名古屋大学情報学研究科・特任助教)

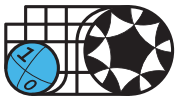
A 班は量子情報理論の研究を遂行するとともに、物理の他の分野に応用できる量子情報の「言語」を発展させていくことを目指している。今年度は以下のような研究成果を得た。

**量子暗号**：森前らは、量子公開鍵暗号を一方向性関数のみから構成することに初めて成功した。公開鍵暗号というのは、あらかじめ秘密鍵を共有しなくても、メッセージを暗号化して送ることが可能であるような暗号タスクであり、現在インターネット等の様々な場所で使われている。しかしながら、古典暗号においては、公開鍵暗号の実現には、一方向性関数よりも強い仮定(つまり、より危険な仮定)が必要であることが30年以上前から知られている。ここで、一方向性関数というのは計算するのは簡単だが、逆の計算をするのは難しいような関数のことであり、古典暗号における最も基礎的な仮定である。森前らは、量子を使った公開鍵暗号の場合、古典とはちがって、一方向性関数のみから構成が可能であることを初めて証明した。これは、古典暗号における30年来の常識を覆すものであり、本研究成果は量子情報のトップ国際会議 QIP2024 に採択された。

**量子測定理論と統計力学**：ブシェミらはまず、「観測エントロピー」と呼ばれる量について、初めて包括的な数学的特徴を与えた。この量は、量子統計力学への多くの新しいアプローチにおいて重要な役割を果たしている。観測エントロピーは1920年代にフォン・ノイマンによって導入されたが、熱化過程や熱力学の法則を理解するための中心的な量として認識されるようになったのはごく最近のことである。観測エントロピーは、測定結果だけから系の状態を推測する問題とも密接な関係がある。量子測定の中でも、両立性のない測定とシャープ測定は、量子情報理論と統計力学において特に重要であり、今回、新しい資源理論的アプローチを用いて、古典的通信やエンタングルメントのような他の情報理論的資源に関して、「非両立性」と「シャープネス」の両方の性質を完全に特徴付けることに成功した。また、数理ファイナンス、特に期待効用理論の統計力学と熱力学への応用も探求し、熱機関の性能に賭けるエージェントの振る舞いを記述する、多くの新しいゆらぎ関係と第二法則を発見した。

**量子誤り訂正**：中田らは、「一般の量子誤り訂正の具体的な復号手法」、及び、「ランダム回路と量子測定を組み合わせることで発現する『測定誘起の相転移』と、量子誤り訂正」について研究を行った。前者に関して、既存の量子誤り訂正符号の多くはスタビライザー符号と呼ばれるものだが、近年、理論物理では量子誤り訂正符号と量子カオス系の関係が指摘されており、ここでは非スタビライザー符号が重要となっている。本研究では、非スタビライザー符号の復号手法に着目し、任意の誤り訂正符号に対して適用できる復号量子回路を具体的に与えることに成功した。この成果は複雑な量子多体系を量子誤り訂正の観点から理解することに役立つもので、近い将来、実験的な実装も望まれるものである。後者に関して、ランダムな量子回路に一定の割合で射影測定を挟むことで動的な相転移が起こることが知られており、このような「測定誘起の相転移」に関しては、その発見以来、様々な研究が行われてきた。本研究では、ランダムな量子回路がよい量子誤り訂正符号の符号化になっていることに着目し、量子誤り訂正の性能の観点から測定誘起の相転移現象を解析した。結果として、量子誤り訂正の性能の急激な変化によって特徴づけられる新しい相転移点を発見し、量子情報と量子多体系の新たなフロンティアを示唆する成果を得た。

**量子通信**：量子インターネットは量子情報処理の究極形であり、様々な量子情報処理タスクの世界規模での実装を可能にする。しかし、量子インターネットの実現には、数多くの解決しなければならない課題がある。その最たるものが、量子情報の長距離伝送に不可欠な量子中継器の実現である。量子中継器は、古典的な中継器、エクステンダやブースタの対応物として、量子ネットワークを構成する量子通信路の損失やノイズを克服するために必要とされる。東らは、量子中継の概念的枠組みやアーキテクチャ、実現に向けた実験的進展について検討した。また、ポイント・ツー・ポイントの量子通信による通信速度限界を克服するための、マイルストーンとなり得る提案についても議論した。最後に、量子インターネットの設計と実現という広範な課題の中で、量子中継器がどのように位置づけられるかについて概観した。



## 量子情報を用いた量子ブラックホールの内部の物理学の解明

## [研究代表者]

飯塚 則裕 (大阪大学理学研究科・助教)

## [研究分担者]

宇賀神 知紀 (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)]

Sunil Kumar Sake (大阪大学理学研究科・研究員)

Nicolò Zenoni (大阪大学理学研究科・研究員)

## [大学院生]

姉川 尊徳 (大阪大学理学研究科)

B01班はゲージ重力対応や量子情報を駆使しブラックホールの量子論を解明する事を目標にしています。本年の成果として、飯塚は姉川、Sake、Zenoniと共に2次元Jackiw-Teitelboim (JT) 重力でのドシッター空間のホログラフィックな量子複雑性を調べた[1]。ホログラフィックな量子複雑性としての「体積」はゲージの選択に依存することから、「作用」による量子複雑性が常に優れているという結論を得た。また、飯塚は姉川と3次元ドシッター空間の量子複雑性が、摂動下で奇妙な振る舞いを示すことを[2]で発見し、双対なモデルへの制限を与えた。またZenoniはAuzzi、Nardelli、Ungureanuと共に3次元で漸近的AdSに埋め込まれたドシッター空間の量子複雑性についても調べた[3]。SakeはNanda、TrivediとともにJT重力と呼ばれる2次元重力のdS空間において、dilatonを時計として選ぶと、量子ヒルベルト空間の状態や規格化が構成できることを[4]で示した。

飯塚は姉川、Mukherjee Sunil、Trivediと共に希薄ランダム行列(いくつかの要素がゼロである行列)のスペクトル統計、レベル間隔、OTOCs、SFFなどの性質と、Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) モデルとの関係を系統的に調べた結果を論文[5]にまとめた。また、飯塚、姉川、Sakeは局所SYKモデルとよばれる相互作用を限定したモデルのトリプルスケール極限とよばれる極限下での振る舞いを[6]で解析し、この局所SYKモデルはSYKモデルと同じ2次元JT重力の特徴を再現することを示した。

飯塚は西田と共に、IP行列モデルのKrylov複雑性について[7,8]で研究し、モデルがブラックホールの特性を示すパラメータ領域でKrylov複雑性が時間に対して指数増加することを示した。ホログラフィックな系に双対であると考えられている行列モデルで、Krylov複雑性が指数増加することを具体的に示したのは、このIP行列モデルの例が初めてのものである。

宇賀神はBalasubramanian、野村と共同でドシッター空間をAdSブラックホールと関連させた場合に実現する時空を2次元重力の場合に構成し、その性質を議論した[9]。また宮田、中山と共同でブラックホール内部をホーキング放射から復元する際に重要と考えられているPetzの再構成写像をSYKモデルおよびランダムユニタリモデルにおいて解析した[10]。

寺嶋は杉下とAdS/CFT対応においてCFTから量子重力理論を再構成する具体的な方法を調べ、CFT側で空間の一部のみを切り取った理論を考えたときに、量子重力の非摂動的な効果のために、CFT作用素としては元のものとは異なることを示し、これをブラックホール相補性の類似として部分領域相補性と呼んだ[11]。

野海は阿部、吉村と[12]で、量子電磁気学における荷電ブラックホールのスペクトルを精査した。ブラックホールが持ちうる電荷の上限を定める「極限条件」に対する量子補正が、「弱い重力予想」から期待されるある種の単調性に従うことを示し、弱い重力予想の証拠を与えた。さらに、重力の量子効果まで取り入れた解析を行うことで、散乱行列理論から得られる整合性条件である「正值性条件」と「極限条件の単調性」に相関があることを指摘した。野海は青木、齋藤、佐藤、白井、徳田、山崎と重力理論における散乱行列理論の定式化と現象論的応用に関する論文[13,14]や青木、佐野、山口と原始揺らぎの非ガウス性を用いた新粒子探索に関する論文[15]も発表した。

重森は、根本とブラックホールの微視的状态を表すmicrostate geometryのうち、余次元2のソースを含むものの構成法を整備し新しい厳密解を書き下した[16]。余次元2のブレーンはその周りで時空が双対性で捻られた構造を持つが、その捻り方を表す行列が互いに交換しないようなブレーンが複数が同時に存在する「非可換」な配位が一般的な微視的状态であると考えられる。

[1] T. Anegawa *et al.*, JHEP **06**, 213 (2023).

[2] T. Anegawa and N. Iizuka, JHEP **08**, 115 (2023).

[3] R. Auzzi *et al.*, Phys. Rev. D **108**, 026006 (2023).

[4] K. K. Nanda *et al.*, arXiv:2307.15900 [hep-th].

[5] T. Anegawa *et al.*, JHEP **11**, 234 (2023).

[6] T. Anegawa *et al.*, JHEP **10**, 160 (2023).

[7] N. Iizuka and M. Nishida, JHEP **11**, 065 (2023).

[8] N. Iizuka and M. Nishida, JHEP **11**, 096 (2023).

[9] V. Balasubramanian *et al.*, arXiv:2308.09748 [hep-th].

[10] Y. Nakayama *et al.*, PTEP **2023**, 123B04 (2023).

[11] S. Sugishita and S. Terashima, arXiv:2309.04231 [hep-th].

[12] Y. Abe *et al.*, JHEP **09**, 024 (2023).

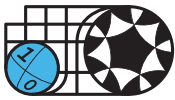
[13] T. Noumi and J. Tokuda, JHEP **06**, 032 (2023).

[14] K. Aoki *et al.*, arXiv:2305.10058 [hep-th].

[15] S. Aoki *et al.*, arXiv:2312.09642 [hep-th].

[16] R. Nemoto and M. Shigemori, arXiv:2312.16384 [hep-th].





## 人工量子物質による量子ブラックホールの解明

## [研究代表者]

手塚 真樹 (京都大学理学研究科・助教)

## [研究分担者]

中島 秀太 (大阪大学QIQB・准教授)

上西 慧理子 (慶應義塾大学理工学研究科・特任講師)

森 貴司 (理化学研究所創発物性科学研究センター・研究員)

山本 大輔 (日本大学文理学部・准教授)

## [領域ポスドク (研究協力者)]

山下 和也 (京都大学理学研究科・特定研究員)

Giacomo Marmorini (日本大学文理学部・研究員)

## [研究協力者]

段下 一平 (近畿大学理工学部・准教授)

高三 和晃 (東京大学理学系研究科・助教)

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

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

本年度における冷却原子実験の進展として、中島と山下は、前年度までに達成したりチウム(Li)のフェルミオン同位体 ${}^6\text{Li}$ のフェッシュバッハ分子 ${}^6\text{Li}_2$ の Bose-Einstein凝縮に引き続き、 ${}^6\text{Li}$ のフェルミ縮退を達成しました。並行して測定誘起相転移の観測と非時間順序相関関数(OTOC)の測定を実現するための光源および光学系の製作・評価を進めました。測定誘起相転移の観測およびOTOCの測定両方の舞台となる光格子系の準備については、光学系の構築及び光格子ポテンシャルの評価を行い、pulsed latticeによる運動量キックの方法を用いてx軸およびy軸について周期性に基づく原子波回折パターンを確認しました(図1)。また、測定誘起相転移の実現に向けた準備として、光トラップ中のフェルミ縮退した ${}^6\text{Li}$ 原子気体において光会合による分子形成・原子ロス共鳴の観測に成功しました。また中島は小山氏・川口氏(名古屋大)、藤本氏(東工大)と共に、Altland-Zirnbauerクラスに属するトポロジカル相を冷却原子系を用いて実現する手法を提案しました[1]。

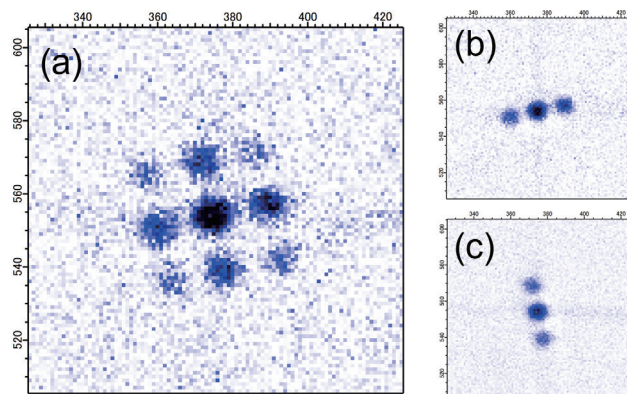


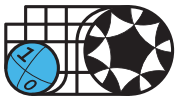
図1 : pulsed lattice による ${}^6\text{Li}$ 原子の回折 (TOF=1.2 ms, pulse 長さ=2.5  $\mu\text{s}$ )。 (a) x, y, 2軸方向同時からの pulsed lattice による回折。 (b) x軸光格子のみによる回折。 (c) y軸光格子のみによる回折。

手塚と花田氏(ロンドン大クイーンメアリー校)、Junyu Liu氏(シカゴ大)、Rinaldi氏(Quantinuum・理研)による、ボソン系を量子計算機でシミュレートする際のカットオフの影響を古典計算機で評価する手法を提案した論文が出版されました[2]。また、手塚は、Jevicki氏・Xianlong Liu氏(ブラウン大)、花田氏、Rinaldi氏と、量子ブラックホールとホログラフィック対応をもつ量子系である Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) 模型に関連し、同模型でランダムな4体相互作用するフェルミオンのかわりにスピン演算子を考えても、準位統計が似た性質を示すことを発見しました[3]。

森はHo氏(シンガポール国立大)、Abanin氏(プリンストン大)、Dalla Torre氏(バル=イラン大)とともに、周期外場によって駆動された古典・量子多体系の非平衡ダイナミクスに関するレビューを執筆しました[4]。また、森と白井氏(早大)は、開放量子系のデコヒーレンスと孤立系の演算子拡散ダイナミクスの間に関係があることを見出し、それに基づき、開放量子多体系のデコヒーレンスが、一般にどのように起きるかを明らかにしました[5]。

山本とMarmoriniは、古川氏・茂木氏(青山学院大)とともに、成分ごとの粒子数比を制御したSU(3)対称性を有するアルカリ土類金属原子気体の系において、連続対称性を持つ2次元系における自発的対称性の破れが生じる新たなメカニズムを発見しました[6]。また、山本は森田氏(東京理科大)とともに、そのようなSU(N)対称性を持つ原子気体を量子領域の温度まで効率的に冷やす新たな方法も提案しました[7]。

- [1] Y. Koyama, K. Fujimoto, S. Nakajima, and Y. Kawaguchi, Phys. Rev. Research **5**, 043167 (2023).
- [2] M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, Mach. Learn.: Sci. Technol. **4**, 045021 (2023).
- [3] M. Hanada, A. Jevicki, X. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, arXiv:2309.15349.
- [4] W. W. Ho, T. Mori, D. A. Abanin, and E. G. Dalla Torre, Ann. Phys. **454**, 169297 (2023).
- [5] T. Shirai and T. Mori, arXiv:2309.03485.
- [6] H. Motegi, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, Phys. Rev. Research **5**, L022056 (2023).
- [7] D. Yamamoto and K. Morita, arXiv:2311.08014.



## 量子情報を用いた量子ブラックホールの数理の解明

## [研究代表者]

石橋 明浩 (近畿大学理工学部・教授)

## [研究分担者]

前田 健吾 (芝浦工業大学工学部・教授)

村田 佳樹 (日本大学文理学部・准教授)

## [領域ポスドク (研究協力者)]

松尾 善典 (近畿大学理工学部・研究支援者)

木下 俊一郎 (日本大学文理学部・博士研究員)

## [研究協力者]

岡村 隆 (関西学院大学理学部・教授)

木村 元 (芝浦工業大学システム理工学部・教授)

野海 俊文 (東京大学・准教授)

宇宙のブラックホールは、時空のゆがみで形作られているにもかかわらず、私たちの身近な物質と同様に熱的な性質をもっています。ブラックホールのこうした性質は、私たちの世界が本質的には量子的であることに由来すると考えられています。B03班では、量子ブラックホールの根底にある性質を、量子情報理論と一般相対論を組み合わせて理解する研究を進めています。

石橋と前田は、B01の飯塚と共に、回転の効果でホーキング温度がゼロとなる極限ブラックホールのアトラクター機構を検討し、その地平面付近がMyers-Perryブラックホールと一致するという特殊性を示しました[1]。また、石橋と前田と岡村[2]は、重力に対して物質の量子効果を取り入れた半古典アインシュタイン方程式を、ゲージ重力対応の枠組みで定式化し、特に反ドジッター (AdS) 時空そのものが不安定になる可能性を示しました。さらに、石橋と共同研究者は、重力の量子効果を高階微分項を含めた作用積分で記述するような有効理論において、定常ブラックホールの剛性と呼ばれる対称性の拡大が起こることを示しました[3]。

古典論の収束定理の量子版である量子収束予想は、これまで、エンタングルメントエントロピーの振舞いが熱力学エントロピーと異なる古いブラックホールについては検証されていませんでした。松尾は、量子情報とホログラフィーから導かれる公式を用いて、古いブラックホールでも量子収束予想が成り立つことを示しました[4]。また、松尾は超弦理論を用いて、高温のブラックホールと弦の結合状態との転移を記述するモデルを構築するとともに、低温のブラックホールでも弦の結合状態で近似できることを示しました[5]。

B03班では、実際の宇宙や物性系で起こり得る現象と量子ブラックホールとの関係を探る研究も行ってい

ます。村田と木下は共同研究者とともに、ゲージ重力対応における場の理論側の操作によって、対応する漸近 AdS 時空中に光的測地線を生成する方法を提案しました[6](図。詳細は木下による「最近の研究から」記事もご参照ください)。その方法を用いて、特にブラックホール時空の周りの光子面の存在を場の理論側の操作で判定出来ることを提案しました。また、村田は共同研究者と共に回転するブラックストリングについての新たな不安定性を発見しました[7]。入射波に比べて反射波の振幅が増幅される超放射という現象が、回転ブラックストリング周りで繰り返し起こり、不安定性を引き起こすことが分かりました。その不安定性の終状態の候補となる新しいブラックストリング解の構成にも成功しました[8][9]。さらに村田は、B01、C03の共同研究者とともに、ビリヤード系のクリロフ複雑性の研究を行い[10]、量子系の演算子の時間発展を決めるランチョス係数の分散とビリヤード系のリアプノフ指数に相関関係があることを示しました。

木下は共同研究者と共に、重力場中を運動する量子的自由粒子に対する時間の遅れの公式を、外場として電磁場中を非慣性運動する量子的な荷電粒子に対する公式へ一般化しました[11]。

石橋と共同研究者[12]は、漸近安全量子重力理論において、量子補正された漸近 AdS ブラックホールが引き起こす新しい相転移を発見しました。

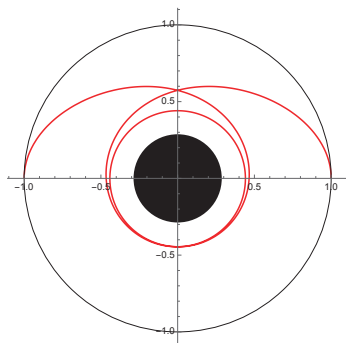
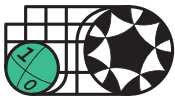


図1: ゲージ重力対応における場の理論側の操作によって、対応する漸近 AdS 時空中に時空中に光的測地線を生成する方法

- [1] N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, JHEP **08** (2023) 177.
- [2] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, JHEP **05** (2023) 212.
- [3] S. Hollands, A. Ishibashi, and H. S. Reall, Commun. Math. Phys. **401** (2023), 2757.
- [4] Y. Matsuo, JHEP **12** (2023) 050.
- [5] Y. Matsuo, Phys. Rev. D **107** (2023) 126003.
- [6] S. Kinoshita, K. Murata, and D. Takeda, JHEP **10** (2023) 074.
- [7] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, JHEP **01** (2023) 147.
- [8] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, JHEP **02** (2023) 069.
- [9] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, JHEP **05** (2023) 041.
- [10] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, JHEP **11** (2023) 040.
- [11] T. Chiba, and S. Kinoshita, Phys. Rev. D **108** (2023) 044036.
- [12] C-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, and N. Ohta, Class. Quant. Grav. **40** (2023) 21, 215007.





## 量子情報を用いた量子宇宙の基礎理論

## [研究代表者]

高柳 匡 (京都大学基礎物理学研究所・教授)

## [研究分担者]

奥山 和美 (信州大学理学部・教授)  
 杉本 茂樹 (京都大学理学研究科・教授)  
 関野 恭弘 (拓殖大学工学部・教授)  
 疋田 泰章 (京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)

## [海外研究協力者]

笠 真生 (Princeton大学・教授)  
 吉田 紅 (Perimeter研究所・教員)

## [領域ポスドク (研究協力者)]

Jonathan Harper (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

## [研究協力者]

上床 隆裕 (釧路工業高等専門学校・創造工学科・講師)  
 北村 比孝 (立教大学理学部・特別研究員)  
 後藤 郁夏人 (京都大学基礎物理学研究所・学振特別研究員 (CPD))  
 酒井 一博 (明治学院大学法学部・准教授)  
 宮下 翔一郎 (国立東華大学(台湾)・研究員)  
 宮地 真路 (名古屋大学 理学研究科 YLC 特任助教)  
 鈴木 健太 (立教大学理学部・助教)  
 Shan-Ming Ruan (京都大学基礎物理学研究所・ポスドク研究員)  
 Ali Mollabashi (IPM研究所(イラン)・助教)  
 Pawel Caputa (ワルシャワ大学・准教授)  
 魏子夏 (Harvard大学・Junior Fellow, Harvard Society of Fellows)  
 森 崇人 (京都大学基礎物理学研究所・学振特別研究員)

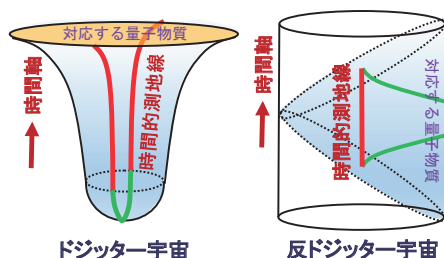
計画研究C01は、宇宙が無から生まれる過程を説明するという最終的な目標に向かって、ミクロな量子宇宙の物理法則を解明することを目的としています。特にホログラフィー原理と量子情報の深い関係を利用してこの難問に挑んでいます。

この目標に直接関係して、C01の高柳、瀧、土井、Harper、Mollabashiは、擬エントロピーと呼ばれる量が、ドジッター宇宙のホログラフィー原理において自然に現れ、それが時間軸の創発に関与することを見出しました[1]。擬エントロピーは、エンタングルメント・エントロピーを始状態と終状態の両方に依存するように拡張した量です。ドジッター宇宙は、ホログラフィー原理で非ユニタリーな共形場理論に対応することが期待されますが、そのような共形場理論のエンタングルメント・エントロピーは複素数値をとり、正しくは擬エントロピーと解釈すべきことが分かりました。この量はドジッター宇宙の時間的測地線の長さに対応し、宇宙の時間方向が擬エントロピーから創発することを示唆します。同様の考察を反ドジッター宇宙に適用すると、時間的測地線の長さは、時間的なエンタングルメント・エントロピーに対応することが分かりました。下図参照のこと。さらに、C01の川本、鈴木(優樹)、高柳、Ruanは、ドジッター宇宙を半分に切って、時間的な境界を作ることで、ホログラフィー原理の新しい定式化を提案しました[2]。また、C01の魏、高柳、瀧は、A01のParzygnatと共同で、擬エントロピーの定義を変形してSVDエントロピーという新しい量を導入し、量子多体系の量子相を区別する秩序変数として機能することを見出しました[3]。C01の疋田、瀧、上床は、Chen(台湾大)と共同で、ドジッター宇宙のホログラフィー原理を応用し、複素化した幾何での量子重力の解析を行

いました[4]。ゲージ重力対応を応用することで、鞍点として可能な複素幾何を同定する手法を開発し、実際に3次元重力理論で可能な複素幾何の同定を行いました。

さらに、ゲージ重力対応や量子重力理論に関する様々な研究も行いました。一例として、2重スケール極限を取ったSachdev-Ye-Kitaevモデル(DSSYK)について研究しました。C01の奥山、鈴木(健太)は、DSSYKの相関関数の1-loop補正がLiouville理論から再現されることを示しました[5]。Jackiw-Teitelboim(JT)重力に現れるEnd-of-the-world(ETW)ブレーンやWeil-Petersson体積がDSSYKにも自然に一般化できることも示しました。また、JT重力のスペクトル形状因子(SFF)についても研究を行いました。C01の奥山、酒井は、B01の飯塚らと共同で、SFFのn点関数への拡張について議論しました[6]。その他の例として、C01の関野、北村、宮下は、ゲージ重力対応を、ゲージ理論が弱結合というこれまで理解が進んでいない極限で理解するための研究を行いました。昨年度提唱した「弦のビット」描像に基づく超弦理論により、ゲージ理論の摂動展開を再現することを目指しています。さらに、C01の杉本、鈴木(優樹)は、弦理論における時空の境界にあるETWブレーンに関する研究を行いました[7]。d+1次元のAdSソリトンと呼ばれる時空における、ある丸まった空間方向に沿って次元簡約すると、得られるd次元の時空にはETWブレーンが生じることが示されます。今回の研究では、そのブレーンの張力を計算する方法を与え、さらにそれをM理論に適用することで、タイプ0A弦理論における新種のETWブレーンの存在を示唆する結果を得ました。

- [1] K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and Y. Taki, Phys. Rev. Lett. **130** (2023) 031601.
- [2] T. Kawamoto, S.-M. Ruan, Y.-k. Suzuki and T. Takayanagi, JHEP **10** (2023) 137.
- [3] A. J. Parzygnat, T. Takayanagi, Y. Taki and Z. Wei, JHEP **12** (2023) 123.
- [4] H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki and T. Uetoko, Phys. Rev. D **107** (2023) L101902.
- [5] K. Okuyama and K. Suzuki, JHEP **05** (2023) 117.
- [6] T. Aneqawa, N. Iizuka, K. Okuyama and K. Sakai, JHEP **07** (2023) 047.
- [7] S. Sugimoto and Y.-k. Suzuki, arXiv:2312.07891.



図：時間的測地点と対応する量子情報量



## 量子ホール系による量子宇宙の実験

## [研究代表者]

遊佐 剛 (東北大学理学研究科物理学専攻・教授)

## [研究分担者]

柴田 尚和 (東北大学理学研究科物理学専攻・教授)

堀田 昌寛 (東北大学理学研究科物理学専攻・助教)

米倉 和也 (東北大学理学研究科・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 保真 (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 (電気通信大学・特任研究員)

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・主任研究員)

高三 和晃 (東京大学理学系研究科・助教)

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[1,2]。

実際の実験を行うためには、大きく分けて(1)任意波形発生器、オシロスコープやスペクトラムアナライザのような室温部に設置された測定機器、(2)極低温強磁場を実現する超伝導マグネット付き冷凍機、(3)量子宇宙と等価な物理系の発現する半導体デバイスの三要素が必要となります。昨年度末に本研究の研究費で購入した最低温度5mK、磁場12Tの希釈冷凍機が納品され(図1)、膨張宇宙に関する電気測定を開始する予定でしたが、装置の不具合のためまだ本測定に至ってはいません。そのため、今年度は[2]で理論提案した構造により近いデバイスを作成し、エッジを膨張させる前段階の研究を進めました。特に、数100psの時間分解能と1 $\mu$ mの空間分解能を持った特殊なストロボ顕微鏡を使って、エッジの励起状態を可視化する研究を進め、外部電場によってエッジの経路を制御し、その経路を可視化することに成功しました(現在論文を準備中)。またエッジの伝搬を可視化する別のツールとして開発したpump-probe 反射ストロボ測定に関する成果をまとめ[3]、量子ホールエッジの熱輸送のイメージングにも成功しました[4]。

理論的な側面として、堀田昌寛氏と南部氏により、量子ホールの膨張エッジを使った量子宇宙シミュレーターにおけるエンタングルメントの理論を確立しました[5]。二つの空間領域の間のエンタングルメントを調べ、膨張エッジ領域からくる

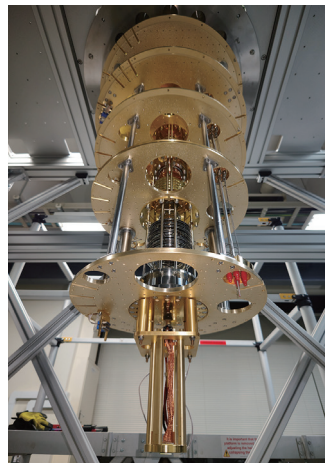


図1：絶対温度5ミリケルビンを実現する希釈冷凍機の内

ホーキング輻射によって、エンタングルメントがどのように減少するか調べました。このふるまいが宇宙のインフレーションの量子性がどのように消えるのかと関連すると考えられます。

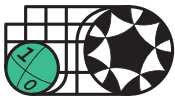
柴田氏を中心にDMRG (Density Matrix Renormalization Group)法を用いて、バルクとエッジを含む広い領域に対する量子多体問題の正確な解析を進めています。新たに開発したTDVP (Time-Dependent Variational Principle)法を用いて、エッジ励起の時間発展を数値的に精密に求め、エッジポテンシャルが急激に変化する際に生じる分数量子ホール状態での電荷密度の時間変化を解析することで、エッジ状態の励起モードとは別にバルクとエッジの境界領域を伝搬する励起モードの存在を確認しました。

米倉氏を中心にヘテロティック超弦理論における新しいブレーンを研究しています[6]。これらは微妙な保存電荷によって特徴づけられています。この研究で、それらのブレーンのホライズン近傍領域を記述する正確な世界面理論を構築しました。この研究の成果は、量子重力理論では全ての可能な電荷について、その電荷を持つダイナミカルな物体が存在するという一般的な予想をサポートしています。

さらに米倉氏は他の研究でさらに共同研究者とともに、2次元超対称性理論でのmod 2 指数[7]、QCDにおける温度と虚数化学ポテンシャルの空間での相図[8]、Yang-Mills理論からの宇宙ひもや暗黒物質[9]なども研究しました。

- [1] M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa, Phys. Rev. A **89**, 012311 (2014).
- [2] M. Hotta *et al.*, Phys. Rev. D **105**, 105009 (2022).
- [3] A. Kamiyama *et al.*, Appl. Phys. Lett. **122**, 202103 (2023).
- [4] J. N. Moore, A. Kamiyama, T. Mano, G. Yusa, Europhysics Lett. **142**, 16004 (2023) [arXiv:2212.12628].
- [5] Y. Nambu, M. Hotta, Phys. Rev. D **107**, 085002 (2023).
- [6] J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa, K. Yonekura, Phys. Rev. Lett. **131**, 121601 (2023) [arXiv:2303.17623].
- [7] Y. Tachikawa, M. Yamashita, K. Yonekura, arXiv:2303.17623.
- [8] S. K. Kobayashi, T. Yokokura, K. Yonekura, JHEP **08**, 132 (2023) [arXiv:2305.01217].
- [9] M. Yamada, K. Yonekura, JHEP **09**, 197 (2023) [arXiv:2307.06586].





## 量子情報を用いた量子宇宙の数理とその応用

## [研究代表者]

白水 徹也 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・教授)

## [研究分担者]

泉 圭介 (名古屋大学素粒子宇宙起源研究所・講師)

小林 努 (立教大学理学部・教授)

棚橋 典大 (中央大学理工学部・助教)

野澤 真人 (大阪工業大学工学部・講師)

吉野 裕高 (大阪公立大学大学院理学研究科・准教授)

## [領域ポスドク(研究協力者)]

吉田大介 (名古屋大学大学院多元数理科学研究科・特任助教)

## [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B01、B03班メンバーとの共同研究で、量子カオスの新たな指標として提案されたKrylov複雑性の性質を古典・量子ビリヤード系で解析し、この量が他のカオス性の指標と強い相関を示すことなどを解明しました[1]。この研究はブラックホールの量子論、AdS/CFT対応のいくつかの予想の検証に繋がるものと期待されています。

4次元時空におけるEinstein方程式の真空解として、宇宙紐によって加速されたブラックホールのペアを表すC計量と呼ばれる解が知られています。野澤らはポテンシャルを持ったファントムスカラー場が存在する場合のC計量を構築し、漸近的AdSワームホールを加速させた時空であることを明らかにしました[2]。この研究は、高次元膜宇宙模型やワームホールのスロート構造の解明に深い洞察を与えます。

泉を中心に提案された強弱に寄らず重力を検知する面(重力検知面)に対する面積不等式の証明が、泉、白水、吉野らにより高次元の場合に拡張されました[3]。重力検知面に関する一連の研究が評価され、物理学会誌の「最近の研究から」に泉による記事が掲載されています[4]。また、白水と泉により、重力検知面の膨張宇宙へ応用などがなされました[5]。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-高柳公式への応用を念頭に研究が進んでいます。関連して、吉野は帯電ブラックホールに静的摂動を加えた時空を調べ、非球対称な光子面が存在しうることを示しました[6]。光子面はその面上の任意の方向に沿って光子が運動し続ける面として定義されるもので、強い重力場中で存在し得ます。一般相対論検証に欠かせない基礎研究として位置づけられます。

一方、小林は、量子重力理論の有効理論の一つとして考えられているHorava-Lifshitz重力のような、楕円型方程式に従うスカラー自由度を含む一般的な重力理論のニュートン極限を調べ、実験・観測による検証可能性を議論しました[7]。泉は広い意味でこの種の重力理論の解析をまとめた冊子を出版しました[8]。さらに、吉田は初期特異点の無い宇宙についてエントロピーの最大量に関する性質を解析し、エントロピーに基づく特異点定理と従来の幾何学的な特異点定理との差異を明らかにしました[9]。

今年度はB03班やその他研究者の方々と協力し、一般相対論と重力に関する国際会議(JGRG32)を名古屋大学にて11月27日から12月1日まで対面形式で開催しました。国内外から240名の参加者が集結し、最後に領域代表の高柳氏が加速膨張宇宙に関する最前線の理解について講演されました。さらに、2024年2月8、9日に小研究会「一般相対論と幾何」を名古屋大学にて、3月4、5日に小研究会「時空と重力」を大阪工業大学にて開催しました。いずれも、極限宇宙をさらに深掘りし、他の追従を許さない研究成果に繋げるため、各分野のコアな研究者の招待講演を中心とし、異分野間の交流を行うことができました。

- [1] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, JHEP 2023, 40 (2023).  
 [2] M. Nozawa and T. Torii, Phys. Rev. D **108**, 064036 (2023).  
 [3] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, PTEP 2023, 043E01 (2023).  
 [4] 泉, 日本物理学会誌 第78巻 第9号 525-529 (2023).  
 [5] T. Shiromizu, K. Izumi, PTEP 2023, 103E02 (2023).  
 [6] H. Yoshino, arXiv:2309.14318[gr-qc].  
 [7] T. Kobayashi and T. Hiramatsu, arXiv:2310.11041 [gr-qc].  
 [8] 泉, 重力理論解析への招待: 古典論から量子論まで (SGCライブラリ 188), サイエンス社 (2023)  
 [9] T. Kanai, K. Nomura, D. Yoshida, Phys.Rev. D **108**, 104024 (2023).

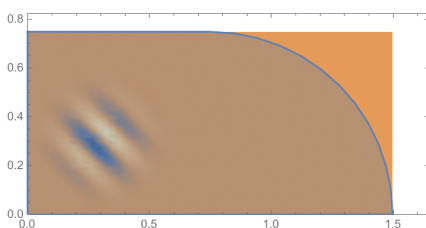


図1: Krylov複雑性の計算に用いた初期波動関数の例。カオスのビリヤード上を運動する点粒子に相当する。

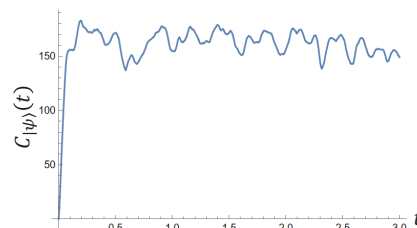


図2: 図1の初期波動関数から得られるKrylov複雑性 $C_{|\psi\rangle}$ の時間依存性。波動関数が時間発展でどの程度複雑化するかを定量化したものの。



## 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 (京都大学基礎物理学研究所・助教)  
松尾 泰 (東京大学大学院理学系研究科・教授)

## 【領域ポスドク(研究協力者)】

Dongsheng Ge (大阪大学大学院理学研究科・特任研究員)  
Pratik Nandy (京都大学基礎物理学研究所・特定研究員)

## 【研究協力者】

鈴木了 (Shing Tung Yau Center of Southeast University, Professor)  
土居 孝寛 (京都大学大学院理学研究科・助教)  
田島 裕之 (東京大学大学院理学系研究科・助教)  
筒井 翔一郎 (理化学研究所数理創造プログラム・客員研究員)  
永野 廉人 (東京大学素粒子物理国際研究センター・特任研究員)  
松本 祥 (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 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・教授)  
吉田 豊 (明治学院大学 法学部 消費情報環境法学科・助手)

西岡(研究代表者)は奥田(研究分担者)と大学院生の川畑、矢萩らとともに、非二進数体および可換環上の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[1]。また西岡、奥田、川畑は量子誤り訂正符号からフェルミオン型共形場理論を新たに構成し[2]、さらに超対称性を持つ共形場理論を、量子誤り訂正符号を用いて系統的に探す方法を提唱しました[3]。

また西岡は大学院生の嶋守と藤村とともに、massless Thirring 模型と呼ばれる質量の無い相互作用を持つ $(1+1)$ 次元フェルミオン系の2次のRenyiエントロピーをボソン化の手法を用いて解析的に計算し、量子エンタングルメント構造を明らかにしました[4]。

伊藤(研究分担者)と松本(研究協力者)は、ハミルトン形式で記述したゲージ場の理論において複合演算子のスペクトルを計算する3つの方法を提案し、3つの結果が一致することを示すとともにそれぞれの手法の利点・欠点を系統誤差などの見積りから精査しました[5]。具体的には、よく議論されているSchwinger modelをフェルミオンが2種類入った場合に拡張し、DMRGの手法を用いて調べました。また、伊藤は[6]で、熱的な量子純粋状態(TPQ状態)から熱力学量を計算するため、量子虚時間発展(QITE)法という量子計算のアルゴリズムを用いて調べ、解析解がある場合にそれと一致するのを見ることで手法の有用性を示しました。どちらの研究も、現在は従来法では符号問題が生じるパラメータ領域の計算へ展開しています。

松尾(研究分担者)は量子計算に応用可能な2次元の可解系の包括的な研究を実行しています。特に、2次元共形対称性(Virasoro代数)を一般化した量子トroidal代数の研究をここ10年ほど継続して行っていて、多くの結果を得ました。最近、それらをまとめたレビュー論文を出版しました[7]。また、量子誤り訂正が不要な量子素子を生成するために有用と考えられている、非可換量子ホール効果を記述する可解模型として、一般化されたCalogero模型を提唱し、その系を記述する対称性(Kac-Moody代数)を明らかにしました[8]。

本多(研究分担者)は、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。まずドジッター

空間上のスカラー場の理論において、相関関数の時間に関する摂動級数の性質を調べてボレル総和法を適用し、長時間での振る舞いを議論しました[9]。また超対称性を持たない様々な5次元場の理論について、超共形場理論からの変形とトポロジカルな議論を組み合わせることで新たな相転移の存在を予言しました[10]。物性に関連する研究では、フラク톤を記述する格子模型について、同一の基底状態の縮退度を持つ位相的場の理論の類似物の存在が示唆されていましたが、それに対応するものが葉層のBF理論と呼ばれるクラスの場の理論であることを明らかにしました[11]。また現在、4次元SU(2)ヤンミルズ理論の相構造、量子計算の場の量子論への応用、重力下での非可逆対称性についても研究を行っており、現在論文を準備しています。上記の研究内容について、集中講義2件・国際会議招待講演6件・国内会議招待講演2件・アウトリーチ活動1件を行いました。

また昨年度に引き続き、D01班主催のスクール「場の理論の新しい計算方法2023」を大阪大学にて開催しました。詳細は研究会報告をご覧ください。

- [1] Y. F. Alam, K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, S. Yahagi, JHEP **12**, 127 (2023).
- [2] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, arXiv:2308.01579.
- [3] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, Phys. Rev. D **108**, L081901 (2023).
- [4] H. Fujimura, T. Nishioka, S. Shimamori, Phys. Rev. D **108**, 125016 (2023).
- [5] E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, JHEP **11**, 231 (2023).
- [6] J. W. Pedersen, E. Itou, R. Y. Sun and S. Yunoki, arXiv:2311.11616.
- [7] Y. Matsuo, S. Nawata, G. Noshita, R.-D. Zhu, Phys. Rept. **1055**, 1-144 (2024).
- [8] J.-E. Bourguine and Y. Matsuo, arXiv:2401.03087.
- [9] M. Honda, R. Jinno, L. Pinol and K. Tokeshi, JHEP **08**, 060 (2023).
- [10] M. Akhond, M. Honda and F. Mignosa, arXiv:2307.13724.
- [11] H. Ebisu, M. Honda and T. Nakanishi, arXiv:2310.06701.





