

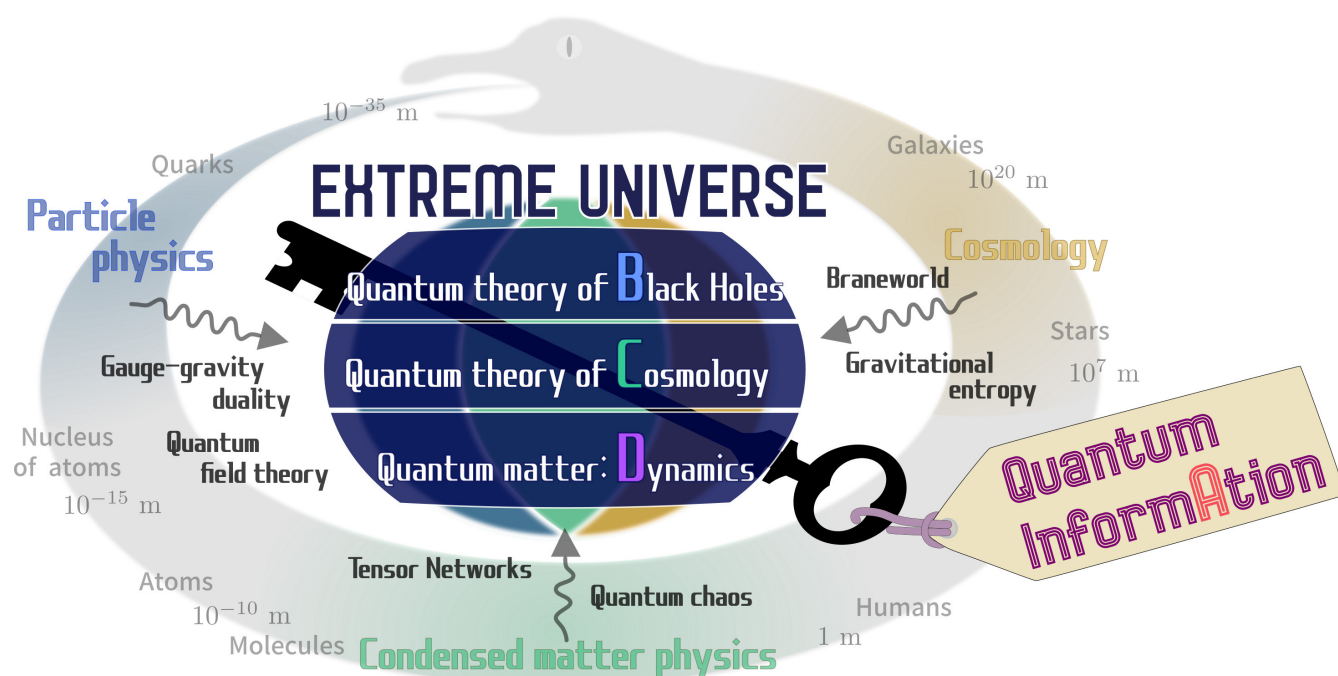


News Letter

極限宇宙
Extreme
Universe

OI

2022 Mar.



Contents

Overview

Outline of Each Projects

Keyword

Conference Reports

Research Highlight

Research Outline & Organization

A01/B01/B02/B03/C01/C02/C03/D01/D02

What is quantum information? (Yoshifumi Nakata)

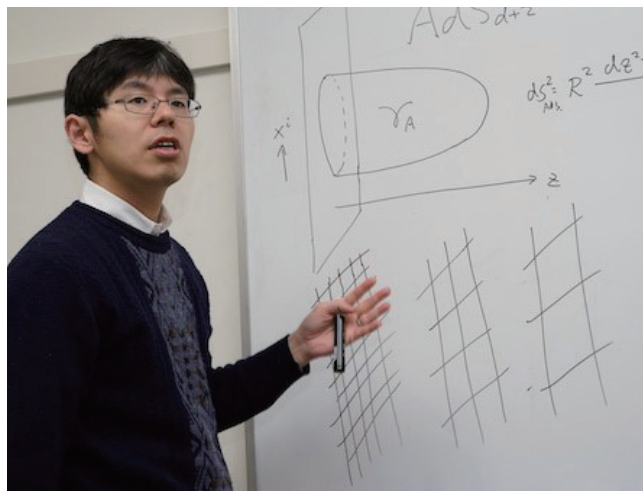
IFQ-ExU Joint mini workshop / ExU Annual Meeting etc.

Gauge/gravity correspondence for three-dimensional de Sitter space (Yasuaki Hikida)

Contents

- 02 巻頭言
領域代表挨拶 (高柳 匡)
- 03 領域概要
領域の研究概要/領域の研究体制
- 06 計画研究紹介
A01班/B01班/B02班/B03班/C01班/C02班/C03班/D01班/D02班
- 15 トピックス:キーワード
量子情報とは何か? (中田 芳史)
- 17 研究会報告
キックオフミーティング/IFQ-ExU共同ミニワークショップ/領域会議 他
- 20 2021年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧
- 21 トピックス:最近の研究から
3次元ドジッター時空におけるゲージ/重力対応 (疋田 泰章)
- 22 Preface
Inauguration address (Tadashi Takayanagi)
- 23 Overview
Research Outline/Research Organization
- 26 Outline of Each Projects
A01/B01/B02/B03/C01/C02/C03/D01/D02
- 35 Topics:Keyword
What is quantum information? (Yoshifumi Nakata)
- 37 Conference Reports
Kickoff meeting/IFQ-ExU Joint mini workshop/Annual Meeting etc.
- 40 Conferences, Workshops & Seminars in 2021-2022
- 41 Topics:Research Highlight
Gauge/gravity correspondence for three-dimensional de Sitter space (Yasuaki Hikida)
- 42 お知らせ
今後の会議予定 Upcoming Conferences/論文等での Acknowledgment について
- 43 編集後記

領域代表挨拶



領域代表

高柳 匡

Tadashi Takayanagi

京都大学基礎物理学研究所 教授

量子情報の時代の到来とともに、物理学の変革が今まさに求められています。物理学の理論は、スケールの違いによって、素粒子論、物性理論、宇宙論のように分野に分かれてこれまで研究がなされてきました。しかし、最近の研究成果のおかげで、量子情報理論やゲージ重力対応と呼ばれる考え方を導入すると、それらの理論の根底にあるものは実は全て同一であることが明らかになりつつあります。昨年9月に発足しました我々の学術変革領域研究(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」では、この新しい研究の潮流を推し進めることで「極限宇宙」の学理構築を目指しております。領域メンバーの皆様の活発な研究活動のおかげで、異分野間の共同研究も様々な角度から展開され始めております。

理念と目的

本領域では、量子情報を自然界の基本的な構成要素とみなすことで、大きな進展が期待される3つの対象:「ブラックホールの量子論(量子ブラックホール)」「宇宙創成のメカニズム(量子宇宙)」「量子物質のダイナミクス」を量子情報と物理学の異分野融合によって解明することを主な目的としています。この三つの対象は一見、別々のテーマのように思えるかもしれませんが、量子情報の視点から考えると、全て量子ビットの集合体のダイナミクスとして捉えることができます。それぞれ、「空間の極限」、「時間の極限」、「物質の極限」に挑むテーマであることから、本領域ではそれらを総称して「極限宇宙」と呼んでおります。本領域では、量子情報理論と理論物理学を融合する理論的な研究のみならず、比較的コンパクトな装置を用いる冷却原子や量子ホール効果の物性実験を通じて、ブラックホールや宇宙創成と

いった壮大な対象を模した実証実験も行う予定です。

異分野融合

本領域では、異分野融合を促進するために月に一回、領域メンバーによる循環ミーティングを開催しております。分野別に行うのではなく、複数の分野が協力して主催し、共通の研究対象に向けた研究活動を報告して、共同研究を発展させる機会を提供するものです。また、国内外の一般の研究者への公開のイベントとして、月に一回、極限宇宙コロキウムをスタートさせ、招待講演や講演後のオンラインコーヒブレイクを通じて、異分野の研究者が交流する場となっております。「極限宇宙」の様々なトピックに関する研究会も領域メンバーによって活発に企画され、領域が発足した秋以降に既に5件の研究会が今年度に開催されました。

若手研究者の育成

異分野融合で変革の原動力となるのは、自分自身の経験を踏まえて考えても、なんといっても若手研究者です。本領域では、前述の循環ミーティングやコロキウムにおける討論に加え、異分野研究グループへの長期滞在プログラム、海外の研究機関への派遣プログラム、そして毎年開催する領域スクール、などを通して、若手の融合研究への参画を触発していきたいと考えております。



本領域は始まったばかりですが、上記のような研究活動を通じて、今後の発展が待望されるこの異分野融合領域「極限宇宙」への革新的な貢献を行っていきたいと考えております。

領域概要

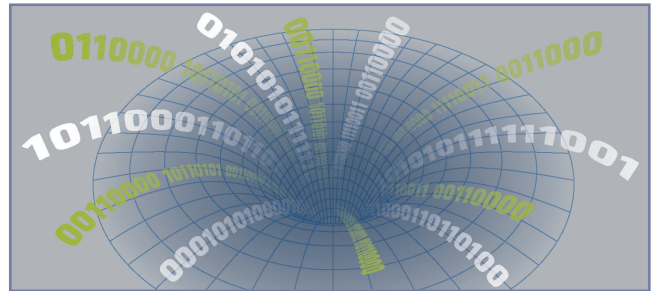
領域の研究概要

従来、物理学では時間と空間と物質を基本的構成要素として自然法則を説明してきました。しかし、自然界における極限的な状況（これを本領域では極限宇宙と呼びます）では、対象となる物理系が持つ強い量子性のために、空間・時間・物質の自由度自体が強く揺らぎ、既存の物理学の理論体系では困難に直面してしまいます。この極限宇宙とは、自然界における次の3つの極限（空間の極限、時間の極限、物質の極限）を意味します。

1 ブラックホールの量子論 [空間の極限]

基本的な問い

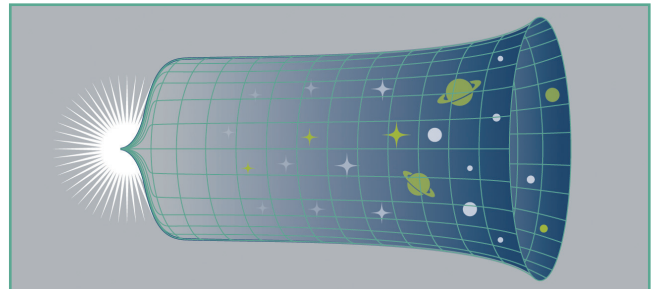
ブラックホールが蒸発すると
中の情報は消えてしまうのか？



2 宇宙創成のメカニズム [時間の極限]

基本的な問い

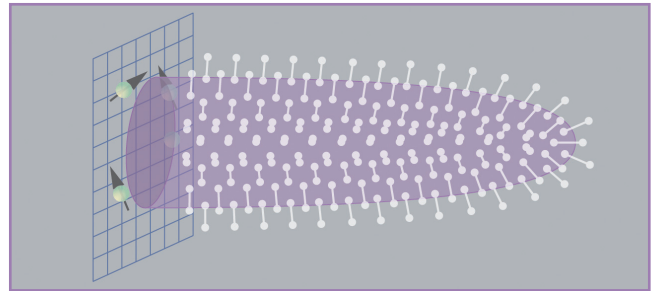
宇宙創成を説明する
究極の自然法則とは何か？



3 量子物質のダイナミクス [物質の極限]

基本的な問い

量子物質のダイナミクスは
どのようにすれば効率的に解けるのか？



しかし、21世紀に入り、「量子情報」分野が勃興すると、その新しい物事の捉え方が物理学へダイナミックな変革をもたらし始めました。量子情報とは、次世代の主要技術と期待される量子計算や量子通信を基礎づけ、ミクロな世界における情報の最小単位「量子ビット」とその間の相関を意味する「量子エンタングルメント（量子もつれ）」の理解と系統的制御法を提供する新しい考え方です。この「情報の極限」とも言える量子ビットが担う情報を自然界の基本的構成要素とみなすことで、時間・空間・物質の立場で捉えていた従来の描像を脱し、究極の物理法則を構築できると期待されます。

超弦理論の分野で発見されたゲージ重力対応は、重力理論を量子物質の理論に等価に結びつけます（AdS/CFT対応、マルダセナ双対性と呼ばれます）。さらに、この対応において、量子エンタングルメントの大きさを測る量であるエンタングルメント・エントロピーは、重力理論における曲面の面積に等しくなります（笠-高柳公式と呼ばれます）。このことから、重力理論の宇宙は量子情報の無数の集積とみなせるという予想が生まれ、世界中で注目されています。一方、このような量子情報の集積はテンソルネットワークとよばれる量子物質の高精度な数値解析手法を与えます。そこで本領域では、量子情報と物理学（素粒子・物性・宇宙）を融合させ、極限宇宙の解明を目指します。

極限宇宙の3つの問題で、対象となるスケールはそれぞれ大きく異なりますが、量子情報の視点に立つと全て量子

ビットの集合体として物理法則が統一的に理解できると期待されます。物理学は、ウロボロスの蛇に例えられるように、様々なスケールに対応する個々の分野から構成されております。本領域では、このドーナツ型（トーラス型）の縦割り型の従来の物理学の構造を、量子情報との融合によって、球体型の新しい物理学へとトポロジーを変化させることで、極限宇宙の問題に迫ります。



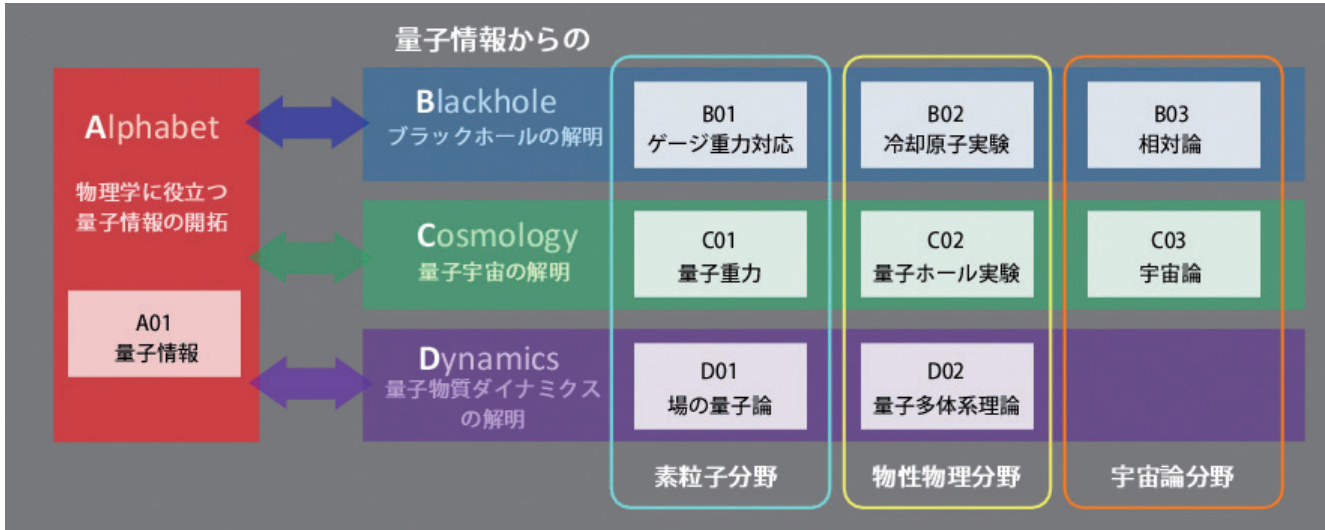
領域の研究体制

● 計画研究

本領域は9つの計画研究から下の図のように構成され、その研究目標から大きくA,B,C,Dのグループに分かれます：

- Aグループ** (計画研究A01)： 物理学に活用する量子情報理論の基礎的研究
- Bグループ** (計画研究B01,B02,B03)： ブラックホールの量子論 (量子ブラックホール)
- Cグループ** (計画研究C01,C02,C03)： 宇宙創成のダイナミクス (量子宇宙)
- Dグループ** (計画研究D01,D02)： 量子物質のダイナミクス

また、B,C,Dのグループでは、素粒子論(01)、物性物理(02)、宇宙論(03)からのアプローチを担当する計画研究に細分化されます。このように、本領域では、縦糸(従来の研究分野のつながり)と横糸(共通の研究目標)の両方がうまく絡むことで分野融合を促進し、ブレークスルーを起こすことを狙います。また、理論的な研究のみならず、比較的コンパクトな装置を用いる冷却原子(B02)や量子ホール効果(C02)の物性実験を通じて、ブラックホールや宇宙創成を模した実験検証を行うことも本領域の特徴です。そして、2022年度から始まる公募研究による相補的な研究プロジェクトが加わることで、量子情報と物理学の異分野融合研究を発展させていきます。



領域概要

●総括班

本領域における個別の研究進捗の把握、領域全体の異分野融合の促進、若手育成に貢献する各種活動の企画・運営を目的として総括班が設けられています。総括班は、各計画研究の代表者(9名)に、さらに7名の研究分担者・研究協力者を加えた計16名で構成されます(下表)。総括班の主な活動内容は、「領域運営」、「国際活動」、「若手支援」、「分野融合」、「広報」に分かれます。本領域は量子情報と理論物理学の分野融合により「極限宇宙」の3つの問題を解明することが目的です。総括班では各分野の研究者がほぼ均等に配置されており、領域の運営においても分野融合を加速させます。

総括班(領域内の立場)	氏名	所属	専門分野	総括班での役割
●領域代表者(C01代表)	高柳 匡	京都大学	素粒子論	領域総括
●研究分担者(A01代表)	森前 智行	京都大学	量子情報	領域運営(ポストドク公募・量子情報)
●研究分担者(A01分担)	中田 芳史	東京大学	量子情報	分野融合(領域コロキウム)
●研究分担者(B01代表)	飯塚 則裕	大阪大学	素粒子論	分野融合(企画)
●研究分担者(B02代表)	手塚 真樹	京都大学	物性理論	若手支援(責任者, 領域スクール)
●研究分担者(B02分担)	中島 秀太	京都大学	物性実験	広報(ニュースレター)
●研究分担者(B03代表)	石橋 明浩	近畿大学	宇宙論	国際活動(責任者, 領域国際会議)
●研究分担者(C02代表)	遊佐 剛	東北大学	物性実験	分野融合(責任者, 実験)
●研究分担者(C02分担)	堀田 昌寛	東北大学	量子情報	広報(責任者, アウトリーチ)
●研究分担者(C03代表)	白水 徹也	名古屋大学	宇宙論	領域運営(責任者, 領域成果)
●研究分担者(C03分担)	泉 圭介	名古屋大学	宇宙論	若手支援(若手研究会・若手滞在)
●研究分担者(C03分担)	小林 努	立教大学	宇宙論	広報(ホームページ)
●研究分担者(D01代表)	西岡 辰磨	京都大学	素粒子論	国際活動(海外派遣)
●研究分担者(D02代表)	奥西 巧一	新潟大学	物性理論	領域運営(公募研究)
●研究分担者(D02分担)	堀田 知佐	東京大学	物性理論	分野融合(理論)
●研究協力者(D02分担)	上田 宏	大阪大学	物性理論	分野融合(循環ミーティング)

●領域アドバイザー・学術調査官

より広い視点からのアドバイスのため、関連分野で著名な国内外の研究者に領域アドバイザーをお願いしています。また本領域の審査・評価、事業の制度等に関する調査、および必要な指導・助言のために2名の学術調査官が任命されています。

領域アドバイザー

Ignacio Cirac	Max Planck Institute of Quantum Optics, ドイツ
細谷 暁夫	東京工業大学大学院
井元 信之	東京大学特命教授室、理学系研究科附属フotonサイエンス機構
Juan Maldacena	Institute for Advanced Study, 米国
Robert Myers	Perimeter Institute, カナダ
笠 真生	Princeton University, 米国
Guifre Vidal	Sandbox @ Alphabet, 米国

学術調査官

南野 彰宏	横浜国立大学・大学院工学研究院
吉田 悠一	国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系



森前 智行 准教授

[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 (東京大学工学系研究科・助教)

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)

[研究協力者]

Andrew Darmawan (京都大学基礎物理学研究所・特定助教)

Michele Dall'Arno (京都大学基礎物理学研究所・特定助教)

山崎 隼太 (ウィーン大学・海外学振)

加藤 豪 (NTTコミュニケーション科学基礎研究所・主任研究員)

[ポストドク研究員]

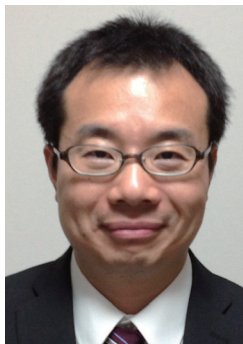
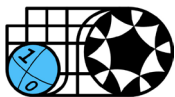
Aditya Nema (名古屋大学情報学研究科・特任助教)

量子力学には、量子的重ね合わせや不確定性原理、No-cloningそしてエンタングルメントといった、古典物理にはない不思議な性質があります。この不思議な性質をうまく利用して、これまでにない高性能な情報処理技術を実現するのが量子情報という研究分野です。とりわけ、高速な計算が可能となる量子計算、古典にはない様々な新しい暗号的タスクが実現できる量子暗号などが主要な応用例であり、理論・実験ともに世界中で活発な研究が行われてきています。また、このような量子情報技術の研究を推進すると、量子を使うと何ができて何ができないのかが明らかになってきます。これは、不思議な量子論がなぜこのような形をしているのかを理解する助けにもなります。量子論はなぜこのように不思議なものなのかを心の底から理解することは、量子論ができた当時の物理学者たちの長年のゴールであり、基礎物理における重要な問題の一つです。さらに、量子情報で得られる結果や知見、テクニックなどが他の物理にも有用であることが近年多く指摘されてきており、様々

な境界領域での研究が行われてきています。例えば、素粒子理論におけるAdS/CFT対応や、統計物理における分配関数、物性物理におけるテンソルネットワーク、ブラックホールにおける量子ランダム性などの様々な概念を量子情報を通じて新しい視点から研究することが可能となってきました。