## 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 (東京大学大学院総合文化研究科)

## [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、本領域の重要なキーワードでもあるテンソルネットワーク(TN)、および、量子多体系とそのダイナミクスの定量的、数理的な理解の構築を軸に、物性系で発現する多彩な現象を解明すること、さらに、それらを極限宇宙の分野横断的な研究に役立てることをめざしています。今年度は、領域PDとして活躍した古谷が4月に埼玉医大の講師に栄転し、その後任として尾崎が東大に着任しました。ここでは、今年度の成果からハイライトをいくつかピックアップして紹介したいと思います。

まずTNに関して、マルチスケールエンタングルメントくりこみ群(MERA)と量子重力に対するホログラフィー原理との関係性の問題があります。奥西はC01班の高柳と協力して、相転移の基本モデルでもあるベータ格子イジング模型に自然なホログラフィックくりこみ群の理論構造が内在することを示しました[1]。具体的にはAdS境界に相当するベータ格子の縁上の有効磁場のくりこみの流れや、双曲的格子構造に由来した縁スピン相関関数の冪依存性出現メカニズム、およびp-adic AdS/CFTとの対応関係を解析的に明らかにしました。ベータ格子模型はTree型TNに分類されますが、その直感的な理解はMERAのように複雑なループ構造を持つTNの解析に弾みを付けると期待されます。実用面では、領域PDのYosprakobが中心となり、2次元多成分シュウィンガー模型のグラスマンテンソルくりこみ群の実装に成功するとともに、グラスマンテンソル演算のPythonパッケージも整備して公開しました[2]。多状態化への道筋の提示により、他班の格子場の理論グループとの連携も視野に入ります。また、TNは量子情報との接点も多く持ちます。上田らは、いわゆるNISQデバイスを念頭に量子変分固有値解法とTN法を融合する際、分岐MERAの考え方を組み込んだエンタングルメントの制御法を提案し、非一様な量子スピン系でそのベンチマーク計算も実施しました[3]。さらに、NISQで効率良く1次元量子多体系の実時間発展を計算するため、エンタングルメントの体積則を満す変分状態としてダイヤモンド型に2量子ビットゲートを積んだ量子回路表現を提案し、その有効性を横磁場イジング模型で検証しました[4]。一方、原田らはTree型TNをベースに量子的生成モデルの研究を進展させ、相互情報量最小限理に基づくネットワーク構造最適化

手法と最適化構造に基づく確率変数同士の依存関係抽出法を提案するとともに、ニューラルネットワークを用いた有限サイズスケールリング法[5]の拡張など、機械学習分野への応用展開を進めました。

物性サイドの研究展開として、桂は制限スペクトル生成代数や可積分境界状態を用いて、量子傷跡状態(QMBS)と呼ばれる特異なダイナミクスを示す状態が現れる量子スピン模型を系統的に構成できることを示しました[6]。さらに、E02班の國見氏、E01班の富田氏らと協力して、QMBSの現れる量子スピン模型のRydberg原子系を用いた実現方法も提案しています[7]。今年着任の尾崎も、桂と連携してクリーン極限のマヨラナSYK模型の厳密解を求めることに成功しました。さらに非時間順序相関関数の解析的な表式を得るなど、ダイナミクスについても非自明な結果を得ています。一方、堀田らは昨年度から引続き、固体物性の量子状態に自然に表れるゲージ構造について調べ、特に実験と共同で熱ホール効果が3副格子の長周期磁気構造に由来するSU(3)ゲージによって現れることを示しました[8]。さらに、熱平衡状態を行列積状態であらわす手法であるTPQ-MPSをGohlkeらとともに2次元系に初めて適用し、マヨラナ粒子の出現で知られるキタエフハニカム模型の比熱を量子多体計算法で正確に得ることに成功しています[9]。

このように、D02班の研究は他班連携も含めて順調に進んでいます。また、可積分SYK模型のように、9月の基研滞在型国際ワークショップで活発に研究交流が行われた話題もあります。上記の研究展開が今後の飛躍に繋がることを期待したいところです。

- [1] K. Okunishi and T. Takayanagi, PTEP **2024**, 013A03 (2024). (arXiv:2310.12601)
- [2] A. Yosprakob., J. Nishimura, and K. Okunishi., JHEP **11**, 187 (2023), A. Yosprakob, SciPost Phys. Codebases **20** (2023).
- [3] R. Watanabe, K. Fujii, and H. Ueda, arXiv:2305.06536.
- [4] S. Miyakoshi, T. Sugimoto, T. Shirakawa, S. Yunoki, and H. Ueda, arXiv:2311.05900.
- [5] R. Yoneda and K. Harada, Phys. Rev. E **107**, 044128 (2023).
- [6] K. Sanada, Y. Miao, and H. Katsura, Phys. Rev. B **108**, 155102 (2023).
- [7] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, arXiv:2306.05591.
- [8] H. Takeda, *et al.* Nat. Comm. in press. (arXiv:2304.08029)
- [9] M. Gohlke, A. Iwaki, C. Hotta, SciPost Physics **15**, 206 (2023)



## 対称性と情報幾何に基づく量子重力・量子物性の探求

## [研究代表者]

田島 裕康 (電気通信大学大学院情報理工学研究科・助教 / JST さきがけ研究者(兼務))

近年、量子情報理論において、対称性が量子力学的過程にもたらす影響を包括的に解析する分野が急速に開拓されつつある。Resource theory of asymmetry (RTA) と呼ばれるこの分野では、「対称性を守るダイナミクス」と、「対称性に対応する保存量に関する量子揺らぎ」を組み合わせることで、量子過程の実現可能・不可能を判別することを目標としている。最近、私はこのRTAの対象領域で成立する複数のトレードオフを発見した(PRL2018, QIP2020, PRL2021等)。本研究計画では、このトレードオフを統一し、量子重力および物性理論に応用することを目標としている。昨年度は、既存のトレードオフを統一し、対称性・不可逆性・量子性の間に普遍的に存在するトレードオフ構造(以下SIQ構造)を得、ブラックホール物理など様々な対象に応用できることを発見した[1](QIP2023talk, APS March meeting invited talk, etc)。

第二年度である本年度は、これを発展・応用すること、そしてベースとなるRTAを発展させることを目標としていた。結果は以下である：

- ・SIQ構造を連続系に拡張する試みの中で、保存則から測定への制限であるWigner-Araki-Yanase(WAY)定理を連続系に拡張することに成功した[2]。これは1960

年のWAY定理の誕生以降60年未解決になっていた問題の一つの解決を意味する。本結果はFeatured in Physicsに選ばれ、日経新聞および海外の科学雑誌2つに記事掲載された。

- ・RTAのnon-iid領域への拡張[3]、[4](日経新聞に記事掲載)、およびRTAの任意有限群及び任意リー群への拡張[5]、[6]。
- ・SIQ構造の不可逆性指標 $\delta$ が、特殊な場合として、既存の様々な誤差・擾乱の指標、そして量子カオスの指標であるOTOCを再現することを示し、これらのふるまいが保存則からどう制限を受けるかを統一的に明らかにした[7]。このほか、本領域の主たる対象ではないが、同様の技術を用いてerror mitigationの普遍限界を求めた[8](日経新聞に記事掲載)。

- [1] H. Tajima, et.al. arXiv:2206.11086 (2022)  
 [2] Y. Kuramochi and H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 210201 (2023)  
 [3] K. Yamaguchi and H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 200203 (2023)  
 [4] K. Yamaguchi and H. Tajima, Quantum **7**, 1012 (2023).  
 [5] D. Kudo and H. Tajima, Phys. Rev. A **107**, 062418 (2023).  
 [6] T. Shitara and H. Tajima, arXiv:2312.15758 (2023).  
 [7] H. Emori and H. Tajima, arXiv:2309.14172 (2023).  
 [8] R. Takagi, H. Tajima and M. Gu, Phys. Rev. Lett. **131**, 210602 (2023).



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

## [研究代表者]

尾張 正樹 (静岡大学情報学部・准教授)

近年、Haar測度を近似するユニタリ群上の確率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、量子通信や量子回路の性能評価を初めとした様々な量子情報処理で必須であるのみならず、量子カオス系を近似する手法や、環境系のマルコフ化を生じさせる手法としても重要であることが分かってきた。しかし、従来のt-designの生成プロトコルは、量子コンピュータ上で効率的に動作する多項式時間アルゴリズムとして設計されているため、量子多体系上で実装する事は困難である。そのため、本研究はマルコフ化などへの応用を念頭に、量子多体系において従来手法よりも物理的に自然なt-designの生成方法を発見することを目的とした。

本研究では、まず、ユニタリ群の任意の閉部分群の近似t-designを構成する一般的な構成手法を与え、この方法で構成されたランダムユニタリ変換は、系のサイズと次数tに対して指数関数的に高速にt-designに収束することを証明した。そして、量子制御理論をこの手法と組み合わせる事で、量子多体系のより自然なt-designの生成アルゴリズムとして、小さな部分系への

ランダムユニタリ変換とハミルトニアンによる時間発展を繰り返す、間接制御を用いたアルゴリズムを提案した。さらに、数値シミュレーションにより、このアルゴリズムは10量子ビット程度までの典型的な1次元スピン鎖に対しては、十分な速さで収束することを示した。

上記のアルゴリズムでは、制御部に対する回転ゲートの回転角やゲートを演算する時刻などのパラメータをランダム化することで、ランダムユニタリ変換を生成していたが、このパラメータは変分量子計算の変分パラメータとして用いることも可能である。そこで、上述のアルゴリズムから作ったパラメータ付き量子回路を用いて変分量子計算の一種である変分量子固有値ソルバの実装を行い、その性能が従来のパラメータ付き量子回路と大きく変わらないことを示した。ここで提案したパラメータ付き量子回路は、従来の回路とは異なり、量子多体系の間接制御により実装することが可能であることにより、環境系からのノイズに強い可能性が高い。したがって、量子ビットの制御のために使用する配線の数の増大により超電導量子回路の冷却が不十分になる問題への有効な解決策となると期待される。





## 量子情報理論的手法による1次元テンソルネットワークの数理的解析

## [研究代表者]

加藤 晃太郎 (名古屋大学情報学研究科・助教)

テンソルネットワークは数値的・解析的研究において量子多体系の状態を調べるのに有効なツールである。記述したい状態が持つエンタングルメントの構造に応じ、様々なクラスのテンソルネットワークが存在する。しかし、各テンソルネットワークがどのような量子状態を表現できるのか、その描写能力の境界は一次元の基底状態(純粋状態)を記述する「行列積状態(Matrix Product State, MPS)」を除きほとんど分かっていない。

本公募研究では、「行列積密度演算子(Matrix Product Operator, MPO)」と呼ばれる一次元有限温度状態に有効なテンソルネットワークの描写能力を、熱平衡系という物理的描像を用いて特徴付けることを目的とした。

MPSの解析においては、空間くりこみ群の手法を用いてMPSをくりこみ固定点と結びつけ、固定点における状態の分類理論を使って一般のMPSの描写能力を特徴づけることができる。近年はMPOに対しても「くりこみ固定点」に相当するものが提案され、こうした固定点が「可換なハミルトニアン熱平衡状態+MPO代数」によって綺麗に分類されることが示され

ている。MPO代数は2次元のトポロジカル秩序相の物理を記述するエニオンの理論と関わりがあり、MPOが一次元有限温度の理論以外にも、こうした二次元系の一次元境界の理論を記述できることを表している。

しかし、先行研究で提案されたMPOのくりこみ固定点に収束するようなくりこみ操作が存在するのかわくは未解決問題であった。本公募研究では、まず(MPOに限らない)一般の量子状態に対し、復元可能なくりこみ(圧縮)操作(トレース保存完全正值写像)が存在する条件を明らかにした[1]。これは新たな量子情報源符号化定理としても見ることができる。続いて得られた条件をもとに数値計算を行ったところ、一般のMPOに対してはくりこみ固定点に達する操作が存在しない可能性が示唆された。さらに、実際にくりこみ操作が収束しない具体的な反例を構成した。

以上より、MPOの特徴づけにはMPSと同様のアプローチが通用しないことが明らかとなった。今後はくりこみ可能なMPOと不可能なMPOの差異がどこにあるのかを解析していく所存である。

[1] K. Kato arXiv:2309.07434 (2023)



## NMRを用いた非平衡量子多体システム構築および量子情報制御

## [研究代表者]

清水 康弘 (名古屋大学理学研究科・講師)

超高密度の量子凝縮系である固体中の電子集団は、多くの場合相転移を通して古典的な粒子として振る舞う。自発的な対称性の破れを伴う相転移を回避し、強い量子ゆらぎを保持するには、基底状態の高い縮重や欠陥のない理想的な電子系を必要とする。巨視的な量子ゆらぎは、量子ホール効果や量子スピン液体といったトポロジカルな量子状態を生み出す。局所な対称性の破れの有無を高感度に検出する上で、核磁気共鳴(NMR)は極めて強力な手段である。

我々は、これまでに核スピンと電子スピンの間にはたらく超微細相互作用に含まれる電子構造や対称性に関わる多彩な情報を紐解くことで、凝縮量子系の局所的な対称性の破れの形態や低エネルギー励起構造を調べてきた。特に、巨視的な量子エンタングルメントを有する量子ホール効果や量子スピン液体に着目して、誤り耐性量子演算において重要となる分数統計性のエニオン励起の根拠を得るべく実験研究に取り組んできた。その結果、量子化されたディラック・フェルミオンの振る舞いを強磁場・極低温のNMR実験により観

測した。また、量子スピン液体の候補物質であるいくつかのフラストレート物質において、NMR測定からスピノン励起に特徴的な振る舞いを見出した。

さらに量子情報処理システムとしての有用性を調べるために、周期的摂動下で時間並進対称性の破れを伴う離散時間結晶としての強固性を評価する実験を進めている。量子スピン液体状態において、フロッケサイクルとよばれる周期的な $\pi$ パルスを加えると、その2倍周期の応答が観測された。驚くべきことに、パルス時間を数十パーセント理想的な $\pi$ パルスからずらした強い摂動に対しても、長時間に渡って時間結晶として機能することを見出した。これは、長距離の量子コヒーレンスによって、集団的な修復機能が発現しているとみなすことができる。今後、様々な量子状態に対する非平衡のスピンドイナミクスを調べることで、巨視的な量子もつれに伴う創発現象を探索する。



## 冷却リユードベリ原子を用いたグラフ状態の生成と測定型量子計算への応用

## [研究代表者]

富田 隆文 (自然科学研究機構分子科学研究所・助教)

本研究では、量子誤り訂正や測定型量子計算のリソースとして重要な「グラフ状態」と呼ばれる多体エンタングルメント状態を、冷却リユードベリ原子が持つ相互作用を用いて、自然な時間発展により生成する実験を進めている。局所的に集光されたレーザー光を用いて冷却原子を個別にトラップする「光ピンセット配列」技術を用いて、量子ビット配列を構築し、それらをリユードベリ状態と呼ばれる高エネルギー状態に励起することで、原子間に長距離相互作用を誘起する。これにより大規模なエンタングルメントを生成し、グラフ状態を作る。加えて、周辺他の原子に対して影響を及ぼさない個別局所原子観測を実装し、生成したグラフ状態をリソースとした測定型量子計算への応用可能性を探る。

これまでに、原子間相互作用時間を制御するためのパルスレーザー用ディレイラインの開発、個別局所原子観測のための低ノイズCMOSカメラでの個別原子撮影実験、リユードベリ励起用レーザーの開発を行った。ディレイライン開発においては、原子間相互作用の大きさに依存して適切な相互作用時間が必要であり、そ

れに従って相互作用の開始・終了に対応する励起・脱励起のための2発のレーザーパルス間の時間間隔の調整が求められる。遅延時間を調整できる光学系として、ヘリオットセル型のディレイラインの開発を行い、ミラー間でのレーザーの反射回数を光学系の調整により制御できることを確かめた。低ノイズCMOSカメラでの個別原子撮影実験では、単一原子からの蛍光カウンターの揺らぎが従来広く使われているEMCCDカメラと比較して小さく、短時間での量子状態判別という点で優れていることを明らかにした。これらは、グラフ状態作成およびその測定のために重要な基盤技術である。

これらに加えて、公募研究の枠組みにおいて、東京理科大学の國見昌哉氏との共同研究でリユードベリ原子系を用いた新奇スピン系の理論提案を行った。リユードベリ状態間をカップルさせるレーザー光の位相を適切に制御することで、ジャロシンスキー・守谷相互作用を実験的に実装可能であることを示した。



## 量子もつれに基づいた強相関開放量子系でのトポロジカル物性の探索

## [研究代表者]

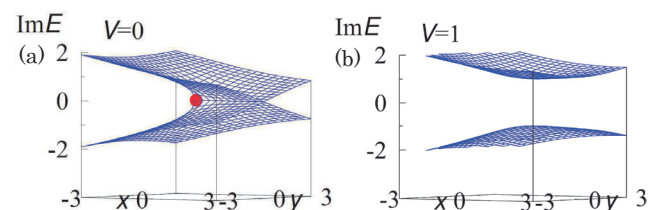
吉田 恒也 (京都大学理学研究科・准教授)

開放量子系は非エルミート行列で記述される。ここでは例外点など閉じた系では見られない異常な物性が多数報告されてきた。例えば、例外点では行列の対角化不可能性によりエネルギー縮退が見られ、非エルミート系特有の非自明なトポロジーをもつ。これまでの研究の多くは自由粒子系が中心であったが、近年、冷却原子系で強相関開放量子系が実装されつつある。また、そのような人工量子系ではトポロジカルポンプなどパラメータ空間のトポロジーも実験的に研究されている。

これらの背景のもと、本研究では開放量子系を念頭に非エルミートトポロジーに対する強相関効果を解析した。その結果、パラメータ空間において非エルミートトポロジカル分類学のリダクションが見られることが明らかになった[1]。さらにこれに基づいてパラメータ空間で発現する例外点の強相関効果に対する安定性/不安定性を明らかにした[2]。

さらに、強相関系における非エルミート表皮効果の解析やそれに起因したダイナミクスも解析した[3-5]。特に、相互作用がリウビアン表皮効果を誘起し得ることを数値計算により実証した[3]。

- [1] T. Yoshida and Y. Hatsugai Phys. Rev. B 104, 075106 (2021); Phys. Rev. B 106, 205147 (2022).
- [2] T. Yoshida and Y. Hatsugai Phys. Rev. B 107, 075118 (2023)
- [3] S. Hamanaka, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B 108, 155114 (2023).
- [4] S. Kaneshiro, T. Yoshida, and R. Peters, Phys. Rev. B 107, 195149 (2023).
- [5] T. Yoshida, SB Zhang, T. Neupert and N. Kawakami, arXiv:2309.14111.



(a) [(b)]:  $V=0$  [ $V=1$ ] でのエネルギー固有値のパラメータ依存性。実数  $x, y$  はハミルトニアンのパラメータ。  $V$  はスピン-スピン相互作用の強さを表す (文献 [2] より引用)。





## 量子情報理論及び物性理論からの量子重力理論へのアプローチ

## [研究代表者]

沼澤 宙朗 (東京大学物性研究所・助教)

物性と量子重力において対称性は重要な役割を占める。特に時間反転対称性は次元によらずに系を特徴づける対称性として幅広い文脈で現れる重要な対称性である。それらの性質をより広い文脈で解明するべく、両者の視点から時間反転対称性の研究を行った。

対称性の量子アノマリー及びそのトポロジカル相との関係は非常に重要である。ところが、これらは主にハミルトニアンで記述される系の絶対零度の基底状態で議論されており、特に非平衡領域や一般の量子チャンネルによる状態変化のもとでは、量子アノマリーとトポロジカル相のどちらも理解されていない。そこで、我々は両方の文脈で重要な役割を持つ Sachdev-Ye-Kitaev 模型を用いてフェルミオン系の量子マスター方程式の対称性による分類を行った。また散逸を含む場合の量子カオス(複素エネルギー準位統計)にアノマリーが反映されることも示した。これらは物性の文脈では開放系の量子カオスや非平衡トポロジカル相の理解の進展に役立ち、また量子重力でもブラックホール生成と蒸発において対称性から課される制限を与えるなど両者の文脈で重要な貢献をしたと考える。この結果はPRXに採用された[1]。

量子重力では全ての対称性は近似的な大域対称性であるか、もしくはゲージ対称性になっていることが期待される。一方、CPT対称性は全ての場の量子論においては厳密に保たれており、また反ユニタリー対称性であることからゲージ対称性として扱うことも難しく、量子重力とどう整合性が取れているのかが謎であった。そこで我々は、時間反転を含む対称性のゲージ化の定式化を行い、その性質を調べた。まず統計力学と整合性の取れた量子重力の理論では、CPT対称性はワームホールの生成によって自然にゲージ化されていることを発見した。さらに、閉じた宇宙では量子力学は実数的な構造だけを持っており、通常の量子力学の複素構造は創発するものであるということもわかった[2]。これらの成果によりCPT対称性がゲージ対称性として扱われることによって量子重力と整合性が取れたこと、また量子力学と重力の密接な関係の理解にもつながったという意味で重要な成果になったと考える。

- [1] K.Kawabata,A.Kulkarni,J.Li, T.Numasawa, S.Ryu, , arXiv:2212.00605[cond-mat.mes-hall], PRX Quantum 4 (2023) 3, 030328  
 [2] D.Harlow, T.Numasawa, arXiv:2311.09978



## テンソルネットワークの素粒子物理学への応用

## [研究代表者]

武田 真滋 (金沢大学理工研究域・教授)

本年の主な研究成果は、テンソルネットワーク粗視化アルゴリズムに確率的ノイズ法を組み込むことで物理量の計算精度向上を達成したことである。従来型の粗視化アルゴリズムでは情報圧縮のために打ち切り特異値分解が採用されているが、その打ち切りによって系統誤差が生じることが知られていた。しかも、粗視化プロセスを繰り返し行うことで系統誤差が複雑になり、最終的な誤差評価が難しくなるという問題があった。この問題を解決するために確率的手法と組み合わせることで系統誤差を完全に除去する方法が提案されてはいたものの、その反動として生じる統計誤差の制御が難しく、これまで成功した例は知られていなかった。そこで本研究[1]では、素粒子物理学の格子QCDの分野でよく用いられるノイズ法と呼ばれる逆行列を効率的に計算する手法をテンソルの分解圧縮計算に適用した。その結果、自由エネルギーの計算精度が確率的要素を一切含まない従来法に比べて数桁ほど改善することを確認した(図1参照)。ここでは、ベンチマークテストとして2次元イジング模型を採用した。

その他にも、本年はトポロジカル項を含んだ2次元

CP(1)模型のテンソルネットワーク表示の改良に成功し、従来法に比べて精度改善を達成した。また、場の理論のエンタングルメントエントロピーをラグランジアン形式のテンソルネットワーク法で計算する手法を確立し、2次元イジング模型でベンチマークテストを行った。今後は3次元以上の系へ応用することが期待される。さらに、テンソルネットワーク法によるスペクトルスコピーの新しい手法を提唱し、2次元イジング模型において実証した。特に、エネルギー固有値の計算だけでなく、比較的高い励起状態の量子数判定も高い精度で可能であることを示した。

- [1] E. Arai, H. Ohki, S. Takeda and M. Tomii, Phys. Rev. D 107, 114515 (2023)

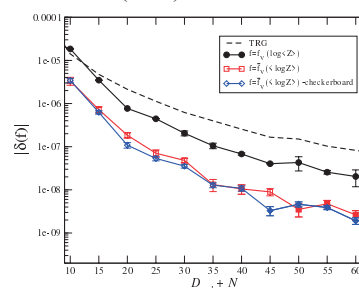


図1：自由エネルギーの相対誤差のテンソルサイズ依存性 TRGは従来法、その他は新手法による結果



## くりこみ群に基づくテンソルネットワークにおける時空の創発の研究

## [研究代表者]

土屋 麻人 (静岡大学理学部・教授)

時空の創発は量子重力理論の本質的な性質であると考えられる。ゲージ重力対応は時空の創発を具現する典型的な例である。MERAやHaPPYコードやランダムテンソルネットワークなどのテンソルネットワークモデルにおけるネットワークは、ゲージ重力対応において境界上の理論から量子エンタングルメントを通じて創発した離散的な空間であると解釈されるため、これらのモデルは時空の創発の研究において重要である。

ここで、連続的な空間の創発を得るためには、連続的なテンソルネットワークモデルを構築する必要があると考えられる。MERAの連続版であるcMERAは、自由場の理論の場合には構成されているが、ゲージ重力対応の観点からは、強結合の相互作用がある場の理論について連続テンソルネットワークを構成することが望まれる。MERAにおけるネットワークの階層はくりこみ群のスケールと解釈され、ゲージ重力対応においてはこれがバルクの方向に対応することから、連続テンソルネットワークの構成は波動関数のスケール依存性を得ることと等価であると考えられる。また、厳密くりこみ群はくりこみ群の非摂動的な定式化として知られる。このような背景のもと、スカラー場の

理論の基底状態の波動関数に対する厳密くりこみ群方程式を導出した[1]。この方程式によって、連続的なテンソルネットワークを構成できると期待される。

また、ゲージ重力対応が矛盾なく成立するためには、量子誤り訂正の構造が必要であることが知られている。実際、HaPPYコードは量子誤り訂正符号と見ることができる。ここでは、相互作用を含むスカラー場理論においてくりこみ群によって量子誤り訂正が実現されることを見た[2]。qレベル系をコヒーレント状態を用いて赤外領域で構築し、基底状態のくりこみ群の流れを記述するユニタリー演算子の逆を作用することにより、これらの状態を紫外領域で符号化した。こうして得られるコード部分空間はコヒーレント状態を生成する演算子による誤りに対して耐性があることを摂動の1次まで示した。この結果は、くりこみ群と量子誤り訂正の間の一般的な関係を示唆し、ゲージ重力対応におけるそれらの役割に対して知見を与えると期待される。

[1] T. Kuwahara, G. Tanaka, A. Tsuchiya and K. Yamashiro, PTEP 2023, no.3, 033B03 (2023), doi:10.1093/ptep/ptad029.

[2] T. Kuwahara, R. Nasu, G. Tanaka and A. Tsuchiya, arXiv:2401.17795 [hep-th].



## インフレーション宇宙モデルにおける量子もつれ構造と情報スクランブリング

## [研究代表者]

南部 保貞 (名古屋大学大学院理学研究科・准教授)

本研究は、現代宇宙論の根幹をなすインフレーション宇宙モデルの量子情報論的側面の理解を目的とした。量子場であるインフラトン場により引き起こされる宇宙の加速膨張により、インフラトン場自身の真空ゆらぎの波長が引き伸ばされ長波長古典ゆらぎが生成される。このゆらぎはのちに宇宙の大規模構造を形成するための種となる。このシナリオにおいて、特に「量子ゆらぎの古典化」の側面に着目し以下の3つの項目について研究を行った。

(1)量子もつれと量子ゆらぎの古典性 [1]: de Sitter時空上の量子スカラー場系において導入した空間的局所モードAB間の量子もつれの振る舞いを、純粋化パートナーモードを用いて解析した。初期に量子もつれ状態にある2体系ABはde Sitter膨張によって量子もつれを持たない分離状態に変化する。この振る舞いを理解するため、ABに対するパートナーモードCDを構成し、AB間の量子相関(内部相関)とAB-CD間の量子相関(外部相関)の間のモノガミー関係が成立することを証明した。そしてAB間の量子もつれ消失現象(古典化)を量子相関に対するモノガミー関係の観点より説明した。

(2)インフレーション宇宙における情報量の振る舞い: インフレーション宇宙を定性的に再現する量子ビット

モデルを用意し情報量の振る舞いを解析した。ビットモデルは状態の変化を表すamplitude damping channelと宇宙膨張の効果を表すbranching channelの2つの量子操作からなるquantum channelとして導入する。このモデルはインフレーションが終了する「non-eternal phase」と大域的にはインフレーションが終了しない「eternal phase」の2つの相を持つ。エントロピー(Shannon、von Neumann)の時間発展の振る舞いを用いて、インフレーション宇宙における情報量の意味さらにはde Sitter時空におけるエントロピー・バウンドの問題との関係を議論した。論文は現在準備中である[2]。

(3)量子ホール系を用いた「量子ゆらぎの古典化実験」: 時間的に形状変化するエッジを持つ量子ホール系を用いた擬似膨張宇宙系での粒子生成並びにHawking放射の理論評価を行った。量子もつれの測定が可能となれば「古典化実験」が実現できることになる [3, 4]。

[1] Y. Nambu and K. Yamaguchi, Phys. Rev. D 108, 045002(2023).

[2] Y. Nambu and H. Tajima, “Bit model of inflation and entropy bound” in preparation.

[3] M. Hotta, Y. Nambu et al., Phys. Rev. D 105009 (2022).

[4] Y. Nambu and M. Hotta, Phys. Rev. D 085002 (2023).





## Jackiw-Teitelboim 重力理論に立脚した量子重力理論の研究

## [研究代表者]

吉田 健太郎 (埼玉大学・准教授)

Jackiw-Teitelboim (JT) 重力理論は、ブラックホールのカオス的な振る舞いを研究するためのトイモデルとして注目されている。当初、このJT重力理論を調べることでブラックホールとカオスの関係を調べることを主要な目的としていたが、D. Gross と V. Rosenhaus の弦理論における散乱のカオス的な振る舞いの研究に触発されて、2次元のトイモデルではなく、超弦理論を用いてアプローチすることを考えた。

論文[1]においては、超弦理論の非摂動的な定式化として知られている Banks-Fischler-Shenker-Susskind (BFSS) 行列模型におけるメンブレイン不安定性とカオス的な崩壊の関係を明らかにした。特に、そのカオスに付随するカントール集合的な自己相似構造を見出し、そのフラクタル次元を計算した。

論文[2]においては、可積分な  $AdS_5 \times S^5$  上の弦理論の pp-波極限に  $1/R^2$  の補正項を残すと、可積分性が壊れて、カオスが生じることを示した。この補正項を入れた理論は、2003年に J. Schwarz らによって提唱されて以来、可積分系だと信じられてきたが、実際には非可積分であった。この結果は、可積分な 3 サイトの戸

田格子模型と非可積分な Henon-Heiles 模型の関係とのアナロジーとして理解できる。戸田格子の指数関数ポテンシャルを展開すると、主要項は連成調和振動子であり、自明に可積分である。3 次の項を残して、調和振動子に相互作用を残すと非可積分な模型の代表例としてよく知られる Henon-Heiles 模型になる。

AdS 空間上のひもの運動は可積分であることがよく知られている。その一方で、AdS 空間の境界に端をもつひもの場合には、その振動が乱流に成長し得ることが指摘されていた。乱流的な振る舞いは、カオスの時間的な乱れに加えて、空間的な乱れも生じる現象であり、非可積分な系でなければ生じ得ないと考えられる。この論文[3]では、この乱流的な振る舞いの起源は、境界条件による可積分性の破れであることを示した。

[1] O. Fukushima and K. Yoshida, JHEP 09, 039 (2022).

[2] S. Kushiro and K. Yoshida, JHEP 01, 065 (2022).

[3] T. Ishii, K. Murata and K. Yoshida, JHEP 01, 073 (2024).



## 重力の量子性の検証に向けた懸架型光学機械振動子の精密理論模型の構築

## [研究代表者]

山本 一博 (九州大学大学院理学研究院・教授)

巨視的物体の量子状態の実現と重力の量子性の検証に向け、光共振器を用いてレーザー光と結合した鏡(光学機械振動子)の理論模型の構築と量子状態の理論予言を行なった。第一に、現在実験で実現されている懸架鏡の光学機械振動子の理論模型として、有限の大きさを持った鏡と梁からなるビーム模型が光共振器のレーザー光と結合する理論模型をラグランジアンから出発して定式化を行なった。その結果、低周波数では重心の運動を表す振り子モードに加えて、鏡の回転を表す回転モードの 2 モードによる定式化が可能であることを示した。梁の曲がりに伴う散逸を取り入れると、その周波数特性は周波数の逆数に比例する構造減衰で記述できることも示した。また、懸架鏡の光連続測定とフィードバック制御を想定し、ウィナーフィルターを用いた推定により実現可能な量子状態の理論評価を行なった。このために必要な懸架鏡の振り子モードと回転モードに対する雑音を除去するウィナーフィルターを構築した。キャビティ光の連続測定の条件下で実現される振り子モードの分散を表す条件付き共分散行列を評価することにより、実現される量子状態を予

測した。その結果、回転モードの適切な取り扱いにより実現される振り子モードの量子状態を明らかにした。それにより現在実現されている実験パラメータを統合することで、ミリグラムスケール物体の量子状態の実現が可能であることを理論的に示した。さらに、これらの懸架鏡を二つ組み合わせたファブリ・ペロー・マイケルソン干渉計を構成することで、二つのミリグラムスケール物体の量子もつれ状態の実現も可能になることを理論的に明らかにした(図を参照)。これらの結果は、重力の量子性の検証実験に向けたマイルストーンとして重要である。

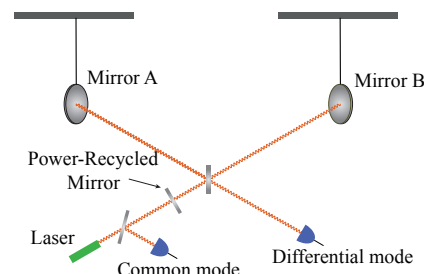
[1] Y. Sugiyama, *et al.*, Phys. Rev. A 107 (2023) 033515[2] T. Shichijo, *et al.* arXiv:2303.04511

図1：  
パワーリサイクル・  
ファブリ・ペロー・  
マイケルソン干渉計の  
模式図。



## 量子情報で繋ぐブラックホールのマイクロ・マクロ描像の研究

## [研究代表者]

玉岡 幸太郎 (日本大学文理学部物理学科・助教)

本研究では、ホログラフィー原理・量子情報理論・量子操作の観点からブラックホールやワームホール時空の物理を理解することを目標に研究を行いました。主要な成果として、(1)ブラックホール蒸発における対称性の破れ(2)ブラックホール・ワームホールの“変形”(3)擬エントロピーの増幅現象に関する新たな知見を得ることができました。

(1)ブラックホールの蒸発過程における対称性の役割を、symmetry resolved entropy と呼ばれる情報量を用いて調べました [1]。量子重力理論において、グローバル対称性は存在しないという期待があります。この期待を裏付ける理由の一つとして、しばしば引き合いに出されるのが、ブラックホールの蒸発する過程です。この議論をより定量的に行うために、Page のモデルを使って、対称性の破れが量子情報量にどのように影響するかを解析しました。特に、Page 時間近傍で対称性の破れの寄与が急激に増大することがわかりました。

(2)正弦二乗変形やその一般化などを組み合わせた量子クエンチを、重力双対を持つ場の理論 (Holographic CFT) に対して考えることで、文字通りブラックホール

やワームホールを変形させることを考えました。純粋な量子多体系としては、空間に非一様性がある場合の非平衡ダイナミクスを調べていることに相当します。結果として、従来の AdS/CFT 対応では見られない現象が多く現れることがわかりました。例えば、準粒子描像や新しいタイプの 3 体量子相関の出現が挙げられます [2]。

(3)擬エントロピーと呼ばれる量子情報量は、事後選択過程や弱値とも密接な関係があり、上限値が存在しないことが知られています。Holographic CFT を含むさまざまな理論における同種のセットアップを考えることで、このような「増幅現象」が起こるメカニズムを調べました [3]。興味深いことに、holographic CFT においては、非摂動効果が無視できる範囲でこの増幅現象が起こらないこともわかりました。

- [1] P. H. C. Lau, T. Noumi, Y. Takii and K. Tamaoka, JHEP 10, 015 (2022).
- [2] K. Goto, M. Nozaki, S. Ryu, K. Tamaoka, M. Tan, [arXiv:2302.08009 [hep-th]] accepted in Phys. Rev. Research.
- [3] Y. Ishiyama, R. Kojima, S. Matsui, K. Tamaoka, PTEP 2022, 093B10 (2022).



## 量子フラストレート磁性体におけるエンタングルメントウィットネス

## [研究代表者]

下川 統久朗 (沖縄科学技術大学院大学・Staff scientist)

近年物性物理学分野においても量子もつれ概念は大きな注目を集めている。特に entanglement entropy (EE) を用いた理論的研究が盛んに行われた結果、量子スピン液体 (QSL) やトポロジカル秩序、量子臨界性などといった量子多体系に現れる特異な現象を理解する上で量子もつれ特性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 EE を実験で直接検出することは困難であることも知られており、物性物理学分野において強く興味を持たれている多くの巨視的な系において量子もつれを実験的に検出することは長年推進すべき大きな課題となっている。

このような状況下で、我々は近年量子情報分野において開発された種々の量子もつれ測度に着目した。例えば One-tangle, two-tangle, concurrence, quantum Fisher information などの量子もつれ測度は実験的にアクセス可能な局所磁化やスピンの静的・動的相関関数の形で書き下すことが可能であり、実際ごく最近になって中性子散乱などを用いた検出実験も行われている。我々はこれらの量子もつれ測度を活用する形で、磁性体分野における未解決問題の 1 つである、QSL 状

態とランダムシングレット (RS) 状態との間の識別問題に取り組んだ。これら 2 つの状態が現れる典型的な舞台として、二次元量子三角格子磁性体を取り扱い、それぞれの状態下における量子もつれ特性を数値的厳密に評価した。

紙面の都合上詳細には立ち入らないが、上記の三角格子磁性体においては以下の知見が得られている。

- (1) RS 状態と QSL 状態は共に multi-partite entangled state である。
- (2) RS 状態と QSL 状態の違いは two-partite entanglement に現れる。
- (3) RS 状態と QSL 状態の違いは multi-partite entanglement の温度依存性にも現れる。

特に中性子散乱実験への応用を考える上では(3)が重要であり、現在投稿論文を執筆中である [1]。また関連して 1 次元磁性体に現れる Tomonaga-Luttinger 液体状態と RS 状態との間の識別問題に関する研究も行っており、同様に現在論文を執筆中である [2]。

- [1] T. S., Snigdha Sabharwal and Nic Shannon, in preparation.
- [2] Snigdha Sabharwal, T. S. and Nic Shannon, in preparation.





## 孤立量子系の非エルゴード性に由来する新奇量子多体現象の研究

## [研究代表者]

國見 昌哉 (東京理科大学理学部第一部物理学科・助教)

本公募研究では孤立量子系の熱平衡化に関する問題、特に長時間時間発展しても熱平衡化が起きない非エルゴード系と呼ばれる系についての量子多体現象に注目して研究を行った。近年見つかった新しい非エルゴード系として量子多体傷跡状態と Hilbert space fragmentation がある。本研究ではこれらについての成果を得た。

Hilbert space fragmentation (HSF) とは系にある種の kinetic constraint があるような系で見られる現象で、constraint により粒子(またはスピン)の運動が制限され、熱平衡化が妨げられるというものである。通常この現象は実空間で kinetic constraint がある場合を考えるが、我々は運動量空間において constraint があるような状況を考え、運動量空間で HSF が起きるモデルを提案した。この場合、運動量空間での状態遷移が制限されることで流れが一旦できると減衰しない永久流状態が実現すると期待される。実際に数値計算により、HSF に由来する永久流状態が実現するということが確かめた [1]。

別の研究として量子多体傷跡状態についての研究を

行った。量子多体傷跡状態とは、非可積分系であられる特別な固有状態であり、この状態の存在により適切に初期状態を選ぶと熱平衡化が起きないということが起きる。本研究では3粒子が同時に同じサイトを占有しないという拘束条件付きの Bose-Hubbard 模型において量子多体傷跡状態を構成し、実験での観測方法の提案を行った [2]。

また、近年注目を集めている Rydberg 原子を用いた量子シミュレーターでの量子多体傷跡状態の研究も行った。本研究では Rydberg 原子系で Dzyaloshinskii-Moriya (DM) 相互作用と呼ばれる相互作用を有する量子スピン系の実験的实现方法を提案した。また、その特別な場合として実現する DM 相互作用項と Zeeman 項のみからなるハミルトニアン (DH 模型と呼ばれる) で量子多体傷跡状態が存在することを厳密に証明した [3]。

- [1] M. Kunimi and I. Danshita, Phys. Rev. A 108, 063316 (2023).
- [2] R. Kaneko, M. Kunimi, and I. Danshita, Phys. Rev. A 109, L011301 (2024).
- [3] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, arXiv:2306.05591 (2023).



## 次世代観測で探る原始ブラックホールの蒸発における量子性の理論的研究

## [研究代表者]

郡 和範 (国立天文台科学研究部・教授)

宇宙初期のインフレーションを引き起こすインフラトン場の量子的な効果により、宇宙の大スケールで約10万分の1という密度ゆらぎが作られました。その密度が大きい場所に重力的に物質が集められることにより銀河が作られました。ここで、物質とはバリオンとその5倍存在するダークマターの2つを指します。2023年6月末に、北アメリカナノヘルツ重力波天文台 (NANOGrav) により宇宙初期から存在する背景重力波を観測したというニュースが報じられました [1]。複数のパルサーが周期的に出す電波のシグナルの相関を15年間観測したところ、ナノヘルツ帯の電波に背景重力波特有のシグナルを観測したというものです。もし背景重力波が存在すると正確なパルサーの電波の周期を変更するため観測されます (図1)。この背景重力波は各々の銀河の中心にあるという超巨大ブラックホールの衝突でも生じることが知られていますが、今回のシグナルはスペクトルの形が異なります。これはインフレーションが直接つくる大きなスケールの重力波に比べて1千万倍以上も大きいものですが、もし、インフレーションが作る小スケールの密度ゆらぎが大きい場合、密度ゆらぎの非線形の2次的効果により

大きな重力波が作られる効果があります (誘導重力波)。我々はこの誘導重力波がシグナルとぴったり一致することを指摘しました [2]。さらに、その大きな密度ゆらぎは、つぶれて太陽より軽い原始ブラックホールになることが予想されます。その存在量はダークマターの総量の約1%にも及びます。その軽い原始ブラックホールの連星の衝突時に発する背景重力波を、アインシュタイン テレスコープ (ET) や コズミック エクスプローラー (CE) が将来見つける可能性があります。将来の重力波実験によりインフラトン場の量子性の検証と原始ブラックホールの発見が期待されます。

- [1] Gabriella Agazie, et al, The NANOGrav15yr collaboration, arXiv:2306.16213 [astro-ph.HE]
- [2] 猪又敬介, 郡和範, 寺田隆広, Phys. Lett. B (2023) in press, arXiv:2306.17834 [astro-ph.CO].

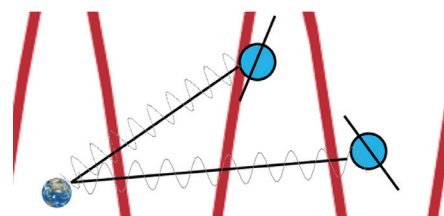


図1: パルサーが放出する電波 (黒線) の周期の相関が背景重力波 (赤線) により変化を受ける模式図。



## 時空の特異点定理からブレンワールド宇宙まで

本領域の主テーマである極限宇宙の謎の発端の一つはペンローズやホーキングの時空の特異点定理であるといっても過言ではありません。この定理によって時空には端が存在し、従来の物理法則が成り立たないことがわかります。そこで登場したのが、超ひも理論です。この理論において、特異点定理の仮定を破る、あるいは従来の考察が大幅な変更を受けることとなり、時空の端は当然のことながら、私たちの宇宙の姿に関する理解も大きく塗り替えられる可能性があります。驚くべきことにこの理論に従えば、私たちの宇宙は高次元時空を運動する薄膜のようなものであることを予言します。これがブレンワールドと呼ばれる宇宙模型で、本領域のキーワードの一つです。

### 1. 特異点定理と極限宇宙

まずは約60年前に発表されたペンローズの特異点定理からみてみましょう。幾分厳密性を欠きますが、

1. 一般相対性理論が正しい
2. 捕捉面が存在する
3. 光のエネルギー密度が正
4. 空間は無限に広がっている
5. タイムマシンが存在しない

という5つのもっともらしい仮定下で、時空は未来に特異点(時空の端)を持つことが証明されます。3~5の仮定は比較的的自然であるので、1、2の仮定に焦点を当てて確認しましょう。

一般相対性理論は時間と空間を扱う物理の理論です。重力(万有引力)を時空の曲がり具合(幾何学)によって表現します。そして、その曲がり具合はアインシュタイン方程式を解くことによって決まります。地球の赤道の異なる2点から北極に向かう人はだんだん近づいていきます。これは地球の表面が(ほぼ)球面で曲がっているからです。最初平行だった二人は北極で出会います。まるで引力で引き合うように。

一般相対性理論はこれまでに数多くの興味深い予言を行い、検証されてきました。宇宙が膨張することとそこで織りなされる(軽い)元素の合成、銀河やダークマターから成る大規模構造。現在の加速膨張。アインシュタイン方程式のブラックホール解の発見と重力崩壊による形成過程。ブラックホールや中性子星の合体由来の重力波。一般相対性理論が正しいという仮定は十分にもっともらしいでしょう。

次に捕捉面の存在について。まずはその定義を紹介しましょう。そのために、球面から放たれる光を想像してみましょう。日常の経験からは、電球から放たれた光を思い返すと、外に光は広がり、私たちの目に届きます。捕捉面はそこから放たれた光が外に進むもの

の、広がらないようなものとして定義されています。そんなことがあるのでしょうか。実は、ブラックホールの内部には存在し得ることが知られています。従って、捕捉面の存在を仮定することは、ブラックホールが存在するほどに重力が強いことを意味します。

捕捉面の存在は暗にブラックホールの存在を想定していることとなりますので、この特異点定理はブラックホールの中の未来に時空の終わりとしての端があることを示します。これが極限宇宙の一つの「空間の極限」に対応します。ペンローズの特異点定理は直ちに当時大学院生だったホーキングによって宇宙全体に適用されました。これが極限宇宙の一つである「時間の極限」の存在を主張します。

時空の端の外側に時空は存在しません。多くの場合、そこでは物質のエネルギー密度が発散する、あるいは時空が激しく歪んでいます。既存の物理法則は成り立ちません。この問題を解決してくれると期待されているのが、超ひも理論です。

### 2. 極限宇宙の世界

超ひも理論の基本構成要素はひもです。また、10次元あるいは11次元時空で定式化されています。ひもには開いたひもと閉じたひもの2つがあります。ひもの振動の仕方によって様々な素粒子を表現することができます。ところが、ポルチンスキーが約30年前に開いたひもの端をよく調べてみると、何もないのではなく薄い膜が存在し、そこに開いたひもの端が張り付いていることに気が付きました。また、開いたひもは物質を、閉じたひもは重力を表すことが知られています。そうすると、自然に物質はブレンに張り付いているという描像が生まれます。この世界観を宇宙全体に適用したものが、ブレンワールドで、アルカニハメドラやランドールらによって約25年前に提案されました。私たちの宇宙は高次元を運動するブレンであるというわけです。

ブレンは素粒子と同様に張力と呼ばれる質量のようなものを持ちます。そして、その重みによって高次元時空は高次元アインシュタイン方程式に従って曲がります。このブレン上に私たちは住んでいます。このブレン上の時空を支配する方程式があると何かと便利です。白水は前田と佐々木と一緒に約25年前にこの問題に取り組み、結果としてブレン上ではアインシュタイン方程式からのずれが存在することがわかりました。ブレン上の物質によるブレンの配置の歪みからくるものと、高次元時空からの重力波からのものが加わります。これらのずれは極限宇宙への一つ目の扉の鍵となると期待しています。また、興味深いこ



とに、これらのずれはホログラフィーとして解釈することが可能です。例えば、高次元時空にブラックホールが存在する場合、ブレーン上の宇宙ではまるで光の気体の類似物が宇宙に充満しているかのように宇宙の膨張速度が上昇します。それは物質として検知することはできません。

### 3. ブラックホール

星の形は多様です。すべてのブラックホールがどのように形成されたか人類は理解していません。しかし、その一部は重たい星が核燃料を失った後に重力崩壊することで形成されると考えられています。形成直後はブラックホールも激しく変化するでしょう。しかし、時間経過とともに時間に依存しない定常状態に落ち着きます。現在観測されていますように、ブラックホール周辺には膠着円盤などの物質が存在しますが、ブラックホールの質量と比べると極めて軽く周辺の時空の構造に影響を与えるほどではありません。形成後、十分時間を経た後には、周辺の主要な物質はブラックホールに吸い込まれ、ブラックホール周辺は真空かつ定常であると思っ差し支えありません。なんと驚くべきことに、そのようなブラックホールは質量と角運動量によって決まるカー解で表されるブラックホール時空のみであることが数学的に証明されました。回転がない場合は質量だけで決まるシュバルツシルトブラックホールのみです。なお、これらは時空の次元が4の場合のお話です。では、高次元ではどうでしょうか？

ブレーンワールドの登場に触発されて、高次元ブラックホール研究も大いに進みました。4次元とは大きく異なり、様々なブラックホール解が発見されました。特に5次元時空において、リング状のものから、ブラックホールとブラックリングが共存するブラック土星のような場合も。異なる回転軸をもつ2つのリングが共存するものはC03班の泉が大学院生のときに発見しました。たくさん解はあるのですが、自転が速いようなものは不安定であることが示唆され、数値シミュレーションでもいびつな形状に変化することがわかりました。一方、回転しない場合については4次元時空の場合と同様に解が唯一に定まることがギボンズ、井田、白水によって証明されました。

ブラックホールの解が発見されてから100年後の現在ようやく本格的な観測が行われていることはニュースなどでよく知られていることと思います。しかし、本当にブラックホールはあるのでしょうか。また、そこに高次元の痕跡はみえるのでしょうか。素朴な疑問は尽きません。

### 4. ブラックホールから広がる世界

ブラックホールは様々な話題を提供し続けています。ほとんどの銀河の中心に巨大ブラックホールは存在してそうです。今日ではブラックホール同士の合体から放出された重力波が数多く検出されています。ブラックホールの影の「直接撮像」も行われるようになりました。

ブラックホールは一方通行ですから、太る一方です。これを反映してブラックホールの表面である事象の地平面の面積は時間とともに増大することがホーキングによって証明されています。その他の性質と合わせて、ブラックホールのエントロピーが事象の地平面の面積に比例するベッケンスタイン・ホーキング公式によって与えられることがわかりました。エントロピー増大則とも合致します。これはブラックホールの情報が、その表面に蓄えられていることを示唆します。通常の物体のエントロピーが体積に比例していることを考えると大変興味深いことが起きていることを意味します。実際にブラックホール表面の注意深い観察から高次元の重力理論と一つ次元の低い物質の理論の間に対応関係があることがマルダセナらによって前世紀終わりごろに指摘されました。さらにこの対応関係を土台に、ベッケンシュタイン・ホーキング公式の普通の物質への一般化が笠・高柳によって今世紀初頭に提案されました。私たちが住む空間を人為的にAとそれ以外のBという領域に分け、Aを観測しないことにしましょう。するとAはブラックホールの類似物とみなせます。ただし、AとBはミクロな世界を支配する量子的な相関はあります。このような場合に系Aの(量子もつれ)エントロピーにしばしば興味がわきます。笠と高柳は具体例を通して、一般的にそのエントロピーがAを囲む余剰次元方向に広がった面のうちで最小の面積に比例することに気がつきました。この発見後、量子情報との融合が急激に進むことになりました。その詳細は本領域「極限宇宙」から発信されるニュースをご覧ください。



●執筆者紹介

白水 徹也 Tetsuya Shiromizu

名古屋大学大学院多元数理科学研究科/  
素粒子宇宙起源研究所 教授

1969年 福岡県生まれ

1996年3月 京都大学大学院理学研究科博士後  
期課程修了

2014年4月から現職



● 報告者

ピーダーセン 珠杏 Juan William Pedersen

東京大学総合文化研究科 博士課程3年生

指導教員 東京大学総合文化研究科 菊川芳夫 教授

受入教員 京都大学基礎物理学研究所 伊藤悦子 准教授 (D01)

受入期間 2023年5月15日(月)~6月8日(木)

近年、場の量子論の新たな計算手法の可能性として、量子コンピュータを用いたアプローチが注目されています。従来の場の量子論の数値計算はラグランジアン形式に基づき、経路積分を格子モンテカルロ法によって計算する手法が使われます。しかし、実時間形式や有限密度系などの系では符号問題と呼ばれる問題が生じ、物理量を精度よく計算することが不可能になることが知られています。一方で、場の量子論をハミルトニアン形式に基づいて数値計算することも可能であり、この場合は符号問題は生じません。しかしこの場合も計算コストが系のサイズに対して指数関数的に増大する問題があり、素朴には計算が困難だとされています。この問題に対して、量子コンピュータを用いると計算量を減らし効率的に計算が可能になることが期待されています。

このような背景のもと、私は本プログラムの受け入れ教員である伊藤悦子氏らと、「有限温度・有限密度場の量子論の量子計算手法」に関する研究を行っています。有限温度・有限密度系において物理量の期待値を量子計算で求めるためには、まず熱的状态を量子回路上で準備する必要があります。しかし、熱的状态は一般に混合状態であり、量子回路上での直接的な表現が困難です。これに対し、我々は熱的純粋状態(Thermal Pure Quantum state, TPQ 状態)として知られる手法を用いています。TPQ 状態は、混合状態である熱的状态をよく近似する純粋状態を提供する理論的な枠組みであり、これを利用することで量子回路上での熱的状态の表現が可能になります。しかし、TPQ 状態の実装のためには、ボルツマン因子に対応する非ユニタリー演算子を演算する必要があり、これもまた困難な課題となっています。この課題に対し我々は、非ユニタリー演算子を精度良く近似するユニタリー演算子を生成するための量子アルゴリズムである量子虚時間発展法(Quantum Imaginary Time Evolution, QITE)と呼ばれるアルゴリズムを用いて量子回路上で実装します。これらを組み合わせることで、熱・化学平衡状態下にある場の量子論の局所的な物理量の期待値を計算することが可能になります。我々はこの手法を用いて具体的に  $1+1$  次元  $U(1)$  ゲージ理論であるシュウィンガー模型の有限温度(・有限密度)下の相構造を調べる研究を進めています。

本研究滞在の初週には、Rong-Yang Sun 氏(理研、神戸)も基礎物理学研究所に滞在し、私と伊藤氏と Sun

氏の3人で前述した研究課題に関する集中的な議論を行いました。対面で綿密に議論を行ったことにより、研究課題に対する理解を一層深めることができました。理論やアルゴリズムの理解と計算コードの開発も進み、滞在中に実際にスーパーコンピュータを利用した計算に着手することができました。この点が本滞在中の最も大きな成果だと考えています。また、中田芳史氏にはランダムユニタリー行列の性質や実装アルゴリズムなどについて教えていただき、議論する機会がありました。ランダムユニタリー行列に関する議論は上述の研究課題でも取り扱う重要な内容ですが、我々の考えていた手法よりも効率的なアルゴリズムや、そのアルゴリズムが適用可能な物理的な条件なども教えていただき、今後の研究の発展につながる有意義な議論でした。

上記の研究課題に限らず、滞在中はさまざまな研究者と幅広く議論を行う機会がありました。印象に残っていることは原子核グループでのセミナー発表の機会をいただき、私の最近の研究である「可積分スピン系の量子計算」についてのトークを行ったことです。この研究は本学術変革 D01 班の丸吉一暢氏、奥田拓也氏、鈴木了氏、山崎雅人氏、吉田豊氏との共同研究です。セミナーでは主に原子核分野・素粒子分野に所属する方が参加してくださりました。様々な観点からご質問やフィードバックをいただき、充実した議論になりました。また、青木慎也氏・伊藤悦子氏・松本祥氏とは滞在中数回にわたって、ゲージ理論の離散的な表現方法である量子リンク模型に関する合同のゼミを行いました。さらに、今回は1ヶ月程度の長期滞在中であったため、日々のランチやディナーを通じて基礎物理学研究所の研究者や海外からのビジターなど、多くの研究者の方々と交流することができました。これらの経験からは自分の研究分野を広げるための刺激的を受けました。この点もこのような長期滞在プログラムの大きな利点だと思います。

最後に、私の滞在中を歓迎してくださった伊藤悦子氏、このような貴重な機会を設けてくださった学術変革オーガナイザーの方々、若手循環プログラムの運営の方々、そしてお世話になった基礎物理学研究所の方々に感謝申し上げます。この滞在中が、私の研究活動にとって大変有益で刺激的なものであったことを改めて述べさせていただきます。





● 報告者

## 濱中 秀有 Shu Hamanaka

京都大学大学院理学研究科 修士課程2年生

指導教員 京都大学大学院理学研究科 吉田恒也 准教授

受入教員 東京大学大学院理学系研究科 桂法称 准教授 (D02)

受入期間 2023年7月10日(月)~2023年8月11日(金)

孤立系におけるトポロジカル相の研究は大きな成功をおさめましたが、近年、孤立系の枠組みを超えた開放量子系におけるトポロジカル相の研究が盛んに行われています。特に開放系においては、表皮効果というバルクモードの殆どが端に局在する顕著な現象が現れます。私は、修士課程で、この表皮効果に関する多体相互作用の影響を研究してきました。桂研究室は乱れや相互作用のあるバンド理論を超えたトポロジカル相に関して多くの成果を上げており、また開放系の研究も多く行っているので私の研究内容を深めるのに最適な場所だと考えました。また、昨年度12月に行われた本領域会議で、桂先生からポスター発表でコメントを頂いたことがきっかけで、以前の研究[1]を発展させることができた経験も、滞在の判断を促進しました。さらに指導教員である吉田先生や、同室の手塚先生、山本さん(現:東工大)の後押しもあり、桂研究室への滞を決めました。

滞在中は、ご多忙の中、桂先生にお時間を割いて頂き、何度も議論をして頂きました。桂先生が造詣の深い可解模型について教えて頂きました。特に、散逸として、dephasing を考えた Liouvillian を、Mattis-Nam による解析的な手法を援用することで、解析的な解を導くことに取り組みました。また、Mathematica で対角化を行う方法を教えて頂いたり、ペーテ仮設を用いた計算手法についても教えて頂いたりしました。京都にいる時は知らなかった内容・手法に触れることができ光栄でした。桂先生とお話していて驚いたことの一つは幅広い文献に精通されていることです。ある模型の解析解を知りたく、桂先生に質問すると、10年以上前のややマニアックな文献をすぐに教えて頂きました。また可解模型や数学的な手法だけでなく、固体中の現象論的な研究についても熟知されていて、感銘を受けました。さらに、研究を進めるスピードについても驚きました。桂先生は論文に必要な本質的な計算は数日で終わらせることもあったと伺い、自分も精進せねばと身の引き締まる思いがしました。

また、桂先生のご厚意で研究室セミナーの講演を行う機会を頂きました(写真1)。発表中には、散逸のある Fermi-Hubbard 模型を研究されている吉田さんや非エルミート系のベリー位相を研究されている坪田さんから有益なコメントを頂きました。特に吉田さんに



写真1: 桂研におけるセミナーの様子

左から赤城先生、吉田さん、私、桂先生

は、滞在中もメールで Liouvillian のユニタリ対称性に関する質問をすると、手書きで詳細をご説明頂いたノートを送って頂き、大変、有難かったです。また、中川さん(上田研)にも時間を取って頂き、粒子ロスがある系での量子ゼノン効果について、議論して頂きました。

また、滞在中、理研の森さんや濱崎さんの研究室にも伺いました。自分の研究内容を説明していると、多体局在におけるマルチフラクタル性[2]との関係性についてご指摘頂きました。本滞在中直前には、滞在中に居る居室に偶然いらっしゃった川畑さん(物性研)に、理研で伺った内容を踏まえ、考えていた今後の研究についての相談に乗って頂きました。その後、多体ヒルベルト空間の表皮モードの示すマルチフラクタル性についての結果を出すことができました[3]。

本プログラムを通して、桂先生はもちろんのこと、多くの方々に研究について議論頂き、大変実りのある滞在中となりました。可解模型や代数的な視点から物性を捉える機会に多く触れることができ、これまでと全く異なった考え方に接することができました。また、理研滞在中に統計物理寄りの話題を教えて頂いたことは、これからの研究に新しい展望を与えて頂いたように感じています。益々精進する必要があると感じつつも、充実した経験でした。

最後に、私の滞在中を受け入れて下さった桂先生に感謝申し上げます。また、滞在中に議論して下さった桂研の方々をはじめとする皆様にお礼申し上げます。このような機会を与えて頂いた若手循環プログラムに感謝の意を表し、本記事の結びとさせていただきます。

[1] S. Hamanaka, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B. **108**, 155114 (2023).

[2] N. Mace, F. Alet, and N. Laflorencie, Phys. Rev. Lett. **123**, 180601 (2019).

[3] S. Hamanaka and K. Kawabata, arXiv: 2401.08304.



# 2023年度 研究会報告

CONFERENCE REPORTS IN FY2023

## ● 領域国際会議(基研国際滞在型研究会)

### “Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity”

2023年9月4日 - 10月6日

#### 第1週：“ExU-YITP School/Workshop on Quantum Information, Quantum Matter, and Quantum Gravity” 9月4日 - 8日, 基礎物理学研究所+オンライン

2023年9月4-8日に本領域と基礎物理学研究所による共催で、スクールならびに研究会 School/Workshop on Quantum Information, Quantum Matter, and Quantum Gravity を対面(基研パナソニックホール)とオンライン(Zoom)によるハイブリッド形式で開催しました。10月6日までの5週間に渡る滞在型国際会議の第一週目にあたります。対面参加者は162名(国内79名, 国外83名)、オンライン参加者は195名という想定を超える大変盛況なものでした。量子情報を基礎とした広範囲の物理の極限分野に跨る本領域において、若手育成・分野横断型の研究を推進することが肝要です。これを具現化するために、スクール部分として、基礎から最新の話題まで2~2.5時間の講義が行われました。素粒子分野からはHeller氏の講義「Complexity and holography」、宇宙分野からはHollands氏の講義「Entropy, Operator Algebras and Black Holes」、量子情報分野からは森前氏の講義「Quantum cryptography based on pseudorandom quantum states」、物性分野からは西野氏の講義「How to study statistical lattice models by “adaptive” tensor network frameworks?」、超高性能量子実験を行う野口氏の講義「How can we manipulate the quantum systems?」と本領域を束ねる3つの極限(時間の極限、空間の極限、物質の極限)のよいモデルとなりました。加えて10名の方から各分野の関連最新トピックスについて1時間の招待講演、13名の方から20分の一般講演、17名のポスター発表と盛りだくさんな研究集会となりました。質問も活発に行われ、多くの講義、講演で大幅に時間を超過し、どこまで休憩時間を短縮すれば済むのだろうと心配になるほどの盛り上がりようでした。幸先のよいスタートとなった第一週目の集会となりました。(文責：白水徹也)

#### 第2週：第3回領域会議／ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information 9月11日-16日, 基礎物理学研究所+オンライン

国際滞在型研究会の第2週目では、初日に第3回領域会議が、その後Workshopが行なわれ、領域内外から約250名が現地参加、約150名がオンライン参加しました。

領域会議では初めに高柳匡(領域代表、京大基研)が領域の目的と組織やイベントなどについて紹介した後、それぞれの研究計画班から各30分の講演が行なわれ班の概要と今年度の研究ハイライトが紹介されました。領域外の滞在型研究会参加者からも多数の質疑があり、活発な議論が行なわれました。最後に、アドバイザーの細谷暁夫氏(東工大名誉教授)と井元信之氏(東大特命教授)から、時空と量子情報について示唆に富むコメントをいただき、閉会となりました。

Workshopは量子情報と重力の関係を中心としたもので、海外からの多数の著名な研究者を含む招待講演21件、領域ポスドクも含む若手研究者を中心としたメンバーによる通常講演23件、そして計41件のポスター発表が行なわれました。極限に近い回転ブラックホールという基本的なテーマについての進展が多く紹介されたのが印象的でした。中でもDias氏とMinwalla氏は、AdS/CFT対応の最も標準的な例であるN=4超対称ヤン=ミルズ理論に双対な重力理論のブラックホールについて講演しました。Dias氏らとMinwalla氏らの2グループの解析が理論の相補的な領域での相構造を明らかにしたことが、講演中の質問に対し明かされました。Harlow氏の講演では沼澤氏(公募研究E02班)との共同研究が紹介されました。時間反転対称性のゲージ化について量子力学の根幹にも関わる刺激的な提案がされ、講演中も講演後も活発な議論が交わされました。

ポスター会場や講演中、講演後、コーヒープレイクで各国からの参加者が至るところで熱気のある議論を交わっていたのが印象的な一週間でした。(文責：島田英彦)



領域国際会議第2週目  
(ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information)  
の集合写真



### 第3週：YKIS conference “Foundations and Developments of Quantum Information Theory” 9月11日-16日，基礎物理学研究所+オンライン

長期研究会三週目は「Foundations and Developments of Quantum Information Theory」と題打った研究会を開催した。本研究会では量子情報に特化して最新の研究発展を議論する予定であったが、準備段階で世話人の中での情報伝達に問題があり、結果的には長期研究会に参加している量子重力や量子多体物理の研究者をメインとして、量子情報関連のトピックスを共有する研究会となった。研究会では何人かの量子情報の研究者から「発表しなかったがいつ受け付けていたのか」という質問をいただいた。うまく事前準備できなかった点に関して、この場を借りて心からお詫びしたい。

元々の想定とは大幅に異なる研究会とはなったものの、各講演者には質の高い発表をしていただき、量子情報に関連する様々な分野の話題を耳にすることができた。量子重力から量子情報、量子多体物理に渡るまで広い分野から参加者が集まっていたこともあり、多くは研究会にスポット的に参加し、それ以外の時間には自由に議論するというスタイルであった。そんな中、招待講演者には量子情報の最先端の成果を発表していただき、量子情報以外を専門とする参加者にも得るものが多かったはずである。本研究会を通じて、異分野交流や研究成果の共有が進んだのであれば幸いである。

最後になったが、本研究会は基礎物理学研究所「湯川国際セミナー」を兼ねて開催した。基礎物理学研究所からのサポートには感謝したい。また、本研究会の開催に尽力していただいた関係者やバイトの学生についても、この場を借りて感謝の意を表したい。(文責：中田芳史)

### 第4週：ExU-YITP Workshop on Condensed Matter-Physics and Quantum Information 9月25日-29日，基礎物理学研究所+オンライン

第4週のワークショップは、主に物性物理分野と量子情報分野や素粒子論分野との境界領域研究の進展を主な対象とした。各分野の第一人者から新進気鋭の若手も含めた計13件の招待講演を軸に、量子計算や量子回路模型の物性分野への応用展開、テンソルネットワーク、量子スピン液体、ランダムスピン系、SYKモデルや量子カオスダイナミクス、実験に近い内容から数値計算アルゴリズム、それらの数理的な側面に至る最先端かつ幅広い内容の講演が行われた。全般を通じて質疑応答も活発で、専門的に深く切り込んだものから、素朴な疑問を投げかけるスペクトルの広い議論が展開されていた。また、ポスター発表は、計35件の発表を2

回に分けて行ったが、部屋が若干手狭であったこともあり、大変な熱気の中で若手研究者を中心に大いに議論が盛り上がっていた。滞在型を反映して、異分野の方々が興味を持った講演に顔を出し、講演の合間の休憩時間に議論に花が咲かせていた姿があちこちで見受けられた。実際、第2週、第3週からは半分程度の聴衆が入り替わった印象で、すこし雰囲気異なる感じが出ていたのは分野横断の研究会らしくて良かったのではないと思う。そのような新しい交流から、次の研究の芽が出て花が咲くことを期待したい。最近は大流行の影響で、物性分野でもごちんまりとした研究会を目にすることが多かったが、「物性、量子情報、そして量子重力の境界領域がこれほど人を惹きつける潜在能力をもっていたのか」ということを改めて実感でき、組織委員としても大変充実した1週間であった。(文責：奥西巧一)

### 第5週：ExU-YITP Conference “Quantum Information and Theoretical Physics” 10月2日-6日，基礎物理学研究所+オンライン

ようやく涼しくなってきた10月2日からの第5週は“量子情報と理論物理”と題して研究会形式で開催し、すべての講演を口頭の形式としました。招待講演のうち10件はオンラインで、中でも第19回極限宇宙コロキウムを兼ねたBrian Swingle氏の講演“Hydrodynamics and Random Matrices”を含む6件は日本の深夜という、やや忙しいスケジュールとなりました。一般講演は、25+5分が10件、15+5分が31件で、多くは現地で行われました。第4週以前から参加していた講演者も多く、それまで日々顔を合わせていた参加者同士が、量子情報や素粒子論、重力理論、物性理論といったバックグラウンドの違いを超えて、互いの研究の問題意識や面白さに触れる機会ともなりました。午前中と午後6時までのパナソニックホールを使ったハイブリッドのセッションでも、深夜の完全オンラインのセッションでも、活発な質疑応答が交わされました。

第二次大戦後の日本で初めての科学の国際会議として、冷戦下の1953年9月に開催された国際理論物理学会議では、基礎物理学研究所が会場の一部として利用されたと伝えられています。その後70年という時期にあっても、残念ながら国際的な人の行き来の制限がなくなったわけではありません。しかし、オンラインの手段も活用しつつ、世界の各地域から幅広い分野の、多くの若手を含む、最新の成果を挙げている研究者の交流と情報交換の機会を作り、そこに参加できたことは、組織委員として大きな喜びです。(文責：手塚真樹)



# 2023年度 研究会報告

CONFERENCE REPORTS IN FY2023

## ● 極限宇宙ワークショップ～実験と理論の協奏に向けて：固体物質系から量子・冷却気体系まで

2023年5月16-17日, 東京大学駒場キャンパス+オンライン

前から「極限宇宙」は素粒子・宇宙論のプロジェクトで物性の守備範囲外なんじゃないか、難しい印象がある、とっつきにくいなどの声を物性分野の方々から折にふれいただいていた。特に物質科学の研究者にとっては無理もない感想かもしれない。ゆえに本会議は実験研究者の技術と理論研究者のアイデアが出会うことでこの敷居をさげることはできないかという狙いをもって設計してみた。結果的に領域代表にも「これほど活発な質疑応答は珍しい」といただいただけのくらい密な議論の飛び交うこじんまりしたワークショップが実施できた。領域内外半分ずつ、後者は当てずっぽうで登壇者をサーチしてお願いしてみたが、蓋を開けるとアタリだったと思う。

まず山本大輔氏と下川氏の物性理論からはじまり、清水氏、米澤氏のNMRや超伝導をからめた独自の物性実験テクや測定できるものについての丁寧な解説と順調な滑り出しに続き、川上氏のとてもユニークなヘリウム表面の電子系の実験が紹介された。彼女の「Rydberg state」の名称は自分たちの扱った状態のほうが歴史的に先なんだという訴えで一気にざっくばらんな楽しい雰囲気が出来上がり、小澤氏の私にとって目新しい理論で初日が終わる。夜は学内でケータリングをして遅くまで懇親会で盛り上がった。

2日目は冷却原子のベテランの内野氏の理論研究の紹介に続き、素川氏、富田氏によってRydberg原子のエンタングルメントや「統計モデル」をどう実現するか、関するレクチャーが行われた。最後は國見氏がScarの話、遊佐氏の量子ホールの実験の話でめでたかった。主によかったことは物性の異分野の専門家同士が、専門の話をお互いに話を通じると実感してもらえたこと、また普段の縦割りの学会では出会わない研究者同士が実はentanglement witnessとcold atomなど、名前は違えど実質的には同じものを計算、観測していた、とわかったことである。このように取って小規模+オンラインで講演者のバラエティを意識した場を設ければ、実りのある濃い時間が構築できるし、このような機会こそ分野横断型の学変Aならではのものだと思う。次回はまた違うテーマやメンバーでどうなるのか見てみたい。

(文責：堀田知佐)

## ● 場の理論の新しい計算方法2023—量子計算とテンソルネットワークに関するスクール—

2023年10月10-13日, 大阪大学豊中キャンパス  
南部ホール + オンライン

2023年10月10日(火) - 13日(金)の4日間、大阪大学豊中キャンパス南部ホールにおいて「場の理論の新しい計算方法2023—量子計算とテンソルネットワークに関するスクール—」を極限宇宙D01班と大阪大学理学研究科FRC-TJRの共催で開催しました。このスクールは2022年9月に京都大学基礎物理学研究所で開催された「場の理論の新しい計算方法—量子計算とテンソルネットワークに関するサマースクール—」の続編にあたります。主な対象は大学院生とポスドクでしたが、参加者(現地約40、オンライン約50名)の中には学部生や企業で研究されている方もいらっしゃいました。

今年度は量子計算とテンソルネットワーク分野で活躍されている4名の講師陣による講義に加えて、10名の参加者による口頭発表が行われました。

大久保毅氏(東京大学、D02班研究協力者)は、テンソルネットワークを用いた量子状態の表現方法の入門的紹介と量子物性への応用、および量子計算への展望について解説を行いました。手塚真樹氏(京都大学、B02班研究代表者)はボソン系の量子シミュレーションに関して、手塚氏自身の最近の研究成果に関する解説を行いました。助野裕紀氏(ストニーブルック大学、D01班研究協力者)は測定型量子計算の入門的解説から始まり、格子ゲージ理論の量子シミュレーションへの応用に関する助野氏の最近の研究成果を紹介しました。赤星友太郎氏(富士通)は量子誤り訂正の理論と誤り耐性量子計算(FTQC)に関する紹介と、Early-FTQCに特化した量子計算アーキテクチャについての赤星氏の最近の研究成果を解説しました。

講義および口頭発表では参加者から多くの質問が挙がり、非常に活発な議論が行われました。また休憩時間中も講師や参加者の間で有意義な議論や情報交換がなされる様子が見受けられました。当スクールが分野の発展に資することを期待しています。

(文責：西岡辰磨)



講義風景



## ●第2回領域若手研究会

2024年2月19 - 23日, 滋賀県高島市 白浜荘

第2回領域若手研究会を開催しました。領域若手研究会では、極限宇宙が扱う様々な分野を研究している学生・研究員を中心とした若手を集め、交流の場を設けることを目的としています。そして、若手が主体となり、分野をまたがった共同研究のきっかけを作ること为目标としています。極限宇宙では、毎年度1回のペースで若手研究会を開催することを予定しています。昨年度の第一回若手研究会ではCOVID-19の影響で合宿型の研究会を行うことができませんでしたが、今年度の若手研究会は滋賀県高島市の白浜荘にて合宿形式で研究を行うことができました。5日間、多くの若手と同じ場所で過ごすことにより、互いに研究内容の紹介することに加えて、研究の興味、そして将来の夢などを語り合い、若手の異分野交流を行うことができました。

研究会には学部学生から、修士・博士課程の学生、研究員そして数名の教員を合わせて合計68名が参加し、そのうちの48名が発表を行いました。発表希望者全員に対し発表の機会を設け、極限宇宙の研究員には30分の、その他の発表者には20分の口頭発表を行っていただきました。講演はすべて英語で行われました。発表内容は量子情報・素粒子・宇宙・物性物理と幅広く、質疑応答の時間には分野外の人からたくさん質問がされました。発表者には学部4年生や修士課程1年生の方も多くおり、彼ら、彼女らにとって公式の場での初めての英語講演であったという方も多くいました。この若手研究会は、若手の交流だけでなく、学部4年生や修士課程1年生の方々の国際活躍の始まりの場としての役割も果たしました。

講演に加えて、極限宇宙の研究によくあられる各分野のキーワードを紹介し、各分野の代表者により各々のキーワードを専門とする参加者が紹介されました。

その後の休憩時間では、各キーワードについて紹介された専門家に対し参加者が質問する場を設け、異なる分野の基礎知識を学ぶ時間を設けました。この紹介と議論の時間は、まず初日の午後に、宇宙・重力分野から始めました。宇宙・重力分野では、宇宙論、ブラックホール、低エネルギーにおける重力の性質、重力の量子性、時空特異点というテーマをもとに、専門家を紹介し、質問時間を設けました。二日目の午前には、素粒子分野に関する紹介と議論を設け、格子ゲージ理論、素粒子現象論、情報喪失問題、ホログラフィーとエンタングルメント、AdSを超えた時空のホログラフィーというテーマを取り扱いました。量子情報理論の紹介と議論は二日目の午後に行い、量子測定、リソース理論、関数解析と量子情報、量子熱力学とその他、量子情報理論、テンソルネットワークというテーマを扱いました。物性物理分野に関しては、三日目の午前に行い、冷却原子系、強相関電子系・量子スピン系、テンソルネットワーク、非エルミート・開放量子系、トポロジカル物質のテーマをもとに、議論が行われました。

夜には懇親会が開かれました。懇親会では、カジュアルな親睦に加えて、昼の講演についての詳細を説明も行われました。また、互いの研究分野の基礎的な事柄や最新の話題についての情報を交換し合うなど、分野間交流が行われました。これまでの研究内容のみでなく、今後の研究に関する議論も繰り広げられ、将来の共同研究に発展することが期待されます。

最後に、若手研究会世話人代表の泉が、第2回若手研究会のまとめと次回の若手研究会についてのアナウンスを行い、第2回領域若手研究会は閉会となりました。

(文責：泉圭介)



参加者による発表の様子



集合写真



# 2023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15回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年4月13日

講演者: Andrew Strominger教授(ハーヴァード大学)

タイトル: Cosmic ER=EPR



### 第16回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年5月24日

講演者: 中村 泰信 教授(東京大学/理研)

タイトル: Superconducting circuits for quantum technologies



### 第17回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年6月6日

講演者: Harvey Reall教授(ケンブリッジ大学)

タイトル: Creases, corners and caustics: non-smooth features on black hole horizons



### 第18回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年7月24日

講演者: 藤堂 眞治 教授(東京大学)

タイトル: Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation



### 第19回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年10月2日

講演者: Brian Swingle教授(ブランダイス大学)

タイトル: Hydrodynamics and Random Matrices



### 第20回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年11月14日

講演者: Anne Broadbent氏(オタワ大学)

タイトル: Quantum Unclonability and Cryptography



### 第21回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2023年12月1日

講演者: Nicolás Yunes教授(イリノイ大学)

タイトル: Probing strong gravity when gravity waves



### 第22回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年2月13日

講演者: 橋坂 昌幸 氏(東京大学物性研究所)

タイトル: Electron dynamics at boundaries of quantum many-body systems



### 第23回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2024年3月14日

講演者: Suvrat Raju教授(ICTS)

タイトル: How is quantum information localized in quantum gravity?



## ● 領域セミナー

### 第12回領域循環ミーティング

開催日: 2023年4月18日

講演者1: 助野 裕紀 (D01)

タイトル: Quantum simulation of gauge theories from entanglement, measurement and feedforward

講演者2: 原田 健自 (D02)

タイトル: Optimal network structure of quantum-inspired generative modeling

### 第2回「極限宇宙」学際セミナー

開催日: 2023年4月20日

講演者1: 吉田 健太郎 (E02)

タイトル: Chaotic instability in the BFSS matrix model

講演者2: 田島 裕康 (E01)

タイトル: Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence

### 第13回領域循環ミーティング

開催日: 2023年5月31日

講演者1: 鳩村 拓矢 氏 (NTT)

タイトル: Shortcuts to adiabaticity and their digital implementation

講演者2: 山崎 隼太 氏 (A01)

タイトル: Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation

### 第3回「極限宇宙」学際セミナー

開催日: 2023年6月14日

講演者1: 加藤 晃太郎 (E01)

タイトル: Does a matrix density operator have a parent Hamiltonian?

講演者2: 吉田 恒也 (E02)

タイトル: Effects of correlations on exceptional points



#### 第14回領域循環ミーティング

開催日：2023年6月26日

講演者1：Sunil Sake (B01)

タイトル：Sparse Random Matrices and Local SYK

講演者2：山本 和樹 (B02)

タイトル：Localization properties in disordered quantum many-body dynamics under continuous measurement

#### 第4回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2023年7月13日

講演者1：武田 真滋 (E02)

タイトル：All-mode renormalization and phase structure of 2d CP(1) model with topological theta term

講演者2：土屋 麻人 (E02)

タイトル：Exact renormalization group and quantum error correction

#### 第15回領域循環ミーティング

開催日：2023年7月25日

講演者1：吉田 大介 (C03)

タイトル：Entropy bound and an initial singularity of the universe

講演者2：米倉 和也 (C02)

タイトル：Nonsupersymmetric heterotic branes

#### 第16回領域循環ミーティング

開催日：2023年10月17日

講演者1：松本 祥 (D01)

タイトル：Three ways of calculating mass spectra of gauge theories in the Hamiltonian formalism

講演者2：Atis Yosprakob (D02)

タイトル：Grassmann TRG study of gauge theory with multiple fermion flavors

#### 第17回領域循環ミーティング

開催日：2023年11月29日

講演者1：水田 郁氏 (東京大学)

タイトル：Optimal quantum algorithm for time-periodic/quasiperiodic Hamiltonian simulation

講演者2：白石 直人氏 (東京大学)

タイトル：Unbounded amplification of quantum coherence

#### 第5回「極限宇宙」学際セミナー

開催日：2023年12月4日

講演者1：尾張 正樹 (E01)

タイトル：Indirect control of quantum many-body systems for generation of t-design and variational quantum algorithms

講演者2：郡 和範 (E02)

タイトル：Possible formation of induced gravitational waves and light primordial black hole dark-matter in inflationary cosmology as suggested by NANOGrav15yr

#### 第18回領域循環ミーティング

開催日：2023年12月19日

講演者1：木下 俊一郎 (B03)

タイトル：Shooting null geodesics into holographic spacetimes

講演者2：山本 大輔 (B02)

タイトル：Holographic teleportation in artificial quantum spin systems

#### 第19回領域循環ミーティング

開催日：2024年1月31日

講演者1：Jonathan Harper (C01)

タイトル：Aspects of multi-entropy

講演者2：堀田 昌寛 (C02)

タイトル：Particle detectors and purification partners for the observed particles

#### 第20回領域循環ミーティング

開催日：2024年3月8日

講演者1：松尾 泰 (D01)

タイトル：A Calogero model for the non-Abelian quantum Hall effect

講演者2：岩木 惇司 (D02)

タイトル：Random sampling for thermal quantum states

#### ●研究会&ワークショップ

##### Recent Developments in Quantum Physics of Black Holes 2023

開催期間：2023年4月3日-7日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

##### Workshop on Quantum Simulation Research

開催期間：2023年4月12日

開催場所：東京大学駒場キャンパス



# 2023年度 学術集会 (国際会議・研究会・セミナー) 一覧

CONFERENCES, WORKSHOPS AND SEMINARS

## “Gravity and Quantum” Workshop, Kyushu University 2023

開催期間：2023年5月8日-9日

開催場所：九州大学

## 極限宇宙ワークショップ～実験と理論の協奏に向けて： 固体物質系から量子・冷却気体系まで

開催期間：2023年5月16日-17日

開催場所：東京大学駒場キャンパス

## APCTP Workshop “Numerical Methods in Theoretical Physics 2023”

開催期間：2023年7月10日-14日

開催場所：APCTP

## Integrability, Deformations and Chaos

開催期間：2023年7月25日-27日

開催場所：沖縄科学技術大学院大学

## 研究会「重力と量子で紡ぐ宇宙」

開催期間：2023年8月20日-22日

開催場所：しきぶ温泉 湯楽里

## YIPQS long-term workshop “Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity”

開催期間：2023年9月4日-10月6日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

## 場の理論の新しい計算方法2023

開催期間：2023年10月10日-13日

開催場所：大阪大学

## Tensor Network 2023

開催期間：2023年11月14日-16日

開催場所：筑波大学

## The 32nd workshop on general relativity and gravitation in Japan

開催期間：2023年11月27日-12月1日

開催場所：名古屋大学

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

開催期間：2023年12月5日-14日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所

## 2024 Kanto-NTU High Energy Physics Workshop

開催期間：2024年1月15日-18日

開催場所：埼玉大学

## 研究会「一般相対論と幾何」

開催期間：2024年2月8日-9日

開催場所：名古屋大学

## 第2回領域若手研究会

開催期間：2024年2月19日-23日

開催場所：白浜荘

## TNスキームに基づく異分野融合型計算科学研究ワークショップ

開催期間：2024年3月14日-15日

開催場所：大阪大学

## Quantum Error Correction

開催期間：2024年3月18日-29日

開催場所：京都大学基礎物理学研究所





## 測定により駆動する格子ゲージ理論のシミュレーション

物理の現象や理論を理解しようとする時、時間が経つとシステムがどう変わるかをよく考える。時間発展をシミュレートして正確に予言できれば、ダイナミクスをよく理解できていることになるし、実験結果と詳細に比較することもできる。最近の発展が著しい量子技術を用いて物理系(特に素粒子のダイナミクスを記述するゲージ理論)の時間発展を定量的にシミュレートするにはどうすれば良いだろう? 原子やイオンで物理系を模倣するアナログ量子シミュレーションや、量子ゲートを組み合わせた回路で計算をする量子コンピュータによる回路型デジタル量子シミュレーションが主流だ。しかし、量子力学ならではの性質を用いる他の可能性もある。

量子力学ならではの、というのは測定だ。学部で学ぶ通り、(例えばエルミート演算子の固有基底で)測定すると、波動関数の収縮が起きて量子状態が(基底ベクトルの一つに)変化する。この変化は確率的に起こり、完全にコントロールすることができない。しかし全く無規則なわけではなく、測定前の量子状態に応じて可能な変化とその確率が決まる。部分的な測定結果を利用すること(適応的な測定)で、決定的(deterministic)に状態を変化させることもできる。自明な例だが、 $|0\rangle|0\rangle+|1\rangle|1\rangle$  に比例するエンタングルした状態の一つ目のキュービットをパウリ行列 $\sigma_z$ の固有基底で測定すると $s=0$ または $1$ を得るが、それに応じて二つ目のキュービットに $\sigma_x^s$ を作用させると最後の状態は必ず $|0\rangle$ である。この例を拡張すると適応的な測定により、量子状態を移すこと(量子テレポーテーション)、量子ゲートを作用させること(ゲート・テレポーテーション)、普遍計算を行うこと(測定型量子計算[1])が可能である。

我々は[2]で、シミュレートしたい(可換)格子ゲージ理論の時空的構造に応じてエンタングルさせたリソース状態を用意し、1キュービット適応的測定を行うことで、離散化された時間発展を実現できることを示した(図1参照)。また、そのリソース状態がゲージ理論が持つ大域的対称性で守られたトポロジカル秩序(symmetry protected topological order; SPT order)を持つことを示した。

論文[2]以降の進行中の研究では、測定型量子シミュレーションの考え方を拡張し、物質場との相互作用を

取り入れることやフラクトン系や非可換ゲージ群への拡張を考察している。一方で、リソース状態とシミュレートされるゲージ理論との間の関係は理論的にも興味深い。我々の考察したリソース状態にはSPT秩序があると述べたが、一般にこのような状態の境界には縮退を持つ基底状態が現れる。実際、我々がシミュレーションのターゲットとしたゲージ理論には対応した縮退が生じる。この他のバルクと境界の間の対応関係についても議論しているが、ここでは割愛する。測定を通じた新たなバルク・境界対応の理論の発展を目指し、研究を広げていく予定だ。

量子コンピュータは超伝導型、イオントラップ型、光学型などの方式が開発されており、まだどれが長期的に優位なのかははっきりしない。測定型シミュレーション方法は回路型に比べて、必要なキュービット数は多いものの、測定がエンタングリングゲートより早く実行できるならばスピードで優位性を持つ。また近年、回路の途中での測定が様々なプログラマブル量子デバイスでも導入されて来ている。どの量子デバイスが測定型シミュレーションの実現に最も合っているか考察を深め、近い将来にデモンストレーションをしたい。

- [1] R. Raussendorf and H. J. Briegel, A one-way quantum computer, Phys. Rev. Lett. 86, 5188 (2001).
- [2] Hiroki Sukeno and Takuya Okuda, Measurement-based quantum simulation of Abelian lattice gauge theories, SciPost Physics 14, 129 (2023), arXiv:2210.10908 [quant-ph].