本計画班は本領域において、量子情報の専門家からなる班という位置づけであり、「量子情報を基礎として極限宇宙の物理法則を創る」という領域全体の目的の達成に向けて、以下の二つの役割を担っています。まずは、極限宇宙の物理法則の理解に必要となる「言語」を他班に提供する役割です。量子情報は様々な物理における有用な新しい言語として期待されています。また、各メンバーが個々の量子情報の研究を推進することにより、量子情報の基礎理論そのものを深化させ、その「言語」をより最先端かつより良いものに磨き上げる役割も担っています。





飯塚 則裕 助教

【研究代表者】

飯塚 則裕 (大阪大学理学研究科・助教)

【研究分担者】

宇賀神 知紀 (京都大学白眉センター・特定助教)

重森 正樹 (名古屋大学理学研究科・教授)

寺嶋 靖治 (京都大学基礎物理学研究所・助教)

野海 俊文 (神戸大学理学研究科・准教授)

【研究協力者】

玉岡 幸太郎 (日本大学文理学部・助教)

橋本 幸士 (京都大学理学研究科・教授)

前田 健吾 (芝浦工業大学工学部・教授)

一般相対性理論で予言されるブラックホールは、その強力な重力場の故に、空間の曲がり具合が極限状態になっており、ホライズンと呼ばれる境界領域をもちます。そのホライズンより内側に一度物体が入ってしまうと、たとえ光速をもってホライズンより外に脱出しようと試みても、外にでることは古典力学では不可能です。しかしこのブラックホールに現代物理学の基礎であるミクロな世界の量子力学を適用すると、粒子がトンネル効果で出てくる様に外に脱出できるようになります。これがホーキングによるブラックホールの蒸発です。この蒸発はブラックホールが非常に低い「温度」をもち、まるで熱輻射しているようにみえます。さらにブラックホールは「温度」と膨大な「エントロピー」をもつ熱力学的対象物であることもわかっています。通常、熱力学にはその背後に多体系の量子論、すなわち量子統計力学があります。ブラックホール時空自体が熱力学の対象物とするならば、その背後にあると考えられる多体系の時空の量子論、それ

こそが、量子重力理論です。近年の研究から、この量子重力理論を理解する上で重要な役割を果たすと考えられている概念が2つあります。1つは近年目覚ましく発展している量子情報理論。そしてもう一つが「ゲージ/重力対応」あるいは「ゲージ/弦対応」とよばれる、ゲージ理論(=場の量子論)と、量子重力理論としての超弦理論の等価予想です。B01班は、この2つの概念をフル活用して、ブラックホールの量子論を理解することを最大の研究目標に掲げます。特にホーキングが予言した、「ブラックホールの時間発展は量子論の原理と矛盾し、ブラックホール内部の量子情報は失われる」という、ブラックホールの情報損失問題に対し、ホーキングの誤りは何か?正しいブラックホールの時間発展がいかに量子論と無矛盾になるか?ブラックホールの内部の量子情報はどのように外部にとりだされるのか?について明快な答えを得ることを目標にして、そこで得られた知識から量子重力理論の基礎原理を解き明かしていきます。

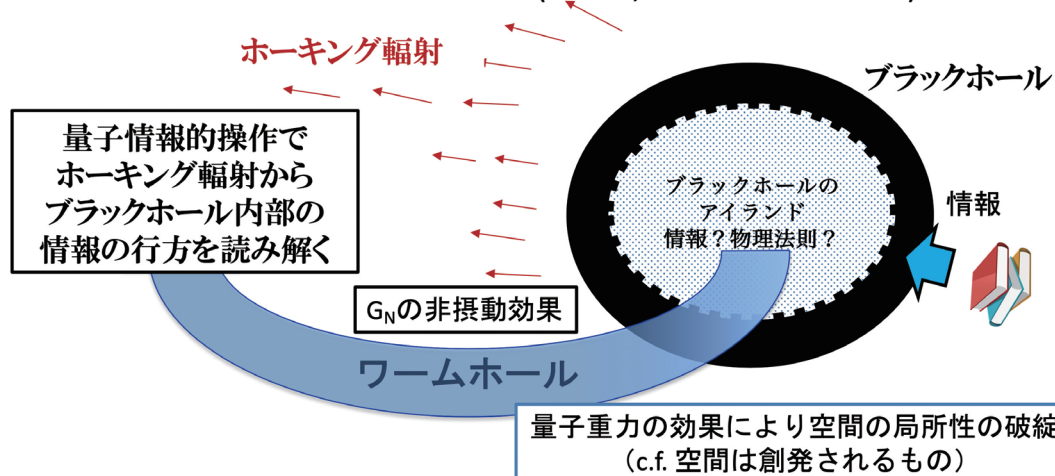
B01班: 量子情報を用いた量子BH内部の物理学の解明

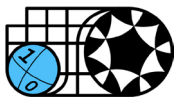
ゲージ重力対応と量子情報で、量子BHの内部の物理法則を解明

ブラックホール(BH)の情報損失問題は、どのように解決されるのか?

研究計画①: 量子情報的操作の観点からブラックホール内部の情報の行方を読み解く

研究計画②: どのような量子多体系(物性系)が重力/BHに双対な特徴を示すか?の解明(B02班, B03班と共同研究)





手塚 真樹 助教

【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（京都大学白眉センター・特定准教授）

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）

【研究協力者】

段下 一平（近畿大学理工学部・准教授）

ブラックホールは徐々に熱輻射（ホーキング輻射）を出して蒸発し、最後には消滅します。つまりブラックホールに投げ入れた情報は何であれ最終的には“消失する”こととなりますが、これは量子力学におけるユニタリー時間発展（情報の保存）と矛盾しており、「ブラックホール情報損失パラドックス」と呼ばれます。どのような機構で情報が消失しているように見えるのかを明らかにすることは量子論と重力理論を統合した「極限宇宙」の理論構築を目指す本領域の主要な目標です。

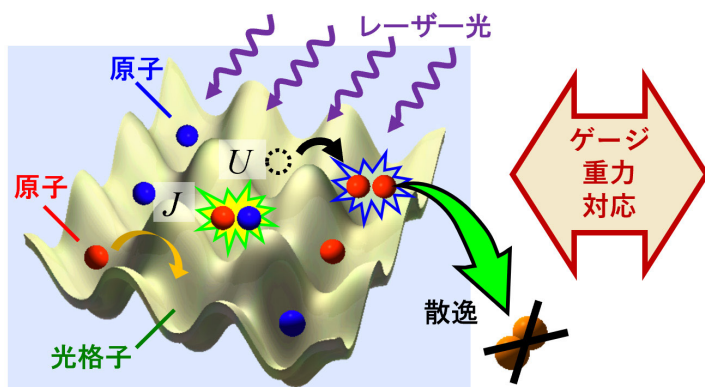
本計画研究B02の目的は、「極限宇宙」の問題の一つであるブラックホールの量子論的側面の研究を、冷却原子実験と理論研究の連携により推進することです。ブラックホールの蒸発過程は、ゲージ重力対応を適用すれば、量子多体系（量子物質）のダイナミクスに置き換えることができます。量子多体系のダイナミクスにおいて情報は保存しますが、異なる初期状態からの時間発展の結果であっても、マクロな物理量の観点からは同じ状態になり情報が消失するように見えるということは起こります。これは孤立量子系の熱化にも関わる問題です。

近年、このような量子多体系の研究において、量子エン

タングルメントや量子測定などの概念を基盤とした量子情報的な視点が重要であると認識されつつあります。エンタングルメントによるトポロジカル量子相の特徴付けのような平衡系の研究のみならず、熱化のような非平衡ダイナミクスの研究においてもこのような量子情報的な視点が重要性を増しており、量子エンタングルメントによる孤立量子系の熱化や、ブラックホールにおける量子情報の非局所化（スクランブリング）など様々な研究が行われています。

本計画研究では、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することを通じて極限宇宙のブラックホールの本質に迫ります。特に冷却原子系において、散逸・測定の効果により起こる測定誘起量子相転移の観測、情報スクランブリングの指標となる非時間順序相関の測定、およびこれらに対応した理論構築を目指します。並行して、非平衡相転移の理論や、量子計算機による非平衡状態の計算方法の開拓、Sachdev-Ye-Kitaevモデルなどの量子ブラックホールとゲージ重力対応すると考えられる量子多体系での量子エンタングルメントの研究を進めます。

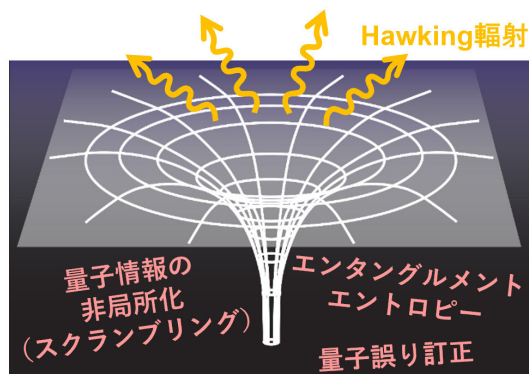
量子多体系（冷却原子系）



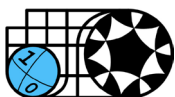
- ✓ 測定誘起量子相転移の観測
- ✓ 非時間順序相関関数の測定
- ✓ 孤立量子系の熱化

量子情報の視点による
量子多体系の非平衡
ダイナミクスの理解

ブラックホール



ブラックホール
情報損失パラドックス



石橋 明浩 教授

[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)

[研究協力者]

岡村 隆 (関西学院大学理学部・教授)

木村 元 (芝浦工業大学システム理工学部・教授)

野海 俊文 (神戸大学理学部・准教授)

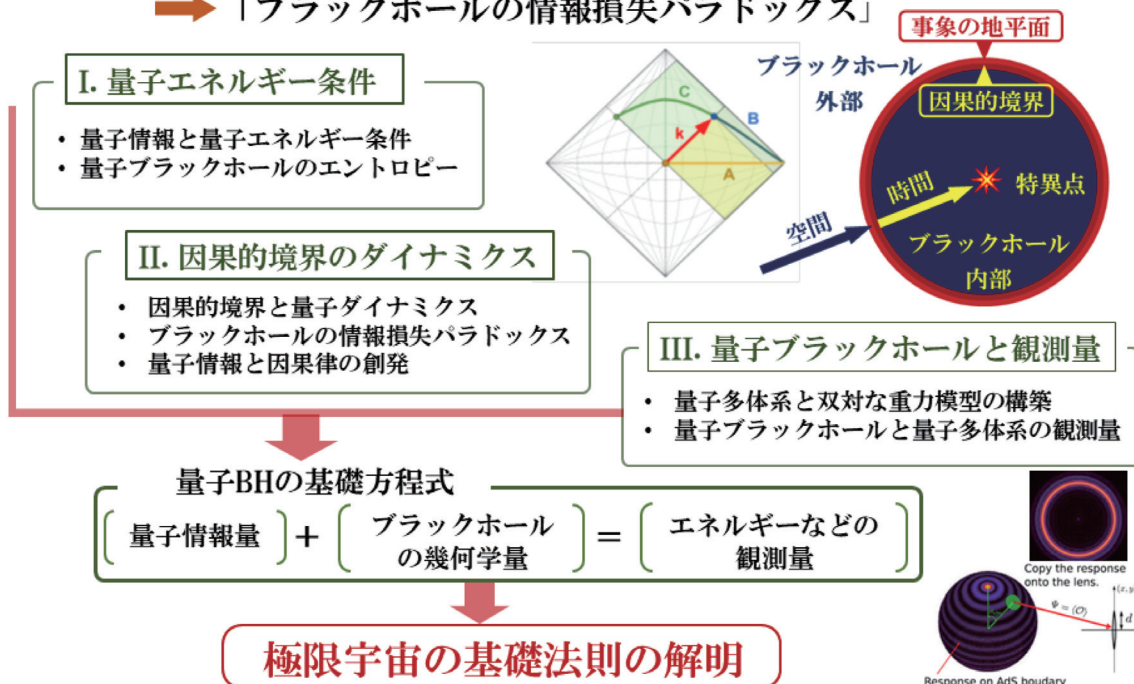
一般相対論に量子情報理論を組み合わせることで、量子重力理論の構築へ向けた新しいアプローチを開発し、量子ブラックホールの基礎理論を解明することが、私たちB03班の研究目的です。一般相対論のブラックホールは時空の曲率のみを構成要素とする宇宙で最も単純な構造物であるにもかかわらず、通常の物質と同じく熱力学的な性質をもつ不思議な存在です。ブラックホールの中心には物理法則の破綻する時空特異点が存在し、その因果的境界である事象の地平面の面積はブラックホールのエントロピーを与え、さらに量子論的效果によりHawking輻射を放出して蒸発することが分かっています。こうしたブラックホールの不思議な性質は、ブラックホールの量子論的な自由度と情報の行方に関する「ブラックホールの情報問題」という、重力・量子・情報にまたがる根源的問いを投げかけています。本研

究班では、ブラックホールの事象の地平面が情報伝達の境界として量子エンタングルメントに結びつくこと、その構造とダイナミクスは一般相対論の枠組みでは光的エネルギー条件で規定されることに着目します。そして量子重力の基本的力学自由度と量子情報が集約・顕在化する時空領域・構造は、ブラックホールの事象の地平面を代表例とする様々な因果的境界にあるという予想のもと、そのダイナミクスを決定する「量子エネルギー条件」などの基礎方程式を導出・整備し、量子ブラックホールの数理解を明らかにすることを目指します。また、ゲージ重力対応を用いて、量子ブラックホールや量子宇宙の観測可能量の問題にも挑みます。それにより「宇宙は量子情報の集合体である」という本領域全体に通底する「極限宇宙」予想の証明に迫ることが目標です。

宇宙を構成する量子情報は、時空のどのような構造に宿されるのだろうか？

量子情報理論から量子ブラックホールの基礎方程式

➡ 「ブラックホールの情報損失パラドックス」





高柳 匡 教授

[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 (京都大学基礎物理学研究所・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)

[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 (理化学研究所・iTHEMS・基礎科学特別研究員)

酒井 一博 (明治学院大学法学部・准教授)

宮下 翔一郎 (早稲田大学理工学術院・講師(任期付))

[ポスドク研究員]

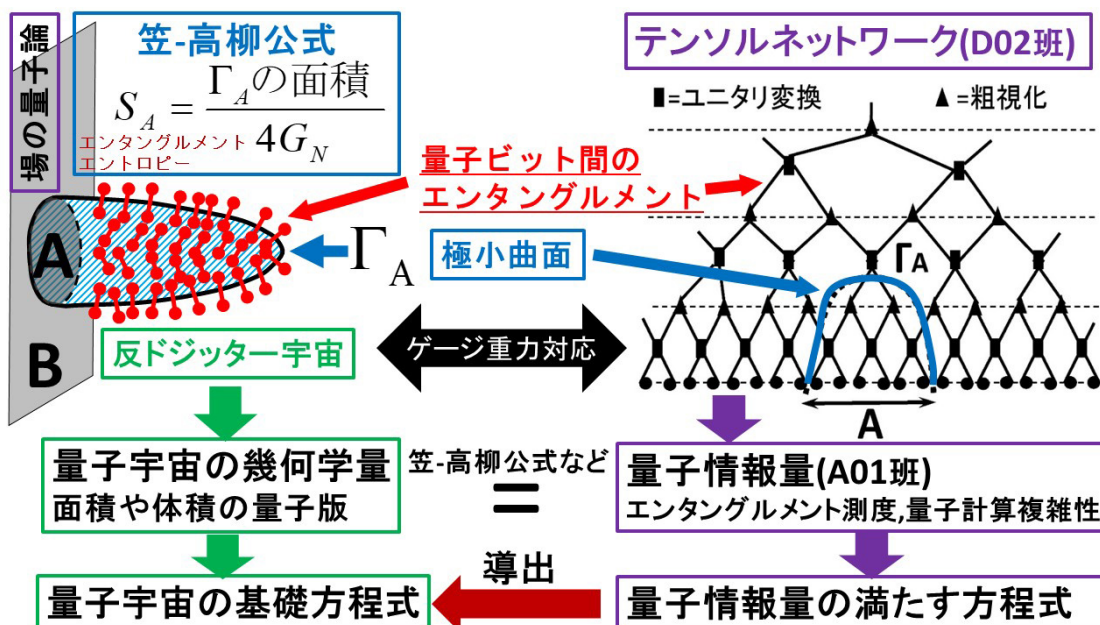
Ibrahim Akal (京都大学基礎物理学研究所・ポスドク研究員)

Shan-Ming Ruan (京都大学基礎物理学研究所・ポスドク研究員)

鈴木 健太 (京都大学基礎物理学研究所・ポスドク研究員)

量子情報と重力理論をつなぐエンタングルメント・エントロピーの幾何学公式(笠-高柳公式)によって、重力理論の曲面の面積が、量子情報の量として解釈できることが分かります。この発見を端緒として、「重力理論の宇宙は量子情報の集合体である」という予想が得られ、世界的に注目されています。超弦理論やその境界分野の研究者陣で構成されるC01班の目的は、この予想を素粒子論に量子情報の視点を導入することで発展させ、「極限宇宙」の一つである「宇宙創成のダイナミクス(量子宇宙)」の基礎理論を解明することです。この土台となるのが、「ゲージ重力対応」、つまり「反ドジッター宇宙の重力理論は共形場理論と呼ばれる場の量子論と等価である」という仮説です。ゲージ重力対応は、多くの具体例の検証に耐えた有力な考え方ですが、何故この対応が生じるのか?という原理の部分は今でも分かっていません。この基礎原理がわかれば、宇宙が無か

ら創成される機構を解明することが可能になり、究極の物理法則の構築へと繋がると期待されます。この時、ミクロな量子情報をブロックのように組み合わせた集合体として宇宙を表すという前述の考え方は、興味深いことに物性物理の高精度な数値計算法である「テンソルネットワーク法」の一種と解釈できると期待されています。また、反ドジッター宇宙は、負の曲率をもつ宇宙ですが、我々の住んでいる現実世界の宇宙や、宇宙創成の過程ではむしろ正の曲率、すなわちドジッター宇宙となっていると考えられています。C01班の研究では、量子情報理論の手法とゲージ重力対応を組み合わせることで、ゲージ重力対応の基礎原理をまず明らかにし、次に、それをヒントに反ドジッター宇宙を超えて、ドジッター宇宙のような、より一般の宇宙に対してゲージ重力対応を大きく拡張することで、量子宇宙の基礎理論をひも解いていきます。





遊佐 剛 教授

[研究代表者]

遊佐 剛 (東北大学理学研究科物理専攻・教授)

[研究分担者]

柴田 尚和 (東北大学理学研究科物理専攻・教授)

堀田 昌寛 (東北大学理学研究科物理専攻・助教)

米倉 和也 (東北大学理学研究科・准教授)

[研究協力者]

間野 高明 (物質・材料研究機構・主任研究員)

山本 一博 (九州大学大学院理学研究院物理学科・教授)

南部 保貞 (名古屋大学理学研究科物理素粒子宇宙物理学専攻・准教授)

堀田 知佐 (東京大学大学院総合文化研究科・准教授)

中山 和則 (東北大学理学研究科・准教授)

John Nicholas Moore (東北大学理学研究科・外国人特別研究員)

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

山口 幸司 (ウオーターラー大学・日本学術振興会海外特別研究員)

佐々木 健一 (NTT物性科学基礎研究所・主任研究員)

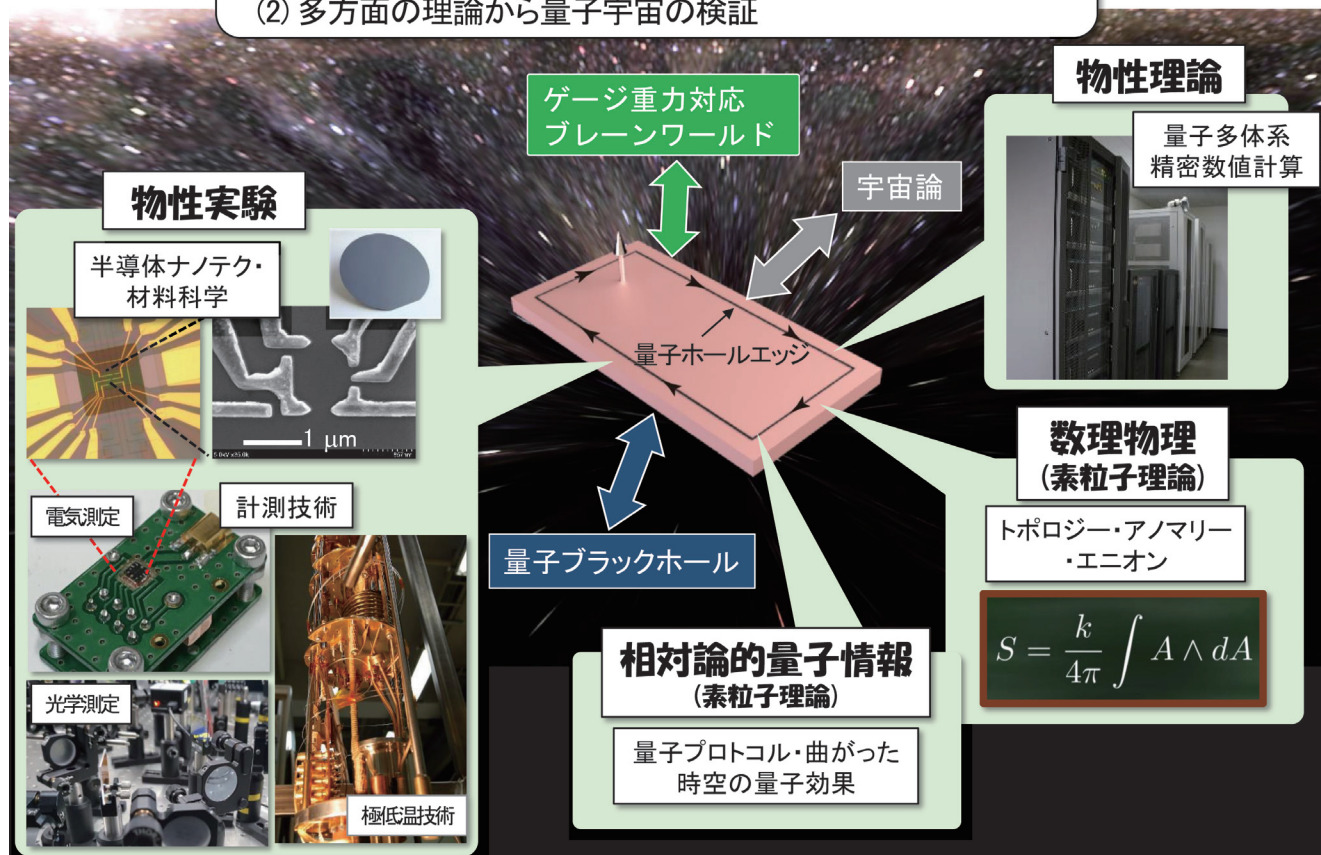
ビックバンから私たちの住む宇宙が創成される量子宇宙 (宇宙創成の初期段階で現れるとされる宇宙) の過程を理解しようとする理論的な努力が積み重ねられており、宇宙背景放射などの観測実験からの検証も試みられています。実験室で宇宙創成をそっくりそのまま再現し、パラメーターを変えながら実験を行って理論検証できれば理想ですが、そのようなことは不可能です。そこで本研究では理論的には等価な物理系、つまりトイ模型としての量子宇宙を研究室レベルの物性実験系で実現し、理論検証のための豊かな遊び場を提供することを目指しています。

私たちが実際に扱う物理系は半導体中の電子です。半

導体産業は超高品質の結晶技術、微細加工技術、エレクトロニクスなど現代科学の粋を極めた技術の集積から成り立っています。本研究ではこのような最先端の技術を背景に量子ホール状態のエッジというきわめて特異な量子多体系を舞台として、トイ模型としての量子宇宙を半導体チップ上で実現し、実験と理論を通して宇宙創成のメカニズムを明らかにしたいと考えています。より具体的には、(1) 高度な量子測定技術を含む実験技術確立して量子ホールエッジの実験を行い、(2) 素粒子論、数理物理、物性理論、量子情報、宇宙論という多方面の理論から、量子ホールエッジによる量子宇宙を検証することを目的としています。

量子宇宙のトイ模型を量子ホールエッジで実現

- (1) 量子測定技術の確立、量子宇宙の実験
- (2) 多方面の理論から量子宇宙の検証





白水 徹也 教授

[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 (大阪市立大学数学研究所・特別研究員)

[研究協力者]

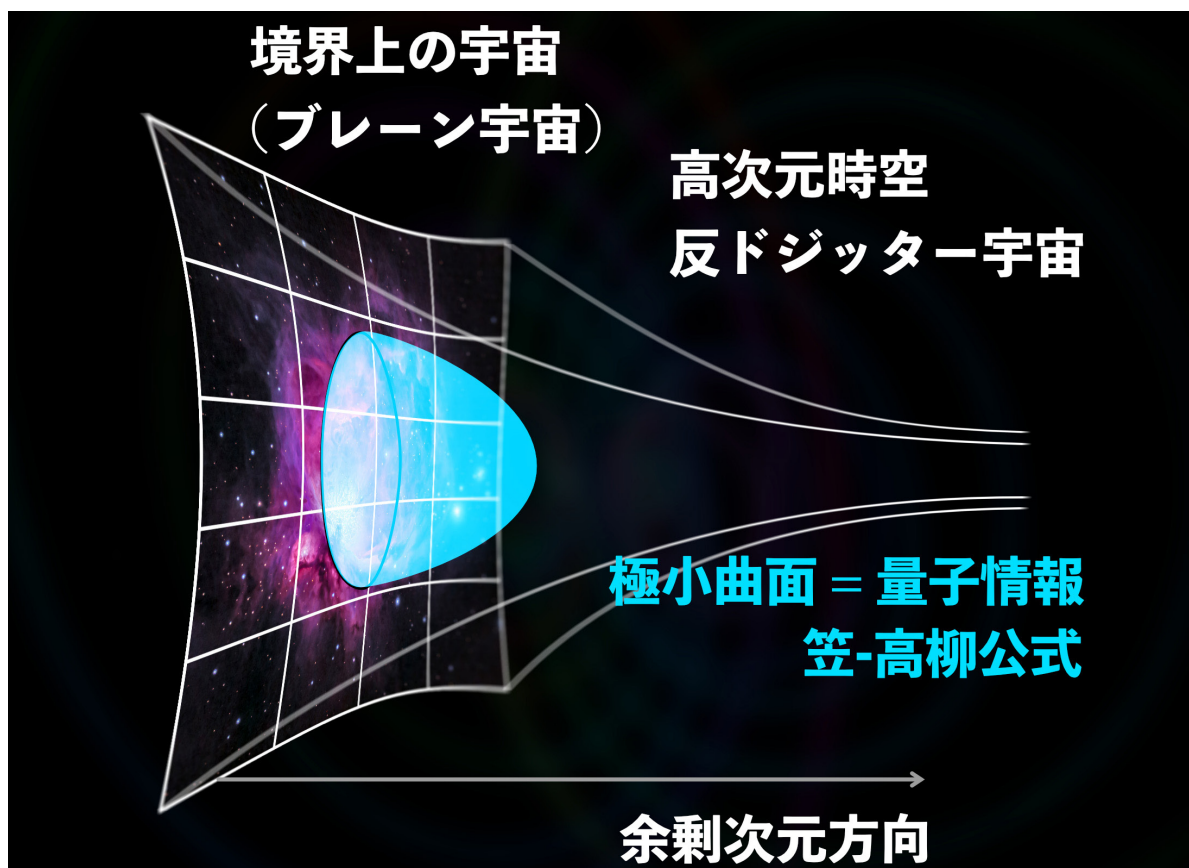
山田 澄生 (学習院大学理学部・教授)

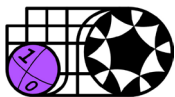
[ポストドク研究員]

木下 俊一郎 (名古屋大学/立教大学/中央大学・研究員)

時空の物理理論である一般相対論を土台とする宇宙論は様々な観測結果を説明し大きな成功を収めてきました。しかし、宇宙初期(インフレーション期)と現在の2回にわたる宇宙空間全体の加速膨張の起源は未だ現代科学最大の謎として残されています。これは人類の重力・時空に関する理解が未熟であることに起因していると考えられます。そこで、C03班は素粒子理論で発展してきたゲージ重力対応(特に笠-高柳公式)の量子情報理論的側面をブレーンワールドに取り入れることにより、宇宙創生・加速膨張の謎および、重力・時空の全容を解明することを目標としています。

「ブレーンワールド」とは、我々の住む宇宙が高次元空間の境界(ブレーン)に相当すると考えるモデルで、素粒子理論から自然に導かれます。このブレーンワールドの理論を笠-高柳公式と量子情報理論の考え方から構築し直し、他班と連携し宇宙の謎に迫ります。一方、時空のさざ波である重力波が2015年に、ブラックホールの作る“影”が2019年に観測されたように、一般相対論が成立するか直接テストできる面白い時代になってきました。そこで、量子重力理論から期待される一般相対論からのずれの検出を念頭に置いた基礎研究も行います。





西岡 辰磨 特定准教授

[研究代表者]

西岡 辰磨 (京都大学基礎物理学研究所・特定准教授)

[研究分担者]

松尾 泰 (東京大学大学院理学系研究科・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)

伊藤 悦子 (理化学研究所仁科加速器科学研究センター・協力研究員)

[研究協力者]

山崎 雅人 (東京大学カブリ数物連携宇宙研究機構・准教授)

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

丸吉 一暢 (成蹊大学理工学部・准教授)

土居 孝寛 (大阪大学核物理研究センター・特任助教)

田島 裕之 (東京大学大学院理学系研究科・助教)

筒井 翔一郎 (理化学研究所仁科加速器科学研究センター・基礎科学特別研究員)

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)

[ポストドク研究員]

猪谷 太輔 (理化学研究所 仁科加速器科学研究センター・協力研究員)

吉田 豊 (東京工業大学理学院素粒子論研究室・特別研究員)

素粒子の標準模型に代表されるように私たちの身の回りの現象の多くは場の量子論の言葉で記述されています。ミクロな領域の物理を理解することは物質の究極的な構成要素を解明するだけでなく、多数の基本的な量子系が互いに協調して新たな物理現象を創発する量子多体系の本質を探る上でも重要です。D01班の目標はこのような量子的な振る舞いを示す物質のダイナミクスを理解することです。量子情報理論では様々な物理操作の下で量子系がどのように変化するかということが一般的な観点から調べられています。このような量子情報理論の視点を取り入れることで、従来の方法では分からなかった場の量子論の新たな側面が明らかになる可能性があります。特に場の量子論と量子情報理論の背後にある共通の数理構造に着目する

ことで、個々の量子系に依存しないすべての場の量子論が持つべき普遍的な性質を見いだすことができると期待されます。また場の量子論のダイナミクスの解明に向けた相補的なアプローチとして量子計算機による場の量子論のシミュレーションを行います。有限密度系や実時間系を含む多くの物理系は古典計算機では困難ですが、量子計算機では効率的にシミュレートできると期待されています。場の量子論に適した量子計算の手法を開発し実装することで、素粒子の散乱過程やブラックホールの蒸発過程などの重要な現象を解明します。さらに場の量子論の量子情報理論的な側面を基礎としてホログラフィー原理や量子重力理論との関係性を模索していきます。

量子情報理論

量子情報量

量子誤り訂正

量子計算

量子シミュレーション

量子アルゴリズム



場の量子論

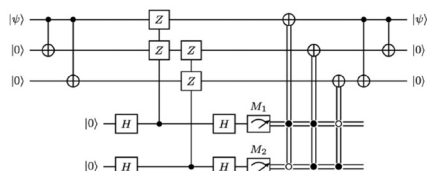
ダイナミクスへの制限

量子エネルギー条件

実時間・有限自由度系

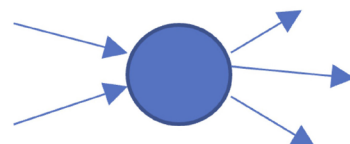
量子ホール系

負符号問題

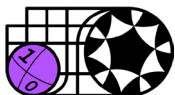


量子計算

量子シミュレーション



素粒子の散乱過程



奥西 巧一 准教授

[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・特任准教授)

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・准教授)

原田 健自 (京都大学情報学研究科・助教)

[研究協力者]

引原 俊哉 (群馬大学大学院理工学府・准教授)

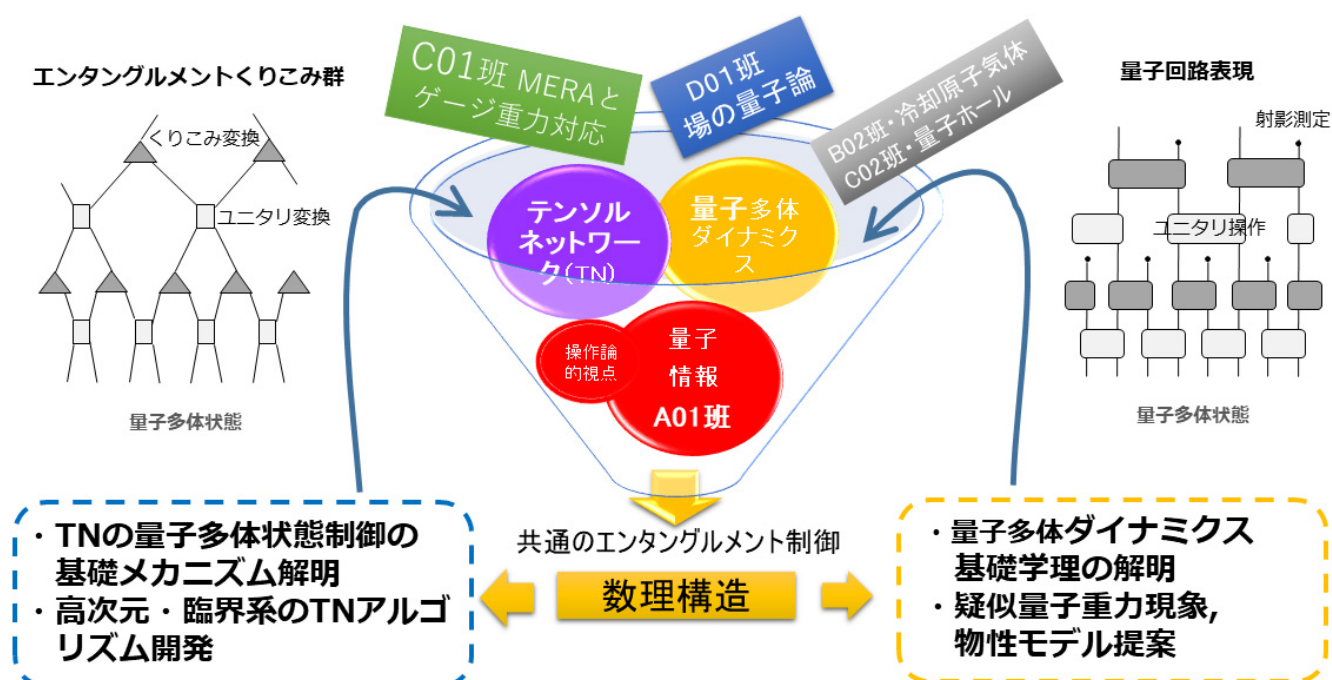
西野 友年 (神戸大学大学院理学研究科・准教授)

大久保 毅 (東京大学大学院理学研究科・特任准教授)

量子スピン系や冷却原子気体、トポロジカル物質などの量子多体系の織り成す多彩な物理やダイナミクスを理解することは、凝縮系物性に残る本質的な課題のひとつです。そして、そのような量子多体系の精密な理解の鍵となるのが量子エンタングルメントの定量解析です。なかでも、テンソルネットワーク法は理論的に大変興味深い量子多体エンタングルメントの記述法を提供するだけでなく、極めて実践的な量子シミュレーションのフレームワークも提示します。さらに、近年、テンソルネットワーク法の一つであるエンタングルメントくりこみ群とゲージ重力対応の笠-高柳公式との密接な関係などが見出されるにともない、テンソルネットワークと量子情報や量子重力との境界領域には、極限宇宙の諸問題を解明するための鍵となる普遍的な物理の存在が見え隠れしていることが徐々に明らかになってきました。このため、物性のみならず多くの分野の研究者が、テンソルネットワークとその関連分野の研究展開に大きな注目と期待を注いで

います。

D02班では、これまで凝縮系物性では見過ごされがちであった量子情報の操作論的側面に着目し、テンソルネットワーク法による量子状態の系統的制御機構を解明するとともに、それをテンソルネットワーク法のアルゴリズム開発にも応用し、高次元系・臨界系なども解析可能なテンソルネットワーク法へと刷新することをめざします。さらに、これらの進展に立脚して量子多体系のダイナミクスに迫ることで、その背後にある数理構造を抽出し、量子情報の時代にあふらしい基礎学理を構築することも大きな目的です。もちろん、D02班の研究の進展を本領域の他班と共有・連携して分野の枠を超えた研究展開をはかり、例えば、エンタングルメントくりこみ群と笠-高柳公式との関係の解明や、物性実験系を念頭においた疑似的量子重力現象の提案とその解明などを通じて、極限宇宙の基本法則の解明に物性の立場から貢献することもめざします。



量子情報の時代にふさわしい量子多体系の基礎学理構築から極限宇宙へ

量子情報とは何か？

最近、“量子情報”という言葉を目にする機会が増え、同時に「“量子情報”って何？」と質問されることが増えた。本稿では真っ向から“量子情報”とは何かを解説していこう。

1. “情報”とは何か

現代社会では“情報”はとても馴染み深いものだ。しかし、改めてその意味を問われると、答えに窮するのではない。例えば「五輪ボブスレーでAさんが金メダルを取った」という“情報”は、どう理解できるだろうか？五輪ボブスレーには30名が出場しているようだが、私は選手を一切知らない。なので、一報を聞く前の私は、「各選手が金メダルを取る確率は1/30」という確率分布で表現してよいだろう。そのような不確定な状態から「確率1でAさん」という確定した状態へと変化することが、「情報を得る」の意味と考えられる。

確率に基づいて考えることで、“情報量”も自然と定義できる。私にとっては各選手の勝率は一樣だったが、{Aが確率0.9、Bが0.05、…}と具体的に勝率を予想する人もいるだろう。その人は元から「Aが勝つだろう」と思っている訳だから、結果から得られる“情報量”は多くはない。このような「得た情報の多寡」は、**確率の逆数の対数**で定量化することが通例だ。確率の逆数で“驚き度”を表し、量を相加的にするために対数を取っている。

この考察から、情報の大前提には、**事象と“未知”や“既知”を定量化する確率分布が存在することが分かる**。これらの組は**情報源**と呼ばれるが、直観的には「確率 p_i で事象 i を出すスロット・マシン」と考えてよいだろう。スロットを回すたびに事象 i が吐き出され、 $\log_2 1/p_i$ の情報量が得られる。また、そのスロット・マシンの**平均情報量**がShannonエントロピーで与えられることも、容易に分かるだろう。

ただし、スロット・マシンはあくまで情報“源”であり、情報そのものではない。例えば、「情報を送ること」はスロット・マシンを梱包して誰かに送り付けることではなく、「スロットの目が i だった場合は、相手も i と知る」だ。この意味では、「**情報=情報源の出力と相関を持つこと**」と表現してもよいだろう。

2. 量子情報とは何か？

情報源=スロット・マシンなので、量子情報源は単純に「**確率 p_i で純粋状態 $|\psi_i\rangle$ を吐き出すスロット・マシン**」と定義すればよい。そして、「**量子情報を得る=量子情報源がどういう純粋状態を出したかを知る**」ということになる。

こう説明すると、古典を少し拡張しただけに聞こえるだろう。しかし、小さな拡張が大きな差異へと繋がるのが量子の面白いところだ。それを理解するために、

量子情報源 A: {確率 q_i で $|\psi_i\rangle$: $i=0$ or 1 , $|\langle\psi_0|\psi_1\rangle|=0$ }

量子情報源 B: {確率 q_i で $|\phi_i\rangle$: $i=0$ or 1 , $|\langle\phi_0|\phi_1\rangle|\approx 1$ }

という二つの量子情報源を考えよう。量子情報源Aは、直交する $|\psi_0\rangle$ と $|\psi_1\rangle$ を確実に識別できることから、古典情報源{確率 q_i で $i=0$ or 1 }を量子状態で書いただけと見做せる。つまり、Aは本質的には古典だ。一方、量子情報源Bは、実質的にはほぼ一つの純粋状態 $|\phi_0\rangle \approx |\phi_1\rangle$ に確定している。つまり、Bでは古典確率 q_i は大きな意味を持たず、{確率 q_i で $i=0$ or 1 }とは全く異なる性質を持つのだ。

このような状態の非直交性に起因する量子特有の事情は、量子情報源 $\{p_i, |\psi_i\rangle\}_{i=0}^{K-1}$ に対応する密度行列 $\rho = \sum_{i=0}^{K-1} p_i |\psi_i\rangle\langle\psi_i|$ を考えて、 $\rho = \sum_{x=0}^{D-1} \lambda_x |\lambda_x\rangle\langle\lambda_x|$ ($D \leq K$)と対角化することで解消できる。量子の世界では**同じ密度行列を持つ量子アンサンブルは原理的に識別不可能で、物理的に同一のもの**なので、 $\{p_i, |\psi_i\rangle\}_{i=0}^{K-1}$ と $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}_{x=0}^{D-1}$ は物理的には完全に同じ量子情報源である。そのため、与えられたアンサンブルを、直交状態から構成されるアンサンブルに置き替えて議論することができて、結果、量子情報源を“古典化”できるのである。

3. 改めて“量子情報”とは何か？

ここまでくると、改めて「量子情報とは何か？」という疑問が湧くのではないだろうか。前章冒頭では、「量子情報を得る=量子情報源 $\{p_i, |\psi_i\rangle\}$ が $|\psi_i\rangle$ にあるのか、 $|\psi_j\rangle$ にあるかを知る」と想像できた。しかし、量子の特性から $\{p_i, |\psi_i\rangle\}$ を $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}$ と読み替えてよいことになり、気付いたら $|\psi_i\rangle$ や $|\psi_j\rangle$ の影も形もなくなってしまった。ううむ、「量子情報を得る」とは、結局、何を“知る”ことになるのだろうか？

個人的な答えは、「量子論において原理的に知ることが可能な範囲内で量子情報源から出た純粋状態を知る」ことが、「量子情報を得る」の意味だ。上述の「量子情報源 $\{p_i, |\psi_i\rangle\}$ が純粋状態 $|\psi_i\rangle$ にある」という書き方では、**特定のアンサンブルから状態が選ばれるかのように記述したことに混乱の種がある**。実際には、密度行列が同じである限り、いかなるアンサンブルから純粋状態が選ばれても区別はつかない。それにも関わらず、頭の中でアンサンブルを $\{p_i, |\psi_i\rangle\}$ と固定したのがナンセンスだったのだ。

以上の考察から、量子論を正しく考慮すると、アンサンブルではなく「**量子情報を得る=密度行列 ρ で記述される量子情報源がどの純粋状態にあるかを知る**」と定義する方が適切だと分かる。この定義が、今日における量子情報の標準的な定義である。

ここで、密度行列 ρ は量子情報“源”であり、量子情報そのものではないことに注意しよう。古典の場合と同じだが、「量子情報を送る」とは、「送信者の量子情報源 ρ が $|\phi_i\rangle$ を出したら、相手も $|\phi_i\rangle$ を受信する」ことであり、密度行列 ρ を送ることではない。こう考えると、古典と同様に、“相関”で量子情報を定義したくなるかもしれない。そこで次に、量子相関に基づく量子情報の定義について説明しよう。