●執筆者紹介

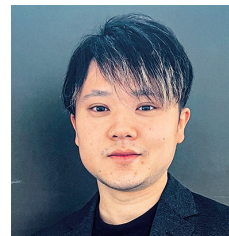
**奥田 拓也** Takuya Okuda

東京大学 総合文化研究科

1977年岐阜県生まれ

2005年6月 カリフォルニア工科大学博士課程修了、Ph.D

2010年9月から現職



**助野 裕紀** Hiroki Sukeno

ニューヨーク州立大学ストーニーブルック校、

Ph.D candidate

1993年愛知県生まれ

2015年3月 東京大学理学部物理学科卒業

2018年8月より現所属校に留学

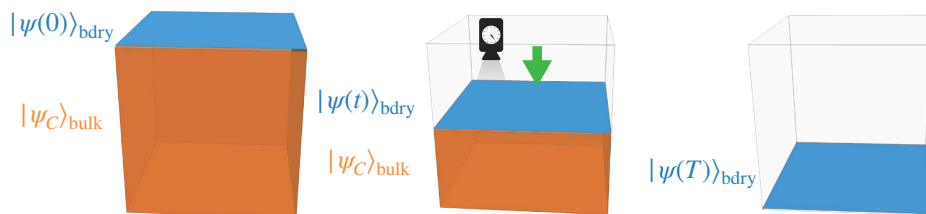


図1: (左) インพุット状態を境界に配置し、バルクのリソース状態とエンタングルさせる。(中) 測定を行う事で、ゲージ理論の時間発展ユニタリと量子テレポーテーションが誘発される。(右) アウトプット状態として時間発展した波動関数が残る。



## ホログラフィックな時空を探索する

目の前のものをたたくなど入力を与えたときに、入力した時刻と位置のあたりで大きな反応が返ってくるというのは、誰しもが直感的に自然と思える現象であろう。これがもし、たたいた直後はすみやかに静まりかえり反応がないものの、しばらく時間が経過した後全く別の位置で大きな反応があらわれたとすると奇妙に感じるのではないだろうか。AdS/CFT対応が成り立つならば、このような現象が物質上で起きることが期待される。

AdS/CFT対応は、負の宇宙項をもつAdS時空上での古典重力系と、そのAdS時空がもつ境界上での強結合の量子系の間で等価性があることを主張する。このとき、AdSバルク時空上を伝播するある場のAdS境界付近での漸近的な振る舞いが、境界上の量子系での対応する外場やその外場への応答などの物理量を与える。もし場の配位がバルク時空の奥深くに局在し、境界付近では値を持たないものであったとすると、境界上の量子系では対応する応答は何も見えない。そこでAdS境界上に適当なソースを与えて、バルク時空内へ空間的に局在した粒子状のものを励起することを考えてみよう。この粒子はバルク時空の中を重力理論にしたがって運動し、場合によっては再び境界上に戻ってくるだろう。一方、これを境界上の量子系の立場でみると、ある外場を入力したものの応答はすぐに静まり、しばらくしてから入力した場所とは異なる位置で応答があらわれるという冒頭で述べた現象となる。バルクの重力理論側では曲がった時空上での粒子のダイナミクスという極めて初等的な物理に過ぎないが、量子系の描像のみでこの現象を直ちに理解することは困難なのではなかろうか。逆に物質上の量子系でこのような現象が起きたならば、その量子系がAdS/CFT対応が示す仮想的な別次元のホログラフィックな時空描像をもつ一つの証拠となり得る。

さて、境界上でどのようなソースを与えればバルクに粒子を射出できるのだろうか。「粒子」の特徴とは位置と運動量が定まっている状態である。このような状態を場、つまり波動で構成するには、実空間と運動量空間ではほぼ局在した波束を考えることになる。振動数が十分高い波動ならアイコンナル近似が適用できるため、波面の進行方向は粒子の運動と同じ方程式で

決定され、波数ベクトルが運動量にあたることが示される。さらに振幅を粒子の位置に局在した関数形で与えれば、実空間(位置)と運動量空間(運動量)で、ある有限幅の広がりをもってほぼ局在した状態が実現できる。つまり、望みの振動数と波数を持った平面波に適当な局在した振幅関数をかけた関数形のものをソースとして入力すれば、振動数と波数に対応するエネルギーと運動量をもった波束が励起されるのである。この時、十分高い振動数にすることが、実空間・運動量空間での分散を相対的に十分小さくできる必要条件となる。

このような考察をもとに、我々はAdS-Schwarzschildブラックホール時空上でのスカラー場を具体例にとり計算を行った[1]。あるエネルギーと運動量をもった上記の関数形でAdS境界上でのスカラー場の境界条件を与え、AdS-Schwarzschild時空中の波動方程式の時間発展を解くことで、スカラー場のAdS境界付近での振る舞いから対応する球面上の量子系での応答を求めた(図1)。当初の期待通り、励起された波束はバルク時空で粒子が運動する測地線上を伝播していき、波束がバルクの奥に局在している間は境界上での応答はあらわれない。測地線が再び境界に到達する時刻と位置で波束も境界に到達しはじめ、応答が大きく現れた。さらに注目すべき点は測地線の予言する到達時間後にも応答の余韻がテールとして現れていることである。これは波束が有限の幅をもっているため、バルクのブラックホールの潮汐力による潮汐破壊が起き、波束が引き延ばされた結果であると考えられる。このような潮汐力はまさに時空の曲率に起因するもので、重力側の描像では基本的で自然な現象の一つだが、境界の量子系の知識のみでの説明は非自明なものになるだろう。

実際にこのような潮汐破壊が観測された例として、約30年前のシューメーカー・レビー第9彗星の木星への衝突が有名である。木星からの潮汐力でいくつかの破片に分裂し細長く分布した彗星は、その後木星へ落下し線上に並んだ衝突痕を木星表面に残した。近い将来、現実の物質で重力描像をもつ量子系が見つければ、このような天上の天文現象と物理を同じくするものが、机上の物質上でも見られるかもしれない。

[1] S. Kinoshita, K. Murata and D. Takeda, JHEP **10**, 074 (2023)

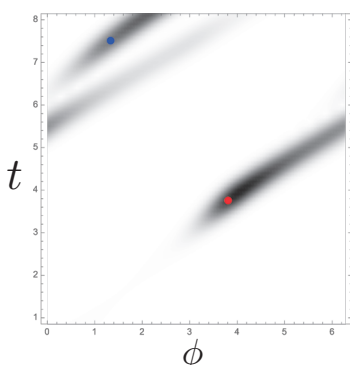


図1: AdS境界球面上の赤道における各時刻 $t$ の応答。点は測地線の到達位置と時刻。



●執筆者紹介

木下 俊一郎 Shunichiro Kinoshita

日本大学文理学部 自然科学研究所 博士研究員

1978年長崎県生まれ

2008年3月 東京大学大学院博士後期課程修了

2022年4月から現職





### In the middle of Extreme Universe travel

Head Investigator

*Tadashi Takayanagi*

Yukawa Institute for Theoretical Physics,  
Kyoto University

A year and a half has passed since this collaboration started. Now, we are back to our previous research environment, free to travel overseas and invite researchers from abroad. Thanks to the great efforts of the members and the warm support by the collaboration advisors, our research activities have made great progress both internationally and in terms of interdisciplinary collaboration with many excellent research results produced.



Our collaboration and the Yukawa Institute for Theoretical Physics in Kyoto University jointly organized a 5-week international long term workshop in fall, which was a great success with over 400 local participants. The workshop was attended by a large number of researchers from abroad and had a wide range of attendees, from prominent researchers to graduate students, who are all interested in the fusion of quantum information and physics. The activities of young researchers such as post-doctoral fellows and graduate students at this meeting were also quite impressive.



There have been remarkable recent developments in various fields related to the fusion of quantum information and physics, which is the main aim of this collaboration. Since Ryu and I found the relationship between quantum entanglement and AdS/CFT correspondence in 2006, a major trend has emerged in the boundary region between quantum information and quantum gravity, and in 2009, Swingle proposed the amazing relationship between tensor networks and AdS/CFT correspondence. In 2014, Almheiri, Dong, and Harlow proposed the relationship between quantum error correcting codes and AdS/CFT correspondence. In 2019, Pennington et al. discovered an outstanding method for correctly computing quantum entanglement for evaporating black holes, and a strong evidence was found for recovering information inside a black hole from Hawking radiation. And very recently, the deep relationship between quantum cryptography, AdS/CFT correspondence and black holes has become a hot topic of discussion at the long term workshop. As mentioned above, quantum entanglement calculations show that it is possible to recover information about the interior of a black hole from Hawking radiation. However, if we consider how difficult it would be

to actually perform that recovery with a quantum computer, it turns out to be so difficult as to be unfeasible in reality, i.e., exponentially difficult. Conversely, the information is embedded in Hawking radiation as quantum information in a form that is extremely difficult to be decoded by an adversary, meaning that it can be regarded as a quantum cryptography. Prof. Morimae (A01) has done excellent research on quantum cryptography, taking hints from quantum gravity, and gave a lecture on quantum cryptography at the long term workshop. Also, an interdisciplinary collaboration between Prof. Nakata (a quantum information theorist in A01), and Prof. Tezuka (a condensed matter theorist in B02), recently produced remarkable results which connect black hole information, quantum error correcting codes and quantum chaos in an interesting way.



In addition, the workshop “Extreme Universe Workshop - Toward Collaboration of Experiment and Theory” was held this year at The University of Tokyo, in order to promote research exchange between theorists and experimentalists. Testing theories of the extreme universe with table-top experimental equipment is an important theme in this collaboration. We hope that many new research directions will be generated through friendly discussions between theorists and experimentalists. The C02 group’s dilution refrigerator has finally been installed in the Yusa Laboratory at Tohoku University. We are looking forward to results of the simulation experiment of the extreme universe using the quantum Hall system.



Finally, I would like to express my gratitude to all PIs of the first phase of publicly offered research, who have contributed to this collaboration for two years from various perspectives that cannot be covered by the planned research. The second phase of publicly offered research will begin next year. Further exciting developments will come next year!



### Mysteries of Particles and the Universe ...Hypothesis and Verification

Advisory Committee member

*Nobuyuki Imoto*

Senior Professor at The University of Tokyo

When Professor Takayanagi asked me to serve as an advisor for this Area of Research, “Extreme Universe,” I felt a little bit scared because only the most intelligent people of our time gather in this Area. But my inner voice whispered to me, “Don’t you want to interact with these people?” So, I happily accepted the offer. Actually, when I entered university (about 50 years ago), I was interested in elementary particles and the universe. But when I had to choose which department to enter, I was torn between the Department of Physics in the School of Science and the Department of Physical Engineering in the School of Engineering. Around that time, holograms began to be visible to the general public, and when I saw their 3D images for the first time, I wondered, “How can 3D information be recorded on a 2D photographic plate?” I wanted to research this, and thought that if I go to the Department of Physical Engineering, I can take lectures also from the Department of Mathematical Engineering and Department of Instrumentation Engineering, which were located in the same building, such as information theory, probability theory, programming, measurement engineering, precision measurement, associative memory, and neural networks, etc. In addition to studying quantum mechanics, statistical mechanics, and fluid mechanics in the Department of Physics and Engineering. I can also include Relativity given by Physics Department, and I filled up all of my time with these classes. During my first year of master’s degree, I created real holograms using lasers and computer-generated holograms of imaginary objects, and I could estimate that the resolution of the 3D image roughly corresponds to the information amount of the interference fringes on the 2D plate. Satisfied with this result, I handed over the holograms to the undergraduate students whom I was supervising. For the rest of my master research, I engaged in self-imaging phenomena in waveguides (later, I knew that time-evolution version of this was called Quantum Carpet) and got Master Degree. After joining the Telegraph and Telephone Public Corporation (currently NTT), I conducted research on QND measurement, attended Hitachi’s ISQM conference. And during my year-long stay in the UK, I had discussions with Zeilinger, Bohm, Peierls, Deutsch, Bennett, and others.



I was impressed by all of these people, especially by the theory of nonlocal hidden variables that Bohm suddenly announced very soon after he published his famous textbook (standard Copenhagen style). I couldn’t believe it because it was a non-local theory, but we talked for two hours. At the other end of the spectrum, Deutsch is a multiverse theorist, and explained that the initial state of a quantum computer changes into a complex superposition (many-qubits entangled) as each gate operation proceeds, i.e., the world in its initial state gradually becomes a superposition of many worlds,

and finally the exponentially parallel world results are processed, exhibiting the desired computational result. This makes the computation exponentially faster. I wanted to ask if Bohm could explain this by his nonlocal hidden variable theory, but he passed away before I could ask him. There was another big name, Peierls, who is a Copenhagen interpreter and says, “Neither Bohm theory nor many-worlds interpretation is necessary! Ordinary quantum mechanics can calculate things properly, so it is sufficient.” What was impressive to me was what Bohm said before his death: “I’m not saying that my theory is the most correct. I agree that the non-local hidden variables are not observables because observable quantities have no choice but to obey the theory of relativity. However, there will be no progress in physics unless we present a hypothesis.” In that sense, it is the many-worlds interpretation that moves the wall between the quantum and the classical and pushes out the classical, and the Bohm theory that kicks out quantum mechanics. Each theory has internal consistency. Compared to that, the Copenhagen interpretation is a patchwork of quantum and classical worlds, that is, there are two different rules: unitary (reversible) during nobody is watching and projective (irreversible) when someone is watching. In this case, it is desired to clarify what are observation and non-observation. We should not just empirically say “We know this telescope causes unitary evolution and that detector causes projection.”

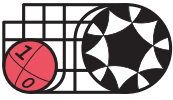


Speaking of hypotheses, I sometimes wish to know which theory is established and which needs to be confirmed. For example, there is a theory that the dimension of space should be 9, which is retrieved from the fact that photon mass = 0. But the dimension of our space is 3. Thus, the rest of 6 dimensions are not visible due to compactifying to Planck length. Among these, to explain why 9 dimensions are required, the formula  $1+2+3+\dots=-1/12$ , obtained using analytic continuation of  $\zeta(z)$  to  $z=-1$ , is used. But I feel whether or not there is a more plausible explanation for the 9th dimension. It is very beautiful if the mathematical relation  $\zeta(-1) = -1/12$  inevitably created this world. But isn’t it also possible that this world was chosen by chance among many possibilities? There are still things I need to study.



Now, I have participated in various events of this “Extreme Space” to the extent possible, and I was surprised at how carefully and orderly the area’s management was proceeding. The results we see and hear in this “extreme universe” are all the results of comprehensive science that is uniquely diverse and profound, from theory to experiment, and it is clear that this is a field that is undergoing remarkable progress and transformation. I look forward to further progress in all of your research.





# Quantum information for theoretical physics

**[Principal Investigator]**

Tomoyuki Morimae (YITP, Kyoto University)

**[Co-Investigator]**

Yoshifumi Nakata (YITP, Kyoto University)  
Koji Azuma (NTT Basic Research Laboratories)  
Francesco Buscemi (Nagoya University)

**[ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]**

Arthur Parzygnat (Nagoya University)

**[Research Collaborators]**

Andrew Darmawan (YITP, Kyoto University)  
Michele Dall'Arno (Toyohashi University of Technology)  
Hayata Yamasaki (The University of Tokyo)  
Go Kato (Advanced ICT Research Institute, NICT)

**[Post-doc fellow]**

Aditya Nema (Nagoya University)

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

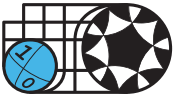
**Quantum cryptography:** Morimae et al. succeeded for the first time in constructing a quantum public-key cryptosystem consisting of only one-way functions. Public key cryptography is a cryptographic task in which a message can be encrypted and sent without sharing a secret key in advance, and is currently used in various places such as the Internet. However, it has been known for more than 30 years that in classical cryptography, stronger assumptions (i.e., more dangerous assumptions) than one-way functions are required to realize public key cryptography. Here, a one-way function is a function that is easy to compute but difficult to reverse, and is the most fundamental assumption in classical cryptography. Morimae et al. proved for the first time that quantum public-key cryptography, unlike classical cryptography, can be constructed entirely from one-way functions. This is a breakthrough of the 30-year-old conventional wisdom in classical cryptography, and this research result was accepted to QIP2024, the top international conference on quantum information.

**Quantum measurement theory and statistical mechanics:** The research activities in the Buscemi Laboratory have evolved around quantum measurement theory and statistical mechanics. First, we gave the first comprehensive mathematical characterization of the quantity called “observational entropy”. This quantity plays a prominent role in a number of new approaches to quantum statistical mechanics. Although it was introduced by von Neumann in the 1920s, observational entropy has only recently been recognized as a central quantity for understanding thermalization processes and the laws of thermodynamics. Observational entropy is also closely related to the problem of inferring the state of a system by looking only at the results of a measurement. Among quantum measurements, incompatible measurements and sharp measurements are particularly important in quantum information theory and statistical mechanics. Using a novel resource-theoretic approach, we fully characterized both the properties of “incompatibility” and “sharpness” with respect to other information-theoretic resources, such as classical communication and entanglement. On a different note, we explored applications of mathematical finance, in particular expected utility theory, to the fields of statistical mechanics and thermodynamics. In this context, we found a number of new fluctuation relations and second laws, each describing the behavior of an agent who must gamble on the performance of a thermal engine.

**Quantum error correction:** Nakata et al. have two results about 1. decoding general quantum error correcting codes (QECCs) and 2. measurement-induced phase transitions (MIPTs) and quantum error correction (QEC). As for the former, most QECCs in quantum information are so-called stabilizer codes. However, theoretical physics has recently pointed out close relations between non-stabilizer codes and quantum chaos, raising a question about decoding non-stabilizer codes. In this study, we succeeded in providing two decoders that are applicable to non-stabilizer codes in the form of quantum circuits, and clarified its complexity.

About the latter, MIPTs are dynamical phase transitions that are induced by a series of projective measurements in random quantum circuits. MIPTs have been studied from various perspectives in quantum many-body physics. In this study, we closely investigated the MIPTs from the viewpoint of QEC and found a new phase transition that can be characterized by the performance of QEC. As the newly discovered phase transition was previously unknown, this result may open a new frontier between quantum information and many-body physics.

**Quantum communication:** A quantum internet is the ultimate form of quantum information processing, enabling implementation of various quantum information processing tasks on a global scale. However, numerous challenges must be solved to realize the quantum internet. The most crucial one is the realization of quantum repeaters, which are indispensable for the faithful transfer of quantum information over long distances. Quantum repeaters, as counterparts to repeaters, extenders and boosters in conventional communication, are needed to overcome loss and noise in the quantum communication channels composing a quantum network. Azuma et al. described the conceptual framework, architecture, and experimental progress toward realization of quantum repeaters. They also discussed various proposals for the near future to overcome fundamental limitations on the communication efficiency of point-to-point quantum communication. Finally, an overview was given to place quantum repeaters in the broader context of designing and realizing the quantum internet.



# Quantum Black Holes from Quantum Information

## [Principal Investigator]

Norihiro Iizuka (Osaka 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)]

Sunil Kumar Sake (Osaka University)

Nicolò Zenoni (Osaka University)

Group B01 aims to elucidate the quantum theory of black holes using gauge-gravity correspondence and quantum information. For that purpose, we study various aspects of black holes and their possible holographic dual, such as SYK model and IP model. In addition, we study holographic complexity, Petz map, bulk reconstruction, weak gravity conjecture, and black hole microstates. Iizuka, together with Anegawa, Sake, and Zenoni, investigated holographic quantum complexity in de Sitter (dS) space in two-dimensional Jackiw-Teitelboim (JT) gravity [1]. They conclude that the holographic complexity using the WdW action is superior to the holographic complexity using Volume in 2-D JT gravity. Anegawa and Iizuka also studied in [2] how the hyperfast growth of holographic complexity in de Sitter spacetime is affected under a small and early perturbation. Zenoni, together with Auzzi, Nardelli, and Ungureanu, also studied holographic volume complexity in a class of asymptotically AdS geometries which include de Sitter bubbles in their interior. [3]. Sake, together with Nanda and Trivedi, analyzed the problem of how physical time arises in dS space in JT gravity [4] and proposed that the dilaton plays the role of time and discussed the normalizability of the physical states.

Iizuka, along with Anegawa, Mukherjee, Sunil, and Trivedi, systematically investigated the sparse random matrices and the spectral statistics, level spacing, OTOCs, SFF, and others and their relationship with the Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) [5]. In [6], Anegawa, Iizuka, and Sake analyzed the behavior of a model called the local SYK model under the triple scaling limit. The results show that the local SYK model reproduces the same interesting features as the SYK model, which are also related to a particular bulk gravity theory.

Iizuka, together with Nishida, studied the Krylov complexity of the IP matrix model in [7, 8] and showed that the Krylov complexity increases exponentially with time in the parameter region where the model exhibits black hole properties. To the best of our knowledge, this example of the IP matrix model is the first concrete demonstration of exponential growth of Krylov complexity in a matrix model.

Ugajin studied the geometry which is realized by making AdS black hole and de Sitter space entangled using QFT degrees of freedom in [9]. Also, he studied the Petz recovery map which is anticipated to play a crucial role in reconstructing the black hole interior from Hawking radiation, in the random unitary model as well as the SYK model in [10].

Terashima and Sugishita investigated a concrete method of reconstructing quantum gravity theory from CFT in the

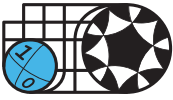
AdS/CFT correspondence [11]. They demonstrated that the subregion duality fails to hold due to the non-perturbative effect of quantum gravity, which they call subregion complementarity.

In [12], Noumi et al studied the spectrum of charged black holes in quantum electrodynamics, motivated by a conjectured quantum gravity constraint called the weak gravity conjecture (WGC). In particular, they demonstrated that the extremal condition characterizing the allowed black hole charge satisfies a certain monotonicity expected from the WGC, providing evidence for the conjecture. Also, they extended the analysis to include quantum gravitational corrections and found an interesting similarity between positivity bounds on scattering amplitudes obtained in the S-matrix theory and the aforementioned monotonicity of black hole extremality. Besides, Noumi published [13, 14] on theoretical and phenomenological aspects of the S-matrix theory in gravity theory and also [15] on primordial non-Gaussianity as a probe of high energy physics.

Shigemori studied supergravity solutions that describe microstates of black holes, in particular the ones that contain codimension-2 sources [16]. Codimension-2 sources have non-trivial U-duality monodromies that twist spacetime around them. He wrote down examples of exact solutions that involve multiple codimension-2 sources with anti-commuting monodromies.

- [1] T. Anegawa *et al.*, JHEP **06**, 213 (2023).
- [2] T. Anegawa and N. Iizuka, JHEP **08**, 115 (2023).
- [3] R. Auzzi *et al.*, Phys. Rev. D **108**, 026006 (2023).
- [4] K. K. Nanda *et al.*, arXiv:2307.15900 [hep-th].
- [5] T. Anegawa *et al.*, JHEP **11**, 234 (2023).
- [6] T. Anegawa *et al.*, JHEP **10**, 160 (2023).
- [7] N. Iizuka and M. Nishida, JHEP **11**, 065 (2023).
- [8] N. Iizuka and M. Nishida, JHEP **11**, 096 (2023).
- [9] V. Balasubramanian *et al.*, arXiv:2308.09748 [hep-th].
- [10] Y. Nakayama *et al.*, PTEP **2023**, 123B04 (2023).
- [11] S. Sugishita and S. Terashima, arXiv:2309.04231 [hep-th].
- [12] Y. Abe *et al.*, JHEP **09**, 024 (2023).
- [13] T. Noumi and J. Tokuda, JHEP **06**, 032 (2023).
- [14] K. Aoki *et al.*, arXiv:2305.10058 [hep-th].
- [15] S. Aoki *et al.*, arXiv:2312.09642 [hep-th].
- [16] R. Nemoto and M. Shigemori, arXiv:2312.16384 [hep-th].





# Understanding quantum black holes through the study of artificial quantum matter

## [Principal Investigator]

Masaki Tezuka (Kyoto University)

## [Co-Investigator]

Shuta Nakajima (Osaka University)

Eriko Kaminishi (Keio University)

Takashi Mori (RIKEN)

Daisuke Yamamoto (Nihon University)

## [ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Kazuya Yamamoto (Kyoto University)

Giacomo Marmorini (Nihon University)

## [Research Collaborators]

Ippei Danshita (Kindai University)

Kazuaki Takasan (University of Tokyo)

Juan Pablo Bayona Pena (Kyoto University)

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

As a progress in this year, Nakajima and Yamashita have achieved Fermi degeneracy of  ${}^6\text{Li}$  (fermionic isotope of lithium) atoms, following the Bose-Einstein condensation of the Feshbach molecules  ${}^6\text{Li}_2$  achieved in the previous year. In parallel, we have constructed and evaluated a light source and optical system to realize the observation of the measurement-induced phase transition and the measurement of the out-of-time-ordered correlation function (OTOC). For the preparation of an optical lattice system, which is the platform for both the observation of the measurement-induced phase transition and the measurement of the OTOC, we constructed the optical system of the optical lattices and evaluated the optical lattice potential by confirming the atomic wave diffraction patterns in the x- and y-axes using the momentum kick with a pulsed lattice (Figure 1). We also succeeded in observing molecular formation and atomic loss resonance by photo-association in a Fermi degenerate  ${}^6\text{Li}$  atomic gas in an optical trap which is necessary to realize the measurement-induced phase transition of atoms in the optical lattice. In collaboration with Yusuke Koyama and Yuki Kawaguchi (Nagoya Univ.) and Kazuya Fujimoto (Tokyo Institute of Technology), Nakajima proposed a method to realize topological phases

belonging to the Altland-Zirnbauer class using cold atomic systems [1].

In collaboration with Masanori Hanada (Queen Mary Univ. of London), Junyu Liu (Univ. of Chicago), and Enrico Rinaldi (Quantinuum and RIKEN), Tezuka published a paper proposing a method to evaluate, by using classical computers, the effect of cut-offs in simulating bosonic systems with quantum computers [2]. Also, in collaboration with Antal Jevicki and Xianlong Liu (Brown Univ.), M. Hanada, and E. Rinaldi, Tezuka observed a striking quantitative coincidence between the spectral statistics of the Sachdev-Ye-Kitaev model with randomly coupled fermions and a model of quantum spins with random interactions between spin operators [3].

Mori, in collaboration with Wen Wei Ho (National Univ. of Singapore), Dmitry A. Abanin (Princeton Univ.), and Emanuele G. Dalla Torre (Bar-Ilan Univ.), published a review article on the nonequilibrium dynamics of classical and quantum many-body systems periodically driven by external fields [4]. In collaboration with Tatsuhiko Shirai (Waseda Univ.), Mori also found a close relation between decoherence in open systems and operator spreading dynamics in isolated systems, and, based on it, revealed how decoherence takes place in open quantum many-body systems [5].

Yamamoto and Marmorini, in collaboration with Hayato Motegi and Nobuo Furukawa (Aoyama Gakuin Univ.), discovered a novel mechanism for spontaneous symmetry breaking of two-dimensional systems with a continuous symmetry, by studying an alkaline earth metal atomic gas system with SU(3) symmetry and particle number ratio between the components controlled [6]. Yamamoto also proposed a new method for efficiently cooling down such cold atomic gases with SU(N) symmetry to quantum regime with Katsuhiko Morita (Tokyo Univ. of Science) [7].

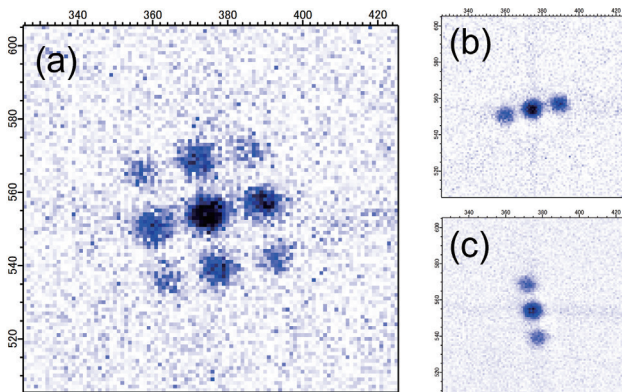
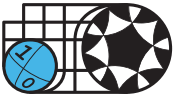


Figure 1: TOF images of  ${}^6\text{Li}$  atoms diffracted by pulsed lattice (TOF=1.2 ms, pulse length=2.5  $\mu\text{s}$ ). (a) Diffracted by pulsed x- and y- lattice potentials. (b) Diffracted by pulsed x-lattice. (c) Diffracted by pulsed y-lattice.

- [1] Y. Koyama, K. Fujimoto, S. Nakajima, and Y. Kawaguchi, *Phys. Rev. Research* **5**, 043167 (2023).
- [2] M. Hanada, J. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, *Mach. Learn.: Sci. Technol.* **4**, 045021 (2023).
- [3] M. Hanada, A. Jevicki, X. Liu, E. Rinaldi, and M. Tezuka, arXiv:2309.15349.
- [4] W. W. Ho, T. Mori, D. A. Abanin, and E. G. Dalla Torre, *Ann. Phys.* **454**, 169297 (2023).
- [5] T. Shirai and T. Mori, arXiv:2309.03485.
- [6] H. Motegi, G. Marmorini, N. Furukawa, and D. Yamamoto, *Phys. Rev. Research* **5**, L022056 (2023).
- [7] D. Yamamoto and K. Morita, arXiv:2311.08014.



# 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 in our universe consist purely of spacetime curvature. Nevertheless, they possess thermodynamic properties just like ordinary matter around us. Such thermodynamic aspects of black holes are believed to originate from fundamentally quantum mechanical nature of our world. The purpose of B03 group is to understand basic properties of quantum black holes by incorporating quantum information into general relativity.

Ishibashi and Maeda, together with Iizuka in B01, studied the attractor mechanism for non-charged rotating extremal black holes [1] and found that the near-horizon geometry must be locally the same as that of Myers-Perry black holes. Ishibashi, Maeda and Okamura [2] considered how to formulate the semiclassical Einstein equations within the framework of AdS/CFT correspondence and found that AdS spacetime can be unstable due to the back-reaction of strongly coupled CFT. Ishibashi and his collaborators [3] have shown that a stationary rotating black hole must be axisymmetric---the property known as the black hole rigidity---in any diffeomorphism invariant theory of vacuum gravity in the sense of effective field theory.

The quantum focusing conjecture was proposed as a quantum version of the classical focusing theorem. It was not known whether the conjecture is true even for old black holes for which the entanglement entropy deviates from the thermal entropy. By using a formula from the quantum information and holography, Matsuo showed that the quantum focusing conjecture holds even for such old black holes [4]. He also studied effects of quantum gravity in black holes by using string theory. He constructed a model of the transition between black holes and strings, and showed that black holes can approximately be described as a bound state of strings even at low temperature [5].

One of the important purposes of B03 group is to understand holographic relationships between black holes and various phenomena occurring in astrophysical and condensed matter systems. Murata and Kinoshita, together with collaborators, proposed a method to generate null

geodesics in asymptotically AdS spacetime by manipulating the source in the corresponding quantum field theory [6]. In particular, for the black hole case, they showed that the photon surface in a dual geometry can be probed by a manipulation of the source in the field theory (see Figure and also Research Highlight by Kinoshita). Murata and his collaborators also discovered a new instability in rotating black strings [7], in which for certain injected waves, the reflected wave can continue to be amplified exponentially. They have also constructed new black string solutions which are candidates for the end point of the instability [8] [9]. Murata, together with members in B01, C03 and other collaborators, studied the Krylov complexity of a billiard system [10] and found a correlation between the variance of the Lanczos coefficient and the Lyapunov exponent of the system.

Kinoshita and his collaborator [11] derived the time dilation formula for non-inertial charged quantum clocks in electromagnetic fields, as an extension of their previous work on the proper time observable for a quantum clock in a weak gravitational field.

Ishibashi and his collaborators [12] studied the phase structure of quantum improved black holes in the asymptotic safe gravity and found a new type of the phase transition between small and large quantum improved Schwarzschild-AdS black holes.

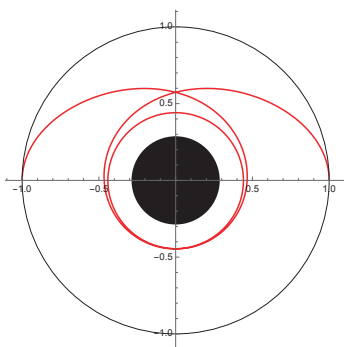
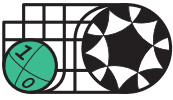


Fig. 1  
a method to generate null geodesics in asymptotically AdS spacetime by manipulating the source in the corresponding quantum field theory [6]

- [1] N. Iizuka, A. Ishibashi, and K. Maeda, *JHEP* **08** (2023) 177.
- [2] A. Ishibashi, K. Maeda, and T. Okamura, *JHEP* **05** (2023) 212.
- [3] S. Hollands, A. Ishibashi, and H. S. Reall, *Commun. Math. Phys.* **401** (2023), 2757.
- [4] Y. Matsuo, *JHEP* **12** (2023) 050.
- [5] Y. Matsuo, *Phys. Rev. D* **107** (2023) 126003.
- [6] S. Kinoshita, K. Murata, and D. Takeda, *JHEP* **10** (2023) 074.
- [7] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, *JHEP* **01** (2023) 147.
- [8] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, *JHEP* **02** (2023) 069.
- [9] O. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, *JHEP* **05** (2023) 041.
- [10] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, *JHEP* **11** (2023) 040.
- [11] T. Chiba, and S. Kinoshita, *Phys. Rev. D* **108** (2023) 044036.
- [12] C-M. Chen, Y. Chen, A. Ishibashi, and N. Ohta, *Class. Quant. Grav.* **40** (2023) 21, 215007.





# 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)

## [ExU Postdoctoral Fellows(Research Collaborators)]

Jonathan Harper (YITP, Kyoto University)

## [Research Collaborators]

Kanato Goto (YITP, Kyoto University)

Tomotaka Kitamura (Rikkyo University)

Shoichiro Miyashita (National Dong Hua University, Taiwan)

Kazuhiro Sakai (Meiji Gakuin University)

Takahiro Uetoko (National Institute of Technology, Kushiro College)

Masamichi Miyaji (Nagoya University)

Kenta Suzuki (Rikkyo University)

Shan-Ming Ruan (YITP, Kyoto University)

Ali Mollabashi (IPM - Institute for Research in Fundamental Sciences, Iran)

Pawel Caputa (Warsaw University, Poland)

Zixia Wei (Harvard University)

Takato Mori (YITP, Kyoto University)

The purpose of C01 group is to understand the description of the microscopic quantum universe with the ultimate goal of explaining how the universe emerges from nothing. In particular, we are taking advantage of deep relationships between holographic principle and quantum information to tackle this difficult problem.

First, directly related to this goal, Doi, Harper, Mollabashi, Takayanagi and Taki in C01 found that a quantity called pseudo entropy, appears naturally in holography on a de Sitter space and that it suggests an emergence of the time axis [1]. Pseudo entropy is a quantity that generalizes entanglement entropy to depend on both the initial and final state. Though a de Sitter space is expected to correspond to a non-unitary conformal field theory via holography, it turns out that the entanglement entropy of such a conformal field theory takes a complex value and should be correctly interpreted as pseudo entropy. This quantity corresponds to the length of a time-like geodesic in a de Sitter space, suggesting that the time direction of the universe emerges from pseudo entropy. Applying the same consideration to the anti de Sitter space, it was found that the length of the time-like geodesic corresponds to the time-like entanglement entropy. See Fig. below. Further, Kawamoto, Ruan, Suzuki (Yu-ki) and Takayanagi in C01 proposed a new formulation of de Sitter holography by cutting the de Sitter space into a half to create a time-like boundary [2]. Takayanagi, Taki and Wei in C01, in collaboration with Parzygnat in A01, introduced a new quantity called SVD entropy by modifying the definition of pseudo entropy and found that it serves as an order parameter which distinguishes different quantum phases [3]. Hikida, Taki and Uetoko in C01 analyzed quantum gravity in complexified geometry in collaboration with Chen (Taiwan Univ.) [4]. Applying the gauge-gravity correspondence in the expanding universe, we developed a

method to identify complex geometries that can be used as saddle points, and determined allowable complex geometries in the three-dimensional gravity theory as a concrete example.

In addition, various aspects on gauge-gravity correspondence and quantum gravity theory have been investigated. As an example, the double-scaled Sachdev-Ye-Kitaev (DSSYK) model was studied. In [5], Okuyama and Suzuki (Kenta) in C01 showed that the 1-loop correction to correlators in DSSYK is reproduced from Liouville theory. Further, Okuyama found that the end-of-the-world (ETW) brane and the Weil-Petersson volume appeared in Jackiw-Teitelboim (JT) gravity have natural analogues in DSSYK. Okuyama in C01 also studied the spectral form factor (SFF) in JT gravity. In collaboration with Iizuka in B01, Okuyama and Sakai in C01 considered an n-point generalization of SFF [6]. Sekino, Kitamura and Miyashita in C01 attempt to understand gauge-gravity correspondence in the limit of weak gauge coupling, which has been poorly understood so far. This work is based on a “string bit” picture of superstring theory, proposed by themselves last year, and the goal is to reproduce perturbative expansions in gauge theory from superstring theory. Sugimoto and Suzuki (Yu-ki) in C01 studied ETW branes, which are branes placed at a boundary of spacetime, in string theory [7]. It can be shown that the ETW brane appears in the d dimensional spacetime obtained by the dimensional reduction along one of the spatial directions in d+1 dimensional so-called AdS soliton background. In this study, they developed a method to calculate the tension of the ETW brane and, applying it to M-theory, they obtained evidence of the existence of a new type of the ETW brane in type 0A string theory.

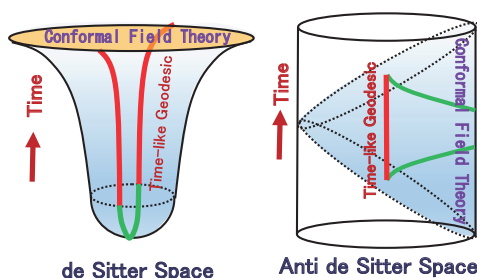
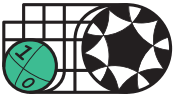


Fig. Time-like geodesic and corresponding quantum information quantity

- [1] K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi and Y. Taki, Phys. Rev. Lett. **130** (2023) 031601.
- [2] T. Kawamoto, S.-M. Ruan, Y.-k. Suzuki and T. Takayanagi, JHEP **10** (2023) 137.
- [3] A. J. Parzygnat, T. Takayanagi, Y. Taki and Z. Wei, JHEP **12** (2023) 123.
- [4] H.-Y. Chen, Y. Hikida, Y. Taki and T. Uetoko, Phys. Rev. D **107** (2023) L101902.
- [5] K. Okuyama and K. Suzuki, JHEP **05** (2023) 117.
- [6] T. Anegawa, N. Iizuka, K. Okuyama and K. Sakai, JHEP **07** (2023) 047.
- [7] S. Sugimoto and Y.-k. Suzuki, arXiv:2312.07891.



# Quantum cosmology experiments in quantum Hall systems

## [Principal Investigator]

Go Yusa (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)

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 [1, 2].

Our experimental system comprises three components: (1) instruments that are operated at a room temperature, such as an arbitrary wave generator, oscilloscope, and spectrum analyzer; (2) a refrigerator with a superconducting magnet that creates an extreme environment; and (3) semiconductor devices that allow us to achieve an equivalent physical system to the quantum universe.

At the end of the last fiscal year, a dilution refrigerator with a minimum temperature of 5 mK and a magnetic field of 12 T, which was purchased with the research funds from this project, was delivered (Figure 1), but due to problems with the refrigerator, we have not yet started electrical measurements on the expanding universe.

Therefore, this year we created devices that are closer to the structure proposed in [2] and proceeded with preliminary studies of expanding edges. In particular, using a special stroboscopic microscope with a time resolution of several hundred ps and a spatial resolution of 1  $\mu\text{m}$ , we have succeeded in visualizing the excited states of the edge and controlling the path of edges by applying the external electric field (paper in preparation). We also summarized our results on pump-probe reflection stroboscopic measurements, which we developed as another tool to visualize edge propagation [3], and succeeded in imaging heat transport along the quantum Hall edges [4].

On the theoretical side, Hotta et al [5]. We established entanglement theory in quantum universe simulators by using expanding quantum Hall system. We investigated Hawking radiation and entanglement behavior predicted by this model assuming that the expansion law of the edge region corresponds to a de

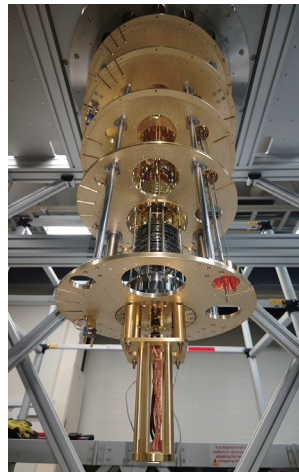


Fig. 1 Inside a dilution refrigerator that achieves an absolute temperature of 5 millikelvin.

Sitter universe. We found the impact of Hawking radiation caused by the edge expansion on autocorrelation functions of the local modes, and confirmed that entanglement death due to Hawking radiation occurs. This behavior of entanglement is related to “quantum to classical transition” in cosmic inflations.

Led by Shibata, we are proceeding with the accurate analysis of quantum many-body problems for large systems including bulk and edges. Using a newly developed time-dependent variational principle calculation, we are analyzing the time evolution of edge excitations. We are investigating the dynamic properties by tracking the electron density oscillations in the fractional quantum Hall state that occur when the edge potential is abruptly changed. The analysis of the time evolution of electron density confirmed the existence of an excitation mode propagating in the boundary region between the bulk and edge states.

Yonekura and coauthors have studied new branes in heterotic superstring theories [6]. These branes are characterized by subtle conserved charges. The authors have constructed exact worldsheet theories describing the near horizon regions of these branes. The findings of this work are consistent with the common statement that any consistent quantum gravity theory contains dynamical objects with all possible charges.

In other works, Yonekura and collaborators also studied mod 2 index in two-dimensional supersymmetric field theories [7], the phase diagram of QCD in the space of temperature and imaginary chemical potential [8], and cosmic strings and dark matter from pure Yang-Mills theory [9].