一般に、量子系Aの密度行列 ρ_A は量子系AR上の「R系をtrace outすると ρ_A となる純粋状態 $|\rho\rangle_{AR}$ 」に拡張でき、この状態を ρ_A の純粋化、R系をAの純粋化系と呼ぶ。純粋化に対して、実は「 ρ_A の純粋化 $|\rho\rangle_{AR}$ のR系を適切な基底で測定すれば、A系に、対応する密度行列が ρ_A である任意の量子アンサンブルを実現可能」という事実を示せる。やや非自明に聞こえる主張だが、これはUhlmannの定理[1]の帰結である。この事実により、例えば2章の例では、量子情報源 ρ を $\{p_i, |\psi_i\rangle\}_{i=0}^{K-1}$ と解釈したければ純粋化 $|\rho\rangle_{AR}$ のR系をある基底で、 $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}_{x=0}^{D-1}$ と解釈したければ別の基底で測定したと考えればよい。R系の基底選択が純粋状態の集合を決定し、測定確率はそのアンサンブルの確率分布を決めるという仕組みだ。この状況ではR系はreference系と呼ばれることが多いが、この系はあくまで仮想系であり、測定結果等のやり取りは考えないことに注意されたい。

純粋化のこの性質は、 $|\rho\rangle_{AR}$ が持つAR間の量子相関と密接に関係している。そのため、ある意味では「量子情報源A」と「その純粋化系R」の間にある量子相関が量子情報を“記録”すると見做せる。このことから、「量子情報=純粋化系Rとの間の量子相関に保存されたA系の情報」と考えることも多い。この定義は密度行列のものとほぼ同義[2]であることが知られているため、実用上はどちらを用いても問題はなからう。

こうして量子情報が二通りの方法で正しく定義された。しかし、量子情報の“量”は自然には定義されないことは強調しておこう。古典情報の場合、“驚き”という観点から情報量を自然に導入できたが、量子ではそもそもアンサンブルを固定できないため、「量子情報源が $|\psi_i\rangle$ だった」という事象単体の“驚き”や“情報量”を定められないのだ。

因みに、von Neumannエントロピーは“情報量”ではなく、「量子情報源が持つ本質的な自由度」と理解すべきものである。この辺りが気になる方は、是非、Schumacherの量子情報源の圧縮定理[3]を参照されたい。

4. 量子情報と物理

最後に、物理の文脈での「量子情報」はどう理解できるだろうか。例えば、Hayden-Preskillの思考実験[4]における「ブラックホール(BH)に投げ込んだ量子情報を、ホーキング放射から復元する」や、「BHの量子情報」とは一体どういう意味だろう。

前者の文章を密度行列で説明すると、「量子情報源 ρ から確率的に出てきた純粋状態 $|\psi_x\rangle$ をBHに投げ込み、ホーキング放射から $|\psi_x\rangle$ を復元する」となる。この時、ホーキング放射から量子情報を復元しようとする人は、どういふ $|\psi_x\rangle$ が投げ込まれたかは知らないものの、量子情報源を表す密度行列 ρ は既知と考える場合が多い。スロット・マシンの目と確率分布くらいは密度行列の意味で知っているだろう、

というシナリオだ。

この状況を量子相関で記述することも出来る。その場合は、量子情報源 ρ_A を $|\rho\rangle_{AR}$ と純粋化し、A系のみをBHに投げ込む。その後、ホーキング放射にうまい操作を行い、元々「A系とR系の間」にある量子相関を「ホーキング放射とR系の間」に復元できれば、量子情報を復元できたことになる。もちろんR系は仮想系なので、一切操作できない。

後者の「BHの量子情報」は、BHそのものが量子情報源という発想だろうか。例えば「BHの量子情報を知る=何らかの密度行列で記述されるBHが、実際にどの純粋状態にあるかを知る」と捉えることは出来る。もしくはBHの密度行列を純粋化し、その状態が持つ「純粋化系とBHの間の量子相関」を、「純粋化系と自分の手元にある量子系」へ転写する、とも表現できよう。

量子情報の意味を厳格に適用すると、このように解釈できる。しかし、それは本当に正しい解釈なのだろうか。また、仮に正しいとしても、本当にそんなことが出来るのだろうか。そんなことが出来たら何らかの物理法則に反する気もしてしまうのだが。

分からない。世の中は分からないことだらけ、不確定だらけだ。そんな自然の情報源から情報を取り出すという作業が物理学の目指すところであり、そこには確かな浪漫がある。その浪漫が「極限宇宙」研究の原動力となり、「情報学の精密さ」と「物理学の浪漫」を兼ね備えた発展に繋がれば、これ以上面白いことはないだろう。

- [1] A. Uhlmann, Rep. Math. Phys., 9:273–279 (1976).
- [2] D. Kretschmann and R. F. Werner, New J. Phys., 6, 26 (2004).
- [3] B. Schumacher, Phys. Rev. A, 51, 2738 (1995).
- [4] P. Hayden and J. Preskill, J. High Energy Phys., 0709, 120 (2007).



●執筆紹介

中田 芳史 Yoshifumi Nakata

東京大学工学系量子科学研究センター助教
1983年大阪府生まれ
2013年3月東京大学大学院博士課程修了
2020年5月より現職

研究会報告

●領域キックオフミーティング

2021年11月29日-30日,オンライン

本領域では、発足から間もない10月より毎月、「循環ミーティング」と呼ぶ領域内集会をオンラインで開催してきました。A(量子情報)、B(量子ブラックホール)、C(量子宇宙)、D(量子物質ダイナミクス)の4つの研究対象に関してローテーションで行い、研究成果の報告と異分野研究者との討論を目的としたミニワークショップです。特に、11月には、これを拡大して、11月29日と30日の二日間、本領域のキックオフミーティングとしてオンライン開催しました。9つあるすべての計画研究グループが、今後の研究計画と、その前提となるこれまでの研究成果に関して、質疑応答を取り入れながら1時間ずつプレゼンを行いました。本領域の研究代表者と研究分担者全員に加え、研究協力者の一部も参加し、60名を超える出席者のもと、多数の質疑・討論が行われました。領域の各メンバーの研究紹介も行われ、またミーティング終了後もオンラインツールSpatial Chatを用いて、自由討論の時間も設けられ、異分野の研究者同士が、お互いを知り合い交流する良い機会となりました。本ミーティングでは、量子情報理論・素粒子理論・宇宙論・物性理論の理論融合により極限宇宙解明へアプローチする研究計画に加え、物性実験家がこれらの理論家と協力して行う量子ホール系による膨張宇宙を模した物性実験や、冷却原子による量子ブラックホールを模した物性実験に関する研究計画についても説明があり、討論も大いに盛り上がりしました。また、本ミーティングでは、物性理論の研究者と量子情報の研究者による量子スクランプリングと量子誤り訂正の関係についての興味深い共同研究など、既に異分野融合研究がスタートしている状況についても報告がありました。

(文責:高柳 匡)

●IFQ-ExU 共同ミニワークショップ

「Extreme Universe from Qubits」

2021年12月16日-18日,オンライン

2021年12月16-18日に、超弦理論への量子情報理論の応用をテーマとした研究会 IFQ-ExU joint mini workshop: Extreme Universe from Qubits が、学術変革領域A「極限宇宙」とサイモンズ財団「It from Qubit コラボレーション」の共催で、完全オンラインで行われた。IFQは、量子情報の知見を用いて素粒子論、特に量子重力理論を開拓することを目的とした、米国を中心とした国際研究プロジェクトの先駆けであり、当領域と共通するテーマが多い。講演者は Matthew Headrick (Brandeis)、Patrick Hayden (Stanford)、Veronika Hubeny (UC Davis)、飯塚 則裕 (阪大)、中田 芳史 (東大)、Edgar Shaghoulian (Penn)、Douglas Stanford (Stanford)、吉田紅 (Perimeter) であった(敬称略)。

スタンフォード大学のDouglas Stanford氏からは、ランダムユニタリー状態について平均をとる操作の、対応する重力理論側での解釈についての報告があった。このユニタリー行列のランク N が大きい場合、平均を large N 展開することが可能だが、本講演ではこの展開のサブリーディング項の一部が、重力理論側のワームホールとして解釈できることが示された。ペンシルバニア大学のEdgar Shaghoulian氏は、de Sitter空間のcosmological horizonがholographic screenだった場合に、そのエンタングルメントエントロピーを計算する公式を提案した。本領域の飯塚則裕氏からはエンタングルメントエントロピーの新しい正則化についての報告があった。この手法の、ゲージ場および共形不変なスカラー場についてのエントロピー計算への応用が議論された。

(文責:宇賀神 知紀)



11月29、30日にオンラインで開催されたキックオフミーティングの様相

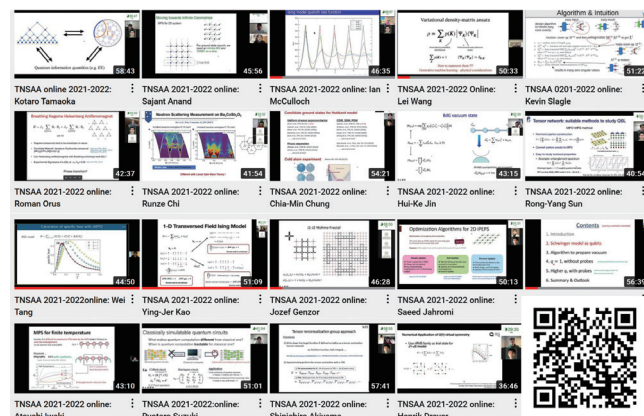
●Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 online

2022年1月17日-21日,オンライン

極限宇宙のD02班の主催により2022年1月17日-21日の日程でTensor Network States: Algorithms and Application (TNSAA)というオンライン形式の国際ワークショップが行われました。TNSAAワークショップは、主に物性分野のテンソルネットワーク研究者を中心に国際研究交流と若手育成を趣旨として、ここ10年ほどアジア圏の国々を舞台に組織・運営され、重要な位置づけの国際ワークショップとして定着してきました。しかし、コロナ禍のため昨年度の開催は見送られ、今年の開催も危ぶまれていました。本学術変革でもテンソルネットワークは異分野融合の中心的な課題の一つです。そこで、本領域が立ち上がって間もない9月頃に、D02班のメンバーが中心となりオンライン形式での開催に漕ぎつけました。コロナ前の現地開催時は、アジア圏や欧州の一部の中心的な研究者による比較のアットホームな雰囲気ワークショップでしたが、オンライン形式にしたことで欧州やアメリカ西海岸からの参加登録が大きく増え、参加者約100名のうち半数程度は海外からの参加となりました。講演についても、9つの招待講演を含む計21講演、物性以外の研究者も招き入れ、予想よりも多様な方向性の話題提供がありました。とくに若い研究者による量子情報や素粒子分野との境界領域の発表も興味深く、活発な議論が展開されました。TNSAAの当初の趣旨に加えて、多様化するテンソルネットワーク研究に対応した新しい形の国際ワークショップとして発展させることができたのではないかと思います。

下の写真は、ワークショップ中の講演の録画をYouTube上で公開したものの一覧です。簡単に講演動画を公開し、情報共有できるようになったのもオンライン化の効能かもしれません。興味のある方は、右下にあるQRコードよりアクセスしていただければと思います。

(文責:奥西 巧一)



●YITP国内モレキュル型研究会 ミニワークショップ「場の理論の量子計算2022」 2022年2月24日, 京都大学基礎物理学研究所+オンライン

京都大学基礎物理学研究所主催、極限宇宙のD01班共催により2022年2月24日に「場の理論の量子計算2022」という対面・オンラインのハイブリッド型ミニワークショップが開催されました。このミニワークショップは2月21日から3月4日まで開催された基礎物理学研究所の国内モレキュル型研究会の一環として行われました。本国内モレキュル型研究会では、量子計算に関連した研究を行なっている12人の素粒子論・原子核理論・物性理論の研究者が基礎物理学研究所に集まり、共同研究の促進と新たな共同研究の立ち上げを行いました。また、24日のミニワークショップではオンラインで参加者も含め71名の参加があり、研究発表と議論が行われました。

物質の最小構成要素であるクォークの物理を記述する「量子色力学(QCD)」は、40年に渉るモンテカルロ法での第一原理計算により、その非摂動論的性質が明らかになってきました。しかし、このモンテカルロ法を用いた場の理論の計算では、符号問題が生じて計算が非常に困難になる領域があることが知られています。そこで近年登場した量子計算機という新しい"道具"をうまく使える計算法を開発し、未知の領域の場の理論の物理的性質を明らかにしようという試みが始まっています。

「場の理論の量子計算」研究会は、昨年度から始まりました。昨年度は完全オンラインで国内外の研究者25名による講演、220人を超える参加登録があり、この分野の現状を網羅的に情報収集することができました。今回は、講演数はミニワークショップで4つ、モレキュル型研究会期間全体でも10講演とゆったりしたスケジュールで行われました。コロナ禍では国内外の縛りが少ないため、英語の研究会が増えたように思いますが、今回は、日本語でしかも対面の研究会のため大変活発に質問や議論を行うことができました。休み時間なども含め朝から夜まで一日中、細かいことまで議論できる対面ならではの感覚を久しぶりに味わうこともできました。(あまりに議論に夢中で研究会の写真を撮り忘れました。)

来年度は9月12日から16日までの一週間、大学院生など若手を対象としたサマースクールを(できるだけ対面で)開催する予定です。この分野に興味を持たれた方は是非ご参加ください。

(文責:伊藤 悦子)

研究会報告

●第1回領域スクール&領域会議

スクール:2022年3月3日-5日, 領域会議:2022年3月7日-8日
京都大学基礎物理学研究所+オンライン

領域スクールは、本領域での分野融合研究を推進するため、関連分野の複数の講演者による講義を開催することで、各分野の考え方、研究動向や問題点や課題等の情報を共有することを目的としています。領域内外の異なる研究背景をもつ研究者・学生間での議論を促進し、本領域の対象とする極限宇宙の諸問題に取り組む共同研究のきっかけとしようとしています。

今回は、領域外から小芦雅斗氏(東大工)、南部保貞氏(名大理)にご参加いただき、下記の講義と、参加者有志のポスターセッションからなるスクールを開催しました。

基研パナソニックホールの定員が制限された中ではありましたが、300名を数えたオンライン参加者とともに、ハイブリッド形式で活発な質疑が交わされました。

小芦氏の講義「量子情報理論の基礎」では、量子情報理論の基本的な諸概念について、多数のわかりやすい図を含むスライドで解説いただきました。量子系を介して情報を扱う様子がどのように一般化され整理されるか、また、原理的にできることとできないことの違いなどが説明されました。量子情報と古典情報の違いの観点から、エンタングルメントや量子テレポーテーションなどの概念や、情報処理の能力を定量化するリソース的な考え方についても解説されました。

南部氏の講義「時空構造と量子論」では、板書で、重力を幾何学として考える方法の解説から出発して、ミンコフスキー時空やシュバルツシルト時空、膨張宇宙などの時空構造を可視化するペンローズ図の見方が解説されました。また、曲がった時空における量子論についても、ブラックホール時空でのホーキング放射や、インフレーション宇宙における原始ゆらぎの具体的な計算を含めて紹介されました。

西岡氏(D01代表)の講義「場の量子論と量子エンタングルメント入門」の前半では、自由スカラー場を題材に、量子力学の経路積分の復習と並列する形で場の量子論の経路積分形式が導入されました。そして、有限温度系の取り扱いや、量子エンタングルメントの指標の一つであるエンタ

ングルメントエントロピーの計算方法、共形場理論との関係が板書で説明されました。

高柳氏(領域代表)は、スクールの冒頭に、本領域の紹介と、その中でのスクールの位置づけを説明しました。そして、3日間の講義を踏まえ、理論物理学の各分野と量子情報理論の融合研究が、ブラックホール情報喪失問題や量子物質のダイナミクスといった、本領域の対象とする「極限宇宙」の最先端の課題に取り組むのにどう有用と期待されるかを、HaPPY模型やアイランド公式のような近年の例を挙げて説明しました。

本年度の領域会議は、会場での参加者を原則として計画研究の代表者と分担者に限定し、オンラインでの参加者も研究協力者等の関係者に限って開催しました。各計画研究の代表者が質疑を含め40分の講演を行いました。また、下記のセミナーは、本領域のオンラインイベントへの登録者を対象に、一般公開の形で行われました:

中田芳史氏(A01分担、東大工)

“Linking quantum information to physics”

正田泰章氏(C01分担、京大基研)

“3D de Sitter space/2D CFT correspondence”

領域会議の冒頭では、高柳代表からの運営状況や今後の行事予定の紹介に続いて、本領域を担当されている文部科学省学術調査官の南野彰宏氏(横浜国立大学)から、研究者と文科省をつなぐ学術調査官の役割等について説明いただきました。初日のA01とD01, D02、2日目のC01, C02, C03とB01, B02, B03の講演では、各計画研究内に留まらず、異なる計画研究間の共同研究でも、新たな成果が得られ始めていることが報告されました。会議中には休憩時間も活発な議論が行われました。最後に、国内アドバイザーの細谷暁夫氏(東京工業大学名誉教授)と井元信之氏(大阪大学名誉教授)から領域の前途に期待するコメントをいただき、領域会議の閉会となりました。

(文責:手塚 真樹)



領域スクールでの講義風景



領域会議の集合写真

2021年度 学術集会(国際会議・研究会・セミナー)一覧

●領域コロキウム

第1回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2021年12月4日

講演者: 笠真生 教授(プリンストン大学)

タイトル: Many-body quantum physics through the lens of quantum entanglement

第2回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年1月26日

講演者: Mark Van Raamsdonk 教授
(プリティッシュコロンビア大学)

タイトル: Cosmology from confinement

第3回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年2月28日

講演者: 橋本幸士 教授(京都大学)

タイトル: Chaos and Holography

第4回極限宇宙オンラインコロキウム

開催日: 2022年3月30日

講演者: Robert Raussendorf 教授
(プリティッシュコロンビア大学)

タイトル: A gauge theory of measurement-based quantum computation

●領域セミナー

第1回領域循環ミーティング

開催日: 2021年10月25日

講演者①: 中田芳史(A01)

タイトル: Decoding the Hayden-Preskill protocol: from classical to quantum

講演者②: 森前智行(A01)

タイトル: Quantum cryptography based on computational assumptions

第2回領域循環ミーティング

開催日: 2021年12月27日

講演者①: 飯塚則裕(B01)

タイトル: Islands and watermelon

講演者②: 中島秀太(B02)

タイトル: Quantum-informatic studies of quantum many-body systems using ultracold atoms

第3回領域循環ミーティング

開催日: 2022年2月24日, オンライン

講演者①: 高柳 匡(C01)

タイトル: AdS/BCFT, Double Holography and Quantum Entanglement

講演者②: 遊佐 剛(C02)

タイトル: Toward quantum cosmology experiments in quantum Hall systems

●研究会&ワークショップ

CIAS-YITP 2021: String Theory and Quantum Gravity

開催期間: 2021年12月13日-16日

開催場所: 京都大学基礎物理学研究所

IFQ-ExU Joint Workshop: Extreme Universe from Qubits

開催期間: 2021年12月16日-18日

開催場所: オンライン

Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 online

開催期間: 2022年1月17日-21日

開催場所: オンライン

YITP 国内モレキュール型研究会

「場の理論の量子計算2022」

開催期間: 2022年2月24日

開催場所: 京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

第1回 極限宇宙スクール

開催期間: 2022年3月3日-5日

開催場所: 京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

第1回 極限宇宙領域会議

開催期間: 2022年3月7日-8日

開催場所: 京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

基研研究会「量子情報エントロピーと物理」

開催期間: 2022年3月21日-25日

開催場所: 京都大学基礎物理学研究所およびオンライン

3次元ドジッター時空中におけるゲージ/重力対応

ドジッター (de Sitter, dS) 時空は、正の宇宙項をもつアインシュタイン方程式の解として与えられ、インフレーション宇宙や現在の宇宙を近似的に記述する。そのため、dS時空の量子重力を理解することは、我々の宇宙の理解の上で非常に重要である。宇宙項が負の場合には、反ドジッター (anti-de Sitter, AdS) 時空が重力解として与えられる。AdS時空の量子重力は、ゲージ/重力対応、特に、AdS/CFT対応を用いて解析できる。CFTは共形場理論 (conformal field theory) の略であり、スケール不変性を拡張した対称性をもつ。1997年のMaldacenaによる提唱以来、AdS/CFT対応の発展は目覚ましいものがあり、特に最近量子情報理論の応用により飛躍的な進展を遂げている。同様に、dS時空中におけるゲージ/重力対応であるdS/CFT対応を応用することで、dS時空の量子重力が理解できると考えるのは自然である。ただし、AdS/CFT対応と比較すると、dS/CFT対応はあまり研究が進展していない。その原因の一つに、具体的な例がほとんど存在しないことがある。我々は論文[1]で、3次元dS時空中におけるアインシュタイン重力を用いたdS/CFT対応を提案し、強い証拠を与えた。また、量子情報理論との関係も議論した。以下では、我々の研究成果について簡単に解説する。

まずは、AdS/CFT対応と比較することで、dS/CFT対応の特徴について説明したい。AdS/CFT対応は、AdS時空上の重力理論がCFTで記述できるという画期的な主張である。 $d+1$ 次元のAdS時空には d 次元の境界があり、対応するCFTはその境界に住む。AdS時空の重力理論の観測量として、境界から境界への散乱振幅が挙げられる。この散乱振幅とCFTの相関関数が対応するというのが主張である。一方、dS時空の観測量と見なせるものとして、無限の未来における相関関数がある。この相関関数は、宇宙の波動関数を用いた真空期待値として計算できる。宇宙の波動関数は、重力理論の場合 ϕ を無限の未来まで境界条件 $\phi=\phi_0$ で経路積分することで得られ、dS時空の量子重力の基本的なものである (図1参照)。この宇宙の波動関数が、あるCFTで計算できるというのが、dS/CFT対応の主張である。ただし、このCFTは、あまり普通でない性質をもつことが知られている。例えば、自由度に対応するパラメータとして中心電荷 c があるが、負や虚数に値を取ることがしばしば起こる。

我々は、3次元dS時空中における重力理論が、SU(2) Wess-Zumino-Witten (WZW) 模型と、dS/CFT対応の関係にあると主張した。WZW模型は、Lie代数を拡張した対称性をもつ、基本的な2次元CFTである。重力理論では古典極限をとり、WZW模型では中心電荷が $c \rightarrow i\infty$ となる極限をとった。WZW模型にはレベル k という量子数があり、一般には正の整数に値をとる。中心電荷を $c \rightarrow i\infty$ とするために、 $k \rightarrow -2$ という特殊な値をとることが本提案の特徴である。提案の証拠の一つとして、重力の分配関数を共形場理論と重力理論の両方から計算し、古典重力の極限で完全に一致することを示した。その際、Wittenにより開発された、2次元WZW模型と3次元ゲージ理論との対応を利用した。また、3次元高階スピン重力を用いたAdS/CFT対応において、パラメータを解析接続することで、我々の提案が導出できることも示した。

本研究では、3次元dS時空中における重力理論を用いたdS/CFT対応を提案し、強い証拠をあげた。さらに、相関関数や量子効果、量子情報理論との関係などについて簡単な解析を行った。エンタングルメントエントロピーは量子情報量の一つであるが、2次元CFTのエンタングルメントエントロピーをdS時空上の理論から導出し、笠・高柳公式が今の場合にも成り立つことを確認した。これからの課題として、量子情報理論との関係をより掘り下げていきたい。ブラックホールエントロピーは量子重力の定式化の指標として扱え、最近では一般化されたエンタングルメントエントロピーがその役目を果たしてきている。一方、dS時空にもホライズンに付随するエントロピーが存在し、その起源の説明がdS時空での重力理論の使命の一つである。我々の系では、3次元重力の位相的エンタングルメントエントロピーが計算でき、dS時空のエントロピーを再現することも示した。この事実は、量子情報理論によるアプローチが、dS時空の量子重力にも有用なことを示唆している。

[1] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki, arXiv:2110.03197; arXiv:2203.02852.