[1] M. Hotta, J. Matsumoto, G. Yusa, *Phys. Rev. A* **89**, 012311 (2014).

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

[3] A. Kamiyama *et al.*, *Appl. Phys. Lett.* **122**, 202103 (2023).

[4] J. N. Moore, A. Kamiyama, T. Mano, G. Yusa, *Europhysics Lett.* **142**, 16004 (2023) [arXiv:2212.12628].

[5] Y. Nambu, M. Hotta, *Phys. Rev. D* **107**, 085002 (2023).

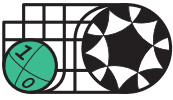
[6] J. Kaidi, K. Ohmori, Y. Tachikawa, K. Yonekura, *Phys. Rev. Lett.* **131**, 121601 (2023) [arXiv:2303.17623].

[7] Y. Tachikawa, M. Yamashita, K. Yonekura, arXiv:2303.17623.

[8] S. K. Kobayashi, T. Yokokura, K. Yonekura, *JHEP* **08**, 132 (2023) [arXiv:2305.01217].

[9] M. Yamada, K. Yonekura, *JHEP* **09**, 197 (2023) [arXiv:2307.06586].





# Gravitation and cosmology: principles and applications based on quantum information

## [Principal Investigator]

Tetsuya Shiromizu (Nagoya University)

## [Co-Investigator]

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

## [ExU Postdoctoral Fellows (Research Collaborators)]

Daisuke Yoshida (Nagoya University)

## [Research Collaborators]

Sumio Yamada (Gakushuin University)

This group is dedicated in foundational research aimed at understanding the origin of the universe and its accelerated expansion, as well as the internal structure of black holes. Our approach encompasses both higher-dimensional and four-dimensional spacetime perspectives.

Tanahashi, in collaboration with members of the B01 and B03 teams, analyzed the properties of Krylov complexity, a newly proposed measure of quantum chaos, in classical and quantum billiard systems [1]. This research revealed strong correlations of this quantity with other indicators of chaos. It is expected to contribute to verifying several conjectures in black hole quantum theory and AdS/CFT correspondence.

In four-dimensional spacetime, a static solution to the vacuum Einstein equations known as the C-metric represents a pair of black holes accelerated by a cosmic string. Nozawa and his collaborator constructed a new C-metric in the presence of a phantom scalar field with potential, revealing that it represents a pair of accelerated wormholes in AdS [2]. This research provides deep insights into the elucidation of higher-dimensional brane cosmology and the throat structure of wormholes.

Izumi and others extended the proof of the area inequality for the attractive gravity probe surfaces (AGPSs) into higher dimensions [3]. Furthermore, Shiromizu and Izumi have applied these studies to the expanding universe [4]. This research has progressed with an emphasis on applications to the Ryu-Takayanagi formula for holographic entanglement entropy. A closely related concept with AGPSs is the photon surface, which is defined as a timelike surface where any photon emitted into arbitrary tangential direction from an arbitrary point on it continues to stay [5]. Yoshino examined static perturbations of a charged black hole, and demonstrated the potential existence of non-spherically symmetric photon surfaces. This provides a fundamental study for the verification of general relativity.

Meanwhile, Kobayashi examined the Newtonian limit of general theories of gravity which include degrees of

freedom for a scalar obeying the elliptic equation, as in the effective theory of Horava-Lifshitz gravity regarded as an effective theory for quantum gravity, and discussed their experimental and observational verifiability [6]. Izumi published a booklet summarizing the analysis of various gravity theories [7]. Additionally, Yoshida analyzed the properties related to the maximum amount of entropy in a universe without an initial singularity, clarifying the differences between entropy-based singularity theorems and traditional geometric singularity theorems [8].

This year, with B03 team members and other researchers, we hosted an international conference on general relativity and gravity (JGRG32) at Nagoya University from November 27 to December 1 in a face-to-face style. With 240 participants from domestic and abroad, the conference concluded with the invited talk by the head investigator Takayanagi on the latest understanding of the accelerated expanding universe. Furthermore, we held small workshops “General Relativity and Geometry (GRGeo)” on February 8–9 at Nagoya University, and “Spacetime and Gravity” on March 4–5 at Osaka Institute of Technology, respectively. Both events deeply delved into the research of extreme universe and facilitated interdisciplinary exchanges centered around invited lectures from core researchers in each field.

- [1] K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, R. Watanabe, JHEP 2023, 40 (2023).
- [2] M. Nozawa and T. Torii, Phys. Rev. D **108**, 064036 (2023).
- [3] K. Izumi, Y. Tomikawa, T. Shiromizu, H. Yoshino, PTEP 2023, 043E01 (2023).
- [4] T. Shiromizu, K. Izumi, PTEP 2023, 103E02 (2023).
- [5] H. Yoshino, arXiv:2309.14318[gr-qc].
- [6] T. Kobayashi and T. Hiramatsu, arXiv:2310.11041 [gr-qc].
- [7] 泉、重力理論解析への招待:古典論から量子論まで (SGC ライブラリ 188), サイエンス社 (2023)
- [8] T. Kanai, K. Nomura, D. Yoshida, Phys.Rev. D **108**, 104024 (2023).

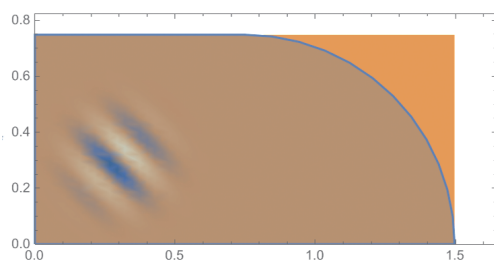


Fig. 1  
An example of the initial wave function used in the calculation of Krylov complexity. It corresponds to a point particle moving on a chaotic billiard table.

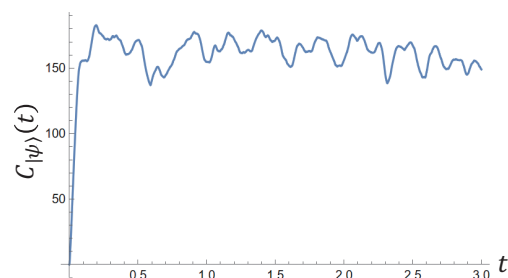


Fig. 2  
Time dependence of the Krylov complexity  $C_{|\psi\rangle}$ , obtained from the initial wave function of Figure 1. This quantifies the extent to which the wave function becomes complex over time.



# 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)]

Pratik Nandy (YITP, Kyoto University)  
Dongsheng Ge (Osaka University)

## [Research Collaborators]

Takahiro Doi (Kyoto University)  
Kazunobu Maruyoshi (Seikei University)  
Akira Matsumoto (YITP, Kyoto University)  
Lento Nagano (ICEPP, University of Tokyo)  
Ryo Suzuki (Southeast University)  
Hiroyuki Tajima (University of Tokyo)  
Shouchiro Tsutsui (iTHEMS, RIKEN)  
Masahito Yamazaki (KIPMU, University of Tokyo)  
Yutaka Yoshida (Meiji Gakuin University)

Nishioka (PI), in collaboration with Okuda (Co-I) and graduate students Kawabata and Yahagi, developed various methods to construct (1+1)-dimensional conformal field theories of Narain type from quantum error-correcting codes on non-binary fields and commutative rings [1]. Additionally, Nishioka, Okuda, and Kawabata newly constructed a fermionic conformal field theory from quantum error-correcting codes [2] and proposed a systematic method using quantum error-correcting codes to explore conformal field theories with supersymmetry [3].

Furthermore, Nishioka, together with graduate students Shimamori and Fujimura, analytically calculated the second Renyi entropy of (1+1)-dimensional fermionic systems with massless Thirring interactions, which is known as the bosonization method, revealing the quantum entanglement structure [4].

Ito (Co-I) and Matsumoto proposed three methods to calculate the spectrum of composite operators in gauge field theories described in the Hamiltonian formalism. They demonstrated the consistency of the three results and systematically examined the advantages and disadvantages of each method through estimates of systematic errors [5]. Their research involved extending the well-discussed Schwinger model to include two types of fermions and using the Density Matrix Renormalization Group (DMRG) method. Additionally, Ito [6] utilized the Quantum Imaginary Time Evolution (QITE) algorithm in quantum computation to calculate thermodynamic quantities from thermal quantum pure states, demonstrating the utility of the method by comparing it with analytical solutions. Both studies have expanded to calculations in parameter regions where sign problems arise with conventional methods.

Matsuo (Co-I) conducted a comprehensive study of two-dimensional integrable systems applicable to quantum computation. In particular, Matsuo has been researching the quantum toroidal algebra, a generalization of two-dimensional conformal symmetry (Virasoro algebra), for the past decade and published a review paper summarizing these results [7]. Additionally, Matsuo proposed a generalized Calogero model to describe the non-commutative quantum Hall effect, which is believed to generate quantum elements without the need for quantum error correction. He also elucidated the symmetry (Kac-Moody algebra) describing this system [8].

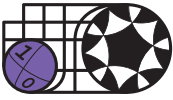
Honda (Co-I) conducted a wide range of research in field quantum theory, cosmology, condensed matter physics, and quantum computation. In the theory of scalar fields on de

Sitter space, Honda investigated the properties of perturbation series in time for correlation functions, applied the Borel summation method, and discussed the long-time behavior [9]. In various 5-dimensional field theories without supersymmetry, Honda predicted the existence of new phase transitions through a combination of deformations from superconformal field theory and topological arguments [10]. In research related to condensed matter physics, Honda clarified that the field theory of layered BF type, known as the BF theory of the leaves, corresponds to a theoretical analogue of the phase with degeneracy of the same ground state in lattice models describing fractons [11]. Currently, Honda is conducting research on the phase structure of 4-dimensional SU(2) Yang-Mills theory, applications of quantum computation to field quantum theory, and irreversible symmetries in gravity, and is preparing papers. He has delivered two intensive lectures, six invited talks at international conferences, two invited talks at domestic conferences, and one outreach activity on the above research topics.

Continuing from the previous year, we organized the school, “A novel numerical approach to quantum field theory 2023,” held at Osaka University. For details, please refer to the research meeting report.

- [1] Y. F. Alam, K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, S. Yahagi, *JHEP* **12**, 127 (2023).
- [2] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, arXiv:2308.01579.
- [3] K. Kawabata, T. Nishioka, T. Okuda, *Phys. Rev. D* **108**, L081901 (2023).
- [4] H. Fujimura, T. Nishioka, S. Shimamori, *Phys. Rev. D* **108**, 125016 (2023).
- [5] E. Itou, A. Matsumoto, Y. Tanizaki, *JHEP* **11**, 231 (2023).
- [6] J. W. Pedersen, E. Itou, R. Y. Sun and S. Yunoki, arXiv:2311.11616.
- [7] Y. Matsuo, S. Nawata, G. Noshita, R.-D. Zhu, *Phys. Rept.* **1055**, 1–144 (2024).
- [8] J.-E. Bourguin and Y. Matsuo, arXiv:2401.03087.
- [9] M. Honda, R. Jinno, L. Pinol and K. Tokeshi, *JHEP* **08**, 060 (2023).
- [10] M. Akhond, M. Honda and F. Mignosa, arXiv:2307.13724.
- [11] H. Ebisu, M. Honda and T. Nakanishi, arXiv:2310.06701.





# 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 aim of research group D02 is to gain a deeper understanding of various interesting phenomena in condensed matter systems as well as to develop interdisciplinary research of the ExU project by focusing on the underlying entanglement and mathematical structures behind physics associated with tensor networks (TNs) and quantum many-body dynamics. This year, a new ExU PD, Dr. Ozaki, joined the D02 group at the University of Tokyo, switching with the former ExU PD, Dr. Furuya, who was promoted to lecturer at Saitama Medical University. Here, we would like to explain some highlights from this year's results.

First, regarding the relationship between the multiscale entanglement renormalization ansatz(MERA) and the holographic principle for quantum gravity, Okunishi, in collaboration with Takayanagi of group C01, demonstrated that the Bethe lattice Ising model, which is a classic model of phase transitions, provides an essential theoretical platform to study the prototype structure of the holographic renormalization [1]. More precisely, we clarified the holographic renormalization group flow of the effective magnetic field on the edge of the Bethe lattice corresponding to the AdS boundary, the mechanism of the power-law decay of the edge spin correlation function, and its connection to the hyperbolic lattice structure and the p-adic AdS/CFT. Although the Bethe lattice model is classified as a tree-type TN, its analytical and intuitive description can be essential for further investigations of the holography in MERA-like TNs with complex loop structures. On the practical side, Yosprakob successfully implemented the Grassmann tensor renormalization group for a two-dimensional multi-flavor Schwinger model and released a Python package for Grassmann tensor operations [2]. Since this result opens a new practical way to multi-flavor systems, it is expected to stimulate further collaborations with other lattice field theory groups in the ExU project. Also, the TN has an intrinsic connection with quantum information. Incorporating the idea of branching MERA, Ueda et al. proposed a novel entanglement control method in combining the TN and the variational quantum eigenvalue solver for so-called NISQ devices and then demonstrated benchmark calculations for a non-uniform quantum spin system [3]. For efficient simulation of real-time evolution of one-dimensional quantum many-body systems, Ueda and his collaborators also introduced the quantum circuit representation of a variational state, where two-qubit gates are stacked in a diamond shape so as to satisfy the volume law of quantum entanglement, and verified its effectiveness for a transverse magnetic field Ising chain [4]. On the other hand, Harada et al. developed some interesting applications relevant to the machine learning field, such as a network structure optimization method based on the minimum

mutual information principle for the tree TN, an extraction technique of dependencies among random stochastic variables, as well as the finite-size scaling method based on neural networks [5].

As research on the condensed matter side, Katsura et al. systematically constructed quantum spin models exhibiting quantum many-body scars (QMBS) by exploiting restricted spectrum generating algebra and integrable boundary states [6]. In collaboration with Kunimi of the E02 group and Tomita of the E01 group, they proposed an experimental scheme to realize quantum spin systems with QMBS using Rydberg atoms [7]. Moreover, the ExU PD, Ozaki, and Katsura succeeded in obtaining the exact solution of the Majorana SYK model in the clean limit, which leads to a closed-form expression for the out-of-time-ordered correlator. On the other hand, Hotta et al. continued to study the gauge structure naturally expected in the quantum state of solid-state physics systems. In collaboration with experimentalists, they notably showed that a thermal Hall effect can be realized by the SU(3) gauge structure originating from the long-period magnetic structure of three sublattices [8]. Furthermore, Hotta, together with Gohlke et al., applied TPQ-MPS, a method for expressing the thermal equilibrium state as a matrix product state, to a two-dimensional system for the first time and accurately calculated the specific heat of the Kitaev honeycomb model, which is known for the appearance of Majorana particles [9].

As seen above, we have successfully developed our research projects, including collaborations with other groups, and obtained interesting results. Moreover, our projects involve such a topical problem as the integrable SYK models, which attracted the intensive attention of researchers from various research fields at the YITP international long-term workshop in September. We hope the above developments will lead to a breakthrough for the ExU collaboration.

- [1] K. Okunishi and T. Takayanagi, PTEP **2024**, 013A03 (2024). (arXiv:2310.12601)
- [2] A. Yosprakob., J. Nishimura, and K. Okunishi., JHEP **11**, 187 (2023), A. Yosprakob, SciPost Phys. Codebases **20** (2023).
- [3] R. Watanabe, K. Fujii, and H. Ueda, arXiv: 2305.06536.
- [4] S. Miyakoshi, T. Sugimoto, T. Shirakawa, S. Yunoki, and H. Ueda, arXiv: 2311.05900.
- [5] R. Yoneda and K. Harada, Phys. Rev. E **107**, 044128 (2023).
- [6] K. Sanada, Y. Miao, and H. Katsura, Phys. Rev. B **108**, 155102 (2023).
- [7] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, arXiv:2306.05591.
- [8] H. Takeda, *et al.* Nat. Comm. in press. (arXiv: 2304.08029)
- [9] M. Gohlke, A. Iwaki, C. Hotta, SciPost Physics **15**, 206 (2023)



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

### [Principal Investigator]

Hiroyasu Tajima (The University of Electro-Communications / JST PRESTO)

In recent years, Resource Theory of Asymmetry (RTA) has been rapidly developing a comprehensive analysis of the effects of symmetry on quantum mechanics. RTA treats quantum operations which are covariant with respect to given symmetry as *free operations*, and defines the quantum fluctuation of conserved quantity corresponds to the given symmetry as *resource*. Recently, I found several trade-off relations in RTA (PRL2018, QIP2020, PRL2021, etc.). The goal of this project is to unify and extend the trade-off relations and apply them to find several useful theorems in quantum gravity and condensed matter theory. The last academic year, I obtained a universal trade-off structure between symmetry, irreversibility, and quantum coherence (SIQ tradeoff:[1], QIP2023talk, APS March meeting invited talk, etc), and found that the tradeoff can be applied to Hayden-Preskill model etc.

In this academic year, I tried to extend the SIQ tradeoff and to apply it to various targets. As results, I obtained the following things:

- In an attempt to extend the SIQ tradeoff to continuous systems, I succeeded in extending one of the corollaries, the Wigner-Araki-Yanase (WAY) theorem, which is a restriction from conservation laws to measurements, to continuous systems [2]. This result corresponds to a

solution of a long-standing open problem that had remained unsolved for 60 years since the birth of the WAY theorem in 1960. This result was selected as Featured in Physics and reported in Nikkei and two foreign scientific journals (New Scientists and Physics.org).

- Extension of RTA to non-iid regions [3], [4] (1 article in Nikkei), and extension of RTA to arbitrary finite groups and arbitrary Lie groups [5], [6].
  - I showed that the irreversibility measure  $\delta$  of the SIQ tradeoff recovers various existing measures of error and disturbance in quantum measurements, as well as OTOC, the measure of quantum chaos. As a result, I clarified in a universal restriction on them from the conservation laws [7].
- In addition, by using similar techniques to SIQ tradeoff, I obtained a universal limit of error mitigation [8] (1 newspaper article).

[1] H. Tajima, et.al. arXiv:2206.11086 (2022)

[2] Y. Kuramochi and H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 210201 (2023)

[3] K. Yamaguchi and H. Tajima, Phys. Rev. Lett. **131**, 200203 (2023)

[4] K. Yamaguchi and H. Tajima, Quantum **7**, 1012 (2023).

[5] D. Kudo and H. Tajima, Phys. Rev. A **107**, 062418 (2023).

[6] T. Shitara and H. Tajima, arXiv:2312.15758 (2023).

[7] H. Emori and H. Tajima, arXiv:2309.14172 (2023).

[8] R. Takagi, H. Tajima and M. Gu, Phys. Rev. Lett. **131**, 210602 (2023).



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

### [Principal Investigator]

Masaki Owari (Shizuoka University)

Recently, unitary t-design, a probability measure on unitary groups that approximates Haar measure, has attracted much attention. Random unitary transformations based on t-design are essential not only for various quantum information processing such as quantum communication and benchmarking of quantum circuits, but also for approximating quantum chaotic systems and for Markovization of environmental systems. Although existing t-design generation protocols are designed as polynomial-time algorithms on a quantum computer, it is difficult to implement them on a quantum many-body system. Therefore, the purpose of this study is to find a physically more natural way to generate t-designs in quantum many-body systems, with applications such as Markovianization in mind.

We first gave a general recipe to construct an approximate t-designs of arbitrary closed subgroups of unitary groups, and proved that random unitary transformations constructed by this method converge to t-designs exponentially fast with respect to the size and order  $t$  of the system. By combining quantum control theory with this method, we proposed an algorithm for generating t-designs on quantum many-body systems by indirect control, in which random unitary transformations to small subsystems

and time evolution by Hamiltonian are repeated. Furthermore, numerical simulations show that this algorithm converges fast enough for typical 1D spin chains up to about 10 qubits.

In the above algorithm, random unitary transformations were generated by randomizing parameters such as the angles of the rotation gates on the small subsystem and the time at which the gate is applied. These parameters can also be used as variational parameters for variational quantum algorithm. Therefore, we numerically simulated a variational quantum eigensolver, a variational quantum computation for calculating the lowest eigenvalue of observables, using the parameterized quantum circuit from the algorithm described above, and showed that its performance is not significantly different from that of existing parameterized quantum circuits. Unlike existing circuits, the parameterized quantum circuit proposed here can be implemented by indirect control of the quantum many-body system, which is likely to be more robust to noise from environmental systems. Therefore, it is expected to be an effective solution to the problem of insufficient cooling of superconducting quantum circuits due to the increased number of wires used to control the qubits.





## Information-theoretical analysis of one-dimensional tensor network

### [Principal Investigator]

Kohtaro Kato (Nagoya University)

Tensor networks are effective tools for investigating the states of quantum many-body systems in numerical and analytical research. Depending on the entanglement structure of the many-body state, various classes of tensor networks has been proposed to use. However, except for Matrix Product States (MPS), which can capture one-dimensional (1D) gapped ground states, the boundary of their descriptive capabilities remains largely unknown.

This research aims to characterize the descriptive capabilities of tensor networks useful for 1D finite-temperature states called Matrix Product Operators (MPO) using thermal equilibrium states. In the analysis of MPS, the method of the spatial renormalization group associates MPS with renormalization fixed-points and characterizes the descriptive capabilities of general MPS using the classification theory of the fixed-points. Recently, an analogous concept of the “renormalization fixed points” for MPO have been proposed for MPO, showing that such fixed-points are beautifully classified by “thermal equilibrium states of commuting Hamiltonians + MPO algebra”. MPO algebra is related to the theory of anyons describing 2D topological ordered phases, and this resembles MPO can also describe the 1D boundary states of topologically ordered phases.

However, it remained unresolved whether renormalization operations leading to such MPO fixed-points exist or not.

In this research, we examine if one can construct a renormalization flow for MPO. To do so, we first establish conditions for the existence of recoverable renormalization (compression) operations (trace-preserving completely positive maps) for general quantum states (i.e., not limited to MPO)[1]. We then use the derived condition and numerically find that generically MPO do not seem to have a renormalization flow. We furthermore reveal that there are specific counterexamples where renormalization operations do not converge. Consequently, it became apparent that the characterization of MPOs does not follow the same approach as MPS. Future efforts will focus on analyzing the differences between renormalizable and non-renormalizable MPOs.

[1] K. Kato arXiv:2309.07434 (2023)



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

### [Principal Investigator]

Yasuhiro Shimizu (Nagoya University)

Electrons in solid are regarded as the highly condensed quantum system, while they usually behave as classical particles through the phase transition. To avoid the phase transition that involves spontaneous symmetry breaking and maintain strong quantum fluctuations, we have to prepare the highly degenerate ground state and the ideal electron system without defects. The macroscopic quantum fluctuations are highlighted as the quantum Hall effect and quantum spin liquid that involve topological quantum states. Nuclear magnetic resonance (NMR) is utilized as the powerful probe for detecting the local symmetry breaking.

We have investigated electronic symmetry breaking via the hyperfine interactions between nuclear spins and electrons, which include a variety of information in the local symmetry and low energy excitation. Our target materials are the system having macroscopic quantum entanglements such as quantum Hall effects and quantum spin liquids, which carry anyons that obey fractional quantum statistics and are useful to the fault-tolerant quantum computation. We have observed the quantized motion of Dirac fermions in the NMR relaxation rates at high fields and ultra-low temperatures. In some frustrated magnets regarded as quantum spin liquid candidates having strong spin-orbit coupling, we found the excitation characteristic

to spinons compatible to the theoretical proposal.

We have developed the new open quantum many-body system called discrete time crystals that breaks spatial translational symmetry, which is useful to read out the quantum information. Under the Floquet cycle applying the periodic  $\pi$  pulses, we found the double-period response of the time crystal in a quantum spin liquid compound. Surprisingly, the time crystal behavior is robust against the strong perturbation characterized as the deviation from the  $\pi$  pulse. The result implies that the long-range quantum coherence acquires a collective restitution function. We further develop the open many-body quantum systems with emergent spin dynamics through the macroscopic quantum entanglement.



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

### [Principal Investigator]

Takafumi Tomita (National Institute of Natural Sciences, Institute for Molecular Science)

In this research, we perform experiments to generate many-body entanglement states, called “graph states,” which are important resources for quantum error correction and measurement-based quantum computation, via natural time evolution with the interaction between cold Rydberg atoms. Using the “optical tweezers array” technique, in which atoms are individually trapped using locally focused laser beams, we construct a qubit array. We then excite them to a high-energy state called the Rydberg state, which induces long-range interactions between the atoms, thereby creating large-scale entanglements called the graph state. In addition, we implement individual local measurement that do not affect other atoms in the vicinity, and explore the possibility of using the generated graph states as a resource for measurement-based quantum computation.

We have developed a delay line for a pulsed laser to control the interaction time between atoms, conducted individual atom imaging experiments with a low-noise CMOS camera, and developed a laser system for Rydberg excitation. In the delay line development, an appropriate interaction time is required depending on the magnitude of the interaction. Accordingly, the time interval between two laser pulses for excitation and de-excitation corresponding to the start and end of the interaction should be adjusted. As

an optical system that can adjust the delay time, we have developed a Herriott-cell delay line and confirmed that the number of laser reflections between mirrors can be controlled by adjusting the optical path. Experiments using a low-noise CMOS camera to image individual atoms showed that the variance in fluorescence count from single atoms is smaller than that of a conventional EMCCD camera, which is suitable in terms of short-time measurement. These are important fundamental technologies for the generation of the graph states and their measurement.

In addition, in the framework of Publicly Offered Research, we proposed a new experimental scheme for novel spin systems based on Rydberg atomic systems in collaboration with Dr. Masaya Kunimi from Tokyo University of Science. We showed that the Dzyaloshinskii-Moriya interaction can be experimentally implemented by controlling the phase of the lasers that couple the Rydberg states.



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

### [Principal Investigator]

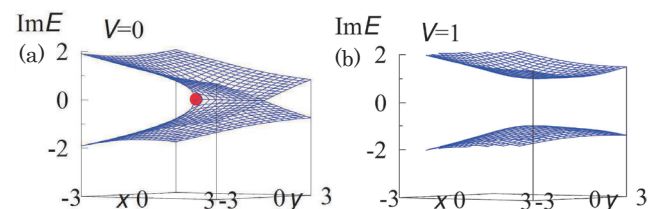
Tsuneya Yoshida (Kyoto University)

Open quantum systems are described by a non-Hermitian matrix and exhibit exotic phenomena such as the emergence of exceptional points. On exceptional points, the matrix becomes non-diagonalizable, which results in the degeneracy of eigenvalues. Exceptional points are robust against perturbations because of non-trivial topology unique to non-Hermitian systems. So far, non-Hermitian topology has been mainly analyzed in non-interacting cases. However, recently, correlated open quantum systems have been fabricated for cold atoms. In addition, such artificial quantum systems allow us to access topological phenomena in a parameter space (e.g., topological pump).

In this project, we have analyzed correlation effects on non-Hermitian topology with keeping open quantum systems in our mind. As the results, we have elucidated that correlation effects result in the reduction of topological classifications in a parameter space[1]. Based on this result, we have elucidated the robustness/fragility of exceptional points against two-body interactions[2].

Furthermore, we have analyzed non-Hermitian skin effects in interacting systems and their dynamics[3-5]. In particular, we have numerically demonstrated that interactions may induce a Liouvillian skin effect[3].

- [1] T. Yoshida and Y. Hatsugai Phys. Rev. B 104, 075106 (2021); Phys. Rev. B 106, 205147 (2022).
- [2] T. Yoshida and Y. Hatsugai Phys. Rev. B 107, 075118 (2023)
- [3] S. Hamanaka, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B 108, 155114 (2023).
- [4] S. Kaneshiro, T. Yoshida, and R. Peters, Phys. Rev. B 107, 195149 (2023).
- [5] T. Yoshida, SB Zhang, T. Neupert and N. Kawakami, arXiv:2309.14111.



(a) [(b)]: Energy eigenvalues in a parameter space for  $V=0$  [ $V=1$ ]. The Hamiltonian parameterized by real values  $x$  and  $y$ . Real value  $V$  denotes the strength of a spin-spin interaction (Reprinted with permission from [2]).





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

## [Principal Investigator]

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

Symmetry plays a crucial role in condensed matter physics and quantum gravity. Particularly, time reversal symmetry stands out as a significant symmetry characterizing systems across dimensions. To elucidate these properties in a broader context, we conducted research on time-reversal symmetry from both perspectives.

The study of quantum anomalies and their relation to topological phases is highly important. However, these discussions primarily focus on the ground states of systems described by Hamiltonians at zero temperature. Especially in the context of non-equilibrium regimes or systems evolved by general quantum channels, neither quantum anomalies nor topological phases are well understood. Hence, we classified the symmetry of fermionic quantum master equations using the Sachdev-Ye-Kitaev (SYK) model, which plays an important role in both contexts. Additionally, we demonstrated how anomalies manifest in dissipative quantum chaos (complex energy level statistics). These findings contribute to advancing the understanding of open-system quantum chaos in condensed matter physics and non-equilibrium topological phases. Furthermore, they shed light on the constraints imposed by symmetry in black hole formation and evaporation in quantum gravity. This work has been published in PRX [1].

In quantum gravity, all symmetries are expected to be approximate global symmetries or gauge symmetries. However, CPT symmetry is rigorously preserved in all quantum field theories as global symmetries, posing a challenge as it is a non-unitary symmetry and difficult to treat as a gauge symmetry. It remained a mystery how CPT symmetry is reconciled with quantum gravity. Thus, we formulated the gauge theory of symmetries involving time reversal and investigated its properties. We discovered that in quantum gravity compatible with statistical mechanics, CPT symmetry is naturally gauged through the formation of wormholes. While it is known in quantum mechanics that the direction of time can be reversed using quantum entanglement, our findings demonstrate the consistency of this fact with the emergent spacetime. Additionally, we found that in a closed universe, quantum mechanics exhibits only real structures, and the complex structure is emergent [2]. These results are crucial as they reconcile CPT symmetry as a gauge symmetry in quantum gravity and provide new insights into relation gravity and quantum mechanics.

[1] K.Kawabata,A.Kulkarni,J.Li, T.Numasawa, S.Ryu, arXiv:2212.

00605[cond-mat.mes-hall], PRX Quantum 4 (2023) 3, 030328

[2] D.Harlow, T.Numasawa, arXiv:2311.09978



# Application of tensor networks to elementary particle physics

## [Principal Investigator]

Shinji Takeda (Kanazawa University)

The main research result this year is to improve the calculation accuracy of physical quantities by incorporating a stochastic noise method into the tensor network coarse-graining algorithms. Conventional coarse-graining algorithms usually employ the truncated singular value decomposition to compress information of a tensor, and it is known that such a truncation causes systematic errors. Moreover, repeating the coarse-graining process complicates the systematic errors, and it makes final error evaluation difficult. To solve this problem, a method was proposed such that it completely eliminates systematic errors by combining it with a stochastic property. Such a stochastic method, however, suffers from controlling statistical errors, and there are no known successful cases so far. In such circumstances, we apply so-called noise method, which is often used in lattice QCD to efficiently compute an inverse matrix, to tensor decomposition/compression calculation. As a result, we confirm that the accuracy of the free energy for 2d Ising model is improved by some orders of magnitude compared to the conventional method that does not include any stochastic elements (see Figure 1).

In addition, this year we succeed in improving the tensor network representation of a 2d CP(1) model including a

topological term, and achieving improved accuracy compared to a conventional method. We also establish a method to calculate the entanglement entropy in quantum field theory using the Lagrangian tensor network formalism and conduct a benchmark test using 2d Ising model. In the future, it is expected that this method will be applied to systems with three dimensions or more. Furthermore, we propose a new scheme of spectroscopy using the tensor network and demonstrated it in 2d Ising model. In particular, we show that it is possible not only to calculate energy eigenvalues but also to determine the quantum numbers of relatively high excited states with high accuracy.

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

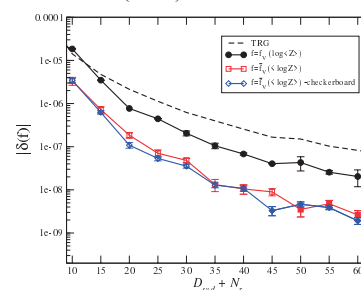


Fig. 1: The bond dimension dependence of the relative error for free energy in 2d Ising model. TRG : conventional method, others : our new methods.



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

### [Principal Investigator]

Asato Tsuchiya (Department of Physics, Shizuoka University, Professor)

The emergence of space-time is considered as an essential feature of quantum gravity. The gauge/gravity correspondence is a typical example in which the emergence of space-time is realized. Tensor networks models such as the MERA, the HaPPY code and the random tensor network are important in the studies of the emergence of space-time, since the models give networks that can be interpreted as discrete spaces emerging from boundary theories through entanglement entropy in the gauge/gravity correspondence.

Here it is needed to construct continuum tensor network models to obtain the emergence of continuum space. The cMERA, a continuum analog of the MERA, is constructed in free field theories, while it is desirable to construct a continuum tensor network in strongly coupled field theories from the viewpoint of the gauge/gravity correspondence. Since the layers in the network of the MERA can be interpreted as the scale of renormalization group, which corresponds to the bulk direction, constructing a continuum tensor network is considered as equivalent to obtaining the scale dependence of wave functionals. Also, the exact renormalization group (ERG) is known to be a nonperturbative formulation of the renormalization group. Against this background, we derived an ERG equation for the wave

functional of the ground state in scalar field theories [1]. We expect to construct a continuum tensor network by using this equation.

It is also known that the structure of quantum error correction is needed for the gauge/gravity correspondence to hold consistently. Indeed, the HaPPY code can be viewed as a quantum error correction code. Here, we demonstrated that quantum error correction is realized by the renormalization group in scalar field theories including interactions [2]. By constructing a q-level system by using coherent states in the IR region and acting on them the inverse of the unitary operator that describes the renormalization group flow of the ground state, we encoded them into states in the UV region. We showed to the first order in the perturbation theory that the code subspace obtained in this manner is correctable for a class of operators that create coherent states. Our result suggests a general relationship between the renormalization group and quantum error correction and should give insights into a role played by them in the gauge/gravity correspondence.

[1] T. Kuwahara, G.Tanaka, A. Tsuchiya and K. Yamashiro, PTEP 2023, no.3, 033B03 (2023), doi:10.1093/ptep/ptad029.

[2] T. Kuwahara, R. Nasu, G. Tanaka and A. Tsuchiya, arXiv:2401.17795 [hep-th].



## Quantum entanglement and information scrambling in inflationary models

### [Principal Investigator]

Yasusada Nambu (Nagoya University)

The purpose of this research project is to understand quantum informational aspect of cosmic inflation, which is accompanied by generation of primordial quantum fluctuations. The following three subjects related to quantum to classical transition of the primordial fluctuations are investigated in this project.

(1) Entanglement and classicalization of quantum fluctuations [1]:

For spatial local modes A and B in de Sitter universe, entanglement behavior between A and B is investigated in the perspective of entanglement monogamy. Purification partner modes CD of AB are constructed and the monogamy relation for the quantum correlation A:B (internal correlation) and AB:CD (external correlation) is established. Based on this relation, emergence of separability for the system AB can be understood as the monogamy between the internal correlation A:B and the external correlation AB:CD.

(2) Behavior of information in inflationary universe [2]:

Using a qubit model of inflation, behavior of entropy (Shannon, von Neumann) is investigated and meaning of information balance and relation to the issue of entropy

bound in de Sitter universe are discussed.

(3) Experimental proposal of quantum inflation using Hall systems [3, 4]:

Using edge excitation in quantum Hall systems, it is possible to realize experiments of analog expanding universes. In this subject, we consider analog (1+1)-dim de Sitter universe in quantum Hall systems with an expanding edge and investigated global structure of analog universe and Hawking radiation from de Sitter horizon.

[1] Y. Nambu and K. Yamaguchi, Phys. Rev. D 108, 045002 (2023).

[2] Y. Nambu and H. Tajima, "Bit model of inflation and entropy bound" in preparation.

[3] M. Hotta, Y. Nambu et al., Phys. Rev. D 105009 (2022).

[4] Y. Nambu and M. Hotta, Phys. Rev. D 085002 (2023).



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

### [Principal Investigator]

Kentaroh Yoshida (Saitama University)

Jackiw-Teitelboim (JT) gravity theory is attracting attention as a toy model for studying the chaotic behavior of black holes. Initially, the main objective was to investigate the relationship between black holes and chaos by investigating this JT gravity theory. But we were inspired by D. Gross and V. Rosenhaus's research on the chaotic behavior of scattering in string theory, and we thought of using an approach using superstring theory instead of a two-dimensional toy model.

In the paper [1], we clarified the relation between membrane instability and chaotic decay in the Banks-Fischler-Shenker-Susskind (BFSS) matrix model, which is known as a non-perturbative formulation of string theory. In particular, we found a Cantor-like self-similar structure associated with the chaos and calculated its fractal dimension.

In the paper [2], we showed that if a correction term of  $1/R^2$  is kept in the pp-wave limit of string theory on the  $AdS_5 \times S^5$  background, the integrability is broken and chaotic behaviors appear. Since the system with this correction term was proposed by J. Schwarz et al. in 2003, it has been believed that it is an integrable system, but actually it is non-integrable. This result can be understood as an analogy between the integrable three-site Toda lattice model and the

non-integrable Henon-Heiles model. When we expand the exponential potential of the Toda lattice, the most dominant term is a system of coupled harmonic oscillators, which is trivially integrable. If we keep the third-order term and include the interaction in the harmonic oscillator, we get the Henon-Heiles model, which is well known as a non-integrable model.

It is well known that the classical motion of a string in AdS space is integrable. On the other hand, it has been pointed out that in the case of a string attaching at the boundary of the AdS space, the vibrations can grow into turbulence. Turbulent behavior is a phenomenon in which spatial randomness occurs in addition to chaotic temporal randomness, and it is thought that it can only occur in non-integrable systems. In this paper [3], we showed that the origin of this turbulent behavior is that the integrability is broken due to boundary conditions.

[1] O. Fukushima and K. Yoshida, JHEP 09, 039 (2022).

[2] S. Kushihiro and K. Yoshida, JHEP 01, 065 (2022).

[3] T. Ishii, K. Murata and K. Yoshida, JHEP 01, 073 (2024).



## Theoretical modeling of optomechanical pendulum for testing quantumness of gravity

### [Principal Investigator]

Kazuhiro Yamamoto (Kyushu University)

Toward the realization of quantum states of macroscopic objects and the verification of the quantum nature of gravity, we constructed a theoretical model of a mirror coupled with laser light using an optical resonator (optomechanical oscillator), and made a theoretical prediction of conditional quantum states with continuous measurement and feedback control as well as quantum filtering process. First, as a theoretical model of an optomechanical oscillator of a suspended mirror currently realized experimentally, we formulated a theoretical model of a beam model consisting of a mirror and a beam with finite size coupled with a laser beam in an optical resonator. As a result, it was shown that at low frequencies, the model is described by two modes: a pendulum mode describing the motion of the center of mass and a rotation mode describing the rotation of the mirror around the center of mass. The frequency response of dissipation due to beam bending can be described by structural damping proportional to the inverse of the frequency. We also theoretically evaluated the quantum states that can be realized by using a Wiener filter, assuming continuous optical measurement and feedback control of the suspension mirror. We constructed a Wiener filter to eliminate the noise for the pendulum and rotational modes of the suspension mirror, which is necessary for this

purpose. We predicted the realized quantum states by evaluating the conditional covariance matrix that represents the variance of the motion under optical measurement conditions. As a result, we have identified the quantum state of the pendulum mode, which is realized by proper handling of the rotational mode. This result indicates that the realization of quantum states of milligram-scale objects is possible by integrating the experimental parameters that are currently realized. Furthermore, it is theoretically shown that the realization of quantum entangled states of two milligram-scale objects is also possible by combining two of these suspension mirrors to form a power-recycle Fabry-Perot-Michelson type interferometer (see Figure). These results are important milestones toward experiments to verify the quantum nature of gravity.

[1] Y. Sugiyama, *et al.*, Phys. Rev. A 107 (2023) 033515

[2] T. Shichijo, *et al.* arXiv:2303.04511

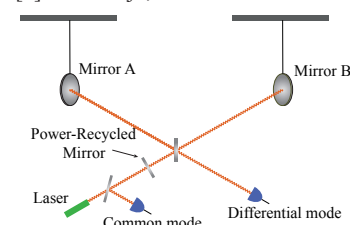


Fig. 1 Schematic plot of the Power-Recycled-Fabry-Perot-Michelson interferometer.





## Mesoscopic picture of black holes from quantum information

### [Principal Investigator]

Kotaro Tamaoka (Nihon University)

In this research, we aimed to understand the physics of black holes and wormhole spacetime from the viewpoints of holographic principles, quantum information theory, and quantum manipulation. As main results, we have obtained new knowledge on (1) symmetry breaking in black hole evaporation, (2) “deformation” of black holes and wormholes, and (3) amplification of pseudo entropy. In what follows, we introduce these findings in turn.

(1) We investigated the role of symmetry in the evaporation process of a black hole by using symmetry-resolved entropy [1]. In quantum gravity, there is an expectation that global symmetry does not exist. One of the reasons often cited to support this expectation is the process of evaporating black holes. To make this argument more quantitative, we used Page’s model to analyze how symmetry breaking affects the properties of quantum information theoretic quantities. From this analysis, we found that the contribution of the symmetry breaking part increases sharply near the Page time. This suggests that the symmetry breaking effect plays an important role in ensuring that the black hole evaporation process is unitary.

(2) By considering quantum quench protocols combined with sine-squared deformations and their generalizations, we have literally deformed the shapes of black holes and

wormholes. In the light of quantum many-body systems, we studied non-equilibrium dynamics including spatial inhomogeneity. As a result, we found many interesting phenomena that are not seen in the conventional AdS/CFT correspondence. For example, we found a quasi-particle picture and the emergence of new types of tripartite entanglement [2]. We also discussed how the cutoff surface of spacetime should be taken when we apply Ryu-Takayanagi formula, for example.

(3) It is known that pseudo entropy is closely related to the post-selection process and weak value. Indeed, pseudo entropy is not bounded above and can be amplified in some situations. We studied this “pseudo entropy amplification” in similar setups of various systems including holographic CFT [3]. Interestingly, we found that this amplification does not occur in holographic CFT as long as non-perturbative effects are negligible.

[1] P. H. C. Lau, T. Noumi, Y. Takii and K. Tamaoka, JHEP 10, 015 (2022).

[2] K. Goto, M. Nozaki, S.Ryu, K.Tamaoka, M. Tan, [arXiv:2302.08009 [hep-th]] accepted in Phys. Rev. Research.

[3] Y. Ishiyama, R. Kojima, S. Matsui, K. Tamaoka, PTEP 2022, 093B10 (2022).