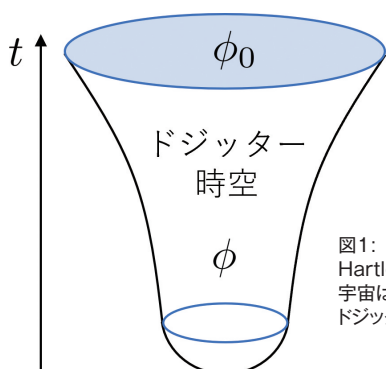


図1:
Hartle-Hawking波動関数。
宇宙は無から始まって
ドジッター宇宙へと繋がる。



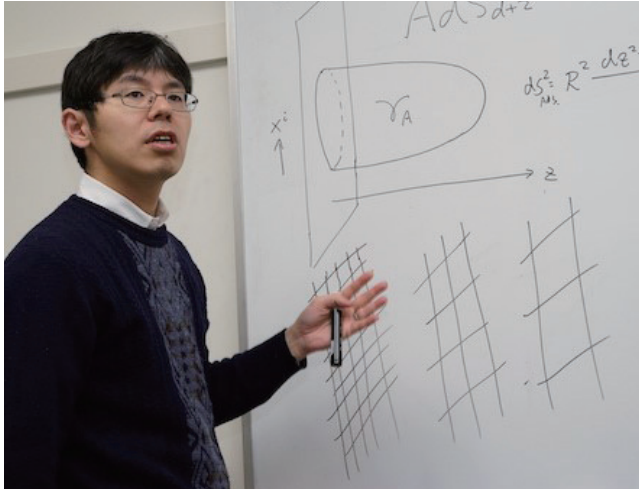
●執筆者紹介

疋田 泰章 Yasuaki Hikida

京都大学基礎物理学研究所 特定准教授
1975年愛知県生まれ
2003年3月東京大学大学院博士課程修了
2016年10月より現職

Preface

Inauguration address



Head Investigator

Tadashi Takayanagi

Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto University

With the advent of the quantum information age, there is a need for a revolution in physics. Theoretical physics has been divided into different fields such as particle theory, condensed matter theory, and cosmology, depending on the length scale. However, owing to recent developments, by introducing the ideas of quantum information and gauge-gravity correspondence, it is becoming clear that what underlies all these theories is actually the same. In September last year, MEXT-KAKENHI- Grant-in-Aid for Transformative Research Areas (A) “The Natural Laws of Extreme Universe--A New Paradigm for Spacetime and Matter from Quantum Information” was inaugurated. This collaboration program is aimed at promoting this new research style and at eventually constructing a theoretical framework of “Extreme Universe”. Thanks to great efforts by members in this program, interdisciplinary collaborations has started from various different angles.

Philosophy and Objectives

By considering quantum information as a fundamental component of the natural world, the “Extreme Universe” project aims at elucidating three subjects that are expected to make great progresses: (1) the quantum theory of black holes (quantum black holes), (2) the mechanism of the creation of the universe (quantum universe), and (3) the dynamics of quantum matter, through the fusion of different fields of quantum information and physics. At first glance, these three topics may seem to be separate, but from the perspective of quantum information, they can all be viewed as the dynamics of a collection of qubits. We call them “extreme universe” because they challenge the “limit of space”, the “limit of time”, and the “limit of matter”, respectively. In this area, we not only conduct theoretical research that integrates quantum information

theory and theoretical physics, but also perform experimental simulations of black holes and the creation of the universe through condensed matter experiments of cold atoms and the quantum Hall effect using relatively compact devices.

Fusion of different fields

In order to promote the fusion of different fields, this collaboration program holds a monthly circular meeting once a month. The meetings provide an opportunity to report research activities to researchers in different fields toward a common research target and to develop interdisciplinary collaborations. We also organize monthly online Colloquium, open to the general researchers, provides a forum for researchers from different fields to interact during the talk and the virtual coffee break time. Our members have also been actively organizing workshops on various topics in the “Extreme Universe”, and five workshops have already been held this year since the inauguration of this program.

Programs for young researchers

Based on my own experiences, the driving force for interdisciplinary research is, after all, young researchers. We would like to inspire young researchers to participate in interdisciplinary collaborations through our program which allows young researcher to stay in different research groups in this collaboration and also visit foreign institutions, and also through our school activities.



Although this field has just started, we hope to make innovative progress in this interdisciplinary field of “Extreme Universe”, through the research activities described above and great contributions by our members.

Overview

Research Outline

Conventionally, physics has explained the laws of nature using time, space, and matter as its basic building blocks. However, in the extreme situations in nature (which we call the “extreme universe” in our area), due to the strong quantum nature of the target physical systems, the degrees of freedom of space, time, and matter themselves fluctuate enormously, and existing theoretical approaches in physics face difficulties. This extreme universe refers to the three limits in nature: the limit of space, the limit of time, and the limit of matter as follows:

1 Quantum Theory of Black holes [the limit of space]

Question

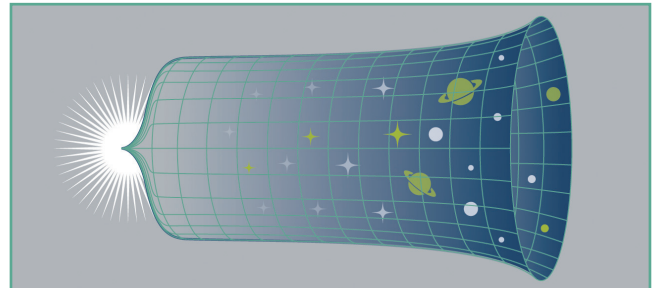
If a black hole evaporates, does the information inside disappear?



2 Quantum Theory of Cosmology [the limit of time]

Question

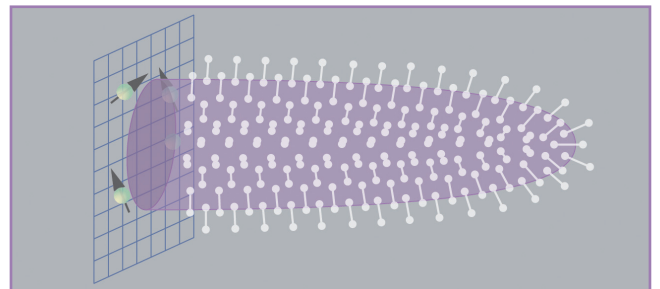
What is the ultimate natural law that explains the creation of the universe?



3 Dynamics of Quantum Matter [the limit of matter]

Question

How can the dynamics of quantum matter be solved efficiently?

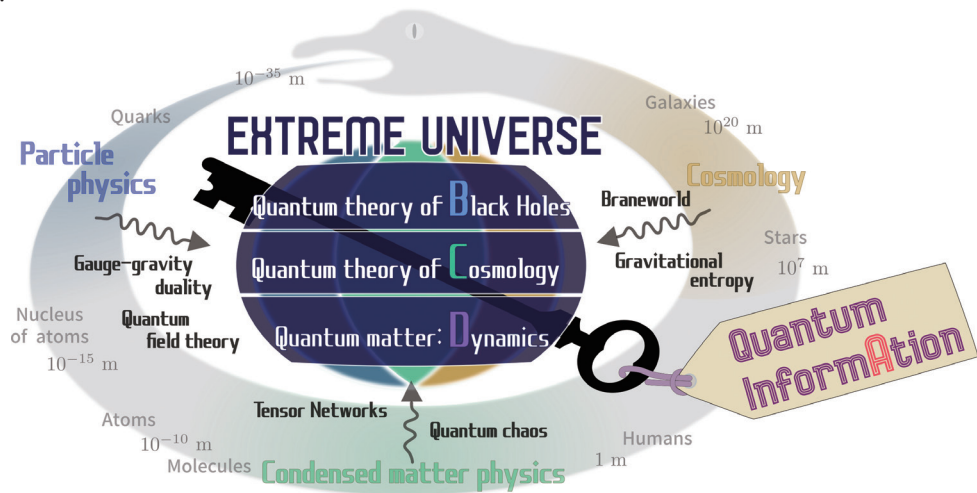


However, as soon as the field of "quantum information" emerged in the 21st century, this new way of looking at things began to bring dynamic changes to physics. Quantum information is the basis of quantum computation and quantum communication, which are expected to be the key technologies of the next generation. It is a new way of thinking that provides an understanding and a systematic control method of quantum entanglement, which means the correlation between qubits, the smallest unit of information in the microscopic world. By treating the information carried by qubits, which can be called the "limit of information," as the basic building blocks of the natural world, we can break away from the conventional picture of time, space, and matter, and expect to construct the ultimate laws of physics.

Gauge-gravity duality (also called AdS/CFT or Maldacena duality), which was discovered in string theory, relates quantum gravity to theory of quantum matter in an equivalent way. Moreover, in this duality, entanglement entropy, which measure the amount of quantum entanglement, becomes equal to an area of a surface in the gravitational spacetime (called Ryu-Takayanagi formula). These imply the new idea that the universe in gravitational theory can be regarded as an accumulation of countless quantum information, which has attracted worldwide attention. On the other hand, such a collection of bits of quantum information provides a high-precision numerical analysis method of quantum matter, called a tensor network. In this research area, we aim to clarify the extreme universe by integrating quantum information and physics of elementary particles/strings, condensed matter, and cosmology.

Although the length scales covered by each problem are very different, it is expected from the viewpoint of quantum information that the laws of physics can be understood in a unified manner, all as a collection of qubits. Physics is

composed of individual fields corresponding to various scales, as exemplified by the Ouroboros snake. In this research area, we will change the topology of physics from the donut-shaped (torus-shaped) structure of conventional physics to a new sphere-shaped physics by taking into account ideas from quantum information, and thereby approach the problem of the extreme universe.



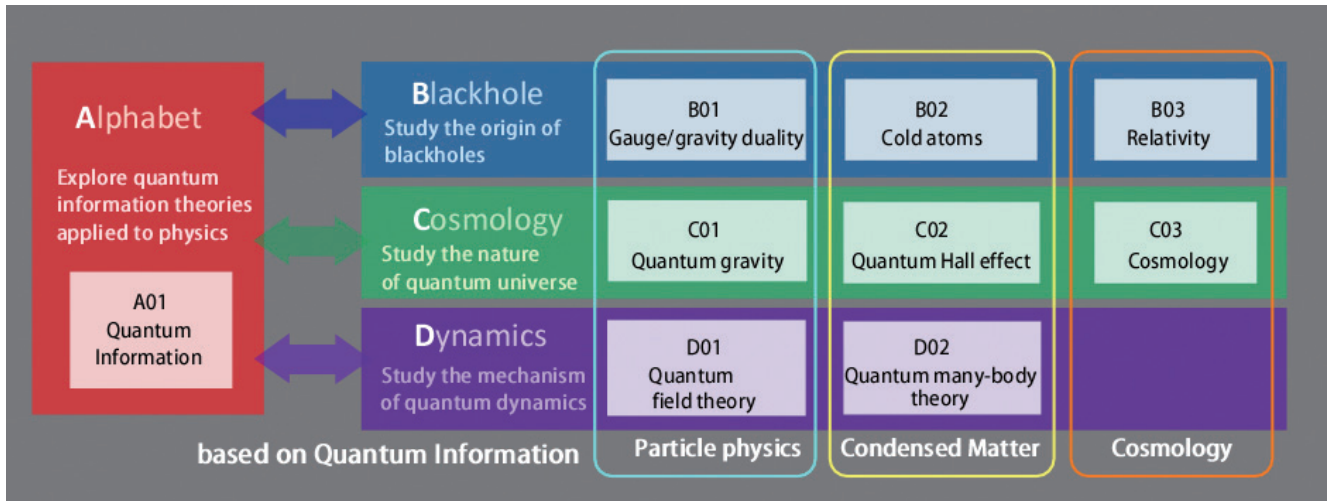
Research Organization

Planned Research Groups

This area consists of nine planned research groups as shown in the figure below, which are roughly divided into A, B, C, and D groups according to their research goals as follows:

- Group A** (A01): Fundamental research on quantum information theory for physics
- Group B** (B01, B02, B03): Quantum theory of Black holes
- Group C** (C01, C02, C03): Quantum theory of Cosmology
- Group D** (D01,D02): Dynamics of quantum matter

Moreover, groups B, C, and D are subdivided into research projects that are responsible for approaches from particle/string theory (01), condensed matter physics (02), and cosmology (03). For more details, please refer to the pages of each of the nine planned research projects. In this way, this area aims to promote fusion of disciplines and make breakthroughs by successfully intertwining both “warp threads” (i.e. connections between conventional research fields) and “weft threads” (i.e. common research goals). In addition to theoretical research, another feature of this area is to conduct experimental verification that mimics black holes and the creation of the universe through experiments of cold atoms (B02) and the quantum Hall effect (C02) using comparatively compact equipment. Together with complementary research projects based on call for research proposals, starting in FY2022, we will develop the interdisciplinary research subjects between quantum information and physics.



Overview

●Management Group

The purpose of the management group is to monitor the progress of individual research in this field, promote interdisciplinary fusion in the entire field, and plan and manage various activities which support young researchers. The group consists of 16 members in total, including nine PIs of the planned research projects and seven co-investigators (see table below). The main activities of the group are divided into "Management of Collaboration", "International Activities", "Young Scientists Support", "Interdisciplinary Activity", and "Public Relations". The ultimate goal of this collaboration is to clarify the three problems of the "extreme universe" by uniting the fields of quantum information and theoretical physics. In the management group, researchers from each field are almost equally distributed to accelerate the fusion of fields in the management of our collaboration.

Title in Management Group	Name	Affiliation	Specialized field	Role in Management Group
●Head Investigator (C01 PI)	Tadashi Takayanagi	Kyoto Univ.	Particle Physics	Supervision of Management
●Co-Investigator (A01 PI)	Tomoyuki Morimae	Kyoto Univ.	Quantum Information	Management
●Co-Investigator (A01 Col)	Yoshifumi Nakata	Univ. of Tokyo	Quantum Information	Interdisciplinary Activity
●Co-Investigator (B01 PI)	Norihiro Iizuka	Osaka Univ.	Particle Physics	Interdisciplinary Activity
●Co-Investigator (B02 PI)	Masaki Tezuka	Kyoto Univ.	Condensed Matter	Young Scientists Support
●Co-Investigator (B02 Col)	Shuta Nakajima	Kyoto Univ.	Condensed Matter	Public Relations
●Co-Investigator (B03 PI)	Akihiro Ishibashi	Kindai Univ.	Cosmology & Relativity	International Activities
●Co-Investigator (C02 PI)	Go Yusa	Tohoku Univ.	Condensed Matter	Interdisciplinary Activity
●Co-Investigator (C02 Col)	Masahiro Hotta	Tohoku Univ.	Quantum Information	Public Relations
●Co-Investigator (C03 PI)	Tetsuya Shimomizu	Nagoya Univ.	Cosmology & Relativity	Management
●Co-Investigator (C03 Col)	Keisuke Izumi	Nagoya Univ.	Cosmology & Relativity	Young Scientists Support
●Co-Investigator (C03 Col)	Tsutomu Kobayashi	Rikkyo Univ.	Cosmology & Relativity	Public Relations
●Co-Investigator (D01 PI)	Tatsuma Nishioka	Kyoto Univ.	Particle Physics	International Activities
●Co-Investigator (D02 PI)	Kouichi Okunishi	Niigata Univ.	Condensed Matter	Management
●Co-Investigator (D02 Col)	Chisa Hotta	Univ. of Tokyo	Condensed Matter	Interdisciplinary Activity
●Collaborator (D02 Col)	Hiroshi Ueda	Osaka Univ.	Condensed Matter	Interdisciplinary Activity

●Advisory Committee & Senior Scientific Research Specialist

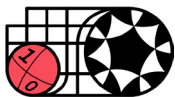
In order to receive advice from broader perspectives, we have asked internationally prominent researchers in related fields to help us as advisors. In addition, two senior scientific research specialists have been appointed to review and evaluate this area, conduct research on the project, and provide necessary guidance and advice.

Advisory Committee

Ignacio Cirac	Max Planck Institute of Quantum Optics, Germany
Akio Hosoya	Tokyo Institute of Technology, Japan
Nobuyuki Imoto	The University of Tokyo, Japan
Juan Maldacena	Institute for Advanced Study, USA
Robert Myers	Perimeter Institute, Canada
Shinsei Ryu	Princeton University, USA
Guifre Vidal	Sandbox @ Alphabet, USA

Senior Scientific Research Specialist

Ahikiri Minamino	Faculty of Engineering , Yokohama National University
Yuichi Yoshida	Principles of Informatics Research Division, National Institute of Informatics (NII)



Tomoyuki Morimae

[Principal Investigator]

Tomoyuki Morimae (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yoshifumi Nakata (Photon Science Center of The University of Tokyo)

Koji Azuma (NTT Basic Research Laboratory)

Francesco Buscemi (Department of Mathematical Informatics, Nagoya University)

[Research Collaborators]

Andrew Darmawan (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Michele Dall'Arno (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Hayata Yamasaki (University of Vienna)

Go Kato (NTT Communication Science Laboratory)

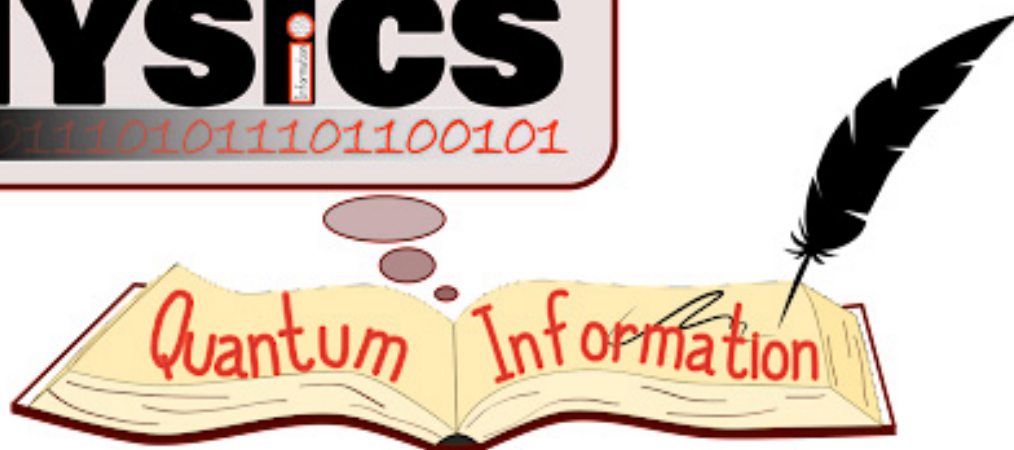
[Post-doc fellow]

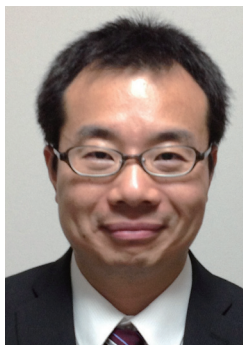
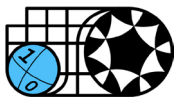
Aditya Nema (Department of Mathematical Informatics, Nagoya University)

Quantum mechanics has mysterious properties not found in classical physics, such as quantum superposition, uncertainty principle, no-cloning, and entanglement. The research field of quantum information exploits these mysterious properties to realize unprecedented high-performance information processing technologies. In particular, quantum computation, which enables high-speed calculations, and quantum cryptography, which enables a variety of new cryptographic tasks not possible in classical physics, are major applications of quantum information technology, and both theoretical and experimental research is being actively conducted around the world. In addition, the promotion of such research on quantum information technology is revealing what can and cannot be done with quantum. This will also help us to understand why the mysterious quantum theory is the way it is. To truly understand why quantum theory is such a mystery has been a long-standing goal of physicists since the time quantum theory was created, and is one of the key problems in fundamental physics. Furthermore, it has been pointed out

in recent years that many of the results, findings, and techniques obtained with quantum information are useful in other physics, and research has been conducted in various interdisciplinary areas. For example, various concepts such as the AdS/CFT correspondence in particle theory, the partition function in statistical physics, tensor networks in condensed matter physics, and quantum randomness in black holes can be studied from a new perspective through quantum information.

In order to achieve the goal of this project, which is "to create physical laws of the extreme universe on the basis of quantum information," the project team plays the following two roles. First of all, it is a role to provide other groups with the "language" necessary to understand the physical laws of the extreme universe. Quantum information is expected to be a useful new language in various physics. We are also responsible for deepening the basic theory of quantum information itself and refining the "language" into a more advanced and better one by promoting research on quantum information by each member of the group.





Norihiro Iizuka

[Principal Investigator]

Norihiro Iizuka (Department of Physics, Osaka University)

[Co-Investigator]

Toshifumi Noumi (Department of Physics, Kobe University)

Masaki Shigemori (Department of Physics, Nagoya University)

Seiji Terashima (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

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

[Research Collaborators]

Kotaro Tamaoka (College of Humanities and Sciences Department of Physics, Nihon University)

Koji Hashimoto (Department of Physics, Kyoto University)

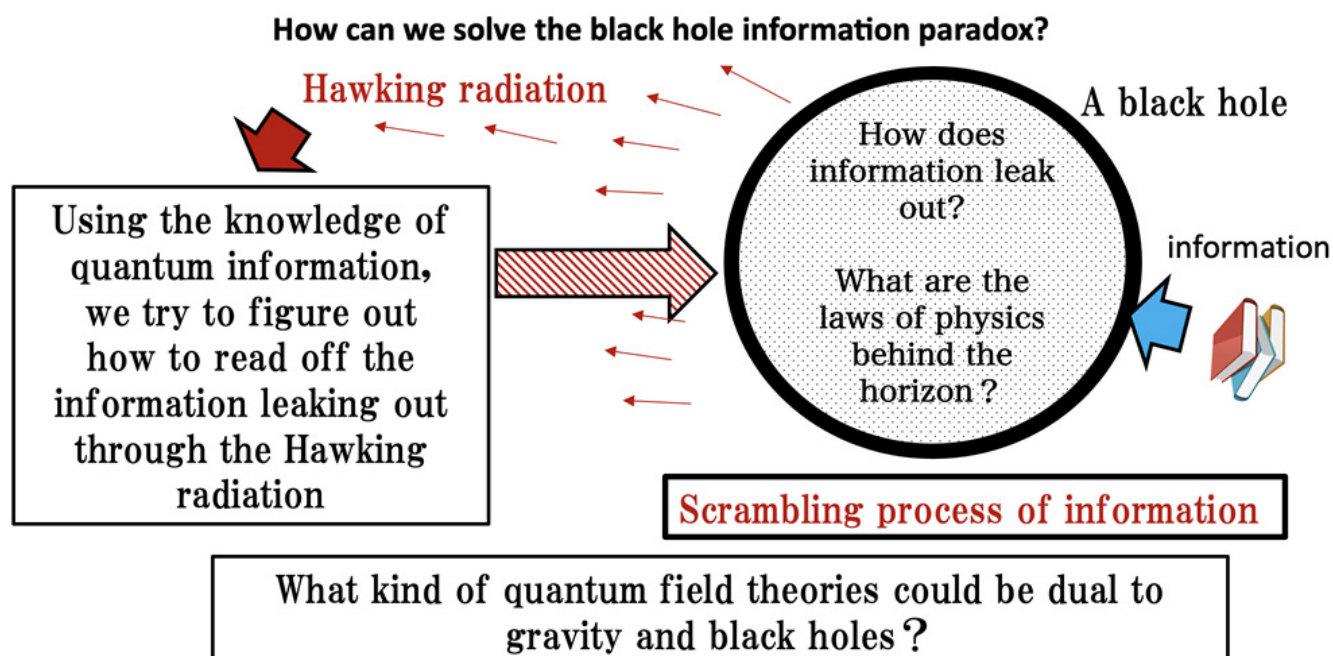
Kengo Maeda (Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology)

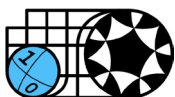
Black Holes are probably the most mysterious and interesting objects in the universe. Classically due to their strong gravitational forces, once a particle enters through the black hole horizon, it can never go out. However, if one considers the quantum effects, this is not true anymore. In fact, a black hole has definite temperature and radiates thermally (which is so-called Hawking radiation) the particles which fall in before. Furthermore, a black hole has huge entropy, suggesting that a black hole is in fact a coarse-grained description of degenerate states, whose degeneracy is given by exponential of the entropy, according to the Boltzmann's famous entropy formula. These suggest that one should also have a fine-grained description of gravity, namely, quantum gravity where one should obtain a quantum-mechanical description of the space-time behind the horizon. String theory is the most successful candidate for quantum gravity. Recent studies

show that two important concepts play an important role in understanding quantum gravity/string theory. One is quantum information. The other is gauge/string duality, which claims that certain quantum gravity is equivalent to certain gauge theory. Our main research goal is using these two important concepts, to understand the physics behind the horizon of quantum black holes, and how quantum mechanics is consistent with gravity, the quantum description of the space-time. More concretely we would like to figure out the answer for the following key questions; how the physical information of the black hole leaks out through the Hawking radiation? How quantum gravity corrects Hawking's mistake? What are the laws of physics behind the black hole horizon? Through the study of quantum black holes, we would like to understand the basic principles for quantum gravity.

Understanding the physics behind the black hole horizon

Using the gauge/string duality and quantum information,
our main goal is to understand quantum black holes





Understanding quantum black holes through the study of artificial quantum matter (21H05185)



Masaki Tezuka

[Principal Investigator]

Masaki Tezuka (Department of Physics, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Shuta Nakajima (The Hakubi Center for Advanced Research, Kyoto University)

Eriko Kaminishi (Quantum Computing Center, Keio University)

Takashi Mori (RIKEN CEMS)

Daisuke Yamamoto (Department of Physics, Nihon University)

[Research Collaborators]

Ippeei Danshita (Department of Physics, Kindai University)

A black hole gradually evaporates into thermal radiation, which is called the Hawking radiation, and finally disappears. This means that whatever information thrown into a black hole will eventually be “lost”. However, this contradicts the unitary time evolution, with the information on the initial state being conserved, in quantum mechanics. This apparent contradiction is called the “black hole information loss paradox”. Clarifying the mechanism by which information appears to be lost is one of the major objectives of this research area which aims to construct a theory of the “extreme universe” that integrates quantum theory and gravity theory.

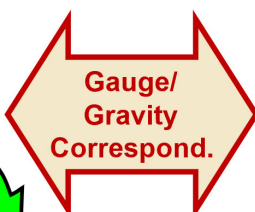
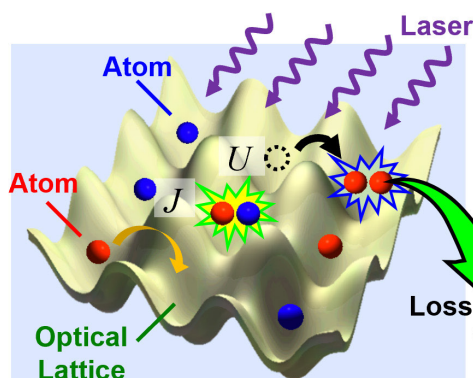
Group B02 aims to promote the study of the quantum features of black holes, one of the key issues of the “extreme universe”, through the collaboration of cold atom experiments and theoretical studies. According to the gauge–gravity correspondence, the evaporation process of a black hole could correspond to the dynamics of a quantum many-body system or quantum matter. Though the quantum information is conserved in the dynamics, different initial states can evolve into final states which are indistinguishable from each other with regard to the macroscopic physical quantities, leading to an apparent loss of information similar to the issue of thermalization in

isolated quantum systems.

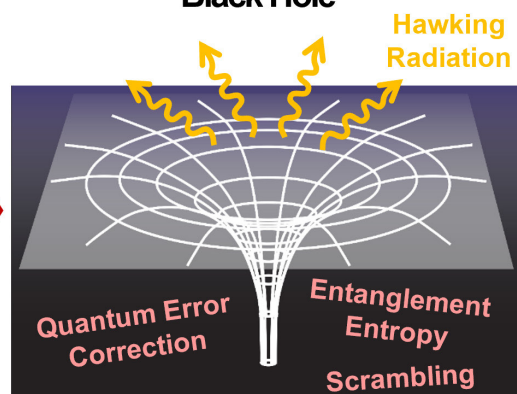
In recent years, the importance of quantum informational approaches has been recognized in the study of quantum many-body systems. They are useful not only for the studies of equilibrium properties of quantum systems but also for the understanding of non-equilibrium dynamics, such as thermalization through quantum entanglement and delocalization of quantum information or “scrambling” in a black hole.

In this project, we will elucidate the nature of black holes by experimentally investigating the non-equilibrium dynamics of cold atomic systems in the laboratory which is a highly controllable artificial quantum matter. In particular, we will experimentally and theoretically perform research on (I) measurement-induced quantum phase transitions due to the effects of dissipation and/or measurement and (II) out-of-time-ordered correlation as a measure of information scrambling in cold atomic systems. In parallel, we will develop the theory for non-equilibrium phase transitions, methods for calculating non-equilibrium states using quantum computers, and evaluate the quantum entanglement in quantum many-body systems that are thought to correspond to quantum black holes and gauge gravity, such as the Sachdev-Ye-Kitaev model.

Quantum Many-Body System (Cold Atoms)



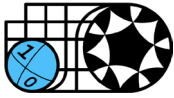
Black Hole



- ✓ Experiment & Theory
- ✓ Measurement-Induced Transition
- ✓ Out-of-Time-Ordered Correlator

Understanding Non-equilibrium Quantum Many-Body Dynamics from a view of Quantum Information

Black Hole Information Loss Paradox



Akihiro Ishibashi

[Principal Investigator]

Akihiro Ishibashi (Department of Physics, Kindai University)

[Co-Investigator]

Kengo Maeda (Faculty of Engineering, Shibaura Institute of Technology)

Keiju Murata (Department of Physics, Nihon University)

[Research Collaborators]

Takashi Okamura (Department of Physics, Kwansei Gakuin University)

Gen Kimura (Systems Engineering and Science, Shibaura Institute of Technology)

Toshifumi Noumi (Department of Physics, Kobe University)

The aim of group B03 is to understand fundamental nature of quantum black holes by developing a new approach to quantum gravity that incorporates quantum information into general relativity. Black holes in general relativity are the simplest but one of the most mysterious objects in the universe since their basic constituent is merely the spacetime curvature, but they nevertheless possess thermodynamic properties, such as temperature and entropy. The possibility that a black hole can evaporate by emitting thermal Hawking radiation has raised the fundamental question, called the “black hole information paradox,” which concerns over general relativity and quantum information. The event horizon of a black hole is the causal boundary of domain of outer communications, whose structure and dynamics are governed by the null energy condition via the Einstein equations, and whose sectional area corresponds to the entropy, known as Bekenstein-Hawking entropy. The former aspect suggests that quantum mechanically corrected null energy conditions would play a significant role in understanding the structure and dynamics of quantum black holes. The latter aspect exhibits the close connection between the black hole entropy and quantum entanglement entropy,

which characterizes the correlations between subsystems separated by a boundary surface in a larger quantum system. An increasing number of evidence shows that the black hole entropy can be described as an entanglement entropy via the gauge-gravity correspondence. Furthermore, recent development of the holographic principle indicates that geometric description of---not only a black hole event horizon but also---a various type of causal boundaries can admit the holographic description as a quantum entanglement via the Ryu-Takayanagi formula, which connects gravity with quantum information. It is thus anticipated that quantum aspects of gravity would become most tangible around causal boundaries and be described most effectively by using the language of quantum information theory. These observations form our view point of “extreme universe” that gravity/spacetime is a collection of quantum information. Based on these ideas, we will derive basic formulas that govern the dynamics of quantum black holes by unifying geometric and quantum information theoretic aspects of causal boundaries, and thereby attempt to establish a theoretical foundation for extreme universe.

What makes quantum aspects of gravity most tangible?

Toward understanding fundamental nature of quantum black holes

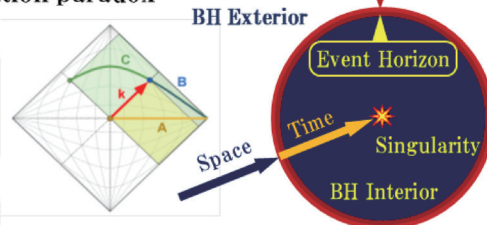
➔ **“Black hole information paradox”**

I. Quantum null energy conditions

- Quantum information and QNEC
- Entropy of quantum black holes

II. Dynamics of causal boundaries

- Causal boundaries and quantum dynamics
- Black hole information paradox
- Quantum information and causality



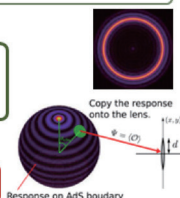
III. Quantum BHs and observables

- Quantum many body system and gravity dual
- Quantum black holes and observables

Basic formulas for quantum black holes

$$[\text{Quantum Information}] + [\text{Geometry of BH}] = [\text{Observables}]$$

Theoretical foundation for extreme universe





Tadashi Takayanagi

[Principal Investigator]

Tadashi Takayanagi (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Yasuaki Hikida (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Kazumi Okuyama (Faculty of Science, Shinshu University)

Yasuhiro Sekino (Faculty of Engineering, Takushoku University)

Shigeki Sugimoto (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

[International Research Collaborators]

Shinsei Ryu (Princeton U., USA)

Beni Yoshida (Perimeter Institute, Canada)

[Research Collaborators]

Kanato Goto (iTHEMS, RIKEN)

Tomotaka Kitamura (Institute of Theoretical Physics, Rikkyo University)

Shoichiro Miyashita (Graduate School of Advanced Science and Engineering, Waseda University)

Kazuhiro Sakai (Institute of Physics, Meiji Gakuin University)

Takahiro Uetoko (National Institute of Technology, Kushiro College)

[Post-doc Fellows]

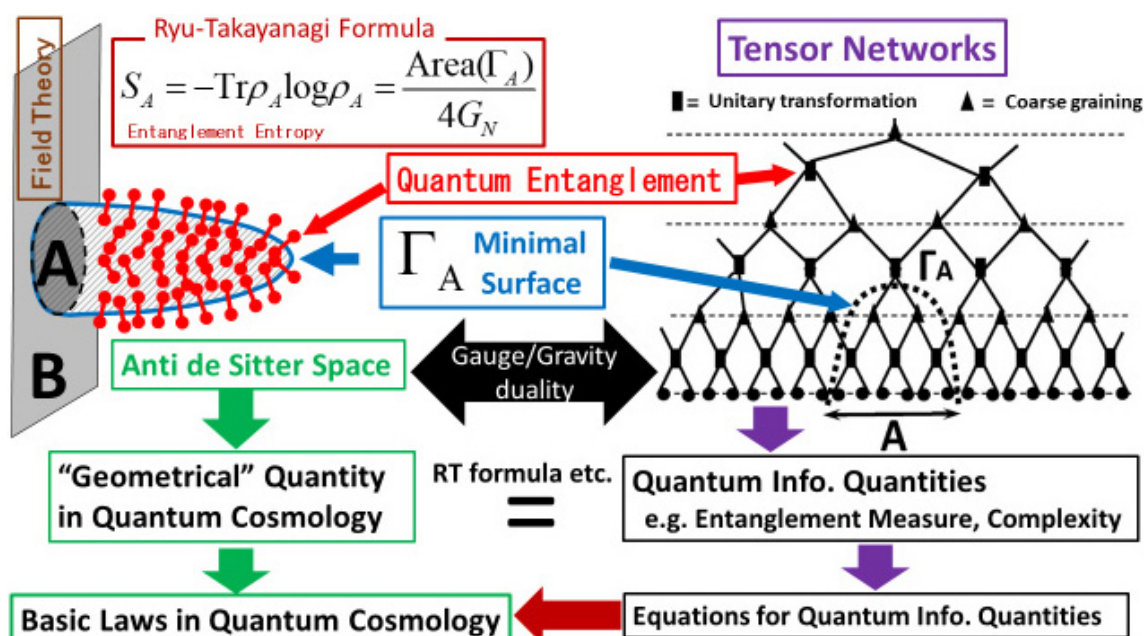
Ibrahim Akal (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Shan-Ming Ruan (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Kenta Suzuki (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

The geometric formula of entanglement entropy (Ryu-Takayanagi formula), which says that a surface area in gravitational theory can be interpreted as an amount of quantum information, has led to the prediction that the universe in gravitational theory is a collection of quantum information, which has attracted worldwide attention. The aim of group C01 is to develop this prediction by introducing the viewpoint of quantum information into high energy theory, and to uncover the basic theory of the "dynamics of the creation of the universe (quantum universe)," which is one of the three problems of extreme universe. The foundation for this is the "gauge-gravity correspondence," or the hypothesis that the gravitational theory of the anti de Sitter universe is equivalent to a theory of quantum many-body system. The gauge-gravity correspondence is a powerful idea that has passed enormous verifications, but the basic principle of why this

correspondence arises still remains unknown. If this principle is understood completely, it will be possible to elucidate the mechanism of the creation of the universe from nothing and eventually to construct the ultimate physical laws. The anti-de Sitter universe is a universe with negative curvature, while the real universe we live in and the process of creation of the universe are thought to have positive curvature, i.e., a de Sitter universe. In this research, we will first clarify the basic principle of gauge-gravity correspondence by combining the methods of quantum information theory and gauge-gravity correspondence, and then use it as a hint to extend the gauge-gravity correspondence beyond the anti-de Sitter universe to more general universes including the de Sitter universe. This will finally provide us with the fundamental theory for quantum cosmology.





Go Yusa

[Principal Investigator]

Go Yusa (Department of Physics, Tohoku University)

[Co-Investigator]

Naokazu Shibata (Department of Physics, Tohoku University)

Masahiro Hotta (Department of Physics, Tohoku University)

Kazuya Yonekura (Department of Physics, Tohoku University)

[Research Collaborators]

Takaaki Mano (National Institute for Materials Science)

Kazuhiro Yamamoto (Department of Physics, Kyushu University)

Yasusada Nanbu (Department of Physics, Nagoya University)

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

Kazunori Nakayama (Department of Physics, Tohoku University)

John Nicholas Moore (Department of Physics, Tohoku University)

Vladimir Umansky (Weizmann Institute of Science)

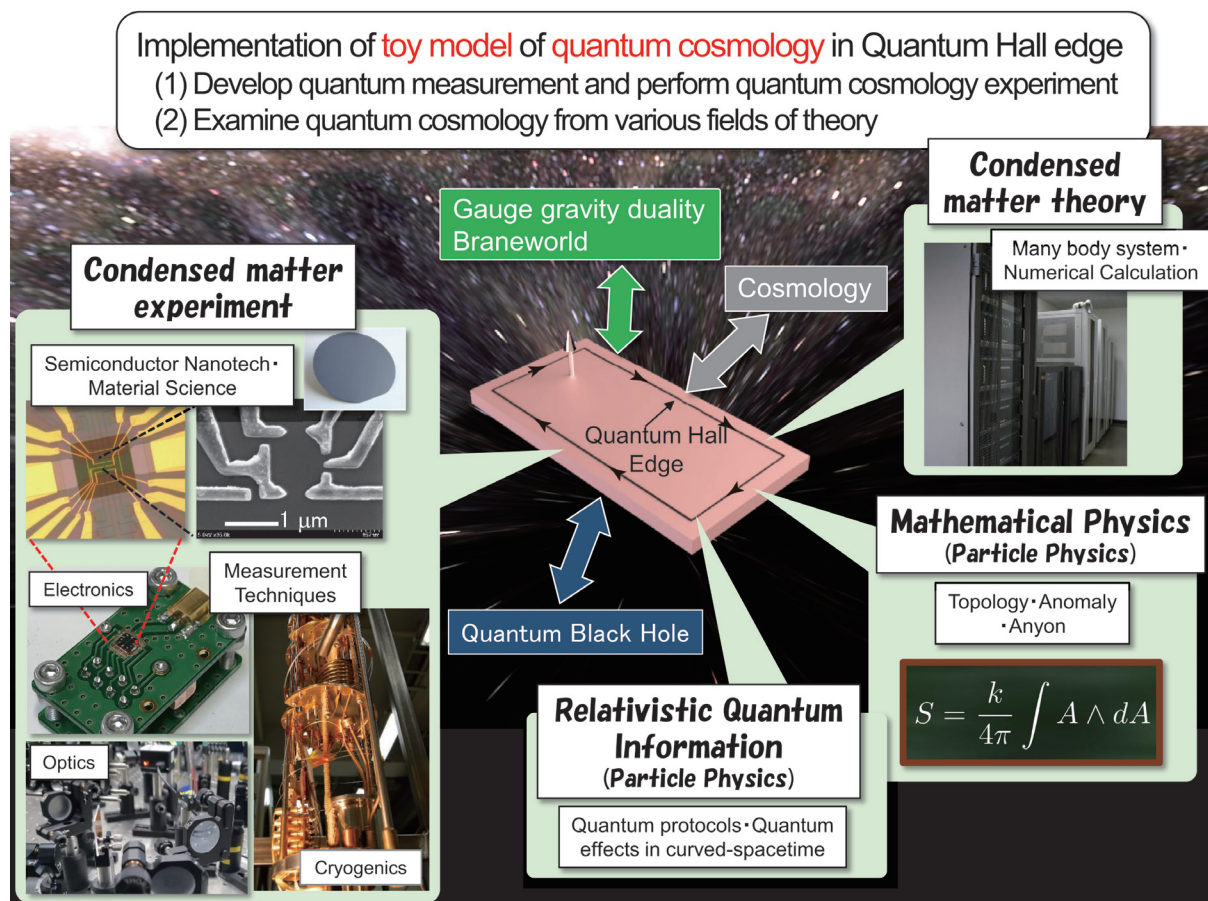
Koji Yamaguchi (University of Waterloo)

Kenichi Sasaki (NTT Basic Research Laboratories)

How did our universe develop from its earliest moments? This is the major question of quantum cosmology, and to answer it great efforts have been made both in theory and in attempts to verify theory by observation of cosmic background radiation. It would be ideal if we could reproduce the origin and evolution of the universe in a laboratory and thereby experimentally verify the theory by controlling key parameters. Therefore, in this research project we aim at implementing quantum cosmology in the laboratory in 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.