## Entanglement Witness in Quantum Frustrated Magnets

### [Principal Investigator]

Tokuro Shimokawa (Okinawa Institute of Science and Technology)

Quantum entanglement has garnered significant attention in the field of condensed matter physics in recent years. Theoretical studies utilizing entanglement entropy (EE) have led to substantial advancements, revealing that quantum entanglement properties are fundamentally important for understanding unique phenomena in quantum many-body systems, such as quantum spin liquids (QSL), topological order, and quantum criticality. However, the experimental detection of EE remains challenging in real materials, posing a longstanding and significant challenge in condensed matter physics to experimentally detect quantum entanglement in many-body systems of great interest.

Under this situation, we have focused on various quantum entanglement measures developed in the field of quantum information in recent years. Measures such as one-tangle, two-tangle, concurrence, and quantum Fisher information can be expressed in terms of experimentally accessible local magnetization and static and dynamic spin correlation functions. Indeed, detection experiments using neutron scattering and  $\mu$ SR have been conducted very recently.

Utilizing these entanglement measures, we have addressed one of the unresolved issues in the field of magnetism, namely the distinction between the QSL and the random singlet (RS) states. We have numerically evaluated

the quantum entanglement properties in each state, focusing on two-dimensional quantum triangular lattice magnets as a typical stage where these two states manifest.

Although space limitations preclude a detailed discussion, the following findings have been obtained in the aforementioned triangular lattice magnets:

1. Both the RS and QSL states are multi-partite entangled states.
2. The distinction between the RS and QSL states is manifested in two-partite entanglement.
3. The difference between the RS and QSL states also appears in the temperature dependence of multi-partite entanglement.

Particularly, point (3) is crucial for applications to neutron scattering experiments, and we are currently drafting a manuscript on this subject [1]. In addition, we are also conducting research on the distinction between the Tomonaga-Luttinger liquid state and the RS state in one-dimensional chains, and a related manuscript is also under preparation [2].

[1] T. S., Snigdh Sabharwal and Nic Shannon, in preparation.

[2] Snigdh Sabharwal, T. S. and Nic Shannon, in preparation.



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

### [Principal Investigator]

Masaya Kunimi (Tokyo University of Science)

In this research project, we focus on the problem of thermalization of isolated quantum systems, especially on the quantum many-body phenomena of non-ergodic systems, which do not exhibit thermalization after a long time evolution. Recently, two new non-ergodic phenomena have been found: quantum many-body scar and Hilbert space fragmentation. In this study, we obtained results on these phenomena.

Hilbert space fragmentation (HSF) is a phenomenon observed in systems with a certain kinetic constraint, in which the motion of particles (or spins) is restricted by the constraint, and thermalization is prevented. Although this phenomenon is usually studied in real space with kinetic constraints, we have proposed a model in which the HSF occurs in momentum space. In this case, it is expected that a persistent current state is realized in which the flow does not decay once it is established because the transition in momentum space is restricted. We have performed numerical calculations and found that the persistent current state originating from the HSF is realized [1].

In another study, we investigated quantum many-body scar states. Quantum many-body scar states are special eigenstates that appear in non-integrable systems, and the existence of these states can prevent thermalization when

the initial state is appropriately chosen. In this study, we construct quantum many-body scar states in the Bose-Hubbard model with three-body constraints and propose a method to observe them experimentally [2].

We also studied quantum many-body scar states in a Rydberg atom quantum simulator, which has attracted much attention recently. In this study, we proposed an experimental realization of a quantum spin system with the Dzyaloshinskii-Moriya (DM) interaction in the Rydberg atom system. We have also exactly proved the existence of quantum many-body scar states in the Hamiltonian (called the DH model) consisting only of the DM interaction term and the Zeeman term, which is realized as a special case of our proposal [3].

- [1] M. Kunimi and I. Danshita, *Phys. Rev. A* **108**, 063316 (2023).
- [2] R. Kaneko, M. Kunimi, and I. Danshita, *Phys. Rev. A* **109**, L011301 (2024).
- [3] M. Kunimi, T. Tomita, H. Katsura, and Y. Kato, arXiv:2306.05591 (2023).



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

### [Principal Investigator]

Kazunori Kohri (National Astronomical Observatory of Japan)

The quantum effects of the inflaton field that induced inflation in the early universe created density fluctuations of approximately  $O(10^{-5})$  on the large scale of the Universe. Galaxies were created when matter was gravitationally collapsed in places where the density was large. Here, matter refers to both baryons, and dark matter, which is five times more abundant than baryons. At the end of June in 2023, it was reported that the North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves (NANOGrav) had observed stochastic gravitational wave (GW) background (SGWB) [1] that have existed since the early Universe. After 15 years of observing the correlation of radio signals periodically emitted by multiple pulsars, NANOGrav has observed a signal specific to the SGWBs in the nanohertz band. If SGWBs are present, they are observed because they modify the periodicity of the precise pulsar radio waves (see Fig.1). SGWBs are also known to be produced by mergers of supermassive black holes at the center of each galaxy [3], but this signal has a different spectral shape. If the small-scale density fluctuations produced by inflation are large, the second-order nonlinear effect of the density fluctuations can produce large SGWBs (called the induced gravitational waves). We have proposed that these induced GWs match the signal exactly [2]. Furthermore,

such a large density fluctuation is expected to collapse into a primordial black hole that is lighter than the Sun. Its abundance amounts to about 1% of the total of dark matter. The Einstein Telescope (ET) and Cosmic Explorer (CE) can in the future discover GWs emitted by the collision of binary primordial black holes. Such future gravitational wave experiments are expected to verify the quantum nature of the inflaton field and discover the primordial black holes.

- [1] Gabriella Agazie, et al, The NANOGrav15yr collaboration, arXiv:2306.16213 [astro-ph.HE]
- [2] K. Inomata, K. Kohri and T. Terada, *Phys. Lett. B* (2023) in press, arXiv:2306.17834 [astro-ph.CO].

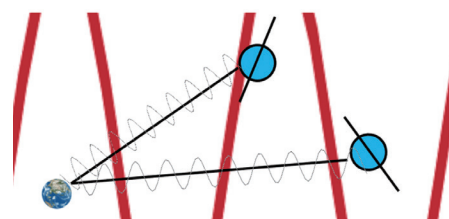


Fig.1: Schematic picture of the correlation of the period of radio waves (black lines) emitted by multiple pulsars undergoes change due to stochastic gravitational wave background (red line).



## From the Singularity Theorem of Spacetime to the Brane World Universe

One of the origins of the mysteries of the extreme universe, which is the main theme of this research area, can be attributed to the spacetime singularity theorem of Penrose and Hawking. This theorem reveals that spacetime has an end where established physical laws do not apply. This is where string theory comes. In this theory, the assumptions of the singularity theorem are either broken or traditional considerations undergo significant revisions, possibly dramatically altering our understanding of the edges of spacetime, and consequently, our universe. Remarkably, this theory predicts that our universe is like a thin membrane moving through a higher-dimensional spacetime. This is known as the brane world universe model, a key concept in this field.

### 1. The Singularity Theorem and the Extreme Universe

First, let us look at Penrose's singularity theorem, presented about 60 years ago. Although somewhat lacking in rigor, it proves that spacetime has a singularity (an edge) in the future under five plausible assumptions:

1. General Relativity is correct,
2. Trapped surfaces exist,
3. The energy density of light is non-negative,
4. Space is infinitely expanding,
5. Time machines do not exist.

Assumptions 3 to 5 are relatively natural, so let us focus on assumptions 1 and 2.

General Relativity is a physical theory dealing with time and space, representing gravity through the curvature of spacetime (geometry), determined by solving the Einstein equations. For instance, people traveling from two different points on the Earth's equator towards the North Pole gradually come closer, meeting at the North Pole, as if attracted by a gravitational force, due to the Earth's surface being (almost) spherical and curved.

General Relativity has made numerous interesting predictions and has been verified over time: the expansion of the universe, the synthesis of (light) elements, the formation of large-scale structures composed of galaxies and dark matter, the current accelerating expansion, the discovery of black hole solutions to the Einstein equations and their formation process through gravitational collapse, and gravitational waves originating from the merger of black holes or neutron stars. The assumption that general relativity is correct would be plausible enough.

Next, the existence of trapped surfaces. Imagine light emitted from a sphere. In everyday experience, light from a bulb spread outward and reaches our eyes. Trapped surfaces are defined as surfaces where emitted light moves outward but does not spread. Such phenomenon is known to be possible inside black holes. Thus, assuming the existence of trapped surfaces implies strong gravity, as found in black holes.

The singularity theorem implies that the future inside a black hole has an end as the edge of spacetime. This corresponds to one of the "limits of space" in the extreme

universe. Penrose's singularity theorem was immediately applied to the entire universe by Hawking. This claims the existence of the "limit of time" in the extreme universe.

Outside the edge of spacetime, spacetime does not exist. In many cases, the energy density of matter diverges there, or spacetime is severely distorted. Established physical laws do not hold. Superstring theory is expected to solve this problem.

### 2. The World of the Extreme Universe

The basic elements of string theory are strings, formulated in 10 or 11-dimensional spacetime. There are two types of strings: open and closed. Various elementary particles can be represented by the vibrations of these strings. However, about 30 years ago, Polchinski discovered that the ends of open strings are not nothing but are attached to a thin membrane. Also, it's known that open strings represent matter, and closed strings represent gravity. This naturally leads to the depiction of matter being attached to the brane. This worldview, applied to the entire universe, is the brane world, proposed by Arkani-Hamed and others about 25 years ago. Our universe is a (mem)brane moving through higher dimensions.

The brane, like elementary particles, has something akin to mass called tension. And its weight causes higher-dimensional spacetime to bend according to higher-dimensional Einstein equations. We live on this brane. It is convenient to have equations governing spacetime on the brane. About 25 years ago, Shiromizu, Maeda and Sasaki tackled this problem and found that deviations from the Einstein equations exist on the brane. These deviations arise from the distortion of the brane's configuration due to the matter on the brane and from gravitational waves in higher-dimensional spacetime. And, they are expected to be the key to the first door to the extreme universe. Interestingly, they can be interpreted holographically. For example, if a black hole exists in higher-dimensional spacetime, the expansion rate of the universe on the brane increases as if it is filled with a gas-like substance of light. But, it cannot be detected as matter.

### 3. Black Holes

The shapes of stars are diverse. We do not understand how all black holes form. However, it is thought that some of them are formed by gravitational collapse of heavy stars after they lose their nuclear fuel. Immediately after formation, black holes will change drastically. However, after a sufficiently long time, they settle into a time-independent steady state. As currently observed, there are materials such as accretion disk around the black hole, but they are so light compared to the mass of the black hole and do not affect the structure of the surrounding spacetime. After formation and sufficient time, the main surrounding matter is sucked into the black hole and the region around the black hole can be vacuum and stationary. Remarkably, such black holes are mathematically proven to be represented only by the Kerr solution in black hole



spacetime, determined by mass and angular momentum. In the case of no rotation, only the Schwarzschild black hole, determined solely by mass, exists. However, this is the story in four-dimensional spacetime. What about higher dimensions?

Inspired by the emergence of the brane world, research on higher-dimensional black holes has also advanced significantly. Differing greatly from four dimensions, various black hole solutions have been discovered. Particularly in five-dimensional spacetime, cases exist from ring-shaped ones to Black Saturn, where black holes and black rings coexist. Two rings with different rotation axes coexisting were discovered by Izumi of team C03 during his graduate studies. Although many solutions exist, rapidly rotating ones are suggested to be unstable, changing into irregular shapes in numerical simulations. On the other hand, in the case of no rotation, the uniqueness of the solution is proven by Gibbons, Ida, and Shiromizu, similar to four-dimensional spacetime.

It is well-known that serious observations of black holes have only been conducted 100 years after their solutions were discovered. But do black holes really exist? And can traces of higher dimensions be seen? The simple questions are endless.

#### 4. The New Paradigm from Black Holes

Black holes continue to provide various topics of discussion. Most galaxies seem to have massive black holes at their centers. Nowadays, numerous gravitational waves emitted from the merger of black holes have been detected. Direct imaging of black hole shadows has also become possible.

Black holes are one-way, constantly gaining mass. Reflecting this, the area of the event horizon, the surface of the black hole, has been proven by Hawking to increase over time. Along with other properties, it is understood that the entropy of black holes is given by the Bekenstein-Hawking formula, proportional to the area of the event horizon, conforming to the entropy increase law. This suggests that black hole information is stored on its surface. Considering that the entropy of ordinary objects is proportional to volume, this signifies a very interesting phenomenon. Indeed, careful observation of black hole surfaces has indicated a correspondence between higher-dimensional gravitational theory and one-lower-dimensional matter theory, pointed out by Maldacena and others around the end of the last century. Furthermore, based on this correspondence, the generalization of the Bekenstein-Hawking formula to ordinary matter was proposed by Ryu and Takayanagi at the beginning of this century. Let us artificially divide the space we live in into regions A and B, with A unobserved. Then A can be considered similar to a black hole. However, A and B have quantum correlations in the microscopic world. In such cases, interest often arises in the (quantum entanglement) entropy of system A. Ryu and Takayanagi, through specific examples, noticed that this entropy generally is proportional to the smallest area of the

surface spread in the surplus dimensions surrounding A. After this discovery, the fusion with quantum information has rapidly progressed. For more details, please refer to the news from the field “Extreme Universe.”



#### ● Author Information

### Tetsuya Shiromizu

Graduate School of Mathematics,  
Nagoya University,  
Professor

Born in Fukuoka, 1969  
Graduated from Kyoto University in  
March 1996  
Current position since April 2014



● Reporter

## Juan William Pedersen

**Graduate school of Arts and Sciences, The University of Tokyo, 3rd year Ph.D. student**

Academic Supervisor Prof. Yoshio Kikukawa, Graduate school of Arts and Sciences, The University of Tokyo

Host Supervisor Prof. Etsuko Ito, Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University (D01)

Duration of Stay May 15 2023 ~ June 8 2023

In recent years, quantum computer-based approaches have been attracting attention as a possible new computational method for quantum field theory. Conventional numerical calculations of quantum field theory are based on the Lagrangian form and use a lattice Monte Carlo method to compute path integrals. However, it is known that for systems such as real-time forms and finite density systems, a problem called the sign problem arises, making it impossible to compute physical quantities with high accuracy. On the other hand, it is possible to numerically calculate the quantum field theory based on the Hamiltonian form, in which case the sign problem does not arise. However, in this case, the computational cost increases exponentially with the size of the system, and it is considered difficult to compute naively. It is expected that a quantum computer can be used to solve this problem by reducing the computational cost and making it possible to perform calculations efficiently.

With this background, I am conducting research on the quantum simulation of quantum field theories at finite temperature and density with Etsuko Ito, the host of this visiting program, Rong-Yang Sun (RIKEN), and Seiji Yunoki (RIKEN). In order to obtain the expectation value of a physical quantity in a finite temperature/finite density system by quantum computation, it is first necessary to prepare a thermal state on a quantum circuit. However, thermal states are generally mixed states, which are difficult to represent directly in quantum circuits. To deal with this problem, we use a technique known as Thermal Pure Quantum state (TPQ state), which is a theoretical framework that provides a pure state that is a good approximation of a mixed state thermal state. By using this framework, it is possible to represent thermal states on quantum circuits. However, the implementation of TPQ states requires the computation of non-unitary operators corresponding to Boltzmann factors, which is also a difficult task. To address this challenge, we use an algorithm called Quantum Imaginary Time Evolution (QITE), which is a quantum algorithm for generating unitary operators that accurately approximate non-unitary operators, and implement it on a quantum circuit. Combining these methods, it is possible to calculate the expectation values of local physical quantities of quantum field theory under thermal and chemical equilibrium conditions. We use this method based on TPQ and QITE to investigate the phase structure of the Schwinger model, a 1+1-dimensional U(1) gauge theory, under finite temperature (and finite density).

During the first week of my stay, Rong-Yang Sun also stayed at YITP, and we had intensive discussions on the

mentioned research. The in-depth face-to-face discussions helped us to further deepen our understanding of the research topics. Our understanding of the theory and algorithms and the development of the calculation code progressed, and we were able to start actual calculations using the supercomputer during our stay. I consider this to be the most significant achievement of my stay. I also had the opportunity to learn about and discuss the properties of random unitary matrices and implementation algorithms with Yoshifumi Nakata. The discussion on random unitary matrices is an important topic to be dealt with in the research project mentioned above, but he also taught us about algorithms that are more efficient than the method we were considering and the physical conditions under which such algorithms can be applied, which was a meaningful discussion that will lead to the development of future research.

Not limited to the above research topics, I had the opportunity to engage in a wide range of discussions with various researchers during my stay. One of the most memorable moments was when I was given an opportunity to present a seminar in the nuclear group, where I gave a talk on my recent research on the quantum calculation of integrable spin systems. This research is a collaboration with Kazunobu Maruyoshi, Takuya Okuda, Ryo Suzuki, Masahito Yamazaki, and Yutaka Yoshida in the D01 group. The seminar was attended mainly by people belonging to the nuclear and elementary particle fields. I received questions and feedback from a variety of perspectives, and the discussions were fruitful. I also had several joint seminars with Shinya Aoki, Etsuko Ito, and Akira Matsumoto on the quantum link model, a discrete representation of gauge theory. Furthermore, since I stayed in YITP for a long period (about one month), I was able to interact with many researchers at the YITP and visitors from overseas through daily lunches and dinners. These experiences stimulated me to broaden my research field. I think this is one of the major advantages of this kind of long-stay program.

Finally, I would like to summarize this report by thanking people who organized this visiting. I would like to thank Etsuko Ito for welcoming me for my stay. I would also like to thank all the organizers and staffs in the Grant-in-Aid for Transformative Research Area, Extreme Universe, for letting me this opportunity. I would like to reiterate that this stay has been very beneficial and stimulating for my research activities.



# Domestic Circulation Program for Young Researchers

● Reporter

## Shu Hamanaka

Department of Physics, Kyoto University, M2

Academic Supervisor Prof. Tsuneya Yoshida, Kyoto University

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

Duration of Stay July 10 2023 ~ August 11 2023

The research on topological phases in isolated systems has achieved significant success. However, in recent years, research on topological phases in open quantum systems, extending beyond the framework of isolated systems, has been actively pursued. Specifically in open systems, a notable phenomenon known as the non-Hermitian skin effect emerges, where most of the bulk modes localize at the edge. During my master's studies, I have been investigating the effects of many-body interactions on this skin effect. The Katsura group has made significant contributions to topological phases of disordered and interacting systems beyond the realm of band theory, and since they also conduct extensive research on open systems, I deemed it the optimal place to deepen my research. Additionally, after receiving comments from Prof. Katsura during a poster presentation at last year's conference of this organization, it motivated me to further develop my previous research [1], which also influenced my decision to stay.

During my stay, despite Prof. Katsura's busy schedule, he generously spared time to engage in discussions with me multiple times. He provided insights into solvable models, particularly delving into dissipative effects and utilizing analytical methods proposed by Mattis-Nam to derive analytical solutions by considering a Liouvillian with dephasing. Furthermore, I learn techniques for diagonalization in Mathematica and about computational methods using Bethe ansatz. It was an honor to be exposed to content and techniques that I was unfamiliar with during my time in Kyoto. One thing that amazed me during conversations with Prof. Katsura was his profound knowledge of a wide range of literature. When I sought information about analytical solutions for a certain model, Prof. Katsura immediately directed me to somewhat obscure literature from over a decade ago. Additionally, I was impressed by his expertise not only in solvable models and mathematical techniques but also in phenomenological studies in condensed matter systems. Furthermore, I was astonished by the speed at which research progresses. Hearing that Prof. Katsura sometimes completes essential calculations for papers within a few days motivated me to work harder.

Moreover, thanks to Prof. Katsura's generosity, I had the opportunity to give a seminar presentation in the group (see Photo 1). During the presentation, I received valuable feedback from Mr. Yoshida, who is researching dissipative Fermi-Hubbard models, and Mr. Tsubota, who is studying Berry phases in non-Hermitian systems. In particular, Mr. Yoshida kindly sent me detailed handwritten notes

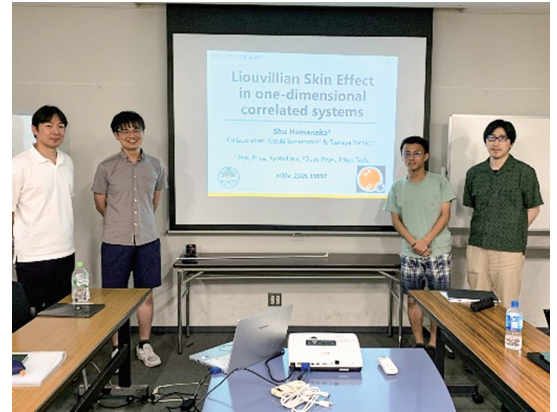


Photo1 Seminar at Katsura group seminar  
From left to right: Prof. Akagi, Mr. Yoshida, me, Prof. Katsura

explaining the unitary symmetry of the Liouvillian when I asked him questions via email after my stay, which I found extremely helpful. Additionally, I had the chance to discuss quantum Zeno effects in systems with particle losses with Prof. Nakagawa (Ueda group).

Furthermore, during my stay, I visited the laboratories of Dr. Mori and Dr. Hamazaki at RIKEN. While explaining my research, they pointed out the relationship with multifractality in many-body localization [2]. Just before the end of my stay, Prof. Kawabata (ISSP) happened to visit the room where I was staying, and based on the discussions I had at RIKEN, he provided advice on my future research plans. Subsequently, I was able to produce results on the multifractality exhibited by the non-Hermitian skin effect of many-body Hilbert spaces [3].

Throughout this program, I had fruitful discussions about research with Prof. Katsura and many others. I had the opportunity to explore physical phenomena from solvable models and algebraic perspectives, exposing me to entirely new ways of thinking. Additionally, learning about topics leaning towards statistical physics during my stay at RIKEN has provided me with fresh perspectives for my future research. While I feel the need to further improve myself, it was an enriching experience.

Finally, I express my gratitude to Prof. Katsura for accepting my stay and to everyone in the Katsura group who engaged in discussions with me during my stay. Lastly, I express my gratitude to the young researchers' exchange program for providing me with such an opportunity, and I conclude this article with my sincere appreciation.

- [1] S. Hamanaka, K. Yamamoto, and T. Yoshida, Phys. Rev. B. **108**, 155114 (2023).
- [2] N. Mace, F. Alet, and N. Laflorencie, Phys. Rev. Lett. **123**, 180601 (2019).
- [3] S. Hamanaka and K. Kawabata, arXiv: 2401.08304.





## Conference Reports in FY2023

### ● ExU International workshop (YIPQS long-term workshop) “Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity”

4 September – 6 October 2023

#### 1st week: “ExU-YITP School/Workshop on Quantum Information, Quantum Matter, and Quantum Gravity” 4 - 8 September 2023, YITP, Kyoto Univ. + Online

The School/Workshop on Quantum Information, Quantum Matter, and Quantum Gravity was held from September 4 to 8, 2023, co-organized by our research area and Yukawa Institute. It took place at the Panasonic Hall of Yukawa Institute, in a hybrid format of both in-person and online participation via Zoom. This event was part of a five-week-long term international conference, marking its first week. The turnout exceeded expectations, with 162 in-person attendees (79 domestic, 83 international) and 195 online participants. In our field, which spans the cutting-edge areas of physics based on quantum information, it is crucial to foster young talent and promote interdisciplinary research. To incorporate this, the school portion included lectures ranging from basic to advanced topics, each lasting 2 to 2.5 hours. From the particle physics field, Dr. Heller delivered the lecture “Complexity and holography”; from the cosmology field, Dr. Hollands presented “Entropy, Operator Algebras and Black Holes”; in the quantum information field, Dr. Morimae lectured on “Quantum cryptography based on pseudorandom quantum states”; from the condensed matter field, Dr. Nishino talked about “How to study statistical lattice models by ‘adaptive’ tensor network frameworks? — Bulk and boundary properties on regular, curved, fractal, and random lattices —”; and Dr. Noguchi, who conducts ultra-high-performance quantum experiments, gave the lecture “How can we manipulate the quantum systems?”. These lectures served as excellent models for the three extremes that bind our field: the limits of time, space, and matter. Additionally, the conference featured 10 one-hour invited talks on the latest topics in each field, 13 twenty-minute general talks, and 17 poster presentations, making it a comprehensive research gathering. The sessions were lively with active questioning, with many lectures and presentations significantly exceeding their allotted time, raising concerns about how much the breaks could be shortened. It was an auspicious start to the first week of the conference. (Reported by Tetsuya Shiromizu)

#### 2nd week: 3rd ExU Annual meeting/ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information

##### 11 - 16 September 2023, YITP, Kyoto Univ. + Online

The second week of the long-term workshop comprised of the third annual meeting held on Sep. 11 followed by the “ExU-YITP Workshop on Holography, Gravity and Quantum Information”. About 250 people participated in person and about 150 people participated online from both inside and outside the Extreme Universe collaboration.

The annual meeting began with Tadashi Takayanagi (Head Investigator; YITP, Kyoto University) explaining the purpose of the collaboration, as well as the organization and events. Each research project group gave a 30-minute presentation, introducing the outline of the group and the research highlights of this fiscal year. There were many questions from participants from outside the ExU collaboration, and lively discussions were held.

Finally, our advisors, Akio Hosoya (Honorary Prof., Tokyo Institute of Technology) and Nobuyuki Imoto (Project Prof., The University of Tokyo) gave encouragement and insightful comments on space-time and quantum information.

The workshop focused on the relationship between quantum information and gravity, and included 21 invited lectures from many renowned researchers from overseas, 23 regular lectures by mainly young researchers including ExU postdocs, and 41 poster presentations.

I found it impressive that many developments were reported to such a basic theme as the properties of near-extreme rotating black holes. In particular, Dias and Minwalla gave seminars on black holes in dual gravity of  $N=4$  super Yang-Mills theory, the most standard example of AdS/CFT correspondence. The analysis of the two groups clarified the phase structure of the theory in the complementary regimes. This point was revealed in response to a question during the lecture.

Harlow’s lecture introduced joint research with Tokiro Numasawa (E02) on the gauging of time reversal symmetry, which include bold proposals regarding the foundation of quantum mechanics. Stimulating discussions were held



Group photo of the 2nd week  
( ExU-YITP Workshop on  
Holography, Gravity and  
Quantum Information )

during and after the lecture on the proposal.

I was impressed by the heated discussions between researchers from various countries exchanged everywhere during the seminars, coffee breaks, and poster sessions this week. (Reported by Hidehiko Shimada)

### **3rd week: YKIS conference “Foundations and Developments of Quantum Information Theory”**

**18 - 22 September 2023, YITP, Kyoto Univ. + Online**

The third week of the long-term workshop centered on the theme “Foundations and Developments of Quantum Information Theory”. While the workshop was originally intended to share the latest achievements in the theory of quantum information, logistical challenges among organizers occurred during the preparation stage, and it was shifted to an interdisciplinary-type workshop. Despite this deviation from the original plan, the workshop successfully refocused on quantum information-related topics, featuring a series of talks that addressed various facets of quantum information from the viewpoint of quantum gravity, cosmology, and quantum many-body physics.

The diverse participation, ranging from quantum gravity to quantum many-body physics, allowed for engaging discussions that cover broad spectrum of interdisciplinary topics. During the workshop, the participants also enjoyed the opportunity for informal and free discussions, further enriching the exchanges of novel ideas. Invited speakers played a crucial role and presented recent exciting breakthroughs and progress in the field of quantum information. Their contributions added significant value to the workshop.

On behalf of the organizers, we would like to thank all participants for their valuable contribution. The workshop was supported by the Yukawa Institute for Theoretical Physics and held as the Yukawa International Seminar (also known as YKIS). We also express gratitude to all contributors, including staff and students, for their roles in organizing the workshop. (Reported by Yoshifumi Nakata)

### **4th week: ExU-YITP Workshop on Condensed Matter Physics and Quantum Information**

**25 - 29 September 2023, YITP, Kyoto Univ. + Online**

The main focus of the fourth week of the workshop was on the progress of research in the interdisciplinary fields of condensed matter physics, quantum information, and particle theory. We had 13 invited talks by leading experts and up-and-coming young researchers on cutting-edge topics such as quantum computation associated with quantum many-body systems, quantum circuit models, tensor networks, quantum spin liquids, random spin systems, the SYK model, and quantum chaotic dynamics. These talks also covered various aspects of condensed matter physics, featuring numerical simulation algorithms, their mathematical backgrounds, and realistic experimental situations, which had close connections to the topics in the other weeks of the workshop. The Q&A sessions were lively throughout the week, with deeply specialized

questions and discussions as well as naïve queries regarding the importance of the topics. For the poster sessions on Tuesday and Thursday, we had 35 presentations in total from various background fields. It was impressive that exciting and enthusiastic discussions were sparked, especially among young researchers.

Reflecting the long-term format of the workshop, participants from diverse fields came to some talks of interest and engaged in discussions during the coffee breaks. About half of the audience had changed from the previous weeks, and interestingly, we could feel a slightly different atmosphere. We hope such cross-disciplinary communications will lead to creative new research ideas. During the pandemic, we often experienced online or compact-style research meetings in the field of condensed matter physics as well. It was a great experience for the organizers to witness how the condensed matter week successfully drew a large audience in person. (Reported by Kouichi Okunishi)

### **5th week: ExU-YITP Conference “Quantum Information and Theoretical Physics”**

**2 - 6 October 2023, YITP, Kyoto Univ. + Online**

The fifth week starting on October 2, with the outside temperature getting more pleasant after a long summer, was devoted to a conference-type meeting titled “Quantum Information and Theoretical Physics”, where all presentations were in the oral style. Ten of the invited talks were given via Zoom. The schedule had to be a bit busy with six of the online talks in late evenings in Japanese time, including the colloquium “Hydrodynamics and Random Matrices” by Brian Swingle. Contributed talks were mainly given on-site. Ten of them were given 25+5 minutes, while the remaining 31 were given 15+5 minutes. Many of the on-site talks were given by speakers who had also participated since the fourth week or earlier. Through these oral presentations, participants had chance to better understand the contexts and interesting contents of research conducted by those whom they had met every day, even if they come from different backgrounds, among fields such as quantum information, elementary particle theory, theory of gravitation, and condensed matter theory. Active discussions occurred both in hybrid-style daytime sessions using the Panasonic Hall and in fully online late-evening sessions.

The Yukawa Hall was among the venues for the International Conference of Theoretical Physics in September 1953, amid the Cold War, marking the first international scientific conference in the post-WWII Japan. Unfortunately, seventy years after the event, restrictions on international movement of people still exist. However, it is a great pleasure of us as organizers that we have realized this meeting as an opportunity for scientists including many young researchers, from various parts of the world, in such a wide range of fields, to interact and exchange the latest information, and have participated in it. (Reported by Masaki Tezuka)



### ● ExU Workshop ~ To inspire the interplay of Experiment and Theory: From Material Condensed Matter to Cold Atoms

16 - 17 May 2023, The Univ. of Tokyo, Kamaba Campus + Online

It is true that for many of the researchers in condensed matter physics, our ‘Extreme Universe’ project looks rather out of scope or difficult to understand. The present workshop was designed with the aim to resolve these impressions, by gathering several experts in condensed matter experiments and solid state and cold atom theorists working inside and outside the project. A variety of members exchanged ideas, explained what they can technically measure or calculate, which made them grab concepts of other fields. We are happy to find that the workshop was successful; we got a comment from our project leader that ‘This level of active Q&A is quite rare.’ The speakers were invited from different fields, we selected them quite at random, while not really random so as to have at least small overlaps in their research interests.

The session started with the talk by Prof. Daisuke Yamamoto and Dr. Shimokawa, both are condensed matter theorists, where they gave us a good introduction and an overview of the background of the topics/fields and the works they have done. Two talks by condensed matter experimentalists, Dr. Shimizu and Prof. Yonezawa, followed, with detailed explanations of unique experimental techniques involving NMR and superconductivity. Then, Dr. Kawakami introduced highly original experiments on the electronic system of helium surfaces. She appealed that her system has a longer history and has a credit in the term, ‘Rydberg state’, although quite many people recognize them as cold atom states, which popped up heartwarming and intimate discussions. Prof. Ozawa explained his research field which was not so familiar to many of us, which was very stimulating.

The second day was a cold atom day; Dr. Uchino’s theoretical introduction followed by lectures from Dr. Tomita and Prof. Sugawa about the entanglement of Rydberg atoms and the realization of a ‘statistical model.’ In the afternoon, Dr. Kunimi discussed a non-thermalized state called quantum scar. Prof. Yusa gave a final talk on experiments on quantum Hall effects, and also how he enjoys our project as one of the very few experimental members.

The most notable aspect of this workshop was that experts from different subfields of condensed matter physics were indeed able to engage in their specialized discussions and still could share many common interests or physical understandings. I renewed the importance of having dense and active communications among people, particularly young people who wouldn’t come across in the usual JPS meetings. In fact, it turned out that the same quantity is dealt as entanglement witnesses calculated in condensed matter and measured in cold atoms without knowing it with each other. I am already quite curious what would happen next if there is another chance of organizing a workshop of similar scale in our project, which might be with different themes and participants.

(Reported by Chisa Hotta)

### ● A novel numerical approach to quantum field theories 2023

#### -Quantum Computing and Tensor Networks-

10 - 13 October 2023, Osaka Univ., Toyonaka Campus, Nambu Hall + Online

From October 10th (Tuesday) to 13th (Friday), a four-day event titled “A novel numerical approach to quantum field theories 2023” was jointly organized by the Extreme Universe D01 Team and FRC-TJR of Osaka University at Nambu Hall in Toyonaka Campus. This school serves as a sequel to the one held at YITP, Kyoto University in September 2022. The main audience consisted of graduate students and postdocs, while there were also participants, approximately 40 on-site and 50 online, including undergraduate students and researchers with various affiliations. This year’s program included lectures by four distinguished lecturers actively contributing to the fields of quantum computing and tensor networks, along with oral presentations by 10 participants.

Prof. Tsuyoshi Okubo (University of Tokyo, D02 collaborator) provided an introductory overview of the representation of quantum states using tensor networks, discussed applications to quantum materials, and presented prospects for quantum computing. Prof. Masaki Tezuka (Kyoto University, B02 PI) discussed his recent research on quantum simulations of bosonic systems such as an anharmonic oscillator and free scalar field on lattice. Mr. Hiroki Sueno (Stony Brook University, D01 collaborator) began with an introductory review of measurement-based quantum computing and went on to introduce his recent research results on the application to quantum simulation of lattice gauge theory. Dr. Yutaro Akaboshi (Fujitsu) presented an introduction to the theory of quantum error correction and fault-tolerant quantum computing (FTQC), along with an explanation of his recent research results on a quantum computing architecture aimed for Early-FTQC.

The lectures and oral presentations generated numerous questions from participants, leading to lively discussions. There were also fruitful discussions and information exchanges among lecturers and participants during break times. We hope that this school contributes to the advancement of the field in the coming years.

(Reported by Tatsuma Nishioka)



Lecture in the school



## ● The 2nd young researchers' workshop of the ExU Collaboration

19 - 23 February 2024,  
Shirahamaso (Takashima city, Shiga)

The 2nd young researchers' workshop of the ExU collaboration was held. The purpose of this workshop is to provide a forum for young people, mainly students and postdocs, who work on various fields in the ExU, to exchange ideas, and to create opportunities for collaboration between different fields by young people. In the ExU, we plan to hold one young researchers' workshop for each year. Last year, due to the COVID-19, we were not able to hold a camp-type workshop, but this year we were able to hold a camp-type workshop at Shirahama-so in Takashima City, Shiga. We spent five days in the same place. Participants were able to share their research interests and future goals, as well as to introduce their research activities to each other.

A total of 68 people attended the workshop, including undergraduate students, masters, doctoral students, and several faculty members, 48 of whom gave presentations. All individuals who requested a presentation were given the opportunity of oral presentations. ExU postdocs gave 30-minute oral presentations while other speakers were given 20 minutes for each presentation. All presentations were given in English. The presentations covered a wide range of topics including quantum information, elementary particles, cosmology, and condensed matter physics. Many questions were asked by people outside the field during the Q&A session. Some of the speakers were fourth-year undergraduate students and first-year master's students. For some of them, the presentation in this workshop was their first official presentation given in English. This workshop serves not only as an opportunity for young researchers to interact with each other, but also as the beginning of their international careers.

In addition to the oral presentations, keywords from various fields that often appear in the ExU collaboration were introduced and participants specialized in each keyword were introduced by a representative from each

field. During the following breaks, participants had the opportunity to ask questions to the experts introduced for each keyword and to learn the basics of the different fields. The introductions and discussions began in the afternoon of the first day, starting with the field of cosmology/gravity field. Topics include cosmology, black holes, infrared aspect of gravity, quantum nature of gravity, and spacetime singularities. The morning of the second day featured was devoted to introductions and discussions of particle physics, covering lattice gauge theory, particle phenomenology, information paradox, holography and entanglement, and holography beyond AdS. Quantum information theory was introduced and discussed in the afternoon of the second day, covering the topics of quantum measurement, resource theory, functional analysis and quantum information, quantum thermodynamics and others, quantum information theory, and tensor networks. On the morning of the third day, discussions on condensed matter physics were held, covering the topics of cold atoms, strongly correlated electrons/quantum spin chains, tensor networks, non-Hermitian systems/open quantum systems, and topological materials.

Banquets were held each day at night. There, in addition to casual socializing, the participants voluntarily explained the details of their research which were given in the oral presentations. Participants also exchanged information on the basics of each field and the latest topics. Discussions were held not only on past research but also on future research, which is expected to develop into joint research in the future.

Finally, Dr. Izumi, the chair of the workshop organizers, summarized the workshop and made an announcement about the next workshop. Then, the 2nd young researchers' workshop of the ExU Collaboration was closed.

(Reported by Keisuke Izumi)



Presentations by participants



Group photo



# Conferences, Workshops and Seminars in FY2023

## ● Extreme Universe Colloquium

### 15th Extreme Universe Colloquium

**Date:** April 13th, 2023

**Speaker:** Prof. Andrew Strominger (Harvard University)

**Title:** Cosmic ER=EPR



### 16th Extreme Universe Colloquium

**Date:** May 24th, 2023

**Speaker:** Prof. Yasunobu Nakamura (The University of Tokyo/RIKEN)

**Title:** Superconducting circuits for quantum technologies



### 17th Extreme Universe Colloquium

**Date:** June 6th, 2023

**Speaker:** Prof. Harvey Reall (University of Cambridge)

**Title:** Creases, corners and caustics: non-smooth features on black hole horizons



### 18th Extreme Universe Colloquium

**Date:** July 24th, 2023

**Speaker:** Prof. Synge Todo (The University of Tokyo)

**Title:** Markov-Chain Monte Carlo in Tensor-Network Representation



### 19th Extreme Universe Colloquium

**Date:** October 2nd, 2023

**Speaker:** Prof. Brian Swingle (Brandeis University)

**Title:** Hydrodynamics and Random Matrices



### 20th Extreme Universe Colloquium

**Date:** November 14th, 2023

**Speaker:** Prof. Anne Broadbent (University of Ottawa)

**Title:** Quantum Unclonability and Cryptography



### 21st Extreme Universe Colloquium

**Date:** December 1st, 2023

**Speaker:** Prof. Nicolas Yunes (University of Illinois at Urbana-Champaign)

**Title:** Probing strong gravity when gravity waves



### 22nd Extreme Universe Colloquium

**Date:** February 13th, 2024

**Speaker:** Prof. Masayuki Hashisaka (ISSP, The University of Tokyo)

**Title:** Electron dynamics at boundaries of quantum many-body systems



## 23rd Extreme Universe Colloquium

**Date:** March 14th, 2024

**Speaker:** Prof. Suvrat Raju (International Centre for Theoretical Sciences (ICTS))

**Title:** How is quantum information localized in quantum gravity?



## ● Extreme Universe Seminar

### 12th Extreme Universe Circular Meeting

**Date:** April 18th, 2023

**Speaker 1:** Hiroki Sukeno (D01)

**Title:** Quantum simulation of gauge theories from entanglement, measurement and feedforward

**Speaker 2:** Kenji Harada (D02)

**Title:** Optimal network structure of quantum-inspired generative modeling

### 2nd Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

**Date:** April 20th, 2023

**Speaker 1:** Kentaroh Yoshida (E02)

**Title:** Chaotic instability in the BFSS matrix model

**Speaker 2:** Hiroyasu Tajima (E01)

**Title:** Universal trade-off structure between symmetry, irreversibility and quantum coherence

### 13th Extreme Universe Circular Meeting

**Date:** May 31st, 2023

**Speaker 1:** Dr. Takuya Hatomura (NTT)

**Title:** Shortcuts to adiabaticity and their digital implementation

**Speaker 2:** Hayata Yamasaki (A01)

**Title:** Time-Efficient Constant-Space-Overhead Fault-Tolerant Quantum Computation

### 3rd Extreme Universe Interdisciplinary Seminar

**Date:** June 14th, 2023

**Speaker 1:** Kohtaro Kato (E01)

**Title:** Does a matrix density operator have a parent Hamiltonian?

**Speaker 2:** Tsuneya Yoshida (E02)

**Title:** Effects of correlations on exceptional points

### 14th Extreme Universe Circular Meeting

**Date:** June 26th, 2023

**Speaker 1:** Sunil Sake (B01)

**Title:** Sparse Random Matrices and Local SYK

**Speaker 2:** Kazuki Yamamoto (B02)

**Title:** Localization properties in disordered quantum many-body dynamics under continuous measurement

#### **4th Extreme Universe Interdisciplinary Seminar**

**Date:** July 13th, 2023

**Speaker 1:** Shinji Takeda (E02)

**Title:** All-mode renormalization and phase structure of 2d CP(1) model with topological theta term

**Speaker 2:** Asato Tsuchiya (E02)

**Title:** Exact renormalization group and quantum error correction

#### **15th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** July 25th, 2023

**Speaker 1:** Daisuke Yoshida (C03)

**Title:** Entropy bound and an initial singularity of the universe

**Speaker 2:** Kazuya Yonekura (C02)

**Title:** Nonsupersymmetric heterotic branes

#### **16th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** October 17th, 2023

**Speaker 1:** Akira Matsumoto (D01)

**Title:** Three ways of calculating mass spectra of gauge theories in the Hamiltonian formalism

**Speaker 2:** Atis Yosprakob (D02)

**Title:** Grassmann TRG study of gauge theory with multiple fermion flavors

#### **17th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** November 29th, 2023

**Speaker 1:** Dr. Kaoru Mizuta (The University of Tokyo)

**Title:** Optimal quantum algorithm for time-periodic/quasiperiodic Hamiltonian simulation

**Speaker 2:** Prof. Naoto Shiraishi (The University of Tokyo)

**Title:** Unbounded amplification of quantum coherence

#### **5th Extreme Universe Interdisciplinary Seminar**

**Date:** December 4th, 2023

**Speaker 1:** Masaki Owari (E01)

**Title:** Indirect control of quantum many-body systems for generation of t-design and variational quantum algorithms

**Speaker 2:** Kazunori Kohri (E02)

**Title:** Possible formation of induced gravitational waves and light primordial black hole dark-matter in inflationary cosmology as suggested by NANOGrav15yr

#### **18th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** December 19th, 2023

**Speaker 1:** Shunichiro Kinoshita (B03)

**Title:** Shooting null geodesics into holographic spacetimes

**Speaker 2:** Daisuke Yamamoto (B02)

**Title:** Holographic teleportation in artificial quantum spin systems

#### **19th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** January 31st, 2024

**Speaker 1:** Jonathan Harper (C01)

**Title:** Aspects of multi-entropy

**Speaker 2:** Masahiro Hotta (C02)

**Title:** Particle detectors and purification partners for the observed particles

#### **20th Extreme Universe Circular Meeting**

**Date:** March 8th, 2024

**Speaker 1:** Yutaka Matsuo (D01)

**Title:** A Calogero model for the non-Abelian quantum Hall effect

**Speaker 2:** Atsushi Iwaki (D02)

**Title:** Random sampling for thermal quantum states

### **● Conferences & Workshops**

#### **Recent Developments in Quantum Physics of Black Holes 2023**

**Date:** April 3rd - 7th, 2023

**Venue:** YITP, Kyoto Univ.

#### **Workshop on Quantum Simulation Research**

**Date:** April 12th, 2023

**Venue:** Univ. of Tokyo(Komaba)

#### **“Gravity and Quantum” Workshop, Kyushu University 2023**

**Date:** May 8th - 9th, 2023

**Venue:** Kyushu Univ.

#### **Extreme Universe Workshop “To inspire the interplay of experiment and theory, from material condensed matter to cold atoms”**

**Date:** May 16th - 17th, 2023

**Venue:** Univ. of Tokyo(Komaba)

#### **APCTP Workshop “Numerical Methods in Theoretical Physics 2023”**

**Date:** July 10th - 14th, 2023

**Venue:** APCTP

#### **Integrability, Deformations and Chaos**

**Date:** July 25th - 27th, 2023

**Venue:** OIST

#### **Workshop “Weaving Universe by Gravity and Quantum”**

**Date:** August 20th - 22nd, 2023

**Venue:** Shikibu Onsen Yurari





## Conferences, Workshops and Seminars in FY2023

---

**YIPQS long-term workshop “Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity”**

**Date:** September 4th - October 6th, 2023

**Venue:** YITP, Kyoto Univ.

**A novel numerical approach to quantum field theories 2023**

**Date:** October 10th - 13th, 2023

**Venue:** Osaka Univ.

**Tensor Network 2023**

**Date:** November 14th - 16th, 2023

**Venue:** Tsukuba Univ.

**The 32nd workshop on general relativity and gravitation in Japan**

**Date:** November 27th - December 1st, 2023

**Venue:** Nagoya Univ.

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

**Date:** December 5th - 14th, 2023

**Venue:** YITP, Kyoto Univ.

**2024 Kanto-NTU High Energy Physics Workshop**

**Date:** January 15th - 18th, 2024

**Venue:** Saitama Univ.

**“General Relativity and Geometry”**

**Date:** February 8th - 9th, 2024

**Venue:** Nagoya Univ.

**The 2nd young researchers’ workshop of the Extreme Universe Collaboration**

**Date:** February 19th - 23rd, 2024

**Venue:** Shirahamaso

**Workshop “Interdisciplinary Computational Science based on TN scheme”**

**Date:** March 14th - 15th, 2024

**Venue:** Osaka Univ.

**Quantum Error Correction**

**Date:** March 18th - 29th, 2024

**Venue:** YITP, Kyoto Univ.



## Lattice gauge theory simulation driven by measurement

When attempting to understand physical phenomena and theories, one often thinks about how systems change over time. If one can simulate time evolution and make accurate predictions, it indicates a good understanding of the dynamics and enables detailed comparisons with experimental results. How can we quantitatively simulate the time evolution of physical systems, especially gauge theories describing the dynamics of elementary particles, using recent advancements in quantum technology? The mainstream methods are analog quantum simulation, which mimics physical systems with atoms or ions, and digital quantum simulation using quantum computers with circuits composed of quantum gates. However, there are other possibilities that utilize the unique properties of quantum mechanics.