The actual physical system that we deal with comprises electrons in semiconductors. Semiconductor industry

consists of state-of-the-art modern technologies such as ultra-high quality crystal growth technology, fine process technology, and electronics. In this project, using such mature technologies as a base, we implement toy models of quantum cosmology on a semiconductor chip using quantum Hall edges, which are an intriguing quantum many-body system. Through experiment and theory, we aim at unveiling the mechanism of the origin of the universe. More specifically, (1) we will establish advanced quantum measurement techniques and perform experiments on quantum Hall edges, and (2) examine quantum cosmology by collaborating with various fields of researchers from particle theory, mathematical physics, solid-state theory, quantum information, and cosmology





Gravitation and cosmology: principles and applications based on quantum information (21H05189)



Tetsuya Shiromizu

[Principal Investigator]

Tetsuya Shiromizu (Graduate School of Mathematics, Nagoya University)

[Co-Investigator]

Keisuke Izumi (Kobayashi-Maskawa Institute, Nagoya University)

Tsutomu Kobayashi (Department of Physics, Rikkyo University)

Masato Nozawa (Faculty of Engineering, Osaka Institute of Technology)

Norihiro Tanahashi (Faculty of Science and Engineering, Chuo University)

Hirofumi Yoshino (Advanced Mathematical Institute, Osaka City University)

[Research Collaborators]

Sumio Yamada (Faculty of Science, Gakushuin University)

[Post-doc Fellows]

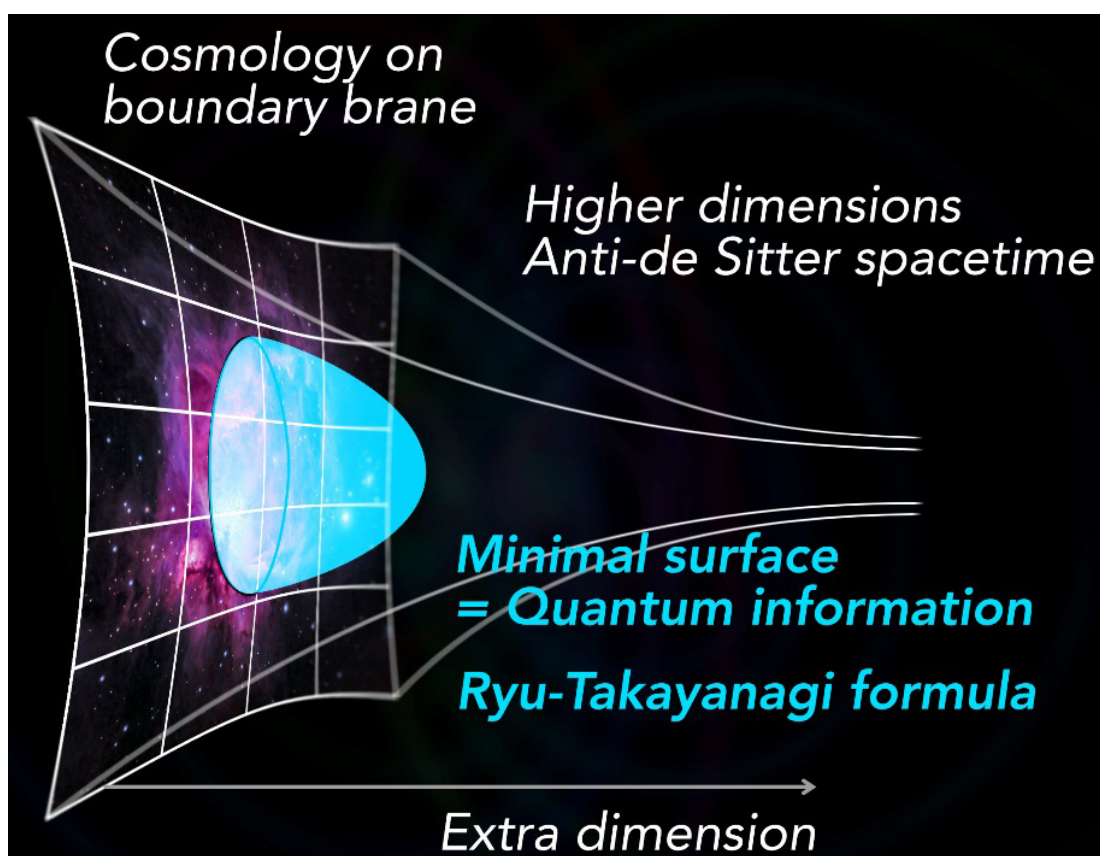
Shunichiro Kinoshita (Nagoya University/Rikkyo University/Chuo University)

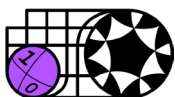
General Relativity proposed by A. Einstein is the most convincing classical theory of gravity describing the dynamical fluctuations of space and time. Cosmological models based on General Relativity have successfully explained a bunch of phenomena observed in the Universe. Nevertheless, some fundamental issues remain long-standing puzzles. Of most prominence is the origin of the two phases of the accelerated expansion of the early and late universe, a.k.a. inflation and dark energy. This exposes a lack of our profound understanding of gravity and spacetime. In this project, we therefore aim to clarify the whole consistent picture of gravity and spacetime, which would make progress toward resolution of the beginning and the accelerated expansion of the Universe.

The research proposal of our group (C3) is two-fold: one is to incorporate the aspects of quantum information—which has been substantially developed during the past decade by the Ryu-Takayanagi formula in the gauge/gravity correspondence—into “braneworld.” A

braneworld describes our 4-dimensional universe as a thin membrane corresponding to the boundary of higher dimensional anti-de Sitter spacetime. This model has been motivated by and consistently derived from particle physics. We try to reframe the braneworld model from the perspective of quantum information theory. It is our hope that this new braneworld perspective would be a powerful tool and provide a clue to get deeper insight into problems of universe.

Another blueprint of our research proposals is to identify the direct signature of quantum gravity by exploring a broad range of topics on gravitational physics. The recent experimental activities including the detection of gravitational wave signals and the image of supermassive black holes have reached a sensitivity where the deviation from General Relativity is testable. Stimulated by this new exciting window of opportunity in cosmology/astrophysics, we address phenomena that lead to the robust predictions of quantum aspects of gravity.





Quantum information theoretic approach to the dynamics of quantum field theory (21H05190)



Tatsuma Nishioka

[Principal Investigator]

Tatsuma Nishioka (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

[Co-Investigator]

Masazumi Honda (Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University)

Etsuko Itou (Strangeness Nuclear Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center)

Yutaka Matsuo (Department of Physics, The University of Tokyo)

Takuya Okuda (Graduate School of Arts and Sciences, The University of Tokyo)

[Research Collaborators]

Takahiro Doi (Research Center for Nuclear Physics, Osaka University)

Kazunobu Maruyoshi (Faculty of Science and Technology, General Education, Seikei University)

Lento Nagano (International Center for Elementary Particle Physics, The University of Tokyo)

Ryo Suzuki (Shing Tung Yau Center of Southeast University)

Hiroyuki Tajima (Department of Physics, The University of Tokyo)

Shouchiro Tsutsui (Strangeness Nuclear Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center)

Masahito Yamazaki (Kavli Institute for the Physics and Mathematics of the Universe, The University of Tokyo)

[Post-doc Fellows]

Daisuke Inotani (Strangeness Nuclear Physics Laboratory, RIKEN Nishina Center)

Yutaka Yoshida (School of Science, Tokyo Institute of Technology)

Many of the phenomena around us, such as the Standard Model of elementary particles, are described in terms of quantum field theory. Understanding the physics of the microscopic realm is important not only for investigating the ultimate constituents of matter, but also for exploring the nature of quantum many-body systems, in which many fundamental quantum systems cooperate with each other to create new physical phenomena. The goal of group D01 is to elucidate the dynamics of matter that exhibits such quantum behavior. In quantum information theory, how quantum systems change under various physical manipulations is investigated from a general viewpoint. By adopting the perspective of quantum information theory, new aspects of quantum field theory may be revealed that cannot be understood by conventional methods. In particular, by focusing on the common mathematical structure behind quantum field theory and quantum

information theory, we hope to uncover universal properties that all field quantum theories should possess, independent of individual quantum systems. As a complementary approach to examining the dynamics of quantum field theories, we will perform quantum computer simulations of quantum field theories. Many physical systems, including finite density systems and real time systems, are difficult to simulate on classical computers, but are expected to be efficiently simulated on quantum computers. By developing and implementing methods of quantum computation suitable for quantum field theory, we will be able to elucidate important phenomena such as the scattering process of elementary particles and the evaporation process of black holes. Furthermore, we will explore the relationship between the quantum information theory aspect of quantum field theory and holographic principles as well as quantum gravity theory.

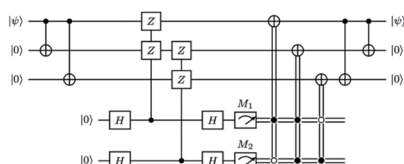
Quantum Information Theory

- Quantum information measure
- Quantum error correction
- Quantum computation
- Quantum simulation
- Quantum algorithm



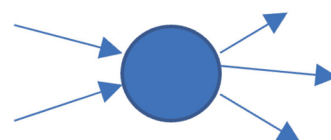
Quantum Field Theory

- Constraints on dynamics
- Quantum energy bounds
- Real time systems
- Quantum Hall systems
- Sign problem

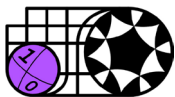


Quantum computation

Quantum simulation



Particle scattering



Tensor Networks and Quantum Many-Body Systems from Quantum Information (21H05191)



Kouichi Okunishi

[Principal Investigator]

Kouichi Okunishi (Department of Physics, Niigata University)

[Co-Investigator]

Kenji Harada (Graduate School of Informatics, Kyoto University)

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

Hosho Katsura (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

Hiroshi Ueda (Center for Quantum Information and Quantum Biology, Osaka University)

[Research Collaborators]

Toshiya Hikihara (Faculty of Science and Technology, Gunma University)

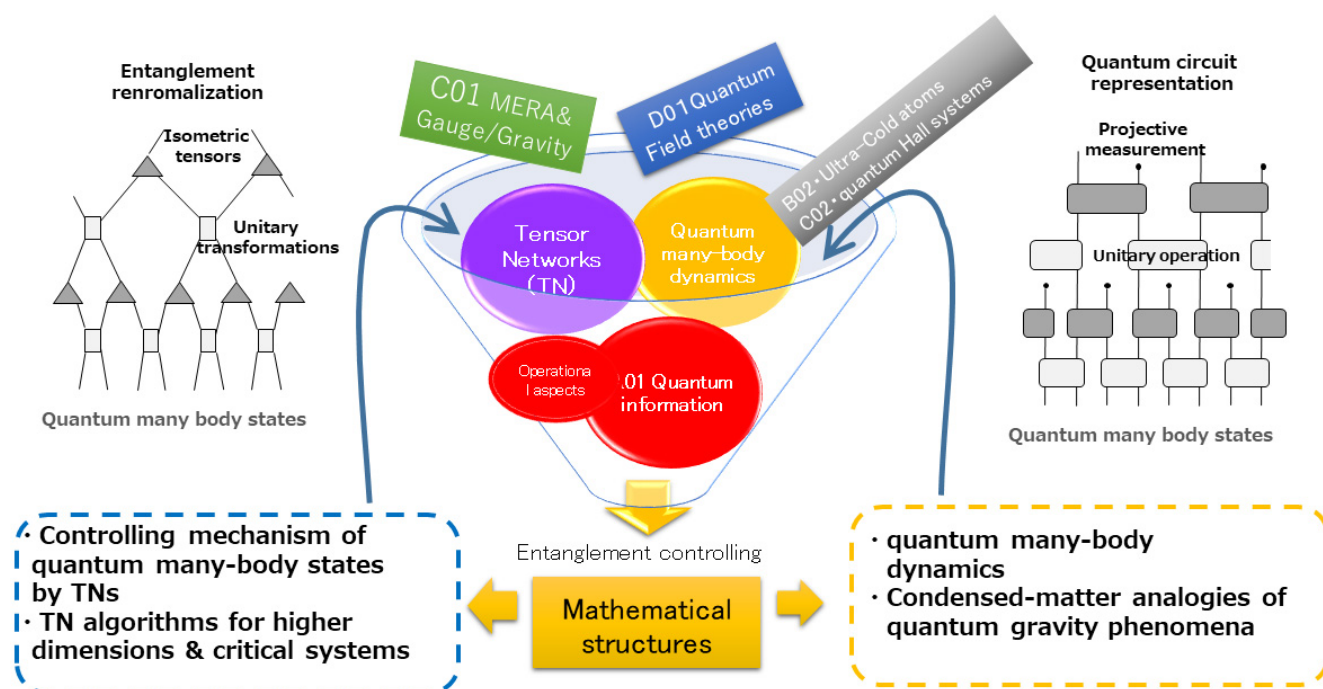
Tomotoshi Nishino (Department of Physics, Kobe University)

Tsuyoshi Okubo (Graduate School of Science, The University of Tokyo)

Quantum many-body systems such as quantum spin systems, ultra-cold atoms, and topological quantum matter, have been a central issue in modern condensed matter physics. The key to understanding such complex systems is the structure of quantum entanglement. The primary goal of group D02 is to precisely understand the physics of quantum many-body systems based on a quantitative analysis of quantum entanglement. For this purpose, we focus on tensor networks that provide very practical numerical and theoretical frameworks for describing and controlling highly entangled quantum many-body states. Actually, recent years have witnessed a growing interest in applying tensor networks not only to condensed matter physics but also to various research fields ranging from quantum information to high-energy physics. Moreover, the fusion of tensor networks and quantum gravity has led us to the nontrivial relation between the Ryu-Takayanagi formula for the holographic entanglement entropy and the entanglement renormalization group that is one of the tensor network methods. These suggest that key physics to

understand “extreme universe” is involved in the interdisciplinary research fields associated with quantum entanglement and the tensor networks.

In this research project, motivated by such interesting interdisciplinary developments, we will systematically clarify the controlling mechanism of quantum many-body states inherent in the tensor networks, and then develop a modern theory of quantum many-body dynamics by focusing on mathematical structures behind quantum entanglement physics. On these basis, we also develop efficient tensor network algorithms for higher dimensions and critical systems, which are of practical importance. In cooperation with other research groups, moreover, we aim to attain possible understanding of the extreme universe from the condensed matter perspective. For instance, we address the relation between the entanglement renormalization and the holographic entanglement entropy, and also explore condensed matter analogies of quantum gravity phenomena in realistic experimental situations.



Tensor networks and quantum many-body systems from quantum information

What is quantum information?

As quantum information science grows, “quantum information” has been started to be widely used in various fields, possibly leading people to wonder what “quantum information” means. The goal of this article is to explain how “quantum information” is described in quantum information science, hopefully as clearly as possible.

1. What is “information”?

Let us begin with information in a classical regime. In the classical case, information is commonly formulated using a probability distribution. For instance, suppose that you are interested in the winner of some competition. Before you know the result, you may have no clue. Hence, it is reasonable to describe your status as “all competitors with equal winning probability”. The information of the winner changes your status from such an uncertain to a certain one. This change of the probability distribution represents a gain of information.

One of the merits of using a probability distribution is that we can naturally define the amount of information. In the above example, if the winner turns out to be the one who you expect unlikely to win, you will probably get more surprised and feel that you have gained more information. Based on this idea, it is common to expect that an event with small probability has more information. Following this, the amount of information of a certain event is typically given by the log of inverse probability. The logarithm is taken for making the quantity additive.

To wrap up, information is formulated by a probability distribution on a set of events, and each event has the information content given basically by the inverse probability. In information theory, the pair of a set of events and a probability distribution is often called an **information source**. Intuitively, the information source can be thought of as a slot-machine: every time you pull a lever, you get an event x with probability p_x and obtain the information content of $\log_2 1/p_x$. It is easy to see that the average information content of the slot-machine is given by the Shannon entropy.

Note that a slot-machine is an information source, not information itself. When you say you send information, it does not mean you pack a slot-machine and ship it to somebody. It does mean that, when your machine outputs x , a receiver gets x as well. This thought may allow us to understand a gain of information as a perfect correlation with the output of an information source.

2. What is quantum information?

We can now easily understand quantum information. Since an information source is a slot-machine, a **quantum information source** is a quantum slot-machine that outputs a pure state $|\Psi_i\rangle$ with probability p_i . If one gains the information about what pure state the source outputs, we can say “quantum information is gained”.

This is a slight generalization of classical information. However, in the quantum regime, a slight extension usually leads to a radical change. To see this, let us consider the following two quantum information sources A and B:

A : $\{|\Psi_i\rangle$ with probability $q_i : i = 0, 1, |\langle\Psi_0|\Psi_1\rangle| = 0\}$,
 B : $\{|\Phi_i\rangle$ with probability $q_i : i = 0, 1, |\langle\Phi_0|\Phi_1\rangle| \approx 1\}$.

Since the two states in A are orthogonal and distinguishable with certainty, the source A is merely a re-labeling of a classical information source $\{(q_i, i) : i = 0 \text{ or } 1\}$. That is, the quantum information source A is classical though it is defined on quantum states! On the other hand, B consists of $|\Phi_0\rangle \approx |\Phi_1\rangle$ and always outputs almost one type of state. Hence, the source B is very different from a classical one $\{(p_i, i) : i = 0 \text{ or } 1\}$.

Clearly, this is due to non-orthogonality of quantum states, which can be simplified by using a trick that we are all familiar with. We can just use a **density matrix** to represent the information source $\{p_i, |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|\}$, such as $\rho = \sum_{i=0}^{K-1} p_i |\Psi_i\rangle\langle\Psi_i|$. By diagonalization $\rho = \sum_{x=0}^{D-1} \lambda_x |\lambda_x\rangle\langle\lambda_x|$ ($D \leq K$), we can introduce another ensemble $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}_{x=0}^{D-1}$ of pure states. It is important that this ensemble represents the quantum information source same as $\{p_i, |\Psi_i\rangle\}_{i=0}^{K-1}$. This is due to the rule of quantum world: there is no physical operation that distinguishes ensembles of quantum states with the same density operator. Thus, we can argue quantum information based on the source $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}_{x=0}^{D-1}$ rather than $\{p_i, |\Psi_i\rangle\}_{i=0}^{K-1}$. This is a great simplification since the former consists of the pure states orthogonal to each other and is essentially classical!

3. Again, what is quantum information?

At this stage, one may be confused about what quantum information is. In the beginning of the previous section, it was explained that quantum information is about the output of a quantum information source $\{p_i, |\Psi_i\rangle\}$, e.g., was the output $|\Psi_i\rangle$ or $|\Psi_j\rangle$? However, in the latter part, the ensemble was replaced with $\{\lambda_x, |\lambda_x\rangle\}_{x=0}^{D-1}$ using the principle of quantum world. Now, neither $|\Psi_i\rangle$ nor $|\Psi_j\rangle$ can you find. Well, what would you actually get to know when you gain quantum information?

The confusion arises from the fact that we have mistakenly expected that an output state is drawn from a **specific** quantum source $\{p_i, |\Psi_i\rangle\}$. This is not true since quantum tells us that any ensembles describe the same physical state if they have the same density matrix. We should never fix the ensemble when we talk about quantum information. If we do so, we will be out of quantum. For this reason, the most common definition of quantum information source is actually representing it by a density matrix ρ instead of an ensemble $\{p_i, |\Psi_i\rangle\}$.

Apart from using a density matrix, it is also possible to define quantum information by entanglement. Recall that a density matrix ρ_A on a quantum system A can be always described by a pure state $|\rho\rangle_{AR}$ on an extended system AR. The pure state and the system R are called a **purification of ρ_A** and a **purifying system of A**, respectively. As a consequence of the Uhlmann’s theorem [1], it can be shown that any ensemble of pure states with a density matrix ρ_A , can be realized in A if the purifying system R of the purification $|\rho\rangle_{AR}$ is measured in a proper basis. This property holds due to the entanglement between A and R. Here, a choice of the measurement basis in R determines a set of pure states in A, and the measurement probability defines a probability distribution on it.

Using this fact, we may expect that a quantum information

source in A, namely a density matrix ρ_A , is kept track of by a purifying system R of ρ_A . Hence, we can say that quantum information is kept in entanglement with a purifying system. If one takes this picture, the purifying system is sometimes called a **reference** system. This definition is nearly equivalent to the one based on a density matrix [2], so either can be used in practice.

Before we move on, it is better to emphasize that there is no way to naturally quantify the “amount” of quantum information. In classical cases, the information content was intuitively defined from the degree of “surprise”. In a quantum case, this is not possible since we should not fix the ensemble and cannot think of how much we would be surprised when we know the output of a quantum information source. Some may wonder what about the von Neumann entropy. In a sense, it may represent quantum information content of a quantum source. However, unlike the classical case, the meaning of quantum information content is by far non-trivial. To correctly understand what it means, one needs to learn the quantum data compression theorem established by Schumacher [3].

4. Quantum information and physics

Finally, let us see what “quantum information” is in the context of physics. For instance, the Hayden-Preskill thought experiment asks how to recover quantum information thrown into a black hole (BH) from the Hawking radiation. We also sometimes hear “quantum information of a BH”. How should we understand them?

Based on a density matrix, the former is interpreted as follows. First, a pure state $|\Psi_x\rangle$, probabilistically drawn from a quantum information source ρ , is thrown into a BH. Second, one, say Bob, tries to recover $|\Psi_x\rangle$ from the Hawking radiation. Bob is typically assumed to know what is ρ though he has no idea about what pure state was chosen. If he succeeds, then we can say that quantum information thrown into the BH is recovered from the radiation.

If one prefers a description by entanglement, we should introduce a purification $|\rho\rangle_{AR}$ of a quantum information source ρ_A . The system A is thrown into a BH, and Bob tries to recover the entanglement between A and R from the Hawking radiation. That is, he applies a good operation onto the Hawking radiation, so that resulting state is $|\rho\rangle_{AR}$ shared between a Bob’s system and R, not between A and R. A success of such an entanglement transfer implies that quantum information is recovered from the radiation. In this scheme, we should be careful that no operation can be applied to the purifying system R since it is virtual.