One such unique property of quantum mechanics is measurement. As learned in undergraduate courses, measurement (for example, in the eigenbasis of a Hermitian operator) causes the wave function to collapse, changing the quantum state to one of the basis states. This change is probabilistic and cannot be fully controlled. However, it's not entirely random; the possible changes and their probabilities are determined by the quantum state before measurement. By using partial measurement results (adaptive measurement), it's possible to change the state deterministically. For example, measuring the first qubit of an entangled state proportional to  $|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle$  in the eigenbasis of the Pauli matrix  $\sigma_z$  yields  $s=0$  or  $1$ , and subsequently acting on the second qubit with  $\sigma_x^s$  results in the final state always being  $|0\rangle$ . Extending this example, adaptive measurement allows for state transfer (quantum teleportation), the application of quantum gates (gate teleportation), and universal computation (measurement-based quantum computation).

In our work [2], we demonstrated that entangled resource states, which reflect the spacetime structure of the lattice gauge theory we wish to simulate, can realize discrete time evolution through single-qubit adaptive measurements (see Figure 1). We also showed that these resource states have symmetry-protected topological (SPT) order.

In our research in progress after paper [2], we have extended the concept of measurement-based quantum simulation to include interactions with matter fields and are exploring extensions to fracton systems and non-Abelian

gauge groups. The relationship between the resource states and the simulated gauge theory is also theoretically intriguing. While our resource states have SPT order as we stated above, generally, degenerate ground states may appear at the boundaries of such states. Indeed, the gauge theories we aim to simulate may exhibit corresponding degeneracies. We discuss other correspondences between bulk and boundary, but will not delve into them here. We plan to expand our research towards developing new bulk-boundary correspondences through measurement.

Various types of quantum computers, such as superconducting, ion-trap, and optical, are being developed, and it's not yet clear which will be superior in the long term. Measurement-based simulation methods could have an advantage in speed over circuit-based methods if measurements can be executed more quickly than entangling gates. Recently, mid-circuit measurement capabilities have also been introduced in various programmable quantum devices. We will deepen our examination to determine which quantum device is most suitable for the measurement-based simulation scheme and aim to demonstrate it in the near future.

- [1] R. Raussendorf and H. J. Briegel, A one-way quantum computer, *Phys. Rev. Lett.* 86, 5188 (2001).
- [2] Hiroki Sukeno and Takuya Okuda, Measurement-based quantum simulation of Abelian lattice gauge theories, *SciPost Physics* 14, 129 (2023), arXiv:2210.10908 [quant-ph].

### Author Information

#### Takuya Okuda

Graduate School of Arts and Sciences,  
University of Tokyo  
Assistant Professor

Born in Gifu, 1977  
Ph.D from California Institute of  
Technology in June 2005  
Current position since September 2010

#### Hiroki Sukeno

State University of New York at Stony  
Brook  
Ph.D candidate

Born in Aichi in 1993  
Graduated from the Faculty of Science,  
Department of Physics, University of  
Tokyo in March 2015  
Studying at current institution since  
August 2018

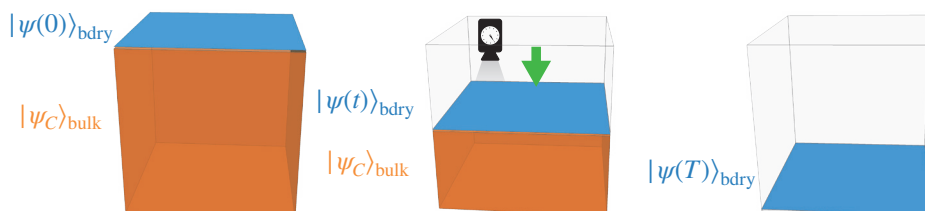


Figure 1: (Left) The input state is placed at the boundary and entangled with the bulk resource state. (Middle) Measurements induce the gauge theory's time evolution unitary and quantum teleportation. (Right) The output state is the time-evolved wave function.



## Exploring holographic spacetimes

Everyone may think it natural that when they tap an object in front of them, a large response is received around the time and location of the input. It would seem peculiar if immediately after tapping there was silence and no response, but later a large response appeared at another location. If the AdS/CFT correspondence is valid, it is expected that such a phenomenon can be observed on materials.

The AdS/CFT correspondence states that there is an equivalence between a classical gravitational system in asymptotically AdS spacetime with a negative cosmological constant and a strongly coupled quantum system on the boundary of the AdS spacetime. The asymptotic behavior near the AdS boundary of a certain field, propagating on the AdS bulk spacetime, gives physical observables in a corresponding quantum system such as an external source and a response to this source on the boundary. If the bulk field is localized deep in the bulk spacetime and has no value near the boundary, then one cannot see any corresponding response in the quantum system on the boundary. So, let's think about giving an appropriate source on the AdS boundary and exciting a spatially localized particle-like object into the bulk spacetime. This particle will move in the bulk spacetime according to the gravitational theory and come back on the boundary again. From the viewpoint of the quantum system on the boundary, the response to the input external source immediately settles down, and after a while, the response appears at a different location from where the input was received, as mentioned at the beginning of this article. In the bulk gravitational theory, this is only elementary dynamics of particle on curved spacetimes, but it may be difficult to immediately understand this phenomenon only from the picture of the quantum system on the boundary. On the other hand, if such a phenomenon occurs in a quantum system on matter, it could be a piece of evidence that the quantum system has a holographic space-time picture in extra dimensions as shown by the AdS/CFT correspondence.

Now, what kind of source on the boundary should we give in order to inject a particle into the bulk? A "particle" is characterized by fixed position and momentum. To construct such a state in a field, i.e., a wave, one must consider a wave packet that is almost localized in real and momentum spaces. For waves with sufficiently high frequency, the eikonal approximation can be applied, and the direction of the wave front is determined by the same

equation as the motion of the particle, and its wave number vector corresponds to the momentum. Furthermore, if the amplitude is given in the form of a function localized to the position of the particle, it is possible to realize a nearly localized state with a certain finite width in position space and momentum space. In other words, if a plane wave with the desired frequency and wavenumber is multiplied by an appropriate localized amplitude function as a source, a wave packet with energy and momentum corresponding to the frequency and wavenumber can be excited. At the same time, a sufficiently high frequency is a necessary condition for the dispersion to be relatively small enough in real and momentum spaces.

Based on these considerations, we have considered a scalar field in the AdS-Schwarzschild black hole spacetime as a concrete example [1]. We have solved the time evolution of the wave equation in the AdS-Schwarzschild spacetime by imposing the boundary condition given by the above source function; we have obtained the response of the quantum system on the sphere from the behavior of the scalar field near the AdS boundary (Figure 1). As expected, the excited wave packet propagates on the geodesic where the particle is moving in the bulk spacetime, and no response appears on the boundary while the wave packet is localized deep in the bulk. At the time and position when the geodesic again arrives at the boundary, the wave packet also begins to reach the boundary and the response is significant. It is also noteworthy that a tail of the response appears even after the predicted arrival time of the geodesic. This is thought to be the result of tidal disruption caused by the tidal force of the bulk black hole and the stretching of the wave packet, because the wave packet has a finite size. Such tidal forces are surely due to the curvature of spacetime, which is one of the fundamental and natural phenomena in the gravitational picture, but an explanation based only on knowledge of the quantum system on the boundary would be nontrivial.

A famous example of such tidal disruption actually observed is the impact of Comet Shoemaker-Levy 9 on Jupiter about 30 years ago. The tidal force from Jupiter disrupted the comet into several fragments, which were aligned in an elongated form, and then fell to Jupiter, leaving scars of the impacts on its surface. In the near future, if a quantum system dual to gravity is discovered in real material, we may be able to see the same physics as these astronomical phenomena in the sky, even in the material on our tabletops.

[1] S. Kinoshita, K. Murata and D. Takeda, JHEP **10**, 074 (2023)

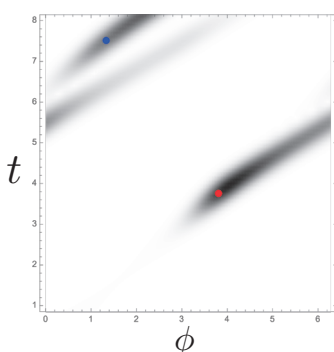


Figure 1: Response at the equator on the sphere of AdS boundary for time  $t$ . The points indicate the arrival time and location of a geodesic.



● Author Information

**Shunichiro Kinoshita**

Department of Physics, Nihon University,  
Postdoctoral Fellow

Born in Nagasaki, 1978

Graduated from the University of Tokyo  
in March 2008

Current position since April 2022





## Project A01

“One-Shot Triple-Resource Trade-Off in Quantum Channel Coding”

E. Wakakuwa and Y. Nakata, *IEEE Trans. Inform. Theory* **69**, 2400 (2022)

“Black holes as clouded mirrors: the Hayden-Preskill protocol with symmetry”

Y. Nakata, E. Wakakuwa, and M. Koashi, *Quantum* **7**, 928 (2023)

“Bayesian inversion and the Tomita--Takesaki modular group”

L. Giorgetti, A. Parzygnat, A. Ranallo, and B. Russo, *Q. J. Math.* **74**, 975 (2023)

## Project B01

“Page curve and symmetries”

P. H. C. Lau, T. Noumi, Y. Takii, and K. Tamaoka, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 15 (2022), collaboration with **E02**

“Higher derivative corrections to black brane thermodynamics and the weak gravity conjecture”

T. Noumi and H. Satake, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 130 (2022)

“Superstrata on orbifolded backgrounds”

M. Shigemori, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 99 (2023)

## Project B02

“Binary-coupling sparse Sachdev-Ye-Kitaev model: An improved model of quantum chaos and holography”

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

“Floquet States in Open Quantum Systems”

T. Mori, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **14**, 35 (2023)

## Project B03

“Transient chaos analysis of string scattering”

K. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Yoda, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 147 (2022)

“Gregory-Laflamme encounters Superradiance”

O. J. C. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 147 (2023)

“Gregory-Laflamme and superradiance encounter black resonator strings”

O. J. C. Dias, T. Ishii, K. Murata, J. E. Santos, and B. Way, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 69 (2023)

“String is a double slit”

K. Hashimoto, Y. Matsuo, and T. Yoda, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, ptad045 (2023)

## Project C01

“Brane Dynamics of Holographic BCFTs”

K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi, and N. Tanahashi, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 50 (2022), collaboration with **C03**

“Large N expansion of an integrated correlator in N=4 SYM”

Y. Hatsuda and K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 86 (2022)

“Free Fermion Cyclic/Symmetric Orbifold CFTs and Entanglement Entropy”

T. Takayanagi and T. Tsuda, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 4 (2022)

“Wedge Holography in Flat Space and Celestial Holography”

N. Ogawa, T. Takayanagi, T. Tsuda, and T. Waki, *Phys. Rev. D* **107**, 026001 (2023)

“Pseudo Entropy in dS/CFT and Time-like Entanglement Entropy”

K. Doi, J. Harper, A. Mollabashi, T. Takayanagi, and Y. Taki, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 031601 (2023)

“Late-time correlation functions in dS3/CFT2 correspondence”

H.-Y. Chen, S. Chen, and Y. Hikida, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 38 (2023)

“AdS/BCFT with Brane-Localized Scalar Field”

H. Kanda, M. Sato, Y. Suzuki, T. Takayanagi, and Z. Wei, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 105 (2023)

“Hartle-Hawking wavefunction in double scaled SYK”

K. Okuyama, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 152 (2023)

## Project C02

“Heterotic global anomalies and torsion Witten index”

K. Yonekura, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 114 (2022)

“Cosmic strings from pure Yang-Mills theory”

M. Yamada and K. Yonekura, *Phys. Rev. D* **106**, 123515 (2022)



“量子ホール系に量子宇宙を再現する”

G. Yusa and M. Hotta, *Oyo Buturi* **92**, 112 (2023)

“Cosmic F- and D-strings from pure Yang-Mills theory”

M. Yamada and K. Yonekura, *Physics Letters B* **838**, 137724 (2023)

## Project C03

“Brane dynamics of holographic BCFTs”

K. Izumi, T. Shiromizu, K. Suzuki, T. Takayanagi, and N. Tanahashi, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 50 (2022), collaboration with **C01**

“Maximum size of black hole in our accelerating Universe”

T. Shiromizu, K. Izumi, K. Lee, and D. Soligon, *Phys. Rev. D* **106**, 084014 (2022)

“Asymptotic behavior of null geodesics near future null infinity III: Photons towards inward directions”

M. Amo, K. Izumi, Y. Tomikawa, H. Yoshino, and T. Shiromizu, *Phys. Rev. D* **106**, 084007 (2022)

“Implications of the singularity theorem for the size of a non-singular universe”

K. Nomura and D. Yoshida, *Phys. Rev. D* **106**, 124016 (2022)

“Bound on energy dependence of chaos”

K. Hashimoto, K. Murata, N. Tanahashi, and R. Watanabe, *Phys. Rev. D* **106**, 126010 (2022), collaboration with **B03**

“How does SU(N)-natural inflation isotropize the universe?”

T. Murata, T. Fujita, and T. Kobayashi, *Phys. Rev. D* **107**, 043508 (2023)

“High-energy properties of the graviton scattering in quadratic gravity”

Y. Abe, T. Inami, and K. Izumi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 213 (2023)

## Project D01

“Method of images in defect conformal field theories”

T. Nishioka, Y. Okuyama, and S. Shimamori, *Phys. Rev. D* **106**, L081701 (2022)

“Velocity of Sound beyond the High-Density Relativistic Limit from Lattice Simulation of Dense Two-Color QCD”

K. Iida and E. Itou, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2022**, 111B01 (2022)

“DMRG study of the higher-charge Schwinger model and its 't Hooft anomaly”

M. Honda, E. Itou, and Y. Tanizaki, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 141 (2022)

“Probing quantum scars and weak ergodicity-breaking through quantum complexity”

B. Bhattacharjee, S. Sur, and P. Nandy, *Phys. Rev. B* **106**, 205150 (2022)

“Operator growth and Krylov construction in dissipative open quantum systems”

A. Bhattacharya, P. Nandy, P. P. Nath, and H. Sahu, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 81 (2022)

“Probing the hadron mass spectrum in dense two-color QCD with the linear sigma model”

D. Suenaga, K. Murakami, E. Itou, and K. Iida, *Phys. Rev. D* **107**, 054001 (2023)

“Comments on epsilon expansion of the O(N) model with boundary”

T. Nishioka, Y. Okuyama, and S. Shimamori, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 51 (2023)

“Schwinger model on an interval: analytic results and DMRG”

T. Okuda, *Phys. Rev. D* **107**, 054506 (2023)

“Scalar, fermionic and supersymmetric field theories with subsystem symmetries in  $d + 1$  dimensions”

M. Honda and T. Nakanishi, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 188 (2023)

“Conserved charges in the quantum simulation of integrable spin chains”

K. Maruyoshi, T. Okuda, J. Pedersen, R. Suzuki, and M. Yamazaki, *J. Phys. A: Math. Theor.* **56**, 165301 (2023)

“The epsilon expansion of the O(N) model with line defect from conformal field theory”

T. Nishioka, Y. Okuyama, and S. Shimamori, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 203 (2023)

## Project D02

“Angular-time evolution for the Affleck-Kennedy-Lieb-Tasaki chain and its edge-state dynamics”

K. Nakajima and K. Okunishi, *Phys. Rev. B* **106**, 134304 (2022)

“Quantum many-body scars of spinless fermions with density-assisted hopping in higher dimensions”

K. Tamura and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **106**, 144306 (2022)

“Gapless symmetry-protected topological phase of quantum antiferromagnets on anisotropic triangular strip”

Y. Hidaka, S. C. Furuya, A. Ueda, and Y. Tada, *Phys. Rev. B* **106**, 144436 (2022)

“Phase diagram of the square lattice Hubbard model with Rashba-type antisymmetric spin-orbit coupling”

M. Kawano and C. Hotta, *Phys. Rev. B* **107**, 045123 (2023)

“Automatic structural optimization of tree tensor networks”

T. Hikihara, H. Ueda, K. Okunishi, K. Harada, and T. Nishino, *Phys. Rev. Research* **5**, 013031 (2023)

“Entanglement bipartitioning and tree tensor networks”

K. Okunishi, H. Ueda, and T. Nishino, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 023A02 (2023)

“Numerical studies on the finite-temperature CP restoration in 4D SU(N) gauge theory at  $\theta=\pi$ ”

A. Matsumoto, K. Hatakeyama, M. Hirasawa, M. Honda, J. Nishimura, and A. Yosprakob, *PoS(LATTICE2022)* **2023** (2023), collaboration with **D01**

“Quantum critical dynamics of electric dipoles in two-dimensions”

C. Hotta, T. Yoshida, and K. Harada, *Phys. Rev. Research* **5**, 013186 (2023)

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

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

“Liouvillian gap and single spin-flip dynamics in the dissipative Fermi-Hubbard model”

H. Yoshida and H. Katsura, *Phys. Rev. A* **107**, 033332 (2023)

“Duality, Criticality, Anomaly, and Topology in Quantum Spin-1 Chains”

H. Yang, L. Li, K. Okunishi, and H. Katsura, *Phys. Rev. B* **107**, 125158 (2023)

### Project E02

“Page curve and symmetries”

P. H. C. Lau, T. Noumi, Y. Takii, and K. Tamaoka, *J. High Energ. Phys.* **2022**, 15 (2022), collaboration with **B01**

“The inflaton that could: primordial black holes and second order gravitational waves from tachyonic instability induced in Higgs-R<sup>2</sup> inflation”

D. Y. Cheong, K. Kohri, and S. C. Park, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2022**, 015 (2022)

“Quantum paramagnetic states in the spin-1/2 distorted honeycomb-lattice Heisenberg antiferromagnet - application to Cu<sub>2</sub>(pymca)<sub>3</sub>(ClO<sub>4</sub>) - ”

T. Shimokawa, K. Takano, Z. Honda, A. Okutani, and M. Hagiwara, *Phys. Rev. B* **106**, 134410 (2022)

“Reduction of one-dimensional non-Hermitian point-gap topology by interactions”

T. Yoshida and Y. Hatsugai, *Phys. Rev. B* **106**, 205147 (2022)

“Consistency between causality and complementarity guaranteed by the Robertson inequality in quantum field theory”

Y. Sugiyama, A. Matsumura, and K. Yamamoto, *Phys. Rev. D* **106**, 125002 (2022)

“Probing primordial black holes with anisotropies in stochastic gravitational-wave background”

S. Wang, V. Vardanyan, and K. Kohri, *Phys. Rev. D* **106**, 123511 (2022)

“Formation of hot spots around small primordial black holes”

M. He, K. Kohri, K. Mukaida, and M. Yamada, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2023**, 027 (2023)

“Fate of exceptional points under interactions: Reduction of topological classifications”

T. Yoshida and Y. Hatsugai, *Phys. Rev. B* **107**, 075118 (2023)

“Search for Gamma-Ray Spectral Lines from Dark Matter Annihilation up to 100~TeV toward the Galactic Center with MAGIC”

H. Abe et al. the MAGIC collaboration, N. Hiroshima, and K. Kohri, *Phys. Rev. Lett.* **130**, 061002 (2023)

“Threshold of primordial black hole formation against velocity dispersion in matter-dominated era”

T. Harada, K. Kohri, M. Sasaki, T. Terada, and C. M. Yoo, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **2023**, 038 (2023)

“Exact renormalization group for wave functionals”

T. Kuwahara, G. Tanaka, A. Tsuchiya, and K. Yamashiro, *Prog. Theor. Exp. Phys.* **2023**, 033B03 (2023)

“Generating quantum entanglement between macroscopic objects with continuous measurement and feedback control”

D. Miki, N. Matsumoto, A. Matsumura, T. Shichijo, Y. Sugiyama, K. Yamamoto, and N. Yamamoto, *Phys. Rev. A* **107**, 032410 (2023)

“Entanglement dynamics of the non-unitary holographic channel”

K. Goto, M. Nozaki, K. Tamaoka, and M. T. Tan, *J. High Energ. Phys.* **2023**, 101 (2023)

“Effective description of a suspended mirror coupled to cavity light: Limitations of Q enhancement due to normal-mode splitting by an optical spring”

Y. Sugiyama, T. Shichijo, N. Matsumoto, A. Matsumura, D. Miki, and K. Yamamoto, *Phys. Rev. A* **107**, 033515 (2023)





# 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT



学術変革領域研究(A)

極限宇宙の物理法則を創る



新学術領域

情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理



## 合同座談会「『情報と物理学』の明日」

2023年10月、「情報と物理学」が共通のキーワードとなっている二つの学術領域、学術変革A「極限宇宙」と新学術「生命の情報物理学」と合同で座談会を開催しました。同じく情報と物理学がキーワードで、この10月から始まったERATO「沙川情報エネルギー変換」のメンバーも含め、「情報と物理学」について熱く語り合いました。

### なぜいま「情報の視点」なのか

**司会** さきほど岡田さんの方から、生物の分野では「情報」という単語がいろいろなレベルで使われてるというお話がありました。今回、事前にテーマとして「なぜいま情報の視点なのか」というのをメールで挙げたのですが、「情報の視点」と言っているものが、「情報論的な手法を使ってる」だけなのか、もっと、遺伝情報を例とするような「情報の観点からの研究」を差すのか、どちらの意味で「情報の視点」と言っているのかで話が変わるのではないかと、中田さんが指摘されてたのですが、どうでしょう、基本的に極限宇宙のほう、というか、物理の人がやってるのは情報の手法ということでしょうか。

**堀田** 多分、きちんと量が測れるものか、シグナルかという違いがあって。素人感覚では遺伝情報っていうのは measurable なものと、シグナルとしての2つの意味があると思うんですけど、量として同じ土台では扱えないんじゃないでしょうか。

**中田** その話をするのであれば、情報とは何かっていう、つきつめると結局そこにいくと思いますね…。

**沙川** 詳しく教えてください。

**中田** 僕がメールで言いたかったのは、情報の観点から研究が行われるようになったのか、情報の手法を用いて研究が行われるようになったのか、そこは区別してもいいのかな、ということです。狭い見方になるかもしれないですけど。当然、情報が何かっていうのは大前提としてよくわからないところで残るんですが、例えば、エントロピーとか、そういったものを用いて研究するというのが最近いろいろ進んできて、量子系だったら量子系の von Neumann エントロピーとか、それに関連した相互情報量とか、いろいろな量が使われるようになってきたと思うんです。けれども、それは単に確率分布みたいなものがあれば、結局、エントロピーが出てくるわけなので、確率を特徴づける一つの量

としてエントロピーを使って、そのエントロピーが物理の現象と関係してる、そういう研究は様々されてると思うんですよね。そこでいろいろな新しい物理がわかってきてると思うので、非常に面白い分野の進展だとは思いますが、でも、確率論に基づく量を使っているから、それが情報の研究だ、情報の観点から研究してますよと言っていいのかと問うてみると、ちょっと違うんじゃないかなという気分も個人的にはしています。例えば、ちょっと狭い見方かもしれないですけど、情報だったら何か情報源があって、ちゃんと i.i.d. リミットがあって、それで漸近極限だったらこうなるとか、そのあと i.i.d. の仮定を緩めるとか、そういうふうなあたりで研究が進んでいくことが多いと思うんですよ。だから、情報論のそういった考え方にのっとって物理を解析しているっていうのはそんなに多くはないんじゃないかな。で、そんなに多くはないと言ってからあれなんですけど、多分、ここにいる人たちはそういうことをやってる方なので、ここではマジョリティになってるかもしれないんですけど、物理全体を見ればまだそこまで情報の考え方、パラダイムっていうのは浸透してなくて、その情報に関係する量、言っちゃえば確率論に関係する量を使ってる段階にあるのかなという気はしています。

**沙川** 情報量を使うか、情報の研究をしてるかみたいなことでしょうか。

**中田** そうですね、情報の観点というのが情報の研究をしてるかという感じで、情報の手法といってるのは情報量を使うかっていう、そういう感じだと思いますね。

**沙川** そういう意味では、i.i.d. とか研究したことあるのは、多分、この中では僕と中田さんだけじゃないかな。

**中田** 多分、実際にやるかやらないかって、個人の興味とか、何を知りたいかというので決まると思うので、別にやらなくてもいいとは思いますが、そもそもそういった i.i.d. とか、本当に狭い意味での情報と物理が、相性がいいのかっていわれると、そんなによくないんじゃないかなと。情報



### 座談会出席者

後列左より川口喬吾氏(●)、中田芳史氏(■)、伊藤創祐氏(●、◆)、堀田知佐氏(■)、中島秀太氏(■)(司会、ニューズレター担当)。

前列左より岡田康志氏(●)、高柳匡氏(■)、沙川貴大氏(●、◆)。

※●は生命の情報物理学、■は極限宇宙、◆は沙川ERATOメンバー

熱力学っていうのは非常に特殊な例で。

**沙川** いや、情報熱力学はi.i.d.とかあまり出てこないです。出るのはリソース理論…

**司会** i.i.d.がちょっとわかんないです。簡単に説明していただけますか。

**中田** 理想気体みたいなもんだと思ってください。

**沙川** 独立同分布、independently and identically distributed。

**司会** ありがとうございます。

**沙川** 情報熱力学は「情報を使う」ほうです、むしろ。それほど情報そのものという感じじゃありません。一方で、リソース理論はむしろ情報理論に寄りすぎていて物理的意味が微妙な点もあります。だから、物理として面白いものは情報を使ってるだけになりがちだし、情報理論そのものの研究しだすと物理的意味が微妙になってくる、そういうトレードオフがある。

**中田** そうなんです。で、それ、恐らく量子情報で物理に興味のある僕みたいな研究者って研究する中でずっとジレンマを持っていて、情報の手法を使って情報の観点から研究したいけど、いや物理って情動的な研究するの向いてないよね、というふうにもなっちゃう。なので、そこが本当に相性いいのかどうかっていうのはよくわからないなという気持ちはしています。

**堀田** でも、情報で提案されてる“量”が私たちにとっては役に立つのであれば、十分、われわれはうれしいので。

**中田** それはもちろん全然いいと思いますし、実際に役に立って面白いことがいっぱい分かってるので、非常に興味深いなと思ってはいます。

**堀田** 中国人が日本で本場の中華料理をやっても受けないみたいに、物理の人にとって情報というものを持ってきたときに、物理ナイズされた情報というものが私たちにとっては価値がある、というのは十分あっていいんじゃないかと思うんですけどね。

**伊藤** 何かi.i.d.の話も出たと思うんですけど、恐らくそれを情報理論と思うのはすごい由緒正しい通信路符号化とかで

**中田** いや、それも狭いと思います(笑)。

**伊藤** 通信路符号化のシャノンの定理とかみたいところから始まった話だと思うんですけど、恐らく情報理論もそれから進展していて、いろいろさまざまなタスクに応じて

さまざまな情報の量が提案されて、それぞれ使い道があって。だから、物理の研究として情報を使うときには提案された中で一番問題に合っているものを使えばいいんじゃないかっていうのが個人的な考えです。僕が今やってるような話で言うと、最適輸送理論という、オリジンとしては数学から始まったような話が情報理論にインスパイアされて、いろんな量が提案された理論があり、この理論が熱力学で使われ始めてきたので、僕もこの理論の量を使っています。歴史的なシャノンのi.i.d.の情報源みたいな話とは独立な考えですけど、そういう別の情報の理論を使って問題が解ければそれはそれで物理としてはうれしいかなと思っています。

**高柳** 素粒子論の分野に使うときも、定義された情報量として量を計算することが多いんですけど、ただ、やっぱり操作的な考え方っていうんですかね、本当に情動的な視点、それも非常に重要なのかなと最近は思っております。まだあんまりうまく応用はできてないんですが、もしかしたら今後大きな発展につながるのかなと。われわれがやるゲージ・重力対応とか、重力を見ると、今おっしゃったi.i.d.ですか、それを最初から取られているような不思議な性質を持っていて、取っても取らなくても変わらないような、私あんまり専門的ではないので間違ったこと言ったら申し訳ないんですけど、そういう状況を特別に取り出して研究しているようなところはある。そういう意味で、操作的な考え方って非常に今後重要になってくるんじゃないかなと個人的には思っています。

**司会** 計算複雑性みたいな話はどっちに分ければいいのでしょうか？情報を使う方じゃなくて、情報そのものの研究になるんですか？

**堀田** そのものの研究です。逆にあれば、私たちにとってはやや理想化されすぎた量になってまして、計算複雑性とかでこういう系は計算不可能とかいわれているようなものでも、私たちは昔からすごくたくさん計算を実際的にはできてたりするので、その辺はコンセプトの違いだと思えます。

**沙川** 熱力学の絡みだと、第二法則は普通は多項式時間でサチるわけです。例えば普通の(von Neumann型の)エンタングルメント・エントロピーは、系のサイズについてリニアなところでサチる、つまりLieb-Robinson時間くらいで



## 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT

緩和すると思います。一方で、最近注目されているのが、中田さんがご専門だと思うんですけど、何かあれですね、僕が説明するのはちょっと(笑)、

**中田** いやいや、どうぞどうぞ。専門の人が説明すると大体マニアックなほうに行くので(笑)。

**沙川** 量子状態の複雑性、その状態を用意するのに必要な量子回路の数ですね、それで測ると、実はその時間では緩和してなくて、緩和に指数時間かかっているという仮説が、Susskindらが言い出したのがあって。それが最近、ある設定で証明されたんですね。その仮説は、もともと結構怪しいなと思ってたんですけど、少なくともその設定だと証明できるのかという驚きがありました。もともと物理で緩和時間というのは、いわゆるエルゴード性に絡んで、いろいろ紛糾する話なんですけど、まあバリストティックなら線形な時間で緩和する。一方で、局在現象とかがあると緩和に指数時間かかるので全然緩和しないという話が、統計力学にはある。いろんな人がいろんなこだわりを持っているわけなんですけど、ただその場合に見ている量は、単なる物理量期待値とか、単なる von Neumann エントロピーとかなんですね。で、それを量子計算複雑性で見ると、その論文で考えているような物理系だと

**中田** 物理系ではないですね。あれはランダム回路。

**沙川** うん。ランダム回路では、多項式時間ではサチらなくて、指数時間かかると。でも、普通のエンタングルメント・エントロピーを見るとリニアでサチるはずなんです。そういう意味では、いわゆる伝統的な第二法則において、単なる von Neumann エントロピーとかを見てるのは、オーダーとして低い、低次の緩和しか見ていないことになる。ランダム回路ではなく、シュレーディンガー方程式に従うハミルトン系の場合は、どうなんですかね、そこは…

**中田** いま話しているのはランダム回路って言って、本当にランダムに量子回路をかけていくだけの非常に簡単なトイモデルで、厳密に数学的に示したっていうのが去年やられた結果で、そのあと、ちょっと進展もあるんですけど。一方で、そういったランダムにゲートをかけていくのに対応するようなハミルトン系は、ランダムな相互作用系だろうみたいな気はして。それを一番理想化したのがランダム行列理論といわれるもので、局所相互作用とか、そういう制約は一切取っ払って、完全にランダムなハミルトニアンを持ってきたときに、今言ったような量子回路複雑性がどういうふうになるかっていう研究は、少しはされています。

**沙川** どうなるんですか？

**中田** それはもちろん指数時間かけて徐々にサチって行って、プラトールを作って、再帰時間のあとには元に戻って、を繰り返します。

**堀田** 何がサチる？何を観察するんですか？

**中田** ユニタリーで純粋状態  $|\psi\rangle$  を時間発展させる。そうすると、 $U|\psi\rangle$  みたいな状態が実現するわけです。ただ、こ

の  $U$  をかけることが、 $U|\psi\rangle$  を作る最短な方法じゃないかもしれない。

**高柳** 複雑性、complexity。

**堀田** complexity っていうんですね。

**中田** はい。complexity を見てるんですけど、その  $U|\psi\rangle$  という状態を最短な方法で作ったときにどれぐらいゲート数が必要ですかっていう問題設定です。ハミルトニアンが十分ランダムであれば指数的な個数のゲート数が必要だろうというのは何となくみんな予想していることだとは思いますが。

**沙川** いわゆる第二法則ってももとは現象論なわけですけど、複雑性をちゃんと見てないってことなんですかね？

**中田** それは、エントロピーとかで高次の項を見るのは結構難しいと思うので、複雑性を正確に見るのは難しいかなと。

**沙川** 多分、Rényi エントロピーを高次にするとだんだん高次になる。

**中田** そうそう。で、Rényi エントロピーの、先ほど、線形時間でエントロピーがサチるっておっしゃったと思うんですけど、それは Rényi-2 まではサチっていて、Rényi-3 とか 4 とか見てたら多少そこからずれる。エントロピーの本当の上限とサチった値にはちょっと差があって、めちゃくちゃ小さいわけですけど、その小さな差まで気にするのであれば、サチった後でもエントロピーの値は上がっていったらと思うんです。でも、この話はエントロピーの上限が  $N$  とかで、人々がサチったと思う値が  $[N-1]$  とかなので、残り 1 をめちゃくちゃ時間かけて上がっていったらみたいな、そういう描像です。それを見るのはエントロピーでは見づらかったっていう話だと。

**沙川** そうですね。だから、本当にその差をどれぐらい重視するかっていう。

**中田** そうそう。で、それはむしろ物理の方々とかに聞きたくて(笑)、そんなの気にするの？みたいな気はします。

**堀田** そう。それを何で気にしなければいけないのかっていう。

**高柳** いま沙川さんがおっしゃってた Susskind とか、もう一つの話として、重力理論の解釈では、ブラックホールがやっぱり出てきて、ブラックホールの中の体積、時間一定面の体積が、今おっしゃってた complexity になると。そうすると、どんどんリニアで増えて行って、一方でエンタングルメントは面積になるんですけど、それは確かに途中でサチっちゃうんですね、かなり速く。ですけど、体積になるとブラックホールの奥まで入って行って、それが本当に無限の時間までいってしまう。言い換えると、指数関数的な時間までってことなんですけど、そういう意味で、ブラックホールの時空をちゃんと理解するためにも、実は複雑性っていうのは非常に重要ですね。

**堀田** 原理的な理解としては必要であるってことなんですかね。

**高柳** ええ。ブラックホールの中を見るためには複雑性が



## ●参加者紹介

### 極限宇宙

**高柳 匡**：専門は素粒子理論。学術変革(A)「極限宇宙」領域代表。

**中島秀太**：専門は冷却原子・量子光学実験。「極限宇宙」ニュースレター担当。司会。

**中田芳史**：専門は量子情報理論。研究テーマは randomness makes it fun。

**堀田知佐**：専門は物性理論、量子多体系、物質科学。

### 生命の情報物理学

**岡田康志**：専門は生物物理。新学術「生命の情報物理学」領域代表。

**沙川貴大**：専門は統計物理と量子情報。ERATO「沙川情報エネルギー変換」総括。

**伊藤創祐**：専門は統計物理と情報幾何。沙川ERATO最適輸送理論グループグループリーダー。

**川口喬吾**：専門は生物物理。最近の研究興味は動物形態の進化、核内動態、生体分子複合系など。

必要だっていうのがもともと Susskind が言っていて、重力の観点からはそういう意味で面白いと。

**堀田** だから多分、どこら辺に理解したいターゲットを置くかに応じてゴールが変わってくるので、それがちゃんと def が取れてればいいってことなんですね？

**中田** それはそうです。

## 実用主義と原理主義

**堀田** ちょっと似たような話で、many-body localization は本当に起こっているのかどうかというのをみんな結構最近、話題にしてるんですけど、many-body localization って基本的に緩和をしない系の一例なんですよ。だけど実際には、本当は中途半端に緩和しているところをみているだけで、最終的にはものすごい長い時間かけると結局は緩和してしまうんじゃないかっていう問題提起が、アバランチという話でされてるんです。これに対して、そもそも数値解計算の実験で、オブザーバブルな範囲で十分 many-body localization という現象が well-defined であればそれでいいんじゃないかという考え方もあって。これと、真に厳密に緩和してるかどうかを明らかにしなければいけないという二つの立ち位置があると思うんですけど、まあプラクティカルな人なのか原理主義なのかという違いが。

**中田** 量子情報ってのは大体原理主義側の意見なので、それが本当に物理に何か意味を持つかって言われると、それぞれの興味に依存するっていう感じだと。

**堀田** うん。物性はものすごくプラクティカルな学問なので、むしろ原理主義っていう話はどちらかという物基・統計の世界だと思ってる。住み分けはしてるんじゃないかと。

**司会** 私の専門の冷却原子の実験系は基本的には孤立量子系になっていて、本当に熱平衡化するのかという話もなくはないんですけど、大抵もう運動量分布を見るとガウシアンになってるんでプラクティカルには熱平衡になっていると考えるし、むしろ冷却原子の実験で割とちゃんと熱平衡になっている気がするな、というところから孤立量子系の熱平衡化とかいう話が注目されるようになったかと。プラクティカルに見てうまくいってるように見えるっていうのが、少

なくとも議論の呼び水にはなると思うので、どちらの立場でやってもいいのかなと、実験家の立場として思います。

**中田** 多分、本当はその辺もうちょっと強調されたほうがいいのかなと。やってる人はみんな、自分はここに興味があるから、これで緩和していたら緩和と呼びましょうっていうのをわかってると思うんですけど、これから初めてこの分野に入ってくる人には、緩和ってみんな違う意味で使ってるのに、全部同じ意味に見えちゃって、そうすると、みんな言ってることが違うじゃないかということは起こり得るので。よく物理の人と共同研究すると緩和の意味が違いすぎて、はじめ何言ってるか互いにわからないみたいなこともある。

**堀田** 多分、それ自身が原理主義の人の意見なんです。

**中田** なるほど。

**一同** (笑)

**中田** そうかもしれないですけど、わかりました。じゃあ、原理主義は原理的な意味での緩和です、みたいに言うようにします。

## 生物と情報

**伊藤** 恐らくですけど、原理主義から遠い側にいるのが生物物理の話だと思うんですよ。ちなみに僕自身は化学反応の情報処理の研究を生物物理としてやっています。量子情報をやらないことの一つの言い訳として、量子的な量は生物で測るのが難しいからというのがあるんですけど。生物物理のお二方はどう思いますか(笑)。

**川口** 先ほど、物性はプラクティカルだってことをおっしゃってて、確かにそういう面もあるんだと思うんです。一方で、何が役に立つかわからないみたいなことに関して、物理の人は寛容な感じがするですよ。今は使えないけれどもいずれ役に立つかもしれない、と考える懐の深さがあるから、例えば量子情報の分野で実験では難しかった時代から深く研究されていたエンタングルメント・エントロピーが、その後物性物理でも使えて、ブラックホールの理解にも有用であるという話になっていったのではないかと思います。他にもたくさんのごうした成功例があるから、物理の方では総じて新しい理論についての寛容さがあるのだ



## 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT

と思いますが、一方で生物のほうでは、一見役に立たなさそうな理論が後になってすごく大事になってくるみたいな事例があったのかが、そもそも疑問なのですよね。情報と生物のかかわりというのは昔から議論されてきましたが、では果たして現代版にアップデートされた情報理論が生物の理解に役に立つのか、というところで皆がんばっているところです。

**司会** 先程のお昼休み中に出てきたバイオインフォマティクスみたいな話を超えて、データの処理とかじゃなくて、最初の話に出て来た、もっと情報を使うほうじゃなくて情報の視点でっていう意味ですかね。

**川口** そうですね、生物の人は昔から情報とのかかわりを論じるのがとても好きな印象があります。そもそもシャノンの情報理論のインスピレーションになっていたシラードエンジンの話からして、シラードが生物的な知性とか何かを定量化しようという試みで考案したモデルなわけですし。沙川さんや伊藤さんがやられてる量子情報熱力学とか、情報幾何みたいな話っていうのは、生物の分子モーターの理論のような具体的なものを参照しつつ、より一般的で抽象化したマルコフ過程の枠組みの中でいろんな新しい理論が展開できるという感じだと思いますが、ではそれをどう生物に戻していくかということに私は関心があります。

**司会** ありがとうございます。

**岡田** さっき堀田さんが、シグナルか、それともちゃんと定量的に測れるものかという点で、情報といっても違うんじゃないかみたいな話、特に例えば遺伝情報みたいなのはただのシグナルでしょって

**堀田** いや、ただのというのは、全然素人考えで。

**岡田** いえ、あえて対比するために強調したんです。でも、それはそういう側面もあるかもしれないですけども、実際はstaticにシグナルとしてあるわけではなくて、情報処理なんです。例えば、遺伝情報を複製するのだからってプロセスとしてあるわけですね。そうすると、沙川さんの古典系の話なんかとも関係する話になります。どこまでが情報の話か、どこまでが非平衡の熱力学の話かって切り分けるのは難しいので、そこはごっちゃにしますが、スピードリミットみたいな話とか、いろんなトレードオフが発生する中で、生物って進化的にきつと何らかの意味でrefineされているだろう。最適かどうかはわかんないけど、でも、よくなっ



生命の情報処理においてどういう設計原理が働いているだろうか？

てるはずのmachineryがどういうふうにできあがってて、どういう意味でうまくいっているのか。この新学術のキーワードの一つは機能とコストのトレードオフ関係で、情報とか情報熱力学はその、いま物理のほうで定式化できている例として取り上げています。つまり、生物というものをmachineryとして見たときに、ある機能を実現するためにどういうコストを支払って、どういう意味で最適化されてるのかという問いです。例えば、ただ単に熱力学的な効率を最適化するだけでできてるかと言ったらそんなはずはないだろうと。この新学術のプロポーザルのときに出した例は、カルノーエンジンです。熱効率率は最高かもしれないけど、仕事率としては最低なわけですね。で、仕事率で最高は何かという話になると、まさに情報熱力学とか、そういう手法を使って議論が行われてきたわけです。例えば、さっきの遺伝情報の話に戻すと、遺伝情報をコピーするときには、ある程度正確でなきゃいけないし、めちゃくちゃ遅かったら今度は増えられないので、ある程度スピードも必要だし、もちろんある程度はエネルギーも節約しなきゃいけない。というように、いろんな制約条件の中でやってくるはずですけど、いったいどういう制約条件のもとでどれが一番リミットとして利いてるんだらうとか、そういうことも含めての情報というのを考えたい。生体内の化学反応ネットワークを情報(処理)と一見アナログ的に言ってるけど、アナロジーを越えて、ちゃんと物理の情報熱力学の議論を持ち込んでくると、どういう設計原理がそこに働いてるかということがわかるんじゃないか、ということをやりたいというのが新学術の目的です。そういう意味で、ただのシグナルかもしれないけど、でもシグナルを処理するときには処理する熱力学限界があるでしょうという話で、その辺が沙川ERATOにDNAとしてつながってるんだといいなと(笑)

**一同** (笑)

**沙川** つながってると思います。

**堀田** だから、コストファンクションがどうやって作れるか、ちゃんとシステムティックに作れるかどうかというチャレンジだと見ていいんですね？

**岡田** そうです。

**堀田** それって多分、生物だけじゃなくって、物理でも起こってる現象を理解するためにどういうコストが一番利いてくるか歴史的にわかってる例がたくさんあるので、多くはそれを参考にしていますが、実際には何もかもわかってるわけじゃないので、新しく考えなくてはいけないことはたくさんあると思います。

**司会** マテリアルインフォマティクスとかいうときには設計を最適化してる？

**堀田** 私、専門家じゃないので何ともいえないんですけど、一言カラいことを言っておくと(笑)、例えば、私は仕事柄、実験の人とのつき合いが結構多いんですけど、特に実際に物質を作ってる方は、若手の人も含め、マテリア



ルインフォーマティクスは必要だよねとはもちろん言うんだけれども、本当に面白いものはそういうふうにはできないって言いますね。今、機械学習にしる何にしる、既存の情報を集めてAI処理すれば今までできなかったことができるって一種のbeliefみたいながあると思うんですけど。一つの大きな疑問としては、そういう情報を集めることによって偶発的に自然にできていることに対して、AIがcomparableにそれに張り合えるのかどうかです。現場の実感としてはノーなんだと思います。計算してできることは、例えば人知を超えたレベルの計算であったとしても所詮計算の結果にすぎないという考えという方ですかね。

**司会** 一応、冷却原子とか、量子計算界限の人は、量子シミュレーションすれば今まで不可能であったレベルで物質設計や量子化学計算ができることを売りにはするんですけど、そもそも量子計算機がちゃんとまだ動いてないんで。

**堀田** やれることはやったほうが良いと思うんですけど。それがどこまでいけるかっていうのはまだオープンクエスチョンだと思います。

**中田** ちなみに先ほど、僕が情報の観点とか手法を言いだした関係で、一つだけコメントさせていただくと、今日、生物の話を少し聞いただけで、生物って情報の観点から研究が進んでそうだなと、僕の意味で。例えば、DNAを単に情報を圧縮したものと考えて、生物っていうのはDNAっていう圧縮されたものを解凍してるみたいに思うと、情報処理の塊というか、そういうふうなものを見なせるので、そこから情報がどういうふうに展開していくとか、スピードとかも関係してくると。もともと、確率分布みたいなものが絶対あるような系なんで、生物って。情報生物みたいなのは、もう手法とか、観点とか、そういう細かいのを抜きにしてすごく相性がよくて、一つ分野として融合できてそうだなっていうのはすごく今感じました。

**沙川** 逆に手法しかないっていうのはどの辺の分野なんですか。

**中田** 例えば、一時期、ものすごくはやったエンタングルメント・エントロピーを計算しましたとか、ああいうのは物理としては面白いけど、それが情報として何か意味を持つのかなみたいな気は、個人的にはします。ただし、強調しておきたいのは、物理として面白いので、それはそれでいいんですけど。

## テンソルネットワークからAIまで

**堀田** 先週の(領域研究会の)トークで、テンソルネットワークで既存の波動関数の一部をどんどん欠損させていったとき、どれくらい情報を落とさせたら元に戻るかみたいな話あったじゃないですか。多分、中田さんはそういうのをすごい気にされるんじゃないかと思ってて、それこそ今、ちょっと情報がどれくらい欠損したら再現するかみたいな研究をしてらっしゃるじゃないですか。残った情報のパーセン

テージみたいのがすごい小さくても再現できるって話だったと思うんですが、ああいう話についてどういうふうに思われるんですか。

**中田** あれは面白いなと思いますが

**堀田** 面白いんだけど、現実的には、ああいうものを聞いたときに情報理論として…

**中田** いや、その話を聞いたときに本当に一番初めに思ったのは、っていうか、その話は皆さんご存じないんですよ、

**堀田** そうですね。すみません。

**中田** 多体系で局所相互作用するハミルトニアンがあったとして、その基底状態が決まるわけですね。まあ、一つに決まるとしましょう。で、その基底状態の一部の情報しか持っていない、何か知らないけど、ちょっと消えちゃったよみたいな、一部の情報しか持っていないときに、その情報からほかの残りを全部復元していくっていう話がありまして。

もう少し具体的にお話すると、今失ってるのは、例えば、スピニアップダウンとかで展開した展開係数です。普通は粒子数に対して指数個の展開係数がある訳ですけど、そのうちの例えば10個しか知りませんと、そこから残りの展開係数を全てを復元してくださいみたいな、そういうふうなタスクを考える。ナイーブに考えると無茶なタスクに思えるんですが、割と多くのハミルトニアンでテンソルネットワークという方法をうまく使ってやると、初めは一部の係数しか知らないのに全部復元できちゃうよっていう話があるんですね。

**沙川** それ、ギャップの場合？

**中田** 僕の理解している限りでは、適当なハミルトニアンで試してみたら数値的にできましたという話で、多分ギャップじゃないとできないはずですよ。もっと言ってしまうと、QMAハミルトニアンとか、計算量的に非常に難しいことがわかってるハミルトニアンだとできないと思うし。

**沙川** ギャップだとそもそも古典シミュレータブルですよ？多分。

**中田** あ、言うのを忘れていましたが、ハミルトニアンが局所相互作用というのは分かっているけど、どのような局所相互作用なのかは分からないという状況だったはずですよ。

**沙川** でも、そこでいきなりQMAハミルトニアンとか持ってくると絶対間違っているので、だから、まあ解けそうなやつしか

**中田** そうそう。だから、リーズナブルなやつで。で、今は物性の、わかんないですけど、ハイゼンベルグとか、そんなのを仮定してやってみたら…、

**堀田** でも、ハイゼンベルグはギャップレスですからね。

**中田** あ、そうですね。何か仮定してやったらできましたよっていう感じ。

**堀田** いや私も、論文読んでなかったんで、トークだけ聞いてると、あれは結構ドラステックな主張だなと思ったんですよ。

**中田** はい。だから、この話を研究会で聞いて真っ先に思っ





## 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT

たことは、面白いけど、この類の結果は仮定を明確にしないと非常に誤解を招くなど。極論を言ってしまうと、自明なハミルトニアンを持ってくれば簡単にできるだろうし、一方で難しいハミルトニアン持ってきたら絶対できないので。おそらく、論文には正確に書かれているだろうとは思いますが。

**堀田** もちろん。ただそれ、さっきの疑問と同じになるんだけど、原理主義というのはどういうことかっていうと、すべてのアプリケーションに対して可能じゃなきゃいけないとできるといえないっていう立場だと思っただけです。だから、これでできましたというのは、どっちかという実験主義的なもので、例えば、あの主張をローカルなある問題についてこれができるかと捉えるのか、たまたま都合がいいやつで一番やりやすい問題を取ってきたからできましたと捉えるのかって問題なんだと思います。

**中田** そうですね。それは結構、物理と情報で見方が分かれるところかもしれないですね。

**沙川** それ量子計算で、多分いま一番大きな問題ですよ。例えば、量子化学計算とかで基底状態エネルギー求めたいってなったときに、本当に任意のハミルトニアンを考えると、QMAハードだから効率的に解けないわけですよ。でも、多分、ギャップが多項式で閉じるようなやつに限定したらBQPに入っていて、ギャップなら古典シミュレータブルなんですよ。だから、そういう良いやつに限定したら、多分、量子コンピューターは実用になるだろうっていうのは信念としてあるんですよ。

**中田** うん。ああいうことやっている人たちはそうだと。僕は「良いやつに限定したら解ける」という主張が面白いのかという点に関しては結構フラットな立場ですが、基本的には沙川さんのおっしゃるとおりだと思います。

**沙川** 本当に任意っていうふうにしちゃうと、もう何もできないんで。

**堀田** ただ、どういう限定にするかという問題もあって。

**高柳** 摂動とかだったら簡単なんですよ。うちの領域の森前さん、LeGallさん、早川さん達の最近の成果はその方向性ですね。

**中田** 摂動ができるようなものだったらアプローチは簡単ですね。

**高柳** でも、いっぱいミニマムがあるような系だとすごく大変そうですね。

**中田** その場合は答えを見つけるのは大変でしょう。

**堀田** ミニマムな話だとちょっと話がずれちゃうと思うんですけど、ニューラルネットワークってグラスで理解できるみたいなお仕事、ご存じですか？あんまり浸透していませんか？

**川口** そう言う方もいますね。

**堀田** 何かあの考え方、私、好きなんですけど、結局、ニューラルネットワークをどう理解するかっていったときに、阪大の吉野さんの仕事なんですけど、多層ネットワークを考えて、情報を入れて、中にある構造を育ててみましょうと

いうのをやるんですよ。端から何層もネットワークがあって、ある一連の情報を与えたときの育ち方にいろんなパターンがあるんだけど、それがもう指数関数的な数のソリューションがあったときに、その間のソリューションは、端のほうのネットワークはすごいそっくりで、中にいくほど全然似てないんだけど、機能としては全く同じで。これは解空間にたくさんの谷があって、その谷同士は一見あんまり似てないんだけど、同じソリューションを返すっていう考え方なんですよ。だから、そういうふうになると、本当はそういう脳とかAIってものすごいたくさんソリューションがあって、単にそれは見た目が似てないだけで、私たちが判定するツールが弱いだけだっただけの話もあるので、だから、例えば、何か少し物理の問題が与えられるときに、その解を見たら、その解が真でかつユニークなソリューションであることがどれぐらい担保されてるかっていうのは問題にもよると思うんですけど、何が言いたかったのか、だんだんわからなくなってしまいました(笑)。

**伊藤** (笑)。ニューラルネットワークにしる、ディープラーニングにしる何かがいつも何かと対応づきますよね、みたいな話は多分無限のようにあって。最近、僕がその類の話で聞いたのは、拡散系がすごいディープなネットワークとみなせるっていうやつです。で、なぜそういう話が出てきたかという、そもそも拡散モデルという生成モデルの一つが非常に良いクオリティを出す認識され始めたからです。情報の人たちがディープラーニングとかでやってた方法よりも、拡散モデルでやったらもっとよくなったみたいなところがあって。そうすると、拡散系がやはり非常にディープなネットワークとみなせる、というようなあつきの理由が出てくるわけです。でも、その事自体は、拡散系は多自由度だし、確率過程だしっていう、僕らはもう前から知ってたようなことを、言葉を言い換えてるように聞こえています。ただ、やっぱり言い換えだけじゃなくて、その意見が市民権を得たのは、いわゆるあるタスクに対してとてもいい性能を出したということが非常に重要だったんじゃないかなと思っています。そういう言い換えは、それが意見として価値があるような何かの成功したアプリケーションがあって、初めてすごい重要な考え方になるんじゃないかなと思います。

**沙川** AIは動いてなんぼですよ。多分動かなかつたら意味がない。

**堀田** ただ、動いてなんぼなんだけど、物理の人はどうしても自分が何で動いているのかがわかりたいという欲求があって、それに対する解釈はいろいろあってもいいと思うんだけど、一つの納得する解釈を与えてくれるんだと思うんですよ。

**川口** でも、現代のAIの発展ということで言うと、物理屋の貢献はかなり少ないと思うんですよ。拡散モデルの元の論文の一つではJarzynski等式という非平衡物理の理論が言及されているんですが、これはインスピレーションに

なってこそすれ、実際には物理側からの貢献と言えるレベルではないように感じました。他にもタンパク質のフォールディングはかつて統計物理の大きな問題の一つだったと思いますが、結局AIに解かれてしまったわけで、物理学の危機というほどではないにせよ、結構違うパラダイムはきてるなって感じはするんですよ。

**堀田** プラクティカルには、物理では解けないような領域に行っているという意味ですか。

**川口** そうです。生物側の気持ちとしては、定量的に数式をつけて色々意味のある理論をつけてくれるのは今までは物理屋しかいなかったけど、100年ぐらいいっしょにやってみてあんまり実りがないから、そろそろディーブローニングのほうに乗り換えようかな、という感じではないかと。

一同 (笑)

## 生物物理と生物の距離～鳥の群れ

**堀田** 逆に川口さん、なぜ生物物理をやってらっしゃるんですか？

**川口** 私は生物のことがわかれば究極的には何でもいかなというふうに思っているんですけど。

**堀田** 物理というアプローチには特にこだわらない。

**川口** そうですね。物理的な視点が有用なときにはもちろん使いたいです。でも例えばアクティブマターという分野では、鳥の群れ運動をシンプルな非平衡モデルで記述したりしますが、そのモデルはフロッキング転移という、みんなの向きがそろって同じ向きに飛び始めるという転移があるんです。このVicsekモデルが研究され始めていた頃は、その転移の次数が1次転移なのか2次転移という議論があって、結局1次転移ということになっていたんですけども、そもそも本当に熱力学的極限でフロッキング相が安定なのかという話はまだ議論が分かれているようです。数値計算の他に、Toner-Tuモデルというもので摂動的繰り込みの結果フロッキング相が安定という結果が示されていたので、みんなそれを信じてたんですけど、真に大きな系では安定ではないかもしれないとか、ちょっとした障害物でオーダーが壊れているかもしれないというような示唆が数値計算の結果得られています。でもこうした議論では、もはや本当の鳥の群れは関係ないわけです。1億羽以上の粒子を集めたらフロッキング転移したのかしないのかという話や、ましてや真の熱力学的極限なんて鳥からしたらどうでもいい。俺たちは100羽の群れが飛べればいいんだと思ってます。物理屋的には熱力学的極限で相が安定なのかどうかは大事な問題なんですけど、生物の方面からしたらそれはもういいやって感じになるところがあるんです。

**沙川** それ、さっきのMBLの話とすごい似てると思うんです。本当にMBLあるかないかって、実験でrelevantになることは

**堀田** ないない。

**沙川** それこそ冷却原子にめっちゃ頑張ってもらうしかないと思うんですけど

**堀田** でも、もう無理ですよ？あれは。

**司会** はい、冷却原子系では何となくそれっぽく見えてるし、光で散逸入れたらMBLっぽかったものが緩和しますみたいなこともやってたりもするんですけど。

**沙川** 本当に孤立系のMBLがあるかどうかってというのは。

**堀田** だから、実験でも数値計算でも本当に永遠に実験的には答えは得られない問題ではある。

**沙川** うん。だから、すごい似てるなと思うんですよ。鳥の群れの極限。

**川口** でも、本当に鳥の群れのことが知りたくて研究してる人もいます。

**堀田** (笑)

**川口** 鳥の群れでなくとも、例えば細胞集団運動のルール解明というようなこともアクティブマターのテーマとしてよく掲げられます。細胞集団運動のことがアクティブマターの物理でわかれば器官形成のルールがわかって病気が治るかも、というような宣伝も…

**堀田** 役に立つと宣伝されたんですか。

**川口** あくまで誇張した例ですが、他にも生物物理では生物の役に立つというようなことを言っているわりに、実態はただ物理を探究してるだけということがあるなと感じます。それでいうと、物理と情報、あるいはそれ以前の確率的熱力学といえば、生物はいかにも良いアプリケーションの対象に見えるのですよね。でも、本当にそれが生物の理解の役に立っている例が、驚くほど実際は少なくて。それがいまいち知られてないとか…うまくいってないことを宣伝するのちょっと変な感じはするんですけど、とても役に立ちそうだけど実践編では難しい、ということ自体が伝わりにくいような気がしています。

**堀田** 一応、生物の中でも、生物物理っていうのは生物とは違う部分にあるっていうのは、認識はしています。

**川口** それも人によって違うと(笑)。

**堀田** 何となくそういう意味では、本当に生物をやってる人とちょっとだけ雰囲気が違うのはわかる。

**川口** 例えば現在の生物学の中心となっている分子生物学を作った人たちにも、物理出身の人がいっぱいいるわけで、生物と物理のそれぞれの立場というように単純に分けきれ



生物物理と生物の距離





## 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT

るものではないのですが、やはり鳥の群れなど具体的な生物の問題が解きたいという需要は常にあるんです。そこでそれを解決してくれそうな物理屋に期待して、物理屋もそれに乗るんだけど、結果双方が納得する成果が得られるとは限らない。

**司会** ちなみにその鳥の群れの話ってどういうふうモデル化しているかわかってないんですけど、飛んでる鳥が隣の鳥はどう飛んでるかみたいなのは知ることができるってモデル？

**堀田** そうそう。だから、視野角みたいな、どこまで見えるかという。

**川口** もともとのVicsekモデルは2次元のXYモデルに変更を加えたもので、各スピンのその場所に座ってるわけじゃなくて、自分のスピンの向きに向かって一定速度で走っていくようにするものでした。

**司会** 素人の考えなんですけど、実際、鳥の気分になったときに、隣の鳥がこっち向いてるみたいな、目で認識してっていうのはまさに情報の観点というか、隣の鳥の情報を知って自分が反応してるみたいな気がするんですけど、それは、モデル化する時には情報を得るとか、そういうのは入ってこないんですか？

**堀田** 入ってくる。

**川口** モデルでは単純化して、一定距離内にいるエージェントと同じ方向を向くような相互作用を入れていますが、実際の鳥の群れで鳥の間の相互作用を調べている人もいて、それによると鳥は視野内にいる一番近い4羽くらいの影響を受けているらしいです。

**堀田** だから、平均場で、自分が、みんな速度を持っていて、アングルだけ考えて、そのアングルを見たときに、隣の何匹か、ある範囲内にあるやつを検知して、そこからの平均場で自分がどうするか決めるみたいなこと。

**司会** そこで情報を得るみたいなのがうまいこと入ると。

**堀田** うん。それは多体化すると普通の多体XY模型なんだけど、バリエーションとしては視野角を狭くしたり広くしたりすることももちろんできて、それによって情報をどれくらい得るかに応じて、群れの形成され方が違うんでしょうね。

**川口** でも、あくまでモデル化する時には情報っぽさはほとんどなくて、ただの相互作用なんで。

**堀田** 数理モデルですね、完全な。

**川口** もちろん鳥の中で実際何が起きてるのかっていうのを研究しようと思ったら脳の情報処理になるんですけど。

**堀田** だから、多分、数理モデル化、完全にできるのかどうかということに対しての問題ですよ。言ってしまうと割と物理まで落ちてしまうんだけど、それ以上のことを生物は本当はやってるんじゃないかという。

**川口** 非平衡物理の問題としては、詳細はともかくXYモデルでスピンを自己駆動粒子に代えるような単純な模型で本当に相転移するのか、というのが元からの問題意識なので、

それに従うと熱力学的極限をとって議論するような話にやはりなってしまいます。でも元の生物の問題を離れて、スピントロポニクスみたいなして物理が発展していくというところにはあります。アクティブマター以外にも、例えばゆらぐ世界の熱力学では生体分子モーターについて理論化したということが元の動機としてあったと思いますが、その文脈を離れて独立しておもしろい研究が進んでいき、情報熱力学などにつながったのではないかと。

**沙川** そういう意味では、情報の観点、手法ってあったんですけど、情報の雰囲気しかないっていうもの、結構あって、鳥の群れなんてまさにそれですよ。多分、鳥と鳥の移動エントロピーとかも計算しようとしたらできるんですけど、やっても面白くないのか知りませんが、多分、誰もやってないですよ。

**伊藤** やってる人はいますね。

**沙川** そうなんです。それをやったとき、移動エントロピーを測るところでようやく情報の手法ぐらいいまで行って、情報の観点到達するのは難しそうですね。だから、鳥が周囲を認識して行動を変えましたということ、情報という概念で捉えることにどのくらい意味があるのか。だから、そこであえてエントロピーとか、相互情報量とかを測ろうっていうのが多分、情報の手法みたいなところですね。一方で観点っていうのもっとすごいというか。

**中田** 観念的なものというか、もうちょっと直接的には役に立たないものというか。

**堀田** でも、例えば、バードフロッキングの行動原理が何らかのバードフロッキング全体で測れるエントロピックな内部量があって、そのコストファンクションを使って行動原理が説明できたら少し情報っぽくなるんじゃないですかね。

**中田** それは相当情報の手法を使ってる僕の中ではカテゴライズされます。情報の観点かどうかは分かりませんが、すいません、個人的な基準です(笑)。

**堀田** (笑)

**中田** でも、いや、一番初めに言ったんですけど、結局、情報って何かっていうことで、われわれも多分、情報って言ったときに非常にざっくりとした意味で使うこともあれば、すごいピンポイントな意味で使うこともあると思うので、その辺の、どういう意味で情報っていう言葉を使っているのかを明確にしてから話を進めた方がよい、とまとめちゃってもいいような気がしますけど。

### エンタングルメント・エントロピーとその周辺

**川口** むしろ物理の中でどういうダイナミックに今なってるのか、すごい気になって。例えば、エンタングルメント・エントロピーが大事だってなったら、いきなりアプリケーションにいくという以前にまず、冷却原子などを使って実験できるかというところに一つの分岐点があるのでしょうか？



**堀田** まずそもそもそれを測れたっていうのが多分、冷却原子ではそれなりのいい成果だと思われる感じです。

**川口** でも、本当にやりたいこととか知りたいことってのもずっと先にあるわけですよ、きっと。

**堀田** 道が遠いんです。

**川口** (笑)

**司会** 一応、冷却原子で見えている実験としては、光格子中の冷却原子に対して超流動-モット絶縁体相転移の前後でエンタングルメントエントロピーを測る。そうすると、超流動相だと原子が広がっているんで、適当なところで切って、片方の領域をトレースアウトして残りを見ると、広がっていたものを無理やり切ってトレースアウトしたので混合状態になっていて、こっちの領域でエンタングルメント・エントロピーを計算すると有限のエンタングルメント・エントロピーが出てくる。一方でモット絶縁体状態という原子が局在している状態に対して片側トレースアウトすると、局在しているからこちらとはもうデカップルしていてエンタングルメント・エントロピーはほぼ出ない、というのを実測した実験があります。あと冷却原子は孤立量子系なのですが、十分時間が経つと熱平衡になる。なるんだけど、孤立量子系なので、本来、純粋状態であるべきなんです、例えば、全系でエンタングルメント・エントロピーを評価すると全系では純粋状態なままでエンタングルメント・エントロピーは変わらないけど、部分的にトレースを取ってみると、確かに部分系についてはエンタングルメント・エントロピーの意味でエントロピーが増えてという、quantum thermalization through entanglementといったものが冷却原子系で実際にエンタングルメント・エントロピーを測って評価したという実験があります。ただ、かなり特殊なセットアップ、「 $2 \times 4$ 」とか「 $4 \times 4$ 」個の原子系で実験していて、原子数を増やすとエンタングルメント・エントロピーの評価をするのがとにかく面倒になるので、熱力学極限みたいな話に全然ならない。ただ一応、小さい系でもとりあえず物理の実際の系でエンタングルメント・エントロピーが測れているというのは大きくて、いろんなところで宣伝するんですけど。

**沙川** モット転移とかはエンタングルメント・エントロピーは測らなくてもわかるわけじゃないですか。

**司会** わかります、ぶっちゃけ。

**沙川** それをあえて。

**中田** 頑張ってる必要性は？っていう(笑)。

**一同** (笑)

**司会** はい。「 $2 \times 4$ 」とかの系ですからね。

**堀田** だから、むしろわかっている系を使ったときに、実験的には、実際に予想できるようなことがシミュレートできるかということを押さえとかないといけないですよ。理論的には自明であっても、本当にそれはモデル計算で実現してるだけで、実験でやってうまくいくかどうかかっていうのは。

**中田** それはそう。実験的にすごいのはすごいんですけど。

**司会** 実際、冷却原子系の実験、例えば、『Nature』あたりに載る研究は、やっぱりが解釈クリアじゃないといけなくて、割と数値計算と合いますよっていうところがどうしてもあって。そういう意味でも、計算できないところをやるっていうのはまだまだ難しいですね。

**堀田** そうですね。それこそ Hilbert space fragmentation も、Monika Aidelsburger がすぐ提案されたあと実装したんですよ。あと、量子スカーなんかはむしろ実験から提案されたので、良いこともある。

**高柳** また全然違う方面ですけど、重力理論の研究だと、一般相対性理論で計量を用いて、マクロな宇宙を説明します。計量って、要するに面積とか体積とかで重力の働いている宇宙を記述して、それがアインシュタイン方程式に従って宇宙が広がったりするんですけど、宇宙の一番最初を調べようとする、ものすごい小さい、プランクスケールという最小のスケールになってしまうんですね。そうすると、もうアインシュタイン方程式は全く適用できない量子重力っていう領域になるんですけど、その時にいったいどうやって空間の大きさを測るか。このときに計量や古典的な幾何学が全く使えない領域になるので、どうしようかなと思ったときに、実はこのエンタングルメント・エントロピーがいい量じゃないかと期待できることが、ホログラフィー原理からわかるんですね。なので、僕にとってはエンタングルメント・エントロピーは、宇宙の大きさ、という印象を実は持っているんです。もちろん、その一方で物質の相を分類するときとか、今おっしゃってたように相転移の研究で活躍していますが。

**堀田** うん。私たちはどれぐらい波動関数に表現力が必要かっていうことを

**高柳** ええ。コストですね。

**堀田** だから、自分たちが実現しようと思ったらどれぐらい大変かっていうことを目安だよ。

**高柳** いろんな解釈ができて非常に面白いと思います。

**司会** そうなのが、冷却原子でもうちょっと頑張ってる測れると、多分、こころは喜ぶだろうな(笑)。

**堀田** あと、やっぱりエンタングルメントっていわゆる熱力学量じゃないから、今までもエンタングルメント・エントロピーがどういう振る舞いをしてればこの相であるとか、相じゃないとか、いろんな議論があったけれども、実際に測れる量じゃないってみんな思ってたんですよ、2010年前後ぐらいまでですかね。正確じゃないのであれですけど。だけど、それが冷却原子ならではの努力で多少なりとも測れるようになったということは少し実験と理論が近づいてきたという。

**高柳** 私もコロキウム講演のときなどに取り入れることができて、測れますっていうことは言うことができるのでありがたいです。

**伊藤** もちろん今、エンタングルメント・エントロピーが



## 特別企画：2 学術領域合同座談会

SPECIAL EVENT

すごいやって、それが測られてすごいという認識になると思うんですけど、

**堀田** それも結構前からですけどね。もうはやってるといえるのかどうかよくわからない(笑)。

**伊藤** でも、それ以外の量も、っていうのもあり得ると思うんですよね。で、僕らの分野でよく最近いわれるのは、エントロピーに近いような分布間の違いの尺度である、KLダイバージェンスと呼ばれる量、つまり相対エントロピーよりも、別の量の方がもっといいんじゃないかということです。それが最適輸送理論で言うところの Wasserstein distance というやつです。それがなぜ使われるかということ、機械学習をするときに KL ダイバージェンスみたいな量はすぐ発散してしまうと。KL ダイバージェンスだと勾配法などで坂を下って学習をしていくときに勾配消失や発散などが発生して全く使えなくて、一方で Wasserstein distance という量はなかなか発散しない。だから、連続的に変化することができる。この二つの量の違いは実は分布をどう見るかみたいな、見方の問題で、KL ダイバージェンスはある変数が実現できる確率がそれぞれ値を持っていたときにちゃんと比較できる量なのに対して、Wasserstein distance は全く実現しないものと実現するものを比較するときに使われる。それで機械学習のほうだと、今は Wasserstein distance のブームがきているわけです。そのブームも KL の方にまた戻ってくるかもしれないですけど。要は情報みたいなものをメジャーとしてどう使うかによって、問題に応じていい量っていうのは多分いろいろあります。そちらの分野では今はエンタングルメントエントロピーがすごいやってるんだなという、そういう印象を受けているんですけども…。

**堀田** いやでも、意外とエンタングルメント・エントロピーが一番はやってたのは2000年代前半で、今はもうちょっといろいろ変わって、今は Rényi-2 よりも上が、ダイナミクスやると Rényi-2 よりも上いかないと分解能が変わっちゃうっていうのが

**沙川** それ、さっきの話。

**中田** それ、本当に重要なんですか、

**堀田** わかんないけど。

**中田** 単なる素朴な疑問なんですけど、いや、僕はそういう細部に拘るような研究もしているから、N分の1ぐらい

の量が重要なこともあるんですけど、僕にとってはですよ。でも、物性の方にとってこの差って本当に重要なんですか(笑)。

**堀田** その辺は、私しかないから困るんですけど、私も偏ってるんで。あと私、どうも統計寄りの友人が多いんですよ。なので、その人たちはそういうのを気にします。

**中田** そういうイメージありますね。

**堀田** もう物質寄りの人はそういうものが存在してることにすら知らない人もいます。

**中田** 気にしてないですよ。N分の1のオーダーなんかもう気にしないですよ、普通。

**堀田** うん。そもそもダイナミクスとか、そういう話がエンタングルメントと絡むとかいう認識すら、物質科学系やっている人のそんなに多くは持ってないと思います。

**沙川** いわゆる量子物性の人もあまり気にしてないって感じしませんか。

**堀田** そうでしょ。だから、phase separation が物性という分野でおこっている。それは多分、私の勝手な解釈なんですけど、歴史的には物質科学って固体物質をいじる科学だったんだけど、大体いろんなことがわかってきてしまって、そのあとはどういうふうにくっついていうと、よりテクニカルに、ちょっと古典プラスちょっと量子みたいな感じで、いろいろいじってやることによって、工学とのブリッジみたいなものを意識しながらやっていくような方向性、個別性と、高度に抽象化して統計みたいな普遍性に寄っていくっていうのがものすごくくっきりと分かれちゃったようなところがあって、両方にブリッジしてる人っていうのはすごい少ないんですよ。だから、中田さんとかが認識されてる物性の人はこの統計系の人なんですよね。

**中田** 最近、僕もようやく統計と物性を使い分けるようになりました。

**堀田** ありがとうございます(笑)。

**中田** ようやく。めちゃくちゃ遅いですが(笑)。

**堀田** 極限宇宙の人はみんな、統計の人しか物性の中の視野に入ってなくて、その後ろに広大な人口がいることをようやく少しはわかっていただけたんじゃないかと思うんですけど(笑)。

**中田** 物理の道に入って20年ぐらいたってようやく認識しました。

**沙川** 僕は物工にいるのでよく知ってます。

**高柳** あと、伊藤さんがおっしゃってた他の量で、相対エントロピーは重要でよく使いますし、ネガティブティという量を混合状態のエンタングルメントを調べる際に利用します。先ほどの沙川さんの話とかにも出てきました複雑性、complexity、それも非常にはやってるトピックになってますね。

**堀田** あと、積分の前のエンタングルメント・スペクトラムっていうのは前から使いますね。

**高柳** ああ、物性でよく使われてますよね。



エンタングルメント・エントロピーは宇宙の大きさ？

**堀田** エンタングルメント・スペクトラムはそれこそ本当にfingerprintだと思っていて、局所密度行列の詳細がわかるんです、構造が。だから、それこそホログラフィック対応とかも認識としては似てて、カットしたときにそこで出てくる密度行列をどう解釈するかって、その構造をハミルトニアンとして見るっていう考え方なんですけど。

**沙川** そのエントロピーの研究ってリソース理論だと思うんですけど、「エントロピー zoo」みたいのがあって、無限にあるんですよね、エントロピーの定理って。

**堀田** (笑)

**沙川** そのzooのうちどれだけが良く使われるのかは分からなくて。

**高柳** 計算するのが難しいんじゃないですか。

**沙川** そういうのもあると思いますね。

**堀田** 1個、新しいのをやったら仕事になったりするんですか、1個ずつ？

**沙川** そうです。もうほとんど無限にあって。なかには実際に計算することが非常に難しい量もあるはずなんですよ。ね。にもかかわらず、漸近極限をとるとだいたいKLになってしまったりする。その辺が物性や弦理論とどう関わるかは難しい。

**中田** そう。間違いない。

**沙川** エントロピー zooみたいなのが果たしてどこまでいわゆる物理に関係あるのかっていうのは。

**中田** エントロピーの研究って形式美を追求するっていうところはありますよね。で、実際に計算しようとするとか計算できないからじゃあ極限をとっちゃえと。そうするとKLダイバージェンスで落ち着きましたみたいな(笑)。

**沙川** そう。だから、最終的に全部KLになる。

**中田** そうなんですよ。どうしてもそうならざるを得ないと、僕も思います。

**沙川** ただ、漸近論って大昔からあるわけですよ。で、エルゴード理論とかも数学でよく研究されていて、すごい難しい話なんですけど、それを全部見通しよくしたのがリソース理論とかの話で、そういう意義はあると思うんです。一方で、たとえばスムーズ・エントロピーとか、実際の物性系などで計算するのは難しい。

**中田** あれはでもSDPなので、一応できて。恐ろしいレベルのSDPなので、実際やろうとすると8 qubitぐらいがマックスですけどね。ただ、計算量の意味では効率的なんですよ、あれ(笑)。効率的なんだけど、実際には難しいという感じ。

**沙川** たしかにそうですね。

**中田** そうなんだけど、効率的の定義がわれわれが実感できる効率性とは違うという話ですね。

**沙川** 原理的にはスムーズ・エントロピーが計算できるというのは、仮説検定とのつながりですね。

**中田** できるんですが、実際はつらいですよ。実際のアルゴリズムって計算量が問題のサイズに対して線形ぐらいじゃないと使い物にならないので。

**沙川** でも、そういう意味では、全然、ハミルトニアンプロブレムとかよりはましと。

**中田** ましですね。

**司会** そろそろ開始から90分、一講義分ほど経過したので、ここで一旦休憩入れましょう。

※座談会後半については「生命の情報物理学」ニュースレターに掲載予定です。

またスペースの関係上割愛された冒頭の各領域の説明などを含む「全体版」を、後日領域Webページで公開予定です。

## ●企画協力

新学術領域

「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」

<https://infophys-bio.jp/>

JST-ERATO

「沙川情報エネルギー変換プロジェクト」

<https://www.jst.go.jp/erato/sagawa/>



座談会(前半)終了。お疲れ様でした。

後列右端は青木一洋氏(「生命の情報物理学」ニュースレター担当)。





# 2023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2回 極限宇宙市民講演会

開催日：2023年11月18日

場所：オンライン(Zoom)開催

対象：一般市民 200名

講演者1：中田芳史(A01)

タイトル：『量子情報：量子の奇妙から情報へ、情報から物理へ』

講演者2：白水徹也(C03)

タイトル：『2023年極限宇宙の旅：ホーキングが残した課題を道しるべに』

## ●アウトリーチ活動・一般向け講演

### NHK文化センター名古屋 宇宙講座「宇宙と物質の起源」 『ホログラフィック原理とはなにか』

開催日：2023年4月19日

媒体/団体名：NHK名古屋

対象：一般市民

講演者：重森 正樹(B01)

### アインシュタイン～天才科学者の殺人捜査～

開催日：2023年8月1日

媒体/団体名：AXN

対象：一般

講演者：野澤真人(C03)

### 大阪大学理学部オープンキャンパス模擬講義 『素粒子と対称性』

開催日：2023年8月10日

媒体/団体名：大阪大学理学研究科・理学部 湯川記念室

対象：高校生 約100名

講演者：西岡辰磨(D01)

### 大阪大学理学部「サイエンスナイト」 『量子もつれと時空』

開催日：2023年10月18日

媒体/団体名：大阪大学理学研究科・理学部 湯川記念室

対象：一般 約130名

講演者：西岡辰磨(D01)

### 西宮湯川記念科学セミナー『量子の世界を計算する』

開催日：2023年12月2日

媒体/団体名：西宮市・西宮湯川記念事業運営委員会

対象：一般 約200名

講演者：伊藤悦子(D01)

### 基礎科学研究所 on-line cafe「湯川博士の贈り物」

開催日：2024年2月10日

媒体/団体名：基礎科学研究所(NPO法人 知的人材ネットワーク・あいんしゅたいん)

対象：一般 約30名

講演者1：伊藤悦子(D01)

タイトル：『量子コンピュータでみる素粒子の世界』

講演者2：中田芳史(A01)

タイトル：『量子と情報の出会い』

### 第19回附置研究所・センターシンポジウム

#### 『量子コンピュータと素粒子の世界』

開催日：2024年3月2日

媒体/団体名：京都大学研究連携基盤

対象：一般 約500名

講演者：伊藤悦子(D01)

## ●極限宇宙ガイド

2023年より本領域の解説記事「極限宇宙ガイド」を領域HP「成果・アウトリーチ」内において随時、更新・掲載中。

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



## 今後の会議予定 Upcoming Conferences

### ● 領域会議 Annual Meeting

Date : 25-28 September 2024

Venue : Osaka University, Osaka

### ● 領域国際会議 ExU International Conference

Quantum Extreme Universe: Matter, Information and Gravity

Date: 21-25 October 2024

Venue : OIST, Okinawa

<https://groups.oist.jp/exu-oist>

### ● 領域若手研究会 Young Researchers' Workshop of the ExU Collaboration

Date : 12-15 September 2024 (tentative)

Venue : Hokkaido

## 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1期)については21H051XY→22H052XYと読み替えて下さい。

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

## 編集後記

2021年9月にスタートした本学術変革領域も3年度目に入り、このニュースレターも発行予定号数のちょうど「折り返し」となる第3号となりました。計画研究・公募研究の成果報告、若手国内循環プログラム報告や研究会報告など昨年度からの記事に加え、特別企画として、新学術領域研究「情報物理学でひもとく生命の秩序と設計原理」およびERATO「沙川情報エネルギー変換プロジェクト」の研究者と本学術変革領域の研究者による合同座談会を開催しました。合同企画をご快諾いただきました両領域代表および座談会関係者の皆様にこの場を借りてお礼申し上げます。「情報と物理学」を共通のキーワードにしながらも研究対象の異なる研究者達が、生命から物質、宇宙まで、熱く楽しく議論を交わす様子が読者の方々に伝われば幸いです。

私事で恐縮ですが、今年度は第1子が生まれ、若い世代にどう物理の面白さを伝えていくかという「アウトリーチ」について、今まで以上に考えるようになりました(上記の座談会はこのような思いもあり企画させていただきました)。また、本ニュースレターのアウトリーチ記事にも記載しましたが、2023年から、本領域をより多くの人に理解してもらうための解説ページ『極限宇宙ガイド』が領域ホームページ内に開設されました。SF『銀河ヒッチハイク・ガイド』に「生命、宇宙、そして万物についての究極の疑問の答え」が出てくることは有名ですが、この『極限宇宙ガイド』が、若い世代が「極限宇宙という究極の疑問の答え」に挑むための道標となることを願いつつ、ニュースレター第3号の編集後記とさせていただきます。(文責：中島秀太)

## Please follow our Web site, Twitter & YouTube!

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

領域ウェブサイト :

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

極限宇宙



extreme universe japan



領域YouTubeチャンネル

@extremeuniverse4346

領域Twitterアカウント

@ExUniverseja



# 極限宇宙 NewsLetter 03 2024 Mar.

学術変革領域研究(A) 極限宇宙の物理法則を創る  
Transformative Research Areas (A) The Natural Laws of Extreme Universe

学術変革領域研究(A)「極限宇宙の物理法則を創る—量子情報で拓く時空と物質の新しいパラダイム」  
ニュースレター第3号

発行日：令和6年3月28日

発行：「極限宇宙」総括班

編集：中島秀太〈協力：事務局 島田英彦〉

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

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