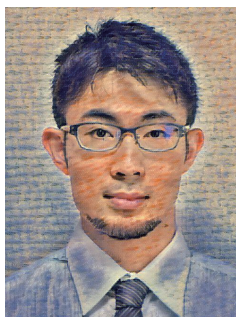
In contrast, it is not so clear to me what “quantum information of a BH” means. Maybe, it is based on the idea that a BH itself is a quantum information source, which is possible since a BH in the quantum regime should be described by a density matrix. If so, quantum information of a BH is about the pure state a BH is actually in. In terms of entanglement, this is equivalent to say that we consider a purification of a density matrix of a BH by a reference system R and try to transfer the entanglement between R and the BH to that between R and the quantum system in

our hand.

These interpretations seem natural from the viewpoint of the theory of quantum information. However, I am not sure if these are the right things. If they are, I actually wonder whether they are physically possible. They look to me too ambitious since I feel that they may possibly violate some physical principle, though I am not sure at all.

When I hear talks about quantum information in physics, I often feel that I am lost on an unknown planet. This leads me to fantasize that nothing is certain in this world and nature is the information source of physics. Our goal is to extract information from the information source of nature. It is extremely exciting if we can contribute to such a dream-like goal through the collaboration of extreme universe.

- [1] A. Uhlmann, Rep. Math. Phys., 9:273–279 (1976).
- [2] D. Kretschmann and R. F. Werner, New J. Phys., 6, 26 (2004).
- [3] B. Schumacher, Phys. Rev. A, 51, 2738 (1995).
- [4] P. Hayden and J. Preskill, J. High Energy Phys., 0709, 120 (2007).



● Author

Yoshifumi Nakata

Photon Science Center,
The University of Tokyo,
Assistant Professor
Born in Osaka, 1983
Graduated from the University of Tokyo
in March 2013
Current position since May 2020

Conference Reports

●ExU Kickoff Meeting 29-30 November 2021, Online

In order to promote the fusion of different research fields, we have been organizing online "Circulation Meetings" every month since October, shortly after this program started. In particular, in November, we expanded this meeting and held it as the kick-off meeting of our extreme universe program for two days on November 29 and 30. Each of nine planned research groups gave a one-hour presentation on their future research plans and current status with plenty of discussion time. More than 60 participants, including all of the principal investigators and co-investigators, together with collaborators, participated.

After the meeting, there was a time for free discussion using the online tool Spatial Chat, which provided a good opportunity for researchers in different fields to get to know each other and interact. In this meeting, in addition to the research plans to approach extreme universe problems through the theoretical fusion of quantum information theory, particle theory, cosmology, and condensed matter theory, the research plans for condensed matter experiments in which experimentalists collaborate with the theorists to simulate an expanding universe with a quantum hall system and a quantum black hole with a cold atom system were also explained. In this meeting, there were also reports on the situation where interdisciplinary researches have already started, such as an interesting collaboration on the relationship between quantum scrambling and quantum error correction by researchers of condensed matter theory and quantum information theory. (Reported by Tadashi Takayanagi)

●IFQ-ExU Joint mini workshop "Extreme Universe from Qubits" 16-18 December 2021, Online

On December 16-18th 2021, the IFQ-ExU joint mini workshop: Extreme Universe from Qubits, an online workshop on the application of quantum information theory to superstring theory, was co-organized by Transformative Research Areas A "Extreme Universe" and the Simons Foundation "It from Qubit" collaboration. This collaboration is a pioneering international research project led by the researchers in the United States that aims to study high-energy theory, in particular quantum theory of gravity, using knowledge of quantum information, and has many themes in common with the ExU collaboration. Invited speakers of the workshop were Matthew Headrick (Brandeis), Patrick Hayden (Stanford), Veronika Hubeny (UC Davis), Norihiro Iizuka (Osaka), Yoshifumi Nakata (Tokyo), Edgar Shaghoulian (Penn), Douglas Stanford (Stanford), and Beni Yoshida (Perimeter).

During the workshop, Douglas Stanford from Stanford University reported dual gravity interpretation of averaging over random unitary states. When the rank N of these unitary matrices is large, the interpretation of the leading term for N is well known. In his talk, it was shown that some of the subleading terms of in the large N expansion can be interpreted as the contributions of wormholes on the gravity theory side. Edgar Shaghoulian from the University of Pennsylvania proposed a formula for the entanglement entropy of holographic theory for de Sitter space by assuming it is living in its cosmological horizon. It was confirmed that this formula has the basic properties that should hold if such a holographic relation exists. Norihiro Iizuka, a member of ExU collaboration from Osaka University reported a new regularization scheme for entanglement entropy in quantum field theory. He also briefly discussed its applications to the calculations of the entropies for gauge field and conformally invariant scalar field.

(Reported by Tomonori Ugajin)



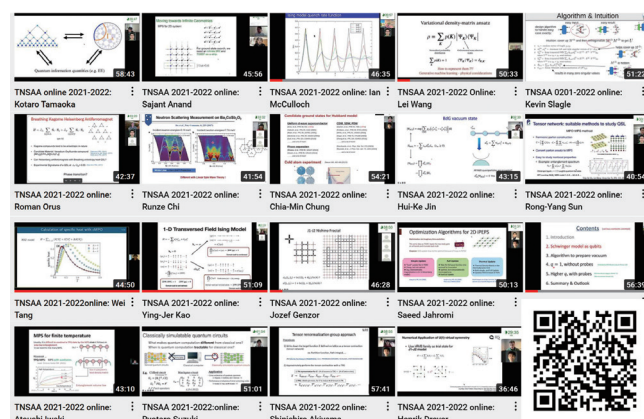
A screenshot of the kick-off meeting.

● **Tensor Network States:
Algorithms and Applications (TNSAA)
2021-2022 online**
17-21 January 2022,online

International workshop of Tensor Network States: Algorithms and Application (TNSAA) was held in online style on 17-21 January 2022. Since 2012, TNSAA has been held mainly in Asian countries and has been providing good opportunities for various researchers and students to discuss ongoing developments in tensor networks and related fields. Last year, however, the workshop was skipped due to COVID19. Tensor network physics is an essential keyword for the interdisciplinary development of physics in the ExU project. We, the members of D02 group in the ExU project, started up as an organizing committee of TNSAA online in September 2021, at almost the same timing as the launch of ExU. The original on-site TNSAA workshop was started as a relatively small size workshop for tensor network researchers in condensed matter fields mainly from Asian countries. This time, we had more than 100 number of participants including young researchers particularly from European countries and west coast of America. We had totally 21 number of interesting talks including 9 invited talks from various research fields among condensed matter physics, elementary particle physics and quantum information. In particular, presentations by young researchers attracted much interest and we could enjoy active discussions reflecting recent interdisciplinary developments in tensor network physics. We believe that this TNSAA online workshop provided a new style and trends of international workshop of tensor network physics, in addition to its original aim.

The photograph below is a snapshot of YouTube channel, where movies of the presentations recorded during the workshop are available. We feel that it may be a nice aspect of the online-style workshop that we could easily combine convenient free internet facilities such as Zoom and YouTube for international research communication. If you are interested in, please check QR-code attached at the right bottom corner of the photo and enjoy tensor network physics.

(Reported by Kouichi Okunishi)



● **YITP Domestic Molecule-type Workshop
“Quantum Computing for
Quantum Field Theories 2022”**
24 February 2022, YITP + Online

A hybrid face-to-face and online mini-workshop on "Quantum Computing in Quantum Field Theories 2022" was held on February 24, 2022, hosted by the Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University, and co-hosted by Project D01 in the Extreme Universe. This mini-workshop was held as a part of a domestic Molecule-type workshop at the Yukawa Institute for Theoretical Physics held from February 21 to March 4, 2022. In the domestic Molecule-type workshop, it was to bring together 12 researchers in the fields of particle theory, nuclear theory, and condensed matter theory who are working on quantum computation to promote joint research and to create new collaborations. In the mini-workshop on the 24th., 71 people participated via both onsite and online, and we had 4 invited talks and active discussions.

Non-perturbative nature of quantum chromodynamics (QCD), which describes the physics of quarks, the smallest constituent of matter, has been revealed through 40 years of first-principles calculations using the Monte Carlo method. However, the Monte Carlo method is known to suffer from the infamous sign problems that make the calculation of field theories very difficult in some regions. In order to solve this problem, an attempt has been made to develop new computational method that can make good use of the quantum computers recently, and to clarify unknown physical properties of field theories in such regions.

The workshop series "Quantum Computing in Quantum Field Theory" started last year. Last year, 25 researchers from Japan and abroad gave talks completely online, and more than 220 people registered to participate, allowing us to collect comprehensive information on the current status of this field. This year, the number of lectures was relaxed with ten talks in the entire period of the Molecule-type workshop. We were able to ask questions and have discussions very actively because of face-to-face. I felt that only face-to-face discussions can provide, where we discussed every detail from morning till night, including coffee-breaks with a relax atmosphere.

Next year, we are planning to hold a summer school (face-to-face I hope) for young people such as graduate students for a week from September 12 to 16. If you are interested in this field, please join us.

(Reported by Etsuko Itou)

Conference Reports

●The 1st ExU School & The 1st ExU Annual Meeting

School: 3-5 March 2022, Annual Meeting: 7-8 March 2022
Yukawa Institute for Theoretical Physics (YITP) + Online

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

This time, all lectures were in the Japanese language. Even though the capacity of the Panasonic Hall at YITP was limited due to the guidelines on prevention of the spread of the Novel Coronavirus, lively discussions were formed between the Hall and the online participants, who numbered around 300.

Masato Koashi (Univ. of Tokyo) lectured online on some of the most fundamental notions of quantum information theory, including the background ideas. The topics included how our treatment of information via quantum systems is generalized and organized, and how the distinction is made between processes that are fundamentally possible and that are not. Furthermore, emphasizing the difference between quantum information and classical information, he explained notions such as entanglement and quantum teleportation, as well as how to quantitatively evaluate the information processing capabilities from resource theoretical point of view.

Starting from the description of gravity as geometry, Yasusada Nambu (Nagoya Univ.) explained how to view the Penrose diagram for representative spacetimes, such as Minkowski and Schwarzschild spacetimes and expanding universe. He introduced the notion of the particle production in curved spacetimes, and its application to the calculation of the Hawking radiation in black hole spacetimes as well as to that of the prismoidal fluctuations in cosmic inflation.

Tatsuma Nishioka (D01 PI, YITP) gave an introductory blackboard lecture to how to calculate the entanglement entropy, which is one of the characterizing quantities of the quantum entanglement, using the path integral formulation

of the quantum field theory, with a free scalar field as an example. He also commented on systems at finite temperature and on conformal field theory.

Tadashi Takayanagi (Head investigator, C01 PI, YITP) inaugurated the school, introducing the Extreme Universe Collaboration and explaining the role of the school in the Collaboration. In closing the school, he gave a short lecture explaining the importance of cooperation between theoretical physics and quantum information theory in investigating the problems that this Collaboration targets, such as black holes, early universe, and dynamics of quantum materials, with recent examples including the island formula.

The first Annual Meeting of this Collaboration was also held in the hybrid style, limiting the onsite participants to principal investigators (PIs) and co-PIs in principle, and limiting the online participants to collaborating researchers. The PI of each project gave a 40-minute talk including discussion on the status of the research since the start of the Collaboration in September 2021, as well as on the plan. Also, the following public seminars were held during the meeting:

Yoshifumi Nakata (A01 co-PI, U.of Tokyo)

“Linking quantum information to physics”

Yasuaki Hikida (C01 co-PI, YITP, Kyoto)

“3D de Sitter space/2D CFT correspondence”

At the beginning of the Annual Meeting, after an overview talk from Tadashi Takayanagi, the Senior Scientific Research Specialist (SSRS) in charge of the ExU Collaboration, Akihiro Minamino (Yokohama National U), gave an invited talk on the roles of the SSRSs connecting researchers and MEXT. Progress in research was reported from all projects, including results of collaboration between different groups. Hot discussions were held both during the sessions and the coffee and lunch breaks. Before closing the Meeting, we received encouraging words from our domestic advisers, Akio Hosoya (Professor emeritus, Tokyo Institute of Technology) and Nobuyuki Imoto (Professor emeritus, Osaka University).

(Reported by Masaki Tezuka)



The 1st ExU School.



Group Photo of the 1st ExU Annual Meeting.

Conferences, Workshops and Seminars in 2021-2022

●Extreme Universe Colloquium

1st Extreme Universe Colloquium

Date : 4 December 2021, Online

Speaker : Prof. Shinsei Ryu (Princeton University)

Title : Many-body quantum physics through the lens of quantum entanglement

2nd Extreme Universe Colloquium

Date : 26 January 2022, Online

Speaker : Prof. Mark Van Raamsdonk (UBC)

Title : Cosmology from confinement

3rd Extreme Universe Colloquium

Date : 28 February 2022, Online

Speaker : Prof. Koji Hashimoto (Kyoto University)

Title : Chaos and Holography

4th Extreme Universe Colloquium

Date : 30 March 2022, Online

Speaker : Prof. Robert Raussendorf (UBC)

Title : A gauge theory of measurement-based quantum computation

●Extreme Universe Seminar

1st Extreme Universe Circular Meeting

Date : 25 October 2021, Online

Speaker ① : Yoshifumi Nakata (A01)

Title : Decoding the Hayden-Preskill protocol: from classical to quantum

Speaker ② : Tomoyuki Morimae (A01)

Title : Quantum cryptography based on computational assumptions

2nd Extreme Universe Circular Meeting

Date : 27 December 2021, Online

Speaker ① : Norihiro Iizuka (B01)

Title : Islands and watermelon

Speaker ② : Shuta Nakajima (B02)

Title : Quantum-informatic studies of quantum many-body systems using ultracold atoms

3rd Extreme Universe Circular Meeting

Date : 24 February 2022, Online

Speaker ① : Tadashi Takayanagi (C01)

Title : AdS/BCFT, Double Holography and Quantum Entanglement

Speaker ② : Go Yusa (C02)

Title : Toward quantum cosmology experiments in quantum Hall systems

●Conferences & Workshops

KIAS-YITP 2021: String Theory and Quantum Gravity

Date : 13-16 December 2021

Venue : YITP, Kyoto

IFQ-ExU Joint Workshop: Extreme Universe from Qubits

Date : 16-18 December 2021

Venue : Online

Tensor Network States: Algorithms and Applications (TNSAA) 2021-2022 online

Date : 17-21 January 2022

Venue : Online

Quantum computing for quantum field theories 2022

Date : 24 February 2022

Venue : Online and YITP, Kyoto

1st Extreme Universe School

Date : 3-5 March 2022

Venue : Online and YITP, Kyoto

1st Extreme Universe Annual Meeting

Date : 7-8 March 2022

Venue : Online and YITP, Kyoto

YITP international workshop: Quantum Information Entropy in Physics

Date : 21-25 March 2022

Venue : Online and YITP, Kyoto

Gauge/gravity correspondence for three-dimensional de Sitter space

de Sitter (dS) space is obtained as a solution to Einstein equation with positive cosmological constant and it approximately describes inflation era and current universe. In order to understand our universe, it is necessary to formulate quantum gravity on dS. In case with negative cosmological constant, anti-de Sitter (AdS) space is given as a gravity solution, and quantum gravity on AdS is formulated via gauge/gravity correspondence, i.e., AdS/CFT correspondence. Here CFT is an abbreviation of conformal field theory, which has an extension of scaling symmetry. Since the proposal by Maldacena in 1997, there have been large developments in AdS/CFT, and progresses have been pushed forward by applying quantum information theory recently. It is thus natural to expect that quantum gravity on dS can be well formulated by applying gauge/gravity correspondence, i.e., dS/CFT correspondence. However, dS/CFT has not been well understood yet compared with AdS/CFT. As a reason, very few concrete examples are available for dS/CFT currently. Recently, we proposed in ref. [1] a new gauge/gravity correspondence with Einstein gravity on three-dimensional (3d) dS and provided strong evidence. Moreover, we discussed relations to quantum information theory.

Applying AdS/CFT, quantum gravity on AdS can be described by CFT living on the boundary of AdS. Observables in AdS gravity are given by scattering amplitudes between the AdS boundary. According to AdS/CFT, scattering amplitudes correspond to correlation functions of CFT at the AdS boundary. On the other hand, observable in dS gravity may be given by correlation functions of bulk fields at late time. The correlation functions can be evaluated as expectation values with wave function of universe obtained via path integral over bulk fields, say, ϕ , associated with boundary condition $\phi=\phi_0$ at late time, see fig. 1. The claim of dS/CFT is that the wave function can be obtained from dual CFT. However, dual CFT is typically quite exotic such as to have negative or pure imaginary central charge, which is expected to count the degrees of freedom.

Concretely speaking, we claimed that classical gravity on 3d dS corresponds to 2d SU(2) Wess-Zumino-Witten (WZW) model. WZW model is a fundamental example of 2d CFT and it has an extension of Lie algebra symmetry. WZW model is parametrized by level k , which is usually positive integer. We set the central charge of the WZW model as $c \rightarrow i\infty$, which requires a strange value of the level as $k \rightarrow -2$. This is one of features of our proposal. As evidence, we computed gravity partition functions both from gravity theory and the WZW model and found perfect agreements at the limit. For this, we utilized a method developed by Witten to compute partition functions of 3d gauge theory from 2d WZW model. We also pointed out that an analytic continuation of AdS/CFT with higher-spin gravity on 3d AdS leads to our proposal of dS/CFT, which is regarded as another evidence.

As explained above, we proposed new dS/CFT correspondence involving 3d dS gravity and provided evidence by examining gravity partition functions and relation to AdS/CFT with higher-spin gravity. In addition, we briefly studied correlation functions, quantum corrections, the relation to quantum information theory and so on. Entanglement entropy is a quantity of quantum information, and we succeeded to reproduce entanglement entropy of 2d CFT from the dual bulk theory on 3d dS. This indicates that Ryu-Takayanagi formula works also in this case. As future projects, we would like to pursue the relation to quantum information theory furthermore. Black hole entropy serves as a guide to formulate quantum gravity and recently generalized entanglement entropy is going to play such a role. dS space also has entropy associated with its horizon and the dS entropy could be regarded as a guide to formulate dS gravity. In our setup, we can compute topological entanglement entropy in 3d dS gravity and it was shown to match with the dS entropy at classical gravity limit. This fact suggests that quantum information theory is quite useful to understand quantum gravity on dS as well.

[1] Y. Hikida, T. Nishioka, T. Takayanagi and Y. Taki, arXiv:2110.03197; arXiv:2203.02852.

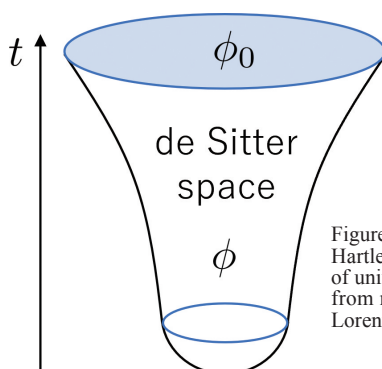


Figure 1. Hartle-Hawking wave function of universe. The universe starts from nothing and continues to Lorentzian de Sitter space.



● Author

Yasuaki Hikida

Yukawa Institute of Theoretical Physics,
Kyoto University, Associate Professor
Born in Aichi, 1975
Graduated from the University of Tokyo
in March 2003
Current position since October 2016

今後の会議予定 Upcoming Conferences

●領域会議 Annual Meeting

2nd Annual Meeting

Date : 26-28 December 2022

Venue : Kobe

●領域国際会議 ExU International Workshop

(2nd) Quantum Extreme Universe From Quantum Information

Date : 26-30 September 2022

Venue : YITP, Kyoto and Online

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~qith2022/>

(3rd) Quantum Information, Quantum Matter and Quantum Gravity

Date : 4 September – 6 October 2023

Venue : YITP, Kyoto and Online

<https://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp/~extremeuniverse/en/longtermws2023/>

●領域メンバーが開催するその他の研究会 Other workshops

Numerical Methods in Theoretical Physics

Organizers : Junggi Yoon, Anosh Joseph, Byungmin Kang, Dario Rosa, Masaki Tezuka

Date : 15-21 May 2022 (tentative, likely to be postponed)

Venue : APCTP, Korea and Online

https://www.apctp.org/theme/d/html/activities/activities01_read.php?id=1690

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

Date : 12-16 September 2022

Venue : Panasonic Auditorium, Yukawa Hall, YITP and Online

<https://www.yukawa.kyoto-u.ac.jp/seminar/s52960?lang=en-GB>

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。

編集後記

2021年9月に本学術変革領域がスタートしてからおよそ半年が過ぎました。年が明けた2022年になっても新型コロナウイルスの感染拡大は収まらず、本領域が主催する研究会やコロキウムもオンライン開催が続いています。その中で、3月に開催された領域スクール・領域会議は「ハイブリッド開催」ということで、本領域のメンバーの多くが京都大学基礎物理学研究所にオンサイトで集まりました。冷却原子実験が専門の筆者にとっては、対面では初めて会うという研究者の方も多く、分野融合をダイレクトに感じる研究会となりました(領域スクール・領域会議の様子についてはp.19の報告記事をご参照下さい)。

今回、本領域のアウトリーチ活動の重要な一端を担う「ニュースレター」担当となり、年度内に出版できるのかと冷や汗を書きながら編集作業をしておりましたが、なんとか無事に刊行することができました。限られた時間の中で、ニュースレターの執筆・編集に協力していただいた多くの方々にこの場を借りて厚く御礼申し上げます。特に、表紙やその他デザイン的なことについては、総括班有志による「美術班」の方にご協力いただきました。ちなみに本領域のロゴマーク(右下)も美術班の方のデザインです。これは、AdSブラックホールからテンソルが出てきて伸びて時間発展し、それが織りなす「時空の網」は実は量子情報=量子ビット球から構成されている、というイメージで、左上の切り欠きはこの学術領域が探す「ミッシングピース」を表します。紙面の都合でロゴの説明ができておりませんでしたので、ここで紹介させていただきました。本領域の分野融合の経糸と緯糸が織りなす「網」が新しい物理を捕まえてくれることに期待し、ニュースレター第1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!

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。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 Twitter アカウント

@ExUniverseja



極限宇宙 NewsLetter OI 2022 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1号

発行日: 令和4年3月25日

発行: 「極限宇宙」総括班

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

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

Email: extuniv-office@yukawa.kyoto-u.ac.jp

